平成 25 年度
地層処分技術調査等事業
処分システム工学確証技術開発

報告書
（第３分冊）

モニタリング関連技術の整備

平成 26 年３月

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

目　次

第 1 章 研究の目的および概要 1-1
1.1 処分システム工学確証技術高度化開発の背景、および目的 1-1
1.1.1 開発の背景 1-1
1.1.2 開発の目的 1-1
(1) 処分システム工学確証技術開発 1-1
(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関する基盤技術の開発 1-3
1.1.3 開発項目の相互関係 1-3
1.2 モニタリング関連技術の整備に関するこれまでの開発成果 1-5
(1) 第１フェーズ 1-5
(2) 第２フェーズ 1-7
(3) 第２フェーズの検討で抽出された課題 1-8
1.3 報告書の構成及び概要 1-10
第 1 章参考文献 1-11

第 2 章 モニタリング関連技術の整備に関する計画の検討 2-1
2.1 モニタリングの枠組み等に関する検討計画 2-1
2.2 モニタリングの技術的実現性向上に関する検討計画 2-4
2.3 記録保存に関する調査計画 2-6
2.4 各年度の成果目標 2-7
第 2 章参考文献 2-9

第 3 章 地層処分モニタリングの枠組みに関する検討 3-1
3.1 目的および実施概要 3-1
3.2 地層処分に関するモニタリングの概要 3-1
3.3 モニタリング国際共同研究 MoDeRn における検討 3-3
3.3.1 MoDeRn の概要 3-3
3.3.2 MoDeRn における検討 3-7
(1) 会合等の開催 3-7
(2) 各ワークパッケージの活動 3-8
(3) 地層処分モニタリングのリファレンスフレームワーク 3-11
3.4 人工バリアの性能確認に資するモニタリングの検討 3-25
3.4.1 背景 3-25
3.4.2 人工バリアの性能確認モニタリングのパラメータ選定方法の検討 3-26
3.4.3 モニタリングの制約条件の検討 3-41

(1) モニタリングの実施における制約条件 3-41
(2) 操業・閉鎖段階において実施可能なモニタリング 3-42
(3) 地中無線送信技術がモニタリングの制約条件へ与える影響 3-44
(4) 処分坑道、処分孔におけるモニタリングの可能性 3-45
(5) モニタリングにより性能確認を行う場合のオプションの比較 3-53
3.4.4 性能確認モニタリングの結果の反映に関する検討 3-54
3.4.5 まとめと今後の課題 3-58
第 3 章参考文献 3-62

第 4 章　地層処分モニタリング技術メニューの整備 4-1
4.1 目的と概要 4-1
4.2 技術メニューの運用再開 4-2
4.2.1 新規サーバ管理会社の選定 4-2
4.2.2 新規サーバへの地層処分モニタリング技術メニューの再現 4-3
4.2.3 新規サーバ上での地層処分モニタリング技術メニューの動作確認 4-3
4.3 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 4-14
4.3.1 モニタリング計画策定を目的とした技術メニューのイメージの検討 4-14
4.3.2 必要情報及び機能の抽出 4-27
4.3.3 必要情報及び機能の実装方法の検討 4-35
4.4 技術メニュー搭載情報の拡充 4-38
4.4.1 MoDeRn プロジェクト報告書 4-38
4.4.2 地中無線装置用電源に関する情報 4-39
4.5 まとめと今後の課題 4-39
第 4 章参考文献 4-42

第 5 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 5-1
5.1 目的および実施概要 5-1
5.2 地層処分モニタリングに関る主な制約条件 5-1
5.3 モニタリング技術の到達状況 5-2
5.3.1 有線センサ及びサンプリング 5-2
5.3.2 光ファイバセンサ 5-5
5.3.3 地中無線通信技術 5-6
5.3.4 モニタリング機器の故障検出 5-7
5.4 地中無線モニタリング技術に関する調査 5-18
5.4.1 地中無線モニタリング技術に関する開発課題の検討 5-18
5.4.2 地中無線送信技術の必要性 5-18

5.4.3 これまでに設定した地中無線送信技術開発課題と開発の実施状況 5-19
5.4.4 開発課題の再検討 5-21
5.4.5 地中無線中継装置等の耐圧性強化に関する検討.....5-31
5.4.6 水分センサを小型地中無線送信装置に接続するアダプタの開発.....5-46
5.4.7 地中無線モニタリング装置の電源に関する検討.....5-57
5.4.8 地中無線中継試験 5-104
5.4.9 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.....5-117
5.4.10 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 5-129
5.4.11 フランス ANDRA との共同研究実施状況.....5-148
5.5 まとめと今後の課題 5-172
第 5 章参考文献.....5-176

第 6 章　記録保存に関する調査 6-1
6.1 目的と概要 6-1
6.2 OECD／NEA における検討状況 6-2
6.2.1 OECD/NEA における記録保存に関する検討の目的 6-4
6.2.2 RK&M プロジェクトの目的・背景 6-4
6.2.3 本年度調査結果.....6-5
6.2.4 調査結果の整理.....6-22
6.3 英国 NDA が発行した安全評価書 DSSC に係る記録保存方策の調査・整理 6-29
6.3.1 調査対象文献 6-29
6.3.2 DSSC の概要 6-29
6.3.3 調査結果 6-31
6.3.4 調査結果とまとめ 6-41
6.4 内閣府による「公文書管理法」に関連した運用方法文書の調査・整理.....6-43
6.4.1 調査対象文献 6-43
6.4.2 調査結果 6-44
6.4.3 調査結果の整理.....6-49
6.5 まとめと今後の課題 6-51
第 6 章参考文献 6-54

第 7 章 まとめと今後の課題.....7-1
7.1 まとめ.....7-1
(1) モニタリング関連技術の整備に関する計画の検討 7-1
(2) 地層処分モニタリングの枠組みに関する検討 7-1

(3) 地層処分モニタリング技術メニューの整備 7-2
(4) 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 7-2
(5) 記録保存に関する調査 7-4
7.2 今後の課題 7-5
(1) 性能確認モニタリングに関する課題 7-5
(2) その他のモニタリングに関する課題 7-6
(3) 技術メニューの整備に関する課題 7-6
(4) 地層処分モニタリングの技術的実現性向上に関する課題 7-6
(5) 記録保存に関する課題 7-7

図　目　次

図 1.1.3-1　処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係 1-4

図 2-1　モニタリングに関する検討の枠組み 2-1

図 3.3.1-1　MoDeRn のホームページ（http://www.modern-fp7.eu/home/） 3-4
図 3.3.1-2　MoDeRn における各 WP の関係 3-6
図 3.3.2-1　MoDeRn によるモニタリングワークフロー 3-13
図 3.3.2-2　NEA 回収可能性および可逆性プロジェクトの R スケールによる処分の段階的実施と回収の困難性の増加、受動的安全性への移行の説明（NEA, 2011） 3-18
図 3.3.2-3　モニタリングデータの評価に関する意思決定プロセスの例 3-20
図 3.4.2-1　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出方法案 3-27
図 3.4.2-2　性能確認モニタリングの位置付け 3-39
図 3.4.2-3　緩衝材の再冠水過程における流出のモニタリング（1/2） 3-40
図 3.4.2-4　緩衝材の再冠水過程における流出のモニタリング（2/2） 3-41
図 3.4.3-1　人工バリアのモニタリング（処分場） 3-43
図 3.4.3-2　人工バリアのモニタリング（地下調査施設） 3-43
図 3.4.3-3　無線による人工バリアのモニタリング（処分場） 3-44
図 3.4.3-4　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 3-45
図 3.4.3-5　無線による人工バリアのモニタリング（地下調査施設） 3-45
図 3.4.3-6　Andra の HLW の処分に対する人工バリア構成 3-47
図 3.4.3-7　Andra の使用済み燃料の処分に対する人工バリア構成 (ESDRED, 2008) 3-47
図 3.4.3-8　ANDRA によるモニタリング機器を計装した処分セルの配置例 3-49
図 3.4.3-9　ANDRA による「ウィットネス」構造物のモニタリング機器の計装例 3-49
図 3.4.3-10　ANDRA による「犠牲セル」のモニタリング機器の計装例 3-50
図 3.4.3-11　HLW セルのプラグを通じた無線送信システム、研究中（Dossier2005） 3-51
図 3.4.3-12　DBE-TEC による地中無線モニタリングのコンセプト 3-52
図 3.4.3-13　地中無線による廃棄体近傍のモニタリング概念図 3-53
図 3.4.4-1　モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（1/4） 3-55
図 3.4.4-2　モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（2/4） 3-56
図 3.4.4-3　モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（3/4） 3-57

図 3.4.4-4　モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（4/4）.....3-58
図 4.2.3-1　システム全般：起動画面.....4-5
図 4.2.3-2　システム全般：ログイン画面.....4-5
図 4.2.3-3　技術メニュー：テーブルビュー画面.....4-6
図 4.2.3-4　技術メニュー：ツリービュー（簡易）画面.....4-6
図 4.2.3-5　技術メニュー：ツリービュー（詳細）画面.....4-7
図 4.2.3-6　技術情報データベース：技術情報 DB 内検索画面.....4-7
図 4.2.3-7　技術情報データベース：WEB 全体検索画面.....4-8
図 4.2.3-8　用語説明画面.....4-8
図 4.2.3-9　コメント画面.....4-9
図 4.2.3-10　リンク画面.....4-10
図 4.2.3-11　ライブラリ画面.....4-10
図 4.2.3-12　ヘルプ画面.....4-11
図 4.2.3-13　管理者メニュー：ユーザ登録画面.....4-11
図 4.2.3-14　管理者メニュー：ユーザ更新／削除画面.....4-12
図 4.2.3-15　管理者メニュー：リンク情報編集画面.....4-12
図 4.2.3-16　管理者メニュー：ライブラリ情報編集画面.....4-13
図 4.2.3-17　管理者メニュー：コメント検索画面.....4-13
図 4.2.3-18　管理者メニュー：編集履歴照会画面.....4-13
図 4.2.3-19　管理者メニュー：アクセス履歴取得画面.....4-14
図 4.3.1-1　現状のモニタリング目的による検索画面（詳細ツリー）.....4-19
図 4.3.2-1　現行メニューにおける伝送方法の表示方法（ツリービュー）.....4-28
図 4.3.2-2　現行メニューにおける伝送方法の表示方法（テーブルビュー）.....4-29
図 4.3.2-3　記録保存に関する情報との関連イメージ.....4-34

図 5.3.4-1　フェールセーフセンサシステムのブロック図.....5-15
図 5.4.2-1　地中無線送信技術の必要性.....5-19
図 5.4.4-1　無線による人工バリアのモニタリング（処分場）.....5-23
図 5.4.4-2　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.....5-23
図 5.4.4-3　無線による人工バリアのモニタリング（地下調査施設）.....5-24
図 5.4.4-4　地中無線による廃棄体近傍のモニタリング概念図.....5-24
図 5.4.4-5　人工バリア試験での地中無線送信技術の適用イメージ.....5-25
図 5.4.4-6　フランス Andra での地中無線送信システムでの測定結果の 地上へのデータ伝送イメージ（現在：有線、将来：無線）.....5-26
図 5.4.5-1　平成 24 年度に開発した地中無線中継装置（本体）.....5-31

図 5.4.5-2　平成 23 年度に開発したボーリング孔対応型受信アンテナ 5-32
図 5.4.5-3　3 個のセンサが接続可能な地中無線送信装置 5-32
図 5.4.5-4　中継動作設定 5-34
図 5.4.5-5　耐圧性向上中継装置本体（モジュール化） 5-36
図 5.4.5-6　耐圧性向上中継装置電源（モジュール化） 5-37
図 5.4.5-7　耐圧性向上中継装置（モジュール化）の相当応力 5-38
図 5.4.5-8　耐圧性向上中継装置（モジュール化）の変形量 5-38
図 5.4.5-9　耐圧性向上中継装置（モジュール化）の安全率 5-39
図 5.4.5-10　中継用送信アンテナ 5-40
図 5.4.5-11　耐圧性向上受信アンテナ 5-41
図 5.4.5-12　耐圧性向上受信アンテナの相当応力 5-42
図 5.4.5-13　耐圧性向上受信アンテナの変形量 5-42
図 5.4.5-14　耐圧性向上受信アンテナの安全率 5-43
図 5.4.5-15　耐圧性向上地中無線送信装置 5-44
図 5.4.5-16　耐圧性向上地中無線送信装置の相当応力 5-45
図 5.4.5-17　耐圧性向上地中無線送信装置の変形量 5-45
図 5.4.5-18　耐圧性向上地中無線送信装置の安全率 5-46
図 5.4.6-1　静電容量型の水分センサ（スペイン Aitemin 製 SHT75-V3）の外観 5-46
図 5.4.6-2 水分センサ用アダプタと小型送信機の構造イメージ 5-48
図 5.4.6-3　水分センサ用アダプタのブロック図 5-49
図 5.4.6-4　水分センサ用アダプタの回路概要 5-49
図 5.4.6-5　設計した水分センサ付小型送信機 5-50
図 5.4.6-6　設計した水分センサ付小型送信機（3D） 5-50
図 5.4.6-7　試作アダプタ 5-51
図 5.4.6-8　水分センサと試作アダプタの動作確認試験 5-51
図 5.4.6-9　珪砂に埋設した水分センサ 5-52
図 5.4.6-10　100cc の水投入後の様子 5-52
図 5.4.6-11　100cc および 200cc の水投入後の湿度変化 5-53
図 5.4.6-12　水投入後の湿度変化（拡大） 5-53
図 5.4.6-13　水分センサ付小型送信機 5-54
図 5.4.6-14　試験状況 5-54
図 5.4.6-15　温度試験結果 5-55
図 5.4.6-16　試験装置 5-56
図 5.4.6-17　加振器と送信機 5-56
図 5.4.7-1　電池の種類 5-59
図 5.4.7-2　耐熱試験装置の概要 5-101

図 5.4.7-3　耐熱試験装置全体 5-101
図 5.4.7-4　炉内用電池と電熱炉 5-102
図 5.4.7-5　耐熱性試験結果 5-103
図 5.4.8-1　幌延深地層研究計画スケジュール 5-105
図 5.4.8-2　地下研究施設整備(第Ⅱ期)等事業の概要 5-105
図 5.4.8-3　作業坑道（140m 調査坑道及び 250m 調査坑道、[26]に加筆） 5-106
図 5.4.8-4　作業エリア（250m 調査坑道） 5-107
図 5.4.8-5　作業エリア（140m 調査坑道） 5-107
図 5.4.8-6　小型地中無線送信装置及び間隙水圧計（第 1 回目送受信用） 5-108
図 5.4.8-7　ボアホール対応受信アンテナ（第 1 回目送受信用） 5-108
図 5.4.8-8　中継機本体 5-109
図 5.4.8-9　大型アンテナ同調用機器（第 2 回目送受信用） 5-109
図 5.4.8-10　大型アンテナ（第 2 回目送受信用） 5-110
図 5.4.8-11　ポータブル受信機及びレベルメーター（第 2 回目送受信用） 5-110
図 5.4.8-12　250m 調査坑道で使用するボーリング孔（当初案） 5-111
図 5.4.8-13　250m 調査坑道の大型試錐座から削孔されているボーリング孔（2 本） 5-111
図 5.4.8-14　250m 調査坑道の大型試錐座から削孔されているボーリング孔の状態 5-112
図 5.4.8-15　140m 調査坑道の孔間透水試験用ボーリング孔の状態 5-112
図 5.4.8-16　地中無線中継システム試験概要（250m 調査坑道間） 5-113
図 5.4.8-17　地中無線中継システム試験概要（250m 調査坑道～140m 調査坑道） 5-114
図 5.4.8-18　地下からの地中無線のデータの地上での受信 5-115
図 5.4.8-19　地中無線中継システムの適用性確認試験での大型アンテナからの
受信強度 5-116
図 5.4.9-1　幌延 URL のイメージ図 5-118
図 5.4.9-2　試験坑道における原位置試験のイメージ図 5-118
図 5.4.9-3　地中無線センサの配置（案） 5-119
図 5.4.9-4　10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置外寸図 5-120
図 5.4.9-5　10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置外観 5-121
図 5.4.9-6　全圧計 1 外寸図 5-121
図 5.4.9-7　全圧計 2 外寸図 5-122
図 5.4.9-8　全圧計 2 外観 5-122
図 5.4.9-9　全圧計 1 を接続した 10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置の外観 5-123
図 5.4.9-10　間隙水圧計外寸図 5-123
図 5.4.9-11　間隙水圧計外観 5-124
図 5.4.9-12　間隙水圧計を接続した 10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置の外観 5-124
図 5.4.9-13　受信機本体外寸図 5-125

図 5.4.9-14　受信機本体外観 5-125
図 5.4.9-15　アンテナ部外寸図 5-126
図 5.4.9-16　電源制御装置 5-126
図 5.4.9-17　電源避雷器 5-127
図 5.4.9-18　格納箱外寸 5-128
図 5.4.9-19　格納箱の設置イメージ 5-128
図 5.4.10-1　瑞浪超深地層研究所周辺における地質 5-129
図 5.4.10-2　瑞浪超深地層研究所の研究計画 5-130
図 5.4.10-3　坑道の再冠水試験の内容 5-131
図 5.4.10-4　可搬型受信機とレベルメータ 5-132
図 5.4.10-5　受信アンテナの設置方向 5-132
図 5.4.10-6　深度 300m 研究アクセス坑道における測定位置 5-133
図 5.4.10-7　深度 300m 研究アクセス坑道①での測定状況 5-134
図 5.4.10-8　深度 300m 研究アクセス坑道②での測定状況 5-134
図 5.4.10-9　深度 300m 研究アクセス坑道③での測定状況 5-134
図 5.4.10-10　深度 300m 研究アクセス坑道④（坑道中央）での測定状況 5-135
図 5.4.10-11　深度 300m 研究アクセス坑道④（L サイド）での測定状況 5-135
図 5.4.10-12　深度 300m 研究アクセス坑道④（R サイド）での測定状況 5-135
図 5.4.10-13　深度 300m 研究アクセス坑道⑤（坑道中央）での測定状況 5-136
図 5.4.10-14　深度 300m 研究アクセス坑道⑤（L サイド）での測定状況 5-136
図 5.4.10-15　深度 300m 研究アクセス坑道⑤（R サイド）での測定状況 5-136
図 5.4.10-16　深度 300m 研究アクセス坑道⑥での測定状況 5-137
図 5.4.10-17　深度 300m 研究アクセス坑道⑦での測定状況 5-137
図 5.4.10-18　深度 500m 研究アクセス北坑道における測定位置 5-138
図 5.4.10-19　深度 500m 研究アクセス北坑道①（坑道中央）での測定状況 5-138
図 5.4.10-20　深度 500m 研究アクセス北坑道①（電線のある L サイド）での測定状況 5-139
図 5.4.10-21　深度 500m 研究アクセス北坑道②での測定状況 5-139
図 5.4.10-22　深度 500m 研究アクセス北坑道③（坑道中央）での測定状況 5-139
図 5.4.10-23　深度 500m 研究アクセス北坑道③（電線のある L サイド）での測定状況 5-140
図 5.4.10-24　深度 300m アクセス北坑道の予備送信試験状況（小型地中無線送信機） 5-143
図 5.4.10-25　深度 300m アクセス北坑道の送信試験結果 5-144
図 5.4.10-26　深度 500m アクセス北坑道の送信試験結果 5-145
図 5.4.10-27　再冠水試験のイメージ図 5-147

図 5.4.10-28　送信方向（正対）.....5-147
図 5.4.10-29　送信方向（平行）.....5-147
図 5.4.11-1　ビュール地下研究所のレイアウト.....5-149
図 5.4.11-2　GEX 坑道（GKE 坑道側から撮影）.....5-149
図 5.4.11-3　ビュール地下研究所坑道 490m 坑道群.....5-150
図 5.4.11-4　TSF1002 ボーリング孔の具体的な位置関係.....5-151
図 5.4.11-5　間隙水圧計の測定結果.....5-153
図 5.4.11-6　土圧計の計測結果（01：孔口-5.50m、02：孔口-6.00m）.....5-153
図 5.4.11-7　温度センサでの計測結果.....5-154
図 5.4.11-8　電圧計の測定結果.....5-154
図 5.4.11-9　長距離送信の対象区間（約 490m）.....5-155
図 5.4.11-10　中継システム用の送信アンテナ.....5-156
図 5.4.11-11　長距離送信試験 A.....5-157
図 5.4.11-12　長距離送信試験 B.....5-157
図 5.4.11-13　長距離送信試験 C.....5-158
図 5.4.11-14　ESL による解析イメージ.....5-159
図 5.4.11-15　ESL が用いる区間確率理論.....5-159
図 5.4.11-16　ESL パラメータ（十分性と重複性）と演算規則.....5-160
図 5.4.11-17　Ratio Plot による結果の可視化.....5-161
図 5.4.11-18　解析対象イメージ（再掲）.....5-161
図 5.4.11-19　主命題「長距離送信が可能である」の樹形図.....5-162
図 5.4.11-20　Uniform confidence plot（支持 100%）.....5-164
図 5.4.11-21　解析結果（主命題「長距離送信試験 A：長距離送信が可能である」）.....5-167
図 5.4.11-22　解析結果（主命題「長距離送信試験 B：長距離送信が可能である」）.....5-168
図 5.4.11-23　解析結果（主命題「長距離送信試験 C：長距離送信が可能である」）.....5-169
図 5.4.11-24　Ratio plot（主命題「長距離送信試験 A：長距離送信が可能である」）...5-170
図 5.4.11-25　Ratio plot（主命題「長距離送信試験 B：長距離送信が可能である」）...5-170
図 5.4.11-26　Ratio plot（主命題「長距離送信試験 C：長距離送信が可能である」）...5-171
図 5.4.11-27　長距離送信試験の実施手順.....5-171

図 6.2.3-1　津波マーカーの例.....6-12
図 6.2.3-2　ARNANO ディスク.....6-19
図 6.3.2-1　DSSC の文書構成.....6-30
図 6.3.2-2　DSSC の階層構造.....6-31
図 6.3.2-3　英国の地層処分概念.....6-31
図 6.3.4-1　NNA の完成予想図.....6-42

表　目　次

表 1.1.3-1　処分システム工学確証技術開発の成果目標 1-4

表 2.2.4-1　モニタリング関連技術の整備に関する計画 2-8

表 3.2.1-1 地層処分の段階と場所によるモニタリング目的（案） 3-2
表 3.3.1-1　RWMC（2005）による地層処分モニタリングの目的の分類 3-5
表 3.3.2-1　MoDeRn リファレンスフレームワーク報告書から作表したモニタリング目的の分類 3-12
表 3.4.2-1　Posiva(2012)による人工バリアのモニタリング対象プロセスの選定 3-28
表 3.4.2-2　緩衝材の安全機能と「基本的なバリア性能の確保」に関する技術要件 3-29
表 3.4.2-3　緩衝材の技術要件 3-30
表 3.4.2-4　安全機能と技術要件の関係（[2]より作表） 3-30
表 3.4.2-5　緩衝材に関する FEP の比較（1/3） 3-32
表 3.4.2-6　緩衝材に関する FEP の比較（2/3） 3-33
表 3.4.2-7　緩衝材に関する FEP の比較（3/3） 3-34
表 3.4.2-8　再冠水過程において重要と考えられる FEP 3-35
表 3.4.2-9　再冠水過程で重要な FEP と安全機能、技術要件との関連付け 3-36
表 3.4.2-10　再冠水過程で重要な FEP とモニタリングパラメータ候補 3-37
表 3.4.2-11　安全機能、技術要件、FEP から推定した再冠水時のモニタリングパラメータ候補 3-38
表 3.4.3-1　人工バリアの性能確認モニタリングのオプション比較 3-54

表 4.2.2-1　インストールした各ソフトウェアのバージョン 4-3
表 4.2.3-1　地層処分モニタリング技術メニューの各機能の動作確認結果 4-4
表 4.3.1-1　モニタリングシステム提示機能の内容案 4-15
表 4.3.1-2　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的の分類 4-20
表 4.3.1-3　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的 「ベースラインとその変動の把握」の解説 4-20
表 4.3.1-4　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的「ファーフィールドの特性の把握」の解説 4-21
表 4.3.1-5　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的 「ニアフィールドの特性の把握」の解説 4-22
表 4.3.1-6　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的 「処分場の安全評価の妥当性の確認」の解説 4-23

表 4.3.1-7　処分に関連する記録保存に係る原環センター及び国内外の検討状況（平成 19 年度以降）……4-26
表 4.3.2-1　第 1 種埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容(1/4)……4-31
表 4.3.2-2　第 1 種埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容(2/4)……4-32
表 4.3.2-3　第 1 種埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容(3/4)……4-33
表 4.3.2-4　第 1 種埋設規則（第 44 条（記録））に記された内容(4/4)……4-34
表 4.3.3-1　モニタリングシステム提示機能の実装に必要な期間……4-36
表 4.3.3-2　モニタリング目的による検索機能の高度化の実装に必要な期間……4-37
表 4.3.3-3　記録保存に関する情報との統合の実装に必要な期間……4-37
表 4.3.3-4　搭載情報のブラッシュアップに必要な期間……4-38

表 5.3.1-1　有線式センサ及びサンプリングによるモニタリング技術……5-3
表 5.3.2-1　光ファイバセンサによるモニタリング技術……5-5
表 5.3.3-1　地中無線通信技術の分類と長所・短所……5-6
表 5.3.4-1　故障モードの分類……5-8
表 5.3.4-2　センサ故障の検出方法（1/2）……5-9
表 5.3.4-3　センサ故障の検出方法（2/2）……5-10
表 5.3.4-4　データ伝送の故障と検出方法……5-11
表 5.3.4-5　測定原理に関係する故障検出方法(1/3)……5-12
表 5.3.4-6　測定原理に関係する故障検出方法(2/3)……5-13
表 5.3.4-7　測定原理に関係する故障検出方法(3/3)……5-14
表 5.4.3-1　適用性向上に向けた地中無線送信技術開発課題……5-20
表 5.4.3-2　地中無線送信技術の開発経緯……5-21
表 5.4.4-1　各適用イメージにおける課題と開発項目……5-27
表 5.4.4-2　各開発項目と対策……5-29
表 5.4.4-3　地中無線送信技術　改訂研究計画……5-30
表 5.4.6-1　静電容量型の水分センサ（スペイン Aitemin 製 SHT75-V3）の技術仕様……5-47
表 5.4.7-1　電池の種類と用いる化学反応式……5-59
表 5.4.7-2　調査結果一覧（1/3）……5-65
表 5.4.7-3　調査結果一覧（2/3）……5-66
表 5.4.7-4　調査結果一覧（3/3）……5-67
表 5.4.7-5　事例　Panasonic BR 系円筒型リチウム電池……5-68
表 5.4.7-6　事例　Lunar-A（月探査機）ペネトレータ用一次電池……5-69
表 5.4.7-7　事例　松下電器産業　オキシライド乾電池……5-70
表 5.4.7-8　事例　松下電器産業　EVOLTA……5-70

表 5.4.7-9　事例　Greatbatch Corp. ELECTROCHEM 5-71
表 5.4.7-10　事例　シックジャパン株式会社　Energizer 5-71
表 5.4.7-11　事例　東芝　アルカリ乾電池　インパルスシリーズ 5-72
表 5.4.7-12　事例　ジーエス・ユアサ・テクノロジー　大容量リチウム一次電池 5-72
表 5.4.7-13　事例　株式会社 TSC マグネシウム電池 5-73
表 5.4.7-14　事例　マグネシウム電池 5-73
表 5.4.7-15　事例　フィルム型 Mg 電池 5-74
表 5.4.7-16　事例　ヤマハ　熱電発電モジュール 5-75
表 5.4.7-17　事例　サイエンスパーク（株）　温度差発電 5-76
表 5.4.7-18　事例　熱電変換による廃熱利用 5-76
表 5.4.7-19　事例　高木製作所　Seebeck Units 5-77
表 5.4.7-20　事例　温度差発電と実証事例 5-78
表 5.4.7-21　事例　OTEC Hawaiian Islands 5-78
表 5.4.7-22　事例　OTEC The Bahamas 5-79
表 5.4.7-23　事例　佐賀大学海洋エネルギー研究センター 5-79
表 5.4.7-24　事例　インド国立海洋技術研究所の海洋温度差発電実証研究 5-80
表 5.4.7-25　事例　フランスにおける OTEC の現状 5-80
表 5.4.7-26　事例　ゼネシス（株）　排熱温度差発電 5-81
表 5.4.7-27　事例　IHI 小型バイナリー発電装置 5-81
表 5.4.7-28　事例　神戸製鋼　小型バイナリー発電装置 5-82
表 5.4.7-29　事例　昭和飛行機工業株式会社　非接触給電システム 5-82
表 5.4.7-30　事例　村田製作所　ワイヤレス電力伝送モジュール 5-83
表 5.4.7-31　事例　長野日本無線　ワイヤレス電力伝送 5-83
表 5.4.7-32　事例　三菱重工　無線電力伝送技術 5-84
表 5.4.7-33　事例　日本電業工作　レクテナ：ワイヤレス給電 5-85
表 5.4.7-34　事例　ワイヤレス給電を利用したモニタリングの電磁界解析 5-85
表 5.4.7-35　事例　村田製作所　新・無線給電技術 5-86
表 5.4.7-36　事例　ソフトスイッチング技術を用いた新しい共鳴型ワイヤレス給電システムの設計理論 5-87
表 5.4.7-37　事例　磁気共鳴による非接触給電の予備的実験 5-88
表 5.4.7-38　事例　電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム 5-88
表 5.4.7-39　事例　三菱重工業　マイクロ波方式ワイヤレス充電システム 5-89
表 5.4.7-40　事例　Widetronix's betavoltanic power source 5-89
表 5.4.7-41　事例　Betavoltaic.co.uk 5-90
表 5.4.7-42　事例　CITY LABS Nano Tritium Battery Model P100 5-90
表 5.4.7-43　事例　City Labs 社がトリチウム燃料のマイクロ燃料電池を発売 5-91

表 5.4.7-44　事例　Qynenergy QynCell 5-91
表 5.4.7-45　事例　Betavotaic Devices 5-92
表 5.4.7-46　事例　液体半導体ダイオードを用いた放射線同位体発電 5-93
表 5.4.7-47　事例　Betacel model 400 5-93
表 5.4.7-48　事例　Cornell University　^{63}Ni を使った湿度センサー用超小型発電回路 5-94
表 5.4.7-49　事例　Cornell University　^{63}Ni を使った半永久動作の超小型発電回路 5-94
表 5.4.7-50　事例　SNAP-19B RTG 5-95
表 5.4.7-51　事例　SNAP-19 RTG 5-95
表 5.4.7-52　事例　SNAP-27 RTG 5-96
表 5.4.7-53　事例　Multi-Hundred Watt RTG 5-96
表 5.4.7-54　事例　General Purpose Heat Source (GPHS) RTG 5-97
表 5.4.7-55　事例　Power Sources for Remote Arctic Application (Office of Technology Assessment, U.S.Congress) 5-97
表 5.4.7-56　事例　MHW-RTG 5-98
表 5.4.7-57　事例　MMRTG 5-98
表 5.4.7-58　事例　Advanced Stirling Radioisotope Generator 5-99
表 5.4.7-59　事例　ソビエトにおける放射性同位体熱電気変換機 5-99
表 5.4.7-60　電池の仕様 5-102
表 5.4.7-61　終止電圧までの期間 5-103
表 5.4.10-1　電磁ノイズ計測に使用した機材 5-132
表 5.4.10-2　深度 300m アクセス北坑道の電磁ノイズ測定結果 5-141
表 5.4.10-3　深度 500m アクセス北坑道の電磁ノイズ測定結果 5-142
表 5.4.10-4　深度 300m アクセス北坑道の予備送信試験結果 5-144
表 5.4.10-5　深度 500m アクセス北坑道の予備送信試験結果 5-145
表 5.4.11-1　埋め戻しに使用したベントナイト材料 5-152

表 6.2.1-1　OECD/NEA 発行文書及び本年度対象 6-3
表 6.2.4-1　2012 年 3 月－2013 年 3 月までの活動報告書（文献⑧） 6-24
表 6.2.4-2　プロジェクトミーティング（2013 年 4 月に開催）のアジェンダ（文献⑨） 6-25
表 6.2.4-3　プロジェクトミーティング（2013 年 4 月に開催）のサマリ（文献⑩） 6-26
表 6.2.4-4　記録すべき最小限の内容を検討するための活動方針（文献⑪） 6-27
表 6.2.4-5　第 3 回ワークショップ（2013 年 9 月開催）のアジェンダ（文献⑫） 6-28

第1章 研究の目的および概要

1.1 処分システム工学確証技術高度化開発の背景、および目的

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、サイト選定の第３段階である精密調査の前半段階（地上からの調査段階）にお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、今後５年程度の期間について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

(1) 処分システム工学確証技術開発

人工バリアとして、オーバーパック及び緩衝材の製作・施工技術について、深地層の環境を考慮し、品質評価に必要な指標の提示や品質評価、健全性評価を行う。また、モニタリング技術の地下研究施設での適用性確認を行う。

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

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、オーバーパック材料の機械的性質が長期健全性におよぼす影響を品質評価に取入れるための調査・検討を実施する。

上記実施内容で得られる知見より、オーバーパックの長期健全性をより確実なものとするため、構造評価と腐食評価を合わせた、人工バリア性能を満足するオーバーパック指標の具体化に資するものとする。

平成２５年度は、オーバーパック溶接部健全性評価モデルの検討等を実施する。具体的には、オーバーパックの設計、製作、評価の各段階で必要となる判断指標を抽出し、３つの検討項目（腐食、材料劣化、欠陥）に大別する。そして、抽出した判断指標を提示するための健全性評価モデル案を作成する。このモデル案を基に、５ヵ年の全体計画を立案す

る。腐食試験については、地上及び地下施設を活用した試験計画を立案し、検討に着手する。また、材料劣化事象の一つである中性子照射脆化を予測するための、オーバーパックの照射線量計算について検討を進める。さらに、非破壊検査による欠陥寸法測定の誤差について検討を実施する。

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、人工バリアの品質確認及び品質改善手法の検討等を実施する。具体的には、今後５ヵ年の研究計画を立案するとともに、処分環境（湧水量や水質等）を考慮した調査により緩衝材施工法の選定方法を検討する。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・検討及び人工バリア全体としての設計・施工仕様に関する検討を実施する。さらに、地下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する。　平成２５年度は、人工バリアの品質確認及び品質改善手法の検討等を実施する。

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するとともに、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の成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推し進め、モニタリングシステムの提示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、モニタリング技術に関する技術選択肢の整備等を実施する。具体的には、国際共同研究 MoDeRn（Monitoring Developments for safe Repository operation and staged closure）プロジェクトによる検討成果の取りまとめにより検討課題を抽出し、５ヵ年の研究計画を立案する。また、モニタリング結果の性能確認への反映方法に関する検討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した技術メニューの整備方針を検討する。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所における中継試験等を実施する。これらに加え、記録保存に関し OECD/NEA （ The Nuclear Energy Agency of the Organisation for Economic Co-operation and Development）等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、事業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、上記の目標を５ヵ年で達成可能な調査及び試験に係る研究・試験計画を具体化する。さらに、具体化した研究・試験計画に基づき、技術課題に係る要素技術についての調査及び解析的検討等を実施することにより、要素技術の適用性を確認する。また、異常状態・事故発生時の人工バリアの限界性能等に係る調査・試験を実施する。具体的には、平成２４年度に選定した「状況把握・監視技術」、「施設計画技術」及び「人工バリアの限界性能等の調査試験」の３つの技術開発課題について、今後５ヵ年の研究・試験計画を具体化する。また、具体化した研究・試験計画に基づき、異常時の状況把握・監視手順の整理と状況把握・監視に係る現況技術の調査、及び処分パネルにおける火災事象等に対する安全確保のための施設計画に係る調査・検討を実施する。さらに、人工バリアの火災影響についての解析的検討と試験によるデータ取得及びキャニスタの腐食性の調査を実施する。

1.1.3 開発項目の相互関係

人工バリアの品質に係わる判断指標や健全性評価技術は、製作・搬送・定置技術により構築される人工バリアを対象として、オーバーパックと緩衝材の相互影響を考慮した検討を実施するものである。また、人工バリアの構築後の健全性は、性能確認に関するモニタリングの知見と技術に基づいて確認する必要がある。さらに、操業期間中の自然災害への対策に関しては、自然災害が人工バリアの健全性に与える影響や、状態把握のためのモニタリングを理解した検討が不可欠である。以上の様に本事業にて実施される各開発は相互に関係を持つことから、統合的に開発を実施する必要がある。図 1.1.3-1 に処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係を示す。また、併せて成果目標を表 1.1.3-1 に示す。

図 1.1.3-1 において、「モニタリング関連技術の整備」は人工バリア品質に関する検討や自然災害への安全対策に関する検討、さらには回収可能性に関する検討と密接に関係しており、

これらの課題との連携を保って実施する必要があることが分かる。

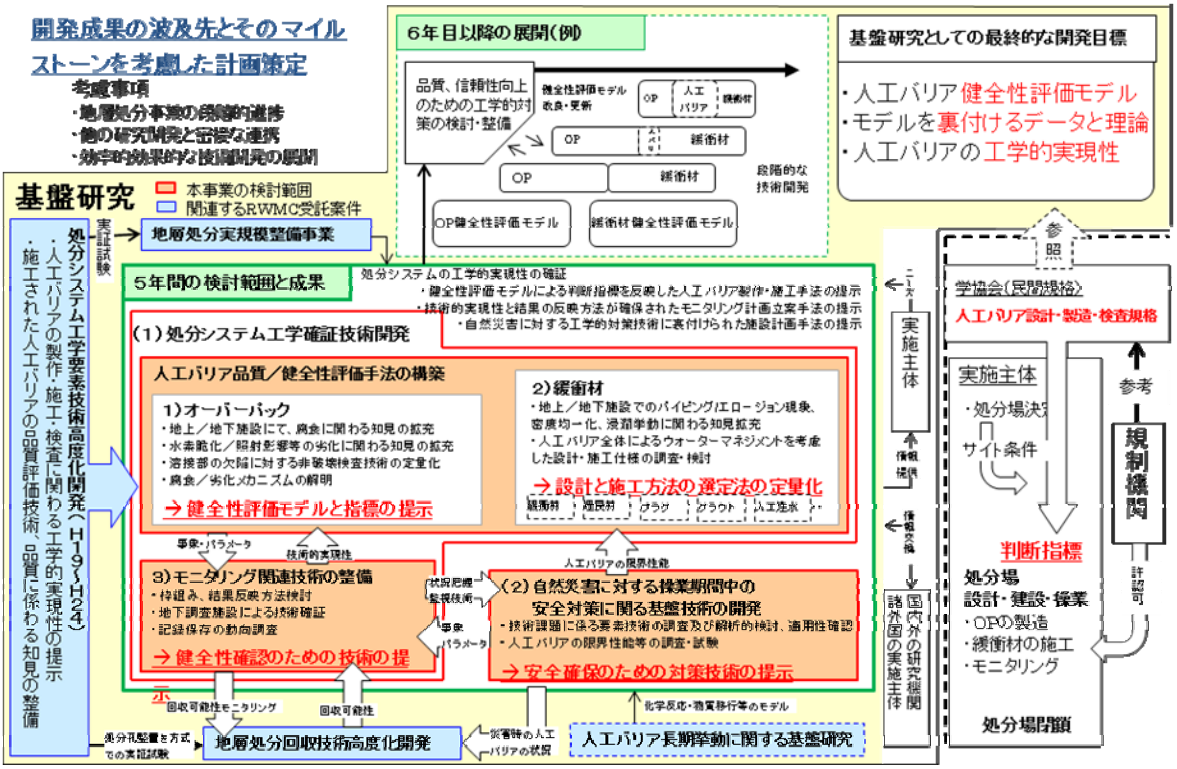


図 1.1.3-1　処分システム工学確証技術開発の全体概要と各課題の関係

表 1.1.3-1　処分システム工学確証技術開発の成果目標

	H25	H26	H27	H28	H29
(1)処分システム工学確証技術開発					
1)人工バリア品質/健全性評価手法の構築ーオーバーパック	・判断指標の抽出 ・健全性評価モデル案の作成 ・研究開発計画策定	・判断指標に影響する劣化事象の抽出	・破壊評価に基づく限界欠陥寸法の提示	・材料劣化を考慮した品質評価法の提案	・品質評価/健全性評価手法の提案 ・説明性のある長期健全性判断指標の提示
2)人工バリア品質/健全性評価手法の構築ー緩衝材	・緩衝材の品質評価項目の抽出 ・研究開発計画策定	・エロージョンによる性能劣化事象(流入量、液種)の定量化	・ウォーターマネジメント(人工注水、グラウト等)の実施方法・課題の提案	・緩衝材の設計・施工仕様策定に資する指標範囲の提示	
3)モニタリング関連技術の整備	・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・操業安全等に関るモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示
(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	・検討手法等の適用性の確認 ・研究開発計画策定	・火災事象に対する人工バリアの健全性の把握	・火災事象に対する施設計画時の制約事項等の提案	・人工バリア限界性能等に関する知見の整備	・地下施設の操業安全確保のための制約事項等の提案

5年間の成果目標

処分システムの工学的実現性の確証

- 健全性評価モデルによる判断指標を反映した人工バリア製作-施工手法の提示
- 技術的実現性と結果の反映方法が確保されたモニタリング計画立案手法の提示
- 自然災害に対する工学的対策技術に裏付けられた施設計画手法の提示

1.2　モニタリング関連技術の整備に関す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２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

「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、国や実施者等の各機関がモニタリング方策およ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および整理を行ない、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、建設段階およ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およ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、センサおよ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、地中無線通信技術およ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、温度およ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、操業時安全およ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および中(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、及び緩衝材およ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、マーカー及びモニュメント等、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

「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。

上記の制約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 2009 の発行が予定されており、Dossier2005 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 2 フェーズの検討で抽出された課題

1) 性能確認に資するモニタリング

本フェーズにおいて性能確認に資するモニタリングについては、その重要性やパラメータの選定方法、モニタリング実施時の制約条件の検討の他、一部の具体的パラメータの検討を実施した。しかしながら、モニタリング結果を性能評価に反映する方法の検討が今後の課題として残された。具体的には、モニタリングによって得られた値をどのような性能評価モデルへのインプットとするのか、モニタリング結果が事前の予測と異なる場合の対応に関する検討等である。

また、モニタリング結果が処分場の状態を代表していることをどのようにして評価すべ

きかという検討や、モニタリング対象とする現象をモニタリング計画の時間枠に確認可能かという検討も必要と考えられる。

さらに、MoDeRn プロジェクトが平成 25 年度の中途まで継続するため、総合的な成果の反映は今フェーズで行なうことができなかった。この反映も今後の課題として挙げられる。

2) 中核的技術の調査研究

地中無線通信技術に関し、第 2 フェーズでは地下研究施設及び地下調査施設でのモニタリングに必要となる技術を優先して段階的に取り組みを行なった。その結果、送信装置及び受信アンテナの小型化や小型送信装置へのセンサ接続技術の開発、無線中継技術の開発、小型送信機及び中距離送信機の地下研究施設における通信能力の実証、複雑な地下環境のモデル化による電磁波の伝播状態の予測技術の開発等を実施した。

しかしながら、調査段階や建設、操業段階における長期間のモニタリングの際に生じるバッテリーの寿命に関する問題や、これを克服するための電源供給技術の検討が課題として残された。電源供給技術については、パッシブ無線技術として基礎的な検討を実施したが、十分な電磁波の強度を得られておらず、今後も取り組むべき課題に挙げられる。

また、人工バリアのうち緩衝材のモニタリングに対して備えることが望ましい特性として、耐熱性の確認と向上も取り組むべき課題である。実廃棄体近傍でのモニタリングが行なわれる可能性は低いものと考えられるが、実施が求められた際への技術的な準備として、耐放射線性についても取り組む必要がある。

さらに、地下調査施設等において人工バリア性能確認試験等に無線モニタリングを適用し、改良すべき点を洗い出していくことが今後必要となるものと考えられる。

また、センサに関しても今フェーズでは光ファイバセンサについて適用性の確認試験を実施したが、ここで課題として挙げられた耐熱性の他、耐圧性、耐腐食性、センサの校正や寿命に伴う交換性等に関する検討も、長期のモニタリングの実施に必要となる事項である。

3) 性能確認以外のモニタリングに関する検討

第２フェーズにおいては、性能確認に資するモニタリングに焦点を当てた検討を実施したが、その他の制度的管理に係るモニタリングや回収可能性の維持に関わるモニタリング等も検討すべき事項として挙げられる。

4) モニタリング技術の体系的整理

第２フェーズまでのシステム開発によって、技術メニューの目的を達成するための主要な機能は搭載され、web 上においてパスワード管理された閲覧も可能となっている。

今後は利便性が高いと判断された場合には機能の追加や修正を行っていく必要がある。また、搭載データに関しては、機器選定に資する技術要件や地層処分環境での計測可能性

について、各分野における専門家の意見も取り入れつつ、さらに情報の高度化を図り、ユーザに有効な情報を提供できるように定期的に追加・更新していく必要がある。さらに、海外機関とのモニタリング機器開発や考え方等に関する相互の情報交換ツールとして利用するための英語版作成なども課題としてあげられる。

5) 記録保存の動向調査

第２フェーズでは記録保存について、関連する国内外の法規制や記録保存事例の調査を行い、国及び関連機関等が地層処分に対す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。

記録保存に関する検討は現在も諸外国、国際機関にて進行中であり、今後の進展について注視し、引続き記録保存に関する計画策定時の判断材料を整備することが必要である。

第 2 章ではこれらの課題を基に、今後の開発計画について検討する。

1.3　報告書の構成及び概要

本報告書は、第 1 章から第 7 章までの 7 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関連技術の整備に関する計画の検討」として、本年度より 5 年間の調査研究計画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、欧州モニタリング国際共同研究 MoDeRn における検討を報告するとともに、人工バリアの性能確認モニタリングについて検討を実施した。

第 4 章では「モニタリング技術メニューの整備」として、今後の整備方針を検討した。

第 5 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課題を検討し､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計画と検討状況を記載した。

第 6 章では「記録保存に関する調査」として、OECD／NEA に及び英国における検討状況を中心とした調査を実施した。

第 7 章では第 2 章から第 6 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　モニタリング関連技術の整備に関する計画の検討

地層処分におけるモニタリングの検討は、モニタリングの目的、対象、パラメータ等を始めとして、モニタリング技術の検討や得られたモニタリングデータをどのように用いるかの検討等、幅広い内容である。図 2-1 にこれらの関係を示す。技術的検討を実施するには、何をどこでモニタリングするのかの検討が不可欠であり、また逆に目的とパラメータ等の枠組みが定まってもモニタリングを実現する技術が不可欠である。これまでにモニタリング目的とパラメータの選定方法等の検討や、技術的側面の検討を実施しているが、モニタリング結果をどう用いるかについての検討はこれからの課題としている。

本章では、地層処分モニタリングに関する検討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する。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の計画を示す。なお、これらの計画は、今後の更なる検討により更新を行うものとする。

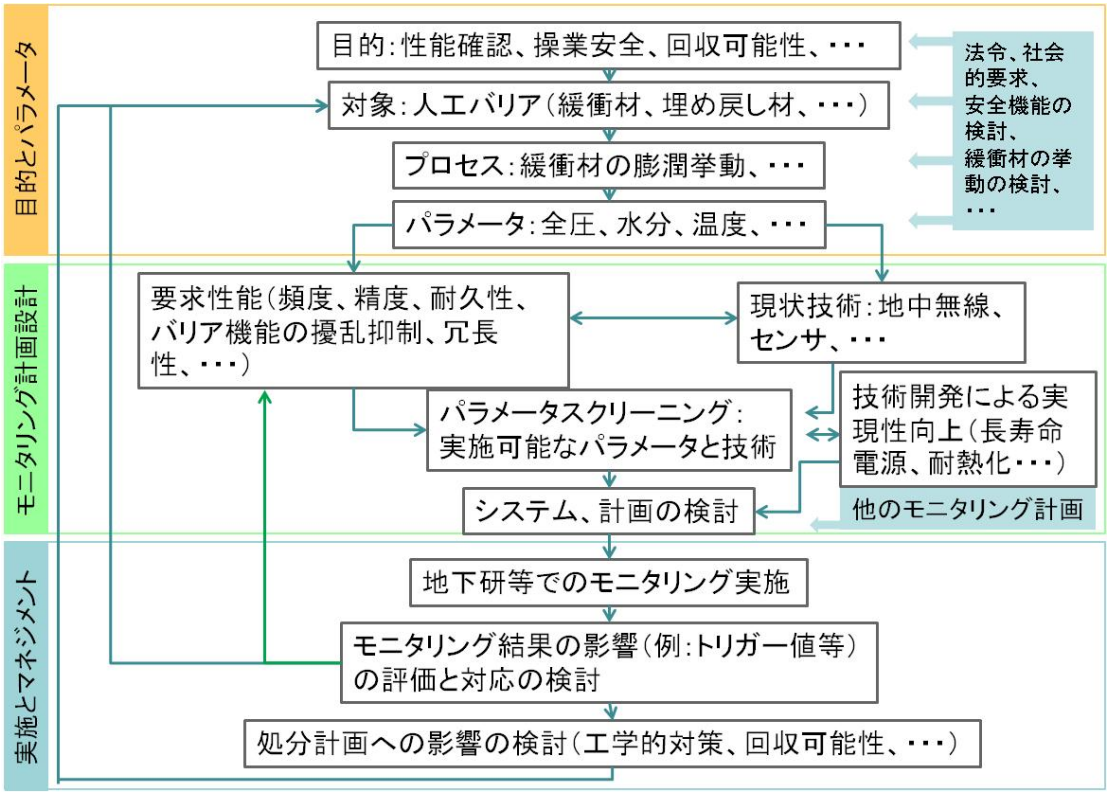


図 2-1　モニタリングに関する検討の枠組み（[1]を改変）

2.1　モニタリングの枠組み等に関する検討計画

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。

地層処分モニタリングをの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）

・長期セーフティケースの根拠のサポート

・閉鎖前の処分プロセスのマネージメントのサポート

b. 操業安全性

・一般労働安全

・放射性安全

c. 環境影響

d. 核保障措置

（直接処分）

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. ～d. 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、廃棄体の回収に関するモニタリングついては、回収の起因事象に関するモニタリングと、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に分類することができるが、回収の起因事象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、回収の実施に関するモニタリングが 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と考えることができる。

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するモニタリングの検討を実施する。

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ー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[2]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する。

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ため、セーフティケースに反映されるものと考えられる原子力発電環境整備機構（NUMO）による安全機能等の報告書[3]等に基づく検討とする他、国際協同研究 Implementing Geological

Disposal of Radioactive Waste Technology Platform（IGD-TP）[4]における検討（ポストMoDeRnプロジェクト）等の国際協力を視野に入れた検討を実施する。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、緩衝材の再冠水時の膨潤挙動を中心的な課題とする。また、同じく「人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック」におけるオーバーパックの腐食事象に関する検討ではモニタリング手法の比較検討を実施する計画であるが、これにより得られた知見についても、性能確認モニタリングへの適用可能性について検討を実施する。

また、処分システム工学確証技術開発において、実施する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する予定であるが、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為、当該研究と情報交換を実施しながら検討を行う。

さらに、廃棄体の回収に関する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する。

これらに加え、モニタリングの枠組みに関する考え方や、技術開発結果、文献調査結果を反映した技術メニューについて整備を実施する。

上記の内容について、平成２５年度より５年間の計画にて以下の様に検討を実施する。

・平成２５年度：
  -実施内容の詳細検討
  -MoDeRn成果取りまとめ
  -性能確認モニタリングに関する課題抽出
  -性能確認モニタリングの結果反映方法に関する検討
  -技術メニューの整備方針検討
・平成２６年度：
  -人工バリア安全機能とFEPによるモニタリングパラメータの抽出
  -性能確認モニタリングの結果反映方法に関する検討
  -操業安全性に関するモニタリングの検討
  -回収可能性に関するモニタリングの検討
  -技術メニューシステムの検討
・平成２７年度：
  -進捗確認と計画の再検討
  -モニタリング結果のトリガー値設定方法に関する検討
  -国際共同研究IGD-TPへの参画による性能確認モニタリングの検討
  -回収起因事象に関するモニタリングの検討
  -技術メニューシステムの更新
・平成２８年度：
  -人工バリア性能確認モニタリングシステムの例示
  -国際共同研究IGD-TPへの参画による性能確認モニタリングの検討

–制度的管理等に関するモニタリングの検討
–技術メニューへの調査、開発成果の反映

・平成２９年度：
–検討成果の取りまとめと課題抽出
–実現可能な人工バリアモニタリング計画の例示
–地層処分の信頼性向上に関するモニタリングの役割の提示
–技術メニューへの人工バリアモニタリングシステムの反映

2.2　モニタリングの技術的実現性向上に関する検討計画

モニタリングの技術的実現性の向上に関する検討では、現在のモニタリング技術の状況を整理し、今後開発に注力すべき課題を抽出する。特に、地層処分独自のモニタリング目的である性能確認モニタリングにおいては、他分野で開発されたモニタリング技術をそのまま適用することが困難であり、地層処分環境に応じた改良等を実施することが必要であることが多い。

原環センターでは、これまで、性能確認に資するモニタリングなどの処分場や地下調査施設等でのモニタリングを実施するために必要とされる、地中無線技術の開発や、センサ技術の適応性試験等に段階的に取り組んできた。残された課題に関し、重要性や技術が必要となる時期を考慮すると、以下の課題に優先的に取り組む必要があるものと考えられる。

・地層処分特有の環境への地中無線通信装置の適応性向上のうち残された課題（耐熱、耐放射線）
・長期モニタリングに対応した地中無線通信装置、センサへの電源供給技術の開発
・段階的埋め戻しに適応した、地中無線通信の中継システムの頑健性の向上
・地下研等における地中無線モニタリング技術の適用性の実証
・センサの地層処分環境への適応性　（耐熱、耐腐食、耐放射線）に関する調査検討

また、原環センターが参画して検討を実施した国際共同研究 MoDeRn プロジェクトでは、モニタリングの技術の現状を取りまとめ[5]、下記の課題を抽出した。

有線（電気式）センサ
・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、SS316L 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。

光ファイバセンサ
・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。

無線モニタリング技術
・小型化
・省エネルギー化
・放射線への耐性が求められる場合には確認と改善
・新たなセンサ技術への適用性（互換性）
・新たなエネルギー源
・現実的な環境での更なる適性の証明
・信頼性と冗長性の改善

これらの MoDeRn(2013)[5]による課題のうち、有線センサにおける課題はそのほとんどが耐食性や耐圧性に関するものであり、複数のセンサメーカーにてこれらの点を考慮した製品を製造していることから、新規の開発課題というよりもセンサ選定時の留意事項という側面が大きい。また、光ファイバセンサに関しては、現在、フランスの ANDRA 等の他国の地層処分実施期間が積極的な開発を行なっていることから、これらの成果の適用が期待される。地中無線モニタリング技術については、原環センターにおける開発が他国での開発と比較して実用に最も近づいており、引続き原環センターが開発に注力する意義が大きい。

これらのことを考慮し、技術的実現性の向上に関する検討では、地中無線モニタリング技術に焦点を当て、長寿命の電源に関する調査や中継時の冗長性の改善に関する検討、及び現実的な環境である地下研究施設等での技術開発結果の検証等を実施することとした。

地下研究施設での地中無線モニタリング技術の検証においては（独）日本原子力研究開発機構及びフランス ANDRA との共同研究により実施することを計画している。また、地中無線モニタリング技術の開発の一部はフランス ANDRA との共同研究により実施することを計画している。

平成２５年度より５年間の計画にて以下の様に検討を実施する。
・平成２５年度：
  –地中無線モニタリング技術の開発に関する詳細検討
  –中継機等の耐圧化検討
  –小型送信機の湿度計アダプタの開発
  –電源供給技術に関する文献調査
  –地下研における地中無線中継技術の検証
  –人工バリア試験への適用準備
  –坑道冠水試験への適用準備
・平成２６年度：
  –地中無線モニタリング技術に関する国際ワークショップの開催（ANDRA との共催)、
  –地中無線中継機の冗長性を持ったネットワーク化に関する検討
  –電磁波による電力供給技術の基礎試験、放射性同位体熱電気変換器の熱影響等の検討

–人工バリア試験における緩衝材、埋め戻し材膨潤挙動モニタリングへの適用性検証の開始
–坑道冠水試験における水圧モニタリングへの適用性検証の開始
–長距離通信技術検証

・平成２７年度：
–地中無線モニタリング技術の開発に関する進捗確認と計画更新
–改良型中継機の製作
–小型送信機耐熱化検討
–地中無線装置への新規電源実装方法の検討（詳細は平成２５年度、２６年度検討により決定）
–人工バリア試験における緩衝材、埋め戻し材膨潤挙動モニタリングへの適用性検証
–坑道冠水試験における水圧モニタリングへの適用性検証
–坑道埋め戻し時のモニタリングへの適用準備

・平成２８年度：
–改良型中継機の製作・試験、小型送信機耐放射線化検討
–地中無線装置への新規電源実装
–人工バリア試験における緩衝材、埋め戻し材膨潤挙動モニタリングへの適用性検証
–坑道埋め戻し時のモニタリングへの適用性検証

・平成２９年度：
–検討成果の取りまとめ
–長期モニタリングへの地中無線モニタリング技術の適用性の提示
–人工バリア、坑道のモニタリングへの地中無線技術の適用性の提示

2.3　記録保存に関する調査計画

本検討では、地層処分の実施主体等の関係機関が，記録保存に関する具体的計画を策定する際の選択肢・判断材料を提示するための，システム案の整備に資することを目的とし，記録保存に関する制度等の最新動向を調査する。

記録保存については、諸外国、OECD/NEA にて検討が進行中であり、その動向を継続的に調査する必要があるものと考えられる。また、制度的管理としてのモニタリングとの関係についても整理を行なう。さらに今後、規制機関による要件が明確化された場合には、これに応じた整理を実施する。最終年度には、これらの調査、検討結果を反映した記録保存システム案を提示する。

・平成２５年度：
-OECD／NEA における検討状況の調査
-英国 NDA が発行した安全評価書 DSSC(The Disposal System Safety Case)に係る記録保存方策の調査・整理
-内閣府による「公文書管理法」に関連した運用方法文書の調査・整理

・平成２６年度：
-OECD／NEA における検討状況の調査・整理

・平成２７年度：

-国内外最新動向の調査・分析（平成２５年度、２６年度の調査結果により詳細を決定）

・平成２８年度：

-モニタリング結果の取扱いとの関係の整理

・平成２９年度：

-調査結果を反映した記録保存システム案の提示

2.4　各年度の成果目標

上記の検討計画により各年度において期待される成果のうち代表的なものを、各年度の成果目標とし、以下に示す。

・平成２５年度：

-性能確認モニタリングの課題抽出

-研究開発計画策定

・平成２６年度：

-操業安全等に関るモニタリングの課題抽出

・平成２７年度：

-地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証

・平成２８年度：

-性能確認モニタリング結果反映方法提案

・平成２９年度：

-実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示

以上のモニタリング関連技術の整備に関する計画の概要を表 2.2.4-1 に示す。

表 2.2.4-1　モニタリング関連技術の整備に関する計画

		H25	H26	H27	H28	H29
①5年間の研究計画立案		・計画立案		・進捗確認、計画更新		
②モニタリングの枠組み等の検討	**ⅰ）性能確認モニタリングの検討**	・詳細計画検討 ・性能確認モニタリングの課題抽出 ・モニタリング結果反映方法の検討	・人工バリアの安全機能とFEPによるモニタリングパラメータの抽出 ・モニタリング結果反映方法の検討	・モニタリング結果のトリガー値設定方法に関する検討	・人工バリア性能確認モニタリングシステムの例示	・実現可能な人工バリアモニタリング計画の例示
		・MoDeRn成果取りまとめ		・IGD-TP参画による性能確認モニタリングの検討		
	ⅱ）その他のモニタリングの検討	・詳細計画検討	・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	・回収起因事象に係るモニタリングの検討	・制度的管理等に係るモニタリングの調査・検討	・地層処分の信頼性向上に関するモニタリングの役割の提示
	ⅲ）技術メニューの整備	・詳細計画検討	・ 技術メニューシステムの検討	・技術メニューシステムの更新	・調査・開発成果の反映	・人工バリアモニタリングシステムの反映
③モニタリングの技術的実現性の向上	**ⅰ）地中無線モニタリング技術の開発**	・詳細計画検討	・国際WS共催	・進捗確認、計画更新		・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
		・中継機等耐圧化検討	・ネットワーク化検討	・改良型中継機製作・試験		
		・小型送信機水分計アダプタ開発		・小型送信機耐熱化検討	・小型送信機耐放射線化検討	
	ⅱ）電源供給技術等の調査	・課題抽出 ・耐熱性試験	・電磁波による電力供給の基礎試験 ・放射性同位体熱電気変換器の熱影響等の検討	・地中無線装置への新規電源実装方法の検討	・地中無線装置への新規電源実装	・長期モニタリングへの地中無線モニタリング技術適用性の提示
	ⅲ）地下研等における検証	・中継技術検証 ・モニタリング技術検証準備	・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 ・長距離通信技術検証	・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 ・坑道埋戻し時のモニタリングへの適用準備	・緩衝材・埋戻し材膨潤挙モニタリングへの適用性検証 ・坑道埋戻し時のモニタリングへの適用性検証	・人工バリア、坑道のモニタリングへの地中無線適用性の提示
④記録保存に関する調査		・詳細計画検討 ・動向調査分析	・OECD/NEAの動向調査・分析	・国内外最新動向の調査・分析	・モニタリングとの関係の整理	・記録保存システム案の提示
各年度の成果目標		・性能確認モニタリングの課題抽出 ・研究開発計画策定	・操業安全等に関るモニタリングの課題抽出	・地下調査施設による地中無線モニタリング技術の確証	・性能確認モニタリング結果反映方法提案	・実現可能な技術選択肢による人工バリア等のモニタリング計画の例示

第 2 章参考文献

[1] MoDeRn:MoDeRn Monitoring Reference Framework report, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)

[2] MoDeRn プロジェクトホームページ、http://www.modern-fp7.eu/

[3] 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

[4] IGD-TP ホームページ、http://www.igdtp.eu/

[5] MoDeRn (2013), State of Art Report on Monitoring Technology, DELIVERABLE (D-N°: 2.2.2), http://www.modern-fp7.eu/publications/project-reports/

第3章　地層処分モニタリングの枠組みに関する検討

3.1　目的および実施概要

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。また、この中で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）について述べ、このようなモニタリングに関する国際共同研究 MoDeRn の成果について述べる。さらに、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。

3.2　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。

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）
- 長期セーフティケースの根拠のサポート
- 閉鎖前の処分プロセスのマネージメントのサポート

b. 操業安全性
- 一般労働安全
- 放射性安全

c. 環境影響

d. 核物質保障措置

（直接処分を実施する場合）

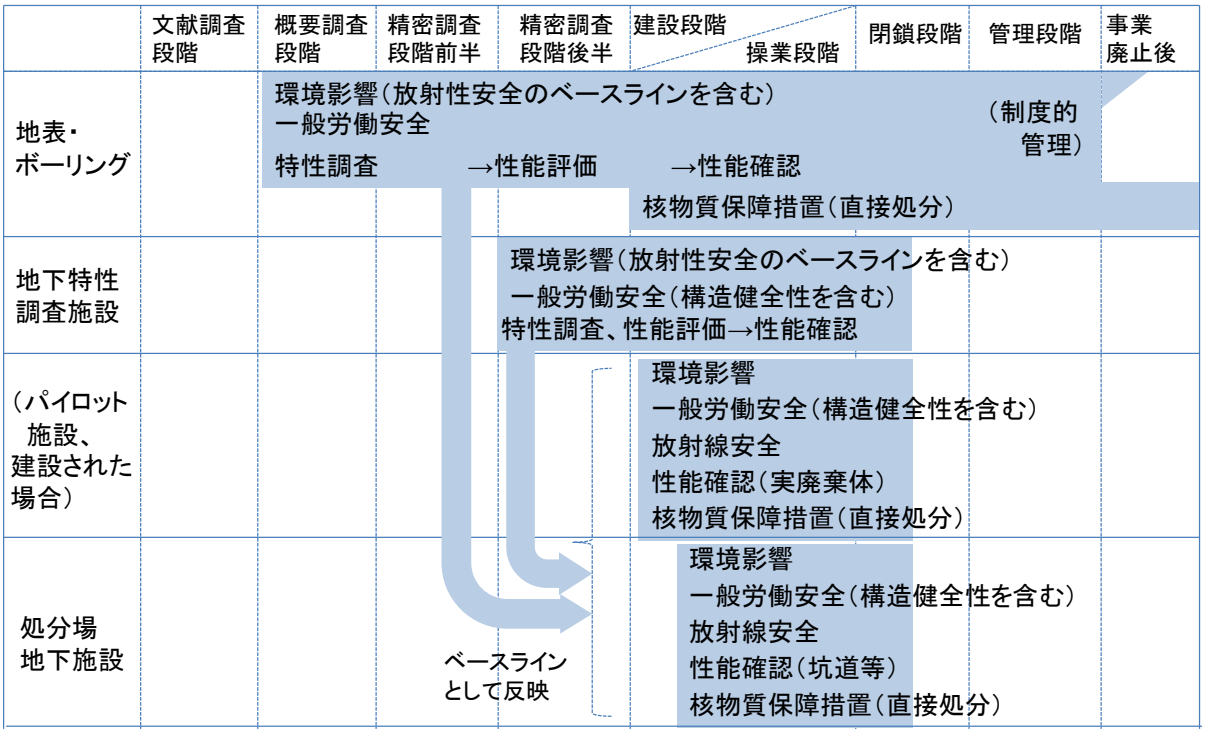
これらに加え、以下のモニタリングが分類される。

- 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. ～d. 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、廃棄体の回収に関るモニタリングついては、回収の起因事象に関するモニタリングと、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に分類することができるが、回収の起因事象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、回収の実施に関するモニタリングが 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と考えることができる。

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 3.2.1-1 の様に考えることができる。

表 3.2.1-1 地層処分の段階と場所によるモニタリング目的（案）



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。期待/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ーケースを強化し、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/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する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ー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する。

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、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実施した、原子力発電環境整備機構（NUMO）による報告書[2]等に基づく検討とする他、国際協同研究 Implementing Geological Disposal of Radioactive Waste Technology Platform（IGD-TP）[3]において、平成 27 年度より実施が計画されている性能確認モニタリングに関する検討（ポスト MoDeRn プロジェクト）等の国際協力を視野に入れた検討を実施する。

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、緩衝材の再冠水時の膨潤挙動を中心的な課題とする。また、同じく「人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック」におけるオーバーパックの腐食事象に関する検討ではモニタリング手法の比較検討を実施する計画であるが、これにより得られた知見についても、性能確認モニタリングへの適用可能性について検討を実施する。

操業期間中の安全性に関しては、処分システム工学確証技術開発において実施する、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する予定であるが、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為、当該研究と情報交換を実施しながら検討を行う。

さらに、廃棄体の回収に関する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する。

3.3　モニタリング国際共同研究 MoDeRn における検討

3.3.1　MoDeRn の概要

MoDeRn 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ている、地層処分事業の各段階（サイト調査から始まり、建設、操業、閉鎖および閉鎖後の制度的管理）において、ステークホルダーの関与を踏まえたモニタリングに関する検討およ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、2009 年 5 月から開始された国際共同研究である。研究期間は約 4 年半である（2009 年 5 月～2013 年 10 月）。

MoDeRn には 12 の国々から、18 の実施機関及び研究機関（EU、米国、日本（原環センター）およびスイスの機関・大学）が参画しており、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）である。MoDeRn ではプロジェクトの開始に当たり、内部および外部用（図 3.3.1-1 参照）のホームページ[1]を製作し情報公開にも努めた。

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。

図 3.3.1-1　MoDeRn のホームページ（http://www.modern-fp7.eu/home/）

欧州における地層処分関連のモニタリングに関する検討としては、2001 年に発行された技術文書 IAEA-TECDOC-1208[4]、EU 共同プロジェクト内で 2001 年から 2 年間、英国 Nirex を中心に実施された Thematic network on the role of monitoring in a phased approach to disposal[5] などが実施されており、地層処分に関連するモニタリングを広く捉えた目的や方策についての検討が行われてきた 。

また、これらと前後していくつかの国では、特定サイトでの活動に関するモニタリング計画策定に向けた検討を実施した。具体的には次のとおりである。

- 米国ニューメキシコ州での廃棄物隔離パイロットプラント（WIPP）処分場で実施される活動をモニタリングするために、米国エネルギー省（US DOE）によって策定されたコンプライアンスモニタリング実施計画[6]
- フィンランドのオルキルオトでの ONKALO 施設のモニタリングプログラム[7]
- カナダの核燃料廃棄物処分場の長期的モニタリングへのアプローチ[8]
- スウェーデンの使用済み燃料処分場の段階的実施中のモニタリングの枠組み[9]
- ユッカマウンテン処分場の包括的「性能確認」プログラム[10]

これらの策定に関する最近の調査がプロジェクトによって行われ、国の策定の現在の状態が

各国のモニタリングに関連する状況の報告書[11]およびその附属書[12]に示されている。これらについては、原環センター（2012、2013）[13][14]においてその内容を要約した。

また、上記の検討各国の検討と同じ時期に原環センター（RWMC, 2005）[15]では、HLW 地層処分場の様々な側面を理解するためのアプローチとモニタリングの技術的可能性に関する研究の体系的レビューを提供した。

表 3.3.1-1　RWMC（2005）[15]による地層処分モニタリングの目的の分類

目的	説明
1. 処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認	・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 ・安全評価モデルの検証 ・処分場の操業・施工に係る改善や補修の判断
2. 法令要件に対する適合性の確認	・処分場閉鎖後の法令要件 ・建設・操業時法令要件（作業員及び周辺住民に対する安全） ・環境影響に関わる法令要件
3. 政策及び事業実施上の意思決定に資する情報提供	・意思決定に向けた情報提供 ・埋設廃棄体の回収可能性への対処
4. 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握	・地質環境特性のベースライン把握
5. 社会的な意思決定に向けた情報提供	・国民・地域住民の地層処分に対する信頼性の向上 ・将来世代のためのデータベース蓄積

MoDeRn はこれらの地層処分に関するモニタリングの検討を背景として、より具体的なモニタリング方策や技術要件の明確化、あるいは計測技術の限界並びに課題抽出等を行うため Euratom の 7th Framework Programme として開始された。

MoDeRn の目的は次の 5 項目である。

- 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ー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ー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、それぞれにリーダーとメンバーを設定した上で、検討を実施した。

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

技術的およ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（ケーススタディー）

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ーを実施する。このケーススタディー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ーとの討議、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）

上記全ての WP を統合し、地層処分モニタリングのための参照すべきフレームワークの提供を行う。このフレームワークは、実施可能なモニタリングの記述、ステークホルダーとの取り決め等に関する提案、意思決定におけるモニタリング結果の適用方法などを含む。

各 WP の関係を図 3.3.1-2 に示す。原環センターは WP3 原位置試験以外（同図のオレンジ色に着色した箇所）の WP に参画した。

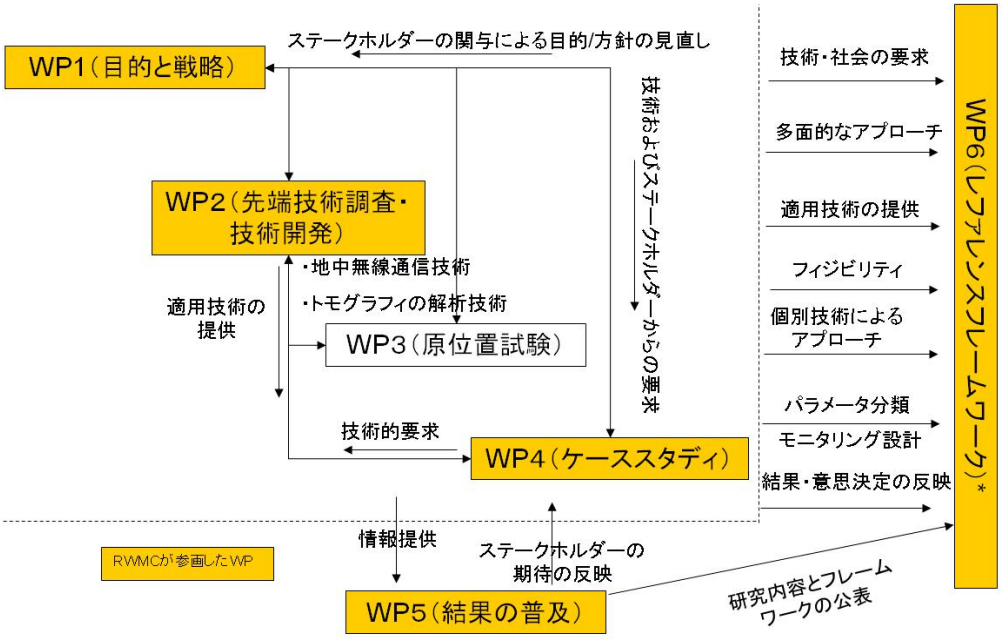


図 3.3.1-2　MoDeRn における各 WP の関係

MoDeRn の参加機関を下記に示す。2010 年 5 月からスウェーデン SKB が参画し、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

3.3.2 MoDeRn における検討

(1) 会合等の開催

MoDeRn では、メール・電話および内部用のホームページを基本に、年 2 回の会合、臨時会合等と、公開ワークショップを活用し業務を遂行した。下記の会合とワークショップが開催された。

MoDeRn メンバーによる会合

- 第１回会合：フランス・パリ（2009 年 6 月）
- 第２回会合：スペイン・マドリッド（2009 年 11 月）
- 第３回会合：フランス・ビュール（2010 年 5 月）
- モニタリングの目的に関する臨時会合：オランダ・ザーンダム（2010 年 9 月）
- 第４回会合：ドイツ・パイネ（2010 年 11 月）
- 第５回会合：チェコ・プラハ（2011 年 6 月）
- 第６回会合：オランダ・ザーンダム(2011 年 11 月)
- 第７回会合：フィンランド・オルキオト（2012 年 5 月）

・　第 8 回会合：スイス・サン・チュルサンヌ（2012 年 12 月）
・　第 9 回会合：英国・ロンドン(2013 年 5 月)

公開ワークショップ
・　モニタリング技術ワークショップ（フランス・トロワ、2010 年 5 月）
・　エキスパートステークホルダーワークショップ（英国・オックスフォード、2011 年 5 月）
・　放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリング（ルクセンブルグ・ルクセンブルグ、2013 年 3 月）

また、これらの会合、ワークショップでの検討結果は MoDeRn 内部での審議の後、順次、報告書が作成されており、現在までに下記のものが公開されている。

・　プロジェクトの概要（2009 年 9 月）[16]
・　原位置試験の概要（WP3）（2010 年 2 月）[17]
・　モニタリング技術ワークショップ報告書（WP2）（2010 年 11 月）[18]
・　技術的要件に関するレポート（WP2）（2011 年 1 月）[19]
・　エキスパートステークホルダー　ワークショップ報告書（2011 年 11 月）[20]
・　各国のモニタリングに関連する状況（WP1）（2011 年 3 月）[11]、[12]
・　放射性廃棄物の安全な処分のモニタリング：技術及び社会-政治面での複合的な活動（WP1）（2012 年 12 月）[21]
・　グリムゼル試験サイトにおける地震波トモグラフィー（WP3）（2013 年 1 月）[22]
・　Bure モニタリング実証試験報告書　（WP3）（2013 年 2 月）[23]
・　モニタリング技術の現状に関する報告書（WP2）（2013 年 5 月）[24]
・　無線ネットワーク実証試験報告書（WP3）（2013 年 7 月）[25]
・　ケーススタディー報告書（WP4）（2013 年 10 月）[26]
・　Hade モニタリング実証試験報告書　無線データ伝送試験（WP3）（2013 年 10 月）[27]
・　モニタリング リファレンスフレームワーク 報告書（WP1）（2013 年 11 月）[28]
・　モニタリング技術の開発に関する報告書（WP2）（2013 年 12 月）[28]

(2)　各ワークパッケージの活動

概要にて述べたように、MoDeRn は 6 つの技術的ワークパッケージを構成し、それぞれにリーダーとメンバーを設定した上で、検討を実施した。以下に、各ワークパッケージの活動を示す。

WP1 ：目的と戦略

WP1 では、様々なモニタリングの要件に関する知識情報を整備する。すなわち、WP1 では、モニタリング活動に係わる物理的・社会的な「境界条件」を整理して、様々なモニタリング要件を分類することを提案している。

また、Thematic Network 報告書[5]や関連する過去の国際モニタリングワークショップ（ジュネーブ[30]／オックスフォード）の従来の成果を引用して、モニタリングの主な目的に焦点を置

いた原則的な議論を行い、処分場開発のすべてのフェーズを対象に、異なる国々の計画における実際の準備状況に相応したレベルでガイダンスを準備する。

さらに、提示された全ての国の状況での地層処分の種々のフェーズを対象として、可能性のあるモニタリングのアプローチと方策の共通性と相違について議論する。

最後に、安全および規制当局といった専門家のステークホルダーや地域市民グループといった非専門家のステークホルダーが参加する会合を開催し、現在の最先端技術のモニタリングへのアプローチ方法について対話する。そして、地層処分の一層の推進のため、彼らへモニタリングの目的、および方策を説明する。すなわち、下記を達成するために、モニタリングの可能性について議論する。

- 段階的な処分プロセスでの意思決定手続きに寄与するため。
- 処分場の安全性の提示に寄与するため。
- 安全性および全体的な廃棄物管理のアプローチの正当性に対するステークホルダーの信頼の増強するため。

WP1 の主要な報告書として検討が進められてきた「目的と戦略」はモニタリング結果の反映方法等を含めた内容にとするため大幅な見直しが進められ、「リファレンスフレームワーク」[28]として公開された。

さらに、処分事業の理解促進に果たすモニタリングの役割について社会学者を中心として議論が行われ、原子力関係の事業を含めた様々な事業に関する文献調査と地層処分の専門家へのインタビュー、及び試験的取り組みとして、ベルギー、スウェーデン、英国の住民に対し、モニタリングに関する説明会を開き、その後各国住民の交流会等を開催している。このうち文献調査及びインタビューの成果[21]については原環センター（2013）[14]にて概要を報告している。

WP1 に関し、各国のモニタリングに関連する状況について、その概要と各国の詳細についての報告書が公開されており（[11]、[12]）。この中には、地層処分に関連する法令や規制の状況、ステークホルダーの関心事項等の社会的側面と、処分概念や処分場の候補とされる地質、人工バリア等の技術的側面、およびこれらから導き出されるモニタリングに関する制約事項や検討状況が述べられている。各国の状況の要点を原環センター（2013）[14]にて報告している。

WP2 ：先端技術・技術開発

WP2 では、先端技術を含めたモニタリング技術に関する情報収集を行うとともに、その結果に基づく、実施可能なモニタリング活動の適用性評価、処分場環境での使用を目的としたモニタリング機器の RTD（Research and Technical Development）要素の選定、およびモニタリングの目的に応じた技術課題並びに将来の RTD 要素の抽出を行う。

2010 年には、WP2 では情報収集の一環として、モニタリング技術ワークショップを開催した。これについては平成 21 年度の本件の報告書に内容を記載した。

また、各参加機関の分担により、モニタリング技術の現状に関する報告書[24]が作成された。現状の技術の概要については第 5 章にて述べる。

WP3 ：原位置試験

WP3 では、以下に示した実証を行うため、フランスのムーズ・オートマルヌ地下研究所(the

Meuse / Haute-Marne URL、通称ビュール(Bure)地下研究所)[23]、 ベルギーのハーデス地下研究所(the underground laboratory HADES)[27]、 スイスのグリムゼル試験サイト(Grimsel Test Site)[22][25]での原位置試験が実施されている。 試験の対象とする技術は、高周波および低周波の地中無線通信、微小地震波によるモニタリング、光ファイバーセンサーによるモニタリングである。

- 利用可能なモニタリング方策が長期安全性に対し有害でないことの実証
- 様々な母岩における非侵入型モニタリング技術の適用性評価
- シールされた、もしくはアクセスできない処分エリア内でのモニタリングの適用性の実証（粘土プラグの膨潤過程も考慮）
- 横置き処分坑道におけるモニタリング能力の実証
- 複数のモニタリング技術を併用することによる冗長性が、計測結果の判断を助勢できることの実証

このうち非侵入型モニタリング技術については、グリムゼル試験サイトにおける地震波トモグラフィーの研究成果の報告書が公開された[22]。

高周波の地中無線技術については、スペインの AITEMIN が開発を実施しており[25]、通信距離は数mを想定している。現在、送信装置に全圧計、水圧計、水分計の 3 つのセンサとリチウム電池を組み込んだ装置を製作し、グリムゼル試験サイトにおいてベントナイト、セメント、および岩盤中に装置を設置、試験を開始している。また、AITEMIN では、無線装置への電力供給のための温度差発電にも取り組んでいる。

低周波の地中無線技術については、オランダの NRG が地下研から地表への送信を目標に開発を実施した[27]。原環センターは WP3 に参加していないが、公表済みの地中無線技術に関する試験成果を提供した。

WP4 ：ケーススタディー

WP4 では、モニタリングのシステム設計の実現可能性の評価を行うために、処分概念およびサイトを仮定してケーススタディーを行う。本ケーススタディーでは、異なる母岩における地層処分において、システム設計を通して関連があるモニタリングすべき事象を全て取り組む予定である。ケーススタディーの対象とする処分場の母岩は、岩塩(Case1)、粘土質岩(Case2)、結晶質岩(Case3) であり、原環センターはこのうち、緩衝材を設置し、日本の地層処分の検討対象の一つである結晶質岩を対象とする Case3 の検討グループに参加し、フィンランドの Posiva、スウェーデンの SKB と共に検討を実施した。本報告書ではモニタリングパラメータの抽出方法の他、センサのレイアウト等について検討を実施している[26]。Case3 の検討内容については原環センター（2013）[14]にて概要を報告した。

なお、ケーススタディーにおける検討は、現時点での考えに基づくもの、あるいは実規模試験施設用のものであり、各国における実際の処分場のモニタリング計画とは異なる部分があることに留意が必要である。これらに加え、本報告書ではセンサ等の故障の検出方法に関する検討や、岩塩のケースにおいてリファレンスシナリオを対象として構築されたモニタリングシステムにより変動シナリオのイベントを検知できるかに関する検討が報告された。

センサ等の故障の検出方法に関する検討については概要を第 5 章にて述べる。

WP5 ：結果の普及

WP5 では、規制機関等ステークホルダーとの討議、EU 主催の国際会議等も含め、検討成果の普及を行う。WP2 で実施したモニタリング技術ワークショップも、成果の普及に活用している。

本年度は、2011 年 5 月にエキスパートステークホルダーワークショップを開催すると共に、2013 年 3 月に MoDeRn での検討成果の最終報告会(International Conference on Repository Monitoring)を実施した。

WP6 ：リファレンスフレームワークへの反映

WP6 では、本プロジェクトの主目的を勘案しつつ、WP1 から WP5 で得られた結果を取りまとめた。

(3) 地層処分モニタリングのリファレンスフレームワーク

MoDeRnにおけるモニタリング戦略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[28]について、その概要を紹介する。なお、詳細については原文を参照されたい。

a) MoDeRn プロジェクトの検討範囲

MoDeRn プロジェクトの目的は、地層処分実施主体がモニタリング計画を策定したり、処分プロセス全体のうちの一部としてどのように実施および使用するかを理解したりするために役立つ例、指針、推奨事項を提供することにある。このため、MoDeRn ではモニタリング計画を策定するプロセス[28]、技術[24][29]、およびケーススタディ[26]に関する報告書を作成した。

これらのうち、技術については地層処分モニタリング技術メニュー（第 4 章）に機器情報を収録した。また、ケーススタディーについては原環センター（2013）[14]にて結晶質岩における検討を報告した。ここでは、モニタリング計画を策定するプロセスに関する報告書の概要を紹介する。詳細については原文[28]を参照されたい。

MoDeRn プロジェクトは、処分場システム挙動のモニタリングに特に焦点を当てている。技術的観点から、処分セル（わが国の場合、処分坑道や処分孔等）のモニタリングは、今日でも最大の課題として、地層処分特有の問題である。操業安全性、環境、安全対策のモニタリングなど地層処分プログラムで要求される他のタイプのモニタリング活動は、非常に重要であると認識されてはいるが、既に他の原子力施設で使用されているものと同様であることが多く、その実施の計画やさらなる開発は過去の経験に基づいている。したがってこれらについては、MoDeRn では詳細を検討していない。

表 3.3.2-1　MoDeRn リファレンスフレームワーク報告書[28]から作表した
モニタリング目的の分類

<table>
<tr><td colspan="4">モニタリングの包括的目標
・信頼性の構築をサポートする－妥当性確認、透明性、追跡性
・意思決定をサポートする－処分プロセスの段階的管理に資する情報の提供</td></tr>
<tr><td colspan="4">4つの主要目的：処分システムを以下の理由のためにモニタリングする。</td></tr>
<tr><td>1.処分システムの期待/予測された挙動の確認</td><td>2.操業安全性のサポート</td><td>3.環境影響調査のサポート</td><td>4.核保障措置のサポート</td></tr>
<tr><td>1.A 長期セーフティケースの根拠のサポート
1.B 処分場の閉鎖前のマネージメントのサポート</td><td colspan="3">――――</td></tr>
<tr><td>MoDeRnの範囲</td><td colspan="3">MoDeRnの範囲外</td></tr>
</table>

MoDeRn プロジェクトでは過去に実施された研究成果[4][5][15][30]を基に、モニタリングへのアプローチについての研究に関する考察を発展させた。

b) MoDeRn モニタリングワークフロー

リファレンスフレームワーク報告書は、モニタリング目標をモニタリング対象のプロセスとパラメータに発展させる体系的アプローチを提供する MoDeRn モニタリングワークフローを提示している。このワークフローの具体的な目的は以下の通りである。

・具体的なモニタリング目標がどのように策定されるのか、そして処分プロセスにおいてそれらの役割がどのように理解されるのか。これらの目標を明確な情報要件に発展させてから、主要安全機能に関連付け、ひいてはモニタリング対象のプロセスやパラメータと関連付ける。

・モニタリングシステムがどのように設計されるのか、そしてどの戦略がモニタリングの目標を達成するのに役立ちそうか。これには、技術的限界に対処するための戦略、さらなる研究開発の見通し、より一般的にはモニタリング計画からの潜在的付加価値ならびに処分プロセスに対して伝える限界評価といった技術的実現可能性の評価が含まれる。

・モニタリング結果がどのように通知され、運営上の意思決定に寄与するのかについての指針を提供することで、処分プロセスのガバナンス全体の一部としてモニタリングをどのように扱うべきか。事前の期待に照らしてモニタリング結果がどのように評価されるのか。事前の期待が外れた特定のモニタリング結果の事例（予期しないまたは逸脱した結果）をどのように扱うか。

・モニタリングがステークホルダーの信頼にどのように寄与するか。閉鎖前の許認可ベースの有効性のテストとして期待された証拠や、プロセス全体および様々なステークホルダーが果たす役割が、処分プロセスへの信頼強化にどのように寄与するかを検討する。

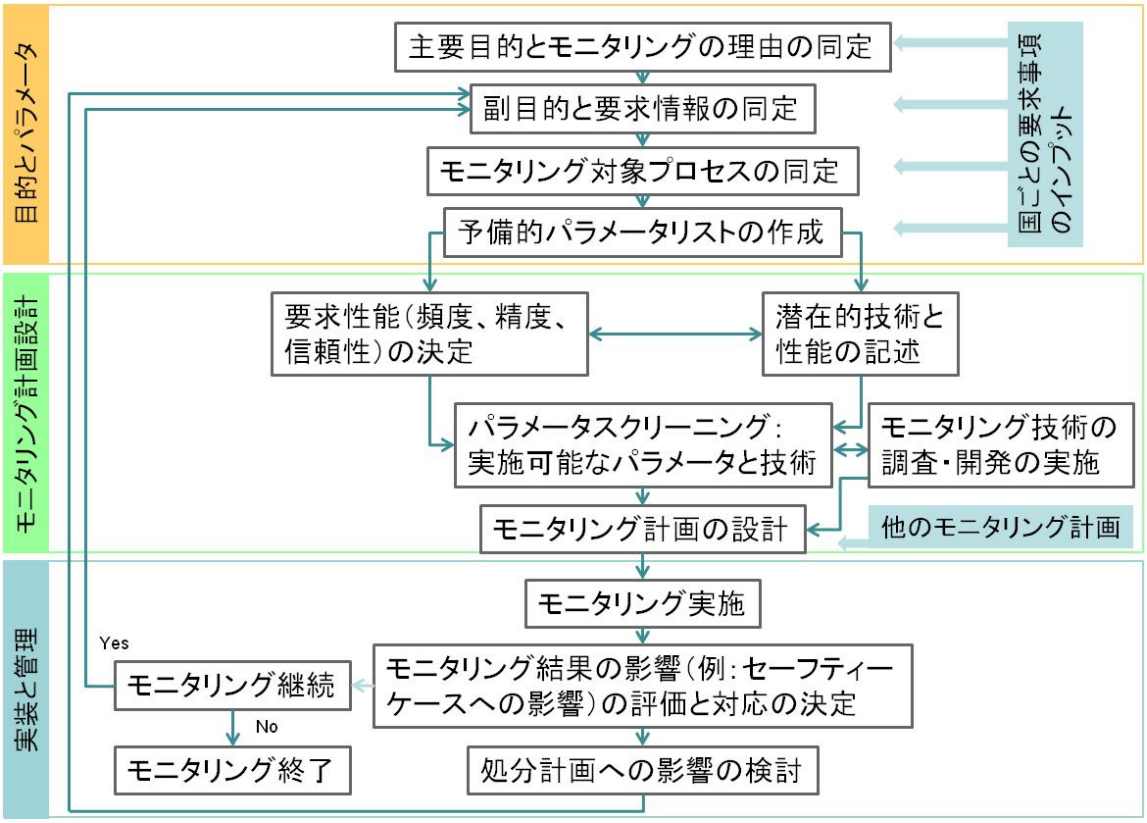


図 3.3.2-1　MoDeRn によるモニタリングワークフロー[28]

MoDeRn モニタリングワークフロー（図 3.3.2-1）に示されるリファレンスフレームワークは、モニタリング計画を策定・管理する上での主な 3 つの段階を識別している。

1. 目的とパラメータ：目的と副目的を特定し、それらをプロセスとパラメータに関連付け、モニタリング用の予備パラメータリストを識別する。
2. モニタリング計画と設計：性能と技術要件、具体的には利用可能なモニタリング技術、モニタリング計画設計における潜在的技術障害に対処するための戦略などの分析。
3. 実施と管理（ガバナンス）：モニタリング計画を実施し、その結果を意思決定に伝える。

MoDeRn モニタリングワークフローは、ハイレベルな目標の特定から始まるアプローチを想定し、体系的分析を通じて、具体的なモニタリング活動の計画につながる明確に定義されたモニタリング要件を策定する。この方法（トップダウンアプローチ）は、包括性、透明性、トレーサビリティを確保するために使われる。このトップダウンによるプロセスの策定は、モニタリング計画が優先事項に確実に正しく焦点を当てるようにするためにも役立つ。また体系的分析は、ステークホルダーと早い段階から関わって、要件（ハイレベルであることが多い）を適切かつ効果的なモニタリング計画に変換するための透明性の高い基礎を提供する。

MoDeRn モニタリングワークフローにおける各ステップについて以下に説明する。

目的とパラメータの設定

主要目的

MoDeRn ではモニタリングの目的を表 3.3.2-1 に示したよう分類し、このうち「処分システムの期待/予測された挙動の確認」に焦点を当てた検討を実施している。これはさらに「長期セーフティケースの根拠のサポート」と「処分場の閉鎖前のマネージメントのサポート」に分けることができる。

副目的

主目的は一般的な性質のものであるため、モニタリング計画の策定における次のステップは「副目的」と呼ぶさらに詳細な目的の策定である。副目的の設定ではモニタリング対象のプロセスやパラメータを識別可能にする必要があるため、複数のステップが必要となることがある。副目的の識別は、セーフティケース、設計作業、規制やステークホルダー関与の策定や分析を含む処分プログラムの特定の側面に基づくことになる。

プロセスとパラメータ

次のステップでは、モニタリング対象候補のプロセスとパラメータの予備リストを策定する。ここでは FEP と安全機能に関する検討が行なわれる。

FEP カタログで編集された特徴、事象、プロセス（FEP）の過去に策定されたリストは、処分場内と周辺で進行中のプロセスの包括的リストを提供する。また、許認可申請の基礎となるセーフティケースの一部として安全機能が定義される。FEP の慎重な評価とそれに伴う処分場の変遷シナリオの評価により、特定の安全機能に悪影響を与えるプロセスが識別され、これにより、安全機能が損なわれていないことを確認するためにモニタリングする価値があるとみなされる。モニタリング計画の策定では、性能評価やモニタリング技術の専門家との間で学際的議論を行うことで、リスト上でより技術的側面からプロセスを識別し、それらのプロセスに関連するモニタリング対象のパラメータを決定する必要がある。

予備パラメータリストの作成

次のステップは、個々のプロセスを特徴付けるパラメータの決定である。このプロセスは、モニタリングプログラムの実施に先だってさらなる評価を行うための予備パラメータリストの策定につながる。プロセスの選択と予備パラメータリストの設定は、すべての要件を確実に考慮するため、関与するステークホルダーと議論すべきである。

モニタリング計画の設計

パラメータのスクリーニング

パラメータのスクリーニングは技術的実現性やパラメータの変化に関する時間枠を考慮して以下の様な手順で実施される。

1. 各パラメータについて、どのようなモニタリング情報が必要か、どのような精度や時間枠が要求されるかを特定する予備的仕様が開発する。これはモニタリングシステムの稼働条

件（温度および物理・化学的環境）も指定することになる。

2. その要件に対処するために利用できるモニタリング技術があるかどうかを分析する。
3. 技術を利用できる場合は、安全（またはその他のモニタリングシステム）に悪影響を及ぼす可能性を確認する評価を行う。
4. 技術を利用できない場合や、感度、精度、耐久性上要求されるレベルに限界があり、安全に影響が及ぶ可能性がある場合には、代替技術または既存技術を改良するための研究開発に着手できる。
5. 技術が使用不能だったり、研究開発を行っても実現できない状況であれば、その特定のパラメータはモニタリング不能であることを認めなければならず、そのパラメータをパラメータリストと正当な根拠の記録から削除すべきである。
6. 分析が完了したら、最終パラメータリストをモニタリングシステムの実施場所とともに策定する。

モニタリングシステムの設計

モニタリングシステムの設計では、モニタリングセンサの位置、各種技術の使用における冗長性の程度、および複数の場所での同じ技術の適用などのモニタリング計画の詳細仕様から着手する。モニタリング計画の設計では、その仕様の実現可能性、時間、モニタリングのコストを考慮に入れるべきである。

モニタリング計画の設計では次の点を検討する。

- モニタリングシステムの性能要件（例：感度、正確性、信頼性、耐久性）およびバリアに対する影響
- モニタリング場所の選択
- 選択したモニタリング技術の性能における不確実性の管理
- データ品質の評価と潜在する技術的障害の管理
- データ管理
- データ、品質評価およびモニタリング結果通知の後処理
- データがトリガーレベルを超えたり、期待どおりに展開しない場合に講じる対応計画についての合意などの、モニタリング計画の性能に関する尺度とトリガーレベル
- 関連するデータを収集する可能性のある他の処分場モニタリング計画との統合（例：国の地下水質モニタリング計画）

モニタリングシステムの設計が進むにつれて、これらは規制機関や関与するステークホルダーとの間で検討され、情報提供やフィードバックの機会が提供される。具体的には、設計手法が期待に沿っているか、適用範囲とコストの問題の検討、設計の有効性に課題がある地域やそれらの課題に対処する計画がある地域とのコミュニケーション、そして将来のモニタリング計画をどのように開発・伝達していくかの精緻化などの検討である。

実施と管理（ガバナンス）

モニタリングを実施すると、情報を収集し、その情報を評価・伝達し、必要に応じて評価結果に対処するためのプロセスが重要となる。

MoDeRn では処分プロセスの全体的なガバナンスに対処することを目的としていないが、モニタリングの包括的目標として「意思決定を支援する」ためには、全体的なガバナンスに関連してモニタリングを議論する必要がある。

処分プロセス内で意思決定ポイントをどのように管理すべきかについて、あらかじめ検討されている一例として、米国学術研究会議（NRC, 2003）[31]は、それぞれの意思決定ポイントでプログラムの実施者によって開始される全体的プロセスを次のように提案した。

- これまでに取得した情報を体系的に収集、集成、評価、適用する
- 初期段階に戻すことの明示的検討を含め、次段階に向けた展開の選択肢
- 選択肢に照らした、処分場システムの安全性評価の評価と更新
- 調査結果を公に透明で使用可能にする
- ステークホルダーとの対話
- 上記すべてに基づいて、次の段階を決定
- 意思決定とその根拠について周知する

処分プロセスの管理に関わる情報には、(i) 長期安全性のための許可ベースの妥当性の検証、(ii) 処分プロセスを続行するために利用できる選択肢、などがある。

多くの処分計画では、プロセスの次の段階に進む前に決定を下すという段階的プロセスを取っている。この目的のため、モニタリング情報がいつどのように使用されるかを考慮する必要がある。このため実施者は規制当局と合意し、その他のステークホルダーと協議の上、以下について明確に定義したモニタリング計画を提示する必要がある。

- モニタリング対象が何か、どのようなモニタリングを実現すべきかの詳細
- モニタリング情報をどのように提示し、生データにどのようにしてアクセスするか
- 事前定義されたトリガーレベルとトリガーレベルに達した場合の行動計画
- 報告のルーチンサイクルと予期せぬ情報を報告するために合意した取り決め
- モニタリング計画の見直しについて合意したサイクル
- モニタリング計画への変更を伝達するためのプロセス

モニタリング計画は、有効なモニタリングプログラムからの教訓やモニタリング設計の変更への対処、モニタリング技術の進歩を活かした新しいモニタリング設備への更新、モニタリングプログラムの有効性判断などを考慮して、定期的に見直すべきである。

段階的実施の一部としてのモニタリング

MoDeRn における検討では、操業および閉鎖フェーズの段階的管理の間に可能な意思決定を支援するモニタリングデータの寄与と使用に重点を置いている。

許認可のベースが確立され、許認可が付与された瞬間から、モニタリングは許認可の基本と比べた進捗の評価を行う役割を果たす。モニタリングは事前の理解を確認するか、新しい理解を精緻化または導入するような情報を提供することが期待される。モニタリング結果に問題がない場

合、それらは許認可のベースとなった条件を追求するための意思決定を支援することが期待される。すなわち、知識の強化が最適化を後押しするのである。一方で、モニタリング結果が事前の理解に疑問を呈するような場合、これは許認可のベースの再評価を求めることがある。

最終的な閉鎖に移行するための許認可は、遠い将来の判断に基づくことになる。

操業フェーズにおける意思決定ポイントをいつどのようにして設定するかは、具体的な国の状況に大きく依存する。意思決定ポイントは、設定されたカレンダーを参照するだけでなく、処分場構成の明確に定義された変更も参照して計画することができる。

- 「カレンダー重視」の手順は、セーフティケースを新たな知識を統合して更新する必要のある定期安全検査あるいは定期安全審査によって課されることがある。
- 「構成重視」の手順では、漸進的閉鎖ならびに漸進的建設や廃棄物定置に関連する意思決定を参照することがある。

また一部の意思決定ポイントは、社会的要因あるいは技術・モニタリング情報の結果として予期せぬ理由で発生することがある。

操業開始時から処分場閉鎖決定に至るまで、廃棄物を定置した処分セルや処分領域は徐々に閉鎖されていく。それに対応する決定として、徐々に処分場を受動的な構成に移行していき、長期安全性のための基盤を形成していく。モニタリングプログラムの期間が長くなるほど、モニタリングは処分場の変遷に関連する多くの情報を提供するため、その後の段階への移行についての意思決定への寄与が大きくなる。並行して、閉鎖前の管理オプション、特に廃棄物回収オプションは、実施がますます困難になる（図 3.3.2-2）。モニタリング情報に基づく意思決定は、安全性評価のベースがしっかりとしており、その回収可能性があまり必要にならないほど信頼度が向上しているとする結論に基づくべきである。

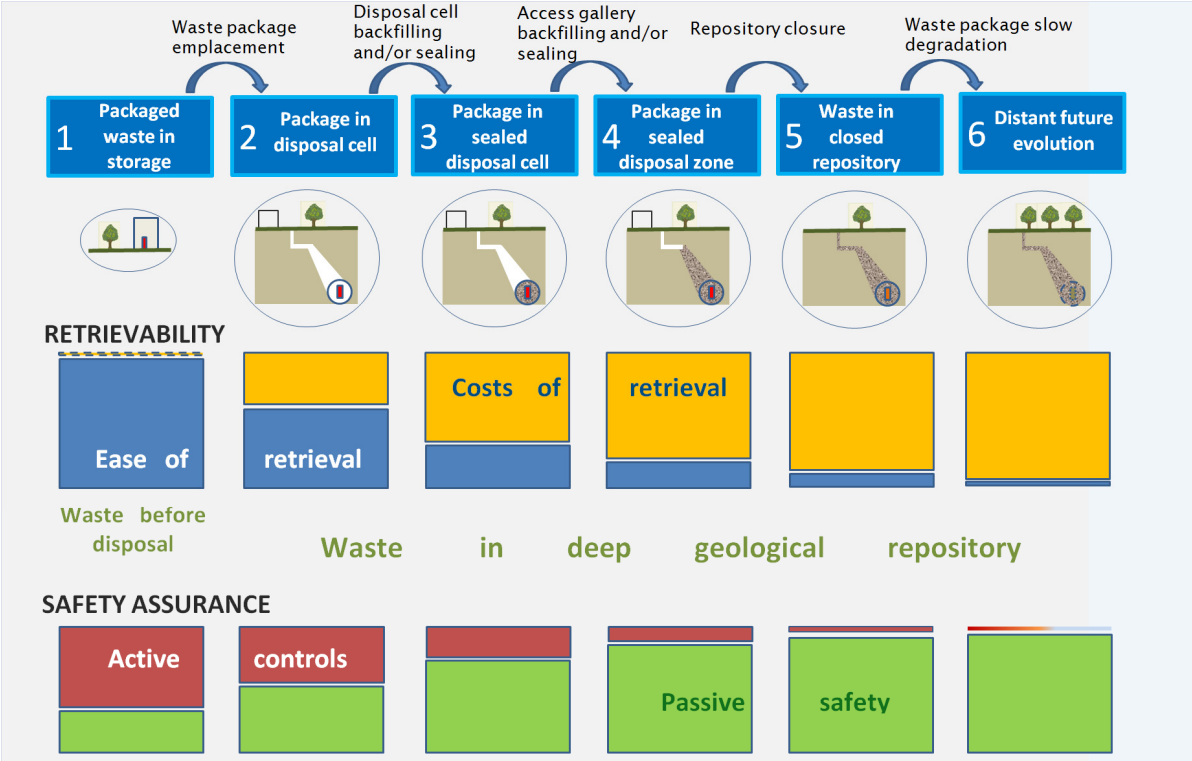


図 3.3.2-2　NEA 回収可能性および可逆性プロジェクトの R スケールによる処分の段階的実施と回収の困難性の増加、受動的安全性への移行の説明（NEA, 2011）

品質保証

モニタリング活動は、特定の品質保証と報告手順に従事し、適切な資格と経験豊富な担当者が行うべきである。データは、分析と検証の有資格者に伝達される。データの解釈と管理のプロセスは、主要ステークホルダーがアクセスしてチェックできるようにして、提供される情報の品質への信頼が高まるようにする必要がある。第三者のチェックやレビューが必要な場合は、提供される情報に、採用した方法に関連する詳細、生データ、および処理済みの情報が含まれていなくてはならない。

モニタリングデータを取得したら、まずデータの品質を検証する。モニタリングシステムの設計は、潜在的な障害への対応を、例えば冗長性すなわち重要パラメータのモニタリングに複数の技術を適用するなどの検知方法によって行う必要がある。大規模な長期モニタリングプログラムでは機器の故障を排除できないので、故障を検知する適切な手段によって故障をあらかじめ予想しておかなくてはならない。従来の品質保証に加えて、モニタリングプログラム中のデータの評価には、同じ技術または他の技術によって収集されたデータの整合性を検討する必要がある。

モニタリング機器の故障の検出に関してはケーススタディー報告書[26]において詳細に議論している。この議論の概略については第 5 章にて紹介する。

結果への対処

モニタリング結果が期待のとおりであった場合は、その結果を定期的に報告し、計画どおりにモニタリングを継続する。結果があらかじめ定義した「トリガー値」を超えた場合の対策を定め

た対応計画を、モニタリングプログラムの開始に先立ち作成しておく。トリガー値は、様々なモニタリング活動によって発生・報告されるパラメータに基づく限界値、範囲、および所見の組み合わせとなる。トリガー値は、1 つまたは複数の測定値が期待から外れた場合に警告を出し、さらなる対策を要求するように設定すべきである（リスク管理)。

トリガー値とパラメータの展開は、以下の手順に従って行う。

- ステップ 1 : 各パラメータの範囲と精度は、許可申請の一部として確立されている。主任調査官（セーフティケースの専門家）は、このパラメータが適用されるプロセスモデルの専門家である。
- ステップ 2 : モニタリングパラメータをその識別にマッピングする。例えば長期セーフティケース関連のパラメータであれば、パラメータを安全性評価モデルのパラメータ、すなわち FEP スクリーニング引数、システム性能の概念モデル、または安全性評価モデルで使用される仮定にマッピングする。ここで説明するようにステップ 2 は、個別性能確認テスト計画の一部である。この情報はすべてモニタリング活動のための正当性を示す。
- ステップ 3 : ステップ 1 と 2 で特定した関係を使用して、パラメータの測定値から期待される結果を求める。特定のモニタリングパラメータについては、パラメータ値で予想される変遷を定義する必要がある。
- ステップ 4 : 測定可能範囲を決定するために、測定パラメータを分析する。例えば、測定センサの校正ドリフトやシステム性能の（許容される）変動に起因するものである。
- ステップ 5 : 試験計画で定義された評価プロセスを開始するモニタリング結果を識別して、トリガー値を求める。

モニタリングデータが性能に関する指標と整合している場合（トリガー値を超えない場合）には、モニタリングからの結果全体の定期的な評価が必要になるまで、計画に基づきデータ収集を続ける。

モニタリングデータがトリガー値を超え、センサの誤動作であると除外できない場合は、以下のようなリスク管理アプローチを開始することとなる。

- モニタリングとトリガー値の設定を支えるセーフティケース/仮定の追加分析
- 結果をチェック/確認するための追加モニタリングの開始
- 工学的対策による介入
- 廃棄物の回収

リスク管理アプローチの中では、トリガー値を超える（処分場の安全性についての）データの重要性を評価すべきである。これは、性能評価や裏付け計算の追加的分析によって実現できる。データは次のいずれかに分類される。

- 「リスクと無関係」: モニタリング結果はセーフティケースの基本前提に影響しない。これらのデータは、処分場が許容安全マージン内で操業を継続していることを示す（データはセーフティケースに影響しない)。

・「リスクと関係」: モニタリング結果はセーフティケースの基本前提に影響を及ぼす可能性がある。これらのデータは、処分場が安全に影響を及ぼしかねない状態で稼働していることを示す（安全に関連するデータ）。

「リスクと関係」するデータの識別に続き、安全戦略で特定された潜在的反応を考慮し、優先されるリスク管理オプションを選択する必要がある。

選択されたリスク管理オプションを適用すると、安全性の基盤に大幅な変更を加えることになり、モニタリング計画や処分プログラムへの変更が生じる。

この様な分析と結果の対応計画を、規制当局との間で討議し合意する必要がある。また、透明性を確保するため、対応計画には他のステークホルダーグループとやりとりし、関与し合うプログラムを含める必要がある。

モニタリング結果の定期的評価は、モニタリング計画の修正に関する決定を可能にするが、これはモニタリングの達成に影響を与える場合がある。また、モニタリングを終了させる決定が下されることもある。モニタリング計画は、実施機関が決定し、規制当局やその他のステークホルダーと合意したときに終了する。

モニタリングからのデータによる意思決定プロセスの例を図 3.3.2-3 に示す。

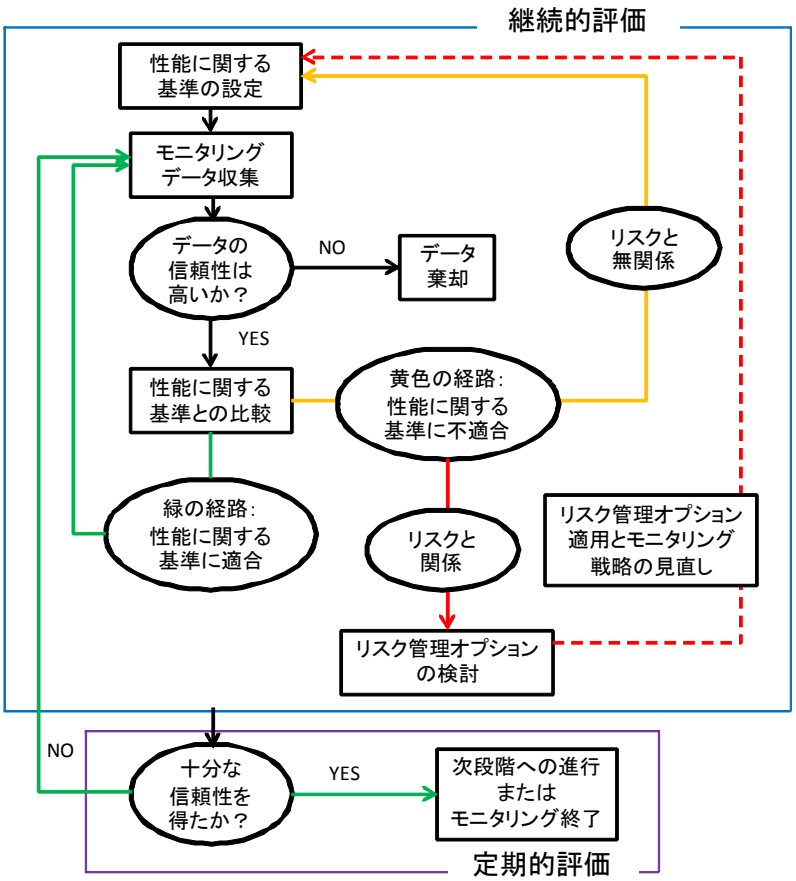


図 3.3.2-3　モニタリングデータの評価に関する意思決定プロセスの例[28]

c) モニタリング結果を評価に用いるための基本ガイドライン

モニタリング結果を活かすには、データと安全性評価との関係をよく理解する必要がある。目標を特定する準備段階、つまり安全機能から目標を明らかにして、期待される性能の評価基盤と結びつける作業をこのリファレンスフレームワークの推奨どおりに行っていれば、既に理解、記録されているはずである。

当初は、モニタリングが提供した情報の種類（確証か逸脱か）にどのように対応するかについて適切に計画する必要がある。許認可の根拠となる確認と課題は、どちらも技術的ベースラインを上げる。

モニタリング結果の評価

モニタリング結果は、許認可基準の事前の理解および予想との間で比較される。モニタリング結果から生じる直接の確認や不一致は、重要な情報を提供する。しかし、意思決定のための真の基盤は個別のモニタリング結果ではなく、安全性評価への影響である。モニタリング対象パラメータが直接の性能指標、すなわち安全性評価に対して正または負の所見が見られた直接の尺度を提供するものとして確立されている場合、トリガー値を超える結果は、さらなる評価や処分プロセス管理の変わりとなる決定（対応計画）を必要とする。

モニタリング結果が以前の基準を「確認」できる場合のガイドライン

対応計画では、二つの措置を行うことが予想される。一つは意思決定者に対し、モニタリングの結果が性能評価の基準を確認したことを知らせるものなので、安全性の基盤に対する信頼感が高まる。もう一つは、モデルとパラメータの不確実性を低減するために新しいデータを組み込むことによって、性能の実際評価を改善する。

モニタリングは、単に期待された挙動を確認するためでなく、現場でパラメータを測定することによって不確実性を低減するためにある（処分場から離れた実験室や試験施設ですでに測定されている可能性はある）。特に後者については、長期にわたる現場のモニタリングが局所的あるいは低速なプロセス（例：過渡的な地下水圧）の特性評価の強化に寄与することがある。これによって予測を更新し、処分システムの性能を再評価することが可能になるので、許容されるシステムの状態および変遷の比較対象となる「性能指標」の更新も可能になる。

モニタリング結果が従来の保守的な仮定の軽減を可能にするほどの証拠を提供した場合、ここまでは不要という過度に保守的な設計要件の緩和を考慮するための根拠として使用できることがある。これは、処分プロセスの実施に対してより最適化されたアプローチに従う決定をもたらす可能性がある。

モニタリング結果が以前の基準を「確認」できない場合のガイドライン

準備した対応計画は、モニタリング結果が従来の予想との違いを示している場合に適用できなければならない。

モニタリングシステムの故障を実証できない場合、（長期的）安全への潜在的影響を評価する必要がある。サイト別の FEP と、対応する基準および変更した処分場の変遷シナリオを分析す

ることにより、代替シナリオを想定する必要がある場合にモニタリング結果を使って分析することができる。

対応計画の準備では、予想される範囲のモニタリング結果を定義し、その予想範囲から外れた結果は、対策の必要性をもたらすことになる。この境界線は、性能指標に関連して設定される。

トリガー値は、モニタリング対象のパラメータごとに設定し、結果が通常の予想範囲を超えた場合に警告を発する。トリガー値はモニタリングを通じて記録した値であり、実行するリスク管理活動を呼び出す。トリガー値は、限界値、範囲、および各種モニタリングプログラムによって生成・報告されたデータと直接比較される観測値の組み合わせになる。トリガー値は、予想観測値が技術ベースラインを満たしておらず、さらなるリスク管理が必要な場合に警告を出すように設定する。

モニタリングが長期安全性評価の基準を参照していることを考えると、事前の予想から外れたデータの結果は、安全性評価への影響を評価するためにさらなる分析が必要である。

手始めにモニタリング構成要素の故障は除外すべきである。地層処分におけるモニタリングシステムには故障検出の（一部自動化された）手法が適用されると考えられるが、想定外の測定値の理由として、故障検出のために事前定義した方法によってカバーされていない故障による可能性が残っている。これは熟練の専門家による整合性チェックによって解決できる。故障のさらなる証拠は、追加の測定、実験室シミュレーション、タイムラインの分析などによって確立できる。

経時によるパラメータの変遷（例：バリア内の応力変遷）が予想を下回ることがある。セーフティケースにとって重要な特定の期待値には到達できないことをこれは意味している。一例を挙げると、立杭シールシステム下部のシール要素内の間隙圧が予想より早く上昇した場合は、上部のシール要素が損傷したことを意味している可能性がある。これは、基準シナリオの代わりに想定される代替シナリオの重要指標となる。

d) 閉鎖前管理との関連

上記の MoDeRn モニタリングワークフローでの検討は、長期セーフティーケースの根拠のサポート（性能確認）を中心的な目的とした説明となっているが、処分場の閉鎖前の管理のサポートもまたモニタリングの重要な目的である。

モニタリング目的（副目的）に閉鎖前管理を関連付けた広範な例を以下に示す。これらは、処分場を開いた状態にしておける柔軟性を備えた処分場インフラを確保しておく必要性を考慮している。将来の意思決定のための稼働の選択肢を提供する複数レベルの柔軟性を強調している。

- 主要段階の間の期間にわたる柔軟性（例：長期安全性に悪影響を及ぼすことなく安全操業を確保するための、主要構造物の寿命と機能に関連）
- 設計の柔軟性（処分場の特性や変遷の多くの不確実性が時間の経過とともに減少するため、設計やレイアウト全体が更新される可能性がある）

閉鎖前管理のためのモニタリング目的（副目的）の例は次のとおりである。

・ 廃棄物処分パッケージの状態は、将来そのような決定が行われた場合に、安全に廃棄物キャニスタを回収する機能に関する情報を提供する。これはキャニスタの適切な取扱いと安全な回収のための機械的安定性、および浸透の危険からの放射線防護と予防のための完全性に向けた配慮につながる。
・ 安全な条件の下で操業が可能かどうかの検証のためにこれらのユニットにアクセスできるようにするため、処分ユニットとすべてのインフラの構造上の安定性について、寿命の推定値を更新する。
・ 処分ユニットの環境条件 - 安全な条件下での操業が可能か、可能であればその期間を検証する。
・ 将来の保守が必要かどうかについては、時間の制約なく意思決定でそれを織り込むようにする必要がある場合は事前に知らせる。
・ 操業中に、必要な設計と性能へのシール定置に矛盾する方法で、ニアフィールドおよびトンネル支保工を変更しないこと。

モニタリング活動は一般に、地下の状態および地盤パラメータが予想どおりであるか、そのように維持できることを確認し、このような状態の変化が設計および許認可プロセスに適用される許容限度内にあることを確認するのが目的である。さらに策定される可能性がある自然環境に関わるモニタリング目的（副目的）は、以下に関連すると思われる。
・ 水理地質環境が許認可におけるベースラインを依然として満たしていることの確認。
・ セーフティケースと擾乱されない母岩特性が維持されているか、変化していても最小限か、または建設・操業時に十分配慮されているかを考慮に入れ、岩石特性が良好かを検証する。
・ セーフティケースおよび閉鎖前の処分プロセス管理を支持するための、建設、操業、部分閉鎖のニアフィールドでの熱・水圧・力学的応答。
・ 建設、操業、閉鎖によるファーフィールド応答（応答がある場合）。

e) 社会的側面

MoDeRn では社会学者と共にモニタリングの持つ社会的側面について検討している。既存の文献調査と地層処分関係者へのインタビューによる、公衆の地層処分への理解への寄与に関する報告書[16]についてはその概要を原環センター（2013）[14]により報告した。また、規制当局や第三者機関等の専門性の高いステークホルダーのモニタリングに関する期待についてはワークショップによりその意見を調査した[20]。この概要については原環センター（2012）[13]において報告している。リファレンスフレームワーク報告書では、考察としてこれらの活動により得られた知見や考え方を述べている。以下にその概要を述べる。

地層処分関係者へのインタビューでは、下記の目的のためモニタリングが使用されるとの予測が示された。
・ 保証を行う。すなわち良好な事例を実証し、長期セーフティケースの基盤の妥当性を検証する。
・ 段階的プロセスで意思決定を支援する。

・ 透明性を提供するため、そしてこれらの機能の結果として、
・ 処分プロセスに対する社会的信頼を支援する。

この結果は、専門家ステークホルダーのワークショップ[20]で得られたフィードバックと一致した。ワークショップでは、一般市民の信頼を構築するために、モニタリング計画、そして特にモニタリング結果の独立した精査の利点が識別された。また、参加者は当初から、モニタリングに関して一般ステークホルダーといつどのようにしてやりとりを行うかを含め、モニタリング計画を実施する際の明確な戦略の策定を推奨した。

ステークホルダーとの関与の性質、形態、程度は、国の状況に大きく依存する。地層処分のモニタリングに関するステークホルダーとの関与は、全体として、処分場プロセスに関連して確立された取り決めの中で行われる。Petts and Leach（2000）[32]は、モニタリングプログラムへの一般市民の関与について考察し、以下の 4 レベルの参加を識別した。

・ 教育と情報提供：様々なメディアを通じた意識の形成と普及を行う。何が起きようとしているか、何が起きているか、または起こったかについて人々に知らせ、活動や問題への意識を形成するが、それに反応するための具体的な仕組みは提供しない。
・ 情報提供とフィードバック：ステークホルダーグループと広範囲な市民が意思決定者に招かれ、情報、事前に作成された提案書、あるいは関連の質問に対して意見を述べる。
・ 関与と協議：専門家のステークホルダー、地元のステークホルダーグループ、および問題に関心のある市民との間で直接の対話を行う。
・ 関与の拡大：一般市民やステークホルダーが意思決定に影響を及ぼす積極的な役割を果たすことがある、長期間にわたって発生する熟議のプロセス。

また、処分プロセス透明性を提供し、社会的信頼を支援するため、モニタリングを活用するための課題として、下記の事項が特定された。

・ ステークホルダーがモニタリングの結果を理解し、適切に対応する能力を持っているかを確認する必要がある。
・ モニタリングからの生の情報の一部は、意味を持たせるための処理が必要であり、そのような処理が明瞭かつ透明であるとみなされているかを確認する必要がある。
・ ステークホルダーが大量のデータに圧倒されてしまうおそれがあるので、重要な情報がきちんと評価されるような方法で提示する必要がある。

一部の処分場プロセスはきわめて緩慢にしか変遷せず、モニタリング期間中に識別可能な変化を全く示さない場合があるので、実際に何かを示すプロセスに焦点を合わせる必要がある。MoDeRn プロジェクトは、すべてのステークホルダーにとってのモニタリングの重要性を認識しており、モニタリングプログラムはプロセスの初期段階で議論すべきであると指摘している。

3.4　人工バリアの性能確認に資するモニタリングの検討

3.4.1　背景

IAEA のモニタリングに関する文章において、処分場の長期安全性に関わるものとして、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」[33]

・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）[34]

・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。

安全指針（DS-357 策定中）

・処分システムが想定どおりに機能していることを検証

・処分施設に関するセーフティーケースの開発において用いられるシステム挙動の側面の理解を増進するとともに、これらの側面を予測するモデルのさらなる試験を可能にする。

技術文書（TECDOC-1208）[4]

・処分場のセーフティー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。

これらのうち、「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」は、セーフティーケースを成立させる境界条件を確認するためのモニタリングと解釈できる。

また、「処分施設に関するセーフティーケースの開発において用いられるシステム挙動の側面の理解を増進」は処分場の安全機能に関わるパラメータのモニタリングにより、直接的に安全性能が確認される事項を示すものと解釈でき、「処分システムが想定どおりに機能していることを検証」や「これらの側面を予測するモデルのさらなる試験を可能にする」については、モニタリングによりシステムの構成要素の挙動を予測するモデルによる予測値と、モニタリング等による実測値の比較により、モデルの更新や確認が行われる事項を示すものと解釈される。これら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いえる。

IAEA の文章に述べられた、モニタリングの目的に関するその他の項目が、既に一部の国で実績が蓄積されている、あるいは既存の原子力施設などでも適用されているものであることに比べて、性能確認のためのモニタリングについては、まだ確定された考え方がなく検討を進める必要があ

る。

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には、以下の要求事項が考えられる。

・閉鎖後セーフティー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））

以上の様に、モニタリングの目的の一つとして、「処分システムの性能確認」が挙げられ、これらはモニタリングにより直接的に性能が確認されるものと、モデルによる予測値との比較により性能が確認されるものとに区分して考えることができる。

3.4.2　人工バリアの性能確認モニタリングのパラメータ選定方法の検討

「基本的考え方」[35]によれば、「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。」という考え方が示されている。本検討では、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。

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 3.4.2-1 の選定フローを検討した[36]。

セーフティーケースにおいては、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。これらを人工バリアの性能目標と呼ぶこととする。

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。

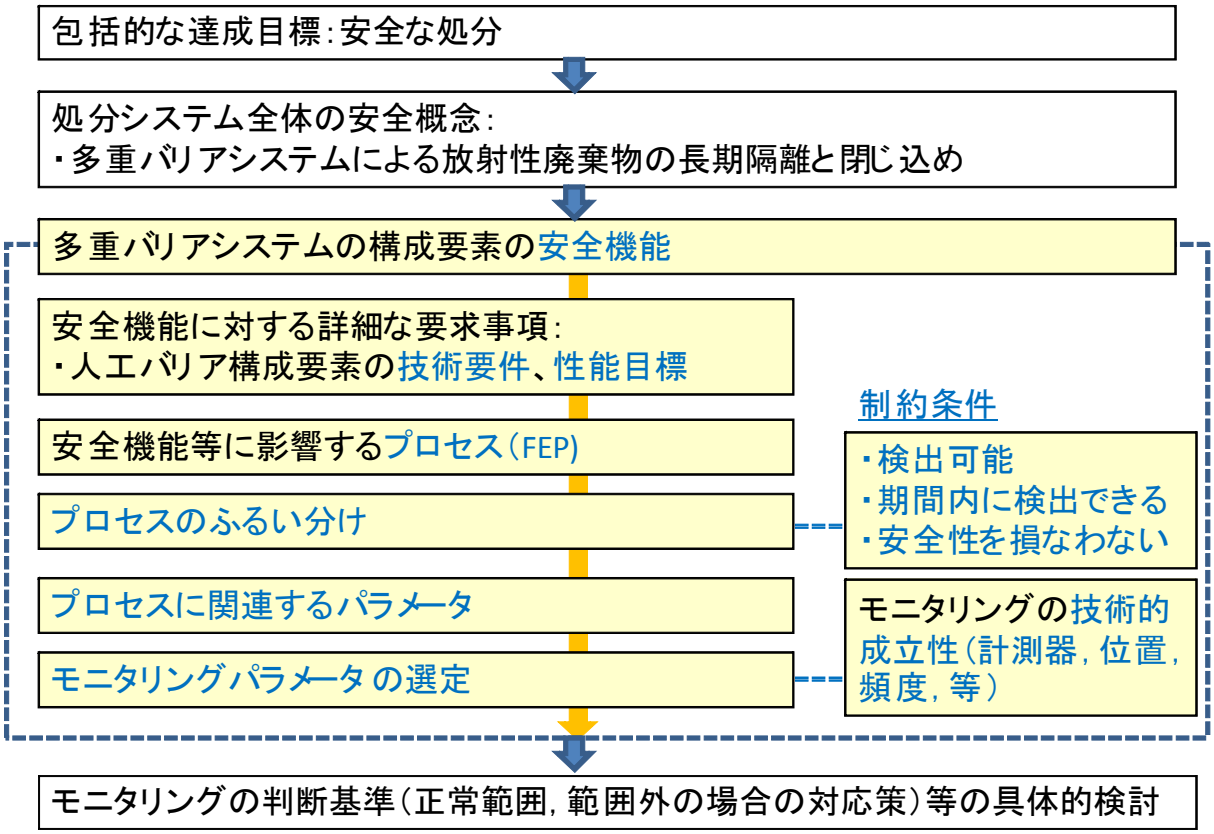


図 3.4.2-1　人工バリアの安全機能に影響するプロセスの
モニタリングパラメータ選定方法案[36]

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検討した事例として、フィンランドの Posiva によるモニタリング計画[45]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 3.4.2-1 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。

表 3.4.2-1　Posiva(2012)[45]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

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。安全機能と性能目標、FEP の関係については調査中であるが、ここでは緩衝材を事例として、現在入手可能な情報に基づき検討した。また、モニタリングを実施する期間は緩衝材の再冠水過程とした。

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]）を参照する。この報告書において緩衝材に割り当てられた安全機能は、「放射性物質の移行抑制」であり、これは下記の 4 つに細分化されている。

・放射性物質の溶解度制限（還元環境を保つことにより確保する機能）
・移流による移行抑制
・コロイド移行の防止・抑制
・収着による放射性物質移行の遅延

このうち下の 3 つについては、それぞれ「基本的なバリア性能の確保」としての技術要件が表 3.4.2-2 の様に割り当てられている。技術要件には「基本的なバリア性能の確保」の他に、「長期健全性の維持」と「工学的な実現性の確保」が定義されており、緩衝材に関するこれらの技術要件をまとめると表 3.4.2-3 の様になる。「長期健全性の維持」に関する技術要件は、「基本的なバリア性能の確保」に関する技術要件に長期に亘って影響を与える可能性がある要因に対する要件、及び他のバリアの保護を目的として設定されている。このことから、「長期健全性の維持」に関する技術要件は「基本的なバリア性能の確保」に関する技術要件と同様の安全機能、及び「他のバリアの保護」のための要件ということができる。以上をまとめると、緩衝材の安全機能と技術要件のうち「基本的なバリア性能の確保」と「長期健全性の維持」の関係は表 3.4.2-4 の様に示すことができる。

表 3.4.2-2　緩衝材の安全機能と「基本的なバリア性能の確保」に関する技術要件[2]

安全機能	技術要件
移流による移行抑制	低透水性
コロイド移行の防止・抑制	コロイドろ過能
収着による放射性物質移行の遅延	収着性

表 3.4.2-3　緩衝材の技術要件[2]

分類	技術要件
基本的なバリア性能の確保	低透水性
	コロイドろ過能
	収着性
長期健全性の維持	自己修復性
	耐熱性
	耐放射線性
	緩衝材流出の抑制
	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
	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)
	オーバーパックの沈下の防止
	施工時の隙間の充填(自己シール性)
工学的な実現性の確保	製作性
	遠隔定置性
	品質管理

表 3.4.2-4　安全機能と技術要件の関係（[2]より作表）

安全機能	技術要件	分類
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	基本的なバリア性能の確保
コロイド移行の防止・抑制	コロイドろ過能	
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、 移流による移行抑制、 コロイド移行の防止・抑制、 収着による放射性物質移行の遅延	自己修復性	長期健全性の維持
	耐熱性	
	耐放射線性	
	緩衝材流出の抑制	
	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)	
(他のバリアの保護)	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)	
	オーバーパックの沈下の防止	

FEP リストについては、第 2 次取りまとめにおける包括的な FEP リスト[46]のうち緩衝材に関するものを基本とし、近年の FEP リストとして SKB による緩衝材に関する安全性能評価 FEP リスト[47]のうち緩衝材に関するもの、POSIVA による緩衝材に関する FEP リスト[45]を参照した。これら 3 つの FEP リストをまとめると表 3.4.2-5～表 3.4.2-7 の様になる。各 FEP リストを比較すると表現や区分が異なるものの、SKB 及び POSIVA による FEP の多くは第 2 次取りまとめの FEP リストに対応する。第 2 次取りまとめの FEP リストには無く、SKB や POSIVA の FEP リストにあるものとしては、凍結と液状化が見られるが、凍結は氷河期における FEP であるため、ここで検討対象としている緩衝材の再冠水過程での発生は期待されない。

表 3.4.2-5　緩衝材に関する FEP の比較（1/3）

分類	JNC(1999)		SKB(2010)		POSIVA(2013)	
	FEP 番号	FEP 名	FEP 番号	FEP 名	FEP 番号	FEP 名
1.熱的現象・特性	B-1.1	緩衝材の熱物性				
	B-1.2	緩衝材の温度	Bu1	放射線減衰／熱生成		
			Bu2	熱移行	5.2.1	熱移動
	B-1.3	緩衝材の熱膨張				
			Bu3	凍結		
2.水理学的現象・特性	B-2.1	緩衝材の水理特性			5.2.2	水の流入と膨潤
	B-2.2	緩衝材の飽和	Bu4	不飽和状態での水吸収および水移行		
			Bu5	飽和状態での水移行		
	B-2.3	緩衝材中での地下水流動	Bu4	不飽和状態での水吸収および水移行		
			Bu5	飽和状態での水移行		
			Bu15	浸透		
3.力学的現象・特性	B-3.1	緩衝材の力学特性				
	B-3.2	緩衝材の応力	Bu8	膨潤・質量の再配分		
	B-3.3	緩衝材の膨潤			5.2.2	水の流入と膨潤
	B-3.4	緩衝材の変形				
	B-3.5	緩衝材の流出	Bu7	パイピング・エロージョン	5.2.3	パイピングとエロージョン
			Bu9	液状化		

下線部は SKB(2010)[47]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

表 3.4.2-6　緩衝材に関する FEP の比較（2/3）

分類	JNC(1999)		SKB(2010)		POSIVA(2013)	
	FEP 番号	FEP 名	FEP 番号	FEP 名	FEP 番号	FEP 名
4.化学的現象・特性	B-4.1	緩衝材の化学特性				
	B-4.2	緩衝材中の地下水化学	Bu14	溶存化学種と化学反応	5.3.1	水溶解度及び化学種の存在形態（特徴）
	B-4.3	緩衝材と地下水の反応			5.2.4	化学的エロージョン
	B-4.4	ガスの発生/影響	Bu6	ガス移行・溶解		
	B-4.5	微生物の影響	Bu21	微生物プロセス	5.2.8	微生物活動
	B-4.6	有機物の影響				
	B-4.7	コロイドの形成	Bu18	モンモリロナイトのコロイド放出		
	B-4.8	緩衝材の化学的変質	Bu13	不純物の変化	5.2.7	随伴鉱物の変質
			Bu16	モンモリロナイトの変質	5.2.6	モンモリロナイトの変質
			Bu17	鉄-ベントナイトの相互作用		
	B-4.9	塩の蓄積				
5.放射線学的現象・特性	B-5.1	緩衝材中での核種の放射性崩壊	Bu24	放射性核種のスペシエーション		
	B-5.2	緩衝材中での間隙水の放射線分解	Bu20	間隙水の放射線分解	5.2.5	間隙水の放射化
	B-5.3	緩衝材の放射線損傷	Bu19	放射線誘発性変質		

下線部は SKB(2010)[47]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

表 3.4.2-7　緩衝材に関する FEP の比較（3/3）

分類	JNC(1999)		SKB(2010)		POSIVA(2013)	
	FEP 番号	FEP 名	FEP 番号	FEP 名	FEP 番号	FEP 名
6.物質（核種）移動現象・特性	B-6.1	緩衝材の物質移動特性				
	B-6.2	幾何学形状/間隙構造				
	B-6.3	緩衝材中での核種の移行	Bu25	水相における放射性核種の移行		
	B-6.3.1	移流/分散	Bu10	溶存種の移流	5.3.5	移流
	B-6.3.2	拡散	Bu11	溶存種の拡散	5.3.4	拡散
	B-6.3.3	収着	Bu12	収着（イオン交換を含む）	5.3.3	収着
	B-6.3.4	沈殿/溶解	Bu22	セメンテーション	5.3.2	沈殿及び共沈
	B-6.3.5	コロイドによる移行	Bu23	コロイド移行	5.3.6	コロイドの移行
	B-6.3.6	ガスによる移行	Bu26	ガス相における放射性核種の移行	5.3.7	気体輸送

下線部は SKB(2010)[47]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

SKB(2010)[47]においては、緩衝材に関する FEP の重要性を再冠水/高温の期間（不飽和フェーズと熱的飽和フェーズに細分）と飽和及び高温期間後の長期に区分して評価している。処分場もしくは地下における実証施設における緩衝材のモニタリング期間は、このうち主に再冠水/高温の期間（不飽和フェーズ）に該当するものと考えられる為、フェーズで重要とされる FEP（Bu2 熱移行、Bu4 不飽和状態での水吸収および水移行、Bu7 パイピング・エロージョン、Bu8 膨潤・質量の再配分、Bu15 浸透）は、モニタリングパラメータの検討において特に重要な FEP であると言える。これらの FEP に対応する第 2 次取りまとめ[46]における FEP を表 3.4.2-5 に基づいて抽出すると、表 3.4.2-8 となる。

表 3.4.2-8　再冠水過程において重要と考えられる FEP

FEP 番号	FEP 名
B-1.2	緩衝材の温度
B-2.2	緩衝材の飽和
B-2.3	緩衝材中での地下水流動
B-3.2	緩衝材の応力
B-3.3	緩衝材の膨潤
B-3.4	緩衝材の変形
B-3.5	緩衝材の流出
B-4.7	コロイドの形成
B-6.3.1	移流/分散

表 3.4.2-8 に示した再冠水過程で重要と考えられる FEP を表 3.4.2-4 に示した安全機能と技術要件に関連付けると、表 3.4.2-9 の様になる。表 3.4.2-9 では、技術要件のうち収着性や耐放射線性など、幾つかの技術要件には再冠水過程で重要と考えられる FEP を関連付けることはできなかった。また、低透水性等の技術要件には複数の FEP を関連付けた。これらの関連付けについては、さらに調査、検討を行い、十分に説明可能なものとする必要がある。

表 3.4.2-9　再冠水過程で重要な FEP と安全機能、技術要件との関連付け

安全機能	技術要件	技術要件との関連を推定した再冠水過程で重要な FEP	
		FEP 番号	FEP 名
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	B-2.2	緩衝材の飽和
		B-2.3	緩衝材中での地下水流動
		B-6.3.1	移流/分散
コロイド移行の防止・抑制	コロイドろ過能	B-2.3	緩衝材中での地下水流動
		B-4.7	コロイドの形成
		B-6.3.1	移流/分散
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、 移流による移行抑制、 コロイド移行の防止・抑制、 収着による放射性物質移行の遅延	自己修復性	B-3.3	緩衝材の膨潤
	耐熱性	B-1.2	緩衝材の温度
	耐放射線性	－	－
	緩衝材流出の抑制	B-2.2	緩衝材の飽和
		B-2.3	緩衝材中での地下水流動
		B-3.5	緩衝材の流出
	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）	B-3.3	緩衝材の膨潤
（他のバリアの保護）	ガラス固化体の過熱の防止	B-1.2	緩衝材の温度
	オーバーパックの保護（物理的緩衝性）	B-3.2	緩衝材の応力
		B-3.4	緩衝材の変形
	オーバーパックの沈下の防止	B-3.2	緩衝材の応力
		B-3.4	緩衝材の変形

次に、表 3.4.2-8 に示した FEP に直接関連するパラメータ、さらにこれらのパラメータを直接、または間接的にモニタリングするためのパラメータを推定すると表 3.4.2-10 のようになる。モニタリングパラメータの候補の選定においては、現状の技術で可能と考えられるものとした。また、

表 3.4.2-10 における関連付けについては、さらに調査、検討を行い、十分に説明可能なものとする必要がある。

表 3.4.2-10　再冠水過程で重要な FEP とモニタリングパラメータ候補

FEP 番号	FEP 名	FEP と直接関係を推定したパラメータ	モニタリングパラメータ候補
B-1.2	緩衝材の温度	温度	温度
B-2.2	緩衝材の飽和	含水比	含水比
B-2.3	緩衝材中での地下水流動	流量、流速、間隙水圧	間隙水圧
B-3.2	緩衝材の応力	膨潤圧、全圧、間隙水圧	全圧、間隙水圧
B-3.3	緩衝材の膨潤	膨潤圧	全圧、間隙水圧
B-3.4	緩衝材の変形	変位、全圧	変位、全圧
B-3.5	緩衝材の流出	排出水中の緩衝材量、流量、流速、密度、膨潤圧	排出水中の緩衝材量（サンプリング）、全圧、間隙水圧
B-4.7	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）
B-6.3.1	移流/分散	流量、流速、間隙水圧	間隙水圧

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 3.4.2-11 の様になる。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ー[26]等を参考としているが、モニタリング結果をセーフティー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等を調査し、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検討する必要がある。また、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点を注意しなければならない（図 3.4.2-2）。

表 3.4.2-11　安全機能、技術要件、FEP から推定した再冠水時のモニタリングパラメータ候補

安全機能	技術要件	技術要件との関連を推定した再冠水過程で重要な FEP		FEP と直接関係を推定したパラメータ	モニタリングパラメータ候補
		FEP 番号	FEP 名		
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	B-2.2	緩衝材の飽和	含水比	含水比
		B-2.3	緩衝材中での地下水流動	流量、流速、間隙水圧	間隙水圧
		B-6.3.1	移流/分散	流量、流速、間隙水圧	間隙水圧
コロイド移行の防止・抑制	コロイドろ過能	B-2.3	緩衝材中での地下水流動	流量、流速、間隙水圧	間隙水圧
		B-4.7	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）
		B-6.3.1	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、 移流による移行抑制、 コロイド移行の防止・抑制、 収着による放射性物質移行の遅延	自己修復性	B-3.3	緩衝材の膨潤	膨潤圧	全圧、間隙水圧
	耐熱性	B-1.2	緩衝材の温度	温度	温度
	耐放射線性				
	緩衝材流出の抑制	B-2.2	緩衝材の飽和	含水比	含水比
		B-2.3	緩衝材中での地下水流動	流量、流速、間隙水圧	間隙水圧
		B-3.5	緩衝材の流出	排出水中の緩衝材量、流量、流速、密度、膨潤圧	排出水中の緩衝材量（サンプリング）、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）	B-3.3	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	B-1.2	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）	B-3.2	緩衝材の応力	膨潤圧、全圧、間隙水圧	全圧、間隙水圧
		B-3.4	緩衝材の変形	変位、全圧	変位、全圧
	オーバーパックの沈下の防止	B-3.2	緩衝材の応力	膨潤圧、全圧、間隙水圧	全圧、間隙水圧
		B-3.4	緩衝材の変形	変位、全圧	変位、全圧

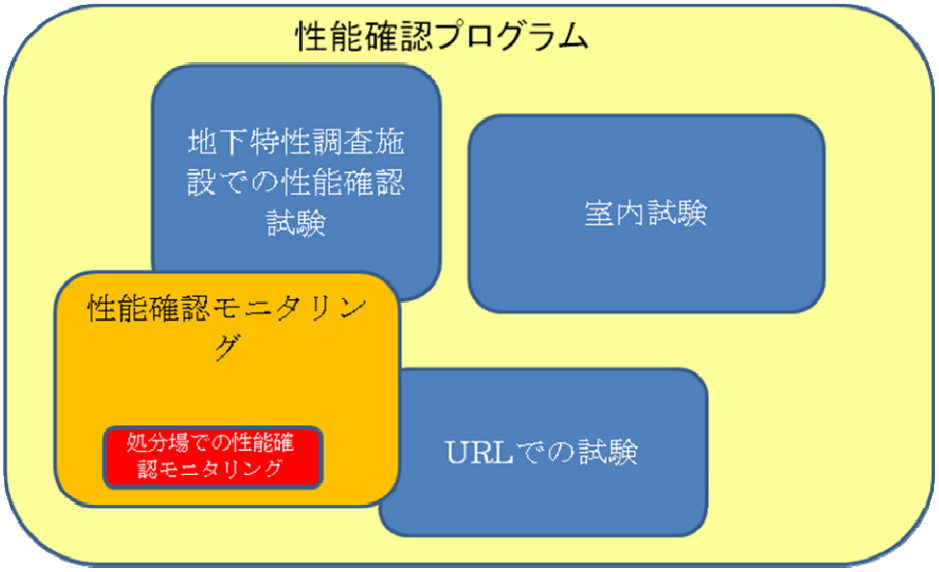


図 3.4.2-2　性能確認モニタリングの位置付け

ここで、緩衝材の流出（パイピング・エロージョン）のモニタリングの可能性について考察する。表 3.4.2-10 及び表 3.4.2-11 においては、モニタリングパラメータとして、排出水中の緩衝材量（サンプリング）、全圧、間隙水圧を挙げている。この中で、緩衝材の流出を直接示すパラメータは排出水中の緩衝材量であるため、実証施設等でのモニタリングにおいて、排水をサンプリング出来る場合には、このパラメータをモニタリングすることが適切であると考えられる。

しかしながら、処分場等でのモニタリングにおいて排水がサンプリング出来ない場合、もしくは複数の処分孔からの排水が混合する場合には、他のモニタリングパラメータから緩衝材の流出（パイピング・エロージョン）を推定することとなる。例えば、緩衝材内の全圧を近傍の母岩（EDZ）の間隙水圧と比較することにより、パイピングが発生する環境にあるか、発生しない環境にあるか推定できる可能性があるものと考えられる。図 3.4.2-3 の上図においては緩衝材を設置した処分孔内部よりも近傍の母岩中の水圧が大きいため、処分孔内に地下水が流入する。これは少なくとも緩衝材の隙間が水で満たされるまで継続する（図 3.4.2-3 下図）。その後、パイピング・エロージョンが発生した場合には母岩中の水圧が緩衝材の全圧を上回る状態が継続するものと考えられる（図 3.4.2-4 上図）。一方で、パイピング・エロージョンよりも膨潤・シーリングが卓越した場合には処分孔内の水の移流は止まり、緩衝材の全圧は近傍の母岩中の水圧を上回ることとなる（図 3.4.2-4 上図）。ただし、以上の圧力の比較による緩衝材が流出する環境にあるか否かの推定では、緩衝材中の全圧が均質であることを仮定しているが、実際には緩衝材内の圧力分布を考慮する必要があるものと考えられる。

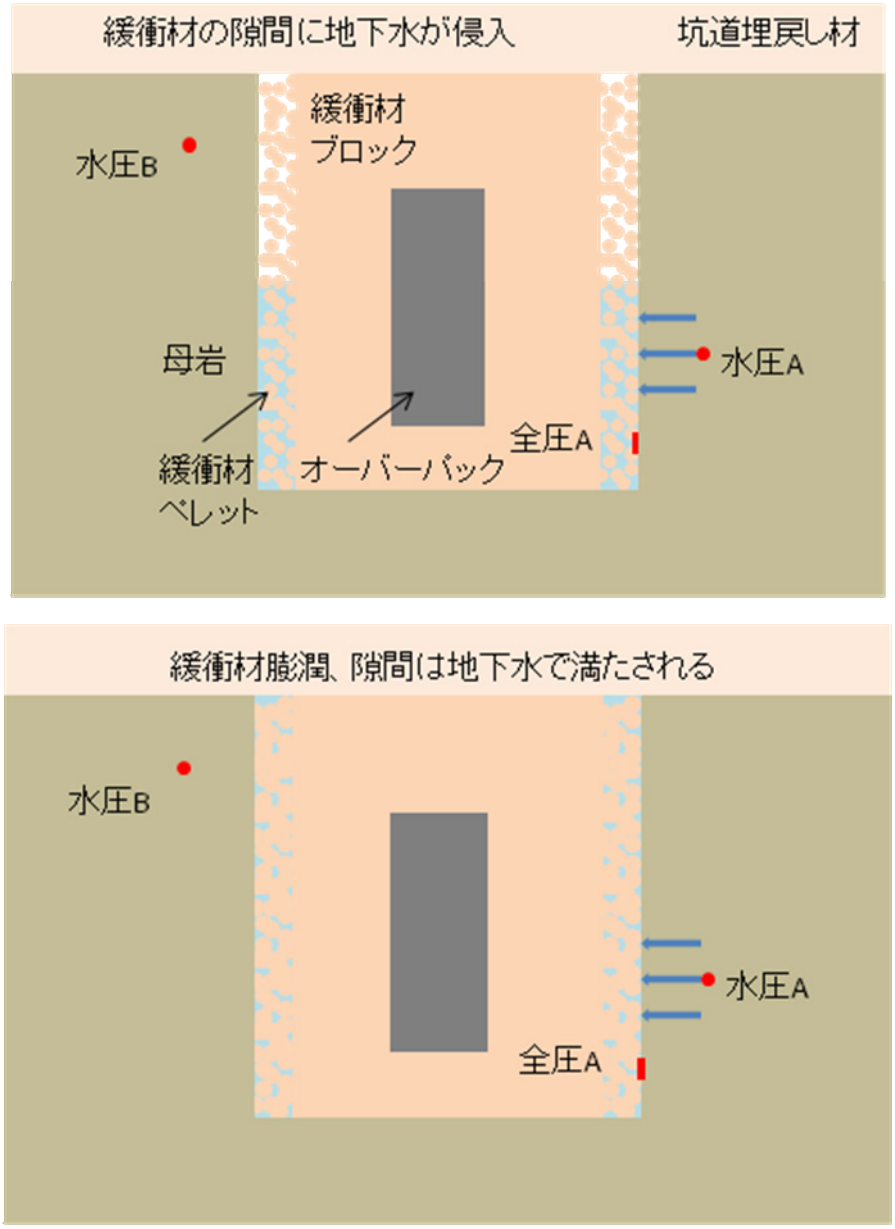


図 3.4.2-3　緩衝材の再冠水過程における流出のモニタリング（1/2）

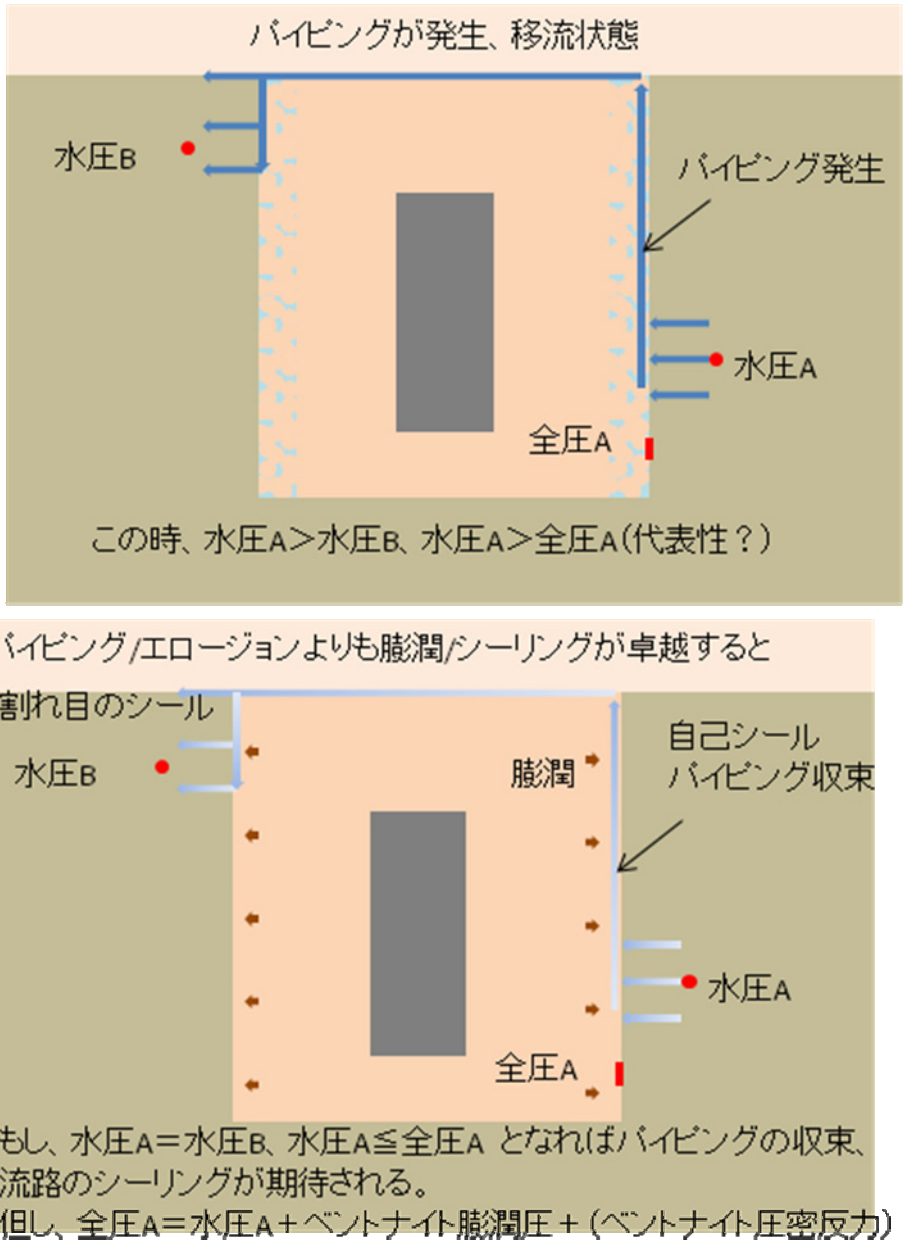


図 3.4.2-4　緩衝材の再冠水過程における流出のモニタリング（2/2）

各モニタリングパラメータの具体的な測定方法については、技術メニュー（第 4 章）に取りまとめているが、バリアの安全性を損なわずに測定するための条件について、十分な検討が必要である。このような制約条件については、次項において述べる。

3.4.3　モニタリングの制約条件の検討

(1)　モニタリングの実施における制約条件

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[4]。

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に対しては工学的対策が困難であり、地層処分の長期安全性の信頼性を高めるために他の対策によりトレードオフを行うことが特に困難であると考えられ、るため、十分な考慮が必要となる。

処分場内部または周辺でのモニタリングを実施する場合、その目的は人工バリア及びニアフィールドの天然バリアが、安全評価上期待される性能を発揮することを確認することと想定される。従って、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が処分場における実廃棄体近傍でのモニタリング以外の方法にて確認され、そのことが規制機関やその他のステークホルダーにとって十分に説得力を持つものであれは良いこととなる。

このための方法として、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。

このような考え方に基づき、原環センターでは「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない。」ことをモニタリングの実施における制約条件の基本事項として、具体的なモニタリングのあり方について検討を行なった[37]、[38]。

(2) 操業・閉鎖段階において実施可能なモニタリング

前項で示した制約条件の基本事項を踏まえ、“潜在的水みちの形成”を防ぐために、本検討では、操業・閉鎖段階における地層処分モニタリング実施時の制約条件を下記のように定義した。このような制約条件を満たすものが原位置で、実施可能なモニタリングとなる。

・ 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 3.4.3-1）。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 3.4.3-2)。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)。

地下施設を活用して実施するニアフィールドのモニタリングは、上記の制約条件に準拠する。

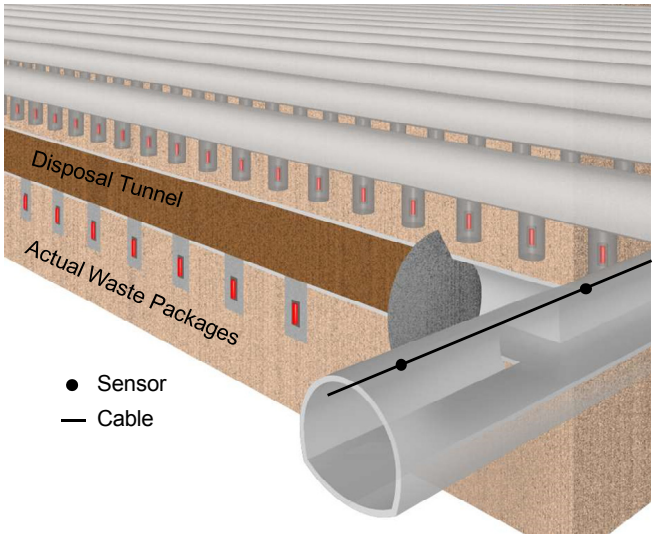


図 3.4.3-1　人工バリアのモニタリング（処分場）

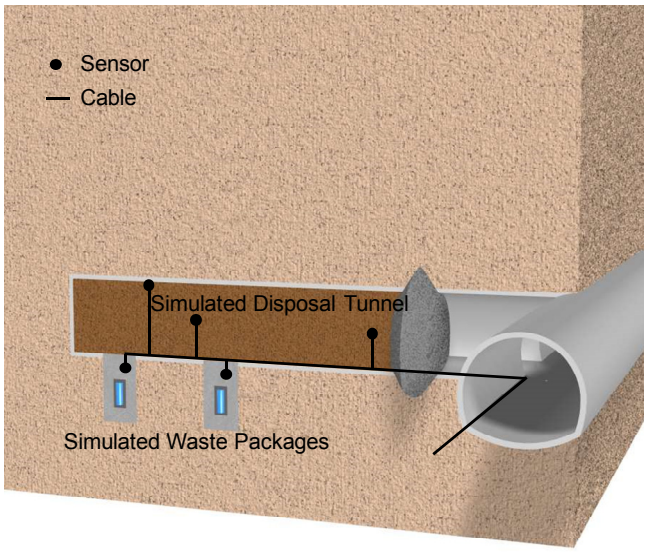


図 3.4.3-2　人工バリアのモニタリング（地下調査施設）

(3)　地中無線送信技術がモニタリングの制約条件へ与える影響

第５章において報告する地中無線送信技術にはケーブルが不要であるというメリットがあるが、現在の技術的な制約条件として、伝送距離が限定され、伝送速度が遅く、かつ機器の寿命に加えバッテリーの寿命も考慮する必要があること等、当然のことながらデメリットも有している。しかしながら、これらの課題を克服すれば、地層処分モニタリング実施時の制約条件を変えることが可能となるものと考えられる[39], [40]。

・　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 3.4.3-3）。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 3.4.3-4）。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 3.4.3-5）。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。

地下施設を活用して実施するニアフィールドのモニタリングは、上記の制約条件に準拠する。

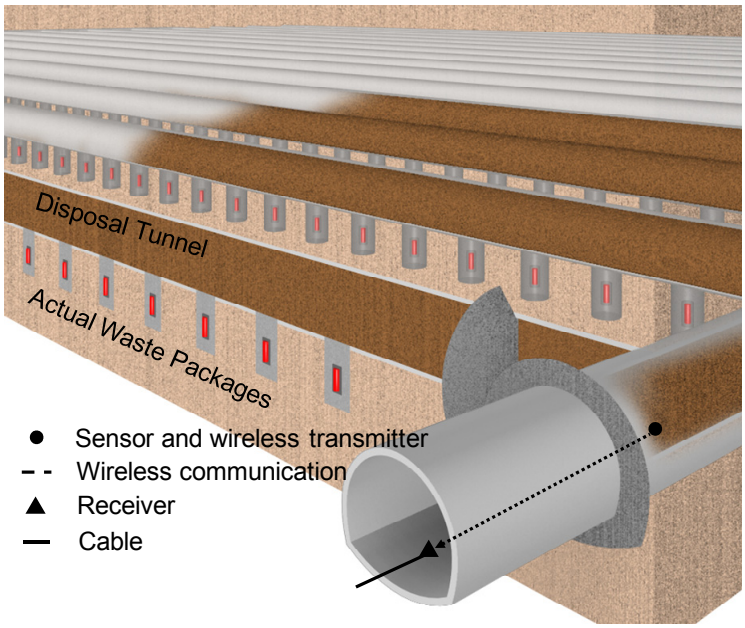


図 3.4.3-3　無線による人工バリアのモニタリング（処分場）

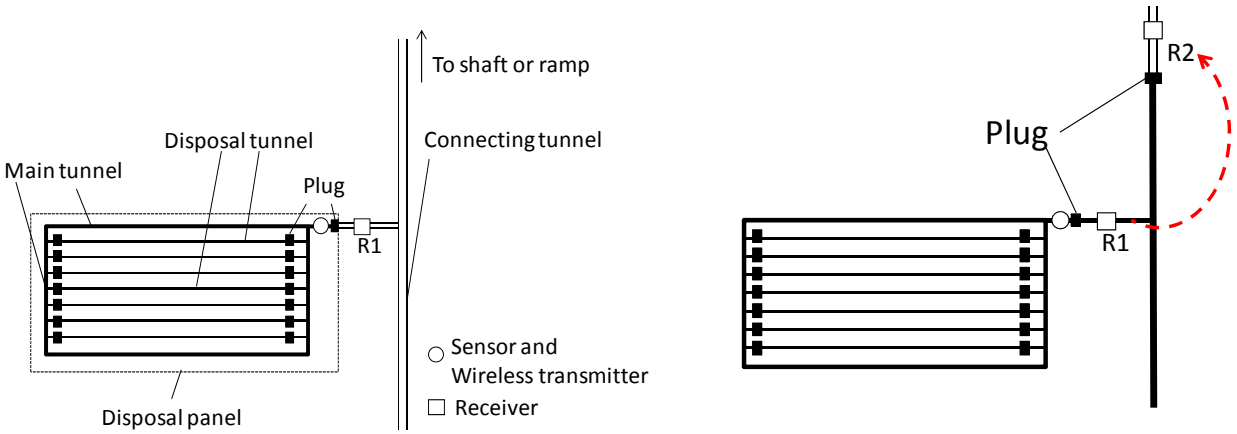


図 3.4.3-4　無線による人工バリアのモニタリング（処分場における無線中継)、左：処分パネルの埋め戻し、右：連絡坑道埋め戻しに伴う無線中継

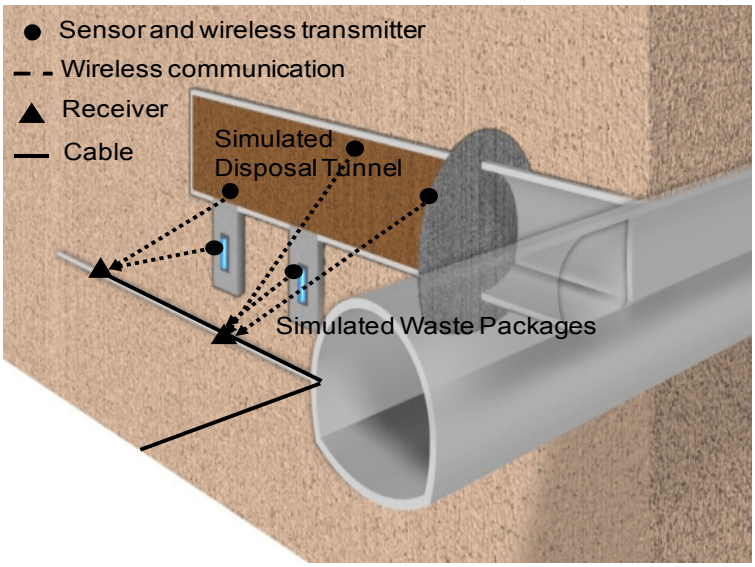


図 3.4.3-5　無線による人工バリアのモニタリング（地下調査施設）

(4)　処分坑道、処分孔におけるモニタリングの可能性

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ってはいけない。」ことをモニタリングの実施における制約条件の基本事項として、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、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可能性が存在する。

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。

フランスにおいては、法令により、1 世紀以上の期間、可逆性を維持しなければならないことが規定されている。このため、ANDRA による地層処分のコンセプトは廃棄体の回収可能性を重視したものとなり、また、回収可能性を維持した管理プロセスに情報を与えるためのモニタリングが計画されている。

MoDeRn（2010）[12]では、Andra は以下の要件に沿った処分場の構成要素に基づくレイアウトを開発するとしている。

- 連続した段階的建設と各処分場モジュールの柔軟な管理を可能にするモジュール方式
- 耐久性の高い処分構造（アクセス坑道、処分セル、廃棄物処分容器）
- 時間的柔軟性のある閉鎖決定までの連続的段階の特定
- 廃棄物定置後の処分セルの埋め戻しが不要な廃棄体の回収可能性を容易にするような設計オプションの採用（岩石による支持、廃棄体周囲に残る空隙の最少化、廃棄物定置後の処分セルの埋め戻しの不要化、等）
- 処分場と廃棄物の継続的管理を支えるモニタリングの規定（一連の閉鎖段階を通じた代表的構造物の監視）

高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体、HLW）及び使用済み燃料（SF）の処分セル（図3.4.3-6）は、何れも堆積岩中に水平坑道を掘削し、坑道内に鋼製スリーブを設置、このスリーブ内に複数の廃棄体を定置するコンセプトとなっている。HLW 及び SF の処分セルの大きさは以下の通りである。

- HLW 処分セル：水平坑道、片側開口、0.7m 径、40m 長
- SF 処分セル：水平坑道、片側開口、 2.6～3.3m 径、46m 長

使用済み燃料の処分セルは図 3.4.3-7 のように鋼製スリーブ外側にベントナイトを設置し、さらにその外側に地下水が侵入できる穴をあけた鋼製ライナーを設置している。閉鎖時には、処分坑道は鋼製プラグ（遮へい用、操業期間中はアクセス可能）、低透水性ベントナイトシール、コンクリートプラグで密閉される。

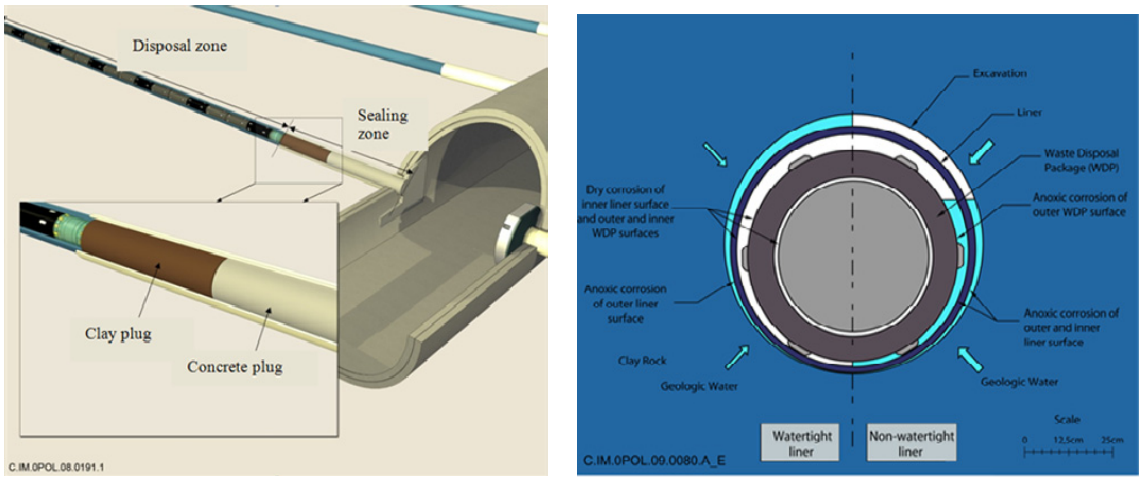


図 3.4.3-6　Andra の HLW の処分に対する人工バリア構成[26]

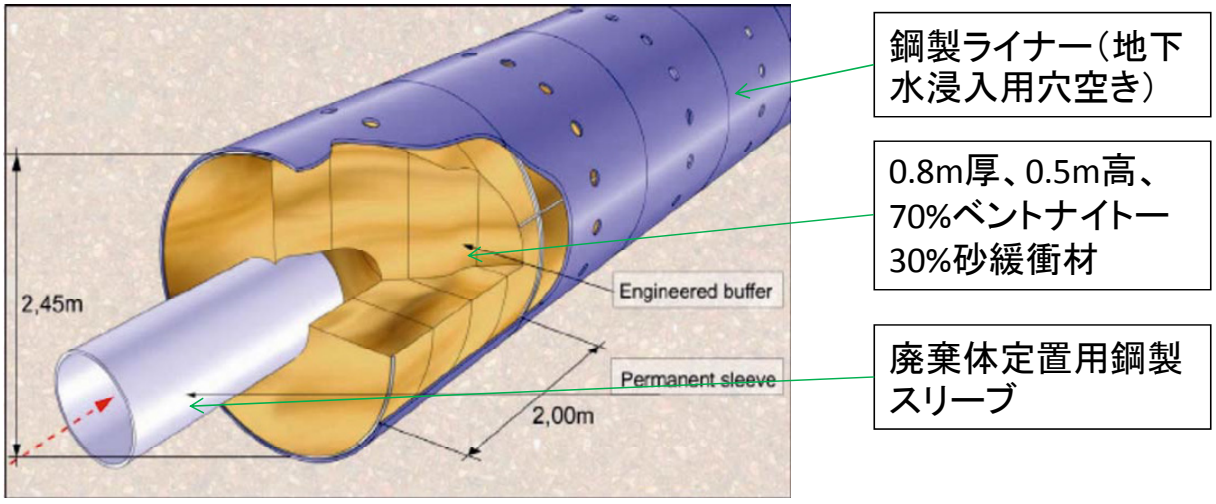


図 3.4.3-7　Andra の使用済み燃料の処分に対する人工バリア構成（ESDRED, 2008)[41]

ANDRA は Dossier2005[42]において処分場のモニタリング（観察と監視）の理由として次の 2 項目を挙げている。(i) 処分場の可逆的管理の助けとなる、(ii) 運用面の安全管理に貢献する、そして長期的に (iii) 地質調査に関する追加情報を提供する。このうち、(i) のモニタリングにより得られた情報は、(a) 次の段階に移ることの妥当性の評価、(b) パッケージの回収能力の評価、(c) 建設すべき次期構造物に関する特に土質工学面からの設計変更の準備に貢献する。としている。主なモニタリング項目はセル内とその周辺における熱領域の変化、岩盤からセルの被覆への応力の変化、金属部材の腐食に影響するセル内雰囲気の変化である。

処分場におけるモニタリング機器の計装について、MoDeRn ケーススタディー報告書[26]において処分パネル内の処分セルを「ウィットネス」構造物、「カレント」構造物、標準的なセル、犠牲セルの 4 種に分け、モニタリング機器の計装密度を変えるという方

法を示している。それぞれの種類の処分セルの説明を以下に示す。また、処分パネル内での配置案を図 3.4.3-8 に示す。

・「ウィットネス」構造物は、最初に建設される構造物の中から選択される。そこには、モニタリング目標を達成するためのあらゆる機器が備えられなければならない。最初の建造物の横にあるウィットネス構造物は、代表的なモニタリングエリアを確保できる特別な位置のために選択される。「ウィットネス」構造物の計装例を図 3.4.3-9 に示す。この種類のセルでは径が比較的小さいセルにモニタリング機器を計装するために、(i)セルライナでのモニタリング装置の設置、(ii)ボーリング孔（セルに対し平行方向または（交差通路が近くにある場合には）鉛直方向）を付近に設置することによる岩石挙動のモニタリング、(iii)モニタリング機器のシーリングプレートへの移動等が検討されている。
・「カレント」構造物は、計器の量がより少なく、「ウィットネス」構造物との比較によりモニタリングされる。
・標準的なセルは、一般に計器を備えない。そこには、操業の安全性に不可欠な機器のみが収納される。それについては、時折検査・制御が行われる。
・モニタリング技術がすべてのモニタリング目標を満たすわけでない場合には、目視検査、破壊分析および建設材料のサンプリングの実施を可能にするために、一部の「犠牲セル」(図 3.4.3-10)の HLW キャニスタについて真の回収試験を行うことも計画される。これらのセルは、試験プロセスによりその構成要素性能が撹乱される可能性があるために、解体される計画である。犠牲セル内部には腐食速度の計測のための試験片も収納され、試験片の回収と計測が実施される。

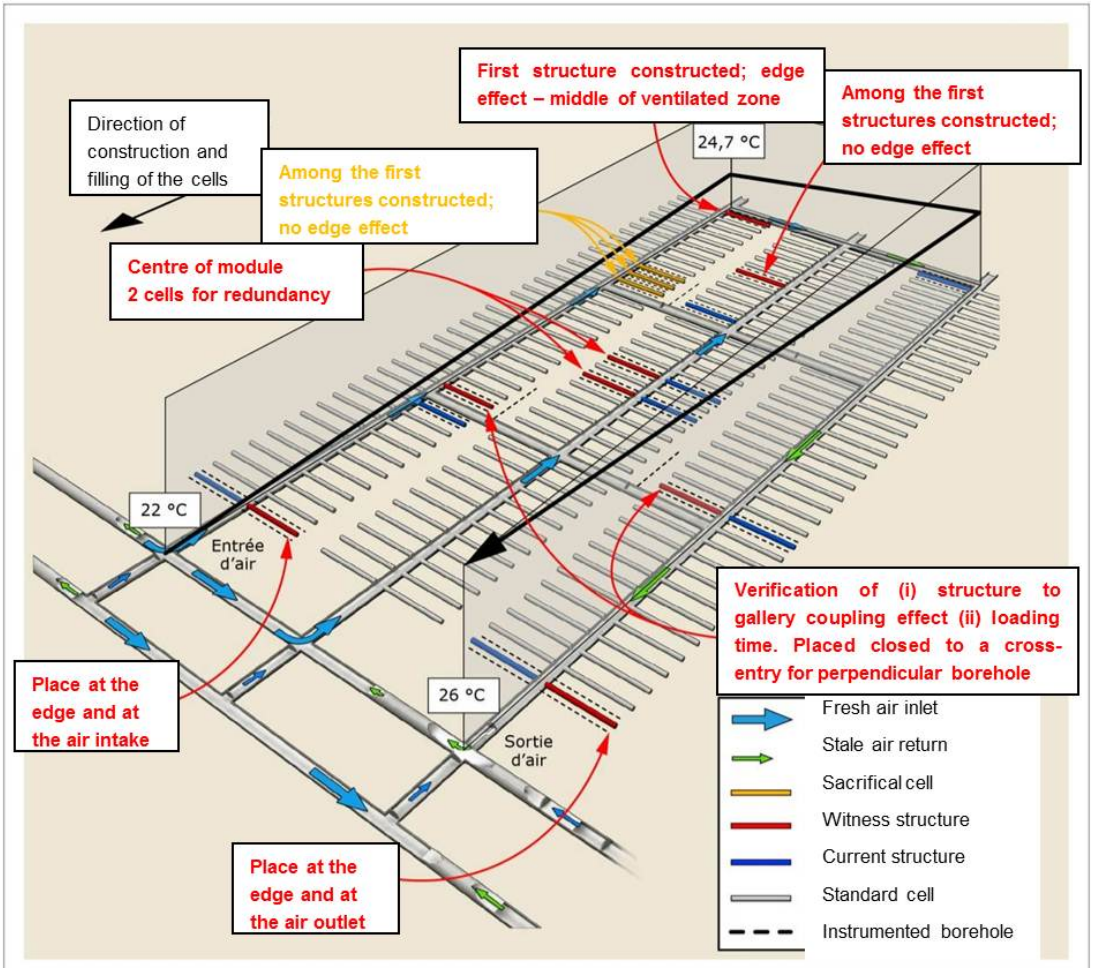


図 3.4.3-8　ANDRA によるモニタリング機器を計装した処分セルの配置例[26]

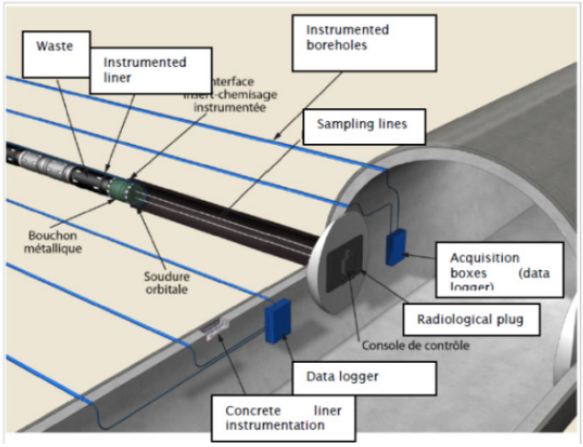


図 3.4.3-9　ANDRA による「ウィットネス」構造物のモニタリング機器の計装例[26]

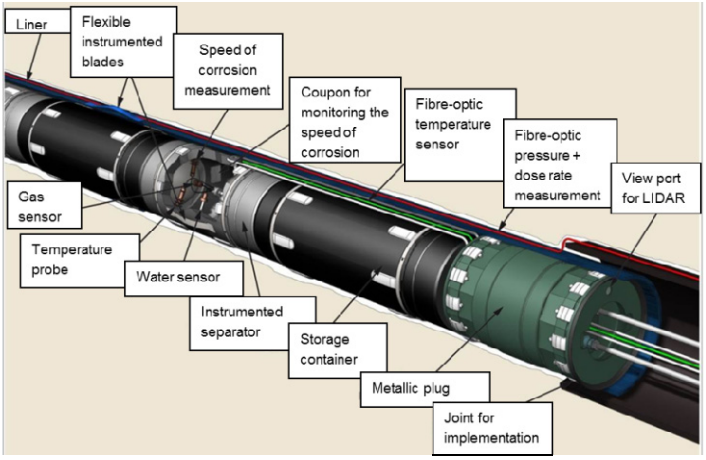


図 3.4.3-10　ANDRA による「犠牲セル」のモニタリング機器の計装例[26]

上記の方法は、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。

また、ANDRA による処分コンセプトでは坑道内に鋼製スリーブを設置し、このスリーブ内に複数の廃棄体を定置するコンセプトとなっているため、鋼製スリーブに沿ってモニタリング機器やケーブルを配置することが可能であり、潜在的な水みちの形成の可能性に与える影響は小さいものと言える。一方で、わが国の処分コンセプトでは廃棄体近傍にモニタリング機器を配置する場合、緩衝材中にセンサやケーブルが置かれ、潜在的な水みちの形成の可能性が大きいものと言える。このため、モニタリング終了後のモニタリング機器の撤去と人工バリアの再構築や、模擬廃棄体の使用、潜在的水みちの形成を防ぐモニタリング手法の利用等を検討すべきと考えられる。

処分場にて人工バリア及びニアフィールドのモニタリングを実施する場合に、モニタリング機器の設置による潜在的水みちの形成を抑制するためには下記の手法が考えられる。

・地中無線通信技術を適用したモニタリング
・物理探査的手法による非侵入型のモニタリング

このうち物理探査的手法による非侵入型の技術による廃棄体近傍のモニタリングについては、MoDeRn におけるグリムゼル地下研究所での試験[22]において、地震波トモグラフィー技術が検討されているほか、Sato and Takayama (2007)[43]及び Takayama and Sato (2007) [44]による光電界センサを利用したイメージングレーダー等も可能性があるものと考えられる。

地中無線モニタリング技術はモニタリングデータを無線にて送信するため人工バリア等を貫通するケーブルを必要とせず、潜在的な水みちの形成を抑制できる技術である。土木分野等で実績を持つ技術であり、地層処分特有の環境条件の克服することにより適用が可能となるものと考えられる。地層処分での適用においては、人工バリア等をモニタリングする必要がある場合に有効であるのみならず、処分坑道や人工バリアでのモニタリングを実施しない場合にも、主要坑道や連絡坑道のモニタリングにおいて地中無線モニタリング技術を適用すると、図 3.4.3-3 及び図 3.4.3-4 に示したように、埋め戻しが行なわれプラグが設置された後もモニタリングが可能となる。

ANDRA では、処分坑道に鋼製プラグ、低透水性ベントナイトシール、コンクリートプラグを設け密閉した後のモニタリングについて、無線通信技術を適用するための研究を原環センターと共同で実施している。このオプションでは低透水性ベントナイトシールにケーブルを貫通させずにモニタリングすることとしており（図 3.4.3-11）、この部分の水密性を特に重視しているものと考えられる。いくつかのケーブルがセンサと無線送信機を接続するために鋼製プラグを貫通することになるが、配線の向きを変えて接続することで、放射線遮へい機能を損なう可能性を小さくしている。

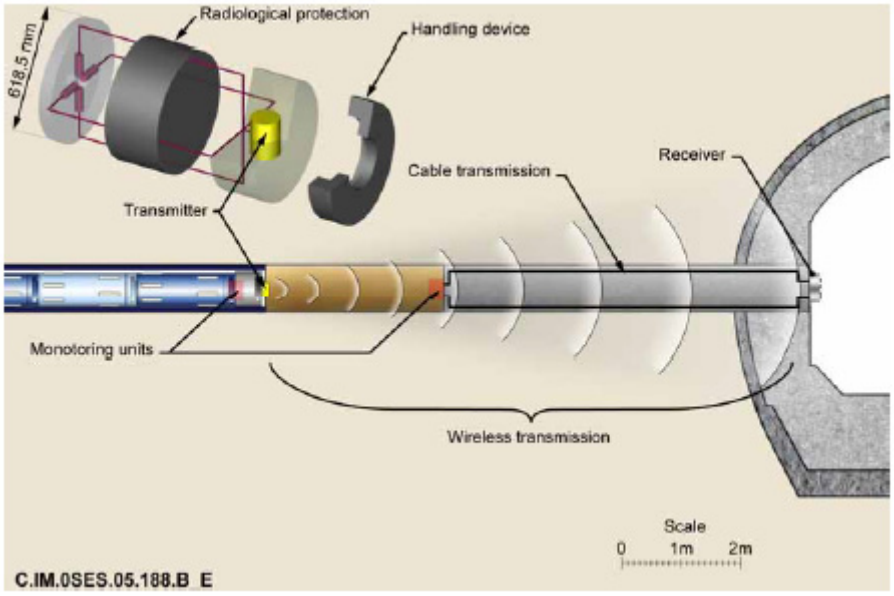


図 3.4.3-11　HLW セルのプラグを通じた無線送信システム、研究中（Dossier2005）[42]

地中無線モニタリング技術を適用したモニタリングについて、ドイツの DBE-TEC は岩塩中の一つの長い処分孔に複数の廃棄体を竪置きする処分コンセプトにおいて、廃棄

体の一つをモニタリング用のユニットに置き換え、この中に複数のセンサと地中無線送信装置をセット（図 3.4.3-12）する考えを示している[26]。このような廃棄体そのものをモニタリング用のユニットに置き換えるという手法は、わが国における竪置きあるいは横置きの処分コンセプトにおいても適用できる可能性があるものと考えられるが、この場合、モニタリング用ユニットは発熱しないため、実廃棄体近傍とは異なった条件でのモニタリングとなることに留意が必要となる。

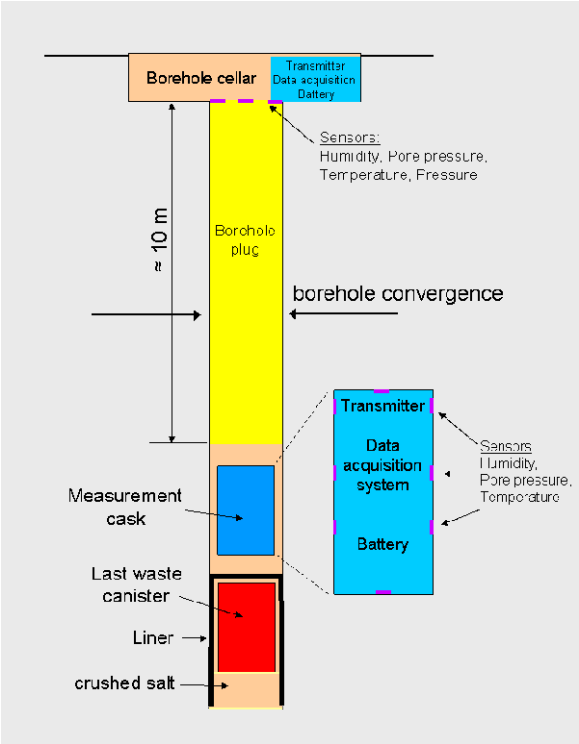


図 3.4.3-12　DBE-TEC による地中無線モニタリングのコンセプト[26]

地中無線通信技術を適用する場合、現在のところ以下の様な課題が存在するものと考えられる。

・廃棄体近傍の高温環境において、無線送信装置（特にバッテリー）が必要とされる期間、機能を維持できるか。

・廃棄体近傍の放射線に対して、無線送信装置が必要とされる期間、機能を維持できるか。

このような課題を克服し、実廃棄体近傍のモニタリングを実施する場合の機器配置は、例えば、処分坑道近傍に設けたボーリングを利用したものとなる可能性がある（図 3.4.3-13）。

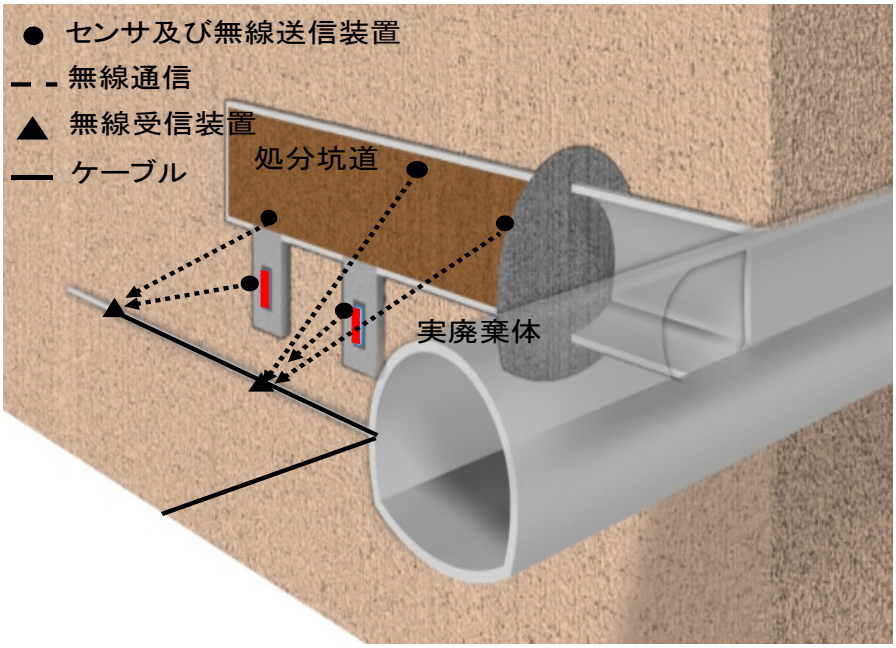


図 3.4.3-13　地中無線による廃棄体近傍のモニタリング概念図

(5)　モニタリングにより性能確認を行う場合のオプションの比較

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を列挙すると以下の様になる。また、その長短を比較すると表 3.4.3-1 の様に示すことができる。

・模擬廃棄体の使用
（実廃棄体と同じ材料的性質、質量、寸法、発熱量を持つヒーター等）
-地下特性調査施設で実施
-処分パネルで実施
・実廃棄体を用いたパイロット施設での実施
・処分場にて、地質学的・水理学的不均一性を考慮してモニタリングを実施
-実廃棄体近傍の人工バリアをモニタリング、終了後モニタリング機器を回収して人工バリアを再構築
-模擬廃棄体を設置した人工バリアをモニタリング
-地中無線、非侵入型のモニタリングの利用
-廃棄体を無線モニタリング装置に置き換えてのモニタリング

表 3.4.3-1　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。 ×：地質学的・水理学的不均一性への対処が困難、放射線の影響はモニタリング出来ない。	
パイロット施設		○：放射線の影響もモニタリング可 ×：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、地質学的・水理学的不均一性への対処が困難。
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。地質学的・水理学的不均一性への対処が可能 ×：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、地質学的・水理学的不均一性への対処が可能。 ×：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。

3.4.4　性能確認モニタリングの結果の反映に関する検討

人工バリアの性能確認モニタリングを実施し、モニタリング結果が得られ、その結果が予め予測した範囲を逸脱した場合、何らかの対応が必要となる。その様な対応を引起すモニタリングデータの閾値をトリガー値と呼ぶ。

トリガー値の設定方法について、3.3.2(3)において MoDeRn（2013）[28]における検討を述べた。この検討から、トリガー値を設定するためには、あるモニタリングパラメータが安全評価や性能評価に用いられるモデルにおいてどのような役割を持つか、その様なモデルからモニタリングパラメータはどのような範囲に収まるものと帰結できるかを、予めマッピングする必要があることが分かる。

また、トリガー値の役割とトリガー値を超えたモニタリング結果を得た場合について MoDeRn（2013）[28]では、図 3.3.2-3 に示したようなリスクとの関係による対応を述べ

ている。

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と、比較の結果による対応について図示すると図 3.4.4-1~図 3.4.4-4 の様になるものと考えられる。これらの図では縦軸に人工バリアの構成要素（緩衝材など）の設計、製作、施工により確保された品質、またはこの品質により達成されるバリアとしての性能に関するパラメータの値、人工バリアが現地に施工された時点からの時間を取っている。人工バリアの性能について記述したモデルによる、品質や性能に関するパラメータの予測値は時間の経過とともに低下し、かつその予測値に対する不確実性が大きくなる。このため予測値の幅は経過とともに大きくなりつつ全体として低下していくものと考えられる（図 3.4.4-1~図 3.4.4-4 の黒線で示した幅）。但し、この品質・性能に関するパラメータの値は、モデル等によるパラメータの変化に関する予測により、人工バリアが性能を維持すべき期間内においては、ある許容値を上回るように設定されているものとする。このような条件の下、閉鎖前のモニタリング期間において、このパラメータがモニタリングされ、モニタリング結果はモデルで予測されたパラメータの値と比較される。

図 3.4.4-1 において、このパラメータのモニタリング結果は事前に予測された値の幅に収まっているものとする。この時モニタリング結果は、このパラメータに関係する品質や性能が確保されており、また、性能を維持すべき期間中は、ある許容値を上回る値の幅にて推移するという予測に対して追加的な根拠をもたらす。また、モニタリング結果はパラメータの予測モデルの精度の向上（不確実性の低減）に寄与し得るものと考えられる（赤線で示した幅）。モニタリングは予定された期間の終了まで継続され、モニタリング結果は新たな予測モデルと比較される。

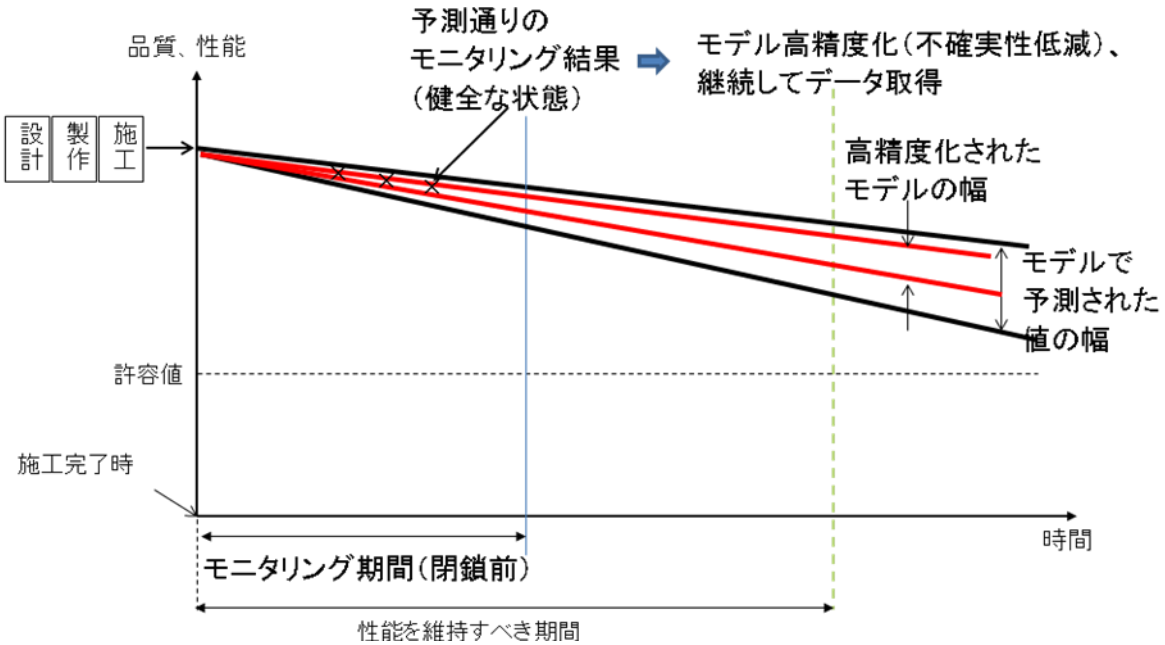


図 3.4.4-1　モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（1/4）

図 3.4.4-2 において、モニタリング結果が事前に予測されたパラメータの幅を下回り、かつ許容値は上回っているものとする。この時モニタリング結果は、現時点ではこのパラメータが示す人工バリア構成要素の品質・性能は許容できる状態であるが、性能を維持すべき期間のある時点で許容値を下回る可能性があることを示唆する。このため、モニタリング結果を踏まえたモデルの見直しが行なわれ、その結果、性能を維持すべき期間内に許容値を下回ることは無く、また処分の安全性に影響しない（リスクに関係しない）と予測されたものとする。この場合、修正されたモデルを確認するため、追加的なモニタリングが実施されるものと考えられる。

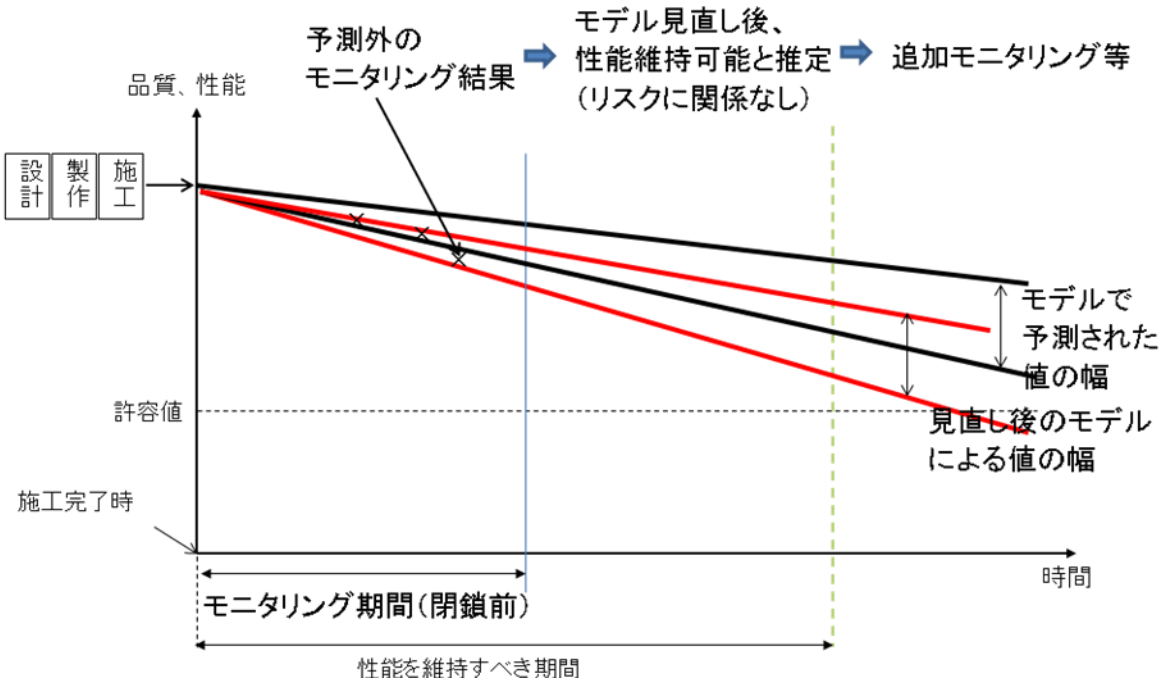


図 3.4.4-2 モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（2/4）

図 3.4.4-3 において、図 3.4.4-2 において、モニタリング結果が事前に予測されたパラメータの幅を下回り、かつ許容値は上回っているものとする。この時モニタリング結果は、現時点ではこのパラメータが示す人工バリア構成要素の品質・性能は許容できる状態であるが、性能を維持すべき期間のある時点で許容値を下回る可能性があることを示唆する。このため、モニタリング結果を踏まえたモデルの見直しが行なわれ、その結果、性能を維持すべき期間内に許容値を下回る可能性があり、かつ処分の安全性に影響し得る（リスクに関係する）と予測されたものとする。この時、リスク管理として、工学的対策や廃棄体の回収などのリスク管理オプションが選択されることとなるものと考えられる。

なお、性能を維持すべき期間内に許容値を下回る可能性があるものの、他のバリアにて十分に安全が確保される等により処分の安全性に影響しない（リスクに関係しない）と予測されることもあり得る。この場合には、追加的モニタリングは実施されるものの、更なる対策は取られない可能性もあるものと考えられる。

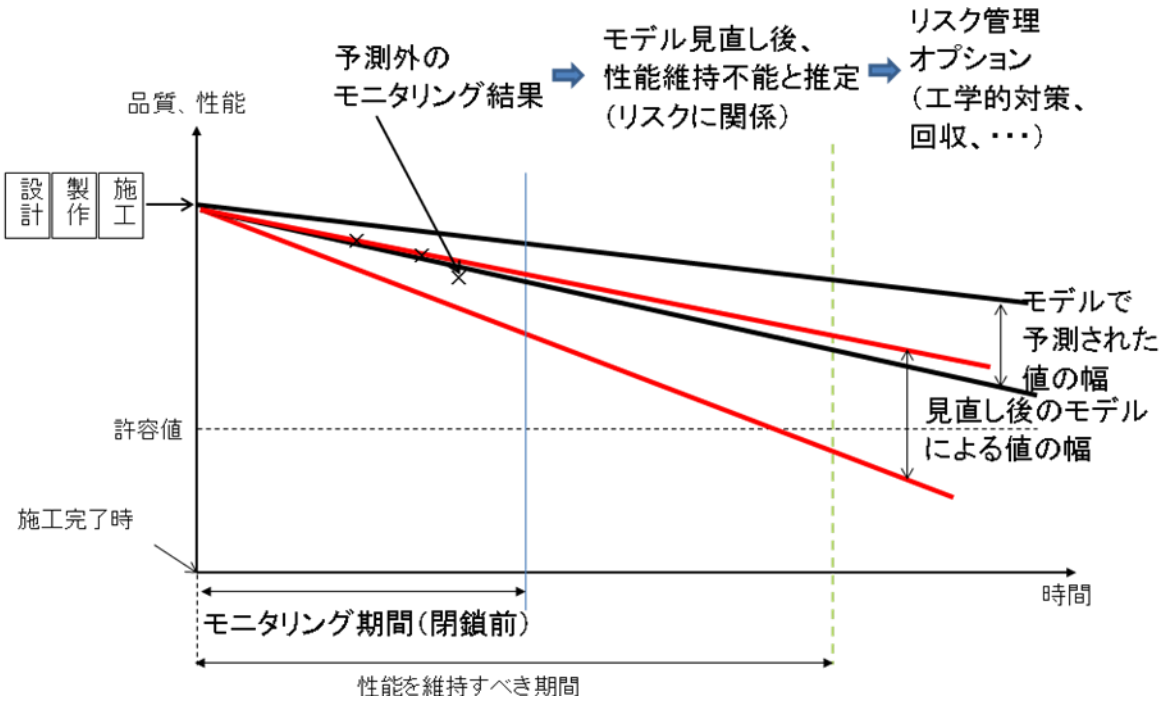


図 3.4.4-3 モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（3/4）

以上の様な人工バリア構築後の性能を予測するモデルのモニタリング結果による確認に関して考えられる問題点として、モニタリング可能な期間と人工バリアの構成要素が性能を維持すべき期間との、時間の長さに大きな差がある（図 3.4.4-4）ことが指摘される。

このためモニタリング結果は、モデルが予測する人工バリア構成要素の挙動のうち、ごく初期の段階と比較されることとなる。このことから、モニタリングにより確認すべき対象としては、ある人工バリア構成要素の性能のうち、初期の段階での挙動が、その後の性能に大きく影響するものを選択することが効果的であると言える。逆に、初期の挙動がバリア性能に大きな影響を与えないようなパラメータをモニタリングした場合には、挙動を予測するモデルに対して、これを確認し信頼性を（ある程度）強化する結果となるものと考えられる。

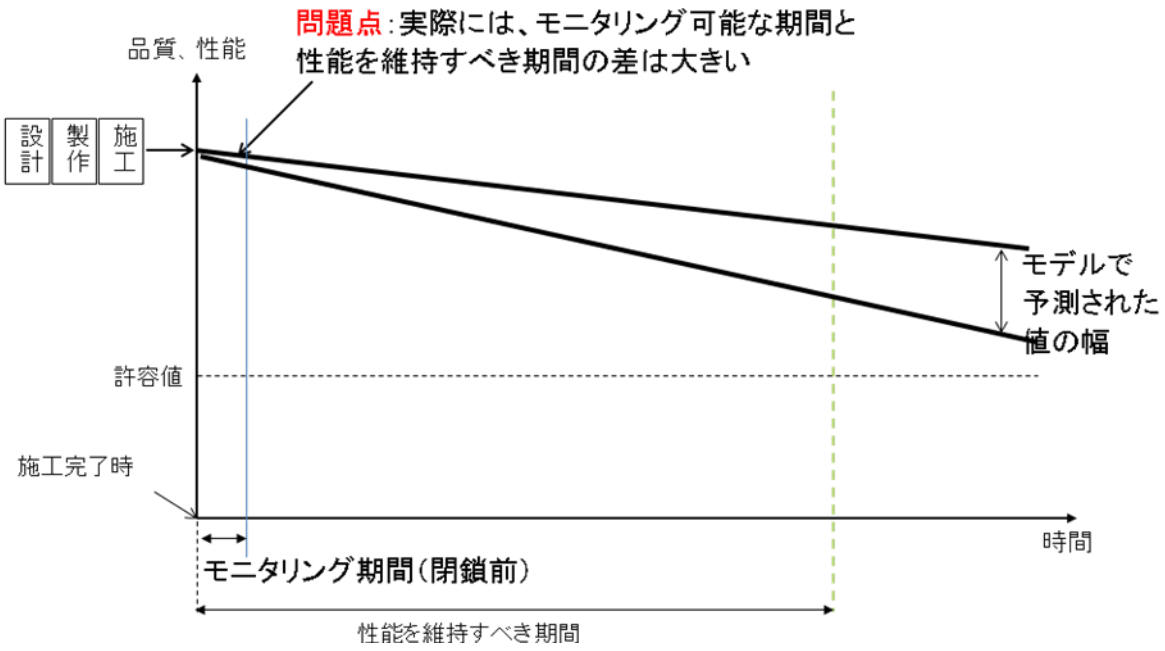


図 3.4.4-4 モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（4/4）

3.4.5 まとめと今後の課題

第 3 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、はじめに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、本検討で対象とするモニタリングについて説明した。次に、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）について検討する国際共同研究 MoDeRn の概要を説明し、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。これらの

検討を踏まえて、人工バリアを対象とした性能確認モニタリングについて、制約条件等を示したうえで、どのような実施のオプションが有り得るかについて考察を行った。

地層処分モニタリングの目的

地層処分のモニタリングについては多様な分類が有り得るが、ここでは MoDeRn の成果に倣い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）、操業安全性、環境影響、核物質保障措置 とした。また、回収可能性に関しては処分システムの期待/予測された挙動の検証/確認に関するモニタリングと操業安全性に関するモニタリングが関連するという考えを示した。

MoDeRn プロジェクト

MoDeRn プロジェクトは本年度で終了し、複数の報告書が順次公開されている。このうち、モニタリングの戦略に関する主要な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。この報告書では、先ず MoDeRn における検討では処分システムの期待/予測された挙動の検証/確認に関するモニタリングに重点を置くことを示し、その理由について説明した。次に、このようなモニタリングを検討する際のレファレンスとなる検討手順（ワークフロー）を示し、その各段階について詳細に説明した。また、モニタリングからのデータによる意思決定プロセスについて検討し、ワークフローを示すとともに、モニタリングの社会的側面について考察を行なった。

人工バリアの性能確認モニタリングの検討

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ものと考えられる。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、人工バリアの性能確認に関するモニタリングパラメータについて、緩衝材を事例として検討を行った。パラメータの選定は、昨年度までに検討したワークフローを一部改編し、安全機能と技術要件、緩衝材に関係する FEP、FEP のうちモニタリング対象として重要なものの選定、重要な FEP に関係するパラメータの選定、さらにこのパラメータを直接または間接的に示しモニタリング可能なパラメータの選定という手順で行った。本年度の検討は試行であり、今後、安全機能や技術要件と FEP の関係、FEP とモニタリングパラメータの関係等について精査する必要がある。

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。

しかしながら、モニタリングが可能な処分場の閉鎖前の期間と、人工バリアの構成要素が性能を維持すべき期間の長さには大きな隔たりがあり、1000 年以上の期間の人工バリアの状態に関する予測モデルに対し、数 10 年間のモニタリング期間の結果を比較することとなるため、人工バリア構築後の数 10 年間の挙動がその後の状態変遷に大きな影響を与え得るパラメータを特定し、モニタリング対象とする必要がある。

性能確認モニタリングに関する課題

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ー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、MoDeRn プロジェクト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、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する必要がある。

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。しかしながら、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ため、入手可能な情報に基づいた検討を実施する必要がある。その方法として、処分システムの構成要素の安全機能に基づく検討すべきものと考えられる。具体的には、安全機能、技術要件、FEP について調査を行い、これらの相互関係の関係を示す必要がある。さらには、これらの FEP のうち重要なものは何か、モニタリングにより確認すべきものは何かを抽出する必要がある。モニタリングにて確認すべき重要な FEP については、技術的にモニタリング可能なパラメータとの関係を明らかにする必要がある。

このようにして特定されたパラメータをモニタリングすることにより、このパラメータに関係付けられた、人工バリア構成要素の安全機能や性能に関する仮定やモデルの妥当性を確認することとなる。このため、このような仮定やモデルについて十分に理解しなければ、モニタリングパラメータの持つ意味を示すことができず、また、パラメータの値がどの様な範囲にあるべきかを示すことができない。人工バリアの性能確認モニタリングにおいては、人工バリアの構成要素の安全機能や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を行うこととなるが、このような比較に

おける課題として、人工バリア構築後の、数10年間のモニタリング可能な期間での挙動が、その後の状態変遷に大きな影響を与え得るパラメータを特定し、モニタリング対象とする必要があることが挙げられる。さらに、人工バリアの挙動に関する仮定やモデルは、室内試験等において取得される情報に基づいて構築されることから、具体的な試験内容を十分に検証できる事象を選定する必要がある。

このような事象としては、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」において検討を実施する、緩衝材の再冠水時の膨潤挙動が挙げられ、先ずはこの事象を中心的な課題とすべきと考えられる。

本事業における成果としては、これらの検討とモニタリングの技術的実現性に関する検討を反映して、地層処分におけるモニタリング、特に性能確認に関するモニタリングについて、いつ、何処で、どのようにしてモニタリングを実施すべきか、モニタリング結果をどのように反映すべきかを示すことにより、地層処分の信頼性向上に関するモニタリングの役割を提示するとともに、具体的なモニタリング計画を例示する計画である。特に、精密調査段階の後半における地下調査施設での実証試験におけるモニタリングにて確認される事項を明確にし、これにより、事業の許認可の後、処分場の建設段階、操業段階にてモニタリングにより確認する事項は何かを提示することに重点を置く。

その他のモニタリングに関する課題

処分システム工学確証技術開発「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ており、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為、当該研究と情報交換を実施しながら検討を行う必要がある。また、廃棄体の回収に関する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」における回収維持期間等の検討内容を考慮し、回収可能性の維持に関るモニタリング、回収の起因事象に関るモニタリングについて検討を実施する必要がある。前者は操業安全に関するモニタリングと密接に関係し、後者は性能確認に関するモニタリングに密接に関係する。これらに加え、制度的管理におけるモニタリングの役割も検討する必要がある。

第３章参考文献

[1] MoDeRn HP: 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] IGD-TP ホームページ、http://www.igdtp.eu/

[4] International Atomic Energy Agency: Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208, (2001).

[5] European Commission: Final Report, Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste, Contract No. FIKW-CT-2001-20130, European Commission, (2003).

[6] Hansen, F. D. and S.W. Wagner, Confirmation Monitoring of Repositories in the United States. SAND2012-10498C. Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste - Conference and Workshop, Luxembourg, (2013) .

[7] Posiva, Programme of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of the ONKALO. Posiva Report 2003-05, (2003).

[8] OPG, An Approach to Long-term Monitoring for a Nuclear Fuel Waste Repository. OPG Report No. 06819-REP-01200-10106-R00, (2003).

[9] SKB, Monitoring during the Stepwise Implementation of the Swedish Deep Repository for Spent Fuel. SKB Report R-04-13, (2004).

[10] Sandia, Performance Confirmation Plan. TDR-PCS-SE-000001 REV 05 AD 01. Las Vegas, Nevada: Sandia National Laboratories. Reference: SNL 2008, ACC: DOC.20080227.0003; DOC.20080324.0002, (2008).

[11] MoDeRn: National Monitoring Contexts - Summary Report, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2011)

[12] MoDeRn: National Monitoring Contexts - Country Annexes, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2011)

[13] 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).

[14] 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).

[15] RWMC, Monitoring of Geological Disposal - Current Status and Technical Possibilities. RWMC Technical Report RWMC-TRE-04004, (2005).

[16] MoDeRn: Monitoring Developments for safe Repository operation and staged

closure MoDeRn,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2009)
[17] MoDeRn: Site Plans and Monitoring programmes report,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2010)
[18] MoDeRn: Monitoring Technologies Workshop Report 7-8 June 2010 - Troyes (France),
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2010)
[19] MoDeRn: Technical Requirements Report,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2011)
[20] MoDeRn: Expert Stakeholders Workshop report,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2011)
[21] MoDeRn: Monitoring the Safe Disposal of Radioactive Waste: a Combined Technical and Socio-Political Activity,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2012)
[22] MoDeRn: Seismic Tomography at Grimsel Test Site,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[23] MoDeRn:Disposal cell monitoring system installation and testing demonstrator in Bure Underground Research Laboratory,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[24] MoDeRn:State of Art Report on Monitoring Technology,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[25] MoDeRn:Wireless sensor network demonstrator report,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[26] MoDeRn:Case study final report,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[27] MoDeRn:Wireless Data Transmission Demonstrator: from the HADES to the surface,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[28] MoDeRn:MoDeRn Monitoring Reference Framework report,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[29] MoDeRn:Development Report of Monitoring Technology,
http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)
[30] RWMC and Nirex, International Workshop on Repository Monitoring Strategies in Geneva, 21-23 February 2007, CD of Workshop Proceedings, Final Version, (2007).
[31] NRC, One step at a time - The staged development of geologic repositories for high-level radioactive waste. The National Academies Press, Washington, D.C., (2003)
[32] Petts, J. and Leach, B., Evaluating Methods for Public Participation: Literature Review. Environment Agency R&D Technical Report , Environment

Agency Bristol(2000).

[33] International Atomic Energy Agency: Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series, Specific Safety Requirements, No. SSR-5 (2012)

[34] International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, Safety Standards Series No. WS-R-4 (2006).

[35] 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.

[36] 田辺博三，江藤次郎，鈴木圭（2012)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

[37] 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).

[38] 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).

[39] 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).

[40] 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).

[41] ESDRED (2008)：Buffer Construction Technology for Horizontal Design Concepts. Website at URL, http://www.esdred.info/module1.htm

[42] Andra (2007)：Dossier 2005 Argile, Tome Architecture and management of a geological repository

[43] Sato and Takayama (2007)：A Novel Directional Borehole Radar System Using Optical Electric Field Sensors, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 45, NO. 8, AUGUST 2007

[44] Takayama and Sato (2007)：A Novel Direction-Finding Algorithm for Directional Borehole Radar, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL. 45, NO. 8, AUGUST 2007

[45] Posiva(2013):Monitoring at Olkiluoto-a Programme for the Period Before Repository Operation, Posiva 2012-01

[46] 核燃料サイクル開発機構(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊3地層処分システムの安全

評価
[47] SKB, 2010, FEP report for the safety assessment SR-Site, SKB TR-10-45

第４章　地層処分モニタリング技術メニューの整備

4.1 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。

昨年度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、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・再整理した。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。

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 技術メニューの運用再開

② 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

③ 技術メニュー搭載情報の拡充

4.2　技術メニューの運用再開

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を、新たに選定したサーバに再現し、運用を再開可能な状態とした。具体的には、以下の事項を実施した。

① 新規サーバ管理会社の選定

② 新規サーバへの地層処分モニタリング技術メニューの再現

③ 新規サーバ上での地層処分モニタリング技術メニューの動作確認

4.2.1　新規サーバ管理会社の選定

地層処分モニタリング技術メニューを運用するサーバとしては、地層処分モニタリング技術メニューを運用するために必要となるソフトウェアである、Apache、PostgreSQL、PHP（拡張ライブラリ、テンプレートエンジン（Smarty）を含む）が利用できることが必要になる。

また、サーバ管理会社が提供しているサーバの利用方法として、以下の 3 形態があげられる。

- 1 台のサーバを複数ユーザで利用する方法（共有サーバ）
- 1 台のサーバを 1 ユーザで利用する方法（専有サーバ）
- 1 台のサーバ上に複数の仮想サーバを稼働させ、1 台の仮想サーバを 1 ユーザで利用する方法（仮想サーバ）

上記のうち、共有サーバは、1 台のサーバを複数ユーザで利用するため、利用できるソフトウェアに制限があり、専有サーバは 1 台のサーバを 1 ユーザで専有するため、費用が高くなる。このため、新規サーバ運用会社として、仮想サーバを運用していることを条件に加え選定を行った。

ここで、新規サーバとして必要な性能は以下の通りである。

- OS：RedHat Linux 4.x 以上（CentOS を含む）
- メモリ：4GB 以上

・ ハードディスク：400GB 以上

上記条件を満足する主なサーバ管理会社として、さくらインターネットを選定した。

4.2.2 新規サーバへの地層処分モニタリング技術メニューの再現

地層処分モニタリング技術メニューの動作で必要となる Apache、PostgreSQL、PHP（拡張ライブラリ、Smarty）をインストールし、必要となる設定を行うことにより、新規サーバに地層処分モニタリング技術メニューを移植した。

なお、マニュアル作成時点以降、各ソフトのバージョンアップが行われている。インストールした各ソフトウェアのバージョンを以下に示す。

表 4.2.2-1 インストールした各ソフトウェアのバージョン

ソフト名	インストールバージョン	マニュアル記載バージョン
Apache	2.2.15	2.0.52
PostgreSQL	8.4.18	8.4.2
PHP	5.3.3	5.2.6

また、廃止前に取得されていたバックアップを元に、地層処分モニタリング技術メニューの登録情報（コンテンツ）を新規サーバ上に復元した。

新規サーバに移植した地層処分モニタリング技術メニューへは、以下の URL にアクセスするよう設定を行った。

http://monitoring-tech.rwmc.or.jp/

4.2.3 新規サーバ上での地層処分モニタリング技術メニューの動作確認

新規サーバに移植した地層処分モニタリング技術メニューの動作確認を、それぞれの機能に対して実施した。以下に、地層処分モニタリング技術メニューの機能の一覧と、各機

能の動作確認の結果をまとめる。

表 4.2.3-1　地層処分モニタリング技術メニューの各機能の動作確認結果

機　能		画　面	動　作
大分類	小分類		
システム全般	起動	図 4.2.3-1	良好
	ログイン	図 4.2.3-2	良好
技術メニュー	テーブルビュー	図 4.2.3-3	良好
	ツリービュー（簡易）	図 4.2.3-4	良好
	ツリービュー（詳細）	図 4.2.3-5	良好
技術情報データベース	技術情報 DB 内検索	図 4.2.3-6	良好
	WEB 全体検索	図 4.2.3-7	良好
用語説明		図 4.2.3-8	良好
コメント		図 4.2.3-9	良好
リンク		図 4.2.3-10	良好
ライブラリ		図 4.2.3-11	良好
ヘルプ		図 4.2.3-12	良好
管理者メニュー	ユーザ登録	図 4.2.3-13	良好
	ユーザ更新／削除	図 4.2.3-14	良好
	リンク情報編集	図 4.2.3-15	良好
	ライブラリ情報編集	図 4.2.3-16	良好
	コメント検索	図 4.2.3-17	良好
	編集履歴照会	図 4.2.3-18	良好
	アクセス履歴取得	図 4.2.3-19	良好

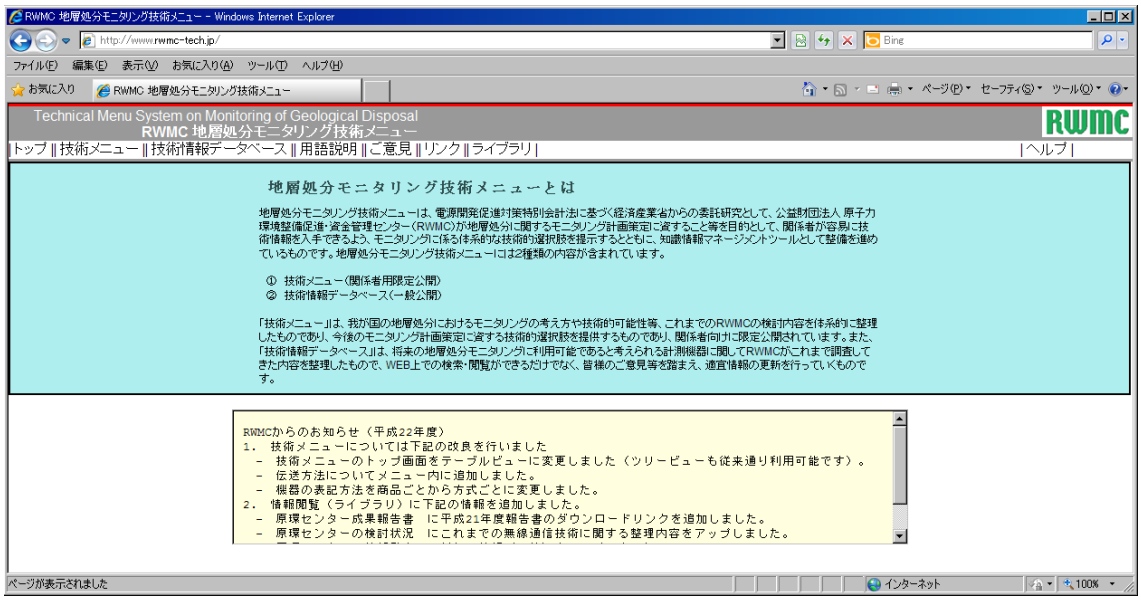


図 4.2.3-1　システム全般：起動画面

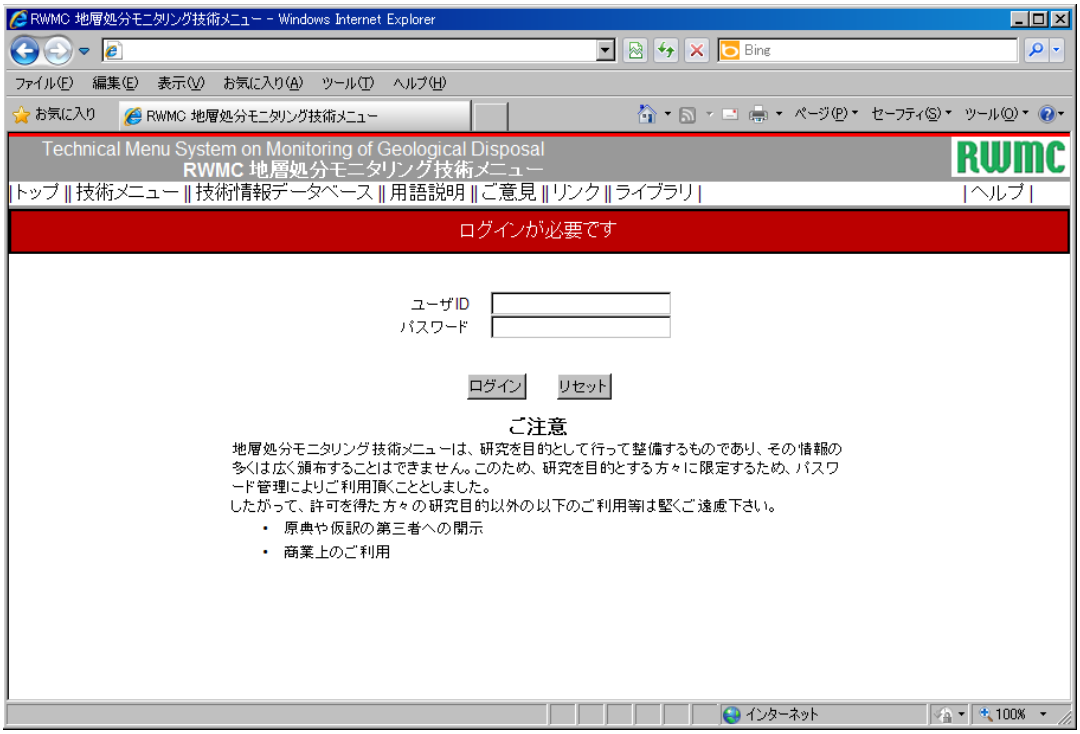


図 4.2.3-2　システム全般：ログイン画面

図 4.2.3-3　技術メニュー：テーブルビュー画面

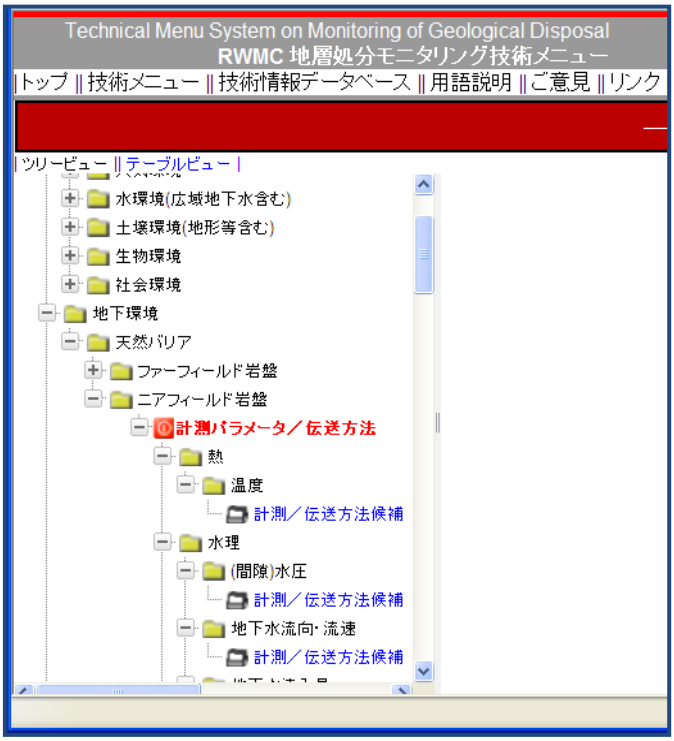


図 4.2.3-4　技術メニュー：ツリービュー（簡易）画面

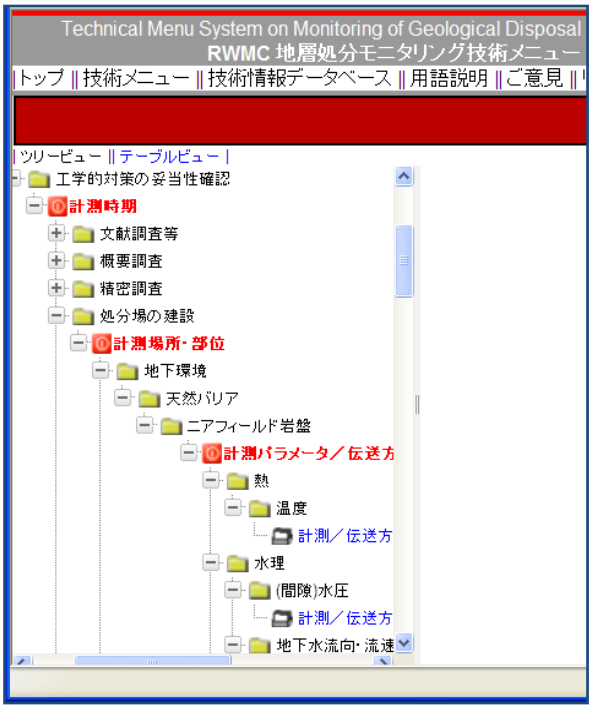


図 4.2.3-5　技術メニュー：ツリービュー（詳細）画面

図 4.2.3-6　技術情報データベース：技術情報 DB 内検索画面

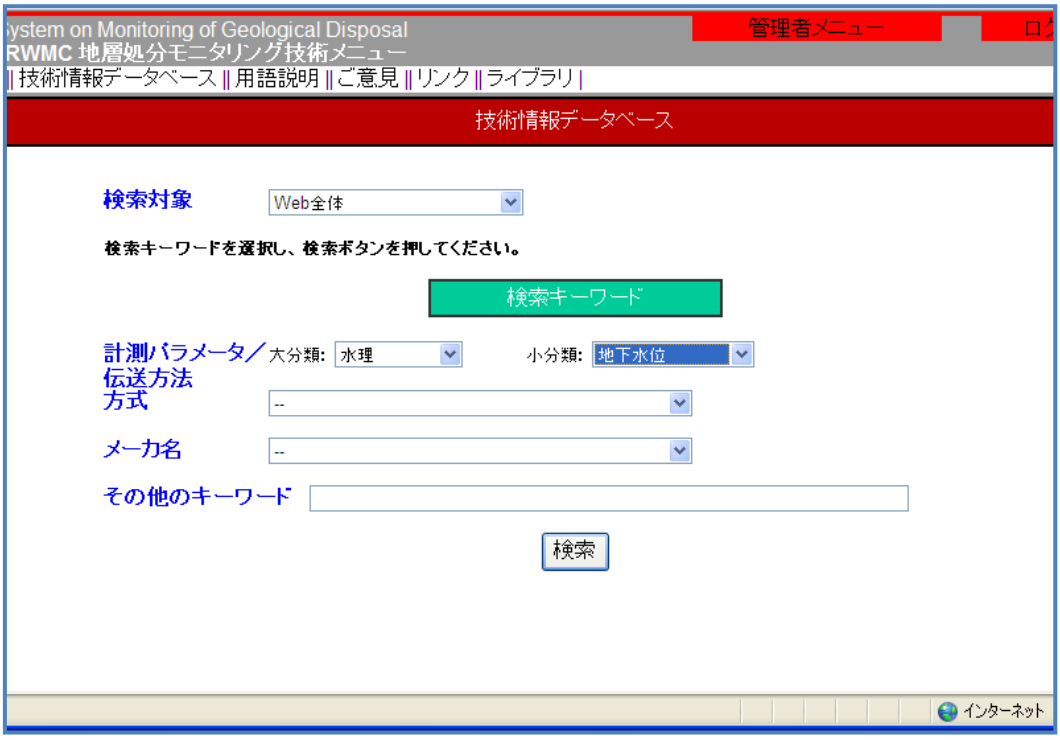


図 4.2.3-7　技術情報データベース：WEB 全体検索画面

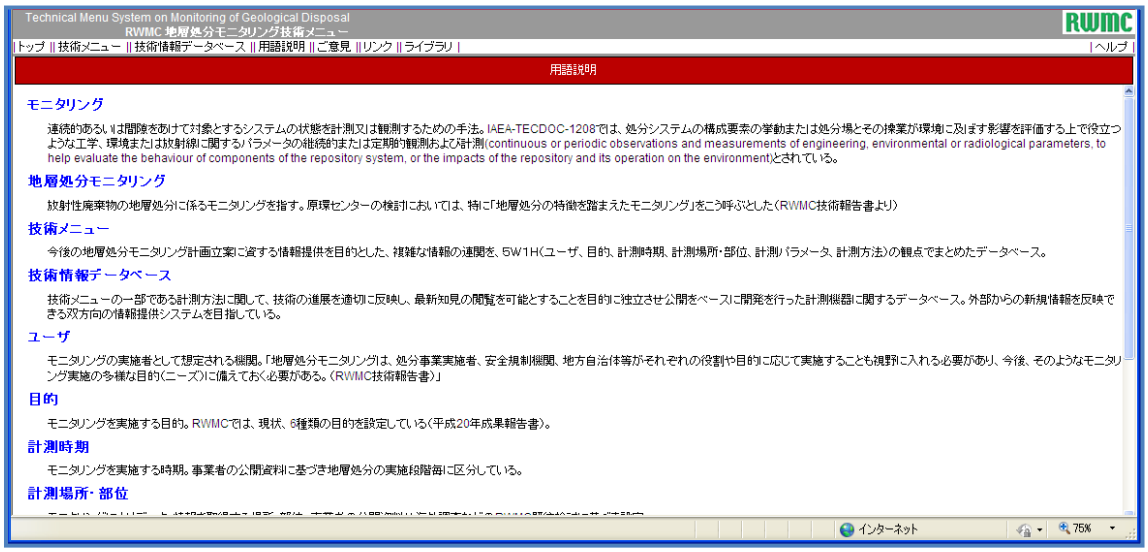


図 4.2.3-8　用語説明画面

図 4.2.3-9　コメント画面

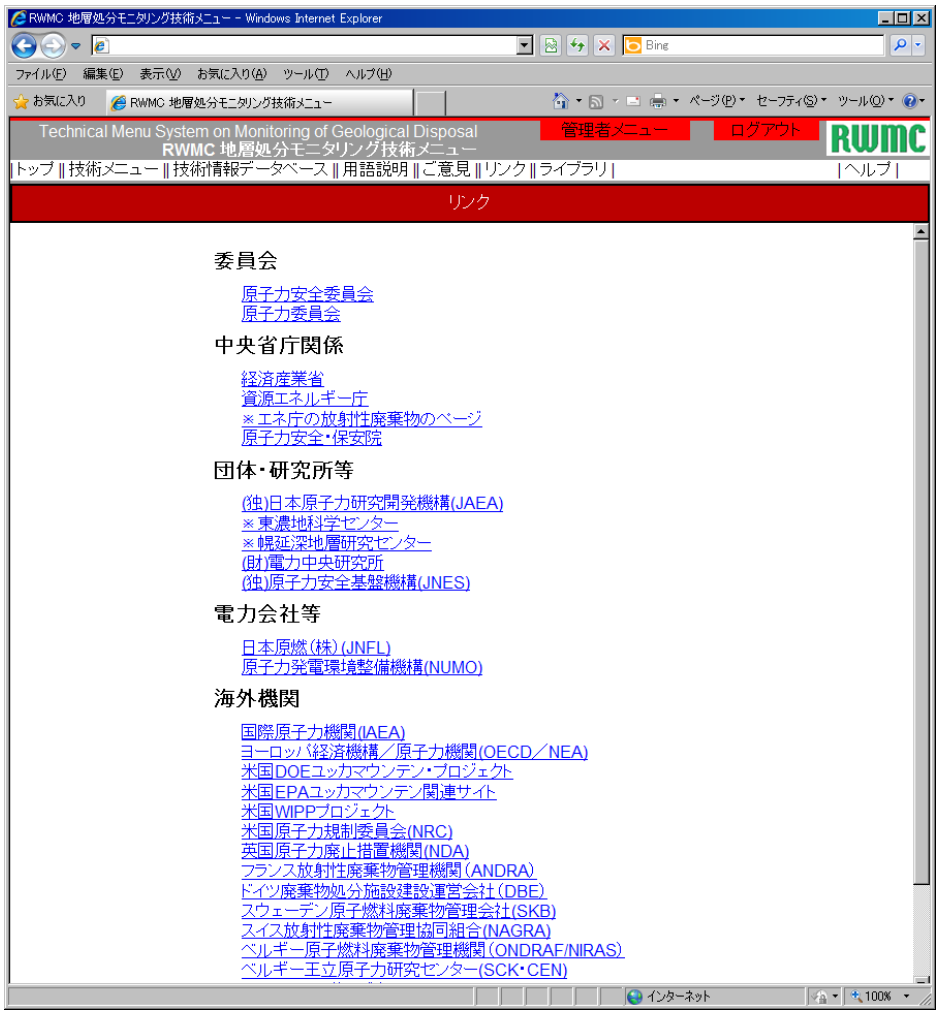


図 4.2.3-10　リンク画面

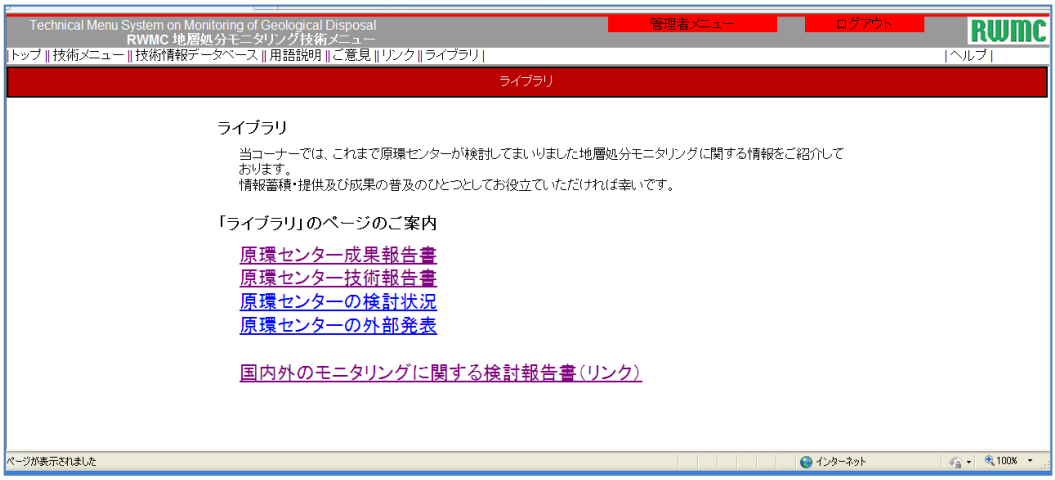


図 4.2.3-11　ライブラリ画面

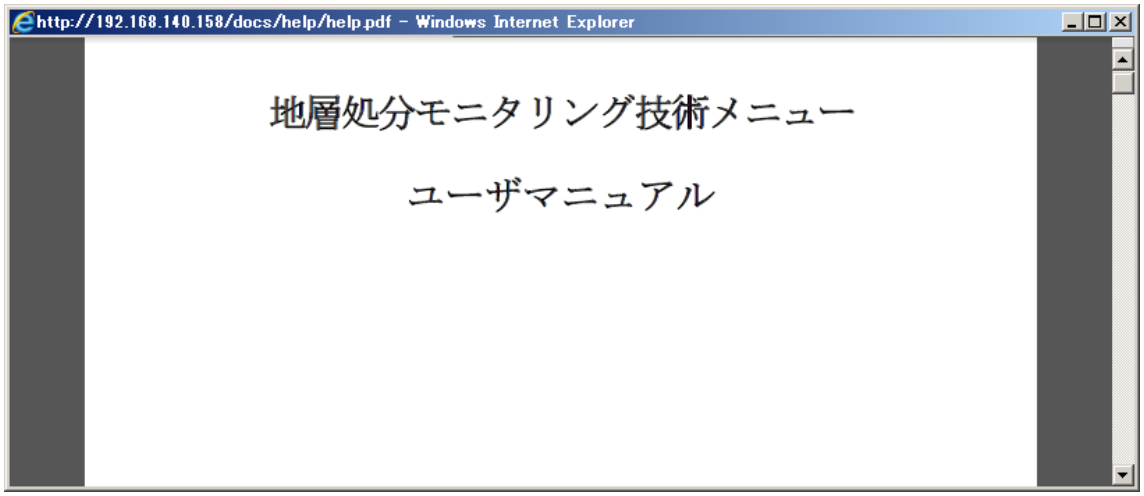


図 4.2.3-12　ヘルプ画面

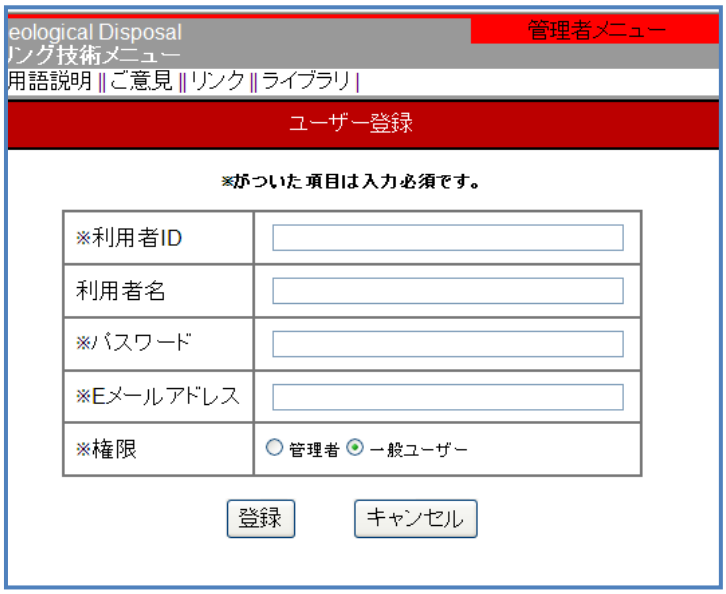


図 4.2.3-13　管理者メニュー：ユーザ登録画面

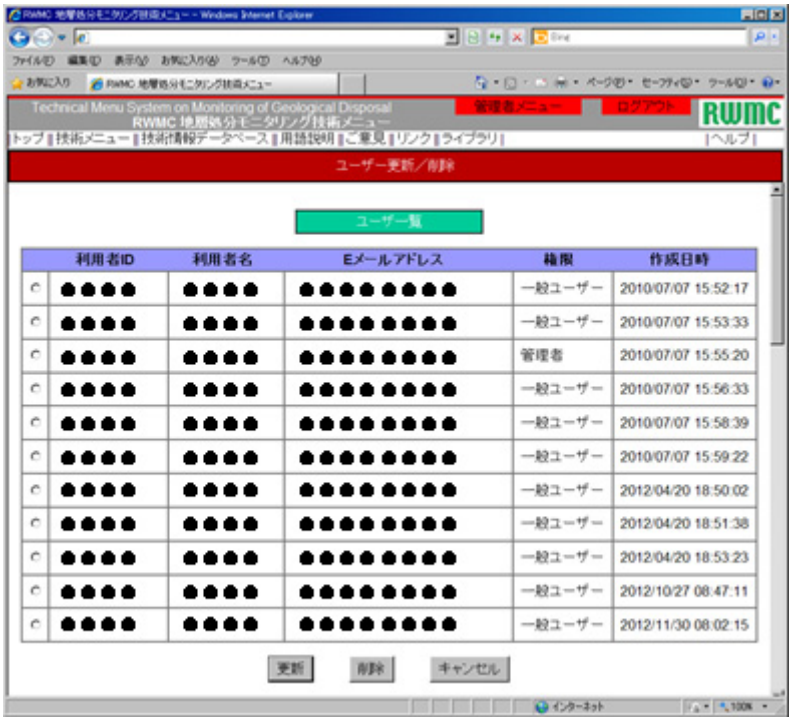


図 4.2.3-14　管理者メニュー：ユーザ更新／削除画面

図 4.2.3-15　管理者メニュー：リンク情報編集画面

図 4.2.3-16　管理者メニュー：ライブラリ情報編集画面

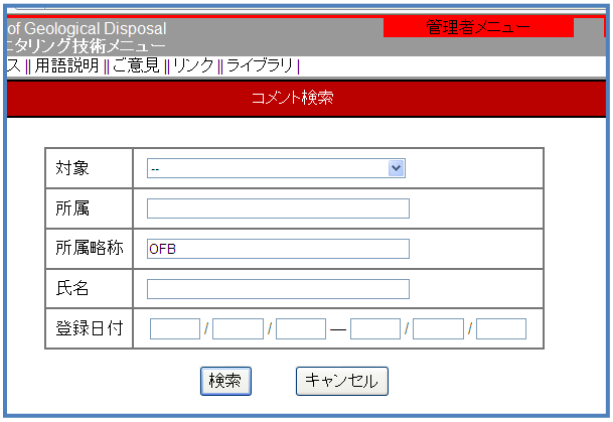


図 4.2.3-17　管理者メニュー：コメント検索画面

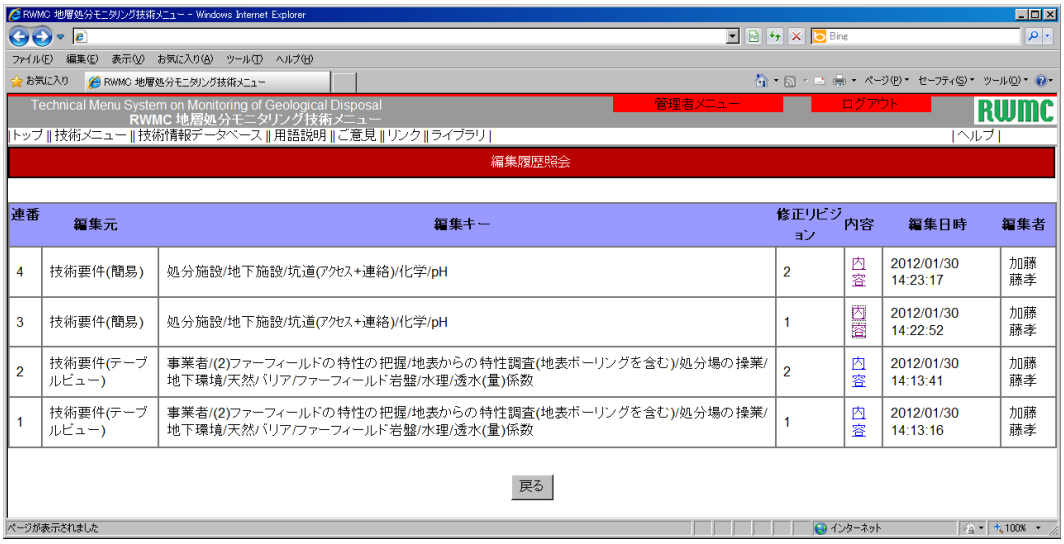


図 4.2.3-18　管理者メニュー：編集履歴照会画面

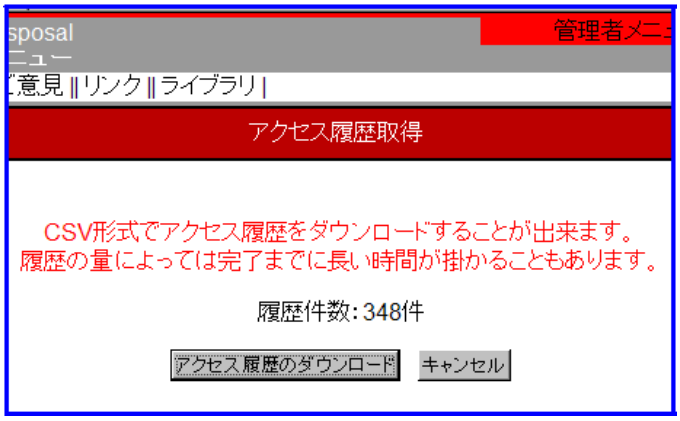


図 4.2.3-19　管理者メニュー：アクセス履歴取得画面

4.3　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

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を検討した。

4.3.1　モニタリング計画策定を目的とした技術メニューのイメージの検討

モニタリング計画策定を目的とした技術メニューのイメージを検討した。具体的には、以下に示す項目のイメージを検討した。

- 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
- 原環センターの他の地層処分技術関連メニューとの統合
- 搭載情報のブラッシュアップ

(1) モニタリングシステム提示機能

現状の技術メニューでは、図 4.2.3-5 に示すように、ユーザが自身でモニタリング条件の 5W（Who, Why When, Where, What）を選択して、その条件に該当する機器情報を取得することができる。この機能は、非常に柔軟性に富んだものであり、あらゆるユーザのより細かいそれぞれの要求に対して的確な機器情報を提供することができる、技術メニューのいわば根幹の機能である。

一方で、観点を変えると、上述したような技術メニューの機能は、ユーザに対して複数回の「選択」を強いる、若干煩雑なシステムであるという見方もできる。この点に対応するため、技術メニューに予め主要なモニタリングシステム（項目、時期、場所、推奨機器のセット）の情報を複数搭載しておき、ユーザがモニタリング要件を選択することにより、それらのうちの適切なモニタリングシステムを表示することができる「モニタリングシステム提示機能」について検討することとした。

上記の内容は、わかりやすくレストランに例えるとすると、現状の技術メニューが、単品料理の注文であるのに対して、「モニタリングシステム提示機能」は、そのレストランお奨めのコース料理に相当する。「モニタリングシステム提示機能」では、例えば、ユーザがあるモニタリングシステムを選定すると、

① 事前に登録したシステムを表記する。

② 例えばシステム選定後、さらに QA 方式やコンボボックス形式の選択方式で要件をユーザが指定し、それに応じたモニタリングシステムシートが表記される

などといった形態が考えられる。

表 4.3.1-1 モニタリングシステム提示機能の内容案

	現行のメニュー仕様	追加・改良案
基本コンセプト	ユーザは、モニタリング要件(目的、時期、場所、パラメータ)を段階的に選択し、機器情報を得る。	ユーザは、モニタリング要件(目的、時期、場所、パラメータ、推奨機器)の組合せを選択し、事前に策定された推奨モニタリングシステム（計画案）情報を得る。
利点	・機器の比較が容易 ・地層処分モニタリングの全体像の把握が可能	・モニタリング計画を行う際に、ユーザによる意思決定が不要である。 ・ある程度の目的を持って利用する場合には煩雑さが少ない。
欠点	・機器情報に到達するまでの操作が煩雑である。 ・モニタリング計画を行う際には、ユーザによる意思決定が必要である。	・複数のモニタリングシステム情報を搭載するものの、汎用性は若干乏しい。 ・機器の比較はできない（ただし、さらなる機能を追加すれば可能)。

また、国際共同研究 MoDeRn における地層処分モニタリングに係る目的、要件、モニタリング対象及び技術的可能性等に関する検討成果を技術メニューに反映することも有用であると考えられる。

(2) モニタリング目的による検索機能の高度化

現状の技術メニューでは、モニタリング目的による検索は、ツリービューのうちの詳細ツリーにおいてのみ実施可能である（図 4.3.1-1）。現状の技術メニューにおけるモニタリング目的の分類を表 4.3.1-2 に示す。また、表 4.3.1-2 に示したモニタリング目的のうち、現状の技術メニューに搭載されているモニタリング目的の解説を表 4.3.1-3～表 4.3.1-6 に示す。これらのモニタリング目的は、これまでの検討の成果（例えば、竹ヶ原ほか, 2004）[1]を反映したものであるが、MoDeRn での各国の検討結果[2]や東北での大地震以降の社会情勢から、以下の 3 つの目的について優先的に技術メニューへの反映を実施することとした。

① 性能確認
② 操業安全
③ 回収可能性

また、これら 3 つの目的に特に着目した整理を実施することを可能とするため、必要に応じて、モニタリング目的による検索機能の高度化を実施することについて検討することとした。参考として、以下に上記 3 つの目的の概要を示す。

1) 性能確認

IAEA の文章において、処分場の長期安全性に関わるものとして、以下の記載が確認される。

- 安全要件（WS-R-4）[3]
  - 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。
- 安全指針（DS-357 策定中）
  - 処分システムが想定どおりに機能していることを検証

- 処分施設に関するセーフティーケースの開発において用いられるシステム挙動の側面の理解を増進するとともに、これらの側面を予測するモデルのさらなる試験を可能にする。

・ 技術文書（TECDOC-1208）[4]

- 処分場のセーフティー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。

これらのうち、「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」は、セーフティーケースを成立させる境界条件を確認するためのモニタリングと解釈できる。また、「処分施設に関するセーフティーケースの開発において用いられるシステム挙動の側面の理解を増進」は処分場の安全機能に関わるパラメータのモニタリングにより、直接的に安全性能が確認される事項を示すものと解釈でき、「処分システムが想定どおりに機能していることを検証」や「これらの側面を予測するモデルのさらなる試験を可能にする」については、モニタリングによりシステムの構成要素の挙動を予測するモデルによる予測値と、モニタリング等による実測値の比較により、モデルの更新や確認が行われる事項を示すものと解釈される。これら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いえる（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2011[5]）。

性能確認モニタリングについては第 3 章にて詳述した。また、次年度以降も引き続き検討を進める予定である。技術メニューにはこれらの検討成果を反映する予定である。

2) 操業安全

MoDeRn[2]では、モニタリングの目的と実施戦略に関わる基礎的事項として、各国の状況がまとめられた結果、モニタリングの目的については、「処分システムの期待または予測された挙動の基礎のなる事項の検証または確認」、「操業安全性」、「環境影響」、「保障措置」等が認識されており、操業安全がモニタリングの目的の一つとされている。

IAEA では、安全要件 WS-R-4「放射性廃棄物の地層処分」(IAEA, 2006[3]) と WS-R-1「放射性廃棄物の浅地中処分」（IAEA, 1996[6]）を統合し、特定安全要件 No.SSR-5

「放射性廃棄物の処分」（IAEA, 2012[7]）を刊行した。この中で「要件 21：処分施設におけるモニタリングプログラム」として、「モニタリングプログラムは、処分施設の建設及び操業の前に、並びに建設及び操業の期間中に、またセーフティケースに含まれる場合には閉鎖後にも実施しなければならない。このプログラムは、防護及び安全の目的で必要となる情報を収集し、更新するように設計されなければならない。情報は、施設の操業期間における、作業員及び公衆の構成員の安全並びに環境の防護のために必要な条件を確認するために取得されなければならない。また、モニタリングは、施設の閉鎖後の安全性に影響する条件が存在しないことを確認するために実施されなければならない」と述べ、モニタリングの目的として、「(a) 後続の評価のための情報の取得、(b) 操業安全性の保証、(c) 施設での操業の条件が、安全評価と整合したものであるの保証、(d) 同条件が、閉鎖後の安全性と整合したものであることの確認」を挙げており、MoDeRn と同様、操業安全がモニタリングの目的の一つとされている。

本事業では「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」の一部として、災害対策のための状況把握・監視技術について調査を実施している。これに加え、平成 26 年度には平時の操業安全のためのモニタリングについて検討する計画としており、これらの成果を技術メニューに反映する予定である。

3) 回収可能性

回収可能性または可逆性に対する責務はモニタリング戦略に大きな影響を与える可能性がある。オランダ、フランス、スイス等では廃棄物は回収可能でなければならないという法的要件が存在する。現在オランダは長期貯蔵を選択しているが、将来的に地層処分が実施される場合、回収可能性が重視される。フランスはこの要件を処分場設計コンセプトに導入しようとしている。一方、スイスでは、過剰な努力なしに廃棄物が回収可能であることを保証するよう規定されている。また、米国、スイス、フランスのように廃棄物を回収可能とすべき点を要件と規定している国々でも、受動的安全性の達成を引き続き目標としていることは注意すべき点と考えられる。スイスの規制当局はモニタリングをパイロット施設で実施するよう義務づけている。また、フランスの指針も特に可逆性、回収可能性を含む柔軟性を提供するための情報について、モニタリングを通じて提供するよう規定している[2]）。

回収可能性に関するモニタリングについては、本事業にて平成 26 年度及び平成 27

年度に検討を実施することを計画している。ここで得られた成果を技術メニューに反映する予定である。

また、資源エネルギー庁の事業として進められている「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）」においては回収技術の開発に加え、処分施設における回収維持期間の検討として、処分施設を埋め戻さずに一定期間維持することで、処分施設の安全性に及ぼす影響について、周辺岩盤の力学的な観点、水理的な観点及び化学的な観点等から調査・整理を行い評価している。周辺岩盤の状態変化を知るにはモニタリングを行う必要があるものと考えられるため、技術メニューにはこの事業でのモニタリングに関する検討成果も取り込む必要があるものと考えられる。

図 4.3.1-1　現状のモニタリング目的による検索画面（詳細ツリー）

表 4.3.1-2　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的の分類

分類1	分類2
(1)ベースラインとその変動の把握	天然現象の把握
	環境特性の把握
(2)ファーフィールドの特性の把握	地表からの特性調査(地表ボーリングを含む)
	地下からの特性調査
(3)ニアフィールドの特性の把握	工学的対策の妥当性確認
	処分場・坑道の品質管理(検討中)
	廃棄体の品質管理(検討中)
	処分場の操業および操業安全の管理(検討中)
(4)処分場の安全評価の妥当性の確認	設計の前提条件の確認
	安全評価の前提条件の確認
	評価データへの利用(今後検討)
(5)法令要件に対する適合性の確認(今後検討)	処分場の立地・地質環境に関わる法令要件(今後検討)
	建設・操業に関わる法令要件(今後検討)
	処分場の放射線安全、環境影響に関わる法令要件
(6)社会に対する情報の提供と蓄積(今後検討)	国民・地域住民の地層処分に対する信頼性向上(今後検討)
	将来世代のためのデータベース蓄積(今後検討)

表 4.3.1-3　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的

「ベースラインとその変動の把握」の解説

◇目的(1)ベースラインとその変動の把握

(1)これまでの検討状況

ベースラインとは、概要調査地区等の擾乱を受けていない地上･地下環境の状態を把握し，将来の変化と比較するためのベースラインとなる初期状態の情報を取得することであり、ベースラインモニタリングの計画では，事業の全期間での連続性を考慮することとなるため，初期の計画立案が極めて重要である。平成 18 年度の検討では、さらに環境影響評価における現況把握をベースラインと位置付け、環境影響評価、環境法令、環境放射能等モニタリングを加えている。なお、ベースライン情報は、処分場の性能確認や工学的対策の実施に必要なパラメータとして役立てることが可能であるだけでなく、社会的な側面からの地層処分モニタリングの目的である「社会に対する情報の蓄積と提供（今後、要・議論)」では、そのデータベースに記録されるべき環境の初期条件として、重要である。さらに「法令要件に対する適合性の確認（規制の具体化に伴い、要・議論)」に関しても、地質環境特性のベースラインの情報は必要と考えられる。したがって、地質環境特性のベースライン把握は、地層処分計画を進める上で基盤的な情報を提供する重要な役割を有するものと考えられる（竹ヶ原ほか, 2004[1])。

(2)海外の状況

海外事例調査結果によれば、地質環境特性のベースライン把握は、IAEA の報告書（TECDOC-1208）（IAEA, 2001[4]）でその意義が記されているのをはじめ、既にフィンランド等その考え方を踏まえたモニタリング計画を進めている（POSIVA, 2003[8])。段階的に処分地を選定していく地層処分事業では、地表面からのボーリングなど地質環境の擾乱が避けられない調査の段階からベースライン把握が必要になるものと予想される。

表 4.3.1-4　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的

「ファーフィールドの特性の把握」の解説

◇目的(2)ファーフィールドの特性の把握

(1)これまでの検討状況

処分事業による環境への影響の把握に供することを目的とした、水理特性、地下水化学特性などの地質環境特性情報を取得する。一定の間隔を持って長期的に実施される地質環境特性の把握は、地表面から地下深部に至る空間的な広がりと長期間という時間を考慮した地質環境情報の追跡性を確保するためにも重要であると考えられる。

これらの状態変化をモニタリングする期間は、先に述べた不確実性などの観点から検討する必要があるが、例えば、地下施設の閉鎖後、数十年から百年オーダと見積もられる地下施設の再冠水が進んでいく期間であるとした場合でも、将来の安全性を理解する上で貴重な情報を提供するものと考えられる。また、このような閉鎖後の地下水位の状況は、処分場建設等の擾乱を受ける前の地下水位を含む環境データ（ベースライン）などを把握し比較できるようにしておくことが不可欠であると考えられる（竹ヶ原ほか, 2004[1]）。

天然バリアの水理・物質移動パラメータは、広域の動水勾配、透水量係数と間隙率等から巨視的な評価モデルで評価できるか、また、複数の段階的な調査を踏まえ、総合的な透水評価手法を確立できるかを今後検討する必要がある（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2008[9]）。

さらに、例えば建設時（処分場掘削中）に処分パネル位置の地質が適切でないことが判明し、国等が政策的な判断を行う場合があると考えられる。地質環境特性のベースライン把握の重要性は国際的な認識であるが、上述の判断のためには「建設時のパネル周辺の地質環境特性評価」が必要である。また、同様の考え方における横並びとして調査時や閉鎖時等の特性評価も必要と考えられる（EC, 2004[10]）。

(2)海外の状況

既往の調査では、海外のモニタリング検討において同様の事例は、フィンランドのONKALO に関するモニタリング活動の目的である「処分場母岩と地表環境における特性とプロセスの理解の一助となるデータ取得のため」があるが、それ以外に独立して目的としている事例はなく、各段階の調査プログラムの一部としての情報収集や施設の設計や建設における最適化に資するため（サイトの状態モニタリング）（EC, 2004[10]）に含まれている場合が多い。

表 4.3.1-5　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的

「ニアフィールドの特性の把握」の解説

◇目的(3)ニアフィールドの特性の把握

(1)これまでの検討状況

技術的な観点からモニタリングは、安全評価結果を導き出す条件となる処分システムの実環境が、事前の解析等で予想された状態に近く、それに応じた処分システムの工学的対策が適切であることを示す根拠となる。安全評価に基づいて説明される性能を確認する手段としては、地質環境場および人工バリアの状況を監視することが考えられる（竹ヶ原ほか, 2004[1]）。具体的には、処分システムの構成要素であるオーバーパック、緩衝材、岩盤などが所期の性能を発揮しているかどうかの確認を行う。室内試験により求められた人工バリア等の物性値が、実際の施工環境でも同様で、それらの物性値を用いて解析的に推定されている応力緩衝機能、温度上昇など物理特性や腐食や水質に関連する化学特性など、主要な評価パラメータの予測が妥当であったかどうかの確認を行うことが含まれる。

また、保守的に設定した設計値の裕度がどれぐらいあるかを示すことは、地層処分システムの信頼性を示す上で重要であり、実際の処分場開発の段階においてこれらの設計・施工上の仮定の検証を含む設計・施工上の設定値の確認も行われる。さらに、掘削工法や排水・換気方式の選択など工学的方策の改善、地震発生時や事故発生時の安全維持対策の検討にフィードバックするためのデータ取得を行う。 また、支保、オーバーパック、緩衝材など、何らかの要因により品質の劣化が認められた場合は、これらを補修することが考えられる。なお、平成 19 年度の検討より、処分場・坑道や廃棄体の品質管理並びに処分場の操業及び操業安全の管理が含まれている。

(2)海外の状況

海外のモニタリング検討の多くで、本目的は「セーフティケース策定のための理解促進」（例えば IAEA（IAEA, 2001[4]）や EU（EC, 2004[10]））あるいは意思決定プロセスの支援（EC, 2004[10]）の一つとして挙げられている。

表 4.3.1-6　現状の技術メニューにおけるモニタリング目的

「処分場の安全評価の妥当性の確認」の解説

◇目的(4)処分場の安全評価の妥当性の確認

(1)これまでの検討状況

技術的な観点からモニタリングは、安全評価結果を導き出す条件となる処分システムの実環境が、事前の解析等で予想された状態に近く、それに応じた処分システムの工学的対策が適切であることを示す根拠となる。安全評価に基づいて説明される性能を確認する手段としては、地質環境場および人工バリアの状況を監視することが考えられる。具体的には、廃棄体が埋設される地下施設周辺の水理や地下水化学特性、廃棄体周辺の熱、水理、応力、地下水化学特性などがあげられる（竹ヶ原ほか, 2004[1]）。

これらの状態変化をモニタリングする期間は、先に述べた不確実性などの観点から検討する必要があるが、例えば、地下施設の閉鎖後、数十年から百年オーダと見積もられる地下施設の再冠水が進んでいく期間であるとした場合でも、将来の安全性を理解する上で貴重な情報を提供するものと考えられる。また、このような閉鎖後の地下水位の状況は、処分場建設等の擾乱を受ける前の地下水位を含む環境データ（ベースライン）などを把握し比較できるようにしておくことが不可欠であると考えられる（竹ヶ原ほか, 2004[1]）。

地下水シナリオに基づく処分システム安全評価においてモデル化される、岩盤の亀裂ネットワークモデルやクリープモデル、あるいはモデルのパラメータである酸化還元電位やpH など、モデルの構成や物理的化学的諸量が妥当に設定されているか検証を行う。あるいは安全評価モデルの境界条件である広域の動水勾配分布や掘削影響領域の特性などもこれに含まれる。

(2)海外の状況

海外のモニタリング検討の多くで、本目的は「セーフティケース策定のための理解促進」（例えば IAEA（IAEA, 2001[4]）や EU（EC, 2004[10]））あるいは意思決定プロセスの支援（EC, 2004[10]）の一つとして挙げられている。また、これらの目的を達成するためのベースライン情報の重要性も示されている。

(3) 記録保存に関する情報との統合

記録保存については、高レベル放射性廃棄物地層処分の制度的管理の一環としての意義と目的、具体的方策及び技術的可能性等を検討することにより、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ことを目的に、これまで長年にわたり調査・検討が進められてきている（原子力環境整備促進･資金管理センター, 2008[9]; 原子力環境整備促進･資金管理センター, 2009[11]）。平成 19 年度以降の、地層処分に関連する記録保存に係る原環センター及び国内外の検討

状況を表 4.3.1-7 に示す（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2013[12]）。

地層処分は、安全性の観点からは長期の人間による管理に頼らない処分概念である。一方、国際機関や諸外国においては、地層処分事業に対する公衆の信頼感醸成の観点から、処分場を閉鎖した後の制度的管理の意義が議論されている。それらの議論の中で処分場に関わる記録を保存することによって、将来世代に処分場の情報を伝えることは重要であるとの認識が示されており、すでにいくつかの国では具体的な記録保存やマーカーの設置等の方策が実行または計画されてきている（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2009[11]）。

我が国の地層処分事業においては、事業法である「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」において経済産業大臣が（地層処分の）記録を永久保存しなければならない（第 18 条の 2）ことを定めている（法律, 2000[13]）。旧原子力安全委員会では、この法律の定める記録保存やマーカーの設置を含む制度的管理に関して、処分場の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であるとしていた（原子力安全委員会, 2000[14]）。

さらに 2003 年に日本が加入した国際条約（日本国政府, 2003[15]）や IAEA-WS-R-4（IAEA, 2006[3]）を踏まえ、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」（法律, 1957[16]）等の改正に伴う規制機関による安全規制の法的枠組みに関する検討では、地層処分においては、閉鎖後も処分に関する記録の保存を行うべきであり、国はその許認可等で既に発生している廃棄体の内容や廃棄物埋設施設に関する記録を国内外で共有するとともに、長期的に保存するための方法を検討することが重要である、とするとともに、閉鎖後の制度的管理に含まれるマーカーについて、“その意義、有効性や技術的可能性等について、今後検討することが重要である”とされた（総合資源エネルギー調査会, 2008[17]）。

また、2009 年に制定された「公文書管理法」（法律, 2009[18]）は、直接実施主体が法律の対象機関ではないものの、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」で定められているように、事業廃止後の記録の保存は国が行うことから、実際は地層処分の記録も保存されることとなる。また、国が必要であると判断された場合（第十四条）に文書の保存が行われる可能性や、第二条第七項の“法人その他の団体（国及び独立行政法人等を除く）又は個人から国立公文書館等に寄贈され又は寄託されたもの”あるいは“組織の見直し（廃止、統合、民営化）に伴う行政文書等の適正な管理のための措置（第三十

三条)”も規定されており、公文書管理法では、民間機関であっても保存が行われる可能性があることが示唆されている。これは、公文書管理法における“将来の国民への説明責任を果たすために必要な文書は適切に保存すべき”という基本理念に基づくものであると考えられる。処分場の記録が保存される場合、公文書管理法にある通り、適切な保存媒体へ識別を容易とするための措置を講じ、ファイル管理簿を作成し、廃棄・保存すべき文書を適切に選定（第二章又は第三章）することなど、が必要となる可能性があると考えられる（原子力環境整備促進・資金管理センター, 2010[19]）。

これらのことから、モニタリングにより様々なデータが取得され、それらのデータをどのように管理・保存していくかは、今後の重要な検討課題の一つとなるものと考えられる。すなわち、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おいても、記録保存に関する情報との統合を検討する。

表 4.3.1-7　処分に関連する記録保存に係る原環センター及び国内外の検討状況（平成 19 年度以降）

		平成 19 年度	平成 20 年度	平成 21 年度	平成 22 年度	平成 23 年度	平成 24 年度
調査の内容及び課題	国内	① 国内の法規制の整理 ② WM'08 での発表(SiC)	① 国内の法規制の整理 ② 記録保存システムの構築検討 ➢ 短期的概念 ➢ 長期的概念	① 公文書管理法の整理 ② 記録保存計画を策定する際の判断材料となる考え方の検討 a) IAEA の要件整理 b) 永久保存すべき記録（案） c) 判断材料の更新 ③ 土木学会での発表			① 第 2 フェーズ取りまとめ
	海外	① 米国 WIPP のマーカー検討 ② 仏 ANDRA の保存事例(L/ILW) ③ IAEA-SR(Draft)	① 英国の記録管理状況（規制） ② IAEA の技術文書(保存技術)	① 英国の記録管理状況(方策・技術) ② 仏 ANDRA の概要記録の紹介 ③ OECD/NEA の状況(概要)			① ANDRA の状況 ② OECD/NEA の状況
	課題	● 記録管理システムの構築（コスト及びベネフィットに関する評価を含む）に資する検討 ● 海外状況 ➢ 実際に記録保存を実施した英国 AEA による Wind Scale の AGR から発生した中レベル放射性廃棄物に関する記録保存事例 ➢ 電子情報の保存：WM'08 で英国より紹介された電子情報に関する長期保存手法の検討(CASPAR) ● 保存技術 ➢ SiC へのレーザー刻印技術の規格案（視認性試験結果から得られた知見である刻印深さや媒体の表面粗度）の作成検討 ➢ IAEA の提唱している国内外を含めた複数箇所での情報共有や耐久性を有する電磁的媒体などの検討	● 記録保存の意義と目的、具体的方策及び技術的可能性等の整備 ● 国内外の情報の注視、概念・技術及び制度の動向の継続調査 ● 最新の知見により現有する記録保存技術に基づいた記録保存システムの具体例を整理	● 公文書管理法（将来の国民への説明責任を果たすために必要な文書は適切に保存すべき） ➢ NUMO は法律の対象機関ではないが、事業廃止後の記録の保存は国が行うことから、記録保存は必要 ➢ 国が必要であると判断した場合（第十四条）など、民間であっても保存が行われる可能性がある ➢ 記録を保存する場合の規定 ✧ 適切な保存媒体 ✧ 識別を容易とするための措置、 ✧ ファイル管理簿の作成、 ✧ 廃棄・保存すべき文書を適切に選定 ● OECD/NEA の検討状況の整理 ● 仏 ANDRA の第 2 回保存記録の調査 ● その他 WM での関連発表内容の整理(2009-2012)			● ANDRA の保存技術 ➢ 保存文書の複写方法 ➢ フランス古文書保存センター(CRCDG)の推奨に基づき選定した耐久性インク ➢ 電子情報管理システム(EDM)の詳細 ➢ 保存記録の定期的な検査の際、劣化が認められた場合の対応
主な国内動向		● 安全小委報告書公表 ● 炉規制法改正(法第五十一条の十五) ● 埋設規則(案)公表(四十四条)	● 埋設規則制定(四十四～四十五条)	● 公文書管理法の制定			
主な諸外国の動向	IAEA	● 長期記録保存に関する安全文書ﾄﾞﾗﾌﾄ作成(非公開)	● 記録保存技術を含む技術文書公開(廃止措置等)				
	仏 ANDRA	● Manche 及び Aube の記録保存に関するパンフレット公開	● 概要記録(第一版)公表	● 年次レポートに 100 万年の設計寿命を有する情報保存媒体（サファイアディスク）の可能性が記載	● 第 2 回保存の実施(Manche) ● 第 1 回保存の実施(Aube)		
	OECD/NEA			● 長期保存に関する検討の提案	● 各国の状況調査実施 ● 調査結果に基づく PJ 更新 ● トピカルセッション実施	● フェーズの内容確定 ● 関連する文献リスト公表	

(4) 搭載情報のブラッシュアップ

地層処分モニタリング技術メニューにおいては、言うまでもなく、搭載されている様々な技術情報がシステムの中核を担っている。それらの技術情報は、単に計測機器の名称や仕様等を示すに留まらず、地層処分モニタリングの特性に応じた分類や、原環センターにおける地層処分事業の各段階や場所への適用性に関する検討成果等も含んだものとなっている。計測機器に関する一般的な情報を幅広く得たい場合には、Google 等の一般的な Web 検索を実施すれば、数多くの情報が得られることは事実であるが、そこで得られる情報は、地層処分モニタリングへの適用性等がばらばらの雑多なものであり、その点を整理した情報が得られることが、Google 等の一般的な Web 検索よりも地層処分モニタリング技術メニューを利用することの意義である。

また、計測機器自体に関しては、その性能等は日々進化していることから、常に最新の機器情報を搭載し、それらの地層処分モニタリングへの適用性等の情報も可能な限り併せて搭載することとする。

これらのことから、今後の地層処分モニタリング技術メニューの運用にあたって、搭載情報のブラッシュアップが非常に重要となると考えられるため、ここでは、その手法やそのための必要事項に関して検討した。

4.3.2 必要情報及び機能の抽出

上記 4.3.1 で検討した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て、現状の技術メニューに対して加える必要がある新たな情報や機能を検討した。

(1) モニタリングシステム提示機能

モニタリングシステム提示機能の実現に向け抽出された必要情報及び機能は以下の通りである。

① 計測機器、伝送方法及び電源の表示方法を区別

② モニタリングシステムの搭載

1）計測機器、伝送方法及び電源の表示方法の変更

現在、伝送方法については、技術メニューにおいて下記のように扱われている。

- ツリービューの場合、計測パラメータと同列に扱われている（図 4.3.2-1）。
- テーブルビューの場合、「伝送方法パラメータ」という名称で他のパラメータと同列に扱われている（図 4.3.2-2）。

伝送方法は、地層処分事業の時期や場所によって、有線か無線かなど、その手法が影響されることから、基本的には現在の表示方法でも問題はないが、煩雑であり、計測パラメータと区別して表示する方が理解し易い。さらに、本事業では、電源について調査・検討を進めるているが、この情報について伝送方法と同様の扱いを行うとさらに煩雑さが増す可能性がある。

このためには、伝送方法及び今後の電源に関する情報については、計測機器とは別の表示方法を検討する必要がある。

図 4.3.2-1　現行メニューにおける伝送方法の表示方法（ツリービュー）

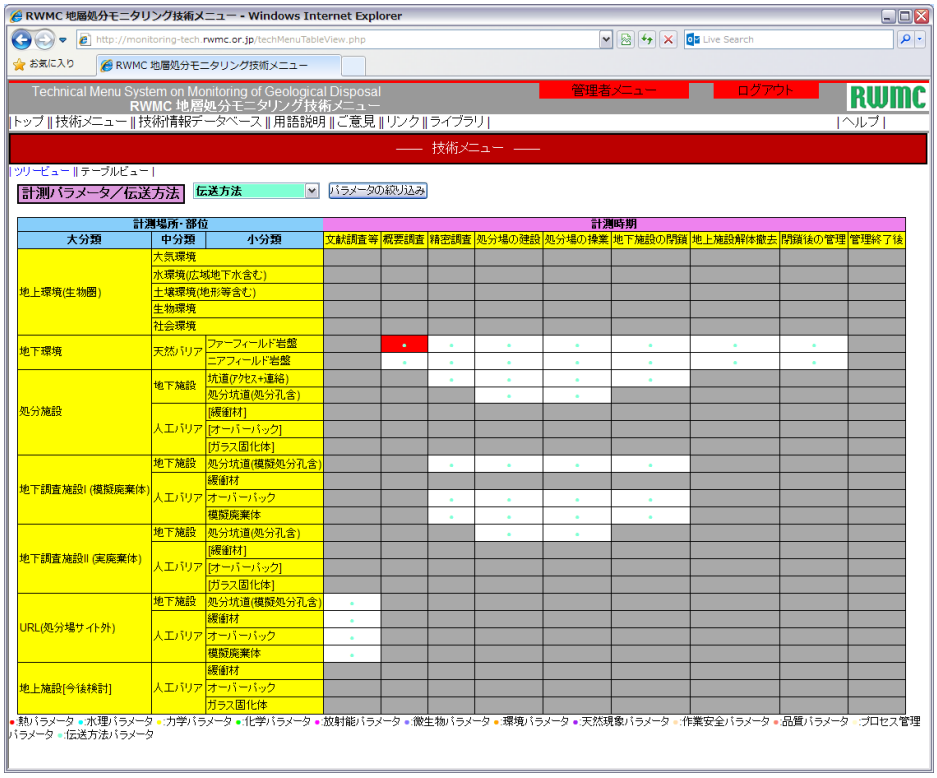


図 4.3.2-2　現行メニューにおける伝送方法の表示方法（テーブルビュー）

2) モニタリングシステムの搭載

現在の技術メニューは、基本的にユーザがモニタリング要件（目的、時期、場所）を指定し、機器情報を提供するツールであるが、本事業では技術的実現性のあるモニタリングシステムを提示することを目指しており、この成果を技術メニューに反映する計画である。技術メニューへの反映には、下記の検討が必要となると考えられる。

① 複数のモニタリングシステム情報の作成

② モニタリングシステムの有効な提示方法の検討

③ 技術メニュー機能の追加・変更

④ モニタリングシステム情報の搭載

(2) モニタリング目的による検索機能の高度化

現在の技術メニューにおける目的分類では、操業安全は「処分場の操業および操業安全の管理」に、性能確認は「工学的対策の妥当性の確認」に、それぞれ該当すると考えられる。ただし、回収可能性に関しては、該当目的分類がないため、マスタの変更が必要となる。

上記の適用・変更により、現状の地層処分モニタリング技術メニューにおいても、詳細ツリーを用いて、操業安全、性能確認、回収可能性を目的とした検索を実施することが可能である。

また、必要に応じて、モニタリング目的による検索機能の高度化を実施する。具体的には、現状のテーブルビューに対して、さらに目的による分類も加えるなどといったことが考えられる。

さらに、各目的の内容を前項「モニタリングシステム」の情報群の一つとして搭載することも有用であると考えられる。

(3) 記録保存に関する情報との統合

記録保存に関する情報を技術メニューに搭載する場合、下記の提示方法が考えられる。

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に登録する。

② 前述のように記録すべき情報にはモニタリング結果が含まれる（表 4.3.2-1～表 4.3.2-4）ことから、関連性を有する情報については、技術メニューの内容とリンクさせる（表示イメージの例を図 4.3.2-3 に示す)。

このためには、下記の検討が必要となると考えられる。

① メニューに搭載する記録保存に関する内容の検討

② メニューに搭載する既往調査成果の整理

③ 既往の技術メニューとのリンケージ機能の追加検討

④ 記録保存情報の搭載

表 4.3.2-1　第 1 種埋設規則[20]（第 44 条（記録））に記された内容(1/4)

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　赤字はモニタリングによる結果を示す。

表 4.3.2-2　第 1 種埋設規則[20]（第 44 条（記録））に記された内容(2/4)

記録事項	記録すべき場合	保存期間
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
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
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

注記　赤字はモニタリングによる結果を示す。

表 4.3.2-3　第 1 種埋設規則[20]（第 44 条（記録））に記された内容(3/4)

記録事項	記録すべき場合	保存期間
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
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、その結果	その都度	事業所から搬出された後 10 年間

表 4.3.2-4　第 1 種埋設規則[20]（第 44 条（記録））に記された内容(4/4)

記録事項	記録すべき場合	保存期間
（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

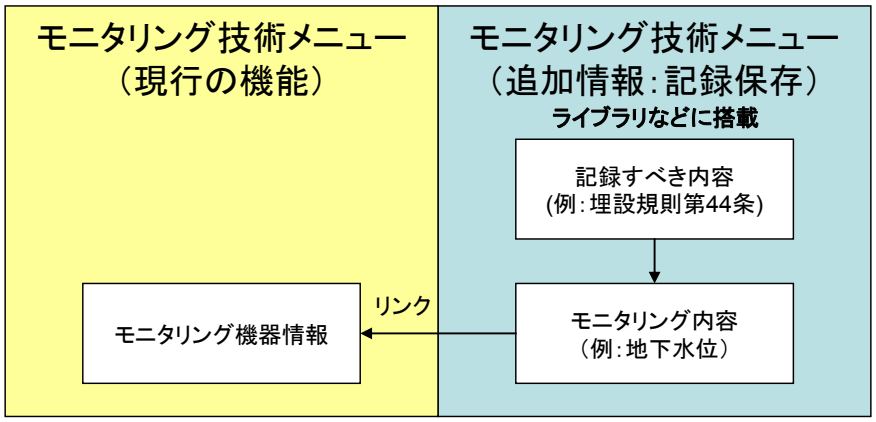


図 4.3.2-3　記録保存に関する情報との関連イメージ

(4) 搭載情報のブラッシュアップ

前項では、下記の検討必要性があげられた。

① 搭載情報の更新

② 技術メニューの英語化

「搭載情報の更新」に関しては、これまでも定期的に更新を実施しているが、現在のところ、無線技術等のトピック的な内容の追加やMoDeRnでの検討成果の反映等にとどまっている。モニタリング計画を実施するユーザ（処分実施機関）の利用が本格化すれば、情報のクオリティに関するニーズや問合せが活発となると想像される。搭載情報のブラッシュアップを図る方法としては、例えば下記の様な方法が考えられる。

(ア)機器に関する専門家へ委託し、レビューを実施して頂き、その情報を反映する。

(イ)モニタリング計画策定のシミュレーションを実施し、現行メニューに搭載された情報の問題点を洗い出し、改善する。

また、「技術メニューの英語化」については、システムの英語版を作成することになる。この場合、マスタ、シーケンス及び機器情報のみならず、内部プログラムについても変更が必要となる。

4.3.3　必要情報及び機能の実装方法の検討

上記4.3.2で検討した必要情報や機能の実装方法について検討し、実施に必要な期間を提示した。機能の拡充等の実施においては、各項目の実施に必要な期間の検討結果に加え、技術メニューに反映する情報である、地層処分モニタリングの枠組みの検討や技術的実現性の向上等に関する検討の進行状況を考慮して、実施時期等を決定する。

(1) モニタリングシステム提示機能

モニタリングシステム提示機能の実装に必要な期間を表 4.3.3-1に示す。

1) 計測機器、伝送方法及び電源の表示方法の変更

モニタリングシステム提示機能のうち、計測機器、伝送方法及び電源の表示方法の変更を行うためには、下記のアクションプランが必要である。

① 表示方法の検討（1年間）

② プログラム改良・試験（2年間）（以下が含まれる）

- データベース改良のための検討（1年間）
- プログラム改良（1.5年間）

- 動作試験（0.5 年間）

2) モニタリングシステムの搭載

モニタリングシステム提示機能のうち、モニタリングシステムの搭載を行うためには、下記のアクションプランが必要である。なお、①の計画は、既往検討情報に基づき行い、試験的にメニューに搭載し、本フェーズでの有効性の確認までを目指す。

① 複数のモニタリングシステム情報の作成（1 年間）

② モニタリングシステムの有効な提示方法の検討（2 年間）

③ 技術メニュー機能の追加・変更（2 年間）

④ モニタリングシステム情報の搭載・確認（2 年間）

表 4.3.3-1 モニタリングシステム提示機能の実装に必要な期間

項目		H26		H27		H28		H29	
[1] 計測機器、伝送方法及び電源の表示方法の変更									
①	表示方法の検討	■	■						
②	プログラム改良			■	■	■	■		
[2] モニタリングシステムの搭載									
①	複数のモニタリングシステム情報の作成	■	■						
②	モニタリングシステムの有効な提示方法の検討	■	■	■	■				
③	技術メニュー機能の追加･変更			■	■	■	■		
④	モニタリングシステム情報の搭載					■	■	■	■

(2) モニタリング目的による検索機能の高度化

現状の地層処分モニタリング技術メニューが有する、詳細ツリーを用いる場合には、現状のままで対応可能である。現状のテーブルビューに対して、さらに目的による分類も加える場合には、データベースの変更及びそれを操作するプログラムが必要となると考えられる。これらを踏まえたモニタリング目的による検索機能の高度化にの実装に必要な期間を表 4.3.3-2 に示す。

表 4.3.3-2　モニタリング目的による検索機能の高度化の実装に必要な期間

項目		H26		H27		H28		H29	
モニタリング目的による検索機能の高度化									
①	新規に目的に関する情報の整理	■	■	検討成果に基づき見直しが必要					
②	技術メニュー機能の追加・変更 （データベース／プログラム）	■	■						
③	データ作成			■	■	検討成果に基づき 見直しが必要			
④	データの搭載・確認			■	■				

(3) 記録保存に関する情報との統合

前述したとおり、記録保存に関する情報との統合は、基本的にライブラリに整理し、モニタリング情報との関連があるものについては、リンケージを行うこととした。これらの実装に必要な期間は表 4.3.3-3 の通りである。

表 4.3.3-3　記録保存に関する情報との統合の実装に必要な期間

項目		H26		H27		H28		H29	
記録保存に関する情報との統合									
①	メニューに搭載する記録保存に関する内容の検討	■							
②	メニューに搭載する既往調査成果の整理	■	■						
③	既往の技術メニューとのリンケージ機能の追加検討		■						
④	技術メニュー機能の追加・変更 （データベース／プログラム）		■ ライブラリ	■ リンケージ	■				
⑤	記録保存情報の搭載		■ ライブラリ	■ リンケージ	■				

(4) 搭載情報のブラッシュアップ

1) 搭載情報の更新

前述の通り、搭載情報の更新に関しては定期的に必要であるが、ここでは、より有効な手段として挙げた下記の 2 種類の方法についてアクションプランを検討した。

① 機器に関する専門家へ委託し、レビューを実施して頂き、その情報を反映する。

② モニタリング計画策定のシミュレーションを実施し、現行メニューに搭載された情報の問題点を洗い出し、改善する。

2) 技術メニューの英語化

「技術メニューの英語化」については、システムの英語版を作成することになる。この場合、マスタ、シーケンス及び機器情報のみならず、内部プログラムについても変更が必要となる。また、和文版の改良等に応じ、適宜見直しが必要となる。

搭載情報のブラッシュアップに必要な期間を表 4.3.3-4 に示す。

表 4.3.3-4　搭載情報のブラッシュアップに必要な期間

項目		H26		H27		H28		H29	
[1] 搭載情報の更新(専門家レビュー)									
①	専門家の選定・委託・レビューの実施	■	■						
②	レビュー結果の反映(データの更新)			■	■				
[1] 搭載情報の更新(シミュレーション)									
①	モニタリング計画策定シミュレーションの実施	■	■						
②	修正点の抽出		■						
③	結果の反映(データの更新)			■	■				
[2] 技術メニューの英語化									
①	プログラム内の英語化	■	■			和文版の変更に応じて見直しが必要			
①	データの英語化	■	■	■	■				

4.4　技術メニュー搭載情報の拡充

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、既存の登録情報の修正を実施した。搭載した情報は以下の通り。

4.4.1　MoDeRn プロジェクト報告書

モニタリング国際共同研究 MoDeRn プロジェクトによる、放射性廃棄物の地層処分モニタリングに関わる最新技術に関する報告書（MoDeRn, 2013[21]）について、以下の情報を

技術メニューに反映した。

(1) 機器情報

MoDeRn プロジェクトにおけるモニタリング技術の報告書（MoDeRn, 2013[21]）に記載されている機器情報について、昨年度の搭載情報からの追加・変更分を、機器情報 DB に登録した。これに加え、第 5 章で述べる地中無線モニタリング装置に接続する小径の全圧計について器情報 DB に登録した。

(2) 抄訳

上記の MoDeRn プロジェクト報告書（MoDeRn, 2013[21]）の記載内容の抄訳を作成し、ライブラリに登録した。

4.4.2　地中無線装置用電源に関する情報

本年度、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て、地中無線モニタリング装置に用いる電源に関する最新情報の調査を実施した。この成果情報をライブラリに登録した。登録した電源は大きく以下の種類に分類した。

- 化学反応による一次電池
- 温度差による発電方式
- 電磁波の送受信による電源供給方式（非接触電力供給）
- ベータボルタイック発電方式
- 放射性同位体熱電気変換器

4.5 まとめと今後の課題

地層処分モニタリング技術メニューは、モニタリング機器等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。昨年度までに地層処分モニタリ

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、一部の外部専門家に対する限定公開を実施している。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ている。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・再整理し、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。

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。

技術メニューの運用再開

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を、新たに選定したサーバに再現し、動作確認を実施、運用を再開可能な状態とした。

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

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

技術メニュー搭載情報の拡充

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、既存の登録情報の修正を実施した。

今後の課題

技術メニューの機能の拡充については、本章にて検討した実装に必要な期間に加え、技

術メニューに格納される情報であるモニタリングの枠組みに関する検討や、技術的実現性の向上に関する検討の進行状況を考慮して実施時期を決定する必要がある。

現在、新たな掲載情報としてまとまった成果が得られているものは、記録保存に関する検討であるため、先ずは記録保存の検討成果をモニタリング技術メニューに統合することを優先して、技術メニューの整備を進めることとする。

第 4 章参考文献

[1] 竹ヶ原 竜大, 虎田 真一郎, 朝野 英一, 大内 仁, 坪谷 隆夫 (2004) : 「地層処分にかかわるモニタリングの研究 -位置付け及び技術的可能性-」原環センター技術報告書,RWMC-TRJ-04003.

[2] MoDeRn (2011) : National Monitoring Contexts – Country Annexes, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/

[3] IAEA (2006) : Geological Disposal of Radioactive Waste, Safety Requirements, Safety Standards Series No. WS-R-4.

[4] IAEA (2001) : Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste,IAEA-TECDOC-1208.

[5] 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.

[6] IAEA (1996) : Near Surface Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series, No. WS-R-1.

[7] IAEA (2012) : Disposal of Radioactive Waste, Safety Standards Series, Specific Safety Requirements, No. SSR-5.

[8] Posiva (2003) : Program of Monitoring at Olkiluoto During Construction and Operation of the ONKALO,2003-05, 2003.12.

[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]EC (2004) : “Nuclear Science and Technology, Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste”,Final Report,European Commission Report EUR 21025 EN.

[11]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.

[12]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.

[13]法律（2000）：特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律（平成十二年六月七日法律第百十七号），最終改正：平成二四年六月二七日法律第四七号

[14]原子力安全委員会（2000）：高レベル放射性廃棄物の処分に関わる安全規制の基本的考え方について（第 1 次報告）

[15]日本国政府（2003）：使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約，第 1 回日本国国別報告書，平成 15 年 9 月

[16]法律（1957）：核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律（昭和三十二年六月十日法律第百六十六号），最終改正：平成二四年六月二七日法律第四七号

[17]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（2008）：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，平成２０年１月１８日

[18]法律（2009）：公文書等の管理に関する法律、平成二十一年七月一日法律第六十六号）最終改正：平成二四年一一月二六日法律第九八号

[19]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

[20]原子力規制委員会(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：平成二五年一二月六日原子力規制委員会規則第一六号

[21]MoDeRn（2013）:State of Art Report on Monitoring Technology, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/

第5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

5.1　目的および実施概要

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と課題、機器の故障に関する検討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、課題の見直しを行い本年度を含む 5 年間で取り組むべき課題を抽出した。また、中継システムに関する試験と耐圧化の検討、小型地中無線送信機への水分センサアダプタの開発、長期モニタリングのための電源の調査、現在の電源の耐熱試験を実施した。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、長距離通信試験について述べた。

5.2　地層処分モニタリングに関る主な制約条件

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[1]。

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に対しては工学的対策が困難であり、地層処分の長期安全性の信頼性を高めるために他の対策によりトレードオフを行うことが特に困難であ

ると考えられるため、十分な考慮が必要となる。

地層処分におけるモニタリングでは、上記の安全性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[2]。

- 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。

5.3　モニタリング技術の到達状況

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[2]。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）[3]にて報告した。ここでは、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述べる。MoDeRn による調査結果の詳細は原文[2]を参照されたい。

5.3.1　有線センサ及びサンプリング

処分場におけるモニタリング技術のうち、電気式の有線のセンサ、及びサンプリングと室内分析によるモニタリング技術については、表 5.3.1-1 に示す通りである。

表 5.3.1-1　有線式センサ及びサンプリングによるモニタリング技術（[2]より作表）

パラメータ	測定方式
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）
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
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）
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
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
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
ガス濃度	ガスクロマトグラフィ(GC)、非分散型赤外線(NDIR)分光学式、-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	ガラス電極、イオン選択性電解効果トランジスタ(ISFET)、KC l 含有固体ポリマ電極
コロイド	現場でのトレーサ検出装置：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 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) 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）

有線センサ の技術の現状と改善の可能性については、以下の点が指摘されている。

全てのパラメータ共通する点

・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、SS316L 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。

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。

原環センターではこれまでに電気式の有線センサやサンプリングによるモニタリング技術の開発は実施していない。しかしながら、長期間のモニタリングが困難とされるオーバーパックの腐食に関するセンサについて、次年度より測定方式による比較試験の実施を計画している[4]。

5.3.2　光ファイバセンサ

光ファイバセンサの現状については表 5.3.2-1 に示す通りである。

表 5.3.2-1　光ファイバセンサによるモニタリング技術（[2]より作表）

パラメータ	測定方式
温度と歪み	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）
化学	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 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 （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）
湿度	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）
圧力	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）、全圧用および水圧用

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。

原環センターでは、ファイバ･ブラッグ･グレーティング（FBG）式の光ファイバセンサについて、温度と圧力の多点測定を目指した開発を実施した（[3]他）。その結果、先ず室内試験において FGB センサを用いて同時多点での温度と圧力の計測が可能であることを確認した。次に、工学規模試験への適用を試みた。装置の大きさと形状の制限に適応するため、センサの形状を変化させたことにより、温度センサについては、外圧の影響を受けて計測値が異常な値を示した。また、ケーブルまで含めてセンサ全体を試験装置の中に組み込んだため、多点で異なる値を計測することができなかった。また、圧力センサについては、高温状態での使用に際し耐久性の問題が生じた。課題を整理すると以下の通りとなる。

・長期耐久性に関する検討：長期耐久性試験において、圧力の評価値が徐々に変化する傾向が見られた。主な原因として、接着剤による接着部の変化が考えられ、この部分については使用する接着剤の材質を含めてさらなる検討が必要である。
・使用材質の検討：多点測定を目指して開発した FBG 温度センサであるが、センサ全体を試験対象領域に敷設した場合、異なる温度の計測が行えなかった。これはセンサ自体の熱

電導によるものと思われ、保護管等の材質について見直す必要があると思われる。また、鞘管に曲げが生じると値に影響が出るため、それを避けるような強度あるいは構造にする必要がある。

・適切な敷設方法に関する検討：実規模試験あるいは原位置試験等を通じて、各種敷設方法による作業性、計測性能等の比較を行い、適切な敷設方法に関する検討を行う必要がある。

5.3.3　地中無線通信技術

処分場での適用を目指した地中無線通信技術については、高周波を用いるものと低周波を用いるものに区分できる。その長所と短所は表 5.3.3-1 の通りである。

表 5.3.3-1　地中無線通信技術の分類と長所・短所（[2]に追記、作表）

	高周波無線システム(UHF)	**低周波無線システム(ULF, SLF, ELF)**
長所	・高いデータ速度 ・短い通信時間 ・低いエネルギー消費 ・小型アンテナ（短い波長） ・モニタリングに応用できる多くの機器が・市場で入手可能	・固体中での非常に小さな減衰 （⇒原環センター：鋼製支保をもつ地下研の岩盤中で 50m（実績）） ・高い侵入性（地中無線システム） ・水や湿度に対する高い許容性
短所	・低い侵入性（岩盤中で数m） ・水や湿度に対する非常に低い許容性（特に 2.4 GHz).	・非常に長い波長（閉じた空間内での使用に不適） ・大きなエネルギー要求量 （⇒原環センター：小型送信機で 10 年） ・無線ネットワークへの低い適性 （⇒原環センター：中継技術を開発）
開発事例	・スペイン・EITAMIN による機器開発と地下研での実証	・原環センターによる各種機器と地下研での検証 ・オランダ・NRG による基礎的検討

地中無線通信技術 については、このシステムはごく最近のものであり、今後数年間で相応の進歩が期待されるとしている。 また、現在の成果に基づくと、処分場での使用は短距離/中距離のシステムと長距離の システムの組合せに基づくべきであり、両者の長所を生かし、短所を補うべきであるとしている。 その改善点としては以下の事項が指摘されている。

・小型化

・省エネルギー化
・放射線への耐性が求められる場合には確認と改善
・新たなセンサ技術への適用性（互換性）
・新たなエネルギー源
・現実的な環境での更なる適性の証明
・信頼性と冗長性の改善

原環センターではこれまで、性能確認に資するモニタリングなどの処分場や地下調査施設等でのモニタリングを実施するために必要とされる、地中無線技術の開発に段階的に取り組んできた。

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。これらの成果を踏まえ、技術の重要性や信頼性の向上を考慮し、以下の課題を抽出した。

・地層処分特有の環境への地中無線通信装置の適応性向上（耐熱、耐放射線）
・長期モニタリングに対応した地中無線通信装置、センサへの電源供給技術の開発
・段階的埋め戻しに適応した、地中無線通信の中継システムの頑健性の向上
・地下研等における地中無線モニタリング技術の適用性の実証
・センサの地層処分環境への適応性 （耐熱、耐腐食、耐放射線）に関する調査検討

今後の地中無線によるモニタリング技術の開発については次節にて述べる。

5.3.4 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[5]において検討した。以下に概要を述べる。詳細については原文を参照されたい。

故障モード

「故障モード」とは、ここでは、*無効な*モニタリングデータを生み出すような個別的状況と定義する。故障モードについての階層的分類を整理すると表 5.3.4-1 の様になる。

表 5.3.4-1　故障モードの分類（[5]より作表）

大分類	小分類
技術的故障	全体的または部分的なセンサ故障
	信号伝送の故障
	信号変換の故障
方法の故障	センサの設置の故障
	確認されない横感度(Cross-sensitivity)
	補正方法の故障（ドリフト、横感度）
手順の故障	冗長性の喪失（複数のセンサの同時故障）
	誤差検出・誤差補正手順の故障

これらの故障モードのうち、地層処分におけるモニタリングでは、センサを設置後、坑道の埋め戻し等によりセンサ及びセンサ近傍の信号伝送ケーブルにアクセスできなくなることから、センサの故障と信号伝送の故障が特に重要と考えられる。このため、これらの故障を検出する方法について表 5.3.4-2～表 5.3.4-4 に示す。

表 5.3.4-2　センサ故障の検出方法（1/2）（[5]より作表）

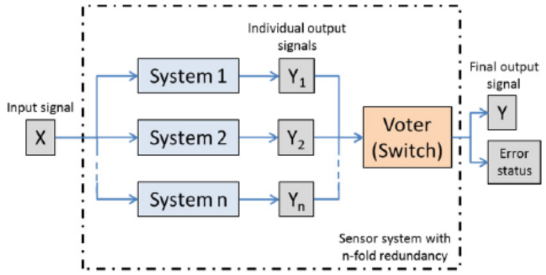
故障検出方法	概要	備考
冗長性による故障の検出	３つ以上の（同一原理の）センサにより同一のパラメータを測定することで、故障を検出する。 冗長性を用いる際には、n 個のマッチングするシステムが、入力 x を受信し、n 個の出力 y_1～y_n を生み出す。これらの出力は多数決回路に送信される。多数決回路は、欠陥のある機能ブロックを検出するために、出力信号を比較し、信号偏差を用いる。出力信号 y_1～y_n が類似する（ある許容範囲内である）ものである場合には、その範囲内ならば値を等しいと見なす多数決回路により正確な出力信号 y を決定する。  Weiler（2001）[6]に基づき修正した冗長性による故障の検出	全ての冗長センサ要素が同時に同じ原因のために故障した場合には、多数決回路によってセンサ出力間の偏差を検出することができない。
既知の関係による故障の検出	既知の関係による誤差検出は、多様性に基づく方法である。多様性または*「明瞭に区別できる機能冗長性」*は、同じパラメータの測定のために設計の異なる複数の構成要素が用いられるという、冗長性の特殊な形態である。センサシステムにおいてこの方法を採用する場合、システム内またはシステム外における独立信号間の時間に独立な関係が利用される。	冗長性とは対照的に、多様性はすべてのセンサシステムのために用いることができるわけではない。 センサ要素における誤差検出のために多様性を用いることができる場合に、冗長性と比較して明確な利点となるのは、一貫性の点検のために独立信号を用いることが可能だという点にある。したがって、多様性は、類似の誤差が冗長センサ要素に影響を及ぼすようなケースを検出することが可能である。
電気刺激による故障の検出	センサ要素が電気インパルスによって直接刺激される。その電気インパルスは測定された変数 x とともに、センサシステムのその後のすべての構成要素によって処理される。正確に動作しているセンサシステムでは、センサ要素の電気刺激が既知のセンサ応答を引き起こす。それは出力信号 y において検出可能である。 処分場のモニタリングでの用途には以下のものが含まれる。 －　熱電対の逆接続の検出（不良な極性） －　ケーブルの問題の検出（理想的には TDR（時間領域リフレクトメトリ）と結び付けて） －　RTD における湿分の検出	電気刺激による誤差検出の１つの欠点は、この方法の用途が主に数種類に限定されることにある。それは、測定原理を電気的に逆転させることが可能であるようなセンサ要素、すなわち、電気インパルスによるセンサ要素の刺激が測定量 x と同じ規模であるようなセンサ要素に対してしか適用できない。ほとんどの集積化センサにはこのことが当てはまる。
信頼性指標による故障の検出	信頼性指標による故障の検出では、故障の発生・変遷を示すのに、回路／システムまたはセンサの一定のパラメータを用いる。誤差発生の場合にのみ達することになる一定の指定範囲／値を超えているか、またはそれを下回っているかを検出するために、これらのパラメータが常時監視される。 例として、相補型金属酸化物半導体（いわゆる CMOS 集積回路）における定常電流の測定またはシステム内の逸脱条件の点検のためにデータ収集システム内部で熱電対を用いる温度測定がある。	この方法の利点は、モニタリングが容易で、試験機器のための諸経費が少ないことにある。

表 5.3.4-3　センサ故障の検出方法（2/2）（[5]より作表）

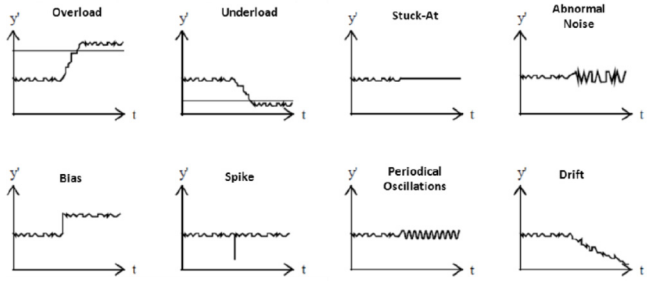
故障検出方法	概要	備考
局所センサ妥当性確認	Yung, （1992a）[7]に基づくセンサシステムの局所的な誤差検出（局所センサ妥当性確認（LSV: local sensor validation）ともいう）は、フィルタ処理されていないシステムの信号 y’の特徴的な信号成分を分析することによって誤差を検出する。 ・限度指標：出力信号 y'が最大値を超過するかどうか、または最小値を下回るかどうかを監視する。最大値／最小値には、物理的限度（達する動作電圧）または用途固有の限度（センサシステムの最大値／最小値）を用いることができる。初期化の際には、両方の限度値をシステムのメモリに記憶させる。 ・シフト指標：この指標は、出力信号 y'における異常なシフトを検出するために用いる。センサシステムの初期化の際には、切替え限界値を一定の値に固定しなければならない。 ・雑音指標：出力信号における雑音変動を上限および下限（選択された周波数範囲に対して有効なもの）と比較し、それに応じて指標を設定する。 ・ドリフト指標：この指標は、システムに記憶させた名目値からの出力平均値の長期偏差をモニタリングするために用いる。  故障の場合に生じる特徴的な出力信号（Yung, 1992b）[8] フィルタ処理されていない出力信号 y'の分析によるセンサの機能不全の検出にあたっては、以下の 4 つの指標を用いる。 ・限度指標：出力信号 y'が最大値を超過するかどうか、または最小値を下回るかどうかを監視する。最大値／最小値には、物理的限度（達する動作電圧）または用途固有の限度（センサシステムの最大値／最小値）を用いることができる。初期化の際には、両方の限度値をシステムのメモリに記憶させる。 ・シフト指標：この指標は、出力信号 y'における異常なシフトを検出するために用いる。センサシステムの初期化の際には、切替え限界値を一定の値に固定しなければならない。 ・雑音指標：出力信号における雑音変動を上限および下限（選択された周波数範囲に対して有効なもの）と比較し、それに応じて指標を設定する。 ・ドリフト指標：この指標は、システムに記憶させた名目値からの出力平均値の長期偏差をモニタリングするために用いる。	この方法は、誤差または故障が、たとえば短絡、切断などの形態によって、またはオペアンプのオーバーライドとして、システムの様々な位置で発生する可能性があるという仮定、ならびにその方法ではすべての可能性のある誤差発生源のモニタリングを非常に効率的に行うことができるという仮定に基づいている。誤差の正確な発生源を決定することが可能となるのは、センサのすべての構成要素とそれらの相互作用が正確に明らかになっている場合に限られる。
相互関係による故障の検出	複数のセンサが同じ物理的パラメータを測定するが、そのパラメータに関して等価の位置に置かれているような場合（たとえば、温度を測定する際に熱源との距離が同じであるが、方向が反対であるような場合）に適用することができる。その際には、それらのセンサの 1 つの読み取り値を他のセンサからの読み取り値と直接関連付けることによって、センサの 1 つの読み取り値が有効であるかどうかを評価することが可能になる。	モニタリング対象プロセスに関する専門家の知識が必要とされる。

表 5.3.4-4　データ伝送の故障と検出方法（[5]より作表）

故障モード	概要	検出方法
電気・機械装置故障	なんらかの種類の電気損傷または機械損傷によるか、または停電により、意味のあるデータが受信されない。	この故障モードは、意味のあるデータを受信できないことが反復的に生じるという事実によって容易に特定される。他の故障モードの 1 つの存在を排除するために、伝送チャネルの追加的スキャンを実施することができる。
データエラー	電気構造物および機械構造物の部分的損傷を含む多くの原因のために発生する可能性がある。	データエラーは「パリティービット」や「チェックサム」使用等の誤差検出方法により特定することが可能である。検出されない誤差の確率は、使用する方法に左右される。
プロトコルエラー	用いたプロトコルのエラーのためにデータが誤解される可能性がある。それらのプロトコルは、ハードウェアまたはソフトウェアにおいてコード化されているアルゴリズムに基づいている。	使用するプロトコルはアルゴリズムに基づいている。それは、ハードウェアまたはソフトウェアにおいてコード化されている。アルゴリズムの試験を十分に行うことで、このようなエラーを回避すべきである。アルゴリズムがなんらかの原因により変更されているかどうかを検出するために、送信機と受信機の自己試験手順を実行することが可能である。
チャネル妨害	他の発生源から生じるデータを受信する可能性がある。	伝送される信号の空間的起源は、様々な位置での信号強度の測定・比較によって推定することができる。2 方向システムでは、暗号キーを要求し、それを（暗号化された）チェックサムと結び付けることによって、伝送の身元を検証することが可能である。

低周波データ伝送における誤差検出

原環センターにて開発を実施している低周波（1~10kHz）電磁波を用いた地中無線モニタリング装置に関するデータ伝送における誤差検出については、以下の記述がなされている[5]。

低周波電磁信号（<100 kHz）の無線データ伝送は、中距～長距離（10 m～>100m）の橋絡に用いられるが、より短距離（1~10 m）にも適用される可能性がある。現在用いられている技術、特に比較的長距離のための技術は、「あつらえられた」解決策として指定することができ、したがって、故障モードに関する結論は、経験ではなく「専門家の判断」に基づき下される。前セクションで論じた誤差検出方法に加えて、以下の点にも注意することができる。

－一般的な装置故障：さらなる分析の可能性の観点から、（このような故障の位置を突き止め、それを修正するにあたり）すべての潜在的尺度が地表にある受信機に制限されていることに注目すべきである。
－データエラー：強力な外部干渉（たとえば落雷）がデータの大きなシーケンスを損なう可能性がある（バーストエラー）ことに注意すべきである。これらの事象を予測する適切な誤差検出方法を選択する必要がある。誤差検出コードの選択（および試験）の際に考慮しなければならない一定のタイプの非ランダム誤差に対しては、個別的な変調方式の使用や非線形成分の効果も役立つ可能性がある。

測定原理ごとの故障検出方法の適用可能性

原理のほとんどについては、利用可能な個別的故障検出方法が存在する（表 5.3.4-5～表 5.3.4-7 下線部）。しかし、圧電効果や化学的効果（特に光ファイバセンサに関する効果）のようないくつかの原理については、適用可能な故障検出方法が存在しない。また、一般に、センサにアクセスしない（自動）故障検出は限定される。

表 5.3.4-5　測定原理に関係する故障検出方法(1/3)[5]

番号	測定原理	冗長性	多様性	電気刺激	信頼性指標	局所故障検出	相互関係	コメント
1	熱電対	「マルチカップル」 1 つのケーブル／パッケージに複数の熱接点	様々なタイプの熱電対（異なる金属）	「ループ電流段階応答法」	連続性（しばしばデータ収集機器に組み込まれる）、隔離抵抗			
2	電気抵抗の変動	×						
	RTD サーミスタ	×		ループ電流段階応答法				
	ひずみゲージ	通常、1 つの有線構成において複数のゲージが結合される。		出力が入力に比例する。		長期ドリフト		
	フルブリッジ型トランスデューサ	×	E.G.圧力センサ：出力信号は圧力に比例するが、入力インピーダンスは温度とともに変化する。		入力および出力インピーダンス			
	電位差計	×		出力が入力に比例する。		接触点の性能（長期間移動がない場合：接触のバーンイン）または力学的ブロッキング		
3	圧電効果	×						
4	磁気誘導	×		インピーダンスメータ				
5	振動ワイヤ	×	熱の影響					
	不連続	×		センサの再磁化のための励磁	連続性、減衰率、信号のスペクトル解析（最新の VW 調整に組み込まれる）			
	連続	×						

表 5.3.4-6　測定原理に関係する故障検出方法(2/3)[5]

番号	測定原理	冗長性	多様性	電気刺激	信頼性指標	局所故障検出	相互関係	コメント
6	容量性システム	×		インピーダンス測定		インピーダンス計		
7	電磁波の伝播	×	電磁波の実（走時）と虚（エネルギー損）	測定原理に固有				
8	熱の放散	高度なモデルには複数の温度センサが組み込まれる。		測定原理に固有	測定の前に温度の安定が必要			
9	中性子減速	×						通常、可動式プローブのみによる（それぞれの測定の前に較正を行う）
10	乾湿計	×		測定原理に固有				熱電対（このセンサに基づく測定原理）参照
11	張力計	×				真空喪失によるドリフト		適正な機能のためには定期的保守が必要（脱気水、・・・）
12	核放射線	×						
13	電気化学システム	×				ドリフト		定期的な較正が必要
	光学的原理			光学刺激				ケーブル故障を検出するためにすべてのファイバで OTDR を用いることができる。
14	IR 検出	×						
15	FO 化学センサ	×						
16	FP 干渉計	×			光エネルギーの必要量、スペクトルにおける「2 次」ピークの存在			

表 5.3.4-7　測定原理に関係する故障検出方法(3/3)[5]

番号	測定原理	冗長性	多様性	電気刺激	信頼性指標	局所故障検出	相互関係	コメント
17	ブラッググレーティング	×	熱の影響					
18	分散型モニタリング							故障は光ファイバにおけるすべての測定に影響を及ぼす。
	ブリルアン散乱	×	ひずみと温度		ブリルアンスペクトル指標	OTDR		
	ラマン散乱	×				OTDR 信号が補償の必要な長さに応じて減少する。		
	相互関係 レイリー散乱（OTDR）	×	ひずみと温度			本質的に検出される。		

すべての電気測定原理に関して以下のことが当てはまる。

－信号ケーブル性能に関する信頼性指標：連続性、隔離抵抗、TDR

－局所故障検出：コネクタまたはワイヤリングパッドの不十分な接触により生じる異常な雑音

フェールセーフシステム

地層処分に関するモニタリングにおいて、特に処分場でのモニタリングにおいては故障検出システムを備えたフェールセーフセンサが用いられる可能性がある。これは、既存のセンサシステムの安全性を高めるため、故障（エラー）検出、解析、表示および排除のための 4 つの機能ブロックによって補われるものである（図 5.3.4-1）。故障が検出されると、エラー解析機能が起動される。この機能は、故障のタイプを決定する（恒久的故障と短期的故障を区別する）。また、故障率と故障の位置を決定する可能性もある。このような情報は、故障排除機能によって処理される。フェールセーフセンサシステムの目的は、たとえ故障が生じても、データ収集を継続的に行うことにある。故障の排除中には、欠陥のある機能ブロックをシャットダウンする必要がある。その間、システムは冗長機能ブロックを通じて動作するか、またはセンサシステムの性能が引き下げられる。故障排除が可能でない場合には、センサシステムを「セーフシステムステータス」にしなければならない。すなわち、次のシステムレベルへのデータ伝送を中断し、欠陥のあるブロックからの出力信号が間違って測定結果として解釈されることがないようにしなければならない。

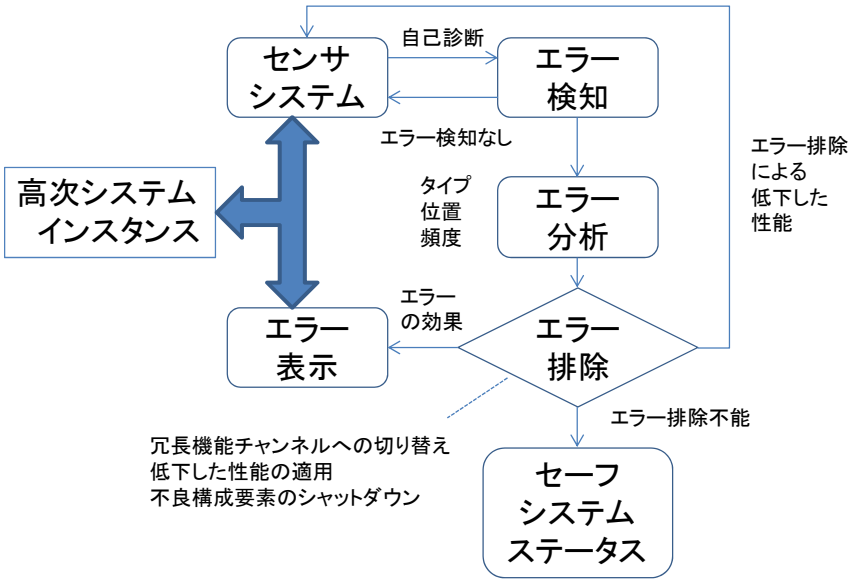


図 5.3.4-1　フェールセーフセンサシステムのブロック図[5]

地層処分モニタリングにおける故障検出

地層処分モニタリングの特徴を利用した故障検知として、以下を述べている。

－パラメータの変遷が通常緩慢であるため、局所的な故障検出システムのための効率的な基準を定義することが可能である。

－冗長性の適用が容易であり、様々なレベルでの適用が可能である。

　〇同じ処分場構成要素における冗長センサの使用。

　〇処分場構成要素の異なる位置／異なる距離のところでのセンサの使用。

　〇処分システムの異なる部分における同じ構成要素の反復的モニタリング。

　〇明瞭に区別できる機能冗長性。

－ほとんどの場合には、複数のパラメータが測定され、これらのパラメータが互いに構成関係を有することがしばしばあるため、相互関係を利用することが可能である。

　長期モニタリングに関して、フェールセーフセンサには（自動）故障検出・補償機能が組み込まれるため、モニタリングプログラムの設計時にはフェールセーフセンサについて検討すべきである。

(2)　人工バリアのモニタリングにおける技術的課題

処分場内部または周辺でのモニタリングを実施する場合、その目的の一つに人工バリア及びニアフィールドの天然バリアが、安全評価上期待される性能を発揮することを確認することが想定される。処分場にて人工バリア及びニアフィールドのモニタリングを実施する場合、モニタリング機器の設置による潜在的水みちの形成を防ぐことが、技術的課題として挙げられる。

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が目的であることを考えると、この性能が処分場における実廃棄体近傍でのモニタリング以外の方法にて確認され、そのことが規制機関やその他のステークホルダーにとって十分に説得力を持つものであれは良いこととなる。このための方法として、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。原環センターではこのような考えの下、「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない。」ことをモニタリングの実施における制約条件の基本事項として、具体的なモニタリングのあり方について検討してきた[3]。

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、地下調査施設での試験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、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可能性が存在する。処分場にて人工バリア及びニアフィールドのモニタリングを実施する場合、モニタリング機器の設置による潜在的水みちの形成を防ぐには下記の手法が考えられる。

・地中無線通信技術を適用したモニタリング
・物理探査的手法による非侵入型のモニタリング

このうち物理探査的手法については MoDeRn における検討[9]において弾性波による緩衝材の膨潤と緩衝材中のガスの移動に関する試験が実施されているが、現在のところ十分な適用性は得られていない。

地中無線モニタリング技術はモニタリングデータを無線にて送信するため人工バリア等を貫通するケーブルを必要とせず、潜在的な水みちの形成を抑制できる技術である。土木分野等で実績を持つ技術であり、地層処分特有の環境条件の克服することにより適用が可能となるものと考えられる。地層処分分野での適用においては、人工バリア等をモニタリングする必要がある場合に有効であるのみならず、処分場の処分坑道と人工バリアでのモニタリングを実施しない場合にも、主要坑道や連絡坑道のモニタリングにおいて地中無線モニタリング技術を適用すると、埋め戻しが行なわれプラグが設置された後もモニタリングが可能となる。

原環センターではこのような利点を持つ地中無線モニタリング技術に着目し、フランスの

ANDRA との共同研究を含む開発と地下研究所における試験を実施してきた。次節では地中無線モニタリング技術に関する調査について述べる。

5.4　地中無線モニタリング技術に関する調査

5.4.1　地中無線モニタリング技術に関する開発課題の検討

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、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等を行ってきた。

本年度はこれまでに抽出した開発課題を再検討し、新たに見直した課題と共に、原位置試験を考慮し他機関との共同研究を積極的に活用する視点も踏まえ、優先順位及び実施年度等を整理した。

5.4.2　地中無線送信技術の必要性

地中無線送信技術は、図 5.4.2-1 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 5.4.2-1　地中無線送信技術の必要性

5.4.3　これまでに設定した地中無線送信技術開発課題と開発の実施状況

(1)　これまでに設定した地中無線送信技術開発課題

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。抽出した地中無線送信技術の開発課題を表 5.4.3-1 に示す。表 5.4.3-1 では各段階に必要な技術を整理しており、最初の段階である地下研究所（実証研究等）においては、ハード技術として「小型化」、「ボーリング孔対応」、「耐圧性の向上」、「センサ接続機器の開発」及び「中継ネットワークの構築」を挙げている。解析技術としては「複雑な地下施設でのモデル化」を挙げている。

第 2 フェーズの後半の 4 年間（平成 21 年度～平成 24 年度）においては、地中無線送信技術の適用性向上として、前半に抽出した開発課題の克服に向け、順次着手を行った。

表 5.4.3-1　適用性向上に向けた地中無線送信技術開発課題

開発課題 時間軸	地下研究所（実証研究等）	地下調査施設	処分施設
【ハード技術】			
小型化 H21年度	○	○	○
ボーリング孔対応(φ100mm)	○	○	○
耐熱性の向上(90℃)	△	○	○
耐圧性の向上(10MPa)	○	○	○
センサー接続器具の開発	△	○	○
耐放射線性の向上			○
耐久性の向上(10年間)		○	○
通信距離の長距離化(500m)	△ANDRA	△	○
中継ネットワークの構築(110m)	△幌延	△	○
通信方式による通信効率の向上	△	△	○
【解析技術】			
複雑な地下施設でのモデル化	○	○	○

済み　実施中

○：当該段階前までに解決すべき課題
△：当該段階までに解決されていることが望ましい課題

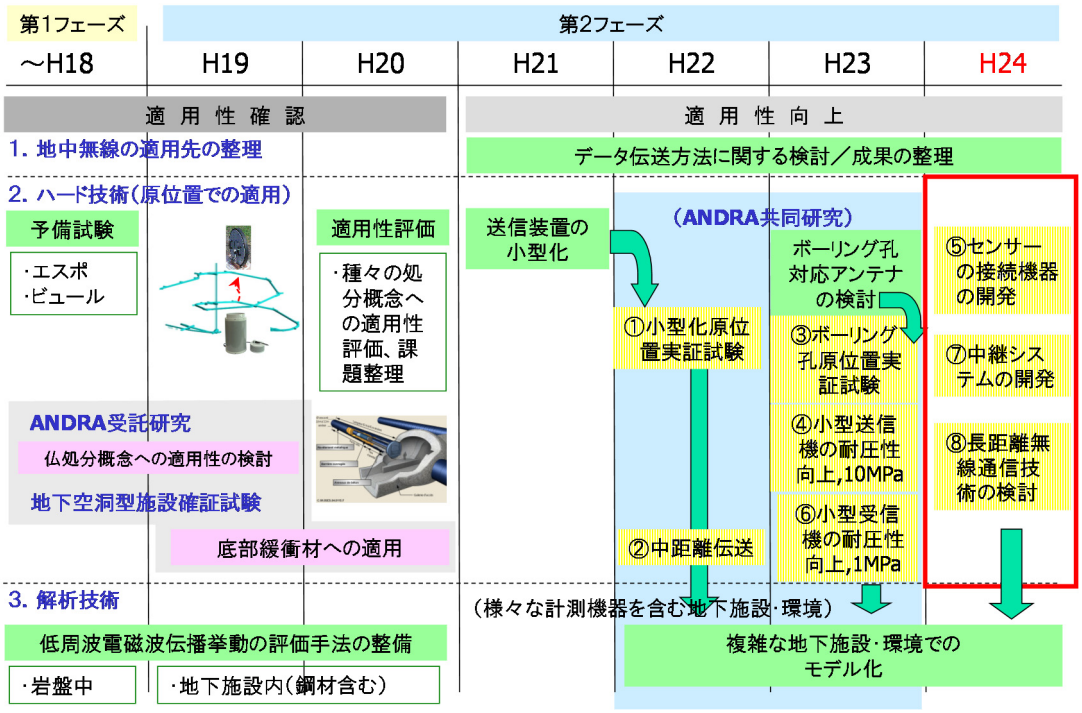
(2)　地中無線送信技術開発課題を踏まえた第 2 フェーズの開発実施内容

原環センター殿の地中無線送信技術の開発に関しては、表 5.4.3-2 に示すように、平成 19 年度から始まる第 2 フェーズの前半の 2 年間において、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抽出した。

平成 21 年度から始まる第 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、ビュール地下研究所（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、ビュール地下研究所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。

表 5.4.3-2　地中無線送信技術の開発経緯



5.4.4　開発課題の再検討

(1)　開発課題の再検討の手順

地中無線の送信技術の開発課題として、これまでハード技術と解析技術に区分して整理してきた。ハード技術としては、以下に示すように装置のサイズの小型化から始まり、耐熱性や耐圧性の向上、そして長距離送信に向けた開発に着目していた。解析技術としては既往の解析ソフトを活用し、複雑な地下環境（様々な鋼製部材を含む）での電磁波伝播特性の評価とした。

- 送信装置の小型化（緩衝材での適用）
- 受信装置のボーリング孔対応（送信距離の短縮化）
- 装置の耐熱性の向上（緩衝材での適用）
- 装置の耐圧性の向上（大深度での静水圧環境への適用）
- 装置の耐放射線性の向上（緩衝材での適用）
- 装置の耐久性の向上（長期間モニタリング）
- センサ接続器具の開発（任意のセンサの適用）
- 送信距離の長距離化（長距離送信）
- 中継ネットワーク（長距離送信）
- 送信方式による送信効率の向上（送信距離の向上）

これらの開発課題に関し、定性的な目標は設定しやすいが、定量的な目標に関しては開発が進み、適用性が認められると更に変化していくこととなる。例えば、送信装置のサイズは小さけれ

ば小さいほど、好ましいためである。また、一つの開発課題が他の開発課題に影響を与えるケースもある。例えば、送信距離を長距離化するためには、送信機を大きくする必要があり、送信装置の小型化と相反する。

以上より、開発課題の再検討については、先ず第 2 フェーズでの開発成果を踏まえ、先ず、①最終的な適用イメージを設定すると共に、②各適用イメージにおける課題と開発項目を抽出した。そして、③原位置試験を考慮し他機関との共同研究も踏まえ、実施のし易さ（課題の克服のし易さ）やモニタリングの枠組みに関する検討との関係を考慮した上で優先順位の重みづけを行った。

(2) 最終的な適用イメージ

以下に、我が国における将来の地層処分プロジェクトを見据え、「操業・閉鎖段階において実施可能なモニタリング」と、実プロジェクトに至るまでの「技術的観点での合意形成において必要となるモニタリング」という視点で、最終的な適用イメージを整理した。

1) 操業・閉鎖段階において実施可能なモニタリング

本報告書の 3.4.3 において述べたように、原環センターでは「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない。」ことをモニタリングの実施における制約条件の基本事項として、具体的なモニタリングのあり方について検討している。

地中無線送信技術にはケーブルが不要であるというメリットを有するが、現在の技術的な制約条件として、伝送距離が限定され、伝送速度が遅く、かつ機器の寿命に加えバッテリーの寿命も考慮する必要があること等のデメリットも有している。しかしながら、これらの課題を克服すれば、下記の様なモニタリングが可能となるものと考えられる[10]、[11]。

- ✓ 処分場の処分坑道と人工バリアでのモニタリングは実施しないが、主要坑道や連絡坑道では、埋め戻しが行なわれプラグが設置された場合においても無線送信装置を用いればモニタリングが可能となる（図 5.4.4-1）。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 5.4.4-2）。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、地下調査施設において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地中無線送信技術により行うことが可能である。また、データの伝送距離に関する欠点を補うため、近傍にボーリング孔を設置することにより、対処可能となる（図 5.4.4-3）。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。

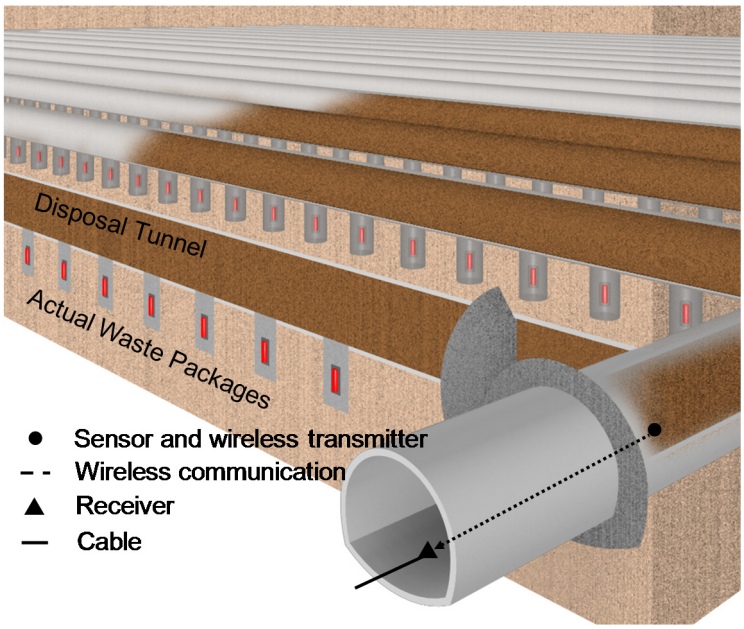


図 5.4.4-1　無線による人工バリアのモニタリング（処分場）

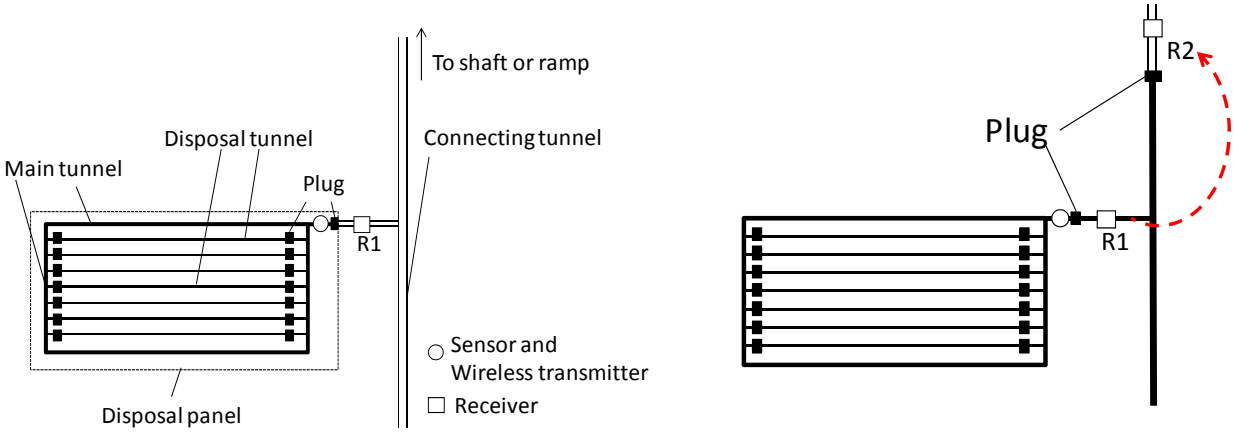


図 5.4.4-2　無線による人工バリアのモニタリング（処分場における無線中継）
左：処分パネルの埋め戻し、右：連絡坑道埋め戻しに伴う無線中継

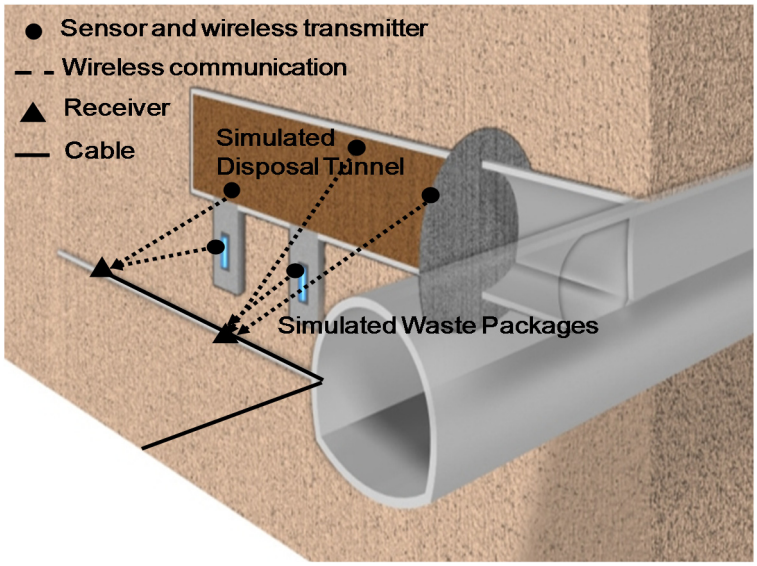


図 5.4.4-3　無線による人工バリアのモニタリング（地下調査施設）

✓　更に必要であれば図 5.4.4-4 に示すように、実廃棄体近傍でのモニタリングへの適用も考えられる。ただし、この場合は廃棄体近傍に送信機とセンサを残置可能かなどの要件を満たす必要がある。

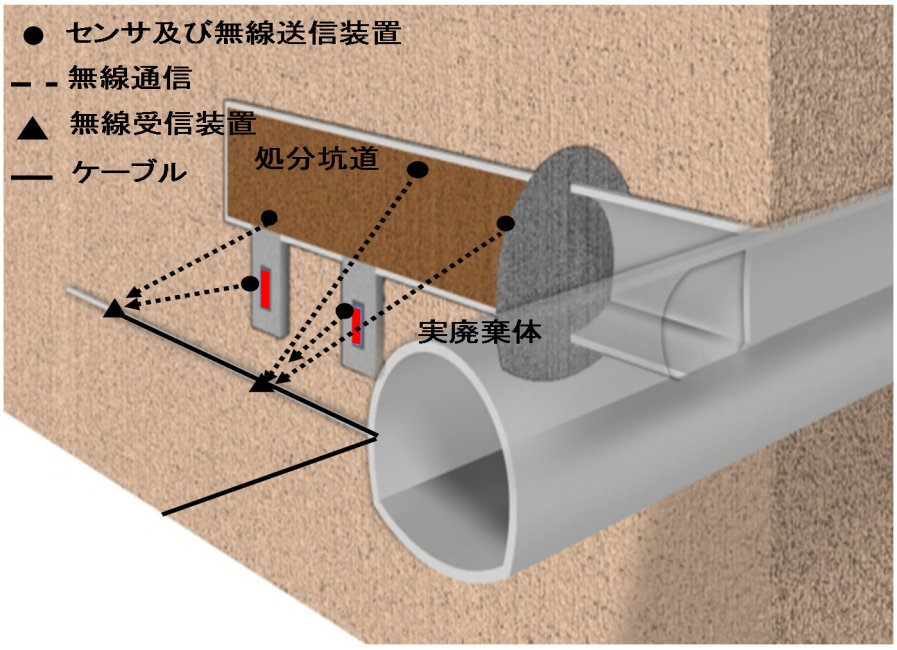


図 5.4.4-4　地中無線による廃棄体近傍のモニタリング概念図

2)　技術的観点での合意形成において必要となるモニタリング

地中無線送信技術を活用して我が国の地層処分プロジェクトの信頼性を向上させ、合意を得ていくためには、海外で行われるプロジェクトにも積極的に関与し、地中無線送信技術の特性を利用して、例えば人工バリアである緩衝材の再冠水挙動などの知見を確実に得ることも重要となる。

例えば、フィンランドの HLW 地層処分の実施主体である Posiva 社では地下特性調査施設オンカロにおいて坑道を用いた人工バリア試験を計画している。MoDeRn によるケーススタディー[5]でのフィンランドの HLW 地層処分を念頭に置いた事例では図 5.4.4-5 に示すような中継システムを用いた地中無線モニタリング技術の適用を原環センターと共に提案した。

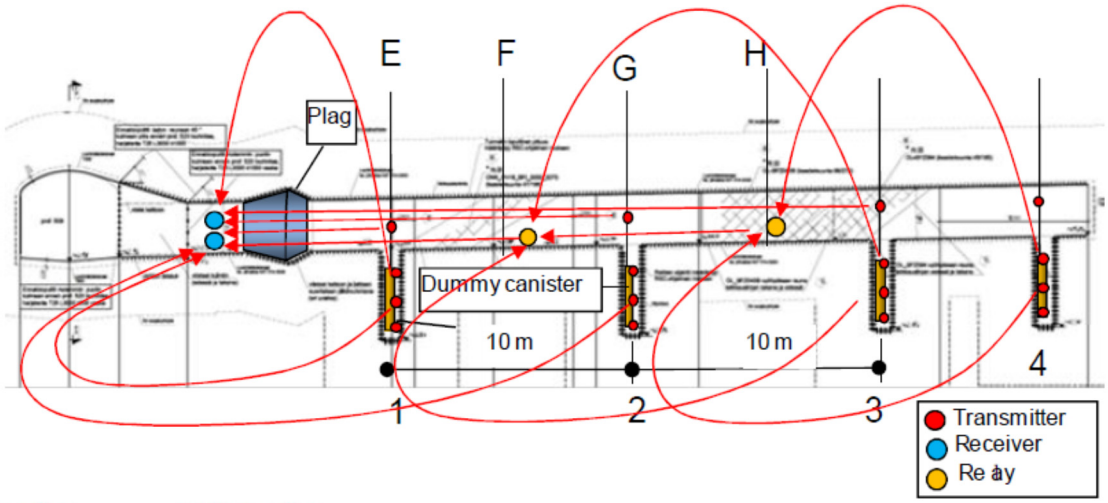


図 5.4.4-5　人工バリア試験での地中無線送信技術の適用イメージ[5]

また、現在フランス Andra では原環センターとの共同研究において、ビュール地下研内にて地中無線送信技術を用いた長期モニタリングを実施している。本長期モニタリングでは坑道に設置されたボーリング孔間の地中無線送信技術による送信結果を図 5.4.4-6 に示す有線にて地上でデータを観測できるようにしている。

しかしながら、地中無線送信技術において地下深部から地上にデータを伝送できる可能性を示し、「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」ことをある一定期間地下研などで実証できれば、地層処分の安全性への理解促進の観点で有望である。そこで、同図 5.4.4-6 に示すように、長距離伝送に地中無線送信技術を適用することも考えられる。

以上より、上述した 5 種類の適用方法を目標として、開発課題の再検討を行い、具体的な開発計画を立案する。

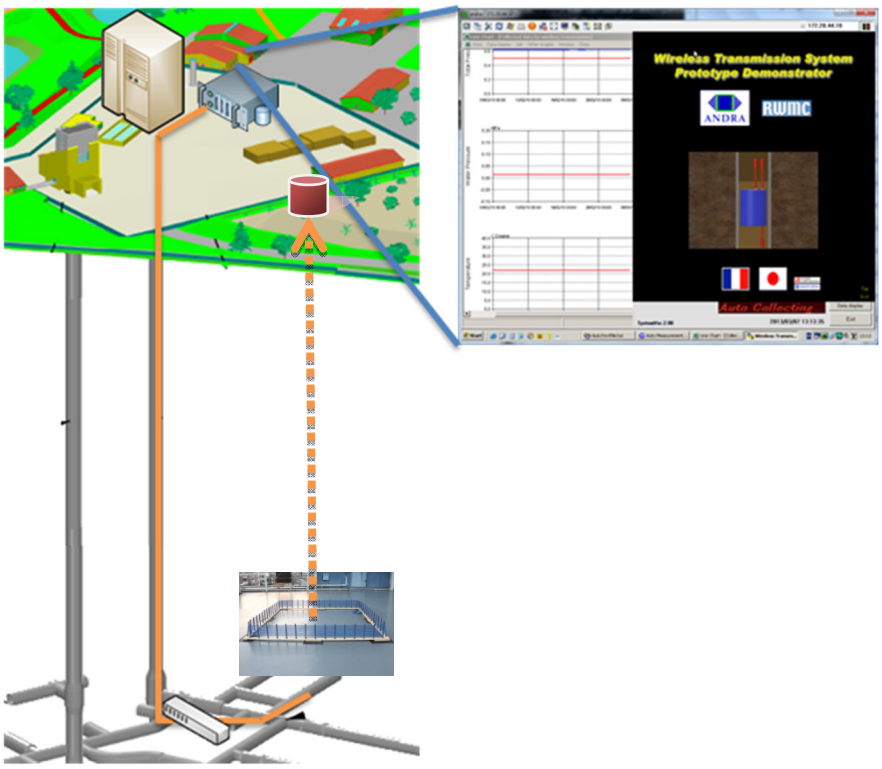


図 5.4.4-6　フランス Andra での地中無線送信システムでの測定結果の
地上へのデータ伝送イメージ（現在：有線、将来：無線）

(3)　開発課題の再検討

前述した 5 種類の適用方法を目標として、開発課題の再検討を行った。再検討においては、表 5.4.4-1 に示すように各適用イメージに対して、その適用の場合の課題を整理し、開発項目を抽出した。

表 5.4.4-1　各適用イメージにおける課題と開発項目

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（図 5.4.4-6）	・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、図 5.4.4-5）	・1 回 50m 程度の中継によるデータ送信 ・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） ・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） ・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、図 5.4.4-3）	・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） ・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 ・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 ・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、図 5.4.4-1、図 5.4.4-2）	・追加が可能な中継装置 ・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、図 5.4.4-4）	・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） ・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 ・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 ・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 5.4.4-1 に示した開発項目を整理すると、表 5.4.4-2 に示すように大きく 3 系統に分類できる。

先ず、最初の開発項目である「a.長距離送信能力（外部電源可）」は他の 2 つの開発項目とは完全に区分して考えることができる。対策としては、現在進めている Andra との共同研究である長距離送信の継続（送信強度の向上、磁束の減衰量の低減、及び S/N の向上）を行うべきである。

次の開発項目である「b.中継装置」については、中継システムを構築（開発、及び高度化）し、中継装置の大きさを確定（中継装置を設計）し、耐圧性を向上させ埋蔵可能なように整備すると共に、内部電源の寿命を高度化することが必要となる。

最後の「c.小型送信機」については、内部電源の長寿命化、耐熱性の向上、センサと一体化した送信機の開発、及び耐放射線性の向上が必要となる。

以上を踏まえ、今後の開発計画を立案するため開発方針と優先度を検討する。

開発方針に関し、「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）」については、表 5.4.4-2 に示す「一次電池の長寿命化」、「非接触電力供給の高度化」、「ベータボルタイック発電方式の高度化」及び「放射性同位体熱電気変換器の高度化」などに関して、現在、様々な技術開発が行われているため、これまでと同様に技術開発の動向を継続してウォッチングしていくことが必要と考えられる。これに加え、「非接触電力供給の高度化」や「放射性同位体熱電気変換器の高度化」については、地中無線への適用を考慮した検討が開始されていることから、現在検討を実施中の機関との協力による基礎的な適用性の確認を行い、この結果を踏まえたその後の方針の再検討が必要である。

優先度に関し、「a.長距離送信能力（外部電源可）」については、「5.4.11 フランス・ANDRA との共同研究状況」に示す通り、既に計画などが検討されているため、来年度実施すべき課題である。

「b.中継装置」については、坑道の埋め戻しに対応するため、現存する一次電池（リチウム電池）を前提として、今年度の検討成果を踏まえ、ネットワーク型の中継システムの検討と耐圧性を向上させ、坑道を埋め戻した環境での使用が可能な機器を整備すべきである。

「c.小型送信機」については、耐熱性を向上させつつ、センサと一体化した送信機の開発が必要である。ただし、耐熱性の向上については、計測レイアウトで多少の対応ができると共に、どこまでの耐熱が必要かとの課題もあるため、基本性能（現状機器での耐熱性）確認調査を継続しつつ、方針を決定すべきである。また、センサと一体化した送信機の開発については、小型送信機によるモニタリングパラメータ、測定値の範囲、精度等の検討を実施した後に一体化すべきセンサを決定する必要があるため、ここでは優先度を下げた（桃色で着色部）。耐放射線性については実際の処分が開始される時期における適用となるため、ここでは開発優先度を下げた。

表 5.4.4-2　各開発項目と対策

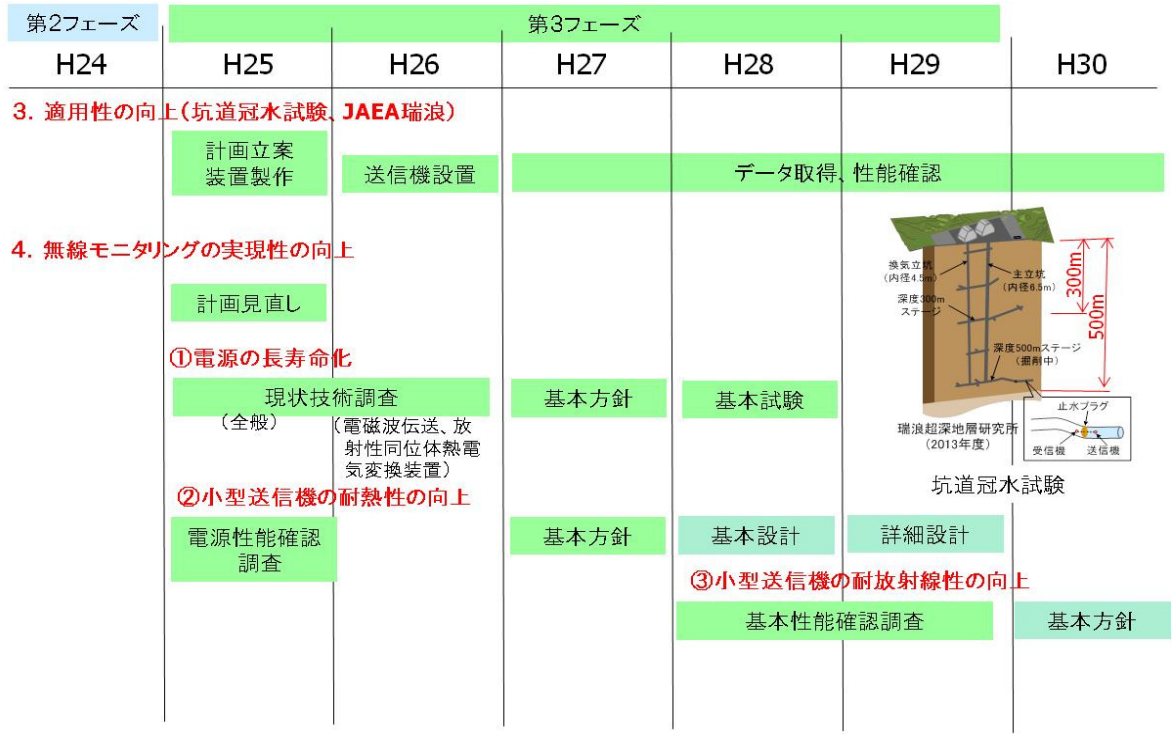
開発項目			対策
a.長距離送信能力（外部電源可）			「Andra との共同研究」 ・送信強度の向上（アンテナの大型化、耐電圧の向上等） ・磁束の減衰量の低減（鋼製部材の少ない坑道の利用、ボーリング孔を活用した鋼製部材外からの送信等） ・S/N の向上（ボーリング孔を利用した受信等）
b.中継装置	中継システム	1 回 50m 程度の 1 段/多段中継	・中継システムの開発
		追加可能な多段中継	・中継システムの高度化
	埋蔵型（耐圧性）		・中継装置の設計 ・耐圧性の向上
	内部電源の 10～20 年程度の長寿命化（高頻度での測定・送信設定のケース）		・一次電池の長寿命化 ・非接触電力供給の高度化 ・ベータボルタイック発電方式の高度化 ・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

更に、地中無線送信装置を適用する場合の課題としては、「地中無線の適用に応じたモニタリングレイアウト（電磁波の伝播経路における金属製部材の除去や中継装置設置用のニッチの掘削など）」に加え、廃棄体の耐熱性や廃棄体の存在自体が磁束の形成に問題がある場合などには、「部分的なケーブルの併用による地中無線によるモニタリングレイアウト」も検討すべき課題となる。

(4)　開発計画

上記の検討成果を踏まえ、整理した開発計画（案）を表 5.4.4-3 に示す。本改訂研究計画には、地中無線技術への適用ニーズに基づく、地中無線技術の適用性向上も含めている（例えば、JAEA 瑞浪の坑道冠水試験）。

表 5.4.4-3　地中無線送信技術　改訂研究計画



5.4.5　地中無線中継装置等の耐圧性強化に関する検討

平成 24 年度に開発した地中無線中継装置、平成 23 年度に開発したボーリング孔対応型受信アンテナ、及び 3 個のセンサが接続可能な地中無線送信装置について、静水圧環境で使用するための耐圧性を付与するための方策を検討し、機器の概念設計を実施した。

(1)　耐圧性強化の対象となる機器

耐圧性強化の対象となる機器は、図 5.4.5-1 に示す「平成 24 年度に開発した地中無線中継装置（本体)」、図 5.4.5-2 に示す「平成 23 年度に開発したボーリング孔対応型受信アンテナ」、及び図 5.4.5-3 に示す「3 個のセンサが接続可能な地中無線送信装置（フランス ANDRA のビュール地下研究施設にて適用中)」の 3 種類である。

本調査では、これらの装置に関し、高水圧環境（10MPa）での適用に向けた耐圧性を付与するための方策（鋼製部材の活用、空隙部充填など）を検討し、機器の概念設計を実施した。

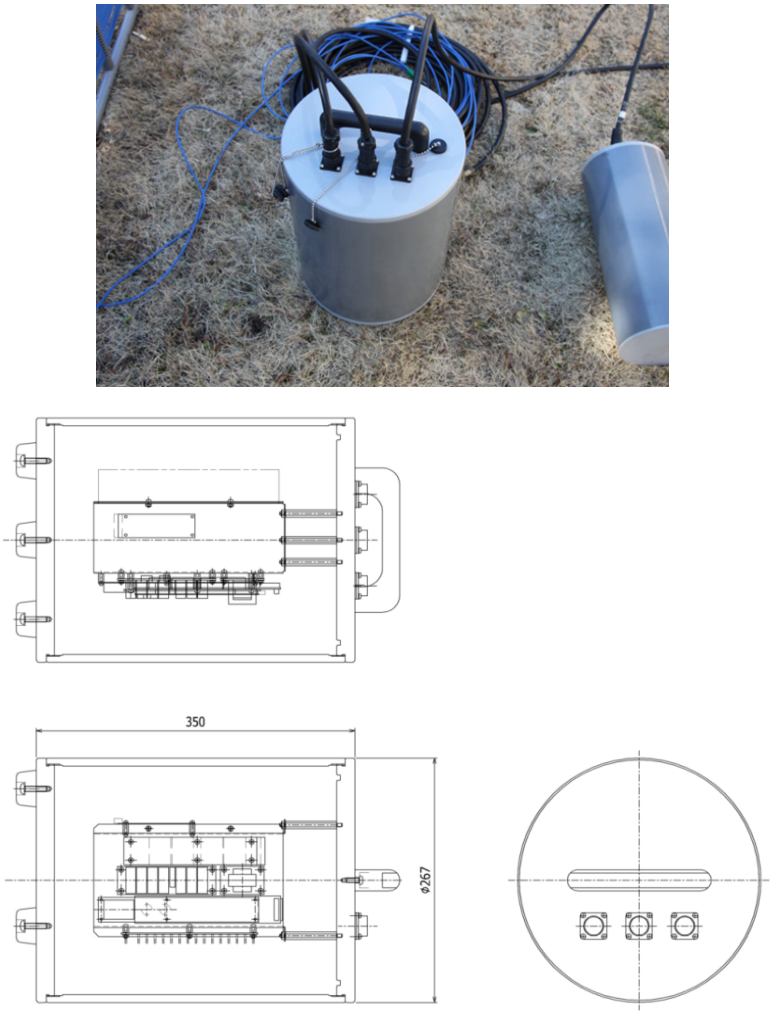


図 5.4.5-1　平成 24 年度に開発した地中無線中継装置（本体）

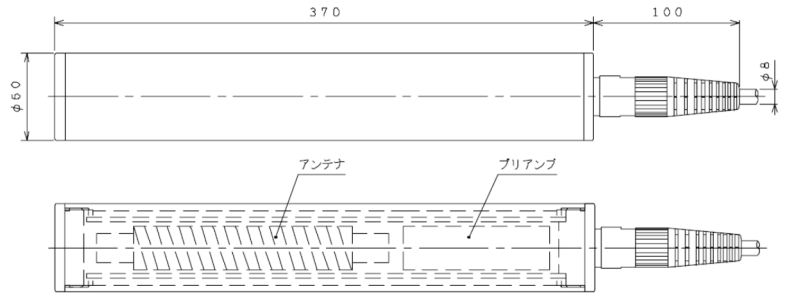


図 5.4.5-2　平成 23 年度に開発したボーリング孔対応型受信アンテナ

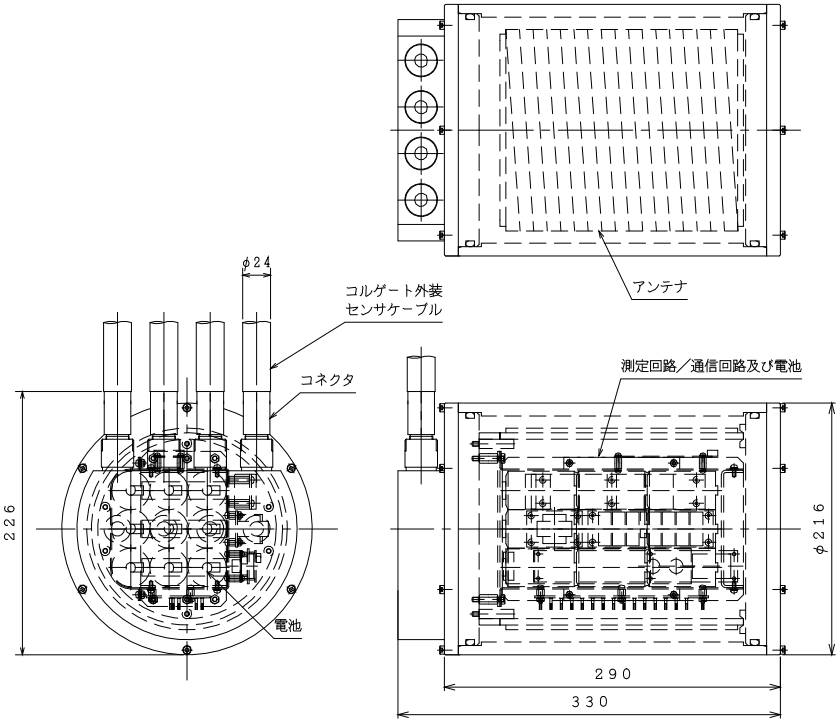


図 5.4.5-3　3 個のセンサが接続可能な地中無線送信装置

(2)　耐圧性強化に関する基本的な方策

高水圧環境（10MPa）での適用に向けた耐圧性を付与するための方策としては、主に以下の基本的な方策に基づき検討する。

① ボーリング孔対応型受信アンテナおよびフランスのビュール地下研究施設に適用した 4 個のセンサが接続可能な地中無線送信装置などの比較的大きさが限られている装置は、通信時に出力される低周波磁界の形成に影響の少ない位置であるアンテナ内側などに、鋼製部材を配置して耐圧性の向上を図るか、内部充填等により耐圧性の向上を図る。

② 中継装置などの大型装置は、機器の小型化を検討し、装置の大きさを現実的な寸法に抑えたうえで装置の耐圧性向上を図る必要がある。ただし、中継装置の場合は電源およびシス

テムとしての課題が残されているため、ここでは中継装置を本体やバッテリー、増幅器などで個々にモジュール化し、そのモジュール毎に耐圧性向上を図ることとした。そのため、ここでは代表化できる一つのモジュールの耐圧性を対象とする。そして、電源の省電力化および中継システムとしての性能向上については、本調査にて課題解決に向けた検討を行った。

(3) 平成 24 年度に開発した地中無線中継装置（本体）の耐圧性付加

1) 基本的な方策に基づく実施方法

開発した中継装置本体は、AC100V で動作し、中継装置本体の外部に電源装置およびアンテナ同調用機材が接続されいる。耐圧性向上を図るためには、すべての機器を耐圧筐体内部に収める必要がある。また、電源となる電池も同様に搭載する必要がある。

耐圧筐体の大型化は、耐圧性向上に大きな影響を与える。これを実現するためには、現実的な寸法に中継装置が収まるように小型化を検討する必要があり、そのためには中継動作の効率化を検討する必要がある。

耐圧性を向上させるために必要な小型化のための省電力化検討項目として、以下のような要素がある。

① 省電力動作シークエンス検討
② 省電力化のための回路見直し検討
③ 単方向送信機の時計同期方法検討
④ 中継動作が複数段になった場合のシークエンス検討
⑤ 異常復旧シークエンス検討
⑥ RTC（リアルタイムクロック）高精度化のための回路変更検討

今後想定される中継動作の要求機能を図 5.4.5-4 のように設定し、各検討項目について概略検討を行い、開発の方向性を整理した。まず中継装置は複数段の中継（2 段程度）を行えることを前提とした。また、最末端の中継装置は複数のセンサ付小型送信機からのデータを受け取ることができ、受信可能な小型送信機は 10 台程度とした。

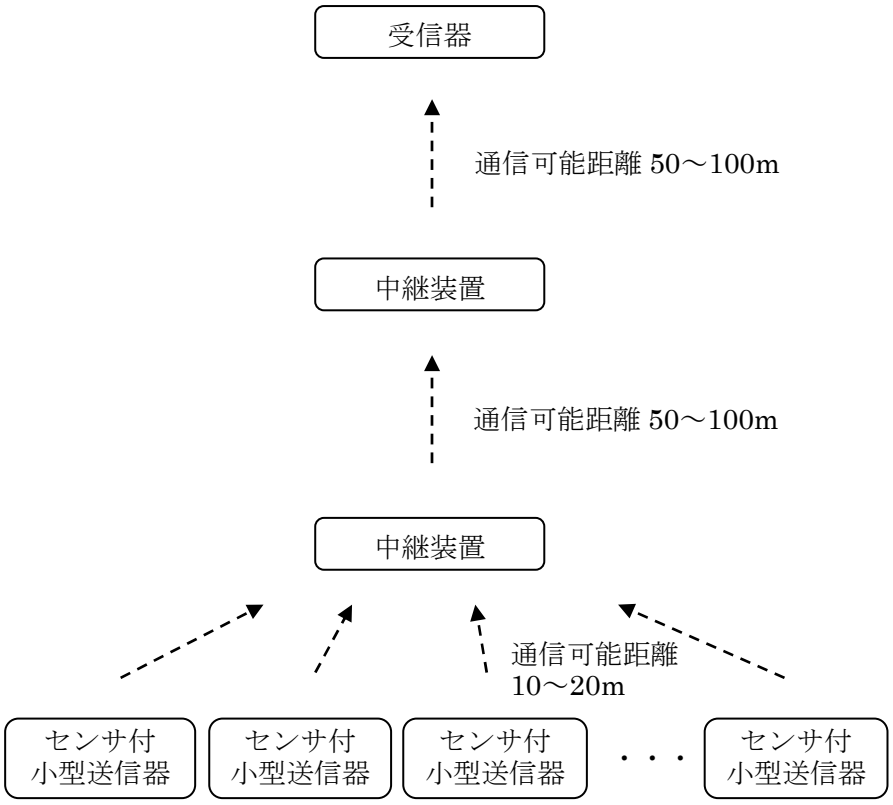


図 5.4.5-4　中継動作設定

①　省電力動作シークエンス検討

現状の中継装置は、センサ付小型送信機から送信してくる信号を受信するため常時受信待機状態で起動しておき、データを受信するとそのデータを即座に上位の中継装置もしくは受信機に伝送する。この場合、問題となるのが、常時受信待機のために起動していることからくる電源問題である。しかしながら、常時受信待機していることからセンサ付小型送信機の時計ずれ等の時間同期問題には対応可能である。省電力化を図るためには時計のずれの問題に対応したうえで受信待機を間欠的に動作させ電力消費を抑える必要がある。

次にデータ送信時については、受信したデータをある程度まとめて送信する方が効率が良くなるが、その分、データの管理が複雑になるなどの問題がある。これらを考慮したうえで、以下のようなシークエンスを今後詳細に検討する必要がある。

- 電源の小型化のためには、受信待機を間欠的な動作とする。
- あらかじめ登録され、データ受信対象となる小型送信機からのデータを受信したのちに、まとめて上位の中継装置もしくは受信機に伝送する。

②　省電力化のための回路見直し検討

中継動作の場合、複数の小型送信機から送られてくるデータをそれぞれ受信する必要がある。各送信機はそれぞれ時間をずらして送信するため、受信する送信機の数が増えるとその分受信のために起動している時間が長くなる。また、送信機に搭載されている時計（水晶）は少しずつずれていくため、その分のマージンを見越す必要がある。よって、受信に要する電力は大きな割合を占めることから、省電力化回路を検討する必要があり、そのためには、受信回路の省

電力化が最も重要となる。送信回路は通信させたい距離に応じて電力を必要とするので省電力化が図りにくい。また、スリープ時の消費電力は電源管理を実施するための時計だけが起動していればよいため十分に省電力ができている。よって、受信回路の省電力化を検討すれば装置（特に電源）の小型化を図ることが可能となる。

③　単方向送信機の時計同期方法検討

センサ付小型送信機は送信機から受信機もしくは中継装置への一方通行の通信装置であることから、受信機や中継装置から個々の小型送信機の時計を同期する（修正する）ことはできない。したがって、想定される時計ずれ量を把握し、そのずれ分を考慮したタイムテーブルを作成する必要がある。確実な通信を見込むためには十分なマージンが必要になるが、マージンを大きくすると消費電力が増加することとなる。そこで、中継装置は小型送信機からデータを受信した時間を記録しておき、本来の受信予定時刻との差を計算し、次回受信予定時刻を求めることで電力消費を抑える方法などを検討する必要がある。

④　中継動作が複数段になった場合のシークエンス検討

中継動作が複数段になった場合、問題になると考えられるのは、各中継装置間の時計同期の問題と、途中の中継装置が故障等の障害を起こした際の対策であると考えられる。各中継装置間の時計の同期問題は、③⑥の対策と同様となる。中継装置が故障等の障害により次の段階にデータを伝送できなくなった場合、それ以前のデータをすべて取得できなくなる。よって、データの欠測を防ぐためには、経路の冗長化が重要となる。冗長化の手法としては、2 段階先の中継装置まで通信可能なように経路を重ねて冗長化する方法と通信経路を 2 つ以上設けて障害を起こした中継装置を迂回する方法がある。通信経路を 2 つ以上設ける場合、通信可能な範囲内に別経路を設ける必要があるため、地中無線の通信方式としては経路を重ねて冗長化する方が適していると考えられる。

⑤　異常復旧シークエンス検討

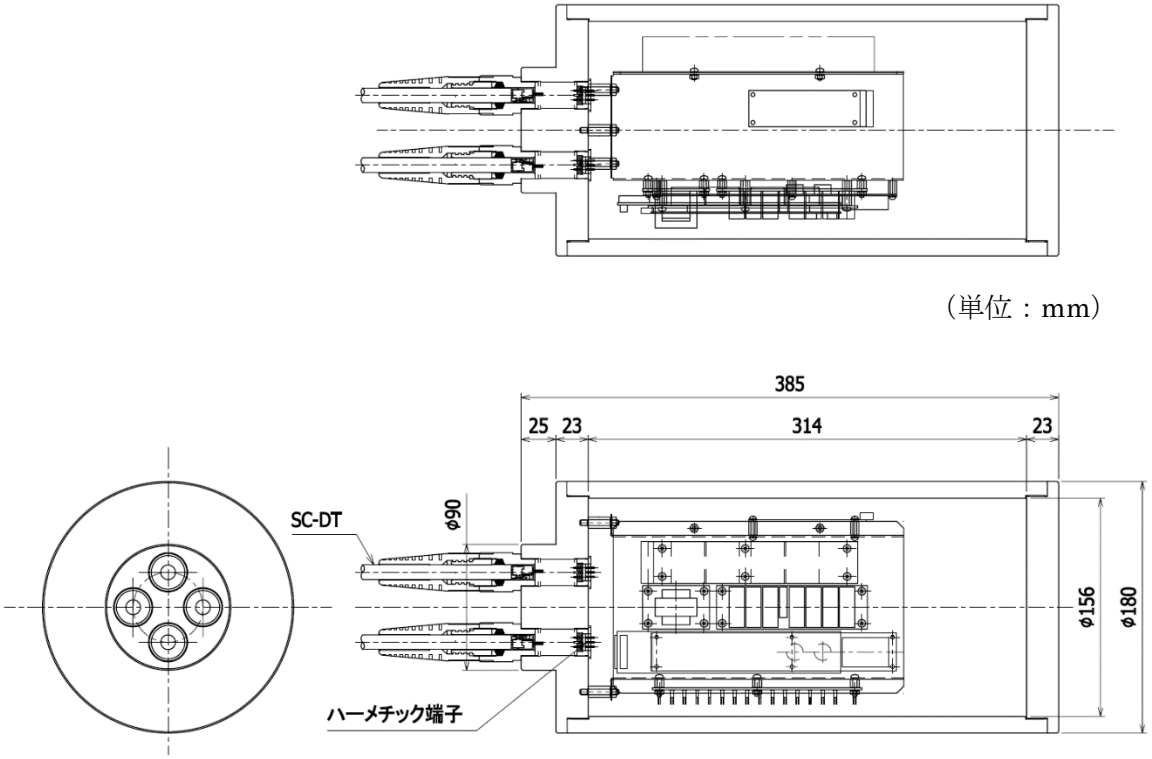
地中に埋設され使用される機器においては、機器に異常が生じた場合、可能な限り自動復旧することが必要となる。特に通信装置など複雑な動きを行う機器においては、内部に制御用のマイクロコンピュータを搭載する場合がほとんどであるため、通常のハードウェア的故障のほかに動作するソフトウェアの異常動作なども考慮する必要がある。そこで、本来決められた動作以外の動作を行っているか監視する回路（ウォッチドック回路）を独立して設け、中継装置の制御回路の監視を行う。これにより異常動作を検知した場合には、機器の再起動を行うなどして自動的に機能復旧を実施するようにする。中継装置の場合、故障に伴いその系統のデータを取得できなくなることから、冗長化等のハードウェア的対応も検討する必要がある。

⑥ RTC（リアルタイムクロック）高精度化のための回路変更検討

時計の同期問題は、機器内部に搭載した時計のずれによって発生する。もし高精度な時計（RTC）を実装できれば、中継動作の信頼性向上に大きく寄与する。そこで、高精度な RTC を調査し、実装可能か検討する必要がある。

2) 概念設計

前述した耐圧性強化に関する基本的な方策に従い、耐圧筐体を設計した。中継装置はアンテナが外部に接続されるため、筐体に金属製部材を使用しても電磁波形成に影響がない。そのため、モジュール化したそれぞれの筐体ごとに金属製耐圧筐体を設計した。設計した筐体を図 5.4.5-5 と図 5.4.5-6 に示す。



（単位：mm）

図 5.4.5-5　耐圧性向上中継装置本体（モジュール化）

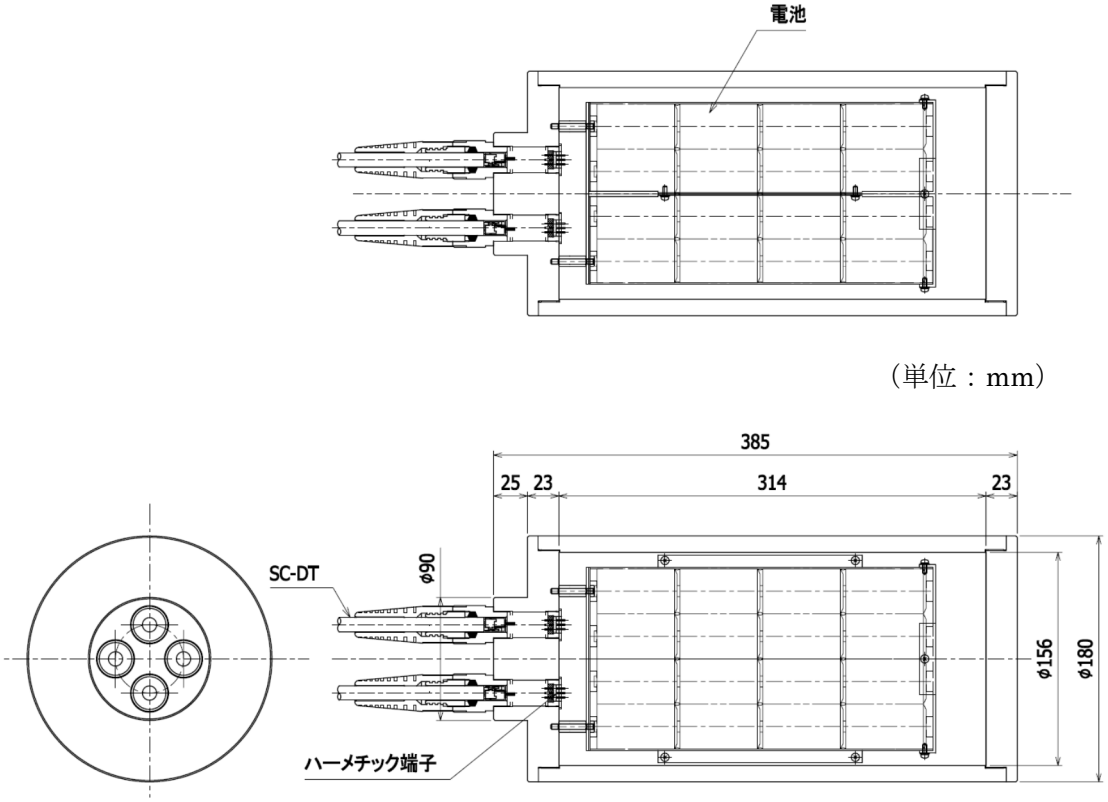


図 5.4.5-6　耐圧性向上中継装置電源（モジュール化）

設計した耐圧筐体の性能を確認するために FEM（有限要素法）解析を行った。図 5.4.5-7、図 5.4.5-8 及び図 5.4.5-9 に FEM 解析結果を示す。その結果、最大静水圧 10MPa かかった場合でも安全率 3 を確保し、所定の耐圧性能を確保できていることが分かった。

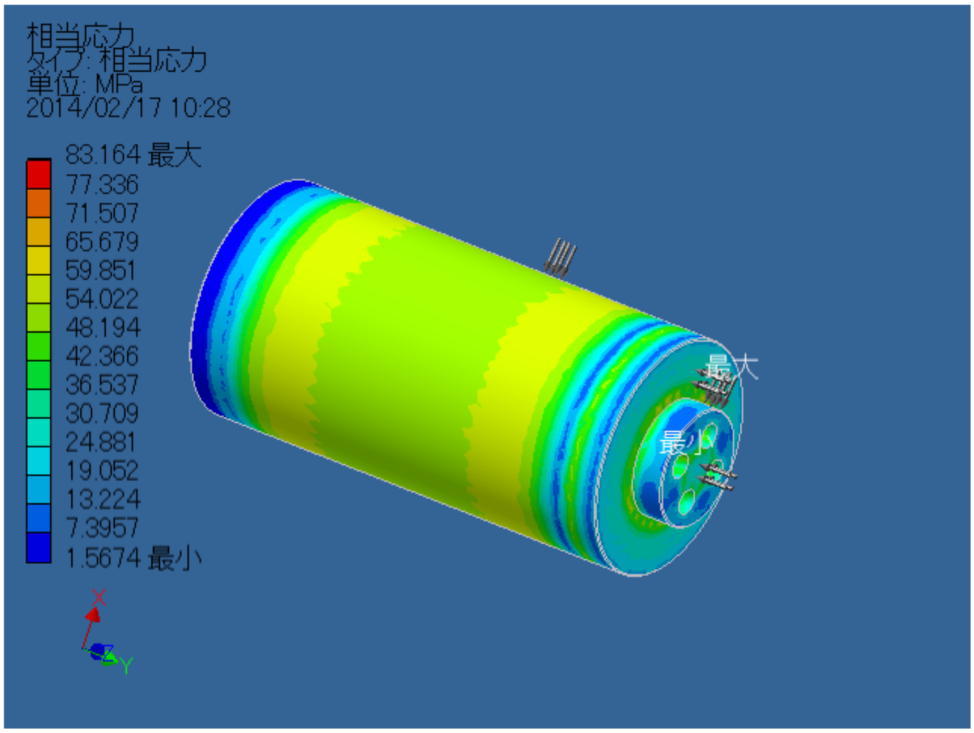


図 5.4.5-7　耐圧性向上中継装置（モジュール化）の相当応力

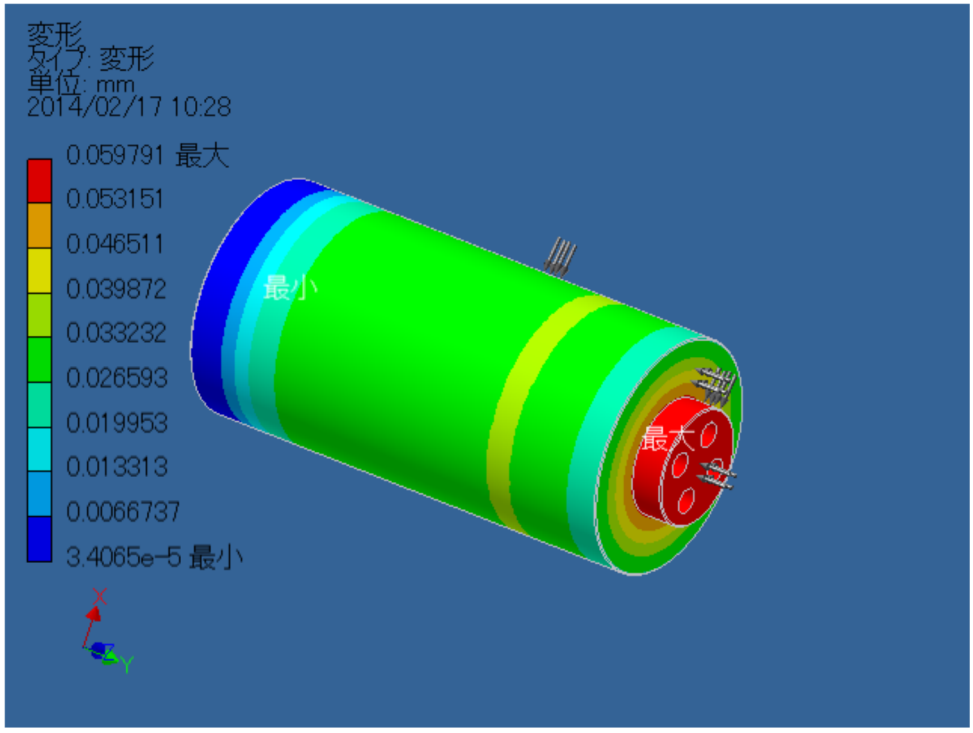


図 5.4.5-8　耐圧性向上中継装置（モジュール化）の変形量

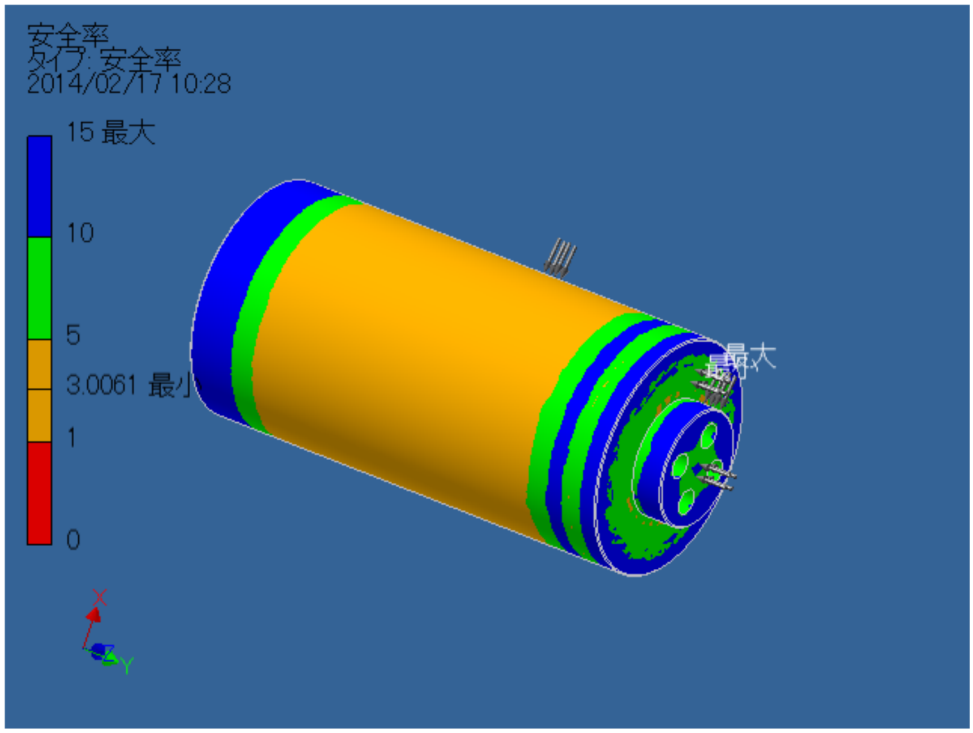


図 5.4.5-9　耐圧性向上中継装置（モジュール化）の安全率

引き続き、中継用送信アンテナの耐圧性向上を設計した。送信アンテナは、アンテナのコイルを構成するコイル銅線、コイル銅線の形状を維持する樹脂製ホルダーからなる。コイル銅線は被覆がビニルでできているため、止水性向上のためクロロプレンゴム被覆銅線に変更した。樹脂製ホルダーは、コイル銅線の線間距離を保持し、アンテナ形状を保つためのものであり PVC 製である。ホルダー内部は空洞であるが、止水等の必要性はないため耐水圧性能は必要がないが、埋め戻し材等の圧縮による変形に耐えるために内部を樹脂製充填剤もしくはモルタル等で充填し、外圧に対して保護した。設計した送中継用信アンテナを図 5.4.5-10 に示す。

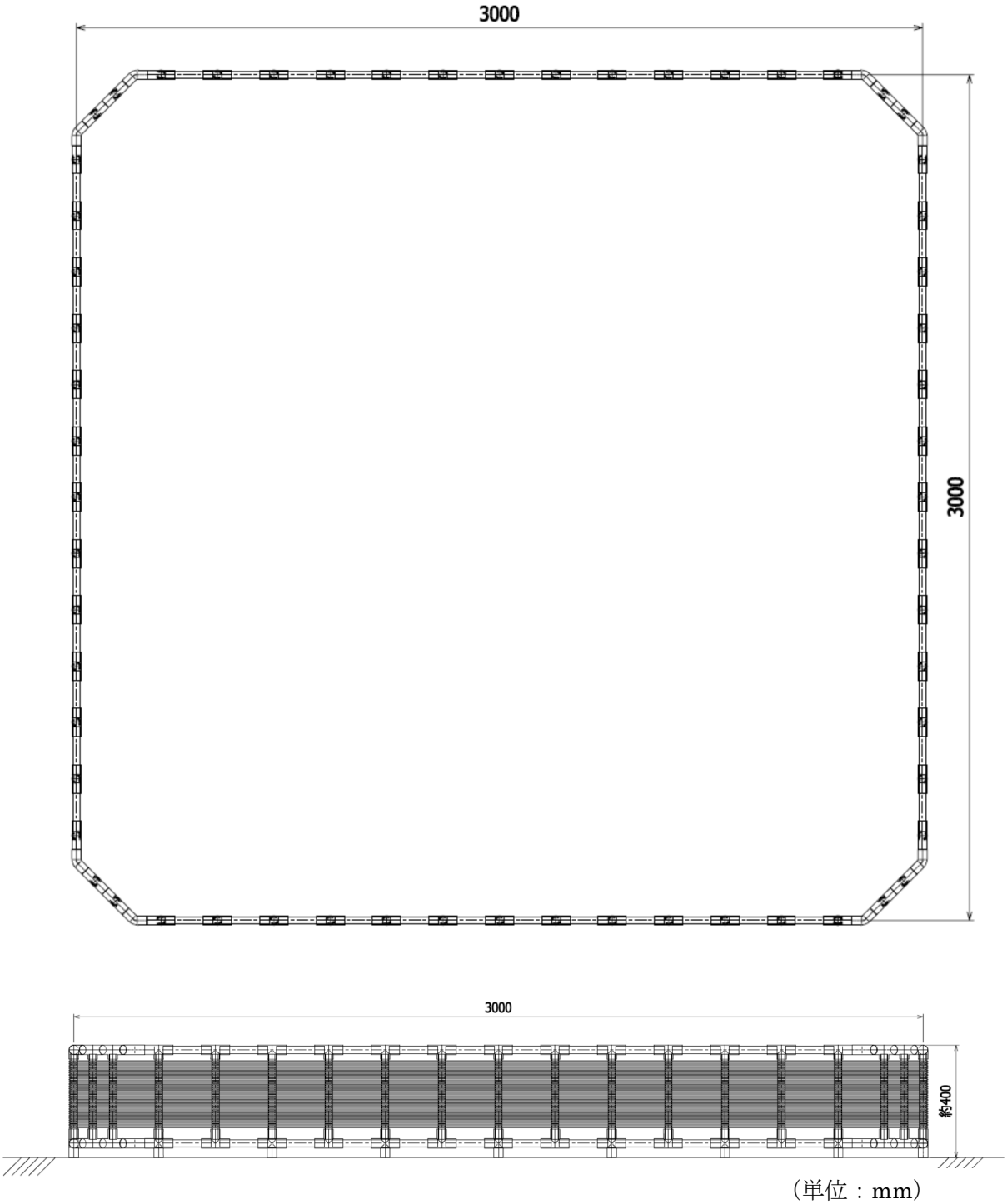


図 5.4.5-10　中継用送信アンテナ

(4)　平成 23 年度に開発したボーリング孔対応型受信アンテナ

1)　基本的な方策に基づく実施方法

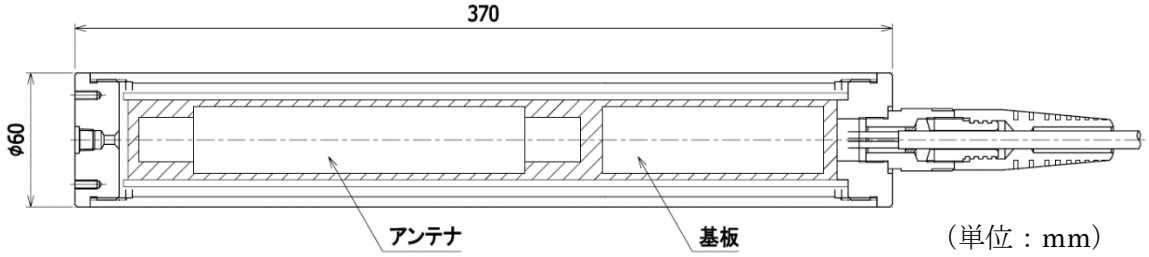
耐圧性向上に関する基本的な方策の①に従い、耐圧性向上の検討を行った。

地中無線通信装置は低周波電磁波を用いた通信方式であるため、受信アンテナであるコイル外周を金属等の導電性物質で覆うと電磁波の減衰が大きく通信できなくなる。これを避けるために、アンテナ外周には止水用の樹脂（PVC）製容器を配置し、電磁波の減衰を最小限にとどめアンテナを防水し保護した。

本受信アンテナは、コイル内側にフェライトコアを配置している。そのため、アンテナ自体が圧縮力に強いため、アンテナとコアの隙間およびアンテナと止水用 PVC 容器の間を圧縮しにくいエポキシ系充填剤で充填することにより、耐圧性の向上を図った。

2)　概念設計

前述した実施方法に従い、設計した結果を図 5.4.5-11 に示す。



※斜線部がエポキシ系硬化充填剤による充填領域

図 5.4.5-11　耐圧性向上受信アンテナ

設計した耐圧性向上受信アンテナの性能を確認するために FEM（有限要素法）解析を行った。図 5.4.5-12、図 5.4.5-13、及び図 5.4.5-14 に FEM 解析結果を示す。その結果、最大静水圧 10MPa かかった場合で安全率 2.7 を確保し、所定の耐圧性能を確保できていることが分かった。

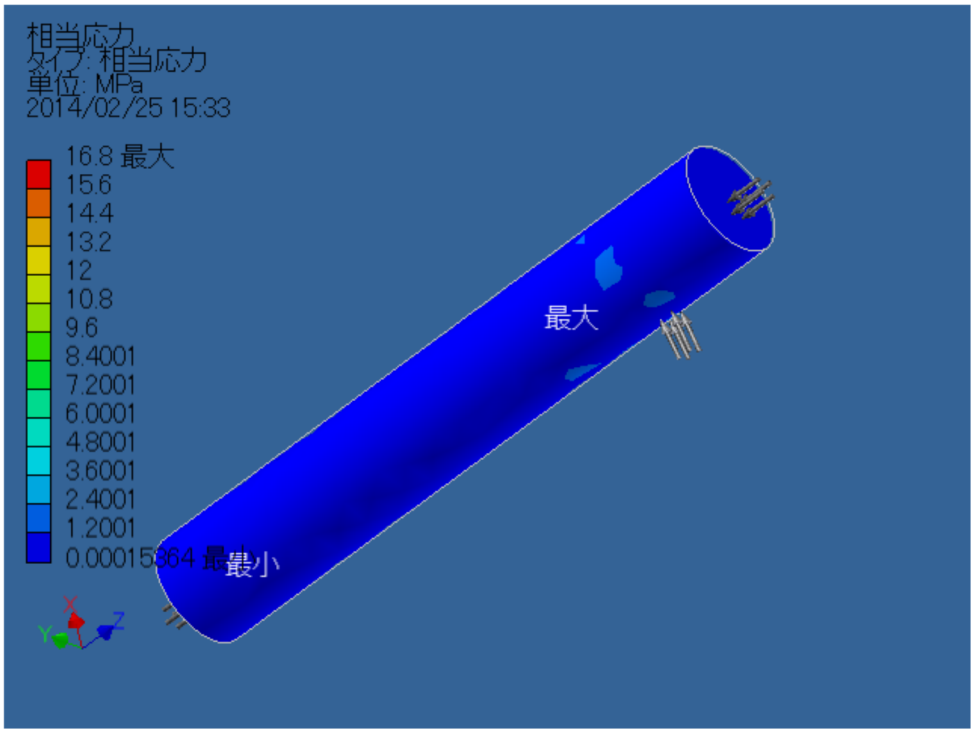


図 5.4.5-12　耐圧性向上受信アンテナの相当応力

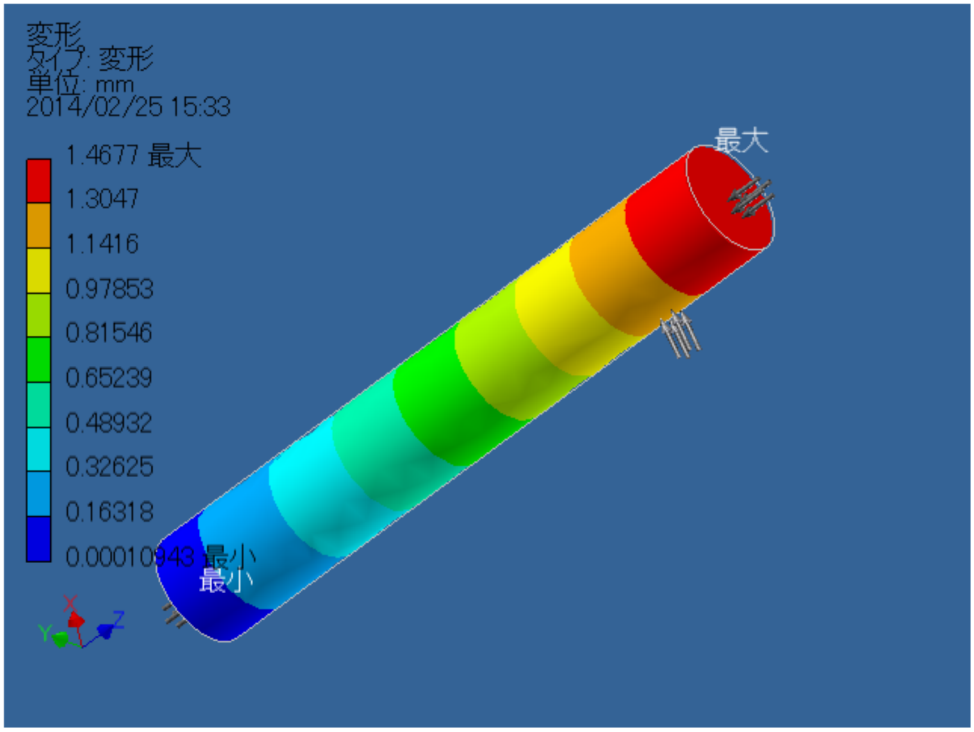


図 5.4.5-13　耐圧性向上受信アンテナの変形量

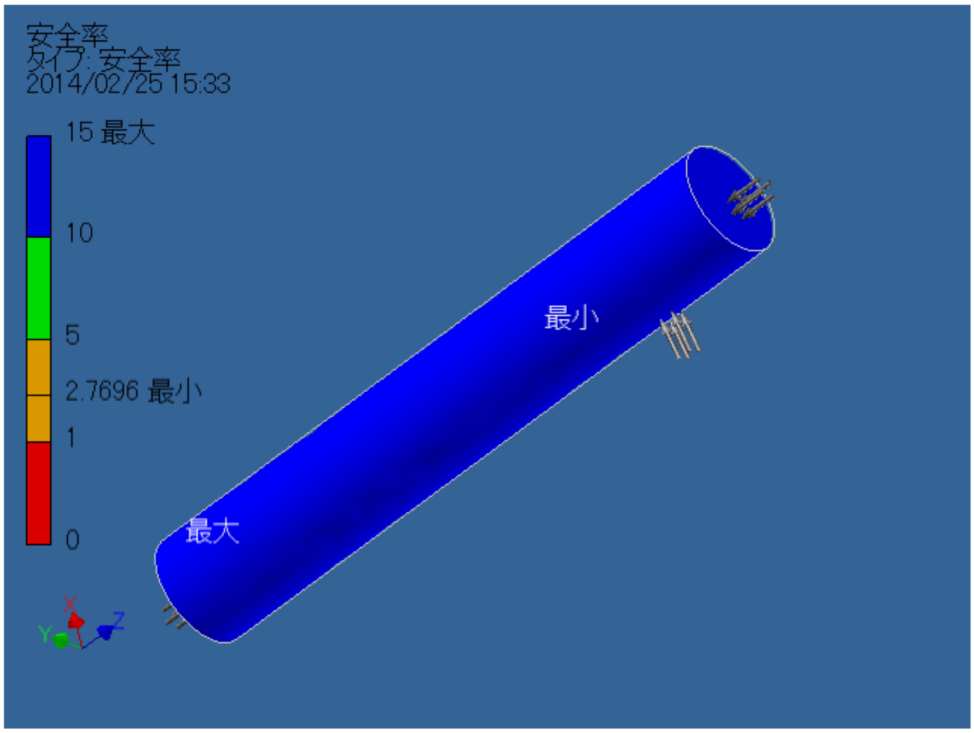


図 5.4.5-14　耐圧性向上受信アンテナの安全率

(5)　3 個のセンサが接続可能な地中無線送信装置（フランス Bure 地下研究施設での適用版）

1)　基本的な方策に基づく実施方法

耐圧性向上に関する基本的な方策の①に従い、耐圧性向上の検討を行った。
地中無線通信装置は低周波電磁波を用いた通信方式であるため、送信機のアンテナ外周を金属等の導電性物質で覆うと電磁波の減衰が大きく通信できなくなってしまう。これを避けるために、受信アンテナ内側に金属製容器を配置した。アンテナ外周には、止水用の樹脂（PVC）製容器を配置し、電磁波の減衰を最小限にとどめるようにした。
外周には PVC 樹脂を用いるが、この樹脂には耐圧性を持たせないこととし、止水の樹脂筐体が受けた圧力を、なるべく変形を伴わずに金属製容器に伝えることとした。そのためには、金属製容器と止水用容器が一体化している必要があり、そこで金属製容器と止水用容器の間に、圧縮しにくいエポキシ系充填剤により充填・密着させることとした。

2)　概念設計

前述した実施方法に従い、耐圧筐体を設計した。設計した筐体を図 5.4.5-15 に示す。センサケーブルの出し口を耐圧化前とは違い、アンテナ軸方向に出すように変更した。これは、ケーブル口の耐圧性（止水性）を向上させるためである。

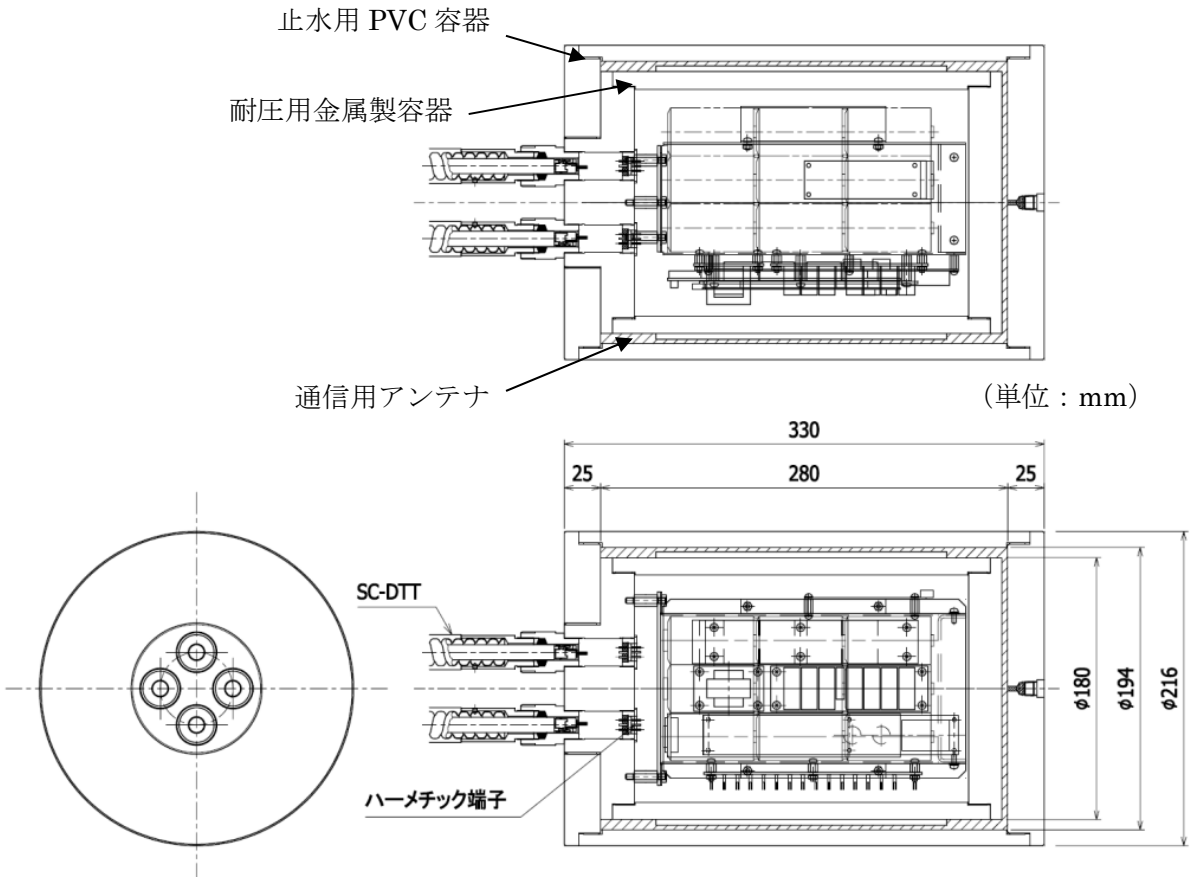


図 5.4.5-15　耐圧性向上地中無線送信装置

設計した耐圧筐体の性能を確認するために FEM（有限要素法）解析を行った。図 5.4.5-16、図 5.4.5-17、及び図 5.4.5-18 に FEM 解析結果を示す。その結果、最大静水圧 10MPa かかった場合でも安全率 3 を確保し、所定の耐圧性能を確保できていることが分かった。

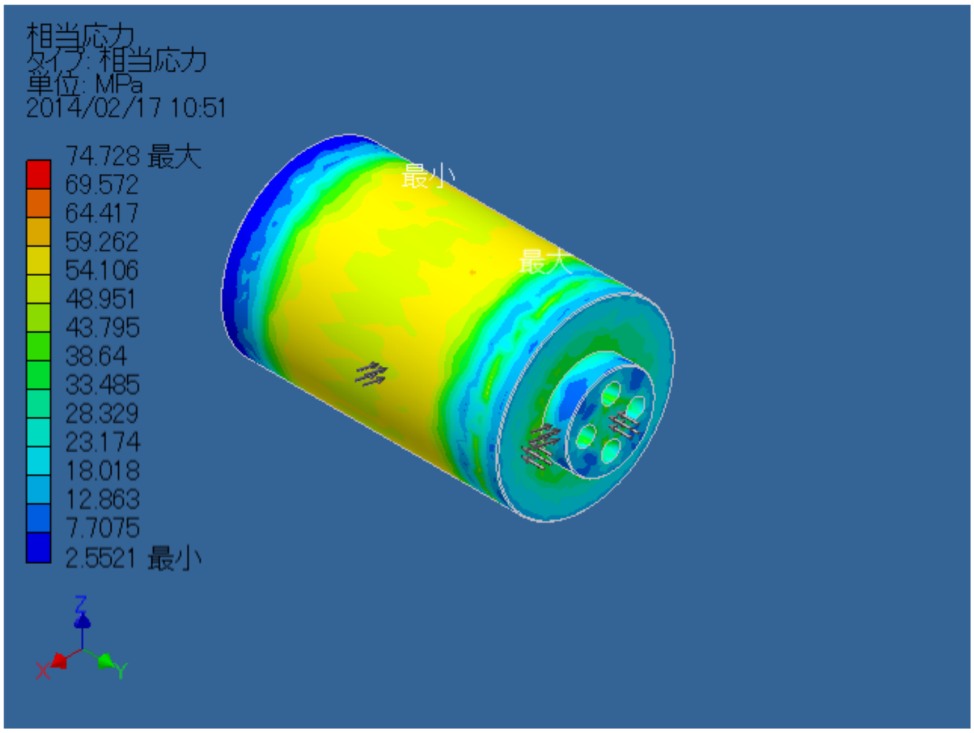


図 5.4.5-16　耐圧性向上地中無線送信装置の相当応力

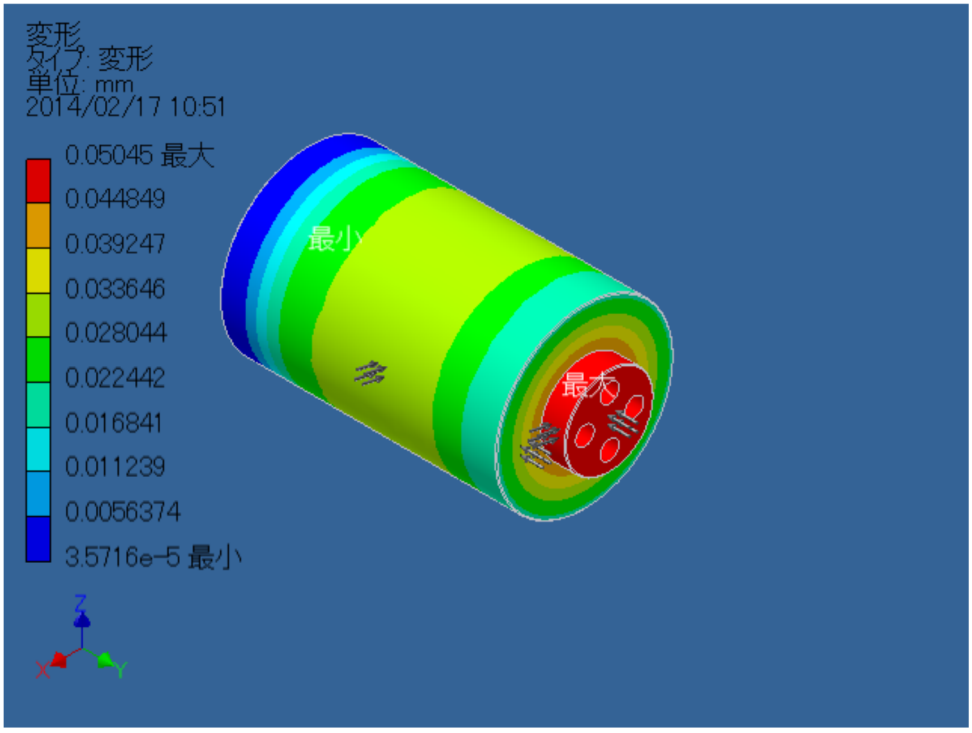


図 5.4.5-17　耐圧性向上地中無線送信装置の変形量

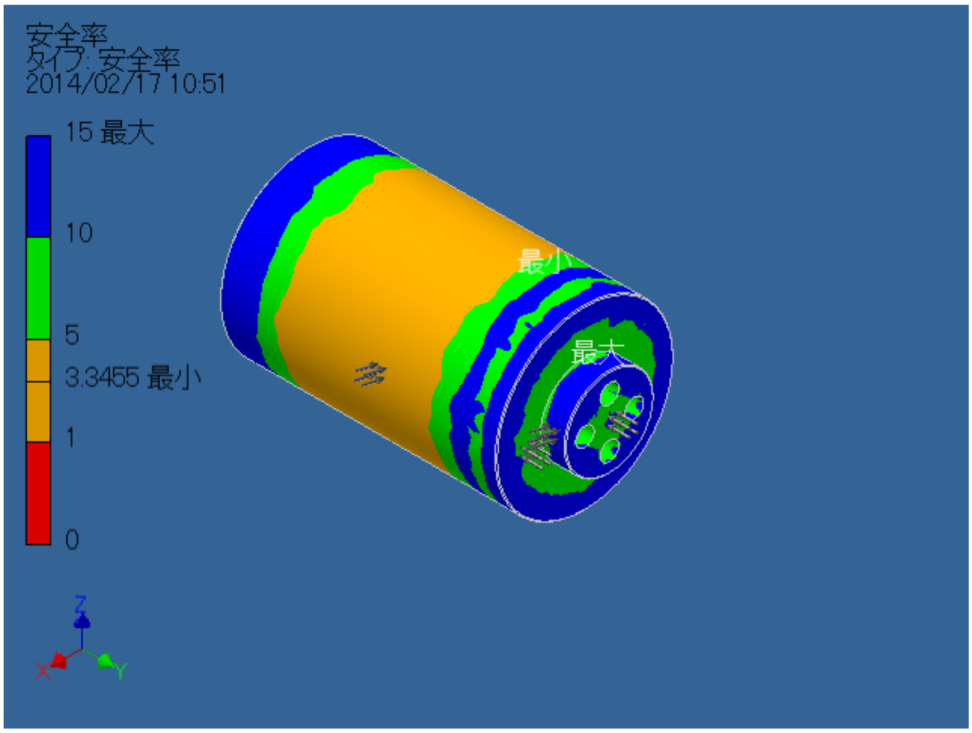


図 5.4.5-18　耐圧性向上地中無線送信装置の安全率

5.4.6　水分センサを小型地中無線送信装置に接続するアダプタの開発

平成 23 年度に開発した静水圧環境で適用可能な小型地中無線送信装置に水分センサを接続するためのアダプタを開発した。

(1)　接続する水分センサ

接続する水分センサの測定方式は静電容量型とし、海外の地層処分での実証試験などで実績が多いスペイン Aitemin 製の SHT75-V3 とした。SHT75-V3 の外観を図 5.4.6-1 に、技術仕様を表 5.4.6-1 に示す。

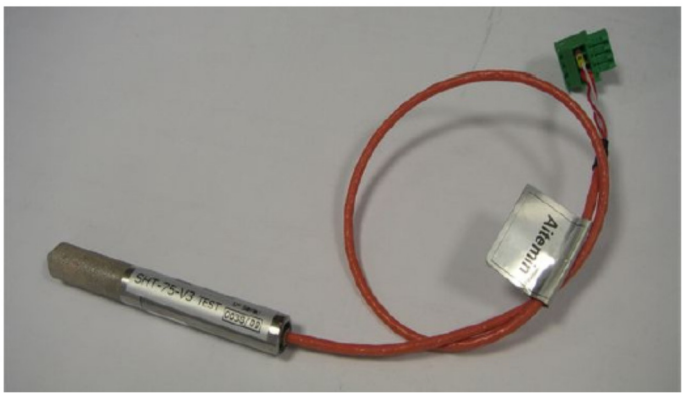


図 5.4.6-1　静電容量型の水分センサ（スペイン Aitemin 製 SHT75-V3）の外観

表 5.4.6-1　静電容量型の水分センサ（スペイン Aitemin 製 SHT75-V3）の技術仕様

Model	Aitemin SHT75 V3 (2012)
Measurement principle	Capacitive
Relative humidity range	0 % to 100% R.H. (not condensing)
Temperature range	-40 °C to 124 °C
Output	Digital 12 bit/14 bit
Resolution	0.03% R.H. /0.01 °C
Dimensions	12 mm diameter; 87 mm length
Head casing material	Stainless steel with steel filter
Cable	Teflon jacketed. Screen threaded cable
Cable length	Max 100m
Cable type	4 x 0.3 mm^2, Teflon insulated
Cable diameter	3 mm
Cable entry protection	Epoxy, water tight up to 30 barg
Tubing coupling	For ¼" OD SS316 tubing (if required)

(2)　静電容量型の水分センサの概要

静電容量型の水分センサは、親水性の高分子膜を感湿材としており、水分子の誘電率が高分子膜の誘電率よりも極めて大きいことを利用し、これを電気的に測定することで相対湿度を求めるものである。また、湿度の測定範囲が 0～100%RH と広いこと、応答速度が速く低消費電力であることからも小型地中無線送信機に接続するセンサとして適している。

使用した Aitemin 製の SHT75-V3 は、2 線式のシリアル通信インタフェース介して測定結果をデジタルデータで出力する機能を持っているため、外部に高精度の A/D コンバータや測定回路の必要もなく、小型かつ低消費電力でアダプタを構成することが出来る。

(3)　静電容量型の水分センサ用アダプタの要件

静電容量型の水分センサ用アダプタには下記の要件を満足する必要がある。

- ✓　緩衝材内部の微小な水分量変化を相対的に検出する。
- ✓　通信インタフェースを介して水分センサの制御を行い、測定データを小型送信機に引渡す。
- ✓　小型送信機は他のセンサと共通のものとし、センサの違いはアダプタで対応する。
- ✓　形状・大きさは小型送信機内部に搭載可能とする。
- ✓　計測期間延長のため可能な限り低消費電力とする。

(4)　静電容量型の水分センサ用アダプタの設計

1)　方式と構造

静電容量型の水分センサ用アダプタは、これまでに開発したアダプタとは異なり、図 5.4.6-2 に示すように小型送信機と一体型とした。

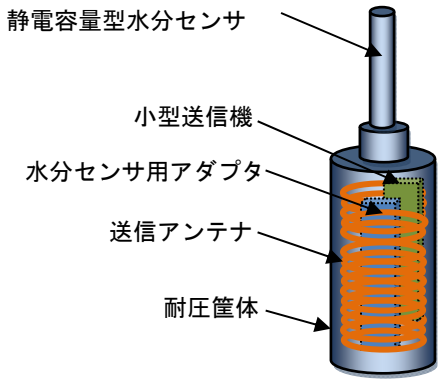


図 5.4.6-2 水分センサ用アダプタと小型送信機の構造イメージ

2)　設計の基本方針

静電容量型の水分センサ用アダプタの設計方針を下記に示す。

- ✓　低消費電力を実現するため、アダプタは小型送信機からの測定要求により起動し、その他の時間は電源非供給状態とする。
- ✓　水分計以外の各種アダプタと小型送信機間のインタフェースを統一するため、小型送信機との通信機能を有する CPU を搭載するものとする。
- ✓　本センサはデジタル出力型であるため、A/D 変換等は必要ないが、本センサ特有の出力形式であるため、小型送信機へのデータの引き渡しについては、小型送信機のインタフェース仕様に沿って変換する。
- ✓　アダプタ内部での測定データの保存は行わず、測定データは即時小型送信機に送られ、小型送信機内部に保存する。
- ✓　センサは送信機本体と直接接続とし、ケーブルは使用しない。

3)　アダプタの設計

静電容量型の水分センサ用アダプタのブロック図を図 5.4.6-3 に示す。

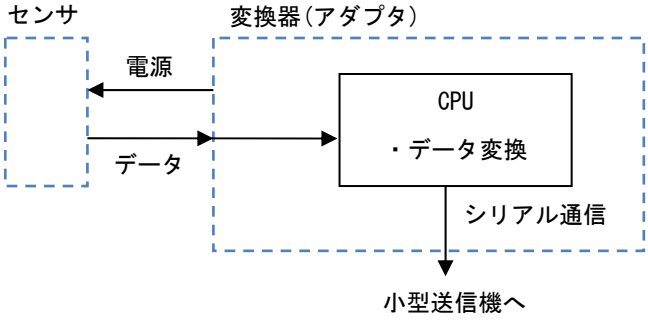


図 5.4.6-3　水分センサ用アダプタのブロック図

- CPU
  CPU には小型かつ低消費電力の物を選択する必要がある。CPU 内部では、センサの制御、測定データ取得・変換、小型送信機間通信の制御を行う。これらのことから、CPU は、シリアル通信機能（UART）を 2 ポート搭載する低消費電力 CPU であるテキサスインスツルメンツ社製 MSP430 を選択した。
- 電源回路
  測定回路を動作させるための電源回路。小型地中無線送信装置の電源回路より 3.3V が給電される。

上記を反映し、回路設計を行った結果を図 5.4.6-4 に示す。

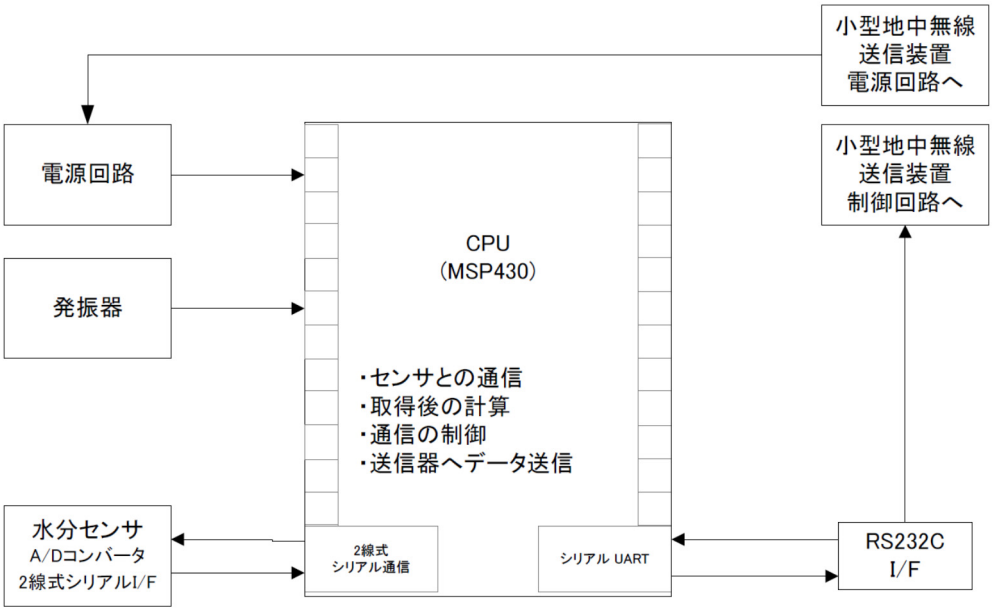


図 5.4.6-4　水分センサ用アダプタの回路概要

次に、センサと小型送信機の接続方法について設計した。基本方針に従い、水分センサは小型送信機（10MPa）と一体化とした形で接続した。そのため、小型送信機の耐圧筐体の形状を

変更して水分センサが直接接続できるように設計した。設計結果を図 5.4.6-5 と図 5.4.6-6 に示す。

（単位：mm）

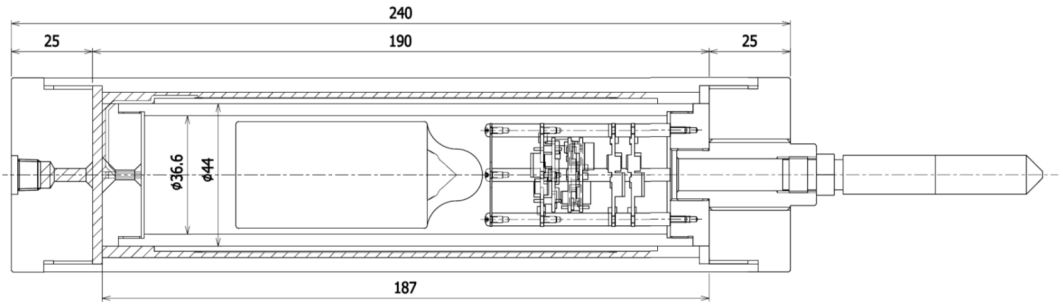


図 5.4.6-5　設計した水分センサ付小型送信機

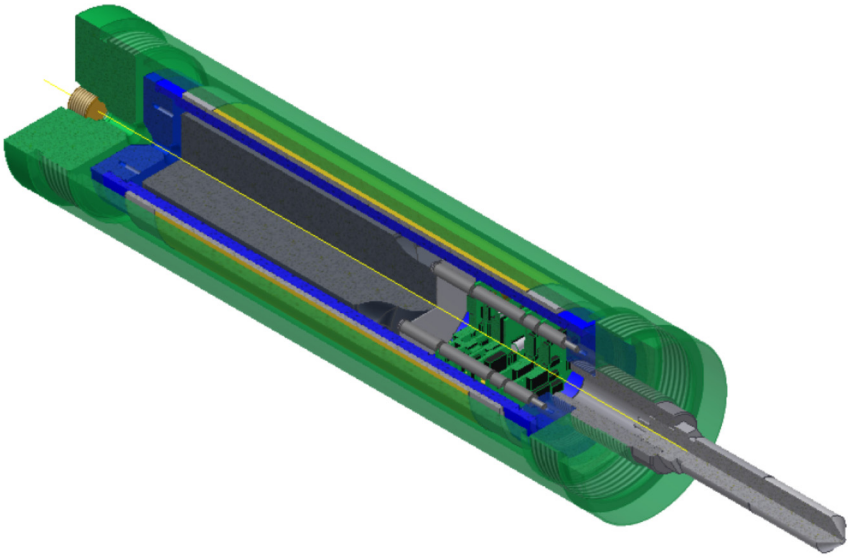


図 5.4.6-6　設計した水分センサ付小型送信機（3D）

(5)　静電容量型の水分センサ用アダプタの製作及び測定試験

1)　試作

アダプタの作製に先立ち、実証確認を行うためのアダプタの試作を実施した。試作したアダプタは検証しやすいように大きめの基板とし、PC に接続できるようにした。

図 5.4.6-7 に試作したアダプタを示す。

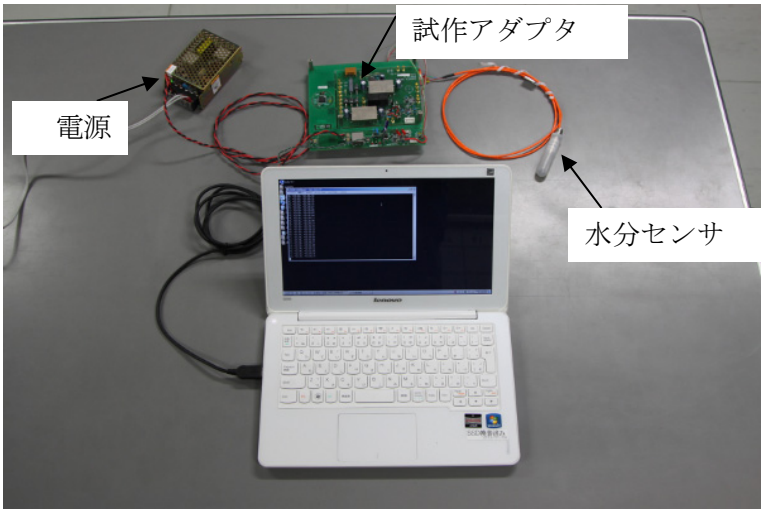


図 5.4.6-7　試作アダプタ

2)　動作確認試験

水分センサと試作したアダプタの動作確認を行うため、水分センサを乾いた珪砂の中に埋設し、水を投入することによって水分量の上昇傾向を測定できるか確認した。試験装置を図 5.4.6-8 と図 5.4.6-9 に示す。

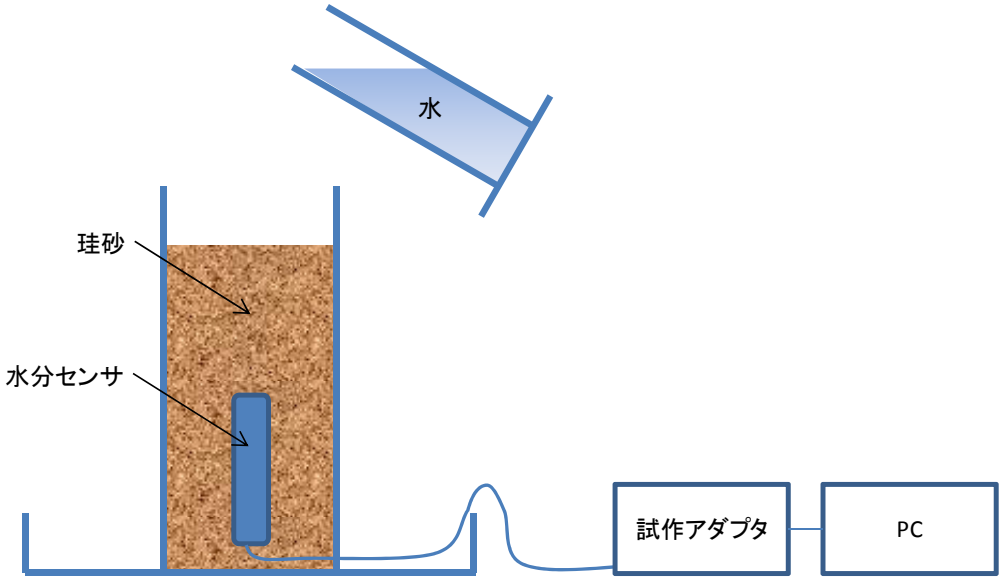


図 5.4.6-8　水分センサと試作アダプタの動作確認試験

図 5.4.6-9　珪砂に埋設した水分センサ

先ず試験は乾燥した状態の珪砂に 100cc の水を加え、徐々に水分センサ周辺に水分が到達するようにして計測した。また、水分量の上昇傾向の違いを把握するために、珪砂を乾いたものに交換し、2 倍（200cc）の水を加えた試験も実施した。試験状況を図 5.4.6-10 に、それぞれの試験結果を図 5.4.6-11 と、初期の挙動を拡大した結果を図 5.4.6-12 に示す。

100cc の水を投入した場合、徐々に水分が浸透し、センサ周辺の湿度を上昇させている様子が確認された。また、200cc の水を投入した場合は、投入した水の量が増えたことにより、水分センサの直近まで水が速やかに到達しており、その傾向をセンサで確認することができた。

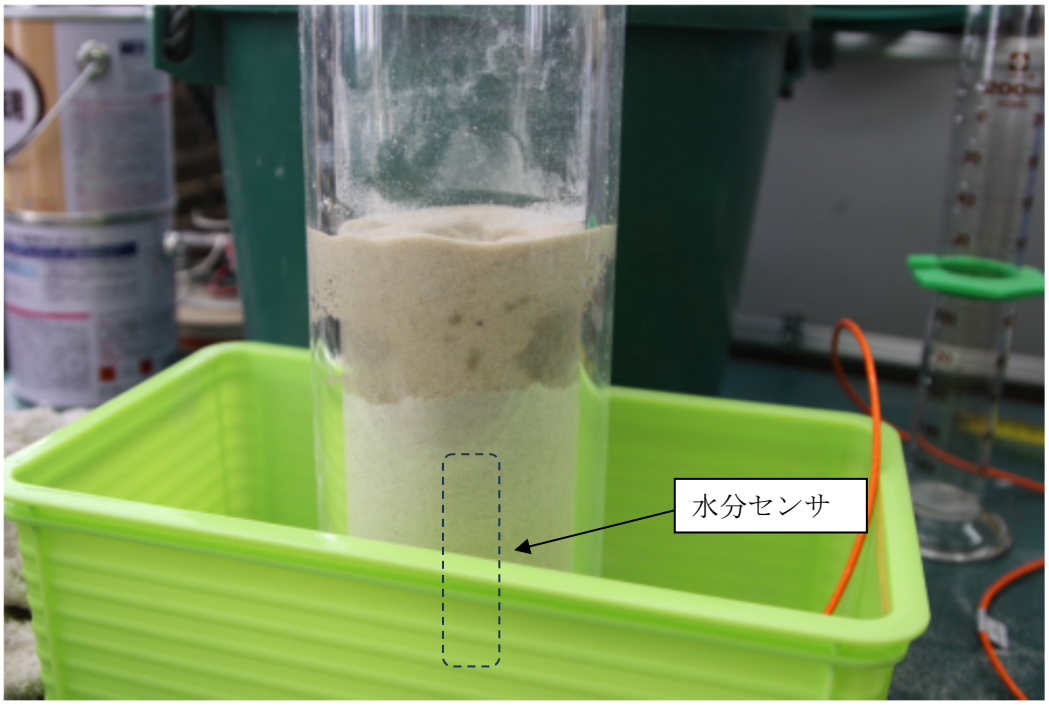


図 5.4.6-10　100cc の水投入後の様子

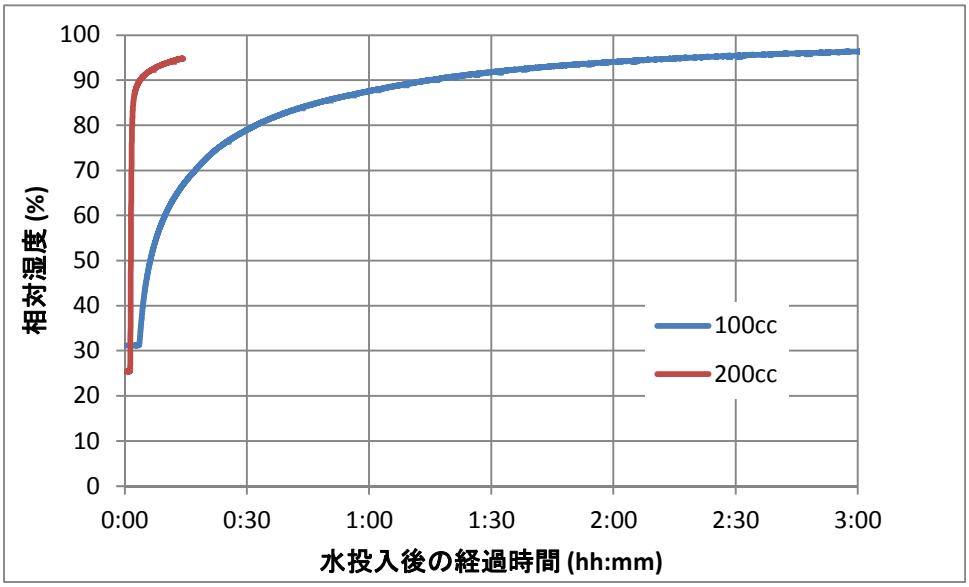


図 5.4.6-11　100cc および 200cc の水投入後の湿度変化

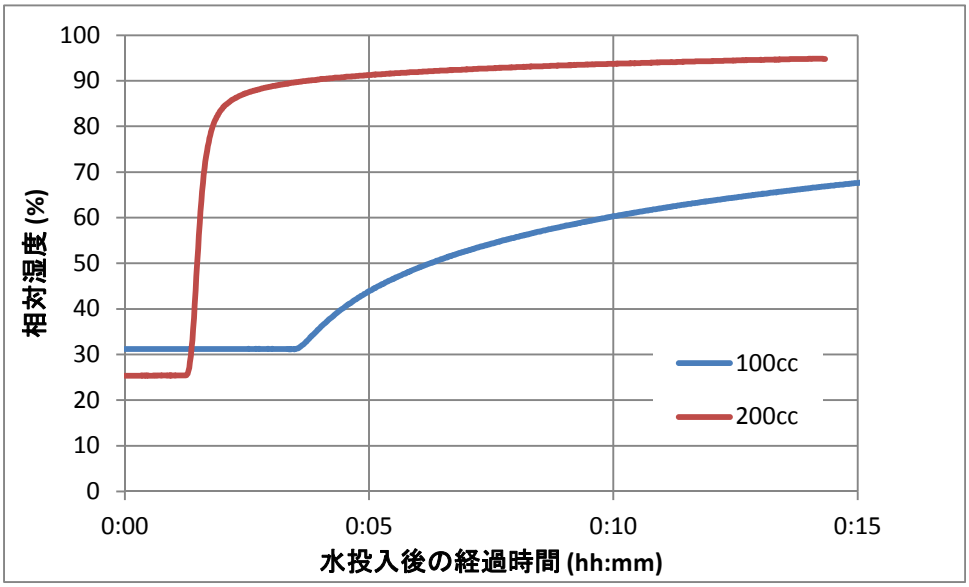


図 5.4.6-12　水投入後の湿度変化（拡大）

3)　製作

試作したアダプタをもとに、小型送信機組み込み用のアダプタを作成し、小型送信機内に組み込み、水分センサと一体化した水分センサ付小型送信機を作成した。送信機の全長は 240mm、直径 60mm であり、水分センサを含めた全長は 320mm 程度である。図 5.4.6-13 に組み立てた水分センサ付小型送信機を示す。

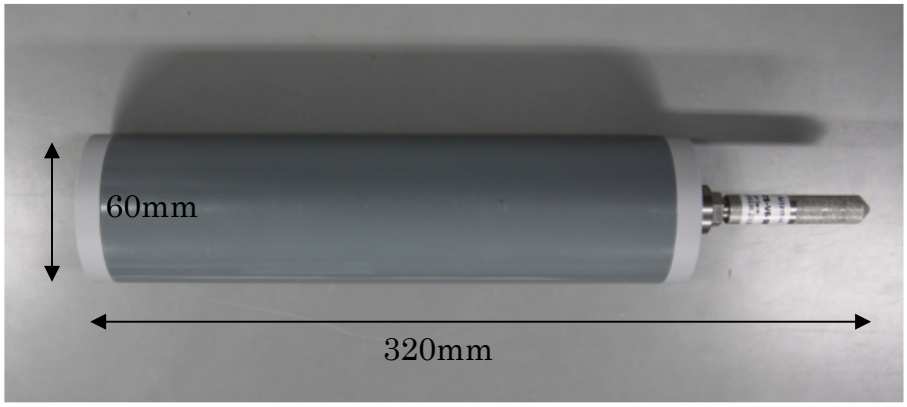


図 5.4.6-13　水分センサ付小型送信機

4)　温度試験

作成した水分センサ付小型送信機の温度試験を行った。試験方法は JIS C0025 に準拠し、2 サイクル以上の温度変化を与えた。

試験は、水分センサ付小型送信機を恒温槽内に配置し、0～50℃の温度変化を与えて実施した。試験状況を図 5.4.6-14 に、試験結果を図 5.4.6-15 に示す。

試験の結果、温度試験後も問題なく測定することを確認できた。

図 5.4.6-14　試験状況

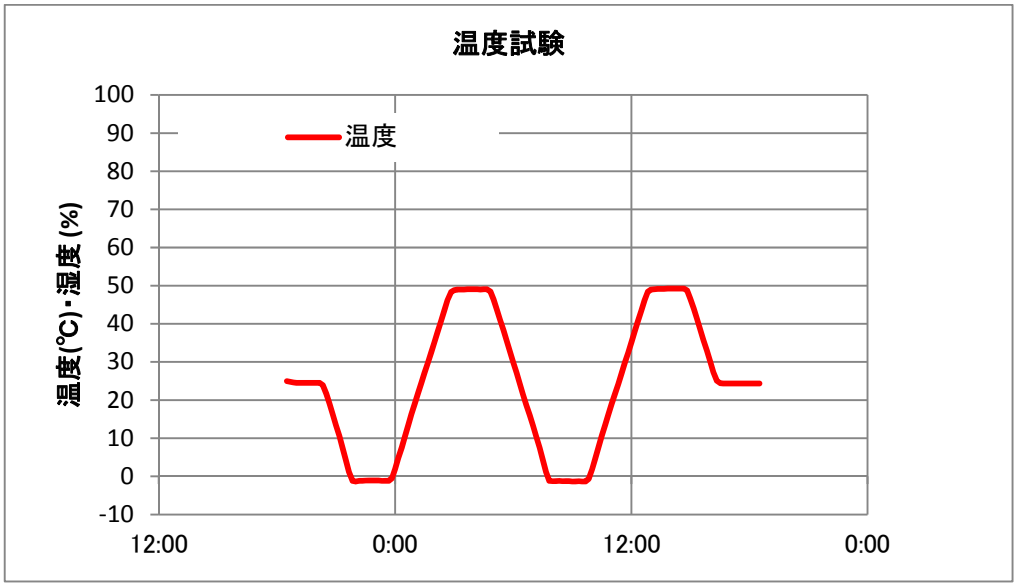


図 5.4.6-15　温度試験結果

5)　振動試験

主に設置時や運搬時にかかる振動により故障が生じないか確認するために、振動試験を実施した。試験装置を図 5.4.6-16、加振器に取り付けた小型送信機を図 5.4.6-17 に示す。試験方法は、振動試験後に測定が可能であるかを確認した。

試験の結果、振動試験後も問題なく測定することを確認できた。

図 5.4.6-16　試験装置

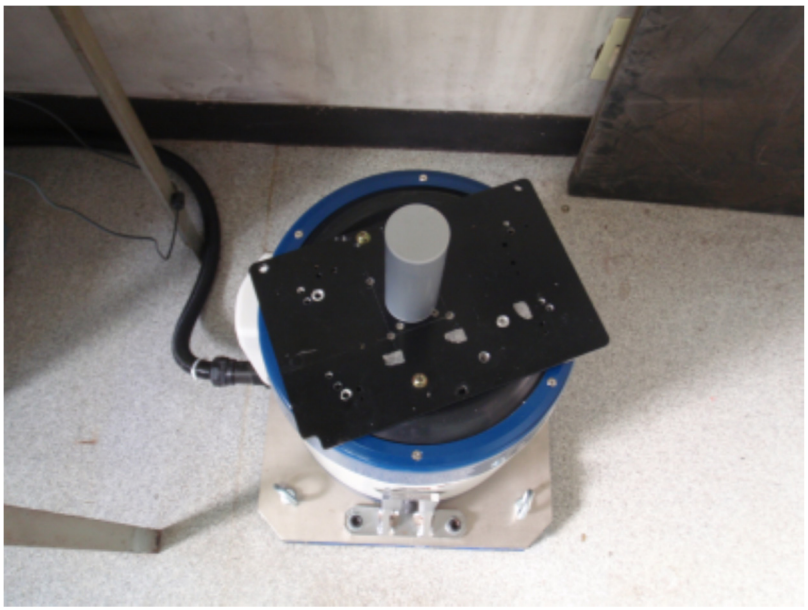


図 5.4.6-17　加振器と送信機

5.4.7　地中無線モニタリング装置の電源に関する検討

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て、地中無線モニタリング装置に用いる電源に関する最新情報の調査を実施した。

(1)　電源に関する文献調査

調査対象とした電源は、下記のものである。

- ✓　化学反応による一次電池
- ✓　温度差による発電方式
- ✓　電磁波の送受信による電源供給方式（非接触電力供給）
- ✓　ベータボルタイック発電方式
- ✓　放射性同位体熱電気変換器

調査に当たっては、下記の公開情報ソースを対象とした。

- ✓　製造者のウェブサイトおよびカタログ
- ✓　大学・研究機関・処分実施主体等の公開文書
- ✓　文献データベース

また、調査内容については、情報を取得できる範囲で下記を含めた。

- ✓　発電または給電方式
- ✓　製造者
- ✓　型式
- ✓　電源供給可能な期間
- ✓　供給電力量
- ✓　使用時の温度環境
- ✓　使用時の放射線遮蔽方法
- ✓　電源の材料、寸法、重量

1)　化学反応による一次電池

物質自身が持つ化学的なエネルギーを化学反応によって直流の電力に変換する電池であり、充電できない使いきりタイプのものである[12]。電池の主な種類は図 5.4.7-1 に示す通りである[13]。利用する化学反応によりいくつかの種類があるが、主な種類と特徴は以下の通りである。また、表 5.4.7-1 に各種類の化学反応式[14]をまとめる。

マンガン電池：一番古くから使われていて安価で経済的。微小な電力で長時間動く機器に適し、

置き時計や掛け時計などに使用される。また一方では、リモコン、ガスや石油機器の自動点火など大きな電力で極時間使用するものにも適している。

アルカリ電池：現在では大半の乾電池はアルカリ電池である。大きな電力が必要な機器に適し、マンガン乾電池の約 2 倍以上使える。デジタルカメラ、CD ラジカセ、ヘッドホンステレオ、モーターを使うおもちゃなど比較的大きな電力で長い時間使う用途に適している。

ニッケル系一次電池：21 世紀になって販売されるようになった。アルカリ乾電池より約 1.2～1.5 倍、デジタルカメラでは約 2 倍長持ちする。液晶テレビのような大きな電力を必要とする機器に適している。

リチウム電池（円筒型）：電圧が 3V と高く、軽いこと、自己放電が少ないことが特長である。大きな電力が出せるので、カメラ、ガスメーターや水道メーターなどに適している。

リチウム電池（ボタン型）：同じく電圧が 3V と高いので、パソコン、ビデオデッキ、炊飯器などのメモリー(記憶保持)機能や時計機能のバックアップとして使われている。また、車のキーレスエントリー、電子手帳やポケット式のライトなどにも適している。

アルカリボタン電池：酸化銀電池の正極の高価な酸化銀の代わりに、比較的安価な二酸化マンガンを使った電池である。経済性に優れるが、電圧が低下しやすい。携帯ゲーム機、歩数計などに使用される。

酸化銀電池：電圧が非常に安定している。寿命の直前まで電圧が低下しないため、クオーツ時計、露出計などの精密機器に適している。

空気亜鉛電池：正極の材料に空気中の酸素を使うので、負極の材料である亜鉛をたくさん詰めることができる。このため大きな電力容量を実現できる。連続して使用する補聴器やページャーに適している。

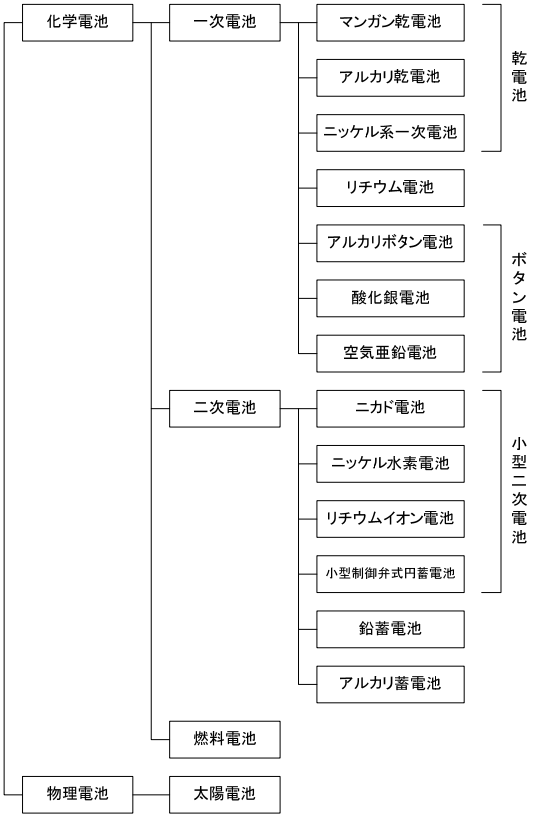


図 5.4.7-1　電池の種類[13]

表 5.4.7-1　電池の種類と用いる化学反応式[14]

電池の種類	反応式
マンガン電池	$8MnO_2 + 8H_2O + ZnCl_2 + 4Zn \rightarrow 8MnO\text{-}OH + ZnCl_2 + 4Zn(OH)_2$
アルカリ電池	$MnO_2 + H_2O + Zn \rightarrow Mn(OH)_2 + ZnO$
ニッケル系一次電池	$NiO\text{-}OH + MnO_2 + Zn + H_2O \rightarrow Ni(OH)_2 + MnO\text{-}OH + ZnO$
リチウム電池	$Mn(IV)O_2 + Li \rightarrow Mn(III)O_2\ (Li^+)$
アルカリボタン電池	$MnO_2 + H_2O + Zn \rightarrow Mn(OH)_2 + ZnO$
酸化銀電池	$Ag_2O + Zn \rightarrow 2Ag + ZnO$
空気亜鉛電池	$1/2O_2 + Zn \rightarrow ZnO$

これら以外の一次電池として空気マグネシウム電池（またはマグネシウム・空気電池）がある。空気マグネシウム電池では負極に金属マグネシウム、正極には空気中の酸素、電解液としては食塩水が用いられる。この電池は自己放電を防ぐために電解液をアルカリ性にすると、マグネシウムの表面に不動態（水酸化マグネシウム）ができて、反応がすぐに停止してしまうという問題があるため実用化には適さないと考えられていた。しかし、近年、水酸化マグネシウムを電解液に溶けやすくするための補助剤が開発されていたり[15]、あるいは、バルクのマグネシウムの代わ

りにフィルム状のマグネシウムを用いることにより問題が解決され[16]、実用化されつつある。空気マグネシウム電池はマグネシウム、酸素、食塩水といった豊富に存在する物質により構成されるため、大いに注目されている。空気マグネシウム電池の反応式は次の通りである。

負極：$2Mg \rightarrow 2Mg^{2+} + 4e^-$
正極：$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$
全反応：$2Mg + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Mg(OH)_2$

2) 温度差による発電方式

温度差を利用して発電する方法は主に二つ存在する。一つ目はゼーベック素子の両端に温度差を与えて発電する方法である。温泉の熱、ろうそくや焚き火の熱、工業プラントで発生する熱など様々な熱から発電することができる[17]。しかし、ゼーベック素子の効率は一般的に数%と低く、また、利用できる熱も限られるため小規模な発電には適しているが、大規模化は困難である。

ゼーベック素子はゼーベック効果（Seebeck effect）を応用した発電素子である。ゼーベック効果とは物体の温度差が電圧に直接変換される現象で、熱電効果の一種である[18]。ゼーベック効果はエストニアの物理学者、トーマス・ゼーベックによって、1821 年、偶然発見された。ゼーベックは金属棒の内部に温度勾配があるとき、両端間に電圧が発生することに気づいた。また、2 種類の金属からなるループの接点に温度差を設けると、近くに置いた方位磁針の針が振れることも発見した。これは 2 種類の金属が温度差に対して異なる反応をしたため、ループに電流が流れ、磁場を発生させたためである。ゼーベック効果は 2 つの効果、荷電粒子の拡散およびフォノン・ドラッグによって起こる。

荷電粒子の拡散とは物質中の帯電したキャリア（電子、正孔、イオンなど）が、導体の一端が異なる温度のとき、その端へ拡散しようとする現象である。熱い端にいる熱いキャリアは、冷たい端のほうへ拡散する。なぜならそこでは熱いキャリアの密度が薄いためである。同様に、冷たいキャリアは、熱い端のほうへと拡散する。帯電したキャリアの動きが電流である。

導体の両端がそれぞれ一定の温度に保たれていれば、キャリアは一定の割合で拡散する。もし熱いキャリアと冷たいキャリアが等しく拡散するならば、電荷の正味の移動はゼロである。しかし拡散する電荷は、物質中の不純物、欠陥、そして格子振動(フォノン)によって散乱を受ける。 散乱がエネルギーに依存するならば、温度の異なるキャリアは異なる割合で拡散することになる。このため一方の端でキャリアの密度が高くなり、プラスとマイナスに帯電した両端の間には電位差が生じる。

フォノン・ドラッグはフォノン(phonon, 音子、音響量子、音量子とも言い、振動を量子化したもの）が、温度勾配があるとそれに従って運動する現象である。その間に電子や他のキャリアとの相互作用、および格子欠陥の影響で運動量を失う。もしフォノンー電子相互作用が優勢ならば、フォノンは電子を物体の端から端まで押し動かしながら、その過程で運動量を失っていく。この過程は、すでにある熱電場をさらに強めるように働く。フォノン・ドラッグの寄与は、フォノンー電子散乱が顕著となる温度領域で重要になる。

二つ目はアンモニアなどの沸点の低い媒体を熱によって気化し、気化した気体によって発電ター

ビンを回転させ電力を得る方法である。この方法を利用した発電としては、海洋温度差発電がある[19]。これは海洋表層の温水と深海の冷水の温度差を利用して発電する方法である。アンモニアなどの沸点の低い媒体を温水によって気化し、気化した気体によって発電タービンを回転させる。気化した媒体は冷水によって液化させた後、再度温水による気化装置に供給される。海洋温度差発電システム全体の効率は 1～3%程度と低いが、赤道から 20 度以内の地域であれば表層と深海の水温差は 20 度以上あり、海洋温度差発電が可能である。すなわち、非常に大きな潜在エネルギーを活用することが可能である。現在では 1MW 級の発電所が試験的に稼動している。

3) 電磁波の送受信による電源供給方式（非接触電力供給）

非接触での電力伝送方式として、電磁誘導方式、電界結合方式、磁界共鳴方式、電波方式などがある[20]。

電磁誘導方式は、送電側と受電側との間で発生する誘導磁束を利用して電力を送る方式のことである。このときの結合係数は距離によって依存するパラメータとなり、小さなコイルを用いた場合は極めて近い距離での送電しかできない。主に Suica や iD などに用いられる FeliCa や調理器として用いられる IH などの近距離送電に用いられる。

電界結合方式は、送電側と受電側にそれぞれ電極を設置し、電極が近接したときに発生する「電界」を利用してエネルギーを伝送する技術のことである。電磁誘導方式に比べ伝送効率が高く、機器の自由度が高い。ひとつの充電台に対して複数の機器・端末を対応させることが可能である。電極は位置自由度が高く、充電台と端末の電極をぴったり合わせなくても充電可能であるという長所がある。

磁界共鳴方式は、送電側と受電側にコイルとコンデンサを埋め込み、それぞれの共振器を磁界共鳴させて、電力を伝送する方式である。受電側は、共鳴によって生じた高周波を整流回路によって直流に変換し、電力として利用する。電磁誘導方式に比べ伝送距離を長く取れるという利点がある。

MIT（Massachusetts Institute of Technology）の実験では、ギャップ 1m で約 90%、2m で約 45%程度の効率を実現し、実際に 2m 先の電球を灯すことに成功した。この実験以降、送受信デバイスの位置ずれに不問であること、複数のデバイスに対しての送電が可能であること、高効率かつ大ギャップでの無線電力伝送が実証されたことが評価され、IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineering）により「世界を変える 7 つの技術」に選定された。

電波方式は、送電側で電流を電磁波（マイクロ波）に変換して受電側に送り、受電側はアンテナから電磁波を受信、整流回路を通じて直流電流に変換し、電力として利用する仕組みとなっている。

4) ベータボルタイック（Betavoltaic）発電方式

放射性同位元素は、アルファ線あるいはベータ線、ガンマ線などの放射線を常に発生し続けている。放射線はエネルギー線であるので、エネルギーを何らかの方法で収集して電気エネルギーに変換すれば、発電回路となる。放射性同位元素が放射線を出し続ける期間は、半減期によって決まる。元素によっては、放射性同位元素の半減期は数十年～数百年と長い。したがって半永久的に動く発電回路を実現できる可能性がある。放射線はいずれも生態に対して有害であるが、遮蔽が比較的容易なベータ線を用いる手法は有力である[21]。

太陽光発電では光子を半導体の pn 接合に照射して、電子－正孔対を生成して電流を発生するものである。同様に、ベータボルタイック発電は放射性同位元素から放出されるベータ線を半導体の pn 接合に照射して、電子－正孔対を生成して電流を発生するものである[22]。得られる電力は小さいため心臓のペースメーカなど、適用されいてる範囲は少ないが、非常に長い期間、安定して稼動させることが可能である。

マイクロマシンの分野では異なった方式により放射性同位元素から放出されるベータ線により発電する研究が行われている。Cornell University の研究グループでは ^{63}Ni を用いて超小型のカンチレバーを振動させることにより発電する研究を行っている。^{63}Ni は半減期が 100.1 年と長く長期間の稼動が期待される。また、放出されるのがベータ線のみで、アルファ線やガンマ線が放出されないので安全上も優れている。しかし、ベータボルタイック発電同様に発生する電力が平均でμW オーダーと低い。

5) 放射性同位体熱電気変換器

放射性同位体熱電気転換器（Radioisotope Thermoelectric Generator, RTG）は放射性崩壊から力を取り出す発電機である[23]。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。

6) 調査結果のまとめ

調査結果の一覧表を表 5.4.7-2 に、各事例を表 5.4.7-5~表 5.4.7-55 に示す。本調査では基礎研究に資する情報収集が目的ではなく、地層処分以外の分野で、ある程度適用実績があるものの利用を目的としているため、適用・開発に係る情報に主眼を置いた。

結果を総括すると、下記のようになる。

化学反応による一次電池

歴史が古く、研究も進んでいて、実績もあり、多くの種類が存在する。また、宇宙空間のような極限環境下、極低温（－55 度）、高温（200 度）などでも、稼動する電池も開発されている。また、使用有効期限が 15 年間と長期にわたる電池や衝撃に強い電池も開発されている。しかし、一次電池は初期の発電物質の量で電力容量が決まり、長期の継続利用には限界がある。

空気マグネシウム電池はマグネシウムの表面に不動態（水酸化マグネシウム）ができて、反応がすぐに停止してしまうという問題があるため実用化されていなかったが、近年、水酸化マグネシウムを電解液に溶けやすくするための補助剤が開発されていたり、あるいは、バルクのマグネシウムの代わりにフィルム状のマグネシウムを用いることにより問題が解決され、大容量の一次電池が実現されつつある。

現在、地中無線送信機に用いている電源であり、センサーの寿命が 10 年~15 年程度と考えられるため、「化学反応による一次電池」は最も現実的な電池である。

温度差による発電方式

ゼーベック素子を用いた発電では、温度差が存在する限り小規模な電力を供給することが可能である。温泉の熱などを利用した小規模発電が行われている。また、災害時にろうそくや焚き火の熱により発電する装置も開発されている。

アンモニアなどの低沸点媒体を気化して、発電タービンを回転させて電力を得る方法は、工業プラントからの排熱や海洋温度差発電に利用されている。工業プラントでは小規模コンテナサイズから、海洋温度差発電では MW 級の大規模発電プラントまで実現されている。

高レベル放射性廃棄物地層処分において考えられる熱源は廃棄体(放射性同位体)であるため、地中無線送信機に対する適用性は「放射性同位体熱電気変換器」において考察する。

電磁波の送受信による電源供給方式（非接触電力供給）

電磁誘導方式及び電界結合方式は近距離で小さな電力を伝送するのに適している。電磁誘導方式は Suica や FeliCa、調理器の IH などで用いられている。また、電界結合方式は携帯電話やモバイル端末の充電に用いられている。

磁気共鳴方式は 1～2m 程度までの距離を大きな電力を伝送するのに適している。電気自動車の充電システムなどへの適用が検討されている。

電波方式ではマイクロ波を使い長距離電力伝送が可能な方式である。高軌道（上空 36,000km）上の静止衛星での宇宙太陽光発電により得られた電力をマイクロ波に変換して地球上に伝送するシステムが検討されている。また、この技術を応用したマイクロ波方式による自動車の充電システムが開発されている。

「非接触電力供給」を地中無線送信機の電源として適用するためには、少なくとも地中無線送信機の送信距離と同等の距離（数十 m~数百 m）を確保する必要があり、今後の技術開発の動向に注目する必要がある。

ベータボルタイック発電方式

放射性物質を用いて発電する方法であるが、遮蔽が容易なベータ線のみを放出する放射性物質を用いることにより安全性が確保される。このような放射性物質の半減期は例えば ^{63}Ni では 100.1 年と長く、長期にわたって発電することが可能である。しかし、発生する電力量が小さく、心臓のペースメーカなど微小電力の用途に限られる。心臓のペースメーカの電源としては 10 年以上安定に稼動した実績をもつ。最近では、ラップトップパソコン用の電源としても検討されている。

現段階で「ベータボルタイック発電方式」では地中無線送信機に適用するに当たり、十分な電力量を確保できない。しかしながら、10 年~15 年程度以上の期間の電力供給が必要な場合は、有望な技術であると考えられるため、今後の技術開発の動向に注目する必要がある。

放射性同位体熱電気変換器

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。

温度差による発電について、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ものと考えられる。このため、廃棄体から離れたエリアで地中無線技術を適用する場合において、放射性同位体熱電気変換器を用いることが可能であると考えられる。

表 5.4.7-2　調査結果一覧（1/3）

番号	大分類	小分類	状況	名称
1-01	一次電池	リチウム電池	商品	Panasonic BR 系円筒型リチウム電池
1-02	一次電池	リチウム電池	研究	Lunar-A（月探査機）ペネトレータ用一次電池
1-03	一次電池	ニッケル系電池	商品	松下電器産業　オキシライド乾電池
1-04	一次電池	アルカリ電池	商品	松下電器産業 EVOLTA
1-05	一次電池	リチウム電池	商品	Greatbatch Corp. ELECTROCHEM
1-06	一次電池	リチウム電池	商品	シックジャパン株式会社　Energizer
1-07	一次電池	アルカリ電池	商品	東芝　アルカリ乾電池
1-08	一次電池	リチウム電池	商品	ジーエス・ユアサ・テクノロジー　大容量リチウム一次電池
1-09	一次電池	空気マグネシウム電池	商品	株式会社 TSC マグネシウム電池
1-10	一次電池	空気マグネシウム電池	研究	マグネシウム電池
1-11	一次電池	空気マグネシウム電池	研究	フィルム型マグネシウム電池
2-01	温度差発電	ゼーベック素子	商品	ヤマハ　熱電発電モジュール
2-02	温度差発電	ゼーベック素子	研究	サイエンスパーク（株）　温度差発電
2-03	温度差発電	ゼーベック素子	研究	熱電変換による廃熱利用
2-04	温度差発電	ゼーベック素子	商品	高木製作所　Seebeck Units
2-05	温度差発電	ゼーベック素子	研究	温度差発電と実証事例
2-06	温度差発電	発電タービン	実用	OTEC Hawaiian Islands
2-07	温度差発電	発電タービン	実用	OTEC The Bahamas
2-08	温度差発電	発電タービン	実用	佐賀大学海洋エネルギー研究センター
2-09	温度差発電	発電タービン	実用	インド国立海洋技術研究所の海洋温度差発電実証研究
2-10	温度差発電	発電タービン	実用	フランスにおける OTEC の現状
2-11	温度差発電	発電タービン	商品	ゼネシス（株）　排熱温度差発電
2-12	温度差発電	発電タービン	商品	IHI 小型バイナリー発電装置
2-13	温度差発電	発電タービン	商品	神戸製鋼　小型バイナリー発電装置
3-01	非接触電力伝送	電磁誘導方式	商品	昭和飛行機工業株式会社　非接触給電システム
3-02	非接触電力伝送	電界結合方式	商品	村田製作所　ワイヤレス電力伝送モジュール

状況の分類：

研究：論文やホームページから得られた技術情報

商品：主にホームページに掲載されている商品に関する情報

実用：主にホームページに掲載されている発電の実施事例

表 5.4.7-3　調査結果一覧（2/3）

番号	大分類	小分類	状況	名称
3-03	非接触電力伝送	磁界共鳴方式	研究	長野日本無線　ワイヤレス電力伝送
3-04	非接触電力伝送	電波方式	研究	三菱重工　無線電力伝送技術
3-05	非接触電力伝送	電波方式	商品	日本電業工作　レクテナ：ワイヤレス給電
3-06	非接触電力伝送	磁界共鳴方式	研究	ワイヤレス給電を利用したモニタリングの電磁界解析
3-07	非接触電力伝送	磁界共鳴方式	商品	村田製作所　新・無線給電技
3-08	非接触電力伝送	磁界共鳴方式	研究	ソフトスイッチング技術を用いた新しい共鳴型ワイヤレス給電システムの設計理論
3-09	非接触電力伝送	磁界共鳴方式	研究	磁気共鳴による非接触給電の予備的実験
3-10	非接触電力伝送	磁界共鳴方式	研究	電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム
3-11	非接触電力伝送	電波方式	研究	三菱重工業　マイクロ波方式ワイヤレス充電システム
4-01	ベータボルタイック	半導体素子	商品	Widetronix's betavoltanic power source
4-02	ベータボルタイック	半導体素子	商品	Betavoltaic.co.uk
4-03	ベータボルタイック	半導体素子	商品	CITY LABS Nano Tritium Battery Model P100
4-04	ベータボルタイック	半導体素子	商品	City Labs 社がトリチウム燃料のマイクロ燃料電池を発売
4-05	ベータボルタイック	半導体素子	商品	Qynenergy QynCell
4-06	ベータボルタイック	半導体素子	研究	Betavotaic Devices

状況の分類：

研究：論文やホームページから得られた技術情報

商品：主にホームページに掲載されている商品に関する情報

実用：主にホームページに掲載されている発電の実施事例

表 5.4.7-4 調査結果一覧（3/3）

番号	大分類	小分類	状況	名称
4-07	ベータボルタイック	半導体素子	研究	液体半導体ダイオードを用いた放射線同位体発電
4-08	ベータボルタイック	半導体素子	商品	Betacel model 400
4-09	ベータボルタイック	マイクロマシン	研究	Cornell University Ni63 を使った湿度センサー用超小型発電回路
4-10	ベータボルタイック	マイクロマシン	研究	Cornell University Ni63 を使った半永久動作の超小型発電回路
5-01	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	SNAP-19B RTG
5-02	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	SNAP-19 RTG
5-03	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	SNAP-27 RTG
5-04	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	Multi-Hundred Watt RTG
5-05	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	General Purpose Heat Source (GPHS) RTG
5-06	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	Power Sources for Remote Arctic Application (Office of Technology Assessment, U.S.Congress)
5-07	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	Voyager1, Voyager2, Lincoln Experimental Satellite8&9 に利用
5-08	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	火星探査機 Curiosity に利用
5-09	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	Advanced Stirling Radioisotope Generator
5-10	放射性同位体熱電気転換器	－	実用	ソビエトにおける放射性同位体熱電気変換機

状況の分類：

研究：論文やホームページから得られた技術情報

商品：主にホームページに掲載されている商品に関する情報

実用：主にホームページに掲載されている発電の実施事例

表 5.4.7-5　事例　Panasonic BR 系円筒型リチウム電池

No.	1-01	分類	化学反応による一次電池（リチウム電池）
名称	Panasonic BR 系円筒型リチウム電池		
状況	商品		
出展	http://industrial.panasonic.com/www-cgi/jvcr13pz.cgi?J+BA+3+AAA4004+BR-C+7+JP		
仕様	出力	公称電圧 3 V、公称容量 5000 mAh	
	温度	－40～85℃	
	寸法	小型、直径 26 mm、高さ 50.5 mm、重さ 42 g	
概要	はやぶさの回収カプセルは 7 年を要した 60 億 km の旅の後、衛星本体から切り離され、オーストラリアの砂漠地帯に落下した。この回収カプセルには Panasonic のリチウム一次電池が搭載されていて、地球に落下後、ビーコンの電源として正常に稼動した。BR 系（正極材：フッ化黒鉛）円筒型のリチウム一次電池である R-C と BR-A を使用した組電池。自己放電が少なく、環境変化に強く、安全かつ長期信頼性を持つ電池。特徴は以下の通りである。 • 高電圧：エネルギー密度が高く(3 V)かつ小型 • 自己劣化率が低い：正極活性剤に安定した物質（BR 系、CR 系）を使用するため 10 年後に 90%以上の残存容量 • 長期間放電：低負荷放電において長期間放電 • 優れた耐漏液性：有機電解液を使用するため環境変化に対してすぐれた耐漏液性を有する • 広い温度範囲：有機電解液は凝固点が低いため広い温度で稼動 • 高い安全性		

表 5.4.7-6　事例　Lunar-A（月探査機）ペネトレータ用一次電池

No.	1-02	分類	化学反応による一次電池（リチウム電池）
名称	Lunar-A（月探査機）ペネトレータ用一次電池		
状況	研究		
出展	http://sce.isas.jaxa.jp/powersupply/primarybattery/index.html		
仕様	出力	1.5 V	
	温度	－40℃で動作確認	
	寸法	小型、直径 14 mm、高さ 50 mm	
概要	人工衛星から投下される観測用機器（プローブ，ペネトレーター）などでは，太陽電池を使うことができないので，あらかじめ必要な電力分の電池を搭載しておかなければならない。したがって，エネルギー密度の高い一次電池が必要で、リチウム電池が用いられる。Lunar-A ペネトレータ用に開発した一次電池は，大きさは単 3 電池と同じだが、通常のマンガン電池約 7 本分の電力量を持っている。またこの電池は，普通の電池は動作しなくなる−40℃という低温環境でも動作する．さらに，ペネトレータが月面に打ち込まれるときの 10,000G という衝撃にも耐える構造となっている． Lunar-A ペネトレータ 1 機には 120 本の塩化チオニルリチウム電池が搭載され，月面で約 1 年にわたって，測定・通信用の電力を供給し続ける．現在までに，月面貫入を模擬した衝撃テスト，長期にわた長期にわたる低温下での動作テスト，送信のための大電力放電テストなどを実施し，すべてに合格している．ただし、プロジェクトが中止されたため実際の衛星への搭載には至らなかった。 *Lunar-A は宇宙航空研究開発機構(JAXA)により開発されていた日本初の本格的な月探査機。ペネトレータと呼ばれる槍状の観測装置による月面内部の探査を主な目的として 1995 年に打ち上げを予定していたが、計画が遅延。2007 年に中止となった。		

表 5.4.7-7　事例　松下電器産業　オキシライド乾電池

No.	1-03	分類	化学反応による一次電池（ニッケル系電池）
名称	松下電器産業　オキシライド乾電池		
状況	商品（生産中止）		
出展	ウィキペディア		
仕様	出力	公称電圧 1.5 V、初期電圧 1.7 V、終止電圧 1 V 程度	
	寸法	単三電池	
概要	2004 年発売開始、2008 年以降上位製品の EVOLTA の発売に伴って生産縮小、現在では生産は中止されている。電極構造はニッケルマンガン一次電池と類似している。正極材料に二酸化マンガンとオキシ水酸化ニッケルの合金を使用して、ここに新しく開発された超微粒子の黒鉛と電解液を高密度に充填している。アルカリ乾電池に比べて 1.5 倍の長寿命。デジタルカメラでは従来の 2.2 倍の画像を撮影することが可能であるが、時計・リモコンなど消費電流の少ない機器では必ずしも寿命が長くなるわけではない。また、初期電圧が 1.7 V と高いため電子機器など使用できない機種もある。放電電圧内における電圧降下が極めて緩やかなので寿命ぎりぎりまで使い切ることが可能である。 オキシライド・スピード・チャレンジ：大阪産業大学と合同で行った、オキシライド乾電池を動力源とする自動車走行での最高速度に挑戦するプロジェクト。単三型 192 本を使用して、平均時速 105.95 km を実現、「乾電池を動力とする世界最速の車」としてギネス記録に認定された。 オキシライド有人飛行プロジェクト：東京工業大学と合同で行った、オキシライド乾電池を使用して友人飛行機を飛ばすプロジェクト。160 本を使用して 391.4m の距離を 59 秒間有人で飛行した。		

表 5.4.7-8　事例　松下電器産業 EVOLTA

No.	1-04	分類	化学反応による一次電池（アルカリ電池）
名称	松下電器産業 EVOLTA		
状況	商品		
出展	http://panasonic.jp/battery/drycell/evolta/series/evolta/04.html		
仕様	出力	1.5 V	
	温度	５～４５度	
	寸法	直径 26.2 mm、高さ 50 mm	
概要	2008 年に 4 月にアルカリ乾電池 EVOLTA が発売、10 月に充電式 EVOLTA も発売された。オキシライド乾電池の後継製品として発売された。正極に二酸化マンガン・黒鉛とオキシ水酸化チタンを負極に亜鉛合金を使用したアルカリ乾電池である。正極ペレットの造粒合剤の密度を均質化することにより、密度むらのない正極ペレットを実現し、正極材料の充填量を増加した。また、負極材料に新開発の亜鉛合金を採用することにより、ガスの発生を抑制して液漏れ防止性能を向上した。電池の外装に「超薄型差厚缶」を採用し封口部の強度上げ、またガスケット部を薄く改良することにより強度を保ちつつ体積を減らし、高密度充填を実現し発電の反応効率を向上した。これらの改良により、世界一の長持ち性能と業界最長の仕様推奨期間（１０年）を実現した。また、「世界一長持ちする単三型アルカリ乾電池」としてギネス世界記録に認定された。		

表 5.4.7-9　事例　Greatbatch Corp. ELECTROCHEM

No.	1-05	分類	化学反応による一次電池（リチウム電池）
名称	Greatbatch Corp. ELECTROCHEM		
状況	商品		
出展	http://www.electrochemsolutions.com/solutions/nonrechargeable.aspx		
仕様	出力	3.93 V	
	温度	モデルにより異なる。低温用で－55 度から＋85 度、高温用で＋70 度から＋200 度	
	寸法	最小で直径 0.54in、高さ 1.94in、最大で直径 1.32in、高さ 4.39in	
概要	グレートバッチ社は医療用ペースメーカ電池（リチウムヨウ素一次電池）の開発と市場占有率では世界のリーダーシップの地位を不動のものとしている。非医療器用リチウム一次電池はメモリーのバックアップから深海探査、気象観測、宇宙飛行等の厳しい環境条件化で使用され、性能、信頼性の面から高い評価を得ている。この電池の特徴は、 • 高電圧、高エネルギー密度（最大 915Wh／l、アルカリ電池の約３倍） • 優れた耐漏性と保存特性 • 大電流放電が可能 • 広い使用温度範囲 • 大容量 などである。		

表 5.4.7-10　事例　シックジャパン株式会社　Energizer

No.	1-06	分類	化学反応による一次電池（リチウム電池）
名称	シックジャパン株式会社　Energizer		
状況	商品		
出展	http://www.schick-jp.com/energizer/battery/		
仕様	出力	1.5 V	
	温度	－40 度から＋60 度	
	寸法	単３、単４	
概要	• リチウム電池 • 世界一長持ちする乾電池 • 最大でデジタルカメラでアルカリ電池の９倍長持ち • アルカリ電池より 33%軽量 • 温度変化に強い（－40 度から＋60 度） • 使用有効期限１５年		

表 5.4.7-11　事例　東芝　アルカリ乾電池　インパルスシリーズ

No.	1-07	分類	化学反応による一次電池（アルカリ電池）
名称	東芝　アルカリ乾電池　インパルスシリーズ		
状況	商品		
出展	http://www.toshiba-battery.jp/ebattery/impulse/index.htm		
仕様	出力	1.5 V	
	寸法	単１、単２、単３、単４	
概要	• 新薄肉缶：正極缶の肉厚を 0.20 mm→0.16 mm とすることにより内容量を増加 • 薄型ガスケット：薄型化と形状変更により正極合剤の高さを 3%向上 • 負極材料の反応性を改善 : 亜鉛中の不純物を提言することによりガスの発生を抑え長期保存を可能に • 正極缶の耐食性を改善 : ニッケルメッキ層と鉄の間に熱拡散層を設けることにより鉄の溶出によるガス発生を抑制、長期保存を可能にした。		

表 5.4.7-12　事例　ジーエス・ユアサ・テクノロジー　大容量リチウム一次電池

No.	1-08	分類	化学反応による一次電池（リチウム電池）
名称	ジーエス・ユアサ・テクノロジー　大容量リチウム一次電池		
状況	商品		
出展	http://www.gs-yuasa.com/gyt/jp/products/lithium1/		
仕様	出力	3.0 V	
	温度	－20 度～＋60 度	
	寸法	幅 31mm×長さ 77mm×高さ 126mm～幅 127mm×長さ 241mm×高さ 224mm	
概要	正極に二酸化マンガン、負極にリチウムを使用した一次電池である。特徴は以下の通りである。 • リチウムイオン電池の２倍以上のエネルギー密度（550Wh／l、250Wh／kg） • 自己放電が年 1%と小さい • 完全密閉構造で漏液に対する高い信頼性を実現 • 広い温度範囲（－20 度～＋60 度）で放電可能 • 高い安全性を備える • 補液などのメンテナンス不要 • 環境にやさしい 用途 : パイプ管内探査用、高圧電線監視用、海洋標識灯用、海難救助用、各種テレメータ用、非常無線用		

表 5.4.7-13　事例　株式会社 TSC マグネシウム電池

No.	1-09	分類	化学反応による一次電池（空気マグネシウム電池）
名称	株式会社 TSC マグネシウム電池		
状況	研究		
出展	http://archive.wiredvision.co.jp/blog/yamaji/201003/201003261201.html		
仕様	出力	1.5 V	
	寸法	小型	
概要	マグネシウム空気電池では、負極活物質は金属マグネシウム、正極活物質は空気中の酸素を用いる。負極のマグネシウムは電子を放出してマグネシウムイオンになり、電解液の中に溶け出す。一方、正極では酸素と水が電子を受け取り、水酸化イオンになる。全体で見ると、マグネシウムと酸素、水から水酸化マグネシウムが生成される。しかし、従来のマグネシウム空気電池では、マグネシウムの表面に電気もイオンも通さない水酸化マグネシウムの皮膜ができて、すぐに反応が停止した。TSC 社では、水酸化マグネシウムの生成を抑止する物質の開発に成功した。この物質を電界液に添付することにより水酸化マグネシウムの付着を抑制し、マグネシウムの全量が電流の生成に寄与し、リチウム電池を上回る容量を実現した。		

表 5.4.7-14　事例　マグネシウム電池

No.	1-10	分類	化学反応による一次電池（空気マグネシウム電池）
名称	マグネシウム電池		
状況	研究		
出展	http://www.nikkei.com/article/DGXNASDG20062_R21C13A2CR8000/		
仕様	出力	14W	
	寸法	縦 340 mm、横 170 mm、厚さ 20 mm	
概要	海水に豊富に含まれるマグネシウムを電極に使う新型の電池が矢部孝（東京工業大学教授）らの研究チームと藤倉ゴム工業が共同で開発し、さいたま市でこの電池を動力とする車の走行試験に成功した。 マグネシウム電池は理論上、電池の主流であるリチウム電池の約 7 倍の電力を取り出すことができる。新たなエネルギー資源として注目されており、実用化にめどをつける画期的な成果である。充電ができない一次電池であるが、携帯電話なら 1 ヶ月、電気自動車なら 500 km 走行できる見通し。 マグネシウムは塩水に漬けると電池になる。ただ、従来のマグネシウム電池では大量の塩水を短時間で交換する必要があった。今回開発された電池では、薄いマグネシウムのフィルムをロール状に巻き、テープレコーダーのように少しずつ送り出して、塩水と持続的に反応させ、塩水の交換なしに長時間使えるようにした。 さいたま市の藤倉ゴム工業の岩槻工場で、この電池を動力とする試験車の性能を確認した。電池は縦 34 cm、横 17 cm、厚さ 2 cm で重さは 800 g。40 個で 560W の出力を出して、200 kg の車を走行させた。		

表 5.4.7-15　事例　フィルム型 Mg 電池

No.	1-11	分類	化学反応による一次電池（空気マグネシウム電池）
名称	フィルム型 Mg 電池		
状況	研究		
出展	http://www.mech.titech.ac.jp/~ryuutai/		
仕様	出力	小型：スマートフォンなど、中型：小型車、オートバイなど、大型：～90 kW	
	寸法	小型：スマートフォンなど搭載用、中型：小型車、オートバイなど搭載用	
概要	従来のバルク Mg を用いた Mg 電池では、Mg の表面が反応すると酸化膜ができて、反応が内部にまで進行しない、つまり Mg の大部分は利用できないという問題があった。また、物質が電解質に溶け出すため電解質を頻繁に交換しなければならなかった。そこで、Mg をロールフィルム状にして、カセットテープレコーダのように順次繰り出すことにより反応を継続的に進行させるようにした。また、水素を掃引することにより、反応の停止、進行をコントロールできるようにした。 マグネシウム電池では理論上 2200Ah／kg の電力が得られる（実証実験で 1300Ah／kg を達成、リチウムイオン電池では 150Ah／kg)。今後の開発計画として、 超小型電池：スマートフォン用の超小型電池は 2013 年末に販売開始、 1 ヶ月間充電不要。 中型電池：小さな車やオートバイ向け、最高出力 10kW。2013 年からテスト開始、2014 年から発売開始。 大型電池：最高出力 90kW、蓄積エネルギー100kWh の大型電池。2013 年から開発及びテストの開始、2015 年から販売開始。		

表 5.4.7-16　事例　ヤマハ　熱電発電モジュール

No.	2-01	分類	温度差による発電方式（ゼーベック素子）
名称	ヤマハ　熱電発電モジュール		
状況	商品		
出展	http://www.yamaha.co.jp/product/thermoelectric_cooler/generator/		
仕様	出力	ΔT=100℃の時 0.29W/1.0V/0.29A 程度	
	温度	ΔT=100℃：25℃と 125℃	
	寸法	小型 10mm 程度	
	変換効率	4%	
概要	独自の高性能熱電変換材料と熱電発電向けに最適設計された構造により、高効率の熱電発電を可能としている。 応用例： • センサーネットワークのセンサー・送信用電源 • 工場排熱発電、排気ガス発電 特徴： • 高効率：温度特性を熱電発電向けに最適化した高性能熱電変換材料により、ゼーベック効果を利用した高効率発電を可能とした。 • 高出力電圧：高精度・高密度実装により、熱電エレメントの多数化（多対化）を実現し、高電圧出力を達成した。 • 小型化：小型化により微小エリアでのゼーベック効果を利用した発電を可能とした。 • ワイヤレス送信：昇圧およびワイヤレス送信回路と組み合わせることにより、センサー情報のワイヤレス送信を実現した。		

表 5.4.7-17　事例　サイエンスパーク（株）　温度差発電

No.	2-02	分類	温度差による発電方式（ゼーベック素子）
名称	サイエンスパーク（株）　温度差発電		
状況	実用化に向けた研究		
出展	http://www.sciencepark.co.jp/eco/development/gene.html		
仕様	出力	ΔT=67℃の時 1.5W	
	温度	ΔT=67℃：20℃と 87℃	
	寸法	中型機器、10cm 程度	
概要	応用例： • 温泉と水の温度差を利用した「温泉発電」 • 薪ストーブの熱を利用した「薪ストーブ発電」 実証実験： • ＜熱海市　「湯気発電」＞ 2012 年 10 月 5 日に熱海市にて源泉の湯気による発電の実証実験が行われた。5 台の発電装置を設置し、LED 照明、音声案内、携帯電話充電、無線 LAN スポットの提供した。 • ＜連続稼働試験＞ 2010 年に温度差発電装置に改良を加え、熱海市にて、連続稼働試験を 2 週間にわたり実施した。実験ではクリスマスツリーに LED100 個を点灯させた。熱海市「温泉イノベーション」の一環として実施された。		

表 5.4.7-18　事例　熱電変換による廃熱利用

No.	2-03	分類	温度差による発電方式（ゼーベック素子）
名称	熱電変換による廃熱利用		
状況	研究		
出展	表面科学 Vol. 34, No. 4, pp. 210-212 特集「エネルギー問題と表面科学」		
仕様	出力	出力密度 7.8 kW／m2、焼却炉で 200 W の発電、工業炉で 700W の発電を実証した。	
	温度	200～500 度	
	寸法	14cm 角	
概要	産創研におけるベンチャー開発事業及び NEDO の新エネルギーベンチャー創出事業の研究資金により、酸化物とビスマス・テルルモジュールを積層したカスケードモジュールが開発された。このモジュールは広い温度範囲に使用でき、高温側の受熱面積に対して 7.8 kW／m2 の出力密度を実現した。これを、製品として製造販売する会社として産創研技術移転ベンチャーである㈱TES ニューエナジーが 2010 年 5 月に創業された。これまでに、工業炉、焼却炉で熱電ユニットの実証実験が進められている。発電ユニットの一例として 14cm 角の加熱部をもつ集熱部と同じサイズの冷却面をもつ水冷槽の間にカスケードモジュールが 4 枚挟まれている炉壁型ユニットがある。このユニットを 4 個組み合わせて焼却炉の煙道に取り付け役 200 W の発電を実証している。また、工業炉の排気管に 9 個のユニットを取り付け 700 W の発電も実証した。		

表 5.4.7-19　事例　高木製作所　Seebeck Units

No.	2-04	分類	温度差による発電方式（ゼーベック素子）
名称	高木製作所　Seebeck Units		
状況	商品		
出展	http://www5f.biglobe.ne.jp/~takagiss/seebeckunit.html		
仕様	出力	5～20W	
	温度	ヒートパイプ加熱式、受熱ブロック式、ヒートパイプ冷却式、液体・気体式（以上 200 度まで)、温水式（100 度まで）	
	寸法	21×60×60 mm～330×60×60	
概要	発電ユニット、温度差発電、熱電発電。温度差を利用して発電するゼーベックユニット。熱電素子に様々な伝熱部品を組み合わせ、すぐに組み込みや実験を行えるユニット。 • SU-05P、ヒートパイプ加熱式、最大発電量 5W • SU-05B、受熱ブロック式、最大発電量 5W • SU-20B、SU-05B を 4 素子使用、最大発電量 20W • SU-50B、SU-05B を 10 素子使用、最大発電量 50W • SU-05HP、ヒートパイプ冷却式、最大発電量 2W • SU-20HP、SU-05HP を 4 素子使用、最大発電量 8W • SU-20WA、液体・気体式、最大発電量 20W • SU-50WW、温水式式、最大発電量 20W これらに加え、100W 用ゼーベックユニット(150×300 mm サイズ)もある。		

表 5.4.7-20　事例　温度差発電と実証事例

No.	2-05	分類	温度差による発電方式（ゼーベック素子）
名称	温度差発電の仕組みと実証事例		
状況	研究		
出展	電気計算　2012.8		
仕様	出力	ろうそく発電 2W、焚き火発電 1.5W	
	温度	ΔT=93 度（温泉発電）、60 度（ろうそく発電）、240 度（焚き火発電）	
	寸法	小型装置	
概要	ディップ形水冷式温度差発電：ゼーベック素子への熱伝達をよくするためヒートパイプを使用した。ヒートパイプは銅のパイプにわずかな作動液が密封されていて、中は真空になっている。ヒートパイプの片側を暖めると、真空であるため大気中より低い温度で気化する。気化した蒸気は熱とともに反対側に移動し、反対側で冷やされ凝縮する。冷えた液体はパイプの内側を通ってもどる。この気化と凝縮による熱輸送により熱伝導率があがる。 ろうそく発電：ろうそく発電機の冷却にはヒートシンクを使用しているが、自然放熱の空冷では冷却性が乏しいため、性能のよい DC ファンを用いて冷却を向上した。3×3cm のゼーベック素子 1 枚で 2W 程度の電力を得た。 焚き火発電：焚き火発電では、熱量が豊富なので加熱側の熱供給は十分である。冷却能力を強化するため DC ファンを 2 台使用した。4×4cm のゼーベック素子 1 枚で 1.5W 程度の電力を得た。		

表 5.4.7-21　事例　OTEC Hawaiian Islands

No.	2-06	分類	温度差による発電方式（発電タービン）
名称	OTEC Hawaiian Islands		
状況	実用		
出展	http://www.oteci.com/projects/hawaiian-islands		
仕様	出力	～100 MW	
	温度	△T～20 度	
	寸法	大規模プラント	
概要	1979 年に Mini-OTEC を構築し発電に成功した。1981 年には 1MW 級の OTEC-1 発電プラントを海軍の輸送船に設置した形で技術的な実証が行われた。その後、100MW 級 OTEC 発電プラントの設計を進めている。OTI の計画では海岸から約 9ｋｍ離れた沖合いに建設され給水孔は深度 900m に達する。この距離であれば景観を損ねることはほとんどなく、また、ガスの放出もないので大気への影響もない。ケーブルは環境への影響を低減するため小さなトンネルを通って陸上に導かれる。 海洋温度差発電では深海から引かれる低温の海水とこれよりも温度の高い表層水の温度差を発電に利用する。ハワイのような温暖な地域はこの発電方法に適した場所である。発電の原理はアンモニアなどの沸点の低い媒体を表層の温水によって気化し、気化した気体によって発電タービンを回転させて発電する。気化した媒体は深層の冷たい水によって再び液化して、再度表層の温水による気化装置に供給する。		

表 5.4.7-22　事例　OTEC The Bahamas

No.	2-07	分類	温度差による発電方式（発電タービン）
名称	OTEC The Bahamas		
状況	実用		
出展	http://www.oteci.com/projects/the-bahamas		
仕様	出力	3.4 MW	
	温度	△T～20 度	
	寸法	大型プラント	
概要	バハマは深層を表層の水温の差が大きく、また沿岸近くでも比較的水深が大きいため海洋温度差発電のプラントには適している。 まず、最初に浮遊式の小型の発電設備を沿岸近くに構築した。この小型の設備の発電能力は 3.4MW で、島々に電力を供給した。この小型の設備の構築に要する時間は 25MW プラントの半分程度で、海洋発電設備の有効性を示すのに有効である。 また、この浮遊式の設備はバハマのように頻繁にハリケーンが通過する場所に適している。通常のハリケーンであれば設備の移動は必要ないが、最大級のハリケーンが予想される場合などには、移動することも可能な構造となっている。		

表 5.4.7-23　事例　佐賀大学海洋エネルギー研究センター

No.	2-08	分類	温度差による発電方式（発電タービン）
名称	佐賀大学海洋エネルギー研究センター		
状況	研究		
出展	http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/about_lab_02.html#s_03		
仕様	出力	30kW	
	温度	△T=20 度程度	
	寸法	大型設備	
概要	1981 年 4 月に 50kW のパイロットプラントを完成。海洋温度差発電では、ランキンサイクルを用いたクローズド式海洋温度差発電システムが最も適していることを明らかにした。その後、世界最大規模の 75kW パイロットプラントを新設した。1985 年カリーナ博士が従来のアンモニアなどの純物質を用いる代わりにアンモニアと水の混合物質を用いることにより飛躍的に熱効率が高くなることを発明した（カリーナサイクル）。1994 年カリーナサイクルを用いた海洋温度差発電の実験装置を新設した。カリーナサイクルの課題を解決するため上原サイクルを発明、インド、韓国、フィリピン、スリランカなどから共同研究等の依頼が急増。 1997 年インドにおける OTEC 共同開発と実証における佐賀大学とインド国立海洋技術研究所の協力協定の覚書が調印された。1999 年ウエハラサイクル実証温度差発電システムを新設。2003 年伊万里サテライトに 30kW 海洋温度差発電基礎実験装置が設置され、実証に向けた実験が加速する。2004 年プレート式熱交換器基礎実験装置が完成。アンモニアを用いたプレート式蒸発器、凝縮器の沸騰凝縮熱伝達の測定と可視化により、OTEC 熱交換器の基礎データの取得を行う。		

表 5.4.7-24　事例　インド国立海洋技術研究所の海洋温度差発電実証研究

No.	2-09	分類	温度差による発電方式（発電タービン）
名称	インド国立海洋技術研究所の海洋温度差発電実証研究		
状況	研究		
出展	海のロマンへの挑戦「海洋温度差発電の現状と展望」2030 年のロードマップへの貢献を目指して		
仕様	出力	～100kW、目標 1000kW	
	温度	△T=20～30 度程度	
	寸法	大型プラント	
概要	オイルショック以降 100kW レベルでの実証研究が行われ、海洋の温度差のみを利用して正味出力が得られることは検証された。しかし、経済性を高め、実用化の推進には 1000kW 以上での実証が不可欠である。OTEC の実用化に積極的なインド政府は 1000kW 以上の商用化施設を目指すプロジェクトをインド国立海洋技術研究所を中心にスタートさせた。 発電プラントはインド工科大学や佐賀大学の協力で完成したが、1000m の深さから海水を汲み上げる取水管に当初問題があったため、海水の温度差を利用した海水の淡水化の研究が重点的に行われた。2005 年には陸上型で日量 100 トンの海洋温度差エネルギーを利用したフラッシュ式海水淡水化を実用化させ 2013 年まで 6 年間継続して稼動している。2007 年には新しい取水管の設置を行い、530m の深さから日量 1000 トンの海洋温度差発電を用いた発電を成功させた。		

表 5.4.7-25　事例　フランスにおける OTEC の現状

No.	2-10	分類	温度差による発電方式（発電タービン）
名称	フランスにおける OTEC の現状		
状況	研究		
出展	海のロマンへの挑戦「海洋温度差発電の現状と展望」2030 年のロードマップへの貢献を目指して		
仕様	出力	～5MW、目標 200MW	
	温度	△T=20 度程度	
	寸法	大型プラント	
概要	フランスでは政府主導で OTEC が推進されている。ヨーロッパにおける海洋再生可能エネルギーの活用は波力や海流の分野ではイギリスが先行しているのに対して、フランスは OTEC に重点を置いている。フランスにおける OTEC の歴史は古いが、近年になって地球温暖化問題や石油価格の高騰の影響から一段と注目を集めている。フランス政府造船局を前身とする DCNS 社が 2015 年までに 10MW 規模の実証機を建設する計画を発表している。2009 年にはインド洋仏領ユニオン島地方政府と R&D に関する合意を締結、2010 年にはタヒチ島における実施可能性調査を行っている。このタヒチにおける 5MW 規模の OTEC では日本企業も協力参加している。 フランスの海洋開発研究機構（IFREMER）は 2020 年までに 200MW の OTEC が導入されるということをひとつのシナリオとして示唆している。		

表 5.4.7-26　事例　ゼネシス（株）　排熱温度差発電

No.	2-11	分類	温度差による発電方式（発電タービン）
名称	ゼネシス（株）　排熱温度差発電		
状況	商品		
出展	http://www.xenesys.com/products/dtec.html		
仕様	出力	ΔT=67℃の時 1.5W	
	温度	200 度以下の排熱	
	寸法	大型機器、コンテナサイズ	
	価格	建設価格：30～40 万円／kW、設備償却：3 円／kWh	
概要	排熱温度差発電の原理 • 蒸留器で低沸点の作動流体を温熱源により加熱し蒸発されせる。 • 発生した作動流体の蒸気でタービン発電機を駆動して発電する。 • タービン駆動後の作動流体蒸気は、凝縮器冷熱源により冷却され液体に戻る。 • 液体となった媒体を再び作動流体ポンプを用いて蒸発器に送り込む。 排熱温度差発電の特徴： • 石油、発電所、鉄鋼、化学等の工場プラントで大量に発生する低温排熱（200℃以下）を用いた発電。 • 化石燃料を使用しないため、省エネ効果と CO2 削減効果が期待できる。 • 各種製造プロセスの冷却設備の代替機能として利用できる。 商品の特徴： • 出荷前に装置をほぼ完成させ、現地設置工事を極力低減している。		

表 5.4.7-27　事例　IHI 小型バイナリー発電装置

No.	2-12	分類	温度差による発電方式（発電タービン）
名称	IHI 小型バイナリー発電装置		
状況	商品		
出展	http://www.ihi.co.jp/compressor/binary/index.html		
仕様	出力	20 kW	
	温度	温水 70～95 度、冷却水 20～30 度	
	寸法	幅 2050×奥行 1360×高さ 1600mm	
概要	身近な温水からエネルギーを取り出し最大限に活用して発電する。特徴は以下の通りである。 • オーガニックランキンサイクルにより、70～95 度の温水から発電が可能。 • 少量の温水で発電できる 20kW の小型タイプ。 • 電力会社の送電網に接続することが可能。 • 作動媒体に不活性ガスを使用するなど規制に対応 • 簡単設置、簡単操作 • 高効率タービン発電機を搭載（タービンインペラを採用）		

表 5.4.7-28　事例　神戸製鋼　小型バイナリー発電装置

No.	2-13	分類	温度差による発電方式（発電タービン）
名称	神戸製鋼　小型バイナリー発電装置		
状況	商品		
出展	http://www.kobelco.co.jp/machinery/products/rotation/microbinary/#spec		
仕様	出力	125kW	
	温度	110～130 度	
	寸法	幅 2250×奥行 3425×高さ 2379mm	
概要	半密閉スクリュタービン方式の高効率・小型バイナリー発電システム。特徴は以下の通りである。 • スクリュタービンと発電機ロータとを一軸一体構造とすることにより軸シール、カップリング、発電機のベアリングが無い半密閉スクユタービン方式のバイナリー発電システムを実現。作動媒体や潤滑油の漏れが無い構造のため長期安定運転が可能。 • 熱源変動に追随した高効率の発電性能。 • 冷却機、ヒートポンプの量産技術の活用や部品の共用化により低価格を実現。 • 70kW ユニットを基本モジュールとして最適なシステムを設計可能 • 作動媒体が不活性ガスであるなど規制に対応。		

表 5.4.7-29　事例　昭和飛行機工業株式会社　非接触給電システム

No.	3-01	分類	非接触電力伝送（電磁誘導方式）
名称	昭和飛行機工業株式会社　非接触給電システム		
状況	商品		
出展	http://www.showa-aircraft.co.jp/products/EV/kyuuden.html		
仕様	出力	IPS で 120 W ～150 kW、AGV 用で 1kW	
	温度	0～50 度	
	寸法	IPS150 kW 型で 150kg、短径 902、長径 1854、厚さ 48 mm AGV 用 1kW タイプで高周波電源装置 350×210×80 mm、給電・受電ヘッド 210×150×60 mm、充電コントローラ 300×210×80 mm	
概要	特徴： • コネクタなど物理的接触なしで移動体に電気エネルギーを供給するシステム。 • 電気自動車や無人搬送台車(AGV)などに適用 • 磨耗部品がなくメンテナンスフリー • ショートや感電など事故の心配がない • 接触による騒音がない • 接触・磨耗による粉塵が発生しない • ニーズに応じた出力を実現可能		

表 5.4.7-30　事例　村田製作所　ワイヤレス電力伝送モジュール

No.	3-02	分類	非接触電力伝送（電界結合方式）
名称	村田製作所　ワイヤレス電力伝送モジュール		
状況	商品		
出展	http://www.murata.co.jp/products/wireless_power/		
仕様	出力	10 W～	
	温度	0～40 度	
	寸法	送電モジュール：108×30×16 mm、受電モジュール：76.5×11.5×11.5 mm	
概要	電界結合方式を用いたワイヤレス電力伝送モジュールで、iPad 用ワイヤレス充電器セットに採用されている。送電側のアクティブ電極、パッシブ電極、受電側のアクティブ電極、パッシブ電極で構成される２組の非対称ダイポールを垂直に配置している。これらのダイポールの結合により発生する誘導電界を利用して電力を伝送する。 この方式では電磁誘導方式などに比べ、結合素子間の位置ずれがあっても伝送効率の低下が少ない。例えば、電極が１個分ずれた状態でも 80%、位置ずれが小さい場合には 90%の伝送効率を実現する。また、電極の形状を問わない、電極部に流れる電流が非常に小さいため、電極材料、電極厚みに関する制限がなく様々な機器に組み込みやすい。また、電極部に流れる電流が小さいことからジュール熱の発生も小さく、温度上昇によるバッテリーの損傷などを防げる。		

表 5.4.7-31　事例　長野日本無線　ワイヤレス電力伝送

No.	3-03	分類	非接触電力伝送（磁界共鳴方式）
名称	長野日本無線　ワイヤレス電力伝送		
状況	研究		
出展	http://www.kec.jp/committee/johoshi/pdf/jyohoshi_220-6.pdf		
仕様	出力	現状では 1 kW、将来的には伝送距離 10 cm 以上、数十 W～数 kW の電力伝送を目標とする	
	効率	80 %	
	寸法	コイルの直径 40 cm	
概要	磁界共鳴方式によるワイヤレス電力伝送の研究。携帯電話の充電器から、将来的には産業機器や電気自動車の充電器を目指す。磁界共鳴方式の特徴は伝送距離が大きい、送信受信部の位置ずれに強い、異物の介在に強いなどであるが、駆動周波数の選択性が低い、小型化高効率化が難しい、安全性などの問題がある。左図は試作された 1 kW ワイヤレス給電・充電システムである。80 %以上の伝送効率を実現した。		

表 5.4.7-32　事例　三菱重工　無線電力伝送技術

No.	3-04	分類	非接触電力伝送（電波方式）
名称	三菱重工　無線電力伝送技術		
状況	研究		
出展	三菱重工技報　Vol. 48 No. 4 (2011)　航空宇宙特集		
仕様	出力	2030 年で火力発電一基分(400MW)相当の電力を伝送することを目的とする	
	寸法	大規模	
概要	宇宙太陽発電システムで発電した電力をマイクロ波に変換して地球上に伝送する技術の開発。宇宙太陽光発電とは 36,000km 上空の静止軌道上で多数の太陽電池パネルを展開して発電するシステムである。パネルは数千万枚で構成されていて、これらのパネルからのマイクロ波を合成するには、各パネルのマイクロ波の位相を高精度に制御する送電制御技術が必要となる。この技術として PAC(Position and Angle Correction)法と並列化法の研究が行われている。PAC 法では地上からのパイロット信号により各パネルにおけるパイロット信号の位相と角度を検出し、これらの情報から各パネルのマイクロ波の位相差から位置ずれを推定し、ずれている分だけ各パネルのマイクロ波の位相を補正する方法である。一方、並列化法はパネルごとにマイクロ波の位相変調を行い、受電側で基準となる周波数のマイクロ波との重ねあわせをすると、位相変調を行ったマイクロ波と基準となるマイクロ波の位相差分だけ、変調周波数に出力が発生する原理を利用して、各パネルごとの位相差を検出し、検出した差分だけ各パネルのマイクロ波の位相を補正する方法である。 2015 年に 100kW 級、2020 年に 10,000kW 級、2025 年に 400,000kW 級の電力の伝送を実現する計画。		

表 5.4.7-33　事例　日本電業工作　レクテナ：ワイヤレス給電

No.	3-05	分類	非接触電力伝送（電波方式）
名称	日本電業工作　レクテナ：ワイヤレス給電		
状況	商品		
出展	http://www.den-gyo.com/solution/solution01_a.html		
仕様	出力	レクテナ素子単体で 80 W、128 個のパネルで 10 kW	
	効率	伝送効率 41 %	
	寸法	レクテナ素子単体で 10 cm×10 cm、パネルの寸法 80×160 cm	
概要	マイクロ波ワイヤレス給電により離れた場所に電力を供給するレクテナ素子の開発。走行中や作業中の車両に電力を供給することが可能である。 レクテナ素子は薄型化に適した円形マイクロストリップアンテナを、その背面に配置した整流回路から構成される。素子単体の定格出力は 80 W。整流回路素子の変換効率は入力が 1～10W の範囲で 80%以上、最大値は 91.6%、80W の整流回路としたときの効率は 84.1 %である。 定格出力 80 W のレクテナ素子を 4×4 個配置して 1.3 kW 出力のレクテナユニットを構成した。さらに、レクテナユニットを 8 台使用して 10 kW 出力のパネルとした。パネルの寸法は 800×1600 mm でトラックの運転席の上部に納まる大きさである。 このレクテナパネルに電波送信機により 4m 離れた場所から 2.45GHz のマイクロ波を送信して、受信した電波を電力に変換して電灯を点灯させる実験を行った。128 個レクテナ素子により構成されるパネルに 10kW のマイクロ波を送電して 4.1kW の電力を取り出した。また、距離を 6 m とした場合には 3.2 kW の出力を得た。		

表 5.4.7-34　事例　ワイヤレス給電を利用したモニタリングの電磁界解析

No.	3-06	分類	非接触電力伝送（磁界共鳴方式）
名称	ワイヤレス給電を利用したモニタリングの電磁界解析		
状況	研究		
出展	日本原子力学会「2013 年秋の大会」O18、685p		
仕様	効率	～30 %	
	寸法	送受信アンテナ直径 150 mm	
概要	人工バリアの長期間にわたるモニタリングのために、人工バリア内に設置したセンサへのワイヤレス給電の可能性を電磁界解析により検討した。送受信アンテナの直径 150 mm、送受信アンテナ間の距離 150 mm、周波数 10～16 MHz、送受信アンテナ間の媒体を含水率 25 %のベントナイトとして電磁界解析を行った。その結果、周波数 12.5 MHz 近辺で最大電力伝送効率 40 %という結果を得た。この結果は先に行った実験結果とよく整合した。		

表 5.4.7-35　事例　村田製作所　新・無線給電技術

No.	3-07	分類	非接触電力伝送（磁界共鳴方式）
名称	村田製作所　新・無線給電技術		
状況	研究		
出展	http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK04022_U2A201C1000000/		
仕様	効率	70%以上	
	寸法	送受信アンテナ直径 150 mm	
概要	無線で電力を伝送するワイヤレス給電技術において、システム全体の電力伝送効率を大幅に高められる技術を開発した。直流電圧から無線区間を経て負荷に至るまでの電力伝送効率が従来技術に比べて高く、例えば 75 W の電力を直流電力源から数十 cm 先の負荷に直流供給する場合、最高で 70%以上の電力効率で電力を伝送できる。 電力の伝送に高周波を使う従来の方法では、直流電圧を交流に変換する際に電力損失が発生し、システム全体の電力効率は 15～30%程度であった。従来の技術では、電力源から 50Ω 系などの高周波交流源を作ってコイルに給電するのが一般的であった。この場合、高周波交流への変換回路と整合回路における電力の損失が大きかった。今回、開発した技術では直流電圧からスイッチング技術により、共鳴周波数で変化する電磁界を直接つくり、送電回路と受電回路を結合させる。このときのスイッチング周波数は 10 MHz 程度としている。これにより、損失の大きい高周波交流への変換回路と整合回路が不要となるため、システム全体の電力効率を大幅に高められた。小型電子回路、携帯電話から電気自動車のような大電力用途まで、さまざまな応用を想定している。		

表 5.4.7-36　事例　ソフトスイッチング技術を用いた新しい共鳴型ワイヤレス給電システムの設計理論

No.	3-08	分類	非接触電力伝送（磁界共鳴方式）
名称	ソフトスイッチング技術を用いた新しい共鳴型ワイヤレス給電システムの設計理論		
状況	研究		
出展	電子情報通信学会　信学技報　WPT2011-22(2011-12)		
仕様	効率	95.5 %	
	寸法	コイル 11×18mm の楕円、伝送距離 100mm	
概要	ソフトスイッチング技術を用いた新しい共鳴型ワイヤレス給電システムの開発。 • 現行の無線通信システムを利用したワイヤレス給電システムは電力効率が悪く実用的ではない。今回 FET などの電力用半導体素子をスイッチとして用いるパワーエレクトロニクス技術の利用を試みた。電力用半導体素子はオンオフのみで動作するため、原理的に損失がなくワイヤレス給電システムの高効率化に適している。 • 磁界共鳴結合方式ではデバイス間の相互インダクタンスを形成して共鳴電流を流して電力を伝送する。一方、電界共鳴結合方式では相互キャパシタンスの共振電流を流して電力を伝送する。今回の方法では、デバイス間の相互インダクタンス、相互キャパシタンスの双方を利用する電磁界共鳴結合方式を用いている。 • 実験では出力 240 W にて最大効率 95.5 %、定格出力 480 W にて効率 94.4 %を達成した。 • 電磁界共鳴結合方式では、電力伝送に関与しないエネルギーは、送電受電のそれぞれの回路において共振エネルギーとして保存される。		

表 5.4.7-37　事例　磁気共鳴による非接触給電の予備的実験

No.	3-09	分類	非接触電力伝送（磁界共鳴方式）
名称	磁気共鳴による非接触給電の予備的実験		
状況	研究		
出展	Touhoku Polytechnic College, AKITA		
仕様	効率	84.29 %（距離 30 mm）、79.51 %（距離 40 mm）、21.79 %（距離 100 mm）、8.33 %（距離 130 mm）	
	寸法	コイルの直径 130 mm	
概要	コイルを駆動する電源は周波数が MHz オーダーの場合、無線通信機の送信回路やリニアアンプという RF 電源が必要となってくる。しかし、コイルを駆動する電源の周波数を kHz オーダーに落とすとインバータという考え方で対応することが可能となる。ここでは、MOSFET を用いたフルブリッジ回路で磁気共鳴による非接触給電の実験を行った。コイルはリッツ線を用いて外形 130 mm、内径 100 mm の空芯コイルを用いた。コイルの 100 kHz での自己インダクタンスは 50μH、Q 値は 100 である。これを 0.068μF の共振用コンデンサに接続して、共振周波数を 100kHz 弱となるようにした。一次コイルの給電回路は CMOS の NOT ゲートを用いた矩形波の発信回路、フルブリッジ回路のためのデッドタイム発生回路、MOSFET ドライバと MOSFET によるフルブリッジで構成した。受電回路は給電側と同様の直列共振回路とブリッジダイオード回路、平滑コンデンサ、負荷抵抗 10Ω で構成した。給電側の電源は 12V の直流を供給した。 インバータの周波数を 98 kHz とし、給電受電コイル間の距離を 30 mm としたとき、給電電力 16.80 W、受電電力 14.16 W、伝送効率 84.29 %を得た。		

表 5.4.7-38　事例　電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム

No.	3-10	分類	非接触電力伝送（磁界共鳴方式）
名称	電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム		
状況	研究		
出展	信学技報		
仕様	効率	200mm の距離で 90%以上、1000W の電力の場合 80%	
	寸法	110mm×480mm	
概要	従来の電界共振結合型では 13.56MHz や 27.12MHz といった周波数が用いられるが、線路長が長くなり、損失が大きくなるという問題がある。そこで、平板電極と直列共振コイルを用いたワイヤレス給電カプラを開発した。110mm×480mm の２枚の電極を 35cm 話して FR4 基板上に配置した。13.56MHz にて共振するようにコイルのインダクタンスを調整し直列に２個のコイルを接続した。送電、受電側は同一の構造とした。小電力であれば 200mm の距離で伝送効率は 90%以上となった。1000W の電力の場合では 80%となった。現状の構造では大きな電界が漏れているので、今後はこの放射電力を低減するためにカプラの構造を検討する。		

表 5.4.7-39　事例　三菱重工業　マイクロ波方式ワイヤレス充電システム

No.	3-11	分類	非接触電力伝送（電波方式）
名称	三菱重工業　マイクロ波方式ワイヤレス充電システム		
状況	商品		
出展	http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1305/23/news133.html		
仕様	効率	68%	
	寸法	小型、自動車充電用	
概要	宇宙太陽光発電システム用に開発したマイクロ波を使ったワイヤレス伝送システムを電気自動車やプラグインハイブリッド車の充電用に転用した。この方式では電力をマイクロ波に変換して送電アンテナから送信し、車両側に搭載した受電アンテナでマイクロ波を受信してから再度電力に変換する。現在、自動車の充電システムとして検討されている電磁誘導方式や磁気共鳴方式に比べ、コストを抑制することができる。一方、送受電効率は電磁誘導方式では装置の損失を含めて 80～90%、磁気共鳴方式では装置の損失を含めずに 80～90%であるのに対してマイクロ波方式では 68%とやや低く、今後の課題である。		

表 5.4.7-40　事例　Widetronix's betavoltanic power source

No.	4-01	分類	ベータボルタイック発電方式（半導体素子）
名称	Widetronix's betavoltanic power source		
状況	商品		
出展	http://www.widetronix.com/technology		
仕様	出力	電圧 2V、電力 nW～μW オーダー	
	寿命	数日～何十年	
	寸法	微小デバイス	
	効率	20 %以上	
概要	ベータボルタイック発電素子は出力は nW～μW オーダーと低いものの、小型、高効率でかつ寿命も数日～何十年と広い範囲で期間で設定することが可能であり、宇宙や医学的なインプラントなどの用途で開発が行われている。ベータボルタイック発電素子は半導体、同位元素、パッケージの 3 つの部分より構成されている。半導体は同位元素から放出されるベータ線を受けて直流電流を生成する。半導体の材料として高効率で極限の環境下でも高い電力を発生する炭化珪素を用いることにより、2V の無負荷電圧と 20%以上の効率を実現している。同位体としてはトリチウムや ^{63}Ni などを利用している。同位体の種類と量を調整することにより、素子の出力と寿命を制御することができる。また、優れたパッケージング技術により小型で安全で信頼性の高い素子を実現することができる。 なお、放射性物質をエネルギー源とするので、安全上の配慮は不可欠である。本デバイスではトリチウムや ^{63}Ni など、低エネルギーのベータ線のみを放出する同位元素を使用しており、パッケージングにより素子外への放射線の漏洩は環境レベル以下に抑えている。		

表 5.4.7-41　事例　Betavoltaic.co.uk

No.	4-02	分類	ベータボルタイック発電方式（半導体素子）
名称	Betavoltaic.co.uk		
状況	商品		
出展	http://www.betavoltaic.co.uk/index.html		
仕様	出力	24W／kg	
	寿命	10 年以上	
	寸法	小型デバイス	
	効率	25%	
概要	ベータボルタイック電池は小電力ではあるが長期間にわたって電力を供給し続けることが可能である。このため、心臓のペースメーカには適していて、理論上 20 年以上も稼動させることができる。ベータボルタイック電池の原理は太陽光発電と同様である。太陽光発電では光子が半導体ダイオード接合部を通過する際に電子を励起して電流を発生する。一方、ベータボルタイック電池では、同位体元素から放出されるベータ線が半導体ダイオード接合部を通過する際に電子を励起して電流を発生する。同位体から放出される放射線のエネルギーは極めて低く十分に遮蔽されているため安全上問題はない。ベータボルタイック電池で使用する同位体はトリチウムで、kg あたり 24W のエネルギーを発生する。10 年以上稼動し、エネルギー効率は 25%程度である。 また、同位体から放出されるベータ線が半導体ダイオードの接合部を通過する割合を向上するため、半導体ダイオードを三次元構造とし、その間を同位体元素で埋める構造とした。		

表 5.4.7-42　事例　CITY LABS Nano Tritium Battery Model P100

No.	4-03	分類	ベータボルタイック発電方式（半導体素子）
名称	CITY LABS Nano Tritium Battery Model P100		
状況	商品		
出展	http://www.gizmag.com/city-labs-nanotritium-betavoltaic-battery/23720/		
仕様	出力	n W オーダー	
	寿命	20 年以上	
	寸法	小型デバイス	
	温度	-50 度～150 度	
概要	危険な場所や遠隔地など、電池の交換が困難な場所の微小デバイスの電源として適している。親指程度の大きさで放射性同位体から放出されるベータ線をエネルギー源とするため、20 年以上にたわってnW オーダーの電力を供給し続ける。耐環境性に優れ広い温度範囲（-50 度～150 度）で動作し、振動や標高の高い場所でも問題がない。宇宙や極地における温度・圧力センサー、医学的なインプラント、SRAM のメモリーのバックアップ、深海などでの適用が考えられる。		

表 5.4.7-43　事例　City Labs 社がトリチウム燃料のマイクロ燃料電池を発売

No.	4-04	分類	ベータボルタイック発電方式（半導体素子）
名称	City Labs 社がトリチウム燃料のマイクロ燃料電池を発売		
状況	商品		
出展	http://wirelessbroadband.seesaa.net/article/275731201.html		
仕様	出力	0.7V～3V、75 nW～50μW	
	寿命	20 年	
	寸法	微小デバイス	
	温度	－50 度～＋150 度	
概要	2012 年 6 月 4 日、米国 City Labs 社はトリチウムを燃料とするマイクロ原子力電池 Nano Trium を発売したことを発表した。Widetronics 社の製品は SiC 半導体を使っていたが、City Labs 社の製品は GaP を使っている。SiC も GaP もバンドギャップの広い半導体で、トリチウムのベータ崩壊で放出されるベータ線のエネルギーを効率よく回収できる。他社のマイクロ原子力電池で使用されている半導体は Qynenergy 社は SiC、BetaBatt 社が Si である。あと、ベータ崩壊により放出されるベータ線の方向はランダムなので、これを効率よく捕獲するためのデバイスの形状も重要である。 寿命は 20 年以上、エネルギーの放出機構が安定して、デバイスも構造が単純で稼動部もないので、動作温度も－50 度～＋150 度と広く、化学反応を利用する一次電池よりも長期的信頼性に優れる。 モデル P100 は電圧が 0.7 V、初期の出力が 75 nW、20 年後の出力が 24.3 nW。 モデル EOL20KY15 は電圧が 3 V、初期の出力が 50 μW、20 年後の出力が 16.2 μW。 用途は主に軍事用。放射線取扱免許を持たないユーザでも購入可能。		

表 5.4.7-44　事例　Qynenergy QynCell

No.	4-05	分類	ベータボルタイック発電方式（半導体素子）
名称	Qynenergy QynCell		
状況	商品		
出展	http://qynergy.com/technology/		
仕様	出力	～50mW	
	寿命	～20 年	
	寸法	小型デバイス	
概要	Qynenergy 社により開発されたベータボルタイック方式の電池。μA オーダーの微小電流を 20 年以上の長期間にわたって放出し続ける。Qynenergy 社の開発した独自のベータボルタイック技術により、高性能 SiC の半導体を用い、ベータ線源としては、クリプトン 85 ガスを用いている。cm^3 のセルで長期間にわたって 50mW オーダーの電力を供給し続ける。		

表 5.4.7-45　事例　Betavotaic Devices

No.	4-06	分類	ベータボルタイック発電方式（半導体素子）
名称	Betavotaic Devices		
状況	研究		
出展	http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/harrison2/		
仕様	出力	nW オーダー	
	寿命	～100 年	
	寸法	微小デバイス	
	効率	4～6%	
概要	ベータボルタイック発電とは放射性物質から放出される高エネルギーのベータ線を pn 接合あるいはショットキーダイオードに照射して電子－正孔ペアを生成して、電流を発生させるものである。 ベータボルタイック発電においてベータ線源の選定は重要である。^{90}Sr→^{90}Y を線源とした場合、半減期が 20 年であるにも関わらず、発電は 14 時間で停止した。これは、^{90}Sr→^{90}Y から放出されるベータ粒子のエネルギーが最大 2MeV に達し、pn 接合に損傷を与えるためである。このことを考慮すると、ベータ線源として用いることができるのは、^{3}H (Emax=18keV、半減期 12.3 年)、^{63}Ni (Emax=67keV、半減期 100.1 年)、^{147}Pm (Emax=230keV、半減期 2.6 年)などに限定される。 ベータボルタイック発電の実用例としては 1970 年代に ^{147}Pm と Si を組み合わせたものが、心臓のペースメーカの電源として採用され 100 人以上の患者に埋め込まれた。エネルギー効率 4%、寿命 10 年が見込まれたが、価格の問題と不純物として含まれる ^{146}Pm から放出されるガンマ線の懸念から使用は中止された。 近年、Nano-Trium ベータボルタイック発電が登場してからこの発電方法は再び見直されている。Nano-Trium では ^{63}Ni と 4H SiC の組み合わせにより 6%の効率を実現している。		

表 5.4.7-46　事例　液体半導体ダイオードを用いた放射線同位体発電

No.	4-07	分類	ベータボルタイック発電方式（半導体素子）
名称	液体半導体ダイオードを用いた放射線同位体発電		
状況	研究		
出展	http://beanskdb.mmc.or.jp/beans/		
仕様	出力	16.2nW	
	寸法	微小デバイス	
	効率	1.24%	
概要	同位体放射元素である ^{35}Se からのβ放射（betavoltaic）を用いて，液体半導体のセレン中で電子＝正孔対を生成し，それを液体半導体と金属のショットキーダイオードで分離する，発電方法とその基礎的評価。 左図のように，ガラス基板上の SU-8 で形成された液だめに p 型半導体であるセレン（融点 221℃）と ^{35}Se の混合物を入れる。下部のアルミ電極はショットキー接合，上部のニッケル電極はオーミック接合となっている。アルミ電極の近傍は空乏層になって電界が生じており，β放射により発生した電子－正孔対を分離して，起電力を発生させることができる。 図に，I-V 曲線を示す．^{35}Se が無いときには，熱イオン電流が現れているがその値は小さく，β放射によって電流が 1 桁以上大きくなることが判る．また，最大電力は 16.2 nW（その時の電圧 359 mV）であり，変換効率は 1.24%だった。		

表 5.4.7-47　事例　Betacel model 400

No.	4-08	分類	ベータボルタイック発電方式（半導体素子）
名称	Betacel model 400		
状況	商品		
出展	Betavoltaic power source		
仕様	出力	400μW	
	寿命	10 年以上	
	寸法	微小デバイス	
	効率	4%	
概要	1968 年から 1974 年にかけて Olsen は Donald W.Douglas Lab においてベータボルタイック発電を実用化した。Si 半導体と Pm_2O_3 の化合物の形にしたを ^{147}Pm を層状の重ね合わせ、最初のベータボルタイック電池を実現した。これは、心臓のペースメーカ内に組み込まれ、実際に 100 人を超える患者に埋め込まれた。効率は 4%程度で、400μW を 10 年以上にわたって供給し続けた。電池の体積が大きいのは、^{147}Pm の中に不純物として含まれる ^{146}Pm からのγ線を遮蔽するためである。この不純物の問題とコストの問題からリチウム電池が実用化されるのに伴って製造は中止された。		

表 5.4.7-48　事例　Cornell University　^{63}Ni を使った湿度センサー用超小型発電回路

No.	4-09	分類	ベータボルタイック発電方式（マイクロマシン）
名称	Cornell University　^{63}Ni を使った湿度センサー用超小型発電回路		
状況	研究		
出展	http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2007/06/18/522.html		
仕様	出力	μW オーダー	
	寸法	小型デバイス	
概要	Cornell University で開発された湿度センサーモジュール。湿度によって静電容量値が変化する高分子膜をセンサーに使用して、放射性同位元素である ^{63}Ni から放出された電子を電荷として収集し電力源とした。上図は試作された湿度センサーモジュールの概観図である。湿度センサーの高分子膜と MOS FET をセラミックパッケージで封ししている。下図は放射性同位元素 ^{63}Ni を電力源とする湿度センサーモジュールの概念図である。左側が ^{63}Ni の電荷を収集する部分である。		

表 5.4.7-49　事例　Cornell University　^{63}Ni を使った半永久動作の超小型発電回路

No.	4-10	分類	ベータボルタイック発電方式
名称	Cornell University　^{63}Ni を使った半永久動作の超小型発電回路		
状況	研究		
出展	http://news.mynavi.jp/articles/2006/02/09/isscc1/		
仕様	出力	2mm 角のフィルムで 10keV	
	効率	23%（ただし、70nW、電圧 10mVpp～10Vpp 時）	
	寸法	小型デバイス	
概要	ニッケルの放射性同位元素(^{63}Ni)を使った半永久動作の超小型発電回路の研究。発電には、静電気と機械振動を利用する。一方を固定した導電性のカンチレバーの自由端付近に、^{63}Ni のフィルムを固定配置する。ベータ線によってカンチレバーの先端が帯電し、^{63}Ni フィルムに引き寄せられる。カンチレバーと ^{63}Ni フィルムが接触すると帯電電荷が移動して中和され、カンチレバーが元の位置に戻る。再びベータ線によってカンチレバーが帯電する。これを繰り返す。この繰り返しはカンチレバーの機械的な振動(数十 Hz)となって現れるので、カンチレバーに PZT フィルムなどの圧電素子を取り付けることで電気エネルギーを取り出せる。図はピエゾ素子のカンチレバーを利用した電力発生の動作原理図。間欠的なパルス電力を発生する。		

表 5.4.7-50　事例　SNAP-19B RTG

No.	5-01	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	SNAP-19B RTG		
状況	人工衛星に利用		
出展	http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm		
仕様	出力	初期の出力、電力として 28.2W	
	寸法	大型装置	
概要	• NimbusIII（1969 年 4 月 14 日打ち上げられた気象衛星）の電源。 • 初期の電力出力 28.2W • NASA が開発した最初の放射性同位体を用いた発電機。 • 1968 年に人工衛星 Nimbus B-1 に搭載された。 • 打ち上げロケットの失敗により実用には至らず。 • RTG 本体はカルフォルニア州のサンタバーバラ海峡に落下した。 • RTG は回収されその燃料である放射性同位体は再利用された。 • これにより RTG の安全性が実証された。		

表 5.4.7-51　事例　SNAP-19 RTG

No.	5-02	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	SNAP-19 RTG		
状況	火星探査機に利用		
出展	http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm		
仕様	出力	初期の出力、Viking に搭載されたものは電力で 42.6W、Pioneer に搭載されたものは電力で 40.3W	
	寿命	Pioneer10 に搭載されたものは地球との交信を 30 年継続、Pioneer11 に搭載されたものは地球との交信を 22 年継続	
	寸法	大型装置	
概要	• Viking1（1975 年 8 月 20 日打ち上げ始めて火星に到達）、Viking2（1975 年 9 月 9 日打ち上げ、火星に到達）、Mars landers、Pioneer10（1972 年 3 月 2 日打ち上げ、木星に接近）、Pioneer11（1973 年 4 月 5 日打ち上げ、木星と土星に接近）に搭載された電源 • 初期の出力、Viking に搭載されたものは電力で 42.6W • 初期の出力、Pioneer に搭載されたものは電力で 40.3W • SNAP-19B の改良機種 • 設計上の寿命は 5 年 • Pioneer10 に搭載されたものは地球との交信を 30 年継続 • Pioneer11 に搭載されたものは地球との交信を 22 年継続 • Viking1 と 2 に搭載されたものは予定通り 90 日間電力を供給した • それぞれの火星探査機はそれぞれ 6 年と 4 年電力を供給した		

表 5.4.7-52　事例　SNAP-27 RTG

No.	5-03	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	SNAP-27 RTG		
状況	月面探査衛星に利用		
出展	http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm		
仕様	出力	初期の出力、電力で 70W	
	寿命	月面探査衛星の任務が完了するまで 5～8 年電力を供給した	
	寸法	大型機器	
概要	• Appolo Lunar Surface Experiment Package の電源。アポロ 12、14、15、16 号に搭載された。 • 初期の出力、電力で 70W • 設計上の寿命は 2 年 • 月面探査衛星の任務が完了するまで 5～8 年電力を供給した		

表 5.4.7-53　事例　Multi-Hundred Watt RTG

No.	5-04	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	Multi-Hundred Watt RTG		
状況	太陽系探査衛星に利用		
出展	http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm		
仕様	出力	初期の出力、電力で 158W	
	寿命	30 年電力を供給、現在も継続中	
概要	• Voyager1 と Voyager2 に搭載された • 初期の出力、電力で 158W • 30 年電力を供給、現在も太陽系の彼方で運転継続中 Voyager1 の概要 • 1977 年 9 月 5 日に打ち上げ • 木星、土星を探査 • 現在も太陽系の彼方で運転継続中 Voyager2 の概要 • 1977 年 8 月 20 日に打ち上げ • 木星、土星、天王星、海王星を探査 • 現在も太陽系の彼方で運転継続中		

表 5.4.7-54　事例　General Purpose Heat Source (GPHS) RTG

No.	5-05	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	General Purpose Heat Source (GPHS) RTG		
状況	惑星探査衛星に利用		
出展	http://solarsystem.nasa.gov/rps/rtg.cfm		
仕様	出力	初期の出力、熱源として 4400 W、電力として 292W	
	効率	6.7 %	
	寿命	Cassini で 14 年（継続運転中）、New Horizons で 6 年（継続運転中）、Galileo で 14 年、Ulysses で 19 年	
	寸法	中型、直径 0.422m、長さ 1.14m、燃料 7.8 kg、全体 55.9 kg	
概要	NASA の惑星探査衛星に搭載されているが、製造は GE。燃料としては ^{238}Pu を用いる。燃料は PuO_2 としてペレット状に成型され、Ir の容器に格納される。左図はカッシーニに搭載された RTG の模式図、右図は燃料として用いられた Pu のペレット。出力は年 0.8 %の割合で低下する。		

表 5.4.7-55　事例　Power Sources for Remote Arctic Application (Office of Technology Assessment, U.S.Congress)

No.	5-06	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	Power Sources for Remote Arctic Application (Office of Technology Assessment, U.S.Congress)		
状況	遠隔北極監視に利用		
出展	http://govinfo.library.unt.edu/ota/Ota_1/DATA/1994/9423.PDF		
仕様	出力	25 型 RTG で 9～20 W、100 型 RTG で 54 W	
	寿命	30 年以上	
	寸法	100 型 RTG で直径 70 cm、高さ 115 cm、重さ 1232 kg	
	温度	－60 度～＋40 度	
概要	アメリカ空軍が運営するアラスカ Burnt Mountain の無人の地震観測所における観測機器の電源として RGT（放射性同位体熱電気変換機）が 1973 年より用いられている。RGT はメンテナンスが不要で長期信頼性も高い。25 型が 9 台、100 型が 1 台用いられている。燃料はストロンチウム 90 で各 RTG におよそ 500 g から 1800 g 搭載されている。25 型の出力は 9～20 W、100 型の出力はおよそ 54 W である。ストロンチウムの半減期は 28 年なので長期間燃料の補給なしで稼動する。 ストロンチウムは $SrTIO_3$ または $SrTIO_4$ としてホッケーのパック程度の大きさに成型される。この材料は強度が高く、耐火性及び耐水性に優れる。^{90}Sr の崩壊により生成する ^{90}Y はベータ線を放射するため汚染の原因となりうる。^{90}Sr は体内に取り込まれると骨に蓄積され、骨癌などを引き起こす。北極圏は寒暖の差が－60 度～＋40 度と大きいが、このような環境の下でも問題なく稼動している。 RGT の断面の模式図を示す。燃料である ^{90}Sr のパックはステンレスのスリーブと超合金のカプセルからなる殻に収められる。カプセルはタングステンのシールドにより囲まれる。このシールドは同時に熱源として熱電対の一端に接続される。そして、さらの容器に格納される。		

表 5.4.7-56　事例　MHW-RTG

No.	5-07	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	MHW-RTG		
状況	Voyager1, Voyager2, Lincoln Experimental Satellite8&9 に利用		
出展	http://en.wikipedia.org/wiki/MHW-RTG		
仕様	出力	電力で 157 W、熱で 2400 W	
	寸法	大型機器	
概要	Voyager に搭載するために開発された RTG。RTG の重さは 37.7 kg でこのうち、4.5 kg は燃料である ^{238}Pu である。球状の固められた酸化プルトニウムが各 RTG に 24 個搭載されている。初期の出力は電力でおよそ 157 W で半減期 87.7 年毎に出力は半減する。各 RGT の熱出力はおよそ 2400 W である。核種崩壊により発生する熱を電気エネルギーに変換するのに 312 個の Si-Ge 熱電対を用いている。初期の熱電対の高温側の温度は 1273 K で低温側は 573 W であった。各 Voyager にはぞれぞれ 3 台の RTG が搭載されている。この 3 台の RTG により、打ち上げ時にはおよそ 470 W の電力が Voyager に供給される。MHT-RTG は Voyager1、Voyager2 及び Lincoln Experimental Satellite8&9 に搭載された。その後のアメリカの宇宙船には GPHS-RTG が搭載されるようになった。GPHS-RTG では同様に SiGe 熱電対が用いられているが、燃料の搭載方法が変更された。		

表 5.4.7-57　事例　MMRTG

No.	5-08	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	MMRTG		
状況	火星探査機 Curiosity に利用		
出展	http://en.wikipedia.org/wiki/Multi-Mission_Radioisotope_Thermoelectric_Generator		
仕様	出力	熱で 2kW、電力で 125W	
	寿命	14 年以上	
	寸法	大型機器	
概要	NASA が火星探査用に開発した RTG。2013 年 11 月 20 日に火星探査機 Curiosity rover は電気系統の問題を診断するために作業を中断した。その後、Curiosity のエネルギー源である MMRTG 内の配線のショートにより電圧が降下したことが判明し、11 月 23 日には作業を再開した。このとき、重大な機能の損失は見られなかった。従来の GPHS-RTG と同様に MMRTG の燃料は二酸化プルトニウム状の ^{238}Pu である。MMRTG では GPHS のモジュールを 8 個使用して、初期で熱で 2kW の出力を得ている。GPHS-RTG では SiGe 熱電対を使用したが、MMRTG では PbTe／TAGS 熱電対を使用している。MMRTG は初期で 125 W、14 年後で 100W の電力を得られるように設計されている。質量が 45 kg なので、2.8 W／kg の電気出力が得られている。火星探査機 Curiosity は 2012 年 8 月 6 日に火星に着陸し、MMRTG から供給される熱と電力で、電子機器を稼動している。現在まで 687 日稼動を継続している。		

表 5.4.7-58　事例　Advanced Stirling Radioisotope Generator

No.	5-09	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	Advanced Stirling Radioisotope Generator		
状況	研究		
出展	http://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_Stirling_Radioisotope_Generator		
仕様	出力	140W	
	寿命	14 年以上	
	寸法	大型機器	
	効率	～30%	
概要	NASA により開発が行われた次世代の RTG。放射性同位体から発生する熱をスターリング変換技術を用いて電力に変換する。しかし、コストが当初 1.1 億ドルと試算されたが、現実に 2.6 億ドルを超過したので、2013 年に開発は中断された。従来の RTG に比べて効率が改善するため、燃料である PuO_2 が 1／4 に、GRT の質量も半分になると期待された。予定された性能は以下の通りである。 • 14 年以上の寿命 • 初期出力：140We • 質量：20kg 程度 • 効率：30%程度 • GPHS の燃料モジュール２個 • 0.8kg の ^{238}Pu		

表 5.4.7-59　事例　ソビエトにおける放射性同位体熱電気変換機

No.	5-10	分類	放射性同位体熱電気変換機
名称	ソビエトにおける放射性同位体熱電気変換機		
状況	無人の灯台や無線標識に利用		
出展	http://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator		
仕様	出力	10～80 W	
	寸法	大型発電機、560～2500kg 程度	
概要	旧ソビエト連邦において ^{90}Sr などを燃料とした RTG が無人の灯台や無線標識で利用されていた。詳細については不明である。現在では多くの Beta-M が身元不明線源となっている。それらのいくつかはスクラップにするために分解された。あるいは、海洋に投棄されたと考えられている。		

(2) 地中無線送信装置に使用する電池に関する耐熱性試験

平成 23 年度に開発した静水圧環境で適用可能な小型地中無線送信装置は、平成 23 年度の開発時に雰囲気温度を-10~60℃まで変化させ、問題なく動作していることを確認している。本業務では次のステップとして、小型地中無線送信装置に使用している一次電池について、高温度環境でのモニタリングを考慮し、熱影響の評価として高温環境での電力供給能力及び耐久性を試験し、結果を評価した。

1) 対象となる一次電池の耐熱特性

小型地中無線送信装置に使用している塩化チオニルリチウム電池は、広い使用温度範囲で使用できることが特徴であり、-60℃～120℃まで使用することが出来るものである。

一方で、高温環境下で使用した場合、低電流領域での電池容量が減少する特性があり、このため省電力状態での長期間動作については検討が必要であるが、本試験では先ず基本特性を把握するため、短期間での試験を行った。

2) 耐熱性試験方法

試験ケースとしては高温ケース（80～90℃程度）と室温ケースの 2 ケースとした。評価においては、高温と室温とでの電圧の低下の違いを評価することとし、試験期間は工期との関係から、高温ケースにおいて 2 週間程度で電力を消費するケースを用いた。

試験装置を図 5.4.7-2、図 5.4.7-3 及び図 5.4.7-4 に示す。試験装置は高温環境を維持する電熱炉、電熱炉を保温するセラミックファイバ断熱材、温度を制御するためのサーモスタット、電熱炉に適した電力を供給するスライダックと電流計、電熱炉および室内の温度を測定する熱電対温度計、温度及び試験対象の電池の電圧を測定するデータロガー、電池を消費させるための負荷抵抗から構成される。

電熱炉内部には高温用の電池と温度計、サーモスタットを配置する。AC100V をスライダックで 30V 程度に下げ、電熱炉を過熱させる。電熱炉内部のサーモスタットは、概ね 90℃を超えると通電をカットし、温度が下がると通電するシステムとした。

電池には表 5.4.7-60 に示す 2 種類の塩化チオニルリチウム電池を用いた。電池 A にはこれまで地中無線で使用実績を有しているフランス製 SAFT 社のリチウム電池、電池 B には温度上昇による内部抵抗が大きくなると考えられる韓国製 XENO 社のリチウム電池である。

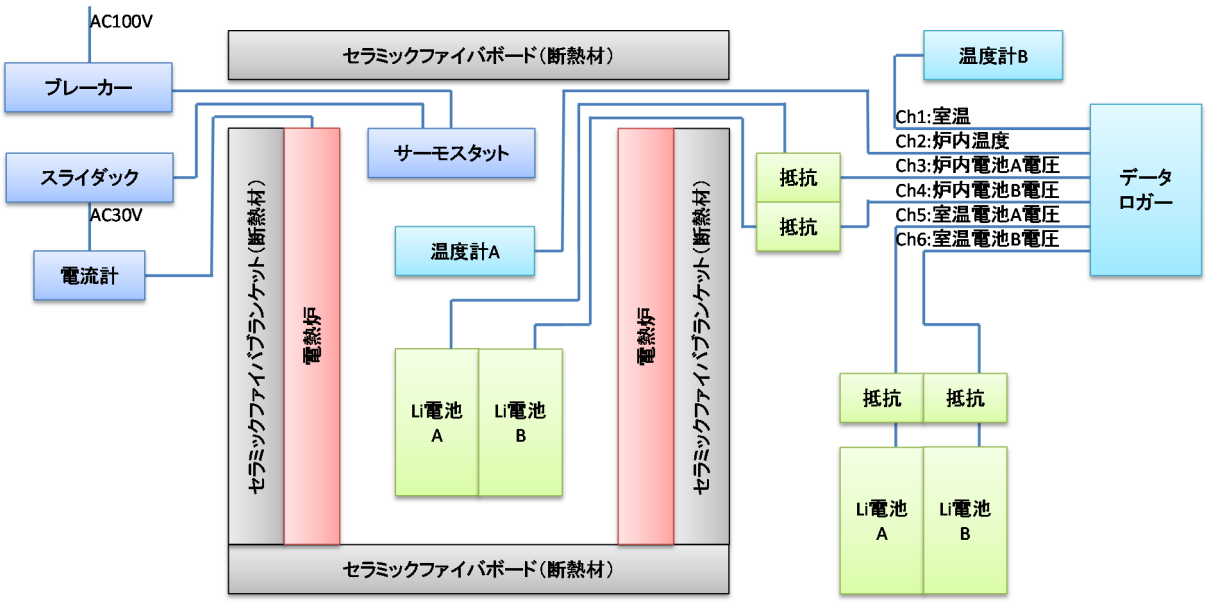


図 5.4.7-2　耐熱試験装置の概要

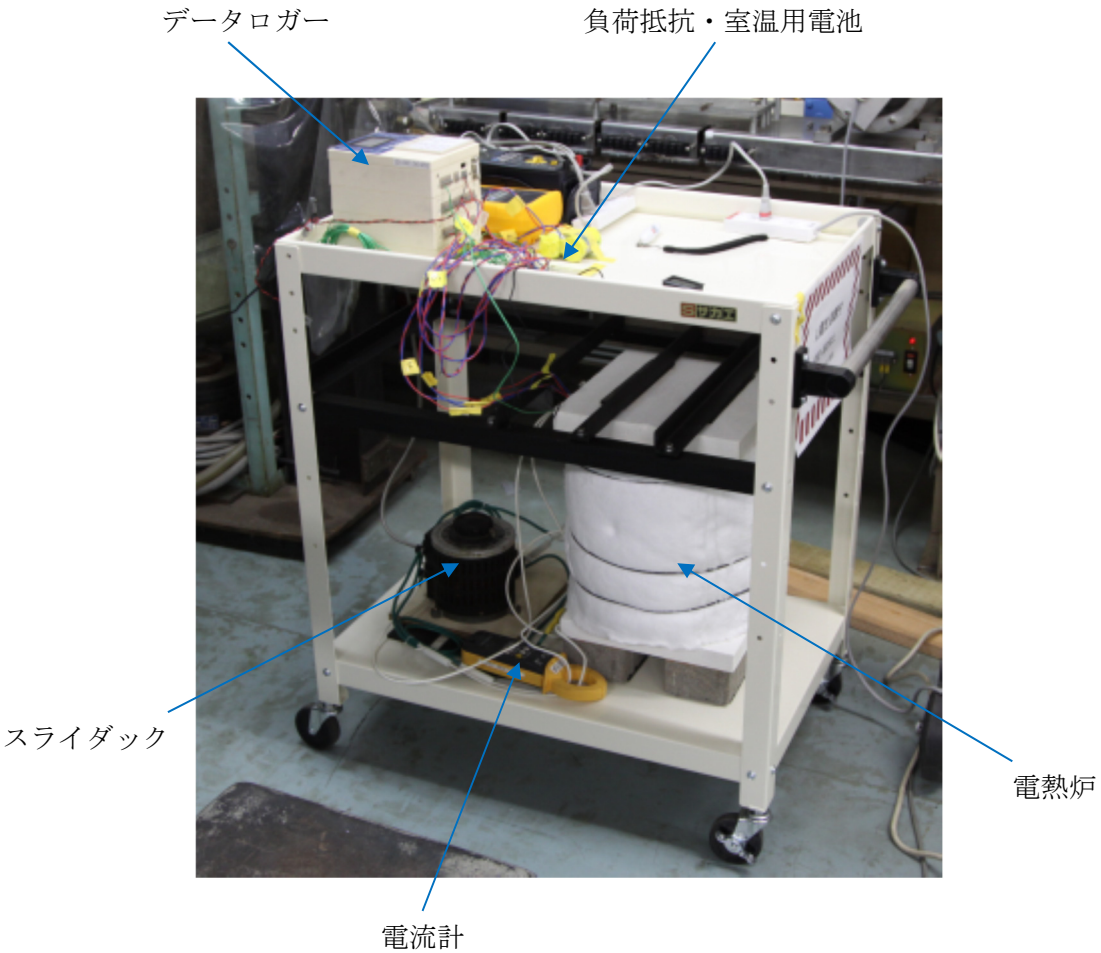


図 5.4.7-3　耐熱試験装置全体

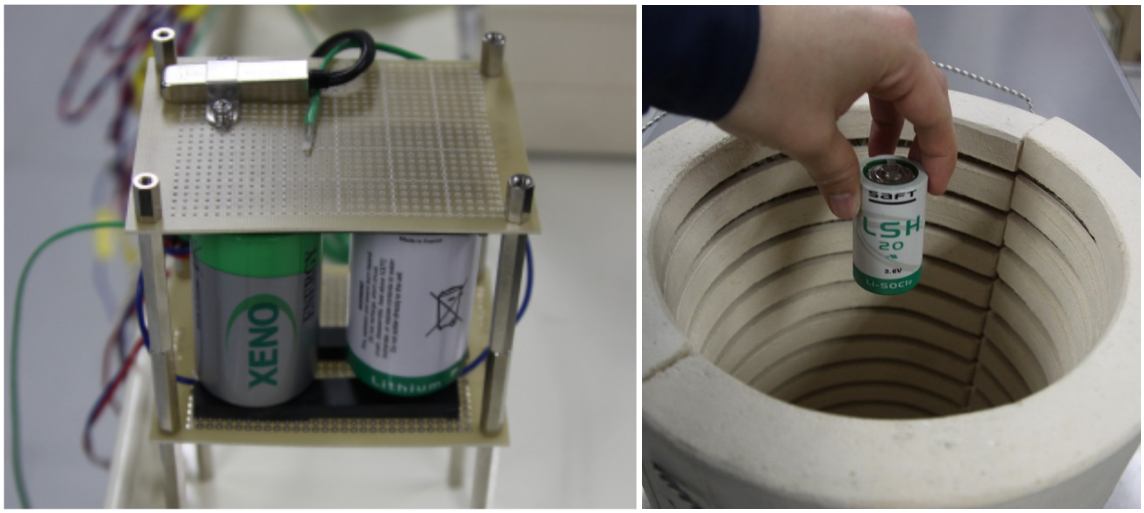


図 5.4.7-4　炉内用電池と電熱炉

表 5.4.7-60　電池の仕様

	電池 A SAFT LSH20	電池 B XENO XL-205F
Nominal capacity	13.0 Ah (at 15mA / +20℃/ 2.0V cut off)	19 Ah (at 5mA / +20℃/ 2.0V cut off)
Nominal voltage	3.6 V	3.6 V
Max. recommended continuous current	1800 mA	230 mA
Max. pilse current capability	4000 mA	400 mA
Operating temperature range	-60～+85 ℃	-55～+85 ℃
Diameter	33.4 mm	33.6 mm
Height	61.6 mm	59.0 mm
Weight	100 g	98 g

3)　耐熱性試験結果

試験の結果を図 5.4.7-5 に示す。ここで、電池 A の電池電圧を青色に、電池 B の電池電圧を緑色に、温度を赤色に示す。また、実線は炉内の電池電圧や温度を、破線は室温環境内の電池電圧や温度を示す。

図 5.4.7-5 より、炉内温度は概ね 80～90℃を維持しており、室温は概ね 20℃前後である。それぞれの電池の終止電圧までの期間を表 5.4.7-61 に示す。

電池 A では、室温に対し炉内電池は 94.5%の期間で終止電圧に達した。実際の地中無線送信機の場合は消費電流がより小さい上、スリープ時には消費電流が小さく通信時には大きいなど消費電流が間欠的に増減することから、正確なデータを得るためにはより長期の確認試験が必要であ

るが、本試験結果からは少なくとも 5%程度の運用期間の短縮になることが示された。

電池 B では、室温に対し炉内電池は 44.7%と非常に短い期間で終止電圧に達した。リチウム電池は他の方式の電池と比較して内部抵抗が高い傾向にあるため、内部抵抗が高い電池の場合は、電池 B のようにある時期から緩やかに電池電圧が低下することとなる。また、温度上昇は更に電池の内部抵抗を高くすることとなり、電池電圧の低下が早くなる。

電池 B の結果を踏まえると、基本的には高温環境下で使用する場合、大容量のキャパシタ等を併用し、電圧低下対策（内部抵抗増加対策）を行うことを考慮すべきである。

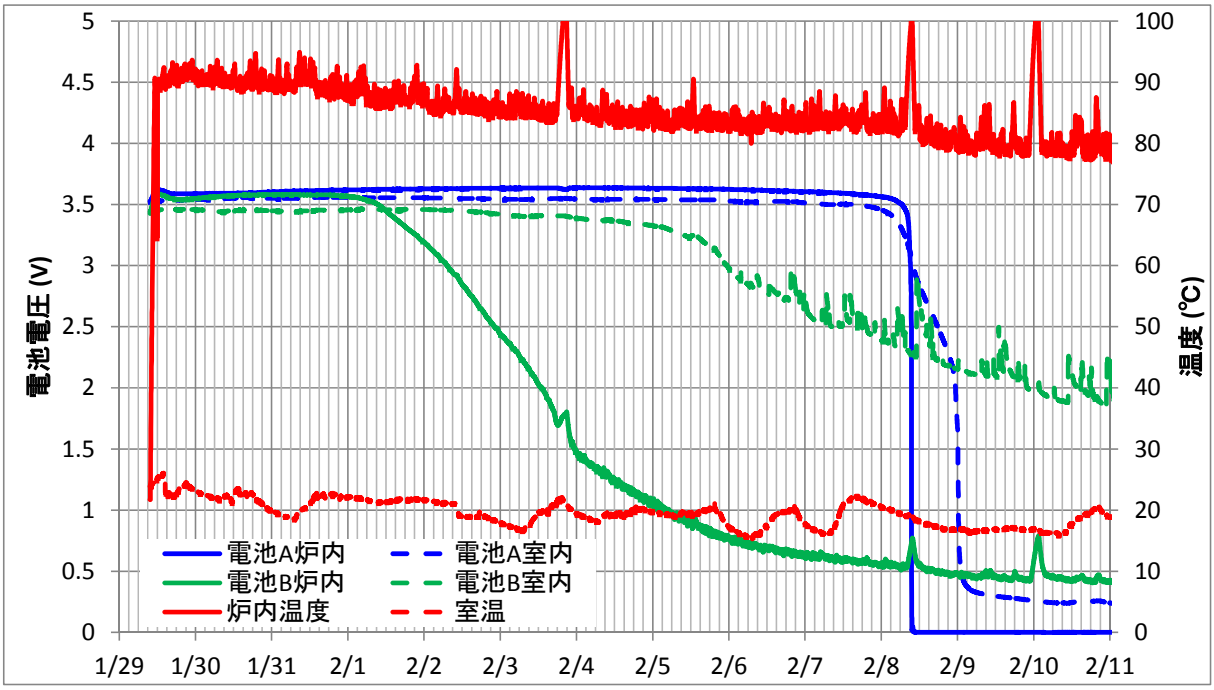


図 5.4.7-5　耐熱性試験結果

表 5.4.7-61　終止電圧までの期間

	開始から終止電圧までの期間（日）	室内に対する炉内の期間の割合（%）
電池A炉内	10.00	94.5%
電池A室内	10.58	–
電池B炉内	5.14	44.7%
電池B室内	11.51	–

5.4.8　地中無線中継試験

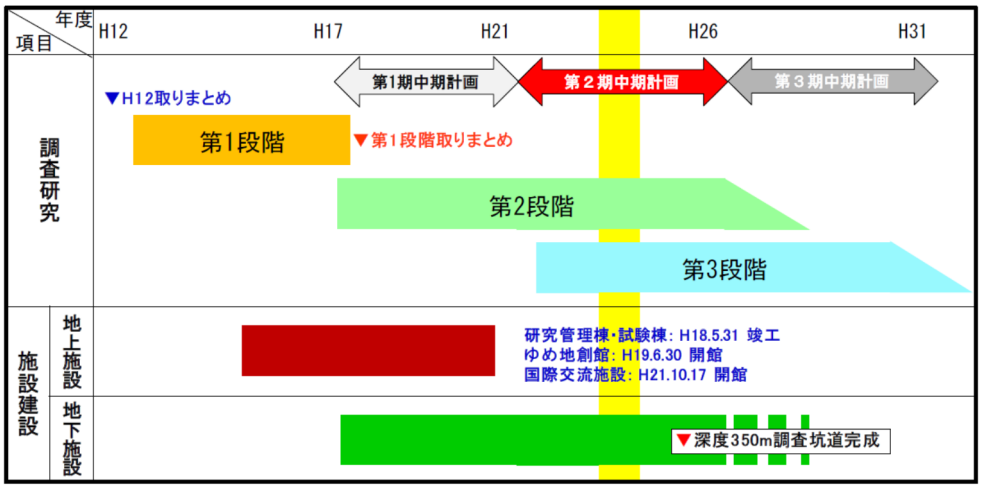
本試験は地中無線による通信距離拡大のため、平成 24 年度に開発した地中無線中継システムの実証試験であり、原環センターと（独） 日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）の共同研究の一環として実施した。

(1)　幌延深地層研究センター周辺の地質環境特性の概要

幌延町には、白亜系を基盤岩として、古第三紀から前期更新世にかけての堆積岩類（羽幌層、曲渕層、宗谷夾炭層、鬼志別層、増幌層、稚内層、声問層、勇知層、更別層）、中期更新世以降の段丘堆積物群、及び完新世堆積物（砂丘、沖積層）が分布している。また、北北西－南南東走向の規模の大きな 2 本の断層と褶曲構造が認められ、幌延町の東部及び西部には、活断層、撓曲、傾動などの第四紀の活構造も認められる。さらに、幌延深地層研究センターの調査研究の対象となる新第三系堆積岩類（主として稚内層及び声問層）は透水性が比較的低いこと、地層中に存在する地下水が塩水系地下水と淡水系地下水の 2 種類に分類されること、地下水には溶存ガスが存在することなどが確認されている[24]。

(2)　幌延深地層研究センターの地下研究施設整備(第Ⅱ期)等事業の概要

現在、幌延深地層研究センターでは図 5.4.8-1 に示す計画スケジュールに基づき、第 2 期中期計画として坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階（第 2 段階）と地下施設での調査研究段階（第 3 段階）の研究を並行して実施している。これらを実施する地下研究施設整備(第Ⅱ期)等事業は図 5.4.8-2 に示すように民間の資金、経営能力及び技術的能力の活用を図り、効率的かつ効果的に実施するため、PFI 法（Private Finance Initiative：民間資金等の活用による公共施設等の整備等の促進に関する法律）に基づく事業として実施している。[25]



第１段階： 地上からの調査研究段階
第２段階： 坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階
第３段階： 地下施設での調査研究段階

図 5.4.8-1 幌延深地層研究計画スケジュール[25]

民間の資金、経営能力及び技術的能力の活用を図り、効率的かつ効果的に実施するため、PFI法に基づく事業として実施。

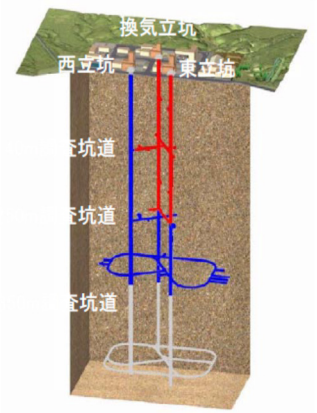
【事業概要】
- 施設整備業務 ：掘削工事、掘削土（ズリ）・排水処理、計測、環境対策など
- 維持管理業務 ：保守、運転・監視、見学者対応支援など
- 研究支援業務 ：地下施設建設時及び地下施設での調査研究支援

【事業期間】
- 施設整備業務 ：平成23年2月 ～ 平成26年3月
- 維持管理業務 ：平成23年2月 ～ 平成31年3月
- 研究支援業務 ：平成23年2月 ～ 平成31年3月

【地下施設の整備範囲】
- 換気立坑 ：深度250m ～ 380m、内径4.5m
- 東立坑 ：深度250m ～ 380m、内径6.5m
- 西立坑 ：地表 ～ 365m、内径6.5m
- 250m水平坑道（完了部分除く）、350m水平坑道

【対価の支払い】
- 事業期間に亘る対価の合計額を平準化

【整備した施設の所有権】
- 定期的に原子力機構へ引渡す



地下施設整備計画工程（予定）

施工箇所	FY H22	FY H23	FY H24	FY H25
換気立坑				
東立坑				
西立坑				
250m調査坑道				
350m調査坑道				

図 5.4.8-2 地下研究施設整備(第Ⅱ期)等事業の概要[25]

(3) 地中無線中継試験の概要

北海道天塩郡幌延町の原子力機構殿 幌延深地層研究センター地下調査坑道（140m 坑道及び250m 坑道）において、地中無線中継システムの適用性確認試験を実施した。

1)　中継試験の実施内容

中継システム試験の実施内容を以下に示す。

①　使用するボーリング孔の状態確認

②　地中無線中継システムの適用性確認試験

2)　作業坑道及び作業エリア

試験を実施した作業坑道（140m 調査坑道及び 250m 調査坑道）を図 5.4.8-3 に、作業エリア（250m 調査坑道）を図 5.4.8-4 に、作業エリア（140m 調査坑道）を図 5.4.8-5 に示す。

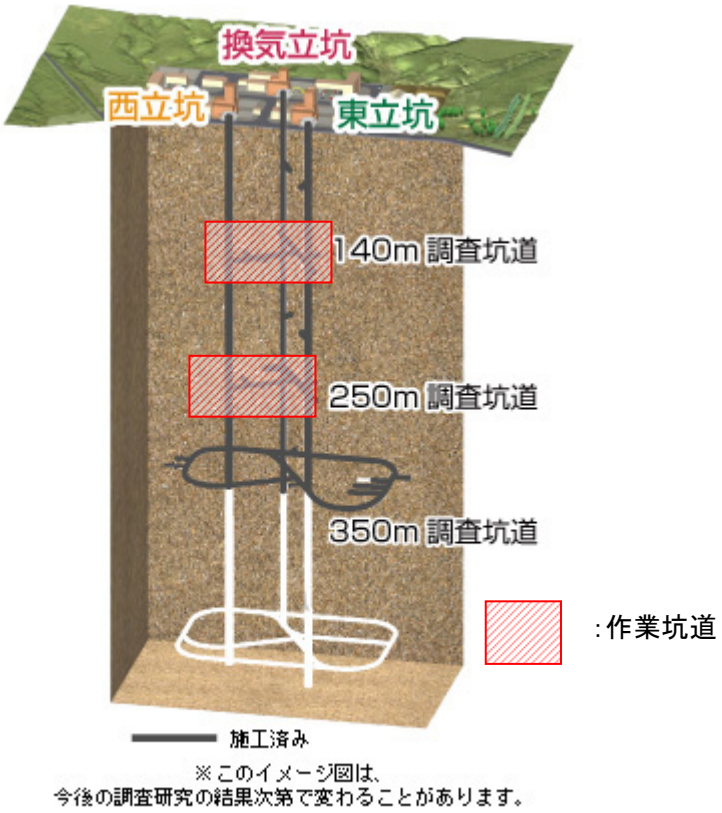


図 5.4.8-3　作業坑道（140m 調査坑道及び 250m 調査坑道、[26]に加筆）

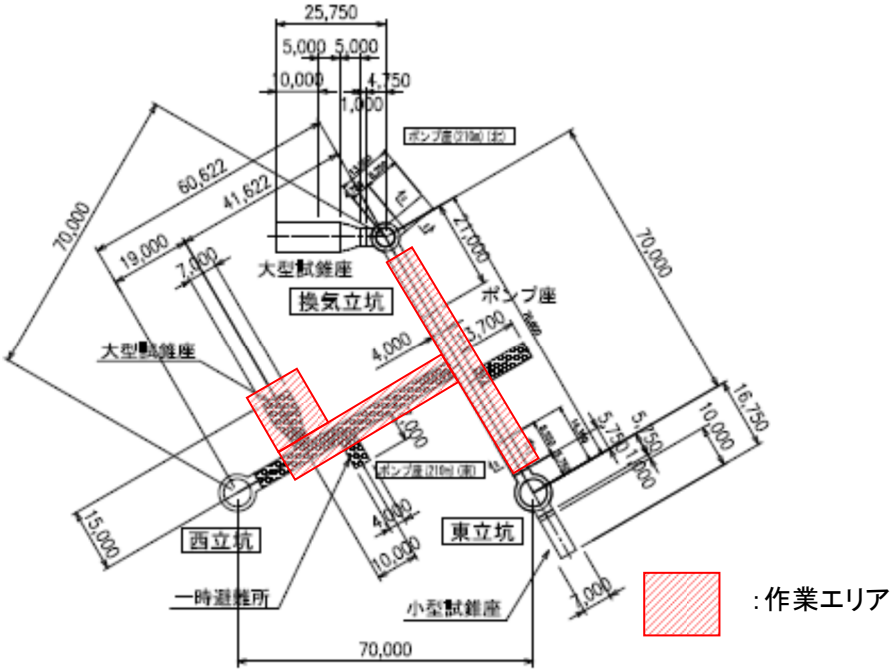


図 5.4.8-4　作業エリア（250m 調査坑道）

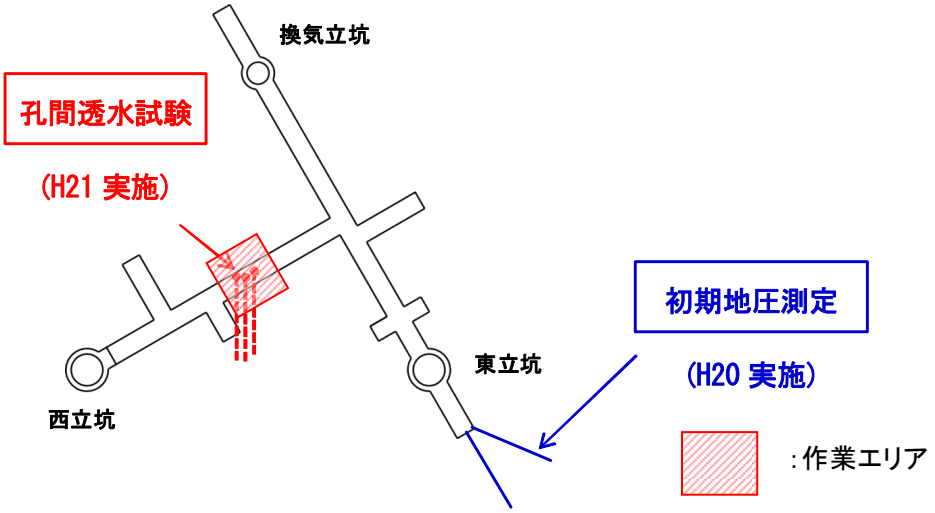


図 5.4.8-5　作業エリア（140m 調査坑道）

3)　中継試験に用いる機器

本中継試験においては、第 1 回目送受信用として小型地中無線送信装置及び間隙水圧計（図 5.4.8-6 参照）、ボアホール対応受信アンテナ（図 5.4.8-7 参照）及び中継機本体（図 5.4.8-8 参照）を、第 2 回送受信用として大型アンテナ同調用機器（図 5.4.8-9 参照）、大型アンテナ（図 5.4.8-10 参照）、及びポータブル受信機（図 5.4.8-11 参照）を用いた。

図 5.4.8-6　小型地中無線送信装置及び間隙水圧計（第 1 回目送受信用）

図 5.4.8-7　ボアホール対応受信アンテナ（第 1 回目送受信用）

図 5.4.8-8　中継機本体

図 5.4.8-9　大型アンテナ同調用機器（第 2 回目送受信用）

図 5.4.8-10　大型アンテナ（第 2 回目送受信用）

図 5.4.8-11　ポータブル受信機及びレベルメーター（第 2 回目送受信用）

(4)　使用するボーリング孔の状態確認

①　　本中継試験では、250m 調査坑道の大型試錐座から削孔されているボーリング孔 2 本（図 5.4.8-4　作業エリア（250m 調査坑道）、図 5.4.8-12　250m 調査坑道で使用するボーリング孔（当初案）参照）、及び 140m 調査坑道の孔間透水試験用ボーリング孔 1 本（図 5.4.8-5　作業エリア（140m 調査坑道）参照）を使用する予定だったが、図 5.4.8-14 と図 5.4.8-15 に示すように蓋が錆び付いており使用できなかった。そのため、第 1 回目の送受信は 250m 調査坑道上で、第 2 回目の受信は 140m 調査坑道上で行うこととした。

平面図

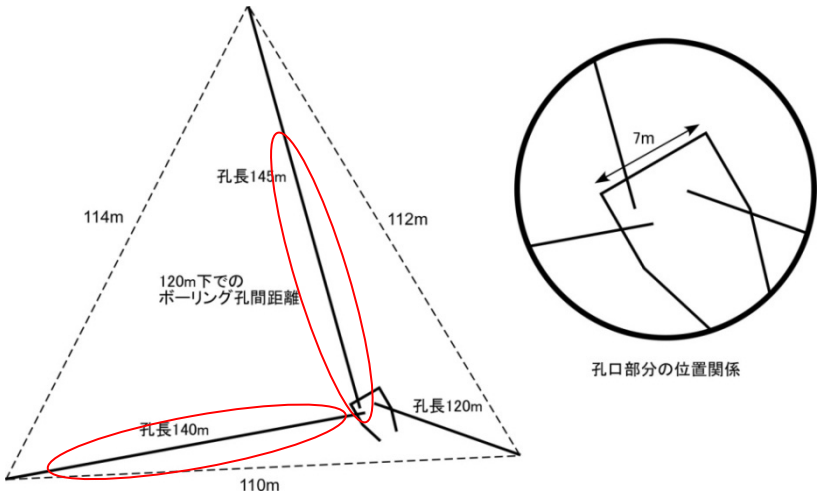


図 5.4.8-12　250m 調査坑道で使用するボーリング孔（当初案）

図 5.4.8-13　250m 調査坑道の大型試錐座から削孔されているボーリング孔（2 本）

図 5.4.8-14　250m 調査坑道の大型試錐座から削孔されているボーリング孔の状態

図 5.4.8-15　140m 調査坑道の孔間透水試験用ボーリング孔の状態

(5)　地中無線中継システムの適用性確認試験

1)　地中無線中継システム試験準備

①　　140m 調査坑道の孔間透水試験用ボーリング孔の直下となる、250m 調査坑道において中継用送信機（3m×3m）を設置し、送信アンテナの調整を行った（図 5.4.8-8、図 5.4.8-9 及び図 5.4.8-10 参照）。

2)　地中無線中継システム試験（250m 調査坑道間）

①　　第 1 回目の送信用に、250m 調査坑道上に間隙水圧計を接続した小型地中無線送信機とボアホール対応の受信機を設置した（図 5.4.8-6 及び図 5.4.8-7 参照）。

②　　第 2 回目の送信用に、250m 調査坑道に中継用送信機（3m×3m）を設置し（図 5.4.8-8、図 5.4.8-9 及び図 5.4.8-10 参照）、東立坑と換気立坑を繋ぐ調査坑道にポータブル受信機を立てて設置した（図 5.4.8-11 参照）。

③　　中継試験を行い、図 5.4.8-16 に示すように受信強度 2,800mV（並行での計測）を確認し、地中無線中継システムによりデータの中継が可能であることを確認できた。

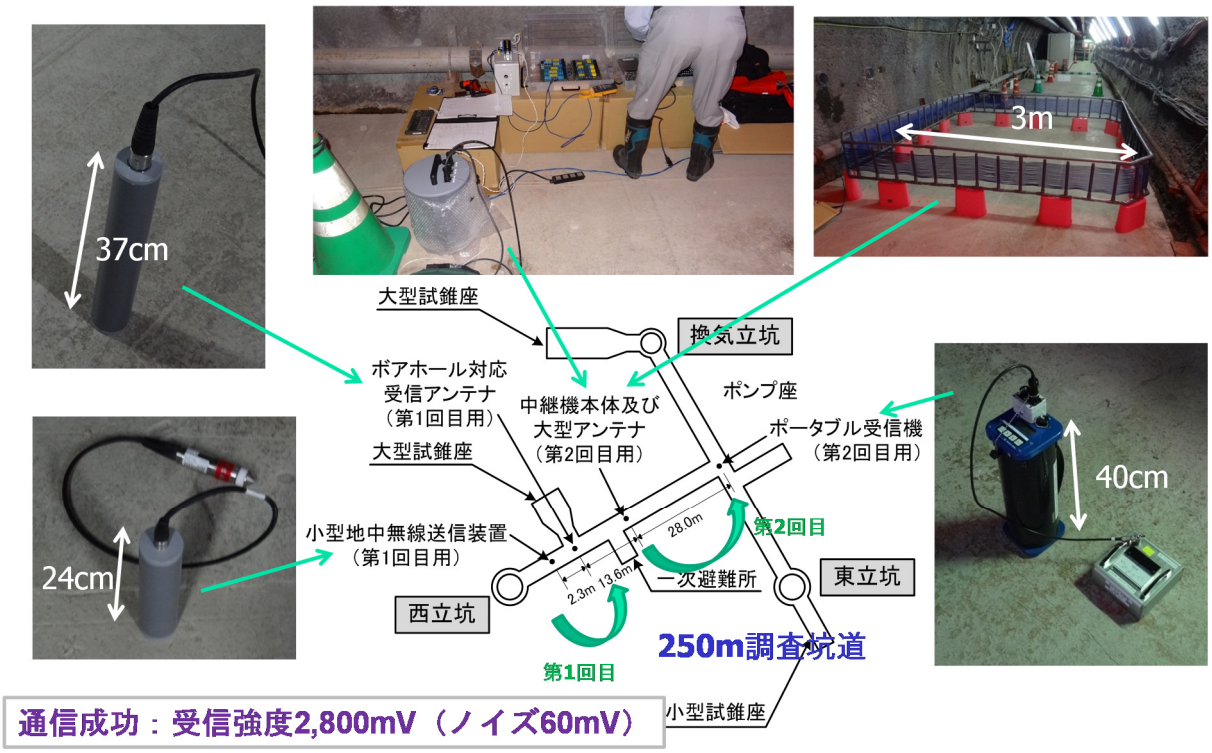


図 5.4.8-16　地中無線中継システム試験概要（250m 調査坑道間）

3)　地中無線中継システム試験（250m 調査坑道～140m 調査坑道）

①　　上記と同様に、第 1 回目の送信用に、250m 調査坑道上に間隙水圧計を接続した小型地中無線送信機とボアホール対応の受信機を設置した（図 5.4.8-6 及び図 5.4.8-7 参照）。

②　　第 2 回目の送信用に、140m 調査坑道の孔間透水試験用ボーリング孔近傍にポータブル受信機を設置し（図 5.4.8-11 参照）、その直下の 250m 調査坑道に中継用送信機（3m×3m）を設置した（図 5.4.8-8、図 5.4.8-9 及び図 5.4.8-10 参照）。

③　　中継試験を行い、図 5.4.8-17 に示すように受信強度 23mV（正対での計測）を確認し、地中無線中継システムによりデータの中継が可能であることを確認できた。

④　　また、本地中無線中継システム試験中に、地上でノイズ計測を実施した際、地下からの地中無線のデータを受信することができた（受信強度 6mV）。つまり、図 5.4.8-18 に示すように鉛直距離で 250m、水平距離で 200m、直線距離で 320m 程度での送信が可

能であることが分かった。

図 5.4.8-17　地中無線中継システム試験概要（250m 調査坑道～140m 調査坑道）

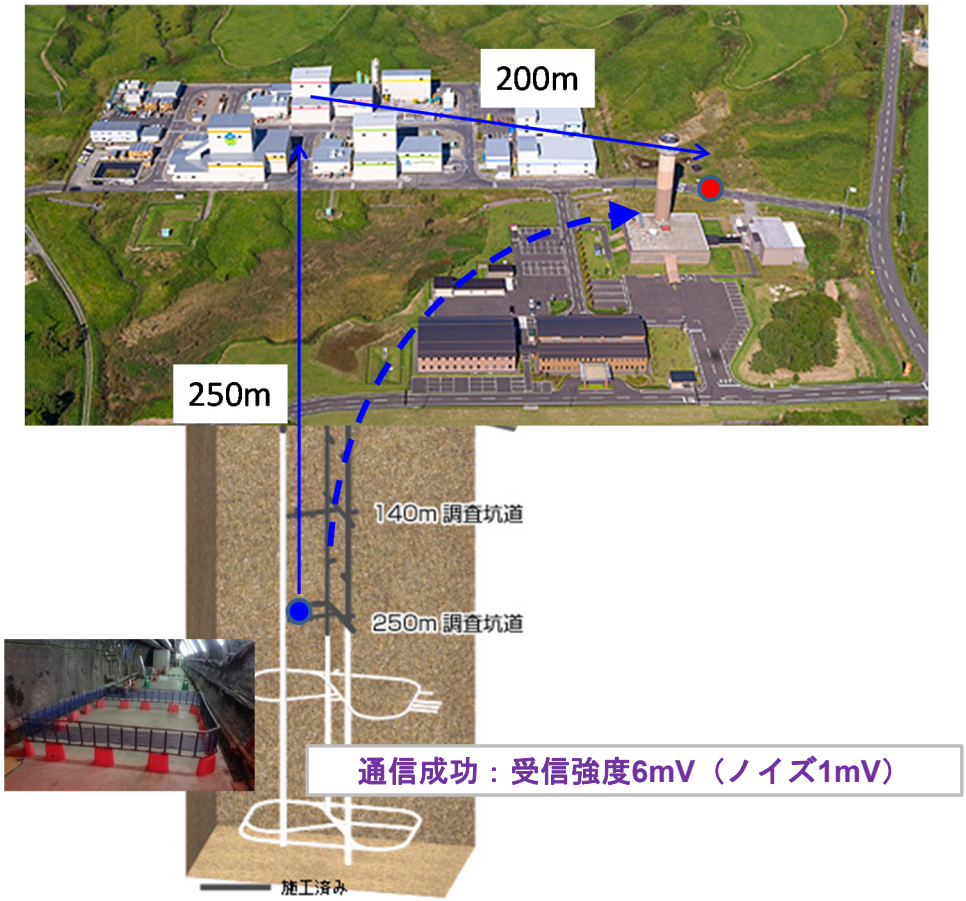


図 5.4.8-18　地下からの地中無線のデータの地上での受信

(6)　地中無線中継システムの適用性確認試験に対する考察

1)　地中無線中継システムの適用性確認

前述したとおり、地中無線通信システムを用いた岩盤内での中継が可能であることが原位置試験で示せた。送信に用いた間隙水圧計の値は 250m 調査坑道上での計測のため、測定値自身に関しては意味を有さないが、システムが成立できたことは意義があることである。

しかしながら、実際の適用を考えた場合、内部電源での作動や多段の中継による通信が必要となるため、更なる高度化が不可欠となる。

2)　地中無線中継システムでの受信時の受信強度に対する考察

地中無線中継システムでの受信時の受信強度に対する考察として、大型アンテナからの第 2 回目の送信の受信強度に関して結果を図 5.4.8-19 に示すように整理した。

図 5.4.8-19 には、基本となった中距離送信装置の減衰ライン及びその 10 倍の出力を持つ今回

の中継試験で用いた長距離送信装置の減衰ライン、更に、本地中無線中継システムの適用性確認試験で得られた結果をプロットした。それぞれの試験結果は、正対での受信強度に補正した値である。

250m 坑道内での計測値は、坑道内の鋼製支保が磁束の形成及び伝播に影響を与え、長距離送信装置の減衰ラインと比較し、少し減衰が生じたと考えられる。

また、140m 坑道内での計測値は坑道間の送信となるため、250m 坑道内及び 140m 坑道の鋼製支保の磁束の通過による影響が大きく、減衰が大きくなり、ほぼ中距離送信装置の減衰ライン上にプロットされている。

地上での計測値は、ほぼ長距離送信機の減衰ライン上にプロットされており、想定以上に減衰量が小さくなっている。原因としては立坑内の鋼製パイプなどがバイパスとなり、トータルとしての減衰量が小さくなったことが考えられるが、詳細検討は今後の課題である。

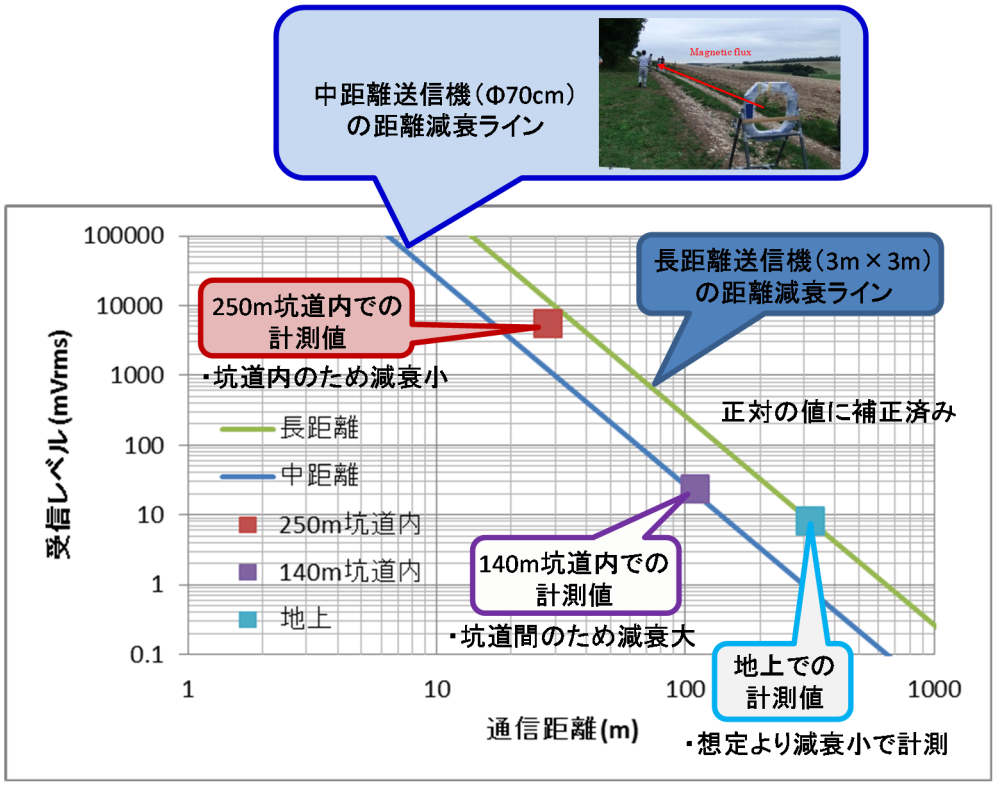


図 5.4.8-19　地中無線中継システムの適用性確認試験での大型アンテナからの受信強度

5.4.9　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 年度に試験を開始する予定となっている。

同試験への地中無線モニタリング装置適用のため、緩衝材または坑道埋め戻し材への地中無線モニタリング装置の配置等を検討し、モニタリングデータの送信に必要な機器の条件等を整理した。

(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 5.4.9-1 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 は 350m 調査坑道および西立坑を掘削中であり、平成 26 年度から人工バリアの性能確認試験などを開始する予定となっている（図 5.4.9-2 参照）[27]。

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 5.4.9-2 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殿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を予定している。また、坑道の埋め戻しには、350m 調査坑道の掘削により生じる掘削ズリとベントナイトの混合材料を用い、坑道下部を現場での転圧締固め、上部を圧縮成型ブロックで施工する計画である[27]。

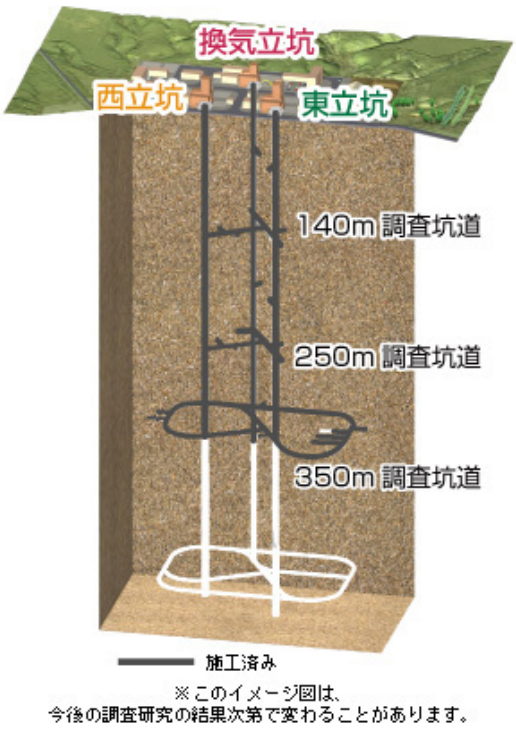


図 5.4.9-1　幌延 URL のイメージ図[26]

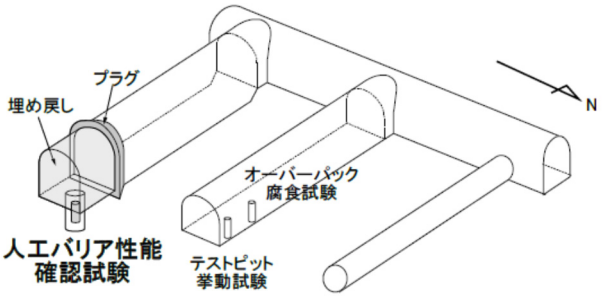


図 5.4.9-2　試験坑道における原位置試験のイメージ図[25]

(2)　幌延 URL への地中無線配置計画への条件

地中無線の配置計画を立案するためには、以下の事項を検討する必要がある。

A)　モニタリング項目
B)　測定距離
C)　測定期間
D)　電磁波伝播媒体（岩盤内、海水内など）
E)　耐圧性
F)　耐熱性
G)　周辺の状態（支保部材、センサ、ケーブル設置状況など）

幌延 URL では地中無線を用いた緩衝材中の計測が主なモニタリング対象となるため、10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置を用いて、以下の条件を満たすように使用する機器の選定を行った。

A)　モニタリング項目：間隙水圧、全圧など
B)　測定距離：10~20m（10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置の適用）
C)　測定期間：1~10 年
D)　電磁波伝播媒体（岩盤内、海水内など）：堆積岩
E)　耐圧性： 3MPa（設計要求仕様）
F)　耐熱性：60℃以下（模擬廃棄体直近は対象外とするため）
G)　周辺の状態（支保部材、センサ、ケーブル設置状況など）：鋼製支保あり、多数のセンサ及びケーブル有

以上を踏まえて、検討した地中無線センサの配置（案）を図 5.4.9-3 に示す。設置位置は緩衝材上部、坑道埋戻し部中段及び上段としたが、詳細は原子力機構との議論を踏まえて決定される。

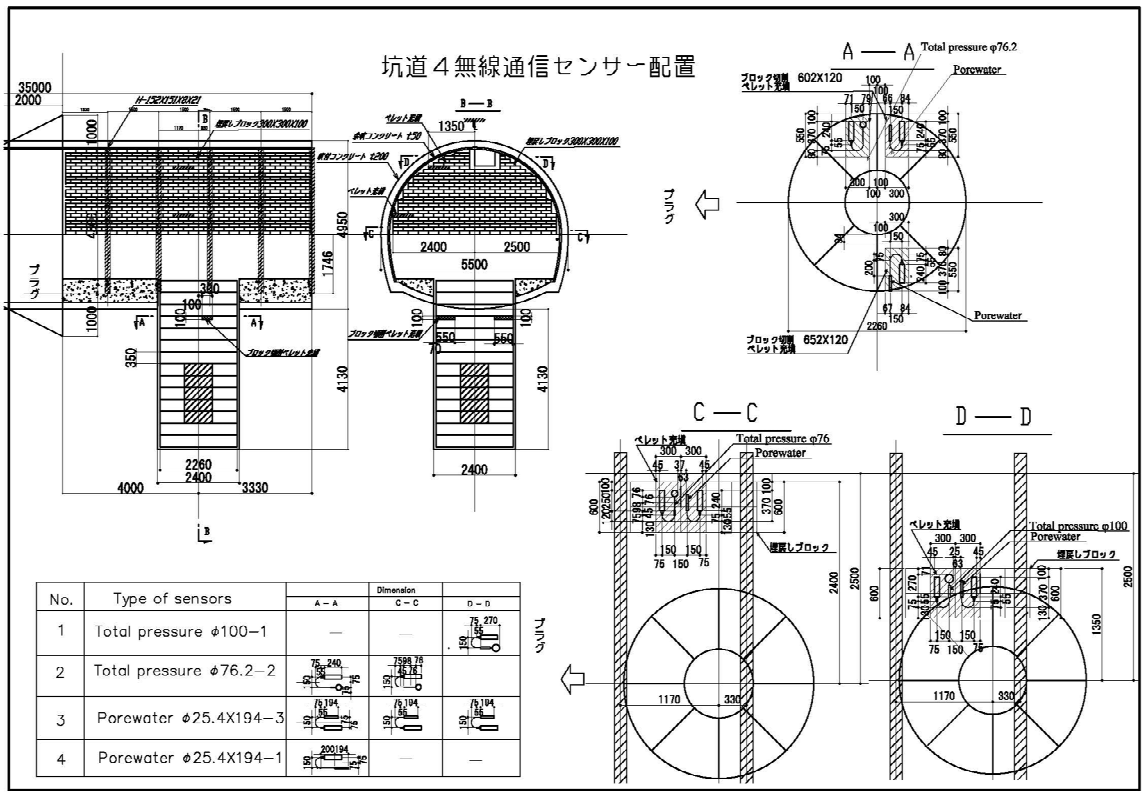


図 5.4.9-3　地中無線センサの配置（案）

(3)　幌延 URL における人工バリア性能確認試験に用いる機器

1)　全圧計を接続した小型地中無線送信装置

幌延 URL における人工バリア性能確認試験に用いる小型地中無線送信装置は、平成２１年度より平成２４年度の「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)」のうち「モニタリング技術の開発」において開発された機器である。

小型地中無線送信装置の仕様は、以下の通りとした。直径は 60mm、長さは 240mm である。内部に塩化チオニルリチウム電池 19Ah を 1 本備え、1 日に 1 回測定、1 週間に 1 回通信する頻度であれば計算上 10 年の運用が可能である。また、振動弦センサを接続できるように振動弦センサアダプタを内蔵させた。

10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置の外寸を図 5.4.9-4 に、外観を図 5.4.9-5 に示す。

- ✓　形式：TR-093
- ✓　耐圧性：10MPa
- ✓　温度センサ内蔵
- ✓　筐体材質：PVC
- ✓　外部接続センサ用アダプタ：振動弦センサ用アダプタ
- ✓　搬送周波数 8.5kHz
- ✓　通信速度 75bps
- ✓　製作個数：３個

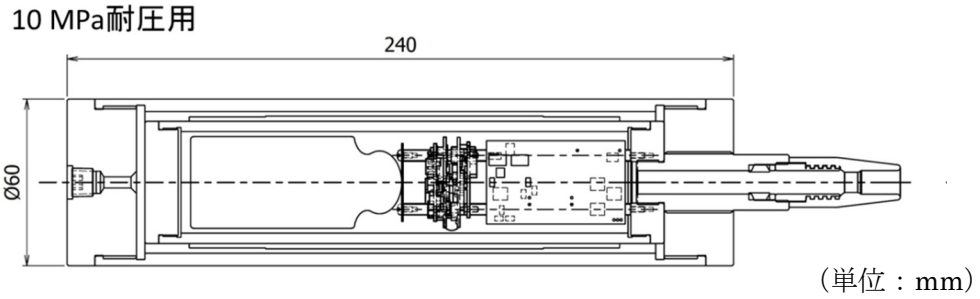


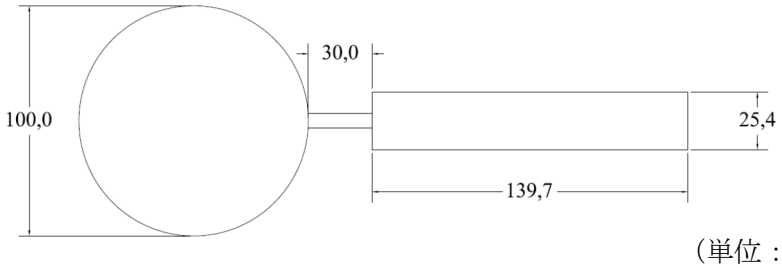
図 5.4.9-4　10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置外寸図

図 5.4.9-5　10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置外観

小型地中無線送信装置に接続する全圧計（２種）の仕様は以下の通りとした。

全圧計１

- ✓　形式：Geokon 社製 Model 4800-1X-3MPa（φ100mm）
- ✓　耐圧性：3MPa
- ✓　材質：SUS316
- ✓　外寸：受圧部φ100mm、変換部φ25.4×139.7mm（図 5.4.9-6 参照）
- ✓　個数：１個



（単位：mm）

図 5.4.9-6　全圧計１外寸図

全圧計２

- ✓　形式：　Geokon 製 Model 4800-1X-3MPa（φ76.2mm）
- ✓　耐圧：3MPa
- ✓　材質：SUS316
- ✓　外寸：受圧部φ76.2×17.9mm（図 5.4.9-7、図 5.4.9-8 参照）
- ✓　個数：２個

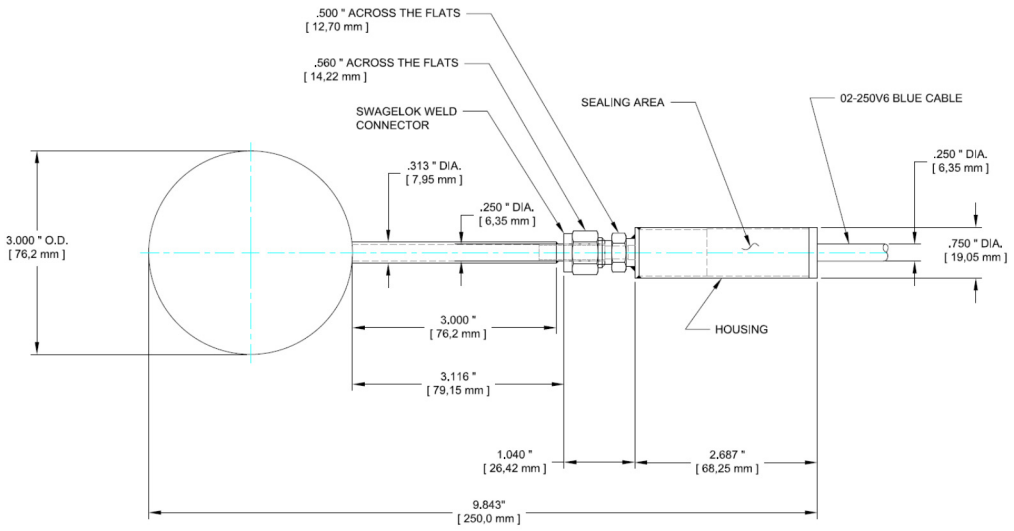


図 5.4.9-7　全圧計２外寸図

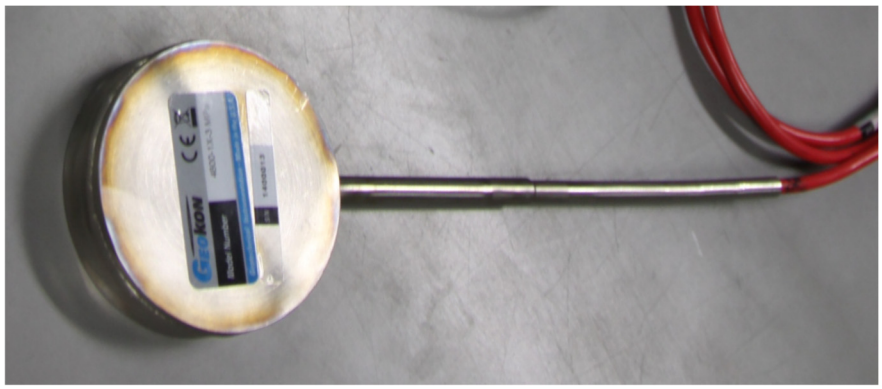


図 5.4.9-8　全圧計２外観

10Mpa 耐圧用小型地中無線送信器に振動弦アダプタを組み込み、振動弦センサ（全圧計１、もしくは全圧計２）を接続した。なお、ケーブル出し口の形状は、本センサに使用されているセンサケーブルの直径に合わせて新たに作成した。

全圧計１を接続した 10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置の外観を図 5.4.9-9 に示す。

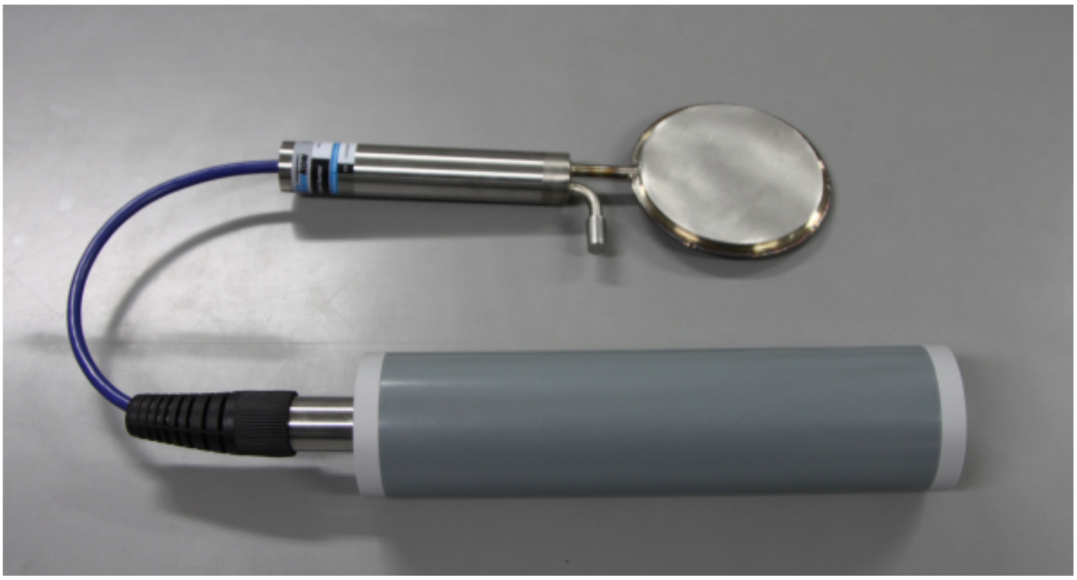


図 5.4.9-9　全圧計 1 を接続した 10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置の外観

2)　間隙水圧計を接続した小型地中無線送信装置

小型地中無線送信装置の仕様は(1)と同様とし、個数は 4 個とした。
また、本装置は(1)と同様に幌延深地層研究センターの地下調査坑道にて使用するものである。
間隙水圧計の仕様は以下の通りとした。

- ✓　形式：Geokon 製 Model 4500SH-3-3MPa
- ✓　耐圧：3MPa
- ✓　材質：SUS316
- ✓　外径：φ25.4mm×194mm
- ✓　個数：4 個

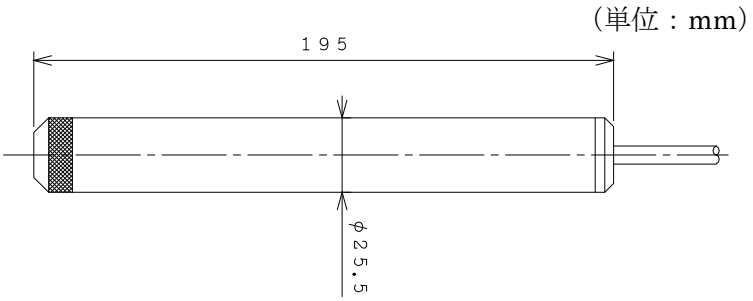


図 5.4.9-10　間隙水圧計外寸図

図 5.4.9-11　間隙水圧計外観

10Mpa 耐圧用小型地中無線送信器に振動弦アダプタを組み込み、振動弦センサ（間隙水圧計）を接続した。なお、ケーブル出し口の形状は、本センサに使用されているセンサケーブルの直径に合わせて新たに作成した。

間隙水圧計を接続した 10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置の外観を図 5.4.9-12 に示す。

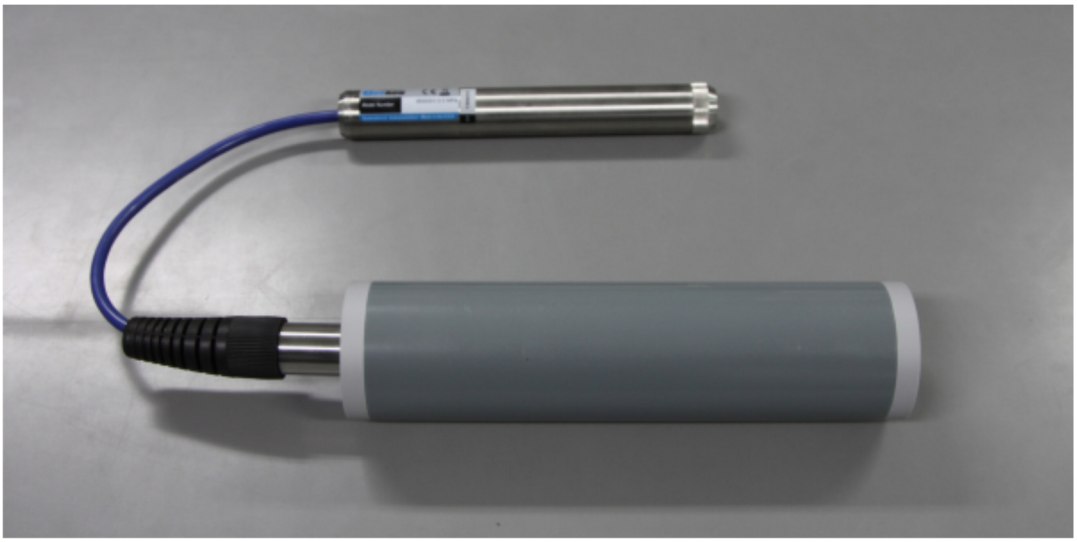


図 5.4.9-12　間隙水圧計を接続した 10MPa 耐圧用小型地中無線送信装置の外観

3)　地中無線受信装置

本地中無線受信装置は上記の(1)及び(2)による信号を受信し、記録するものである。

地中無線受信装置は以下の機器により構成した。製作は各 2 セットとした。

A)　受信器（設置型受信器、アンテナ込み）

B)　PC（電源制御装置、I/F 込み、ソフト）

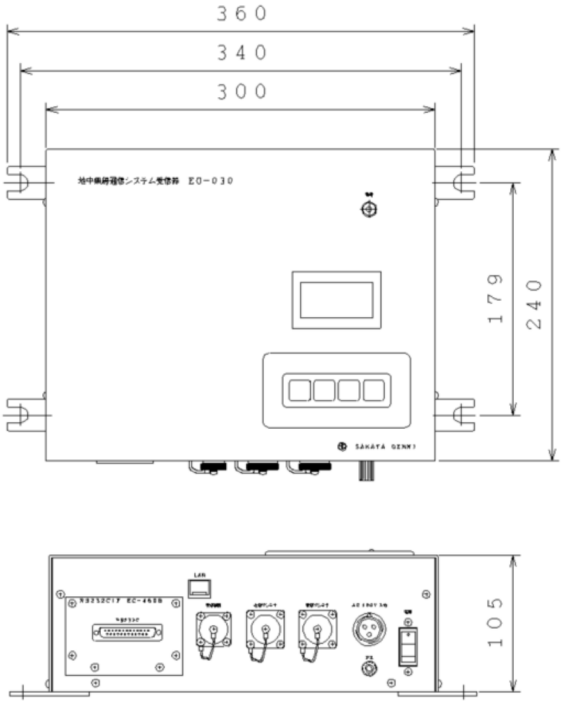
C)　電源避雷器

D)　取付器具及び雑材

各機器の仕様は以下の通りとした。

A) 受信器（設置型受信器、アンテナ込み）

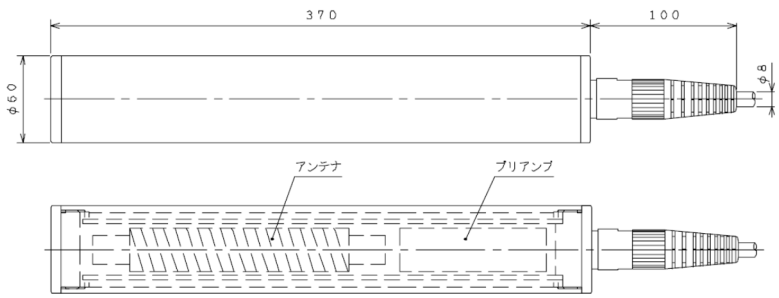
- ✓ 形式：坂田電機株式会社製、EO-030
- ✓ 搬送周波数：8.5kHz
- ✓ 地中無線通信速度：75bps
- ✓ 外部インターフェース：LAN、RS-232C
- ✓ 本体外寸：図 5.4.9-13、図 5.4.9-14 参照
- ✓ アンテナ部外寸：図 5.4.9-15 参照



（単位：mm）

図 5.4.9-13 受信機本体外寸図

図 5.4.9-14 受信機本体外観



（単位：mm）

図 5.4.9-15　アンテナ部外寸図

B)　PC（電源制御装置、I/F 込み、ソフト）

・PC

✓　形式：日本電気株式会社製、FC-E16U

✓　OS　：Windows XP

✓　CPU：Intel Corei5

✓　外部インターフェース：LAN、RS-232C

✓　メモリ：2GB

✓　HDD：160GB

✓　液晶モニタ有り

・電源制御装置

✓　形式：坂田電機株式会社製、U-0322（図 5.4.9-16 参照）

✓　出力：無電圧接点（a 接点動作）、無電圧接点（b 接点動作）、AC100V

✓　外部インターフェース：RS-232C

図 5.4.9-16　電源制御装置

・専用地中無線通信自動観測用ソフトウェア

✓　形式：坂田電機株式会社、計測管理システム Ver2 および地中無線通信自動観測ソフト

✓　動作環境：WindowsXP

✓　主な機能：地中無線受信器の制御機能、収録データの保存機能、各種センサの演算機能、演算結果表示機能

C)　電源避雷器

電源避雷器は、電力線に誘導される以上電圧による測定システムの破損や損傷を防止するための保安器で、機器の電源入力部に接続するものである。製作した電源避雷器を図 5.4.9-17 に示す。

✓　形式：坂田電機株式会社、EC-56DP

✓　電源容量：300VA、入力 AC101V±6V、出力 AC90～115V

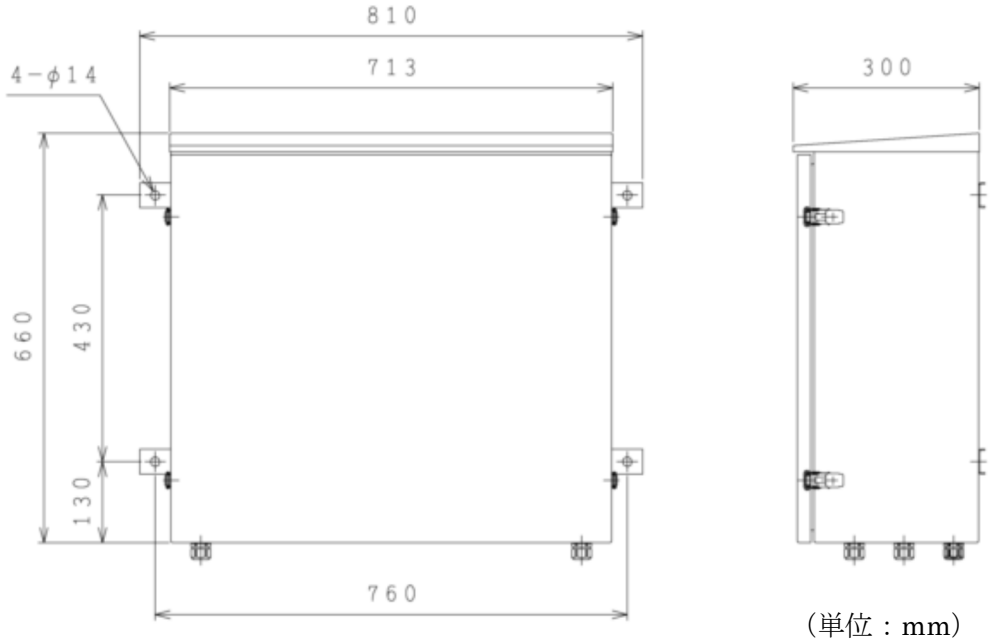
✓　サージ寿命：500 回（8/20 μ sec. 100A）

✓　形状：255×138×200（取付足含）

図 5.4.9-17　電源避雷器

D)　取付器具

受信装置格納箱および受信アンテナの設置に要する機材である。受信装置格納箱は、受信器や電源避雷器等を収めることができる。ステンレススティール製で長期運用に適している。坑道壁面に寄せて設置可能なものとした。製作した格納箱の外寸を図 5.4.9-18 に、格納箱の設置イメージを図 5.4.9-19 に示す。



（単位：mm）

図 5.4.9-18　格納箱外寸

図 5.4.9-19　格納箱の設置イメージ

5.4.10　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[28]。

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。

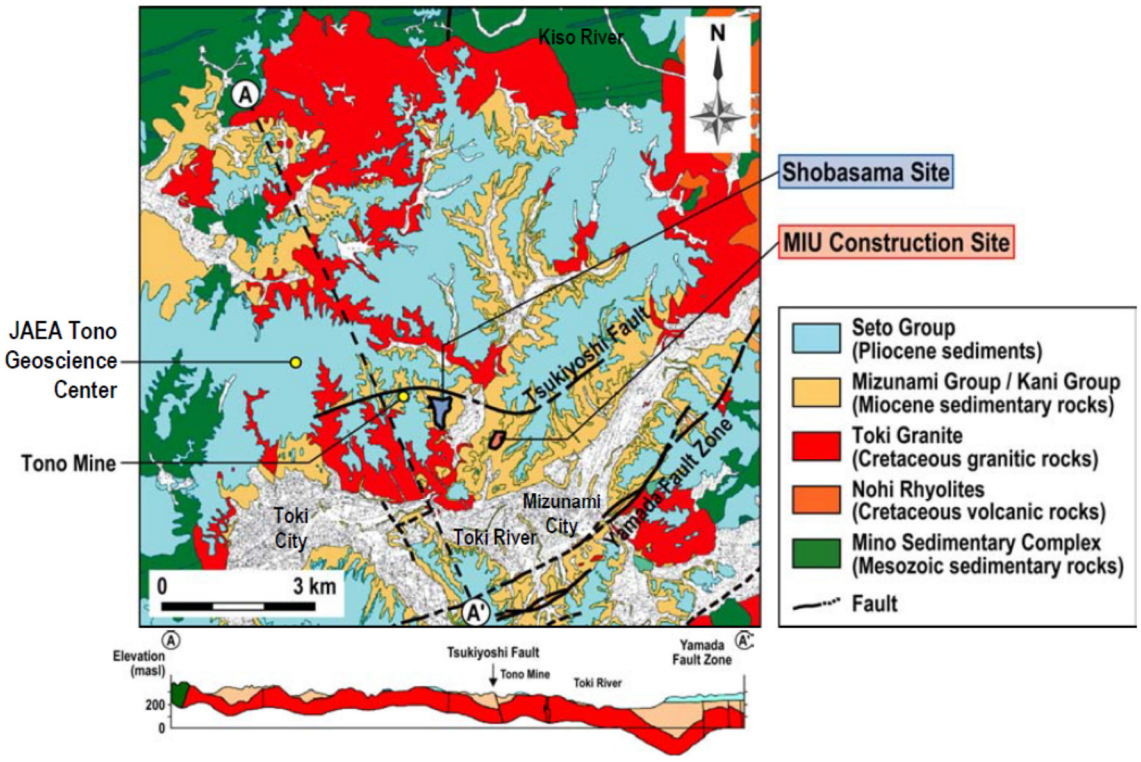


図 5.4.10-1　瑞浪超深地層研究所周辺における地質[29]

(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 5.4.10-2 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。

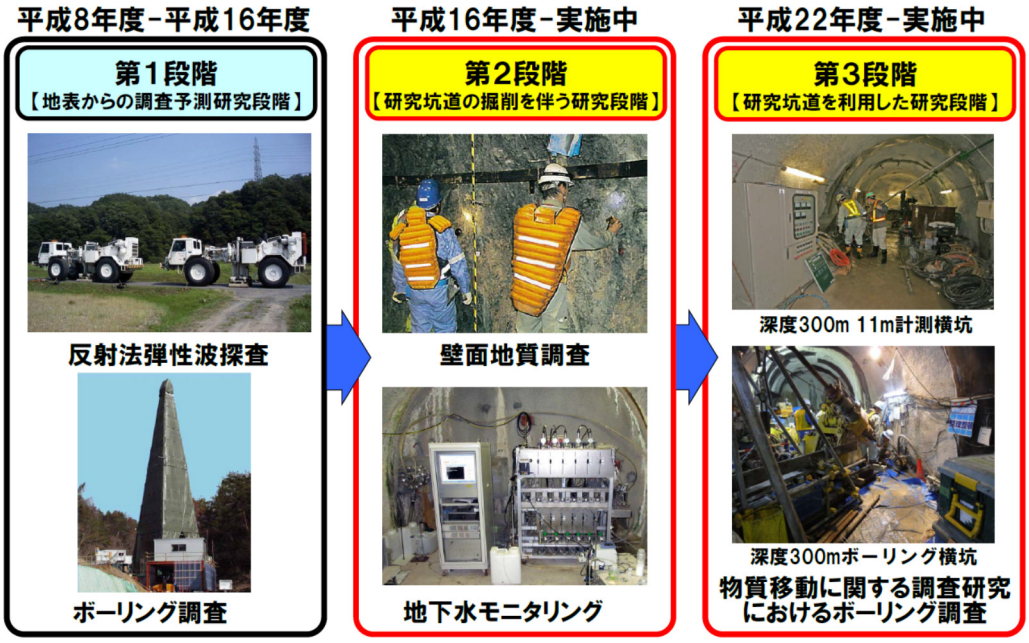


図 5.4.10-2　瑞浪超深地層研究所の研究計画[30]

(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 5.4.10-3 に示すように下記のステップで行われる計画である。

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 再冠水試験の実施：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

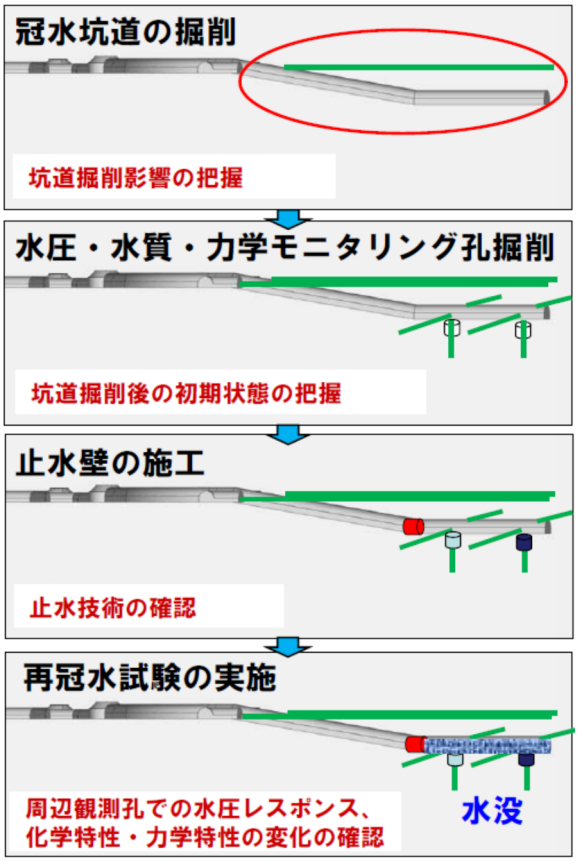


図 5.4.10-3　坑道の再冠水試験の内容[30]

(4)　瑞浪超深地層研究所における地中無線通信環境の調査

原子力機構殿の瑞浪超深地層研究所における冠水試験において、結晶質岩を対象とした坑道閉鎖時の水理地質環境の変化を計測する技術として、瑞浪超深地層研究所では地中無線モニタリング技術の適用を平成 26 年度より実施する計画である。

本業務では冠水試験への地中無線モニタリング技術の適用準備のため、試験実施場所など（深度 500m 研究アクセス北坑道など）における電磁ノイズの強度を計測し、地中無線通信環境の調査を実施した。

1)　調査概要

瑞浪超深地層研究所の深度 300m 研究アクセス坑道および深度 500m 研究アクセス北坑道において電磁ノイズ（8.5kHz）の計測を実施した。

2)　使用機材

電磁ノイズ計測にて使用した機材を表 5.4.10-1 に示す。また、可搬型受信機とレベルメータを図 5.4.10-4 に示す。

表 5.4.10-1　電磁ノイズ計測に使用した機材

対象	機材名	寸法/重量	備考
8.5kHz	可搬型受信器	140×140×400mm、6kg	受信アンテナ込み バッテリー内臓
	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

図 5.4.10-4　可搬型受信機とレベルメータ

3)　計測方法

計測は次のように実施した。測定位置に 8.5kHz 用の受信アンテナを図 5.4.10-5 に示す X 軸（坑道軸直角方向）、Y 軸（坑道軸方向）、Z 軸（坑道軸鉛直方向）に向けてセットし、測定機器（レベルメータ、レコーダー）を接続し、電磁ノイズレベルをレベルメータで読み取り、レコーダーに自動的に記録した。1 受信機 1 箇所当たりの X、Y 及び Z 軸方向 3 点の測定時間は、約 5 分である。

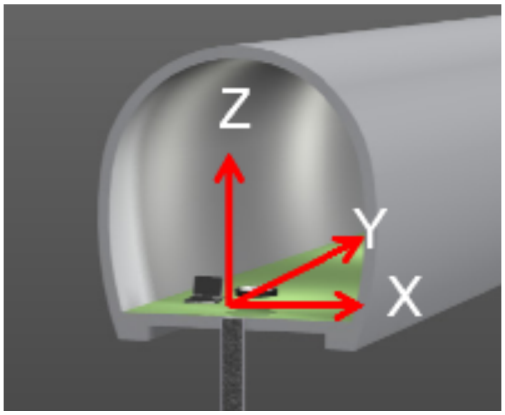


図 5.4.10-5　受信アンテナの設置方向

4) 調査場所及び測定状況

深度 300m 研究アクセス坑道における測定位置を図 5.4.10-6 に示す。深度 300m 研究アクセス坑道での測定は環境整備された坑道内のバックグランドの把握を目的とし、同坑道内の①、②、③と、④（坑道中央、L サイド、R サイドの 3 箇所）、⑤（坑道中央、L サイド、R サイドの 3 箇所）、⑥、及び⑦の計 11 箇所で行った。測定状況を図 5.4.10-7～図 5.4.10-17 に示す。

また、深度 500m 研究アクセス北坑道における測定位置を図 5.4.10-18 に示す。深度 500m 研究アクセス北坑道での測定は再冠水試験実施予定場所周辺のノイズ状況の確認を目的とし、①（坑道中央と電線のある L サイドの 2 箇所）、②、及び③（坑道中央と電線のある L サイドの 2 箇所）の計 5 箇所で計測を行った。測定状況を図 5.4.10-19～図 5.4.10-23 に示す。

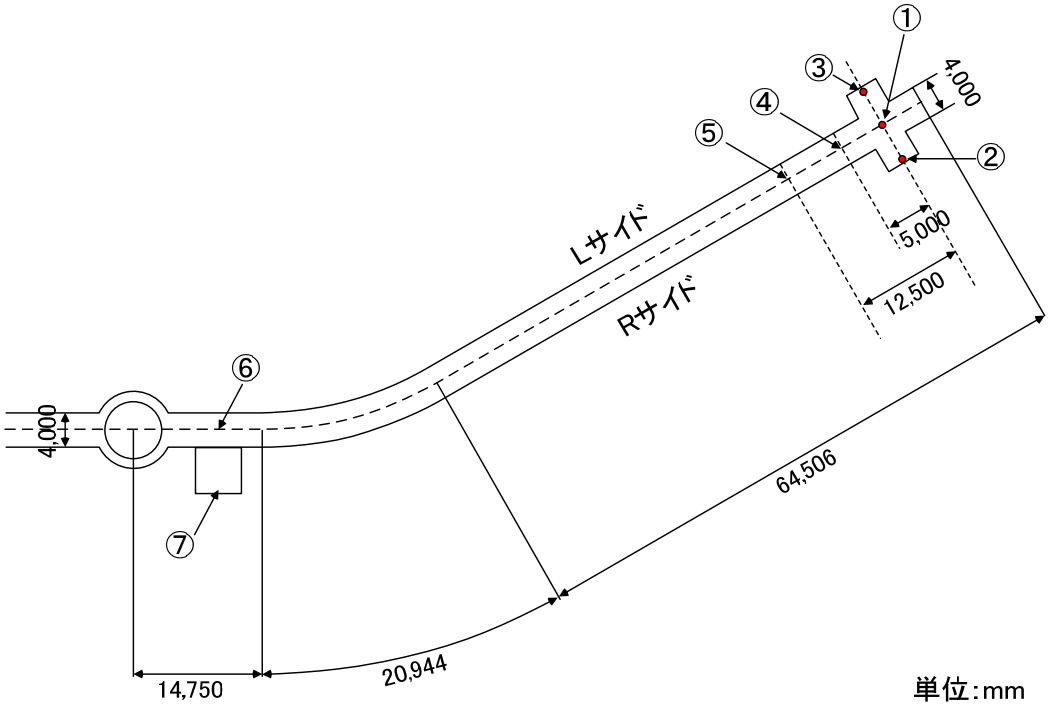


図 5.4.10-6 深度 300m 研究アクセス坑道における測定位置

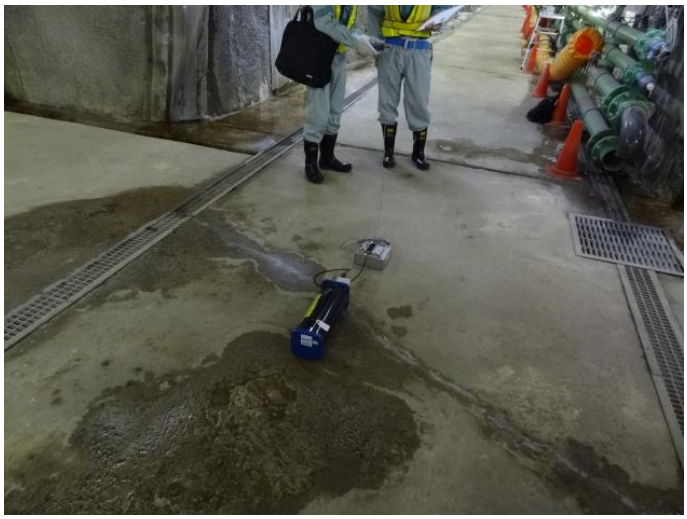


図 5.4.10-7　深度 300m 研究アクセス坑道①での測定状況

図 5.4.10-8　深度 300m 研究アクセス坑道②での測定状況

図 5.4.10-9　深度 300m 研究アクセス坑道③での測定状況

図 5.4.10-10　深度 300m 研究アクセス坑道④（坑道中央）での測定状況

図 5.4.10-11　深度 300m 研究アクセス坑道④（L サイド）での測定状況

図 5.4.10-12　深度 300m 研究アクセス坑道④（R サイド）での測定状況

図 5.4.10-13　深度 300m 研究アクセス坑道⑤（坑道中央）での測定状況

図 5.4.10-14　深度 300m 研究アクセス坑道⑤（L サイド）での測定状況

図 5.4.10-15　深度 300m 研究アクセス坑道⑤（R サイド）での測定状況

図 5.4.10-16　深度 300m 研究アクセス坑道⑥での測定状況

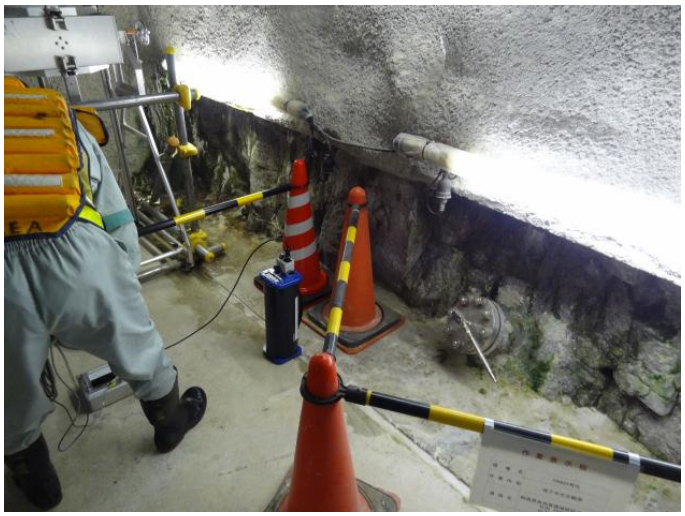


図 5.4.10-17　深度 300m 研究アクセス坑道⑦での測定状況

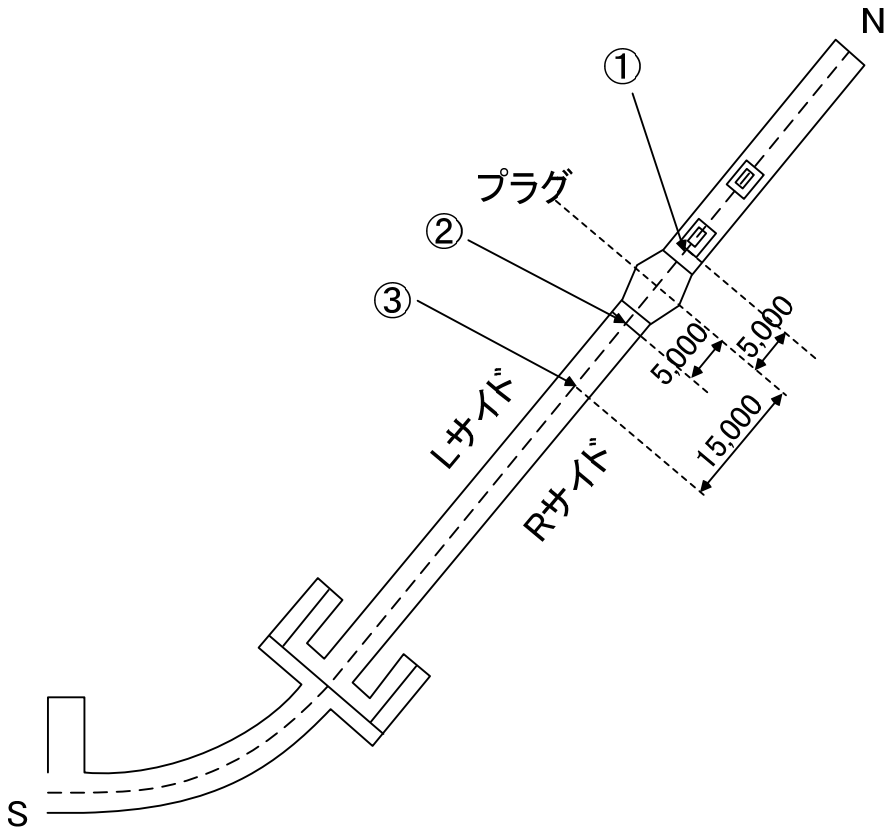


図 5.4.10-18　深度 500m 研究アクセス北坑道における測定位置

図 5.4.10-19　深度 500m 研究アクセス北坑道①（坑道中央）での測定状況

図 5.4.10-20　深度 500m 研究アクセス北坑道①（電線のある L サイド）での測定状況

図 5.4.10-21　深度 500m 研究アクセス北坑道②での測定状況

図 5.4.10-22　深度 500m 研究アクセス北坑道③（坑道中央）での測定状況

図 5.4.10-23　深度 500m 研究アクセス北坑道③（電線のある L サイド）での測定状況

5)　電磁ノイズ測定結果

深度 300m アクセス北坑道の測定結果を表 5.4.10-2 に、深度 500m アクセス北坑道の測定結果を表 5.4.10-3 に示す。最終的にはレコーダーでの記録値を正とした。

本測定結果をまとめると以下のようになる。

① 深度 300m アクセス北坑道も深度 500mアクセス坑道共に電磁ノイズが低く（1mV 以下）、地中無線の通信環境として好ましい。

② 電線や機器近傍では電磁ノイズが高くなるため（数 mV）、受信機の設置位置は他のモニタリング機器の配置計画も含め設定する必要がある。

表 5.4.10-2　深度 300m アクセス北坑道の電磁ノイズ測定結果

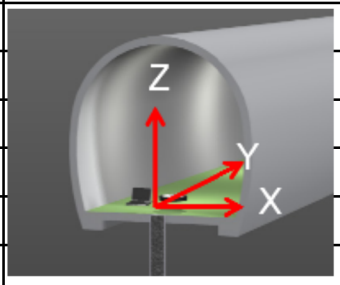
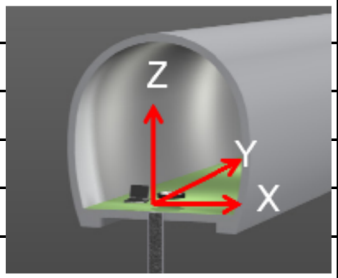
No.	坑道	測定点	方向	ノイズレベル（mV）	
				（読み取り）	（記録）
1	深度300mアクセス北坑道	①	X	0.7	0.7
2			Y	0.4	0.3
3			Z	0.3	0.4
4		②	X	0.5	0.5
5			Y	0.6	0.6
6			Z	0.3	0.4
7		③	X	0.4	0.5
8			Y	0.6	0.6
9			Z	1.5	1.2
10		④	X	0.6	0.6
11			Y	0.4	0.4
12			Z	0.5	0.5
13		④L	X	0.8	0.8
14			Y	0.4	0.5
15			Z	0.7	0.7
16		④R	X	0.5	0.6
17			Y	0.4	0.4
18			Z	0.4	0.5
19		⑤	X	0.7	0.7
20			Y	0.7	0.7
21			Z	0.8	0.8
22		⑤L	X	0.9	0.8
23			Y	0.8	0.8
24			Z	2.2	2.3
25		⑤R	X	0.6	－
26			Y	0.4	－
27			Z	0.5	－
28		⑥	X	6.0	－
29			Y	10.0	－
30			Z	4.0	－
31		⑦	X	2.5	－
32			Y	1.5	－
33			Z	0.6	－

表 5.4.10-3　深度 500m アクセス北坑道の電磁ノイズ測定結果

No.	坑道	測定点	距離(m)	方向	ノイズレベル(mV)	
					(読み取り)	(記録)
1	深度500mアクセス北坑道	①	プラグからN5m	X	0.4	0.5
2	【小型送信機①設置】			Y	0.6	0.6
3				Z	1.5	1.4
4		①L	プラグからN5m	X	0.4	0.5
5				Y	0.4	0.4
6				Z	0.9	0.9
7		②	プラグからS5m	X	1.5	1.7
8				Y	0.8	0.8
9				Z	3.0	2.8
10		③	プラグからS15m	X	2.5	2.6
11				Y	0.6	0.5
12				Z	2.5	2.3
13		③L	プラグからS15m	X	6.0	5.5
14				Y	0.6	0.6
15				Z	2.0	2.2

6)　予備送信試験

小型地中無線送信機を用いて予備的な送信試験を深度 300m アクセス北坑道、及び深度 500m アクセス北坑道で実施した（図 5.4.10-24 参照)。深度 300m アクセス北坑道の予備送信試験では図 5.4.10-6 の①に送信機を設置し、主立坑方向へ 10m 離れ、20m 離れ及び 30m 離れにおいて実施した。深度 500m アクセス北坑道の予備送信試験では図 5.4.10-18 の①に送信機を設置し、10m 離れの②、20m 離れの③で試験を実施した。それぞれの予備送信試験結果を表 5.4.10-4 と表 5.4.10-5 に示す。また、地表での通信特性との比較した結果を図 5.4.10-25 と図 5.4.10-26 に示す。

本試験結果をまとめると以下のようになる。

① 深度 300m アクセス北坑道も深度 500mアクセス坑道共に小型地中無線送信装置を用いて、20m~30m 程度の送信が可能であることが分かった。

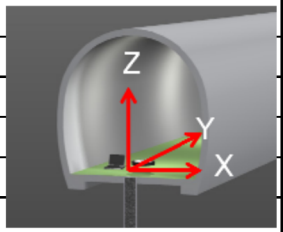
② 正対（Y 方向）での受信強度が平行（X 方向及び Y 方向）の約 2 倍とほぼ理論通りの結果となっており、測定事態に特に問題が無いことが分かった。

③ 電源など電磁環境を乱す恐れがある場所では電磁ノイズが大きくなるため、受信機の設置位置については留意が必要である。

④ 正対（Y 方向）での受信強度は、地表での通信特性と同じ値を示していることから、現状（掘削直後）では深度 300m アクセス北坑道、及び深度 500m アクセス北坑道共に、距離減衰以外の減衰に寄与する要因がないことが分かる。

図 5.4.10-24　深度 300m アクセス北坑道の予備送信試験状況（小型地中無線送信機）

表 5.4.10-4　深度 300m アクセス北坑道の予備送信試験結果

No.	坑道	測定点	距離(m)	方向	受信強度(mV)		ノイズレベル(mV)	
					(読み取り)	(記録)	(読み取り)	(記録)
1	深度300mアクセス北坑道		①から10m離れ	X	25.0	23.4	1.00	1.1
2	【小型送信機①設置】			Y	50.0	49.9	1.00	0.9
3				Z	25.0	24.7	1.00	1.2
4			①から20m離れ	X	3.0	2.9	1.00	1.2
5				Y	6.0	6.3	1.00	1.2
6				Z	3.2	3.3	0.65	0.7
7			①から25m離れ	X	1.5	1.5	0.65	0.6
8				Y	3.0	3.5	0.35	0.4
9				Z	2.0	1.9	0.55	0.6
10			①から30m離れ	X	1.0	1.1	0.55	–
11				Y	2.0	1.9	0.30	0.4
12				Z	1.2	1.3	0.65	0.7

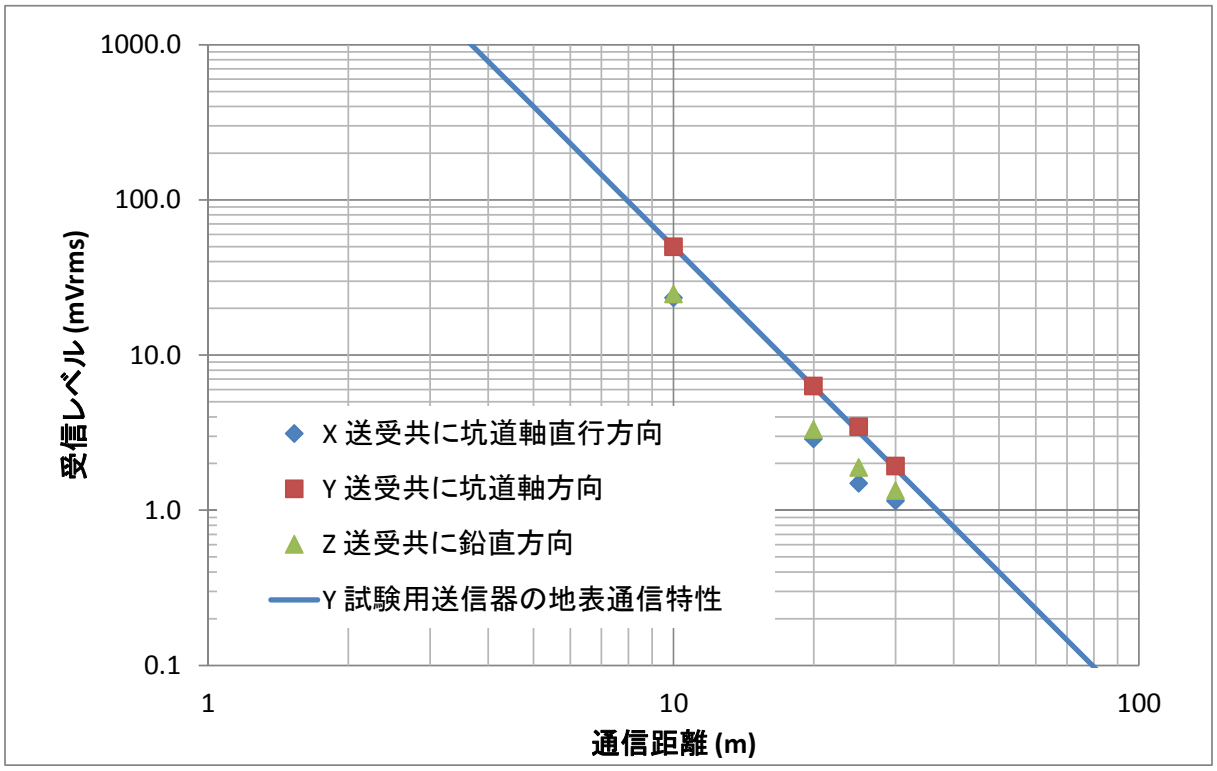
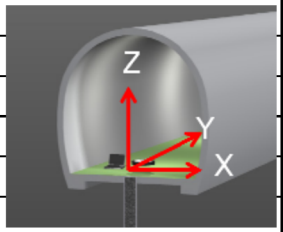


図 5.4.10-25　深度 300m アクセス北坑道の送信試験結果

表 5.4.10-5　深度 500m アクセス北坑道の予備送信試験結果

No.	坑道	測定点	距離(m)	方向	受信強度(mV)		ノイズレベル(mV)	
					(読み取り)	(記録)	(読み取り)	(記録)
1	深度500mアクセス北坑道	①	プラグからN5m	X	–	–	0.4	0.5
2	【小型送信機①設置】			Y	–	–	0.6	0.6
3				Z	–	–	1.5	1.4
4		①L	プラグからN5m	X	–	–	0.4	0.5
5				Y	–	–	0.4	0.4
6				Z	–	–	0.9	0.9
7		②	プラグからS5m	X	25.0	24.4	1.5	1.7
8				Y	50.0	55.0	0.8	0.8
9				Z	30.0	29.6	3.0	2.8
10		③	プラグからS15m	X	4.0	4.4	2.5	2.6
11				Y	6.0	6.5	0.6	0.5
12				Z	4.0	4.1	2.5	2.3
13		③L	プラグからS15m	X	7.0	6.9	6.0	5.5
14				Y	6.0	6.0	0.6	0.6
15				Z	3.5	3.8	2.0	2.2

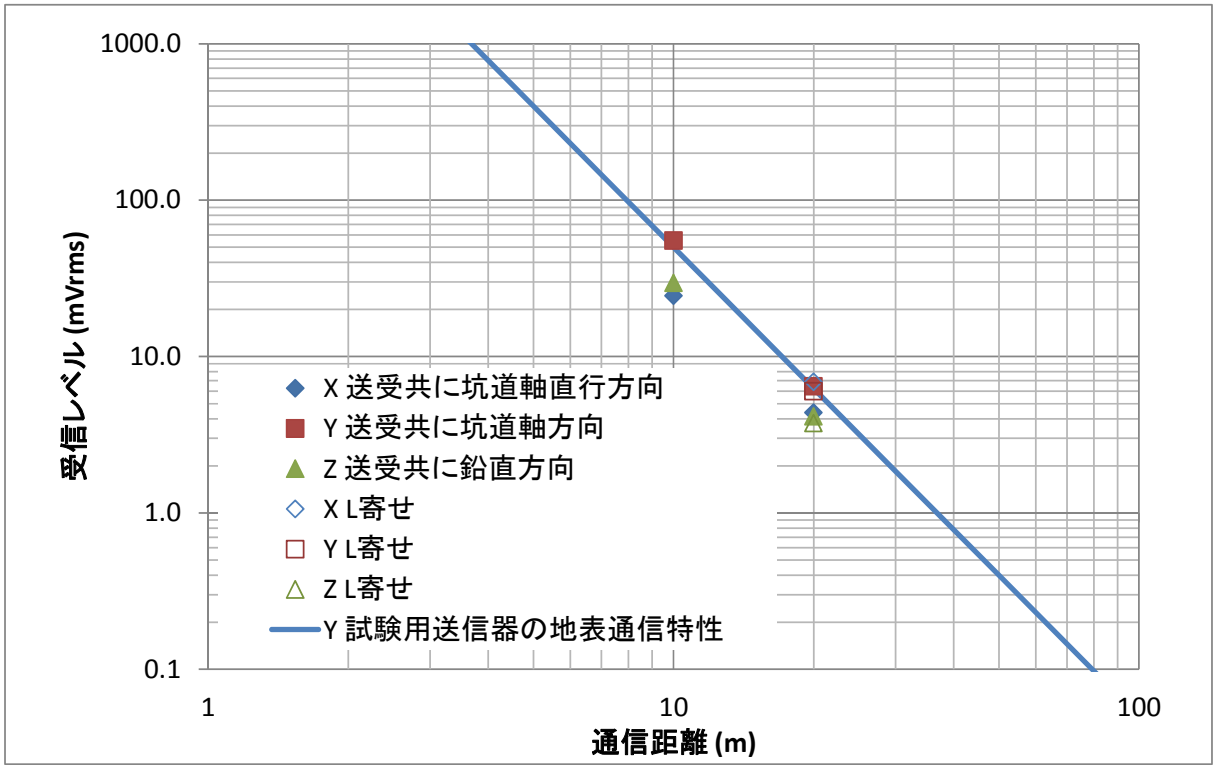


図 5.4.10-26　深度 500m アクセス北坑道の送信試験結果

(5)　地中無線モニタリングシステムの検討

前述した地中無線通信環境の調査結果を踏まえ、冠水試験に適用する地中無線モニタリングシステムに必要とされる機器仕様を検討した。また、併せて機器の設置方法について検討した。

1)　小型地中無線送信装置

モニタリングに用いる小型地中無線送信装置は深度 500m での適用のため耐圧型（10MPa）とした。また、小型地中無線送信装置に接続する間隙水圧計及び無線の受信機は、5.4.9(3)に示した人工バリア性能確認試験に用いる機器と同様の仕様とした。

2)　計測期間

小型地中無線装置による計測期間は、データ取得間隔及びデータ転送間隔に依存する。ここでは、冠水直後のデータを取得することに主眼を置くため、データ取得間隔は 2 分~30 分での検討を行った。

データ取得間隔 2 分
この間隔では最低 1 日 4 回送らないと、1 回の送信時間制限を超えてしまうため、1 日 4 回のデータ伝送とすると計測期間は 1.8 カ月となる。

データ取得間隔 5 分
この間隔では最低 1 日 2 回送らないと、1 回の送信時間制限を超えてしまうため、1 日 2 回のデータ伝送とすると計測期間は 4 か月となる。

データ取得間隔 10 分
この間隔では 1 日 1 回のデータ送信が必要となり、計測期間は 9 か月となる。

データ取得間隔 30 分
この間隔では 3 日に 1 回のデータ送信が必要となる。1 日 1 回のデータ伝送とすると計測期間は 2 年に、3 日 1 回のデータ伝送としても計測期間は 2 年となる。

3)　機器の設置方法

冠水試験での小型地中無線を用いた計測は、図 5.4.10-27 に示すような形式となる。つまり、コンクリート製の止水プラグを横断する必要が生じる。よって、小型地中無線送信装置による送信は、止水プラグ内にあると考えられる鉄筋などの鋼材の影響を避けるため正対（図 5.4.10-28）ではなく、平行（図 5.4.10-29）での送信が適している。

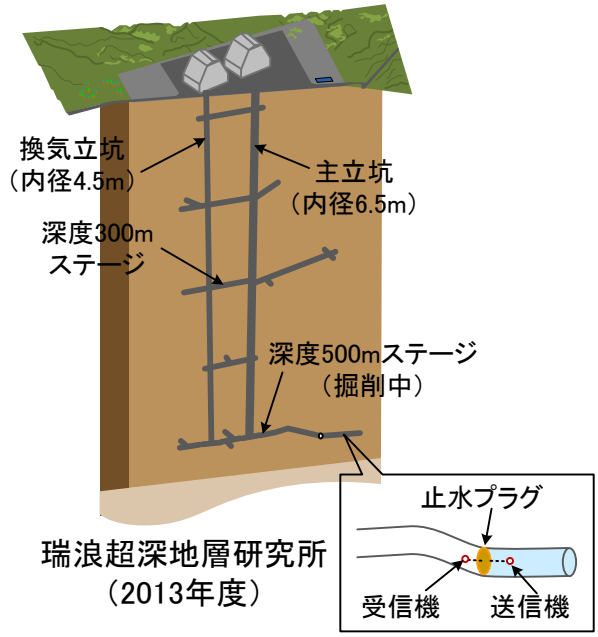


図 5.4.10-27　再冠水試験のイメージ図

図 5.4.10-28　送信方向（正対）

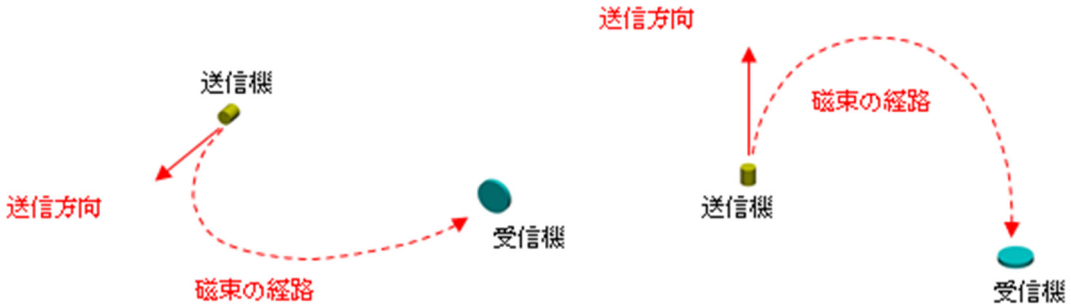


図 5.4.10-29　送信方向（平行）

5.4.11　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

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、ビュール地下研究所（MHM URL）で実証試験を開始している。今年度は、以下の調査を実施している。

- ✓　長期モニタリング
- ✓　長距離送信
- ✓　地中無線 WS（2014 年 5 月開催予定）
- ✓　中継システム

(2)　長期モニタリング

ビュール地下研究所では、送信機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機を設置し、ボーリング孔間の長期モニタリングを実施している。

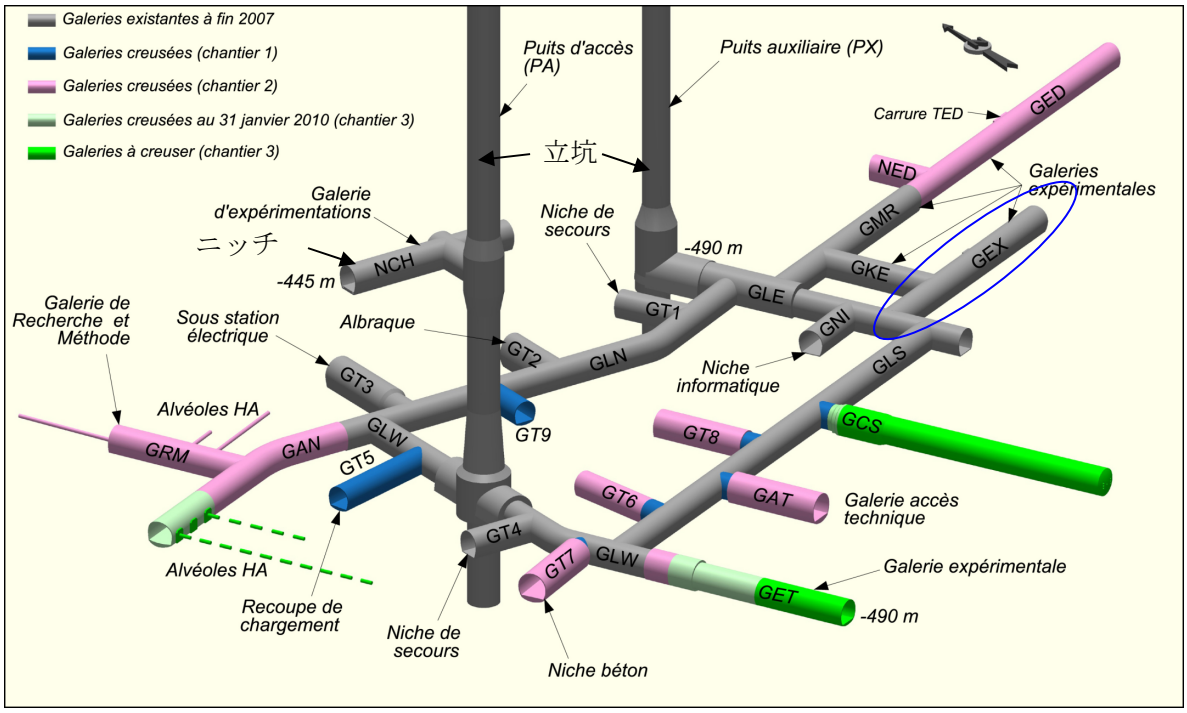
以下に、長期モニタリングの現状を示す。

1)　ビュール地下研究所の概要

レイアウトと坑道

図 5.4.11-1 に示すとおりビュール地下研究所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 5.4.11-1 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 5.4.11-2）。



伝送試験に利用した坑道

図 5.4.11-1　ビュール地下研究所のレイアウト

図 5.4.11-2　GEX 坑道（GKE 坑道側から撮影）

図 5.4.11-3 にビュール地下研究所の 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 5.4.11-3 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。

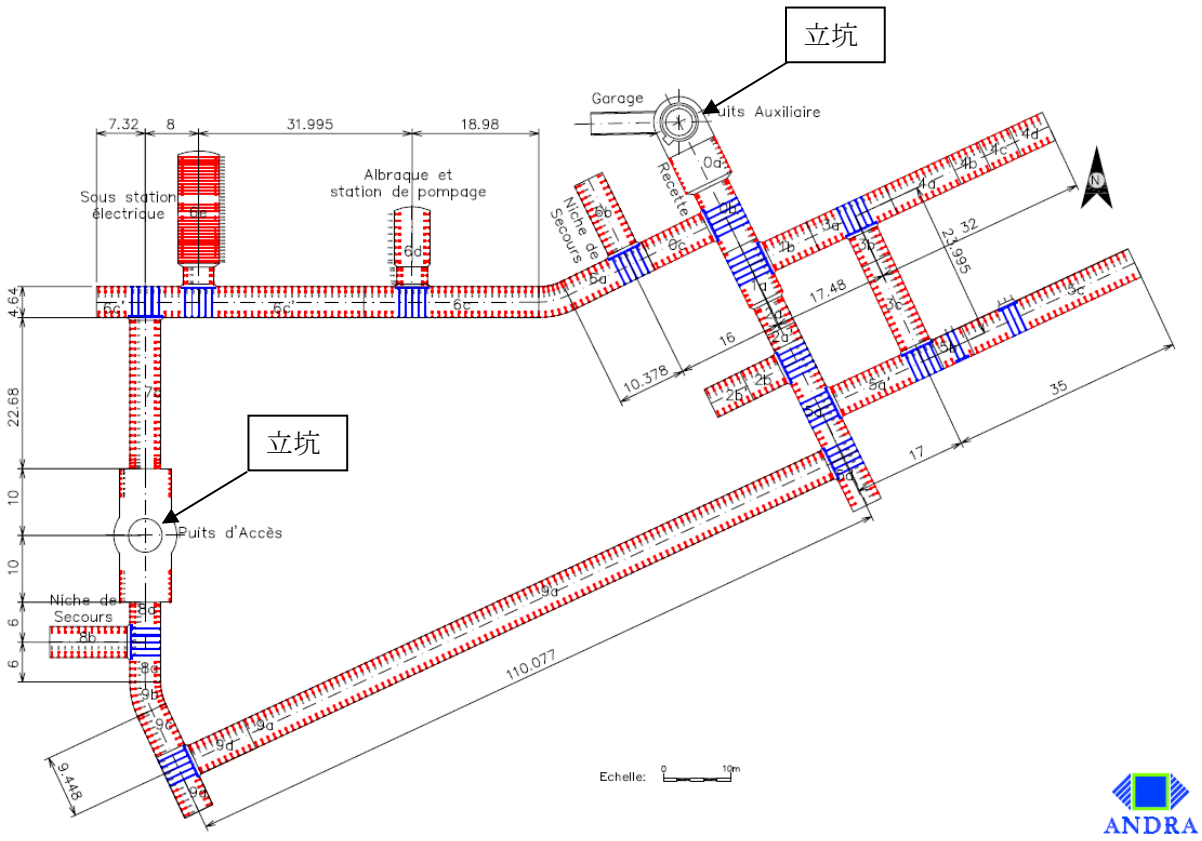


図 5.4.11-3　ビュール地下研究所坑道 490m 坑道群

母岩

ビュール地下研究所の母岩は 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 [%]
- CaCO3 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 5.4.11-4 に示す。

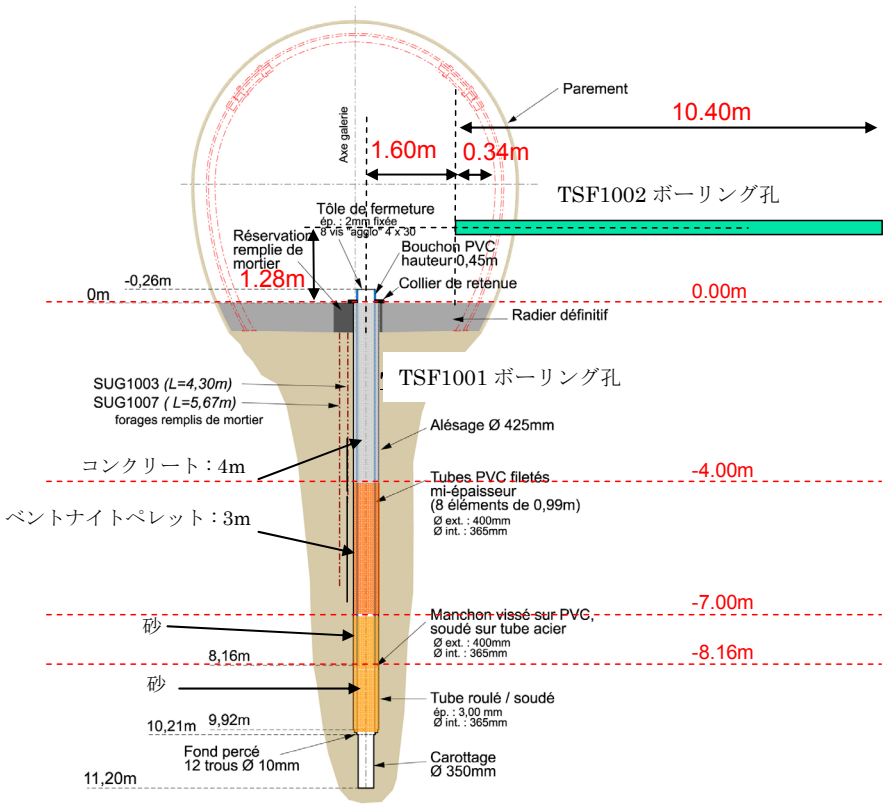


図 5.4.11-4　TSF1002 ボーリング孔の具体的な位置関係

TSF1001 ボーリング孔内を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 5.4.11-1 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 5.4.11-1 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。尚、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。

2011 年 8 月 31 日から開始し、2014 年 1 月 20 日まで（約 2 年 5 ヶ月間）の間隙水圧計の測定結果を図 5.4.11-5 に、土圧計の測定結果を図 5.4.11-6 に、温度センサの測定結果を図 5.4.11-7 に、電圧計の測定結果を図 5.4.11-8 に示す。

間隙水圧計の測定結果である図 5.4.11-5 より、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（0.014MPa）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。

土圧計の測定結果である図 5.4.11-6 より、計測初期はベントナイトの埋め戻し材およびコンクリートの自重により、土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土圧が上昇し、設計膨潤圧である 0.5MPa 近傍（0.52MPa と 0.66MPa）でほぼ安定していた。その後、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、再度 2013 年 8 月の水の注入により土圧が設計膨潤圧まで回復している。

温度センサの測定結果である図 5.4.11-7 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、電圧計の測定結果である図 5.4.11-8 より、長期通信試験を開始後 2 年 5 ヶ月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 ボーリング孔での地下水の浸透状況に係る知見を得ていく予定である。

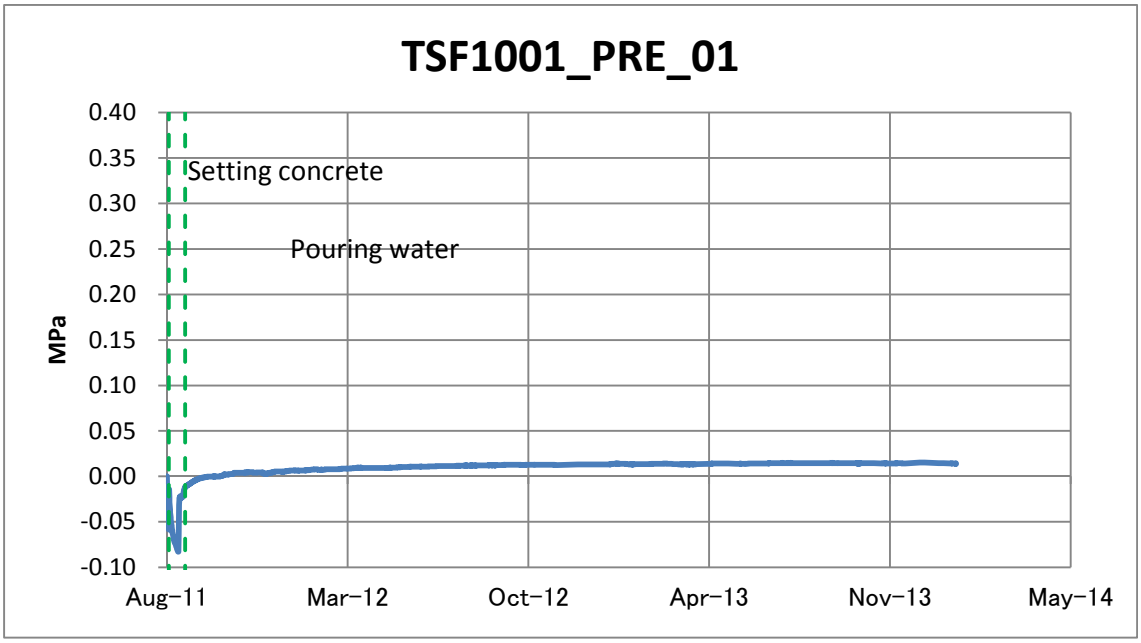


図 5.4.11-5　間隙水圧計の測定結果

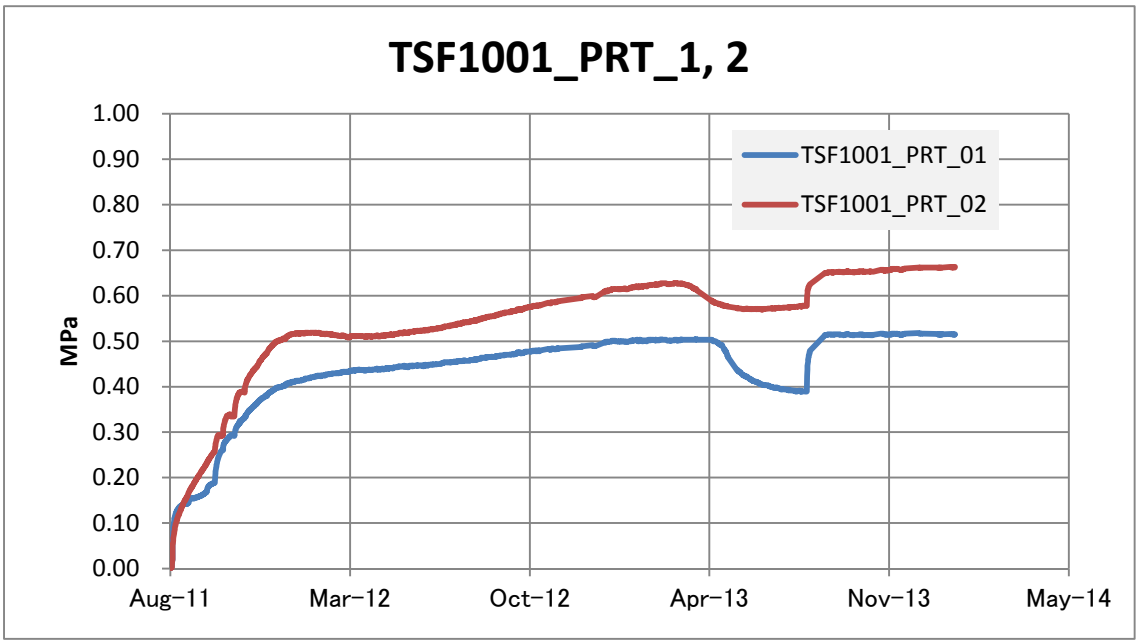


図 5.4.11-6　土圧計の計測結果（01：孔口-5.50m、02：孔口-6.00m）

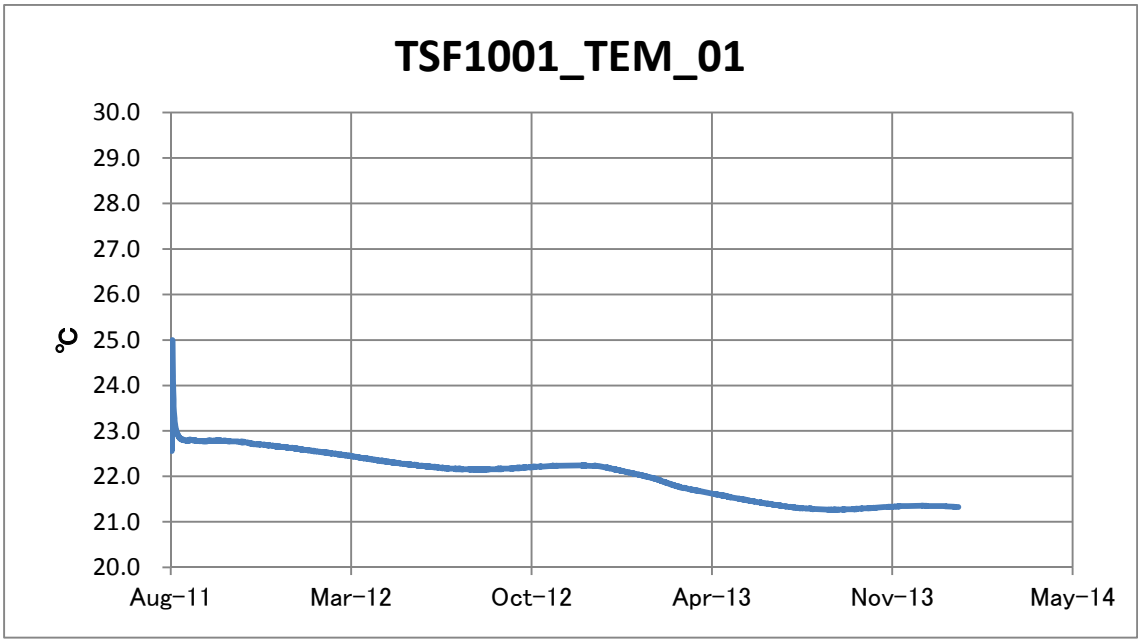


図 5.4.11-7　温度センサでの計測結果

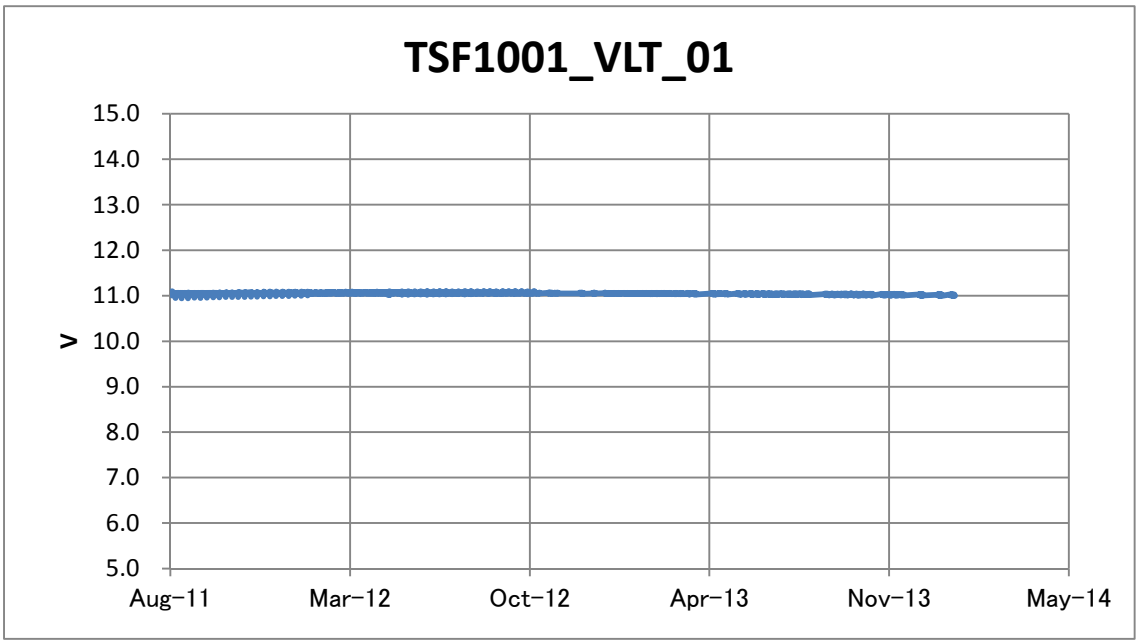


図 5.4.11-8　電圧計の測定結果

(3)　長距離送信

昨年度の検討から、フランス ANDRA のビュール地下研究施設での長距離送信（地上と地下施設間の約 490m 送信、図 5.4.11-9 参照）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。

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 5.4.11-10 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 SN 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）

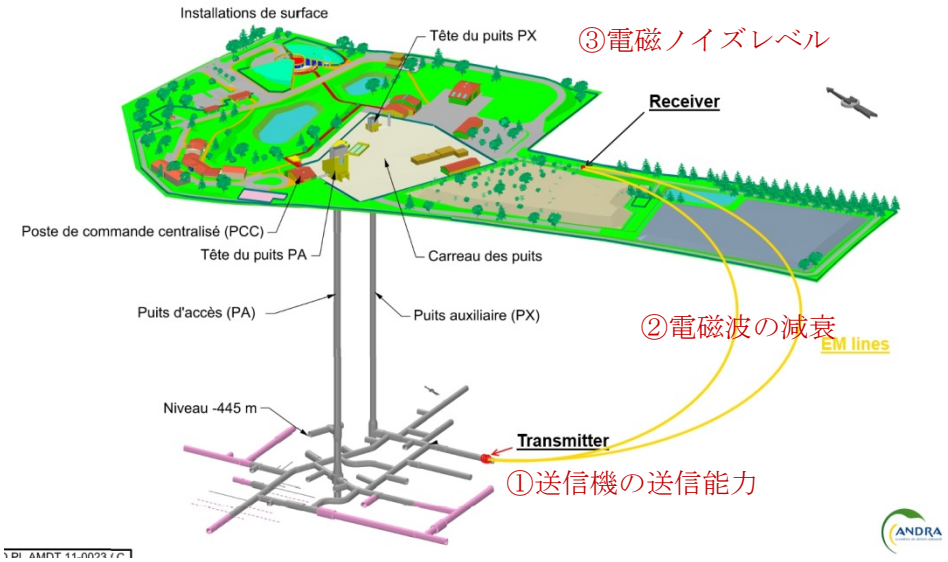


図 5.4.11-9　長距離送信の対象区間（約 490m）

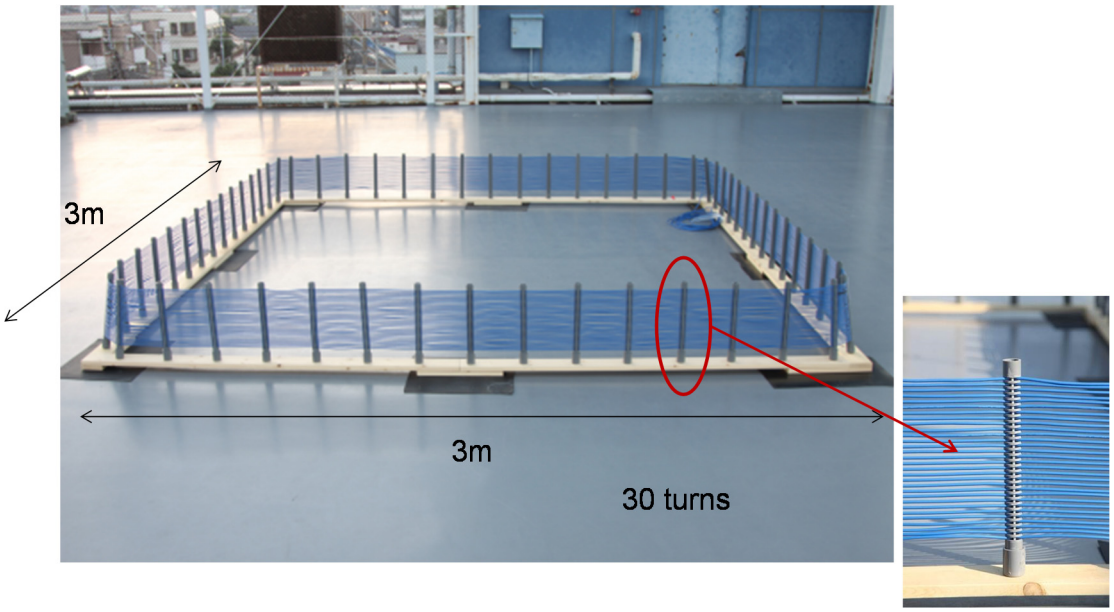


図 5.4.11-10　中継システム用の送信アンテナ

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、③ビュール地下研究所において、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、本調査では以下のような試験計画を立案した。

1)　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 SN 比の向上（③対応）として、図 5.4.11-11 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間で実施する。

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)

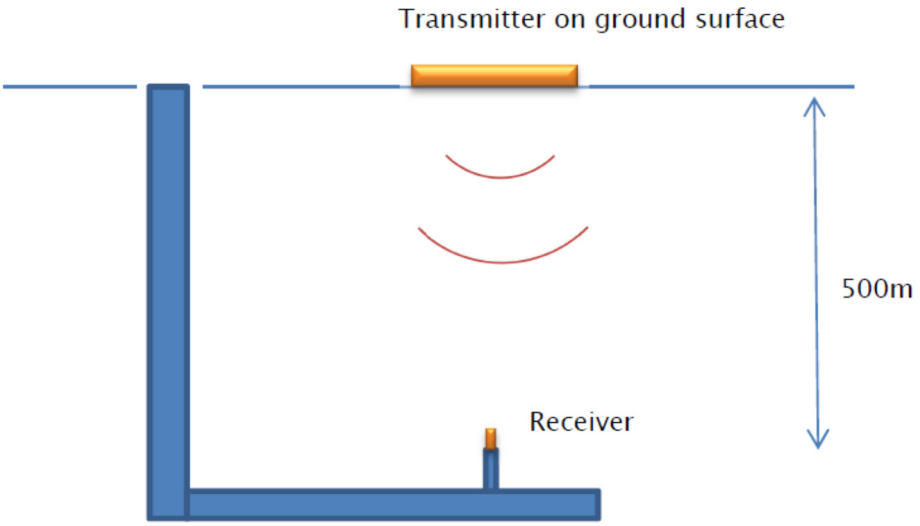


図 5.4.11-11　長距離送信試験 A

2)　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 5.4.11-12 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。

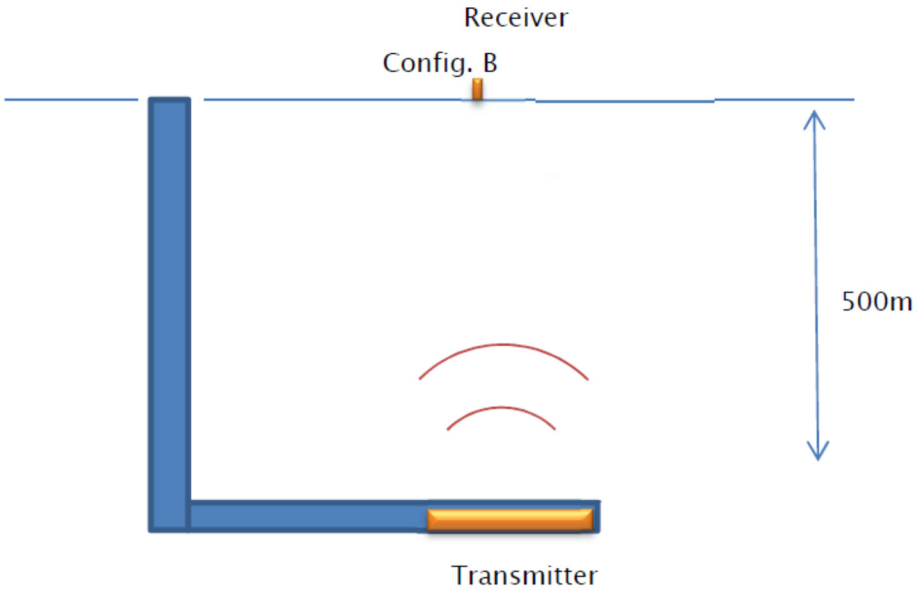


図 5.4.11-12　長距離送信試験 B

3)　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 5.4.11-13 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 SN 比の向上を図る計画である。

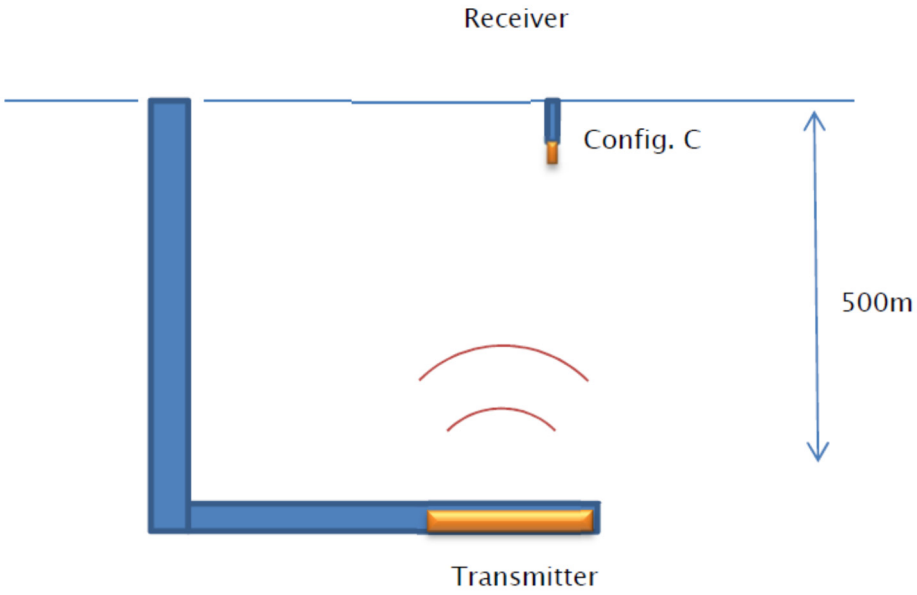


図 5.4.11-13　長距離送信試験 C

(4)　長距離送信の実現可能性の確からしさの定量的評価

長距離送信の実現可能性は、昨年度検討で示した通り、様々な不確実性要因が含まれており、現段階では成功できるか否か、明確な判断ができないのが現状である。そこで、本調査ではこれまでの経験を踏まえ、前述した 3 種類の長距離送信の実現可能性の確からしさ（不確実性）の評価を Evidential support logic (ESL)を用いて試みた。

1)　ESL の概要

ESL[32]は、資源（石油）探査分野や経営工学分野などで適用されており、様々な判断要素を考慮できる意思決定手法 AHP（Analytic Hierarchy Process）[33]に、不確実性の定量的評価手法である IPT（Interval Probability Theory、区間確率理論）を組み込んだものである。特長としては、①階層構造により命題に対する判断プロセスを提示でき（図 5.4.11-14）、②区間確率理論を用いることにより、判断時に生じる不確実性（図 5.4.11-15；支持（緑）＝1-不支持（赤）、

不確実性（白）が存在）を定量的に評価できることである。

その結果、不確実性を考慮した形で命題の現状を理解することができ、さらに現状の理解を深めるために次段階において何をすべきかの意思決定を支援できる。

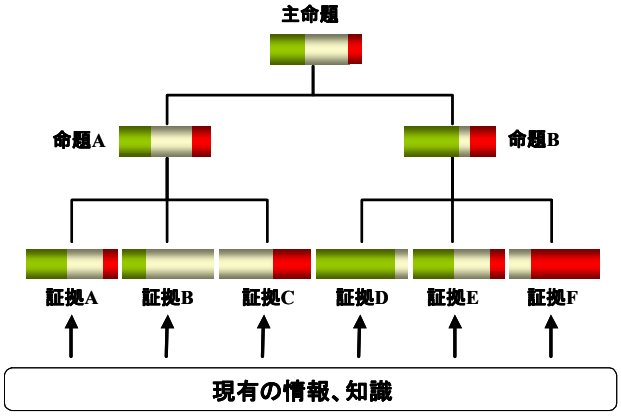


図 5.4.11-14　ESL による解析イメージ

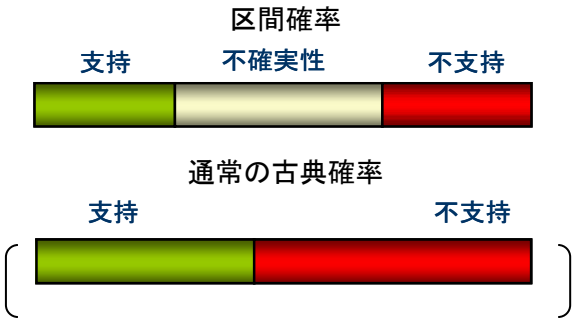


図 5.4.11-15　ESL が用いる区間確率理論

2)　ESL による解析手順

本手法による解析手順を整理すると、以下のようになる。

A)　樹形図の構築：命題を設定し、命題を評価できる階層構造（樹形図）を構築する。樹形図の構築は、概念的な主命題からトップダウンで具体的な証拠（Evidence）までブレイクする。

B)　パラメータの入力：インタビューなどによりパラメータを入力する。パラメータには、図 5.4.11-16 示すように証拠の上位命題への貢献度を意味する十分性（条件付確率、下位命題が成立（100%支持）するときに、上位命題が成立する確率）と証拠間の情報の重なり具合を示す重複性などがある。

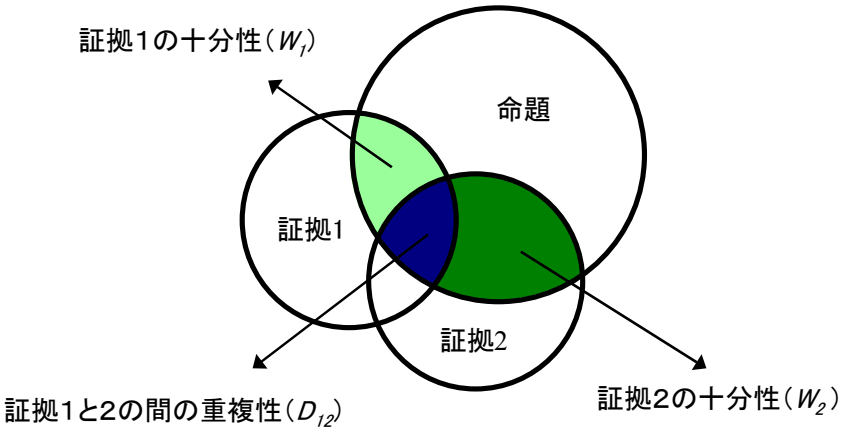
C)　証拠の入力：樹形図の各証拠に、図 5.4.11-15 に示す区間確率理論に基づいて支持、不支持を設定する。

D)　解析の実行：図 5.4.11-16 に示した考えに基づき支持、不支持の程度をそれぞれ計算

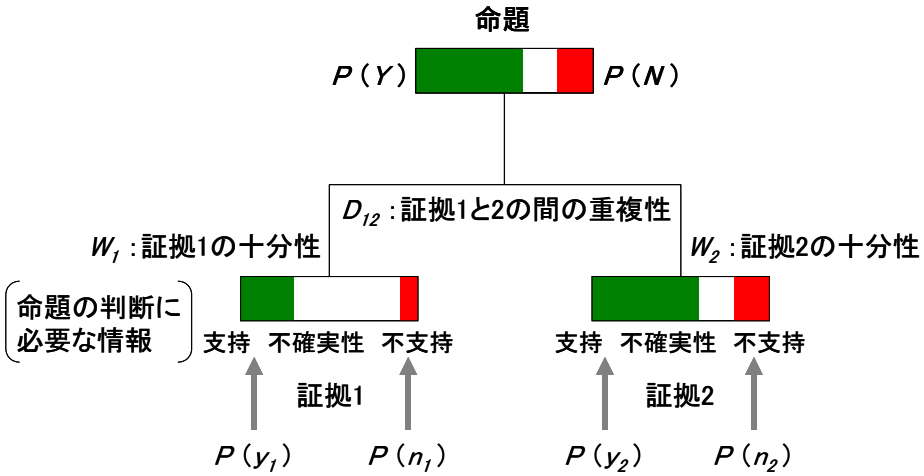
する。

E)　解析結果の表示：解析結果は、図 5.4.11-17 に示す Ratio Plot を用い可視化することができる。Ratio Plot は、横軸に不確実性を、縦軸は支持／不支持を対数で表示している。図 5.4.11-17 中濃い緑（赤）は、支持（不支持）である確度が高いことを意味している。薄い緑（赤）は、支持（不支持）であるが、不確実性が高いことを意味している。

F)　感度解析の実施：樹形図の末端の証拠の支持を例えば 0.1 変化させることにより、証拠の命題に対する感度を知ることができる。この結果により、証拠の重要度分類ができる。



ESLにおける各パラメータの意味



ESLの演算規則

図 5.4.11-16　ESL パラメータ（十分性と重複性）と演算規則

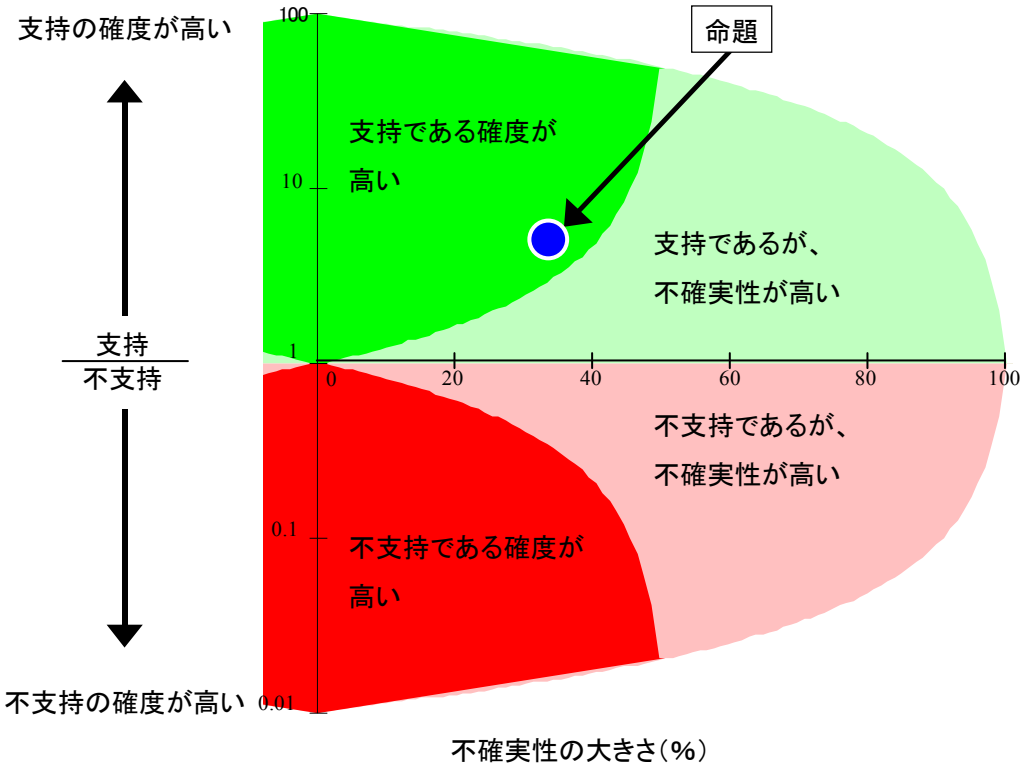


図 5.4.11-17　Ratio Plot による結果の可視化

3)　樹形図の構築

本調査の主命題は「長距離送信が可能である」となる。この主命題を支持する命題は、図 5.4.11-18 に示す解析対象イメージのとおり、「1.十分な送信能力を有している」、「2.受信位置の電磁ノイズが十分に小さい」及び「3.電磁波の減衰が十分に小さい」となる。

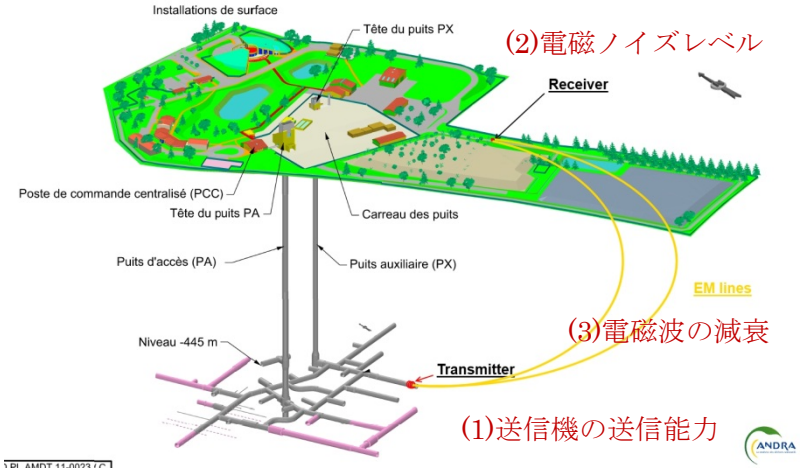


図 5.4.11-18　解析対象イメージ（再掲）

「1.十分な送信能力を有している」ことを満足するためには、磁気モーメントを大きくする必要があり、そのためには、「1.1 アンテナ面積が広い」、「1.2 アンテナに流れる電流が大きい」及び「1.3 コイル巻き数が多い」という証拠を集める必要がある。

また、「2.受信位置の電磁ノイズが十分に小さい」ことを満足するためには、「2.1 受信位置近傍にノイズを発生する機器が存在しない」と、電磁ノイズが十分に低減する程度の、「2.2 ボーリング孔の掘削深度が十分に深い」という証拠が必要となる。

更に、「3.電磁波の減衰が十分に小さい」ことを満足するためには、「3.1 送信機の中心が坑道外にある」及び「3.2 送信機近傍に鋼製の機材などがない」という証拠を集める必要がある

以上より、構築した主命題「長距離送信が可能である」の樹形図を図 5.4.11-19 に示す。同図では、主命題「長距離送信が可能である」を判断するための要件を階層構造により表現できている。

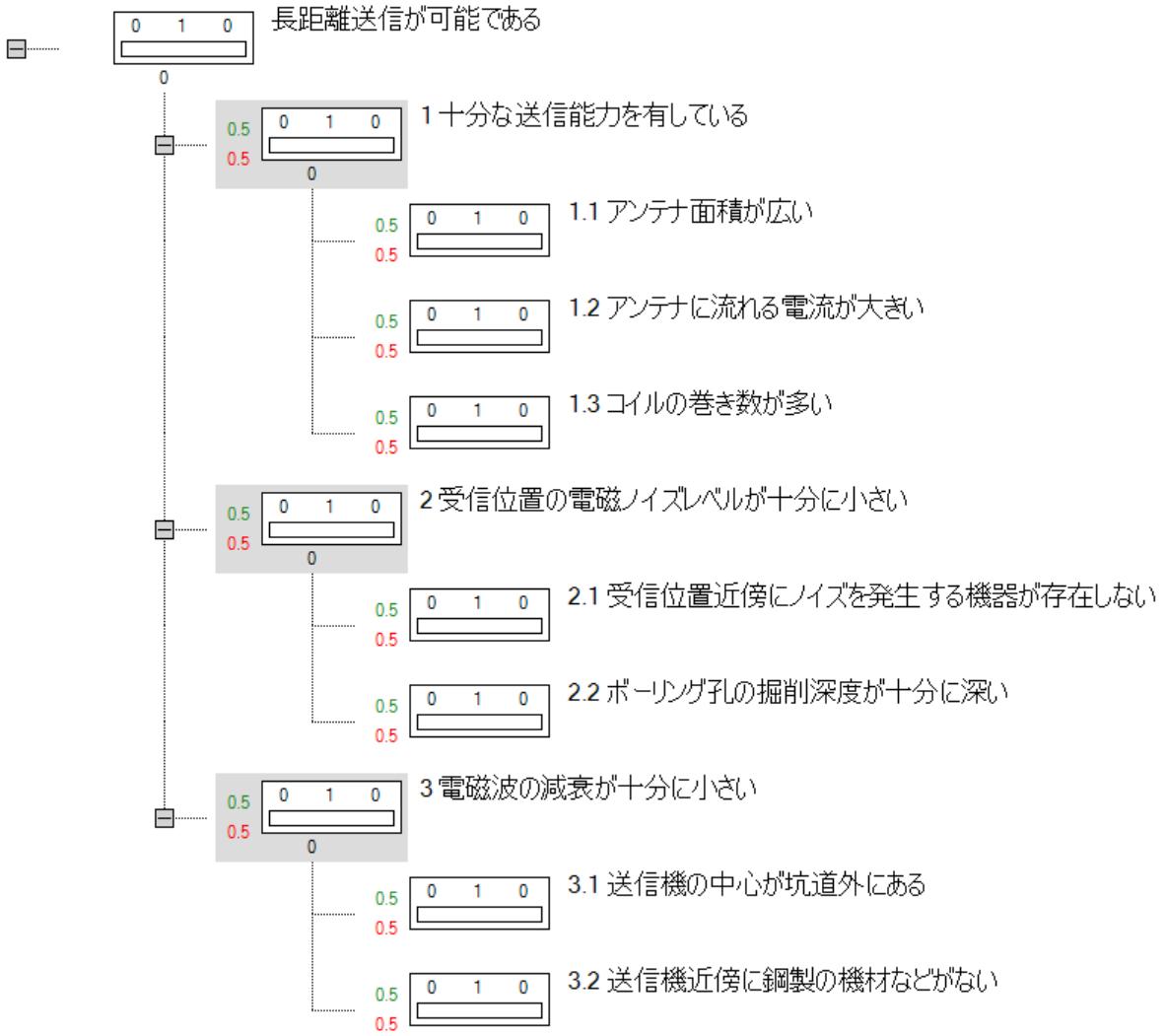


図 5.4.11-19　主命題「長距離送信が可能である」の樹形図
（図中の数字はリファレンスの値である。）

4) パラメータの入力

パラメータ（十分性、及び重複性）は下記の考えに基づき、設定した。設定時には言語表現を用い、高（0.8）・中（0.5）・低（0.2）を適用した。また、高中低で表現しきれない場合は、+-で調整可能である。

- ✓ 支持及び不支持の十分性は同じとした。
- ✓ 主命題「長距離送信が可能である」を支持する 3 つの命題は、単独では主命題を支持しきれないため、十分性は“中（0.5）”とした。
- ✓ 命題「1.十分な送信能力を有している」を支持する 3 つの証拠は、単独では主命題を支持しきれないため、十分性は“中（0.5）”とした。
- ✓ 命題「2.受信位置の電磁ノイズが十分に小さい」を支持する 2 つの証拠は、単独では主命題を支持しきれないため、十分性は“中（0.5）”とした。
- ✓ 命題「3.電磁波の減衰が十分に小さい」を支持する 2 つの証拠は、単独では主命題を支持しきれないため、十分性は“中（0.5）”とした。
- ✓ 各命題及び各証拠は独立していると考え、重複性は設定しない。

今回設定したパラメータでは、仮に全ての証拠が 100%満足できても、図 5.4.11-20 に示すように主命題に 22%の不確実性が残ることとなる。

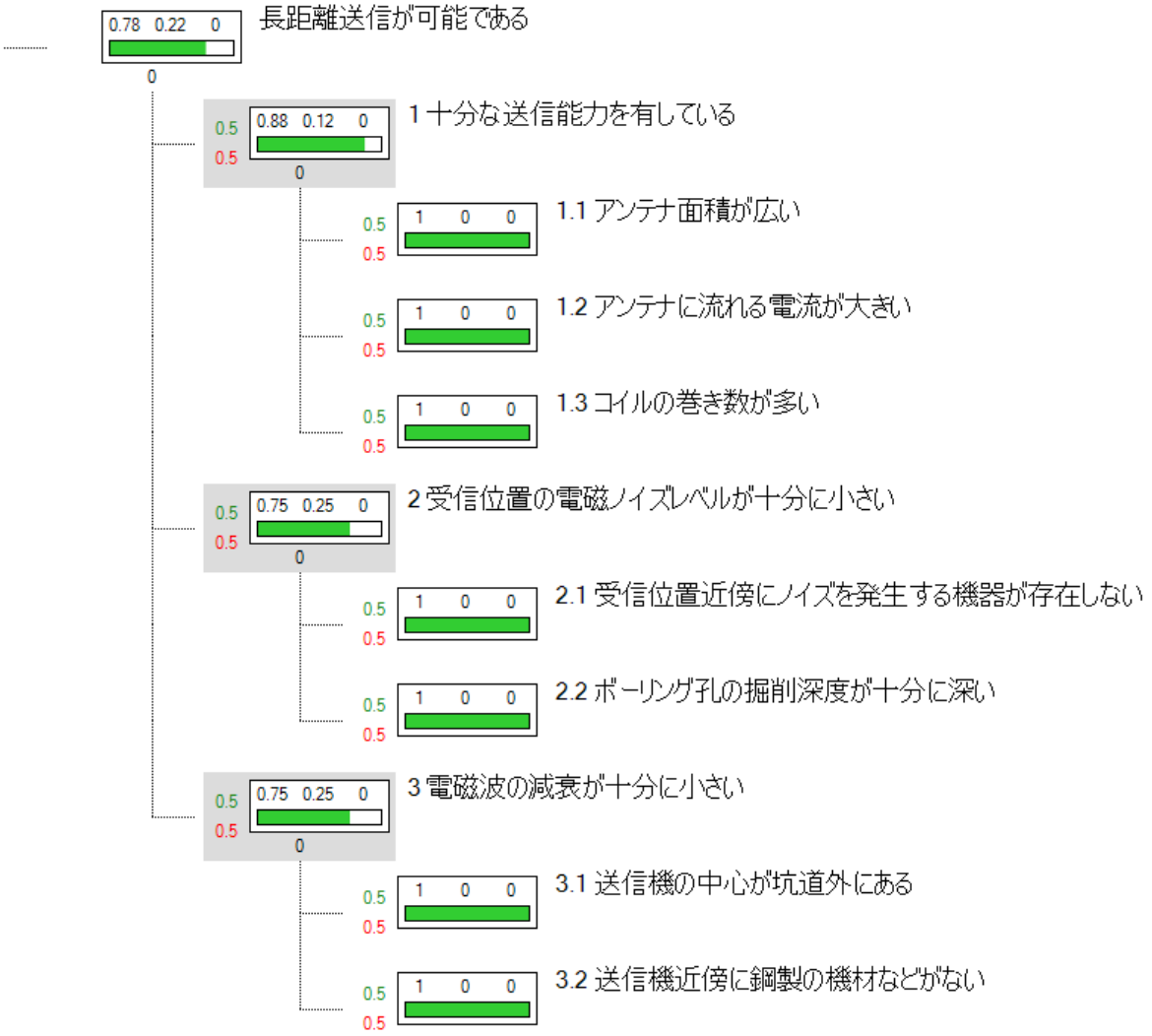


図 5.4.11-20　Uniform confidence plot（支持 100%）

5)　証拠の入力

証拠（支持、及び不支持）は下記の考えに基づき、設定した。設定時にはパラメータと同様に言語表現を用い、高（0.8）・中（0.5）・低（0.2）を適用した。また、高中低で表現しきれない場合は、+-で調整可能である。

以下に、3 種類の長距離送信の実現可能性の確からしさ（不確実性）評価に採用した証拠を示す。

①長距離送信試験 A

✓　「1.1 アンテナ面積が広い」は中継システム用のアンテナサイズであれば、坑道断面を考慮しても十分の大きさであると考えられるが、更に大きなアンテナも考えられるため、支持は中（0.5）、不支持は低（0.2）とした。

✓　「1.2 アンテナに流れる電流が大きい」は十分な耐圧性（現状の 3 倍程度）を有する機器があると考えられるが、未だ確認は出来ていないため、支持は中（0.5）、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「1.3 コイル巻き数が多い」は中継システム用のアンテナから増やすことは可能なため、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「2.1 受信位置近傍にノイズを発生する機器が存在しない」は基本的に可能と考え、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「2.2 ボーリング孔の掘削深度が十分に深い」は基本的に可能と考え、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 送信機を地上に置くため、「3.1 送信機の中心が坑道外にある」は十分に可能と考え、支持は高（0.8)、不支持は低-（0.1）とした。

✓ 送信機を地上に置くため、「3.2 送信機近傍に鋼製の機材などがない」は十分に可能と考え、支持は高（0.8)、不支持は低-（0.1）とした。

②長距離送信試験 B

✓ 「1.1 アンテナ面積が広い」は中継システム用のアンテナサイズであれば、坑道断面を考慮しても十分の大きさであると考えられるが、更に大きなアンテナも考えられるため、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「1.2 アンテナに流れる電流が大きい」は十分な耐圧性（現状の 3 倍程度）を有する機器があると考えられるが、未だ確認は出来ていないため、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「1.3 コイル巻き数が多い」は中継システム用のアンテナから増やすことは可能なため、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「2.1 受信位置近傍にノイズを発生する機器が存在しない」は基本的に可能と考え、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「2.2 ボーリング孔の掘削深度が十分に深い」は当初計画と異なるため、支持は低-（0.1)、不支持は中（0.5）とした。

✓ 「3.1 送信機の中心が坑道外にある」は困難なため、支持は低-（0.1)、不支持は中（0.5）とした。

✓ 「3.2 送信機近傍に鋼製の機材などがない」は可能性があるが不確かなため、支持は低(0.2)、不支持は低（0.2）とした。

③長距離送信試験 C

✓ 「1.1 アンテナ面積が広い」は中継システム用のアンテナサイズであれば、坑道断面を考慮しても十分の大きさであると考えられるが、更に大きなアンテナも考えられるため、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「1.2 アンテナに流れる電流が大きい」は十分な耐圧性（現状の 3 倍程度）を有する機器があると考えられるが、未だ確認は出来ていないため、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「1.3 コイル巻き数が多い」は中継システム用のアンテナから増やすことは可能なため、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

✓ 「2.1 受信位置近傍にノイズを発生する機器が存在しない」は基本的に可能と考え、支持

は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。

- ✓ 「2.2 ボーリング孔の掘削深度が十分に深い」は基本的に可能と考え、支持は中（0.5)、不支持は低（0.2）とした。
- ✓ 「3.1 送信機の中心が坑道外にある」は困難なため、支持は低-（0.1)、不支持は中（0.5）とした。
- ✓ 「3.2 送信機近傍に鋼製の機材などがない」は可能性があるが不確かなため、支持は低(0.2)、不支持は低（0.2）とした。

6) 解析の実行及び可視化

前述したパラメータと証拠の入力結果を踏まえ、ESL により実施した長距離送信試験 A の解析結果を図 5.4.11-21 に、長距離送信試験 B の解析結果を図 5.4.11-22 に、長距離送信試験 C の解析結果を図 5.4.11-23 に示す。これらの図より、主命題「長距離送信試験 A：長距離送信が可能である」の確からしさは、支持 62%、不確実性 12%及び不支持 26%となり、主命題「長距離送信試験 B：長距離送信が可能である」の確からしさは、支持 44%、不確実性 17%及び不支持 39%となり、主命題「長距離送信試験 C：長距離送信が可能である」の確からしさは、支持 48%、不確実性 17%及び不支持 34%となった。

長距離送信試験 A の Ratio plot による可視化結果を図 5.4.11-24 に、長距離送信試験 B の Ratio plot による可視化結果を図 5.4.11-25 に、長距離送信試験 C の Ratio plot による可視化結果を図 5.4.11-26 に示す。これらの図より、全てのケースにおいて主命題が支持の確度が高い（濃い緑）の位置に来ているが、支持の割合は長距離送信試験 A＞長距離送信試験 C＞長距離送信試験 B の順となっている。

よって、実際の原位置の試験は、図 5.4.11-27 に示すフローにて行うべきであることが言える。

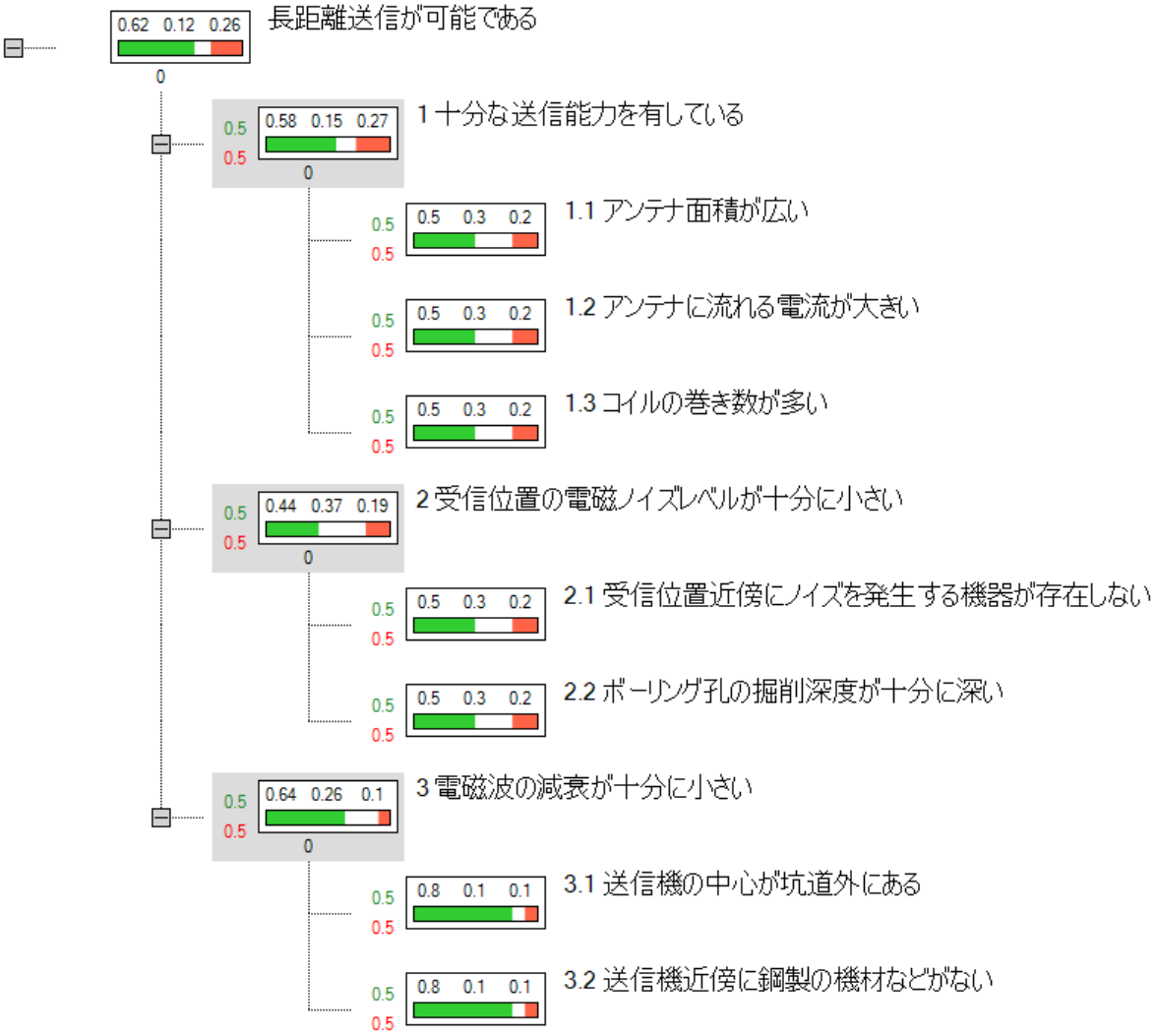


図 5.4.11-21　解析結果（主命題「長距離送信試験 A：長距離送信が可能である」）

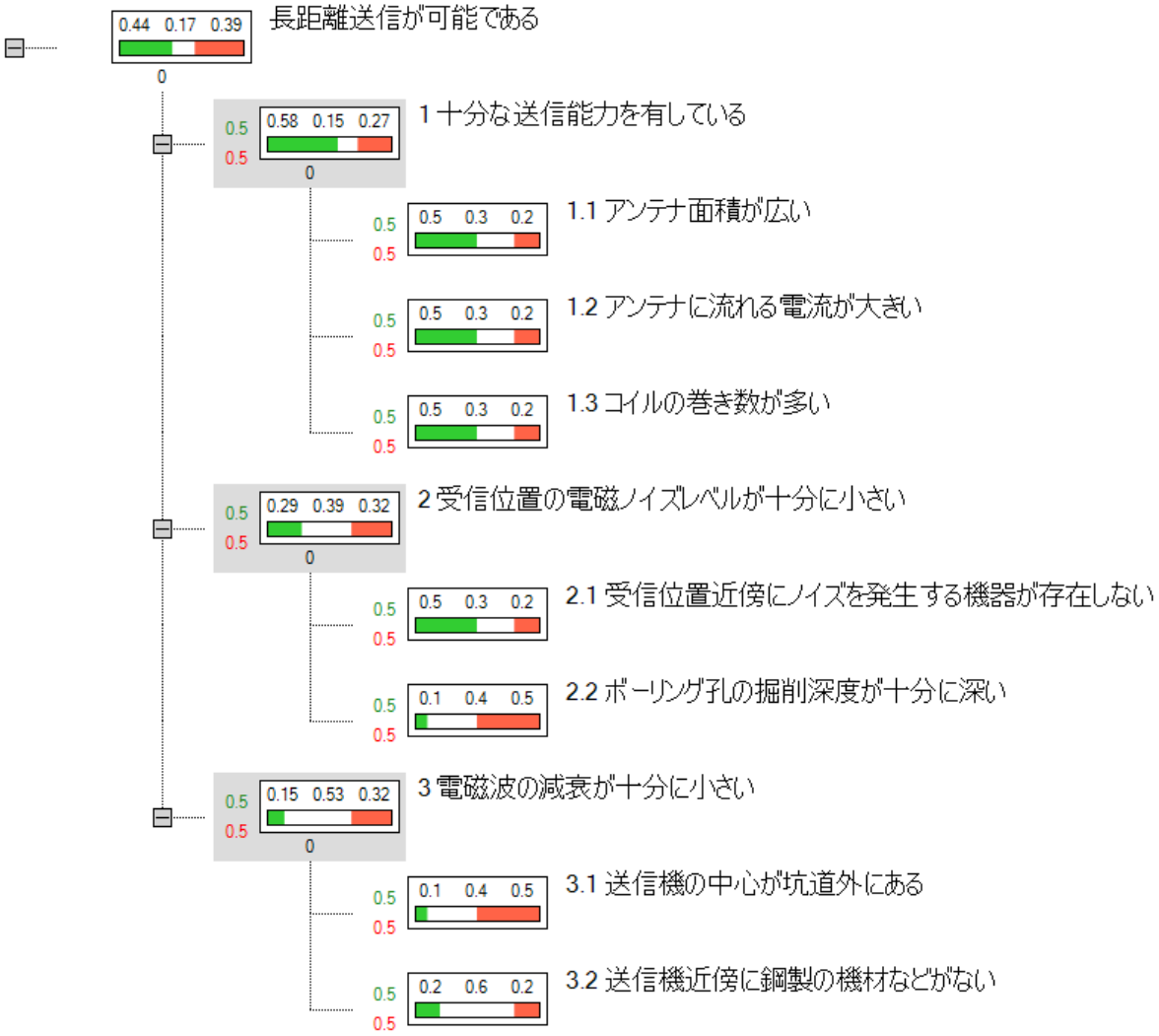


図 5.4.11-22　解析結果（主命題「長距離送信試験 B：長距離送信が可能である」）

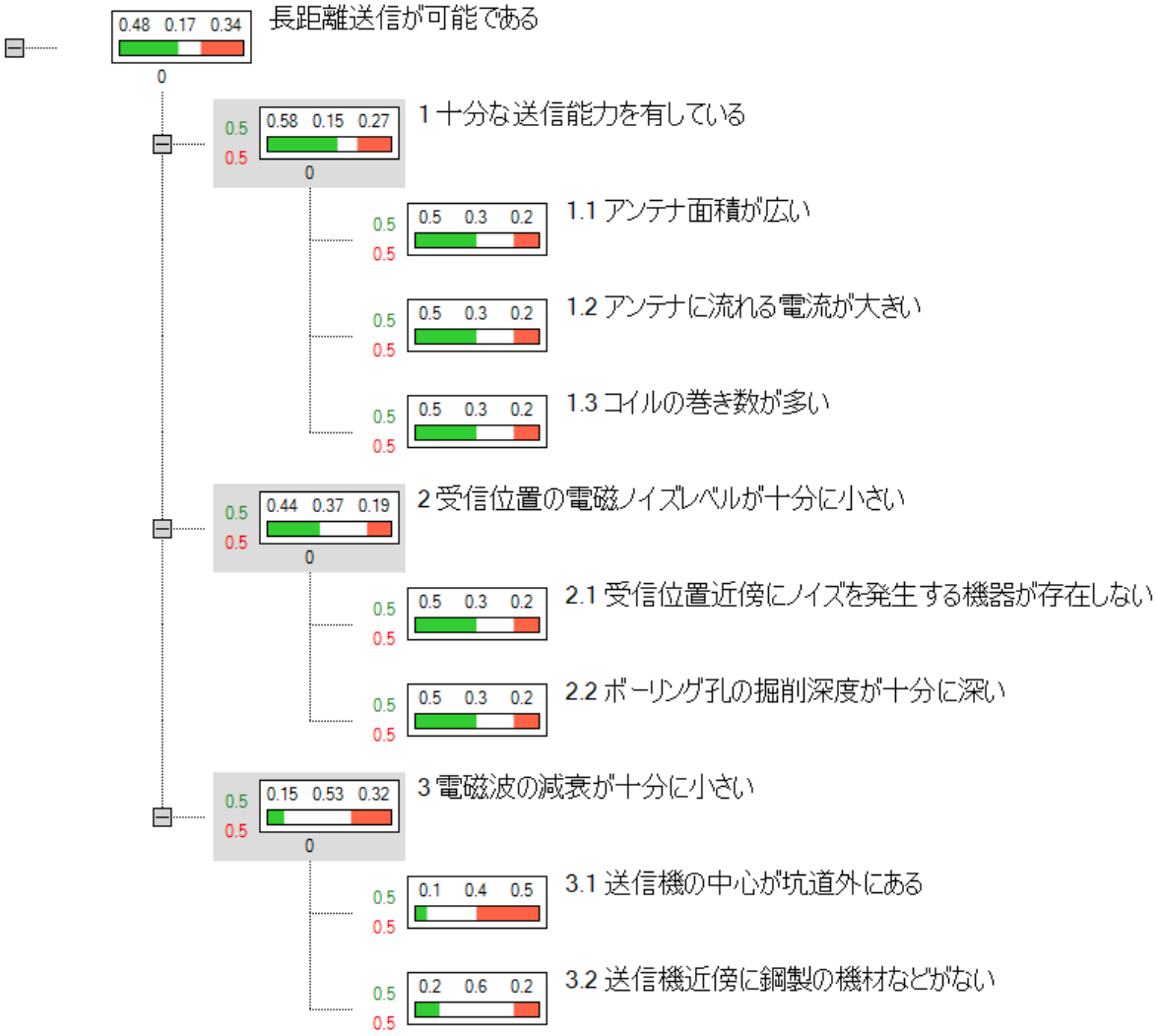
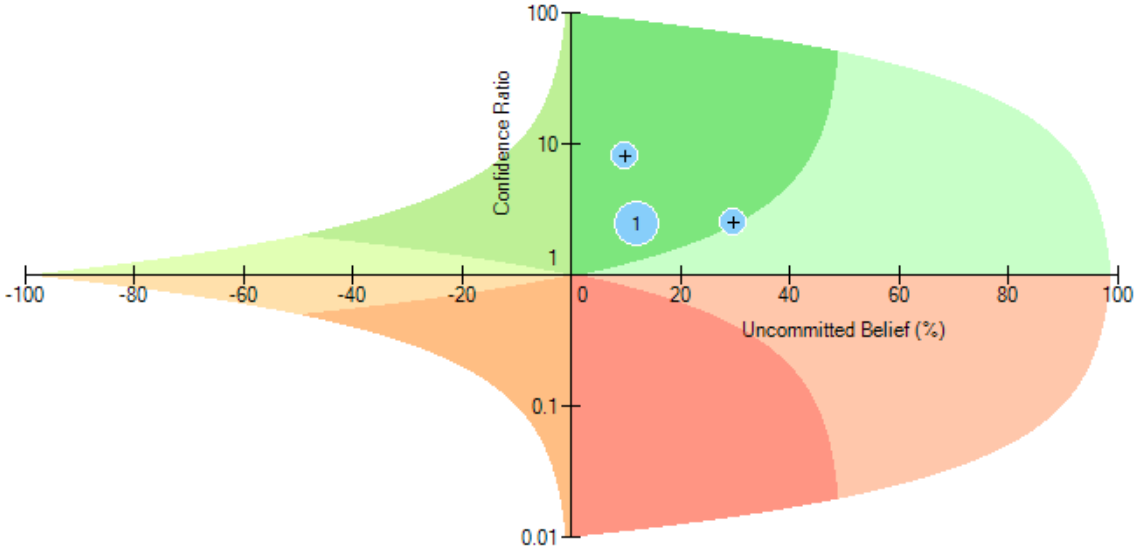
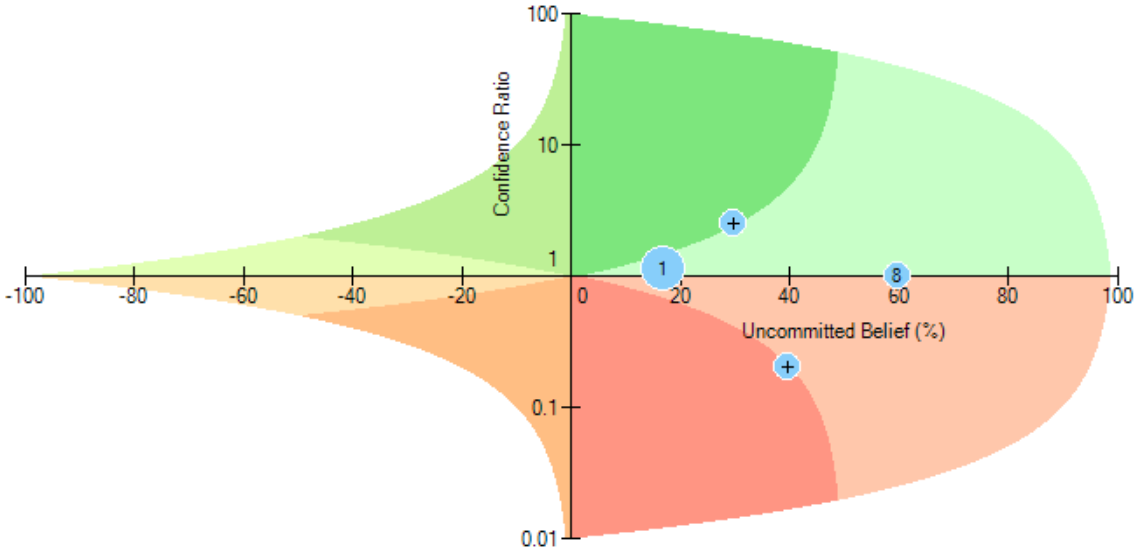


図 5.4.11-23　解析結果（主命題「長距離送信試験 C：長距離送信が可能である」）



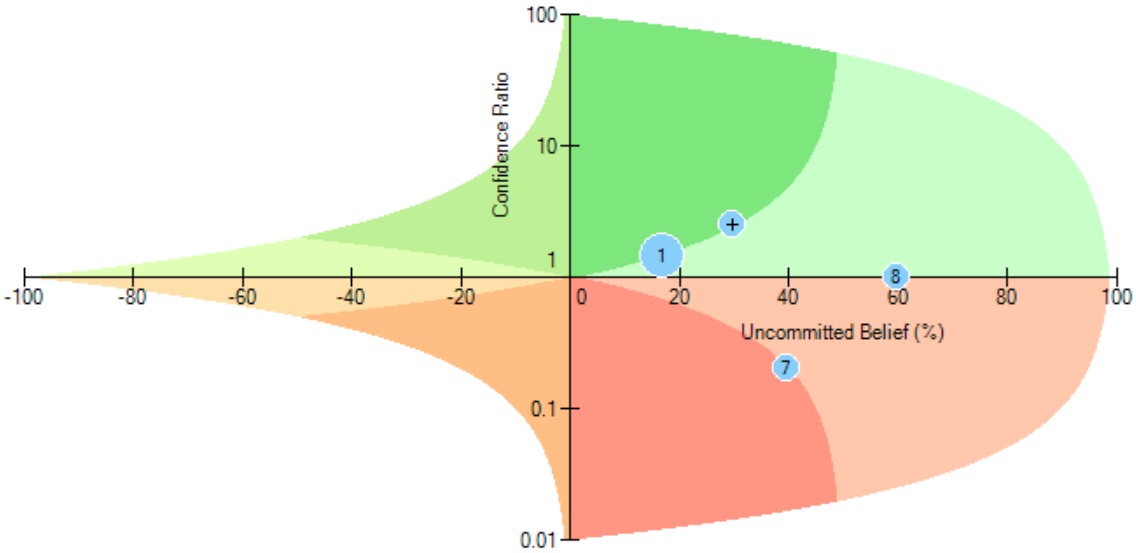
1： 長距離送信が可能である
2： 1.1 アンテナ面積が広い
3： 1.2 アンテナに流れる電流が大きい
4： 1.3 コイルの巻き数が多い
5： 2.1 受信位置近傍にノイズを発生する機器が存在しない
6： 2.2 ボーリング孔の掘削深度が十分に深い
7： 3.1 送信機の中心が坑道外にある
8： 3.2 送信機近傍に鋼製の機材などがない

図 5.4.11-24　Ratio plot（主命題「長距離送信試験 A：長距離送信が可能である」）



1： 長距離送信が可能である
2： 1.1 アンテナ面積が広い
3： 1.2 アンテナに流れる電流が大きい
4： 1.3 コイルの巻き数が多い
5： 2.1 受信位置近傍にノイズを発生する機器が存在しない
6： 2.2 ボーリング孔の掘削深度が十分に深い
7： 3.1 送信機の中心が坑道外にある
8： 3.2 送信機近傍に鋼製の機材などがない

図 5.4.11-25　Ratio plot（主命題「長距離送信試験 B：長距離送信が可能である」）



1： 長距離送信が可能である
2： 1.1 アンテナ面積が広い
3： 1.2 アンテナに流れる電流が大きい
4： 1.3 コイルの巻き数が多い
5： 2.1 受信位置近傍にノイズを発生する機器が存在しない
6： 2.2 ボーリング孔の掘削深度が十分に深い
7： 3.1 送信機の中心が坑道外にある
8： 3.2 送信機近傍に鋼製の機材などがない

図 5.4.11-26　Ratio plot（主命題「長距離送信試験 C：長距離送信が可能である」）

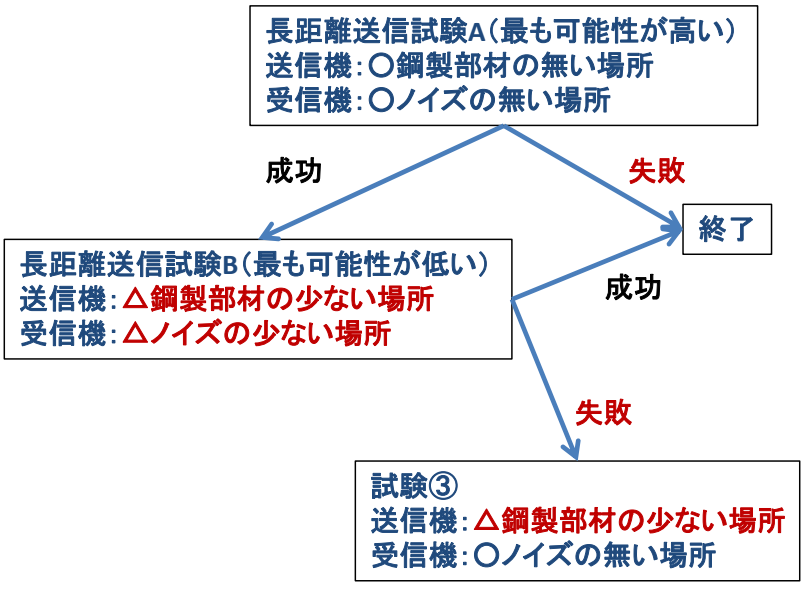


図 5.4.11-27　長距離送信試験の実施手順

(5)　地中無線 WS（2014 年 5 月開催予定）

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計画している。現状の議題を以下に示す。

詳細はワークショップ HP 参照のこと（http://www.wireless-2014.com/）。

1.Transmission over long distances in the solid and soft matter
  a.Relay Networks
  b.Technologies (Electromagnetism - Mechanical waves ...)
2.Energy
  a.Battery and energy storage
  b.Energy Recovery
3.Integration of systems and sensors
  a.Connections - sensor interfaces to the transmitter
  b.Noise management on the wireless signal
  c.Integration in the employment environment - formatting for monitoring storage - miniaturization / reducing the intrusiveness

5.5　まとめと今後の課題

本章では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。

モニタリング技術の到達状況と故障検出

ここでは、原環センターが参画した国際共同研究 MoDeRn において抽出されたモニタリング技術に関する到達状況と課題、故障検出に関する検討の概略を述べた。現在のモニタリング技術の課題として、処分環境へのセンサの適応に関し、モニタリング機器の耐圧性、耐食性、耐放射線性という主に材料や製作上の工夫により克服される課題と、処分環境で適用できる信頼性と安定性のある pH センサの開発の必要性等のより原理的な部分での課題が存在する。また、原環センターが開発している低周波の電磁波を用いた地中無線通信技術については、エネルギー要求量や無線ネットワークへの適性 について課題を有する。モニタリング機器の故障については、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。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。

地中無線モニタリング機器の開発課題の再検討

本年度はこれまでに抽出した開発課題を再検討した。開発課題の再検討においては、先ず第 2 フェーズでの開発成果を踏まえ、先ず、最終的な適用イメージを設定すると共に、各適用イメージにおける課題と開発項目を抽出した。そして、原位置試験を考慮し他機関との共同研究も踏まえ、課題の克服のし易さや、モニタリングの枠組みに関する検討との関係を考慮した上で優先順位の重みづけを行った。その結果、地中無線による長距離通信試験の実施、地中無線中継装置のネットワーク化や地中無線装置に用いる電源の検討等の課題を優先性の高い課題と位置付け、年度ごとの計画を立案した。

地中無線中継試験の実施

地中無線モニタリング技術については、予め抽出した課題に基づき段階的に開発を実施している。昨年度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。

地中無線中継装置等の耐圧化に関する検討

処分坑道の埋め戻しが行なわれる環境での中継に必要な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（有限要素法）解析を実施し、10MPa の静水圧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用水分計アダプタの開発

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。開発した水分センサ付小型送信機については 0～50℃における耐熱性、耐振動性を確認した。水分センサ接続アダプタの開発により、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。

人工バリア性能確認試験及び冠水試験への地中無線の適用準備

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確認試験、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いる。本年度はこれらの試験のための準備として、人工バリア性能確認試験における地中無線でのモニタリングに関し、周辺の状態（支保部材、センサ、ケーブル設置状況など）を考慮した機器の配置案を検討するとともに装置の製作を行った。また、冠水試験実施予定箇所の電磁ノイズレベルを確認し、地中無線でのデータ送信が可能であることを確認するとともに装置の製作を行った。

地中無線の電源に関する文献調査

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、本年度は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。温度差による発電については、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ものと考えられる。このため、廃棄体から離れたエリアで地中無線技術を適用する場合において、放射性同位体熱電気変換器を用いることが可能であると考えられる。また、電磁波による電源力供給については、磁気共鳴方式が 1～2m 程度までの距離を大きな電力を伝送するのに適しているが、電力供給可能な距離について課題を有している。

地中無線用電池の耐熱性評価試験

地中無線モニタリング装置を廃棄体近傍(または模擬廃棄体近傍)において使用するためには、装置の耐熱性を確保する必要がある。このため、温度により大きく影響を受けると考えられる電源（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。

ビュール地下研究所における長期モニタリング

原環センターでは地中無線モニタリング装置の開発について、フランスの ANDRA と共同研究を実施している。平成 23 年度から実施している、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については、間隙水圧計のモニタリング結果から緩衝材がほぼ飽和状態にあること、温度坑内温度の影響を受けつつも地温に漸近していること等を確認した。

ビュール地下研究所における長距離通信の検討

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、本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)を用いて評価した。その結果、地上の送信機から地下坑道に掘削したボーリング孔中の受信機への送信が最も実現性が高く、地下坑道の送信機から地上より掘削したボーリング孔中の受信機への送信がこれに次ぐ実現性を持ち、地下坑道の送信機から地上の受信機への送信が最も実現性が厳しいとの評価結果となり、この順番で試験を実施すべきと結論した。

今後の課題

今後の課題については、センサに関する課題、伝送手段に関する課題、システムとしての課題に分類できる。処分環境へのセンサの適応に関しては、耐圧性、耐食性、耐放射線性という共通的な課題があるが、モニタリングパラメータと測定原理により多様なセンサがあるため、自らがセンサ開発を行うのではなく、海外の実施機関が地下環境での試験等に選定するセンサ等を継続

的にウォッチングし、有望なセンサを選定すべきと考えられる。

地中無線モニタリング技術については、本年度、課題を再検討し、地中無線による長距離通信試験の実施、地中無線中継装置のネットワーク化や地中無線装置に用いる電源の検討等の課題を優先性の高い課題と位置付け、年度ごとの計画を立案した。

モニタリングシステムの課題としては、センサや伝送経路の故障を考慮した、頑健性、冗長性のあるシステムを検討する必要がある。このためには処分環境で適用可能な各種のセンサの選定と共にこれを多重化し、必要なモニタリングデータを確実に取得できるようにするとともに、有線の伝送経路、無線による伝送経路ともにメッシュ型のネットワーク化等により、データ伝達経路に故障が起きた場合にもデータを送ることができるシステムを検討する必要がある。

また、技術開発成果については地下研究施設等での検証を実施する必要があるものと考えられる。地下研究施設での地中無線モニタリング技術の検証においては（独）日本原子力研究開発機構及びフランス ANDRA との共同研究により実施することを計画している。また、地中無線モニタリング技術の開発の一部はフランス ANDRA との共同研究により実施することを計画している。

第 5 章参考文献

[1] International Atomic Energy Agency: Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste, IAEA-TECDOC-1208, (2001).

[2] MoDeRn:State of Art Report on Monitoring Technology, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)

[3] 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).

[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 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 （2014）

[5] MoDeRn:Case study final report, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)

[6] Weiler (2001): Selbsttest und Fehlertoleranz mit zugelassener milder Degradation in integrierten CMOS-Sensorsystemen, Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität-Gesamthochschule Duisburg, Fachbereich Elektrotechnik, Essen.

[7] Yung, S.K. (1992): Signal Processing in Local Sensor Validation, Oxford University, Ph. D. Thesis.

[8] Yung, S.K. (1992): Local Validation of Sensor Signals, Fault Diagnosis and Control Systems, IEEE Colloquium 125, p. 7.1-7.8, London.

[9] MoDeRn: Seismic Tomography at Grimsel Test Site, http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/, (2013)

[10] 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).

[11] 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).

[12] 一次電池の参考、http://www.baj.or.jp/knowledge/feature.html

[13] 電池の種類、http://www.baj.or.jp/knowledge/type.html

[14] 電池の種類と用いる化学反応式、http://www.baj.or.jp/knowledge/structure.html

[15] 山路達也の「エコ技術研究者に訊く」、http://archive.wiredvision.co.jp/blog/yamaji/201003/201003261201.html

[16] 日本経済新聞、2014 年 1 月 9 日、新型電池、実用化にメド　携帯電話なら 1 カ月
[17] 武藤佳恭、小路幸市郎、瀬戸口広樹：温度差発電の仕組みと実証事例、電気計算 2012.8
[18] Wikipedia、ゼーベック効果
[19] Wikipedia、海洋温度差発電
[20] Wikipedia、非接触電力伝送
[21] 福田昭、Trancducer2007 レポート 100 年間使える超小型電池でバッテリ交換を不要に
[22] Sara Harrison：Betavoltaic Devices,
http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/harrison2/
[23]Wikipedia、放射性同位体熱電気転換器
[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]　中山雅，澤田純之，棚井憲治，杉田裕：幌延 URL における人工バリアの性能確認試験(1)試験計画の全体概要、日本原子力学会「2013 年春の年会」、2013 年 3 月
[28]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)
[29]　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.
[30]　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および今後の計画−、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.
[31] 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).
[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 6 章　記録保存に関する調査

6.1 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。

平成 25 年度は、地層処分の実施主体等の関係機関が，記録保存に関する具体的計画を策定する際の選択肢・判断材料を提示するための，システム案の整備に資することを目的とし，記録保存に関する制度等の最新動向を調査した。

調査対象には，以下の内容とした。

① OECD／NEA における検討状況
② 英国 NDA が発行した安全評価書 DSSC(The Disposal System Safety Case)に係る記録保存方策の調査・整理
③ 内閣府による「公文書管理法」に関連した運用方法文書の調査・整理

6.2　OECD／NEA における検討状況

OECD/NEA の放射性廃棄物管理委員会（以下，「OECD/NEA-RWM」）では 2009 年 5 月に Preserving Information and Memory Across Generations: Proposal for A Dedicated Initiative and A Specific Project と題されたプロジェクト提案を行い，現在まで検討が進められている。

本年度は，昨年度調査以降に公開された本プロジェクトに関する文書を調査し，その概要を 1 件 1 葉で整理すると共に，わが国の地層処分事業における今後の記録保存方策において有益と考えられる情報については，その内容を取りまとめる。

現在までに下記の文書が公表されており，平成 25 年度は，このうち，⑧～⑫を中心とした調査を行った。

表 6.2.1-1　OECD/NEA 発行文書及び本年度対象

No.	発行年	文書名
①	2009 年 3 月	Preserving Information And Memory Across Generations: Proposal For A Dedicated Initiative And A Specific Project
②	2010 年 6 月	Long-Term Preservation Of Information And Memory:Summary of a topical session held at the 43rd meeting of the RWMC, 25 March 2010
③	2011 年 10 月	A vision for the RWMC project on “Preservation of RK&M across generations ”
④	2011 年 11 月	Preservation of Records, Knowledge and Memory Across Generations, Reference Bibliography within NEA RKM Project
⑤	2011 年 11 月 2012 年 10 月(rev.1)	NEA Project on Long-term Preservation of Records, Knowledge and Memory (RKM)- Glossary of Key Terms
⑥	2012 年 6 月	The Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations Workshop Proceedings - 11-13 October 2011 NEA Headquarters, Issy-les-Moulineaux (France)
⑦	2012 年 6 月	The RK&M Project of The NEA/RWMC Progress Report March 2011- March 2012
⑧	2013 年 6 月 21 日	Progress Report of the Project on Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations March 2012 – March 2013[4]
⑨	2013 年 3 月 27 日 2013 年 4 月 12 日 (rev.1)	Proposed Adenda of the 4th Meeting of the RWMC Project on the “ Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations ” 16-18 April 2013, OECD Headquarters, Paris (France)[5]
⑩	2013 年 6 月 21 日	Summary Record of the Fourth Meeting of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations project 16-18 April 2013, OECD Conference Centre, Paris (France)[6]
⑪	2013 年 3 月 26 日	“ Minimal Set of Records ” Initiative-Vision Document[7]
⑫	2013 年 9 月 20 日	Proposed Adenda of the Meeting of the OECD NEA Radioactive Waste Management Committee “ RK&M ” Project 24-26 September 2013 NEA Premises, Issy les Moulineaux (France)[8]

注記　⑧～⑫を本年度調査対象とした。

6.2.1　OECD/NEA における記録保存に関する検討の目的

OECD/NEA の放射性廃棄物管理委員会(OECD/NEA-RWMC)では 2009 年 3 月に Preserving Information and Memory Across Generations: Proposal for A Dedicated Initiative and A Specific Project と題されたプロジェクト提案を行った。

本プロジェクト目的としては、下記が挙げられている。

- 記録、知識及び記憶(records, knowledge and memory : RK&M)の保存において、各国のギャップを明確にすることを目的に報告済の作業と対象範囲を目録化し、定期的に更新する。誤解を避けるため言葉の定義を明確にする。
- 処分プロセスの異なる段階を評価し、長期にわたって収集・伝承されなければならないデータや背景情報(contextual information)を明らかにする。
- 情報の選定基準と記録方法について議論しとりまとめること。記録保存の失敗例を分析し、代替及び是正方法を明確にする。
- 全ての時間枠において RK&M の損失に繋がる理由とプロセスを系統的に明らかにし、潜在的な緩和方策を策定する。さらに、この課題に関して様々な分野での研究を助成する。

上記の今後の検討内容のうち、例えば、長期に保存すべき情報や背景情報(contextual information)の明確化や記録保存に失敗した際の代替及び是正措置の方法については、今後の記録保存方策の策定を行なう上で重要となると考えられる。

6.2.2　RK&M プロジェクトの目的・背景

上記のプロジェクトの提案を受けて、2010 年 3 月の RWMC のトピカルセッション会議でさらに検討が進められ、2011 年 3 月、世代を超えた記録、知識、記憶の保存（Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across generations）プロジェクト（以下、RK&M プロジェクトという。）が正式に発足した。

現在、OECD/NEA に参画している国々は、高レベル放射性廃棄物・長寿命放射性廃棄物・使用済燃料の地層処分の計画を進めている。これらのプロジェクトを実行するには何十年もの年月を要し、何千年もの間安全に地層処分場を操業する必要がある。最終的な放射性

廃棄物の管理については、それぞれの国が異なった段階にあるがすべての国で以下の問題が挙がっている。

- ◆ どの記録を保存すべきか
- ◆ 保存の目的
- ◆ 保存のタイムスケール
- ◆ 実施者
- ◆ 対象者
- ◆ 管理、技術、法律、規制の観点から記録、メッセージ、アクセスを最大限維持するには今なにができるか
- ◆ 必要な作業量、作業内容、作業時期

これらの問題を検討すべく、OECD/NEA の RWMC は RK&M プロジェクトを立ち上げ、2014 年に最終報告書を作成し出版する予定である。2012 年 6 月現在、12 ヶ国からの 16 機関及び IAEA が参加し、欧州委員会（EC：EU の政策執行機関）の賛助を得ている。

また RK&M プロジェクトでは、各国の放射性廃棄物処分計画において記録、知識、記憶の保存が必要な理由として以下があるとしている。

- ◆ システムの安全性と安全保障における信頼を維持する規制当局によるレビューのため
- ◆ 公衆、とりわけ地元社会からの要請を明らかにし、それらに応えるため
- ◆ 将来世代による意思決定が適切なデータに基づいて行われるように保証するため
- ◆ 過去の活動に関する理解促進のため

6.2.3　本年度調査結果

(1) 調査対象文献の概要

表 6.2.1-1 に示した昨年度以降に OECD/NEA/RWM より発行された文書（⑧～⑫）について，各文書の概要を 1 件 1 葉の形式で表 6.2.4-1～表 6.2.4-5 に示す。

この結果より，特に有益と判断された文書は，以下の 3 件（⑧、⑩、⑪）であることから，これらについて次項以降でその内容を取りまとめた。

- ・ 2012 年 3 月−2013 年 3 月までの活動報告書
- ・ プロジェクトミーティング（2013 年 4 月に開催）のサマリ

・ 記録すべき最小限の内容を検討するための活動方針

(2) 2012 年 3 月−2013 年 3 月までの活動報告書

本プロジェクトの現段階の優先事項は、現時点のスコーピング作業を完成させ、それを文書として纏めることである。2012 年から 2013 年にかけて次のミーティング及び活動を実施済みまたは実施する予定である。

・ プロジェクトミーティング（2012 年 4 月開催）
・ 第 2 回ワークショップ（2012 年 9 月開催）
・ プロジェクトミーティング（2013 年 4 月開催予定）
・ 第 3 回ワークショップ（2013 年 9 月開催予定）

2010 年に発行された活動計画書（Vision Document）[1]で言及されているように、本プロジェクトは RK&M の保存に関する戦略的実施計画の内容を記した最終報告書（メニュー形式文書：Menu-driven document、以下「MDD」という）完成に向けて取り組んでおり、最終報告書は 2014 年に発行する予定である。

1）第 2 回ワークショップ（2012 年 9 月開催）について

RK&M の第 2 回ワークショップが、2012 年 9 月 12～13 日にフランスの OECD/NEA の本部で開催された。

政府機関、大学、廃棄物管理機関、安全機関、地域団体、技術・社会科学の専門家、OECD/NEA、IAEA、UNESUCO から 11 か国 50 名が参加した。

ここでは 31 の発表が行われ、下記の 8 分野に関する議論がなされた。

・ 規制
・ 文献集
・ 記録及びアーカイブ
・ 監視（Oversight and Monitoring）
・ 知識及び知識管理
・ 契約（Engagement）
・ 費用
・ 超国家的なメカニズム

2) “記録すべき最小限の内容”の概念の確立

2012 年 4 月のプロジェクトミーティングにおいて、記録すべき最小限の内容の概念を確立すべきであるという合意に達した。記録すべき最小限の内容とは、次世代が処分場であると認識できる最も簡潔な記録のセットである。この選定方法を確立するには、まず、将来の社会がどのようになっているかに依らず、次世代は何を知る必要があるのか、記録が示すメッセージは何か、ということを解決しておく必要がある。

なお、本件の報告書は、2013 年 9 月に開催されるワークショップで発表される予定である。

3) 進行中の研究

本プロジェクトに関して以下の 6 つの委託研究が行われている。

① 文献集の分析
② 地層処分場のマーカーに関する文献調査
③ 地層処分場施設の技術モニタリング
④ 中期的な記録、知識及び記憶の保存を支援するための超国家的な（二か国以上が関与して一国を超える権威を有する）メカニズム
⑤ モニタリング、知識及び記憶の保存、信頼性との関係における地域コミュニティの立場に関する研究
⑥ 埋立て地及び過去の汚染サイトの記憶喪失に関する予備調査

4) 2013 年 4 月開催予定のプロジェクトミーティングについて

2013 年 4 月開催予定のプロジェクトミーティングで議論する予定の項目は以下の通りである。

- 年次報告
- 2012 年 3 月に開催された RWMC ミーティングからの報告
- 2012 年 9 月のワークショップのプロシーディング
- 2012 年 9 月のワークショップから得られた主な知見
- 用語集の更新版
- 規制の項目一覧

- 委託研究の結果
  - 文献集の分析
  - モニタリングと記憶：ステークホルダーの要望
  - モニタリングと記憶：実施の可能性
  - 超国家的な（二か国以上が関与して一国を超える権威を有する）メカニズム
  - 記憶の喪失と回復
- 記録すべき最小限の内容の選定方法を確立するための研究プロジェクトに関する議論
- MDD-Wiki（情報の集積に便利なウェブ・プログラムの形態。例、Wikipedia）についてデザインのデモンストレーションと議論
- その他の提案に関する議論

(3) プロジェクトミーティング（2013 年 4 月に開催）のサマリ

RK&M の第 4 回プロジェクトミーティングが、2013 年 4 月 16～18 日にフランス、パリの OECD 本部で開催された。12 か国から 22 名、IAEA から 1 名、OECD/NEA から 4 名が参加し、32 の発表が行われた。

本報告書は、第 4 回プロジェクトミーティングのサマリ報告書である。発表資料は、RK&M プロジェクトの内部関係者のみ閲覧可能である。以下、本ミーティングの概要を記す。

＜1 日目＞

1. **イントロダクション及び進捗状況の報告**

本プロジェクトの背景、目的、ミッション声明書の概略説明があった。

2. **第 2 回ワークショップ（2012 年 9 月開催）のプロシーディング**

第 2 回ワークショップでは、2012 年 9 月 13-14 日に開催され、11 か国から 50 名の参加があった。34 の発表があり、多様な議論が展開された。

3. **用語集及び文献集**

文献集に IAEA の報告書等の文献を追加した。

用語集は、「知識（Knowledge)」の定義を以下のように更新[3]し、合意を得た。

知識 knowledge	利用可能なデータ(data)、情報(information)、記録(record)を理解し、活用する能力 知識は、教育、学習又は経験を通じて得られた、熟知(familiarity)、認知(awareness)又は理解に依存する。

↓

知識 knowledge	学習プロセスの結果。一度特定の分野で習得すれば、知識は洞察とスキルを与える。それは、利用可能なデータ(data)、情報(information)、記録(record)を理解し、解釈し、活用する能力に繋がる。 **合成表現** ● 知識の保存：特定の分野における知識を保存するためには、その分野における学習プロセスを維持または作り上げることである。中期間にわたる例は、大学の理事長（University Chair）の融資することである；中期にわたるもう一つの例は、次世代へスキルの伝承を促進することである。 知識の再構築：長期間にわたり、興味が薄れるにつれ知識は必然的に希釈される。知識の再構築には道具／機会（tools / opportunities）を作り出すことが必要である。例えば、ロゼッタストーンは古代エジプト語の知識を再構築するための良い道具であると証明されている。

4. UNESCO デジタル記憶カンファレンスの報告

UNESCO デジタル記憶カンファレンスで RK&M プロジェクトの発表を行った。なお、本プロジェクトは、CoData（Committee on Data for Science and Technology、国際的に共通な基礎物理定数を定期的に提供している。http://www.codata.org/）のリスク時データタスクフォースと共同で進める。

5. UNESCO デジタル記憶カンファレンスのプロシーディング

UNESCO カンファレンスのプロシーディングでは、データの保存よりもデジタル化されたデータへのアクセスに焦点が当てられていた。また、特出すべき点は、検討中の時間スケールが RK&M プロジェクトと非常に異なり、検討されている長期間は、わずか数 10 年であるということである。

ただし、デジタル化については、RK&M プロジェクトにおいても重要視しているという点では共通している。

6. 議論

アクセスと保存の区別に関する議論を行った。情報にアクセスする手段を作ることはその情報の価値を高めることになる。アクセスと保存のどちらに焦点を当てるかは、RK&M をなぜ保存するかという疑問に立ち返ることと関連している。本件については精緻していく予定である。

様々な団体で記録について興味のある特定のセクションを部分的に保存することが提案された。

E-アーカイブは目に見える情報を増やすことができる。この問題についても焦点を当てることが提案された。

「集合記憶（Collective Memory)」の概念、インターネットをベースにしたデジタル化及び貯蔵システムの使用が議題に上がった。情報の信頼性、つまりデジタル・フィンガープリント（メールやデジタル証明書が改竄されていないか確認するためのデータ）のような技術革新に関する問題点があるかどうか問われた。

自由にオンラインで利用可能な記録をするメリットについて、以下の 3 つの重要なポイントが挙げられた。

- アクセスしやすさの利点：アクセスしやすい情報は思い出すことや保存することが容易である。
- 信憑性の問題：記録は今でもハードコピーによる裏付けと内容変更に対する保護が必要とされている。
- セイフガードの問題：一般市民はすべての記録にアクセスできる許可を与えられているわけではない。

記録を保管することは単なるアクセスの問題ではなく、人々がその情報を理解する必要がある。廃棄物のインベントリは、他の情報や知識なしで解釈することは容易ではない。

7. アーカイブ及びデジタル・ライブラリー

SKB のアーカイブのアプローチとプロセスの概要が紹介された。

ここで、重要なことは、有用なアブストラクト（複雑な情報を説明し纏めたもの）が必要であるということである。システムにおいて異なる要素を繋ぎ合わせること、

及びシステムの検索機能が強調された。

システムは ISO 基準に基づいている。これは国立公文書館（national archives）との整合性は保証されており、将来のデータ移行の単純化、データ喪失に対する安全性が確保されている。

また、デジタル・ライブラリの有用性についても議論された。明らかなことは、短期的な戦略はあるものの、その後、長期的にはどのように準備するのかという問題がある。

システムに関して国立公文書館と同様の基準を採用することは、長期的な計画立案及び移行の計画立案の一環であり、読み易さや継続的なアクセスを保証する手助けとなる。このため、国立公文書館の基準を採用することが望ましいということで合意した。

政府機関や地方自治体はより快適に情報を移行できるようにし、新たなデータのアプローチや保管方法を模索しており、今よりも相互運用可能で標準化された管理を目指している。

また文書による記録だけではなく、例えば映像やフィルムでの保存も検討すべきである。

8. マーカー及び記憶保存に関する文献調査

研究の進捗状況が説明された。研究成果は、2013 年 9 月のワークショップまでにまとめる予定である。

9. 津波マーカーの研究

報告書のドラフト更新版（本報告書は 2013 年 9 月のワークショップまでに公開する予定。）が説明され、今後の方針が示された（議論については下記 10. 参照）。

出典：MoDeRn サイト（http://nuclear.artscatalyst.org/content/report-modern）

図 6.2.3-1 津波マーカーの例

10. マーカーに関する議論

津波マーカーに関する議論では、その利用可能性よりむしろ、処分場の記憶を呼び起こすための方策、例えば、地名を変えることは可能かどうか議論された。

具体的に、エストハンマル自治体（スウェーデン）では地名の変更について提案されている。

なお、地名は人々にとって、非常にアイデンティティに影響を与えるものであり、公衆の合意を得ることは非常に難しいが、記憶保存の観点においては、有益な方法であるとされた。

この議論の結果を受け、津波マーカーの研究に関しては、ケース・スタディとしては利用可能であるが、むしろ、津波マーカーの事例から得られら知見に基づく別の研究として進めることとされた。

11. モニタリング、知識及び記憶の保存、信頼性との関係における地域コミュニティの立場に関する研究

委託研究では、施設の受入先の社会の要望について調査が行われている。

この議題については、一般的な見解として、各国でばらつきがあり、地域からの正式な要求または地域との議論があった事例はほとんどないが、モニタリングについては関心がある。また、パイロット施設の概念について議題に上がった。

12. 監視（Oversight）の概念

監視（Oversight）の概念について RK&M プロジェクトからのからの知見を発表した。

13. 監視とモニタリング（Oversight and Monitoring）

監視とモニタリングを成功に導くためには、ベースライン情報が重要であることで一致した。

また、監視とモニタリングの責任の所在や誰のために実施するかなどの議論も行われた。処分場を受入れる価値は金銭面であるべきか？何も起こらなかった場合、監視とモニタリングの必要性は低下していくのか？などが議論され、処分場が本来受動的安全性によって公衆を防護するものであり、能動的安全性（積極的なモニタリングなど）とは区別されることなども議論された。

さらに RK&M プロジェクトとモニタリングとの関連性についても議論が行われた。

14. 記録すべき最低限の内容

本件に関するヒアリングを行う対象者について議論した。この結果、各国で最大 10 名程度を推薦することとした（ただし、具体的に「記録すべき最低限の内容」の中身まで議論するに至ってない)。

ヒアリング対象者の範囲に焦点を当てるべきである。また言葉の壁があるとヒアリング内容を書き写し翻訳するために追加の費用がかかる。実施上の問題点は、研究設計の段階で出てくると考えられる。

15. 1 日目終わりの挨拶

＜2 日目＞

16. イントロダクション

17. 埋立て地及び過去の汚染サイトの記憶喪失に関する予備調査

本調査の概要についての説明があった。調査に関して最も大きな問題は、喪失の理由を記載したファイルへのアクセスが困難なことであり、この報告書は、記録の

保存に関する問題点を提起するものである。

18. 世代を超えて知識を保存する際の困難

Asse II 岩塩坑（ドイツ）における記録の喪失の概要と鉱山に関する知識及び記憶の再生の必要性に関する事例紹介が行われた。

ここで得られた問題点としては、鉱山での現在の作業を行うにあたり、オリジナルの文書では不十分であることがあげられた。すなわち、継続的な文書管理や記録の変更する際のシステムがないこと、詳細な記録の喪失及び利用可能なすべての文書が揃っていない。

19. 記録と記憶の喪失に関する議論

RK&M の喪失について建設的に話をするために外交関係の配慮が必要である。

これらの問題は今日どの程度関連しているのかという質問が出て、記録の維持の重要性への関心が高まった。

記憶の喪失の十分な例が明らかになりつつあり、異なるタイプの記憶喪失を表している場合は、新しいものを追加すべきである。

“喪失”とは、相対的な用語である：記憶は後に必要とされた場合に、記憶は“喪失”されたとされるだけである。

20. 規制要件のまとめ（Regulatory Catalogue）

ここでは、各国の記録保存に関する規制要求事項がまとめられている。これについては、更なる分析と品質管理の必要性が強調された（議論については下記 21. 参照）。

21. 規制要件のまとめに関する議論

ここでは、規制要件のまとめ（Regulatory Catalogue）について、下記の意見があった。

- アクセス可能性
- 記述方法へのコメント
- 現在のエクセル形式から MDD Wiki への移行
- 法律比較の際の基準を記した文書（note）の作成

22. 中期的な記録、知識及び記憶の保存を支援するための超国家的な（二か国以上が関与して一国を超える権威を有する）メカニズム

国家間の記録管理メカニズムは、RK&M の保存に有用であるが、特定の期間、継続維持することはできない可能性があるとの意見があった。

23. 超国家的なメカニズムに関する議論

「マルチレベル」のアプローチの重要性が強調された。専門家の意見を取り入れた枠組みとして国際協定を用いることとした。

スペースデブリ（宇宙ゴミ）と放射性廃棄物の類似点について議論があった。両者ともテクノロジーの影響を考慮する必要があり、処分した記憶を維持していく必要がある。

超国家的なメカニズムは、地層処分場の記録の保存に関与しているかどうか、“超国家的”以外の可能性のある他のメカニズムについて議論があった。現在あるメカニズムを用いる目的が明確でない。環境または原子力のメカニズムを用いるシンボル性について議論があった。

24. 文献集の分析

現在、64 の文書を分析し、文献集には追加文書も含め 100 以上の文書がある。

文献集を作成する目的は、全体的な分析よりも探索能力であり、文書を追加し続けることができるようにすべきであるとの意見があった。

25. 文献集の分析に関する議論

文献集分析の当初の目的は、統合する必要がある研究を示すことであり、この目的達成のため、新しい文書を追加できるように“文献保管庫（literature repository）”を確保し続けるべきであるとされた。

なお、今後も Nagra（スイスの地層処分場実施主体）が継続して“文書保有者”となることとなっている。

文献集の報告書の中には、新しいことを議論しなくても RK&M の保存に関するアイデアを“発見している”報告書がある。

MDD Wiki の導入を試みる際に文献集は役立つ。オンラインで閲覧できない文書の確認を十分に行う。

外国語（foreign language）の論文については、主要な文献集に含める必要がある参考文献を特定し、その概要の準備および疑問点の回答を作成する。

26. 最終報告書 Wiki（情報の集積に便利なウェブ・プログラムの形態。例、Wikipedia）

27. 2 日目終わりの挨拶

＜3 日目＞

28&29. イントロダクションと本ミーティングのレビュー

30. 2013 年 9 月に開催予定のワークショップ

2013 年 9 月に開催予定のワークショップでは、最終報告書（MMD 形式）のドラフトの内容を中心に議論することで合意した。

プロジェクトに新たな視点を取り入れるため、可能な方向性として景観考古学が提案された。またフェーズ 2 のトピックス及び進め方についても次回のワークショップで議論すべきであるとした。

31. 本プロジェクトのフェーズ 2 について

ANDRA は、フェーズ 2 の立ち上げに際し、2014 年に国際会議を主催することを申し出た。

また、FAQ を作成し、フェーズ 1 の終わりまでに回答する。

用語集の貢献は高く評価された。これらの専門用語の使い方は継続して行うべきであるとの意見が出された。

「知識」は重要な概念であり、本プロジェクトの作業範囲を決めている。知識管理は現在、短期間な見通しであるが、長期的な見通しの必要性も指摘された。

本プロジェクトの 1 つの利点は、短期、中期、長期を一緒に検討したことである。

32. 総括

次回のワークショップは外部からの情報を取り入れ、最終報告書のドラフトを中心に話し合うワークショップとする予定である。

・フェーズ 1 の結論を出すことに積極的に取り組む。

・2014 年の国際会議開催への期待が高まっている。

・すべての文書をオンライン上で公表する予定である。

・次回のワークショップの前に、さらに Wiki の開発を進める予定である。

(4) 記録すべき最小限の内容を検討するための活動方針

RK&M プロジェクトでは、2012 年 4 月に記録すべき最小限の内容（a Minimal Set of Records、以下「MSR」という。）のサブグループを設立している。

MSR サブグループでは、最初の報告書を 2012 年 9 月と 2013 年 1 月に全体プロジェクトに提示した。

この結果、RK&M の見解としては、本サブグループを今後も継続して作業を続けることとした。

1) “記録すべき最低限の内容”（MSR）の定義

“記録すべき最低限の内容”とは、“記録すべき最も少ない必要不可欠な内容”を示している。

ここで、“最小限”とは、“不可能でないにしても、その情報なしでは理解することが非常に難しい”という意味であることとした。

2) MSR サブグループの目的

RK&M の MSR サブグループは、1 種類以上の MSR に含める基本的な情報及びメッセージを作成するための作業を進めており、その作業の中で以下の問題点が挙げられた。

- 伝達のための対象期間
- 伝達の媒体また経路の耐久性
- 伝達すべき情報の種類
- 伝達できる情報量
- 対象者

これらの問題点は相互に関係しあっており、今後の見通しを提案するために下記の考察が行われた。

3) 伝達のための対象期間

RK&M プロジェクトでは、MSR の伝達のための対象期間に関しては、*中・長期的な期間*の記録保存におけるツールであるとし、しかしながら、歴史及び言語の知識を用いて理解する受領者に依存する場合、無限の時間スケールを考えることは有効ではないものとした。この結果、時間スケールとしては、数百年から数千年を想定した。

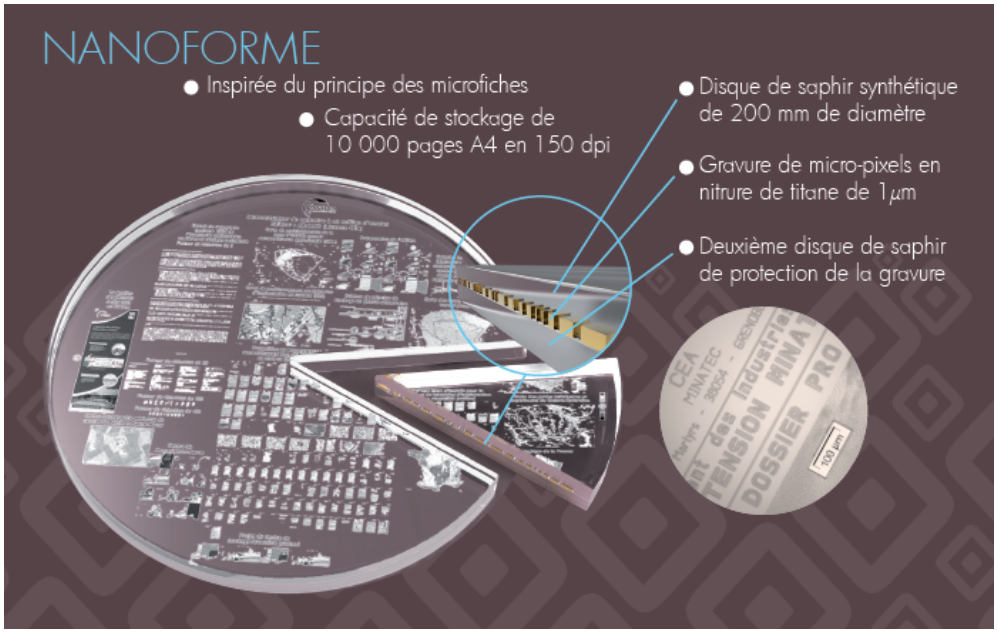
また、MSR は、時間と独立的であるようにすべきである、つまり、マーカーや記録方法は、どの時代の人々でも理解できるようにすべきであるとした。

4) 伝達の媒体また経路の耐久性

対象期間（中・長期間）内は、技術的及び制度的な観点からいくつかの期間に分けることができる。

例えば、1,000 年間までは紙は記録するために実行可能な選択肢であり、いくつかの制度も残っている可能性はあるが、それ以降の期間では、紙はもはや実行可能な選択肢ではなく、制度も存続しているか疑問である。

また、直接的な伝達方法として、例えば、地下モニュメント（例えば、ロング・ナウ協会の 10,000 年時計、http://longnow.org/clock/）や様々な地下又は半地下のマーカーである。その他、紙や Arnano ディスク（フランスで開発されているサファイアディスク）の記録保管庫も有効であると考えられる。



出典：http://www.minatec-entreprises.fr/

図 6.2.3-2　ARNANO ディスク

5) 伝達すべき情報の種類

RK&M の目的は、将来世代が、理解し判断する方法を与える手助けをすることである。よってこの点から、MSR は、すべての情報が網羅されている必要はなく、“最小かつ本質的な”情報が含まれていればよいこととされ，**処分場システムと処分場内の廃棄物に関する概要、性能を確認するための可能性や手段**を含めるべきである，とされている。

現在の RK&M プロジェクトの見解は、MSR は、メッセージ性を有するべきではあるが、部分的に異なるメッセージまたは補完されたメッセージが別のステークホルダによって本質的なものとされてしまう可能性がある（すなわち、情報が少ないために間違った解釈がなされてしまう可能性がある)。

このため、MSR メッセージを選択する際には、たとえどんなことであっても説明可能で正当化可能なものにすべきである。そうすることによって、論理的根拠または知的ベースを確立することとなり、幅広く興味を持った人の意見を調査して得られた MSR について、選択するための基準を作成するために解析を行うことができる。

さらに、別のステークホルダは、合意の得られた本質的な情報を表現または確立する可能性を通して、異なる形式を想像するかもしれない。

6) 伝達できる情報量

伝達できる情報量は、媒体によって限定される。

Arnano ディスクまたは紙は決まった量の情報しか残せず、モニュメントは非常に重要な 1 つのメッセージまたはメッセージのセットしか伝達できない可能性がある。

7) 対象者

対象者は、個人よりもむしろ将来の社会である。このため MSR は、将来の社会が個人の集合体としての機能を果たしており、記録／情報を正確に理解できることを仮定する。

対象者が、MSR のメッセージを判断するため、「レファレンス社会またはレファレンス世界」の設定が必要であり、本サブグループでは、現在の社会をレファレンス社会として用いた。

8) MSR に関する研究

本サブグループの目的は、MSR に何を含めるのかを議論し、文書化することである。このために下記の検討を実施した。

① **記録すべき最小限の内容について知識的な基礎(intellectual basis)を確立する。**
概念及び視点を幅広い分野から収集する。長期的な視点で記録すべき最小限の内容に関する見通し及び理由を文書化する予定である。

② **文書化した概念を整理し、検証する。**
文書化した概念をレビューし、事前の分析を行い、記録すべき最小限の内容をどのように構築するかを RK&M プロジェクト全体に反映する。

その後、基準を確立し、記録すべき最小限の内容の種類を選別するために MSR グループ及び RK&M プロジェクト内で作業を進める予定である。

＜アプローチ＞

知識的な基礎を確立するために、研究では現在のステークホルダが必要としている定性的なデータを収集する予定である。

研究では本質的に以下の問題を中心として行う。

社会が多かれ少なかれ詳細な情報を受取り、有害物質は 500 年または数 1,000 年前に莫大な費用と労力をかけて地中深くに埋められたと仮定した場合、社会として何が知りたいのか、なぜ知りたいのか。

＜サンプル＞

本プロジェクトは RK&M プロジェクトのメンバーを超えて、地域社会の代表者、廃棄物または環境モニタリングに対して責任・権限のある者、歴史学者、人類学者等、様々なコミュニティにまたがるべきである。

＜解析＞

インターンが調査の整理及び文書化を行う。MSR サブグループによる議論及び事前解析のために、インターンと NEA 事務局は定性的な研究について一連の報告書を準備する予定である。

＜プロジェクトの進行状況＞

① 2013 年 1 月の電話会議で MSR サブグループの方針案が示され、原則、承認された。現行のテキストは 2013 年 1 月の会議の提案に基づいている。
② 聞き取り調査担当者のガイドラインは添付する予定である。
③ RK&M プロジェクトのメンバーは、各国でアプローチを行っている個人及び団体を確認するために MSR サブグループの目的について議論する。
④ 2013 年 4 月のプロジェクトミーティングで進捗状況のレビューを行い、作業分担が決まる予定である。
⑤ 2013 年 5 月／6 月に量的な研究設計の詳細を精査し、2013 年 6 月／7 月に聞き取り調査を実施する。報告書及び事前解析は 2013 年 9 月のワークショップで報告する。
⑥ 研究の解析結果は MSR グループが活用し、その後 RK&M プロジェクトのメンバーが記録すべき最小限の内容を選定する基準セットを整理するために活用する。
⑦ その結果作成された記録すべき最小限の内容について、どのように簡潔かつ完璧なものにするかレビューする。

⑧ NEA のウェブページだけではなく専門誌及び学術誌への投稿を検討する。

6.2.4 調査結果の整理

OECD/NEA-RWM が 2009 年より実施している、Preserving Information and Memory Across Generations: Proposal for A Dedicated Initiative and A Specific Project に関して、本業務に有益であると判断した 3 文書についてその内容を整理した。

⑧ 2012 年 3 月−2013 年 3 月までの活動報告書[5]

⑩ プロジェクトミーティング（2013 年 4 月に開催）のサマリ[6]

⑪ 記録すべき最小限の内容を検討するための活動方針[7]

文献⑧は、昨年までの活動報告である。このうち、「地層処分場のマーカーに関する文献調査」や「2 カ国以上の国々での複数保存」等の検討が実施されていることが明らかとなった。特に文書⑧において、これまで RWMC において検討してきた記録保存システムに有益な情報としては、下記である。

- 記録保存システムを確立するに当たって検討が必要な事項（議論された 8 種類の分野）
- 記録すべき最小限の内容
- 委託研究（共通認識としての記録保存に関する文献集、モニタリングとの関連、国家間の記録管理・保存方法、記録の喪失や回復事例）
- 記録保存（管理）に有益となる情報データベースの形態

また、文献⑩は、開催されたプロジェクト会合の内容である。このうち 2013 年 4 月に開催されたプロジェクト会合では、本業務に重要な内容として下記が議論された。

- 主としてデジタル情報へのアクセスと保護に関する議論
- 情報管理に関する基準（国立公文書館での基準に準拠）
- 地域住民へ処分場の記憶を残す手段（例：地名の変更）
- モニタリングとの関連性
- 最低限記録すべき内容に関する議論
- 記録喪失に関する議論

文献⑪は、今後検討される記録すべき最低限の内容（MSR）についての検討方針である。ここでの議題は次の通りであり、本議論に関する内容は、今後の処分場に関する長期間保存すべき記録を考える上で重要となり得ると考えられる。

- 伝達のための対象期間
- 伝達の媒体また経路の耐久性
- 伝達すべき情報の種類
- 伝達できる情報量
- 対象とする受領者

特に文書⑪において、有益な情報としては、下記である。

- 記録すべき最小限の情報を検討する際の着眼点
- 検討に際しての時間スケールを数百年から数千年としたこと
- 現在の制度が継続する期間としては、1000 年程度であること
- MSR としては、処分場、廃棄物及び安全評価の概要があげられていること
- 検討に際しての対象は、個人より社会であり、さらに社会は現行の社会が継続すること

これらの検討成果又は取りまとめ報告書について、継続的に調査を進めるべきである。

さらに、文献⑪について、NEA では各国の記録保存に関する規制要件について統一したフォーマットでの取りまとめを行っており、公開されれば、これについても有用な情報となると考えられる。

本プロジェクトは、2014 年に終了する予定であり、今後公開される報告書等の情報は、（一部はすでに RWMC での検討内容と重複するものの）非常に重要であると考えられる。

表 6.2.4-1　2012 年 3 月−2013 年 3 月までの活動報告書（文献⑧）

【文書名】
Progress　Report of the Project on Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations March 2012 – March 2013
【概要】
■主なミーティング及び活動 ・プロジェクトミーティング（2012 年 4 月開催） ・第 2 回ワークショップ（2012 年 9 月開催） ・プロジェクトミーティング（2013 年 4 月開催） ・第 3 回ワークショップ（2013 年 9 月開催） ■第 2 回ワークショップ（2012 年 9 月開催）について 政府機関、大学、廃棄物管理機関、安全機関、地域団体、技術・社会科学の専門家、OECD/NEA、IAEA、UNESUCO から 11 か国 50 名が参加した。31 の発表が行われ、以下の分野に関する十分な議論がなされた。 ・規制 ・文献集 ・記録及びアーカイブ ・監視（Oversight and Monitoring） ・知識及び知識管理 ・契約（Engagement） ・費用 ・メカニズム ■“記録すべき最小限の内容”の概念の確立 ■進行中の研究 ■2013 年 4 月開催予定のプロジェクトミーティングについて

表 6.2.4-2　プロジェクトミーティング（2013 年 4 月に開催）のアジェンダ（文献⑨）

【文書名】
Proposed Adenda of the 4th Meeting of the RWMC Project on the " Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations " 16-18 April 2013, OECD Headquarters, Paris (France)
【概要】
＜1 日目＞ ・イントロダクション及び進捗状況の報告 ・第 2 回ワークショップ（2012 年 9 月開催）のプロシーディング ・用語集及び文献集 ・委託研究（地層処分場のマーカー及び記憶保存に関する文献調査、NEA 文書の変更及び発行状況） ・津波マーカーの研究 ・UNESCO デジタル記憶カンファレンスの紹介と報告 ・UNESCO デジタル記憶カンファレンスに対する反応 ・アーカイブ及びデジタル・ライブラリ ・委託研究（モニタリング、知識及び記憶の保存、信頼性との関係における地域社会の立場に関する研究） ・Oversight の概念 ・グループディスカッション ・記録の最小単位 ＜2 日目＞ ・委託研究（埋立て地及び過去の汚染サイトの記憶喪失に関する予備調査） ・知識の保存に関する困難 ・グループディスカッション ・規制要件 ・グループディスカッション ・委託研究（中期的な記録、知識及び記憶の保存を支援するための超国家的な（二か国以上が関与して一国を超える権威を有する）メカニズム） ・委託研究（文献集の分析） ・グループディスカッション ・最終報告書 Wiki（情報の集積に便利なウェブ・プログラムの形態。例、Wikipedia） ＜3 日目＞ ・本ミーティングのレビュー、活動項目の議論 ・2013 年 9 月に開催予定のワークショップ ・本プロジェクトのフェーズ 2 について

表 6.2.4-3　プロジェクトミーティング（2013 年 4 月に開催）のサマリ（文献⑩）

【文書名】
Summary Record of the Fourth Meeting of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations project 16-18 April 2013, OECD Conference Centre, Paris (France)
【概要】
RK&M の第 4 回プロジェクトミーティングが、2013 年 4 月 16～18 日にフランス、パリの OECD 本部で開催された。12 か国から 22 名、IAEA から 1 名、OECD/NEA から 4 名が参加し、32 の発表が行われら。本報告書は、第 4 回プロジェクトミーティングのサマリ報告書である。発表資料は、RK&M プロジェクトの内部関係者のみ閲覧可能である。また以下の 3 つの Appendix を添付した。 ・2012 年 9 月に開催されたワークショップのプロシーディングの変更点 ・MDD　Wiki の開発に関する議論と活動方針の概要 ・決定事項と活動 本ミーティングでの発表は、表 2.1-3 に示したアジェンダに概ね従って進められた。 本ミーティングの総括は以下の通りである。 ・次回のワークショップは外部からの情報を取り入れるワークショップとする予定である。 ・フェーズ 1 の結論を出すことに積極的に取り組む。 ・2014 年に国際会議を開催することに関心が集まっている。 ・すべての文書をオンライン上で公表する予定である。 ・次回のワークショップの前に、さらに Wiki の開発を進める予定である。

表 6.2.4-4　記録すべき最小限の内容を検討するための活動方針（文献⑪）

【文書名】
“ Minimal Set of Records ” Initiative-Vision Document
【概要】
安定した深層地層に建設された工学的施設で行う長寿命放射性廃棄物の処分は、生物圏と廃棄物を永久に隔離するために参考となる手法である。この管理手法は本来安全で最終的なもの（つまり、安全目標を満たすための人間の存在や介入に関係しない）として考えられるが、処分場または処分場で処分される廃棄物に関する知識や認知していることを常に考慮しないというわけではない。処分場の建設について産業界は十分に成熟しており、処分場閉鎖後に間接的に監視を維持する方法は研究されている（国際的な合意、記録の維持、最終的に保存する記憶に応じたモニタリング、セーフガードの適用を含む)。制度的な取り決めはこれらの準備をする上で必要不可欠であり、RK&M を継続するにはまず責任の引継ぎを確立しておく必要がある。同時に社会経済的な影響を受けず制度に依存しない新たな方法も研究し適用すべきである。つまり、これは多くの専門分野に関わる活動であり、これから数年間で多くのことを学べると期待している。 RK&M プロジェクトでは、2012 年 4 月に記録すべき最小限の内容（a Minimal Set of Records：MSR）のサブグループを設立した。MSR サブグループの最初の報告書は 2012 年 9 月と 2013 年 1 月に全体プロジェクトに提示された。RK&M では、本サブグループは長期間に集中し、プロジェクト用語集に依存し、今のところプロジェクトの背景内の作業を続けることとしている。 本文書で示されている内容を以下に示す。 ・“MINIMAL SET OF RECORDS”（MSR）の定義 ・MSR グループの目的 ・対象とする期間 ・伝達の媒介また経路の耐久性 ・伝達すべき情報の種類 ・伝達できる情報量 ・対象とする受領者 ・MSR の研究 ・今後について ・Appendix：現在把握している作業の関連事項

表 6.2.4-5　第 3 回ワークショップ（2013 年 9 月開催）のアジェンダ（文献⑫）

【文書名】
Proposed Adenda of the Meeting of the OECD NEA Radioactive Waste Management Committee “ RK&M ” Project 24-26 September 2013 NEA Premises, Issy les Moulineaux (France)
【概要】
RK&M の第 3 回ワークショップが、2013 年 9 月 24～26 日にフランスの OECD/NEA の施設で開催された。 ＜1 日目＞ 1. イントロダクション ・開会のことば・本ミーティングの目的・本プロジェクトの状況 2. アップデート ・Wiki の状況と計画・用語集・文献集・必要不可欠な記録内容 3. フェーズ 1 の文書化 ・フェーズ 1 を終了する基本計画（Masterplan） 4. 議論 ・文献集とその分析・記録及び記憶を喪失する原因・安全性との関連・アーカイブ・マーカー・指導原理（Guiding principle） 5. まとめ ＜2 日目＞ 6. 発表者と議論参加者による 1 日目のレビュー 7. 議論 ・ 超国家的なメカニズム・規制の側面・文化財・その他の記事の確認 8. 人類の記憶プロジェクト：Martin Kunze との対比 ・ プロジェクトの説明・議論 9. まとめ ＜3 日目＞ 10. 発表者と議論参加者による 2 日目のレビュー 11. 議論 ・ 本プロジェクトの今後の見通し・2014 年 9 月の国際会議とダイアログ・研究の主な項目・主な提出書類 12. 今後の方針

6.3　英国 NDA が発行した安全評価書 DSSC に係る記録保存方策の調査・整理

英国 NDA が、2010 年に発行した地層処分に関する一連のセーフティケース文書(DSSC：The Disposal System Safety Case、以下「DSSC」とする)[11]及び関連文書を対象に下記の観点を含む内容について調査・整理を行った。

- 閉鎖前の文書管理
- 制度的管理、
- 記録の保存方策
- マーカー等

6.3.1　調査対象文献

調査に当っては、英国環境省による 2009 年の地層処分に関する GRA（Guidance on Requirements for Authorisation）[9]における記録保存等に関する要件とそれに対する事業者 NDA の取組状況を対象とした。

6.3.2　DSSC の概要

DSSC[11]は、2010 年、英国 NDA が、下記の理由により発行した一連のセーフティケース文書である。

- 地層処分施設（GDF : Geological Disposal Facility）に安全に処分できるという信頼を与えるため
- 現在貯蔵されている廃棄物の廃棄処理評価の基準として
- 政府の方針である放射性廃棄物の安全管理（MRWS）プログラムの第 4 段階である「選定オプションの実施」について机上調査の根拠を提供するため
- 規制当局による NDA の活動の監査（その後のフィードバック）を円滑化するため
- ステークホルダに情報を提供するとともに、コメントに対する回答を行うたm
- サイト特性調査の要件として

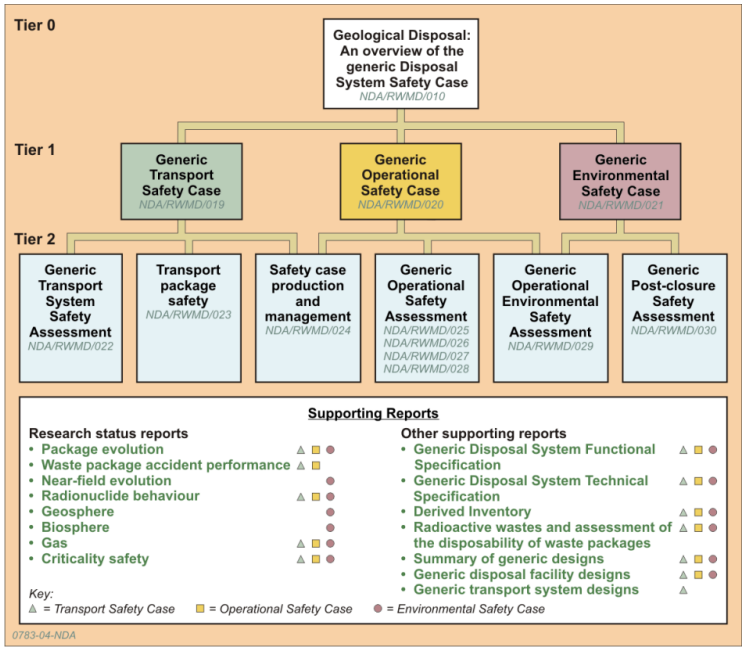
また、DSSC[11]の目的は、以下の通りであり、公表されている文書群及び文書間の階層は、図 2.2-1 及び図 2.2-2 のようになっている。

なお、現在英国では対象サイトは特定されていない。

- 分析と科学・工学的証拠をまとめた一連のレポートにより、地層処分施設の安全性に対する信頼が支えられる。
- 包括的な処分システム・セーフティケースは、以下のとおり。
  - 施設への廃棄物の輸送
  - 施設の建設と操業
  - 施設が閉鎖された後の長期的な環境の安全
- DSSC は、MRWS の基準インベントリで定義されたすべての高放射性廃棄物と物質の総合評価を初めて提示する。
- この段階の DSSC は一般的なものであり、 3 種類の地質環境の概念例を含む、処分の概念に関する決定は行われない。

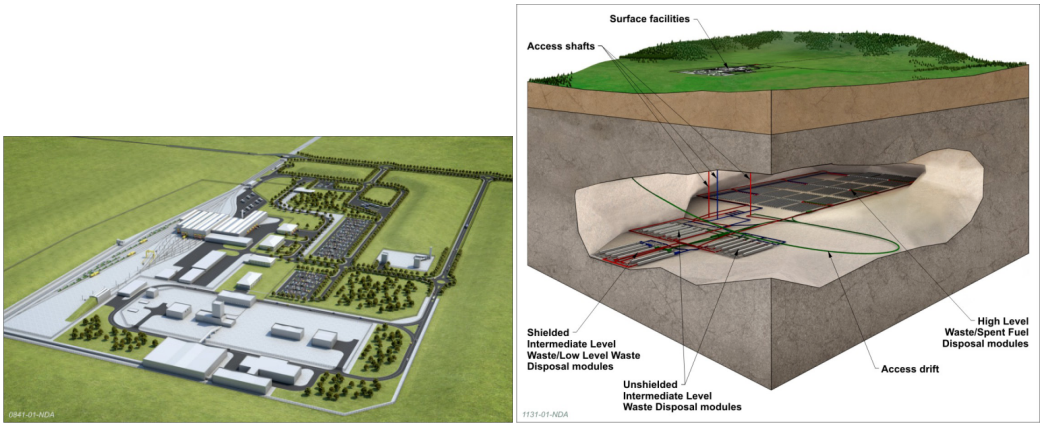
出典　http://www.nda.gov.uk/rwmd/safety/detail.cfm

図 6.3.2-1　DSSC の文書構成



出典： Nuclear Decommissioning Authority (2010), Geological Disposal: Summary of generic designs, NDA/RWMD/054

図 6.3.2-2　DSSC の階層構造



出典： Nuclear Decommissioning Authority (2010), Geological Disposal: Summary of generic designs, NDA/RWMD/054

図 6.3.2-3　英国の地層処分概念

6.3.3　調査結果

DSSC[11]は、英国環境省が 2009 年に発行したガイダンス（以下「GRA」という）[9]に基づき作成されている。このため次項の記録保存に関する調査結果についても、規制

要件（GRA）とそれに対する事業者の取組（DSSC 内容）を整理した。

(1)　閉鎖前の文書管理

1)　規制要件

地層処分に関する規制要件である GRA において，文書・記録等の管理についての規定は，要件 R4（環境安全文化と管理システム）に含まれ，その主な内容は以下となっている。

Requirement R4: Environmental safety culture and management system 6.2.5 The developer/operator of a disposal facility for solid radioactive waste should foster and nurture a positive environmental safety culture at all times and should have a management system, organisational structure and resources sufficient to provide the following functions: (a) planning and control of work; (b) the application of sound science and good engineering practice; (c) provision of information; (d) documentation and record-keeping; (e) quality management.
要件 R4：環境安全文化とマネジメントシステム 6.2.5 放射性固体廃棄物を対象とする処分施設の事業者は、いかなる時点においても、環境安全に関する肯定的な文化を育成し、助成しなければならず、また次に示す機能を提供する上で十分なマネジメントシステム、組織構成及び資源を備えていなければならない (a) 計画設定及び作業管理、 (b) 健全な科学及び良好な設計への適用、 (c) 情報の提供、 (d) 文書化及び記録の維持、 (e) 品質マネジメント。

①　方針決定及び意思決定の際の決定並びに根拠についての記録の要求

Policy and decision making 6.2.16 (...) Policy and decision making implies choice: whenever a policy is established or a decision is taken, the reasons for the choice made need to be recorded. The reasons recorded should include the other choices considered and reasons why they were rejected. Planning and control of work 6.2.24 All work that supports the environmental safety case needs to be properly planned and controlled. Any changes need to be made within a well-defined change control procedure, described in the written management arrangements, that assures quality and includes decision-making, doing the work and recording what has been done.
方針決定と意思決定 6.2.16 (略)　方針決定及び意思決定は、選択の実施を意味する。すなわち，一つの方針が設定されるか、一つの決定がなされる時はいつでも、それに伴う選択の根拠が記録される必要がある。記録される理由の中には、検討されたその他の選択肢とそれらが採用されなかった理由が含まれているべきである。 計画設定と作業管理 6.2.24 環境セーフティケースを支援する全ての作業は、適切に計画され、管理される必要がある。何らかの変更がなされる場合、その変更は、品質を保証する明確に定義された変更管理手順に従って実施される必要があり、この手順には、意思決定、作業の実施、実施されたことの記録などが含まれる。

② 記録管理システムの開発及び維持の要求

③ 最低限度記録すべき内容

④ 記録保存要件（複製，複数の保存場所，事業廃止後の移管）

Documentation and record-keeping
6.2.37 The developer/operator will need to set up and maintain a comprehensive system for recording information on all aspects of the project affecting the environmental safety case. The information to be recorded should include: decisions taken and the reasons for them, data and results from the site investigation and characterisation programme; design documents, drawings and engineering details of the facility as constructed; records of waste form and characterisation; records of waste emplacements and their location in the facility; other operational information; details of facility closure; and results of monitoring and assessment at all stages of the project. Duplicates of the records will need to be kept at diverse locations and in durable form. During the period of authorisation, the records will be needed by the organisation exercising control and, potentially, by the regulators. We shall expect the operator to make arrangements at the end of the period of authorisation for the records to be included in the public archive.

文書化及び記録の維持
6.2.37 事業者は、環境セーフティケースに影響を及ぼすプロジェクトに関する情報を記録するために、包括的なシステムを開発し、維持する必要がある。
記録対象となる情報には、以下のものが含まれる。
- ・決定とその根拠
- ・サイト調査及び特性調査計画から得られたデータと結果
- ・設計文書、図面及び建設中の施設の工学的な詳細
- ・廃棄物形態及びその特性調査の記録
- ・廃棄物の定置に関する、さらには施設内での定置位置に関する記録
- ・その他の操業情報
- ・施設の閉鎖に関する詳細
- ・モニタリングの結果と当該プロジェクトの全ての段階における評価

こうした記録の複製は、いくつかの場所に、また耐久性の高い形で維持される必要がある。許可期間中にこれらの記録は、規制管理を実施している組織によって、また場合によっては規制組織によって必要とされる。
我々は、事業者が、許可期間が終了した時点で、これらの記録を公共の記録保管所(Public Archives）で保管するための措置を講じるものと考えている。

⑤ 記録管理要件（データ検索，データ間の関係（コンテクスト）の明確化）

Quality management
6.2.39 Quality management arrangements that allow all types of information to be traced back to their source are particularly important. We shall require access to the original data and shall want to know how they were gathered, so that we can examine the provenance and interpretation of the data.

品質マネジメント
6.2.39 あらゆるタイプの情報について、その発生源にまで遡ることのできる品質マネジメント措置が設定されていることがとくに重要である。我々は、データの由来や解釈に関する調査を行うために、オリジナル・データへのアクセスや、これらのデータが収集された方法に関する知識の提供を求める場合がある。

2)　事業者の取組

GRA の要件（R4）に対しては、DSSC の主要報告書（NDA/RWMD/021、§3.3）[11]にその対応方針が示されている。次項より記録管理に関する主な要求事項について事業者の取組方針を示す。

（a）記録管理方針

前述の要件概要「①　方針決定及び意思決定の際の決定並びに根拠についての記録の要求」に対する NDA の方針は次の通りである。

- NDA は、知識管理方針を有している。これは、地層処分を達成するという目的を支持するために保存すべき知識を要求するものである。
- NDA は、現時点及び将来予想されるニーズについて分析し、地層処分特有の知識管理方策を開発中である。
- NDA は、採用されなかったオプションとその理由を含む意思決定の内容について適切に記録することは、事業の初期段階で特に重要であることを認識している。なぜなら、事業の進展に伴い蓄積していく重要な決定は、初期の決定に基づき実施されているくためである。
- 仮に初期の決定が変更された場合、関連するすべての決定に再評価が必要となるため、決定間の関係及び関連する情報をトレースできることが重要であると考えている。
- NDA はすでに地層処分施設の設計のための要件、制約及び受入基準に係る要件管理システムの開発を開始している。
- 要件管理システムの開発要件は、知識の共有のみならず、意思決定プロセスに係る根拠にアクセス可能であるとともに恒久性の確保であると考えられている。

（b）記録管理システム

前述の要件概要「②　記録管理システムの開発及び維持の要求」及び「⑤　記録管理要件（データ検索、データ間の関係(コンテクスト)の明確化）」に対する NDA の方針は次の通りである。

- NDA では、現在、以下を達成するため、2 種類の文書管理システム（①アクセス、保存及び管理が容易な電子文書と記録の管理システムと②システム内の文書の管理及び配布するシステム）を運用している。

- プロジェクト文書が検索可能なデータベースの提供
- 透明性とセキュリティポリシーに基づく文書へのアクセス管理
- 文書の変更及び改訂履歴のトレース

- 文書管理システムは、NDA 内で発生した文書及び外部から受信した文書の大部分から構成されている（過去の Nirex 文書もこのシステムに移管されている）
- 規制機関（環境省）とのやり取りに関しては、「課題解決形式（IRFs：issue resolution forms）」とよばれる形式により記録及び管理される。

(c) 将来の記録保存

前述の要件概要「③　最低限度記録すべき内容」及び「④　記録保存要件（複製、複数の保存場所、事業廃止後の移管）」に対する NDA の方針は次の通りである。

- NDA では、将来的に、サイト選定決定や詳細な設計情報及び評価に関わる情報のような特定の情報についての記録管理方策を整備する必要性があると考えている（ただし検討については時間的に猶予がある、としている）。
- 制度的管理の一環として、NDA は、施設の位置や一般的な内容に関する記録を地域の記録保管庫及び NNA（原子力アーカイブ）へ提供する予定である。

(2) 制度的管理

1) 規制要件

地層処分に関する規制要件である GRA において，制度的管理についての規定は，要件 5（放射線学的要件）に含まれ，その主な内容は以下となっている。

Requirement R5: Dose constraints during the period of authorisation 6.3.1 During the period of authorisation of a disposal facility for solid radioactive waste, the effective dose from the facility to a representative member of the critical group should not exceed a source-related dose and a site-related dose constraint
要件 R5：許可期間中の線量拘束値 6.3.1 放射性固体廃棄物を対象とする処分施設の許可期間内において、当該施設から決定グループの代表的な構成員の一人が受ける実効線量は、線源及びサイトに関する線量拘束値を超えてはならない

Active institutional control 6.3.7 If the developer/operator claims for the purposes of the environmental safety case that during the period of authorisation there will be a time after closure when the facility is under active institutional control, the developer/operator will need to show that the controls proposed for this time are sufficient to support the claim and that the arrangements for applying the controls can be relied on to be implemented as planned. A claim for active institutional control will need to be supported by detailed forward planning of organisational arrangements and a suitable demonstration of funding arrangements.
能動的な制度的管理 6.3.7 事業者が、環境セーフティケースのために、閉鎖後の施設が許可期間の範囲内で能動的な制度的管理の下に置かれる期間を設定することを望む場合、事業者は、当該期間に関して提案される管理が、この要請の裏付けとなる上で十分なものであることを示し、こうした管理を適用する措置は計画通りに実行されると信頼できることを示す必要がある。また能動的な制度的管理の実施要請の裏付けとなる組織面での準備を行うために、その詳細な将来計画が設定されるだけでなく、資金提供の手筈が整うことが適切に立証される必要がある。

6.3.8 Organisational arrangements would need to provide for continued management, staffing and site security. A claim of active institutional control for a period of time is expected to include provisions for site surveillance with scope for remedial work if needed, a programme of environmental monitoring, control of land use and arrangements for the preservation of records. It will need to be supported by evidence that these provisions can be relied on to remain effective throughout the claimed period of time. Because of the major social changes that may take place over long periods of time, it is unlikely that the environment agencies would accept a claim for active institutional control lasting longer than 300 years after the end of waste emplacement.
6.3.8 継続的な廃棄物管理、要員の確保及びサイトのセキュリティのために、組織面での手筈を整える必要がある。一定の期間にわたる能動的な制度的管理の実施要請には、サイト監視のための規定が含まれ、それに伴って必要となった場合の是正作業、環境モニタリング計画、土地利用の規制管理、及び記録の保存に関する準備が整えられるものと考えられる。またそのためには、これらの措置が要請された期間を通じて有効性を維持すると十分な信頼をもって判断できることを示す証拠が、裏付けとして提示される必要がある。きわめて長い期間を考慮した場合、重要な社会的変革が起こる可能性があるため、廃棄物定置が終了してから 300 年よりも長い期間にわたって能動的な制度的管理を実施する要請を環境規制機関が認めるとは考えにくい。

2)　事業者の取組

GRA の要件（R5）のうち制度的管理に対しては，DSSC の主要報告書（NDA/RWMD/021、§3.1.1、4.1.6）[11]では、次のように記されている。

- 現在の DSSC で制度的管理に関して詳細には検討していない（将来のセーフティケースの更新に際してのプレースホールダとしての位置づけとしている）（§4.1.6)
- 処分場の閉鎖後安全性は，サイトや施設の設計，廃棄物パッケージの性能によって担保されるが，保障措置や公衆の安心の観点から，監視等を含む能動的な制度的管理が閉鎖後一定期間実施する(§3.1.1)。

- 制度的管理には，受動的または能動的である。能動的管理については，EPR2010[1]に規定されており，GDF でのモニタリング，監視及び是正措置（必要に応じて土地利用制限）が含まれる。
- 能動的な制度的管理のための将来計画や資金調達を適切に行う予定である（従来の廃棄物(Legacy Wastes)に関する GDF 開発の資金は英国政府から得る）。
- 閉鎖以降のサイトがどのようになるのか（農地，森林，環境回復あるいは建設その他の使用）については，将来世代にとって課題となるが，廃棄物は地下数百 m に多重バリアによって隔離されたままとなる。（このため）我々は，地方の文書保管庫や NNA に施設の位置や一般的な内容に関する記録を提供する予定である。
- さらに，サイトの集落や近隣の住民が希望すれば，閉鎖後モニタリングの延長もありうる。ただし，セーフティケースは，いかなる閉鎖後の能動的管理にも依存するものではない。

[1] The Stationery Office, The Environmental Permitting (England and Wales) Regulations. Statutory Instruments 2010 No. 675. March, 2010.
Department for Environment, Food and Rural Affairs, Department of Energy and Climate Change, and Welsh Assembly Government. Environmental Permitting Guidance – Core Guidance for the Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2010. Version 3.1, March 2010.
Department for Environment, Food and Rural Affairs, Department of Energy and Climate Change, and Welsh Assembly Government. Environmental Permitting Guidance – Radioactive Substances Regulation for the Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2010. Version 1.1, March 2010.
(three separate documents).

(3)　記録の保存方策

1)　規制要件

地層処分に関する規制要件であるGRAにおいて,記録の保存方策についての規定は,前述 2.2.4 項と同様要件 R4（環境安全文化と管理システム）に含まれ，その主な内容は以下となっている。

Documentation and record-keeping 6.2.37 The developer/operator will need to set up and maintain a comprehensive system for recording information on all aspects of the project affecting the environmental safety case. The information to be recorded should include: decisions taken and the reasons for them, data and results from the site investigation and characterisation programme; design documents, drawings and engineering details of the facility as constructed; records of waste form and characterisation; records of waste emplacements and their location in the facility; other operational information; details of facility closure; and results of monitoring and assessment at all stages of the project. Duplicates of the records will need to be kept at diverse locations and in durable form. During the period of authorisation, the records will be needed by the organisation exercising control and, potentially, by the regulators. We shall expect the operator to make arrangements at the end of the period of authorisation for the records to be included in the public archive.
文書化及び記録の維持 6.2.37 事業者は、環境セーフティケースに影響を及ぼすプロジェクトの全ての側面に関する情報を記録するために、包括的なシステムを設定し、維持する必要がある。 記録対象となる情報には、以下のものが含まれる。 ・決定とその根拠 ・サイト調査及び特性調査計画から得られたデータと結果 ・設計文書、図面及び建設中の施設の工学的な詳細 ・廃棄物形態及びその特性調査の記録 ・廃棄物の定置に関する、さらには施設内での定置位置に関する記録 ・その他の操業情報 ・施設の閉鎖に関する詳細 ・モニタリングの結果と当該プロジェクトの全ての段階における評価 こうした記録の複製は、いくつかの場所に、また耐久性の高い形で維持される必要がある。 許可期間中にこれらの記録は、規制管理を実施している組織によって、また場合によっては規制組織によって必要とされる。 我々は、事業者が、許可期間が終了した時点で、これらの記録を公共の記録保管所(Public Archives）で保管するための措置を講じるものと考えている。

2)　事業者の取組

GRA の要件（R4）に対しては，DSSC の主要報告書（NDA/RWMD/021、§3.3）[11]にその対応方針が示されている。

- NDA では，将来的に，サイト選定決定や詳細な設計情報及び評価に関わる情報のような特定の情報についての記録管理方策を整備する必要性があると考えている（ただし検討については時間的に猶予がある，としている)。

- 制度的管理の一環として，NDA は，施設の位置や一般的な内容に関する記録を地域の記録保管庫及び NNA（原子力アーカイブ）へ提供する予定である。

(4) マーカー

1) 規制要件

地層処分に関する規制要件である GRA において，マーカーについての規定は，要件 R7（許可期間終了後の人間侵入）に含まれ，その内容は以下となっている。

Requirement R7: Human intrusion after the period of authorisation 6.3.35 The developer/operator of a geological disposal facility should assume that human intrusion after the period of authorisation is highly unlikely to occur. The developer/operator should consider and implement any practical measures that might reduce this likelihood still further. The developer/operator should also assess the potential consequences of human intrusion after the period of authorisation.
要件 R7：許可期間終了後の人間侵入 6.3.35 地層処分施設の事業者は、許可期間終了後の人間侵入の生起可能性は極めて低いと仮定すべきである。事業者は、その生起可能性をさらに低下させる実用的な措置が見いだされた場合には、それについて検討し、実行に移す必要がある。また事業者は、許可期間終了後の人間侵入によって生じる潜在的な影響についても評価しなければならない。

Measures to reduce the likelihood of human intrusion 6.3.42 The developer/operator should consider, and implement, any practical measures that might reduce the likelihood of human intrusion. We encourage such measures where they are likely to be beneficial. We may not accept that they can be claimed in an absolute sense in the environmental safety case, but it may be useful to invoke them in contributory, qualitative arguments in support of the environmental safety case. We recognise that it is not easy to judge the benefits of these measures and that some measures, such as providing a marker at the surface, might have the opposite of the intended effect. We also recognise that there are practical limits to what can be done. In particular, it is important that any measures intended to reduce the likelihood of human intrusion do not compromise the environmental safety performance of the disposal system if human intrusion does not occur. We shall expect the developer/operator to consider measures to reduce the likelihood of human intrusion as part of option studies under Requirement R8, Optimisation. Implementation of any measures intended to reduce the likelihood of human intrusion is subject to our agreement to those measures
人間侵入の可能性の低減措置 6.3.42 事業者は、人間侵入の可能性を低減する有用な方法が見いだされた場合、それについて検討し、実施に移さなければならない。我々はこのような措置によって利点が得られる見込みが高い場合には、奨励する。 環境セーフティケースにおいて絶対的な意味でその種の措置の有効性を主張できるという点については、我々はそれを受け入れない場合もあるが、環境セーフティケースの裏づけとなる有力な定性的な論拠の中でそれらについて言及することが有益な場合もあろう。 我々は、これらの措置の利点に関する判断が容易ではないことを、そして一部の措置（例えば地表に標識を設置することなど）が、その意図とは逆の影響を及ぼす可能性があること，さらに、実際面での制約があることも認識している。 いずれにしても人間侵入の生起可能性の低減を意図した措置により、人間侵入が発生しない場合の処分システムの環境安全性能が損なわれないことが重要である。 我々は、事業者によって、人間侵入の生起可能性の低減を目的とした様々な措置が、要件 R8（最適化）の下でのオプション調査の一環として検討されるものと考えている。こうした人間侵入の生起可能性の低減を目的とした措置を実行に移す際には、当該措置に関して我々の合意を受けることが条件となる。

なお、GRA に関するコンサルタント協議報告書[10]では、2 人の個人より「永久マーカーについて要件となっているのか」との質問とコンサルテーションワークショップにおいても議論されたとある。これに対して、EA の回答は以下のとおりであり、「GRA では、永久マーカーを要求している訳ではない」としている。

3.14 Responses to Q10 – Human intrusion (geological disposal) (...) There is no requirement for permanent markers. It is the responsibility of the developer and operator to prepare an institutional control plan, in which the advantages and disadvantages of permanent markers should be discussed. We shall judge these plans on their merits.
3.14 質問 10 への回答：人間侵入（地層処分） (中略) 永久マーカーについては要件ではない。これは，事業者が責任で，制度的管理計画を準備する際に永久マーカーの利点・欠点を含めて議論すべきである。我々は，これらのメリットに基づき計画を判断する。

2)　事業者の取組

GRA の要件（R7）に対しては、DSSC の主要報告書（NDA/RWMD/021、§3.2.3）[11]では、人間侵入に関する評価を実施したうえで，侵入可能性を低減させる可能性がある実用的な措置を検討していくことが示されているものの具体的施策についての記載はない。

6.3.4　調査結果とまとめ

英国の地層処分に関する記録保存について，これまで調査を実施していなかった 2009 年の規制要件及び事業者の対応策を整理した。主な調査結果の概要及び考察は次の通りである。

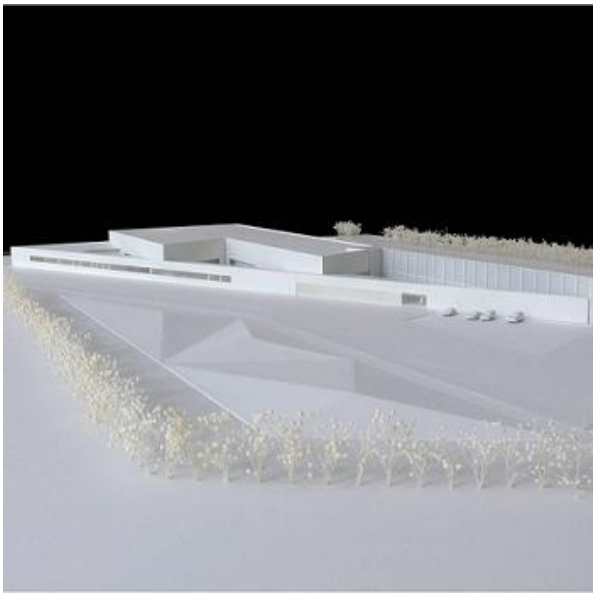
① 英国の規制要件は，記録保存に関わる内容として下記のように明確に規定している。

- 閉鎖前の意思決定に関する記録管理（包括的システムの開発，耐久性の高い技術での維持）
- 閉鎖及び廃止措置後の記録保管所（原子力アーカイブ）への移管
- 情報のアクセス容易性及び情報間の関連性（コンテクスト）の確保
- 300 年程度の能動的な制度的管理計画の一環としての記録保存の要求
- マーカーについては制度的管理計画策定の一環として必要性の検討を要求

② NDA は規制要件に従い，上記①の要件について，ほぼ実施することとしている。

なお、上記の原子力アーカイブ（NNA）に関しては、本調査の第 2 フェーズにおいてその状況を調査した[18]。

NDA サイトによれば、現在の状況は、2016 年の運用開始を目指して建設準備が行われている。また、アーカイブに保管される最初の文書は 250 トンに及ぶドーンレイサイトの文書類であることが、スコットランドの WEB ニュースで報道された(2013 年 8 月)[17]。



出典：NDA サイト https://www.nda.gov.uk/news/nna-project-proceeds.cfm

図 6.3.4-1　NNA の完成予想図

6.4　内閣府による「公文書管理法」に関連した運用方法文書の調査・整理

わが国においては、平成 23 年に「公文書管理法」[19]が施行されており、その概要について調査を実施している。本法では、地層処分事業については、直接対象とはされていないものの、社会への説明責任として公益を有する記録は永久保存されることとなっており、今後地層処分事業により発生する記録についても対象となる可能性がある。

このため、本年度は、本法施行後に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）に関して、その内容を調査・整理した。

6.4.1　調査対象文献

本年度の調査対象文献及び概要を下表に示す。

調査対象文献	概要
公文書等の管理に関する法律施行令(2011)[20]	法律運用のための政令であり、具体的な内容が記されている。
内閣府(2012): 行政文書の管理に関するガイドライン[21]	法律制定に伴い、統一的な行政文書作成を行うための指針文書であり、文書作成及び管理に関する基本的な要件が記されている。
内閣府(2012): 特定歴史公文書等の保存、利用及び廃棄に関するガイドライン[22]	法人文書が保存される公文書館の管理ための指針文書であり、文書等の保存、利用及び廃棄に関する要件が記されている。

6.4.2　調査結果

(1) 公文書等の管理に関する法律施行令

「公文書等の管理に関する法律施行令(平成二十二年十二月二十二日政令第二百五十号)」[20]の条項を以下に示す。さらに処分に関する記録が保存される場合を想定し，把握しておく必要があると考えられる条文を以降に記す。

条項		備考
第 1 条	法第 2 条第 1 項第四号及び第五号の政令で定める機関	
第 2 条	法第 2 条第 3 項第二号の政令で定める施設	
第 3 条	法第 2 条第 4 項第三号の政令で定める施設	
第 4 条	法第 2 条第 4 項第三号の歴史的な資料等の範囲	
第 5 条	法第 2 条第 5 項第三号の政令で定める施設	
第 6 条	法第 2 条第 5 項第三号の歴史的な資料等の範囲	
第 7 条	法第 2 条第 5 項第四号の区分の方法	
第 8 条	行政文書ファイル等の分類、名称及び保存期間	本文参照
第 9 条	保存期間の延長	
第 10 条	行政文書ファイル等の移管の措置	本文参照
第 11 条	行政文書ファイル管理簿の記載事項等	本文参照
第 12 条	法第 7 条第 1 項 ただし書の政令で定める期間	
第 13 条	行政文書ファイル管理簿の閲覧場所の公表	
第 14 条	行政文書管理規則の記載事項	本文参照
第 15 条	法人文書ファイル管理簿の記載事項等	
第 16 条	法第 11 条第 2 項 ただし書の政令で定める期間	
第 17 条	法人文書ファイル管理簿の閲覧場所の公表	
第 18 条	法人文書ファイル等の移管	
第 19 条	目録の作成及び公表	本文参照
第 20 条	本人であることを示す書類	
第 21 条	法第 18 条第 1 項 の政令で定める事項	
第 22 条	法第 18 条第 2 項 の政令で定める事項	
第 23 条	法第 18 条第 3 項 の政令で定める事項	
第 24 条	電磁的記録の利用の方法	
第 25 条	手数料の納付の方法	

第 8 条　行政文書ファイル等の分類、名称及び保存期間
行政機関の長は、当該行政機関における能率的な事務及び事業の処理に資するとともに、国の有する諸活動を現在及び将来の国民に説明する責務が全うされるよう、法第五条第一項 及び第三項 の規定により、行政文書及び行政文書ファイルについて、当該行政機関の事務及び事業の性質、内容等に応じて系統的に分類し、分かりやすい名称を付さなければならない。 ２　　法第五条第一項 の保存期間は、次の各号に掲げる行政文書の区分に応じ、それぞれ当該各号に定める期間とする。 一　　別表の上欄に掲げる行政文書（次号に掲げるものを除く。）　同表の下欄に掲げる期間 二　　他の法律又はこれに基づく命令による保存期間の定めがある行政文書　当該法律又はこれに基づく命令で定める期間 三　　前二号に掲げる行政文書以外のもの　別表の規定を参酌し、行政機関の事務及び事業の性質、内容等に応じて行政機関の長が定める期間 ３　　行政機関の長は、別表の上欄に掲げる行政文書以外の行政文書が歴史公文書等に該当する場合には、一年以上の保存期間を設定しなければならない。 ４　　法第五条第一項 の保存期間の起算日は、行政文書を作成し、又は取得した日（以下「文書作成取得日」という。）の属する年度の翌年度の四月一日とする。ただし、文書作成取得日から一年以内の日であって四月一日以外の日を起算日とすることが行政文書の適切な管理に資すると行政機関の長が認める場合にあっては、その日とする。 ５　　法第五条第三項 の保存期間は、行政文書ファイルにまとめられた行政文書の保存期間とする。 ６　　法第五条第三項 の保存期間の起算日は、行政文書を行政文書ファイルにまとめた日のうち最も早い日（以下この項及び第十一条第一項において「ファイル作成日」という。）の属する年度の翌年度の四月一日とする。ただし、ファイル作成日から一年以内の日であって四月一日以外の日を起算日とすることが行政文書の適切な管理に資すると行政機関の長が認める場合にあっては、その日とする。 ７　　第四項及び前項の規定は、文書作成取得日においては不確定である期間を保存期間とする行政文書及び当該行政文書がまとめられた行政文書ファイルについては、適用しない。
関連する公文書等の管理に関する法律
（整理） 第五条　　行政機関の職員が行政文書を作成し、又は取得したときは、当該行政機関の長は、政令で定めるところにより、当該行政文書について分類し、名称を付するとともに、保存期間及び保存期間の満了する日を設定しなければならない。 ２　　行政機関の長は、能率的な事務又は事業の処理及び行政文書の適切な保存に資するよう、単独で管理することが適当であると認める行政文書を除き、適時に、相互に密接な関連を有する行政文書（保存期間を同じくすることが適当であるものに限る。）を一の集合物（以下「行政文書ファイル」という。）にまとめなければならない。 ３　　前項の場合において、行政機関の長は、政令で定めるところにより、当該行政文書ファイルについて分類し、名称を付するとともに、保存期間及び保存期間の満了する日を設定しなければならない。

第 10 条 行政文書ファイル等の移管の措置
第十条　法第五条第五項 の移管の措置は、国立公文書館の設置する公文書館への移管の措置とする。
関連する公文書等の管理に関する法律
（整理） ５　行政機関の長は、行政文書ファイル及び単独で管理している行政文書（以下「行政文書ファイル等」という。）について、保存期間（延長された場合にあっては、延長後の保存期間。以下同じ。）の満了前のできる限り早い時期に、保存期間が満了したときの措置として、歴史公文書等に該当するものにあっては政令で定めるところにより国立公文書館等への移管の措置を、それ以外のものにあっては廃棄の措置をとるべきことを定めなければならない。

第 11 条 行政文書ファイル管理簿の記載事項等
第十一条　法第七条第一項 の規定により行政文書ファイル管理簿に記載しなければならない事項は、次に掲げる事項とする。 一　分類 二　名称 三　保存期間 四　保存期間の満了する日 五　保存期間が満了したときの措置 六　保存場所 七　文書作成取得日（行政文書ファイルにあっては、ファイル作成日）の属する年度その他これに準ずる期間 八　前号の日における文書管理者（行政文書ファイル等を現に管理すべき者として行政機関の長が定める者をいう。第十一号において同じ。） 九　保存期間の起算日 十　媒体の種別 十一　行政文書ファイル等に係る文書管理者 ２　行政機関の長は、行政文書ファイル管理簿を磁気ディスク（これに準ずる方法により一定の事項を確実に記録しておくことができる物を含む。第十五条第二項において同じ。）をもって調製しなければならない。
関連する公文書等の管理に関する法律
（行政文書ファイル管理簿） 第七条　行政機関の長は、行政文書ファイル等の管理を適切に行うため、政令で定めるところにより、行政文書ファイル等の分類、名称、保存期間、保存期間の満了する日、保存期間が満了したときの措置及び保存場所その他の必要な事項（行政機関の保有する情報の公開に関する法律 （平成十一年法律第四十二号。以下「行政機関情報公開法」という。）第五条 に規定する不開示情報に該当するものを除く。）を帳簿（以下「行政文書ファイル管理簿」という。）に記載しなければならない。ただし、政令で定める期間未満の保存期間が設定された行政文書ファイル等については、この限りでない

第 14 条 行政文書管理規則の記載事項
第十四条　法第十条第二項第七号 の政令で定める事項は、行政文書に関する次に掲げる事項とする。 一　管理体制の整備に関する事項 二　点検に関する事項 三　監査に関する事項 四　職員の研修に関する事項 五　前各号に掲げるもののほか、行政文書の管理が適正に行われることを確保するために必要な事項
関連する公文書等の管理に関する法律
（行政文書管理規則） 第十条　行政機関の長は、行政文書の管理が第四条から前条までの規定に基づき適正に行われることを確保するため、行政文書の管理に関する定め（以下「行政文書管理規則」という。）を設けなければならない。 ２　行政文書管理規則には、行政文書に関する次に掲げる事項を記載しなければならない。 一　作成に関する事項 二　整理に関する事項 三　保存に関する事項 四　行政文書ファイル管理簿に関する事項 五　移管又は廃棄に関する事項 六　管理状況の報告に関する事項 七　その他政令で定める事項

第 18 条 法人文書ファイル等の移管
第十条　法第五条第五項 の移管の措置は、国立公文書館の設置する公文書館への移管の措置とする。
関連する公文書等の管理に関する法律
（法人文書の管理に関する原則） ５　独立行政法人等は、前項の規定により国立公文書館等に移管する法人文書ファイル等について、第十六条第一項第二号に掲げる場合に該当するものとして国立公文書館等において利用の制限を行うことが適切であると認める場合には、その旨の意見を付さなければならない。

(2) 行政文書の管理に関するガイドライン（平成 23 年 4 月）

本ガイドライン[21]は、各行政機関が適切に行政文書管理規則を制定できるよう、内閣府が各行政機関に対し、規定例や規定の趣旨・意義や実務上の留意点を解説したものである。

本ガイドライン[21]の構成は次の通りとなっており、それぞれの内容及び留意事項が記されている。

目次

第１ 総則：目的及び用語の定義

第２ 管理体制：総括及び副総括文書管理者，文書管理者，監査責任者，職員の責務

このうち，文書管理者は，主に下記を実施する。

① 保存

② 保存期間が満了したときの措置の設定

③ 行政文書ファイル管理簿への記載

④ 移管又は廃棄（移管・廃棄簿への記載を含む。）等

④　管理状況の点検等

第３ 作成：文書主義の原則，業務に係る文書作成，適切・効率的な文書作成

第４ 整理：職員の整理義務，分類・名称，保存期間

第５ 保存：行政文書ファイル保存要領，保存，集中管理の推進

第６ 行政文書ファイル管理簿：管理簿の調製及び公表，管理簿への記載

第７ 移管、廃棄又は保存期間の延長：保存期間満了時の措置，移管又は廃棄，延長

第８ 点検・監査及び管理状況の報告等：点検・監査，紛失等への対応，報告等

第９ 研修：研修の実施，研修への参加

第 10 補則

(3) 特定歴史公文書等の保存、利用及び廃棄に関するガイドライン（内閣府）

本ガイドラインは，各国立公文書館等の長が適切に利用等規則を制定できるよう、内閣府が各国立公文書館等に対し、規定例や規定の趣旨・意義や実務上の留意点を解説したものである。本ガイドラインの構成は次の通りとなっており，それぞれの内容及び留意事項が記されている。

目次

第Ａ章 総則：目的，特定歴史公文書等の定義

第Ｂ章 保存

第１節 受入れ：行政機関又は独立行政法人等，寄贈・寄託された文書，著作権の調整

- 行政機関や独立行政法人等からの受入れの際の留意事項は次の通りである。

- 各館においては、行政機関や独立行政法人等において保存期間が満了した歴史公文書等として移管とされたものを受け入れ、保存する。受け入れた歴史公文書等は、法第２条第７項の規定により、特定歴史公文書等となる。
- 受入れを行った後、くん蒸、ウイルスチェック（検疫）、媒体変換、綴じ直しや皺伸ばしといった簡単な修復等の保存に必要な措置を施した上で、識別番号の付与、利用制限事由の該当性の事前審査を行い、目録を作成した上で、１年以内に排架を行う。

第２節 保存：保存方法等，複製物，個人情報漏えい防止のために必要な措置，目録の作成及び公表

第Ｃ章 利用

第１節 利用の請求：手続き，利用請求の取扱い，部分利用，利用決定，利用の方法

第２節 利用の促進：簡便な方法による利用等，貸出し，原本の特別利用

第３節 移管元行政機関の利用

第４節 利用時間及び休館日

第Ｄ章 廃棄

(1) 館は、特定歴史公文書等として保存している文書について、劣化が極限まで進展して判読及び修復が不可能で利用できなくなり、歴史資料として重要でなくなったと認める場合には、内閣総理大臣に協議し、その同意を得て、当該特定歴史公文書等を廃棄することができる。

(2) 館は、(1)の規定に基づき特定歴史公文書等の廃棄を行った場合には、廃棄に関する記録を作成し、公表するものとする。

第Ｅ章 研修

第Ｆ章 雑則：保存及び利用の状況の報告，利用等規則の備付等

6.4.3 調査結果の整理

わが国における、記録管理・保存の状況について、平成 23 年施行された「公文書管理法」の運用方法について調査した。

「公文書管理法」では、地層処分事業については、直接対象とはされていないものの、社会への説明責任として公益を有する記録は永久保存されることとなっており、今後地層

処分事業により発生する記録についても対象となる可能性がある。

また、前述した OECD/NEA の調査結果より、国立公文書館の保存システムや保存の際の基準は、地層処分事業で発生する記録についても参考とすべきとの意見で合意されており、本調査で得られた調査結果は、今後の記録保存システム構築の際の参考となると考えられる。

6.5 まとめと今後の課題

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。平成 25 年度は、地層処分の実施主体等の関係機関が，記録保存に関する具体的計画を策定する際の選択肢・判断材料を提示するための，システム案の整備に資することを目的とし，記録保存に関する制度等の最新動向として以下の内容を調査した。

OECD/NEA の検討状況

OECD/NEA-RWM が 2009 年より実施している、Preserving Information and Memory Across Generations: Proposal for A Dedicated Initiative and A Specific Project に関して、本業務に有益であると判断した 3 文書についてその内容を整理した。

① 2012 年 3 月−2013 年 3 月までの活動報告書
② プロジェクトミーティング（2013 年 4 月に開催）のサマリ
③ 記録すべき最小限の内容を検討するための活動方針

文献①において、これまで RWMC において検討してきた記録保存システムに有益な情報としては、下記であげられた。

- 記録保存システムを確立するに当たって検討が必要な事項（議論された 8 種類の分野）
- 記録すべき最小限の内容
- 委託研究（共通認識としての記録保存に関する文献集、モニタリングとの関連、国家間の記録管理・保存方法、記録の喪失や回復事例）
- 記録保存（管理）に有益となる情報データベースの形態

また、文献②より本業務に重要な内容として下記が議論された。

- 主としてデジタル情報へのアクセスと保護に関する議論
- 情報管理に関する基準（国立公文書館での基準に準拠）
- 地域住民へ処分場の記憶を残す手段（例：地名の変更）

- モニタリングとの関連性
- 最低限記録すべき内容に関する議論
- 記録喪失に関する議論

さらに文書③において、有益な情報としては、下記であげられた。

- 記録すべき最小限の情報を検討する際の着眼点（伝達のための対象期間、伝達の媒体また経路の耐久性、伝達すべき情報の種類、伝達できる情報量、対象者）
- 検討に際しての時間スケールを数百年から数千年としたこと
- 現在の制度が継続する期間としては、1000 年程度であること
- MSR としては、処分場、廃棄物及び安全評価の概要があげられていること
- 検討に際しての対象は、個人より社会であり、さらに社会は現行の社会が継続すること

なお、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、（一部はすでに RWMC での検討内容と重複するものの）非常に重要であると考えられる。

英国の状況

英国の地層処分に関する記録保存について、これまで調査を実施していなかった 2009 年の規制要件及び事業者の対応策を整理した。主な調査結果の概要及び考察は次の通りである。

① 英国の規制要件は、記録保存に関わる内容として下記のように明確に規定している。

- 閉鎖前の意思決定に関する記録管理（包括的システムの開発、耐久性の高い技術での維持）
- 廃止措置後の地域の記録保管所や記録保管所（原子力アーカイブ）への移管
- 情報のアクセス容易性及び情報間の関連性（コンテクスト）の確保
- 300 年程度の能動的な制度的管理計画の一環としての記録保存の要求
- マーカーについては制度的管理計画策定の一環として必要性の検討を要求

② NDA は規制要件に従い、上記①の要件について、ほぼ実施することとしている。

公文書管理法

平成 23 年に「公文書管理法」が施行されており、その概要について調査を実施している。本法では、地層処分事業については、直接対象とはされていないものの、社会への説明責任として公益を有する記録は永久保存されることとなっており、今後地層処分事業により発生する記録についても対象となる可能性がある。

このため、本年度は、本法施行後に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）に関して、その内容を調査・整理した。

本調査結果の概要は次の通りである。

- 公文書等（国の行政文書等）は国及び独立行政法人等の諸活動や歴史的事実の記録であり、国民共有の知的資源であるとされており、その記録は、決められた手続きにより作成、保管、廃棄、移管が定められている。

なお、前述した OECD/NEA の調査結果より、国立公文書館の保存システムや保存の際の基準は、地層処分事業で発生する記録についても参考とすべきとの意見で合意されており、本調査で得られた調査結果は、今後の記録保存システム構築の際の参考となると考えられる。

今後の課題

今後の課題として、OECD/NEA における検討が引続き実施されているため、検討成果を引続き調査する必要がある。また、OECD/NEA における検討では、モニタリングに関する言及があり、モニタリング結果が保存すべき記録の一部として捉えられている。本事業では、モニタリングすべき項目や結果の反映方法等について検討を実施していることから、モニタリング結果の保存について、検討を進めるべきであると考えられる。さらに、第 4 章で述べたように記録保存に関する調査結果をモニタリング技術メニューに統合することを検討しており、技術メニューに搭載すべき内容とその提示方法について検討を行う必要がある。

第 6 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] OECD/NEA (2010), Long-term preservation of information and knowledge. Draft vision document of the RWMC project 2010-2013. NEA/RWM(2010)9/PROV, 30-Jun-2010. www.oecd-nea.org/rwm/docs/2010/rwm2010-9.pdf

[3] OECD/NEA (2013), Glossary of Terms NEA Project on Long-term Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) Across Generations, Draft - Definitions as of 31 October 2013 NEA/RWM(2011)14/REV3, 31 October 2013. http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/RWM(2011)14/REV3&docLanguage=En

[4] OECD/NEA (2013), Progress Report of the Project on Preservation of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations March 2012 – March 2013 NEA/RWM/RKM(2013)1, 21 June, 2013. http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/RWM/RKM(2013)1&docLanguage=En

[5] OECD/NEA (2013), Proposed Adenda of the 4th Meeting of the RWMC Project on the Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations 16-18 April 2013, OECD Headquarters, Paris (France) NEA/RWM/RKM(2013)2, 27 March, 2013. http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/RWM/RKM(2013)2/REV1&docLanguage=En

[6] OECD/NEA (2013), Summary Record of the Fourth Meeting of Records, Knowledge and Memory (RK&M) across Generations project 16-18 April 2013, OECD Conference Centre, Paris (France) NEA/RWM/RKM(2013)4, 21 June, 2013. http://www.oecd-nea.org/rwm/rkm/documents/summary-record-rkm-2013-4.pdf

[7] OECD/NEA (2013), Minimal Set of Records Initiative-Vision Document NEA/RWM/RKM(2013)3/PROV, 26 March, 2013.
http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/RWM/RKM(2013)3/PROV/REV1&docLanguage=En

[8] OECD/NEA (2013), Proposed Adenda of the Meeting of the OECD NEA Radioactive Waste Management Committee " RK&M " Project 24-26 September 2013 NEA Premises, Issy les Moulineaux (France)
http://search.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/RWM/A(2013)2&docLanguage=En

[9] UK-EA (2009), Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes, Guidance on Requirements for Authorisation, February 2009.
http://publications.environment-agency.gov.uk/pdf/GEHO0209BPJM-e-e.pdf

[10] UK-EA (2009), Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes, Guidance on Requirements for Authorisation , Response to Consultation Comments, March 2009
http://cdn.environment-agency.gov.uk/geho0209bpjo-e-e.pdf

[11] NDA (2010), Generic Environmental Safety Case, main report, NDA Report no.NDA/RWMD/021, December 2010
https://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-Generic-Environmental-Safety-Case-main-report-December-2010.pdf

[12] NDA (2010), WPS/921 Guidance on the preparation of submissions for the disposability assessment of waste packages by use of a Standard Waste Package Description, NDA Technical Note no.13813923, October 2010
http://www.nda.gov.uk/documents/biblio/upload/GD-Guidance-on-the-preparation-of-submissions-for-the-disposability-assessment-of-waste-packages-WPS921.pdf

[13] NDA (2010), Generic disposal facility designs, NDA Report no.NDA/RWMD/048, December 2010
https://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-Generic-disposal-facility-designs-December-2010.pdf

[14] NDA (2010), Safety case production and management, NDA Report no. NDA/RWMD/024, December 2010
http://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-Safety-case-production-and-management-December-2010.pdf#search='NDA%2FRWMD%2F024+Safety+case+production+and+management'

[15] NDA (2010), Steps towards implementation, NDA Report no.NDA/RWMD/013, March 2010
https://www.nda.gov.uk/documents/upload/Geological-Disposal-Steps-Towards-Implementation-March-2010.pdf

[16] NDA (2012), National Nuclear Archive project
https://www.nda.gov.uk/news/nna-project-proceeds.cfm

[17] Scotland on Sunday (2013), Dounreay documents set for nuclear archive
http://www.scotsman.com/lifestyle/heritage/dounreay-documents-set-for-nuclear-archive-1-3052390

[18] RWMC (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）
http://www.enecho.meti.go.jp/rw/library/21-07/21fy7-5.pdf

[19] 公文書等の管理に関する法律（平成二十一年七月一日法律第六十六号／最終改正：平成二四年一一月二六日法律第九八号）
http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H21/H21HO066.html

[20] 公文書等の管理に関する法律施行令（平成二十二年十二月二十二日政令第二百五十号／最終改正：平成二三年一二月二六日政令第四二一号）
http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H22/H22SE250.html

[21] 内閣府(2012), 行政文書の管理に関するガイドライン（平成 23 年 4 月 1 日　内閣総理大臣決定／平成 24 年 6 月 29 日一部改正）
http://www8.cao.go.jp/chosei/koubun/hourei/kanri-gl.pdf

[22] 内閣府(2012), 特定歴史公文書等の保存、利用及び廃棄に関するガイドライン（平成 23 年 4 月 1 日　内閣総理大臣決定／平成 24 年 11 月 13 日一部改正（最終））
http://www8.cao.go.jp/chosei/koubun/hourei/hozonriyou-gl.pdf

第7章　まとめと今後の課題

7.1　まとめ

(1)　モニタリング関連技術の整備に関する計画の検討

第2章では本年度から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（表 2.2.4-1）。計画にあたっては、昨年度、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。

(2)　地層処分モニタリングの枠組みに関する検討

第 3 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、はじめに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、本検討で対象とするモニタリングについて説明した。次に、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）について検討する国際共同研究 MoDeRn の概要を説明し、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。これらの検討を踏まえて、人工バリアを対象とした性能確認モニタリングについて、制約条件等を示したうえで、どのような実施のオプションが有り得るかについて考察を行った。

地層処分のモニタリングについては多様な分類が有り得るが、ここでは MoDeRn の成果に倣い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）、操業安全性、環境影響、核物質保障措置 とした。また、回収可能性に関しては処分システムの期待/予測された挙動の検証/確認に関するモニタリングと操業安全性に関するモニタリングが関連する。

MoDeRn プロジェクトは本年度で終了し、複数の報告書が順次公開されている。このうち、モニタリングの戦略に関する主要な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。この報告書では、処分システムの期待/予測された挙動の検証/確認に関するを検討する際のレファレンスとなる検討手順（ワークフロー）（図 3.3.2-1）を示し、その各段階について詳細に説明した。また、モニタリングからのデータによる意思決定プロセスについて検討し、ワークフローを示すとともに、モニタリングの社会的側面について考察を行なった。

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（表 3.4.3-1）。

また、人工バリアの性能確認に関するモニタリングパラメータについて、緩衝材を事例として検討を行った。パラメータの選定は、昨年度までに検討したワークフローを一部改編し、安全機能と技術要件、緩衝材に関係する FEP、FEP のうちモニタリング対象として重要なものの選定、重要な FEP に関係するパラメータの選定、さらにこのパラメータを直接または間接的に示しモニタリング可能なパラメータの選定という手順で行った（表 3.4.2-11）。

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（図 3.4.4-1～図 3.4.4-4）。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。

(3) 地層処分モニタリング技術メニューの整備

第 4 章では地層処分モニタリング技術メニューの整備に関する検討を行った。地層処分モニタリング技術メニューは、モニタリング機器等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。昨年度までに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・閲覧を可能としている。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ている（図 4.1.3-3）。

今年度は、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

(4) 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 5 章では、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。

処分環境へのセンサの適応に関し、モニタリング機器の耐圧性、耐食性、耐放射線性という主に材料や製作上の工夫により克服される課題と、処分環境で適用できる信頼性と安定性のあるpHセンサの開発の必要性等のより原理的な部分での課題が挙げられる。

モニタリング機器の故障については、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。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。

地中無線モニタリング機器の開発については課題の再検討を実施した。第2フェーズでの開発成果を踏まえ、最終的な適用イメージを設定すると共に、各適用イメージにおける課題と開発項目を抽出した。その後、原位置試験を考慮し他機関との共同研究も踏まえ、課題の克服のし易さや、モニタリングの枠組みに関する検討との関係を考慮した上で優先順位の重みづけを行った。その結果、地中無線による長距離通信試験の実施、地中無線中継装置のネットワーク化や地中無線装置に用いる電源の検討等の課題を優先性の高い課題と位置付け、年度ごとの計画を立案した（表 5.4.4-3）。

昨年度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（図 5.4.8-17、図 5.4.8-18）。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（図 5.4.5-5、図 5.4.5-6）。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（図 5.4.6-13）。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いる。本年度はこれらの試験のための準備として、人工バリア性能試験における地中無線でのモニタリングに関し、周辺の状態（支保部材、センサ、ケーブル設置状況など）を考慮した機器の配置案（図 5.4.9-3）を検討するとともに装置の製作を行った。また、冠水試験実施予定箇所の電磁ノイズレベルを確認し、地中無線でのデータ送信が可能であることを確認するとともに装置の製作を行った。

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（表 5.4.7-2、表 5.4.7-4）。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（表 5.4.7-61）。

原環センターでは地中無線モニタリング装置の開発について、フランスの ANDRA と共同研究を実施している。平成 23 年度から実施している、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については、間隙水圧計のモニタリング結果から緩衝材がほぼ飽和状態にあること（図 5.4.11-5）、温度坑内温度の影響を受けつつも地温に漸近していること（図 5.4.11-7）等を確認した。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、本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)を用いて評価した。その結果、地上の送信機から地下坑道に掘削したボーリング孔中の受信機への送信が最も実現性が高く、地下坑道の送信機から地上より掘削したボーリング孔中の受信機への送信がこれに次ぐ実現性を持ち、地下坑道の送信機から地上の受信機への送信が最も実現性が厳しいとの評価結果となり、この順番で試験を実施すべきと結論した（図 5.4.11-27）。

(5) 記録保存に関する調査

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。本章では、地層処分の実施主体等の関係機関が，記録保存に関する具体的計画を策定する際の選択肢・判断材料を提示するための，システム案の整備に資することを目的とし，記録保存に関する制度等の最新動向として以下の内容を調査した。

OECD/NEA-RWM が 2009 年より実施している, Preserving Information and Memory Across Generations: Proposal for A Dedicated Initiative and A Specific Project に関して，本業務に有益であると判断した 3 文書についてその内容を整理した（5.2.4 項）。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。

英国の地層処分に関する記録保存について，これまで調査を実施していなかった 2009 年の規制要件及び事業者の対応策を整理した（6.3.4 項）。英国の規制要件は，記録保存に関わる内容として閉鎖前の意思決定に関する記録管理や廃止措置後の地域の記録保管所や記録保管所（原子力アーカイブ）への移管等について明確に規定しており、NDA は規制要件に従い，これらの要件について，ほぼ実施することとしている。

わが国では平成 23 年に「公文書管理法」が施行されており，その概要について調査を実施している。本法では，地層処分事業については，直接対象とはされていないものの，社会への説明責任として公益を有する記録は永久保存されることとなっており，今後地層処分事業により発生する記録についても対象となる可能性がある。このため，本年度は，本法施行後に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）に関して，その内容を調査・整理した（6.4.2 項）。

7.2 今後の課題

(1) 性能確認モニタリングに関する課題

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。今後は、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する必要がある。

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。しかしながら、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ため、入手可能な情報に基づいた検討を実施する必要がある。その方法として、処分システムの構成要素の安全機能に基づく検討を試行した。その結果得られた課題として、安全機能、技術要件、FEP について調査を行い、これらの相互関係の関係を示す必要があること、これらの FEP のうち重要なものは何か、モニタリングにより確認すべきものは何かを抽出する必要があること、このような FEP について、技術的にモニタリング可能なパラメータとの関係を明らかにする必要があることを抽出した。

人工バリアの性能確認モニタリングにおいては、人工バリアの構成要素の安全機能や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を行うこととなるが、このような比較における課題として、人工バリア構築後の、数 10 年間のモニタリング可能な期間での挙動が、その後の状態変遷に大きな影響を与え得るパラメータを特定し、モニタリング対象とする必要があることが挙げられる。さらに、人工バリアの挙動に関する仮定やモデルは、室内試験等において取得される情報に基づいて構築されることから、具体的な試験内容を十分に検証できる事象を選定する必要がある。このような事象としては、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」において検討を実施する、緩衝材の再冠水時の膨潤挙動が挙げられ、先ずはこの事象を中心的な課題とすべきと結論した。

本事業における成果としては、これらの検討とモニタリングの技術的実現性に関する検討を反映して、性能確認に関するモニタリングについて、いつ、何処で、どのようにしてモニタリングを実施すべきか、モニタリング結果をどのように反映すべきかを示すことにより、具体的なモニタリング計画を例示すべきである。特に、精密調査段階の後半における地下調査施設での実証試験におけるモニタリングにて確認される事項を明確にし、これにより、事業の許認可の後、処分場の建設段階、操業段階にてモニタリングにより確認しなければならない事項は何かを提示すべきと結論した。

(2)　その他のモニタリングに関する課題

処分システム工学確証技術開発「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する基盤技術の整備」において、状況把握・監視技術について検討を実施しており、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為、当該研究と情報交換を実施しながら検討を行う必要がある。また、廃棄体の回収に関する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」における回収維持期間等の検討内容を考慮し、回収可能性の維持に関するモニタリング、回収の起因事象に関するモニタリングについて検討を実施する必要がある。前者は操業安全に関するモニタリングと密接に関係し、後者は性能確認に関するモニタリングに密接に関係する。さらには、制度的管理におけるモニタリングの役割も検討すべきである。

(3)　技術メニューの整備に関する課題

技術メニューの機能の拡充については、本章にて検討した実装に必要な期間に加え、技術メニューに格納される情報であるモニタリングの枠組みに関する検討や、技術的実現性の向上に関する検討の進行状況を考慮して実施時期を決定する必要がある。

現在、新たな掲載情報としてまとまった成果が得られているものは、記録保存に関する検討であるため、先ずは記録保存の検討成果をモニタリング技術メニューに統合することを優先して、技術メニューの整備を進めるべきと結論した。

(4)　地層処分モニタリングの技術的実現性向上に関する課題

技術的実現性向上に関する課題については、センサに関する課題、伝送手段に関する課題、システムとしての課題に分類できる。処分環境へのセンサの適応に関しては、耐圧性、耐食性、耐放射線性という共通的な課題があるが、モニタリングパラメータと測定原理により多様なセンサがあるため、自らがセンサ開発を行うのではなく、海外の実施機関が地下環境での試験等に選定するセンサ等を継続的にウォッチングし、有望なセンサを選定すべきと結論した。

地中無線モニタリング技術については、本年度、課題を再検討し、地中無線による長距離通信試験の実施、地中無線中継装置のネットワーク化や地中無線装置に用いる電源の検討等の課題を優先性の高い課題と位置付けた。

モニタリングシステムの課題としては、センサや伝送経路の故障を考慮した、頑健性、冗長性のあるシステムを検討する必要がある。このためには処分環境で適用可能な各種のセンサの選定と共にこれを多重化し、必要なモニタリングデータを確実に取得できるようにするとともに、有線の伝送経路、無線による伝送経路ともにメッシュ型のネットワーク化等により、データ伝達経路に故障が起きた場合にもデータを送ることができるシステムを検討する必要がある。

また、技術開発成果については地下研究施設等での検証を実施する必要があるものと考えられる。地下研究施設での地中無線モニタリング技術の検証においては（独）日本原子力研究開発機構及びフランス ANDRA との共同研究により実施することを計画している。また、地中無線モニタリング技術の開発の一部はフランス ANDRA との共同研究により実施することを計画している。

(5) 記録保存に関する課題

今後の課題として、OECD/NEA における検討が引続き実施されているため、検討成果を引続き調査する必要がある。また、OECD/NEA における検討では、モニタリングに関する言及があり、モニタリング結果が保存すべき記録の一部として捉えられている。本事業では、モニタリングすべき項目や結果の反映方法等について検討を実施していることから、モニタリング結果の保存について、検討を進めるべきであると考えられる。さらに、第 4 章で述べたように記録保存に関する調査結果をモニタリング技術メニューに統合することを検討しており、技術メニューに搭載すべき内容とその提示方法について検討を行う必要がある。