# 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

公益財団法人　原子力環境整備促進・資金管理センター

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した、平成２６年度地層処分技術調査等事業　処分システム工学確証技術開発のうち、処分システム工学確証技術開発モニタリング関連技術の整備の開発成果を取りまとめたものです。

# 報告書の構成

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の報告書は、以下の分冊により構成されている。

| 当該報告書 | 分冊名 | 報告書の標題 |
|---|---|---|
| | 第 1 分冊 | 処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック |
| | 第 2 分冊 | 処分システム工学確証技術開発 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材 |
| ◎ | 第 3 分冊 | 処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備 |
| | 第 4 分冊 | 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発 |

# 第 3 分冊　目　次


第 1 章 研究の目的及び概要 ..... 1-1
1.1 処分システム工学確証技術開発の背景及び目的 ..... 1-1
1.1.1 開発の背景 ..... 1-1
1.1.2 開発の目的 ..... 1-1
1.2 モニタリング関連技術の整備に関るこれまでの開発成果 ..... 1-4
1.3 モニタリング関連技術の整備に関する計画 ..... 1-10
1.4 報告書の構成及び概要 ..... 1-12
第 1 章参考文献 ..... 1-13

第 2 章 地層処分モニタリングの枠組みに関する検討 ..... 2-1
2.1 目的及び実施概要 ..... 2-1
2.2 地層処分に関するモニタリングの概要 ..... 2-1
2.2.1 モニタリングの目的による分類 ..... 2-1
2.3 モニタリングの検討に関する動向 ..... 2-5
2.3.1 モニタリング国際共同研究 MoDeRn プロジェクトにおける検討 ..... 2-5
2.3.2 OECD/NEA における検討 ..... 2-17
2.4 人工バリアの性能確認に資するモニタリングの検討 ..... 2-29
2.4.1 背景 ..... 2-29
2.4.2 モニタリングの制約条件 ..... 2-30
2.4.3 人工バリアの性能確認モニタリングのパラメータ選定に関する検討 ..... 2-35
2.4.4 ニアフィールドのモニタリングによる人工バリアの性能確認 ..... 2-42
2.5 操業時の安全性に関わるモニタリングの検討 ..... 2-123
2.6 回収可能性に関係したモニタリングの検討 ..... 2-126
2.6.1 背景 ..... 2-126
2.6.2 回収可能性に関係したモニタリングの分類 ..... 2-129
2.6.3 検討に関わる状態設定 ..... 2-130
2.6.4 人工バリアと坑道環境の時間的変化の整理 ..... 2-146
2.6.5 坑道環境のモニタリング項目の検討 ..... 2-152
2.6.6 人工バリアのモニタリング項目の検討 ..... 2-160
2.6.7 モニタリングの時期と場所の検討 ..... 2-164
2.6.8 モニタリング結果の反映方法の検討 ..... 2-188
2.7 まとめと今後の課題 ..... 2-191

2.7.1 まとめ ..... 2-191
2.7.2 今後の課題 ..... 2-199
第 2 章参考文献 ..... 2-201

第 3 章 地層処分モニタリングの技術的実現性の向上に関する検討 ..... 3-1
3.1 目的及び実施概要 ..... 3-1
3.2 モニタリング技術の概要 ..... 3-1
3.2.1 性能確認モニタリングに関する技術 ..... 3-1
3.2.2 操業時の安全性のモニタリングに関する技術 ..... 3-7
3.3 地中無線モニタリング技術に関する調査 ..... 3-10
3.3.1 地中無線送信技術の必要性 ..... 3-10
3.3.2 地中無線モニタリング技術に関する開発の実施状況 ..... 3-11
3.3.3 地中無線中継装置の多段化に関する検討 ..... 3-14
3.3.4 電磁波による電力供給に関する検討 ..... 3-47
3.3.5 放射性熱電気変換器による電力供給に関する検討 ..... 3-98
3.3.6 地中無線モニタリング技術の人工バリア性能確認試験への適用に関する検討 ... 3-146
3.3.7 地中無線モニタリング技術の坑道冠水試験への適用に関する検討 ..... 3-184
3.3.8 フランス ANDRA との共同研究実施状況 ..... 3-200
3.4 まとめと今後の課題 ..... 3-225
3.4.1 まとめ ..... 3-225
3.4.2 今後の課題 ..... 3-229
第 3 章参考文献 ..... 3-232

第 4 章 記録保存に関する調査 ..... 4-1
4.1 目的と概要 ..... 4-1
4.2 OECD/NEA の検討状況の調査・整理 ..... 4-1
4.2.1 主要報告書の調査 ..... 4-2
4.2.2 プロジェクト状況の調査 ..... 4-32
4.3 石英ガラス内部へのデジタルデータ記録技術 ..... 4-41
4.3.1 石英ガラスに関する技術内容の比較 ..... 4-41
4.3.2 石英ガラスへのレーザー記録技術の地層処分への適用性 ..... 4-41
4.4 まとめと今後の課題 ..... 4-44
4.4.1 まとめ ..... 4-44
4.4.2 今後の課題 ..... 4-46
第 4 章参考文献 ..... 4-48

第 5 章 地層処分モニタリング技術メニューの整備 ..... 5-1
5.1 目的と概要 ..... 5-1
5.2 モニタリング技術に関する情報の拡充 ..... 5-1
5.2.1 平成 25 年度原環センター成果報告書 ..... 5-2
5.2.2 電磁波による給電技術の検討に関する成果情報 ..... 5-2
5.3 記録保存に関する情報の収録 ..... 5-4
5.3.1 技術メニューに収録する記録保存に関する内容の検討 ..... 5-4
5.3.2 技術メニューに収録する既往調査成果の整理 ..... 5-13
5.3.3 モニタリングに関わる記録事項と機器情報との関連の整備 ..... 5-13
5.3.4 技術メニューのプログラムの改良 ..... 5-21
5.3.5 記録保存に関する情報の要約の収録 ..... 5-26
5.4 まとめと今後の課題 ..... 5-26
5.4.1 まとめ ..... 5-26
5.5 今後の課題 ..... 5-28
第 5 章参考文献 ..... 5-29

第 6 章 まとめと今後の課題 ..... 6-1
6.1 まとめ ..... 6-1
6.1.1 地層処分モニタリングの枠組みに関する検討 ..... 6-1
6.1.2 地層処分モニタリングの技術的実現性の向上に関する検討 ..... 6-2
6.1.3 記録保存に関する調査 ..... 6-3
6.1.4 地層処分モニタリング技術メニューの整備 ..... 6-4
6.2 今後の課題 ..... 6-5
6.2.1 地層処分モニタリングの枠組みに関する検討 ..... 6-5
6.2.2 地層処分モニタリングの技術的実現性の向上に関する検討 ..... 6-5
6.2.3 記録保存に関する調査 ..... 6-6
6.2.4 地層処分モニタリング技術メニューの整備 ..... 6-7
第 6 章参考文献 ..... 6-8

図目次

図 2.2.1-1　地層処分におけるモニタリングの目的..... 2-2
図 2.3.1-1　 MoDeRn モニタリングワークフロー　[3] ..... 2-8
図 2.3.1-2 犠牲セル[3]（HLW 処分セルのうち、集中的なモニタリングを実施し、処分場閉鎖前に廃棄体を回収するセル）でのモニタリングに関する模式図 .....2-11
図 2.3.1-3　蒸発岩（岩塩）のケース（ドイツ）におけるモニタリング用模擬廃棄体の概念、地中無線送信装置により竪置き処分孔（長孔）からデータを処分坑道に送信する。 .... 2-14
図 2.3.1-4　結晶質岩のケース（フィンランド）における模擬廃棄体を用いた人工バリアのモニタリング、原環センターによる地中無線モニタリングシステム（第 3 章参照）を用いた概念..... 2-14
図 2.3.2-1　自治体のモニタリングに関する要請（2012 年の FSC メンバによる）[5]. 2-24
図 2.3.2-2　自治体が期待するモニタリング（2012 年の FSC メンバによる）[5] ..... 2-25
図 2.3.2-3　自治体が期待するモニタリングの時間スケール(2012 年の FSC メンバによる)[5]..... 2-26
図 2.3.2-4　処分場のライフサイクルと監視（Oversight）[5] ..... 2-28
図 2.4.2-1　人工バリアのモニタリング（処分場） ..... 2-32
図 2.4.2-2　人工バリアのモニタリング（地下調査施設） ..... 2-32
図 2.4.2-3　無線による人工バリアのモニタリング（処分場） ..... 2-33
図 2.4.2-4　無線による人工バリアのモニタリング（処分場における無線中継)、左：処分パネルの埋め戻し、右：連絡坑道埋め戻しに伴う無線中継 ..... 2-33
図 2.4.2-5　無線による人工バリアのモニタリング（地下調査施設） ..... 2-33
図 2.4.3-1　人工バリアの安全機能に影響するプロセスのモニタリングパラメータ選定方法案[27] ..... 2-36
図 2.6.1-1 廃棄体の回収にかかわる R スケール[43]..... 2-127
図 2.6.1-2　性能確認を目的としたモニタリング結果の反映の検討例（予測外の結果が得られた場合）（[44]より再掲） ..... 2-128
図 2.6.1-3 回収可能性に関する NUMO の基本的考え方[42] ..... 2-129
図 2.6.3-1　本検討における処分孔竪置き定置概念　人工バリア基本構成 ..... 2-132
図 2.6.3-2　本検討で設定した操業手順（概略） ..... 2-132
図 2.6.3-3　本検討で設定した操業手順（オーバーパック、緩衝材、隙間充てん材） 2-134
図 2.6.3-4　本検討で設定した操業手順（処分坑道埋め戻し） ..... 2-135
図 2.6.3-5　本検討で設定した操業手順（処分坑道端部プラグ） ..... 2-136
図 2.6.3-6　本検討で設定した回収手順（概略） ..... 2-137
図 2.6.3-7　本検討で設定した処分坑道端部プラグ除去手順..... 2-138
図 2.6.3-8　本検討で設定した処分坑道埋め戻し材除去手順..... 2-139

図 2.6.3-9　本検討で設定した上部緩衝材除去手順..... 2-140
図 2.6.3-10　本検討で設定した側部緩衝材除去手順 ..... 2-141
図 2.6.3-11　本検討で設定したオーバーパックの取り出し手順 ..... 2-142
図 2.6.3-12　回収時の各段階での状態一覧と廃棄体へのアクセス性への影響 ..... 2-143
図 2.6.3-13　処分坑道端部除去段階での状態 ..... 2-144
図 2.6.3-14　処分坑道埋め戻し材除去段階での状態 ..... 2-144
図 2.6.3-15　上部緩衝材除去段階での状態 ..... 2-145
図 2.6.3-16　側部緩衝材除去段階での状態 ..... 2-145
図 2.6.3-17　オーバーパック回収段階での状態..... 2-146
図 2.6.5-1　モニタリングパラメータ間の連関関係の整理..... 2-160
図 2.6.6-1　緩衝材のモニタリングパラメータ間の連関関係の整理 ..... 2-163
図 2.6.6-2　オーバーパックのモニタリングパラメータ間の連関関係の整理 ..... 2-164
図 2.6.7-1　回収行為前におけるモニタリング場所(力学的影響に関するパラメータ). 2-166
図 2.6.7-2　回収行為前におけるモニタリング場所(水理学的影響に関するパラメータ)2-167
図 2.6.7-3　回収行為前におけるモニタリング場所(化学的影響、熱的に関するパラメータ)2-167
図 2.6.7-4　SKB による PrototypeRepository におけるレイアウト(上)と、配線用ボーリング孔の配置図（下）[52]..... 2-168
図 2.6.7-5　プラグ･埋戻し除去状態におけるモニタリング場所(力学的影響に関するパラメータ) ..... 2-169
図 2.6.7-6　プラグ･埋戻し除去状態におけるモニタリング場所(水理学的影響に関するパラメータ)..... 2-169
図 2.6.7-7　プラグ・埋戻し除去状態におけるモニタリング場所(化学的影響、熱的に関するパラメータ)..... 2-170
図 2.6.7-8　緩衝材除去状態におけるモニタリング場所(力学的影響に関するパラメータ)2-170
図 2.6.7-9　緩衝材除去状態におけるモニタリング場所(水理学的影響に関するパラメータ)2-171
図 2.6.7-10　緩衝材除去状態におけるモニタリング場所(化学的影響、熱的に関するパラメータ) ..... 2-171
図 2.6.7-11　回収作業状態におけるモニタリング場所(力学的影響に関するパラメータ)2-172
図 2.6.7-12　回収作業状態におけるモニタリング場所(水理学的影響に関するパラメータ)2-172
図 2.6.7-13　回収作業状態におけるモニタリング場所(化学的影響、熱的に関するパラメータ) ..... 2-173
図 2.6.7-14　Prototype における稼動計測器数とスケジュール（Section1)[54] ..... 2-177
図 2.6.7-15　モニタリング場所のイメージ（回収行為前） ..... 2-183
図 2.6.7-16　モニタリング場所のイメージ（埋め戻し材除去） ..... 2-183
図 2.6.7-17　モニタリング場所のイメージ（緩衝材除去） ..... 2-184
図 2.6.7-18　モニタリング場所のイメージ（回収作業） ..... 2-184

図 2.6.8-1　検討方法の概念 ..... 2-189

図 3.3.1-1　地中無線送信技術の必要性 ..... 3-11
図 3.3.3-1　従来の受信動作 ..... 3-16
図 3.3.3-2　低消費起動コードを用いた受信動作 ..... 3-16
図 3.3.3-3　動作フロー ..... 3-17
図 3.3.3-4　現状送信装置の動作シークエンス ..... 3-18
図 3.3.3-5　中継装置の動作シークエンス ..... 3-19
図 3.3.3-6　省電力試算モデル ..... 3-20
図 3.3.3-7　試算結果による消費電力比 ..... 3-20
図 3.3.3-8　水晶の温度特性例[6] ..... 3-21
図 3.3.3-9　中継受信側による通信タイミングの調整 ..... 3-22
図 3.3.3-10　同期信号による時計の同期 ..... 3-23
図 3.3.3-11　複数段の中継のイメージ ..... 3-24
図 3.3.3-12　マルチホップ通信の基本手順 ..... 3-25
図 3.3.3-13　中継途中に送信装置がある場合 ..... 3-26
図 3.3.3-14　指令送信の手順 ..... 3-27
図 3.3.3-15　通信を二つの系統に冗長化した際の手順 ..... 3-28
図 3.3.3-16　故障時の手順 ..... 3-29
図 3.3.3-17　基本的なネットワークトポロジ ..... 3-32
図 3.3.3-18 中継装置と Zigbee ネットワークトポロジの比較 ..... 3-33
図 3.3.3-19　データフローの比較 ..... 3-34
図 3.3.3-20 本方式のルーティング ..... 3-35
図 3.3.3-21　ZigBee のルート探索 ..... 3-36
図 3.3.3-22　WDT 監視状況の概念図 ..... 3-39
図 3.3.3-23　RTC のクロック源 ..... 3-40
図 3.3.3-24　水晶発振器の周波数安定性[11] ..... 3-41
図 3.3.3-25　中継装置の構成 ..... 3-42
図 3.3.3-26　中継装置の動作シークエンス ..... 3-43
図 3.3.3-27 CPU 動作フローチャート ..... 3-44
図 3.3.3-28 動作設定 ..... 3-46
図 3.3.4-1　電磁波による電力供給を行う地中無線装置を用いた人工バリアのモニタリング ..... 3-47
図 3.3.4-1　電界共振結合のイメージ図 ..... 3-49
図 3.3.4-2　磁界共振結合のイメージ図 ..... 3-49
図 3.3.4-3　複素誘電率の実部と虚部 ..... 3-50

図 3.3.4-4　複素透磁率の実部と虚部 ..... 3-50
図 3.3.4-5　平成 23 年に開発されたボーリング孔対応型受信アンテナ ..... 3-51
図 3.3.4-6　水分センサ付き小型送信機 ..... 3-52
図 3.3.4-7　HLW 第 2 次取りまとめ[15]における緩衝材の大きさ ..... 3-53
図 3.3.4-8　既存の無線モニタリング機器（中継用アンテナ） ..... 3-54
図 3.3.4-9　塩ビ管のイメージ図 ..... 3-56
図 3.3.4-10　ポリエステル線 0.56mm ..... 3-56
図 3.3.4-11　KIV ケーブル 0.5$^{sq}$ ..... 3-57
図 3.3.4-12　KIV ケーブル 2.0$^{sq}$ ..... 3-57
図 3.3.4-13　KIV ケーブル 3.5$^{sq}$ ..... 3-57
図 3.3.4-14　ポリエステル線 0.56mm を用いて作成したコイル① ..... 3-58
図 3.3.4-15　KIV ケーブル 0.5sq を用いて作成したコイル② ..... 3-59
図 3.3.4-16　KIV ケーブル 2.0sq を用いて作成したコイル③ ..... 3-60
図 3.3.4-17　KIV ケーブル 3.5sq を用いて作成したコイル④ ..... 3-61
図 3.3.4-18　送電コイルの巻軸 ..... 3-62
図 3.3.4-19　作成した送電コイル ..... 3-63
図 3.3.4-20　電磁界共振結合のイメージ図 ..... 3-64
図 3.3.4-21　磁界共振結合の等価回路 ..... 3-65
図 3.3.4-22　測定に利用した VNA（E5061） ..... 3-66
図 3.3.4-23　受電コイル①の測定結果 ..... 3-66
図 3.3.4-24　受電コイル②の測定結果 ..... 3-67
図 3.3.4-25　受電コイル③の測定結果 ..... 3-67
図 3.3.4-26　受電コイル④の測定結果 ..... 3-68
図 3.3.4-27　送電コイルの測定結果 ..... 3-68
図 3.3.4-28　受電コイル①と送電コイルの Q 値の積 ..... 3-69
図 3.3.4-29　受電コイル②と送電コイルの Q 値の積 ..... 3-70
図 3.3.4-30　受電コイル③と送電コイルの Q 値の積 ..... 3-70
図 3.3.4-31　受電コイル④と送電コイルの Q 値の積 ..... 3-71
図 3.3.4-32　給電試験におけるベントナイトブロック配置図 ..... 3-72
図 3.3.4-33　アクリル板で作成した型枠 ..... 3-73
図 3.3.4-34　締固めたベントナイトブロック ..... 3-73
図 3.3.4-35　等価回路 ..... 3-76
図 3.3.4-36　電源と負荷がある等価回路 ..... 3-76
図 3.3.4-37　送電コイル①(左図)と受電コイル(右図) ..... 3-78
図 3.3.4-38　試験状況 ..... 3-78
図 3.3.4-39　LCR メータ ..... 3-78

図 3.3.4-40　相互インダクタンスの測定結果 ..... 3-79
図 3.3.4-41　相互インダクタンスより計算した最大効率 ..... 3-79
図 3.3.4-42　相互インダクタンスより計算した最大効率（縦軸の最大値 1） ..... 3-79
図 3.3.4-43　試験状況 ..... 3-80
図 3.3.4-44　フェライトを入れた受電コイル① ..... 3-81
図 3.3.4-45　相互インダクタンスの測定結果（フェライトなし） ..... 3-81
図 3.3.4-46　相互インダクタンスより計算した最大効率（フェライトなし） ..... 3-81
図 3.3.4-47　相互インダクタンスの測定結果（フェライトあり） ..... 3-82
図 3.3.4-48　相互インダクタンスより計算した最大効率（フェライトあり） ..... 3-82
図 3.3.4-49　試験状況 ..... 3-83
図 3.3.4-50　相互インダクタンスの測定結果（フェライトなし） ..... 3-84
図 3.3.4-51　相互インダクタンスより計算した最大効率（フェライトなし） ..... 3-84
図 3.3.4-52　相互インダクタンスの測定結果（フェライトあり） ..... 3-85
図 3.3.4-53　相互インダクタンスより計算した最大効率（フェライトあり） ..... 3-85
図 3.3.4-54　試験機器 ..... 3-86
図 3.3.4-55　試験状況 ..... 3-87
図 3.3.4-56　電力伝送試験結果 ..... 3-87
図 3.3.4-57　電力伝送試験結果（縦軸の最大値 1） ..... 3-87
図 3.3.4-58　試験状況 ..... 3-88
図 3.3.4-59　電力伝送試験結果（フェライトなし） ..... 3-89
図 3.3.4-60　電力伝送試験結果（フェライトあり） ..... 3-89
図 3.3.4-61　試験状況 ..... 3-90
図 3.3.4-62　電力伝送試験結果（フェライトなし） ..... 3-91
図 3.3.4-63　電力伝送試験結果（フェライトあり） ..... 3-91
図 3.3.4-64　試験状況 ..... 3-92
図 3.3.4-65　アクリル型枠の電力伝送試験結果（フェライトなし） ..... 3-93
図 3.3.4-66　アクリル型枠の電力伝送試験結果（フェライトあり） ..... 3-93
図 3.3.4-67　相互インダクタンスからの最大効率（フェライトなし） ..... 3-94
図 3.3.4-68　相互インダクタンスからの最大効率（フェライトあり） ..... 3-94
図 3.3.4-69　電力伝送試験結果（フェライトなし） ..... 3-95
図 3.3.4-70　電力伝送試験結果（フェライトなし）（縦軸の最大値 1） ..... 3-95
図 3.3.4-71　電力伝送試験結果（フェライトあり） ..... 3-96
図 3.3.4-72　事前試験の伝送効率結果 ..... 3-96
図 3.3.4-73 本試験の伝送効率結果 ..... 3-97
図 3.3.5-1　RTG の概念図 ..... 3-102
図 3.3.5-2　初期条件、境界条件、解析モデルの概念図 ..... 3-102

図 3.3.5-3　温度測定点の概念図 ..... 3-104
図 3.3.5-4　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 1、中心付近） ..... 3-105
図 3.3.5-5　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 1 を通る xy 平面、中心付近） .. 3-105
図 3.3.5-6　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 2、中心付近） ..... 3-106
図 3.3.5-7　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 2 を通る yz 平面、中心付近） .. 3-106
図 3.3.5-8　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 3、中心付近） ..... 3-107
図 3.3.5-9　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 3 を通る yz 平面、中心付近） .. 3-107
図 3.3.5-10　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 1、中心付近） ..... 3-108
図 3.3.5-11　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 1 を通る xy 平面、中心付近）3-108
図 3.3.5-12　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 2、中心付近） ..... 3-109
図 3.3.5-13　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 2 を通る yz 平面、中心付近）3-109
図 3.3.5-14　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 3、中心付近） .....3-110
図 3.3.5-15　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 3 を通る yz 平面、中心付近）3-110
図 3.3.5-16　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 1、中心付近） .....3-111
図 3.3.5-17　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 1 を通る xy 平面、中心付近）.3-111
図 3.3.5-18　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 1、中心付近） .....3-112
図 3.3.5-19　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 2 を通る yz 平面、中心付近）.3-112
図 3.3.5-20　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 3、中心付近） .....3-113
図 3.3.5-21　1 年後の温度分布（低温ケース、線分 3 を通る yz 平面、中心付近）.....3-113
図 3.3.5-22　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 1、中心付近） .....3-114
図 3.3.5-23　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 1 を通る xy 平面、中心付近） ..3-114
図 3.3.5-24　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 2、中心付近） .....3-115
図 3.3.5-25　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 2 を通る yz 平面、中心付近）...3-115
図 3.3.5-26　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 3、中心付近） .....3-116
図 3.3.5-27　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 3 を通る yz 平面ンク、中心付近）3-116
図 3.3.5-28　10 年後の温度分布の比較（線分 1） .....3-117
図 3.3.5-29　10 年後の温度分布の比較（線分 2） .....3-117
図 3.3.5-30　10 年後の温度分布の比較（線分 3） .....3-118
図 3.3.5-31　坑道の全体図（RTG と地中無線伝送装置の距離 6.66 m） ..... 3-120
図 3.3.5-32　坑道の全体図（RTG と地中無線伝送装置の距離 3.33 m） ..... 3-120
図 3.3.5-33　坑道の全体図（RTG と地中無線伝送装置の距離 1.00 m） ..... 3-120
図 3.3.5-34　坑道の断面図 ..... 3-121
図 3.3.5-35　支保工の断面図 ..... 3-121
図 3.3.5-36　処分孔及び廃棄体の概念図 ..... 3-122
図 3.3.5-37　地中無線送信装置の解析モデル ..... 3-122
図 3.3.5-38　解析モデル及び境界条件の概念図（d = 6.66 m） ..... 3-123

図 3.3.5-39　解析モデル及び境界条件の概念図（d = 3.33 m） ..... 3-124
図 3.3.5-40　解析モデル及び境界条件の概念図（d = 1.00 m） ..... 3-124
図 3.3.5-41　温度分布（d=6.66 m、廃棄体無し） ..... 3-126
図 3.3.5-42　温度分布（d=6.66 m、廃棄体有り） ..... 3-126
図 3.3.5-43　d=6.66 m、廃棄体無し ..... 3-127
図 3.3.5-44　d=6.66 m、廃棄体有り ..... 3-127
図 3.3.5-45　d=3.33 m、廃棄体無し ..... 3-128
図 3.3.5-46　 d=3.33 m、廃棄体有り ..... 3-128
図 3.3.5-47　 d=1.00 m、廃棄体無し ..... 3-129
図 3.3.5-48　 d=1.00 m、廃棄体有り ..... 3-129
図 3.3.5-49　温度分布の比較（d=6.66 m） ..... 3-130
図 3.3.5-50　温度分布の比較（d=3.33 m） ..... 3-130
図 3.3.5-51　温度分布の比較（d=1.00 m） ..... 3-131
図 3.3.5-52　磁界強度を表示する線分の概念図 ..... 3-133
図 3.3.5-53　磁束密度コンター図　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、面 1）3-135
図 3.3.5-54　磁束ベクトル図　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、面 1）3-135
図 3.3.5-55　磁束密度コンター図　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、面 2）3-136
図 3.3.5-56　磁束ベクトル図　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、面 2）3-136
図 3.3.5-57　磁束密度コンター図　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、面 1）3-137
図 3.3.5-58　磁束ベクトル図　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、面 1）3-137
図 3.3.5-59　磁束密度コンター図　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、面 2）3-138
図 3.3.5-60　磁束密度ベクトル図図　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、面 2）
..... 3-138
図 3.3.5-61　磁束密度分布　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、線分 1）3-139
図 3.3.5-62　磁束密度分布　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、線分 2）3-139
図 3.3.5-63　磁束密度分布　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、線分 1）3-140
図 3.3.5-64　磁束密度　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、線分 2） .... 3-140
図 3.3.5-65　磁束密度　解析ケース③（距離 3.33 m、鋼製支保工無し、線分 1） .... 3-141
図 3.3.5-66　磁束密度　解析ケース③（距離 3.33 m、鋼製支保工無し、線分 2） .... 3-141
図 3.3.5-67　磁束密度　解析ケース④（距離 3.33 m、鋼製支保工有り、線分 1） .... 3-142
図 3.3.5-68　磁束密度　解析ケース④（距離 3.33 m、鋼製支保工有り、線分 2） .... 3-142
図 3.3.5-69　磁束密度　解析ケース⑤（距離 1.00 m、鋼製支保工無し、線分 1） .... 3-143
図 3.3.5-70　磁束密度　解析ケース⑤（距離 1.00 m、鋼製支保工無し、線分 2） .... 3-143
図 3.3.5-71　磁束密度　解析ケース⑥（距離 1.00 m、鋼製支保工有り、線分 1） .... 3-144
図 3.3.5-72　磁束密度　解析ケース⑥（支距離 1.00 m、鋼製保工有り、線分 2） .... 3-144
図 3.3.6-1　幌延 URL のイメージ図[26] ..... 3-147

図 3.3.6-2　実施場所　平面図（試験坑道 4）[26] ..... 3-147
図 3.3.6-3　実施場所　断面図（試験坑道 4）（単位：mm） ..... 3-148
図 3.3.6-4　地中無線モニタリング装置のシステム構成図..... 3-149
図 3.3.6-5　地中無線送信装置（a:土圧計の接続された装置、b:間隙水圧計の接続された装置） ..... 3-149
図 3.3.6-6　試験坑道 4 における測定位置..... 3-150
図 3.3.6-7　一時避難所（東）における測定位置 ..... 3-151
図 3.3.6-8　坑道内での計測方向..... 3-151
図 3.3.6-9　試験坑道 4-送受信機①②位置（左側壁沿い）での測定状況 ..... 3-152
図 3.3.6-10　試験坑道 4-送受信機③④⑤⑥位置（右側壁沿い）での測定状況..... 3-153
図 3.3.6-11　一時避難所（東）-送受信機①②③の位置（CL 沿い）での測定状況 ..... 3-154
図 3.3.6-12　一時避難所（東）-送受信機④⑤⑥の位置（右側壁沿い）での測定状況 . 3-155
図 3.3.6-13　試験坑道 4 での通信試験結果..... 3-156
図 3.3.6-14　一時避難所（東）での通信試験結果 ..... 3-157
図 3.3.6-15　人工バリア性能確認試験への地中無線モニタリング装置設置の施工フロー3-159
図 3.3.6-16　緩衝材ブロックへの地中無線送信装置及びセンサ設置手順図 ..... 3-160
図 3.3.6-17　地中無線送信装置及びセンサの設置位置（全体図） ..... 3-160
図 3.3.6-18　地中無線送信装置及びセンサの設置位置（図 3.3.6-17 中の A-A 断面）3-161
図 3.3.6-19　地中無線送信装置及びセンサの設置位置（図 3.3.6-17 中の C-C 及び D-D 断面） ..... 3-161
図 3.3.6-20　緩衝材ブロック加工状況写真 ..... 3-163
図 3.3.6-21　緩衝材ブロック No.11-2 加工後写真 ..... 3-164
図 3.3.6-22　緩衝材ブロック No.11-6 加工後写真 ..... 3-165
図 3.3.6-23　緩衝材ブロック No.11-7 加工後写真 ..... 3-166
図 3.3.6-24　緩衝材ブロックへの地中無線送信装置及びセンサ設置状況（全景） ..... 3-167
図 3.3.6-25　緩衝材ブロックへの地中無線送信装置及びセンサの設置状況 ..... 3-168
図 3.3.6-26　装置周辺の隙間充填状況 ..... 3-168
図 3.3.6-27　緩衝材ブロックの隙間充填完了（全景） ..... 3-169
図 3.3.6-28　試験坑道 4 における埋め戻し材ブロックの設置作業状況 ..... 3-169
図 3.3.6-29　埋め戻し材ブロックの設置作業 ..... 3-170
図 3.3.6-30　埋め戻し部への地中無線送信装置及びセンサの設置状況（C-C 断面） . 3-170
図 3.3.6-31　装置周辺の空隙部充填状況（C-C 断面） ..... 3-171
図 3.3.6-32　装置周辺の空隙部充填完了（C-C 断面） ..... 3-171
図 3.3.6-33　埋め戻し部への地中無線送信装置及びセンサの設置状況（D-D 断面） . 3-172
図 3.3.6-34　装置周辺の空隙部充填状況（D-D 断面） ..... 3-172
図 3.3.6-35　装置周辺の空隙部充填完了（D-D 断面） ..... 3-173

図 3.3.6-36　地中無線受信アンテナ用ボーリング孔位置図 ..... 3-174
図 3.3.6-37　地中無線受信アンテナ用ボーリング孔　削孔状況 ..... 3-175
図 3.3.6-38　地中無線受信アンテナ用ボーリング孔　削孔完了 ..... 3-175
図 3.3.6-39　　受信装置等の設置位置図 ..... 3-176
図 3.3.6-40　　地中無線受信装置　受信アンテナの設置状況 ..... 3-177
図 3.3.6-41　　地中無線受信装置等の設置及び接続状況（全景） ..... 3-177
図 3.3.6-42　地上での PC 設置状況 ..... 3-178
図 3.3.6-43　計測小屋内の LAN 接続状況 ..... 3-178
図 3.3.6-44　処分孔硅砂中（間隙水圧及びセンサ温度）及び緩衝材 11 段目横（送信器温度）の測定データ（002 局） ..... 3-180
図 3.3.6-45　緩衝材 11 段目の測定データ（003 局） ..... 3-180
図 3.3.6-46　緩衝材 11 段目の測定データ（004 局） ..... 3-181
図 3.3.6-47　処分孔埋め戻し材ブロック中部の測定データ（005 局） ..... 3-181
図 3.3.6-48　処分孔埋め戻し材ブロック中部の測定データ（006 局） ..... 3-181
図 3.3.6-49　処分孔埋め戻し材ブロック上部の測定データ（007 局） ..... 3-182
図 3.3.6-50　処分孔埋め戻し材ブロック上部の測定データ（008 局） ..... 3-182
図 3.3.7-1　瑞浪超深地層研究所周辺における地質[28] ..... 3-184
図 3.3.7-2　瑞浪超深地層研究所の研究計画[29] ..... 3-185
図 3.3.7-3　坑道の再冠水試験の内容[29] ..... 3-186
図 3.3.7-4　試験実施場所（深度 500m 研究アクセス北坑道）[30] ..... 3-186
図 3.3.7-5　地中無線モニタリング装置のシステム構成図 ..... 3-187
図 3.3.7-6　通信確認試験レイアウト図（坑道平面図） ..... 3-188
図 3.3.7-7　坑道内での計測方向 ..... 3-189
図 3.3.7-8　受信器格納箱設置位置（止水壁手前側） ..... 3-189
図 3.3.7-9　受信器格納箱内と PC（止水壁手前側） ..... 3-189
図 3.3.7-10　受信アンテナ設置位置（止水壁手前側） ..... 3-190
図 3.3.7-11　送信器設置位置の検討：ケース 1、2、4、5（止水壁奥側） ..... 3-190
図 3.3.7-12　送信器設置位置の検討（止水壁奥側） ..... 3-191
図 3.3.7-13　送受信間距離と受信レベルの関係：ケース 1～3 ..... 3-194
図 3.3.7-14　送受信間距離と受信レベルの関係：ケース 4～6 ..... 3-195
図 3.3.7-15　地中無線送信装置の設置状況 ..... 3-196
図 3.3.7-16　地中無線送信装置の固定方法（矢印：樹脂バンド） ..... 3-196
図 3.3.7-17　定期送信の受信レベル ..... 3-197
図 3.3.7-18　地中無線受信装置と PC の保管状況 ..... 3-198
図 3.3.8-1　MHM URL のレイアウト ..... 3-201
図 3.3.8-2　 GEX 坑道（GKE 坑道側から撮影） ..... 3-201

図 3.3.8-3　MHM URL 坑道 490m 坑道群 ..... 3-202
図 3.3.8-4　TSF1002 ボーリング孔の具体的な位置関係..... 3-203
図 3.3.8-5 TSF1001 ボーリング孔における地中無線送信装置とセンサの配置..... 3-205
図 3.3.8-6　TSF1001 ボーリング孔モニタリング結果　全圧 ..... 3-206
図 3.3.8-7　TSF1001 ボーリング孔モニタリング結果　間隙水圧 ..... 3-206
図 3.3.8-8　TSF1001 ボーリング孔モニタリング結果　温度 ..... 3-207
図 3.3.8-9　TSF1001 ボーリング孔モニタリング結果　バッテリー電圧 ..... 3-207
図 3.3.8-10　長距離送信の対象区間（約 490m） ..... 3-208
図 3.3.8-11　中継システム用の長距離無線送信装置..... 3-209
図 3.3.8-12　長距離送信試験 A ..... 3-210
図 3.3.8-13　長距離送信試験 B ..... 3-210
図 3.3.8-14　長距離送信試験 C .....3-211
図 3.3.8-15　長距離送信試験の実施手順..... 3-212
図 3.3.8-16　送信能力向上の方策（送信機用ニッチ掘削） ..... 3-213
図 3.3.8-17　長距離送信用地中無線送信アンテナ（平面図） ..... 3-214
図 3.3.8-18　長距離送信用地中無線送信アンテナ（断面図） ..... 3-214
図 3.3.8-19　長距離送信用送信器本体の外観 ..... 3-215
図 3.3.8-20　パワーオシレータ（高出力発振器）ユニットの外観..... 3-215
図 3.3.8-21　抵抗・コンデンサユニットの外観..... 3-216
図 3.3.8-22　製作した長距離送信用地中無線送信アンテナの外観（実際の設置は上下逆）3-216
図 3.3.8-23　製作したアンテナホルダ ..... 3-217
図 3.3.8-24 ボアホール対応受信アンテナの種類..... 3-217
図 3.3.8-25　ボアホール対応の受信アンテナ B..... 3-218
図 3.3.8-26　ボアホール対応受信アンテナ B の外観..... 3-218
図 3.3.8-27 ワークショップ会場全景 ..... 3-220
図 3.3.8-28　振動弦型ひずみ計を装着した小型地中無線送信装置..... 3-221

図 4.2.1-1　処分場のライフサイクルに関連する決定の例（OECD/NEA-RWMC, 2014d） ..... 4-28
図 4.2.2-1　NEA 国際会議の様子..... 4-35
図 4.2.2-2　記録保存における要件の階層構造（RWMC-TRJ-08001） ..... 4-40

図 5.2.2-1　ライブラリ：原環センター成果報告書画面 ..... 5-3
図 5.2.2-2　ライブラリ：原環センターの検討状況画面 ..... 5-3
図 5.2.2-1　記録保存に関する情報との関連イメージ..... 5-4
図 5.3.1-1　記録保存システムの全体図..... 5-5

図 5.3.1-2　記録保存で考慮する必要がある時間枠（RWMC-TRJ-08001）[21]..... 5-11
図 5.3.1-3　記録保存における要件の階層構造（RWMC-TRJ-08001）[21]（再掲）.... 5-12
図 5.3.3-1　機器情報表示機能のイメージ..... 5-21
図 5.3.4-1　技術メニューのトップ画面（修正後）..... 5-22
図 5.3.4-2　記録保存に関する情報の収録部分の初期画面..... 5-23
図 5.3.4-3　記録保存に関する情報（コンテンツ）の一例..... 5-24
図 5.3.4-4　モニタリングに関わる記録事項に関連する機器情報の表示機能　（リンク機能）..... 5-25
図 5.3.4-5　モニタリングに関わる記録事項に関連する機器情報の表示機能　（機器情報表示画面）..... 5-26

表目次

表 2.2.1-1 地層処分の段階と場所によるモニタリング目的..... 2-3
表 2.3.1-1　MoDeRn プロジェクト最終報告書[3]の構成と主な内容 ..... 2-7
表 2.3.2-1　報告書「地層処分施設のモニタリング：技術的及び社会的側面」[5]の構成及び主な内容 ..... 2-19
表 2.4.2-1　人工バリアの性能確認モニタリングのオプション比較..... 2-35
表 2.4.3-1　Posiva(2012)[28]による人工バリアのモニタリング対象プロセスの選定... 2-38
表 2.4.3-2　安全機能、技術要件、FEP から推定した緩衝材のモニタリングパラメータ候補 ..... 2-39
表 2.4.3-3　坑道埋め戻し材の安全機能と技術要件（基本的なバリア性能の確保、長期健全性の維持）[2] ..... 2-40
表 2.4.3-4　SKB-TR-10-47[30]における再冠水時(不飽和フェーズ)の坑道埋め戻し材の重要 FEP、及び対応する第 2 次取りまとめ[26]の FEP..... 2-40
表 2.4.3-5　安全機能、技術要件、FEP から推定した坑道埋め戻し材のモニタリングパラメータ候補 ..... 2-41
表 2.4.4-1　モニタリングパラメータの検討対象として選定したニアフィールドの FEP2-43
表 2.4.4-2　FEP より抽出された人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）(1/2) ..... 2-49
表 2.4.4-3　FEP より抽出された人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）(2/2) ..... 2-50
表 2.4.4-4　集約されたニアフィールドパラメータ（次項での検討対象） ..... 2-51
表 2.4.4-5　JNC(2005)によるニアフィールドモニタリングの項目・期間・計測方法等2-53
表 2.4.4-6　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](1/6) ..... 2-54
表 2.4.4-7　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](2/6) ..... 2-55
表 2.4.4-8　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](3/6) ..... 2-56
表 2.4.4-9　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](4/6) ..... 2-57
表 2.4.4-10　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](5/6)..... 2-58
表 2.4.4-11　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](6/6)..... 2-59
表 2.4.4-12　Posiva（2012）[28]における岩盤力学モニタリングの対象..... 2-61

表 2.4.4-13　Posiva（2012）[28]における水理学モニタリングの対象 ..... 2-62
表 2.4.4-14　Posiva（2012）[28]における地下水化学モニタリングの対象 ..... 2-63
表 2.4.4-15　Posiva（2012）[28]における外来物質モニタリングの対象..... 2-63
表 2.4.4-16　SKB によるモニタリングカテゴリ（SKB, 2004）[32]..... 2-64
表 2.4.4-17　SKB(2004)による初期モニタリングで取得すべきパラメータ(1/2) ..... 2-65
表 2.4.4-18　SKB(2004)による初期モニタリングで取得すべきパラメータ(2/2)..... 2-66
表 2.4.4-19　人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）の計測可能性(1/4)2-68
表 2.4.4-20　人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）の計測可能性(2/4)2-69
表 2.4.4-21　人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）の計測可能性(3/4)2-70
表 2.4.4-22　人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）の計測可能性(4/4)2-71
表 2.4.4-23　モニタリングシステムの検討結果（1/23） ..... 2-73
表 2.4.4-24　モニタリングシステムの検討結果（2/23） ..... 2-74
表 2.4.4-25　モニタリングシステムの検討結果（3/23） ..... 2-75
表 2.4.4-26　モニタリングシステムの検討結果（4/23） ..... 2-76
表 2.4.4-27　モニタリングシステムの検討結果（5/23） ..... 2-77
表 2.4.4-28　モニタリングシステムの検討結果（6/23） ..... 2-78
表 2.4.4-29　モニタリングシステムの検討結果（7/23） ..... 2-79
表 2.4.4-30　モニタリングシステムの検討結果（8/23） ..... 2-80
表 2.4.4-31　モニタリングシステムの検討結果（9/23） ..... 2-81
表 2.4.4-32　モニタリングシステムの検討結果（10/23） ..... 2-82
表 2.4.4-33　モニタリングシステムの検討結果（11/23） ..... 2-83
表 2.4.4-34　モニタリングシステムの検討結果（12/23） ..... 2-84
表 2.4.4-35　モニタリングシステムの検討結果（13/23） ..... 2-85
表 2.4.4-36　モニタリングシステムの検討結果（14/23） ..... 2-86
表 2.4.4-37　モニタリングシステムの検討結果（15/23） ..... 2-87
表 2.4.4-38　モニタリングシステムの検討結果（16/23） ..... 2-88
表 2.4.4-39　モニタリングシステムの検討結果（17/23） ..... 2-89
表 2.4.4-40　モニタリングシステムの検討結果（18/23） ..... 2-90
表 2.4.4-41　モニタリングシステムの検討結果（19/23） ..... 2-91
表 2.4.4-42　モニタリングシステムの検討結果（20/23） ..... 2-92
表 2.4.4-43　モニタリングシステムの検討結果（21/23） ..... 2-93
表 2.4.4-44　モニタリングシステムの検討結果（22/23） ..... 2-94
表 2.4.4-45　モニタリングシステムの検討結果（23/23） ..... 2-95
表 2.4.4-46　人工バリアシステムの構成要素の技術要件（NUMO、 2010） ..... 2-97
表 2.4.4-47　オーバーパックの技術要件（基本性能、長期健全性）（NUMO、 2010）2-98
表 2.4.4-48　緩衝材の技術要件（基本性能、長期健全性）（NUMO、 2010）(1/2)..... 2-99

表 2.4.4-49　緩衝材の技術要件（基本性能、長期健全性）（NUMO、 2010）(2/2)... 2-100
表 2.4.4-50　埋め戻し材･止水プラグの技術要件(基本性能､長期健全性)(NUMO、2010) ..... 2-101
表 2.4.4-51　人工バリアに係る技術要件からのモニタリング結果の反映方法の検討（オーバーパック） ..... 2-102
表 2.4.4-52　人工バリアに係る技術要件からのモニタリング結果の反映方法の検討（緩衝材）(1/2) ..... 2-103
表 2.4.4-53　人工バリアに係る技術要件からのモニタリング結果の反映方法の検討（緩衝材）(2/2) ..... 2-104
表 2.4.4-54 人工バリアに係る技術要件からのモニタリング結果の反映方法の検討（埋め戻し材・止水プラグ） ..... 2-105
表 2.4.4-55　人工バリアに係る技術要件、ニアフィールドモニタリングの役割と関連パラメータ(1/2)..... 2-106
表 2.4.4-56　人工バリアに係る技術要件、ニアフィールドモニタリングの役割と関連パラメータ(2/2)..... 2-107
表 2.4.4-57　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:オーバーパックの耐食性) ..... 2-108
表 2.4.4-58　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:オーバーパックの構造健全性)..... 2-109
表 2.4.4-59　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:耐熱性) .....2-110
表 2.4.4-60　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:残置物との相互作用の影響の低減) .....2-111
表 2.4.4-61　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:低透水性).....2-112
表 2.4.4-62　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材のコロイドろ過能).....2-113
表 2.4.4-63　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材の収着性).....2-113
表 2.4.4-64　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材の自己修復性) .....2-114
表 2.4.4-65　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材の緩衝材流出の抑制) .....2-115
表 2.4.4-66　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材の物理的緩衝性).....2-116
表 2.4.4-67　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要

件:オーバーパックの沈下の防止)....2-117
表 2.4.4-68　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:自己シール性(施工時の隙間の充填))....2-118
表 2.4.4-69　技術要件ごとのニアフィールドモニタリングの役割及び関連パラメータの測定可能性 .... 2-121
表 2.4.4-70　技術要件ごとのニアフィールドモニタリングの役割及び関連パラメータの測定可能性 .... 2-122
表 2.4.4-1　想定した異常状態 .... 2-124
表 2.4.4-2　事故事象に関する項目 .... 2-124
表 2.4.4-3　事故時の環境に関する項目 .... 2-124
表 2.4.4-4　作業安全パラメータごとの計測パラメータと計測機器の例.... 2-125
表 2.6.3-1　本検討における人工バリアの仕様.... 2-131
表 2.6.4-1　処分孔、坑道及びニアフィールドにおける状態の時間的な変化 .... 2-148
表 2.6.4-2　処分孔、坑道及びニアフィールドの状態の経時変化[45] .... 2-149
表 2.6.4-3　人工バリアに発生する現象とその時期の整理【熱的影響】[45] .... 2-150
表 2.6.4-4　人工バリアに発生する現象とその時期の整理【力学的影響】[45] .... 2-150
表 2.6.4-5　人工バリアに発生する現象とその時期の整理【水理的影響】[45] .... 2-150
表 2.6.4-6　人工バリアに発生する現象とその時期の整理【化学的影響】[45] .... 2-151
表 2.6.4-7　人工バリアにおける現象と変状のまとめ表 .... 2-151
表 2.6.5-1　モニタリングパラメータ候補の抽出結果（力学的影響） .... 2-153
表 2.6.5-2　モニタリングパラメータ候補の抽出結果（水理的影響） .... 2-154
表 2.6.5-3　モニタリングパラメータ候補の抽出結果（化学的影響） .... 2-155
表 2.6.5-4　モニタリングパラメータ候補の抽出結果（熱的影響） .... 2-156
表 2.6.5-5　候補となるモニタリング技術の抽出 .... 2-157
表 2.6.6-1 人工バリアに対するモニタリングパラメータの候補 .... 2-161
表 2.6.6-2　測定対象となるモニタリングパラメータ .... 2-162
表 2.6.7-1　モニタリング時期と場所の検討結果(力学的影響に関するパラメータ)..... 2-174
表 2.6.7-2　モニタリング時期と場所の検討結果(水理学的影響に関するパラメータ). 2-174
表 2.6.7-3　モニタリング時期と場所の検討結果(化学的、熱的影響に関するパラメータ)2-175
表 2.6.7-4　COUPLE における計測器稼働率[55].... 2-177
表 2.6.7-5　モニタリングによる損益の整理 .... 2-178
表 2.6.7-6　モニタリング場所の検討 .... 2-182
表 2.6.7-7　モニタリング時期の検討 .... 2-187
表 2.6.8-1　モニタリングパラメータと技術要件の関係 .... 2-190

表 3.2.1-1　性能確認モニタリングにおける各パラメータのモニタリング技術（[1]より作表）

(1/2) ..... 3-3
表 3.2.1-2　性能確認モニタリングにおける各パラメータのモニタリング技術（[1]より作表）(2/2) ..... 3-4
表 3.2.1-3 ボーリング孔を利用した各地球物理学的手法の適用可能性 ..... 3-5
表 3.2.2-1　操業時の安全に関わるモニタリング機器に関する整理(1/2)..... 3-8
表 3.2.2-2　操業時の安全に関わるモニタリング機器に関する整理(2/2)..... 3-9
表 3.3.2-1　処分の実施段階ごとの地中無線モニタリング技術の適用課題と開発項目 .. 3-12
表 3.3.2-2　各開発項目と対策 ..... 3-13
表 3.3.3-1　現状の送信装置（ANDRA MHM　URL 設置送信装置）の消費電流量の比3-14
表 3.3.3-2　送信装置動作条件 ..... 3-20
表 3.3.3-3　中継装置動作条件 ..... 3-20
表 3.3.3-4　中継装置のネットワーク構成機器..... 3-30
表 3.3.3-5　Zigbee のネットワーク構成機器 ..... 3-31
表 3.3.3-6　地中無線と ZigBee の送受信フレーム..... 3-37
表 3.3.3-7　中継装置への指令通信種別..... 3-45
表 3.3.3-8　次回通信時刻（1/5 12:01 現在） ..... 3-46
表 3.3.4-1　電磁界共振結合の手法..... 3-51
表 3.3.4-2　受電コイルと送電コイルの大きさの設定..... 3-55
表 3.3.4-3　1/3 にした受電コイルと送電コイルの大きさ..... 3-55
表 3.3.4-4　塩ビ管（VP16）の詳細（JIS K6741：2007） ..... 3-56
表 3.3.4-5　ポリエステル線 0.56mm を用いて作成したコイル①の仕様..... 3-58
表 3.3.4-6　KIV ケーブル 0.5sq を用いて作成したコイル②の仕様..... 3-59
表 3.3.4-7　KIV ケーブル 2.0sq を用いて作成したコイル③の仕様..... 3-60
表 3.3.4-8　KIV ケーブル 3.5sq を用いて作成したコイル④の仕様..... 3-61
表 3.3.4-9　作成した送電コイルの仕様..... 3-63
表 3.3.4-10　ベントナイトの水分調整表..... 3-74
表 3.3.4-11　ベントナイトブロックの密度 ..... 3-75
表 3.3.5-1　解析に使用する物性値..... 3-101
表 3.3.5-2　緩衝材内に設置された RTG の適用可能性を評価するための解析ケース . 3-103
表 3.3.5-3　RTG の影響評価のための解析ケース.....3-118
表 3.3.5-4　RTG の影響評価のための解析ケース..... 3-132
表 3.3.5-5　電磁場解析に用いる物性値..... 3-133
表 3.3.5-6　地中無線送信装置のコイルの設定..... 3-134
表 3.3.5-7　100m 離れ地点における磁束密度の割合（鋼製支保有り） ..... 3-145
表 3.3.6-1　試験に用いた機材一覧..... 3-150
表 3.3.6-2　試験坑道 4 での通信試験結果..... 3-156

表 3.3.6-3　一時避難所（東）での通信試験結果 ..... 3-157
表 3.3.6-4　地中無線送信装置及びセンサの設置断面 ..... 3-162
表 3.3.6-5　地中無線モニタリング装置の測定・通信条件 ..... 3-167
表 3.3.6-6　地中無線モニタリング装置設置直後の定期送信の受信レベル ..... 3-179
表 3.3.7-1　試験に用いた機材一覧 ..... 3-187
表 3.3.7-2　通信確認試験の計測位置 ..... 3-188
表 3.3.7-3　通信試験結果 ..... 3-193
表 3.3.7-4　地中無線送信装置の計測・通信条件 ..... 3-197
表 3.3.8-1 埋め戻しに使用したベントナイト材料 ..... 3-204
表 3.3.8-2　原環センターと ANDRA による共研の概要 ..... 3-221
表 3.3.8-3　小型地中無線送信装置に接続可能なセンサの例 ..... 3-224

表 4.2.1-1　放射性廃棄物処分場への侵入に関する潜在的リスク・シナリオとマーカープログラムの防護要因の概要[4] ..... 4-5
表 4.2.1-2　放射性廃棄物処分場への侵入に関する潜在的リスク・シナリオと必要な技術、及び可能性のある予防措置の概要[4] ..... 4-6
表 4.2.1-3　長期リスク考察の視点から見たマーカー技術[4] ..... 4-8
表 4.2.1-4　記録の喪失に関する検討報告書（NEA/RWM/R(2014)3）の事例調査結果の整理（[5]より作表） ..... 4-11
表 4.2.1-5　特定された知識の喪失に寄与する主要要因とその内容（[5]より作表） ..... 4-18
表 4.2.1-6　対象としたケーススタディ並びに記録及び知識の喪失の主要要因のまとめ[5] ..... 4-20
表 4.3.2-1　石英ガラスに関する記録媒体技術の比較 ..... 4-43

表 5.3.3-1　第一種廃棄物埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容（1/4）[22] .... 5-14
表 5.3.3-2　第一種廃棄物埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容（2/4）[22] .... 5-15
表 5.3.3-3　第一種廃棄物埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容（3/4）[22] .... 5-16
表 5.3.3-4　第一種廃棄物埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容（4/4）[22] .... 5-17
表 5.3.3-5　モニタリングに関わる記録事項（第一種廃棄物埋設規則第 44 条）（[22]より作表） ..... 5-18

# 第1章 研究の目的及び概要

## 1.1 処分システム工学確証技術開発の背景及び目的

### 1.1.1 開発の背景

我が国において、これまでの原子力発電の利用に伴って放射性廃棄物が既に発生しており、その処理・処分対策を着実に進める必要がある。高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）については、地層処分に向けた取組が行われており、処分技術の信頼性向上に関する基盤技術の開発が、最終処分のサイト選定プロセスを考慮して段階的に実施されている。

処分場の操業期間中におけるガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術及び人工バリアのモニタリング技術等の要素技術について、必要となる基盤技術が整備されてきた。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のためには実際の深部地下環境での活用を通して、これらの工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。

さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、操業期間中における自然災害である巨大地震や巨大津波等の操業期間中の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。

本事業では、上記状況を踏まえ、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術及びモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設を活用して確証していくとともに、自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行う。

### 1.1.2 開発の目的

平成 25 年度に立案した 5 か年計画の 2 年目として、以下の研究開発を実施する。

(1) 処分システム工学確証技術開発

オーバーパック及び緩衝材の製作・施工技術に対して深部地下環境を考慮した長期健全性の観点から工学的信頼性の向上を図るため、種々の判断指標の提示に向けた品質に係わる知見の拡充、及び健全性評価技術の構築に係わる検討を行う。また、これらの健全性を確認するモニタリング技術の整備の一環として地下研究施設での適用性確認等を行う。

1) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック

平成 24 年度までの遠隔操作技術高度化開発により、HLW 第 2 次取りまとめで提示された板厚 190 mm の炭素鋼オーバーパックについて、現状の技術で実際に製作、検査が可能であることを示した。さらに、人工バリア品質評価技術の開発では、溶接部と母材の耐食性は同等であることを確認した。

本開発では、実際の地下深部を想定した複合系でのオーバーパック溶接部の耐食性評価試験を実施するとともに、材料の劣化予測方法の検討、非破壊検査による欠陥検出精度の向上に関する検討を実施する。上記の実施内容で得られる知見より、腐食評価と構造評価を合わせたオーバーパックの健全性評価手法を構築し、判断指標の具体化に資するものとする。

平成２５年度は、オーバーパックの健全性評価の方法論について整理し、全体計画を立案した。腐食試験については、地上及び地下研究施設を活用した試験計画を立案し、地下研究施設での試験孔の掘削や、試験に必要な溶接供試体や試験機器の一部について製作を実施した。また、材料劣化事象の一つである中性子照射による脆化量を予測するための、オーバーパックの照射線量評価について検討を進めた。さらに、超音波探傷法による欠陥寸法測定誤差について調査した。

平成 26 年度は、腐食・構造評価を合わせた健全性評価手法について検討を進め、オーバーパックの品質確保に必要な判断指標（腐食、材料劣化、欠陥）の観点から健全性評価モデルを検討する。また、複雑系での溶接部の腐食挙動評価のため、地下研究施設及び地上での溶接部耐食性評価試験を開始するとともに、耐食性におよぼす溶接組織の影響を評価するための知見を電気化学試験により取得する。材料の中性子照射脆化については、最新の計算コードを用いてオーバーパックへのガラス固化体からの照射線量を取得するとともに、照射脆化量予測のための方法論について検討する。さらに、超音波探傷法による欠陥寸法測定精度向上に関する検討を実施する。

2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材

緩衝材の製作・施工技術について実規模試験などを通してその実現性が示された一方、緩衝材の初期の密度分布は膨潤しても均質化せず密度分布が残ることや、隙間を有する緩衝材施工において湧水量によってはパイピングが発生し、ベントナイトの成分が流出することが示されている。

本開発では、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した調査・検討を実施し、緩衝材施工法の選定方法に定量的な評価を加える。さらに、緩衝材の性能劣化事象として懸念されるパイピング／エロージョン現象に対しては、工学的対策の提示に向けた調査・検討を実施する。また、上記実施内容で得られる知見を取りまとめ、多様な技術により構築される人工バリアの品質／健全性評価に向け、人工バリア性能を満足する緩衝材指標の具体化に資するものとする。

平成 25 年度は、処分環境（湧水量や水質等）を想定した緩衝材施工法の選定方法を検討した。また、パイピング／エロージョンに対する工学的対策に関する調査・検討では、岩盤と緩衝材との隙間へのペレット充填効果、モンモリロナイト含有率の高い緩衝材ブロックのパイピング／エロージョン挙動の評価を行い、人工バリア全体としての設計・施工仕様に関する検討では、地下水マネジメントを調査した。また、地下研究施設を活用した試験計画を策定し、試験孔と設備の一部を施工した。

平成 26 年度は、塩水環境下における緩衝材の密度分布の残留現象、パイピング／エロージョン現象を定量的に評価するとともに、平成 25 年度に検討したパイピング／エロージョンに対する工学的対策の有効性を検討する。地下研究施設におけるパイピング／エロージョン試験を開始し、工学規模室内試験との比較評価を実施し、小規模試験で得られた挙動の再現性を確認する。人工バリア全体としての設計・施工仕様については、プラグの構築、止水性能等に資するデータを整備する。

3) モニタリング関連技術の整備

地層処分のためのモニタリングについては、その目的を検討し、特に重点的な検討が必要な性能確認モニタリングについて制約条件やパラメータの選定方法案を提示した。また、バリア機能を保持したモニタリングの実現のため地下研究施設における地中無線通信装置の性能確認試験等を実施し、これらの成果や文献調査結果を反映した技術メニューの整備を実施した。さらに、併せて制度的管理としての記録保存について媒体の開発や国内外の調査を行い、基本的システム案を提示した。

本整備では、技術的選択肢検討の基盤となるモニタリングの枠組みや結果の反映方法等に関する検討を、国際研究等への参画とフィードバック等により実施する。また、モニタリングの技術的実現性の向上のため、バリア機能や処分場性能を保持したモニタリングシステムの確立に向けた地中無線モニタリング技術の検討を、地下研究施設への反映を考慮して実施する。

上記で得られる知見より、セーフティーケースの信頼性強化に資するモニタリングの技術選択肢の整備を行い、モニタリング計画の立案に資するものとする。

また、併せて制度的管理としての記録保存についても動向の調査を実施する。

平成 25 年度は、5 年間の検討計画を国際共同研究 MoDeRn に参画して得た成果等を参照して立案した。これに基づき、モニタリング結果のバリア性能の確認への反映方法に関する課題抽出を実施するとともに、研究開発成果や文献調査結果を反映する技術メニューの整備方針を検討した。さらに、モニタリングの技術的実現性の向上のため、地中無線モニタリング技術について地下研究施設における中継試験等を実施した。これらに加え、記録保存に関し英国及び OECD/NEA における検討状況の調査を実施した。

平成 26 年度は、モニタリングの枠組みの検討及び技術的実現性向上のための整備等を実施する。具体的には、人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材等との連携を図りつつモニタリング結果のバリア性能の確認への反映方法に関する検討を実施するとともに、自然災害に対する操業期間中の安全対策に関る基盤技術の開発との連携による操業期間中の安全性に関するモニタリングの検討、及び回収技術、回収可能性に関する検討成果を参照した廃棄体の回収可能性に関連するモニタリングの検討を実施し、技術的課題を抽出する。また、研究開発成果や文献調査結果を反映する技術メニューの整備を実施する。さらに、モニタリングの技術的実現性の向上のため、地中無線モニタリング技術について地下研究施設における適用試験等を実施する。これらに加え、記録保存に関して引続き OECD/NEA における検討状況の調査を実施する。

(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関る基盤技術の開発

本開発では、東北地方太平洋沖地震を受け、実施主体が実施する地層処分施設の設計に反映すべく、主に処分事業操業中の処分システムに対する地震・津波等の大規模な自然災害の影響を検討し、安全確保のための対策技術を開発、提示する。

平成 25 年度は、処分パネルにおける火災事象等を対象に、気流解析及び避難シミュレ

ーション解析による安全確保対策の検討に向け、解析条件の設定や事前解析を実施した。人工バリアの限界性能等の調査試験については、ガラス固化体及びオーバーパックを対象とした火災影響についての解析的検討、緩衝材の高温時熱特性試験及び津波被害を想定したガラス固化体の腐食性に関する情報収集を実施した。状況把握・監視技術については、地層処分施設で想定される種々の異常状態や事故ごとに、状況把握手順を整理・体系化するとともに、その際に必要となる技術の抽出と技術情報調査に着手した。

平成 26 年度は、施設計画技術については、平成２５年度の事前解析結果等を踏まえ、処分パネルの解析モデルによる気流解析及び避難シミュレーション解析を実施し、火災事象等に対する安全確保対策の検討にあたっての解析的手法の適用性等を検討する。また、施設全体についての操業安全確保の観点からの技術要件の調査・検討に着手する。人工バリアの限界性能等の調査試験については、緩衝材を介した火災影響の解析的検討を実施するとともに、高温履歴を受けた人工バリア材料の力学的性質に関する検討及び津波被害を想定したキャニスタの腐食環境条件に係る検討に着手する。

## 1.2 モニタリング関連技術の整備に関るこれまでの開発成果

地層処分モニタリングに関する開発は平成 12 年度に開始された。平成 12 年度から 18 年度の期間を第 1 フェーズ、平成 19 年度から平成 24 年度の期間を第 2 フェーズとして開発、検討を行っており、平成 25 年度からの 5 年間を第 3 フェーズとしている。

### (1) 第 1 フェーズ（平成 12 年度～18 年度）

「モニタリング技術の開発」に着手した第 1 フェーズ（平成 12 年度～18 年度）では、地層処分の周辺基盤技術整備の観点に立ち、国や実施主体等の各機関がモニタリング方策及び計画等を検討する際の判断材料を供することを目的とした調査を実施した。制度的管理として位置付けられるモニタリングに関する国内外情報の収集及び整理を行ない、さらにわが国におけるモニタリングに関する位置付け、目的を検討しつつ、技術の適用性について体系的に情報を整備した。これらの検討内容は、地層処分専門家等で構成した「地層処分モニタリングシステム調査検討委員会」にて継続的な審議を実施してきた。

この間、平成 12 年には原子力委員会より「高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方について（第 1 次報告）」[1]が公開され、「処分場においては、立地段階から事業廃止に至るまで、各段階に応じたモニタリングや巡視・点検等を実施することが必要」であること、及び「処分場の閉鎖に際しては、建設段階及び操業段階に得られたデータを追加し、安全評価の結果が妥当であることの確認を行う。また、その妥当性を確認するまでの期間は、高レベル放射性廃棄物の回収の可能性を維持することが重要」であることが述べられた。また、平成１８年には総合資源エネルギー調査会　原子力安全・保安部会　廃棄物安全小委員会より「放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について（案）」[2]が公開された。ここでは、「事業の各段階に応じた安全規制のあり方」として、許可申請から事業廃止前までの段階毎に適切なモニタリングに関する記載が含まれた。

平成 12 年度に開始した「モニタリング技術の開発」では、広くモニタリングにかかわる国内外の動向及び関連技術の調査を行なうとともに、わが国における地層処分モニタリングの考え方について議論を行い、地層処分モニタリングの位置付けに関する整理を行なった。

これらの成果に基づき、関連機器の地層処分環境における適用可能性を示すことを目的として、センサ及び伝送系の要素技術について検討を実施した。他分野での計測機器技術に関する調査を行ない、地層処分環境での利用可能性について検討を行なうと共に、これらの情報を整理し、将来のモニタリング実施者がモニタリング計画を立案する際に、実施目的、実施時期、実施場所等に応じて、何をどのように測定することにより、どのような情報が入手可能かを示した技術選択肢（地層処分モニタリング技術メニュー）の整備に着手した。地層処分技術メニューの整備においては、モニタリング計画立案の流れに符合した構成内容となるよう検討・試行を実施すると共に、コンピュータ検索、階層化を具体化させたメニュー構成の試作を行った。

さらに、地層処分環境での計測やデータ通信技術は、処分場の安全性能への影響を最小にしつつ、適切に情報取得することが必須であると考え、これを実現するための中核的な技術として、地中無線通信技術及び光ファイバセンサ技術等のモニタリング技術の調査を実施した。海外の地下研究施設での地中無線通信試験では結晶質岩・堆積岩中でのデータ送受信に成功した。また、温度及び圧力を検知する光ファイバセンサは既存の汎用計器と遜色ないことを実験室試験で確認した。

平成 18 年度に原環センターが開催した国際ワークショップ[3]では、無線データ伝送技術と光ファイバセンサを用いたモニタリング技術の開発の重要性が国際的に認識され、本研究が国際的に最も先行している地中無線通信技術は高く評価された。

これらの成果を取りまとめ、以降の主要な課題として下記が示された。

・モニタリング技術の調査と技術メニューの整備：地層処分において実施される幅広いモニタリングのうち、操業時安全及び廃棄体の品質管理のためのモニタリングについて、機器の等の調査と技術メニューへの反映を行なうこと、性能評価からの重要性の高いオーバーパック金属腐食量、緩衝材の間隙水化学の検出技術について調査を行うこと、これらを踏まえて、さらに詳細に個々の測定方法、データ伝送方法等を整理し、今後の技術開発の対象とするモニタリング技術を抽出すること。

・技術開発：無線モニタリング技術について、第 1 フェーズの開発成果をベースに周波数帯を最適化し、アクティブな低周波無線技術により短距離及び中（長）距離の伝送機器を調査研究すること、パッシブセンサの性能評価等のフィージビリティを調査すること、及び緩衝材及びその中のオーバーパックへの光ファイバ等の配線敷設を伴う温度・応力の検出技術を調査研究すること。

・埋設廃棄体の回収可能性：埋設廃棄体の回収可能性への対処として、回収の原因となる事象の抽出、回収するとなった場合の技術的対応可能性等の検討を行うこと、また、回収の原因事象を技術的に排除するための課題を摘出すること。

モニタリング技術の開発と併せて実施された、記録保存に関する調査では、国内外の事例調査等に基づき、その意義、目的、方策及び技術的可能性に関する基礎的な検討を行ない、下記

の成果が得られた。

・意義：地層処分に対する社会的合意に向けた方策として、社会的・倫理的観点から記録保存は重要な位置付けを持つという考えを示した。

・目的：記録保存の目的として、「将来世代の処分場への接近・侵入行為の抑制」及び「将来世代の意思決定に資する情報提供」の 2 つを挙げた。

・方策：異なる複数の方策を組み合わせ、情報伝達に冗長性を持たせ、部分的な損傷があっても全体の機能が保たれる頑強性を保持し、将来の背景条件の変化にも対応し得る柔軟性を持った記録保存システムの概念を示した。このような記録保存システムを構築するために、記録保存・伝達を社会制度の中に維持する「リレーシステム」と、社会制度や人間の管理に依存しない記録保管庫や媒体などに委ねる「永続システム」により、記録を保存する考えを示し、文書及びマーカー・モニュメントにより記録を保存するための具体的内容について検討した。

・技術的可能性：記録媒体としては上質紙の技術開発が進んでおり、保存環境に配慮することにより数百年～千年程度の耐用年数が期待できることがわかった。一方、インクについては耐久性の評価に関する研究例が見当たらず、今後の研究課題が示された。また、記録の長期保存媒体として、強度、耐食性、耐磨耗性等に優れ、レーザーによる刻印精度も良好な炭化珪素が実用的であることを示した。

これらの成果を踏まえ、今後は我が国の状況に即した記録保存場所、方法、マーカー・モニュメント等、記録保存システム構築に向けた具体的な課題を抽出し、検討を行うべきこととした。

(2) 第 2 フェーズ（平成 19 年度～平成 24 年度）

「モニタリング技術の開発」の第 2 フェーズ（平成 19 年度～平成 24 年度）では、国内外の最新の知見の調査を通じて、地層処分事業において調査や操業段階から閉鎖後に至る間のモニタリングの意義や技術等に関して調査検討すると共に、中核的な技術の基礎試験等を行ない、モニタリング計画の策定に資する技術基盤として整備することを目的とした。

モニタリングの意義等の検討においては、モニタリング目的について国内外の事例を調査し、反映先の観点から以下の様に整理した。

・ベースライン構築（サイト調査と密接に関係）

・環境データベース構築（サイト調査と密接に関係）

・規制等遵守（放射線学的、非放射線学的、防護措置の遵守）

・性能確認（安全評価結果に影響を及ぼす FEPs（特質(Features)、事象（Events)、プロセス（Processes)）に関連するパラメータの確認）

このうち、閉鎖後性能の確認のためのモニタリングは地層処分に独自であり、更なる検討が必要であることを確認し、モニタリングパラメータへの要求事項、パラメータの選定方法を検討した。また、地層処分事業において最も重要な意思決定の一つである閉鎖時の判断への寄与について検討を行なった。

さらに、性能確認のためのモニタリングを実施する際の制約条件について検討を実施し、「モ

ニタリング機器の設置によるバリアでの経路の形成から処分場内部または周辺で放射性核種の移動が潜在的に増加する可能性」（IAEA、 TECDOC-1208）を避けるべきこと、即ちモニタリング機器設置による水みち形成を避けることを技術的に重要な制約条件と捉え、この制約条件を満たした上で人工バリアの性能確認のためのモニタリングを実施するための検討を実施した。この結果、下記事項を結論として得た。

- 処分場での廃棄体近傍でのモニタリングは避ける。
- 人工バリアの性能確認のためのモニタリングは、模擬廃棄体を用いた地下調査施設等で実施する。
- 実廃棄体近傍での人工バリアの性能確認モニタリングが必要となった場合には、実廃棄体を用いた地下調査施設等で実施し、モニタリング終了時には機器を撤去する。その後は地下調査施設を処分場の一部とするか、モニタリング機器により損傷を受けた人工バリアから廃棄体を取り出し、処分場に新たに定置する。
- 上記モニタリングについては将来の規制との整合が必要である。

上記の条件を満たして性能確認モニタリングを実施するため、バリア機能への擾乱を低減したモニタリング技術の開発を実施した。幾つかの技術を検討した結果、地中無線通信技術のモニタリングへの適用が有望であると結論し、重点的な開発を実施した。

地中無線通信技術の開発においては、先ず、地下施設を含む岩盤中の電磁波の伝播特性を判断するため、特に鋼製部材が電磁波の伝播挙動に与える影響に着目した解析的検討を行い、評価手法の整備を行うと共に開発課題を抽出した。機器開発としては、緩衝材等の限られた空間においてモニタリングを実施可能とするため、小型地中無線送信装置の開発を行い、10MPa の耐水性・耐圧性を付与すると共に、センサを接続するためのアダプタを開発した。また、坑道から隣接する坑道等への通信を行なうための中距離無線送信装置、さらに遠方に通信するための中継技術の開発を実施した。無線により送信されたデータの受信のための技術としては、ボーリング孔対応型のアンテナを開発した。これらの機器開発と通信能力の実証を効率的に実施するため、フランス ANDRA と共同で研究を行ない、ビュール地下研究所で通信実証試験を実施、通信試験結果について、3 次元電磁界の解析により複雑な地下施設の環境下での電磁波伝播挙動を解明した。

記録保存に関する調査については、第 1 フェーズに引き続き、関連する国内外の法規制や記録保存事例の調査を行い、今後、国及び関連機関等が地層処分に対する社会的信頼性の向上につながる記録保存計画を策定する際の判断材料となる考え方について検討を行った。関連動向の調査の結果、OECD/NEA において実施される予定の検討内容は今後の地層処分事業において有効な情報であると考えられた。さらにフランスに関しては、Dossier 2005 からの地層処分における記録及びマーカー等についての進展についても注視していく必要があると結論した。

(3) 第 3 フェーズ（平成 25 年度）

平成 25 年度は当該年度から 5 年間のモニタリング関連技術の整備に関する計画を、目的や実施場所、パラメータ、そして結果の反映方法などの枠組みに関する検討と、技術的実現性の向上に関する検討に分けて計画した。計画にあたっては、第 2 フェーズの取りまとめにあたり抽出

した課題に加え、原環センターが参画した共同研究である MoDeRn プロジェクトにおいて抽出した課題を参照した。これに加え、モニタリング結果を含む地層処分に関する様々な記録の保存についても調査計画を示した。

地層処分モニタリングの枠組みに関する検討として、地層処分における各種のモニタリングについてその分類を示し、本検討で重点を置く処分場の閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認モニタリング）に関する国際共同研究 MoDeRn の主要報告書であるリファレンスフレームワーク報告書について概要を示した。

人工バリアの性能確認については、室内や地下研究所等で行なわれる各種の試験を含む性能確認プログラムの一部として、モニタリングによる確認が行なわれる。モニタリングにより人工バリアの性能確認を行う際には、モニタリング機器の設置による水みちの形成によりバリア機能を損ねる可能性があり、この可能性を十分に検討し、モニタリングにより得られるデータの重要性と比較してモニタリング対象や方法を決定する必要がある。ここでは、地下特性調査施設、パイロット施設、処分パネルの各箇所で人工バリアの性能確認モニタリングを行う場合について、バリア機能の阻害、地質学的・水理学的な代表性、放射線影響の観点から比較し、その得失を示した。また、性能確認モニタリングの結果の反映方法については、人工バリアの構成要素の品質とこれにより達成される性能に関するモデルにより、事前に予測されたあるパラメータの範囲とモニタリング結果の比較による対応について検討した。この結果、モニタリング結果が許容値を満たしている場合であっても、モニタリング結果を踏まえたモデルの再検討により、モニタリング対象である人工バリアの構成要素が性能を保持すべき期間内に性能を維持できなくなると予測され、かつ処分の安全性に影響を及ぼすと判断された場合には、リスクに対応するために工学的対策や廃棄体の回収等が検討されることを示した。

また、平成 24 年度末に運用を中止した地層処分モニタリング技術メニューの運用を再開するとともに、原環センターにおける地層処分モニタリングに関する検討結果及び国際共同研究 MoDeRn プロジェクトにおける検討結果を技術メニューに反映した。また、地層処分の調査、建設、操業等の各段階でのモニタリング計画の策定における技術メニューの運用方法として、以下に示す項目について検討し、必要となる情報及び機能を抽出した。また、これらの情報及び機能を技術メニューのプログラムとして実装するための方法と必要な期間を検討した。

- モニタリングシステム提示機能の追加
- モニタリング目的による検索機能の高度化
- 記録保存に関する情報との統合
- 搭載情報のブラッシュアップ

さらに、地層処分モニタリングの技術的実現性の向上を目的として、現在のモニタリング技術の概略と課題を示し、また、運用上クリアすべき問題としてモニタリング機器の故障に関する検討の概略を述べた。次にモニタリング実施上の制約事項であるモニタリング機器の設置による水みちの形成を制限し、技術的実現性を向上し得る技術である、地中無線モニタリング技術の開発について述べた。

地中無線モニタリング機器の開発については、平成 24 年度に開発した中継システムについて、原子力機構の幌延深地層研究所において、深度 250m の坑道と深度 140m の坑道間、及び度 250m の坑道と地表間にて中継試験を実施し、通信の成功を確認した。これにより小型地中無線送信装置によるモニタリングデータを、同送信装置の通信距離である 20 数 m を越えて遠方に送信することが可能となり、処分坑道の埋め戻しやプラグの設置が行なわれる環境での地中無線装置を用いたモニタリングの実現性が向上した。また、中継装置等の耐圧性の確保について検討を行い、装置を複数の部位に分割し、モジュール化した上で耐圧性を付与するという概念設計を行った。設計した耐圧筐体について FEM 解析を実施し、10MPa の静水圧がかかった場合でも安全率 2.7~3 を確保し、所定の耐圧性能を確保できることを確認した。

小型地中無線送信装置によるモニタリングの適用範囲拡大のため、水分センサの接続アダプタを開発した。これにより、小型地中無線送信機を用いた緩衝材のモニタリングにて想定されるモニタリングパラメータである、全圧、間隙水圧、水分（飽和度）、温度が測定可能となり、地中無線によるモニタリングの実現性が向上した。

平成 26 年度には地中無線モニタリング技術の地下研究所での適用性の確認のため、幌延深地層研究所での人工バリア性能試験、及び瑞浪超深地層研究所での冠水試験での適用を計画しており、平成 25 年度にはこれらの試験のための準備として、装置の製作等を実施した。

地中無線技術に関する重要な課題である長寿命化について、各種の電源供給技術の文献調査を実施した。地中無線モニタリング装置に現在用いている電源である、化学反応による一次電池については 10~15 年の間、電力が供給可能な電池が市販されており、この期間はセンサの寿命と同程度と考えられる為、現状で最も現実的な電源といえる。しかしながら、これ以上の期間に亘り電力を供給するためには、放射性同位体熱電気変換器や電磁波による電力供給等の適用を検討すべきであると結論した。また、現在、地中無線送信装置に使用している電源（リチウム系電池）の高温環境での耐久性に関する試験を実施した。この結果、現在使用している電池は高温環境（80～90℃）において、室内温度環境（20℃）と比較して 94.5%の期間電力を供給可能であることを確認した。

平成 23 年度から実施している、地中無線モニタリング装置の開発に関するフランスの ANDRA と共同研究については、ビュール地下研究所の坑道から掘削したボーリング孔における緩衝材の膨潤挙動に関する長期モニタリングの継続的な実施した。また、ビュール地下研究所における 490m 坑道と地表との間の長距離通信について、平成 25 年度の中継試験の結果を考慮して、実現可能性の確からしさ（不確実性）について Evidential support logic (ESL)を用いて評価を実施し、試験方法について考察した。

これらに加え、高レベル放射性廃棄物の地層処分における記録保存について最新動向の調査を実施した。OECD/NEA-RWMC が 2009 年より実施している記録保存に関するプロジェクトの 3 文書についてその内容を整理した。本プロジェクトは現在進行中であるが、議題となる内容は、制度的管理の一環である記録保存、マーカー・モニュメント等に加えて、閉鎖までの記録管理について含むこととなる予定であり、今後公開される報告書等の情報は、非常に重要であると考えられる。また、英国の地層処分に関する記録保存について、 2009 年の規制要件及び事業者の対

応策を整理するとともに、わが国に於いて平成 23 年に施行された「公文書管理法」について、内閣府等により公表された具体的な運用方法についての文書（管理法施行例や運用マニュアル等）の内容を調査・整理した。

### 1.3　モニタリング関連技術の整備に関する計画

平成 25 年度に実施した 5 年間の調査研究計画を基に、進捗状況等を考慮し一部更新を行った計画を表 1.1.2-1 に示す。

表 1.1.2-1　平成 25 年度から平成 29 年度の調査研究計画

<table>
<tr><th colspan="2"></th><th>H25</th><th>H26</th><th>H27</th><th>H28</th><th>H29</th></tr>
<tr><td colspan="2">5 年間の研究計画立案</td><td>・計画立案</td><td></td><td>・進捗確認、計画更新</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td rowspan="4">長期健全性の確認等に関する検討</td><td rowspan="2">長期健全性の確認に関する検討</td><td>・詳細計画検討<br>・性能確認モニタリングの課題抽出<br>・モニタリング結果反映方法の検討</td><td rowspan="2">・人工バリアの長期健全性に関わる安全機能と FEP によるパラメータの抽出<br>・状態確認結果反映方法の検討</td><td>・状態確認結果の反映方法に関する検討</td><td>・人工バリア長期健全性の状態確認に関するシステムの例示</td><td rowspan="3">・実現可能な技術による人工バリア長期健全性の確認に関する計画の例示<br>・地層処分の信頼性向上への状態確認の役割の提示</td></tr>
<tr><td>・MoDeRn 成果取りまとめ</td><td colspan="2">・国際的な共同研究への参画などによる性能確認モニタリングの検討</td></tr>
<tr><td>その他の状態確認に関する検討</td><td>・詳細計画検討</td><td>・操業安全及び回収可能性に係るモニタリングの調査・検討</td><td></td><td>・制度的管理等に係る状態確認の調査・検討</td></tr>
<tr><td>技術メニューの整備</td><td>・詳細計画検討</td><td>・ 技術メニューへの記録保存成果反映</td><td>・調査・開発成果の反映</td><td>・モニタリングシステム反映方法検討</td><td>・人工バリアモニタリングシステムの反映</td></tr>
<tr><td rowspan="3">状態確認技術の検討</td><td rowspan="2">地中無線モニタリング技術の開発</td><td>・詳細計画検討</td><td>・国際 WS 共催</td><td>・進捗確認、計画更新</td><td></td><td rowspan="3">・頑健性、冗長性を備えた無線モニタリングシステムの提示</td></tr>
<tr><td>・中継機等耐圧化検討<br>・小型送信機水分計アダプタ開発</td><td>・多段中継方法検討</td><td>・ネットワーク化検討、試作</td><td>・改良型中継機製作・試験</td></tr>
<tr><td>電源供給技術等の調査</td><td>・課題抽出<br>・耐熱性試験</td><td>・電磁波による電力供給の基礎試験<br>・放射性同位体熱電気変換器の熱影響等の検討</td><td>・電磁波による電力供給の基礎試験</td><td>・地中無線装置への電源実装方法検討</td></tr>
<tr><td colspan="2">地下研等における検証</td><td>・中継技術検証<br>・モニタリング技術検証準備</td><td>・緩衝材・埋戻し材膨潤挙動、水圧モニタリングへの適用性検証</td><td>・緩衝材・埋戻し材膨潤挙動、水圧モニタリングへの適用性検証</td><td>・緩衝材・埋戻し材膨潤挙、水圧モニタリングへの適用性検証</td></tr>
<tr><td colspan="2">記録保存に関する調査</td><td>・詳細計画検討<br>・動向調査分析</td><td>・OECD/NEA の動向調査・分析</td><td>・記録保存に関する動向調査・分析</td><td>・記録保存事項の検討</td><td>・記録保存システム案の提示</td></tr>
<tr><td colspan="2">各年度の成果目標</td><td>・性能確認モニタリングの課題抽出<br>・研究開発計画策定</td><td>・操業安全等に関するモニタリングの課題抽出</td><td>・地下研究施設における地中無線モニタリング技術の確証</td><td>・性能確認モニタリング結果反映方法提案</td><td>・実現可能な技術による人工バリア長期健全性の確認に関する計画の例示</td></tr>
</table>

## 1.4　報告書の構成及び概要

本報告書は、第 1 章から第 6 章までの 6 部構成となっている。

第 1 章では「研究の目的及び概要」として、本調査の背景や目的、概要を示した。

第 2 章では「地層処分モニタリングの枠組みに関する検討」として、地層処分において行なわれるモニタリングを概観し、国際的な検討の動向に関する調査結果を報告するとともに、人工バリアの長期健全性の確認を含む性能確認モニタリング、操業期間中の安全に関するモニタリング、回収可能性に関わるモニタリングについて検討を実施した。

第 3 章では「地層処分モニタリングの技術的実現性の向上に関する検討」として、地層処分モニタリングに適用される技術の現状を記載するとともに、水みちの形成を抑制したモニタリングを実現可能とする地中無線モニタリング技術の検討状況を記載した。

第 4 章では「記録保存に関する調査」として、OECD/NEA における検討状況に関する文献調査等を実施した。

第 5 章では「モニタリング技術メニューの整備」として、これまで収録していなかった記録保存に関する既往の調査結果の収録等を実施した。

第 6 章では第 2 章から第 5 章までの調査研究を取りまとめた。

第 1 章参考文献

[1] 原子力安全委員会（2000）：高レベル放射性廃棄物の処分に係る安全規制の基本的考え方(第 1 次報告、平成 12 年 11 月 6 日
[2] 原子力安全・保安部会　廃棄物安全小委員会報告書（2006）；放射性廃棄物の地層処分に係る安全規制制度のあり方について、平成 18 年 9 月 11 日
[3] RWMC and Nirex； International Workshop on Repository Monitoring Strategies in Geneva、 21-23 February 2007、 CD of Workshop Proceedings、 Final Version、 (2007).

# 第2章　地層処分モニタリングの枠組みに関する検討

## 2.1　目的及び実施概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では、概要調査・精密調査のサイト調査段階に始まり、建設・操業・部分閉鎖の段階を経て、処分場を最終閉鎖した後も一定の期間にわたり、様々な目的で地層処分モニタリングを実施することが考えられている。

本章では、地層処分に関するモニタリングについて概観し、モニタリングの目的について概略を示す。この中で人工バリアの長期健全性に関連し、地層処分独自のモニタリングとして重要な処分場閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認モニタリング）に関し、国際的な動向として、国際共同研究 MoDeRn の主要成果、及び OECD/NEA における検討を紹介する。また、性能確認モニタリングのうち技術的側面からの困難を有する人工バリアのモニタリングに関して考察を行うとともに、ニアフィールドのモニタリングにより人工バリアの性能確認に資する方法について考察する。さらに、操業期間中の安全に関するモニタリングについて検討するとともに、廃棄体の回収可能性に関わるモニタリングについて検討する。

## 2.2　地層処分に関するモニタリングの概要

地層処分におけるモニタリングは、処分プロセスの段階的管理に関する意思決定への貢献、及び処分プロセスに対する信頼の強化への貢献を包括的な目標として実施される。しかしながら、これらを実現するためのモニタリングは多様であるため、その枠組みを理解した上で技術的側面の検討を行う必要がある。

### 2.2.1　モニタリングの目的による分類

地層処分モニタリングを目的に基づき分類すると、以下の様になる。

a.処分システムの期待／予測された挙動の検証/確認　（閉鎖後安全、性能確認）

- ・処分システム構成要素の機能の確認
- ・設計・施工上の仮定の確認
- ・健全性評価モデルの検証

b.操業安全性

- ・一般労働安全
- ・放射線安全

c.環境影響

これらに加え、以下のモニタリングが分類される。

- ・ベースラインの取得

a.及びc.のためのモニタリング結果と比較されるサイトの初期状態の取得

・法令要件の遵守

a.～c.に関し定められた法令要件（制度的管理に関する法令要件を含む）の遵守

さらに、廃棄体の回収とモニタリングの関連については、回収の理由に関らず、回収が決定された後にスムーズな回収が実施できるかに関するモニタリング、一部の廃棄体を回収した場合に回収行為が他の廃棄体に与える影響（回収後の状態）に加え、a.の性能確認に関するモニタリングの結果が事前の予測と異なり、さらにリスクがあるものと判断された場合の対処における選択肢の一つとして、廃棄体の回収があり得るものと考えられる。なお、回収時の安全性に関するモニタリングは b.の操業安全性に関するモニタリング（特に坑道の構造安定性など）に密接に関連しているもの、また、回収行為が他の廃棄体に与える影響に関するモニタリングは、a.の性能確認に関するモニタリングに類似したものと考えることができる。これらの関係について図 2.2.1-1 に示す。

これらの各種のモニタリングが実施される地層処分の段階と場所は、例えば、表 2.2.1-1 の様に考えることができる。

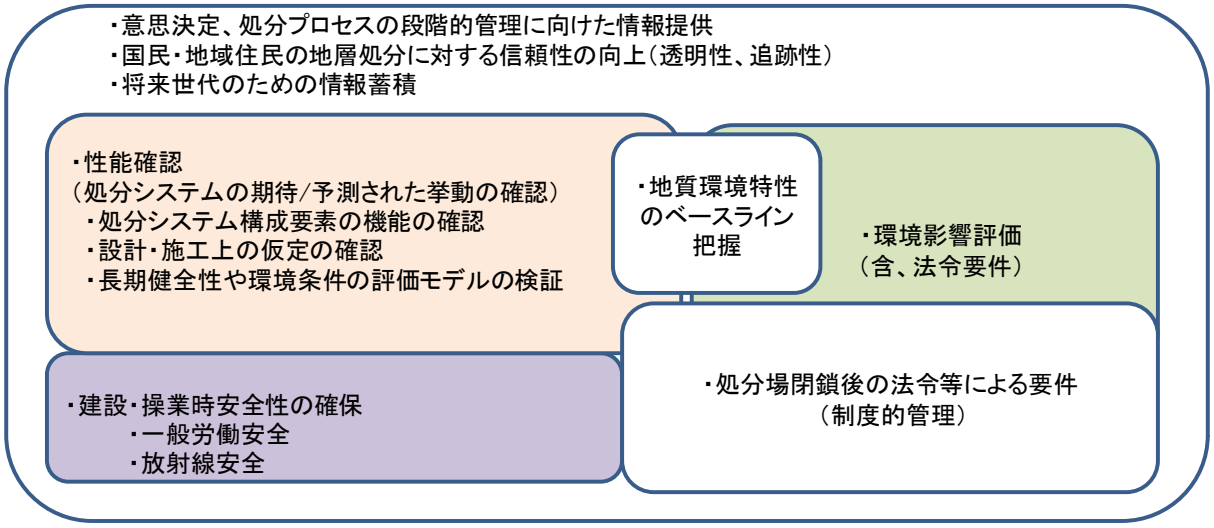



図 2.2.1-1　地層処分におけるモニタリングの目的

表 2.2.1-1 地層処分の段階と場所によるモニタリング目的

<table>
<tr><th></th><th>概要調査段階</th><th>精密調査段階前半</th><th>精密調査段階後半</th><th>建設段階</th><th>操業段階</th><th>閉鎖段階</th><th>閉鎖後管理</th></tr>
<tr><td>遠隔（衛星、航空）</td><td colspan="2">調査・ベースライン</td><td colspan="5">環境影響評価</td></tr>
<tr><td rowspan="2">地表・ボーリング</td><td colspan="2">調査・ベースライン</td><td colspan="5">環境影響評価</td></tr>
<tr><td colspan="2">調査・ベースライン</td><td colspan="5">性能確認（ファーフィールド）</td></tr>
<tr><td rowspan="3">地下特性調査施設</td><td colspan="2" rowspan="3"></td><td colspan="4">環境影響評価</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="4">性能確認</td></tr>
<tr><td colspan="4">操業安全</td></tr>
<tr><td rowspan="3">処分場</td><td colspan="3" rowspan="3"></td><td colspan="3">環境影響評価</td><td rowspan="3"></td></tr>
<tr><td colspan="3">性能確認</td></tr>
<tr><td colspan="3">操業安全</td></tr>
</table>

これらの地層処分における様々なモニタリングのうち、処分システムの期待／予測された挙動の検証／確認 （閉鎖後安全、性能確認）のためのモニタリングは、処分場の閉鎖前（操業期間中等）において実施するモニタリング結果を、閉鎖後の安全性に関して期待/予測された挙動と比較するものである。このモニタリング結果は、処分場の操業・施工に係る改善や対策の判断に用いられる。期待や予測に沿ったモニタリング結果の場合には処分場の閉鎖後の安全性に関するセーフティケースを強化し、また、事業者の閉鎖後安全に関する確信を強化することとなる。しかしながら、期待や予測と異なったモニタリング結果がもたらされた場合については、その意味や結果の反映について十分な事前検討が必要である。

本調査では、地層処分独自のモニタリングである性能確認に関するモニタリングを中心として検討を実施し、これに加え操業安全性に関するモニタリング、及びこれらと関連の深い、廃棄体の回収に関係したモニタリングの検討を実施する計画である。

性能確認に関するモニタリングの検討においては、平成 25 年度までに天然及び人工バリアの安全機能に基づくモニタリングパラメータの選定方法を提示するとともに、モニタリング対象・パラメータの選定時において考慮すべき制約条件等を提示した。しかしながら、モニタリング結果をセーフティケースの信頼性向上や処分プロセスのマネジメントにどのように反映するかの検討は十分に検討されていない。このような状況は、欧州各国と日本（原環センター）、米国による国際共同研究 MoDeRn プロジェクト[1]においても同様であり、モニタリング結果の反映方法の検討が今後の重要な課題として位置づけられている。このような経緯から、平成 26 年度からの検討においては、性能確認モニタリングの結果の反映方法に焦点を当てた検討を実施している。

性能確認モニタリングの結果の反映方法の検討では、本来は特定のサイトにおけるセーフティケースに基づいた検討を実施すべきであるが、現在のところこのようなセーフティケースは存在しない。このため、平成 25 年度及び本年度の検討に於いては、セーフティケースにおいて重要な位置を占める処分場の構成要素の安全機能に関する検討を示した原子力発電環境整備機構（NUMO）による報告書[2]等に基づいた検討を実施した。

また、検討対象とする処分場の構成要素については、処分システム工学確証技術開発「人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材」において具体的にバリア性能に影響する事象について検討を実施する、緩衝材及び埋め戻し材の再冠水時の挙動を中心的な課題とした。人工バリアの長期健全性に影響を与える外部の条件（例えば、地下水の湧水量や水質など）は、人工バリアの設計のために予め把握され、あるいは設計に於いて仮定した範疇にあるかが確認されるものと考えられ、このことは性能確認モニタリングの一部であるものと解釈できる。

国際協同研究 MoDeRn については、後続の共同研究の実施が予定されており、現在、EC に対するプロジェクトの申請中である。このプロジェクトは平成 27 年度からの開始を予定しており、これらの国際協力を視野に入れた検討を実施する予定である。

操業期間中の安全性に関しては、平成 25 年度に処分システム工学確証技術開発のうち、巨大地震や巨大津波等の自然災害の操業期間中の安全対策に関る基盤技術の整備において、状況把握・監視技術について検討を実施したが、この状況把握・監視は操業安全性に関するモニタリングの一部を成すものと考えられるため、当該研究と情報交換を実施しながら検討を行った。

さらに、廃棄体の回収に関係したモニタリングについては、資源エネルギー庁の事業である「地層処分回収技術高度化開発」における検討内容を考慮して検討を実施した。

## 2.3　モニタリングの検討に関する動向

### 2.3.1　モニタリング国際共同研究 MoDeRn プロジェクトにおける検討

#### (1)　MoDeRn の概要

MoDeRn プロジェクトは Euratom（the European Atomic Energy Community、欧州原子力共同体）の 7th Framework Programme の一つとして実施された。地層処分事業の各段階（サイト調査から始まり、建設、操業、閉鎖及び閉鎖後の制度的管理）において、ステークホルダの関与を踏まえたモニタリングに関する検討及びモニタリングの実施に向け参照すべきフレームワークの提供を目指した国際共同研究である。研究期間（助成金の受給期間）は約 4 年半であった（2009 年 5 月～2013 年 10 月）[1]。

MoDeRn には 12 の国々（EU、米国、日本（原環センター）及びスイス）から、18 の処分実施主体、研究機関、大学が参画し、幹事会社はフランスの ANDRA（高レベル放射性廃棄物処分を含む放射性廃棄物を管理するフランスの放射性廃棄物管理機関）であった。

原環センターでは平成 20 年度より、「モニタリング技術の開発」の一環としてモニタリングに関わる最新の海外動向を把握し、我が国の地層処分モニタリングの目的や考え方の討議に活用するため MoDeRn に参画してきた。

MoDeRn の目的は次の 5 項目であった。

- 広範に受け入れられる最新のモニタリングの目的を設定すること。
- 処分の段階的なアプローチ期間内において、より具体性のあるモニタリングイメージを開発すること。
- 開発するモニタリングが、専門家や非専門家のステークホルダの要望に沿っているかどうかを確認すること。
- モニタリング活動によって得られる知見並びに処分環境で利用可能な技術について提示すること。
- 将来のステークホルダとの関わり方についての提言を行うこと。

これらの目的を達成するために、MoDeRn は以下に示す 6 つの技術的ワークパッケージを構成し、検討を実施した。

WP1: Monitoring Objectives and Strategies（目的と戦略）

技術的及び社会科学的観点からモニタリングの主要な目的を分析し、有益なモニタリング戦略を提示する。

WP2: State-of-the-art and RTD of relevant monitoring technologies（先端技術・技術開発）

モニタリングの最先端技術を整理し、処分システムの要求に応じた技術開発を行う。

WP3: In-situ demonstration of innovative monitoring techniques（原位置試験）

最先端技術を用いたモニタリング技術の実証を原位置で実施する（対象サイト：フランス地下研究所ビュール、 ベルギー地下研究所モル、 スイスグリムゼル試験サイト）。

WP4: Case study of monitoring at all stages of the disposal process（ケーススタディ）

処分事業の各段階においてモニタリングのケーススタディを実施する。このケーススタディにおいては予想外の結果が得られた場合などにモニタリング結果をどのように取り扱うかに関するガイダンスの提供に向けたシナリオも考慮する。

WP5: Knowledge Dissemination（成果の普及）

規制機関等ステークホルダとの討議、EU 主催の国際学会等も含め、検討成果の普及を行う。

WP6: Reference framework for repository monitoring（リファレンスフレームワークへの反映）

MoDeRn の参加機関を下記に示す。12 カ国、18 機関で運営された。

- Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA)、 France
- Asociación para la Investigación y el Desarrollo Industrial de los Recursos Naturales (AITEMIN)、 Spain
- DBE Technology GmbH (DBETEC)、 Germany
- Empresa Nacional de Residuos Radioactivos S.A. (ENRESA)、 Spain、
- ESV EURIDICE (EURIDICE)、 Belgium
- Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA)、 Switzerland、
- Nuclear Decommissioning Authority (NDA)、 United Kingdom、
- Nuclear Research and Consultancy Group v.o.f. (NRG)、 Netherlands
- Posiva Oy (Posiva)、 Finland
- Radioactive Waste Repository Authority (RAWRA)、 Czech Republic
- 原子力環境整備促進・資金管理センター(Radioactive Waste Management Funding and Research Center、 RWMC)、 Japan
- Sandia National Laboratories (SANDIA)、 USA
- Universiteit Antwerpen (UA)、 Belgium
- University of East Anglia (UEA)、 United Kingdom
- University of Gothenburg (UGOT)、 Sweden
- Galson Sciences Limited (GSL)、 United Kingdom
- Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETH ZURICH)、 Switzerland
- Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)、 Sweden

(2) MoDeRn プロジェクトの主要な結論

MoDeRn プロジェクトは最終報告書[3]を 2014 年 1 月に EC に提出して、その活動を終了した。MoDeRn プロジェクトの最終報告書[3]の構成と主な内容を表 2.3.1-1 の通りである。

表 2.3.1-1　MoDeRn プロジェクト最終報告書[3]の構成と主な内容

| 報告書構成 | 主な内容 |
|---|---|
| §1　はじめに | 地層処分におけるモニタリングの定義、MoDeRn プロジェクトの背景と目的が述べられている。 |
| §2　処分場モニタリングのためのリファレンス・フレームワーク | MoDeRn モニタリングワークフローの概要を示すと共に、処分場モニタリングのために MoDeRn リファレンス・フレームワークについて説明している。 |
| §3　処分場のモニタリング技術 | 処分場モニタリングの技術的な側面について、現時点における状況及び MoDeRn プロジェクトで実施された研究、URL で行われた実証試験の結果について説明している。 |
| §4　モニタリングプログラム：ケーススタディ及び故障検出の検討 | MoDeRn モニタリングワークフローの試験のために実施したケーススタディの概要を示すとと共に、この種のフレームワークにおけるモニタリング技術の適用について具体的に説明している。さらに、処分場性能がセーフティケースの内容に適合していることをチェックするためにモニタリングの使用、モニタリングシステムの故障の検出可能性について考察している。 |
| §5　モニタリングプログラムへのステークホルダの関与 | MoDeRn プロジェクトで実施されたモニタリングプログラムへのステークホルダの参加に関する研究の概要を説明している。 |
| §6　結論 | MoDeRn プロジェクトで得られた結論を示している。 |

MoDeRn プロジェクトの最終報告書[3]に基づき、同プロジェクトの主要な結論を以下に述べる。なお、本報告書の詳細については原文[3]を参照されたい。

MoDeRn プロジェクトでは、放射性廃棄物地層処分に関するモニタリングという言葉を次のように定義した。

「工学、環境、放射線学又はその他の状況に関するパラメータ及び指標／特性の連続的又は定期的な観察及び測定のことをいい、処分場システムの構成要素の挙動に関する評価を、さらには処分場とその操業が環境に及ぼす影響に関する評価を支援するために、したがって処分プロセスにおける意思決定を支援し、処分プロセスへの信頼の向上を支援するために実施されるもの。」

MoDeRn プロジェクトは、地層処分の段階的な実現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参加機関によって開始されたものであり、その目的は、特に処分実施主体に対して、これらの処分実施主体によるモニタリングプログラムの開発に役立つ可能性のある具体例だけでなくガイダンス及び勧告を、さらにはこれらをどのように実行することができるのかに関する理解や、全体的な処分プロセスの一環として使用する可能性に関する理解を、提供することにある。この目的は、次に挙げる活動を通じて達成されてきた。

- 「MoDeRn モニタリングワークフロー」（モニタリングプログラムの開発及び実現のためのジェネリックな体系的なアプローチをもたらすもの）（図 2.3.1-1）及び「MoDeRn リファレンス・フレームワーク」（さまざまな背景状況においてモニタリングをどのように実行できるのかに関する具体的な説明及び例を示すもの）を開発すること。

- モニタリング技術についての理解を、さらにはモニタリング技術に関する「研究及び技術的開発」（RTD）についての理解を深めること。それにより、処分実施主体にとって利用可能なモニタリング技術の範囲を拡大し、これらの技術を使用することのできる用途の範囲を評価すること。
- 特定のプログラム目標を取り扱う統合的な処分場モニタリングプログラムをどのように開発することができるのかを示す具体例となる一定範囲のモニタリングプログラムに関する記述を行うこと。
- 処分場モニタリングプログラムの範囲内でステークホルダが果たしうる役割について評価することに加えて、処分場モニタリングに関するステークホルダの見解がどのように各国の処分場モニタリングプログラムの開発に影響を及ぼす可能性があるのかを検討すること。

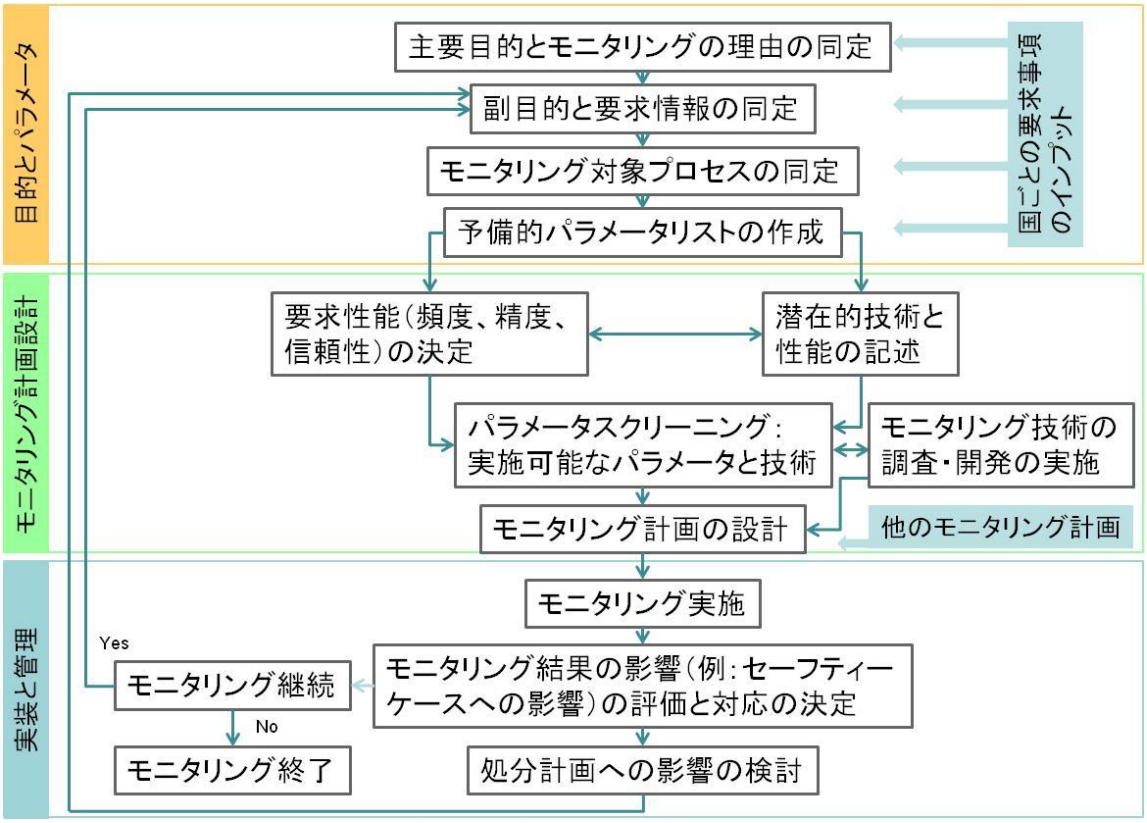



図 2.3.1-1　MoDeRn モニタリングワークフロー　[3]

モニタリングの主要目標とは、特定のモニタリングプログラムの開発、実施及び使用が要請される根拠となる最終目標を記述したものである。MoDeRn プロジェクトでは、次に示す 4 つの基本的な主要目標が認識された。

- 処分場性能評価の根拠に対する支援を行うこと。
- 操業安全面での支援を行うこと。
- 環境保護に関する支援を行うこと。

・　核物質保障措置に関する支援を行うこと。

MoDeRn プロジェクトでは、このうち「処分場性能評価の根拠に対する支援を行うこと」を目標としたモニタリングについて検討を行った。この目標はさらに、「閉鎖後長期のセーフティケースの根拠に対する支援を行うこと」及び「閉鎖前の処分場のマネジメントに対する支援を行うこと」に分けて考えることができる。

また、MoDeRn プロジェクトでは、全てのモニタリングプログラムが寄与する 2 件の包括的な最終目標を、「意思決定を支援すること」と「信頼醸成を支援すること」とした。意思決定に関する支援は、段階的な処分場実現プロセスと関連するモニタリングから導き出される情報の使用と結びつく。この場合にモニタリングにより、当該プロセスを通じて必要とされる管理決定を支援する情報がもたらされる。信頼醸成の支援は、モニタリングから予想することのできるより一般的な付加価値の一部と結びついている。モニタリングにより、当該処分施設がセーフティケースで想定された範囲内の挙動を示すことを確認するために、さらには防護に関する最終目標が満たされていることを確認するために処分場とその周辺環境の実際の変遷に関する検証及び評価を実施する手段の 1 つがもたらされる。

1)　モニタリングプログラムの開発及び実施に関するガイダンス

MoDeRn モニタリング・ワークフロー（図 2.3.1-1）は、1 つの体系的なトップダウン型のアプローチをもたらすものであり、このアプローチは、モニタリング目標をモニタリング対象とされるべきプロセス及びパラメータへと発達させ、モニタリングプログラムを設計し、モニタリングプログラムの結果を意思決定の支援に使用するものである。このワークフローは、モニタリングプログラムを作成する実施組織を支援するはずである。

このワークフローでは、モニタリングプログラムの開発及び管理において次に示す 3 件の鍵となる段階が特定されている。

(i) **目標及びパラメータ**：モニタリングプログラムの目標及び下位目標を特定することと、これらのプロセス及びパラメータへの関連付けを、モニタリングに関する予備的なパラメータ・リストを特定する目的で行うこと。プロセス及びパラメータは、セーフティケースの分析を通じて特定することができる。その例として、安全機能の検討及び/又は特定の処分構成機器の安全機能に影響を及ぼす可能性のある、あるいはたとえば廃棄物の回収が可能であることを立証する際の鍵となるプログラム要件に関わる「特性、事象及びプロセス」（FEP）の検討が挙げられる。

(ii) **モニタリングプログラム及び設計**：予備パラメータ・リストのスクリーニングを行い、モニタリングプログラムの設計を容易にするための性能要件、利用可能なモニタリング技術及びオーバーラップ／冗長性に関する分析。プログラム設計により、どのような方法で、どのような場所で、またどの時点でデータが収集されるのかが定義されると共に、性能レベル、ト

リガー値、さらには一定のモニタリング結果に応じて実施される可能性のある潜在的リスク緩和措置が指定されることになる。

（iii）**実現及びガバナンス**：モニタリングプログラムを実行し、意思決定に必要な情報を提供するために得られた結果を利用すること。モニタリングプログラムの実施期間にわたり、連続的に、さらには周期的にも結果の評価を行ってゆく必要がある。連続的評価の焦点は個別のモニタリング結果の評価に合わせられているが、周期的な評価では、モニタリング結果がセーフティケースに与える、さらにはプログラム決定に与える全体的な影響が検討される。

MoDeRn プロジェクトにより、モニタリングプログラムを開発し、実行する決定を正当化する動機とそれに関連する目標について理解することの重要性が明示されている。モニタリングプログラムは、予想との比較における実際の性能のチェックを行い、全てのステークホルダにとっての透明性を高め、処分場実現プログラムのさまざまな段階を通じて意思決定に必要な情報を提供するための情報をもたらすものとなるべきである。

この MoDeRn モニタリングワークフローは規範的なものでなく、それぞれのプログラムが一定範囲の技術的、社会及び政治的に境界条件による影響を受けることが明示的に認められている。したがって MoDeRn プロジェクトにおいてこのワークフローは、1 つのジェネリックなレファレンス・プログラムを提示するものとしてではなく、むしろ各国の背景状況を取り扱い、特定のモニタリングプログラムへと統合するアプローチの 1 つとして開発されている。実際にこのプロジェクトでは、各国の背景状況の多様性が、さらにはその結果として開発が見込まれるモニタリング策の多様性が、明確に認識されている。

こうして各国の境界条件によって処分場モニタリングプログラムに関する具体的な詳細だけでなく、さまざまなステークホルダが関与を行うことができる（あるいは実際に関与を行う）方法に関する具体的な詳細が決定される。技術的な問題の例として、処分インベントリの特性や処分場が建設される母岩の特性、さらには処分場の設計や、操業期間中と閉鎖後期間の両方に処分場のそれぞれの構成要素に割り当てられる安全機能などが含まれる。

ステークホルダの検討事項により、モニタリングプログラムに関する責任を負う処分実施主体とその他の組織（規制組織、諮問機関、関連する自治体及び一般公衆などを含む）との間の連携がどのような性格のものとなるかが決定づけられる。またこれにより、ステークホルダが助言又は要求事項を当該プログラムの開発及び実施のどの段階において提示するのかが決定づけられる。

政策面での条件により、モニタリングプログラムのいくつかの側面に影響が及ぶ可能性がある。この中には、処分場モニタリングプログラムに関して開発された戦略も含まれる可能性があり、その例としてパイロット施設又は犠牲セル（原環センター注：フランスによるケーススタディにて示された概念であり、集中的なモニタリングが実施され、処分場閉鎖期間には廃棄物が回収される、図 2.3.1-2）の使用が挙げられる。政策面での決定が、閉鎖後のモニタリング又は回収可能性のためにモニタリングに関する決定に影響を及ぼす可能性もある。この中には、この種のモニタリングの実施がどの程度の期間にわたって要求される可能性があるのか、この種のモニタリン

グをどのような方法で管理することができるのかなどが含まれる。こうした政策はさらに、セーフティケースがモニタリングによる支援を受けなければならない範囲や、より広範な科学プログラムを実施することによって廃棄物定置後の処分場の直接的なモニタリングの必要性をどの程度まで取り除くことができるのかにも、影響を及ぼす可能性がある。

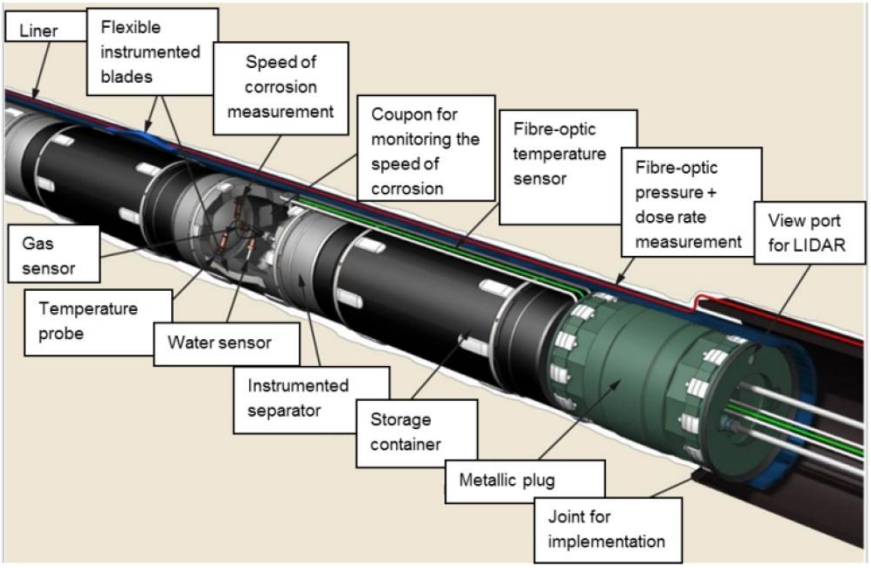



図 2.3.1-2 犠牲セル[3]（HLW 処分セルのうち、集中的なモニタリングを実施し、処分場閉鎖前に廃棄体を回収するセル）でのモニタリングに関する模式図

2) モニタリング技術とモニタリングプログラム

MoDeRn プロジェクトにおける技術的な研究開発作業の焦点は、ニアフィールドのモニタリングに（特に技術面での観点から EBS のモニタリングに）合わせられており、ニアフィールド岩盤は現時点における最大の技術的な課題として、また長寿命放射性廃棄物の地層処分に特有の課題として残っている。

MoDeRn プロジェクトではモニタリング技術に関する相当規模の研究活動が実施され、その中には、モニタリング技術の現時点における最先端状況に関する報告書の作成も含まれている。また本プロジェクトでは、URL 及びその他の研究施設における最先端のモニタリング手法に関するいくつかの開発及び実証プログラムが実施されている。この研究及び開発作業は、技術的な実現可能性や地層処分のモニタリングにとっての限界に関する洞察をもたらしただけでなく、追加投資の実施に値する研究開発領域の特定にも役立った。

MoDeRn プロジェクトでは、次に列記するモニタリング技術に関する開発が実施された。

- 地震波断層撮影データの全波形弾性インバージョンに関する新規アルゴリズムが開発され、断層撮影データを得るためのいくつかの実用的な方法がモン・テリ及びグリムゼルでの試験を通じて開発された。
- 新しい弾性波発生ハンマーが開発された。このハンマーは強い S 波信号を発生させる糊を

高め、それによってニアフィールドの伝導するせん断波（S 波）のモニタリングの実現可能性を改善するものである。これにより、EDZ に生じた変化に関する情報がもたらされる可能性が強化されることになる。

- いくつかのパラメータ（たとえば間隙水圧、全圧及び水の含有量に関するもの）の測定や数メートルの距離にわたる測定データの送信を可能にする高周波ワイヤレス・ノードの設計、開発及び試験が実施された。このノードは、20～25 年の寿命を備えるものと予想されている。（原環センター注：第 3 章にて述べる地中無線モニタリングシステムにも同様のバッテリーを用いているが、バッテリーの自己消費の見積もりから供用期間を 10 年としている。）この作業の成果の 1 つとして、ワイヤレス・ノードに関する特許出願が行われた。
- 低周波送信システム、すなわち 1.7 kHz までの周波数で、導電性の高い地質媒体において 225 m の距離にわたるデータ送信を可能とするシステムが、HADES URL において設計され、開発され、試験された。またこうした周波データ送信が実施されうる条件の評価も行われている。これにより、処分場閉鎖後に処分場から地表にモニタリングデータを送信する方法の 1 つが実現する可能性がある。（原環センター注：第 3 章にて述べる地中無線モニタリングシステムも低周波を用いており、周波数は 8.5kHz または 1.2kHz である。）
- 光ファイバ・センサを使用する分散モニタリングに関する研究が、HADES 及びビュール URL で実施された。この両方の URL でセンサの設置及び試験は成功裡に実施され、実験坑道の周囲で坑道掘削に対応して生じた移動の測定に成功した。
- AE モニタリング等が、「ベルギー・スーパーコンテナ」の 2 分の 1 スケールの試験において、割れの発生及び成長の検出に使用され、良好な成績を収めた。
- 原位置での腐食速度の測定が可能な腐食センサが開発され、地上施設で試験された。

これらのモニタリングの開発により、EBS 及びニアフィールド岩盤のモニタリングに容易に応用することのできるニアフィールドモニタリング技術の範囲が拡大されるだけでなく、モニタリングによって明らかにされる技術的な課題の大部分に対処することができる一定範囲のモニタリング技術が利用可能となる。しかし、次に挙げる目的のために、今後さらなる開発が必要とされている：(i) モニタリング技術の信頼性や、1 つのモニタリングプログラムの範囲における故障識別手順の実行の信頼性を改善すること、(ii) 特に EBS やニアフィールド岩盤に関する閉鎖後モニタリングを実施する上で必要な長期間にわたり電力を自給する可能性を向上させること、及び（iii）一般的なモニタリング・アプローチを特定のパラメータをモニタリングするために適用できる方法や、いくつかのモニタリング技術をモニタリングプログラムの範囲内で統合する方法を明示すること。さらに、許認可発給を受けた後に処分プログラムが処分場の建設及び操業に向けて進展するのにつれて、モニタリングデータによってセーフティケースの反復的な開発がどのように支援されるのかに関する定義をより明確なものとする必要もある。

3) 処分場モニタリングプログラムに関する結論

岩塩、粘土岩質及び花崗岩質の母岩に立地される処分場で実施される可能性があるモニタリングプログラムのタイプの包括的な例が開発された。これらの具体例となるプログラムは、MoDeRn

モニタリング・ワークフロー（図 2.3.1-1）を使用して作成されたものであり、MoDeRn プロジェクトにおいて開発された技術の使用が念頭に置かれている。

この具体例となるモニタリングプログラムにより、ニアフィールド・モニタリング・プログラムの設計をセーフティケースで検討された FEP の体系化された分析に基づいて実現できることが、さらには規制で設定された閉鎖前の情報要件に対処できることが（たとえば可逆性を明示することが）、理論ベースで示された。

処分場モニタリングに関してよく知られている課題を克服するために設定されたいくつかの戦略が、具体例となるモニタリングプログラムにおいて設定され、提案されている。その例として、モニタリング対象となる異なる種類の処分セル（この中にはたとえば、処分場閉鎖期間には廃止措置が実施され、廃棄物が回収されることになるいわゆる「犠牲セル」（図 2.3.1-2）も含まれる）、また操業の第 1 段階を対象とする定置後廃棄物のモニタリングに焦点を合わせたモニタリング戦略（これにより当該情報が収集され、その後の操業段階における意思決定で使用されることになる）、さらには実際の廃棄物が収容されない処分坑道のモニタリングの使用などが挙げられる。模擬廃棄体の使用が、これらの具体例のうちの 2 件において提案されている（図 2.3.1-3 及び図 2.3.1-4）。

またこの具体例となるモニタリングプログラムの開発を通じて、既存のセーフティケースやその他の各国の背景状況に関する情報を使用した MoDeRn モニタリングワークフローの試験を実施することが可能となっている。これらの具体例となるプログラムは MoDeRn モニタリングワークフローとの整合性が保たれたプロセスを用いて開発されている。このプロセスとはすなわち、モニタリングを実施する主な目標及び理由の特定を、またセーフティケースやその他の動機の評価を通じた下位目標、プロセス及びパラメータの特定を（その例としてステークホルダの要件に関するいくつかの仮定などが挙げられる）、さらには性能要件及び利用可能な手法に関する理解に基づくモニタリングシステム設計の開発を、含むもののことをいう。したがって MoDeRn モニタリングワークフローは、モニタリングプログラムの開発にとって適切な体系的アプローチの 1 つと見なすことができる。

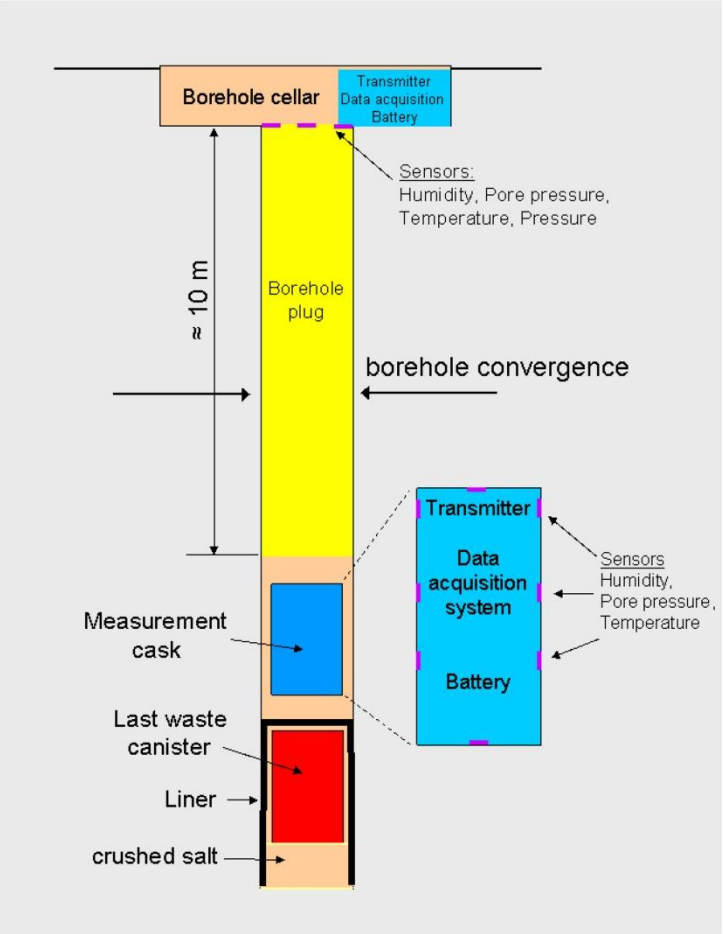



図 2.3.1-3　蒸発岩（岩塩）のケース（ドイツ）におけるモニタリング用模擬廃棄体の概念、地中無線送信装置により竪置き処分孔（長孔）からデータを処分坑道に送信する。

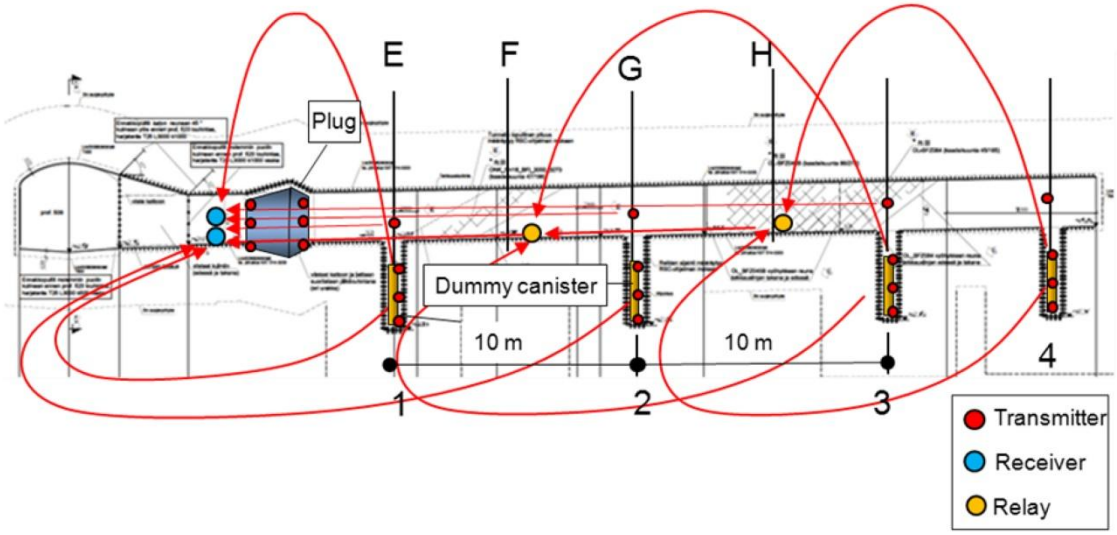



図 2.3.1-4　結晶質岩のケース（フィンランド）における模擬廃棄体を用いた人工バリアのモニタリング、原環センターによる地中無線モニタリングシステム（第 3 章参照）を用いた概念

4) 処分場モニタリングに関するステークホルダの関与に関する結論

国レベルのワークショップやスイスの URL 訪問見学により、処分場プログラムの早い段階においてさえモニタリングの問題に関して関心を抱く地元のステークホルダとの詳細な議論の実施が可能であることが明示された。こうした活動によってさらに、参加した技術専門家と地元ステークホルダの間に相互の関心が存在し、これによって両当事者が有益な、そして興味深いものと見なした実りの多い議論が実現した。

モニタリングプログラムに対するステークホルダの関与に関する作業で得られた結論として、次のものが挙げられる。

- 多くのステークホルダから、モニタリングは確認のためのプロセスというよりもむしろチェックのためのプロセスであるべきだという意見が表明された。したがってモニタリングプログラムは、処分場の挙動が予想通りに展開するかどうかを試すという観点で設計されたものであることが明確に伝達された場合に、さらにはステークホルダが処分場性能のそれぞれの側面がチェックされる方法に関する明確な情報にアクセスできるようになっている場合に、一部のステークホルダによってより信頼性の高いものと判断されることが見込まれる。
- 公衆ステークホルダは、処分場性能のチェックは包括的なものとなるべきであるという、また全体的な科学プログラムと結びついたものとされるべきであるという意見を示した。処分場のモニタリング手法に関する研究及び開発作業が今後も継続されることが期待されている。処分実施主体は、この見解が処分場実現のさまざまなフェーズにおけるモニタリングの役割に関してステークホルダと議論することによって、さらには操業及び長期安全性が確保される方法を伝達することによって表明されるものであるようにすることができる。
- 予想されるように、一部の公衆ステークホルダは閉鎖後モニタリングが行われることを期待している。その主な目的は、予期しない事象又は変遷が生じた場合の準備（及び対応策）を整えておくことにある。個別のプログラムにおいて、こうした期待にどのような方法によって応えるのかを決定しておく必要があろう。これに加えて、残存する不確実性に関して理解されている事柄を伝達し、処分場に予測される変遷を辿るのに応じて、またこれらの変化に対応するモニタリング・オプションの変化（例えば処分場の閉鎖の延期など）を可能にする準備が整っていることを伝達することが、長期的なモニタリングに関するステークホルダの期待に応える上で有益である可能性がある。
- モニタリングは社会-技術的な活動の 1 つと特徴づけることができ、ある特定の処分場プロジェクトの安全性に対する公衆ステークホルダの信頼醸成に寄与することができるが、このことがモニタリング単独で可能となるわけではない。当然のことながら、その他の多くの要素もステークホルダ信頼醸成に関して一定の役割を果たすことになる。その例として、意思決定の方法や公衆及びステークホルダの関与のレベルなどが挙げられる。モニタリングは、それがステークホルダの期待に対応できる場合には、またそれが処分場性能に関する見張りを継続する実際的な取組みとして提示される場合には、さらにはモニタリングの限界（この中にはモニタリング手法の進歩に関して現実的に予想しうることも

含まれる）に関する透明性が確保されている場合には、処分場のガバナンスに寄与することができる。

(3) 後継プロジェクト MoDeRn2020

MoDeRn プロジェクトは 2014 年 1 月に最終報告書[3]を EC に提出して、その活動を終了したが、後続の共同研究プロジェクトついて 2014 年 9 月に EC に提案書を提出、2015 年 2 月に採択された。今後実施予定の協定書の締結より 4 年間の活動を予定している。本プロジェクトの概略[4]は以下に示す。

・共同研究名：MoDeRn2020

（Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal、地層処分におけるモニタリング戦略及び技術の開発とデモンストレーション）

・プロジェクトの目的：処分場操業時のモニタリング計画について、個別の国の処分計画からの要求を考慮したうえで、効率的かつ実効力のある計画を開発、実施する方法を提供すること。

・実施事項：処分場操業時のニアフィールドでのモニタリングに焦点をあて、下記の作業を実施する計画である。

・戦略：必要性に由来するモニタリング戦略を特定し、モニタリングにより得られた情報に対応する方法を明らかにするため、セーフティケースをスクリーニングする詳細な手法を開発する。

・技術：処分場でのモニタリングに関する顕著な技術的課題を解決する。この技術的課題にはモニタリング技術の開発におけるギャップとして、異なる地中無線通信技術（高周波・短距離と低周波・長距離）の組み合わせ、電力供給技術、地球物理学的手法、機器の信頼性と適格性に関する研究が含まれる。

・原位置試験：操業実施に関する知見を拡充し、現在到達している最新の技術と革新的な手法の性能をデモンストレーションするため、実規模の原位置試験を実施する。

・社会的関心とステークホルダの関与：国による処分場のモニタリング計画への、住民ステークホルダの関心事と社会的な期待を統合するための方法を開発し、評価する。

### 2.3.2　OECD/NEA における検討

OECD/NEA-RWMC（経済協力開発機構原子力機関-放射性廃棄物管理）による「世代を超えた記録、知識及び記憶（RK&M）の保存」(Records、 Knowledge and Memory（RK&M）)プロジェクトでは、記録保存に関する検討を実施しているが（第 4 章参照)、記録保存に関連してモニタリングについても報告書「地層処分施設のモニタリング:技術的及び社会的側面」[5](以下､RK&M モニタリング報告書）を取りまとめている。この報告書の概要について以下に記述する。なお、記録保存との関係の深い§6「モニタリングに関する地元自治体の期待や要請と地層処分場に関する記録、知識及び記憶の保存」については、第 4 章に於いて詳しく記載した。また、RK&M モニタリング報告書の詳細については原文[5]を参照されたい。

(1) 報告書の概要

RK&M モニタリング報告書では、RK&M プロジェクトとモニタリングとの関連を以下のように述べている。

OECD/NEA-RWMC が 2011 年から 2014 年にかけて実施した RK&M プロジェクト(Phase I)の目的は、地層処分施設に関する記録、知識及び記憶の長期間にわたる保存に関する規制、政策、管理及び技術的な側面について研究すると共に、関連するガイダンスを作成することにあった[6]。記録、知識及び記憶の保存を行う公式の責任は制度側に存在するものの、地元自治体が処分場に関する記憶の維持において重要かつ実際的な役割を、たとえばその継続的な「監視」(oversight)のいずれかのレベルを担うことによって果たすことが見込まれる[7]。モニタリング、すなわちデータを連続的に収集し、その解釈を行い、保持する活動は、記録、知識及び記憶の維持と継続的な監視の目的にとって役立つものである。

RK&M モニタリング報告書は、次の 3 件の目標を示している。

- 各国の地層処分プログラムで使用されており、一定数の国際プロジェクトで高度化がはかられている一般的な技術モニタリング情報、実践方法及びアプローチを包括的な方法で提示すること。
- 地層処分場に関するモニタリング及び RK&M の保存に関する地元自治体の役割、ニーズ及び期待について調査すること。
- 上述した検討内容に基づき、これまでに得られた教訓を、さらには地層処分プロジェクトのライフサイクルに含まれる諸段階の全体を通じてこの種のプロジェクトのモニタリングを行う論理的根拠を、技術的な観点と社会的な観点の両方から確認すること。

RK&M モニタリング報告書は以下の 2 件の調査に基づいている。

- モニタリングの技術的知識に関する概要を示す『地層処分施設のモニタリング（2013 年 8

月)』[8]というタイトルの NEA 内部報告書

- 『モニタリングに関する地元自治体の期待及び要請と地層処分場の記録、知識及び記憶の保存（2013 年 10 月)』[9]というタイトルの NEA 公開文書

後者の文書は、OECD/NEA-RWMC のワーキンググループの一つである「ステークホルダの信頼獲得に関するフォーラム」（FSC）が RK&M プロジェクトへの貢献として作成し、2012 年の 7 月及び 8 月に FSC のメンバを対象に実施された質問票調査、及び合計 7 ヶ国の現地と国の両方のレベルで関連する一定範囲のステークホルダを対象とした体系的な面談調査、文献調査による研究結果を含んでいる。

表 2.3.2-1 に RK&M モニタリング報告書の構成と主な内容を示す。

表 2.3.2-1　報告書「地層処分施設のモニタリング：技術的及び社会的側面」[5]の構成及び主な内容

| 報告書構成 | 主な内容 |
|---|---|
| §1　はじめに | ・　これまで検討されてきたモニタリングの定義、目的及び理由（動機）が示されたうえで、本検討の目的が提示される。<br>・　報告書の構成が示されている。 |
| §2　過去 10 年間の文献レビュー | ・　過去 10 年間に発表された技術及び社会面でのモニタリングに関する文献のレビューが行われたことが示されている。<br>・　整理結果として「様々な既往プロジェクトでのモニタリングの定義」が示されている。 |
| §3　モニタリング目標及び計画の概要 | 既往検討成果を踏まえた、放射性廃棄物処分場モニタリングについて下記の観点から示される。<br>①　処分場の開発段階とモニタリング<br>②　モニタリングの目的 |
| §4　モニタリング計画の策定に関わる考え方 | MoDeRn で提案されたモニタリング計画策定の考え方（図 2.3.1-1）が示される。 |
| §5　モニタリングに関する主要課題 | 技術的側面からのモニタリングに関し、下記の主要課題が特定され、各内容について示されている。<br>①　データ管理<br>②　材料及び装置の耐久性<br>③　パラメータの選定<br>④　モニタリング対象となるプロセスの特定<br>⑤　連成プロセス<br>⑥　閉鎖後モニタリング |
| §6　モニタリングに関する地元自治体の期待や要請と地層処分場に関する記録、知識及び記憶の保存 | ・　OECD/NEA の「ステークホルダの信頼獲得に関するフォーラム」（FSC）のメンバを対象に、放射性廃棄物管理（RWM）施設のモニタリング及び RK&M の保存に関する地元自治体の期待に関して実施された質問票調査の結果が示される。<br>・　その調査を受け、関連する国レベルと地元レベルの両方の一定範囲のステークホルダを対象として、体系化された方法での面談調査が実施された。<br>・　文献調査も実施され、その焦点はインターネットを通じて見いだすことができたか、面談調査に参加した人々が示唆した FSC の刊行物やその他の文書及び刊行物に合わせられた。<br>・　処分場ライフサイクルのさまざまなフェーズとの関連において、またそれぞれ異なる国レベルの背景状況との関連において、地元自治体がモニタリングに関して抱く関心や期待が明らかにされている。 |
| §7　MoDeRn 会議及びワークショップで得られた見解 | 2013 年に開催された MoDeRn 主催の「国際処分場モニタリング会議及びワークショップ」で示された様々な意見や結果について示されている。 |
| §8　技術及び社会レベルからの教訓 | 考察及び結論が示されている。 |
| 添付資料 1 | 地層処分の開発段階におけるモニタリングパラメータ |
| 添付資料 2 | MoDeRn でのモニタリング検討フロー |
| 添付資料 3 | 地層処分の開発段階におけるモニタリング計画 |
| 添付資料 4 | サイト理解や性能確認に重要なプロセス |

(2) モニタリングの目的

モニタリングを実施する目的として以下の項目を挙げている。

- 意思決定プロセスを支援すること
- 環境データベースの形成のためにサイトに関する情報を収集すること
- 処分システムの性能に関する理解を深め、その検証を行うこと
- 規制要件への適合を実証すること
- 情報をさまざまなステークホルダに提供すること

モニタリングの役割は、原則として以下の疑問点への回答として示すことができるとしている。

- なぜモニタリングを実施するのか（その目的及びプロセスの特定）。
- 何をモニタリングするのか（パラメータや人間の活動）。
- どのようにモニタリングを行うのか（測定及び観察の手順と対応する装置）。
- いつモニタリングを実施するのか（タイミング、頻度及び継続期間）。
- その結果はどのように使用し、解釈するのか（モデル化、入力情報の統合、記録）。

RK&M モニタリング報告書では、モニタリングの実施時期、パラメータについて以下のように述べている。

- モニタリングプログラムは、処分施設立地作業の初期フェーズに開始され、閉鎖終了後も継続される可能性がある。
- プログラムの範囲及びレベルが変化しても、特定のパラメータに関する検証は持続的なものとなるべきである。
- パラメータの選定が網羅的かの検証は、地層処分プロジェクトが十分に進んでいない現段階では行うことができない。

(3) モニタリング、RK&M 及び監視の関係

RK&M モニタリング報告書では、モニタリングと RK&M の両方を包含する概念として、ICRP[10]、Pescatore et al.[11]による処分場システムから、また決定の実施状況から「目を離さない」という監視（oversight）を挙げている。また、この監視について以下の点を指摘している。

- 監視は、技術的あるいは規制に基づくモニタリングのみでなく、現地の自治体やその他のステークホルダとのモニタリングに関する協定を通じて行われる可能性がある。
- 監視のレベル及び推移に関する決定は、当該施設の挙動に対する信頼度や、社会的及び経済的な要素などに基づいてなされる。
- 規制組織やステークホルダが、地層処分の監視の性格や役割に関して追加的な洞察をもたらす可能性がある。

・ 監視の組織化や推移に関する決定についてはステークホルダとの議論がなされるべきである。

(4) モニタリングプログラムの設計

RK&M モニタリング報告書ではモニタリングプログラムの設計にとって鍵となる目的として、次の 2 点を示している。

・ 対象を決定すること。
・ 並行して、あるいは時間的に連続して実施され、技術、安全及び社会経済面での進展に関する理解を得ることを目標とするさまざまなプロジェクトを通じ、これらの対象をどのように取り扱うのかを決定すること。

また、モニタリング対象の選定プロセスについて以下のように述べている。

・ 選定プロセスは、処分場のライフサイクル期間のうちに生じた改定の必要に対応できるよう、十分な柔軟性を備えているべきである。

これは、数世紀もの期間にわたるものとなり得る処分プロジェクト期間についてプログラム全体の概略を示すことが困難であるためとしている。

操業前フェーズ及び操業フェーズにおいて、さまざまなパラメータのモニタリングを行う手法及び手順は、すでに存在していると述べた上で、モニタリングに関する技術的課題としては、以下を挙げている

・ データの長期的な管理
・ 使用される資材及び装置の耐久性
・ 長期的な施設サーベイランスに関する代表的なパラメータの選定
・ 当該システム内で起こり得るさまざまなプロセスに関する完全な理解を得ること

処分場の閉鎖後のモニタリングについては、以下のように述べている。

・ 閉鎖後期間には処分システムがそれ自体で安全なもの、すなわち何らかの制度的又は非制度的な組織によるモニタリングにはかかわらず安全なものでなければならない点について、広範な意見の一致が存在する。
・ 施設の閉鎖後にも間接的な形での監視を行うことが当局によって要請されることが予想され、その例として記録の維持、一定の形式のモニタリングが含まれる可能性がある。

モニタリングと RK&M を含む監視のステークホルダへの寄与について以下のように述べている。

- 監視機能の一環として行われるモニタリングと RK&M の保存に関する現在のステークホルダの見解について調べておくのは有益なことであろう。
- モニタリングがどのように RK&M の作成及び保存に寄与できるのかに関する作業又はガイダンスは、これまでわずかしかなかった。
- FSC の調査[9]により、地元ステークホルダが RWM 施設におけるモニタリング及び RK&M の保存に対して一定の関心を抱いていることが明らかになっている。
- 地元ステークホルダは、モニタリングの方法や、モニタリングの実施が重要となるプロセスに関する知識を得ることを望んでいる。
- 地元自治体は、モニタリングが立地手順の早い段階から行われるべきものであり、次第により高度なものとされ、施設閉鎖時にも終了されない可能性があることを認識している。
- 地元ステークホルダが実施を要請しているモニタリングの性格及び規模は、ステークホルダのモニタリングに関する理解や定義に応じて異なったものとなる。

(5) モニタリングの技術的側面の現状

RK&Mモニタリング報告書ではモニタリングの技術的側面の現状について、次のようにまとめている。

- 現時点ですでに、操業前フェーズと操業フェーズにおいて必要な各種のパラメータのモニタリングに使用する手法と手順は存在しており、これは特に、処分システムの特性評価及び変遷、セーフティケースの開発、処分場の操業期間における安全性、そして環境面での影響の評価の領域について言えることである。しかし処分場計画が建設段階へと進行するのにつれて、施設の長期的な性能を効果的に評価するためのパラメータの選定の最適化が当面のトピックとなる。
- 将来の世代が自ら決定を下す上で適切なデータを入手できるようにするため、処分場の供用期間全体を通じたデータ管理が維持されなければならない。
- 地下施設の長期モニタリングの重要な技術問題の例として、1 つの材料がそれに作用するさまざまな劣化プロセス（腐食、温度、放射能及び圧力）に耐えられることを保証する方法などが挙げられる。このために、さらなる研究開発活動を実施する必要がある。
- ゆっくりとしたプロセスのモニタリングと評価に関しては、その特定と定量化の両面で不確実性が存在する。長期間にわたるフルスケールの実証試験により、この種の不確実性のレベルを大幅に低減することができよう。
- モニタリングシステムは放射性核種の優先的な移動経路の生成に寄与することがなく、それ以外の面でも全体的な安全性に悪影響を及ぼさないことが望ましい。現在、無線データ伝送を含め、適切な技術的回答を得るための調査が進められている。
- 処分システムで生じるゆっくりとした結合プロセスに対しては、セーフティケースの開発者が注意を払うに値する。その目的は、それらの関連度と生じ得る長期的な影響に関する現実的な評価を可能にするモニタリング及び評価の効果的な方法を見いだすことにある。
- 閉鎖後期間において処分システムは、モニタリングに依存することなく受動的な安全性を備えていなければならない。現在のところ技術関係者の間では施設の閉鎖後すぐにモニタ

リングを中止するというのが一般的な方針となっているが、その一方で地元ステークホルダは、閉鎖後施設のモニタリングが継続されることを好む傾向がある。モニタリングは監視を支援するのに役立つだけでなく、その不可分の一部であることから、閉鎖後の施設自体の監視の必要性に基づいて一定の種類のモニタリングが導入されることになろう。

- 地元ステークホルダは、閉鎖後の処分施設の受動的安全性が確保された状態に到達したことを示す単純な証拠を入手することが要請しているが、一般的に見てこれは実現困難である。その理由として、この種の証拠は複雑かつきわめて長期間にわたるモニタリングプログラムと、その科学的な評価及び解釈に基づくものとなることが挙げられる。ステークホルダの全面的な信頼を得るためには、この問題に対処する方法に関する合意を成立させておくことが不可欠である。
- 保障措置モニタリングは 1 つの特殊なケースである。処分場に「実質的に」回収可能な核物質が収容されている限り、閉鎖後期間であってもサイトのモニタリングが実施されなければならない。
- 施設閉鎖後であっても、さまざまな記録の維持、また最終的にはサイトの記憶の維持といった当局による間接的な監視は必要となろう。そしてこの中には何らかの形のモニタリングが含まれる可能性もある。

### (6) モニタリングの社会的側面の現状

#### 1) 地元自治体が表明したモニタリングに対する関心と期待に関する分析

ここでは、RK&M モニタリング報告書の§6.2 及び§6.3 に示された、FSC による 2 つの側面（地元自治体のモニタリングに関する関心と期待及び地元自治体と記憶の定着化）からの調査結果のうちモニタリングに関するもの、及び FSC での結果を踏まえた地元自治体がモニタリングに対して抱いている関心や期待についての分析結果を示す。

- FSC の結果より、放射性廃棄物管理施設の様々な事業段階（すなわち、実現可能性研究段階又は建設に先立つベースラインの記録、建設段階、操業段階又は操業後段階）で実施されるモニタリングの重要性は認識されている。
- 放射性廃棄物管理施設の各段階における生活の変化（物理的、心理的及び社会的な福利）に関するモニタリングも実施されるべきである。
    - ハンガリーの場合、各自治体が、原子力施設のモニタリングと管理を行う。例えば、使用済燃料中間貯蔵施設が操業中のパクシュ（Paks）では、訓練を受けた自治体グループが、搬入される物質の定期的な管理を行い、その他の測定も実施している。さらに、高レベル廃棄物処分場候補地であるボダ（Boda）近傍の地元グループがそのモニタリングを実行できるようになるための訓練を受ける予定である。
    - 2010 年にバール=ル=デュックで開催されたワークショップでは、主として環境面の関心から、モニタリングが、安全性を確保し、透明性を保証する上での鍵と

なる問題の 1 つであることが明らかにされた。例えば、フランスのビュール周辺の地元ステークホルダは、健康への影響に加えて、土地の価格や経済面での開発など、社会-経済的な変数に関するモニタリングも重要だと考えている。さらにフランス国内の地元自治体は、実施機関と規制機関がモニタリング活動を実施するだけでは十分ではないと考えている。

- 一方、地元自治体がモニタリングを実施することに対して、見解が異なる 2 つの問題も存在している。
  - 第 1 は、モニタリングへの地元ステークホルダの関与のレベルである。調査結果から、モニタリングへの積極的な関与を望む自治体もあれば、ただ結果を知りたいだけで自らモニタリングを行うことは望まない自治体もある。
  - 第 2 は、モニタリングの結果の解釈を誰が行うかという問題である。例えば、スウェーデンの自治体ではモニタリング結果の解釈は環境裁判所と EIA 手続きによって行われるだけで十分だと考えているのに対し、フランスでは、独立した監査官又は地元自治体が選んだ特定のモニタリング担当者が行うのが最適だと考えている。なお、これらのいずれの場合でも、規制機関は明確かつ信頼のおけるものと見なされている。

- 地元自治体は、施設に関する関心が曖昧かつ明確に定義されていないものであるとはいえ、施設の各段階（建設前期間、操業期間及び操業後期間）におけるモニタリングに対して明確な関心と期待を抱いていることが明らかになった。
  - 地層処分に対するモニタリングについて、多くの地元自治体は施設のモニタリングの実施を求めている（図 2.3.2-1 に示すように 17 サンプルでの調査の約 2/3）。

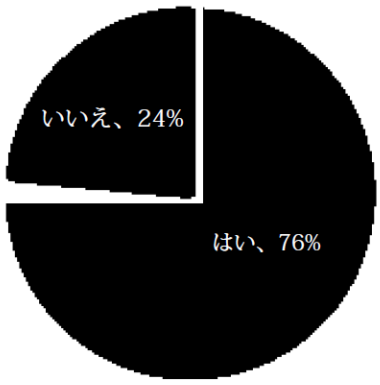



図 2.3.2-1　自治体のモニタリングに関する要請（2012 年の FSC メンバによる）[5]

  - 自治体が関心を抱いているモニタリングは、第一に環境モニタリングであり、社会-経済的な影響のモニタリングがそれに次ぐ。放射線学的・化学的なモニタリングと回答したのは約 3 分の 1 を下回っており、制度的プロセス及び当事者に関

するモニタリングの要請はほとんどなかった（図 2.3.2-2)。ただし、処分計画が進み、次の段階への移行が決定した段階で、全てのモニタリングの実施を要請する可能性があるとの回答も得られている。

- 自治体が関心を抱いているモニタリングの段階の分析については、これは調査結果（図 2.3.2-3）に基づき「操業前段階及び操業段階」と「操業後段階（数百年程度)」での実施がなされた。

① 地元ステークホルダの観点から見た場合、いずれの国においても操業前段階と操業段階における環境モニタリングが中心的な関心事の 1 つと考えられる。また、環境モニタリング以外では、生活の質の変化と社会-経済的な変化のモニタリングが挙げられる。

② 操業後段階におけるモニタリングに関する地元自治体から要請は、操業前段階と操業段階におけるモニタリングの場合と比べ、さほど明確なものではない。しかし、調査結果からは、何も実施しなくてもよい、という結論には至っていない。

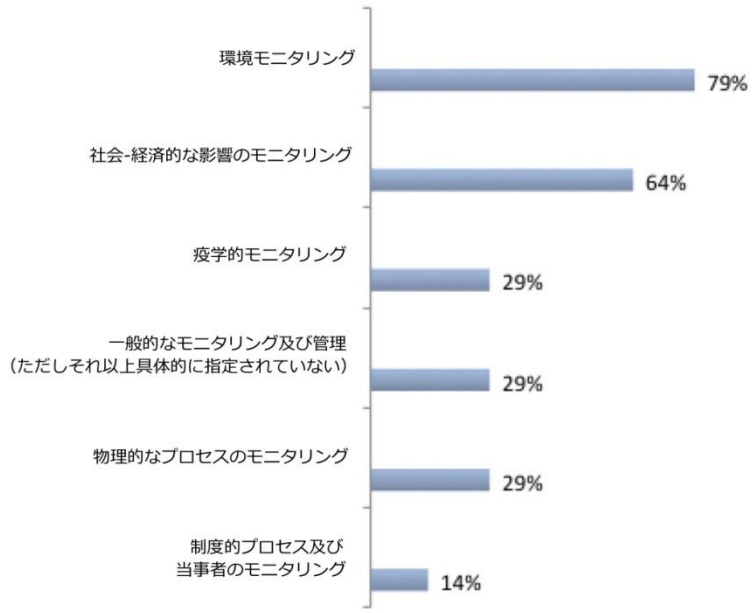



図 2.3.2-2　自治体が期待するモニタリング（2012 年の FSC メンバによる）[5]

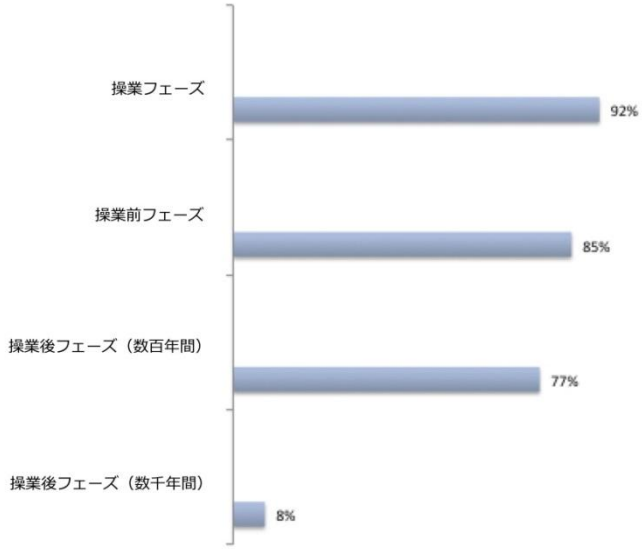



図 2.3.2-3　自治体が期待するモニタリングの時間スケール（2012 年の FSC メンバによる）[5]

2)　社会的側面に関する結論

RK&M モニタリング報告書では、モニタリングの社会的側面の現状について以下のようにまとめている。これらの結論の一部は、上述の MoDeRn プロジェクトによる成果である。

- 調査結果により、現時点においては、モニタリング及び RK&M の保存が、1 つの国又はサイトに固有の解釈がなされ得る概念であることが示唆されている。これらの概念は時の経過と共に変化する可能性があり、誰が定義するかに応じて異なる意味を持つ可能性もある。したがってステークホルダとの協議を通じて明確化をはかり、共通理解を実現してゆかなければならない。
- モニタリングがどのように RK&M の実現及び保存に寄与するかに関して、さらには自治体がこのプロセスにおいてどの程度の役割を果たし得るかに関して実施された作業や作成されたガイダンスは比較的少ない。RK&M モニタリング報告書による研究は、この論議に対して情報を提供すると共に、この分野で実施されている取組み又は対話の例を示すことを目指したものである。また RK&M モニタリング報告書は 1 つの規範的な計画を示すのではなく、国際的なレベルで見てこれらの概念が地元自治体によってどのように検討されているかに関する最初の展望を示すものである。
- 地元ステークホルダは、モニタリングがどのように実施されるのか、モニタリングの対象として何が重要であるのか、またそれはなぜなのかについて知ることを望んでいる。それに加えて地元自治体は、モニタリングは立地手続きの早い段階から実施されるべきであること、継続的に改良される可能性があること、施設の閉鎖と共に終了されない可能性があることを認識している。地元自治体が要請するモニタリングの性質及び規模は、モニタリングがどのように理解されているのかに応じて異なってくる。
- 地元ステークホルダがモニタリングの対象とされるべきだと考える広範な関心事の中には、

環境面での影響、社会-経済的な要素、そして特殊なケースにおける健康問題が含まれる。これと並行して RK&M の保存に関して、曖昧で明確なものとはなっていない関心が存在する。

- フランスなど一部の国では、モニタリングと RK&M は互いに不可分につながったものと見なされており、国及び地元の当事者がこれらの問題に関する作業を密接な協力のもとで進めている。実施機関である Andra は、「恒久的環境観測所」など、具体的な研究プログラム、研究及び取組みを進めている。これと並行して国の技術支援組織である IRSN が、公認の地元ステークホルダ・グループ（ANCCLI、さらには CLI）がフランスにおける地層処分場プロジェクトに関する交流、専門能力の構築、問題及び課題の特定を進めるための活動を支援している。将来の課題の中には、モニタリング及び RK&M の保存に関連した問題が含まれる。
- RK&M については、公式の要請が報告された証拠はほとんどない。本研究では、カナダ、スウェーデン、英国及び米国におけるモニタリングに関する地元の要請及び期待の例がいくつか示されている。フィンランドや東欧諸国など、それ以外の国では、これらの要請はさほど明確に示されていない。しかしさまざまな国々において、地元自治体が放射性廃棄物管理プログラムのさまざまなフェーズへの関与を深めるにつれ、これらの自治体の関心が当該概念のさらなる検討に向けられることが明確になってきている。
- FSC の国別ワークショップとハンガリーの自治体訪問[12]で確認された課題は、処分施設を、現地の生活の一部となるだけでなく、文化及び快適さの面での価値を世代を超えて付加することにより当該自治体が誇りに思えるようなものとなるよう設計し、実現することである。地元自治体は、施設の安全性に対する信頼を確保し、維持するための手段として継続的な監視への参加をもとめる可能性があるが、モニタリングの対象や時間スケールの定義が可能となるほど具体的なものではない。モニタリングが地層処分に対する信頼醸成にどのように寄与できるのかだけでなく、さまざまな国の背景状況において地元自治体が監視活動にどのように関与できるかを明らかにするための研究が、その役割、要請及び期待をより明確なものとする上で役立とう。
- MoDeRn プロジェクトの枠内で実施された Bergmans et al.[13]の研究成果は、ここに示した本プロジェクトの結果を補完するものである。Bergmans et al.は、モニタリングの意味とそれが長期安全性にどの程度寄与するかが、専門家と非専門家のステークホルダー・グループとで異なっているという観察結果を示している。専門家にとってモニタリングとは、処分場システムに関する情報を収集し、測定を通じてそのシステムの挙動及び影響を観察するものである。しかし専門家ではないステークホルダー・グループの場合、モニタリングの解釈はそれよりもはるかに広く、ステークホルダと処分場のモニタリングプログラムの開発との関連、信頼醸成及び信用などと結びついている。Bergmans[14]によれば、専門家ではないステークホルダは、モニタリングが、サイト調査期間から閉鎖後期間にわたり処分場とその自然及び社会環境の挙動に関するデータの収集をカバーするものと考えている。市民はどのパラメータをどこでモニタリングするかについてはさほどの関心を示さず、むしろモニタリングプログラムの包括性により大きな関心を抱いている。このためモニタリングを通じて、閉鎖後期間においても施設に目を配ることと、行動を取るべき場合の対

応計画を設定することが求められる。

- MoDeRn プロジェクトでは、モニタリングを「技術及び産業面での革新と同様に、社会及び制度面での革新の追求」を伴う「社会-技術的活動」として認識するべきだという提案が示されている（Bergmans et al.[13]）。モニタリング活動を支援する手段の 1 つとして RK&M が一定の役割を果たすことができると認識することにより、このアプローチを強化することができる。立地が行われる時期が近づくにつれて、RK&M に関する具体的な関心及び期待が表面化しつつあるものと考えられ、いくつかの国で知識を将来の世代に伝えるための最善の方法に関する非公式及び公式の協議が進められている。これに伴って我々は、システムに対して、また決定の実施に対して「目を配る」という監視の有益な概念へと導かれた（Pescatore et al.[11]）。
- 「監視」により、長期モニタリングと RK&M の保存を包含する有益な概念的な枠組みがもたらされる。監視のレベルとその進展に関する決定は、施設の挙動への信頼度、社会的及び経済的な要素など、さまざまな要素に基づくことになろう。これらの問題に関する実施機関、規制機関及び関係するステークホルダの見解を知ることは、地層処分の監視の性質及び役割に関してさらなる洞察を得る上で役立つ可能性がある。ICRP（2013）[10]が検討したように、「監視の組織化や推移に関する決定についてはステークホルダとの議論がなされるべきである」。

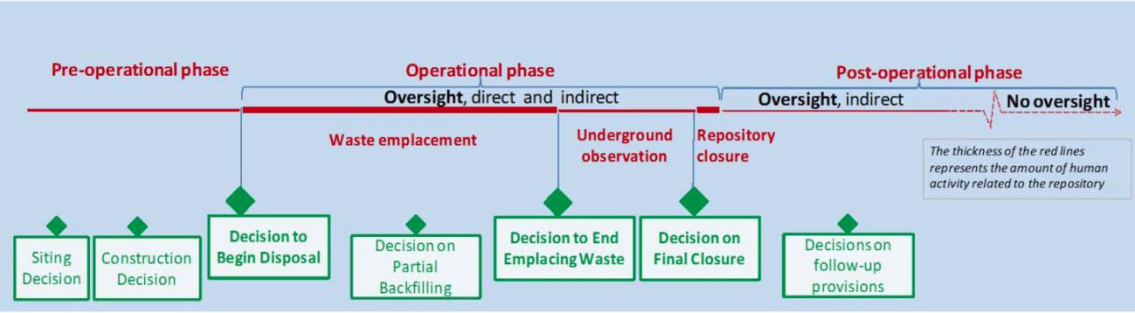



図 2.3.2-4　処分場のライフサイクルと監視（Oversight）[5]

## 2.4　人工バリアの性能確認に資するモニタリングの検討

### 2.4.1　背景

分冊１及び分冊２に示されたように、本研究では長期健全性を持った人工バリアを構築するための指標について検討を実施している。

①長期健全性を確保した人工バリアの設計のための指標
②製作、施工におけるプロセス管理による品質確保のための指標
③定置後から閉鎖まで期待した品質が確保出来ているかの指標

①長期健全性を確保した人工バリアの設計のための指標のうち、人工バリアの長期健全性に影響を与える外部の条件（例えば、地下水の湧水量や水質など）に関するものは、人工バリアの設計のために予め把握され、あるいは設計に於いて仮定した範疇にあるかが確認される。このような条件の一部は、モニタリングにより把握または確認されるものと考えられる。

また、③定置後から閉鎖まで期待した品質が確保出来ているかの指標に関しても、同様に外部の条件であるニアフィールドの状態が確認される事に加え、人工バリアの状態そのものに関しても一部が確認されるものと考えられる。これらのニアフィールド及び人工バリアの状態の確認の一部はモニタリングによるものと考えられる。

これらのモニタリングは、これまで「性能確認」、「処分システムの期待／予測された挙動の検証／確認」、「閉鎖後安全」、のためのモニタリングとして取り扱ってきたもの、及びその比較対象となる「地質環境特性のベースライン把握」のためのモニタリングの範疇にあり、このうち、特に人工バリアの閉鎖後長期の健全性に影響を与える要因をどのように操業期間中に把握するかに焦点をあてたものと言える。従って、これまでに検討してきた性能確認モニタリングの考え方が適用できる。

処分場の閉鎖後の安全性に関わるモニタリングについて、IAEA の文章において以下の記載が確認される。

安全要件 No.SSR-5 「放射性廃棄物の処分」[15]

・要件 21：処分施設におけるモニタリングプログラム

5.4. モニタリングは、処分施設の開発及び操業における各段階で実施されなければならない。・・・

モニタリングプログラムは、閉鎖後における施設の安全性の全体水準を低下させないように計画し、実施されなければならない。

安全要件（WS-R-4）[16]

・施設の閉鎖後の安全性を損なうことになる条件がないことを確認

・目的には、評価のための基礎情報の提供や、諸条件は閉鎖後の安全と矛盾しないという確認が含まれる。

技術文書（TECDOC-1208）[17]

・処分場のセーフティケースを開発する際に用いるシステム挙動のある側面の解明を進め、そのような側面を予測するモデルをさらに試験できるようにする。

これらの記述は、モニタリングの適用方法として処分システムの性能確認に資することを求めているものと言うことができ、従って人工バリアの長期健全性にも関連した記述と言える。

以上の様に、モニタリングの目的の一つとして、人工バリアの長期健全性の確認に資することが言え、これは処分システムの性能確認のためのモニタリング、及びそのベースライン取得のためのモニタリングに包含されるものと考えられる。

### 2.4.2　モニタリングの制約条件

#### (1)　モニタリングの実施における制約条件

原環センターでは、地層処分のモニタリングにおける制約条件を検討してきた[18]、[19]。以下に概略を述べる。

地層処分におけるモニタリングの主要な目的の一つは、処分システムの性能確認であるが、実際のモニタリング計画ではモニタリングの実施により得られる長期安全性への信頼性の向上というメリットと下記のデメリットとの間で整合を図ることが求められる[17]。

a) モニタリングを行う作業員が受ける放射線被ばく

b) モニタリングの実施に伴う人工バリア設置の遅延により生じえる処分場材料の劣化（人工バリアが所定の機能を発揮できない可能性がある）

c) 処分場内部または周辺でのモニタリング機器の設置に伴う放射性物質の移動に係わる潜在的水みちの形成

d) モニタリングを実施するために処分場へのアクセス坑道を残存した場合の人間侵入、あるいは自然または誘発された現象（洪水など）による悪影響が生じる可能性の増大

e) 処分場建設、操業、閉鎖等への干渉

この中で、c) の潜在的水みちの形成を抑制することは地層処分における主要な技術的課題の一つである。この問題に対する方策の一つとしては、処分場内部または周辺でセンサを埋め込む必要があるモニタリングは避け、放射性物質の移動に係わる潜在的水みちの形成を防ぎ、人工バリア及びニアフィールドの天然バリアの性能確認は模擬廃棄体を用いた地下調査施設などにて実施することが考えられる。これを具体的に示すと以下のようになる。

・　基本的に、処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施しない。アクセス可能な坑道のみ、モニタリングが可能である（図 2.4.2-1）。処分場の閉鎖後は全ての坑道のモニタリングを中止する（閉鎖時においては水みちになる可能性がある坑道のケーブルは撤去）。

・　再冠水過程の浸潤状況の把握等、人工バリアのモニタリング情報が必要であれば、処分場

とは異なる場所に地下調査施設（ヒーター等を有する模擬廃棄体を埋設）を建設し、人工バリア、模擬処分坑道でのモニタリングを行う（図 2.4.2-2）。処分場の閉鎖後は中止する（閉鎖時においては水みちになる可能性がある連絡坑道のケーブルは撤去）。

また、このような考えに基づき、第 3 章にて詳述する地中無線通信によりデータ伝送を行うモニタリング機器を用いた場合には、以下のようなモニタリングが可能と考えられることを示してきた[20]～[23]。

- 基本的に、処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施しない。主要坑道や連絡坑道においては、埋め戻しが行なわれプラグが設置された場合にも、無線送信装置によりデータを送信することでモニタリングが可能である（図 2.4.2-3）。坑道の埋め戻しが進行し、無線送信装置の伝送距離の限界を越える場合には、データの中継を行ない、さらにモニタリングを継続することが可能である（図 2.4.2-4）。処分場の閉鎖後のモニタリングはバッテリーの寿命等に依存するが、一定期間のモニタリングが技術的に可能である。
- 再冠水過程の浸潤状況の把握等、人工バリアのモニタリング情報が必要であれば、処分場とは異なる場所に地下調査施設を建設し、模擬廃棄体周辺の人工バリア、模擬処分坑道でのモニタリングを行う（図 2.4.2-5）。処分場の閉鎖後のモニタリングはバッテリーの寿命等に依存するが、一定期間のモニタリングが技術的に可能である。

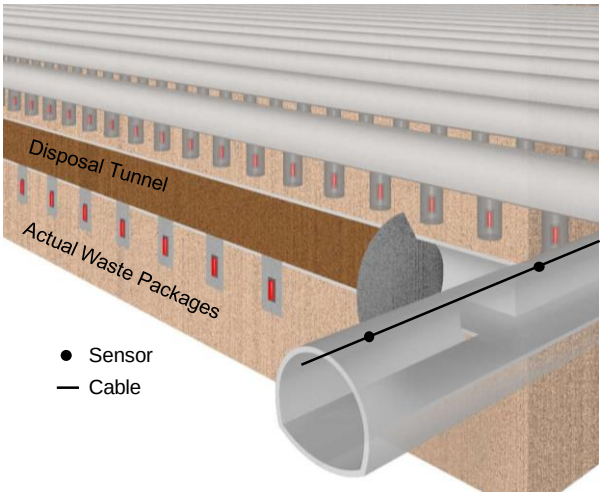



図 2.4.2-1　人工バリアのモニタリング（処分場）

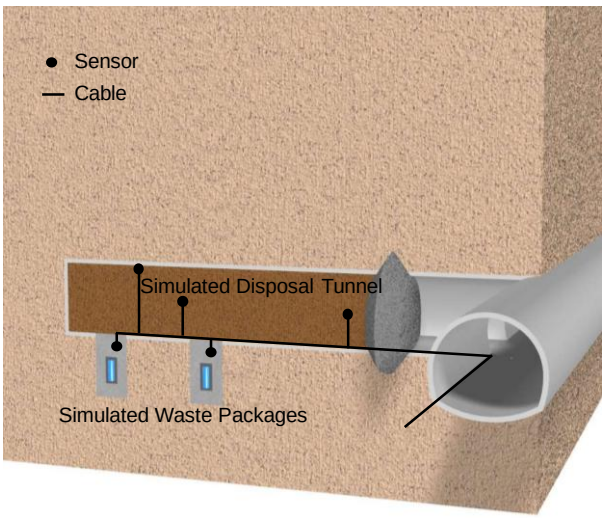



図 2.4.2-2　人工バリアのモニタリング（地下調査施設）

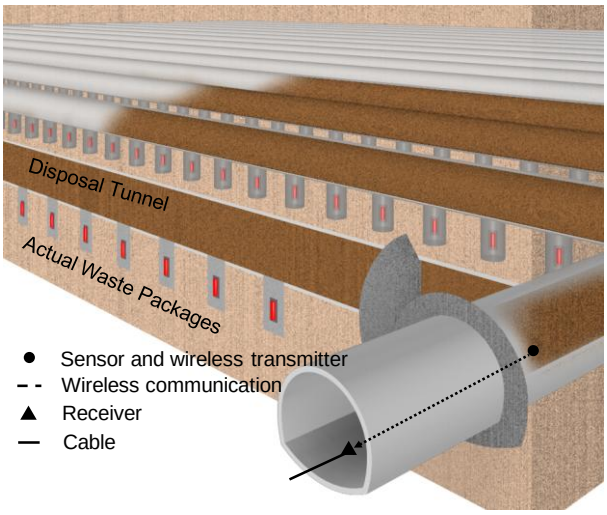



図 2.4.2-3　無線による人工バリアのモニタリング（処分場）

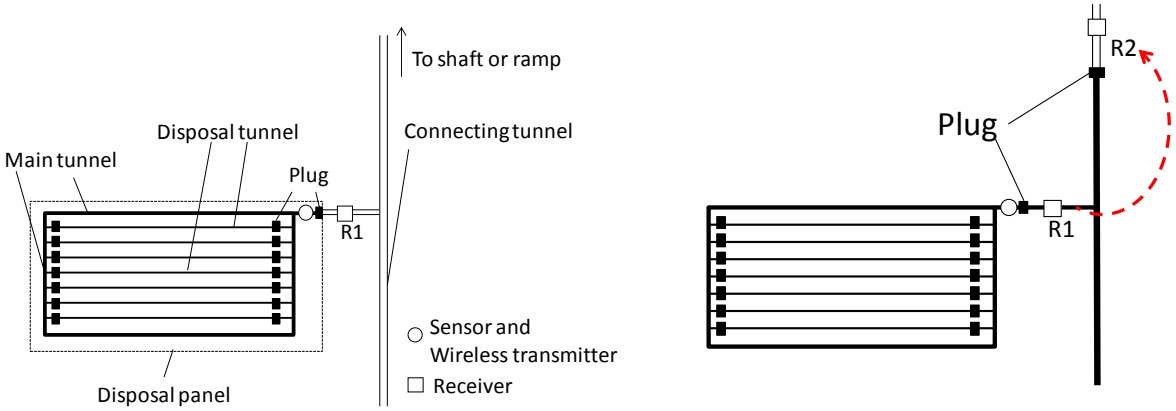



図 2.4.2-4　無線による人工バリアのモニタリング（処分場における無線中継）、左：処分パネルの埋め戻し、右：連絡坑道埋め戻しに伴う無線中継

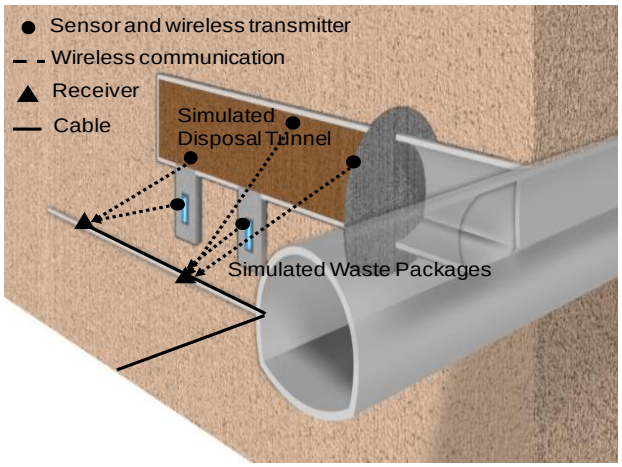



図 2.4.2-5　無線による人工バリアのモニタリング（地下調査施設）

(2) 処分坑道、処分孔におけるモニタリング

上記の検討では、モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なわないことをモニタリングの実施における制約条件として、処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施せず、人工バリア及びニアフィールドの天然バリアの性能確認は模擬廃棄体を用いた地下調査施設などにて実施する考えを示した。このような考え方を採用する海外実施機関としては、スウェーデンの SKB やフィンランドの Posiva が挙げられる。

しかしながら、処分場が建設される地下の地質や水理的特性において空間的な不均一性が存在する場合、地下調査施設でのモニタリングでは実際の処分場の地質的及び水理的特性の幅広さを十分に代表できない可能性がある。このような場合、地層処分の長期安全性の信頼性を高めるためのデータ取得が重要視されると、処分場の複数の人工バリア及びニアフィールドにてモニタリングを実施し、幅広い地質的及び水理的特性を持つニアフィールドと、そこからの人工バリアへの影響を代表するデータを取得するという方策があり得る。また、廃棄体の定置後、坑道の埋め戻しまでに廃棄体周辺の人工バリアやニアフィールドの変化が予測され、この状態変化の情報取得が重視される場合にも、処分場でのモニタリングが考えられる。

処分場において廃棄体近傍でのモニタリングを検討している事例として、フランスの ANDRA による検討が挙げられる。この内容は ANDRA (2007)[24]にまとめられているが、これに加え、MoDeRn（2013）[25]に於いてケーススタディとしてモニタリング計画の検討案を示している。ANDRA の方法は、処分パネルにおける温度分布や廃棄体の定置の順番（定置後の経過時間の違い）等を考慮して、モニタリング対象とする処分セルを選択しているが、フランスの地層処分における候補としている母岩（粘土質岩）は均質性が高いため、母岩からの影響はほぼ一様であるとの考え方に基づいている。わが国における地層処分では候補地は未定であるものの、フランスの候補母岩と比べ母岩の空間的な均質性は低いものと想定できる。このため、処分パネル内部で地質学的あるいは水理学的不均一性が存在した場合、処分坑道や処分孔を母岩の地質学的・水理学的な特徴によりグループ分けし、グループごとに人工バリアの変遷を検討するために、各グループの代表となる人工バリアに対して性能確認のためのモニタリングを実施する必要が生じる可能性があるものと考えられる。

さらに、地層処分の建設・操業段階では、パネルごとの建設、廃棄体の定置、埋め戻しが想定されている[26]。処分孔竪置き方式にて処分する場合、ある処分パネルにて廃棄体を定置し、緩衝材を施工した後、このパネルでの廃棄体定置と緩衝材施工が終わるまで、坑道の埋め戻しが実施されないこととなり、この間、廃棄体と緩衝材は処分場閉鎖後とは異なった雰囲気や水理状態、熱的状態に置かれることとなる。このような環境での人工バリアの状態に関する情報を取得することが求められた場合には、上記の ANDRA の方法と同様に廃棄体の定置の順番を考慮する必要性が考えられる。

処分場に於いて人工バリアのモニタリングによる性能確認を行うことが求められ、かつモニタリング機器の設置による長期安全性への影響を抑える必要がある場合には、実際の処分坑道または処分孔に模擬廃棄体を設置してこの周辺の人工バリアをモニタリングするという方策が考えられる。

以上の検討で考察した人工バリアの性能確認モニタリングのオプションとの長短を表

2.4.2-1 のように示すことができる。

表 2.4.2-1　人工バリアの性能確認モニタリングのオプション比較

| モニタリング実施場所 | 模擬廃棄体近傍の人工バリア | 実廃棄体近傍の人工バリア |
|---|---|---|
| 地下特性調査施設 | ○：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響は、安全面からは考慮しなくて良い。<br>Δ：処分坑道埋め戻し前の状態変化の確認については検討必要。<br>×：地質学的・水理学的不均一性への対処が困難。<br>×：放射線の影響はモニタリング出来ない。 | |
| 処分パネル | ○：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響は、安全面からは考慮しなくて良い。<br>○：処分坑道埋め戻し前の状態変化の確認が可能。<br>○：地質学的・水理学的不均一性への対処が可能。<br>×：放射線の影響はモニタリング出来ない。 | ○：放射線の影響もモニタリング可能<br>○：処分坑道埋め戻し前の状態変化の確認が可能。<br>○：地質学的・水理学的不均一性への対処が可能。<br>×：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響の対処が必要。 |

以上、人工バリアの性能確認のため、人工バリアそのものをモニタリングする場合の制約条件について考察した。しかしながら、人工バリアの状態変化は地下水の組成や流量などの環境要因によりもたらされることを考えると、これらの環境要因をモニタリングすることで間接的に人工バリアの状態変化を推定できるものと考えられる。このようなモニタリングについては、2.4.4 にて考察する。

### 2.4.3　人工バリアの性能確認モニタリングのパラメータ選定に関する検討

本検討では、人工バリアの閉鎖後長期安全性の確保について、以下のように想定した。

処分の安全確保は地質環境、廃棄体及び人工バリアの特性の組み合わせで行う。このうち人工バリアの特性に関しては、地表での実験室規模試験、工学規模試験及び地下研究所での実証的な試験による確認等の結果にもとづく仕様、施工手順の設定と技術的根拠の整備を行う。

建設・操業時には人工バリアの製作・施工時の品質管理を行うとともに、処分場の処分エリアと同様の地質環境で並行して行われる実証試験と実処分場のモニタリングによるデータ取得を行う。

閉鎖時の性能確認においては、これらの試験結果、品質管理結果、モニタリングデータの組み合わせによる総合判断によって、安全評価の結果が妥当であることの確認を行う。

原環センターでは、モニタリングの対象となるプロセスとパラメータの選定の考え方として、図 2.4.3-1 の選定フローを検討した[27]。セーフティケースにおいては、包括的な達成目標である安全な処分の実現、処分システム全体の安全概念としての多重バリアシステムによる放射性廃棄物の長期隔離と閉じ込めのため、処分システムの安全に寄与する多重バリアシステムの構成要素毎に安全機能が設定される。また、安全機能に対し、より詳細な要求事項が、可能な場合は、定量的なパラメータが、各バリアに対し設定される。次に、安全機能及び性能目標に影響するプロセス（FEP）を抽出する。抽出されたプロセスに対し、モニタリング実施の観点から、検出可能性や、モニタリング機器設置による長期安全性への悪影響等の制約条件を考慮してふるい分けを行う。その後、プロセスに関連するパラメータを抽出し、パラメータのモニタリング可能性（技術的成立性）を検討し、モニタリングパラメータを選定する。技術的成立性の検討では本調査にて整備した技術メニューを利用することが考えられる。このようにして選定されたパラメータ（例：全圧、間隙水圧等）のモニタリングにあたっては、判断基準（正常な値の範囲、範囲外の場合の対応策）等を具体的に検討する必要がある。

なお、このモニタリングパラメータの選定フローは、MoDeRn プロジェクトによるモニタリング・ワークフロー（図 2.3.1-1）と別個に検討されたが、MoDeRn プロジェクトによるモニタリングワークフローのうち、処分システムの安全性に関わる技術的な検討を抽出したものとなっている。

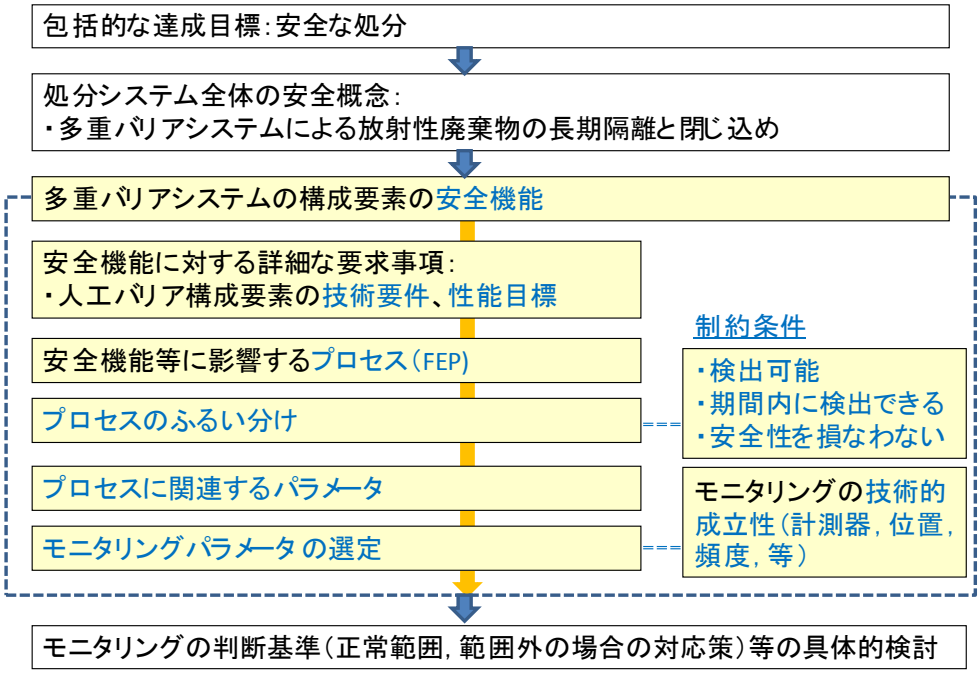



図 2.4.3-1　人工バリアの安全機能に影響するプロセスのモニタリングパラメータ選定方法案[27]

また、性能確認のためのモニタリングの候補となるパラメータへの要求事項は以下のようにまとめることができると考えられる[21]。

・閉鎖後セーフティケースに関連が深い
・閉鎖までの数十年から 100 年程度のデータにもとづき、何らかの結論（判断）を導くことができる
・モデル（予測）等とモニタリング結果の整合に関して議論が可能である
・測定点が処分場のひろがり、ばらつきを考慮しても代表性がある
・処分場の閉鎖後安全性に影響を及ぼさない
（このため、廃棄体近傍や人工バリアシステム（EBS）は極力避け、必要であれば、地下特性調査施設等において模擬廃棄体等を用いてモニタリングすることを考える。）
・モデル（予測）等とモニタリング結果が食い違う場合の対応を事前に検討できる
（対応計画（モデルの更新など）、是正処置（修復など））

安全機能とそれに関するプロセスを基にモニタリングパラメータを選定した事例として、フィンランドの Posiva によるモニタリング計画[28]がある。人工バリアの変化に関係するプロセスからモニタリングの対象の選定を表 2.4.3-1 に示す。この表では、29 のプロセスを人工バリアの変化に関係するものとして示し、このうちモニタリングの対象となり得るものを 5 つ示している。他の 24 のプロセスは、変化が規則的でありモニタリングの対象とする必要がないもの、実験室での試験により確認すべきもの、変化が起こる時期が氷河期やキャニスター（わが国の概念でのオーバーパックに相当）の破損後でありモニタリング期間には起こらないと予測されるもの、等の理由によりモニタリング対象としては棄却されている。

このように、性能確認のためのモニタリングはあくまで性能確認プログラムの一部であり、モニタリングにより全ての性能確認を行うのではないことに注意する必要がある。

わが国においてもこの様な手順に従ったモニタリングパラメータの選定を実施すべきものと考えられる。昨年度は、緩衝材の再冠水過程を対象とした検討を実施した。この検討に於いては、処分場の構成要素の安全機能と要求事項（技術要件）については、NUMO による報告書（処分場の安全機能と技術要件、NUMO-TR-10-11[2]）を参照した。また、FEP については、第 2 次取りまとめ[26]の FEP を対象に、SKB(2010)[29]において再冠水過程（不飽和フェーズ）にて重要とされた FEP に対応するものを抽出した。以上の安全機能、技術要件、FEP、モニタリングパラメータの関係をまとめると、表 2.4.3-2 の様になる。この表は昨年度の結果を精査、修正したものである。

表 2.4.3-1　Posiva(2012)[28]による人工バリアのモニタリング対象プロセスの選定

| 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（キャニスター内） | | 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 | | キャニスター破損 |
| | 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 | | キャニスター破損 |
| | 3.2.10 | | ヘリウムガスの生成 | | 規則的 |
| | キャニスター | | | | |
| | 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 | | キャニスターの熱膨張 | | 規則的 |
| | 4.2.5 | | 銅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 | | キャニスター破損 |
| | 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 |

表 2.4.3-2　安全機能、技術要件、FEP から推定した緩衝材のモニタリングパラメータ候補

| 安全機能<br>（NUMO-TR-10-11） | 技術要件<br>（NUMO-TR-10-11） | 再冠水過程の事象<br>（第 2 次取りまとめ、SKB TR-10-45 参照） | 直接関連するパラメータ | モニタリングパラメータ |
|---|---|---|---|---|
| 放射性物質の溶解度制限 | （還元環境の保持） | - | | |
| 移流による移行抑制 | 低透水性 | 緩衝材の飽和 | 含水比 | 含水比 |
| | | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速 | - |
| | | 移流/分散 | 流量、流速 | - |
| コロイド移行の防止・抑制 | コロイドろ過能 | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速 | - |
| | | コロイドの形成 | 排水中のコロイド量 | 排水中のコロイド量（サンプリング） |
| | | 移流/分散 | 流量、流速、間隙水圧 | 間隙水圧 |
| 収着による放射性物質移行の遅延 | 収着性 | - | - | - |
| 放射性物質の溶解度制限、<br>移流による移行抑制、<br>コロイド移行の防止・抑制、<br>収着による放射性物質移行の遅延 | 自己修復性 | 緩衝材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | 耐熱性 | 緩衝材の温度 | 温度 | 温度 |
| | 耐放射線性 | - | | |
| | 緩衝材流出の抑制 | 緩衝材の飽和 | 含水比 | 含水比 |
| | | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速 | |
| | | 緩衝材の流出 | 排出水中の緩衝材量、流量、流速、密度、膨潤圧 | 全圧、間隙水圧、排出水中の緩衝材量（サンプリング） |
| | | 緩衝材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | 残置物との相互作用の影響の低減 | - | - | - |
| | バリア材料間の相互作用の影響の低減 | - | - | - |
| | 施工時の隙間の充填（自己シール性） | 緩衝材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| （他のバリアの保護） | ガラス固化体の過熱の防止 | 緩衝材の温度 | 温度 | 温度 |
| | オーバーパックの保護（物理的緩衝性） | 緩衝材の応力 | 全圧 | 全圧 |
| | | 緩衝材の変形 | 変位 | 変位 |
| | オーバーパックの沈下の防止 | 緩衝材の応力 | 全圧 | 全圧 |
| | | 緩衝材の変形 | 変位 | 変位 |

緩衝材と同様な方法で、坑道埋め戻し材のモニタリングパラメータを検討すると、安全機能と技術要件（基本的なバリア性能の確保、長期健全性の維持）[2]は表 2.4.3-3 の通りである。

表 2.4.3-3　坑道埋め戻し材の安全機能と技術要件（基本的なバリア性能の確保、長期健全性の維持）[2]

| 項目 | 細目 | 記述 |
|---|---|---|
| 安全機能 | 放射性物質の移行抑制 | アクセス坑道及びその周辺が卓越した移行経路となることの抑制 |
| 技術要件 | 基本的なバリア性能の確保 | 低透水性 |
| | 長期健全性の維持 | 施工時の隙間の充填（自己シール性） |
| | | 残地物、材料間の相互作用の影響の低減 |

また、モニタリング実施可能な期間に対応する、再冠水時(不飽和フェーズ)の重要プロセスを SKB-TR-10-47[30]より抜粋し、第 2 次取りまとめ[26]による FEP との対応を表 2.4.3-4 に示した。

表 2.4.3-4　SKB-TR-10-47[30]における再冠水時(不飽和フェーズ)の坑道埋め戻し材の重要 FEP、及び対応する第 2 次取りまとめ[26]の FEP

| SKB-TR-10-47[30] | | 第 2 次取りまとめ[26] | |
|---|---|---|---|
| FEP 番号 | FEP 名 | FEP 番号 | FEP 名* |
| BfT1 | 熱移行 | D-1.2 | 埋め戻し材の温度 |
| BfT3 | 不飽和状態での水吸収及び水移行 | D-2.2 | 埋め戻し材の飽和 |
| | | D-2.3 | 埋め戻し材中での地下水流動 |
| BfT5 | ガス移行・溶解 | D-4.4 | ガスの発生/影響 |
| BfT6 | パイピング・エロージョン | D-3.5 | 埋め戻し材の流出 |
| BfT7 | 膨潤・質量の再配分 | D-3.3 | 埋め戻し材の膨潤 |
| | | D-3.4 | 埋め戻し材の変形 |
| BfT9 | 核種の移流移行 | D-6.3 | 埋め戻し材中での核種の移行 |
| BfT12 | 不純物の変化 | D-4.8 | 埋め戻し材の化学変質 |
| BfT14 | 浸透 | D-2.2 | 埋め戻し材の飽和 |
| | | D-2.3.1 | 移流/分散 |

*：プラグ、グラウト、支保に関する記述を省略

以上の安全機能、技術要件、FEP に対応するモニタリングパラメータは、表 2.4.3-5 のように示すことができる。

表 2.4.3-5　安全機能、技術要件、FEP から推定した坑道埋め戻し材のモニタリングパラメータ候補

| 安全機能<br>（NUMO-TR-10-11） | 技術要件<br>（NUMO-TR-10-11） | 再冠水過程の事象<br>（第2次取りまとめ､SKB TR-10-47 参照） | 直接関連するパラメータ | モニタリングパラメータ |
|---|---|---|---|---|
| アクセス坑道及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 | 埋め戻し材の飽和 | 含水比 | 含水比 |
| | | 埋め戻し材中での地下水流動 | 流量、流速 | - |
| | | 移流/分散 | 流量、流速 | - |
| | 施工時の隙間の充填（自己シール性） | 埋め戻し材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | 残地物、材料間の相互作用の影響の低減 | 埋め戻し材の化学変質 | 鉱物組成、化学組成 | - |

緩衝材、坑道埋め戻し材ともに、モニタリングパラメータの選定にあたっては、現在の技術で実現可能であることを考慮しているため、最終的なモニタリングパラメータの数はかなり絞り込まれたものとなっている。

技術要件と FEP、モニタリングパラメータの関係については MoDeRn におけるケーススタディ[25]等を参考としているが、モニタリング結果をセーフティケース等に反映するためには緩衝材の挙動についての検討を基に、技術要件とプロセス（FEP）の関係や各パラメータの意味を十分に精査する必要がある。

なお、今回の検討にて抽出されたモニタリングパラメータは、温度、全圧、間隙水圧等の少数のものに絞り込まれたが、このような結果は、同様の方法にてモニタリング計画を立案した Posiva （2012）[28]とも整合している。

ここでは、人工バリアの性能確認を行うために人工バリアを直接モニタリングする場合、バリア性能への影響を考慮すると、上記のように限られたパラメータをモニタリングすることで、人工バリアの状態を推定することとなる。

そこで、人工バリアの性能に影響する外部環境であるニアフィールドのプロセスや事象をモニタリングし、これにより人工バリアの置かれた環境が長期性能を損なうものでないことを確認する方法について、次項で検討した。

### 2.4.4　ニアフィールドのモニタリングによる人工バリアの性能確認

人工バリアが設計あるいは予測通りの性能を発揮することを確認するモニタリングに於いては、人工バリアそのもののモニタリングに加え、人工バリアに影響を与えるニアフィールドの水理学的パラメータ等のモニタリングが手法として考えられる。

例えば、原環センターでは緩衝材の再冠水時の挙動に着目した検討を実施しているが（第 2 分冊参照）、この中で、不飽和状態の緩衝材が岩盤からの湧水により浸食される現象（パイピング・エロージョン）等に着目している。このような浸食の発生は岩盤からの湧水量、水質（塩濃度）、湧水の圧力等の条件に依存しており、これらは緩衝材を設置した処分孔を含むニアフィールドの水理学的、地球化学的なパラメータの一部である。

#### (1)　モニタリングパラメータの選定

本検討では、人工バリア性能に影響を与えると考えられる、ニアフィールドの岩盤力学的パラメータ、水理学的パラメータ、地球化学的パラメータ等について、国内外の地下研究所での計測、モニタリングの実績等を参照して抽出する。

これらのパラメータの抽出においては、ニアフィールドにおける FEP とモニタリングパラメータの関係、人工バリアの健全性に与える影響を検討する。なお、人工バリアの健全性に影響を与えると考えられるニアフィールドの FEP に直接対応するパラメータが、技術的にモニタリング出来ないと判断される場合は、これを間接的に示し、モニタリング可能なパラメータを選定する。

1)FEP の選定

本検討に於いては、処分坑道または処分孔周辺のニアフィールドにおける事象が人工バリアに与える影響を検討している。ここで、着目すべき事象の一つとして、分冊２に示されるようにわが国の地下環境の特性として湧水量が多いことが挙げられる。このため、湧水に対する対策として、処分坑道への覆工や岩盤へのグラウトの施工等のセメント系材料の使用がが行われる可能性が高いものと推測される。このことを考慮し、高レベル放射性廃棄物の FEP として、Posiva(2012)[28]に於いて重要性が高いと評価された FEP、第 2 次取りまとめ[26]の FEP に加え、セメントと岩盤やベントナイトとの反応を考慮している TRU2 次レポート[31]の FEP を参照して検討を行った。その結果、モニタリングパラメータの検討対象として選定したニアフィールドの FEP を表 2.4.4-1 に示す。

表 2.4.4-1　モニタリングパラメータの検討対象として選定したニアフィールドの FEP

| 記号* | 分野 | FEP | 詳細 FEP |
|---|---|---|---|
| M-01 | 岩盤力学 | 熱の伝達 | 母岩の熱物性 |
| | | | 母岩の温度 |
| | | | 母岩の熱膨張 |
| M-02 | 岩盤力学 | 応力再配分 | ― |
| M-03 | 岩盤力学 | 既存の亀裂の再活性化及び変位 | ― |
| M-04 | 岩盤力学 | 岩盤の剥離 | ― |
| M-05 | 岩盤力学 | クリープ | ― |
| H-01 | 水理学 | 地下水の流動 | ― |
| H-02 | 水理学 | 水頭の変遷 | ― |
| H+C-01 | 水理学＋地球化学 | 塩水の変遷 | ― |
| C-01 | 地球化学 | 岩石及び地下水の相互作用 | ― |
| C-02 | 地球化学 | 地下水の酸化 | ― |
| C-03 | 地球化学 | 地下水の炭酸化 | ― |
| C-04 | 地球化学 | セメントの影響 | ― |
| C-05 | 地球化学 | 微生物の活動 | ― |
| C-06 | 地球化学 | コロイド移行 | ― |
| C-07 | 地球化学 | ガス発生 | ― |

*：本検討にて用いる記号、参照した文献の記号とは異なる。

2)FEP によるニアフィールドのパラメータの抽出

本検討に於いては、対象とした FEP が人工バリアへどのような影響を及ぼすかに着目し、

対象としたFEPの具体的な因子（パラメータ）は何かを検討した。検討の結果FEPより抽出された、人工バリアに影響を与えると考えられるニアフィールドのパラメータを以下に示す。なお、この段階でのパラメータは、モニタリングを行う（機器で測定する）パラメータとは必ずしも同一ではない。

a. 熱の伝達

母岩の伝達に係るパラメータによって、人工バリアの化学的な変質が生起しないことを確認するためには、発熱廃棄体から放出される熱が、予測通りに外部（母岩）へと伝達し、さらに母岩はその熱を地中に広く拡散させ、人工バリア内部での熱の蓄積を抑制する能力を有しているかの確認を行うことが必要である。すなわち、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 母岩と隣接するプラグ／グラウト／支保／埋め戻し材の温度
- 母岩自身の温度

母岩の熱物性については、母岩自身の温度や地下水の性状によって変化すると考えられる。また、坑道掘削によって発生する掘削影響領域や岩盤クリープなどの長期的な力学的影響、地下水及びセメント系材料などからの溶出成分による化学的影響によって、熱物性は変化すると予想されることから、下記のニアフィールドパラメータについて複合的に考慮することで、より精度の高い把握が可能となる。

- 母岩自身の温度
- 掘削影響領域の変化や岩盤クリープ量
- 周辺岩盤の地下水及びセメント系材料などからの溶出成分量

また、人工バリアに隣接する周辺母岩の温度（地熱）の変化は、処分場の長期的な温度を規定する主要因であるといえる。また、母岩の温度変化は、熱影響による構成鉱物の変質や母岩及び周辺の温度差による熱応力の発生、水の粘性係数に影響を及ぼし地下水流れに影響を与えることも考えられる。すなわち、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 母岩の温度
- 母岩の構成鉱物の変化
- 熱応力の変化、
- 地下水流

さらに、熱による応力の変化が、母岩の力学的安定性の低下やクリープの促進、または地下水流動等に影響を与える可能性があることから、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 母岩の変位やクリープ量
- 地下水流動

上記の結果を整理すると、熱の伝導性についてのニアフィールドパラメータは、以下

の通りとなった。

- 母岩と隣接するプラグ／グラウト／支保／埋め戻し材の温度
- 母岩自身の温度
- 掘削影響領域の変化や岩盤クリープ量
- 周辺岩盤の地下水及びセメント系材料などからの溶出成分量
- 母岩の構成鉱物の変化
- 熱応力の変化
- 地下水流動

b. 応力再配分

人工バリアの力学的安定性に影響を与える可能性がある応力再分配は、坑道掘削により、母岩の初期地圧が解放され生じる。このため、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 坑道掘削時の母岩の地圧の変化

さらに、岩盤に発生する応力が増加し、クリープ現象の促進や掘削影響領域の増大につながることや、岩盤の応力が岩盤自身の耐力を上回った場合、岩盤に亀裂が生じることから、下記についてもニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 岩盤クリープ
- 岩盤の亀裂状態及び発達程度を考慮するための弾性波速度

c. 既存の亀裂の再活性化及び変位

廃棄体からの核種移行の遅延やコロイド移行の抑制などを低減する可能性のある、既存の亀裂の再活性化及び変位については、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 母岩としての亀裂の発達程度を考慮するための弾性波速度
- 坑道掘削時の母岩の変形状態

d. 岩盤の剥離

処分孔の壁面岩盤の剥離については、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 処分孔施工から廃棄体定置後の初期の温度上昇の影響

e. クリープ

坑道内の人工バリアに力学的影響を与える可能性があるとともに、母岩の透水係数にも影響を及ぼすクリープについては、処分坑道掘削時に発生した周辺岩盤の掘削影響領域が、クリープ変形に伴って、さらにその範囲を拡大し強度低下や高透水性化が発生すること、また、掘削後の操業期間及び閉鎖後において、時間経過に伴いひずみが増大することから、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 岩盤特性の変化（岩盤強度など）
- 母岩の透水係数

- 掘削後の岩盤の変形（内空変位）

f. 地下水の流動

母岩での地下水流動は、断層、割れ目などの地質学的特徴の間隙や母岩のマトリクス部の間隙で起き、地下水流動が変化した場合、母岩中での地下水流速が変化することから、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 母岩の断層や割れ目幅の変化
- 地下水流速の変化

なお、下記の地下水流動の駆動力に関しては、広範囲での差を確認する必要があるため、ファーフィールド・パラメータとして挙げられる。

- 動水勾配
- 地下水の密度差
- 温度差

g. 水頭の変遷

水頭の変遷に関わるパラメータは、前項と同様である。

h. 塩水の変遷

塩水の変遷は、流体の特性の変化に起因する密度流や熱対流の影響を受け、母岩における溶質移行に影響する。ニアフィールドパラメータとしては下記が挙げられる。

- 地下水中に溶存する塩水濃度

また、母岩での溶質の移動の駆動力の原因として挙げられている下記については、ファーフィールド・パラメータとして挙げられる。

- 地下水流動
- 濃度勾配（塩淡境界）
- 地下水の密度差による密度流
- 温度差による熱対流

i. 岩石及び地下水の相互作用

岩石及び地下水の相互作用については、①母岩と地下水の反応、及び②母岩の化学的変質がある。これらは、処分場の地下水性状に起因するものの、その反応は、pH、地下水組成、酸化還元電位などの地下水の性状に影響することから、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化
- 反応後の母岩特性（力学、水理、化学的特性）

j. 地下水の酸化

還元性の地下水を酸化性地下水に変化させる原因となりうる、処分坑道の掘削時の坑道内への地下水の流入や坑道壁面からの地下水の蒸発による処分坑道周辺の母岩中に不飽和領域に関連する下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 坑道周辺の不飽和領域の状態

- 処分坑道への地下水の流入量（湧水量）
- 坑道壁面からの地下水の蒸発水分量

また、地下水の反応が生じているかどうかの確認に関連する下記もニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化

さらに、廃棄体定置後に地下水の酸化を引き起こす可能性がある下記もニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 地下水中の硝酸イオン濃度

k. 地下水の炭酸化

地下水の炭酸化は、通常、有機物の分解によって生じた炭酸ガスが地下水中に溶存するためであるため、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 炭酸化の可能性がある地下水中の有機物量

また、地下水の反応が生じているかどうかの確認に関連する下記もニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化

l. セメントの影響

処分場の構成要素及び一部の廃棄体からのセメントの影響に関しては、母岩の性状に影響することから、影響を受けた結果として、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 母岩の特性（力学、水理、化学、鉱物）

また、地下水との反応が生じているかどうかの確認に関連する下記もニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位、Ca2+イオン濃度）の変化

m. 微生物の活動

微生物の活動については、影響を及ぼす可能性のあるその存在の把握が必要である。また、微生物による有機物の代謝・分解により錯化剤、有機酸、ガスなどが生成することも考えられることから、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 地下水中の微生物（量や種類（硫酸塩還元菌等））の把握
- 微生物による有機物の代謝・分解により生成する錯化剤、有機酸、ガス

さらに、微生物活動により水化学環境の変化が生じることから、下記もニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位）の変化

n. コロイド移行

コロイドについては、まず、影響を及ぼす可能性のあるその存在の把握が必要であることから、下記がニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 地下水中のコロイド（量や種類（①岩石の風化に起因する粘土系鉱物、②鉄／マンガン酸化物、③有機物（フミン質）及び④微生物））の把握

また、コロイドの影響状況は、コロイドが移行する媒体に依存することから下記もニアフィールドパラメータとして挙げられる。

- 母岩の断層や透水割れ目

o. ガス発生

ガス発生に係るニアフィールドパラメータとしては、水素ガスがあげられる。

以上の検討結果を表 2.4.4-2 及び表 2.4.4-3 にまとめる。これらの表から、一つの FEP に対し複数のパラメータが同定され、他の FEP から同定されたパラメータと重複していることが分かる。このため、さらにパラメータの重複を考慮し、ニアフィールドパラメータを集約した（表 2.4.4-4）。なお、表 2.4.4-4 への集約に於いては、表 2.4.4-2 及び表 2.4.4-3 のパラメータのうち、ファーフィールドでの測定項目と判断された地下水の密度差による密度流、濃度勾配（塩淡境界）、温度差による熱対流は除外した。

表 2.4.4-2　FEP より抽出された人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）(1/2)

| FEP 記号 | 分野 | FEP | 詳細 FEP | パラメータ |
|---|---|---|---|---|
| M-01 | 岩盤力学 | 熱の伝達 | 母岩の熱物性<br>母岩の温度<br>母岩の熱膨張 | ・ 母岩と隣接するプラグ／グラウト／支保／埋め戻し材の温度<br>・ 母岩自身の温度<br>・ 掘削影響領域の変化や岩盤クリープ量<br>・ 周辺岩盤の地下水及びセメント系材料などからの溶出成分量<br>・ 母岩の構成鉱物の変化（坑壁の変化）<br>・ 熱応力の変化<br>・ 地下水流動 |
| M-02 | 岩盤力学 | 応力再配分 | — | ・ 坑道掘削時の母岩の地圧の変化<br>・ 岩盤クリープ<br>・ 岩盤の亀裂状態及び発達程度を考慮するための弾性波速度 |
| M-03 | 岩盤力学 | 既存の亀裂の再活性化及び変位 | — | ・ 母岩としての亀裂の発達程度を考慮するための弾性波速度<br>・ 坑道掘削時の母岩の変形状態 |
| M-04 | 岩盤力学 | 岩盤の剥離 | — | ・ 処分孔施工から廃棄体定置後の初期の温度上昇の影響 |
| M-05 | 岩盤力学 | クリープ | — | ・ 岩盤特性の変化（岩盤強度など）<br>・ 母岩の透水係数<br>・ 掘削後の岩盤の変形（内空変位） |
| H-01 | 水理学 | 地下水の流動 | — | ・ 母岩の断層や割れ目幅の変化<br>・ 地下水流速の変化<br>・ 動水勾配<br>・ 地下水の密度差<br>・ 温度差 |
| H-02 | 水理学 | 水頭の変遷 | — | ・ 母岩の断層や割れ目幅の変化<br>・ 地下水流速の変化<br>・ 動水勾配<br>・ 地下水の密度差<br>・ 温度差 |

表 2.4.4-3　FEP より抽出された人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）
(2/2)

| FEP 記号 | 分野 | FEP | 詳細 FEP | パラメータ |
|---|---|---|---|---|
| H+C-01 | 水理学＋地球化学 | 塩水の変遷 | ― | ・ 地下水中に溶存する塩水濃度<br>・ 地下水流動<br>・ 濃度勾配（塩淡境界）<br>・ 地下水の密度差による密度流<br>・ 温度差による熱対流 |
| C-01 | 地球化学 | 岩石及び地下水の相互作用 | ― | ・ 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化<br>・ 反応後の母岩特性（力学、水理、化学的特性） |
| C-02 | 地球化学 | 地下水の酸化 | ― | ・ 坑道周辺の不飽和領域の状態<br>・ 処分坑道への地下水の流入量（湧水量）<br>・ 坑道壁面からの地下水の蒸発（水分量）<br>・ 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化<br>・ 地下水中の硝酸イオン濃度 |
| C-03 | 地球化学 | 地下水の炭酸化 | ― | ・ 炭酸化の可能性がある地下水中の有機物量<br>・ 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化 |
| C-04 | 地球化学 | セメントの影響 | ― | ・ 母岩の特性（力学、水理、化学、鉱物）<br>・ 地下水組成（pH、地下水組成、Eh、Ca2+イオン濃度）の変化 |
| C-05 | 地球化学 | 微生物の活動 | ― | ・ 地下水中の微生物量や種類<br>・ 微生物による有機物の代謝・分解により生成する錯化剤、有機酸、ガス<br>・ 地下水組成（pH、地下水組成、Eh）の変化 |
| C-06 | 地球化学 | コロイド移行 | ― | ・ 地下水中のコロイド量や種類（①岩石の風化に起因する粘土系鉱物、②鉄／マンガン酸化物、③有機物及び④微生物）<br>・ 母岩の断層や透水割れ目 |
| C-07 | 地球化学 | ガス発生 | ― | ・ 水素ガス |

表 2.4.4-4　集約されたニアフィールドパラメータ（次項での検討対象）

| ﾆｱﾌｨｰﾙﾄﾞ ﾊﾟﾗﾒｰﾀ 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 (特定されている場合) |
|---|---|---|
| T-01 | 温度 | 坑道内 |
| T-03 | 温度(岩盤) | — |
| T-04 | 温度(プラグ／グラウト／支保／埋め戻し材) | — |
| T-05 | 温度(地下水) | — |
| H-01 | 水分量(岩盤内飽和度) | — |
| H-02 | 湧水量 | — |
| H-03 | 地下水圧 | — |
| H-04 | 地下水流動 | — |
| H-05 | 透水係数 | — |
| M-01 | 岩盤応力 | — |
| M-02 | 岩盤強度 | — |
| M-03 | 岩盤の変形 | 坑道内 |
| M-04 | 割れ目幅 | — |
| M-05 | 掘削影響領域の変化 | — |
| M-06 | 岩盤クリープ量 | — |
| M-07 | 内空変位 | 坑道内 |
| C-01 | 鉱物組成 | — |
| C-02 | 水素ガス濃度 | — |
| C-03 | 地下水組成(Ca2+) | 周辺岩盤 |
| C-05 | 地下水組成 (pH、Eh、イオン) | — |
| C-06 | 地下水中のコロイド | — |
| C-08 | 地下水中の塩分濃度 | — |
| C-09 | 地下水中の微生物 | — |
| C-10 | 地下水中の有機物量(有機酸) | — |
| C-11 | 地下水中の有機物量(炭酸化) | — |
| C-12 | 有機物分解生成ガス | — |

3) ニアフィールドでのモニタリングパラメータの事例調査

国内外の地下研究所での計測、モニタリングの実績等を勘案し、計測機器の有無よりニアフィールドでのモニタリングパラメータの絞り込みを行った。参照した文献は以下の通りである。

- 国内の地下研究所での計測事例として、原子力機構の幌延深地層研究計画
- 海外のモニタリング計画として、フィンランドの Posiva（2012）[28]及びスウェーデンの SKB(2004)[32]の事例

a. 国内の地下研究所での計測事例

幌延深地層研究計画における人工バリア性能確認試験に係るニアフィールド岩盤中での計測事例について下記文献を対象に調査を行った。

- 人工バリア性能確認に関する基盤情報取得方法の調査研究(Ⅱ)（JNC, 2005）[34]
- 幌延深地層研究計画 調査研究計画及び成果報告（JAEA, 2011~2014）[35]~[39]

JNC(2005) [34]は、主としてモニタリングの観点から、人工バリア性能確認の計測計画や計測可能性が検討されている。JNC(2005[34]における、ニアフィールド岩盤での計測項目(案)や計測期間、計測位置等の検討結果から、表 2.4.4-5 のように整理した。

次に、幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）での調査研究計画及び成果報告書（[35]~[39]）を参考に、ニアフィールドパラメータのモニタリングに係る内容を調査・整理した。表 2.4.4-6～表 2.4.4-11 に第２段階（平成２２～２５年度）での計測技術に関する調査・研究状況を整理した結果を示す。バリア性能に関連するニアフィールドモニタリングについては、平成 25 年度の調査報告において、深度 350m の試験坑道 4 の人工バリア性能確認試験の試験孔周辺に設置した埋設ひずみ計による計測が実施されており、岩盤の変形に関わるデータを適切に取得できている。

表 2.4.4-5　JNC(2005)によるニアフィールドモニタリングの項目・期間・計測方法等

| 計測項目 | | 計測位置 | 坑道掘削 | | 廃棄体ピット掘削 | | | 人工バリア定置 | | 坑道埋め戻し | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 前 | 中 | 前 | 中 | 後 | 中 | 後 | 前 | 中 | 後 |
| 周辺岩盤（坑道周辺） | 温度 | ピット近傍の坑道壁面 | | | センサ | | | | | | | |
| | 応力・ひずみ | 同一地下深度の別の箇ピット近傍の坑道壁面 | MPシステムなど | MPシステムなど | | | | | | | | |
| | 間隙水圧 | 同一地下深度の別の箇ピット近傍の坑道壁面 | MPシステムなど | MPシステムなど | | | | | | | | |
| | 緩み域の特性（領域幅，力学特性，透水係数） | ピット近傍の坑道壁面 | | MPシステムなど | | | | | | | | |
| | 間隙水の地球化学（pH，酸化還元電位，化学組成） | ピット近傍の坑道壁面 | | MPシステムなど | | | | | | | | |
| | 浸出水量（坑道壁面） | 試験坑道の集水路 | | 転倒ますなど | | | | | | | | |
| 周辺岩盤（ピット近傍） | 温度 | 廃棄体ピットの周囲および底面 | | | センサ | | | | | | | |
| | 応力・ひずみ | 廃棄体ピットの周囲および底面 | | | センサ | | | | | | | |
| | 間隙水圧 | 廃棄体ピットの周囲および底面 | | | センサ | | | | | | | |
| | 間隙水の地球化学（pH，酸化還元電位，化学組成） | 廃棄体ピットの周囲および底面 | | | センサ | | | | | | | |
| | 浸出水量（ピット壁面） | 廃棄体ピットの底面 | | | | 汲み上げ | | | | | | |
| 埋め戻し材 | 温度 | 埋め戻し材中 | | | | | | | | | | センサ |
| | 応力・ひずみ | 埋め戻し材中 | | | | | | | | | センサ | |
| | 間隙水圧 | 埋め戻し材中 | | | | | | | | | | センサ |
| | 水分量 | 別区画(初期状態の確認)埋め戻し材中 | | | | | | | | センサ | センサ | |
| | 間隙水の地球化学（pH，酸化還元電位，化学組成） | 埋め戻し材中 | | | | | | | | | | センサ |
| | 密度・空隙率 | 埋め戻し材中 | | | | | | | | | センサ | |
| | 天端との隙間 | 坑道天端との間 | | | | | | | | | センサ | |

表 2.4.4-6　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](1/6)

| 計測内容 | 本検討に関連する内容（計測機器及びその適用性） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 平成２２年度 | 平成２３年度 | 平成２４年度 | 平成２５年度 |
| 坑道壁面からの湧水 | 平成 21 年度に引き続き、換気立坑及び東立坑壁面に設置した集水リングや坑道内のボーリング孔から採取した地下水の水質の連続観測を継続。 | 平成 22 年度に引き続き、換気立坑及び東立坑壁面に設置した集水リング（立坑内に湧水する地下水を回収・採取するために、立坑壁面に 30～40m 毎に設置されている設備）や、坑道内のボーリング孔から採取した地下水の水質の観測を継続。 | 継続。ただし、平成 25 年 2 月上旬に調査ボーリング箇所からのメタンガスの噴出と坑道切羽からの大量湧水により掘削工事を一時中断。 | 継続。 |
| 岩石からの間隙水の化学分析 | 地下施設の建設に伴う周辺の地球化学環境の変化に関わる調査解析技術を構築することを目的とし、坑道内において地下水の pH や電気伝導度、酸化還元電位などを測定するための装置を開発し、その適用性の確認を行うとともに、坑道近傍で採取した地下水の水質分析を実施し、その変化の解析を実施。<br>また、立坑掘削による周辺の pH 及び酸化還元状態の変化を詳細に把握するために、坑道から掘削したボーリング孔を用いて、原位置の圧力を維持した状態で pH、酸化還元電位の連続観測を実施 | 第 1 段階の調査結果に基づいて推定した地下施設周辺における地下水の水質分布の妥当性を確認するとともに、地下施設の建設に伴う周辺の地球化学環境の変化を把握するため、坑道内において地下水の pH や電気伝導度、酸化還元電位などを連続観測するための装置を開発し、その適用性を確認するとともに、坑道近傍で採取した地下水の水質分析を実施し、その変化について評価を実施。<br>また、立坑掘削による立坑周辺の pH 及び酸化還元状態の変化を詳細に把握するために、坑道から掘削したボーリング孔を用いて、実際の地下環境の間隙水圧を保持した状態で pH､酸化還元電位を連続して観測。<br>なお、立坑掘削に伴い生じる脱ガスによる不飽和領域の形成や pH の上昇に伴う鉱物の変化についても調査や観測、解析を実施する予定。 | 坑道の掘削による周辺の地下水の pH 及び酸化還元状態の変化を把握するために、坑道内に掘削したボーリング孔内をパッカーで区切り、原位置の嫌気状態及び圧力状態を保持しながら､pH と酸化還元電位のモニタリングを実施。平成 21 年度から継続している地下水のモニタリングデータを確認すると、pH は全ての観測区間でやや上昇傾向。各観測区間では地下水の水圧が徐々に低下していることから、水圧の低下に伴って地下水に含まれていた炭酸ガスが脱ガスすることによって、地下水の pH が上昇していると推定。一方、全ての観測区間における地下水の酸化還元電位は約-250～-200mV であり、平成 21 年度から継続して地下水の還元状態が維持。 | 継続。<br>平成24年度に製作した深度350mで使用可能な耐圧性能を有する観測装置を 350m 調査坑道に設置し、水圧・水質モニタリングを開始。<br>坑道内で使用している観測装置は、ボーリング孔内の地下水を空気と触れないように閉鎖しつつ、坑道に設置したポンプで循環させることにより水質のモニタリングや採水を実施。<br>なお、これまでの観測装置において生じていた主にガスによる地下水循環の妨害解消とメンテナンス性向上を目的とした改良を実施し、従来よりも円滑に地下水のモニタリングを行うことが可能 |
| 岩盤の化学的な緩衝能力 | なし | 岩盤の化学的な緩衝能力を評価するために、酸化還元に関するデータを測定するための試験装置の開発を行い、140m 調査坑道及び 250m 調査坑道において試験を実施するとともに、評価手法について検討。今後は、酸化還元反応に関わるパラメータのデータ取得方法などの検討を実施 | 岩盤の酸化還元反応に対する緩衝能力を理解するために、140m 調査坑道においてボーリング孔を埋め戻す試験を実施し、掘削土(ズリ)と粘土（ベントナイト）を混合した材料に含まれる間隙水や微生物を分析する手法を構築 | 記載なし |
| 溶存ガス・コロイド・有機物・微生物の分析 | 既存のボーリング孔から採取したコアや地下水を用いて、岩石や緩衝材中での物質の拡散特性や収着特性のほか、物質移行に及ぼす有機物などの影響に関する室内試験を継続。 | 同左 | 同左 | なし |
| | 坑道周辺の地下水の地球化学特性、微生物特性、岩盤の還元環境回復能力を把握するための試験装置として､平成 21 年度に 140m 調査坑道に設置した観測装置の適用試験を行うとともに、その改良型観測装置を製作し、250m 調査坑道に設置。<br>これらの観測装置を利用して、岩盤中の微生物やその餌となる有機物、岩盤の還元環境回復能力などを調査した結果、岩盤内においては、坑道から酸素を含む大気が侵入しても、数日で酸素が消費され還元環境が回復した。また、製作した試験装置の有効性を確認した。 | 140m 及び 250m 調査坑道において岩石、地下水を採取し、その微生物特性、化学特性の分析。 | 岩盤の酸化還元反応に対する緩衝能力を理解するために、140m 調査坑道においてボーリング孔を埋め戻す試験を実施し、掘削土(ズリ)と粘土（ベントナイト）を混合した材料に含まれる間隙水や微生物を分析する手法を構築 | 平成 25 年度は地下水中のコロイドに関する調査を京都大学・東北大学との共同研究として実施。<br>140m 調査坑道及び 250m 調査坑道から採取した地下水を様々なフィルターサイズのろ過膜によりろ過し、地下水中でどのような元素がコロイドとして存在しているかを調査し、地下水中には鉄やシリカ、カルシウム、リンなどの成分がコロイドとして存在していた。 |

表 2.4.4-7　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](2/6)

| 計測内容 | 本検討に関連する内容（計測機器及びその適用性） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 平成２２年度 | 平成２３年度 | 平成２４年度 | 平成２５年度 |
| 坑道内での初期地圧の測定 | 140m 調査坑道において、幌延地圏環境研究所が新たに開発した技術を用いて岩盤の初期地圧の調査を実施し、調査技術の適用性を確認 | 平成21年度に実施した250m換気側調査坑道での測定に引き続き、東側第１ボーリング横坑と西側第１ボーリング横坑の２箇所で初期地圧測定を実施。これらの初期地圧測定では、方向の異なる３本のボーリング孔を掘削し、水圧破砕法により初期地圧を三次元的に測定。<br>これまで実施した 140m 調査坑道及び 250m 調査坑道での初期地圧測定の結果の妥当性も確認。 | 第１段階で構築した岩盤力学モデルの妥当性を評価するために、地下施設において初期地圧測定を実施。<br>平成 24 年度は、350m 調査坑道のポンプ座で測定を実施し、さまざまな方向・傾斜の４本のボーリング孔を掘削し、水圧破砕法により初期地圧を３次元的に測定。<br>平成 25 年度以降には、350m 調査坑道であと２箇所の初期地圧測定を計画。 | 記載なし |
| 坑道内での温度、湿度、気圧の連続観測 | 140m 東側第３ボーリング横坑で計測開始。坑内温度は季節変動のほか、坑内の通風・換気の状況にも影響されるが、夏期から冬期にかけて低下し、観測期間全体では概ね 7℃から 25℃の範囲にある。<br>また、水分量の計測を制御する装置は 140m 東側第３ボーリング横坑にあり、当該装置から同軸ケーブルを用いてボーリング孔奥部の水分量を計測 | 同左 | 平成 23 年度に 250m 調査坑道から実施した孔長 140m 程度のボーリング孔の掘削（斜め下方向に３孔、コア観察及び物理・流体検層（ボーリング孔内に測定機器を設置して、岩盤の温度や密度、地下水が流れている位置などを計測）に引き続き、平成 24 年度は比抵抗トモグラフィ調査、音響・弾性波トモグラフィ調査及び水理試験を実施 | 記載なし |
| 内空変位計測 | 解析手法の確立（今後計測結果との比較を実施） | 記載なし | 平成 25 年度以降、350m 調査坑道で行う２箇所の初期地圧測定結果に加え、地質構造、内空変位や吹付けコンクリートの応力などの計測結果を利用して地下坑道での測定結果の妥当性を検討 | 記載なし |
| 水圧・水質モニタリング装置 | 平成 21 年度から、140m 調査坑道から掘削したボーリング孔に、地下水の間隙水圧と水質（pH、酸化還元電位、溶存酸素、電気伝導度、水温）の同時連続観測が可能なモニタリング装置を設置し、適用試験を開始。平成 21 年度の試験結果より、溶存ガスの多い環境下に対応した間隙水圧・水質モニタリング技術の改良などが課題として挙げられたため、平成 22 年度はモニタリング装置に付随する観測区間切替バルブ、配管プラグ、注水口・採水口などについて改良を実施し、計測値の異常は確認されず、正常な間隙水圧のモニタリングが可能になった。<br>また、水質モニタリングの結果からは、pH 及び酸化還元電位の測定値は平成 21 年度と比較してほとんど変化しておらず、間隙水圧の低下の影響を受けている領域においても、化学的擾乱が小さいことが示された。<br>一方、モニタリング装置内の水質センサに地下の高水圧を瞬時にかけると、水質センサが異常値を示すことが確認されたことから、今後の改良が課題とされた。 | 平成 23 年度は、平成 22 年度に実施したモニタリング装置改良後の適用性を確認。<br>なお一部の間隙水圧観測装置が故障し一定区間の間隙水圧が低下したものの、修理後は故障発生前の値と同等になった。 | 左記は継続。<br>350m 調査坑道において水質モニタリングを実施するため、水質及び水圧のモニタリングが可能な装置の設計・開発を実施。平成 24 年度におけるモニタリング装置の設計・製作に際して、これまでの 140m 調査坑道及び 250m 調査坑道に設置してきたモニタリング装置における課題を抽出し、それらを解決しつつ、350m 調査坑道で使用可能な耐圧性能を有する装置を製作。 | 平成24年度に製作した深度350mで使用可能な耐圧性能を有する観測装置を 350m 調査坑道に設置し、水圧・水質モニタリングを開始。<br>坑道内で使用している観測装置は、ボーリング孔内の地下水を空気と触れないように閉鎖しつつ、坑道に設置したポンプで循環させることにより水質のモニタリングや採水を実施。 |

表 2.4.4-8　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](3/6)

| 計測内容 | 本検討に関連する内容（計測機器及びその適用性） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 平成２２年度 | 平成２３年度 | 平成２４年度 | 平成２５年度 |
| 高精度傾斜計 | 地表面から地下深部の岩盤や地下水の挙動をモニタリングする技術を確立することを目的として、立坑の周辺に 9 台の高精度傾斜計を配置し、坑道掘削に伴う地表面における岩盤の傾斜の変化を計測 | 平成 23 年度の主要な掘削工事は、換気立坑及び東立坑の掘削（深度約 250m～約 350m）、西立坑の掘削（地表～深度約 50m）、250m 調査坑道の一部の掘削であり、それらの影響が確認 | 平成 23 年度と同様の方法で計測データ（直交する 2 方向での傾斜角度の時系列データ）に含まれるノイズ成分を除去した後、計測した傾斜データと地下施設建設の工程との対比を実施。平成 24 年度の主要な掘削工事は、西立坑の掘削（深度約 47m から深度約 300m）及び 350m 調査坑道の総延長の半分程度の掘削であり、一部の傾斜計で、それらの影響が確認。 | 平成 25 年度は、平成 24 年度と同様の方法で計測データ（直交する 2 方向での傾斜角度の時系列データ）に含まれるノイズ成分を除去した後、計測した傾斜データと地下施設建設の工程との対比を実施。平成 25 年度の主要な掘削工事は、西立坑の掘削（深度 300m から深度 365m）、換気立坑の掘削（深度 350m から深度 380m）、東立坑の掘削（深度 350m から深度 371m）及び 350m 調査坑道の掘削であり、一部の傾斜計で、それらの影響が確認。 |
| 間隙水圧 | 140m 調査坑道と平行に掘削した水平ボーリング孔を利用して計測を行っており、調査坑道掘削後の坑道周辺の水理特性を示すデータを取得。 | 平成 21 年度から、140m 調査坑<br>道から掘削したボーリング孔（掘削長 100m）に、地下水の間隙水圧と水質（pH、酸化還元電位、溶存酸素、電気伝導度及び水温）の同時連続観測が可能なモニタリング装置を設置し、適用試験を開始。平成 23 年度は、平成 22 年度に実施したモニタリング装置改良後の適用性を確認。 | 平成 24 年度におけるモニタリング装置の設計・製作に際して、これまでの 140m 調査坑道及び 250m 調査坑道に設置してきたモニタリング装置における課題を抽出し、それらを解決しつつ、350m 調査坑道で使用可能な耐圧性能を有する装置を製作 | 平成 24 年度に製作した深度 350m で使用可能な耐圧性能を有する観測装置を 350m 調査坑道に設置し、水圧・水質モニタリングを開始<br>坑道内で使用している観測装置では、ボーリング孔内の地下水を空気と触れないように閉鎖しつつ、坑道に設置したポンプで循環させることにより水質のモニタリングや採水を実施 |
| 水分量 | 140m 調査坑道と平行に掘削した水平ボーリング孔を利用して計測を実施。水分量計測機器の一部に、一時的に不具合が認められましたが、データ取得開始から現在まで概ね計測性能を維持していることを確認 | | | |
| 光ファイバ式地中変位計の長期性能確認 | 平成 21 年度に東立坑の深度 160m に位置する立坑周囲の変位を計測する目的で光ファイバー式地中変位計を既に技術が確立されている電気式の地中変位計と同じ位置の変位を計測するように設置した。この結果、光ファイバー式と電気式とでは変位量・挙動ともに両者の対応が良く、光ファイバー式は電気式と比べノイズが少なく安定した計測ができることがわかった。 | 記載なし | 記載なし | 350m 調査坑道の試験坑道 2～4 において、掘削影響領域について力学・水理・化学的観点から検討を行っており、岩盤のひずみや変位を連続的にモニタリングし、坑道掘削時及び掘削後長期にわたる掘削影響領域の変化を計測。 |
| 掘削影響領域調査 | ― | ― | ― | 坑道全体の掘削影響領域を調査することを目的として、平成 25 年 3 月～6 月に弾性波屈折法探査を 250m 西側調査坑道で実施し、坑道掘削による割れ目の発生が顕著である範囲を推定。 |
| 弾性波トモグラフィ調査 | 坑道周辺における掘削影響領域の長期挙動を把握するため坑道掘削時には 1m 掘削毎に、坑道掘削後には、約 50 日おきに調査を繰り返し実施し、調査の結果、坑道壁面近傍においては坑道の掘削が終了した後も、弾性波速度に変化する部分（遅くなる部分）が僅かながら拡大していた。今後この調査を継続して行い、掘削影響領域のモニタリング技術としての適用性を確認する。 | 坑道掘削時には 1m 掘削ごとに、坑道掘削後には約 50 日おきに調査を繰り返し継続。調査の結果、坑道壁面近傍においては坑道の掘削が終了した後も、弾性波速度の変化する部分（遅くなる部分）がわずかながら拡大していた。なお、弾性波トモグラフィ調査が長期に渡ってきたため、弾性波計測の測線の組み合わせを固定したままでの測定が困難となったため、751 日以降は新たな測線の組み合わせを設定し、調査を継続。今後も調査を継続し、坑道周辺岩盤の状態変化のモニタリング技術としての適用性を確認する。 | 250m 西側調査坑道での調査は、掘削切羽が調査領域を通過する前後 6 段階で実施し、調査領域の掘削後から 1 年間は 50 日ごと、それ以降は 100 日ごとに<br>調査を実施。今後も 100 日ごとの調査を継続して行い、季節的な影響を含めた長期的な坑道周辺岩盤の弾性波速度の変化の分布やその大きさをモニタリングし、調査技術としての適用性を確認 | 弾性波トモグラフィ調査、比抵抗トモグラフィ調査を試験坑道 2 及び 4 の掘削前及び掘削直後に実施しており、掘削終了後は年 2 回実施していく予定。 |

表 2.4.4-9　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](4/6)

| 計測内容 | 本検討に関連する内容（計測機器及びその適用性） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 平成２２年度 | 平成２３年度 | 平成２４年度 | 平成２５年度 |
| コントロールボーリング技術により掘削したボーリング孔を利用したモニタリング技術の開発 | 平成 21 年度までに、上幌延地区において掘削技術や試験技術の確認を行いながら掘削長約 900m まで掘削。平成 22 年度は、掘削長 900m～950m までの区間についてほぼ水平の角度で掘削を継続し、左右に掘削方向をコントロールする試験掘削を行い、掘削技術を構築。今後、掘削長約 1,000m まで掘削し、コントロールボーリングに関わる様々な掘削技術、観測技術を確立する予定 | 平成 23 年度は、掘削長 1,000m までの区間について水平の角度で、左右に掘削方向を制御する試験掘削を実施。今後、コントロールボーリング孔における様々な観測、モニタリング技術を確立する予定。 | 平成 24 年度は、平成 23 年度までに上幌延地区で掘削した掘削長約 1,000m のコントロールボーリング孔の孔内において、応力の状態を測定する装置の挿入設置に関する動作確認を行うとともに、耐圧性能及び通信機能などの適用性を確認。 | 平成 25 年度は、ボーリング調査時に掘削の継続が困難となり、異なる方位への掘削が必要となった場合を想定し、上幌延地区で掘削した掘削長約 1,000m のコントロールボーリング孔の孔内から異なる方位へ再掘削する技術の適用性確認。<br>コントロールボーリングの掘削技術開発については平成 25 年度で完了し、平成 26 年度からはコントロールボーリング孔を利用した連続的な水圧・水質長期モニタリングに関する技術開発を開始 |
| 岩盤の変位・支保工の応力の観測 | 東立坑及び 250m 調査坑道の掘削を進めながら、地中変位計やコンクリート応力計などの計測器を設置してデータを取得。<br>現場計測では、覆工コンクリート中心部の同一水平面内に応力計を配置する一般的な計測手法に対して、立坑軸方向及び半径方向の応力分布を計測するために、初期地圧の最大・最小主応力方向の縦断面内に各 5 個の応力計を配置し、解析結果と比較し、若干の差異がみられたことから、既存の計測計画を実際の岩盤や支保の挙動に合わせて見直すこととした。 | 明確な記載なし | 明確な記載なし | 平成 25 年度は、試験坑道 4 の人工バリア性能確認試験の試験孔周辺に設置した埋設ひずみ計による計測を実施。計測には、塩化ビニルパイプに 6 個のひずみ計を固定した計器を製作し、6 方向のひずみを計測可能とした。ボーリング孔の所定の位置に計器を設置した後、岩盤と同程度の弾性定数を示すエポキシ樹脂で充てんし、岩盤と樹脂の変形挙動が同一となり、岩盤の変形に関わるデータを適切に取得できた。また、人工バリア性能確認試験の試験孔掘削に伴い、ひずみが急激に変化する傾向を捉えた。<br>人工バリア性能確認試験では、試験孔内に熱源と緩衝材を設置し、その後坑道を埋め戻しが行われるため、平成 26 年度以降、それらに伴って周辺の岩盤がどのように変形していくかを調査。 |
| 塩水と淡水が混在する場における地下水流動などに関する調査技術開発 | 塩水と淡水が混在する場における地下水流動や水質形成などに関する調査解析技術の開発を継続して実施。平成 22 年度は、幌延町の沿岸域を対象として実施した物理探査や浜里地区におけるボーリング調査の結果に基づき、地下水の流動状態や塩分濃度分布に関わる解析技術の検討を実施。 | 塩水と淡水が混在する場における地下水流動や水質形成などに関する調査解析技術の開発を継続して実施。平成 23 年度は、幌延町の沿岸域の海域を対象として実施した物理探査（海域電磁探査）の結果に基づき、浅海域の地下水の塩分濃度分布に関わる解析技術の検討を継続。 | 平成 24 年度は、幌延町の沿岸域に位置する浜里地区の既存ボーリング孔（DD-1 孔：孔長約 1,000m）を約 1,200m まで掘削し、水理試験や地下水分析などを行い、地下水流動や地下水年代を調査。<br>ボーリング孔を利用した塩水と淡水が混在する場における地下水流動や水質形成などに関する調査解析技術の開発は、平成 24 年度で終了。 | 左記の取り纏め |

表 2.4.4-10　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](5/6)

| 計測内容 | 本検討に関連する内容（計測機器及びその適用性） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 平成２２年度 | 平成２３年度 | 平成２４年度 | 平成２５年度 |
| 低アルカリ性コンクリート材料の原位置施工試験の実施及び周辺岩盤などへの影響調査 | 平成 21 年度に HFSC（低アルカリ性セメント）を用いた吹付けコンクリートで施工した 140m 調査坑道からコンクリート及び岩石のコアを採取し、分析を実施し、これまでに実施された地質調査やボーリング調査から得られたデータと整合的であり、コンクリート打設後数ヶ月では周辺岩盤の変質は生じていないことを確認。今後 10 年程度に渡って分析を継続し、周辺岩盤の変質などについてのデータを取得する計画。<br>また、140m 調査坑道に平成 21 年度に設置した採水装置から、坑道近傍の地下水を採取し分析。今回の測定結果からは、坑道近傍の地下水水質は吹付けコンクリートからの距離にほとんど依存せず、HDB-6 孔などから得られている既往の分析結果と整合的であり、地下水についても変質していないことを確認 | HFSC を用いた吹付けコンクリートが、坑道周辺の岩盤及び地下水に与える影響を調査するため、140m 調査坑道の坑道壁面から、施工後約 21 ヵ月を経過した平成 22 年 3 月に、コンクリート及び岩石のコアを採取し分析を実施。その結果、坑道周辺の岩盤中の鉱物にはほとんど変化ないことを確認。<br>一方、HFSC を用いた吹付けコンクリートは、平成 22 年度に実施した試験結果（施工後約 3 ヵ月）よりも約 10 倍水を通しにくくなっていることが判明。<br>また、140m 調査坑道に平成 21 年度に設置した採水装置から、坑道付近の地下水を採取して分析。この測定結果からは、施工後約 21 ヵ月では、坑道付近の地下水の水質は吹付けコンクリートからの距離に関わらず、ほとんど影響を受けていない。 | 平成 24 年度は、350m 調査坑道の一部に低アルカリ性セメントをグラウト材料に使用した湧水抑制対策を実施するとともに、低アルカリ性セメントを 350m 調査坑道の支保工に吹付けコンクリートとして使用し、施工性の確認を実施。<br>今後は、施工箇所周辺の岩盤や地下水への影響について継続的に調査。<br>250m 調査坑道で施工試験を実施した約 6 ヶ月後に、坑道壁面から、コンクリート及び岩石のコアを採取し、分析を実施しました。岩石の分析結果は、これまでに地上から実施したボーリング調査や 140m 調査坑道で採取・分析した結果と同等であり、コンクリートの影響を受ける前の初期値を取得。また、高アルカリ性の原因となるカルシウム、カリウム及びナトリウムの濃度が低く、未だコンクリート材料による影響を受けていないと推察。 | 平成 25 年度は、350m 調査坑道の西連絡坑道の一部及び試験坑道 2、3、4 の施工に低アルカリ性の吹付けコンクリートを使用するとともに、平成 24 年度に施工した低アルカリ性のグラウト材料の影響評価として、グラウト改良範囲における岩盤の透水性を確認。今後も定期的に透水試験を実施し、低アルカリ性セメントを用いたグラウト施工による湧水抑制効果の経時的な変化を観測する計画。 |
| 地下水中における放射性核種挙動の予測技術構築 | － | 天然に存在する微量元素のうち放射性核種と似た挙動をすると考えられている元素（アナログ元素）の挙動を把握するための試験を実施。<br>平成 23 年度は、地下水中での元素の状態を調べるために、地下水の状態を変化させずにろ過することを試み、地下水を空気に触れないように保持した状態で、通過できる粒子のサイズを変えた数種類のろ紙を用いてろ過できた。また、各ろ液の分析結果では、主要成分（mg/L 程度の濃度をもつ元素）に違いがないことを確認 | 記載なし | 記載なし |
| 坑道周辺岩盤の割れ目を対象とした物質の移動特性に関する調査を行うための技術開発 | － | 亀裂性堆積岩・塩水系地下水・遊離ガス発生の環境におけるトレーサ試験に適用可能な試験装置及び試験手法を検討し、その適用性を確認するために 250m 調査坑道において試験を実施。<br>さらに、開発した試験装置と試験手法の適用性を確認するために、250m 調査坑道において物質移行試験（孔間トレーサー試験）を実施し、試験装置が有効に機能することを実証 | 平成 23 年度までに実施した原位置トレーサ試験の結果に基づき、トレーサ濃度の計測装置における光ファイバー部の破断防止及び濃度計測部の防水を課題として抽出し、必要な改良を実施し、さらに水圧のかかった状態で電気伝導度や水温などの物理化学パラメータを連続的に取得できる機能を新たに組み込み。<br>装置の改良後に動作確認及び改良効果の確認のため、ウラニンを使った原位置トレーサ試験を実施しました。その結果、平成 23 年度までに認められたトレーサ濃度の計測不良及び計測ノイズが改善・低減され、より正確に岩盤内の自然状態を示す物理化学パラメータを取得 | 平成 25 年度は、健岩部での拡散現象を対象とした原位置試験装置の製作を実施した。試験孔内の圧力やトレーサ濃度を管理しやすい様に循環システムを構築し、孔内試験区間内のデッドボリュームの低減や多数の地下水試料採取を可能とするために試験区間長の最短化やバッファタンクの追加を実施。 |

表 2.4.4-11　本検討に関連する幌延深地層研究計画に関する第２段階（平成２２～２６年度）の調査研究内容（JAEA, 2011,2012,2013,2014）[35]~[39](6/6)

| 計測内容 | 本検討に関連する内容（計測機器及びその適用性） | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 平成２２年度 | 平成２３年度 | 平成２４年度 | 平成２５年度 |
| 無線モニタリング装置の適用性確認 | ― | ― | ― | 本研究は、無線計測技術を人工バリア性能確認試験に適用し、従来の有線の計測器から得られるデータと比較評価を行い、無線計測技術の適用性を検証することを目的に、地中無線計測技術に係わる研究を実施。平成 25 年度は、地下施設の坑道から地上へデータを送るための中継技術の確認試験を実施した結果、140m 調査坑道において良好にデータを受信することができ、さらに地上にポータブル受信機を移設して確認したところ、地上でもデータを受信（第 2 回目受信）ができた。 |
| オーバーパックの溶接部腐食及び緩衝材のパイピング／エロージョン現象に関する研究 | ― | ― | ― | 室内試験で観察された定置後に孔内からの湧水により緩衝材が削られて流出する現象（パイピング／エロージョン）を実際の地下環境において調査することを目的に開始。350m 調査坑道（試験坑道 5）での原位置試験を計画し、平成 25 年度は試験に使用する試験孔を掘削し、掘削後に、掘削した試験孔の孔壁の状態や湧水量など、試験条件を設定するために必要な基礎的なデータを取得。 |

b. フィンランド Posiva による ONKALO での操業前モニタリング計画（Posiva, 2012）

フィンランド Posiva による ONKALO での操業前モニタリング計画（Posiva, 2012）[28]より、ニアフィールドパラメータのモニタリング内容について調査した。Posiva（2012）では、別途検討された FEP に基づき、サイト及び処分場性能の観点からその影響の程度を検討し、パラメータの抽出が行われている。さらに、パラメータ分類（岩盤力学、水理、地下水化学、地表環境、サイトへの外来物質、人工バリアシステム）ごとにモニタリング計画が示されている。このうち、岩盤力学、水理、地下水化学、サイトへの外来物質について表 2.4.4-12～表 2.4.4-15 に示す。人工バリアシステムについては表 2.4.3-1 に示した。

Posiva（2012）では人工バリアシステムの計画を除き、計測方式も示されているが、分野に応じて、非常に現実的な内容である。

- 岩盤力学パラメータについては、一般的な計測技術（例えば変位計や観察）が使用されている。また、ほとんどのパラメータに関して操業中も計測が継続される予定である。
- 水理パラメータについては、基本的に試錐孔を利用したサンプリングであり、最短で１時間に１回、最長で２年に１階程度の間欠計測が行われる（自動であるが、連続計測は計画されていない）。また、ほとんどのパラメータに関して操業中も計測が継続される予定であるが、特に長期安全性の観点では、塩水分布の変化と地下水位、地下水頭に注目するとしている。
- 地下水化学パラメータについては、水理パラメータと同様に調査孔を利用したサンプリングによる計測・分析が間欠で行われる予定であり、例えば化学センサによる連続計測は計画されていない。また、ほとんどのパラメータに関して操業中も計測が継続される予定であるが、特に長期安全性の観点では、塩水分布の変化に注目するとしている。
- セメントなどの搬入材に関するモニタリングは、搬入材の量の把握、集水域での pH 及び Eh 計測、及び地下水サンプリングであり、操業中も計測が継続される予定である。
- 人工バリアシステムに関するモニタリングの詳細については、Posiva（2012）の時点では検討中であり、さらに実廃棄体での計測についても今後検討するとしている。

表 2.4.4-12　Posiva（2012）[28]における岩盤力学モニタリングの対象

| プロセス | 対象/方法 | 場所 |
|---|---|---|
| 応力再分配 | 伸縮計による測定 | ONKALO |
| | 収束測定 | |
| | 目視検査 | |
| 既存の亀裂帯の再活性化、新たな亀裂の形成 | 微小地震の活動 | オルキルオト、ONKALO |
| | 亀裂帯の収束の測定 | ONKALO |
| | 亀裂のひび割れまたはジョイントメーター測定 | |
| | 目視検査 | |
| 岩石クリープ | 伸縮計による測定 | |
| | 収束測定 | |
| | 目視検査 | |
| | 岩石ボルトの負荷 | |
| スポーリング | 目視検査 | |
| | 微小地震のモニタリング | |
| 熱変遷 | 岩石温度の測定 | オルキルオトの基盤岩の原位置測定 |
| | | ONKALO 地表 |
| 地殻均衡隆起/基盤岩の安定性 | 高精度水準測量 | ONKALO/VLJ ループとオルキルオト海峡 |
| | | オルキルオトの GPS ネットワーク |
| | | 広域：オルキルオト-Lapijoki |
| 基盤岩の造構運動 | GPS 測定 | オルキルオト、9 か所の自動化観測設備 |
| | | オルキルオト、9 か所の手動観測設備 |
| | EDM ベースライン測定 | オルキルオト |
| | 制御マーカーの測定 | |
| 地震活動 | 微小地震のモニタリング | オルキルオト、ONKALO |

表 2.4.4-13　Posiva（2012）[28]における水理学モニタリングの対象

| プロセス | 対象/方法 | 場所 |
|---|---|---|
| 地下水面の変遷 | 地下水面の位置 | 観察管、手動及び自動 |
| | | 基盤岩の浅い孔、手動及び自動 |
| 地下水の流動の変化 | 開いたボーリング孔での流動条件 | |
| | ボーリング孔での横方向の流動 | |
| 母岩と表土の水理特性の変遷 | 透水係数/透水量係数<br>圧力への応答（水頭参照） | 観察管におけるスラグ試験 |
| | | 深層ボーリング孔におけるHTU試験 |
| | | ボーリング孔におけるPFL |
| 水頭の変遷 | 水頭 | パッカーが適用されたボーリング孔 |
| | | 地下深部の基盤岩の開いたボーリング孔 |
| 坑道への流入 | 坑道への流入 | |
| | 量水堰への流入量 | 手動 |
| | | 自動 |
| | 量水堰への流入量 | |
| | 立坑への漏出 | |
| | 漏出の目視マッピング | |
| | 空気の流れと湿度 | |
| | 使用される産業用水の量 | |
| 地下水の塩分濃度の分布の変遷 | ボーリング孔の水のEC | |
| | 地下水サンプルの塩分濃度 | |
| Korvensuo貯水池の影響 | Korvensuo貯水池の水位 | |
| | 堰堤浸透管内の地下水面 | |
| | 堰堤浸透管内の透水係数 | |
| 地表の水理学的状況の擾乱 | 海の水位 | |
| | 流出水 | 自動 |
| | 降雨量 | |
| | 積雪量及び水の含有量 | |
| | 浸潤 | |
| | 地盤の凍結 | |

表 2.4.4-14　Posiva（2012）[28]における地下水化学モニタリングの対象

| プロセス | 対象/方法 | 場所 |
|---|---|---|
| 浅層地下水の地下水特性と塩分濃度の分布の変遷 | 地下水のサンプリング:化学的性質 | OL-PVP、OL-PP、OL-PR、OL-EP |
| 深層地下水の地下水特性と塩分濃度の分布の変遷 | 地下水のサンプリング：化学的性質 | OL-KR 、 ONK-PVA 、ONK-KR、ONK-PP |
| | オンライン測定（pH、EC、O2、$E_h$ 及び T） | OL-KR、ONK-PVA、ONK-KR |
| | 微生物と気体のサンプリング | ONK-PVA、ONK-KR |
| Korvensuo 貯水池の影響 | 安定同位体のサンプリング（$\delta^2H$ 及び $\delta^{18}O$） | 浅層ボーリング孔<br>深層ボーリング孔 |
| 外来物質の影響 | 定義されたパラメータのサンプリング（セクション 6.3.4） | ONK-POOL 、 OL-DI1 、ONK-PVA、ONK、KR<br>ONK-PP 、 ONK-RV 、ONK-KOU |
| ONKALO 坑道への流入 | 定義されたパラメータのサンプリング（セクション 6.3.4） | ONK-MPL（EC 及び pH） |
| | 化学分析 | ONK-MPL 、 ONK-RV 、ONK-KOU |
| ONKALO のプロセス水 | ナトリウム・フルオレセイン、EC 及び pH の測定 | ONK-POOL 及び OL-DI1<br>出口水路の入口、放出管の下流（pH のみを測定） |
| | 化学サンプリング | ONK-POOL 及び OL-DI1 |
| 廃石からの浸出 | 化学サンプリング | OL-DI14 及び OL-EP5 |

表 2.4.4-15　Posiva（2012）[28]における外来物質モニタリングの対象

| プロセス | 対象/方法 | 場所 |
|---|---|---|
| 外来物質の使用 | 量 | |
| プロセス水における外来物質の影響 | EC及びpHのモニタリング | 沈殿プール |
| | | 排出管 |
| | 地下水サンプリング | 沈殿プール |
| | | 排出管 |
| 地下水における外来物質の影響 | 地下水サンプリング | ONKALOの漏出を伴う構造物及び亀裂 |

c. スウェーデン SKB の事例

スウェーデン SKB では、地層処分に関わるモニタリング計画を 2004 年に公表している（SKB, 2004）[32]。SKB(2004)では、下記の内容が示されている。

① 国際機関と各国のモニタリング検討の状況
② スウェーデンの廃棄物管理計画の概要
③ SKB によるモニタリング方策
④ SKB の実施しているサイト調査手法のモニタリングへの適用

上記のうち、③では、モニタリングの目的やモニタリング項目の選定の考え方が示されているが、基本的には、フィンランドと同様、FEP を念頭にモニタリングすべき内容を特定し、表 2.4.4-16　SKB によるモニタリングカテゴリ（SKB, 2004）に示すカテゴリのモニタリングが特定されている。

表 2.4.4-16　SKB によるモニタリングカテゴリ（SKB, 2004）[32]

| Issue | Planned duration | Frequency |
|---|---|---|
| **Man-made inpact** | | |
| Industries, type&location | Not decided | Annually |
| **Geology** | | |
| Seismic network | Not decided | Event-triggering on line |
| **Hydrogeology** | | |
| Groundwater pressure in cored boreholes | Entire site investigation phase | User defined event-logging (down to once every two second) for changes > 2 kPa, or every hour, if less change is detected |
| **Hydrogeochemistry** | | |
| Sampling of core boreholes, Class 3 and Class 5 Surface water | Entire site investigation phase | Semi-annually |
| **Occuaptional safety and environmental impact** | | |
| Groundwater levels, pH, water temperature, etc during core drilling | Until groundwater levels is restored | 24 h |

また、本検討に関連するカテゴリについて、初期に取得すべきパラメータは表 2.4.4-17 及び表 2.4.4-18 とされている。

一方、モニタリング機器に関しては、サイト特性調査プログラムで使用した機器を参考に設計等を行うことが示されているが、具体的な設置等に関しての記載はない。

表 2.4.4-17　SKB(2004)による初期モニタリングで取得すべきパラメータ(1/2)

| カテゴリ | プロセス／特性 | パラメータ | | 役割 a) | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| 岩盤力学 | 岩盤応力 | 原位置応力場の大きさ、方向 | | R1 | 応力変化モニタリングは岩盤支持性、熱負荷評価等にも利用可能 |
| | 伝播速度 | 圧力及び剪断波 | | R1 | 応力変化あるいは飽和度変化に関する指標（波圧） |
| 水理 | 地下水圧 | 地下水面 | | R1/R2/R3 | |
| | | 母岩内での浸透 | | | |
| | | 地下水密度（塩分）分布 | | | |
| | | 深部試錐孔内の（絶対）圧力 | | | |
| | | 深部試錐孔内の地下水温度 | | | |
| | | 隆起量 | | | |
| | | 海水準変動 | | | |
| | | 地球潮汐 | | | |
| | | 大気圧 | | | |
| | 地下水流動 | 試錐孔内の流量 | | R1 | |
| 地下水化学 | コア掘削された試錐孔内（深度200m以上）及び浅いパーカッション試錐孔内(深度0～200m)での化学及び微生物成分 | 利用（目的）により分類 | | | プロセス理解の基礎 |
| | | 使用済燃料関連 | pH, Eh, $Fe^{2+}$, $HS^-$ | R1 | |
| | | 銅製キャニスタ関連 | pH, Eh, $Fe^{2+}$, $HS^-$, $Cl^-$, $NO_2^-$, $NO_3^-$, $NH_4^+$ | R1 | |
| | | 緩衝材関連 | pH, $K^+$, $Na^+$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, TDS | R1 | TDS：全溶存固体 |
| | | 核種保持関連 | pH, Eh, $Fe^{2+}$, $HS^-$, $HCO_3^-$, $Cl^-$, $Na^+$, $Ca^{2+}$, HA/FA, 溶存ガス状 $N_2$, $H_2$, $CO_2$, $CH_4$, He, Ar, コロイド、バクテリア | R1 | |
| | | 地球化学的特性把握 | 電気伝導度 | R1 | |
| | | | pH, Eh | R1 | |
| | | | 主要構成要素（Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Li, Sr, Si, $HCO_3$, $SO_4$, Cl）、ウラニン（あるいは掘削水の標識に利用したトレーサ） | R1 | |
| | | | 微量元素（Fe, Mn, U, Th, Ra, Si, Al, Li, Cs, Ba, HS, I, Br, F, $PO_4$, $NO_2$, $NO_3$ 及び／又は $NO_2$+$NO_4$, DOC） | R1 | DOC：溶存有機炭素 |
| | | | 溶存ガス（$N_2$, $H_2$, $CO_2$, $CH_4$, Ar, He） | R1 | |

注記　SKB（2004）に基づく。
注記 a)　「役割(Ratiolane)」の数字は、1.工学技術、安全及び性能評価への入力、2.環境影響、3.ベースライン条件に対する外部影響、局所的影響を意味する。

表 2.4.4-18　SKB(2004)による初期モニタリングで取得すべきパラメータ(2/2)

| カテゴリ | プロセス／特性 | パラメータ | | 役割 a) | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| 地下水化学 | コア掘削された試錐孔内(深度200m以上)及び浅いパーカッション試錐孔内(深度0～200m)での化学及び微生物成分 | | 安定同位体（地下水中の O-18, H-2, H-3, DIC 及び DOC 中の C-13, $SO_4$ 中の S-34, O-18, HS, Sr-87/Sr-86, He-3, He-4） | R1 | DIC：溶存無機炭素 |
| | | | 放射性同位体（H-3, DIC 及び DOC 中の C-14, U-234/U-238, Cl-36） | R1 | |
| | | | バクテリア | R1 | |
| | | | 鉱物：可溶性、当該エリアでの現象を示す反応 | R1 | |
| | | | 酸化した保存試料及び保存処理されない凍結試料 | R1, R3 | |
| | | 同位体 σS-34（$SO_4$ 中），σCl-37, σSr-87, σB-10 | | R1 | オプション |
| | | C-14 pmc (Percent modern carbon：バイオマス起源炭素の寄与割合), σC-13 | | R1 | |
| | | Ra-226, Ra-228, Rn-222 | | R1 | |
| | | U 及び Th 同位体 | | R1 | |
| | | 微量金属 | | R1 | |
| | | 溶存ガス（σO-18, σC-13, He-3/He-4 を含む） | | R1 | |
| | | バクテリア | | R1 | |
| | | コロイド | | R1 | |
| | | 腐植土及びフルボ酸 | | R1 | |
| | | オンラインでの pH 及び Eh 測定 | | R1, R3 | |
| | 井戸内での化学及び微生物成分 | 電気伝導度、pH, Cl, $HCO_3$, $SO_4$, Br, ウラニン（または掘削水の標識に利用したトレーサ）、温度、陽イオン（Na, K, Ca, Mg, Li, Sr, Si）、$SO_4$ | | R1 | |
| | | 保存凍結試料 | | R1 | オプション |
| | | σH-2, σH-3, σO-18 | | R1 | |
| | | σS-34（$SO_4$ 中），σCl-37, σSr-87, σB-10 | | R1 | |
| | | C-14pmc(Percent modern carbon：バイオマス起源炭素の寄与割合), σC-13 | | R1 | |

注記　SKB（2004）に基づく。
注記 a)　「役割(Ratiolane)」の数字は、1.工学技術、安全及び性能評価への入力、2.環境影響、3.ベース

ライン条件に対する外部影響、局所的影響を意味する。

4) ニアフィールドでのモニタリングパラメータの抽出

ここでは、2)で FEP 内容より抽出したニアフィールドパラメータに関し、次のようにニアフィールドでのモニタリングパラメータの絞込みを行った。

a) FEP 内容より抽出したニアフィールドパラメータに関して、MoDeRn による技術報告書（MoDeRn, 2013）[33]に記載の計測方式及び処分事業での適用実績の有無を調査・整理した。

b) 次に、上記の結果、3)の国内外の地下研究施設での事例等から、各パラメータの計測可能性について、アクセス可能性を踏まえた計測方法（センサ類による直接計測／物理探査手法等による間接的な計測／サンプリングによる分析）の観点で検討整理した。

c) さらに、現状技術では計測が困難または課題を有する場合には、代替方法について記した。

この結果を表 2.4.4-19～表 2.4.4-22 に示す。

① 計測場所へのアクセスが可能な段階（処分孔または処分坑道埋戻し前）では、多くのパラメータの直接計測が可能である。しかし、一部のパラメータ（例えば、地下水化学や有機物）については、センサ技術による直接計測の適用事例は少なく、国内外の調査結果では、一般的にサンプリング手法によっている。

② 一方、処分孔または処分坑道が埋戻された後、アクセスが困難となると、ほとんどのパラメータの計測は困難となる（特に化学パラメータ）。また、本検討では、水理パラメータについて、処分坑道内の調査孔による計測を仮定したが、国内外調査結果では、これらのパラメータや化学成分などは、坑道周辺からの MP（マルチパッカ）システムやサンプリングによって、間接的なモニタリングが行われる予定であり、この計測方法であれば、処分坑道が埋戻された後でも継続的に計測が可能である（ただし、パラメータによって、要求されるスケールでの把握は困難となる）。

この結果、アクセス性に拘わらず、現状技術では、センサ類での直接計測に克服すべき課題があると考えられたニアフィールドでのモニタリングパラメータは、次の通りとなった。

- 水素ガス濃度
- 地下水組成
- 地下水中のコロイド
- 地下水中の塩分濃度
- 地下水中の微生物
- 地下水中の有機物量

- 有機物分解生成ガス

表 2.4.4-19　人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）の計測可能性(1/4)

| 記号 | モニタリングパラメータ | MoDeRn(2013a)で取り上げられている計測機器情報 | | 計測可能性 | | アクセス困難な段階で計測困難な場合の代替手法 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 測定方式 | 適用実績 | アクセス容易(処分坑道埋戻し前) | アクセス困難(処分坑道埋戻し後) | |
| T-01 | 温度 | 熱電対式 | 有 | センサ類により直接計測可能（坑道内／坑道壁面） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | 測温抵抗体式 | － | | | |
| | | サーミスタ式 | － | | | |
| | | 光ファイバ式 | 有 | | | |
| T-03 | 温度(岩盤) | T-01 の機器と同様 | | センサ類により直接計測可能（坑道内／坑道壁面） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| T-04 | 温度(プラグ／グラウト／支保／埋め戻し材) | T-01 の機器と同様 | | センサ類により直接計測可能（坑道と部材の隙間） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| T-05 | 温度(地下水) | T-01 の機器と同様 | | センサ類により直接計測可能（坑道内側溝） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |

表 2.4.4-20　人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）の計測可能性(2/4)

| 記号 | モニタリング パラメータ | | MoDeRn(2013a)で取り上げられている計測機器情報 | | 計測可能性 | | アクセス困難な段階で計測困難な場合の代替手法 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 測定方式 | 適用実績 | アクセス容易（処分坑道埋戻し前） | アクセス困難（処分坑道埋戻し後） | |
| H-01 | 水分量(岩盤内飽和度) | 主要坑道 | 物理探査手法 | 有 | 物理探査手法により計測可能 | ⇒ | ― |
| | | | 検層類 | 有 | 坑道壁ボーリングより計測可能 | ⇒ | ― |
| | | 処分坑道 | 物理探査手法 | 有 | 物理探査手法により計測可能 | 直接計測困難 | 主要坑道からの計測 |
| | | | 検層類 | 有 | 坑道壁ボーリングより計測可能 | 計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| H-02 | 湧水量 | 処分坑道 | 誘電法 TDR,FDR 等 | 有 | センサ類による直接計測可能（側溝） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | 張力式 | 有 | | | |
| | | | 圧電式 | 有 | | | |
| | | | 光ファイバ式 | 有 | | | |
| | | 処分孔 | 主要坑道の機器と同様 | | センサ類による直接計測可能（処分孔壁） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| H-03 | 地下水圧 | | ピエゾ抵抗式 | 有 | 処分坑道壁ボーリングより計測可能 | 計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | ひずみゲージ式 | 有 | | | |
| | | | 差動トランス式 | 有 | | | |
| | | | 振動弦式 | 有 | | | |
| H-04 | 地下水流動 | | 流量計 | 有 | 処分坑道壁ボーリングより計測可能 | 計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | トレーサ希釈 | 有 | | | |
| | | | 音響流量計 | 有 | | | |
| | | | 電磁流量計 | 有 | | | |
| | | | 熱流量計 | 有 | | | |
| | | | 熱崩壊ログ | 有 | | | |
| H-05 | 透水係数 | | 弾性波探査（MS） | 有 | 物理探査手法により計測可能 | 計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |

表 2.4.4-21　人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）の計測可能性(3/4)

| 記号 | モニタリングパラメータ | | MoDeRn(2013a)で取り上げられている計測機器情報 | | 計測可能性 | | アクセス困難な段階で計測困難な場合の代替手法 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 測定方式 | 適用実績 | アクセス容易（処分坑道埋戻し前） | アクセス困難（処分坑道埋戻し後） | |
| M-01 | 岩盤応力 | | ひずみゲージ式 | 有 | センサ類による直接計測可能（側溝） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | 圧電式 | 有 | | | |
| | | | 静電容量式 | 有 | | | |
| | | | 振動弦式 | 有 | | | |
| | | | 光ファイバ式 | － | | | |
| M-02 | 岩盤強度 | | 弾性波探査（MS） | 有 | 物理探査手法により計測可能 | 計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| M-03 | 岩盤の変形 | | 静電容量式 | 有 | センサ類による直接計測可能（側溝） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | 電位差式 | 有 | | | |
| | | | 振動弦式 | 有 | | | |
| | | | 光ファイバ式 | 有 | | | |
| M-04 | 割れ目幅 | 処分孔 | 弾性波探査（MS） | 有 | 物理探査手法により計測可能 | 計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測による把握 |
| | | 処分坑道 | 弾性波探査（MS） | 有 | 物理探査手法／処分坑道壁ボーリングにより計測可能 | 計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | ﾎﾞｱﾎｰﾙﾃﾚﾋﾞｭｰｱ | 有 | | | |
| M-05 | 掘削影響領域の変化 | 処分孔 | 電位差式 | 有 | センサ類による直接計測可能（処分孔壁） | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | 差動トランス式 | 有 | | | |
| | | | 静電容量式 | － | | | |
| | | | 振動弦式 | 有 | | | |
| | | | 光ファイバ式 | 有 | | | |
| | | 処分坑道 | 電位差式 | 有 | センサ類による直接計測可能 | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | 差動トランス式 | 有 | | | |
| | | | 静電容量式 | － | | | |
| | | | 振動弦式 | 有 | | | |
| | | | 光ファイバ式 | 有 | | | |
| M-06 | 岩盤クリープ量 | | 電位差式 | 有 | センサ類による直接計測可能 | センサ類により直接計測可能（処分性能影響対策必要） | 主要坑道からの計測 |
| | | | 差動トランス式 | 有 | | | |
| | | | 静電容量式 | － | | | |
| | | | 振動弦式 | 有 | | | |
| M-07 | 内空変位 | | 内空変位計測システム | 有 | 直接計測可能 | ⇒ | － |

表 2.4.4-22　人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）の計測可能性(4/4)

| 記号 | モニタリング パラメータ | MoDeRn(2013a)で取り上げられている計測機器情報 | | 計測可能性 | | アクセス困難な段階で計測困難な場合の代替手法 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 測定方式 | 適用実績 | アクセス容易(処分坑道埋戻し前) | アクセス困難(処分坑道埋戻し後) | |
| C-01 | 鉱物組成 | 検層類 | （有）a) | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道での計測 |
| C-02 | 水素ガス濃度 | ガスセンサ | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |
| C-03 | 地下水組成(Ca2+) | 光ファイバ式 | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |
| C-05 | 地下水組成(pH、Eh、イオン) | 電極式 | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |
| | | 光ファイバ式 | ― | | | |
| C-06 | 地下水中のコロイド | トレーサ式 | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |
| C-08 | 地下水中の塩分濃度 | 光ファイバ式 | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |
| C-09 | 地下水中の微生物 | ― | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |
| C-10 | 地下水中の有機物量(有機酸) | ― | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |
| C-11 | 地下水中の有機物量(炭酸化) | ― | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |
| C-12 | 有機物分解生成ガス | ガスセンサ | ― | サンプリング分析 | 直接計測困難 | 主要坑道からのサンプリング |

注記 a)　鉱物組成の測定機器として、坑道岩盤壁からのボーリングによるサンプリング実績が示されている。

5)　モニタリングシステムの検討

前項に於いて抽出したニアフィールドパラメータをセンサ類で直接計測する場合のモニタリングシステムについて、地層処分モニタリング技術メニュー（第 5 章参照）を利用して検討した。整理した内容は下記の通りである。

①　関連する FEP

②　ニアフィールドパラメータ名

③　測定方式

④　測定原理

⑤ 測定実績
⑥ 機器仕様
- 測定範囲
- 精度／感度／分解能
- 耐久性（耐熱／耐水／耐圧／耐放射線／その他外乱）
- 寿命及び交換性
- 伝送方法

⑦ モニタリングシステム案の考え方
⑧ モニタリングイメージ
⑨ 課題

なお、表 2.4.4-23～表 2.4.4-45 において、アクセス可能な段階においても、現状で適用可能な計測機器がなく、サンプリング計測を実施するとした項目に関してはここでは取り上げないこととした。

表 2.4.4-23　モニタリングシステムの検討結果（1/23）

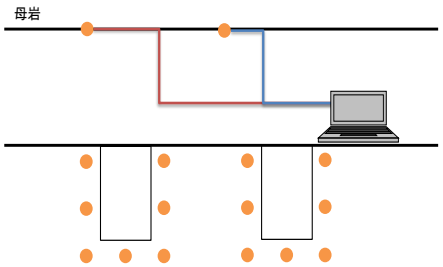
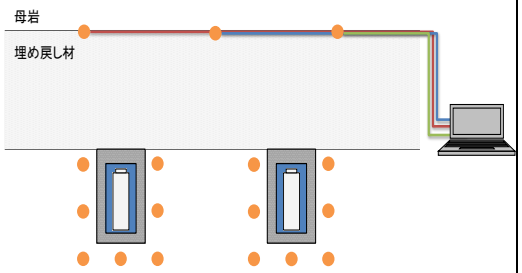
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>T-01～T-05</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">温度</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">熱電対式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">一端が接合された 2 種類の異なる金属線で構成され、接合部の温度が変化すると他の両端間の起電力が変化する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">スウェーデンの SKB がエスポ岩盤研究所で 1800W の模擬廃棄体を用いて実施している実規模人工バリア性能確認試験(センサは 2001 年及び 2002 年に設置)において、使用されている。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">-270℃ - 2300℃</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">1.5℃又は 0.75℃(400℃まで)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>-200℃ - 1200℃</td><td>注水試験では計測可能</td><td>緩衝材膨潤圧程度は計測可能</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">スウェーデンの SKB がエスポ岩盤研究所で 1800W の模擬廃棄体を用いて実施している実規模人工バリア性能確認試験(センサは 2001 年及び 2002 年に設置)において、使用されている。</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内／坑道壁面／坑道内側溝に設置し、その温度変化を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>適用実績より、機器自体の耐久性等は比較的問題ないレベルであるが、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-24　モニタリングシステムの検討結果（2/23）

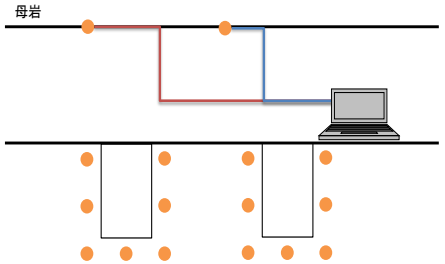
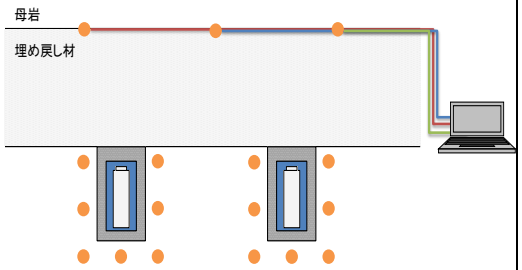
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>T-01～T-05</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">温度</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">測温抵抗体式(RTD)／サーミスタ式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">抵抗温度装置は材料の温度変化による電気抵抗の変化を利用する。主要なタイプとして抵抗温度検出器(測温抵抗体:RTD)及びサーミスタがある。<br>①　RTD は金属の抵抗変化に依拠するものであり、主にプラチナ及びニッケルが用いられる。<br>②　サーミスタはセラミック半導体の抵抗変化に基づくものである。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn レポートに記載されているが適用実績は不明</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">-240℃ - 650℃</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">精度：±0.3K (0℃), ±0.8K(100℃), ±1.55K(250℃)、相対誤差：>0.5%</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内／坑道壁面／坑道内側溝に設置し、その温度変化を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>適用実績より、機器自体の耐久性等は比較的問題ないレベルであるが、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-25　モニタリングシステムの検討結果（3/23）

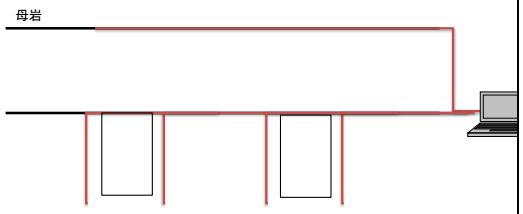
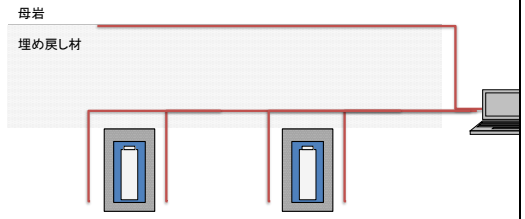
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>T-01～T-05</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">温度</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">光ファイバ式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">光ファイバ式による温度センサは複数の方式がある。<br>・分布型：DTS (Distributed Temperature Sensing)や FTR (Fiber Temperature Laser Rader)<br>・局所多点型：Bragg grating 型光ファイバ式センサやファブリペロ（Fabry-Perot）</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn レポートには、地質及び地層処分場関連のモニタリングに利用されているとしている。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">不明であるが、例えば-200℃-+300℃(DTS)</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">不明であるが、例えば、精度：±0.1℃、分解能：0.25m (DTS)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線（ファイバ自体）</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内／坑道壁面／坑道内側溝に設置し、その温度変化を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>機器自体サイズは、電気式センサより小型であり、配線の影響も少ないものの、具体的な適用事例に基づく耐久性等が不明である。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-26　モニタリングシステムの検討結果（4/23）

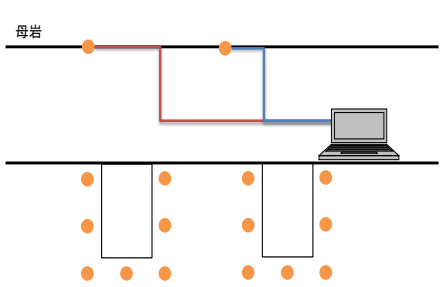
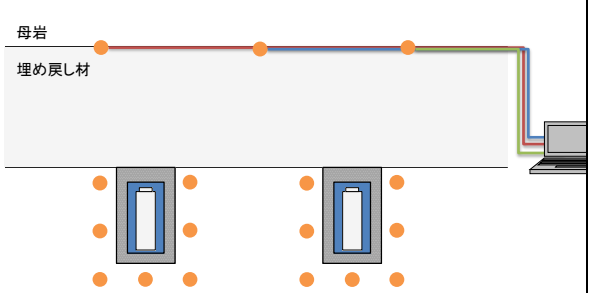
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-01</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">岩盤応力</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">ひずみゲージ式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">水圧が抵抗素子を備えたゲージのひずみを引き起こすことを利用する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn レポートに記載されているが適用実績は不明。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">0.2 - 2.0 MPa（MoDeRn）</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">計器精度:±2 % R.O.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>-30 - 80℃（MoDeRn）</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">—</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道壁面や処分孔周辺に設置し、熱による岩盤応力の変化を計測する</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>一般の地質調査で使用されており機器の性能についての課題は少ないと考えられるが、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-27　モニタリングシステムの検討結果（5/23）

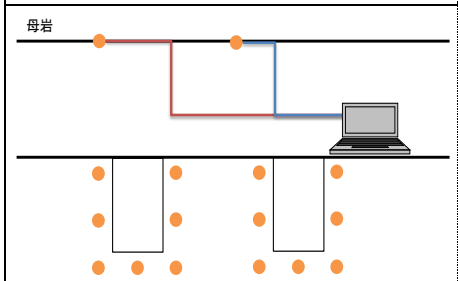
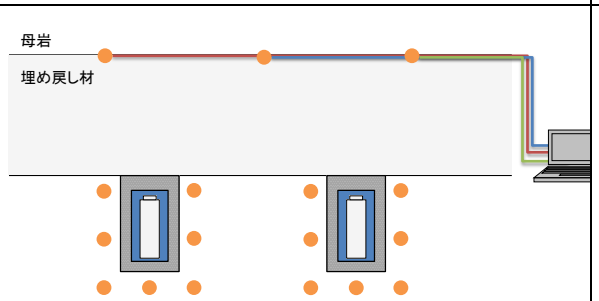
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-01</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">岩盤応力</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">圧電式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">水晶の変形によって発生する電荷を計測するものである。電荷の発生量は、水晶の変形を引き起こす力に比例する(圧電効果)</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn レポートに記載されているが処分分野での適用実績は不明。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">—</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">精度：0.1 % f.s.／感度：-0.02 - -0.05 % f.e. per℃(200℃以下)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>500℃</td><td>—</td><td>40,000 bar</td><td>—</td><td>ヒステリシスなし</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">—</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道壁面や処分孔周辺に設置し、岩盤応力の変化を計測する</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td>坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td colspan="2">本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2">一般の地質調査で使用されており機器の性能についての課題は少ないと考えられるが、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-28　モニタリングシステムの検討結果（6/23）

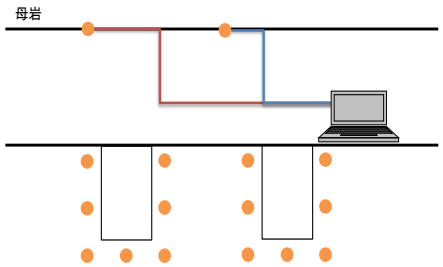
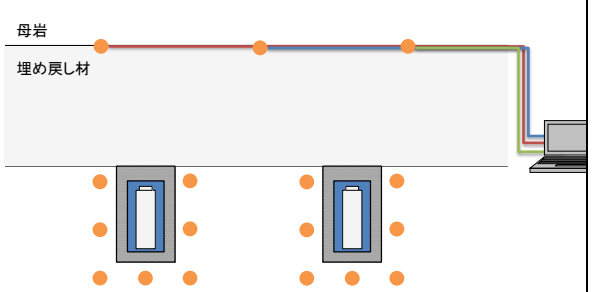
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-01、03、05、06</td><td>ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="3">岩盤応力、岩盤の変形、掘削影響領域の変化、岩盤クリープ量</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">静電容量式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">静電容量センサは､検出ダイヤフラムに加わる圧力によって2つの蓄電板の1つが動く際の蓄電板間の静電容量(キャパシタンス)の変化を計測するものである。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn レポートに記載されているが適用実績は不明</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">感度:0.1 % f.s.</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">不明</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>－</td><td>－</td><td>－</td><td>－</td><td>－</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">－</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道壁面や処分孔周辺に設置し、岩盤特性の変化を計測する</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>適用実績不明であるが、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-29　モニタリングシステムの検討結果（7/23）

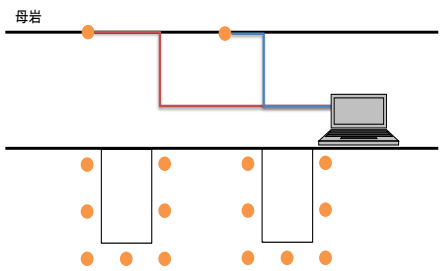
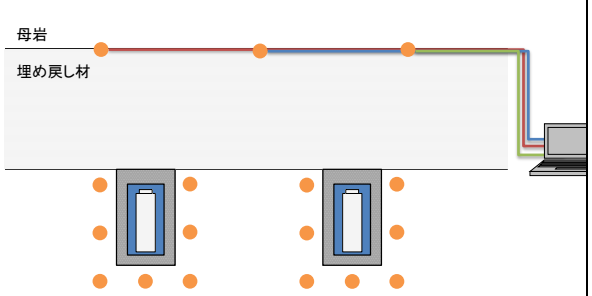
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-01、03、05、06</td><td>ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">岩盤応力、岩盤の変形、掘削影響領域の変化、岩盤クリープ量</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="4">振動弦式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="4">ワイヤが固定されたダイヤフラムに加わる圧力等により、ワイヤの張力が変化する際の、ワイヤの自然振動数の変化を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="4">岩盤応力：MoDeRn レポートに記載されているが処分分野での適用実績は不明。<br>岩盤の変形：Olkiluoto VLJ 処分場及び Loviisa VLJ 処分場で使用</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="4">―</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="4">岩盤応力：感度:0.2 % f.s. ; 岩盤の変形：計器精度:0.05 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="4">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="4">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="4">坑道壁面や処分孔周辺に設置し、岩盤特性の変化を計測する</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td>坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>一般の地質調査で使用されており機器の性能についての課題は少ないと考えられるが、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-30　モニタリングシステムの検討結果（8/23）

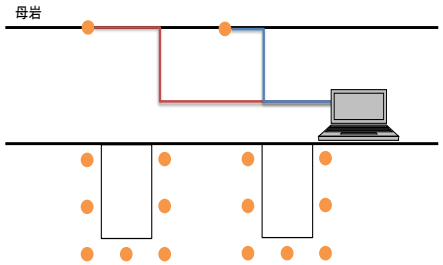
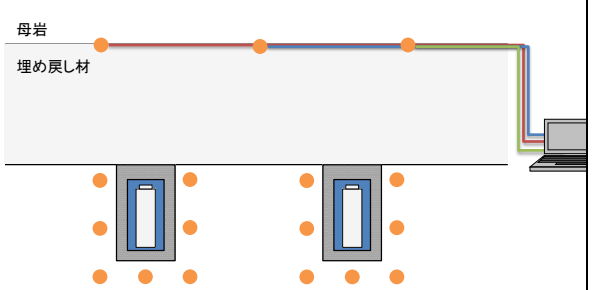
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-01、03、05、06</td><td>ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="3">岩盤応力、岩盤の変形、掘削影響領域の変化、岩盤クリープ量</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">光ファイバ式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">LED から放出される赤外線が不透明板によって部分的にブロックされる際の赤外線の擾乱を計測用ダイオードで計測するものである。不透明板は、検出ダイヤフラムに加わる圧力によって変位する際に光をブロックする。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn レポートに記載はあるが、適用実績の記載はない。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">感度:0.5 % f.s.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線（ファイバ）</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道壁面や処分孔周辺に設置し、岩盤特性の変化を計測する</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>機器の性能については不明である。また、ファイバ自体は配線としての利用であるため、センササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-31　モニタリングシステムの検討結果（9/23）

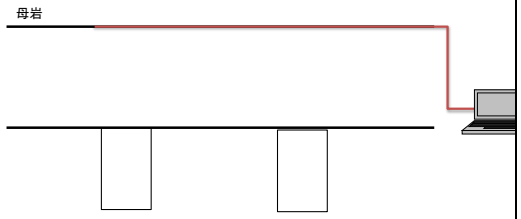
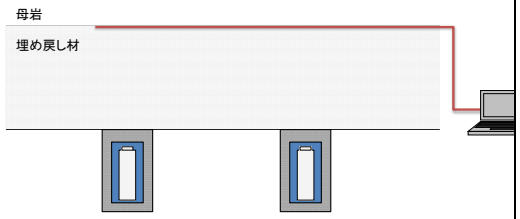
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-02、04</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">岩盤強度、割れ目幅</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">弾性波探査（MS）</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">MS のモニタリングは、一般に、誘導(人工)地震のモニタリングのためのものである。明確な根拠があるわけではないが、一般に、振動数が 100 Hz 以下の場合は MS と称されている。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">カナダでは、地下構造物の長期安定性の判断に MS モニタリングが使用された。（MoDeRn）</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">検知ケーブルが必要</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">母岩に設置し、岩盤強度や割れ目幅など、岩盤特性の変化を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>計測機器自体は、一般土木で利用されているが、検知ケーブルを敷設する必要があり、埋戻し後は、配線等による処分性能への影響を事前に確認しておく必要がある。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-32　モニタリングシステムの検討結果（10/23）

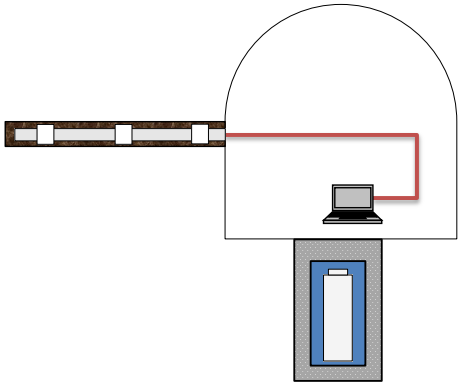
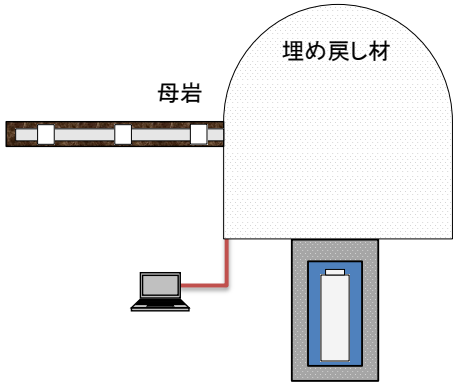
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-04</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">割れ目幅</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">ボアホール･テレビューアー</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">一般土木／幌延地下研究施設で使用</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td colspan="2">その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td colspan="2">―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">不明であるが、アクセス可能であれば交換可能</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">ボアホールでの計測</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内からボアホールを設置し、ボアホール内の断層や割れ目幅の変化を観察する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道埋戻し前</td><td colspan="2">坑道埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> 
</td><td>一般の地質調査で使用されており機器の性能については課題はないと考えられるが、坑道内からボアホールを設置する場合、カメラを埋殺しすることになり、定期的に観察を行うとしても耐久性に課題があると考えられる。また、坑道内からボアホールを設置する場合には、埋戻し後の処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-33　モニタリングシステムの検討結果（11/23）

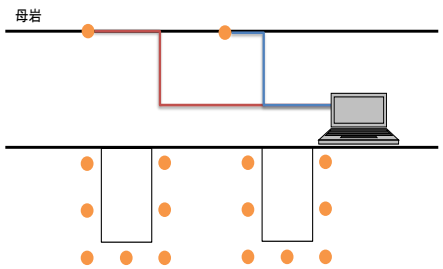
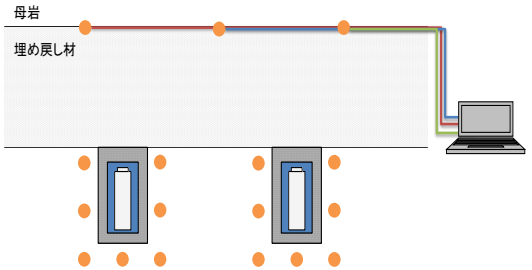
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-03、05、06</td><td>ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="3">岩盤の変形、掘削影響領域の変化、岩盤クリープ量</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">電位差式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">モニタされる可動部に機械的に取り付けられる滑り接触(sliding contact)の変位が回路の抵抗変化をもたらすことに基づく。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">坑道シーリング実験（AECL）やスイスの Grimsel test site (GTS)で実施の FEBEX 原位置試験で使用</td></tr>
<tr><td rowspan="6">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">不明</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">不明</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>100 度程度では問題ない(FEBEX)</td><td>FEBEX 原位置試験では冠水によって 6 個すべて故障</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">FEBEX 試験（Phase2）は 2000 年 9 月から 2004 年 12 月まで実施されたが、故障しているため、寿命等は不明である。</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道壁面や処分孔周辺に設置し、岩盤特性の変化を計測する</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td>坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>適用実績からは、耐水性に課題がある。また、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-34　モニタリングシステムの検討結果（12/23）

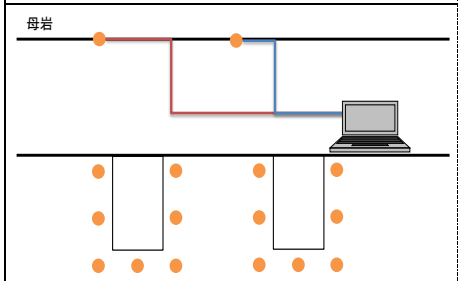
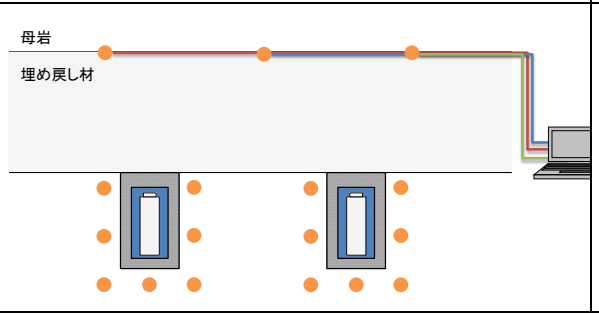
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td colspan="2">M-05、06</td><td>ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">掘削影響領域の変化、岩盤クリープ量</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">差動トランス式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">モニタされる変位を、磁気回路内のコイルを通るフラックスの変化を示す素子に伝達することに基づく。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">LVDT は坑道シーリング実験（AECL）、FEBEX、及び ESDRED などその他のプロジェクトでも使用された。<br>ただし、スイスの Grimsel test site (GTS)で実施の FEBEX 原位置試験では、ベントナイトバリア間の変位を測定する LVDT 式傾斜計(inclinometer)は、冠水によって全て故障した。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">不明</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">不明</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>100 度程度では問題ない(FEBEX)</td><td>FEBEX 原位置試験では冠水によってすべて故障</td><td>－</td><td>－</td><td>－</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">FEBEX 試験（Phase2）は 2000 年 9 月から 2004 年 12 月まで実施されたが、故障しているため、寿命等は不明である。</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道壁面や処分孔周辺に設置し、岩盤特性の変化を計測する</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>適用実績からは、耐水性に課題がある。また、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-35　モニタリングシステムの検討結果（13/23）

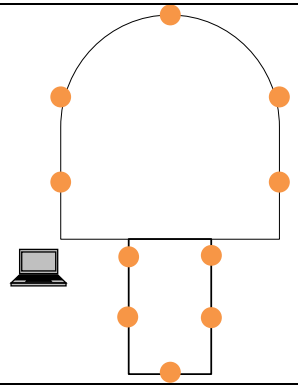
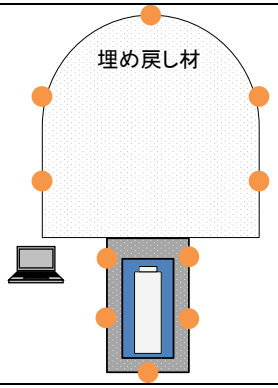
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>M-07</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">内空変位</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">内空変位計測システム</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">掘削境界上の幾セットかのピン間の相対距離を、収斂テープ(convergence tape)又はインバーワイヤ(Invar wire)を用いて手動で測定する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">Olkiluoto VLJ 処分場及び Loviisa VLJ 処分場で使用されてきた。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">精度：0.1 - 0.5 mm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">設置したマーキングを外部から検知</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">母岩に設置し、坑道掘削時の坑道の内空変位量を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> 
</td><td>計測機器自体は、一般土木で利用されており、マーキングを設置するのみで計測が可能であり、処分性能への影響も少ないと考えられる。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-36　モニタリングシステムの検討結果（14/23）

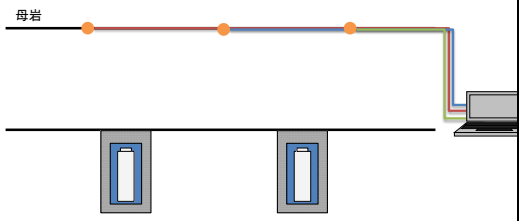
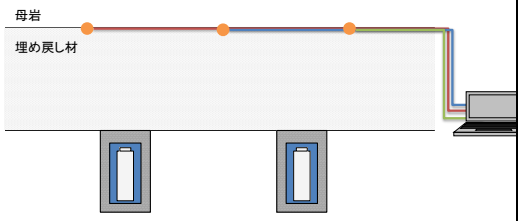
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-01、02、06</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">水分量、湧水量</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">誘電法(容積法) (volumetric method: dielectric technique) ; FDR／ADR 等</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">誘電法は、対象物質を通る電磁波又は電磁パルスの速度を決定するバルク誘電率(bulk permittivity)を測定することによって水分含量を推定する</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn 報告書に記載はあるが、具体的な適用実績は記載されていない。</td></tr>
<tr><td rowspan="6">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">処分孔周辺母岩及び坑道周辺の湧水量を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ<br>（H-02、06 の場合）</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>適用実績不明であるが、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-37　モニタリングシステムの検討結果（15/23）

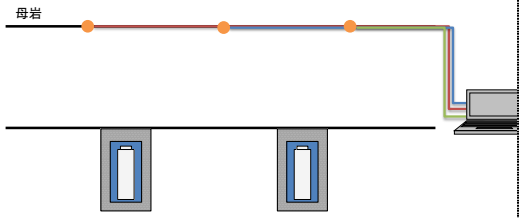
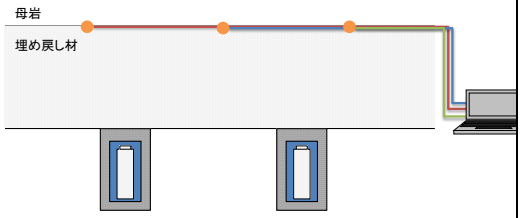
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-01、02、06</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">水分量、湧水量</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">張力(場)法（テンシオメータ）</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">吸着効果及び毛管効果の両方を含む水マトリクスポテンシャルを推定する</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn 報告書に記載はあるが、具体的な適用実績は記載されていない。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">0 - 100% RH</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">処分孔周辺母岩及び坑道周辺の湧水量を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ<br>（H-02、06 の場合）</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>適用実績不明であるが、配線やセンササイズにより処分性能への影響が懸念される。<br>また、測定範囲から、完全飽和すると機器は測定できない。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-38　モニタリングシステムの検討結果（16/23）

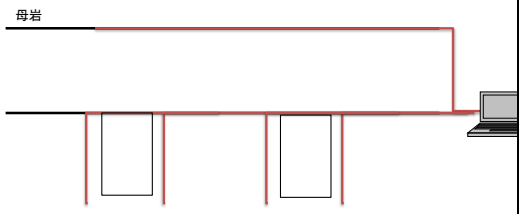
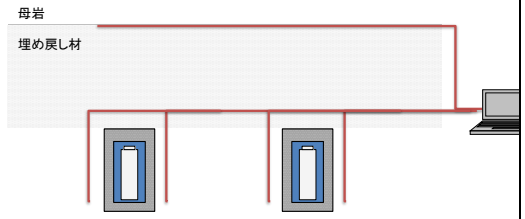
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-01、02、06</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">水分量、湧水量</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">光ファイバ式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">光ファイバ式による温度センサは複数の方式がある。<br>・分布型：DTS (Distributed Temperature Sensing)や FTR (Fiber Temperature Laser Rader)<br>・局所多点型：Bragg grating 型光ファイバ式センサやファブリペロ（Fabry-Perot）</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn レポートには、地質及び地層処分場関連のモニタリングに利用されているとしている。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">不明であるが、例えば-200℃-+300℃(DTS)</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">不明であるが、例えば、精度：±0.1℃、分解能：0.25m (DTS)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">有線（ファイバ自体）</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内／坑道壁面／坑道内側溝に設置し、その水分量を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ<br>（H-02、06 の場合）</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>機器自体サイズは、電気式センサより小型であり、配線の影響も少ないものの、具体的な適用事例に基づく耐久性等が不明である。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-39　モニタリングシステムの検討結果（17/23）

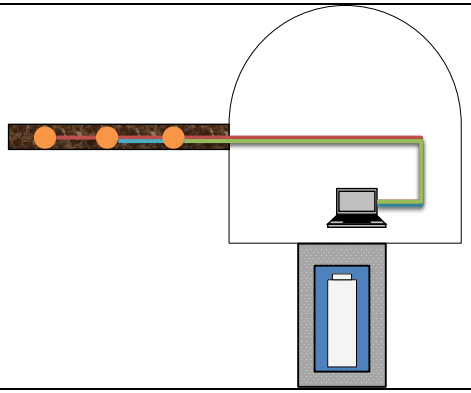
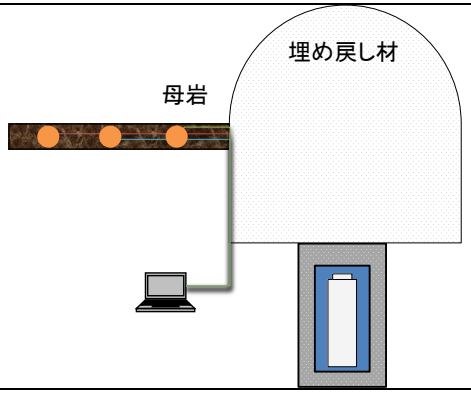
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-03</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">地下水圧</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">ピエゾ抵抗式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">圧力下にあるダイアフラム(隔膜)のピエゾ抵抗変化を利用する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">・KULITE 製のピエゾ抵抗式センサは、エスポ HRL での Backfill & Plug Test 用に開発<br>・ピエゾ抵抗式センサは、FEBEX プロジェクトでも使用</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">測定範囲(データ):0 - 140 MPa</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">計器精度:±0.1 % F.S.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>55 - 120℃</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">不明であるが、アクセス可能であれば交換可能</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">ボアホールでの計測</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内からボアホールを設置し、ボアホール内での地下水圧を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道埋戻し前</td><td colspan="2">坑道埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> 
</td><td>坑道内からのボアホールで計測する場合、埋戻し後の処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-40　モニタリングシステムの検討結果（18/23）

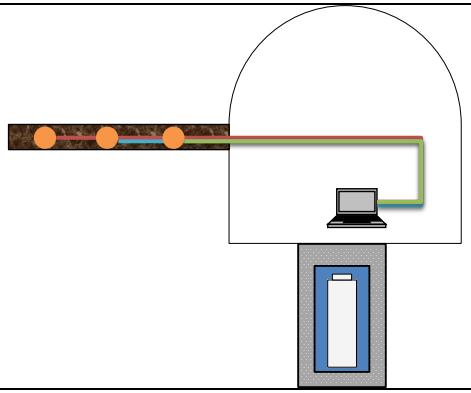
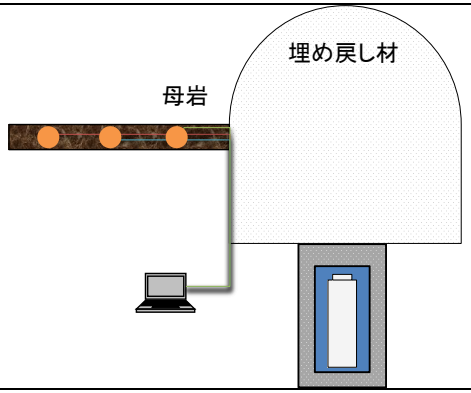
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-03</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">地下水圧</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">ひずみゲージ式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">□　　水圧が抵抗素子を備えたゲージのひずみを引き起こすことを利用する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn 報告書に記載はあるが、具体的な適用実績は記載されていない。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">測定範囲(データ):0.2 - 2.0 MPa</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">計器精度:±2 % R.O.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td colspan="2">その他外乱</td></tr>
<tr><td>-30 - 80℃</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td colspan="2">—</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">不明であるが、アクセス可能であれば交換可能</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">ボアホールでの計測</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内からボアホールを設置し、ボアホール内での地下水圧を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道埋戻し前</td><td colspan="2">坑道埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> 
</td><td>坑道内からのボアホールで計測する場合、埋戻し後の処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-41　モニタリングシステムの検討結果（19/23）

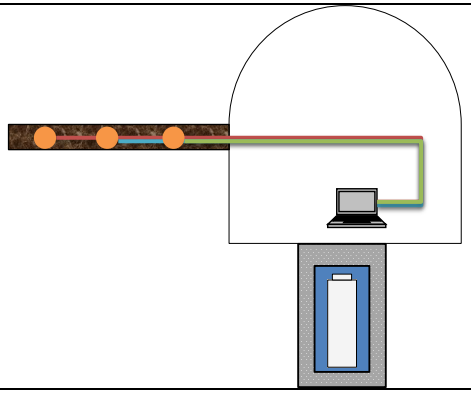
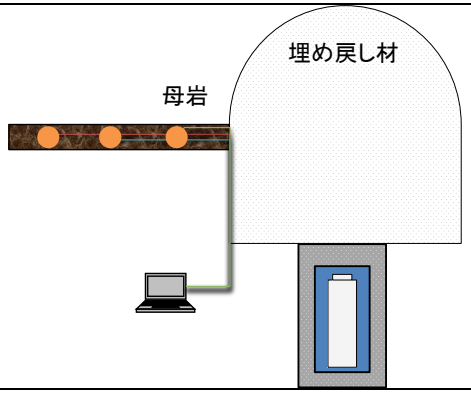
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-03</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">地下水圧</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="6">差動トランス式（LVDT：linear variable differential transformer）</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="6">LVDT は、可動磁心(コア)の変位に線形比例する電気出力を生成する電気機械的装置である。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="6">MoDeRn 報告書に記載はあるが、具体的な適用実績は記載されていない。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="6">測定範囲(データ)：0 - 1MPa</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="6">計器精度:±0.5 % F.S.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td colspan="2">その他外乱</td></tr>
<tr><td>-30 - 80℃</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td colspan="2">―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="6">不明であるが、アクセス可能であれば交換可能</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="6">ボアホールでの計測</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="6">坑道内からボアホールを設置し、ボアホール内での地下水圧を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道埋戻し前</td><td colspan="2">坑道埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> 
</td><td>坑道内からのボアホールで計測する場合、埋戻し後の処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-42　モニタリングシステムの検討結果（20/23）

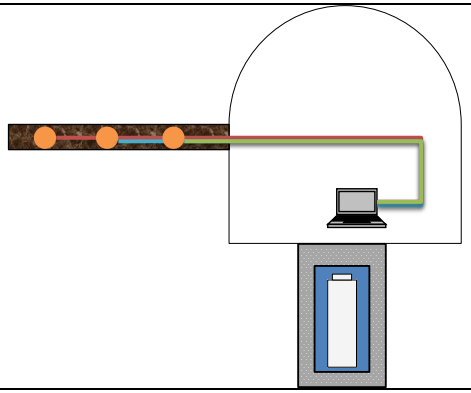
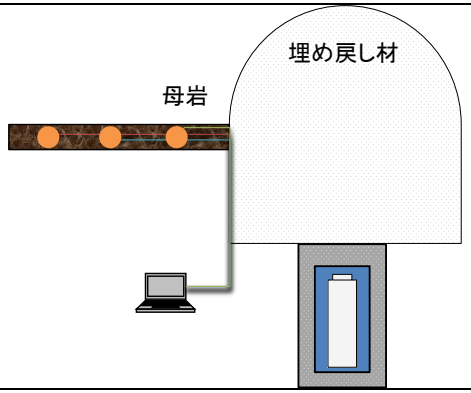
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-03</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">地下水圧</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">振動弦式</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">張力がかけられた鋼線の共鳴振動数がワイヤのひずみ又は張力に依存することを利用する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn 報告書に記載はあるが、具体的な適用実績は記載されていない。</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">測定範囲(データ)：-0.1 - 150 MPa</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">計器精度:±0.5 % F.S.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td colspan="2">その他外乱</td></tr>
<tr><td>0 - 200℃</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td><td colspan="2">—</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">不明であるが、アクセス可能であれば交換可能</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">ボアホールでの計測</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内からボアホールを設置し、ボアホール内での地下水圧を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道埋戻し前</td><td colspan="2">坑道埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> 
</td><td>坑道内からのボアホールで計測する場合、埋戻し後の処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-43　モニタリングシステムの検討結果（21/23）

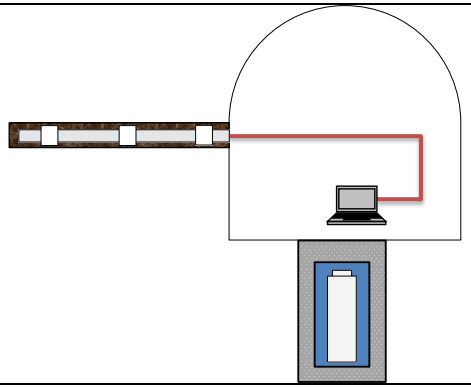
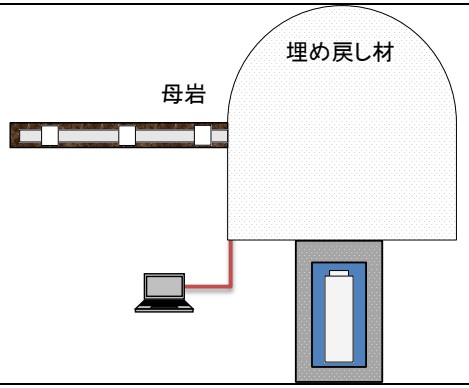
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-04</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">地下水流動</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">流量計類／トレーサ希釈／検層類</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">一般土木／幌延地下研究施設で使用</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">1E-10 - 1E-05(m/sec)（トレーサ式）</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">不明</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>60℃以下</td><td>―</td><td>10MPa の高圧下</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">不明であるが、アクセス可能であれば交換可能</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">ボアホールでの計測</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内からボアホールを設置し、ボアホール内での地下水流動を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道埋戻し前</td><td colspan="2">坑道埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> 
</td><td>一般の地質調査で使用されており機器の性能については課題はないと考えられるが、坑道内からボアホールを設置する場合には、埋戻し後の処分性能への影響が懸念される。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-44　モニタリングシステムの検討結果（22/23）

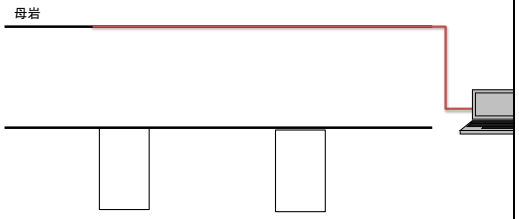
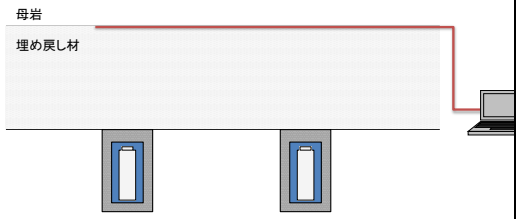
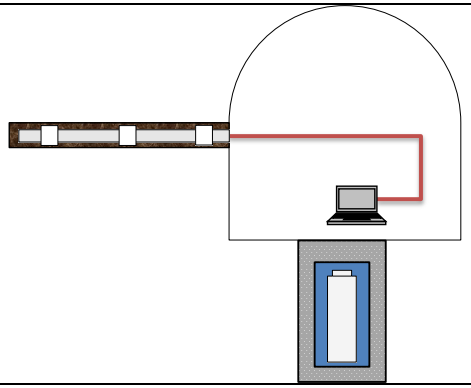
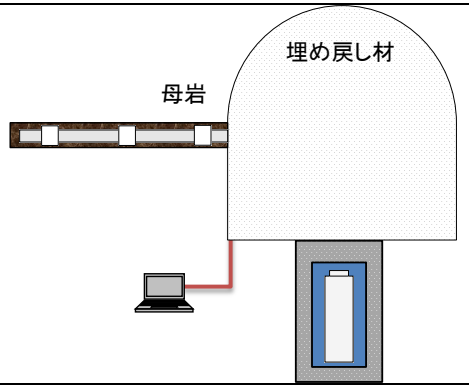
<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>H-05</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">透水係数</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">弾性波探査（MS）</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">MS のモニタリングは、一般に、誘導(人工)地震のモニタリングのためのものである。明確な根拠があるわけではないが、一般に、振動数が 100 Hz 以下の場合は MS と称されている。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">カナダでは、地下構造物の長期安定性の判断に MS モニタリングが使用された。（MoDeRn）</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td><td>―</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">―</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">検知ケーブルが必要</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">母岩に設置し、岩盤強度や割れ目幅など、岩盤特性の変化を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道掘削及び処分孔掘削時</td><td colspan="2">埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"> 
</td><td colspan="2"> 
</td><td>計測機器自体は、一般土木で利用されているが、検知ケーブルを敷設する必要があり、埋戻し後は、配線等による処分性能への影響を事前に確認しておく必要がある。</td></tr>
</table>

表 2.4.4-45　モニタリングシステムの検討結果（23/23）

<table>
<tr><td colspan="2">記号</td><td>C-01</td><td colspan="2">ニアフィールドモニタリングパラメータ</td><td colspan="2">鉱物組成</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定方式</td><td colspan="5">検層類（γ線、比抵抗、電磁誘導、音波）</td></tr>
<tr><td colspan="2">測定原理</td><td colspan="5">単一ボアホールで任意の深さで実施でき、ボアホール自体及びその直近(数 cm - 約 1m)の特性のセンシングを行う。</td></tr>
<tr><td colspan="2">適用実績</td><td colspan="5">MoDeRn レポートに記載されているが適用実績は不明</td></tr>
<tr><td rowspan="5">機器仕様</td><td>測定範囲</td><td colspan="5">不明</td></tr>
<tr><td>精度／感度／分解能</td><td colspan="5">不明</td></tr>
<tr><td rowspan="2">耐久性</td><td>耐熱</td><td>耐水</td><td>耐圧</td><td>耐放射線</td><td>その他外乱</td></tr>
<tr><td>－</td><td>－</td><td>－</td><td>－</td><td>－</td></tr>
<tr><td>寿命及び交換性</td><td colspan="5">不明であるが、アクセス可能であれば交換可能</td></tr>
<tr><td>伝送方法</td><td colspan="5">ボアホールでの計測</td></tr>
<tr><td colspan="2">システム案の考え方</td><td colspan="5">坑道内からボアホールを設置し、ボアホール内及びその直近の構成鉱物の変化を計測する。</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">モニタリングイメージ</td><td colspan="2">坑道埋戻し前</td><td colspan="2">坑道埋戻し後</td><td>本手法を使用した場合の課題</td></tr>
<tr><td colspan="2">  </td><td colspan="2"> 
</td><td>一般の地質調査で使用されており機器の性能については課題はないと考えられるが、坑道内からボアホールを設置する場合には、埋戻し後の処分性能への影響が懸念される。<br>なお、処分坑道の周辺（数 cm - 約 1m）からの計測の場合には、処分坑道埋戻し後の計測も可能。</td></tr>
</table>

6)ニアフィールドの事象の人工バリアへの影響

前項までの結果を踏まえ、「人工バリア性能の確認」という目的に反映させる方法について検討した。本検討で対象としているモニタリングの目的は、定置後の人工バリアが設計あるいは予測通りの性能を発揮しているかを確認することである。このため、ここでは、レファレンスシナリオにおけるオーバーパック破損後の核種移行に関するものではなく、定置後より主坑道及びアクセス立坑の閉鎖前までの期間の、人工バリアの初期性能を確認するため、前項までに抽出したパラメータのモニタリング結果が、人工バリアの技術要件にどのように反映されるかについて検討を行った。人工バリアの技術要件については、「処分場の安全機能と技術要件（TR-10-11）」(NUMO, 2010) [2]を参照した。人工バリアシステムの構成要素の技術要件を表 2.4.4-46、オーバーパック、緩衝材及び埋め戻し材・止水プラグの技術要件の説明及び設計項目のうち、本検討に関係する基本的なバリア性能の確保とバリア長期健全性の維持に関するものをを表 2.4.4-47～表 2.4.4-50 にそれぞれ示した。

さらに、各技術要件のうち、ニアフィールドモニタリング結果の利用が可能な内容について検討した。

オーバーパック、緩衝材及び埋め戻し材・止水プラグの技術要件について、ニアフィールドモニタリングの役割と、関連すると考えられたパラメータを表 2.4.4-51～表 2.4.4-54、検討結果をマトリクス形式で整理した結果を表 2.4.4-55 及び表 2.4.4-56 に示す。

また、各技術要件とニアフィールドパラメータとの関係を、NUMO（2004）[40]に基づく、調査から閉鎖までの処分の事業段階を参考にし、さらに、前項の計測可能性を踏まえ、モニタリング計画（案）と技術的課題を表 2.4.4-57～表 2.4.4-68 に示した。

なお、技術要件に関連すると考えられたパラメータについては、ここでは主として、直接関連するパラメータを示している。例えば地下水にかかわるパラメータでは、その駆動力である温度なども必要なパラメータであるが、ここでは表記していない。

表 2.4.4-46　人工バリアシステムの構成要素の技術要件（NUMO、 2010）

| | **基本的なバリア性能の確保** | **バリア長期健全性の維持** | **工学的実現性の確保** |
|---|---|---|---|
| OP | ・　耐食性<br>・　構造健全性<br>・　溶接部耐食性・構造健全性 | ・　耐熱性<br>・　耐放射線性<br>・　残置物との相互作用の影響の低減<br>・　バリア材料間の相互作用の影響の低減<br>・　ガラス固化体の過熱の防止 | ・　製作性<br>・　遠隔封入性<br>・　遠隔定置性<br>・　品質管理 |
| 緩衝材 | ・　低透水性<br>・　コロイドろ過能<br>・　収着性 | ・　自己修復性<br>・　耐熱性<br>・　耐放射線性<br>・　緩衝材流出の抑制<br>・　残置物との相互作用の影響の低減<br>・　バリア材料間の相互作用の影響の低減<br>・　ガラス固化体の過熱の防止<br>・　オーバーパックの保護（物理的緩衝性）<br>・　オーバーパックの沈下の防止<br>・　施工時の隙間の充填（自己シール性） | ・　製作性<br>・　遠隔定置性<br>・　品質管理 |
| 埋め戻し材・止水プラグ | ・　低透水性 | ・　施工時の隙間の充てん（自己シール性）<br>・　残置物、材料間の相互作用の影響の低減 | ・　製作性<br>・　品質管理 |

表 2.4.4-47　オーバーパックの技術要件（基本性能、長期健全性）（NUMO、 2010）

| 技術要件の分類 | 技術要件 | 技術要件の説明 | | 設計項目 |
|---|---|---|---|---|
| 基本的なバリア性能の確保 | 耐食性 | オーバーパックの定置後の腐食により、安全機能が損なわれないように、適切な対策を設定する。例えば、建設、操業段階に地下に流入し、残存した酸素による腐食、酸素消費後の水による全面腐食などが腐食現象として考えられている（JNC、1999b）。また、ガラス固化体からの放射線により、地下水が放射線分解し発生した酸化性化学種の影響による不動態化の可能性などについても、設計上の対応を講じる。 | 所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと | オーバーパックの設計（材料設計、形状・厚さの設計） |
| | 構造健全性 | 地下環境において、埋設後に作用するさまざまな応力に対して、オーバーパックが機械的に破損しないように対策を講じる。オーバーパックに作用する応力の要因としては、水圧、地圧などの処分深度に依存する圧力や、岩盤のクリープ変形などに起因する応力、また腐食膨張に伴い緩衝材が圧密され、その反作用として現れる圧密反力、緩衝材の膨潤圧などが挙げられる。<br>なお、緩衝材が変形することにより、これらの応力の要因を緩和できるため（JNC、2005）、緩衝材の技術要件として、「オーバーパックの保護（物理的緩衝性）」を設定した。 | 埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること | オーバーパックの設計（材料設計、形状・厚さの設計） |
| | 溶接部耐食性・構造健全性 | オーバーパックの溶接部が物理的にも化学的にも弱部となって、上記のオーバーパックの安全機能が損なわれないように溶接方法を選定する。 | 溶接部の機械強度、耐食性が母材と比較して著しく劣らないこと | オーバーパックの溶接設計（材料設計、蓋構造設計、溶接法、溶接条件） |
| バリア長期健全性の維持 | 耐熱性 | 廃棄体からの発熱によりオーバーパック材料の熱による変形や、熱応力によりオーバーパックが破損しないように設定した。ただし、現在は金属製オーバーパックの採用を基本としており、良好な耐熱性を有している。 | 廃棄体からの発熱により耐食性や強度が著しく低下しないこと | オーバーパックの設計（材料設計） |
| | 耐放射線性 | 長期にわたる放射線の照射によりオーバーパックが脆化し、構造健全性に影響を与えないために設定した。材料として放射線による照射脆化の感受性が低い材料を選定する。 | 放射線脆化が著しくないこと | オーバーパックの設計（材料設計） |
| | 残置物との相互作用の影響の低減 | コンクリート支保、グラウト、コンクリートプラグなどの残置物の長期的な劣化などに伴う、化学環境などの変化が、オーバーパックの安全機能を著しく低下させないことを目的として設定した。残置物が人工バリアの安全機能を著しく低下させると判断できる場合には、坑道の埋め戻し時に残置物を撤去するなどの対策をとるか、あるいは、より影響が低減できる材料、工法を採用するなどの対策を検討する。 | コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | 坑道の設計（支保工の材料設計） |
| | バリア材料間の相互作用の影響の低減 | 人工バリア材料間の相互作用により相互に安全機能が著しく低下しないように設定した。オーバーパックがガラス固化体及び緩衝材の安全機能に有意な影響を与えないことを確認し、必要に応じて対策を講ずる。 | 人工バリア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 | オーバーパックの設計（材料設計） |
| | ガラス固化体の過熱の防止 | ガラス固化体が自らの発熱し、安全機能を損なうことがないように設定した。金属製オーバーパックであれば、良好な熱伝導性を有する。 | 良好な熱伝導性を有すること | オーバーパックの設計（材料設計、形状・厚さの設計） |

注記　「技術要件の説明」の赤字は、モニタリング結果の反映方法の検討に資する内容である。

表 2.4.4-48　緩衝材の技術要件（基本性能、長期健全性）（NUMO、 2010）(1/2)

| 技術要件の分類 | 技術要件 | 技術要件の説明 | | 設計項目 |
|---|---|---|---|---|
| 基本的なバリア性能の確保 | 低透水性 | 緩衝材が有する低透水性を活かし、周囲の動水勾配がある程度大きくなっても、緩衝材中の物質移行が拡散により支配され、移行が抑制されるように対策を検討する。このため、材料組成や緩衝材の乾燥密度を高く設定するなどの対策を検討する。 | 緩衝材中の地下水の動き（移流）を抑制し、結果的に放射性物質の移行を遅延すること | 緩衝材の設計（材料設計、 形状・厚さの設計） |
| | コロイドろ過能 | 廃棄体から浸出した放射性物質がコロイド化する場合に、コロイドの移行を物理的に防止または抑制するための対策を検討する。このため、コロイドのろ過能が確保されるように、緩衝材中の空隙がコロイドをろ過できる大きさ以下となるように乾燥密度を高く設定する。 | 放射性物質がコロイドとして移行することを防止または抑制すること | 緩衝材の設計（材料設計、 形状・厚さの設計 |
| | 収着性 | 緩衝材の有する収着能力を活かし、放射性物質の拡散による移行を遅延するように材料を選定する。 | ガラス固化体から溶出した放射性物質を収着することにより遅延する | 緩衝材の設計（材料設計） |
| バリア長期健全性の維持 | 自己修復性 | 人工バリア施工後の周辺岩盤の変形やオーバーパックの腐食に伴い発生する水素ガスが破過する際に隙間が発生する可能性があるため、それらの隙間を自己修復するように設定した。緩衝材が有する膨潤能力を利用し、施工後に生じる隙間を充填できるよう、設計上の対策を検討する。 | 施工後変形などにより隙間が生じたとしても、自己修復できること | 緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計） |
| | 耐熱性 | 廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないように設定した。緩衝材の材料設計や坑道離間距離と廃棄体ピッチを適切に設定するなどの対策を検討する。 | 廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないこと | 地下施設の設計（坑道離間距離、廃棄体ピッチ） |
| | 耐放射線性 | 廃棄体の放射線により緩衝材の機能が著しく低下しないように設定した。なお、現状では、放射線により緩衝材の長期健全性が変化することは報告されていない。 | 廃棄体の放射線により緩衝材の機能が著しく低下しないこと | 緩衝材の設計（材料設計） |
| | 緩衝材流出の抑制 | 緩衝材が流出することにより安全機能が低下しないために設定した。緩衝材が亀裂に侵入し、さらにある程度地下水の流れが速い条件では、緩衝材が取り去られる現象が指摘されている。ただし、割れ目には充填物が介在していることなどから、どこまでも流出することは考えにくい（NUMO、2004）。これまでの解析では、密度低下は100 万年後でも 20%であることなどが示されている。廃棄体定置箇所には岩盤に有意な亀裂がない場所を選択するなどの対策や亀裂をグラウトで充填するなどの対策を検討する。 | 地下水流による緩衝材の流出が著しくないこと | 地下施設の設計 |

注記　「技術要件の説明」の赤字は、モニタリング結果の反映方法の検討に資する内容である。

表 2.4.4-49　緩衝材の技術要件（基本性能、長期健全性）（NUMO、 2010）(2/2)

| 技術要件の分類 | 技術要件 | 技術要件の説明 | | 設計項目 |
|---|---|---|---|---|
| バリア長期健全性の維持 | 残置物との相互作用の影響の低減 | 残置物と緩衝材との相互作用により、緩衝材の安全機能が著しく低下しないように設定した。影響があると想定される場合には、埋め戻し時に残置物が緩衝材に影響を与えない程度まで撤去することや、あるいはより影響の少ない材料として低 pH セメントを利用するなどの対策を検討する。 | コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | 坑道の支保設計（材料設計） |
| | バリア材料間の相互作用の影響の低減 | 人工バリア材料間の相互作用により相互に安全機能が著しく低下しないように設定した。緩衝材がガラス固化体及びオーバーパックの緩衝材の安全機能に有意な影響を与えないことを確認し、必要に応じて対策を講ずる。 | 人工バリア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 | 緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計 |
| | ガラス固化体の過熱の防止 | ガラス固化体が自らの発熱し、安全機能を損なうことがないように設定した。現状では、緩衝材の材料は十分な熱伝導性を有する（JNC、1999b）。 | 良好な熱伝導性を有すること | 緩衝材の設計（材料設計） |
| | オーバーパックの保護（物理的緩衝性） | オーバーパックの腐食膨張による影響や、岩盤の変形によるオーバーパックへの影響を緩和しオーバーパックを機械的な破壊から保護するよう、物理的緩衝性を有するように設定した。緩衝材の材料設計や厚さの設計において影響を検討する。 | オーバーパックの腐食膨張、岩盤の変形を緩和し、オーバーパックを機械的な破壊から保護するよう、物理的緩衝性を有すること | 緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計 |
| | オーバーパックの沈下の防止 | 廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、オーバーパックを力学的に安定に支持することである。対策の例としては緩衝材の材料設計や密度設定などがある。 | 廃棄体オーバーパックを力学的に支持すること | 緩衝材の設計（材料設計） |
| | 施工時の隙間の充填（自己シール性） | 施工時の隙間を充てんするよう、膨潤性を有することである。対策の例としては緩衝材の材料設計、形状・厚さの設計などがある。また、緩衝材近傍のすき間の位置及び大きさは処分概念の検討時に考慮する。付録-1 に、この技術要件に対して、最近の塩水環境下での膨潤性を考慮して、乾燥密度と厚さの下限について評価した事例を示す。 | 施工時の隙間を充填するよう、膨潤性を有すること | 緩衝材の設計（材料設計、形状・厚さの設計）操業システムの設計（施工技術） |

注記　「技術要件の説明」の赤字は、モニタリング結果の反映方法の検討に資する内容である。

表 2.4.4-50　埋め戻し材・止水プラグの技術要件（基本性能、長期健全性）（NUMO、2010）

| 技術要件の分類 | 技術要件 | 技術要件の説明 | | 設計項目 |
|---|---|---|---|---|
| 基本的なバリア性能の確保 | 低透水性 | 埋め戻し材と止水プラグを適切に配置することで、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。また、埋め戻し材に加え、アクセス坑道に沿った連続的な水みちの形成を抑制する目的で、止水プラグを設置することも有効な対策として考えている。止水プラグの材料はベントナイトを圧縮成型したものを基本としている。止水プラグにベントナイトを利用した場合には、膨潤変形を防止するために力学プラグを補助的に設置する。力学プラグとしては、コンクリートを検討している。 | 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）<br>止水プラグの設計（材料設計、配置設計） |
| バリア長期健全性の維持 | 施工時の隙間の充てん（自己シール性） | 施工方法によっては埋め戻し材や止水プラグの施工時に坑道壁面との間に隙間が発生すると想定されるため、それらの隙間が膨潤により充填することを要件として設定した。そのため、埋め戻し材や止水プラグのベントナイト含有率や乾燥密度などの検討において対策を検討する。 | 施工時の隙間を充てんするよう、膨潤性を有すること | 埋戻し材の設計（材料設計、形状・厚さの設計）<br>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 | 残置物と埋め戻し材、止水プラグあるいは止水プラグと力学プラグ間の相互作用により、埋め戻し材や止水プラグの安全機能が著しく低下しないために設定した。影響があると想定される場合には、埋め戻し時に残置物が埋め戻し材に影響を与えない程度まで撤去することや、あるいはより影響の少ない材料としてコンクリート支保や力学プラグに低 pH セメントを利用するなどの対策を検討する。 | 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 | 埋戻し材の設計（材料設計、形状・厚さの設計）<br>止水プラグ、力学プラグの設計（材料設計、配置設計） |

注記　「技術要件の説明」の赤字は、モニタリング結果の反映方法の検討に資する内容である。

表 2.4.4-51　人工バリアに係る技術要件からのモニタリング結果の反映方法の検討（オーバーパック）

| 技術要件 | 技術要件の説明（NUMO(2010)） | | ニアフィールドモニタリングの役割 | 関連するニアフィールドパラメータ |
|---|---|---|---|---|
| 耐食性 | 所定の期間、腐食により安全機能が損なわれないこと | オーバーパックの定置後の腐食により、安全機能が損なわれないように、適切な対策を設定する。例えば、建設、操業段階に地下に流入し、残存した酸素による腐食、酸素消費後の水による全面腐食などが腐食現象として考えられている（JNC、1999b）。また、ガラス固化体からの放射線により、地下水が放射線分解し発生した酸化性化学種の影響による不動態化の可能性などについても、設計上の対応を講じる。 | ① オーバーパックの定置後の所定の期間、腐食により安全機能が損なわれていないことまた、不動態化の可能性などを引き起こす酸化性化学種の発生に至らないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 水分量(岩盤飽和度)(H-01)<br>・ 湧水量(H-02)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05)<br>・ 地下水中の塩分濃度(C-08)<br>・ 地下水中の有機物量(C-10,11) |
| 構造健全性 | 埋設後作用する機械的荷重に対して構造健全性を維持すること | 地下環境において、埋設後に作用するさまざまな応力に対して、オーバーパックが機械的に破損しないように対策を講じる。オーバーパックに作用する応力の要因としては、水圧、地圧などの処分深度に依存する圧力や、岩盤のクリープ変形などに起因する応力、また腐食膨張に伴い緩衝材が圧密され、その反作用として現れる圧密反力、緩衝材の膨潤圧などが挙げられる。<br>なお、緩衝材が変形することにより、これらの応力の要因を緩和できるため（JNC、2005）、緩衝材の技術要件として、「オーバーパックの保護（物理的緩衝性）」を設定した。 | ① オーバーパックが構造健全性を維持していることを埋設後に作用する機械的荷重をニアフィールド環境でモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 岩盤応力(M-01)<br>・ 岩盤強度(M-02)<br>・ 岩盤の変形(M-03)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 内空変位(M-07) |
| 耐熱性 | 廃棄体からの発熱により耐食性や強度が著しく低下しないこと | 廃棄体からの発熱によりオーバーパック材料の熱による変形や、熱応力によりオーバーパックが破損しないように設定した。ただし、現在は金属製オーバーパックの採用を基本としており、良好な耐熱性を有している。 | ① オーバーパック材料の熱による変形や、熱応力による破損が引き起こるような周辺環境とならないことを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 温度(T-01)<br>・ 温度(岩盤)(T-03)<br>・ 温度(プラグ／グラウト／支保／埋め戻し材)(T-04)<br>・ 温度(地下水)(T-05)<br>・ 岩盤応力(M-01) |
| 残置物との相互作用の影響の低減 | コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | コンクリート支保、グラウト、コンクリートプラグなどの残置物の長期的な劣化などに伴う、化学環境などの変化が、オーバーパックの安全機能を著しく低下させないことを目的として設定した。残置物が人工バリアの安全機能を著しく低下させると判断できる場合には、坑道の埋め戻し時に残置物を撤去するなどの対策をとるか、あるいは、より影響が低減できる材料、工法を採用するなどの対策を検討する。 | ① オーバーパックの安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物のオーバーパックへの浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 地下水流動(H-04)<br>・ 湧水量(H-02)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 地下水組成(Ca2+)(C-03)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05) |

表 2.4.4-52　人工バリアに係る技術要件からのモニタリング結果の反映方法の検討（緩衝材）(1/2)

| 技術要件 | 技術要件の説明（NUMO(2010)） | | ニアフィールドモニタリングの役割 | 関連するニアフィールドパラメータ |
|---|---|---|---|---|
| 低透水性 | 緩衝材中の地下水の動き（移流）を抑制し、結果的に放射性物質の移行を遅延すること | 緩衝材が有する低透水性を活かし、周囲の動水勾配がある程度大きくなっても、緩衝材中の物質移行が拡散により支配され、移行が抑制されるように対策を検討する。このため、材料組成や緩衝材の乾燥密度を高く設定するなどの対策を検討する。 | ① 周辺地下水の流れが、緩衝材の低透水性が有効に機能するレベルであることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量(H-02)<br>・ 地下水圧(H-03)<br>・ 地下水流動(H-04)<br>・ 透水係数(H-05)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06) |
| コロイドろ過能 | 放射性物質がコロイドとして移行することを防止または抑制すること | 廃棄体から浸出した放射性物質がコロイド化する場合に、コロイドの移行を物理的に防止または抑制するための対策を検討する。このため、コロイドのろ過能が確保されるように、緩衝材中の空隙がコロイドをろ過できる大きさ以下となるように乾燥密度を高く設定する。 | ① ベースライン情報として、周辺環境中のコロイド種類や量を把握する。 | ・ 地下水中のコロイド(C-06) |
| 収着性 | ガラス固化体から溶出した放射性物質を収着することにより遅延する | 緩衝材の有する収着能力を活かし、放射性物質の拡散による移行を遅延するように材料を選定する。 | ① 緩衝材の収着能力を低下（例えば Ca 型化）させるような周辺環境とならないかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 地下水組成(Ca2+)(C-03)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05)<br>・ 地下水中の塩分濃度(C-08) |
| 自己修復性 | 施工後変形などにより隙間が生じたとしても、自己修復できること | 人工バリア施工後の周辺岩盤の変形やオーバーパックの腐食に伴い発生する水素ガスが破過する際に隙間が発生する可能性があるため、それらの隙間を自己修復するように設定した。緩衝材が有する膨潤能力を利用し、施工後に生じる隙間を充填できるよう、設計上の対策を検討する。 | ① 緩衝材の自己修復機能を低下させるような周辺環境とならないかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量(H-02)<br>・ 地下水圧(H-03)<br>・ 地下水流動(H-04)<br>・ 透水係数(H-05)<br>・ 岩盤応力(M-01)<br>・ 岩盤強度(M-02)<br>・ 岩盤の変形(M-03)<br>・ 地下水組成(Ca2+)(C-03)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05)<br>・ 地下水中の塩分濃度(C-08) |
| | | | ② 施工後に生じる隙間が、緩衝材の自己修復機能で充填できる程度のレベルであるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 岩盤の変形(M-03)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06) |
| | | | ③ オーバーパックの腐食に伴い発生する水素ガスの発生がないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 水素ガス濃度(C-02) |
| 耐熱性 | 廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないこと | 廃棄体の発熱により緩衝材の機能が著しく低下しないように設定した。緩衝材の材料設計や坑道離間距離と廃棄体ピッチを適切に設定するなどの対策を検討する。 | ① 緩衝材の機能が著しく低下しない温度環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 温度(T-01)<br>・ 温度(岩盤)(T-03)<br>・ 温度(プラグ／グラウト／支保／埋め戻し材)(T-04)<br>・ 温度(地下水)(T-05)<br>・ 岩盤応力(M-01) |
| 緩衝材流出の抑制 | 地下水流による緩衝材の流出が著しくないこと | 緩衝材が流出することにより安全機能が低下しないために設定した。緩衝材が亀裂に侵入し、さらにある程度地下水の流れが速い条件では、緩衝材が取り去られる現象が指摘されている。ただし、割れ目には充填物が介在していることなどから、どこまでも流出することは考えにくい（NUMO、2004）。これまでの解析では、密度低下は 100 万年後でも 20%であることなどが示されている。廃棄体定置箇所には岩盤に有意な亀裂がない場所を選択するなどの対策や亀裂をグラウトで充填するなどの対策を検討する。 | ① 安全機能を低下させる緩衝材の流出が著しく生じない環境であることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量(H-02)<br>・ 地下水圧(H-03)<br>・ 地下水流動(H-04)<br>・ 透水係数(H-05)<br>・ 地下水中の塩分濃度(C-08) |
| | | | ② 緩衝材の流出が生じていないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05)<br>・ 地下水中のコロイド(C-06) |
| | | | ③ 緩衝材の流出が生じないような対策（岩盤に有意な亀裂がない場所を選択するなど）が有効に機能しているかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06) |

表 2.4.4-53　人工バリアに係る技術要件からのモニタリング結果の反映方法の検討（緩衝材）(2/2)

| 技術要件 | 技術要件の説明（NUMO(2010)） | | ニアフィールドモニタリングの役割 | 関連するニアフィールドパラメータ |
|---|---|---|---|---|
| 残置物との相互作用の影響の低減 | コンクリートなどの残置物との相互作用により安全機能が著しく低下しないこと | 残置物と緩衝材との相互作用により、緩衝材の安全機能が著しく低下しないように設定した。影響があると想定される場合には、埋め戻し時に残置物が緩衝材に影響を与えない程度まで撤去することや、あるいはより影響の少ない材料として低 pH セメントを利用するなどの対策を検討する。 | ① 緩衝材の安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物の浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 地下水流動(H-04)<br>・ 湧水量(H-02)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 地下水組成(Ca2+)(C-03)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05) |
| オーバーパックの保護（物理的緩衝性） | オーバーパックの腐食膨張、岩盤の変形を緩和し、オーバーパックを機械的な破壊から保護するよう、物理的緩衝性を有すること | オーバーパックの腐食膨張による影響や、岩盤の変形によるオーバーパックへの影響を緩和しオーバーパックを機械的な破壊から保護するよう、物理的緩衝性を有するように設定した。緩衝材の材料設計や厚さの設計において影響を検討する。 | ① 緩衝材の物理的緩衝性が有効に機能する力学的環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 岩盤応力(M-01)<br>・ 岩盤強度(M-02)<br>・ 岩盤の変形(M-03)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 内空変位(M-07) |
| オーバーパックの沈下の防止 | 廃棄体オーバーパックを力学的に支持すること | 廃棄体埋設後、オーバーパックの機能が維持される期間、オーバーパックを力学的に安定に支持することである。対策の例としては緩衝材の材料設計や密度設定などがある。 | ① オーバーパックの機能が維持される期間、設計通りにオーバーパックを力学的に安定に支持できる周辺環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 岩盤応力(M-01)<br>・ 岩盤強度(M-02)<br>・ 岩盤の変形(M-03)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 内空変位(M-07) |
| 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 | 施工時の隙間を充てんするよう、膨潤性を有することである。対策の例としては緩衝材の材料設計、形状・厚さの設計などがある。また、緩衝材近傍のすき間の位置及び大きさは処分概念の検討時に考慮する。付録-1 に、この技術要件に対して、最近の塩水環境下での膨潤性を考慮して、乾燥密度と厚さの下限について評価した事例を示す。 | ① 緩衝材の自己シール性が発揮できる環境であるか、この機能を阻害する要因がないかなどをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 水分量(岩盤内飽和度)<br>・ 湧水量(H-02)<br>・ 地下水圧(H-03)<br>・ 地下水流動(H-04)<br>・ 透水係数(H-05)<br>・ 岩盤応力(M-01)<br>・ 岩盤強度(M-02)<br>・ 岩盤の変形(M-03)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 地下水組成(Ca2+)(C-03)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05)<br>・ 地下水中の塩分濃度(C-08) |

表 2.4.4-54 人工バリアに係る技術要件からのモニタリング結果の反映方法の検討（埋め戻し材・止水プラグ）

| 技術要件 | 技術要件の説明（NUMO(2010)） | | ニアフィールドモニタリングの役割 | 関連するニアフィールドパラメータ |
|---|---|---|---|---|
| 低透水性 | 地下水の流れを抑制すること | 埋め戻し材と止水プラグを適切に配置することで、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。また、埋め戻し材に加え、アクセス坑道に沿った連続的な水みちの形成を抑制する目的で、止水プラグを設置することも有効な対策として考えている。止水プラグの材料はベントナイトを圧縮成型したものを基本としている。止水プラグにベントナイトを利用した場合には、膨潤変形を防止するために力学プラグを補助的に設置する。力学プラグとしては、コンクリートを検討している。 | ① 埋め戻し材と止水プラグが適切に配置され、地下水の流れを抑制していることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量(H-02)<br>・ 地下水圧(H-03)<br>・ 地下水流動(H-04)<br>・ 透水係数(H-05)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 内空変位(M-07) |
| 施工時の隙間の充てん（自己シール性） | 施工時の隙間を充てんするよう、膨潤性を有すること | 施工方法によっては埋め戻し材や止水プラグの施工時に坑道壁面との間に隙間が発生すると想定されるため、それらの隙間が膨潤により充填することを要件として設定した。そのため、埋め戻し材や止水プラグのベントナイト含有率や乾燥密度などの検討において対策を検討する。 | ① 埋め戻し材や止水プラグの施工時の隙間が膨潤により充填されているか、この機能を阻害する要因がないかなどをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 水分量(岩盤内飽和度)<br>・ 湧水量(H-02)<br>・ 地下水圧(H-03)<br>・ 地下水流動(H-04)<br>・ 透水係数(H-05)<br>・ 岩盤応力(M-01)<br>・ 岩盤強度(M-02)<br>・ 岩盤の変形(M-03)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 内空変位(M-07)<br>・ 地下水組成(Ca2+)(C-03)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05)<br>・ 地下水中の塩分濃度(C-08) |
| 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 | 残置物と埋め戻し材、止水プラグあるいは止水プラグと力学プラグ間の相互作用により、埋め戻し材や止水プラグの安全機能が著しく低下しないために設定した。影響があると想定される場合には、埋め戻し時に残置物が埋め戻し材に影響を与えない程度まで撤去することや、あるいはより影響の少ない材料としてコンクリート支保や力学プラグに低 pH セメントを利用するなどの対策を検討する。 | ① 埋め戻し材や止水プラグの安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物のオーバーパックへの浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 地下水流動(H-04)<br>・ 湧水量(H-02)<br>・ 割れ目幅(M-04)<br>・ 掘削影響領域の変化(M-05)<br>・ 岩盤クリープ量(M-06)<br>・ 地下水組成(Ca2+)(C-03)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)(C-05) |

表 2.4.4-55　人工バリアに係る技術要件、ニアフィールドモニタリングの役割と関連パラメータ(1/2)

| 人工バリアの技術要件 | ニアフィールドモニタリングの役割 | T-01 温度 | T-03 温度(岩盤) | T-04 温度(埋戻材等) | T-05 温度(地下水) | H-01 水分量(岩盤飽和度) | H-02 湧水量 | H-03 地下水圧 | H-04 地下水流動 | H-05 透水係数 | M-01 岩盤応力 | M-02 岩盤強度 | M-03 岩盤の変形 | M-04 割れ目幅 | M-05 掘削影響領域の変化 | M-06 岩盤クリープ量 | M-07 内空変位 | C-01 鉱物組成 | C-02 水素ガス濃度 | C-03 地下水組成(Ca2+) | C-05 地下水組成(pH、Eh、イオン) | C-06 地下水中のコロイド | C-08 地下水中の塩分濃度 | C-09 地下水中の微生物 | C-10 地下水中の有機物量(有機酸) | C-11 地下水中の有機物量(炭酸化) | C-12 有機物分解生成ガス |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 耐食性 | オーバーパックの定置後の所定の期間、腐食により安全機能が損なわれていないことまた、不動態化の可能性などを引き起こす酸化性化学種の発生に至らないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | ● | ● | | | | | | | | | | | | | | ● | | ● | | ● | ● | |
| 構造健全性 | オーバーパックが構造健全性を維持していることを埋設後に作用する機械的荷重をニアフィールド環境でモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | |
| 溶接部<br>耐食性・構造健全性 | — | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 耐熱性 | オーバーパック材料の熱による変形や、熱応力による破損が引き起こるような周辺環境とならないことを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ● | ● | ● | ● | | | | | | ● | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 耐放射線性 | — | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 残置物との相互作用の影響の低減 | オーバーパックの安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物の浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | ● | | ● | | | | | ● | ● | ● | | | | ● | ● | | | | | | |
| 低透水性 | 周辺地下水の流れが、緩衝材の低透水性を有効に機能するレベルであることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | ● | ● | ● | ● | | | | ● | ● | ● | | | | | | | | | | | |
| コロイドろ過能 | ベースライン情報として、周辺環境中のコロイド種類や量を把握する。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | | | |
| 収着性 | 緩衝材の収着能力を低下（例えばCa型化）させるような周辺環境とならないかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ● | ● | | ● | | | | |
| 自己修復性 | ① 緩衝材の自己修復機能を低下させるような周辺環境とならないかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | | ● | ● | | ● | | | | |
| | ② 施工後に生じる隙間が、緩衝材の自己修復機能で充填できる程度のレベルであるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | | |
| | ③ オーバーパックの腐食に伴い発生する水素ガスの発生がないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | ● | | | | | | | | |
| 耐熱性 | 緩衝材の機能が著しく低下しない温度環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ● | ● | ● | ● | | | | | | ● | | | | | | | | | | | | | | | | |

注記　■はオーバーパック、■は緩衝材、■は埋め戻し材・止水プラグの技術要件を示す。

表 2.4.4-56　人工バリアに係る技術要件、ニアフィールドモニタリングの役割と関連パラメータ(2/2)

| 人工バリアの技術要件 | ニアフィールドモニタリングの役割 | T-01 温度 | T-03 温度(岩盤) | T-04 温度(埋戻材等) | T-05 温度(地下水) | H-01 水分量(岩盤飽和度) | H-02 湧水量 | H-03 地下水圧 | H-04 地下水流動 | H-05 透水係数 | M-01 岩盤応力 | M-02 岩盤強度 | M-03 岩盤の変形 | M-04 割れ目幅 | M-05 掘削影響領域の変化 | M-06 岩盤クリープ量 | M-07 内空変位 | C-01 鉱物組成 | C-02 水素ガス濃度 | C-03 地下水組成(Ca2+) | C-05 地下水組成(pH、Eh、イオン) | C-06 地下水中のコロイド | C-08 地下水中の塩分濃度 | C-09 地下水中の微生物 | C-10 地下水中の有機物量(有機酸) | C-11 地下水中の有機物量(炭化) | C-12 有機物分解生成ガス |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 緩衝材流出の抑制 | ①安全機能を低下させる緩衝材の流出が著しく生じない環境であることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | | | | ● | | | | |
| | ②緩衝材の流出が生じていないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ● | ● | | | | | |
| | ③緩衝材の流出が生じないような対策（岩盤に有意な亀裂がない場所を選択するなど）が有効に機能しているかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | | | | | | | | ● | ● | ● | | | | | | | | | | | |
| 残置物との相互作用の影響の低減 | 緩衝材の安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物の浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | ● | | ● | | | | | ● | ● | ● | | | | ● | ● | | | | | | |
| バリア材料間の相互作用の影響の低減 | — | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ガラス固化体の過熱の防止 | — | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| オーバーパックの保護（物理的緩衝性） | 緩衝材の物理的緩衝性が有効に機能する力学的環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | |
| オーバーパックの沈下の防止 | オーバーパックの機能が維持される期間、設計通りにオーバーパックを力学的に安定に支持できる周辺環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | |
| 施工時の隙間の充填（自己シール性） | 緩衝材の自己シール性が発揮できる環境であるか、この機能を阻害する要因がないかなどをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | | | | ● | ● | | ● | | | | |
| 低透水性 | 埋め戻し材と止水プラグが適切に配置され、地下水の流れを抑制していることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | ● | ● | ● | ● | | | | ● | ● | ● | ● | | | | | | | | | | |
| 施工時の隙間の充てん（自己シール性） | 埋め戻し材や止水プラグの施工時の隙間が膨潤により充填されているか、この機能を阻害する要因がないかなどをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | ● | ● | ● | ● | ● | | ● | ● | ● | ● | ● | ● | | | | ● | ● | | ● | | | |
| 残置物、材料間の相互作用の影響の低減 | 埋め戻し材や止水プラグの安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物の浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | | | | | | ● | | ● | | | | | ● | ● | ● | | | | | ● | ● | | | | | | |

注記　■はオーバーパック、■は緩衝材、■は埋め戻し材・止水プラグの技術要件を示す。

表 2.4.4-57　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:オーバーパックの耐食性)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C-05<br>C-08<br>C-10, 11 | 地下水組成<br>地下水中の塩分濃度<br>地下水中の有機物量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 坑道内（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | オーバーパック腐食の原因となる地下水組成の変化を主要坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。 | ・ 主要坑道からのデータに基づくオーバーパックの腐食可能性の判断に係る検討 |
| | | | 坑道内（ｾﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | オーバーパック腐食の原因となる地下水組成の変化を処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。<br>ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・ 処分環境での適用性の検討<br>・ センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・ データ送信技術の確立<br>・ センサの耐久性<br>・ 長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内（ｾﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| H-01 | 水分量（岩盤飽和度） | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ・ 処分坑道埋め戻し後、主要坑道からのデータに基づく処分坑道への地下水浸入シミュレーション手法の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | 坑道内へ浸入する水分を岩盤内飽和度として、坑道岩盤より確認し、必要に応じて対策を講じる。 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| H-02 | 湧水量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ・ 処分環境での適用性の検討<br>・ センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・ データ送信技術の確立<br>・ センサの耐久性<br>・ 長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔（ｾﾝｻ類） | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | 坑道内へ浸入する湧水を処分坑道壁や処分孔壁より確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果（H-01）からの類推となる。 | |
| | | | 坑道壁（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-58　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:オーバーパックの構造健全性)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M-01 | 岩盤応力 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | オーバーパックが構造健全性を維持していることを埋設後に作用する機械的荷重に係る岩盤力学パラメータを処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| M-02 | 岩盤強度 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 定期計測(MS) | | | | | | | | | | | オーバーパックが構造健全性を維持していることを埋設後に作用する機械的荷重に係る岩盤力学パラメータを定期的に処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測 | |
| M-03 | 岩盤の変形 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | オーバーパックが構造健全性を維持していることを埋設後に作用する機械的荷重に係る岩盤力学パラメータを処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| M-04 | 割れ目幅 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(MS) | | | | | | | | | | | オーバーパックが構造健全性を維持していることを埋設後に作用する機械的荷重に係る岩盤力学パラメータを処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道(MS) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(BTV) | | | | | | | | | | | | |
| M-05<br>M-06 | 掘削影響領域の変化<br>岩盤クリープ量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の岩盤力学的変化の把握 |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | オーバーパックが構造健全性を維持していることを埋設後に作用する機械的荷重に係る岩盤力学パラメータを処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道か | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| M-07 | 内空変位 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 坑道内壁 | | | | | | | | | | | 埋戻し後も計測可能であると考えられる。 | — |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測を意味する。
注記3　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-59　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:耐熱性)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| T-01<br>T-03<br>T-04<br>T-05 | 温度<br>(坑道内/岩盤/部材/地下水) | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | オーバーパック破損が引き起こるような温度環境とならないことを、主要坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる(操業前はベースライン)。 | ・主要坑道からのデータに基づくオーバパック破損可能性の判断に係る検討 |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | オーバーパック破損が引き起こるような温度環境とならないことを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 坑壁・部材内(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| M-01 | 岩盤応力 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ― |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | 熱応力によるオーバーパック破損が引き起こるような周辺環境とならないことを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測を意味する。
注記3　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-60　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:残置物との相互作用の影響の低減)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H-02 | 湧水量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔（ｾﾝｻ類） | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | 人工バリア機能を低下させる残置物からの生成物がバリアに接近しているかを湧水で確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの | |
| | | | 坑道壁（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| H-04 | 地下水流動 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道への地下水浸入シミュレーション手法の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | 人工バリア機能を低下させる残置物からの生成物がバリアに接近しているかを地下水の流れより確認する。 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | 同上。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道での計測結果からの類推となる。 | ・配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立等 |
| M-04 | 割れ目幅 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 処分坑道（MS） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔（MS） | | | | | | | | | | | 人工バリア機能を低下させる残置物からの生成物を含む地下水がバリアに移行しやすい環境でないことを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道（MS） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（BTV） | | | | | | | | | | | | |
| M-05<br>M-06 | 掘削影響領域の変化<br>岩盤クリープ量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 坑道内（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の岩盤力学的変化の把握 |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | 人工バリア機能を低下させる残置物からの生成物を含む地下水がバリアに移行しやすい環境でないことを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| M-07 | 内空変位 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 坑道内壁 | | | | | | | | | | | H-05,06と同様。埋戻し後も計測可能であると考えられる。<br>なお、埋め戻し材・プラグのみ。 | — |
| C-03<br>C-05 | 地下水組成（Ca2+）<br>地下水組成（pH, Eh, イオン） | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | 人工バリア機能を低下させる残置物の劣化生成物がバリアに接近しているかを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内（ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　内空変位(M-07)は埋め戻し材やプラグのみ。
注記5　残置物の劣化因子の一つである温度パラメータもあるが、ここでは割愛した。
注記6　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-61　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:低透水性)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H-02 | 湧水量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(ｾﾝｻ類) | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | H-03と同様であるが、処分孔周辺の水分センサ技術の課題は多い。 | |
| | | | 坑道壁(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| H-03 | 地下水圧 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ― |
| | | 処分施設(処分坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | 周辺地下水の流れが、緩衝材の低透水性が有効に機能するレベルであることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| H-04 | 地下水流動 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道への地下水浸入シミュレーション手法の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | H-03と同様 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | ・配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立等 |
| H-05 | 透水係数 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ― |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(MS) | | | | | | | | | | | H-03と同様 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道(MS) | | | | | | | | | | | | |
| M-04 | 割れ目幅 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ― |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(MS) | | | | | | | | | | | 所定の通り、緩衝材中の地下水移行が抑制される岩盤環境であること確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道(MS) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(BTV) | | | | | | | | | | | | |
| M-05<br>M-06 | 掘削影響領域の変化<br>岩盤クリープ量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の岩盤力学的変化の把握 |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | M-04と同様 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| M-07 | 内空変位 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 坑道内壁 | | | | | | | | | | | 坑道埋め戻し後も計測可能であると考えられる。 | ― |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測を意味する。
注記3　内空変位(M-07)は埋め戻し材やプラグのみ。
注記4　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-62　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材のコロイドろ過能)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C-06 | 地下水中のコロイド | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | コロイドの移行を物理的に防止または抑制するための対策に問題がないかを主要坑道でコロイド種類や量を確認し、必要に応じて対策を行う(操業前はベースライン)。 | ― |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | コロイドの移行抑制対策に問題がないかを定置直後の処分坑道でコロイド種類や量を確認し、必要に応じて対策を行う(操業前はベースライン)。ただし、現状では処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-63　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材の収着性)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C-03<br>C-05<br>C-08 | 地下水組成(Ca2+)<br>地下水組成<br>地下水中の塩分濃度 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | ・主要坑道からのデータに基づく緩衝材の収着性能が低減する可能性の判断に係る検討 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | 人工バリア機能を低下させる物質がバリアに接近しているかを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　処分坑道への地下水流入に係る岩盤力学・水理パラメータ、緩衝材劣化の要因の一つである温度パラメータも必要であるが、ここでは割愛した。
注記5　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-64　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材の自己修復性)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M-01 | 岩盤応力 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | 緩衝材の自己修復機能を低下させる岩盤状態でないことを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| M-02 | 岩盤強度 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 定期計測(MS) | | | | | | | | | | | 緩衝材の自己修復機能を低下させる岩盤状態でないことを定期的に確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | |
| M-03 | 岩盤の変形 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | 緩衝材の自己修復機能を低下させる岩盤状態でないこと及び、施工後に生じる隙間が、緩衝材の自己修復機能で充填できる程度のレベルであるかを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| M-04 | 割れ目幅 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(MS) | | | | | | | | | | | 緩衝材施工後に生じる隙間が、自己修復機能で充填できる程度のレベルであるかを定期的に確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道(MS) | | | | | | | | | | | | |
| M-05<br>M-06 | 掘削影響領域の変化<br>岩盤クリープ量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の岩盤力学的変化の把握 |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | 緩衝材施工後に生じる隙間が、自己修復機能で充填できる程度のレベルであるかを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| C-02 | 水素ガス濃度 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | オーバーパックの腐食に伴い発生する水素ガスが隙間を通気していないことを確認し、必要に応じて対策を講じる(操業前はベースライン)。 | ・主要坑道からのデータに基づくオーバパックの腐食可能性の判断に係る検討 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| C-03<br>C-05<br>C-08 | 地下水組成(Ca2+)<br>地下水組成<br>地下水中の塩分濃度 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | 緩衝材の自己修復機能を低下させる地下水環境でないことを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・主要坑道からのデータに基づくオーバパックの腐食可能性の判断に係る検討 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　地下水流入や緩衝材機能への影響要因の一つである水理・温度パラメータも必要であるが、ここでは割愛した。
注記5　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-65　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材の緩衝材流出の抑制)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H-03 | 地下水圧 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ― |
| | | 処分施設(処分坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | 緩衝材の流出が著しく生じない水理環境であることを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| H-04 | 地下水流動 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道への地下水浸入シミュレーション手法の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | H-03と同様 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | H-03と同様 | ・配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立等 |
| H-05 | 透水係数 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ― |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(MS) | | | | | | | | | | | H-03と同様 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道(MS) | | | | | | | | | | | | |
| H-02 | 湧水量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(ｾﾝｻ類) | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | H-03と同様であるが、処分孔周辺の水分センサ技術の課題は多い。 | |
| | | | 坑道壁(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| M-04 | 割れ目幅 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ― |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(MS) | | | | | | | | | | | 緩衝材の流出が生じないような対策が有効に機能しているかを確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。<br>ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道(MS) | | | | | | | | | | | | |
| M-05<br>M-06 | 掘削影響領域の変化<br>岩盤クリープ量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の岩盤力学的変化の把握 |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | 緩衝材の流出が生じないような対策が有効に機能しているかを確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。<br>ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| C-05<br>C-06<br>C-08 | 地下水組成<br>地下水中のコロイド<br>地下水中の塩分濃度 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ― |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | 緩衝材の流出が生じていないことを確認し、必要に応じて対策を講じる（定置前はベースライン）。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・主要坑道からのデータに基づく緩衝材流出可能性の判断に係る検討 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-66　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:緩衝材の物理的緩衝性)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M-01 | 岩盤応力 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | 緩衝材の物理的緩衝性が有効に機能する力学的環境であるかを処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。<br>ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| M-02 | 岩盤強度 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 定期計測(MS) | | | | | | | | | | | M-01と同様 | |
| M-03 | 岩盤の変形 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | | |
| M-04 | 割れ目幅 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 岩盤(MP等) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔(MS) | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道(MS) | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤(BTV) | | | | | | | | | | | | |
| M-05<br>M-06 | 掘削影響領域の変化<br>岩盤クリープ量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(主要坑道) | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の岩盤力学的変化の把握 |
| | | 処分施設(処分坑道) | 処分孔周辺(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内(ｾﾝｻ類) | | | | | | | | | | | | |
| M-07 | 内空変位 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設(処分坑道) | 坑道内壁 | | | | | | | | | | | 坑道埋め戻し後も計測可能であると考えられる。 | — |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　緩衝材の力学的緩衝性が担保できない化学・水理環境（劣化を促す物質の流入や地下水による緩衝材の流出）に関わるパラメータは割愛した。
注記5　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-67　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:オーバーパックの沈下の防止)

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| M-01 | 岩盤応力 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | 緩衝材設計により所定の期間、オーバーパックの沈下が生じない力学的環境が継続しているかを処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。<br>ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| M-02 | 岩盤強度 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 定期計測（MS） | | | | | | | | | | | M-01と同様 | |
| M-03 | 岩盤の変形 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| M-04 | 割れ目幅 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔（MS） | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道（MS） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（BTV） | | | | | | | | | | | | |
| M-05<br>M-06 | 掘削影響領域の変化<br>岩盤クリープ量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 坑道内（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の岩盤力学的変化の把握 |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| M-07 | 内空変位 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 坑道内壁 | | | | | | | | | | | 坑道埋め戻し後も計測可能であると考えられる。 | — |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　緩衝材の劣化に関わる化学・水理環境（劣化を促す物質の流入や地下水による緩衝材の流出）に関わるパラメータは割愛した。
注記5　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。

表 2.4.4-68　事業段階ごとのモニタリング計画（案）及びモニタリング結果の反映(技術要件:自己シール性(施工時の隙間の充填))

| 記号 | ニアフィールドパラメータ | 計測場所 | | サイト選定以前 | 概要調査 | 精密調査 | 建設 | 第１パネル 操業 | 第１パネル 埋戻し | 最終パネル※ 操業 | 最終パネル※ 埋戻し | 主要坑道閉鎖 | アクセス坑道閉鎖 | 備考 | 課題 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H-01 | 水分量（岩盤飽和度） | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ・処分坑道埋め戻し後、主要坑道からのデータに基づく処分坑道への地下水浸入シミュレーション手法の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | 自己シール性を発揮できる水分環境であるかを主要坑道で確認する。 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| H-02 | 湧水量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔（ｾﾝｻ類） | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | 自己シール性を発揮できる水分環境であるかを処分坑道より確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測(H-01)結果からの類推となる。 | |
| | | | 坑道壁（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| M-01 | 岩盤応力 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | 緩衝材の自己シール性を阻害する岩盤状態でないことを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| M-02 | 岩盤強度 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 定期計測（MS） | | | | | | | | | | | M-01と同様 | |
| M-03 | 岩盤の変形 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 処分坑道（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| M-04 | 割れ目幅 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | — |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔（MS） | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・検知部や配線などによる処分性能への影響検討 |
| | | | 処分坑道（MS） | | | | | | | | | | | | |
| M-05<br>M-06 | 掘削影響領域の変化<br>岩盤クリープ量 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 坑道内（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | パネル埋戻し以降も継続して実施可能 | ・主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の岩盤力学的変化の把握 |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | M-01と同様 | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | | |
| M-07 | 内空変位 | URL | | | | | | | | | | | | 計測技術の有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 坑道内壁 | | | | | | | | | | | 埋戻し後も計測可能であると考えられる。 | — |
| C-05<br>C-06<br>C-08 | 地下水組成<br>地下水中のコロイド<br>地下水中の塩分濃度 | URL | | | | | | | | | | | | 主にセンサ類の計測技術の確立・有効性の確認 | — |
| | | 地下調査施設 | | | | | | | | | | | | 地下調査施設の計画の詳細は不明であるが、URLでの手法の原位置での適用可能性の確認 | |
| | | 処分施設（主要坑道） | 坑道内（ｾﾝｻ類） | | | | | | | | | | | 緩衝材の自己シール性を阻害する物質を含む地下水が流入しないことを確認し、必要に応じて対策を講じる。ただし、現状では、処分坑道埋戻し後の計測は困難であり、主要坑道からの計測結果からの類推となる。 | ・主要坑道からのデータに基づく自己シール性を阻害する物質を含む地下水が流入しないことの判断に係る検討 |
| | | | 坑道内（ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |
| | | 処分施設（処分坑道） | 処分孔周辺（ｾﾝｻ類） | | | | 適用可能な技術が開発された場合 | | | | | | | | ・処分環境での適用性の検討<br>・センサや配線などによる処分性能への影響検討<br>・データ送信技術の確立<br>・センサの耐久性<br>・長期計測可能な電源技術の確立 |
| | | | 坑道内（ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ） | | | | | | | | | | | | |
| | | | 岩盤（MP等） | | | | | | | | | | | | |

注※　一部のパラメータに関しては、初期パネルでの計測によって設計・施工・管理等への反映が行われることにより、以降のパネルでは計測が不要となる。
注記1　主要坑道閉鎖以降のニアフィールドモニタリングはデータ送信等の向上や長期的な電源確保など技術的に課題が多いことから、地表環境及びボーリング孔からの探査技術によるモニタリングをベースラインより行う。
注記2　■はセンサ機器による直接計測、■は物理探査等の間接計測、■はサンプリング分析を意味する。
注記3　赤矢印は、地下研究施設等においてセンサ技術の適用性が実証された場合を示す。
注記4　緩衝材の自己シール性を阻害する物質を含む地下水が流入することを確認するための地下水圧等の水理パラメータも必要であるが、ここでは割愛した。
注記5　色の濃淡は終了時期が不明であることを示す。
注記6　内空変位(M-07)は埋め戻し材やプラグのみ。

(2) まとめ

人工バリアが設計あるいは予測通りの性能を発揮することを確認するモニタリングにおいては、人工バリアそのもののモニタリングに加え、人工バリアが施工されたニアフィールドの地質学的、水理学的パラメータ等のモニタリングが不可欠と考えられる。

このため、既存の FEP 内容を整理し、人工バリア性能に影響を与える要因を特定し、これらに関連する約 30 種類のニアフィールドパラメータを（熱、水理、岩盤力学、化学）を抽出した。

次に、国内外の地下研究所での計測、モニタリングの実績等を勘案し、計測機器の有無よりニアフィールドでのモニタリングパラメータの絞り込みを行った。主な調査結果は、次の通りとなった。

- 長期耐久性や処分性能への影響に関する技術課題やデータ精度の観点では課題はあるものの、ほとんどのパラメータに関して（直接／間接的に）計測が行われている。
- 今回の海外調査対象国（フィンランド）では、すでに実績のある技術を主に使用することとしている。このため、岩盤力学パラメータを除けば、水理パラメータや化学パラメータの多くは、ボーリングサンプリングやサンプリング分析を主としており、センサ類による直接計測はほとんど実施していない。
- この結果より、各パラメータの現状での計測可能性は以下の通りとなった。
- 計測場所へのアクセスが可能な段階（処分孔または処分坑道埋戻し前）では、多くのパラメータの直接計測が可能である。しかし、抽出したニアフィールドパラメータのうち、化学パラメータ（水素ガス濃度、地下水組成、地下水中のコロイド、地下水中の塩分濃度、地下水中の微生物、地下水中の有機物量、有機物分解生成ガス）については、現状技術では、サンプリング分析が汎用性の高い技術であり、センサ類での直接計測を行う場合には、克服すべき課題があると考えられた。
- 処分孔または処分坑道が埋戻され、アクセスが困難となると、ほとんどのパラメータの計測は困難となる（特に化学パラメータ）。また、本検討では、水理パラメータについて、処分坑道内の調査孔による計測を仮定したが、国内外調査結果では、これらのパラメータや化学成分などは、坑道周辺からの MP（マルチパッカ）システムやサンプリングによって、間接的なモニタリングが行われる予定であり、この計測方法であれば、処分坑道が埋戻された後でも継続的に計測が可能である（ただし、パラメータによって、要求されるスケールでの把握は困難となる）。

さらに、抽出したニアフィールドパラメータをセンサ類で直接計測する場合のモニタリングシステムについて、地層処分モニタリング技術メニューを用いて検討した。最後に、実施主体のオーバーパック、緩衝材及び埋め戻し材・止水プラグの技術要件の観点から、ニアフィールドでのモニタリング結果の反映について検討した。

上記の結果より、今回の FEP より抽出したニアフィールドパラメータについて、モニタリングを実施した場合の技術要件への反映結果を表 2.4.4-69 及び表 2.4.4-70 に示す。なお、ここでは、アクセスが可能な段階においての計測可能性（現状技術では、直接計測可能／サンプリング手法が一般的であるか）についても示した。

本検討結果より、ニアフィールド環境において人工バリアの性能確認モニタリングを実施する場合の技術的課題は、次の通りである。

① 処分坑道において、現状ではサンプリング機器を使用するパラメータ（例：地下水化学）をセンサ類で計測する場合：
- 処分環境での適用性の検討
- センサや配線などによる処分性能への影響検討
- データ送信技術（無線）の確立
- センサの耐久性
- 長期計測可能な電源技術の確立
- センサや配線等の残置物による処分性能への影響

② 処分坑道が埋め戻され、主要坑道で計測を行う場合：
- 主要坑道からのデータに基づく処分坑道内の状況の把握方法の検討（例えばデータに基づくシミュレーション技術の検討）

③ 主要坑道及びアクセス坑道が埋め戻された後の場合：
- ファーフィールドからの計測による処分坑道内の状況の把握方法の検討（例えばデータに基づくシミュレーション技術の検討）

表 2.4.4-69　技術要件ごとのニアフィールドモニタリングの役割及び関連パラメータの測定可能性

| 技術要件 | ニアフィールドモニタリングの役割 | 関連するニアフィールドパラメータ | | |
|---|---|---|---|---|
| | | センサ類による直接計測 | 物理探査手法等による間接計測 | サンプリング分析 a) |
| 耐食性 | ①オーバーパックの定置後の所定の期間、腐食により安全機能が損なわれていないことまた、不動態化の可能性などを引き起こす酸化性化学種の発生に至らないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量 | ・ 水分量(岩盤飽和度) | ・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)<br>・ 地下水中の塩分濃度<br>・ 地下水中の有機物量 |
| 構造健全性 | ① オーバーパックが構造健全性を維持していることを埋設後に作用する機械的荷重をニアフィールド環境でモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 岩盤応力<br>・ 岩盤の変形<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 岩盤強度<br>・ 割れ目幅<br>・ 内空変位 | － |
| 耐熱性 | ① オーバーパック材料の熱による変形や、熱応力による破損が引き起こるような周辺環境とならないことを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 温度<br>・ 温度(岩盤)<br>・ 温度(プラグ／グラウト／支保／埋め戻し材)<br>・ 温度(地下水)<br>・ 岩盤応力 | － | － |
| 残置物との相互作用の影響の低減 | ① オーバーパックの安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物のオーバーパックへの浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 地下水流動<br>・ 割れ目幅 | ・ 地下水組成(Ca2+)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン) |
| 低透水性 | ① 周辺地下水の流れが、緩衝材の低透水性が有効に機能するレベルであることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 地下水圧<br>・ 地下水流動<br>・ 透水係数<br>・ 割れ目幅 | － |
| コロイドろ過能 | ① ベースライン情報として、周辺環境中のコロイド種類や量を把握する。 | － | － | ・ 地下水中のコロイド |
| 収着性 | ① 緩衝材の収着能力を低下（例えば Ca 型化）させるような周辺環境とならないかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | － | － | ・ 地下水組成(Ca2+)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)<br>・ 地下水中の塩分濃度 |
| 自己修復性 | ① 緩衝材の自己修復機能を低下させるような周辺環境とならないかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量<br>・ 岩盤応力<br>・ 岩盤の変形 | ・ 地下水圧<br>・ 地下水流動<br>・ 透水係数<br>・ 岩盤強度 | ・ 地下水組成(Ca2+)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)<br>・ 地下水中の塩分濃度 |
| | ② 施工後に生じる隙間が、緩衝材の自己修復機能で充填できる程度のレベルであるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 岩盤の変形<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 割れ目幅 | － |
| | ③ オーバーパックの腐食に伴い発生する水素ガスの発生がないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | － | － | ・ 水素ガス濃度 |
| 耐熱性 | ① 緩衝材の機能が著しく低下しない温度環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 温度<br>・ 温度(岩盤)<br>・ 温度(プラグ／グラウト／支保／埋め戻し材)<br>・ 温度(地下水)<br>・ 岩盤応力 | － | － |
| 緩衝材流出の抑制 | ① 安全機能を低下させる緩衝材の流出が著しく生じない環境であることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量 | ・ 地下水圧<br>・ 地下水流動<br>・ 透水係数 | ・ 地下水中の塩分濃度 |
| | ② 緩衝材の流出が生じていないことをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | － | － | ・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)<br>・ 地下水中のコロイド |
| | ③ 緩衝材の流出が生じないような対策（岩盤に有意な亀裂がない場所を選択するなど）が有効に機能しているかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 割れ目幅 | － |

注記　■はオーバーパック、■は緩衝材、■は埋め戻し材・止水プラグの技術要件を示す。

注記 a)　国内外の技術調査より、アクセス性にかかわらず、一般的にはサンプリング分析が使用されていることを示す。

表 2.4.4-70　技術要件ごとのニアフィールドモニタリングの役割及び関連パラメータの測定可能性

| 技術要件 | ニアフィールドモニタリングの役割 | 関連するニアフィールドパラメータ | | |
|---|---|---|---|---|
| | | センサ類による直接計測 | 物理探査手法等による間接計測 | サンプリング分析 a) |
| 残置物との相互作用の影響の低減 | ① 緩衝材の安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物の浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 地下水流動<br>・ 割れ目幅 | ・ 地下水組成(Ca2+)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン) |
| オーバーパックの保護（物理的緩衝性） | ① 緩衝材の物理的緩衝性が有効に機能する力学的環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 岩盤応力<br>・ 岩盤の変形<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 岩盤強度<br>・ 割れ目幅<br>・ 内空変位 | － |
| オーバーパックの沈下の防止 | ① オーバーパックの機能が維持される期間、設計通りにオーバーパックを力学的に安定に支持できる周辺環境であるかをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 岩盤応力<br>・ 岩盤の変形<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 岩盤強度<br>・ 割れ目幅<br>・ 内空変位 | － |
| 施工時の隙間の充填（自己シール性） | ① 緩衝材の自己シール性が発揮できる環境であるか、この機能を阻害する要因がないかなどをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 水分量(岩盤飽和度)<br>・ 湧水量<br>・ 岩盤応力<br>・ 岩盤の変形<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 地下水圧<br>・ 地下水流動<br>・ 透水係数<br>・ 岩盤強度<br>・ 割れ目幅 | ・ 地下水組成(Ca2+)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)<br>・ 地下水中の塩分濃度 |
| 低透水性 | ① 埋め戻し材と止水プラグが適切に配置され、地下水の流れを抑制していることを、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 地下水圧<br>・ 地下水流動<br>・ 透水係数<br>・ 割れ目幅<br>・ 内空変位 | － |
| 施工時の隙間の充てん（自己シール性） | ① 埋め戻し材や止水プラグの施工時の隙間が膨潤により充填されているか、この機能を阻害する要因がないかなどをニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 水分量(岩盤飽和度)<br>・ 湧水量<br>・ 岩盤応力<br>・ 岩盤の変形<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 地下水圧<br>・ 地下水流動<br>・ 透水係数<br>・ 岩盤強度<br>・ 割れ目幅<br>・ 内空変位 | ・ 地下水組成(Ca2+)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン)<br>・ 地下水中の塩分濃度 |
| 残置物、材料間の相互作用の影響の低減 | ① 埋め戻し材や止水プラグの安全機能を著しく低下させる可能性のある、残置物の長期的な劣化による生成物の有無や量、さらにこれら生成物の浸入可能性の因子について、ニアフィールド環境でのモニタリングにより確認し、必要に応じて対策の見直しなどを行う。 | ・ 湧水量<br>・ 掘削影響領域の変化<br>・ 岩盤クリープ量 | ・ 地下水流動<br>・ 割れ目幅 | ・ 地下水組成(Ca2+)<br>・ 地下水組成(pH、Eh、イオン) |

注記　■はオーバーパック、■は緩衝材、■は埋め戻し材・止水プラグの技術要件を示す。

注記 a)　国内外の技術調査より、アクセス性にかかわらず、一般的にはサンプリング分析が使用されていることを示す。

## 2.5　操業時の安全性に関わるモニタリングの検討

地層処分における建設・操業段階に於いては、作業員の安全性に関わるモニタリングが実施されるものと考えられる。このようなモニタリングには、通常の労働安全に関わるモニタリングと、放射線安全にかかわるモニタリングが含まれる。

地層処分システム工学確証技術開発では、平成 25 年度に「自然災害に対する操業期間中の安全対策に関る基盤技術の開発」において「状況把握・監視技術」として主に災害発生時の安全性に着目した検討を実施した[41]。

地層処分システムで考えうる多様な異常状態や事故について、応急対策、恒久対策、及び対策のための試験・解析を検討・抽出した 15 枚の対策シートを、状況把握・監視に関る手順（行為）の観点から見直し・整理を行い、各々のシートに「状況把握・監視手順（行為）及び「必要な情報」の欄を設け、応急対策のフロー中で状況把握・監視に関連する部分に、その手順と必要な情報を記述した。

次に、状況把握・監視に必要な技術の調査を実施した。地層処分施設のように、放射線影響を伴う緊急時の状況を把握・監視するには、技術や機器に放射線環境下での適用性が重要であり、また地下処分施設では、大深度地下施設での適用性も求められ、両方向からの検討が必要である。これらを踏まえ、福島第一原子力発電所事故時の対応やチリ・コピアポ鉱山の落盤事故でのモニタリング技術等を調査・整理した。

さらに、上述の状況把握・監視手順に関る 15 枚の整理シートに、放射線環境下に適用できる技術、及び大深度地下に適用できる技術の調査結果を加えて整理し、状況把握・監視手順の整理シートに、「状況把握・監視のために必要な技術や機器」及び「技術の開発状況や適用事例」の欄を追加し、当該欄に上記の 2 通りの技術調査結果を記述して取りまとめた。

上記の検討では、事故時の状況把握に重点を置いてモニタリング等により把握すべき内容を抽出したが、計測またはモニタリングすべきパラメータと機器情報の調査は、放射線や放射性物質の把握に重点を置いたものであった。しかしながら、事故時の状況は一般労働安全のための環境に関する項目等の、通常時から監視している項目の異常値として把握されるものも多いと考えられる。

本年度はモニタリング関連技術の整備に於いて、このような観点から作業時の安全に関する項目の抽出を実施した（表 2.4.4-1～表 2.4.4-3)。操業時の作業員の安全性に関わるモニタリングに於いては少なくともこれらの項目を網羅すべきものと考えられる。

さらに、これらの作業安全パラメータごとに、適用可能な技術について地層処分モニタリング技術メニュー（第 5 章参照）や MoDeRn プロジェクトによる技術報告書[33]等を対象に調査を行い、計測、モニタリングするパラメータとその方式の例を表 2.4.4-4 に整理した。操業時の安全性に関するモニタリングについては、ほとんどの場合、既存の技術にて実施可能と言える。

表 2.4.4-1　想定した異常状態

| |
|---|
| ①　火災・爆発 |
| ②　落盤・落石 |
| ③　湧水（多量の湧水） |
| ④　有毒ガスの発生 |
| ⑤　体外被ばく |
| ⑥　体内被ばく |

表 2.4.4-2　事故事象に関する項目

| |
|---|
| (1)粉塵 |
| (2)酸素濃度（の低下） |
| (3)機械誤作動／衝突 |
| (4)換気機能停止 |
| (5)電気・通信の状態 |
| (6)バックアップ機器の状態 |
| (7)振動 |

表 2.4.4-3　事故時の環境に関する項目

| |
|---|
| a.　酸素濃度 |
| b.　温度 |
| c.　湿度 |
| d.　作業員の位置 |
| e.　作業機器の位置 |
| f.　空間放射線 |
| g.　岩盤・支保の安定性 |

表 2.4.4-4　作業安全パラメータごとの計測パラメータと計測機器の例

| 分類 | 作業安全パラメータ（モニタリングにより確認する項目） | 計測・モニタリングパラメータ | | 計測機器の例 |
|---|---|---|---|---|
| | | 大分類 | 小分類 | |
| 異常状態 | ① 火災・爆発 | ・ 放射能<br>・ 酸素濃度 | ・ 空間線量<br>・ 酸素<br>・ 放射性物質量 | ・ ヨウ化ナトリウムスペクトロメーター検出器<br>・ 酸素濃度計<br>・ HEPA フィルタ |
| | ② 落盤・落石 | ・ 放射能<br>・ 変形<br>・ 振動 | ・ 空間線量<br>・ 変位・ひずみ量<br>・ 地震 | ・ ヨウ化ナトリウムスペクトロメーター検出器<br>・ ゲージ<br>・ セオドライト<br>・ 傾斜計<br>・ 地表用加速度計<br>・ 可搬式データ収録・処理装置<br>・ GPS 測量 |
| | ③ 湧水 | ・ 放射能<br>・ 地下水 | ・ 土壌線量<br>・ 水質・底質線量<br>・ 地下水位<br>・ 湧水 | ・ シンチレーション式水質・底質線量用サーベイメータ<br>・ 曳航式放射線計測システム<br>・ 地下水位計<br>・ 地下水検層器 |
| | ④ 有毒ガス | ・ 有毒ガス | ・ 一酸化炭素<br>・ 二酸化炭素<br>・ メタン | ・ ガスクロマトグラフィ<br>・ SE-H2 水素センサ<br>・ メタン濃度計測器<br>・ 二酸化炭素濃度計測器 |
| | ⑤ 体外被ばく | ・ 放射能<br>・ データ管理システム | ・ 空間線量<br>・ 放射性物質量 | ・ GM 管（ガイガーミュラー計数管）<br>・ Na(Tl)シンチレーター<br>・ LaBr3(Ce)シンチレーター<br>・ Csl(Tl)シンチレーター<br>・ CdTe(CdZnTe)半導体検出器<br>・ Ge 半導体検出器<br>・ Si(Li)半導体検出器<br>・ モニタリングポスト（※蛍光ガラス線量計）<br>・ 電離箱式線量計<br>・ 熱ルミネッサンス線量計<br>・ フィルムバッジ<br>・ HEPA フィルタ<br>・ 放射線管理システム |
| | ⑥ 体内被ばく | ・ 放射能 | ・ 体内被ばく量 | ・ ホールボディカウンター |
| 事故事象 | (1)粉塵 | ・ 放射能<br>・ データ管理システム | ・ 放射性物質量 | ・ HEPA フィルタ<br>・ 放射線管理システム |
| | (2)酸素濃度 | ・ 酸素濃度 | ・ 酸素 | ・ 酸素濃度計 |
| | (3)機械誤作動／衝突 | － | － | ・ 監視カメラ<br>・ 通信システム |
| | (4)換気機能停止 | ・ 放射能<br>・ データ管理システム | ・ 体内被ばく量 | ・ 放射線管理システム<br>・ ホールボディカウンター |
| | (5)電気・通信の状態 | － | － | ・ 電力、通信網の監視システム |
| | (6)バックアップ機器の状態 | － | － | ・ 電力、通信網の監視システム |
| | (7)振動 | ・ 変形<br>・ 振動 | ・ 変位・ひずみ量<br>・ 地震 | ・ ゲージ<br>・ セオドライト<br>・ 傾斜計<br>・ 地表用加速度計<br>・ 可搬式データ収録・処理装置 |
| 事故時の環境 | a.酸素濃度 | ・ 酸素濃度 | ・ 酸素 | ・ 酸素濃度計 |
| | b.温度 | ・ 熱 | ・ 温度 | ・ 熱電対式（他多数） |
| | c.湿度 | ・ 水分 | ・ 湿度 | ・ 静電容量式（他多数） |
| | d.作業員の位置 | － | － | ・ 入坑管理、坑内 PHS |
| | e.作業機器の位置 | － | － | ・ 建設、操業に関する記録 |
| | f.空間放射線 | ・ 放射能<br>・ データ管理システム | ・ 空間線量<br>・ 体内被ばく量 | ・ GM 管（ガイガーミュラー計数管）<br>・ Na(Tl)シンチレーター<br>・ LaBr3(Ce)シンチレーター<br>・ Csl(Tl)シンチレーター<br>・ CdTe(CdZnTe)半導体検出器<br>・ Ge 半導体検出器<br>・ Si(Li)半導体検出器<br>・ モニタリングポスト（※蛍光ガラス線量計）<br>・ 電離箱式線量計<br>・ 熱ルミネッサンス線量計<br>・ フィルムバッジ<br>・ 放射線管理システム<br>・ ホールボディカウンター |
| | g.岩盤・支保の安定性 | ・ 変形 | ・ 変位・ひずみ量 | ・ ゲージ<br>・ セオドライト<br>・ 傾斜計 |

## 2.6　回収可能性に関係したモニタリングの検討

### 2.6.1　背景

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業は、可逆性とこれを具体化する方策の一つである廃棄体の回収可能性を保持しつつ、長い年月をかけて段階的に事業が進められる。わが国における回収可能性に関連した報告書の記述としては、例えば以下のものがみられる。

・高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る安全規制について（総合資源エネルギー調査会、2008）

「国は、事業許可申請に対する安全審査を行い、許可後は基本設計ないし基本的設計方針が適切に反映され維持されていることを確認することから、基本的に廃棄体を回収するような事態が生じることはないと考えられる。<中略>埋設事業において、閉鎖までの間は、基本的に廃棄体を回収することは可能と考えられるが、これを安全かつ効率的に実施するために、回収可能性に配慮した設計の採用や具体的な回収手段を検討しておくことが重要と考えられる。」

また、総合資源エネルギー調査会放射性廃棄物ワーキンググループにおいて、可逆性・回収可能性を含めた放射性廃棄物の処分に関する審議が進められており、中間とりまとめ[42]には以下の記述がみられる。

「最終処分に向けた取組を進める上は、数世代にも及ぶ長期的な事業であることから、可逆性・回収可能性を担保し、将来世代も含めて最終処分に関する意思決定を見直せる仕組みとすることが不可欠。」

「最終処分が実施される（処分場の閉鎖）までの間の、使用済燃料の中間貯蔵や高レベル放射性廃棄物の管理のあり方の具体化が不可欠であり、回収可能性をいつまで維持するかについて、地元の意向等を踏まえ今後決定していけるよう、まずは技術的観点から、処分場を閉鎖せずに安全に管理可能な期間がどの程度であるか（坑道安定性や地質環境特性への影響等）調査研究を行うこと」

2015年2月には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」の改定に関する意見の公募[43]が行われた。改定案には以下の記述がみられる。

「最終処分事業は極めて長期にわたる事業であることを踏まえ、今後の技術その他の変化の可能性に柔軟かつ適切に対応する観点から、基本的に最終処分に関する政策や最終処分事業の可逆性を担保することとし、今後より良い処分方法が実用化された場合等に将来世代が最良の処分方法を選択できるようにする。このため、機構は、特定放射性廃棄物が最終処分施設に搬入された後においても、安全な管理が合理的に継続される範囲内で、最終処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の搬出の可能性（回収可能性）を確保するものとする。（中略）合わせて、最終処

分施設を閉鎖せずに回収可能性を維持した場合の影響等について調査研究を進め、最終処分施設の閉鎖までの間の特定放射性廃棄物の管理の在り方を具体化する。」

NUNOにおいては、地層処分事業の安全確保（2010年度版）[44]の中で、「可逆性」は事業の段階を実施してきた方向とは逆の方向に戻すことの可能性という意味で用いられ、「回収可能性」は廃棄物の回収という可逆性を具体化する方策の一つと位置付けて用いている。NUMO は、閉鎖措置計画が認可されるまでの間、すなわち地層処分システムが十分な信頼性を持って構築されたということが確認されるまでは、廃棄体の回収可能性を維持することとしている。なお、NUMOではこの閉鎖措置計画が認可される前の段階について、廃棄体を定置した処分坑道はすでに埋め戻されており、処分坑道の端部にはプラグが設置された状態を想定している。

なお、廃棄体の回収に関しては、事業段階の進捗とともに困難になっていくということがOECD/NEA主催のR&Rプロジェクトでも共通の認識となっている[45]。R&Rプロジェクトではそのような考え方を図 2.6.1-1に示すように、事業段階の進行とともに人間が関与した安全確保から受動的な安全確保へと移行していき、同時に廃棄体の回収はより難しくなり、回収に要する費用も増大していくという考え方を示している。

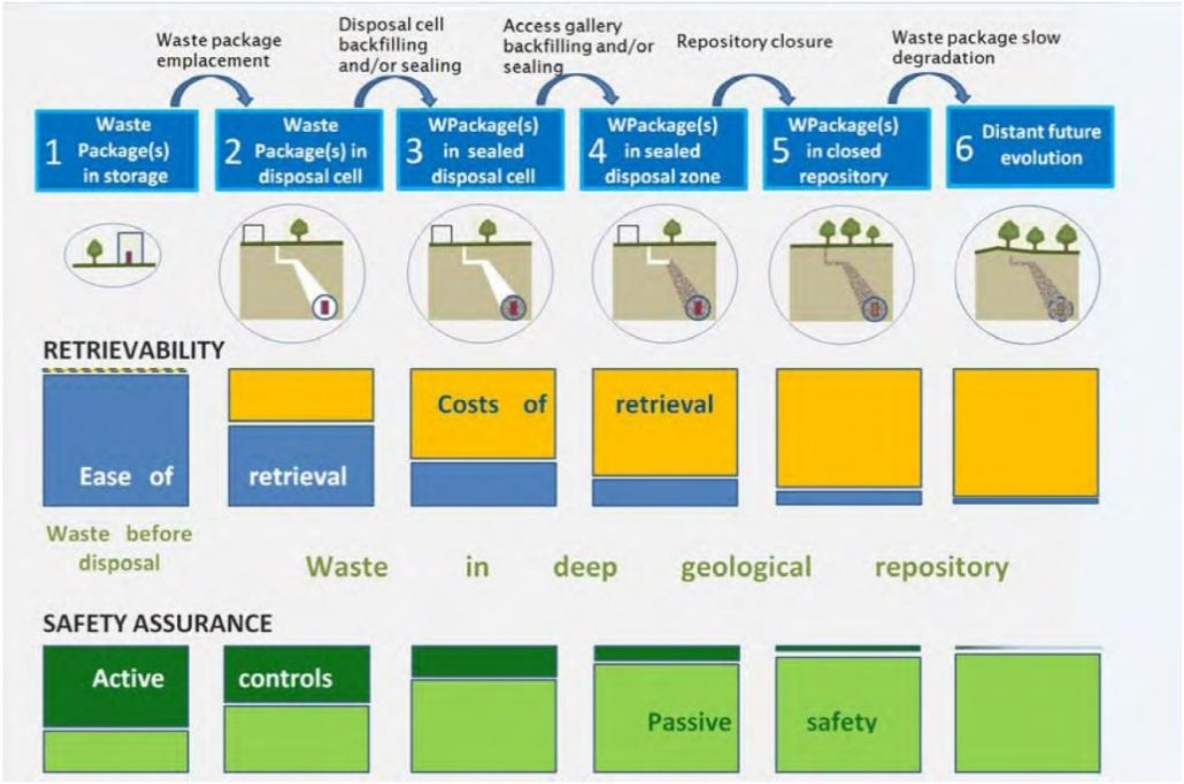



図 2.6.1-1 廃棄体の回収にかかわる R スケール[45]

MoDeRn[3]における地層処分のモニタリングにかかわる議論より、モニタリングに対する包括的な目標の一つとして、「処分プロセスの段階的管理に関する意思決定への貢献」が挙げられている。この包括的目標は、回収可能性に関しても十分に適用できるものであり、「回収可能性の維持に関する保有性能の判断への貢献」と表現することができる。

原環センター[46]では、処分システムの構成要素、特に人工バリアの性能の確認を目的としたモニタリングにおいて、予測外のモニタリング結果が得られた際の対処のオプションの一つとして廃棄体の回収が検討される可能性があることを示した（図 2.6.1-2）。詳細な調査や、施工中の品質管理を実施しても、地盤が有する初期のばらつきや時間的な変化、施工後の人工バリアと坑道環境の状態変化により、人工バリアが当初の予測と異なった状態になり得ることを想定している。

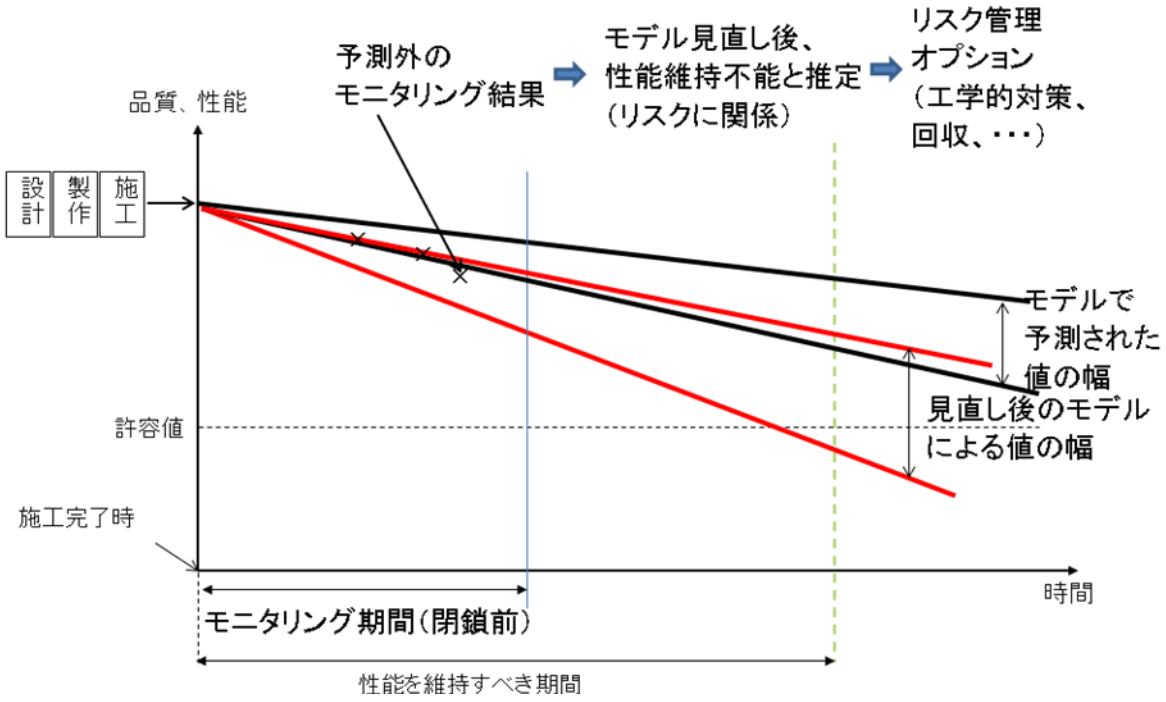



図 2.6.1-2　性能確認を目的としたモニタリング結果の反映の検討例（予測外の結果が得られた場合）（[46]より再掲）

NUMO(2011)[44]における回収可能性とモニタリングに関する基本的考え方を図2.6.1-3に示す。閉鎖措置計画認可申請までの期間は、閉鎖の判断を行うために必要なモニタリングを継続し、得られた結果は閉鎖の判断、つまり閉鎖措置計画の認可申請に適用される。閉鎖の判断がなされた段階で、処分場の受動的安全性が担保できるという判断がなされていることになり、閉鎖措置計画の認可以降は閉鎖後長期の安全確保という観点では、モニタリングや回収可能性を維持する必要性はなくなると考えている。ただし、その時点では処分場の閉鎖措置がまだ実施されておらず、受動的安全性を担保するために確実に閉鎖措置を行う必要があり、そのために必要なモニタリングは実施するものとしている。閉

鎖措置が完了し、閉鎖確認が行われた後は、安全確保という観点ではモニタリングを継続する合理的な理由はなくなる。ただし、地層処分システムへの信頼感の向上という観点で必要に応じてモニタリングを実施することとしている。

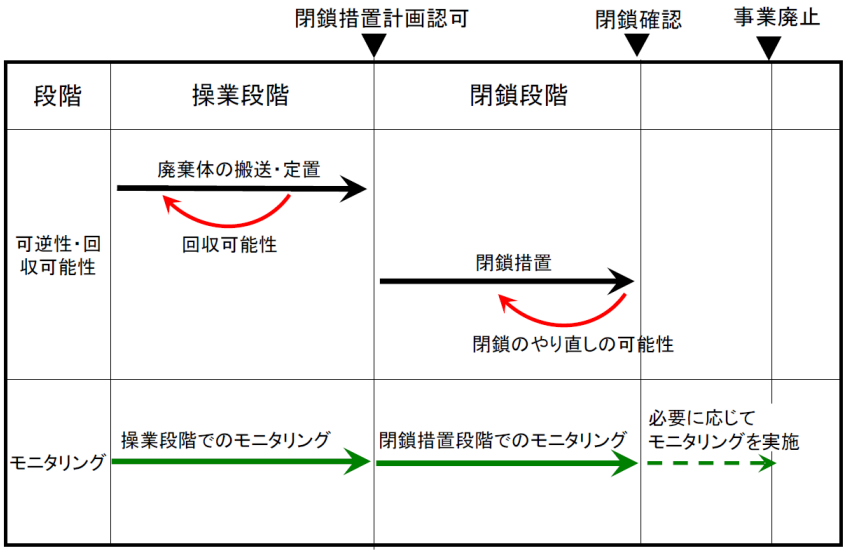



図 2.6.1-3 回収可能性に関する NUMO の基本的考え方[44]

### 2.6.2 回収可能性に関係したモニタリングの分類

回収可能性の維持に関連したモニタリングは次の３つに分けて考えることができる。

・回収を実施する際の安全性に関するモニタリング

何らかの理由で廃棄体の回収を行う場合、回収作業中の安全を確保し、回収技術を選択するための情報を取得するためのモニタリングである。

・回収がバリア性能に影響しているか否かに関するモニタリング

何らかの理由により一部の廃棄体の回収が行われた際、この回収作業が回収対象ではない領域のバリア性能に影響を与えていないことを確認する必要がある。このような判断に貢献するモニタリングである。実施内容は閉鎖後安全性、性能確認のためのモニタリングに類似したものと考えられる。

・性能確認モニタリングの結果への対応の選択肢の一つ

これまでに検討してきた閉鎖後の長期安全性を主眼としたモニタリング（性能確認モニタリング）に於いて、予測外のモニタリング結果が得られ、かつリスクがあると判断された場合の対応オプションの一つとして、廃棄体の回収が検討されることがあり得る。

上記のモニタリングのうち、「回収がバリア性能に影響しているか否かに関するモニタリング」と「回収を実施する際の安全性に関するモニタリング」が廃棄体の回収可能性に関

わる独自のモニタリングである。従って、以下の検討では主にこれらのモニタリングについて検討を実施する。

2.6.3　検討に関わる状態設定

(1)坑道、人工バリアの状態設定

廃棄体の回収可能性に関わるモニタリングについて検討するためには、処分坑道や処分孔がどこまで埋め戻された状態かを予め設定して検討を行う必要がある。本検討では、回収可能性が維持された坑道や人工バリアの状態として、以下を設定した。

・処分方式は、処分孔竪置き方式とする。
・坑道の埋め戻し状態は、処分孔及び処分坑道を埋め戻し、処分坑道端部のプラグを設置するが、主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道は埋め戻さない状態とする。
・モニタリングの実施期間は、処分場の操業期間中とする。
・モニタリング対象は、人工バリア（オーバーパック、緩衝材)、処分坑道及び主要坑道（支保、路盤等）処分坑道埋め戻し材、処分坑道端部のプラグ、ニアフィールドとする。

処分孔竪置き方式の人工バリアについては、人工バリアの構成要素であるオーバーパックとブロック型緩衝材を地上施設で製造後、地下施設（処分孔）まで搬送定置装置を用いて運搬・定置し、人工バリアを組み立てる方式を設定した。このような設定の人工バリアについて、既往の研究（原環センター、2006[47]）において、人工バリアの構成が表 2.6.3-1 にのように示されており、本検討ではこの仕様を人工バリアの設定とした。原環センター（2006）[47]では、緩衝材ブロック仕様は、定置に必要な隙間と処分孔施工精度（傾き）等を考慮し、製作目標乾燥密度を 1.9Mg/m$^3$、製作含水比 10%としている。オーバーパックと緩衝材ブロック定置時に必要となる隙間は、オーバーパック定置に必要な隙間を片側 20mm、緩衝材ブロック定置に必要な処分孔内壁との隙間を片側 20mm に設定されている。また、緩衝材ブロックの製作、施工誤差及び定置後の寸法変化を考慮し、オーバーパック上部に 20mm、処分孔上部に 50mm の隙間を考慮している。さらに、オーバーパック定置後の処分坑道内の空間線量当量率を管理区域条件以下まで遮へいするため、上部ブロックを定置するものとしている。なお、上部ブロックの厚さは HLW 第 2 次取りまとめ[26]で提示されているものの材料仕様については不明であるため、緩衝材ブロックと同一仕様としている。表 2.6.3-1 の仕様から検討した人工バリアの基本構成を図 2.6.3-1 に示す。

表 2.6.3-1　本検討における人工バリアの仕様

| 項目 | | | 仕様 |
|---|---|---|---|
| オーバーパック | 寸法 | | 直径（以下φ）820×長さ（以下 L）1、730 mm（つかみ部含む L＝1、880 mm） |
| | 質量 | | 6.1 ton |
| 緩衝材ブロック／遮蔽用ブロック | 形状 | | ブロック型緩衝材 |
| | 配合 | | ベントナイト：砂＝70：30 |
| | ブロック乾燥密度 | | 1.9 Mg/m$^3$ |
| | 製作含水比 | | 10 wt% |
| | 寸法 | | φ2、260×H3、300 mm |
| | 質量 | | 25.4 ton（湿潤状態） |
| | 底部・上部分割仕様 | 寸法 | φ2、260×H350 mm |
| | | 質量 | 2.9 ton（湿潤状態） |
| | | 分割数 | 4 分割 |
| | オーバーパック側部分割仕様 | 寸法 | 外径（以下 OD）φ2、260×内径（以下 ID)φ860×高さ（以下 H）475 mm |
| | | 質量 | 3.4 ton（湿潤状態） |
| | | 分割数 | 4 分割 |
| | 上部ブロック | 寸法 | φ2、260×H333 mm |
| | | 質量 | 2.8 ton（湿潤状態） |
| | | 分割数 | 3 分割 |
| 隙間充てん材 | 形状 | | クニゲル原鉱<br>粒径 20mm 以下 |
| | 嵩密度 | | 1.2Mg/m$^3$（乾燥状態） |
| | 充てん量 | | 1.2ton（乾燥状態） |

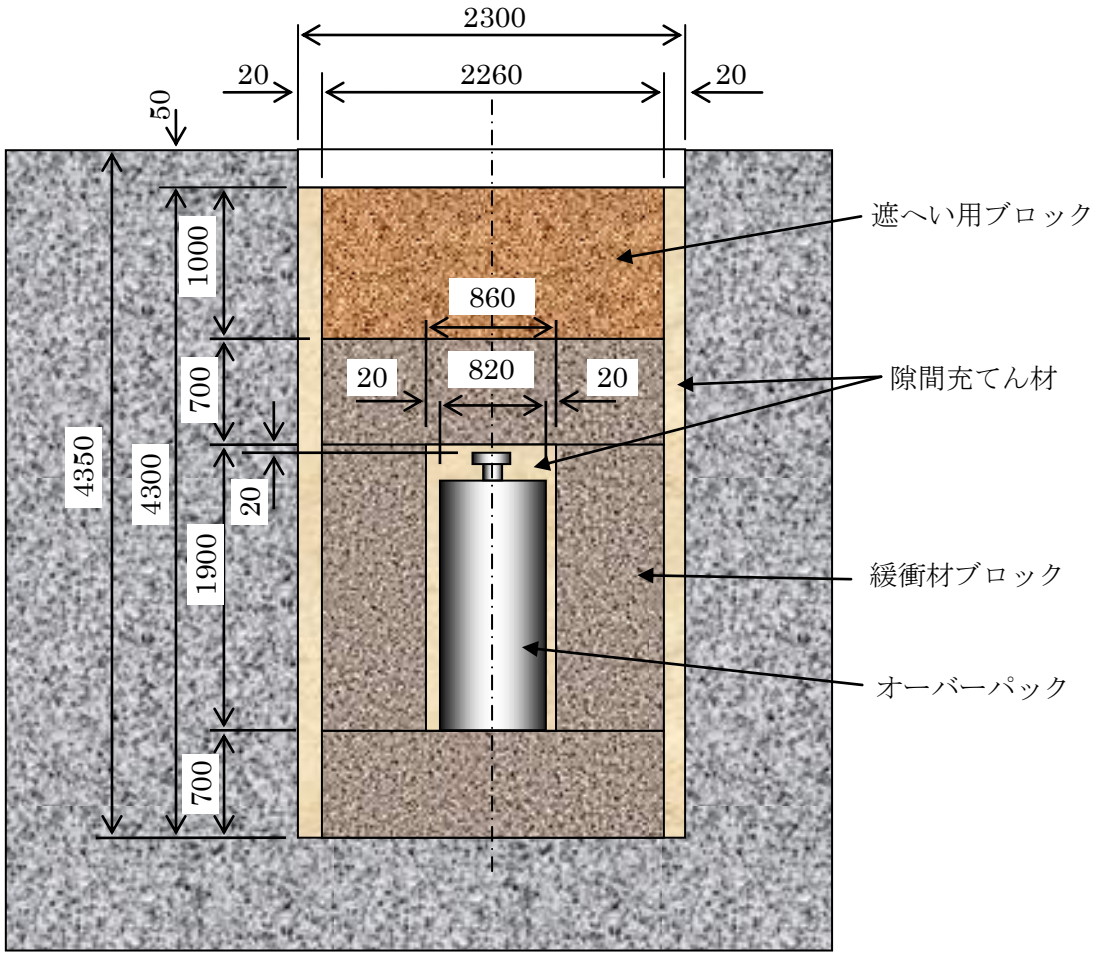



図 2.6.3-1　本検討における処分孔竪置き定置概念　人工バリア基本構成

(2)　操業手順の設定

本検討で設定した処分孔竪置き定置概念に対する概略の操業手順を図 3.2.4-4 に示す。

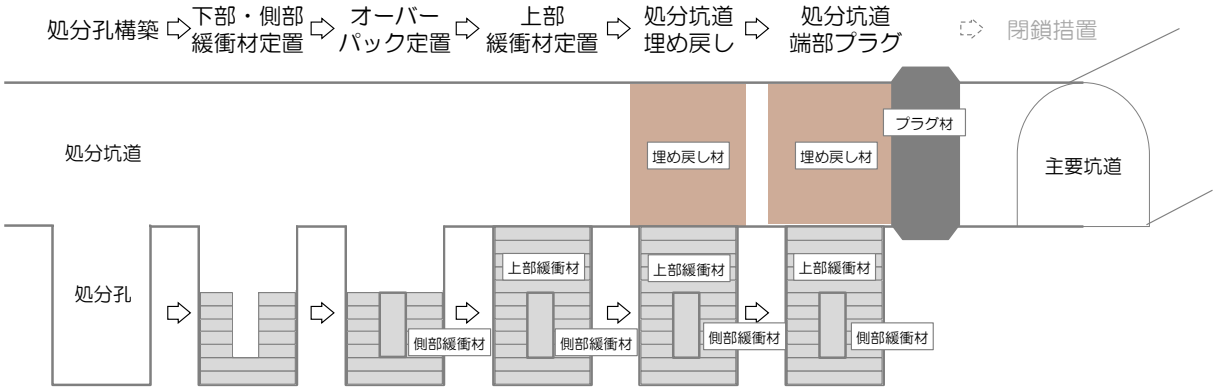



図 2.6.3-2　本検討で設定した操業手順（概略）

オーバーパック、緩衝材及び隙間充てん材の操業手順の詳細（ブロックフロー図）図

2.6.3-3 に示す。なお、同図において作業放射線管理区域での作業となる工程を着色して示している。

オーバーパックは地上施設でガラス固化体を封入・検査後、一次保管する。放射線管理区域の設定からアクセス坑道を除外するために地上から地下への搬送には遮へい機能を有する専用の搬送装置を用いる。アクセス坑道を搬送されてきたオーバーパックは、地下の積み替えエリアで定置装置に積み替える。積み替えエリアは、放射線管理区域と非管理区域を分けるために設定した。オーバーパックを積み込んだ定置装置により、処分孔へオーバーパックを定置される。

緩衝材ブロックは、地上施設で材料を混ぜ合わせた後にプレス機など用いてブロック状に圧縮成形した後に検査を行い、その後一時保管する。地上から地下への搬送には搬送装置を用いる。アクセス坑道を搬送されてきたブロック型緩衝材は、積み替えエリアで定置装置に積み替られる。緩衝材を積み込んだ定置装置により、処分孔へ緩衝材が定置される。なお、緩衝材の設置は、オーバーパック定置前までに底部と側部のパーツ、オーバーパック定置後に隙間充てんを挟んで頂部のパーツに分けて定置される。

隙間充てん材は、地上施設で材料を必要に応じて加工して保管する。地下施設へは、防湿が可能なタンクなどに積載して搬送される。アクセス坑道を搬送されてきた隙間充てん材は、積み替えエリアで隙間充てん材施工装置に積み替えられる。隙間はオーバーパックと緩衝材、緩衝材と処分孔壁面に生じることから、オーバーパック定置後と上部ブロックの定置後の 2 回の施工工程がある。

処分坑道埋め戻しの操業手順の詳細を図 2.6.3-4 に示す。地上施設で埋め戻し材を製作した後に検査を行い、その後一時保管する。地上から地下への搬送には搬送装置を用いる。アクセス坑道を搬送されてきた埋め戻し材は、地下の積み替えエリアで埋め戻し材施工装置に積み変えられる。埋め戻し材を積み込んだ埋め戻し材施工装置により、処分坑道へ埋め戻し材が施工される。

処分坑道端部プラグの操業手順の詳細を図 2.6.3-5 に示す。地上施設での材料（コンクリート）の製造・検査及び搬送装置に積み込みまれ地下施設へ搬送される。処分坑道端部に搬送されてきた材料（コンクリート）を用いて、端部プラグが施工（コンクリートが打込み）される。

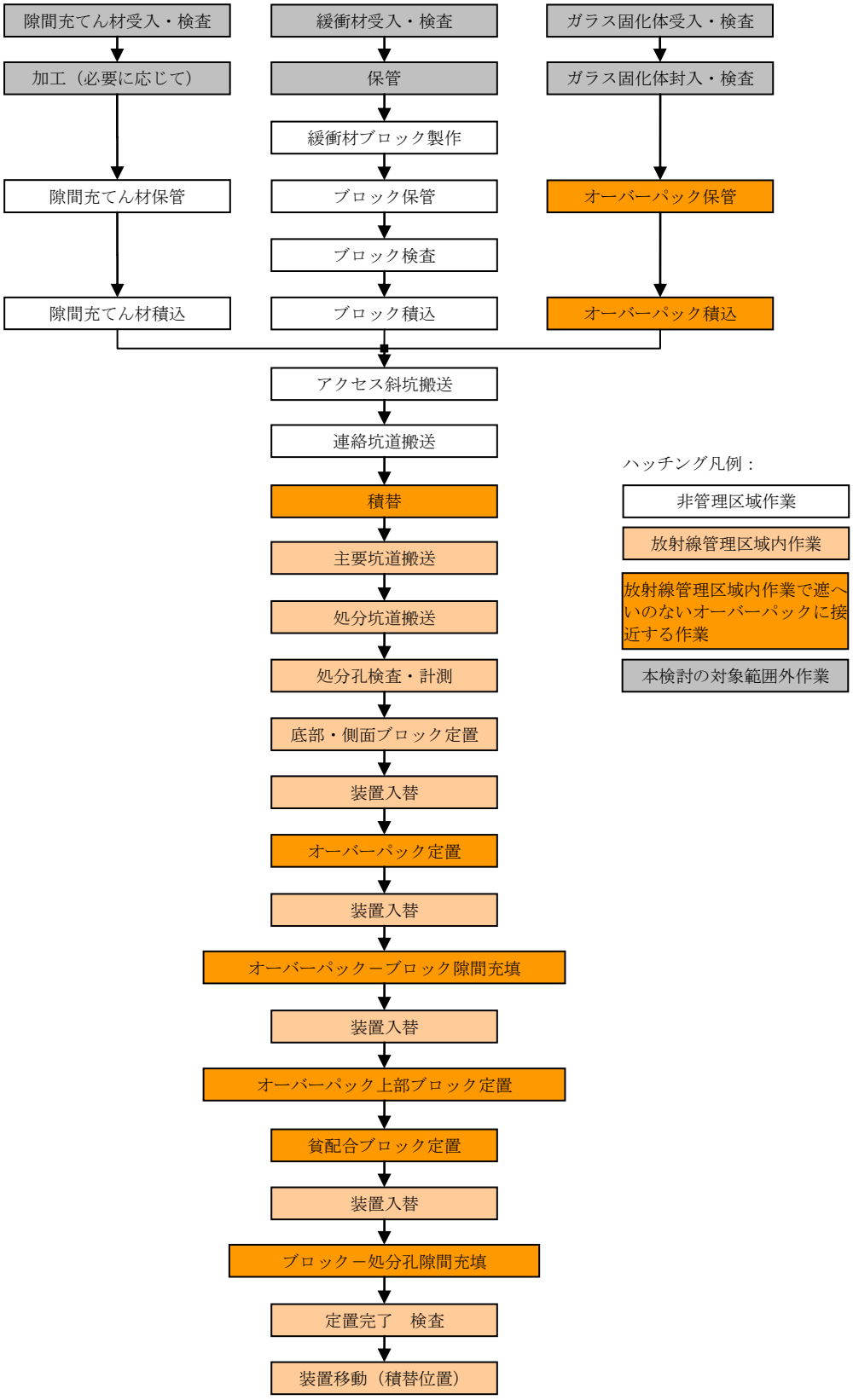



図 2.6.3-3　本検討で設定した操業手順（オーバーパック、緩衝材、隙間充てん材）

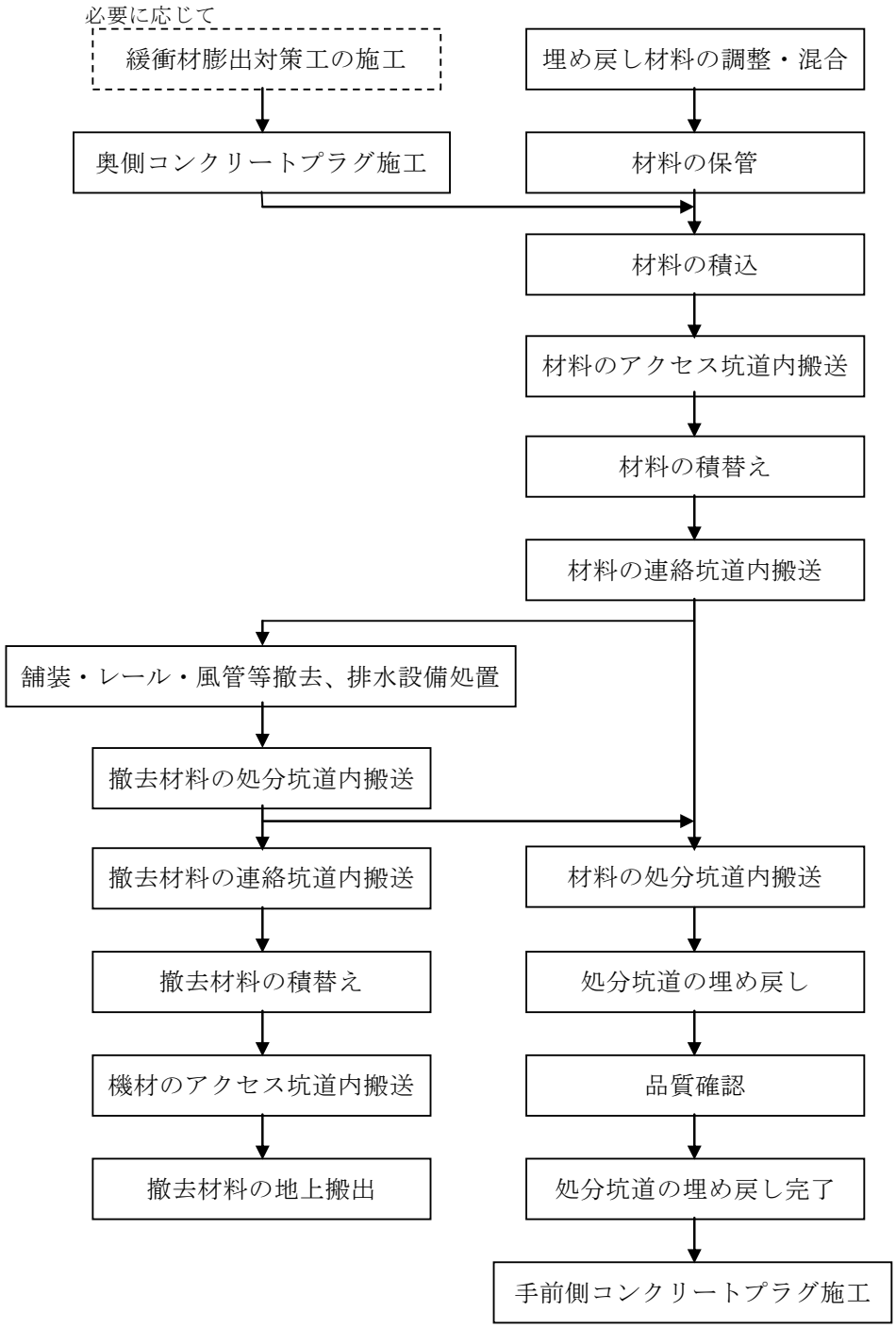



図 2.6.3-4　本検討で設定した操業手順（処分坑道埋め戻し）

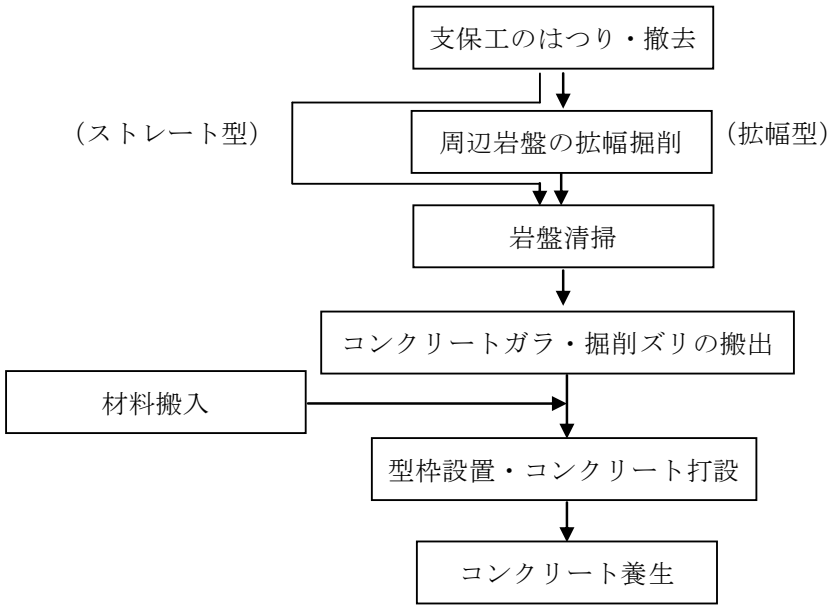



図 2.6.3-5　本検討で設定した操業手順（処分坑道端部プラグ）

(3)　回収手順の設定

回収に関係したモニタリングについて検討するためには、どのような手順で回収を実施するかを予め検討しておく必要がある。本検討では、回収の手順を以下のように設定する。

廃棄体を回収するための手順を検討する地下施設の状態は、以下の通りである。

・処分孔及び処分坑道は埋め戻されている。
・処分坑道端部にはプラグを設置されている。
・主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道は埋め戻されていない。

この状態は、上述した操業手順のうち、処分坑道の端部プラグまで施工された状態であり、廃棄体を回収するためには、廃棄体までのアクセスに障害となる複数の構成部材を除去する必要がある状態である。

1)　全体手順

HLW 第 2 次取りまとめ[26]では、閉鎖前は定置技術の逆手順をたどれば廃棄体を回収することが可能であるとしている。すなわち、図 2.6.3-2 に対する逆手順が基本的な考え方となり、回収手順の概略は、図 2.6.3-6 に示すようになる。ここで、オーバーパックは、周囲に充てんされる隙間充てん材によって拘束を受けるとともに、再冠水による緩衝材の膨潤に伴う拘束を受ける状態であるため、オーバーパックの回収（排出）は、側部緩衝材（及び隙間充てん材）の除去を行った後となり、唯一、操業の逆手順と異なる手順である。

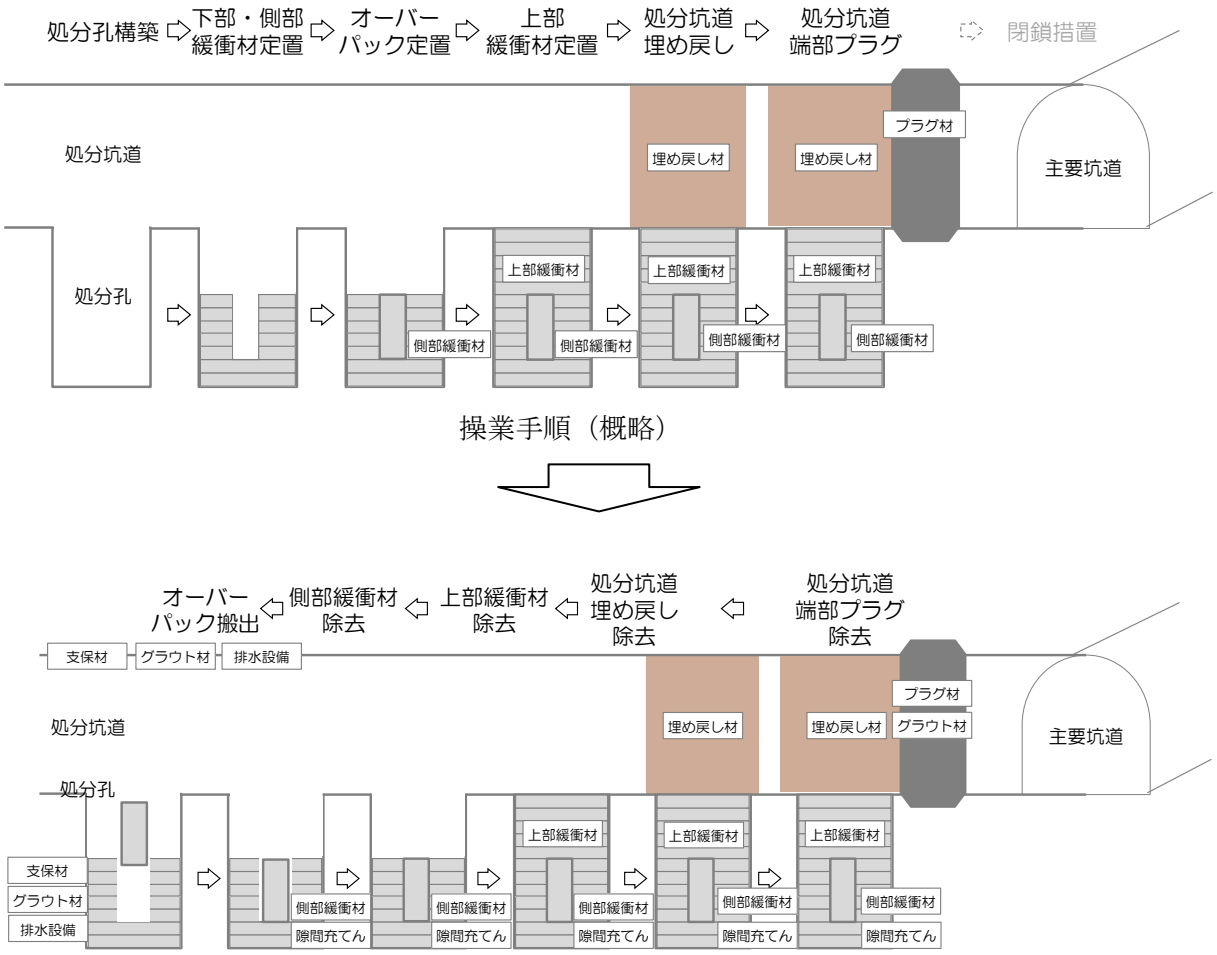



図 2.6.3-6　本検討で設定した回収手順（概略）

2)　処分坑道端部プラグ除去手順

処分坑道端部プラグ除去手順の詳細を図 2.6.3-7 に示す。処分坑道端部プラグの除去は、その素材であるコンクリートを除去することになる。コンクリートを除去（撤去）技術は、土木建築分野で多様な技術が実用化されている。なお、放射線環境での作業になることも考えられることから、遠隔での操作を想定する必要がある。また、放射線管理のための遮へい扉を適切な箇所（処分坑道入口付近）に設ける必要もある。さらに、除去したガラが汚染されている場合には、遮へい容器を用いたガラ搬出の必要や、地上でのガラ保管・廃棄方法についても加えておく必要がある。

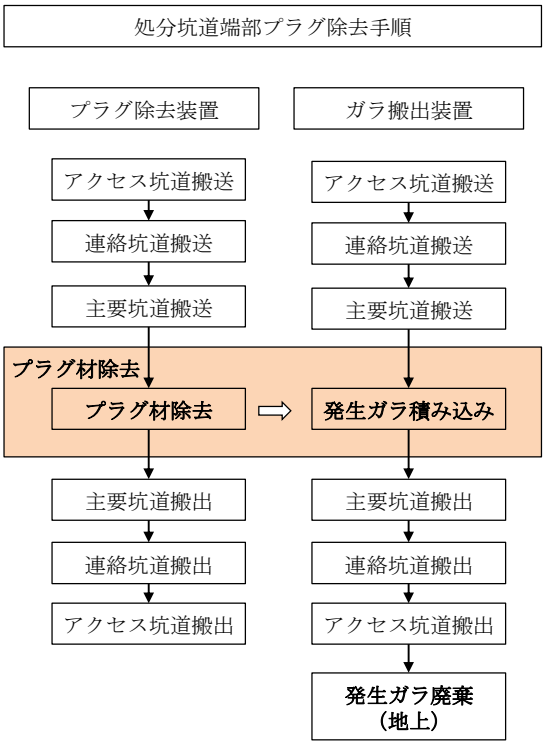



図 2.6.3-7　本検討で設定した処分坑道端部プラグ除去手順

3)　処分坑道埋め戻し除去手順

処分坑道埋め戻しの除去手順の詳細を図 2.6.3-8 に示す。処分坑道埋め戻し材の除去は、その素材であるベントナイト混合土を除去することになる。、混合土の除去（撤去）術は、土木建築分野で一般的に用いられている土砂掘削技術（油圧ショベル）を用いれば実現できると考えられる。なお、放射線環境での作業になることも考えられることから、遠隔での操作を想定する必要がある。また、放射線管理のための遮へい扉を適切な箇所（処分坑道入口付近）に設ける必要もある。さらに、除去したガラが汚染されている場合には、遮へい容器を用いたガラ搬出の必要や、地上でのガラ保管・廃棄方法についても加えておく必要がある。

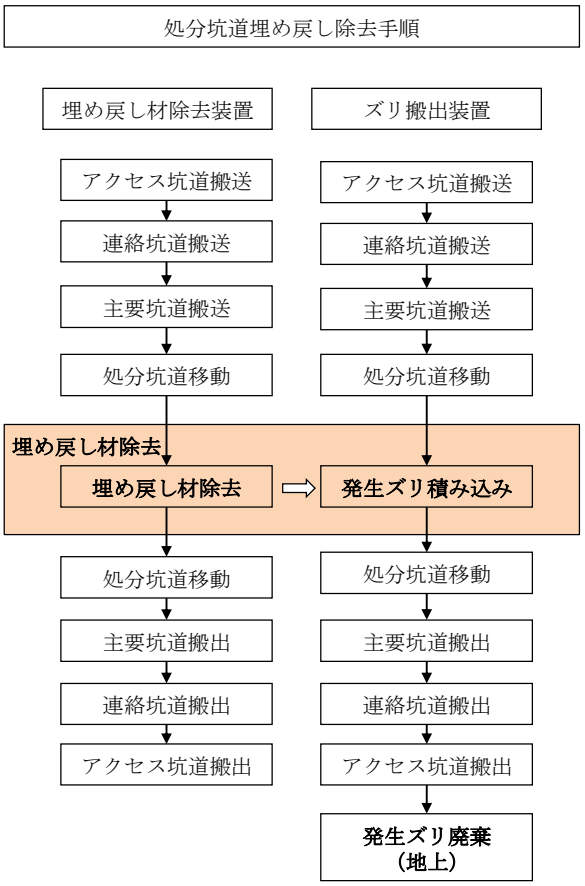



図 2.6.3-8　本検討で設定した処分坑道埋め戻し材除去手順

4)　上部緩衝材除去手順

上部緩衝材の除去手順の詳細を図 2.6.3-9 に示す。上部緩衝材の除去は、オーバーパックの位置を把握（探査）してオーバーパックを傷つけることなく、ケイ砂混合ベントナイトを除去することになる。緩衝材中のオーバーパックの探査精度は、原環センターによる既往の検討[47]において数 10cm 程度であることが示されている。したがって、オーバーパックから数 10cm の離隔を保つことにより、オーバーパックを傷つけることなく、上部緩衝材を除去することが可能となる。また、その際に用いる除去方法としては、処分坑道埋め戻し材と同様に、土木建築分野で一般的に用いられている土砂掘削技術（油圧ショベル）を用いれば実現できると考えられる。なお、除去する範囲が処分坑道底面から下部へ約 2m 下となることから、選択するショベルのブーム長に留意が必要となる。また、放射線環境での作業になることも考えられることから、遠隔での操作を想定する必要がある。さらに、除去した上部緩衝材が汚染されている場合には、遮へい容器を用いた搬出装置の必要や、地上での保管・廃棄設備も加えておく必要がある。

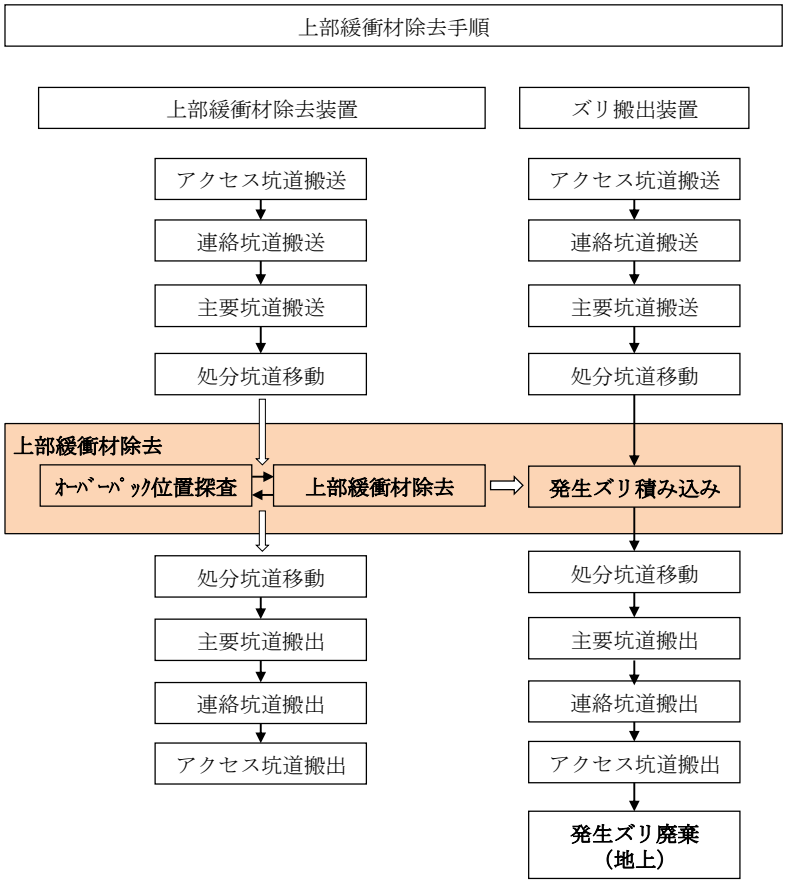



図 2.6.3-9　本検討で設定した上部緩衝材除去手順

5)　側部緩衝材除去手順

側部緩衝材の除去手順の詳細を図 2.6.3-10 に示す。側部緩衝材の除去は、オーバーパックの位置を把握（探査）してオーバーパックを傷つけることなく、ケイ砂混合ベントナイトを除去することになる。原環センターによる既往の研究（例えば[47]）において、オーバーパックを傷つけることなく緩衝材を除去する技術として、塩水を用いた緩衝材除去技術の適用が優位であるとの判断から、実規模スケール試験を含めた開発が行われている。なお、放射線環境での作業になることも考えられることから、遠隔での操作を想定する必要がある。さらに、除去した上部緩衝材が汚染されている場合には、遮へい容器を用いた搬出装置の必要や、地上での保管・廃棄設備も加えておく必要がある。

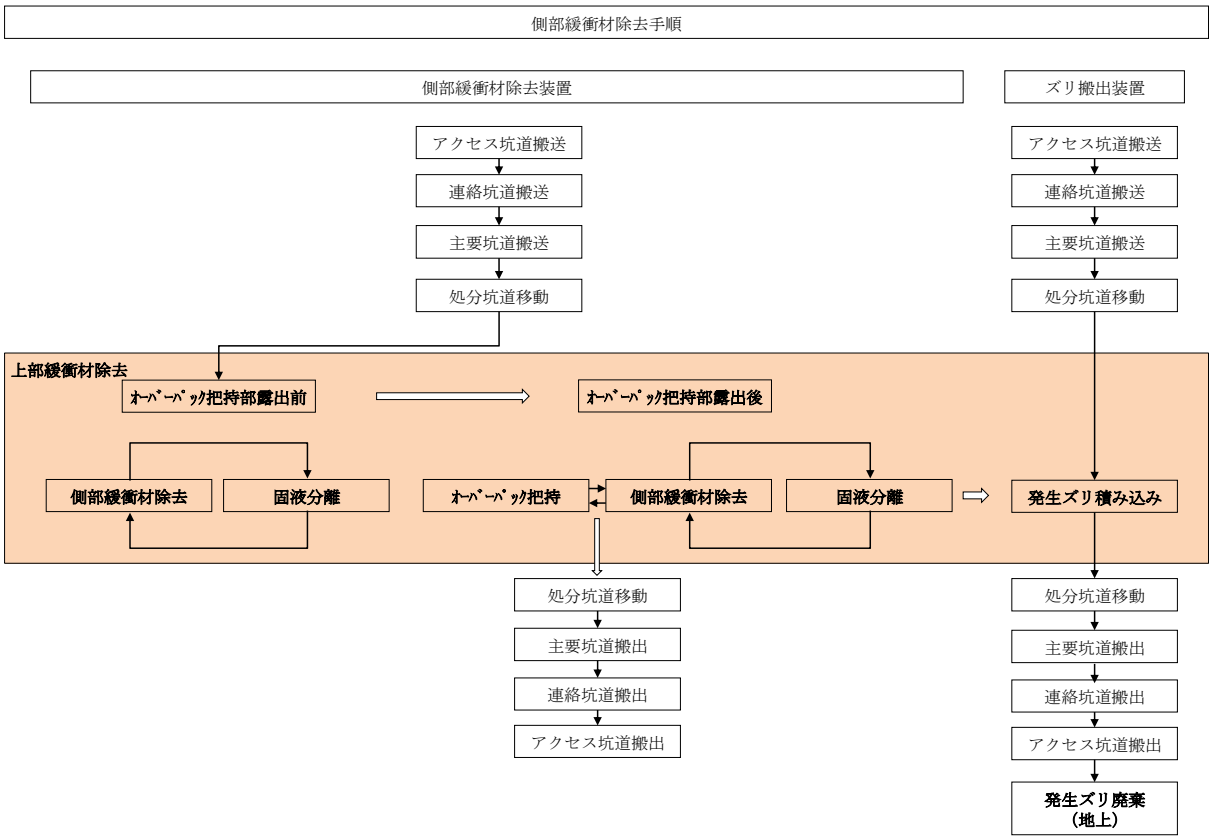



図 2.6.3-10　本検討で設定した側部緩衝材除去手順

6)　オーバーパック排出手順

オーバーパックの取り出し手順の詳細を図 2.6.3-11 に示す。取り出しに支障となる側部の緩衝材が除去された後，側部緩衝材の除去装置により把持されているオーバーパックは，除去に用いた装置を用いて処分孔より引き出され，オーバーパックを搬送する装置へ引き渡され，その後，地上まで搬出される。

なお，これらの作業は，高い放射線環境での作業になることから、遠隔での操作を想定する必要がある。運搬には、遮へい容器を用いた搬出装置が必要になるとともに、取り出したオーバーパックを地上で保管する設備も必要となる。

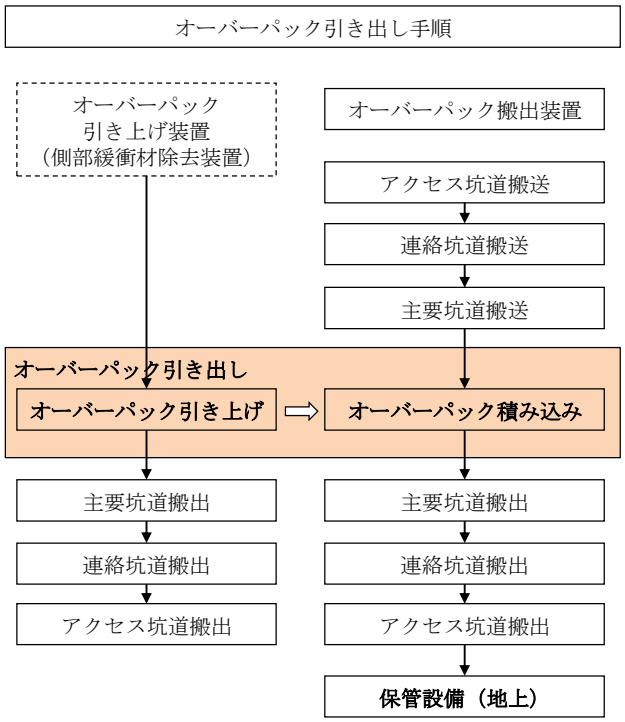



図 2.6.3-11　本検討で設定したオーバーパックの取り出し手順

(4)　回収段階の設定

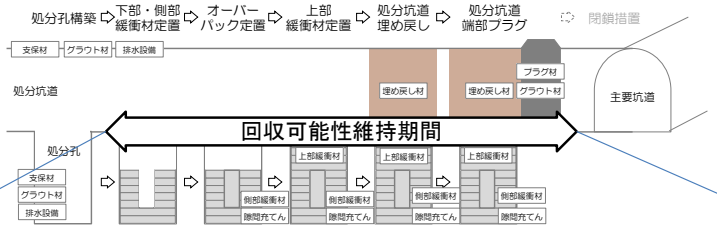
操業手順を踏まえた回収手順の整理の結果、検討対象となる処分坑道端部プラグを施工した状態においては、廃棄体回収するために多数の障害を除去することが求めらることがわかった。また、一連の回収手順において、除去対象物が変化するタイミングを境界として、除去に使用する技術や装置が変化することがわかった。

本調査においては、上記のタイミングを境界とした以下に挙げる 5 つの回収時の段階を設定し、以下の検討を進める。

①プラグ除去段階（処分坑道が埋め戻された状態）
②埋め戻し材除去段階（処分坑道が埋め戻された状態）
③上部緩衝材除去段階（緩衝材が定置された状態）
④側部緩衝材除去段階（緩衝材が定置された状態）
⑤オーバーパック搬出段階（オーバーパック定置状態）

(5)　各回収時の段階での状態の設定

前項で設定した回収時の段階において、手順を踏まえて処分坑道、処分孔、人工バリアの状態を以下のように設定した。




| 構成部材 | | ＯＰ定置 | 隙間充てん（OP-BU間） | 上部Ｂｕ定置 | 隙間充てん（BU-孔壁間） | 処分坑道埋め戻し | 処分坑道端部プラグ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 支保 | | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 |
| 湧水抑制対策 | グラウト | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 |
| | 排水設備 | | | | | | |
| オーバーパック | | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 |
| 緩衝材 | 下部 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 |
| | 側部 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 |
| | 上部 | | | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 |
| 隙間充てん | OP-Bu間 | | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 | 存在 |
| | Bu-岩盤間 | | | | 存在 | 存在 | 存在 |
| 処分坑道埋め戻し | | | | | | 存在 | 存在 |
| 処分坑道端部プラグ | | | | | | | 存在 |
| | | ⇩ | ⇩ | ⇩ | ⇩ | ⇩ | ⇩ |
| 廃棄体へのアクセス性からの各操業段階での状態 | | 非拘束状態 | 隙間充てんにより廃棄体を拘束 | 左記に加え、上部緩衝材が廃棄体アクセスを阻害 | 左記状態が継続 | 左記に加え、処分坑道埋め戻しが廃棄体アクセスを阻害 | 左記に加え、処分坑道端部ﾌﾟﾗｸﾞが廃棄体アクセスを阻害 |

図 2.6.3-12　回収時の各段階での状態一覧と廃棄体へのアクセス性への影響

1)　処分坑道端部プラグ除去段階

処分坑道端部プラグ除去段階における状態を図 2.6.3-13 に示す。閉鎖後長期の安全性を確保しつつオーバーパックを回収するためには、同図に示す構成部材の状態（閉鎖後長期の安全性を判断する情報）を把握する必要がある。また、その状態については、回収作業中の影響についても継続して情報を得ておく必要がある。さらに、処分坑道プラグ材除去装置の選択に向けて、処分坑道プラグ材の特性について把握する必要がある。

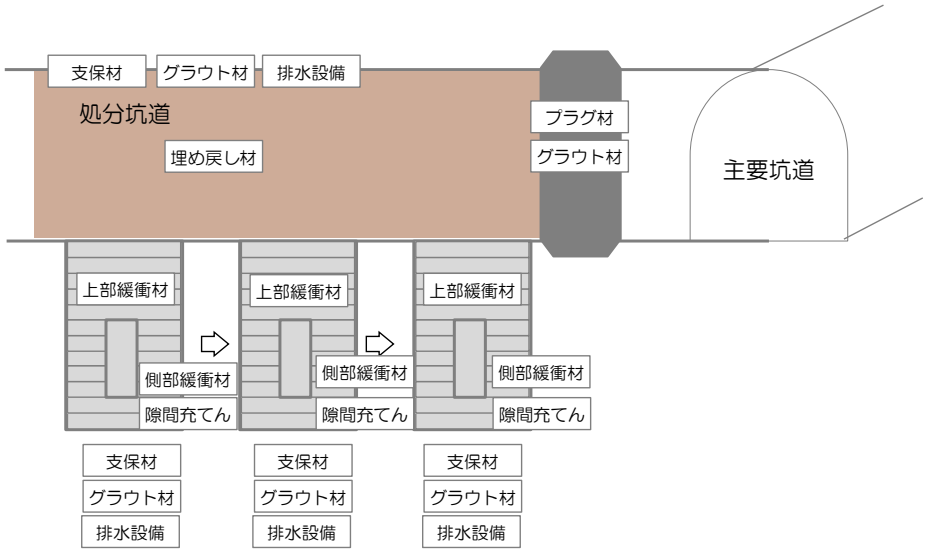



図 2.6.3-13　処分坑道端部除去段階での状態

2)　処分坑道埋め戻し材除去段階

処分坑道埋め戻し材除去段階における状態を図 2.6.3-14 に示す。閉鎖後長期の安全性を確保しつつオーバーパックを回収するためには、同図に示す構成部材の状態（閉鎖後長期の安全性を判断する情報）を把握する必要がある。また、その状態については、回収作業中の影響についても継続して情報を得ておく必要がる。さらに、処分坑道埋め戻し除去装置の選択に向けて、処分坑道埋め戻し材の特性について把握する必要がある。

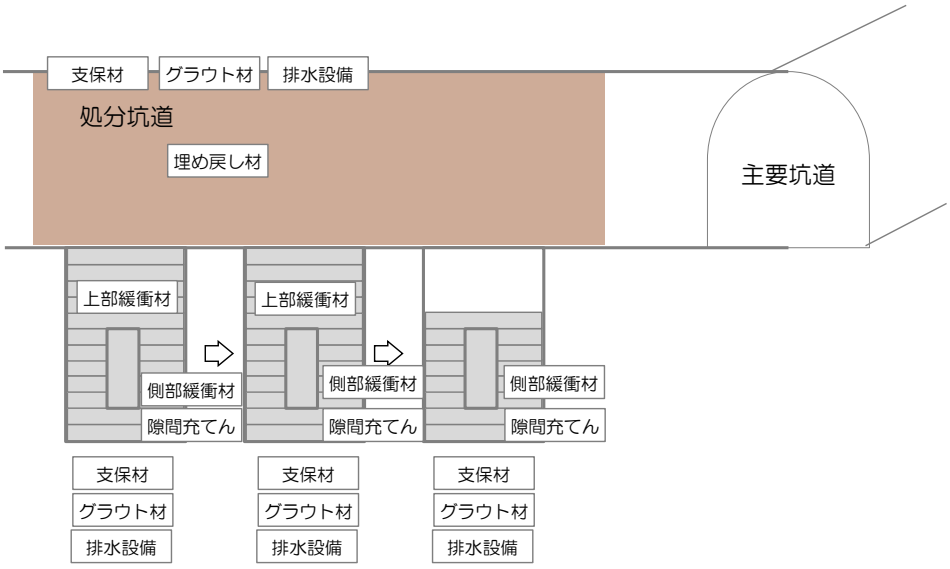



図 2.6.3-14　処分坑道埋め戻し材除去段階での状態

3)　上部緩衝材除去段階

上部緩衝材除去段階における状態を図 2.6.3-15 に示す。閉鎖後長期の安全性を確保しつつオーバーパックを回収するためには、同図に示す構成部材の状態（閉鎖後長期の安全性

を判断する情報）を把握する必要がある。また、その状態については、回収作業中の影響についても継続して情報を得ておく必要がる。さらに、上部緩衝材除去装置の選択に向けて、上部緩衝材の特性について把握する必要がある。

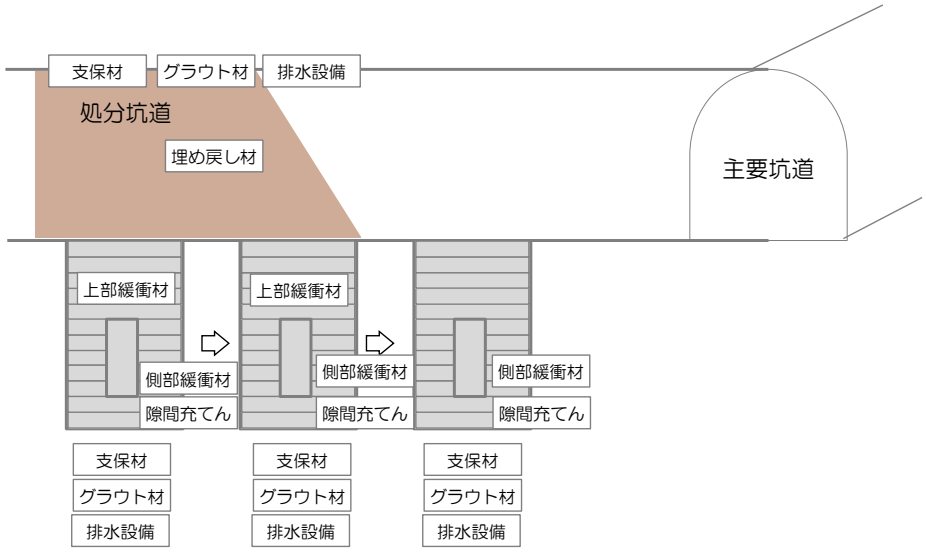



図 2.6.3-15　上部緩衝材除去段階での状態

4)　側部緩衝材除去段階

側部緩衝材除去段階における状態を図 2.6.3-16 に示す。閉鎖後長期の安全性を確保しつつオーバーパックを回収するためには、同図に示す構成部材の状態（閉鎖後長期の安全性を判断する情報）を把握する必要がある。また、その状態については、回収作業中の影響についても継続して情報を得ておく必要がる。さらに、側部緩衝材除去装置の選択に向けて、側部緩衝材の特性について把握する必要がある。

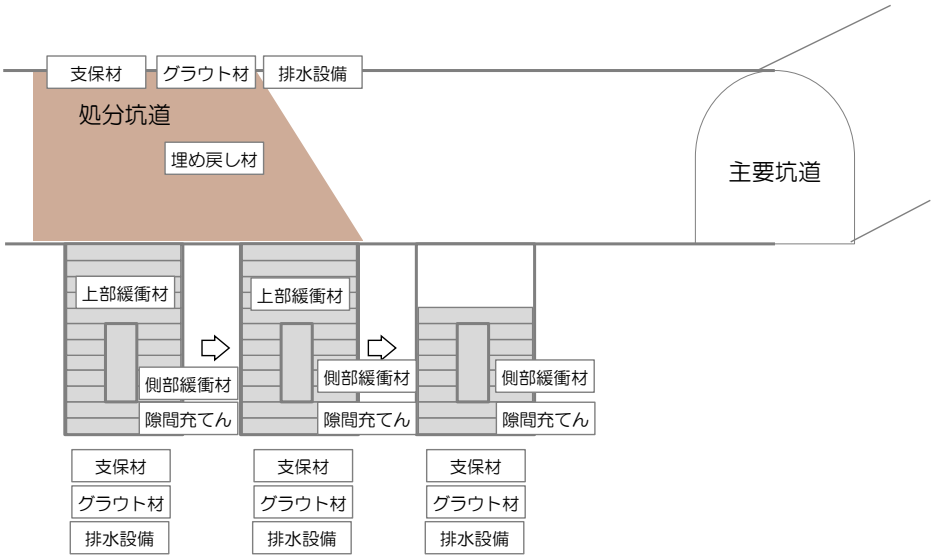



図 2.6.3-16　側部緩衝材除去段階での状態

5)　オーバーパック回収段階

オーバーパック回収段階における状態を図 2.6.3-17 に示す。閉鎖後長期の安全性を確保しつつオーバーパックを回収するためには、同図に示す構成部材の状態（閉鎖後長期の安全性を判断する情報）を把握する必要がある。また、その状態については、回収作業中の影響についても継続して情報を得ておく必要がる。さらに、オーバーパック排出装置の選択に向けて、オーバーパックの状態について把握する必要がある。

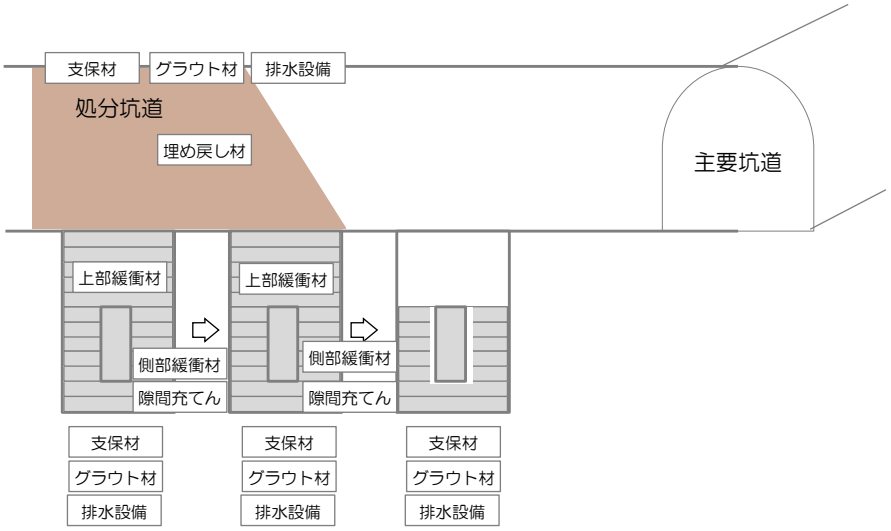



図 2.6.3-17　オーバーパック回収段階での状態

2.6.4人工バリアと坑道環境の時間的変化の整理

回収がバリア性能に影響しているか否かの判断のためのモニタリングなどを検討するため、人工バリアと坑道の環境がどのように変化するかを、力学的影響、水理的影響、化学的影響、熱的影響の観点から整理した。なお、本検討では放射線による影響は検討の対象外とした。

(1)坑道環境の時間的な変化

1)　力学的影響

回収行為前の状態では、埋め戻されていない坑道(主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道)においては、坑道周辺に大きな応力が作用し続けることになり、時間依存性の挙動が進行する。一方埋め戻された坑道(処分坑道、処分孔)周辺では再冠水による緩衝材、埋め戻し材の膨潤圧による応力再配分が生じることが予測される。回収に伴い、プラグ及び埋め戻し材の撤去が実施されるが、これにより埋め戻された坑道周辺では、釣り合っていた応力が再び解放されることになる。以降処分坑道は解放されるため、処分坑道及びその周辺岩盤においても時間依存性の挙動や支保の変質等が進行する。同様に緩衝材が除去されると、

処分孔周辺岩盤においても応力の再解放が生じ、以降時間依存性の挙動が進行する。

2) 水理的影響

回収開始前の状態では、埋め戻されていない坑道においては排水が実施される。これに伴い掘削影響領域(EDZ)では不飽和層が増大することが予測される。一方埋め戻された坑道においては再冠水により間隙水圧が回復し、EDZ の不飽和層が減少に転じてくることが予測される。回収に伴い、プラグ及び埋め戻し材が撤去されると、処分坑道周辺の応力の再解放により EDZ 内の亀裂の開口幅の増加が生じ透水性が増加（透水係数が増大）することが予測される。さらに処分坑道でも排水が開始されると EDZ での不飽和層が増加することが予測される。緩衝材が除去されると処分孔周辺においても透水性が増加し、不飽和層の増加が予測される。

3) 化学的影響

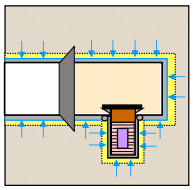
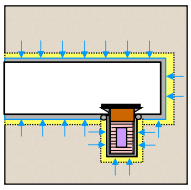
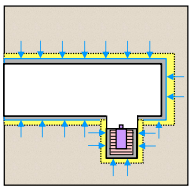
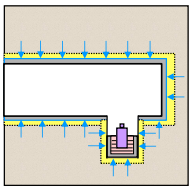
埋め戻さない坑道周辺においては、酸素や微生物が供給され続けることから、参加環境での腐食の発生などが懸念される。また、水圧低下の領域が拡大し続ける場合には、遠方の地下水を坑道内に導くこととなり、地下水の化学的性質が想定と異なる変化をすることも考えられる。埋め戻された処分孔周辺では空気との接触が絶たれることにより還元環境への移行が予測される。回収に伴いプラグ及び埋め戻し材が撤去されると処分坑道も空気に接触することになり、再び酸化環境へ移行する。緩衝材が撤去されると処分孔周辺においても同様に酸化環境への移行が進む。また、埋め戻し材及び緩衝材の撤去には塩水が用いられる可能性もあり、地下水と異なる成分の水が供給されることによる化学場の変化も予測される。

4) 熱的影響

埋め戻さない坑道周辺は換気により温度が制御され岩盤温度は低下する。一方試験孔周辺では、オーバーパックの発熱により温度が上昇することが予測される。回収に伴いプラグ及び埋め戻し材が撤去されると、処分坑道の空気が断熱材の役割をすることから、オーバーパック周辺の温度上昇は、撤去前に比べて大きくなることが予測される。回収作業に至ると、オーバーパックは露出することになり、さらに坑道温度は上昇することが予測される。

以上で整理した、処分孔、坑道及びニアフィールドにおける熱的、水理的、力学的、化学的影響の状態の時間的な変化の整理結果を表 2.6.4-1 に示す。

表 2.6.4-1　処分孔、坑道及びニアフィールドにおける状態の時間的な変化

| | 回収行為前 | ⇨ プラグ・埋戻し除去 | ⇨ 緩衝材除去 | ⇨ 回収作業 |
|---|---|---|---|---|
| |  |  |  |  |
| 温度影響 | ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸの発熱<br>定置後約10年で最高温度 | ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸ周辺の環境の変化 | ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸ周辺の環境の変化 | ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸ露出に伴う温度上昇 |
| 水理的影響 | 主要坑道：<br>排水に伴う掘削影響領域（EDZ）での不飽和層の増大<br>処分坑道：<br>再冠水に伴うEDZの不飽和層の減少<br>間隙水圧の回復 | 不飽和層の変化 | 不飽和層の変化 | |
| 力学的影響 | 掘削時の応力解放<br>支保・覆工の劣化 | | | |
| 化学的影響 | 主要坑道：地上から空気の持込<br>処分坑道：還元環境へ移行<br>セメント材の劣化（溶出）<br>鋼材の劣化 | 塩水注水による場の変化 | 塩水注水による場の変化 | 塩水注水による場の変化 |

(2)　人工バリアの時間的な変化

原環センターによる平成 25 年度の回収維持期間の検討[47]において整理した人工バリアにおけるニアフィールド状態の経時変化を表 2.6.4-2 に示す。表に示されているように、人工バリアの特性への影響として、熱的影響としての「人工バリア温度上昇」、力学的影響としての「容器剛性低下、腐食膨張」、水理学的影響としての「緩衝材の膨潤、流出」、化学的影響としての「緩衝材の劣化」、「オーバーパックの劣化」が挙げられる。このような状態より、人工バリアに発生する現象とその時期が整理されており、表 2.6.4-3～表 2.6.4-6 に示す。ここで、放射線に関する影響については、人工バリアによるニアフィールドへの影響はあるが、人工バリア特性の変化には直接的に影響していないため検討対象外とする。

表 2.6.4-2　処分孔、坑道及びニアフィールドの状態の経時変化[47]

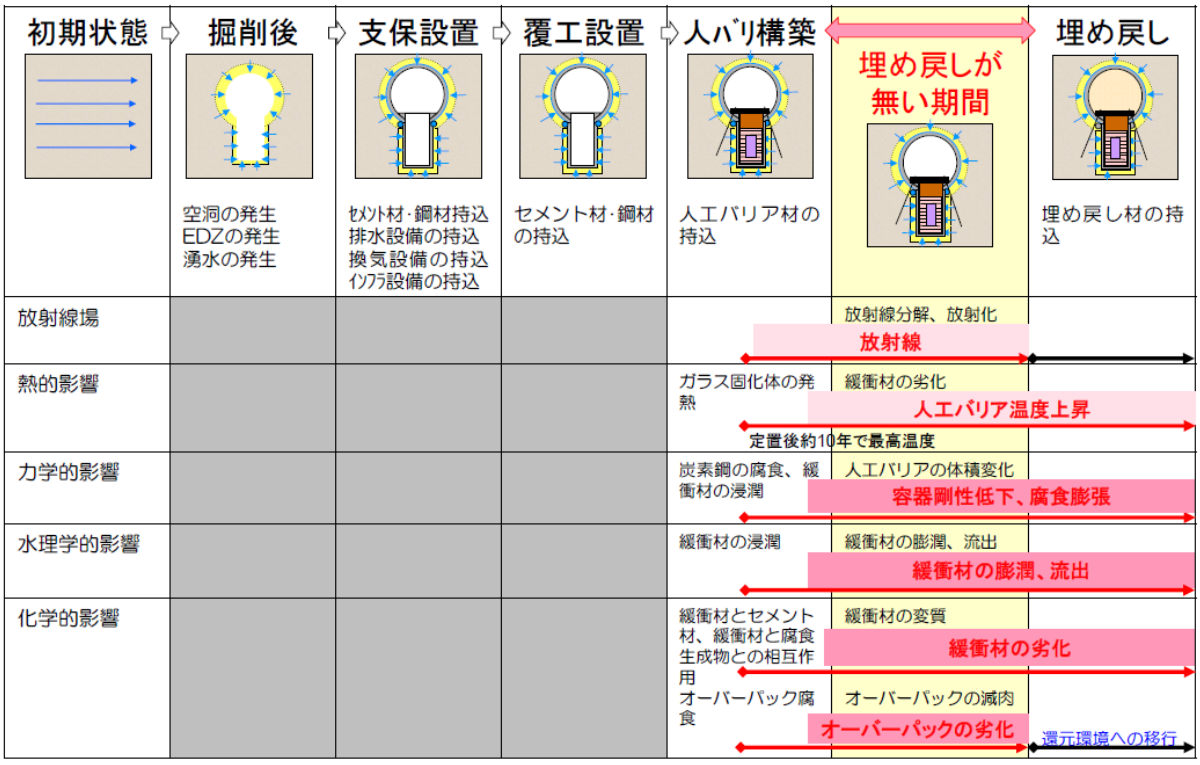


表 2.6.4-3　人工バリアに発生する現象とその時期の整理【熱的影響】[47]

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

凡例　○：特性の変化が生じる可能性あり

表 2.6.4-4　人工バリアに発生する現象とその時期の整理【力学的影響】[47]

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

凡例　○：特性の変化が生じる可能性あり

表 2.6.4-5　人工バリアに発生する現象とその時期の整理【水理的影響】[47]

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

凡例　○：特性の変化が生じる可能性あり

表 2.6.4-6　人工バリアに発生する現象とその時期の整理【化学的影響】[47]

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

凡例　○：特性の変化が生じる可能性あり

これらの抽出された現象や現象を原因とする変状をまとめると表 2.6.4-7 になる。これらについて次項以降のモニタリング項目として検討する。

表 2.6.4-7　人工バリアにおける現象と変状のまとめ表

| 整理の観点 | 現象 | 特性の変状 | |
|---|---|---|---|
| 熱的影響 | 熱によるベントナイトの変質 | 緩衝材 | 膨潤特性の劣化 |
| | 熱による緩衝材含水比の変動 | | 比熱の変動 |
| | | | 熱伝導率の変動 |
| 力学的影響 | オーバーパック腐食による減肉 | オーバーパック | 強度の劣化 |
| | | | 遮へい性の劣化 |
| | 緩衝材膨潤及び腐食膨張による緩衝材変形による密度低下 | 緩衝材 | 膨潤特性の劣化 |
| | | | 止水性の劣化 |
| | | | 核種吸着性の劣化 |
| | PEM 容器の腐食による減肉 | PEM 容器 | 強度の劣化 |
| 水理学的影響 | 湧水による緩衝材の流出による密度低下 | 緩衝材 | 膨潤特性 |
| | | | 止水性 |
| | | | 核種吸着性の劣化 |
| 化学的影響 | 地下水質の変化による腐食速度の変動 | オーバーパック | 耐食性の変動 |
| | 地下水質及び腐食生成物による緩衝材の劣化 | 緩衝材 | 膨潤特性の劣化 |
| | | | 止水性の劣化 |
| | | | 核種吸着性の劣化 |
| | 地下水質の変化による腐食速度の変動 | PEM 容器 | 耐食性の変動 |

### 2.6.5　坑道環境のモニタリング項目の検討

#### (1)　モニタリングパラメータ候補の検討

ここでは前項において検討した現象や変化が、どのようなパラメータに影響を及ぼすかについて検討を検討し、モニタリングパラメータの候補を抽出した。検討に於いては平成25年度地層処分技術調査等事業地層処分回収技術高度化開発報告書[48]を参照した。

力学的影響に関しては、応力場、強度特性（一軸圧縮強度、せん断強度、内部摩擦角）、変形特性(弾性係数、ポアソン比)がモニタリングパラメータの候補となる。応力場は、THMCにおける重要なパラメータの一つであり、岩盤物性の劣化及びベントナイトの膨潤とシール性能を直接評価することができる。

水理学的影響に関しては、ニアフィールドの水理場(動水勾配、間隙水圧)、水理特性(岩盤の透水係数)がモニタリングパラメータの候補となる。間隙水圧はもっとも重要なパラメータの一つである。

化学的影響に関しては、水質(pH、電気伝導度、溶存気体、溶存イオン)、酸化還元状態、起源・年代がモニタリングパラメータの候補となる。特にニアフィールドの pH は、ニアフィールドと人工バリア間の化学的平衡状態を知る上で重要である。

熱的影響に関しては、ニアフィールドの温度環境（地温分布、地温勾配、地下水温度）、熱伝導性（熱伝導率、密度、比熱、線膨張率）がモニタリングパラメータの候補となる。温度は重要なパラメータの一つであり、オーバーパックの発熱の影響範囲を知るためにも、ニアフィールドの地温分布や地温勾配を得ることが重要である。

表 2.6.5-1～表 2.6.5-4 にこれらのモニタリングパラメータの候補を示す。これらのパラメータをモニタリングするための技術については、基本的に 2.5 節にて検討したものと同様であり、現場での測定とサンプリングと室内試験を組み合わせたものとなるものと考えられる（表 2.6.5-5）。

但し、表 2.6.5-1～表 2.6.5-5 に示したモニタリングでは、バリア内での水みちの形成等の可能性があるものが含まれている。これらのモニタリングを実施することによる損益については、2.6.7 にて検討する。

表 2.6.5-1　モニタリングパラメータ候補の抽出結果（力学的影響）

| 整理の観点 | モニタリング項目(事象) | モニタリングパラメータ候補（周辺岩盤の特性） | | 特性の変化 |
|---|---|---|---|---|
| 力学的影響 | 岩盤・岩石・割れ目の劣化(クリープ+微視的クラックの発達) | 応力場 | 応力分布 [応力] | 変動 |
| | 支保の変質・劣化・消失 | | | |
| | 廃棄体による熱応力 | | | |
| | 緩衝材の膨潤(圧), 変質, 溶解 | | | |
| | 埋め戻し材の膨潤(圧), 変質, 溶解 | | | |
| | プラグ・埋戻し除去に伴う応力解放 | | | |
| | 緩衝材除去に伴う応力解放 | | | |
| | 劣化(＋微視的クラックの発達) | 強度特性 | 一軸圧縮強度 | 低下 |
| | プラグ・埋戻し除去に伴う応力解放 | | | |
| | 緩衝材除去に伴う応力解放 | | | |
| | 劣化(＋微視的クラックの発達) | | せん断強度 | 低下 |
| | プラグ・埋戻し除去に伴う応力解放 | | | |
| | 緩衝材除去に伴う応力解放 | | | |
| | 劣化(＋微視的クラックの発達) | | 内部摩擦角 | 低下 |
| | プラグ・埋戻し除去に伴う応力解放 | | | |
| | 緩衝材除去に伴う応力解放 | | | |
| | 劣化(＋微視的クラックの発達) | 変形特性 | 弾性係数 [ひずみ, 変位, 割れ目幅] | 低下 |
| | プラグ・埋戻し除去に伴う応力解放 | | | |
| | 緩衝材除去に伴う応力解放 | | | |
| | 劣化(＋微視的クラックの発達) | | ポアソン比 [ひずみ, 変位, 割れ目幅] | 増加 |
| | プラグ・埋戻し除去に伴う応力解放 | | | |
| | 緩衝材除去に伴う応力解放 | | | |

表 2.6.5-2　モニタリングパラメータ候補の抽出結果（水理的影響）

| 整理の観点 | モニタリング項目(事象) | モニタリングパラメータ候補(周辺岩盤の特性) | | 特性の変化 |
|---|---|---|---|---|
| 水理的影響 | 坑道が大気圧環境となる | 水理場 | 動水勾配［地下水位，間隙水圧］ | 動水勾配の増大 |
| | プラグ・埋戻しの除去に伴う水理バランスの変化 | | | 動水勾配の低下 |
| | 緩衝材の除去に伴う水理バランスの変化 | | | |
| | 坑道周辺は大気圧状態に近いため | | 間隙水圧 | 間隙水圧の変動 |
| | プラグ・埋戻しの除去に伴う水理バランスの変化 | | | |
| | 緩衝材の除去に伴う水理バランスの変化 | | | |
| | 地震による地下水流動 | | | |
| | 地下水水質の化学的作用(鉱物の溶解)による材料変質 | 水理特性（岩盤の透水性） | 透水係数［地下水流向・流速，間隙水圧，地下水流入量，水分量，ガス圧］ | 坑道周辺岩盤基質部：透水性/透水係数の増加 |
| | プラグ・埋戻しの除去に伴う応力再配分による応力低減 | | | |
| | 緩衝材の除去に伴う応力再配分による応力低減 | | | |
| | 地下水中の 2 次鉱物の沈殿による間隙の減少 | | | 坑道周辺岩盤基質部：透水性/透水係数の減少 |
| | 微生物による酸化物の沈殿 | | | |
| | プラグ・埋戻しの除去に伴う応力再配分による応力増加 | | | |
| | 緩衝材の除去に伴う応力再配分による応力増加 | | | |
| | プラグ・埋戻しの除去に伴う応力再配分による割れ目の開口 | | | 坑道周辺岩盤割れ目：透水性/透水係数の増加 |
| | 緩衝材の除去に伴う応力再配分による割れ目の開口 | | | |
| | プラグ・埋戻しの除去に伴う応力再配分による新規の割れ目の発生 | | | |
| | 緩衝材の除去に伴う応力再配分による新規の割れ目の発生 | | | |
| | 割れ目内の充填鉱物の溶解による通水性の増加 | | | |
| | 廃棄体の熱応力による応力再配分 | | | |
| | プラグ・埋戻しの除去に伴う応力再配分による割れ目の閉合 | | | 坑道周辺岩盤割れ目：透水性/透水係数の減少 |
| | 緩衝材の除去に伴う応力再配分による割れ目の閉合 | | | |
| | 地下水中の 2 次鉱物の沈殿による割れ目内の通水性の低下 | | | |
| | 微生物による酸化物の沈殿による割れ目内の通水性の低下 | | | |
| | 廃棄体の熱応力による応力再配分 | | | |

表 2.6.5-3　モニタリングパラメータ候補の抽出結果（化学的影響）

| 整理の観点 | モニタリング項目(事象) | モニタリングパラメータ候補(周辺岩盤の特性) | | 特性の変化 |
|---|---|---|---|---|
| 化学的影響 | 吹付けコンクリートのアルカリ成分の溶脱 | 水質 | pH | pH 値の増加（高アルカリ化） |
| | ロックボルトの定着材のアルカリ成分の溶脱 | | | |
| | グラウト材のアルカリ成分の溶脱 | | | |
| | 周辺からの地下水の高 pH の流入 | | | |
| | 坑道周辺の間隙水圧の低下による溶存気体の脱気 | | | |
| | 廃棄体の熱(温度上昇)による水質の変化 | | | |
| | 坑道の大気からの気体($CO_2$等)の地下水への溶解 | | | pH 値の低下(酸性化) |
| | 周辺からの地下水の低 pH の流入 | | | |
| | 廃棄体の熱(温度上昇)による水質の変化 | | | |
| | 水質・溶存イオンの変化 | | 電気伝導度 | 電気伝導度の変動 |
| | 坑道周辺の水質とは異なる地表水の流入 | | 溶存気体(酸素など), 溶存イオン[ガス組成・濃度, イオン濃度] | 溶存気体(酸素など), 溶存イオンの変化 |
| | 坑道周辺の飽和領域における大気との接触 | | | |
| | 還元環境における鋼材の腐食 | | その他[ガス組成・濃度] | ガス(水素)の発生 |
| | 水質・溶存イオンの変化 | 酸化還元状態 | 酸化還元電位(Eh) | 酸化還元電位(Eh)の変動 |
| | 廃棄体の熱(温度上昇)による影響 | | | |
| | 大気からの微生物の進入と酸化反応の促進 | | | |
| | 不飽和領域の変化 | | | 酸化還元フロントの変動 |
| | 異なる起源・年代の地下水の流入 | 起源・年代[Eh, pH, 有機物] | | 水質変化 |

表 2.6.5-4　モニタリングパラメータ候補の抽出結果（熱的影響）

| 整理の観点 | モニタリング項目(事象) | モニタリングパラメータ候補（周辺岩盤の特性） | | | 特性の変化 |
|---|---|---|---|---|---|
| 熱的影響 | 流入する地下水の温度 | 温度環境 | 地温分布，地温勾配 [温度] | | 変動 |
| | 坑道の大気温度の影響 | | | | |
| | 廃棄体の熱 | | | | |
| | 地表水の流入による低下 | | 地下水の温度 [温度] | | 変動 |
| | 季節変動 | | | | |
| | 坑道の大気温度の影響 | | | | |
| | 応力再配分による緩み領域の発達 | 熱伝導性 | 熱物性 | 熱伝導率 | 変動 |
| | 飽和度の低下 | | | | |
| | 応力再配分による緩み領域の岩盤・岩石の体積増加 | | | 密度 | 変動 |
| | 応力再配分による割れ目・微小クラックへの水，空気の進入 | | | 比熱 | 変動 |
| | 割れ目・微小クラックによる膨張変形の吸収 | | | 線膨張率 | 変動 |

表 2.6.5-5　候補となるモニタリング技術の抽出

| 整理の観点 | モニタリングパラメータ | モニタリング技術 |
|---|---|---|
| 力学的影響 | 圧力 | 土圧計、ロックボルト軸力計 |
| | ひずみ | ひずみ計、傾斜計 |
| | 変位 | 変位計、傾斜計、(3D レーザースキャナー) |
| | 一軸圧縮強度 | -(シュミットロックハンマ、軟岩ペネトロメータ、室内試験) |
| | せん断強度 | ー(室内試験) |
| | 内部摩擦角 | ー(室内試験) |
| | 弾性係数 | ー(室内試験) |
| | ポアソン比 | ー(室内試験) |
| | 割れ目幅 | (ボアホール TV) |
| 水理学的影響 | 地下水位 | 水位計→ニアフィールドにおいては間隙水圧計で代用、(電気探査) |
| | 間隙水圧 | 間隙水圧計 |
| | 地下水流向・流速 | 流向・流速計 |
| | 地下水流入量 | 測定堰、(孔間透水試験法) |
| | 水分量 | 湿度計、水分量計 |
| | 透水(量)係数 | 間隙水圧計、測定堰、流向・流速計、(孔間透水試験法) |
| | ガス圧 | 圧力計 |
| 化学的影響 | ガス組成・濃度 | -(採取後室内試験) |
| | Eh | -(採水後室内試験) |
| | pH | -(採水後室内試験) |
| | イオン濃度 | -(採水後室内試験) |
| | コロイド | -(採水後室内試験) |
| | 有機物 | -(採水後室内試験) |
| 熱的影響 | 温度 | 温度計 |
| | 熱伝導率 | ー(コア等サンプル室内試験) |
| | 密度 | ー(コア等サンプル室内試験) |
| | 比熱 | ー(コア等サンプル室内試験) |
| | 線膨張係数 | ー(コア等サンプル室内試験) |

※表中“ー”は原位置で直接連続モニタリングする手法が存在せず、“ () ”内は適宜物性値を取得する方法

(2)　モニタリングパラメータの連関関係の整理

ニアフィールド環境は、ガラス固化体からの崩壊熱の発生、岩盤及び緩衝材中の地下水流動及び物質移行、緩衝材の膨潤変形、地下水と鉱物間の反応など、熱的、水理学的、力学的、地球化学的作用が相互に影響し合う複雑な場が形成されることが予想される。ここでは、各モニタリング項目に対して多種のモニタリングパラメータが関係するとともに、各モニタリング項目で共通するモニタリングパラメータも存在するものと考えられることから、抽出されたモニタリングパラメータの整理を試みる。

1)力学的影響

力学的影響に関しては水理学的変化から受ける影響として、有効応力の変化及び膨潤応力の含水比依存性に起因する変化が考えられる。これらの影響をモニタリングするパラメータとしては、ひずみ、圧力が挙げられる。化学的変化から受ける影響としては、岩盤組成の変化に起因する弾性係数の変化や、緩衝材等の膨潤応力の変化が考えられ、これらの影響をモニタリングするパラメータとしては、圧力、ひずみが挙げられる。さらに熱的変化から受ける影響としては、廃棄体の発熱に伴う熱応力の発生と岩盤の力学特性の温度依存性に起因する変化が考えられ、これらの影響をモニタリングするパラメータとしては、圧力が挙げられる。

例えば岩盤の力学特性と温度の関係に関して、小玉ら[49]は、異なる温度条件下の水中で一軸圧縮試験、圧裂引張試験、破壊靭性試験を行い、温度が、岩石の変形、破壊挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、温度の上昇に伴い一軸圧縮強度、圧裂引張強度、応力拡大係数の減少が見られた。これらの温度上昇に伴う物性値の低下には、

・応力腐食速度の増加
・水の粘性低下
・熱応力(鉱物間の熱膨張・収縮量の差異)

が影響を及ぼしているとしている。

さらに、熱と応力の関係について池野谷ら[50]は、堆積軟岩中に構築した深度 50m の地下空間実験場において原位置加熱実験を実施し、岩盤に熱を負荷した際の熱源周辺のひずみ、温度、間隙水圧等を長期間にわたり計測し、熱 - 水 - 応力連成解析コードの検証を行っている。原位置加熱実験は、G.L.-50m の横坑内にある幅 1.1~2.0m、奥行き 3.65m、高さ 1.9m の馬蹄形横坑（多目的実験室）において実施した。その結果、周辺岩盤の温度上昇量が最大約 35℃に対して、ひずみは全ての方向で引張方向のひずみが生じており、熱膨張に起因するひずみが計測されたとしている。

2)水理学的影響

水理学的影響に関しては、力学的変化から受ける影響として、岩盤内応力の変化に伴う透水性の変化や不飽和水分特性の変化、飽和度の変化が考えられ、これらの影響をモニタ

リングするパラメータとしては、間隙水圧、透水係数、水分量が挙げられる。化学的変化から受ける影響としては、岩盤気質部や亀裂の成分変化に伴う透水性の変化や不飽和水分特性の変化、飽和度の変化が考えられ、これらの影響をモニタリングするパラメータとしては、間隙水圧、透水係数、水分量が挙げられる。熱的変化から受ける影響としては、水理特性の温度依存性に伴う変化が考えられ、この影響をモニタリングするパラメータは間隙水圧、透水係数が挙げられる。

例えば岩盤の剛性と間隙水圧の関係について、加納ら[51]は、神岡鉱山内に掘削された 4 本のボアホールの間隙水圧データを用いて、間隙水圧の大気圧応答と潮汐応答の解析を実施し、載荷効率を決定し剛性率の推定を行った。また、応答の低周波の遮断周波数から水理拡散率を求めている。間隙水圧には、地球潮汐の日周潮あるいは半日周潮に対応する 2~3kPa の変化が見られ、低気圧の通過に伴って減少するなど、間隙水圧と大気圧との間には正の相関がみられた。間隙水圧の大気圧応答や応答を用いて岩盤の透水性を評価することの利点は、特定の時期に実施する室内試験などとは異なり、連続的に評価することができる点であるとしている。

3)化学的影響

化学的影響に関しては、力学的変化から受ける影響として、地下水流速の変化、気液分圧の変化が考えられ、これらの影響をモニタリングするパラメータとしては、地下水流向流速、ガス圧が挙げられる。水理的変化から受ける影響としては飽和度に応じた液相濃度変化であり、この影響をモニタリングするパラメータとしては水分量、ガス圧が挙げられる。熱的変化から受ける影響としては、平衡定数、分子拡散係数の温度依存性に起因する変化であり、この影響をモニタリングするパラメータとしては、pH、イオン濃度が挙げられる。

例えば、化学的影響と水理特性の関係について、橋本ら[52]は、岐阜県瑞浪産の花崗岩の粉末試料に対するフロースルー溶解実験を行い、作用温度と pH に依存する鉱物溶解現象について検討を行い、温度、pH が上昇すると溶解速度定数も上昇することを示した。

4)熱的影響

熱的影響に関しては力学的変化、化学的変化から受ける影響として、熱物性の変化が考えられ、この影響をモニタリングするパラメータは温度となる。水理的変化から受ける影響として、熱輸送と熱物性の変化が考えられ、この影響をモニタリングするパラメータは温度となる。

たとえば、熱的影響と力学的影響、水理学的影響の関係について、多田井ら[53]は砂岩に対して、異なる含水状態下及び、圧密した異なる密度の試料に対して熱伝導率を測定している。その結果、間隙率が変化しない条件下では、試料の含水率が高くなるに従い、熱伝導率が高くなる傾向が明確に確認され、乾燥状態と湿潤状態では、熱伝導率が約 28%の差異が認められた。

また、紛体試料(カオリナイト質粘土)に対してプレス機を用いて圧密し、異なる密度の試

料に対して熱伝導率の測定を実施したところ、熱伝導率とカオリン密度は正の相関関係を示した。

以上の検討から、図 2.6.5-1 にモニタリングパラメータ間の連関関係を整理した。

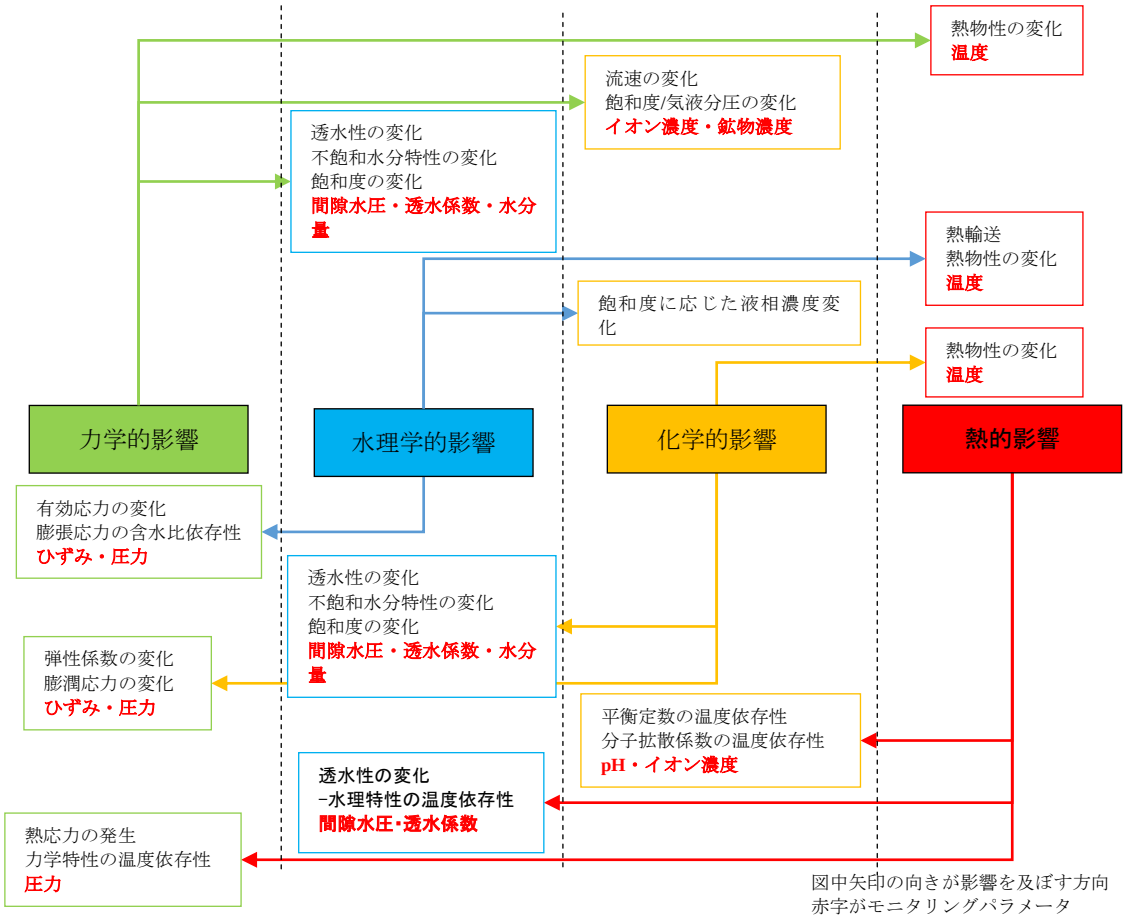



図 2.6.5-1　モニタリングパラメータ間の連関関係の整理

## 2.6.6　人工バリアのモニタリング項目の検討

### (1)　モニタリングパラメータ候補の検討

2.6.4 で検討した人工バリアに対する熱的影響、力学的影響、水理学的影響、化学的影響の観点からのモニタリング項目について、モニタリングを行うパラメータの候補を検討した。

検討した結果を表 2.6.6-1 に示す。緩衝材については、膨潤圧、含水比、密度、透水係数をモニタリングパラメータの候補とし抽出した。また、熱的影響における項目において温度も現象に関連するパラメータであることから、モニタリングパラメータの候補とした。オーバーパックについては、腐食量をモニタリングパラメータの候補とし抽出した。PEM 容器については、腐食量をモニタリングパラメータの候補として抽出した。

表 2.6.6-1 人工バリアに対するモニタリングパラメータの候補

| 整理の観点 | 現象 | モニタリング項目候補 | | モニタリングパラメータ候補 |
|---|---|---|---|---|
| 熱的影響 | 熱によるベントナイトの変質 | 緩衝材 | 膨潤特性の劣化 | 膨潤圧 |
| | | | | 温度 |
| | 熱による緩衝材含水比の変動 | | 比熱の変動 | 含水比<br>温度 |
| | | | 熱伝導率の変動 | |
| 力学的影響 | オーバーパック腐食による減肉 | オーバーパック | 強度の劣化 | 腐食量 |
| | | | 遮へい性の劣化 | |
| | 緩衝材膨潤及び腐食膨張による緩衝材変形による密度低下 | 緩衝材 | 膨潤特性の劣化 | 膨潤圧 |
| | | | 止水性の劣化 | 透水係数 |
| | | | 核種吸着性の劣化 | 密度 |
| | PEM 容器の腐食による減肉 | PEM 容器 | 強度の劣化 | 腐食量 |
| 水理学的影響 | 湧水による緩衝材の流出による密度低下 | 緩衝材 | 膨潤特性の劣化 | 膨潤圧 |
| | | | 止水性の劣化 | 透水係数 |
| | | | 核種吸着性の劣化 | 密度 |
| 化学的影響 | 地下水質の変化による腐食速度の変動 | オーバーパック | 耐食性の変動 | 腐食量 |
| | 地下水質及び腐食生成物による緩衝材の劣化 | 緩衝材 | 膨潤特性の劣化 | 膨潤圧 |
| | | | 止水性の劣化 | 透水係数 |
| | | | 核種吸着性の劣化 | 密度 |
| | 地下水質の変化による腐食速度の変動 | PEM 容器 | 耐食性の変動 | 腐食量 |

表 2.6.6-1 に示したモニタリングパラメータの候補において、緩衝材の膨潤圧、温度や透水係数などは直接測定することが可能であるが、緩衝材の含水比、密度、オーバーパックの腐食量、PEM 容器の腐食量は直接測定できない。直接測定する技術がないモニタリングパラメータについては、2.5 節における検討を参照し、既存技術として測定可能な項目を代替パラメータとして設定した。代替パラメータとして測定対象となるモニタリングパラメータを表 2.6.6-2 に示す。また、3.2 節に示した MoDeRn（2013）[33]及び 2.5 節での検討を参照し、候補となるモニタリング方法を示した。

但し、表 2.6.6-2 に示したモニタリングでは、人工バリア内での水みちの形成等の可能性があるものが含まれている。これらのモニタリングを実施することによる損益については、2.6.7 にて検討する。

表 2.6.6-2　測定対象となるモニタリングパラメータ

| モニタリング対象 | モニタリングパラメータ候補 | 測定対象となるモニタリングパラメータ | モニタリング方法 |
|---|---|---|---|
| 緩衝材 | 膨潤圧 | 圧力（全圧、間隙水圧） | センサによる測定 |
| | 温度 | 温度 | センサによる測定 |
| | 含水比 | 水分量 | センサによる測定 |
| | 密度 | 圧力（全圧、間隙水圧） | センサによる測定 |
| | 透水係数 | 圧力（全圧、間隙水圧） | センサによる測定 |
| オーバーパック | 腐食量 | pH、Eh、イオン濃度 | サンプリングと室内試験 |
| | | 腐食率 | センサによる測定 |
| PEM 容器 | 腐食量 | pH、Eh、イオン濃度 | サンプリングと室内試験 |
| | | 腐食率 | センサによる測定 |

(2)　モニタリングパラメータの連関関係の整理

人工バリアシステムに於いては、ガラス固化体からの崩壊熱の発生、坑道及び緩衝材中の地下水流動及び物質移行、緩衝材の膨潤変形、地下水と緩衝材鉱物の反応、地下水によるオーバーパックの腐食など、熱的、水理学的、力学的、地球化学的作用が相互に影響し合う複雑な場が形成されることが予想される。ここでは、各モニタリング項目に対して複数のモニタリングパラメータが関係するとともに，各モニタリング項目で共通するモニタリングパラメータも存在するものと考えられることから，抽出されたモニタリングパラメータの整理を試みた。

緩衝材及びオーバーパックについて、モニタリングパラメータ間の連関関係を整理した結果を図 2.6.6-1、図 2.6.6-2 に示す。

1)緩衝材

力学的影響

力学的影響に関しては、水理学的変化から受ける影響として、湧水による緩衝材の流出、膨潤変形による緩衝材の密度低下が考えられる。化学的変化から受ける影響としては、地下水質、腐食生成物による緩衝材の劣化が考えられる。また、熱的変化から受ける影響としては、熱変質による緩衝材の劣化が考えられる。これらの影響をモニタリングするパラメータとしては、共通として圧力となる。密度低下については、センサにより直接密度を測定することができないため、膨潤圧（全圧と間隙水圧の差により算出）が代替測定項目となる。

水理的影響

水理学的影響に関しては、力学的変化から受ける影響として、緩衝材の膨潤・オーバーパックの腐食膨張による変形による密度低下が考えられる。化学的変化から受ける影響としては、地下水質、腐食生成物による緩衝材の劣化が挙げられる。また、熱的変化

から受ける影響としては、熱変質による緩衝材の劣化が考えられる。これらの影響をモニタリングするパラメータとしては、共通として透水係数となるが、緩衝材の透水係数を現場でモニタリングすることは困難であるため、圧力（全圧及び間隙水圧）が代替測定項目となる。密度低下については、直接密度を測定することができないため圧力（全圧及び間隙水圧）が代替測定項目となる。

化学的影響

化学的影響に関しては、水理学的変化から受ける影響として、含水比、地下水の水質、腐食生成物による緩衝材の劣化が挙げられる。これらの影響をモニタリングするパラメータとしては水分量、pH、Eh、イオン濃度が代替測定項目となる。

熱的影響

熱的影響に関しては、水理学的変化から受ける影響として、含水比の変動による緩衝材の熱物性の変化が挙げられる。これらの影響をモニタリングするパラメータとしては、温度となる。

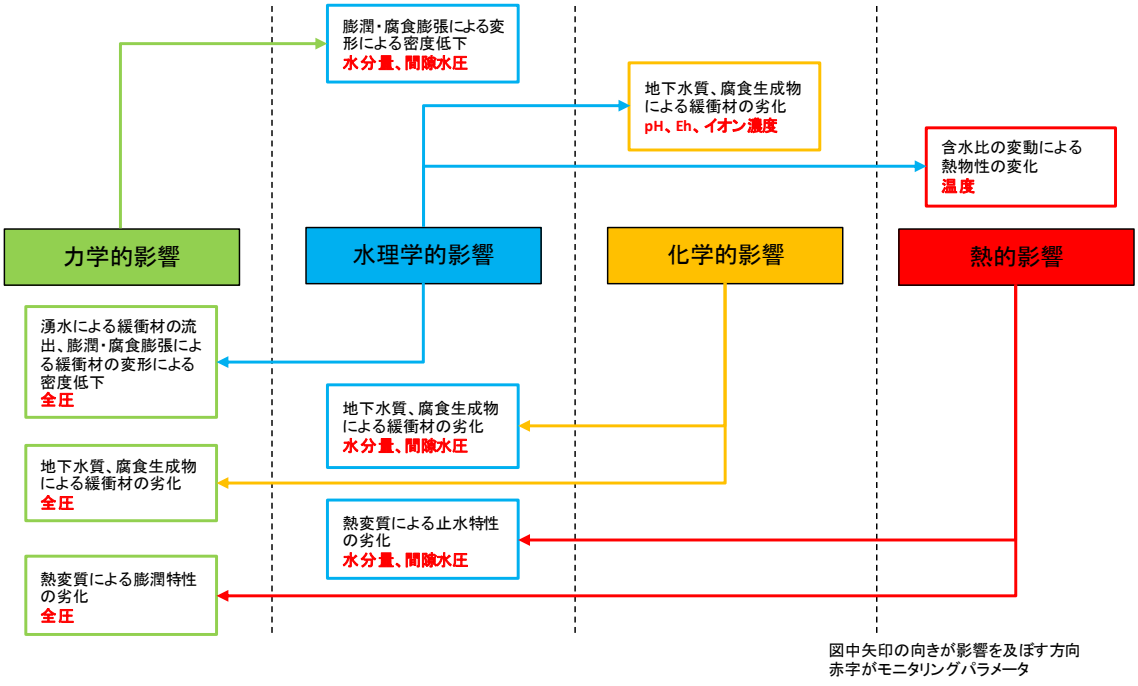



図 2.6.6-1　緩衝材のモニタリングパラメータ間の連関関係の整理

2)オーバーパック

力学的影響

力学的影響に関しては、化学的変化から受ける影響として、オーバーパックの腐食減肉による強度劣化が考えられる。この影響をモニタリングするパラメータとしては腐食量となるが、直接測定することができないため代替項目として pH、Eh、イオン濃度、微

生物挙動、腐食率（腐食速度）とし、これらが測定項目となる。

水理的影響

オーバーパックに関しては、水理的影響に関するパラメータはモニタリングの候補としなかった。

化学的影響

化学的影響に関しては、水理学的変化から受ける影響として、地下水質の変化によるオーバーパックの腐食率（腐食速度）の変動が考えられる。この影響をモニタリングするパラメータとしては腐食量となるが、直接測定することができないため代替項目として pH、Eh、イオン濃度、腐食率（腐食速度）とし、これらが測定項目となる。

熱的影響

オーバーパックに関しては、熱的影響に関するパラメータはモニタリングの候補としなかった。

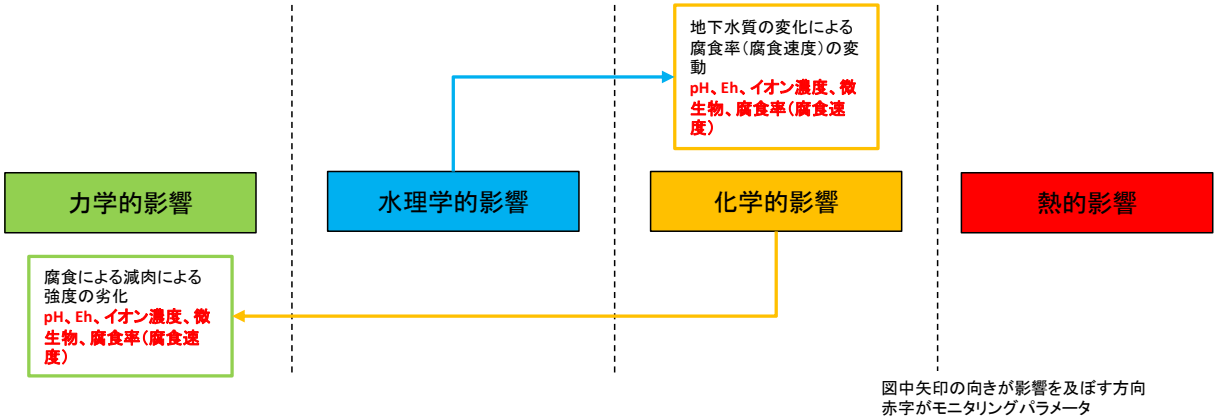



図 2.6.6-2　オーバーパックのモニタリングパラメータ間の連関関係の整理

## 2.6.7　モニタリングの時期と場所の検討

地層処分場におけるモニタリングは、2.4 項にて検討した性能確認モニタリングのように、継続的に行うことにより人工バリアや坑道環境に発生する現象や変状の前兆を押さえることが可能になるものと考えられる。

一方で、事業（回収）段階によって状態が変化し、モニタリング機器のメンテナンス可否の観点も含め、モニタリングパラメータの情報を取得することが難しくなることも想定される。

さらに、モニタリング機器の設置によるバリア性能の低下への懸念など、モニタリングが不利益になることも考えられる。

以上のように、人工バリア及び坑道環境の物理的な状態がモニタリング技術の選択に大

きく関係すると考えられる。従って、モニタリング技術の適用範囲について考慮し、モニタリングパラメータとして成立しているかについても判断する必要がある。

ここでは、これまでの検討で得られたモニタリングパラメータに対し、モニタリングする場所を整理するとともに、事業（回収）段階の進行に伴う状態の変化を参照し、モニタリングを行うことによる損益を考察する。

(1)坑道環境に対するモニタリング場所と時期の検討

1)モニタリング場所の検討

以下に、力学的影響、水理学的影響、化学的影響、熱的影響のそれぞれに関するモニタリングについて、実施場所を検討する。

力学的影響に関しては、応力場の変動をモニタリングするために、主要坑道周辺岩盤内、処分坑道周辺岩盤内、処分孔周辺岩盤内、プラグ内、埋戻し内で、土圧計及びひずみ計を用いた計測を行う。主要坑道周辺ではロックボルト軸力計による計測を行う。主要坑道の安定性を確認するために、内空変位計測を行い、周辺岩盤の全体的な挙動をモニタリングするために傾斜計による計測を行う。回収作業に伴い、プラグ・埋戻しや緩衝材の除去が行われた際は、処分坑道において空洞の安定性を確認するためのモニタリングが、主要坑道と同様に必要となる。

水理学的影響に関しては、水理バランスの変化や透水係数の変化などをモニタリングするために、主要坑道周辺岩盤内、処分坑道周辺岩盤内、処分孔周辺岩盤内、埋戻し内で間隙水圧計を用いた計測を行う。主要坑道周辺岩盤では、流向流速計を行う。主要坑道内では、地下水流入量をモニタリングするために、測定堰による計測を行う。水分量をモニタリングするために、主要坑道内では湿度計、埋戻し内では水分量計による計測を行う。回収に伴い、プラグ・埋戻しや緩衝材の除去が行われた際は、湧水箇所が増えることになるため、それら箇所にて地下水流入量や水分量等のモニタリングを行う。

化学的影響に関するパラメータについては、前述の検討から、連続モニタリングは実施しないと仮定し、適時サンプルする箇所として、ガスサンプルを主要坑道内、採水を主要坑道内と主要坑道周辺岩盤内で実施する。

熱的影響に関しては、地温分布や地温勾配の変化をモニタリングするために、主要坑道周辺岩盤内、処分坑道周辺岩盤内、処分孔周辺岩盤内、プラグ内、埋戻し内で温度計による計測を行う。

回収行為前におけるモニタリング場所の概念図を図 2.6.7-1～図 2.6.7-3 に示す。

回収行為前におけるモニタリングには、予め処分システムの性能確認等の目的でモニタリングが実施されている場合と、何らかの理由により回収を実施することが決められた後に、回収行為の安全性のためにモニタリング機器が配置されることが考えられるが、ここでの検討ではこれらを区別していない。

主要坑道、主要坑道周辺岩盤で実施する計測に関して、計測器のケーブル等を主要坑道へ配線することは容易である。一方、処分坑道周辺岩盤、処分孔周辺岩盤で実施する計測

に関しては、プラグ、埋戻しが除去されると、プラグ、埋戻し内に配線したケーブル等も破損することになり、以降の計測が不可能となる。プラグ、埋戻しの除去前後で継続して計測を行うためには、計測器のケーブル等はプラグ、埋戻しを通さず直接主要坑道へ配線する必要がある。

計測器のケーブル類を、プラグを通さずに配線する方法としては、SKB で実施された Prototype　Repository において実施された手法がある[54]。プラグへの貫通物を極力減らすために、試験坑道(実際の処分坑道にあたる)から、隣接する別の坑道へケーブル配線用のためにボーリング孔を掘削し、プラグを貫通させずに、ケーブルを配線している(図 2.6.7-4)。また、第 3 章に示すように、計測器とデータロガー間で、ケーブルを用いずに無線でデータを転送する地中無線モニタリング技術も開発が行われているが、今回の検討では、モニタリングの実施期間等が未定であることから、一般的な計測手法を前提とし、処分坑道や処分孔周辺で実施される計測に関しては、主要坑道へ直接接続することを想定している。

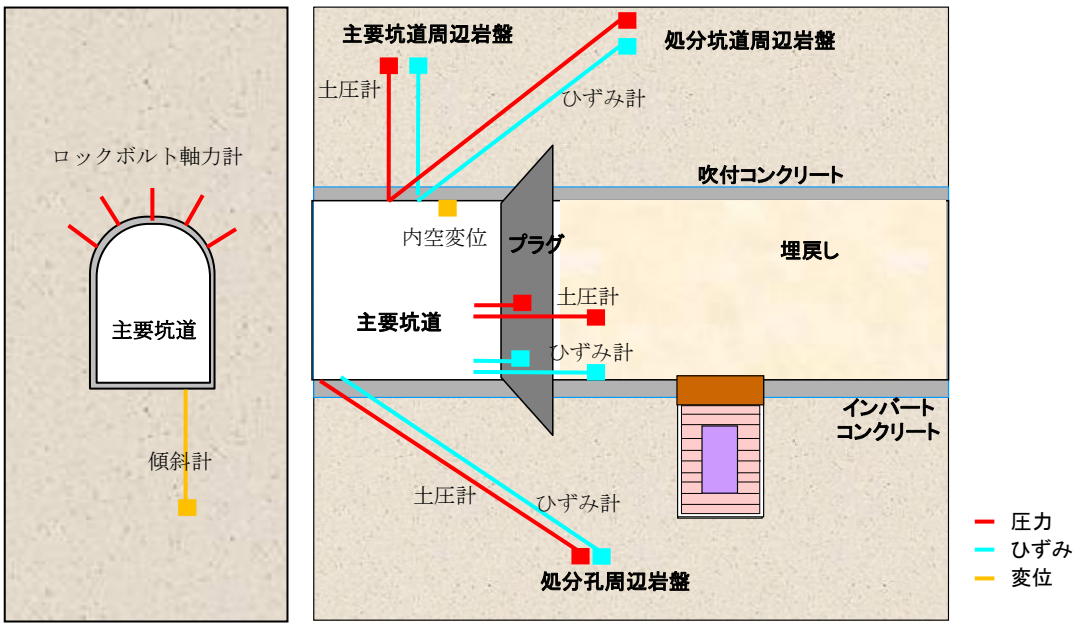



図 2.6.7-1　回収行為前におけるモニタリング場所(力学的影響に関するパラメータ)

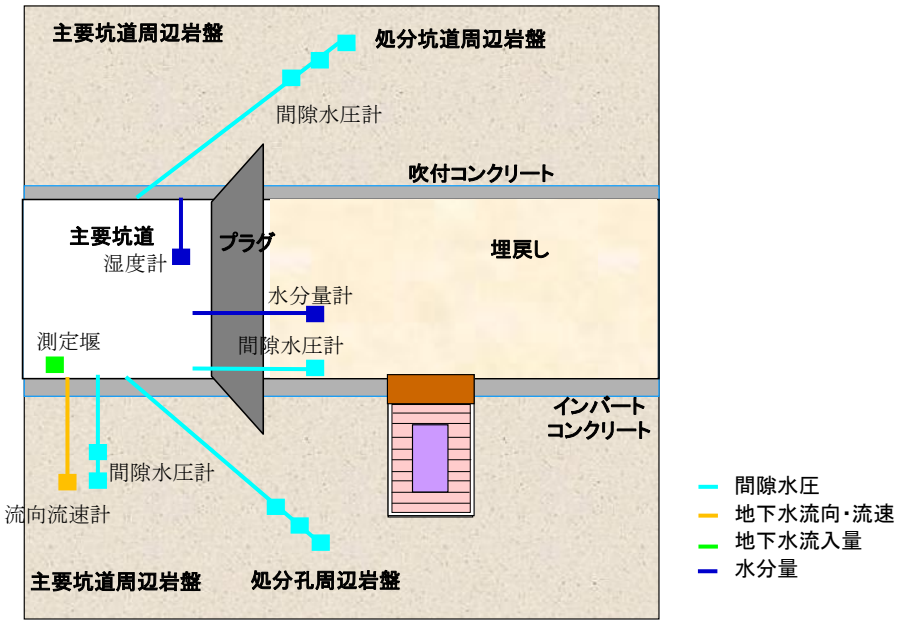



図 2.6.7-2　回収行為前におけるモニタリング場所(水理学的影響に関するパラメータ)

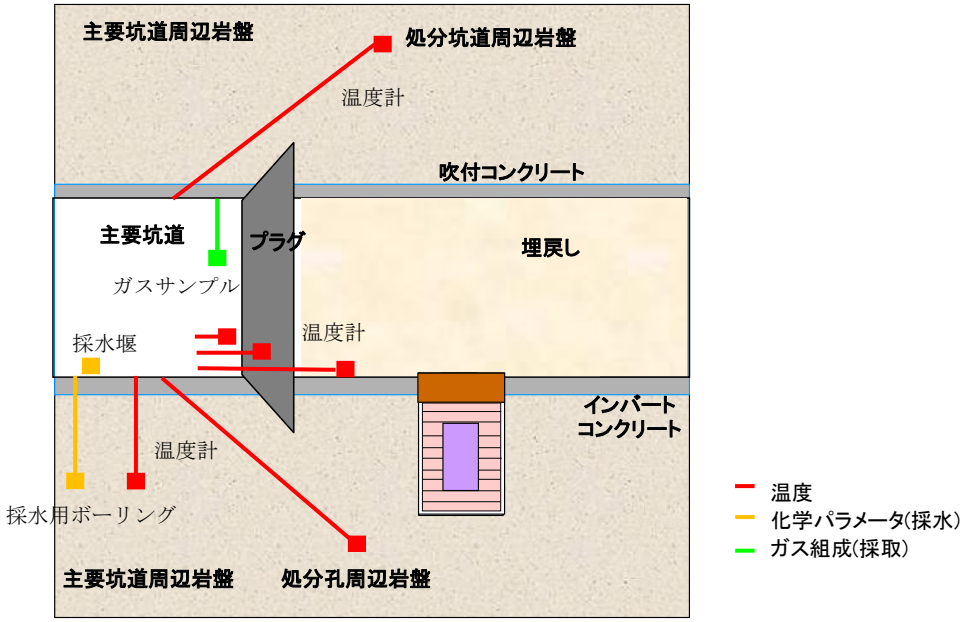



図 2.6.7-3　回収行為前におけるモニタリング場所(化学的影響、熱的に関するパラメータ)

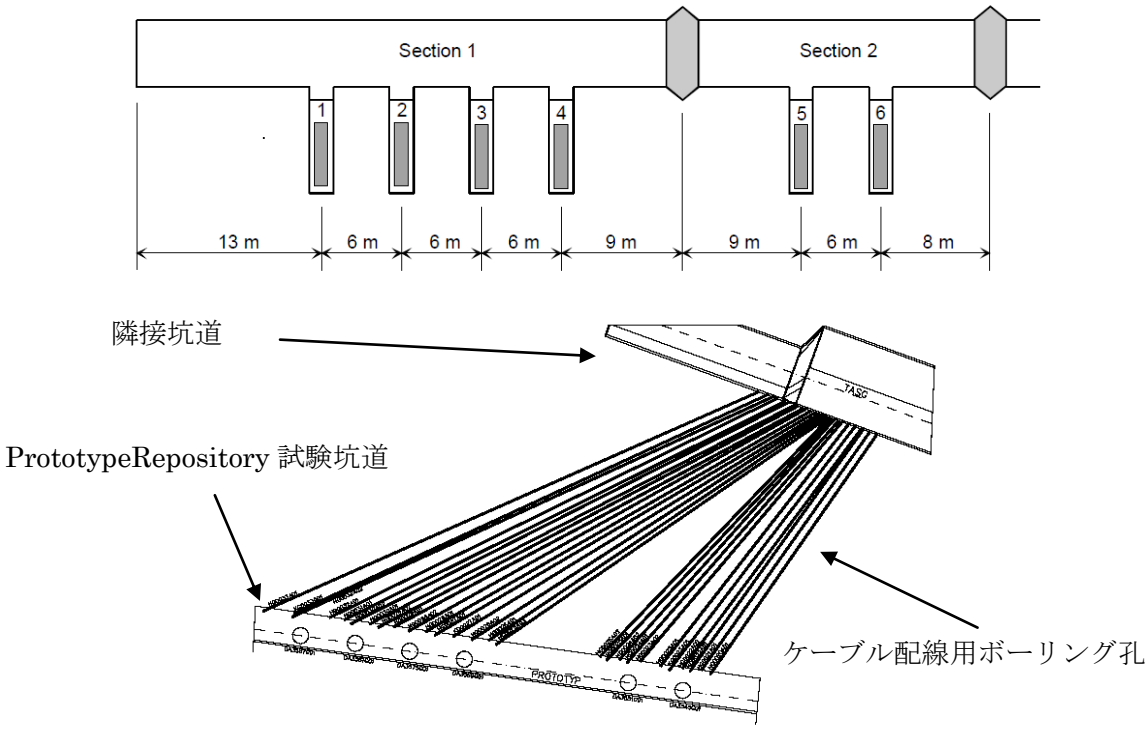



図 2.6.7-4　SKB による PrototypeRepository におけるレイアウト(上)と、配線用ボーリング孔の配置図（下）[54]

プラグ・埋戻し除去状態におけるモニタリング場所の概念図を図 2.6.7-5～図 2.6.7-7 に示す。回収行為前からの主要な変化は、プラグ・埋戻し内に設置されていた計測機器が撤去され、新たに露出した処分坑道に関する計測項目が増える点である。

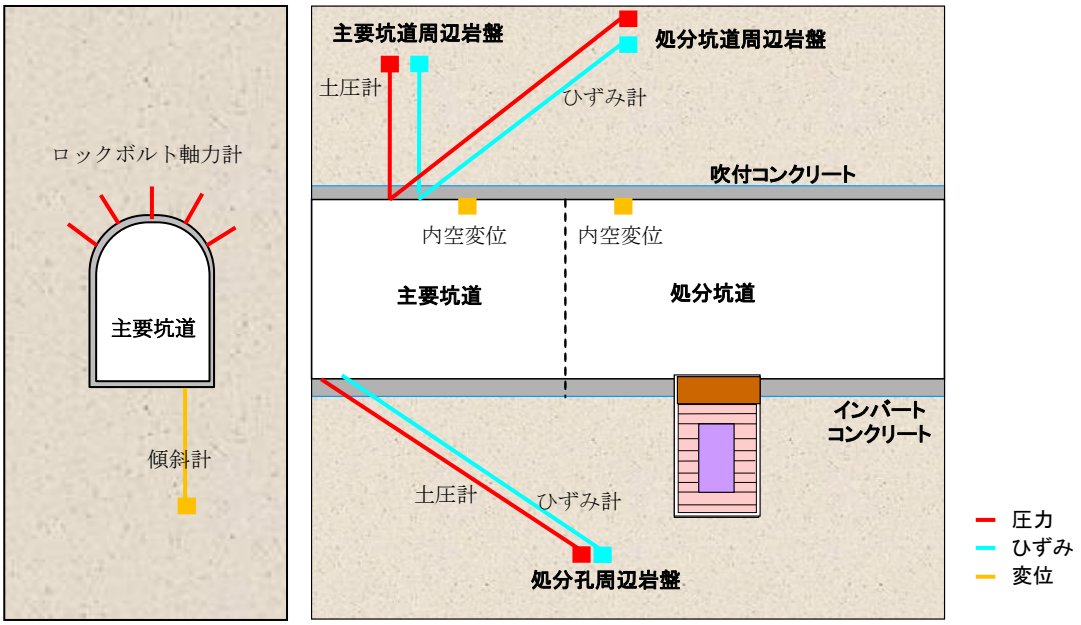



図 2.6.7-5　プラグ･埋戻し除去状態におけるモニタリング場所(力学的影響に関するパラメータ)

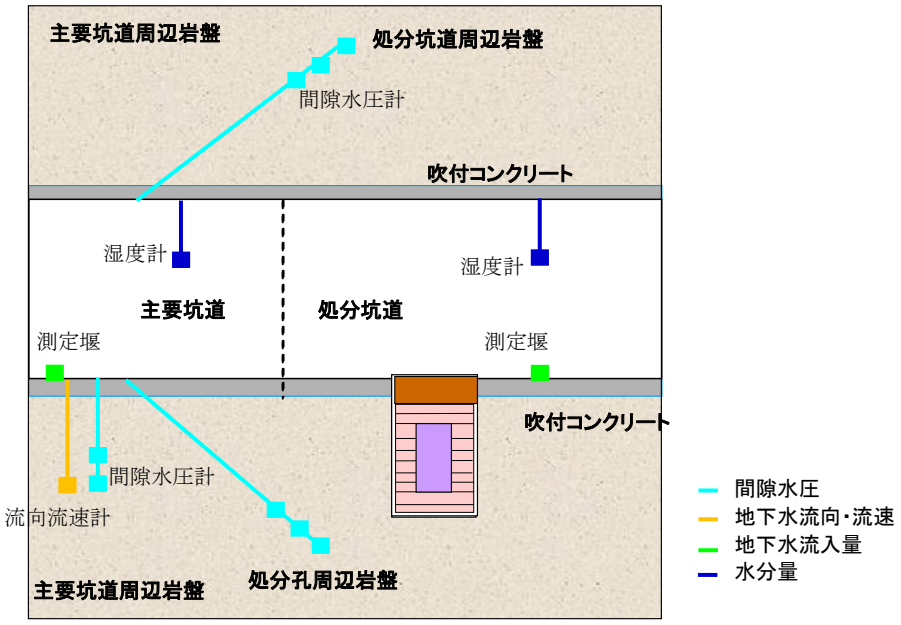



図 2.6.7-6　プラグ･埋戻し除去状態におけるモニタリング場所(水理学的影響に関するパラメータ)

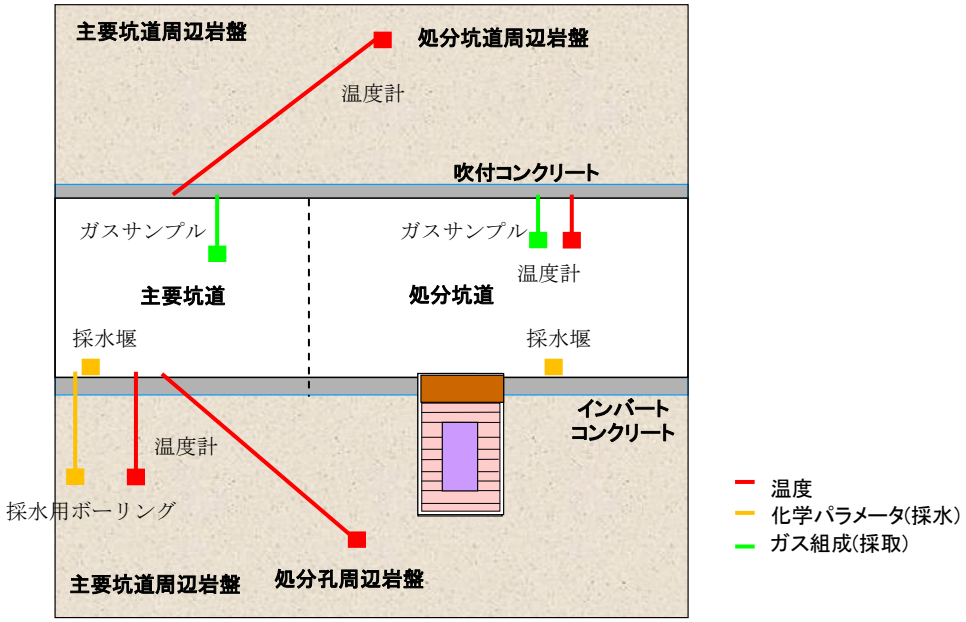



図 2.6.7-7　プラグ・埋戻し除去状態におけるモニタリング場所(化学的影響、熱的に関するパラメータ)

緩衝材除去状態におけるモニタリング場所の概念図を図 2.6.7-8～図 2.6.7-10 に示す。プラグ・埋戻し除去状態からの主要な変化は、新たに露出した処分孔に関する計測項目が増える点である。ただし、緩衝材除去状態から次の回収作業までの間にどの程度期間を要するかにより、連続モニタリングが不可能となる項目が出ることも予想される。

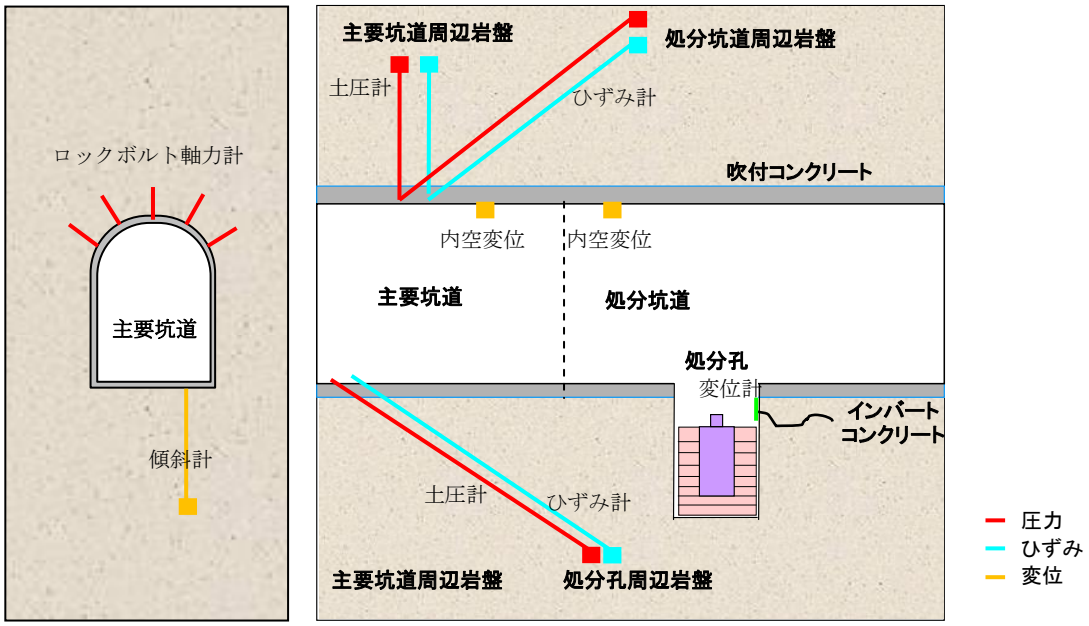



図 2.6.7-8　緩衝材除去状態におけるモニタリング場所(力学的影響に関するパラメータ)

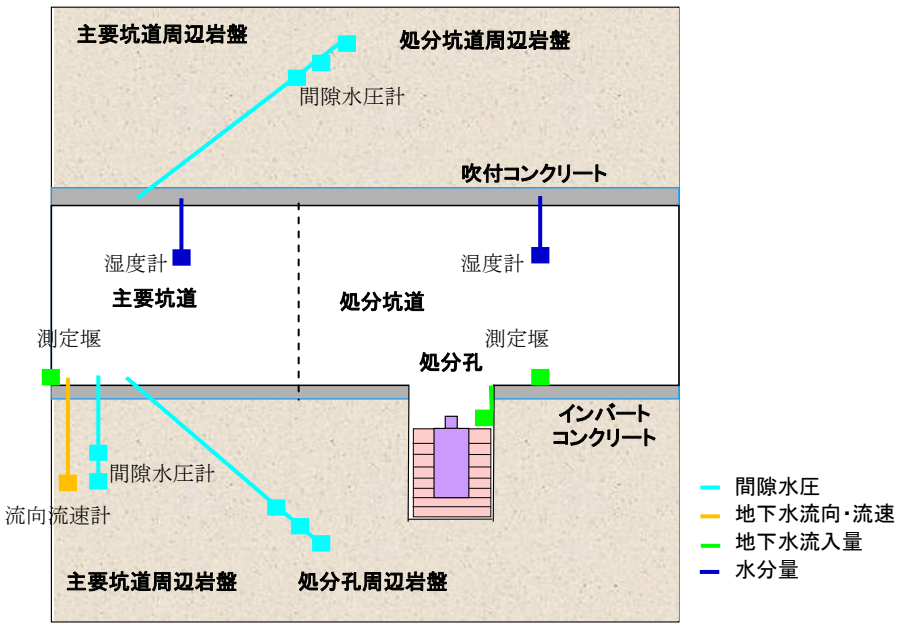



図 2.6.7-9　緩衝材除去状態におけるモニタリング場所(水理学的影響に関するパラメータ)

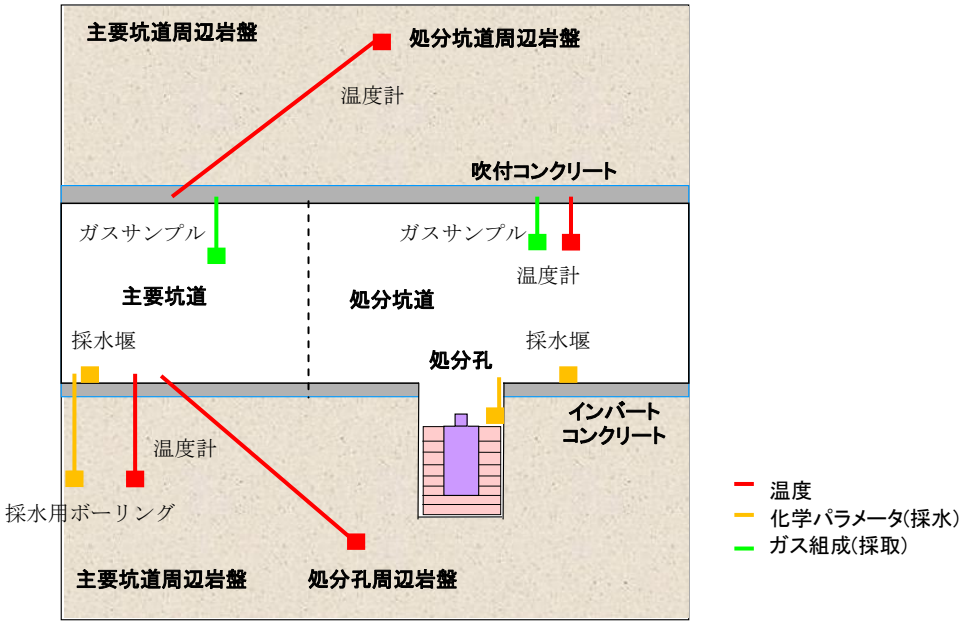



図 2.6.7-10　緩衝材除去状態におけるモニタリング場所(化学的影響、熱的に関するパラメータ)

回収作業状態におけるモニタリング場所の概念図を図 2.6.7-11～図 2.6.7-13 に示す。緩衝材除去状態からの大幅な変更はないが、オーバーパックが露出することによる温度変化に着目する必要がある。また、処分孔内及び処分坑道の計測に関しては、回収作業に用いる装置の設置状況によっては、計測が困難となる項目が出ることが予想される。

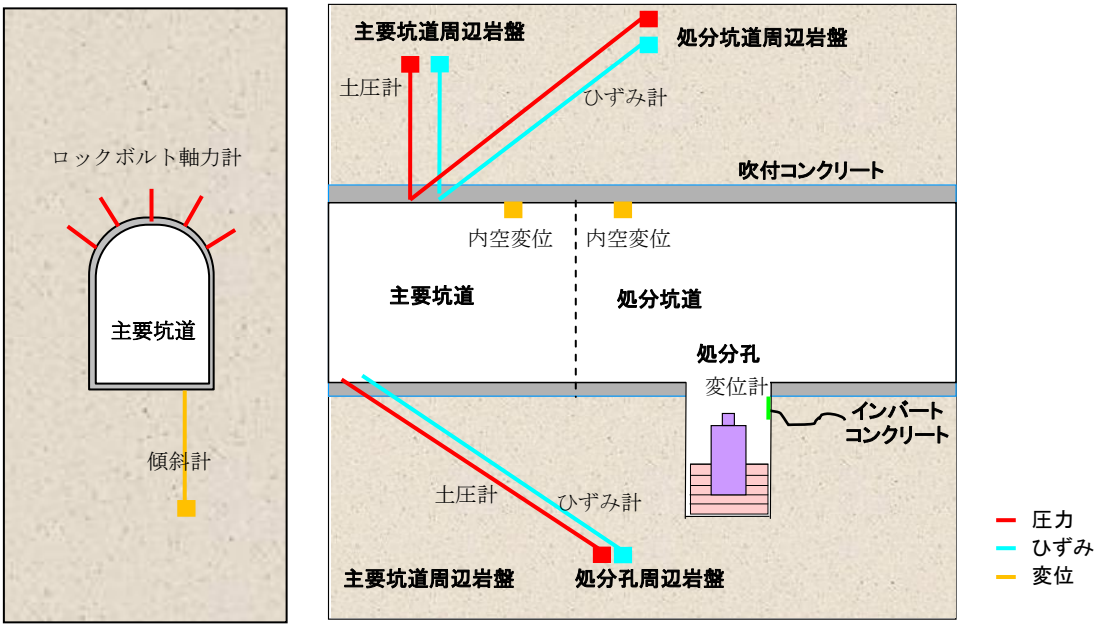



図 2.6.7-11　回収作業状態におけるモニタリング場所(力学的影響に関するパラメータ)

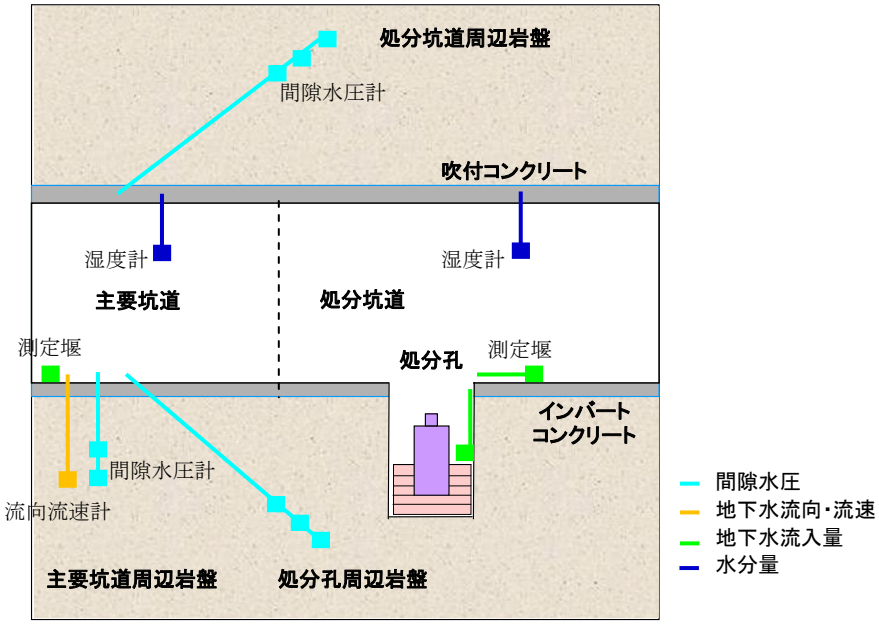



図 2.6.7-12　回収作業状態におけるモニタリング場所(水理学的影響に関するパラメータ)

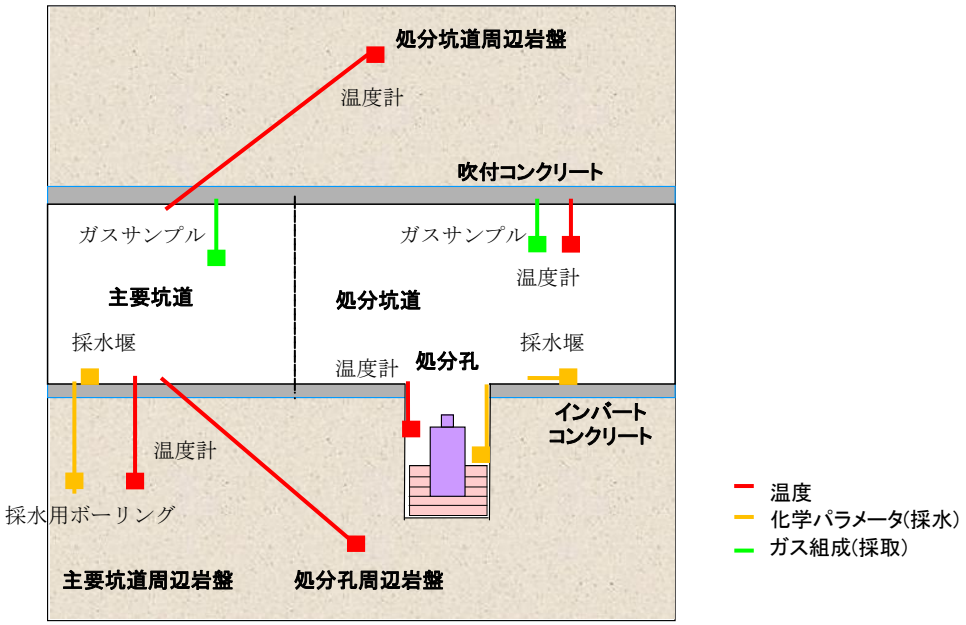



図 2.6.7-13　回収作業状態におけるモニタリング場所(化学的影響、熱的に関するパラメータ)

2)モニタリング時期の検討

モニタリング時期に関して、1)で検討したモニタリング場所と併せて、表 2.6.7-1～表 2.6.7-3 に検討結果を示す。

表 2.6.7-1　モニタリング時期と場所の検討結果(力学的影響に関するパラメータ)

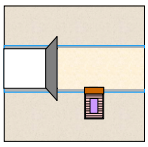
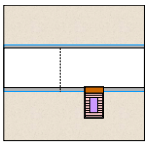
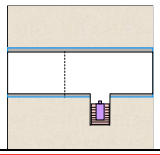
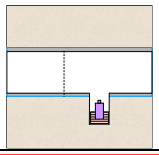
| | モニタリングパラメータ | 回収行為前  | プラグ・埋戻し除去  | 緩衝材除去  | 回収作業  |
|---|---|---|---|---|---|
| 力学的影響 | 圧力 | 主要坑道周辺岩盤、処分坑道周辺岩盤、処分孔周辺岩盤<br>主要坑道<br>プラグ<br>埋戻し | | | |
| | ひずみ | 主要坑道周辺岩盤、処分坑道周辺岩盤、処分孔周辺岩盤<br>主要坑道<br>プラグ、埋戻し | | | |
| | 変位 | 主要坑道周辺岩盤、処分坑道周辺岩盤、処分孔周辺岩盤<br>主要坑道<br>プラグ、埋戻し | 処分坑道 | 処分孔 | |

表 2.6.7-2　モニタリング時期と場所の検討結果(水理学的影響に関するパラメータ)

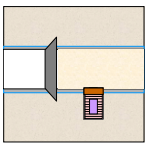
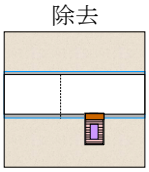
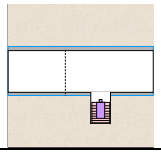
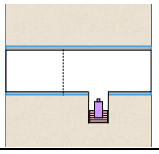
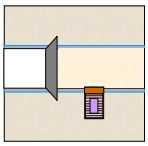
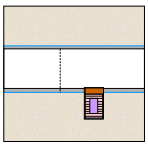
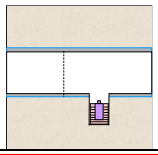
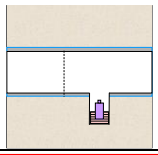
| | モニタリングパラメータ | 回収行為前  | プラグ・埋戻し除去  | 緩衝材除去  | 回収作業  |
|---|---|---|---|---|---|
| 水理学的影響 | 間隙水圧、ガス圧、 | 主要坑道周辺岩盤、処分坑道周辺岩盤、処分孔周辺岩盤<br>埋戻し | | | |
| | 地下水流向流速 | 主要坑道周辺岩盤 | | | |
| | 透水係数、地下水流入量 | 主要坑道周辺岩盤、処分坑道周辺岩盤、処分孔周辺岩盤<br>主要坑道 | 処分坑道 | 処分孔 | |
| | 水分量 | 主要坑道<br>埋戻し | 処分坑道 | | |

表 2.6.7-3　モニタリング時期と場所の検討結果(化学的、熱的影響に関するパラメータ)

| | モニタリングパラメータ | 回収行為前 | プラグ・埋戻し除去 | 緩衝材除去 | 回収作業 |
|---|---|---|---|---|---|
| | |  |  |  |  |
| 化学的影響 | 採水 | 主要坑道周辺岩盤<br>主要坑道 | 処分坑道 | 処分孔 | |
| | ガスサンプル | 主要坑道 | 処分坑道 | | |
| 熱的影響 | 温度 | 主要坑道周辺岩盤、処分坑道周辺岩盤、処分孔周辺岩盤<br>主要坑道<br>プラグ、埋戻し | 処分坑道 | | |

3)モニタリングによる損益の整理

前項までは、モニタリングを実施することを前提として検討を進めてきたが、ここでは、実際の事業(回収)を想定し、モニタリングによる損益の整理として、モニタリングを実施することによって生じるメリットとデメリットについて検討を行う。

a. モニタリングによるメリット

これまで述べたように、モニタリングを実施することにより、力学的影響、水理学的影響、化学的影響、熱的影響を直接評価できると共に、各パラメータ間の連関関係(メカニズム)の解明に寄与する。また、メカニズムが明らかな現象に対しては、操業中に想定された現象が生じているかを確認することが可能となる。たとえば、主要坑道、処分坑道、処分孔などでの空洞の安定性の確認、廃棄体に対する遮蔽性の確認などが可能となる。

また、モニタリングは計測点数が限られた中で広範囲かつ長期間計測を実施することが想定される。そのため、解析による再現や予測と併せた評価を実施することにより、データ間の影響因子や環境影響因子を明らかにしたり、精度を向上させたりすることに寄与できると考えられる。例えば水封式岩盤タンクに関する事例では、間隙水圧の計測値の変化から透水係数の変化を逆解析手法により求め、長期にわたる健全性を評価している実績がある[55]。

b. モニタリングによるデメリット

施工の煩雑化と止水等の懸念

1)で述べたとおり、SKB で実施された Prototype Repository[54]では、計測器のケーブルがプラグを貫通しないように、隣接坑道に向けてケーブル配線用ボーリング孔を掘削し、

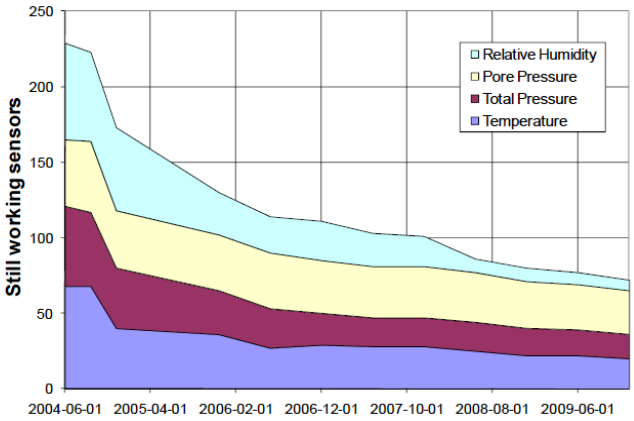
ボーリング孔内にケーブルを配置した。ボーリング孔周辺に関して、水みちとならないよう、大規模な止水処理がなされている。計測器の配線に関する施工(ボーリング孔の掘削、止水処理)だけでも大幅に施工が煩雑化している。さらに、止水処理を施すとはいえ、ボーリング孔や、プラグを計測ケーブルが貫通する場合には計測ケーブルが水みちとなる可能性は捨てきれない。

計測器の稼働率

SKBで実施されたPrototypeRepositoryにおける稼働計測器数と、実験スケジュールを、図 2.6.7-14 に示す。PrototypeRepository では、計測器は市販品を用いるのではなく、接液部の素材を全てチタン製の特注品を用いている。それでも、約 5 年間の計測器の稼働率は図 2.6.7-14 に示すとおり、計測器によっては1割程度に下落している。

日本原子力研究開発機構にて実施された工学規模の室内試験である COUPLE における計測器稼働率を表 2.6.7-4 に示す。COUPLE においても、熱電対については、6 か月後でも稼働率はほぼ 100%を保っているが、間隙水圧計、土圧計は 6 か月後にはおよそ 50%、その他の計測器に関しては、6 か月後にはほぼ 0%となっている。

このように、計測環境として苛酷な状態で計測が行われることが予想され、また実際の処分を想定した場合に、検討期間を通してモニタリングが可能となる耐久性を備えた技術に関しては、さらに検討が必要である。前述の施工の煩雑化や水みち形成のリスクを冒して計測器を設置しても、稼働率が低い場合には、得られる情報は少ないのにリスクのみが増大することが懸念される。




| Activity | Date |
|---|---|
| Start backfilling | 3/9 2001 |
| Start heating canister 1 | 17/9 2001 |
| Start heating canister 2 | 24/9 2001 |
| Start heating canister 3 | 11/10 2001 |
| Start heating canister 4 | 22/10 2001 |
| Finish backfilling | 20/11 2001 |
| Plug casting | 14/12 2001 |
| Decreased power (-20 W) | 17/9 2002 |
| Decreased power (-40 W) | 5/9 2003 |
| Decreased power (-30 W) | 8/9 2004 |
| The drainage of tunnel was closed | 1/10 2004 |
| The power to all canisters was switched off | 2/12 2004 |
| The drainage of the tunnel was opened | 6/12 2004 |
| The power to the canisters was switched on | 15/12 2004 |
| Decreased power (-30 W) | 2/12 2005 |
| A packer installed in the rock was broken | 18/5 2006 |
| Decreased power (-30 W) | 21/12 2006 |
| Decreased power (-30 W) | 11/12 2007 |
| Decreased power (-30 W) | 29/1 2009 |

図 2.6.7-14　Prototype における稼動計測器数とスケジュール（Section1)[56]

表 2.6.7-4　COUPLE における計測器稼働率[57]

| 設置場所 | 機器名称 | 数量 | 稼働率［%］ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1ヶ月後 | 2ヶ月後 | 4ヶ月後 | 6ヶ月後 |
| 模擬岩体 | 熱電対 | 42 | 93 | 93 | 93 | 93 |
| | 間隙水圧計 | 8 | 88 | 75 | 50 | 50 |
| | pH 計 | 1 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| 緩衝材 | 熱電対 | 20 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| | サイクロメータ | 24 | 96 | 71 | 25 | 8 |
| | 湿度計 | 8 | 88 | 50 | 0 | 0 |
| | 土圧計(境界壁面) | 8 | 100 | 75 | 63 | 63 |
| | 土圧計(ブロック間) | 7 | 43 | 14 | 0 | 0 |
| | pH 計 | 2 | 50 | 0 | 0 | 0 |

本項の検討から得られた、モニタリングによる損益の整理結果を表 2.6.7-5 に示す。

表 2.6.7-5　モニタリングによる損益の整理

| モニタリングによる利点 | 懸念が予想される事項 |
|---|---|
| ・ メカニズム解明、もしくは確認<br>例えば空洞安定性、遮蔽性能の確認 | ・ 施工費用の増大<br>・ 施工の煩雑性の増大<br>・ 計測器稼働率の問題<br>・ 配線等による遮水性能の低下 |

(2)人工バリアに対するモニタリング場所と時期の検討

これまでの検討にて抽出した人工バリアに対するモニタリングパラメータ及びモニタリング技術に対し、回収時の段階ごとにモニタリングを行う場所及びモニタリングの時期を検討した。

1)モニタリング場所の検討

これまでの検討にて抽出した人工バリアに対するモニタリング項目、パラメータに対するモニタリング場所を整理した。整理した結果を表 2.6.7-6 に示す。

ここで、第 3 章に示すように計測データをケーブルを用いずに地中無線送信技術で地中を転送する技術が開発されているが、今回の検討では、モニタリングを実施する期間等が未定であることから、坑道環境に対するモニタリングの検討と同様にケーブルを用いることを想定した。

a. 緩衝材

温度

回収行為前には、今後の回収維持に関する方針検討に柔軟に対応できるようにモニタリングを継続して実施する期間である。緩衝材に対して熱の影響の有無を把握するため、温度センサを用いた測定が考えられる。温度の測定のためには、緩衝材の内部にセンサを設置する必要がある。データ取得のためには、転送用ケーブルを主要坑道まで引き出す必要がある。

プラグ・埋め戻し材除去時には、埋め戻し材が除去されて処分坑道が空洞になり、熱の伝わり方が遅くなる方に変化が生じる。また、緩衝材内部に設置した温度センサは継続して利用が可能である。したがって、空洞となった後の熱の挙動を把握するため、温度センサを用いて継続したモニタリングが考えられ、測定の方法は回収行為前フェーズと同様である。

緩衝材除去後では、緩衝材が取り除かれるためモニタリングは不要となる。

隣接する人工バリアの緩衝材に対しては、プラグ・埋め戻し材除去以降において、プラグ・埋め戻し材の除去による熱的影響が考えられる。隣接する人工バリアに対する温度変化を計測するためには、新たに埋め戻し材中に温度センサを設置することが考えられる。この場合、計測後において最終的に埋め戻し材による止水を実施することで、人

工バリアへの影響は小さいと考えられる。また、処分孔の緩衝材中に温度センサを設置することは、埋め戻し材中を通す場合には途中で挿入孔を曲げて施工する必要があり困難であり、また岩盤中を通すことにより直線的に緩衝材に到達する方法もあるが、岩盤に空けた穴の止水やオーバーパックに影響しないよう精密な掘削が要求される。したがって、緩衝材を直接計測することは現実的ではないと考える。

膨潤圧

回収行為前には、今後の回収維持に関する方針検討に柔軟に対応できるようにモニタリングを継続して実施する期間である。緩衝材の密度変化や膨潤特性の劣化状況を把握するため、膨潤圧を把握するための圧力センサを用いた測定が考えられる。圧力の測定のため、緩衝材と周辺岩盤の境界面、緩衝材内部中にセンサを設置することが考えられる。データ取得のためには、転送用ケーブルを主要坑道まで引き出す必要がある。

プラグ・埋め戻し材除去時には、埋め戻し材の除去により処分坑道が空洞になるため、緩衝材の処分坑道側へのはらみ出しによる膨潤圧への影響や、処分孔への地下水の流入状況の変化により緩衝材中への地下水の浸潤状況が変化することで、膨潤圧の変化を把握することが考えられる。また、緩衝材内部に設置した圧力センサは継続して利用が可能である。したがって、回収行為前フェーズと同様に、膨潤圧についても継続したモニタリングが考えられ、測定の方法は回収行為前フェーズと同様である。

緩衝材除去後には、緩衝材が取り除かれるためモニタリングは不要となる。

隣接する人工バリアの緩衝材に対しては、プラグ・埋め戻し材除去後において、プラグ・埋め戻し材の除去により、処分孔上の埋戻し材の拘束力が減少し、処分孔内部からの緩衝材のはらみ出しを引き起こす懸念がある。そこで、処分孔上部の埋め戻し材中の圧力の経時変化を計測し、処分孔からのはらみ出しの状況を観察することが考えられる。ただし、地下水の浸潤による埋め戻し材の膨潤力の上昇もあることから、計測値がはらみ出しの影響かどうかの判断は難しいと考えられる。隣接する人工バリアに対する圧力変化を計測するための新たな圧力センサの設置は、埋め戻し材中への 1)温度と同じ方法による設置が考えられる。

含水比、透水係数

回収行為前には、今後の回収維持に関する方針検討に柔軟に対応できるようにモニタリングを継続して実施する期間である。緩衝材の密度変化や止水性の劣化状況、及び熱物性の変化を把握するため、透水係数や含水比取得のための水分量センサを用いた測定が考えられる。透水係数や水分量の測定のため、緩衝材内部にセンサを設置することが考えられる。データ取得のためには、転送用ケーブルを主要坑道まで引き出す必要がある。

プラグ・埋め戻し材除去時には、埋め戻し材の除去により処分坑道が空洞になるため、処分孔への地下水の流入状況の変化による緩衝材の地下水浸潤挙動や緩衝材密度への影響などの変化を把握することが考えられる。回収行為前と同様に、透水係数や水分量に

ついても継続したモニタリングが考えられ、測定の方法は回収行為前フェーズと同様である。

緩衝材除去後には、緩衝材が取り除かれるためモニタリングは不要となる。

隣接する人工バリアの緩衝材に対しては、プラグ・埋め戻し材除去後において、プラグ・埋め戻し材の除去により、空間が広がることによる間隙水圧の変化から地下水の浸入状況が変化することが考えられる。この変化により緩衝材の密度が低下するなどの悪影響は考え難いことから、特に計測による変化状況を確認する必要はないと考える。

b. オーバーパック

腐食量

これまでの検討で示した通り、腐食量をモニタリングするためには、①周辺岩盤から地下水をサンプリングし、専用装置で地下水水質（pH、Eh、イオン濃度）分析をし、オーバーパックの腐食量の参考とする方法、②オーバーパックと同様の材質の電極を緩衝材内部に設置し、その腐食率（腐食速度）をモニタリングする方法、及び、③オーバーパック表面にセンサを設置し直接、腐食率をモニタリングする方法がある。

回収行為前には、今後の回収維持に関する方針検討に柔軟に対応できるようにモニタリングを継続して実施する期間であり、この期間で地下水とオーバーパックが接触すれば腐食が進行する可能性もある。腐食量を評価するための地下水質等を把握するため、人工バリアと接触している地下水質とできるだけ同じ状態の水質を得るため、処分坑道の端部でのサンプリングの実施が考えられる。腐食率の測定では、緩衝材中やオーバーパック表面にセンサ等を設置することが考えられる。この腐食率の測定については、データ取得のために転送用ケーブルを主要坑道まで引き出す必要がある。

プラグ・埋め戻し材除去時には、埋め戻し材の除去により処分坑道が空洞になるため、処分孔への地下水の流入状況の変化による腐食挙動への影響などの変化を把握することが考えられる。回収行為前フェーズと同様に、腐食率についても継続したモニタリングが考えられる。地下水のサンプリングについては、処分孔近傍での実施が考えられる。これらの測定方法は、回収行為前フェーズと同様である。

緩衝材除去後は、オーバーパックが露出することになり、大気と接する等腐食に関する環境が大きく変化することになる。しかし、回収作業の段階でオーバーパックが長い期間、処分孔内で露出している状態にあるとは考え難いため、オーバーパックの腐食に対する懸念はないことからモニタリングは不要と考える。基本的には定期的なカメラによるオーバーパック表面の観察程度と考える。

回収作業後においては、廃棄体が回収されるためモニタリングは不要となる。

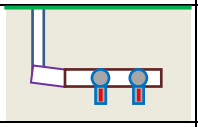
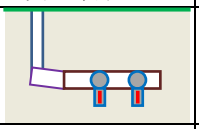
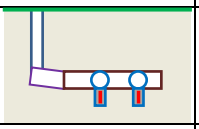
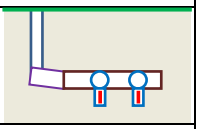
隣接する人工バリアのオーバーパックに対しては、プラグ・埋め戻し材除去後において、プラグ・埋め戻し材の除去による腐食挙動への影響は、温度や地下水挙動が変化する可能性があることから何らかの影響が有るものと考えられる。しかし、人工バリアへの影響が無いようにオーバーパックに新たにセンサを設置することはほとんど不可能である。したがって、現実的には、前述した埋め戻し材や地下水サンプリング等からの情

報からの推測することになると考える。

c.モニタリング場所のイメージ

a, b より、モニタリングする場所とモニタリングパラメータのイメージを、回収行為前から緩衝材除去時について、図 2.6.7-15～図 2.6.7-17 に示す。廃棄体除去後についてはモニタリング対象が無いことから省略した。

表 2.6.7-6　モニタリング場所の検討

| モニタリング対象※ | モニタリング項目 | モニタリングパラメータ | 回収行為前 | プラグ・埋め戻し材除去 | 緩衝材除去 | 回収作業 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | |  |  |  |  |
| 緩衝材 | 膨潤圧の劣化 | 温度 | 緩衝材内部にセンサを設置 | 緩衝材内部の既存のセンサを使用 | モニタリング不要 | モニタリング不要 |
| | 膨潤圧の劣化 | 膨潤圧 | 緩衝材と周辺岩盤の間にセンサを設置 | 緩衝材と周辺岩盤の間の既存のセンサを使用 | モニタリング不要 | モニタリング不要 |
| | 核種吸着性の劣化 | | 緩衝材内部にセンサを設置 | 緩衝材内部の既存のセンサを使用 | | |
| | 比熱の変動 | 含水比 | 緩衝材内部にセンサを設置 | 緩衝材内部の既存のセンサを使用 | モニタリング不要 | モニタリング不要 |
| | 熱伝導率の変動 | | | | | |
| | 止水性の劣化 | | | | | |
| オーバーパック | 強度の劣化 | 腐食量 | オーバーパック表面にセンサを設置 | オーバーパック表面の既存のセンサを使用 | モニタリング不要 | モニタリング不要 |
| | 遮蔽性の劣化 | | | | | |
| | 耐食性の変動 | | 緩衝材内部に電極を設置 | 緩衝材内部の既存の電極を使用 | モニタリング不要 | |
| | | | 周辺岩盤から地下水をサンプリング | 周辺岩盤から地下水をサンプリング | 周辺岩盤から地下水をサンプリング | |

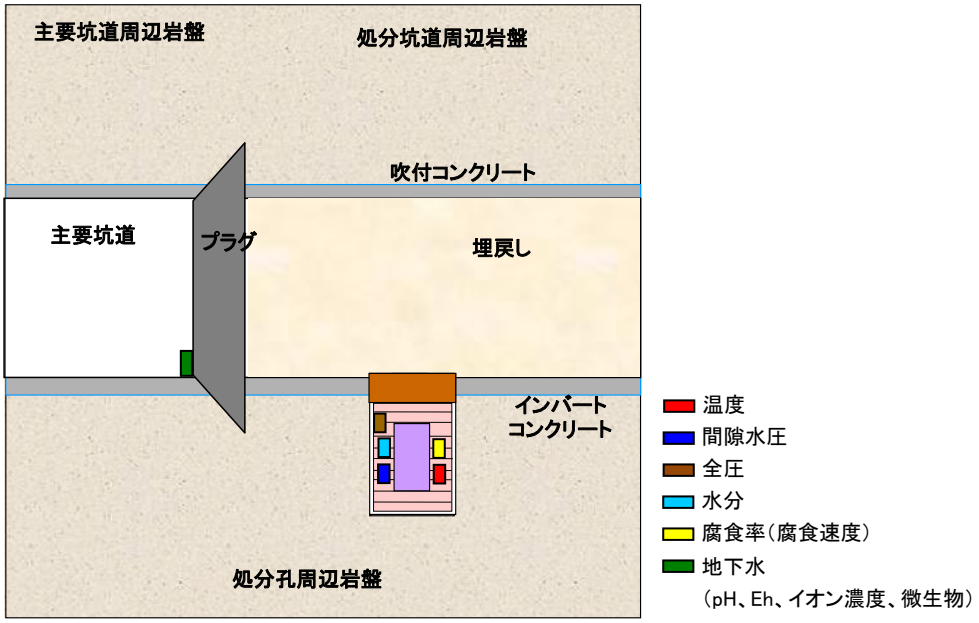



図 2.6.7-15　モニタリング場所のイメージ（回収行為前）

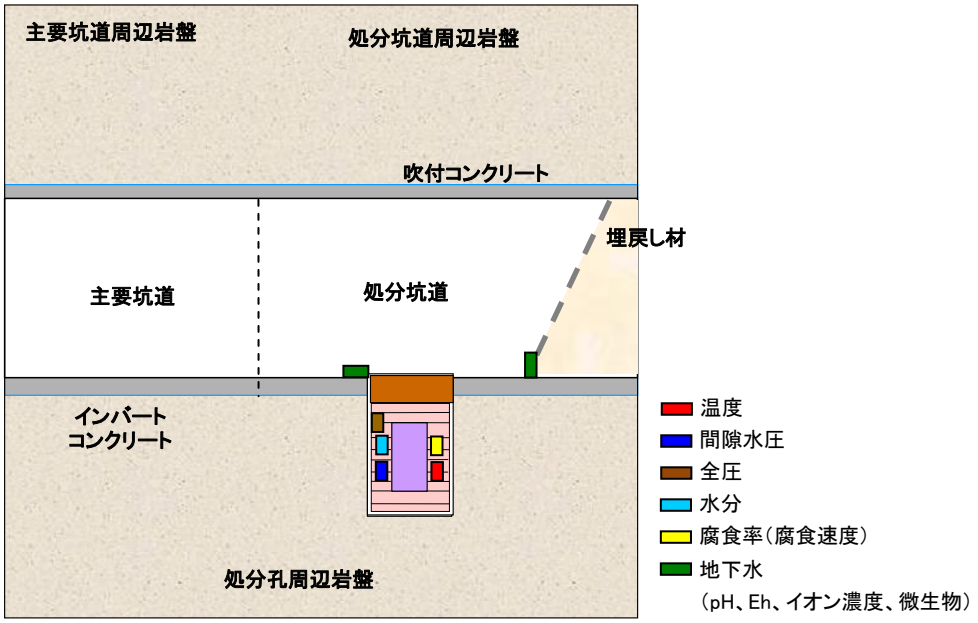



図 2.6.7-16　モニタリング場所のイメージ（埋め戻し材除去）

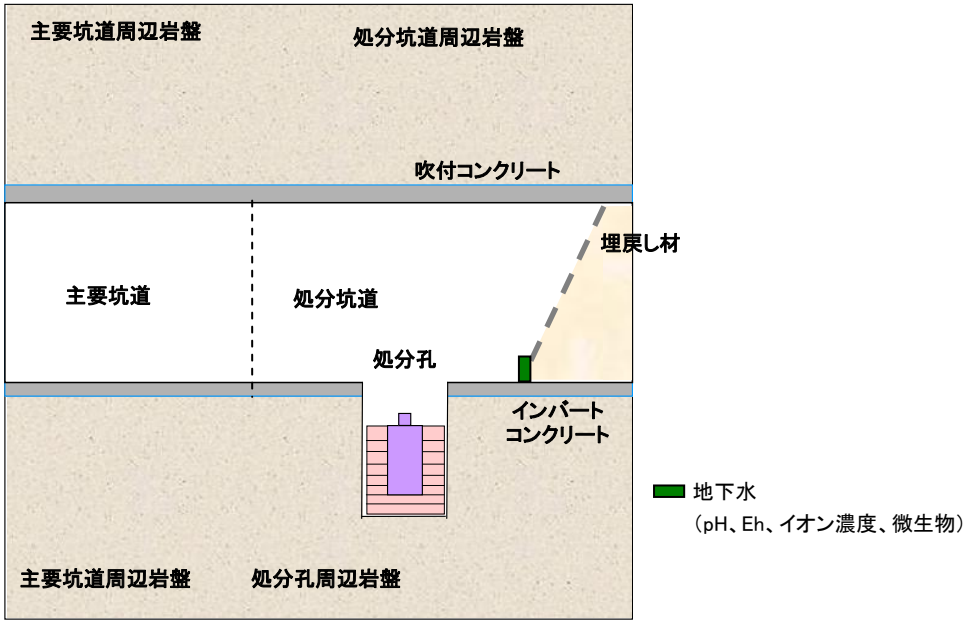



図 2.6.7-17　モニタリング場所のイメージ（緩衝材除去）

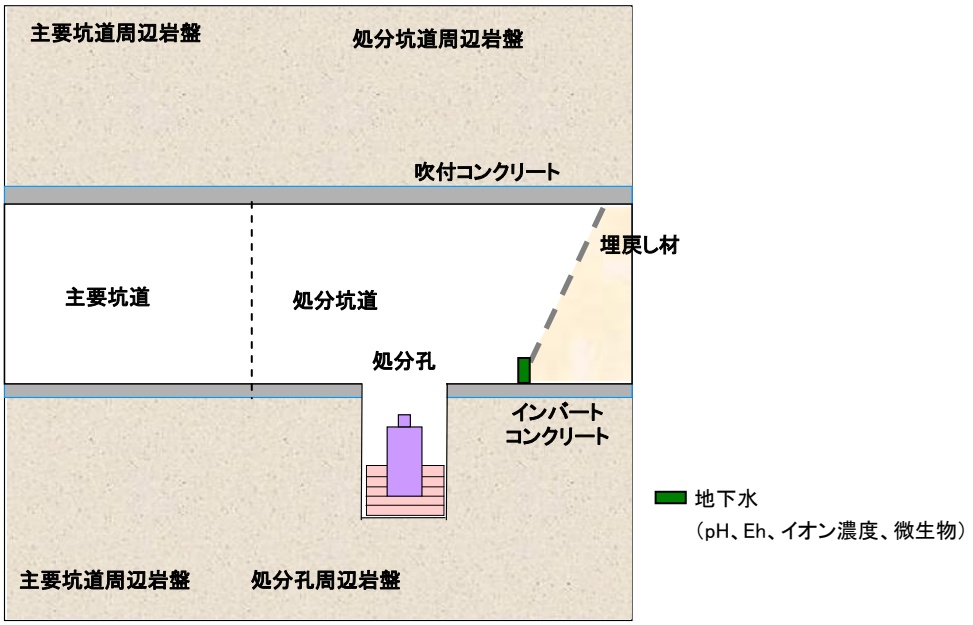



図 2.6.7-18　モニタリング場所のイメージ（回収作業）

2)モニタリング時期の検討

1)で整理したモニタリング場所を基にモニタリング時期を整理した。整理した結果を表2.6.7-7に示す。

a. 緩衝材

温度

回収行為前は、今後の回収維持に関する方針検討に柔軟に対応できるようにモニタリングを継続して実施する期間である。緩衝材に対して熱の影響の有無を把握するため、温度センサを用いた測定が考えられる。

プラグ・埋め戻し材除去時には、埋め戻し材が除去されて処分坑道が空洞になり、熱の伝わり方に変化が生じる。熱の挙動の変化による緩衝材への影響を把握するため、温度センサを用いた測定が考えられる。

緩衝材除去後は、緩衝材が取り除かれるためモニタリングは不要となる。

膨潤圧

回収行為前は、今後の回収維持に関する方針検討に柔軟に対応できるようにモニタリングを継続して実施する期間である。緩衝材の密度変化や膨潤特性の劣化状況を把握するため、膨潤圧（全圧と間隙水圧の差として算出）を把握するための圧力センサを用いた測定が考えられる。

プラグ・埋め戻し材除去時には、埋め戻し材の除去により処分坑道が空洞になるため、緩衝材の処分坑道側へのはらみ出しによる膨潤圧への影響や、処分孔への地下水の流入状況の変化による緩衝材中への地下水の浸潤状況が変化することによる緩衝材の膨潤圧の変化を把握することが考えられる。回収行為前と同様に、膨潤圧をモニタリングすることが考えられる。

緩衝材除去後は、緩衝材が取り除かれるためモニタリングは不要となる。

含水比、間隙水圧

回収行為前は、今後の回収維持に関する方針検討に柔軟に対応できるようにモニタリングを継続して実施する期間である。緩衝材の地下水浸潤挙動、密度変化や止水性の劣化状況、及び熱物性の変化を把握するため、間隙水圧や含水比取得のための水分量センサを用いた測定が考えられる。

プラグ・埋め戻し材除去時には、埋め戻し材の除去により処分坑道が空洞になるため、処分孔への地下水の流入状況の変化による緩衝材の地下水浸潤挙動や緩衝材密度への影響などの変化を把握することが考えられる。回収行為前と同様に間隙水圧や水分量をモニタリングすることが考えられる。

緩衝材除去以降、処分孔の緩衝材が無くなるためモニタリングは不要となる。

b. オーバーパック

腐食量

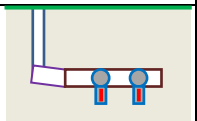
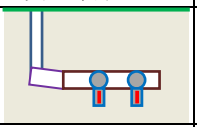
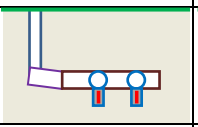
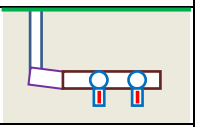
回収行為前は、今後の回収維持に関する方針検討に柔軟に対応できるようにモニタリングを継続して実施する期間であり、この期間で地下水とオーバーパックが接触すれば腐食が進行する可能性もある。腐食量を評価するための地下水質等を把握するため、人工バリアと接触している地下水質とできるだけ同じ状態の水質を得るため、処分坑道の端部でのサンプリングの実施が考えられる。腐食率の測定では、緩衝材中やオーバーパック表面にセンサ等を設置することが考えられる。

埋め戻し材除去時には、埋め戻し材の除去により処分坑道が空洞になるため、処分孔への地下水の流入状況の変化による腐食挙動への影響などを腐食率の測定より把握することが考えられる。地下水のサンプリングについては、処分孔近傍での実施が考えられる。

緩衝材除去後は、オーバーパックが露出することになるが、地下水との直接接触等が生じる可能性があり腐食量が変化する可能性がある。方法としては、オーバーパック表面へのセンサ設置による測定が考えられるが、定量的な方法ではないがカメラによる腐食状況の観察も考えられる。また、地下水質の把握として、処分孔からのサンプリングによる測定が考えられる。

廃棄体除去後においては、廃棄体が回収されるためモニタリングは不要となる。

表 2.6.7-7　モニタリング時期の検討

| モニタリング対象※ | モニタリング項目 | モニタリングパラメータ | 回収行為前 | プラグ・埋め戻し材除去 | 緩衝材除去 | 回収作業 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | |  |  |  |  |
| 緩衝材 | 膨潤圧の劣化 | 温度 | 緩衝材内部にセンサを設置 | 緩衝材内部の既存センサを使用 | モニタリング不要 | モニタリング不要 |
| | 膨潤圧の劣化 | 膨潤圧 | 緩衝材と周辺岩盤の間にセンサを設置 | 緩衝材と周辺岩盤の間の既存センサを使用 | モニタリング不要 | モニタリング不要 |
| | 核種吸着性の劣化 | | 緩衝材内部にセンサを設置 | 緩衝材内部の既存センサを使用 | | |
| | 比熱の変動 | 含水比 | 緩衝材内部にセンサを設置 | 緩衝材内部の既存センサを使用 | モニタリング不要 | モニタリング不要 |
| | 熱伝導率の変動 | | | | | |
| | 止水性の劣化 | | | | | |
| オーバーパック | 強度の劣化 | 腐食量 | オーバーパック表面にセンサを設置 | オーバーパック表面の既存センサを使用 | モニタリング不要 | モニタリング不要 |
| | 遮蔽性の劣化 | | | | | |
| | 耐食性の変動 | | 緩衝材内部に電極を設置 | 緩衝材内部の既存電極を使用 | モニタリング不要 | |
| | | | 周辺岩盤から地下水をサンプリング | 周辺岩盤から地下水をサンプリング | 周辺岩盤から地下水をサンプリング | |

3)モニタリングによる損益の整理

緩衝材の温度測定、圧力測定及び水分量の測定、オーバーパックの腐食率（腐食速度）の測定に関し、上述の検討では、緩衝材中またはオーバーパック表面にセンサを設置してモニタリングすることを想定した。この場合、これらを測定するセンサのデータ転送用ケーブルを主要坑道まで引き出す必要がある。したがって、緩衝材中にケーブルに沿って優位な水みちを形成することが考えられ、核種移行や緩衝材流出のパスとなることが懸念される。また、優位な水みちとなった場合には、測定データへの影響も考えられる。

従って、これらの緩衝材やオーバーパックの状態に関するデータを取得するためセンサを設置する場合には、人工バリアの長期挙動に対する影響やデータの信頼性への影響等の損失があること認識したうえで、取得されるデータによる利益の比較を行い、モニタリング実施の有無について判断する必要がある。

また、2.4 節にて検討したように、ニアフィールドや坑道におけるモニタリングデータから、外部環境から人工バリアへの影響を推定することも考えられる。この場合には、人工バリアから離れた地点におけるモニタリングとなることから、モニタリング結果と人工バリアの状態との関係や、データの信頼性について評価しておく必要がある。

### 2.6.8　モニタリング結果の反映方法の検討

モニタリング結果を処分システムの構成要素の技術要件（NUMO（2011）[2]）に反映することを念頭に、モニタリングパラメータと技術要件の関係について検討した。検討に当たっては、モニタリングパラメータ間の連関を参照して、統合的にそれらの関係の整理を図った。図 2.6.8-1 に検討の概念を、検討結果を表 2.6.8-1 に示す。

この検討を行うことにより、モニタリング項目は技術要件や安全対策と対応して、今後、取り扱うことが可能となるものと考えられる。このような考え方は、2.4 節にて検討した性能確認モニタリングの結果を技術要件に対応させる考えと同様であるが、ここでは、技術要件や安全対策に関する確認を行うことにより、さらに、回収を実施する際の安全性が確保されているか、あるいは回収がバリア性能に影響しているか否かの判断に資することを目的としている。

なお、回収を実施する際の作業員の安全性の確保に関するモニタリング項目とその結果の反映先については、2.5 節で検討したモニタリング項目と作業安全パラメータの関係に準ずるものと考えられる。

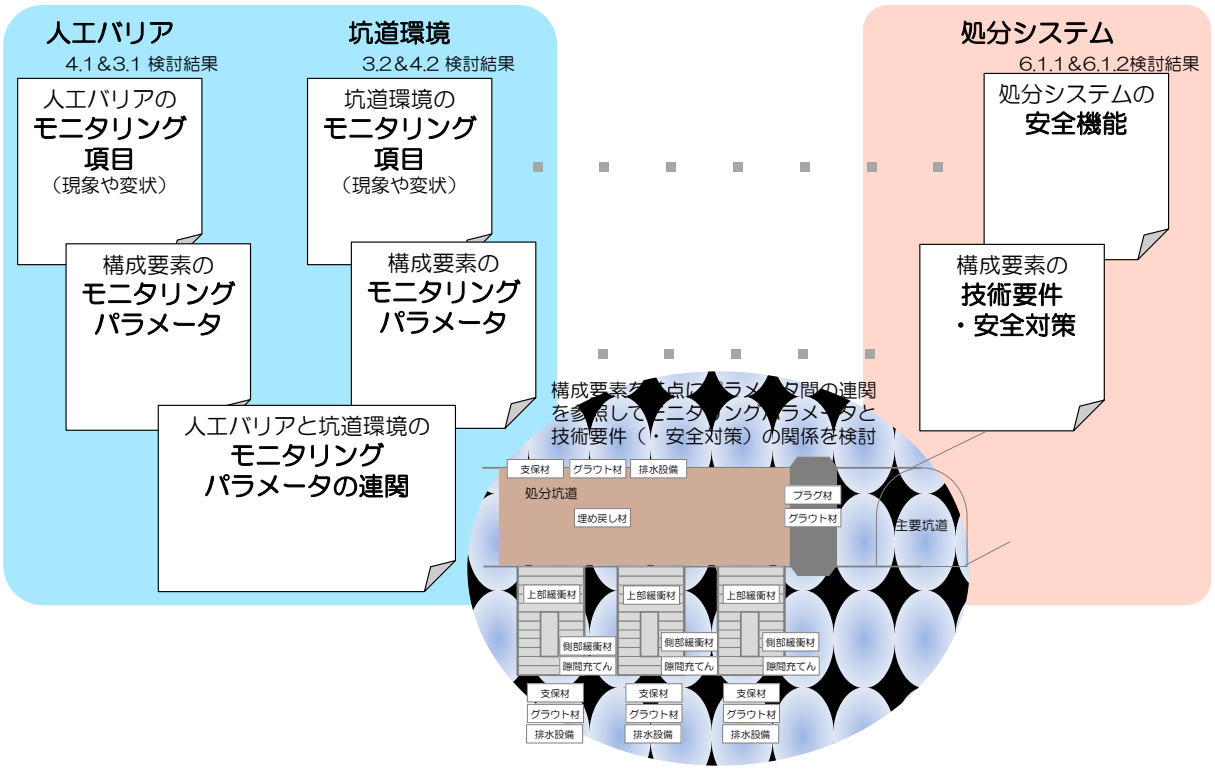



図 2.6.8-1　検討方法の概念

表 2.6.8-1　モニタリングパラメータと技術要件の関係

| 技術要件 | | モニタリングパラメータ | | | | | | 説明（測定対象特性） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 分類 | 項目 | オーバーパック M | 緩衝材 T M H | 処分坑道埋め戻し材 H | 処分坑道端部プラグ（力学）M | 処分坑道端部プラグ（止水）H | 坑道環境 | |
| 基本的なバリア性能の確保 | 耐食性 | M | | | | | H C | H:間隙水圧,水量<br>C:pH,Eh,ｲｵﾝ濃度 |
| | 構造健全性 | M | | | | | H C | － |
| | 溶接部耐食性 | M | | | | | H C | H:間隙水圧，水量<br>C:pH,Eh,ｲｵﾝ濃度 |
| | 溶接部構造健全性 | M | | | | | H C | － |
| | 低透水性 | | H | H | | H | T M C | T:温度<br>M:ひずみ,圧力<br>C:pH,Eh,ｲｵﾝ濃度 |
| | コロイドろ過能 | | H | | | | T M C | 同上 |
| | 収着性 | | H | | | | T M C | 同上 |
| | 力学・構造安定性 | | | | M | | C | C:pH,Eh,ｲｵﾝ濃度 |
| 長期健全性の維持 | 耐熱性 | T | T | | | | T H | T:温度<br>H:間隙水圧,水量 |
| | 耐放射線性 | | | | | | | |
| | バリア材料間・残置物の相互作用の影響の低減 | M | H | H | | H | H ⇦ T C | T:温度<br>H:間隙水圧,水量<br>C:pH,Eh,ｲｵﾝ濃度 |
| | ガラス固化体の過熱の防止（熱伝導性） | T | T | T | | | T ⇦ H C | 同上 |
| | 自己修復性 | | H | | | | H ⇦ T C | 同上 |
| | 緩衝材・処分坑道埋め戻し材の流出抑制 | | H | H | | H | H ⇦ T C | 同上 |
| | オーバーパックの保護（物理的緩衝性） | | M | | | | T ⇦ H C | 同上 |
| | オーバーパックの沈下の防止 | | M | | | | T ⇦ H C | 同上 |
| | 施工時の隙間の充てん（自己シール性） | | H | H | | H | H ⇦ T C | 同上 |
| 工学的実現性の確保 | 製作性 | 品質管理により取得 | | | | | | |
| | 遠隔封入性 | | | | | | | |
| | 遠隔定置性 | | | | | | | |
| | 施工性 | | | | | | | |
| | 品質確認性 | | | | | | | |

※網掛け部は各構成要素が該当する技術要件を示す。赤矢はモニタリングの方向を示す。黄矢は補足的にモニタリングするパラメータを示す。

## 2.7 まとめと今後の課題

### 2.7.1　まとめ

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では、概要調査・精密調査のサイト調査段階に始まり、建設段階・操業段階・部分的埋め戻しを経て、処分場を閉鎖した後も一定の期間にわたり、様々な目的で地層処分モニタリングを実施することが考えられている。

本章では、地層処分に関するモニタリングの目的について概略を示し、この中で人工バリアの長期健全性に関連する、処分場閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認モニタリング）を中心として検討を実施した。

性能確認モニタリングに関する国際的な動向として、国際共同研究 MoDeRn の主要成果、及び OECD/NEA における検討の概要を記載した。また、性能確認モニタリングのうち技術的な困難を有する人工バリアのモニタリングに関して考察を行うとともに、ニアフィールドのモニタリングにより人工バリアの性能確認に資する方法について検討した。

さらに、操業期間中の安全に関するモニタリングについて検討するとともに、廃棄体の回収可能性に関わるモニタリングについて検討した。

(1)　地層処分モニタリングの目的の分類

地層処分モニタリングを目的に基づき以下の様に分類した。

a.処分システムの期待/予測された挙動の検証/確認　（閉鎖後安全、性能確認）

- ・処分システム構成要素の機能の確認
- ・設計・施工上の仮定の確認
- ・健全性評価モデルの検証

b.操業安全性

- ・一般労働安全
- ・放射線安全

c.環境影響

これらに加え、以下のモニタリングを分類した。

- ・ベースラインの取得

  a.及び c.のためのモニタリング結果と比較されるサイトの初期状態の取得
- ・法令要件の遵守

  a.～ｃ.までに関し定められた法令要件（制度的管理に関する法令要件を含む）の遵守

さらに、廃棄体の回収とモニタリングの関連ついては、回収の理由に関らず、回収が決定された後にスムーズな回収が実施できるかに関するモニタリング、一部の廃棄体を回収した場合に回収行為が他の廃棄体に与える影響（回収後の状態）に加え、a.の性能確認に関するモニタリングの結果が事前の予測と異なり、さらにリスクがあるものと判断された場

合の対処における選択肢の一つとして、廃棄体の回収があり得る。

(2) 性能確認モニタリングに関する国際的動向

EU における国際共同研究 MoDeRn プロジェクトの主要な結論、及び OECD/NEA におけるモニタリングの検討報告書の概要を示した。

1) MoDeRn プロジェクトの主要な結論

MoDeRn プロジェクトは欧州原子力共同体の 7th Framework Programme の一つとして実施された。地層処分事業の各段階において、ステークホルダの関与を踏まえたモニタリングに関する検討及びモニタリングの実施に向け参照すべきフレームワークの提供を目指した国際共同研究である。MoDeRn には 12 の国々（EU、米国、日本（原環センター）及びスイス）から、18 の処分実施主体及び研究機関・大学が参画した。

MoDeRn プロジェクトは 2009 年 5 月より活動を開始し、2014 年 1 月に最終報告書[3]を EC に提出して、その活動を終了した。なお、後続の共同研究プロジェクトが 2015 年より 4 年間の活動を予定している。

MoDeRn プロジェクトの最終報告書に述べられた、主要な結論を以下に示す。

・モニタリングプログラムの開発及び実現のためのジェネリックな体系的なアプローチとして「MoDeRn モニタリングワークフロー」（図 2.3.1-1）とこれを包含するリファレンス・フレームワークを開発した。このワークフローでは、モニタリングプログラムの開発及び管理において次に示す 3 件の鍵となる段階が特定された。

- ・目標及びパラメータ：モニタリングプログラムの目標及び下位目標を特定することと、これらのプロセス及びパラメータへの関連付け行う。プロセス及びパラメータは、「特性、事象及びプロセス」（FEP）の検討等の、セーフティケースの分析を通じて特定することができる。これにより予備パラメータ・リストを作成する。
- ・モニタリングプログラム及び設計：予備パラメータ・リストのスクリーニングを行い、性能要件、モニタリング技術、オーバーラップ／冗長性に関する分析を行う。どのような方法で、どのような場所で、またどの時点でデータが収集されるのかが定義されると共に、性能レベル、トリガー値、さらには一定のモニタリング結果に応じて実施される可能性のある潜在的リスク緩和措置が指定される。
- ・実現及びガバナンス：モニタリングプログラムを実行し、意思決定に必要な情報を提供するために得られた結果を利用すること。モニタリングプログラムの実施期間にわたり、連続的に、さらには周期的にも結果の評価を行い、モニタリング結果がセーフティケース等に与える影響が検討される。

・MoDeRn プロジェクトにおける技術的な検討は、ニアフィールド及び EBS のモニタリングに焦点が合わせられた。このようなモニタリング技術に関する現在の状況を整理するとともに、以下の技術開発を実施した。

- ニアフィールドでの地震波探査技術を用いたモニタリングのための、弾性波のインバージョン・アルゴリズムと、弾性波発生ハンマー
- 高周波及び低周波の地中無線送信システム
- 光ファイバ・センサによる坑道での分散モニタリング技術
- AE（アコースティック・エミッション）技術の人工バリアへの適用
- 原位置での腐食速度の測定が可能な腐食センサ

・岩塩、粘土岩質及び花崗岩質の母岩に立地される処分場で実施される可能性があるモニタリングプログラムのタイプの包括的な例が開発された。これらの具体例となるプログラムは、MoDeRn モニタリングワークフローを使用して作成されたものであり、MoDeRn プロジェクトにおいて開発された技術の使用が念頭に置かれている。

・処分場モニタリングに関するステークホルダの関与に関する検討として、複数の国におけるワークショップやスイスの URL 訪問見学により、処分場プログラムの早い段階においてモニタリングの問題に関して関心を抱く地元のステークホルダとの詳細な議論の実施が可能であることが示された。

- 多くのステークホルダから、モニタリングは確認のためのプロセスというよりもむしろチェックのためのプロセスであるべきだという意見が表明された。
- 公衆ステークホルダは、処分場性能のチェックは包括的なものとなるべきであるという、また全体的な科学プログラムと結びついたものとされるべきであるという意見を示した。
- 一部の公衆ステークホルダは閉鎖後モニタリングが行われることを期待している。その主な目的は、予期しない事象又は変遷が生じた場合の準備（及び対応策）を整えておくことにある。
- モニタリングは、ステークホルダの期待に対応でき、また処分場性能に関する見張りを継続する実際的な取組みとして提示され、さらにはモニタリングの限界に関する透明性が確保されている場合には、処分場のガバナンスに寄与することができる。

2) OECD/NEA におけるモニタリングの検討

OECD/NEA-RWMC による「世代を超えた記録、知識及び記憶（RK&M）の保存」(Records、 Knowledge and Memory（RK&M）)プロジェクトでは、記録保存に関する検討を実施しているが、モニタリングについても報告書「地層処分施設のモニタリング：技術的及び社会的側面」[5]を取りまとめている。この報告書の概要について以

下に記述する。なお、記録保存との関係の深い部分については、第 4 章に於いて詳しく記載した。

・本報告書ではモニタリングと RK&M の両方を包含する概念として、処分場システムから、また決定の実施状況から「目を離さない」という監視（oversight）を挙げている。また、この監視について以下の点を指摘している。

・監視は、技術的あるいは規制に基づくモニタリングのみでなく、現地の自治体やその他のステークホルダとのモニタリングに関する協定を通じて行われる可能性がある。

・監視のレベル及び推移に関する決定は、当該施設の挙動に対する信頼度や、社会的及び経済的な要素などに基づいてなされる。

・規制組織やステークホルダが、地層処分の監視の性格や役割に関して追加的な洞察をもたらす可能性がある。

・監視の組織化や推移に関する決定についてはステークホルダとの議論がなされるべきである。

・本報告書ではモニタリングプログラムの設計にとって鍵となる目的として、対象を決定すること、さまざまなプロジェクトを通じ、これらの対象をどのように取り扱うのかを決定することを挙げ、モニタリング対象の選定プロセスについて、処分場のライフサイクル期間のうちに生じた改定の必要に対応できるよう、十分な柔軟性を備えているべきであることを述べている。

・操業前フェーズ及び操業フェーズにおいて、さまざまなパラメータのモニタリングを行う手法及び手順は、すでに存在していると述べた上で、モニタリングに関する技術的課題としては、以下を挙げている

・データの長期的な管理
・使用される資材及び装置の耐久性
・長期的な施設サーベイランスに関する代表的なパラメータの選定
・当該システム内で起こり得るさまざまなプロセスに関する完全な理解を得ること

・また、処分場の閉鎖後のモニタリングについては、以下のように述べている。

・閉鎖後期間には処分システムがそれ自体で安全なもの、すなわち何らかの制度的又は非制度的な組織によるモニタリングにはかかわらず安全なものでなければならない点について、広範な意見の一致が存在する。

・施設の閉鎖後にも間接的な形での監視を行うことが当局によって要請されることが予想され、その例として記録の維持、一定の形式のモニタリングが含まれる可能性がある。

・さらに、モニタリングと RK&M を含む監視のステークホルダへの寄与について以下のように述べている。

・監視機能の一環として行われるモニタリングと RK&M の保存に関する現在のステークホルダの見解について調べておくのは有益なことであろう。

・モニタリングがどのように RK&M の作成及び保存に寄与できるのかに関する作業又はガイダンスは、これまでわずかしかなかった。

・地元ステークホルダが RWM 施設におけるモニタリング及び RK&M の保存に対して一定の関心を抱いていることが明らかになっている。

・地元ステークホルダは、モニタリングの方法や、モニタリングの実施が重要となるプロセスに関する知識を得ることを望んでいる。

・地元自治体は、モニタリングが立地手順の早い段階から行われるべきものであり、次第により高度なものとされ、施設閉鎖時にも終了されない可能性があることを認識している。

・地元ステークホルダが実施を要請しているモニタリングの性格及び規模は、ステークホルダのモニタリングに関する理解や定義に応じて異なったものとなる。

(3) 人工バリアの性能確認に資するモニタリングの検討

分冊 1 及び分冊 2 に示されたように、本研究では長期健全性を持った人工バリアを構築するための指標について検討を実施している。これらの指標に関するモニタリングは、これまで性能確認モニタリングとして取り扱ってきたもの、及びその比較対象となる地質環境特性のベースライン把握のためのモニタリングの範疇にあり、このうち、特に人工バリアの閉鎖後長期の健全性に影響を与える要因をどのように操業期間中に把握するかに焦点をあてたものと言える。従って、これまでに検討してきた性能確認モニタリングの考え方が適用できる。

1) 人工バリアのモニタリング

人工バリアのモニタリングに関する検討では、「処分場内部または周辺でのモニタリング機器の設置に伴う放射性物質の移動に係わる潜在的水みちの形成」[17]を避けることがモニタリングの実施における考慮事項として求められており、これを重視すると、処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施せず、人工バリア及びニアフィールドの天然バリアの性能確認は模擬廃棄体を用いた地下調査施設などにて実施するという方策がある[18][19]。しかしながら、処分場が建設される地下の地質や水理的特性において空間的な不均一性が存在する場合、地下調査施設でのモニタリングでは実際の処分場の地質的及び水理的特性の幅広さを十分に代表できない可能性がある。このようなとき、地層処分の長期安全性の信頼性を高めるためのデータ取得を重要視した場合には、処分場の複数の人工バリア及びニアフィールドにてモニタリングを実施し、幅広い地質的及び水理的特性を持つニアフィールドと、そこからの人工バリア

への影響を代表するデータを取得するという方策が考えられる。また、廃棄体の定置後、坑道の埋め戻しまでに廃棄体周辺の人工バリアやニアフィールドの変化が予測され、この状態変化の取得が重要である場合にも、これらのモニタリングを行うという方策があり得る。

これまでにモニタリングの対象となるプロセスとパラメータの選定の考え方として、処分システムの安全に寄与する多重バリアシステムの構成要素毎の安全機能と性能目標、技術要件に着目し、これらに影響するプロセス（FEP）を対象にモニタリング項目を抽出する考え方を示してきた。抽出されたプロセスに対し、モニタリング実施の観点から、プロセスに関連するパラメータを抽出し、パラメータのモニタリング可能性（技術的成立性）を検討した上でモニタリングパラメータを選定することとなる。この方法は、MoDeRn により示された方法とも整合している。本年度は、このような方法により緩衝材及び埋め戻し材のモニタリングパラメータの検討を行った。その結果抽出されたモニタリングパラメータは、温度、全圧、間隙水圧等の少数のものに絞り込まれた。このような結果は、同様の方法にてモニタリング計画を立案した Posiva（2012）[28]とも整合している。

人工バリアの性能確認を行うために人工バリアを直接モニタリングする場合、バリア性能への影響を考慮すると、上記のように限られたパラメータをモニタリングすることで、人工バリアの状態を推定することとなる。そこで、人工バリアの性能に影響する外部環境であり、バリア性能への影響という観点での制約が比較的緩やかであると考えられる、ニアフィールドのプロセスや事象をモニタリングし、これにより人工バリアの置かれた環境が長期性能を損なうものでないことを確認する方法について、検討した。

2) ニアフィールドのモニタリングによる人工バリアの性能確認

人工バリアが設計あるいは予測通りの性能を発揮することを確認するモニタリングにおいては、人工バリアそのもののモニタリングに加え、人工バリアが施工されたニアフィールドの地質学的、水理学的パラメータ等のモニタリングを行うことが手法として考えられる。

このため､既存の FEP 内容を整理し､人工バリア性能に影響を与える要因を特定し、これらに関連する約 30 種類のニアフィールドパラメータを（熱、水理、岩盤力学、化学）を抽出した。次に、国内外の地下研究所での計測、モニタリングの実績等を勘案し、計測機器の有無よりニアフィールドでのモニタリングパラメータの絞り込みを行った。主な調査結果は、次の通りとなった。

・長期耐久性や処分性能への影響に関する技術課題やデータ精度の観点では課題はあるものの、ほとんどのパラメータに関して（直接または間接的に）計測が行われている。

・今回の海外調査対象国（フィンランド）では、すでに実績のある技術を主に使用することとしている。このため、岩盤力学パラメータを除けば、水理パラメータや

化学パラメータの多くは、ボーリングサンプリングやサンプリング分析を主としており、センサ類による直接計測はほとんど実施していない。

この結果より、各パラメータの現状での計測可能性は以下の通りとなった。
・計測場所へのアクセスが可能な段階（処分孔または処分坑道埋戻し前）では、多くのパラメータの直接計測が可能である。しかし、抽出したニアフィールドパラメータのうち、化学パラメータ（水素ガス濃度、地下水組成、地下水中のコロイド、地下水中の塩分濃度、地下水中の微生物、地下水中の有機物量、有機物分解生成ガス）については、現状技術では、サンプリング分析が汎用性の高い技術であり、センサ類での直接計測を行う場合には、克服すべき課題があると考えられた。
・処分孔または処分坑道が埋戻され、アクセスが困難となると、ほとんどのパラメータの計測は困難となる（特に化学パラメータ）。また、本検討では、水理パラメータについて、処分坑道内の調査孔による計測を仮定したが、国内外調査結果では、これらのパラメータや化学成分などは、坑道周辺からの MP（マルチパッカ）システムやサンプリングによって、間接的なモニタリングが行われる予定であり、この計測方法であれば、処分坑道が埋戻された後でも継続的に計測が可能である（ただし、パラメータによって、要求されるスケールでの把握は困難となる）。

さらに、抽出したニアフィールドパラメータをセンサ類で直接計測する場合のモニタリングシステムについて、地層処分モニタリング技術メニューを用いて検討した。最後に、NUMO によるオーバーパック、緩衝材及び埋め戻し材・止水プラグの技術要件の観点から、ニアフィールドでのモニタリング結果の反映について検討した。

(4) 操業時の安全性に関わるモニタリングの検討

地層処分における建設・操業段階に於いては、作業員の安全性に関わるモニタリングが実施されるものと考えられる。このようなモニタリングには、通常の労働安全に関わるモニタリングと、放射線安全にかかわるモニタリングが含まれる。

本検討では、作業時の安全に関する項目の抽出を実施し、これらの項目ごとに、適用可能な技術について地層処分モニタリング技術メニュー（第 5 章参照）や MoDeRn プロジェクトによる技術報告書[33]等を対象に調査を行い、計測、モニタリングするパラメータとその方式の例を整理した。操業時の安全性に関するモニタリングについては、ほとんどの場合、既存の技術にて実施可能と言える。

(5) 回収可能性に関係したモニタリングの検討

回収可能性の維持に関連したモニタリングは次の３つに分けて考えることができる。

・回収を実施する際の安全性に関するモニタリング

何らかの理由で廃棄体の回収を行う場合、回収作業中の安全を確保し、回収技術を選択するための情報を取得するためのモニタリングである。

・回収がバリア性能に影響しているか否かに関するモニタリング

何らかの理由により一部の廃棄体の回収が行われた際、この回収作業が回収対象ではない領域のバリア性能に影響を与えていないことを確認する必要がある。このような判断に貢献するモニタリングである。実施内容は閉鎖後安全性、性能確認のためのモニタリングに類似したものと考えられる。

・性能確認モニタリングの結果への対応の選択肢の一つ

これまでに検討してきた閉鎖後の長期安全性を主眼としたモニタリング（性能確認モニタリング）に於いて、予測外のモニタリング結果が得られ、かつリスクがあると判断された場合の対応オプションの一つとして、廃棄体の回収が検討されることがあり得る。

これらのモニタリングのうち、「回収がバリア性能に影響しているか否かに関するモニタリング」と「回収を実施する際の安全性に関するモニタリング」が廃棄体の回収可能性に関わる独自のモニタリングである。従って、主にこれらのモニタリングについて検討を実施した。

廃棄体の回収可能性に関わるモニタリングについて検討するためには、処分坑道や処分孔がどこまで埋め戻された状態かを予め設定して検討を行う必要がある。本検討では、回収可能性が維持された坑道や人工バリアの状態として、以下を設定した。

・処分方式は、処分孔竪置き方式とする。

・坑道の埋め戻し状態は、処分孔及び処分坑道を埋め戻し、処分坑道端部のプラグを設置するが、主要坑道、連絡坑道、アクセス坑道は埋め戻さない状態とする。

・モニタリングの実施期間は、処分場の操業期間中とする。

・モニタリング対象は、人工バリア（オーバーパック、緩衝材)、処分坑道及び主要坑道（支保、路盤等）処分坑道埋め戻し材、処分坑道端部のプラグ、ニアフィールドとする。

この状態を初期状態として、回収のための作業が進むにつれ、プラグ、坑道埋め戻し材、緩衝材が順に除去され、最終的に廃棄体（オーバーパック）が回収される。このとき、作業の各段階ごとに、坑道やニアフィールド、人工バリアの状態が変化する。これらの時間的変化を、力学的影響、水理的影響、化学的影響、熱的影響の観点から整理した。なお、本検討では放射線による影響は検討の対象外とした。

次に、このような坑道やニアフィールド、人工バリアの状態変化が、どのようなパラメータに影響を及ぼすかについて検討し、モニタリングパラメータの候補を抽出した。

その結果、ニアフィールド及び坑道における力学的影響に関しては、応力場、強度特性（一軸圧縮強度、せん断強度、内部摩擦角)、変形特性(弾性係数、ポアソン比)、水理学的

影響に関しては、ニアフィールドの水理場(動水勾配、間隙水圧)、水理特性(岩盤の透水係数)、化学的影響に関しては、水質(pH、電気伝導度、溶存気体、溶存イオン)、酸化還元状態、起源・年代、熱的影響に関しては、ニアフィールドの温度環境（地温分布、地温勾配、地下水温度)、熱伝導性（熱伝導率、密度、比熱、線膨張率）がモニタリングパラメータの候補として抽出された。

また、同様の検討を実施した結果、人工バリアのモニタリングパラメータの候補としては、緩衝材の圧力（全圧、間隙水圧)、温度、水分量、オーバーパック及び PEM 容器の腐食率、周辺地下水の pH、Eh、イオン濃度が抽出された。

これらのパラメータをモニタリングするための技術については、基本的に性能確認モニタリングにて検討されたものと同様であり、現場での測定とサンプリングと室内試験を組み合わせたものとなるものと考えられた。

但し、これらモニタリングでは、バリア内での水みちの形成等の可能性があるものが含まれているため、これらのモニタリングを実施することによる損益について検討を実施した。モニタリングを実施するメリットとしては、力学的影響、水理学的影響、化学的影響、熱的影響を直接評価できると共に、各パラメータ間の連関関係やメカニズムの解明に寄与すること挙げられる。一方で、デメリットとしてはバリア機能への影響と施工の煩雑化が挙げられる。特に人工バリアのモニタリングについて、データを取得するためセンサを設置する場合には、ケーブル等がデータの信頼性や人工バリアの長期挙動に対する影響があることを十分考慮する必要がある。そのため、ニアフィールドや坑道におけるモニタリングデータから、人工バリアの状態を推定することも考えられる。この場合、人工バリアから離れた地点におけるモニタリングでは、データの信頼性について評価しておく必要がある。

### 2.7.2　今後の課題

本章にて検討したモニタリングのうち、処分システムの構成要素の性能確認に関するモニタリングは、本来、セーフティケースの分析を出発点として、モニタリング対象の特定やモニタリング結果の反映先の特定を実施すべきものである。しかしながら、現時点ではわが国の地層処分に関するセーフティケースは未整備であるため、将来のセーフティケースに反映されるものと予測される、処分システムの構成要素の安全機能や技術要件に関する記述を手掛かりに検討を実施した。従って、将来セーフティケースが示された時点で、これに基づいて再度検討を行う必要がある。

既にセーフティケースが示された諸外国においても、処分場の操業期間中のニアフィールドや人工バリアのモニタリング計画の立案には、モニタリングの実施による長期安全性への影響や、操業計画への影響を十分に考慮する必要があり、容易ではない。このため、2015 年に開始する国際共同研究 MoDeRn2020 では、処分場の建設を申請中のスウェーデンやフィンランドをはじめとした、複数の国における地層処分場の操業期間中のモニタリング計画を検討する計画である。このような検討において、実際のモニタリング計画の立

案における課題が明らかになることが期待されるため、引き続き着目すべきと考えられる。

処分場の操業期間中の安全性に関するモニタリングについても、処分場の操業計画が整っていくにつれ、より具体的な検討が必要になるものと考えられる。

最後に、廃棄体の回収に関係したモニタリングについては、主に、何らかの理由で回収が実施される際の安全確保、及び回収行為が他の廃棄体に与える影響という観点から検討を行ったが、今後、回収可能性の維持に関する議論の進展により、さらに具体的な検討が必要となる可能性がある。

第 2 章参考文献


[1] MoDeRn HP: http:// http://www.modern-fp7.eu/home/.

[2] 原子力発電環境整備機構（NUMO）（2011）、処分場の安全機能と技術要件、NUMO-TR-10-11

[3] MoDeRn: Monitoring During the Staged Impremention of Geological Disposal:The MoDeRn Project Synthesis、http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/、 (2014)

[4] IGD-TP Newsletter Issue #3, March 2015, http://www.igdtp.eu/index.php/key-documents/doc_download/370-igd-tp-newsletter-3, (2015)

[5] OECD/NEA-RWMC Preservation of Records、 Knowledge and Memory (RK&M) across Generations: Monitorin of Geological Disposal Facilities: Technical and Social Aspects、 http://www.oecd-nea.org/rwm/rkm/、 (2014)

[6] Vision of the RWMC Project on “Preservation of RK&M Across Generations” 17 March 2011. OECD Nuclear Energy Agency http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2011/ rwm2011-6.pdf

[7] Tools and Processes for Handling of Transfer of Burdens、 Knowledge and Responsibility: Preparing Future Generations and Empowering Local Communities. Proceedings of a Topical Session Issy-les-Moulineaux、France 6-8 June 2007. OECD Nuclear Energy Agency、 Paris、 France.

[8] Nachmilner、 L. (2013) “Monitoring of Geological Disposal Facilities”. Internal NEA report within the framework of the RK&M International project.

[9] “Local Communities’ Expectations and Demands on Monitoring and the Preservation of Records、 Knowledge and Memory of a Deep Geological Repository” NEA/RWM/R(2013)4/PROV (October 2013)

[10] International Commission on Radiological Protection、ICRP (2013) Radiological Protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste. ICRP Publication 122、 Ann. ICRP 42(3)、 2013. Available online.

[11] Pescatore、C. Nachmilner、L.、Martell、M.、Mays、C.: Oversight of a Deep Geological Repository and the Role of Monitoring – Some preliminary findings within the RK&M Project of the NEA、 Proceedings of the MoDeRn Conference and Workshop 、 Luxembourg 、 18-20 March 2013 、 http://www.modern-fp7.eu/monitoring-gdrw-2013/download-section/presentations-and-abstracts/

[12] Regional development and Community support for radioactive waste management. Synthesis of the FSC national workshop and Community Visit

Tengelic and Bátaapáti、 Hungary、 14-17 November 2006. OECD Nuclear Energy Agency.

[13] Bergmans、 A.; Elam、 M; Simmons、 P.; Sundqvist、 G. (2012) "Monitoring the Safe Disposal of Radioactive Waste: a Combined Technical and Socio-Political Activity". Deliverable D1.3.1. MoDeRn project.

[14] Bergmans、 A. (2013) "Different views on monitoring and the governance of repository development and staged closure". Presentation at the MoDeRn International Conference and Workshop、 19-21 March 2013、 Luxembourg.

[15] International Atomic Energy Agency: Disposal of Radioactive Waste、 Safety Standards Series、 Specific Safety Requirements、 No. SSR-5 (2012)

[16] International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste、 Safety Requirements、 Safety Standards Series No. WS-R-4 (2006).

[17] International Atomic Energy Agency: Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste、 IAEA-TECDOC-1208、 (2001).

[18] 原子力環境整備促進・資金管理センター：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）モニタリング技術の開発 (2010).

[19] 須山泰宏、田辺博三、江藤次郎、吉村公孝：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 (2010).

[20] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 23 年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連、処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）モニタリング技術の開発 (2012).

[21] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連、処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）モニタリング技術の開発 (2013).

[22] Hiromi TANABE、 Jiro ETO、 Kei SUZUKI、 Yasuhiro SUYAMA (2013): Basic Requirement of Monitoring Activities in Geological Disposal and Role of Wireless Data Transmission 、 MoDeRn 、 Proceedings of Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste – Conference and Workshop、 S4P14、 (2013).

[23] Jiro ETO、 Kei SUZUKI、 Hiromi TANABE、 Hisashi TAKAMURA、 Yasuhiro SUYAMA、 Johan BERTRAND、Guillaume HERMAND (2013): Development of Wireless Monitoring System for Stepwise Backfill/Sealing of Geological Repository、 MoDeRn、 Proceedings of Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste – Conference and Workshop、 S4P13、 (2013).

[24] Andra: Dossier 2005 Argile、 Tome Architecture and management of a geological repository, (2007)

[25] MoDeRn:Case study final report、

http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/、 (2013)
[26] 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
[27] 田辺博三、江藤次郎、鈴木圭:地層処分における性能確認モニタリングのパラメータ選定について、日本原子力学会、2012 年秋の大会予稿集、CD, (2012)
[28] Posiva:Monitoring at Olkiluoto-a Programme for the Period Before Repository Operation、 Posiva 2012-01, (2012)
[29] SKB, FEP report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-45(2010)
[30] SKB, 2010, Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-47(2010)
[31] 電気事業連合会／核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書 －第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
[32] SKB: Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel, SKB-R-0413, (2004)
[33] MoDeRn:State of Art Report on Monitoring Technology, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[34] 核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書： 人工バリア性能確認に関する基盤情報取得方法の調査研究(II), JNC TJ8400 2004-027.（2005）
[35] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成 22 年度調査研究成果報告、（2011）
[36] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成 23 年度調査研究成果報告、（2012）
[37] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成 24 年度調査研究成果報告、（2013）
[38] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成 25 年度調査研究成果報告、（2014）
[39] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画 平成 26 年度調査研究計画、（2014）
[40] 原子力発電環境整備機構(NUMO): 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性—「処分場の概要」の説明資料—, NUMO-TR-04-01 (2004).
[41] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 25 年度地層処分技術調査等委託費、処分システム工学確証技術開発 報告書（第 4 分冊）自然災害に対する操業期間中の安全対策に関る基盤技術の開発 （2014）
[42] 経済産業省、総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 放射性廃棄物ワーキンググループ - 中間とりまとめ、http://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/houshasei_haikibutsu_wg/report_001.pdf、（2014）
[43] 政府（電子政府窓口 e-Gov）, 特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針の改

定に対する意見公募について、http://search.e-gov.go.jp/servlet/Public?CLASSNAME=PCMMSTDETAIL&id=620115010&Mode=0, (2015)

[44] 原子力発電環境整備機構(NUMO): 地層処分事業の安全確保(2010 年度版)(NUMO TR-11-01、2011)

[45] OECD/NEA: International understanding of reversibility of decisions and retrievability of waste in geological disposal、(2011)

[46] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 25 年度地層処分技術調査等委託費、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(2014)

[47] 原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 17 年度地層処分技術調査等遠隔操作技術高度化調査報告書(2/3), (2006)

[48] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 25 年度地層処分技術調査等委託費、地層処分回収技術高度化開発 報告書(2014)

[49] 小玉ほか: "水中における稲田花崗岩と白浜砂岩の変形・破壊挙動に対する温度の影響"、資源と素材、Vol.119、pp.461-468、2003

[50] 池野谷ほか: "堆積軟岩における原位置加熱実験(フェーズⅢ)"、第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.197－201、2012

[51] 加納ほか: "地殻応力及びひずみモニタリングにおける間隙水圧計測の意義"、材料、Vol.63、No.3、pp.265-270、2014

[52] 橋本ほか: "温度・pH 制御したフロースルー溶解試験による岩石溶解機構の検討"、第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.327－331、2012

[53] 多田井ほか: "掘削試料の非定常細線加熱法による熱伝導率測定の高精度化に向けた実験"、JAMSTEC Report of Research and Development、Vol.9、No.2、pp.1－14、2009

[54] L. Börgesson ほか: Prototype Repository Installation of buffer、canisters、backfill and instruments in Section 1、SKB International Progress Report IPR-02-23、200

[55] 城代ほか: "水封式岩盤タンクの健全性評価に対する透水係数の逆解析手法の適用"、第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集、pp.229－232、2008.

[56] T. Sandén: Prototype Repository Detailed design of lead throughs and cable protections in the Prototype Repository Section l、 SKB International Progress Report IPR-01-18、2001

[57] 鈴木ほか: 熱-水-応力連成試験設備(COUPLE)における熱-水-応力-化学連成試験(I)、JNC TN8400 2003-033、2004

# 第3章　地層処分モニタリングの技術的実現性の向上に関する検討

## 3.1　目的及び実施概要

本章では様々な制約条件のもとに実施される地層処分に関するモニタリングの、技術的実現性を向上させることを目的とした検討について述べる。はじめに技術の現状について概要を示し、その後、潜在的水みちの形成を抑制可能な技術である地中無線モニタリング技術の開発について述べる。

地中無線モニタリング技術については、昨年度実施した課題抽出を踏まえ、中継システムの多段化の検討、長期モニタリングのための電源の調査として放射性同位体熱電気変換器の適用に関する検討､及び電磁波による地中無線モニタリング装置への給電に関する検討を実施した。さらに、日本原子力研究開発機構との共同研究である人工バリア性能確認試験及び坑道冠水試験への準備、フランス・ANDRA との共同研究である緩衝材膨潤挙動の長期モニタリングについて述べた。

## 3.2　モニタリング技術の概要

本節では、人工バリアの健全性の確認を含む、処分場の性能確認のためのモニタリング、及び操業時の安全性に関わるモニタリングに関する技術について、モニタリングパラメータごとに整理を行った。

### 3.2.1　性能確認モニタリングに関する技術

MoDeRn ではモニタリング技術の到達状況について取りまとめを実施した[1]。このうち処分場でのモニタリング機器については地層処分技術メニュー（第 4 章）に収録するとともに原環センター（2013）[2]にて報告した。また、モニタリング機器の調査を行った結果と現状での限界と改善の可能性及び原環センターでの開発状況について原環センター（2014）[4]にて報告した。ここでは、処分場におけるモニタリングパラメータごとの技術について、MoDeRn(2013) [1]及び地層処分技術メニュー(第 4 章)を参照して再整理を行った。MoDeRn による調査結果の詳細は原文[1]を参照されたい。

<u>性能確認モニタリングにおける技術的課題</u>

地層処分における性能確認モニタリングでは、第 2 章で述べたモニタリング機器の設置によるバリアの擾乱に関する制約条件の他に、モニタリング対象とする事象の進行速度がモニタリング実施期間に比較して非常に遅い場合があるという時間枠に関する制約条件や、現状の技術において、目的とするパラメータを測定可能であるか、モニタリング機器は十分な耐久性を持っているか等の技術的な制約条件が存在する。

地層処分の主な技術的課題は、以下のとおりである[1]。

・複数のバリアへの損傷または擾乱を避ける。
・過酷な環境（温度、湿度、放射線、誘発ストレス）で効果的かつ精度良く機能すること。
・安全性の根拠が長いタイムスケールにわたった非常に小さな変化に関わっている。そのなかで要求される精度を達成する。
・選択された場所からのモニタリング情報が明らかに代表的な情報であること。
・想定される特に長いタイムスケールにわたるモニタリングシステムの信頼性と耐久性。
・バリアの擾乱なしで現場のセンサにアクセスするのが不可能である。
・センサ故障を識別するための基準・方法を定義する必要がある。

モニタリングパラメータごとの技術

性能確認モニタリングに関する各パラメータごとの技術を MoDeRn（2013）[1]に基づき整理した。

MoDeRn（2013）[1]において検討されたパラメータは、何らかの方法で計測可能とされたものであり、その方法はセンサによる計測、サンプリングと室内分析による計測、地球物理的手法や GPS 等の技術による計測、目視等による観察があり得る。また、センサによる計測には、電気式のセンサによる計測と光ファイバセンサによる計測が含まれる。

これらの各パラメータの計測技術について、表 3.2.1-1 及び表 3.2.1-2 に整理する。その場での測定を行うセンサについて、基本的に電気式のセンサは市販品が存在するが、光ファイバセンサについては、水分、化学センサは実験室での開発段階にある。しかしながら、地層処分でのモニタリングに求められる耐久性や、耐熱性等については本表では考慮していない。各測定方式ごとのセンサの情報は、第 5 章で述べる地層処分モニタリング技術メニューにデータベースとして整備しており、この収録情報には地下研究所等での使用実績が含まれている。

地球物理的手法については、各パラメータを直接測定するものは少なく、電磁気あるいは弾性波等の応答から測定対象の状態を推測するものであるため、別途整理している。性能確認モニタリングにおいてこれらの技術が使用される場合、地表または地下施設からのボーリング孔を用いると考えられるため、ボーリング孔を用いた技術の適用可能性について、地層処分モニタリング技術メニューの掲載情報より表 3.2.1-3 に示す。

表 3.2.1-1　性能確認モニタリングにおける各パラメータのモニタリング技術（[1]より作表）(1/2)

| パラメータ | 電気的センサ | 光ファイバセンサ | サンプリングと室内試験 |
|---|---|---|---|
| 温度 | 熱電対、測温抵抗体（RTD)、サーミスタ（他のパラメータを補うセンサに使用） | 局所型（ファブリペロー、ファイバ･ブラッグ･グレーティング及びそのネットワーク)、疑似分散型（ファイバ内の数個の部分ミラーを持つファブリペロー･キャビティ(> 20cm) : SOFO)、分散型（ラマン散乱、ブルリアン散乱） | --- |
| 機械的圧力 | ひずみゲージ（ホイートストンブリッジ)、ピエゾ（圧電）式、静電容量式、振動弦式 | ファイバ･ブラッグ･グレーティング（2 つのブラッグ･グレーティングを用い温度影響を補正） | --- |
| 水分量、湿度 | 中性子減速法、誘電法（TDR、 FDR、ADR、 TDT）張力場方式（テンシオメータ、抵抗ブロック、石膏ブロック、微細マトリックスセンサ（GMS)、熱分散、相対湿度センサ、土壌（熱電対）サイクロメータ、静電容量式相対湿度センサ） | 実験室での開発段階（水分により特性を変化させる物質を使用した化学センサ） | --- |
| 水圧 | 圧力―電気信号の変換方式は水圧と同じ：　ピエゾ抵抗素子式、振動弦式、ひずみゲージ式、差動トランス(LVDT)式、感圧共振微細加工構造（石英製、ケイ素製)、誘導センサ、容量センサ | ファイバ･ブラッグ･グレーティング（2 つのブラッグ･グレーティングを用い温度影響を補正） | --- |
| 放射線 | ガス封入式（電離箱、比例計数管、ガイガー・ミュラー計数管)、シンチレーション検出器、半導体検出器 | --- | --- |

表 3.2.1-2　性能確認モニタリングにおける各パラメータのモニタリング技術（[1]より作表）(2/2)

| パラメータ | 電気的センサ | 光ファイバセンサ | サンプリングと室内試験 |
|---|---|---|---|
| 変位 | 変位変換器（電位差式、容量型、振動弦式）、傾斜計（泡傾斜計、差動トランス式） | --- | --- |
| 変形（ひずみ） | 抵抗ゲージ（ホイートストンブリッジ）、インバールワイヤと収束テープ、測地測定計（セオドライト）、レーザ測距計、振動弦式、ロッド型伸び計 | 局所型（ファブリペロー、ファイバ･ブラッグ･グレーティング及びそのネットワーク）、疑似分散型（ファイバ内の数個の部分ミラーを持つファブリペロー･キャビティ(> 20cm)：SOFO）、分散型（ラマン散乱、ブルリアン散乱） | --- |
| ガス濃度 | -化学反応ガスセンサ（電気化学と触媒）による水素、酸素、メタン、二酸化炭素センサ） | --- | ガスクロマトグラフィ(GC)、非分散型赤外線(NDIR)分光学式 |
| ガス圧 | 圧力―電気信号の変換方式は機械的圧力、水圧と同じ：　絶対圧力センサ、相対圧力センサ（大気圧と比較）、差圧センサ | --- | --- |
| pH、 Eh | 耐久性等に課題<br>イオン選択性電解効果トランジスタ(ISFET)、KCｌ含有固体ポリマ電極 | 実験室での開発段階<br>光ファイバの途中や先端の化学反応を起こす追加被覆により吸収、反射、散乱特性、発光強度、屈折率、偏光挙動等が変化<br>外部型光ファイバ化学センサ（オプトード）、内在型光ファイバ化学センサ<br>（ファイバ屈折計、エバネッセント分光器、能動的被覆、能動的コア） | ガラス電極、イオン選択性電解効果トランジスタ(ISFET)、KCｌ含有固体ポリマ電極 |
| 溶液中の化学成分 | （MoDeRn(2013)には記載なし） | | （MoDeRn(2013)には記載なし） |
| コロイド | --- | --- | トレーサ検出装置：ダウンホールウラニン検出装置、ガンマ線分光分析測定用の高純度ゲルマニウム(HPG)検出器、レーザ誘起ブレークダウン検出器(LIBD)と光子相関分光法(PCS)装置<br>実験室でのトレーサ検出装置：α-/γ-分光測定、ICP-MS、一粒子計数(SPC：異なるコロイドのサイズクラスを決定)<br>トレーサ：（安定同位体（C、H、O、N、S）、希ガス（Kr、 Ne、Ar、 He、 Xe）、放射性同位体（3H、 14C、 36Cl、 125I、 129I、131I） |

表 3.2.1-3 ボーリング孔を利用した各地球物理学的手法の適用可能性

| 探査手法 | | 技術概要 | 地層処分場モニタリング手法としての適用可能性 |
|---|---|---|---|
| VSP | | ・ボーリング孔に地震計を挿入し、地表で人工的に発生させた弾性波を受振する。<br>・得られた波形記録を、ボーリング孔方向に進む波（下方進行波）と、地表方向に進む波（上方進行波）に分離して解析し、弾性波速度と反射面の位置、性状を求める。<br>・反射法地震探査と組み合わせることにより、地質構造解釈の精度が向上する。 | ・地層処分モニタリングの目的で反射法地震探査（3次元探査を含む）を適用する場合、探査精度を高める上で不可欠な手法と位置づけられる。 |
| 地震走時トモグラフィ | | ・探査領域を囲むように配置した発震点及び受振点で、探査領域全体カバーするように配した多数の波線に沿った弾性波の初動走時を測定し、弾性波伝播速度の分布を推定する。<br>・解析手順は対象領域をメッシュに分割、その各々に初期モデルとしての弾性波速度を設定、各メッシュの速度値を測定された走時に最も合致するよう繰り返し修正し計算、速度分布を求める。<br>・弾性波の振幅を使って減衰定数を求める方法もある。<br>・孔内震源としては多段式多層円盤型坑井内震源が有力 | ・石油EOR(Enhanced oil Recovery)、CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)、岩盤緩みのモニタリング手法としての実績がある。<br>・地層処分サイトに適用する場合、反射法、VSP等との組み合わせにより、探査精度は向上する。 |
| 比抵抗トモグラフィ | 比抵抗トモグラフィ | ・地表やボーリング孔中に電極を設置し、電極から電流を地下に通電したときの各電極での電位を測定する。<br>・全ての組合せについて、電流、電位データを得て、最小自乗法により逆解析法により、それらのデータに適合するようなボーリング孔間の地盤の比抵抗分布を求める | ・ 塩水トレーサによる地下水調査、VOC（揮発性有機化合物）対策処理の効果判定、塩淡境界の把握、地下水汚染拡大防止のために設置した人工バリアの性能評価、など様々なモニタリングに対する適用実績がある。<br><br>・比抵抗の大きさから単純に、地層の種類や力学的に特性、水理学的特性などを推定することは難しいが、地下水位や湿潤状態、地層の緩みなど地層の状態の変化は比抵抗の変化として検出できる場合が多く、地層処分場のモニタリング手法としての適用可能性を示している。 |
| | 高速比抵抗電気探査・トモグラフィ | 比抵抗電気探査において大量のデータセットを測定する必要があり、測定の高速化が色々試みられている。<br>①高周波の交流波形で通電し高速で切り替える（高周波通電タイプ）、<br>②周波数の異なった交流波形で同時に多点から通電する（多周波数同時通電タイプ）、<br>③正負のパターンを符号化した互いに無相関の矩形または交替直流波形で同時に多点から通電する（符号化同時通電タイプ）、等の工夫がされている。<br>電極配置は通常2極法を用いる。 | ・従来型の比抵抗電気探査に比べて、数十分の一の時間で測定が可能であり、比較的短時間で変化する現象の経時的変化を測定する場合に有効である。<br>・電極や電線などを含めて、保守性の高いシステムを構築すれば、本方法は繰り返し測定が容易になることからモニタリング手法としての適用可能性が高いと考えられる。<br><br>・比抵抗の大きさから単純に、地層の種類や力学的に特性、水理学的特性などを推定することは難しいが、地下水位や湿潤状態、地層の緩みなど地層の状態の変化は比抵抗の変化として検出できる場合が多く、地層処分場のモニタリング手法としての適用可能性を示している。 |
| EMトモグラフィ | シングルホールトモグラフィ SBH－24 | ・地表に配置した直径4mのループアンテナ式の磁場発信源（垂直成分＋水平2成分）交流磁場（14kHz～8Hz）を発生、深さ600mまでのボーリング孔に降下した直径38mmの3成分磁力計で測定する。<br>・逆解析法により、地表とボーリング孔の間の地下比抵抗イメージを求める。<br>・大容量の送信源を使用できることから、広範囲の探査を行うことが出来る | ・石油EOR(Enhanced oil Recovery)での使用実績がある。<br>・地層処分サイトにおいて、地下水水理特性の把握に対する適用性が考えられる。 |
| | クロスホールトモグラフィ | ・対向する一方のボーリング孔内に送信用ループを配し、他方のボーリング孔内に受信用三成分磁力計を配して磁場を測定する。<br>・送信、受信の位置を変えて多くの組み合わせによる測定結果を用いて、ボーリング孔間の比抵抗イメージを求める。 | ・塩水注入前後の帯水層のモニタリングでの使用実績がある。 |
| レーダトモグラフィ | 反射法 | ・1本のボーリング孔中に送信、受信アンテナを挿入、送受信する。反射波により、ボーリング孔と交差する断層や近傍の高角度の断層を検出できる。<br>・無指向性アンテナと指向性アンテナがある。 | 電磁波は導電性媒質中では減衰が著しく、適用可能な地質は、花崗岩、岩塩、石灰岩など高比抵抗な岩盤に限られる。 |
| | クロスホールトモグラフィ | 複数のボーリング孔を用いて、あるボーリング孔で電磁波を送信、他孔で受信し、得られた電磁波の振幅や位相差から地盤の電磁波伝播特性を推定するものがレーダトモグラフィである | |
| 微小地震観測 | | ・AE法（Acoustic Emission）により、岩石の小破壊によって発生する微小な振動を観測する。 | ・ HDR地熱地帯における水圧破砕法、坑道掘削時による周辺緩み状況などへの適用実績がある。<br>・ 検出範囲が極めて限られることから、地層処分への適用性は限定的である。 |

MoDeRn（2013）[1]ではセンサの技術的課題として以下の事項が指摘されている。原環センター(2014)[4]より再掲する。

電気式センサ（各パラメータ共通）

・センサのハウジングの材料は圧力と腐食に耐えるよう改善されるべきである。SS316L 又はチタンが推薦される。
・ケーブルも同様に PUR またはフッ素重合体（PTFE、FEP 等）による被覆が期待され、環境により、SUS316L 又はチタンによる外部被覆も防護性を向上させる。
・特にケーブル接続部において水とガスからの遮断が保障されるべきである。耐性試験は 5MPa まで実施することが推薦される。
・放射線による影響は殆どのケースで検討されるべきである。

電気式センサ（パラメータごと）

・機械的圧力について直径 100mm 以下の信頼できるセンサの供給が 1 社（KULITE USA）に限られており、供給に 30 週を要する。他の供給元が必要である。(原環センターからの依頼の結果、Geokon 及び坂田電機にて納期約 3 カ月で供給可能となった。)
・飽和に近い状態での緩衝材や埋め戻し材の正確な湿度測定について適切な解がない。また、不飽和状態での間隙水圧測定について信頼できるセンサが必要である。
・放射性廃棄物のモニタリングに適した放射線センサが存在しない。
・処分場の厳しい環境で使用可能な、非接触型の変位センサが求められる。
・フィールド環境、処分環境で適用できる、信頼性と安定性のある pH センサの開発が必要である。
・コロイドセンサは存在しない。

光ファイバセンサ

光ファイバセンサの技術の現状と改善の可能性については、今後数年間で多くの改善が期待されるが、現状では少なくとも以下の改善が必要とされている。。

・干渉法以外の技術により信頼性が外挿されるべきである。
・水圧やガス圧、放射線からの空間的防護が確立されることが期待される。
・化学、湿度、放射線に関する光ファイバセンサを開発すべきである。
・一般的に、処分場での使用に関する更なる適性の証明が必要である。

モニタリング機器の故障検出

モニタリング結果を何らかの目的に反映する場合、先ずモニタリング機器により得られたデータが、モニタリング対象の現実の挙動を示していること、即ち機器の故障等による偽りのデータではないことが重要である。

モニタリング機器の故障について、MoDeRn プロジェクトではケーススタディー報告書[3]においてセンサとデータ送信における各種の故障モードと故障検出方法が検討されている。こ

の報告書では、地層処分でのモニタリングにおいては、機器の故障に耐え得る冗長性を確保してデータ取得を確実に行うと共に、自動故障検出システム等の適用を検討すべきであると結論している。本検討の概要については、原環センター（2014）[4]にて述べている。また、詳細については原文を参照されたい。

なお、地中無線を用いたデータ送信における故障についての検討を 3.3.3 において述べる。

### 3.2.2　操業時の安全性のモニタリングに関する技術

第 2 章において検討した操業時の作業員の安全性に関わるモニタリングについて、機器情報の整理を行った。機器情報は、第 5 章に述べる地層処分モニタリング技術メニューに収録済みの情報に加え、放射線計測機器については東北地方太平洋沖地震時に福島第一原子力発電所等で活用されたものに基づいている。また、MoDeRn(2013)[1]に示された情報についても参照した。調査の結果、操業時の安全性に関わるモニタリングは、基本的にアクセス可能な状態、機器の交換が可能な状態で実施される限りは、既存技術にてモニタリング可能なものと考えられた。

各パラメータの測定機器、方式について表 3.2.2-1 及び表 3.2.2-2 に整理した。なお、各パラメータのモニタリングにより確認する項目（作業安全パラメータ）については 2.5 節での検討を参照されたい。

表 3.2.2-1　操業時の安全に関わるモニタリング機器に関する整理(1/2)

| モニタリングパラメータ | 測定機器 | 測定方式 |
|---|---|---|
| 放射能（空間線量） | GM 管（ガイガーミュラー計数管） | GM 管の円筒形の内部にヘリウム、アルゴン等の不活性ガスが詰められており、中心電極と壁材の間に 700～1000Vの直流電圧が加えられている。γ（X）線は、壁材と反応して内部に電子を放出させ、電子は内部のガスに電離を引き起こす. 電離によって生じたイオンがきっかけとなって管内に放電が起き、放電によるパルスを計測することにより測定が行われる。 |
| | Na(Tl)シンチレーター | γ 線と反応して微弱な光を発するヨウ化ナトリウムを検出することにより、当該物質の γ 線を測定する |
| | LaBr3(Ce)シンチレーター | 方式は Na(TI)と同様。エネルギー分解能が NaI(Tl)の約 2 倍。 |
| | Csl(Tl) シンチレーター | 方式は Na(TI)と同様。NaI より感度が少し高く、エネルギー分解能も多少改善。 |
| | CdTe(CdZnTe) 半導体検出器 | 放射線が半導体検出器を通過するとそれらによって電離した電子が電子-正孔対を作り出し、これを逆バイアス電場によって電極に集める。こうして集められた電荷をチャージセンシティブアンプ(電荷総量に比例した信号を出力する増幅器)を介して増幅・測定することにより、空孔内部で失われたエネルギーを測定する。物質的には NaI や Ge より高感度だが、大きな CdTe 素子を利用する技術が成熟していないため、 大きな結晶を利用しやすい NaI などに比べると感度を高くしにくい。 |
| | Ge 半導体検出器 | |
| | Si(Li)半導体検出器 | |
| 放射能（空間線量） | 放射線管理システム | 作業環境や排気・排水設備に設置される様々な種類の「放射線モニタ」と管理室に設置する「中央監視装置」より構成されるシステム。 |
| 放射能（空間線量）(※個人線量は主にフィルムバッジにより計測) | モニタリングポスト（※蛍光ガラス線量計） | 蛍光ガラス線量計は、銀を入れた特殊なガラスに放射線を照射後、紫外線を当てると蛍光を出す性質を利用して線量を測定。 |
| | 電離箱式線量計 | 放射線照射によって電離箱の空洞内で発生する電離電流(電荷)を計測. 放射線による気体の電離作用を利用した放射線測定器。 |
| | 熱ルミネッサンス線量計 | 熱ルミネセンス線量計は、放射線を照射後加熱すると光を発する物質の性質を利用して線量を測定。 |
| | フィルムバッジ | γ（X）線、β 線及び熱中性子線等の放射線がフィルムバッジに入射する場合に、材質の異なるフィルタを通してできるフィルムの黒化度の差を利用して被ばく線量を評価し、かつ放射線の種類及び入射エネルギーを推定する。 |
| 放射能（土壌線量） | ヨウ化ナトリウムスペクトロメーター検出器 | ヨウ化ナトリウム(Nal)の結晶を検出器として使用し、放射性物質から出るガンマ線を測定。 |
| 放射能（水中・底質線量） | シンチレーション式水質・底質線量用サーベイメータ | 水中・底泥中に設置し、放射線量を測定。 |
| | 曳航式放射線計測システム | 海底土の放射能の連続・精密測定を行うシステムであり、海底を約 3mピッチで連続計測することが可能。 |
| 放射能（放射性物質量） | HEPA フィルタ | 排気塔に設置し、施設内の放射性物質を採集する。 |
| 放射能（体内被ばく量） | ホールボディカウンター | 体内に存在する放射性物質を体外から測定する機械。立った状態、座った状態で体内の放射性物質を計測できるもので、1 人あたり 3 分～5 分で計測が終了する。体内の放射性物質から放出される γ 線を体外で計測することで、内部被ばく量を測定する。 |

表 3.2.2-2　操業時の安全に関わるモニタリング機器に関する整理(2/2)

| モニタリングパラメータ等 | 測定機器 | 測定方式 |
|---|---|---|
| 変形<br>（変位・ひずみ量） | ゲージ | ゲージは、変形を計測したい物等に貼り付けて使用。<br>セオドライト及び傾斜計は測量機器。 |
| | セオドライト | |
| | 傾斜計 | |
| 有毒ガス<br>（一酸化炭素、二酸化炭素） | ガスクロマトグラフィ | 移動相を気体とし、試料を移動相とともにカラムの中に流し、固定相の相互作用（吸着・分配）によって分離。ガスを測定する。 |
| 有毒ガス<br>（水素） | SE-H2 水素センサ | コンベクション管等を用い、計測対象の水素濃度（体積）を測定する（In-Situ）水素センサ。 |
| 有毒ガス<br>（メタン） | メタン濃度計測器 | 炭化水素の計測器として、検出原理から、水素炎イオン化検出法（FID）によるもの、赤外線吸収（NDIR、オープンパス方式）によるもの、接触燃焼法によるもの、化学発光によるもの、半導体センサによるものがある。化学発光法は、開発途上にあり、NDIR 法、接触燃焼法は測定対象が比較的高濃度の場合に、オープンパス法は、測定対象が比較的低濃度の場合に適用される。 |
| 有毒ガス<br>（二酸化炭素） | 二酸化炭素濃度計測器 | 赤外光源と光センサ素子を両端に固定した筒（セル）の中に測定したい気体を流す方法。低濃度では入射光の減衰が少なく、高濃度では減衰が大きいという原理を活用。 |
| 酸素濃度 | 酸素濃度計 | 隔膜を拡散してセンサー内部に到達する酸素の電解電流を酸素濃度として表示。 |
| 振動<br>（地震） | 地表用加速度計 | 地表の振動を計測。計測したデータはデータ収録･処理装置に送る。 |
| | 可搬式データ収録・処理装置 | |
| 地下水<br>（地下水） | 地下水位計 | 地下水位計は、ボーリング孔内や井戸内に設置して、地下水位を測定。地下水検層器は、ボーリング孔内の水の比抵抗値を測定することにより流水層を検出する装置。 |
| | 地下水検層器 | |
| 変形<br>（変位・ひずみ量） | GPS 測量 | GPS の L1 波を利用した原位置計測機である。地すべりの検知や橋梁の動揺など高精度の測量が必要とされる分野で mm 単位の計測が可能。 |
| （データ管理システム） | ガス検知警報機用指示警報ユニット、モニタリングシステム全般 | データの自動保存・監視。 |

## 3.3　地中無線モニタリング技術に関する調査

原環センターでは、配線による処分安全性能の影響を低減することが可能な地中無線通信技術の適用範囲の拡大を目指した検討を行っている。本検討では、予め抽出した課題に対し段階的に開発を実施している。

これまでに、送受信アンテナの送信効率、受信効率の向上、電磁波伝播挙動を評価するための解析手法の構築、岩盤中における電磁波伝播特性の把握、小型化送信装置の開発を実施し、また、これらの技術の成立性を実証するため、フランスの地下研究所における小型化した地中無線送信装置とボーリング孔対応の地中無線受信装置の実証試験、原子力機構との共同研究による幌延深地層研究センターでの地中無線中継試験等を行ってきた。

本年度は、昨年度実施した課題抽出を踏まえ、中継システムの多段化の検討、長期モニタリングのための電源の調査として放射性同位体熱電気変換器の適用に関する検討、及び電磁波による地中無線モニタリング装置への給電に関する検討を実施した。さらに、日本原子力研究開発機構との共同研究である人工バリア性能確認試験及び坑道冠水試験への準備、フランス・ANDRA との共同研究である長距離通信試験の準備状況、及び緩衝材膨潤挙動の長期モニタリングの状況について述べた。

### 3.3.1　地中無線送信技術の必要性

地中無線送信技術は、図 3.3.1-1 に示すように①ケーブルを使用しないため、バリアの安全性を損なわずにモニタリングが実施できる、②ケーブル敷設により計測場の擾乱を避けられるため、取得データの信頼性を向上させることができる及び③作業が容易のため作業性、経済性が向上するものである。また、③は作業員の労働時間の短縮にもつながるため、作業員の被ばく線量の低減にも寄与するものである。

そのため、地中無線送信技術の様々な課題を克服し、地層処分モニタリング実施時に生じる制約条件（長距離での実施が困難、高温環境での耐熱性が高くない等）を変えていくことが必要となる。

図 3.3.1-1　地中無線送信技術の必要性

### 3.3.2　地中無線モニタリング技術に関する開発の実施状況

本研究では平成 18 年度までの第 1 フェーズにおいて、地中無線送信技術の地層処分モニタリングへの適用性を判断するため、スウェーデンエスポ地下研究施設での予備実験などを行い、その有用性を確認した。第 2 フェーズでは最初の 2 年間（平成 19 年度、平成 20 年度）において、電磁波の伝播特性を判断するため、特に鋼製部材に着目した解析的検討を行い、評価手法の整備を行うと共に、今後の適用性向上に向けた開発課題を平成 21 年度に抽出した.

平成 21 年度からの第 2 フェーズの後半の 4 年間においては、まず、平成 21 年度に小型地中無線送信装置の開発を行った。引き続き、地中無線送信技術の地層処分モニタリングへの適用に関する研究開発を効率的に実施するため、平成 22 年度からフランス ANDRA と共同研究を実施し、ムーズ・オートマルヌ地下研究所（MHM URL）で実証試験を開始した。本共同研究において、平成 22 年度には小型地中無線送信装置、中距離無線送送信装置を用いた実証試験を行い、平成 23 年度においてはボーリング孔対応地中無線受信装置を開発し、MHM URL においてボーリング孔間の長期送信試験を開始した。また、これらの送信試験結果については、3 次元電磁場解析を実施して、磁束に影響を及ぼすと考えられる様々な部材をモデル化し、複雑な地下施設の環境下での電磁波現象を評価した。更に、平成 23 年度には、小型地中無線送信送信装置に 10MPa の耐水性、耐圧性を付与した。平成 24 年度には中継システム用に長距離無線送信装置を開発した。また、小型地中無線送信装置にサンサーを接続するため、センサ接続機器（アダプタ）を開発した。

平成 25 年度には、これまでの開発経緯と処分の実施段階ごとの適用方法について検討を進め、検討課題の絞り込みを行うとともに、地中無線中継装置の耐圧化に関する検討や、幌延深地層研究センターにおける中継試験等を実施した。

処分の実施段階ごとの地中無線モニタリング技術の適用課題と開発項目を表 3.3.2-1 に示す。

また、これを基に優先度が高いと評価した課題を表 3.3.2-2 に示す。着色項目は他の項目よりも優先度が下がると判断した項目である。

表 3.3.2-1　処分の実施段階ごとの地中無線モニタリング技術の適用課題と開発項目

| 適用イメージ | | | 課題 | 開発項目 |
|---|---|---|---|---|
| 立地・調査段階 | 地下研究施設 | ①地下深部から地上へのデータ伝送 | ・500m 程度の長距離を中継無しでの送信（地中無線の可能性を示すことが目的のため、電源は外部電源の利用が可能） | ・長距離送信能力（外部電源可） |
| | 地下調査施設（模擬廃棄体） | ②人工バリアや処分坑道のモニタリング（中継によるデータ送信） | ・1 回 50m 程度の中継によるデータ送信<br>・機器に使用する材料の長期間の挙動評価が求められるため、センサと同程度の寿命（10～20 年）<br>・模擬廃棄体に対する耐熱 | ・中継装置（中継システム（50m 程度の 1 段/多段中継）、埋蔵型（耐圧性）、内部電源の 10～20 年程度の長寿命化）<br>・小型送信機の 10～20 年程度の長寿命、耐熱性 |
| | | ③人工バリアや処分坑道のモニタリング（近傍のボーリング孔での受信） | ・機器に使用する材料の長期間の挙動評価が求められるため、センサと同程度の寿命（10～20 年）<br>・確実な挙動モニタリングを行うためのセンサと送信機の小型化<br>・模擬廃棄体に対する耐熱 | ・小型送信機の 10～20 年程度の長寿命、耐熱性<br>・センサと送信機の一体化によるモニタリング装置全体としての小型化 |
| 操業・閉鎖段階 | 実処分場 | ④主要坑道や連絡坑道でのモニタリング（プラグを挟んだ送信など） | ・追加が可能な中継装置<br>・機器に使用する材料の長期間の挙動評価が求められるため、センサと同程度の寿命（10～20 年） | ・中継装置（中継システム（追加可能な多段中継）、埋蔵型（耐圧性）、内部電源の 10～20 年程度の長寿命化） |
| | | ⑤人工バリアや処分工坑道のモニタリング（近傍ボーリング孔での受信） | ・機器に使用する材料の長期間の挙動評価が求められるため、センサと同程度の寿命（10～20 年）<br>・確実な挙動モニタリングを行うためのセンサと送信機の小型化<br>・実廃棄体に対する耐熱、耐放射線 | ・小型送信機の 10～20 年程度の長寿命、耐熱性、耐放射線性<br>・センサと送信機の一体化によるモニタリング装置全体としての小型化 |

表 3.3.2-2　各開発項目と対策

| 開発項目 | | | 対策 |
|---|---|---|---|
| a.長距離送信能力（外部電源可） | | | 「ANDRA との共同研究」<br>・送信強度の向上（アンテナの大型化、耐電圧の向上等）<br>・磁束の減衰量の低減（鋼製部材の少ない坑道の利用、ボーリング孔を活用した鋼製部材外からの送信等）<br>・S/N 比の向上（ボーリング孔を利用した受信等） |
| b.中継装置 | 中継システム | 1 回 50m 程度の 1 段/多段中継 | ・中継システムの開発 |
| | | 追加可能な多段中継 | ・中継システムの高度化 |
| | 埋蔵型（耐圧性） | | ・中継装置の設計<br>・耐圧性の向上 |
| | 内部電源の 10～20 年程度の長寿命化（高頻度での測定・送信設定のケース） | | ・一次電池の長寿命化<br>・非接触電力供給の高度化<br>・ベータボルタイック発電方式の高度化<br>・放射性同位体熱電気変換器の高度化 |
| c.小型送信機 | 内部電源の 10～20 年程度の長寿命化（高頻度での測定・送信設定のケース） | | （同上） |
| | センサと送信機の一体化 | | ・センサと一体化した送信機の開発 |
| | 耐熱性 | | ・耐熱性の向上 |
| | 耐放射線性 | | ・耐放射線性の向上 |

### 3.3.3　地中無線中継装置の多段化に関する検討

本項では、地中無線中継装置について複数段の中継について検討を行った。検討にあたっては、平成 25 年度に実施した耐圧性付加に関する検討結果を前提とした。具体的には本中継装置による複数段の中継、最末端の中継装置での 10 台程度までの複数のセンサ付き小型送信機からのデータの受信を目標とし、省電力動作シークエンスの検討、単方向送信機の時計同期方法の検討、中継動作が複数段となった場合のシークエンス検討などを実施した。

#### (1)　省電力化のための回路見直し検討

地中無線によるデータの中継を多段化するためには、各中継装置においてデータ受信の待機等が生じるため、装置の省電力化を行う必要がある。中継装置や送信装置の機能は、その電流の消費状態から見て次の機能要素に分類できる。

① スリープ機能
② 測定機能
③ 受信待機機能
④ 送信機能

これらは、①に近いほど消費電流が少なく、④に近いほど消費電流が大きくなる。省電力化のためには、各機能要素の消費電流を下げることが重要となる。また、各機能要素をどのくらい使用するかによっても運用寿命に影響するため、機能要素の使用割合を④側から①側に増やしてく必要がある。例えば、測定回数や通信回数を少なくし、受信待機時間も短くすれば、消費電流の最も少ないスリープ機能の時間割合が増え、結果的に消費電流量が減少して運用可能な期間を延ばすことが可能となる。中継装置の場合、②の測定機能は必要ないかわりに、複数送信装置からデータを受信するための受信待機機能の割合が多くなることが考えられる。例として、現状の送信装置における機能要素の消費電流量の比を表 3.3.3-1 に示す。

表 3.3.3-1　現状の送信装置（ANDRA MHM　URL 設置送信装置）の消費電流量の比

| 機能要素 | 動作時間比（年） | 消費電流量比（年） |
|---|---|---|
| ①スリープ機能 | 81.05% | 0.43% |
| ②測定機能（4 回/日） | 0.02% | 7.96% |
| ③受信待機機能 | 18.91% | 69.75% |
| ④送信機能（1 回/週） | 0.02% | 21.86% |

①スリープ機能

スリープ機能とは、あらかじめ設定されたスケジュール通りに中継装置を動作させるために最低限必要な機能を除いて、他の機能（回路）を動作させない（通電させない）機能のことである。具体的には、次回起動時刻を監視するための時計回路、回路に異常が発生していないか

監視して異常発生時にはリセットするための監視回路（独立したウォッチドックタイマ回路）による機能である。

現状では、消費電流が数 μA 程度であり、表 3.3.3-1 からわかるように大半の動作時間を占めるにもかかわらず、消費電流量は年間使用量の 1%程度であることから、大きな機能変更や回路変更を行わず、より消費電流の少ない部品を選定する方針とする。

②測定機能

中継装置においては、測定機能は不要であるため、検討対象外とする。

③受信待機機能

中継装置にとって、最も重要かつ最も消費電流量が多い機能である。対象とする送信装置が多い場合、それぞれの送信装置からデータを受信する必要がある。また、中継段数に応じて、各中継装置に送る指令の回数も増えるため、送信装置に比べてはるかに長い受信待機時間が必要となる。ANDRA の MHM に設置した双方向通信型の送信装置の場合でも送信時間に対する受信待機時間の比は 800 倍にもなる。1 台の中継装置が 10 台程度の送信装置を管理する場合、その 10 倍程度の時間が必要になる可能性がある。

そこで、受信待機機能の消費電流を減らすため以下の視点に立ち検討を行った。

a. 指令やデータを受信する際の消費電流量を減らす
b. 指令やデータを受信するための回路の動作時間を減らす

現在の受信待機機能は、起動すると受信アンテナの信号を監視し、信号の受信を確認すると受信電磁波の波形処理・復調の演算を行ってデータ化し、メモリに保存する。その際、信号の演算処理に多くの電流を消費する。これは、受信処理のためにメインの CPU を動作させる必要があるためで、CPU の動作時間がそのまま消費電流量の増加を招く。

そこで、受信待機機能を 2 つに分けることを検討した。1 つは、より消費電流の少ないタイミングをとるためだけの受信待機とし、メインの CPU を利用せず、起動コード（これから指令やデータを送るタイミングをとるためのコード）を受信して受信待機機能を起動させるための低消費起動コード受信機能である。もう一つは従来の受信機能である。低消費起動コード受信機能を設けることで、指令やデータを待つ時間に消費電流の大きい受信待機機能を動かす時間を減らせること、起動コードが来なければ低消費起動コード受信機能のみの動作となるため消費電流量が減らせることとなり、指令やデータを受信する際に消費する電流量を減らすことが可能となる。図 3.3.3-1 に従来の受信動作を、図 3.3.3-2 に低消費起動コード受信機能を用いた受信動作を示す。

また、例としてデータ送信要求指令を受信した際の中継装置の動作を図 3.3.3-3 に示す。通常スリープ状態にある中継装置は、指令やデータを受信する予定時刻になると、低消費起動コード受信機能の電源を ON にする。本機能により、上位の中継装置や受信装置から起動コードが来ないか、または送信装置から起動コードが来ないか一定の時間監視を行う。起動コードの受信がない場合、そのまま電源を OFF にし、次の予定時刻までスリープする。起動コードが届いた場合、受信待機機能の電源を ON にし、信号受信に備える。上位の中継装置や受信装置

からの指令、もしくは管理下にある送信装置からデータが伝送されてきた場合、それを復調して内容に合わせた動作を行う。本例の場合、上位の中継装置もしくは受信装置からデータ要求指令を受信したので、送付する測定データをメモリより読み出し、データを変調し、送信機能の電源を ON にしてデータを送信する。データ送信後は送信機能・受信待機機能の電源 OFF にしたのち、低消費起動コード受信機能の電源を OFF にして、スリープ状態に移行する。

本検討の機能により、従来の 1/10 の消費電流を目標としている。この目標が達成できれば、センサ付送信装置を 10 台程度管理してデータの中継を行う場合でも、消費電流量は従来のセンサ付送信装置を 1 台管理する場合と同程度に抑えることが可能となると考えられる。

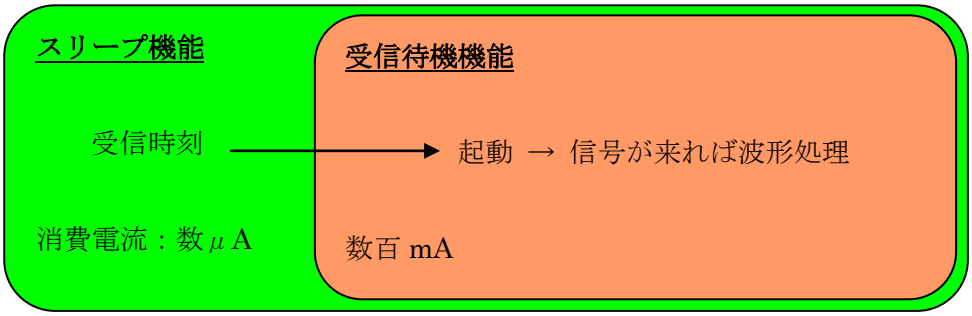



図 3.3.3-1　従来の受信動作

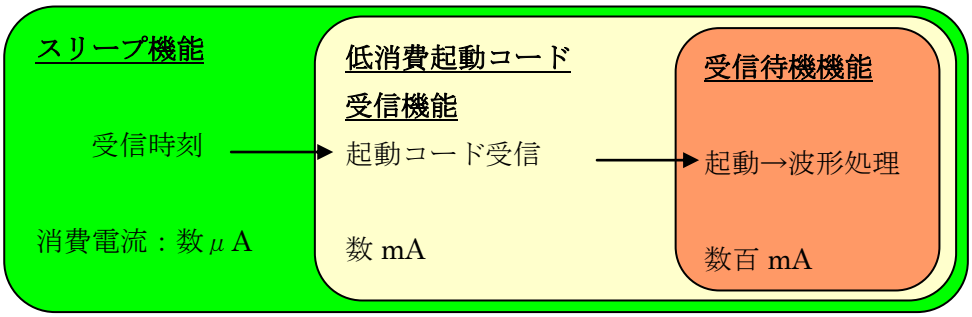



図 3.3.3-2　低消費起動コードを用いた受信動作

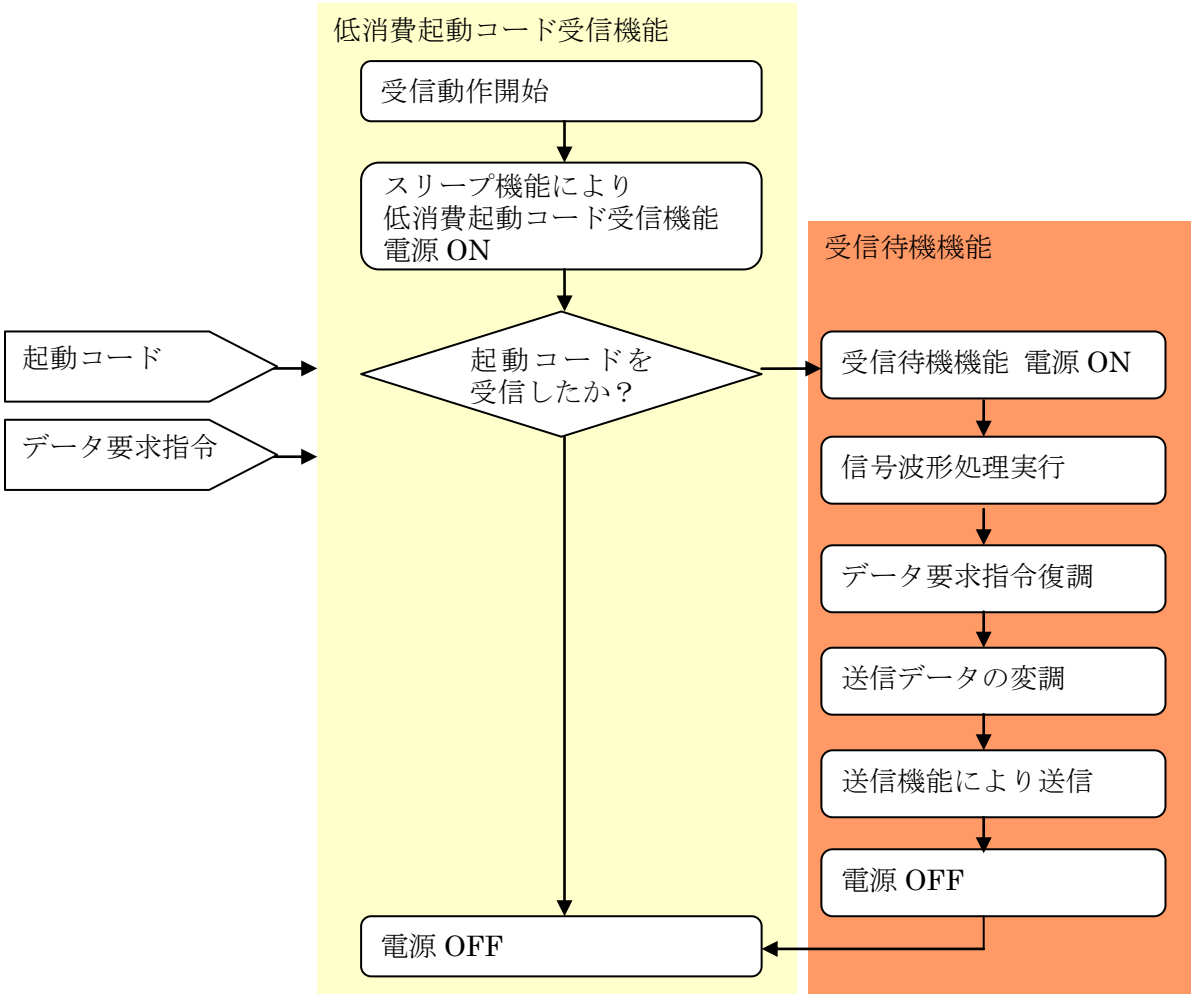



図 3.3.3-3　動作フロー

④送信機能

送信機能は、中継装置より上位の中継装置や受信装置に対してデータや指令に対するレスポンスを送信する機能である。送信機能の消費電流は、送信出力に比例する。すなわち、長距離の伝送を行うと、その分消費する電流は増える。また、送信機能の消費電流量はデータの量に比例する。つまり、管理する送信装置の台数が増えれば、その分中継させるデータ量が増えるため、送信に要する消費電流量が増加する。よって、送信機能で重要なことは、回路の改良ではなく、より効率的な高出力が望めるアンテナの開発であり、また、送信回数を減らすための動作シーケンスとなる。アンテナ開発は ANDRA との共同研究である長距離伝送試験に関する検討を参照し、動作シーケンスの検討については次節で検討する。

(2)　省電力動作シークエンス検討

各機能を動作させるに当たり、必要な機能を必要な時に必要なだけ動作せることで、不要な消費を抑えることが出来る。現状送信装置の動作シークエンスは、図 3.3.3-4 のようになっており、(1)で検討したように、受信待機機能が全体の消費電力の 69.75%を占めている。

中継装置の動作シークエンスは、(1)で検討した低消費起動コードを反映し、図 3.3.3-5 のようになる。中継装置では測定機能を搭載しないため、この機能を削除し、受信については指令受信に加えて中継受信と定期受信がある。中継受信は、下位中継装置からのデータ受信であり、定期受信は自身が直接管理する送信装置からのデータ受信である。中継受信及び定期受信は、下位から上位への単方向通信であるから応答送信の必要はなく、受信完了後は受信待機状態に戻り、それ以上、下位からのデータ伝送がなければ直ちにスリープする。現状送信装置の定期送信にあたる動作は中継装置では中継送信と呼ぶ。これは、自身の直接管理する送信装置及び下位中継装置から受信した全ての送信装置のデータをまとめて上位の中継装置あるいは受信装置に送信する動作である。全体の消費電力の多くを占める受信待機機能が、低消費起動コード受信機能に置き換わることによって、大幅な省電力化が見込まれる。

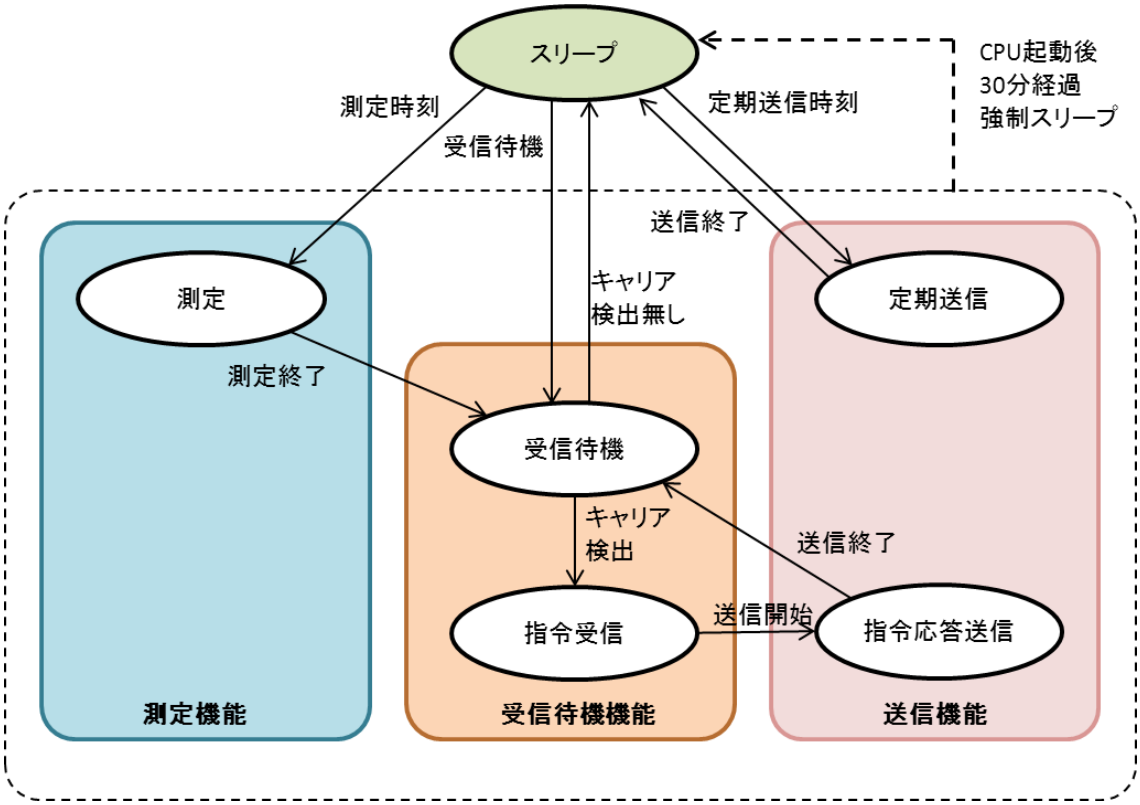



図 3.3.3-4　現状送信装置の動作シークエンス

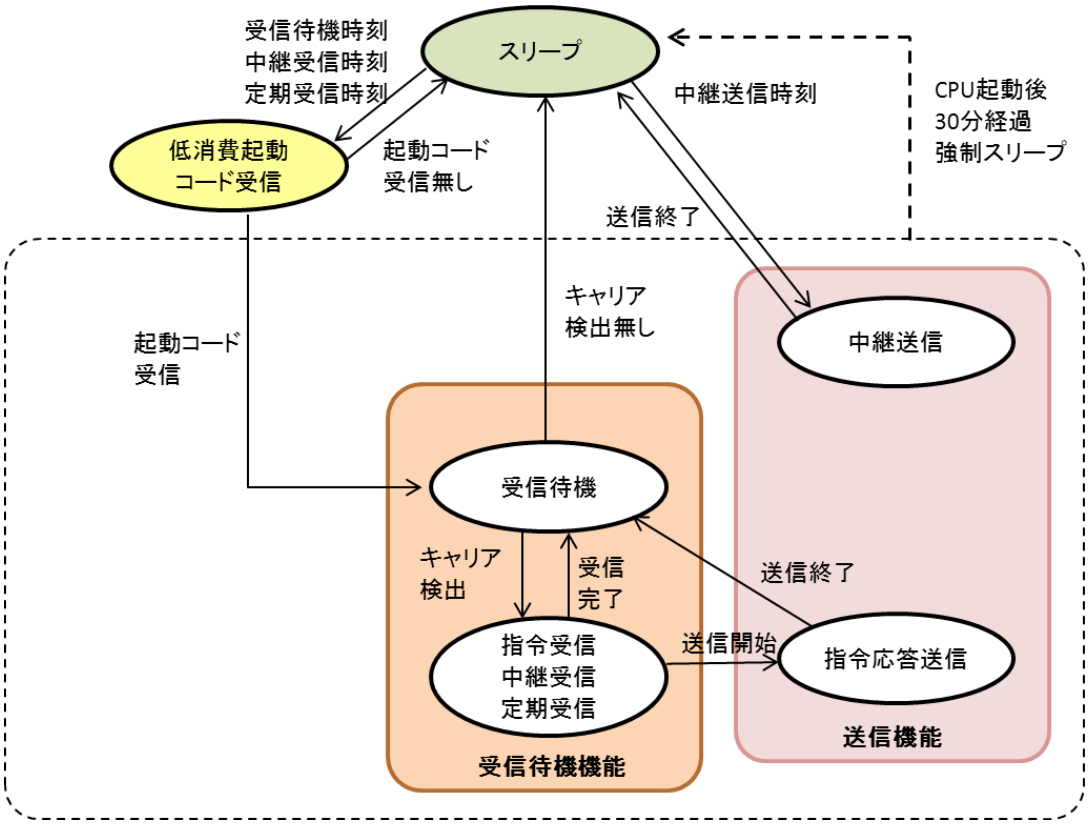



図 3.3.3-5　中継装置の動作シークエンス

実際にどの程度の省電力化が期待できるか検討するために、図 3.3.3-6　省電力試算モデルに示すように送信装置 1 台を中継する場合と、10 台を中継する場合の 2 通りで試算を行った。送信装置と中継装置の動作条件を表 3.3.3-2 及び表 3.3.3-3 に示す。なお、計算条件は、単方向小型送信装置を用いて長期的にモニタリングを実施する場合を仮定して条件を決めて比較している。

年間消費電力を比較した結果、図 3.3.3-7 に示すように送信装置 1 台を管理する場合、現状の送信装置に対して 34%の消費電力に抑えられる結果となった。これは、中継装置に測定機能がない点と、低消費起動コード受信機能による受信電力の削減の効果である。送信装置 10 台を管理する場合には、現状の送信装置に対して 366%に増加する結果となった。送信については、現状の送信装置と同等の送信性能としているため、送信データ数が増加した分消費電力も大幅な増加となったが、受信については、現状の送信装置と比較すれば 3 割程度の増加で抑えられた。

上記試算により、中継装置単体での省電力化の効果を確認することでき、2~3 台程度の送信装置を中継するのであれば現状の送信装置程度の電池容量で実現可能であると考えられる。また、10 台程度の送信装置を管理する場合でも、現状の 3~4 倍程度の電池容量を搭載することで実現できると考えられる。

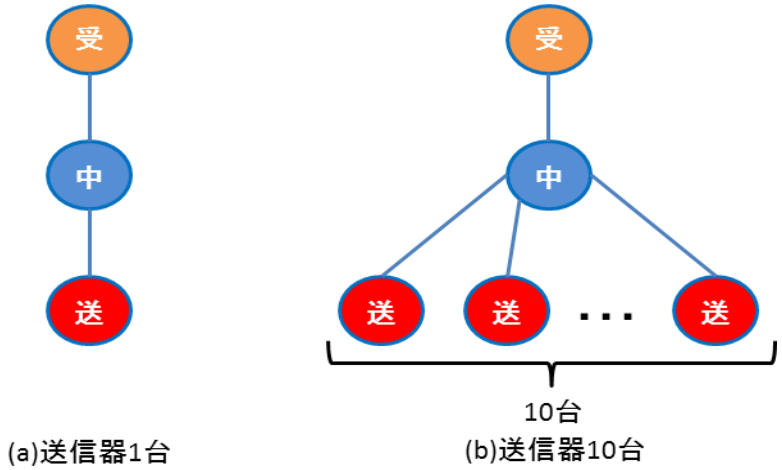



図 3.3.3-6　省電力試算モデル

表 3.3.3-2　送信装置動作条件

| | |
|---|---|
| 測定チャンネル数 | 3 チャンネル（センサ、温度、電池電圧） |
| 測定頻度 | 1 回／日 |
| 定期送信 | 1 回／週 |
| 受信待機 | 3 回／週 |

表 3.3.3-3　中継装置動作条件

| | |
|---|---|
| 定期/中継/指令受信 | 時刻ずれを考慮し定刻の 2 分前に起動し、低消費起動コード受信にて待機する。 |
| 中継送信 | 1 回／週 |
| 受信待機 | 3 回／週 |

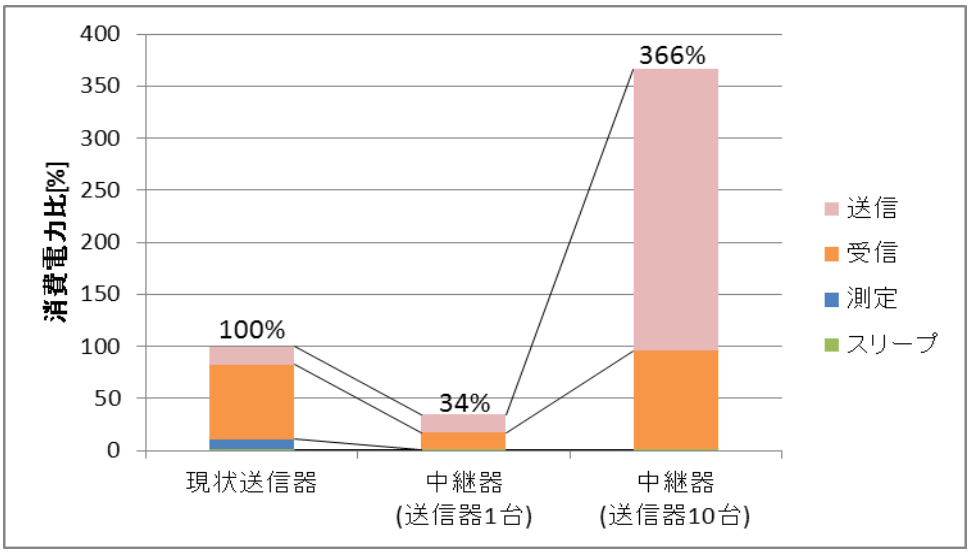



図 3.3.3-7　試算結果による消費電力比

(3)　単方向送信装置の時計同期方法検討

送信装置や中継装置は運用可能期間を延ばすために、可能な限り消費電流を少なくするため、様々な機能に分割され、それぞれ電源が管理されている。様々な動作は全てあらかじめ決められたスケジュールに基づいて動作し、それを制御しているのが内部の時計（RTC：リアルタイムクロック）である。RTC は、測定の時刻になると測定機能の電源を ON にして測定を実施する。また、送信時刻になると送信機能の電源を ON にしてデータの送信を行う。このように送信装置及び中継装置の動作は、内蔵バッテリを長持ちさせるために RTC の制御に基づいて実施されている。

RTC は水晶発振子の周波数をもとに時間の経過を監視している。しかしながら、水晶はその振動数に誤差があり、図 3.3.3-8 に示すように温度依存性もあることから、少しずつ時計がずれることになる。各送信装置や中継装置のそれぞれの内部時刻が狂ってくると、例えば送信装置の送信時刻に中継装置の受信機能の電源が ON になっていないといった問題が発生し、正常にデータの伝送を行えなくなる。中継装置には指令を受信する機能があるため、双方向通信により時計の同期をとることが可能になるが、小型送信装置のように受信機能を持たない送信装置は時計を同期する方法がない。水晶にもさまざまな種類が存在するが、一般的に精度の高い発振回路は消費電流が大きい傾向にあり、また、必要となる回路面積も大きくなることから限られた容積しか持たない小型送信装置には適さない。

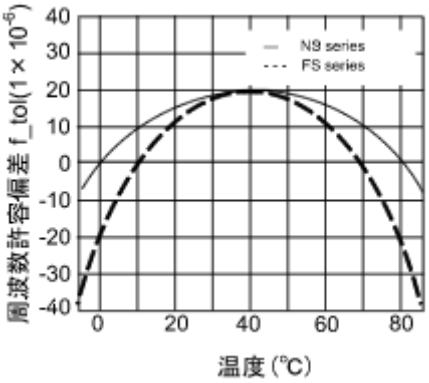



図 3.3.3-8　水晶の温度特性例[6]

時計がずれる量を見込んで受信待機する時間を設定すれば、時計ずれによる通信不良を回避することができるが、前述したように電池の消費の大きな部分を受信待機が占める中で、さらにその時間を増加させることは運用期間の短縮につながるため避けるべきである。

そこで、通信不良を発生させないように通信のタイミングを計る方法について 2 つの案を検討した。

一つ目の案は、送信装置側の時計を合せるのではなく、中継装置側の受信のタイミングを送信装置側に合わせる方法である（図 3.3.3-9）。時計の同期が不可能なのは小型送信装置だけなので、中継装置の管理下にある送信装置の送信時間を中継装置が監視しておき、中継装置から

見た送信装置の送信時刻のずれを送信装置毎に把握して次回の各送信装置からの受信時刻を調整することで、通信不良を避ける方法である。しかしながら、この方法にも問題は存在する。

a. 水晶は、ある温度から温度が上がっても下がっても時計が進む方向に誤差を生じる。そのため、送信装置毎に時計のずれにばらつきを持つ場合、長期間運用するといずれは別の送信装置の通信時刻と重なる可能性がある。よって、運用期間と想定される時計ずれを見越して各送信装置の送信時間を決める必要があり、送信装置毎の送信時間間隔を十分に確保する必要がある。しかしながら、放射性廃棄物のモニタリングの場合、モニタリング対象である様々な挙動が時間的に緩慢であることから、高頻度に測定・伝送させる必要性は低く、十分な送信間隔を確保することが可能であると考えられる。
b. 中継装置は管理下にある送信装置の時計ずれを監視し、それぞれのずれ量を把握しておく必要がある。もし仮に、中継装置内部の CPU 上で動作するプログラムのハングアップや、ずれ量を記録するメモリ領域が破損した場合、中継機能自体は再起動やメモリの破棄により自動的に機能を回復することができたとしても、送信装置の送信タイミングに合わせることができなくなる。タイミングを再び合わせるためには、長い時間受信状待機態を維持し、いつ送信されてくるかわからない送信装置の送信タイミングを探る必要が出てくる。その場合の電源の消耗が大きく運用可能期間が短くなることや、中継装置内部のプログラムの複雑さに起因する問題等により通信不良が発生する可能性がある。

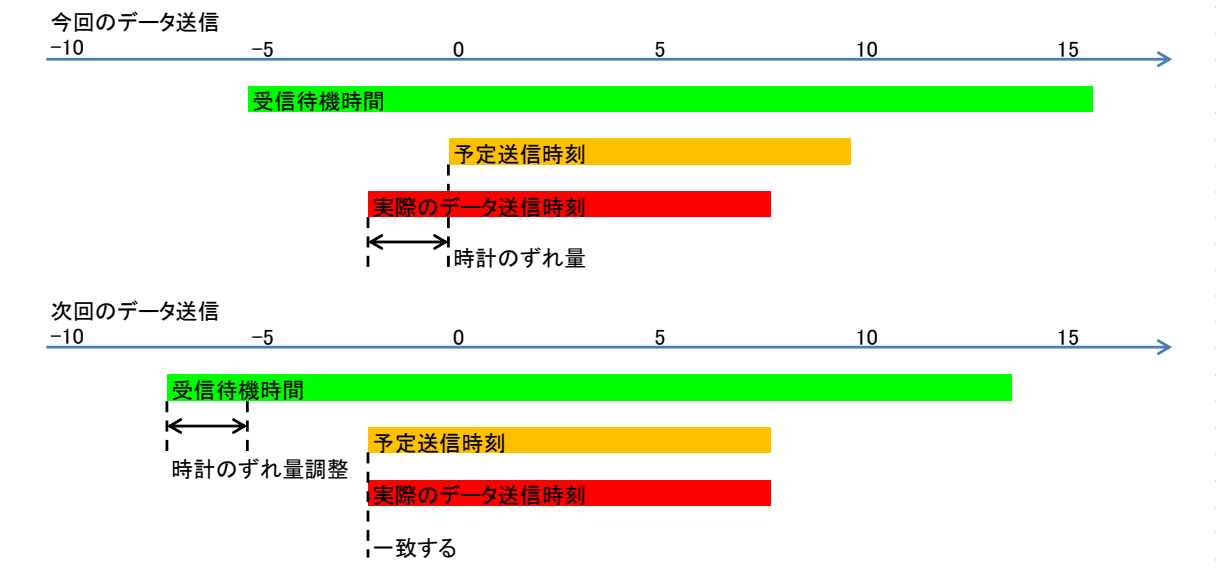



図 3.3.3-9　中継受信側による通信タイミングの調整

二つ目の案として、時計の同期専用の同期信号を発信し、各機器間の時計の同期をとる方法である。地上の時計の同期をとる方法に、標準電波送信所から送信されるデジタル信号を受信し、自動的に時刻を合わせる方法がある（図 3.3.3-10）。そこで、地中無線通信システムの場合でも、定期的に時計同期のための地中無線信号を発信し、その信号の受信タイミングで受信

した側の時計を合わせる方法である。現状では小型送信装置には受信装置は搭載されていない。これは、電源容量及び回路サイズの問題で搭載が不可能なためである。そこで、指令やデータを受信するのではなく、同期をとるタイミングとしてだけ使用する回路を開発できれば、小型でかつ低消費電流な時計同期機能となりえるはずである。前述の低消費起動コード受信機能を同期調整用として小型送信装置に搭載すれば同期が可能となる。小型送信装置は定期的に中継装置から送られてくる同期信号を基準に時計をリセットし、中継装置と時計の同期をとる。しかしながら、この方法にも問題点が存在する。

- 中継装置の不調により同期信号の発信がずれた場合、その中継装置より下位に存在するすべての中継装置と送信装置の時刻が狂うことになる。常にずれた状態で維持できれば問題ないが、一時的な不調・故障による同期信号の発信ずれの場合、以降のデータを受信できなくなることから、障害発生時のリスクが大きい。

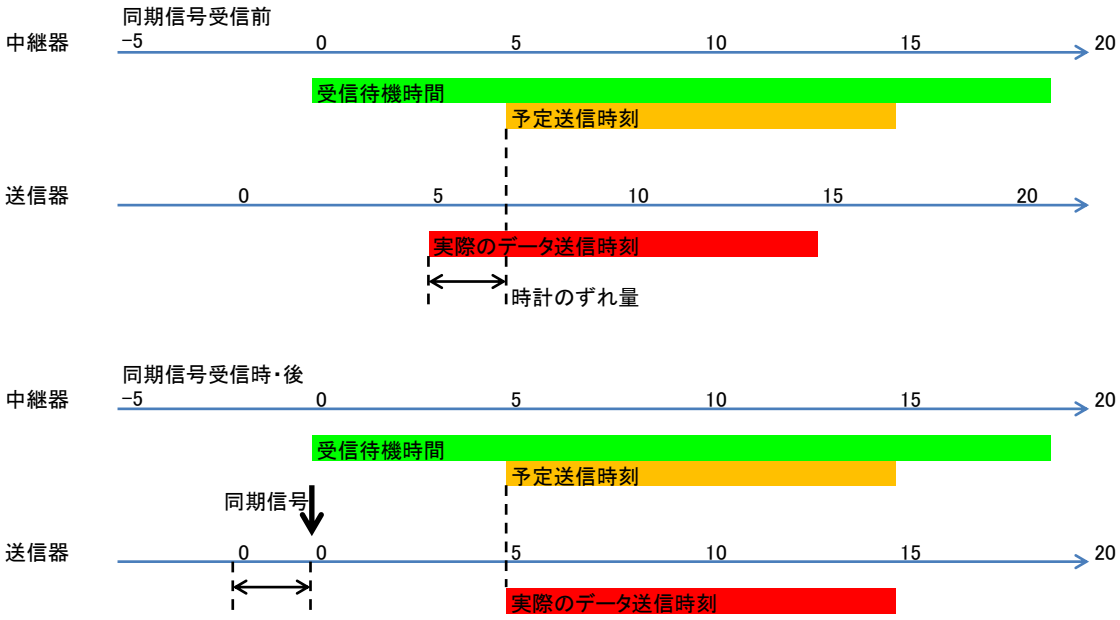



図 3.3.3-10　同期信号による時計の同期

検討した二つの案のうち、二つ目の案の同期用低消費起動コード受信機能が小型送信装置に搭載できるくらい小型・低消費で実現できれば、二つ目の案を採用することが可能である。

(4)　中継動作が複数段になった場合のシークエンス検討

通信距離が増大した場合に必要となる、中継動作を複数段とするために必要な事項を検討する。具体的には、中継を多段化するために必要な事項に加え、中継が多段化することで発生の可能性が増大することが予測される、装置の故障に備えた通信経路の冗長化に必要な事項である。通信経路の冗長化を実現するためには、複数経路からのデータの収録や、通信経路が故障

した際の復旧のための検討が必要である。

複数段の中継のイメージを図 3.3.3-11 に示す。図中におけるノードとは中継装置のことである。送信装置から集めたデータは中継装置に一旦収録され、そのデータを次の中継装置に伝送していく。最終的には受信機までデータを中継・伝送を繰り返すことで分散配置もしくは遠方に設置されたセンサの測定結果を収録する。

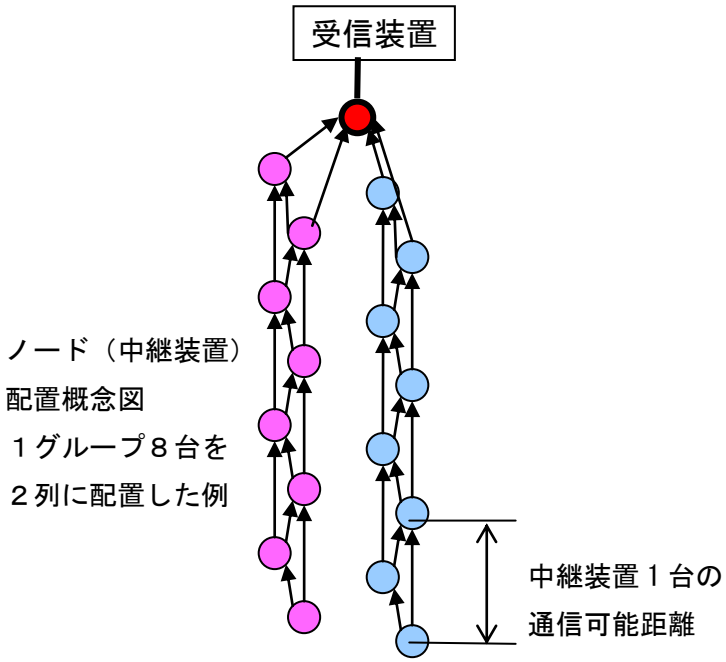



図 3.3.3-11　複数段の中継のイメージ

データの中継方法には 2 つの方法が考えられる。

a.　受信したデータを即座に受信した分だけ伝送する方法

【利点】

この方法は、受信したデータを受信したタイミングで受信した量のみ次の中継装置に伝送するため、中継通信の制御が簡単であり、信頼性が高いことがあげられる。

【欠点】

複数存在する送信装置からくるデータをその都度伝送するために効率が悪く消費電流量が大きくなる。また、各送信装置の同期ずれの調整を中継装置側で行う場合、下位の中継装置が管理する送信装置全ての同期ずれ情報を管理して受信状態を保つ必要があるため、中継段数や送信装置の台数が増えた場合に管理しきれなくなる。

b.　受信したデータを一旦中継装置にストックし、管理下にある送信装置のデータをまとめて別のタイミングで伝送する方法

【利点】

この方法は、管理下にあるすべての送信装置のデータをまとめて送信するため、中継装置間の通信回数が減り、効率が良い点にある。また、送信装置の同期管理も自分の管理下にある送信装置だけを対象とすればよく、下位の中継装置が管理する送信装置を管

理せずに済むことから、送信装置台数や中継段数が増えても大きな問題になりにくい。

【欠点】

送信装置からのデータを受信する制御と、上位の中継装置にデータを伝送する制御が完全に分かれるため、通信の制御が複雑になる。

10 台程度の送信装置を管理してデータを伝送させることを考えると、電池の消費量から勘案して b.案の方が適していると考えられる。

次に、複数段の中継（マルチホップ通信）の基本的な手順について検討する。図 3.3.3-12 に送信装置から中継装置を介して受信機までデータを伝送させる場合の基本的な手順を示す。

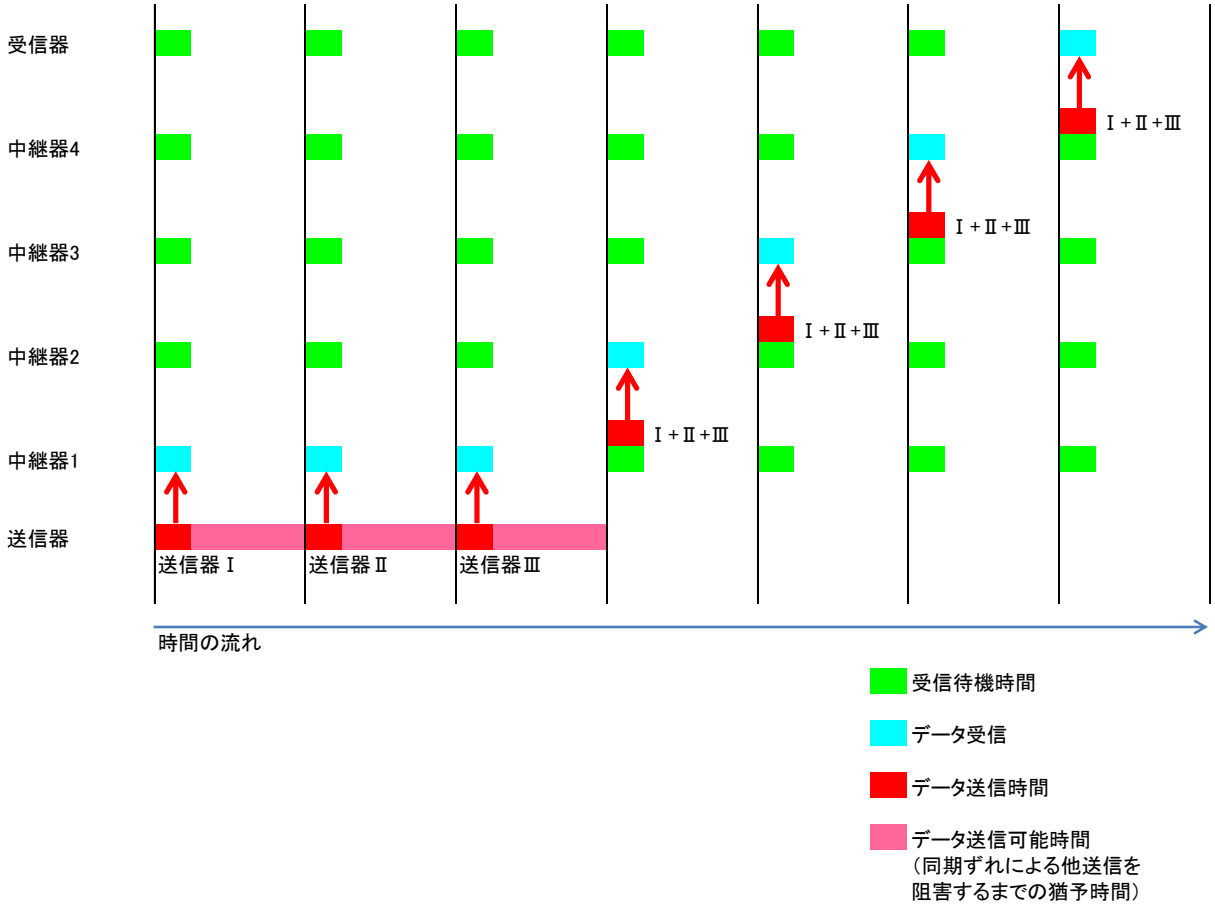



図 3.3.3-12　マルチホップ通信の基本手順

各送信装置は、ある時間間隔をあけて中継装置 1 にデータを伝送する。中継装置 1 は各送信装置のデータ（本図の場合Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）を受信すると内部メモリに収録する。あらかじめ決められた中継時刻になると、中継装置 2 に測定データを伝送する。以後、各中継装置は送られてきたデータを一旦ストックし、中継装置毎に決められた時刻に次の上位の中継装置にデータを伝送する。

図 3.3.3-13 に途中の中継装置が管理する測定器が存在する場合を示す。前述の場合と同様に、中継で送られてきたデータに加え、自分の管理する送信装置からのデータも受信したのちに保存し、決められた時刻になると次の中継装置にデータを合わせて伝送する。各中継装置には予め、管理しなければいけない送信装置と、下位の中継装置から送られてくるデータ数を設定しておく。

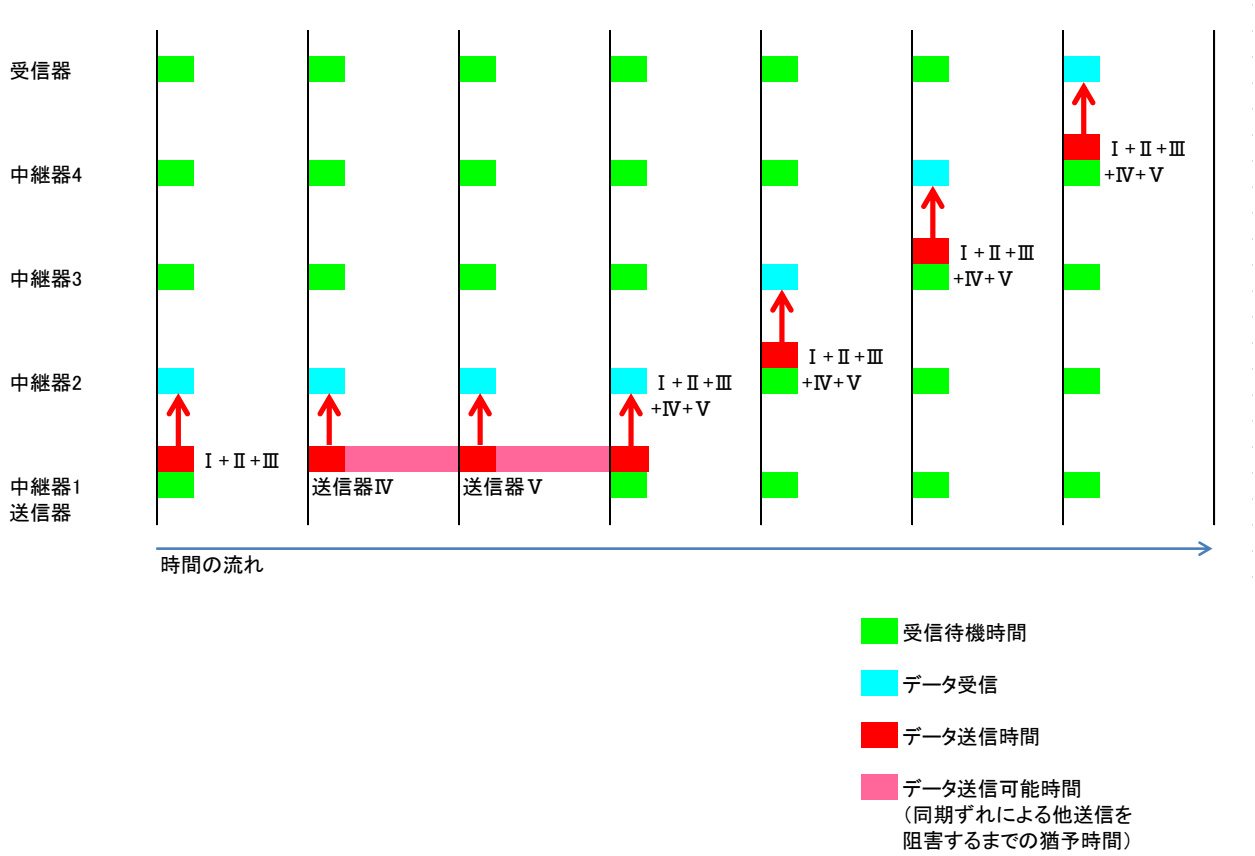



図 3.3.3-13　中継途中に送信装置がある場合

受信装置から指令を送る場合は逆の手順となる。受信装置から中継装置 2 に指令を送りそのレスポンスを受け取る手順を図 3.3.3-14 に示す。各中継装置は下位の中継装置と通信する時刻に上位から送られてきた指令を伝送する。中継装置 2 にまで指令が達すると、中継装置 2 は指令内容に沿った動作を行う。例えばデータの送信指令だった場合、データを上位の中継装置に伝送する。以後、上位の中継装置はデータの中継手順に従い受信機までデータを伝送する。なお、中継装置 2 を対象とした指令であるため、これより下位の中継装置には指令は伝送されない。

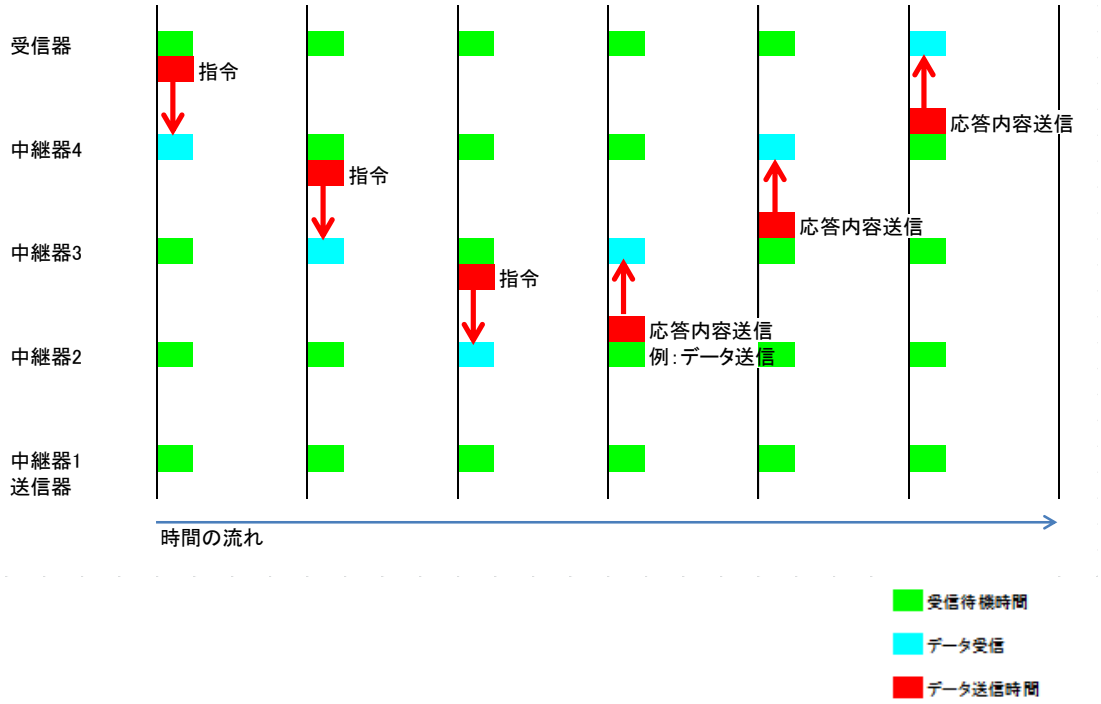



図 3.3.3-14　指令送信の手順

次に経路の冗長化について検討した。原環センターにて開発を進めてきた、低周波電磁波を用いた地中無線通信方式には指向性がある。送信アンテナの軸方向が最も強く出力できることから、必然的に伝送経路方向にアンテナ軸を向けることになる。経路を冗長化するためには、少なくとも 2 つ以上のデータ伝送先が存在する必要がある。地層処分においては、中継の多段化は、坑道や処分パネルの段階的な埋め戻しに伴って通信経路が構築されていくことが想定されるため、処分坑道や立坑に沿って通信・中継を行うこととなると考えられる。そこで、同じ坑道内に 2 つの通信経路を構築し、中継装置の発信した信号が両方の通信経路の中継装置に届くように中継装置を配置することで、途中の中継装置が故障した場合でももう一方の経路でデータ伝送を肩代わりできるような配置を取ることができる。

図 3.3.3-15 に二つの系統に冗長化した際の送信手順を示す。

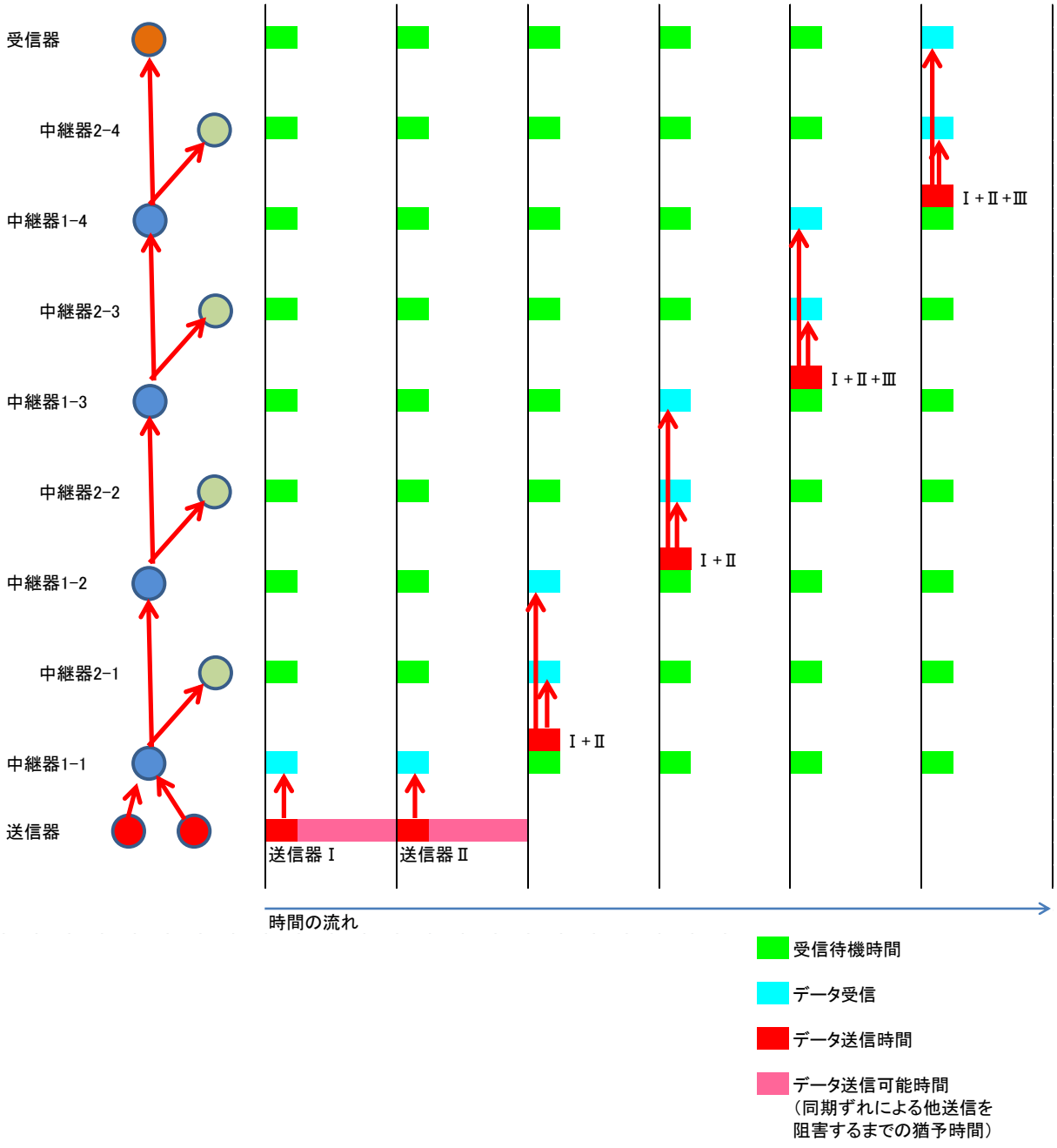



図 3.3.3-15　通信を二つの系統に冗長化した際の手順

ここでは、中継装置の系統を系統 1 と系統 2 の二つの系統とした。通常、系統 1 の管理下にある送信装置のデータは系統 1 の中継装置が受信機まで伝送する。同様に系統 2 の送信装置のデータは系統 2 の中継装置が伝送する。ただし、各中継装置が送信した信号は、最も近い両方の系統の中継装置までデータは届いている。

ここで、中継装置 1-2 が故障したと仮定する。すると、系統 1 の中継装置 1-3 にはデータが届かない。そこで、中継装置 1-1 の信号を受信している中継装置 2-1 が中継装置 2-2 に送信し、中継装置 2-2 は中継装置 1-3 及び 2-3 に伝送する。中継装置 1-3 は 2-2 から来た信号を系統 1

のデータとして、通常通り受信機に向けて伝送する。結果、中継装置 1-2 の故障により、中継装置 2-1、2-2 が経路を負担してデータを伝送することができる。本手順を図 3.3.3-16 に示す。

本方式の問題点は、経路を負担した中継装置 2-1 及び 2-2 の消費電流が増えることであるが、これは電池の余裕度を上げることで対応することが可能である。

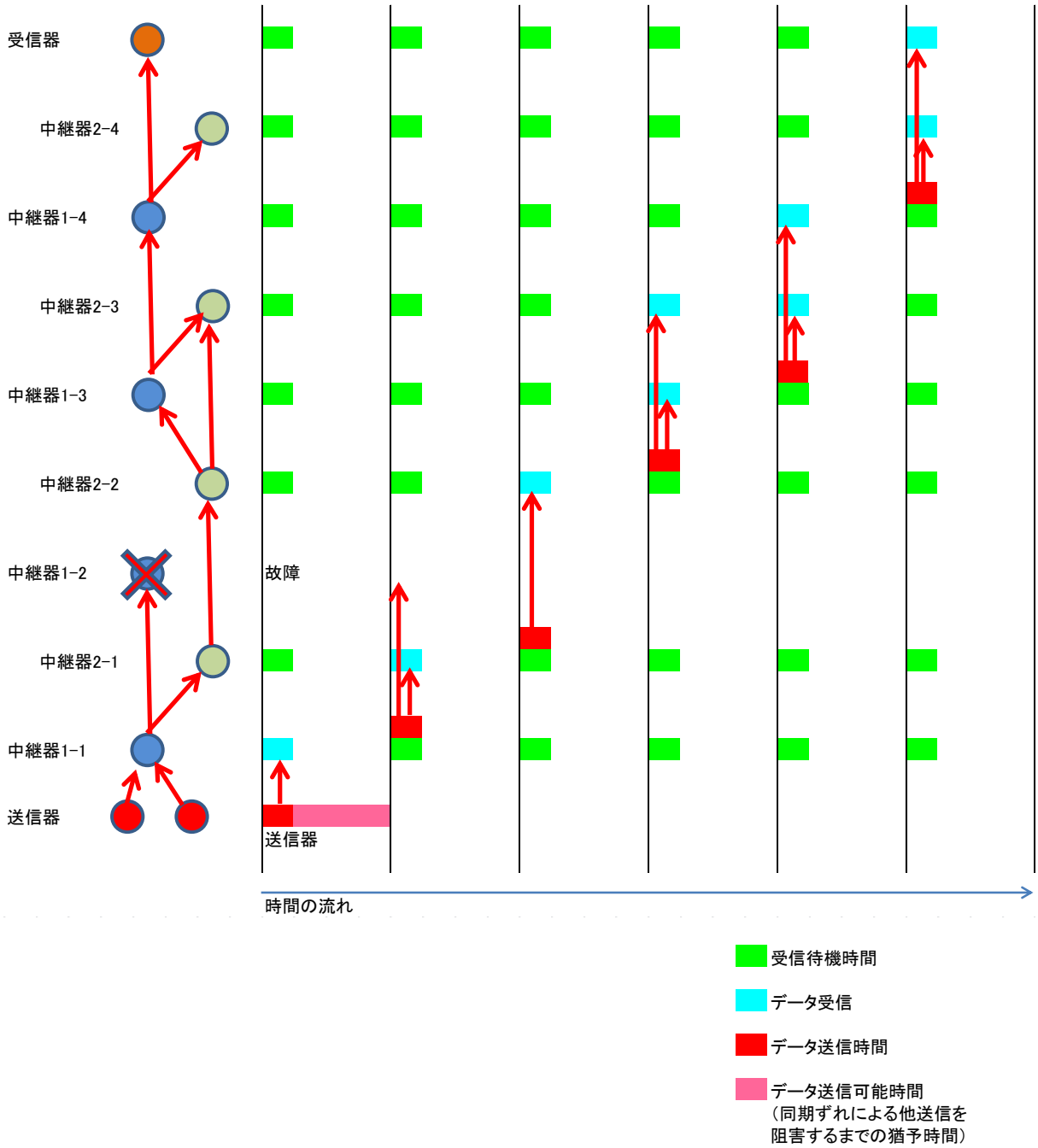



図 3.3.3-16　故障時の手順

(5) ZigBee との比較

ここまで、中継伝送についての具体的な実現方法を述べたが、最後に本中継方法（以下、本方式）の特徴と、一般的な無線ネットワーク、特に低消費電力の無線センサネットワークの一つといわれる ZigBee[7][8]との比較を行い、本中継方法の有意性を検討する。

a. ネットワーク構成機器と役割

表 3.3.3-4 と表 3.3.3-5 に本方式と ZigBee それぞれのネットワーク構成機器とその役割について示す。本方式のネットワークは、受信装置、中継装置、送信装置の 3 種の装置で構成され、ZigBee の場合も同様に、コーディネータ、ルータ、エンドデバイスと呼ばれる 3 種の装置で構成される。

ネットワーク上に 1 台のみ存在するという点で、受信装置とコーディネータ、中継機能を有するという点で、中継装置とルータ、中継機能を持たず間欠動作を行うという点で送信装置とエンドデバイスがそれぞれ対応していると考えてよい。

最も異なる点としては、本中継方法の中継装置には省電力動作が求められるために間欠動作を行うのに対して、ZigBee のルータは間欠動作を行うことが出来ない点である。

表 3.3.3-4　中継装置のネットワーク構成機器

| 構成機器 | 機能 | | | | 説明 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 送信 | 受信 | 中継 | 動作 | |
| 受信装置 | ○ | ○ | × | 常時 | ネットワークの最上位に 1 台のみ存在し、送信装置から直接、あるいは中継装置を介して全ての送信装置の測定データを回収する。常時受信待機状態で、中継機能は持たない。 |
| 中継装置 | ○ | ○ | ○ | 間欠 | 下位の送信装置あるいは中継装置からのデータを受信し、一時的に保管する。全ての送信装置のデータを統合し、上位の中継装置あるいは受信装置に送信する。<br>また、受信装置から任意の送信装置あるいは中継装置への指令通信を一時的に保管し、下位の送信装置あるいは中継装置へ送信する。<br>決められた時刻にのみ起動し、受信待機あるいは送信動作を行い、それ以外はスリープする（間欠動作）。 |
| 送信装置 | ○ | Δ | × | 間欠 | 測定を行いデータを蓄積し、定期的に中継装置に測定データを送信する。<br>受信機能を搭載しない単方向型と、受信機能を搭載する双方向型の 2 種類がある。<br>決められた時刻にのみ起動し、受信待機あるいは送信動作を行い、それ以外はスリープする（間欠動作）。 |

表 3.3.3-5　Zigbee のネットワーク構成機器

| 構成機器 | 機能 | | | | 説明 |
|---|---|---|---|---|---|
| | 送信 | 受信 | 中継 | 動作 | |
| コーディネータ | ○ | ○ | ○ | 常時 | ネットワーク内に 1 台存在し、ネットワークで使用するチャンネルなどを決定し、ネットワークを開始するなどのネットワークの制御を行う。コーディネータがネットワークを開始すると周辺のルータやエンドデバイスがネットワークに参加し、ネットワークが形成されていく。ネットワーク形成後は、ルータと同様の動作を行う。 |
| ルータ | ○ | ○ | ○ | 常時 | 常時受信状態で待機し、エンドデバイスからデータを受信すると最終的な宛先から次の宛先への経路を求めデータを送信する。<br>受信したデータが自分の管理するエンドデバイス宛の場合は一時的にデータを保管し、エンドデバイスから問い合わせが来た時点でエンドデバイスに送信する。 |
| エンドデバイス | ○ | ○ | × | 間欠 | 間欠動作を行い、起動するとルータへ自分宛のデータがあるか問い合わせし、あれば受信する。送信するデータがある場合には、宛先をデータにセットしてルータへ送信する。<br>ネットワーク開始時は近くのコーディネータあるいはルータを探し、ネットワークへの参加要求を行う。 |

b.　ネットワークトポロジ

ネットワークトポロジとは、通信を行う装置同士の物理的あるいは論理的配置及び経路を表すものである。基本的なネットワークトポロジには、図 3.3.3-17 のようなものがある。

図 3.3.3-17 中(a)のリング型は環状に経路を構成したもので、経路の 1 か所で障害が発生しても反対方向の経路で全ての装置との経路を確保することが出来るという特徴がある。同様に(e)メッシュ型も 1 つの装置を複数の経路で接続することによって、障害発生時でも迂回路を経由することによって経路を確保することが出来る。ただし、メッシュ型の場合、通信経路を選択するためのルーティングが複雑になる。

ルーティングが不要なものには、図 3.3.3-17 中(b)のスター型や図 3.3.3-17 中(c)のバス型がある。これらは通信を行う装置同士が必ず 1 対 1 で直接接続されるためにルーテ

ィングの必要がない。ただし、バス型の場合には、1 つの経路に複数の装置が同時に接続されるため、通信の衝突を回避する方法を検討する必要がある。

図 3.3.3-17 中(d)のツリー型は、枝状に階層構造をもっており、規模の大きなネットワークを構築するのに適している。また、下位階層の装置の通信負荷を軽くすることが出来、上位階層の装置ほど通信負荷が重くなる。

本方式によるネットワークトポロジを図 3.3.3-18(a)に示す。図 3.3.3-18(b)には比較のため Zigbee のネットワークトポロジを示す。本方式のネットワークトポロジは、受信装置―中継装置―送信装置のツリー型を基本とし、中継装置間の信頼性を向上させるため、一部にメッシュ型を組み合わせたものといえる。通信経路の数は、地中無線通信を行う回数であり、消費電力と比例することとなるため、一部のみのメッシュ化としている。また、全ての装置が相互通信を行う Zigbee と異なり、本方式の場合、送信装置から受信装置へのデータ伝送が主目的のため、最低限の経路が 2 重化出来ればよいと考えられる。従って、下層の中継装置同士の経路などは省略している。

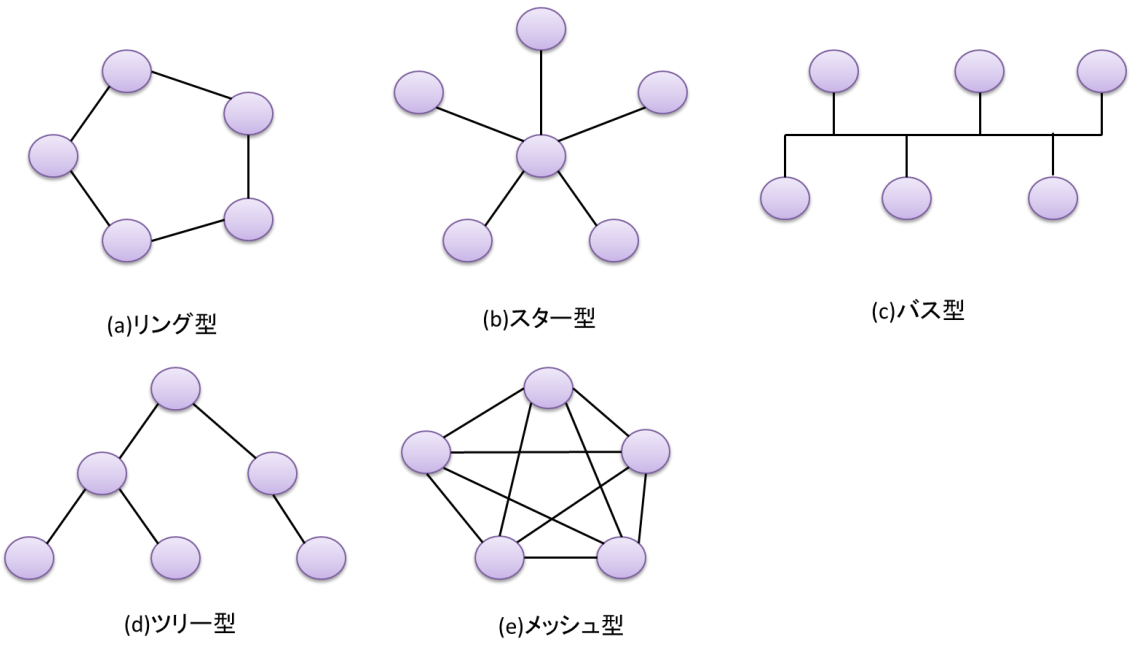



図 3.3.3-17　基本的なネットワークトポロジ

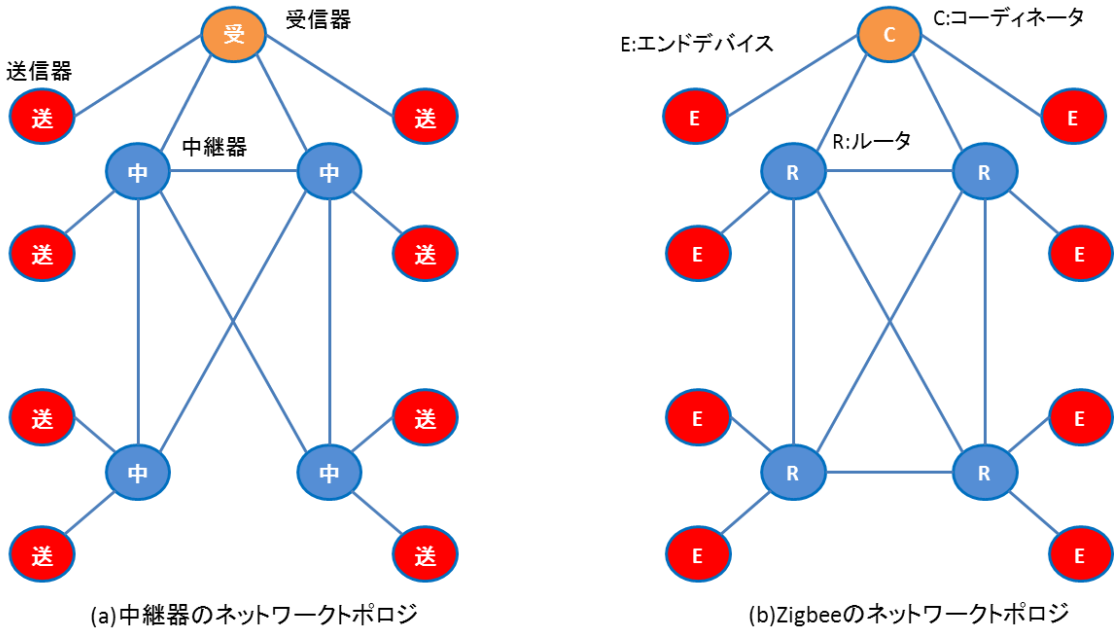



図 3.3.3-18 中継装置と Zigbee ネットワークトポロジの比較

c.データフロー

ネットワークを介した装置間のデータのやり取りをデータフローと呼ぶ。図 3.3.3-19 に本方式と ZigBee のデータフローをそれぞれ示す。

本方式の場合、通信の種類は定期通信と指令通信の 2 種類のみである。前者は、送信装置から 1 台の受信装置に対して測定データを送信するものであり、データの宛先は必ずネットワーク上に 1 台しか存在しない受信装置固定となる。後者は、受信装置から中継装置あるいは送信装置へのコマンドの送信と、その応答という通信であり、これもネットワーク上に 1 台しか存在しない受信装置から発せられる通信である。

一方の ZigBee の場合は、全ての装置から全ての装置に対して通信を行うことが出来るようになっている。これは、様々な通信に柔軟に対応できる反面、中継を行うルータに高度なルーティングなどが必要となる。

本方式は、通信の種類を限定することでルーティングを簡略化し、中継装置の間欠動作を可能とすることで省電力化を実現するものといえる。

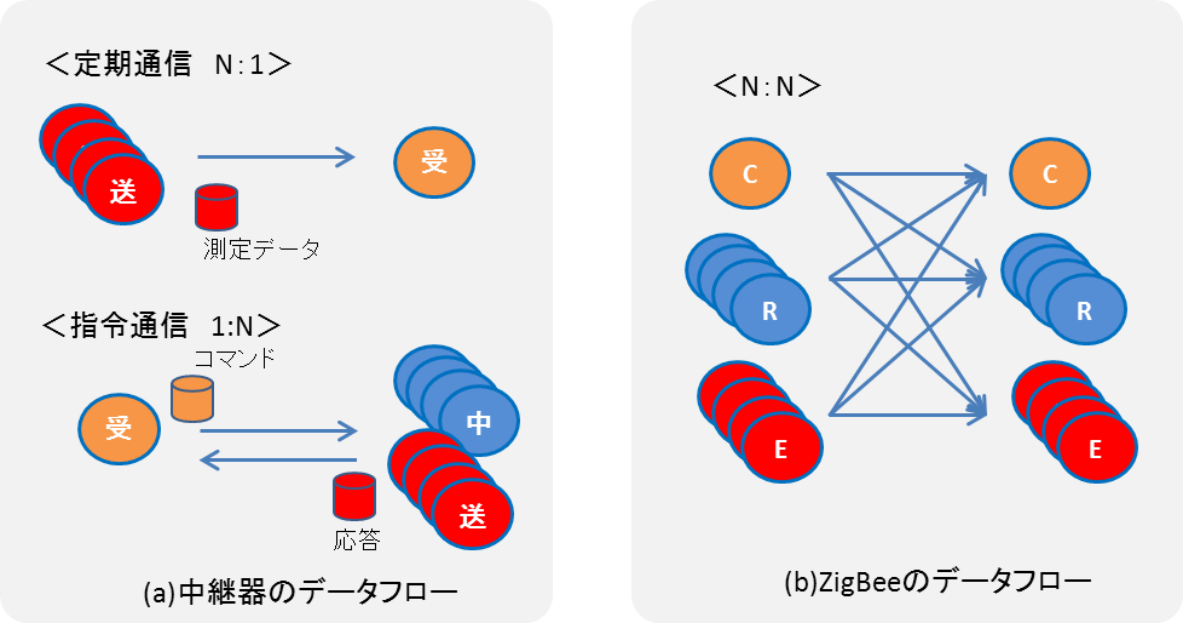



図 3.3.3-19　データフローの比較

d.　ルーティング[10]

ネットワーク上の通信経路を選択して宛先の装置までデータを伝送する方法をルーティングとよぶ。

本方式による中継方法は、本節冒頭から既に述べてきたが、ルーティングという点については、時刻同期による静的ルーティングといえる。後述する ZigBee が自律的にネットワークを再構成し、ルーティングについても最適な経路を選択する点と対比して静的ルーティングとした。また、あらかじめ設定された時刻に通信を行う装置が起動し、起動した装置同士のみ通信を行う、つまり時刻同期によって経路が決定されるものである。図 3.3.3-20 は、(a)~(d)の 4 つの時刻における装置の状態と通信状況について示したものである。灰色の装置はスリープ状態であり、赤枠内の装置が起動している状態である。また、矢印は通信を示す。すなわち、(a)時刻 1 では、送信装置 1 が定期送信時刻で送信を行い、中継装置 1 は中継受信時刻に起動し送信装置 1 のデータを受信する。(b)時刻 2 も同様にして中継装置 1 は送信装置 2 のデータを受信する。(c)時刻 3 では、中継装置 1 が中継送信時刻に起動し送信装置 1 及び 2 のデータを送信する。中継装置 2 及び 3 は同時刻に中継受信のために起動し、中継装置 1 から送信装置 1 及び 2 の測定データを受信する。(d)時刻 4 では、中継装置 2 が中継送信時刻に起動し測定データを送信する。受信装置は同時刻に起動して中継装置 2 から測定データを受信する。また、図中には示していないが、送信装置 1 及び 2 の測定データは、中継装置 3 にも保存されており、中継装置 3 の中継送信によっても受信装置へ送信されることとなり、経路の多重化が実現される。

このようにして時刻同期によって経路が選択される。

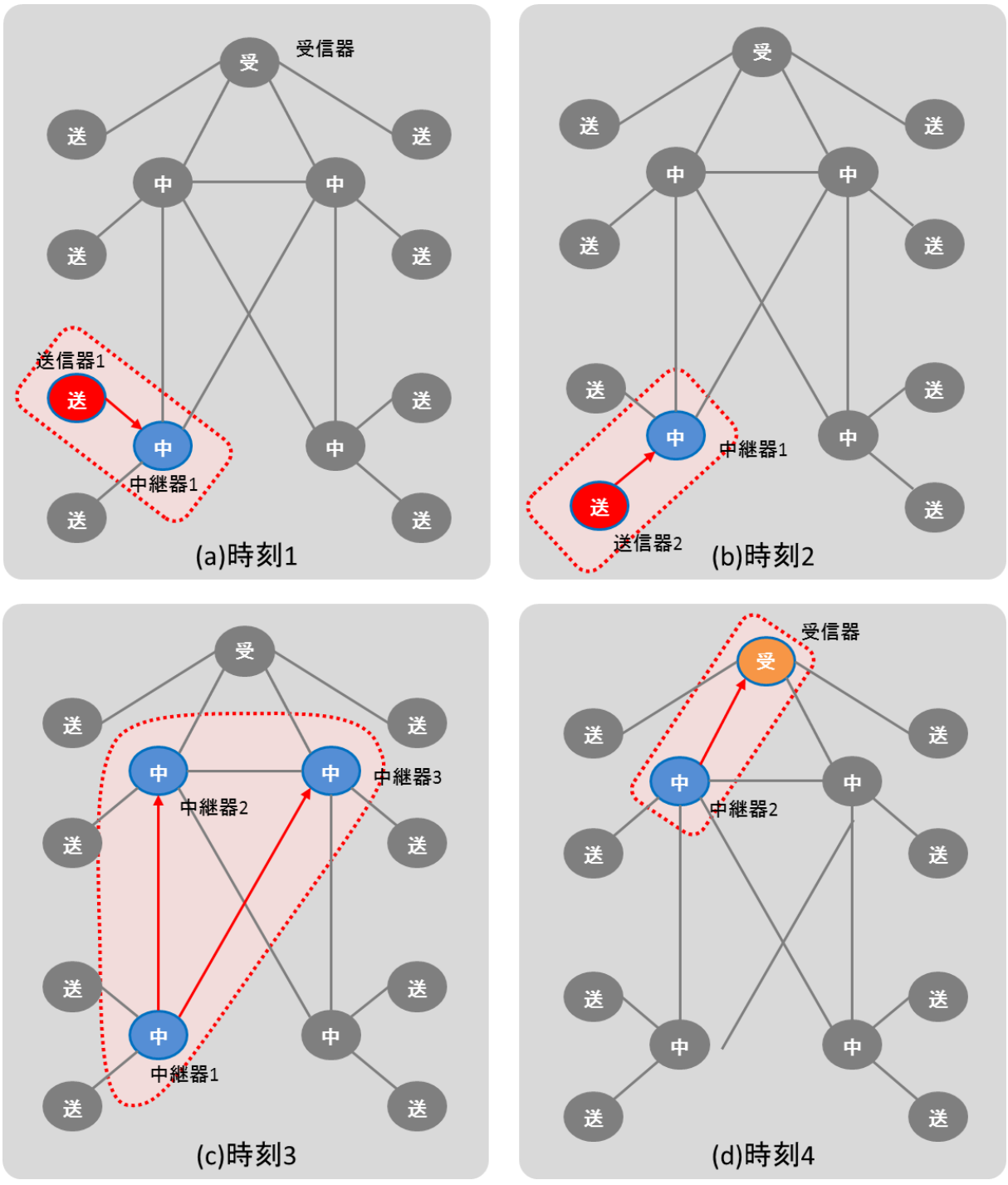



図 3.3.3-20 本方式のルーティング

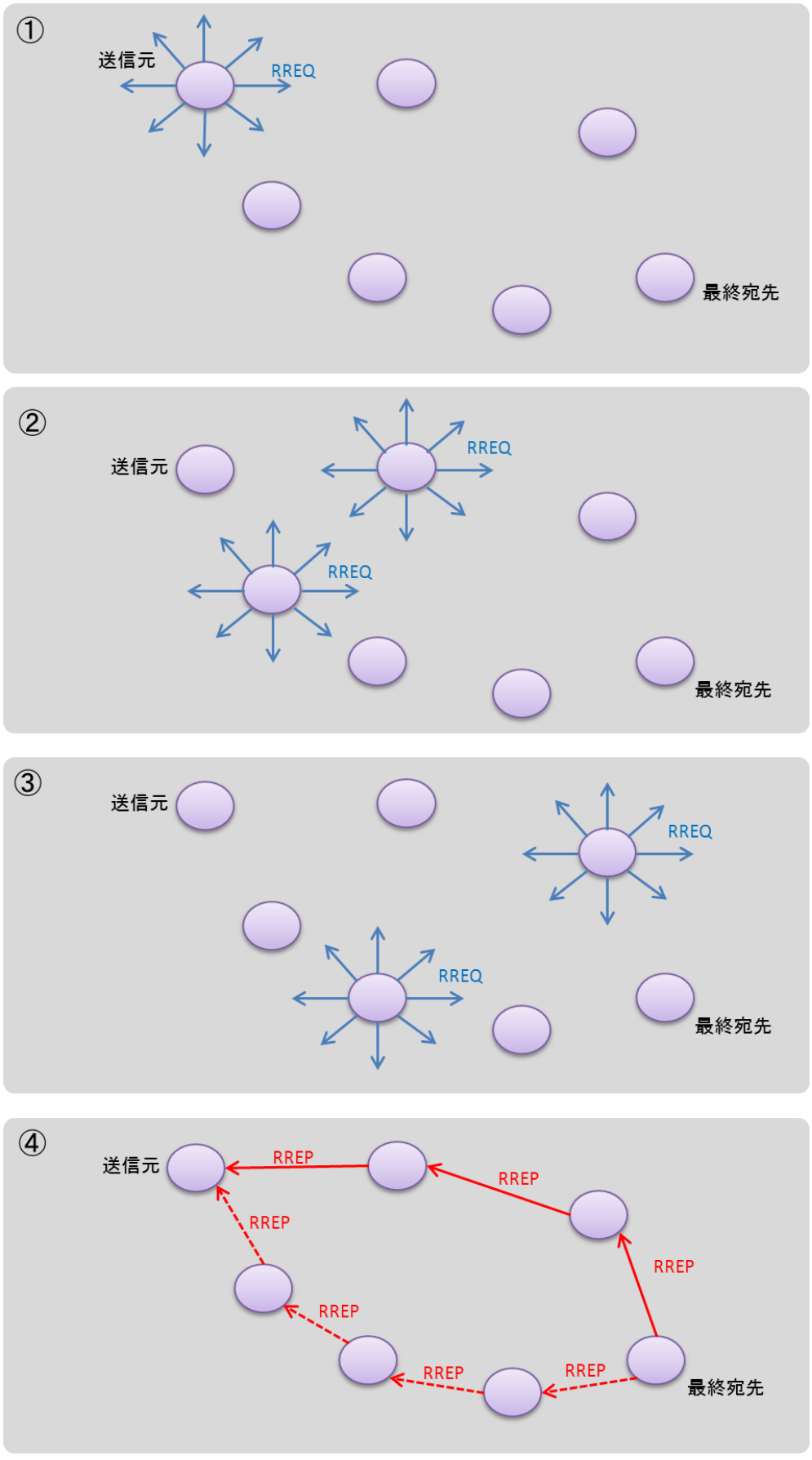



図 3.3.3-21　ZigBee のルート探索

Zi g Bee では、送信元から最終宛先の装置までの経路を選択するために次のようなルートディスカバリと呼ばれる動作を行っている。

まず、送信元の装置は無線の届く範囲にある全てのルータに対してルートリクエストフレーム（RREQ：Route REQuest）を送信する（図 3.3.3-21　ZigBee のルート探索中①)。この RREQ フレームを受信した全ての装置（エンドデバイス以外）は同様に全てのルータに対して RREQ フレームを送信し（同図中②)、最終宛先に RREQ フレームが到達するまで繰り返される（同図中③)。最終宛先の装置は、この RREQ フレームを受信すると、送信してきた装置（エンドデバイス以外）に対して、ルートリプライコマンドフレーム（RREP：Route REPly）を返信する。その RREP フレームを受信した装置は、前に RREQ フレームを送ってきた装置にさかのぼって RREP フレームを送信する。この動作を繰り返し、RREP フレームが送信元まで返信されていく（同図中④)。こうして送信元から最終宛先までのルートが確立される。

また、このとき複数の経路が見つかる場合があるが、最短となる経路及び無線通信品質などが考慮され最適な経路が選択される。これらの動作は数秒程度の時間で行われる。

e.　送受信フレーム

次に通信で送受信されるデータの最小単位であるフレームについて述べる。本方式の地中無線通信と ZigBee の無線通信の特徴を表 3.3.3-6 に示す。

ZigBee は 1 フレームの送信時間が 4 ミリ秒と非常に短い。例えばエンドデバイスが 1 秒間隔で間欠動作をしたとしても、起動してデータを受信する時間は数ミリ秒以下で、スリープ時間の割合は 90%程度となる。従って、エンドデバイスは省電力を実現しながらも、高頻度の通信要求に対しても遅延時間の少ない通信を行うことが出来る。

一方の地中無線の場合は、フレーム送信時間にすると ZigBee の 1000 倍要するうえ、フレームサイズも小さいことから、前述の ZigBee のような通信を実現することは難しい。

表 3.3.3-6　地中無線と ZigBee の送受信フレーム

| | 地中無線 | ZigBee |
|---|---|---|
| 周波数帯 | 10KHz 以下 | 2.4GHz 帯 |
| 通信速度 | 100bps 以下 | 250Kbps |
| フレームサイズ | 37byte | 127byte |
| フレーム送信時間 | 約 4 秒 | 約 4 ミリ秒 |
| 通信頻度 | 週 1 回、月 1 回など | リアルタイム |

以上、本方式と ZigBee の特徴について述べたが、ZigBee はネットワークの柔軟性が高く経路変更などにもリアルタイムで対応できる利点があるが、省電力化を期待できるのは間欠動作が可能なエンドデバイスのみであって、中継機能を有するルータなどは給電可能な状況で使用されるべきである。一方の本方式は、1 日に数回程度の測定頻度のデータ回収を目的として、

低頻度で通信経路もある程度固定可能な環境に特化し、中継装置を間欠動作とすることで省電力化を可能とするものといえる。

(6)異常復旧シークエンス検討

中継動作を考えるうえで発生すると考えられる異常には、ソフト的異常[10]とハード的異常の 2 種類がある。それぞれの要素を以下に示す。

ソフト的異常
① 受信機能の制御用 CPU のハングアップ
② 時計（RTC：リアルタイムクロック）の異常
③ 送信機能の制御用 CPU のハングアップ
④ 経路変更等の通信条件の変更機能の設定ミス
⑤ 各種設定情報を書き込んでいるメモリの読み取り異常

ハード的異常
① 電子部品の故障
② 電池の消耗
③ 耐圧筐体の損傷

これらのうち、ソフト的異常については、大きく分けると動作そのものが異常になる①②③と、動作条件が異常になる④⑤の二つに分類できる。動作そのものが異常になる現象を回復する方法としては、一般的に WDT（ウォッチドックタイマ）が使用される。これは、CPU 等から一定間隔で信号を WDT に出力し、WDT はその信号が途絶えたら対象の機器をリセットすることで異常動作からの回復を促すものである。WDT には様々な方法がある。たとえば、同じ CPU 内でソフト的に信号を受信して異常を監視するソフトウェア WDT や、別に独立した IC で監視するハードウェア WDT などである。重要なことは、可能な限り独立性を高くし、監視対象と違うアルゴリズムで動作することである。そこで、中継装置では以下のような WDT を検討する。

a. 監視対象である CPU や RTC と別の基板に構築する。
b. CPU や MPU といったソフトウェアが動作する部品を使わずにロジック IC 等のハードウェアで構築する。
c. タイマカウントのための水晶発振回路も独立させる。
d. WDT 自体を 2 重化し、互いを監視させる。

図 3.3.3-22 にこのような WDT を用いた監視の概念図を示す。

メモリの読み取り異常等による動作条件が異常になる現象を回復するためには、各機能が情報に従い動作しようとした際に、ありえない、もしくは取りえない情報だった場合にデフォルト情報ですべてを書き換える方法を検討する。たとえば、次回の通信が明日の予定だったのに、

昨年という情報が入力された場合、次回起動時刻を設定させることができず動作ができない。そのようなありえない情報が見つかった場合は、他の情報も信頼性がないものとして、全く別のメモリ領域に保存しておいたデフォルト情報に書き換えて動作させる。

ハード的異常は、ハードウェアの冗長化でしか防ぐことができない。特に②③は(4) 中継動作が複数段になった場合のシークエンス検討で述べたような経路の冗長化によって異常復旧を図ることができる。①の場合は、内部回路のみ 2 重化する方法も考えられるが、②③と同様に経路の冗長化によって対応することで、装置の内部構造の複雑さを回避することができる。

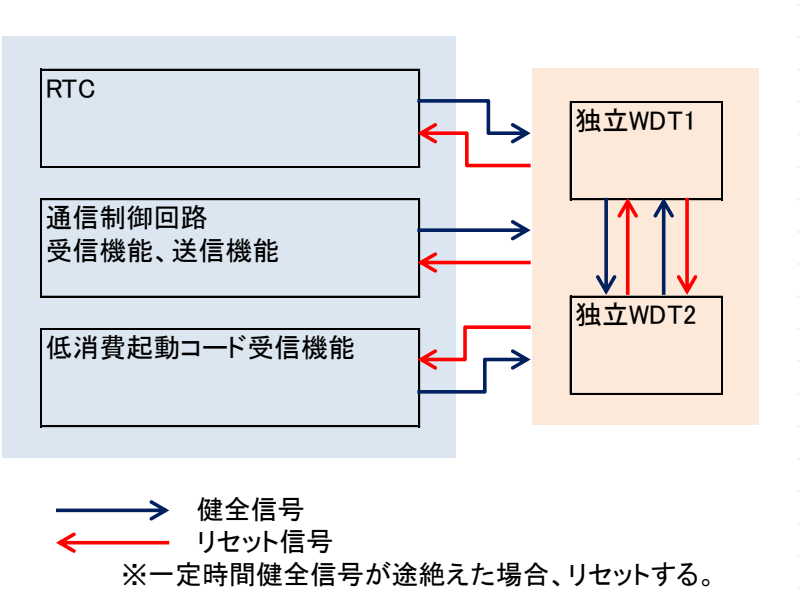



図 3.3.3-22　WDT 監視状況の概念図

また、上記いずれの方法によっても動作が正常化しない場合に、最終手段として、電源監視タイマが用意される。これは電池の消耗を防ぐため強制的に電源を遮断しスリープ状態へ移行させるものである。

現状の装置では、電源監視タイマは 30 分としており、スリープ状態から CPU が起動した時点からカウントを開始し、30 分間でスリープ状態に移行しない場合には電源を強制的に遮断する。この場合、途中の処理については諦め、次の起動時刻に復旧処理を行う。

### (7)　RTC（時計、リアルタイムクロック）高精度化のための回路変更検討

(3)で述べたように、中継装置の動作においては RTC による時間管理及びその精度が極めて重要となる。

RTC は、図 3.3.3-23 に示すように、水晶振動子や水晶発振器のような外部クロック源から現在時刻をカウントしているが、水晶の発振周波数偏差及び温度変化による発振周波数のずれが精度悪化の要因となる。例えば、発振周波数偏差が±20ppm 程度の水晶振動子の場合、1 か月で約 1 分程度の時計ずれが生じ、さらに温度変化による誤差を考慮すれば数分のずれが生じ

ると考えらる。

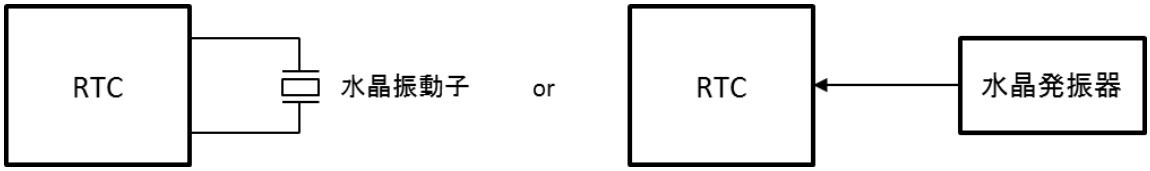



図 3.3.3-23　RTC のクロック源

上記の誤差を解消し、高精度化を図るためには次の２つの方法が考えられる。

a.　水晶の周波数誤差を RTC で補正する

RTC には、時計誤差補正回路を搭載したものがあり、これは外部クロックのカウント数をあらかじめ設定された補正値で補正するものである。

外部クロックの発振周波数偏差については、製造時に発振周波数を実測し、補正値を求め、RTC に補正値を設定する。温度依存による発振周波数のずれについては、動作時に周囲温度を計測し、発信周波数の温度特性から補正値を求め、RTC の補正値を変更する。

上記により、時計精度の向上はある程度は期待できるが、後者の温度依存による補正については、RTC 単体では出来ず、CPU が動作したときのみ可能となるため、温度変化が激しい環境では効果は少ない。また、温度計測制度にも依存することとなる。

b.　高精度水晶発振器を採用する

水晶発振器は、水晶振動子と発振回路及び補償回路を１つのパッケージ化したものである。水晶振動子よりも発振周波数精度及び安定度は向上するが、消費電流が大きく、回路サイズも大きいのが問題である。

水晶発振器は、大きくは以下の 3 つのタイプに分けられる。

① SPXO（Simple Packaged Crystal Oscillator）：パッケージ水晶発振器
温度制御や温度補償は行っておらず周波数温度特性は水晶振動子に依存する。高精度は要求されない一般的な用途で用いられる。

② TCXO（Temperature Compensated Crystal Oscillator）：温度補償水晶発振器
温度補償回路を付加して、周囲温度の変化による周波数変化が少なくなるようにしたもの。

③ OCXO（Oven Controlled Crystal Oscillator）：恒温槽付き水晶発振器
恒温槽によって水晶振動子の温度を一定に保ち、温度変化による周波数変化を抑えたもの。

上記水晶発振器の周波数安定性は図 3.3.3-24 に示すように、最も精度の高いのが OCXO で ppb（$\times 10^{-9}$）レベルの高精度が求められる分野で用いられている。

また最近では、携帯電話等に搭載することを目的とした、小型・高安定・低消費電力の TCXO が盛んに開発されている。しかし、温度補償回路を搭載した TCXO では、消費電流は数ミリ A 程度である。スリープ時に数マイクロ A の消費電流に抑えたい中継装置で使用するには、さらなる低消費電力化が求められる。

以上のことから、地中無線中継装置には b.の高精度水晶発振器のうち、数マイクロ A 程度の消費電流のものを調査して使用する計画である。しかしながら、そのような低消費電流の水晶発振器が見つからなかった場合には、a.の水晶の周波数誤差を RTC で補正する方法を採用する予定である。この場合、送信装置は埋設環境下に置かれるため、温度の変化は緩慢（測定間隔に対して温度変化幅が小さい）と考えらえることから、ある程度補正の効果は得られると考える。しかしながら、精度よく温度を測定しなければいけなくなるため、それに要する消費電流量は別途考慮する必要がある。

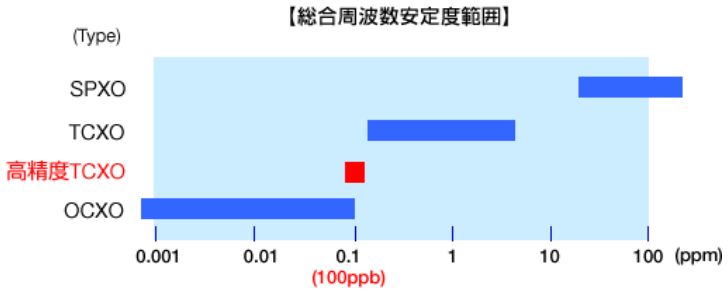



図 3.3.3-24　水晶発振器の周波数安定性[11]

(8)　中継装置の全体概念設計

(1)～(7)における各課題の検討結果を踏まえ、中継装置の全体構成を検討・設計した。

1)　ハードウェア構成

図 3.3.3-25 に中継装置の全体構成を示す。中継装置は大きく分けて、受信アンテナ、送信アンテナ、制御装置、電池で構成される。制御装置内では、通信の制御を主に司り受信機能や送信機能、RTC 等を搭載した回路 A と、低消費起動コード受信機能を搭載した回路 B、異常復旧のための WDT を搭載した回路 C、送信アンテナを高出力で動作させるための高出力アンプを搭載した回路 D、各回路を動作させるための電源回路から構成される。そのほかには、送信アンテナ、電源（電池）から構成される。

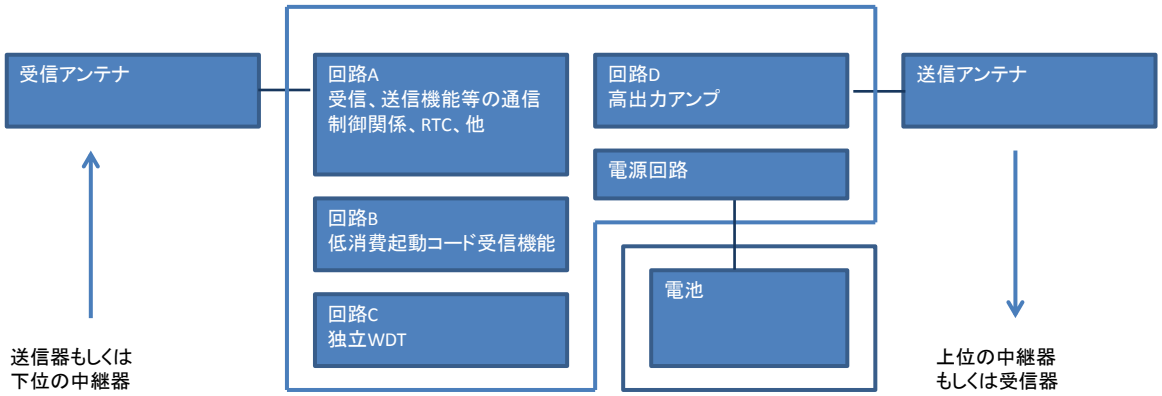



図 3.3.3-25　中継装置の構成

2)　動作概要

次に中継装置の動作を示す。図 3.3.3-26 は中継装置の動作シークエンスを示したものである。基本的には RTC が時刻の監視を行い、各機能を制御している。通常はスリープ状態にあり、定期送信時刻になると、送信機能の電源を ON にしてデータを準備し、上位の中継装置に向けてデータを伝送する。また、受信待機時刻になると、低消費起動コード受信機能の電源を ON にし、起動コード受信の準備に入る。もし、起動コードを受信しなければ、再びスリープする。起動コードが送られてきた場合、受信機能の電源を ON にして指令を受信する。受信した指令がさらに下位の中継に対するものであれば、下位の中継装置に向けて指令を送信する。本中継装置に対する指令だった場合、指令内容に応じて動作を行い、その結果を上位の中継装置に送信する。

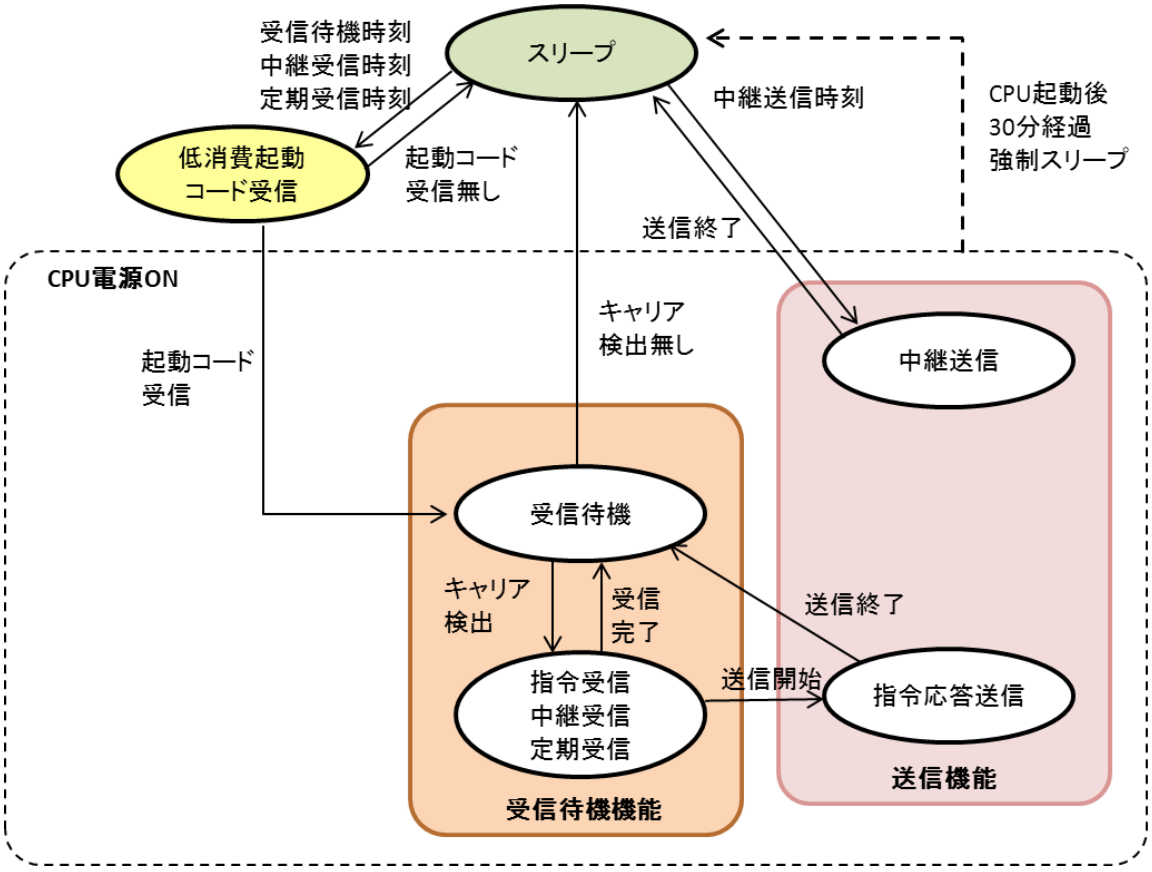



図 3.3.3-26　中継装置の動作シークエンス

3)　CPU プログラム動作

次に CPU が起動してからスリープするまでのフローチャートを

図 3.3.3-27 に示す。これは前述の状態遷移図中の破線部内の動作である。CPU を起動させるための起動要因は、RTC 及び低消費起動コード受信回路の 2 種類である。CPU はいずれかの起動要因によって起動させられた直後、次回起動時刻を RTC へ設定する。これは動作中に誤動作が発生した場合でも、次回、確実に起動できるようにするためである。その後、起動要因を判定し、RTC からの中継送信時刻のための起動の場合には、中継送信処理を実行する。低消費起動コード受信機能からの起動コード受信による起動の場合には、受信待機機能を ON にし、キャリアを待機する。キャリアを検出できない場合には通信不可と判断し直ちにスリープする。キャリアを検出できた場合には、信号波形処理を実行し、受信したフレームに応じて、指令応答処理、中継受信処理及び定期受信処理を行う。

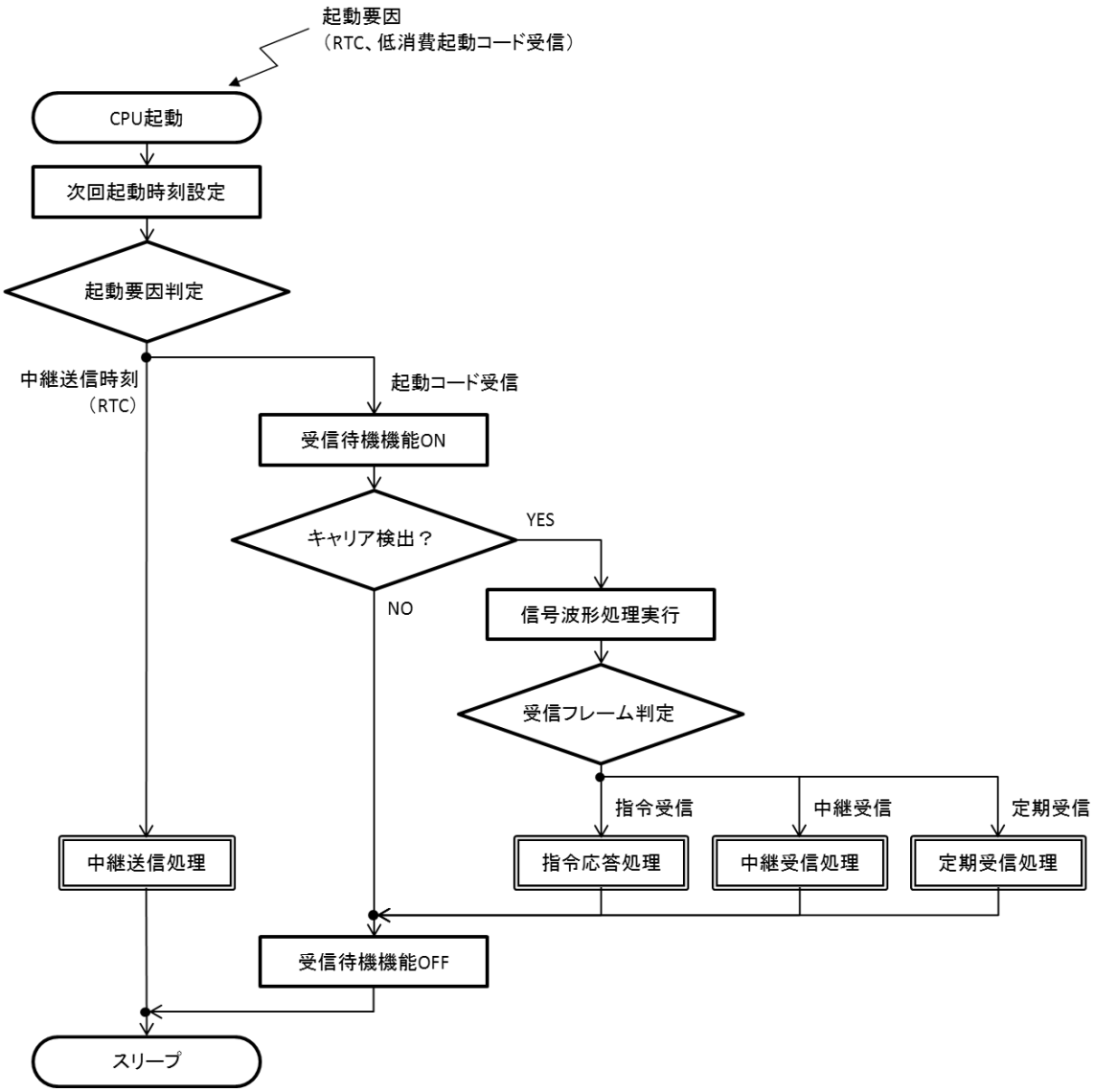



図 3.3.3-27 CPU 動作フローチャート

①中継送信処理

中継送信処理では、一時的に内部メモリに保存された測定データ及び下位中継装置からの受信データを読み出し、送信フレームを生成し、上位の中継装置あるいは受信装置に送信する処理を行う。

②指令応答処理

指令応答処理は、受信装置からの指令通信フレームを受信したときの処理である。自身への指令通信フレームであれば、指令に対する処理を実行し、結果を応答するが、さらに下位中継装置への指令フレームの場合には、指令フレームを内部メモリに保存する。中継装置に対する主な指令通信フレームとその動作について表 3.3.3-7　中継装置への指令通信種別に示す。

表 3.3.3-7　中継装置への指令通信種別

| 種別 | 内容 |
|---|---|
| 時計設定 | 中継装置の内部時計を受信装置から設定する。中継装置は内部時計が変更されると、次回起動時刻を再計算する。 |
| 設定読み出し | 中継装置の設定情報を受信装置に送信する。設定情報はデータサイズが大きいため通信時間が長く電力を多く消費する。 |
| 測定データ読み出し | 中継装置に保存されている測定データを読み出す。 |
| エラー履歴読み出し | 中継装置で発生したエラー情報を受信装置に読み出す。 |

③中継受信処理

中継受信処理は、下位中継装置からの受信処理である。これには、下位の中継装置が回収した測定データの受信の他に、下位中継装置が受信装置からの指令フレームに対する応答の 2 種類がある。前者の場合には後述する④定期受信処理と同様に処理し、後者の場合には、内部メモリに保存し自身の中継送信時刻にさらに上位中継装置へ送信する。

④定期受信処理

定期受信処理は、自身の直接管理する送信装置からの定期送信を受信する処理である。定期受信処理によって受信した測定データは、送信装置ごとに内部メモリに保存する。

4)　動作設定

中継装置には、通信を行う送信装置や中継装置の送信時刻を設定する必要がある。例えば図 3.3.3-28 のように、中継装置 1 が 2 台の送信装置（送信装置 1、送信装置 2）と 2 台の中継装置（中継装置 2、中継装置 3）を管理する場合には、中継装置 2 及び 3 の中継送信時刻と送信装置 1、2、3 の定期送信時刻を設定しておく必要がある。これらの設定時刻をもとに中継装置 1 は全ての装置との通信時刻を計算し、現在時刻に最も近い時刻を次回起動時刻として RTC にセットしスリープする。表 3.3.3-8　次回通信時刻（1/5 12:01 現在）では、中継装置 2 との通信時刻 1/6 13:02 が近いため、この時刻を RTC にセットし、その時刻までスリープする。

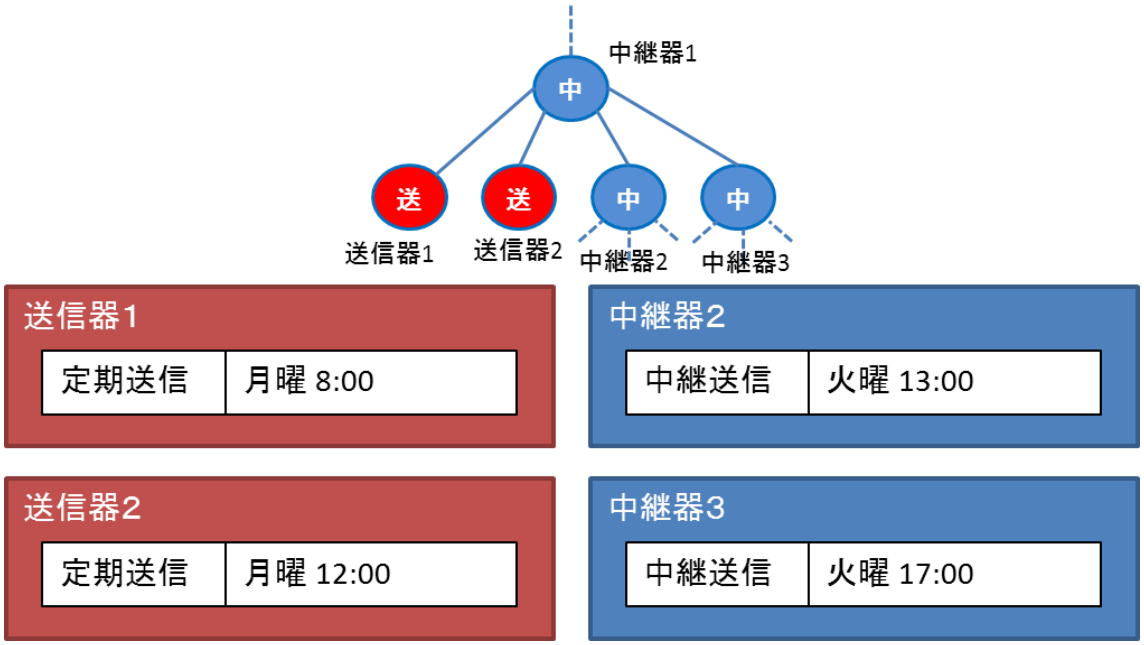



図 3.3.3-28 動作設定

表 3.3.3-8 次回通信時刻（1/5 12:01 現在）

| 装置 | 設定時刻 | ずれ | 次回通信時刻 | 起動順 |
|---|---|---|---|---|
| ＜定期受信＞ | | | | |
| 送信装置 1 | 月曜 8:00 | -3 | 1/12 7:57 | 4 |
| 送信装置 2 | 月曜 12:00 | -2 | 1/12 11:58 | 5 |
| ＜中継受信＞ | | | | |
| 中継装置 2 | 火曜 13:00 | +2 | 1/6 13:02 | 1 |
| 中継装置 3 | 火曜 17:00 | 0 | 1/6 17:00 | 2 |
| ＜中継送信＞ | | | | |
| 中継装置 1 | 水曜 10:00 | 0 | 1/7 10:00 | 3 |

以上の概念設計をもとに、今後、これらを実現する回路とプログラムの詳細設計と製作を実施する必要がある。

### 3.3.4　電磁波による電力供給に関する検討

地層処分において、地中無線通信技術を適用した無線モニタリング機器は、有線モニタリング機器と比較し、配線によるバリア機能への影響を低減することが可能である。一方で、内蔵する電源の容量や電力の自己消費などによる利用期間の制限などの課題がある。そのため、地中モニタリング技術の適用性の拡大のためには、無線モニタリング機器の電源の利用期間の長期化に関する検討が必要である。

本項では地中無線モニタリング装置の利用可能期間を長期化することを目的とした電源に関する調査のうち、電磁波による電力供給方式に関する検討について述べる。本検討は、昨年度実施した文献調査に基づき、有望な技術として電磁波による電力供給方式と放射性同位体熱電気変換器を抽出したことに基づいている。なお、放射性同位体熱電気変換器については次項にて述べる。

(1)　検討の基本的考え方

図 3.3.4-1に地中無線通信技術と無線電力伝送技術を人工バリア（緩衝材）のモニタリングに適用した場合の概念図を示す。本図ではセンサと一体となった無線モニタリング機器へ無線で電力を供給して、その電力を利用して無線モニタリング機器が継続的に動作できる状況を示している。

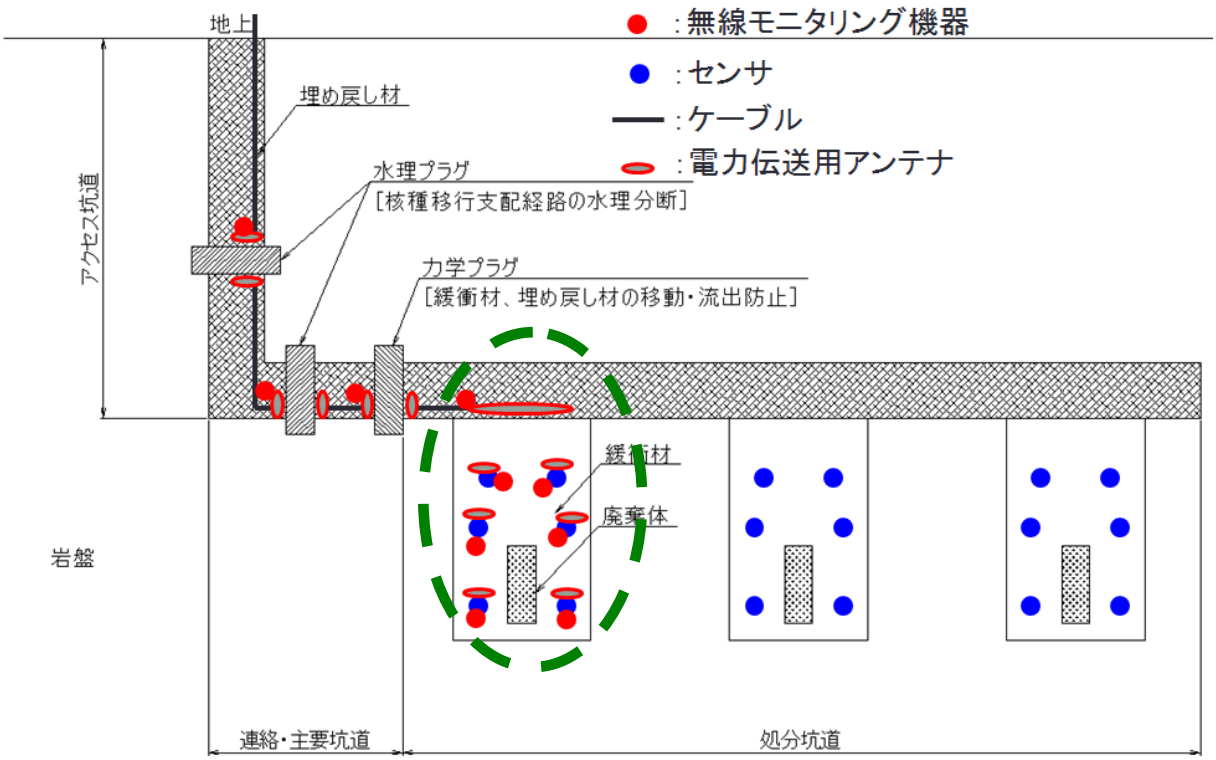



図 3.3.4-1　電磁波による電力供給を行う地中無線装置を用いた人工バリアのモニタリング

図 3.3.4-1ではプラグ間においては、電力伝送用アンテナが1:1の状況で電力を送っているのに対して、廃棄体周辺のセンサへはアンテナが1:多の状況で電力を送ることを想定している。

今回の検討では図 3.3.4-1の緑の点線で囲った部分を対象として、電力伝送用アンテナの送受信装置が1:1の状況を考えて検討を行った。検討は具体的には下記の5つのステップを行った。

①無線電力伝送方式の検討
②送受信コイルの設計製作
③周波数の検討
④給電試験の実施
⑤試験結果の評価

(2) 無線電力伝送方式の検討

無線モニタリング装置の電源として電磁界共振結合方式による無線電力伝送技術の適用性について検討を行った。ここで、電磁界共振結合方式とは、送受電コイルが共振状態にあり、電界もしくは磁界によって送受信コイルが結合していることを意味している[12]。つまり、電磁界共振結合方式は、磁界を利用する磁界共振結合方式と、電界を利用する電界共振結合方式の2つが考えられる。しかし、この両方式においてどちらが地層処分モニタリングを行う上で適用性が高いかの検討は行われていない。そこで上記2つの方式において、無線モニタリング装置の電源としての適用性を既往文献などから検討し、適用性の高い磁界共振結合の方式を選定した。

1) 電磁界共振結合

磁界共振結合方式は、図 3.3.4-1に示すような電界共振結合方式と図 3.3.4-2に示すような磁界共振結合方式が考えられる。図 3.3.4-1の電界共振結合方式は、電界を用いてエネルギーを伝搬する手法であり、送電器と受電器には、平板やそれに代わるものが利用される。図3.3.4-2の磁界共振結合方式は、磁界を用いてエネルギーを伝搬する手法である。送電器と受電器には、コイルやそれに代わるものが利用される。送受電器は、電気的に共振状態になるように設計されるため、共振器と示されることもある。また、電磁界共振結合方式の無線電力伝送技術は2007年に発表された技術である[13]。

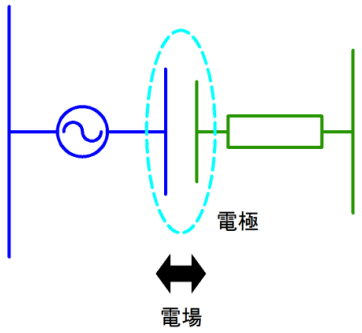



図 3.3.4-1　電界共振結合のイメージ図

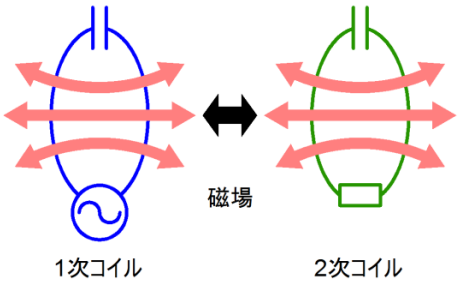



図 3.3.4-2　磁界共振結合のイメージ図

2)　送受電器間の媒体（ベントナイト）を考慮した電磁界共振結合の検討

無線モニタリング装置は図 3.3.4-1のように緩衝材や埋戻材に埋設しての利用を想定している。また、電磁界共振結合方式による無線電力伝送の受電器は無線モニタリング装置の送信装置に電源を供給するために、無線モニタリング装置とセットになる必要がある。そのため、磁界共振結合方式の無線電力伝送の送受電器の媒体は、緩衝材や埋戻材となる。そこで、緩衝材や埋戻材を送受電器の媒体にしたときに、電界共振結合方式と磁界共振結合方式での送電時の優位性について調査を行った。

長井ら[14]は、含水率21%のベントナイトの複素誘電率を測定した結果、虚部が大きいことを示している。これは、ベントナイトを媒体として電界を発生すると、損失が大きく発生することを意味している。しかし、ベントナイトの複素透磁率を測定すると、虚部はほとんどなく、ベントナイトを媒体として磁界を発生する場合損失がほとんどないことを示している。図 3.3.4-3に複素誘電率を、図 3.3.4-4に複素透磁率を示す。上記内容をまとめ、表 3.3.4-1に示す。この文献から、損失がない磁界を利用する磁界共振結合方式が、ベントナイトを送電器間の媒体とした場合の無線電力伝送には優位であると考えられる。このことから、無線モニタリング装置の電源としては、磁界共振結合の方が適していると判断した。以後の検討は磁界共振結合方式を考えることとする。

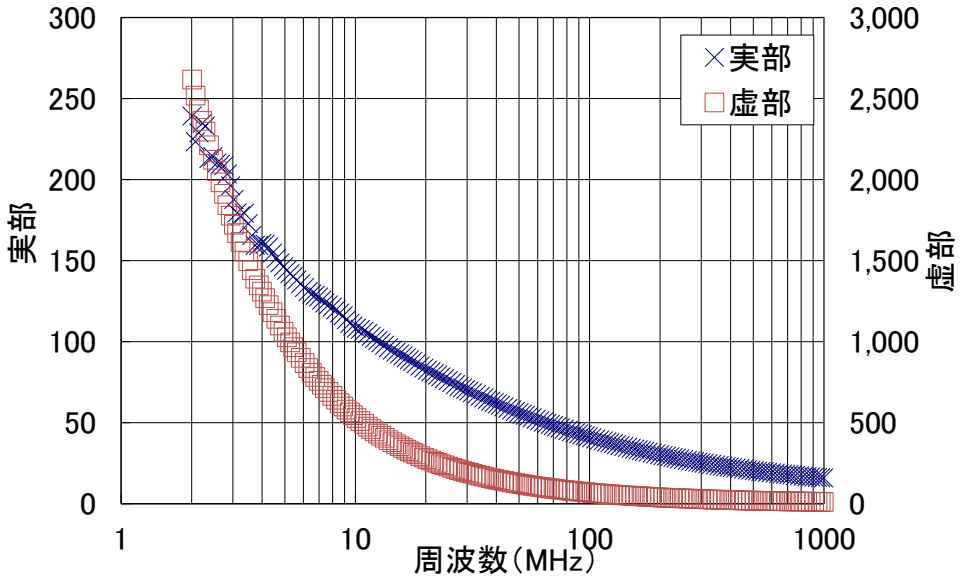



図 3.3.4-3　複素誘電率の実部と虚部

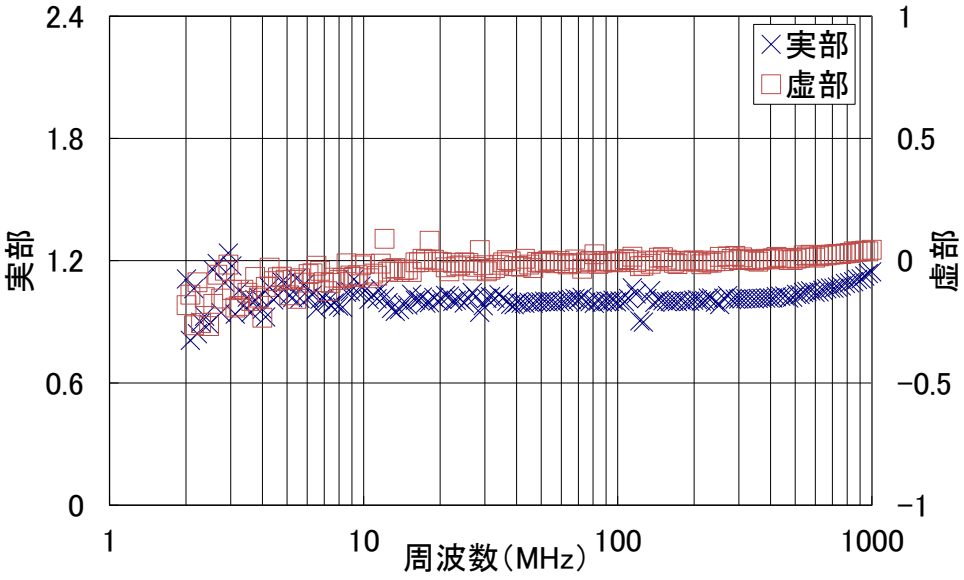



図 3.3.4-4　複素透磁率の実部と虚部

表 3.3.4-1　電磁界共振結合の手法

| 方式 | 電界共振結合 | 磁界共振結合 |
|---|---|---|
| 電力を送る効率などに関わるパラメータ | 複素誘電率 | 複素透磁率 |
| ベントナイトでの評価 | 電界はエネルギー損失が大きい | 磁界はエネルギー損失がほぼ 0 であり、優位な手法である |

(3)　送受信コイルの設計製作

1) 送受電コイルのサイズ設定

磁界共振結合の無線電力伝送を行うためには、送電コイルと受電コイルを作成する必要がある。今回の検討では放射性廃棄物処分のモニタリングに特化した送電コイルと受電コイルのサイズを設定した。

受電コイル

受電コイルは緩衝材にとっては小さければ小さいほどよいが、今回は既存の無線モニタリング機器のサイズと同じものを考えた。既存の無線モニタリング機器のサイズとして、平成23年に開発したボーリング孔対応型受信アンテナ、水分センサ付き小型送信機の2つを考慮した。図 3.3.4-5に平成23年に開発したボーリング孔対応型受信アンテナを、図 3.3.4-6に水分センサ付き小型送信機を示す。

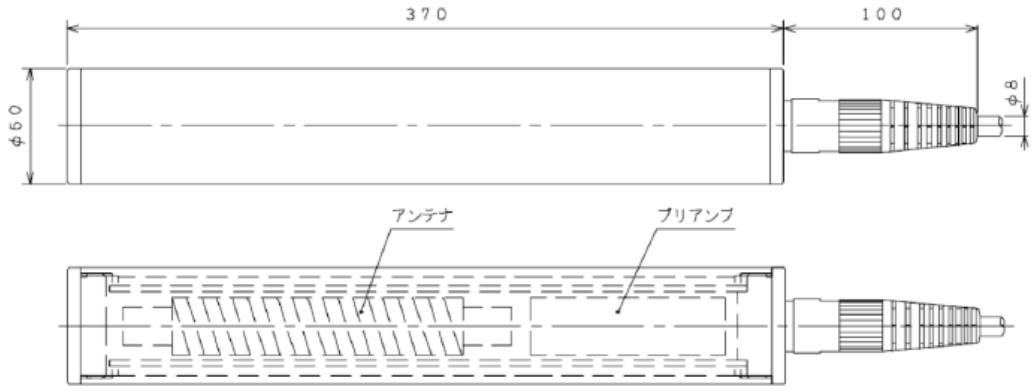



図 3.3.4-5　平成 23 年に開発されたボーリング孔対応型受信アンテナ

（単位：mm）

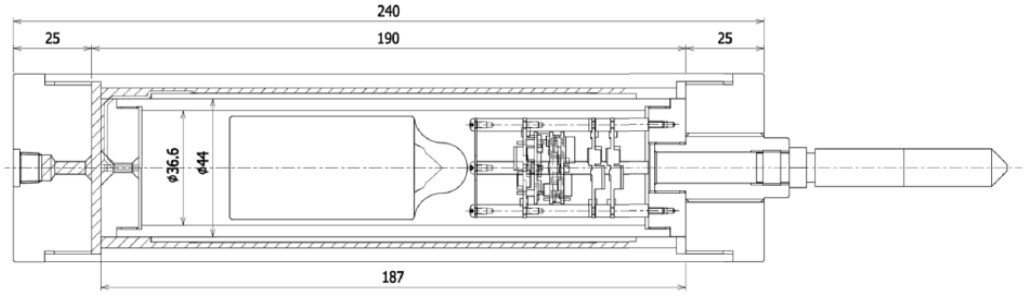



図 3.3.4-6　水分センサ付き小型送信機

図 3.3.4-5と図 3.3.4-6の情報をまとめ下記の(a)と(b)に示す。

(a) 平成23年に開発されたボーリング孔対応型受信アンテナ：Φ6cm×長さ37cm

(b) 水分センサ付き小型送信機：Φ6cm×長さ24cm

今回の検討では、適用性確認の試験であることを考慮し、(a)のサイズ（Φ6cm×長さ37cm）を設定した。

送電コイル

送電コイルの大きさについては下記の（c)と(d)を考慮したコイルを設定した（2.2mの直径と高さ0.4m）とした。

(c) 送電側のアンテナの大きさはHLW第2次取りまとめ[15]で示された緩衝材の直径。図 3.3.4-7にHLW第2次取りまとめの大きさを示す（緩衝材の大きさ：2220mm、高さ：4130mm）。

(d) 既存の無線モニタリング機器である中継用アンテナ（3m×3m×0.4m）。図 3.3.4-8に中継用アンテナを示す。

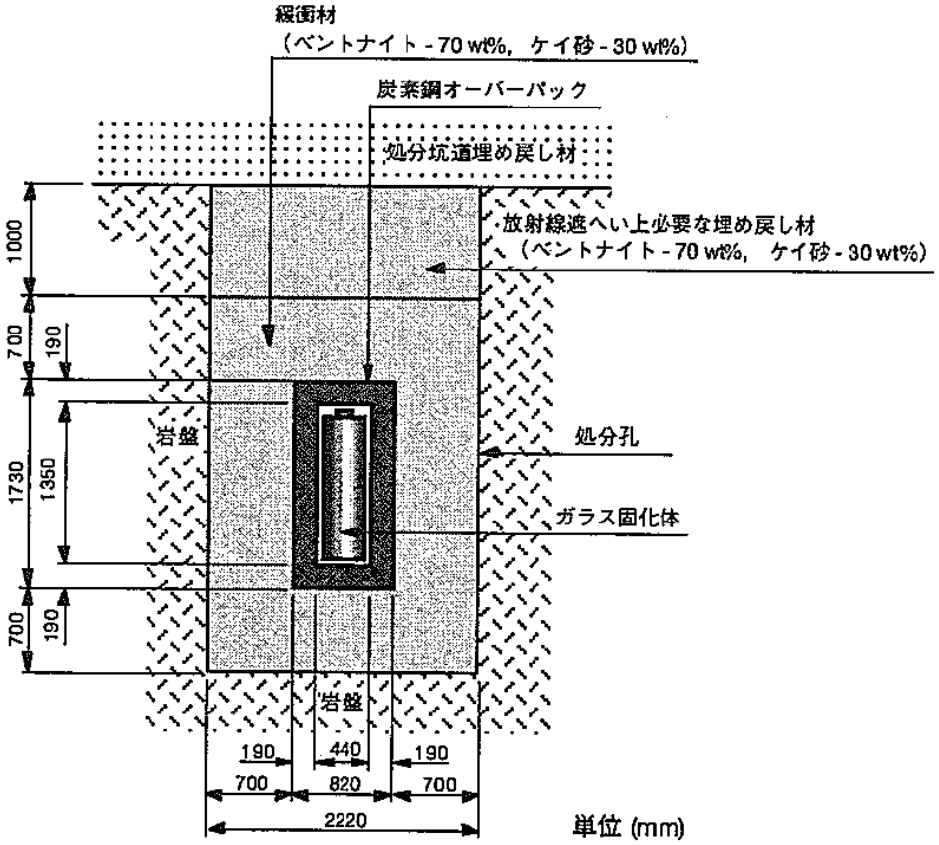



図 3.3.4-7　HLW 第 2 次取りまとめ[15]における緩衝材の大きさ

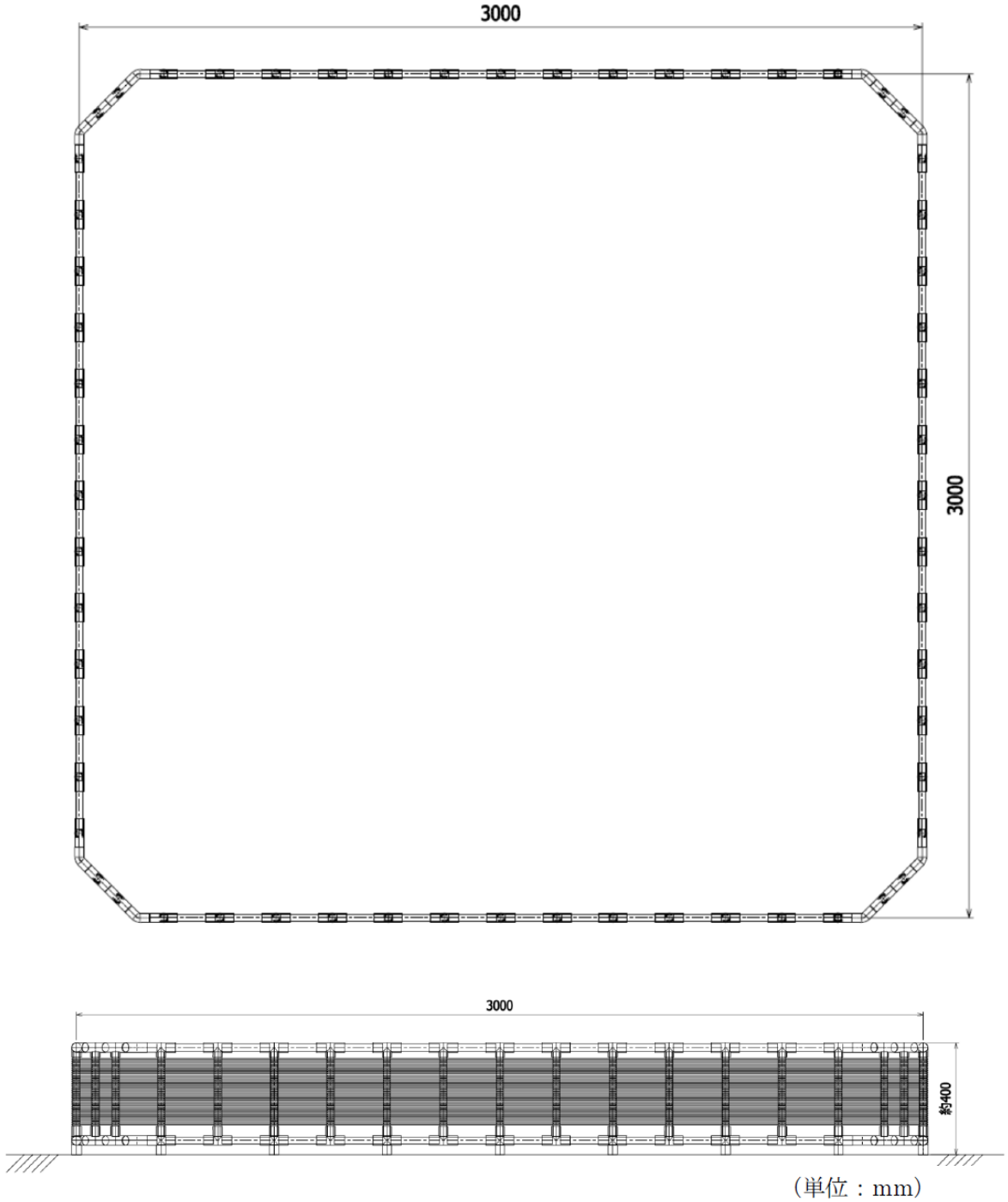



図 3.3.4-8　既存の無線モニタリング機器（中継用アンテナ）

受電コイルと送電コイルのサイズ設定を表 3.3.4-2に示す。今回設定した送電コイルのサイズは試験を実施する施設に対し大きすぎるため、試験の実施が困難であった。そのため、1/3サイズのコイルを作成して実験を行うこととした。1/3のサイズにしたコイルのサイズを表 3.3.4-3に示す。なお、送電コイル、受電コイルの大きさと電力送信の効率との関係は、今後検討を必要とする課題である。

表 3.3.4-2　受電コイルと送電コイルの大きさの設定

| | 直径［m］ | 長さ［mm］ |
|---|---|---|
| 送電コイル | 2.2 | 0.4 |
| 受電コイル | 0.06 | 0.37 |

表 3.3.4-3　1/3 にした受電コイルと送電コイルの大きさ

| | | 直径［m］ | 長さ［m］ |
|---|---|---|---|
| 1/3 | 送電コイル | 0.73 | 0.13 |
| | 受電コイル | 0.02 | 0.12 |

2) 受電コイルの製作

1)で設定した受電コイルのサイズを元に受電コイルを4つ作成した。コイルを作成する軸としては塩ビ管（VP16）を利用した。表 3.3.4-4に塩ビ管の詳細を示す。また図 3.3.4-9に塩ビ管のイメージ図を示す。

表 3.3.4-4　塩ビ管（VP16）の詳細（JIS K6741：2007）

| 区分 | VP（塩ビ厚肉管） | | |
|---|---|---|---|
| 呼び径 | 外径 (mm) | 内径 (mm) | 1m当り 質量(g) |
| 16 | 22 | 16 | 256 |

図 3.3.4-9　塩ビ管のイメージ図

表 3.3.4-4に示した塩ビ管（VP16）に種類の違うケーブル4種類（ポリエステル線0.56mm ・KIVケーブル0.5sq・2.0sq・3.5sq）を軸に巻いて送電コイルを作成した。図 3.3.4-10にポリエステル線0.56mmの写真を示す。また、各KIVケーブル0.5sq・2.0sq・3.5sqの写真を図 3.3.4-11、図 3.3.4-12、図 3.3.4-13に示す。

図 3.3.4-10　ポリエステル線 0.56mm

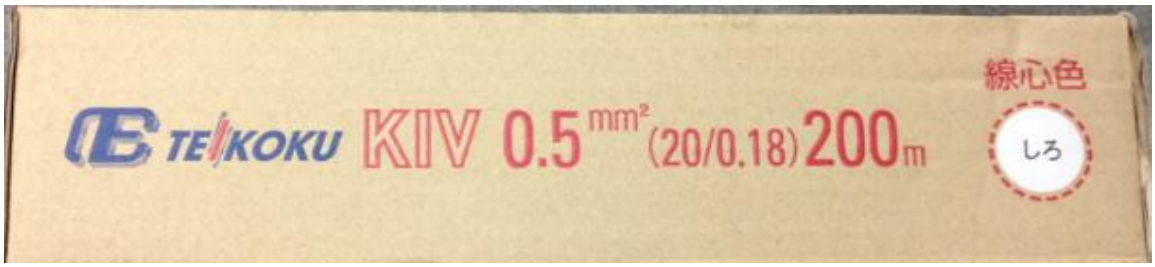



図 3.3.4-11　KIV ケーブル 0.5sq

図 3.3.4-12　KIV ケーブル 2.0sq

図 3.3.4-13　KIV ケーブル 3.5sq

ポリエステル線0.56mmを用いて作成した受電コイル①を図 3.3.4-14に、図 3.3.4-14で作成した受電コイル①の仕様を表 3.3.4-5に示す。他に、KIVケーブル0.5sqを用いて作成したコイルを図 3.3.4-15に、図 3.3.4-15で作成した受電コイル②の仕様を表 3.3.4-6に示す。KIVケーブル2.0sqを用いて作成したコイルを図 3.3.4-16に、図 3.3.4-16で作成した受電コイル③の仕様を表 3.3.4-7に示す。KIVケーブル3.5sqを用いて作成したコイルを図 3.3.4-17に、図 3.3.4-17で作成した受電コイル④の仕様を表 3.3.4-8に示す。

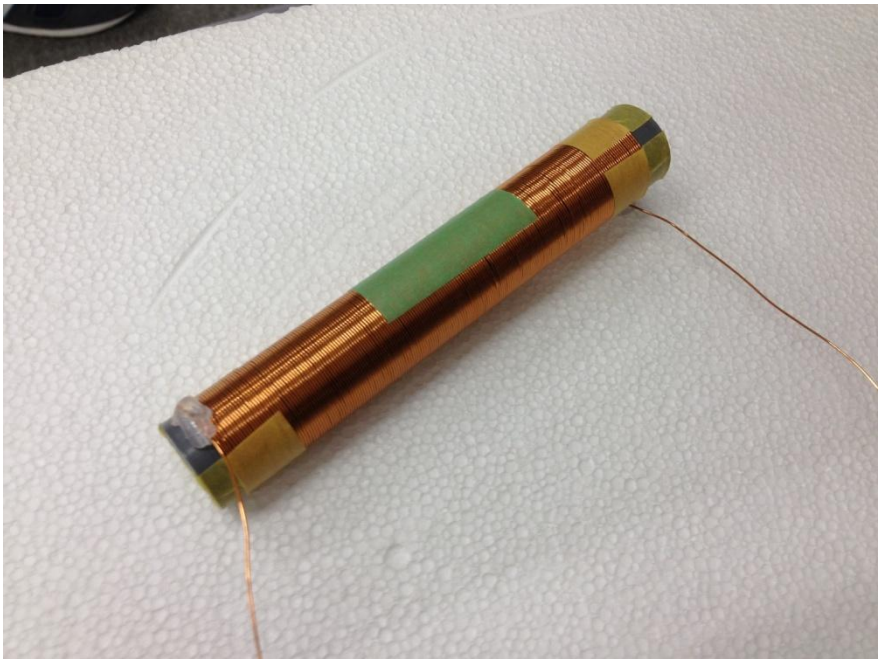


図 3.3.4-14　ポリエステル線 0.56mm を用いて作成したコイル①

表 3.3.4-5　ポリエステル線 0.56mm を用いて作成したコイル①の仕様

| | |
|---|---|
| 直径 | 2cm |
| 高さ | 12cm |
| 利用ケーブル | ポリエチレン線<br>0.56mm |
| 巻数 | 196 巻 |

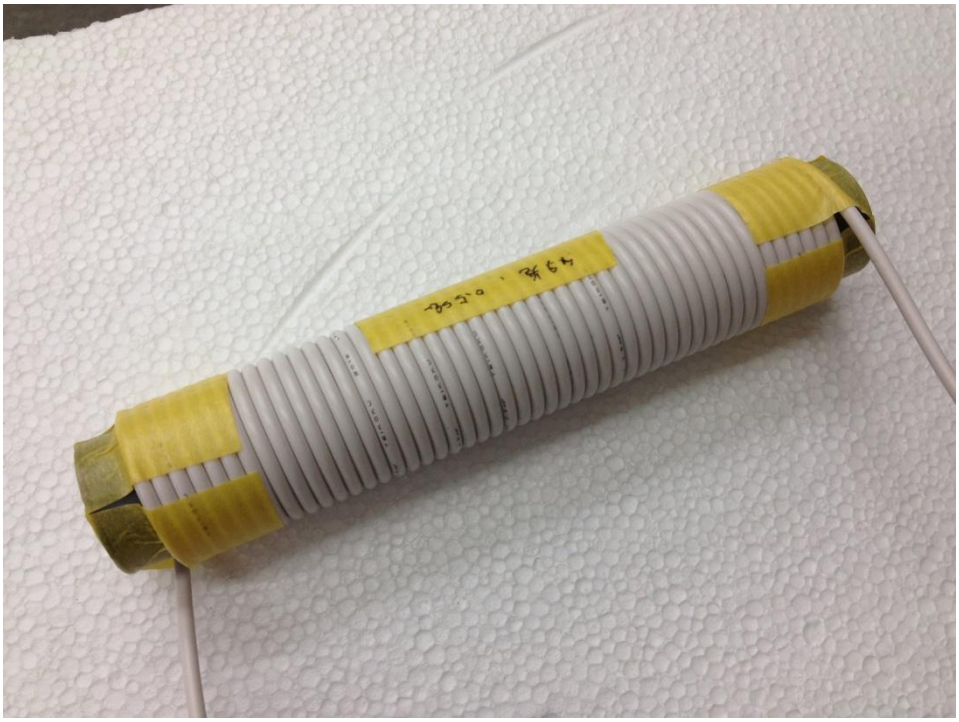


図 3.3.4-15　KIV ケーブル 0.5sq を用いて作成したコイル②

表 3.3.4-6　KIV ケーブル 0.5sq を用いて作成したコイル②の仕様

| | |
|---|---|
| 直径 | 2cm |
| 高さ | 12cm |
| 利用ケーブル | KIV　0.5$^{sq}$ |
| 巻数 | 49 巻 |

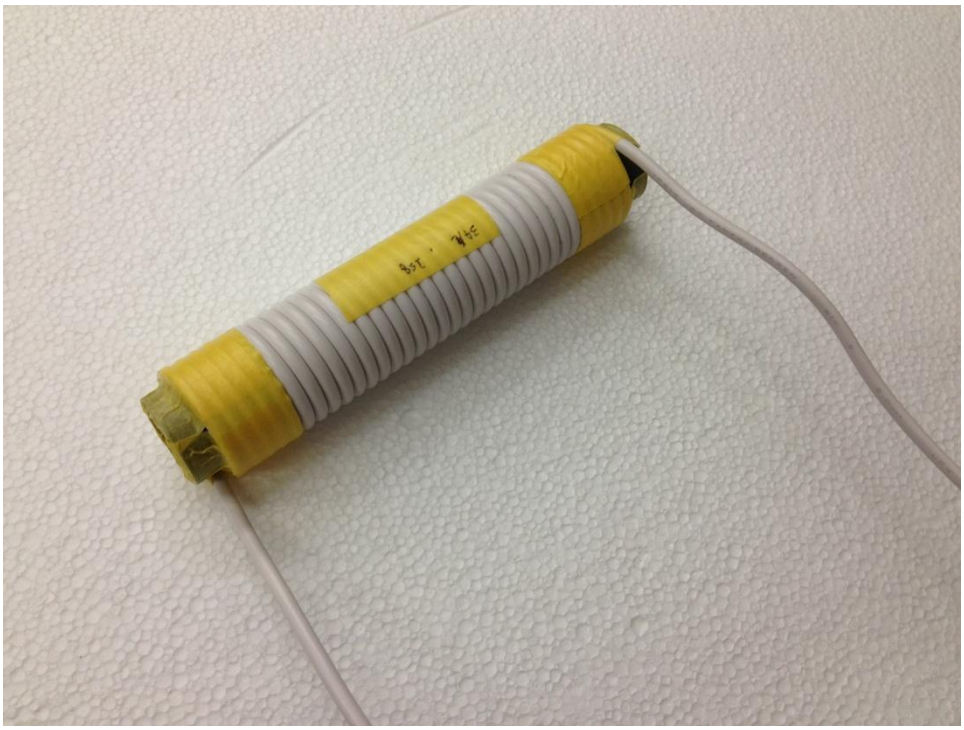


図 3.3.4-16　KIV ケーブル 2.0sq を用いて作成したコイル③

表 3.3.4-7　KIV ケーブル 2.0sq を用いて作成したコイル③の仕様

| | |
|---|---|
| 直径 | 2cm |
| 高さ | 12cm |
| 利用ケーブル | KIV　$2^{sq}$ |
| 巻数 | 34 巻 |

図 3.3.4-17　KIV ケーブル 3.5sq を用いて作成したコイル④

表 3.3.4-8　KIV ケーブル 3.5sq を用いて作成したコイル④の仕様

| | |
|---|---|
| 直径 | 2cm |
| 高さ | 12cm |
| 利用ケーブル | KIV　3.5$^{sq}$ |
| 巻数 | 27 巻 |

3) 送電コイルの製作

1)で設定した送電コイルのサイズにしたがって送電コイルを1つ作成した。コイルを作成する軸は図 3.3.4-18のように木製とした。コイルに用いたケーブルは、送電コイル②と同じKIVケーブル0.5sqである。作成した送電コイルを図 3.3.4-19に示す。また、その仕様を表3.3.4-9に示す。

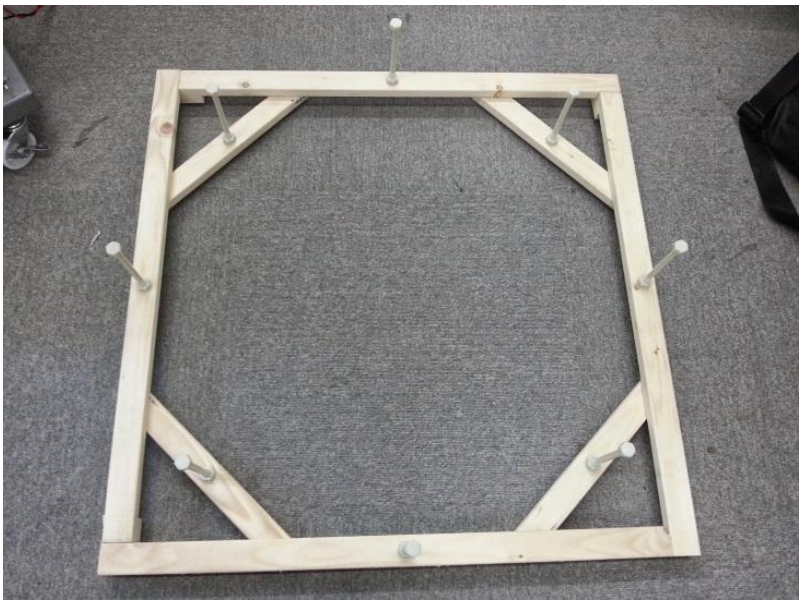


図 3.3.4-18　送電コイルの巻軸

図 3.3.4-19　作成した送電コイル

表 3.3.4-9　作成した送電コイルの仕様

| | |
|---|---|
| 直径 | 73cm |
| 高さ | 13cm |
| 利用ケーブル | KIV　0.5$^{sq}$ |
| 巻数 | 50 巻 |

(4) 周波数の検討

1) 周波数の選定方法

磁界共振結合方式の無線給電を行うためには、図 3.3.4-20 に示すように電源の周波数、送電コイルの共振周波数、受電コイルの共振周波数を一致させる必要がある。利用する周波数を一致させることで共振が発生し、伝送効率（=出力電力/入力電力）を上昇させることが可能になる。このことから、磁界共振結合方式では利用できる周波数は 1 つとなる。今回は前項で作成したコイルを測定して評価することにより最適な周波数を選定した。

また、送受電コイルの共振周波数 f(Hz)は式(1)により求めることができる。ここで、L はインダクタンス、C はキャパシタンスである。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \cdots\cdot\text{式(1)}$$

式(1)よりアンテナを制作するときには、インダクタンスとキャパシタンスを最適な値に設定することで共振周波数を設定できることが分かる。

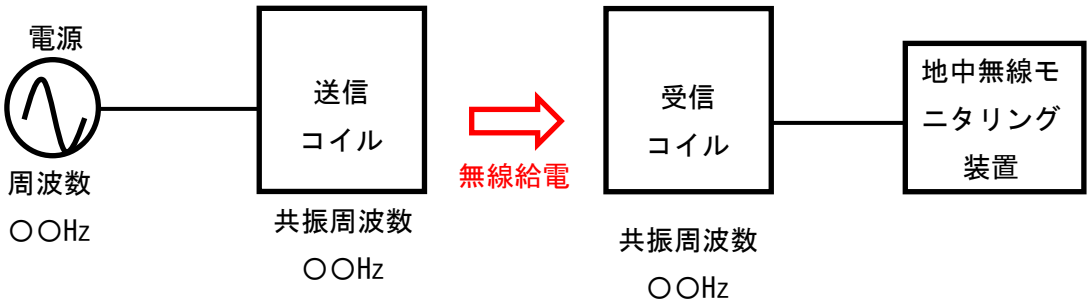
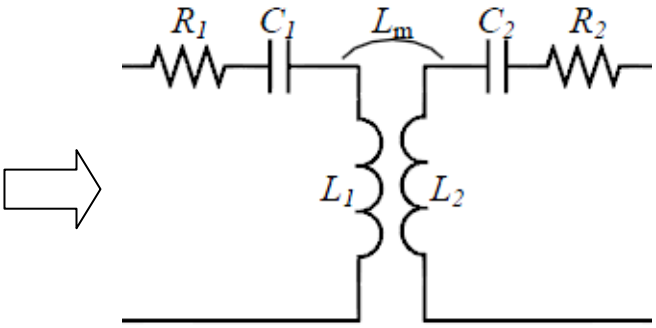



図 3.3.4-20　電磁界共振結合のイメージ図

2)　設計製作した送受電コイルの測定

遠井ら[16]によると、図 3.3.4-21 のように磁界共振結合のインダクタンスとコンデンサが直列で接続されている SS 方式（Serial- Serial）での無線電力伝送の伝送効率 η は式(2)で示される。




$R_1$：送電コイルの内部抵抗
$L_1$：送電コイルの自己インダクタンス
$C_1$：送電コイルの共振用コンデンサ
$R_2$：受電コイルの内部抵抗
$L_2$：受電コイルの自己インダクタンス
$C_2$：受電コイルの共振用コンデンサ
$L_m$：相互インダクタンス

図 3.3.4-21　磁界共振結合の等価回路

$$\eta_{\max SS} = \frac{1}{1+\frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}} \qquad \cdots \text{式(2)}$$

ここで Q1、Q2、k は下記の式で求めることができる。

$$Q_1 = \frac{\omega_0 L_1}{r_1}, \quad Q_2 = \frac{\omega_0 L_2}{r_2}, \quad k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

$Q_1$：送電コイルの Q
$Q_2$：受電コイルの Q
$k$：結合係数

式(2)より、無線電力伝送の効率を上昇させるためには、k もしくは $Q_1$・$Q_2$ を大きくすれば良いことが分かる。つまり、3)で制作したコイルの Q 値と周波数の関係を測定して、Q が大きい周波数を利用することで伝送効率が良いシステムを構築できる。

そこで、今回作成した送受電コイルの Q 値を測定した。Q 値の測定にはベクトルネットワークアナライザ(VNA)[E5061(アジレントテクノロジー)]を利用した。図 3.3.4-22 に利用した VNA を示す。また、受電コイル①の測定結果を図 3.3.4-23 に、受電コイル②の測定結果を図 3.3.4-24 に、に受電コイル③の測定結果を図 3.3.4-25 に、受電コイル④の測定結果を図 3.3.4-26 にそれぞれ示す。送電コイルの測定結果は図 3.3.4-27 に示す。図 3.3.4-23～図

3.3.4-27 は横軸を周波数として測定しており、周波数の範囲は 1kHz～1MHz である。

測定結果から受電コイル①～④については周波数が大きくなれば、Q 値も大きくなることがわかる。しかし、送電コイルに関しては、100k~120kHz において Q 値が大きいことが分かる。また、350kHz に反共振周波数が存在しているため、350kHz 以上の周波数においてインダクタンスとして利用することができない。

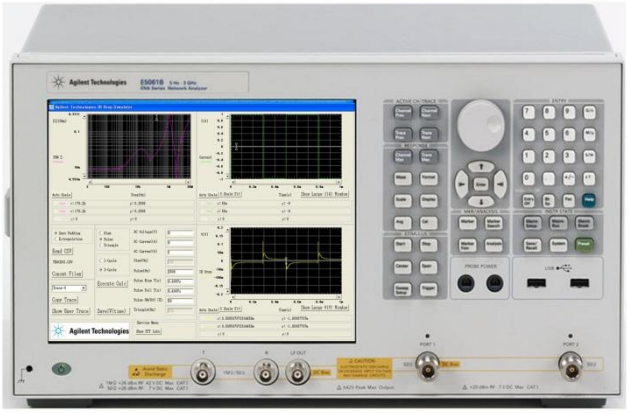


図 3.3.4-22　測定に利用した VNA（E5061）

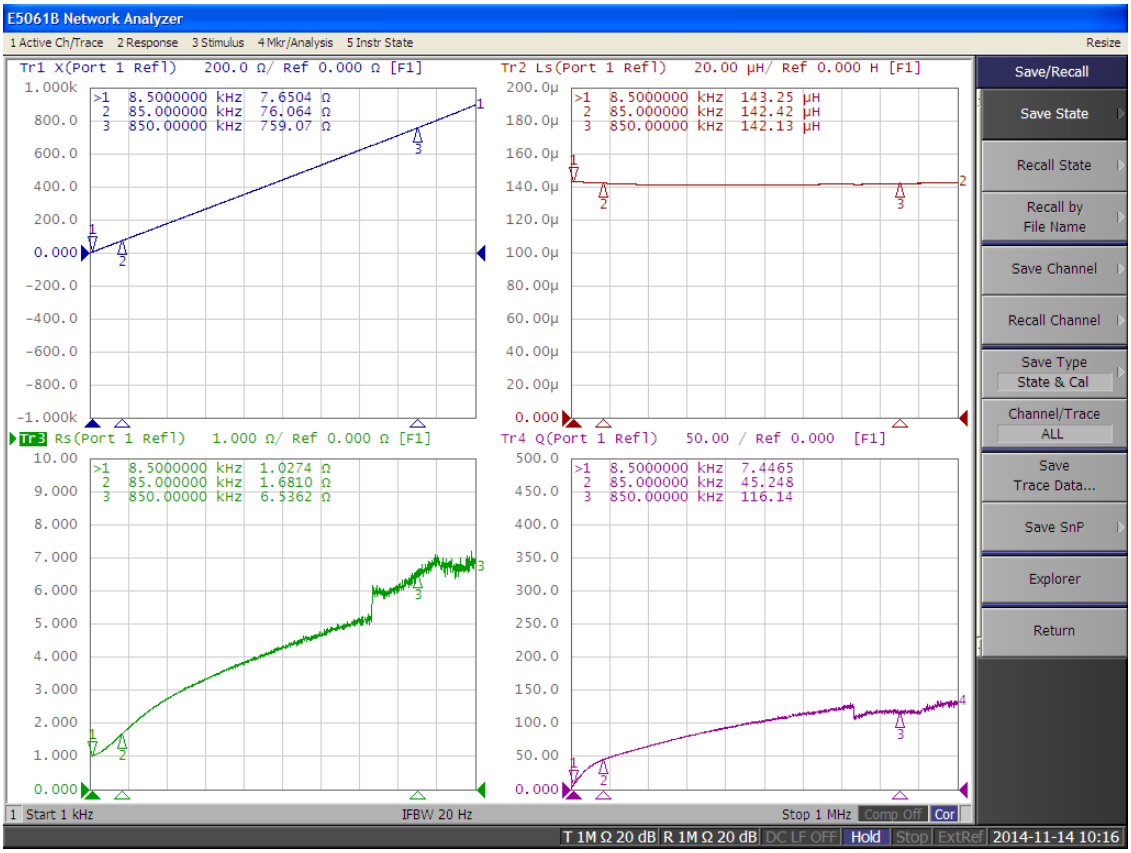



図 3.3.4-23　受電コイル①の測定結果

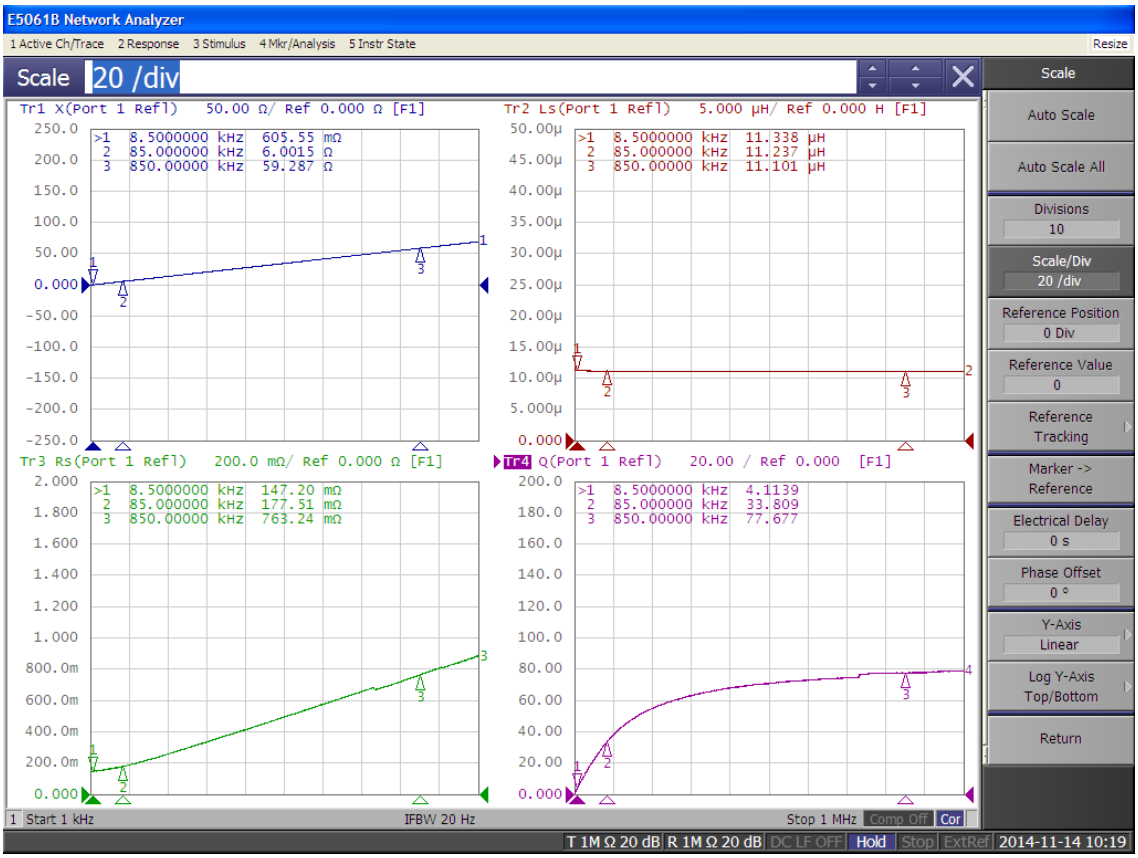



図 3.3.4-24　受電コイル②の測定結果

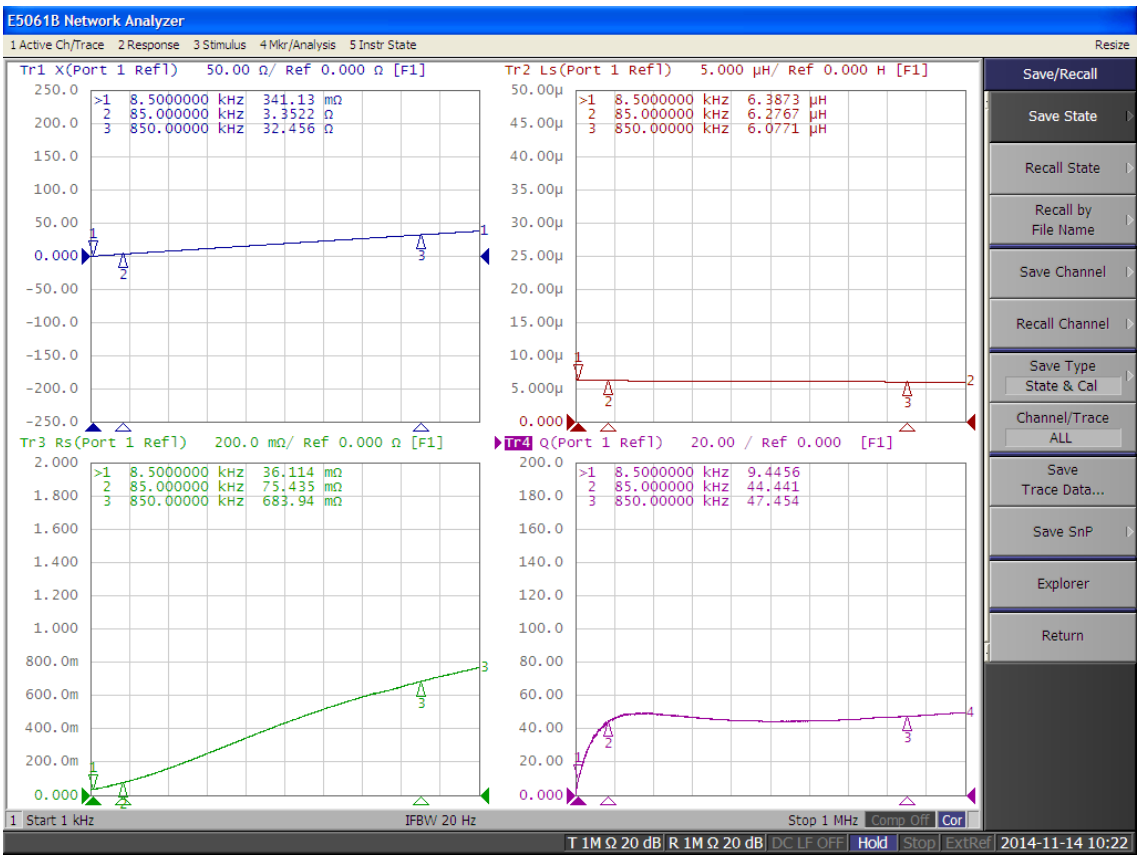



図 3.3.4-25　受電コイル③の測定結果

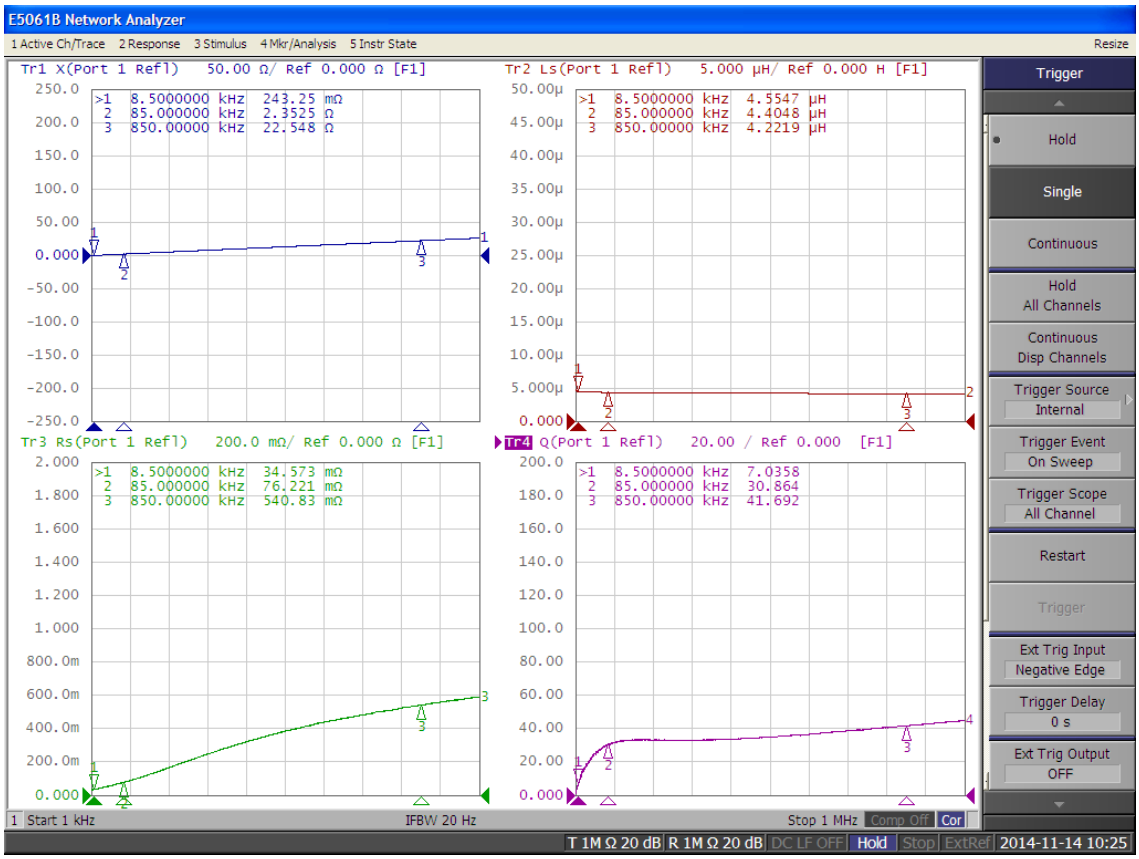



図 3.3.4-26　受電コイル④の測定結果

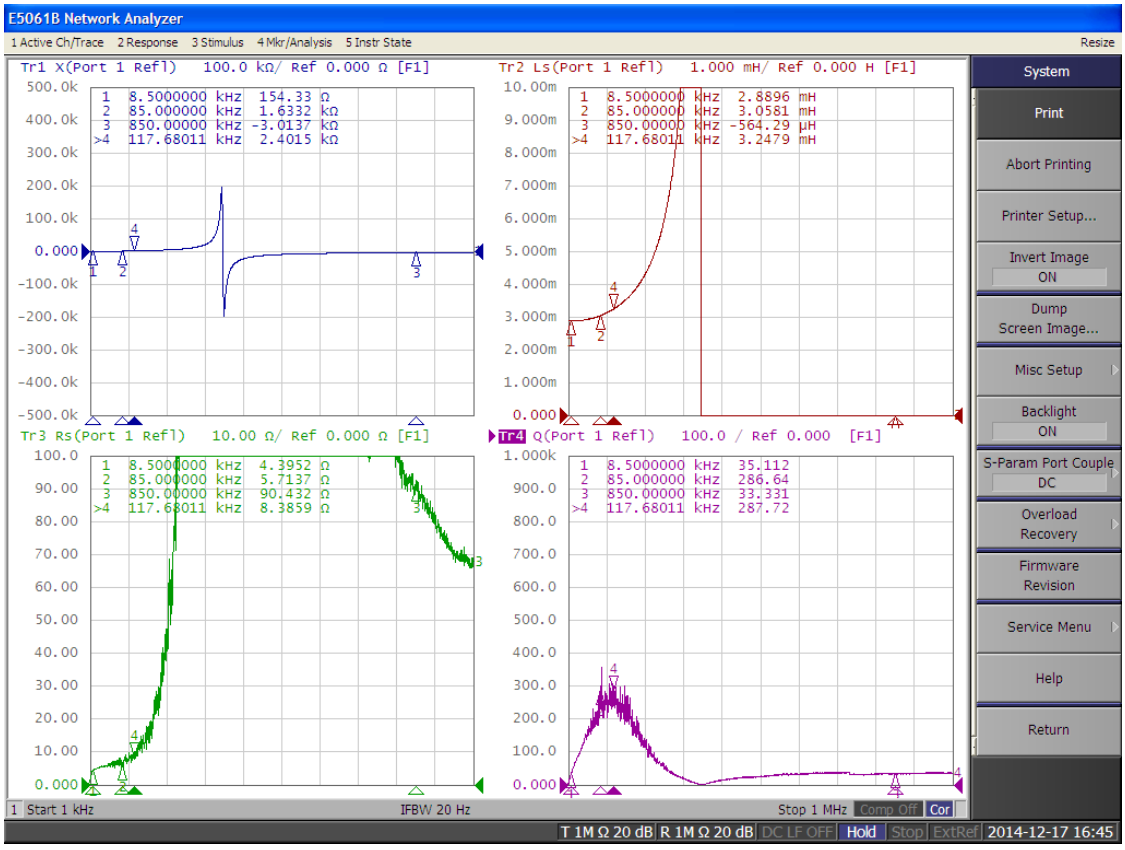



図 3.3.4-27　送電コイルの測定結果

3) 周波数の選定

式(1)より、受電コイルの $Q_1$ と送電コイルの $Q_2$ の積が高い周波数が、送受電コイルを考えたときの最適な周波数である。そのため、測定した受電コイル①～④と送電コイルの Q 値に、周波数における積を取ったものを算出した。受電コイル①と送電コイルの Q の積を図 3.3.4-28 に示す。また、受電コイル②と送電コイルの Q 値の積を図 3.3.4-29 に、受電コイル③と送電コイルの Q 値の積を図 3.3.4-30 に、受電コイル④と送電コイルの Q 値の積を図 3.3.4-31 にそれぞれ示す。

図 3.3.4-28～図 3.3.4-31 の中で $Q_1 \times Q_2$ が一番大きいものは、受電コイル①と送電コイルの組み合わせである。また、周波数は 100~120kHz 周辺で $Q_1 \times Q_2$ が平均的には最大となっているため共振周波数としては 100~120kHz 周辺を用いることとする。

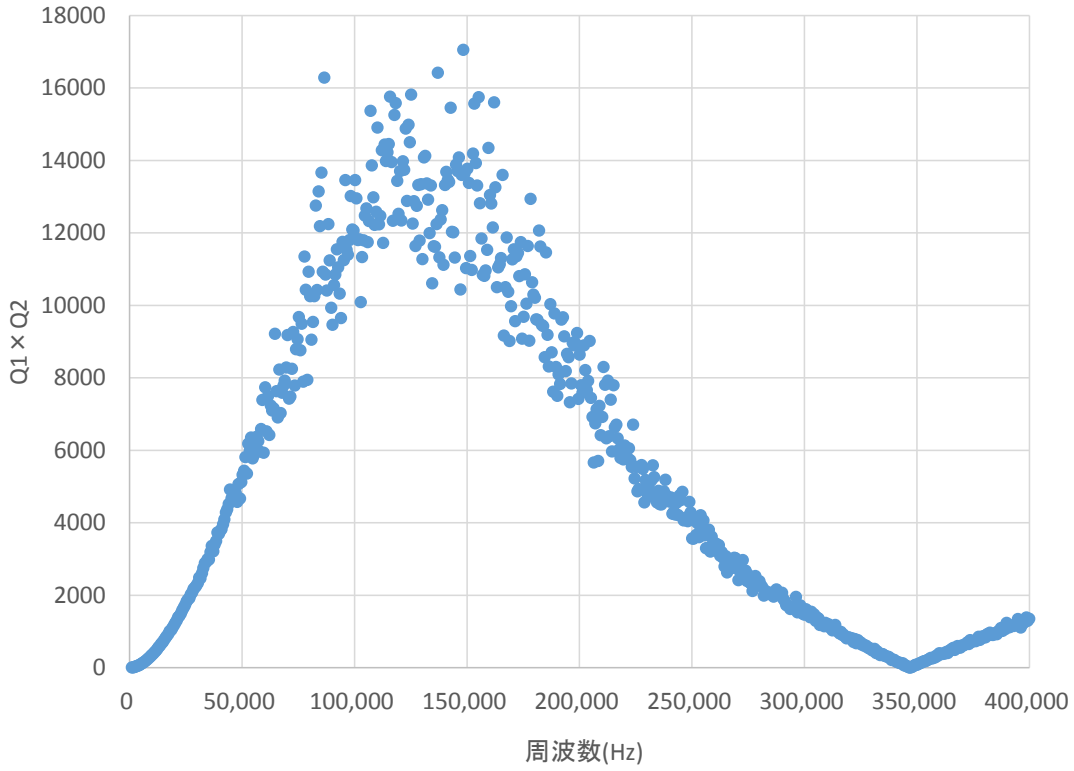



図 3.3.4-28　受電コイル①と送電コイルの Q 値の積

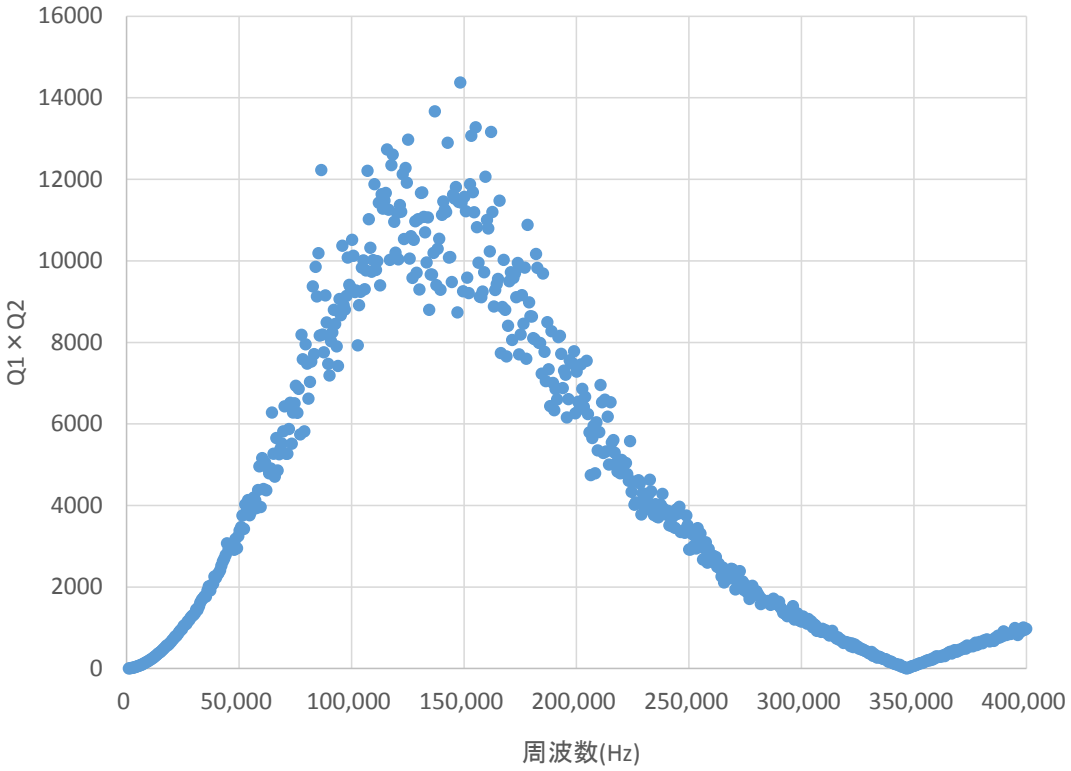



図 3.3.4-29　受電コイル②と送電コイルの Q 値の積

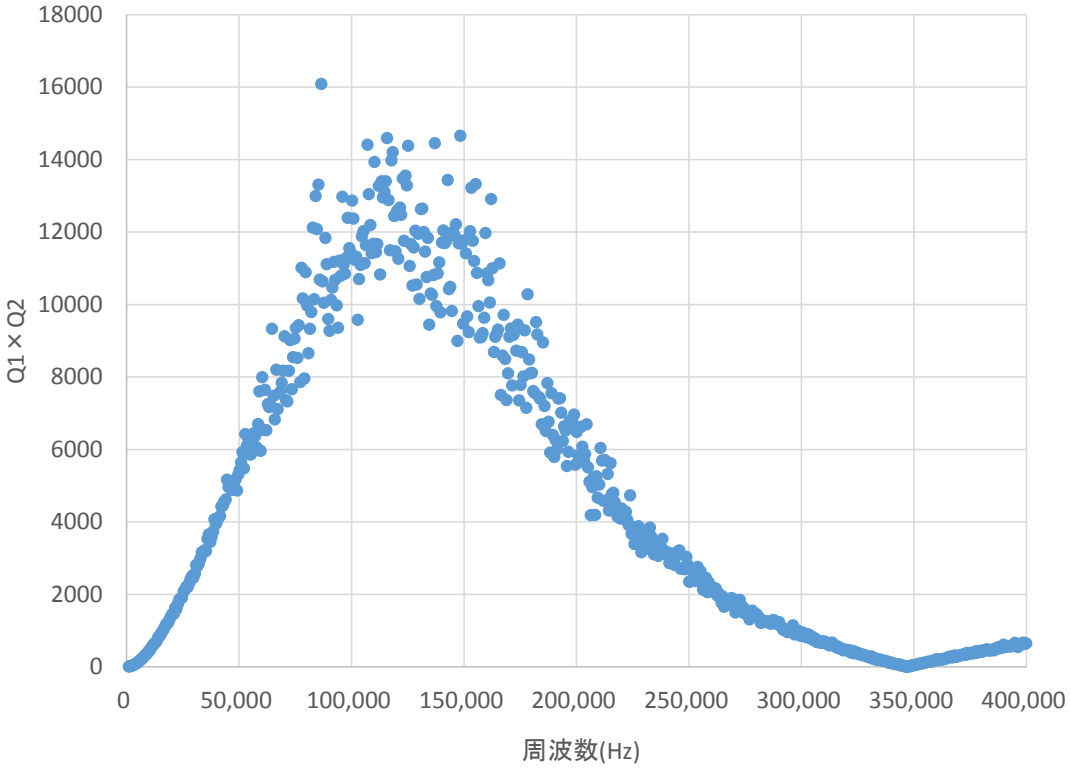



図 3.3.4-30　受電コイル③と送電コイルの Q 値の積

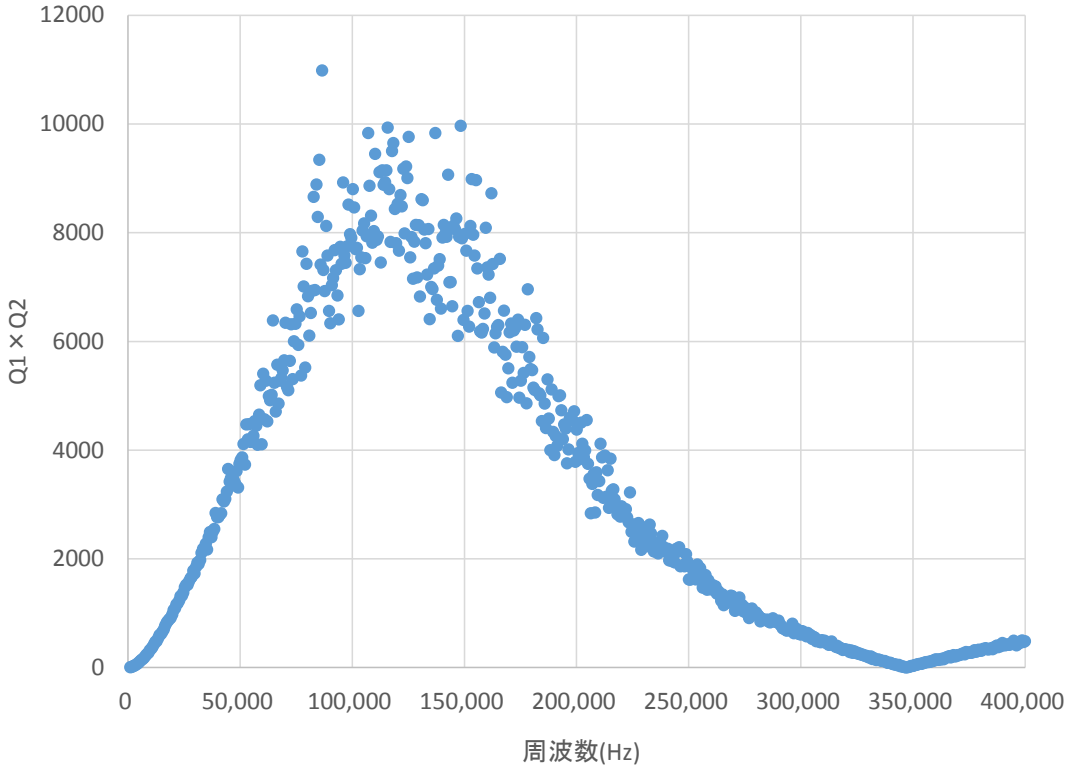



図 3.3.4-31　受電コイル④と送電コイルの Q 値の積

(5)　給電試験の実施

給電試験として、①送受電コイル間の相互インダクタンスを用いた評価試験と、②実際に電力伝送を行う試験の 2 つを行った。送受電コイル間には緩衝材を模擬したベントナイトブロックを設置し、空気中とベントナイトの比較を行った。

なお、②実際に電力伝送を行う試験を実施すれば伝送効率が測定できるが、高周波電源、コンデンサ、最適な負荷抵抗(受電側に取り付ける抵抗)が必要である。そのため、実際の電力試験を行わなくても作成した送受電コイルを利用した伝送効率を評価できると、今後の設計を行うときに有用である。そのために①相互インダクタンスを用いた評価試験を行った。

1)　ベントナイトブロックの作製

ベントナイト中の電力伝送試験ではベントナイトブロックを図 3.3.4-32 のように重ねることで送受信コイル間の距離を調整し測定を行った。ベントナイトブロックは、厚さ 10mm のアクリル板を組み合わせた型枠（内寸：300mm×400mm×100mm）を作成し、その中でベントナイトを締め固めることで作成した。アクリル板で作成した型枠を図 3.3.4-33 に示す。また、ベントナイトを締め固めたベントナイトブロックを図 3.3.4-34 に示す。ベントナイトブロックの破損を防止するためにアクリル型枠に入れたまま積み重ねて試験を実施し、別途、アクリル型枠のみを送受電コイル間に置いた電力伝送試験を行うことによりアクリル枠の影響を評価した。ベントナイトブロックの材料には、含水率を 21%を目標に調整したクニゲル V1 を用いた（表 3.3.4-10)。また、締固め後のベントナイトブロックの密度は約 1.35Mg/m$^3$ であった（表

3.3.4-11)。

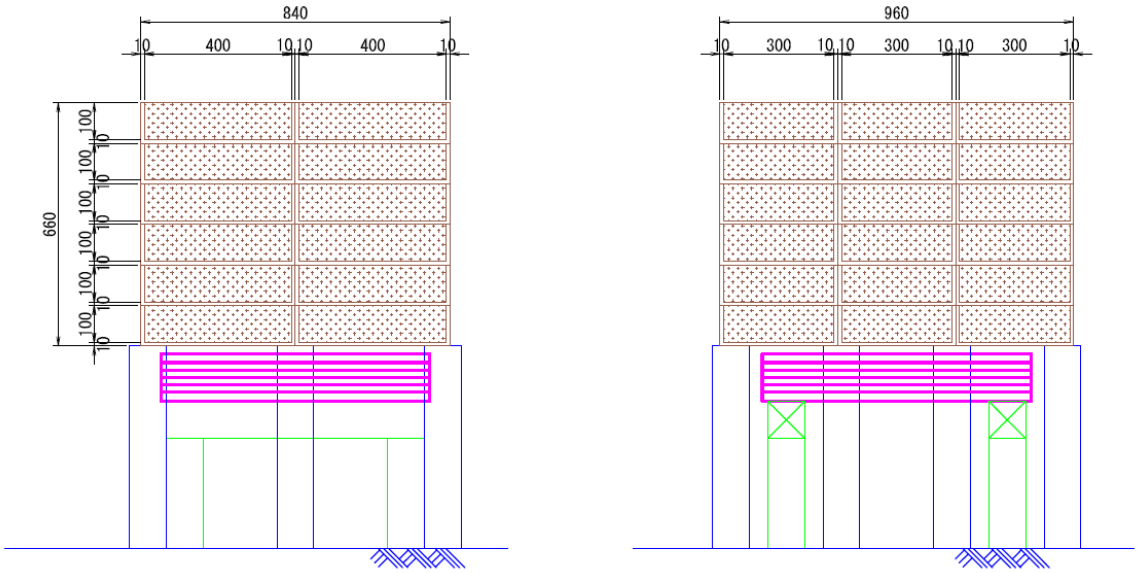



図 3.3.4-32　給電試験におけるベントナイトブロック配置図

図 3.3.4-33　アクリル板で作成した型枠

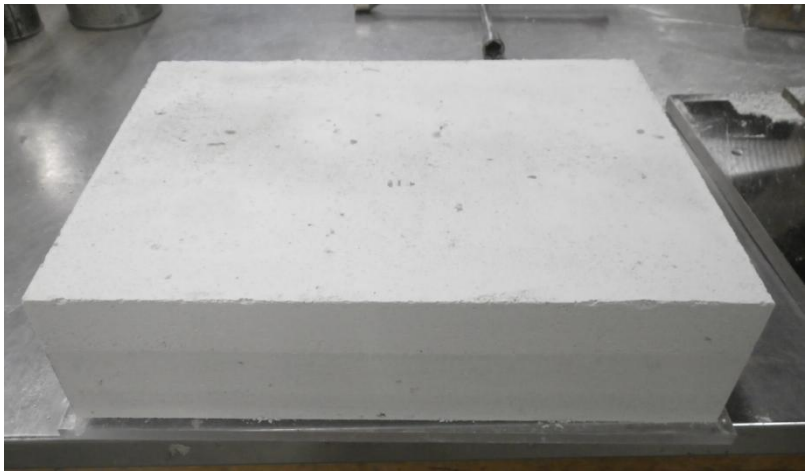


図 3.3.4-34　締固めたベントナイトブロック

表 3.3.4-10　ベントナイトの水分調整表

| バッチ | 加水前<br>含水比(%) | クニゲルV1<br>投入量(kg) | 加水量(L) | 加水調整後 | 赤外線水分計 | 乾燥減量法 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 含水率(%) | 含水比(%) | 含水比(%) |
| 1 | 6.8 | 40 | 5.1 | 17.2 | 20.8 | 20.2 |
| 2 | | | | 16.8 | 20.2 | 19.7 |
| 3 | | | | 17.6 | 21.4 | 19.9 |
| 4 | | | | 16.9 | 20.3 | 20.0 |
| 5 | | | | 16.9 | 20.3 | 19.7 |
| 6 | | | | 17.1 | 20.6 | 20.4 |
| 7 | | | | 17.2 | 20.8 | 20.0 |
| 8 | | | | 17.1 | 20.6 | 20.4 |
| 9 | | | | 17.2 | 20.8 | 20.3 |
| 10 | | | | - | - | 20.6 |
| 11 | | | | - | - | 20.1 |
| 12 | | | | - | - | 20.0 |
| 13 | | | | - | - | 20.2 |
| 14 | | | | - | - | 20.3 |
| 15 | | | | - | - | 20.2 |
| 16 | | | | - | - | 20.0 |
| 17 | | | | - | - | 20.4 |
| 18 | | | | - | - | 20.3 |
| 19 | | | | - | - | 20.3 |
| 20 | | | | - | - | 20.4 |
| 21 | | | | - | - | 20.6 |
| 22 | | | | - | - | 20.3 |
| 23 | | | | - | - | 20.4 |

※9 バッチ以降の含水比は、乾燥減量法のみ実施した。

表 3.3.4-11　ベントナイトブロックの密度

| 番号 | アクリル型枠容積 ($cm^3$) | アクリル型枠質量 (g) | アクリル型枠+試料質量 (g) | 試料質量 (g) | 試料含水比 (%) | 湿潤密度 ($g/cm^3$) | 乾燥密度 ($g/cm^3$) | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12000 | 3305.5 | 22756.5 | 19451.0 | 21.0 | 1.621 | 1.340 | 最大乾燥密度 1.400$g/cm^3$ |
| 2 | | | 22846.0 | 19540.5 | | 1.628 | 1.345 | |
| 3 | | | 22887.0 | 19581.5 | | 1.632 | 1.349 | |
| 4 | | | 22916.0 | 19610.5 | | 1.634 | 1.350 | |
| 5 | | | 22893.0 | 19587.5 | | 1.632 | 1.349 | |
| 6 | | | 22902.5 | 19597.0 | | 1.633 | 1.350 | |
| 7 | | | 22907.5 | 19602.0 | | 1.634 | 1.350 | |
| 8 | | | 23020.0 | 19714.5 | | 1.643 | 1.358 | |
| 9 | | | 22989.5 | 19684.0 | | 1.640 | 1.355 | |
| 10 | | | 22883.5 | 19578.0 | | 1.632 | 1.349 | |
| 11 | | | 23050.0 | 19744.5 | | 1.645 | 1.360 | |
| 12 | | | 22975.5 | 19670.0 | | 1.639 | 1.355 | |
| 13 | | | 22947.5 | 19642.0 | | 1.637 | 1.353 | |
| 14 | | | 22838.0 | 19532.5 | | 1.628 | 1.345 | |
| 15 | | | 22771.0 | 19465.5 | | 1.622 | 1.340 | |
| 16 | | | 22870.0 | 19564.5 | | 1.630 | 1.347 | |
| 17 | | | 22898.0 | 19592.5 | | 1.633 | 1.350 | |
| 18 | | | 22918.5 | 19613.0 | | 1.634 | 1.350 | |
| 19 | | | 22863.5 | 19558.0 | | 1.630 | 1.347 | |
| 20 | | | 22742.0 | 19436.5 | | 1.620 | 1.339 | |
| 21 | | | 22773.5 | 19468.0 | | 1.622 | 1.340 | |
| 22 | | | 23093.0 | 19787.5 | | 1.649 | 1.363 | |
| 23 | | | 22888.5 | 19583.0 | | 1.632 | 1.349 | |
| 24 | | | 22916.5 | 19611.0 | | 1.634 | 1.350 | |
| 25 | | | 22925.0 | 19619.5 | | 1.635 | 1.351 | |
| 26 | | | 22960.5 | 19655.0 | | 1.638 | 1.354 | |
| 27 | | | 23087.0 | 19781.5 | | 1.648 | 1.362 | |
| 28 | | | 23124.0 | 19818.5 | | 1.652 | 1.365 | |
| 29 | | | 23058.5 | 19753.0 | | 1.646 | 1.360 | |
| 30 | | | 22972.0 | 19666.5 | | 1.639 | 1.355 | |
| 31 | | | 22957.0 | 19651.5 | | 1.638 | 1.354 | |
| 32 | | | 22935.5 | 19630.0 | | 1.636 | 1.352 | |
| 33 | | | 22954.0 | 19648.5 | | 1.637 | 1.353 | |
| 34 | | | 22804.5 | 19499.0 | | 1.625 | 1.343 | |
| 35 | | | 22952.5 | 19647.0 | | 1.637 | 1.353 | |
| 36 | | | 22746.0 | 19440.5 | | 1.620 | 1.339 | |

2)相互インダクタンスを用いた給電評価試験

本試験では既存文献より、送受電コイルなどを等価回路により示した加藤などの手法(相互インダクタンスを測定して伝送効率を評価する手法)を利用して評価した。

加藤ら[17]によると、磁界共振結合のインダクタンスとコンデンサが直列で接続されている SS 方式（Serial- Serial）は図 3.3.4-35 のように等価回路で示すことができ、電源と負荷を設置したものを図 3.3.4-36 で示すことができる。

図 3.3.4-35 で $R_1$ は送電コイルの内部抵抗、$L_1$ は送電コイルの自己インダクタンス、$R_2$ は受電コイルの内部抵抗、$L_2$ は受電コイルの自己インダクタンス、$C_1$ は受電コイルに取り付けた共振用のコンデンサ、$C_2$ は受電コイルに取り付けた共振用のコンデンサ、$L_m$ は送受電コイルの相互インダクタンスである。図 3.3.4-35 に電源 $V_1$ と負荷抵抗 $R_L$ を入れた図が図 3.3.4-36 である。また図 3.3.4-36 の等価回路を用いて計算した伝送効率が式(3)であり、伝送効率 η が最大となる $R_L$ は式(4)で示すことができる。

今回行った相互インダクタンスを用いた評価試験では、$L_1$、$R_2$、$L_m$ を LCR メータで測定して式(3)を用いて伝送効率を計算した。相互インダクタンスを用いた評価試験と実際に電力伝送を行う試験の結果が同等であれば、加藤などの手法で示されている等価回路が、今後の検討でも利用できることとなる。

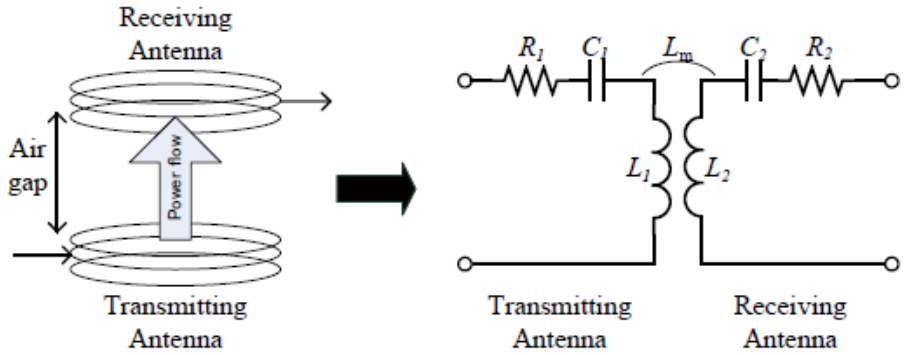



図 3.3.4-35　等価回路

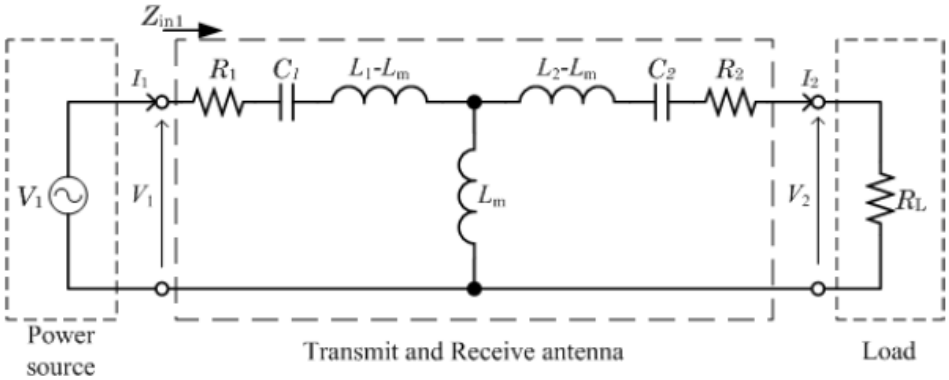



図 3.3.4-36　電源と負荷がある等価回路

$$\eta = \frac{(\omega_0 L_m)^2 R_L}{(R_L + R_2)(R_1 R_L + R_1 R_2 + (\omega_0 L_m)^2)} \quad \text{・・・式(3)}$$

$$R_{L\eta\max} = \sqrt{R_2(\frac{(\omega_0 L_m)^2}{R_1} + R_2)} \quad \text{・・・式(4)}$$

$\eta$：伝送効率
$r_1$：送電コイル内部抵抗
$C_1$：送電コイルに接続するコンデンサ結合係数
$L_1$：送電コイルの自己インダクタンス
$L_m$：相互インダクタンス
$r_2$：受電コイル内部抵抗
$C_2$：受電コイルに接続するコンデンサ結合係数
$L_2$：受電コイルの自己インダクタンス
$R_L$：受電コイルに接続する抵抗（センサの抵抗など）

a) 送受電コイル間が空気の試験（予備試験）

(3)で作成した受電コイル①と送電コイル（図 3.3.4-37）を用いて、送受電コイルの距離を0~1.4m として 10cm 間隔で相互インダクタンスを測定する試験を行った。図 3.3.4-38 に試験状況を示す。この試験では、送受電コイル間の距離を比較的大きくとれるが、送受電コイル間にベントナイトブロックを置いた試験とは設置環境が異なるため、予備試験と位置付けた。

相互インダクタンスは、自己インダクタンスを用いる方法[18]を利用して測定した。測定に用いた LCR メータを図 3.3.4-39 に示す。

図 3.3.4-40 に相互インダクタンスの測定結果を示す。また、相互インダクタンスの結果から式(3)を利用して計算した最大効率を図 3.3.4-41 及び図 3.3.4-42 に示す。式(3)の $R_L$ は式(4)より最適な値を計算して入力した。

図 3.3.4-40～図 3.3.4-42 の結果より、送受電コイル間距離が長くなると最大効率が低下していくことが分かる。また、距離 80cm の測定値は他の測定値と異なった傾向を示しているが、測定を行った環境（鉄製の機材の配置等）による影響と考えられる。

図 3.3.4-37　送電コイル①(左図)と受電コイル(右図)

図 3.3.4-38　試験状況

図 3.3.4-39　LCR メータ

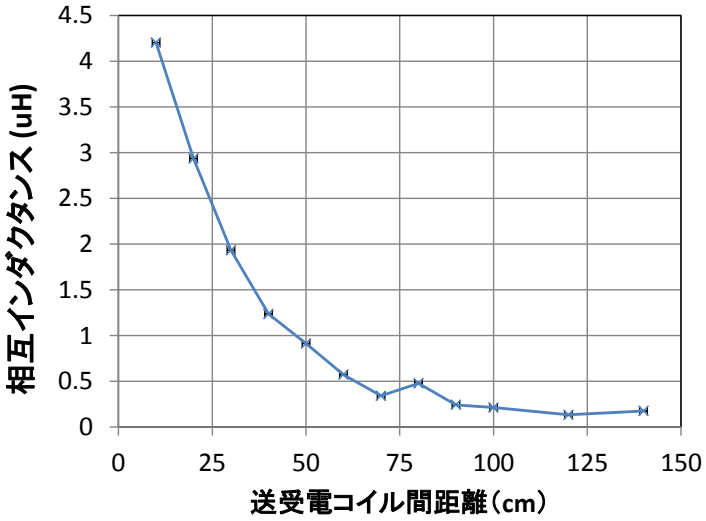



図 3.3.4-40　相互インダクタンスの測定結果

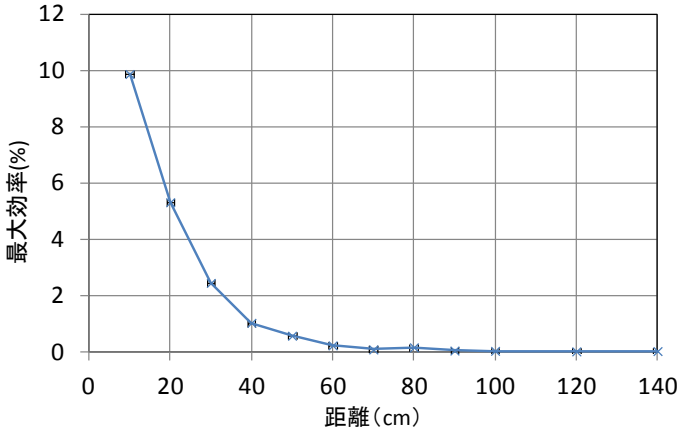



図 3.3.4-41　相互インダクタンスより計算した最大効率

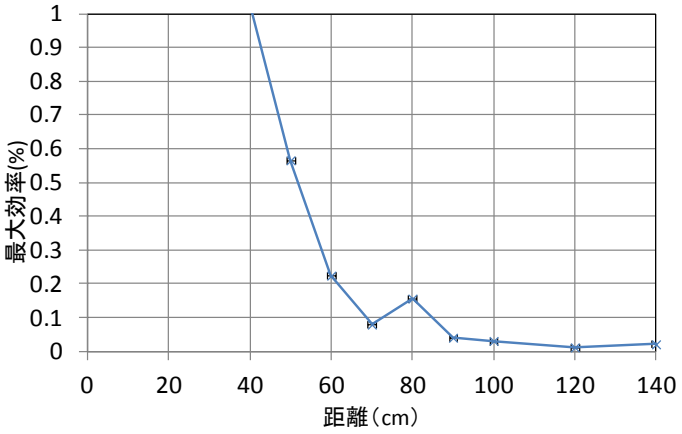



図 3.3.4-42　相互インダクタンスより計算した最大効率（縦軸の最大値 1）

b) 送受電コイル間が空気の試験（本試験）

(3)で作成した受電コイル①と送電コイルを用いて、送受電コイルの距離を 0~0.6m として 10cm 間隔で相互インダクタンスを測定する試験を行った。この試験は後述のベントナイトブ

ロックを送受電コイル間に設置した試験との比較のため、周辺環境を同一として実施した。図 3.3.4-43 に試験状況を示す。相互インダクタンスは a)と同様の方法にて測定した。本試験では、受電コイル①にフェライトを入れた場合と入れない場合の比較も行った。試験に用いたフェライトは PE22(TDK 製)である。フェライトをいれた受電コイル①を図 3.3.4-44 に示す。

図 3.3.4-45 にフェライトを入れてない場合の相互インダクタンスの測定結果を示す。相互インダクタンスの結果から式(3)を利用して計算した最大効率を図 3.3.4-46 に示す。また、図 3.3.4-47 にフェライトを入れた場合の相互インダクタンスの測定結果を示す。相互インダクタンスの結果から式(3)を利用して計算した最大効率を図 3.3.4-48 に示す。式(3)の $R_L$ は式(4)より最適な値を計算して入力した。

図 3.3.4-43　試験状況

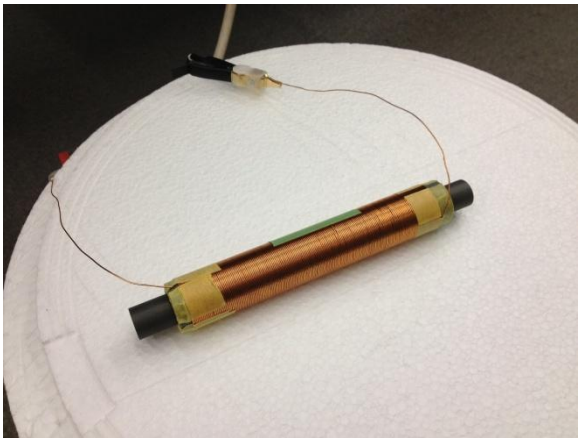


図 3.3.4-44　フェライトを入れた受電コイル①

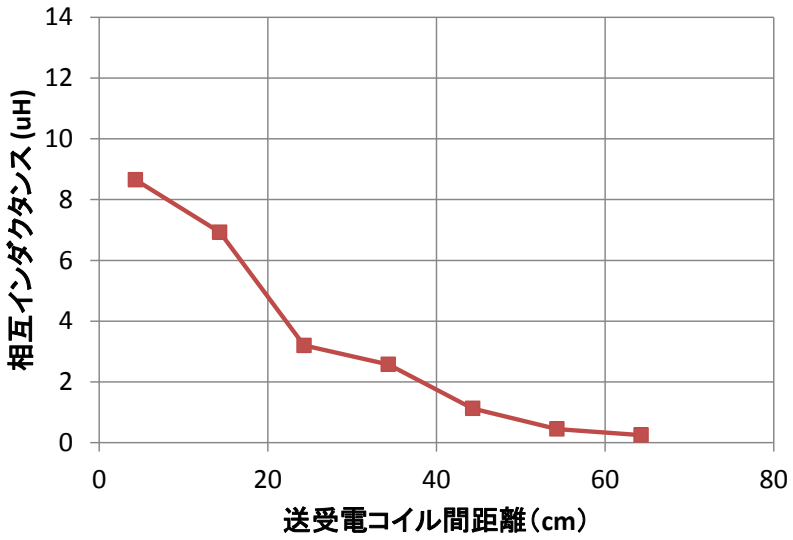



図 3.3.4-45　相互インダクタンスの測定結果（フェライトなし）

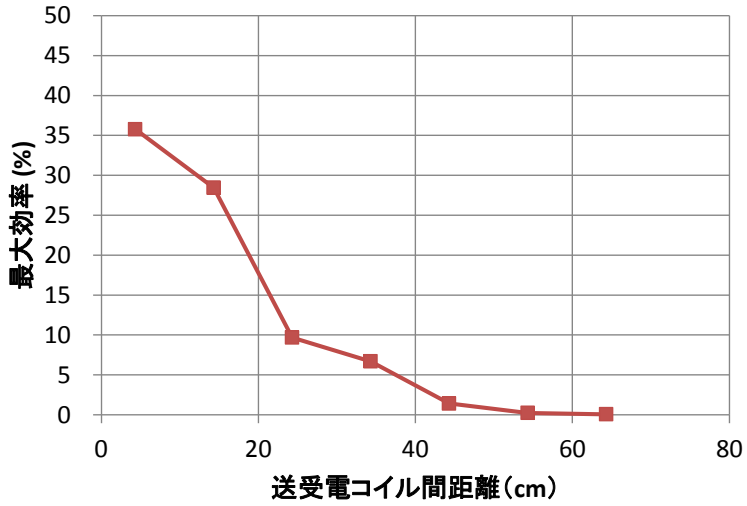



図 3.3.4-46　相互インダクタンスより計算した最大効率（フェライトなし）

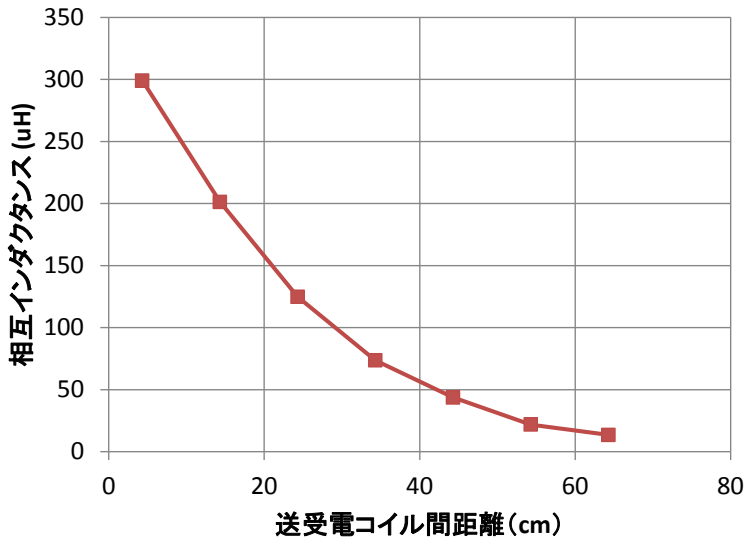



図 3.3.4-47　相互インダクタンスの測定結果（フェライトあり）

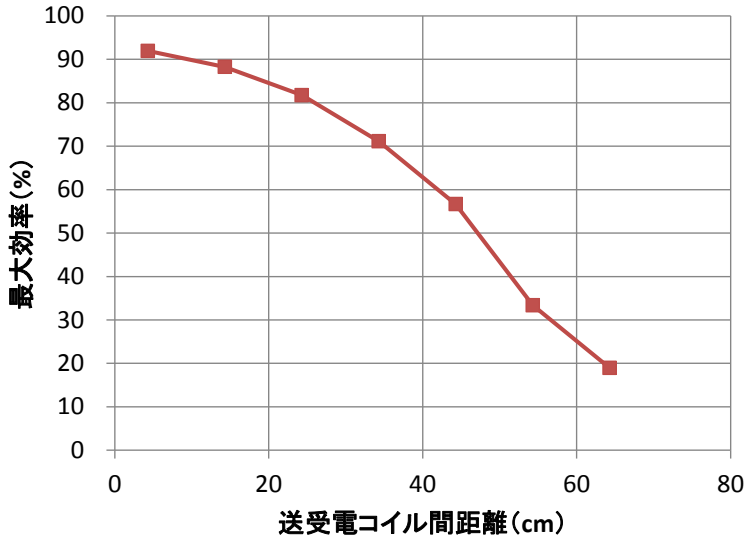



図 3.3.4-48　相互インダクタンスより計算した最大効率（フェライトあり）

c) 送受電コイル間がベントナイトの試験（本試験）

ベントナイトブロックを送受電コイル間に入れて距離を 0~0.6m として 10cm 間隔で相互インダクタンスを測定する試験を行った。図 3.3.4-49 に試験状況を示す。周辺環境は上述の b)と同様である。相互インダクタンスは a)、b)と同様の方法にて測定した。また、b)と同様に受電コイル①にフェライトを入れた場合と入れない場合の比較も行った。

図 3.3.4-50 にフェライトを入れてない場合の相互インダクタンスの測定結果を示す。相互インダクタンスの結果から式(2)を利用して計算した最大効率を図 3.3.4-51 に示す。また、図 3.3.4-52 にフェライトを入れた場合の相互インダクタンスの測定結果を示す。相互インダクタンスの結果から式(3)を利用して計算した最大効率を図 3.3.4-53 に示す。式(3)の $R_L$ は式(4)より最適な値を計算して入力した。

図 3.3.4-49　試験状況

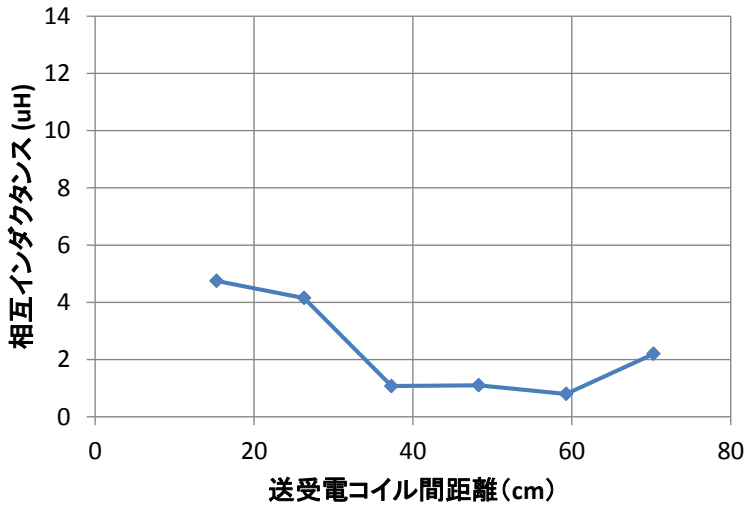



図 3.3.4-50　相互インダクタンスの測定結果（フェライトなし）

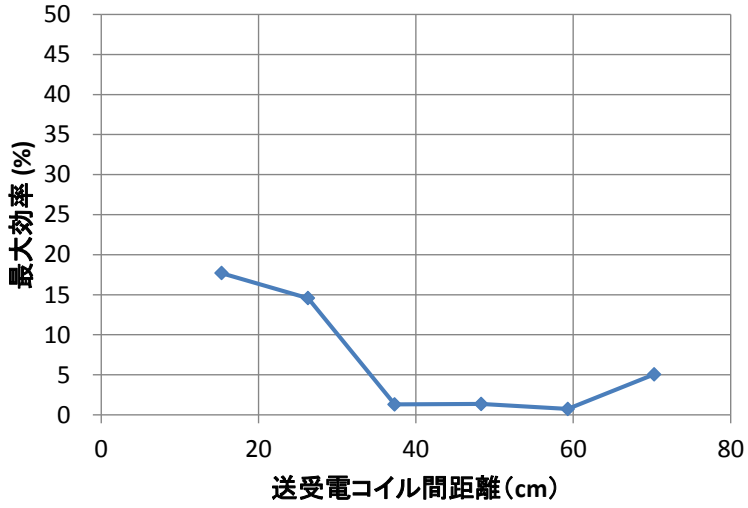



図 3.3.4-51　相互インダクタンスより計算した最大効率（フェライトなし）

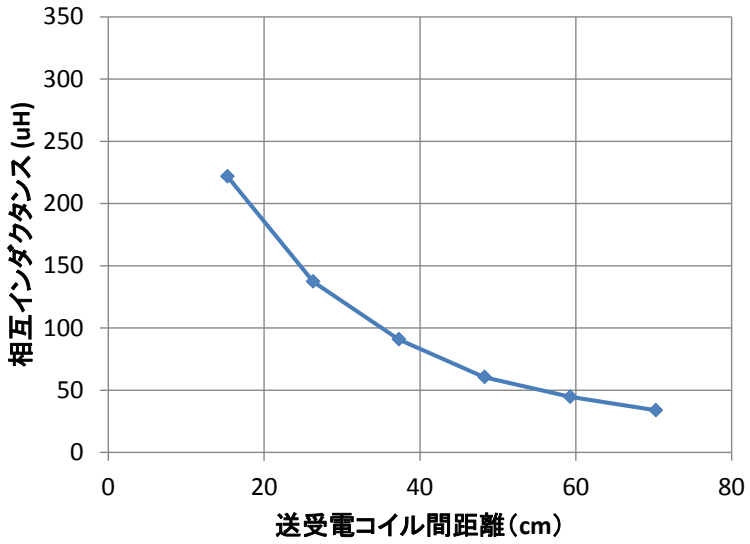



図 3.3.4-52　相互インダクタンスの測定結果（フェライトあり）

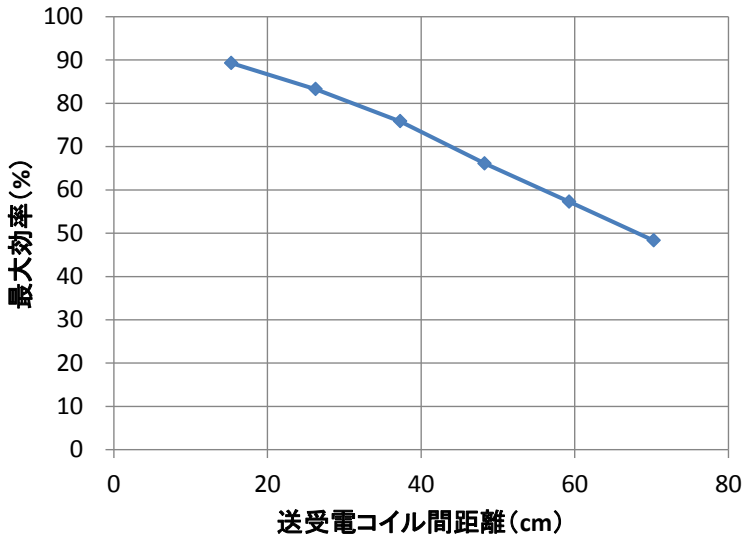



図 3.3.4-53　相互インダクタンスより計算した最大効率（フェライトあり）

3)給電試験

給電試験では、実際に電力伝送を行う試験を行った。試験に利用した機器の接続を図 3.3.4-54 に示す。

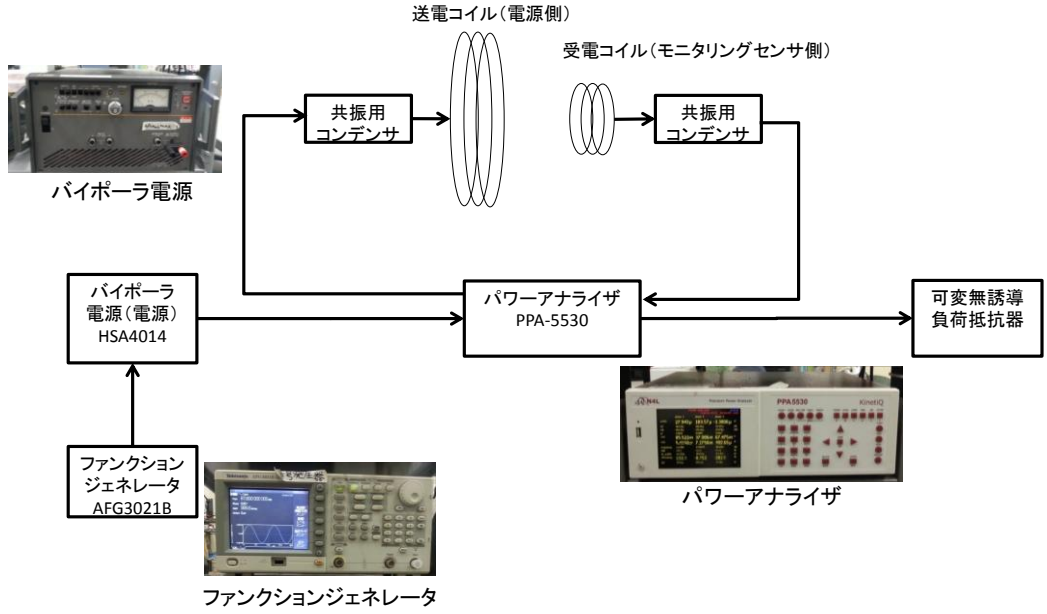



図 3.3.4-54　試験機器

図 3.3.4-54 に示すように、送受電コイルには共振用のコンデンサを取り付けた。共振周波数は(4)で設定した 100~120kHz の間のうち、既存のコンデンサで効率が良くなる周波数を選び、その周波数の電力をバイポーラ電源から送電コイルへ送り試験を行った。また、電力はパワーアナライザを通して送電コイルから受電コイルに送り、受電コイルで受け取った電力はパワーアナライザに入れることで、送受電の電力を確認した。

a)送受電コイル間が空気の試験（予備試験）

(3)で作成した受電コイル①と送電コイルを用いて、送受電コイルの距離を 0~1.4m として 10cm 間隔で電力伝送試験を行った。試験では 2.3.2 で設定した 100~120kHz のうち 106.70kHz を利用して試験を行った。試験状況を図 3.3.4-55 に示す。試験結果を図 3.3.4-56 に示す。また、図 3.3.4-56 の縦軸の最大値を 1 とした図を図 3.3.4-57 に示す。

図 3.3.4-55　試験状況

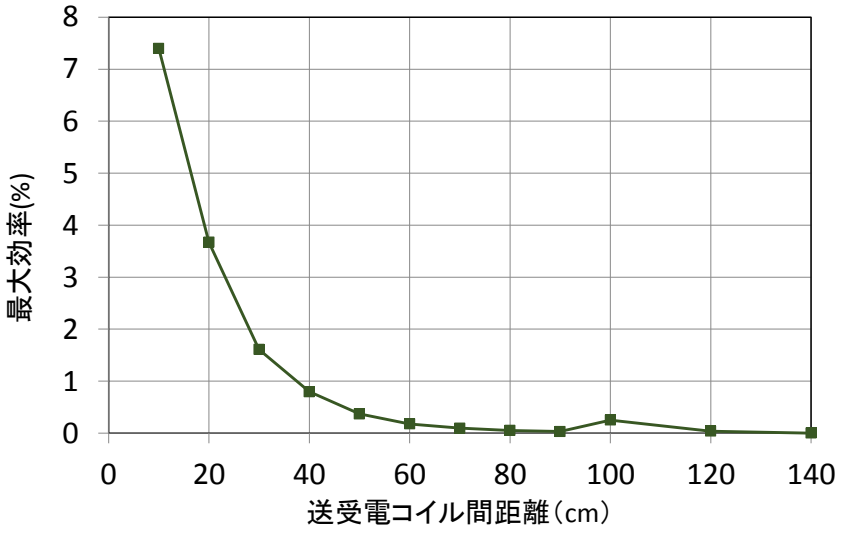



図 3.3.4-56　電力伝送試験結果

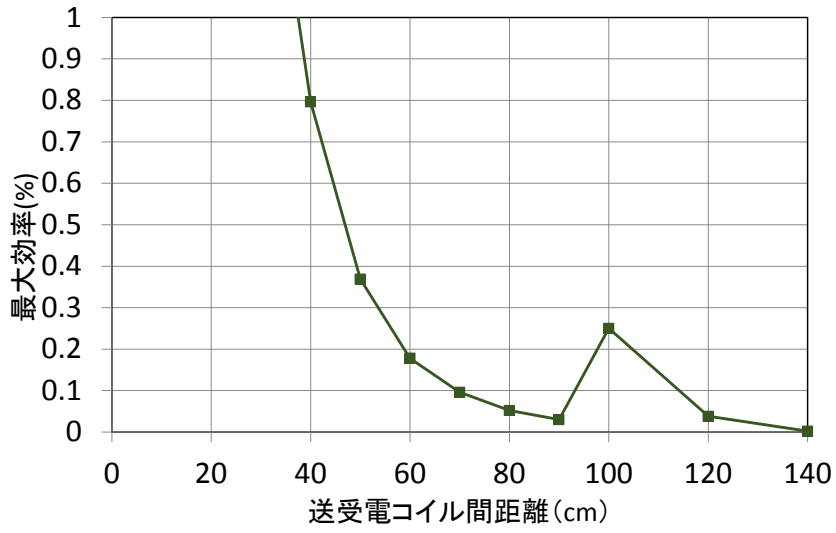



図 3.3.4-57　電力伝送試験結果（縦軸の最大値 1）

b)送受電コイル間が空気の試験（本試験）

(3)で作成した受電コイル①と送電コイルを用いて、送受電コイルの距離を 0~0.6m として 10cm 間隔で電力伝送試験を行った。試験では(4)で設定した 100~120kHz のうち 108.76kHz を利用して試験を行った。図 3.3.4-58 に試験状況を示す。本測定では、受電コイル①にフェライトを入れた場合と入れない場合の比較も行った。利用したフェライトは PE22(TDK 製)である。

図 3.3.4-59 にフェライトを入れてない場合の測定結果を示す。また、図 3.3.4-60 にフェライトを入れた場合の相互インダクタンスの測定結果を示す。

図 3.3.4-58　試験状況

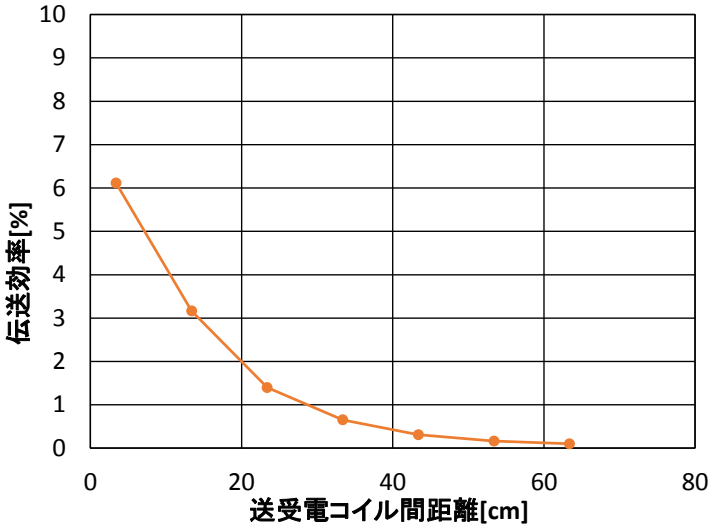



図 3.3.4-59　電力伝送試験結果（フェライトなし）

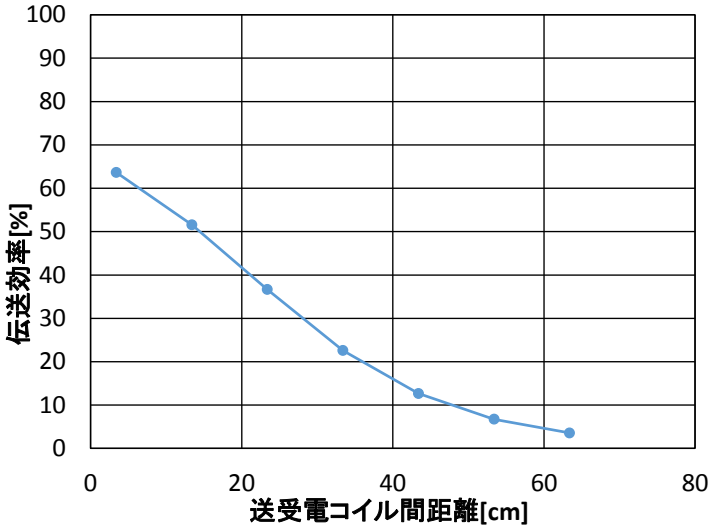



図 3.3.4-60　電力伝送試験結果（フェライトあり）

c)送受電コイル間がベントナイトの試験（本試験）

(3)で作成した受電コイル①と送電コイルを用いて、送受電コイルの距離を 0~0.6m として 10cm 間隔で電力伝送試験を行った。試験では(4)で設定した 100~120kHz のうち 108.76kHz を利用して試験を行った。図 3.3.4-61 に試験状況を示す。本測定では、受電コイル①にフェライトを入れた場合と入れない場合の比較も行った。利用したフェライトは PE22(TDK 製)である。

図 3.3.4-62 にフェライトを入れてない場合の測定結果を示す。また、図 3.3.4-63 にフェライトを入れた場合の相互インダクタンスの測定結果を示す。

図 3.3.4-61　試験状況

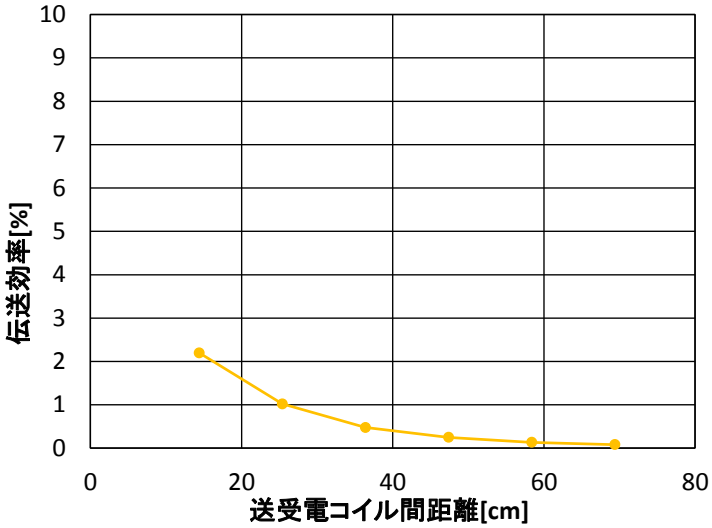



図 3.3.4-62　電力伝送試験結果（フェライトなし）

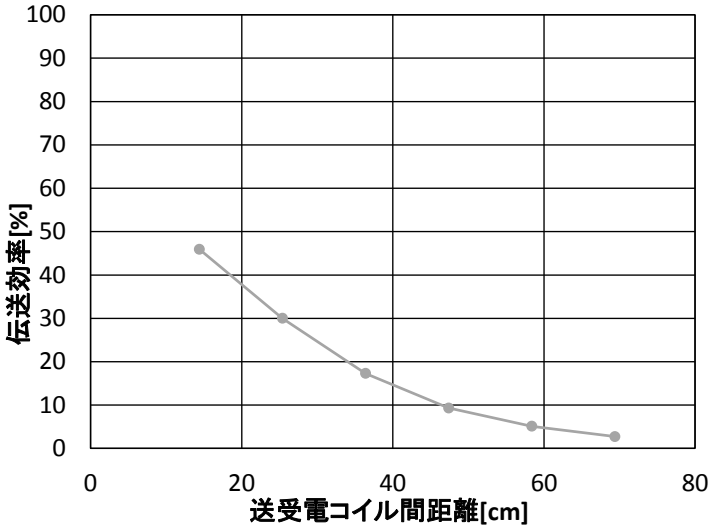



図 3.3.4-63　電力伝送試験結果（フェライトあり）

4) アクリル型枠の影響確認試験

ベントナイトブロックの型枠として利用したアクリル型枠の影響を確認するために。アクリル型枠のみの電力伝送試験を行った。試験では(4)で設定した 100~120kHz のうち 108.76kHz を利用して試験を行った。図 3.3.4-64 に試験状況を示す。本測定では、受電コイル①にフェライトを入れた場合と入れない場合の比較も行った。利用したフェライトは PE22(TDK 製)である。

図 3.3.4-65 にフェライトを入れてない場合の測定結果を示す。また、図 3.3.4-66 にフェライトを入れた場合の相互インダクタンスの測定結果を示す。図 3.3.4-65 と図 3.3.4-66 より、空気中とアクリル型枠の伝送効率はほぼ同じであるため、アクリル型枠の影響は軽微であると考えられる

図 3.3.4-64　試験状況

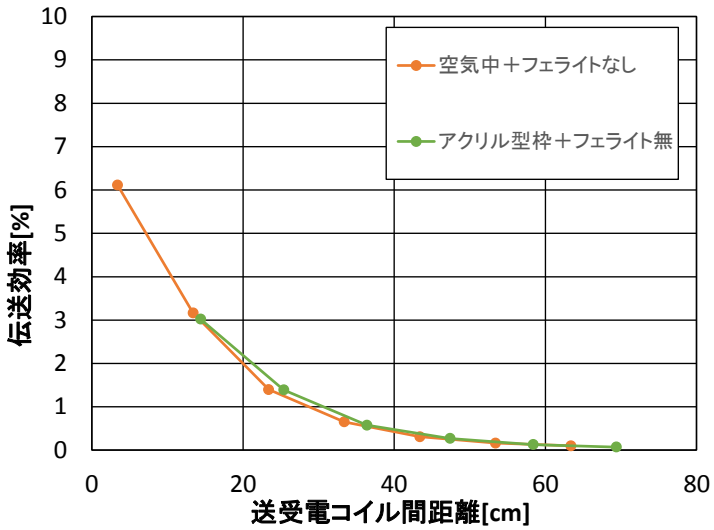



図 3.3.4-65　アクリル型枠の電力伝送試験結果（フェライトなし）

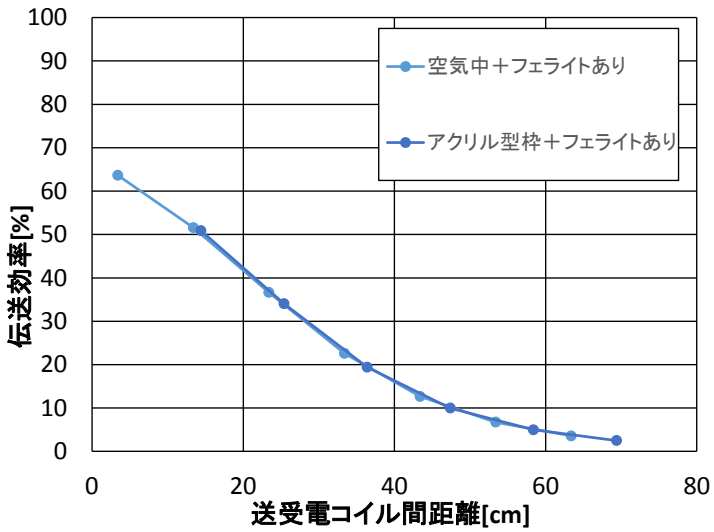



図 3.3.4-66　アクリル型枠の電力伝送試験結果（フェライトあり）

(6)試験結果と評価

1)給電試験結果のまとめ

a)相互インダクタンスを利用した最大効率

フェライトを利用しない場合

相互インダクタンスを利用した最大効率結果のうち、フェライトを利用しない試験結果を図 3.3.4-67 に示す。図 3.3.4-67 より、送受電コイル間が空気やベントナイトでも電力を送れることが分かる。

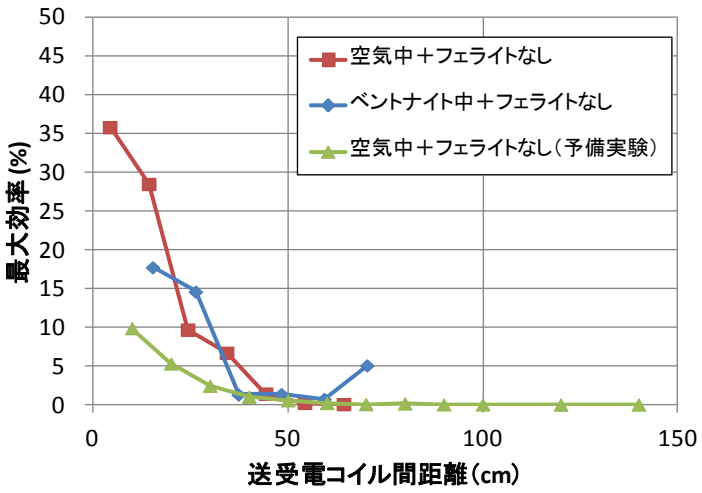



図 3.3.4-67　相互インダクタンスからの最大効率（フェライトなし）

フェライトを利用した場合

相互インダクタンスを利用した最大効率結果のうち、フェライトを利用した試験結果を図 3.3.4-68 に示す。図 3.3.4-68 より、フェライトを利用すると最大効率が大幅に上昇することが分かる。

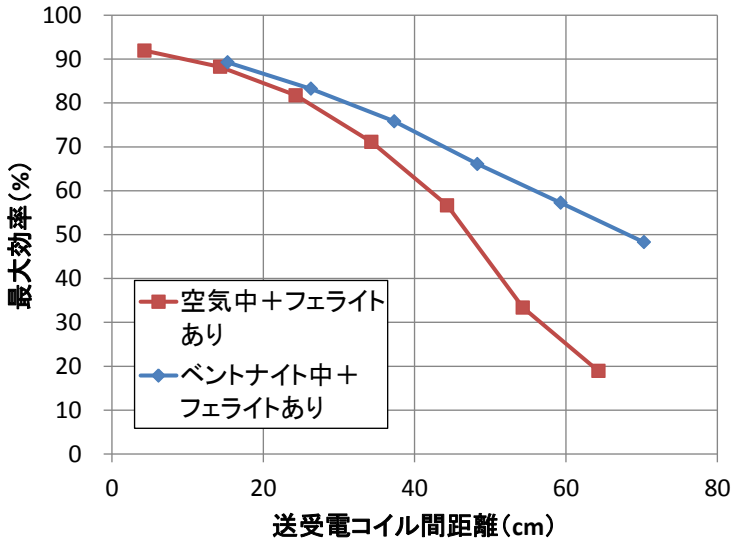



図 3.3.4-68　相互インダクタンスからの最大効率（フェライトあり）

b)給電試験結果

フェライトを利用しない場合

電力伝送試験の結果（フェライトを利用しない場合）を図 3.3.4-69 に示す。また、縦軸の最大値を 1 にした図を図 3.3.4-70 に示す。図 3.3.4-70 より、伝送効率は低いが、電力伝送は空気中でもベントナイト中でも可能であり、伝送効率の変化も見られない。

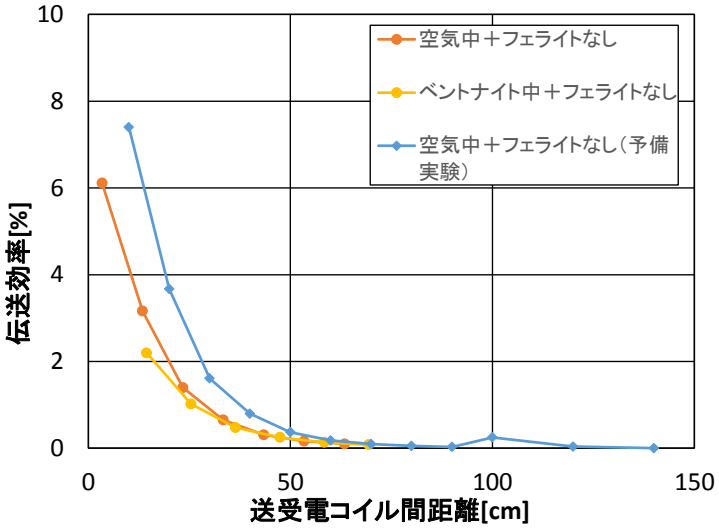



図 3.3.4-69　電力伝送試験結果（フェライトなし）

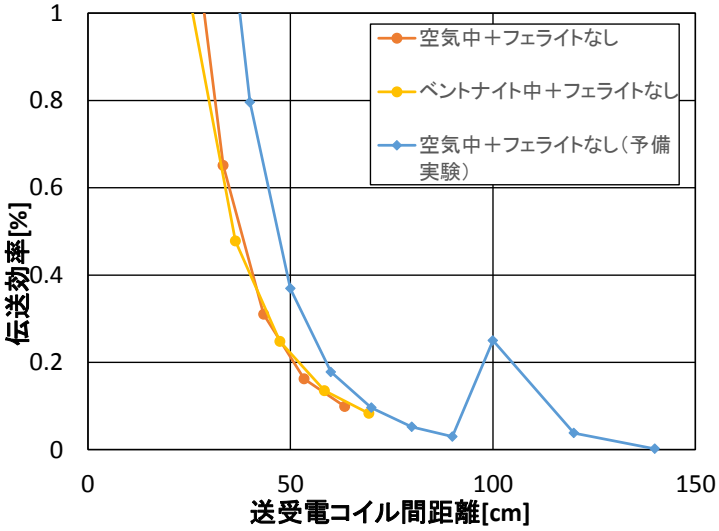



図 3.3.4-70　電力伝送試験結果（フェライトなし）（縦軸の最大値 1）

フェライトを利用した場合

電力伝送試験の結果（フェライトを利用した場合）を図 3.3.4-71 に示す。伝送効率は、空気中でもベントナイト中でもほぼ変化がなく、フェライトを利用することで伝送効率の大幅な上昇が見られた。

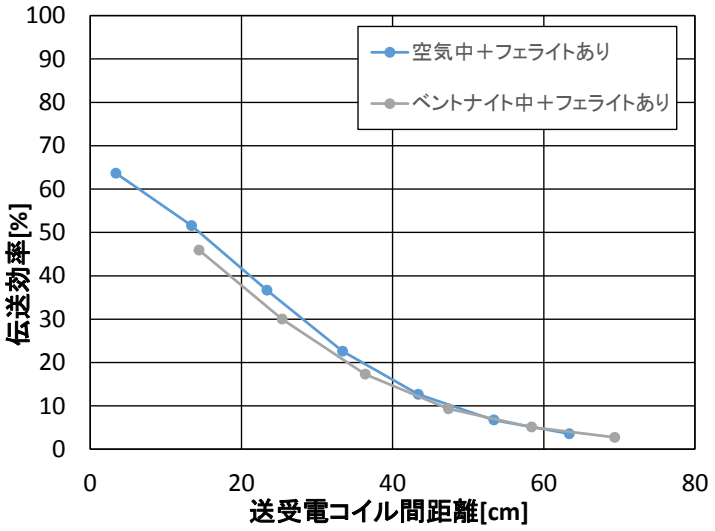



図 3.3.4-71　電力伝送試験結果（フェライトあり）

c) 相互インダクタンスから求めた最大効率と電力伝送試験による伝送効率の比較

事前実験における伝送効率（空気中、フェライトなし）の結果を図 3.3.4-72 に示す。実験値と相互インダクタンスの結果は、ほぼ同等であり、この結果からは図 3.3.4-36 の等価回路は十分使えると判断された。

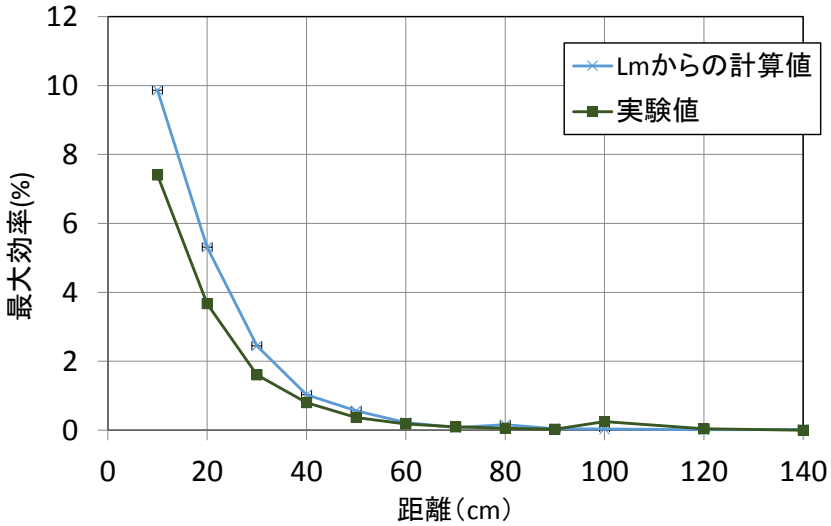



図 3.3.4-72　事前試験の伝送効率結果

図 3.3.4-73 に本試験の伝送効率の結果を示す。相互インダクタンスを用いて計算した伝送効率と、実際の電力伝送実験の結果が大きく異なることが分かる。ベントナイト中の伝送効率の

結果の乖離については、図 3.3.4-36 の等価回路がベントナイトが入ることにより利用できなったとも考えられる。しかし、図 3.3.4-72 で示したように空気中であれば、図 3.3.4-36 の等価回路が利用できるはずである。このことから、空気中での伝送効率の乖離のについては、他の要因の影響と考えられる。

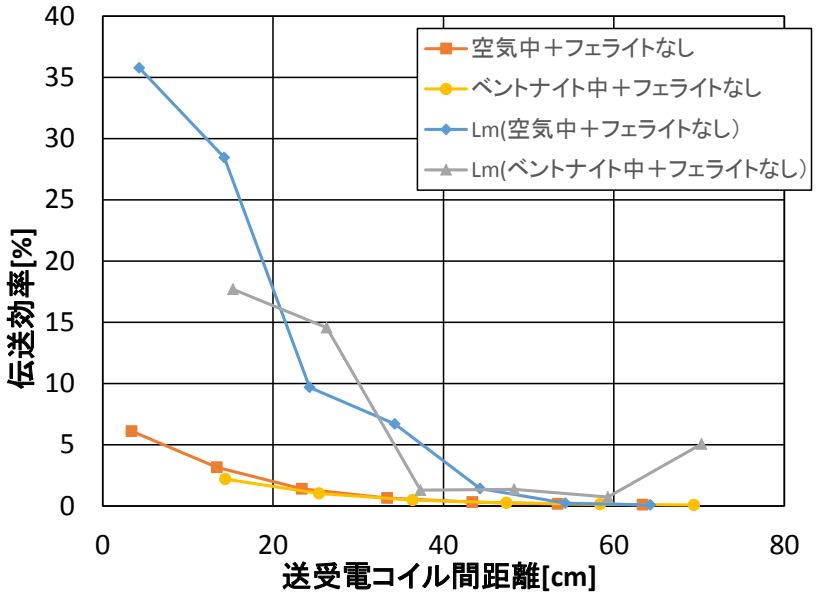



図 3.3.4-73 本試験の伝送効率結果

2)総合評価

図 3.3.4-7 で確認した処分孔上部の緩衝材の厚さ 170cm を 1/3 縮尺とした厚さ 60cm のベントナイト中を、今回の検討で作成した送受電コイルを利用して送受電することができた。また、送受電コイル間が空気であっても、ベントナイトであっても、伝送効率はほぼ同じであることを示した。また、受電コイルにフェライトを利用することで伝送効率は大幅に改善することを示した。

ただし、今回の試験結果では、送受電コイル間が長いところでの伝送効率の低さが見られた。例えば送受電コイル間が 140cm での空気中の送電では 0.1%以下の伝送効率である。ロスした電力は、送受電コイル間が長いときには、ほぼ送電コイルの銅損になるため送電コイルが発熱してしまい、長期間の電力伝送には適さないと考えられる。この問題については、受電コイルに蓄電できる機器（例えばキャパシタなど）を取り付け、短期間の電力伝送を周期的に行うようなシステムを構築することで、伝送効率が悪い長距離の電力伝送でもシステムを実現することが可能になると考えられる。

今回、相互インダクタンスの測定結果から求めた最大効率と、給電試験による伝送効率の測定結果には、有意な差がみられた。この要因については、引き続き検討が必要である。

### 3.3.5　放射性熱電気変換器による電力供給に関する検討

原環センターではモニタリング機器の配線によるバリア機能への影響を低減することが可能な地中無線モニタリング技術の開発を実施している。平成 25 年度には地中無線モニタリング技術の運用期間の拡大を目指し、長寿命の電源について調査を実施し、有力な候補の一つとして放射性同位体熱電気転換器（Radioisotope Thermoelectric Generator、 以下 RTG）を選出した。

RTG を地層処分場における地中無線モニタリング装置の電源に適用する際の課題として、熱影響と電磁波伝搬への影響が挙げられる。RTG は内部に放射性同位体による熱源を持っているため、時間の経過とともに周辺に熱が伝播され、発電効率を低下させるとともに地中無線モニタリング装置に影響を与えることが懸念される。また、RTG は放射線の遮へいの観点で金属製部材等が使用されており、地中無線装置の電磁波による通信に影響を与えることが懸念される。

本項では、RTG を地中無線送信装置または中継装置の電源として使用することを想定し、無線装置の近傍に RTG を設置した場合の熱伝播と地中無線モニタリング装置に与える影響及び RTG の存在が地中無線装置の電磁波による通信に与える影響を検討し、RTG の配置方法に関する知見として整理した。

#### (1)　RTG の概要

RTG の概要を[4]より以下に再掲する。

RTG は放射性崩壊から力を取り出す発電機である。熱電対を用い、ゼーベック効果によって放射性物質の崩壊熱を電気に変換する。

RTG は人工衛星、宇宙探査機、ソビエト連邦が北極圏に設置した灯台のように遠隔無人装置の電源として用いられる。長期間に渡り数百ワット以下の電力を無人の状況で、太陽電池の設置ができない場所で使用される。

RTG の構造は非常にシンプルなものである。主要部は頑丈な放射性物質（燃料）の格納容器であり、熱電対が容器の壁の中に設置され、それぞれの熱電対の端はヒートシンクに繋がれている。燃料の放射性崩壊は熱を産み出し、それが熱電対を流れてヒートシンクに達し、この過程で電気が発生する。

放射性同位体としては $^{238}$Pu（プルトニウム）、$^{244}$Cm（キュリウム）、$^{90}$Sr（ストロンチウム）がよく用いられる。$^{238}$Pu は、防護壁が最も薄くてもよく、寿命が最も長い。エネルギー放出は、kg 当たり 0.54kW である。鉛防護壁の厚さが 25mm 以下ですむ同位体は 3 つしかない。$^{238}$Pu は、その 3 つの中で最も望ましいもので、鉛防護壁の厚さは 2.5mm 以下で良く、格納容器が適切なものであれば、$^{238}$Pu の RTG は、多くの場合、鉛防護壁を必要としない。$^{238}$Pu は、酸化プルトニウム(IV)の形で、最も広範に RTG の燃料になる。$^{238}$Pu は、87.7 年の半減期を持ち、出力密度も手頃で、ガンマ線や中性子線の放出もかなり少ない。

$^{90}$Sr はベータ崩壊で崩壊するが、ガンマ線の放出は無視できるほど少ないため、防護壁はほ

とんど必要ない。半減期は 28.8 年で $^{238}$Pu よりも短く、崩壊エネルギーも小さい。そのため、出力密度は kg 当たりわずか 0.46kW である。エネルギー出力が小さいため、$^{238}$Pu よりも低い温度にしかならず、効率も低い。$^{90}$Sr は、核分裂後に高収率で得られる廃棄物であり、安い価格で大量に調達することができる。

$^{244}$Cm は自発核分裂によりガンマ線や中性子線を発生し、厚い防護壁が必要とする。

RTG は放射性物質からの熱を電気に変換するのに熱電対を用いている。熱電対は、非常に信頼性が高く長持ちするものの効率が非常に悪い。効率が 10%を上回ることはなく、ほとんどの RTG の効率は 3 から 7%である。宇宙ミッションに用いられる熱電対の材料は、ケイ素-ゲルマニウム合金、テルル化鉛、テルル化アンチモン-ゲルマニウム-銀合金（TAGS）等である。

以上をまとめると、RTG は放射性同位体の発熱をゼーベック素子により電力に変換するため、超長期にわたり発電を継続できる。人工衛星、惑星探査機や北極圏における地震観測所、灯台、無線標識など無人で動く設備の電源として使用されていて、長期にわたって比較的大きな電力を供給することが可能である。しかし、放射性同位体を利用するため、取り扱いの難しさが課題として残る。

高レベル放射性廃棄物地層処分においては廃棄体（放射性同位体）が熱源として活用できるが、廃棄体近傍では十分な温度差を維持できない可能性がある。また、廃棄体の利用は処分の観点で好ましくないと考えられる。

そこで、本調査では、高レベル放射性廃棄物地層処分において処分坑道内に地中無線装置の電源として RTG を用いた場合の適用可能性を検討した。

(2) 検討方法

本調査における検討は以下の手順で実施した。

①RTG の発電及び熱影響の予備的評価（温度）
②RTG の発熱が地中無線送信装置に与える影響評価（温度）
③RTG の存在が地中無線の電磁波の伝播特性に与える影響評価（電磁波）

①、③及び④における数値解析には 3 次元電磁界解析・熱解析ソフト「JMAG version13.1」を用いた。本ソフトは電気機器の設計・開発のためのシミュレーションソフトウェアである。

(3) RTG の発電及び熱影響の予備的評価

本検討では、地下深部が緩衝材及び坑道埋め戻し材によって埋め戻された状態を前提に、埋め戻し材内に設置された RTG が地中無線送信装置を稼働させるのに必要な電気を出力できるかを検討した。ここで必要な電池出力は、ANDRA との共同研究として MHM URL で実施している長期モニタリングに用いている地中無線送信装置に必要な電池出力 33W を参考値とした。

また、RTG の発熱が地中無線送信装置に与える影響評価の予備的検討として、一つの RTG が近傍の地中無線送信装置に与える影響を確認した。ここで地中無線送信装置の許容温度は、通常の電池を有する送信装置での許容温度 40℃を参考値とした。

1) 解析条件

解析条件を次に示す。

発熱体は放射性物質＋遮蔽材とし、放射性物質は $^{238}PuO_2$ とした。

$^{238}Pu$ の発熱量は 540 W／kg であり、$PuO_2$ の密度は $11.5\times10^3$ kg／$m^3$ である。よって、発熱量（$Wm^{-3}$）$=11.5\times10^3\times\frac{238}{238+16+16}\times540=5.47\times10^6$（$Wm^{-3}$）となる。

本検討にて参照した GPHS-RTG（NASA の惑星探査衛星に搭載されている RTG）では 7.8 kg の燃料で 4400 W の熱出力を得ている。発熱体の体積の多くは遮蔽材が占めており、放射性物質の体積に比べて十分大きいため、解析の効率化のため放射性物質はモデル化せず、発熱体全体を熱源として設定した。発熱体の物性値には銅を用いた。

断熱材の物性値はコバレントマテリアル社の工業炉用断熱材 THERMOSCATT[19]を参考に設定した。

GPHS-RTG の発電ユニットの詳細は不明であるため、高木製作所のゼーベック熱発電ユニットを参照した。このモジュールの体積の多くは 10 mm の厚みのバイトンとよばれるゴムが占めている。しかしながら、バイトンの物性値が不明であるため、本検討ではニトリルゴムの物性値を使用した[20]。発電モジュールの面積は 0.1256 $m^2$（半径 0.2m の円）とした。高木製作所のゼーベック熱発電ユニットの場合、0.036 $m^2$ であり、GPHS-RTG の発電ユニットの詳細は不明であるが、概観図より同程度（半径 0.2m の円）と考えられる。

ヒートシンクは銅とした。

埋め戻し材はベントナイトとし、HLW 第 2 次取りまとめを参考に物性値を設定した。

地中無線送信装置の容器は PVC とし、地中無線送信装置のコイルは銅とした。

また、解析は下記の高温ケースと低温ケースの 2 種類を考えた。

<u>①高温ケース</u>

発電モジュールの両面の温度差は、地中無線送信装置で必要な電池出力 33W となる 100℃程度を目安とする（高温ケース）。高木製作所のゼーベック熱発電ユニットの場合[21]、150℃

程度の温度差で 50W の電気出力を得ているためである。(カタログによると高温側の最高加熱温度が 200℃、低温側を水冷するので、温度差は 150℃と想定され、最大発電能力は 50W であった。)

電気出力が明らかにされている MM-RTG の場合 300℃程度の温度差で 110W の電気出力を得ている[22]。(高温側 823K、低温側 510K、温度差 313K、温度差出力 110W として効率の計算が行われている。) このことから、上記の高木製作所のゼーベック熱発電ユニットの電気出力は、RTG の熱発電ユニットの参考値として妥当であると考えられる。

なお、このケースでは RTG が埋め戻し材に接触する箇所の温度条件は設けない。

②低温ケース

RTG が埋め戻し材に接触する箇所の温度を 100℃以下とする（低温ケース)。

以上を踏まえ、解析に使用する物性値を表 3.3.5-1 に示す。

表 3.3.5-1　解析に使用する物性値

| 部品 | 密度 ($g/cm^{-3}$) | 熱伝導率 ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$) | 比熱 ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$) | 材質 |
|---|---|---|---|---|
| 発熱体 | 8.93 | 50 | 380 | 銅 |
| 断熱材 | 0.8 | 0.22 | 1000 | THERMOSCATT |
| 発電モジュール | 1.0 | 0.25 | 1960 | ニトリルゴム |
| ヒートシンク | 8.93 | 50 | 380 | 銅 |
| 埋め戻し材 | 1.712 | 0.78 | 590 | ベントナイト |
| PVC | 1.4 | 0.2 | 1000 | PVC[23] |
| コイル | 8.93 | 50 | 380 | 銅 |

2)解析モデル

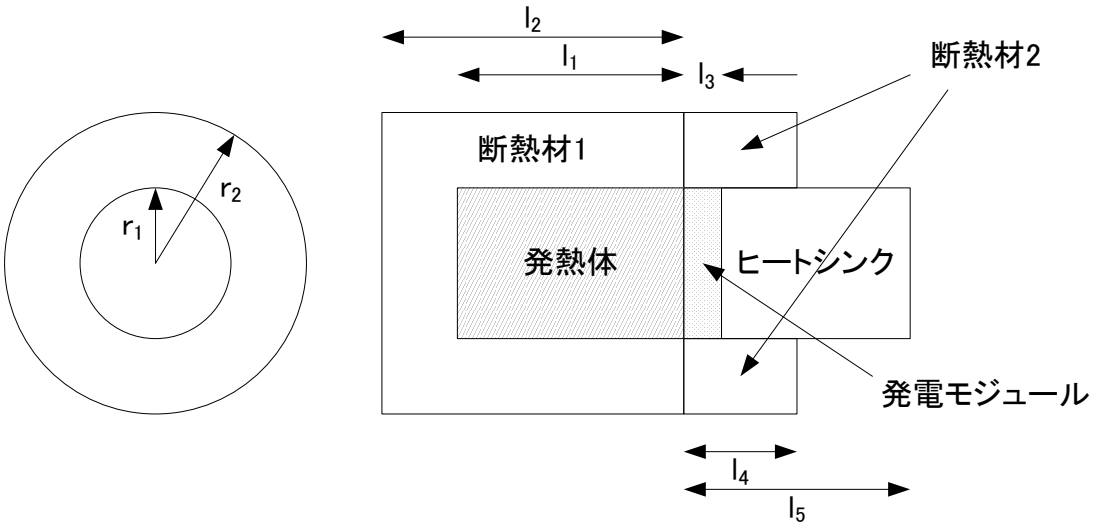
解析領域

RTG の概念図を図 3.3.5-1 に示す。初期条件、境界条件、解析モデルの概念図を図 3.3.5-2 に示す。解析領域は 400 m×400m×400m とする。解析領域の中心に RTG を設置して、これ以外の領域はと埋め戻し材とした。境界面は温度固定境界とした。

温度の設定としては、地表面を 15℃、地温勾配を 3℃/100m とし、深度 500m に RTG をセットすることとした。これにより、RTG 深度近傍の固定境界の温度は 30℃、深度 300m にあたる解析領域上面は 24℃、深度 700mにあたる解析領域下面は 36℃となる。また、側部の境界条件は上下方向に 3 分割し、上から 24℃、30℃、36℃とした。

初期温度は RTG、埋め戻し材すべて 30℃とした。発熱体の発熱は 20,700 W／$m^3$（高温ケース)、10,350 W／$m^3$（低温ケース）とした（表 3.3.5-2)。発熱体の体積は 0.0628 $m^3$ なので、発熱量は 1300 W（高温ケース)、650 W（低温ケース）である。実際に放射性物質を用いると

すると $PuO_2$ で 0.0002 $m^3$（高温ケース）、0.0001$m^3$（高温ケース）ほどの体積となり、上述の解析条件と整合している。




| 変数 | r1 | r2 | $l_1$ | $l_2$ | $l_3$ | $l_4$ | $l_5$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.6 | 0.01 | 0.5 | 1.0 |

図 3.3.5-1　RTG の概念図

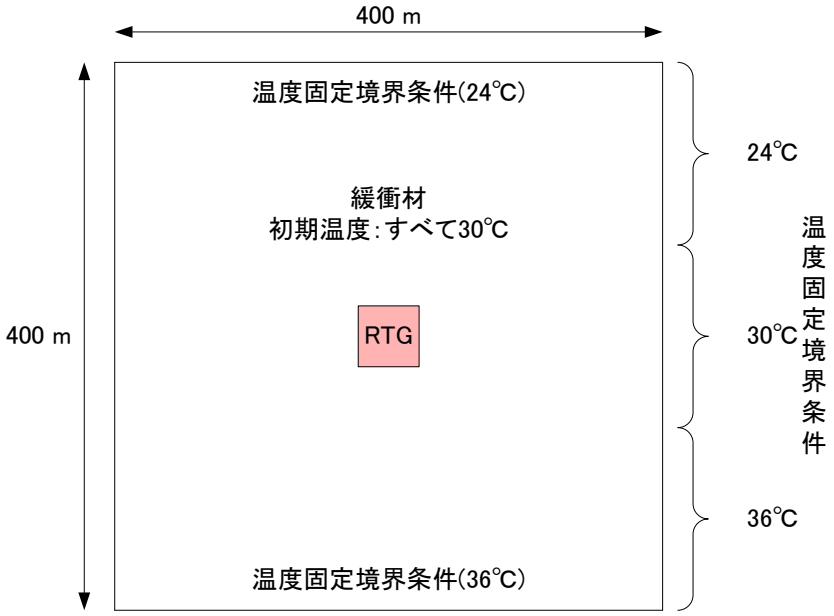



図 3.3.5-2　初期条件、境界条件、解析モデルの概念図

表 3.3.5-2　緩衝材内に設置された RTG の適用可能性を評価するための解析ケース

| 解析ケース | 発熱量 | 期間 |
|---|---|---|
| ①高温ケース | 1300 W | 1 年、10 年 |
| ②低温ケース | 650 W | 1 年、10 年 |

3)　解析結果

図 3.3.5-3 に温度分布を描く線分の概念図を示す。線分 1 は RTG の中心を通る線分、線分 2 は発熱体の高温部を通る線分、線分 3 はヒートシンクの露出部分を通る線分である。

①高温のケース

図 3.3.5-4 に 1 年後の線分 1 上の温度分布を示す（高温）。図 3.3.5-5 に 1 年後の線分 1 を通る xy 平面上の温度分布を示す（高温）。

図 3.3.5-6 に 1 年後の線分 2 上の温度分布を示す（高温）。図 3.3.5-7 に 1 年後の線分 2 を通る yz 平面上の温度分布を示す（高温）。図 3.3.5-8 に 1 年後の線分 3 上の温度分布を示す（高温）。図 3.3.5-9 に 1 年後の線分 3 を通る yz 平面上の温度分布を示す（高温）。

図 3.3.5-10 に 10 年後の線分 1 上の温度分布を示す（高温）。図 3.3.5-11 に 10 年後の線分 1 を通る xy 平面上の温度分布を示す（高温）。

図 3.3.5-12 に 10 年後の線分 2 上の温度分布を示す（高温）。図 3.3.5-13 に 10 年後の線分 2 を通る yz 平面上の温度分布を示す（高温）。

図 3.3.5-14 に 10 年後の線分 3 上の温度分布を示す（高温）。図 3.3.5-15 に 10 年後の線分 3 を通る yz 平面上の温度分布を示す（高温）。

発電モジュールの両面の温度差は 1 日後に 88℃に達し、その後徐々に上昇して、1 年後に 100℃に達するが、その後の変化は小さく 10 年後も 100℃である。10 年後でも埋め戻し材に接する箇所の温度は 165℃ほどである。

②低温のケース

図 3.3.5-16 に 1 年後の線分 1 上の温度分布を示す（低温）。図 3.3.5-17 に 1 年後の線分 1 を通る xy 平面上の温度分布を示す（低温）。

図 3.3.5-18 に 1 年後の線分 2 上の温度分布を示す（低温）。図 3.3.5-19 に 1 年後の線分 2 を通る yz 平面上の温度分布を示す（低温）。

図 3.3.5-20 に 1 年後の線分 3 上の温度分布を示す（低温）。図 3.3.5-21 に 1 年後の線分 3 を通る yz 平面上の温度分布を示す（低温）。

図 3.3.5-22 に 10 年後の線分 1 上の温度分布を示す（低温）。図 3.3.5-23 に 10 年後の線分 1

を通る xy 平面上の温度分布を示す（低温）。

図 3.3.5-24 に 10 年後の線分 2 上の温度分布を示す（低温）。図 3.3.5-25 に 10 年後の線分 2 を通る yz 平面上の温度分布を示す（低温）。

図 3.3.5-26 に 10 年後の線分 3 上の温度分布を示す（低温）。図 3.3.5-27 に 10 年後の線分 3 を通る yz 平面上の温度分布を示す（低温）。

発電モジュールの両面の温度差は 1 日後に 44℃に達し、その後徐々に上昇して、1 年後に 50℃に達するが、その後の変化は小さく 10 年後も 50℃である。10 年後でも埋め戻し材に接する箇所の温度は 97℃ほどである。

①高温ケースと②低温ケースの比較として、図 3.3.5-28 に 10 年後の線分 1 の結果を、図 3.3.5-29 に 10 年後の線分 2 の結果を、図 3.3.5-30 に 10 年後の線分 3 の結果を示す。

発熱体の違いが温度差として表現されている。

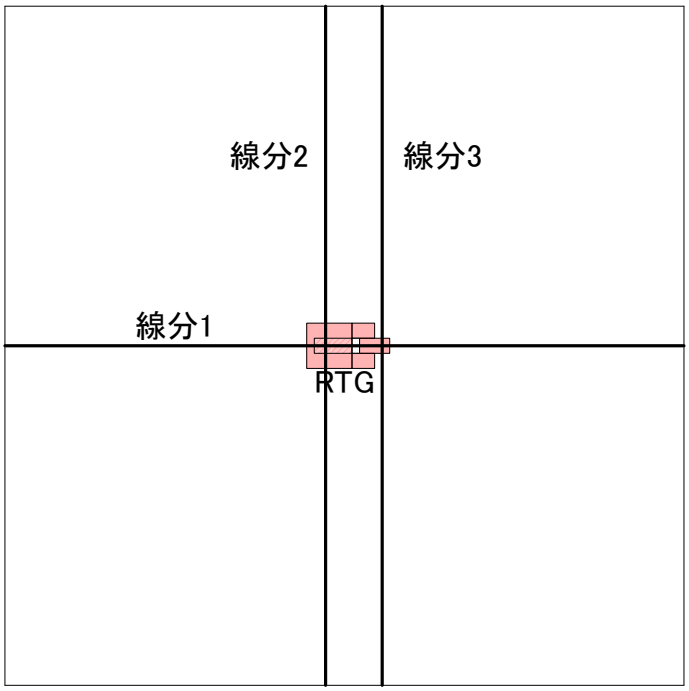



図 3.3.5-3　温度測定点の概念図

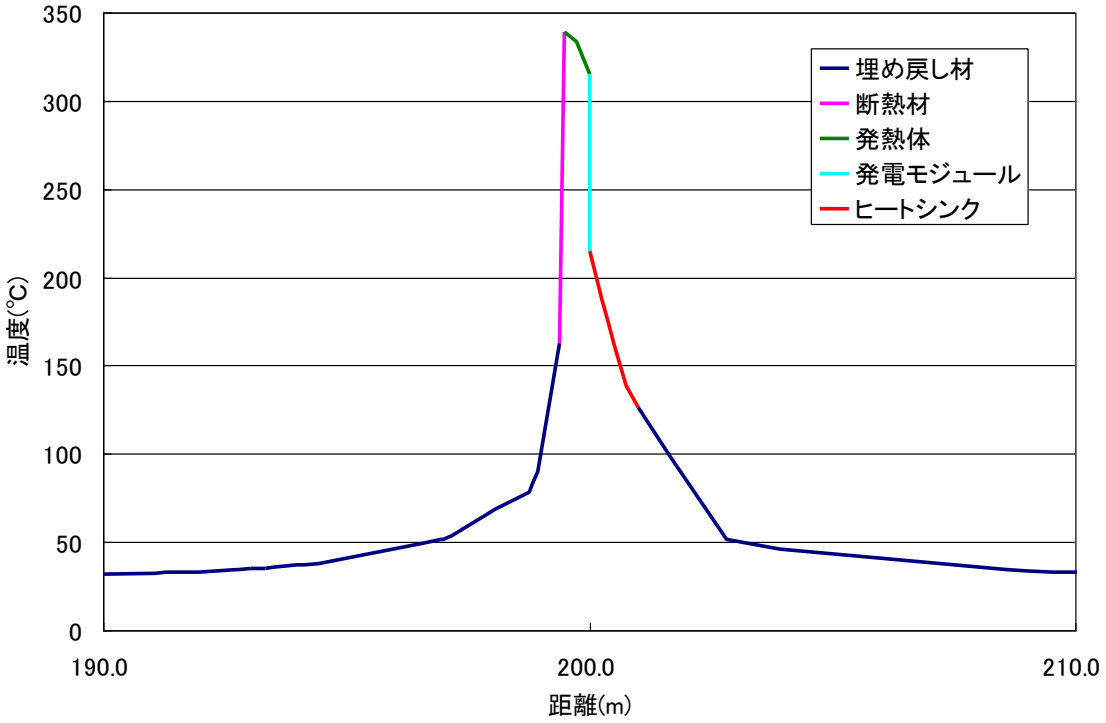



図 3.3.5-4　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 1、中心付近）

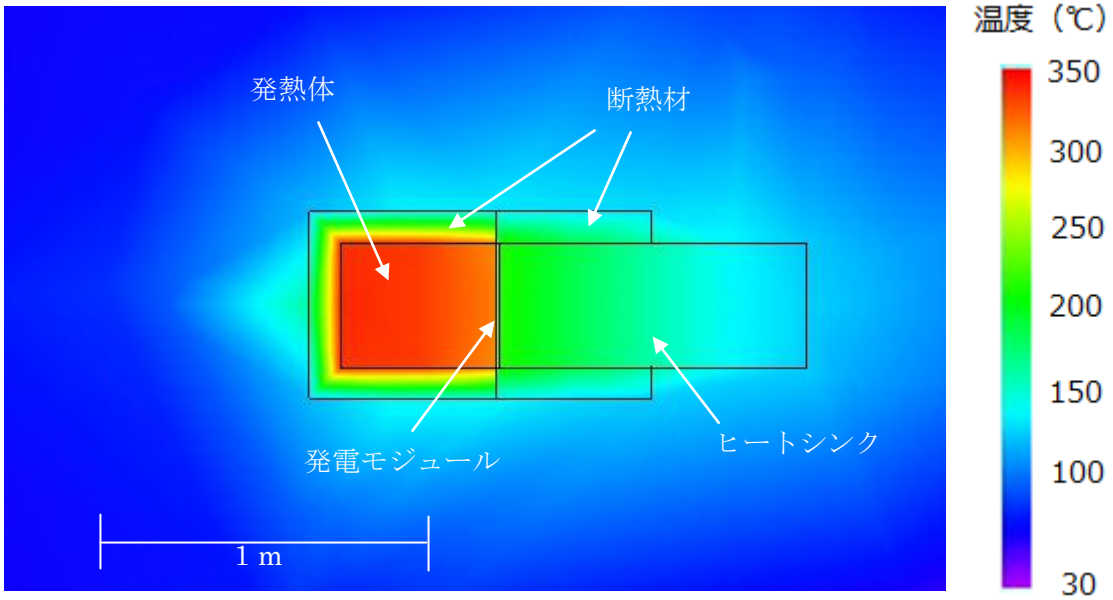



図 3.3.5-5　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 1 を通る xy 平面、中心付近）

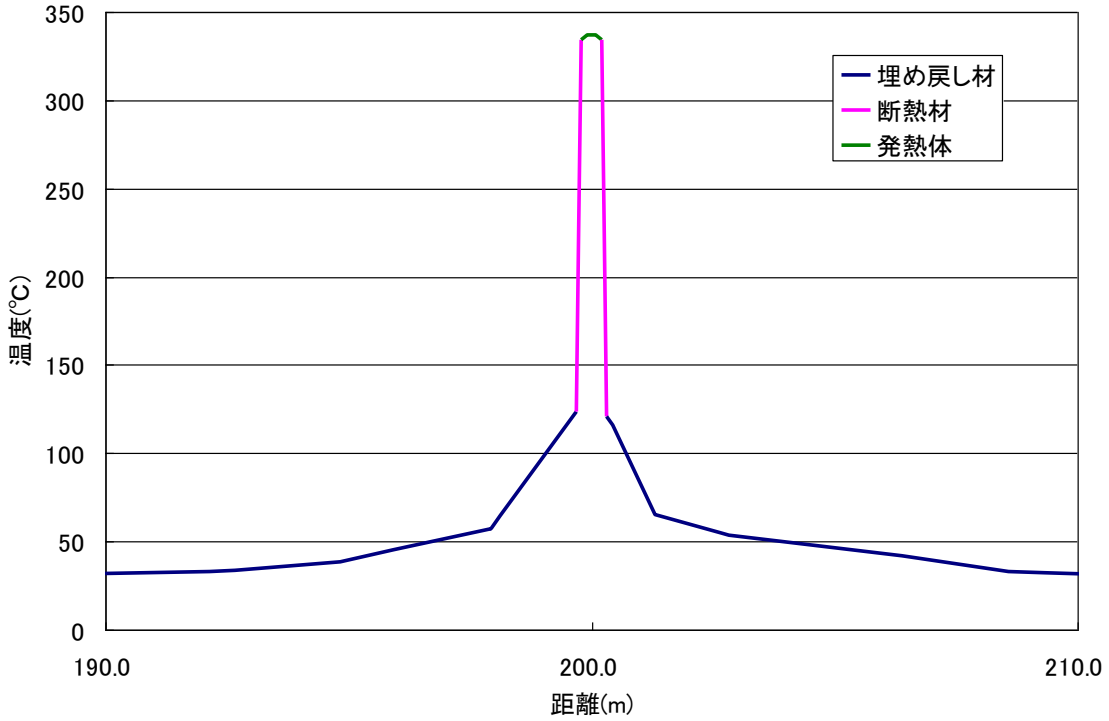



図 3.3.5-6　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 2、中心付近）

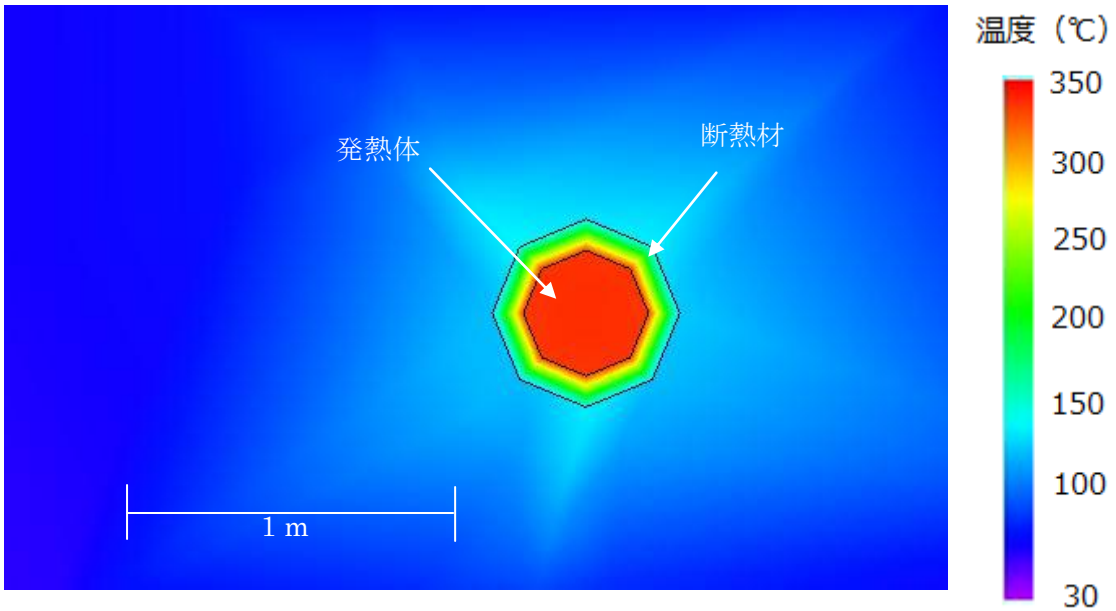



図 3.3.5-7　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 2 を通る yz 平面、中心付近）

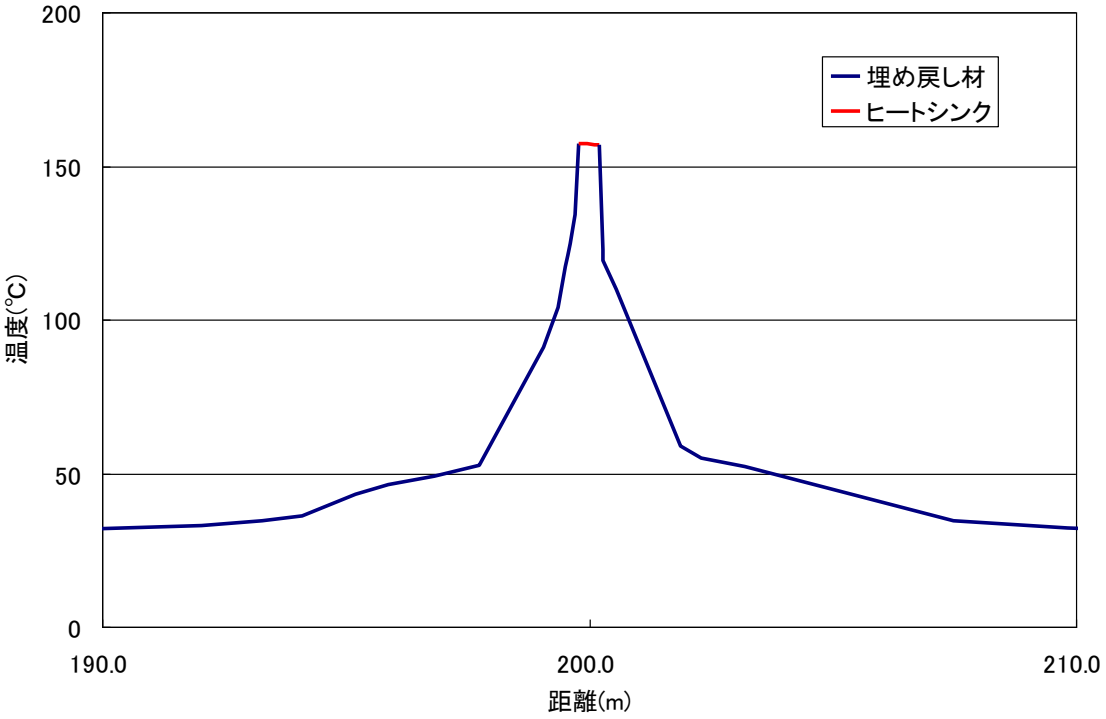



図 3.3.5-8　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 3、中心付近）

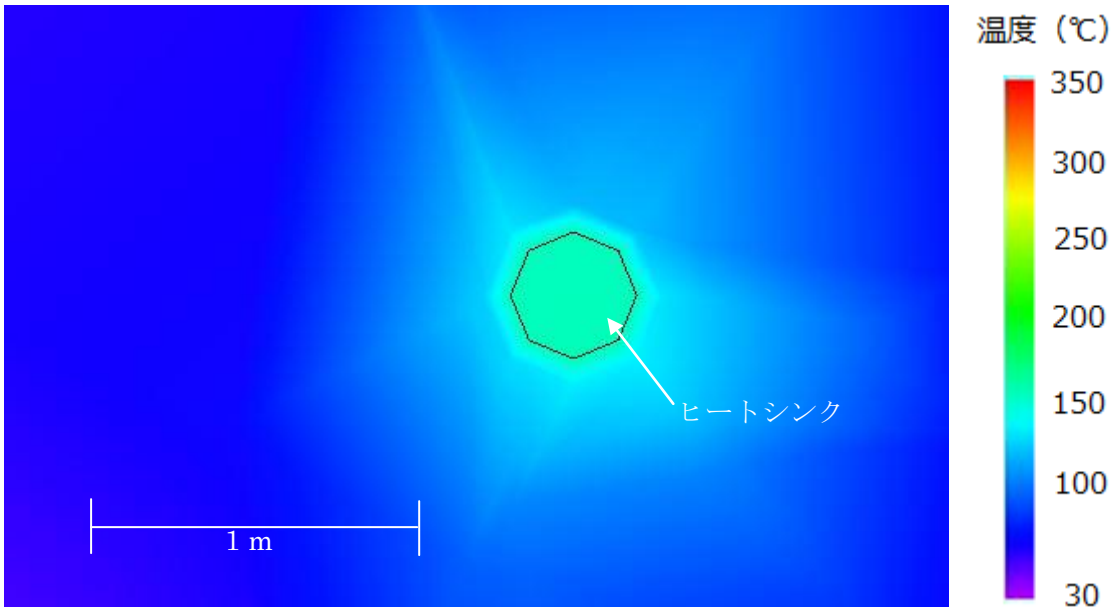



図 3.3.5-9　1 年後の温度分布（①高温ケース、線分 3 を通る yz 平面、中心付近）

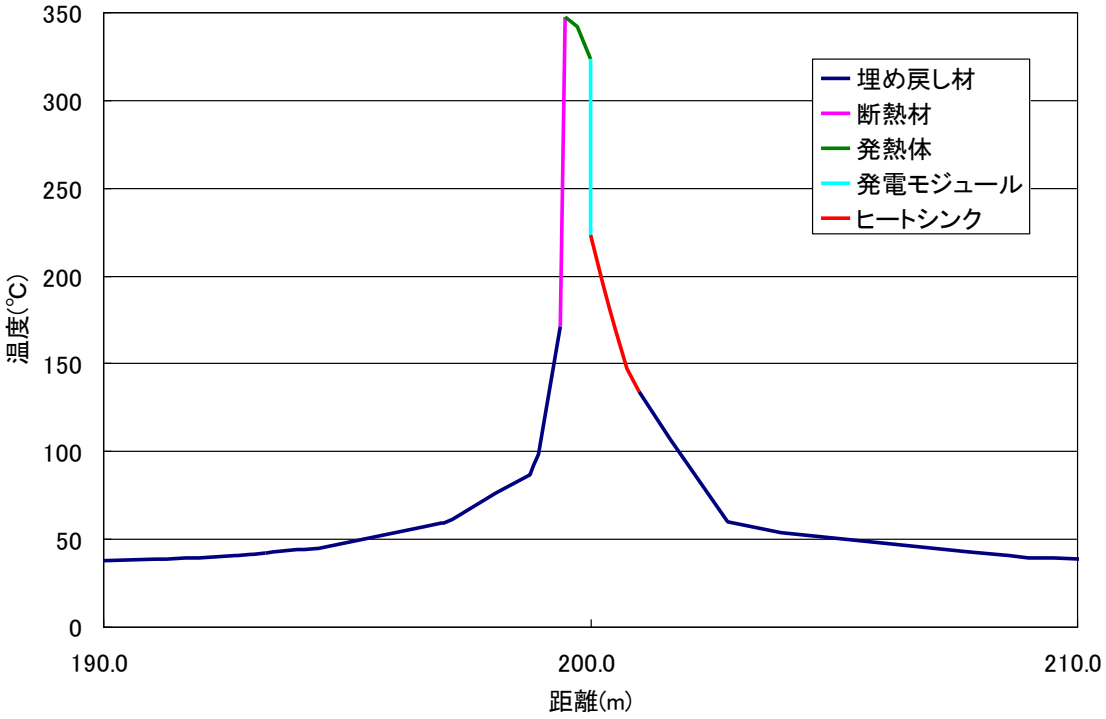



図 3.3.5-10　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 1、中心付近）

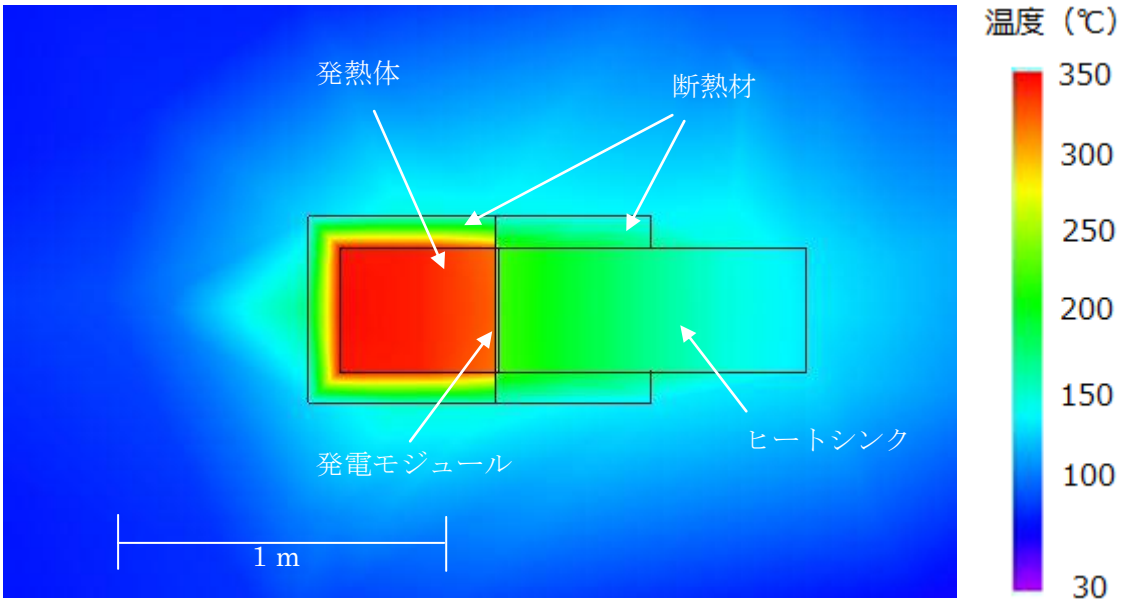



図 3.3.5-11　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 1 を通る xy 平面、中心付近）

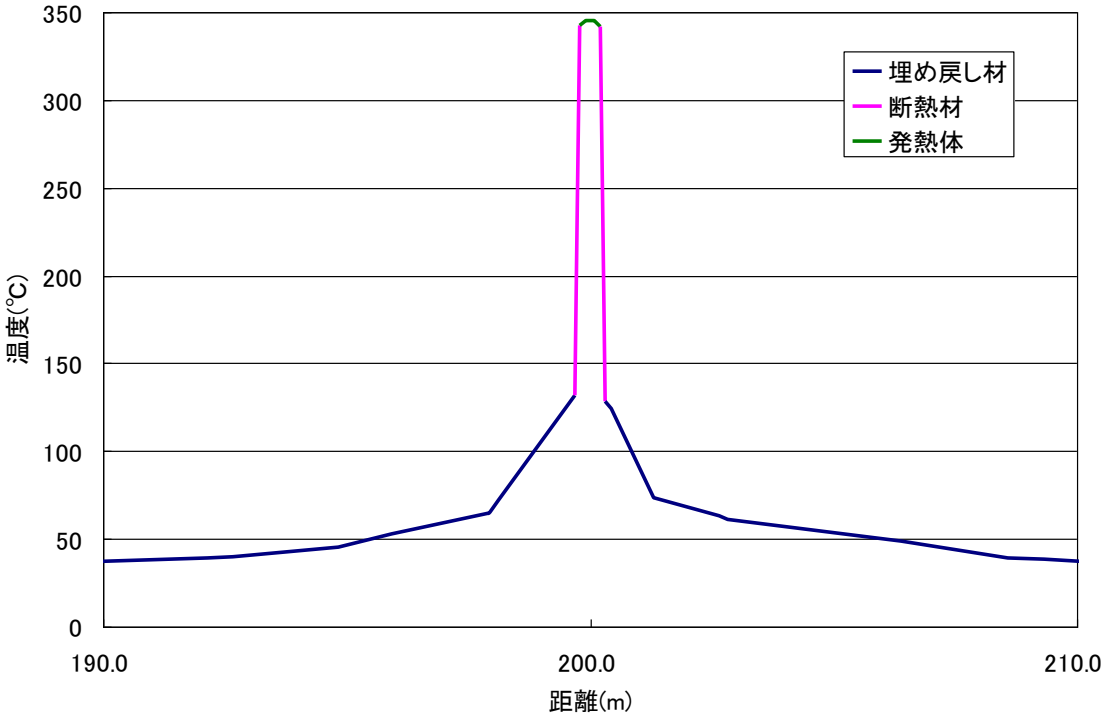



図 3.3.5-12　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 2、中心付近）

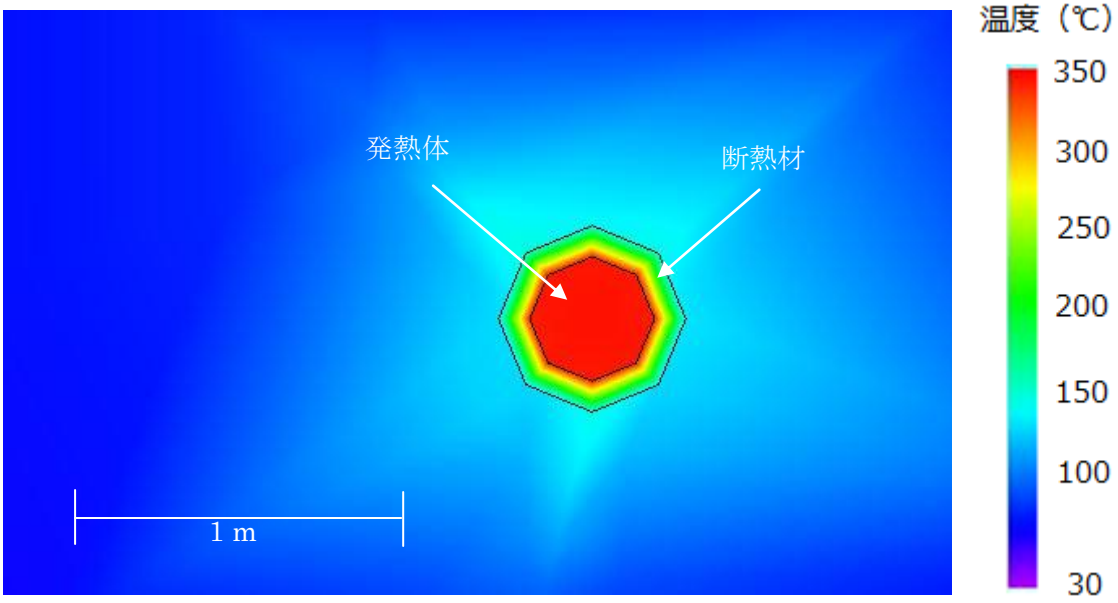



図 3.3.5-13　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 2 を通る yz 平面、中心付近）

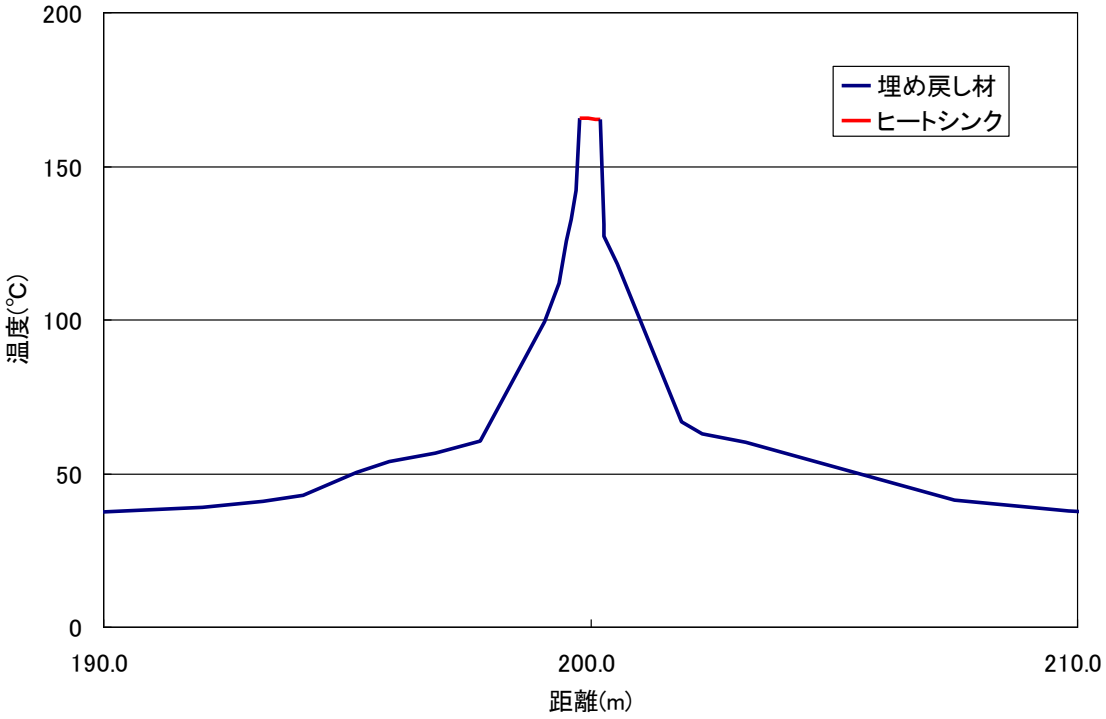



図 3.3.5-14　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 3、中心付近）

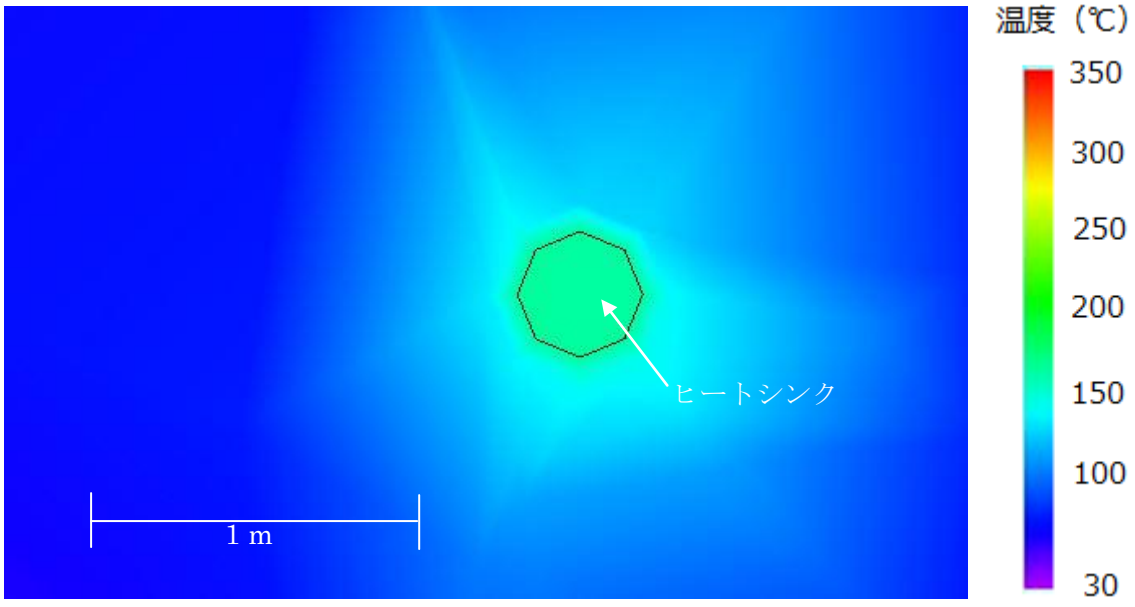



図 3.3.5-15　10 年後の温度分布（①高温ケース、線分 3 を通る yz 平面、中心付近）

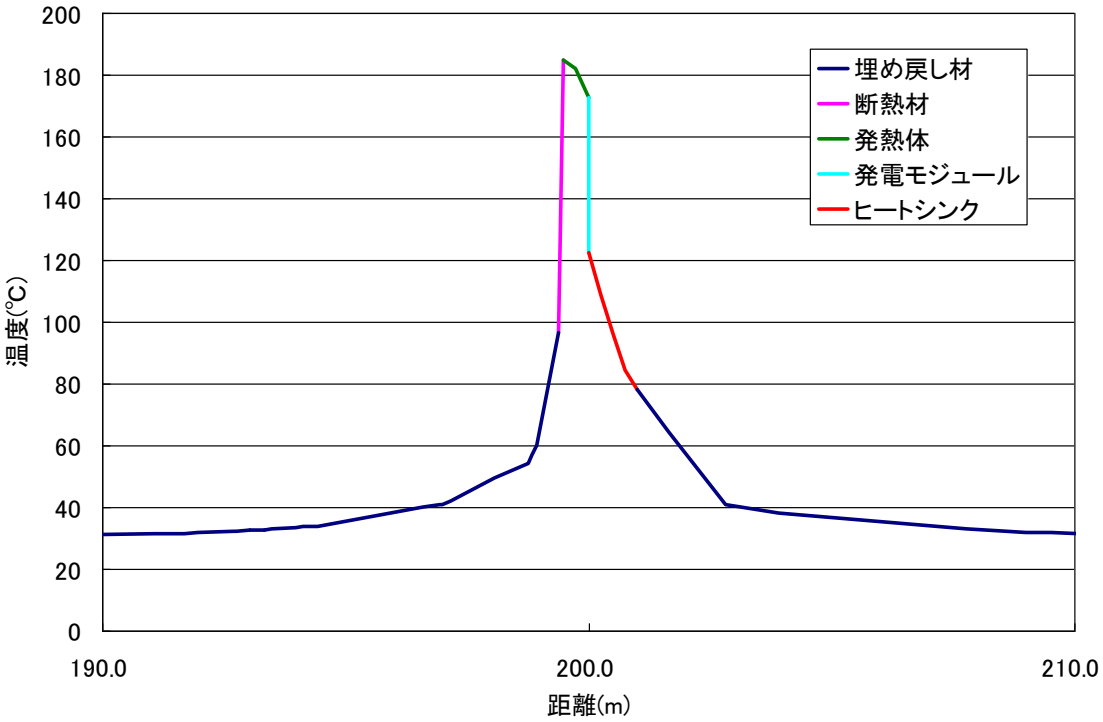



図 3.3.5-16　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 1、中心付近）

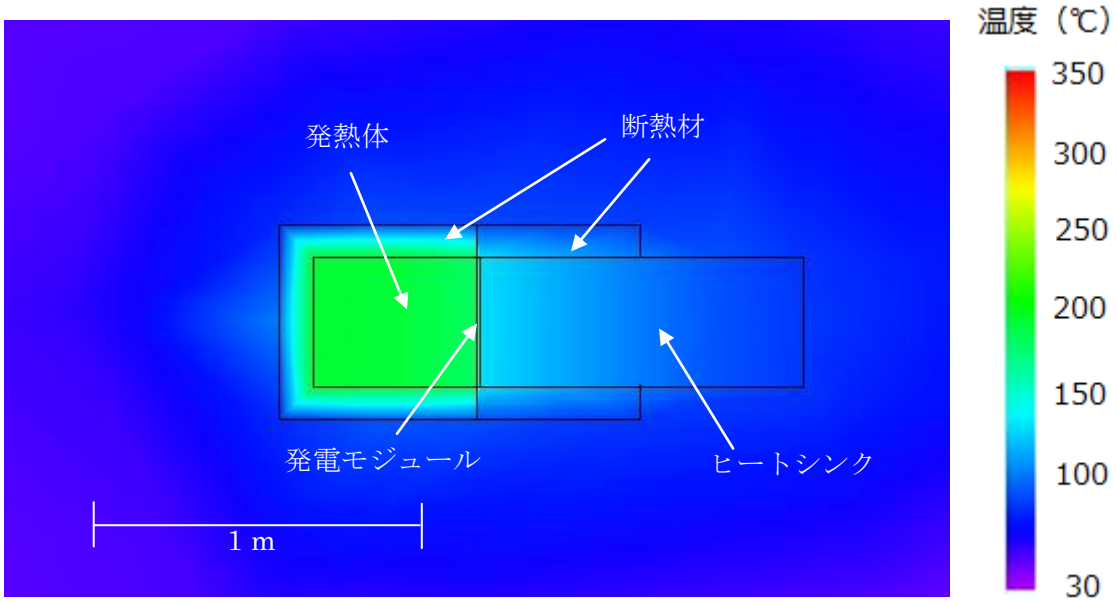



図 3.3.5-17　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 1 を通る xy 平面、中心付近）

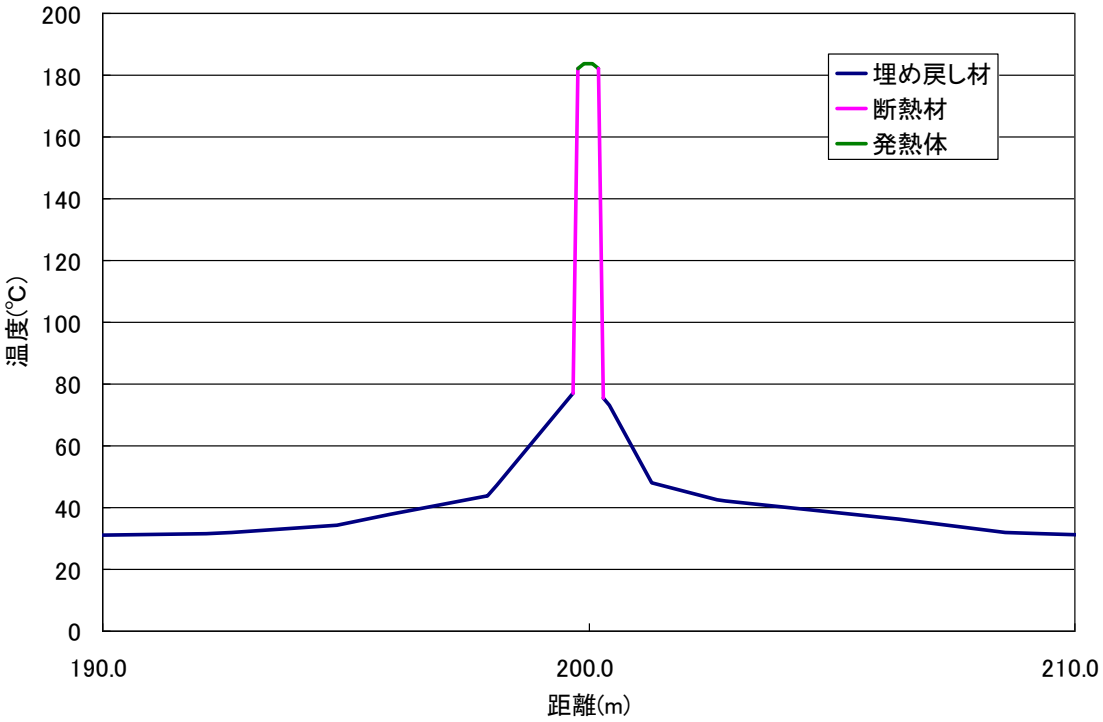



図 3.3.5-18　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 1、中心付近）

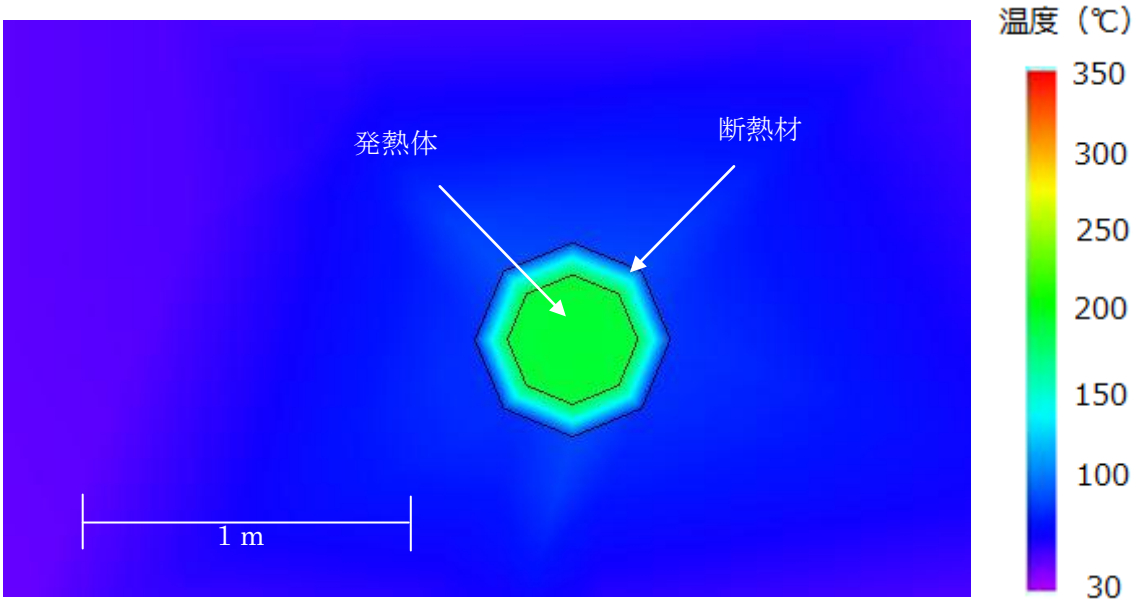



図 3.3.5-19　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 2 を通る yz 平面、中心付近）

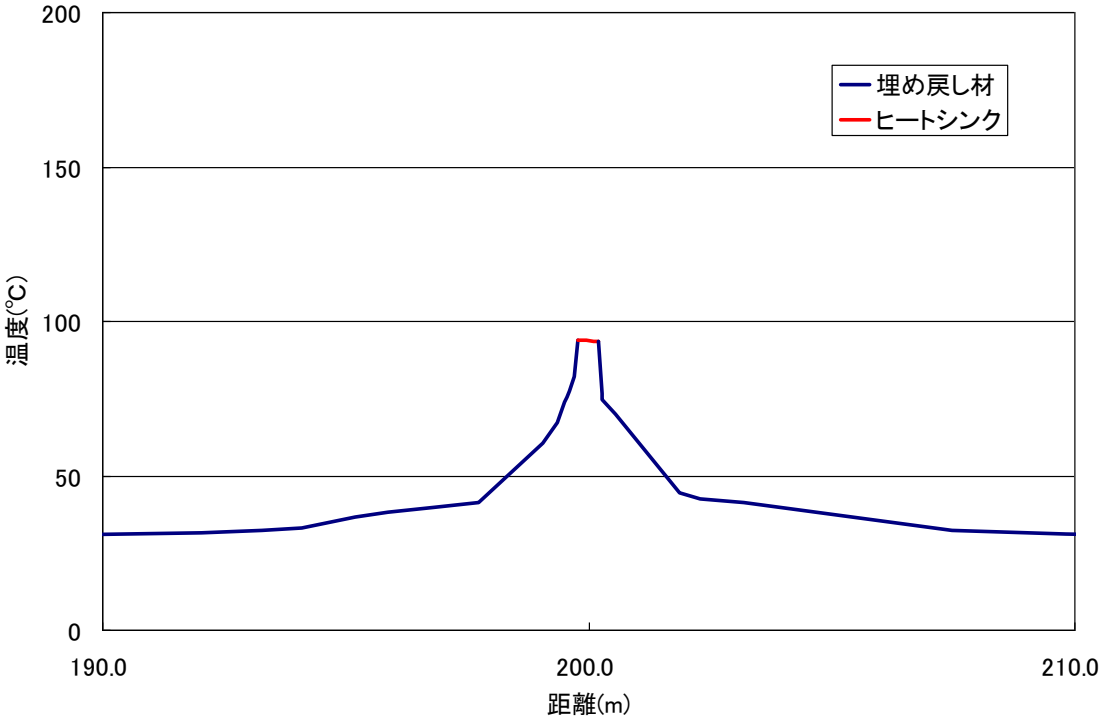



図 3.3.5-20　1 年後の温度分布（②低温ケース、線分 3、中心付近）

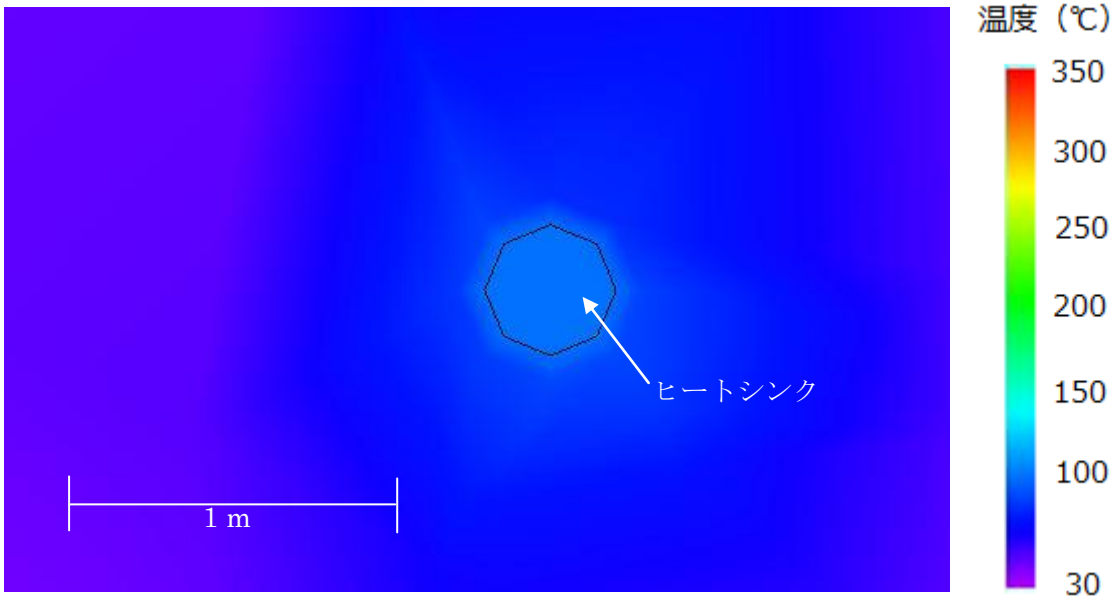



図 3.3.5-21　1 年後の温度分布（低温ケース、線分 3 を通る yz 平面、中心付近）

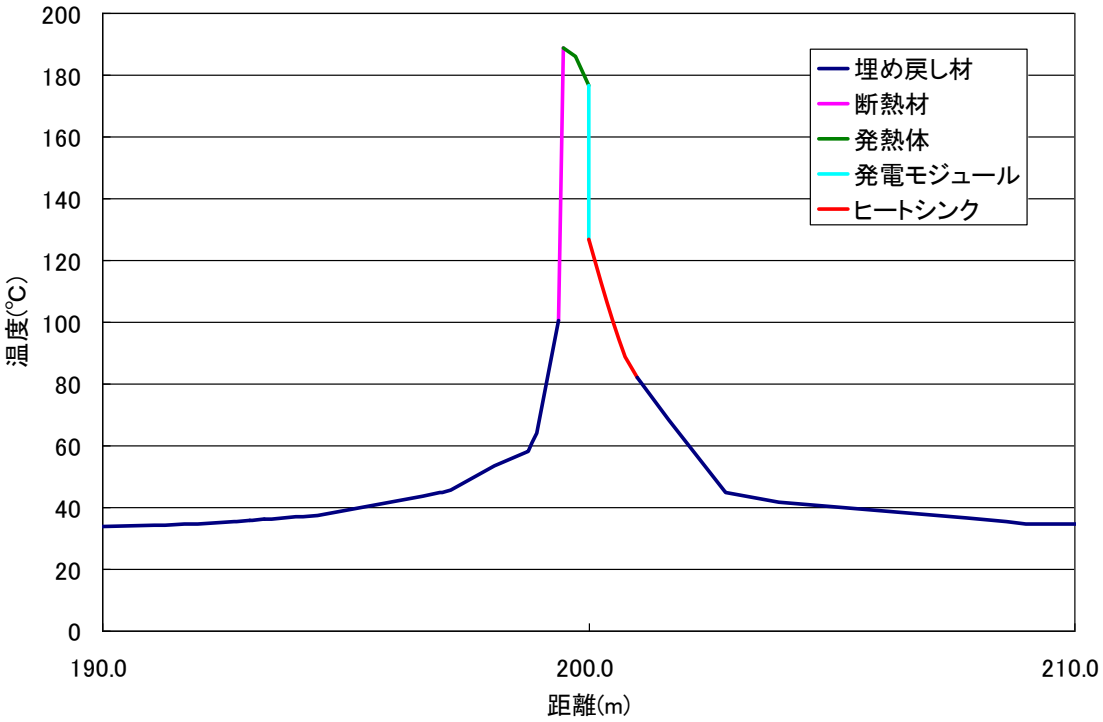



図 3.3.5-22　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 1、中心付近）

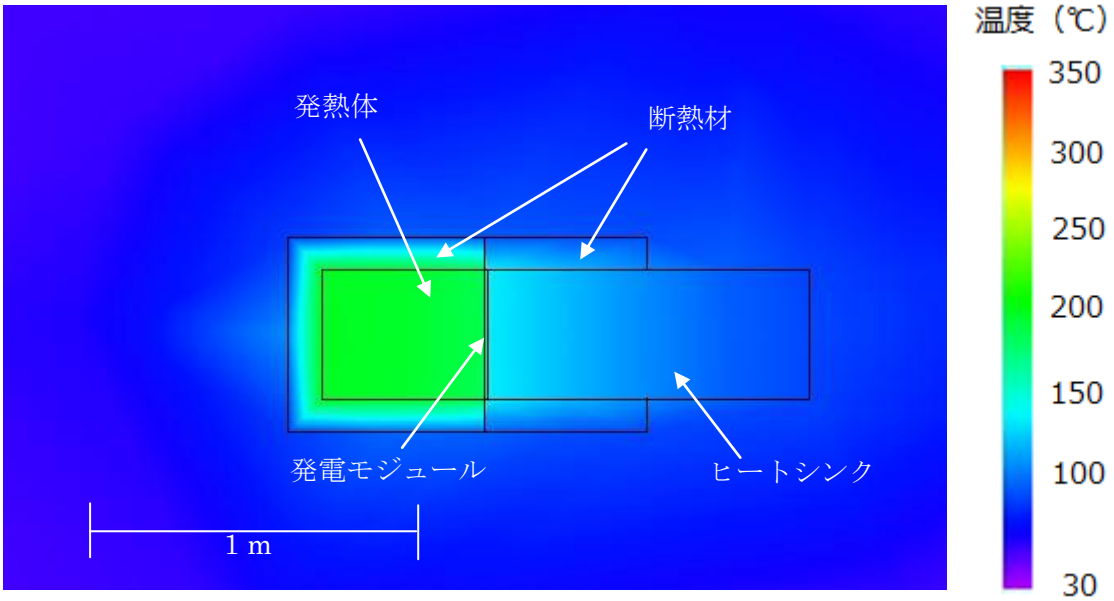



図 3.3.5-23　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 1 を通る xy 平面、中心付近）

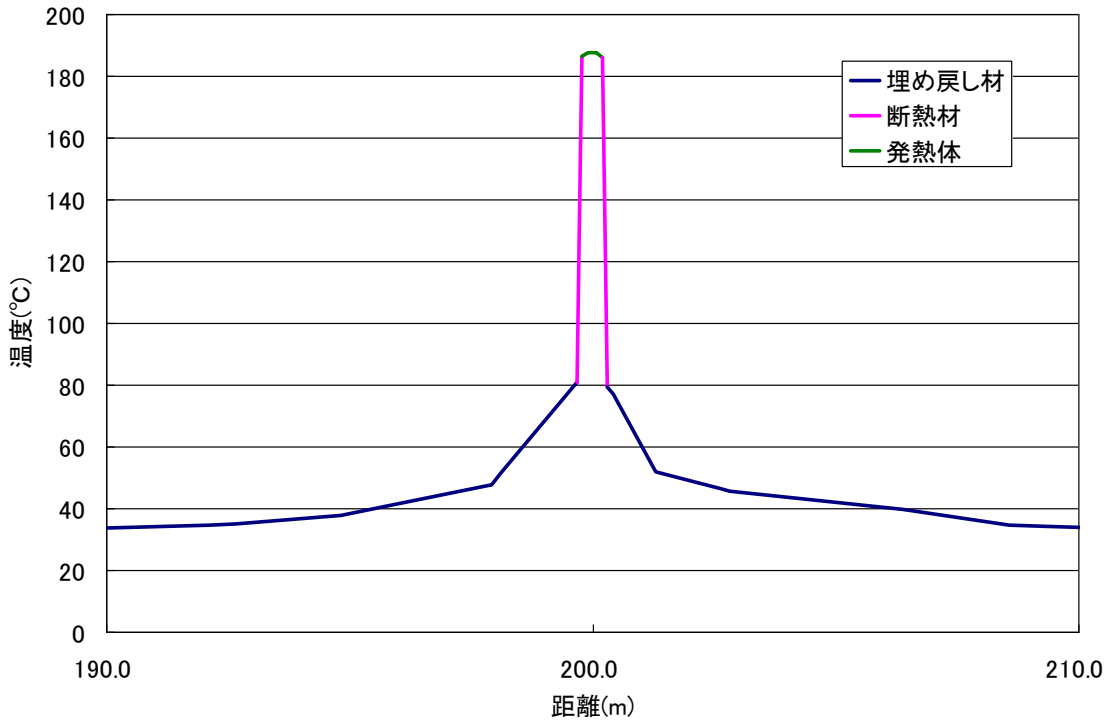



図 3.3.5-24　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 2、中心付近）

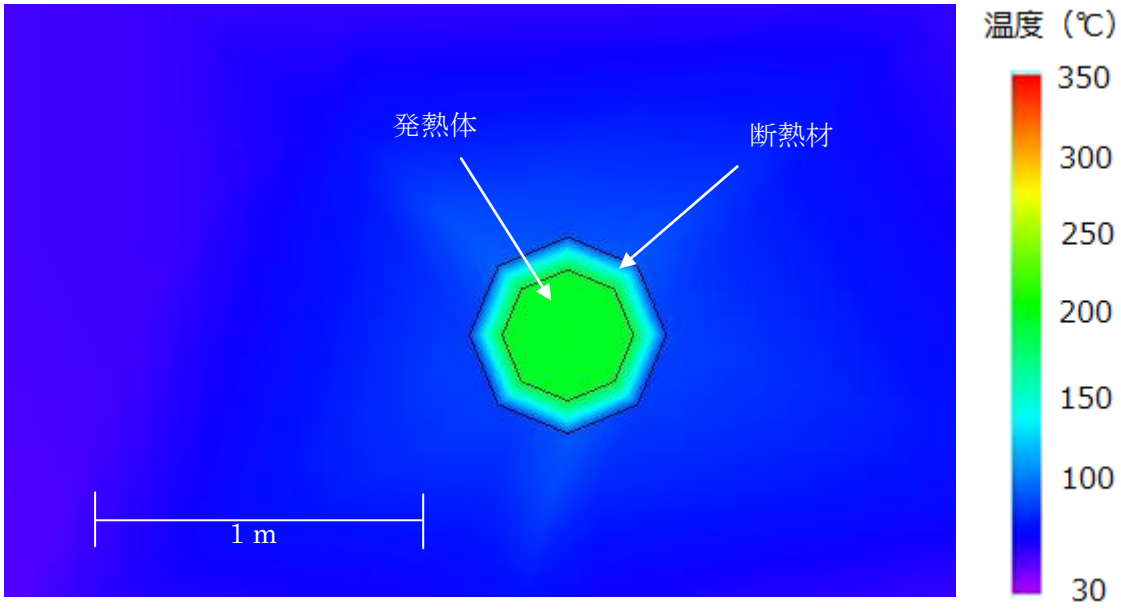



図 3.3.5-25　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 2 を通る yz 平面、中心付近）

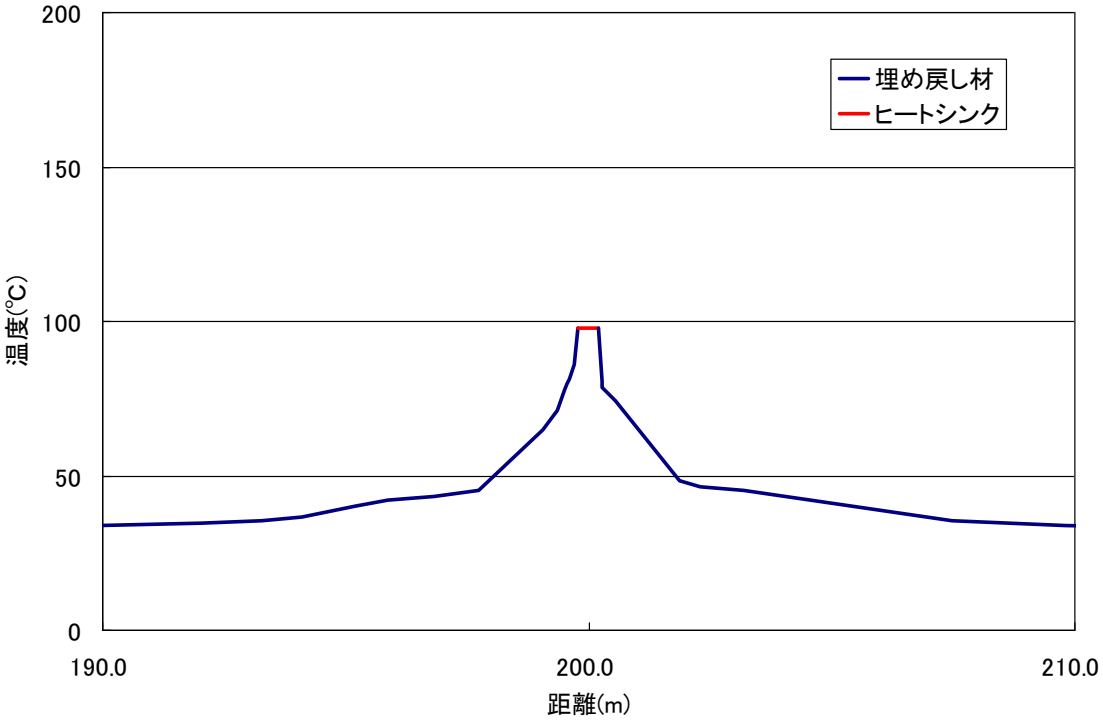



図 3.3.5-26　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 3、中心付近）

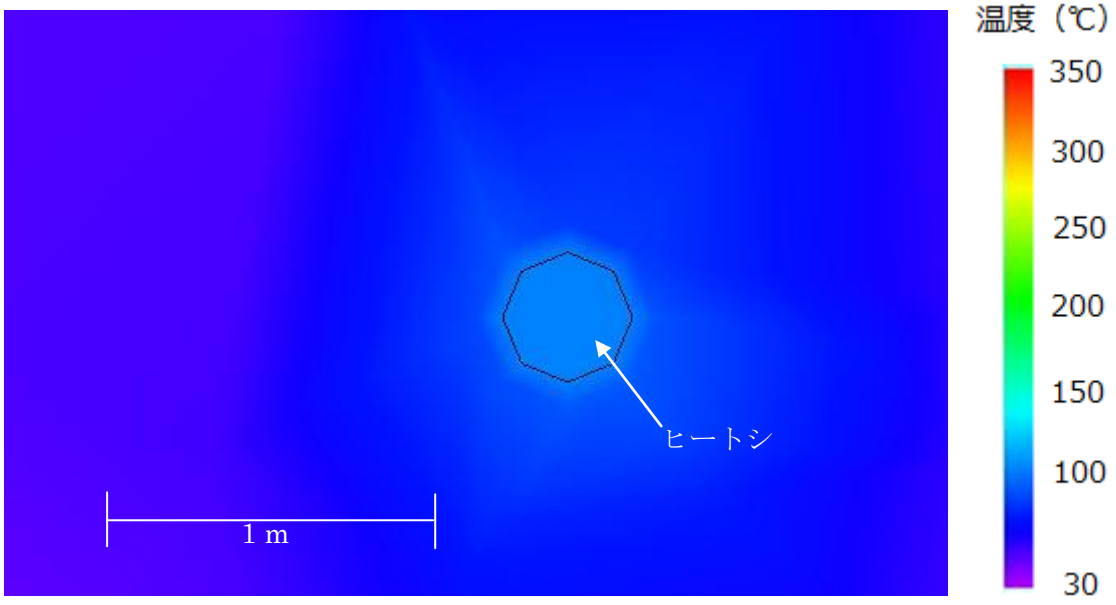



図 3.3.5-27　10 年後の温度分布（低温ケース、線分 3 を通る yz 平面　　、中心付近）

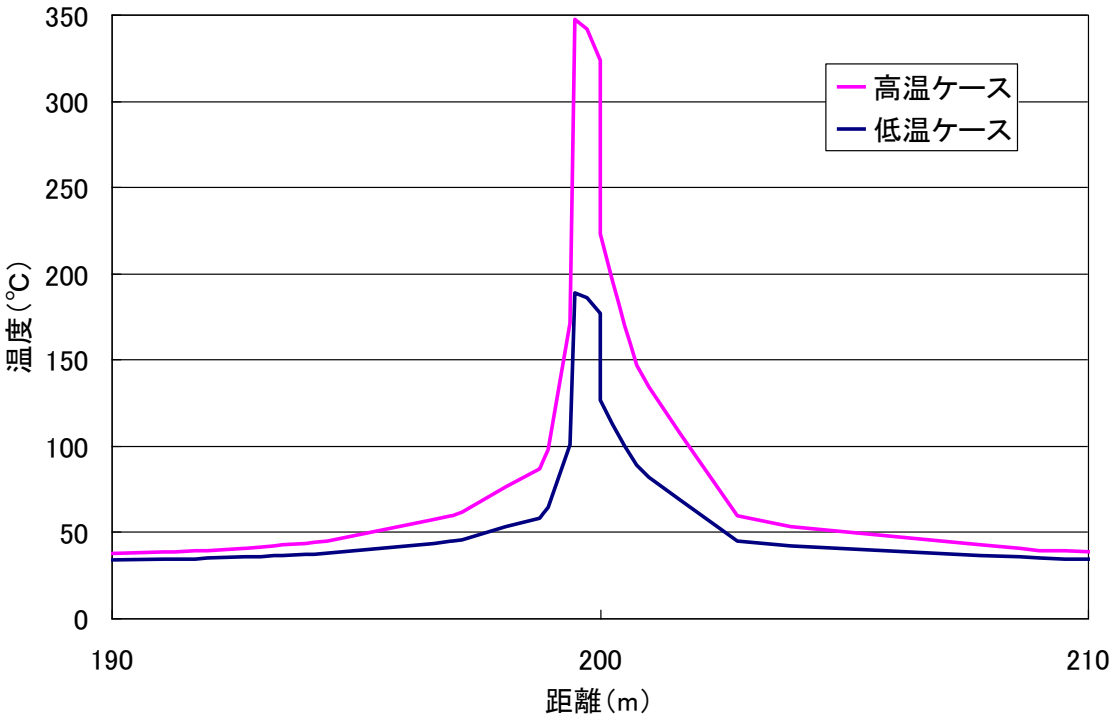



図 3.3.5-28　10 年後の温度分布の比較（線分 1）

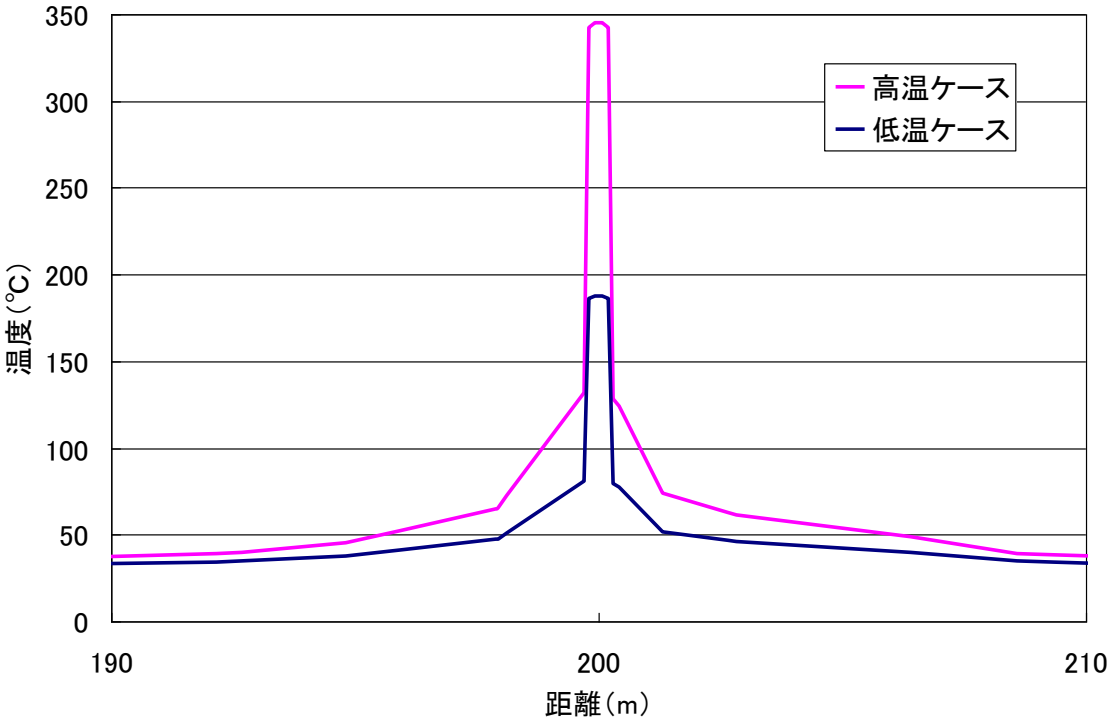



図 3.3.5-29　10 年後の温度分布の比較（線分 2）

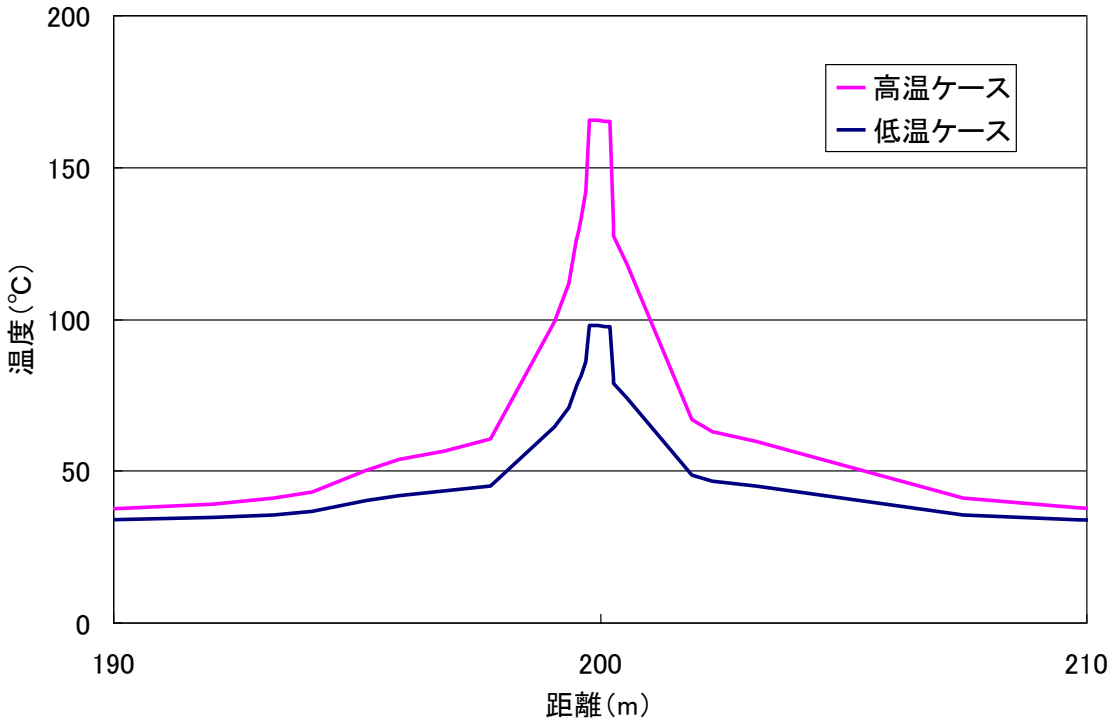



図 3.3.5-30　10 年後の温度分布の比較（線分 3）

(4)　RTG の発熱が地中無線送信装置に与える影響評価

RTG の発熱が地中無線送信装置に与える影響評価として、3 種類の“RTG と地中無線伝送装置の距離（d＝6.66mm、3.33m、及び 1.00m）”と廃棄体有り（発熱有り）と廃棄体無し（発熱無し）の 6 ケース実施した（表 3.3.5-3）。RTG からの発熱が地中無線送信装置内の温度上昇に与える影響を把握するため、3 次元熱伝導解析を行い、地中無線装置内の温度上昇の程度を把握した。

ここで地中無線送信装置の許容温度は、通常の電池を有する送信装置での許容温度 40℃を一つの目安とした。

表 3.3.5-3　RTG の影響評価のための解析ケース

| 解析ケース番号 | RTG と地中無線伝送装置の距離 | 廃棄体の有無 |
|---|---|---|
| ① | 6.66 m | 廃棄体無し |
| ② | | 廃棄体有り |
| ③ | 3.33 m | 廃棄体無し |
| ④ | | 廃棄体有り |
| ⑤ | 1.00 m | 廃棄体無し |
| ⑥ | | 廃棄体有り |

1)解析モデル

解析領域

解析領域は 400m×400m×400m とする。中心に坑道、RTG、地中無線伝送装置などを設置する。坑道が x 軸方向、鉛直方向を z 軸とする。

坑道全体図

図 3.3.5-31～ 図 3.3.5-33 に坑道の全体図を示す。坑道長さは影響範囲の関係から 40m とし、鋼製支保工 1.665 m ピッチ、廃棄体ピット 6.66 m ピッチ、RTG と地中無線伝送装置の距離 6.66 m（図 3.3.5-31）、3.33m（図 3.3.5-32）及び 1.00m（図 3.3.5-33）の 3 ケースを考えた。

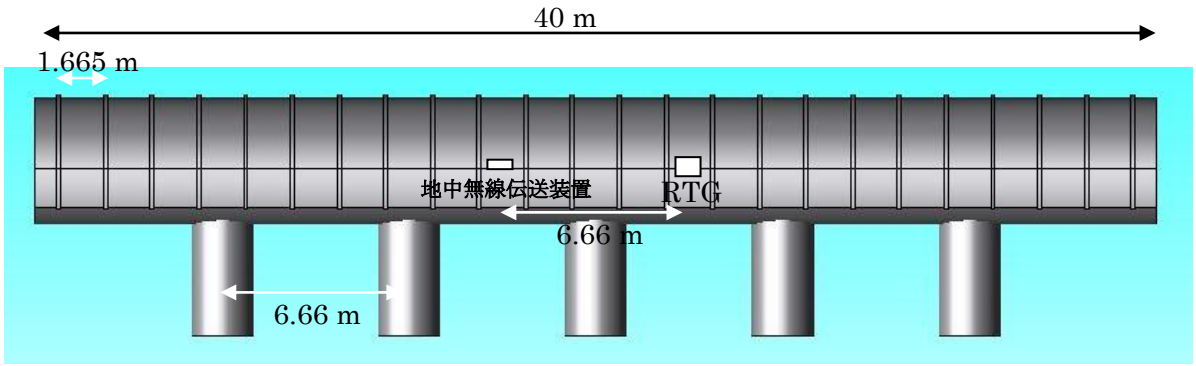



図 3.3.5-31　坑道の全体図（RTG と地中無線伝送装置の距離 6.66 m）

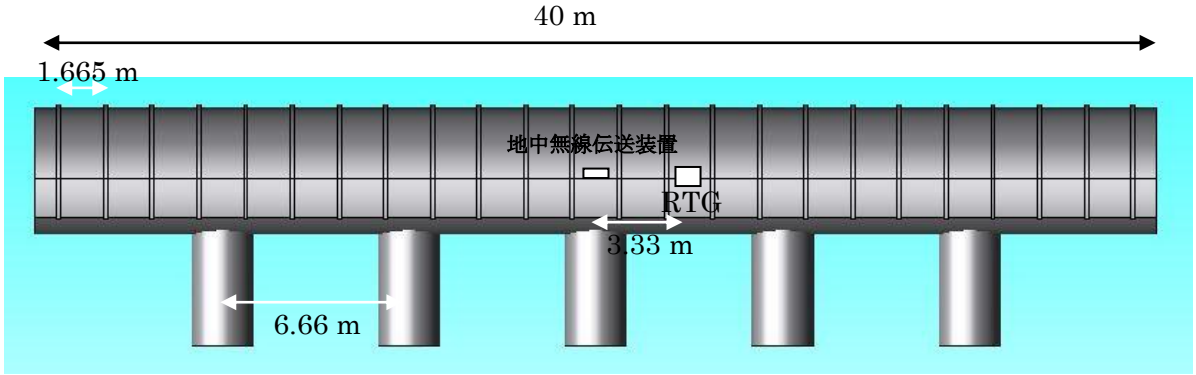



図 3.3.5-32　坑道の全体図（RTG と地中無線伝送装置の距離 3.33 m）

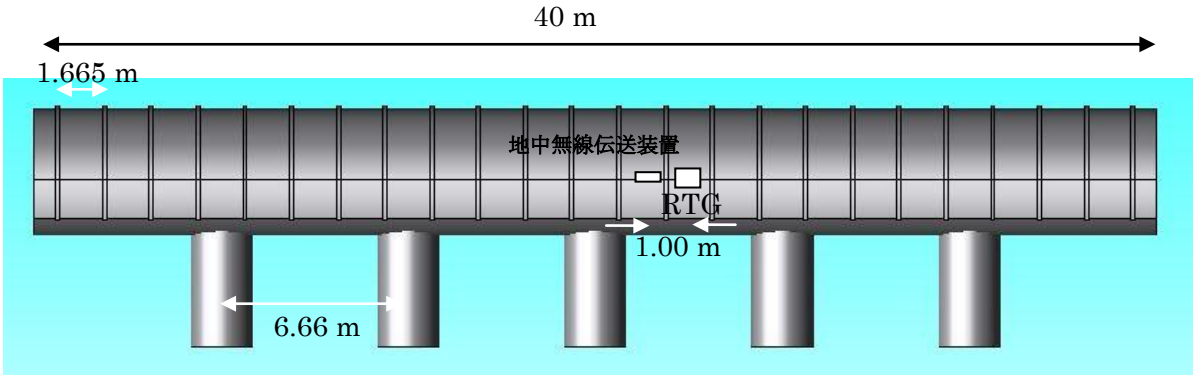



図 3.3.5-33　坑道の全体図（RTG と地中無線伝送装置の距離 1.00 m）

坑道断面

図 3.3.5-34 に坑道の断面図を示す。HLW 第 2 次取りまとめ、IV-218、図 4.2.2-8(b)に準ずる。

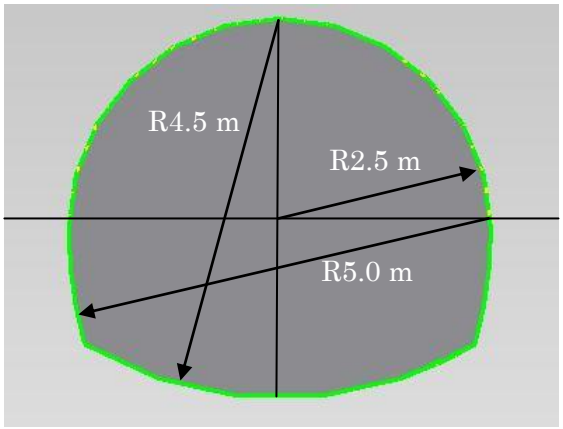



図 3.3.5-34　坑道の断面図

支保工

図 3.3.5-35 に鋼製支保工の断面図を示す。内径が坑道の形状と一致させた。H 鋼の断面は 150 mm×150 mm である。

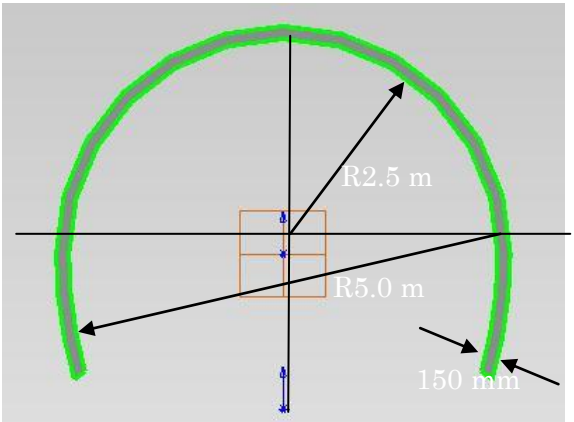



図 3.3.5-35　支保工の断面図

廃棄体

図 3.3.5-36 に処分孔と廃棄体の概念図を示す。廃棄体ピット直径 2.22 m、高さ 4.13 m とした。また、ガラス固化体直径 0.44m、高さ 1.35 m とした。これらの位置は HLW 第 2 次取りまとめ、IV-273、図 4.2.2-91 に準ずる。

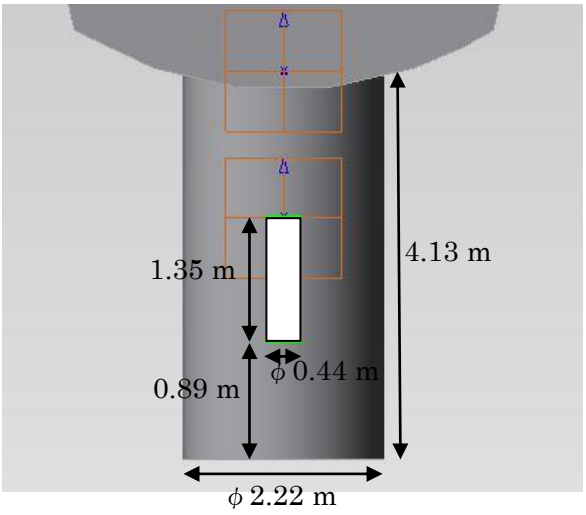



図 3.3.5-36　処分孔及び廃棄体の概念図

廃棄体の初期の発熱量は 1 本あたり 350W とし、10 年後までに 320 W にリニアに減少するとする。

地中無線送信装置

図 3.3.5-37 にに地中無線送信装置の解析モデルを示す。容器は PCV で、直径 216 mm、長さ 290 mm とする。コイルは容器の内部に配置しており、外径 196 mm、内径 176 mm、長さ 230 mm とする。コイルの内部は耐圧用に充填していない地中無線送信装置を対象としているため、空隙部を考慮し空気の物性値を代用する。

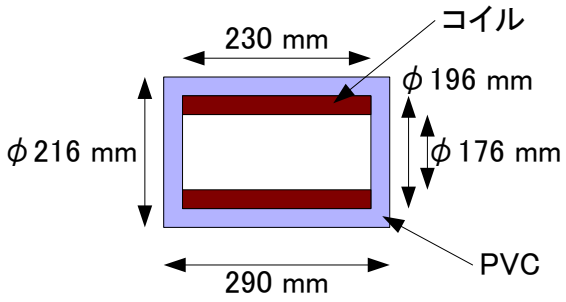



図 3.3.5-37　地中無線送信装置の解析モデル

RTG

RTG の形状、寸法、物性値の設定条件は(3)と同様とする。RTG の発熱は(3)における①高温のケースとする。

2)境界条件

解析モデル及び境界条件の概念図（d = 6.66 m）を図 3.3.5-38 に、d = 3.33 m の場合を 図 3.3.5-39 に、d = 1.00 m の場合を図 3.3.5-40 に示す。

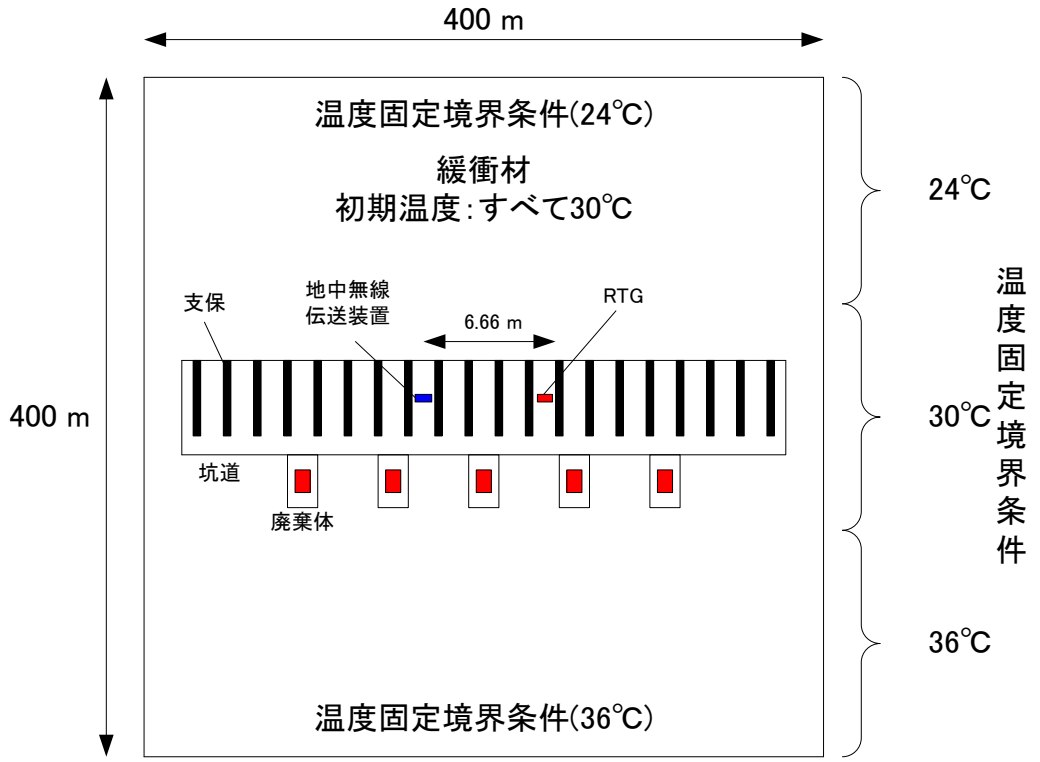



図 3.3.5-38　解析モデル及び境界条件の概念図（d = 6.66 m）

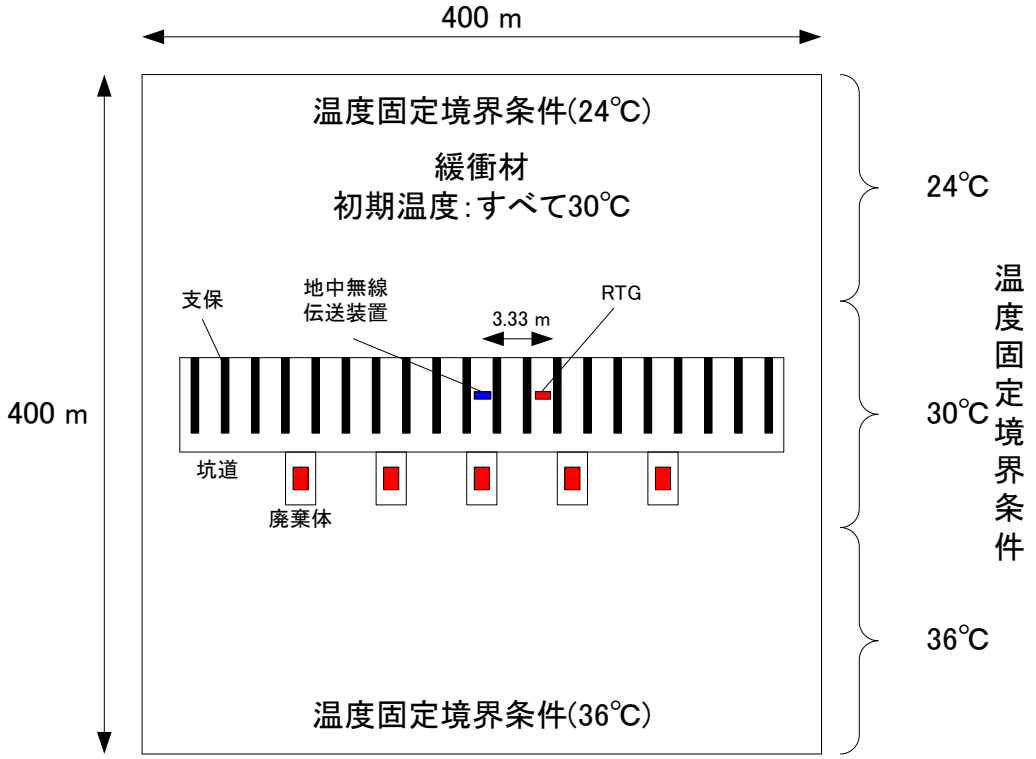



図 3.3.5-39　解析モデル及び境界条件の概念図（d = 3.33 m）

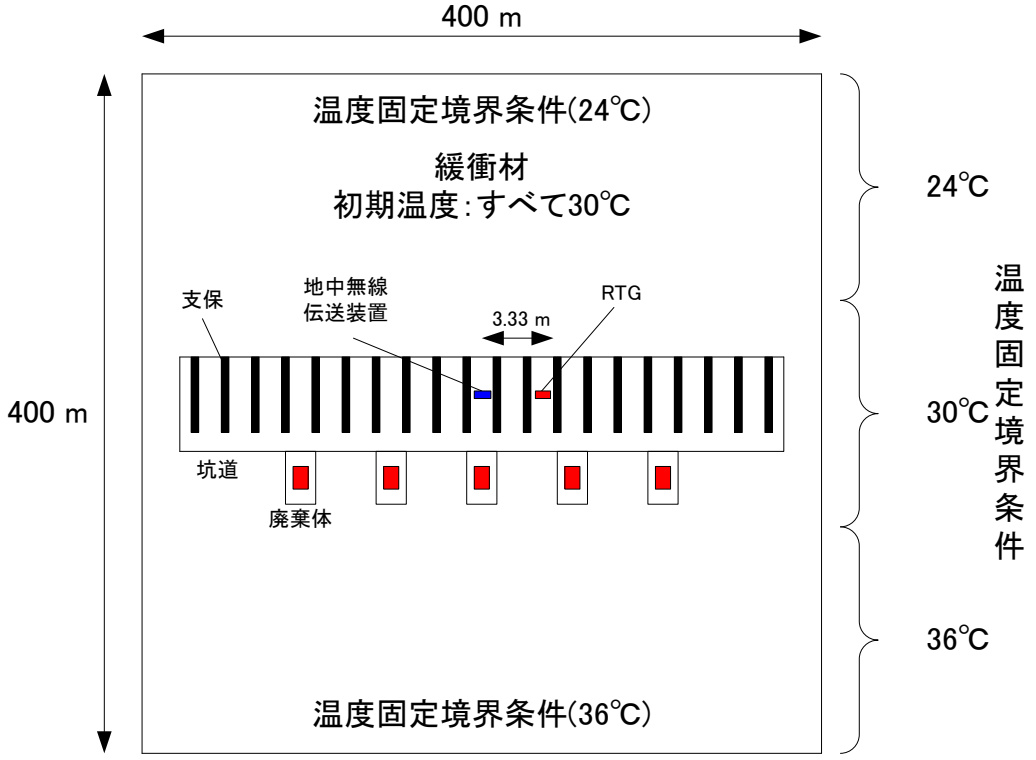



図 3.3.5-40　解析モデル及び境界条件の概念図（d = 1.00 m）

3) 解析結果

RTG と地中無線伝送装置の距離が 6.66m の場合

図 3.3.5-41 に廃棄体無しで、線分 1 を通る xz 平面上の温度分布のコンターを示す。図 3.3.5-42 に廃棄体有りで、線分 1（図 3.3.5-3 参照）を通る xz 平面上の温度分布のコンターを示す。

図 3.3.5-43 に廃棄体無しで、線分 1 上の温度分布を示す。図 3.3.5-44 に廃棄体有りで、線分 1 上の温度分布を示す。

RTG と地中無線伝送装置の距離が 3.33m の場合

図 3.3.5-45 に廃棄体無しで、線分 1 上の温度分布を示す。図 3.3.5-46 に廃棄体有りで、線分 1 上の温度分布を示す。

RTG と地中無線伝送装置の距離が 1.00m の場合

図 3.3.5-47 に廃棄体無しで、線分 1 上の温度分布を示す。図 3.3.5-48 に廃棄体有りで、線分 1 上の温度分布を示す。

また、各 RTG と地中無線伝送装置の距離における廃棄体有りと無しの温度分布の違いを図 3.3.5-49（d=6.66 m）、図 3.3.5-50（d=3.33 m）、及び図 3.3.5-51（d=1.00 m）に示す。

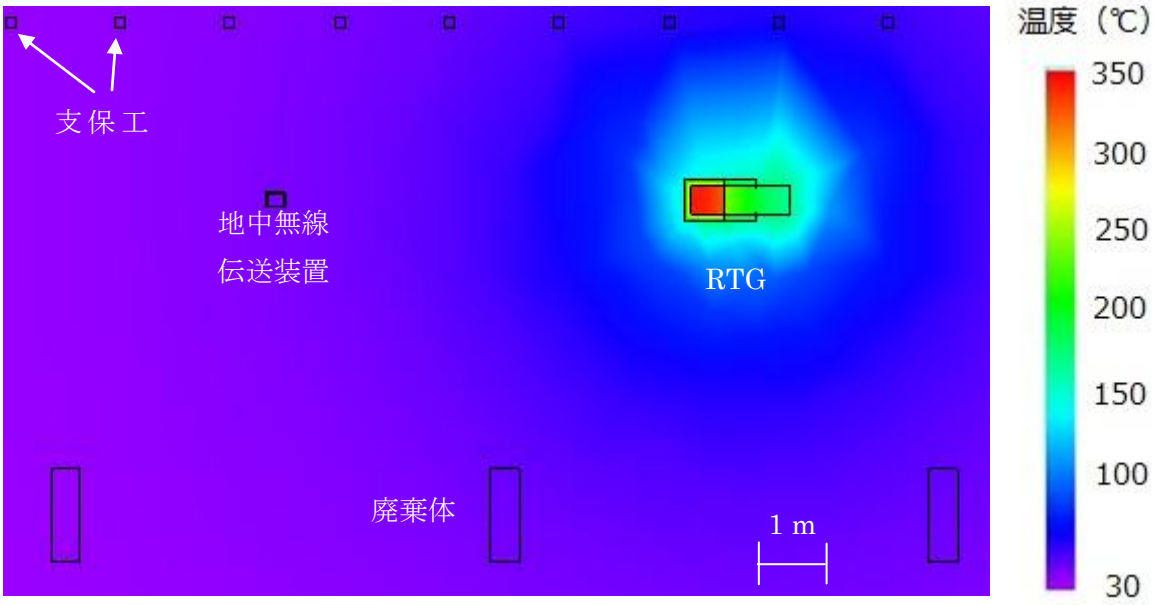



図 3.3.5-41　温度分布（d=6.66 m、廃棄体無し）

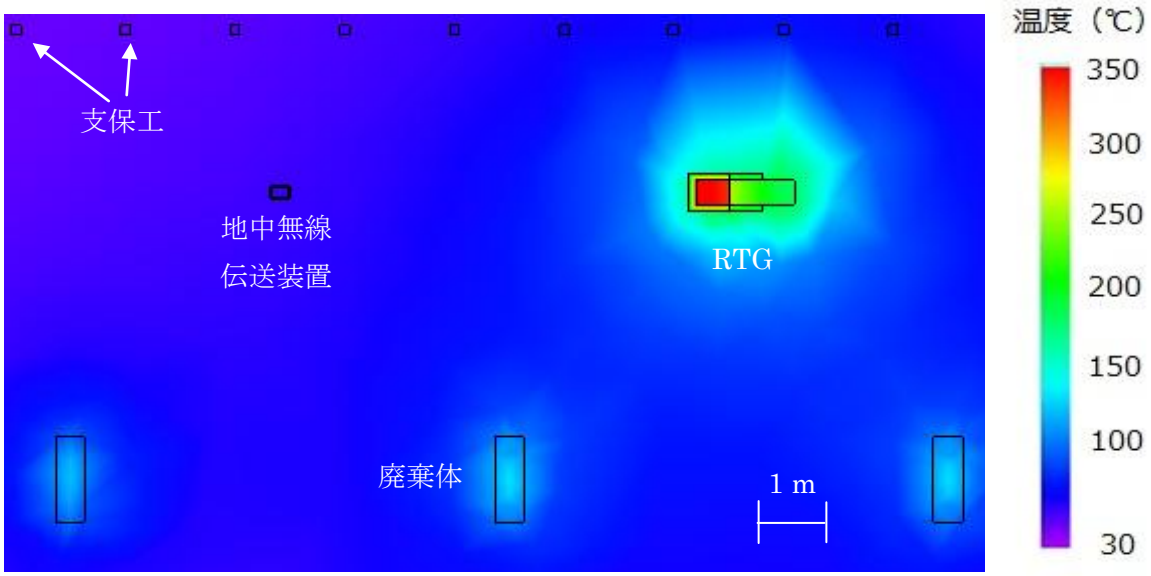



図 3.3.5-42　温度分布（d=6.66 m、廃棄体有り）

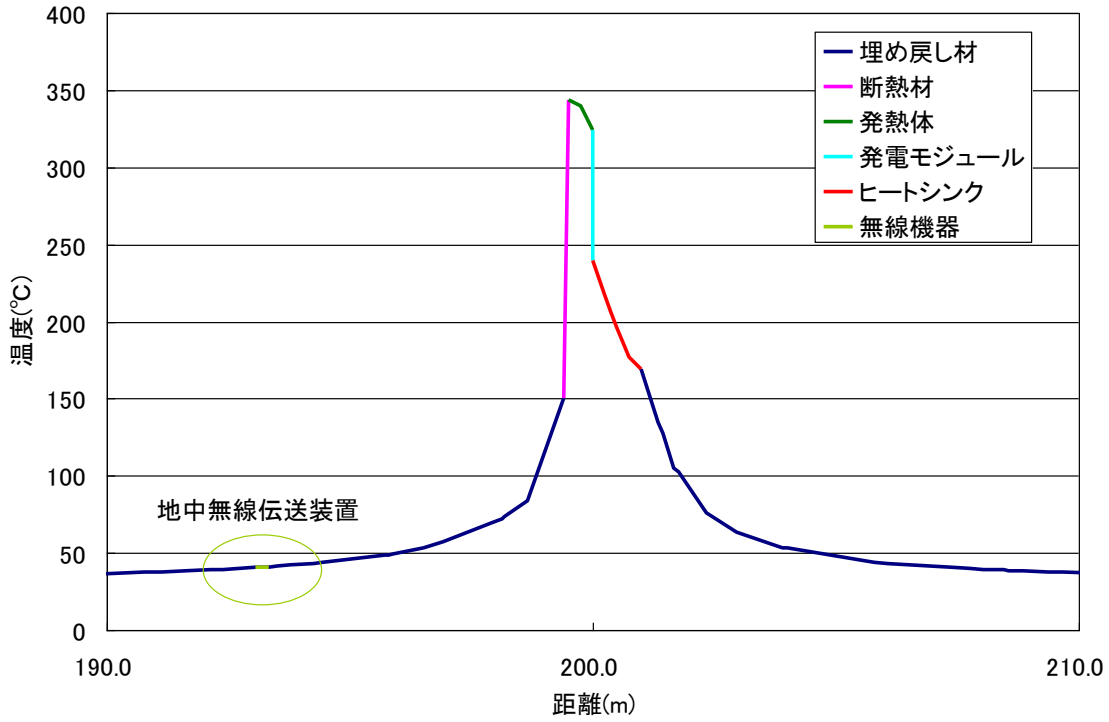



図 3.3.5-43　d=6.66 m、廃棄体無し

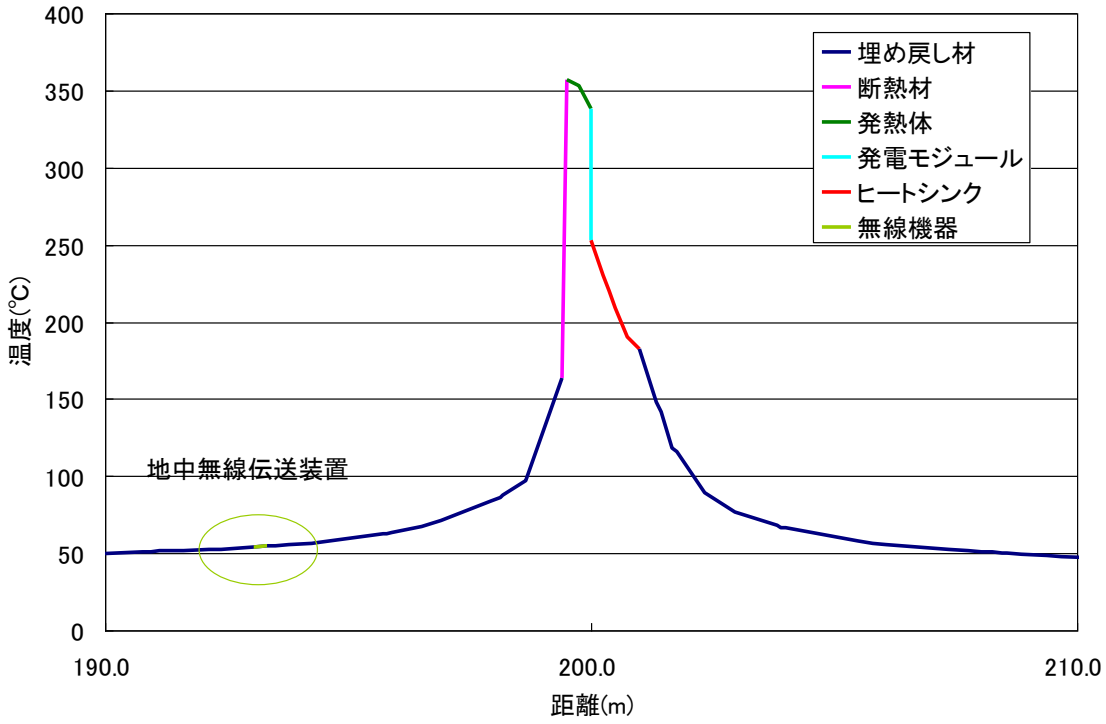



図 3.3.5-44　d=6.66 m、廃棄体有り

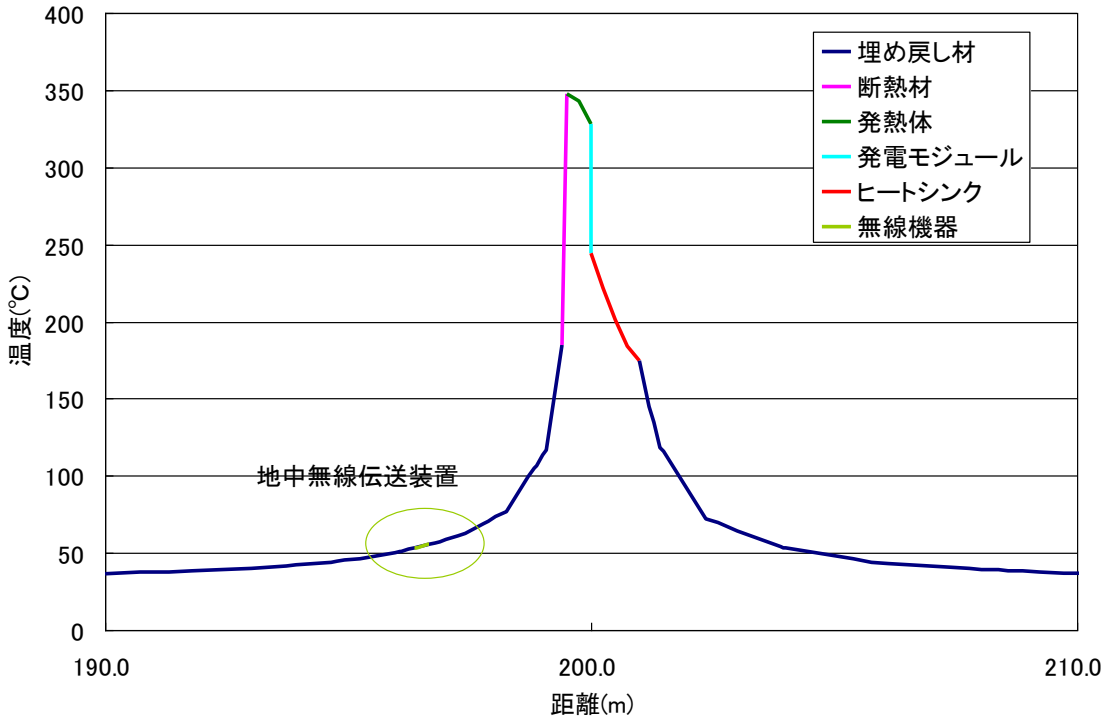



図 3.3.5-45　d=3.33 m、廃棄体無し

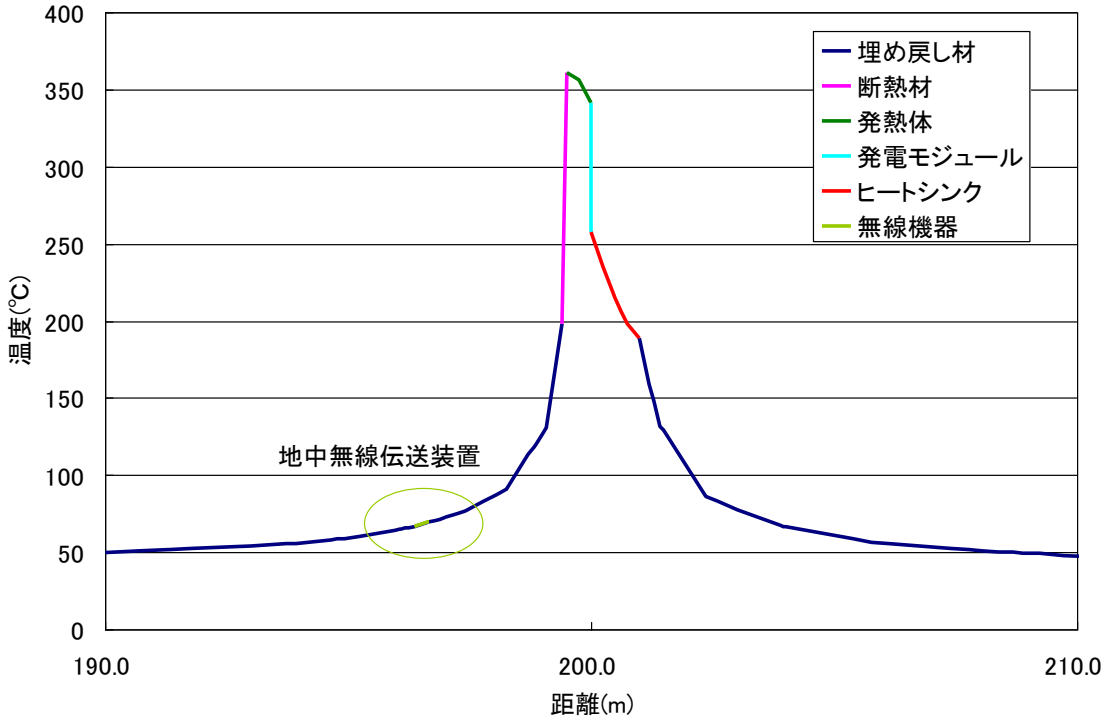



図 3.3.5-46　d=3.33 m、廃棄体有り

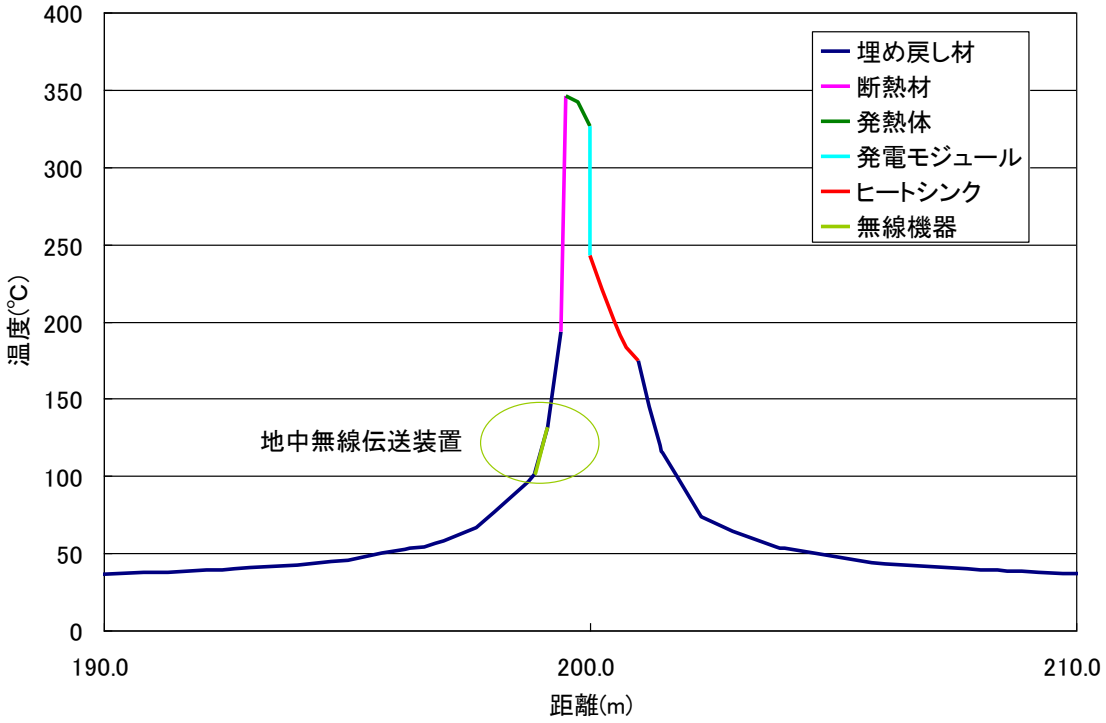



図 3.3.5-47　d=1.00 m、廃棄体無し

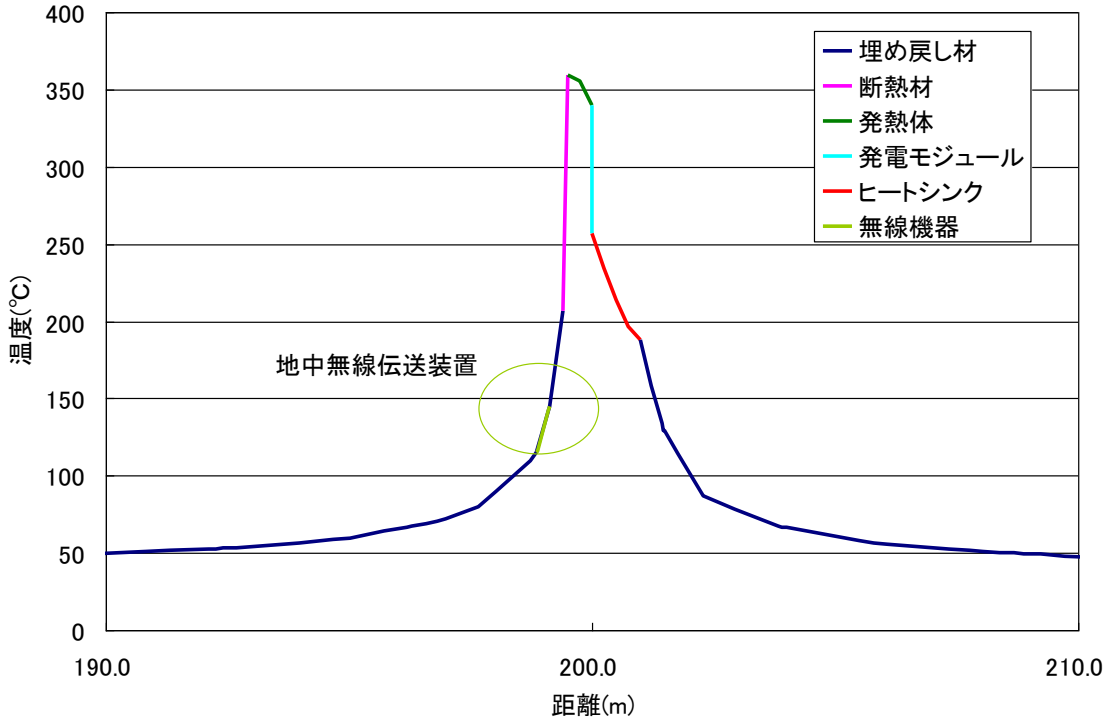



図 3.3.5-48　d=1.00 m、廃棄体有り

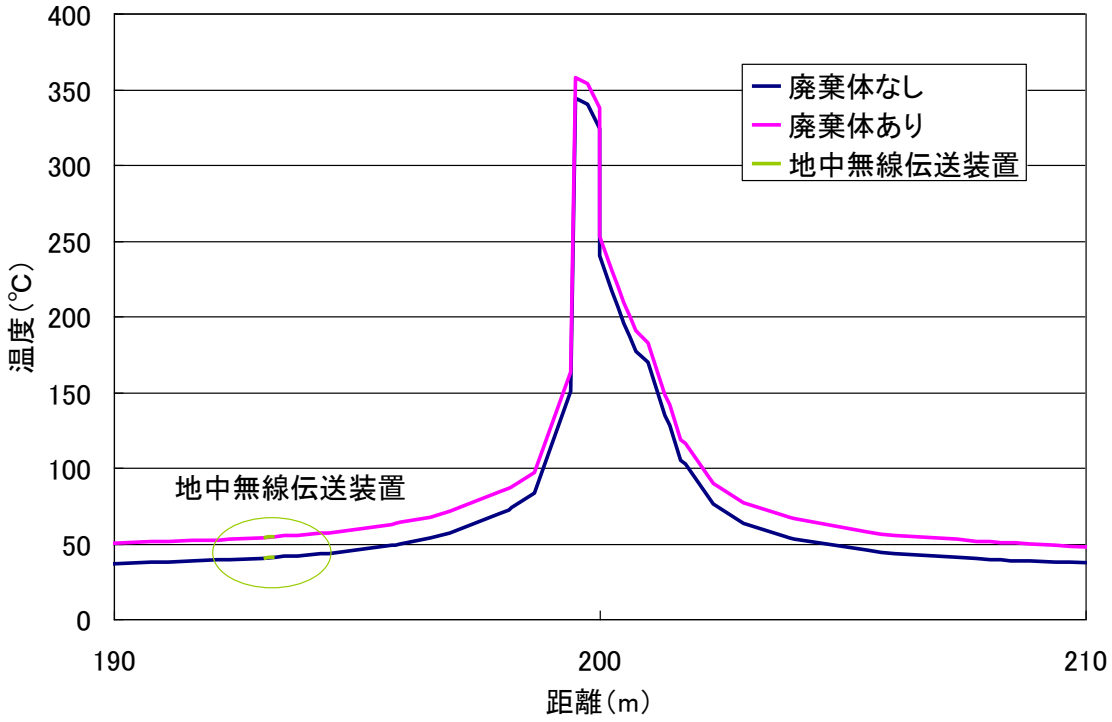



図 3.3.5-49　温度分布の比較（d=6.66 m）

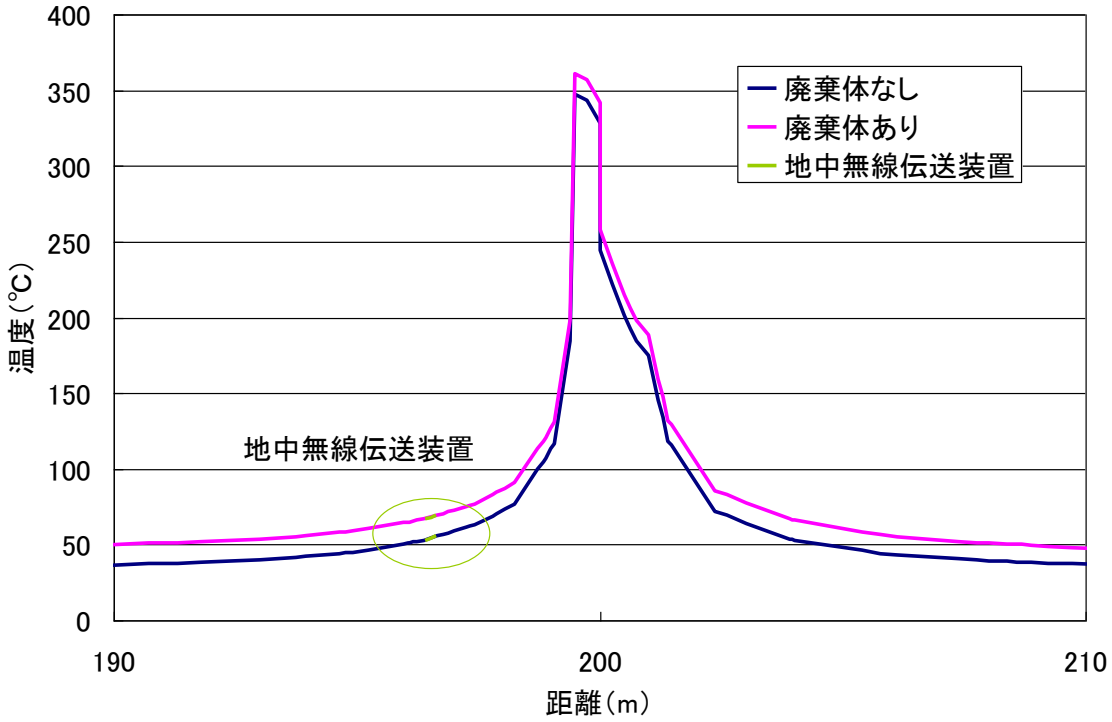



図 3.3.5-50　温度分布の比較（d=3.33 m）

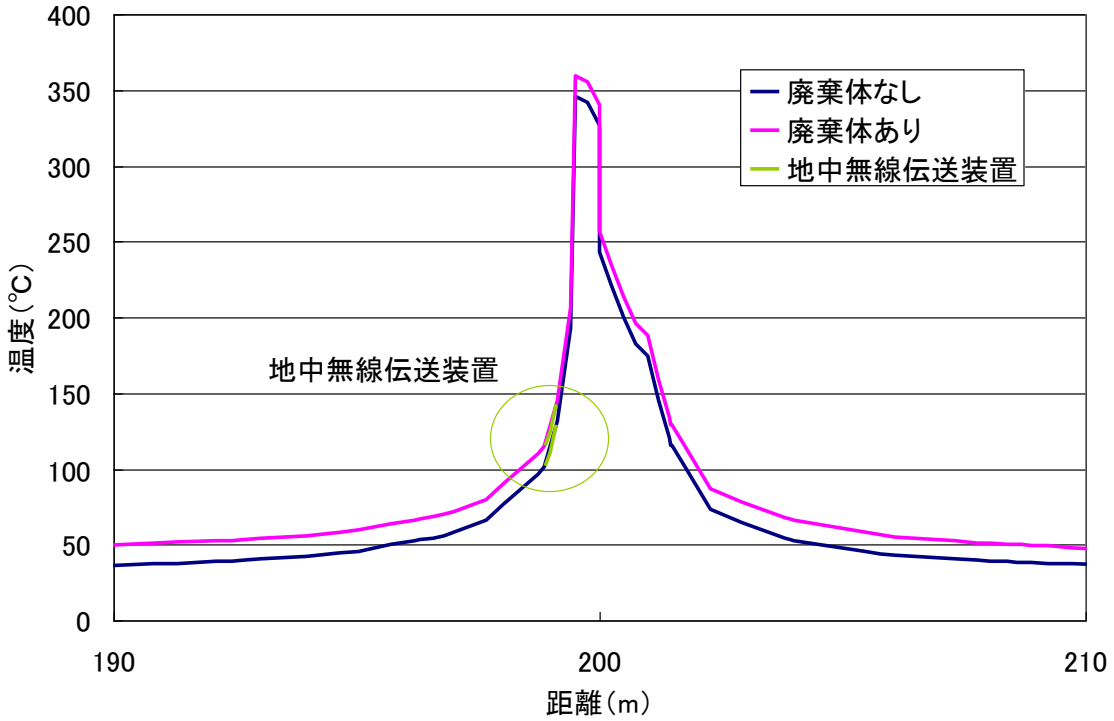



図 3.3.5-51　温度分布の比較（d=1.00 m）

4)RTG の温度影響に関するまとめ

以上の解析結果から、以下のことが明らかとなった。

- 全体的に、地中無線伝送装置が温度分布に与える影響は小さい。
- 廃棄体を設置すると RTG 中心部での坑道軸方向において、最高到達温度として最大 15℃程度上昇する。
- RTG と地中無線伝送装置の距離が 6.66m の場合で廃棄体無しの場合のみ、地中無線伝送装置の温度は約 40℃程度であったが、それ以外のケースでは、目安の 40℃を上回る値を示した。
- 廃棄体を定置した場合、坑道内温度は 50℃程度となり、地中無線を適用するためには温度対策が必要となる。

これらのことから、地中無線送信装置と RTG の配置方法に関して、以下のことが言える。

- 地中無線送信装置を処分坑道に定置する場合、目安の 40℃は上回るため、地中無線送信装置への耐熱性の付与は不可欠である。
- RTG と地中無線装置の距離は、今後の耐熱性の付与の程度に依存するが、基本的に 6.66m 程度以上離すことが望まれる。

(5) RTG の存在が地中無線の電磁波の伝搬特性に与える影響評価

RTG は遮へいの観点で鋼製部材が使用されている。そのため、RTG の存在が地中無線の電磁波の伝播特性に影響を与えることが予測される。この影響に関する知見を得るため 3 次元電磁波伝播解析を実施した。解析においては、RTG と地中無線伝送装置の距離を 3 種類（d＝6.66mm、3.33m、及び 1.00m）と、支保工及び RTG の有無の 6 ケースを設定し、解析を実施した（表 3.3.5-4）。そして、解析結果より RTG の配置方法に関する知見を整理した。

なお、本解析では地中無線送信装置の出力強度を正確に算定することはできないため、各解析ケースの結果を相互比較し、相対的な評価を行った。評価を行うパラメータとしては磁束密度（T）を用いた。

表 3.3.5-4 RTG の影響評価のための解析ケース

| 解析ケース番号 | RTG と地中無線伝送装置の距離 | 支保工及び RTG の有無 |
|---|---|---|
| ① | 6.66 m | 無し |
| ② | | 有り |
| ③ | 3.33 m | 無し |
| ④ | | 有り |
| ⑤ | 1.00 m | 無し |
| ⑥ | | 有り |

解析の出力において、磁界強度を表示する線分 1 は、地中無線装置を起点とし、坑道、RTG（断熱材、発熱体、発電モジュール、ヒートシンク）、坑道、岩盤を通る x 軸に平行な線分とする（図 3.3.5-52）。なお、RTG を構成する発熱体、発電モジュール、ヒートシンクは同じ物性値とし、ヒートシンクとしてまとめて表示する。磁界強度を表示する線分 2 は、地中無線装置を起点とし、坑道、岩盤を通る z 軸に平行な線分とする（図 3.3.5-52）。

また、磁束密度のコンター図及びベクトル図を表示する面 1 は、線分 1 及び線分 2 を含む y 軸に垂直な平面とし、面 2 は、線分 1 を含む x 軸に垂直な平面とする。

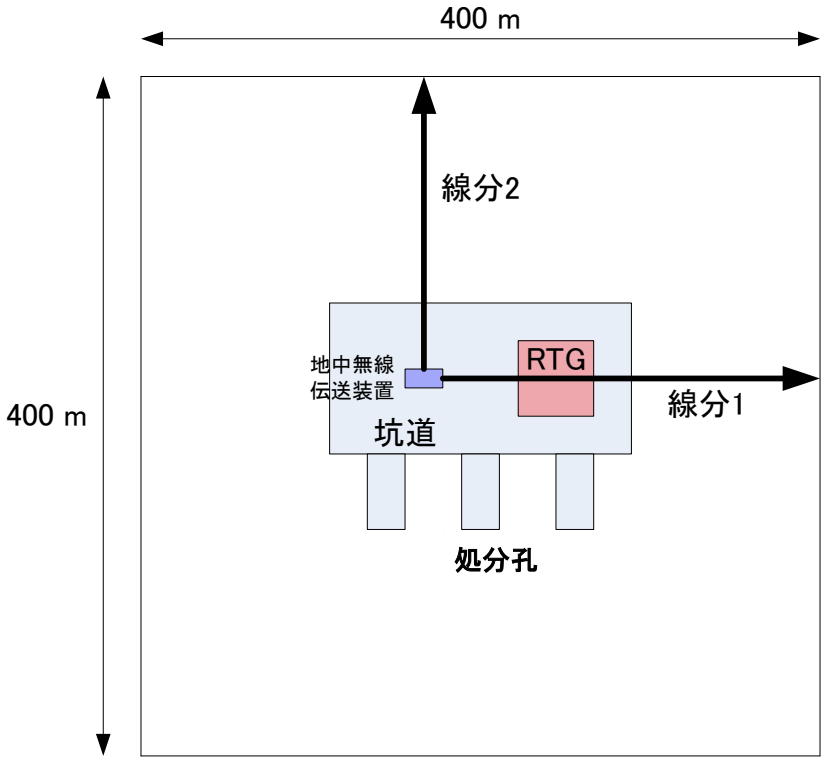



図 3.3.5-52　磁界強度を表示する線分の概念図

1)解析条件

表 3.3.5-5 に電磁場解析に用いる物性値を示す。比透磁率は鋼製支保工では 1、000 とし、他の部品では 1 とする。渦電流損を考慮する場合、鋼製支保工と RTG の金属部に導電率を設定する。支保工での導電率は 1、000、000S/m とする。RTG の金属部での導電率は 57、600、000S/m（銅）とする。また、表 3.3.5-6 に地中無線送信装置のコイルの設定値を示す。

表 3.3.5-5　電磁場解析に用いる物性値

| 部品名 | 導電率（S/m） | 比透磁率（ - ） |
|---|---|---|
| 岩盤 | － | 1 |
| 支保工 | 1、000、000 | 1、000 |
| 埋め戻し材 | － | 1 |
| 廃棄体 | － | 1 |
| RTG（金属部） | 57、600、000 | 1 |
| RTG（断熱材） | － | 1 |
| PVC | － | 1 |
| コイル | － | 1 |

表 3.3.5-6　地中無線送信装置のコイルの設定

| | |
|---|---|
| 形状 | 外径 196 mm、内径 176 mm、長さ 230 mm |
| コイル巻数 | 60 |
| 周波数 | 8500 Hz |
| 電流 | 2 A |

2)解析結果

RTG と地中無線伝送装置の距離が 6.66m の場合

図 3.3.5-53 に鋼製支保工無しの場合の面 1 上の磁束密度のコンター図を示す。図 3.3.5-54 に支保工無しの場合の面 1 上の磁束のベクトル図を示す。図 3.3.5-55 に鋼製支保工無しの場合の面 2 上の磁束密度のコンター図を示す。図 3.3.5-56 に鋼製支保工無しの面 2 上の磁束のベクトル図を示す。

図 3.3.5-57 に鋼製支保工有りの場合の面 1 上の磁束密度のコンター図を示す。図 3.3.5-58 に支保工有りの場合の面 1 上の磁束のベクトル図を示す。図 3.3.5-59 に鋼製支保工有りの場合の面 2 上の磁束密度のコンター図を示す。図 3.3.5-60 に鋼製支保工有りの場合の面 2 上の磁束のベクトルを示す。

図 3.3.5-61 に鋼製支保工無しの場合の線分 1 上の磁束密度を示す。図 3.3.5-62 に鋼製支保工無しの場合の線分 2 上の磁束密度を示す。

図 3.3.5-63 に鋼製支保工有りの場合の線分 1 上の磁束密度を示す。図 3.3.5-64 に鋼製支保工有りの場合の線分 2 上の磁束密度を示す。

RTG と地中無線伝送装置の間の距離 3.33 m の場合

図 3.3.5-65 に鋼製支保工無しの場合の線分 1 上の磁束密度を示す。図 3.3.5-66 に鋼製支保工無しの場合の線分 2 上の磁束密度を示す。

図 3.3.5-67 に鋼製支保工有りの場合の線分 1 上の磁束密度を示す。図 3.3.5-68 に鋼製支保工無しの場合の線分 2 上の磁束密度を示す。

RTG と地中無線伝送装置の間の距離 1.00 m の場合

図 3.3.5-69 に鋼製支保工有りの場合の線分 1 上の磁束密度を示す。図 3.3.5-70 に鋼製支保工無しの場合の線分 2 上の磁束密度を示す。

図 3.3.5-71 に支保工有りの場合の線分 1 上の磁束密度を示す。図 3.3.5-72 に支保工有りの場合の線分 2 上の磁束密度を示す。

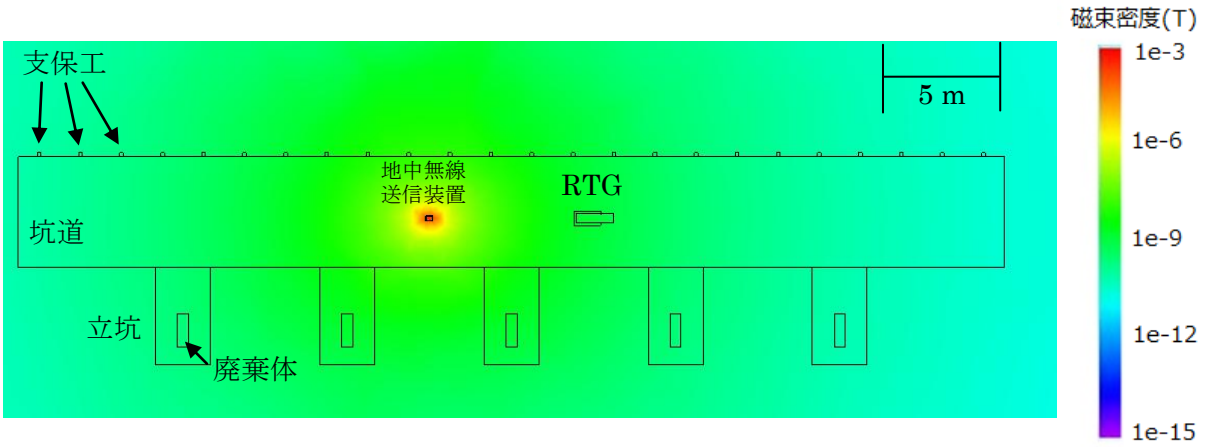



図 3.3.5-53　磁束密度コンター図　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、面 1）

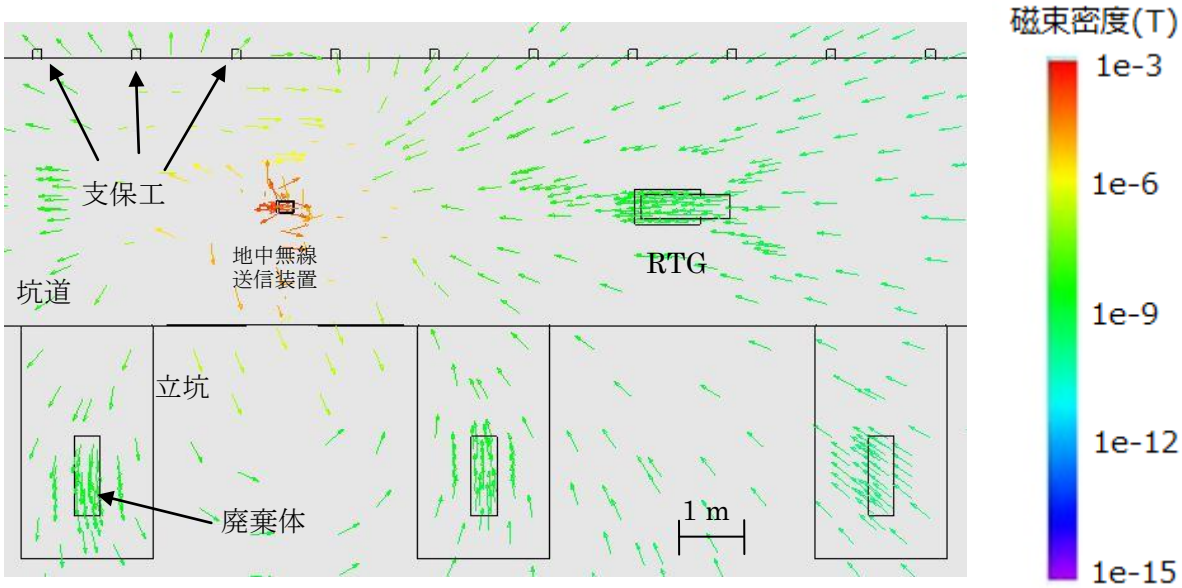



図 3.3.5-54　磁束ベクトル図　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、面 1）

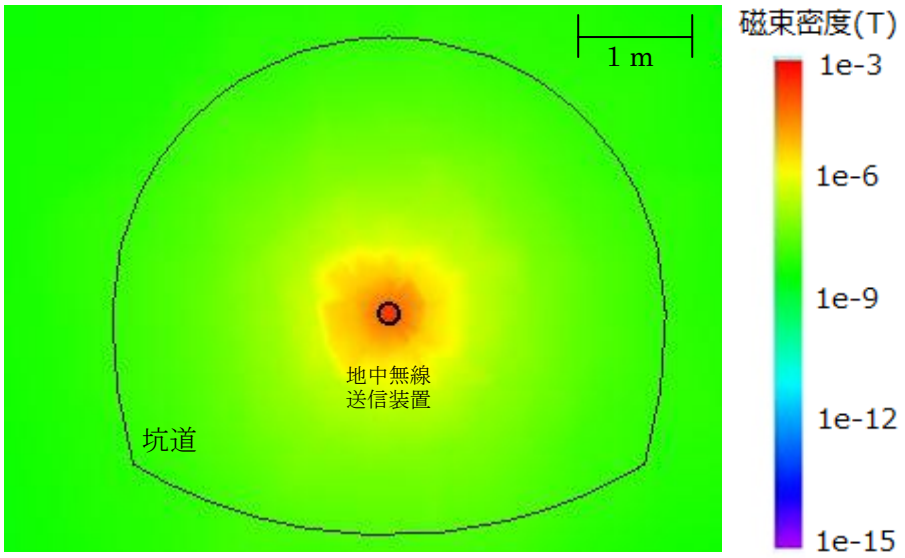



図 3.3.5-55　磁束密度コンター図　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、面 2）

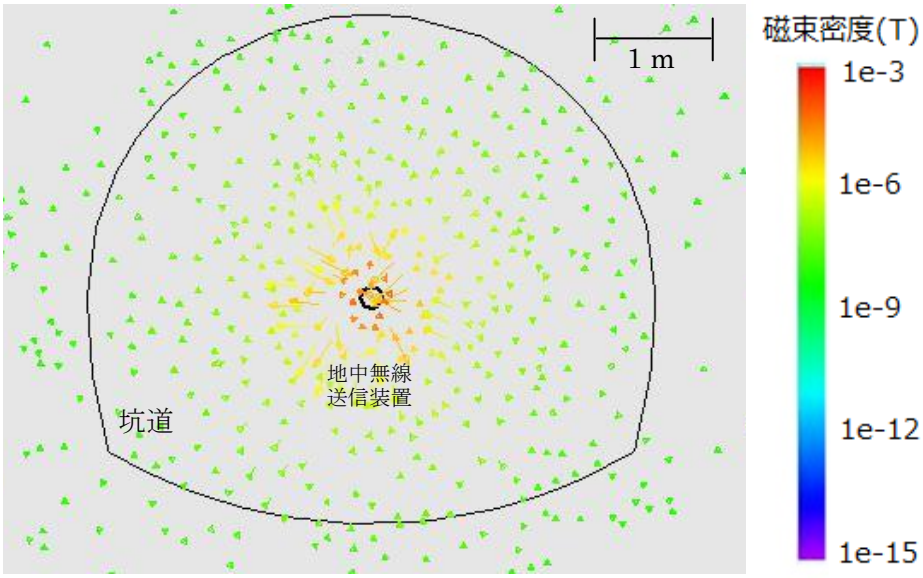



図 3.3.5-56　磁束ベクトル図　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、面 2）

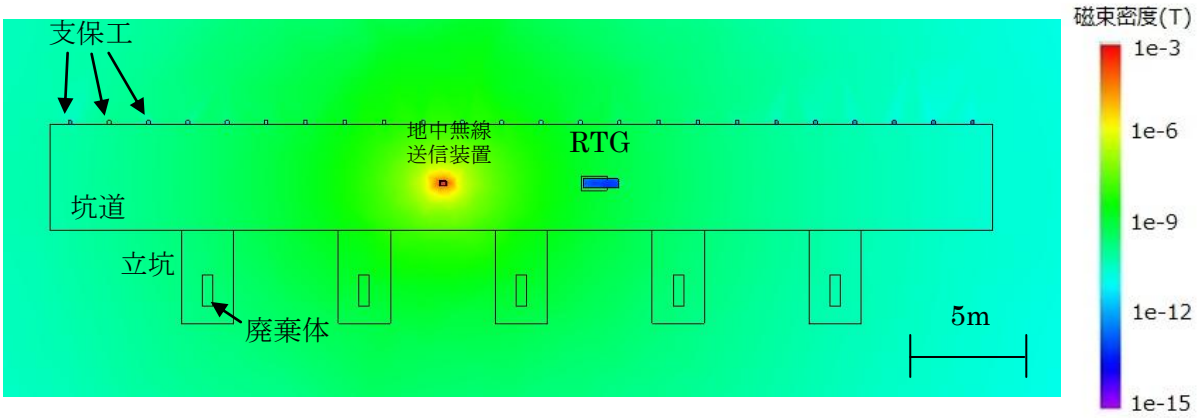



図 3.3.5-57　磁束密度コンター図　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、面 1）

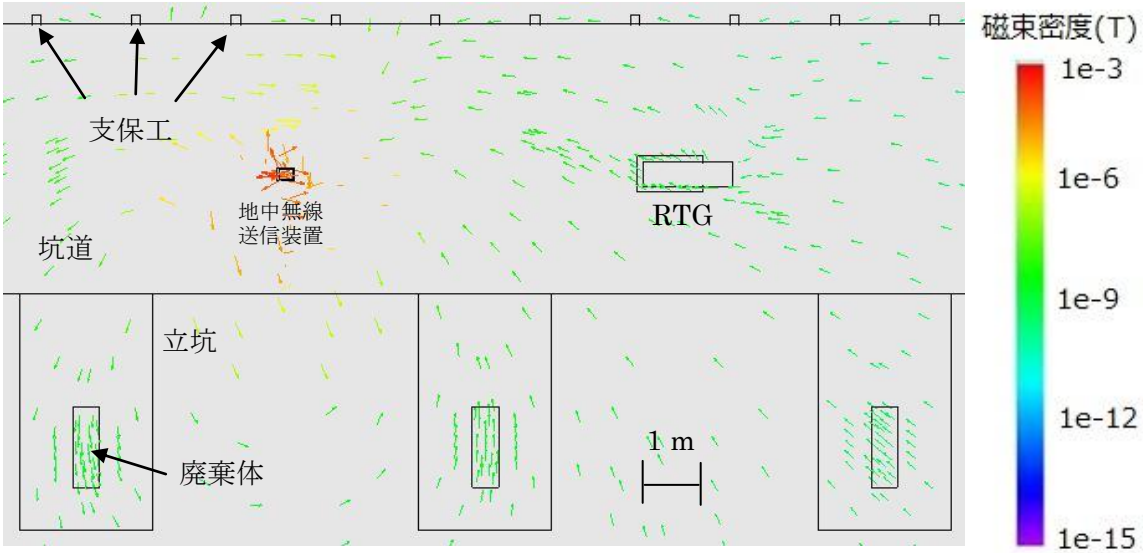



図 3.3.5-58　磁束ベクトル図　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、面 1）

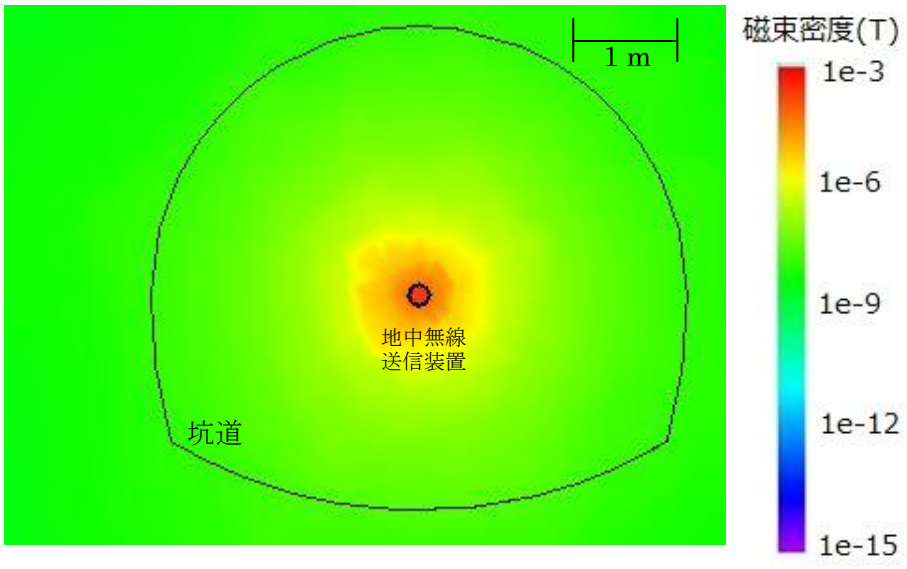



図 3.3.5-59　磁束密度コンター図　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、面 2）

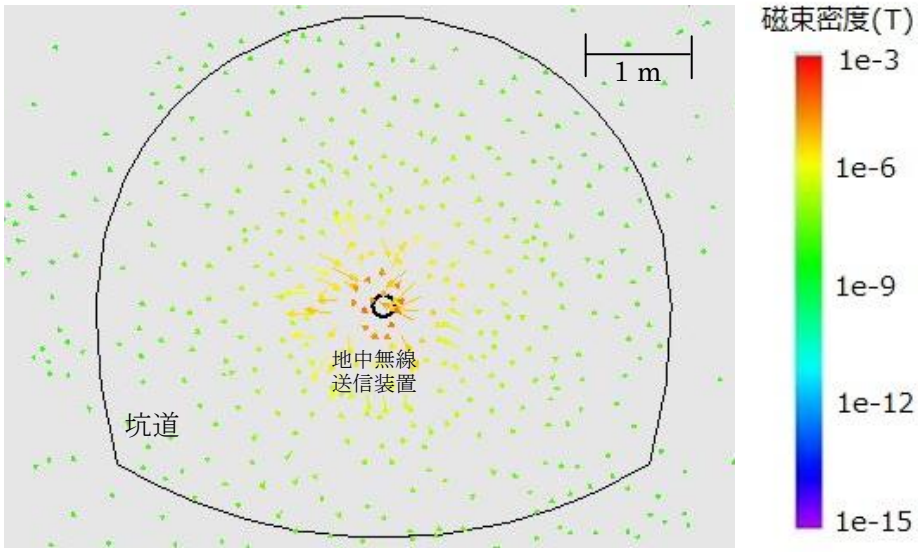



図 3.3.5-60　磁束密度ベクトル図図　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、面 2）

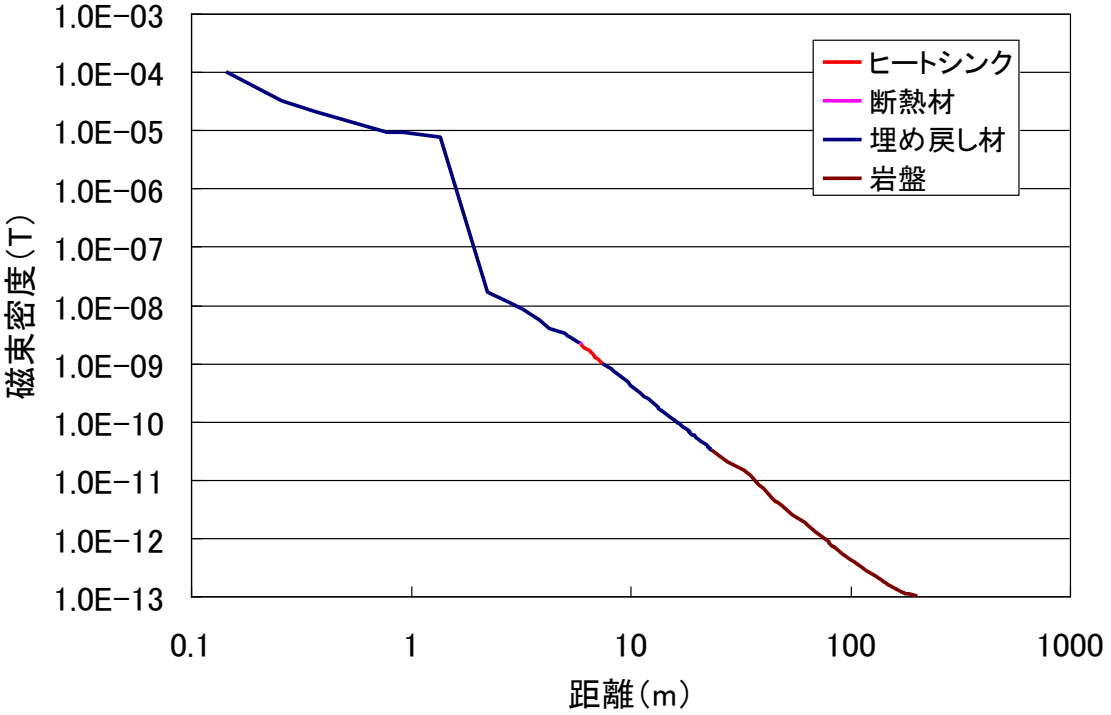



図 3.3.5-61　磁束密度分布　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、線分 1）

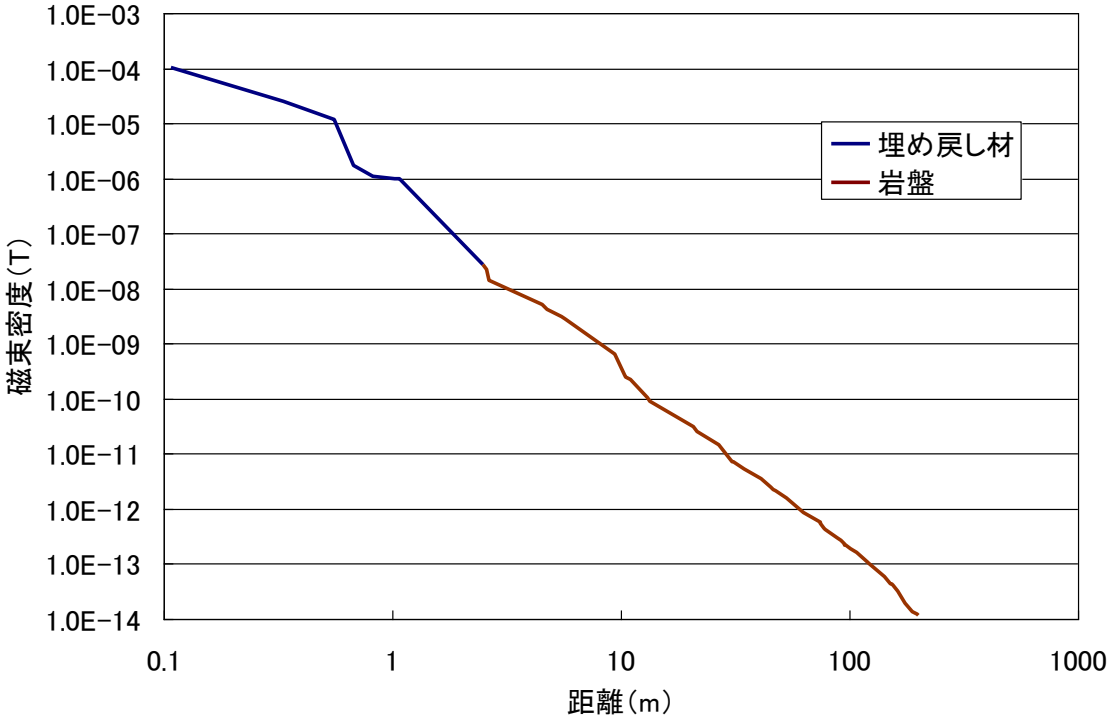



図 3.3.5-62　磁束密度分布　解析ケース①（距離 6.66 m、鋼製支保工無し、線分 2）

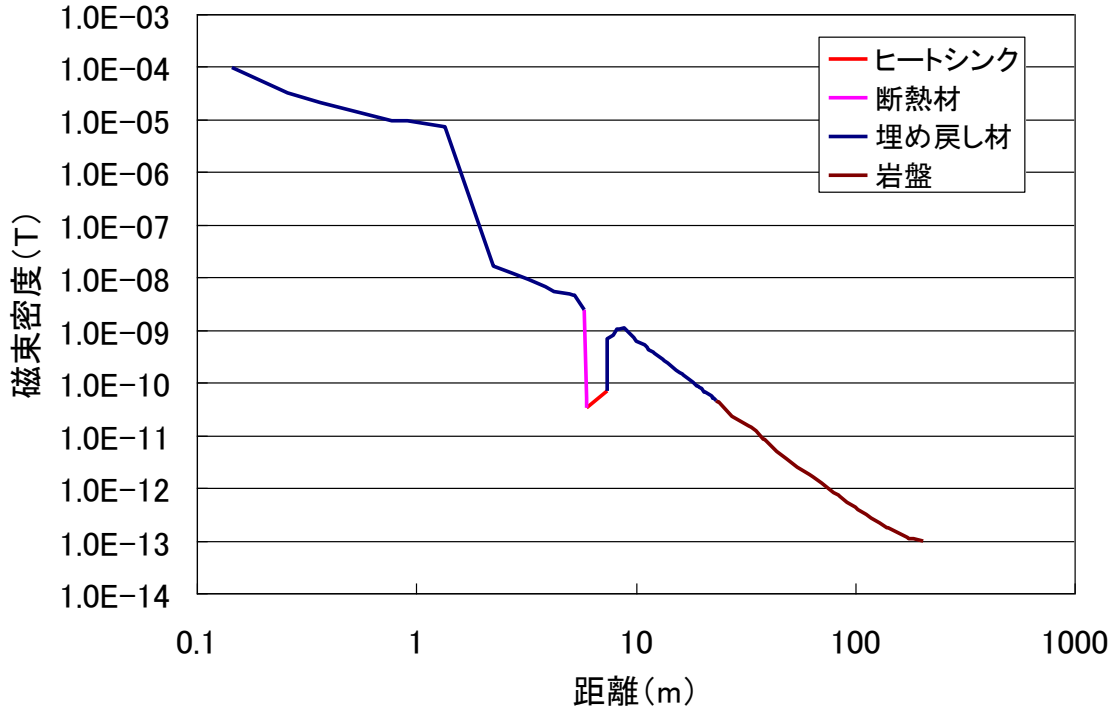



図 3.3.5-63　磁束密度分布　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、線分 1）

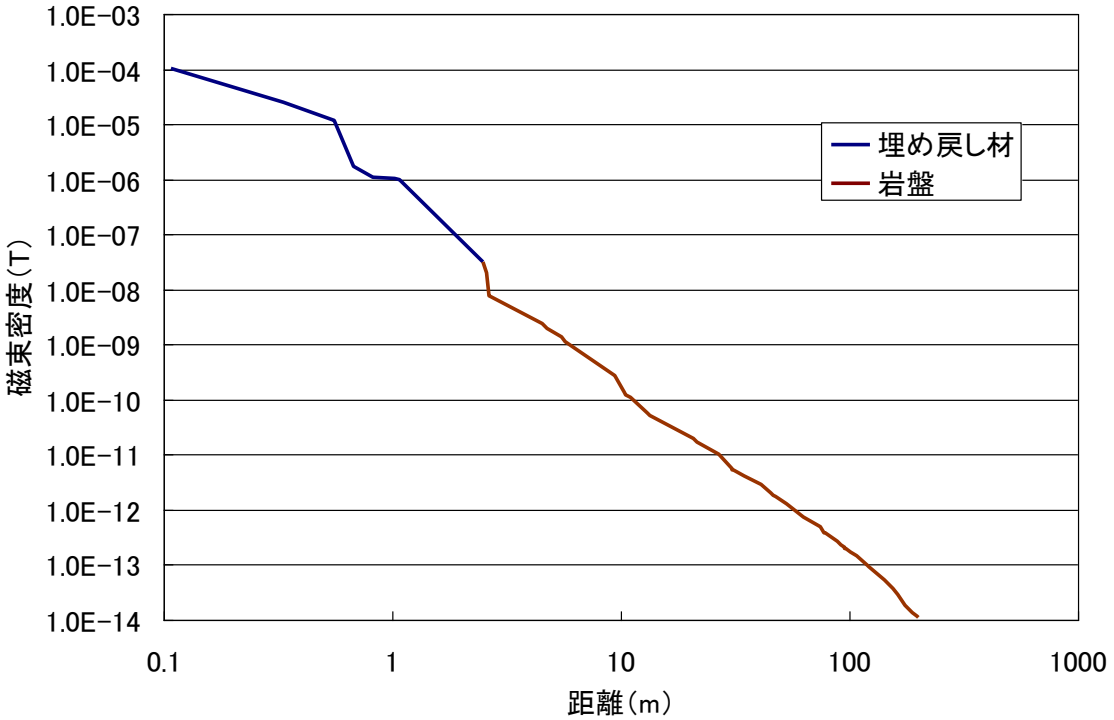



図 3.3.5-64　磁束密度　解析ケース②（距離 6.66 m、鋼製支保工有り、線分 2）

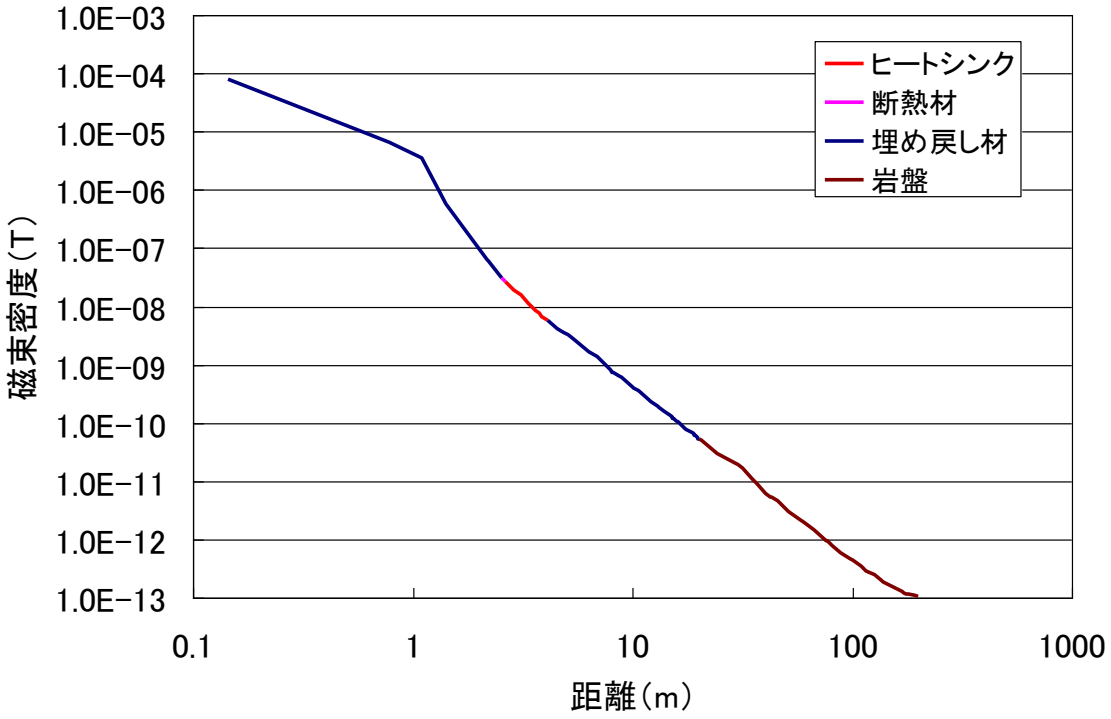



図 3.3.5-65　磁束密度　解析ケース③（距離 3.33 m、鋼製支保工無し、線分 1）

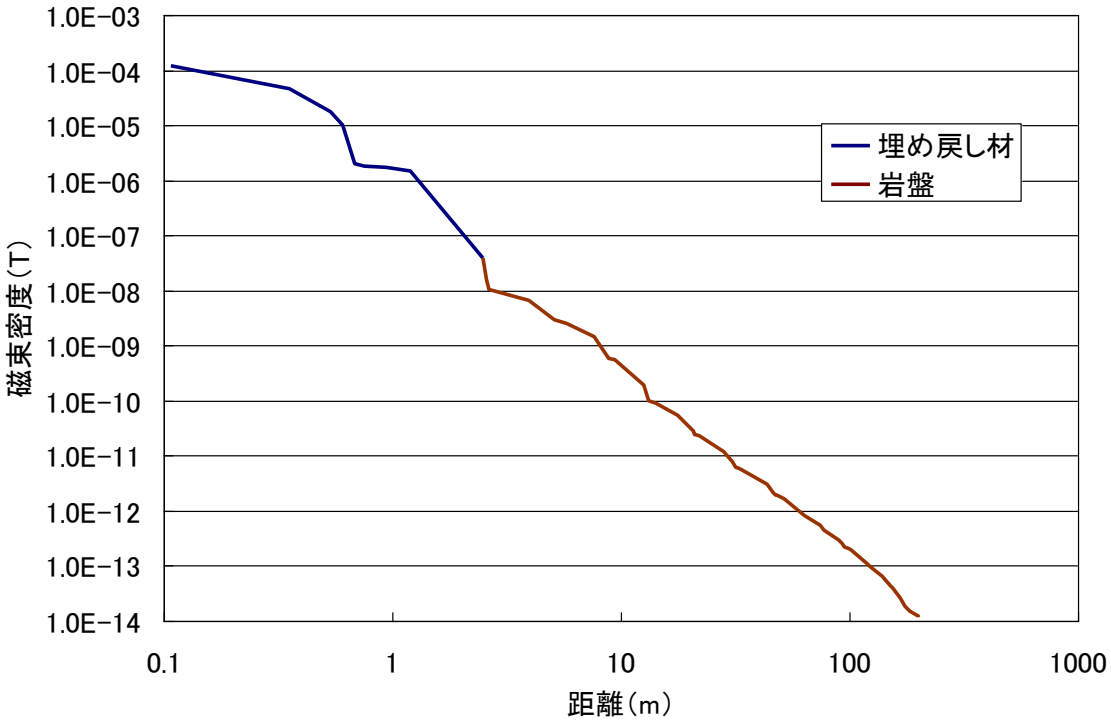



図 3.3.5-66　磁束密度　解析ケース③（距離 3.33 m、鋼製支保工無し、線分 2）

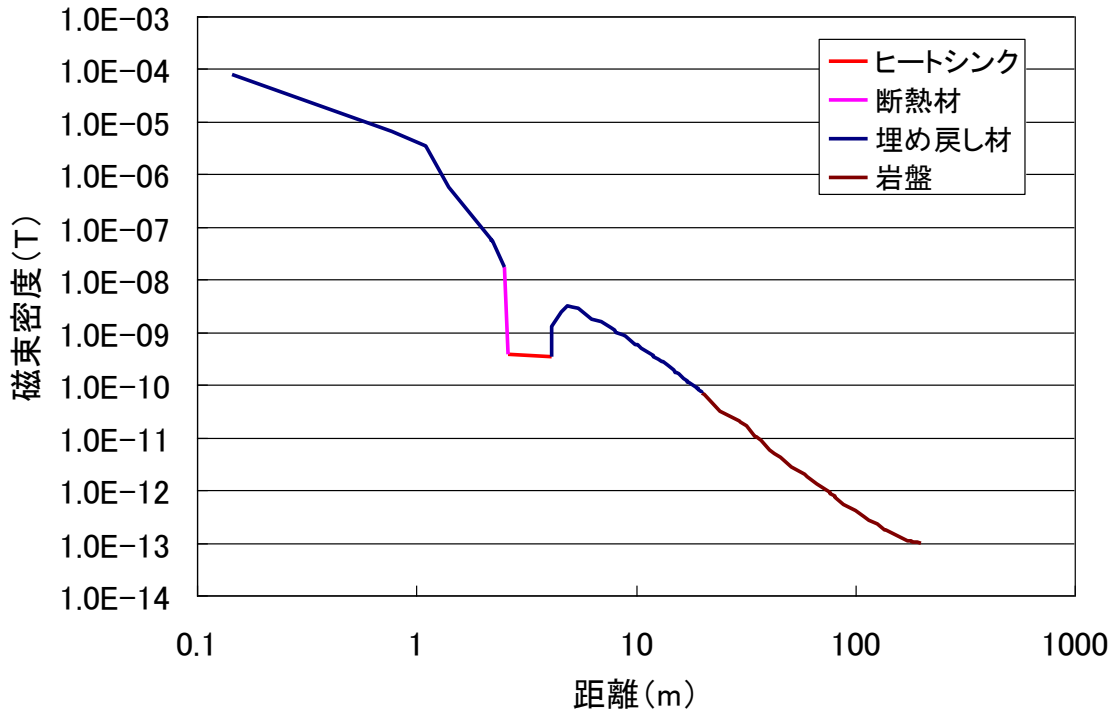



図 3.3.5-67　磁束密度　解析ケース④（距離 3.33 m、鋼製支保工有り、線分 1）

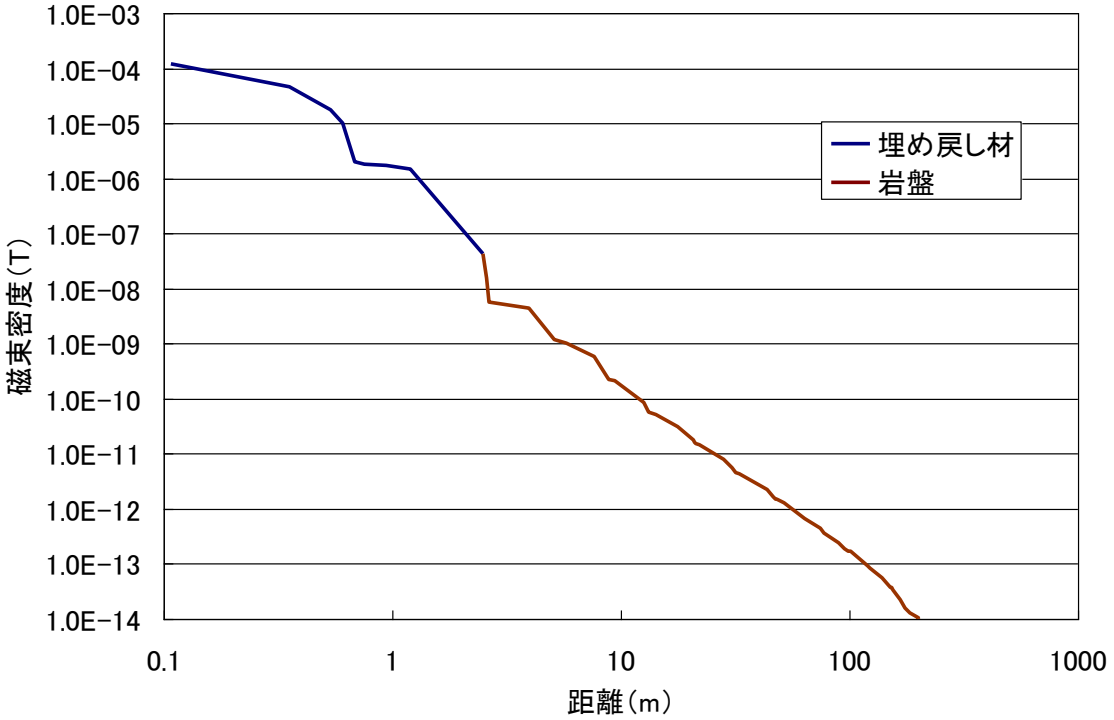



図 3.3.5-68　磁束密度　解析ケース④（距離 3.33 m、鋼製支保工有り、線分 2）

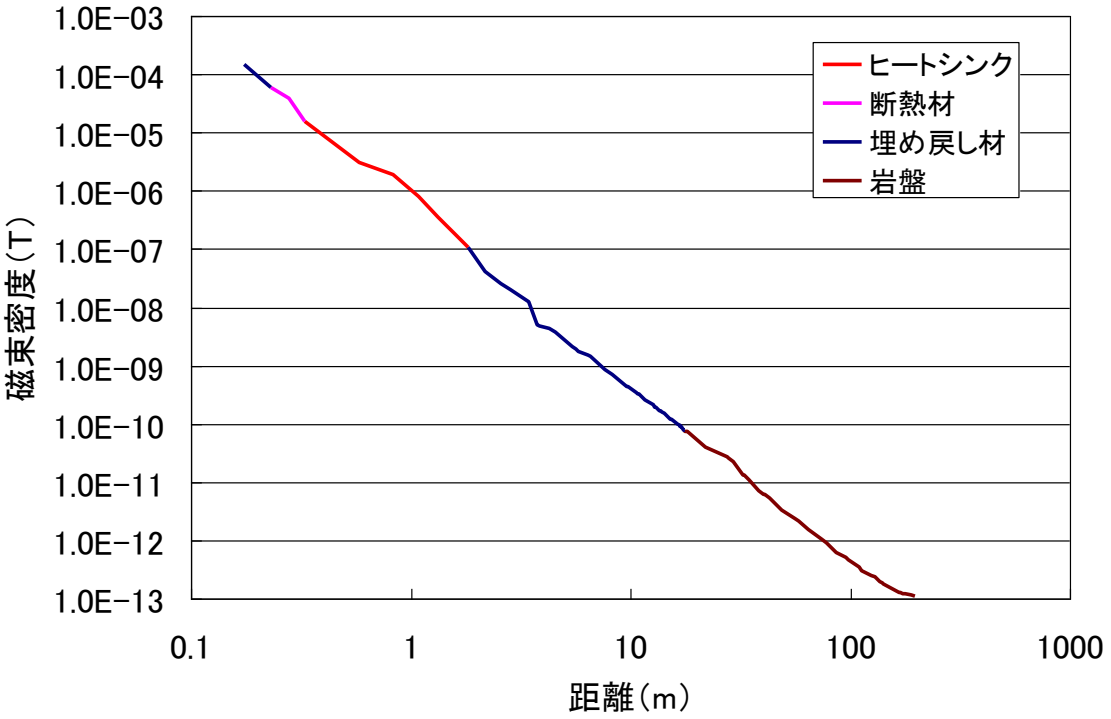



図 3.3.5-69　磁束密度　解析ケース⑤（距離 1.00 m、鋼製支保工無し、線分 1）

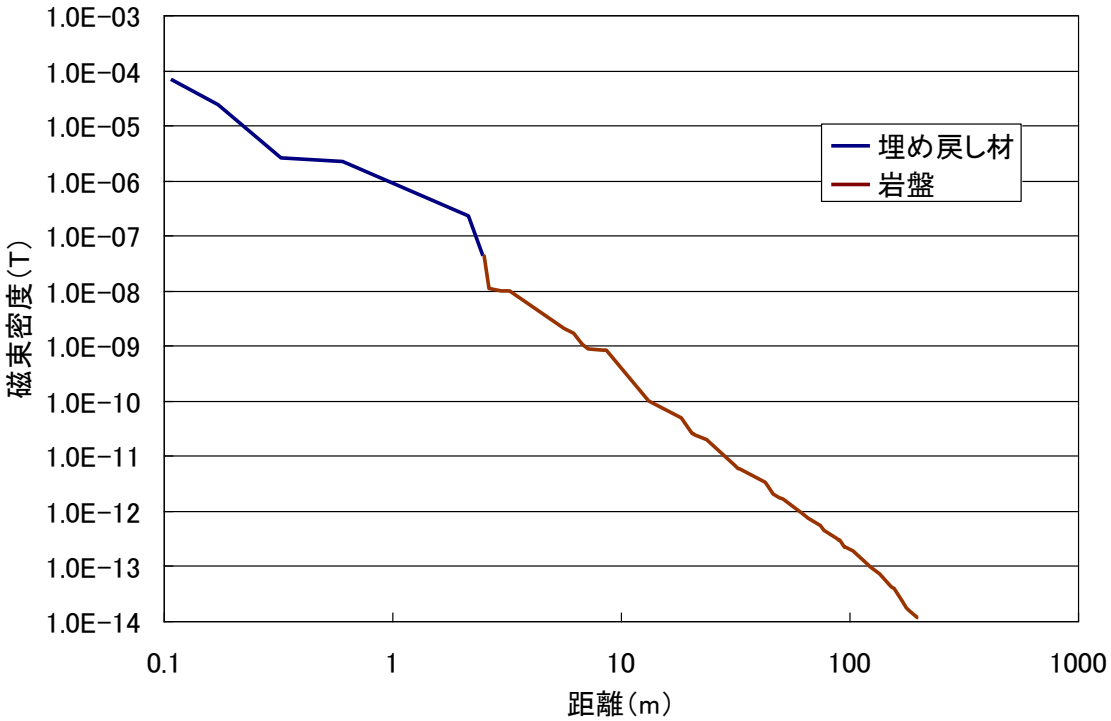



図 3.3.5-70　磁束密度　解析ケース⑤（距離 1.00 m、鋼製支保工無し、線分 2）

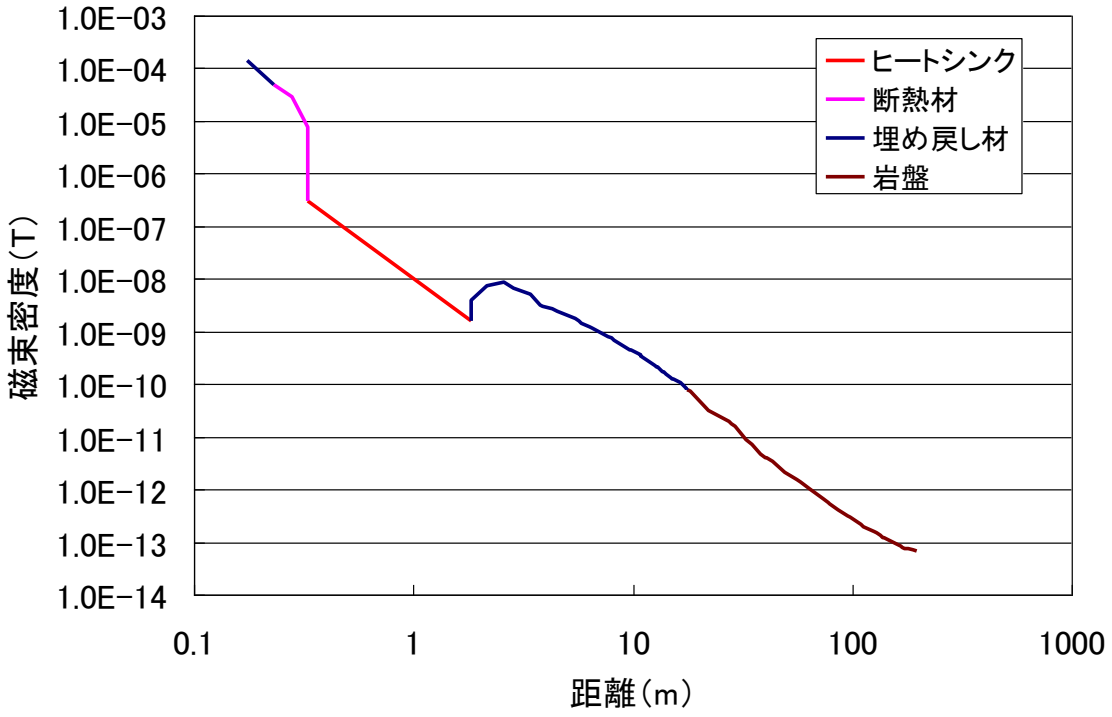



図 3.3.5-71　磁束密度　解析ケース⑥（距離 1.00 m、鋼製支保工有り、線分 1）

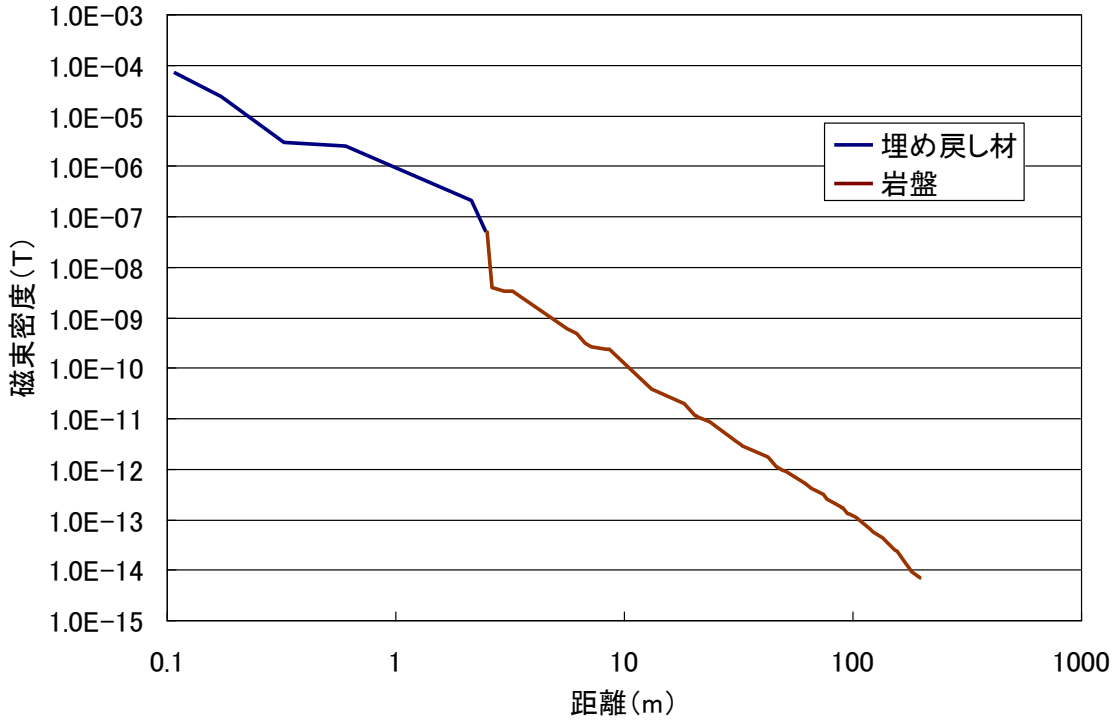



図 3.3.5-72　磁束密度　解析ケース⑥（支距離 1.00 m、鋼製保工有り、線分 2）

3) RTG の電磁波影響に関するまとめ

RTG と地中無線伝送装置の間の 3 種類の距離の結果を取りまとめると以下のようになる。

（全体）

- メッシュのサイズの影響により多少のばらつきが確認されるが、基本的に磁束密度は距離の 3 乗に反比例して減衰している。
- RTG 近傍では、磁束の形成が不十分のため、上記の 3 乗則に準じていない。
- 支保工及び RTG 有りの場合は RTG 内部に磁束が生じにくいため、磁束密度は大きく減衰するが、その外側では磁束の回り込みが生じている。このため、全体としての磁束密度分布は支保工及び RTG 無しの場合と同様の傾向を示している。

地中無線送信装置から 100m 離れ地点における RTG と地中無線伝送装置の間の距離 6.66 m の場合を基準とした時の磁束密度の割合（鋼製支保有り）を表 3.3.5-7 にまとめて示す。

（鋼製支保工有りの場合）

- RTG と地中無線伝送装置の間の距離 6.66 m の場合を基準とすると、x 方向（坑道方向）へ 100 m 離れた点における磁束密度は RTG と地中無線伝送装置の間の距離 3.33 m の場合 96.0 %、1.00 m の場合 70.2%であった。
- RTG と地中無線伝送装置の間の距離 6.66 m の場合を基準とすると、z 方向（鉛直方向）へ 100 m 離れた点における磁束密度は RTG と地中無線伝送装置の間の距離 3.33 m の場合 96.3%、1.00 m の場合 61.9 %であった。
- 地中無線送信装置近傍に RTG が存在した場合、磁束密度が低減するが、今回の条件においてその影響の程度は、異なる方向（坑道方向及び鉛直方向）において大きく変わらなかった。

これらのことから、地中無線送信装置と RTG の配置方法に関して、以下のことが言える。

- RTG と地中無線装置の距離は、送信距離と現地の電磁ノイズレベルに依存するが、今回の解析を踏まえると、1.00m まで近づけると減衰が大きくなるため、3.33m以上、できれば 6.66m 程度離すことが望まれる。この結果は、別途実施した熱解析の結果（6.66m 程度離す）と同様の結果であり、地中無線装置の電源として RTG を適用する際には、基本的には、互いの設置位置をより離すことが好ましいと言える。

表 3.3.5-7 100m 離れ地点における磁束密度の割合（鋼製支保有り）

| RTG との距離 | 線分 1（坑道軸方向） | 線分 2（鉛直方向） |
|---|---|---|
| 6.66 m | 基準 | 基準 |
| 3.33 m | 96.0% | 96.3% |
| 1.00 m | 70.2% | 61.9 % |

### 3.3.6　地中無線モニタリング技術の人工バリア性能確認試験への適用に関する検討

原子力機構の幌延深地層研究センターの地下研究施設における人工バリア性能確認試験において、地中無線モニタリング装置を適用するための準備を実施した。同試験は平成 25 年度に準備し、平成 26 年度に試験を開始した。

本年度は同試験への緩衝材及び埋め戻し材中に地中無線モニタリング装置を設置し、適用試験を開始した。

#### (1)　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計画

幌延深地層研究センター（以下、幌延 URL）の第 3 段階の調査研究では、深度 350m 調査坑道（図 3.3.6-1、図 3.3.6-2 参照）において、人工バリア性能確認、オーバーパック腐食挙動、テストピット挙動評価などに関する原位置試験を計画している。現在、幌延 URL においては 350m 調査坑道が掘削され、平成 26 年度から人工バリア性能確認試験などを開始している（図 3.3.6-3 参照）[24]。

人工バリアの性能確認試験については、軟岩系岩盤における竪置き方式を対象に、図 3.3.6-3 に示すように坑道の先端部分に掘削した処分孔に実物大の模擬人工バリアを設置した上で、坑道の埋め戻しやプラグの設置を行い、熱・水・応力・化学連成現象に関わるデータを取得するとともに、試験終了後には解体してデータの検証をする計画である。なお、坑道の支保には原子力機構で開発した低アルカリ性セメントを用い、処分孔は無支保、緩衝材はブロック定置方式で施工された。また、坑道の埋め戻しには、350m 調査坑道の掘削により生じた掘削ズリとベントナイトの混合材料を用い、坑道下部は現場での転圧締固め、上部は圧縮成型ブロックで施工された[25]。

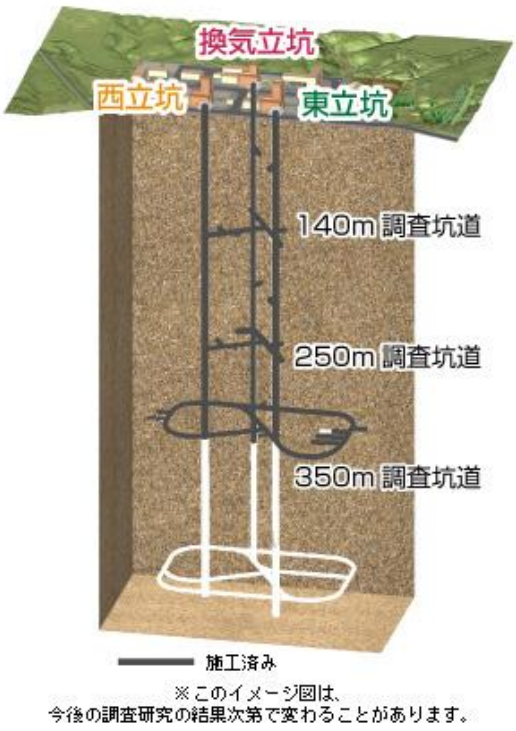



図 3.3.6-1　幌延 URL のイメージ図[26]

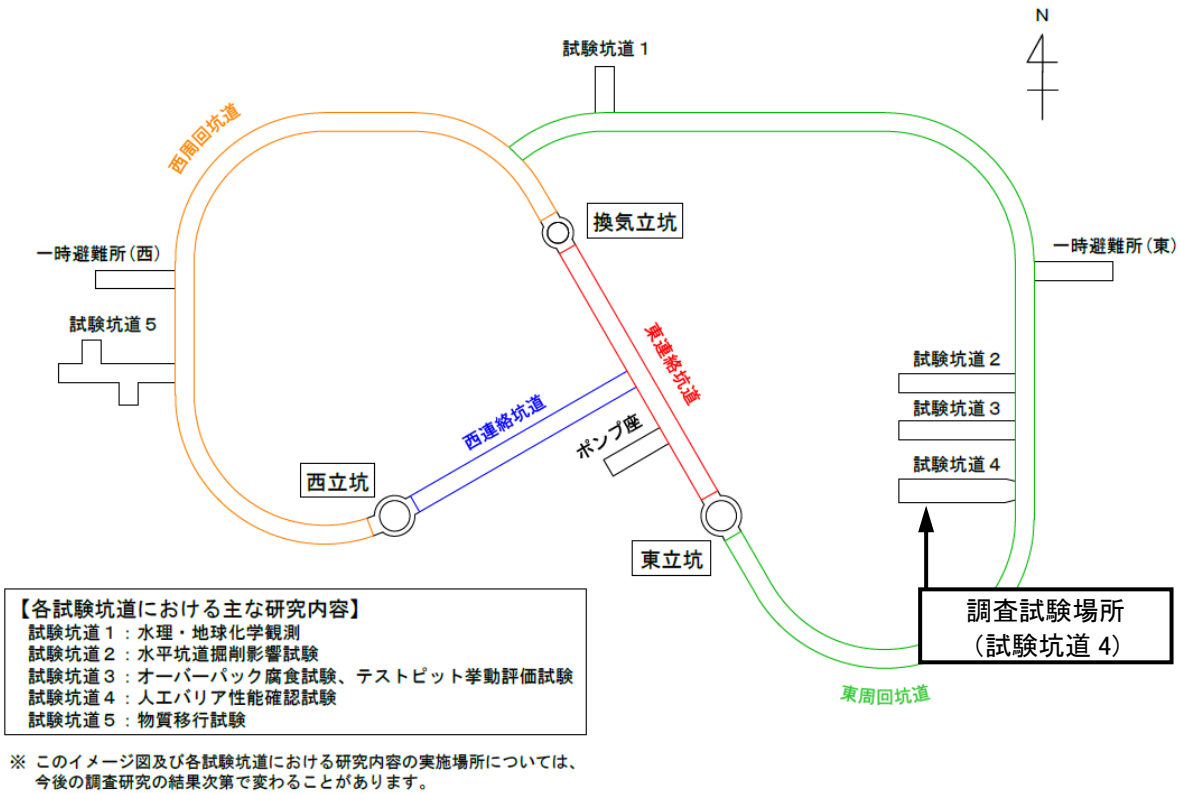



図 3.3.6-2　実施場所　平面図（試験坑道 4）[26]

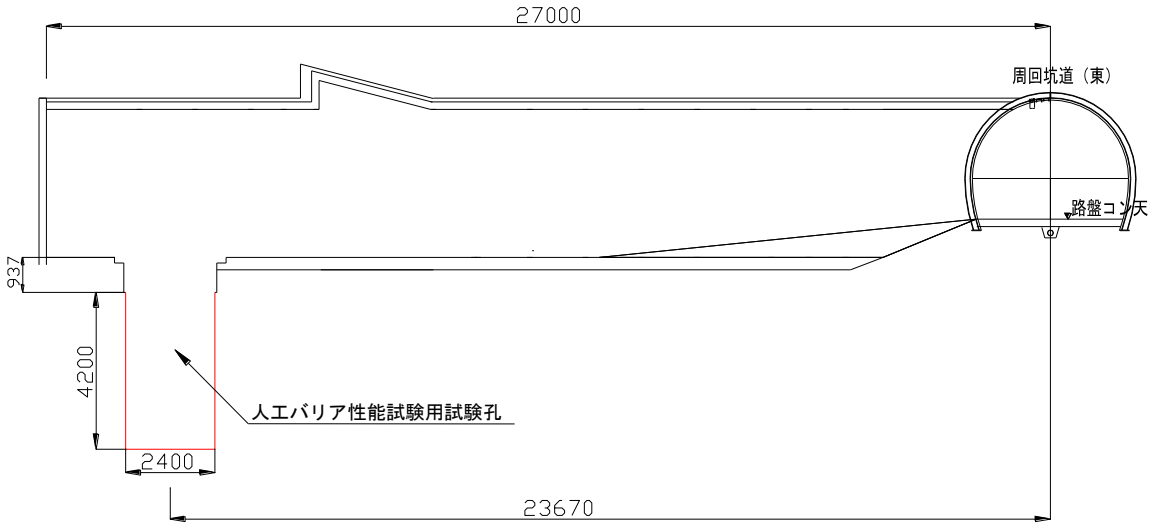



図 3.3.6-3　実施場所　断面図（試験坑道 4）（単位：mm）

(2)　人工バリア性能確認試験への地中無線モニタリング適用準備

幌延 URL の地下研究施設における人工バリア性能確認試験において、地中無線モニタリング装置を適用するための準備作業を行った。具体的には、坑道内での通信確認試験、緩衝材及び坑道埋め戻し材への地中無線モニタリング装置の設置位置及び設置方法の検討、緩衝材ブロックの加工、通信設定、土圧計及び間隙水圧計を接続した地中無線送信装置の緩衝材及び坑道埋め戻し材ブロックへの設置である。

1)　地中無線モニタリング装置の構成

本検討における地中無線モニタリング装置のシステム構成図を図 3.3.6-4 に示す。計測システムは、大きく地中無線送信装置、地中無線受信装置、データ収録システムから構成される。

地中無線送信装置は、土圧計及び間隙水圧計が 10 MPa 耐圧用小型地中無線送信機とそれぞれ接続されたものである（図 3.3.6-5 参照）。本試験では、土圧計が接続されたものを 3 台（直径 76.2mm のものが 2 台、直径 100mm のものが 1 台）、間隙水圧計が接続されたものを 4 台使用する。

受信装置は、受信アンテナと格納箱で構成される。格納箱には、受信機本体、電源制御装置、LAN 変換／HUB、電源避雷器が収納される。受信アンテナと格納箱は、最長 30m のアンテナケーブルで接続される。

データ収録用の PC は地上に設置し、受信機格納箱から LAN ケーブルを用いて接続される。

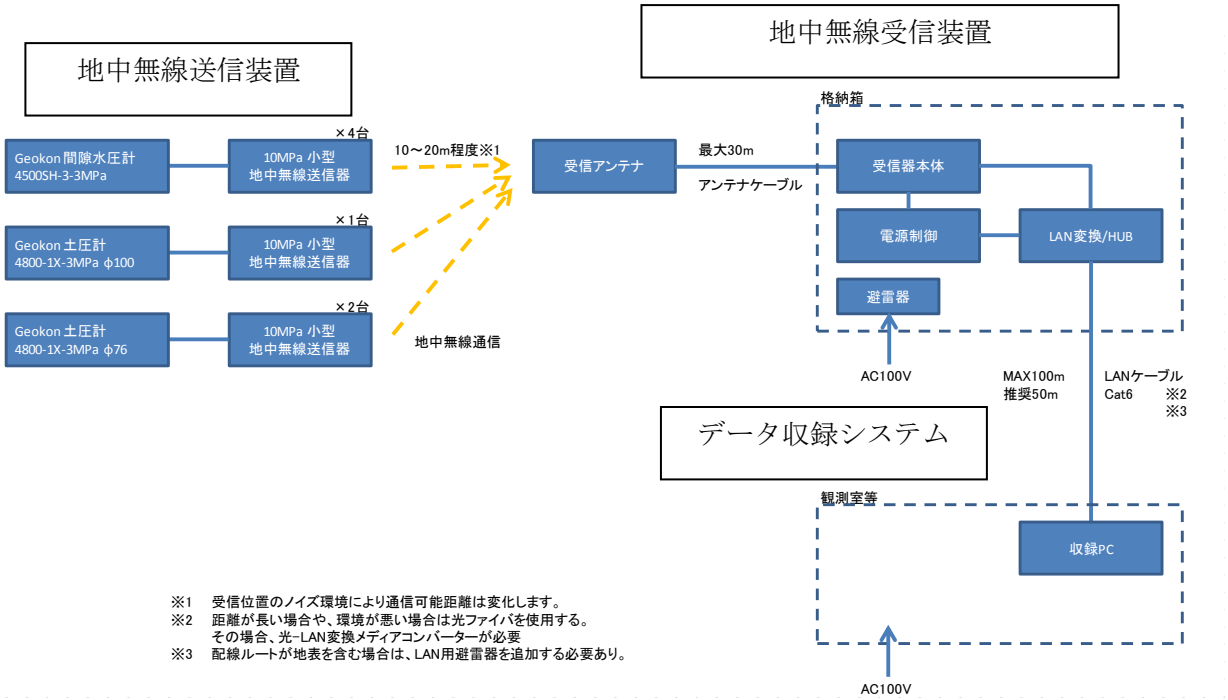



図 3.3.6-4　地中無線モニタリング装置のシステム構成図

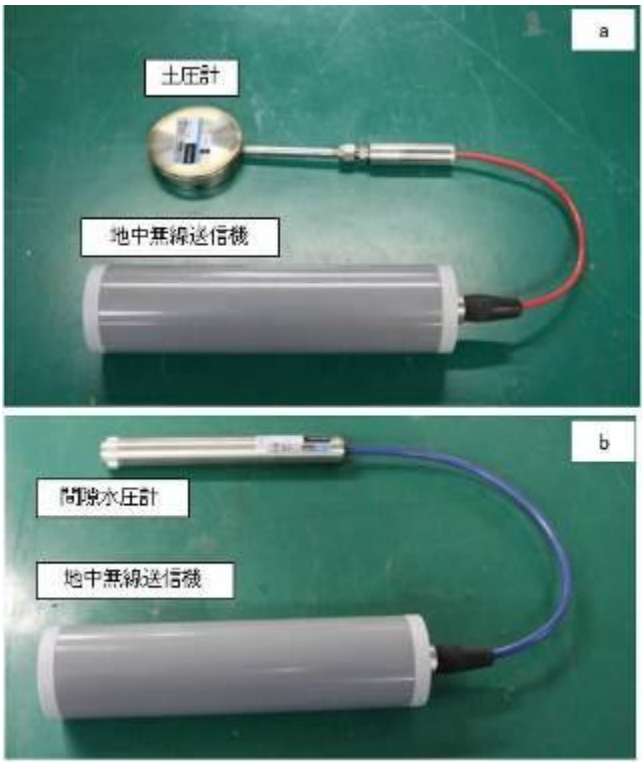



図 3.3.6-5　地中無線送信装置（a:土圧計の接続された装置、b:間隙水圧計の接続された装置）

2)　坑道内の通信確認試験

350m 調査坑道の内、試験坑道 4 と一時避難所（東）において、坑道内の電磁ノイズ状況、及び受信レベルを確認するため、可搬型受信機と確認用手動送信機を用いた通信確認試験を実施した。表 3.3.6-1 に、試験に用いた機材を示す。

表 3.3.6-1　試験に用いた機材一覧

| 機材名 | 寸法／重量 | 備考 |
|---|---|---|
| 可搬型受信機 | 140×140×400mm／6kg | 受信アンテナ込み、バッテリ内臓 |
| レベルメータ | 170×170×80mm／1kg | 受信レベル測定用アナログメータ |
| レコーダー | 180×100×40mm／0.6kg | 受信レベル収録用レコーダー |
| 確認用手動送信機 | 50×140 mm／1kg | - |

試験は、受信レベル確認用機器（レベルメータ、レコーダー）を可搬型受信機に接続し、計測位置、高さ、方向を変えながら、坑道内の電磁ノイズレベルと受信レベルを計測した。試験坑道 4 と一時避難所（東）での測定位置を、図 3.3.6-6、図 3.3.6-7 に示す。試験坑道 4 では 6 箇所で計 14 回の計測、一時避難所（東）では 6 箇所で計 21 回の計測を行った。なお坑道内の計測方向は、図 3.3.6-8 に示すように、坑道軸直角方向を X 軸、坑道軸方向を Y 軸、坑道軸鉛直方向を Z 軸と定義している。測定状況を、図 3.3.6-9～図 3.3.6-12 に示す。

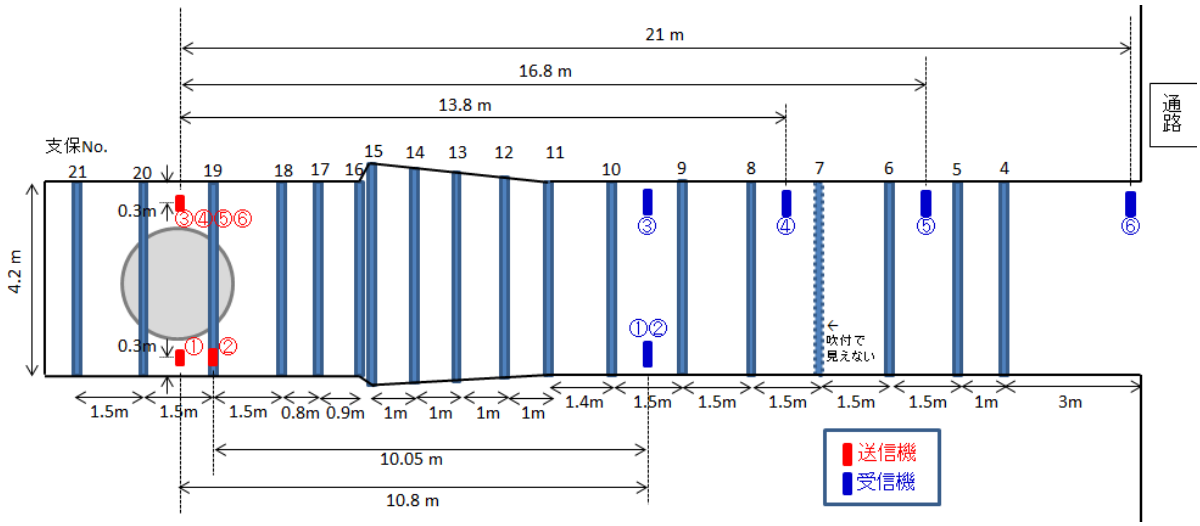



図 3.3.6-6　試験坑道 4 における測定位置

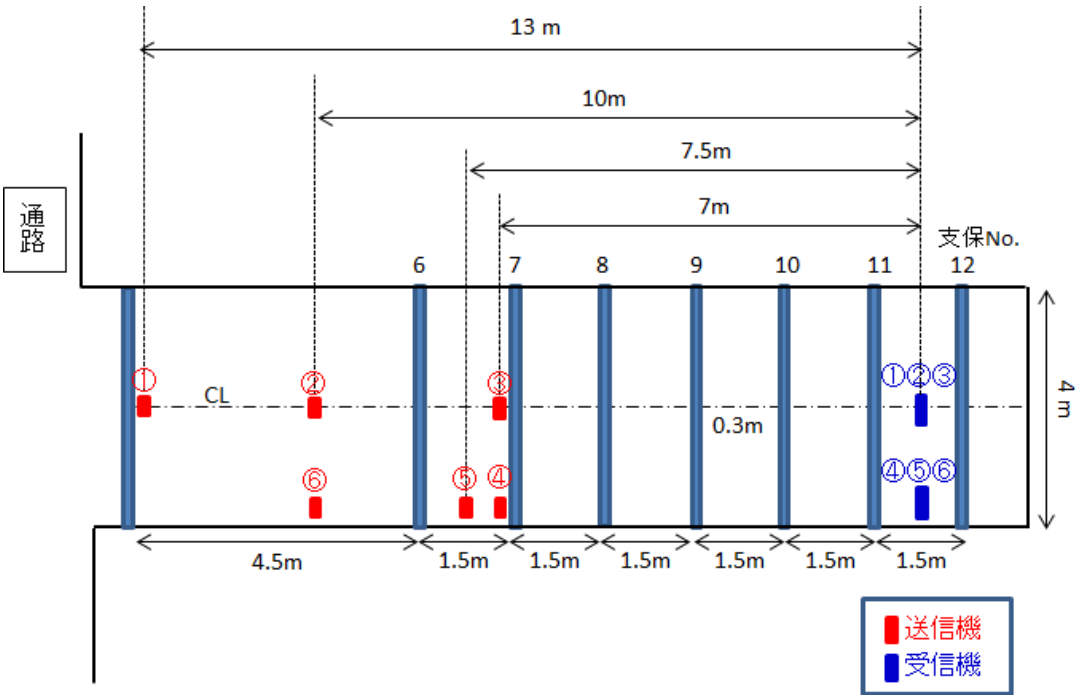



図 3.3.6-7　一時避難所（東）における測定位置

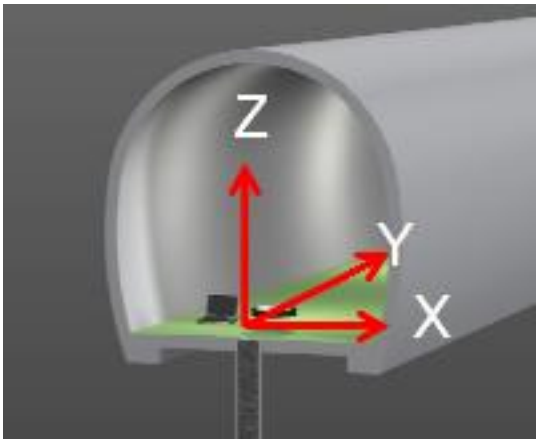



図 3.3.6-8　坑道内での計測方向

図 3.3.6-9　試験坑道 4-送受信機①②位置（左側壁沿い）での測定状況

図 3.3.6-10　試験坑道 4-送受信機③④⑤⑥位置（右側壁沿い）での測定状況

図 3.3.6-11　一時避難所（東）-送受信機①②③の位置（CL 沿い）での測定状況

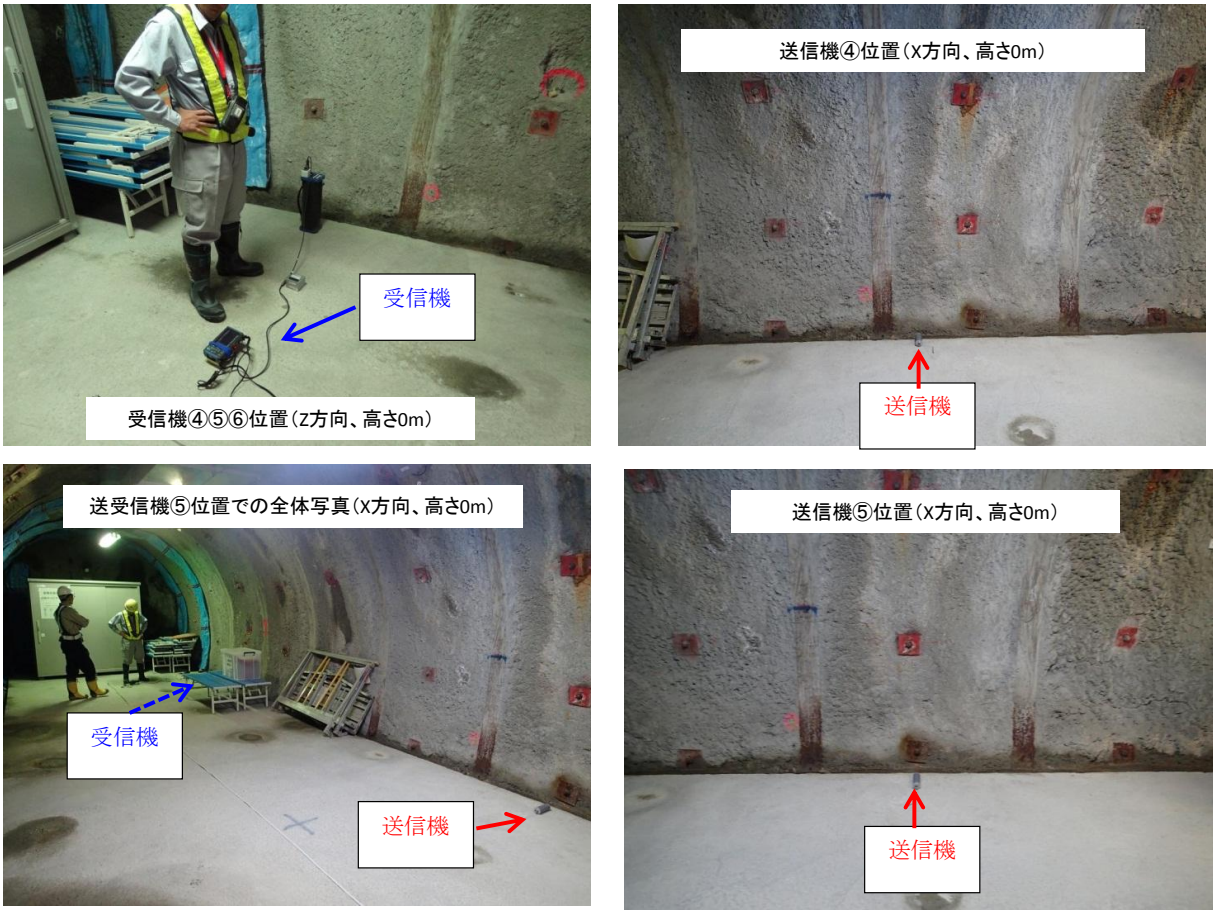



図 3.3.6-12　一時避難所（東）-送受信機④⑤⑥の位置（右側壁沿い）での測定状況

計測結果を、表 3.3.6-2、表 3.3.6-3 にまとめる。計測値は、現地でのレベルメータの読み値とレコーダーに記録された値が記載されており、最終的には記録値を正とした。図 3.3.6-13、図 3.3.6-14 は、発受信間距離と受信レベル（記録値）の関係をグラフに示したものである。

本試験結果をまとめると以下のようになる。

- 試験坑道 4、一時避難所（東）共に、10～20m 程度の送信が可能であることが分かった。
- 試験坑道 4 の結果について、送受信機位置④⑤の受信レベルが、一部、非常に小さな値を示している。これは、図 3.3.6-9 でもみられるように、それぞれの計測場所近傍に他の計測器やロックボルトが存在しており、これらによって電磁波の伝播が妨害されたためと考えられる。
- 避難坑道の結果については、正対（Y 方向）での受信強度が平行（X 方向、Z 方向）の値よりも全体的に高くなっている。これは、一般的な通信試験結果と同様である。

表 3.3.6-2　試験坑道 4 での通信試験結果

| 送受信機の位置 | | 機器の高さ(m) | | 方向 | ノイズレベル(mV) | 受信レベル(mV) | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 位置番号 | 距離(m) | 送信機 | 受信機 | | 【読み値】 | 読み値 | 記録 | |
| ① | 10.8 | 0 | 0 | X | 0.5 | 5 | 5.5 | |
| ① | 10.8 | 2 | 0 | X | 0.5 | 5 | 5.1 | |
| ① | 10.8 | 2 | 2 | X | 1.2 | 6 | 6.2 | |
| ② | 10.05 | 0 | 0 | X | 4 | 30 | 32.9 | |
| (②) | – | – | 0 | Z | 0.4 | – | – | ノイズチェックのみ |
| (②) | – | – | 0 | X | 0.6 | – | – | |
| (②) | – | – | 0 | Y | 0.3 | – | – | |
| ③ | 10.8 | 0 | 0 | X | 0.7 | 20 | 21.6 | |
| ③ | 10.8 | 2 | 0 | X | – | – | – | |
| ④ | 13.8 | 0 | 0 | X | 0.5 | 20 | 16.0 | 受信レベルは20弱 |
| ④ | 13.8 | 2 | 0 | X | 0.5 | 1.5 | 1.5 | 後半別発信有 |
| ⑤ | 16.8 | 0 | 0 | X | 0.6 | 10 | 10.9 | |
| ⑤ | 16.8 | 2 | 0 | X | 0.6 | 1.5 | 1.6 | |
| ⑥ | 21 | 0 | 0 | X | 0.5 | 5 | 4.7 | |

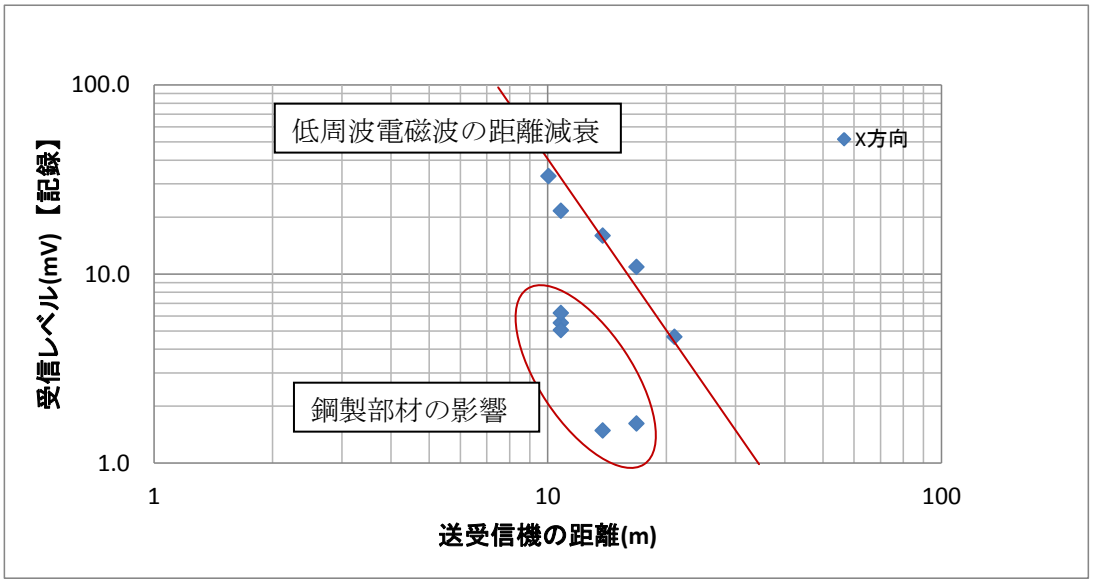



図 3.3.6-13　試験坑道 4 での通信試験結果

表 3.3.6-3　一時避難所（東）での通信試験結果

| 送受信機の位置 | | 機器の高さ(m) | | 方向 | ノイズレベル(mV) | 受信レベル(mV) | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 位置番号 | 距離(m) | 送信機 | 受信機 | | 【読み値】 | 読み値 | 記録 | |
| ① | 13 | 0 | 0 | X | 0.15～1.0 | 7 | 7.1 | |
| ① | 13 | 0 | 0 | Y | 0.2～1.0 | 9 | 8.7 | |
| ① | 13 | 0 | 0 | Z | 0.2 | 10 | 9.3 | |
| ① | 13 | 1.5 | 1.5 | Y | 0.3～1.5 | 10 | 10.4 | |
| ① | 13 | 1.5 | 1.5 | X | 0.2 | 3 | 2.9 | |
| ① | 13 | 1.5 | 1.5 | Z | 0.2 | 3 | 2.8 | |
| ② | 10 | 0 | 0 | X | 0.2 | 12 | 12.6 | |
| ② | 10 | 0 | 0 | Y | 0.2 | 20 | 23.6 | 103129 |
| ② | 10 | 0 | 0 | Z | 0.2 | 15 | 16.9 | |
| ③ | 7 | 0 | 0 | X | 0.2 | 30 | 35.7 | |
| ③ | 7 | 0 | 0 | Y | 0.2 | 70 | 85.5 | |
| ③ | 7 | 0 | 0 | Z | 0.2 | 50 | 61.5 | |
| ④ | 7 | 0 | 0 | X | 0.2 | 50 | 53.5 | 鋼製支保に近い位置から送信 |
| ④ | 7 | 0 | 0 | Y | 0.2 | 70 | 77.3 | |
| ④ | 7 | 0 | 0 | Z | 0.2 | 70 | 82.6 | |
| ⑤ | 7.5 | 0 | 0 | X | 0.2 | 40 | 44.6 | |
| ⑤ | 7.5 | 0 | 0 | Y | 0.2 | 50 | 61.1 | |
| ⑤ | 7.5 | 0 | 0 | Z | 0.2 | 60 | 67.6 | |
| ⑥ | 10 | 0 | 0 | X | 0.2 | 20 | 22.7 | |
| ⑥ | 10 | 0 | 0 | Y | 0.2 | 20 | 24.2 | |
| ⑥ | 10 | 0 | 0 | Z | 0.2 | 25 | 27.2 | |

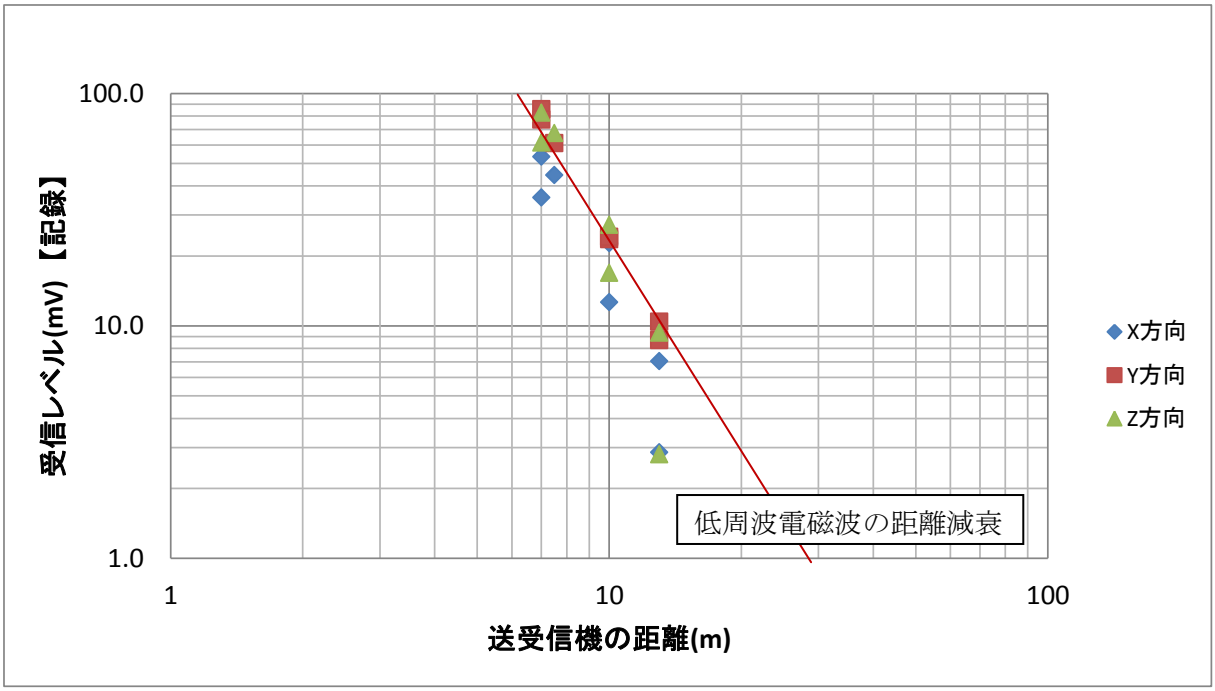



図 3.3.6-14　一時避難所（東）での通信試験結果

3)地中無線モニタリング装置の設置位置及び設置方法

図 3.3.6-15 に地中無線モニタリング装置設置の施工フロー図を示す。センサ付きの地中無線送信装置は、緩衝材ブロックに 3 台（土圧計 1 台、間隙水圧計 2 台)、埋戻し材ブロック施工部に 4 台（土圧計 2 台、間隙水圧計 2 台）設置した。このうち緩衝材ブロックへの設置手順を図 3.3.6-16 に示す。設置位置を図 3.3.6-17～図 3.3.6-19、及び表 3.3.6-1 に示す。

地中無線送信装置を設置する緩衝材ブロックは 11 段目のものであり、事前にブロック上面に 3 箇所切欠き加工を行った。緩衝材ブロックの加工の状況を図 3.3.6-20 に示す。ブロックの加工は事前に地中無線送信装置の外形に合わせたテンプレートを製作し、このテンプレートを緩衝材ブロックの加工面に設置後、サンドブラストにて地中無線送信装置を設置する切欠きを設けた。加工後の緩衝材ブロックの状態を図 3.3.6-21～図 3.3.6-23 に示す。この緩衝材ブロックが人工バリア性能確認試験の所定の位置に施工された後、切欠き加工部へそれぞれ装置を設置する（A-A 断面：図 3.3.6-18)。また装置周辺の空隙部はベントナイト混合土（ベントナイト（クニゲル V1)：珪砂（3 号+5 号）＝7：3）を用いて充填した。

埋戻し材ブロック施工部に設置する装置は、図中の C-C 断面、D-D 断面の位置にそれぞれ設置する（図 3.3.6-19)。装置周辺の空隙部は、埋め戻し材（ベントナイト（クニゲル V1)：掘削ズリ（20 ㎜アンダー）＝4：6）を用いて充填した。

受信アンテナの設置位置は、プラグ外の坑道壁面より水平方向に掘削されたボーリング孔内とする。ボーリング孔の位置は、プラグから 3m 程度で、長さ 3m、直径 10cm の裸孔である。アンテナを孔内へ設置した後、孔口は粘土で塞いだ。受信機格納箱は、プラグ外側の計測小屋壁面に設置した。

データ収録用の PC は地上に設置し、受信機格納箱と LAN ケーブルを用いて接続した。

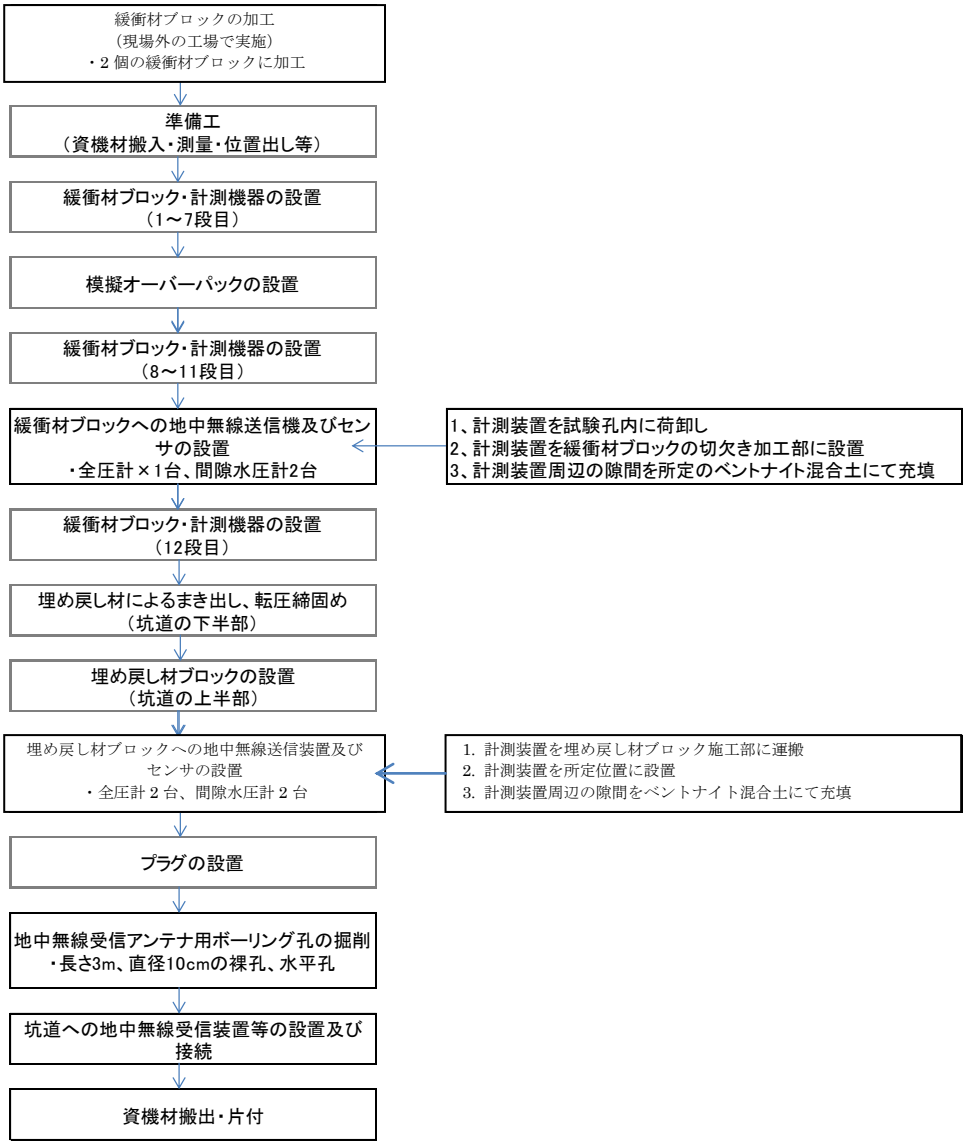



図 3.3.6-15　人工バリア性能確認試験への地中無線モニタリング装置設置の施工フロー

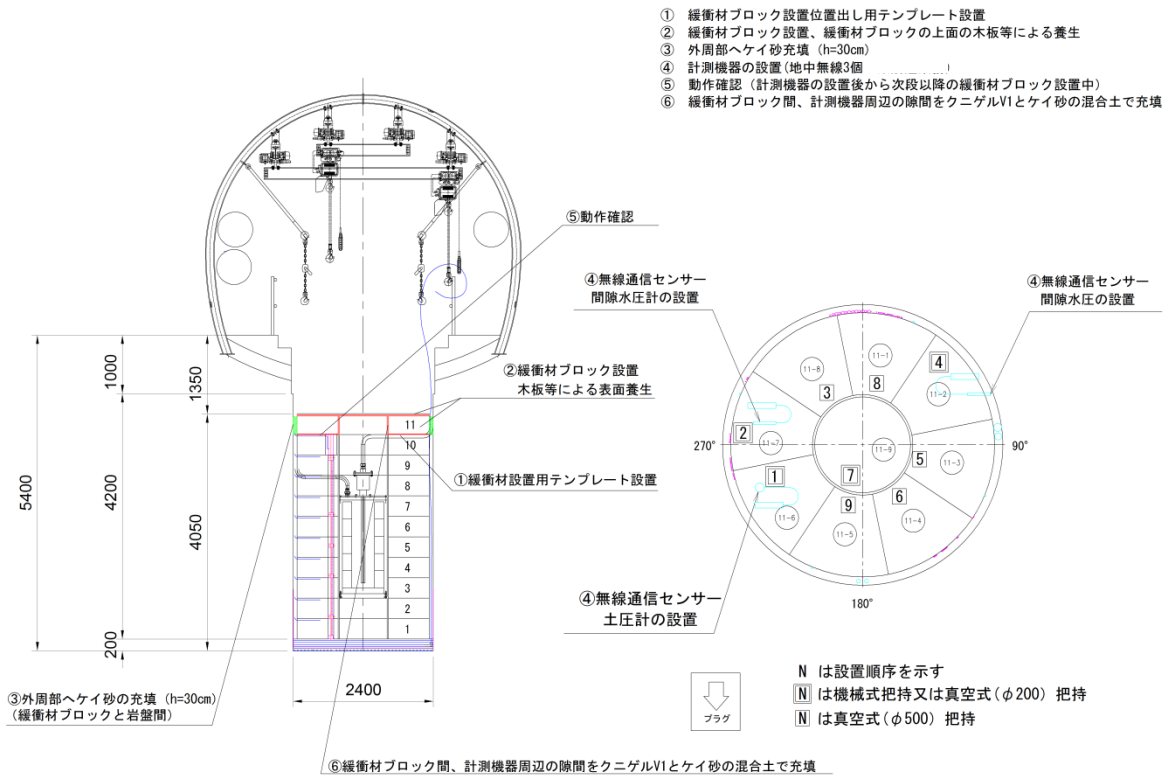



図 3.3.6-16　緩衝材ブロックへの地中無線送信装置及びセンサ設置手順図

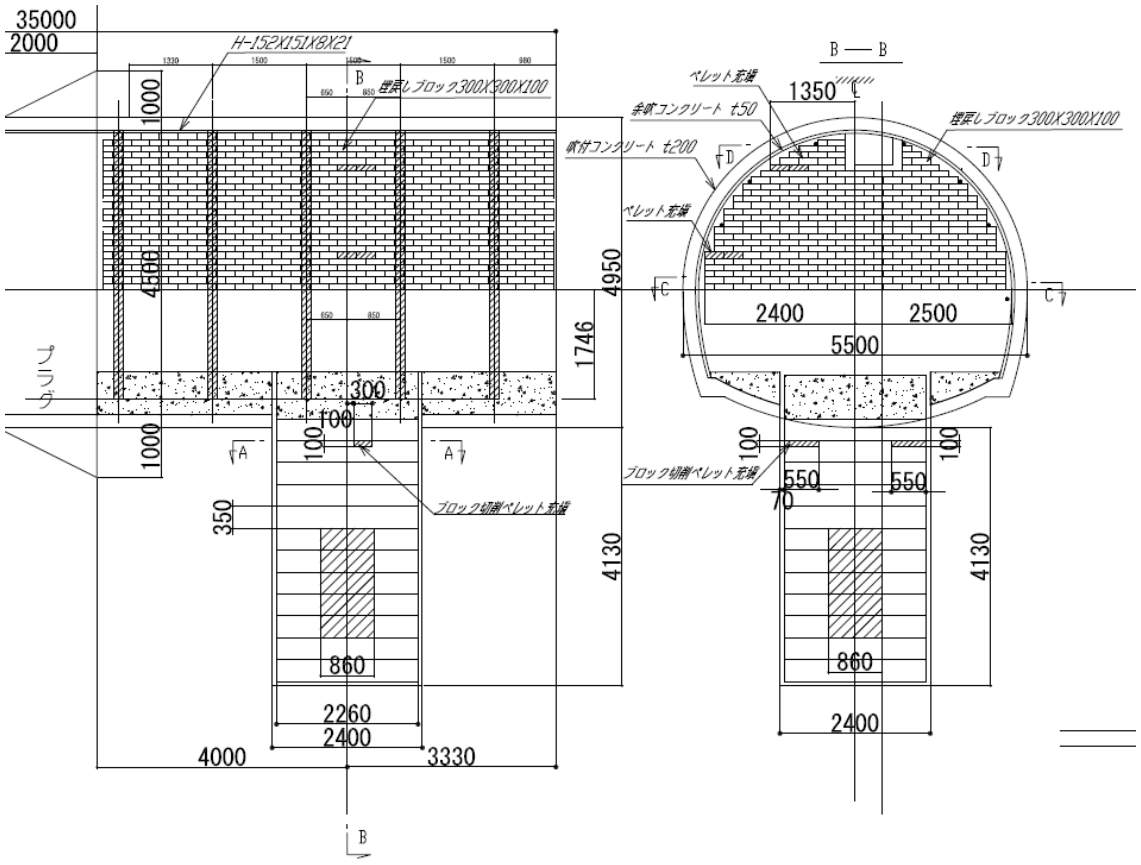



図 3.3.6-17　地中無線送信装置及びセンサの設置位置（全体図）

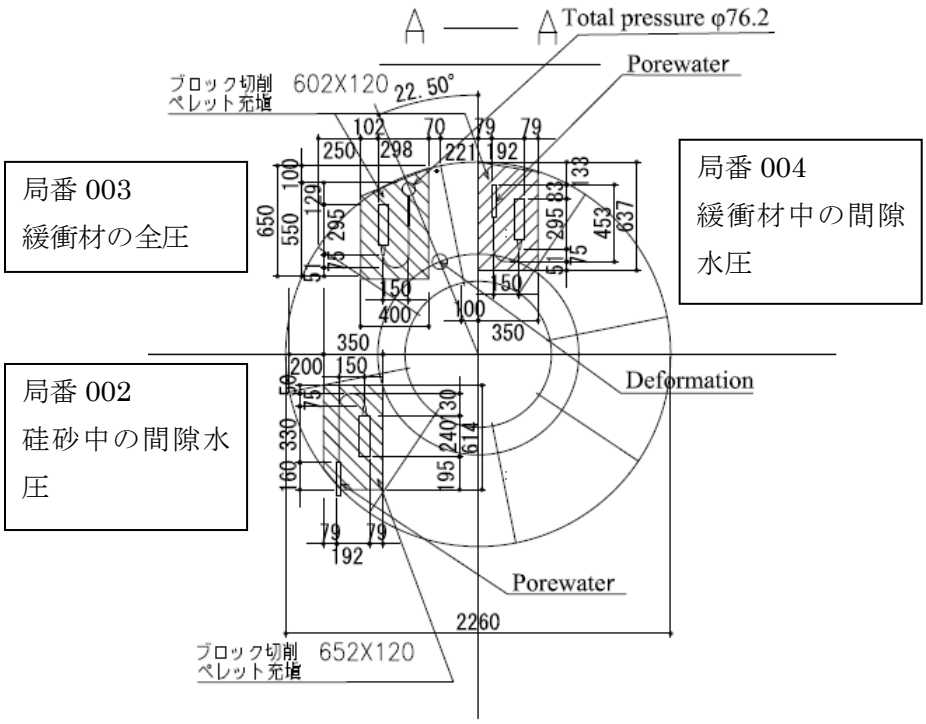



図 3.3.6-18　地中無線送信装置及びセンサの設置位置（図 3.3.6-17 中の A-A 断面）

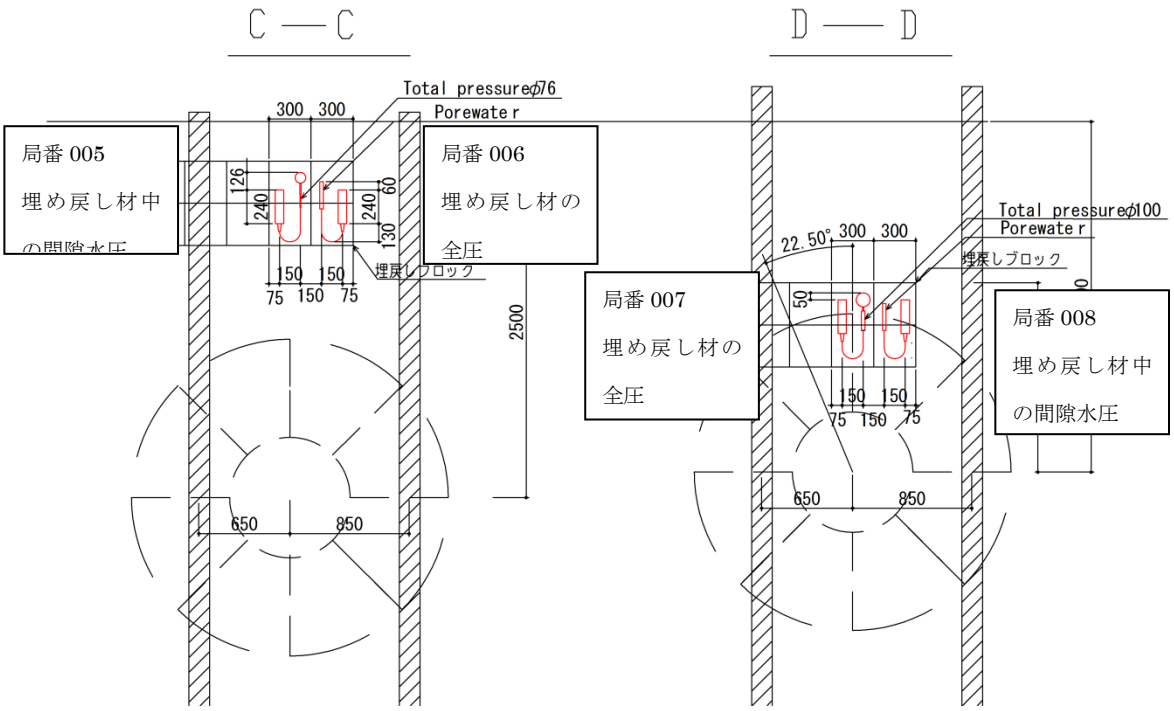
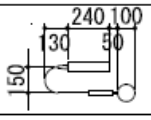
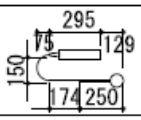
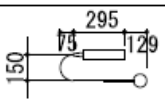
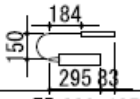
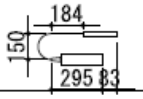
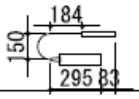
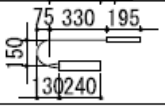



図 3.3.6-19　地中無線送信装置及びセンサの設置位置（図 3.3.6-17 中の C-C 及び D-D 断面）

表 3.3.6-4　地中無線送信装置及びセンサの設置断面

| No. | Type of sensors | Dimension | | |
|---|---|---|---|---|
| | | A－A | C－C | D－D |
| 1 | Total pressure φ100−1 | — | — |  |
| 2 | Total pressure φ76.2−2 |  |  | — |
| 3 | Porewater φ25.4X194−3 |  |  |  |
| 4 | Porewater φ25.4X194−1 |  | — | — |

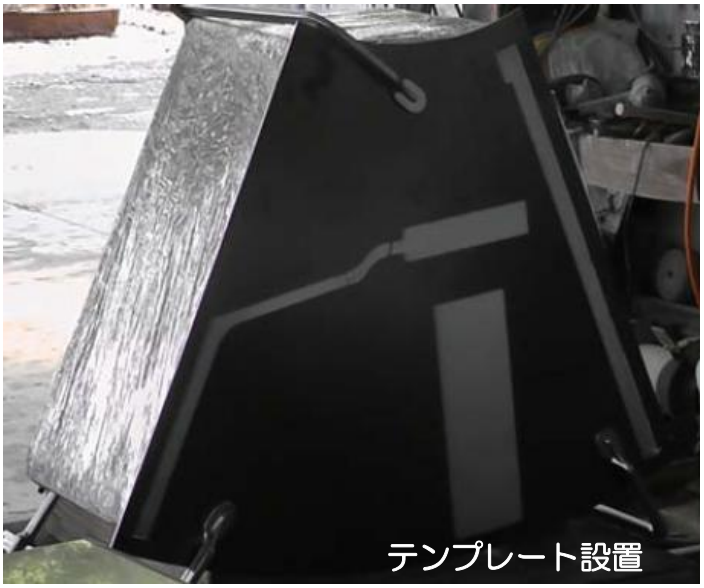


図 3.3.6-20　緩衝材ブロック加工状況写真

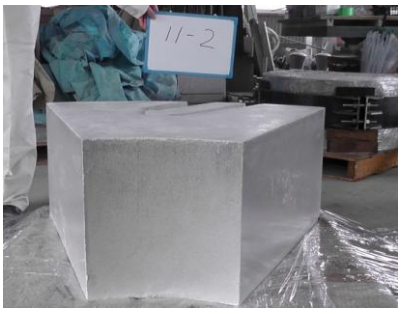
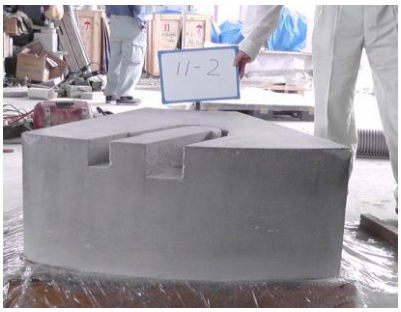
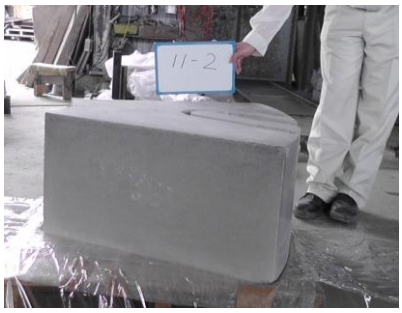
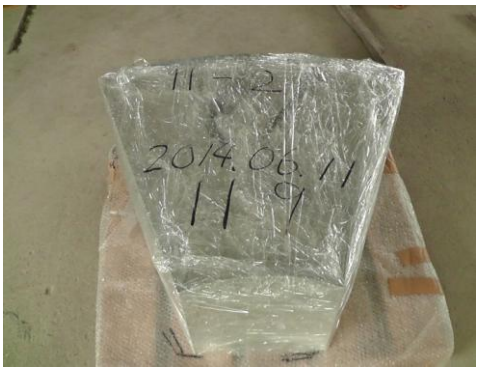
| | | | |
|---|---|---|---|
| 正面 |  | 背面 |  |
| 右側面 |  | 左側面 | |
| 上面 | | 底面 | |
| 梱包時 | *ID.No.記載面を撮影<br>  | | |

図 3.3.6-21　緩衝材ブロック No.11-2 加工後写真

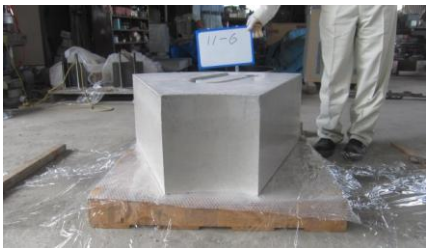
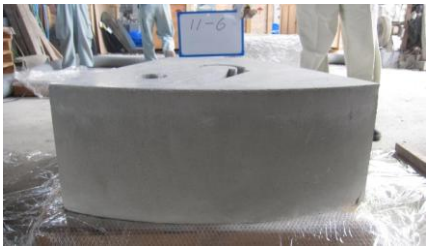
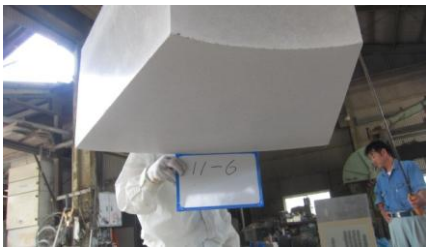
| | | | |
|---|---|---|---|
| 正面 |  | 背面 |  |
| 右側面 | | 左側面 | |
| 上面 | | 底面 |  |
| 梱包時 | *ID.No.記載面を撮影<br> | | |

図 3.3.6-22　緩衝材ブロック No.11-6 加工後写真

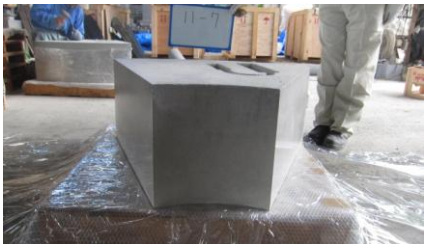
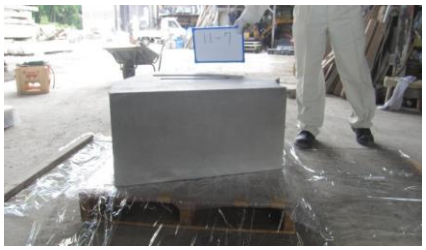
<table>
<tr><td>正面</td><td>  </td><td>背面</td><td> </td></tr>
<tr><td>右側面</td><td> </td><td>左側面</td><td>  </td></tr>
<tr><td>上面</td><td> </td><td>底面</td><td> </td></tr>
<tr><td>梱包時</td><td colspan="3">*ID.No.記載面を撮影<br>
</td></tr>
</table>

図 3.3.6-23　緩衝材ブロック No.11-7 加工後写真

4)　測定及び通信時刻の設定

地中無線モニタリング装置（送信装置及びセンサ）の各センサの測定時刻、及び送信機の通信時刻を表 3.3.6-5 に示す。測定は毎日 0 時と 12 時の 2 回とし、通信は毎週火曜日の 1 回とした。通信時刻は、10:15 から 1 時間ずつ時間をずらして送信することとした。

表 3.3.6-5　地中無線モニタリング装置の測定・通信条件

| 局番 | 送信器S/N | センサ種別 | センサS/N | 測定時刻 | 通信時刻 | 設置断面 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 002 | H0795487 | 間隙水圧計 | 1302377 | 毎日0, 12時 | 火曜16:15 | A-A |
| 003 | H0795488 | 土圧計 | 1400012 | 毎日0, 12時 | 火曜15:15 | A-A |
| 004 | H0795489 | 間隙水圧計 | 1302376 | 毎日0, 12時 | 火曜14:15 | A-A |
| 005 | H0795490 | 間隙水圧計 | 1302375 | 毎日0, 12時 | 火曜13:15 | C-C |
| 006 | H0795508 | 土圧計 | 1400013 | 毎日0, 12時 | 火曜12:15 | C-C |
| 007 | H0795509 | 土圧計 | 1332567 | 毎日0, 12時 | 火曜11:15 | D-D |
| 008 | H0795510 | 間隙水圧計 | 1302374 | 毎日0, 12時 | 火曜10:15 | D-D |

5)　緩衝材ブロックへの地中無線モニタリング装置の設置

人工バリア性能確認試験への地中無線モニタリング装置（送信装置及びセンサ）の設置作業の内、11 段目の緩衝材ブロックへの設置状況を以下に示す。

図 3.3.6-24 及び図 3.3.6-25 に緩衝材ブロックへの設置状況を示す。切欠きがセンサと無線送信機をつなぐケーブルの長さよりも短かったため、ケーブルの余長分をループさせた状態で施工した。緩衝材ブロック切欠き加工部への地中無線モニタリング装置の設置後、隙間をベントナイト混合土にて充填した（図 3.3.6-26、図 3.3.6-27）。

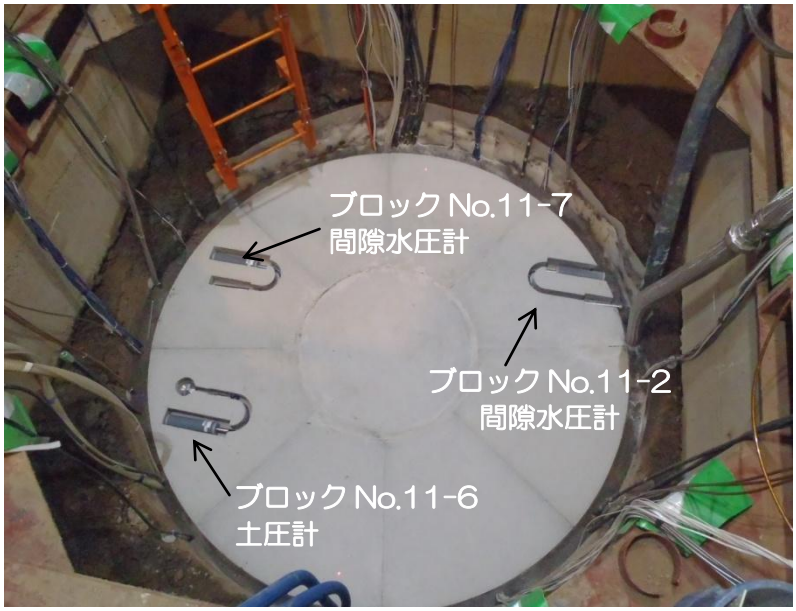



図 3.3.6-24　緩衝材ブロックへの地中無線送信装置及びセンサ設置状況（全景）

図 3.3.6-25　緩衝材ブロックへの地中無線送信装置及びセンサの設置状況

図 3.3.6-26　装置周辺の隙間充填状況

図 3.3.6-27　緩衝材ブロックの隙間充填完了（全景）

6)　坑道埋め戻し材ブロックへの地中無線モニタリング装置の設置

坑道埋め戻し材ブロック施工部内に地中無線送信装置及び同装置に接続されたセンサ（全圧計×2 台（直径 76.2mm：1 台、直径 100mm：1 台）、間隙水圧計×2 台）を設置した。

埋め戻し材ブロック施工部への地中無線送信機及びセンサの設置状況を以下に示す。図 3.3.6-28 は、試験坑道 4 の路盤上に埋め戻し材を厚さ約 1400mm に転圧ローラーで施工後、上部を埋め戻し材ブロック（300 x 300 x 100mm）で埋め戻ししている状況である。埋め戻し材ブロックは、図 3.3.6-29 に示すように作業員が手作業で施工した。装置周辺の空隙部は、埋め戻し材（ベントナイト混合土（ベントナイト（クニゲル V1）：掘削ズリ＝4：6、含水比 w=30%程度）を用いて充填した。図 3.3.6-30～図 3.3.6-35 に施工時の写真を示す。

図 3.3.6-28　試験坑道 4 における埋め戻し材ブロックの設置作業状況

図 3.3.6-29　埋め戻し材ブロックの設置作業

図 3.3.6-30　埋め戻し部への地中無線送信装置及びセンサの設置状況（C-C 断面）

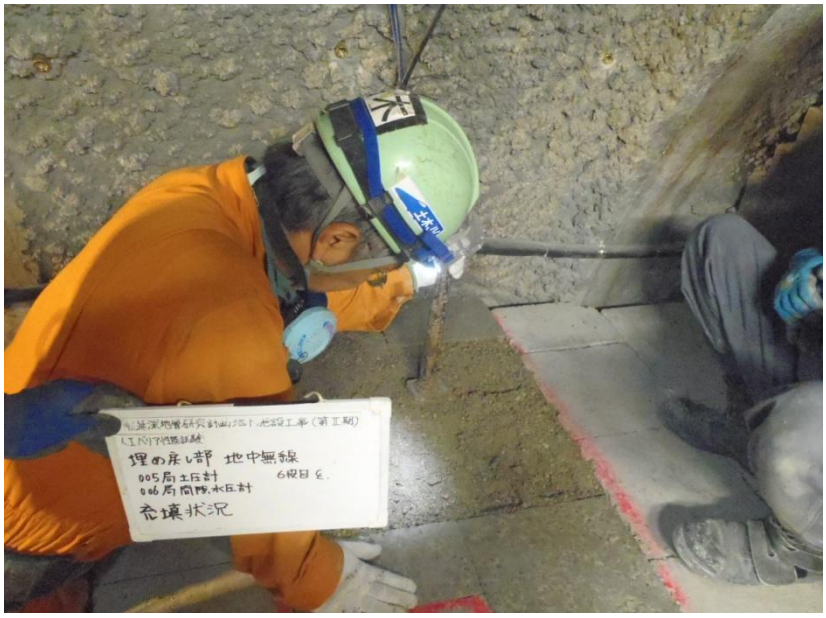



図 3.3.6-31　装置周辺の空隙部充填状況（C-C 断面）

図 3.3.6-32　装置周辺の空隙部充填完了（C-C 断面）

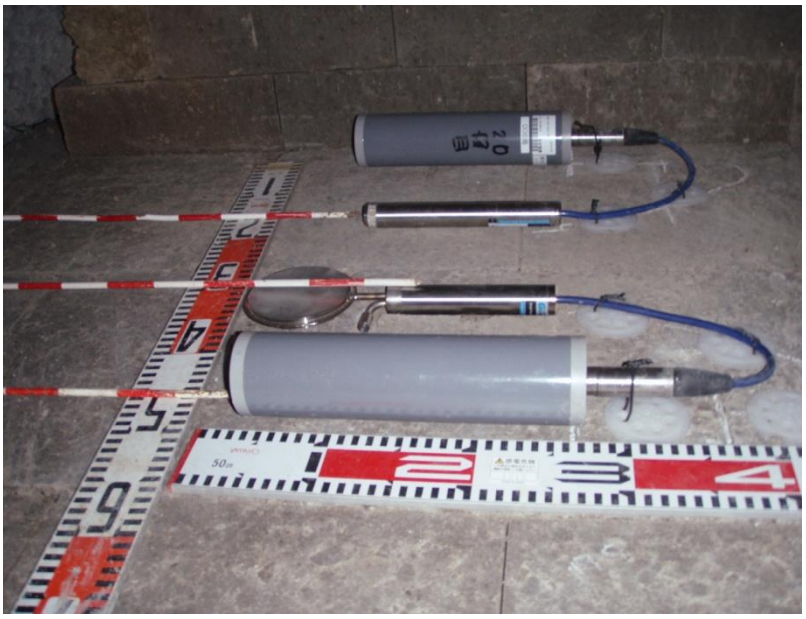


図 3.3.6-33　埋め戻し部への地中無線送信装置及びセンサの設置状況（D-D 断面）

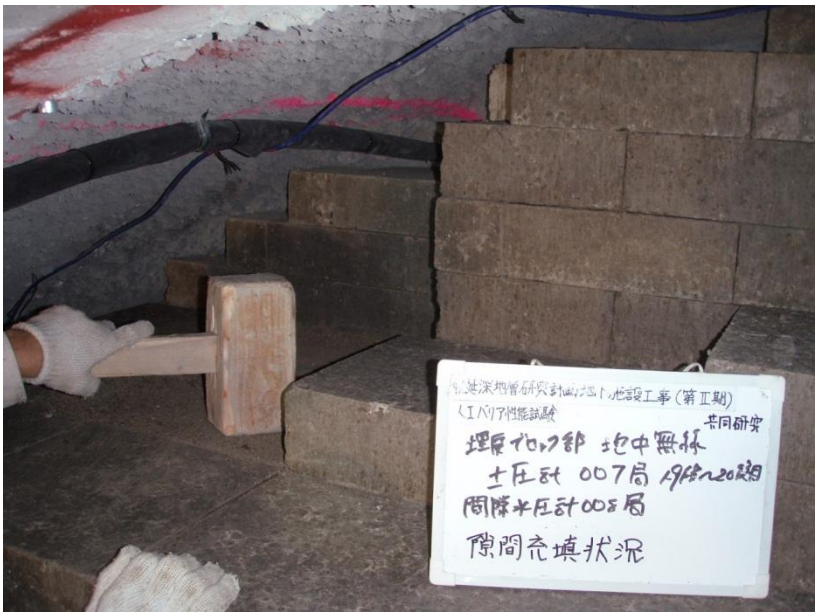



図 3.3.6-34　装置周辺の空隙部充填状況（D-D 断面）

図 3.3.6-35　装置周辺の空隙部充填完了（D-D 断面）

7)　地中無線受信アンテナ用ボーリング孔の削孔

プラグの打設完了後、プラグ外の坑道壁面に地中無線受信アンテナの設置に用いるボーリング孔を削孔した。ボーリング孔の削孔位置は、プラグ外の坑道壁面のうち南側壁面のプラグ端部から 4m 以内、ボーリング孔は長さ 3m、直径 10cm の裸孔とした。削孔位置図を図 3.3.6-36 に示す。

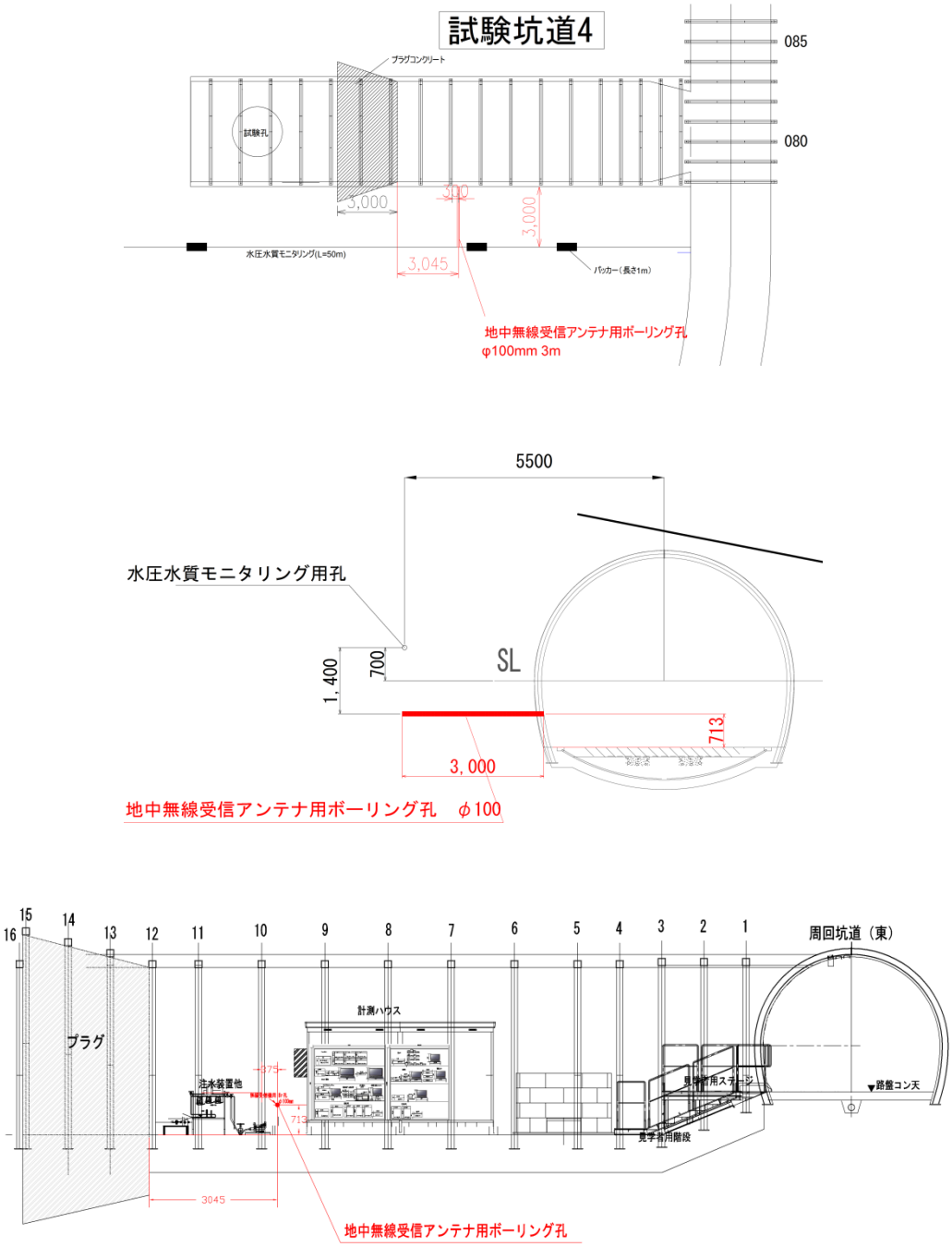



図 3.3.6-36　地中無線受信アンテナ用ボーリング孔位置図

（上：平面図、中：断面図、下：縦断図）

削孔には、コアドリルを使用した。コアドリルは吹付けコンクリートにアンカーボルトを打ち込み水平方向に固定し、順次ロッドを継足し削孔した。削孔水は給水設備から供給される水を使用した。施工完了後に削孔穴をステンレスプレートで養生した。ステンレスプレートは吹付コンクリートにアンカーボルトを打ち込み固定した。図 3.3.6-37、図 3.3.6-38 に施工時の写真を示す。

図 3.3.6-37　地中無線受信アンテナ用ボーリング孔　削孔状況

図 3.3.6-38　地中無線受信アンテナ用ボーリング孔　削孔完了
（φ100mm、L=3010mm）確認

8)坑道への地中無線受信装置等の設置及び接続

地中無線受信アンテナの設置用のボーリング孔内に受信アンテナを設置した。地中無線受信装置本体、電源避雷器、電源制御装置を格納箱内に収納し、プラグ外の坑道の壁面に設置した。上記の地中無線受信装置本体及び付属機器を配線により接続すると共に、交流電源（100V）に接続した。地中無線受信装置本体及び付属機器のシステム構成図は図 3.3.6-4 の通りである。受信装置等の設置位置図を図 3.3.6-39 に示し、図 3.3.6-40～図 3.3.6-41 に施工時の写真を示す。

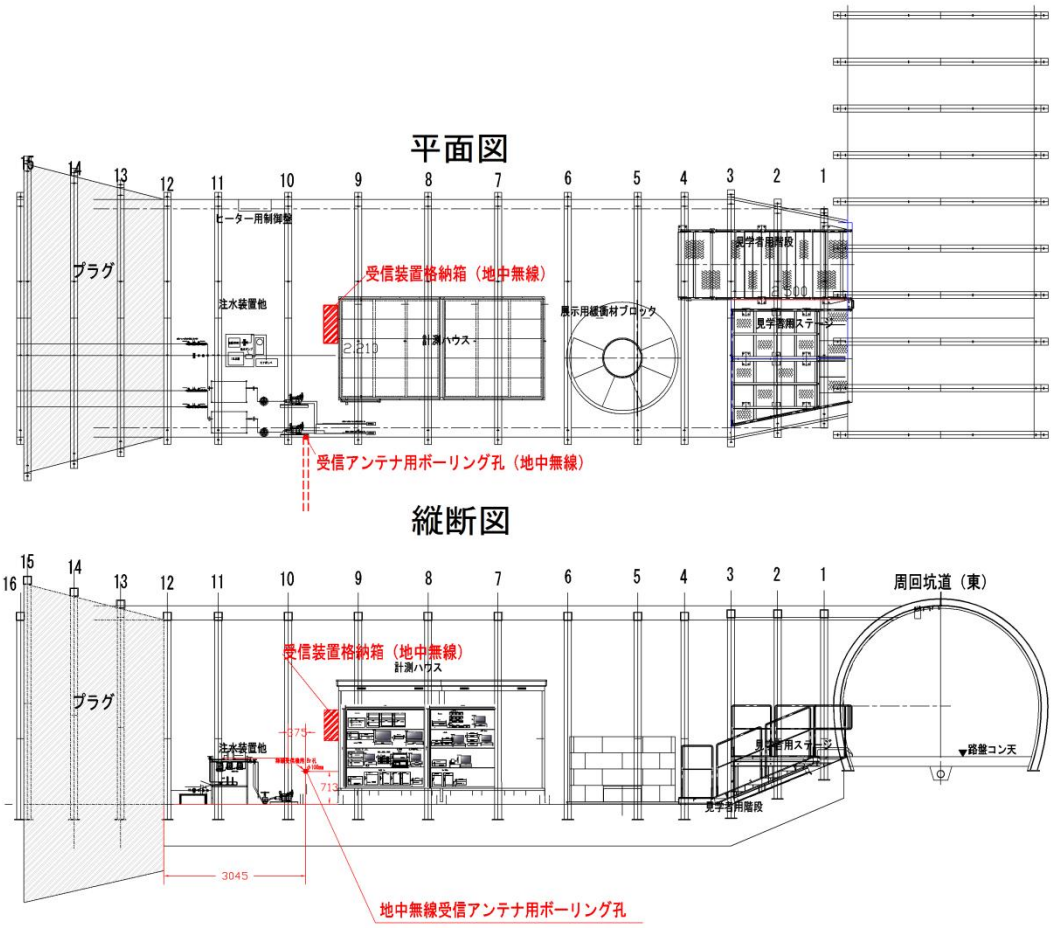



図 3.3.6-39　　受信装置等の設置位置図

図 3.3.6-40　　地中無線受信装置　受信アンテナの設置状況

図 3.3.6-41　　地中無線受信装置等の設置及び接続状況（全景）

9)データ収録システムの設置

データ収録システムである PC は、地上の研究棟 2F の一室に設置した。設置状況を図 図 3.3.6-42 に示す。坑道内に設置した受信器格納箱から延びる LAN ケーブルは、計測小屋内の HUB（Ch16）に接続されており（図 3.3.6-43）、ネットワーク経由で地上の PC へ自動的にデータが送られる。

図 3.3.6-42　地上での PC 設置状況

図 3.3.6-43　計測小屋内の LAN 接続状況

(3)地中無線モニタリング装置設置後の通信状況の確認

地中無線モニタリング装置（地中無線送信装置、地中無線受信装置、データ収録システム）を設置後､計 7 台の無線送信器の発する定期送信を受信し､坑内で受信レベルを確認した｡表 3.3.6-6 に結果を示す。各局番の送信装置の設置位置については、図 3.3.6-17～図 3.3.6-19 を参照されたい。008 局から 002 局まで約 1 時間おきに定期送信が発信される。

008 局の定期送信の受信時、受信アンテナは孔口から 2.5 m の位置に配置していたが、S/N 比が 3 以下と小さかったため、受信レベルが高くなるように、受信アンテナの設置位置を孔口側へ変更することとした。しかしながら孔口に近づき過ぎるとノイズレベルが高くなるため、レベルメータによりノイズレベルを確認しながら、最終的に孔口から 0.6 m の位置へ受信アンテナを設置した。その結果、翌週の定期送信の受信レベルが 3.55mV となり改善された。その他の送信器についても、S/N 比が 4 以上となっている。

表 3.3.6-6　地中無線モニタリング装置設置直後の定期送信の受信レベル

| 局番 | ノイズレベル(mV) | 受信レベル(mV) | S/N比 |
|---|---|---|---|
| 008 | 1.0 | 3.55 | 3.55 |
| 007 | 1.0 | 4.0 | 4 |
| 006 | 1.0 | 5.0 | 5 |
| 005 | 1.0 | 4.5 | 4.5 |
| 004 | 1.0 | 14.0 | 14 |
| 003 | 1.0 | 22.2 | 22.2 |
| 002 | 1.0 | 9.1 | 9.1 |

(4)　地中無線モニタリング装置による計測結果

上記の人工バリア性能確認試験の緩衝材中及び埋め戻し材中に設置された地中無線モニタリング装置により、温度、全圧、間隙水圧のデータを取得した。

図 3.3.6-45～図 3.3.6-50 に、各センサの計測値（温度と間隙水圧値、あるいは土圧）の経時変化を示す。各局番の送信装置の設置位置については、図 3.3.6-17～図 3.3.6-19 を参照されたい。計測データから、各センサにより所定の頻度（2 回/日）で計測が行われていること、さらに地中無線モニタリング装置により、それらのデータが所定の頻度（1 回/週）で通信されていることを確認した。

緩衝材ブロックに設置したセンサの計測データ（図 3.3.6-44～図 3.3.6-46）からは、以下の傾向が観察される。

- プラグ打設後から、土圧がわずかに上昇。
- ヒーターON、注水に伴い、土圧、温度が顕著に上昇。一方で水圧は、わずかに上昇。

埋戻し材に設置したセンサの計測データ（図 3.3.6-47～図 3.3.6-50）からは、以下の傾向が観察される。

- プラグ打設後から、埋戻し材中部（C-C 断面）の土圧がわずかに上昇。温度については、プラグ打設後から、中部、上部（D-D 断面）共に、約 2℃上昇。
- ヒーターON、注水に伴う、圧力、温度の変化は観察されていない。

計測データについて、受信装置設置後、約 1.5 か月を経過したころから通信支障が発生し、データの一部が欠損していることが明らかとなった。通信支障の発生頻度は 2 回の通信で 1 回程度であり、その 1 回の通信で送信される全 56 データのうちの一部で発生している。ただし、地中無線送信装置は、毎週の定期送信で過去 4 週分のデータを重複して送信しているため、仮に通信支障が発生しても 4 週以内に受信が成功することで欠測データは補完される。

通信障害の発生原因については、これまで通信障害が発生した 005 局、006 局、007 局、008 局の 4 台の S/N 比が 002～004 局と比べて低いことから（表 3.3.6-6）、ノイズレベルの上昇であると考えられる。したがって本通信支障の対策としては、以下の二つの方法が挙げられる。

① 受信アンテナの配置位置の変更

地中無線送信器の 005 局～008 局の受信レベルが上がる位置に受信アンテナの配置位置を変更することで、S/N 比が高くなり、通信状態が安定すると考えられる。具体的な変更位

置は、これら 4 台の送信器と受信アンテナの配置の関係から、現在の位置より孔口側に近い位置の方が望ましいと考えられる。ただし孔口に近づけすぎると、鋼製支保工や坑道内の機械類の影響を受けてノイズレベルが高くなる可能性がある。

② ノイズ源の配置位置の変更

地中無線のノイズ源として、坑道内の機械類や動力線等が考えられる。したがって、これらの配置変更が可能であれば、受信アンテナ付近におけるノイズレベルが軽減することが期待できる。

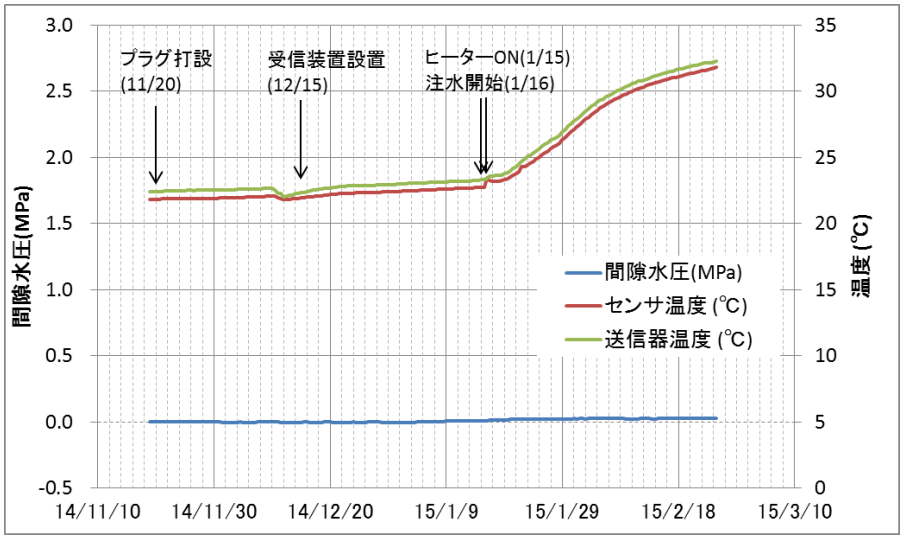



図 3.3.6-44 処分孔硅砂中（間隙水圧及びセンサ温度）及び緩衝材 11 段目横（送信器温度）の測定データ（002 局）

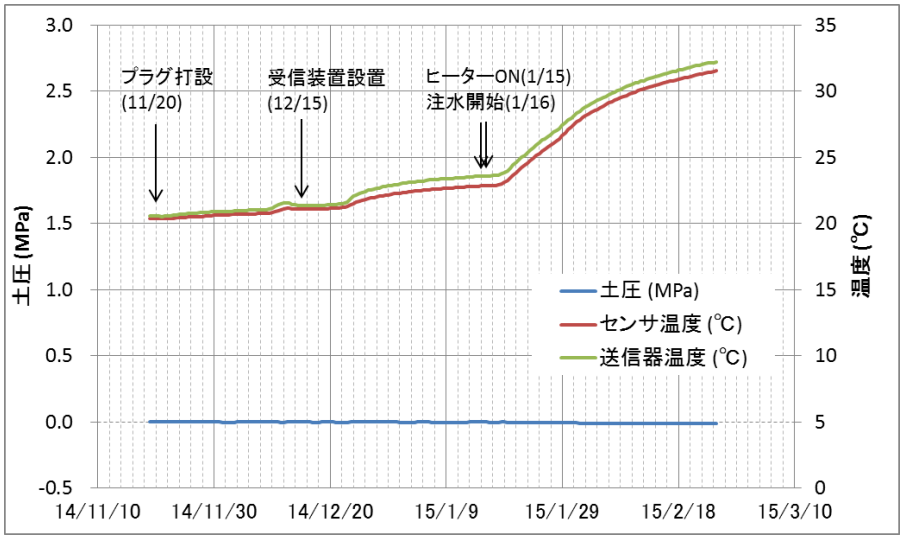



図 3.3.6-45 緩衝材 11 段目の測定データ（003 局）

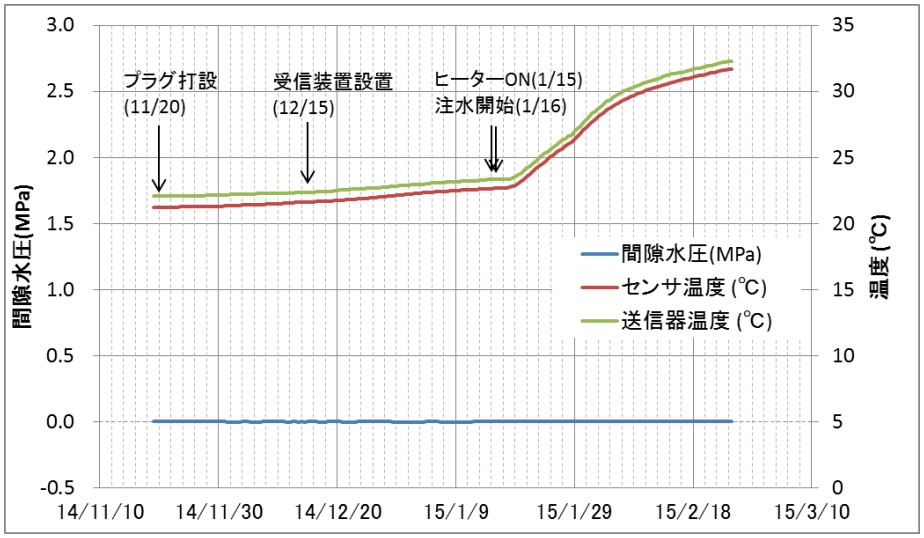



図 3.3.6-46　緩衝材 11 段目の測定データ（004 局）

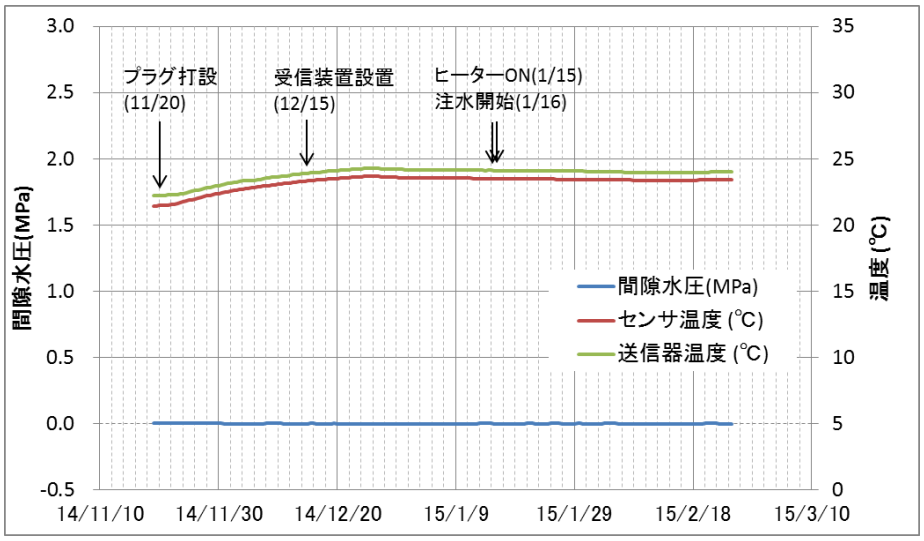



図 3.3.6-47　処分孔埋め戻し材ブロック中部の測定データ（005 局）

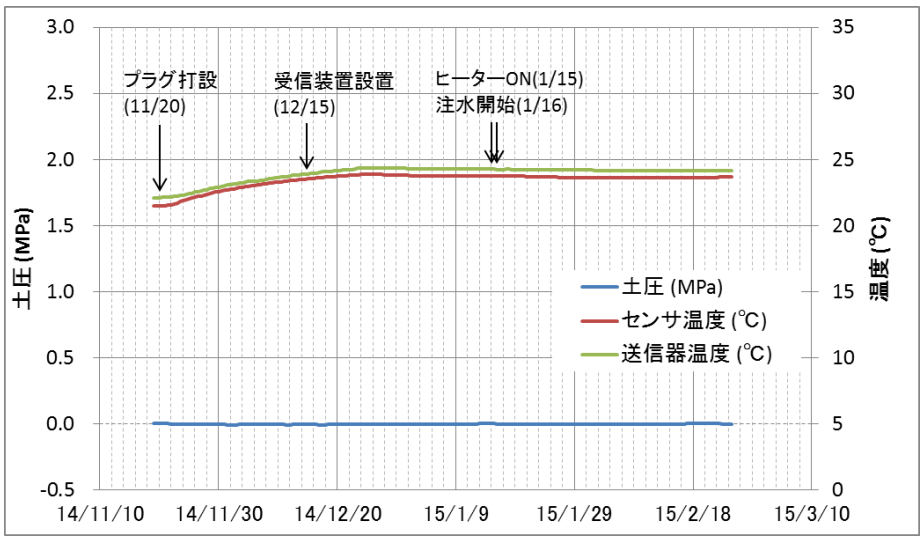



図 3.3.6-48　処分孔埋め戻し材ブロック中部の測定データ（006 局）

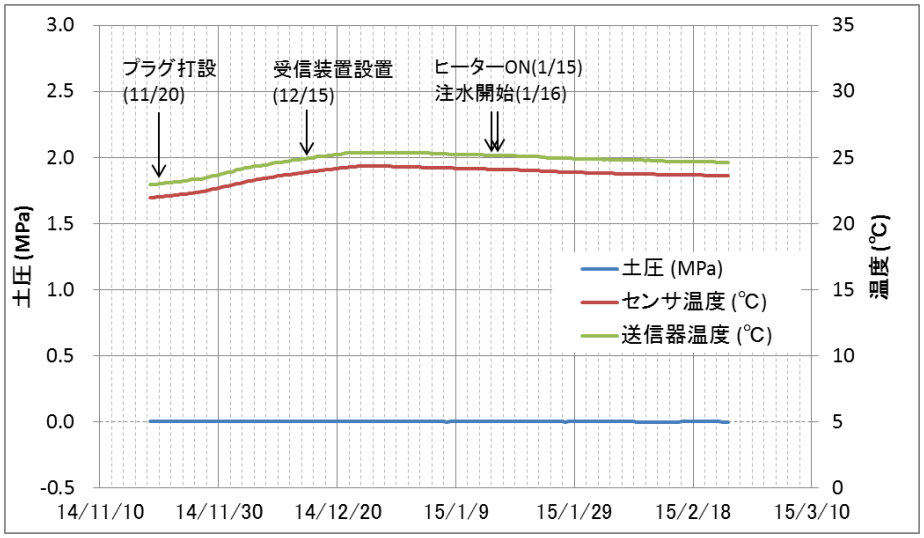



図 3.3.6-49　処分孔埋め戻し材ブロック上部の測定データ（007 局）

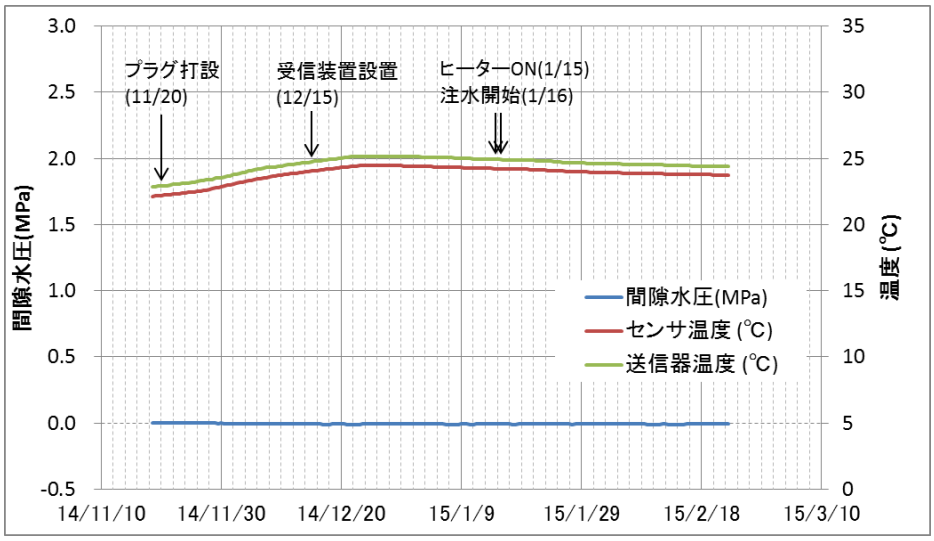



図 3.3.6-50　処分孔埋め戻し材ブロック上部の測定データ（008 局）

(5)　人工バリア性能確認試験への適用に関するまとめ

原子力機構の幌延 URL の地下研究施設で実施される人工バリア性能確認試験において、地中無線モニタリング装置（地中無線送信装置、地中無線受信装置、データ収録システムで構成）を適用するために、以下の作業を実施した。作業内容と得られた知見を記す。

人工バリア性能確認試験への地中無線モニタリング適用準備

地中無線モニタリング装置の設置位置及び設置方法の検討と、坑道内での通信確認試験を実施した。その結果、人工バリア性能確認試験用坑道（試験坑道 4）において、送受信間距離が 10～21m で、無線通信を行うのに十分な受信レベルを確認した。しかしながら試験結果の一部において、受信レベルが非常に小さな値を示す場合があり、その原因として、送受信器周辺の鋼製部材（他の計測器やロックボルト等）が電磁波の伝播を妨害している可能性が考えられた。そこで本試験結果から、安定した通信環境を確保するためには、受信アンテナの設置場所とし

て坑壁から掘削したボーリング孔内が妥当であると判断した。

人工バリア性能確認試験への地中無線モニタリング適用

地中無線モニタリング装置の設置作業と、各センサによる圧力・温度のモニタリングの実施、及び地中無線モニタリングの適用性について検討を行った。

設置作業に関して、地中無線送信装置は、緩衝材ブロックに 3 台（土圧計 1 台、間隙水圧計 2 台)、埋戻し材ブロック施工部に 4 台（土圧計 2 台、間隙水圧計 2 台）をそれぞれ設置した。前者については、緩衝材ブロックの切欠きの寸法と装置のケーブル長が合わず、ケーブルの一部がループした状態で設置されている。そのため、過度な圧力がケーブルに作用した場合、芯線の一部が露出する可能性が指摘される。次に地中無線受信装置について、受信器格納箱は計測小屋の側壁に枠を設置し、そこに固定した。受信アンテナは、プラグから 3m 程度離れた坑壁に水平に掘削した長さ 3m、直径 10cm のボーリング孔内に設置した。孔口からの距離は 0.6 m である。最後にデータ収録システムである PC は、地上の研究棟 2F の一室に設置した。坑道内に設置した受信器格納箱から延びる LAN ケーブルは、計測小屋内の HUB に接続されており、ネットワーク経由で地上の PC へ自動的にデータが送られる。以上の設置作業後、計 7 台の無線送信器からの定期送信を受信し、無線通信を安定して行うための目安である S/N 比が 3 以上であることを確認した。

測定データは 2014 年 11 月 18 日の測定分から受信されており、2015 年 2 月下旬までの各センサの計測データ（温度と間隙水圧、あるいは土圧）から、各センサにより所定の頻度（2 回/日）で計測が行われていること、さらにそれらのデータが所定の頻度（1 回/週）で通信されていることを確認した。またプラグ設置、ヒーターON、注水等の各イベントに対して、計測データが有意に変化している様子も確認された。一方で受信装置設置後、約 1.5 か月を経過したころから通信支障が発生し、データの一部が欠損していることが明らかとなった。ただし、1 回の定期送信で過去 4 週分のデータが重複して送信されるため、仮に通信支障が発生しても欠測データは補完される。通信障害の発生原因は、ノイズレベルの上昇であると考えられるため、対策としては、①受信レベルが上がる位置に受信アンテナの配置位置を変更する、②坑道内の機械類や動力線などのノイズ源の配置位置を変更する、の 2 つが挙げられる。

### 3.3.7　地中無線モニタリング技術の坑道冠水試験への適用に関する検討

原環センターと原子力機構の共同研究の一環として、地中無線モニタリング技術の冠水試験への適用のため、瑞浪超深地層研究所における通信環境の調査及び通信機器使用に関する検討を実施した。

#### (1)　瑞浪超深地層研究所周辺における地質環境特性の概要

東濃地域周辺は、中生層（美濃堆積岩類）とそれを貫く後期白亜紀花崗岩体（土岐花崗岩；82～68Ma）により基盤岩が形成され、その基盤が地表に直接露出、あるいは上位の新第三紀の堆積岩類により不整合に覆われる地質構造を示している。土岐花崗岩は対象領域に分布する基盤岩類の大部分を占め、東西約 12km、南北約 14km のほぼ円形の岩体として分布する。本花崗岩は主に細～粗粒の黒雲母花崗岩からなり、岩体中には北北西方向の石英斑岩質、アプライト質などの岩脈が幾つか貫入する。新第三紀の堆積岩類は中新世の瑞浪層群と鮮新世の瀬戸層群からなり、上位の瀬戸層群は下位の瑞浪層群を不整合に覆う。主要な断層として東濃地域のほぼ中央に東西系の走向を示す月吉断層、南東部に北東系の山田断層帯が分布する[27]。

瑞浪超深地層研究所は結晶質岩の淡水系地下水を対象とした研究施設という位置づけである。

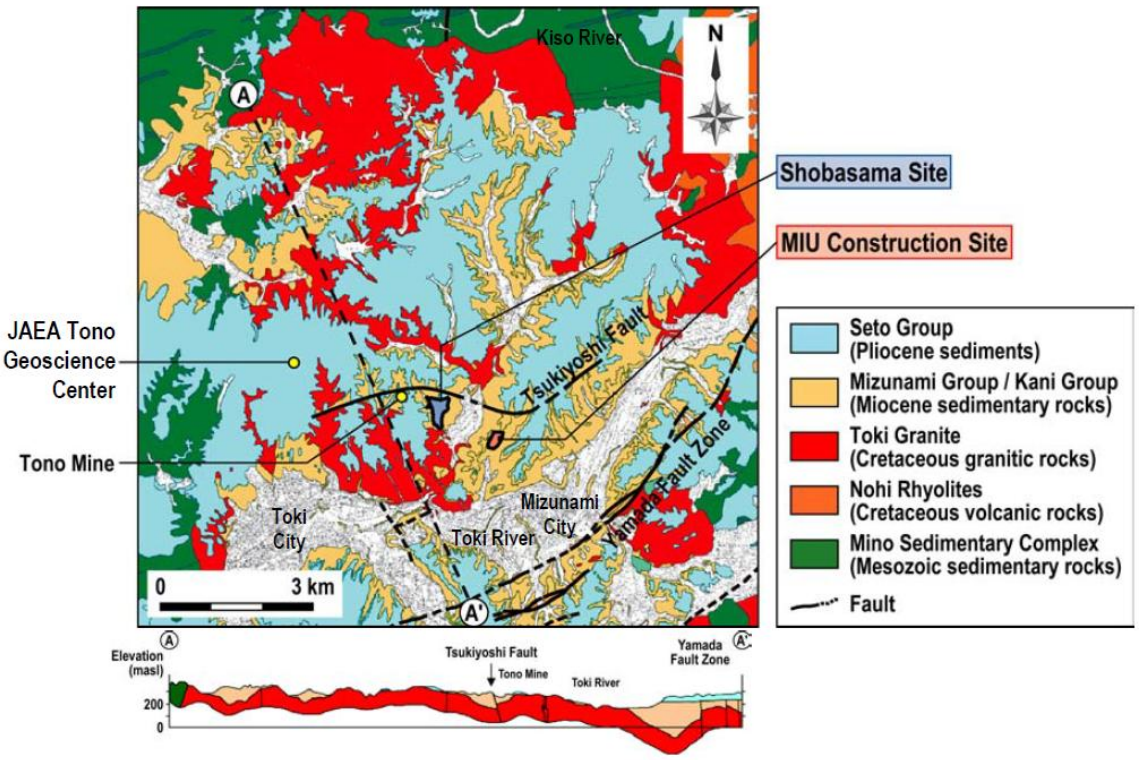



図 3.3.7-1　瑞浪超深地層研究所周辺における地質[28]

#### (2)　瑞浪超深地層研究所の概要

瑞浪超深地層研究所では、岩盤や地下水を調査する技術や解析する手法の確立、深い地下で用

いられる工学技術の基盤の整備を目指している。そのため、主に花崗岩を対象として、岩盤の強さ、地下水の流れ、水質などの調査に加え、実際に地下に立坑及び水平坑道を設置して研究を行っている。

研究は大きく図 3.3.7-2 に示すように 3 つの段階に分けて進めている。現在は主に、研究坑道を利用した研究段階（第 3 段階）を行っている。

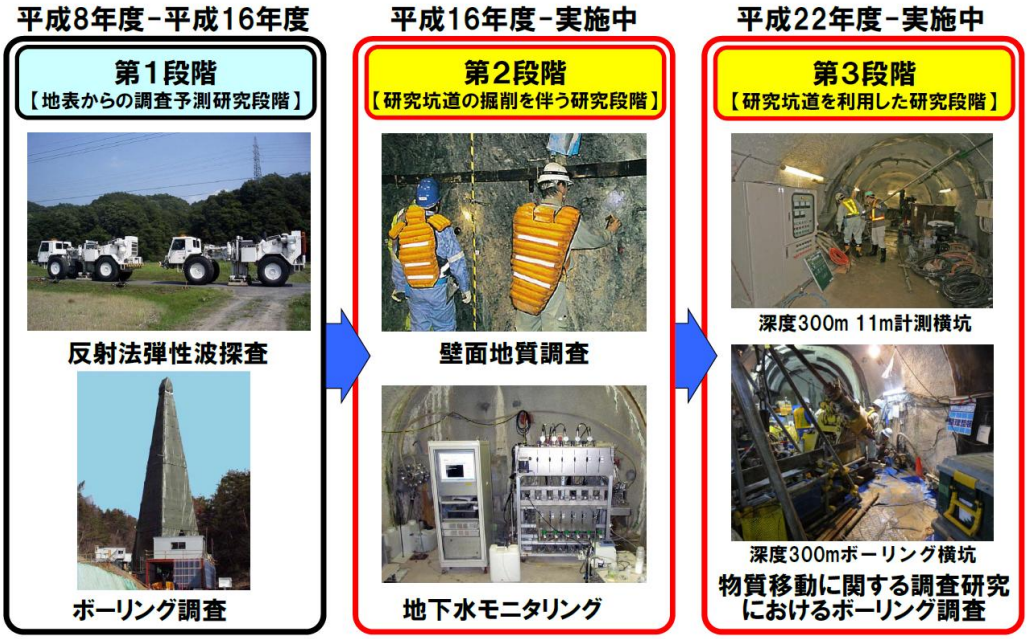



図 3.3.7-2　瑞浪超深地層研究所の研究計画[29]

(3)　瑞浪超深地層研究所で計画されている坑道の再冠水試験

瑞浪超深地層研究所では、深度 500m の研究アクセス北坑道において再冠水試験を計画している。再冠水試験は図 3.3.7-3 に示すように下記のステップで行われる。

① 冠水坑道の掘削：坑道掘削影響の把握
② 水圧・水質・力学モニタリング孔掘削：坑道掘削後の初期状態の把握
③ 止水壁の施工：止水技術の確認
④ 冠水試験の実施：周辺観測孔での水圧レスポンス、化学特性・力学特性の変化の確認

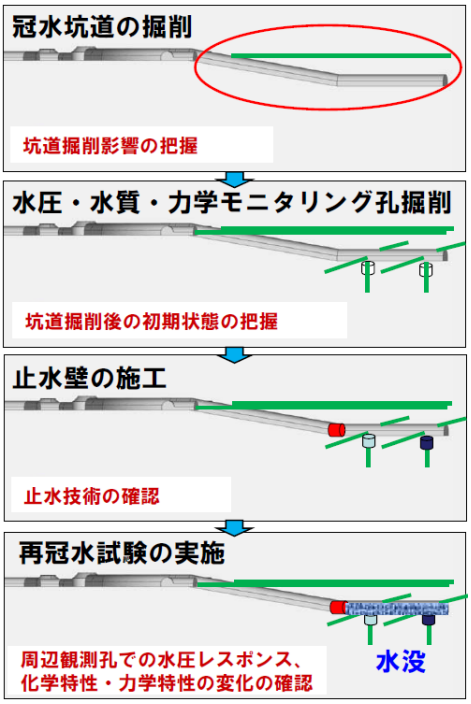



図 3.3.7-3　坑道の再冠水試験の内容[29]

(4)　地中無線モニタリング装置の設置

本検討では冠水試験への地中無線モニタリング技術の適用のため、図 3.3.7-4 に示す試験実施場所（深度 500m 研究アクセス北坑道）に、昨年度の検討結果に基づき、地中無線送信装置（水圧計付き）、受信装置等を設置した。

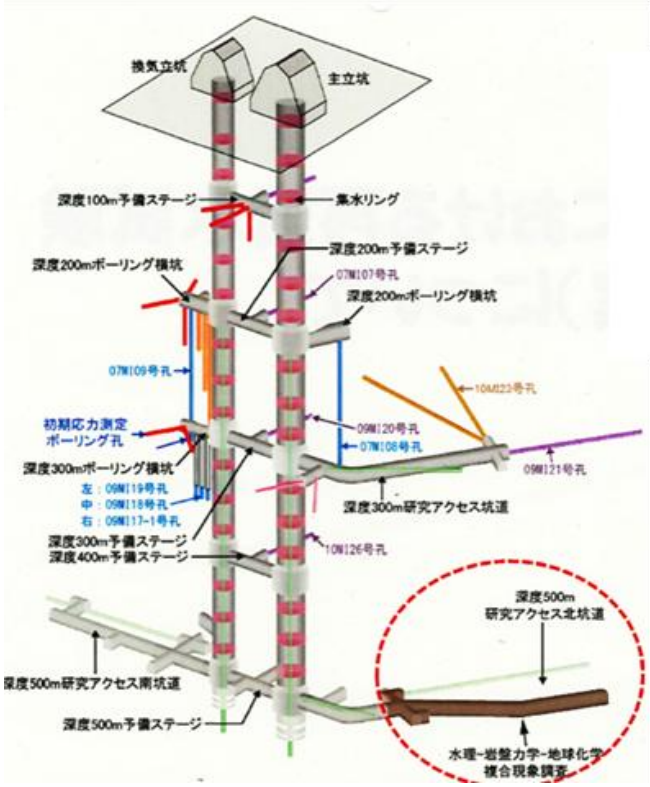



図 3.3.7-4　試験実施場所（深度 500m 研究アクセス北坑道）[30]

1)　地中無線モニタリング装置の構成

本検討における地中無線モニタリング装置のシステム構成図を、図 3.3.7-5 に示す。計測システムは、大きく地中無線送信装置、地中無線受信装置及びデータ収録システムから構成される。地中無線送信装置は、間隙水圧計が地中無線送信機と接続されたものであり、本試験では 2 台使用した。受信装置は、受信アンテナと受信機本体や電源制御装置などを収納した格納箱で構成され、受信アンテナと格納箱は最長 30m のアンテナケーブルで接続した。データ収録システム（PC）は、LAN ケーブルにより受信装置格納箱と接続した。

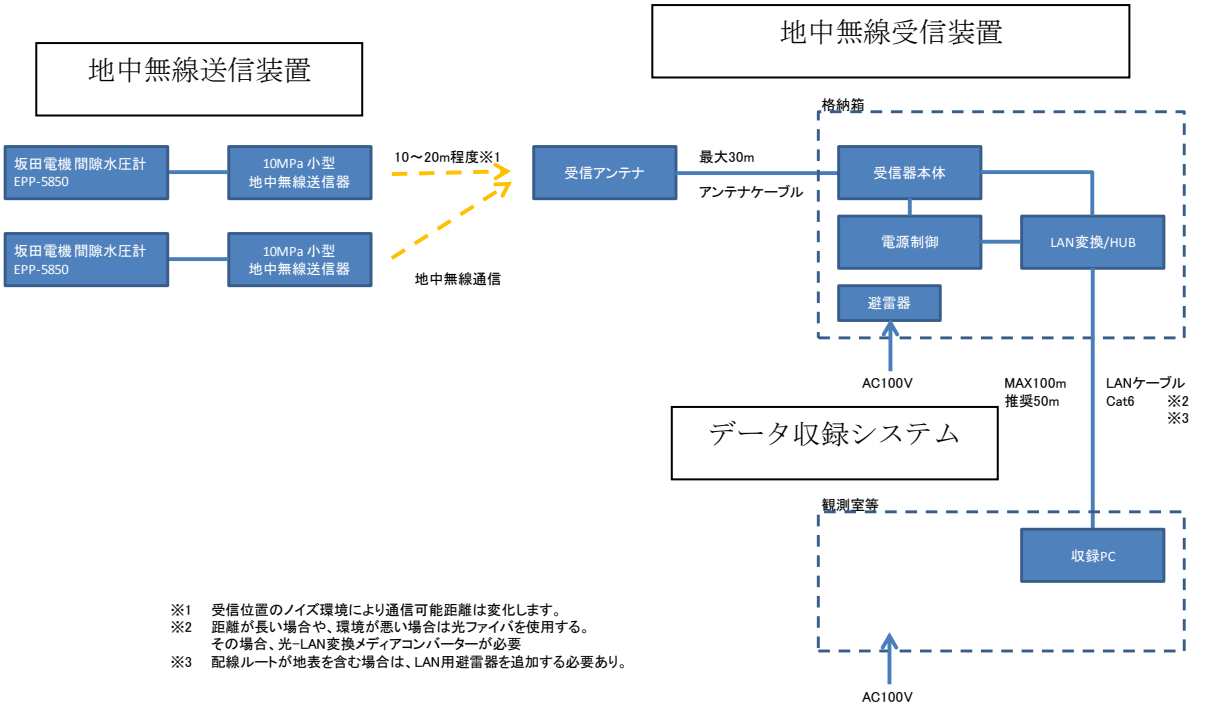



図 3.3.7-5　地中無線モニタリング装置のシステム構成図

2)　地中無線モニタリング装置設置位置及び設置方法の検討

地中無線モニタリング装置の設置に先立ち、地中無線送信装置と受信アンテナの設置場所及び設置方向を選定するために、坑道内の電磁ノイズ、及び受信レベルを確認した。試験場所は、深度 500m 研究アクセス北坑道（図 3.3.7-4）である。本試験で使用する機材を表 3.3.7-1 に示す。

表 3.3.7-1　試験に用いた機材一覧

| 機材名 | 寸法／重量 | 備考 |
|---|---|---|
| レベルメータ | 170×170×80mm／1kg | 受信レベル測定用アナログメータ |
| レコーダー | 180×100×40mm／0.6kg | 受信レベル収録用レコーダー |
| 確認用手動送信器 | 50×140 mm／1kg | - |

試験は、止水壁奥側に確認用送信器を、止水壁手前側に受信アンテナを設置し、位置や方向を変えながら実施した。図 3.3.7-6 に試験レイアウトを示し、表 3.3.7-2 に計測位置をまとめる。本試験は全部で 6 ケースであり、各ケースで受信アンテナの位置、方向を固定し、送信器の位置、高さ、方向を変えている。なお本試験では、図 3.3.7-7 に示すように、坑道軸直角方向を X 方向、坑道軸方向を Y 方向、坑道軸鉛直方向を Z 方向と定義している。また試験中のノイズレベル、及び受信レベルは、受信器格納箱に接続したレベルメータとレコーダーにより記録した。試験状況の写真を図 3.3.7-8～図 3.3.7-12 に示す。

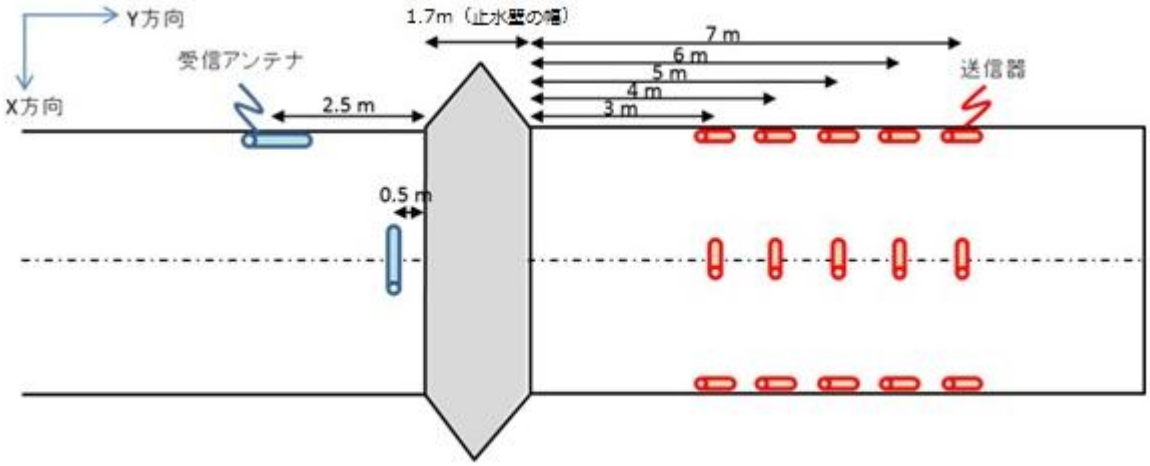



図 3.3.7-6　通信確認試験レイアウト図（坑道平面図）

表 3.3.7-2　通信確認試験の計測位置

| | 受信アンテナ | | | | 送信器 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 場所 | 位置 | 高さ | 方向 | 場所 | 位置 | 高さ | 方向 |
| case 1 | 左壁 | 2.5m | 0m | y | 左壁 | 3～7m | 1m | x, y, z |
| case 2 | 左壁 | 2.5m | 0m | y | 左壁 | 3～7m | 0m | x, y, z |
| case 3 | 中央 | 0.5m | 0m | x | 中央 | 3～7m | 0m | x, y, z |
| case 4 | 左壁 | 2.5m | 0m | y | 右壁 | 3～7m | 1m | x, y, z |
| case 5 | 左壁 | 2.5m | 0m | z | 左壁 | 3～7m | 1m | x, y, z |
| case 6 | 左壁 | 22.5m | 0m | y | 左壁 | 0.5m | 1m | y |

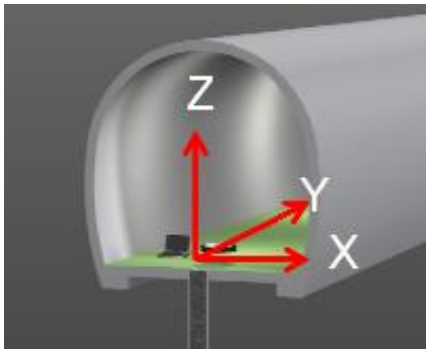


図 3.3.7-7　坑道内での計測方向

図 3.3.7-8　受信器格納箱設置位置（止水壁手前側）

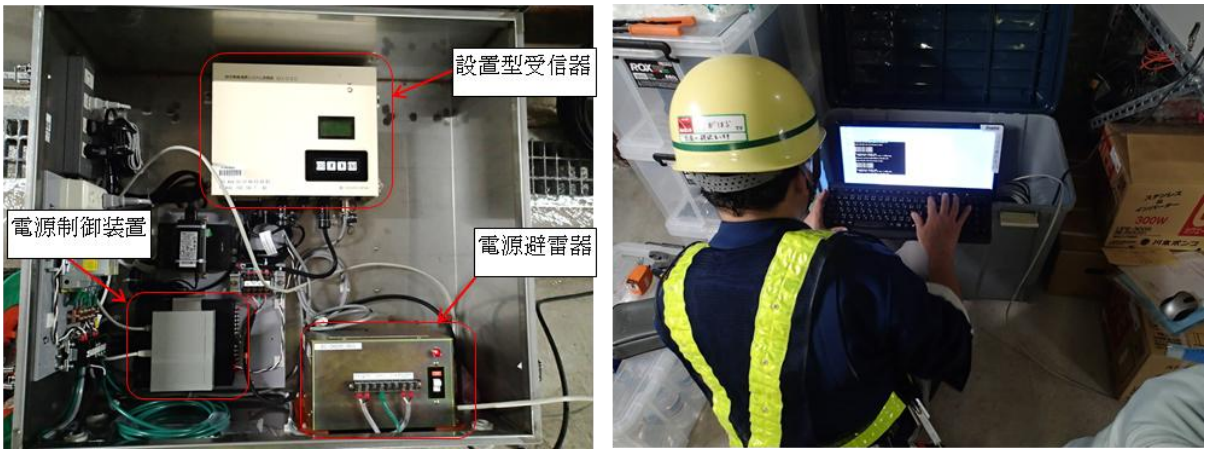



図 3.3.7-9　受信器格納箱内と PC（止水壁手前側）

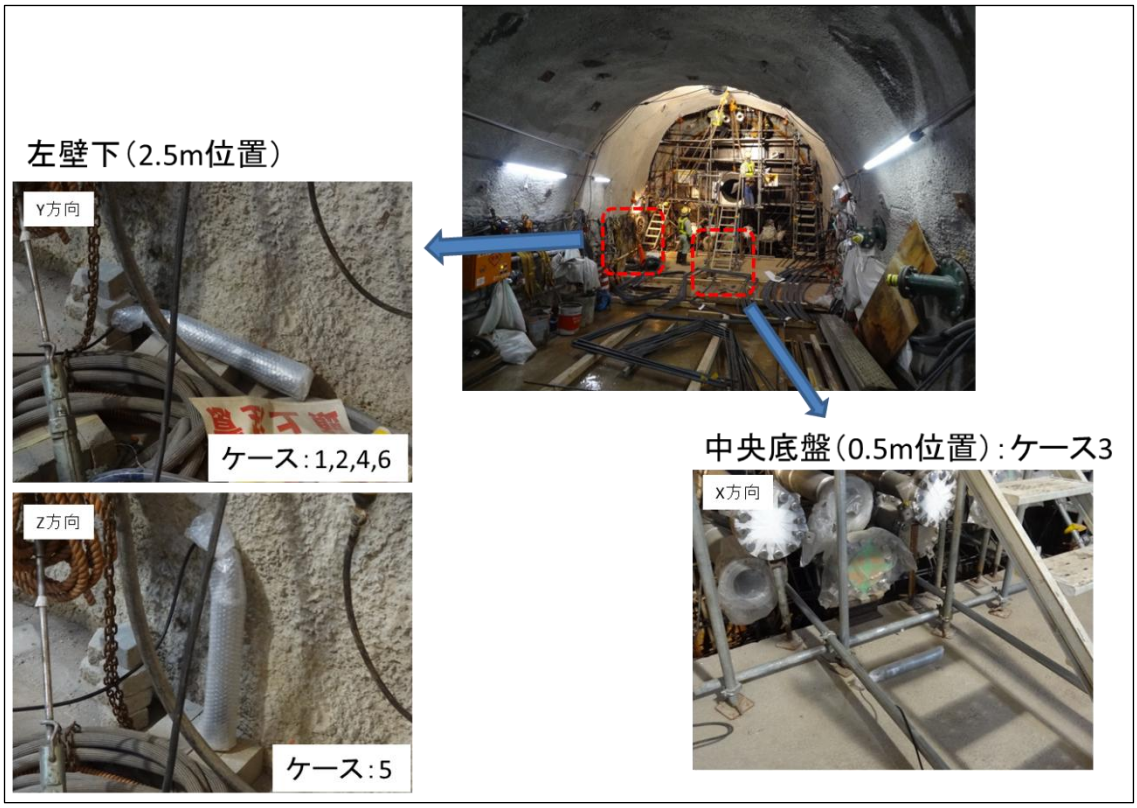



図 3.3.7-10　受信アンテナ設置位置（止水壁手前側）

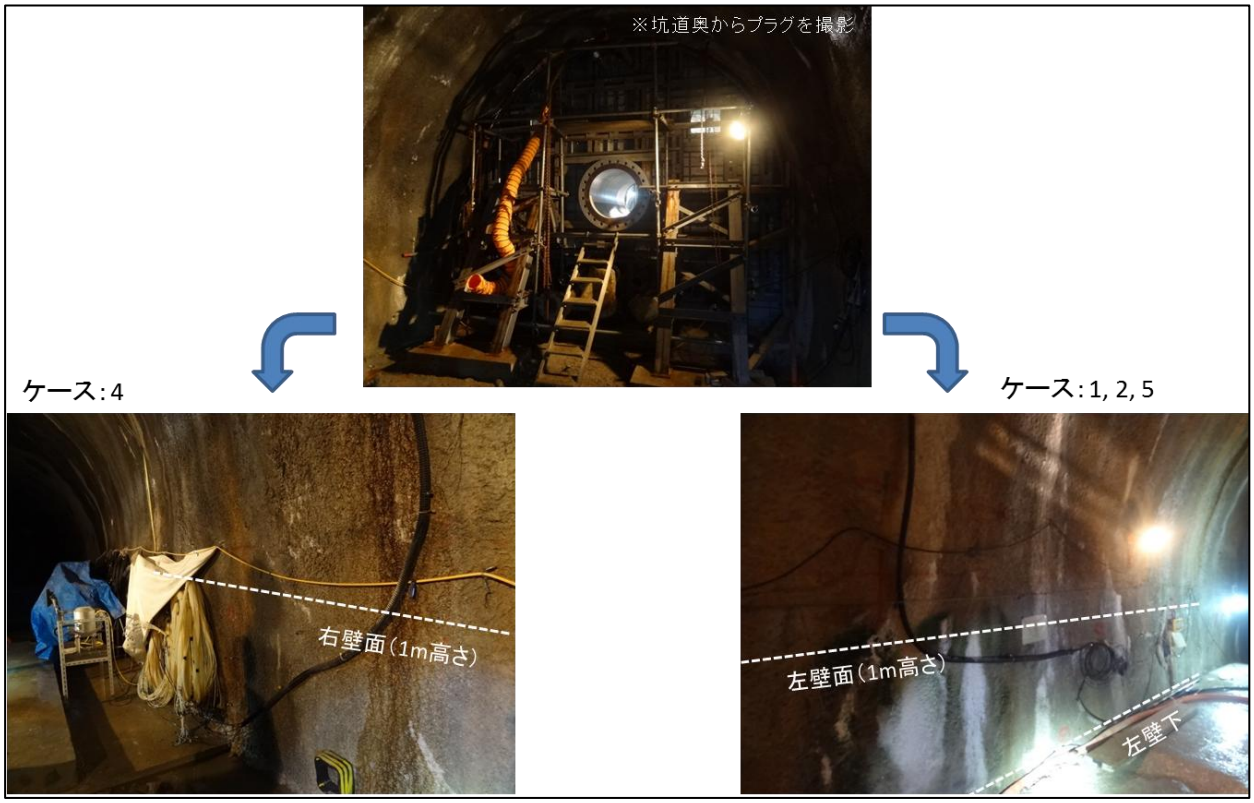



図 3.3.7-11　送信器設置位置の検討：ケース 1、2、4、5（止水壁奥側）

左壁面（1m高さ）:ケース1, 5

左壁下：ケース2

底盤面：ケース3

右壁面（1m高さ）：ケース4

左壁面　プラグ最接近部（1m高さ）
ケース6

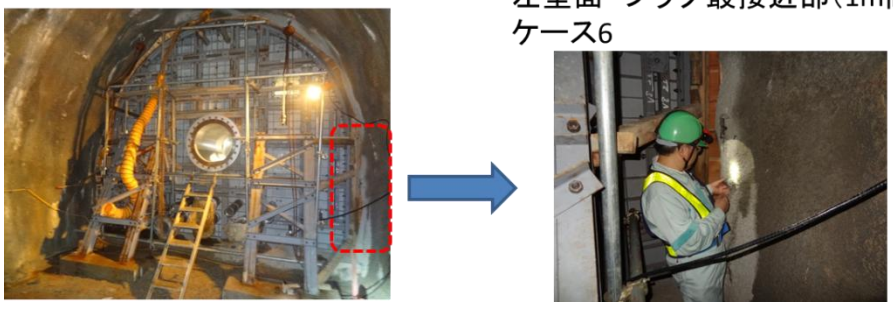


図 3.3.7-12　送信器設置位置の検討（止水壁奥側）

試験結果を表 3.3.7-3 にまとめ、各ケースにおける送受信間距離と受信レベルの関係を図 3.3.7-13、図 3.3.7-14 に示す。本試験結果をまとめると以下のようになる。

- 全結果から、送信器と受信アンテナの設置方向を揃えたほうが、受信レベルが高くなることが分かった。またケース 1、 2、 3、 5 において、電磁波の距離減衰の傾向が確認された。
- ケース 1 とケース 2 では、左壁に発信と受信位置を設け、高さを変えたが、ほぼ同様な受信レベルが得られた。このことから、1m 程度の高さの違いは受信レベルにほとんど影響しないと考えられる。
- ケース 4 では、発信を右壁、受信を左壁に設けたが、全体的に受信レベルが低くなった。また、発受信間距離と受信レベルの関係も見かけ上、線形ではなく、ばらついている。
- ケース 6 から、最大で 25m 程度まで通信可能であることが分かった。ただし S/N 比を 10 以上にする場合は、10m 程度が限界である。

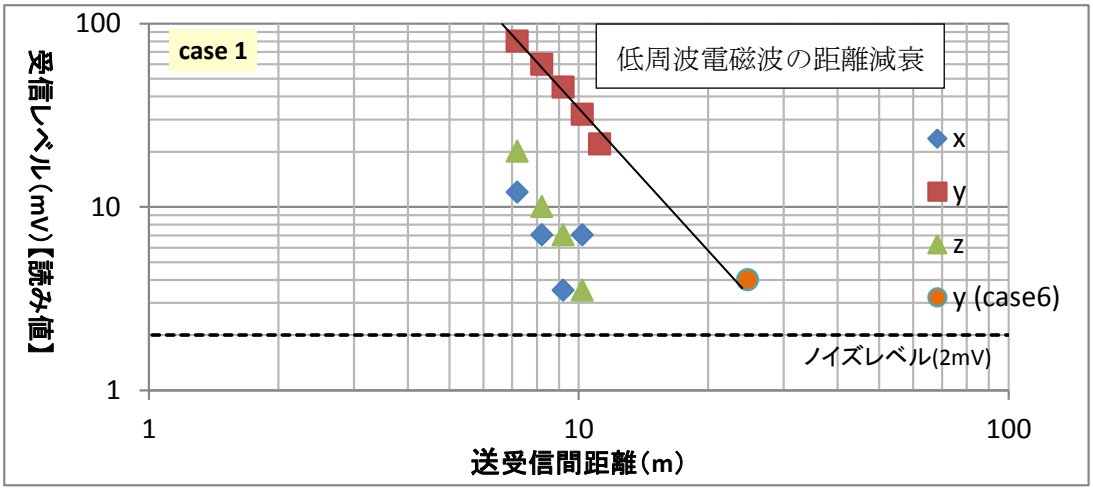
以上の結果から、地中無線送信器の設置場所を以下の通りに決定した。

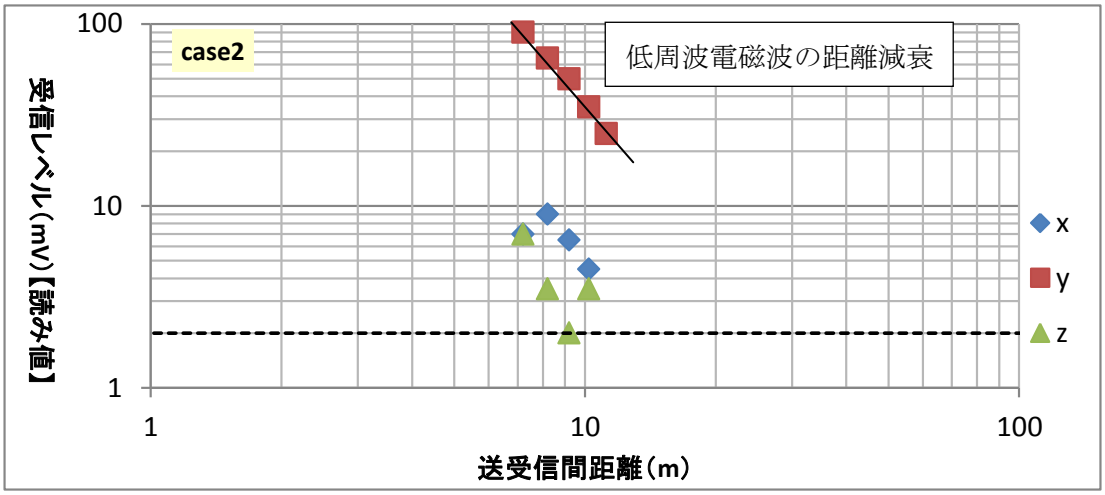
- 設置位置は、止水壁から 5m 程度（送受信間距離：約 9m）
  ※5m 以内は、止水壁施工状況から、設置困難である。
- 設置場所は、左壁面
  ※右壁は、他の計測ケーブル類が設置予定であり、中央は、作業員の通路になるため設置困難である。
- 設置高さは、それぞれ 0.4m、1.3m
- 設置方向は、Y 方向（坑道軸方向）

これらの条件に相当する位置は、表 3.3.7-3 の No.21 であり、S/N 比は 25 である。この値は、通信を安定して行うための目安である S/N 比 3 に対して、はるかに大きな値となっている。

表 3.3.7-3　通信試験結果

| No. | | 受信器 | | | | 発信器 | | | | 発受信間距離(m) | ノイズレベル (mV) | 受信レベル (mV) | S/N比 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 場所 | 止水壁との離間距離(m) | 高さ(m) | 方向 | 場所 | 止水壁との離間距離(m) | 高さ(m) | 方向 | | | | |
| 1 | case1 | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 3 | 1 | x | 7.2 | 2 | 12 | 6.0 |
| 2 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 3 | 1 | y | 7.2 | 2 | 80 | 40.0 |
| 3 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 3 | 1 | z | 7.2 | 2 | 20 | 10.0 |
| 4 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 4 | 1 | x | 8.2 | 2 | 7 | 3.5 |
| 5 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 4 | 1 | y | 8.2 | 2 | 60 | 30.0 |
| 6 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 4 | 1 | z | 8.2 | 2 | 10 | 5.0 |
| 7 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 5 | 1 | x | 9.2 | 2 | 3.5 | 1.8 |
| 8 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 5 | 1 | y | 9.2 | 2 | 45 | 22.5 |
| 9 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 5 | 1 | z | 9.2 | 2 | 7 | 3.5 |
| 10 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 6 | 1 | x | 10.2 | 2 | 7 | 3.5 |
| 11 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 6 | 1 | y | 10.2 | 2 | 32 | 16.0 |
| 12 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 6 | 1 | z | 10.2 | 2 | 3.5 | 1.8 |
| 13 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 7 | 1 | y | 11.2 | 2 | 22 | 11.0 |
| 14 | case2 | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 3 | 0 | x | 7.2 | 2 | 7 | 3.5 |
| 15 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 3 | 0 | y | 7.2 | 2 | 90 | 45.0 |
| 16 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 3 | 0 | z | 7.2 | 2 | 7 | 3.5 |
| 17 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 4 | 0 | x | 8.2 | 2 | 9 | 4.5 |
| 18 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 4 | 0 | y | 8.2 | 2 | 65 | 32.5 |
| 19 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 4 | 0 | z | 8.2 | 2 | 3.5 | 1.8 |
| 20 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 5 | 0 | x | 9.2 | 2 | 6.5 | 3.3 |
| 21 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 5 | 0 | y | 9.2 | 2 | 50 | 25.0 |
| 22 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 5 | 0 | z | 9.2 | 2 | 2 | 1.0 |
| 23 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 6 | 0 | x | 10.2 | 2 | 4.5 | 2.3 |
| 24 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 6 | 0 | y | 10.2 | 2 | 35 | 17.5 |
| 25 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 6 | 0 | z | 10.2 | 2 | 3.5 | 1.8 |
| 26 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 左壁 | 7 | 0 | y | 11.2 | 2 | 25 | 12.5 |
| 27 | case3 | 中央 | 0.5 | 0 | x | 中央 | 3 | 0 | x | 5.2 | 1.5 | 95 | 63.3 |
| 28 | | 中央 | 0.5 | 0 | x | 中央 | 3 | 0 | y | 5.2 | 1.5 | 3.2 | 2.1 |
| 29 | | 中央 | 0.5 | 0 | x | 中央 | 3 | 0 | z | 5.2 | 1.5 | 3.5 | 2.3 |
| 30 | | 中央 | 0.5 | 0 | x | 中央 | 4 | 0 | x | 6.2 | 1.5 | 60 | 40.0 |
| 31 | | 中央 | 0.5 | 0 | x | 中央 | 5 | 0 | x | 7.2 | 1.5 | 45 | 30.0 |
| 32 | | 中央 | 0.5 | 0 | x | 中央 | 6 | 0 | x | 8.2 | 1.5 | 32 | 21.3 |
| 33 | | 中央 | 0.5 | 0 | x | 中央 | 7 | 0 | x | 9.2 | 1.5 | 22 | 14.7 |
| 34 | case4 | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 3 | 1 | x | 7.2 | 2 | 32 | 16.0 |
| 35 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 3 | 1 | y | 7.2 | 2 | 18 | 9.0 |
| 36 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 3 | 1 | z | 7.2 | 2 | 9.5 | 4.8 |
| 37 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 4 | 1 | x | 8.2 | 2 | 25 | 12.5 |
| 38 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 4 | 1 | y | 8.2 | 2 | 20 | 10.0 |
| 39 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 4 | 1 | z | 8.2 | 2 | 4.5 | 2.3 |
| 40 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 5 | 1 | x | 9.2 | 2 | 20 | 10.0 |
| 41 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 5 | 1 | y | 9.2 | 2 | 12 | 6.0 |
| 42 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 5 | 1 | z | 9.2 | 2 | 6 | 3.0 |
| 43 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 6 | 1 | x | 10.2 | 2 | 7.5 | 3.8 |
| 44 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 6 | 1 | y | 10.2 | 2 | 15 | 7.5 |
| 45 | | 左壁 | 2.5 | 0 | y | 右壁 | 6 | 1 | z | 10.2 | 2 | 7.5 | 3.8 |
| 46 | case5 | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 3 | 1 | x | 7.2 | 3.5～4 | 9 | 2.3 |
| 47 | | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 3 | 1 | y | 7.2 | 3.5～4 | 5.5 | 1.4 |
| 48 | | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 3 | 1 | z | 7.2 | 3.5～4 | 55 | 13.8 |
| 49 | | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 4 | 1 | x | 8.2 | 3.5～4 | 5.5 | 1.4 |
| 50 | | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 4 | 1 | y | 8.2 | 3.5～4 | 検知不能 | － |
| 51 | | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 4 | 1 | z | 8.2 | 3.5～4 | 40 | 10.0 |
| 52 | | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 5 | 1 | z | 9.2 | 3.5～4 | 30 | 7.5 |
| 53 | | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 6 | 1 | z | 10.2 | 3.5～4 | 22 | 5.5 |
| 54 | | 左壁 | 2.5 | 0 | z | 左壁 | 7 | 1 | z | 11.2 | 3.5～4 | 15 | 3.8 |
| 55 | case6 | 左壁 | 22.5 | 0 | y | 左壁 | 0.5 | 1 | y | 24.7 | 1.5 | 4 | 2.7 |



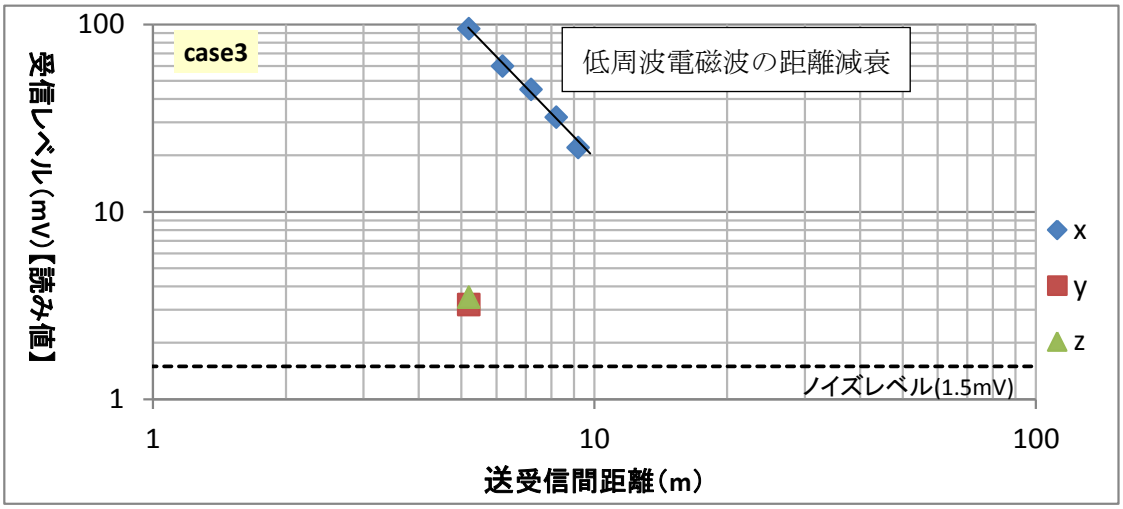
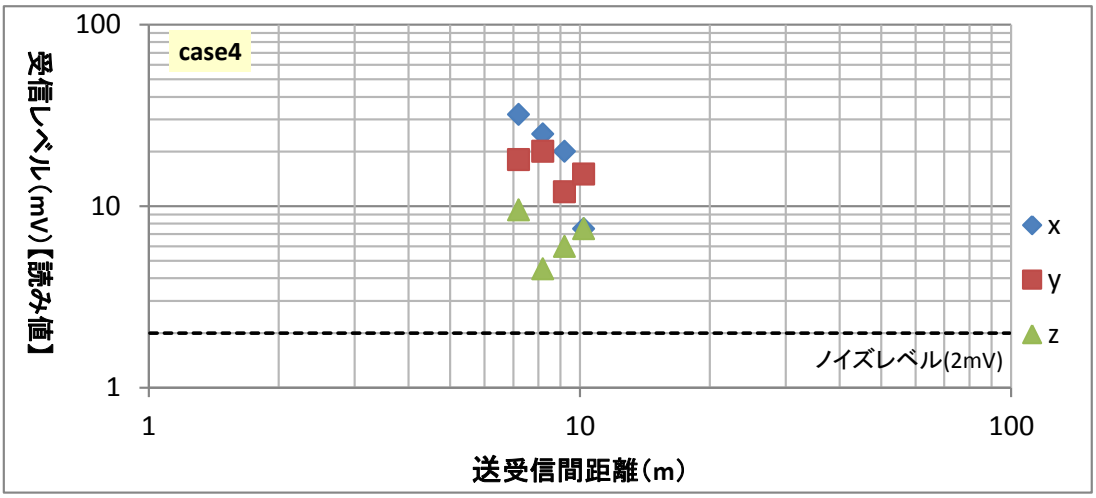
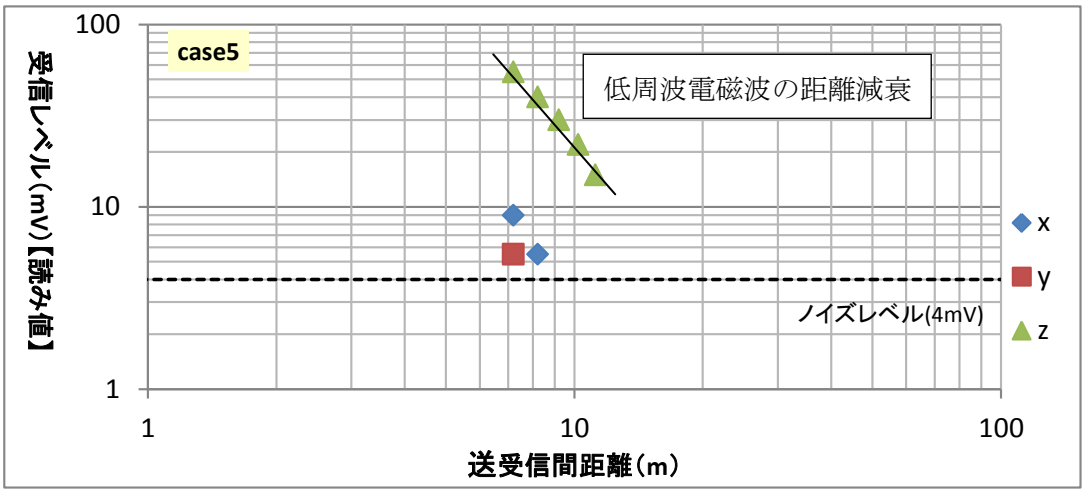




図 3.3.7-13　送受信間距離と受信レベルの関係：ケース 1～3



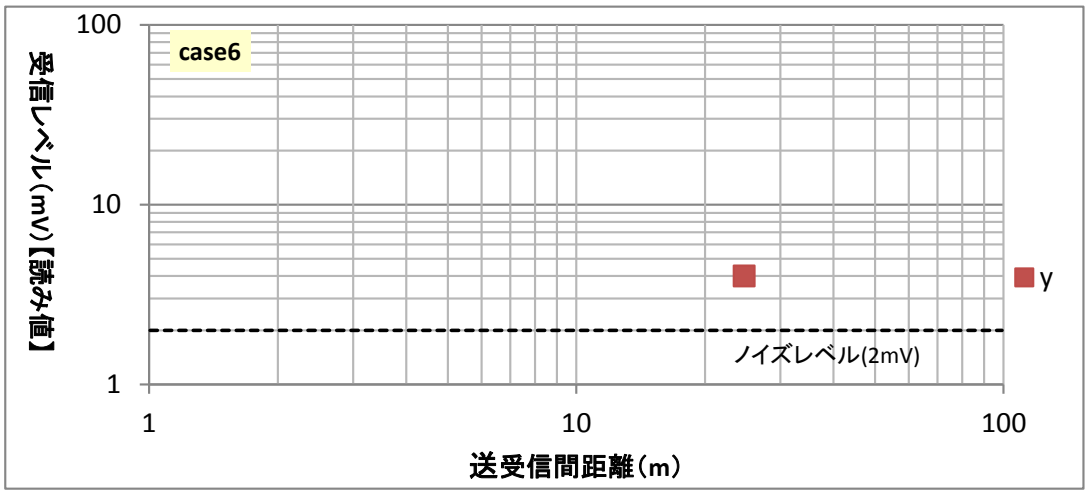




図 3.3.7-14　送受信間距離と受信レベルの関係：ケース 4～6

3)　地中無線モニタリング装置設置

前述の通信確認試験で決定した設置位置に地中無線送信装置を設置した。設置状況を図 3.3.7-15 に示す。送信器の取り付けには、地中無線の通信を阻害しないようにするために、金属バンドではなく樹脂バンドを使用した（図 3.3.7-16 の矢印)。このバンドを坑道壁面にコンクリート釘で固定した。

間隙水圧計の高さは、0.22 m と 1.15 m である。

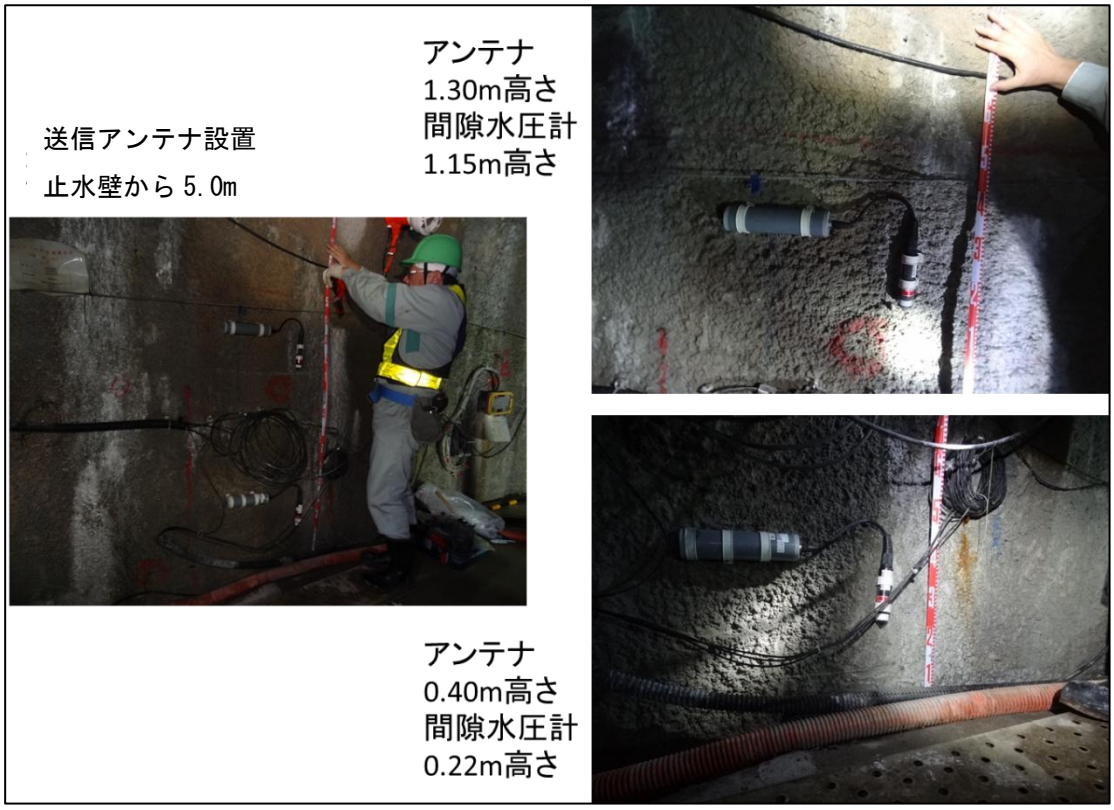



図 3.3.7-15　地中無線送信装置の設置状況

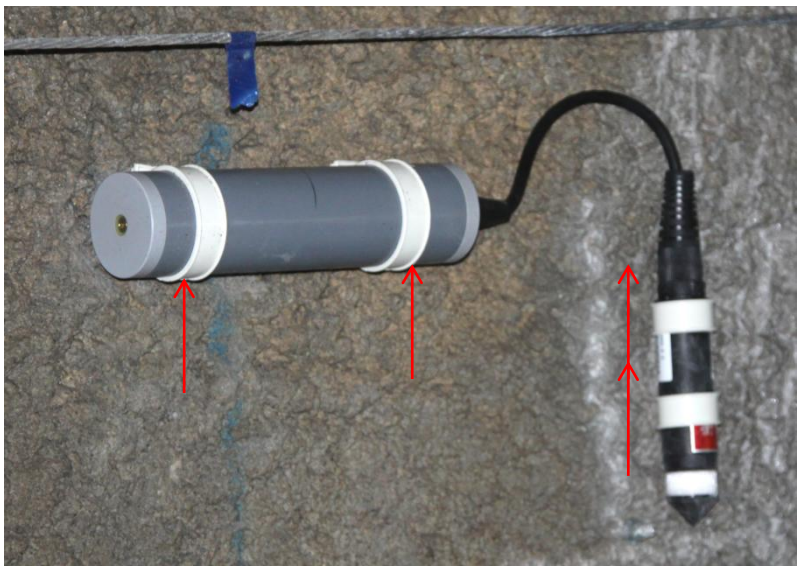


図 3.3.7-16　地中無線送信装置の固定方法（矢印：樹脂バンド）

4)　地中無線モニタリング装置によるデータ計測

本検討で使用する地中無線送信装置は 2 台である。表 3.3.7-4 に、それぞれの装置の計測・通信条件を示す。冠水試験の初期段階は、坑道内の水位変化が大きいと予想されるため、装置①では測定間隔を 1 日 12 回（測定時間は 0、2、4、・・・22 時の偶数時間）として、その様子をモニタリングする。一方で、測定間隔が短いと、送信データが増え、電池の寿命も短くなるため、装置②では、測定間隔を 1 日 1 回（昼の 12 時）とし、長期間の計測・通信が可能な設定としている。

通信間隔、及び送信データは、装置①では 1 日 1 回（14 時台）で 2 日分、装置②では 1 週間に 1 回（毎週火曜日の 15 時台）で 2 週分とする。無線通信による計測データの取りこぼしをなくすために、装置①では前日分、装置②では前週分のデータも再送させる設定になっている。

表 3.3.7-4　地中無線送信装置の計測・通信条件

| | 測定間隔 | 通信間隔 | 送信データ | 測定寿命* |
|---|---|---|---|---|
| 装置① | 12 回/日（偶数時間） | 1 回/日（14 時台） | 2 日分 | 3 年以上 |
| 装置② | 1 回/日（昼の 12 時） | 1 回/週（毎週火曜日の 15 時台） | 2 週分 | 10 年程度 |

（* 計算値）

地中無線送信装置の設置作業後、装置①の定期送信の受信を坑道内で確認した。その時の受信レベルを図 3.3.7-14 に示す。ノイズレベル約 2mVrms に対し、受信レベル 45mVrms で S/N 比 22.5 であった。これは、十分安定して通信できる状況であり、多少ノイズレベルが上昇しても問題なく通信が可能であると考えられる。なお、装置②は毎週 1 回火曜日の定期送信であるため、現地での確認ができなかったが（装置の設置作業日は水曜日であった）、同等の場所に設置された装置①の通信状態が良好であることから通信環境は問題ないと考えられる。

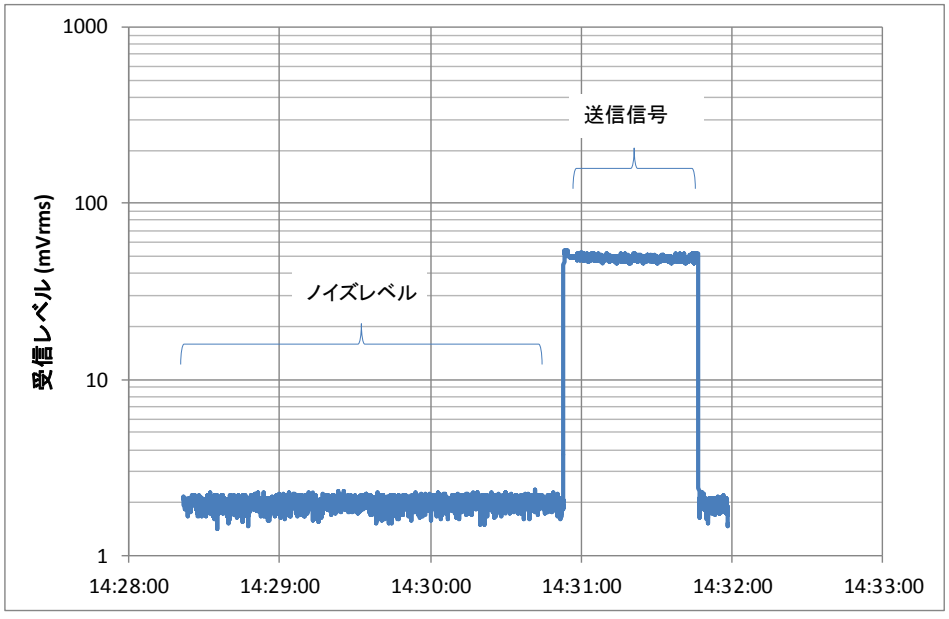



図 3.3.7-17　定期送信の受信レベル

止水壁が施工中であったため、地中無線受信装置（受信器格納箱、受信アンテナ）と PC は一度撤収し、図 3.3.7-18 に示すような状態で坑道内に保管しており、無線によるデータ通信は行っていない。今後、止水壁の施工が完了した後、再度、受信装置、及び PC の設置作業を行い、モニタリングを開始する予定である。

図 3.3.7-18　地中無線受信装置と PC の保管状況

5)　まとめ

原子力機構の瑞浪超深地層研究所において計画されている冠水試験において、地中無線モニタリング装置を適用するために、以下の作業を実施した。作業内容と得られた知見を記す。

a）地中無線モニタリング装置の設置

地中無線送信装置と受信アンテナの設置場所及び設置方向の選定のための通信確認試験、地中無線送信装置の設置作業を実施した。

通信確認試験では、坑道内において送信器と受信器の位置や方向を変えながら、受信レベルを確認した。以下に得られた主な知見を記す。

- 送信器と受信アンテナの設置方向を揃えたほうが、受信レベルが高くなる。
- 1m 程度の高さの違いは、受信レベルにほとんど影響しない。
- 発受信位置を互い違い（例：発信位置を右壁、受信位置を左壁）にすると、全体的に受信レベルが低くなり、また発受信間距離と受信レベルの関係も見かけ上、線形ではなく、ばらつく。
- 本坑道では、最大 25m 程度まで通信可能である。ただし S/N を 10 以上にする場合は、10m 程度が限界である。

これらの結果から、地中無線送信器の設置場所を以下の通りに決定した。

- 設置位置は、止水壁から 5m 程度（送受信間距離：約 9m）
  ※　5m 以内は、止水壁施工状況から、設置困難である。
- 設置場所は、左壁面

※ 右壁は、他の計測ケーブル類が設置予定であり、中央は、作業員の通路になるため設置困難である。

・ 設置高さは、それぞれ 0.4m、1.3m
・ 設置方向は、y 方向（坑道軸方向）

上記の通信確認試験において、これらの設置条件に相当する位置（表 3.3.7-3 の No.21）の S/N 比は 25 であった。

地中無線送信装置の設置については、地中無線の通信を阻害しないようにするために、金属バンドではなく樹脂バンドを使用した。

設置作業後、2 台の装置の内、1 台（装置①）の定期送信の受信を坑道内で確認した。その結果、ノイズレベル約 2mVrms に対し、受信レベル 45mVrms で S/N 比 22.5 であった。もう 1 台の装置の定期送信は坑内で確認できなかったが、装置①と同等の場所に設置されており、通信環境は問題ないと考えられる。

b) 地中無線装置によるモニタリングの実施

止水壁が施工中であったため、地中無線受信装置（受信器格納箱、受信アンテナ）と PC は一度撤収し、坑道内に保管しており、無線によるデータ通信は行っていない。今後、止水壁の施工が完了した後、再度、受信装置、及び PC の設置作業を行い、モニタリングを開始する予定である。

### 3.3.8　フランス ANDRA との共同研究実施状況

#### (1)　フランス ANDRA との共同研究の概要

原環センターは平成 22 年度からフランスの ANDRA と地中無線モニタリング技術の適用拡大を目指し、共同研究を実施してきた。本年度の内容は、長距離地中無線送信装置の作製、ムーズ・オートマルヌ地下研究所（MHM URL）緩衝材の膨潤挙動の長期モニタリングの継続、地中無線モニタリングワークショップの共催である。

#### (2)　長期モニタリング

MHM URL では、送信装置を坑道底盤から掘削されている TSF1001 ボーリング孔内に設置し、ベントナイトで埋戻し後、新たに掘削された TSF1002 ボーリング孔内に受信装置を設置し、ボーリング孔間の長期モニタリングを実施している。

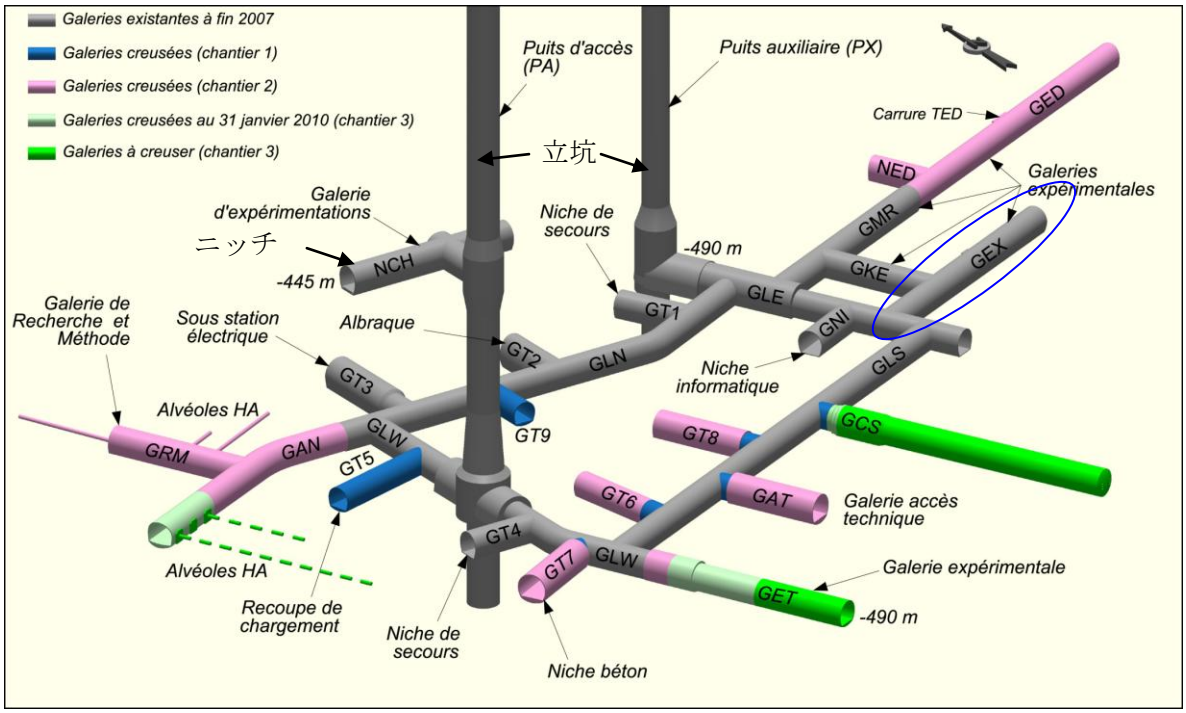
以下に、長期モニタリングの現状を示す。

##### 1)　MHM URL の概要

a) レイアウトと坑道

図 3.3.8-1 に示すとおり MHM URL の主な坑道群は地下約 490m（以下、490m 坑道）に建設されている。また、深度 445m には、ニッチと呼ばれる長さ 20m 程度の研究坑道が掘削されている。これらの地下坑道は、地上と 2 本の立坑により結ばれており、それぞれの立坑の直径は 4m と 5m であり、110m 程度離れている。

図 3.3.8-1 のうち、青色の楕円で示した坑道が、本調査を行った GEX 坑道である（図 3.3.8-2）。




伝送試験に利用した坑道

図 3.3.8-1　MHM URL のレイアウト

図 3.3.8-2　　GEX 坑道（GKE 坑道側から撮影）

図 3.3.8-3 に MHM URL の 490m 坑道群の詳細を示す。坑道は馬蹄形をしており、坑道断面積は 17 $m^2$ である。また、坑道支保工は、ロックボルト、ワイヤーメッシュ、鋼製支保工からなっており、鋼製支保工は、1m 間隔で設置（図 3.3.8-3 中の赤色の部材）されている。また、必要に応じて吹付コンクリートが施工されている。

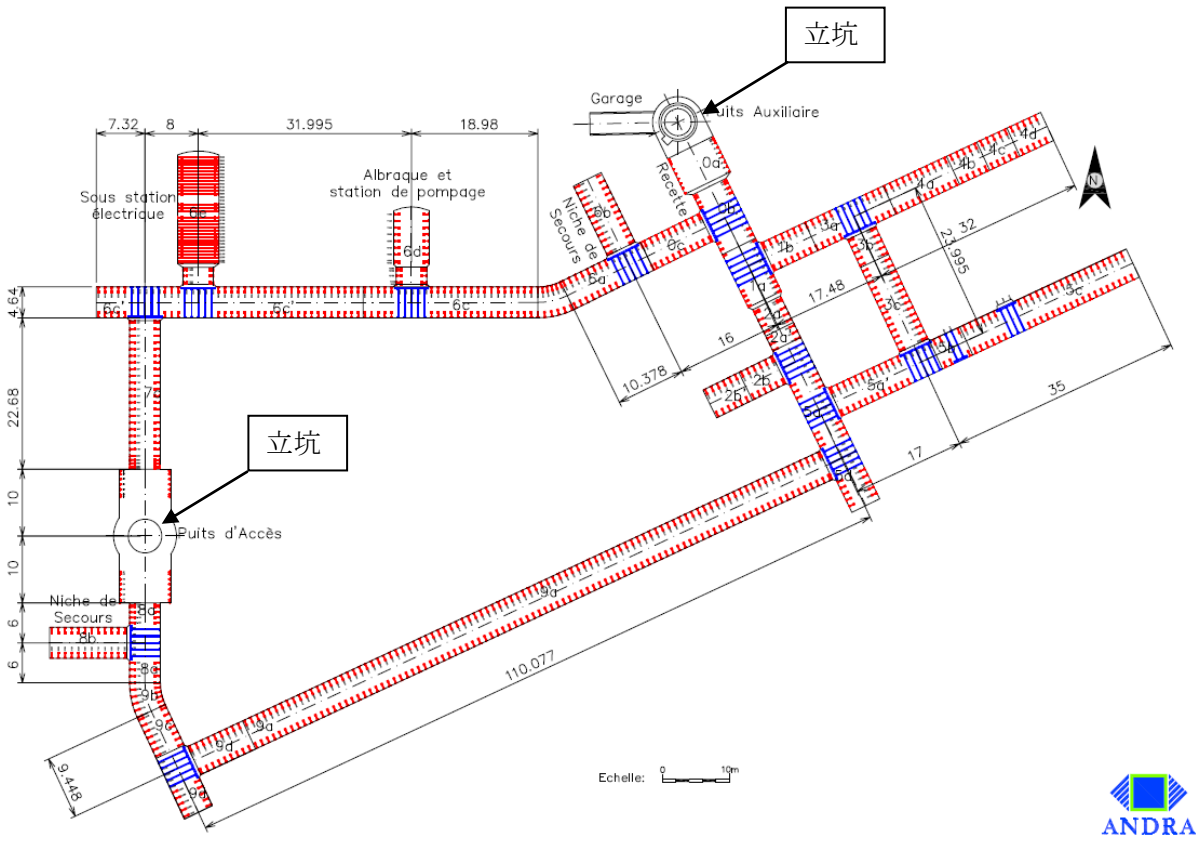



図 3.3.8-3　MHM URL 坑道 490m 坑道群

b) 母岩

MHM URL の母岩は Callovo-Oxfordian 層と呼ばれる堆積粘土質岩であり、その主な特性は以下のとおりである。

- 一軸圧縮強度： 20 [MPa]
- 弾性係数： 4、000 [MPa]
- 間隙率： 12～15 [%]
- 含水率： 6 [%]
- $CaCO_3$ 含有率： 25 [%]
- 透水係数（水平方向）： 10-12　[m/s]
- 透水係数（鉛直方向）： 10-14　[m/s]
- 塩分量： 3.7～8.5 [g/l]

上記の特性のうち、電磁波伝播挙動に最も関連が深いのは含水率と塩分量である。岩盤の電気伝導率は岩盤中の地下水の含水の程度及びその水質に大きく依存する。特に地下水が塩分を含む際には電気伝導率が大きくなり、電磁波の減衰が大きくなる。しかしながら、ANDRA とのこれまでの研究により、上記の含水率は低周波電磁波の伝播挙動に影響を与えることのないほど小さいことが明らかになっている。

2)　ボアホール孔対応受信機の設置用 TSF1002 ボーリング孔の状況

本調査においては、より実際の適用環境に近づけるために、受信機については TSF1002 ボーリング孔内に設置している。TSF1002 ボーリング孔は、本調査のために TSF1001 ボーリング孔を通る GEX 坑道断面内に掘削されたものである。TSF1002 ボーリング孔の仕様として、ボーリング孔長は坑壁から約 10m、内径約 115mm で、材質はポリ塩化ビニルである。

TSF1002 ボーリング孔の具体的な位置関係を図 3.3.8-4 に示す。

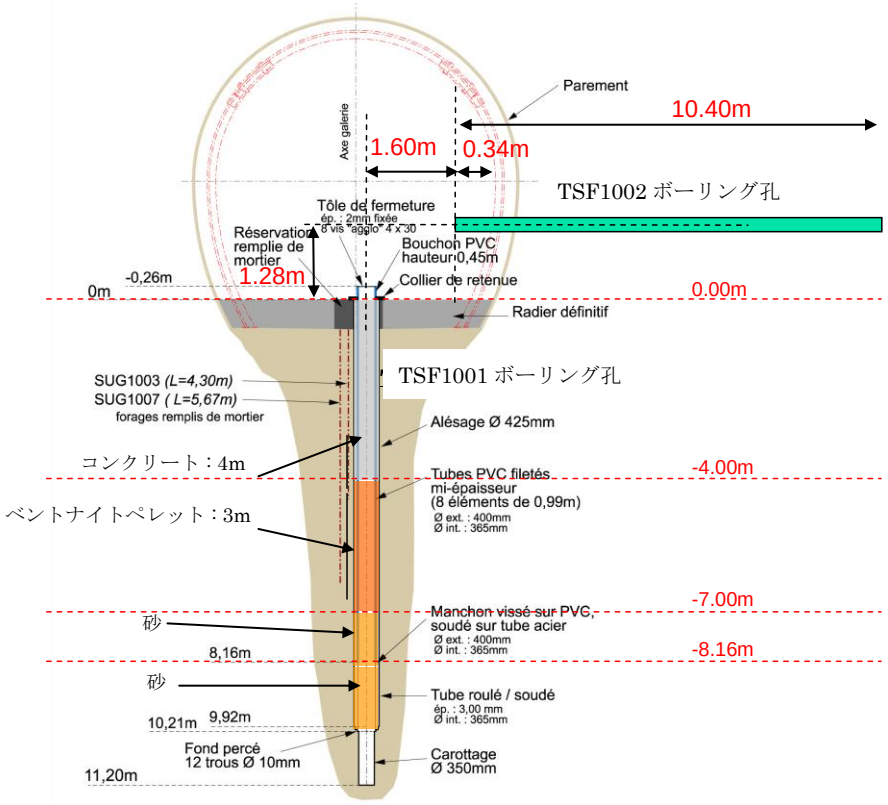



図 3.3.8-4　TSF1002 ボーリング孔の具体的な位置関係

なお、TSF1001 ボーリング孔内は、実際の処分環境に近づけるためベントナイト材料を用い埋め戻している。埋設する送信機は日本での適用環境を踏まえ、耐圧 1MPa 仕様としているため、浸潤後のベントナイトの最大膨潤圧は 1 MPa とした。また、埋め戻しはベントナイト材料の自由落下による締め固めが基本となるため、材料はベントナイトペレットと粉体ベントナイトとした。

本調査で用いている材料は、表 3.3.8-1 に示すものである。

モニタリング機器の設置作業及び埋め戻し作業の詳細は、平成 23 年度の報告書[31]を参照されたい。

表 3.3.8-1 埋め戻しに使用したベントナイト材料

| | |
|---|---|
| Type of Bentonite | MX80 |
| % of pellets Expangel | 54 % |
| % of powder WH2 Gelclay | 46% |
| Average water content | 12% >w>12.5 % |
| Apparent aerated density | 1.47 g/cm$^3$ |
| Grain density | 2.78 g/cm$^3$ |
| Porosity | 52.9 % |
| Saturation | 29.7% |

3) 長期モニタリング

TSF1001 ボーリング孔口-4.00m までベントナイトによる埋め戻しが完了した時点で、TSF1001 ボーリング孔～TSF1002 ボーリング孔間の長期モニタリングを開始した。TSF1001 ボーリング孔における地中無線送信装置とセンサの配置を図 3.3.8-5 に示す。

なお、TSF1002 ボーリング孔には、設置角度の調整が不要（万一受信機が回転しても、受信への影響が少ない）という理由で、受信アンテナ B を設置した。また、受信アンテナの位置は、受信強度を踏まえ TSF1002 ボーリング孔口から 9.0m の地点とした。更に、今後のメンテナンスを考え、TSF1002 ボーリング孔は埋め戻していない。

モニタリングを開始した 2011 年 8 月 31 日から 2015 年 3 月 9 日までの約 3 年半のモニタリング結果を図 3.3.8-6～図 3.3.8-9 に示す。

緩衝材の全圧（土圧）測定結果である図 3.3.8-6 より、計測初期はベントナイトの埋め戻し材及びコンクリートの自重により、全圧が少しずつ大きくなっており、水注入後以降は膨潤により更に全圧が上昇し、全体としては設計膨潤圧である 0.5MPa 近傍（0.5～0.7MPa）の値を示している。2013 年 4 月以降に水注入用の塩ビ管の塑性変形と考えられる事象により一時土圧が減少したが、その後、2013 年 8 月の水の注入により全圧が回復している。さらに、2014 年 5 月頃から再び減少し再度回復している。この現象と回復の要因については調査中である。

間隙水圧（図 3.3.8-7）については、計測初期は間隙水圧計周囲のベントナイトに間隙水圧計を養生しているベントナイト中の水を吸われ、不飽和状態の計測値（負圧）を示したが、飽和促進のため実施した水注入後以降は、ほぼ塩ビ管高さの静水圧（水頭 2m、0.02MPa）レベルの値（0.014～0.015MPa）を示している。その後大きな変動が無いことから、TSF1001 ボーリング孔の間隙水圧計近傍は、ほぼ飽和状態であると言える。

温度センサの測定結果（図 3.3.8-8）より、計測初期はコンクリートの硬化熱により高めの値を示したが、その後は 23℃弱まで低下し、引き続き坑道内の温度変化を受けつつ、ほぼ地温に近づきつつあると考えられる。

最後に、バッテリーの電圧測定結果である図 3.3.8-9 より、長期通信試験を開始後 3 年半の間ではほとんど電圧の低減が生じていないことが分かる。

本長期モニタリングは来年度以降も継続していくことにより、ボーリング孔対応送信機を用いた地中無線装置の長期適用性に関する情報を取得すると共に、TSF1001 ボーリング孔での緩衝材の挙動に係る知見を得ていく予定である。

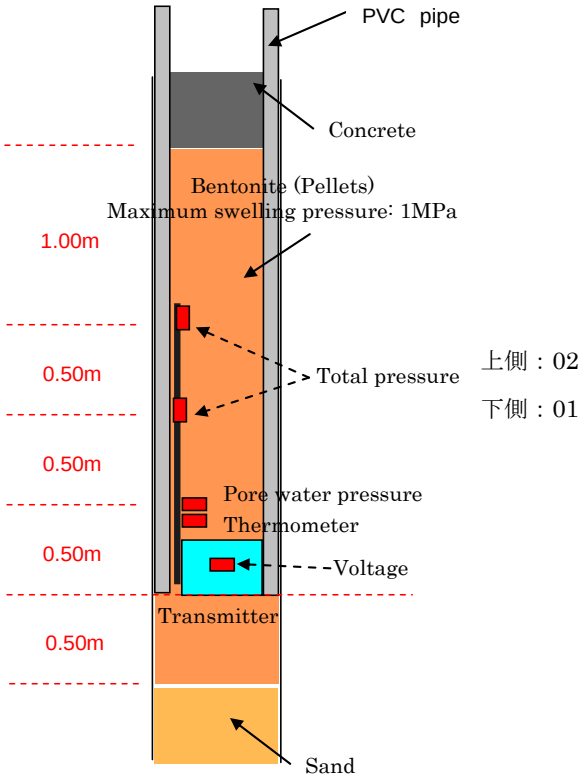



図 3.3.8-5 TSF1001 ボーリング孔における地中無線送信装置とセンサの配置

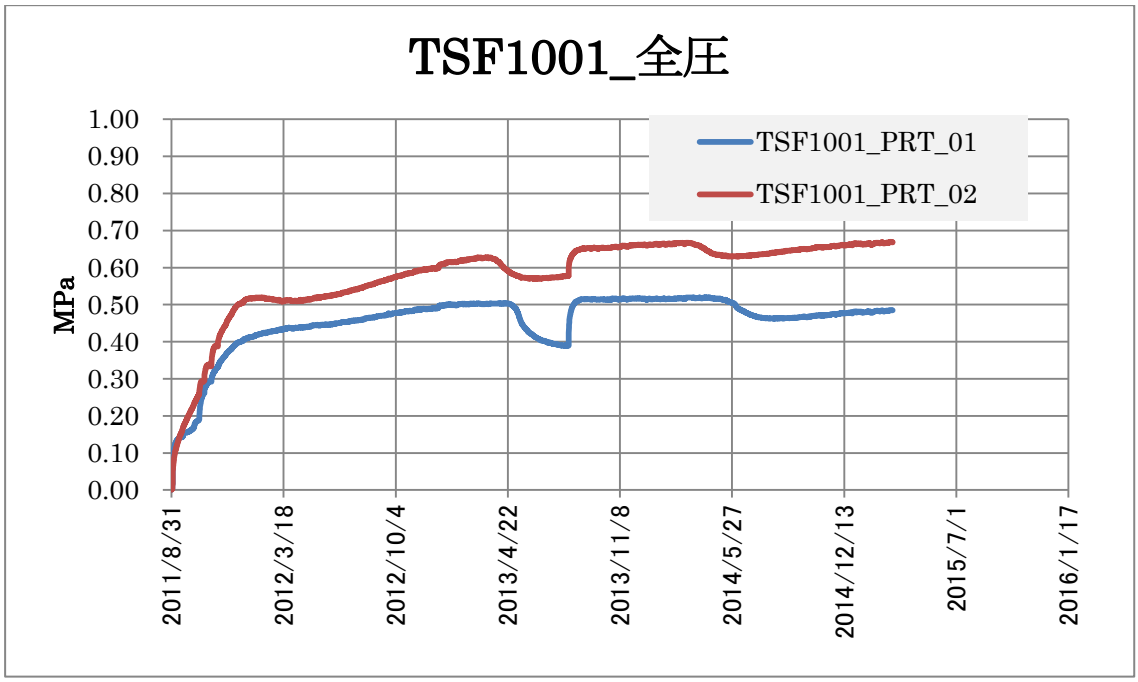



図 3.3.8-6　TSF1001 ボーリング孔モニタリング結果　全圧

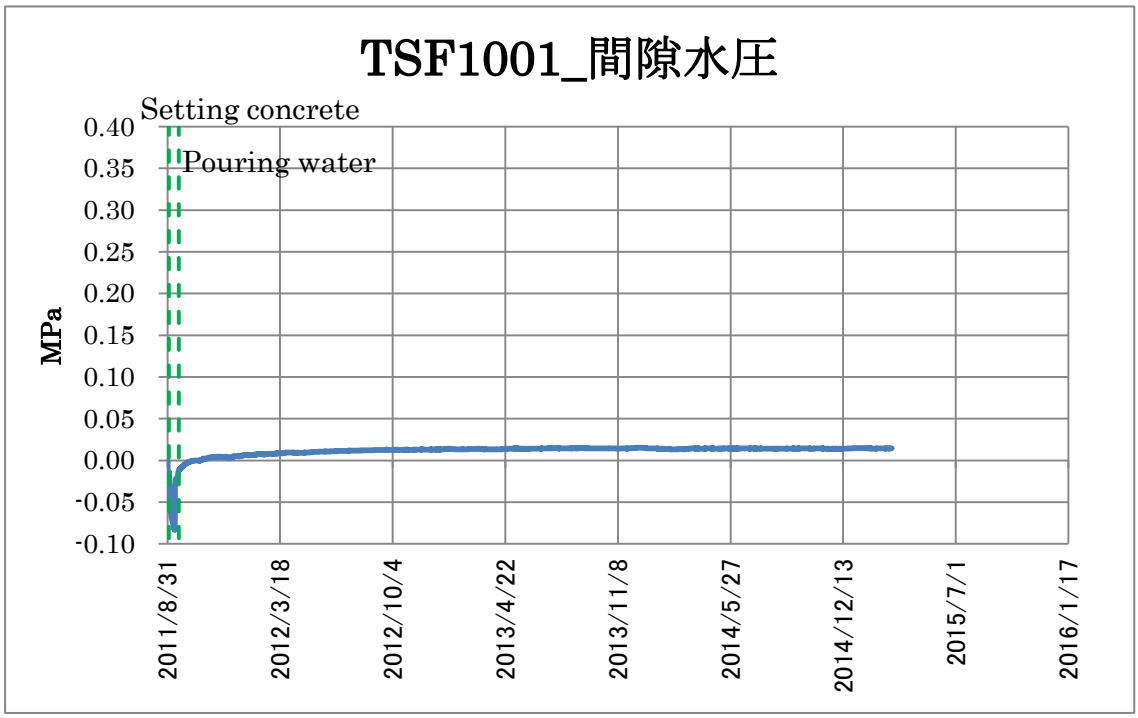



図 3.3.8-7　TSF1001 ボーリング孔モニタリング結果　間隙水圧

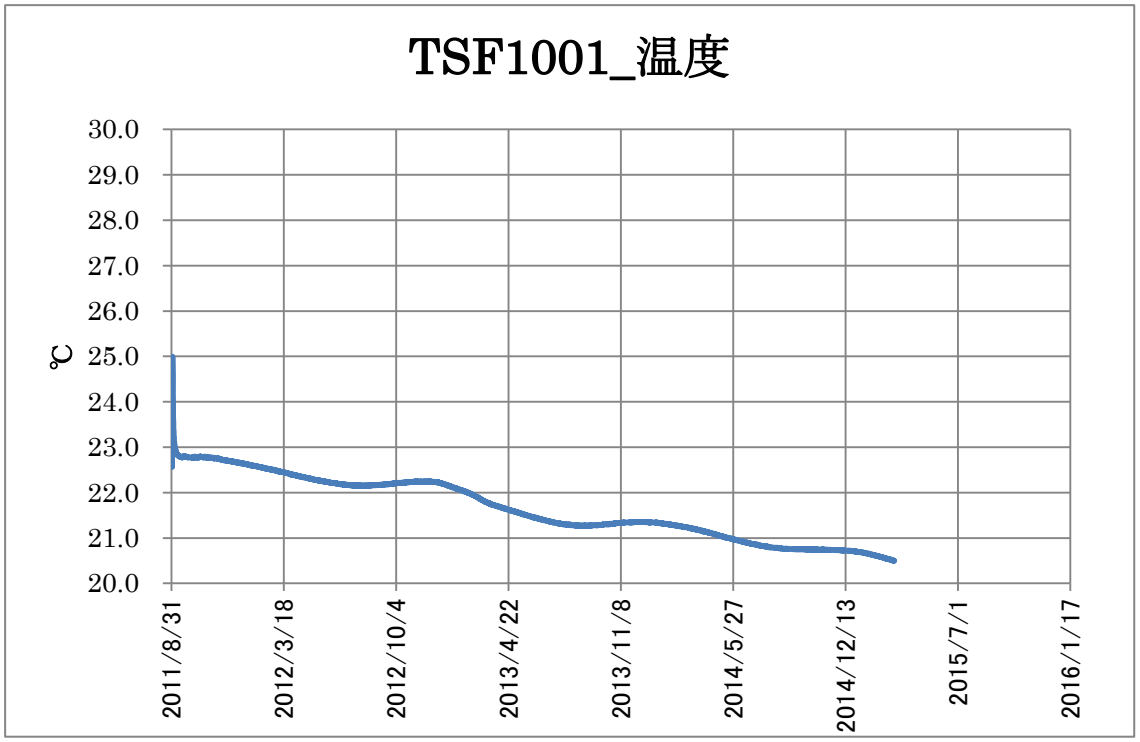



図 3.3.8-8　TSF1001 ボーリング孔モニタリング結果　温度

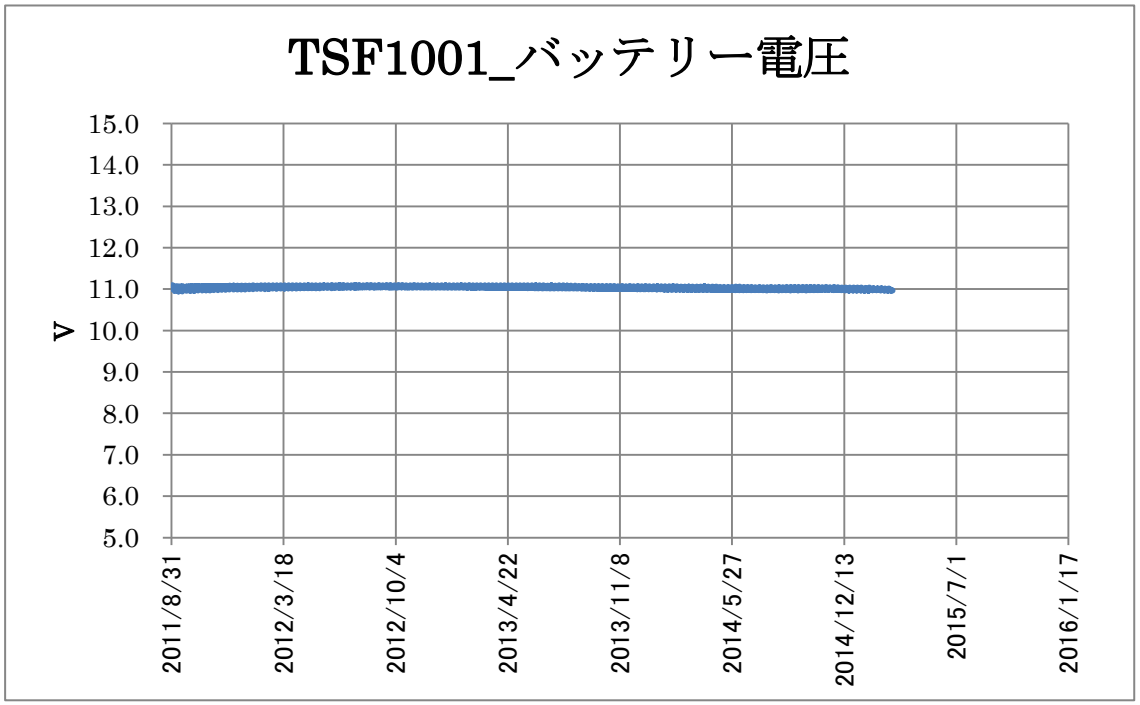



図 3.3.8-9　TSF1001 ボーリング孔モニタリング結果　バッテリー電圧

(3)　長距離送信

本調査では、長距離伝送用地中無線送信アンテナ等を製作し、フランス ANDRA の MHM URL での地表面と地下主要坑道間（約 490m）における長距離伝送の実現可能性を調査した。なお、本検討は ANDRA の費用分担により実施した。

1)　試験計画

昨年度の検討から、MHM URL での長距離送信（地上と地下施設間の約 490m 送信、図 3.3.8-10）の実現可能性を更に向上させるためには、大きく下記の対応が必要となることが明らかとなった。

① 送信機の送信能力：幌延での中継試験で適用した大型送信アンテナ（3m×3m 四方、図 3.3.8-11 参照）において、耐高圧機器の使用による約 3 倍程度の送信強度の向上
② 電磁波の減衰：坑道でのニッチの掘削による鋼製支保部材による減衰の低減
③ 受信時の S/N 比向上の観点から、地上から掘削したボーリング孔による受信（地上での電磁ノイズの低減のため）

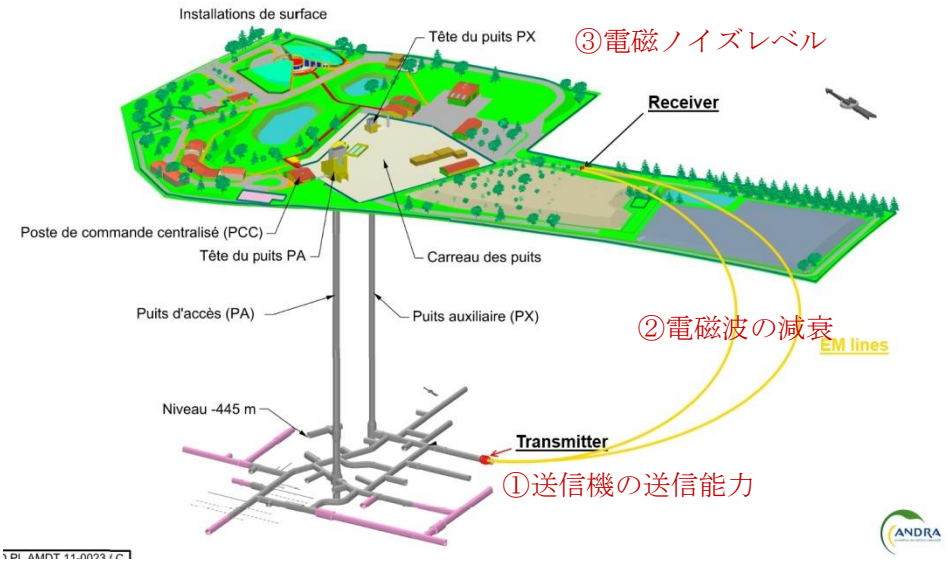



図 3.3.8-10　長距離送信の対象区間（約 490m）

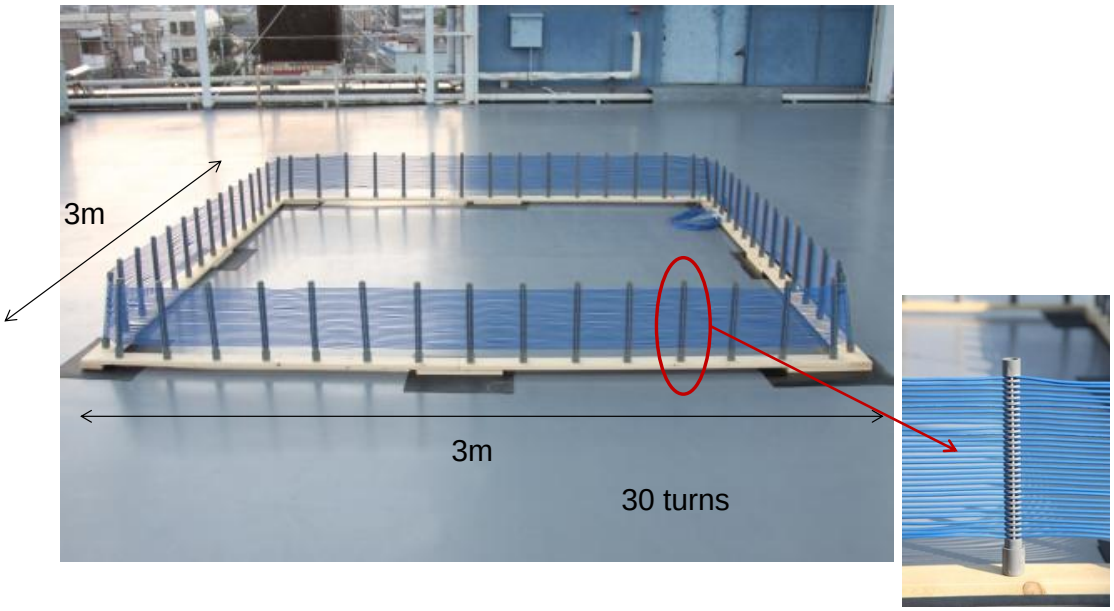



図 3.3.8-11　中継システム用の長距離無線送信装置

①については既に耐高圧機器を使用しているが、可能な限りより送信強度の向上を行う計画である。しかしながら、現状では②作業安全の観点から、坑道に鋼製支保部材を保有していないニッチの掘削をすることは難しい、そして、③MHM URL において、鋼製部材の使用頻度が少なく、かつその直上に鋼製ケーシングを有していないボーリング孔が存在していない。

そこで、本調査では原位置の状況を踏まえ、以下のような試験計画を立案した。

・長距離送信試験 A

送信時の鋼製部材の影響の低減（②対応）及び S/N 比の向上（③対応）として、図 3.3.8-12 に示すように地上に送信機を設置し、地下の坑道の鉛直上方のボーリング孔内に受信機を設置した長距離送信試験を実施する。

本試験では地上の緑地帯を使用することにより、送信時の電磁波の減衰を低減することが可能となり、また地下の坑道の鉛直上方のボーリング孔内に受信機を設置することにより、電磁ノイズの低減及び鋼製部材による電磁波の減衰を防ぐことが可能となる。

現状では最も理想的な長距離送信の条件となる。

**(Baseline)**

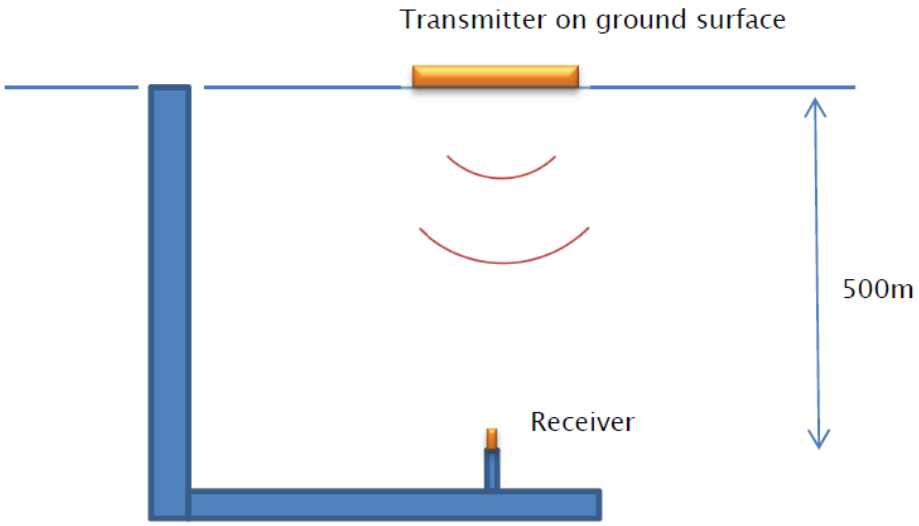



図 3.3.8-12　長距離送信試験 A

・長距離送信試験 B

長距離送信試験 A が成功した場合は次のステップとして図 3.3.8-13 に示すように、本来のニーズに沿って地下の坑道に送信機を設置し、地上に受信機を設置した長距離送信試験を行う。

地下の坑道は極力鋼製部材を適用していない場所を選定する。また、受信機は地上に設置するために、電磁ノイズが課題として残る。そこで、必要に応じて地上での電磁ノイズが低いと考えられる休日や深夜に試験を実施することも考慮することとした。

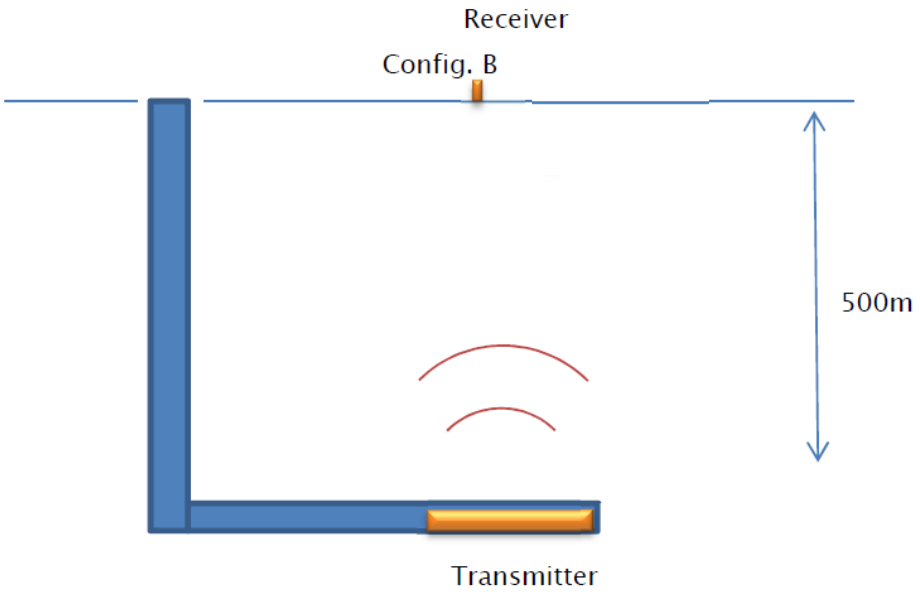



図 3.3.8-13　長距離送信試験 B

・長距離送信試験 C

もし、長距離送信試験 B が成功した場合は長距離送信が可能なことを示せるため、本調査は終了となる。しかしながら、成功しなかった場合は、図 3.3.8-14 に示す長距離送信試験 C を実施する。

長距離送信試験 C は基本的に長距離送信試験 B と同様であるが、送信機を地上ではなく、地上から掘削したボーリング孔に設置することにより S/N 比の向上を図る計画である。

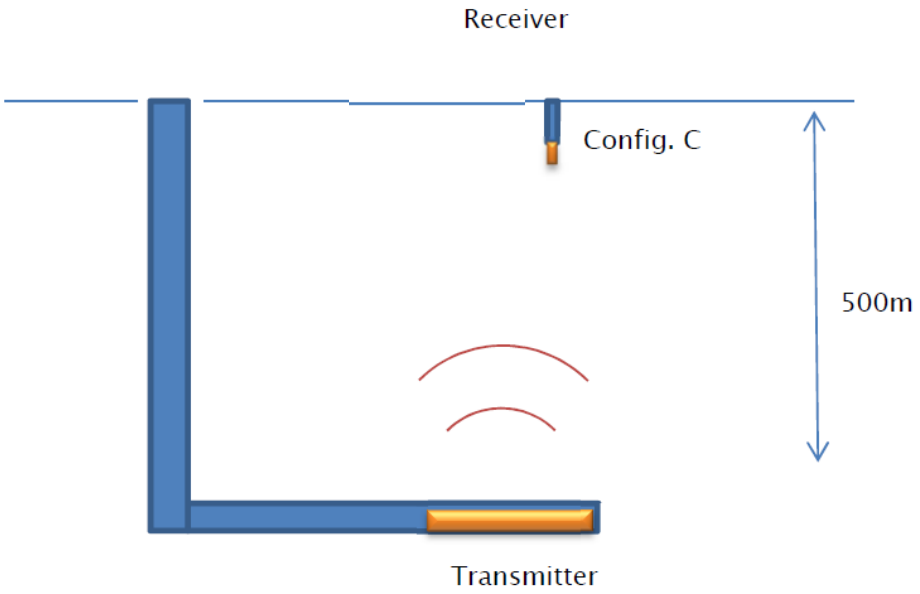



図 3.3.8-14　長距離送信試験 C

また、昨年度実施した、Evidential support logic (ESL)[32]、[33]を用いた長距離送信の確からしさの評価結果に基づき、実際の原位置の試験は、図 3.3.8-15 に示すフローにて行うこととした。

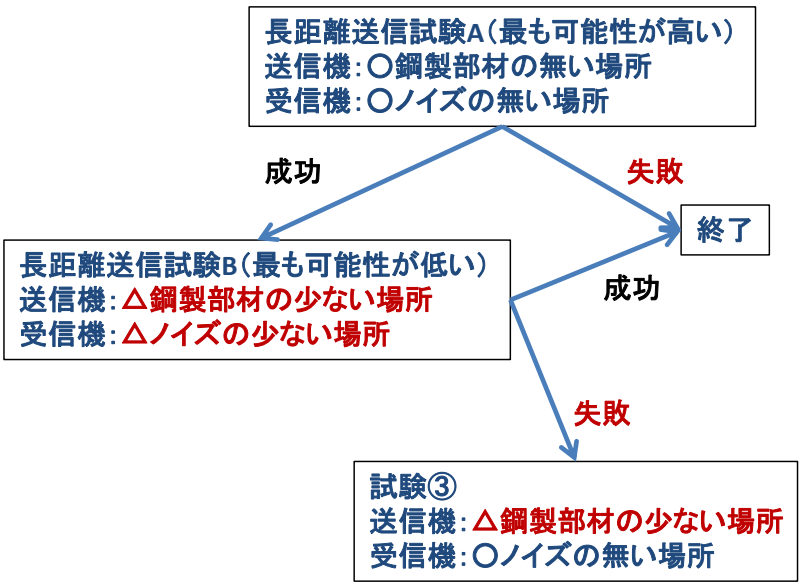



図 3.3.8-15　長距離送信試験の実施手順

2)　長距離送信用地中無線送信アンテナの設計

平成 25 年度に幌延深地層研究センターで適用した中継システム用送信アンテナの出力増強方法を検討し、長距離送信用地中無線送信アンテナの設計を行った。

①長距離送信用地中無線送信アンテナに必要となる要求性能

一昨年度実施したシミュレーション結果を踏まえ、長距離（500m）送信の実現可能性に関し検討を行った。その結果、以下に示す対応を行うことにより長距離（500m）送信の実現可能性が向上すると考えられた。

- 磁気モーメントを大きくするために、先ずは、耐圧性の高い機器を採用し、送信時の電圧を高め、コイルに流れる電流を大きくする。または、磁気モーメントを大きくするために、アンテナの面積を大きくする。目標とする磁気モーメントの大きさは、シミュレーション結果より中継システム用送信機の 3 倍程度である。
- 地上からボーリング孔を長めに掘削し、受信機の位置での電磁ノイズレベルを低減させる。
- 鋼製支保部材が磁束の形成に与える影響を低減させるため、鋼製支保部材が使われていない坑道を探す。もしくは、坑道端面にニッチを形成し、アンテナ中心が極力坑道端部に近づくようにする（図 3.3.8-16）。

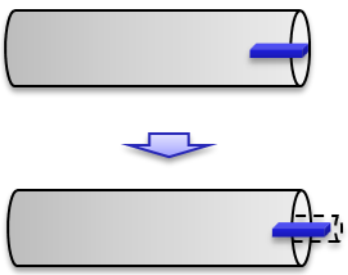


図 3.3.8-16　送信能力向上の方策（送信機用ニッチ掘削）

本検討には、受信アンテナを坑道から掘削されたボーリング孔に設置しての送信試験も計測も含めている。よって、長距離送信用地中無線送信アンテナに必要となる要求性能（目標とする磁気モーメントの大きさ)は､コイルに流れる電流とアンテナ面積を大きくすることにより、中継システム用送信機の 2~3 倍程度とした。

②長距離送信用地中無線送信アンテナの仕様

本検討において製作したアンテナは、次のように設計した。

a.　出力電流の増加

アンテナの同調ユニット（コンデンサ、抵抗の部分）の耐圧を向上させるため、回路の配線を見直し、部品の構成を変更した。これにより約 1.4 倍の出力増加が見込める。

更に、坑道に存在する鋼製部材の影響を少しでも緩和するため、アンテナを床から離して設置できるように構造を見直した。具体的には、アンテナ下部に PVC パイプを継ぎ足せるような構造とし、床面の配筋等の鋼製部材からの距離を確保できるようにした。

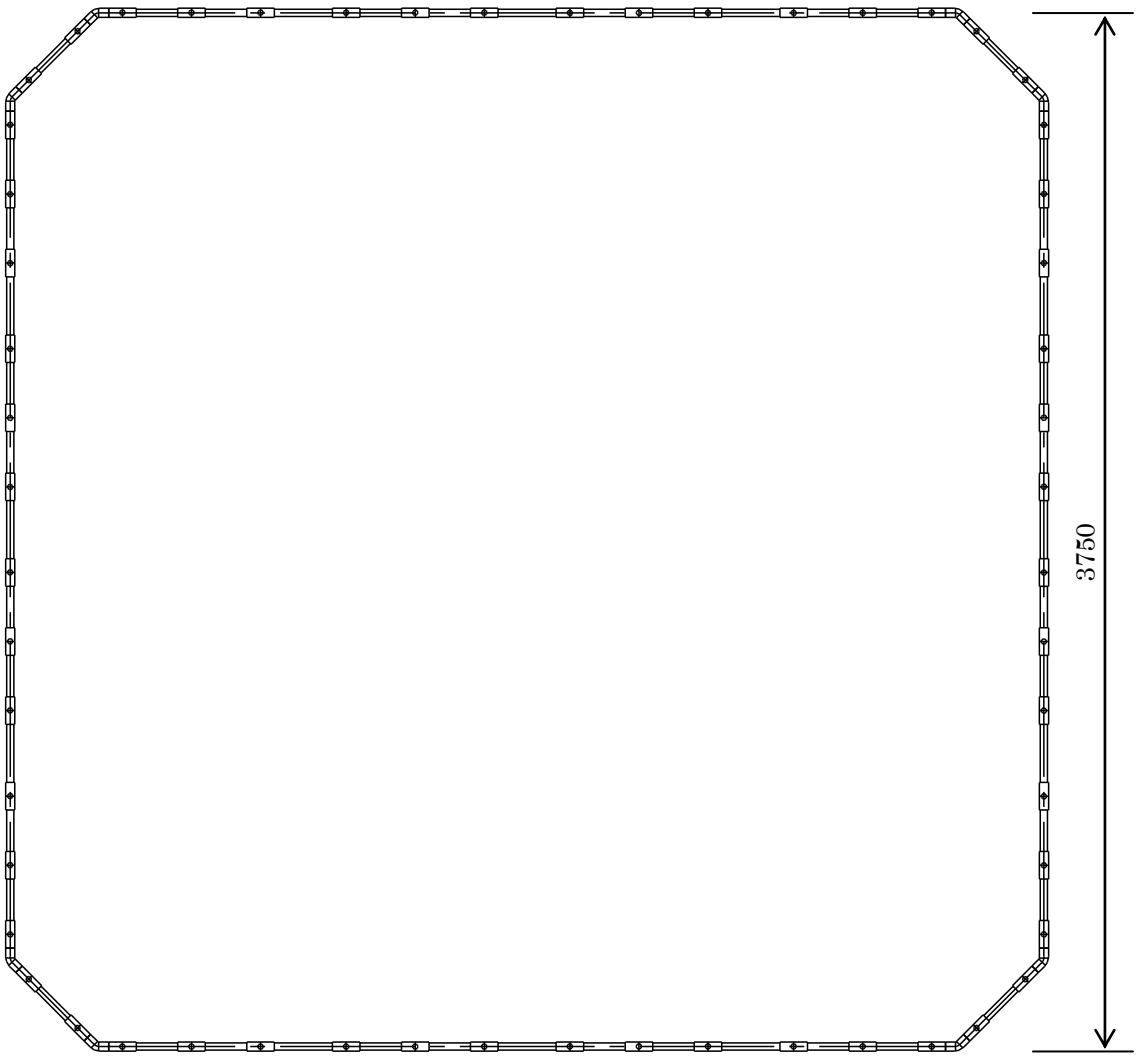
b.　アンテナサイズの大型化

アンテナサイズを 3m×3m から 3.7m×3.7m に大型化した。これにより面積比で約 1.5 倍とした。更に、坑道での設置可能エリアの広さを考慮し、おおよそ 3.2m×3.2m までサイズを可変にできるようにした｡長距離送信用地中無線送信アンテナの図面を図 3.3.8-17 と図 3.3.8-18 に示す。

以上より、現段階の設計では、磁気モーメントの大きさは 2.1 倍程度となった。現段階での各機器の仕様を以下に示す。

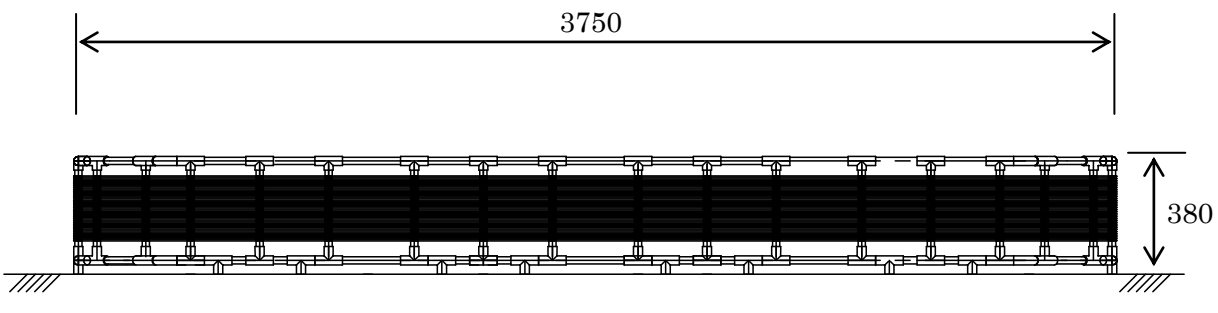
○長距離送信用地中無線送信アンテナ（図 3.3.8-17、図 3.3.8-18）

- アンテナ形状：空芯アンテナ
- アンテナサイズ：3.7 m×3.7 m
- アンテナ面積：13.7 $m^2$
- ターン数：30 T
- 素線線材径：3.3 mm
- 線材抵抗：5.68 kΩ/km
- 素線総延長：約 440 m
- アンテナ直流抵抗：2.52 kΩ
- 重量：約 20 kg




（単位：mm）

図 3.3.8-17　長距離送信用地中無線送信アンテナ（平面図）




（単位：mm）

図 3.3.8-18　長距離送信用地中無線送信アンテナ（断面図）

○長距離送信用送信器本体（図 3.3.8-19）

- サイズ：φ267 mm× 350 mm（持手・突起除く）
- 入力電源：AC100V～AC240V
- 最大出力電流：15A
- 出力電圧：60 Vrms
- 出力周波数：8533 Hz
- 重量：約 10 kg

図 3.3.8-19　長距離送信用送信器本体の外観

○パワーオシレータ（高出力発振器）ユニット（図 3.3.8-20）

- 概要：アンテナの同調用発信器（設置時のみ使用）
- 出力周波数範囲：0Hz～200kHz（矩形波）
- 出力電流：72Vpp
- 電源入力：最大 15Arms
- 消費電力：100V～240V（50Hz/60Hz）
- 寸法：幅 430mm×高さ 132.5mm×奥行 450mm
- 質量：約 5kg

図 3.3.8-20　パワーオシレータ（高出力発振器）ユニットの外観

○抵抗・コンデンサユニット（図 3.3.8-21）

- 概要：アンテナの同調用
- 抵抗範囲：0Ω～2Ω
- 静電容量範囲：0～59.9nF
- 耐電圧：3.5kV（AC）
- 寸法：幅 320mm×高さ 99mm×奥行 280mm
- 質量：約 10kg

図 3.3.8-21　抵抗・コンデンサユニットの外観

3)　長距離送信用地中無線送信アンテナの製作

前述した長距離送信用地中無線送信アンテナの設計に基づき、送信アンテナの製作を行った。製作においては送信アンテナの運搬を考慮し、アンテナフォルダーの製作も行った。

①送信アンテナの製作

製作した長距離送信用地中無線送信アンテナを図 3.3.8-22 に示す。なお、図中の写真では実際の使用時とは上下が逆になっている。写真上のアンテナ上端にある突起が、床から数 10cm 離してアンテナを設置するための足をつなぐ治具である。

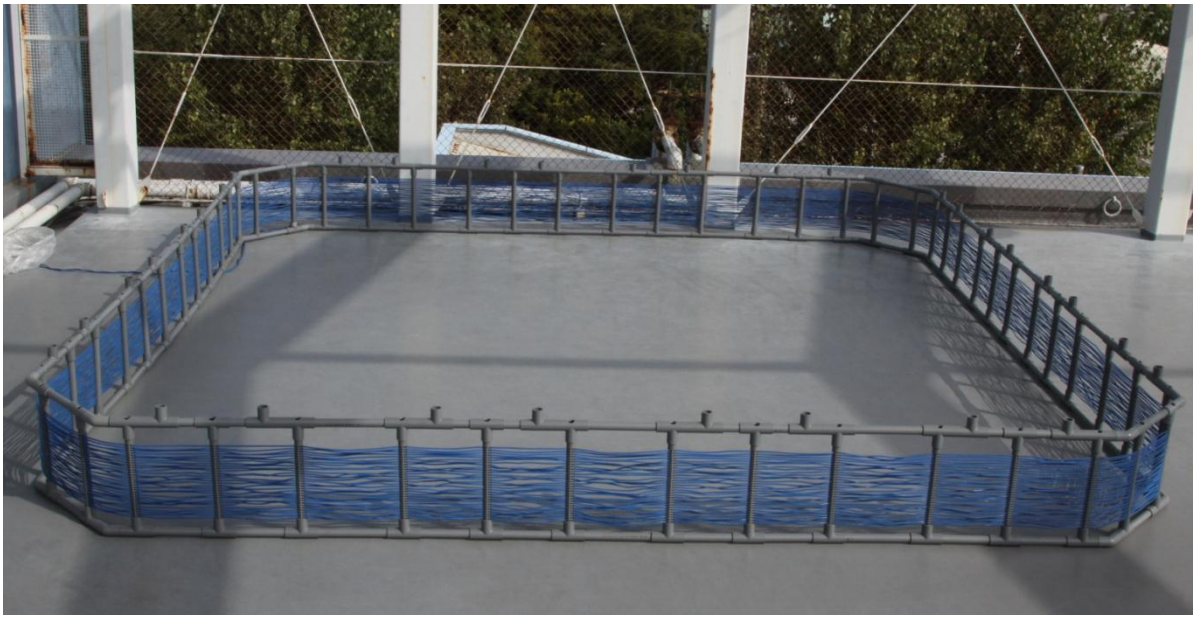


図 3.3.8-22　製作した長距離送信用地中無線送信アンテナの外観（実際の設置は上下逆）

②アンテナホルダの製作

製作したアンテナフォルダーを図 3.3.8-23 に示す。アンテナホルダは PVC 製であり、アンテナのコイル線を通すための溝が 30 段切削されている。ここにアンテナのコイル線を挟み、線が交差せず、かつ、線の間隔をある程度保つようになっている。また、アンテナホルダの上下は、PVC 管で接続されており、アンテナの形状を保てるようになっている。この形状保持治具は、輸出・可搬性を考慮し、分割できる構造とした。

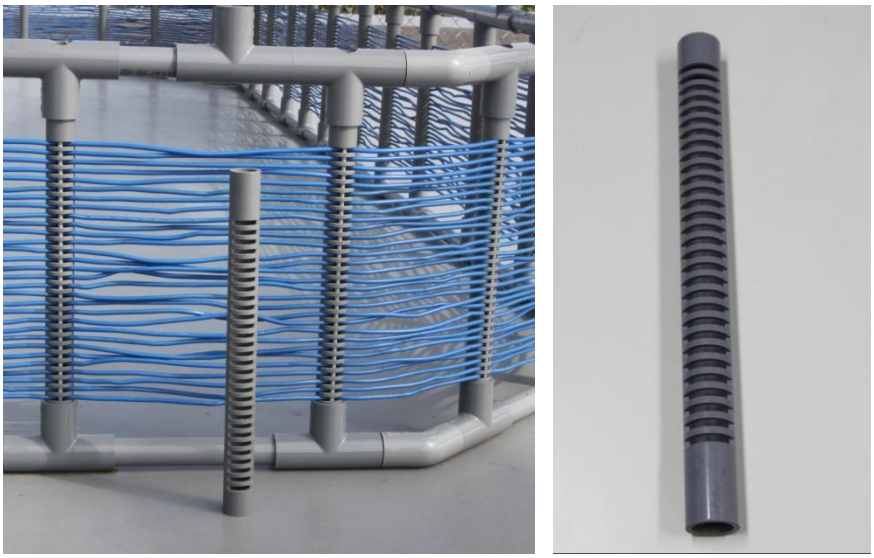


図 3.3.8-23　製作したアンテナホルダ

③受信アンテナの製作

平成 23 年度に開発したボアホール対応受信アンテナの製作を行った。ボアホール対応受信アンテナには、図 3.3.8-24 に示すように A タイプ及び B タイプがある。今回の長距離送信試験では、ボーリング孔内で鉛直上方（図 3.3.8-12）、もしくは鉛直下方（図 3.3.8-14）からの電磁波の受信が必要となるため、B タイプを選定し、製作した。

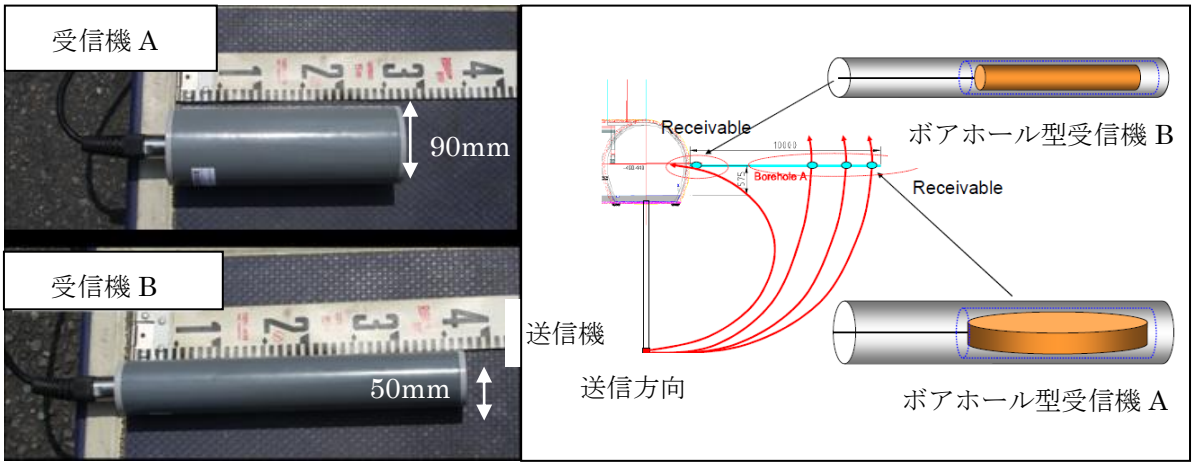



図 3.3.8-24 ボアホール対応受信アンテナの種類

ボアホール対応の受信アンテナ B の形状を図 3.3.8-25 に示す。受信アンテナ B のサイズはφ60mm×h370mm であり、センサの接続用に h100mm のケーブル出し口が付いている。本アンテナは、可能な限り細くするため、フェライト材にアンテナコイルを直接巻き、増幅用プリアンプを内蔵している。防水用筐体の材質は電磁波の透過性を考慮し、ポリ塩化ビニフェニール（PVC）製とした。

製作したボアホール対応の受信アンテナ B を図 3.3.8-26 に示す。

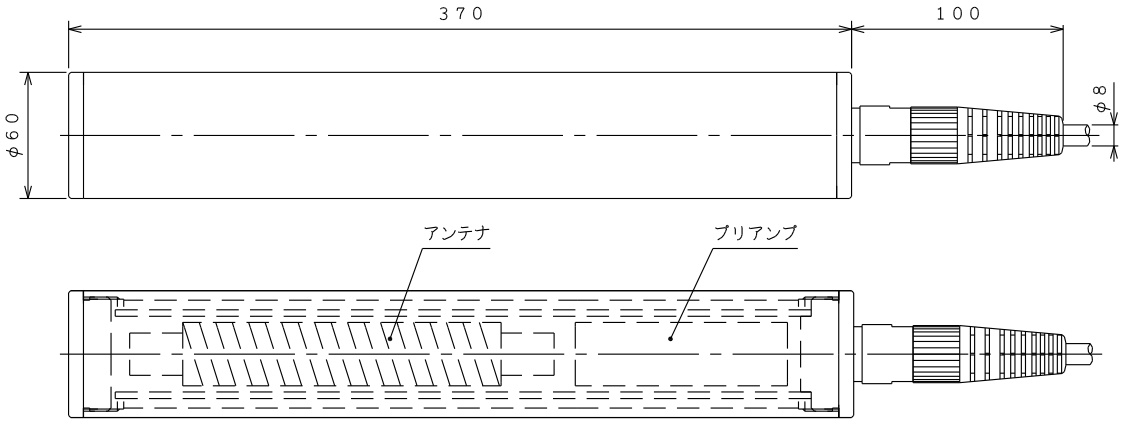



図 3.3.8-25　ボアホール対応の受信アンテナ B

図 3.3.8-26　ボアホール対応受信アンテナ B の外観

製作した装置は通信能力の確認後、ANDRA に送付した。ANDRA により、2015 年に MHM URL にて試験を実施する計画である。

(4)　地中無線ワークショップ

2014 年 5 月に“Workshop on Wireless Monitoring through rock”と題して、フランスのパリで

ワークショップの開催を実施した。　本ワークショップは、原環センターと ANDRA との地中無線に関する共同研究の一環として共催したものであり、これまでの共同研究の成果を周知するとともに、他の地中無線モニタリング技術、無線モニタリング機器へのエネルギー供給技術、物理探査的モニタリング手法に関する発表が行なわれ、地中無線に関する今後の課題についての討議を行った。

・日時：2014 年 5 月 20 日～21 日

・場所：フランス・パリ

・参加機関
フランス：ANDRA、IGD-TP 代表（ANDRA）、AREVA、Senseor 社、Nidia Scientific Services 社
日本：原環センター、鹿島建設、坂田電機、東北大学（佐藤源之教授）、岡山大学（西垣教授）
フィンランド：VTT、
スペイン：Aitemin、ENRESA、
オランダ：NRG、
ベルギー：ESV EURIDICE GIE、
スイス：Nagra、
ドイツ：DBE-Tec、
英国：Galson Science、Strathclyde 大学、
チェコ：FSV、
イタリア：ENEA(Italian National Agency for New Technologies)、
ニュージーランド：T.P.H.

主な発表内容：
・地中無線について
原環センターと ANDRA の共同研究の内容紹介
スペイン・Aitemin による高周波地中無線モニタリング装置開発と原位置試験
フィンランド・VTT による地中無線開発状況
・地中無線の電源について
・物理探査手法について
主な議題：
・長距離通信について
・ネットワーク化について
・電源について

1)　概要紹介
会議では、原環センターよりワークショップの目的の紹介と挨拶を行い、これに引続き、欧州

共同研究 IGD-TP の代表 J. Delay 氏より IGD-TP と Horizon2020 の紹介、これらの中でのモニタリング共同研究（後述）の位置付け、本ワークショップの位置付けが紹介された。会議の状況を図 3.3.8-27 に示す。

図 3.3.8-27 ワークショップ会場全景

これに引続き、原環センターよりこれまでの原環センターと ANDRA との地中無線に関する共同研究の経緯と実施内容の概要を紹介した。　共同研究は 2005 年に始まり、現在までに 3 回の協定を締結している（表 3.3.8-2)。その中で開発した装置の例として振動弦型ひずみ計を装着した小型地中無線送信機を図 3.3.8-28 に示す。

表 3.3.8-2　原環センターと ANDRA による共研の概要

***The first stage of the collaborative development***

*2005:  Collaboration on wireless monitoring was initiated.*

*- Preliminary transmission test was performed.*

*- Monitoring in the TSF1001 borehole of the main MHM URL level (-490 m) was initiated.*

***The second stage of the collaborative development***

*2010: Specific agreement was updated.This agreement included;*

*- Long distance transmission performance test between the niche and the main MHM URL level,*

*-Transmission performance test of a miniaturized system, and*

*-Transmission towards a borehole-type receiving antenna.*

***The third stage of the collaborative development***

*2012: Specific agreement was updated with a technical scope.*

*-Sensor implementation in miniaturized transmission system*

*-Network transmission performance test*

*- Long distance transmission test*

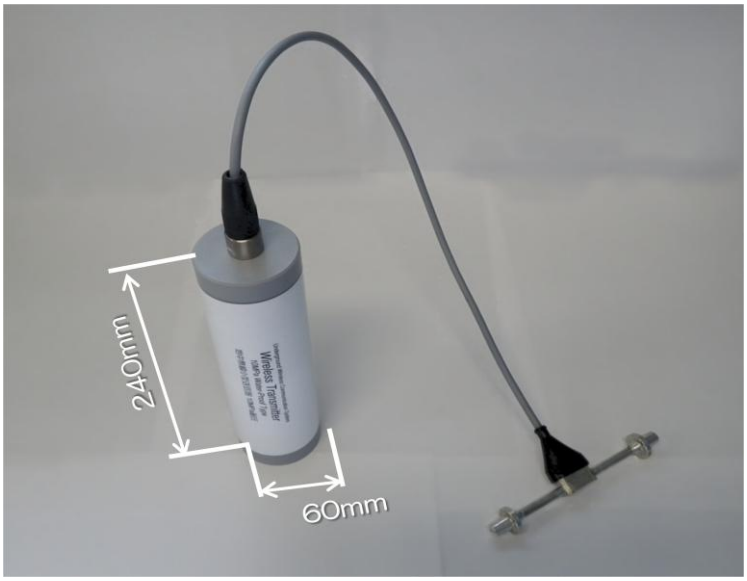



図 3.3.8-28　振動弦型ひずみ計を装着した小型地中無線送信装置

その後、地中無線の製作を行った坂田電機より小型地中無線送信装置のデモンストレーションが行なわれた。原環センターーANDRA 共研の紹介とデモンストレーションに対する質問として、小型地中無線送信装置に接続可能なセンサの種類、新規センサの接続には新規アダプタの開発が必要か、センサの駆動力は無線と共通としているか等の質問が寄せられた。これに対し、現在接続可能なセンサとその測定方式、データ出力方式について説明し、新規に接続するセンサのデータ出力形式等が、これまでにセンサ接続アダプタを開発したセンサと同様であれば新規のアダプタ開発は必要ないこと、センサの電源は無線送信装置と共用していることを回答した。

2) セッション１　最新技術

・東北大学における関連技術への取り組み

東北大学の佐藤教授より地中での電磁波の伝播に関する原理、地中レーダーと光ファイバセンサを組み合わせたモニタリング技術、無線センサネットワーク技術について発表が行なわれた。

地中での電磁波の伝播については、高周波では岩種の違いによる比抵抗や透磁性の違いが電磁波の減衰に大きな影響を与えるが、低周波では比較的小さな影響にとどまることが指摘された。

地中レーダーに関しては、発信装置からの電磁波の受信により光ファイバ内を通る光の波形を変える小型の受動的センサを、光ファイバ内に複数組み込んだものを受信装置とし、発信装置と受信装置の間の電気的特性の分布を測定する技術が紹介された。受信機は電力供給を必要としないこと、経時的にデータを取得することにより、地下水の浸潤状況等のモニタリングに適用できる可能性があるとのことであった。

地中無線センサネットワークは高周波を用いたセンサを特定の中心的な送受信装置を持たず、網の目状に接続するアドホック型と呼ばれるものであり、現在、ガス会社の検針用として開発しているとのことであった。特定の中心的な送受信装置を持つ場合には、この送受信装置が故障した場合、その装置につながる複数のセンサの情報を受信できないこととなる。このような中心的な装置を持たないことは、ネットワーク上のセンサや送受信装置が故障しても、故障していないセンサのデータは確実に受信できることにつながり、地層処分のモニタリングシステムに求められる頑健性を実現することとなる。一方で、各受信装置やセンサは互いの存在を定期的に確認し、ネットワーク構造を更新することとなるので、電力消費量の増加が懸念される。また、通信する情報量の増加は、原環センターが開発を進めている低周波の電磁波を用いたシステムには負担となる可能性が懸念される。

・圧電素子を受動的センサとして用いた地中レーダー技術

フランスの SENSeOR 社より、圧電素子を受動的センサとして用いた地中レーダー技術について紹介があった。

この技術では、電磁波による地中レーダーのターゲットとして圧電素子を設置しておくと、電磁波を受けた圧電素子が弾性波を発生させ、この弾性波がさらに圧電素子により電磁波を発生させることを利用しており、その結果、圧電素子が電磁波に対する反射装置として働いている。

この手法は地中レーダーによる地下の電気的な特性の違いによる不連続面のプロファイルの取得において用いられる。レーダーのターゲットである圧電素子は電源を必要としていないことが特徴の一つである。また、集積回路を必要としないため、耐放射線性が期待される。

・放射性同位体熱電気転換器

フランス・AREVA 社より放射性同位体熱電気転換器に関する紹介が行なわれた。

放射性同位体熱電気転換器は地中無線モニタリング装置の電源として期待される候補の一つである。この発表では、放射性同位体熱電気転換器の人工衛星等での電源としての利用と、地中無線の電源として放射性同位体熱電気転換器を用いる場合には、線源としてアメリシウムを用いる

ことが半減期の面で有力な候補であることが紹介された。

3) セッション２　ケーススタディー

・フィンランド、VTT における無線モニタリングの取り組み

フィンランド・VTT より、無線ネットワークを用いたモニタリングに関する取り組みが紹介された。

VTT では野積みされた鉱石の温度モニタリングのため、無線モニタリング技術を開発している。周波数は既存の RFID を利用するため、125kHz とし、電磁結合方式によりデータを通信する。

海水を媒体とした通信試験において、直径１ｍのループアンテナを用いたときの通信距離は 7m 以上、直径 20cm のループアンテナを用いたときの通信距離は最大 5m と報告された。また、鉄筋コンクリート中に設置された送信機からのデータを受信できたことが報告された。

・フランス、ムーズ・オートマルヌ地下研究所（MHM URL）におけるボーリング孔を用いた地中無線モニタリングの実施状況

フランス・ANDRA より、原環センターと ANDRA との共同研究として実施している、MHM URL におけるボーリング孔を用いた地中無線モニタリングの実施状況について報告された。このモニタリングの詳細は本項(2)の通りである。

・スペイン、Aitemin による短距離地中無線モニタリング

スペイン・Aitemin の García-Siñeriz 氏より、高周波の電磁波を用いた短距離の地中無線モニタリング技術について紹介された。本技術は、昨年度まで実施されていた欧州モニタリング共同研究 MoDeRn プロジェクトの成果の一部である。

この技術は、433 MHz、 868 MHz、2.4 GHz という高周波（UHF 帯）を用いた通信を行うものである。既存の通信機器を利用でき、ネットワーク化が容易に行えること、機器を小型化し易いことが長所として挙げられ、通信距離が短いこと（粘土質岩中で 3.5m、ベントナイト中で 5m のデータ通信が可能と発表）、通信に岩盤やベントナイト中の水分の影響を受けやすいことが短所である。

実際に制作された装置は直径 75mm、長さ 190mm の筒状の本体中に全圧計、間隙水圧計、水分計を内蔵し、外部にアンテナを伸ばした形状となっている。耐圧性については、具体的な数値は示されていない。

・ANDRA による EPG プローブによるモニタリング

ANDRA より、MHM URL 近郊で実施されたボーリング孔を用いた無線モニタリングについて紹介された。このモニタリングでは、ボーリング孔底部にセンサと無線送信機が設置され、無線送信機の上部はセメントでプラグされる。ボーリング孔のケーシングはセメントプラグよりも上部に設けられ、無線通信のガイドとして機能する。

4) セッション３　実施中及び予定する試験

・フランス、MHM URL における長距離通信試験

本年度、原環センターと ANDRA との共同研究として実施する予定である長距離通信試験につい

て、準備を実施した鹿島建設より発表した。本試験の詳細については、本項（3）の通りである。

・地中無線送信装置への新規センサの実装

小型地中無線送信装置に実装可能なセンサの種類と幌延 URL における人工バリア性能確認試験での使用予定について、原環センターより紹介した。これまでに接続を実施したセンサは、全圧計、間隙水圧計、水分計であり（表 3.3.8-3）、このうち全圧計、間隙水圧計を幌延 URL における人工バリア性能確認試験において使用している。

表 3.3.8-3　小型地中無線送信装置に接続可能なセンサの例

| Sensor Type | Manufacturer | Material | Pressure | temperature | Sensor Cable |
|---|---|---|---|---|---|
| Total pressure | Geokon 4800 | SS316 | 20MPa | 50°C | PVC |
| Pore pressure | Geokon 4500HT | SS316 | 10MPa | 50°C | PVC |
| RH humidity | Aitemin | Stainless steel | 5MPa (Hydraulic) | 50°C | Twisted shielded, Teflon jacketed |

□ For RH humidity with10MPa sensor is able to offer.

Pore pressure 4500HT Cell 133mmX19.1mm　Total pressure 4800 Cell 230mmX6mm　Total pressure 4820 150mmX12mm　Relative humidity SHT75-V3

・スーパーコンテナの実証試験におけるモニタリングシステム

ベルギーの ESV EURIDICE GIE の Lue Areias 氏より、スーパーコンテナ（の実証試験におけるモニタリングシステムについて紹介された。ベルギーの処分概念では、緩衝材としてセメント系材料を用いている。試験ではスーパーコンテナの長手方向及び円周方向の温度と歪みの分布を FBG 式の光ファイバセンサにてモニタリングする。

5)　総合討議

- 長距離通信について：原環センターと ANDRA は今年度、MHM URL にて約 500m の通信試験を実施予定であるが、これ以上の通信距離が必要かとの問いかけに対し、必要との意見は無かった。
- ネットワーク化について：スペイン・Aitemin では高周波を用いた無線システムにおいてネットワーク化を達成している。低周波無線においてもネットワーク化の必要性が指摘された。
- 電源について：
- 放射性同位体熱電気変換器は装置内部で放射性同位体を用いて高温部を作り出し、装置外部の低温部との間で温度差発電を行うものである。地中無線に必要な温度差は 200℃以上が目安との回答であったが、必要電力量と発電効率により見積もりを行う必要がある。また、内

部に発生した熱の多くは電力に変換されず、外部に伝わることとなるため、周辺への熱影響を考慮する必要がある。

- 電磁波による電源供給は大電力が期待しにくいため、無線装置側にキャパシタや蓄電池を備える必要がある。
- 装置の小型化について：原環センターの開発した小型無線送信装置は直径 6cm、長さ 23cm で 10MPa の耐圧性をもつものであるが、これ以上の小型化が必要かとの問いかけに対し、スペイン・Aitemin からは、十分との考えが示された。Aitemin による機器もほぼ同様の寸法であるが 3 種のセンサを内蔵しているため、原環センターの送信装置とは状況が異なっている。原環センターの送信装置は外部に 1 つのセンサを接続するものであるため、この点で改良の必要性があるものと考えられる。

## 3.4 まとめと今後の課題

### 3.4.1 まとめ

本章では様々な制約条件のもとに実施される地層処分に関するモニタリングの、技術的実現性を向上させることを目的とした検討を行った。はじめに技術の現状について概要を示し、その後、潜在的水みちの形成を抑制可能な技術である地中無線モニタリング技術の開発について述べた。

(1) モニタリング技術の概要

性能確認のためのモニタリング、及び操業時の安全性に関わるモニタリングに関する技術について、モニタリングパラメータごとに整理を行った。

処分場の構成要素の性能確認のためのモニタリングについては、MoDeRn にて実施したモニタリング技術の到達状況に関する報告書[1]等を用いた。これらの情報は、地層処分技術メニュー（第 4 章）に収録しているが、ここでは、各パラメータごとに、現地でのセンサによるモニタリング、サンプリングと室内分析によるモニタリングに分けて再整理を行った。また、併せて技術メニューの収録情報より物理探査的手法によるモニタリングについて記載した。

操業時の安全性に関するモニタリングについて、第 2 章にて抽出したパラメータごとに、モニタリング技術を整理した。操業時の安全性に関わるモニタリングは、基本的にアクセス可能な状態、機器の交換が可能な状態で実施されるものであり、既存技術にてモニタリング可能なものと考えられる。

(2) 地中無線モニタリング技術に関する調査

地中無線モニタリング技術については、昨年度実施した課題抽出を踏まえ、中継システムの多段化の検討、長期モニタリングのための電源の調査として放射性同位体熱電気変換器の適用に関する検討及び電磁波による地中無線モニタリング装置への給電に関する検討を実施した。さらに、日本原子力研究開発機構との共同研究である人工バリア性能確認試験及び坑道冠水試験への準備、フランス・ANDRA との共同研究である緩衝材膨潤挙動の長期モニタリングについて述べた。

1) 地中無線中継装置の多段化に関する検討

処分パネルでの地中無線モニタリングにおいて、測定個所（地中無線送信装置の設置個所）と

受信個所（地中無線受信機、受信アンテナの設置個所）の距離が長い時、地中無線中継装置が必要となる。送信装置と同様に中継装置をバッテリー駆動とした場合、現状の技術では、一度に中継できる距離は 30~50m 程度と見込まれる。これ以上の距離をデータ中継する場合、複数段の中継が必要となる。

本年度は、複数段の中継において必要となる技術の抽出と検討を行った。検討にあたっては、平成 25 年度に実施した中継装置への耐圧性付加に関する検討結果（機器の仕様等）を前提とした。具体的な検討としては、複数段の中継、最末端の中継装置での 10 台程度までの複数のセンサ付き小型送信機からのデータの受信を目標とし、省電力動作シークエンスの検討、単方向送信機の時計同期方法の検討、中継動作が複数段となった場合のシークエンス検討などを行った。

省力化のための回路見直し検討においては、回路全体を 4 つの機能（スリープ機能、測定機能、受信待機機能、送信機能）に分類して検討し、最も重要かつ消費電流量の多い機能である受信待機機能について、新たに低消費起動コード受信機能を開発することで、消費電流量を削減できることを示した。また、省電力動作シークエンスを検討し、送信装置 1 台当たりの運用時の消費電流量を 66%削減できる見込みを示した。さらに、受信待機の時刻は、送信装置や下位の中継装置からのデータ送信時刻をカバーしている必要があるが、長期間のモニタリングでは、各機器の内蔵する時計（RTC）の時刻にずれが生じ、適切な時刻に受信待機ができなくなる可能性がある。特に問題となるのは、中継装置にデータを送る小型地中無線送信装置は受信機能を持たないため、中継装置からの時刻データ送信による時計の同期を行うことができない点である。このための解決方法を検討し、中継装置または受信装置は送信装置から送られてきた時刻から予定時刻との差を記録し、次回受信時刻に反映する方法とする方法を提示した。また、併せて装置内の時計の高精度化のための方法を検討し、温度で発信周波数の変わる水晶の周波数誤差を温度測定値から RTC で補正する方法を候補として示した。

単一の中継経路でデータを送信装置から受信装置に送る場合、中継が複数段になり、経路に存在する装置の数が増えることにより、いずれか装置の故障が生じ、結果としてモニタリングデータを受信装置で受信できなくなる可能性が大きくなる。そのため、データを複数の中継経路で受信装置に送ることでデータ中継の冗長性を確保する方法を検討し、複数段に存在する中継装置を 2 つの系統で通信できるように配置することで、途中の中継装置が故障等により通信不能状態となった場合にも、受信装置からの指令により別系統に迂回させてデータを中継するため方法を提示した。また、装置の異常のうちソフト的要因によるものに対しては、WDT（ウォッチドックタイマ）による動作の監視を行い、WDT 自体を冗長化（2 重化）することで、不具合発生時の回復を図る方法を提示した。

最後に、これらの検討結果より中継装置の全体構成を検討・設計した。検討・設計した内容は、ハードウェア構成、動作概要、CPU プログラム動作、時刻管理である。

2)電磁波による電力供給に関する検討

現在の地中無線モニタリング装置（送信装置等）は内蔵バッテリーにより駆動しているが、その供与期間は 10 年程度であるため、例えば処分場の操業期間全体にわたりモニタリングを実施する際には、地中無線モニタリング装置に長期間電力を供給するための方法の開発が必要となる。本検討では、平成 25 年度の調査により有力と判断された手法の一つである、電磁波による電力

供給技術の検討を実施した。電磁波による電力供給技術としては、従来の電磁誘導よりも効率が良いとされる共振結合方式による電力伝送技術を対象に検討を実施した。

検討においては、はじめに電界共振結合方式と磁界共振結合方式の 2 つの手法を比較し、緩衝材の材料を介して電力を送電する場合は、磁界共振結合方式が適していることを示した。次に、緩衝材中に設置された小型地中無線送信装置の駆動電力を、処分孔直上の処分坑道内から送ることを想定し、1/3 のスケールで送電及び受電コイルを設計・製作した。今回の送電及び受電コイル間の電力伝送の効率が良い周波数を選定するため、送電及び受電コイルの効率を表すパラメータである Q 値の積を周波数を変えながら取得し、電力送信に用いる周波数を約 120kHz に決定した。

次に、これらの送受電コイルを用いて 1/3 のスケールでの給電試験を実施した。具体的には、送受電コイル間の相互インダクタンスを用いた評価試験と、実際に電力伝送を行う試験の 2 つを行った。送受電コイル間には緩衝材を模擬したベントナイトブロックを設置し、空気中とベントナイトの比較を行った。試験の結果、HLW 第 2 次取りまとめで示されている緩衝材の大きさや、緩衝材の材料（ベントナイト）を介しても電力を送受電することが可能であり、地層処分において地中無線モニタリング装置を適用した場合の電源の候補となり得ることが分かった。

3)放射性熱電気変換器による電力供給に関する検討

平成 25 年度の長寿命の電源に関する調査の結果、有力な候補の一つとして放射性同位体熱電気転換器（RTG）を選出した。しかしながら、RTG は内部に放射性同位体による熱源を持っているため、時間の経過とともに周辺に熱が伝播され、発電効率を低下させるとともに地中無線モニタリング装置に影響を与えることが懸念された。また、RTG は放射線の遮へいの観点で金属製部材等が使用されており、地中無線装置の電磁波による通信に影響を与えることが懸念された。このため、本年度は RTG を処分坑道内に設置された地中無線送信装置または中継装置の電源として使用することを想定し、無線装置の近傍に RTG を設置した場合の熱伝播が設置環境（坑道埋め戻し材）及び地中無線モニタリング装置に与える影響、電磁波の伝播特性に与える影響を検討し、放射性同位体熱電気転換器の配置方法に関する知見を整理した。

その結果、坑道埋め戻し材内に設置された RTG が地中無線送信装置を稼働させるのに必要な電気を出力でき、地中無線送信装置と RTG の組み合わせが地層処分において適用できる見込みがあることが分かった。

熱影響に関し、現在フランス地下研で実施している長期モニタリングに用いている地中無線送信装置で必要な電池出力 33W（RTG の温度差 100℃）を一つの目安として検討したところ、温度差 100℃を確保した場合には、埋め戻し材との接触箇所の温度は 165℃となった。埋め戻し材との接触箇所の温度を 100℃以下に抑えると、RTG の温度差は 50℃程度となった。この場合、二次電池等との組み合わせにより送信時に必要な電力量を確保することで、地中無線送信装置の電源として用いることができるものと考えられた。

RTG の電磁波影響に関しては、RTG が坑道内に存在すると、RTG 内部に磁束が生じ辛く、磁束密度は大きく減衰するが、その外側では磁束の回り込みが生じることにより影響が軽減される。RTG と地中無線装置の距離を 3.33m以上離すことにより、RTG を地中無線装置の電源として使用できる見込みがあることが分かった。

4)地中無線モニタリング技術の人工バリア性能確認試験への適用に関する検討

原子力機構の幌延 URL の深度 350m 研究坑道のうち試験坑道 4 で実施される人工バリア性能確認試験において、地中無線モニタリング装置（地中無線送信装置、地中無線受信装置、データ収録システムで構成）の適用を実施した。

はじめに地中無線モニタリング装置の設置位置及び設置方法の検討と、坑道内での通信確認試験を実施し、試験坑道 4 において、送受信間距離が 10～21m で、無線通信を行うのに十分な受信レベルを確認した。しかしながら試験結果の一部において、受信レベルが非常に小さな値を示す場合があり、その原因として、送受信器周辺の鋼製部材（他の計測器やロックボルト等）が電磁波の伝播を妨害している可能性が考えられた。そこで本試験結果から、安定した通信環境を確保するためには、受信アンテナの設置場所として坑壁から掘削したボーリング孔内が妥当であると判断した。

小型地中無線送信装置に土圧計または間隙水圧計を接続した装置を、緩衝材ブロックに 3 台（土圧計 1 台、間隙水圧計 2 台）、埋戻し材ブロック施工部に 4 台（土圧計 2 台、間隙水圧計 2 台）をそれぞれ設置した。次に地中無線受信装置について、受信器格納箱は計測小屋の側壁に枠を設置し、そこに固定した。受信アンテナは、プラグから 3m 程度離れた坑壁に水平に掘削した長さ 3m、直径 10cm のボーリング孔内に設置した。孔口からの距離は 0.6 m である。データ収録システムである PC は地上施設に設置した。受信装置から地上の PC へは LAN 経由で自動的にデータが送られる。

以上の設置作業後、計 7 台の無線送信器からの定期送信を受信し、無線通信を安定して行うための目安である S/N 比が 3 以上であることを確認した。

測定データは 2014 年 11 月 18 日分から受信されており、2015 年 2 月下旬までの各センサの計測データ（温度と間隙水圧、あるいは土圧）から、各センサにより所定の頻度（2 回/日）で計測が行われていること、さらにそれらのデータが所定の頻度（1 回/週）で通信されていることを確認した。一方で受信装置設置後、約 1.5 か月を経過したころから通信支障が発生し、データの一部が欠損していることが明らかとなった。ただし、1 回の定期送信で過去 4 週分のデータが重複して送信されるため、仮に通信支障が発生しても欠測データは補完される。通信障害の発生原因は、周辺の機器によるノイズレベルの上昇であると考えられた。

5)地中無線モニタリング技術の坑道冠水試験への適用に関する検討

原子力機構の瑞浪超深地層研究所において計画されている冠水試験において、地中無線モニタリング装置を適用するため、地中無線送信装置と受信アンテナの設置場所及び設置方向の選定のための通信確認試験、地中無線送信装置の設置作業を実施した。通信確認試験では、坑道内において送信器と受信器の位置や方向を変えながら、受信レベルを確認した。その結果から、地中無線送信器の設置場所を以下の通りに決定し、設置を実施した。

プラグが施工中であったため、地中無線受信装置（受信器格納箱、受信アンテナ）と PC は一度撤収し、坑道内に保管しており、無線によるデータ通信は行っていない。今後、プラグの施工が完了した後、再度、受信装置、及び PC の設置作業を行い、モニタリングを開始する予定である。

6)フランス ANDRA との共同研究実施状況

原環センターはフランスの ANDRA と地中無線モニタリング技術の適用拡大を目指し、共同研究を実施してきた。本年度の内容は、長距離地中無線送信装置の作製、緩衝材の膨潤挙動の長期モニタリングの継続、地中無線モニタリングワークショップの共催である。

緩衝材の膨潤挙動の長期モニタリングは MHM URL の深度 490m の坑道にて実施している。送信装置を坑道底盤から掘削されている TSF1001 ボーリング孔内に設置し、ベントナイトで埋戻し後、新たに掘削された TSF1002 ボーリング孔内に受信装置を設置し、ボーリング孔間の長期モニタリングを実施している。モニタリングの開始は 2011 年 8 月 31 日であり、現在までの約 3 年半にわたり、全圧、間隙水圧、温度、バッテリー電圧を継続的に測定し、地中無線モニタリング装置が問題なく稼働していることを確認している。

長距離地中無線送信装置は、フランス、MHM URL での地表面と地下主要坑道間（約 490m）における長距離伝送の実現可能性を調査する試験に用いるものである。この装置の設計要件については、平成 25 年度に解析的検討を実施し、同年に幌延で適用した中継システム用送信装置の 2~3 倍程度の出力が必要であることが示された。よって、本年度は上記の性能確保に向け、送信アンテナ等の設計及び製作を実施した。送信アンテナの設計では、アンテナの同調ユニットの耐圧の向上などにより、出力電流の向上を図った。また、アンテナサイズを大型化し、磁気モーメントの増強を図った。長距離送信試験用機器であるパワーオシレータ（高出力発振器）ユニット、抵抗・コンデンサユニット、長距離送信用地中無線送信機本体、長距離送信用地中無線送信アンテナ、地中無線送信アンテナ用脚部（坑道に鋼製部材がある場合に、離間距離を確保するためのもの）及びボアホール対応受信アンテナを製作した。製作した装置を用いた長距離通信試験はフランス・ANDRA により、2015 年に実施される計画である。なお、本検討は ANDRA の費用分担により実施した。

2014 年 5 月に“Workshop on Wireless Monitoring through rock”と題して、フランスのパリでワークショップの開催を実施した。　本ワークショップでは、原環センターと ANDRA との地中無線に関する共同研究の成果を周知するとともに、他の地中無線モニタリング技術、無線モニタリング機器へのエネルギー供給技術、物理探査的モニタリング手法に関する発表が行なわれ、地中無線に関する今後の課題についての討議を行った。討議では、長距離通信については上記の約 500m の通信試験で十分であること、地中無線中継装置の多段化（ネットワーク化）が必要であること、長期モニタリングのための電源開発が必要であり、RTG が有力な候補であること、電磁波による電源供給は大電力が期待しにくいため、無線装置側にキャパシタや蓄電池を備える必要があること等が指摘された。

### 3.4.2　今後の課題

(1)モニタリング技術全般

地層処分における性能確認モニタリングに関しては、MoDeRn(2012) [1]により、下記の技術的課題が指摘されている。

- 複数のバリアへの損傷または擾乱を避ける。

- 過酷な環境（温度、湿度、放射線、誘発ストレス）で効果的かつ精度良く機能すること。
- 安全性の根拠が長いタイムスケールにわたった非常に小さな変化に関わっている。そのなかで要求される精度を達成する。
- 選択された場所からのモニタリング情報が明らかに代表的な情報であること。
- 想定される特に長いタイムスケールにわたるモニタリングシステムの信頼性と耐久性。
- バリアの擾乱なしで現場のセンサにアクセスするのが不可能である。
- センサ故障を識別するための基準・方法を定義する必要がある。

原環センターでは、このうち、複数のバリアへの損傷または擾乱を避けること、及び想定される特に長いタイムスケールにわたるモニタリングシステムの信頼性と耐久性を確保することを現時点で取り組むべき課題として重視し、地中無線モニタリング技術の開発を実施している。

なお、操業時の安全性に関わるモニタリングは、基本的にアクセス可能な状態、機器の交換が可能な状態で実施されるものであり、既存技術にてモニタリング可能なものと考えられる。

(2)地中無線モニタリング技術

地中無線モニタリング技術の開発に関しては、現段階で取り組むべきと判断された主要な課題として、処分施設の埋め戻しに対応した送信距離の長距離化と長寿命化が挙げられる。また、開発した技術の地下研究所等での実証が必要である。

原環センターでは、長距離化については、送信装置からのモニタリングデータを複数の中継装置により中継して受信装置に送る技術を有力視して開発を実施している。これは、一度に長距離を送信する技術よりも小さな電力で駆動可能な装置による技術であり、そのため、バッテリー等の電源での運用が相対的に容易であるためである。

地中無線の中継技術に関する課題として、故障に対する冗長性の確保が挙げられる。単一の中継経路でデータを送信装置から受信装置に送る場合、中継が複数段になり、経路に存在する装置の数が増えることにより、いずれか装置の故障が生じ、結果としてモニタリングデータを受信装置で受信できなくなる可能性が大きくなる。また、長寿命化に関連し各装置の消費電力量を低減する必要がある。このため、本年度複数の経路にて中継可能なシーケンスやソフトウェア的故障への対処方法、消費電力の低減方法を検討し、設計を行ったが、実機を製作して機能が確保されていることを確認する必要がある。

地中無線モニタリング装置の長寿命化に関しては、装置の消費電力の低減と合わせ、電源の長寿命化が中心的な課題である。電源の長寿命化に関しては、平成 25 年度に幅広く文献調査を実施し、その結果、電磁波による電源供給と RTG を有力な候補とした。これを受け、本年度それぞれの方法について検討を実施した。

電磁波による電源供給に関し、本年度は、竪置き処分孔内の緩衝材に設置された小型地中無線送信装置への電力供給を想定した検討を行い、基本的な適用可能性を確認したが、今後は、処分坑道端部のプラグにおける詳細な適用性を確認する必要がある。これは、地中無線モニタリング装置を適用する必然性の高い個所は、ケーブルによる水みちの形成を防ぐことが重視される個所であり、これが緩衝材と（止水性能が期待される）プラグであるためである。また、今回の適用性の確認では、試験施設の制限により 1/3 スケールでの検討であったため、規模の大きさの影響

を検討する必要がある。さらに、相互インダクタンスを利用した伝送効率の評価方法については、事前試験の段階では利用できると評価しており、また、この手法は他分野でも一般的になりつつある。しかしながら、今回、本試験にて相互インダクタンスの測定結果から求めた最大効率と、給電試験による伝送効率の測定結果には、有意な差がみられた。この要因については、引き続き検討が必要である。

RTG による電力供給については、今回、埋め戻された処分坑道でのモニタリングに対する基本的な適用性を確認したが、現在の RTG は装置が大きいため、処分孔でのモニタリングには不向きである。また、RTG の使用は、処分場への放射性物質の持ち込みを意味するため、安全評価等が必要である。

地下研究所での技術の実証については、フランス・ANDRA との共同研究として実施してきた一連の通信試験、長期モニタリングに加え、本年度は原子力機構との共同研究として幌延 URL 及び瑞浪超深地層研究所での地中無線モニタリングシステムの適用を開始した。このうち、幌延 URL では人工バリア性能確認試験における緩衝材及び坑道埋め戻し材の挙動のモニタリングを開始し、データの継続的取得を実施している。この中で、周辺の機器からの電磁ノイズが一時的に上昇し、一部の地中無線モニタリングデータの欠損が見られた。地中無線送信装置は測定したデータを内部に一定回数分保管し、これを定期的に送信するが、今回は送信の頻度（1 回/週）よりも長い期間（約 1 カ月）のモニタリングデータを送信機内に保管し、一つのデータを複数回（4 回）の送信で繰り返し送る設定としたため、データ欠損を補うことができた。地中無線モニタリングシステムの設計においては、このような冗長性の確保と通信回数の増加等による消費電力の増加のバランスをどのように取るかが、適用事例ごとの課題である。

第 3 章参考文献


[1] MoDeRn:State of Art Report on Monitoring Technology、 http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/、 (2013)

[2] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連、処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）モニタリング技術の開発 (2013).

[3] MoDeRn:Case study final report、 http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/、 (2013)

[4] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成２５年度地層処分技術調査等事業　処分システム工学確証技術開発（第 3 分冊）モニタリング関連技術の整備（2014）

[5] Posiva:Monitoring at Olkiluoto-a Programme for the Period Before Repository Operation、 Posiva 2012-01、 (2013)

[6] エプソン水晶デバイス http://www5.epsondevice.com/ja/quartz/.

[7] ZigBee SIG ジャパン： ZigBee メッシュネットワーク技術概説、 http://www.zbsigj.org/zigbee_mesh_network.

[8] 安藤繁、田村陽介、戸辺義人、南正輝 : センサネットワーク技術、東京: 東京電機大学出版、 2007.

[9] 寺田真行：無線マルチホップネットワークにおける自律分散経路制御に関する研究、東京大学電子情報学専攻博士論文、2008.

[10] 山田茂: ソフトウェア信頼性評価技術 : 理論と応用、日本信頼性学会誌、巻 20 号 7、pp455-462、 1998.

[11] 日本電波工業株式会社：第 1 章 OCXO ではない、超ハイレベルの TCXO、 http://www.ndk.com/jp/ad/beyond/001/index.html.

[12] 居村岳広、堀洋一、電磁界共振結合による伝送技術、電気学会誌 Vol.129 No.7 pp.414-417、 2009

[13] A. Kurs、 A. Karalis、 R. Moffatt、 J. D. Joannopoulos、 P. Fisher、 and M. Soljacic、 “Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances.、” *Science*、 vol. 317、 no. 5834、 pp. 83–6、 Jul. 2007.

[14] 長井千明、安藤賢一、田中達也、渡辺和哉、居村岳広、堀洋一、磁界共鳴式無線給電を利用したモニタリングに関する検討、日本原子力学会 2014 年秋の大会、2014

[15] 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

[16] 遠井敬大、金子裕良、阿部茂、非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現、電気学会 D 部門 モータドライブ研究会、2011

[17] M. Kato、 T. Imura、 and Y. Hori、 “New characteristics analysis considering transmission distance and load variation in wireless power transfer via magnetic resonant coupling、” in Intelec 2012、 2012、 pp. 1–5.

[18] 電気学会、 「電磁気計測」
[19] http://www.covalent.co.jp/jpn/rd/detail_06.html
[20] http://www.packing.co.jp/GOMU/syuyougomu_teisuuhyou.htm
[21] http://www5f.biglobe.ne.jp/~takagiss/pdf/SU-50B.pdf
[22] http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator
[23] http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01010.htm
[24] 日本原子力研究開発機構：幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第 1 段階)研究成果報告書 分冊「深地層の科学的研究」JAEA-Research 2007-044、March 2007
[25] 日本原子力研究開発機構：資料 14-4 幌延深地層研究計画、―平成 24 年度までの進捗と今後の展開―、第 14 回 深地層の研究施設計画検討委員会、2013 年 3 月
[26] 日本原子力研究開発機構：深地層研究計画の状況 -地下施設整備の工事状況-、http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/shisetsuseibi_kouji.html
[27] 柳澤孝一、武田精悦、茂田直孝、仙波毅、須山泰宏、戸井田克、高瀬博康、西垣誠、地質環境特性を対象とした不確実性解析の方法論－東濃地域を対象とした適用性検討－、日本地下水学会誌、第 48 巻、第 3 号、Page149-167(2006.08)
[28] 三枝博光ほか：超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階（第 1 段階）研究成果報告書、JAEA-Research、2007.
[29] 日本原子力研究開発機構：資料 14-3 超深地層研究所計画―第 1 段階の予測結果と第 2 段階における検証状況及び今後の計画―、第 14 回 深地層の研究施設計画検討委員会（平成 25 年 3 月 15 日）、2013.
[30] 独立行政法人日本原子力研究開発機構：日本原子力研究開発機構の改革計画に基づく「地層処分技術に関する研究開発」報告書-今後の研究課題について-、2014 年 9 月
[31] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 24 年度地層処分技術調査等事業高レベル放射性廃棄物処分関連、処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）モニタリング技術の開発 (2013).
[32] P.C.Robinson and N.S.Cooper：MUNVAR Project、 nuclear science and technology、European Commission、 EUR 16174EN、 1995.
[33] T.L.Saaty：The Analytic Hierarchy Process、 Mc GRAW-HILL INTERNATIONAL BOOK COMPANY、 1980.

# 第4章　記録保存に関する調査

## 4.1 目的と概要

本調査の目的は、高レベル放射性廃棄物の地層処分における記録保存について、その目的、具体的方策及び技術的可能性を検討し、国及び関連機関等が地層処分に対する社会的信頼性の向上につながる計画を策定する際の判断材料を整備するものである。

我が国の記録保存方策、特に制度的管理としての記録保存に関して、総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会の「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究（平成 22 年度～平成 26 年度）」[1]において「廃棄物埋設地は、生活環境から隔離され、長期的な制度的管理に依存しなくても安全性が維持されるよう閉鎖されることが必要である一方で、閉鎖後の制度的管理は、廃棄物への不注意な干渉など、人間活動の発生可能性を低減し、安全性や地層処分の社会的受容性を高めるものと考えられる。具体的な制度的管理として、処分に関する記録の保存、処分施設及び敷地の管理、土地利用制限、閉鎖後のモニタリング、マーカーの利用が考えられており、これらについての意義や位置づけ等について検討する。」として「種々の管理やモニタリングのあり方に関する基本的考え方の整理」をすることとなっており、本調査はこのような制度的管理の一環としての記録保存に関する意義の検討材料となるものである。

本年度は、放射性廃棄物の処分における記録保存に関する動向を、海外の記録保存に関する最新の考え方、方策及び技術の調査として下記を実施した。

① OECD/NEA における検討状況（継続調査）
② 石英ガラス内部へのデジタルデータ記録技術

## 4.2　OECD/NEA の検討状況の調査・整理

昨年度に引き続き、OECD/NEA-RWMC（経済協力開発機構原子力機関-放射性廃棄物管理）が検討している Records, Knowledge and Memory（RK&M）プロジェクトに関する最新公開情報の内容を調査・整理した。調査にあたっては、平成 24 年度及び平成 25 年度の調査内容（原環センター, 2013, 2014）[2]、[3]を踏まえ、重複を避け、下記を実施した。

① 最新主要報告書の調査
② プロジェクト状況の調査

### 4.2.1　主要報告書の調査

OECA/NEA の RK&M プロジェクトからは、昨年度末より、いくつかの取り纏め報告書が作成・公開されている。本年度は、これらのうち、本検討に有用な主要報告書の内容の整理を行った。

① Literature Survey on Markers and Memory Preservation for Deep Geological Repositories（OECD/NEA-RWMC, 2013、以下、「マーカーに関する文献整理」と称する）[4]

② Loss of Information, Records, Knowledge and Memory – Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal（OECD/NEA-RWMC, 2014a、以下、「記録の喪失に関する検討」と称する）[5]

③ Markers - Reflections on Intergenerational Warnings in the Form of Japanese Tsunami Stones（OECD/NEA-RWMC, 2014b、以下、「津波石碑の考察」と称する）[6]

④ Monitoring of Geological Disposal Facilities: Technical and Societal Aspects（OECD/NEA-RWMC, 2014d、以下、「モニタリングと記録との関連」と称する）[8]

(1) マーカーに関する文献整理

本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2013）[4]は、2008～2010 年にスイス連邦エネルギー局（BFE）の委託により、原子力安全検査局（ENSI）の Marcos Buser を中心としたグループにより作成された文献の改訂英語版である。

スイスでは、2000 年ごろ、専門家グループ“放射性廃棄物に関する概念”（EKRA）が国内の廃棄物管理プログラムに関する概念的基盤を提案したが、この際、同グループは、廃棄物サイトのマーカーに関する研究を開始すること、また同時に、このような技術的及び社会的に非常に複雑な分野において、規制機関の支援により独立した研究プログラムを実施することも勧告し、2003 年原子力法として立法化された。

この法律に基づき、BFE は、地層処分場のマーカープログラムの最新状況に関する文献調査を実施する決定を行い、オリジナル（独語）の報告書が作成された。

1) 本報告書の目的

本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2013）[4]の目的は、主として、放射性廃棄物処分に責任を有する様々な組織、国家機関、及び関心を有する公衆に情報を提供するように、また、テーマの複雑さ及び将来対処しなければならない多様な問題を伝達することにある。このため、本問題に関して、「直接利用可能な解決策を提供しようとしているものではない」とされている。

この目的のもと、1990～2000 年代を中心にマーカーの概念、実施あるいは要件等に関する技術報告書、学術論文、国の規制等を調査し、マーカーシステムに関連する下

記の課題や問題点が整理され、特に議論が必要な課題に関して検討が実施されている。

① マーカーに関する基本的な課題
② 人間及び社会に関する問題点
③ 地表環境及び地下空間
④ マーカーと構造物
⑤ 経時的な情報伝達
⑥ マーカーシステムの喪失に対する感受性

以下に上記①～⑥の概要を整理する。

2) マーカーに関する基本的な課題

調査の結果、全ての文献でマーカーには、警告機能を有すべきであるとされている。加えて、複数の文書類では、処分場の認知を維持するためには“記憶の文化（memory culture）”の必要性も言及されている。

一方、文書によっては、遠い将来への警告の伝達は、将来の取扱いに（従来とは異なる）新機軸が必要となること、さらに、警告の伝達には非常に大きな構造的かつ経済的な課題を有する可能性があることが示唆された。特に、この情報伝達の難しさは、閉鎖的地域社会の周辺や変化した状況下において特に顕著となるとの意見があった。

3) 人間及び社会に関する問題点

様々な文書で、将来の誰に向けて警告すべきかに関するアイディアが提示されている。また、マーカー設計に関し、記憶の保存を維持すべき期間については、ある程度のコンセンサスがあり、一般的な見解としては、凡そ 10,000 年間であった（ただし提案されている期間の根拠はほとんど明示されていない）。

報告書の本文では、マーカープログラムを検討する際の考慮事項として、処分場への侵入に対する動機についての分析がなされている（表 4.2.1-1）。

さらに、調査文献より、人間侵入の潜在的なシナリオの分析を行い、その侵入低減措置の提案を行っている（表 4.2.1-2、ただし、先述のように本報告書は、直接利用可能な解決策を提供するものではなく、「将来世代は、処分場のマーカーに有効性を見出すか否かという問いに対する明確な答えはない」としている）。

4) 地表環境及び地下空間

マーカーに関して予測される時間枠における地表環境の変化について、多くの文書では、情報の耐久性及び安定性の問題が言及されている。このため、本報告書では、この問題に関し、適切な材料の選定や開発課題が議論された。この際、処分場は忘却されるべきか（すなわち、地表から隠される又はカモフラージュされるべきか）どうかについても議論された。

5) マーカーと構造物

多くの文書では、地表設置されたマーカーの耐久性は、気候的又は社会的な要因によって左右されることから、情報伝達が困難にならないためのシステム及び防護策の必要性について言及されている。この解決策として、複数の文書では、侵入リスクの低減化策として、処分場と地表の間のマーカー設置の必要性が強調されている。

この点に関して、文献整理結果から、長期リスク考察の視点から見たマーカー技術の要件が整理されている（表 4.2.1-3）。

なお、すべての文書で、マーカー単独での処分場への侵入阻止は困難であるとの結論に達している。

6) 経時的な情報伝達

知識の保存のための能動的措置が必要なことは、一般に合意されているものの、その伝達方法については、統一的な見解はみられない。

文献によっては、言語及び文字を介した情報伝達の技術及び問題点について議論しているものの、記号論的な伝達が優位であるとの見解もなされていない。

7) マーカーシステムの喪失に対する感受性

情報が喪失することは広く認識されている。本調査において、意識的及び無意識な行為を通じて、情報が損失する多くのエラー源が存在することが分かった。特に、歴史的な分析により、中央集権化されている際には、情報管理が意図的に操作され得る。

表 4.2.1-1　放射性廃棄物処分場への侵入に関する潜在的リスク・シナリオとマーカープログラムの防護要因の概要[4]

| リスクのタイプ | | 行動の駆動力又は非行動の理由 | リスクの認知 | | 実現の形態 | 侵入に対するマーカープログラムの防護要因（効果） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 強欲 | 非情な私的利益志向（投機的投資家：証券取引所や宝探し、リスクタイプ 4 参照） | 低傾向 | 利益志向が支配的なためリスク認知に強く影響 | 有用物質の取得を目的とした、暴力的かつ意図的な略奪 | 駆動力（動機）が、考えられる予防措置や事前プログラムを上回るので、効果は小～最小。マーカーの破壊 |
| 2 | 困窮 | 物質的に耐え難い生活状況の軽減（第三世界諸国の貧困：医療用放射線源の窃盗） | 最小 | 困窮状況では無視小 | 困窮改善のための有用物質の取得を目的とした、暴力的略奪 | 困窮が処分場からのリスクよりも脅威と考えられるので、効果は小～最小。地表近傍のマーカー破壊の可能性 |
| 3 | 好奇心 | ニーズを満たすことによる駆動力の充足：個人的使用のための知識の私有（研究者：考古学） | 中～高 | 支配的な個人的嗜好内容に依存 | 地下環境及び処分場への意図的な侵入の可能性 | 特に地下でマーカーの効果は比較的大 |
| 4 | 利益の最大化 | 廃棄物など、定置された、経済的価値がありそうな物質の回収（財宝探求者：沈没船からの金銀及び日用品の回収） | 小～大 | プロセスが連成しているかどうかに依存 | 処分場への意図的な侵入。侵入のコストが実施の経済的成功を決定 | 特に地下構造物に関してマーカーの効果は比較的大 |
| 5 | 責任感 | 漏洩処分場による危険を回避（浄化プログラム：スイスの有害廃棄物処分サイトのデコミショニング） | 高 | 危険に関する知識は良好である可能性 | 処分場への意図的な侵入。健康リスクと侵入コストの比較 | 特に地下構造物及び処分坑道に関してマーカーの効果は大 |
| 6 | ヘロストラティズム、わがまま、ファナティシズム | ニーズを満たすことによる駆動力の充足：破壊目的や人に危害を与える目的での有害物質の私有（テロリズム） | 高 | 破壊的結末をもたらす目的のため、意図的に危険の源を探索 | 有害物質の獲得を目的とした、意図的で、恐らく素早く、かつ暴力的な侵入 | 特に地下構造物及び処分坑道に関してマーカーの効果は大 |
| 7 | 関心の欠如 | 危険の源に対する絶対的な無関心、危険の完全なブランクアウト | 最小 | リスクは認知されない、又は、軽視傾向 | 地下環境の探査の場合のみ、侵入のリスク | マーカーの効果は恐らく限定的 |
| 8 | 怠慢 | 危険の源に対する無関心、危険の完全なブランクアウト | 最小 | リスクは正しく認知されない | 地下環境の探査の場合のみ、侵入のリスク | マーカーの効果は恐らく限定的 |
| 9 | 無知 | 潜在的危険に関する知識の喪失及び危険を認識するノウハウ及び可能性の喪失、地下環境の探査及び利用の可能性あり | リスク認知無 | 危険の源が知られないため | 地下環境の探査の場合に侵入リスク | マーカーの効果は恐らく限定的 |
| 10 | 連成プロセス(例えば、無知と好奇心) | 利益の再調整及び危険の評価の可能性 | 最小～大 | シナリオに依存 | 地下環境の探査の場合に侵入リスク | マーカーの効果は変化 |

**注記**　参考文献は、OECD/NEA-RWMC（2013）を参照のこと。

表 4.2.1-2　放射性廃棄物処分場への侵入に関する潜在的リスク・シナリオと必要な技術、及び可能性のある予防措置の概要[4]

| 侵入シナリオ | | 参考文献 | 動機 | 必要な技術 | 予防措置 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 経済的理由による、処分場への意図的でない掘削。鉛直方向又は側面からの貫入。(動機：例えば、ガス探査 Forest Oil Weiach 2004、石炭層 Permo-Carbon トラフ開発、水（Zurzach）、地熱、塩採掘） | Kaplan 1982, S.3; HITF 1984, S. 4; Hora et al. 1991, S. IV-9; Posner1990,S.44 | 原材料、水の探索；処分場の場所又はその危険性の忘却 | 1900 年からの回転掘削（spindle top 1901） | 地表近傍（浅地）マーカー |
| 2 | 貯蔵施設（ガス、石油）、トンネル（例えば、スイスメトロ）又はその他の地下構造物の意図的でない建設。鉛直方向又は側面からの貫入 | Kaplan 1982, S.3; Hora et al. 1991, S. IV-10; Benford et al. 1991, S. 20; Tolan 1993,S. 21 | 貯蔵容量の探索；処分場の場所又はその危険性の忘却 | 1900 年からの掘削技術<br>1900 年からの採鉱技術<br>1870 年からのトンネル技術 | 地表近傍、アクセス立坑及び処分場でのマーカーが可能。処分場周辺外の場合は、マーカーを用いた予防措置は困難 |
| 3 | 液体廃棄物（$CO_2$隔離、液体廃棄物、など）の意図的でない注入 | Hora et al. 1991, S. IV-10; NEA 1995, S. 57; Tolan 1993, S. 21 | 貯蔵容量の探索；処分場の場所又はその危険性の忘却 | 1900 年からの回転掘削（spindle top 1901） | 地表近傍マーカー |
| 4 | 新しい兵器システムを試験するための、処分場又はその周辺への意図的でない掘削（例えば、1957 年 7 月からの Nevada Test Site での地下核実験） | Hora et al. 1991, S. IV-12, IV-24; NEA 1995, S. 57; Tolan 1993,S.21 | 試験サイトの探索；処分場の場所又はその危険性の忘却 | 1900 年からの回転掘削（spindle top 1901） | 地表近傍マーカー |
| 5 | 新たな廃棄物を定置するための、処分場の意図的な開放 | Hora et al. 1991, S. IV-10, IV-16 | 処分場の拡張又は再利用 | 20 世紀の採鉱技術 | 有効な予防措置なし。あるいは、地表近傍、アクセス立坑及び処分場でのマーカー |
| 6 | 有価物（銅、鋼、など）を回収するための、処分場の意図的な開放 | HITF 1984, S. 3; NEA 1995,S.57 | 資源のリサイクリング | 19 世紀の採鉱技術 | リサイクルできない材料（例えば、セラミックス）だけを使用。追加のマーカー（地表、深部） |
| 7 | 新たな空間計画評価又はリスク考察（浄化の必要なし）による、廃棄物インベントリの意図的な回収 | AEN 2002 | 処分場又はその一部の解体 | 20 世紀の採鉱技術 | 地表近傍、アクセス立坑及び処分場でのマーカー |
| 8 | 地下環境を浄化するための、廃棄物の意図的な回収 | AEN 2002 | 処分場又はその一部の解体 | 21 世紀の採鉱技術 | 地表近傍、アクセス立坑及び処分場でのマーカー |

| 侵入シナリオ | | 参考文献 | 動機 | 必要な技術 | 予防措置 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | |
| 9 | 社会に危害を加える（焦土作戦）ための、処分場への意図的な掘削 | HITF 1984, S. 3; NEA 1995, S.57 | ヘロストラティズム／ファナティシズム（テロリズム） | 1900 年からの回転掘削（spindle top 1901） | 有効な予防措置なし。 |
| 10 | 繰り返し（repetition） | HITF 1984, S. 3; NEA 1995, S. 57 | | | |
| 11 | 考古学的な探査又は地下研究 | Hora et al. 1991, S. IV-11, IV-23; NEA 1995, S. 57; Tolan 1993, S. 21 | 歴史的好奇心（宝探し）、地下探索 | 19 世紀の採鉱技術 | 有効な予防措置なし。あるいは、地表近傍、アクセス立坑及び処分場でのマーカー |
| 12 | 水力的短絡（hydraulic short-circuit）のある処分場近傍の地下の、意図的でない探査 | HITF 1984, S. 3; Tolan 1993, S. 21 | 天然資源、水の探索；処分場の場所又はその危険性の忘却 | 1900 年からの回転掘削（spindle top 1901） | 処分場ペリメータ外ならば、マーカーによる予防は困難 |
| 13 | 処分場への影響がある、地表での建設（例えば、大型ダム） | Hora et al. 1991, S. IV-12, IV-25 | 水供給、エネルギー生成、灌漑 | 20 世紀のダム技術 | 地表近傍マーカー |

**注記** 参考文献は、OECD/NEA-RWMC（2013）を参照のこと。

表 4.2.1-3　長期リスク考察の視点から見たマーカー技術[4]

| 構造的マーカー技術 | | 目的 | 耐久性 | リスク・シナリオ | マーカーに関する要件 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 地表(地上)の構造物 | 警告及び記念碑の場所として、処分場の上方の地表をマーカー | 維　　持：最大>2000 年（Pont du Gard（ポン・デュ・ガール）、Pantheon Rome（パンテオン；ローマ）、Porta nigra Trier（ポルタ・ニグラ；トリーア）、など）<br>維持せず：<250 年 | 有価物（例えば、建設資材に使用可能な切出石(hewn stone)、タイル）の回収 | 記念碑的でない構造物、建設資材に使用可能な切出石は不使用、価値のない材料でできた壁 |
| 2 | 地表下の構造物 | 将来の考古学者向けに、地表又は地表下に処分チャンバの複製（処分場情報）を設置 | 維　　持：最大>2000 年（Catacombs Rome（カタコンベ；ローマ）、Eupalinus water tunnel（Eupalinus 水トンネル）、Pythagorion Samos（ピタゴリオ；サモス島）、など）<br>ｱｽﾌｧﾙﾄｼｰﾘﾝｸﾞ：最大>2000 年 | 保守の欠如による崩壊 | 価値のない材料でできた安定な壁、注意深いシールの施工、など |
| 3 | 地表下に埋設された物体（<2 m） | 警告シグナル | 岩石／ｻｲﾚｯｸｽ　：>百万年<br>ﾃﾗｺｯﾀ　：>10,000 年<br>ガラス　：数千年<br>金属　：<1000 年(天然金属を除く) | 骨董品への関心 | 同一の警告及び手段（警報又は無線トークン）を備えた非常に大きなボリューム内の、人目を引かない（魅力のない）同一の物体（例えば、テラコッタ、特殊セラミックス） |
| 4 | 立坑区域及びアクセスギャラリ（例えば、円形ギャラリ）内のマーカー物体 | 解体の制御機能、警告機能 | 特殊ｾﾗﾐｯｸｽ/ﾃﾗｺｯﾀ：>10,000 年<br>ガラス　：数千年<br>その他(金属)　：<1000 年（天然金属を除く） | 骨董品への関心 | 同一の警告及び手段を備えた非常に大きなボリューム（例えば、無線トークンを備えた 2 m 毎の環状マーカー）内の、人目を引かない（魅力のない）同一の物体（例えば、特殊セラミックス） |
| 5 | 処分チャンバ又は坑道（概念に依存） | 解体の制御機能、警告機能 | 特殊ｾﾗﾐｯｸｽ/ﾃﾗｺｯﾀ：>10,000 年<br>ガラス　：数千年<br>その他(金属)　：<1000 年（天然金属を除く） | 骨董品への関心 | 定置技術用に特別設計された、立坑区域内のマーカー物体と同じもの |
| 6 | 処分コンテナ及び恐らく反射体 | 警告機能 | 鋼製コンテナ　：<10,000 年(?)<br>銅製コンテナ　：100,0001 年(?)<br>その他の材料　：(?) | 資源への関心／有価物の回収 | 特殊セラミックス又はその他の価値のない材料を用いた、処分コンテナのマーカー |
| 7 | 化学マーカー | 警告機能 | 未知 | 資源への関心（考え難い） | 耐久性の明確化、化学的警告マーカーの製造 |
| 注記　マーカーシステムは人目を引かない（魅力的に見えない）ほど、長期間損なわれないままである可能性が高くなる。<br>なお、廃棄物処分区域内のマーカーのために提案された幾つかの材料（ラバーマット、建設資材に使用可能な切出石(hewnstone)；例えば Tolan 1993（SAND91-7097）, National Security Technologies 2007 を参照）は、安全性の理由から、本研究では排除している。 | | | | | |

**注記**　参考文献は、OECD/NEA-RWMC（2013）を参照のこと。

(2) 記録の喪失に関する検討

本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014a）[5]は、NEA プロジェクトを実施するための参考情報として、スイス、米国及びドイツにおける埋立地並びに有害廃棄物の旧工業用地又は処分サイトの事例を参考に情報の喪失に係る調査・整理が行われている。調査内容を表 4.2.1-4 に整理した。

また、情報の調査・整理結果から、情報、記録、知識及び記憶の喪失に関する共通の主要要因が特定されており（表 4.2.1-5）、各事例との対照も行われた（表 4.2.1-6）。

本研究（OECD/NEA-RWMC, 2014a）[5]から得られた結論としては、下記の通りとされた。

- 廃棄物処分に関する全ての情報が喪失することは稀であるが、細部が最初に失われる傾向にある。
- 多くの記録は、不十分なデータを用いて作成され、一旦失われると記録を再構築することは非常に困難である。
- 知識の喪失に関して重要と考えられる主要要因は次のように定義され、各々の下に総計 18 のサブ要因が特定された（表 4.2.1-5）。
    - ・技術的／環境的要因
    - ・経済的要因
    - ・人的要因
    - ・構造的要因
    - ・法規制
- 特定された 18 の要因と 21 事例とが対照し分析された（表 4.2.1-6）。
  事例の多くは記憶の喪失に関して複数の理由を示している。また、技術的、経済的及び人的要因グループから抽出された以下に示す 4 つの理由は、21 の事例の全てにおいて関連寄与要因として特定されている。
    - ・記録なし又はアーカイブス不足
    - ・記録の更新なし／不十分（例えば、地図、図面）
    - ・職務遂行のための予算なし／不十分
    - ・人事異動
- 記憶の喪失をもたらす可能性がある要因として次の内容が挙げられた。
    - ・参照すべき一次記録がないため、記録の作成失敗又はそれらの更新継続失敗の際の補完ができない
    - ・記録保存費用を賄う予算がない
    - ・人事異動（要員の交代）は不十分な職務引継ぎを伴うことが多い
- 稀ではあったが、その他の理由のうちの次の 2 つは特に重要と考えられる。しかしながら、単に管理システムを作ることによってこれら 2 つの要因を防止することは、不可能ではないにしても、明らかに困難である。
    - ・不法行為：これは、通常は金銭上の利益によって動機づけられ、記録の意

図的で不法な喪失又は破壊を含んでいる。

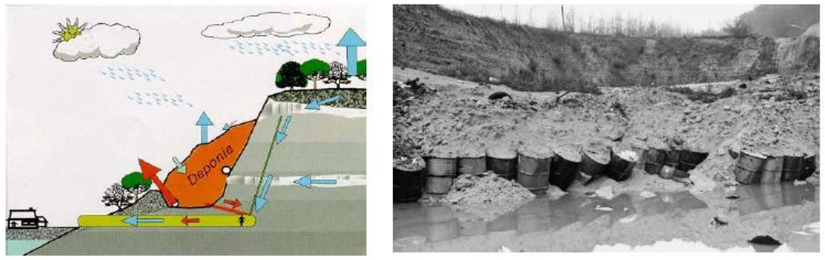
・社会的不連続性（断絶）：優先順位の過渡的変化を伴うと考えられる、戦争や国境移動といった大きな社会的激変に関連している

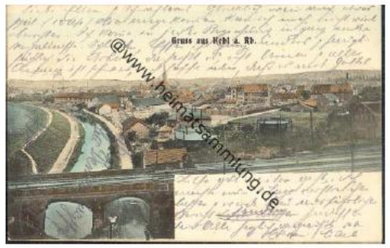
このような事例検討を踏まえ、本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014a）では、「将来に向けて関連知識を保管するために、原子力を利用している諸国の既存の法令を補完することが肝要である」ことが示唆されている。

表 4.2.1-4　記録の喪失に関する検討報告書（NEA/RWM/R(2014)3）の事例調査結果の整理（[5]より作表）

| 事例 | 国 | 経緯 | 経緯に基づく分析 |
|---|---|---|---|
| Jura 州 St-Ursanne の Fabrique de Chaux SA（1907 年–2007 年） | スイス | 1907 年－1993 年の間、Delémont（Jura 州）近傍の Jura 山脈中の Fabrique de Chaux は、炭酸塩含有量が非常に多い石灰岩礁から焼成チョーク（fired chalk）を生産した。石灰岩礁は、ローカル帯水層の直上にあり、かつ、2005 年まで様々なプールに養魚場用水を提供していた 2 本の河川の下方に位置する、地下鉱山から抽出されていた。水文地質学的研究により、鉱山に注入された着色トレーサーは数時間で河川及びプールに達することが示された。<br><br>Fabrique de Chaux は旧鉱山内の幾つかの主要ギャラリを彼等の産業廃棄物で埋め戻した（FIG.5.1-1）。様々な種類の廃棄物に混じって、石灰釜のオペレーションから生じる重油を収納した“たる（barrel）”もあった。<br><br>経済的な見通しがなかったため、Fabrique de Chaux は 1993 年に操業を停止し、施設を廃棄物管理会社に売却した。この会社は有害廃棄物とセメント混合物を固結することを計画しており、大量の未固結廃棄物をギャラリに蓄積していた（FIG.5.1-1）。この会社の活動は、1994 年にグリーンピースがサイトを占拠した際に判明した。<br> <br>FIG.5.1-1　St-Ursanne のチョーク鉱山のギャラリ内の廃棄物インベントリの写真。Jura 州の DMS プロジェクトのアーカイブ（左側は 1970 年－1993 年の間に鉱山に投棄された空の又は充填された数千のドラム缶の一部。右側は 1995 年に定置されたガルバニック廃棄物のビッグバッグ）<br><br>州当局が動かなかったので、グリーンピースは 1995 年に 2 度目のサイト占拠を行った。その結果、当局及び専門家は当該ケースの調査を行い、無許可の活動を明らかにした。廃棄物会社は 1997 年 3 月に破産宣言した。Jura 州は、暫定貯蔵された廃棄物を自らの費用で処分する必要があった。会社の元従業員は当該ケースに関する情報を何も明らかにしなかった。<br><br>破産担当事務所がアーカイブス（記録保管所）を開き、州環境庁が文書評価のために立ち入った。当局は、工場の技術文書についてさらなるアーカイビングを行う価値は乏しいと判断した。それ故、全ての技術レポートは破壊された。その結果、工場のインフラストラクチャに関する有用な知識は失われ、高い費用をかけて可能な限り回復する必要性が生じた。<br><br>Fabrique de Chaux の重油だる処分に関する知識は、既に 1997 年に失われた。担当事務所は旧鉱山に直接隣接していたが、誰もギャラリ内で行われた可能性のある廃棄物処分行為に関する情報を提供できなかった。旧作業員の多くが既に退去又は死亡していた。掘削機を用いたギャラリ内の探査及び洞窟学者（探検家）の専門スタッフによる調査によって、水汚染流体の存在が報告された。石油残渣による河川及び地下水への重大なハザードのため、充填ギャラリの徹底調査が行われた。鉱山全体の研究が体系的に実施され、全ての廃棄物の回収は州の費用で 2007 年に完了した。 | Fabrique de Chaux のケースは、スイスの 90 年代後半の状況をとてもよく表している。1998 年まで汚染サイトの修復に関する法規定は何も存在せず、当局側が介入する法的義務は何もなかった。この事例から、情報、記録及び知識の喪失に関する多くの異なる要因を特定することができる。<br><br>まず第一に、鉱山内でのかつての処分活動に関する多くの情報及び知識は、環境被害の可能性の認識が単に欠如していたことによって失われた。かつての鉱山労働者は後に、彼自身が Fabrique de Chaux の操業廃棄物のギャラリ内への定置に関与していたことを知ってショックを受けたと証言した。第二に、当時は廃棄物に関心を持っている人はほとんどいなかった。サイトを 1993 年に固体廃棄物（有害廃棄物）の地下貯蔵施設として取得した新しい運営会社は、それまでに定置された廃棄物に頓着しなかった。廃棄物管理会社がサイトを引き継ぐと、情報が意図的に隠匿されたため、状況はさらに複雑化した。このケースの最後の段階では、情報や記録の破壊など、廃棄物会社の違法可能性のある活動が明確に検出可能となっている。最後に、会社の倒産後、管轄当局が記録の価値の判断を誤ったため、アーカイブは失われた。こうした理由の全ては、人的欠陥（human deficiency）によるものと考えられる。<br><br>Fabrique de Chaux のケースの分析により、情報、記録及び知識の喪失に関して 3 章で提示した要因のほとんど全てを特定することができる。これは、おそらく大部分の旧埋立地に適用できる重要な洞察である。 |
| Jura 州 Bonfol の Céramiques industrielles SA (CISA) (1995 年–1997 年) | スイス | 同様の状況は、20 年以上にわたって大きな粘土ピットを運営してきた Céramiques Industrielles de Bonfol SA (CISA)のケースで見られた。1960 年代早期、ピット浄化の要件及び義務に適合するため、CISA は Basel 化学工業界（BaselChemical Industry）の会社に権利を売却した。この会社は次に、数段階を経て、粘土ピットを有害廃棄物の埋立地に転換した（5.1.3 節参照）。有害廃棄物埋立地は 1975 年に閉鎖された。2000 年から Basel 化学工業界は、彼等の旧有害廃棄物サイトを完全に浄化することを確約した。2000 年に、CISA は破産を表明した。Fabrique de Chaux のケースと同様、旧ピットの図面を含めて技術的及び地質学的レポート類は完全に破壊された。実際、全アーカイブ（保管文書）は最も近い埋立地に処分され、その結果、廃棄物サイトの浄化のために大きな価値があったであろう知識が失われた。 | 浄化は既に計画又は進行中であったが、関係する行政機関間のコミュニケーションが欠落していた。浄化のための技術的及び地質学的記録の重要性は、当局も浄化を任された化学業界も認識していなかった。粘土ピットの歴史は、多額の費用をかけて可能な限り再構築しなければならなかった。<br><br>複雑な問題に対処する際には、学際的なコミュニケーションが確保されなければならない。政府機関が法律上の義務を果たすだけでは不十分である。情報及び記録の移転は成り行き任せでなく、明確に規定された規則に従って行われることも必要である。 |
| Jura 州 Bonfol の Décharge Industrielle de Bonfol DIB | スイス | Basel 化学工業界の Bonfol 埋立地は、スイスの主要な有害廃棄物サイトの 1 つである。それは、（大部分は第二次世界大戦中及び大戦後に）採掘された粘土ピット内に設置された。1961 年－1975 年の間に 7 つの会社が生成した化学、農薬及び医薬品廃棄物の全インベントリが、埋立地に処分された。サイトの歴史の幾つかの側面は RK&M プロジェクトにとって非常に興味深い。第一に、埋立地の運営会社である Geigy AG（合併後の 1970 年からの登録は Ciba-Geigy AG）は、適切な廃棄物処分土地台帳運営（所有権及び保有権の登記）を行わなかった。実際、2001 年にサイトに配送された化学廃棄物を含む鋼製ドラム缶の大多数に関する輸送請求書には、利用可能な情報が極僅かしか含まれていない。<br><br>当局は後に Basel 化学工業界に対して、その期間の生産リストを、従って廃棄物リストを作成するよう求めたが、操業者（運営者）からは曖昧な返事しか得られなかった。貯蔵された廃棄物に関する知識が実際に失われたか、あるいは、貯蔵された物質の有害性を考慮した情報が維持されているかは定かでない。いずれにせよ、埋立地の含有量及び状態に関する多くの知識は、ドラム缶の無秩序な充填プロセス及び広範な腐食によって失われた（FIG.5.1-3 参照）。<br><br>2010 年 7 月 7 日、廃棄物処分サイトの端部近傍の掘削時に爆発が起こった。幸いなことにけが人はいなかったが、浄化作業は 1 年以上にわたった停止した。爆発は塩素酸塩によるもので、これが掘削ショベルからのスパークによって発火した。この事象は次の 2 つの側面を浮き彫りにしている。第一に、このインシデントは、処分廃棄物及びそれらのその後の化学反応に関する知識が限られたものであることを確認している。第二に、埋立地の形状に関する知識におけるギャップを、その後のサイト歴史評価の際の研究（例えば、航空写真の評価）にもかかわらず必要な精度で検出できなかったことも示している。 | Bonfol 廃棄物処分サイトの事例は、RK&M プロジェクトにとって特に興味深い。早期の全ての埋立地の場合と同様、廃棄物に関する、また埋立地の条件に関する知識は非常に限られている。過去の記録は、たとえ存在するとしても、不完全なものである。歴史研究によってさえ、限定的な知識が回復できるにすぎない。<br><br>有害廃棄物処分サイト Bonfol の事例は、もう 1 つの現象もとても良く浮き彫りにしている。埋立地の含有物に関する知識の欠如とそれによる環境へのリスクは、認識の欠如だけに起因するものではない。同様に重要なことは、知識のコントロールに関する疑問である。工業化社会の多くの国々では、“汚染者負担”の原則が廃棄物及び汚染サイトの取扱のためのガイドラインとして確立している。これは、汚染者に、適正な処分のための支払い義務を、あるいは過去の不十分な行為から生ずる損害に対する支払い義務を課するものである。汚染者負担原則と関連するのはデータ及び知識を管理する必要性であり、これはもっぱら操業者の責任下にある。<br><br>Bonfol 有害廃棄物埋立地の事例が示すように、汚染者は自身の知識及びデータをどのように扱うかに関して非常に幅広い裁量権を有している。今日に至るまで、廃棄物遺産に関する知識の程度は、Basler Chemie（BaselChemical Industry）によるアーカイブスの開示がなされていないため不透明なままである（5.1.4 節参照）。近隣の土地 |

| 事例 | 国 | 経緯 | 経緯に基づく分析 |
|---|---|---|---|
| | | <br>FIG5.1-3　スイスの Jura 州 Bonfol 村近傍の粘土ピットに 1961 年－1975 の間に投棄された化学廃棄物の写真 | 所有被害者の一部についての賠償請求が行われる可能性があるので、こうした施設の操業者は情報へのアクセスを制限する傾向がある、また、廃棄物所有者は過去の誤った決定及び違法の可能性がある行為の程度を開示することには基本的に関心がないと想定される。 |
| Basel 周辺の化学工業界の埋立地 | スイス | 第二次世界大戦以降逐次的に工業化した Basel 地域内の化学工業界の埋立地の物語については、非常に包括的かつ詳細な調査が行われた（Forter 2000, Forter 2010）。Basel 化学工業界の廃棄物は、1960 年代まで、Rhine 川に直接放出されるか、あるいはフェリーボートで河川の中央に投棄された。住民からの抗議によって、Basel 化学工業界は廃棄物を Basel 近傍の--一部は国境近くのドイツ領及びフランス領の--埋立地に処分し始めた（Grenzach FRG, Le Letten Hagenthal leBas F, Roemisloch-Neuwiller F, Feldreben Muttenz CH etc.,FIG.5.1-4 参照）。繰り返される汚染のため、幾つかの地域社会（コミュニティ）で抗議行動が行われたが、Basel 化学工業界は数十年にわたって曖昧な対応を続けた。影響を受けた地域社会は、Basel 化学工業界の強力な企業に打ち勝つだけの十分な影響力を有していなかった。旧サイトの浄化は、環境団体や専門家が関与し出した後、近年になってやっと少しずつ開始された。<br> <br>FIG5.1-4　Basel 化学工業界の廃棄物取扱に関する写真。<br>左：Rhine 川への放出（1965 年）、中央：Barsel 近傍の Muttenz の旧砂利採取場内の Feldreben 投棄場（1955 年）、<br>右：Alsace（フランス）の Neuwiller 内の Roemisloch 投棄場（2011 年）<br><br>他の投棄場の場合と同様、処分廃棄物の含有物、量及び毒性、埋立地の規模、そして環境への影響に関する情報及び知識はほとんどなかった。数十年間、処分の様々な場所についての適正なモニタリングは何も行われておらず、Basel 化学工業界のアーカイブスはほとんどアクセスできない状態に留まった。Basel 市の、そしてスイス、ドイツ及びフランス当局のアーカイブスは、特殊な事象に関する散発的な情報だけを提供している。Martin Forter は、彼の著書“Farbenspiel”において記録保管源（archival sources）を詳細にリストアップしている。その大部分は、関係機関、影響を受けた地域社会及び産業界の間の書簡、地方議会のミーティングのプロトコル、そして、侵害行為の場合の当局の命令（デクレ）である。時には検査結果に関わるものであり、稀には--プレスからのレポートであっても--サイト評価に関わるものであることもある。各埋立サイトに関する知識の統合は、確認可能な限りにおいては、責任主体によって命じられてはおらず、せいぜい再開発プロジェクトの中で要求されているだけであった。 | Basel 化学工業界の埋立地の歴史は、RK&M プロジェクトにとって非常に興味深い。こうした事例によって、廃棄物について責任を取ることに対する、また、特定の行為の記録・文書化及び汚染の浄化に対する汚染者の抵抗が明らかとなる。ここでもまた、経済的な配慮（廃棄物に金をかけるべきではない）が、その後は取り消し・廃止（無効化）に関する法的考察あるいは保守費用や評判喪失に関する懸念が、活動の前面にあらわれる。浄化プロジェクトの過程での大きな努力にもかかわらず、情報のレベルはわずかなものに留まる。処分された廃棄物の含有物及び量に関する必須情報は欠落し、多額の費用をかけて限定的にしか回復することができない。<br><br>これらの研究から、廃棄物を可能な最小費用で処分することができる限り、廃棄物の取扱は手ぬるいものになること、また、文書化及びアーカイブスに関して化学工業界は一般に無関心であることが確認される。しかしながら、これらの事例は、産業界が当局及び公衆への通知に関して多かれ少なかれフリーハンドであったことも非常に明確に示している。世論の圧力がない限りは、埋立地のアフターケアは最小限なものに過ぎなかった。環境意識の立ち上がりを受けた世論の圧力だけが、化学工業界による長期的管理措置の実施を促進させた。しかし、汚染の実情及び環境被害の程度に関する情報は、もしあったとしても、非常に注意深く開示された。汚染サイト分野における法規制は非常に遅く、米国で採用された法律（1986 年包括的環境対処・補償・責任法[CERCLA]）に続いたのは、汚染者の自己防衛的姿勢をサポートした、1998 年の欧州における法律であった。 |
| Winterthur 市の Riet 埋立サイト | スイス | Riet 埋立地は、国内及び Winterthur 市の産業廃棄物を対象とした大きな処分サイトである。このサイトは 20 世紀の初めから操業され、埋立地の古い部分に限っては、大きな農業改良計画の一部でありその大部分が第一次世界大戦と第二次世界大戦の間に構築された、水路と排水路の古いシステム上に建設された。埋立地は、さらなる保護対策を施すことなく、1970 年代まで操業された。これらの水路の 1 つは、埋立地の中心的な廃水用水路として使用された。このようにして、埋立地から地下水及び水路に向かう直接的な漏洩経路が形成された。<br><br>地下水汚染が起こった後、管轄当局は廃棄物サイトを浄化することを決定した。探査作業及び再開発計画には歴史研究も含まれていた。この作業の過程で古い農業改良計画が再発見され、埋立地の排水にとっての旧ドレンの重要性が明らかになった。このように、Riet 埋立地のケースでも、広く知られている情報及び知識のギャップを特定することができる：廃棄物土地台帳の欠如、全体的に乏しい情報、アーカイブスの無視、統合（総合）の欠如、長期的な文書化のための資源の欠如、など。環境データの文書化とアーカイブサービスは、スイスのような豊かな国においてさえ無視されている。 | 今日の視点から言えば、当初の操業者は地下水（汚染）の面での廃棄物の危険性を認識していなかったであろう。当時（20 世紀初頭）、市議会は非常に遠隔な地域を選定した。埋立地による環境汚染は、生態学的価値の認識に変化が生じたかなり後になってから認識されたに過ぎない。<br><br>Riet のケースは、最終処分の概念及びセキュリティの考察は時間とともに変化し、その結果として、長期安全の検証に関して根本的に新しい疑問が生じることを示している。この事例からは、学際的接触がいかに重要であるかも見て取れる。数十年間、調査を行う地質学者は州の改良局と排水計画について協議することを思いつかなかった。 |
| Argovia 州 Würenlingen の Bärengraben 埋立サイト | スイス | Bärengraben の埋立地は、公的機関（Würenlingen 地方自治体、Argovia 州、及び Turgi 廃棄物焼却プラント）のコンソーシャムとして、1960 年代に地域の主要なセメント工場の旧泥灰土採掘場に設立された。閉鎖までに、ごみ、鉱滓（スラグ）及び建設廃棄物が中心だが約 300,000 トンの産業廃棄物も含んだ、最大で 400 万 $m^3$ の廃棄物が堆積された。<br><br>埋立地は、地質コンサルタントの当初の提案通り、防護対策なし及び基底部での密封（シーリング）対策なしで、岩盤上に直接開発された。しかしながら、埋立地の基底部はすぐに、浸透水中の微細な浮遊物によって目詰まりしたと思われる。Bärengraben の埋立地の地質安全システムの一番弱い部分はロックバリア（rock barrier）のない浸出水排水路建設領域であり、そのため埋立地からの浸出水は（FIG.5.1-6 に大きな赤矢印で示されているように）より低い Aare 峡谷の地下水に達して地下水の重大な汚染をもたらし、水供給を脅かしさえした。<br><br>埋立地の傾斜部から浸出水のサンプルを収集するため、技術者は最初に開放埋立地の周囲に排水リングを設置した（FIG.5.1-6 の埋立地中央部の白リングを参照）。この措置は、主要なカルスト源（karst source）が考慮されなかったことから、あまり成功しなかった。岩崖からのこうした天然のカルスト源は当初の採掘場探査時には知られていたが、情報は時間とともに失われた。1990 年代に、Argovia 州は、カルスト流入（karstic inflow）起源のより多くの浸出水を収集するため、埋立地の下方に収集排水システムを備えたトンネルを建設せざるを得なかった（FIG.5.1-6 の緑色のトンネルを参照）。 | Bärengraben のケースは、RK&M プロジェクトとの関連から言うと、次の 3 つの理由で興味深い。第一に、Bärengraben のケースは、廃棄物の特性及び起源に関する情報が“失われつつある”と意識されながら長い間有害廃棄物の処分が行われてきた、ことを示している。実際、廃棄物発生者はしばしばまばらにラベル（標識）付けされた廃棄物を処分業者に引き渡し、処分業者はそれらを埋立地に引き渡した。この処分チェーンに関する記録は何も残されなかった。結局、通常は廃棄物の輸送者だけが知られていた。それに何が保管されていたかは、廃棄物発生者にとっても、当局にとっても、処理業者にとっても興味がなかった。このようにして、多くの有益な情報が失われた。全ての責任当事者--議員、行政機関あるいは企業--は、情報の即時喪失及び潜在的環境影響を受け入れた。彼等は時代精神（zeitgeist）の原則に則って行動した。彼等が疑問視されない限り、彼等自身の行為を疑問視する理由はなかった。<br><br>第二に、Bärengraben のケースは、一旦失われた情報を回復することは、仮に可能 |

| 事例 | 国 | 経緯 | 経緯に基づく分析 |
|---|---|---|---|
| | | Bärengraben の埋立地は、1980 年代末に、地方自治体レコーダ（municipality recorder (Gemeindeschreiber)）がドイツの輸送者からの非常に大量（最大で数万トン）の化学廃棄物の処分を許可し、この不法なサービス代金の支払いを受けたことが公になったことによって、有名となった。責任者が刑事裁判所で有罪とされ、数年間投獄された。しかしながら、情報がほぼ完全に失われていたので、産業廃棄物のドラム缶の量も含有物も実際に再構成することができなかった。Bärengraben は、産業廃棄物の不法投棄に関わる犯罪活動を検知及び実証することができた稀なケースの 1 つである。<br>  <br>FIG5.1-6　スイスの Würenlingen の Bärengraben 埋立地。Effinger 部層の泥灰土採掘場及び埋立地周辺の水循環の断面図。緑色は浸出水収集排水システム（左図）；1974 年の処分活動。200ℓ ドラム缶入り産業廃棄物の処分（右図）。含有物に関する情報は収集されていない。 | であるとしても非常に困難なものとなり得ることも例証している。廃棄物“たる”の費用のかかる化学分析によって、処分廃棄物の種類に関する重要情報が得られる可能性がある。但し、この目的のためにはこれらのたるを回収する必要があり、その場合は、現在の Kölliken (AG)の化学廃棄物埋立地のケースのように、少なくとも廃棄物処分サイトの部分的浄化が必要となるであろう。しかしながら、背景、起源及び発生者、協定、安全措置等さえも、回復はほとんど望めない。情報の喪失は、広範囲に及びすぎている。<br><br>最後に、Bärengraben のケースは、犯罪活動による情報の意図的な隠蔽を例証している。廃棄物分野における犯罪活動については、不法活動を追跡するという意志が欠如している、従って資源が欠如していることがしばしばあるので、その立証は困難なことで有名である。それでも、廃棄物に関する情報及び知識の完全ではないにしろ広範な喪失に関連する犯罪活動はありふれたものなのかもしれない。“criminal activity waste disposal（犯罪活動廃棄物処分）”という用語を用いたシンプルな“Google”検索からは、総計 40,000 エントリが得られる。従って、我々はまだ、従来の廃棄物分野内のある小さな現象について話すことができるようにはなっていない。 |
| Zurich 州 Wildberg の Tössegg 埋立サイト | スイス | Winterthur 市(Zurich 州)の Tösstal の Wildenberg 自治体内の Tössegg 埋立地は、Russikon 石油精製残滓（Madetswil /Russikon, ZH）に関して中心的な悪評を得た。1960 年代及び 1970 年代に、精製所は、粘性のタール状生成物、硫酸及び液体油の混合物である酸性タールからなる残滓を伴う鉱油を再生した。油は高濃度のポリ塩化ビフェニル（PCB）も含んでいた。これらの残滓は 200ℓ ドラム缶に詰められた。1970 年－1974 年の間に、こうしたおよそ 8,000 体の“たる”が Tössegg Wildenberg (ZH) 自治体の埋立地の中の 17 のピットに処分された（FIG.5.1-7 参照）。精製所は、廃油残滓はパラフィンのように固化すると想定した。加えて、プロジェクトマネージャは、ピットが掘られた第四紀氷堆石はリークプルーフであり、Winterthur 市の流域の帯水層の地下水汚染の可能性に対する十分な防護を提供すると想定した。いずれの想定も間違いだということが判明した。<br> <br>FIG5.1-7　スイスの Wildenberg 自治体の Tössegg の酸性樹脂用の埋立地。PCB 含有酸性樹脂を内包した 8,000 体以上の 200 ℓドラム缶が充填された 1－17 の処分位置<br><br>埋立地の下方の地下水の最初の汚染は、既に 1980 年代に検知されていた。最初に課せられた浄化作業は、排水ライン--最初は地表近傍の排水ライン、後にはより深い排水ライン--の有毒浸透水の収集に焦点が合わせられた。1989 年、Zurich 州は依然として、地下水に関するさらなる管理あるいは埋立地での干渉は必要なく、埋立地からの溶出液は法律の範囲以内にあると想定していた。しかしながら、少量のタールの浸出が繰り返されたため、1994 年に再調査が行われた。専門家は浄化措置の様々なニーズを評価し、州の管轄環境局はその問題を放置し、さらなる措置を何も命じなかった。州当局は積極的に当該ケースを忘れようと欲したと思われる。<br><br>自治体の首長である Wildberg はあきらめず、埋立地の問題に関して Zurich 州の当時の企画部長と対決したため、このケースは再開された。州議会での喚問がさらに圧力を加えた。その影響で、管轄当局は 1998 年にさらなる調査を開始し、地下水に対する埋立地の危険性を確認した。その結果、埋立地は修復しなければならなくなった。酸性タール埋立地 Tössegg は、1998 年－2001 年の間に約 1400 万スイスフランを投じ、数段階かけて掘削及び浄化された。 | このケースは、積極的な忘却願望が行政から、従って公共機関から来ていることを示しており、興味深い。管轄部門及び元企画部長は Tössegg 埋立地のケースをそのままの状態としていくことを望んだ。地方自治体及び州議会の政治的介入だけが、詳細調査、リスク状況の再評価、そして最終的に埋立地の完全な再開発をもたらした。<br><br>多くの埋立地は同じように“管理”されている。行動を取る緊急性がない限り、古い堆積場は“休眠”状態のままとされる。国の機関は、特定の問題が生じると、孤立した又は継代の遺産問題に関する最後の手段として介入するだけである。大部分のケースでは、これらの問題は地下水汚染又はガス放出と関係しており、それが、このような投棄が現在スイスやドイツといった豊かな国で“恒久的”（以下を参照）にモニターされていることの理由である。古い堆積廃棄物は大量にあり、修復のためのフォローアップ費用は膨大であり、また修復プログラムにはしばしば問題があることから、その他の戦略は現在は失敗する運命にある。従って、当局及び専門家は、旧堆積場が自然減衰するのに任せることに甘んじ、時折の地下水検査及び場合によっては土壌検査を行うことでよしとしている。<br><br>この戦略は、関連する政府機関が廃棄物処分のこのようなフォローアッププログラムのために有する財源が限られていることのあらわれでもある。この厳しい財政的制約は、豊かな国においてさえ、こうしたサイトに関する知識を保存するために、あるいは知識を更新及び拡張するために使うことができる資金を制限している。この意味において、当局は後見人の役割を担っている。積極的な対策は、重大な汚染又は環境問題が生じた場合にのみ講じられる。 |
| Zürich 州 Urdorf の Hardwald 埋立地及び Zürich 州 Kloten の Homberg 埋立地 | スイス | Urdorf 自治体の Winigen 自動車道路ジャンクション付近にある Hardwald 埋立地は、Zurich 州地域の大きな古い埋立地の 1 つである。砂利及び砂が豊富な渓谷におけるその他の埋立地と同様、Hardwald 埋立地は、Limmat 渓谷での砂利の採取に、また採掘区域の再充填及び植物再生という当局の要請に起源を有している。Hardwald は、特に Zurich とその近傍全体からの商業・産業廃棄物を含めて、多かれ少なかれ廃棄物インベントリ全般を受け入れた。前述の Russikon 製油所（5.1.7 節参照）は、Tössegg ピットに対するよりもはるかに大量の酸性タールを Hardwald に配送した。埋立地は 1950 年代に人気を得た。なぜなら、病院及び研究センター、そして Zurich の産業界が彼等の放射性廃棄物さえも埋立地に処分したからであり、それらは厚さ 3m の粘土層でカバーされた。埋立地内の正確なインベントリ及び廃棄物処分位置は、今日知られていない。古い廃棄物堆積場に関する州の登録記録は、これらの放射能源を記載していない。<br><br>1980 年代の自動車道路インターチェンジ建設の際に、州は埋立地の脱ガスを開始した。しかしながら、地下水及びガスのモニタリングプログラムは、財源不足及び主要汚染物質に関する情報の欠如のため数年後に中止された。埋立地のモニタリングは、埋立地に隣接する大きなコンクリート製造・砂利採取区域を運営する会社からの苦情があり、当局の注意を引いた後に、やっと再開された。このモニタリングプログラムの結果はまたもや否定的なものであり、当局は再びモニタリングを放棄した。1990 年代に、Hardwald 埋立地の端部に建屋が建設された。建設トレンチを掘削中に黒い液体が発見されたが、当局は汚染源の調査を行わなかった。当局は意図的に忘れたいという方針のようだったので、先には進まなかった。Hardwald 埋立地は地域の大きな遺産であり、当局は眠っている犬を起こさないことを望んだ。1990 年代半ばになっても、汚染サイトの土地台帳作成（Katasters belasteter Standorte KBS）において、埋立地内の産業・商業廃棄物の登録は完了しなかった。切迫した環境問題が生じない限り、管轄当局は知識ベースを拡張するための措置を何も命じなかった。今日は、切迫した汚染ケースへの対応だけに甘んじている。情報の体系的保守といったさらなる対策のための資金はない。<br><br>同様の状況は、“ゴールデン・ゲート（goldenes Tor）”の重要な地下水再生（groundwater resurgence）に近い、Zürich 空港近傍の Homberg 埋立地について見ることができる。この埋立地のインベントリは、多かれ少なかれ都市区域に典型的なものである：焼却一般廃棄物からのごみ及びスラグ、産業及び貿易からの廃棄物、建設廃棄物、その他。連邦政府が 1963 年に収集を開始するまで、放射性廃棄物さえも堆積されていた。しかしな | これら 2 つの事例は、記録の喪失過程における別の重要な構成要素を示している。記録の喪失は、人間の過誤、不注意、及び先見性のなさによって起こるだけでなく、忘却願望によっても積極的に推進される。防御メカニズムとして、記憶の抑圧及び喪失はいずれも、心理学（Frankl）、ジャーナリズム（Pöttker et al.）そして歴史（Meier）といった多くの分野で知られている。廃棄物処分の分野では、積極的な忘却は嫌な現実を回避するために、あるいは、過去になされた誤りを隠蔽するために行われている。こうした知見は、個々の行動に当てはまるだけでなく国家機関の作業も反映することから、興味深い。従って、忘却（即ち、抑圧）行為は国によって体系的に意図され、認められる。時代精神（zeitgeist）は価値及びその結果としての行動を形作るが、この文脈においては権力を行使する能力がより重要である。国家機関及び経済関連機関は、嫌なことを寄せ付けないようにするために、自身の権力を用いて極めてシンプルに行動する。このように、記憶及び忘却はコントロールすることができる。 |

| 事例 | 国 | 経緯 | 経緯に基づく分析 |
|---|---|---|---|
| | | がら管轄当局は、地下水及び埋立地ガスの通常のモニタリングプログラムに加えた特別の対策を何も命じなかった。公式には、環境をこうしたサイトから防護する必要性はないということだが、実際は、当局は旧処分サイトを積極的に無視することを奨励しているように見える。 | |
| Kehl ガス工場 | ドイツ | 1980 年代末、ドイツの水管理局は、汚染サイトを記録するための登録用紙に記入しなければならなかった。彼等は用紙を自治体に渡し、汚染の可能性のある地域の大雑把なリストを作成した。しかしながら、最初の調査で分かったサイトについては注意深い検討が必要であり、それは、疑わしいサイトの多くが根本的に改造（再設計）されていたため困難なことが多かった。Kehl 市内の、Rhine 川から約 600 m 東の旧ガス工場及びタール油製造施設跡地の場合がそうであった。サイト直下の土壌及び地下水は高濃度の多環芳香族炭化水素（PAH）で汚染されており、それは約 20 m 下方の地下水で検出することができた（LfU 2001）。<br><br>ガス工場及びタール油製造施設は当初、“Schuttermühlkanal”と呼ばれる運河に位置していた（FIG.5.2-1 参照）。この運河は、市の保健所からマラリアなどの病原と見なされ、第二次世界大戦後に埋め戻された。地形はその後さらに変形した（盛り土、土壌堆積、新街路、改造ビルなど）。旧ガス工場のサイト計画及び建屋指定は、土壌汚染及びタール杭の位置特定のためにはあまり効果がなかった。従って、各当局のアーカイブスにおける汚染サイトの歴史探査は、長い間極めて要領を得ないものであった。1956 年設立の Hanauer 市ミュージアム--主として、市のネイティブかつ民族学的な歴史に関する記録を保存していた--の探索の拡張だけが、専門家を正しい方向に導いた。<br> <br><br>  <br><br>FIG5.2-1　2 つのガスタンクを備えた Kehl 市の旧ガス工場地域の絵はがき：2 つの写真の左側には、今は埋め戻されている運河が見える。<br><br>この歴史情報を用いて、Kehl ガス工場は第一次世界大戦（1919－1930 年）後の占領期間中にフランスの Gaz de France の所有物となったと結論された。Gaz de France 及び Alsace のアーカイブスでの情報探査からは、しかしながら、有用情報はほとんど得られなかった。同時代の証人が既に死亡又は追跡不能となっているか、あるいは、アーカイブ文書がほぼ完全に消失していた。加えて、汚染に関する多くの情報、特に事故及び（長い間気付かれなかった）地下水汚染に関する情報は、記録されることがなかった。<br><br>Gaz de France はさらに、占領期間終了後に施設（コンパウンド）を売却した。その後サイトは改造（再設計）され、“Schuttermühlkanal”が埋め戻されて建物が建てられたため、汚染者、その法定相続人、及び修復に関する財務責任に関する新たな疑問が提示された。1990 年代後半から、地下水汚染に対する積極的な修復アプローチが行われ、次いでゆっくりと自然浸出プロセスへと転換されていった（Rügner et al. 2004）。 | Kehl ガス工場及びタール油工場の事例は、様々な理由から、RK&M プロジェクトにとって興味深い。このケースは、従来型の廃棄物（多環芳香族炭化水素（PAH）を含むタール油）であっても重大な環境問題を、また、こうした廃棄物を取扱う際に今日の視点からはほとんど理解できないような不注意を引き起こす、長い時間スパンについて記述している。このケースは、遺産の忘却をもたらす様々な、時には交錯した要因も明らかにしている：戦争、所有権の変化、占領終了後のドイツ企業による地域の再購入、戦争の混乱とそれに関連した移住によるガス工場及びタール油工場に関する重要情報の喪失、その結果としての証人の減少、占領期間終了後のフランス側のアーカイブスの喪失、そして、歴史と民俗学（フォークロア）に特化した市博物館企業での情報の思いがけない保存。 |
| Rastatt 埋立地 | ドイツ | 知識の喪失の典型的な事例は、Rastatt（Baden-Württemberg 州）の“Hintere Dollert”埋立地におけるドラム缶貯蔵のケースである。歴史的汚染サイト調査に際して、担当の専門家は、埋立地のインベントリは“通常の”都市の埋立地のそれであり、特別な危険はないと考えてよいと信じていた。しかしながら偶然に、サイトは化学廃棄物のドラム缶も受け入れていたことが判明した。担当の専門家は、歴史調査によって埋立地内でのたる貯蔵（barrel storage）を発見した。検証のために、地中レーダ及び地中電気手法（geo-electric method）を用いたさらなる調査を命じた。専門家は、試験方法の信頼性を試すため、実施会社に対して故意に、ドラム缶の場所を間違えて伝えた。地中電気調査に基づき、実施会社は、ドラム缶は別の場所、即ち歴史調査が既に明らかにしている場所に厳密に位置していなければならないと主張した。 | Rastatt の“Hintere Dollert”埋立地の事例は、2 つの理由から、RK&M プロジェクトにとって興味深い。第一に、この事例は、不正行為が行われたことを、また、不正行為は有害廃棄物の処分の際にはしばしば行われるものであり、従って、申告・受入の管理、独立した管理機構・構造、及びデータの古典的アーカイビングには特別の注意を払わなければならないことを示している。第二に、それにもかかわらずこの事例は、その意志が本当にあり、かつ必要な資源（リソース）が利用できるならば、廃棄物をバックトラック（back-track）することは可能であることも示している。 |
| Rheinland Pfalz 州 Bad Kreuznach の工業地帯 | ドイツ | Bad Kreuznach は Koblenz 特別市内に位置している。Koblenz 特別市内の汚染サイトを管轄する上級当局（機関）である構造・承認北部総局（Structural and Approval Directorate North）は、Bad Kreuznach の事業者の区域内の廃棄物遺産に疑いを抱いた。しかし、自治体当局への数回の問い合わせからは、満足な成果は得られなかった。その結果、歴史調査を委任された経験豊かな調査機関はホームシティ・アーカイブス（Home City Archives）に相談した。しかしながら、産業界は 2011 年に、自身の土地の中の汚染サイトの存在を依然として否定した。<br><br>この事例は汚染サイトの分野では極めて典型的なものであり、産業界では多くの形態で見受けられる。汚染サイトに対する責任は高費用となることが常であるため、業界企業は通常、当局が調査や修復を要求するような当局の計画には反対する。このケースでは、真実の探求は、担当事業者によって妨害されることも、Bad Kreuznach 自治体当局によって支援されることもなかったため、上級当局は市の地方当局と重要業界の間の癒着及び依存性を示唆することができた。 | こうしたケースの蓄積は、2 つの観点で、RK&M プロジェクトにとって興味深い。これらの事例は、産業界が廃棄物の危険性を軽視するために、従って文書化及びアーカイブスを無視するために一般的に使用される戦略を文書化している。一方、これらの事例は、廃棄物発生者と地方当局の間の危険な構造的依存性は両者に金銭的関係が存在する（例えば、重要な納税者である）場合に生じることを示している。このようなケースでは、行政は短期的利益を追及し、業界を保護するような立場を取る。 |
| Hamburg の Boehringer 工業地帯の T-酸製造 | ドイツ | Hamburg 市内の Boehringer の工業地帯は 1951 年に創設され、殺虫剤、特にリンデンとして知られるヘキサシクロヘキサン（HCH）の製造が行われた。リンデンの製造では極めて高い割合（体積で約 85%）で廃棄物が発生したため、廃棄物のリサイクリング・オプションが探求された。さらなるケミカル・リサイクリングによって、次には T-酸と呼ばれる 2,4,5-トリクロロフェノキシ酢酸が得られ、これがさらに除草剤及びその他の有機化学製品を製造するための出発物質となった。残念なことに、不要な副産物である 2,3,7,8-テトラクロロジベンゾジオキシン（TCDD）もあり、これはすぐに、既存の 70 以上のダイオキシン異性体の中で最も有毒であると認識された。1953 年までは、T-酸の製造に関与した作業員の間で健康問題は知られていなかった。しかしながらその年、Hamburg の生産現場で塩素座瘡（クロアクネ（chloracne））の最初のケースが発生した。同じ年に、ダイオキシンの放出を伴う事故があり、また BASF Ludwigshafen でも塩素座瘡が発生した。（ウサギによる）動物実験から、残渣の極度の毒性が確認された。<br><br>従って 1954 年末に、Boehringer は T-酸の製造を停止した。1954 年－1956 年 9 月に Hamburg-Eppendorf 大学病院、Hamburg 木材技術研究所及び Boehringer 自身が実施した研究から、塩素座瘡の発生原因は TCDD であることが立証された。しかしながら 1956 年に企業は T-酸製造の改善に成功し、その改善は妥当と考えられ得ることから、1957 年に Hamburg で製造を再開した。1956 年 9 月に Boehringer はダイオキシンに関する彼等の所見のいくつかを医学雑誌に公表することを計画したが、1956 年 10 月末にそれを禁止した。Boehringer の代表者は後に、彼等は軍事的及 | Boehringer のケースは、3 つの理由から、RK&M プロジェクトにとって興味深い。第一に、Boehringer はまれな率直さで歴史分析を行い、記録資料が社外に持ち出されジャーナリストに渡ったことを発見した。会社は“それらがどれだけ多くの、どのような種類の資料であったか”を述べることはできなかった。第二に、Boehringer は、彼等自身の歴史の説明において、その価値ゆえに、この情報の喪失を遺憾に思っていた。それ故、会社は、アーカイブス管理が無視されていたこと、またスタッフが多くの文書を廃棄したことを明らかにした。Boehringer はさらに、会社のダイオキシンの歴史の確定的評価は“記録の不完全さゆえに”不可能であろうと述べ、質の劣るアーカイブスから生じる直接的影響を指摘した。会社のパンフレットは、ダイオキシンの製造及び放出についての Boehringer Ingelheim の責任に関する完全で十分な文書化がいつか行われるかは何とも言えない、との見解を示して締めくくっている。第三に、 |

| 事例 | 国 | 経緯 | 経緯に基づく分析 |
|---|---|---|---|
| | | び政治的悪用が予見され得るため所見の開示を恐れたと述べた。しかしながら、ダイオキシンの毒性については、1957 年春に Hamburg-Eppendorf 大学病院によって公表され、幅広い医療広報が行われた。後に、この情報は米国の軍事部門にも伝わり、米軍はベトナム戦争時に枯れ葉剤（Agent Orange）として神経毒を使用した。Boehringer は後に、TCDD の少ない方法（TCDD-poor method）の生産ライセンスを Dow Chemical に販売していたことを認めたが、ベトナムでの枯れ葉剤の使用とは関係ないとした。<br><br>低 TCDD 生産法は 1984 年まで BoehringerHamburg で継続された。後にサイトで特定された環境被害は、主として TCDD の危険性の過小評価及び不適切な取扱に起因するものであった。汚染物の重要な出口は、プラントの下水道システムを通したものであった。下水道のスリーブは当時管理されておらず、汚染物を含む廃水の地下への伝播が可能であった。加えて、インシデントが起こり、かつ、施設（コンパウンド）での貯蔵が不適切であった。Hamburg の生産現場からのダイオキシン汚染廃棄物が周辺の埋立地で検出された後、管轄当局が介入した。1984 年にプラントが閉鎖され、かなりの費用で浄化が行われた。 | 知識の取扱に関しても、Boehringer のケーススタディは非常に興味深い。一例として、首脳陣は 1950 年代に T-酸の異常な危険性を既に認識し、この知識が流布することを阻止しようと試みた。一方で、ライバル企業に情報を与えることを欲し、米国の競争相手にライセンスを販売したのも同じ会社であった。Boehringer は明らかに、この非常に危険な製品に関する知識をどのように扱うべきかについてジレンマの渦中にいた。 |
| Rheinland Pfalz 州 Alzey の Prael in Sprendlingen 工業地帯 | ドイツ | Rheinland Pfalz（英語：Rhineland Palatinate）州の Alzey において、個人所有者が旧採石場で埋立地を運営していた。地域社会（ローカル・コミュニティ）及び大規模かつ有名な化学会社（BASF、Giulini、及び Ingelheim BoehringerMannheim）の両方が、このピットに彼等の有害廃棄物を長年にわたって処分した。1966 年－1972 年の間だけで、およそ 450,000 t の廃棄物が埋立地に処分された（Siemon and Maier-Harth 2013）。個人業者が廃棄物を引き取ったが、配送あるいは処分された廃棄物の文書化は行われなかった。後に採掘場の所有者は、埋め戻された埋立地を公的機関に売却した。その結果、公金を用いて埋立地を高い費用をかけて浄化しなければならなかった。遮水壁が設置され、地下水修復が行われた。関与した廃棄物処分業者への回復（賠償）請求の発行は思いも寄らないことであった。廃棄物の処分に関与した民間企業は、正規の処分に対する支払いは済んでおり責任から解放されている、との立場を取った。 | この事例は、実際の処分廃棄物を特定するために考えられる形跡を隠蔽するために多くの場所で実施されてきた、古い伝統的慣行を示している。この事例は、廃棄物インベントリの文書化及びアーカイビングにおける法的欠陥が非難されるべきことだけではなく、実際の廃棄物遺産の計画的隠蔽を想定すべきことも例証していることから、RK&M プロジェクトにとって興味深い。有害廃棄物で満たされた閉鎖粘土ピットの公的機関へのその後の売却は、このことを明確に示している。 |
| 爆弾クレーターと爆弾 | ドイツ | 調査に関する 1 つの特定の問題が、ドイツにおいて戦争の最後の 2 年間に形成された多数の爆弾クレーターから生じている。連合軍は、爆撃による被害を判定するために航空写真を撮り、それらの場所に関する幾つかの情報を与えた。こうした爆弾クレーターそして高射砲跡や古い塹壕のようなかつての軍事施設は、戦後の復興の際にがれきや廃物で充填された。この事例は、戦争のような暴力的紛争が廃棄物管理に対して及ぼす破滅的影響を示している。戦争の最後の数年間及び戦後においては、有害軍事廃棄物のインベントリを把握・整理することは不可能であった。今日に至るまでこうした廃棄物に関する知識の再構築のために公的機関による多大な努力が必要とされるのは、こうした理由による。<br><br>Saxony-Anhalt 州だけで、終戦以降およそ 45,000 例の軍需品発見を特定することができる（FIG.5.3-1 参照）。具体的には、700,000 の砲弾、160,000 のライフル銃弾薬、そして 230 の爆弾が、2006 年から 2008 年にかけて発見された。この州の 556 km² の汚染地域のうちの約 356 km² が、現時点までに復興したと見なされた。こうした掘削の費用は、この州についてだけで数億ユーロに達している。<br> <br>FIG5.3-1　ドイツにおける第二次世界大戦による爆弾及び不発弾の典型的発見例：左は Köthen（Saxony-Anhalt）での発見、右は Nuremberg（Bavaria）での発見。 | この所見は RK&M プロジェクトにとって重要である。それは、軍事紛争はまさに危険物、兵器あるいはアーカイブスに関する知識の完全喪失をもたらし得ることを示している。しかし、一度失われた知識は多大な努力によってしか回復可能ではなく、しかもその度合いはやはり限られたものとなる。事象（このケースでは第二次世界大戦）からの時間的距離が増すにつれて、証拠の発見及び文書化の欠如といった追加の問題が色濃くなる。 |
| 米軍のタンク－Karlsruhe Knielingen タンク収納施設 | ドイツ | 全く異なる事例として、米軍が 1995 年に残していった Karlsruhe Knielingen のタンク収納施設（tank barrack）がある。施設の立ち退き後に行われた地下水調査から、タンク収納施設から大量の炭化水素が最大で数 m の深さまで浸入していることが報じられた。このドラマチックな汚染の原因は最終的に、元従業員への集中尋問によって判明した。Karlsruhe Knielingen のタンク収納施設では、タンクへのガソリンの配送が厳格に規定され、割り当てを受けていた。毎週、必要な燃料が鉄道で配送された。配送される燃料のための貯蔵スペースは限られていたが週ごとの配送物の受け入れが義務付けられていたため、ガソリンが過剰となることがしばしばあった。それらは供給者に戻すことができなかったため、サイトの地中にそのまま棄てられた。タンクの操作がほとんど行われない週には、大量のガソリンがこのようにして地中に入れられた。 | このケースは、問題の原因としてまたしてもヒューマンエラーを特定し文書化していることから、RK&M プロジェクトにとって興味深い。軍事規則が、環境上適正な配送燃料管理を阻害した。この慣行は施設が明け渡されるまで行われた。後の地下水研究によって被害が明らかになった。このケースでは、ばかげた規則、こうした規則へのかたくなな忠誠、便宜性、そして環境に対する責任の欠如が、こうした被害事象をもたらした。お粗末な慣行が文書化されなかったため汚染は長いこと認識されず、地下水汚染行為に関する情報は長い間軍事当局によって抑制され得た。 |
| 米軍の Karlsruhe Ettlingen 収納施設 | ドイツ | 同様の地下汚染が、Karlsruhe Ettlingen の米軍施設で検証された。これらの施設では大型車両が燃料補給を受けたが、ガソリンスタンド、運転室及びガレージは 1930 年代のしろものであった。2000 年頃の土壌調査から、地下の炭化水素汚染は当初考えられていたよりもはるか深部に達していることが示された。最終的には深さ 25 m のボアホールで液相ガソリンが発見された。これは Traxter（レーシングカート）の燃料として使われていた。液相はその後吸い上げられ、基部は地気処理（ground-air treatment）によって修復された。 | 5.3.2 節と同様、このケースでは人的欠陥が汚染の発端であった。管轄軍事当局は、鉱油が環境にとって危険なものであることを知っていたが、漏出に関する責任を取らなかった。燃料タンクは、タンクがあふれてガソリンが地中に浸み込むまで充填されたが、個人的責任は認識されず、ユーザは“誰もがやっている”と主張した。そうしたケースで典型的なように、これらのインシデントは文書化されず、後の証人インタビューや調査によって復元（再構築）しなければならなかった。インシデントは隠蔽され、それは、管轄機関が--少なくとも原理上は--乱用を認識しているという事実によって強化された。 |
| Niagara Falls の Love Canal における廃棄物投棄 | 米国 | Niagara Falls の Love Canal における廃棄物投棄は、1970 年代及び 1980 年代に世界的に有名になった。埋立地の実情が、注目すべき科学的調査において極めて詳細に究明された（Levine 1982）。手短に言うと、本レポートの中の他の汚染及び埋立地の事例において生じた多くの問題が、ここでも繰り返されている。Love Canal は、19 世紀末の電力化、及び産業の落ち込みとの関連から、部分的に建設はされたが完成することはなかった。第二次世界大戦まで、長さ 1000 m、幅 20 m、そして深さ 3 m の運河はレクリエーション地域としての役割を果たした。その後、近傍の電気化学プラントが運河を埋立地として利用することを考えた。プラント会社は運河の一部をなんとか購入し、1942 年－1953 年の間、そこに毒性の強い廃棄物を堆積した。合計でおよそ 21,000 t の有毒化学廃棄物がたるに入れて投棄され、粘土層で覆われた。この当時の常として、会社は貯蔵廃棄物に | Love Canal のケースは、RK&M プロジェクトにとって重要な別の側面を指摘している。貯蔵土地台帳が欠如又は不適切あるいは文書化が希薄又は存在しないといった良く知られた要因のほかに、Love Canal のケースは、どのようにして情報が失われ得るかを示す別の重要な特性を指摘している。 |

| 事例 | 国 | 経緯 | 経緯に基づく分析 |
|---|---|---|---|
| | | 関する埋立地記録を何も保管しなかったため、埋立運河の内容物に関する情報は極めて限られていた。第二次世界大戦以後の力強い経済成長と急速に拡大する都市開発が相俟って、Love Canal サイトは売却された。1953 年、会社はおおよそ 64,000 m²の土地を 1 ドルという象徴的な値段で公立学校になんとか売却した。<br><br>購入契約において会社は、将来考えられる損害を防止する条件を付けることによって、その後に起こり得る訴訟からわが身を守った。その地域は一般に建物が過密であった。運河に沿って住宅が林立しており、学校は埋め立てられた運河そのものの上に建設された。ドラム缶あるいはそれらの内容物が地表に戻り始め、地域の住民及び旧運河近傍の学童の間に重篤な疾患そして時には死さえももたらした。その後の数年及び数十年間、この事例は米国環境保護庁（U.S. EPA）によって調査された。Love Canal の事例は、汚染サイトからの防護及び汚染サイトの修復のために 1980 年に採択された法律（包括的環境対処・補償・責任法（CERCLA））に決定的な影響を与えた。<br> <br>FIG5.4-1　浄化中及び浄化後の Love Canal のイメージ | Love Canal における化学的に有害な廃棄物の堆積は、Niagara Falls 市では広く知れ渡っていた。運河内の廃棄物の危険性に関する知識は、売り手である化学会社（協定によって保護が与えられた）、及び、買い手であり、サイト全体を 1 ドルという象徴的な値段で購入した Niagara Falls 教育委員会の両方に存在していた。両者は廃棄物の有害特性をできるだけ知りたくないと欲した。<br><br>リスクは意識的に又は無意識に抑え込まれ、危険性に関する学校当局の無経験及び無知が浮き彫りにされた。所轄の保健当局も介入しなかった。最善のアーカイブスでさえも、恐らく、異なる結果はもたらさなかったであろう。市の優先順位が設定され、人間の健康及び環境はその他の関心事に取って代わられた。<br><br>今日でさえ、当局及び普通の市民は廃棄物の実際の危険性を意図的に過小評価している。危険な遺産に関する文書化及びアーカイブスの確保は、不十分である。物質のハザードに関する知識の長時間にわたる伝達も、同じぐらい重要である。我々はここで、送り手がハザードに関する十分な知識を受け手に対してより長期間にわたって手渡す必要がある、信号過程（semiosis）の古典的事例を取扱っている。文書及びアーカイブスの存在は、この知識の伝達を保証するものでは決してない。 |
| New Jersey 州 Dover Township の Toms River 廃棄物処分場 | 米国 | Toms River の Ciba-Geigy Corporation（訳者注：現ノルバティス社）のサイトは、有害廃棄物及び情報の取扱に関するもう 1 つの有益な事例である。1952 年から 1988/1990 年にかけて、サイトでは合成有機顔料、有機染料及びエポキシ樹脂が製造された（EPA 1989）。液体又は固体の生産廃棄物が、サイトのラグーンに保持されるか、ドラム缶に入れられて埋立地に処分された。排出地域の地下水井戸はラグーン及びたる貯蔵の開始後まもなく汚染の兆候を示したが、オーナーも飲料水の管轄官庁も介入しなかった。近隣の住民及び井戸の所有者からの苦情の高まりによって初めて、住民の厳しい健康影響に対して地方の環境保護局が、またその後まもなく米国環境保護庁（U.S. EPA）が介入した。<br><br>1983 年、New Jersey 州の当局は、操業者は排水処理プラントで処理すべき液体廃棄物をこれ以上受け入れてはならないと命じた。しかしながら 1984 の検査で、Ciba-Geigy がサイトで液体廃棄物を排出し続けていることが判明した。当局が開始した調査によってついには、化学廃棄物の不法投棄、New Jersey 環境保護局（NJDEP）への偽造文書の提出、NJDEP への虚偽及び誤解を招く陳述、そして有害廃棄物の不法投棄の罪で、幾人かの Ciba-Geigy 職員が起訴されるに至った（EPA 1989, p.4）。 | Toms River のケースでは、廃棄物遺産の取扱における既知かつ通常の“要因”が見受けられる：初期段階からの文書化の欠陥又は欠落、不完全なアーカイブス、文書化の不適切な追跡、明確化への自己防衛的姿勢、そして資源（リソース）の欠如。Toms River のケースの 1 つの側面は、特にドラマチックである。<br>廃棄物の不法な取扱を検証することができた、これまでに述べてきたケースは、どちらかといえば怪しげな会社、あるいは構成・管理が不十分なプロジェクトに関するものであった（Fabrique de Chaux や、Würenlingen の Bärengraben のケースを参照）。しかし、Toms River のケースは、高い評価を得ており国際的に認められている一流の多国籍企業が関係していた。このような企業が公式の犯罪捜査において文書の偽造や虚偽の申告を行うことは、情報及び記録の誠実な利用に関して根本的な疑問を投げかけることになる。それは、国際銀行界のケース（例えば、Libor（ライボー）レートの操作）のように、確立された経済の中では、データ、情報及びアーカイブスの操作に関する分野が、一般に推測されるよりもはるかに広範囲であることを示している。 |
| 深井戸への有毒廃棄物流体の注入 | 米国 | 廃棄物の取扱に関する特に興味深い事例は、液体有害廃棄物の注入あるいは浸透である。核利用の初期には、浸透及び稀釈による液体放射性廃棄物の体系的“処分”のケースが見られる（例えば、Washington 州 Hanford サイトや Tennessee 州 Oak Ridge サイト）。旧ソ連そして今日のロシアでも、液体放射性廃棄物が地下深部に注入されている。<br><br>当初は石油業界で適用されたこの技術は、他の業界に広がっていった。注入は、飲料用貯水池の長期汚染に関する警告が存続してはいるが、米国では 100 年以上にもわたって採用されている（Scientific American 2012）。<br><br>地下への廃棄物注入の問題は、その規模の大きさから重要である。“30 兆ガロン以上の有毒液体”が地下深部に注入されてきたと計算されている。“国全体では 680,000 超の地下廃棄物注入井戸があり、その中の 150,000 超は地下数千フィートに工業用流体を放出している。”（Scientific American 2012） | 世界中での深部注入井戸への液体有毒廃棄物の注入は、RK&M プロジェクトにとって 2 つのさらなる所見をもたらしている。第一に、この事例は、情報の量が非常に多いため、注入行為及び廃棄物に関する知識が失われるのは避け難く、合理的に再構築することはできないことを示している。この問題は、規模を縮小した形で、原子力産業にも関係する。<br><br>第二に、この事例は、予見し得る（近い）将来に原子力界によって取り組まれることはありそうもない、もう 1 つの基本的問題をもたらしている。将来世代は「原子力界は深部の核処分施設の危険性について警告したのに、その一方で、非原子力業界は長期間にわたって深部地下水資源を汚染したのはなぜなのか」、不思議に思うであろう。このような状況において、原子力サイドは理解可能な記憶文化という観点からの答えを必要としている。 |
| 海洋への軍事廃棄物（武器弾薬、シェルなど）投棄の一般戦略 | 米国 | 特に第二次世界大戦後に多くの国防関連局によって世界的に実践された特定形態の廃棄物処分は、海洋投棄であった。マスタードガスあるいは神経ガスのような化学物質、ロケット弾、弾道・誘導ミサイル、爆弾、火砲弾薬、手榴弾、地雷（機雷）などを含めて、より古い武器弾薬は単純に海洋投棄された（Carton 2009）。武器弾薬に加えて、いくらかの放射性廃棄物も海洋投棄された（IAEA 1996; Davis and van Dyke 1990）。投棄場所は、常にではないが時折は、国の水路関連部門に報告された。<br><br>第二次世界大戦後、米国で海洋保護・研究・サンクチュアリ法が採択された 1972 年まで、さらに多くの軍事廃棄物が投棄された。投棄領域の水深は数十mから数千mの範囲に亘った。投棄場所は、“航行の誤差及び不適切な記録保存のために”あまり知られてない（Chin and Otta 2001）。さらに、海流が、沈降の際及び大陸斜面に沿った滑りを通して、廃棄物を散乱させた。それ故、インベントリ、軍事廃棄物状態及び廃棄物位置の歴史的復元は不十分であり再構築困難なままとなるであろう。 | こうした洞察から、RK&M プロジェクトが心に留めておくべき幾つかの教訓がある。第一に、軍事廃棄物は制約下で投棄され、そうした制約の幾つかは有効期限切れの爆発物に関する安全性の考察といった全く技術的なものであった。その他の理由としては、新しい武器弾薬製造のための技術開発、速やかに減少させる必要のある過剰弾薬ストック、そして、バックエンドにおいて最小費用の“解決策”を確保するための財政的考察、があった。ここで再び、廃棄物投棄は、こうした厄介な廃棄物を処分するための最も容易かつ最も安価な方法であった。<br><br>懸念のその他の理由として、当局の行政慣行、環境意識の欠如、あるいは単なる便宜性がある。このような条件下では、情報の伝達及び知識の保存を確保することは困難であった。こうしたケースにおける廃棄物、技術データ及び処分区域に関する正確な情報及び知識の喪失は、ほとんどが人間の欠陥に起因するものと考えなければならな |

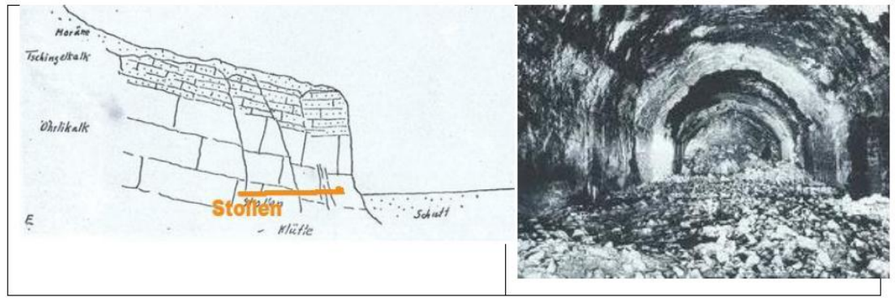
| 事例 | 国 | 経緯 | 経緯に基づく分析 |
|---|---|---|---|
| | | | い。 |
| スイスの湖中の軍事廃棄物（武器弾薬、シェルなど） | スイス | 第一次世界大戦以降、スイス陸軍は Thun（Bern 州）、Altdorf（Uri 州）及び Wimmis（Bern 州）のプラントで弾薬を製造した。これらの企業は最初から、製品残渣、規格外バッチ及び廃棄物を湖に直接処分した。時間が経つと、別のカテゴリーの廃棄物--第二次世界大戦中のスイスの防衛概念であるいわゆる“Réduit”の強化による弾薬ストック--が続いた。軍事当局は、Mitholz 地下弾薬貯蔵施設（Bern 州 Kandergrund、FIG.5.5-2 参照）での大惨事が起こるまで、地下貯蔵のリスクを過小評価していた。この災害は、スイスの弾薬の湖への投棄措置に対して直接的影響を与えた。<br>  <br><br>FIG5.5-2　Mitholz の貯蔵空洞の 1947 年の図面（Bern 州 Kandergrund、左側）及びインシデント以後の洞窟（右側）<br><br>Mitholz 地下弾薬貯蔵施設における 1947 年 12 月 19 日夜のおよそ 7,000 t のアルミニウムの突然の爆発（爆轟）は、9 人の死者をもたらし、近隣の多くの住宅を破壊し、一億スイスフラン超の損害をもたらした。Mitholz の事故は、人工的非核爆発（爆轟）の中で重大なインシデントと考えられている（Rytz and Bakhtar 2010）。<br><br>Mitholz の事故はすぐに影響をもたらした。スイス陸軍は弾薬庫の全体概念を監査し、既存の弾薬ストックの大部分を Thun 及び Wimmis（いずれも Bern 州）の湖の、また「4 つの森の州の湖（the lake of the four forest cantons）」（スイス中央部）の 2 か所の、深度数百 m 地点に放出することを決定した。様々な弾薬庫から 8,000 t 超のストックが事故から半年以内に投棄された。後の調査で、処分物に雷管が含まれていたかどうかが調べられた（Schenker Korner & Partner and Van Stuijvenberg 2012）。軍需工場は、第二次世界大戦以降でさえも--Altdorf では 1961 年まで、Thun では 1967 年まで--湖への彼等の廃棄物の投棄行為を継続した。Bern 州の当局はそうした投棄を無条件に支持したが、Uri 州の当局は投棄活動にやや批判的であった。1967 年に Thun の軍需工場の管理が変更された。新しい管理では、湖への投棄行為は即座に停止された。<br><br>湖への弾薬投棄が不可能になって以降、期限切れの弾薬は、最初は Gasterntal（Bern 州）で、後には Susten pass（Bern 州）で爆破された。爆薬が爆薬（製造）プラントサイトで正しく取扱われ、爆破され、処分されるようになったのは後になってのことである。1992 年、製造期間中に爆薬廃棄物が Thun 湖に投棄されていたというプレス報道があった。連邦議員はこれらのインシデントの解明を欲し、陸軍の有害廃棄物及び廃棄物遺産に関する短報を作成するために防衛・市民保護・スポーツ局（Department of Defence, Civil Protection and Sport（DDPS））の環境官が招聘された。これが、今日の汚染サイト土地台帳の先駆けとなった。しかし、これらの調査は公衆によってあまり認知されなかった。<br><br>2000 年頃、Thun 湖の漁師がホワイトフィッシュの生殖器の変形（奇形）について一般公衆に警告した。さらなる調査の中で、投棄弾薬が問題の潜在的原因とされた。数年後の 2004 年 3 月、地方テレビ局のキャスターが投棄弾薬（の存在）を公衆に認識させた。証人から旧陸軍の膨大な量のストックが投棄されていたとの報告があり、この発言についてはその後大局的な視点で把握しなければならなかった。<br><br>湖への弾薬投棄のもう 1 つのケースが Zürich 州から報告されている。スイスの工場 Oerlikon Bührle & Co.,での工業兵器製造から得られた弾薬の投棄は 1936 年に開始され、1966 年に停止された。この間、およそ 90 t の弾薬が Zürich 湖の中央部の 3 ヶ所に投棄された。漁師はすぐに潜在リスクーハザードを意識した--これは、実際上は無視できるほど小さいと思われる（Baudirektion Kanton Zürich 2007）。 | スイスの湖への投棄による弾薬の処分は、厳しい圧力を受けて実施されたようである。Mitholz の事故の後、スイス陸軍は洞窟内での弾薬貯蔵の安全状態を大いに疑問視し、容認不能と思われるリスクを低減するための速やかな解決策を必要とした。既存のストックの切迫した爆発可能性を考慮し、生態学的配慮は脇において、決定が下された。さらに、廃棄物処分も、非常に安価な、従来型の陸地投棄でも適用されている戦略とされた。アーカイバル保管を除いて、投棄に関する及び浸漬廃棄物の変化に関するデータ、情報、従って知識を保存するための措置は何も講じられなかった。<br><br>さらに、廃棄物処分のこうした早期段階に関する知識の所有者は、新たなバブル経済の最初の影響から数年間の、連邦年金制度改革の際に失われた。退職制度が見直され、条件が厳しく再調整された。職員は、旧体制下でのより良い金銭条件で 60 歳で退職するか、あるいは退職金を少なくしてさらに 5 年間働くかを選択することができた。それは分かりきった選択であり、連邦職員は集団で退職した。数年以内に、スイス連邦の旧軍需会社 RUAG は“生きた記憶（living memory）”の大部分を失った。 |

表 4.2.1-5　特定された知識の喪失に寄与する主要要因とその内容（[5]より作表）

| 記録及び知識の喪失の主要要因 | | | | コメント |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 技術的／環境的要因 | 1.1 | サイトの劣化（オリジナ技術設備を含む） | サイトの維持あるいはサイトの重要施設の保守が無視又は損なわれ、及び／又は、土地がもはや処分サイトと認識できなくなった場合には、知識が喪失する可能性がある。 |
| | | 1.2 | 旧処分サイトの再開発／カモフラージュ | カモフラージュ：埋立地に関する知識の喪失のさらなる原因として、当局の規制に従って砂利及び粘土を充填する再利用措置があり得る。 |
| | | 1.3 | 記録なし／アーカイブス（保存記録、記録保管所）不足 | 記録及びアーカイブスの欠如は知識の喪失の主要原因として考慮しなければならない。 |
| | | 1.4 | 記録の更新なし／不十分（例えば、地図、図面） | 知識及び記憶の喪失の注目すべき特性は、サイトの図面又は地図（あるいは、様々な操業段階からの図面、地図及び記録の存在--これらは明確に割り当てることができない）を更新しそこなう可能性があることである。古典的な紙のレポートから電子データへの移行といった、記録生成のための新技術の適用による知識及び記憶の喪失は、同じカテゴリーに属する。 |
| | | 1.5 | アーカイブスの喪失／破壊 | 重要な保管資料の破壊又は喪失は、埋立地及び廃棄物堆積場に関する知識の管理における重要問題である。実際、多くの国において汚染された土地の記録を高い費用をかけて作成し直さなければならなかったという事実は、この現象の重要性を例証している。 |
| 2 | 経済的要因 | 2.1 | 職務遂行のための予算なし／不十分 | 知識の喪失の古典的かつ主要な原因として考慮しなければならないのは、それらを保存するための資金が不十分なことである。 |
| 3 | 人的要因 | 3.1 | 人事異動 | スタッフが離任（例えば、退職、転職）する前に知識が保存又は移転されないならば、これは喪失の重要原因となる。 |
| | | 3.2 | RKM 保存分野への一般的無関心 | これは、知識の保存は一般にほとんど価値がないと見なされるという支配的文化によって引き起こされる主要原因である。こうしたケースでは、情報及び記録の根幹部分とは言わないまでも、大きな部分が喪失する可能性がある。 |
| | | 3.3 | 職務怠慢 | この要因は、上述した要因“一般的無関心”と密接に関連している。関心の欠如の結果であることが多い。 |
| | | 3.4 | 無知及び／又は無能 | 無知及び無能も、課題に対する関心の欠如並びに廃棄物堆積場がもたらすリスク及びハザードの過小評価のあらわれである。 |
| | | 3.5 | 傲慢 | 傲慢は知識の喪失の原因と考えるべきである。警告の否定が重要な役割を果たす可能性がある。 |
| | | 3.6 | 実効リスクの過小評価 | この要因は、有能なスタッフの訓練と密接に関連している。多くのプロジェクトは、人為的及び環境的なハザード（化学物質、反応性及び劣化など）から生ずる実際のリスクを意図的に過小評価している。 |
| | | 3.7 | 情報及び記録の誤った理解 | 不注意、酷使あるいはストレスが、この要因に寄与している。これらは全て、重要な知識の喪失につながる可能性がある。 |
| | | 3.8 | 不法行為（例えば、文書の改ざん、無許可処分） | このカテゴリーのケースには、記録を意図的に破壊又は隠蔽するという不法行為が含まれる。故意の知識破壊については、十分に裏付けられたケースが幾つかある。 |
| | | 3.9 | データ、情報及び記録の意図的な制限／操作 | 知識喪失のもう１つの重要なカテゴリーは、データ、情報及び記録の意図的なカモフラージュ、 |

| 記録及び知識の喪失の主要要因 | | | | コメント |
|---|---|---|---|---|
| | | | | 制限あるいは操作から生ずる可能性がある。これは、機密のプログラムと公衆の情報請求のインターフェイスで起こることが多く、特に軍事部門の汚染サイトに関連している。そこでは、情報及び記録は意図的に差し控えられた可能性があり、幾つかのケースでは意図的に破壊された可能性がある。 |
| 4 | 構造的要因 | 4.1 | 不連続性（断絶）（例えば、戦争、社会危機、倒産） | この要因は、単一企業の危機（例えば、倒産）及びより大きな社会危機（経済不況、戦争）における知識の喪失に言及している。 |
| | | 4.2 | 構造的欠陥（例えば、構造的能力の欠如） | この要因は一般に、非常に過小評価されるか、あるいは、関連要因として認識すらされないことが多い。公的あるいは私的な構造が適切な記録を収集、分類及び保存するように設計されなければ、知識の喪失は必ず起こる。知識の喪失は、例えば不適切なデータが収集される場合には、部分的に起こる可能性もある |
| | | 4.3 | 構造的連続性なし／不十分 | 構造的変化（例えば、行政及び企業の再編成、職務の構造改革）あるいは技術革新（例えば、新たな執筆ツール（タイプライター／コンピュータ）の導入）は、知識の喪失のもう 1 つの重要な原因である。 |
| 5 | 法規制 | 5.1 | 法規制の欠如 | 上述した情報、記録及び知識の喪失原因の多くは、単純に、記録をどう扱うかに関して規制者が法的規制を行わなかったか、あるいは少なくとも拘束力のある規則を制定しなかったという事実の結果であることに留意することも重要である。 |
| 6 | 連成プロセス | 6.1 | 上記のいずれかの組合せ | 連成プロセスが重要な役割を果たし得ることも明らかであり、それは危機及び資源（リソース）欠如の事例において最も容易に示すことができる。本研究では、汚染サイト及び埋立地の実例と各種要因を比較し、それらを明確に体系化する。そのために、多くの埋立地及び汚染サイトについて詳細な調査研究を行う。 |

表 4.2.1-6　対象としたケーススタディ並びに記録及び知識の喪失の主要要因のまとめ[5]

| | 記録及び知識の喪失の主要要因 | St.. Ursanne | CISA Bonfol | DIB Bonfol | Region of Basel | Riet | Bärengraben | Tössegg | Hardwald/Homberg | Kehl | Rastatt | Bad Kreuznach | Boehringer Hamburg | Prael | Bombs（爆弾） | Knielingen | Ettlingen | Love Canal | Toms River | Injection wells（井戸注入） | See dumping（海洋投棄） | Dumping in lakes（湖への投棄） |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **1** | **技術的／環境的要因** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.1 | サイトの劣化（技術設備も一部含む） | x | | x | x | x | x | x | x | x | | | x | | | | | x | x | | | |
| 1.2 | 旧処分サイトの再開発／カモフラージュ | x | | x | x | | | x | x | x | | | | x | x | x | x | x | x | | | |
| 1.3 | 記録なし／アーカイブス不足 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 1.4 | 記録の更新なし／不十分（例えば、地図、図面） | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 1.5 | アーカイブスの喪失／破壊 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | x | | | | | | | ? | ? | ? |
| **2** | **経済的要因** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.1 | 職務遂行のための予算なし／不十分 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| **3** | **人的要因** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 | 人事異動 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 3.2 | RKM 保存分野への一般的無関心 | x | x | x | x | x | x | x | x | | | x | | x | | x | x | x | x | x | x | x |
| 3.3 | 職務怠慢 | x | x | x | x | x | x | x | x | | | x | x | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 3.4 | 無知及び／又は無能 | x | | x | x | x | x | x | x | | | x | | | | x | x | x | x | x | x | x |
| 3.5 | 傲慢 | | | x | x | | | | | | | | | | | x | x | | x | x | x | |
| 3.6 | 実効リスクの過小評価 | x | | x | x | x | x | x | x | ? | x | x | x | | | x | x | x | x | x | x | |
| 3.7 | 情報及び記録の誤った理解 | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | |
| 3.8 | 不法行為（例えば、文書の改ざん、無許可処分） | x | | ? | ? | | x | | | | | | | x | | ? | ? | | x | ? | ? | |
| 3.9 | データ、情報及び記録の意図的な制限／操作 | | | ? | ? | | x | | | | | ? | | x | | ? | ? | ? | x | ? | ? | |
| **4** | **構造的要因** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.1 | 不連続性（断絶）（例えば、戦争、社会危機、倒産） | x | x | x | | | | | | x | | | | | | | | | | | x | x |
| 4.2 | 構造的欠陥（例えば、構造的能力の欠如） | x | | x | x | x | | | | x | | x | | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 4.3 | 構造的連続性なし／不十分 | x | x | | | | | x | x | x | | x | x | x | | x | x | x | x | x | x | x |
| **5** | **法規制** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.1 | 法規制の欠如 | x | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | x | x | x | x | x | x | x |
| **6** | **連成プロセス** | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.1 | 上記のいずれかの組合せ | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |

(3) 津波石碑の考察

本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014b）[6]は、NEA-RWM からの要請により、将来世代に情報及び警告を伝達するための媒体としてのマーカーの潜在的有効性への理解を深めることを目的として、日本の北東部沿岸に数百個設置されている津波に関する石碑（stone marker）の役割について検討されている。

以下にその概要をまとめた。

1) 津波に関する石碑の状況

日本の石碑（stone marker）は、破壊（壊滅）的現象について世代を超えて警告するためのマーカーとして、かなりユニークである。それらは何百もあり、日本の歴史の様々な時期に建設された。日本には何世紀も前の石碑も存在するが、大部分は 1896 年の明治三陸津波及び 1933 年の昭和三陸津波の後に設置された。2011 年の事象以後に石碑の地理的位置とメッセージに関する情報を記載したリストを作成した日本の国土交通省（MLIT）によれば、1896 年以降で 317 の石碑が建てられ、そのうちの 125（40 %）は 2011 年の津波による破壊で消失した。

なお、室浜及び姉吉は、石碑の警告に従ったとして知られているただ 2 つの村である。他にもこのような事例があるかもしれないが、大多数の村はメッセージを知らないか無視しており、致命的な結果を迎えた。

2) 津波石碑から処分場マーカー検討への考察

(a) 現象の特性

津波は繰り返し発生する事象であり、その大きさ（マグニチュード）によっては、数十年間にわたって目に見える被害を及ぼす可能性がある。事象の再発特性は、人々に対して絶えず津波のリスクを思い出させ、事象に関して石碑によってもたらされるような情報及び警告を定期的に評価できることを保証している。

一方、処分場は、洪水などの地表現象から廃棄物を遮蔽する深さに建設され、津波よりもはるかに静的であり、処分場が閉鎖されたのちには、地元住民の間で定期的に関心を高めることは有りそうもない。

予測不可能性の程度は、処分場不注意で（故意によらずに）侵入される場合に関係してくる。しかしながらその事象では、処分場の損傷もそれによる影響も眼には見えないと考えられる。これは、津波及び津波がもたらす目に見える破壊との大きな違いである。

(b) 媒体の耐久性

調査した石碑は、設置より最長 1,000 年に及んでおり、RK&M プロジェクトの用語集で定義された短期（100 年）、中期（数百年）、及び長期（十万年）の前半をカバーしている。

耐久性に関して引き出される教訓として、日本の事例では、石碑の 40%が 1 世紀

強、存在し続けており、日本のケースから、石碑の概念が実現可能かつ有益であるといえる。この理由の一つとして、様々な津波の後に新しい津波石碑碑が建てられており、経験上、新しい記念碑は時には古い石碑があった場所に建てられることが挙げられる。一方、処分場の場合、その後の多くの世代がマーカーを設置するかどうかは不明である。

(c) メッセージ

津波石碑に刻まれたメッセージは、下記のように情報提供あるいは警告（忠告）とみなすことができる。

- 記念－情報：1896 年 6 月 15 日に大津波がここに到達した。この地域で 600 人以上が死亡し、500 戸以上の家屋が損壊した
- 警告－予測：地震が来たら津波に注意せよ
- 警告－忠告：最も高い場所へ走れ。津波に捕まるから、遠く離れた場所だけに走るな、あるいは、高所の住居は我々の子孫の平和と幸福を保証する。大津波の災難を思い出せ。ここより下に家を建てるな

処分場の場合、記載すべきメッセージは、例えば次のようになるかもしれない。

- 情報型：「･･･年にここに処分場が建設された」や「･･･の深度に処分場がある」といった記念
- 忠告型：「この領域内では･･･以上の深さでの掘削をしないで下さい。あなた自身及びその他の人々が危険な放射能に曝される可能性があります」といった警告

(d) 結論

- 日本の石碑の寿命（最長で千年）は、類似の時間スケールにわたる、特に自然災害による破壊に曝されることのない地域におけるマーカーの残存可能性を例証している。同様の年齢の及びもっと古い石碑及びモニュメントは、世界の他の地域にも存在している。
- 目に見えるマーカーは記憶の保持に寄与する。しかしながら、それらは、今日の継続的警戒に実質的影響を及ぼすことのない、歴史的及び文化的な価値のある物体になる可能性がある。それらの警告機能は、過去の土地及び栄誉との連続性を有している比較的小さな地域社会（コミュニティ）で生き残る可能性が高い。
- 記憶は安全性を保証しない。地層処分場はそれ自体で安全であるべきだとする現在の国際的見解は、本研究によって裏付けられている。
- 記憶は特別な環境下で命を救う可能性があり、そうした環境は促進されるべきである。
- 記憶以上に、知識は命を救う。マーカーは、学習及び理解を促進させる、従って知識を育むためのより大きな戦略の一部となる可能性がある。例えば、そのうち発見されるように処分場サイトの近傍に戦略的に置かれたマーカーは、好奇心を

かき立て、学習意欲を高める可能性がある。

(4) モニタリングと記録との関連

モニタリング、すなわちデータを連続的に収集し、その解釈を行い、保持する活動は、記録、知識及び記憶の維持と継続的な監視の目的にとって役立つものである。

本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014d）[8]のうち、特に記録保存に関わる内容は、§6「モニタリングに関する地元自治体の期待や要請と地層処分場に関する記録、知識及び記憶の保存」であることから、その内容を中心に整理した。

§6 では、OECD 原子力機関（NEA）が、2012 年及び 2013 年に実施した「ステークホルダの信頼獲得に関するフォーラム」（以下、「FSC」と称する[1]。）での下記成果が利用された。

§6.1 では、FSC によって実施された調査手法が提示され、§6.2 では、RK&M に関連する側面やモニタリングに関する FSC の研究成果に関するレビューが行われている。

- FSC 参加メンバへのモニタリング及び RK&M の保存に関する地元自治体の期待に関して実施された質問票調査（11 ヶ国）
- FSC 参加国のうち全国レベルと地元レベルの両方で一定範囲の関連ステークホルダとの面談調査（7 ヶ国の合計 25 人）
- ステークホルダからの情報に基づく文献調査（特に下記 3 件の報告書が、モニタリング及び RK&M の保存における地元自治体の役割と期待の検討という面で有益である）
    - NEA/OECD, Radioactive Waste Repositories and Host Regions: Envisaging the Future Together, FCS National Workshop, Bar-le-Duc, France, 7-9 April 2009, NEA No. 6925 (2010)
    - Fostering a durable relationship between a waste management facility and its host community. Adding value through design and process. OECD Nuclear Energy Agency/ NEA, Paris. http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2007/nea6176-fostering.pdf
    - More than just concrete realities: The symbolic dimension of radioactive waste management. OECD Nuclear Energy Agency, Paris. http://www.oecd- nea.org/rwm/reports/2010/nea6869-symbolic.pdf

また、本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014d）の§6.3 では、本分析で使用した FSC の成果に基づき、処分場の様々な段階とそれぞれの国での背景状況を踏まえ、地元自治体がモニタリングに対して抱いている関心や期待について分析が実施されている。

[1] FSC とは、OECD/NEA により行われている廃棄物処分関係者の意見交換の場であり、テーマ別セッション、国別ワークショップ、自治体訪問を含む会合を毎年開催している。これらの活動は全て記録され、その成果として作成された文書は FSC のウェブサイト（www.oecd-nea.org/fsc/）からオンラインで入手することができる。

§6.4 では、RK&M の保存について、将来、地元ステークホルダとの議論の対象となる可能性があるのかが検討されている。

§6.5 では、上記の検討結果（§6.3 及び§6.4）を踏まえ、モニタリング及び RK&M の保存が地層処分場の長期安全性への信頼の構築及び維持にどのように役立つ可能性があるのかについての提言がなされている。

さらに§6.6 において、モニタリングと RK&M の両方を包含するものとしての「監視（oversight）」の概念に関して、その解釈に関する検討が行われている。

以降、§6 に関して、§6.2 に示されたレビュー結果の概要、及び特に§6.3～6.5 の概要及び本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014d）の結果（§8）について紹介する。

1）FSC での調査結果のレビュー

ここでは、本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014d）の§6.2 に示された、FSC による 2 つの側面（地元自治体のモニタリングに関する関心と期待、及び地元自治体と記憶の定着化）からの調査結果のうち、地元自治体と記憶の定着化について列挙する。

「記憶の定着化」とは、文化的な特徴の 1 つ、すなわち人々がそこに何があるのかを把握し、記憶に留めるようにするため、当該サイトに標識を設置し、その物語が語られるようにする物理的及び文化的な措置を講じることとして理解されている（OECD/NEA-RWMC, 2014d）。

- 安全上の理由のみならず、放射性廃棄物がユニークな社会的重要性を有することから、処分場の記憶を保存することは重要である。
- 例えば、記憶を保存する必要のある廃棄物管理施設の構想及び設計において、世界遺産プログラムにおける記憶の定着化に関する経験を考慮に入れることが有益である可能性がある。ユネスコの世界遺産委員会が保護対象として指定した記念物の基準（例えば、重要な考え、信念及び出来事などと関連する時間及び場所に関する証言）を、地元自治体及び社会が処分場プロジェクトに結びつけている価値（たとえば芸術、歴史、社会及び科学面の価値など）と関連付けることは可能であろう。
- 地元自治体は、老朽化したり、消失したりした古い標識に代わって独自の新たな標識を建設することもできることから、制度的モニタリング期間が終了した後もサイトの記憶を維持する上で地元自治体の役割はきわめて重要である。
- 一方、フランス ANDRA は、標識は将来読み取ることのできない状態となる可能性があることから、地元公衆との交流を維持することが、サイトの積極的な記憶の定着化にとってきわめて重要だと認識している。この点において処分場記録を維持するために地元の経験や自治体のアーカイブ（記録保管所）の記録（写真や紙の資料など）で構成される「生きている歴史」を活用することも示唆されている。

- 知識を将来の世代に伝達できることだけでなく、理解しやすいものであることも重要である。例えばWIPPの場合、社会は進展するものであり、したがって1つのメッセージが将来にわたり同じ意味に解釈され続けることはないことから、「意味を保つこと」もまた情報を保つ上での課題の1つであると主張している。
- 処分場の存在に関する認識を維持するための戦略が設定されることが重要であり、そのための簡単な方法の1つとして地図を利用するものが挙げられる。さらに言葉が失われた場合に備えて絵による記録も必要とされる。しかし、数世代を経た後では記号やアイコンは読解できなくなる可能性があることや、我々が必ずしも伝達される内容を理解しておく必要はないことにも留意するべきである。
- 地層処分に関して、アーカイブと標識の問題は重要なものである。大きな時間スケールを取り扱う場合、記録技術は可能な限り簡略なものとするべきである。また、このような物理的な標識やアーカイブは、処分場の計画と共に開始され、閉鎖後まで継続的に計画に組み込むことが必要である。この場合、処分場サイトは地元自治体に恒久的に存在するものであるため、現在においても将来においてもそこに住む人々と実りのある肯定的な関係が打ち立てられている必要がある。すなわち、施設は、その周辺域を含めて単に人々に受け入れられるだけでなく、事実上地元の生活構造の一部となるように設計し、実現することが重要となる。
- 施設に標識を設置する際、文化的な価値だけでなく生活を快適にするものとしての価値も与える手段の1つとなる可能性があるが、逆に標識によって侵入（すなわち意図的ではない侵入と意図的な侵入）が起こることも予期しておくべきである。

なお、一部の国では、モニタリング及び記憶の保存は、可逆性や回収可能性の問題と組み合わせて検討されている。例えば、フランスでは、数百年間にわたるモニタリングの実施が法律によって義務付けられている。ANDRAによれば、モニタリングは、それによって工学的な施設とその性能に関する情報がもたらされることから、可逆性を可能にする上で重要なものと考えられている。さらにモニタリングにより、安全性やセキュリティ面での寄与がなされるだけでなく、実施機関による定期的な可逆性問題の再検討が可能となる。

2）RK&Mの保存に関する分析

ここでは、本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014d）の§6.4に示された、FSCでの結果を踏まえたRK&Mの保存に関する分析結果を示す。なお、前項のモニタリングに関する分析と異なり、記録保存について、現時点では住民の明確な関心事ではないことから、下記に示すとおり、各国の状況にとどまっている。

- 現時点では、フランスを除き、地元からの記録、知識及び記憶の保存に関する強い公式要請が示されている結果は、得られていないものの、地層処分場が現実的な問題となる時期が近づくにつれ、記録の保管や記憶の保存に関する計画について、より強い要請が示されることが予想される。
- 米国 WIPP では、規制に含められているモニタリング要件以外に、米国 EPA により、能動的な制度的管理を実行可能な限り長期間にわたって維持する必要性が確認されており、EPA 規制により、廃棄物の危険性とその所在地を示す「受動的制度的管理」（PICs）の実施も求められている。自治体との RK&M 協議は、これまで地元レベルで「断続的に」行われてきたが、DoE は、施設の閉鎖が近づくにつれて、恒久的な標識を設置する計画や記録保管要件の決定に参加する機会を得られることを認めている。
- スウェーデンでは、SKB が将来の世代のために情報の保存を行う問題に関する検討をすでに開始しており、サイトに関する知識及び記憶を保存する上で検討可能ないくつかのメカニズムも提案している。また、スウェーデンの地元代表者たちも、RK&M の保存が、地元レベル、地方レベル及び全国レベルにおいて、さらには国際的なレベルにおいてさえ、重要な関心事になるはずだと考えている。
- 英国に関しては、1 人の面談調査対象者が、セラフィールドの過去の記録保持が貧弱なものであったことから、遺産原子力サイトの廃止措置の問題がより複雑になったと述べた。このように、原子力開発の早い時期における記録の保持に配慮が足りなかったことを受けて、記録及び知識の保存が将来において取り組むべき鍵となる分野の 1 つであるという認識がかえって高まることになった。現在進行中の英国の「原子力アーカイブ・プロジェクト」は、この問題を取り扱う記憶施設を実現することを目指している。
- カナダでは、先住民の人々との地域対話によって記憶の保存の必要性が提起されている。一方、処分場のセキュリティ問題に関連し、処分場の存在を将来の世代に伝えることへの疑問を示した人々もいた。

3) 分析結果に基づく信頼感の醸成へのモニタリング及び RK&M の役割

ここでは、本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014d）の§6.5 に示された、上記の検討結果（§6.3 及び§6.4）を踏まえ、モニタリング及び RK&M の保存が地層処分場の長期安全性への信頼の構築及び維持にどのように役立つ可能性があるのかについての提言を示す。

・ 分析結果から、モニタリングは信用を作り出し、透明性を確保し、地元ステークホルダの信頼を維持することに寄与することが明らかとなった。さらにモニタリングは、一部のケースでは長期安全性やセキュリティに関して予期されていることを実現する上で、さらには長期的な保護監視にとっても、重要なものと思われる。

・ 地元自治体にとって、モニタリングは安全性の確保と透明性の保証の両面で鍵となるものである。FSC の調査において、実際に面談調査対象者の 1 人は、安全性と信頼はともに相互に結びつくものであり、人々は安全だと信じた場合にのみ信頼感を抱くと述べた。また、別の面談調査対象者は、「モニタリングそれ自体は信頼醸成にとって十分なものではないが、それを達成する上では役立つ」と述べた。

・ 公衆の信頼に寄与するためには、独立した立場にある機関がモニタリングの実施に関与することが重要である。

・ 多くの面談調査対象者によれば、地元自治体はモニタリングプログラムへの関与において一定の役割を果たすことを希望する傾向がある。当局とステークホルダの両者によって強化された監視は、信頼醸成プロセスの一部となることができる。

・ フランスや英国などの国では、モニタリング及び記憶の保存は、可逆性及び回収可能性に関する検討にとって切り離すことのできない部分の 1 つである。

4) 監視概念に関する考察

ここでは、本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014d）の§6.6 に示された、モニタリングと RK&M の両方を包含するものとしての「監視（oversight)」の概念に関して、その解釈に関する検討結果を示す。

・ モニタリングと RK&M が実施される動機の 1 つは、閉鎖後の処分施設の安全性と監視を維持する活動の一環として記憶を維持することにある。現在までのところ、モニタリングと RK&M は一般に別々のトピックと見なされ、この両者にまったくつながりはない。本報告書で検討する監視の概念は、モニタリングが記録、知識及び記憶の能動的な保持にとって重要な役割の 1 つを果たすことを提案するものである。

・ Pescatore 他が MoDeRn ワークショップで提案し、ICRP Publ.122（2013）が提起したこの「監視（oversight）」概念は、モニタリングと RK&M の両方を包含する包括的な用語として有益である。ここでは、「監視とは、技術的なシステムだけでなく、計画や決定の実際の遂行から社会が『目を離さない』ことを意味するより一般的な用語である」。すなわち、一言で言えば、この「監視（oversight）」とは「注意深い配慮（watchful care）」を意味する。

- 監視は、さまざまに異なる活動を通じて実行することができる。ICRP のガイダンスでは、「監視の進展に伴って行われるべき様々な決定については、ステークホルダとの協議が実施されるべきである」と述べられている。様々な関係者、すなわち実施機関、規制機関、政策決定者及び地元自治体、さらには外部専門家などが、処分施設の開発及び実施の様々な段階における監視及びモニタリングの計画設定や実施に携わる可能性がある。したがってモニタリングは監視の目的にとって役立つものであり、この点において監視の一部でもある。
- ICRP は、操業開始から数十年から数百年後に直接的な監視が終了した時点で、その他の形態の受動的な管理が、すなわち当局とステークホルダによって共同で決定される記憶、記録又はそれ以外の措置などが設定される可能性がある、と述べている。
- ICRP は、この監視には 3 つの主要レベル又はタイプが存在するとしており、状況が正しいものであることを確認する目的で、その状況を注意深く見守り、チェックする何らかのシステム又は行動が含まれる（図 4.2.1-1）。
    ① 廃棄物への接近が可能な期間（処分水平坑道がまだ開かれた状態にある期間）の「直接的な監視」、
    ② 密封後に処分施設の一部又は施設全体における廃棄物への直接的な接近が再掘削を行わずにはもはや可能ではない期間における「間接的な監視」、
    ③ 処分施設の記憶が失われてしまった場合に生じる「監視の欠如」。間接的な監視が行われる期間と監視が欠如している期間は、施設を直接管理する人間が存在する必要のなくなった操業後フェーズに対応するものである。

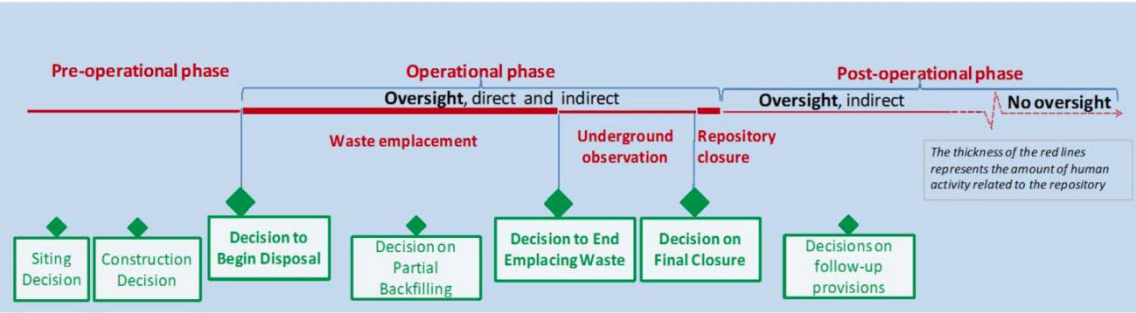



図 4.2.1-1　処分場のライフサイクルに関連する決定の例（OECD/NEA-RWMC, 2014d）

・ 2013 年にルクセンブルクで開催された MoDeRn 国際会議において「監視（oversight）」という言葉が、モニタリングと管理の両方を包含し、これらの概念を超えた用語として、すなわち技術的要素と社会的要素が共存することを認識する用語として提示された。この言葉には、規制監督や管理だけではなく、施設の存在に関する社会的記録や社会的記憶の保存も含まれる。
なお、この会議の参加者の一部は、当初はこの新たな用語の使い方に困惑した様子を見せたものの、この用語を使用することにより、後のワーキンググループ・セッションにおいて、さらなる考察に向けたいくつかの道が拓けることになった。

5）結論

ここでは、本報告書（OECD/NEA-RWMC, 2014d）の§8 に示された、結論のうち、RK&M 及び「監視（oversight）」に関する内容を列挙する。

- FSC の調査結果では、モニタリング及び RK&M の保存は、現時点において 1 つの国又はサイト固有の解釈がなされ得る概念であることが示唆されている。ただし、これら概念は時の経過と共に変化する可能性があり、誰が定義するかに応じて異なる意味を持つ可能性もある。したがって、ステークホルダとの協議を通じて明確化をはかり、共通理解を実現してゆかなければならない。
- FSC の質問票調査、文献調査及び面談調査の結果に基づく限り、モニタリングがどのように RK&M の実現及び保存に寄与するかに関して、さらには自治体がこのプロセスにおいてどの程度の役割を果たし得るかに関して、実施された作業や作成されたガイダンスは比較的少ない。このため、ここでは、この論議に対して情報を提供すると共に、この分野で実施されている取組み又は対話の例を示すことにとどまることとした。
- 本研究において、地元ステークホルダが、施設におけるモニタリングと RK&M の保存に関心を持っていることが示されている。地元ステークホルダは、モニタリングがどのように実施されるのか、モニタリングの対象として何が重要であるのか、またそれはなぜなのかについて知ることを望んでいる。それに加えて地元自治体は、モニタリングは立地手続きの早い段階から実施されるべきであること、継続的に見直されること、施設の閉鎖と共に終了されるべきではないことをことを認識している。
- 地元ステークホルダが関心を持つ、モニタリングの対象は、環境面での影響、社会-経済的な要素、そして特殊なケースにおける健康問題が含まれる。また、RK&M の保存に関しても、明確な関心が存在する。
- フランスなど一部の国では、モニタリングと RK&M は密接に関連するものと見なされており、国及び地元の当事者がこれらの問題に関する作業を密接な協力のもとで進めている。将来の課題の中には、モニタリング及び RK&M の保存に関

連した問題が含まれる。

- 多くの国において、モニタリングに関する要請及び期待の方が、RK&M に関するものと比べて明確に定義されている。RK&M については、公式の要請が報告された証拠はほとんどない。しかし様々な国々において、地元自治体が放射性廃棄物管理プログラムの様々な段階への関与を深めるにつれ、これらの自治体の関心が当該概念のさらなる検討に向けられることが明確になってきている。
- FSC の調査結果より、処分施設は、地元の生活の一部となるだけでなく、文化及び快適さの面での価値に関し、世代を超えて付加することにより、当該自治体が誇りに思えるようなものとなるよう設計し、実現することが課題であることを示している。この点から、様々な国の今後の検討及び開発テーマの一つは、地元自治体が処分場の記憶の維持にどの程度寄与できるか、であるといえる。
- 地元自治体は、施設の安全性に対する信頼を確保し、維持するための手段として継続的な監視への参加をもとめる可能性がある。しかし、こうした関心はしばしば、モニタリングの対象とされるべき重要な側面や対象となる時間スケールの定義が可能となるほど具体的なものではない。このため、モニタリングが地層処分に対する信頼醸成にどのように寄与できるのかを明らかにするだけでなく、様々な国の背景状況において地元自治体が監視活動にどのように関与できるかを明らかにするためにさらなる研究が行われることが、その役割、要請及び期待をより明確なものとする上で役立つ。
- MoDeRn プロジェクトでは、モニタリングを「技術及び産業面での革新と同様に、社会及び制度面での革新の追求」を伴う「社会-技術的活動」として認識するべきだという提案が示されている。モニタリング活動を支援する手段の 1 つとして RK&M が一定の役割を果たすことができると認識することにより、この社会面からのアプローチを強化することができる。立地が行われる時期が近づくにつれて、RK&M に関する具体的な関心及び期待が表面化しつつある。これまでのところ、いくつかの国で知識を将来の世代に伝えるための最善の方法に関する非公式及び公式の協議が進められている。
- 「監視（oversight)」により、長期モニタリングと RK&M の保存を包含する有益な概念的な枠組みがもたらされる。監視（oversight）のレベルとその進展に関する決定は、施設の挙動への信頼度、社会的及び経済的な要素など、様々な要素に基づくことになろう。これらの問題に関する実施機関、規制機関及び関係するステークホルダの見解を知ることは、地層処分の監視（oversight）の性質及び役割に関してさらなる洞察を得る上で役立つ可能性がある。ICRP Publ.122（2013）が検討したように、「監視（oversight）の組織化や推移に関する決定についてはステークホルダとの議論がなされるべきである」。
- 以上をまとめると、本報告書で提示された監視（oversight）は、技術的側面か

らの処分場管理だけではなく、地元の受入れ側及びその他のステークホルダとのモニタリングに関する取り決めを通じて、実行することができる。

### 4.2.2　プロジェクト状況の調査

下記を含む公開情報を参考に、当該プロジェクトについての状況及び今後の計画に関する調査・整理を行った。

① Articles about strategic aspects of the preservation of Records, Knowledge & Memory (RK&M) across Generations（OECD/NEA-RWMC, 2014c）[7]

本年度は当該プロジェクトの Phase-I の終了年度であり、2014 年 9 月 15～17 日に NEA 主催（運営 ANDRA）による国際会議「Preservation of Records, Knowledge and Memory of Radioactive Waste across Generations An International Conference and Debate」が開催されたことから、これに出席し、この概要も取り纏めた。

また、本年度より当該プロジェクトの Phase-II が開始されたことから、Phase-II における検討の予定についても記載する。

(1) プロジェクト状況

RK&M の Phase-I では、下記トピックに関する各国の状況を把握･整理するとともに、様々な分野からの意見が交わされた。

1) アーカイブ（Archives）：

- RK&M における役割について議論がなされた。
- 各国のアーカイブに関する規制について調査が行われ、多くの国で公文書管理法は制定されており、国の文書は移管・保管されることになっている。
- 今後の方針として下記が挙げられている。
  - ・ANDRA のラ・マンシュや他国の記録管理方法は利用すべきである。
  - ・英国 NDA の原子力アーカイブの情報は継続的に調査すべきである。

2) 関連文献集の作成（Bibliography）：

- RK&M では、放射性廃棄物処分のための記録保存に関する関連文献集を作成した。
- 今後は、文書の追加を継続するとともに、検索のための関連付けなどの検討を行う。

3) RK&M の喪失に係る主要因子：

- 放射性廃棄物処分に関する記録の喪失の主要因子を理解するため、有害物質管理における経験に関する調査・分析を実施した（この成果は、本調査の対象文書である OECD/NEA-RWMC(2014a)に該当する）。
- この結果として抽出された主要な要因は、次の通りとされた。
  - ・リソース（人員及び財政上）の欠如：人員の退職や財政面の打切
  - ・スキル（知識及び理解力）の欠如：RK&M への無知／無能力／無関心
  - ・責任（ヒューマンエラー、傲慢など）の欠如：不適切な記録の作成
  - ・制度的な問題：RK&M に関して意識の低い規制、文書の改ざん、不法投棄
  - ・重大事象（政治的及び環境面）：紛争、社会の持続性の断絶

・ 今後の活動としては、下記が提案されている。
  ・回避可能な喪失の主要要因の特定とその方法
  ・喪失した RK&M の修復・再構築に関する方法
  ・消滅した言語の再構築の例としてシンボルの解釈

4) 安全性との関連

・ RK&M と安全性との関連性は、議論され続けられている課題の一つであるが、当プロジェクトでは、この課題に関して 2 つの見地（「RK&M は、処分場閉鎖後においても安全性に関する目的で必要なのか？（技術的な見地からの安全性確保）」及び「安全は規制においてでさえ、一義的に定義づけられていない（より広義な安全性）」）からの議論を行った。
・ 今後の活動としては、他分野からの意見も踏まえ、安全性に関する RK&M の位置づけについてさらに議論を進める。

5) 指針（Guiding Principles）：

・ 当プロジェクトでは、処分場の「Oversight」という観点から、 RK&M の保存に関する指針について議論を行った。

6) 国際的な取組（International Mechanisms）：

・ 国際的な記録や文化財保存（UNESCO、EC 指令、ESPOO、OSPAR、IAEA など）に関する取組について調査を行った。
・ 今後の活動としては、下記が提案されている。
  ・中期及び長期の観点での RK&M に関連する既存の記録保存（例えば IAEA の放射性廃棄物管理データベース（NEWMDB））を対象とした調査・分析を行う。
  ・継続的な他の関係者（例：有害廃棄物の管理会社や農業関係者）の特定と関係の構築
  ・規制の観点以外の民間又は半民間のプロジェクトで実施されている関連手法についての調査（地質、鉱山（SMRI）、リモートセンシング関連（ISPRS））

7) マーカー：

・ マーカーに関しては、長期の地層処分に関連する議論の中で再度取り上げられた議題であり、2 種類の研究（文献レビュー(OECD/NEA-RWMC, 2013)及び日本の津波石碑が果たした役割(OECD/NEA-RWMC, 2014b)）が実施された。
・ 当プロジェクトでの議論の結果、今後も調査を継続することとされている。
・ 今後の議論の内容として下記が提案されている。
  ・RK&M の保存にマーカーが果たす役割とその期間
  ・RK&M の保存の体系的アプローチにマーカーが占める部分
  ・マーカータイプなどの国際標準についての議論
  ・（単純なメッセージを伝達できるマーカーとしての）タイムカプセル

8) モニタリングと当プロジェクトとの関係

・ Phase-I では、 2 種類の研究（技術的な観点からの「地層処分施設のモニタリン

グ」及び社会的な観点からの「地域のコミュニケーション」）が実施され、モニタリングとの関連性について議論された。

- ANDRA の活動（施設及び環境モニタリングとアーカイブ）についての紹介。モニタリング活動には、事業者のみならず規制や地域が様々な形で関与しており、施設の社会的な「Oversight」に寄与している。
- 今後は、米国 DOE のレガシ管理やラ・マンシュについてのモニタリング項目、責任の所在の変化、RK&M 保存におけるモニタリングの役割に関するケーススタディ、が提案されている。

9) 規制：

- 記録保存に関する「規制カタログ」が作成されている。
- 今後の内容としては、下記が提案されている。
- 長期的な RK&M 保存に関する規制機関と関係者の役割についての議論
- 当プロジェクトは、規制機関と連携し、処分場閉鎖時の適切な RK&M の移管や責任の配分などに関する議論

10) 用語集の作成

- 今後は、用語集の精査を継続するとともに必要に応じ用語の追加を行う。

(2) 国際会議の概要（2014 年 9 月 15～17 日）

NEA 主催の国際会議「Preservation of Records, Knowledge and Memory of Radioactive Waste across Generations An International Conference and Debate」が 2014 年 9 月 15～17 日にフランス北東部の Verdun（パリ市内より約 250km）の世界平和センター（Centre Mondial de la Paix）にて開催された（OECD/NEA-RWMC Web ページ[9]）。

1) 参加機関

会議は、17 ヵ国、約 200 名程度が参加した。参加者の主な職種機関は、以下の通りであった。

- 処分を含む技術関連機関(35%),
- 地域ステークホルダ(24%),
- 大学等の学術機関(7%),
- 調査機関（5%）
- アーカイブ関連（5%）
- 映像分野の芸術家及び国際機関(IAEA, EC)(14%)

図 4.2.2-1　NEA 国際会議の様子

2) 会議の目的・範囲

本会議の目的は、NEA の実施している RK&M（記録、知識及び記憶）プロジェクトの現状及び将来の見通しや課題に関し、様々な専門分野の利害関係者間での議論を行うフォーラムを提供することである。この目的のため、放射性廃棄物管理のみならず、アーカイブ、文化遺産、考古学、通信、記号論や芸術など、幅広い見地から、RK&M の保存に関する今後の見通しやプロジェクトに関する発表及びグループ討論を含む議論が行われた。

3) 会議の結論（総論）

最終日の Pescatore 氏による総括では、本会議を通じて、次の結論が得られたことが示された。

- 本会議を通じて、幅広い見地から RK&M のイニシアチブは概ね受け入れられたこと。
- プロジェクト参加者[2]へ今後の作業への方針へ重要な情報提供の場となったこと。
- RK&M に関しては、今後も国際的に共通の認識が必要であること。

[2] ANDRA (France), DOE (USA), GRS (Germany), Nagra (Switzerland), NDA (UK), NWMO (Canada), Ondraf/Niras (Belgium), Puram (Hungary), SURAO (Czech Republic), SCK・CEN (Belgium), SFOE (Switzerland), SKB (Sweden), SSM (Sweden), STUK (Finland), IAEA(サポート機関として)

4) 会議の内容

会議プログラムとその概要を以下に示す。

| 第 1 日目 |
|---|
| **Monday, 15 September 2014**<br>14:00 – 16:45　Registration & exhibition opening<br>16:45 - 19:30　Conference Opening<br>① Welcome by the President of the Centre Mondial de la Paix, G. Longuet (France)<br>② Welcome by President of the NEA RWMC, J.-P. Minon<br>③ Welcome by the President of ANDRA, F.-M.Gonnot (France)<br>④ First Opening lecture by Professor M. Ioannides, Cyprus University of Technology<br>Coffee break<br>⑤ Second Opening lecture by Professor Emeritus K. Kornwachs Technical University of Cottbus- Senftenberg (Germany)<br>⑥ Presentation by RK&M Project "RK&M project findings & guiding principles, C. Pescatore, RK&M<br>19:30 - 20:15　Vernissage of artistic exhibitions |
| ・ 会議初日であり、前半は Centre Mondial de la Paix 館長である Longuet 氏（Bure サイトのある Meuse 県の議員でもあった）、NEA-放射性廃棄物管理委員会の Minon 氏（ONDRAF）、Gonnot 氏（元 ANDRA 社長）より開会の挨拶が行われた。<br>・ キプロス工科大学の Ioannides 教授からは、EU 予算で実施されている歴史的建造物に関するデジタルアーカイブ化に関する研究の紹介がなされた。<br>・ コトブス工科大学の Kornwachs 教授からは、他の分野での事例を交えた知識と情報に関する世代間の伝承についての研究紹介がなされた。<br>・ 第 1 日最終は、NEA の Pescatore 氏より RK&M プロジェクトに関する概要が説明された（右写真）。これによれば、RK&M プロジェクトは 2014 年より Phase-II が開始され、12 ヶ国及び IAEA が参加する予定であるとのことである。なお、Pescatore 氏は過去の RWMC が SKB と共同でローマにおいて開催した記録保存に関する国際ワークショップにも参加している。 |

| 第 2 日目 |
|---|
| **Tuesday, 16 September 2014**<br>09:00 – 10:45　Session 1 "Short Term (up to ~100 years) / Preparing for repository closure" - Presentation　Session Chair: J.-P. Minon, ONDRAF |

(Belgium)

Presentations by：

1) J. Schröder, RK&M, SCK/CEN (Belgium)

2) S. Tucker, NDA (United Kingdom)

3) H. Codee, COVRA (Netherlands) tbc

4) F. Espiet-Subert, ANDRA (France)

5) Panel discussion (including questions from audience)

Coffee break

11:15 – 13:00 Session 2 "Medium Term (up to ~ 500 years) – Period of continued oversight" - Presentation

Session Chair: M. Sailer, Öko Institut (Germany)

Presentations by：

1) S. Hotzel, RK&M, GRS (Germany)

2) A. Storm, Stockholm University (Sweden)

3) R. Moxham, Author of "The great hedge of India"(United Kingdom)

4) C. Jacobs, Limonade&Co (France)

5) Panel discussion (including questions from audience)

Lunch break

14:45 – 16:15 Session 3a Discussion in groups on Short and Medium Term

Group discussions (3 groups per timescale)

Tea time / Break for session rapporteurs to prepare (30 min)

16:45 – 17:45 Session 3b Plenary wrap-up of the discussions in groups

Session Chair: J. Fekete, RHK (Hungary) tbc

Group Moderators reports

Plenary discussion

- NEA-RK&M プロジェクトでは、記録保存に関わる期間を「oversight（監視）」と呼ばれる考え方を取り入れ、下記の 3 段階に区分した検討が行われている。
  - 直接的に処分場を監視可能な操業前から操業段階（短期）：約 100 年間
  - 間接的には処分場を監視可能な操業後段階（中期）：約 500 年まで
  - 処分場の監視は困難な操業後段階（長期）：約 500 年以降

- 会議 2 日目は、この段階のうち①の短期と②の中期に関し、主に処分実施機関からの検討例についての説明があり、その後グループディスカッションが行われた。下記にこれまでの原環センターにおける調査に関連する進捗状況等を示す。

- UK の原子力アーカイブに関し、NDA より説明があったが、現時点では建設地の誘致は完了したものの、建設は今後とのことであった。
- ANDRA の CSM（ラ・マンシュ）では、これまで文書による記録が主体であったが、CSM のディレクタである Subert 氏によれば、マーカーの検討が開始されているとのことであった。
- 
- また、現在のプロジェクトとしては、①詳細記録に関するユーザーガイドの作成、②新規の文書分類、③社会に関する情報の追加、④新しいバージョンの概要記録の検討などがある。
- グループディスカッションの議題は、「アーカイブ」についてであったが、Chair-man の準備不足のため議論が発散し、纏まった内容とはならなかった。

第 3 日目

**Wednesday, 17 September 2014**

08:30 – 10:00 Session 4 "Long Term (period beyond ~500 years) / Period of loss of oversight – Presentations

Session Chair: S. Laârouchi Engström, SKB (Sweden)

Presentations by :

1) A. Claudel, RK&M, Nagra (Switzerland)

2) D. Barrowclough, Cambridge University (United Kingdom)

3) Professor D. Harmand, University of Lorraine (France)

4) Professor C. Holtorf & A. Högberg, Linnaeus University (Sweden)

5) Panel discussion (including questions from audience)

10:10 – 11:00 Session 5a "Long Term (period beyond ~500 years) / Period of loss of oversight – Group discussions

Session Chair: F. Boissier, ANDRA (France)

Group discussions (all groups on the Long Term timescale)

Coffee break and preparation for session chair with the moderators (30 min)

11:30 – 12:00 5b Plenary wrap-up of the group discussions

Report by session chair

Plenary discussion

12:00 – 12:30 Conference Closure

Conference main messages for decision-makers by B. Sido tbc (France)

Conference rapporteur's report by Professor E. Van Hove, Antwerp University

| |
|---|
| (Belgium)<br>Word of thanks　by C. Pescatore, RK&M Coordinator |
| ・　最終日は午前中のみのセッション及びグループディスカッションが行われた。議題は、2 日目に引き続き、長期に関する記録（マーカーを含む）についてである。<br>・　長期に関するグループディスカッションの議題は、「体系的アプローチ」であった。今回は ANDRA や NDA による事前準備が行われており、議論は発散することなく進められた。内容的には、下記に関する発言があったものの、基本的には、図 4.2.2-2 に示した、原環センターによる検討成果（杉山ほか, 2009）と同様であることを確認した。<br>　・　マーカーシステムの世代間での更新（再設置）について<br>　・　国際的なネットワークが重要であること |

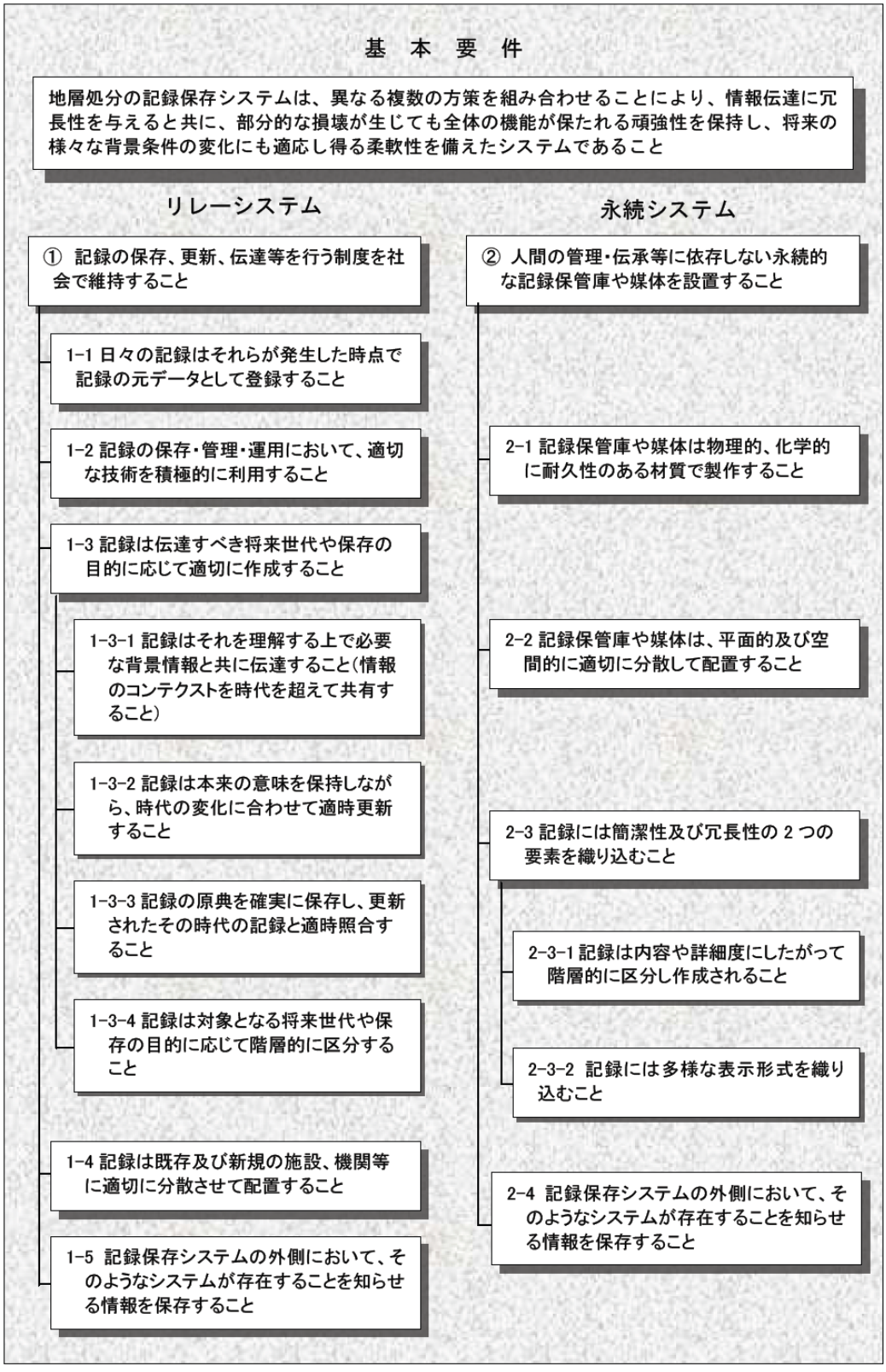



図 4.2.2-2　記録保存における要件の階層構造（RWMC-TRJ-08001）

## 4.3　石英ガラス内部へのデジタルデータ記録技術

2012 年、デジタルデータの半永久的保存を目指して、耐熱性・耐水性に優れている石英ガラス内部に、コンパクトディスク（以下、「CD」と称する）並みの容量のデータを記録・再生する技術が開発された（以下、「2012 年の媒体技術」と称する）[12]。この技術に関しては、すでに調査・報告済みである（原環センター, 2013）[2]。

一方、本年 10 月に同じく石英ガラスを用いたブルーレイディスク ™（以下、「BD™」と称する）並みの容量のデータを記録・再生する技術が開発されている（以下、「本調査での媒体技術」と称する）[11]。以下に、2012 年の媒体技術との比較を行い、過去の調査（原環センター, 2013）と同様に地層処分への適用可能性について検討した。

### 4.3.1　石英ガラスに関する技術内容の比較

2012 年に実施した調査及び本調査での媒体技術、並びに原環センターが検討を行った SiC（炭化ケイ素）板へのレーザー刻印技術との比較結果を表 4.3.2-1 に示す。

2012 年の媒体技術より本調査での媒体技術の改良点は、次の通りである。

- 2012 年の媒体技術では、その耐久性について「1000℃で 2 時間加熱する高温劣化加速試験を行った結果、数億年以上の長期保存が可能であること」より耐年数が「3 億年以上」であることが示された。
- 本調査での媒体技術の最大の改良点は、①記録可能な情報量が格段に増加したことと、②再生技術に関しても改良が加えられ読み取りエラーが低減されたことである。

上記のように、石英ガラスへのレーザー記録技術の媒体に関する仕様に変更はない。このため、SiC 媒体との比較においては、前回調査結果（原環センター, 2013）[2]と同様、物性に関してはほぼ同等であり、記録・再生に関しては、コンセプトが異なるため、単純比較はできない。

### 4.3.2　石英ガラスへのレーザー記録技術の地層処分への適用性

前項での比較結果を踏まえて、石英ガラスへのレーザー記録技術の地層処分への適用性及び課題を下記に列挙した。

なお、結論としては、既往の調査結果（原環センター, 2013）[2]と同様である。

- 媒体の耐久性については、ほぼ同等であるが、SiC が物理的影響に強いことに比べ、石英ガラスは SiC よりもこの点で若干劣っている。よって、文書記録の保管庫などへの長期保存には優れているものの、マーカーなどへの利用については限

定的であると考えられる。

- 情報の記録に関して、SiC 板へのレーザー刻印技術のコンセプトとしては、現在の文化や社会が消滅した場合も考慮し、あらゆる再生技術がなくなった場合でも対応可能とするため、文字を直接刻印する、というものである。一方、今回の石英ガラスへのレーザー記録技術は、基本は、現在のデジタル情報であり、デジタル信号の解読技術が必要となる。
- SiC 板へのレーザー刻印技術と同様の技術で、石英ガラスへのレーザー記録により文字の刻印も可能であると考えられるが、視認性の観点で課題があると考えられる。

表 4.3.2-1　石英ガラスに関する記録媒体技術の比較

| 比較項目 | | SiC へのレーザー刻印技術[a] | 石英ガラスへのレーザー記録技術 | |
|---|---|---|---|---|
| | | | 2012 年の媒体技術[b] | 本調査での媒体技術[c] |
| 媒体 | 材質 | 炭化ｹｲ素（SiC） | 石英ｶﾞﾗｽ（$SiO_2$） | 石英ｶﾞﾗｽ（$SiO_2$） |
| | 硬度 | 9-9.5（Mohs）[d] | 5.3-6.5（Mohs）[d] | 5.3-6.5（Mohs）[d] |
| | 耐熱性 | 2730 度（融点）[d]<br>電気炉に入れ 700 及び 1000℃で最大 3 週間加熱した結果、視認性に影響なし | 1650 度（融点：Si02）[d]<br>1,000℃で 2 時間加熱する高温劣化加速試験を行った結果、劣化無くﾃﾞｰﾀを再生できたことから数億年の耐久性を有するとした。 | 1650 度（融点：Si02）[d]<br>**1,000℃で 2 時間加熱する高温劣化加速試験を行った結果、劣化無くﾃﾞｰﾀを再生できたことから 3 億年の耐久性を有するとした。** |
| | 耐水性 | 不溶（水）[d] | Si02：0.012 g/100 mL（水）[d] | Si02：0.012 g/100 mL（水）[d] |
| | 耐衝撃性 | 厚さ 1 及び 3mm では破壊したが、厚さ 5mm 以上では視認性に影響なし | 不明 | 不明 |
| | 摩擦 | 圧力 1kg/cm2、20cm/s の速度で摺りあわせた場合、摩耗距離 100m まで、文字の視認性は確認 | 不明 | 不明 |
| | 腐食 | 室温及び 80℃で 1N 及び 10N の塩酸、硫酸溶液に最大 3 週間浸漬させたところ、常温では実験前と視認性は変化なし。<br>80℃下では、10N 水酸化ﾅﾄﾘｳﾑ溶液において、視認性の低下が確認。 | 一般的なガラスは、フッ酸には溶解するが、その他はほとんど影響を受けないと思われる。 | 一般的なガラスは、フッ酸には溶解するが、その他はほとんど影響を受けないと思われる。 |
| 記録 | 記録方式 | ﾚｰｻﾞｰにより表面に文字を刻印 | 高出力ﾚｰｻﾞｰによりｶﾞﾗｽ内部 4 層にﾃﾞｼﾞﾀﾙ情報をﾄﾞｯﾄ記録 | **球面収差補正ﾚﾝｽﾞを採用したﾚｰｻﾞｰにより品質劣化を抑え，ｶﾞﾗｽ内部 100 層にﾃﾞｼﾞﾀﾙ情報をﾄﾞｯﾄ記録** |
| | 情報量 | 10cm×10cm×1mm の SiC に、A4 版ﾚﾎﾟｰﾄ 6 ﾍﾟｰｼﾞ分の文字を両面に刻印（合計 12 頁） | 2cm×2cm×2mm の石英ｶﾞﾗｽ内部 4 層に CD 相当のﾃﾞｼﾞﾀﾙ情報 | **2cm×2cm×2mm の石英ｶﾞﾗｽ内部 100 層（片面 50 層づつ）に BD™相当のﾃﾞｼﾞﾀﾙ情報** |
| 再生 | | 文字刻印であるため再生機器は全く不要（ﾙｰﾍﾟ程度） | 20 倍程度の光学顕微鏡で読み取り、補正後ﾃﾞｼﾞﾀﾙ情報を変換 | **ﾉｲｽﾞ除去再生ｱﾙｺﾞﾘｽﾞﾑを適用した 20 倍程度の光学顕微鏡で読み取り、ﾃﾞｼﾞﾀﾙ情報を変換** |

**注記**　石英ガラスへのレーザー記録技術については，「2012 年の媒体技術」及び「本調査での媒体技術」との相違点を**赤フォント**で示した。
**注記[a]**　杉山ほか（2009）[10]
**注記[b]**　原環センター（2013）[2]、株式会社日立製作所（2012）[12]、ASCII デジタル記事（2012）[13]、日経コンピュータ記事（2012）[14]
**注記[c]**　株式会社日立製作所（2014）[11]
**注記[d]**　文献値による。

## 4.4 まとめと今後の課題

### 4.4.1　まとめ

放射性廃棄物の処分における記録保存に関する最新動向として、昨年度に引き続き、OECD/NEA の RK&M プロジェクトの調査を実施した。

本年度は RK&M プロジェクトの Phase-I の終了年度であり、引き続き Phase-II が開始された。Phase-I では下記トピックに関する各国の状況を把握・整理してきた。

- アーカイブ（Archives）
- 関連文献集の作成（Bibliography）
- RK&M の喪失に係る主要因子
- 安全性との関連
- 指針（Guiding Principles）
- 国際的な取組（International Mechanisms）
- マーカー
- モニタリングと当プロジェクトとの関係
- 規制
- 用語集の作成

本年度の調査対象として、最新主要報告書である下記の文献を選定した。

- 「マーカーに関する文献整理」[4]
- 「記録の喪失に関する検討」[5]
- 「津波石碑の考察」[6]
- 「モニタリングと記録との関連」[8]

主要報告書のうち「マーカーに関する文献整理」[4]は、2008～2010 年にスイス連邦エネルギー局（BFE）の委託により、原子力安全検査局（ENSI）の Marcos Buser を中心としたグループにより作成された文献の改訂英語版である。本報告書の目的は、主として、放射性廃棄物処分に責任を有する様々な組織、国家機関、及び関心を有する公衆に情報を提供するように、また、テーマの複雑さ及び将来対処しなければならない多様な問題を伝達することにある。この目的のもと、1990～2000 年代を中心にマーカーの概念、実施あるいは要件等に関する技術報告書、学術論文、国の規制等を調査し、マーカーシステムに関連する下記の課題や問題点が整理され、特に議論が必要な課題として下記の検討が実施された。

- マーカーに関する基本的な課題
- 人間及び社会に関する問題点
- 地表環境及び地下空間
- マーカーと構造物

・ 経時的な情報伝達
・ マーカーシステムの喪失に対する感受性

マーカーに関する基本的な課題については、全ての文献でマーカーには、警告機能を有すべきであるとされていること、複数の文書類では処分場の認知を維持するためには“記憶の文化”の必要性も言及されていることが示された。一方、警告の伝達には非常に大きな構造的かつ経済的な課題を有する可能性があることが示唆された。

人間及び社会に関する問題点に関しては、将来の誰に向けて警告すべきか、マーカー設計に関し、記憶の保存を維持すべき期間について調査結果が示されるとともに、マーカープログラムを検討する際の考慮事項として、処分場への侵入に対する動機についての分析がなされ、その侵入低減措置の提案を行っている。

地表環境及び地下空間に関しては、マーカーに関して予測される時間枠における地表環境の変化について述べられ、情報の耐久性及び安定性の問題に関し、適切な材料の選定や開発課題が議論された。また、処分場は忘却されるべきかについても議論されている。

マーカーと構造物については、地表設置されたマーカーの耐久性について言及されるとともに、マーカー技術の要件が整理されている。なお、マーカー単独での処分場への侵入阻止は困難であるとの結論に達している。

経時的な情報伝達については、知識の保存のための伝達方法については、統一的な見解はみられないこと、言語及び文字を介した情報伝達の技術及び問題点について議論しているものの、記号論的な伝達が優位であるとの見解もなされていないことが記載されている。

マーカーシステムの喪失に対する感受性については、情報が喪失することは広く認識されており、意識的及び無意識な行為を通じて、情報が損失する多くのエラー源が存在すること、中央集権化されている際には、情報管理が意図的に操作され得ることが示されている。

「記録の喪失に関する検討」[5]では、NEA プロジェクトを実施するための参考情報として、スイス、米国及びドイツにおける埋立地並びに有害廃棄物の旧工業用地又は処分サイトの事例を参考に情報の喪失に係る調査・整理が行われている。また、情報の調査・整理結果から、情報、記録、知識及び記憶の喪失に関する共通の主要要因が特定され、各事例との対照も行われた。本研究から、廃棄物処分に関する全ての情報が喪失することは稀であるが、細部が最初に失われる傾向にあること、及び、多くの記録は、不十分なデータを用いて作成され、一旦失われると記録を再構築することは非常に困難であることが指摘されている。また、知識の喪失の要因分析の結果、特に以下に示す 4 つの理由が、調査事例の全てにおいて関連寄与要因として特定されたとしている。

・ 記録なし又はアーカイブス不足
・ 記録の更新なし／不十分
・ 職務遂行のための予算なし／不十分
・ 人事異動

さらに、稀ではあるが防止の困難な要因として下記の 2 つを挙げている。

- 不法行為
- 社会的不連続性（断絶）

このような事例検討を踏まえ、本報告書では、「将来に向けて関連知識を保管するために、原子力を利用している諸国の既存の法令を補完することが肝要である」ことが示唆されている。

「津波石碑の考察」[6]では、将来世代に情報及び警告を伝達するための媒体としてのマーカーの潜在的有効性への理解を深めることを目的として、日本の北東部沿岸に数百個設置されている津波に関する石碑（stone marker）の役割について検討された。その結果、日本の石碑の寿命（最長で千年）は、類似の時間スケールにわたるマーカーの残存可能性を例証していること、目に見えるマーカーは記憶の保持に寄与するが、継続的警戒に実質的影響を及ぼすことのない、歴史的及び文化的な物体になる可能性があることが述べられている。また、記憶は安全性を保証しないが、特別な環境下で命を救う可能性がある。さらに、記憶以上に、知識は命を救うと結論している。

「モニタリングと記録との関連」[8]については、第 2 章にて概要を紹介しているが、第 4 章では記録保存に関連の深い内容を中心に整理した。記録保存に関連する結論として、地元ステークホルダが、施設におけるモニタリングと RK&M の保存に関心を持っており、モニタリング及び RK&M の保存は、ステークホルダとの協議を通じて明確化をはかり、共通理解を実現してゆかなければならないこと、また、RK&M については、様々な国々において、地元自治体が放射性廃棄物管理プログラムの様々な段階への関与を深めるにつれ関心が向けられることが明確になってきていることが述べられている。さらに、モニタリングと RK&M の保存を包含する有益な概念的な枠組みとして「監視（oversight）」を挙げた上で、「監視（oversight）の組織化や推移に関する決定についてはステークホルダとの議論がなされるべきであるとしている。

以上の文献調査に加え、記録保存に関する技術的な進展に関する調査を実施した。その結果、本年 10 月に、石英ガラスを用いた BD™ 並みの容量のデータを記録・再生する技術が開発されており[11]、これに関して、過去の調査（原環センター, 2013）[2]と同様に地層処分への適用可能性について検討した。その結果、地層処分への適用可能性は、既往の調査結果（原環センター, 2013）[2]と同様であることがわかった。

### 4.4.2　今後の課題

OECD/NEA の RK&M プロジェクトに関しては、調査結果に示したように 2014 年より Phase-II として検討が開始されている。Phase-II では、例えば規制機関の役割（長期的な RK&M 保存に関する規制機関と関係者の役割や処分場閉鎖時の適切な RK&M の移管や責

任の配分など）に関する議論やマーカータイプなどの国際標準についての議論など、具体的な内容が予定されている。さらにプロジェクトの中心は、これまでの調査対象機関（フランス ANDRA・英国 NDA）であり、各国の最新状況の把握という観点でも今後もその動向に注目していく必要がある。

技術的な面では、個別の記録技術よりも記録保存システムの中でどの部分にどの技術を適用するかを、冗長性の確保等の側面から検討する必要があるものと考えられる。

第 4 章参考文献


[1] 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会（2009），放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究（平成２２年度～平成２６年度），http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g91019d01j.pdf

[2] 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報告書（第 3 分冊）-モニタリング技術の開発- 平成 25 年 3 月.

[3] 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開発- 平成 26 年 3 月.

[4] OECD/NEA-RWMC (2013): Literature Survey on Markers and Memory Preservation for Deep Geological Repositories, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M), NEA/RWM/R(2013)5. https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2013/rwm-r2013-5.pdf

[5] OECD/NEA-RWMC (2014a): Loss of Information, Records, Knowledge and Memory – Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/R(2014)3. https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-3.pdf

[6] OECD/NEA-RWMC (2014b): Markers - Reflections on Intergenerational Warnings in the Form of Japanese Tsunami Stones, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/R(2014)4. https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-4.pdf

[7] OECD/NEA-RWMC (2014c): Articles about strategic aspects of the preservation of Records, Knowledge & Memory (RK&M) across Generations, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/RKM(2014)5. http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-rkm2014-5.pdf

[8] OECD/NEA-RWMC (2014d): Monitoring of Geological Disposal Facilities: Technical and Societal Aspects, , Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/R(2014)2. http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-2.pdf

[9] OECD/NEA-RWMC Web ページ「An International Conference and Debate on the Preservation of Records, Knowledge and Memory of Radioactive Waste across Generations」 https://www.oecd-nea.org/rwm/rkm/verdun2014/

[10] 杉山 和稔、高尾 肇、杉山 武，青木 和弘，大内 仁，坪谷 隆夫（2009）：地層処分にかかわる記録保存の研究－位置付け・方策・技術的可能性－、原環センター技術報告

書　RWMC-TRJ-08001
http://www.rwmc.or.jp/library/file/RWMC-TRJ-08001.pdf
[11] 株式会社日立製作所（2014）：石英ガラスの内部にブルーレイディスク ™ 並みの記録密度でデジタルデータの記録・再生に成功
http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2014/10/1020a.pdf
[12] 株式会社日立製作所（2012）：石英ガラスの内部に CD 並み容量のデジタルデータを記録・再生する技術を開発
http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2012/09/0924.pdf
[13] ASCII デジタル記事（2012）：保存期間は 3 億年？最強のメディアの正体を日立製作所に聞く
http://ascii.jp/elem/000/000/743/743706/
[14] 日経コンピュータ記事（2012）：数億年保存のストレージ向け、石英ガラスに CD 並み密度で記録する技術を日立が開発
http://itpro.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20120924/424764/

# 第5章　地層処分モニタリング技術メニューの整備

## 5.1目的と概要

地層処分に関するモニタリング計画は、個々のモニタリング項目に関する機器情報等を踏まえて策定する必要があるが、地層処分モニタリング技術メニュー（以下、技術メニュー）は、これらの技術情報を体系的に整備し、処分事業実施者や安全規制機関等に対して技術的選択肢を提示するためのツールとして整備を実施している。地層処分に関するモニタリングは、実施者により多様な目的を有するため、技術メニューでは、共通的事項としての時間と場所を基軸にモニタリング項目を体系的に整理し、技術的選択肢を提供するものである。

これまでに整備した技術メニューの代表的機能として、将来の地層処分モニタリングに利用可能と考えられる計測機器に関して、モニタリングの時期と場所、測定パラメータを基に、技術要件とともに計測方法候補の WEB 上での検索・閲覧を可能としており（http://monitoring-tech.rwmc.or.jp/）、一部の外部専門家に対する限定公開を実施した。モニタリング項目については、水理、力学、化学等の分類から、個別のパラメータを選択可能とした。また、モニタリング機器情報の内容については、搭載データの再検討を随時実施するとともに、閲覧時の利便性向上の為、計測方式ごとに約 100 件程度に集約・整理した。また、原環センターにおいて開発した地中無線技術や光ファイバセンサ技術等の成果も機器情報として収録している。多数のモニタリング機器のうち、地層処分関連分野での使用実績のあるモニタリング機器の情報を重視する観点から、海外の実施機関における人工バリア性能確認試験におけるモニタリング機器や、MoDeRn による処分環境でのモニタリング機器の検討結果を整理するとともに、技術メニュー及び機器情報データベースへの登録を実施している。また、平成 25 年度にはモニタリング計画策定を目的とした技術メニューの実現に向けた検討を実施した。

今年度は、技術メニューの実用性の向上を目指し、以下に示す内容を実施した。

① モニタリング技術に関する情報の拡充

② 記録保存に関する情報の収録

## 5.2　モニタリング技術に関する情報の拡充

原環センターにおける地層処分モニタリングに関する検討結果及び技術開発結果等を技術メニューに反映した。また、併せて既存の登録情報の修正を実施した。具体的な搭載・修正内容は以下の通りである。

① 平成 25 年度原環センター成果報告書[15]
② 電磁波による給電技術の検討に関する成果情報（第 3 章参照）

### 5.2.1 平成 25 年度原環センター成果報告書

技術メニューの「トップ ＞ ライブラリ ＞ 原環センター成果報告書」に、平成 25 年度原環センター成果報告書(原環センター, 2014)[15]へのリンク[1]を追加した(図 5.2.2-1)。報告書名の右側にある PDF のアイコンを押下すると、平成 25 年度原環センター成果報告書（原環センター, 2014）を PDF 形式で閲覧することができる。

### 5.2.2 電磁波による給電技術の検討に関する成果情報

本年度、地中無線モニタリング技術の運用期間の拡大を目指し、電磁界共振結合方式による給電技術について、無線モニタリング機器の電源としての適用性を確認するための試験、検討を実施している（第 3 章参照)。ここでは、その成果情報を、技術メニューの「トップ ＞ ライブラリ ＞ 原環センターの検討状況」に追加した（図 5.2.2-2)。

なお、電磁界共振結合方式による給電技術の試験、検討は以下の手順で実施されている。

① 電磁界共振結合方式の区分と適用性の高い区分（磁界共振結合方式）の選定
② 送受信コイルの設計製作
③ 周波数の検討
④ 給電試験の実施
⑤ 試験結果の評価

図 5.2.2-1　ライブラリ：原環センター成果報告書画面

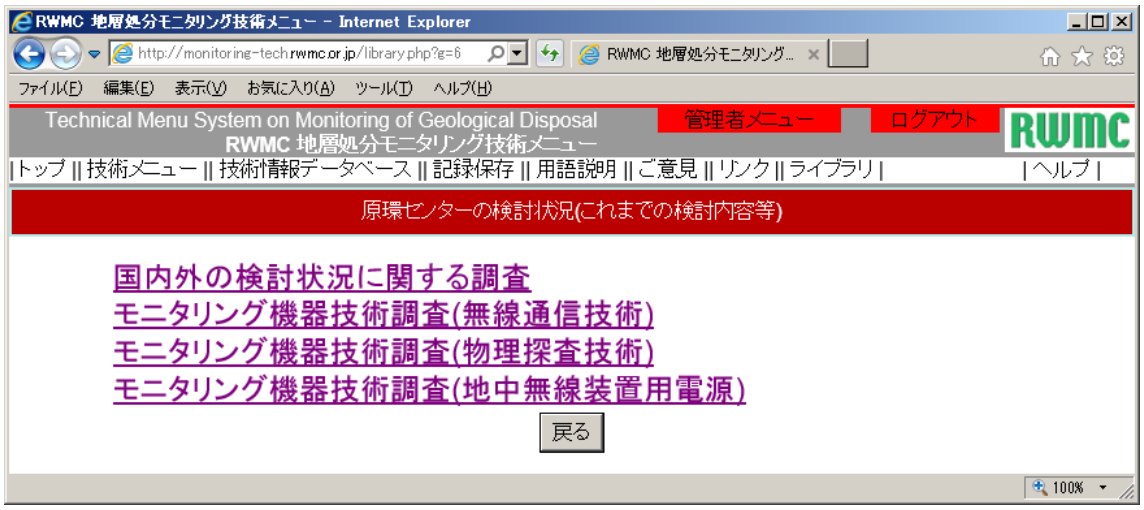



図 5.2.2-2　ライブラリ：原環センターの検討状況画面

## 5.3　記録保存に関する情報の収録

本報告書第４章にて報告している地層処分に関する記録保存は、記録する内容にモニタリング結果が含まれるなど、モニタリングとは非常に関連性が高いものと考えられる。このため、地層処分モニタリング技術メニューに対して、記録保存に関する情報の収録を実施した。記録保存に関する情報を技術メニューに収録する場合、下記の提示方法が考えられ、その実現に向けた検討・作業を実施した。

① 記録保存に関する調査検討成果を、トピックごとに技術メニューのライブラリ等に登録。

② 記録すべき情報にはモニタリング結果が含まれることから、そのモニタリングに関連する機器情報について、技術情報データベースとの関連を整備（図 5.2.2-1）。

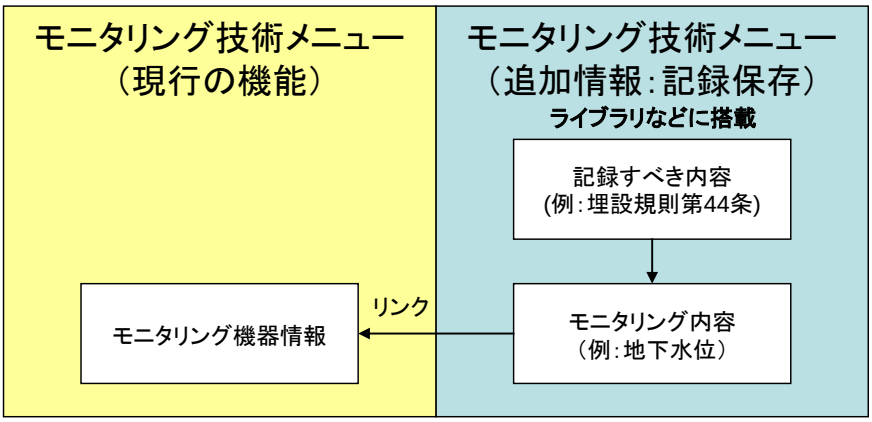



図 5.2.2-1　記録保存に関する情報との関連イメージ

### 5.3.1　技術メニューに収録する記録保存に関する内容の検討

技術メニューに収録する記録保存に関する情報の内容とその表示方法について検討した。収録する記録保存に関する情報は、これまでの原環センターにおける調査項目（[2]～[15]）を網羅的に含むものとした。記録保存に関する情報は、現状のライブラリ機能に追加する方法や、新規の項目として独立して技術メニューに収録する方法が考えられるが、ここでは、記録保存に関する情報を収録していることを明示的にすることを目的に、新規の項目として独立して技術メニューに収録することとした。

表示方法については、原環センターにおける広範な調査項目の全体像を把握することができるようにすることを目的に、図 5.3.1-1 に示すような記録保存システムの全体図を、記録保存の収録部分の初期画面とし、着目する情報へ遷移する機能（青フォント部分を押下）を有するものとした。各遷移先に収録する情報は、これまでの原環センターにおける記録保存に関する調査内容から、以下の通りとした。

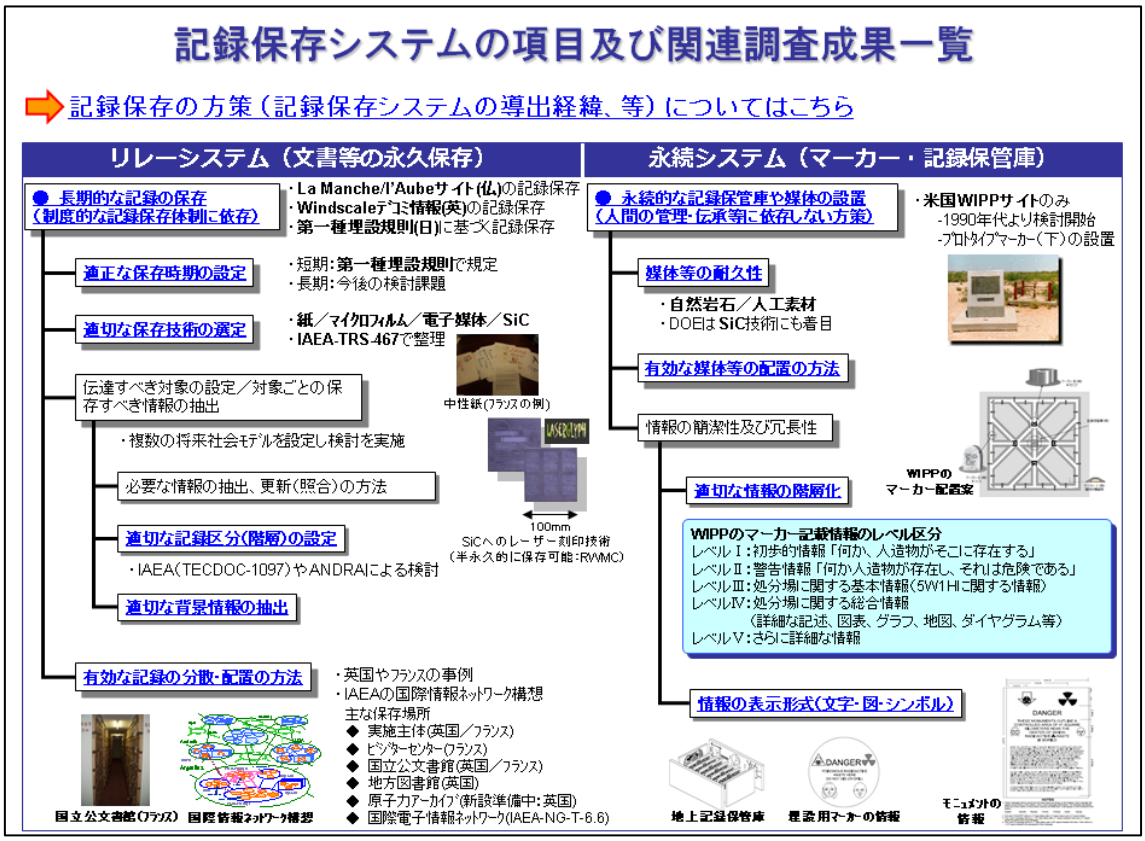



図 5.3.1-1　記録保存システムの全体図

(1)長期的な記録の保存事例

長期的な記録の保存事例に関しては、以下の各国の事例に関する情報を収録した。

① フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センター（La Manche サイト及び l'Aube サイト）の記録保存

② イギリスの Windscale 廃止措置情報の記録保存

③ わが国における第一種廃棄物埋設規則に基づく記録保存

1)フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センター（La Manche サイト及び l'Aube サイト）の記録保存

フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターの記録保存に関しては、原環センターにおいて、平成 12 年度、平成 16～19 年度、平成 21 年度、平成 24 年度に調査を実施している（原環センター, 2001[2], 2005[6], 2006[7], 2007[8], 2008[9], 2010[11], 2013[14]）。ここでは、これらの調査結果を基に以下の情報を収録する。

① 中・低レベル廃棄物センターの概要

② 中・低レベル廃棄物センターの記録保存の経緯

③ 安全規制

④ 委員会勧告

⑤ 記録保存の検討スケジュール

⑥ 記録保存の目的
⑦ 記録保存の方策

2)イギリスの Windscale 廃止措置情報の記録保存

イギリスのWindscale廃止措置情報の記録保存に関しては､原環センターにおいて、平成 20 年度に調査を実施しており（原環センター, 2009）[10]、その情報を収録した。

3)わが国における第一種廃棄物埋設規則に基づく記録保存

わが国における地層処分に関する記録保存については、第一種廃棄物埋設規則の第 44 条に具体的な記録事項と記録すべき場合、及び保存期間について示されている（法律, 2008）[22]。ここでは、それらの情報を収録し、さらに、モニタリングに関わる記録事項について、機器情報との関連を整備する。詳細については、5.3.3 において後述する。

(2)適正な保存時期の設定

適正な保存時期の設定に関しては、以下の各国の事例や考え方に関する情報を収録した。

① フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターでの保存期間
② IAEA-TECDOC-1398 に示される時期別記録例
③ わが国の考え方等

1)フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターでの保存期間

フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターでの保存期間に関しては、原環センターにおいて、平成 18～19 年度、及び平成 24 年度に調査を実施している（原環センター, 2007[8], 2008[9], 2013[14]）。ここでは、これらの調査結果を基とした情報を収録した。

2)IAEA-TECDOC-1398 に示される時期別記録例

IAEA-TECDOC-1398（IAEA, 2004a）[17]に示される時期別記録例に関しては、原環センターにおいて、平成 21 年度に調査を実施しており（原環センター, 2010）[11]、その情報を収録した。

3)わが国の考え方等

わが国における地層処分に関する記録保存の保存時期等に関する考え方については、原環センターにおいて、平成 12～13 年度、及び平成 20 年度に調査を実施しており（原環センター, 2001[2], 2002[3], 2009[10]）、その情報を収録した。

(3)適切な保存技術の選定

適切な保存技術の選定に関しては、これまでに原環センターが調査もしくは開発の対象としてきた以下の保存技術に関する情報を収録した。

① 紙
② マイクロフィルム
③ 電子媒体
④ SiC
⑤ 石英ガラス

1)紙

紙による記録保存に関しては、原環センターにおいて、IAEA-TRS-467（IAEA, 2008）[19]の情報も参考に、平成 20 年度に調査を実施している（原環センター, 2009）[10]。ここでは、これらの調査結果を基とした情報を収録した。

2)マイクロフィルム

マイクロフィルムによる記録保存に関しては、原環センターにおいて、IAEA-TRS-467（IAEA, 2008）[19]の情報も参考に、平成 20 年度に調査を実施しており（原環センター, 2009）[10]、その情報を収録した。

3)電子媒体

電子媒体による記録保存に関しては、原環センターにおいて、IAEA-TRS-467（IAEA, 2008）[19]の情報も参考に、平成 20 年度に調査を実施している（原環センター, 2009）[10]。ここでは、これらの調査結果を基とした情報を収録した。

4)SiC

SiC による記録保存に関しては、原環センターにおいて、平成 15 年度から平成 17 年度にかけて技術開発を実施している（原環センター, 2004[5], 2005[6], 2006[7]）。また、平成 20 年度には、IAEA-TRS-467（IAEA, 2008）[19]の情報も参考に、調査を実施している（原環センター, 2009）[10]。ここでは、これらの開発結果や調査結果を基とした情報を収録した。

5)石英ガラス

石英ガラスによる記録保存に関しては、原環センターにおいて、平成 24 年度に調査を実施している（原環センター, 2013）[14]。また、本年度においても、本件に関する追加調査を実施しており（第 4 章参照）、ここでは、これらの調査結果を基とした情報を収録した。

(4)適切な記録区分（階層）の設定

適切な記録区分（階層）の設定に関しては、以下の事例や考え方に関する情報を収録した。

① IAEA-TECDOC-1097[16]の考え方

② フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターでの記録区分（階層）

1)IAEA-TECDOC-1097 の考え方

IAEA-TECDOC-1097（IAEA, 1999）[16]の考え方に関しては、原環センターにおいて、平成 12 年度に調査を実施しており（原環センター, 2001）[2]、その情報を収録した。

2)フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターでの記録区分（階層）

フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターでの記録区分（階層）に関しては、原環センターにおいて、平成 16～17 年度、及び平成 19 年度に調査を実施している（原環センター, 2005[6], 2006[7], 2008[9]）。ここでは、これらの調査結果を基とした情報を収録した。

(5)適切な背景情報の抽出

適切な背景情報の抽出に関しては、原環センターにおいて、IAEA のその時点における考え方（IAEA, 2004b）[18]に関する調査を、平成 16 年度に実施しており（原環センター, 2005[6]）、その情報を収録した。

(6)有効な記録の分散・配置の方法

有効な記録の分散・配置の方法に関しては、以下の各国等の事例や構想に関する情報を収録した。

① IAEA の国際情報ネットワーク構想

② フランスの事例

③ イギリスの事例

1)IAEA の国際情報ネットワーク構想

IAEA の国際情報ネットワーク構想に関しては、原環センターにおいて、平成 16 年度、及び平成 18～19 年度に調査を実施している（原環センター,2005[6], 2007[8], 2008[9]）。ここでは、これらの調査結果を基とした情報を収録した。

2)フランスの事例

フランスの事例に関しては、原環センターにおいて、平成 18～19 年度、及び平成 24 年度に調査を実施しており（原環センター,2007[8], 2008[9], 2013[14]）、その情報を収録した。

3)イギリスの事例

イギリスの事例に関しては、原環センターにおいて、平成 20～21 年度に調査を実施しており（原環センター, 2009[10], 2010[11]）、その情報を収録した。

(7)永続的な記録保管庫や媒体の設置

永続的な記録保管庫や媒体の設置に関しては、以下の検討に関する情報を収録した。

① 米国 WIPP の記録保存に関する検討事例

② OECD/NEA のマーカーに関する検討状況

1)米国 WIPP の記録保存に関する検討事例

米国 WIPP の記録保存に関する検討事例に関しては、原環センターにおいて、平成 12～13 年度、及び平成 19 年度に調査を実施している（原環センター,2001[2], 2002[3], 2008[9]）。ここでは、これらの調査結果を基とした情報を収録した。

2)OECD/NEA のマーカーに関する検討状況

OECD/NEA のマーカーに関する検討状況に関しては、本年度において調査を実施している（第 4 章参照）。ここでは、その結果を基とした情報を収録した。

(8)媒体等の耐久性

媒体等の耐久性に関しては、原環センターにおいて、平成 13 年度と平成 19 年度に、米国 WIPP の記録保存に関する検討事例に関する調査を実施しており（原環センター,2002[3], 2008[9]）、その情報を収録した。

(9)有効な媒体等の配置の方法

有効な媒体等の配置の方法に関しては、原環センターにおいて、平成 13 年度と平成 19 年度に、米国 WIPP の記録保存に関する検討事例に関する調査を実施しており（原環センター,2002[3], 2008[9]）、その情報を収録した。

(10)適切な情報の階層化

適切な情報の階層化に関しては、原環センターにおいて、平成 12～13 年度と平成 19 年度に、米国 WIPP の記録保存に関する検討事例に関する調査を実施しており（原環センター,2001[2], 2002[3], 2008[9]）、その情報を収録した。

(11)情報の表示形式（文字・図・シンボル）

情報の表示形式（文字・図・シンボル）に関しては、原環センターにおいて、米国 WIPP の記録保存に関する検討事例に関する調査を平成 19 年度に実施しており（原環センター,2008[9]）、その情報を収録した。

(12)記録保存の方策（記録保存システムの導出経緯、等）

ここでは、記録保存システムの導出経緯などといった、記録保存の方策に関するこれまでの原環センターの検討成果に関する情報を収録する。具体的には、以下の情報を収録した。

① 記録保存の目的
② 記録保存で考慮する必要がある時間枠
③ 記録保存の要件の階層構造

1)記録保存の目的

記録保存の目的に関しては、原環センターでは、以下の 2 項目を、地層処分事業における記録保存の目的として挙げている（原環センター, 2009[10]；須山ほか, 2009[20]）。ここでは、これら各目的の項目の内容に関する情報を収録した。

- 将来世代の処分場への接近・侵入行為の抑制：地層処分は人間による長期間の管理に依存するものではないため、“技術的な安全要件の一部として記録保存が必要である”と言うことはできないが、“処分場と人間との予測不能な接触の可能性を小さくする上で有効”という見解を踏まえ、考慮している。
- 将来世代の意思決定に資する情報の提供：現世代が選択した地層処分に対して、将来世代が何らかのよりふさわしい対処を計画するような場合（例えば、廃棄物の回収等）、必要な情報があればそれだけ将来世代の負担を軽減することができるため、倫理規範を尊重し、考慮している。

2)記録保存で考慮する必要がある時間枠

記録保存で考慮する必要がある時間枠に関しては、原環センターの検討成果として、以下の図（杉山ほか, 2009）[21]を収録した。

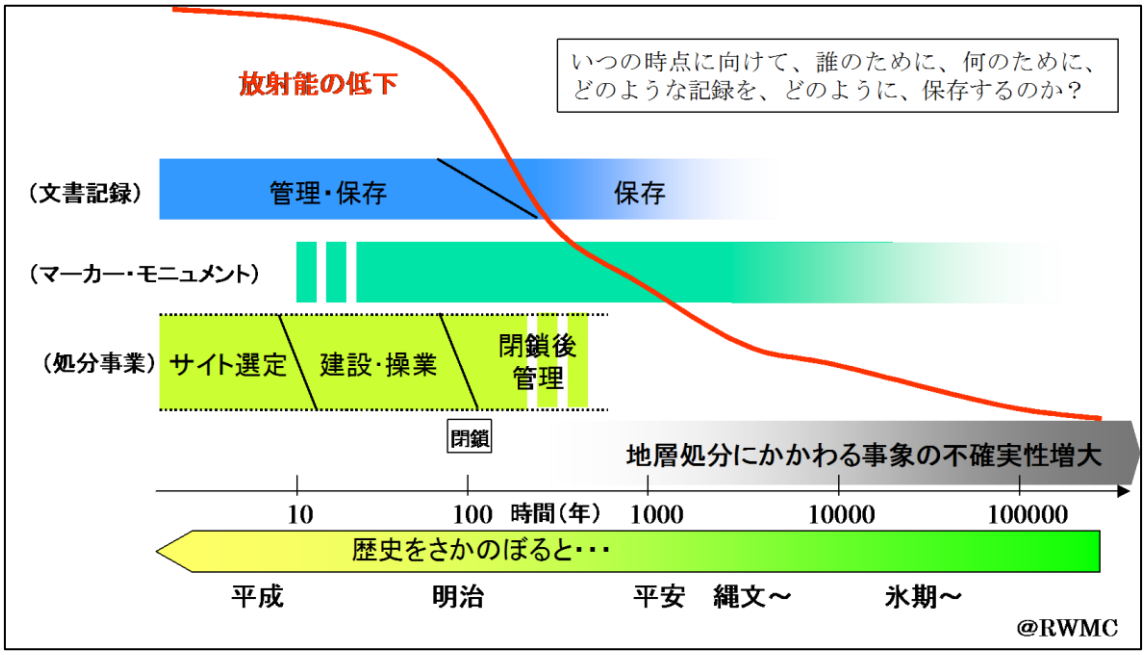



図 5.3.1-2　記録保存で考慮する必要がある時間枠（RWMC-TRJ-08001）[21]

3)記録保存の要件の階層構造

記録保存の要件の階層構造に関しては、原環センターの検討成果として、以下の図（杉山ほか, 2009）[21]を収録した。

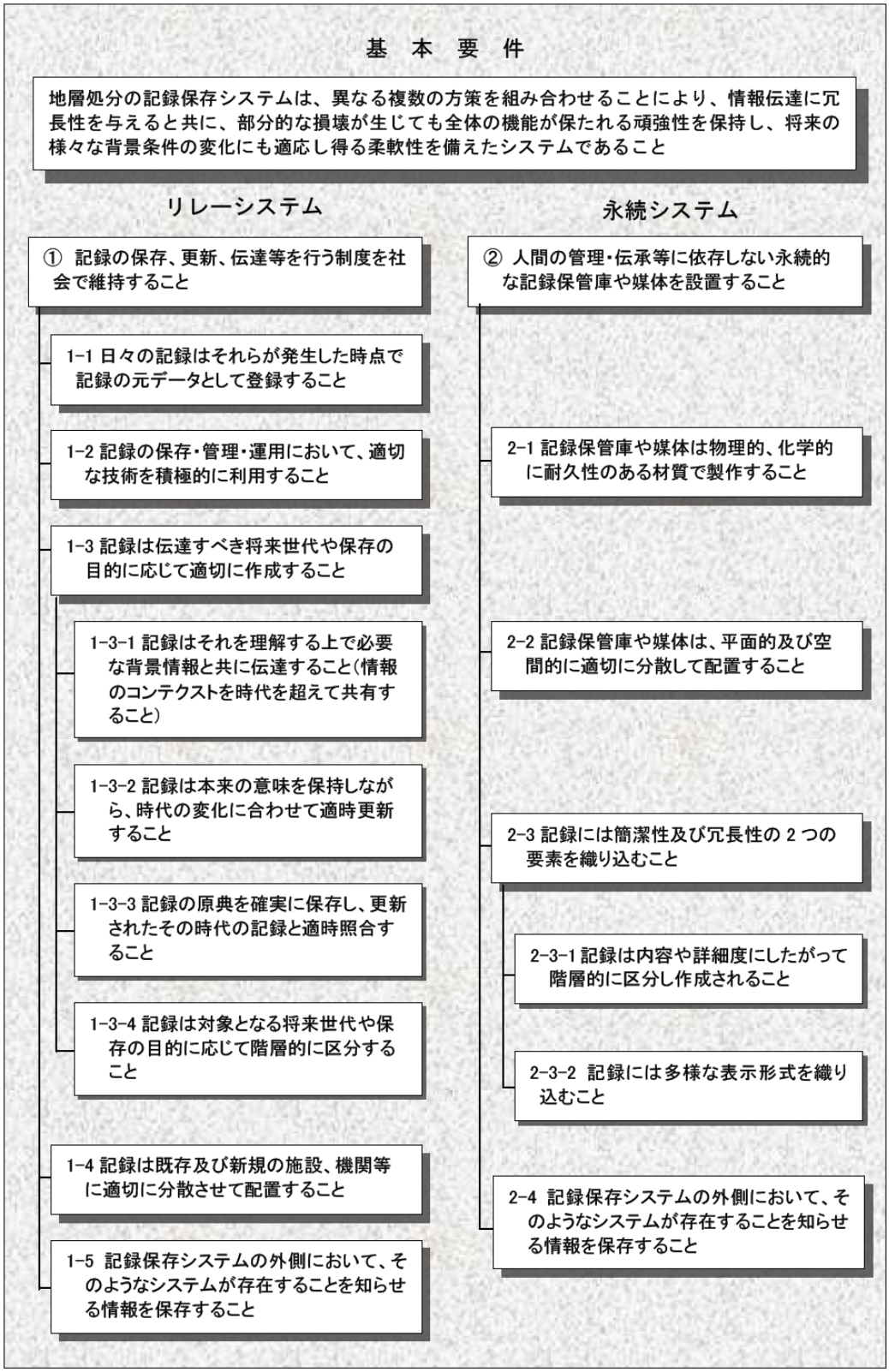



図 5.3.1-3　記録保存における要件の階層構造（RWMC-TRJ-08001）[21]（再掲）

### 5.3.2　技術メニューに収録する既往調査成果の整理

上記 5.3.1 に示した、記録保存に関する各収録項目への搭載情報とすることを目的に、原環センターに於いてこれまでに実施した、各国の地層処分に関する記録保存の制度等に関する情報の調査内容の要約を作成した。要約作成にあたっては、閲覧者がその内容を理解しやすいような記述・情報量となるよう配慮した。

### 5.3.3　モニタリングに関わる記録事項と機器情報との関連の整備

上記 5.3.1 に示したように、わが国では、第一種廃棄物埋設規則（法律, 2008）[22]の第 44 条に具体的な記録事項と記録すべき場合、及び保存期間について示されている（表 5.3.3-1~表 5.3.3-4）。ここでは、それら記録事項のうち、モニタリングに関わる記録事項について、そのモニタリングに関する機器情報との関連を整備し、関連する機器情報を、機器情報データベースから取得して表示させる機能を追加した。

表 5.3.3-1　第一種廃棄物埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容（1/4）[22]

| 記録事項 | 記録すべき場合 | 保存期間 |
|---|---|---|
| 1　第一種廃棄物埋設に関する記録 | | |
| イ　法第 51 条の 6 第 1 項の規定による第一種廃棄物埋設に関する確認の結果 | 確認の都度 | 第 7 項に定める期間 |
| ロ　法第 51 条の 6 第 2 項の規定による第一種廃棄物埋設に関する確認の結果 | 確認の都度 | 第 7 項に定める期間 |
| ハ　廃棄物埋設地に埋設した放射性廃棄物の種類、数量、当該放射性廃棄物に含まれる放射性物質の数量、その埋設の日及び埋設を行った場所 | 埋設の都度 | 第 7 項に定める期間 |
| 2　特定廃棄物埋設施設の検査記録 | | |
| イ　法第 51 条の 8 第 1 項の規定による使用前検査の結果 | 検査の都度 | 同一事項に関する次の検査のときまでの期間 |
| ロ　法第 51 条の 10 第 1 項の規定による施設定期検査の結果 | 検査の都度 | 同一事項に関する次の検査のときまでの期間 |
| ハ　第 57 条の規定による施設定期自主検査の結果 | 検査の都度 | 施設定期自主検査終了後 5 年が経過するまでの期間 |
| 3　放射線管理記録 | | |
| イ　廃棄物受入れ施設、廃棄物取扱施設等の放射線遮へい物の側壁における線量当量率 | 毎日操作中 1 回。ただし、法第 51 条の 25 第 2 項の認可を受けた場合にあっては毎週 1 回とする。 | 10 年間 |
| ロ　放射性廃棄物の排気口又は排気監視設備及び排水口又は排水監視設備における放射性物質の濃度 | 排気又は排水の都度 | 10 年間 |
| ハ　管理区域における外部放射線に係る 1 週間の線量当量、空気中の放射性物質の 1 週間についての平均濃度及び放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度 | 毎週 1 回 | 10 年間 |
| ニ　周辺監視区域における外部放射線に係る 1 月間（すべての廃棄物埋設地を埋め戻すまでの間においては 1 週間）の線量当量及び地下水中の放射性物質の濃度 | 毎月 1 回（1 週間の線量当量にあっては、毎週 1 回） | 線量当量にあっては 10 年間、地下水中の放射性物質の濃度にあっては第 7 項に定める期間 |
| ホ　放射線業務従事者の 4 月 1 日を始期とする一年間の線量、女子（妊娠不能と診断された者及び妊娠の意思のない旨を第一種廃棄物埋設事業者に書面で申し出た者を除く。）の放射線業務従事者の 4 月 1 日、7 月 1 日、10 月 1 日及び 1 月 1 日を始期とする各 3 月間の線量並びに本人の申出等により第一種廃棄物埋設事業者が妊娠の事実を知ることとなった女子の放射線業務従事者にあっては出産までの間毎月 1 日を始期とする 1 月間の線量 | 1 年間の線量にあっては毎年度 1 回、3 月間の線量にあっては 3 月ごとに 1 回、1 月間の線量にあっては 1 月ごとに 1 回 | 第 5 項に定める期間 |
| ヘ　4 月 1 日を始期とする 1 年間の線量が 20 ミリシーベルトを超えた放射線業務従事者の当該 1 年間を含む経済産業大臣が定める五年間の線量 | 経済産業大臣が定める 5 年間において毎年度 1 回（上欄に掲げる当該 1 年間以降に限る。） | 第 5 項に定める期間 |

注記　赤フォントはモニタリングによる結果を示す。

表 5.3.3-2　第一種廃棄物埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容（2/4）[22]

| 記録事項 | 記録すべき場合 | 保存期間 |
|---|---|---|
| 3　放射線管理記録 | | |
| ト　放射線業務従事者が当該業務に就く日の属する年度における当該日以前の放射線被ばくの経歴及び経済産業大臣が定める 5 年間における当該年度の前年度までの放射線被ばくの経歴 | その者が当該業務に就く時 | 第 5 項に定める期間 |
| チ　事業所の外において運搬した核燃料物質等の種類別の数量、その運搬に使用した容器の種類並びにその運搬の日時及び経路 | 運搬の都度 | 1 年間 |
| リ　廃棄施設に廃棄した放射性廃棄物（事業所内の廃棄物埋設地に埋設した放射性廃棄物を除く。）の種類、当該放射性廃棄物に含まれる放射性物質の数量、当該放射性廃棄物を容器に封入し、又は容器に固型化した場合には当該容器の数量及び比重並びにその廃棄の日時、場所及び方法 | 廃棄の都度 | 第 7 項に定める期間 |
| ヌ　放射性廃棄物を容器に封入し、又は容器に固型化した場合には、その方法 | 封入又は固型化の都度 | 第 7 項に定める期間 |
| ル　放射性物質による汚染の広がりの防止及び除去を行った場合には、その状況及び担当者の氏名 | 防止及び除去の都度 | 1 年間 |
| 4　操作記録（法第 51 条の 25 第 2 項の認可を受けた場合を除く。） | | |
| イ　保安規定に定める保安上特に管理を必要とする設備における温度、圧力及び流量 | 連続して | 1 年間 |
| ロ　廃棄物埋設地の附属施設に係る設備の操作開始及び操作停止の時刻 | 停止の都度 | 1 年間 |
| ハ　保安規定に定める保安上特に管理を必要とする設備の操作責任者及び操作員の氏名並びにこれらの者の交代の時刻 | 操作の開始及び交代の都度 | 1 年間 |
| 5　保守記録 | | |
| イ　廃棄物埋設施設の巡視及び点検の状況並びにその担当者の氏名 | 巡視及び点検の都度 | 1 年間 |
| ロ　廃棄物埋設施設の修理の状況及びその担当者の氏名 | 修理の都度 | 1 年間（廃棄物埋設地に係る場合にあっては、第 7 項に定める期間） |
| 6　廃棄物埋設施設の事故記録 | | |
| イ　事故の発生及び復旧の時 | その都度 | 第 7 項に定める期間 |
| ロ　事故の状況及び事故に際して採った処置 | その都度 | 第 7 項に定める期間 |
| ハ　事故の原因 | その都度 | 第 7 項に定める期間 |
| ニ　事故後の処置 | その都度 | 第 7 項に定める期間 |
| 7　気象記録（法第 51 条の 18 第 2 項の認可又は変更の認可を受けた保安規定に定めるところにより、記録しないこととした場合を除く。） | | |
| イ　風向及び風速 | 連続して | 10 年間 |
| ロ　降雨量 | 連続して | 10 年間 |
| ハ　1 月間についての積算降雨量 | 毎月 1 回 | 第 7 項に定める期間 |
| ニ　大気温度 | 連続して | 10 年間 |

注記　赤フォントはモニタリングによる結果を示す。

表 5.3.3-3　第一種廃棄物埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容（3/4）[22]

| 記録事項 | 記録すべき場合 | 保存期間 |
|---|---|---|
| 8　地下水の水位（法第 51 条の 18 第 1 項の認可又は変更の認可を受けた保安規定に定めるところにより、記録しないこととした場合を除く。） | 毎月 1 回 | 第 7 項に定める期間 |
| 9　保安教育の記録 | | |
| イ　保安教育の実施計画 | 策定の都度 | 3 年間 |
| ロ　保安教育の実施日時及び項目 | 実施の都度 | 3 年間 |
| ハ　保安教育を受けた者の氏名 | 実施の都度 | 3 年間 |
| 10　第 46 条の品質保証計画に関しての文書及び品質保証計画に従った計画、実施、評価及び改善状況の記録（他の号に掲げるものを除く。） | 当該文書又は記録の作成又は変更の都度 | 当該文書又は記録の作成又は変更後 5 年が経過するまでの期間 |
| 11　第 58 条の規定による廃棄物埋設施設の定期的な評価等の結果 | 評価又は措置の都度 | 第 7 項に定める期間 |
| 12　第 62 条に規定する防護措置の記録 | | |
| イ　見張人による巡視の状況及びその担当者の氏名 | 毎日 1 回 | 1 年間 |
| ロ　防護区域又は周辺防護区域へ立ち入ろうとする者への証明書等の発行の状況及びその担当者の氏名 | 発行の都度 | 5 年間 |
| ハ　防護区域又は周辺防護区域の出入口における物品の持込み、持出しの点検の状況及びその担当者の氏名 | 点検の都度又は毎日 1 回 | 1 年間 |
| ニ　出入口及び特定核燃料物質の常時監視の状況並びにその担当者の氏名 | 毎日 1 回 | 1 年間 |
| ホ　特定核燃料物質並びに特定核燃料物質を取り扱う設備及び装置の点検の状況並びにその担当者の氏名 | 点検の都度 | 1 年間 |
| ヘ　防護のために必要な設備及び装置の点検並びに保守の状況並びにその担当者の氏名 | 点検又は保守の都度 | 1 年間 |
| ト　防護のために必要な教育及び訓練の実施状況 | 教育又は訓練の実施の都度 | 5 年間 |
| チ　特定核燃料物質の防護に関する秘密の範囲及び業務上知り得る者の指定の状況 | 指定の都度 | すべての特定核燃料物質の取扱いを終了するまでの期間 |
| リ　防護措置の評価及び改善の実施状況 | 評価又は改善の都度 | 5 年間 |
| 13　法第 51 条の 24 の 2 第 2 項の規定による閉鎖措置の確認の結果 | 確認の都度 | 第 7 項に定める期間 |
| 14　廃止措置に係る工事の方法、時期及び廃止措置の対象となる廃棄物埋設地の附属施設に係る設備の名称 | 法第 51 条の 25 第 2 項の認可を受けた廃止措置計画に記載された工事の各工程の終了の都度 | 第 7 項に定める期間 |

注記　赤フォントはモニタリングによる結果を示す。

表 5.3.3-4　第一種廃棄物埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容（4/4）[22]

| 記録事項 | 記録すべき場合 | 保存期間 |
|---|---|---|
| １５　事業所において用いた資材その他の物に含まれる放射性物質の放射能濃度について法第 61 条の 2 第１項の規定に基づく確認を受けようとするもの（以下「放射能濃度確認対象物」という。）の記録 | | |
| イ　放射能濃度確認対象物中の放射能濃度についてあらかじめ行う調査に係る記録 | | |
| （１）　放射能濃度確認対象物の発生状況及び汚染の状況について調査を行った結果 | 調査の都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （２）　放射能濃度確認対象物の材質及び重量 | 調査の都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （３）　放射能濃度確認対象物について放射性物質による汚染の除去を行った場合は、その結 | その都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （４）　放射能濃度確認対象物中の放射性物質について計算による評価を行った場合は､その計算条件及び結果 | その都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （５）　評価に用いる放射性物質の選択を行った結果 | 選択の都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （６）　放射能濃度の決定を行う方法について評価を行った結果 | 評価の都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| ロ　放射能濃度確認対象物の測定及び評価に係る記録 | | |
| （１）　放射性物質の放射能濃度の測定条件 | 測定又は評価の都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （２）　放射能濃度の測定結果 | 測定又は評価の都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （３）　放射能濃度確認対象物中の放射能濃度の決定を行った結果 | 測定又は評価の都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （４）　測定に用いた放射線測定装置の点検・校正・保守・管理を行った結果 | その都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| （５）　放射能濃度確認対象物の測定及び評価に係る教育・訓練の実施日時及び項目 | その都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |
| ハ　放射能濃度確認対象物の管理について点検等を行った結果に係る記録 | その都度 | 事業所から搬出された後 10 年間 |

(1) モニタリングに関わる記録事項

第一種廃棄物埋設規則（法律, 2008）[22]の第 44 条に示されている記録事項のうち、モニタリングに関わる記録事項を表 5.3.3-5 に示す。モニタリングに関わる記録事項は以下の６種類である。

- 線量当量率・線量当量
- 放射性物質濃度
- 風向・風速
- 降雨量
- 大気温度
- 地下水水位

表 5.3.3-5　モニタリングに関わる記録事項（第一種廃棄物埋設規則第 44 条）（[22]より作表）

| 記録対象 | 記録事項 | 記録頻度 | 保存期間 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 放射線遮へい物の側壁 | 線量当量率 | 毎日 1 回<br>（毎週 1 回） | 10 年間 | 廃棄物受入れ施設、廃棄物取扱施設等 |
| 排気口・排気監視設備 | 放射性物質濃度 | 排気の都度 | 10 年間 | |
| 排水口・排水監視設備 | 放射性物質濃度 | 排水の都度 | 10 年間 | |
| 管理区域 | 線量当量<br>（1 週間） | 毎週 1 回 | 10 年間 | |
| 管理区域空気中 | 放射性物質濃度 | 毎週 1 回 | 10 年間 | 1 週間平均 |
| 放射性汚染物表面 | 放射性物質密度 | 毎週 1 回 | 10 年間 | |
| 周辺監視区域 | 線量当量<br>（1 月間） | 毎月 1 回 | 10 年間 | 廃棄物埋設地埋戻後 |
| | 線量当量<br>（1 週間） | 毎週 1 回 | 10 年間 | 廃棄物埋設地埋戻前 |
| 周辺監視区域の地下水 | 放射性物質濃度 | 毎月 1 回 | 原子力規制委員会の確認まで | |
| 気象 | 風向・風速 | 連続 | 10 年間 | |
| | 降雨量 | 連続 | 10 年間 | |
| | | 毎月 1 回 | 原子力規制委員会の確認まで | 1 月間積算 |
| | 大気温度 | 連続 | 10 年間 | |
| 地下水 | 水位 | 毎月 1 回 | 原子力規制委員会の確認まで | |

(1)機器情報との関連整備

モニタリングに関わる記録事項と機器情報との関連を整備した。具体的には、各記録事項のモニタリングに適する機器を、機器情報データベースから抽出した。

1)線量当量率・線量当量

機器情報データベースに登録されている機器情報のうち、記録保存に関わる線量当量率もしくは線量当量のモニタリングに適すると考えられる計測技術は以下の通りである。

線量当量率については、放射線遮へい物の側壁が記録対象とされているため、ここでは透過力の強い γ 線及び中性子線の計測技術を挙げた。なお、これらによる線量当量率データは、時間積分することにより、線量当量に換算することも可能と考えられる。さらに、線量当量の計測技術として、熱蛍光線量計（TLD）と蛍光ガラス線量計を挙げた。

- GM 計数管式（線量当量率：γ 線）
- NaI(Tl)シンチレーション式（線量当量率：γ 線）
- 電離箱式（線量当量率：γ 線）
- BF3 中性子比例計数管式（線量当量率：中性子）
- He-3 中性子比例計数管（線量当量率：中性子）
- γ 線補償型電離箱式（線量当量率：中性子）

・　熱蛍光線量計（線量当量）
・　蛍光ガラス線量計（線量当量）

2)放射性物質濃度・放射性物質密度（表面汚染密度）

機器情報データベースに登録されている機器情報のうち、記録保存に関わる放射性物質濃度もしくは放射性物質密度（表面汚染密度）のモニタリングに適すると考えられる計測技術は以下の通りである。

放射性物質濃度については、平常時においては、モニター装置（例えば、日本電気計測器工業会, 2012）により連続的に計測が実施されることが考えられる。一方、何らかの事象が発生した場合等、必要に応じて、別途サンプリングした試料に対して計測を実施することも考えられる（例えば、文部科学省放射能測定法シリーズ）。

放射性物質密度（表面汚染密度）については、モニター装置（例えば、日本電気計測器工業会, 2012）やサーベイメータで直接計測する方法と、ろ紙等により表面を拭き取った試料中の放射性物質量を計測する方法（スミヤ法）がある。

・主にモニター装置やサーベイメータでの直接計測に用いられる計測技術
　－NaI(Tl)シンチレーション式（放射性物質濃度：γ核種、表面汚染密度）
　－GM 計数管式（放射性物質濃度：主にβ核種、表面汚染密度）
　－ZnS(Ag)シンチレーション式（放射性物質濃度：α核種）
　－プラスチックシンチレーション式（放射性物質濃度：主にβ核種、表面汚染密度）
　－ガスフロー式（表面汚染密度）
・主にサンプリングした試料に対して用いられる計測技術
　－ゲルマニウム半導体式（γ核種）
　－液体シンチレーション式（Sr、I、Co、Ce、Pu）

3)風向・風速

機器情報データベースに登録されている機器情報のうち、記録保存に関わる風向・風速のモニタリングに適すると考えられる計測技術は以下の通りである。ここでは、気象庁の「気象観測ガイドブック」に示されている計測技術を挙げた。

・風車型風向風速計

4)降雨量

機器情報データベースに登録されている機器情報のうち、記録保存に関わる降雨量のモニタリングに適すると考えられる計測技術は以下の通りである。ここでは、気象庁の「気象観測ガイドブック」に示されている計測技術を挙げた。

・転倒マス式

5)大気温度

機器情報データベースに登録されている機器情報のうち、記録保存に関わる大気温度のモニタリングに適すると考えられる計測技術は以下の通りである。ここでは、気象庁の「気象観測ガイドブック」に示されている計測技術を挙げた。

・白金測温抵抗体

6)地下水水位

機器情報データベースに登録されている機器情報のうち、記録保存に関わる地下水水位のモニタリングに適すると考えられる計測技術は以下の通りである。機器情報データベースには、地下水水位の計測技術として、物理探査技術のような間接的な計測技術も含めて多くの計測技術が登録されているが、ここでは、直接的な計測技術のみを挙げた。

・圧力センサ式
  - 電気信号型センサ
    圧電式(ピエゾ抵抗式)：半導体
    水晶式：水晶振動子
  - 光信号型センサ
    光ファイバセンサ式(FBG 型)
    ファブリ・ペロ型干渉計式
・フロート式

(2)機器情報表示機能

モニタリングに関わる記録事項に関連する機器情報を、機器情報データベースから取得して表示させる機能を追加した。追加した機能のイメージを図 5.3.3-1 に示す。本機能では、第一種廃棄物埋設規則（法律, 2008）[22]の第 44 条に示されている記録事項のうち、モニタリングに関連する記録事項に対してリンクを貼り、リンクを押下すると、その記録事項のモニタリングに適する機器を、機器情報データベースから抽出して表示することができる。

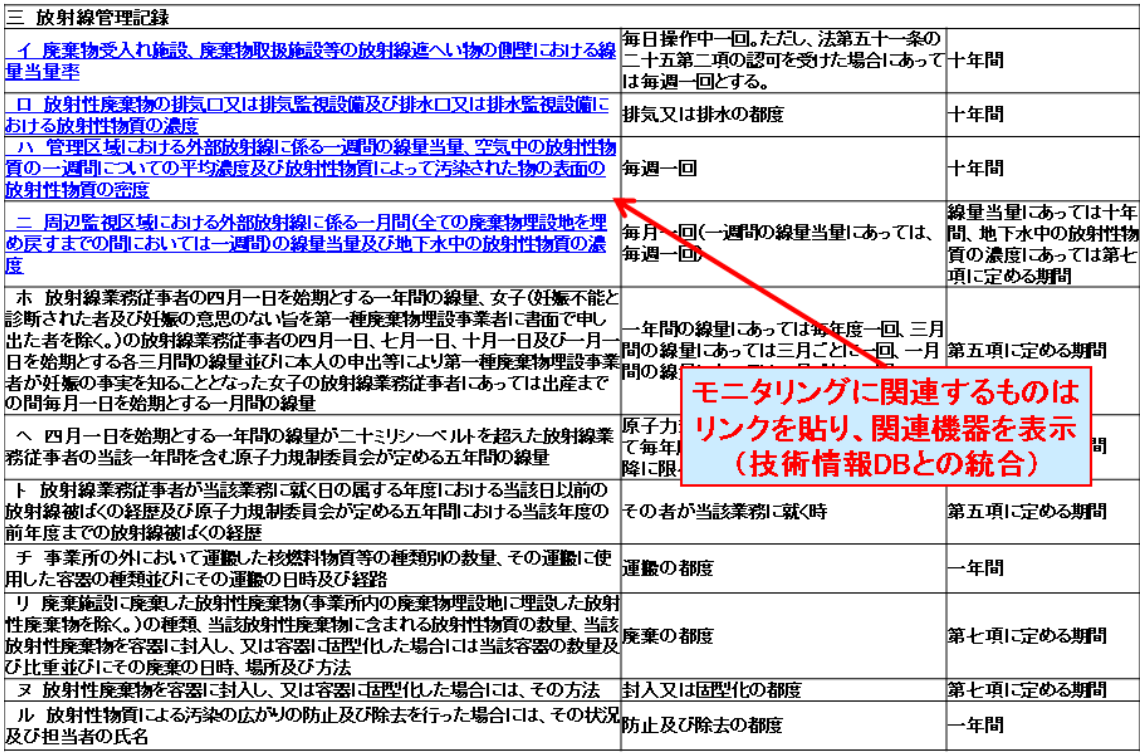



図 5.3.3-1　機器情報表示機能のイメージ

### 5.3.4　技術メニューのプログラムの改良

上記 5.3.1 及び 5.3.3 において示した機能を具体化するため、技術メニューの機能の追加・変更を実施した。

(1) トップ画面の修正

技術メニューによる検索・閲覧の利便性の向上に向けて、技術メニューのトップ画面を修正した。具体的には、目次表を追加することにより、搭載情報の内容をよりわかりやすく示すこととした。また、5.3.1 に示したように、本年度は、記録保存に関する情報を、新規の項目として独立して技術メニューに収録することとしたため、記録保存に関する情報に遷移するためのリンク「記録保存」も併せて追加した。修正後のトップ画面を図 5.3.4-1 に示す。

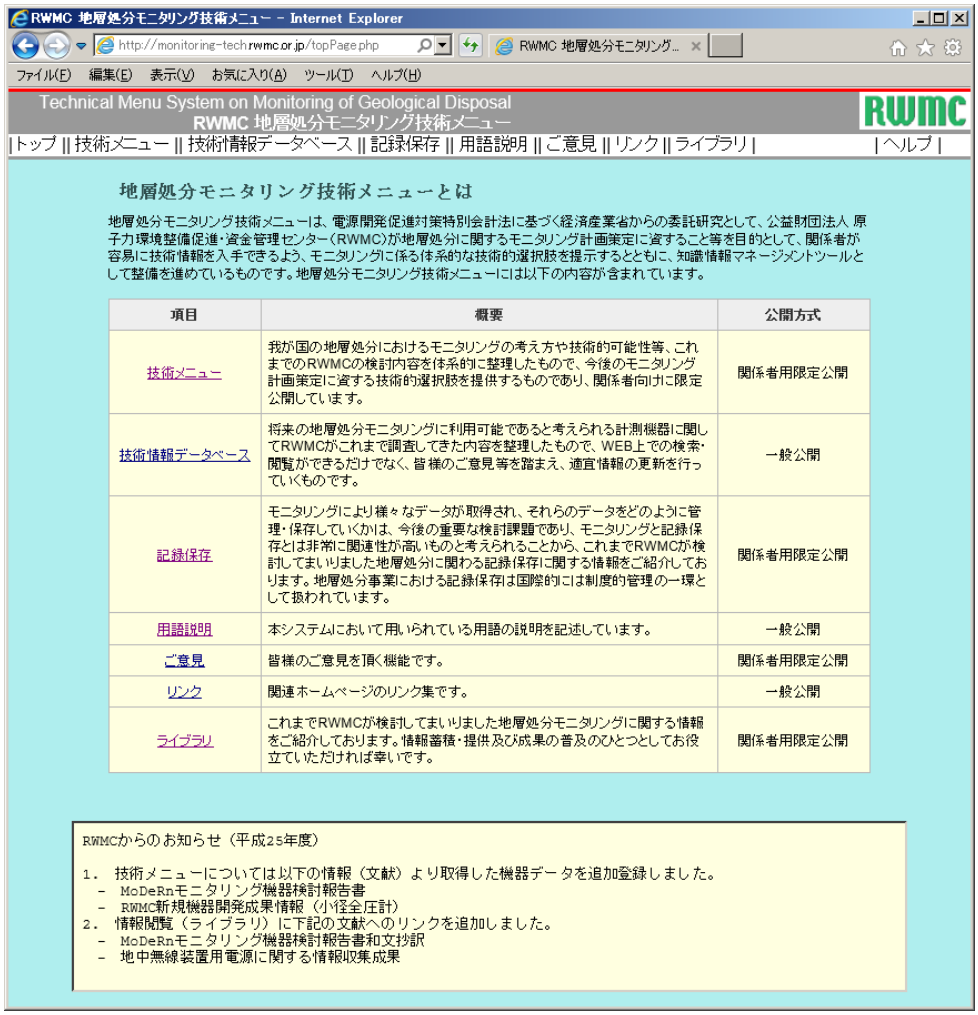



図 5.3.4-1　技術メニューのトップ画面（修正後）

(1)記録保存に関する情報の収録・表示機能の追加

上記5.3.1において示した、記録保存に関する情報の収録・表示機能を追加するための、技術メニューのプログラム改良を実施した。

1)記録保存に関する情報の初期画面の表示機能

上記の図 5.3.4-1 に示した技術メニューのトップ画面にあるリンク「記録保存」を押下した際に、図 5.3.4-2 に示す、記録保存に関する情報の収録部分の初期画面を表示する機能を追加した。追加した記録保存に関する情報の初期画面では、青色下線フォントの部分をリンクとし、それらリンクを押下することにより、関連するコンテンツを表示させる機能を付加した。なお、記録保存に関する情報の初期画面は、図 5.3.1-1、図 5.3.4-2 に示した画面イメージをそのまま踏襲することを念頭に、グラフィックスとして表示させることとし、青色下線フォントの部分に相当する座標に対して、リンク機能を持たせることとした。このため、初期画面に表示される文字列のコピーはでき

ない点に注意が必要である。

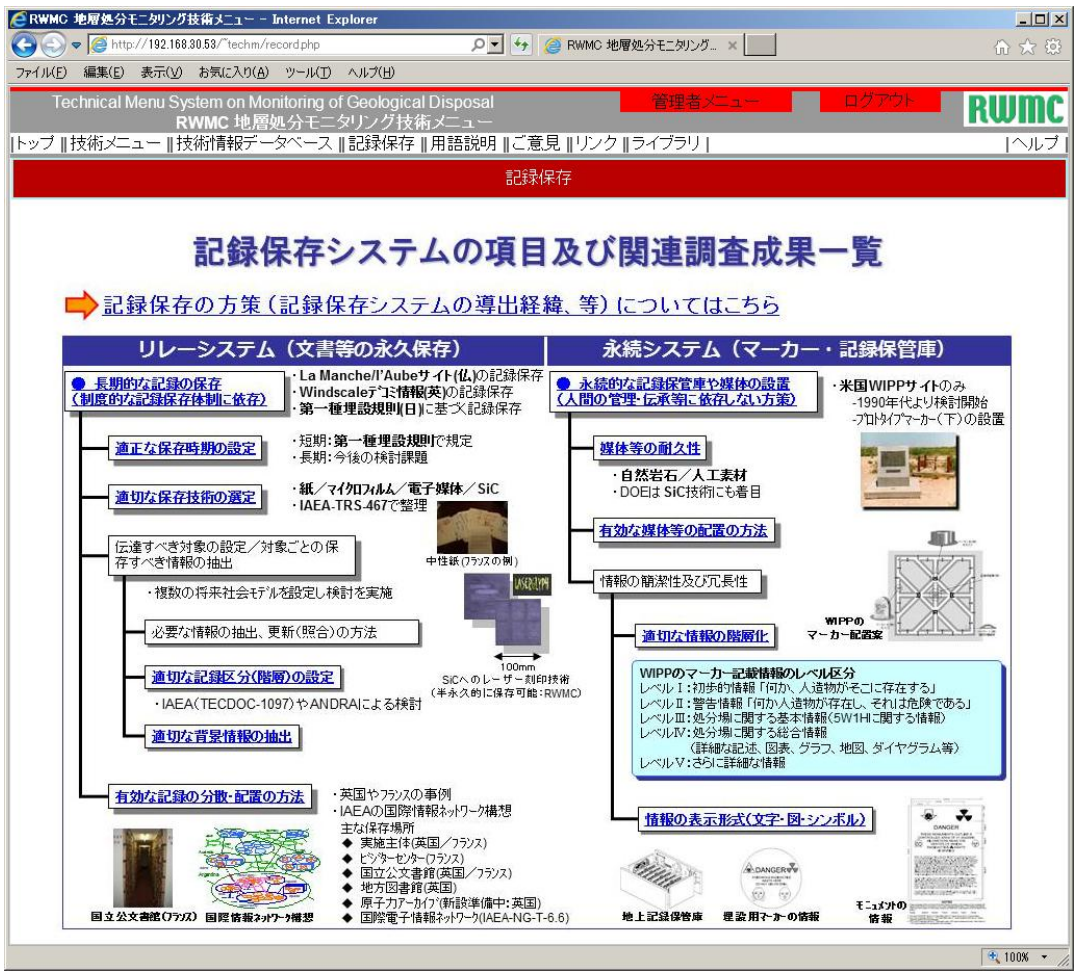



図 5.3.4-2　記録保存に関する情報の収録部分の初期画面

2)ログイン機能

記録保存に関する情報は、技術メニュー（テーブル及びツリー）やライブラリと同様、関係者用限定公開とした。このため、記録保存に関する情報の収録部分の初期画面を表示するためには、ログインを必要とすることとし、そのための機能を追加した。この機能は、技術メニュー（テーブル及びツリー）やライブラリにおけるログイン機能と同様であり、既にこれらの情報閲覧等のためにログインしている場合には、記録保存に関する情報の表示機能を使用するための新たなログインは不要である。

3)コンテンツ表示機能

上記の図 5.3.4-2 に示した記録保存に関する情報の収録部分の初期画面に付加したリンクを押下した後、複数階層にわたる情報（コンテンツ）を表示させる機能を追加した。コンテンツの表示イメージ（図 5.3.4-3）は通常の Web ページと同様であり、コンテンツ画面にあるリンクを押下することにより、次の階層の情報を閲覧すること

ができる。コンテンツ画面は、表示する情報が主にこれまでの調査成果を示すものであり、今後追加の可能性はあっても、内容の変更の可能性はほとんどないことや、原環センターにおける記録保存の方策に関する考え方が、後述する最近の OECD/NEA 国際会議（OECD/NEA-RWMC Web ページ）に示された考え方と整合していることから、階層構造や記述内容の変更の可能性は小さいものと判断し、基本的に静的な HTML として整備した。ただし、情報量が多く、HTML では閲覧しにくいと考えられるものについては、PDF ファイルとして表示させることとした。

図 5.3.4-3　記録保存に関する情報（コンテンツ）の一例

(2)モニタリングに関わる記録事項に関連する機器情報の表示機能の追加

上記 5.3.3 において示した、モニタリングに関わる記録事項に関連する機器情報の表示機能を追加するための、技術メニューのプログラム改良を実施した。

1)リンク機能

第一種廃棄物埋設規則[22]の第 44 条に示されている記録事項のうち、モニタリングに関連する記録事項に対してリンク機能（図 5.3.4-4 の青色下線フォント部分）を付与

した。この際、一つの項目の中に、複数の記録事項が含まれる場合があることから（例えば、図 5.3.4-4 における「ハ」や「ニ」）、項目全てではなく、それぞれの記録事項の部分のみにリンクを付与した。

| 記録事項 | 記録すべき場合 | 保存期間 |
|---|---|---|
| 3　放射線管理記録 | | |
| イ　廃棄物受入れ施設、廃棄物取扱施設等の放射線遮へい物の側壁における線量当量率 | 毎日操作中1回。ただし、法第51条の25第2項の認可を受けた場合にあっては毎週1回とする。 | 10年間 |
| ロ　放射性廃棄物の排気口又は排気監視設備及び排水口又は排水監視設備における放射性物質の濃度 | 排気又は排水の都度 | 10年間 |
| ハ　管理区域における外部放射線に係る1週間の線量当量、空気中の放射性物質の1週間についての平均濃度及び放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度 | 毎週1回 | 10年間 |
| ニ　周辺監視区域における外部放射線に係る1月間（すべての廃棄物埋設地を埋め戻すまでの間においては1の線量当量及び地下水中の放射性物質の濃度 | 毎月1回（1週間の線量当量にあっては、毎週1回） | 線量当量にあっては10年間、地下水中の放射性物質の濃度にあっては第7項に定める期間 |
| ホ　放射線業務従事者の4月1日を始期とする一年間の線量、女子（妊娠不能と診断された者及び妊娠の意思のない旨を第一種廃棄物埋設事業者に書面で申し出た者を除く。）の放射線業務従事者の4月1日、7月1日、10月1日及び1月1日を始期とする各3月間の線量並びに本人の申出等により第一種廃棄物埋設事業者が妊娠の事実を知ることとなった女子の放射線業務従事者にあっては出産までの間毎月1日を始期とする1月間の線量 | 1年間の線量にあっては毎年度1回、3月間の線量にあっては3月ごとに1回、1月間の線量にあっては1月ごとに1回 | 第5項に定める期間 |
| ヘ　4月1日を始期とする1年間の線量が20ミリシーベルトを超えた放射線業務従事者の当該1年間を含む経済産業大臣が定める五年間の線量 | 経済産業大臣が定める5年間において毎年度1回（上欄に掲げる当該1年間以降に限る。） | 第5項に定める期間 |
| ト　放射線業務従事者が当該業務に就く日の属する年度における当該日以前の放射線被ばくの経歴及び経済産業大臣が定める5年間における当該年度の前年度までの放射線被ばくの経歴 | その者が当該業務に就く時 | 第5項に定める期間 |
| チ　事業所の外において運搬した核燃料物質等の種類別の数量、その運搬に使用した容器の種類並びにその運搬の日時及び経路 | 運搬の都度 | 1年間 |
| リ　廃棄施設に廃棄した放射性廃棄物（事業所内の廃棄物埋設地に埋設した放射性廃棄物を除く。）の種類、当該放射性廃棄物に含まれる放射性物質の数量、当該放射性廃棄物を容器に封入し、又は容器に固型化した場合には当該容器の数量及び比重並びにその廃棄の日時、場所及び方法 | 廃棄の都度 | 第7項に定める期間 |
| ヌ　放射性廃棄物を容器に封入し、又は容器に固型化した場合には、その方法 | 封入又は固型化の都度 | 第7項に定める期間 |
| ル　放射性物質による汚染の広がりの防止及び除去を行った場合には、その状況及び担当者の氏名 | 防止及び除去の都度 | 1年間 |

図 5.3.4-4　モニタリングに関わる記録事項に関連する機器情報の表示機能（リンク機能）

2)機器情報抽出・表示機能

上記 1）において付与したリンクを押下した際に、そのリンクに関連する機器情報を技術情報データベースから抽出して、表示させる機能を追加した。機器情報の抽出は、各リンクに関連する機器の「機器 ID」を予めシステムに登録しておき、リンクを押下した際に、該当する「機器 ID」の機器を一括して表示させる方式を採用した。このため、表示画面については、図 5.3.4-5 に示すように、技術メニュー（テーブル及びツリー）における機器情報の表示画面と同様のフォーマットを用いた。

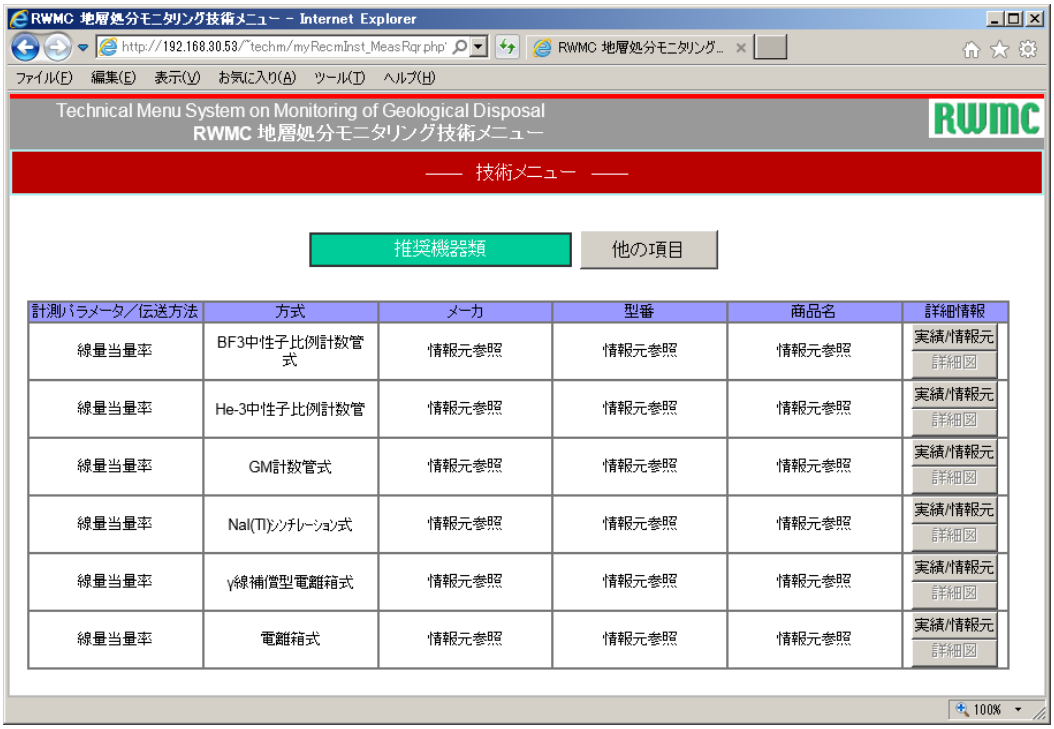



図 5.3.4-5　モニタリングに関わる記録事項に関連する機器情報の表示機能
（機器情報表示画面）

### 5.3.5　記録保存に関する情報の要約の収録

上記 5.3.2 において作成した記録保存の調査成果の要約を技術メニューに収録し、検索・閲覧可能な状態として整備した。

## 5.4　まとめと今後の課題

### 5.4.1　まとめ

地層処分の実施主体等の関係機関が、モニタリング計画の検討を実施する際に参照可能な技術的選択肢を取りまとめたツールとして開発した、地層処分モニタリング技術メニューの整備を実施した。

(1)　モニタリング技術に関する情報の収録

原環センターにおける地層処分モニタリングに関する検討結果及び技術開発結果等を技術メニューに反映した。また、併せて既存の登録情報の修正を実施した。具体的な搭載内容は以下の通りである。

① 平成 25 年度原環センター成果報告書
② 電磁波による給電技術の検討の成果情報

このうち平成 25 年度原環センター成果報告書については、ライブラリに資源エネルギー庁の web ページに収録されている PDF ファイルへのリンクとして掲載した。

また、電磁波による給電技術の検討の成果情報については、同じくライブラリに原環センターの検討状況として掲載した。なお、本検討の詳細を第 3 章に記載している。

(2) 記録保存に関する情報の収録

モニタリングと記録保存とは非常に関連性が高いものと考えられることから、地層処分モニタリング技術メニューに対して、記録保存に関する情報の収録を実施した。具体的には、以下の検討・作業を実施した。

① 技術メニューに収録する記録保存に関する内容の検討
② 技術メニューに収録する既往調査成果の整理
③ モニタリングに関わる記録事項と機器情報との関連の整備
④ 技術メニューのプログラムの改良
⑤ 記録保存に関する情報の要約の収録

これらの記録保存に関する情報は、原環センターにて整理した記録保存システムの全体図（図 5.3.1-1）を基に、リレーシステムと永続システムに分け、さらにそれらの要件ごとに、これまでの調査情報を整理して収録した。各項目へは、記録保存システムの全体図内のリンクからアクセスできるようにした。

主な収録内容は以下の通りである。

①長期的な記録の保存事例
- フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターの記録保存
- イギリスの Windscale 廃止措置情報の記録保存
- わが国における第一種廃棄物埋設規則に基づく記録保存

②適正な保存時期の設定
- フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターでの保存期間
- IAEA-TECDOC-1398 に示される時期別記録例
- わが国の考え方等

③適切な保存技術の選定
- 紙
- マイクロフィルム
- 電子媒体
- SiC
- 石英ガラス

④適切な記録区分（階層）の設定
- IAEA-TECDOC-1097[16]の考え方
- フランスの低・中レベル放射性廃棄物貯蔵センターでの記録区分（階層）

⑤適切な背景情報の抽出

・IAEA における考え方

⑥有効な記録の分散・配置の方法

・IAEA の国際情報ネットワーク構想

・フランスの事例

・イギリスの事例

⑦永続的な記録保管庫や媒体の設置

・米国 WIPP の記録保存に関する検討事例

・OECD/NEA のマーカーに関する検討状況

⑧媒体等の耐久性

⑨有効な媒体等の配置の方法

⑩適切な情報の階層化

⑪情報の表示形式（文字・図・シンボル）

いずれも、

・米国 WIPP の記録保存に関する検討事例

⑫記録保存の方策（記録保存システムの導出経緯、等）

・記録保存の目的

・記録保存で考慮する必要がある時間枠

・記録保存の要件の階層構造

## 5.5 今後の課題

地層処分モニタリング技術メニューは、モニタリング技術に関するデータベースであるとともに、原環センターにおけるモニタリング及び記録保存に関する検討成果のデータベースとなっている。このようなデータベースは情報の網羅性や、最新の情報であることが重要であるため、本年度の各章での検討内容を含めた情報の更新を実施する必要がある。

また、モニタリング技術に関しては、本年度第 2 章に示したように、モニタリングシステムの検討も実施しているため、このような情報を収録できる枠組みが必要である。さらに、モニタリング技術のみでなく、モニタリング項目の選定過程に即したインターフェースを持つことが望ましいと言える。

第 5 章参考文献


[1] 資源エネルギー庁「放射性廃棄物のホームページ」
http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/

[2] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2001）：平成 12 年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書（第 3 分冊）-モニタリング機器技術高度化調査-（2/2 地層処分記録保存システムの開発）平成 13 年 3 月.

[3] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2002）：平成 13 年度 高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査報告書 -モニタリング機器技術高度化調査-（その 3）地層処分記録保存システムの開発 平成 14 年 3 月.

[4] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2003）：平成 14 年度 地層処分技術調査等報告書 -モニタリング機器技術高度化調査-（その 2）地層処分記録保存システムの検討 平成 15 年 3 月.

[5] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2004）：平成 15 年度 地層処分技術調査等報告書 -モニタリング機器技術高度化調査-（その 2）地層処分記録保存システムの調査 平成 16 年 3 月.

[6] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2005）：平成 16 年度 地層処分技術調査等 モニタリング機器技術高度化調査報告書 （その 2）地層処分記録保存システムの調査 平成 17 年 3 月.

[7] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2006）：平成 17 年度 地層処分技術調査等 モニタリング機器技術高度化調査報告書 （その 2）地層処分記録保存システムの調査 平成 18 年 3 月.

[8] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2007）：平成 18 年度 地層処分技術調査等 モニタリング機器技術高度化調査報告書 （その 2）地層処分記録保存システムの調査 平成 19 年 3 月.

[9] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2008）：平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 3 分冊）-モニタリング技術の開発- 平成 20 年 3 月.

[10] 原子力環境整備促進・資金管理センター（2009）：平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第 3 分冊）-モニタリング技術の開発- 平成 21 年 3 月.

[11] 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）-モニタリング技術の開発- 平成 22 年 3 月.

[12] 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）-モニタリング技術の開発- 平成 23 年 3 月.

[13] 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）-モニタリング技術の開発- 平成 24 年 3 月.
[14] 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報告書（第 3 分冊）-モニタリング技術の開発- 平成 25 年 3 月.
[15] 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開発 - 平成 26 年 3 月.
[16] IAEA (1999): Maintenance of records for radioactive waste disposal, IAEA-TECDOC-1097
[17] IAEA (2004a): Records for Radioactive Waste Management up to Repository Closure: Managing the Primary Level Information (PLI) Set, IAEA TECDOC Series No.1398
[18] IAEA（2004b）：Preservation and Transfer to Future Generations of Information Important for the Safety of Radioactive Waste Disposal Facilities.
[19] IAEA (2008): Long Term Preservation of Information for Decommissioning Projects, Technical Reports Series No.467
[20] 須山 泰宏，和田 隆太郎，杉山 武（2009）：高レベル放射性廃棄物地層処分における記録保存計画を策定する際の判断材料の調査，土木学会第 64 回年次学術講演会予稿集(平成 21 年 9 月)
[21] 杉山 和稔、高尾 肇、杉山 武，青木 和弘，大内 仁，坪谷 隆夫（2009）：地層処分にかかわる記録保存の研究－位置付け・方策・技術的可能性－、原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-08001
http://www.rwmc.or.jp/library/file/RWMC-TRJ-08001.pdf
[22] 法律（2008）：核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第一種廃棄物埋設の事業に関する規則（平成二十年三月二十八日経済産業省令第二十三号），最終改正：平成二六年二月二八日原子力規制委員会規則第一号

# 第6章　まとめと今後の課題

## 6.1　まとめ

### 6.1.1　地層処分モニタリングの枠組みに関する検討

第 2 章では、まず地層処分に関するモニタリングについて概観し、モニタリングの目的について概略を示した。この中で人工バリアの長期健全性に関連し、地層処分独自のモニタリングとして重要な処分場閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認モニタリング）に関し、国際的な動向として、国際共同研究 MoDeRn の主要成果[1]、及び OECD/NEA における検討[2]の概要を記載した。また、性能確認モニタリングのうち技術的側面からの困難を有する人工バリアのモニタリングに関して考察を行うとともに、ニアフィールドのモニタリングにより人工バリアの性能確認に資する方法について考察した。さらに、操業期間中の安全に関するモニタリングについて検討するとともに、廃棄体の回収可能性に関わるモニタリングについて検討した。

性能確認モニタリングは、人工バリアの長期健全性に影響を与える外部因子の確認等が含まれ、第1分冊及び第2分冊において検討を行っている長期健全性に関する指標と関連するものである。性能確認モニタリングの具体的なパラメータの候補の検討においては、モニタリングの実施が考えられる処分場の操業期間内においてバリア性能に影響を与え得る事象として、緩衝材と坑道埋め戻し材の再冠水過程（膨潤過程）に着目した検討を行った。検討においては緩衝材と坑道埋め戻し材の安全機能、技術要件に影響する FEP を抽出し、これをモニタリングできるパラメータを検討した。この結果、少数のモニタリングパラメータが抽出されたが、より幅広い情報を基に人工バリアの性能を確認するためには、人工バリアの性能に影響を与え得るニアフィールドの事象をモニタリングすることで、人工バリアの性能について間接的に情報を得る方法があり得る。本年度はこのようなモニタリングについても検討を実施した。

ニアフィールドのモニタリングによる人工バリア性能の確認に関する検討では、ニアフィールドに関する FEP 内容を整理し、人工バリア性能に影響を与える要因を特定し、これらに関連する約 30 種類のニアフィールドパラメータ（熱、水理、岩盤力学、化学）を抽出した。次に、国内外の地下研究所での計測、モニタリングの実績等を勘案し、計測機器の有無よりニアフィールドでのモニタリングパラメータの絞り込みを行った。ニアフィールドのモニタリングにおいては坑道の埋め戻し前と後で状況が異なるが、埋め戻し前で、モニタリング箇所にアクセス可能な状態では、センサによるモニタリングとサンプリングと室内分析を組み合わせることで、ほぼすべてのニアフィールドパラメータがモニタリング可能であることが分かった。さらに、抽出したニアフィールドパラメータをセンサ類で直接計測する場合のモニタリングシステムについて、地層処分モニタリング技術メニューを用いて検討した。最後に、NUMO によるオーバーパック、緩衝材及び埋め戻し材・止水プラグの技術要件の観点から、ニアフィールドでのモニタリング結果の反映について検討した。

地層処分における建設・操業段階においては、作業員の安全性に関わるモニタリングが実施されるものと考えられる。このようなモニタリングには、通常の労働安全に関わるモニタリングと、放射線安全にかかわるモニタリングが含まれる。本検討では、作業時の安全に関する項目の抽出を実施し、これらの項目ごとに、適用可能な技術について地層処分モニタリング技術メニュー（第5章参照）やMoDeRnプロジェクトによる技術報告書[3]等を対象に調査を行い、計測、モニタリングするパラメータとその方式の例を整理した。

廃棄体の回収可能性に関連したモニタリングについては、まずその内容を、「回収を実施する際の安全性に関するモニタリング」、「回収がバリア性能に影響しているか否かに関するモニタリング」、「性能確認モニタリングの結果への対応の選択肢の一つ」に分類し、これらのうち、「回収がバリア性能に影響しているか否かに関するモニタリング」と「回収を実施する際の安全性に関するモニタリング」が廃棄体の回収可能性に関わる独自のモニタリングであるとして、主にこれらのモニタリングについて検討を実施した。検討においては、処分坑道端部のプラグまでが施工された状態を設定し、この状態を初期状態として、回収のための作業が進むにつれ、プラグ、坑道埋め戻し材、緩衝材が順に除去され、最終的に廃棄体（オーバーパック）が回収されることとした。このとき、作業の段階ごとに、坑道やニアフィールド、人工バリアの状態が変化することを示した。これらの時間的変化を、力学的影響、水理的影響、化学的影響、熱的影響の観点から整理し、このような状態変化が、どのようなパラメータに影響を及ぼすかについて検討し、モニタリングパラメータの候補を抽出した。これらのパラメータをモニタリングするための技術については、基本的に性能確認モニタリングにて検討されたものと同様であり、現場での測定とサンプリングと室内試験を組み合わせたものとなるものと考えられた。

### 6.1.2　地層処分モニタリングの技術的実現性の向上に関する検討

第3章では様々な制約条件のもとに実施される地層処分に関るモニタリングの、技術的実現性を向上させることを目的とした検討を行った。はじめに技術の現状について概要を示し、その後、潜在的水みちの形成を抑制可能な技術である地中無線モニタリング技術の開発について述べた。

技術の現状について概要では、性能確認のためのモニタリング及び操業時の安全性に関わるモニタリングに関する技術について、モニタリングパラメータごとに整理を行った。性能確認のためのモニタリングについては、MoDeRnプロジェクトによる技術報告書[3]を基にパラメータごとに、現地でのセンサによるモニタリング、サンプリングと室内分析によるモニタリングに分けて再整理を行った。また、操業時の安全性に関するモニタリングについて、第2章にて抽出したパラメータごとにモニタリング技術を整理したが、基本的にアクセス可能な状態、機器の交換が可能な状態で実施されるものであることから既存技術にてモニタリング可能なものと考えられた。

地中無線モニタリング技術については、昨年度実施した課題抽出を踏まえ、中継システムの多段化の検討、長期モニタリングのための電源の調査として電磁波による地中無線モニタリング装置への給電及び放射性同位体熱電気変換器（RTG）の適用に関する検討を実施した。さらに、日本原子力研究開発機構との共同研究である人工バリア性能確認試験及び坑道冠水試験への準備、フランス・ANDRA との共同研究である緩衝材膨潤挙動の長期モニタリング、長距離通信試験の

ための機器製作及びワークショップの開催について述べた。

地中無線の中継を多段化することで、段階的に埋め戻しが行われる地層処分施設において、複数のプラグをまたいでモニタリングデータを送ることが可能となる。また、中継の経路を複数設けることにより、一部の中継装置が故障した場合にもデータを送ることができるようになる。本年度はこのような地中無線の中継の多段化において課題となる、電力消費の低減方法や時計の同期方法について検討を行い、中継の多段化と複数経路による中継が可能であることの見込みを得た。

また、長期のモニタリングに地中無線モニタリング装置を適用する際に必要となる長寿命の電源について、電磁波による電力供給と RTG と無線電力伝送について検討を行った。電磁波による電力伝送については、緩衝材中に設置された地中無線モニタリング装置への電力供給を想定し、電力供給に優位な手法として磁界共振結合方式を選定し、また、最適な周波数を選定した。その後、緩衝材を媒体とした電力伝送試験を実施し、電力の供給が可能であることを確認した。RTG については、既存の装置を処分坑道に設置された地中無線モニタリング装置の電源とした場合を想定し、発電に必要な温度差を確保できるか、坑道埋め戻し材と無線モニタリング装置にに有意な熱影響を与えないかという熱伝搬に関する解析、及び金属材料を多用する RTG が地中無線モニタリング装置からの通信に有意な影響を与えないかという電磁波伝搬に関する解析を実施し、地中無線モニタリング装置の電源として、基本的な適用可能性があることを確認した。

さらに本年度は、地中無線モニタリング装置の適用性の実証のため、原子力機構の幌延 URL における人工バリア性能確認試験の緩衝材及び坑道埋め戻し材中に小型地中無線送信装置を設置し、土圧及び間隙水圧のモニタリングを開始した。また、瑞浪超深地層研究所における坑道冠水試験での水圧モニタリングのための装置の設置を行った。

フランス・ANDRA との共同研究としては、緩衝材膨潤挙動の長期モニタリングを継続するとともに長距離通信試験のための機器製作を実施した。長距離通信試験は次年度、ANDRA により実施される計画である。また、地中無線モニタリングに関するワークショップを開催し、成果の普及と今後の開発課題に関する検討を行った。

### 6.1.3　記録保存に関する調査

第 4 章では、高レベル放射性廃棄物の地層処分における記録保存について、国及び関連機関等が地層処分に対する社会的信頼性の向上につながる計画を策定する際の判断材料を整備するための調査について述べた。

放射性廃棄物の処分における記録保存に関する最新動向として、昨年度に引き続き、OECD/NEA の RK&M プロジェクトの調査を実施した。本年度は RK&M プロジェクトの Phase-I の終了年度であり、引き続き Phase-II が開始された。

本年度は最新主要報告書である下記の文献を調査した。

・「マーカーに関する文献整理」[4]
・「記録の喪失に関する検討」[5]
・「津波石碑の考察」[6]
・「モニタリングと記録との関連」[2]

主要報告書のうち「マーカーに関する文献整理」[4]では、マーカーに関する基本的な課題として、マーカーは警告機能を有すべきであるが、警告の伝達には非常に大きな構造的かつ経済的な課題を有する可能性があることや、マーカープログラムを検討する際の考慮事項として、処分場への侵入に対する動機についての分析結果と侵入低減措置の提案を行っている。また、地表設置されたマーカーの耐久性について言及されるとともに、マーカー技術の要件が整理されている。なお、マーカー単独での処分場への侵入阻止は困難であるとの結論に達している。「記録の喪失に関する検討」[5]では、スイス、米国及びドイツにおける埋立地並びに有害廃棄物の旧工業用地又は処分サイトの事例を参考に情報の喪失に係る調査・整理を行い、特に以下に示す 5 つの理由が、調査事例の全てにおいて関連寄与要因として特定されたとしている。

- 記録なし又はアーカイブス不足
- 記録の更新なし／不十分
- 職務遂行のための予算なし／不十分
- 人事異動
- 社会的不連続性（断絶）

「津波石碑の考察」[6]では、将来世代に情報及び警告を伝達するための媒体としてのマーカーの潜在的有効性への理解を深めることを目的として、日本の津波に関する石碑（stone marker）の役割について検討され、日本の石碑の寿命（最長で千年）は、類似の時間スケールにわたるマーカーの残存可能性を例証していること、目に見えるマーカーは記憶の保持に寄与するが、継続的警戒に実質的影響を及ぼすことのない、歴史的及び文化的な物体になる可能性があること等が述べられている。「モニタリングと記録との関連」[2]については、記録保存に関連する結論として、地元ステークホルダが、施設におけるモニタリングと RK&M の保存に関心を持っており、共通理解を実現してゆかなければならないこと、また、RK&M については、様々な国々において、地元自治体が放射性廃棄物管理プログラムの様々な段階への関与を深めるにつれ関心が向けられることが明確になってきていることが述べられている。さらに、モニタリングと RK&M の保存を包含する有益な概念的な枠組みとして「監視（oversight）」を挙げた上で、「監視（oversight）の組織化や推移に関する決定についてはステークホルダとの議論がなされるべきであるとしている。

以上の文献調査に加え、記録保存に関する技術的な進展に関する調査を実施した。その結果、平成 26 年に、石英ガラスを用いたブルーレイディスク並みの容量のデータを記録・再生する技術が開発されており[7]、地層処分への適用可能性について検討したところ既往の調査結果[8]と同様であることがわかった。

### 6.1.4　地層処分モニタリング技術メニューの整備

第 5 章では、地層処分に関するモニタリングの技術情報を体系的に整備し、実施主体や安全規制機関等に対して技術的選択肢を提示するためのツールとして整備を実施している地層処分モニタリング技術メニューの整備について述べた。

本年度は、技術メニューの実用性の向上を目指し、モニタリング技術に関する情報の拡充に加え、これまでに調査した記録保存に関する情報の収録を実施した。

モニタリング技術に関する情報の収録は、平成 25 年度原環センター成果報告書、及び本年度検討内容のうち電磁波による給電技術の検討の成果情報を対象とした。

また、記録保存に関する情報に関する収録内容は以下の通りである。

・長期的な記録の保存事例
・適正な保存時期の設定
・適切な保存技術の選定
・適切な記録区分（階層）の設定
・適切な背景情報の抽出
・有効な記録の分散・配置の方法
・永続的な記録保管庫や媒体の設置
・媒体等の耐久性
・有効な媒体等の配置の方法
・適切な情報の階層化
・情報の表示形式（文字・図・シンボル）
・記録保存の方策（記録保存システムの導出経緯、等）

## 6.2 今後の課題

### 6.2.1 地層処分モニタリングの枠組みに関する検討

本章にて検討したモニタリングのうち、処分システムの構成要素の性能確認に関するモニタリングは、本来、セーフティケースの分析を出発点として、モニタリング対象の特定やモニタリング結果の反映先の特定を実施すべきものである。しかしながら、現時点ではわが国の地層処分に関するセーフティケースは未整備であるため、将来のセーフティケースに反映されるものと予測される、処分システムの構成要素の安全機能や技術要件に関する記述を手掛かりに検討を実施した。従って、将来セーフティケースが示された時点で、これに基づいて再度検討を行う必要がある。

処分場の操業期間中の安全性に関するモニタリングについても、処分場の操業計画が整っていくにつれ、より具体的な検討が必要になるものと考えられる。

最後に、廃棄体の回収に関係したモニタリングについては、主に、何らかの理由で回収が実施される際の安全確保及び回収行為が他の廃棄体に与える影響という観点から検討を行ったが、今後、回収可能性の維持に関する議論の進展により、さらに具体的な検討が必要となる可能性がある。

### 6.2.2 地層処分モニタリングの技術的実現性の向上に関する検討

地層処分における性能確認モニタリングに関しては、MoDeRn(2012) [3]により、複数の技術的課題が示されている。原環センターでは、このうち、複数のバリアへの損傷または擾乱を避ける

こと、及び想定される特に長いタイムスケールにわたるモニタリングシステムの信頼性と耐久性を確保することを現時点で取り組むべき課題として重視し、地中無線モニタリング技術の開発を実施している。なお、操業時の安全性に関わるモニタリングは、基本的にアクセス可能な状態、機器の交換が可能な状態で実施されるものであり、既存技術にてモニタリング可能なものと考えられる。

地中無線モニタリング技術の開発に関しては、現段階で取り組むべきと判断された主要な課題として、処分施設の埋め戻しに対応したデータ送信の長距離化と長寿命化が挙げられる。また、開発した技術の地下研究所等での実証が必要である。

原環センターでは、送信の長距離化については、送信装置からのモニタリングデータを複数の中継装置により中継して受信装置に送る技術を有力視して開発を実施しているが、中継技術に関する課題として、故障に対する冗長性の確保が挙げられる。また、長寿命化に関連し各装置の消費電力量を低減する必要がある。このため、本年度、複数の経路にて中継可能なシーケンスやソフトウェア的故障への対処方法、消費電力の低減方法を検討し、設計を行ったが、今後、実機を製作して機能が確保されていることを確認する必要がある。

地中無線モニタリング装置の長寿命化に関しては、装置の消費電力の低減と合わせ、電源の長寿命化が中心的な課題である。電源の長寿命化に関しては、平成 25 年度に幅広く文献調査を実施し、その結果、電磁波による電源供給と RTG を有力な候補とした。電磁波による電源供給に関し、本年度は、竪置き処分孔内の緩衝材に設置された小型地中無線送信装置への電力供給を想定した検討を行い、基本的な適用可能性を確認したが、今後は、処分坑道端部のプラグにおける適用性を確認する必要がある。これは、地中無線モニタリング装置を適用する必然性の高い個所は、ケーブルによる水みちの形成を防ぐことが重視される個所であり、これが緩衝材と止水プラグであるためである。RTG による電力供給については、今回、埋め戻された処分坑道でのモニタリングに対する基本的な適用性を確認したが、現在の RTG は装置が大きいため、処分孔でのモニタリングには不向きである。また、RTG の使用は、処分場への放射性物質の持ち込みを意味するため、安全評価等が必要である。

地下研究所での技術の実証については、幌延深地層研究センターでは人工バリア性能確認試験における緩衝材及び坑道埋め戻し材の挙動のモニタリングを開始し、データの継続的取得を実施している。この中で、周辺の機器からの電磁ノイズが一時的に上昇し、一部の地中無線モニタリングデータの欠損が見られた。このようなデータ欠損に対処するため、データを複数回送信するように装置を設計しているが、地中無線モニタリングシステムの設計においては、このような冗長性の確保と通信回数の増加等による消費電力の増加のバランスをどのように取るかが、適用事例ごとの課題である。

### 6.2.3　記録保存に関する調査

OECD/NEA の RK&M プロジェクトに関しては、2014 年より Phase-II として検討が開始されている。Phase-II では、例えば規制機関の役割に関する議論やマーカータイプなどの国際標準についての議論など、具体的な内容が予定されている。さらにプロジェクトの中心は、これまでの

調査対象機関（フランス ANDRA・英国 NDA）であり、各国の最新状況の把握という観点でも今後もその動向に注目していく必要がある。

記録保存に関する技術的な面では、個別の記録技術よりも記録保存システムの中でどの部分にどの技術を適用するかを、冗長性の確保等の側面から検討する必要があるものと考えられる。

### 6.2.4　地層処分モニタリング技術メニューの整備

地層処分モニタリング技術メニューは、モニタリング技術を中心としたデータベースであることから、情報の網羅性や、最新の情報であることが重要であるため、情報の更新を実施する必要がある。

また、モニタリング技術に関しては、本年度第 2 章に示したように、モニタリングシステムの検討も実施しているため、このような情報を収録できる枠組みが必要である。さらに、モニタリング技術のみでなく、モニタリング項目の選定過程に即したインターフェースを持つことが望ましいと言える。

第 6 章参考文献


[1] MoDeRn: Monitoring During the Staged Impremention of Geological Disposal:The MoDeRn Project Synthesis、
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/、 (2014)

[2] OECD/NEA-RWMC Preservation of Records、 Knowledge and Memory (RK&M) across Generations: Monitorin of Geological Disposal Facilities: Technical and Social Aspects、http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-2.pdf 、(2014)

[3] MoDeRn:State of Art Report on Monitoring Technology,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)

[4] OECD/NEA-RWM (2013): Literature Survey on Markers and Memory Preservation for Deep Geological Repositories, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M), NEA/RWM/R(2013)5.
https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2013/rwm-r2013-5.pdf

[5] OECD/NEA-RWM (2014a): Loss of Information, Records, Knowledge and Memory – Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/R(2014)3.
https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-3.pdf

[6] OECD/NEA-RWM (2014b): Markers - Reflections on Intergenerational Warnings in the Form of Japanese Tsunami Stones, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/R(2014)4.
https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-4.pdf

[7] 株式会社日立製作所 (2014) : 石英ガラスの内部にブルーレイディスク ™ 並みの記録密度でデジタルデータの記録・再生に成功
http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2014/10/1020a.pdf

[8] 株式会社日立製作所 (2012) : 石英ガラスの内部に CD 並み容量のデジタルデータを記録・再生する技術を開発
http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2012/09/0924.pdf