

平成28年度  
地層処分技術調査等事業  
処分システム工学確証技術開発

報告書  
(第4分冊)

モニタリング関連技術の整備

平成29年3月

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28年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発のうち、モニタリング関連技術の整備の成果を取りまとめたものです。

## 報告書の構成

平成28年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発の報告書は、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	人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
○	第4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

# 目 次

第 1 章 研究の目的及び概要 .....	1-1
1.1 研究目的.....	1-1
1.2 平成 28 年度の実施概要.....	1-1
1.3 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 .....	1-1
1.4 本年度の実施内容 .....	1-6
1.5 報告書の構成 .....	1-7
第 2 章 モニタリングの枠組みに関する検討.....	2-1
2.1 目的及び実施概要 .....	2-1
2.2 性能確認プログラムを指向した国際的動向の調査 .....	2-1
2.2.1 IAEA による安全基準文書 .....	2-2
2.2.2 米国における事例.....	2-25
2.2.3 フィンランドの事例.....	2-31
2.2.4 スウェーデンの事例.....	2-35
2.2.5 フランスの事例 .....	2-41
2.2.6 わが国の法令.....	2-45
2.2.7 モニタリング国際共同研究 MoDeRn プロジェクトにおける検討.....	2-45
2.2.8 モニタリング国際共同研究 MoDeRn2020 プロジェクトにおける検討 .....	2-50
2.2.9 OECD/NEA における検討 .....	2-59
2.3 地層処分における性能確認プログラムに関するまとめと考察.....	2-61
2.3.1 IAEA による安全基準文書における動向 .....	2-61
2.3.2 事業が先行する諸外国の取組動向 .....	2-61
2.3.3 国際共同研究での動向 .....	2-63
2.3.4 国際動向から抽出された事項 .....	2-63
2.3.5 わが国における性能確認プログラムの方向性に関する考察.....	2-64
参考文献.....	2-71
第 3 章 地中無線モニタリング技術の検討 .....	3-1
3.1 目的および実施概要 .....	3-1
3.2 無線伝送技術の開発 .....	3-2
3.2.1 概要.....	3-2
3.2.2 中継装置の製作および動作確認.....	3-3
3.2.3 地中無線伝送技術に関する開発状況の調査.....	3-42
3.2.4 試験坑道で実施中の適用試験の整理、確認.....	3-47
3.3 無線給電技術の開発 .....	3-51
3.3.1 概要.....	3-51

3.3.2	実施内容における前提条件の整理 .....	3-52
3.3.3	無線給電システム設計手法の検討 .....	3-55
3.3.4	プラグを介した無線給電の適用性の検討 .....	3-72
3.3.5	処分孔を対象とした無線給電技術の調査 .....	3-83
3.4	技術メニューの整備 .....	3-92
3.4.1	概要.....	3-92
3.4.2	実施内容 .....	3-92
3.5	まとめ .....	3-100
3.5.1	無線伝送技術の開発 .....	3-100
3.5.2	無線給電システム設計手法の検討 .....	3-100
3.5.3	技術メニューの整備 .....	3-101
	参考文献.....	3-102
<b>第4章</b>	<b>記録保存に関する調査 .....</b>	<b>4-1</b>
4.1	目的および実施概要 .....	4-1
4.2	OECD/NEA の検討状況の調査・整理.....	4-1
4.2.1	RK&M イニシアチブの概要 .....	4-1
4.2.2	RK&M イニシアチブ会合における検討状況.....	4-6
4.2.3	短・中期における記録、知識、記憶の保存を支援する国際的メカニズム .....	4-12
4.3	まとめ .....	4-20
	参考文献.....	4-21
<b>第5章</b>	<b>まとめ.....</b>	<b>5-1</b>
5.1	モニタリングの枠組みに関する検討.....	5-1
5.2	地中無線モニタリング技術の検討.....	5-1
5.2.1	無線伝送技術の開発 .....	5-1
5.2.2	無線給電システム設計手法の検討 .....	5-3
5.2.3	技術メニューの整備 .....	5-3
5.3	記録保存に関する動向調査.....	5-4

# 目 次

図 2.2.2-1	性能確認の実施と評価に関する階層構造 (SANDIA 国立研究所 [10])	2-28
図 2.2.2-2	性能確認パラメータの特定に用いたソース (SANDIA 国立研究所 [10])	2-29
図 2.2.2-3	性能確認プログラムの実施 (SANDIA 国立研究所 [10])	2-30
図 2.2.4-1	安全評価の主な段階の概要 (SR-Site[17])	2-38
図 2.2.7-1	MoDeRn モニタリングワークフロー [23]	2-50
図 2.2.8-1	各ワークパッケージの関係図[24]	2-52
図 2.2.8-2	人工バリアに関するプロセスからのパラメータ選定方法[26]	2-58
図 2.3.5-1	モニタリングの段階的な役割[28]	2-66
図 2.3.5-2	「品質保証/性能確認プログラム」の構成要素に関する概念図	2-68
図 2.3.5-3	人工バリアの性能の変遷と処分システムの成立性の確保方法	2-69
図 3.2.2-1	中継装置設計フロー	3-4
図 3.2.2-2	アンテナの構成 (断面模式図)	3-5
図 3.2.2-3	ナノ結晶軟磁性材料シート	3-6
図 3.2.2-4	送受信兼用アンテナ受信強度の計算結果	3-6
図 3.2.2-5	磁性材コアの量の決め方	3-7
図 3.2.2-6	アンテナ回路図	3-8
図 3.2.2-7	製作した送受信兼用アンテナ	3-8
図 3.2.2-8	アンテナの調整	3-9
図 3.2.2-9	アンテナ調整機器の構成	3-10
図 3.2.2-10	送受信兼用アンテナの測定結果及び計算結果	3-11
図 3.2.2-11	電源の回路図	3-13
図 3.2.2-12	FEM 解析結果 (相当応力)	3-15
図 3.2.2-13	FEM 解析結果 (変位量)	3-15
図 3.2.2-14	耐圧筐体を構成する内殻 VP150 (左) と外殻 VP200 (右)	3-16
図 3.2.2-15	設計した中継装置の組立図	3-17
図 3.2.2-16	中継装置基板 (上: 制御基板、下: 低消費受信基板)	3-18
図 3.2.2-17	固定用シャーシと中継装置基板	3-18
図 3.2.2-18	作成した電源 (リチウム電池 3 本×2 組)	3-19
図 3.2.2-19	蓋に固定された最下段電池部 (リチウム電池 3 本×4 組)	3-19
図 3.2.2-20	基板・最下段電池部の固定	3-20
図 3.2.2-21	組み立てた電源部	3-20
図 3.2.2-22	内殻筐体 (左図) 及び外殻筐体 (右図) の組み立て	3-21
図 3.2.2-23	筐体の水没状況	3-22
図 3.2.2-24	加圧試験前 (左図) と加圧試験中 (右図)	3-22

図 3.2.2-25	水没検知シール .....	3-23
図 3.2.2-26	筐体外観（左：試験前、右：試験後） .....	3-24
図 3.2.2-27	開封した筐体底部（左：試験前、右：試験後） .....	3-24
図 3.2.2-28	開封した筐体内部（蓋部） .....	3-25
図 3.2.2-29	内殻と外殻の間の充填状況 .....	3-25
図 3.2.2-30	温度サイクル（変温パターン） .....	3-26
図 3.2.2-31	温度試験状況（恒温器内部の中継装置） .....	3-27
図 3.2.2-32	温度試験後の動作確認（数百 mVrms の受信信号を確認） .....	3-27
図 3.2.2-33	包装貨物振動試験状況.....	3-28
図 3.2.2-34	包装貨物振動試験結果.....	3-29
図 3.2.2-35	振動試験後の動作確認試験状況.....	3-29
図 3.2.2-36	受信器改良状況 .....	3-30
図 3.2.2-37	通信特性試験模式図 .....	3-31
図 3.2.2-38	通信特性試験状況.....	3-32
図 3.2.2-39	通信特性試験結果.....	3-32
図 3.2.2-40	データ集約試験模式図.....	3-33
図 3.2.2-41	データ集約試験状況 .....	3-34
図 3.2.2-42	データ集約試験結果（受信強度） .....	3-35
図 3.2.2-43	データ分岐試験模式図.....	3-36
図 3.2.2-44	データ分岐試験状況 .....	3-36
図 3.2.2-45	データ分岐試験結果（データ通信①の受信強度） .....	3-37
図 3.2.2-46	データ分岐試験結果（データ通信②の受信強度） .....	3-38
図 3.2.2-47	データ分岐試験結果（PC 画面上の温度データ） .....	3-38
図 3.2.2-48	ランニング試験状況 .....	3-39
図 3.2.2-49	ランニング試験模式図.....	3-39
図 3.2.2-50	ランニング試験結果 .....	3-40
図 3.2.2-51	ランニング試験で受信した温度データ .....	3-41
図 3.2.3-1	高周波無線通信システム（左：無線ノードと受信器、右：制御器） [5] .....	3-43
図 3.2.3-2	無線ノード模式図[5] .....	3-43
図 3.2.3-3	グリムゼル試験サイトでの試験レイアウト[5] .....	3-43
図 3.2.3-4	HADES URL での送信アンテナ（ECN-1） [6] .....	3-44
図 3.2.3-5	ワイヤレス間隙水圧計[13] .....	3-45
図 3.2.3-6	除染土壌等の現場保管への適用事例[18] .....	3-46
図 3.2.4-1	測定データ（002 局）【幌延 URL】 .....	3-47
図 3.2.4-2	測定データ（003 局）【幌延 URL】 .....	3-48
図 3.2.4-3	測定データ（004 局）【幌延 URL】 .....	3-48
図 3.2.4-4	測定データ（005 局）【幌延 URL】 .....	3-48
図 3.2.4-5	測定データ（006 局）【幌延 URL】 .....	3-48

図 3.2.4-6	測定データ (007 局) 【幌延 URL】 .....	3-49
図 3.2.4-7	測定データ (008 局) 【幌延 URL】 .....	3-49
図 3.2.4-8	測定データ (瑞浪超深地層研究所) .....	3-50
図 3.3.2-1	磁界共振結合のイメージ図 .....	3-52
図 3.3.2-2	変位や偏角のイメージ図 .....	3-53
図 3.3.3-1	磁界共振結合の等価回路 .....	3-56
図 3.3.3-2	試験に使用するコイル (処分孔用の 1/6 サイズ) .....	3-57
図 3.3.3-3	インピーダンスアナライザ E4990A .....	3-58
図 3.3.3-4	1/6 スケールコイルの自己インダクタンス .....	3-58
図 3.3.3-5	1/6 スケールコイルの内部抵抗 .....	3-59
図 3.3.3-6	1/6 スケールコイルの $Q$ 値 .....	3-59
図 3.3.3-7	結合係数 $k$ の測定方法 (JIS-C5321) .....	3-61
図 3.3.3-8	結合係数 $k$ の測定状況 .....	3-61
図 3.3.3-9	結合係数 $k$ の測定結果 .....	3-62
図 3.3.3-10	給電効率の計算結果 .....	3-62
図 3.3.3-11	試験のセットアップ .....	3-63
図 3.3.3-12	給電試験の試験状況 .....	3-63
図 3.3.3-13	給電試験結果 .....	3-64
図 3.3.3-14	変位に対する結合係数 $k$ の測定状況 .....	3-65
図 3.3.3-15	変位に対する結合係数 $k$ の測定結果 .....	3-66
図 3.3.3-16	変位時のコイル間距離に対する結合係数 ( $k$ ) .....	3-66
図 3.3.3-17	変位に対する給電効率 ( $Q$ ) の変化 .....	3-67
図 3.3.3-18	変位時のコイル間距離に対する給電効率 ( $Q$ ) .....	3-67
図 3.3.3-19	変角に対する結合係数 ( $k$ ) の測定状況 .....	3-68
図 3.3.3-20	偏角に対する結合係数 ( $k$ ) の測定結果 .....	3-69
図 3.3.3-21	偏角時のコイル間距離に対する結合係数 ( $k$ ) .....	3-69
図 3.3.3-22	偏角に対する給電効率 ( $Q$ ) の変化 .....	3-70
図 3.3.3-23	偏角時のコイル間距離に対する給電効率 ( $Q$ ) .....	3-70
図 3.3.4-1	試験坑道断面 (概念図) [25] .....	3-73
図 3.3.4-2	瑞浪超深地層研究所のプラグ配筋図 (その 1) [26] .....	3-74
図 3.3.4-3	瑞浪超深地層研究所のプラグ配筋図 (その 2) [26] .....	3-74
図 3.3.4-4	プラグの鉄筋とコイルの大きさの関係 .....	3-75
図 3.3.4-5	小規模試験における空気中の給電効率測定 .....	3-76
図 3.3.4-6	解析モデル .....	3-76
図 3.3.4-7	溶融金網を介した給電効率の影響評価 .....	3-77
図 3.3.4-8	金網を介した給電効率 ( $Q$ ) .....	3-77
図 3.3.4-9	自己インダクタンス (金網) .....	3-78
図 3.3.4-10	内部抵抗 (金網) .....	3-78

図 3.3.4-11	金網を介した周波数と給電効率 ( $Q$ ) の関係 .....	3-78
図 3.3.4-12	改善策に対する試験結果.....	3-79
図 3.3.4-13	試験体のコンクリートブロック[27].....	3-80
図 3.3.4-14	コンクリートを介した給電効率の影響評価.....	3-80
図 3.3.4-15	コンクリートを介した給電効率の測定結果.....	3-81
図 3.3.5-1	インナー方式 .....	3-84
図 3.3.5-2	直線状の中継方式 (左) と平面上の中継方式 (右) .....	3-84
図 3.3.5-3	平行二線式.....	3-85
図 3.3.5-4	平行二線路の定在波のイメージ .....	3-85
図 3.3.5-5	インナー方式の処分孔への適用イメージ .....	3-86
図 3.3.5-6	中継方式の処分孔への適用イメージ.....	3-86
図 3.3.5-7	インナー方式と中継方式の双方の適用イメージ.....	3-87
図 3.3.5-8	インナー方式の室内試験計画 1 .....	3-88
図 3.3.5-9	インナー方式の室内試験計画 2 .....	3-88
図 3.3.5-10	中継方式の室内試験計画.....	3-88
図 3.3.5-11	クロスカップリング (インナー方式での一例) .....	3-89
図 3.3.5-12	受電コイルが 2 つの場合の等価回路とクロスカップリング .....	3-90
図 3.4.2-1	操作性向上のためのシステム改良前後の画面イメージ (その 1) .....	3-98
図 3.4.2-2	操作性向上のためのシステム改良前後の画面イメージ (その 2) .....	3-99
図 4.2.1-1	NEA 組織図 .....	4-2
図 4.2.1-2	放射性廃棄物管理委員会 (RWMC) 組織図.....	4-3
図 4.2.2-1	RK&M イニシアチブの提唱する処分場に関する記録の構造 .....	4-9

# 目 次

表 1.3-1 平成 27 年度に見直した 5 か年計画.....	1-5
表 1.4-1 平成 28 年度の実施内容 .....	1-6
表 2.2.1-1 性能確認及びモニタリング（特定安全要件[1]） .....	2-4
表 2.2.1-2 性能確認及びモニタリング（特定安全指針[2]） .....	2-6
表 2.2.1-3 セーフティケース及び裏付けとなる安全評価（特定安全指針[2]） .....	2-8
表 2.2.1-4 放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価（特定安全指針[3]） .....	2-9
表 2.2.1-5 放射性廃棄物処分施設のモニタリング及びサーベイランス（特定安全指針[4]） .....	2-11
表 2.2.1-6 モニタリング及びサーベイランスの定義と目的（特定安全指針[4]） .....	2-13
表 2.2.1-7 地層処分施設におけるモニタリング（特定安全指針[4]） .....	2-14
表 2.2.1-8 処分施設の操業期間中におけるモニタリング（特定安全指針[4]） .....	2-15
表 2.2.1-9 モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用（特定安全指針[4]） .....	2-17
表 2.2.1-10 予測される結果からの逸脱（特定安全指針[4]） .....	2-19
表 2.2.1-11 モニタリング対象とすべきパラメータ（特定安全指針[4]） .....	2-21
表 2.2.2-1 性能確認プログラムの要件（10 CFR Part 63[7]） .....	2-25
表 2.2.2-2 DOE の報告書による性能確認に関する記載.....	2-27
表 2.2.2-3 処分場におけるモニタリングの要件（SANDIA 国立研究所 [10]） .....	2-28
表 2.2.2-4 性能確認のアプローチ（米国電力研究所（2001）） .....	2-30
表 2.2.3-1 放射線・原子力安全センター（STUK）の規則及び安全指針における性能確認及 びモニタリング .....	2-31
表 2.2.3-2 Posiva 社の建設許可申請書及び報告書における性能確認モニタリング .....	2-32
表 2.2.3-3 人工バリアのモニタリング対象プロセスの選定（Posiva 社[14]） .....	2-34
表 2.2.4-1 放射線安全機関（SSM）の規則及びその注釈における品質保証、性能確認に関 する記載.....	2-35
表 2.2.4-2 バリア性能のモニタリングに関する記述（SKB R-04-13[16]） .....	2-37
表 2.2.4-3 モニタリングに関する概要（SR-Site[17]） .....	2-40
表 2.2.5-1 性能確認及びモニタリング（フランスの法令及び安全指針） .....	2-42
表 2.2.5-2 ANDRA による地層処分に関する性能確認及びモニタリング（実現可能性報告書 （Dossier2005）） .....	2-44
表 2.2.6-1 原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律における処分場の性能の維 持に関する規定.....	2-45
表 2.2.7-1 MoDeRn におけるモニタリングの目標と分類[25].....	2-48
表 2.2.7-2 MoDeRn プロジェクト最終報告書[23]の構成と主な内容.....	2-48
表 2.2.8-1 プロジェクトへの参加機関 .....	2-54

表 2.2.8-2	性能確認に資するモニタリングに関する戦略要素[26]	2-55
表 2.2.8-3	回収の有無、実施場所によるモニタリングの長所と短所[26]	2-56
表 2.2.8-4	対象によるモニタリングの長所と短所[26]	2-56
表 2.2.8-5	実施時期によるモニタリングの長所と短所[26]	2-57
表 2.2.9-1	地層処分施設のモニタリング（技術的及び社会的側面）[25]の構成及び内容 .....	2-60
表 2.3.2-1	諸外国での性能確認に対する規制と実施主体の取り組みの例	2-62
表 2.3.5-1	目的に基づくモニタリングの分類[28]	2-65
表 3.2.2-1	中継装置の設計条件	3-5
表 3.2.2-2	アンテナの概略設計結果	3-7
表 3.2.2-3	電源設計のための運用条件	3-12
表 3.2.2-4	各動作別年間消費電流量	3-12
表 3.2.2-5	電源容量計算結果	3-12
表 3.2.2-6	筐体の FEM 解析条件	3-14
表 3.2.2-7	温度サイクル（変温パターン）	3-26
表 3.2.2-8	データ集約試験結果（受信器での回収データ）	3-35
表 3.2.2-9	データ分岐試験結果（データ通信①の回収データ）	3-37
表 3.2.2-10	データ分岐試験結果（データ通信②の回収データ）	3-38
表 3.3.2-1	給電方式の分類（赤枠は本検討対象）	3-52
表 3.3.2-2	地層処分事業で無線電力供給が想定される場所	3-54
表 3.3.3-1	給電試験に用いる 1/6 スケールのコイル	3-57
表 3.3.3-2	180kHz におけるコイルのパラメータ	3-60
表 3.3.3-3	理論式からの計算値と試験結果	3-64
表 3.3.3-4	変位に対する結合係数 ( $k$ )	3-66
表 3.3.3-5	変位に対する給電効率 ( $Q$ )	3-68
表 3.3.3-6	偏角に対する結合係数 ( $k$ )	3-69
表 3.3.3-7	偏角に対する給電効率 ( $Q$ )	3-71
表 3.3.4-1	小規模試験の仕様	3-75
表 3.3.4-2	空気中の給電効率 ( $Q$ )	3-76
表 3.3.4-3	金網を介した給電効率 ( $Q$ )	3-77
表 3.3.4-4	180 kHz における空気中と金網がある時のコイルのパラメータ	3-78
表 3.3.4-5	改善策に対する試験結果	3-79
表 3.3.4-6	コンクリートブロックの配合	3-80
表 3.3.4-7	コンクリートを介した給電効率の測定結果	3-81
表 3.4.2-1	技術メニューのデータ更新の方針及び更新の概要	3-94
表 3.4.2-2	検索条件のプログラム変更点	3-96
表 3.4.2-3	検索結果におけるプログラム変更点	3-96
表 3.4.2-4	計測／伝送方法比較表の非表示化のためのプログラム変更点	3-97

表 4.2.1-1	NEA 技術委員会の名称.....	4-2
表 4.2.2-1	鍵となる情報ファイル (KIF) の構成案[12].....	4-10
表 4.2.2-2	記録保存システムの階層構造.....	4-10
表 4.2.2-3	高度なレベルの情報 (HLI) の例示 (IAEA TECDOC-1097[13]) .....	4-11
表 4.2.2-4	IAEA、TECDOC-1097 と RK&M イニシアチブの記録の階層構造の関係 .....	4-11
表 4.2.2-5	RK&M イニシアチブ フェーズ 2 最終報告書構成案 .....	4-12
表 4.2.3-1	「短・中期における記録、知識、記憶の保存」調査結果概要表[14] (1/6) ....	4-14

# 第1章 研究の目的及び概要

## 1.1 研究目的

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

その中で「モニタリング関連技術の整備」は、将来のモニタリング計画の策定や実施における技術基盤として、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共同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、モニタリングに係る要素技術開発として、バリア機能や処分場性能への影響を抑制したモニタリングシステムの構築に向けた地中無線モニタリング技術の検討を、地下研究施設への適用をとおして実施する。これらの取組によって、地層処分モニタリングに係る技術基盤の整備を行い、将来のモニタリング計画の立案やプログラムの策定に資するものとする。

さらに、モニタリングと同様に、地層処分事業の制度的管理に関連する取組の 1 つと位置付けられる記録保存の考え方や取組内容について、国際的な検討動向を調査する。

## 1.2 平成 28 年度の実施概要

平成 28 年度は、地層処分システムの長期健全性の確認等に関する検討として、人工バリアの状態確認に対するモニタリング結果の反映方法を検討するとともに、国際共同研究への参画等によるモニタリングの検討も併せて検討する。地中無線モニタリング技術については、無線伝送冗長化技術の確認試験や無線給電技術の検討等を行い、地下研究施設等において、システムの適用性を検証する。これらに加え、記録保存については OECD/NEA における検討状況の調査を継続実施する。

## 1.3 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 1 フェーズ、平成 19 年度から平成 24 年度の期間を第 2 フェーズとして開発、検討を行っており、平成 25 年度からの 5 年を第 3 フェーズとしている。

### (1) 第 1、第 2 フェーズ

モニタリングに係る調査研究は、資源エネルギー庁調査等委託事業として平成 12 年度に着手している。以降、わが国におけるモニタリング方策や計画等の策定に資する情報や基盤技術等の整備に向けて、モニタリングの位置付けや目的等に係る検討とともに、技術

の適用性に関する体系的な情報整備を進めてきた。併せて、記録保存についても、本事業の調査研究の対象として、国際的な議論などの最新動向の調査を実施している。

このような調査研究の取組は、委託事業の節目とも整合させつつ段階的に進めており、第1フェーズ（平成12年度～平成18年度）及び第2フェーズ（平成19年度～平成24年度）の調査研究を経て、それらの地層処分事業における位置付けに関する国内外の検討動向等の整理を行い、モニタリングについては次の4つの反映先の観点からその意義や目的等を整理した。

- 1) ベースライン構築（サイト調査と関連）
- 2) 環境データベース構築（サイト調査と関連）
- 3) 規制等遵守（放射線学的、非放射線学的、防護措置の遵守）
- 4) 性能確認（安全評価結果に影響を及ぼす FEPs (Features, Events and Processes) に関連するパラメータの確認）

また、技術的側面に関する検討（技術開発）では、技術メニューの整備を進めるとともに、モニタリングに関連する要素技術のうち、共通のかつ中核技術であるデータ伝送技術に着目し、特にケーブルを用いないことから処分場の安全機能への擾乱の抑制が期待できる無線通信技術について、要素試験から地下環境での実証試験へと段階的に取り組んできた。

## (2) 第3フェーズ（平成25～27年度）

平成25年度からの5ヵ年計画では、上記のこれまでの調査研究成果を踏まえ、主に技術的観点から以下の取組を進めている。

- ① 長期健全性の確認等に関する検討：地層処分事業に特徴的な（特有の）取組となる上記の「性能確認」について、モニタリングを含めた取組の全体枠組みの具体化に向けた検討を進める。併せて、技術メニューの整備・拡充を進める。
- ② 状態確認技術の検討：モニタリングに関連する要素技術の開発として、引き続き無線通信技術の信頼性や実用性（適用性や冗長性）の向上に取り組むとともに、無線通信技術に関連する電源供給技術や他の状態確認に係る技術の調査や検討を進める。
- ③ 記録保存に関する調査：地層処分事業における記録保存について、国や関連機関による取組計画等の策定の際に活用可能な基盤情報等の整備に向けて、特に最新の国際的な検討動向等の調査を行い、その目的や具体的方策ならびに技術的可能性等に関する検討動向等の整理・分析を進める。

### 1) 平成25年度

平成25年度は当該年度から5年間のモニタリング関連技術の整備に関して、①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、②技術的実現

性の向上に関する検討に分けて計画した。計画にあたっては、第 2 フェーズの取りまとめにあたり抽出した課題に加え、国際共同研究 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。

長期健全性の確認等に関する検討では、地層処分モニタリングの枠組みに関する検討として、地層処分における各種のモニタリングについてその分類を示し、本検討で重点を置く処分場の閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認モニタリング）の国際共同研究 MoDeRn プロジェクトが作成した主要報告書（リファレンスフレームワーク報告書）について概要を整理した。

また、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。さらに、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を基に性能確認モニタリングの結果の反映方法を検討した。

状態確認技術の検討では、平成 24 年度に開発した地中無線モニタリング機器の中継システムについて、原子力機構の幌延深地層研究所において、深度 250m の坑道と深度 140m の坑道間、及び度 250m の坑道と地表間にて中継試験を実施し、通信の成功を確認した。これにより小型地中無線送信装置によるモニタリングデータを、同送信装置の通信距離である 20 数 m を越えて遠方に送信することが可能となった。また、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、中継装置の概念設計を行うとともに、緩衝材の全圧、間隙水圧、水分（飽和度）、温度を測定する水分センサの接続アダプタを開発した。これにより、処分坑道の埋戻しやプラグの設置が行われる環境での地中無線による緩衝材モニタリングの実現性が向上した。

## 2) 平成 26 年度

長期健全性の確認等に関する検討では、地層処分に関するモニタリングの目的について概略を示し、この中で人工バリアの長期健全性に関連する、処分場閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認モニタリング）を中心として検討を実施し、性能確認モニタリングに関する国際的な動向として、国際共同研究 MoDeRn の主要成果、及び OECD/NEA における検討の概要を整理した。

また、性能確認モニタリングのうち技術的な困難を有する人工バリアのモニタリングに関して考察を行うとともに、ニアフィールドのモニタリングにより人工バリアの性能確認に資する方法について検討した。さらに、操業期間中の安全に関するモニタリングについて検討するとともに、廃棄体の回収可能性に関わるモニタリングについても検討した。

状態確認技術の検討では、地中無線技術に関する重要な課題である長寿命化について、各種の電源供給技術の文献調査を実施した。地中無線モニタリング装置に現在用いている電源である、化学反応による一次電池については 10~15 年の間、電力が供給可能な電池が市販されており、この期間はセンサの寿命と同程度と考えられるため、現状で最も現実的

な電源といえる。しかしながら、これ以上の期間にわた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づけた。また、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%の期間電力が供給可能であることを確認した。

また、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に対し、平成25年度に開発した装置等を設置して計測し、地中無線モニタリング技術の地下研究施設での適用性検証を開始した。

さらに、平成23年度から実施している地中無線モニタリング装置の開発に関するフランスのANDRAと共同研究については、ビュール地下研究所の坑道から掘削したボーリング孔における緩衝材の膨潤挙動に関する長期モニタリングを実施した。また、平成25年度の中継試験の結果を基に、ビュール地下研究所における490m坑道と地表との長距離通信の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、試験方法を検討した。

記録保存に関する調査では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する記録保存についての最新動向の調査として、OECD/NEA-RWMCが2009年より実施している記録保存に関するプロジェクトの3文書について、内容を整理した。本プロジェクトは進行中であるが、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、閉鎖までの記録管理について含むこととなる予定であり、今後公開される報告書等の情報は非常に重要であると考えられる。また、英国の地層処分に関する記録保存について、2009年の規制要件及び事業者の対応策を整理するとともに、わが国において平成23年に施行された「公文書管理法」について、内閣府等により公表された具体的な運用方法についての文書（管理法施行例や運用マニュアル等）の内容を調査・整理した。

### 3) 平成27年度

平成25年度に策定した調査研究計画について、長期健全性の確認等に関する検討および性能確認技術の検討の観点から更新した。平成27年度に更新した5ヵ年計画を表1.3-1に示す。

性能確認技術の検討では、無線通信技術の検討として、地中無線の冗長化手段としてのデータの伝送経路を複数確保することの有効性について、システム全体の信頼性を計算することで検証した。その結果、単一の伝送経路に比べ、複数の方がシステム全体の信頼性が飛躍的に向上することが確認できた。

また、中継装置の要求される通信距離、信頼性に応じて、必要な段数、系統数の算出方法についても確認した。平成26年度の検討結果と開発課題をもとに、各回路とプログラムの詳細設計およびプログラム開発を実施した。そして、通信同期、中継動作、異常復旧時の指令通信や系統変更などの機能について確認した。さらに、地下研究施設等における地中無線通信技術の適用性試験の評価では、設置した小型送信器が正常に動作していることを確認した。

無線給電技術の検討では、地層処分事業における非接触給電の適用に向けた課題を整理し、開発目標を明確にするため、コイル直径やコイル間隔をパラメータとした給電効率の理論値を算出した。その結果、例えば、プラグ部分に設置可能な最大寸法である直径 4m の 1 次コイルと 2 次コイルにおいて、コイル寸法比=1 の場合、離間距離 3m に対する給電効率は 76%となるなどの結果が得られ、コイル直径やコイル間隔をパラメータとした給電効率の理論的特性を把握することができた。

記録保存に関する調査では、放射性廃棄物の処分における記録保存に関する動向、海外の記録保存に関する最新の考え方、方策について、OECD/NEA-RWMC（経済協力開発機構原子力機関-放射性廃棄物管理）が検討している Records, Knowledge and Memory（RK&M）イニシアチブの概要、位置付け、方針、話題等を整理した。

なお、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は平成 25 年度に再開するとともに、毎年、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反映し、情報を更新してきた。

表 1.3-1 平成 27 年度に見直した 5 か年計画

		平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
①5年間の研究計画立案		・計画立案		・進捗確認、計画更新		
②長期健全性の確認等に関する検討	i) 長期健全性の確認に関する検討	・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	・人工バリアの長期健全性に関わる技術要件とFEPによるパラメータの抽出 ・状態確認結果反映方法の検討	・状態確認結果の反映方法に関する検討	・実際の作業段階に留意した、5WHHの整理 ・人工バリアの性能評価における計測結果の取り扱い方法の提示（人バリア品質と連携） ↑地質環境条件 ・処分場の段階的な進捗に合わせたベースライン/状態変遷把握方法の提示	・段階的な進捗、それに伴う様々な実際の処分事業における人工バリアの性能確認プログラム構築の方法論の提示 ・各目的に対する計測技術ごとの特性に着目した技術選択方法の提示
		・MoDeRn成果取りまとめ		・国際的な共同研究への参画などによる性能確認モニタリング事例の検討	・国際的な共同研究への参画などによる性能確認モニタリング事例の情報収集	
	ii) その他の状態確認に関する検討	・詳細計画検討	・作業安全及び回収可能性に係るモニタリングの調査・検討		・作業安全、可逆性・回収可能性の維持に係る状態確認方法の調査・検討 ・制度的管理等に係る状態確認の調査・検討	
	iii) 技術メニューの整備	・詳細計画検討	・技術メニューへの記録保存成果反映	・調査・開発成果の反映	・性能確認プログラムに基づく、対象・技術の整理	・技術メニューへの実装
③状態確認技術の検討	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	・無線伝送技術の開発 ・中継装置のパッケージ化の検討・実装、複数段の中継試験 ・無線伝送技術の運用方法の検討、実際の地層処分事業における仕様の推奨例	・無線伝送技術の開発 ・複数段・複数系統の中継試験による、無線伝送技術の信頼性の提示
		・中継機等耐圧化検討 ・小型送信機水分計アダプタ開発	・多段中継方法検討	・多段中継機詳細設計		
	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	・電磁波による電力供給の基礎試験	・理論的な性能評価に基づく、無線給電技術の適用範囲の提示	・無線伝送装置と組み合わせた、使用方法の提示
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	・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	・地下調査施設における地中無線伝送技術の実証 ・計測計画の自薦的検討 ・地下施設の環境回復確認（予定）	・地下調査施設における地中無線伝送技術の実証	
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	・記録保存に関する動向調査・分析	・記録保存事項の検討	・記録保存システム案の提示

## 1.4 本年度の実施内容

平成 28 年度の実施内容を表 1.4-1 に示す。①長期健全性の確認等に関する検討については、性能確認プログラムを指向した国際動向の調査および技術メニューの整備を、②状態確認技術の検討については無線伝送技術の開発および無線給電技術の開発を実施し、また、③記録保存に関する調査については、国際的な動向を継続して実施する。

表 1.4-1 平成 28 年度の実施内容

実施項目 (大項目)	個別実施項目	実施内容
①長期健全性の 確認等に関する 検討	性能確認プログラム を指向した国際的動 向の調査	・国際的な視点から、性能確認プログラムの開発動 向を把握し、次年度に諸外国の先行事例や国際共研 で共有されつつある同プログラムの体系や構造等 の整理を行う
	技術メニューの整備	・5 ヶ年の節目に向けて、上記の取組で得られた成 果の反映や既整備データのアップデートを実施。
②状態確認技術 の検討	無線伝送技術の開発	・地下研究所での実証的な取組を経た実用化技術と しての取りまとめを行う。その際、関連技術の開発 動向を含めて、現時点における無線伝送技術の技術 レベル等に関する知見も整理する。 ・5 ヶ年の節目までのハード開発として、以下を完 了させる。 ・無線伝送：地下での実証（瑞浪、幌延） ・中継装置によるシステムとしての冗長化：多段 他系統に係る地上での確認試験
	無線給電技術の開発	・理論的アプローチに基づき得られた限定的な利用 場面を念頭に置いたシステム設計論について、実用 化の見通しやそれに向けた今後の課題を含めて取 りまとめる
③記録保存に関する調査		・主に制度的管理に係る取組として、最新の国際的 な検討動向を整理する。

## 1.5 報告書の構成

本報告書は、第 1 章から第 5 章までの構成となっている。

第 1 章では「研究の目的及び概要」として、本調査の目的や概要を示した。

第 2 章では「モニタリングの枠組みに関する検討」として、人工バリアの長期健全性に関連し、性能確認モニタリングを包含する性能確認プログラムについて、国際機関、各国での事例、国際共同研究での国際的な検討の動向を調査した。

第 3 章では「地中無線モニタリング技術の検討」として、無線伝送技術、無線給電技術の開発を実施するとともに、国内外における地中無線モニタリング技術について調査を実施した。また、地下研究施設における地中無線モニタリングを継続実施した。

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

第 5 章では第 2 章から第 4 章までの調査研究を取りまとめた。

## 第2章 モニタリングの枠組みに関する検討

### 2.1 目的及び実施概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では、概要調査・精密調査のサイト調査段階に始まり、建設・操業段階（処分坑道やパネル等の部分的な埋め戻しを含む）から処分場の最終閉鎖まで（さらには、その後の一定の期間）、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。

このようなモニタリングの枠組みに関して、平成 25 年度及び平成 26 年度には地層処分に関するモニタリング目的についての概略を示すとともに、地層処分独自のモニタリングとして重要な、人工バリアの長期健全性の確認を含む、処分場閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認に資するモニタリング）に関し、国際共同研究 MoDeRn の主要成果や OECD/NEA における検討など、国際的な検討動向を整理した。また、併せて日本の地層処分における人工バリアのモニタリング項目について検討を行った。その結果、原位置でのモニタリングによって人工バリアの性能を確認できるものは限定的であり、地下特性調査施設あるいは他の場所での試験や室内試験等によって確認や品質管理を含む複数の手段で性能を確認する「性能確認プログラム」として、全体像を把握する必要性が明らかとなった。

本章では、地層処分に関するモニタリングのうち人工バリアの長期健全性に関連し、地層処分独自のモニタリングとして重要な処分場閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認に資するモニタリング）を包含する性能確認プログラムに関する検討に資するため、国際機関、諸外国、国際共同研究の検討状況を整理する。

### 2.2 性能確認プログラムを指向した国際的動向の調査

処分システムの閉鎖後長期にわたる安全性は、多重バリアの安全機能によって受動的に確保されるものであり、これらは地質環境の選定と、処分施設の工学要素の設計、施工における品質保証等により実現される。また、地層処分事業の先行する各国においては、閉鎖後長期の安全性を確実にするため、多重バリアの安全機能に関わる要素を調査段階～操業段階にモニタリングや原位置試験等からなる一連のプログラムにより追跡調査し、処分システムの挙動が地層処分場の設置許可申請時に予測された範囲内にあることを確認すること（性能確認）を求める傾向がみられる。

性能確認プログラムの実施は、処分施設の設計や操業計画に影響を与え得るものであり、我が国でも地層処分事業の進展に伴い、諸外国と同様にサイト選定段階（概要調査段階）～操業段階における性能確認が求められる可能性が想定されるため、地層処分事業の進展に先立った調査、検討が必要である。

本節では、このような背景のもと、モニタリングを含む性能確認プログラムに関する検

討に資するため、国際機関、諸外国、国際共同研究の検討状況を整理する。

調査対象は、国際原子力機構（IAEA）による安全基準文書、諸外国（米国、フィンランド、スウェーデン、フランス）の法的要件と処分実施主体の取組、国際共同研究（MoDeRn、MoDeRn2020）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）による研究報告書の概要である。

### 2.2.1 IAEA による安全基準文書

IAEA による安全基準文書は、安全の概念、目標、基本原則を示す「安全原則」（Safety Fundamentals）、安全を確保するための基本的な要求を示す「安全要件」（Safety Requirements）、安全要件を満足する方法を示す「安全指針」（Safety Guide）の3段階の階層構造を有する複数の文書から構成されている。

このうち、地層処分に関する性能確認プログラム及びモニタリングに関する記述がみられる文書は以下の通りである。

- ・ 特定安全要件 No.SSR-5「放射性廃棄物の処分」（2011年5月）[1]
- ・ 特定安全指針 No.SSG-14「放射性廃棄物の地層処分施設」（2011年9月）[2]
- ・ 特定安全指針 No.SSG-23 「放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価」（2012年9月）[3]
- ・ 特定安全指針 No. SSG-31「放射性廃棄物処分施設のモニタリング及びサーベイランス」（2014年5月）[4]

これらの特定安全要件及び特定安全指針は2011年及び2014年の出版であり、近年の国際的検討の反映が期待される。また、モニタリングに関する技術的文書として、TECDOC-1208「高レベル放射性廃棄物の地層処分場のモニタリング」（2001年4月）[5]が存在する。

これらの文書のうち、特に特定安全指針 No. SSG-31「放射性廃棄物処分施設のモニタリング及びサーベイランス」は、「処分システムの性能を確認するためのモニタリング」に焦点を当てる（1.15）としており、性能確認プログラムを指向した国際的動向の調査において重要な位置を占める。

以下に、特定安全要件及び特定安全指針における性能確認及びモニタリングに関する記載について述べる。

#### (1) 特定安全要件 No.SSR-5「放射性廃棄物の処分」（2011年5月）

特定安全要件 No.SSR-5[1]の目的は、全ての種類の放射性廃棄物の処分に関する安全目標及び基準を設定すると共に、安全原則 SF-1、「基本安全原則」（2006年11月）[6]で確立された原則に基づいて、放射性廃棄物の処分で満足しなければならない要件を確立することにある。従って、本文書における記述は、地層処分に関する性能確認プログラムを検討す

るにあたって、満足すべき基本的な要件と言える。

本文書では天然及び人工バリアの能力が、セーフティケースで仮定されたような処分システムの全体としての性能の能力とともに、立証されるべきことを求めた上で、モニタリング等の能動的管理が、天然及び人工バリア、及びその安全機能に対する確信を高めることができることを述べている。また、モニタリングを実施すべき時期については、処分施設の建設前から操業期間中にわたり実施すべきことを述べるとともに、モニタリングが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すべきことを述べている。さらに、モニタリング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、実施すべきこと、閉鎖後における安全確保を目的とするモニタリング計画は地層処分施設の建設に先立ち作成すべきことを述べている。

これらの記述より、本文書では、モニタリングは、処分システムがセーフティケースで仮定された性能を発揮していることを確認する手段の一つであり、処分場の操業期間中に閉鎖後の安全を確認するためのモニタリングを実施すべきこと、その計画は処分場の建設以前に作成すべきと述べていると解釈できる。表 2.2.1-1 に特定安全要件 No.SSR-5 における性能確認及びモニタリングに関する記述を示す。

表 2.2.1-1 性能確認及びモニタリング（特定安全要件[1]）  
（下線は原環センターによる）

要件	記述
要件 7: 多重安全機能	<p>安全が多重安全機能によって確保されるようにするために、設置環境が選定され、処分施設の工学要素が設計、操業されなければならない。廃棄物の閉じ込めと隔離は、多数の処分システムの物理的バリア（physical barriers）によって提供されなければならない。これらの物理的バリアの性能は、様々な操業管理とともに、多様な物理的及び化学的プロセスの手段によって達成されなければならない。処分システムの全体がセーフティケースで仮定されたように機能する、個々の物理的バリア及び操業管理の能力（capability）は、セーフティケースで仮定されたような処分システムの全体としての性能の能力とともに、立証されなければならない。処分システムの全体としての性能は、単一の安全機能に過度に依存するものであってはならない。</p> <p>3.36. 能動的管理は、安全機能の役割を果たしたり、天然バリアと人工バリア及び安全機能に対する確信度の一因となることもできる。安全機能を提供する多数の物理的構成物及びその他の構成物の一部が（たとえば想定されないプロセスまたは可能性の低い事象のために）期待通りに十分に機能しない場合であっても、それらが複数存在していることによって、安全性の余地が十分に残っていることを保証するものとなる。</p>
要件 10: 受動的 安全特性の監視 と管理 (surveillance and control of passive safety features)	<p>閉鎖後の安全性のセーフティケースで割り当てられた機能が達成できるようにするために、必要な範囲で、受動的な安全特性を防護し、維持する、適切なレベルの監視と管理が適用されなければならない。</p> <p>3.48. 地層処分及び中レベル放射性廃棄物の処分の場合は、受動的な安全特性（バリア）は、それらの修繕またはアップグレードが必要とされないように、十分な頑健性を備えなければならない。放射性廃棄物の処分施設の長期安全性（long term safety）は、能動的な制度的管理に依存したものではないことが求められている（要件 22（原文）を参照）。浅地中処分施設の場合には、その採鉱及び精錬処理廃棄物を対象とする施設を含め、処分施設の監視と管理は制度化される場合がある。これらの措置には、人間及び動立ち入り制限、物理的条件の検査、適切な保守能力の維持、規定された性能を確認する方法としての監視とモニタリング（すなわち、劣化の確認）が含まれる。監視とモニタリングの意図は、放射線学的パラメータを測定することだけでなく、安全機能の継続的な達成度を確認することにある。</p>
要件 21 処分施設でのモニタリングプログラム	<p>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。</p> <p>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の目的には、以下のものが含まれる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>(a) 後続の評価のための情報の取得。</li> <li>(b) 操業安全性の保証。</li> <li>(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ことの保証。</li> <li>(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。</li> </ul> <p>ガイダンスは参考文献[20]（原文）に示されている。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。</p> <p>5.5. 閉鎖後における地層処分施設の安全性に関連したモニタリングの議論は、IAEA の TECDOC 8（技術文書）で行われている。閉鎖後における安全確保を目的とするモニタリング計画は、取り得るモニタリング方策を提示するために、地層処分施設の建設に先立ち作成されなければならない。しかしながら、その計画は柔軟性を維持しなければならない。必要に応じて、施設の開発及び操業において改訂及び更新しなければならない。</p>

(2) 特定安全指針 No.SSG-14「放射性廃棄物の地層処分施設」(2011年9月)

特定安全指針 No.SSG-14[2]は、特定安全要件 No.SSR-5「放射性廃棄物の処分」[1]で制定された安全要件に合致するように、放射性廃棄物の地層処分のための施設の開発と規制管理に関連するガイダンスと勧告を提供することを目的とした文書である。従って、本文書における記述は、安全要件を満足した形で性能確認プログラムを検討する際にも、指針となるものである。

本文書では、地層処分施設の操業期間中に処分場の閉鎖の決定の基礎とされる閉鎖後セーフティケースが策定されることを示し、その裏付けとしての安全評価の更新に、処分施設の試運転や操業期間中の原位置試験やモニタリングによるデータが使用されることを示している。また、このことで施設の操業安全に対する継続的信頼や、現実の状態が閉鎖後に対する仮定と合致していることの確認が得られることを述べている。さらに、モニタリング結果が、予測、あるいは仮定された状態からの相違を示した場合には、相違の原因を特定し、処分システムの理解を改善すべきことを述べている。

これらの記述は、地層処分場の操業期間中に実施されるモニタリングにより、セーフティケースの裏付けとなる安全評価の更新が行われ、処分施設の閉鎖後の状態に関する予測や仮定との一致の確認が行われること、モニタリング結果が予測や仮定と異なる場合には処分システムの理解の改善が行われていることを示しており、性能確認に資するモニタリングの役割を示しているものと解釈できる。

表 2.2.1-2 に特定安全指針 No.SSG-14 における性能確認及びモニタリングに関する記述を示す。また、「5. セーフティケースと安全評価」における「セーフティケース及び裏付けとなる安全評価の漸進的な開発」に関する表(原文表-1)を表 2.2.1-3 に示す。

表 2.2.1-2 性能確認及びモニタリング（特定安全指針[2]）  
 (1/2)（下線は原環センターによる）

章	記述
5. セーフティケースと安全評価	5.19. セーフティケース及び裏付けとなる安全評価は、地層処分施設の開発と操業が進展するのに伴い、より詳細化、補足されるべきである。セーフティケース及び裏付けとなる安全評価の漸進的な開発を表-1（原文）に例示する。
6. 地層処分施設の段階的アプローチの要素	<p>段階的な開発と評価</p> <p>6.2. <u>重要なプログラム</u>（例えば、サイト特性調査、設計作業、核物質の会計、管制、環境モニタリング、安全評価）が処分施設の開発における多数のステップとして進められる（図-1（原文）参照）。情報は、セーフティケース、設計、及びサイト特性調査とともに成熟し、進展され、<u>これらの重要なプログラムからの情報が、他の関連するプログラムに分配されるべきである</u>（例えば、セーフティケースは、サイト特性調査と設計プログラムに不確実性の関連性を通知し、<u>性能モニタリングは、セーフティケースの仮定の確認を提供すべき</u>）。段階的なプロセスは、ステップの連続として展開した時に、情報価値を最大にする反復のプロセスである。</p> <p>操業</p> <p>6.55. <u>いくつかの地層処分プログラムでは、施設は廃棄物の定置を終了した後に、考慮された一定の期間開放することを想定している。これは、操業段階をさらに拡大し、閉鎖後の施設の性能に関連するモニタリングデータ（例えば、廃棄物パッケージの腐食、埋め戻し材の浸潤、水理条件の変化）の量の増加を提供する。手順は、施設の閉鎖後安全性への拡大した操業段階の影響の観点からモニタリングデータを評価（例えば、モニタリングデータに基づいた安全性の再評価）するために策定すべきである。モニタリングデータ、ベースライン条件からの関連する変化、必要に応じた閉鎖後安全性への拡大した操業段階の影響を明確に完全に文書化すべきである。</u></p> <p>モニタリングプログラム</p> <p>6.60. <u>モニタリングとは、放射線パラメータ又はその他のパラメータを連続的又は定期的に測定すること、あるいは構築物、システム又は機器の状態を確定することである。『モニタリングは、処分施設の開発及び操業の各ステップにおいて実行しなければならない』[1]（原文）。モニタリングによって安全評価に対する入力提供され、さらには施設の操業安全に対する継続的信頼や、現実の状態が閉鎖後に対する仮定と合致していることの確認が得られる。</u></p> <p>6.61. <u>モニタリングプログラムは、建設に先立ちセーフティケースの開発と関連して定義するべきである。母岩の特性を含めてサイトのベースライン調査は、建設活動の開始の前に実施すべきである。モニタリングプログラムは、建設と操業で得られた新しい情報を反映して周期的に更新すべきである。操業前及び操業段階で運営されるモニタリング活動の議論を参考文献[20]（原文）に示す。</u></p>

表 2.2.1-2 性能確認及びモニタリング（特定安全指針[2]）  
 (2/2)（下線は原環センターによる）

章	記述
6. 地層処分施設の段階的アプローチの要素（つづき）	<p>モニタリングプログラム（つづき）</p> <p>6.62. <u>モニタリングプログラムは、セーフティケースの部分として含まれ、セーフティケースの更新で改良されるべきである。操業段階では、モニタリングプログラムは、環境及び放射線防護の安全要件を含めて、操業のために保証された規制の要件と認可条件に適合していることの実証に使用すべきである。</u></p> <p>6.63. モニタリングプログラムは、規制機関あるいは認定された他の組織による検査と独立の認証に従うべきである。</p> <p>6.64. <u>閉鎖後段階に対しては、地層処分施設は受動的な安全設計であるべきで、安全性の保証を提示するために閉鎖後のモニタリングプログラムを要求あるいは依存すべきではない。閉鎖後モニタリングは、もし政府あるいは規制機関から要求されるのであれば、公衆への保証の提供に対して実施されるかもしれないが、受動的な安全設計を危うくすべきではない。</u></p>
付録 II 閉鎖後の安全評価	<p>データの要件</p> <p><u>操業及び閉鎖後のモニタリングのデータ</u></p> <p>II.23. <u>操業のモニタリングデータは、予測されたか、あるいは仮定された状態からの相違を示すかもしれない。これらの相違の原因は特定され、システムの理解を改善するために使われるべきである。予測された状態からの重要な偏差が観察されるところでは、新しい安全評価が、規制基準を満足し続けることを確認する必要があるかもしれない。</u></p> <p>モデルの検証、検定、確証</p> <p>確証</p> <p>II.66. <u>可能な限り、モデリングアウトプットが妥当である、すなわち、実際の条件で得られた経験的なデータに対応することが示されるべきである。よりサイト固有なモデル調整プロセスである検定と対照して、確証は、種々のサイトの変動あるいは広範囲の条件下で、信頼できる結果を生むのを多く持っている。特定のサイトの長期変遷に関するモデルの確証は関連するタイムスケールを超えてできないが、限定された確証はナチュラルアナログ研究あるいは気候アナログからのデータの使用を通して可能であるかもしれない。<u>モデリングアウトプットを処分システムのあ</u>  <u>る特定のコンポーネントの挙動についての観察、例えば、原位置試験あるいはサイト性能調査及び操業段階の間に実施された測定で得られたデータセットと比較することが役に立つ場合もある。</u></u></p>

表 2.2.1-3 セーフティケース及び裏付けとなる安全評価（特定安全指針[2]）

（下線は原環センターによる）

施設存続期間の段階	セーフティケースの特性 <sup>a</sup>	安全評価の基礎
初期サイト調査と施設予備設計	操業セーフティケースの概要、予備的閉鎖後セーフティケース。	初期サイト調査からのデータ；予備的な設計研究と閉鎖計画；廃棄物インベントリ、材料の挙動に関するデータの概要；類似のサイト及びプロセスのデータと観測
サイト特性調査とサイト確認	建設の決定の基礎とするのに足る詳細度の中間的な操業と閉鎖後のセーフティケース。	地表及び地価の調査から得られた詳細な調査データ；施設の設計と建設の詳細計画；廃棄物インベントリ、サイト固有の材料挙動データ；操業計画と閉鎖計画。建設の規制決定
建設	試運転及び操業の決定の基礎とするのに足る詳細度の最終操業セーフティケースと改良された閉鎖後セーフティケース。	建設で得られたサイトデータ；廃棄物インベントリ、廃棄物定置の試行、施工設計；操業で試験される閉鎖計画；詳細な操業計画。操業の規制決定
操業	試運転及び操業の経験とデータを使用した周期的に更新された操業セーフティケースは要求によって提供される。 <u>閉鎖の決定の基礎とする閉鎖後セーフティケース。</u>	<u>試運転及び操業の経験とデータを使用した操業安全評価と閉鎖後安全評価の更新（原位置試験、モニタリングと試験、閉鎖計画の試験から得られた情報を含む）。</u> 閉鎖の規制決定
閉鎖後	処分システムの挙動が予測されたとおりであることを保証するために提供される操業上の付加的な閉鎖後セーフティケース。	セーフティケースに関連する新しい科学的な根拠が判明したときの閉鎖後安全評価の操業上の更新

<sup>a</sup> 施設開発プログラムの各段階において策定することがあるセーフティケース

(3) 特定安全指針 No.SSG-23 「放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価」(2012年9月)

特定安全指針 No.SSG-23[3]は、全てのタイプの放射性廃棄物処分施設の安全性をどのように評価し、実証し、文書化するかについて、ガイダンスを示すことを目的としている。

本文書では、処分地の調査と選定の段階において、設計オプションに含まれる天然及び人工バリアの構成要素の安全機能がいかんにして検討対象のサイトで達成されるかを示すことを説明するため、性能確認プログラム等を通じて処分システムの技術的実現可能性を実証する方法を提案すべきことを述べている。

表 2.2.1-4 放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価（特定安全指針[3]）  
（下線は原環センターによる）

章	記述
<p>4. 放射性廃棄物処分に 関するセーフ ティケース</p>	<p>セーフティケースの役割と開発</p> <p>4.6. 参考資料 [2] <u>(原文)</u> の要件 (3.8 項を参照) に従って、処分施設の操業段階と閉鎖後の安全を取り扱うセーフティケースの開発が必要である。本安全指針は、閉鎖後期間中の安全に焦点を当て、安全に関する全ての議論と処分施設の安全を実証する上で裏付けとなる評価、解析、及び証拠を示すために、必要なセーフティケースの役割と要素に関するガイダンスを提示する。この点については、セーフティケースの役割は、以下を示すことである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>閉鎖後期間中の処分システムの挙動と性能に関する理解を実証する、構造化された追跡可能な透明性のある方法での関連情報の統合。</u></li> <li>・ 処分システムの挙動と性能における不確定要素の特定、不確定要素の重要性の分析、重要な不確定要素の管理のためのアプローチの特定。</li> <li>・ 処分施設が人間の健康と環境を防護する方法で機能することの合理的な保証を提供することによる、長期安全の実証。</li> <li>・ 処分施設開発の段階的アプローチにおける、意思決定の支援。</li> <li>・ 処分施設に関連する問題に関する、利害関係者間のコミュニケーションの促進</li> </ul> <hr/> <p>データの要件補完的な安全及び性能の指標</p> <p>4.83. 一般的に使用されてきた補足的な安全指標には、放射性核種の濃度とフラックスが含まれる。それ以外のそのような指標は、放射性核種インベントリとは関係しないが、たとえば人工バリアの性能に関する結論が引き出されることを可能にする特性に基づくものとすることができる。他の補足的な安全指標は、施設の性能を検証するためのモニタリング計画の目標として定義することができる。</p>
<p>6. 特定の 問題点</p>	<p>処分地の調査と選定</p> <p>6.10. 処分地の調査と選定の段階では、サイトの基本的な特性は、提案される設計オプションに含まれるそれぞれの天然及び人工の構成要素の安全機能がいかんして検討対象のサイトで達成されるかを示すように説明すべきである。この記述は以下をもって裏付けられるべきである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 可能な摂動であると確認された擾乱事象の下で、その期待された役割を果たす処分システムの各構成要素の能力に関する知識レベルの概観。</li> <li>・ 概念開発段階で決定されたサイトの予想される特性を確認するための研究開発プログラム。これは、プログラムが高レベル廃棄物の処分施設を開発するために、地下研究施設の開発及び操業を含むこともある</li> <li>・ 既存及び予想される将来の廃棄物ストリームに対応するサイト及びその能力の評価。</li> <li>・ 特に、各構成要素と施設全体が内部発生源（たとえば熱、化学、力学、放射線、反応度変化）又は外部発生源（侵入、気候変動、地震）から受けるかもしれない摂動を特定する、予備的評価。</li> <li>・ 処分施設の安全性に必要な構成材料（一般的に金属、粘土及びコンクリート）の望ましい挙動の調査。</li> <li>・ 処分システムの技術的実現可能性が、適切な適格性及び性能確認プログラムを通じてどのように実証されるかに関する提案。</li> <li>・ 立証済／容易に実証可能な機能に依存し、処分システムのさまざまな構成要素の予想される性能に関連する不確実性に対応できるという意味で、少なくとも 1 つの設計オプションが実現可能性の適切な予測を表すことの実証。</li> <li>・ システムの構成要素の全体としての適合性の詳細にわたる確認を含め、適切な深層防護が確実に行われるようにするための、処分システムの構成要素がいかんして共に補完的に機能するかに関する再検討</li> <li>・ 安全性にとって重要な不確実性が存在する可能性があり、安全性実証の一部として管理しなければならない分野の特定。</li> </ul>

(4)特定安全指針 No. SSG-31 「放射性廃棄物処分施設のモニタリング及びサーベイランス」  
(2014年5月)

特定安全指針 No. SSG-31[4]は、地層処分を含む放射性廃棄物処分施設の寿命全体におけるモニタリング及びサーベイランスのための指針を提供することを目的としている。

本文書は、処分システムの性能を確認するためのモニタリングに焦点を当てており、地層処分施設の操業期間中に実施される性能確認を目的としたモニタリングについて指針を与えるものである。ここでは、主に性能確認に関する記述及び地層処分に関係する記述について概要を述べる。表 2.2.1-5 に文書の目次を示す。

表 2.2.1-5 放射性廃棄物処分施設のモニタリング及びサーベイランス（特定安全指針[4]）

目次

1. はじめに
  - 背景(1.1-1.8)
  - 目的(1.9)
  - 範囲(1.10-1.16)
  - 構成(1.17)
2. モニタリング及びサーベイランスの概要(2.1-2.10)
  - 処分施設のモニタリング及びサーベイランスの一般的目的(2.11-2.18)
3. 操業者と規制機関の責任事項
  - 操業者の責任事項(3.1-3.2)
  - 規制機関の責任事項(3.3-3.7)
4. モニタリングプログラムの設計(4.1-4.26)
5. 種類の異なる処分施設のモニタリング(5.1)
  - 浅地中処分施設(5.2)
  - 地層処分施設(5.3)
  - 採鉱・鉱物処理による廃棄物の処分施設(5.4-5.5)
6. 処分施設の寿命中の各期間におけるモニタリング(6.1-6.2)
  - 操業前期間におけるモニタリング(6.3-6.6)
  - 操業期間におけるモニタリング(6.7-6.11)
  - 閉鎖後期間におけるモニタリング(6.12-6.13)
  - 緊急事態への対応のモニタリング(6.14-6.15)
7. サーベイランスプログラムの策定と実施(7.1-7.2)
  - 処分施設の寿命全体におけるサーベイランス(7.3-7.5)
  - 処分施設の種類別のサーベイランス(7.6-7.9)
  - 検査の種類と頻度(7.10-7.13)
  - 日常的検査(7.14-7.16)
  - 特定の目的のための検査(7.17)
8. モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用(8.1-8.3)
  - 主要な目的の分析とそれらへの対応(8.4-8.10)
  - 予測される結果からの逸脱(8.11-8.15)
  - モニタリング及びサーベイランスプログラムの定期レビュー(8.16)
9. 管理システム(9.1-9.7)

付属書 I

- 地層処分プログラムのために収集されるモニタリング及びサーベイランス情報の例
- ベースラインの傾向の確定
- 定置された廃棄物パッケージの状態のモニタリング
- 処分施設の構築物と人工バリアのモニタリング
- 処分施設によって生み出される擾乱
- 放射性核種放出のモニタリング
- 地圏の変化
- 環境データベースの開発
- 代替的なデータ収集方法

付属書 II

- 浅地中処分施設のモニタリング及びサーベイランスプログラムの例
- はじめに
- 操業前モニタリング及びサーベイランス活動
- 早期操業モニタリング及びサーベイランス活動
- 操業モニタリング及びサーベイランス
- 閉鎖後モニタリングの計画

原稿作成及びレビューへの貢献者

本指針のうち、性能確認プログラムに関連する事項について、以下に概要を示す。

#### 1) モニタリング及びサーベイランスの定義と目的

本文書では、モニタリング及びサーベイランスについて以下のように定義している。

- ・モニタリング：廃棄物処分システムの構成要素の挙動と廃棄物処分システムが公衆・環境に及ぼす影響についての評価に役立つような継続的または定期的観測及び測定
- ・サーベイランス：安全バリアの健全性を検証するために行う廃棄物処分施設の物理的検査

また、モニタリング及びサーベイランスの目的について、以下の5つを挙げている。

- (i) 規制要件と許認可条件の遵守を立証する。
- (ii) セーフティケースで述べられているように、処分システムが予測どおりの性能を示していることを検証する。このことは、処分システムの構成要素が安全評価で特定された機能を果たしていることを意味する。
- (iii) 安全の評価のために置かれた重要な仮定及び用いられたモデルが、実際の条件と整合していることを検証する。
- (iv) 処分施設、サイト及びその周囲環境に関する情報のデータベースを確立する。このデータベースは、立地から建設、操業、閉鎖及び閉鎖後期間へと進む際の将来の決定を支援するのに用いられる。また、そのデータベースは、モニタリングのための概念及び手順の更新に係る決定を支援するのに用いられる。
- (v) 公衆のために情報を提供する。

このうち(ii) 及び(iii) の目的が処分システムの性能確認に該当するものと言える。また、モニタリング及びサーベイランスの社会的な意義について、モニタリング及びサーベイランスプログラムは、技術的目的のみでなく、公衆の信頼を高めるためのツールになる可能性があることを述べ、社会的利益やステークホルダの懸念を考慮することにより、モニタリングプログラムを補足する有用な情報が得られる可能性を指摘している。

特定安全指針 No. SSG-31 におけるモニタリング及びサーベイランスの定義と目的に関する記述のうち、上述した部分について表 2.2.1-6 に抜粋する。

表 2.2.1-6 モニタリング及びサーベイランスの定義と目的（特定安全指針[4]）  
（抜粋）

章	記述
2. モニタリング及びサーベイランスの概要	2.1. モニタリングについては、多様な IAEA 出版物において多様な方法で定義がなされてきた [6-11]（原文）。本安全指針の文脈における「モニタリング」という用語は、廃棄物処分システムの構成要素の挙動と廃棄物処分システムが公衆・環境に及ぼす影響についての評価に役立つような継続的または定期的観測及び測定を指す。極めて具体的に言うと、放射線学的パラメータ、環境パラメータ及び工学パラメータの測定が含まれる。
	2.7. 「サーベイランス」という用語は、本安全指針の文脈においては、安全バリアの健全性を検証するために行う廃棄物処分施設の物理的検査を指す。
	2.10. 一部の加盟国では、処分施設のためのモニタリングの概念とサーベイランスの概念が区別されていない。
	2.13. 放射性廃棄物の処分施設のモニタリング及びサーベイランスは、以下のよう な5つの大まかな目的を有している。  (i) 規制要件と許認可条件の遵守を立証する。 (ii) セーフティケースで述べられているように、処分システムが予測どおりの性能を示していることを検証する。このことは、処分システムの構成要素が安全評価で特定された機能を果たしていることを意味する。 (iii) 安全の評価のために置かれた重要な仮定及び用いられたモデルが、実際の条件と整合していることを検証する。 (iv) 処分施設、サイト及びその周囲環境に関する情報のデータベースを確立する。このデータベースは、立地から建設、操業、閉鎖及び閉鎖後期間へと進む際の将来の決定を支援するのに用いられる。また、そのデータベースは、モニタリングのための概念及び手順の更新に関係する決定を支援するのにも用いられる。 (v) 公衆のために情報を提供する。
	2.17. モニタリング及びサーベイランスプログラムは、その技術的目的のためばかりでなく、公衆の信頼を高めるための適切なツールにもなる可能性がある。そういう意味で、公益・社会的利益、並びにステークホルダの懸念を考慮することによって、モニタリングプログラムを補足する有用な情報が得られる可能性がある。

## 2) 地層処分施設におけるモニタリング

本文書では、地層処分施設で採用される安全戦略が、地圏への放出が管理下で緩やかに生じるよう、放射性物質を十分な期間にわたり閉じ込めることであるため、モニタリングの焦点は、閉じ込めシステムに対する信頼の獲得に当てられることを指摘している。このことは、放射性物質を閉じ込める機能を持つ人工バリアのモニタリングの重要性を示すものと考えられる。

また、地層処分の場合には、浅地中処分の場合と異なり、閉鎖後の直接的な管理措置が実施不可能であるため、入手可能なデータと既存の知識に基づく予測によって安全及び防護のための目標が導出されることを指摘している。この記述は、地層処分場の地下施設での閉鎖後のモニタリング及びサーベイランスの困難を述べているものと解釈できる。

特定安全指針 No. SSG-31 における地層処分施設におけるモニタリングに関する記述のうち、上述した部分について表 2.2.1-7 に抜粋する。

表 2.2.1-7 地層処分施設におけるモニタリング（特定安全指針[4]）  
（抜粋）

章	記述
1. はじめに	1.4. モニタリング及びサーベイランスプログラムは、放射性廃棄物の処分施設が操業段階及び閉鎖後段階において要求されている安全レベルの性能を示すことを保証する上での重要な要素である。廃棄物の種類とそれに対応する処分施設は、採用されるモニタリングアプローチに影響を及ぼすものと考えられる。比較的短寿命の放射性核種を含有する廃棄物の浅地中処分施設の場合には、安全目標が達成されつつあるか否かの判断に当たり、直接的な管理措置を適用することができる。長寿命放射性核種を含有する廃棄物の地層処分の場合には、閉鎖後の直接的な管理措置が実施不可能である。この場合の安全及び防護のための目標は、入手可能なデータと既存の知識に基づく予測によってしか導出することができない。
5. 種類の異なる処分施設のモニタリング	5.3. 地層処分は、長期安全性の確保に当たり接近可能な環境からのより高度な格納・隔離を必要とするような ILW、高レベル放射性廃棄物（HLW）などの廃棄物に適している。例えば、長寿命放射性核種を含有する放射性廃棄物、または放射能レベルが高いために放射性崩壊によって大量の熱を発生するような、使用済燃料（廃棄物と見なされる場合）、再処理による HLW などの廃棄物は、一般に、数千年が経過するまで汚染物質の周囲の地圏への移行が始まることのないような、人工バリアを備えた地層処分施設の中で処分される。採用する安全戦略とは、地圏への放出が管理下で緩やかに生じるよう、放射性物質を十分な期間にわたり格納することである。このような場合には、モニタリングの焦点が、格納システムに対する信頼の獲得に当てられる。施設の閉鎖後のモニタリングを規制機関が要求、規定する場合には、環境における放射性核種の存在の検出がモニタリングの焦点となる可能性がある。環境への放出が早期に生じない可能性が高いため、この種のモニタリングは一般に、処分システムの性能を確保するためというより、公衆を安心させるために実施される。実際にモニタリングによって明らかになる地層処分施設の安全関連の特徴や事象、プロセスとは、例えば、腐食性ガスの発生、水の流入及び人間侵入などである。

### 3) 処分施設の操業期間中におけるモニタリング

本文書では、操業期間中に実施される、性能確認に資するモニタリングについて、処分施設の性能を確認するため、操業期間と閉鎖後期間の両方に関係する重要な技術的パラメータについてのモニタリングを実施し、安全評価に用いられるデータを裏付ける追加的なデータを提供すべきことを述べている。また、このモニタリングがセーフティケース開発の段階的プロセスの一部であり、セーフティケース開発の段階的プロセスが、処分システムの操業性能、または閉鎖後性能の予測可能性を漸進的に高めるものとしている。さらに、操業期間中のモニタリングにより、処分システムに対する理解を漸進的に改善させ、理解の改善を通じて、操業アプローチ、安全機能の定義、施設の設計及びモニタリングプログラムの設計を改善すべきであることを述べている。

また、定置作業の完了後であるが処分施設の最終閉鎖よりも前の期間でのモニタリングについて、セーフティケースで特定された重要な安全機能を直接的、または間接的な証拠によって確認するため実施すべきことを述べている。なお、直接的な証拠としては、測定可能なパラメータを、間接的な証拠としては、予測モデルの開発に用いる科学的根拠の強化、またはパイロット／実証処分施設からのデータ収集を挙げている。

さらに、このようなモニタリングにより得られたデータは、処分システムが予測どおりの機能を果たしていることを検証するために用いるべきとしている。

特定安全指針 No. SSG-31 における処分施設の操業期間中におけるモニタリングに関する記述のうち、上述した部分について表 2.2.1-8 に抜粋する。

表 2.2.1-8 処分施設の操業期間中におけるモニタリング（特定安全指針[4]）  
（抜粋）

章	記述
6. 処分施設の操業期間中におけるモニタリング	<p>6.7. 操業期間には、モニタリングプログラムが操業の安全に寄与すべきであり、モニタリングによって公衆及び環境への潜在的影響が測定されるべきであり、処分システムの性能が評価されるべきである。モニタリングには、施設の性能を確認するためのプログラムの一環としての、セーフティケースにとって重要な特徴、事象及びプロセスの評価が引き続き包含されるべきである。これにより、操業のセーフティケースと閉鎖後のセーフティケースを精密化するうえで、処分システムの挙動に対する理解を深めることができるようになる。このモニタリングプログラムでは、閉鎖後段階におけるシステムの長期性能の予測に役立てるための、施工完了時の処分システムの短期の（操業中の）性能に基づくデータの収集にも焦点を当てるべきである。操業期間におけるモニタリングプログラムの目的は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>－処分システムの要素の性能を確認するための、物質と構築物の施工完了時の特性に関するデータを提供する。かかるデータは、閉鎖後セーフティケースの改定、改善、またはそれに対する信頼の構築のために用いることができる。</li> <li>－排出物の処理・管理のためのシステムの性能が適切であるかどうかを点検する上で必要な情報を提供する。</li> <li>－通常運転からの逸脱についての早期の警告を行う。</li> <li>－環境における放射線レベル及び放射能濃度、並びに公衆の被ばくについて推定するための予測モデリングで用いる放射性核種の環境への放出についてのデータを提供する（例えば、放出率と放射性核種の構成）。</li> </ul> <p>6.8. 処分施設の性能を確認するため、操業期間と閉鎖後期間の両方に関係する重要な技術的パラメータについてのモニタリングを実施すべきである。このことは、セーフティケース開発の段階的プロセスの一部と見なすことができる。セーフティケース開発の段階的プロセスは、操業期間中の操業許可発行後も継続され、処分システムの操業性能、または閉鎖後性能の予測可能性を漸進的に高める。操業期間を通じた安全評価の更新・改善を可能にするために、そのようなモニタリングによって、安全評価に用いられるデータを裏付ける追加的なデータを提供すべきである。操業のための許可条件の一環として、規制機関が性能確認のプログラムの確立を必要とする可能性もある。このような方法により、操業者は、操業許可の付与のための条件としてというよりは、操業期間中のみにおける技術的問題の解決を義務付けられる可能性がある。このアプローチは、建設許可が付与された時点での技術的問題に関する残存する不確実性を管理するため用いることができるが、このアプローチを、処分施設の開発初期における適切なレベルの規制的精査やセーフティケースにおける不確実性の慎重な検討の代替とすべきでない。</p>
8. モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用	<p>8.10. 定置作業の完了後であるが処分施設の最終閉鎖よりも前の期間においては、セーフティケースで特定された重要安全機能が果たされ続けていることを直接的な証拠によって（すなわち、測定可能なパラメータによって）、または間接的な証拠によって（すなわち、予測モデルの開発に用いる科学的根拠の強化によって、またはパイロット／実証処分施設からのデータ収集を通じて）確認するために、モニタリング及びサーベイランスデータを収集すべきである。得られたデータは、処分システムが予測どおりの機能を果たしていることを検証するために用いるべきである。そのことは、重要な構成要素がセーフティケースで特定された、または規制機関によって指定された機能を果たしていること、そして実際の状態が閉鎖後の安全のために置かれた重要仮定と整合していることを意味する。例えば、処分システムが指定の期間にわたり受動的に安全な状態を維持してきたことを検証することによって、得られたデータが能動的な制度的管理終了の決定を裏付けるのに用いられるものと考えられる。</p>

#### 4) モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用

本文書では、モニタリング及びサーベイランスにより得られた情報の使用者に、処分場の操業者のみでなく、規制機関、地元のステークホルダ等の全ての関係者が含まれることを述べ、これにより処分のプロセス等に関する透明性の向上や、処分施設と周辺環境及びバリアの性能の変化に対する理解の促進、公衆及び環境の防護の強化に役立つとしている。

また、モニタリングに基づく情報には、常にある程度の不確実性が伴うことを述べ、以下の理由を指摘している。

- (モニタリングにより情報を得ようとする事象の) 空間的・時間的変動性の分解の困難さ
- (モニタリングにより情報を得ようとする事象に) 直接関係する一部のパラメータが測定不可能であること
- 処分施設の将来の挙動の予測が不可能であること
- 関係するいくつかのプロセスが根本的に理解されているわけではないこと

さらに、モニタリング情報を使用する際の注意事項として以下を確保すべきことを指摘している。

- 十分な冗長性
- 値についての独立した検証
- 適切な設計の強固な機器の使用
- 場合によりナチュラルアナログの併用によるモニタリングデータの信頼性の検証
- 訓練と経験を積んだスタッフによるモニタリング及び関連の活動の実施

特定安全指針 No. SSG-31 におけるモニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用に関する記述のうち、上述した部分について表 2.2.1-9 に抜粋する。

表 2.2.1-9 モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用（特定安全指針[4]）  
（抜粋）

章	記述
8. モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用	<p>8.1. これまでのセクションで論じたとおり、モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の収集は、処分施設の安全に対する信頼の構築とリスクもしくは不確実性の低減を目的として、また、セーフティケースの更新が必要と見なされる場合にはセーフティケースの更新を助けるために行われる。モニタリング及びサーベイランス情報の使用者には、操業者、規制機関、地元のステークホルダ、公衆などのすべての関係者、またはその他のあらゆる利益団体が含まれるべきである。モニタリング及びサーベイランス情報の使用者にすべての関係者を含めると、処分プロセスと操業性能における透明性が高まり、処分施設、その周辺環境及びバリアの性能の展開に対する理解が深まり、公衆及び環境の防護が強化される。放射性廃棄物の処分施設の目的は、長期の受動的安全性に備えることにある。処分施設は、安全のために長期の能動的管理が必要とされることのないように設計される。</p>
	<p>8.2. モニタリングに基づく情報には、常にある程度の不確実性が伴う。測定及び処分施設の理解における残された不確実性の管理は、セーフティケースの開発の1つの主要な機能である。モニタリング情報の使用に関連する課題には、空間的・時間的変動性を解消する際の困難さ、直接関係する一部のパラメータの測定が不可能であること、処分施設の将来の挙動の予測が不可能であること、関係するいくつかのプロセスが根本的に理解されているわけではないことが含まれる。</p>
	<p>8.3. 入手可能なモニタリング情報を使用する際には注意すべきである。十分な冗長性（それをモニタリングシステムの設計の一部とすべきである）、値についての独立した検証、適切な設計の強固な機器の使用、そして場合によってはナチュラルアナログも使用することによって、モニタリングデータの信頼性を検証すべきである。特に、訓練と経験を積んだスタッフのみが、モニタリング及び関連の活動の実施を許可されるべきである。モニタリングは一定の時間の枠組みを超えると妥当でなくなることが認識されている。遠い将来には、気候パターンのある意の変動やそれに関連する人間の挙動・慣行の変化が生じるものと考えられる。遠い将来までの処分システムの挙動を現在のモニタリング情報に基づき予測することには常に不確実性が伴う。将来のさらなる変動は、処分施設からの放射性核種の放出の可能性や、生物圏及び代表的人間の被ばくを引き起こしうる被ばく経路に影響を及ぼす可能性がある。</p>

#### 5) 予測される結果からの逸脱

本文書では、モニタリングにより取得されたデータが、事前に予測された範囲から外れている場合に対する解釈や対応について、以下のような事項を記載している。

本文書では、操業時のセーフティケースは、施設の開発における不確実性を管理するために保守的に構築されるため、性能確認のために実施されるモニタリング及びサーベイランスによるデータは、より現実的なセーフティケースと異なるデータをもたらすことを指摘した上で、パラメータの変動や安全評価で予測されなかった事象の発生を示す、モニタリング結果がもたらされる可能性を述べている。このような、モニタリング結果の解釈に関して、以下を指摘している。

- ・モニタリングによる予期しない結果は、必ずしも処分システムの安全が損なわれたことを示すわけではない。
- ・安全評価の複雑さが、モニタリング結果との比較において、直観に反する結果を生み

出すことがある。

- 予期しない結果は、セーフティケースに反映されていない新たな情報を示唆する可能性もある。そのような情報は一般に、十分に理解が進んでいない FEP や、以前には重要と見なされなかった FEP に関連するものと考えられる。

(予期しない結果への技術的対応)

予期しない結果に対しては、以下のような対処をすべきであることを指摘している。

- 測定エラーの可能性の排除。
- モニタリング結果のもたらす情報の分析と、既存のセーフティケースにおけるその重要度の決定。

また、予期しない結果が、十分に理解されていなかった FEP やこれまで重要とみなされていなかった FEP によるものと判断される場合には、以下のような対処をすべきであるとしている。

- 詳細な調査のための、モニタリング及びサーベイランスプログラムの改定と実施。
- 場合により、予期しない結果についての理解を深めるための新たな研究の開始。
- 新たな知識を反映するための、セーフティケースの更新。

さらに、モニタリングによる予期しない結果は、必ずしも処分システムの安全が損なわれたことを示すわけではないため、性能基準の不合格は必ずしも修復措置または防護対策の必要性を意味するわけではないことを指摘し、予期しない結果への対応に当たっては、等級別アプローチを採用すべきであるとして、以下のように説明している。

- 等級別アプローチには、全く対策を行わないことから、空間的・時間的傾向の特定、確認のためのサンプリング頻度の引き上げ、設計もしくは手順の変更、重要な修復措置、定置された廃棄物の回収が含まれる。
- 等級別アプローチの選定にあたっては、個々の測定値を重要視しすぎず、傾向を明らかにすることを重視すべきである。
- 廃棄物の回収措置は、修復措置に関連するリスクの考慮を含むきわめて慎重な研究と正当化が行われた後でなければ、実施すべきでない。
- 廃棄物の回収の決定は、廃棄物の取り扱い、処理及び貯蔵のための施設・インフラが利用可能であることを条件に行うべきであり、廃棄物を移転する場合には、適切な処分サイトが利用可能であることを条件に行うべきである。

特定安全指針 No. SSG-31 における予測される結果からの逸脱に関する記述のうち、上述した部分について表 2.2.1-10 に抜粋する。

表 2.2.1-10 予測される結果からの逸脱（特定安全指針[4]）  
（抜粋）（1/2）

章	記述
<p>8. モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用</p>	<p>8.11. パラグラフ 8.9 で述べたとおり、操業セーフティケースは、施設の開発におけるその段階の不確実性を管理するために保守的な仮定の集合に基づき構築されることが多い。したがって、性能確認のために実施されるモニタリング及びサーベイランスは、そのようなセーフティケースに用いられるデータとは異なるデータをもたらすと予測され、それは概して、より現実的なデータであると予測される。同様に、安全評価における保守主義のために、環境モニタリングデータは、セーフティケースで予測されたレベルの範囲内にとどまると予測できる。しかし、パラメータの変動または安全評価で予測されなかった事象の発生のような見かけのまたは実際の矛盾がモニタリング結果によってもたらされる可能性もある。そのような結果は、「予期しない結果」と呼ばれる。以前の予測に確証を与えるものではないからである。モニタリング結果とそれに関係する不確実性は、プロセスの早期の段階において規制機関やその他のステークホルダに対して伝達し始めるべきである。モニタリングの開始後に説明を行おうとするよりも、プログラムの開始前に不確実性を説明する方が一般に容易だからである。</p>
	<p>8.12. モニタリングによる予期しない結果は必ずしも処分システムの安全が損なわれたことを示すわけではない。可能性のある測定エラーを排除した上でその情報を注意深く分析することによって、既存のセーフティケースにおけるその重要度を決定すべきである。安全評価が複雑であれば、モニタリング結果との比較により、直観に反する結果が生み出されることもある。例えば、安全評価において採用された保守的なバイアスを含む地下水移行モデルでは、汚染物質のブルームの先端の重要性が無視される、あるいは強調されない可能性がある。セーフティケースにおいてはこのことを考慮しなければならないが、モデル結果との整合性のない汚染物質の早期到達というモニタリング観測については注意深い解釈が必要とされる場合がある。</p>
	<p>8.13. 予期しない結果は、セーフティケースに反映されていない新たな情報を示唆する可能性もある。そのような情報は一般に、さほど理解が進んでいない特徴、事象及びプロセス、または以前には重要と見なされなかった特徴、事象及びプロセスに関連するものと考えられる。予期しない結果がこのような分類に含まれると判断される場合には、その問題についてさらに詳しく調査するため、モニタリング及びサーベイランスプログラムを改定し、実施すべきである。場合によっては、予期しない結果についての理解を深めるため新たな研究を開始するのが妥当となる。そのような新たな知識を反映するため、セーフティケースを更新すべきである。予期しない結果が発生すると、それにより規制機関に対する懸念が引き起こされる可能性があり、また処分施設の安全性に対する関係者の信頼に影響が及ぶ可能性がある。したがって、信頼性を維持するように、適度で公明で真摯なコミュニケーションの必要性が強調されるべきである。</p>

表 2.2.1-10 予測される結果からの逸脱（特定安全指針[4]）  
（抜粋）（2/2）

章	記述
8. モニタリング及びサーベイランスに基づく情報の使用（つづき）	<p>8.14. パラグラフ 8.12 で示した例のような理由のために、性能基準の不合格は必ずしも修復措置または防護対策の必要性を意味するわけではない。例えば、定置された廃棄物の回収の決定が、被ばく状況が明白でないような要因（例えば、腐食指標）に関連している可能性があり、性能指標より他の要因の方がその決定にとって重要であることもある（例えば、廃棄物回収中の作業員の防護）。</p> <p>8.15. 予期しない結果への対応に当たっては、等級別アプローチを採用すべきである。そのような対応は多様で、全く対策を行わないことから、空間的・時間的傾向の特定、または確認のためのサンプリング頻度の引き上げ、設計もしくは手順の変更、そして重要な修復措置または定置された廃棄物の回収まで、広範囲である。個々の測定値を重要視しすぎるのではなく、傾向を明らかにすることを重視すべきである。廃棄物の回収のような措置は、修復措置に関連するリスクの考慮を含むきわめて慎重な研究と正当化が行われた後でなければ、実施すべきでない。また、廃棄物の回収の決定は、廃棄物の取り扱い、処理及び貯蔵のための適切な施設・インフラが適時に利用可能であることを条件に行うべきであり、廃棄物を移転する場合には、適切な処分サイトが利用可能であることを条件に行うべきである。</p>

6) 地層処分におけるモニタリングの例示

本指針では付属書において、地層処分地層処分におけるモニタリングパラメータを例示している。これらを総括した表（原文 表 I-1.）を表 2.2.1-11 に示す。なお、操業期間中に測定されるパラメータについては、長期の安全性に影響を及ぼさない限り、規模が縮小された上で閉鎖後期間にもモニタリングが続けられる可能性がある。これについては(x)で示している。

表 2.2.1-11 モニタリング対象とすべきパラメータ（特定安全指針[4]）

(1/4)

モニタリング対象とすべき パラメータ/プロセス	操業前期間 (サイトの選定と施 設の建設を含む)	操業期間 (閉鎖を含む)	閉鎖後期間 (規模縮小の上、継 続の可能性：(x))
<b>ベースライン（初期値）</b>			
母岩と周囲の地圏における地下水流動場：			
－地下水圧の分布			
－動水勾配			
－流動の方向			
－透水性			
－涵養域・湧水域			
地下水の地球化学的特性：			
－酸化還元反応	x		
－塩分濃度	x		
－主要元素・微量元素の濃度	x		
－天然放射性核種の含有量/バックグラウンド放射能	x (原文 x)		
処分施設の一部を構成する母岩の鉱物学的特徴	x		
処分施設の構築物の安定性に寄与する母岩の地力学特性	x		
処分施設の一部を構成する母岩の保持・水理特性	x		
処分施設の一部を構成する母岩の不連続部分（亀裂など）の特性調査	x		
地下水、地表水、空気、土壌・堆積物、動物・植物における自然放射能のバックグラウンドレベル	x		
周囲の地圏と大気における化学的・物理的変化	x		
気象・気候条件	x		
地表水系の水文学的条件（排水パターン、浸透率など）	x		

表 2.2.1-11 モニタリング対象とすべきパラメータ (特定安全指針[4])

(2/4)

モニタリング対象とすべき パラメータ/プロセス	作業前期間 (サイトの選定と施 設の建設を含む)	作業期間 (閉鎖を含む)	閉鎖後期間 (規模縮小の上、継 続の可能性 : (x))
自然生息地と生態系の生態学的条件	x	x	
処分施設の構築物の力学特性		x	
人工バリアの力学特性		x	
人工バリアの保持・水理特性		x	
<b>ベースラインパラメータの継続的モニタリング</b>		x	x
<b>廃棄物パッケージの健全性</b>			
直接測定可能なパラメータ :			
- 腐食			
- ひずみ		x	(x)
- 廃棄物パッケージにかかる圧力 (すなわち粘土 緩衝材の膨潤圧)			
環境パラメータ :			
- 温度			
- 湿度		x	(x)
- 再飽和			
- 廃棄物由来の気体の特性			
<b>処分施設の構築物と人工バリア</b>			
処分施設の構築物と人工バリアの構造的安定性 :			
- 力学特性			
- 応力			
- ひずみ			
- 地下開口部についての従来型観測によるもの :		x	(x)
・ 岩盤応力			
・ 岩盤支持物の変形とそれにかかる荷重			
・ 壁とライニングの変形			
・ 亀裂			
人工バリア (すなわち埋め戻し材と密封材) の挙			
動 :			

表 2.2.1-11 モニタリング対象とすべきパラメータ（特定安全指針[4]）

(3/4)

モニタリング対象とすべき パラメータ/プロセス	操業前期間 (サイトの選定と施 設の建設を含む)	操業期間 (閉鎖を含む)	閉鎖後期間 (規模縮小の上、継 続の可能性：(x))
ー再飽和率 ー以下のような特性の変化： ・水理特性 ・力学特性（膨潤など） ・化学的特性 ・熱特性 処分施設内への水の進入または処分施設内の水の 浸透を防止するためのもの		x	(x)
<b>処分施設（建設、廃棄物定置、人工バリア）によ って生み出される擾乱</b>			
母岩における力学的擾乱：			
ー応力場	x	x	(x)
ー変形			
ー亀裂			
地球化学的擾乱：			
ー土壌の組成（間隙水と鉱物学的特徴）			
ーpH 値	x	x	(x)
ー酸化還元反応			
ー保持特性			
ー生物学的変化			
水理的擾乱：			
ー透水性	x	x	(x)
ー水圧			
ー飽和度			
熱の擾乱：			
ー温度分布		x	(x)
ー熱伝導率			
<b>放射性核種放出のモニタリング</b>			
浸出水の濃度		x	(x)
地下水中の放射能濃度		x	x
潜在的に汚染される区域の範囲		x	x

表 2.2.1-11 モニタリング対象とすべきパラメータ（特定安全指針[4]）

(4/4)

モニタリング対象とすべき パラメータ/プロセス	操業前期間 (サイトの選定と施 設の建設を含む)	操業期間 (閉鎖を含む)	閉鎖後期間 (規模縮小の上、継 続の可能性：(x))
潜在的に汚染される区域における動水勾配、流動 の速度・方向		x	x
地下水面のレベル		x	x
帯水層の涵養と帯水層からの湧水		x	x
水の化学組成		x	x
地圏の変化			
力学特性： －応力 －ひずみ －亀裂（優先的な経路を生み出す可能性のある連 結）		x	x
水理特性： －地下水圧			x
化学的特性： －溶質の化学的条件 －鉱物学的特徴		x	x
熱特性 －温度		x	x
<b>環境データベースの開発</b>			
気象条件	x	x	x
水文学的条件（排水、水の使用、水質など）	x	x	x
様々な環境コンパートメント（生物圏、堆積物、 水域など）における放射性核種とその他の汚染物 質の濃度	x	x	x
地域生態系	x	x	x
地形プロセス（表面侵食、局所的侵食、斜面の発 達など）	x	x	x
造構活動（垂直及び横方向の地動速度、地震事象、 地熱流量など）	x	x	x
周辺地域での土地の使用	x	x	x

## 2.2.2 米国における事例

米国では、規制機関である原子力規制委員会（NRC）による技術要件・基準によりユッカマウンテン地層処分場での性能確認プログラムの実施を規定している。

ユッカマウンテン地層処分場では使用済燃料とガラス固化体を処分対象とし、処分深度は深度 200m～500m（地下水位は処分予定地から下方平均約 300m）、周辺岩盤は凝灰岩である。処分坑道に廃棄体を複数横置きで定置し、その上に液滴や岩石の落下から廃棄体を保護する「ドリップシールド」を設置する。緩衝材や埋め戻し材の設置は予定されていない。このように、処分概念はわが国で想定されるものと大きく異なるが、「性能確認プログラム」の実施を明確に規制要件とし、実施主体が検討を進めた事例としての意味を持つ。

本項では、このユッカマウンテン地層処分場における性能確認プログラムに関する規定と実施主体であるエネルギー省（DOE）による取組について記述する。

### (1) 規制要件

ユッカマウンテン地層処分場での性能確認プログラムの実施を規定する条項は、10 CFR Part 63：ネバダ州ユッカマウンテン地層処分場での高レベル放射性廃棄物の処分、(NRC, 2001/2009) [7]に記載されている。この規定では、性能確認プログラムは、サイト特性調査中に開始し、永久閉鎖まで継続するものとされている。また、性能確認プログラムは、原位置モニタリング、室内試験及び現場試験、原位置実験を含むものである。表 2.2.2-1 に該当する条項を抜粋する。

表 2.2.2-1 性能確認プログラムの要件 (10 CFR Part 63[7])  
(1/2) (下線は原環センターによる)

<p>10 CFR Part 63: ネバダ州ユッカマウンテン地層処分場での高レベル放射性廃棄物の処分、NRC, 2001年11月2日/2009年3月13日</p> <p>サブパート E：技術基準、§ 63.102 概念</p> <p>(m) 性能確認：性能確認プログラムは、処分場の建設及びその後に行われる廃棄物の定置を可能にした調査結果につながる仮定、データ及び分析の適切性を評価するために実施される。主要な地質工学及び設計面でのパラメータ（天然及び人工システム及び構成要素の間の何らかの相互作用を含む）のモニタリングが、サイト特性調査、建設、定置及び操業段階の全体を通じ、§ 63.113(b)及び(c)で指定された性能目標の順守に影響を及ぼす可能性のある許認可申請において仮定された条件に重要な変化が起こった場合に、それらを特定するために実施される。</p> <p>サブパート F：性能確認プログラム、§ 63.131 一般的な要件</p> <p>(a) 性能確認プログラムは、<u>実行可能な限りにおいて</u>、次の点に関するデータをもたらすものでなければならない。</p> <p>(1) <u>建設及び廃棄物定置作業中に実際に遭遇した地表面下の条件やこれらの条件の変化が、許認可審査で想定された限度内に収まっているかどうか。</u>及び、</p> <p>(2) <u>処分場の操業にとって必要であり、永久閉鎖後にもバリアとして機能することが設計に組み込まれているか、想定されている自然体系及び人工システムが、意図及び予測された機能を果たしているかどうか。</u></p>
--

表 2.2.2-1 性能確認プログラムの要件 (10 CFR Part 63[7])

(2/2) (下線は原環センターによる)

<p>(b) 性能確認プログラムは、サイト特性調査中に開始され、永久閉鎖まで継続されなければならない。</p> <p>(c) 性能確認プログラムには、本セクションのパラグラフ(a)で要求されているデータを入手する上で適切と考えられる原位置モニタリング、室内試験及び現場試験、原位置実験が含まなければならない。</p> <p>(d) 性能確認プログラムは、次のような形で実施されなければならない。</p> <p>(1)このプログラムによって、地層処分場の地質及び人工の要素がそれぞれの性能目標を満たす能力に悪影響が生じることはない。</p> <p>(2) このプログラムによって、サイト特性調査、建設及び操業活動によって変化した可能性のある地質環境に関するパラメータ及び自然プロセスに関する基礎情報と、それらの基礎情報に関する分析がもたらされる。</p> <p>(3) <u>このプログラムによって、地層処分場の性能に影響を与え得るパラメータの基礎条件の変化を対象としたモニタリング及び分析が行われる。</u></p> <p>§ 63.132 地質工学的なパラメータと設計パラメータの確認</p> <p>(a)処分場の建設及び操業期間中、サーベイランス、測定、試験及び地質図作成のための連続的な計画が実施されなければならない。この計画の目的は、地質工学的パラメータと設計パラメータの確認を保証すると共に、現場で実際に遭遇した条件に対応する上で必要な設計上の変更に関する情報を NRC に提供するために適切な措置がとられることを保証することにある。</p> <p>(b) 地表面下の条件は、設計で用いられた前提に照らしてサーベイランス及び評価されなければならない。</p> <p>(c) <u>測定及び観察を行うべき具体的な地質工学及び設計面でのパラメータが、自然体系及び人工システム及び構成要素の間の何らかの相互作用を含めて、性能確認プログラムにおいて特定されなければならない。</u></p> <p>(d) <u>これらの測定及び観察は、当初の設計の基盤 (design bases) 及び前提と比較されなければならない。測定及び観察された結果と、当初の設計の基盤 (design bases) 及び前提の間に重要な相違が存在する場合、設計及び建設方法の修正の必要性が明らかにされなければならない、これらの相違点、それらの地層処分場にとっての重要性、さらには勧告される変更が、NRC に報告されるものとする。</u></p> <p>(e) 地下施設の熱力学的な応答に関する原位置モニタリングは、地質学的な特徴及び人工特徴の性能が設計限度内であることを保証するために、永久閉鎖まで実行されなければならない。</p>
--

## (2) 実施主体の取組

前述の規制要件に対し、DOE が示した報告書には、当時実施されていた性能確認プログラムへの取組について、表 2.2.2-2 のような記載がみられる。

表 2.2.2-2 DOE の報告書による性能確認に関する記載  
(下線は原環センターによる)

報告書	記載
ユッカマウンテン サイト適合性評価 DOE, 2002 年 2 月 [8]	III. 閉鎖後適合性評価 DOE は、EPA および NRC もその規制の中で明確に認めているように、絶対的現実性というものは得ることができず、したがって TSPA (Total System Performance Assessment) モデル化の結果は、将来の結果に関する絶対的現実性を構成するものではないことを認識している。(…) 複数の天然および人工バリアを処分システムに含めることと解析における類似物の検討に加えて、 <u>閉鎖後性能目標が達成されるという確信を高めるための追加措置が実施されている。これらの措置には、モデル検証、厳格な品質保証プログラムの実施、および性能確認プログラムの継続が含まれる。</u>
ユッカマウンテン 科学・工学報告書 DOE, 2002 年 2 月 [9]	XIV. 性能確認およびモニタリング ユッカマウンテン処分システムが期待通りに性能を示しつつあることを監視および確認するために策定された性能確認プログラムは、サイト特性調査中にすでに開始されており、永久的閉鎖まで続く予定である。 <u>性能確認プログラムの焦点は、閉鎖後の処分場性能に影響する天然のプロセスおよび人工バリアの性能に関するデータを収集・解析し、それらの影響を評価することである。</u>

また、DOE のサンディア国立研究所は、地層処分場の性能確認プログラムについて、モニタリングに焦点を当てた報告書 (SANDIA (2011) [10]) を作成している。

この報告書は、後述する国際共同研究 MoDeRn プロジェクトに対し、モニタリングを含む性能確認に関する検討の先行事例を示したものである。以下に本報告書のうち、異なった処分概念を持つ、他の処分場での性能確認モニタリングに共通する記述について、その概要を述べる。

### 1) 性能確認プログラムの位置付け

本報告書では、性能確認プログラムの実施は規制によって明確に要求されているものであり、性能確認プログラムに関する記述は許認可申請書にとって重要な部分の 1 つであること、そして、性能確認は規制当局にとっても拘束力を伴う関与の 1 つであることを述べている。また、性能確認試験及びモニタリングは、処分場の建設・操業許可申請における様々な仮定や、データ及び分析の妥当性を評価するために行われるとし、性能確認プログラムの鍵となる側面として、以下の 2 つを挙げている。

- (1) 測定またはモニタリングされるパラメータの選択
- (2) 技術的なベースラインとは異なるものとして測定またはモニタリングされた情報に関し、規制当局が通知を受ける条件の決定

処分場にて実施されるモニタリングには、表 2.2.2-3 のタイプがあることを述べ、性能確認モニタリングを処分場の長期的科学戦略として実施されるモニタリングに分類し、作業時のマネジメントのためのモニタリングと区別している。また、性能確認モニタリングの対象としては、許認可発給にあたっての性能確認目標が事実上のモニタリング要件となっているとしている。

表 2.2.2-3 処分場におけるモニタリングの要件 (SANDIA 国立研究所 [10])

作業	1. 工学システムの試験及び評価
	2. 設計、建設及び作業の試験
	3. 健康、安全及び排水
	4. 安全保障及び緊急事態の試験
	5. 許認可の仕様 (specifications)
長期的な科学 (Long-term science)	6. 規制の指示による試験
	7. 選択的な試験
	8. 性能確認

## 2) 性能確認プログラムの構造

性能確認プログラムの構造については、図 2.2.2-1 に示されるように、国の法律及び規制フレームワークが支配的な役割を果たしており、これらの高水準の政策が「境界条件」となること、各国の背景状況に関する戦略的選択には、地層、廃棄物インベントリ及び処分概念が含まれることを述べている。これらの高い水準の入力情報によって具体的要件が設定され、評価が行われた後、性能確認活動として実行に移されるとしている。また、具体的要件が設定された後に、実現、評価及びフィードバックの方法が次第に詳細さの度合いを増すことを述べている。

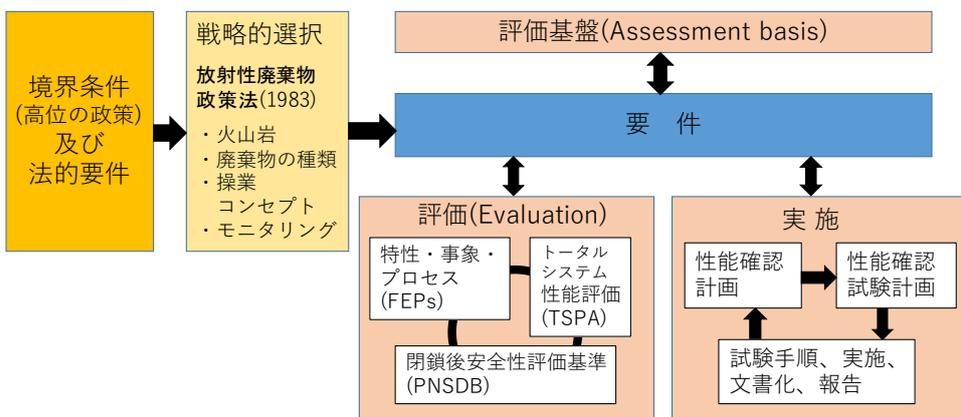


図 2.2.2-1 性能確認の実施と評価に関する階層構造 (SANDIA 国立研究所 [10])  
一部改編 (他国の事例を削除、説明を付加)

### 3) 性能確認パラメータの特定

性能確認のためのモニタリング又は測定の対象となるパラメータは、図 2.2.2-2 に示したような情報源から導き出されるとしている。左側に示した性能評価シーケンスにおいて、リスクや線量に影響を及ぼす最も重要なパラメータの多くが特定され、右側に示した閉鎖後安全性に関する設計基準により、バリア能力にとって重要な特性及び構成要素に関するパラメータ及び特徴が特定されている。これらについて定量的な試験又はモニタリングの実施が可能である場合、性能確認の候補パラメータとなる可能性があるとしている。また、こうして候補として挙げられる確認パラメータは、バリアに関する FEP 分析や性能評価の結果から選定されるものであると説明している。さらに、性能確認パラメータの選定については、性能に関する感度解析に依拠することを述べている。

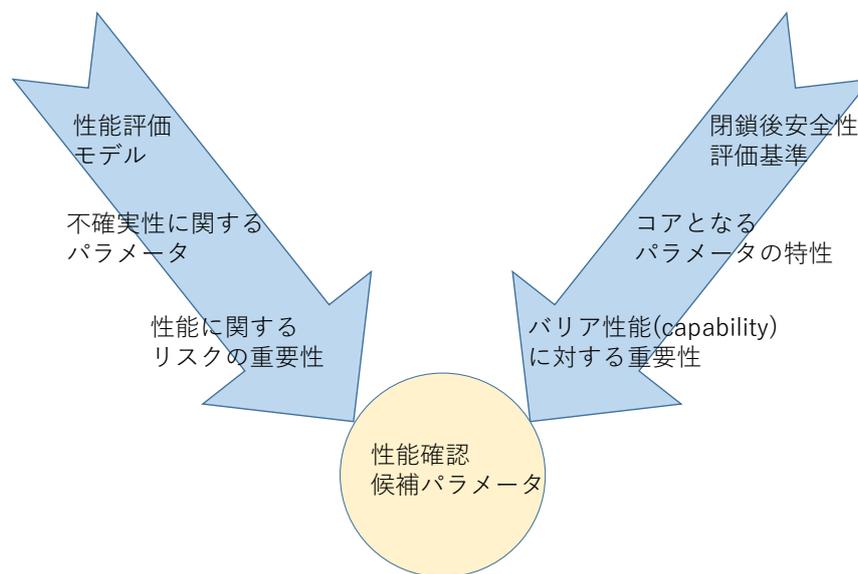


図 2.2.2-2 性能確認パラメータの特定に用いたソース (SANDIA 国立研究所 [10])

#### 4) 性能確認の実施と評価

性能確認へのアプローチについて、表 2.2.2-4 のステップ（米国電力研究所、2001）を示し、さらにこのアプローチを内包する、性能確認プログラムの実施と評価の反復的な手順を図 2.2.2-3 のように示している。

図 2.2.2-3 について、性能確認試験及びモニタリングは1つの特別試験計画により実行されること、調査主任(Principal Investigator)によって開始され、正当化されるのが一般的であるとしている。セーフティケースに基づき、この主任研究員が、確認試験及びモニタリングのためにパラメータ、データ品質目標及び範囲を設定する。

表 2.2.2-4 性能確認のアプローチ（米国電力研究所（2001））

- 1.性能確認パラメータ及び試験方法の選択。
- 2.性能を予測し、1つのベースラインを設定する。
- 3.複数の鍵となるパラメータに関する境界及び裕度を設定する。
- 4.試験完了規準及び分散（バリエーション）に関するガイドラインを設定する。
- 5.さまざまな活動に関する計画を設定した上で、性能確認プログラムを構築し、設置する。
- 6.データのモニタリング、試験及び収集を行う。
- 7.データの分析及び評価を行う。
- 8.分散（バリエーション）が生じた場合に、是正処置の勧告を行う。

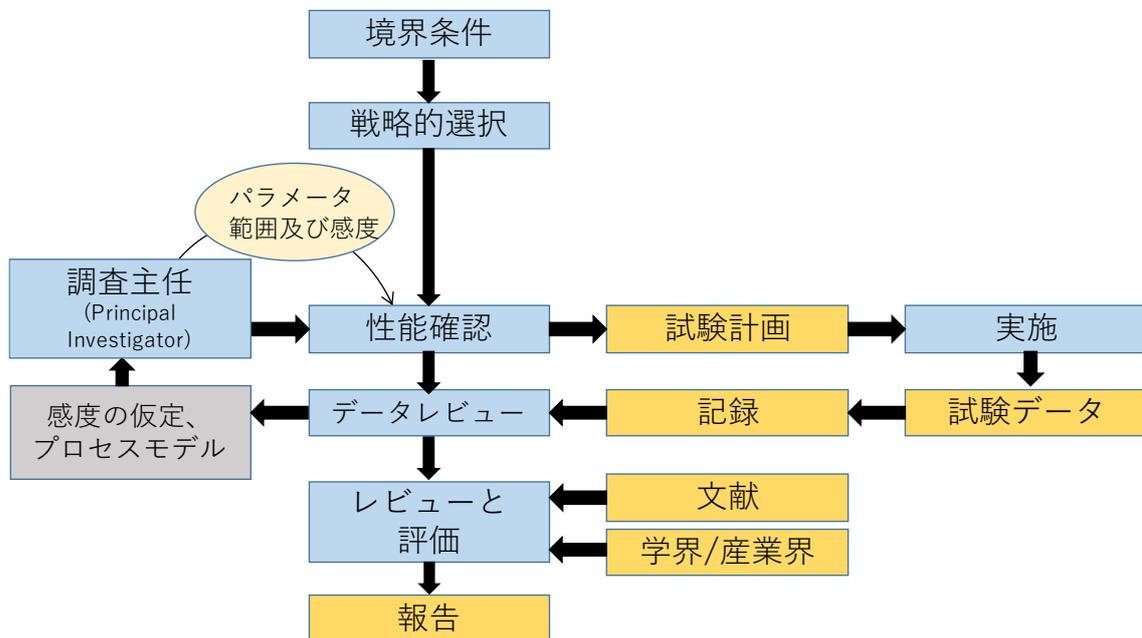


図 2.2.2-3 性能確認プログラムの実施（SANDIA 国立研究所 [10]）

### 2.2.3 フィンランドの事例

フィンランドのオルキルオト処分場では深度 400m～450mの結晶質岩中に使用済燃料を処分する予定であり、廃棄体の周囲にベントナイト緩衝材を設置する処分概念（KBS-3 概念）を採用している。この処分概念は、わが国にて検討中の処分概念[28]に類似しているため、フィンランドにおいて性能確認の対象とされるプロセスやパラメータは、わが国に於ける性能確認プログラムの検討において参考となるものと考えられる。

#### (1) 規制要件

フィンランドの規制機関である放射線・原子力安全センター（STUK）の規則及び安全指針において、性能確認及びモニタリングに関して、表 2.2.3-1 の記載がみられる。

安全指針ではバリア性能等について、調査、試験及びモニタリングにより補足敵情を得ることを要求している。

表 2.2.3-1 放射線・原子力安全センター（STUK）の規則及び安全指針における性能確認及びモニタリング

（下線は原環センターによる）

規則等	記載
STUK-Y-4-2016 原子力廃棄物の最終処分の安全性に関する放射線・原子力安全センター（STUK）規則、2015年12月22日[11]	<p>第2章 安全性一般 第5条 安全等級分け</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>原子力廃棄物施設の操業に関する安全機能と長期安全性に関する安全機能が示されなければならない。</u>これらを構成するかこれらに結び付くシステム、構造物及び設備は、それらの使用目的に基づき、操業安全性又は長期安全性にとって、もしくは必要に応じてこの両者にとって持ちうる意味に応じて分類されなければならない。</li> <li>2. この安全面での分類は、システム、構造物及び設備に関する品質要件を決定する際に使用されなければならない。</li> <li>3. 操業安全性との関連の大きい安全機能を構成するかそれと結び付くシステム、構造物及び設備に設定される要件と、これらが要件への順守を保証するために講じられる措置は、対象物の安全等級に基づくものとされなければならない。</li> <li>4. <u>長期安全性のための安全機能を構成するシステム、構造物及び設備は、その品質レベルが、さらにはその品質レベルの確認に必要な評価、検査及び試験が、当該対象物の安全面での役割にふさわしいものとなる方法で計画し、製造し、設置しなければならない。</u></li> </ol>
STUK YVL D.5 原子力廃棄物の処分（安全指針、2013.11.15）[12]	<p>処分施設の建設、操業及び閉鎖</p> <p>506. <u>処分施設の建設及び操業期間中に、掘削する場所および岩盤が処分に適していることを確実にするために、並びに母岩の安全に関わる特性やバリアの性能に関する補足的情報を得るために、調査、試験及びモニタリング・プログラムを実施しなければならない。</u>このプログラムには、少なくとも次のものを含まなければならない。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>a. 掘削が予定されている岩体（rock volumes）の特性評価。</li> <li>b. 定置室を取り囲む岩盤の岩盤応力、移動及び変形に関するモニタリング。</li> <li>c. 定置室を取り囲む岩盤に関する水理地質学的なモニタリング。</li> <li>d. 処分地における地下水の化学的な性質に関するモニタリング。</li> <li>f. <u>人工バリアの挙動に関するモニタリング。</u></li> </ol>

(2)処分実施主体の取組

フィンランドの処分実施主体である Posiva 社の地層処分場の建設許可申請書及び報告書には、性能確認のためのモニタリングに関して、表 2.2.3-2 のような記載がみられる。

表 2.2.3-2 Posiva 社の建設許可申請書及び報告書における性能確認モニタリング  
(下線は原環センターによる)

書類の名称	記載
使用済燃料のためのオルキオト・キャニスタ封入及び最終処分施設の建設許可申請、POSIVA OY、2012年12月31日[13]	<p>附属書 8 申請者が従う予定の安全性原則に関する説明並びに原則の実施に関する評価 [YEA 第 32 条第 6 項]</p> <p>4.4 最終処分措置 (VNA 736/2008、第 9 条) (前略)</p> <p><u>ONKALO 及び将来行われる最終処分場の建設は、周辺の岩盤、地下水流動条件及び化学反応、さらには地表環境に影響を及ぼすことになる。これらの影響を最小限とするために、特に水量、水漏れの管理、孔の掘削、掘削中に生じる岩盤の破損、そして最終処分にとっての全ての異物の地下空間及びその近辺での使用に関する指示が設定される。これらの影響の大きさ及び広がり、岩盤力学、水文学、水文地化学及び地表環境に関するモニタリング調査、さらには最終処分施設で使用する異物の質及び量の追跡を含むモニタリング・プログラムを通じて追跡調査される。これらのモニタリングは、最終処分施設からも地表からも手作業によって行われる。2004 年から機能しているプログラムの調査結果及び 2012 年までの計画の詳細は、ポシヴァ社の作業報告書シリーズにおいて、それぞれの分野ごとに 1 年に 1 度公表されている。新しいモニタリング・プログラムには、<u>2012 年～2018 年のモニタリング計画が含まれている。また建設段階のモニタリング・プログラムは、準備中の操業段階のモニタリング・プログラムに適用され、今後補足されてゆく予定である。さらに操業段階における人工的な最終処分システム (すなわちキャニスタ、緩衝材及び埋め戻し材) の挙動に関するモニタリングを、最終処分システムの性能を脅かすことのない範囲で実施することが目指される。</u></u></p>
Posiva 2012-01: オルキオトにおけるモニタリング: 処分場操業期間前までの計画、2012年8月[14]	<p>(記載内容の説明)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <u>安全指針 (当時はドラフト版) による性能確認の指示への対応を含むモニタリング計画を検討</u></li> <li>・ モニタリングの目標として下記を提示</li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <u>長期安全性 (サイト): 処分場周辺の条件が、処分場を建設及び操業が実施された場合であっても、長期安全性にとって好ましいものであり続けることを実証すること。</u></li> <li>2. <u>サイト特性評価及びモデル化に対するフィードバック: 処分場の周囲について様々なモデルを定義し、試験するために利用できるデータを取得すること。これによってサイトの理解とサイトにおける変化の理解が深まる。</u></li> <li>3. <u>環境に対する影響のモニタリングを実施すること。</u></li> <li>4. <u>地圏及び地表環境に対して建設が与える影響を調査し、建設及び設計作業へのフィードバックを行うこと。</u></li> <li>5. <u>人工バリアシステムの性能に関するモニタリングを行うこと。人工バリアシステムの性能をモニタリングして、挙動の予想/予測の根拠の確認を行うこと。</u></li> <li>6. <u>義務づけられている放射線モニタリングを行うこと。処分場から環境への放射性物質の放出と放射線に関するモニタリングの実施が義務づけられており、これを実行する。</u></li> </ol> <p>天然バリアのモニタリングについて</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ プロセス/特徴、パラメータ/対象、方法、測定サイクル、場所を特定するとともに、自然変動の幅、<u>処置限界 (この値を超えると何らかの処置を行う値) を提示。</u></li> <li>・ <u>処置限界を超えた場合の対応として、再確認、評価グループ招集、安全分析、操業計画見直し、廃棄体回収の検討を提示。</u></li> </ul> <p>人工バリアの性能確認モニタリングについて</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処分場操業許認可申請の提出前に更新</li> <li>・ 人工バリアの変遷と核種移行に係るプロセス (FEP) を特定</li> <li>・ プロセスの確認について、<u>モニタリングによるもの、試験によるもの、直接確認できないものを分類。</u></li> <li>・ <u>実際にモニタリングする内容は、将来の手法の研究開発に基づき決定。</u></li> </ul>

Posiva 社のモニタリング計画 (Posiva 2012-01) [14]では、安全機能とそれに関するプロセスを基に性能確認モニタリングのパラメータを選定している。人工バリアの変化に関係するプロセスからモニタリングの対象の選定を表 2.2.3-3 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、実験室での試験にて確認すべきもの、変化が起こる時期が氷河期やキャニスタ（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 2.2.3-3 人工バリアのモニタリング対象プロセスの選定 (Posiva 社[14])

分類	プロセス番号	プロセス名	モニタリング分野	棄却理由	
人工バリアの変化に関するプロセス	使用済み燃料				
	3.2.1	放射性壊変		規則的	
	3.2.2	熱生成		規則的	
	3.2.3	熱移動		間接測定	
	3.2.4	燃料ペレットの構造変化		実験室	
	3.2.5	残留水の放射化 (キャニスタ内)		実験室	
	3.2.6	間隙水の放射化		実験室	
	3.2.7	燃料被覆管及びその他金属材料の腐食		キャニスタ破損	
	3.2.8	燃料集合体の変質と溶解		実験室	
	3.2.9	インベントリの不安定区分の放出		キャニスタ破損	
	3.2.10	ヘリウムガスの生成		規則的	
	キャニスタ				
	4.2.1	放射線の減衰			規則的
	4.2.2	熱移動	人工バリア		
	4.2.3	変形	人工バリア		
	4.2.4	キャニスタの熱膨張			規則的
	4.2.5	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

## 2.2.4 スウェーデンの事例

スウェーデンのフォルスマルク処分場では深度約 500mの結晶質岩中に使用済燃料を処分する予定であり、廃棄体の周囲にベントナイト緩衝材を設置する処分概念 (KBS-3 概念) を採用している。この処分概念は、わが国にて検討中の処分概念[28]に類似しているため、スウェーデンにおける品質保証や性能確認に関連する検討内容は、わが国に於ける性能確認プログラムの検討において参考となるものと考えられる。

### (1) 規制要件

スウェーデンの規制機関である放射線安全機関 (SSM) の規則及びその規則の適用に関する一般勧告には、性能確認モニタリングに関して、表 2.2.4-1 の記載がみられる。

このうち、規則の適用に関する一般勧告では、閉鎖後の処分場の健全性や、バリアの性能をモニタリングするための措置を講じることを「可能である」としている。

表 2.2.4-1 放射線安全機関 (SSM) の規則及びその注釈における品質保証、性能確認に関する記載

規則の名称	記載
核物質及び原子力廃棄物の処分の安全性に関する放射線安全機関の規則 SSMFS 2008:21、2008年12月19日決定[15]	第1条 この規則は、核燃料及び原子力廃棄物の処分のための施設 (処分場) に適用される。(略) この規則は、原子力施設の安全性に関する放射線安全機関の規則 (SSMFS 2008:1) を補足する規定を含む。  第8条 処分された核物質または原子力廃棄物のモニタリングまたは処分場からのそれらの回収を容易にするための措置、または処分場への侵入を困難にするための措置については、それらの措置が安全性に与える影響を解析し、放射線安全機関に報告しなければならない。
核物質及び原子力廃棄物の処分の安全性に関する放射線安全機関の規則 (SSMFS 2008:21) の適用に関する一般勧告、 2008年12月19日決定[15]	第1条に対する注釈 処分場の許可保有者は、原子力施設の安全性に関する放射線安全機関の規則 (SSMFS 2008:1) の規定に基づいた品質保証、安全レビュー、安全プログラム、及び定期安全審査の要件を満たすために講じられる措置が、閉鎖後安全性に関しても十分であることを確実にすべきである。  第8条に対する注釈 建設中及び操作中においては、閉鎖後の処分場の健全性 (integrity) や、バリアの性能をモニタリングするための措置を講じることは可能である。(後略)

### (2) 処分実施主体の取組

#### 1) SKB R-04-13

スウェーデンの処分実施主体であるスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB) では、地層処分に関わるモニタリング計画に関する研究報告書「スウェーデンにおける使用済燃料の地層処分の段階的实施期間におけるモニタリング (SKB R-04-13)」[16]を2004年に公開した。

SKB R-04-13 では、段階的に実施される処分事業におけるモニタリングは主に以下のよう理由で実施されるとしている。

- ▶ 処分サイトのベースライン条件を記述するため
- ▶ 処分サイトおよび人工バリア挙動に関する理解を進展させ実証するため
- ▶ 意思決定プロセスへの支援のため
- ▶ 国際的および国内のガイドラインや規制を順守していることを示すため

また、モニタリングの具体的な役割として以下を示している。

- ・ 地層処分の各段階における活動の影響を特定し評価するために、擾乱を受けない場合の自然条件とその季節変化（ベースライン）に関する知見を取得すること
  - ▶ 安全性の説明をサポートし、モデルや仮定を試験するために、地層処分システムの機能に関してさらに理解すること
  - ▶ 地層処分場の環境影響を監視すること
  - ▶ 作業環境が放射線学的に、および非放射線学的に安全であることの証拠を提供すること
  - ▶ 放射性廃棄物の検査（保障措置）が満たされる要件を示すこと

また、長期安全性の評価に関するモニタリングに関して以下のことを述べ、これらを検討し、モニタリングの対象とする特性やプロセス、現象を特定すべきと述べている。

- ・ 長期安全評価のためにモニタリングする特性、プロセスおよび現象の特定は安全評価の内容に本質的に関連する。
- ・ モニタリングすべき基本的性質は「長期安全性」であると考えられるが、これは不可能であるため、一つもしくは複数のプロセスのパラメータを複合して「鍵となる指標」とし、プロセスや特徴の本質的要素を取得するという手法をとる。例えば、個々の元素の挙動を特定し追跡することができないような場合には、温度のモニタリングが放射性崩壊のよりよい「鍵となる指標」となる。
- ・ 「鍵となる指標」を追跡することにより、システム全体がどのように進展していくかについての初期情報を得ることができるため、モニタリングプログラムの中で「鍵となる指標」を設定することは賢明である。また、「鍵となる指標」は、操業時や長期の安全性についての安全評価の中でも示される可能性がある。

なお、バリア性能の確認に関するモニタリングについては、表 2.2.4-2 に示す記述がある。地層処分場でのバリア性能のモニタリングについては、使用済燃料キャニスタからの中性子線やガンマ線を考慮せずに、及び閉鎖後のバリア性能を損なうことなしにモニタリングシステムを設置、維持及び廃止することは非現実的であるとし、模擬廃棄体を用いた Äspö

硬岩研究所のプロトタイプ処分場でのモニタリングに限定して議論している。

表 2.2.4-2 バリア性能のモニタリングに関する記述 (SKB R-04-13[16])

(下線は原環センターによる)

3.5.3 Äspö 硬岩研究所でのモニタリング  
バリア性能のモニタリング

バリア性能に関する多くの実験が実施済みもしくは現在実施中である。ここではプロトタイプ処分場に限定して議論する。

プロトタイプ処分場での実験は、処分手順を試験し実証するために、及び人工バリアや周辺岩盤において発生するプロセスを理解し認識するために実施されている。実験の実施は、詳細な特性調査から定置坑道の再飽和や坑道の埋め戻しまでの、地層処分場を建設するために必要な行動の本番並みの練習である。プロトタイプ処分場からは処分場の総合的な機能の実証、及び個別要素やシステム全体に関する予測モデルの試験のためのフルスケールレファレンスが得られる。Äspö HRL では深度 450 m において 6 個の処分孔を用いて実施されている。銅製キャニスタ内部のヒーターは廃棄体からの熱を模擬している。図 3-7 (省略) に示すように、キャニスタの周囲を粘土緩衝材で覆い、坑道をベントナイトと粉碎岩の混合物で埋め戻している。

プロトタイプ処分場では 2 種類のモニタリングが実施されている。一つは、図 3-8 (省略) に示すような、プロトタイプの周辺環境における境界条件と初期条件のモニタリングであり、もう一つは、図 3-9 (省略) に例示するような、KBS-3 システムでのキャニスタや緩衝材の現実的な性能のモニタリングである。以下のプロセスがモニタリングされている。

- ・キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材及び岩盤の内部温度の変遷
- ・ニアフィールド岩盤の透水係数と水頭
- ・ニアフィールド岩盤内での応力及び変位
- ・複合的な水理及び応力のレジーム
- ・緩衝材及び埋め戻し材の湿潤
- ・緩衝材、埋め戻し材及び岩盤の内部間隙圧の変遷
- ・緩衝材及び埋め戻し材内部の膨潤圧と変位の変遷
- ・キャニスタの変位
- ・緩衝材及び埋め戻し材内部のガス組成
- ・緩衝材及び埋め戻し材の間隙水の化学組成、及びニアフィールド岩盤中の水の化学組成

プロトタイプ処分場は実規模でのバリア性能のモニタリング例である。図 3-9 (省略) は地層処分場でのバリア性能のモニタリングが危険である (そのため、実施すべきではない) 可能性があることを示している。なぜならば、使用済燃料キャニスタからの中性子線やガンマ線を考慮せずに、及び閉鎖後のバリア性能を損なうことなしに、モニタリングシステムを設置、維持及び廃止することは非現実的と考えられるためである。

## 2) SR-Site

SKB では、2011 年 3 月に原子力法に基づき、地層処分場の立地・許可申請を行った。この申請書には安全評価書 (SR-Site) [17]が添付された。

SR-Site の安全評価の流れは、基本的にこれまでの安全評価(SR-Can)の流れを踏襲しており、図 2.2.4-1 に示す 11 段階で行われる。

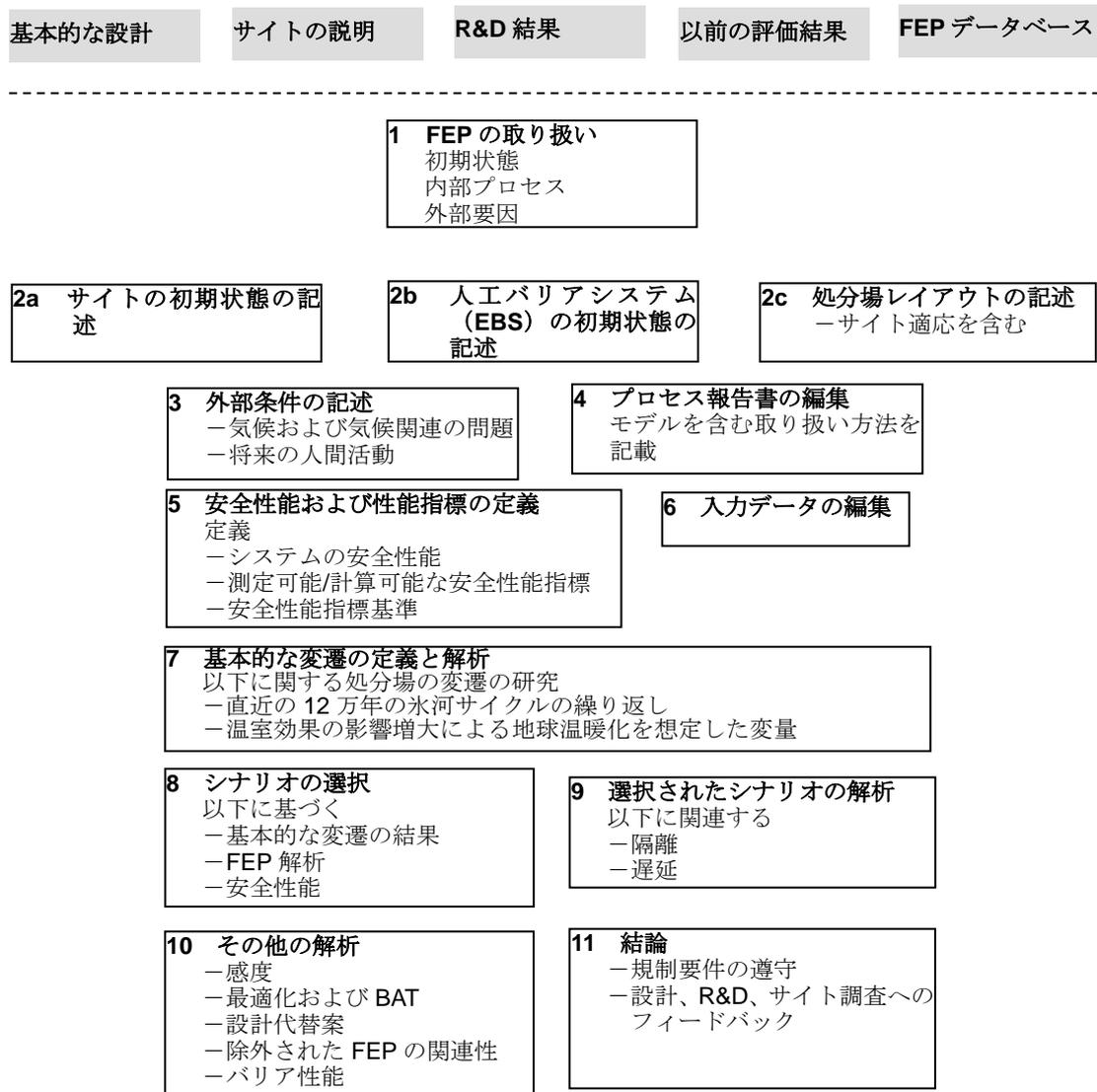


図 2.2.4-1 安全評価の主な段階の概要 (SR-Site[17])

(点線の上のボックスは評価へのインプット)

このうち、処分システムが時間経過とともに理想的な形で満足すべき安全機能のセットを定義することが、安全評価の方法論における中心的要素の一つである。安全機能のセットを決めること自体が、処分システムの備える安全特性の理解につながっていると共に、安全評価で評価すべき重要事項を抽出することを意味している。

安全機能に関する記述は、図 2.2.4-1 の「5 安全性能および性能指標の定義」に対応しており、「閉じ込め」と「遅延」の二つの全体的な安全機能をキャニスタ、緩衝材、処分坑道埋め戻し材、母岩についての低位の安全機能に細分化し、これについて安全機能指標、安全機能指標基準という概念で定量的に取り扱えるようにしている。

- ・安全機能 (safety functions) : 安全性への寄与という観点で処分場の構成要素が果たす役割
- ・安全機能指標 (safety function indicators) : 安全機能を満たす程度を示す、測定あるいは計算可能な構成要素の特性
- ・安全機能指標基準 (safety function indicator criteria) : 安全機能が満たされるための安全機能指標の定量的な値

SR-Site では、その要約において以下のように述べ、処分場の構成要素の製造時の品質保証を中心として、長期安全性の確保を行うことを述べている。

「安全評価 SR-Site の中心的な結論は、長期安全性の要求事項を満たす KBS-3 処分場をフォルスマルクの地に建設できる、ということである。(略) 処分場の人工構築する部分の仕様を詳細化し、所定の仕様を満足する構築物を品質保証できる方法で製造する技術を立証したこと。これにより、安全評価で用いる初期状態を品質保証がある形で用意できた。」

また、モニタリングについては、図 2.2.4-1 の「2a サイトの初期状態の記述」に対応する枠組みにおいて、4つのモニタリングを定義し、それぞれに対する取組を示している。これらの記載の概要を表 2.2.4-2 に示す。このうち、「処分場建設・操業の管理プログラム」に関するモニタリングでは、処分場の建設・操業が、設計の前提条件や他の要求への適合することを保証することを目的とするとしており、設計の前提条件には、上述の安全機能に基づく処分場構成要素の性能が含まれるため、この事項が性能確認に対応するものと言える。一方で、人工バリアのモニタリングについて、「廃棄体定置後のモニタリング」において、最終的に処分された廃棄体の人工バリア (キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材) のモニタリングは、人工バリアの安全機能を損なう為、意図していないことを述べている。

表 2.2.4-3 モニタリングに関する概要 (SR-Site[17])

項目	概要
ベースライン記述のためのモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地表からのサイト調査期間におけるベースラインコンディション確立の目的は、処分場周辺の環境の処分場開発による変化を認識し、自然による変化と人為的な変化を区別する為の、基準を定義することである。</li> <li>・ベースラインコンディションを記述することは、本質的に、サイト記述モデルに等しく、サイトの特性調査によって得られたデータに基づく。</li> <li>・サイト特性の一部は時間により変化するため、地球科学的、あるいは環境的なパラメータのモニタリングはサイト調査段階に開始され、いくつかの例外を除き、地表からの調査の完了後、地下の掘削作業開始後も継続されている。</li> </ul>
処分場建設の影響のモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モニタリングは統合された詳細特性調査の一部となる。</li> <li>・処分場建設・操業が環境対し、どのように影響を与えるかを調査することを目的とする。</li> <li>・水理地質学的あるいは水理地球化学的モデルの作成と妥当性の確認に用いられる。</li> <li>・モニタリング計画は必要の都度見直され、特に長期の測定が処分場建設・操業による影響を捉え続けているかに着目する。</li> <li>・モニタリング計画は環境制御計画や処分場建設計画の要求事項に適合しなければならない。</li> </ul>
処分場建設・操業の管理プログラム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・管理プログラムは処分場の掘削に先立って作成されるが、処分場建設等の経験がフィードバックされる。</li> <li>・処分場の建設・操業が、設計の前提条件や他の要求への適合することを保証することを目的とする。</li> <li>・材料供給、職人の技量、施工が完了し操業している施設が設計と操業活動の事項に対応するかの管理、が考慮される。</li> </ul>
廃棄体定置後のモニタリング	<ul style="list-style-type: none"> <li>・これまでに述べた（ベースライン、処分場建設・操業の影響）モニタリング計画は、廃棄体が定置され、処分場の閉鎖が開始されるまで継続する。</li> <li>・処分場の閉鎖時には、モニタリングシステムは徐々に解体されるが、閉鎖のプロセスをどこまでモニタリングするかが課題となる。</li> <li>・最終的に処分された廃棄体の人工バリア（キャニスタ、緩衝材、埋め戻し材）のモニタリングは、人工バリアの安全機能を損なう為、意図していない。</li> <li>・閉鎖後のモニタリングに対する法的要求はないが、核物質防護のためのモニタリングは開発されるだろう。</li> <li>・閉鎖後のモニタリングについては、閉鎖時の政策決定者により決定される。</li> <li>・SR-Site では閉鎖後のモニタリング計画について考慮しないが、長期安全性に影響を与えないものとなるだろう。</li> </ul>

### 3) SKB R-11-14

「使用済燃料の最終処分場の建設と操業に関する詳細特性調査のフレームワークプログラム (SKB R-11-14)」 [18]は、SKB が 2011 年 3 月に実施した地層処分場の立地・許可申請を行った際に提出した安全評価書 (SR-Site) [17]の下位文書である。

SKB R-11-14 においては、建設および操業中のモニタリングは、「継続的な、より詳細なサイト特性調査に寄与し、その結果、母岩の特性への詳細な適合、最新の安全評価、さらに環境影響の決定の基盤として役立つ」とされ、詳細特性調査プログラムの一部として位置付けられている。

## 2.2.5 フランスの事例

フランスでは、地下研究所のあるビュール近傍の深度 500m の堆積岩（粘土層）中に、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）及びわが国の TRU 廃棄物に類似した長寿命中レベル放射性廃棄物を地層処分する予定である。高レベル放射性廃棄物は、粘土層中に水平に掘削された処分孔（長さ 100m 以上を検討中）に鋼製スリーブ（パイプ）を設置した後に複数定置され、廃棄体の周囲に緩衝材は設置されない。このように、わが国の処分概念とは異なるものの、法令により可逆性の担保が要求されていることから、同じく可逆性の担保が要求されたわが国における性能確認の検討に資する可能性があるものと考え、調査を行った。

### (1) 規制要件

フランスの法令及び規制機関である原子力安全機関（ASN）による地層処分に関する安全指針、安全オプション書類に関する要求事項には、性能確認及びモニタリングに関し、表 2.2.5-1 の記載がみられる。

なお、フランスでは、放射性廃棄物処分場を含む原子力基本施設の設置許可申請に先立ち、施設を操業しようとするものが、施設の安全を確保するために採用したオプション（安全オプション）に関し、ASN に意見を請求することができることが、政令にて規定されている。また、同政令により、操業者は設置許可申請に付属する予備的安全解析書において、安全オプションに関する ASN の意見書にて要求された追加調査及び追加説明を明記し、安全オプションについて行った変更や補足について説明することが義務付けられている。このため、事業者が提出する安全オプションに関する書類に対する ASN の審査は、原子力基本施設の設置許可申請に関する予備的な審査としての意味を持ち、処分実施主体は安全オプション書類に対する ASN の要求事項に対応する必要がある。

ASN による審査結果は、2017 年 3 月時点で未公開であるが、正式な審査の一環として ASN が IAEA に依頼したピアレビューの結果は公開されている。

これらの書類において、ASN は「安全機能に寄与するとみなされる処分システムの構成要素のそれぞれ（パッケージ、人工構築物、母岩）、並びに、その全体性能の安全性にとって有利な特性の確認」[20]や、「操業フェーズにおける施設（廃棄物パッケージを含む）のモニタリングプログラムの確定のために採用した原則と目標」[30]の提示を求めており、また、IAEA によるピアレビューでは、「操業中のモニタリング計画内容の検討をさらに進める：モニタリングのパラメータと処分場閉鎖後の安全性の関連、モニタリング機器の保守・交換等も含めた操業期間中を通じたモニタリング活動のフェージビリティ等を検討すること」[31]を要求している。これらの事項から、フランスにおいては、規制機関によりモニタリングを含む性能確認が要求されていると言える。

表 2.2.5-1 性能確認及びモニタリング（フランスの法令及び安全指針）

(1/2)（下線は原環センターによる）

法令等の名称	記 載
<p>長寿命高・中レベル放射性廃棄物の可逆性のある深地層処分施設の設置方法を明確にした 2016 年 7 月 25 日付法律 第 2016-1015 号[19]</p>	<p>第 1 条 第 2 項 (前略) 処分センターの操業は、とくに原位置試験計画によって施設の可逆的性格と安全実証を補強することができるパイロット操業フェーズによって始まる。すべての廃棄物パッケージは、この段階においては容易に回収できる状態を維持していなければならない。パイロット操業フェーズは、廃棄物パッケージの回収試験で構成される。</p>
<p>深地層における放射性廃棄物の最終処分に関する安全指針、ASN、2008 年 2 月 12 日[20]</p>	<p>5. 安全に関する設計基礎 5.6 監視プログラム 処分用建造物の建設期間中並びに施設の閉鎖時点まで、施設監視プログラムを実施しなければならない。施設の閉鎖後も、いくつかの監視措置は維持される場合がある。こうした監視実施の必要性は、処分システムの設計時から考慮しなければならない。 操業段階における施設の安全性への寄与に加えて、監視プログラムは、<u>処分施設及び地質環境の構成要素の状態を特徴付ける幾つかのパラメータの変遷、及びこの変遷の原因となる主要現象を追跡調査することを目的とするものである。科学的知識の更新に基づいた監視プログラムにより、上記の現象が確かに予期されていたものであり、管理下に置かれ続けることを示すことができなければならない。</u>また、監視プログラムは、施設の管理、操業及び可逆性のために必要な要素をもたらすものでもある。 監視のために使用される手段は、処分の安全性レベルを低下させるものであってはならない。</p> <p>6. 処分施設閉鎖後の安全性の立証 安全性への取り組みは、閉鎖後の処分の安全性の反復評価プロセスに基づくものである。このプロセスは、設計から閉鎖までの処分施設の展開の様々な段階において定期的実施される。これらの評価の結果として、処分の安全性の立証を行うために、前の段階で定められた措置の確認または見直しが行われる。 こうした反復的アプローチは、各段階において、以下の 3 つの補完的項目を対象として実施されなければならない： ・<u>安全機能に寄与するとみなされる処分システムの構成要素のそれぞれ（パッケージ、人工構築物、母岩）、並びに、その全体性能の安全性にとって有利な特性の確認。</u> ・処分システムの様々な構成要素間の相互作用によって処分システムにもたらされる擾乱の評価、並びに、擾乱またはその影響を最低限に抑えるためにシステムの設計において採用された予防及び対症的措置を考慮した上で、安全機能の実現に対するこれらの擾乱の影響の推定。 ・リファレンス状態及び変動状態の一連の代表的シナリオについての処分システムの将来挙動のモデル化、並びに、これらのシナリオのそれぞれに関する放射線リスク及び化学的リスクの推定。</p>
<p>ASN、2014 年 12 月 19 日付け書簡「地層処分場（Cigéo）プロジェクトの安全オプション」 (CODEP-DRC -2014-039834)</p>	<p>(略) まず、それらの安全オプションは、すべての施設、すなわち概略設計（APS）の検討段階での地上施設、地下施設、及び地上 - 地下のアクセスをカバーするものでなければならない。特に、ASN の安全指針[9]（原文）に規定された処分システムの基本概念に鑑みた文書の充足性に留意しなければならない。 提出される書類は完結性を具備していなければならない、長期にわたる開発の各段階、すなわち設計、建設、操業、停止、廃止措置または閉鎖、維持及びモニタリングを通じて、施設の構成要素ごとに、安全を確実にする上で採用される目標、概念及び原則が明確に示されていないなければならない。その詳細さの度合いは、問題となるリスクと有害性の重大さに見合ったものでなければならない。</p>

表 2.2.5-1 性能確認及びモニタリング（フランスの法令及び安全指針）  
 (2/2)（下線は原環センターによる）

法令等の名称	記載
<p>(前ページから続き)</p> <p>ASN、2014年12月19日付け書簡「地層処分場（Cigéo）プロジェクトの安全オプション」（CODEP-DRC-2014-039834）</p>	<p>以上の要求事項は、附属書に示した安全オプションに関する書類の審査要件に関する詳細リストにより補完される。</p> <p>(略)</p> <p>書簡 CODEP-DRC-2014-039834 の附属書                  安全オプションに関する書類の審査要件                  安全オプションに関する書類は、以下の項目についての評価を可能にするものでなければならない。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 採用される安全目標</li> <li>- 処分場の設計に用いられる安全アプローチの根拠</li> <li>- <u>APS の検討段階で処分場の設計と建設に採用される技術オプション。この項目については、処分場の開発（閉鎖を含む）、可逆性及びモニタリングの主なオプションへの潜在的な影響を評価することが目的となる。</u>提出される安全性評価では、それらの概念に関する APS 検討段階での様々な不確実性を示し、検討することになる。</li> <li>- 設計上の選択において将来の介入の必要性和組織体制を考慮するために履行された手続き</li> <li>- 採用される安全目標の達成を正当化する基本的な要素</li> <li>- 補完的安全性評価（ECS）の手順に関する考察</li> <li>- APS の検討段階で考慮する主なシナリオについての、想定し得る限りでの操業状況の全体をカバーした、環境及び人間への処分場の放射線影響に関する最初の評価</li> </ul> <p>上述のような理由から、この安全オプションに関する書類は以下の内容を示すものでなければならない。</p> <p>(略)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 建設、操業、停止、廃止措置または閉鎖、維持及びモニタリングの期間を通じて施設の構成要素ごとに考慮すべき、<u>安全性を左右する操業範囲と主要なパラメータの最初の定義</u></li> <li>- <u>安全機能に係る処分システムの構成要素の性質が個別に（廃棄物パッケージ、充填材を含む構造材、母岩）、またシステム全体として、安全確保にとって望ましいものであることの正当化</u></li> </ul> <p>(略)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>操業フェーズにおける施設（廃棄物パッケージを含む）のモニタリング・プログラムの確定のために採用した原則と目標</u></li> </ul> <p>(略)</p>
<p>IAEA、地層処分場 CIGÉO の安全オプションに関する書類への国際レビュー報告書、2016年11月</p>	<p>要約</p> <p>(略)</p> <p>プロジェクトマネジメントを強化し、ASN やステークホルダーの間での信頼醸成のため、ANDRA は以下のような取組みを行うべきである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 地層処分場開発のフェーズが次フェーズへと移行する際に、それまでに得られた新たな知見の活用方法、前フェーズとのつながりや一貫性を明示すること。</li> <li>- 100 年超の地層処分場の供用期間にわたって、操業や閉鎖後の安全確保のために重要なデータや情報が更新・維持され、適切に理解されることを担保すること。</li> <li>- 研究開発について、その内容、意図、地層処分場開発の各フェーズとの関連性を特定し、優先順位を検討することにより、地層処分場開発と研究開発計画間の整合性を明確にすること。</li> <li>- <u>操業中のモニタリング計画内容の検討をさらに進める：モニタリングのパラメータと処分場閉鎖後の安全性の関連、モニタリング機器の保守・交換等も含めた操業期間中を通じたモニタリング活動のフィージビリティ等を検討すること。</u>(略)</li> </ul>

(2) 処分実施主体の取組

フランスの処分実施主体である放射性廃棄物管理機関（ANDRA）の地層処分に関する実現可能性報告書である Dossier2005 には、性能確認及びモニタリングに関して、表 2.2.5-2 の記載がみられる。なお、上述の安全オプション書類は、2017 年 3 月時点で未公開である。

表 2.2.5-2 ANDRA による地層処分に関する性能確認及びモニタリング（実現可能性報告書（Dossier2005））  
（下線は原環センターによる）

報告書名称	記載
ANDRA、Dossier2005 [粘土、分冊]：地層処分場の構成と管理 2005 年 12 月 [21]	<p>10.3 観察と監視</p> <p>10.3.1.1 主要な理由の概観</p> <p>処分場の観察と監視は、(i) 処分場の逆転可能な管理を支援する、(ii) 操業安全と長期的管理に資する、(iii) 地層探査に関する補助情報を提供するという 3 つの主要な動機に依るものである。</p> <p>10.3.1.3 操業と長期的な安全に寄与する</p> <p>処分場の監視は、操業又は長期的な安全機能に作用する可能性がある変化を検出することを目標とする。監視によって長期的な性能の評価に介入するモデルとパラメータの管理を強化できる。</p> <p>(中略)</p> <p><u>長期的安全に関しては、安全基本規則 III.2.f（2008 年に安全指針に改訂）が処分場の計装を勧告している。一般的に、長期的安全に有利な条件の存在を確認することが必要である。そのために、実施される測定は、構造物及び隣接する粘土質岩の短期的、中期的変化がモデルで予測されたようにその後の長期的な変化と整合性のある領域にとどまることを確認することを目標とする。</u></p>

## 2.2.6 わが国の法令

わが国では、原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律において、処分場の性能の維持に関して表 2.2.6-1 の事項が規定されている。この規定は、処分施設の性能が技術上の基準に適合するように、施設を維持することを求めているものであり、そのための手段（性能確認、品質管理等）を規定するものではないと考えられる。

表 2.2.6-1 原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律における処分場の性能の維持に関する規定

法令の名称	規定
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：平成二八年五月一日法律第四二号	第五章の二 廃棄の事業に関する規制 (特定廃棄物埋設施設等の性能の維持) 第五十一条の九の二 第一種廃棄物埋設事業者又は廃棄物管理事業者は、特定廃棄物埋設施設又は特定廃棄物管理施設の性能が原子力規制委員会規則で定める技術上の基準に適合するようにこれらの施設を維持しなければならない。ただし、第五十一条の二十四の二第一項又は第五十一条の二十五第二項の認可を受けた場合（原子力規制委員会規則で定める場合を除く。）における当該認可を受けた計画に係る施設については、この限りでない。

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

### (1) MoDeRn プロジェクトの概要

MoDeRn プロジェクト[22]は Euratom (the European Atomic Energy Community、欧州原子力共同体) の 7th Framework Programme の一つとして実施された。地層処分事業の各段階（サイト調査から始まり、建設、操業、閉鎖及び閉鎖後の制度的管理）において、ステークホルダの関与を踏まえたモニタリングに関する検討及びモニタリングの実施に向け参照すべきフレームワークの提供を目指した国際共同研究である。研究期間（助成金の受給期間）は約 4 年半であった（2009 年 5 月～2013 年 10 月）。

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

原環センターでは平成 20 年度より、経済産業省資源エネルギー庁の委託事業である「処分システム工学要素技術高度化開発」及び「処分システム工学確証技術開発」の一環としてモニタリングに関わる最新の海外動向を把握し、我が国の地層処分モニタリングの目的や考え方の討議に活用するため MoDeRn に参画してきた。

MoDeRn の目的は次の 5 項目であった。

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

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

①WP1: Monitoring Objectives and Strategies (目的と戦略)

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

②WP2: 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。

③WP3: 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)。

④WP4: Case study of monitoring at all stages of the disposal process (ケーススタディ)

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

⑤WP5: Knowledge Dissemination (成果の普及)

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

⑥WP6: Reference framework for repository monitoring (リファレンスフレームワークへの反映)

MoDeRn の参加機関を下記に示す。12 カ国、18 機関が参加した。

- ・ 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 ZÜRICH)、 Switzerland
  - Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB)、 Sweden

## (2) MoDeRn プロジェクトの主要な結論

MoDeRn プロジェクトでは、モニタリングの目標と分類を表 2.2.7-1 のように示し、このうち「処分システムの期待／予測された挙動の確認」を目的としたモニタリングに特化して検討を行った。なお、MoDeRn プロジェクトにおけるモニタリングの定義は、「処分システムの構成要素の挙動、または処分場とその操業が環境に及ぼす影響を評価するうえで役立つような、ひいては段階的な処分事業の実施における意思決定を支援し、処分プロセスの信頼を高めるような工学、環境、放射線その他に関するパラメータ、指標、特性の継続的または定期的観測及び計測」とされている。

MoDeRn プロジェクトは最終報告書[23]を 2014 年 1 月に EC に提出して、その活動を終了した。MoDeRn プロジェクトの最終報告書[23]の構成と主な内容は表 2.2.7-2 の通りである。

表 2.2.7-1 MoDeRn におけるモニタリングの目標と分類[25]

モニタリングの包括的目標			
<ul style="list-style-type: none"> <li>・信頼性の構築をサポートするー妥当性確認、透明性、追跡性</li> <li>・意思決定をサポートするー処分プロセスの段階的管理に資する情報の提供</li> </ul>			
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			
1.処分システムの期待/予測された挙動の確認	2.操業安全性のサポート	3.環境影響調査のサポート	4.核保障措置のサポート
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ジメントのサポート			
MoDeRn の範囲		MoDeRn の範囲外	

表 2.2.7-2 MoDeRn プロジェクト最終報告書[23]の構成と主な内容

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

MoDeRn プロジェクトの最終報告書[23]に基づき、同プロジェクトの主要な結論を以下に述べる。なお、本報告書の詳細については原文[23]を参照されたい。

- ・モニタリングプログラムの開発及び実現のためのジェネリックな体系的なアプローチとして「MoDeRn モニタリングワークフロー」(図 2.2.7-1) とこれを包含するリファレンス・フレームワークを開発した。このワークフローでは、モニタリングプログラムの開発及び管理において次に示す 3 件の鍵となる段階が特定された。

- ー 目標及びパラメータ：モニタリングプログラムの目標及び下位目標を特定することと、これらのプロセス及びパラメータへの関連付けを行う。プロセス及びパ

ラメータは、「特性、事象及びプロセス」(FEP)の検討等の、セーフティケースの分析を通じて特定することができる。これにより予備パラメータ・リストを作成する。

- モニタリングプログラム及び設計：予備パラメータ・リストのスクリーニングを行い、性能要件、モニタリング技術、オーバーラップ／冗長性に関する分析を行う。どのような方法で、どのような場所で、またどの時点でデータが収集されるのかが定義されると共に、性能レベル、トリガー値、さらには一定のモニタリング結果に応じて実施される可能性のある潜在的リスク緩和措置が指定される。
- 実現及びガバナンス：モニタリングプログラムを実行し、意思決定に必要な情報を提供するために得られた結果を利用すること。モニタリングプログラムの実施期間にわたり、連続的に、さらには定期的にも結果の評価を行い、モニタリング結果がセーフティケース等に与える影響が検討される。

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

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

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

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

- 多くのステークホルダから、モニタリングは確認のためのプロセスというよりもむしろチェックのためのプロセスであるべきだという意見が表明された。
- 公衆ステークホルダは、処分場性能のチェックは包括的なものとなるべきであ

るという、また全体的な科学プログラムと結びついたものとされるべきであるという意見を示した。

- 一部の公衆ステークホルダは閉鎖後モニタリングが行われることを期待している。その主な目的は、予期しない事象又は変遷が生じた場合の準備（及び対応策）を整えておくことにある。
- モニタリングは、ステークホルダの期待に対応でき、また処分場性能に関する見張りを継続する実際的な取組みとして提示され、さらにはモニタリングの限界に関する透明性が確保されている場合には、処分場のガバナンスに寄与することができる。

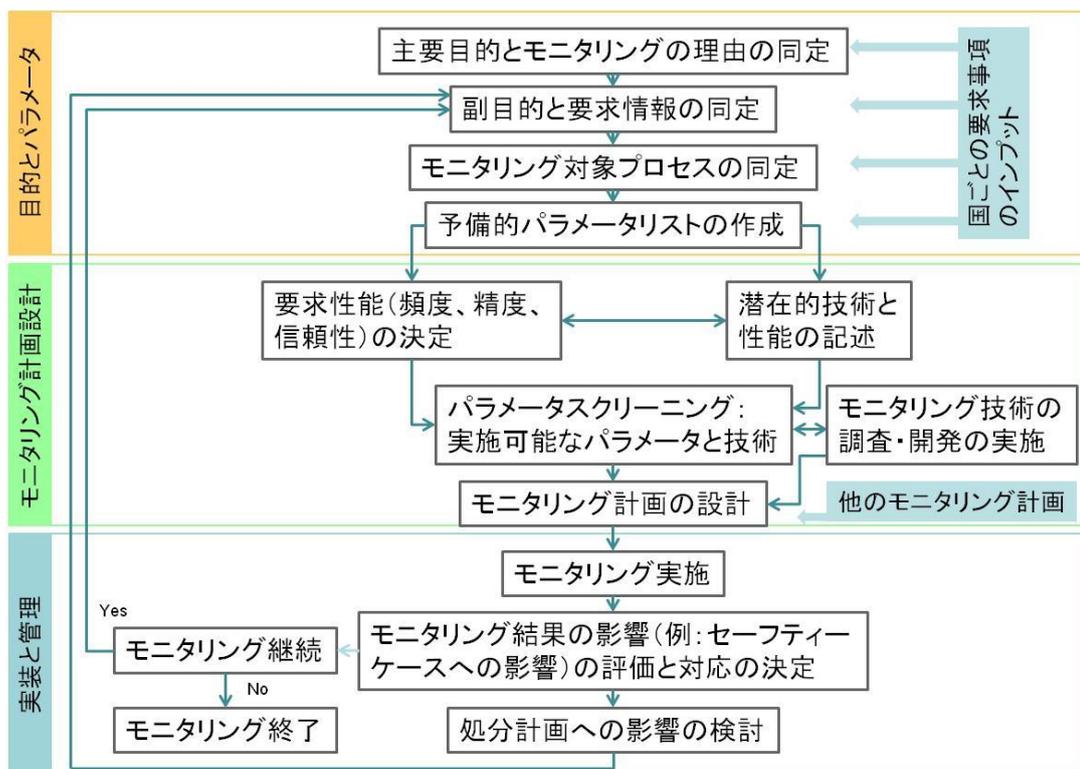


図 2.2.7-1 MoDeRn モニタリングワークフロー [23]

## 2.2.8 モニタリング国際共同研究 MoDeRn2020 プロジェクトにおける検討

MoDeRn プロジェクトは 2014 年 1 月に最終報告書[23]を EC に提出して、その活動を終了したが、後続の共同研究プロジェクトについて 2014 年 9 月に EC に提案書を提出、2015 年 2 月に採択された。2015 年 6 月～2019 年 5 月の 4 年間の活動を予定している。本プロジェクトの概略[24]を以下に示す。

## (1) MoDeRn2020 プロジェクトの概要

プロジェクトの名称は、MoDeRn2020 (Development and Demonstration of monitoring strategies and technologies for geological disposal、地層処分におけるモニタリング戦略及び技術の開発とデモンストレーション) である。本プロジェクトは、EC による研究フレームワークである Horizon 2020 の一環として実施される、地層処分に関するモニタリングの共同研究プログラムであり、2009～2013 年に実施された MoDeRn プロジェクトの後継プログラムとして実施される。実施期間は、2015 年 6 月～2019 年 5 月の 4 年間で予定している。なお、本プロジェクトに対する EC からの補助金の最大額は 5,997,142.50 ユーロであるが、EU 加盟国でない日本（原環センター）及びスイスからの参加機関には配布されない。

本プロジェクトの目的は、各国固有の地層処分計画の要求事項に対応した、地層処分場操業段階のモニタリング計画の開発・実施手法の提供であり、以下の特徴を持つ。

- ・操業段階での人工バリアを含むニアフィールドのモニタリングに特化。
- ・地層処分事業を先行する国で、2020 年代に開始される処分場操業でのモニタリングシステムの設計を可能とする。
- ・地層処分事業が進んでいない国や、ステークホルダに対し、各国固有の要求事項をどのようにモニタリング計画に組み入れるかを例示する。

本プロジェクトは、処分場操業時のニアフィールドでのモニタリングに焦点をあて、下記の作業を実施する予定である。このうち原環センターは組織運営（全機関参加）、モニタリング戦略、モニタリング技術、成果普及（全機関参加）に関するワークパッケージ (WP1、2、3、6) に参加している。

### ①WP1 組織運営

WP リーダー：ANDRA

### ②WP2 戦略（モニタリング計画設計、モニタリング戦略と意思決定）

WP リーダー：SKB

必要性に由来するモニタリング戦略を特定し、モニタリングにより得られた情報に対応する方法を明らかにするため、セーフティケースをスクリーニングする詳細な手法を開発する。フランス、フィンランド、スウェーデン、スイス、ドイツ、オランダ、チェコのモニタリング計画が対象。

### ③WP3 技術（関係するモニタリング技術の研究開発）

WP リーダー：当初 AITEMIN、同組織解散に伴い AMBERG 社に変更

処分場でのモニタリングに関する顕著な技術的課題を解決する。この技術的課題にはモニタリング技術の開発におけるギャップとして、異なる地中無線通信技術（高周波・短距離と低周波・長距離）の組み合わせ、電力供給技術、新規センサ開発地球物理学

的手法の応用、機器の信頼性と適格性に関する研究が含まれる。原環センターは地中無線モニタリング技術等について情報を交換する。

④WP4 現位置試験（実規模現地試験におけるモニタリング技術の実証）

WP リーダー：EURIDICE

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

⑤WP5 社会的関心とステークホルダの関与

WP リーダー：UA

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

⑥WP6 結果の普及

WP リーダー：ANDRA

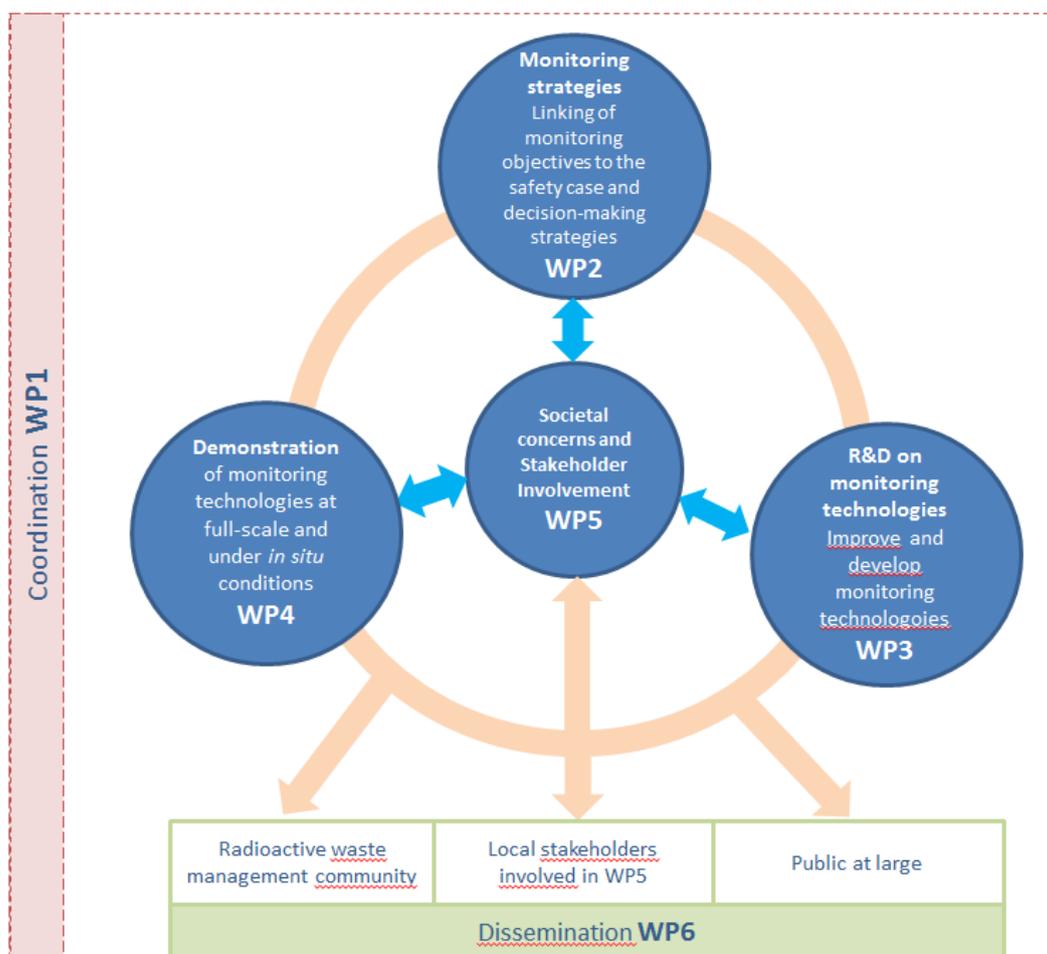


図 2.2.8-1 各ワークパッケージの関係図[24]

本プロジェクトには 29 機関（表 2.2.8-1 参照）が参加しており、MoDeRn プロジェクトよりも大幅に拡張している。また、このうち実施主体が 9 組織、研究機関が 6 組織、企業が 6 組織、大学が 8 組織であり、企業や大学の参加が増えている。また、MoDeRn プロジェクトに参加していた機関のうち Sandia（米国）を除く 17 機関が継続して参加している。

なお、本プロジェクトの中途ではあるが、2016 年に、技術的な取り組みのワークパッケージ（WP3）のリーダーであるスペインの AITEMIN の組織が解散された。しかし、MoDeRn2020 の担当者が、ARQUIMEA 社及び AMBERG 社に異動し、MoDeRn2020 への参加を継続することで、WP3 は継続して実施されている。

表 2.2.8-1 プロジェクトへの参加機関

機関名	区分	国	MoDeRn 参加
ANDRA (幹事)	実施主体	フランス	○ (幹事)
AREVA 社	企業	フランス	
AITEMIN (2016 年まで)	研究機関	スペイン	○
チェコ工科大学	大学	チェコ	
DBE TEC 社	研究機関	ドイツ	○
EDF 社 (フランス電力)	企業	フランス	
ENEA	研究機関	イタリア	
Enresa	実施主体	スペイン	○
チューリッヒ工科大学	大学	スイス	○
EURIDICE	研究機関	ベルギー	○
Galson Sciences 社	企業	英国	○(事務局)
IRSN	研究機関	フランス	
NAGRA	実施主体	スイス	○
Nidia	企業	イタリア	
NRG	実施主体	オランダ	○
ONDRAF/NIRAS	実施主体	ベルギー	○
POSIVA 社	実施主体	フィンランド	○
NDA	実施主体	英国	○
原環センター	研究機関	日本	○
SKB	実施主体	スウェーデン	○
RAWRA/SURAO	実施主体	チェコ	○
リベレツ工科大学	大学	チェコ	
アントワープ大学	大学	ベルギー	○
ヨーテボリ大学	大学	スウェーデン	○
モンス大学	大学	ベルギー	
リモージュ大学	大学	フランス	
ストラックライド大学	大学	英国	
VTT	研究機関	フィンランド	
ARQUIMEA 社 (2016 年より)	企業	スペイン	
AMBERG 社 (2016 年より)	企業	スペイン	

(2) 性能確認に資するモニタリングに関するこれまでの検討成果

閉鎖後安全性への品質管理の寄与を認識した上で、モニタリングの寄与の検討、スウェーデン、フィンランド、フランス等の処分場操業時の性能確認に資するモニタリングに焦点をあて、モニタリングできるプロセスではなく、モニタリングを必要とするプロセスの抽出に取り組むことを方針としている。

これまでに得られた成果のうち、性能確認に資するモニタリングに関する戦略要素を表 2.2.8-2 に、モニタリングの実施場所（どこで）、対象（なにを）および実施時期（いつ）におけるモニタリングの長所と短所を表 2.2.8-3～表 2.2.8-5 に示す。また、人工バリア等に関するプロセスからのパラメータ選定方法のフローを図 2.2.8-2 に示す。

表 2.2.8-2 性能確認に資するモニタリングに関する戦略要素[26]

観点	上位レベルの戦略的な要素
どこで	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処分場にてモニタリング、モニタリング期間終了時の対象物（廃棄体等）の回収なし</li> <li>・ 処分場にてモニタリング、モニタリング期間終了時に対象物（廃棄体等）は回収、または解体（廃棄体は再処分）</li> <li>・ パイロット施設でのモニタリング</li> <li>・ オンサイトの地下特性調査施設でのモニタリング</li> </ul>
なにを	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 廃棄体（及び周囲の EBS とニアフィールド岩盤）</li> <li>・ 模擬廃棄体（及び周囲の EBS とニアフィールド岩盤）</li> <li>・ EBS の特定要素（例えば、（緩衝材等の）小規模バッチ試験）</li> <li>・ 天然バリア（ニアフィールド岩盤及びファーフィールド岩盤）</li> <li>・ 生活圏</li> </ul>
いつ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処分場の操業以前または試験操業期間中</li> <li>・ 廃棄体定置期間中</li> <li>・ 処分場の閉鎖後</li> </ul>
どのように	(MoDeRn2020 において引き続き検討中)

表 2.2.8-3 回収の有無、実施場所によるモニタリングの長所と短所[26]

戦略的な要素	潜在的な長所	潜在的な短所
原位置 (回収なし)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実際の処分場の条件を反映する</li> <li>• 廃棄体パッケージの回収に伴う安全リスクを避ける</li> <li>• モニタリング期間はモニタリング機器の寿命によってのみ制限される</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EBS への潜在的に有害な影響 (ただし、セーフティケースへの影響は重大ではない)</li> <li>• モニタリング可能なのは限られたパラメータのみである</li> <li>• モニタリング結果の信頼性が疑問視される可能性がある</li> <li>• 適切な装置を開発するには時間と費用がかかる</li> </ul>
原位置 (回収あり)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実際の処分場の条件を反映する</li> <li>• 最終的な EBS への悪影響はない</li> <li>• 有線システムを使用し、より多くのパラメータのモニタリングが可能である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 廃棄体パッケージの回収に伴う安全リスク</li> <li>• 有線システム (使用される場合) がモニタリング対象のプロセスに影響を与える可能性がある</li> <li>• モニタリング期間は処分場閉鎖前に回収する必要性によって制限される</li> </ul>
パイロット施設	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 廃棄体を回収し再処分する選択肢 (EBS に悪影響を与えない;有線システムを使用してより多くのパラメータをモニタリングすることができる)</li> <li>• メンテナンス/調査のためのアクセスが潜在的に容易である</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 岩盤は均質でなければならず、処分場の状態を反映していないかもしれない</li> <li>• 廃棄体パッケージが回収された場合の安全リスク</li> <li>• 有線システム (使用される場合) がモニタリング対象のプロセスに影響を与える可能性がある</li> </ul>
オンサイト URCF*	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 処分場の操業に相当する期間、運用することができる</li> <li>• 比較的容易なアクセス</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 岩盤は均質でなければならず、処分場の状態を反映していないかもしれない</li> <li>• 定置された廃棄物 (及び周囲の EBS) は、URCF ではモニタリングすることができない</li> </ul>

※URCF (Underground Rock Characterisation Facility) : 将来の処分場の一部を構成することを意図した地質環境特性の調査を目的とした施設

表 2.2.8-4 対象によるモニタリングの長所と短所[26]

戦略的な要素	潜在的な長所	潜在的な短所
廃棄体 (EBS の有/無)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実際の廃棄体を反映し、放射線影響を含む全システムのモニタリングが可能となる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 機器の維持管理や予期しない結果の調査に伴う潜在的な放射線安全のリスク</li> </ul>
模擬廃棄体 (EBS の有/無)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• モニタリングセンサーを廃棄体パッケージ内に配置できる</li> <li>• EBS の機能喪失の場合にも放射線リスクはない</li> <li>• 維持管理や調査に関わる放射線リスクはない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 廃棄体の重要な特性の全てを反映していない可能性がある (熱-水-応力-化学 (THMC)、生物学的特性は概ね反映されるが放射線は含まない)</li> <li>• 追加の (放射性でない) 廃棄体を作り、追加の地下空間を使用する</li> </ul>
特定の EBS の要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 柔軟性: 必要に応じて調整することができ、システム全体にわたる広範な計画を必要としない。</li> <li>• 放射線リスクはない</li> <li>• 維持管理と調査のためのアクセスが容易</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• システム全体にわたる試験ではない</li> <li>• 放射線学的影響や要素間の相互作用が見逃される可能性がある</li> <li>• 代表性を証明する必要がある</li> </ul>
天然バリア	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 潜在的に (処分場内からではなく) 遠方でモニタリングすることができるため、処分場を閉じた後にモニタリングすることができる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• システム全体にわたる試験ではない</li> <li>• 予期せぬ挙動の前兆は天然バリアでは起こりにくい</li> </ul>

表 2.2.8-5 実施時期によるモニタリングの長所と短所[26]

戦略的な要素	潜在的な長所	潜在的な短所
操業前／試運転中	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経験知を設計/定置活動に反映することができる</li> <li>・柔軟性が高くアクセス性が良い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・事業全体を通じて進展していく状況が正確に反映されない可能性がある</li> <li>・プロセスをモニタリングするには時間枠が短い</li> </ul>
廃棄体定置段階	<ul style="list-style-type: none"> <li>・プロセスをモニタリングするうえで最長の時間枠が提供でき、広範囲のパラメータをモニタリングできる可能性がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・経験知を設計に反映させることは難しい</li> </ul>
閉鎖後	<ul style="list-style-type: none"> <li>・定置された廃棄体やニアフィールドにアクセスできなくなった段階以降も、期待される性能への信頼性を継続的に与える</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・幾つかのパラメータに関する継続的なモニタリングの実施に、技術的な不確実性がある</li> <li>・結果への応答が困難である（機器にアクセスできない）</li> <li>・閉鎖後の期間全体と比較して限られた時間枠である</li> </ul>

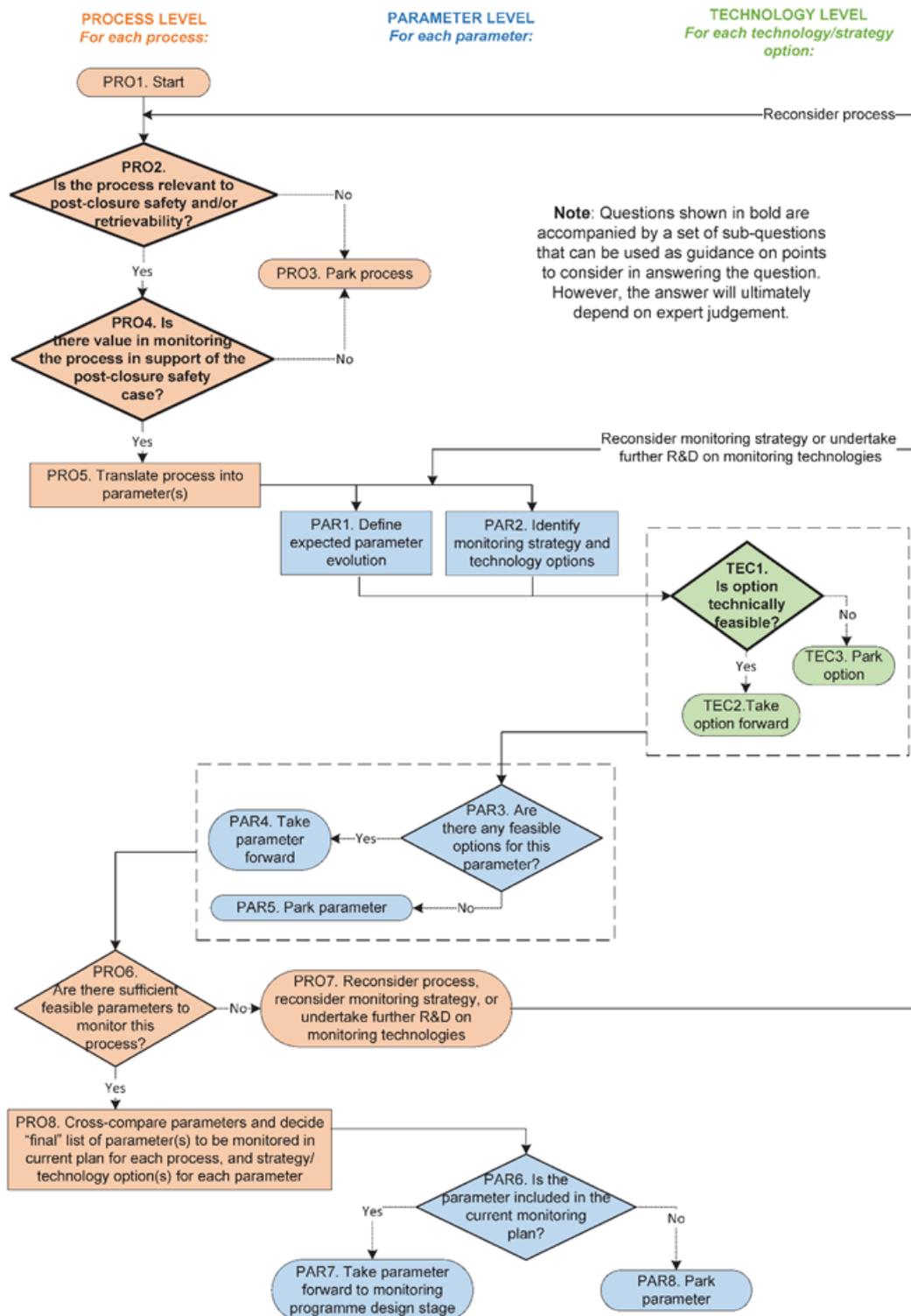


図 2.2.8-2 人工バリアに関するプロセスからのパラメータ選定方法[26]

### 2.2.9 OECD/NEA における検討

OECD/NEA-RWMC（経済協力開発機構／原子力機関の放射性廃棄物管理）による「世代を超えた記録、知識及び記憶（RK&M）の保存」（Records、 Knowledge and Memory（RK&M））イニシアチブでは、記録保存に関する検討を実施しているが（第 4 章参照）、記録保存に関連してモニタリングについても報告書「地層処分施設のモニタリング：技術的及び社会的側面」[25]（以下、RK&M モニタリング報告書）を取りまとめている。この報告書では、モニタリングと RK&M の両方を包含する概念として、処分場システムから、また決定の実施状況から「目を離さない」とい監視（oversight）という概念について多くを記述していること、社会的側面について記述していることが特徴である。しかし、性能確認に資するモニタリングについては、MoDeRn プロジェクトの成果を基に記述しており、内容が重複しているため、表 2.2.9-1 に報告書の構成と章ごとの内容を示すのみとする。

表 2.2.9-1 地層処分施設のモニタリング（技術的及び社会的側面）[25]の構成及び内容

報告書構成	主な内容
§1 はじめに	<ul style="list-style-type: none"> <li>これまで検討されてきたモニタリングの定義、目的及び理由（動機）が示されたうえで、本検討の目的が提示される。</li> <li>報告書の構成が示されている。</li> </ul>
§2 過去 10 年間の文献レビュー	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去 10 年間に発表された技術及び社会面でのモニタリングに関する文献のレビューが行われたことが示されている。</li> <li>整理結果として「様々な既往プロジェクトでのモニタリングの定義」が示されている。</li> </ul>
§3 モニタリング目標及び計画の概要	<p>既往検討成果を踏まえた、放射性廃棄物処分場モニタリングについて下記の観点から示される。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 処分場の開発段階とモニタリング</li> <li>② モニタリングの目的</li> </ol>
§4 モニタリング計画の策定に関わる考え方	MoDeRn で提案されたモニタリング計画策定の考え方（図 2.2.7-1）が示される。
§5 モニタリングに関する主要課題	<p>技術的側面からのモニタリングに関し、下記の主要課題が特定され、各内容について示されている。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① データ管理</li> <li>② 材料及び装置の耐久性</li> <li>③ パラメータの選定</li> <li>④ モニタリング対象となるプロセスの特定</li> <li>⑤ 連成プロセス</li> <li>⑥ 閉鎖後モニタリング</li> </ol>
§6 モニタリングに関する地元自治体の期待や要請と地層処分場に関する記録、知識及び記憶の保存	<ul style="list-style-type: none"> <li>OECD/NEA の「ステークホルダの信頼獲得に関するフォーラム」（FSC）のメンバを対象に、放射性廃棄物管理（RWM）施設のモニタリング及び RK&amp;M の保存に関する地元自治体の期待に関して実施された質問票調査の結果が示される。</li> <li>その調査を受け、関連する国レベルと地元レベルの両方の一定範囲のステークホルダを対象として、体系化された方法での面談調査が実施された。</li> <li>文献調査も実施され、その焦点はインターネットを通じて見いだすことができたか、面談調査に参加した人々が示唆した FSC の刊行物やその他の文書及び刊行物に合わせられた。</li> <li>処分場ライフサイクルのさまざまなフェーズとの関連において、またそれぞれ異なる国レベルの背景状況との関連において、地元自治体がモニタリングに関して抱く関心や期待が明らかにされている。</li> </ul>
§7 MoDeRn 会議及びワークショップで得られた見解	2013 年に開催された MoDeRn プロジェクト主催の「国際処分場モニタリング会議及びワークショップ」で示された様々な意見や結果について示されている。
§8 技術及び社会レベルからの教訓	考察及び結論が示されている。
添付資料 1	地層処分の開発段階におけるモニタリングパラメータ
添付資料 2	MoDeRn プロジェクトでのモニタリング検討フロー
添付資料 3	地層処分の開発段階におけるモニタリング計画
添付資料 4	サイト理解や性能確認に重要なプロセス

## 2.3 地層処分における性能確認プログラムに関するまとめと考察

本節では、2.2 節にて調査を行った IAEA による安全基準文書における性能確認に関する動向、事業が先行する諸外国の規制と事業者の取組の動向、国際共同研究での動向について述べた後、これらの調査にて抽出された事項について述べる。その後、わが国における性能確認プログラムの検討の方向性について考察する。

### 2.3.1 IAEA による安全基準文書における動向

IAEA の特定安全要件 No.SSR-5「放射性廃棄物の処分」(2011 年 5 月)では、地層処分における性能確認プログラム及びモニタリングに関連する要求事項として、施設の閉鎖後の安全性に影響する状態が存在しないことを確認するため、モニタリングを実施することが挙げられている。また、特定安全指針 No.SSG-14「放射性廃棄物の地層処分施設」(2011 年 9 月)では、性能に関するモニタリングにより、セーフティケースの条件を確認することとされており、特定安全指針 No.SSG-23 「放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価」(2012 年 9 月)では、性能確認プログラムを通じた処分システムの技術的実現可能性の実証に関する提案がなされている。

さらに、特定安全指針 No. SSG-31「放射性廃棄物処分施設のモニタリング及びサーベイランス」(2014 年 5 月)では、処分施設の性能の確認のため、閉鎖後期間に関係する重要な技術的パラメータのモニタリングを実施することが挙げられ、IAEA による安全基準文書では、性能確認プログラム、またはその一部であるモニタリングを要求している。

### 2.3.2 事業が先行する諸外国の取組動向

米国では規制機関 (NRC)による技術要件・基準により性能確認プログラムの実施が規定されている。この性能確認プログラムは、サイト特性調査中に開始、閉鎖まで継続。原位置モニタリング、室内及び現場での試験 (testing)、原位置実験 (experiments) を含むものとされており、実施主体は規制要件、処分概念に基づいた性能確認プログラムを策定した。

フィンランドでは、規制機関 (STUK) の安全指針により処分施設の建設、操業期間中に、岩盤の適性を確実にし、母岩特性やバリア性能に関する補完的情報を得るための調査、試験及びモニタリング計画の実施を規定しており、性能確認プログラムの実施を規定しているものと言える。これに対し、実施主体がモニタリング計画を策定する過程で、性能確認の対象となるプロセスやパラメータについて、一部のみがモニタリングにより確認されることを示しており、このことは、モニタリング計画が性能確認プログラムに統合されることを示唆しているものと考えられる。

フランスでは、規制機関が性能確認と共に、操業期間中における廃棄物パッケージを含む施設のモニタリングを要求しており、実質的に処分場でのモニタリングを含む性能確認

を要求している。これに対し、実施主体は国際共同研究 MoDeRn プロジェクトにて処分場でのモニタリング計画を示しているものの、性能確認プログラムの全体像は未公開である。

スウェーデンでは、規制機関（SSM）の規則の適用に関する文書において、品質保証等の要件を満たす措置が、閉鎖後安全性に関しても十分であることを確実にすべきことを要求している。併せて、建設中及び操業中における、閉鎖後の処分場の健全性（integrity）やバリアの性能をモニタリングするための措置を講じることが可能であることを示されている。しかし、米国等のように性能確認の実施が明示的に規定されているわけではなく、実施主体は、人工バリア等の製造時の品質管理／品質保証プログラムにより、閉鎖後の安全性を確保しようとしている。

事業が先行する諸外国での性能確認に対する取り組みの例を表 2.3.2-1 に示す。国によって性能確認プログラムの中でのモニタリングの位置付けが異なっているが、性能確認プログラムあるいは品質管理/性能保証プログラム等により、閉鎖後長期の性能を保証（確認）しようとする考えは同じであると言える。

表 2.3.2-1 諸外国での性能確認に対する規制と実施主体の取り組みの例

国名	規制機関	実施主体
性能確認の実施を規定している例		
米国	規制機関（NRC）による技術要件・基準により性能確認プログラムの実施を規定。性能確認プログラムは、サイト特性調査中に開始、閉鎖まで継続。原位置モニタリング、室内及び現場での試験（testing）、原位置実験（experiments）を含む。	実施主体は規制要件、処分概念に基づいた性能確認プログラムを策定
フィンランド	規制機関（STUK）の安全指針により処分施設の建設、操業期間中に、岩盤の適性を確実にし、母岩特性やバリア性能に関する補完的情報を得るため、調査、試験及びモニタリング計画の実施を規定	実施主体がモニタリング計画を策定する過程で、性能確認プログラムへの統合が示唆される
フランス	規制機関（ASN）による安全指針等にて、安全機能に寄与する処分システムの構成要素の性能確認や、操業フェーズにおける廃棄物パッケージを含む施設のモニタリングを要求	実施主体は、国際共同研究にて処分場における性能確認モニタリングの計画を示したものの、性能確認プログラムの全容は未公開
性能確認の実施に言及している例		
スウェーデン	規制機関（SSM）の規則の適用に関する文書において、品質保証等の要件を満たす措置が、閉鎖後安全性に関しても十分であることを確実にすべきことを要求。併せて、建設中及び操業中における、閉鎖後の処分場の健全性やバリアの性能をモニタリングするための措置を講じることが可能であることを示す	実施主体は、人工バリア等の製造時の品質管理／品質保証プログラムにより、閉鎖後の安全性を確保

### 2.3.3 国際共同研究での動向

国際共同研究 MoDeRn プロジェクトは 2009 年 5 月～2013 年 10 月に実施され、各国共通の性能確認に関するモニタリングのフレームワークの構築に向けた検討やケーススタディ等を実施した。そこでは、①閉鎖後安全性に関わる性能確認や操業安全のために各種のモニタリングが行われるが、このうち性能確認に関するモニタリングは地層処分特有の検討課題であること、②各国の法的要件や処分概念の違いにより、性能確認プログラムの中でモニタリングの位置付けは異なることなどの知見が得られている。また、図 2.2.7-1 に示される各国に共通なジェネリックなモニタリングパラメータの選定と実施に関するワークフローが得られている。

また、国際共同研究 MoDeRn2020 プロジェクトは 2013 年に終了した国際共同研究 MoDeRn プロジェクトの後継プロジェクトとして 2015 年 6 月～2019 年 5 月での実施を予定している。MoDeRn2020 プロジェクトでは、閉鎖後安全性への品質管理の寄与を認識した上で、モニタリングの寄与の検討、スウェーデン、フィンランド、フランス等の処分場操業時の性能確認に資するモニタリングに焦点をあて、モニタリングできるプロセスではなく、モニタリングを必要とするプロセスの抽出に取り組む方針としている。

なお、OECD/NEA の「世代を超えた記録、知識及び記憶 (RK&M) の保存」(Records, Knowledge and Memory (RK&M)) イニシアチブの報告書では、モニタリングと RK&M の両方を包含する概念として、監視 (oversight) という概念について多くを記述していることが特徴であるが、性能確認モニタリングについては、MoDeRn プロジェクトの成果を基に記述している。

### 2.3.4 国際動向から抽出された事項

IAEA の特定安全要件、特定安全指針では性能確認プログラム、またはその一部であるモニタリングを要求している。また、地層処分事例が先行する米国、フィンランド、スウェーデン、フランスでは表 2.3.2-1 にまとめたように、性能確認プログラムは、規制要件との関係で、国により異なった形で行われようとしている。また、性能確認プログラムよりも品質管理計画を主体とした取組の事例もみられる。

国際的動向の調査結果から、性能確認プログラムは、以下のような要点になると考えられる。

- ・ 処分場の構成要素 (人工バリア等) の安全機能、性能や品質に影響する事象を対象として実施される。
- ・ 処分概念や確認すべき事象の特性により、人工バリア等の製造時の品質管理、建設・操業時の品質管理、室内試験や現地試験、モニタリングという異なった手法を組み合わせ実施される。

- ・このため、モニタリングや室内試験等の個別の計画のみでなく、性能確認プログラム、品質管理計画の全体を俯瞰し、個々の手法の役割を把握する必要がある。

### 2.3.5 わが国における性能確認プログラムの方向性に関する考察

#### (1) わが国における検討状況

わが国の地層処分の実施主体である NUMO（原子力発電環境整備機構）では、地層処分における閉鎖後閉じ込めと隔離を実現するために、以下の三つの安全確保策を確実に実施するとしている[28]。

- ・地層処分にとって適切な地質環境を選定し、建設段階以降はサイト選定時における評価の妥当性を確認する（適切なサイト選定と確認）。
- ・選定された地質環境に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・構築する（処分場の設計・施工などの適切な工学的対策）。
- ・構築された地層処分システムの安全性を評価する（地層処分システムの長期安全性の評価）。

NUMO[28]では、地層処分システムの性能確認について、閉鎖後長期の安全確保を支える三つの安全確保策のうち、「地層処分システムの長期安全性の評価」の目的の一つとして挙げており、「地質環境の調査・評価と処分場の設計に基づき構築する地層処分システムについて、種々の安全機能の組み合わせによって、被ばく線量が合理的に達成できる限り低くなることを確認する」としている。

なお、安全評価上のシナリオの一つとして、「性能確認シナリオ」を挙げている、この「性能確認シナリオ」は、被ばくの評価に主眼が置かれたものであり、処分場の構成要素の性能を確認することに主眼を置いた性能確認プログラムとは趣旨の異なる面があるものと考えられるが、参考として記載する。このシナリオについて、以下のように説明している。

- ・自然過程を介するシナリオのうち、過去～現在のデータが充分にあり、外挿法などによる将来予測が可能な期間（期間 A）については、予測の不確実性が比較的小さいことから、最新の知見に照らして科学的に確からしいと予見する標準的なシナリオを策定することが可能である。
- ・このようなシナリオを用いて線量評価することによって、長期安全性に対する余裕の程度を事業者が自主的に確認することが可能となる。
- ・評価された被ばく線量が基準値を下回る場合でも、防護の一層の最適化の観点から、当該被ばく線量を合理的に達成可能な限り低く抑えるよう努力していることを示すことが可能になる。
- ・種々の安全機能が適切に組み合わせられていることを確認する上では、システム構成要素ごとの性能指標（あるバリアにおける核種移行率など）を算出することも有効で

ある。

- ・ 期間 A においても地表環境や人間の生活習慣についての予測には不確実性が含まれる可能性があることから、これらの性能指標は被ばく線量の評価結果を補完する役割も担う。

また、モニタリングについては表 2.3.5-1 に示す目的と分類、図 2.3.5-1 に示す段階的な役割を示し、閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングは、地層処分に特有の重要項目であるとした上で、モニタリングは、事業許可以降の安全レビューにおいて閉鎖後の長期的な安全性が担保される見通しであることを確認するために利用する最新知見のひとつであるとしている。一方で、「モニタリングによって事業許可申請時の安全評価で仮定されるシナリオ全体の確からしさを直接的に確認することはできない。従って、モニタリングでは、安全評価で仮定された個別の現象のいくつか（例えば緩衝材の飽和現象）について、それが実際に起こっていることを確認したり、地質環境モデルに含まれる特定の現象（例えば地下水位の遷移状況）の予測の妥当性を確認したりすることによって、補完的に安全評価の妥当性を示すことが検討されている[29]」とし、閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリングが安全評価の妥当性を示す補完的な手段の一つであることを述べている。

表 2.3.5-1 目的に基づくモニタリングの分類[28]

目的		モニタリング の分類
閉鎖後長期の安全確保		閉鎖後長期の安全確認に関するモニタリング
事業期間中の 安全確保	放射線安全の確保	放射線安全の確保に関するモニタリング
	一般労働安全の確保	一般労働安全の確保に関するモニタリング
	周辺環境の保全	周辺環境の保全に関するモニタリング

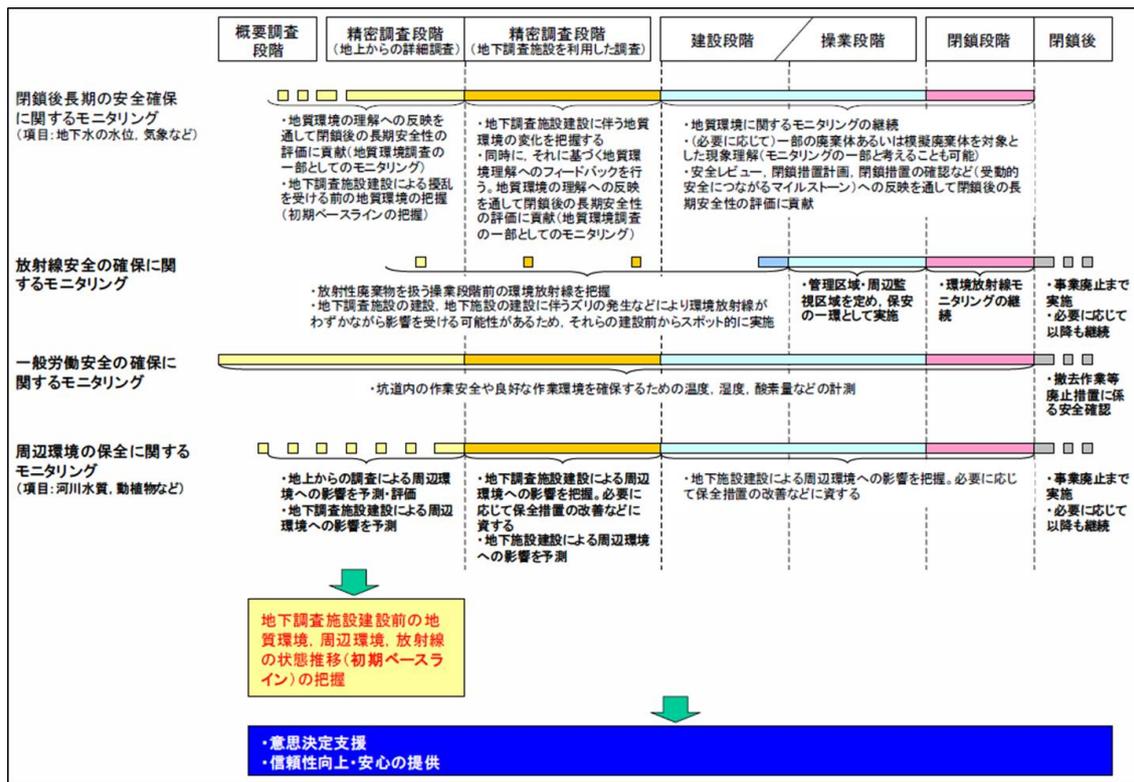


図 2.3.5-1 モニタリングの段階的な役割[28]

## (2) 性能確認プログラムの方向性に関する考察

わが国においては、わが国における検討状況で前述したように、性能確認の位置付け及び閉鎖後長期安全性に関わるモニタリングの役割については、認識されているものと言える。しかし、処分システムのどの構成要素にどのような性能目標を設定し、このうち何を、いつ、どのような手段を用いて確認するか等、性能確認プログラムの具体的な内容については十分な検討が進んでいるとは言えない。また、国際的動向からは、性能確認プログラムの成り立ちは、各国の規制動向に影響されることが示されたが、わが国においても、今後の地層処分に関する規制要件の整備状況に留意する必要がある。

しかし、今回の調査により、IAEAの安全基準文書や、処分事業の進展した各国においては、処分場の閉鎖後の安全性を保証する方法の一つとして、性能確認プログラムを取り入れていることが示されたことから、わが国においても、地層処分事業の進展とともに、性能確認プログラムの検討が必要と考えられる。但し、スウェーデンの事例にみられるように、品質管理/品質保証を閉鎖後安全性の確保の主要な方策として位置付けている国もみられることから、性能確認と品質保証の双方の特徴と役割を考察した上で、その組み合わせにより長期安全性の確保に貢献するプログラムを検討することが有効であるものと考えられる。

わが国において検討されている処分概念では、廃棄体の周囲へのベントナイトを主材料とする緩衝材の設置が示されており[28]、この特徴はスウェーデンのSKB社やフィンランドのポシヴァ社が採用する処分概念と共通するものである。さらに、SKB社とポシヴァ社

が協力して地層処分の安全確保への取組を進めていることを勘案すると、わが国における「品質保証／性能確認プログラム」を検討するにあたっては、スウェーデンにおける品質管理／品質保証プログラム及びフィンランドにおける性能確認プログラム体系と構造について調査を進めることが、有意義であると考えられる。

現在検討中の「品質保証／性能確認プログラム」の構成要素に関する概念を図 2.3.5-2 に示す。このプログラムはモニタリング、施工プロセス管理および製造管理プロセスを主要な要素として構成され、適用可能な複数の手法を組み合わせることで頑健性を持たせるものと考えられる。

次に、「品質保証／性能確認プログラム」の対象となる処分システムの成立性について人工バリアの性能（機能レベル）の変遷を例に考察する。処分システムの成立性を示すためには、①閉鎖後長期の安全性を満たすこと、②設計／構築する処分場が「閉鎖後長期の安全評価」の前提となる初期性能を達成することの 2 つの視点が必要である（図 2.3.5-3）。前者は閉鎖後長期の安全評価の枠内で扱われる取り組みであり、後者は設計・建設～閉鎖段階におけるエンジニアリングの枠内で扱われる取り組みである。現在、上記①②に資する研究開発の積み重ねにより、人工バリアを中心に個別材料に関する知見やデータや製作・施工等に関する個別要素技術などの成果が蓄積しつつある。

人工バリアの性能は、一般的に定置された時点を最大として考えることができる。この最大値については人工バリアの個別材料の製作や施工品質によりある程度の幅を持つものの、定置時に必要とされる施工仕様（施工時の性能目標）を満足するように施工される。また、操業期間中の（施工後の）擾乱により、ある程度の性能の変遷・劣化が発生するが、閉鎖時には安全評価における初期性能（設計仕様）を満足するように設計されている。閉鎖後は、セーフティケースにおいて想定されている一定の期間、人工バリアの性能の要件は満たしながら、性能の変遷・劣化が進行することになる。

このように時間の経過とともに変遷する人工バリアの性能に関し、エンジニアリングで対処すべき領域（期間）は、定置から閉鎖までの期間に該当する。エンジニアリングのうち「設計」では、設計する処分システムの人工バリア（EBS）を含む各構成要素（材料）が、建設・操業～閉鎖までの擾乱や変遷の影響、対策効果を見込んだうえで、閉鎖後長期の安全評価が期待する初期性能を達成することを示す必要がある。また、エンジニアリングのうち「施工」では、構築する処分システムが、閉鎖後の長期安全評価が期待する初期性能を満足することを、品質保証／性能確認プログラムによって示す必要があるものと考えられる。

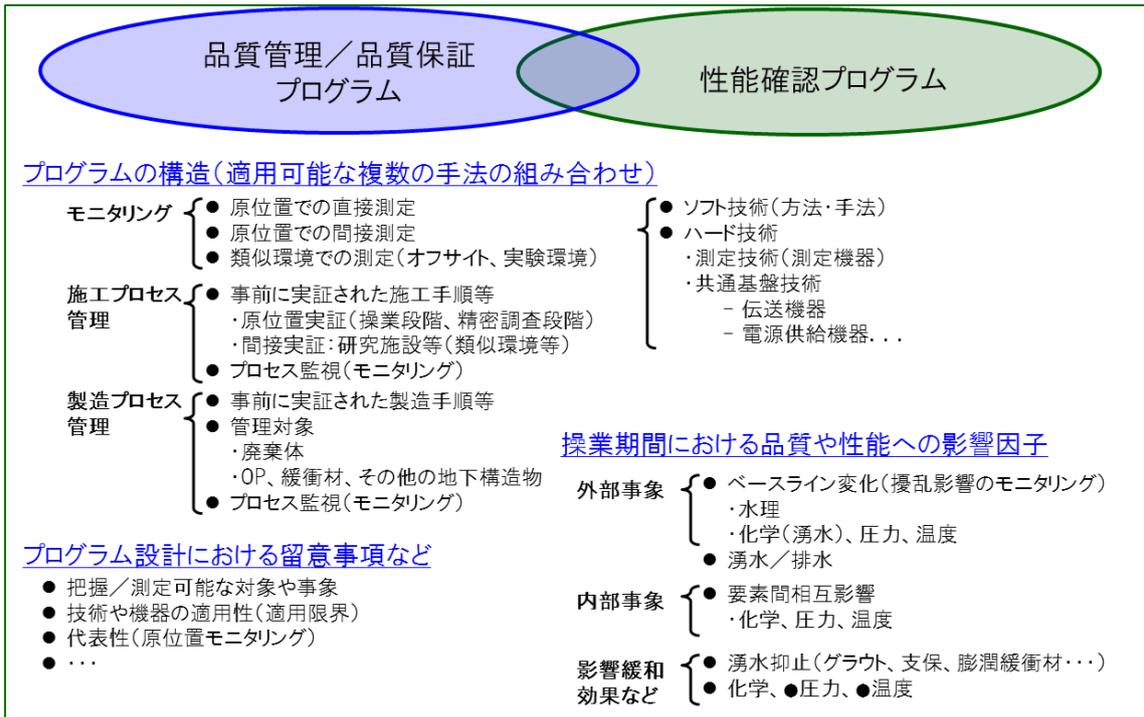


図 2.3.5-2 「品質保証/性能確認プログラム」の構成要素に関する概念図

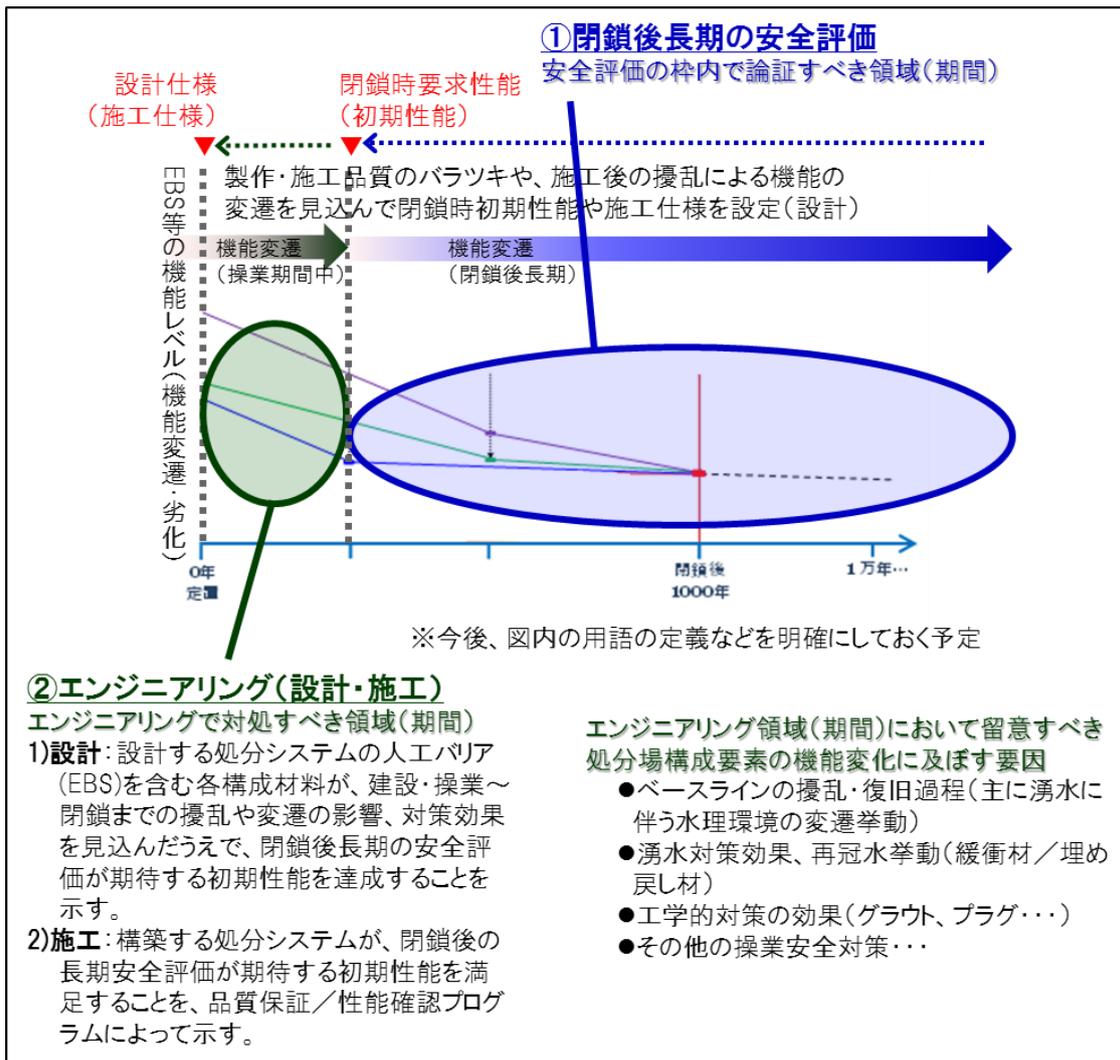


図 2.3.5-3 人工バリアの性能の変遷と処分システムの成立性の確保方法

(3) 本研究における今後の課題

わが国における「品質保証/性能確認プログラム」について検討するためには、プログラムの構築に必要な要素と制約条件の整理を実施する必要がある。

例えば、

- ・人工バリア等の製造プロセス及び施行プロセスの管理の要素と制約条件
- ・操業期間における品質や性能への影響因子
- ・品質や性能への影響因子の確認方法(室内試験、モニタリング等)の構成要素と制約条件

これらの「品質保証/性能確認プログラム」の構築に必要な要素と制約条件は互いに関連しているため、施行プロセスの管理やモニタリング等の個別の計画のみでなく、性能確認プログラム、品質管理計画の全体を俯瞰し、個々の手法の役割を把握する必要がある。

このため次年度は、処分事業の先行する各国の事例のうち、わが国で検討されている処分概念と共通した処分概念を有するスウェーデンとフィンランドについて、相互補完的役割を持つと考えられる下記のプログラムを特に重点的に整理し、成果の取りまとめを行う。

- ・スウェーデンの品質管理／品質保証プログラム
- ・フィンランドの性能確認プログラム

## 参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency: Safety Standards Series, Specific Safety Requirements, No. SSR-5, "Disposal of Radioactive Waste", (2012)
- [2] International Atomic Energy Agency: Safety Standards Series, Specific Safety Guide, No. SSG-14, "Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste", (2011)
- [3] International Atomic Energy Agency: Safety Standards Series, Specific Safety Guide, No. SSG-23 "The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste", (2012)
- [4] International Atomic Energy Agency: Safety Standards Series, Specific Safety Guide, No. SSG-31, "Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities", (2014)
- [5] International Atomic Energy Agency: TECDOC-1208, "Monitoring of geological repositories for high level radioactive waste", (2001)
- [6] International Atomic Energy Agency: Safety Standards Series, Safety Fundamentals, No. SF-1, "Fundamental Safety Principles", (2006)
- [7] NRC: 10 CFR Part 63: Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, (2001/2009)
- [8] DOE: DOE/RW-0549, "Yucca Mountain Site Suitability Evaluation", (2002)
- [9] DOE: DOE/RW-0539-1, "Yucca Mountain Science and Engineering Report, Technical Information Supporting Site Recommendation Consideration Rev.1", Executive Summary, (2002)
- [10] Sandia National Laboratories: SAND2011-6277, "Repository Performance Confirmation", (2011)
- [11] STUK: Y/4/2016 Radiation and Nuclear Safety Authority Regulation on the Safety of Disposal of Nuclear Waste, (2016)
- [12] STUK, Guide YVL D.5 DISPOSAL OF NUCLEAR WASTE, (2013)
- [13] Posiva: "RAKENTAMISLUPAHAKEMUS Olkiluodon kapselointi- ja loppusijoituslaitoksen rakentamiseksi käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta varten, (2012)
- [14] Posiva: Monitoring at Olkiluoto-a Programme for the Period Before Repository Operation, Posiva 2012-01, (2012)
- [15] SSM: SSMFS 2008:21 The Swedish Radiation Safety Authority's regulations concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste, (2008)
- [16] SKB: Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep repository for spent fuel, SKB-R-0413, (2004)
- [17] SKB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at

- Forsmark, Main report of the SR-Site project, TR-11-01, (2011)
- [18] SKB: Framework programme for detailed characterisation in connection with construction and operation of a final repository for spent nuclear fuel, R-11-14, (2010)
- [19] France, LOI no 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue
- [20] ASN, "Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde", (2008)
- [21] Andra: Dossier 2005 Argile, ome Architecture and management of a geological repository, (2005)
- [22] MoDeRn Project HP: <http://www.modern-fp7.eu/>
- [23] MoDeRn: Monitoring During the Staged Imprementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis, [http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/MoDeRn\\_D6.1\\_Project\\_Synthesis\\_Report.pdf](http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables/MoDeRn_D6.1_Project_Synthesis_Report.pdf), (2014)
- [24] MoDeRn2020 Project HP: <http://www.modern2020.eu/>
- [25] OECD/NEA-RWMC Preservation of Records、 Knowledge and Memory (RK&M) across Generations: Monitorin of Geological Disposal Facilities: Technical and Social Aspects、 <http://www.oecd-nea.org/rwm/rkm/>, (2014)
- [26] MoDeRn: MoDeRn Monitoring Reference Framework report, <http://www.modern-fp7.eu/fileadmin/modern/docs/Deliverables>, (2013)
- [27] Modern2020: Work Package 2 Deliverable D2.1, Repository Monitoring Strategies and Screening Methodologies, (2016)
- [28] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全性確保（2010年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために－、NUMO-TR-11-01、2011.9
- [29] 原子力発電環境整備機構：放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討、NUMO-TR-10-01、2010.5
- [30] ASN、2014年12月19日付け書簡「地層処分場（Cigéo）プロジェクトの安全オプション」, "Options de sûreté du projet Cigéo", (CODEP-DRC-2014-039834)
- [31] IAEA、地層処分場 CIGÉO の安全オプションに関する書類への国際レビュー報告書、INTERNATIONAL PEER REVIEW ON THE “SAFETY OPTIONS DOSSIER” OF THE PROJECT OF DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE IN DEEP GEOLOGICAL FORMATIONS: CIGÉO, PEER REVIEW REPORT、2016年11月

## 第3章 地中無線モニタリング技術の検討

### 3.1 目的および実施概要

本章では、配線ケーブル（以下、「有線」という）による系の擾乱を防ぐ地中無線通信技術の適用性について、予め抽出した課題に対し、段階的に開発を実施している。

これまでに、送受信アンテナの送信効率、受信効率の向上、電磁波伝播挙動を評価するための解析手法の構築、岩盤中における電磁波伝播特性の把握、小型化送信装置の開発を実施した。また、これらの技術の成立性を実証するため、フランスでは地下研究所における小型化した地中無線送信装置の製作を行い、試験の計画を予定している。国内では、日本原子力研究開発機構との共同研究による幌延深地層研究センターや瑞浪超深地層研究所での地中無線中継試験を行っている。

電源技術の開発では、長期モニタリングのための電源技術調査を実施した上で、放射性同位体熱電気変換器の適用に関する検討、及び電磁波による地中無線モニタリング装置への給電技術に関する検討・試験を実施してきたところである。

本年度は、昨年度に実施した結果を踏まえ、無線伝送技術の開発では故障等におけるシステムの冗長性を持たせるため、中継器による多段化の検討及び試験による検証を実施する。また、無線給電技術の検討では、地層処分において磁界共振結合（磁界共鳴）方式の給電技術を適用した場合について課題を検討し、試験による検証を実施する。

## 3.2 無線伝送技術の開発

### 3.2.1 概要

本業務は、地層処分モニタリングにおいて系の擾乱を防ぐ地中無線通信技術の検討および機器の開発を行っているもので、平成 14 年度から平成 27 年度まで段階的に整備を進めてきた。平成 26 年度からは実地下環境での適用性を評価するため、小型・耐圧化を施した送信器を原子力機構幌延深地層研究センターならびに瑞浪超深地層研究所の地下研究施設（URL）の試験坑道に設置し、ケーブルを介さずに計測データを伝送する試験を実施している。平成 27 年度からは、残された遠距離伝送の課題として、中継装置に関する検討を開始した。

平成 28 年度は、平成 27 年度の検討成果を基にプロトタイプ用中継装置（以下「中継装置」という）の製作とともに、以下の項目を実施した。

- ① 中継装置の動作確認
- ② 地中無線伝送技術に関する開発状況の調査
- ③ 試験坑道で実施中の適用試験データの整理、確認

### 3.2.2 中継装置の製作および動作確認

平成 27 年度は、平成 26 年度に実施した中継装置の課題に対する基本設計を前提とし、中継装置による複数段の中継、2 系統以上の伝送経路の確保、10 台までのセンサ付き小型送信器からのデータ受信を目標とした各機能の詳細設計及びプログラミングを行い、基板・回路の製作を実施した。

平成 28 年度は、アンテナ・電源を設計・製作し、地下 500m の耐水圧性（5MPa 程度）を確保しつつ、アンテナ・電源を内包可能な管体を製作し、装置全体を組み立てた。また、受信器については、中継器の設置に伴うシステム制御方法の改良（プログラムと基板の改良）を行い、動作検証試験を実施した。

#### (1) 中継装置の開発条件・設計フロー

中継装置は大きく分けて以下の要素から構成される。

- ・受信アンテナ：送信器もしくは中継装置からデータを受ける
- ・送信アンテナ：中継装置もしくは受信器にデータを送る
- ・制御器：送信・受信を制御する
- ・電源：受信アンテナ、送信アンテナ、制御器を長期間稼働させる

このうち、受信アンテナと送信アンテナについては、アンテナを切り替えて送受信兼用とすることが可能であるため、構成としてはアンテナ、制御器、電源となる。当初計画では、これら 3 要素を別々の管体に内包し、それぞれの管体をケーブルで接続する構想であったが、ケーブル接続が故障の要因になると考えた。そこで、平成 27 年度の詳細設計において、一つの管体にアンテナ、制御器、電源を内包することが可能であることを確認したため、ケーブル接続が不要な単一管体で製作することとした。

本開発では、中継装置の開発条件を以下のように設定した。

- ① 人工バリア、天然バリアへの影響（空隙）を抑えるために、低重量、小さなサイズになるように設計を行う。なお地層処分坑道へ設置する際は、設置場所の制約や通信距離などの条件を考慮した設計の見直しを行う必要がある。
- ② 深度 500m の静水圧に耐えられる仕様（耐水圧性 5MPa）とする。
- ③ 管体の材質は、耐水圧性を確保しつつ、整形しやすく比較的安価で市販の硬質塩化ビニル樹脂（PVC\*1）とする。なお、耐放射性及び耐久性については、今後の課題とする。
- ④ 計測期間は、10 年間とする。

このような開発条件のもと、表 3.2.2-1 に示す設計条件を設定し、図 3.2.2-1 の中継装置開発フローに従い設計・製作を行った。耐用年数、通信距離、管理する小型送信器の台数については、昨年度の開発条件を踏襲し、データ送受信の頻度については、瑞浪超深地層研究所で実施している試験の条件と同じとした。時刻同期、指令通信の頻度については、表 3.2.2-1 に示すように試験条件より高い頻度を設定した。

---

\*1 PVC は、小型送信器で使用しており、引張降伏強さは 46.53MPa、ヤング率は 2500MPa である。

目標通信距離からアンテナサイズを設計する際に、アンテナの形状・寸法が変わると出力（受信強度）・消費電流が変わるため、必ず試作して目標とする受信強度が得られるか、消費電流がどの程度かを確認する。受信強度については、これまでの実績から SN 比（ノイズレベルに対する受信強度）が 3 以上確保できれば安定した通信状態と判断できるため、試験では SN 比 3 以上を満たしているかどうかを確認する。

次に、電源の開発では、各種基板・回路やアンテナの消費電力、計測期間などを考慮し、必要な電力量を計算する。必要な電力量が計算できれば、電池の数が求まり、電源サイズが決まる。

最後に、アンテナ、電源、制御器を内包でき耐水圧性を有する筐体を設計する。筐体の寸法が決まれば、数値解析により耐圧性を確認する。止水方法や電源固定方法など詳細設計を行い、製作する。

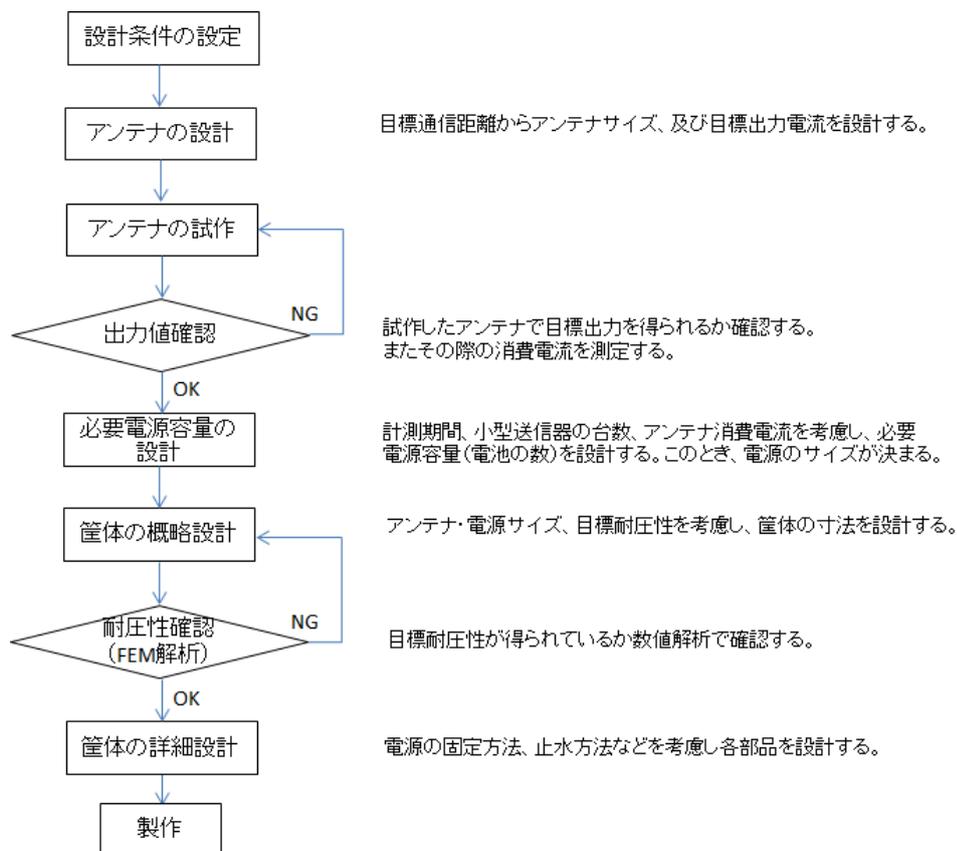


図 3.2.2-1 中継装置設計フロー

表 3.2.2-1 中継装置の設計条件

項目	目標値	備考
耐用年数	10年間	昨年度の開発条件
通信距離	～100m	必要な受信強度: 400mV (20m通信時)
管理する小型送信器台数	10台	
データ送受信	1回/週	2週間分のデータ
時刻同期	1回/2週	
指令通信	1回/2ヶ月	
筐体の耐圧性	5MPa	

(2) アンテナ設計・製作

中継装置の送信・受信アンテナを設計・製作する際には、出来る限り小型化するため、送信・受信アンテナは、送受兼用アンテナとして統合し、送信時・受信時に切り替えて使用する方式とした。アンテナの構成は、図 3.2.2-2 の断面模式図に示すように、内側からボビン、磁性材コア、コイル、保護層（ポリエステル絶縁テープ）となっている。この構成は、小型送信器アンテナと同様である。ボビンは作成したい形状・寸法に合わせやすいように紙製とした。磁性材コアは、アンテナで発生した磁束がアンテナ内部の電気回路および電池類で遮られないように使用するものである。本開発では、超高飽和磁束密度材料であるナノ結晶軟磁性材料シート（図 3.2.2-3）を用いた。磁性材コアの外周にコイルを巻き、その外側を保護層としてポリエステル絶縁テープを巻きつける。

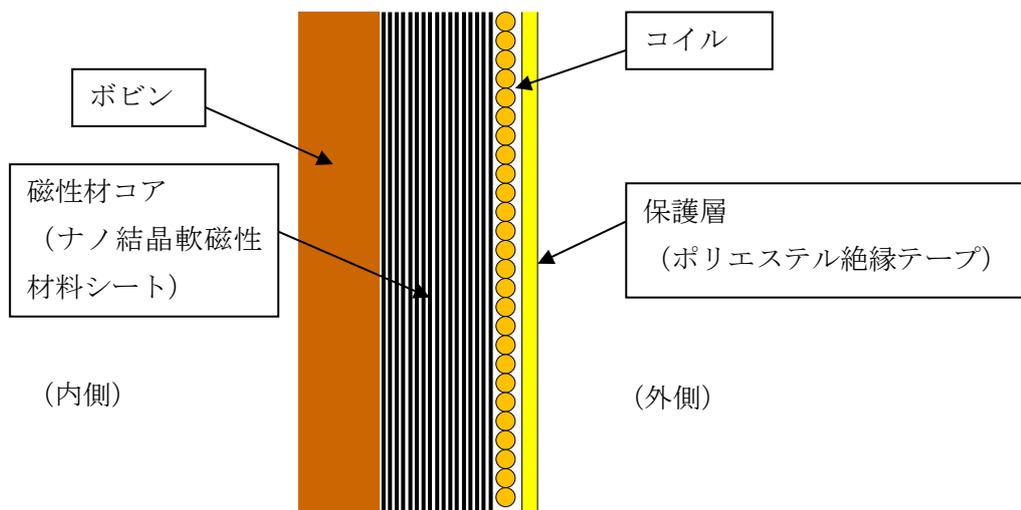


図 3.2.2-2 アンテナの構成 (断面模式図)

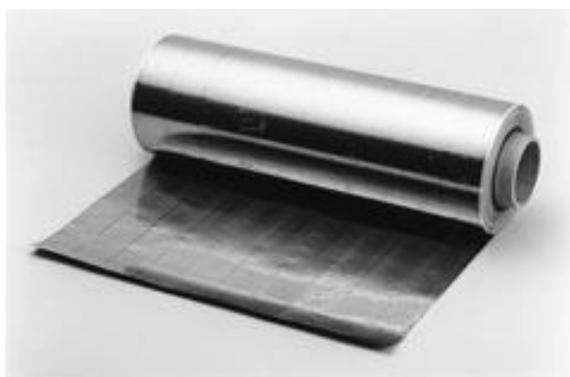


図 3.2.2-3 ナノ結晶軟磁性材料シート

アンテナの概略設計として、目標とする受信強度からアンテナの寸法を設計する。

アンテナの出力は、アンテナのコイルの面積とコイルに流す電流に比例する。小型送信器の場合、アンテナの直径は約 40 mm で、アンテナの電源電圧は 3.6 V であり、これまでの実績から通信距離 20 m での信号強度は約 12.5 mV であった。一方、中継装置のアンテナは、ノイズレベルを 1 mV（これまでの実証試験などで測定された値）と仮定すると、今回目標とする通信距離 100 m の場合、受信強度は 3 mV 以上必要となる（図 3.2.2-4）。

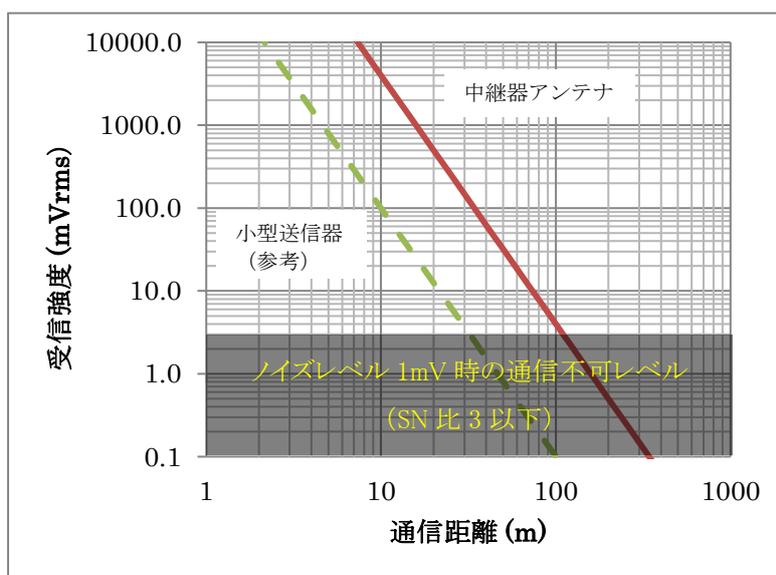


図 3.2.2-4 送受信兼用アンテナ受信強度の計算結果

よって、中継装置では小型送信器のアンテナと比較して 32 倍 ( $400 \text{ mV} \div 12.5 \text{ mV}$ ) の出力が必要となる。昨年度開発した中継装置の制御基板は 10.8 V で動作することから、中継装置のアンテナの電源を 10.8 V とすると、小型送信機のアンテナ電源 (3.6 V) の 3 倍の出力となる。さらに、中継装置のアンテナ面積を小型送信機のアンテナ面積の 10 倍強（概略計算でのコイル直径は 145 mm）とすることで、32 倍の出力を実現することとした。表 3.2.2-2 に概略設計結果を示す。

表 3.2.2-2 アンテナの概略設計結果

	小型送信器	中継装置	倍率
電源電圧 V	3.6	10.8	3
アンテナ直径 mm	40	145	-
アンテナ面積 mm <sup>2</sup>	1,257	16,513	13
計	-	-	39

アンテナ長さについては、昨年度開発した中継装置の基板と電池を内包する長さが必要となる。しかしながら、現時点では送信時のアンテナの消費電流が不明なため、これまでの知見および基板自体の消費電流から 200~300Ah 程度と仮定すると、アンテナの長さは 400~500mm 必要となる。なお、搭載基板サイズおよびその固定金具、電池を 6 段に重ねると仮定すると 455mm となり、設定した 400~500mm の範囲内であるため、アンテナの長さを 455mm として製作した。

コイルによって発生する磁束に対し、飽和しない最小の磁性材コアの量は、図 3.2.2-5 に示す方法で試行錯誤的に求め、17 層構造とした。コイルは、φ0.6mm の銅線を両端に 110 ターン巻き、その外側に保護層としてポリエステルフィルム絶縁テープを巻いた。図 3.2.2-6 にアンテナの回路図を、図 3.2.2-7 に製作した送受信兼用アンテナを示す。

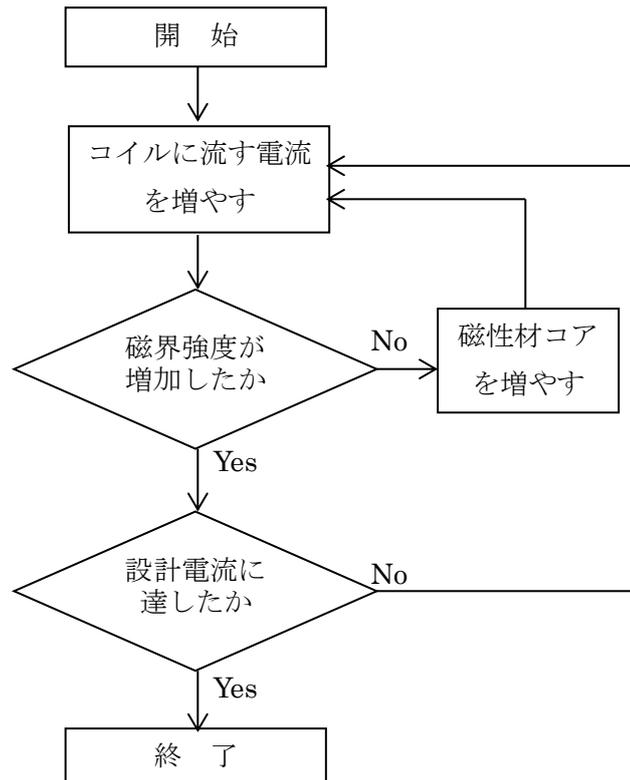


図 3.2.2-5 磁性材コアの量の決め方

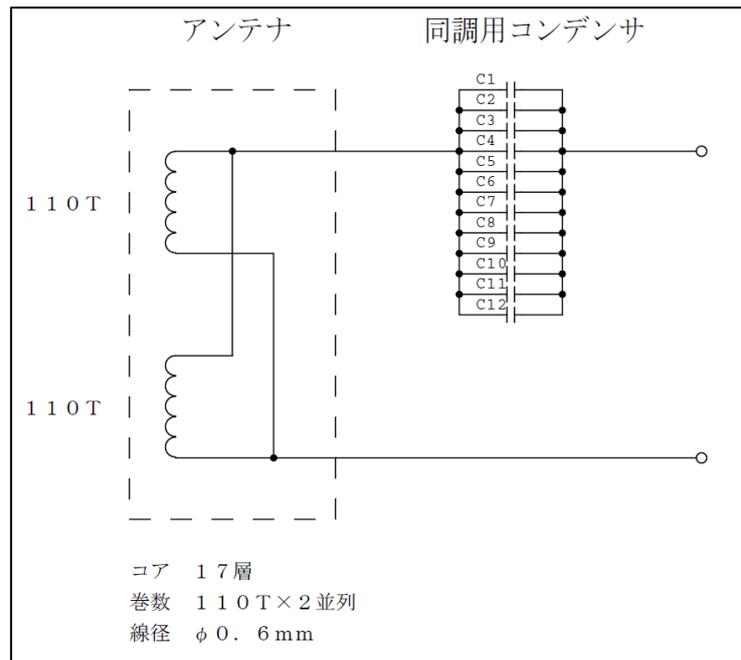


図 3.2.2-6 アンテナ回路図

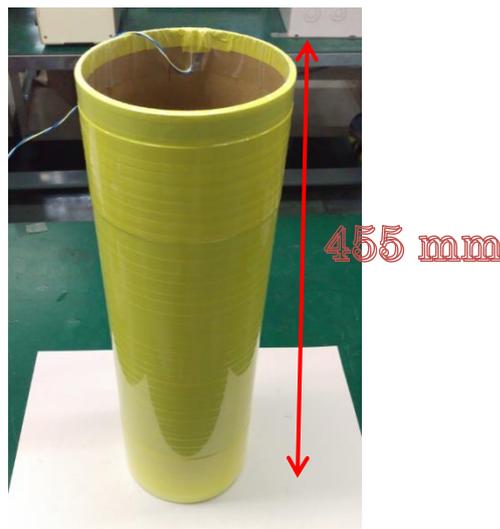


図 3.2.2-7 製作した送受信兼用アンテナ

アンテナ製作後に、周波数特性を調整した。具体的には周波数 8.5kHz（小型送信器で使用している周波数）の電磁波を最も効率良く出力するように同調用コンデンサおよび抵抗を求めた。図 3.2.2-8 にアンテナの調整作業状況、図 3.2.2-9 にアンテナ調整機器の構成模式図を示す。以下に、調整方法を記す。

まず初めに、製作したアンテナのインダクタンス ( $L$ )、抵抗 ( $R$ ) を 8.5 kHz ( $f_0$ ) に設定した LCR メーターで測定する (図 3.2.2-9(a))。測定の結果、 $L=4.97$  mH、 $R=1.6\Omega$  であった。次に式(1)により、接続するコンデンサ容量 ( $C$ ) を 70nF と算出した。

$$C = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L} \quad (1)$$

算出した容量を初期値としてコンデンサをアンテナに接続し (図 3.2.2-9(b))、発信器の周波数

を 8.5 kHz から変化させながら以下の調整を行い、コンデンサ容量およびアンテナの抵抗値を求めた。

- 最も多くの電流が流れる周波数が 8.5 kHz になるようにコンデンサの容量を調整した。この結果、コンデンサ容量は 67.96 nF となった。
- 最大電流の  $1/\sqrt{2}$  の電流が流れる周波数 ( $f_+$ ,  $f_-$ ) を探す。  $f_+$  及び  $f_-$  はアンテナの抵抗値により変化するため、アンテナに抵抗器を接続し、式(2)で求める  $Q$  値 (クオリティファクター) が適した範囲 (32~34) \*<sup>2</sup> となるように抵抗を調整した。この結果、抵抗は 0  $\Omega$  (無接続) となった。

$$Q = \frac{f_0}{f_+ - f_-} \quad (2)$$

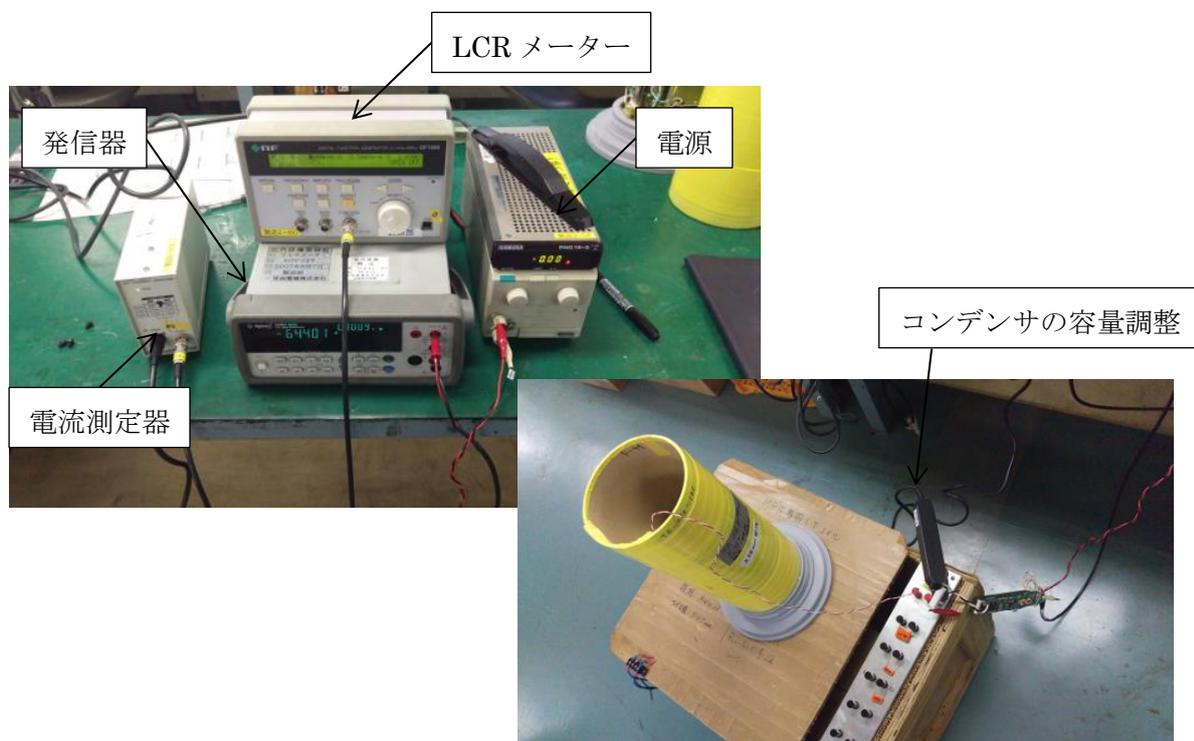
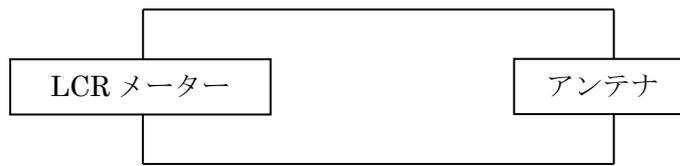
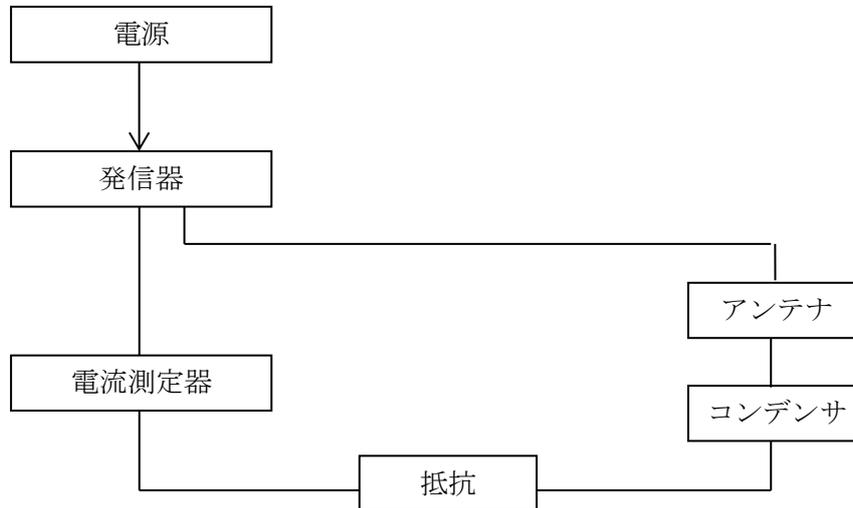


図 3.2.2-8 アンテナの調整

\*<sup>2</sup>  $Q$  値はこのアンテナの周波数の特性を表し、 $Q$  が高い場合、効率は上がるが通信できる周波数の幅が狭くなる。



(a) 初期接続コンデンサ容量の測定



(b) 調整

図 3.2.2-9 アンテナ調整機器の構成

以上の調整後、通信距離を 20m に設定し、実際に信号を出力させた時の受信強度を測定した。図 3.2.2-10 に示した赤丸 (●) が測定値である。直線は、受信強度が通信距離の三乗に反比例して減衰するとして求めた計算結果である。この結果から、通信距離 100m の場合でも、受信強度が 3mV 以上となっており (図中赤線)、安定した通信が可能な SN 比 3 以上 (ノイズレベル 1mV の場合) を確保できていることを確認した。

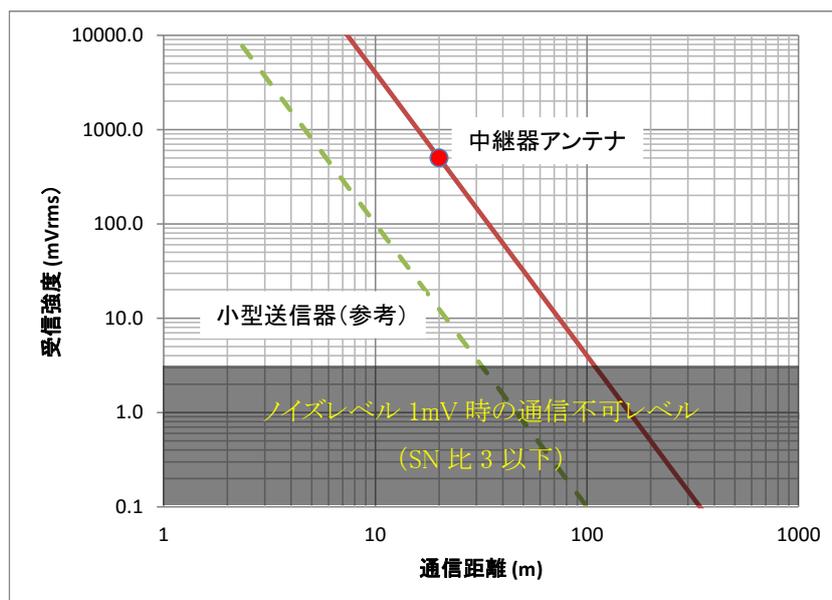


図 3.2.2-10 送受信兼用アンテナの測定結果及び計算結果

### (3) 電源製作

電源製作においては、表 3.2.2-3 の運用条件のもとで設計を行った。運用条件は、昨年度の開発仕様に合わせ、小型送信器を 10 台まで管理可能とし、週 1 回のデータ中継送受信（過去 2 週分）、2 週間に 1 度の中継装置の時計同期、2 ヶ月に 1 度の指令通信とした。なお、受信待機用低消費受信回路は週に 3 日、8 時間ずつ起動させることとした。表 3.2.2-3 の運用条件に合わせ、昨年度に開発した中継装置の各基板の消費電流をもとに年間の動作別消費電流量を計算した結果を表 3.2.2-4 に示す。さらに 10 年間継続して中継装置を運用するために必要な電源容量を計算した結果を表 3.2.2-5 に示す。10 年間運用時の必要容量は 138.3Ah となり、25%<sup>\*3</sup>のマーヅンを付加して必要な消費電流量を 173Ah とした。この電流量が 10 年後に 0 になるとして年間の電池の自己消費分（放電）<sup>\*4</sup>から逆算すると、運用開始時に 230Ah の電流量が中継器装置に搭載されている必要がある。超低自己消費型塩化チオニルリチウム一次電池は、標準容量値が 16.5Ah なので、 $230\text{Ah} \div 16.5\text{Ah} = 14$  となり、14 セット×3 個直列=42 本の電池が必要になる。電源の回路図を図 3.2.2-11 に示す。

\*3 一般に電池の容量は、使用環境（温度等）、使い方（使用頻度、一回当たりの使用時間など）で減少幅が変わるため、本開発では 25%をマーヅンとして設定した。

\*4 電池の自己消費分は、電池メーカーの公称値をもとに利用者の経験から導き出した数値である。

表 3.2.2-3 電源設計のための運用条件

中継装置		
対象とする小型送信器の台数	10	台
定期データ送信間隔	7	日/回
同期通信間隔	14	日/回
中継指令要求間隔(非常時用)	60	日/回
低消費受信回路動作間隔	3	日/週
	8	時間/日
小型送信器		
測定間隔	1	日/回
定期データ通信間隔	7	日/回

表 3.2.2-4 各動作別年間消費電流量

項目	動作時間 h/年	消費電流量 Ah/年
スリープ	7421.0	0.037
低消費受信待機・受信待機	1338.0	7.90
同期通信	2.2	2.17
定期データ通信	2.8	2.75
中継指令	2.1	0.96
計	8766.0	13.83

表 3.2.2-5 電源容量計算結果

超低自己消費型塩化チオニルリチウム一次電池	3.6	V(公称電圧)
	16.5	Ah(標準値)
中継動作電圧	10.8	V
10年間運用時の必要容量	138.3	Ah
マージン	25	%
必要電池容量	173	Ah
自己消費分考慮した必要容量	230	Ah
必要電池本数	42	本

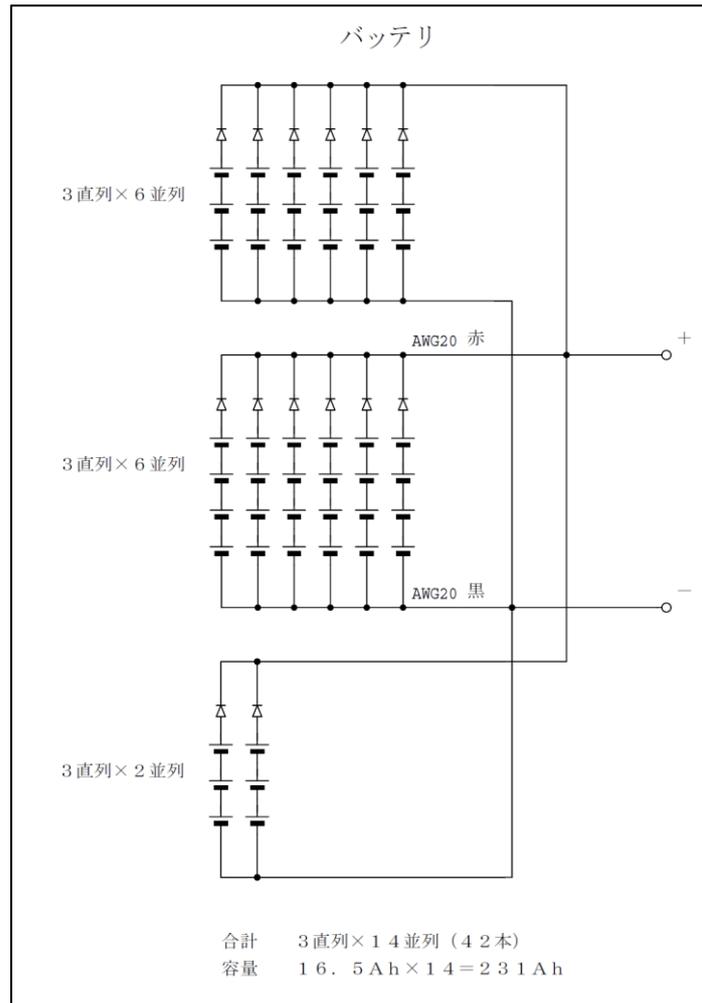


図 3.2.2-11 電源の回路図

#### (4) 筐体の設計・製作

設計したアンテナ・電源を内包するようにして、耐圧 5MPa を確保できるように筐体設計を行った。設計方法は JIS B8257 などを参考に、円筒部（直径 216mm、高さ 565mm）の必要肉厚を計算した結果から 35mm（蓋部厚 55mm）とした。

設計した筐体の耐圧性を確認するために、FEM 解析を実施した。解析ソフトウェアは、Autodesk Inventor Professional 2017 64bitEditon, Release: 2017 RTM を使用した。表 3.2.2-6 に解析条件を示す。筐体は円筒形（中空構造）で、寸法は前述の通りである。材質は PVC を仮定し、ヤング率、ポアソン比、密度、引張降伏強さは、PVC メーカーの公称値を使用した。解析モデルの一端面を拘束し、载荷圧力 5MPa を等方的に作用させ、筐体に発生する応力、変形量を計算した。応力に関しては、一般的に X, Y, Z の 3 成分に各せん断方向を合わせた 6 成分に分けられ煩雑になるため、式(1)で計算される相当応力（フォン・ミーゼス応力）： $\sigma^D$  で評価する。

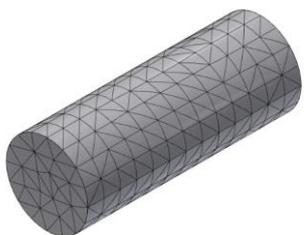
$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2\}} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  は最大主応力、中間主応力、最小主応力である。相当応力はスカラ値で方向を持たないため、一つの値で評価できる。すなわち、延性材料である PVC の場合、計算さ

れた相当応力が材料の引張降伏強さを超えると塑性変形が発生する[1]と評価できる。

解析結果として、図 3.2.2-12 に相当応力分布、図 3.2.2-13 に変位量を示す。図 3.2.2-12 から、筐体に発生する相当応力は、筐体側面の中心（内壁）で最大 16.64 MPa を示した。この値は、PVC の引張降伏強さ(46.53 MPa)を下回っている。また筐体円筒部の大部分において、相当応力は、引張降伏強さの 20%以下で、局所的に相当応力が高い箇所でも引張降伏強さの 40%程度であった。筐体の変位に対して内包したアンテナを変形させないために、アンテナと筐体の間隙を 1mm 確保した。変位量の解析結果から、最大変位量が 0.5mm 程度で、1mm 以下であることを確認した。以上の解析結果から製作した筐体は、5 MPa の耐圧性が確保できていることを確認した。

表 3.2.2-6 筐体の FEM 解析条件

境界領域寸法（筐体寸法）	φ 216 mm × 565 mm（中空構造） 円筒部肉厚 35mm、蓋部厚 55mm
パーツ質量	18.97 kg
パーツ体積	1.309E+07 mm <sup>3</sup>
ノード	1,322
要素	658  (メッシュモデル)
ヤング率	2,500 MPa
ポアソン比	0.38
密度	1.45E+06 kg/mm <sup>3</sup>
引張降伏強さ	46.53 MPa
载荷圧力	表面圧力 5 MPa
拘束条件	筐体一端面拘束（蓋部一端エッジ拘束）

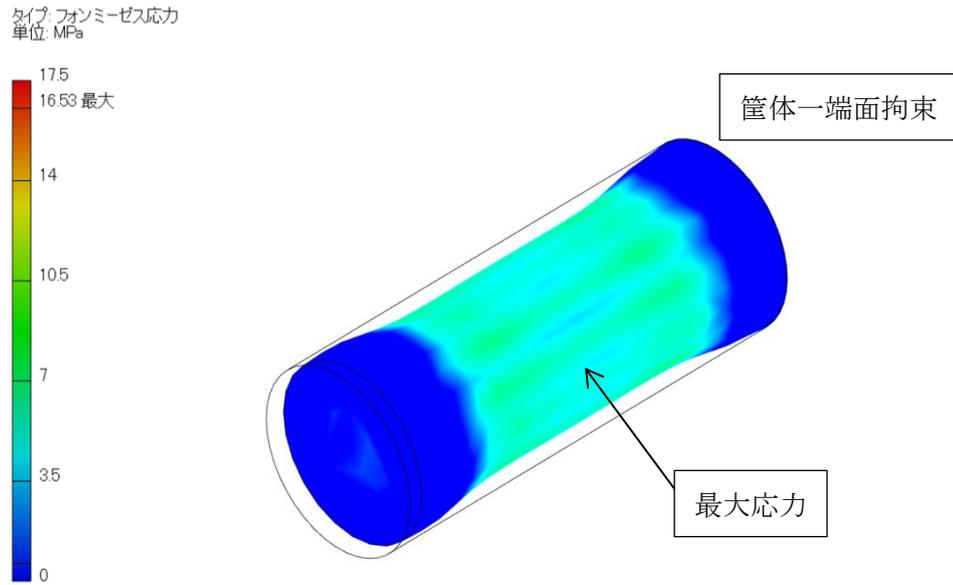


図 3.2.2-12 FEM 解析結果 (相当応力)

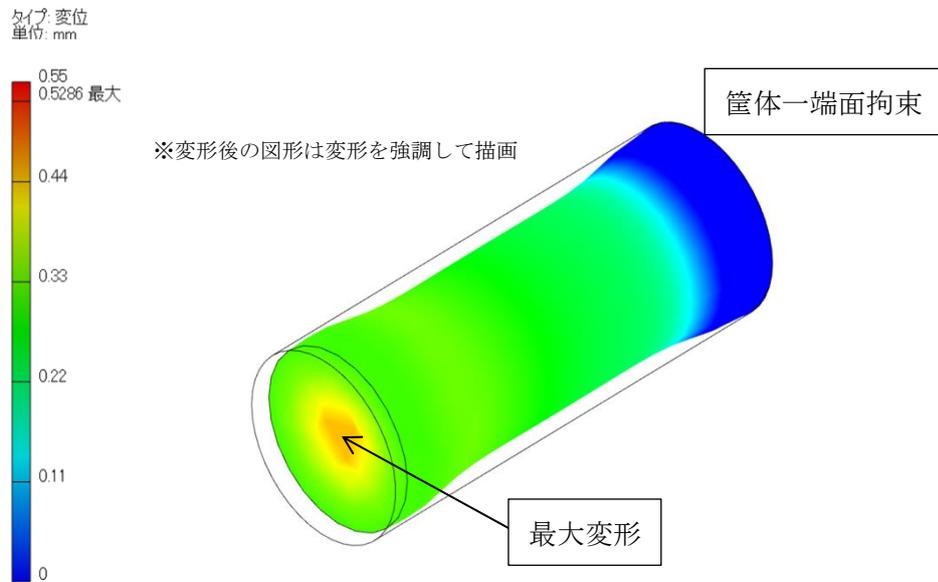


図 3.2.2-13 FEM 解析結果 (変位量)

本開発で設計した筐体について、厚さ 35mm の PVC が市販されていないため、筐体を内殻・外殻に分けた上で、組み立て時に内殻と外殻の隙間に樹脂（PVC とほぼ同じ物性）を入れて一体化し、厚さ 35mm を確保した。設計に基づいて製作した筐体の写真を図 3.2.2-14 に示す。左側は内殻筐体、右側は内殻の外側を覆う外殻筐体である。また、図 3.2.2-15 に中継装置の組立図を示す。

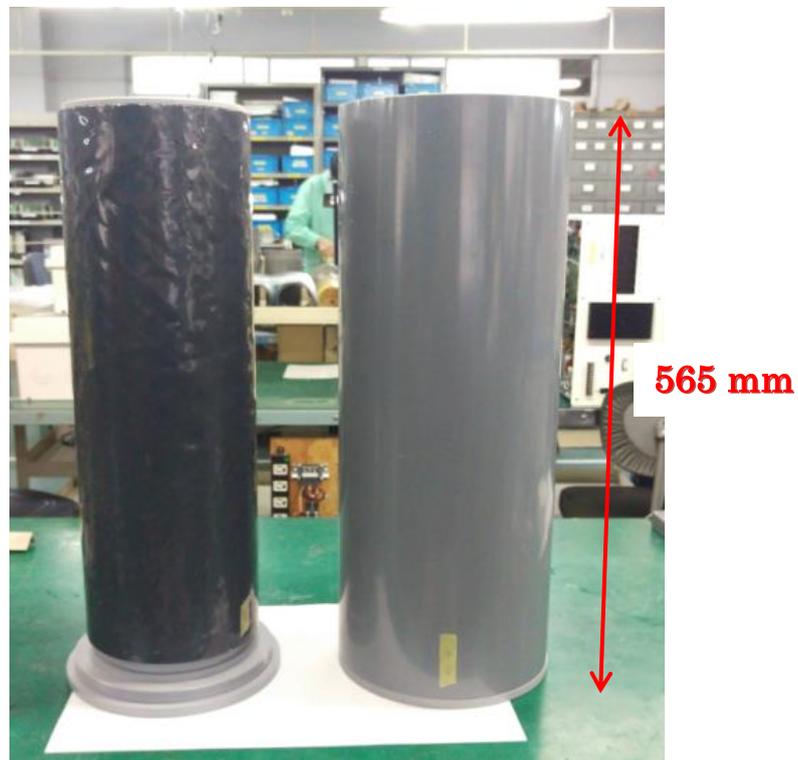


図 3.2.2-14 耐圧筐体を構成する内殻 VP150（左）と外殻 VP200（右）

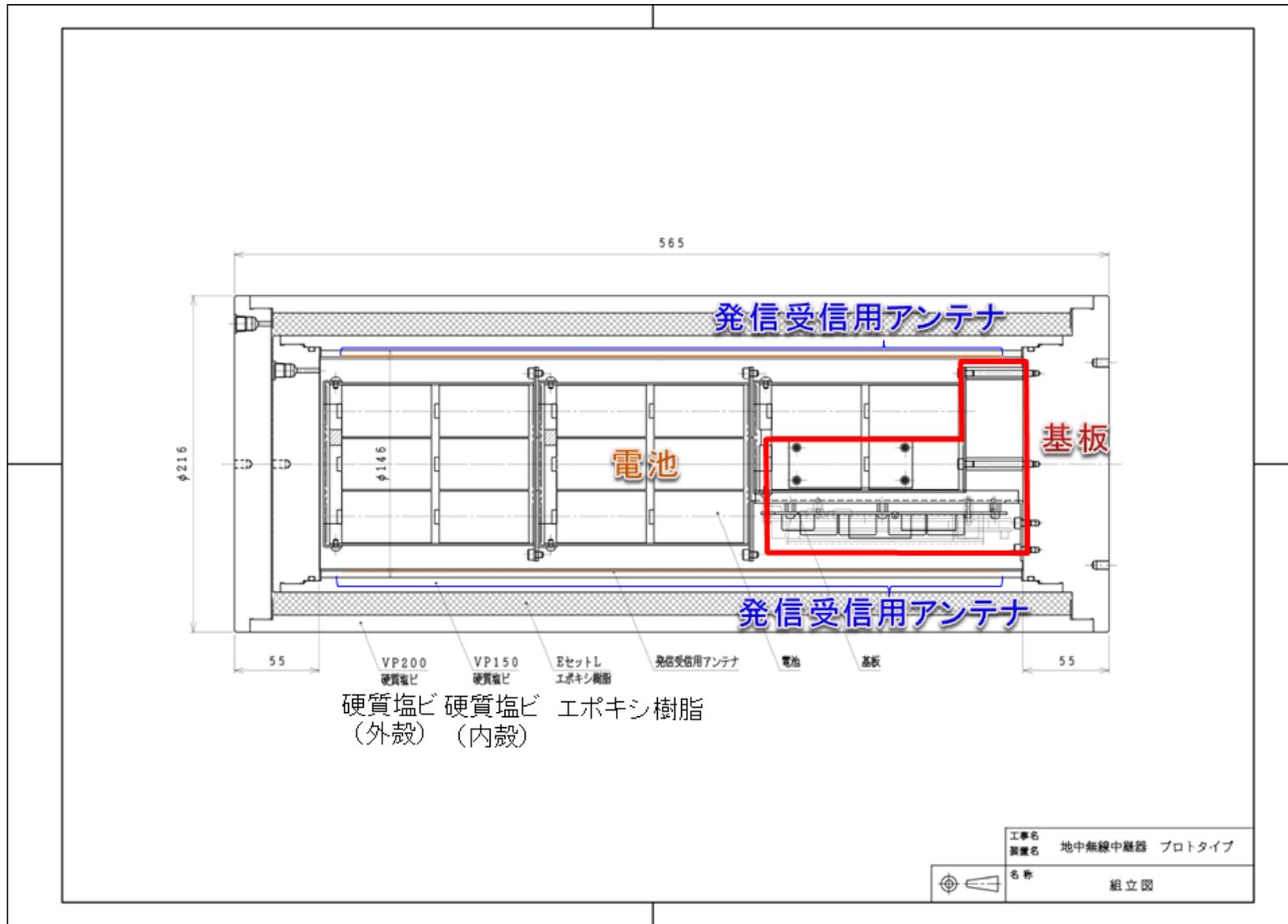


図 3.2.2-15 設計した中継装置の組立図

(5) 全体組み立て・接続

製作した筐体にアンテナ、回路基板、電源等を組み込み、中継装置の組み立て作業を行った。組み立ての作業内容を手順毎に以下に示す。

図 3.2.2-16 は、中継装置の基板である。これを図 3.2.2-17 のように、固定用シャーシに固定する。

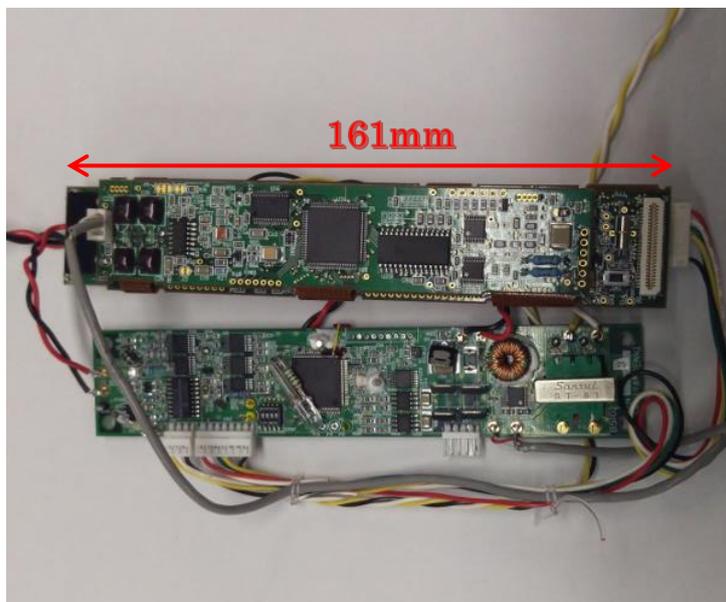


図 3.2.2-16 中継装置基板（上：制御基板、下：低消費受信基板）

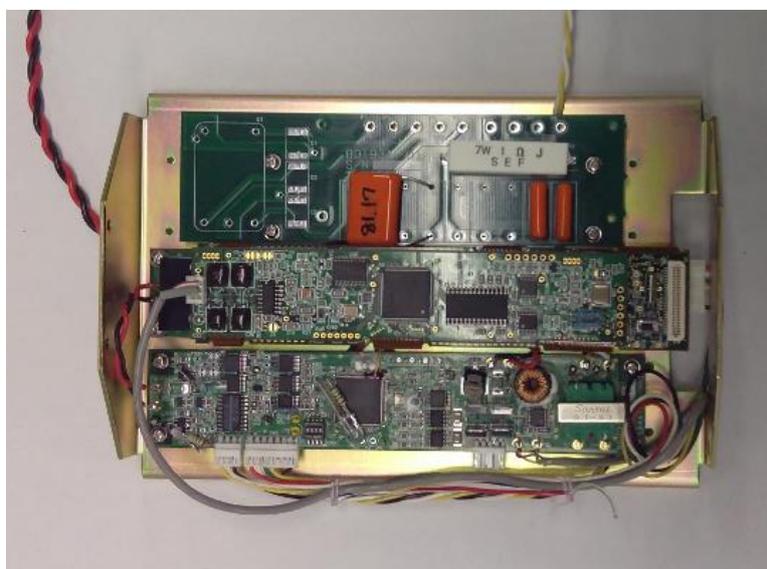


図 3.2.2-17 固定用シャーシと中継装置基板

次に、電池部の組み立て作業内容を以下に示す。図 3.2.2-18 は作成した電源であり、リチウム電池 3 本を 1 組としてテープで固定した。筐体蓋の最下段の電池部を固定した写真を図 3.2.2-19 に、同蓋に基板部を固定した写真を図 3.2.2-20 にそれぞれ示す。さらに、中段・上段の電池部を組み立てる (図 3.2.2-21)。

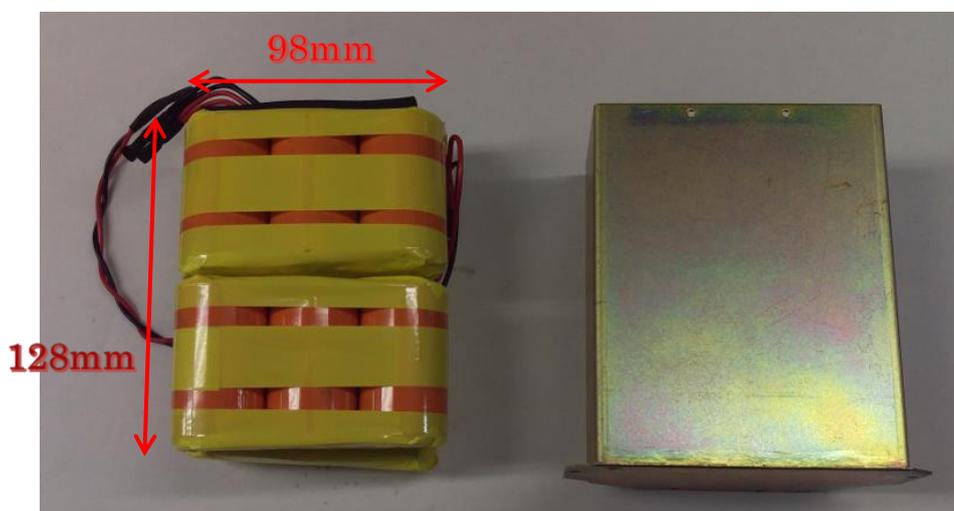


図 3.2.2-18 作成した電源 (リチウム電池 3 本×2 組)

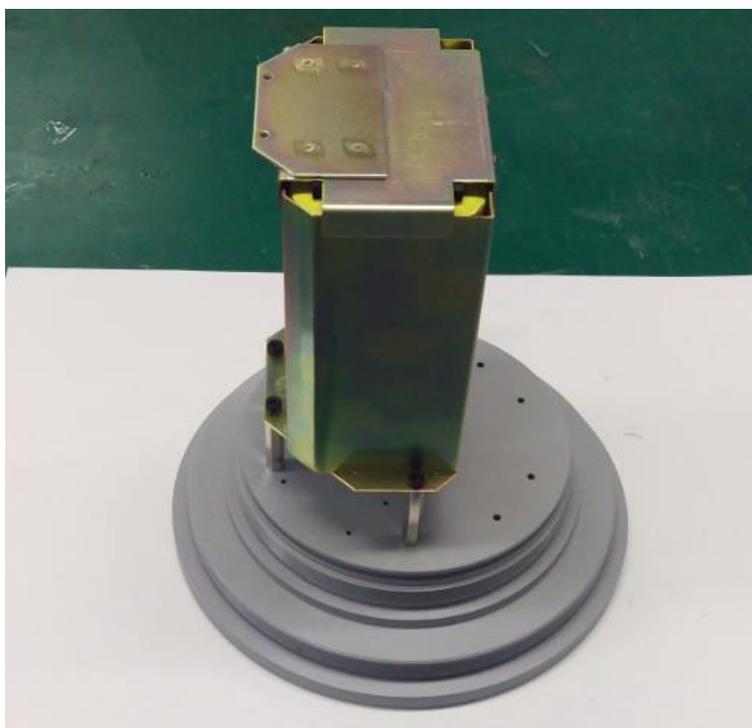


図 3.2.2-19 蓋に固定された最下段電池部 (リチウム電池 3 本×4 組)

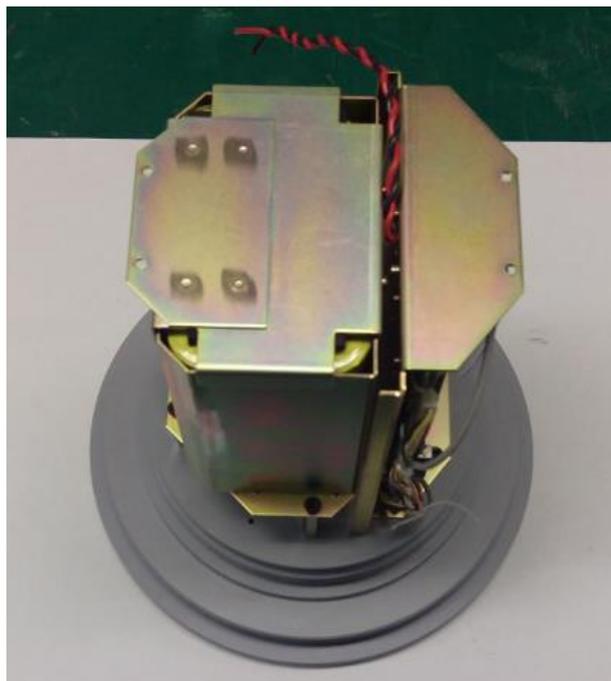


図 3.2.2-20 基板・最下段電池部の固定

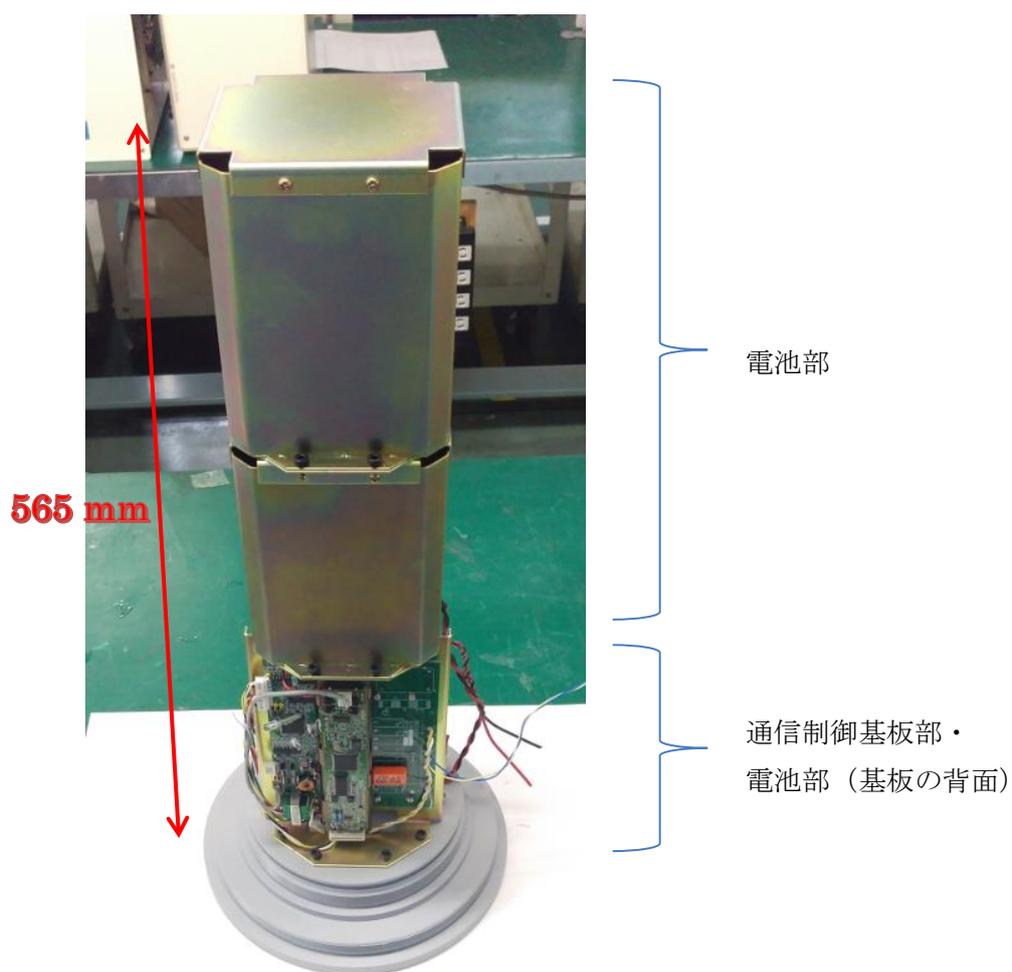


図 3.2.2-21 組み立てた電源部

内殻筐体及び外殻筐体の組み立て写真を図 3.2.2-22 に示す。この段階で内殻と外殻の間を樹脂で充填し、蓋をする。ただし一度充填すると電池等の交換が困難になるため、水密確認試験のみ内殻と外殻の隙間を樹脂固定することとした。

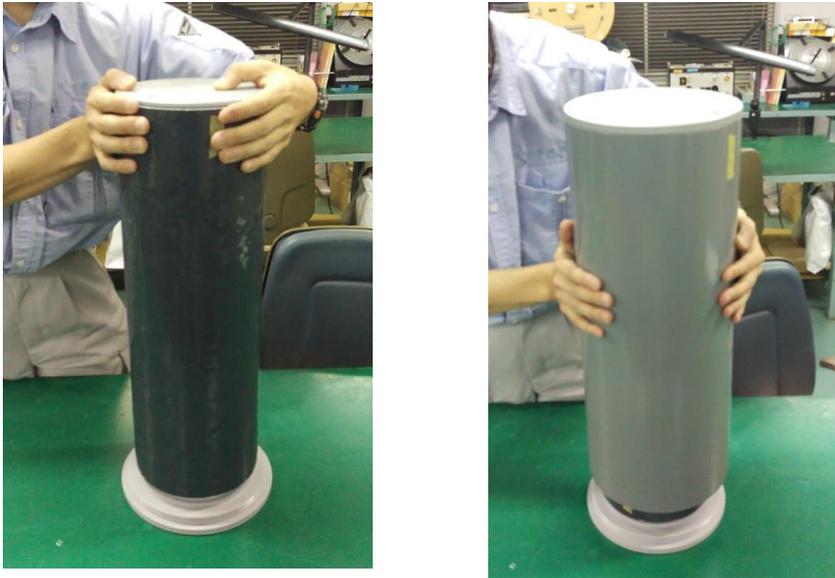


図 3.2.2-22 内殻筐体（左図）及び外殻筐体（右図）の組み立て

筐体に基板、電源等を内包できることを確認したため、以下の筐体に関する試験を実施した。

- ・水密試験
- ・加圧試験
- ・温度試験（高温：50℃）
- ・振動試験

### 1) 水密試験

筐体の水密性が確保できているか水密試験を行い確認した。最初に、樹脂で蓋を固定した筐体を水槽内に水没させ（図 3.2.2-23）、気泡等が発生しないことを確認した。



図 3.2.2-23 筐体の水没状況

### 2) 加圧試験

筐体に 5MPa の等方圧力を作用させ、筐体にひび割れ等が発生しないか確認した。試験は JIS B8266-2003 付属書 17（圧力容器の耐圧試験及び漏れ試験）に準拠して行った。試験条件および試験手順を以下に示す。また、試験状況を図 3.2.2-24 に示す。



図 3.2.2-24 加圧試験前（左図）と加圧試験中（右図）

## ○試験方法

### a) 加圧手順

- 1) 加圧流体（水）と加圧タンク、中継装置の筐体の温度がほぼ等しくなってから加圧する。
- 2) 空気を排除しながら加圧タンクを水で満たし、残存空気のないことを確認する。
- 3) 最大試験圧力（5MPa）の 50%（2.5MPa）まで徐々に加圧し、加圧タンクに異常がないことを確認する。
- 4) その後、10%（0.5MPa）ずつ徐々に加圧し、その都度、異常の有無を確認しながら最大試験圧力まで加圧する。

### b) 圧力の保持

最大試験圧力まで加圧した後、圧力が安定してから 60 分間保持する。

### c) 降圧および排水

耐圧試験終了後、圧力を 5 分程度かけて降圧し、圧力の放出および排水を行う。

### d) 試験後の確認事項

- 1) 耐圧試験終了後、筐体の外観を目視によって異常がないか確認する。
- 2) 筐体の蓋を開け、内部に水滴が入っていないかを水没検知シール等を確認する。

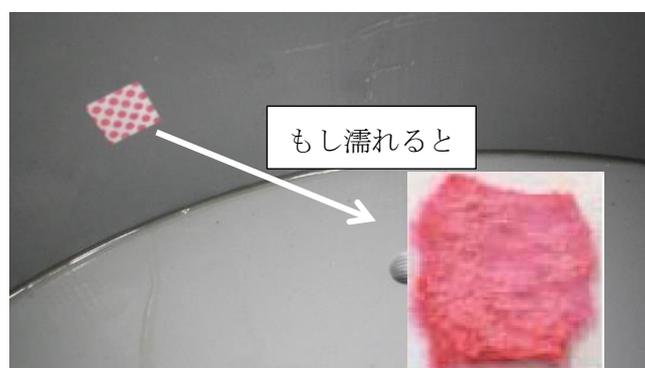


図 3.2.2-25 水没検知シール

試験完了後の確認結果を以下に示す。

筐体外観については、異常がないことを確認した（図 3.2.2-26）。

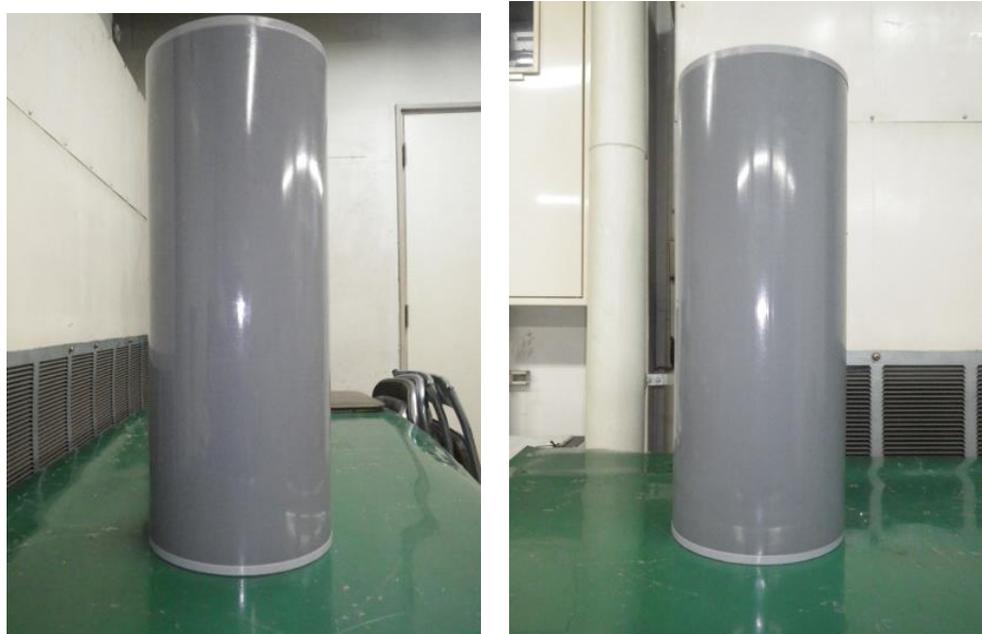


図 3.2.2-26 筐体外観（左：試験前、右：試験後）

また、その筐体を旋盤にて解体し、内部に水の侵入がないことを目視および水没検知シール（図 3.2.2-27）により確認した。以上の結果から、筐体の水密性を確認した上で、この方法で筐体を密閉することとした。

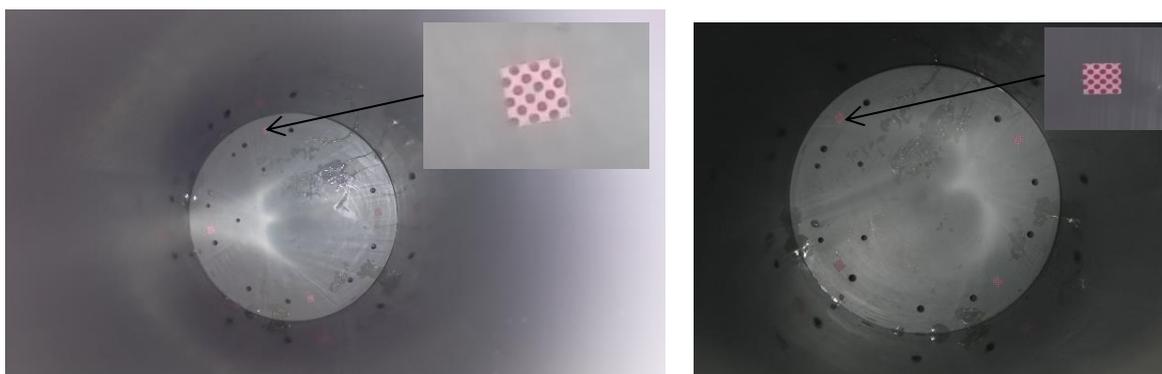


図 3.2.2-27 開封した筐体底部（左：試験前、右：試験後）  
（付着物のようにみえるのは、蓋部の接着剤）

最後に、解体した際に、内殻と外殻の間を充填していた樹脂についても、設計通り隙間なく充填されている様子を確認した（図 3.2.2-28、図 3.2.2-29）。

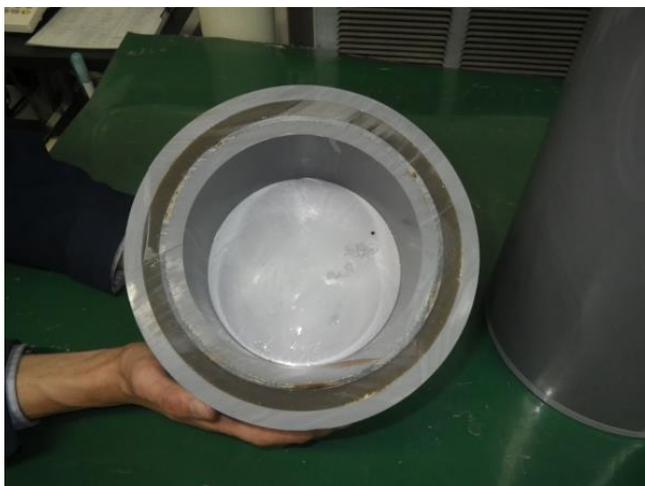


図 3.2.2-28 開封した筐体内部（蓋部）

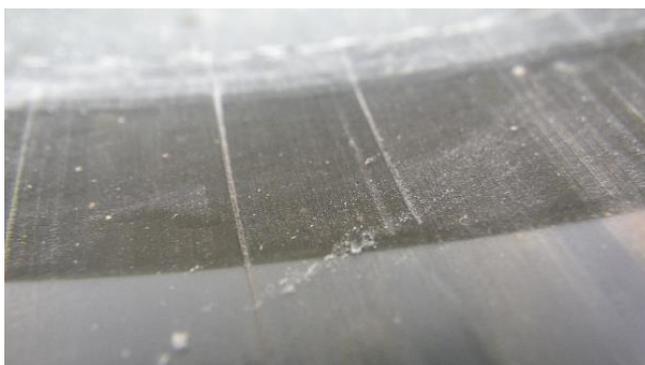


図 3.2.2-29 内殻と外殻の間の充填状況  
(隙間なくきれいに充填されている様子がわかる)

### 3) 温度試験

製作した中継装置（樹脂固定していない筐体内部にアンテナ・電源を内包したもの）の品質を確認するため、温度試験を実施した。

温度試験は、運搬時などの一時的に高温環境に置かれた状況に対して、中継器が正常に動作することを目的に実施した。温度試験は、恒温槽内部に中継装置を置き、表 3.2.2-7 及び図 3.2.2-30 に示す温度サイクル（0°Cから 50°Cに変化）で実施した。試験状況を図 3.2.2-31 に示す。試験後、小型送信器から信号を受信できること、及び受信器に信号を通信できることを確認する。

表 3.2.2-7 温度サイクル（変温パターン）

	設定温度	保持・遷移時間
No.1	25°C	5 h
No.2	25°C → 50°C	1 h
No.3	50°C	5 h
No.4	50°C → 0°C	1 h
No.5	0°C	5 h
No.6	0°C → 50°C	1 h
No.7	50°C	5 h
No.8	50°C → 0°C	1 h
No.9	0°C	5 h
No.10	0°C → 50°C	1 h
No.11	50°C	5 h
No.12	50°C → 25°C	1 h
No.13	25°C	5 h

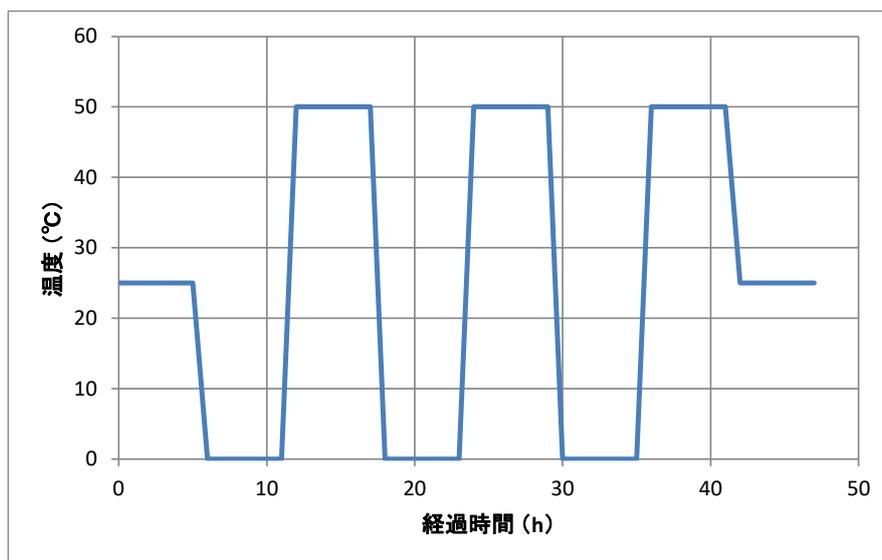


図 3.2.2-30 温度サイクル（変温パターン）



図 3.2.2-31 温度試験状況（恒温器内部の中継装置）

温度試験後の動作確認状況を図 3.2.2-32 に示す。通信距離 20m 程度で通信させたところ、400mVrms 超の受信強度があり、問題なく通信できることを確認した。



図 3.2.2-32 温度試験後の動作確認（数百 mVrms の受信信号を確認）

#### 4) 振動試験

振動試験では、中継装置を運搬・設置する際、機器に加わる振動によって故障が発生しないか、また電氣的に接続不安定な場所がないか確認する目的で実施した。振動試験は、JIS Z 0232（包装貨物振動試験方法）に準拠し方法に従い実施した。JIS Z 0232 は、包装貨物が輸送過程で受ける垂直振動に対する内容品又は包装の耐振性を評価する試験方法として規定されているものであり、今回は機器運搬時の耐振動性を確認する目的であったのでこの試験方法を採用した。以下に試験手順を示す。

- 1) 加振台に中継装置を固定する。
- 2) 包装貨物振動試験 JISZ0232A-1（対数掃引）を実施する。
  - ・ 中継装置は、軸方向に振動させる。  
振動加速度  $\pm 7.35\text{m/s}^2$   
振動範囲 5~50Hz
  - ・ 中継装置の上端面に加速度を付けて、試験中に中継装置の軸方向の加速度を計測。  
加振時間 20分
- 3) 加振終了後、温度試験と同様に、小型送信器と受信器を使った通信試験を行い、異常がないか確認する。

包装貨物振動試験状況を図 3.2.2-33 に、試験結果を図 3.2.2-34 に示す。図から、異常な振動等確認できず、機器外観にも問題は見当たらなかった。



図 3.2.2-33 包装貨物振動試験状況

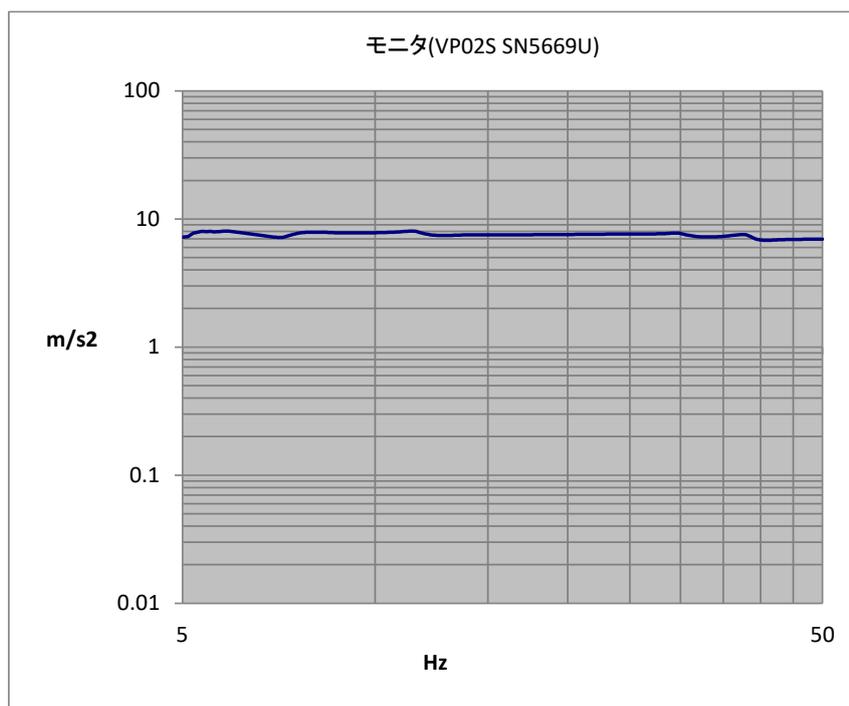


図 3.2.2-34 包装貨物振動試験結果

振動試験を実施した後、通信試験を行い、動作確認を実施した（図 3.2.2-35）。その結果、問題なく通信したことを確認した。以上から、運搬・設置等の振動に対しては問題ないことを確認した。



図 3.2.2-35 振動試験後の動作確認試験状況

### (6) 中継装置対応の受信器の改良

既存の受信器は、中継装置に未対応であるため、改良を行った。改良箇所は、従来の受信器に平成 27 年度に開発した中継動作対応のプログラム（中継装置へ通信信号を発信する機能）の追加と、低消費受信回路に対応した中継装置指令コード（下記）を通信できるように対応基板を追加した。なお、プログラム自体は、昨年度に開発済みである。

#### 追加した機能

- ・ 低消費受信回路への送信機能
  - ・ 中継装置指令コード
- 10bpsGOLAY コード送信機能
  - 中継経路情報
  - 同期通信
  - 健全通信
  - 再送要求
  - 中継種別（経路変更）要求
  - 異常復旧要求

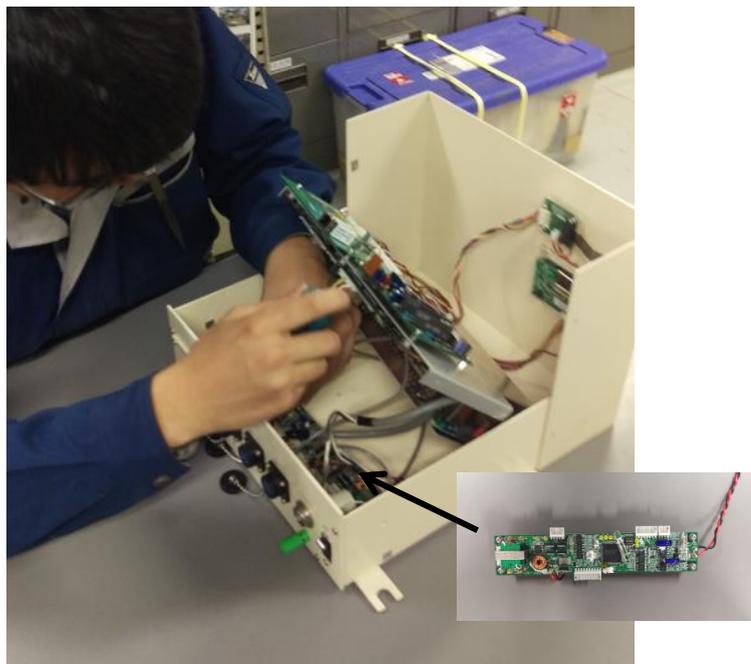


図 3.2.2-36 受信器改良状況

## (7) 動作検証試験

昨年度開発済みの基板も使用し、中継装置 3 台で動作検証のための試験を実施した。

### 1) 通信試験

試験項目は平成 27 年度と同様であるが、平成 27 年度は基板のみを使った試験に対して、平成 28 年度（本年度）は製作したアンテナ、電源、基板、筐体を含めて動作検証を行う。

#### ① 通信特性試験

製作した中継装置の通信特性を確認するために通信距離に対する受信強度（電圧）の関係を測定した。試験の模式図を図 3.2.2-37 に示す。中継装置と受信アンテナ間距離を 15、20、25m で試験を行った。

試験状況および試験結果をそれぞれ、図 3.2.2-38、図 3.2.2-39 に示す。試験結果から、通信距離 25 m 程度まで通信が可能であることを確認した。また、測定値のプロットは、理論解の直線上にあることを確認し、そのことから 100m まで通信が可能である。

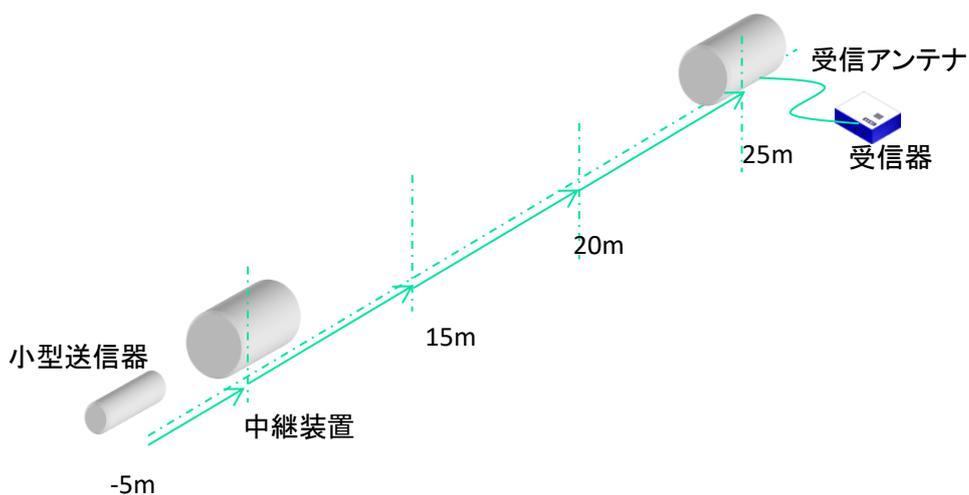


図 3.2.2-37 通信特性試験模式図

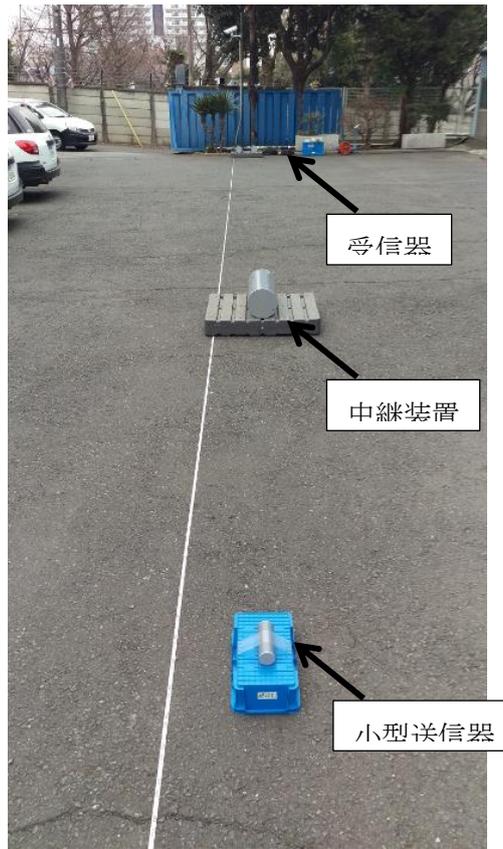
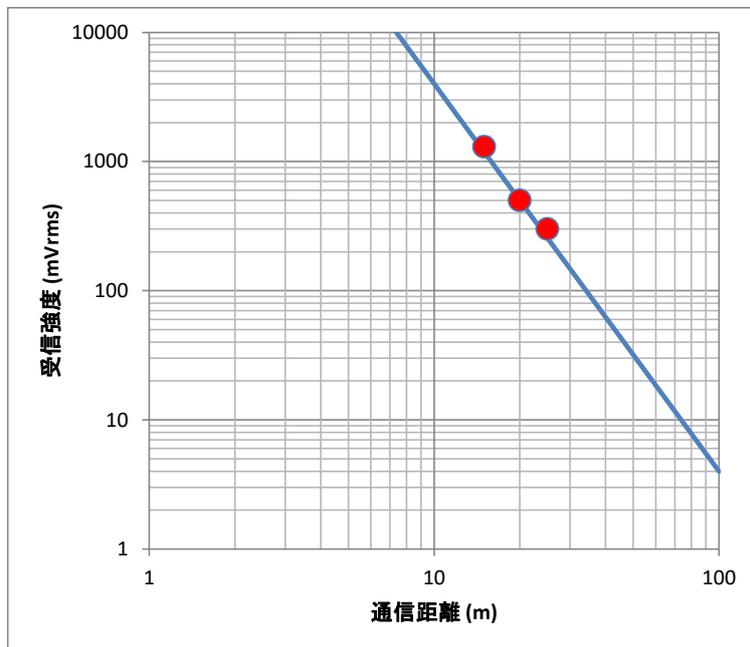


図 3.2.2-38 通信特性試験状況



赤丸 (●) は、試験結果  
直線は、理論式より求めた計算結果

図 3.2.2-39 通信特性試験結果

## ② 中継動作試験

中継装置を介して長距離の無線伝送を実施する場合、複数の送信器や中継装置から受取る事象（データ集約）と複数の中継装置にデータを送信する事象（データ分岐）の2種類がある。そこで、3台の中継装置を用いて、データ集約とデータ分岐の動作検証試験を実施した。

まず、データ集約の試験模式図を図 3.2.2-40 に示す。小型送信器から温度データをそれぞれ上位の中継装置へ通信させ、さらに上位の中継装置でデータを集約し、受信器まで通信する。そして、受信器で温度データを確認し、別々の中継装置からデータを受信しても、受信器まで問題なく通信できていることを確認する。なお、図中の時刻は、各装置の通信時刻を表している。

### 【データ集約試験手順】

定期通信① 小型送信器 1 → 中継装置 1 → 中継装置 3 → 受信器の通信  
小型送信器 2 → 中継装置 2 → 中継装置 3 → 受信器の通信

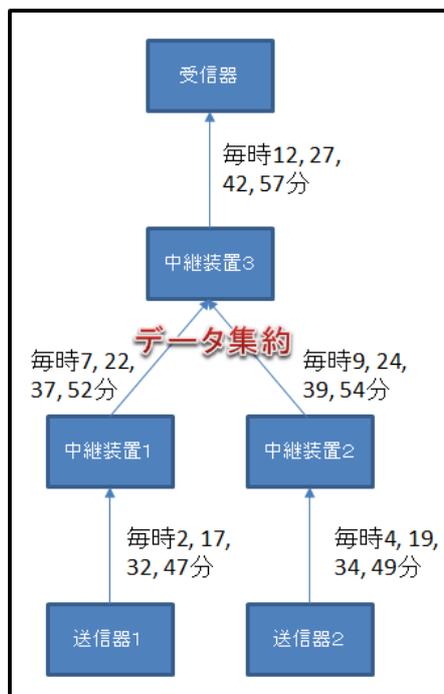


図 3.2.2-40 データ集約試験模式図

図 3.2.2-41 に試験状況を示す。受信器は、中継装置からの信号を受信するためのアンテナと中継装置へ送信するためのアンテナ、受信器本体、PC（パソコン）で構成される。また、試験箇所近傍にポータブルの電圧計を設置し、各装置の信号の電圧を測定しながら通信状況を確認した。

一例として、図中の右側に電圧計の拡大写真を示している。

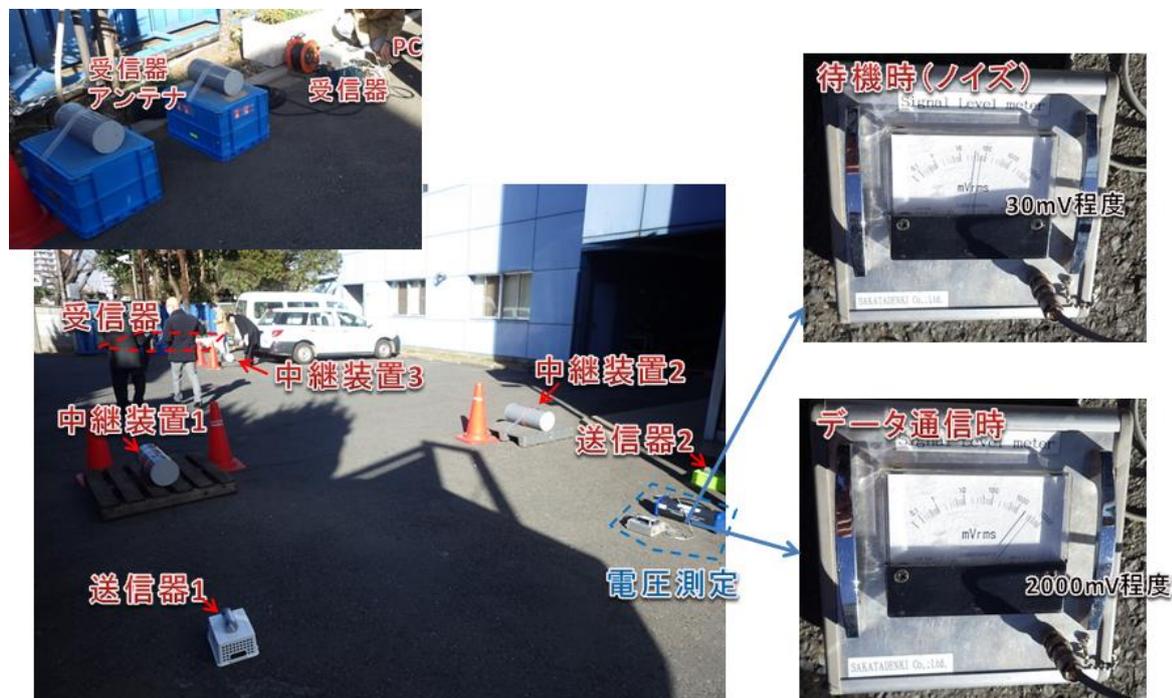


図 3.2.2-41 データ集約試験状況

試験結果を図 3.2.2-43 に示す。通信が行われていない待機時（ノイズレベル）は、 $30\text{mVrms}$  程度であるのに対し、通信時は  $2,000\text{mVrms}$  程度であった。また、全ての装置において所定の時刻で通信が行われたことを電圧計から確認した。受信器で回収した温度データを表 3.2.2-8 に示す。他の経路のデータを中継器が受信することを防ぐため、通信する装置以外が待機状態となるように通信時間を設定した。以上のことから、それぞれの送信器で測定された温度データが別々の経路を通して受信器まで通信できていることを確認した。

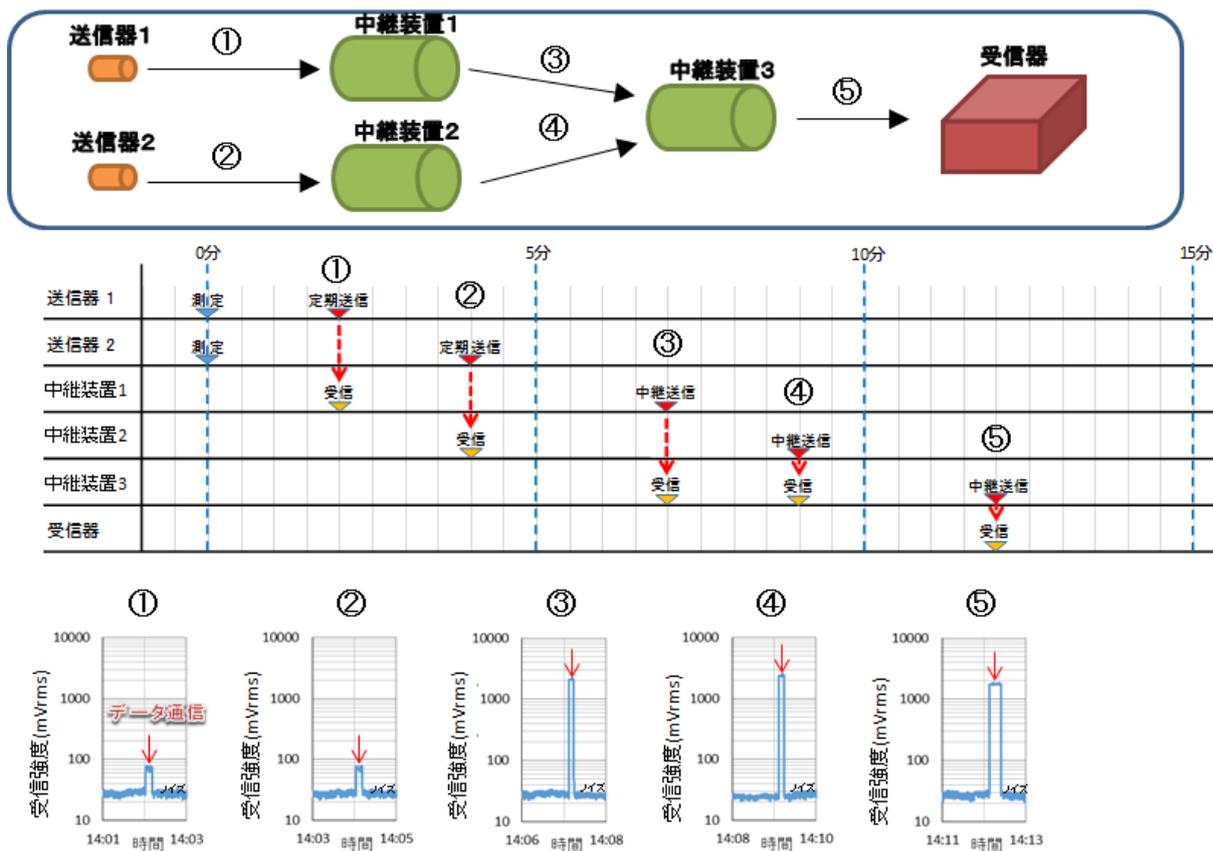


図 3.2.2-42 データ集約試験結果（受信強度）

表 3.2.2-8 データ集約試験結果（受信器での回収データ）

	送受信データ
送信器 1	8.81℃
送信器 2	9.68℃

次にデータ分岐試験の試験モード図を図 3.2.2-43 に示す。中継装置 3 から中継装置 2 に経路が切り替わっても、小型送信器からのデータが受信器まで通信できていることを確認する。

【データ分岐試験手順】

定期通信① 小型送信器 1, 2→中継装置 1→中継装置 2→受信器の通信

- 小型送信器 1, 2 は時刻をずらして通信（温度データ）する。同じように、中継装置 1 も時刻をずらして中継装置 2 及び中継装置 3 へ通信（小型送信器 1, 2 両方のデータ）する。
- 中継装置 2 から受信器への通信は行われるが、中継装置 3 から受信器の通信はしない。

故障想定・ルート変更 中継装置 2 の故障（人為的に電源を切る）

- 受信器で中継装置 2 からの信号を受信できないことを確認する。
- 受信器から中継装置 3 へ指令通信（ルート変更）を通信する。

定期通信② 小型送信器 1, 2→中継装置 1→中継装置 3→受信器の通信

- 受信器で、小型送信器 1, 2 の温度データを受信できていることを確認する。

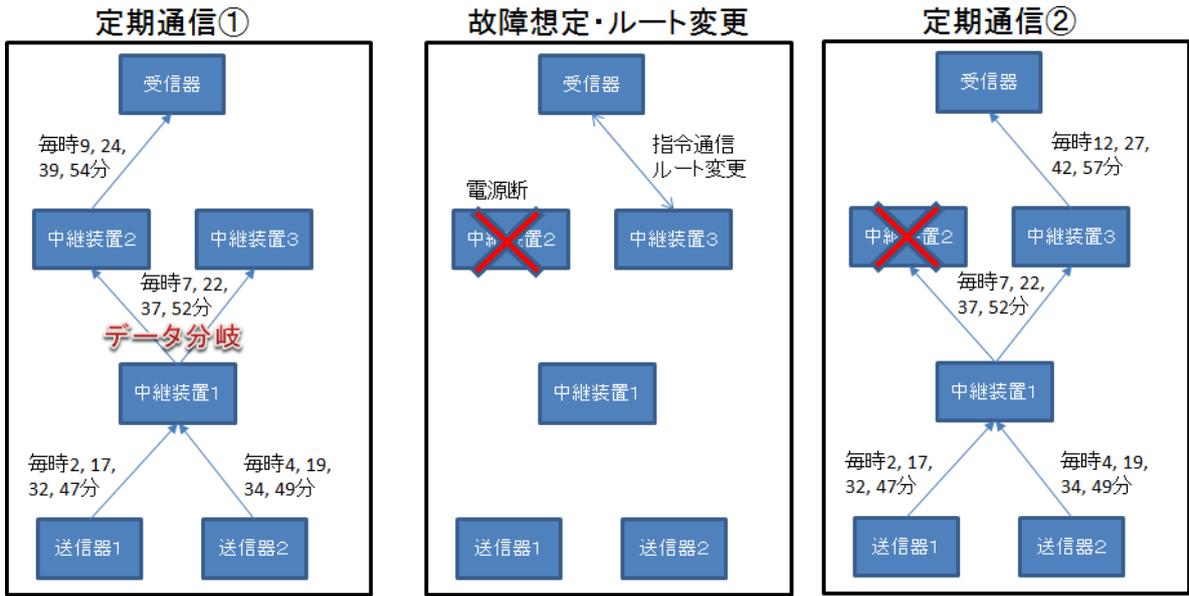


図 3.2.2-43 データ分岐試験模式図

データ分岐による試験状況を図 3.2.2-44 に示す。また小型送信器で送る温度データについては、室内を測定したデータ（小型送信器 1）と、屋外を測定したデータ（小型送信器 2）の異なる温度データを準備し、受信した温度データがどの送信機から送られたか確認しやすいようにした。



図 3.2.2-44 データ分岐試験状況

定期通信①の結果を図 3.2.2-45 と表 3.2.2-9 に示し、定期通信②の結果を図 3.2.2-46 と表 3.2.2-10 に示す。また図 3.2.2-47 は、受信器に送られた温度データを PC 画面上で表示させた結

果である。受信強度は、いずれの場合も待機時で 20~30mVrms、データ通信時で 2,000mVrms 程度であった。また、全ての装置において所定の時刻に通信が行われたことを確認した。受信器で回収した温度データを確認したところ、通信経路が変わってもデータ通信行われ、温度データの内容についても正常であることを確認した。

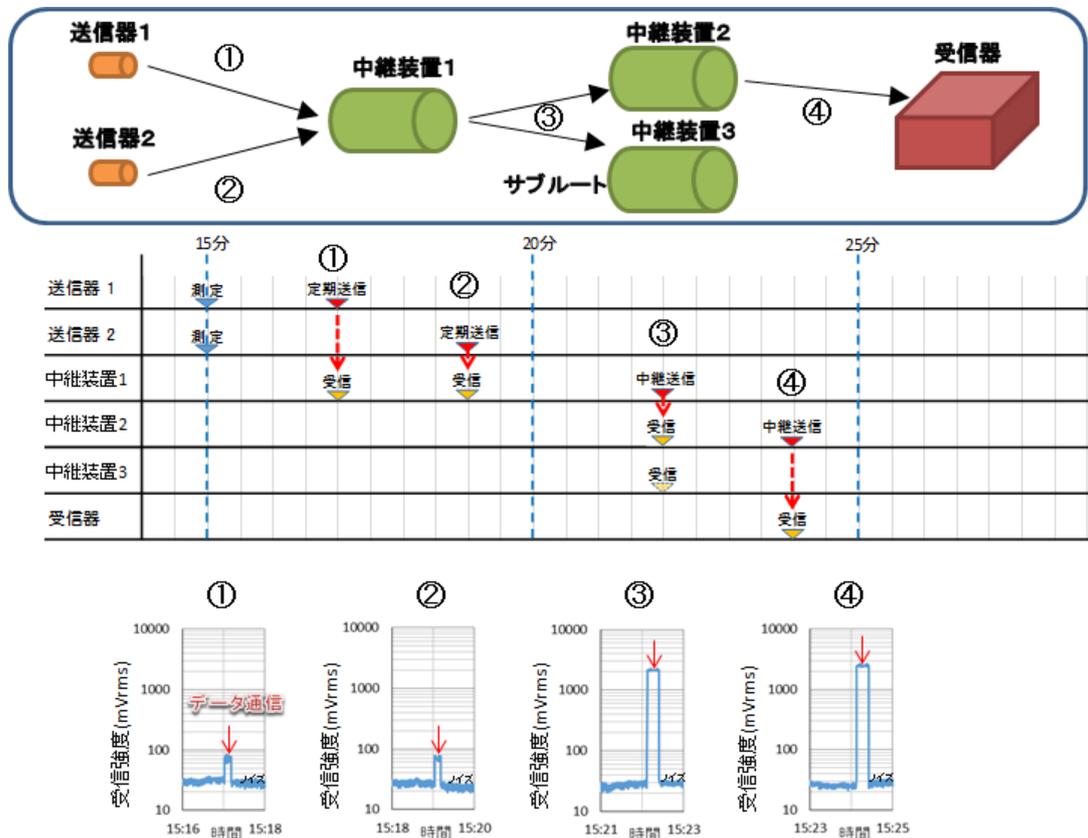


図 3.2.2-45 データ分岐試験結果 (データ通信①の受信強度)

表 3.2.2-9 データ分岐試験結果 (データ通信①の回収データ)

	送受信データ
送信器 1	18.75℃
送信器 2	10.75℃

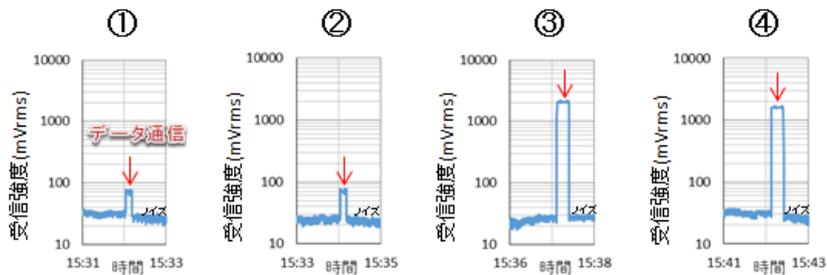
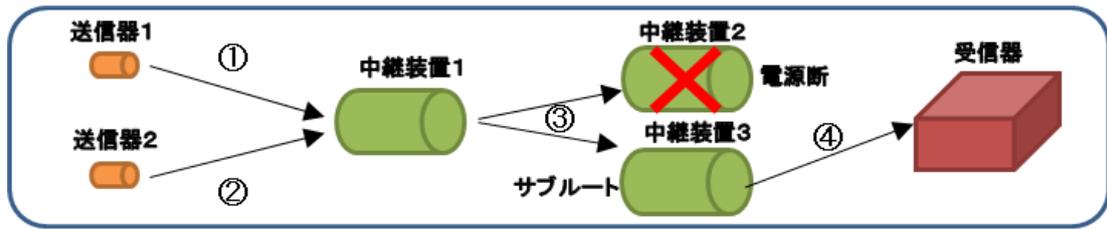


図 3.2.2-46 データ分岐試験結果（データ通信②の受信強度）

表 3.2.2-10 データ分岐試験結果（データ通信②の回収データ）

	送受信データ
送信器 1	22.56°C
送信器 2	9.18°C

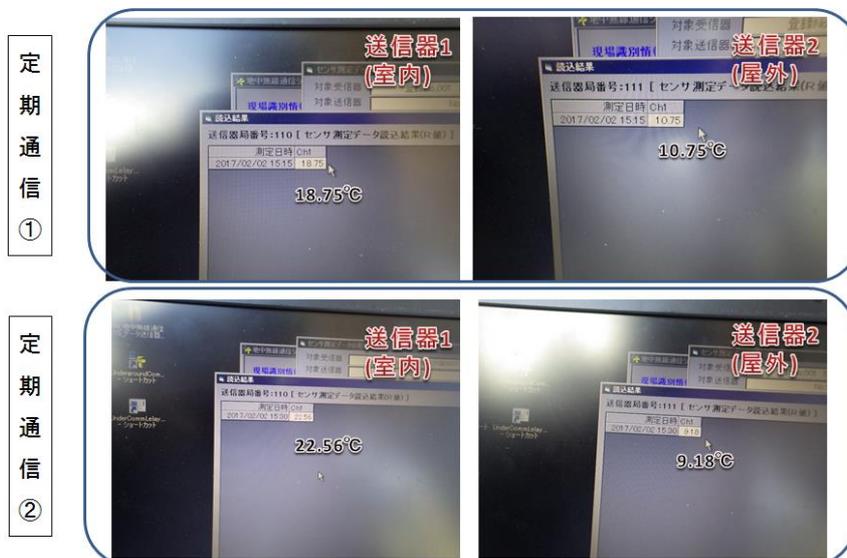


図 3.2.2-47 データ分岐試験結果（PC 画面上の温度データ）

## 2) ランニング試験

継続的にシステムを稼働させた際に動作に不具合がないかを確認することを目的とし、ランニング試験を実施した（図 3.2.2-48）。試験は、2 週間程度で、中継装置 2 台を使った 1 列 2 段の試験（図 3.2.2-49）である。小型送信器は 1 時間毎に測定と定期送信を繰り返すように設定した。中継装置も同様に、小型送信器から送られてきたデータを 1 時間毎に次段の中継装置もしくは受信器に通信する。

試験結果を図 3.2.2-50 に示す。図中のプロットは、中継装置 2 から受信器へ通信が正常に行われたことを示しており、データの内容にも問題がないことから、2 週間という限定したランニング試験ではあるが、継続的かつ正常にデータ通信が行われたことを確認した。

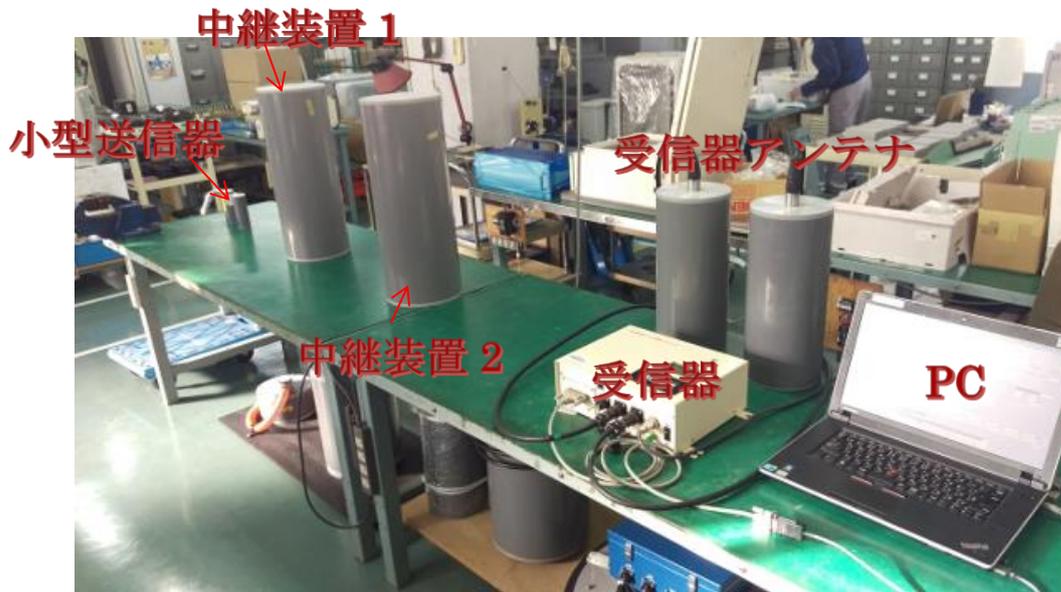


図 3.2.2-48 ランニング試験状況



図 3.2.2-49 ランニング試験模式図

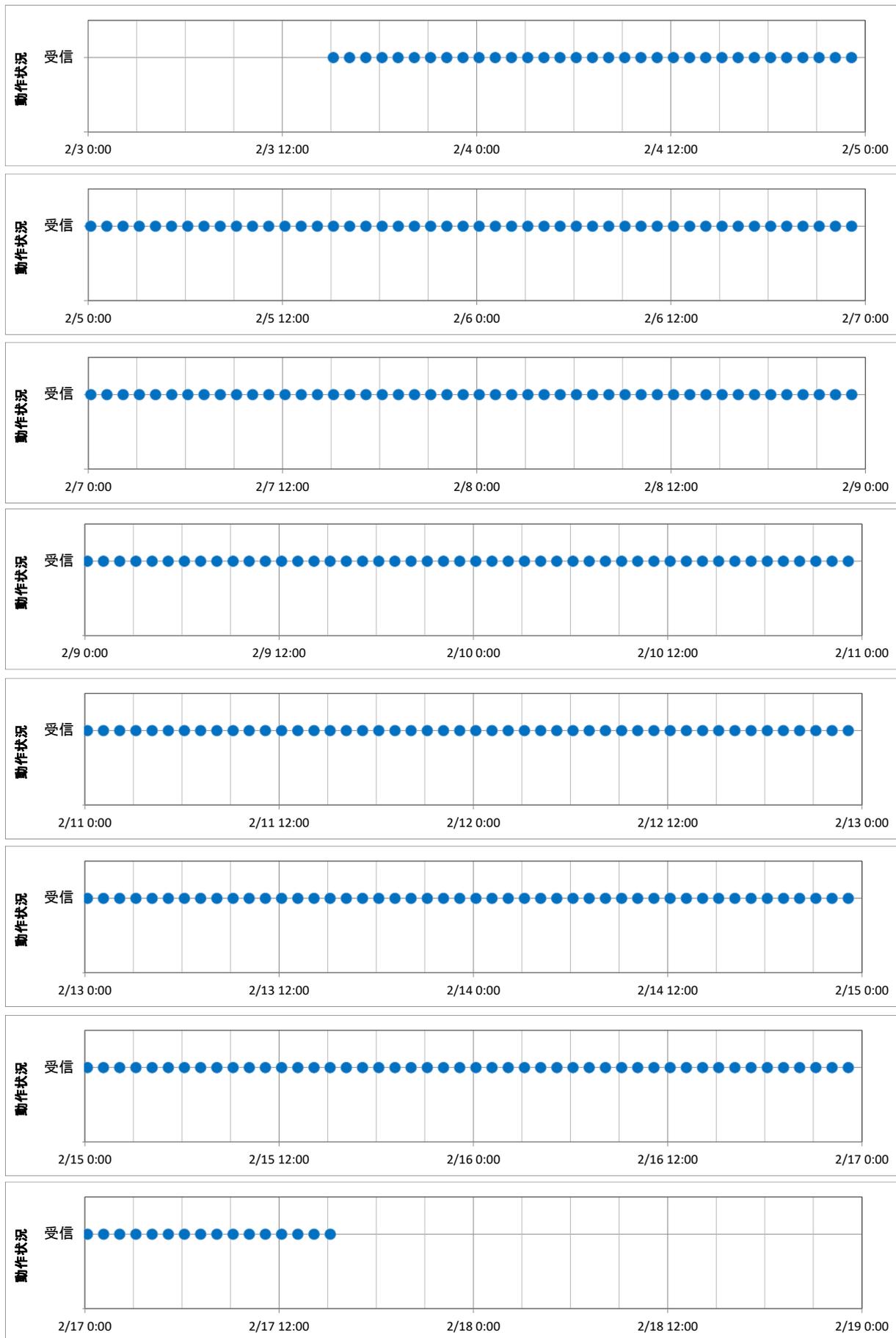


図 3.2.2-50 ランニング試験結果

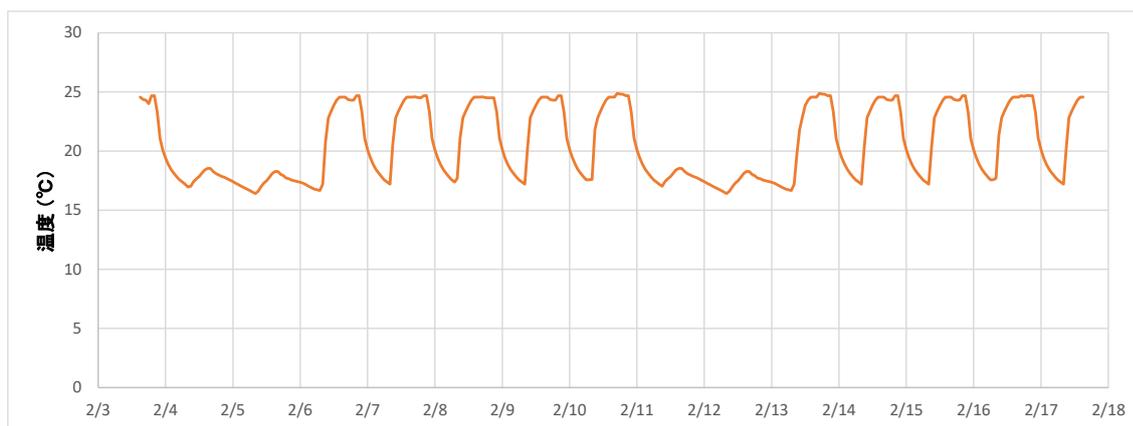


図 3.2.2-51 ランニング試験で受信した温度データ

#### (8) 試験結果のまとめ

中継装置の設計フロー図に従い、筐体を設計し中継装置を製作した。製作した中継装置は、小型送信器 10 台分のデータを 100m 先に 10 年間継続して送信可能な内臓電池を備え、深度 500m の静水圧(5MPa 程度)に耐えられる設計である。また、この中継装置に対して温度試験と振動試験を実施した後、動作検証・2 週間のランニング試験を行って継続的なデータ通信できることを確認した。さらに、中継器による多段化の検討・試験を実施し、中継器の故障等におけるシステムの冗長性を検証した。

平成 28 年度に実施したランニング試験は 2 週間であるが、今後、より長期にわたる試験の実施が必要と考える。また、オーバーパックによる磁界への影響を想定したデータ通信試験の実施についても検討する必要がある。

### 3.2.3 地中無線伝送技術に関する開発状況の調査

地層処分に関する地中無線通信技術の開発状況は、国内に関しては本開発以外に見つからず、国外に関しては MoDeRn プロジェクトにおいて成果がまとめられている。そこで、平成 28 年度は主に MoDeRn プロジェクトで共有されている情報の整理を行うとともに、公開情報として確認した鉱山等の他分野での活用事例を整理した。

#### (1) 地層処分分野での開発状況

MoDeRn (2014) 等[2][3]によると、地層処分に関する地中無線開発に関しては、大きく高周波無線データ通信と低周波無線データ通信に分けられる。高周波無線データ通信では、超短波 (VHF: 周波数 30MHz~300MHz) と極超短波 (UHF: 周波数 300MHz~3GHz) での利用が検討されてきた。これらの周波数帯は、低周波の通信と比べてデータ速度能力が高いので、通信時間の短縮、消費電力量の減少というメリットがある。一方で、デメリットとしては高周波の電磁波は岩盤内で減衰しやすいため通信距離が短くなる。

##### 1) 高周波無線データ通信

###### (a) MoDeRn (2013a) [4]

様々な媒体の各周波数に対する通信距離について調査している。室内試験では、周波数 868MHz と 433MHz の試験が行われ、通信距離はベントナイトで 50cm、塩水で 25cm、珪質粘土岩で 40cm であった。さらに高周波の 2.4GHz の場合は、通信距離はもう少し短くなる。原位置試験 (スペインのエル・カブリル低レベル放射性廃棄物処分施設とフランスのトゥルヌミール URL) では、周波数 169MHz での試験が行われ、通信距離は粘性岩盤で約 3.5m、飽和したベントナイトでは 5m 以上であった。

###### (b) MoDeRn (2013b) [5]

実環境下での高周波無線データ通信の実証試験結果が報告されている。試験場所はスイスのグリムゼル試験サイトで、図 3.2.3-1 に示す高周波無線通信システムが使用された。システムは、無線ノード (送信装置)、受信器、制御器で構成され、この内、無線ノードは直径 75mm、高さ 190mm で、内部に間隙水圧、全圧、相対湿度・温度を計測するためのセンサーが組み込まれている (図 3.2.3-2)。なお周波数について MoDeRn (2013a) [4] の試験結果を踏まえて設定された。設置場所は、図 3.2.3-3 に示すように、ベントナイト緩衝材に 2 台、ショットクリート・プラグ (厚さ 4m) に 2 台、周辺岩盤に 1 台であった (図中の▲)。試験の結果、全無線ノードにおいて継続的にデータ取得でき、無線通信の有効性が確認された。



図 3.2.3-1 高周波無線通信システム（左：無線ノードと受信器、右：制御器）[5]

※図左で無線ノードは6台あるが、実際に設置されたのは5台

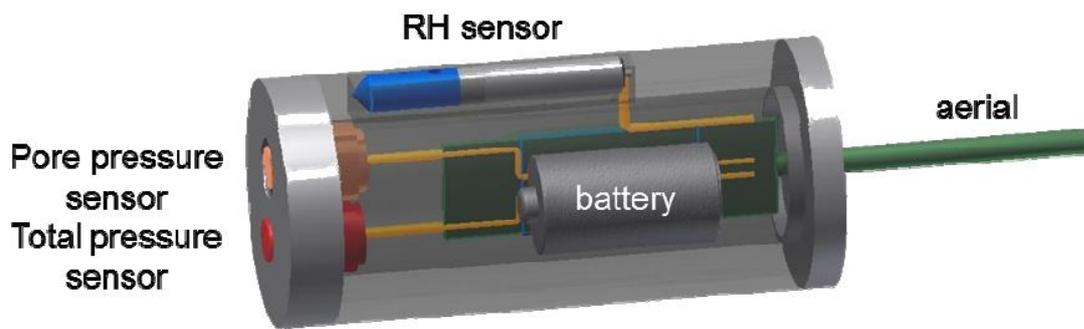


図 3.2.3-2 無線ノード模式図[5]

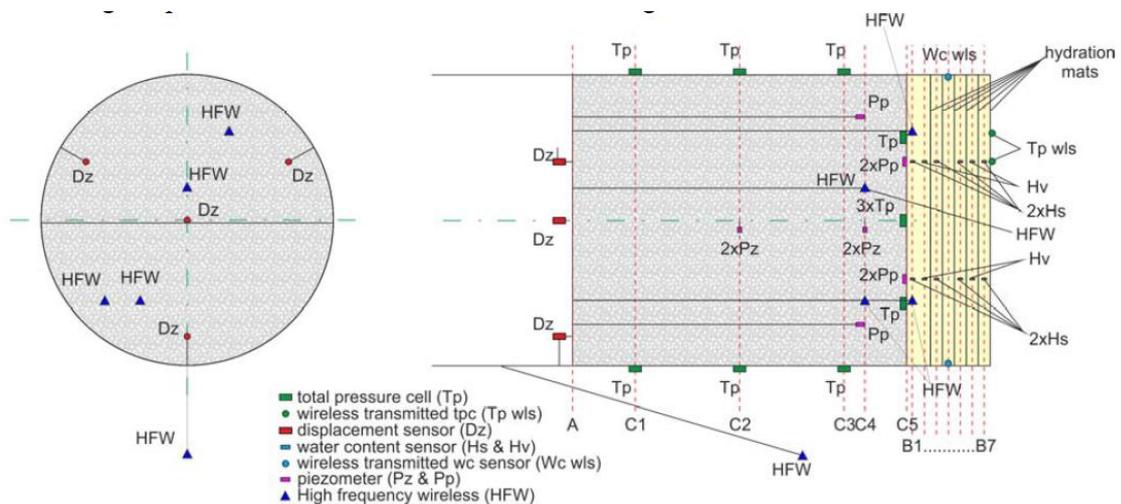


図 3.2.3-3 グリムゼル試験サイトでの試験レイアウト[5]

## 2) 低周波無線データ通信

高周波と比べて岩盤内での減衰が小さいため、通信距離は数百 m まで適用できると考えられている[2]。低周波無線データ通信システムの実証試験については、MoDeRn (2013c) [6]で報告されている。試験場所は、ベルギーの HADES URL (古第三紀の軟質泥岩：ブームクレイ) で、地下坑道から地上への通信試験が実施された。送信用アンテナは半径 1.7m~1.8m (図 3.2.3-4) で、約 225m の通信に成功したと報告されている。また複数の周波数においてデータ通信に成功しており、この内、最適な周波数は 1.4kHz~1.7kHz であったと報告されている。



図 3.2.3-4 HADES URL での送信アンテナ (ECN-1) [6]

## (2) 地層処分以外での開発状況

地層処分以外では、鉱山用通信・救助 (閉じ込められた鉱山労働者の位置を検出)、洞窟探査／通信 (洞窟用無線)、及び軍用通信として開発が進められている[7]。これらの分野で使用される周波数は、主に 100Hz~数十 kHz の低周波である。

### 1) 鉱山用通信

1930 年代の初期実験で、既に地中無線通信は原理的に可能であるといわれていたが、当時は要件を満たすハードウェアの開発が遅れており、70 年代になってシステムの開発が進められた。まず開発されたのが、鉱山労働者が持ち運びできる携帯型のもので、閉じ込められた鉱山労働者の居場所を割り出すために利用された[8]。アンテナ用コイルはバック等に収納されており、鉱山内で閉じ込められた際に、バックから取り出し送信アンテナとして地上へ信号を送る。送信アンテナの直径は約 8.7m で、周波数は 1kHz~3kHz である。いくつかの鉱山で実証試験が行われ、地下坑道から地表まで 180m 程度の通信に成功したと報告されている。また Mine Site Technologies 社は、鉱山労働者にメッセージを送信するための PED (Personal Emergency Device) と呼ばれるシステムを開発している[7]。このシステムでは、直径 150-3000m (現場の状況に依る) の大型のループ・アンテナを適用しており、約 1.2kW の電力供給が必要である。

## 2) ダム現場

ワイヤレス間隙水圧計が開発され[10]、現場へ適用されている[11]～[14]。ワイヤレス間隙水圧計は、筐体、基板、電池、アンテナコイル、間隙水圧計で構成される(図 3.2.3-5)。直径は 125mm、高さは 205mm の円筒形で、通信周波数は 8.5kHz、土中の通信距離は 70m 程度(空中では 100m)である。計測期間は、計測・通信頻度により異なるが、10 年以上としている。斜面への適用事例については、樋口ら(2009)[15]が斜面崩壊検知センサを開発し、現場へ適用している。センサは、斜面の表層に埋設され、崩壊が発生すると無線で信号が送られる仕組みである。センサの寸法は直径 114mm、高さ 205mm で、地中無線の周波数は 8.5kHz、土中での最大通信距離は最大 30m 程度である。

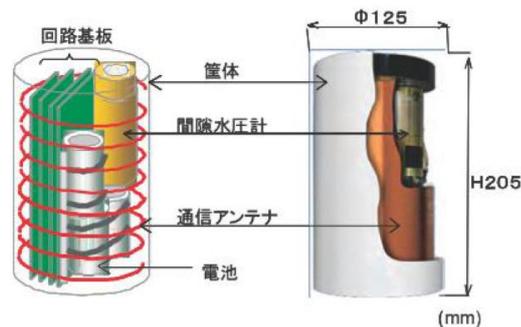


図 3.2.3-5 ワイヤレス間隙水圧計[13]

## 3) 埋め立て工事

須賀原ら(2006)[16]や樋口・遠目塚(2010)[17]で紹介されている。例えば埋め立て工事の現場では、海底に設置した地中無線送信器(沈下計や傾斜計が接続されたもの)から送信される沈下や変位等のデータを海上あるいは埋め立て後は地上の受信器で受信し、施工中から維持管理までのモニタリング用として地中無線システムを利用している。河川の現場では、堤防の維持管理を目的として、侵食計や水位計が接続された地中無線送信器が堤防内へ埋設されている。また土砂の移動実態調査用のトレーサに地中無線通信技術が適用された事例もある。礫に小型の地中無線送信器を埋め込んでおくことで、洪水等で移動した礫を追跡することができ、特に礫が水中や堆積土砂に埋没しても追跡可能である。またコンクリート構造物への適用事例としては、シールドトンネルのセグメント内に地中無線送信器が導入された事例も紹介されている。

## 4) 軍用通信

潜水艦との長距離通信のために 20～200Hz の周波数を用いている[7]。アンテナ長さは 60-150km(一部、地中に埋められている)で、消費電力は 100kW 以上である。短距離通信用としては、Ultra Electronics 社が開発した「Rock Phone」[9]と呼ばれる装置がある。Rock Phone は、直径 3.8m のループ・アンテナが使用され、5kHz 前後の周波数で動作する。双方向の音声・データ通信が可能で、データ伝送速度は最大 2,412 bits/sec である。洞窟、トンネル、及び大型建屋構造物で使用でき、最大通信距離は 200m である。

## 5) その他

富岡町の夜の森公園の除染土壌等の一時保管場所において、発酵による内部温度変化の状況を把握するため除染土壌内に小型地中無線が適用された実績がある（図 3.2.3-6）[18]。

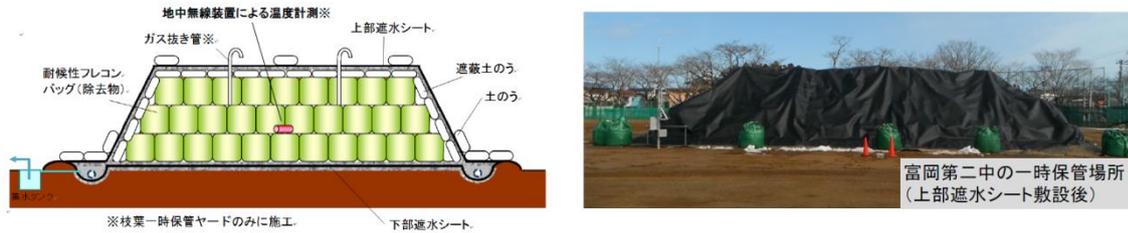


図 3.2.3-6 除染土壌等の現場保管への適用事例[18]

### (3) 調査結果のまとめ

地中無線伝送技術に関する国内外での開発状況について、予備的調査を実施した。今回の調査では、国内での地層処分における無線伝送技術の適用事例が見つからなかった。一方、国外に関しては MoDeRn プロジェクトにおいて成果がまとめられていたため、本プロジェクトで公開されている情報について整理した。そこで、国内の事例については、鉱山やトンネル等の他分野での適用事例について調査し、概要を整理した。今後は、他分野も含めた無線伝送技術の適用事例について詳細な調査を行い、地層処分への適用について取りまとめを行う。

### 3.2.4 試験坑道で実施中の適用試験の整理、確認

平成 26 年度から、日本原子力研究開発機構との共同研究により、幌延深地層研究センターおよび瑞浪超深地層研究所の試験坑道にて地下環境下での無線伝送試験を実施している。以下、それぞれの試験における無線伝送システムの動作状況について整理する。

#### (1) 幌延深地層研究センター

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、平成 26 年度、地中無線モニタリング装置 7 台を、緩衝材ブロック (Section-11、間隙水圧計 2 台：002 局・004 局、土圧計 1 台：003 局) と埋戻し材ブロック (間隙水圧計 2 台：005 局・008 局、土圧計 2 台：006 局・007 局) にそれぞれ設置した。

平成 29 年 2 月末時点までの約 27 ヶ月間の各センサの計測値の経時変化を図 3.2.4-1～図 3.2.4-7 に示す。全てのセンサにおいて継続的にデータ伝送が行われていること、無線伝送によりデータの破損がないこと、各センサにおいて所定の頻度 (2 回/日) で計測が行われていることを確認した。

一方で平成 26 年度、平成 27 年度の報告書に記載した通り、本システムでは、毎週の定期通信で過去 4 週分のデータを重複して通信しており、通信障害によるデータ欠損が生じた場合でも、4 週以内に受信ができれば欠損データは自動的に補完される。これまでの無線伝送では、4 週間連続してデータ送信が送れなかったことはなく、十分な機能を有している。

なお、図 3.2.4-1、図 3.2.4-3 には緩衝材ブロック Section-9 の間隙水圧計 (PP015) を、図 3.2.4-2 には緩衝材ブロック Section-9 の土圧計 (TP012) を、図 3.2.4-5、図 3.2.4-6 には埋め戻し材ブロック E 断面の土圧計 (TPB019) を有線センサでの計測例として示した。計測データの経時変化に関しては、有線センサのデータと概ね一致している。

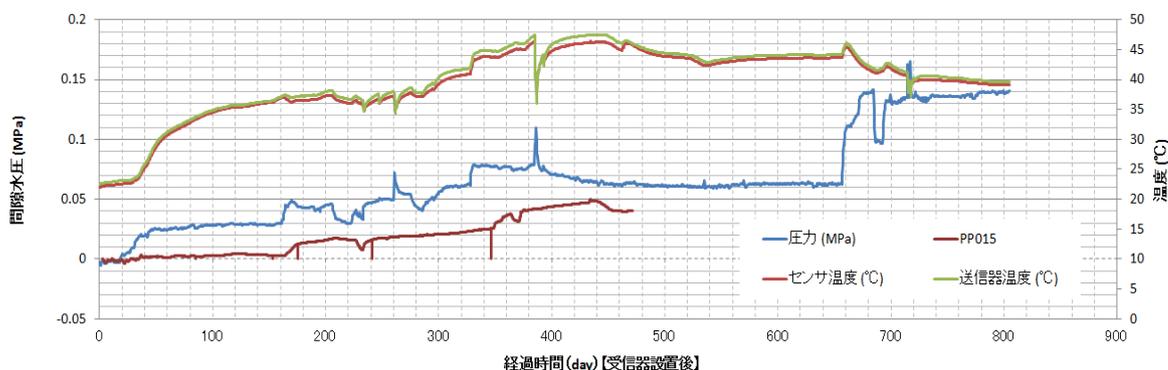


図 3.2.4-1 測定データ (002 局) 【幌延 URL】

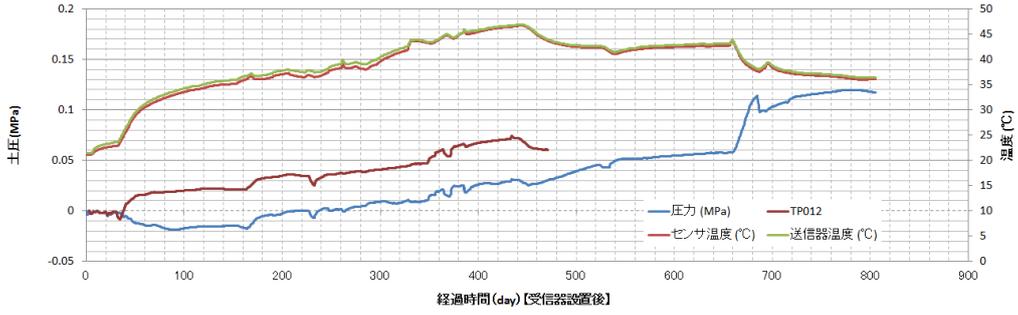


図 3.2.4-2 測定データ (003局) 【幌延 URL】

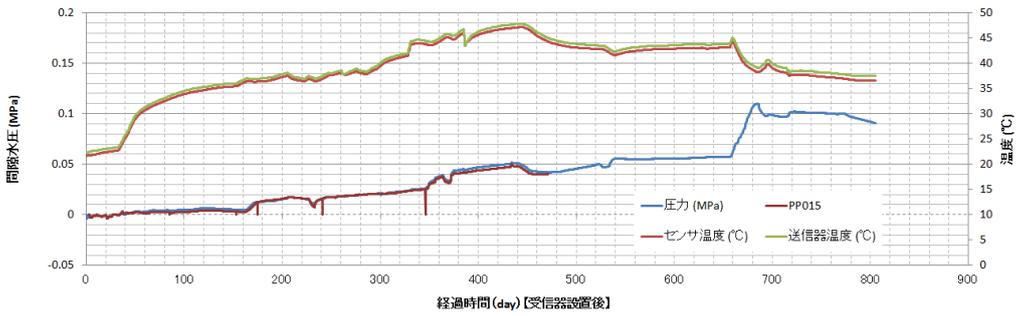


図 3.2.4-3 測定データ (004局) 【幌延 URL】

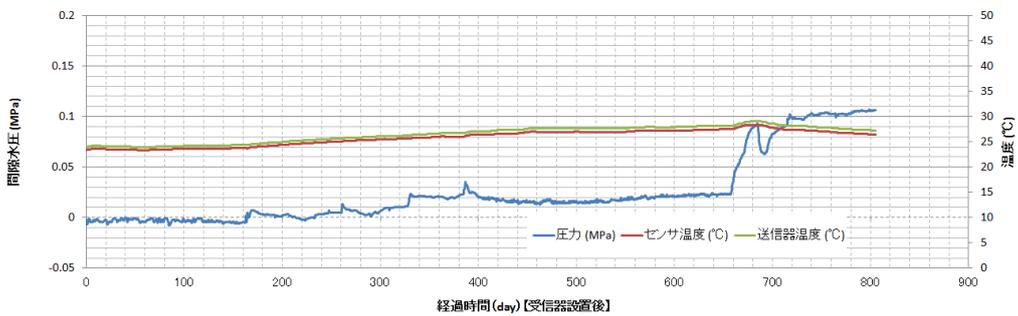


図 3.2.4-4 測定データ (005局) 【幌延 URL】

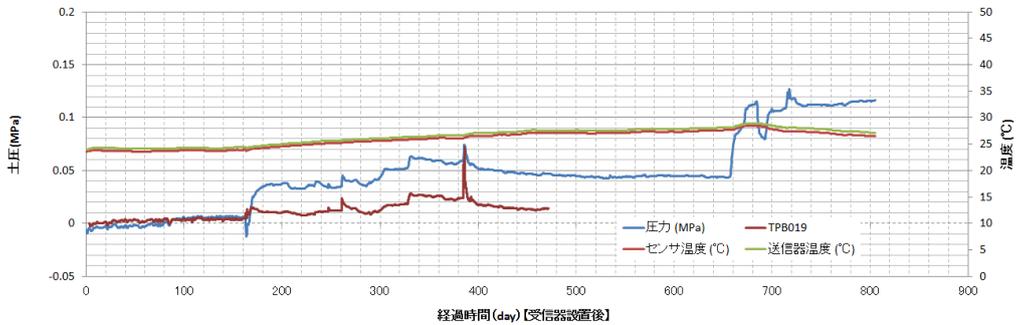


図 3.2.4-5 測定データ (006局) 【幌延 URL】

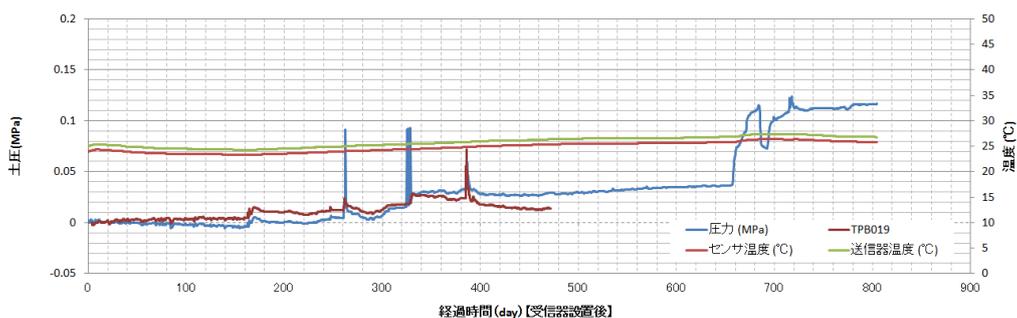


図 3.2.4-6 測定データ (007局) 【幌延 URL】

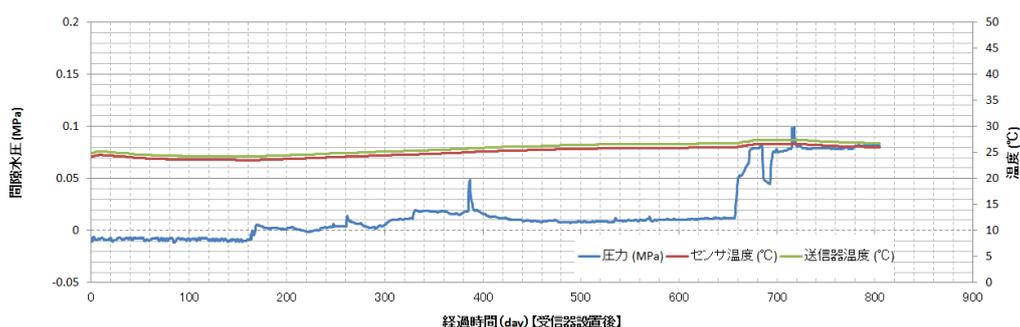


図 3.2.4-7 測定データ (008局) 【幌延 URL】

## (2) 瑞浪超深地層研究所

瑞浪超深地層研究所の地下 500m にある研究アクセス北坑道で実施している再冠水試験において、地中無線を利用したモニタリング（水圧センサ 2 台での計測）を実施している。

平成 29 年 3 月 13 日までの 8 ヶ月間の計測データを図 3.2.4-8 に示す。継続的にデータの取得ができており、地中無線によるデータ通信が正常に行われていることを確認した。しかしながら、図 3.2.4-8 に示すように、データ取得のできていない期間があることを確認した。

原因調査のためシステムのバックアップデータを調べたところ、送受信装置それぞれの内部時計のずれによる動作異常ではないこと、データの送信が行われていることから、受信器及びパソコンの再起動を実施し、データが正常に取得されていることを確認した。

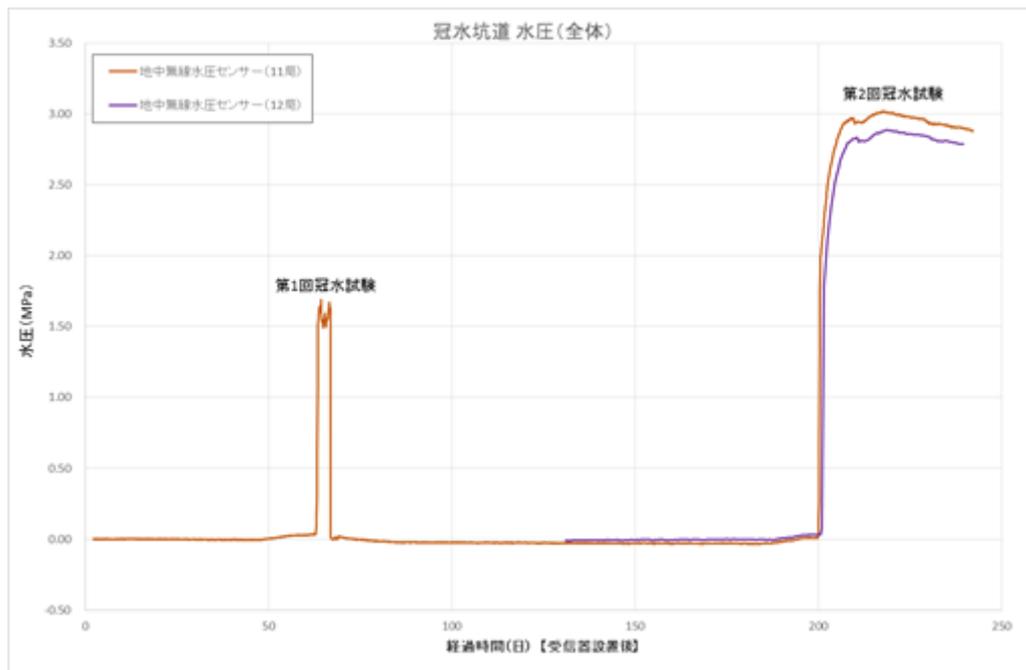


図 3.2.4-8 測定データ（瑞浪超深地層研究所）

### (3) 試験のまとめ

幌延深地層研究センターおよび瑞浪超深地層研究所の地下調査坑道にて実施している地中無線伝送試験に関して、動作状況、測定データを整理した。測定データを引き続き取得し、有線センサーのデータと比較、検討を行い、取りまとめを行う。また、幌延深地層研究センター及び瑞浪超深地層研究所での無線伝送試験で得られた知見を整理し、対応マニュアルを整備する必要がある。

### 3.3 無線給電技術の開発

#### 3.3.1 概要

##### (1) 実施内容

無線給電技術の開発として実施した内容を以下に示す。

##### 1) 無線給電システム設計手法の検討

平成 27 年度は、製作した送受電コイルに微弱な電流を流すことによって、結合係数 ( $k$ ) とコイルの性能値 ( $Q$  値) の 2 つのパラメータを測定し、給電効率を算出した。平成 28 年度 (本年度) は、複数の計測装置に必要な供給電力 (10W 程度) を想定し、給電効率の測定試験を行った。更に、これまでの成果を踏まえ、給電効率の比較評価およびシステム設計手法の検討を行った。

また、無線給電技術の課題として、施工時のズレや施工後の移動により送受電コイルの給電効率の低下が挙げられる。そこで、変位・偏角の影響に関する計測試験をケーススタディとして行い、変位・偏角における給電効率への影響について評価、検討を行った。

##### 2) プラグを介した無線給電技術の適用性の検討

プラグを介した無線給電について、送受電コイルのサイズや送受電コイル間隔、プラグの寸法・構成等の条件を整理し、電磁界シミュレータと電力伝送試験の双方の取組から無線給電の特性等を把握し、その結果を利用してプラグを介した無線給電の適用性について検討を行った。

##### 3) 処分孔を対象とした無線給電技術の調査

処分孔におけるモニタリングについては、計測の目的や位置等によって複数の計測装置を設置することが考えられる。そのため、処分孔に無線給電を適用させる基礎検討として、1 つの送電コイルから複数の受電コイルへ無線給電する技術について文献等の調査を行った。その調査結果を踏まえ、室内試験の計画を検討した。

### 3.3.2 実施内容における前提条件の整理

H28 年度の実施内容における前提条件を示す。

H27 年度までの実施内容としては、無線で電力を供給する無線給電技術の方式と選定、無線給電技術の理論的境界の取得、小規模用試験による給電効率の評価手法などを実施した[19]。その実施における無線給電の方式については、処分孔に使用される材料の一つである緩衝材を介した給電効率の観点から磁界共振結合を選定した。平成 28 年度の検討についても、磁界共振結合を利用して検討を行う。表 3.3.2-1 に無線給電の方式を示す。無線給電の方式については、磁界、電界、光・電波の 3 方式が考えられる。磁界共振結合は、磁界+共振の方式である。

表 3.3.2-1 給電方式の分類（赤枠は本検討対象）

給電方法	電磁界				光・電磁波
	磁界		電界		
原理など	電磁誘導 (磁界結合)	磁界共振結合 (磁界共鳴)	電界結合	電界共振結合	マイクロ波 レーザ
最大効率	90 %~	90 %~	90 %~	90 %~	~54%
伝送距離	~数 10cm	~数 m	~数 10cm	~数 m	km
ベントナイトを介した給電効率	○	○	△	△	△

※ベントナイトを介した給電効率は、の複素透磁率と複素誘電率の測定から求めた損失係数より設定

磁界共振結合は、共振現象を利用するため図 3.3.2-1 ように電源の周波数、送電器の共振周波数、受電器の共振周波数の 3 つの周波数を一致させる必要がある。

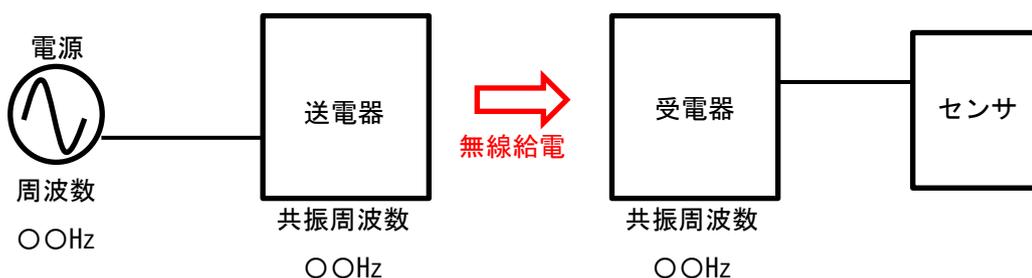


図 3.3.2-1 磁界共振結合のイメージ図

送受電器は、コイルとコンデンサで構成され、共振周波数は式 1 で示される。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{式 1}$$

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

磁界共振結合の無線給電では、送電器のコイルに交流を流すことにより磁束を発生させ、受電器のコイルでそれを受け取ることで、電力を送受電している。そこで、受電電力(W)/送電電力(w)=給電効率(%)として示すこととする。

また、平成 28 年度の実施項目における前提条件を(1)~(3)に示す。

#### (1) 無線給電システム設計手法の検討における前提条件

- 1) 平成 27 年度に実施した給電効率の理論限界値（無線給電システム設計手法）の検証を目的として、要素試験における小規模コイルを用いて 10W 程度の無線給電を行う実証試験を実施する。
- 2) 設置精度上の変位や偏角などのパラメータを考慮するために、小規模コイルを用いた変位や偏角における試験を実施する。送受電コイルの変位や偏角のイメージを図 3.3.2-2 に示す。

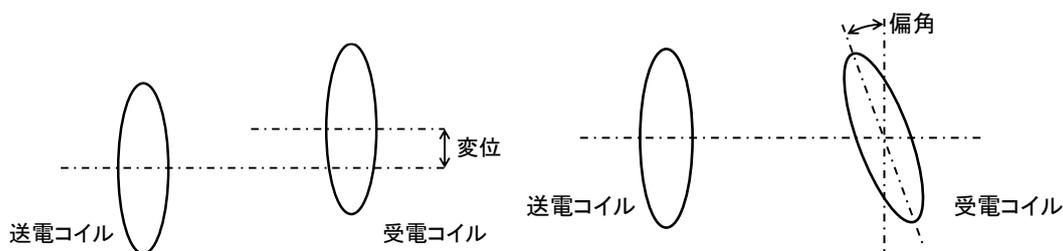


図 3.3.2-2 変位や偏角のイメージ図

#### (2) プラグを介した無線給電の適用性の検討における前提条件

地層処分事業において、無線による給電技術の活用が想定される場所として表 3.3.2-2[19] が考えられる。無線化する目的は、ケーブルによる水みちを形成させないことで高い止水性を保ち、放射性核種の流出経路を防ぐことである。一方で、無線化による給電効率の低下を考えると、すべての場所を想定するのではなく、放射性核種の流出経路を防ぐ上で重要度の高い場所を無線化すべきと考えられる。これらの理由から、以下の場所において無線給電の活用の可能性が高いと考えられる。

- ・坑道内の埋戻材の膨出の抑制や止水を目的として設置するプラグ
- ・高い止水性が必要とされる緩衝材（ベントナイト）を使用する処分孔

これまでの検討では、処分孔に注目して、処分孔に使用される緩衝材の影響評価をすることで、無線給電における適用性の評価を行った。

そこで、平成 28 年度の実施項目としてはプラグに注目し評価する。プラグは、鉄筋やコンクリート、緩衝材が材料として考えられる。緩衝材の影響評価は昨年度までの業務で実施済みである。そこで、コンクリートおよび鉄筋を介した無線給電における影響評価を行う。

鉄筋とコンクリートの影響評価を示せば、表 3.3.2-2 の無線給電における媒体について、プ

ラグと処分孔に使用される材料を網羅することが出来る。また、これらの媒体において、鋼材であれば材質や空間的な配置、岩盤や粘土系材料およびコンクリートにおいては、配合、組成、含水比などに影響をうける。

表 3.3.2-2 地層処分事業で無線電力供給が想定される場所

場所	媒体
坑道間	岩盤
処分孔	緩衝材
坑道内	埋戻材
プラグ	鉄筋（鋼材）、コンクリート、緩衝材
支保	鋼材

### (3) 処分孔を対象とした無線給電技術の調査における前提条件

処分孔に関するモニタリングについては、計測の目的によって、複数の計測装置（温度センサや圧力センサなど）を処分孔の緩衝材内に設置することが考えられる。例えば、幌延深地層研究センターで行われている人工バリア性能確認試験においても、複数の計測装置が設置されモニタリングが行われている。このモニタリングに無線給電を適用する場合、複数のセンサに付属される受電コイルに、給電可能な（複数の受電コイルに対応する）無線給電技術が必要となる。そのため、複数の受電コイルに給電可能な無線給電技術の調査を行う。この無線給電技術についての実用化例は、ほとんど無いため、調査においては研究論文を対象とした。また、調査結果を踏まえ、単純な系の室内試験の計画を検討する。

### 3.3.3 無線給電システム設計手法の検討

平成 27 年度の実施内容において、送受電コイル間の結合係数 $k$ およびコイルの $Q$ 値を用いた無線給電システムの設計手法を検討した。本章では、結合係数 $k$ および $Q$ 値を用いた無線給電における給電効率の理論値と、給電試験により得られる給電効率が一致するかを確認し、設計手法の妥当性を検証する。さらに、コイルを設置する際に、変位や偏角が生じた場合、効率の低下が考えられるため、これらの給電効率への影響評価を行う。

#### (1) 検証の方法

電力伝送の理論値と給電試験による比較の検証方法の概要を①～⑥に示す。

- ① 処分孔の直径を 2220mm (1/1 サイズ) として、その 1/6 サイズの直径のコイルを製作した。  
1/1 サイズにおけるコイルの長さは平成 26 年度と平成 27 年度と同様に 400mm とした。平成 27 年度の「コイルサイズの影響評価試験」より、直径の小さなコイルから、大きなコイルの効率評価ができることが示されたため、1/6 サイズのコイルの結果を用いて、1/1 サイズの結果が推定可能である。そこで、1/6 スケーリングモデルにより検討する。
  - ② 製作したコイルの $Q$ 値の測定を行う。
  - ③ 製作したコイルを利用して、コイル間距離を、コイル直径の 1/2 倍、1 倍、3/2 倍として結合係数 $k$ の測定を行う。
  - ④ ②の $Q$ 値、③の結合係数 $k$ から、理論式より導き出された給電効率を示す。
  - ⑤ 製作したコイルを用いて、実際に 10W 程度の電力伝送を行う。
  - ⑥ ④の理論値と⑤の試験値を比較し、考察を行う。
- ①～⑥について実施した内容は、(3)1)～6) に後述する。

次に、変位および偏角の給電効率への影響評価についての概要を⑦～⑩に示す。

- ⑦ 製作したコイルを利用して、コイルを変位させた場合の結合係数 $k$ を測定する。変位量はコイル直径の 10%、20%、30%、40%、50%とする。
  - ⑧ ⑦で測定した結合係数 $k$ と②の $Q$ 値を用いて、理論式から給電効率を算出する。変位が給電効率に与える影響を評価する。
  - ⑨ 製作したコイルを利用して、コイルを偏角させた場合の結合係数 $k$ を測定する。偏角させる角度は 10°、20°、30°、40°、50°とする。
  - ⑩ ⑨で測定した結合係数 $k$ と②の $Q$ 値を用いて、理論式から給電効率を算出する。偏角が給電効率に与える影響を評価する。
- ⑦～⑩について実施した内容は、(4)1)～4) に後述する。

(2) 磁界共振結合の無線給電における給電効率の理論値

図 3.3.3-1 に、コイル ( $L$ ) とコンデンサ ( $C$ ) が直列で接続されている (Series-Series) 方式における磁界共振結合の無線給電による給電効率 ( $\eta_{ss}$ ) は式 2 で表され、その時の最適負荷抵抗は式 3 で表せる[20]。

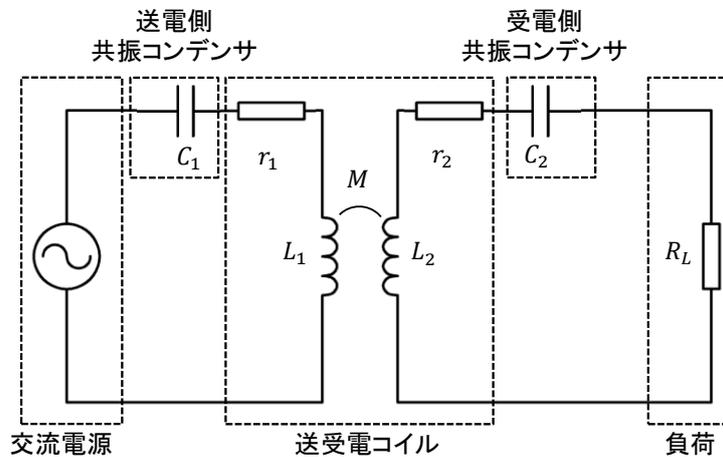


図 3.3.3-1 磁界共振結合の等価回路

$$\eta_{ss} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad \text{式 2}$$

$$R_{Lopt} = r_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} \quad \text{式 3}$$

また、式 2 は式 4 に近似することができる[21]。

$$\eta_{ss} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}} \quad \text{式 4}$$

ここで、 $Q$  値はある周波数 ( $f$ ) におけるコイルの性能を表す指標である。 $Q$  は式 5 で表される。 $L$  は  $f$  におけるコイルの自己インダクタンス。 $r$  は  $f$  における損失を表す抵抗成分である。

$$Q = \frac{\omega L}{r} = \frac{2\pi f L}{r} \quad \text{式 5}$$

$k$  は結合係数である。結合係数は送電コイルから出た磁束が受電コイルに入る割合であり、 $0 \leq k \leq 1$  である。また、送電コイルと受電コイルの自己インダクタンス ( $L$ ) と、相互インダクタンス ( $M$ ) を用いて式 6 で表される。

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

式 6

これらより、 $Q$  値と結合係数 $k$ が既知であれば給電効率が算出できる。

平成 27 年度は、このように $k$ と  $Q$  を利用した設計法を論じ効率評価を行った。平成 28 年度は、実際に電力伝送を行うことで給電効率が理論値どおりになるか検証する。

### (3) 理論値と電力伝送試験の比較

本節では、結合係数 $k$ とコイルの  $Q$  値を利用した給電効率の理論値が、実際に電力伝送を行った給電効率の結果と同程度になるか比較を行う。まず理論値を求めるために結合係数 $k$ およびコイルの $Q$ 値を測定し、給電効率を算出した。次に、試験で電力伝送を行って給電効率の測定を行い、計算した理論値と比較した。

#### 1) 試験に使用するコイル

処分孔の直径 2220mm[22] の 1/6 サイズの直径となるコイルを送電側と受電側の 2 つ用意した。表 3.3.3-1 にコイルの仕様を示す。コイルの巻線には被覆直径 2.4mm の KIV 0.5sq を使用した。(コイルの長さ/被覆直径) より巻き数は 29 巻とした。製作したコイルを図 3.3.3-2 に示す。

表 3.3.3-1 給電試験に用いる 1/6 スケールのコイル

縮尺	コイルの直径(mm)	コイルの長さ(mm)	巻数
1/1 サイズ	2220	400	-
1/6 サイズ	370	70	29

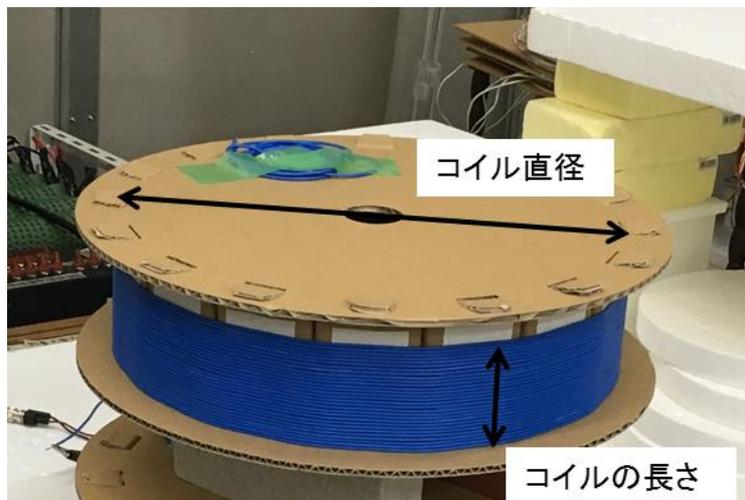


図 3.3.3-2 試験に使用するコイル (処分孔用の 1/6 サイズ)

## 2) コイル特性 ( $Q$ 値) の測定

1) で示したコイルの自己インダクタンス $L$ 、内部抵抗 $r$ を計測し、式 5 により  $Q$  値を計算した。自己インダクタンス $L$ 、内部抵抗 $r$ の計測には、インピーダンスアナライザ E4990A を使用した。測定周波数は 60kHz~300kHz とした。図 3.3.3-3 に測定に使用したインピーダンスアナライザを示す。

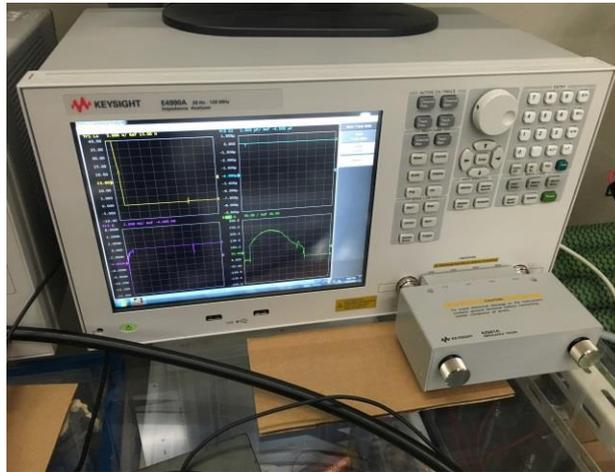


図 3.3.3-3 インピーダンスアナライザ E4990A

コイルの自己インダクタンスの測定結果を図 3.3.3-4 に示す。コイルの内部抵抗は周波数が高くなると内部抵抗は増加する。これは周波数が高くなると、表皮効果や近接効果などの影響により [23]、交流抵抗が増加するためである。

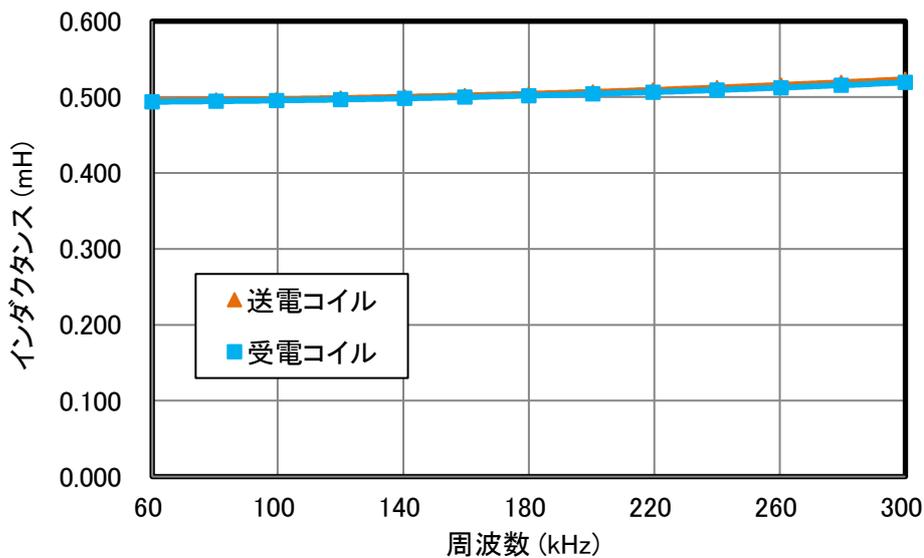


図 3.3.3-4 1/6 スケールコイルの自己インダクタンス

コイルの内部抵抗の測定結果を図 3.3.3-5 に示す。自己インダクタンスは周波数に対する依存性は低いものの、周波数が高くなると若干増加した。

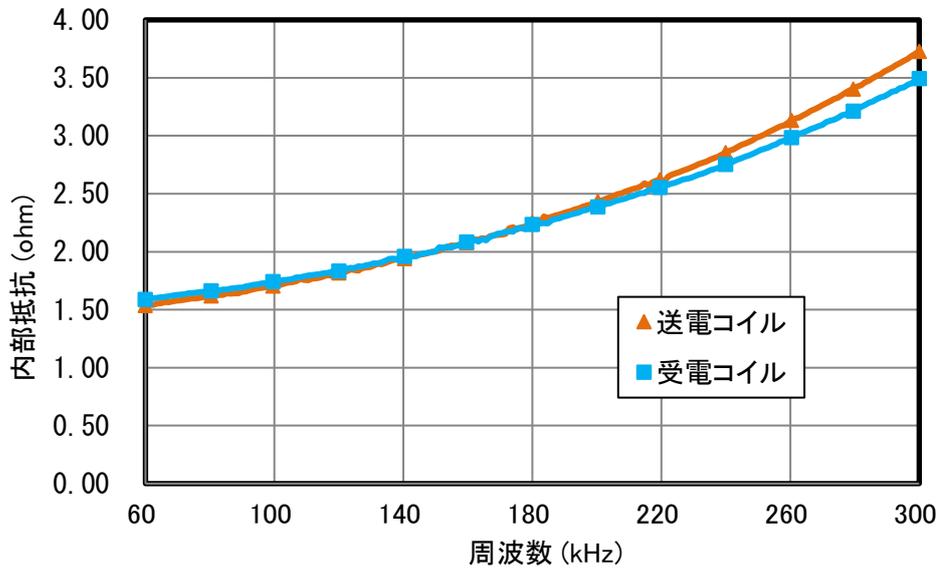


図 3.3.3-5 1/6 スケールコイルの内部抵抗

式 5 から計算した  $Q$  値を図 3.3.3-6 に示す。コイルの  $Q$  値にはピークの周波数が存在する。このピークの周波数を利用することで給電効率を最適化することが可能である。平成 28 年度の検討においては、 $Q$  値が 250 程度となる（平成 27 年度と同様の値）180kHz を電力伝送に用いる周波数と選定した。これは、今年度の試験と昨年度の理論値の比較を行うためである。表 3.3.3-2 に 180kHz におけるコイルのパラメータを示す。

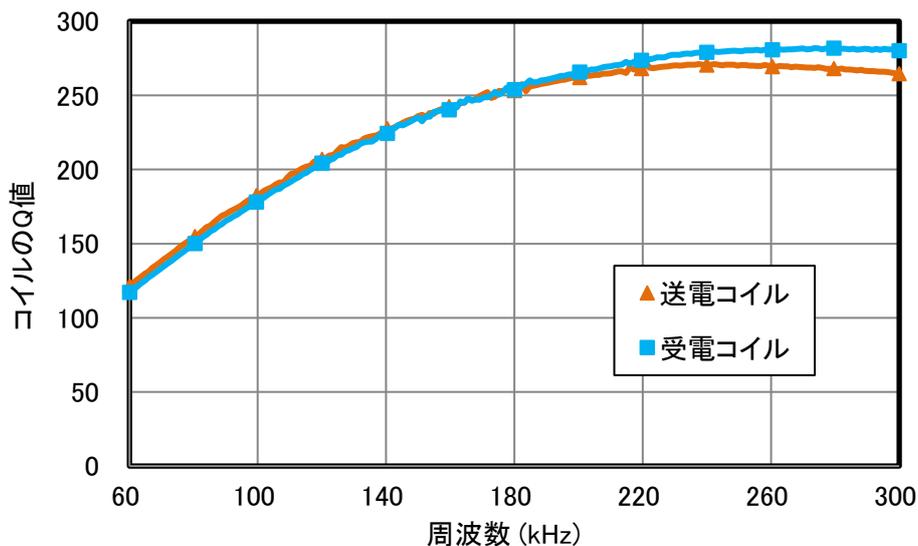


図 3.3.3-6 1/6 スケールコイルの  $Q$  値

表 3.3.3-2 180kHz におけるコイルのパラメータ

	周波数 (kHz)	自己インダクタンス (mH)	内部抵抗 (ohm)	$Q$ 値
送電コイル	180	0.504	2.25	253
受電コイル	180	0.502	2.24	254

### 3) 結合係数 $k$ の測定

1) で製作した送受電コイルの結合係数 $k$ の測定を行った。コイル間距離はコイル直径の 1/2 倍、1 倍、3/2 倍として測定を行った。平成 27 年度のコイルサイズの影響評価試験において、コイル間距離をコイル直径で規格化した値を用いることで、異なるサイズのコイルの評価が可能であることが得られた。そこで、今年度の検討では、コイル直径を基準としてコイル間距離を決定した。

結合係数 $k$ の測定は、JIS-C5321 に定められた方法で行った。測定方法を図 3.3.3-7 に示す。この方法は、片方のコイルを短絡させた場合のインダクタンス $L_s$ と解放させた場合のインダクタンス $L_o$ を測定し、図 3.3.3-7 の式から結合係数 $k$ を計算する方法である。インダクタンスの測定には、2) と同様にインピーダンスアナライザを用い、周波数 180kHz を利用した。測定状況を図 3.3.3-8 に、測定結果を図 3.3.3-9 に青線で示す。また、橙線に平成 27 年度にて実施した測定結果を示す。結果を比較すると昨年度と同程度の値であり、結合係数 $k$ はコイル同士の距離が近いと高くなる結果となった。

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_s}{L_o}}$$

- $k$  : 結合係数
- $L_o$  : 受電側開放時のインダクタンス
- $L_s$  : 受電側短絡時のインダクタンス
- P, P' : 送電側コイルの端子
- S, S' : 受電側コイルの端子

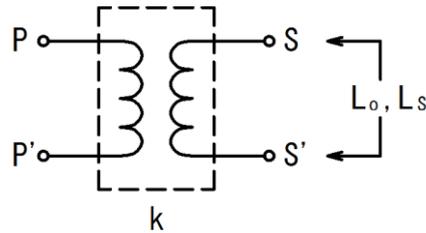


図 3.3.3-7 結合係数 $k$ の測定方法 (JIS-C5321)

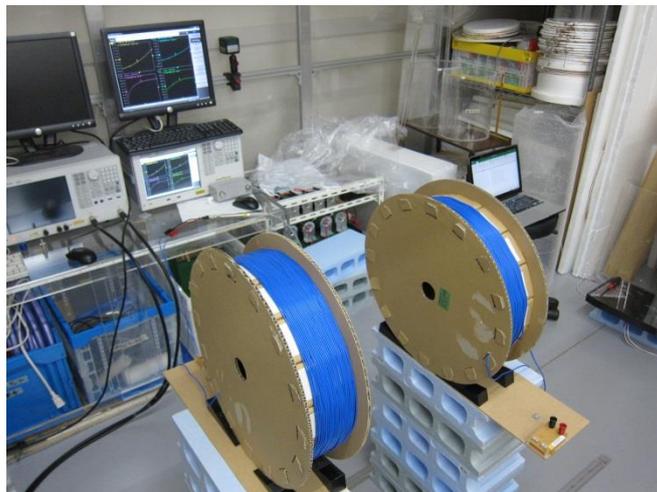


図 3.3.3-8 結合係数 $k$ の測定状況

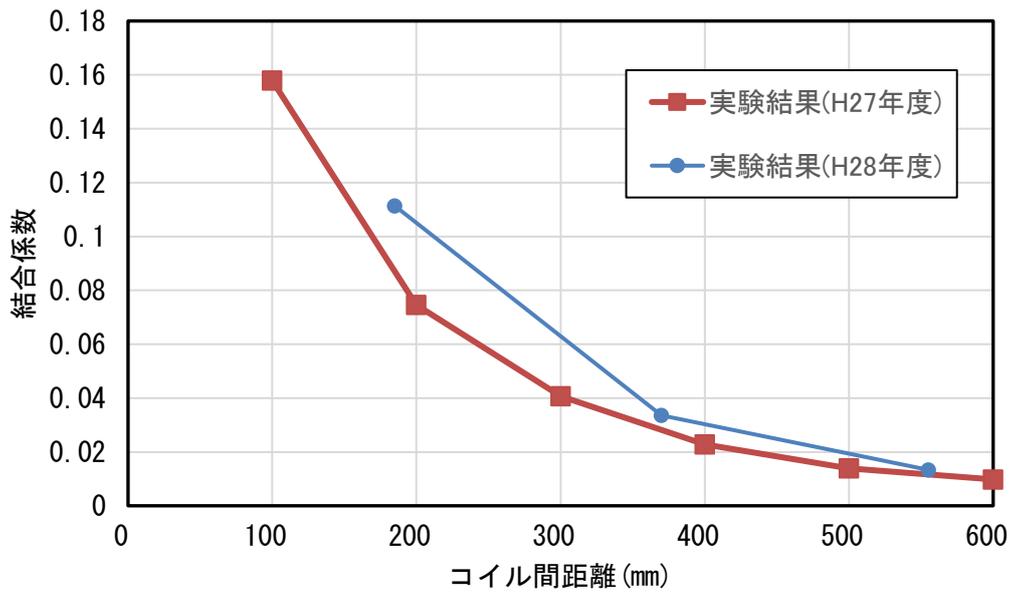


図 3.3.3-9 結合係数 $k$ の測定結果

#### 4) 理論式からの給電効率の計算

式 2 を利用して、表 3.3.3-2 の  $Q$  値と図 3.3.3-9 の結合係数 $k$ により、給電効率を算出した。結果を図 3.3.3-10 に青線で示す。算出した給電効率より、コイル間距離が短いと効率が高くなる結果となった。また、平成 27 年度に実施した計算結果を図 3.3.3-10 に灰色の線で示す。平成 27 年度の結合係数 $k$ と  $Q$  値を基に理論式から求めた計算結果と比較しても同程度効率の計算値が得られた。

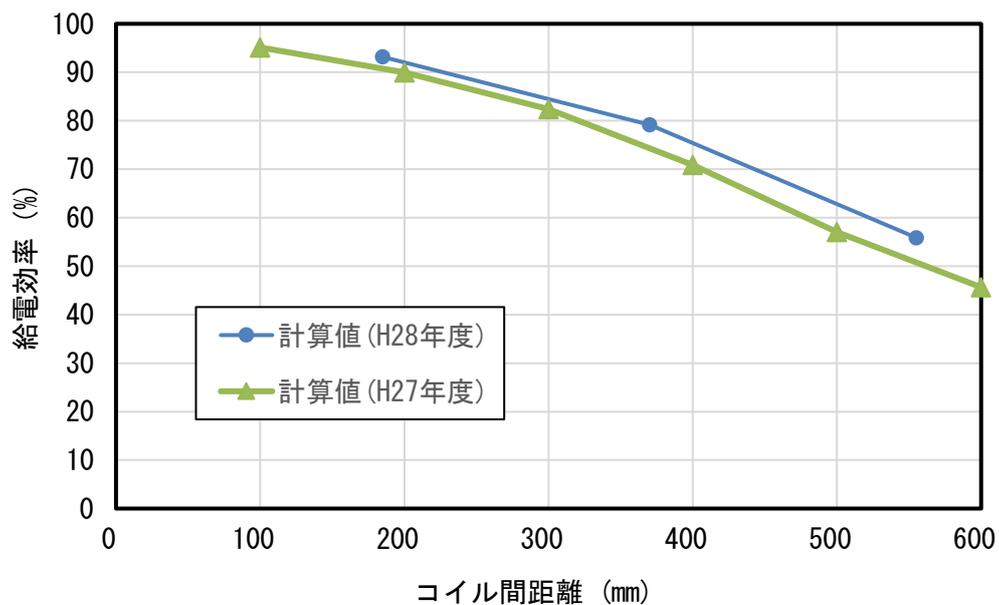


図 3.3.3-10 給電効率の計算結果

### 5) 給電試験による給電効率の測定

実際に電力伝送を行う給電試験により、給電効率の評価を行った。試験に使用した機器のセットアップを図 3.3.3-11 に示す。図 3.3.3-11 に示すように、送受電コイルにはそれぞれ共振用のコンデンサを接続した。共振周波数は 2) で設定した 180kHz となるようにコンデンサの値を選定した。電力はパワーアナライザを通して電源から送電コイルに送り、また、受電コイルで受けとった電力はパワーアナライザを通して負荷抵抗器へと送ることで、給電効率を評価した。負荷抵抗器の値は式 3 で計算した最適負荷抵抗値を用いた。無線給電の給電効率は、送電電力に依存しないものの複数の計測センサを稼働させることができる 10W 程度の送電電力を目標として給電試験を実施した。伝送距離は 2) の結合係数  $k$  の測定と同様、コイル直径の 1/2 倍、1 倍、3/2 倍として試験を行った。試験状況を図 3.3.3-12 に示す。

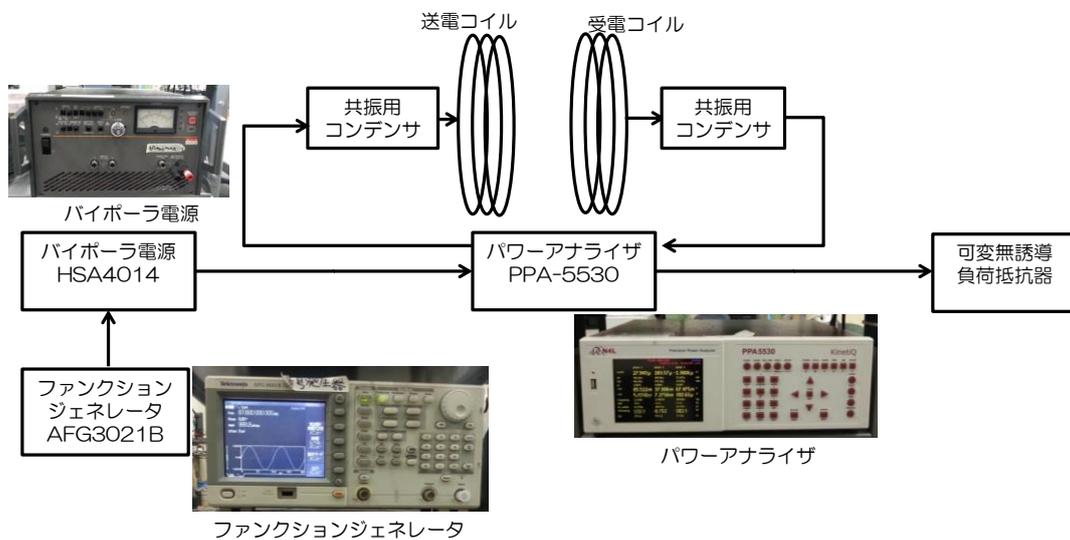


図 3.3.3-11 試験のセットアップ

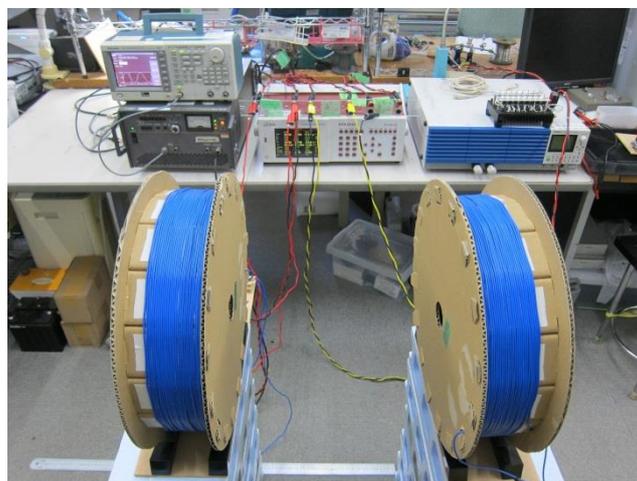


図 3.3.3-12 給電試験の試験状況

6) 給電効率の理論値と給電試験結果の比較

図 3.3.3-10 の給電効率の計算結果に、給電試験結果（橙線）を追加したものを図 3.3.3-13 に示す。また、結合係数 $k$ を利用した理論式からの計算結果と給電試験結果をまとめたものを表 3.3.3-3 に示す。給電効率は、コイル間距離が近くなると給電効率は高くなるという理論式からの計算結果と同様の傾向がみられる。また、結合係数 $k$ と  $Q$  値を用いた理論式の計算結果と給電試験結果はほとんど重なっており、理論式からの計算値を用いた評価が妥当であることが示された。

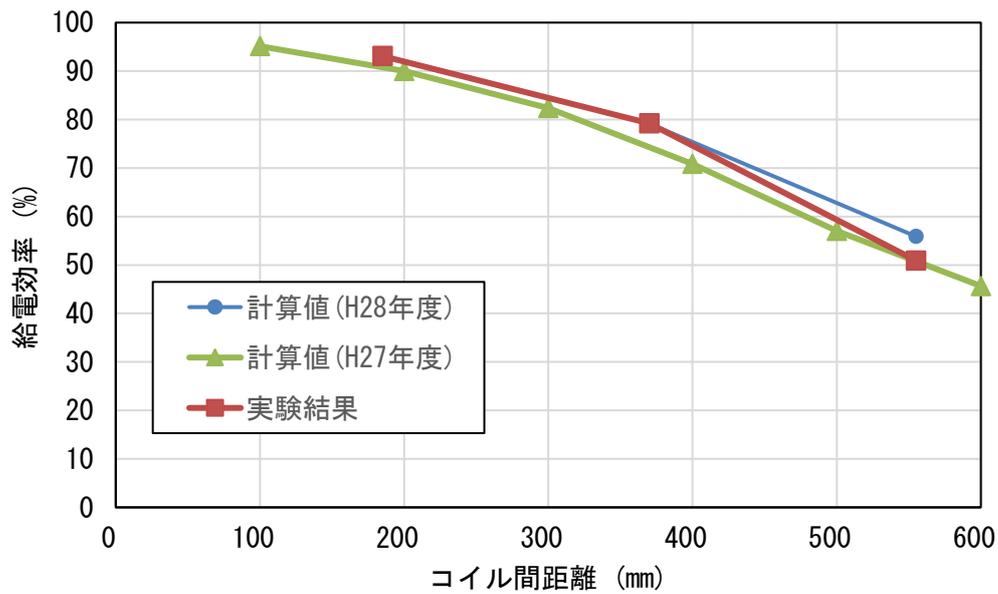


図 3.3.3-13 給電試験結果

表 3.3.3-3 理論式からの計算値と試験結果

コイル間距離		$k$ : 結合係数	$K$ と $Q$ を利用した最大効率 (%) ( $Q=250$ )	最大効率時の最適負荷抵抗 (ohm)	給電試験の伝送効率 (%)	給電試験に利用した負荷抵抗 (ohm)
—	(mm)					
a/2	185	0.1114	93	63	93	63
a	370	0.0336	79	19	79	19
3a/2	555	0.0134	56	8	51	8

#### (4) コイルの変位および偏角が給電効率に与える影響評価

##### 1) 変位に対する結合係数 $k$ の測定

変位に対する効率評価においても、1)と同様のコイルを用いる。変位に対する測定については、送受電コイルを対向して配置し、コイル間距離はコイル直径の1/2倍、1倍、3/2倍とした。変位量は、受電コイルの中心軸から、コイル直径の10%、20%、30%、40%、50%移動させて結合係数 $k$ を測定した。

結合係数 $k$ の測定は、3)と同様にJIS-C5321に定められた方法で行った。測定状況を図3.3.3-14に示す。結合係数 $k$ の測定結果を図3.3.3-15、その結果をまとめたものを表3.3.3-4に示す。また、図3.3.3-15の横軸をコイル間距離としたグラフを図3.3.3-16に示す。図3.3.3-15および図3.3.3-16より、変位量が大きいほど、またコイル間距離が長くなるほど、結合係数 $k$ の値は小さくなる。

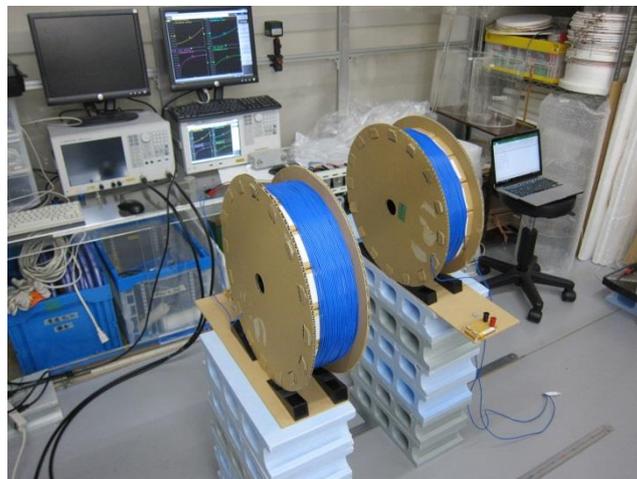


図 3.3.3-14 変位に対する結合係数 $k$ の測定状況

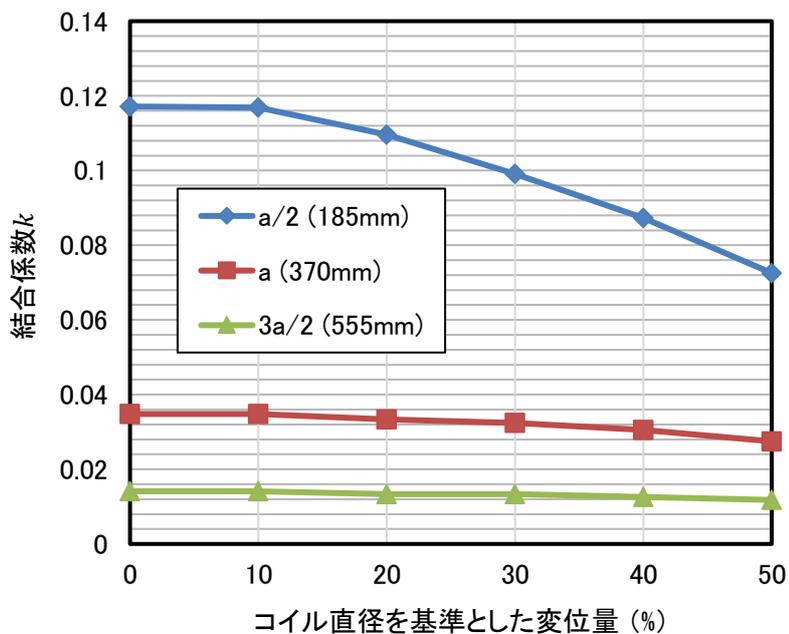


図 3.3.3-15 変位に対する結合係数 $k$ の測定結果

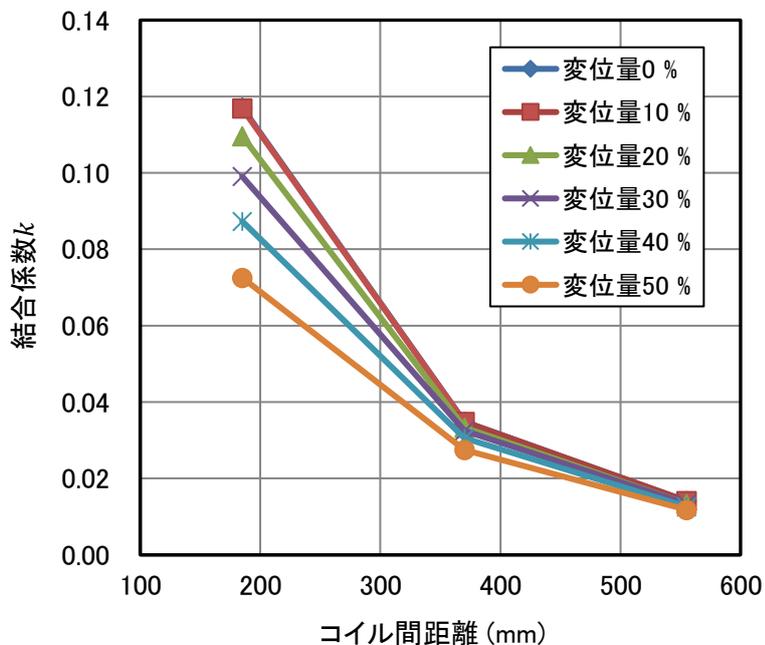


図 3.3.3-16 変位時のコイル間距離に対する結合係数 ( $k$ )

表 3.3.3-4 変位に対する結合係数 ( $k$ )

結合係数		コイル間距離 (コイル直径 $a$ とした場合)		
		$a/2$	$a$	$3a/2$
変位	0%	0.1171	0.0348	0.0140
	10%	0.1169	0.0348	0.0141
	20%	0.1096	0.0334	0.0134
	30%	0.0991	0.0325	0.0134
	40%	0.0873	0.0306	0.0126
	50%	0.0725	0.0275	0.0118

## 2) 変位に対する給電効率の測定結果

測定した結合係数 $k$ およびコイルの $Q$ 値から、変位した場合の給電効率を計算した。結果を図 3.3.3-17 に、その値をまとめたものを表 3.3.3-5 に示す。また、図 3.3.3-17 の横軸をコイル間距離としたものを図 3.3.3-18 に示す。この結果より、コイル直径の半分程度変位した場合であっても給電効率の低下は数%である。このことから、コイルの施工を考えたときに、変位に対して高い施工精度は必要ないと考えられる。ただし、図 3.3.3-18 から、コイル間距離が長くなると変位に対する効率の低下が大きくなる傾向がみられるため、コイル間距離がコイル直径に対して長くなる場合には、効率の低下の影響を考慮する必要がある。

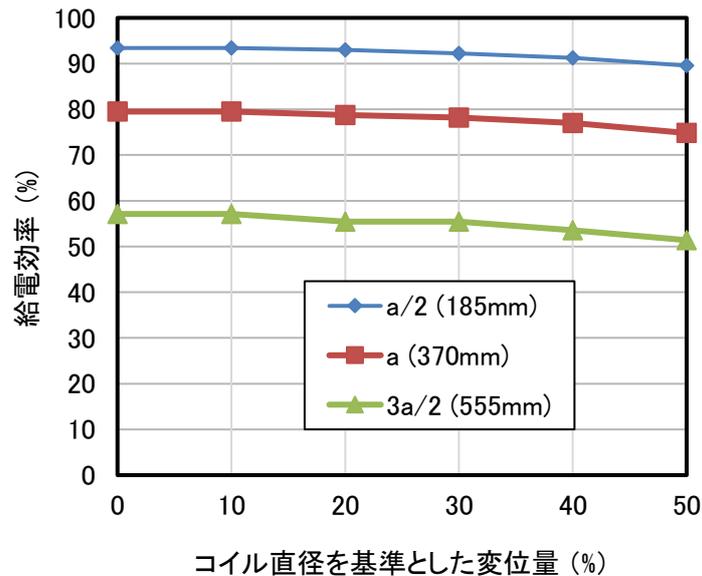


図 3.3.3-17 変位に対する給電効率 ( $Q$ ) の変化

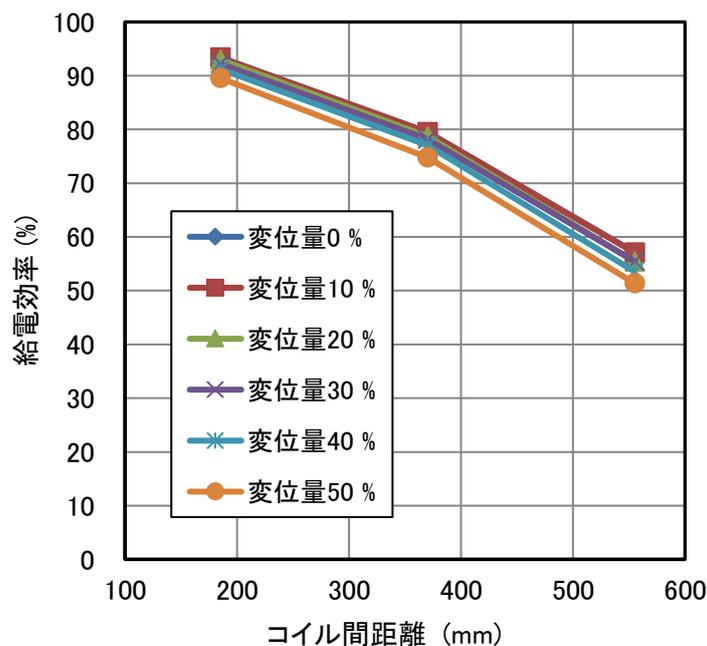


図 3.3.3-18 変位時のコイル間距離に対する給電効率 ( $Q$ )

表 3.3.3-5 変位に対する給電効率 ( $Q$ )

伝送効率(%)		コイル間距離 (コイル直径 $a$ とした場合)		
		$a/2$	$a$	$3a/2$
変位	0 (0mm)	93.40	79.51	57.11
	$a/10$ (37mm)	93.39	79.51	57.11
	$2a/10$ (74mm)	92.96	78.72	55.46
	$3a/10$ (111mm)	92.24	78.20	55.46
	$4a/10$ (148mm)	91.25	77.03	53.57
	$5a/10$ (185mm)	89.56	74.82	51.38

### 3) 偏角に対する結合係数 $k$ の測定

偏角に対する効率評価においても、1)と同様のコイルを用いる。(3)1)で製作した送受電コイルのコイル間距離はコイル直径の1/2倍、1倍、3/2倍とした。受電コイルの偏角は $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $50^\circ$ として結合係数 $k$ を測定した。

結合係数 $k$ の測定は、3)と同様にJIS-C5321に定められた方法で行った。測定状況を図3.3.3-19に示す。結合係数 $k$ の測定結果を図3.3.3-20に、結果をまとめたものを表3.3.3-6示す。また、横軸をコイル間距離としたものを図3.3.3-21に示す。コイル間距離が、コイル直径の1/2かつ偏角が $50^\circ$ の場合はコイル端が接触するために計測は行えなかった。図3.3.3-20より、コイル間距離が近いときは偏角によりコイル同士が近づくことによって結合係数 $k$ が大きくなった。コイル間距離がコイル直径以上の場合では、偏角によりコイルに鎖交する磁束が少なくなるために結合係数 $k$ が小さくなったと考えられる。また図3.3.3-21より、変位時の測定と同様にコイル間距離が長くなると結合係数 $k$ は小さくなる。

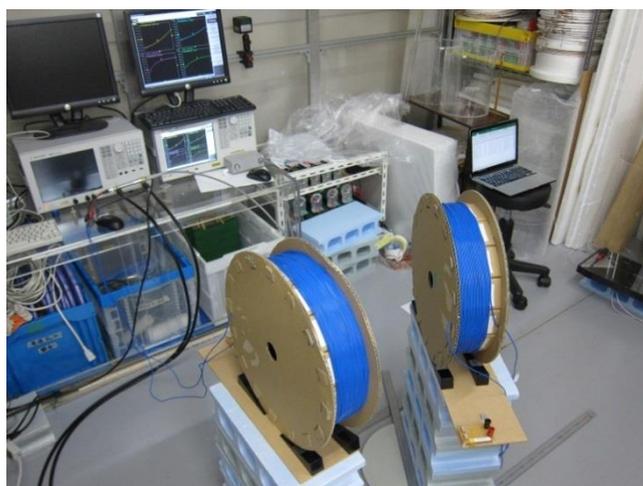


図 3.3.3-19 変角に対する結合係数 ( $k$ ) の測定状況

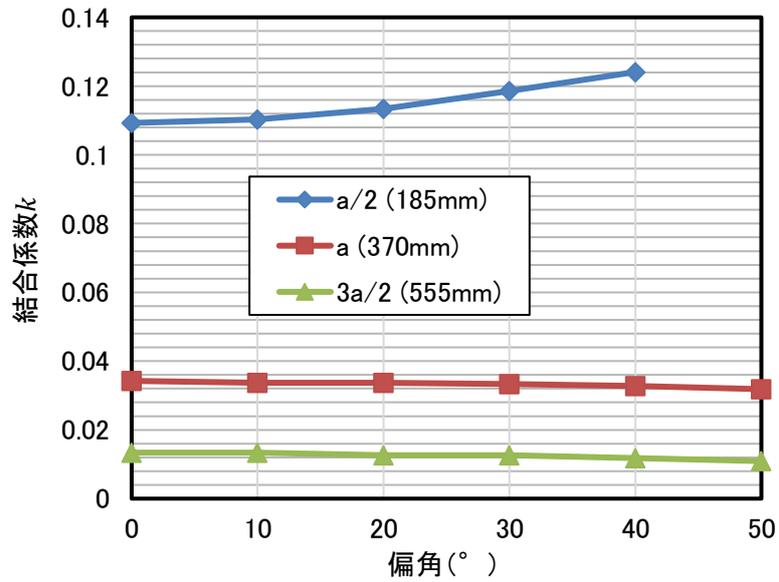


図 3.3.3-20 偏角に対する結合係数 ( $k$ ) の測定結果

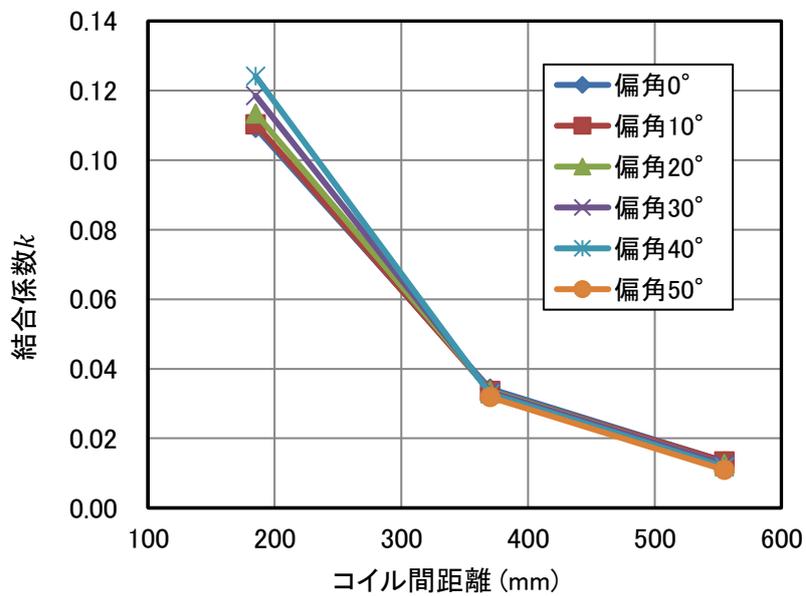


図 3.3.3-21 偏角時のコイル間距離に対する結合係数 ( $k$ )

表 3.3.3-6 偏角に対する結合係数 ( $k$ )

結合係数		コイル間距離 (コイル直径aとした場合)		
		a/2	a	3a/2
偏角	0	0.1093	0.0343	0.0134
	10°	0.1103	0.0337	0.0134
	20°	0.1134	0.0337	0.0126
	30°	0.1185	0.0334	0.0126
	40°	0.1241	0.0328	0.0118
	50°	コイルが接触し 測定不可	0.0318	0.0109

#### 4) 偏角に対する給電効率の測定結果

測定した結合係数 $k$ およびコイルの $Q$ 値から、偏角した場合における給電効率を計算した。結果を図 3.3.3-22 に、その値をまとめたものを表 3.3.3-7 に示す。また、図 3.3.3-22 の横軸をコイル間距離としたものを図 3.3.3-23 に示す。図 3.3.3-22 より、コイル直径の $50^\circ$ 程度の偏角でも給電効率の低下は数%である。このことから、コイルの施工を考えたときに、偏角に対して高い施工精度は必要ないと考えられる。また図 3.3.3-23 より、コイル間距離が長くなると偏角に対する効率の低下が大きくなる傾向がみられるため、コイル間距離がコイル直径に対して長くなる場合には、効率の低下の影響を考慮する必要がある。

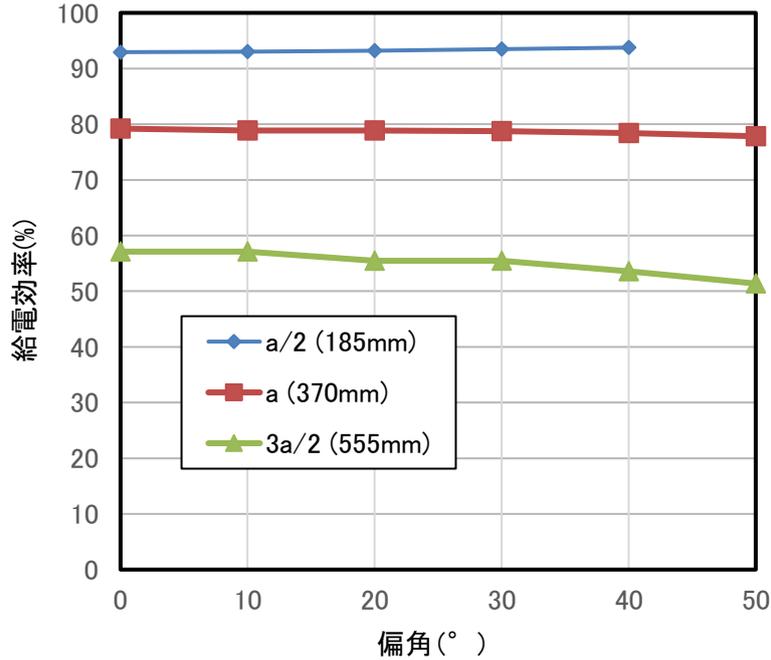


図 3.3.3-22 偏角に対する給電効率 ( $Q$ ) の変化

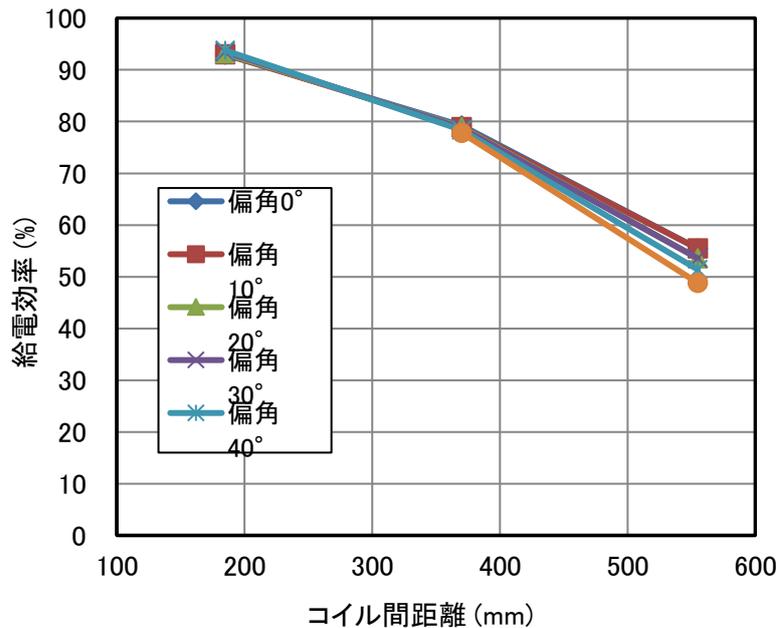


図 3.3.3-23 偏角時のコイル間距離に対する給電効率 ( $Q$ )

表 3.3.3-7 偏角に対する給電効率 ( $Q$ )

伝送効率(%)		コイル間距離 (コイル直径aとした場合)		
		a/2	a	3a/2
偏角	0 (0mm)	92.94	79.21	55.46
	10° (32mm)	93.00	78.89	55.46
	20° (63mm)	93.19	78.89	53.57
	30° (93mm)	93.47	78.73	53.57
	40° (119mm)	93.76	78.38	51.39
	50° (142mm)	コイルが接触し 測定不可	77.84	48.82

(5) 測定結果のまとめ

最初に、コイルの  $Q$  値とコイル間の結合係数  $k$  から計算した給電効率の理論値と、電力伝送を行った際の給電効率の比較を行った。比較結果より、両者はほとんど一致した。この結果より、実際に電力伝送を行わなくとも、あらかじめ測定したコイルの  $Q$  値と結合係数  $k$  を用いることで、実際の給電効率の推定が可能である。

次に、送電コイルおよび受電コイルの間に、変位および偏角がある場合に、給電効率にどの程度影響が生じるかを評価した。変位および偏角のようなコイル同士の位置関係が変化した場合の結合係数  $k$  を測定し、そこから給電効率を算出した。変位に対する給電効率の結果は、コイル間距離がコイル直径と同じとき、変位が 50% で 5% 程度の効率低下と小さく、コイルの施工時に位置ずれに対しては高い精度は必要ない。また、偏角に対する給電効率の結果でも、コイル間距離がコイル直径と同じとき、偏角が 50° 生じた場合でも 2% 程度と小さく、施工時に偏角に対しても高い精度は必要ないことを確認した。

### 3.3.4 プラグを介した無線給電の適用性の検討

この章では、プラグ材として考えられている鉄筋コンクリートを介した無線給電の適用性を検討する。この検討では、プラグを模擬した試験体を利用して、その試験体を介した給電試験を行う。給電試験より得られる給電効率を比較し、プラグを介した無線給電の評価を行うことで適用性を検討する。試験にあたり、鉄筋とコンクリートによる影響を分けて評価するために、鉄筋とコンクリートは個別に試験体を準備して、給電試験を行う。

#### (1) 評価方法

鉄筋およびコンクリートを介した無線給電の給電効率について、評価方法の概要を①～⑥に示す。

- ① 鉄筋やコンクリートを介して無線給電を行った場合における給電効率の変化を、空気中における場合と比較して評価する。初期検討として 1/1 サイズのプラグサイズから、簡易にスケールダウンした室内試験を行う。そのため、試験には 3 章と同じ、直径 370mm のコイルを用いる。プラグ直径は 4,000mm (1/1 サイズ) であり、これを実規模のコイル直径と設定するため、約 1/11 にスケールダウンした小規模の試験にて評価を行う。
- ② 実規模の鉄筋の仕様として、瑞浪超深地層研究所におけるプラグの補強筋を参考にした。小規模の試験においては約 1/11 にスケールダウンしたものとして、溶接金網を試験に用いる。
- ③ 空気中の給電効率を試験により測定する。また、電磁界解析により計算する。
- ④ ②の溶接金網を送受電コイル間に設置し、給電効率を測定する。鉄筋の設置位置による給電効率への影響を評価するため、溶接金網を送受電コイルの中央から移動した場合の給電効率を測定する。③の空気中における給電効率と、④の溶接金網がある場合の給電効率を比較し、評価・考察を行う。
- ⑤ コンクリートの影響評価としては、溶接金網を用いた試験と同様の考えのもと約 1/11 サイズの給電試験を行う。試験に利用するコンクリートは、一般的な無筋プレキャストコンクリートブロックを用いる。その際、プラグの厚みによる影響を評価するため、コンクリートブロックの厚みを変化させた場合の給電効率を測定する。
- ⑥ 空気中における給電効率とコンクリートを介した給電効率を比較し、評価・考察を行う。

①～⑥の内容については、(2)～(7)に後述する。

## (2) 実規模を想定した仕様

鉄筋コンクリートは通信等のための電磁波に影響を与えることが知られている[24]。そのため、プラグ材として考えられている鉄筋コンクリートを介した無線給電においても鉄筋コンクリートが影響をあたえることが想定され、その影響の評価は重要であると考えられる。

プラグ材の鉄筋やコンクリートが無線給電に与える影響を評価するにあたって、実際のプラグを想定し、設定する必要がある。本検討では、人工バリア性能確認試験が行われている幌延深地層研究センターのプラグを参考にした。図 3.3.4-1 に幌延深地層研究センターの試験坑道の概念図を示す。図 3.3.4-1 から、坑道直径は 4,000mm、プラグの厚みは 3,000mm である。よって、坑道に設置可能なコイルの最大の直径も 4,000mm とし、この大きさを実規模の想定仕様とした。

一方、幌延深地層研究センターのプラグにおいて、鉄筋の配筋図は公開されていない。そこで、配筋については、地下環境の工学技術に関する研究が行われている瑞浪超深地層研究所の研究坑道を参考にした。図 3.3.4-2 および図 3.3.4-3 に瑞浪超深地層研究所のプラグ配筋図を示す。これらの鉄筋のうち格子状になっている補強筋を対象とした。

瑞浪超深地層研究所のプラグの配筋図を参考に、試験坑道における鉄筋とコイルの大きさの関係を図 3.3.4-4 に示す。この寸法を基準とし、小規模試験の大きさにスケールダウンして鉄筋やコンクリートが無線給電に与える影響の評価を行う。

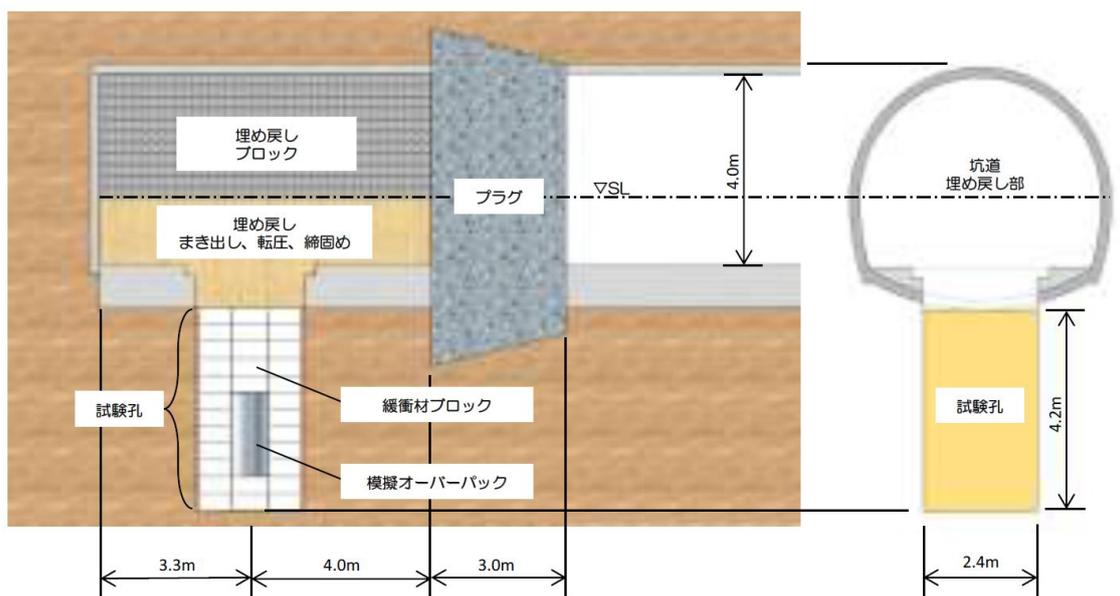


図 3.3.4-1 試験坑道断面（概念図） [25]

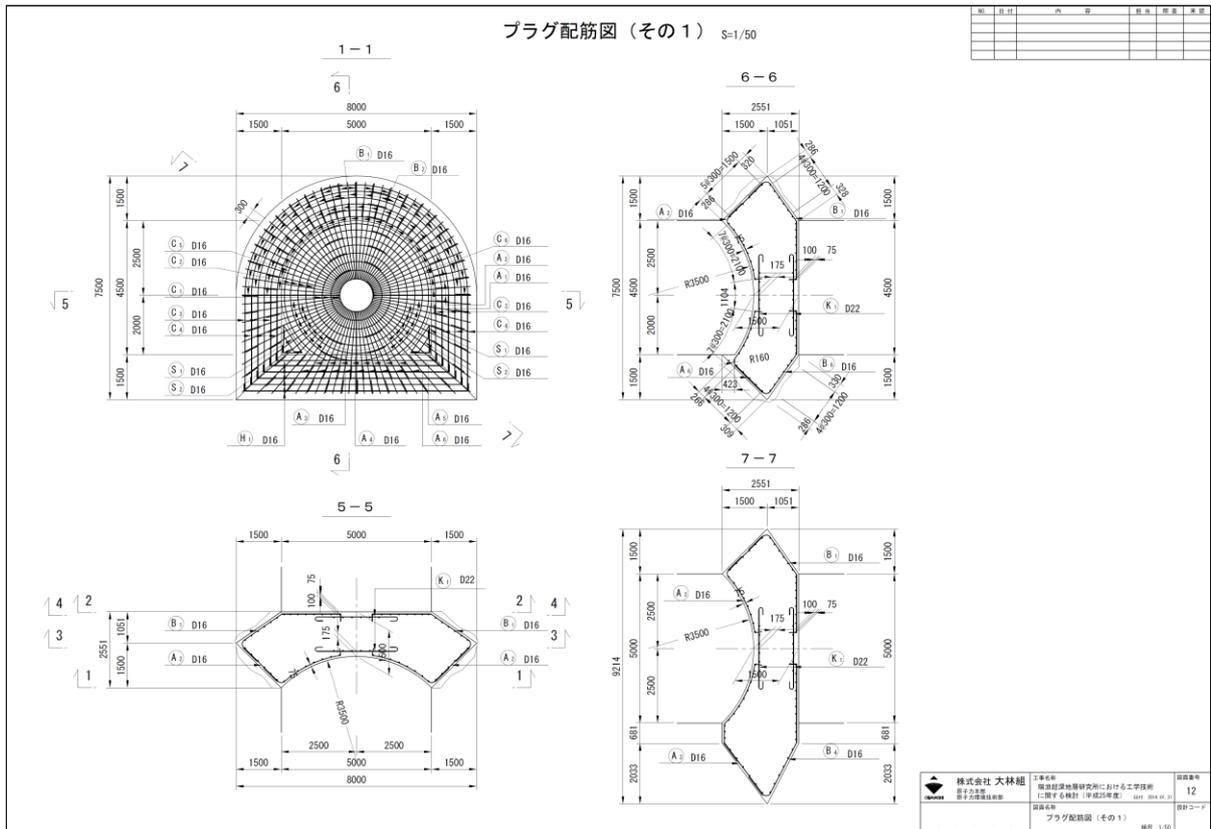


図 3.3.4-2 瑞浪超深地層研究所のプラグ配筋図 (その1) [26]

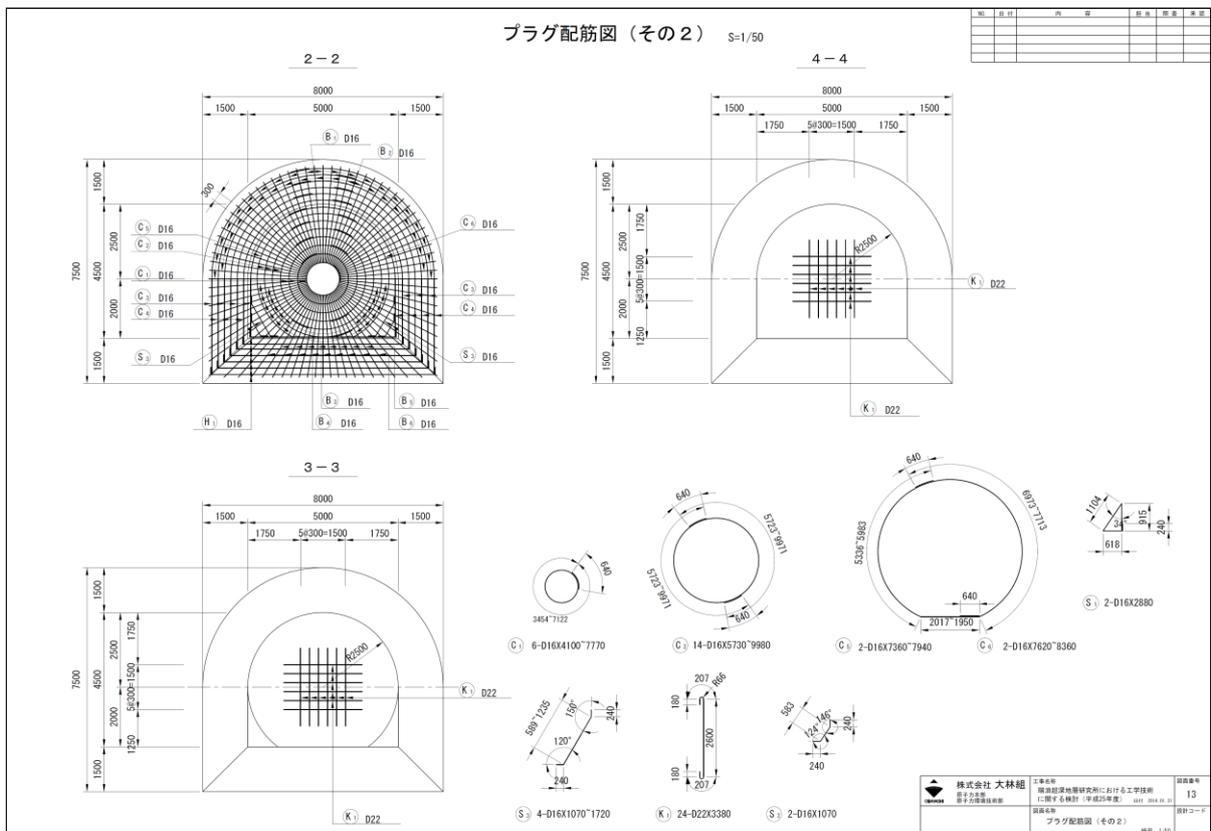


図 3.3.4-3 瑞浪超深地層研究所のプラグ配筋図 (その2) [26]

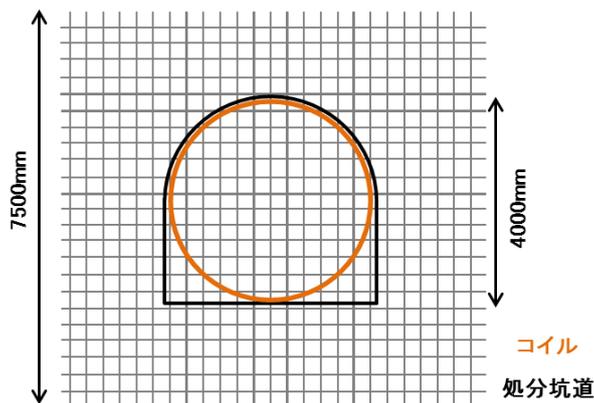


図 3.3.4-4 プラグの鉄筋とコイルの大きさの関係

### (3) 小規模試験の仕様

本検討では、鉄筋のような無線給電へ影響を与えうる媒体がプラグに存在する場合に、どの程度の影響あるか把握しておくことが目的である。そのため、大掛かりとなる実規模の試験ではなく、スケールダウンした小規模試験を行うことで、鉄筋がどの程度給電効率へ影響を与えるか評価する。

小規模の試験において、前述した 3.3.3(3)1) のコイルを用いて検証することとし、これを基準に大きさをスケールダウンした。処分坑道の直径が 4,000mm であることから、実規模で設置可能なコイルの最大直径も 4,000mm とする。使用するコイル直径は 370mm であるため、約 1/11 ( $\approx 370\text{mm} / 4,000\text{mm}$ ) の大きさを試験を行う。プラグの厚みは 3,000mm であることから、これをスケールダウンすると 273mm が小規模試験におけるプラグの厚みである。本検討においては後述するコンクリートの影響評価で使用するコンクリートブロックの規格から、小規模試験における伝送距離は 300mm を基準とした。よって小規模試験においては無線給電の伝送距離（コイル間距離）は 300mm である。

鉄筋評価のスケールダウンした小規模試験においては、鉄筋の代わりに溶融金網（亜鉛メッキ鉄線）を用いることとした。補強筋の径は 22mm、ピッチは 300mm であることから、1/11 倍した金網の径は 2mm、ピッチは 27mm となる。溶融金網の規格の中からこれに最も近い、金網の径は 2mm、ピッチは 25mm を選定した。

表 3.3.4-1 にスケールダウンした小規模試験の仕様を示す。

表 3.3.4-1 小規模試験の仕様

	実規模の想定仕様	スケールダウンした小規模実験の仕様
コイルの直径	4000mm	370mm
プラグの厚み(伝送距離)	3000mm	300mm
鉄筋(補強筋)の径	22mm	2mm
鉄筋のピッチ	300mm	25mm

#### (4) 空気中における小規模の効率評価

プラグの影響評価の比較対象として、空気中の給電効率を試験及び解析で求めた。

##### 1) 空気中における小規模試験

試験に用いた機器は 3.3.3(3)5) と同様であり、コイル間距離は表 3.3.4-1 のとおり 300mm として計測を行った。試験環境を図 3.3.4-5 に示す。試験の結果、空気中における給電効率は 82.6 % となった。

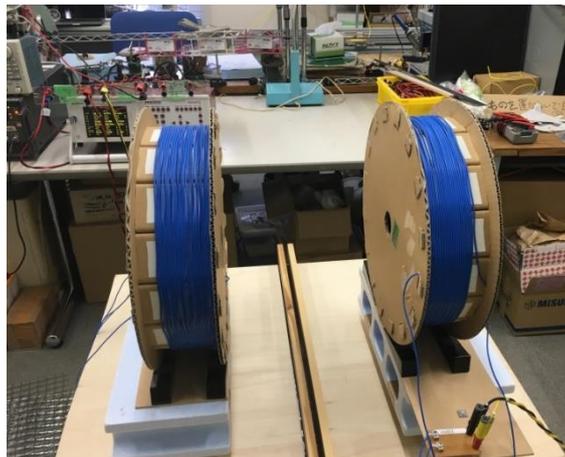


図 3.3.4-5 小規模試験における空気中の給電効率測定

##### 2) 空気中における小規模解析

電磁界解析を利用して空気中における給電効率を求めた。解析には JMAG を用いた。図 3.3.4-6 に解析モデルを示す。解析におけるコイルは 3.3.3(3)1) の形状および 3.3.3(3)2) で測定した特性をもとにモデル化を行った。図 3.3.4-6 左側がコイル 5° 分の部分モデルである。これを一周分 (360°) に換算することで、図中左側のフルモデルの解析結果を求めた。

給電効率の解析結果および、試験により測定した結果を表 3.3.4-2 に示す。解析結果と試験の差異は 2% 程度であり、同程度の結果が得られた。平成 27 年度の報告において解析精度が課題として挙げられていたが、本結果より解析と試験の差異は小さくなり解析精度の向上が見られた。

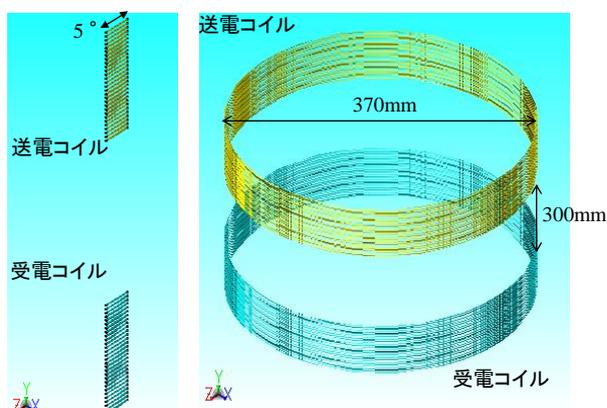


図 3.3.4-6 解析モデル

表 3.3.4-2 空気中の給電効率 (Q)

	給電効率(%)
電磁界解析結果	80.8
試験結果	82.6

## (5) 無線給電効率における鉄筋の影響評価

### 1) 鉄筋の影響評価のための小規模試験方法

表 3.3.4-1 に示した大きさの溶融金網を用意し、コイル間に設置することで鉄筋の影響評価を行う。鉄筋がコイル間のどの位置に設置されるかにより給電効率が変化することが考えられるため、鉄筋の影響評価においては、鉄筋の位置を送電コイルから 50mm、100mm、150mm（コイル間の中央）、200mm、250mm の 5 箇所に移動させて、給電効率の測定を行った。また、鉄筋量の変化の影響評価のために、溶融金網を 2 枚重ねた場合の給電効率の測定も行った。給電効率の測定には 3.3.3(3)5) と同様の機器を用いた。試験環境を図 3.3.4-7 に示す。



図 3.3.4-7 溶融金網を介した給電効率の影響評価

### 2) 鉄筋の影響評価のための小規模試験結果

給電効率の測定結果を図 3.3.3-8、表 3.3.4-3 に示す。図 3.3.3-8 より、空気中の伝送効率である 82.6% に対して大きく効率が低下し、金網の枚数が増えると効率も低下することがわかる。金網の位置がコイル間の中央にある時に一番効率が高く、16.6% となった。この結果から、プラグに鉄筋を用いた場合には、給電効率が低下することが予想される。

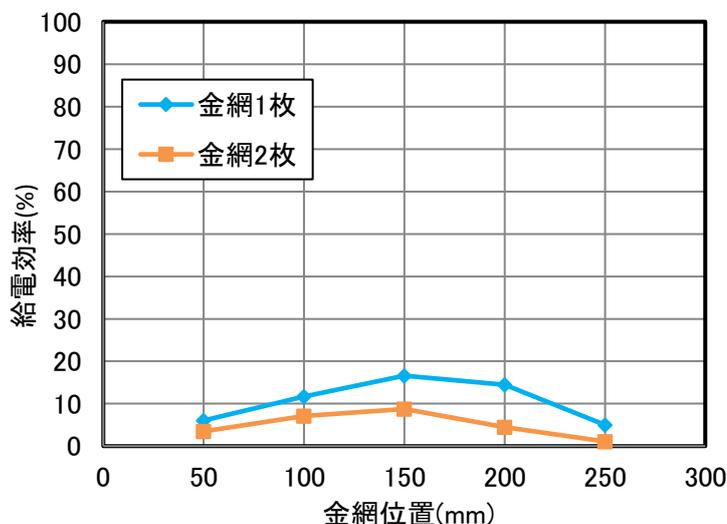


図 3.3.4-8 金網を介した給電効率 (Q)

表 3.3.4-3 金網を介した給電効率 (Q)

給電効率 (%)		金網枚数	
		1	2
金網位置 (mm)	50	6.06	3.47
	100	11.7	7.12
	150	16.6	8.76
	200	14.5	4.48
	250	5.02	1.11

### 3) 鉄筋の影響の改善方法の検討

効率低下の原因の考察として、金網がコイルのパラメータに与える影響を測定した。測定の条件として、金網を送電コイルから 150mm の位置に設置し、前述した 3.3.3(3)2) と同様に送電コイル特性の測定を行った。図 3.3.4-9 から図 3.3.4-11 に測定結果を示す。また、180kHz における各パラメータを表 3.3.4-4 に示す。測定結果より、金網を設置することでインダクタンスは低下し、抵抗値は増加する。これにより式 5 の関係からコイルの  $Q$  値が低下する。

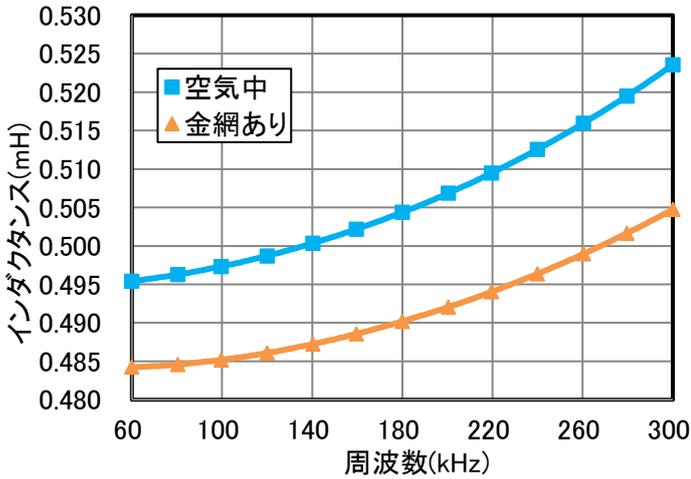


図 3.3.4-9 自己インダクタンス (金網)

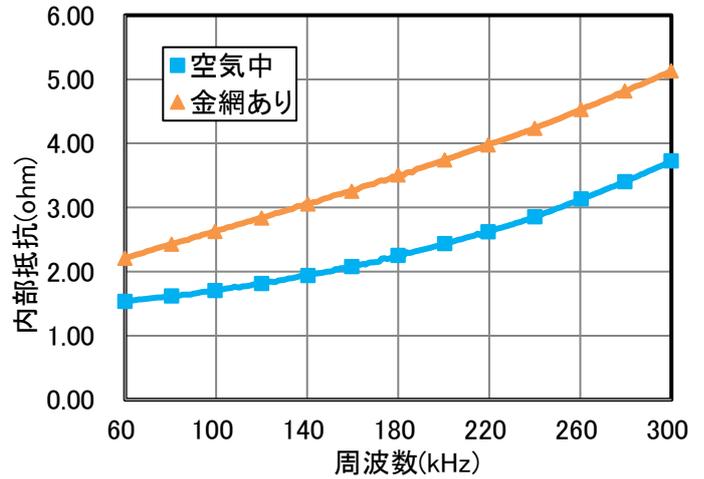


図 3.3.4-10 内部抵抗 (金網)

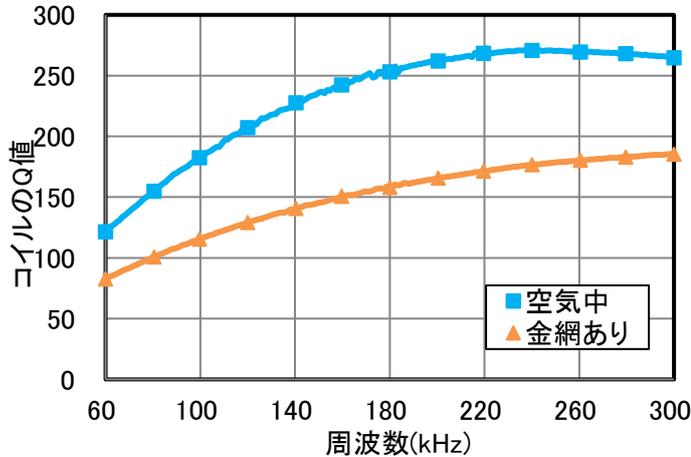


図 3.3.4-11 金網を介した周波数と給電効率 ( $Q$ ) の関係

表 3.3.4-4 180 kHz における空気中と金網がある時のコイルのパラメータ

	周波数(kHz)	自己インダクタンス(mH)	内部抵抗(ohm)	Q値
空気中	180	0.504	2.25	253
金網あり	180	0.490	3.51	157

ここから、給電効率が低下した原因を以下の 3 点が考えられる。

①コイルの共振周波数のずれ

インダクタンスの変化により、コイルの共振周波数がずれることによる効率の低下。

②最適負荷抵抗値の変化

コイル特性の変化により、最適負荷抵抗値がずれることによる効率の低下。

③媒体中（鉄筋など）による損失

媒体中で生じる損失であり、コイルの磁束が媒体を通る以上は避けられない損失。

これらの原因の中から、①②は改善が見込めるため、試行錯誤的に金網がある場合における効率の改善を試みた。金網がないときと、金網の位置は150mm（コイル間の中央）に設置したときにおいて、下記の4つの条件で試験を行った。

- a. 金網なし、電源周波数 180kHz、負荷抵抗 23Ω（4.4.1の空気中での給電効率の結果）
- b. 金網あり、電源周波数 180kHz、負荷抵抗 23Ω（4.5.2の金網位置 150mmの結果）
- c. 金網あり、電源周波数 182.5kHz、負荷抵抗 23Ω（試行錯誤的に共振周波数を調整）
- d. 金網あり、電源周波数 182.5kHz、負荷抵抗 5Ω（試行錯誤的に負荷抵抗を調整）

給電効率の測定結果を図 3.3.4-12、表 3.3.4-5 に示す。b との結果より、共振周波数を調整しなおすことで給電効率が約 8%改善した。また b と d の結果より、共振周波数と負荷抵抗の両方を調整することで給電効率が約 18%改善した。

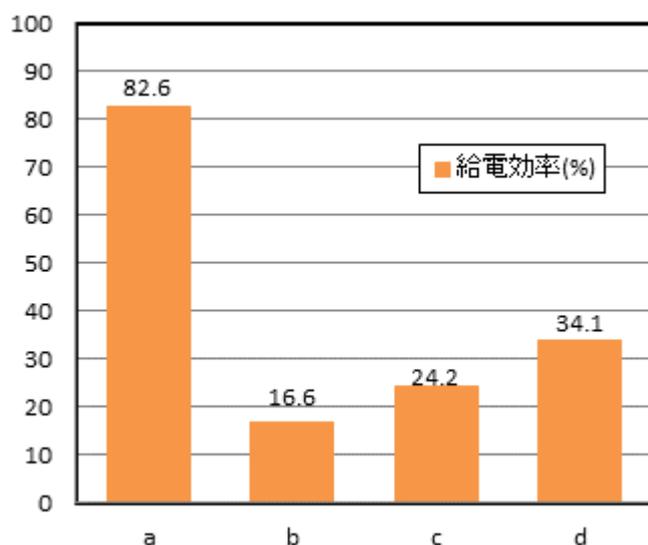


表 3.3.4-5 改善策に対する試験結果

条件	給電効率 (%)
a	82.6
b	16.6
c	24.2
d	34.1

図 3.3.4-12 改善策に対する試験結果

## (6) 無線給電効率におけるコンクリートの影響評価

### 1) コンクリートの影響評価のための小規模試験の方法

コンクリートにおいてもスケールダウンした小規模試験により給電効率の評価を行った。コンクリートは一般的な無筋プレキャストコンクリートとした。鉄筋とコンクリートを別々に評価することが目的であるため、無筋でスラグなどの金属を含まないものを用いる。100mm×100mm×600mmのコンクリートブロック使用し、これを積み重ねることでコンクリートの試験体とした。図 3.3.3-13 に使用するコンクリートブロック、表 3.3.4-6 にその配合を示す。

コンクリートの影響評価においては、コンクリートの量が少ないと給電効率への影響が見られない可能性が懸念される。そこで、コイル間距離を100mm～600mmまで100mmごとに増やしていき、コイル間にコンクリートブロックを積み重ねることでコンクリートの量を変化させることとした。給電効率の測定には前述した3.3.3(3)5)と同様の機器を用いた。給電効率の測定試験環境を図 3.3.4-14 に示す。

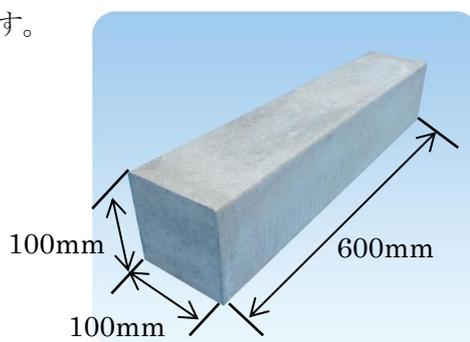


図 3.3.4-13 試験体のコンクリートブロック [27]

表 3.3.4-6 コンクリートブロックの配合

水セメント比 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
49	161	329	820	1.089	1.15



図 3.3.4-14 コンクリートを介した給電効率の影響評価

2) コンクリートの影響評価のための小規模試験の結果

給電効率の測定結果を図 3.3.4-15、表 3.3.4-7 に示す。図 3.3.4-15 より、300mm での給電効率は空气中より 3%程度低下している。しかし、コイル間距離が長くなるとコンクリートが給電効率へ与える影響は大きくなり、500mm や 600mm では空气中より 10%程度の効率の低下がみられた。

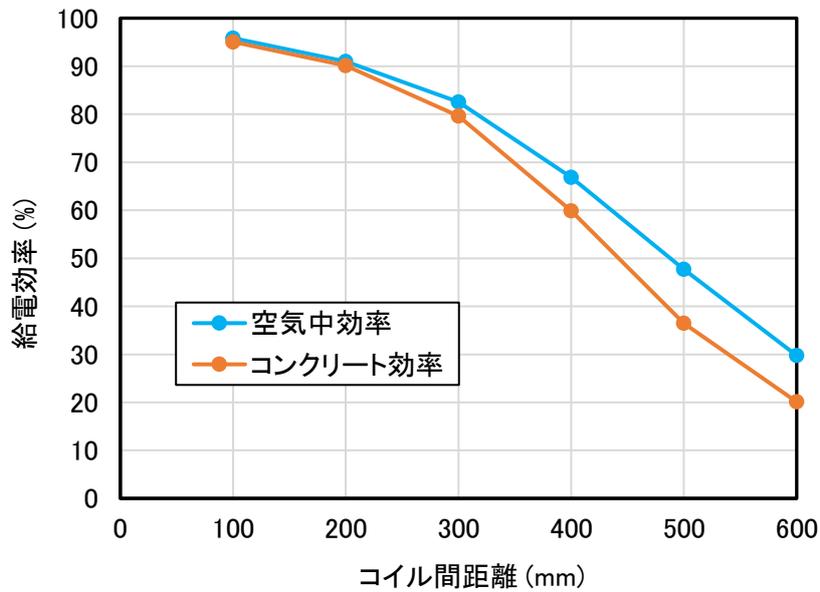


図 3.3.4-15 コンクリートを介した給電効率の測定結果

表 3.3.4-7 コンクリートを介した給電効率の測定結果

給電効率(%)		空气中	コンクリート
コイル間 距離(mm)	100	95.85	95.07
	200	90.96	90.10
	300	82.57	79.60
	400	66.83	59.91
	500	47.69	36.46
	600	29.76	20.11

## (7) 検討結果のまとめ

プラグを介した無線給電の評価として、鉄筋およびコンクリートが給電効率へ与える影響を給電試験により評価した。評価においては小規模試験を行った。

鉄筋の影響評価としては、スケールダウンした大きさの溶融金網を用いて給電試験を行い、給電効率に与える影響を測定した。測定の結果、送受電コイル間に金網がある場合の給電効率は空气中に比べると、82.6%から16.6%と大きく低下することがわかった。この効率低下の原因について考察を行い、共振周波数や最適負荷抵抗値を調整することで、16.6%から34.1%と約18%の効率の改善ができることを示した。更なる効率改善の検討案としては、鉄筋に導電率の低い素材を適用することや、送受電コイルの形状や配置を工夫することでプラグを迂回して岩盤中に磁束を通すことなどが考えられる。

コンクリートの評価も同様に、スケールダウンした大きさの無筋プレキャストコンクリートを用いて給電試験を行い、効率に与える影響を測定した。測定の結果、送受電コイル間にコンクリートがある場合の給電効率は、空气中に比べると3%程度の効率低下であり、影響はほとんど受けないことがわかった。一方で、コンクリートの施工では現地で生産された材料を用いることが一般的であるため材料の違いによる影響、コンクリートの含水率や地下水の影響などを評価することが、今後の課題として挙げられる

### 3.3.5 処分孔を対象とした無線給電技術の調査

処分孔に関するモニタリングについては、計測の目的や位置によって、複数の計測装置を処分孔の緩衝材内に設置することが考えられる。このモニタリングに無線給電を適用する場合、複数の測定装置に電力を送る必要がある。そこで本項では、その状況を考慮して、複数の受電コイルへ無線給電する技術について文献調査を行った。また、文献調査から複数のコイルを用いた給電技術の方式について分類を行い、その方式を処分孔へ適用する方策や試験計画を示した。また、複数のコイルを用いた給電技術の課題も示した。

#### (1) 調査内容

文献調査とそれを踏まえた方策などの概要を①～③に示す。

##### ①複数の受電コイルに無線給電を行う方式の分類

1つの送電コイルから複数の受電コイルに一括で無線給電を行う給電方法について文献調査を行い、その方法を3つの方式に分類した。また、その特徴を示した。

##### ②処分孔における複数の受電コイルへの無線給電

文献調査を踏まえ、分類した各方式を処分孔に適用する方策を示した。また、室内試験の計画を立案した。

##### ③複数のコイルが存在する無線給電の課題

複数のコイルを用いた無線給電の課題を抽出した。また、その課題に対する改善方法を調査し、有効と考えられる方法について示し、考察を行った。

①～③の調査した結果を(2)～(4)に示す。

## (2) 複数の受電コイルへ無線給電を行う方式の分類

1つの送電コイルから複数の受電コイルに一括で無線給電を行う給電方法を調査し、3つの方式に分類を行った。各方式について下記に示す。

### 1) インナー方式

1つの大きな送電コイルを用いて、複数の小さな受電コイルに一括で給電を行う方式である。図 3.3.5-1 にインナー方式のイメージを示す。この方式の特徴として、受電コイルが増えるほど総合効率が高くなるという利点が挙げられる[28] [29]。ここで、複数のコイルへ給電する場合の総合効率は、送電電力に対してすべての受電コイルが受ける電力合計の比である。総合効率が高くなる原理としては、受電コイルが増えることで、送電コイルから発生する磁束を逃すことなく受けられるからである。受電コイルの数を多く設置できるような場合や、受電コイルを大きくできる場合に有効な方法であると考えられる。

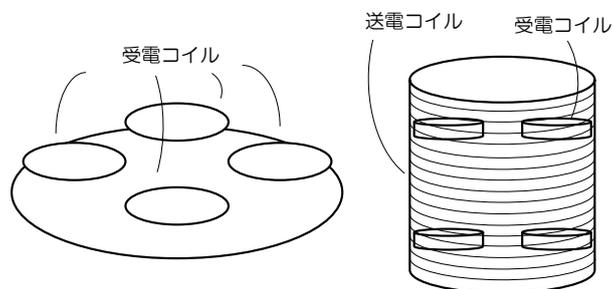


図 3.3.5-1 インナー方式

### 2) 中継方式

1つの送電コイルから、直線状もしくは平面状に配置された中継コイルを介して、個々の受電コイルに給電を行う方式である[30] [31]。直線状及び平面状に中継コイルが設置された方式のイメージを図 3.3.5-2 に示す。中継コイル[32] [33] は、電源や負荷が繋がっておらず、受けた電力を次に設置されたコイルに伝える役割を持っている。この方式と特徴として、中継コイルを用いることで伝送距離を長くできるという利点がある。一方で、受電コイルが多い場合には中継コイルが増加してしまうために、中継コイルによる損失が増加してしまい、受電コイルが増えるほど総合効率が低下する特徴がある。そのため、伝送距離が長くなる場合や、受電コイルの数が少ない場合に有効な方法であると考えられる。

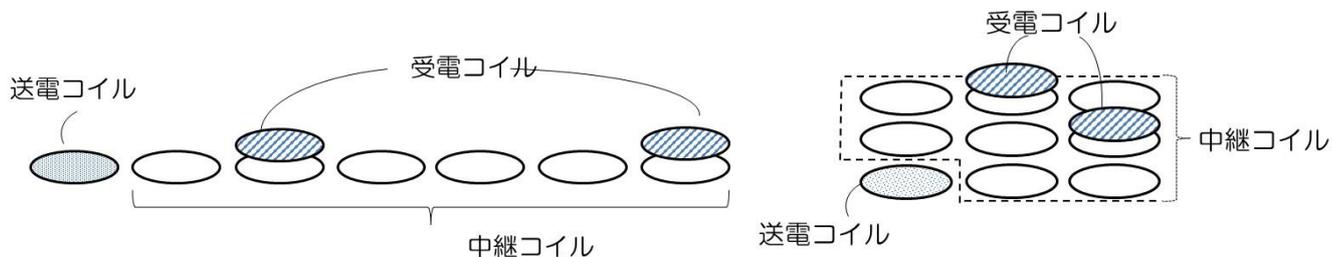


図 3.3.5-2 直線状の中継方式 (左) と平面上の中継方式 (右)

### 3) 平行二線式

送電側が平行二線路となっており、線路上に沿って設置された受電コイルに一括で給電する方式である。図 3.3.5-3 に平行二線式のイメージを示す。送電側の平行二線路はコイルのように何重にも巻くのではなく、往復の 2 本の線で構成される。そのため、容易に給電可能な範囲を広域化できることが特徴である[34]。平行二線式においては、電源周波数の波長に対して送電側の平行二線路の長さが長いため、磁界だけでなく電界も生じ、図 3.3.5-4 のように線路中に定在波が生じる[35]。そのため、図 3.3.5-4 のように線路中で電界と磁界の強度が交互にピークとなる。最初は線路中に生じる磁界の結合を用いて電力伝送を行っていたが、磁界の結合と電界の結合の双方を用いた電力伝送も提案されている[36]。この方法は、他の手法に比べて容易かつ安価に広域に給電を行うことができると考えられる。

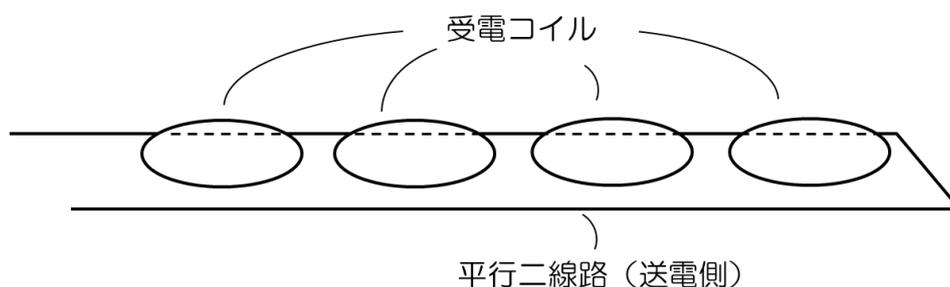


図 3.3.5-3 平行二線式

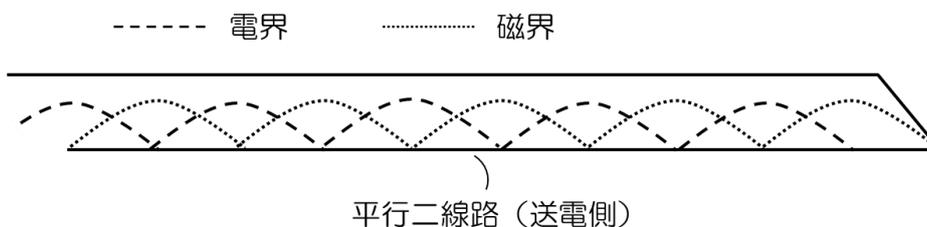


図 3.3.5-4 平行二線路の定在波のイメージ

### (3) 処分孔における複数の受電コイルへの無線給電

前節で分類を行った各方式について、処分孔へ適用する方策について示す。また、室内試験の計画を示す。

#### 1) インナー方式による処分孔の無線給電

処分孔の緩衝材内に設置するセンサの種類や数が多い場合、無線給電を利用するためにセンサに付属される受電コイルの数も増え、総合効率を上げることができるといえるためインナー方式は有効である。受電コイルが少ない場合でも、受電コイルを大きくし、送電コイルの近くにセンサを設置すれば総合効率を高くできると考えられる。

以上から、センサの数が多い場合には、効率を改善するために、図 3.3.5-5 (左) のように処分孔を大きなコイルで覆い、その中に複数のセンサを設置するような構造が考えられる。一方で、センサの数が少ない場合は、図 3.3.5-5 (右) のように送電コイルに対して受電コイルを大きくすることで効率の改善ができる。

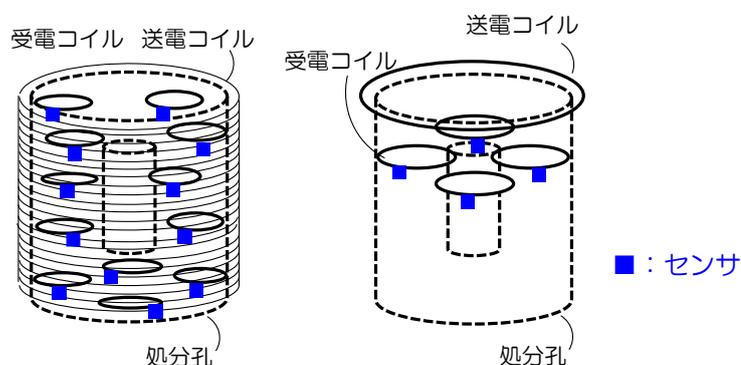


図 3.3.5-5 インナー方式の処分孔への適用イメージ

#### 2) 中継方式による処分孔の無線給電

中継方式では、中継コイルにより伝送距離を長くできる、一方で、受電コイルの数に応じて中継コイルが増え、それにともない中継コイルでの損失が増加する。そのため、伝送距離が長い場合や受電コイルが少ないときに有効な方法であると考えられる。

よって、中継方式を処分孔への無線給電へ適用する場合、図 3.3.5-6 のようにセンサに付属される受電コイルの数が少なく、処分孔の深い位置にセンサを設置する場合に有効な方式と考えられる。

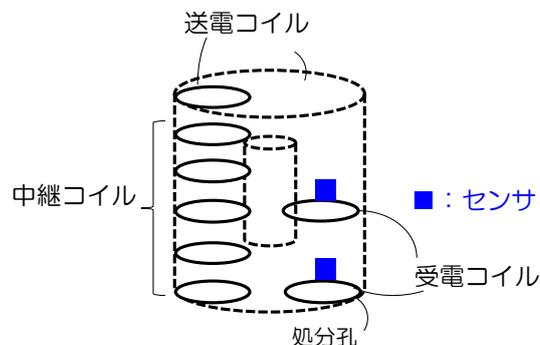


図 3.3.5-6 中継方式の処分孔への適用イメージ

### 3) 平行二線式による処分孔の無線給電

平行二線式では、線路中に磁界のみでなく電界も生じる。処分孔の緩衝材では磁界に比べて電界の損失が大きいため、処分孔の緩衝材において電界の損失が生じることが予想される。よって、この方式を処分孔に適用することは、不向きと判断した。

### 4) インナー方式と中継方式の組み合わせによる処分孔の無線給電

センサが多いときに効率が高いと考えられるインナー方式と、センサが少ないときに効率が高いと考えられる中継方式では、センサの数と設置位置によって方式を選定すべきである。ただし、センサの数や設置位置によっては、図 3.3.5-7 のように中継方式をインナー方式と組み合わせた給電も考えられる。センサの数や設置位置が具体的に制定された際には解析や試験を通して、今後、インナー方式、中継方式、インナー方式と中継方式を組み合わせた方法の中で処分孔に有効な複数のセンサへの無線給電方法を決めていく必要があると考えられる。

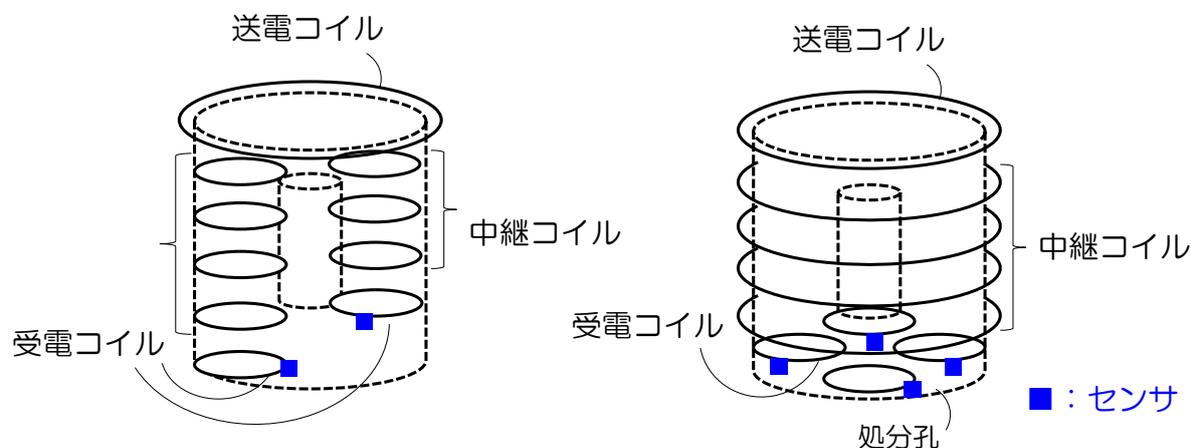


図 3.3.5-7 インナー方式と中継方式の双方の適用イメージ

### 5) 基礎検討のための室内試験の計画

上記のように複数の受電コイルを用いた場合の方式として、インナー方式と中継方式の2つを組み合わせた方法も考えられるが、基礎検討としてはインナー方式と中継方式を個々に評価することで、それぞれの特性を把握することが必要である。最初の検討として、単純な系を想定して、送受電コイルを3つ利用した試験より、それぞれの特性を定量的に把握することを計画した。以下にインナー方式と中継方式における基礎検討のための室内試験計画の概要を示す。

### インナー方式

基礎検討のための室内試験計画のイメージ図を図 3.3.5-8 と図 3.3.5-9 に示す。

図 3.3.5-8 の試験では、コイル間距離については同じ距離として受電コイル 1 つの場合と 2 つの場合の給電効率を把握する。これにより、受電コイルが増えた場合の特性を把握する。

図 3.3.5-9 の試験では、送電コイルと受電コイル 1 と、受電コイル 2 の距離が同じ場合と異なる場合の給電効率を把握する。これにより、送受電コイル間距離の差と給電効率の関係性を把握し、インナー方式の基礎的な特性を評価する。

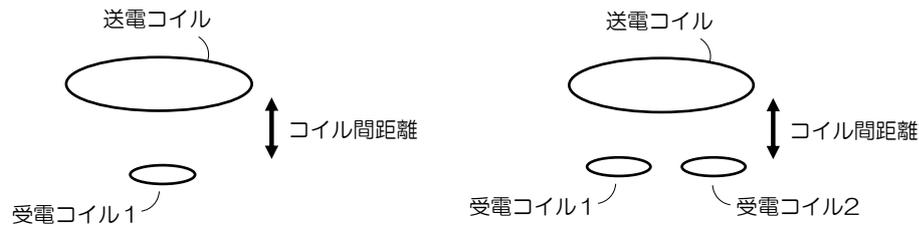


図 3.3.5-8 インナー方式の室内試験計画 1

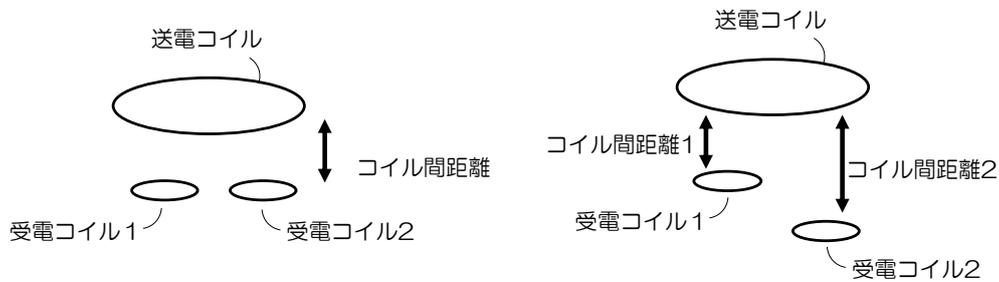


図 3.3.5-9 インナー方式の室内試験計画 2

### 中継方式

基礎検討のための室内試験計画のイメージ図を図 3.3.5-10 に示す。送電コイル 1 つ、受電コイル 2 つを利用した試験計画である。図 3.3.5-10 の試験では 2 つの試験を行う。1 つ目は、コイル間距離 3 を固定して、中継コイルの位置を変化させることで、中継コイルの位置と給電効率の関係性を評価する試験である。2 つ目は、中継コイルを送電コイルと受電コイルのちょうど中間に設置し、コイル間距離 3 を変化させた場合の給電効率を測定する。また、中継コイルを設置しない場合での試験も行い、中継コイルがある場合と無い場合の比較を行い、それらの関係を把握する。この 2 つの試験より、中継方式の基礎的な特性を評価する。

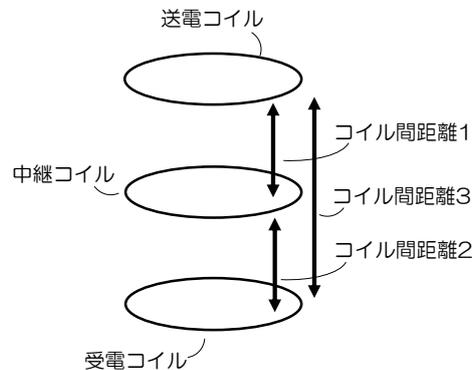


図 3.3.5-10 中継方式の室内試験計画

#### (4) 複数のコイルが存在する無線給電の課題

複数のコイルを用いた無線給電の各手法共通の問題として、クロスカップリングにより給電効率が低下する現象がある。クロスカップリングとは複数のコイルがある場合に意図しないコイル同士の結合である。たとえば、中継方式であれば隣り合う中継コイル同士の結合ではなく一つ先の中継コイルとの結合や、インナー方式のように1つの送電コイルから複数の受電コイルに一括で無線給電を行う場合は、受電コイル同士の結合である。図 3.3.5-11 に、インナー方式でのクロスカップリングの一例を示す。クロスカップリングが生じる場合は、共振周波数がずれてしまうために効率が低下する[37]。図 3.3.5-11 (左) のように受電コイル間が離れていれば十分無視できる場合もあるが、図 3.3.5-11 (右) のように近くなればなるほどその影響を考慮すべきである。

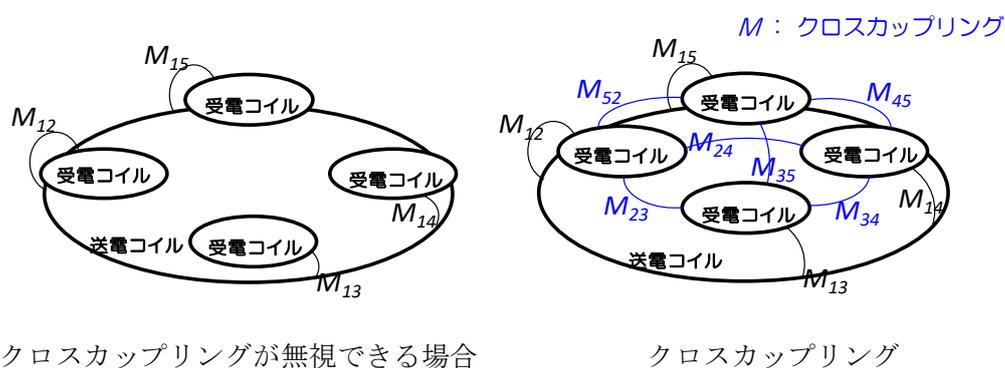


図 3.3.5-11 クロスカップリング (インナー方式での一例)

クロスカップリングの対策手法については、主に下記の3つの方法が文献により示されている。

##### ①最適負荷抵抗のみの調整

クロスカップリングを考慮し、再度回路方程式を解きなおすことで、クロスカップリングを考慮した最適負荷抵抗値に変更する[38][39]。

##### ②クロスカップリングの補償

クロスカップリングにより共振周波数がずれるため、補償用のリアクタンス成分 (コイルやコンデンサ) を直列に回路に追加してクロスカップリングを補償し、再度共振させる方法である[37][40]。クロスカップリングの検討においては、受電コイルが2つ、あるいは3つ程度の検討にとどまっていることが多いが、文献[40]では任意の受電コイル数に対応した補償方法の定式化が行われている。

### ③電源周波数の調整

クロスカップリングにより共振周波数がずれるため、コイルではなく電源周波数を調整して再度共振させる方法である[41]。

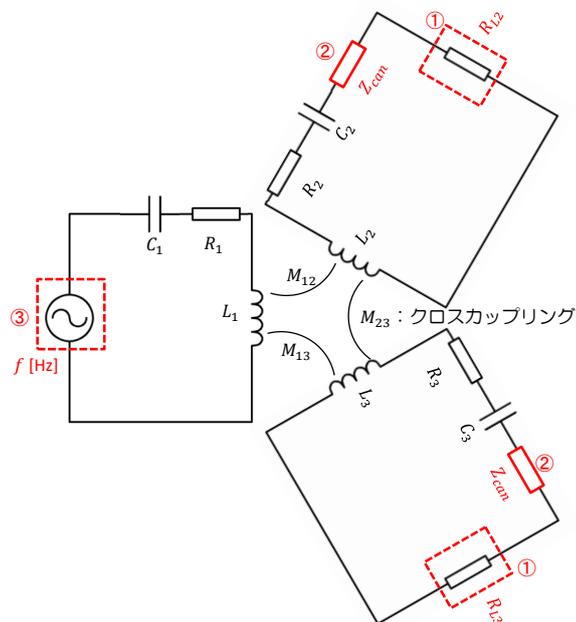


図 3.3.5-12 受電コイルが2つの場合の等価回路とクロスカップリング

図 3.3.3-1 の回路図に、受電コイルが2つの場合である1対2に書き換えたものを図 3.3.5-12 に示す。図中の赤文字が、各方法で調整を行う箇所である。

これらの3つの対策方法について、文献[37]では一例として、受電コイルが2つの1対2の無線給電において各方法の比較が行われている。効率の改善結果としては③が一番高く、次に②、①の順に効率が改善されるという結果が述べられている。

その他にも、図 3.3.5-11 の説明で述べたとおり、受電コイル同士を十分に離すことでクロスカップリングの影響を抑えることができるため、電磁界解析などであらかじめ影響を評価したコイル設計も行われている[42]。

地下環境においては他の電磁波を用いた技術との干渉もなく、使用できる周波数帯についての自由度は高いと考えられる。調査結果を踏まえると、処分孔においてクロスカップリングによる効率低下が確認された場合には、③の電源周波数の調整を行う方法が適していると考えられる。

## (5) 調査結果のまとめ

処分孔を対象とした無線給電の技術として、複数の受電コイルへ一括で無線給電を行う技術について調査を行った。複数の受電コイルへ給電する方法について、インナー方式、中継方式、平行二線式の3つの方式に分類を行った。各方式のうち、インナー方式と中継方式については処分孔への適用が可能であり、どの方式を利用するかは、処分孔のモニタリングのために設置されるセンサの数や位置によって選定すべきである。また、インナー方式と中継方式を組み合わせることも考えられる。さらに、上記を踏まえた基礎的な室内試験の計画概要を示した。

複数の受電コイルに無線給電を行う各方式共通の問題として、クロスカップリングによる効率低下が問題となることがわかった。そこで、受電コイル間の結合などのクロスカップリングが生じると共振周波数が変化してしまい効率が低下する問題について改善方法を調査した。調査した方法の中では、ずれたコイルの共振周波数に電源周波数を合わせることで有効と考えられる。

## 3.4 技術メニューの整備

### 3.4.1 概要

技術メニューの開発では、将来の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、モニタリングの実施時期と場所及び測定パラメータを基に、技術要件及び計測方法候補等を WEB 上での検索・閲覧可能なシステムを開発した。

平成 28 年度は、これまでに整備した情報やデータ等の確認を行った。また、技術メニューの操作性向上を目的に現状の課題を整理し、改良方法を検討した。

### 3.4.2 実施内容

実施内容は以下のとおりである。

- ① 技術メニューのデータ確認
- ② 操作性向上のためのシステム改良検討

#### (1) 技術メニューのデータ確認

これまでに整備したデータについて、計測機器の製造中止や機器メーカー等のアドレス変更等によって WEB 上で閲覧できなくなっているデータの有無などを確認し、必要な更新（削除を含む）を行った。また、整備した時期の違い等により整合性が保たれていないデータがあった場合には、データ項目の定義を整理しつつ、用語の統一等により整合性を図る必要がある。

データ更新の際の方針や更新の概要を表 3.4.2-1 に示す。

#### 1) リンク参照修正・削除

技術情報データベース（以下、「技術情報 DB」）において、リンク先が見つからない箇所について、リンク先の修正を実施する必要がある。なお、リンク先がない場合には、リンクを削除する。作業手順は以下の通りとした。

- ① Techinf.xls の列 AH（情報ソース）を確認・修正
- ② Techinf.xls の再登録

#### 2) 不要データ（製造中止機器等）の削除

技術情報 DB に登録されている機器情報のうち、既に製造が中止されている等、現段階において不要と考えられる機器情報について、技術情報 DB からの削除を実施する必要がある。作業手順は以下の通りとした。

- ① Techinf.xls を確認・修正
- ② Techinf.xls の再登録
- ③ Sequence.xls の修正・再登録（不要機器情報の機器 ID を削除）

### 3) データの整合性等に関わる修正

#### a. 計測方式の用語統一

技術情報 DB に登録されている同一方式に複数の同じ機器が重複して登録されているデータがある。これらのうち、情報の内容を鑑みて同一の機器情報に統合を行う必要がある。

また、同一の計測方式と考えられるものの、その用語が不統一の機器情報がある場合には、計測方式の用語統一を実施する。

上記の作業手順は以下の通りとした。

- ① Techinf.xls を確認
- ② 用語統一、機器情報統合の必要性検討
- ③ Techinf.xls の修正・再登録

#### b. 伝送方法、伝送方式の見直し

技術情報 DB に登録されている伝送方法、伝送方式について、同一の用語（有線、無線、等）が伝送方法、伝送方式に混在して登録されているため、登録内容を整理し、データの修正を実施する。作業手順は以下の通りとした。

- ① Techinf.xls の列 AC（伝送方法）及び列 AD（伝送方式）を確認・修正
- ② Techinf.xls の再登録

#### c. 文字化けの修正

ブラウザのバージョンの更新等に伴い、文字化けが発生しているため、データの修正を実施する必要がある。作業手順は以下の通りとした。文字化けについては、特殊な記号が要因として文字化けしていたため、修正する。

- ① システムの各画面の確認
- ② Techinf.xls 等、修正必要箇所に該当する登録ファイルの修正・再登録

#### d. 記述の一部修正

記述内容に「今後検討」や「検討中」等の未完成的なデータがあるため見直しを行い、修正する。

表 3.4.2-1 技術メニューのデータ更新の方針及び更新の概要

項目	更新の方針	更新結果	該当箇所	該当機器*
修正・削除 リンク	リンク先が見つからない箇所について修正・削除する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>基本的に該当機器等に関連する企業の HP のトップページをリンク先とする。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>情報ソース (列 AH)</li> </ul>	リンクがある全ての機器
不要データ (製造中止機器等) の削除	計測方式の記載内容が曖昧な場合には、この手法を削除する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>例えば、計測方式が、単なる「加速度計」や「静電容量式」とあり、情報ソースも不明な情報を削除</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測方式 (列 B)</li> <li>情報ソース (列 AH)</li> </ul>	削除する機器 ID 18, 50, 107, 108, 112, 134, 137~140, 171, 173, 203, 236, 314, 315, 409, 905
	技術メニューの目的以外の機器の削除	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去の経緯により搭載していた、例えば作業安全に係わる手法などについては、削除する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>情報ソース (列 AH) の内容より判断</li> </ul>	削除する機器 ID 37, 58, 61, 87, 88, 109, 110, 114, 115, 132, 181, 233~235, 238, 503, 504, 516, 517, 519, 610, 634, 701, 728
	類似手法が新規に開発されている／処分環境での実績を有した場合には、過去の手法の情報や類似の一般的な手法の情報は削除	<ul style="list-style-type: none"> <li>情報を削除</li> <li>情報ソースより、有益な過去の実績は類似手法の情報に統合</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測方式 (列 B) 及び情報ソース (列 AH) の内容より判断</li> </ul>	削除する機器 ID 39, 40, 147, 169, 193
	情報ソースの更新・見直し	<ul style="list-style-type: none"> <li>情報ソースの記載内容のうち、センサ型番が記載されている場合には、今後の更新を考慮し、機器自体の WEB 情報と共に削除する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>情報ソース (列 AH)</li> </ul>	センサ型番記載機器
データの整合性に関する修正 計測方式の用語統一	現在は、「計測機器自体 (～センサ)」、「～式」、「～法」など、様々なモニタリング手法の記載が混在しているため、これを統一する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測機器自体の表記は取りやめる。</li> <li>主にセンサ類等の計器によるモニタリング手法は、「～方式」に統一</li> <li>主に物理探査によるモニタリング手法は、「～法」に統一</li> <li>その他、全体的なシステムによるモニタリング手法は、「～システム」に統一</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測方式 (列 B)</li> </ul>	修正を行なった機器 ID 1, 4, 7, 10~13, 17, 20, 21, 24~28, 34, 35, 41~47, 51, 56, 57, 60, 63~66, 69~75, 77~79, 81, 83, 84, 89, 91~95, 98~104, 111, 113, 116, 118, 119, 129~131, 135, 136, 141~143, 155, 156, 159, 161, 167, 168, 170, 174~177, 179, 180, 182, 183, 185, 189~192, 194~197, 200, 205, 207~210, 212~215, 218, 221, 223, 224, 229, 230, 240, 241, 244, 302, 310~313, 316, 403, 406, 407, 410, 414~416, 426, 428, 429, 501, 506~508, 510~515, 518, 602, 603, 605, 611~613, 660, 702, 704, 705, 708, 718, 730, 800~869, 871, 879~883, 885, 887~890, 892~899, 901~904, 906, 907, 1000, 1001

項目	更新の方針	更新結果	該当箇所	該当機器※	
データの整合性等に関する修正	計測方式の用語統一	重複したモニタリング手法を統合・削除する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測方式 (列 B)</li> <li>情報ソース (列 AH)</li> </ul>	統合により削除する機器 ID 2, 5, 6, 9, 16, 29~31, 52~55, 59, 62, 80, 85, 96, 97, 106, 121, 125, 128, 144, 145, 154, 157, 158, 160, 163~165, 178, 184, 188, 211, 216, 217, 232, 237, 239, 243, 245, 246, 300, 301, 303~309, 400~402, 404, 405, 408, 411~413, 427, 500, 502, 505, 710, 875, 891	
		新規の手法の追加	<ul style="list-style-type: none"> <li>見直しの過程で更新・開発された手法を追加</li> </ul>	—	追加する機器 ID 706
		その他の項目の見直し	<ul style="list-style-type: none"> <li>上記以外の項目については「情報元参照」に修正</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>上記以外適宜</li> </ul>	—
伝送方法、伝送方式の	伝送方法／伝送方式に記載すべき内容の統一	<ul style="list-style-type: none"> <li>伝送方法は、有線／無線／ファイバに統一し、これ以外の記載がある場合には削除する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>伝送方法 (列 AC)</li> </ul>	修正する機器 ID 8, 19, 41, 42, 49, 60, 66, 70, 82, 86, 98, 104, 122, 123, 127, 135, 136, 141~143, 151, 159, 162, 206, 215, 221, 222, 224, 702, 703, 705, 841	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>伝送方式：アナログ／デジタルに統一し、これ以外の記載がある場合には削除する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>伝送方式 (列 AD)</li> </ul>	修正する機器 ID 8, 19, 35, 42, 60, 66, 70, 78, 82, 86, 98, 122, 123, 127, 135, 136, 141~143, 151, 159, 162, 174, 191, 206, 215, 221, 222, 224, 247, 248, 702, 703	
文字化け	文字化けの修正	<ul style="list-style-type: none"> <li>文字化けしない文字に変更</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>情報ソース (列 AH)</li> </ul>	文字化けしていた機器	
記述の一	今後に先送りするような表現を削除	<ul style="list-style-type: none"> <li>「今後検討」や「検討中」などを削除</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Master.xls</li> <li>Tree.xls</li> <li>Sequence.xls</li> </ul>	—	

## (2) 操作性向上のためのシステム改良検討

システム全体を通して、操作性の向上にむけたシステム改良点を抽出し、改良後の機能や画面、改良方法について検討した。改良前後の画面イメージを図 3.4.2-1 に示す。

### 1) 検索条件からの「リリース日」の削除

「リリース日」は、Techinf.xls において設定する情報の一つであり、技術情報 DB の検索条件の一つとして表示している。しかし、実際のデータには、「リリース日」のデータが登録されていない機器が多いため、検索条件から「リリース日」を削除することとした。本改良のイメージは、図 3.4.2-1～図 3.4.2-2 の赤色枠部分に相当する。本改良のためのプログラム変更点は表 3.4.2-2 の通りである。

表 3.4.2-2 検索条件のプログラム変更点

プログラムファイル名	変更部分
program/templates/tdRfnFm.tpl	リリース日入力欄の削除
program/templates/tdRfnRs.tpl	検索結果画面の検索条件で表示されるリリース日欄の削除

### 2) 検索結果における「型番」、「商品名」の表示場所の統一

「型番」や「商品名」は、Techinf.xls において設定する情報の一つであり、技術情報 DB 等の検索結果の表示画面に、機器情報の一つとして表示される。しかし、現状、ほとんどの機器において、「型番」や「商品名」を含む機器の仕様等の詳細情報は、「実績／情報元」において一括して記述する方式を採っており、「型番」や「商品名」については、「情報元参照」と表示される。このため、「型番」や「商品名」については、検索結果の表示画面に表示させないこととした。本改良のイメージは、図 3.4.2-1～図 3.4.2-2 の青色枠部分に相当する。本改良のためのプログラム変更点は表 3.4.2-3 の通りである。

表 3.4.2-3 検索結果におけるプログラム変更点

プログラムファイル名	変更部分
public_html/tdRfnRs.php	検索結果のタイトル行の変更
public_html/stylesheet/pageheader.css	検索結果テーブルのカラム幅を最適なサイズにする

### 3) 計測／伝送方法比較表の非表示化

計測／伝送方法比較表については、前述の通り、「今後検討」や「検討中」等と未整備なデータが多いため、データが整備されるまで表示させないこととした。本改良のイメージは、図 3.4.2-1～図 3.4.2-2 の緑色枠部分に相当する。本改良のためのプログラム変更点は表 3.4.2-4 の通りである。

表 3.4.2-4 計測／伝送方法比較表の非表示化のためのプログラム変更点

プログラムファイル名	変更部分
program/templates/RecmInst_MeasRqr.tpl	計測/伝送比較表ボタンの非表示
program/templates/_recommended_inst.tpl	ツリービュー、テーブルビューから遷移する検索結果テーブルのカラム幅を最適なサイズにする

改良前

改良後

Technical Menu System on Monitoring of Geological Disposal  
RWMC 地層処分モニタリング技術メニュー  
トップ || 技術メニュー || 技術情報データベース || 記録保存 || 用語説明 || ご意見 || リンク || ライブラリ

技術情報データベース

検索対象: 技術情報データベース内

検索条件と参照したい情報の種別を選択し、検索ボタンを押してください。

検索条件

計測パラメータ/伝送方法 大分類: [ ] 小分類: [ ]

方式 [ ]

メーカー名 [ ]

リリース日 [ ]/[ ]/[ ] (YYYY/MM/DD)

フリーワード [ ]

出力情報の種別

測定範囲(データ) 測定精度(時間的) 測定点数(空間的) 精度 全選択

感度 分解能 耐久性(耐水) 耐久性(耐化学) 耐久性(長期性) 耐久性(耐放射線) 耐久性(その他外乱) 寿命 再検性 校正方法 校正精度 サイズ 重量 電源 伝送方式 適用実績等

検索

Technical Menu System on Monitoring of Geological Disposal  
RWMC 地層処分モニタリング技術メニュー  
トップ || 技術メニュー || 技術情報データベース || 記録保存 || 用語説明 || ご意見 || リンク || ライブラリ

技術情報データベース

検索対象: 技術情報データベース内

検索条件と参照したい情報の種別を選択し、検索ボタンを押してください。

検索条件

計測パラメータ/伝送方法 大分類: [ ] 小分類: [ ]

方式 [ ]

メーカー名 [ ]

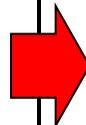
フリーワード [ ]

出力情報の種別

測定範囲(データ) 測定精度(時間的) 測定点数(空間的) 精度 全選択

感度 分解能 耐久性(耐水) 耐久性(耐化学) 耐久性(長期性) 耐久性(耐放射線) 耐久性(その他外乱) 寿命 再検性 校正方法 校正精度 サイズ 重量 電源 伝送方式 適用実績等

検索



Technical Menu System on Monitoring of Geological Disposal  
RWMC 地層処分モニタリング技術メニュー  
トップ || 技術メニュー || 技術情報データベース || 記録保存 || 用語説明 || ご意見 || リンク || ライブラリ

技術情報データベース

検索条件

計測パラメータ/伝送方式	熱	温度
方式	-	-
メーカー名	-	-
リリース日	-	-
フリーワード	-	-

検索結果

計測パラメータ/伝送方法	方式	メーカー	型番	商品名	詳細情報
温度	光ファイバ式(Bragg格子型)	情報元参照	情報元参照	温度計情報元参照	詳細情報参照
温度	光ファイバ式(分相型)	情報元参照	情報元参照	温度計情報元参照	詳細情報参照
温度	光ファイバ式(光弾断層分相型)	情報元参照	情報元参照	温度計情報元参照	詳細情報参照
温度	光ファイバ式(OPL型)	情報元参照	情報元参照	温度計情報元参照	詳細情報参照
温度	光ファイバ式	Rockwell	情報元参照	温度計情報元参照	詳細情報参照
温度	振動計式	Geokon	情報元参照	温度計情報元参照	詳細情報参照
温度	比抵抗式	Rotronic	情報元参照	温度計情報元参照	詳細情報参照
温度	測定抵抗棒式	情報元参照	情報元参照	温度計情報元参照	詳細情報参照

Technical Menu System on Monitoring of Geological Disposal  
RWMC 地層処分モニタリング技術メニュー  
トップ || 技術メニュー || 技術情報データベース || 記録保存 || 用語説明 || ご意見 || リンク || ライブラリ

技術情報データベース

検索条件

計測パラメータ/伝送方式	熱	温度
方式	-	-
メーカー名	-	-
フリーワード	-	-

検索結果

計測パラメータ/伝送方法	方式	メーカー	詳細情報
温度	光ファイバ式(Bragg格子型)	情報元参照	温度計情報元参照
温度	光ファイバ式(分相型)	情報元参照	温度計情報元参照
温度	光ファイバ式(光弾断層分相型)	情報元参照	温度計情報元参照
温度	光ファイバ式(OPL型)	情報元参照	温度計情報元参照
温度	光ファイバ式	Rockwell	温度計情報元参照
温度	振動計式	Geokon	温度計情報元参照
温度	比抵抗式	Rotronic	温度計情報元参照
温度	測定抵抗棒式	情報元参照	温度計情報元参照
温度	熱電対式	Geokon	温度計情報元参照
温度	熱電対式	情報元参照	温度計情報元参照
温度	熱電対式	情報元参照	温度計情報元参照
温度	熱電対式	情報元参照	温度計情報元参照
温度	サーミスタ式	情報元参照	温度計情報元参照
温度(示温管(示温管)型)	温度計情報元参照	温度計情報元参照	温度計情報元参照

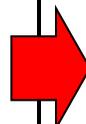


図 3.4.2-1 操作性向上のためのシステム改良前後の画面イメージ (その1)

改良前

Technical Menu System on Monitoring of Geological Disposal  
RWMC 地処分場モニタリング技術メニュー

トップ || 技術メニュー || 技術情報データベース || 記録保存 || 用語説明 || 意見 || リンク || ライブラリ

技術メニュー

詳細情報

計測場所/部位	大分類	中分類	小分類
計測場所/部位	地上環境(生物圏)	大気環境	—
計測パラメータ/伝送方法	放射能	—	放射線量

施設選定の際の考慮事項

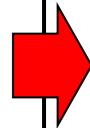
地上環境(生物圏)での放射線量計測モニタリング項目とする場合、例えば施設選定中において定期的に地表から直接の手法により計測可能な方式を決定する必要がある。

計測/伝送方法比較表

編集 参考文獻

推奨施設情報 (他の項目) ★:実績あり ●:可能性あり

計測パラメータ/伝送方法	方式	メーカ	型番	商品名	詳細情報	放射線量	放射線	検出								
放射線量	Bf-3中子比増設管式	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	GM計数管式	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	He-3中子比増設管	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	Nal(Tl)シンチレータ式	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	v検流管型電離管式	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	比増設管式	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	液体シンチレータ式	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	電離管式	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	ガラスシンチレータ式	情報元参照	情報元参照	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★



改良後

Technical Menu System on Monitoring of Geological Disposal  
RWMC 地処分場モニタリング技術メニュー

トップ || 技術メニュー || 技術情報データベース || 記録保存 || 用語説明 || 意見 || リンク || ライブラリ

技術メニュー

詳細情報

計測場所/部位	大分類	中分類	小分類
計測場所/部位	地上環境(生物圏)	大気環境	—
計測パラメータ/伝送方法	放射能	—	放射線量

施設選定の際の考慮事項

地上環境(生物圏)での放射線量計測モニタリング項目とする場合、例えば施設選定中において定期的に地表から直接の手法により計測可能な方式を決定する必要がある。

編集 参考文獻

推奨施設情報 (他の項目) ★:実績あり ●:可能性あり

計測パラメータ/伝送方法	方式	メーカ	詳細情報	放射線量	放射線	検出										
放射線量	Bf-3中子比増設管式	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	GM計数管式	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	He-3中子比増設管	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	Nal(Tl)シンチレータ式	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	v検流管型電離管式	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	比増設管式	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	液体シンチレータ式	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	電離管式	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★
放射線量	ガラスシンチレータ式	情報元参照	実績/情報元参照	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★	★

図 3.4.2-2 操作性向上のためのシステム改良前後の画面イメージ (その2)

## 3.5 まとめ

### 3.5.1 無線伝送技術の開発

平成 28 年度は、地中無線通信技術の開発のうち中継装置について、平成 27 年度の検討成果に基づき以下の項目を実施した。

#### (1) 中継装置の製作および動作確認

本検討では、中継装置の設計フロー図に従い、小型送信器 10 台分のデータを 100m 先に 10 年間継続して送信可能な内臓電池を確保するとともに、深度 500m の静水圧(5MPa 程度)に耐えられる筐体材料として硬質塩化ビニル樹脂 (PVC) を用いた筐体の製作を行った。アンテナの寸法は直径 145mm、高さ 455mm となり、電源を内包する筐体の寸法は、直径 216mm、高さ 565mm で円筒部の肉厚を 35mm (蓋部厚 55mm) とすることで、静水圧等の前提条件を満足する結果となった。また、品質確認のため、製作した中継装置に対して温度試験と振動試験を行った後に、動作検証・ランニング試験を行って継続的なデータ通信ができることを確認した。

#### (2) 地中無線伝送技術に関する開発状況の調査

平成 29 年度の取りまとめに向けた予備的調査として、地中無線伝送技術に関する国内外での開発状況について調査した。地層処分分野では、本研究開発を除くと、スペインとオランダの 2 事例を確認した。地層処分以外では、鉱山、ダム、河川堤防、斜面、トンネル現場等での開発事例を確認したため、参考事例として整理した。

#### (3) URL で実施中の適用試験データの整理、確認

本検討では、平成 26 年度から、幌延深地層研究センターおよび瑞浪超深地層研究所の地下調査坑道にて実施している地中無線伝送試験に関して、動作状況等を整理した。

- 幌延深地層研究センター

平成 29 年 2 月末時点までの約 27 ヶ月間について、全てのセンサにおいて継続的にデータ取得 (データ通信) でできていることを確認した。

- 瑞浪超深地層研究所

平成 29 年 3 月中旬まで継続的にデータ通信できていることを確認した。その後に発生したデータ収録装置 (パソコン) の一時的なデータ未取得に関しては、原因調査を行い、対策を実施した。

### 3.5.2 無線給電システム設計手法の検討

#### (1) 設計手法の検討

結合係数 ( $k$ ) と  $Q$  値による計算値 (給電効率の算出) と実際の給電試験における実測値を比較し、設計手法 (給電効率の算出) の実証を行った。計算値と実測値が一致したことが

ら、結合係数 ( $k$ ) と  $Q$  値によって給電効率を算出することが可能であることを確認した。

## (2) 変位、偏角による無線給電の影響評価

施工時に発生する送受電コイルの設置位置ずれで生じる影響の評価を行った。具体的には、送電コイルと受電コイルの間に、変位および偏角がある場合の給電効率への影響評価を行った。影響評価結果においてコイル間距離とコイル直径が同じ場合では、変位がコイル直径の 50% に対して 5% 程度の効率低下、偏角が  $50^\circ$  生じた場合では 2% 程度の効率低下であった。したがって、送受電コイル施工時には、変位、偏角に対する高い精度を必要としないことを確認した。

## (3) プラグを介した無線給電の影響評価

プラグを介した無線給電の影響評価として、鉄筋及びコンクリートがそれぞれ無線給電に与える影響評価を行った。鉄筋を模擬した金網を介する給電試験では、金網を介することにより給電効率が 66% に低下することを確認した (82.6% → 16.6%)。この効率低下の原因について考察を行い、共振周波数や負荷抵抗を調整することにより 34.4% まで改善ができることを確認した。しかしながら、鉄筋などの金属がコイル間にあることによる給電効率の低下は無視できない一方、コンクリートを介した影響評価については、3% 程度の給電効率の低下であり、プラグを介した無線給電の評価では、鉄筋に対する影響軽減策を検討することが重要である。

## (4) 処分孔を対象とした無線給電技術の調査

複数の受電コイルに給電を行う技術について調査した。調査の結果を複数の受電コイルに給電する方法について分類し、処分孔への適用方法を述べた。また、調査結果および見つかった課題を基に、初期検討として単純な系における試験計画(案)を立案した。

また本業務より、今後の課題として下記の 2 つが考えられる。

1. 緩衝材やコンクリートにおいて、地下水や含水率、生産地の影響が出る可能性があるため、これらが無線給電に与える影響評価を行うこと。
2. 複数の受電コイルに給電する手法において立てた試験計画を基に、給電試験を行いその特性の評価を行うこと。

### 3.5.3 技術メニューの整備

これまでに整備した情報やデータ等の確認を行った。また、技術メニューの操作性向上を目的に現状の課題を整理した上で、改良方法を検討し、改良内容 (案) を提示した。

参考文献

- [1] 小寺 秀俊 (2011), 有限要素法の学び方・設計現場に必要な CAE 知識, 日刊工業新聞社, pp. 97-101.
- [2] MoDeRn (2014). Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal: The MoDeRn Project Synthesis. MoDeRn Project Deliverable D-6.1.
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター (2014), 平成 25 年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発報告書 (第 3 分冊) モニタリング関連技術の整備.
- [4] MoDeRn (2013a). Development Report of Monitoring RTD. MoDeRn Project Deliverable D-2.3.1.
- [5] MoDeRn (2013b). Wireless Sensor Network Demonstrator Report. MoDeRn Project Deliverable D-3.3.1.
- [6] MoDeRn (2013c). Wireless Data Transmission Demonstrator: from the HADES to the surface. MoDeRn Project Deliverable D-3.4.2.
- [7] MoDeRn (2013d). WP2 State of Art Report on Monitoring Technology. MoDeRn Project Deliverable D-2.2.2.
- [8] Powell, J. A. (1976) An Electromagnetic system for detecting and locating trapped miners. Bureau of Mines Report of Investigations, 8159, United States Department of the Interior.
- [9] Ultra Electronics (2009). Magneto Inductive Rock Phone. Product technical specification brochure, Ultra Electronics Maritime Systems, San Bernadina, USA.
- [10] 浅野 勇・坂田 進・矢野 康明・林田 洋一・向後 雄二 (2003), 低周波電磁波を用いたワイヤレス間隙水圧計の開発, 第 38 回地盤工学研究発表会, T-12, pp. 1269-1270.
- [11] 浅野 勇・向後 雄二・高橋 章・遠目塚 良一 (2004), ワイヤレス間隙水圧計の開発, ダム工学会第 14 回研究発表会講演集.
- [12] 樋口 佳意・向後 雄二・高橋 章 (2004) : ワイヤレス間隙水圧計の開発と現場への適用事例, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム発表論文集, pp. 61-64.
- [13] 林田 洋一・遠目塚 良一・浅野 勇・増川 晋・田頭 秀和 (2009), ワイヤレス間隙水圧計の長期計測性能の検証, 農村工学研究所技報, 第 210 号, pp. 243-254.
- [14] 林田 洋一・遠目塚 良一・浅野 勇・増川 晋・田頭 秀和 (2013), ロックフィルダムにおける地中無線通信型埋設器の長寿命化に関する検証, 土木工学論文集 F3 (土木情報学), Vol. 69, No. 1, pp. 47-57.
- [15] 樋口 佳意・永江 祐・田村 圭司・内田 太郎・伊藤 洋輔・秋山 浩一 (2009), 地中無線通信システムを活用した斜面崩壊検知センサの開発と現場への適用, 第 48 回日本地すべり学会研究発表会講演集, pp. 120-121.
- [16] 須賀原 慶久・樋口 佳意・才田 誠・石坂 周平・川嶋 実 (2006), 地中無線通信技術による構造物の計測と維持管理計測への適用, 地盤工学会関西支部地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2006.
- [17] 樋口 佳意・遠目塚 良一 (2010), 地中無線通信システムを用いた地盤の無線調査

- 技術, 地盤工学会誌, 第 58 巻第 8 号, pp. 22-25.
- [18] 内閣府原子力被災者生活支援チーム、福島除染推進チーム、独立行政法人日本原子力研究開発機構、鹿島建設・日立プラントテクノロジー・三井住友建設共同企業体 (2012)、富岡町富岡第二中学校における除染モデル実証事業の結果概要 (ポスター)、除染モデル実証事業等の成果報告.
- [19] 原子力環境整備促進・資金管理センター:「平成 27 年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発報告書 (第 4 分冊) モニタリング関連技術の整備」(2016)
- [20] S. Li and C.C. Mi, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, pp. 4-17 (2015)
- [21] 遠井敬大, 金子裕良, 阿部茂:「非接触給電の最大効率の結合係数  $k$  とコイルの  $Q$  による表現」, *電気学会論文誌 D*, Vol. 132, No. 1, pp. 123-124 (2012)
- [22] 核燃料サイクル開発機構:「わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—」(1999)
- [23] 柏木隆行・長谷川均・加藤佳仁・坂本泰明・浮田啓悟:「非接触給電コイルにおける導体の近接効果による損失の検討」, *鉄道総合技術論文誌* 27(7), 29-34 (2013)
- [24] 田野井淳一・川瀬隆治:「鉄筋コンクリート壁の電磁波シールド特性に関する研究 - 特定周波数の電磁波シールド方法の検討 - 」, *東急建設技術研究所報 No.37*, pp.61-64 (2012)
- [25] 中山雅・大野宏和・棚井憲治・白瀬光泰・丹生屋純夫・下原正弘:「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験(11)緩衝材, 埋め戻し材およびコンクリートプラグの施工」, *日本原子力学会 2015 年秋の大会*, H57 (2015)
- [26] JAEA:「瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討 (平成 25 年度) - 掘削影響の修復・軽減技術の開発 - 」, (2015)
- [27] 林屋コンクリート工業: <http://www.hayasiya.jp/> (最終アクセス 2017 年 2 月 20 日)
- [28] 居村岳広:「磁界共振結合を用いた複数負荷への一括ワイヤレス給電に関する研究」, *電気学会論文誌 D*, Vol. 134, No. 6 pp. 625-633 (2014)
- [29] Jin-Wook Kim, Hyeon-Chang Son, Do-Hyun Kim, Kwan-Ho Kim and Young-Jin Park, “Analysis of wireless energy transfer to multiple devices using CMT,” *Microwave Conference Proceedings (APMC)*, pp.2149-2152 (2010)
- [30] B.L.Cannon, J.F.Hoburg, D.D.Stancil and S.C.Goldstein, “Magnetic Resonant Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple small Receivers,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 24, No. 7, pp. 1819-1825 (2009)
- [31] 伊藤有基・島田晃郎・宮路祐一・上原秀幸・大平孝:「磁界共鳴型 2 次元マルチホップ電力伝送による 2 つの受電器への均等な電力分配手法」, *電気学会論文誌 C*, Vol. 134, No. 3, pp. 374-380 (2014).
- [32] 居村岳広:「磁界共振結合のワイヤレス電力伝送における中継アンテナの等価回路化」, *電気学会論文誌 D*, Vol. 131, No. 12, pp. 1373-1382 (2011)
- [33] Yoshiaki Narusue, Yoshihiro Kawahara and Tohru Asami, “Impedance matching method for any-hop straight wireless power transmission using magnetic resonance,” *IEEE*

Radio and Wireless Symposium (RWS), (2013)

- [34] 東野武史・馬子驥・岡田実・辰田康明・後藤義和・鶴田義範・田中良平：「平行二線路を用いたワイヤレス電力伝送方式の提案」，信学技報, WPT2013-05 (2013)
- [35] 伊原木駿・東野武史・岡田実：「平行二線無線電力伝送方式における複数負荷への電力分配」，信学技報, WPT2014-75 (2014)
- [36] 前川拓也・ズオンクオンタン・東野武史・岡田実：「平行二線路を用いた電磁界結合ワイヤレス給電における二次側負荷の制御方法」，信学技報, WPT2015-70 (2015)
- [37] 居村岳広：「磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送におけるクロスカップリングキャンセリング法の提案」，電気学会論文誌 D, Vol. 134, No. 5, pp. 564-574 (2014)
- [38] J. Kim, H.-C. Son, D.-H. Kim and Y.-J. Park, “Impedance matching considering cross coupling for wireless power transfer to multiple receivers,” IEEE Wireless Power Transfer (WPT) (2013)
- [39] Tong Zhang, Minfan Fu, Chengbin Ma and Xinen Zhu, “Optimal load analysis for a two-receiver wireless power transfer system,” IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC) (2014)
- [40] Minfan Fu, Tong Zhang, Xinen Zhu, Patrick Chi-Kwong Luk and Chengbin Ma, “Compensation of Cross Coupling in Multiple-Receiver Wireless Power Transfer Systems,” IEEE Transactions on Industrial Informatics , Vol. 12, No. 2, pp.474-482 (2016)
- [41] Chi Kwan Lee, W. X. Zhong and S. Y. R. Hui, “Effects of Magnetic Coupling of Nonadjacent Resonators on Wireless Power Domino-Resonator Systems,” IEEE Transactions on Power Electronics , Vol. 27, No. 4, pp.1905-1916 (2012)
- [42] 下出大輔・村井敏昭・澤田理：「鉄道用非接触給電の 2 次コイルのフェライトの大面积化及び 2 次コイルの複数化に関する検討」，電気学会論文誌 D, Vol. 137, No. 1, pp. 60-68 (2017)

## 第4章 記録保存に関する調査

### 4.1 目的および実施概要

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、具体的な方法とその技術的な実現可能性を検討し、国や関連機関等が記録保存に係る取組の計画を具体化する際の基板情報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、処分に係る記録の保存、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」としている。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検討材料となるものである。

本章では、放射性廃棄物の処分における記録保存に関する動向、海外の記録保存に関する最新の考え方、方策について、OECD/NEA-RWMC（経済協力開発機構原子力機関・放射性廃棄物管理）が検討している Records, Knowledge and Memory（RK&M）イニシアチブの概要、位置付け、方針等について調査結果を整理する。

### 4.2 OECD/NEA の検討状況の調査・整理

本検討では、RK&M イニシアチブに関して、公開情報の内容を対象とした調査を平成 24 年度より平成 26 年度にかけて実施し（[2]～[4]）、平成 27 年度からは同イニシアチブに加入し、会合への参加による検討を実施してきた。

#### 4.2.1 RK&M イニシアチブの概要

##### (1) RK&M イニシアチブの位置付け

NEA における放射性廃棄物管理委員会（RWMC）の位置付けについて図 4.2.1-1 及び表 4.2.1-1 に示す。また、放射性廃棄物管理委員会における RK&M イニシアチブの位置付けについて図 4.2.1-2 に示す。放射性廃棄物管理委員会は NEA の技術委員会の一つで、RK&M イニシアチブは、放射性廃棄物管理委員会のイニシアチブの一つであり、フェーズ 1（2011 年～2014 年）とフェーズ 2（2014 年～2018 年）が実施されている。

# NEA Structure and Technical Committees

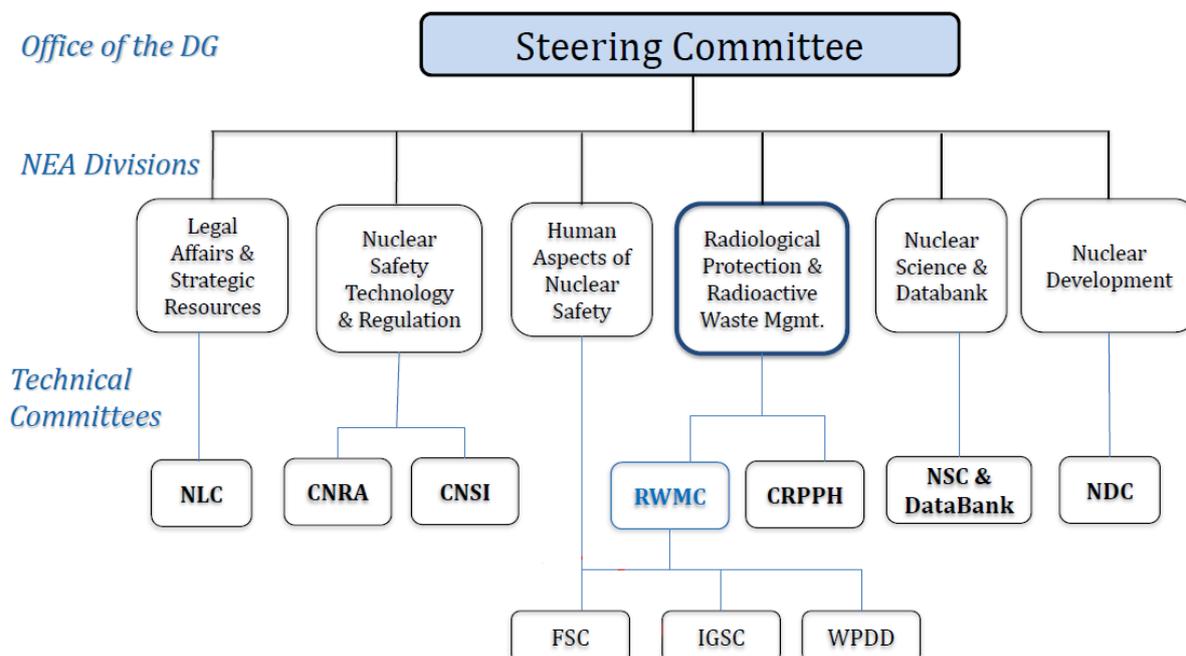


図 4.2.1-1 NEA 組織図  
(RK&M イニシアチブ会議資料より抜粋)

表 4.2.1-1 NEA 技術委員会の名称  
(RK&M イニシアチブ会議資料より抜粋)

	NEA Technical Committees
NLC	- Nuclear Law Committee
CSNI	- Committee on the Safety of Nuclear Installations
CNRA	- Committee on Nuclear Regulatory Activities
<b>RWMC</b>	<b>- Radioactive Waste Management Committee</b>
CRPPH	- Committee on Radiation Protection and Public Health
NSC	- Nuclear Science Committee AND -Executive Group of NSC: Data Bank Management Committee
NDC	- Nuclear Development Committee



<b>ABG:</b> National Advisory Bodies to Government	<b>RF:</b> Regulators' Forum
<b>IGSC:</b> Integration Group for the Safety Case	<b>FSC:</b> Forum on Stakeholder Confidence
<b>WPDD:</b> Working Party on Management of Materials from Decommissioning and Dismantling	<b>EGFWMD:</b> Expert Group on Fukushima Waste Management and Decommissioning
<b>EGPMRW:</b> Predisposal Management of Radioactive Waste	<b>EGIRM:</b> Expert Group on Inventorying and Reporting Methodology

図 4.2.1-2 放射性廃棄物管理委員会（RWMC）組織図  
（RK&M イニシアチブ会議資料より抜粋）

## (2) フェーズ1における主な成果

OECD/NEA-RWMC ではフェーズ1として2011年よりRK&M イニシアチブを行い、2014年3月まで継続された。フェーズ1における主要な観察結果は以下の通りである[11]。

- ・記録保存の目的が単に処分場への侵入を阻止することと考えられてきた1980年代以降、処分場の技術的、社会的情報を将来世代のために、実現可能な範囲で可能な限り長期にわたり保存することを目的とするなど状況は大きく変化している。
- ・放射性廃棄物の分野の外部に、多数の記録保存を助成する仕組みがある。これらは処分実施主体や政府にとっての潜在的な資源である。
- ・処分場の閉鎖後の1～2世紀の期間は、RK&Mの用語では中期と定義される。この期間はこれまで文献において取り扱われることは稀であったが、RK&Mの保存、そしてさらなる将来への準備のためには重要な期間である。
- ・長期の記録保存に関する規制の制定と体系化が必要とされている。
- ・長期の課題を議論するためには用語の定義が重要である。

また、フェーズ1における検討の成果として、下記の取り纏め報告書が作成・公開されている。これらの主要報告書の内容は平成26年度の処分システム工学確証技術開発報告書にて報告している[4]。

- ①Literature Survey on Markers and Memory Preservation for Deep Geological Repositories  
（以下、「マーカーに関する文献整理」）[5]
- ②Loss of Information, Records, Knowledge and Memory - Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal（以下、「記録の喪失に関する検討」）[6]
- ③Markers - Reflections on Intergenerational Warnings in the Form of Japanese Tsunami

Stones（以下、「津波石碑の考察」）[7]

④Monitoring of Geological Disposal Facilities: Technical and Societal Aspects（以下、「モニタリングと記録との関連」）[9]

以下に、これらのRK&Mによる報告書について平成26年度の処分システム工学確証技術開発報告書[4]より要約する。

① 「マーカーに関する文献整理」[5]

「マーカーに関する文献整理」[5]の目的は、主として、放射性廃棄物処分に責任を有する様々な組織、国家機関、及び関心を有する公衆にマーカーに関する情報を提供するとともに、マーカーに関する問題を伝達することである。1990～2000年代を中心としたマーカーの概念、実施あるいは要件等に関する技術報告書、学術論文、国の規制等の調査結果より下記の課題や問題点が整理され、検討が実施された。

マーカーに関する基本的な課題として、マーカーには、警告機能を有すべきであるが、処分場の認知を維持するためには“記憶の文化”の必要であることが指摘されている。

人間及び社会に対する問題点に関しては、警告の対象、記憶の保存期間についての調査結果が示されている。また、処分場への侵入の動機を分析し、侵入低減措置を提案している。

地表環境及び地下空間に関しては、予測される時間枠における地表環境の変化に対する情報の耐久性及び安定性の観点から、適切な材料の選定や開発課題が議論された。また、処分場は忘却されるべきかについても議論されている。

マーカーと構造物については、地表設置されたマーカーの耐久性等の技術要件が整理されている。また、マーカー単独での処分場への侵入阻止は困難であることを述べている。

経時的な情報伝達のうち、知識の保存のための伝達方法については、統一的な見解はみられない。また、言語及び文字を介した情報伝達の技術とその問題点が議論されているものの、記号論的な伝達が優位であるとの見解は示されていない。

マーカーシステムの喪失については、一般的に情報の喪失について、意識的及び無意識な行為を通じた多くの原因（[6]参照）が存在すること、特に社会が中央集権化されている際には意図的操作により情報が消失し得ることが指摘されている。

② 「記録の喪失に関する検討」[6]

「記録の喪失に関する検討」[6]では、スイス、米国及びドイツにおける埋立地並びに有害廃棄物の旧工業用地又は処分サイトの事例を参考に、情報の喪失に係る調査・整理が行われている。この情報の調査・整理結果から、情報、記録、知識及び記憶の喪失に関する共通の主要要因が特定され、各事例との比較も行われた。本研究から、廃棄物処分に関する全ての情報が喪失することは稀であるが細部が最初に失われる傾向にあること、及び、多くの記録は、不十分なデータを用いて作成されているため、一旦失われると記録を再構築することは非常に困難であることが指摘されている。また、知識の喪失の要因分析の結果、以下に示す理由を特定している。

・記録なし又はアーカイブス不足

- ・記録の更新なし／不十分
- ・職務遂行のための予算なし／不十分
- ・人事異動

さらに、稀ではあるが防止の困難な要因として下記の2つを挙げている。

- ・不法行為
- ・社会的不連続性（断絶）

このような事例検討を踏まえ、「記録の喪失に関する検討」[6]では、記録保存のためには原子力を利用する各国の法令の整備の重要性を指摘している。

### ③ 「津波石碑の考察」[7]

「津波石碑の考察」[7]では、将来世代に情報及び警告を伝達するための媒体としてのマーカ―の潜在的有効性への理解を深めることを目的として、日本の北東部沿岸に数百個設置されている津波に関する石碑（stone marker）の役割について検討された。その結果、日本の石碑の寿命（最長で千年）は、類似の時間スケールにわたるマーカ―の残存可能性を例証していること、目に見えるマーカ―は記憶の保持に寄与するが、継続的な警戒に実質的影響を及ぼさない、歴史的及び文化的な物体になる可能性があることが示された。

### ④ 「モニタリングと記録との関連」[9]

「モニタリングと記録との関連」[9]では、地元ステークホルダが、施設におけるモニタリングとRK&Mの保存に関心を持っており、モニタリング及びRK&Mの保存は、ステークホルダとの協議を通じて共通理解を形成すべきこと、RK&Mについて、様々な国の地元自治体から関心が向けられつつあることが述べられている。さらに、モニタリングとRK&Mの保存を包含する概念的な枠組みとして「監視（oversight）」を挙げた上で、「監視（oversight）」の組織化や推移に関する決定についてはステークホルダとの議論が行われるべきであるとしている。

## (3) フェーズ2の実施内容

OECD/NEA-RWMCでは、フェーズ1のイニシアチブの成果を受け、さらに4年間（2014年4月～2018年4月）のイニシアチブをフェーズ2として実施している。実施期間については、当初3年間で予定していたが、中途にて延長された。

以下に、フェーズ2における実施内容について、趣意書[11]に基づいて記載する。

### 1) 実施方法

実施方法は以下に挙げるフェーズ1のものを継続する。この理由はイニシアチブをOECD/NEA加盟国の記録保存の領域に関する考え方や目標、実施のリファレンスとなるコミュニティーとするためである。

- ・RK&Mの定例会合とワークショップを通じ、地域のコミュニティー、学会、規制機関のイニシアチブへの調和を継続する。
- ・ウィキペディアに見られるような技術(wiki形式：ウェブ上で編集される辞典形式)による、

文献を引き続きイニシアチブのメンバーのためのコミュニケーションのプラットフォームとする。

## 2) 参加機関

現在、12カ国から16の機関が参加している。フェーズ2からは、Sandia（米国）、Enresa（スペイン）、BfS（ドイツ）、JAEA（日本）、RWMC（日本）が新規に参加している。IAEAはオブザーバとして参加している。

## 3) 期間

4年間（2014年4月～2018年4月）

## 4) 作業計画

RK&M イニシアチブは以下の基本的ツールを引き続き維持する。

- ・記録保存に関する用語集
- ・各国及び国際的な法規制のカタログ
- ・記録保存に関する参考文献集
- ・内部にメニューを持つ wiki-technology による文献

また、フェーズ2では、フェーズ1で認識された以下の記録保存の領域で作業が実施される。各参加機関が下記の作業に優先度をつけて実施することとなる。

- ・アーカイブ
- ・国際的なメカニズム
- ・規制
- ・マーカー
- ・文化遺産

### 4.2.2 RK&M イニシアチブ会合における検討状況

本年度、RK&M イニシアチブ（フェーズ2）の第11回目の会合が開催された。原環センターは、この会合に出席し検討状況を調査するとともに、同イニシアチブが新たに記録保存の手法として提起している基本的情報セット（SER: Set of Essential Records）について、会議に先立つ調査への協力を行った。

#### (1) 記録等の保存手法の分類について

RK&M イニシアチブでは、記録・知識・記憶の保存に関する各種の手法が記録・知識・記憶のどれを保存する手法であるかを分類している。この中で、「認識」(Awareness) 及び「発見による認識」(Awareness upon discovery) という分類を、記録・知識・記憶という分類に並ぶものとして定義すべきことが議長（ドイツの施設・原子炉安全協会（GRS））より提起された。地上に設置

されたマーカー等が「知覚」に区分され、地下マーカーや地下に設置されるタイムカプセル等が「発見による知覚」に区分されるという内容である。議論の結果、最終的には、「知覚」及び「発見による知覚」という分類を、記録・知識・記憶という分類に並ぶものとして定義しないこととなった。

## (2) グループディスカッション1 (文化遺産 / マーカー)

最終報告書の取りまとめに向け、記録保存に関する各種の手法の特徴を各2ページ程で簡潔に記載した文書を作成するため、予め担当者が準備した主要な項目の記載内容についてグループディスカッションを実施し、記載内容の変更案等を担当者に提案した。

記録等の保存に関する各種の手法は、**Strategic component** 及び **Strategic element** として区分され、体系的に整理される。例えば、**Strategic component** としてマーカーがあり、**Strategic element** として地上の痕跡 (**Surface traces**)、地上マーカー、地下マーカー、モニュメントに区分されている。地上の痕跡 (**Surface traces**) 及び地下マーカーの記載内容について議論を行った。

地上の痕跡 (**Surface traces**) とは、処分場閉鎖後に残された地上施設の土台部分や地上施設建設のために変えられた地形等を意味し、いわば遺跡として、処分場跡地に対する興味を引き起こす可能性を持つものである。これらは処分場に関する十分な情報を伝えるものではないが、詳細な情報は他のマーカーや公文書保存施設に保存された記録により補完される。この項目の記述内容に関しては、国により「処分場跡地を処分場建設前の状態に回復しなければならない」旨の規制があることを記載することが提案された。

地下マーカー (**Sub-surface markers**) とは、地表面と処分場地下施設の間の地下に設置されたマーカーであり、何らかの理由により処分場跡地の掘削が行われた際に、マーカーに記載された情報により地下に有害な物質が存在することを知らせる機能や、物理探査を実施した際に、強い磁性等により人工物の存在を知らせる機能を持つ。地下マーカーは処分場建設時に地下施設、斜坑、立坑の近傍に敷設されるものと、任意の時期に深度 10~20m の浅部に敷設されるものとに区分される。地下浅部のマーカーは浸食により地表に露出し、風化の影響や人為的破壊の影響を受ける可能性があるが、地下施設近傍のマーカーに関しては、これらのリスクは低い。この項目の記述内容については、公文書保存施設に保存された記録との相互補完性を記述することや、タイムカプセルとの関連を記述することが提案された。また、「地下施設近傍のマーカーが処分場のバリア機能を損ねないようにすべき」ということを記述することが提案された。

## (3) グループディスカッション2 (鍵となる情報ファイル / 基本的情報セット)

本セッションでは、鍵となる情報ファイル (**KIF: Key Information File**) 及び基本的情報セット (**SER: Set of Essential Records**) について各2グループ、合計4グループに分かれて記載内容の討議を行った。

**RK&M** イニシアチブでは、地層処分に関する記録を文末の表に示す4階層に区分することを検討している (図 4.2.2-1)。上位の階層の記録ほど分量が少なく、重要な情報が簡潔にまとめられている。このうち、最上位の区分が「鍵となる情報ファイル」(**KIF**) であり、一般向けの約 50 ページの書類である。その構成としては、表 4.2.2-1 が提案されている。**RK&M** イニシアチブでは、

具体的な事例として、フランスのラマンシュ処分場、米国の WIPP 処分場、スウェーデンの地層処分場に関する KIF を作成している。KIF に次ぐ階層が、基本的記録セット (SER) であり、技術的知見を持った読者を対象としている。SER の下の階層には、「永久保存するために選定された記録」、「処分場の事業期間中発生した全ての記録」がある。

SER については、以下のように定義されている。

「基本的記録セット(SER)とは、永久に保存するために選定された記録であり、将来の世代が処分システムに関し、なぜ、どのようにして処分場が建設されたか、また、どれくらい長期にわたって安全性が保障されているかを理解できるようにするものである。SER は、読者が処分場のセーフティケースを評価、検証することができ、また、計画的行動について伝え、その結果を評価できるものでなければならない」

SER の概要について、ANDRA よりフランスの事例を挙げて説明が行われた。フランスでは、処分場の閉鎖・監視段階への移行時に、処分場の記録ファイルを規制機関に提出することが規定されており、この内容は KIF よりも SER に類似していること、また、5年ごとにモニタリング結果等の内容が付加されることが説明された。なお、この規定は、「原子力基本施設及び原子力安全・放射性物質輸送管理に関する 2007 年 11 月 2 日のデクレ(政令) (2007-1557)」の第 42 条であるが、「施設の (mémoire) の総括一件書類」と表現されている。「mémoire」は通常「記憶」と和訳されるが、規制条項の文脈からは「記録」の保存と理解される。ANDRA は「Record」と英訳し、「記録」と解釈して規制要求事項への対応を実施している。

フランスでは、上記のデクレによる規定に加え、IAEA の TECDOC-1097 による記録の階層構造を参照すべきことを緩やかな要求事項「Soft regulation」として認識している旨が説明された。IAEA の TECDOC-1097 「放射性廃棄物処分に係る記録の維持管理」(1999) では、3 段階の情報の階層 (表 4.2.2-2) が示されており、RK&M イニシアチブによる KIF と SER は、TECDOC-1097 における HLI (高度なレベルの情報、表 4.2.2-3) をさらに 2 階層に分割したものとして説明している (表 4.2.2-4)。

今回のグループディスカッションでは、SER の概念を説明する報告書の記述について議論され、主に会議に先立って実施された質問表による調査結果の反映が行われた。

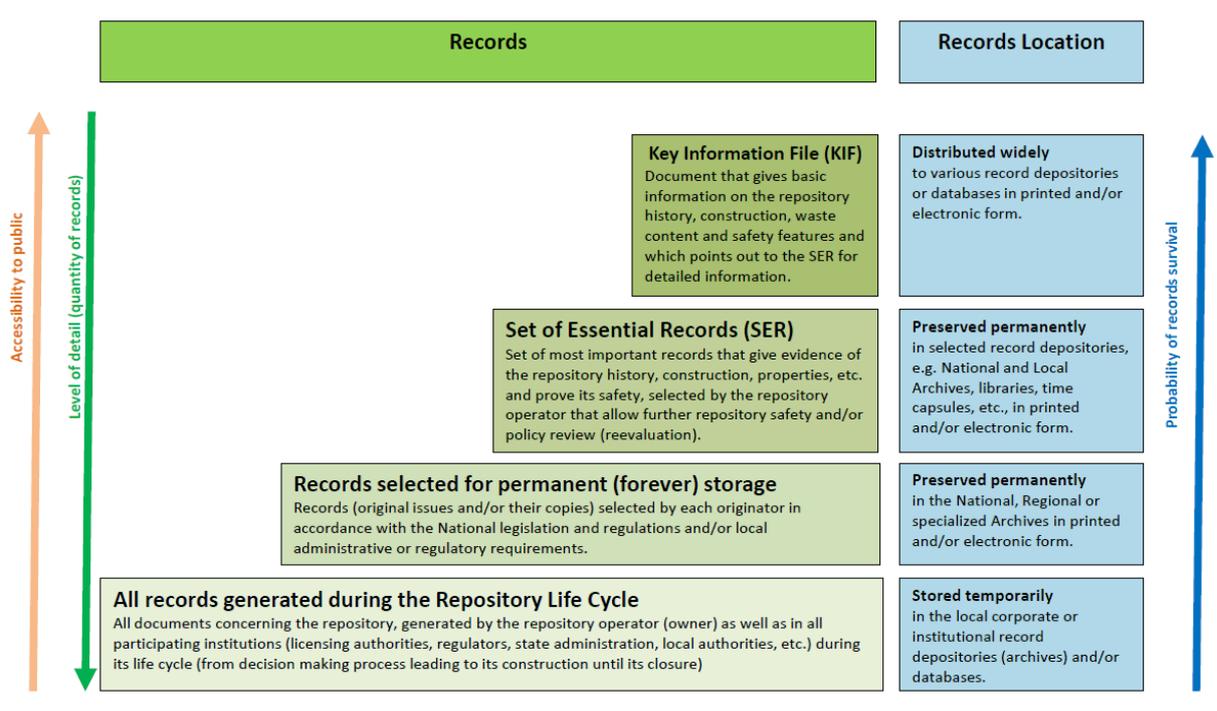


図 4.2.2-1 RK&M イニシアチブの提唱する処分場に関する記録の構造  
(RK&M イニシアチブ会議資料より抜粋)

表 4.2.2-1 鍵となる情報ファイル (KIF) の構成案[12]

節	題名と内容
0	本書の目的と目次 (数種の言語で記述)
1	処分に関する背景 <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射能と放射性廃棄物の性質</li> <li>・この廃棄物はどのようにして形成されたか</li> <li>・なぜこの廃棄物は地層処分を必要としたか</li> <li>・重要な日付</li> <li>・施行された規制条項</li> </ul>
2	施設の位置 <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場の座標 (緯度、経度、深度)</li> <li>・地質環境</li> <li>・閉鎖時の水理 - 地質 - 化学パラメータのベースライン</li> <li>・敷地のモニタリングに関する措置 (範囲と時間枠)</li> </ul>
3	容器及び施設の配置 <ul style="list-style-type: none"> <li>・使用された容器の形式</li> <li>・工学的特性</li> <li>・接近手段と閉鎖</li> </ul>
4	処分された廃棄物のインベントリ <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射性核種</li> <li>・有害成分</li> <li>・擾乱がない場合の放射能の変遷に関する分析結果</li> <li>・情報の再生方法</li> </ul>
5	セーフティケース <ul style="list-style-type: none"> <li>・閉鎖後セーフティケースの原則 (隔離と閉じ込め)</li> <li>・予測される影響 (通常の変遷)</li> <li>・人為的擾乱の影響 (侵入への警告)</li> </ul>
6	処分に関する記録 <ul style="list-style-type: none"> <li>・KIF の更新計画</li> <li>・KIF の配置</li> <li>・詳細記録の位置と配置</li> </ul>
7	世界各国における類似処分場のリスト (数種の言語で記述) <ul style="list-style-type: none"> <li>・処分場の座標</li> <li>・保存された記録の座標</li> </ul>

表 4.2.2-2 記録保存システムの階層構造

(IAEA TECDOC-1097[13]より作表)

情報の階層	説明
高度なレベルの情報 (HLI) High Level Information	将来世代が処分システムを基本的に理解するために必要な、高度に凝縮された情報の集合。国立公文書館や国際公文書館等で保存される
中程度のレベルの情報 (ILI) Intermediate level Information	主に許認可や法的要件を満足するための情報から構成される凝縮された集合
基本的なレベルの情報 (PLI) Primary level Information	処分事業の全期間にわたり収集される全ての情報を含む集合

表 4.2.2-3 高度なレベルの情報 (HLI) の例示 (IAEA TECDOC-1097[13])

記録の概要	事 例
安全評価あるいは修復活動の実施に関連する記録	
処分施設位置と サイトデータ	-閉鎖後の制度的管理期間中に管理されるべき領域と、処分領域（マーカー位置を含む）の境界 -国／国際的地理学的文献の参照 -地元の人口統計学 -サイトデータ（地質学的、水文学的、気象学的、地球化学的データを含む）
処分上設計と 人工バリア	-材質と方法を含む建設仕様／手順 -各処分ユニット（トレンチ、セル等）の建設と場所を示す最新の図面 -修正作業を含めた建設不適合／ずれ -積極的、受動的モニタリングシステムの詳細製図と仕様 -人工バリアの保守と修復の仕様と記録
処分された廃棄体 の総量	-処分記録（処分位置、廃棄物データを含む） -施設受け入れ規準（廃棄物形状、パッケージング、放射線場、全体含有量）
記録管理システム	-記録管理システムの記述（内容物と構造、使用説明書、手順、計画）
操業記録	-モニタリングデータ -操業承認記録（不適合、修復活動と承認記録）
バックグラウンド 情報	-処分場システムの機能と性能を将来世代が理解する上で手助けとなる情報
歴史的、法律上、あるいは他の利用に関する記録	
許認可記録	-操業認可、許可、要件の記録 -被曝限度を含め、性能目的 -モニタリング要件 -性能評価報告書
法律	-操業と閉鎖時期に適用される法律環境の記述
一般情報	-廃棄物を処分した社会についての情報

表 4.2.2-4 IAEA、TECDOC-1097 と RK&M イニシアチブの記録の階層構造の関係  
(RK&M イニシアチブ会議資料より抜粋)

RK&M	IAEA Techdoc correspondence	Comment
KIF	HLI	Single document ~40 pages Described in dedicated RK&M report <b>Basic goal: avoid involuntary intrusion</b>
SER		Set of documents selected for post-closure only Reviewed and updated post closure May contain condensed documentation prepared during operation, closure and after closure <b>Basic goal: allow informed decisions</b>
Other permanent archives	ILI	
All documents	PLI	

#### (4) グループディスカッション3 (最終報告書 / 個別報告書)

このセッションでは、RK&M イニシアチブのフェーズ2全体の成果を取りまとめた最終報告書と、個別の成果報告書として今後何を加えるべきかについて各2グループ、合計4グループに分かれて記載内容の討議を行った。その結果最終報告書に関しては、表 4.2.2-5 の構成案が得られた。

表 4.2.2-5 RK&M イニシアチブ フェーズ2 最終報告書構成案  
(RK&M イニシアチブ会議を反映して作成)

章	内容
第1章	イントロダクション (RK&M イニシアチブ設立時の文書を参照して記載)
第2章	目的と範囲 (RK&M イニシアチブ設立時の文書の記載、記録保存に関する各種手法：Strategic component 及び Strategic element の位置付けを記載)
第3章	RK&M イニシアチブにおける取り組みの戦略を記載
第4章	記録保存に関する各種手法の相互関係を記載
第5章	記録保存に関する各種手法を各2ページで記載
付録	記録保存手法の相互関係表、用語集、法令集

#### 4.2.3 短・中期における記録、知識、記憶の保存を支援する国際的メカニズム

RK&M イニシアチブでは、検討成果を順次報告書としているが、2015年には、国際的な協力に基づくメカニズムが放射性廃棄物に関する「記録、知識及び記憶」(RK&M)の短期及び中期にわたる保存にとってどのような潜在的有用性を備えているのかを調査した結果[14]を公表した。この文献について調査した結果を以下に示す。

本文献は「記録、知識及び記憶」(RK&M)の保存に向け、「情報へのアクセスしやすさ」、「理解の可能性」及び「検討対象となる時間スケールにわたる存続可能性」を最大限にするための数百年の期間にわたり、RK&Mの保存を確保する国際的メカニズムの役割について検討している。この数百年という期間は、処分場の「直接的」及び「間接的」な監視が実施されると考えられる期間である。また、「国際的メカニズム」とは、国際的な影響、範囲又は支持を得ており、国際協力に基づくRK&Mの保存メカニズムとして定義されている。

調査対象は国際連合教育科学文化機関(ユネスコ)、国連欧州経済委員会(UNECE)、国際原子力機関(IAEA)及び欧州委員会(EC)を通じて設置された11件の国際的メカニズムであり、さまざまな国際的メカニズムの間の調整を担当する組織がどのような特徴を備えているのか、またこれらの組織が記録、記憶及び知識の保存に関してどのような貢献を行っているのかについて分析している。国際的メカニズムの分析結果を表 4.2.3-1 に示す。分析を通じ、以下の結論を示している。

- ・放射性廃棄物管理の分野におけるRK&Mに関し、既存の国際的メカニズムとのつながりを伴

う 1 つの国際的メカニズムを開発する価値がある。

- RK&M に関するメカニズムは、原子力問題を取り扱うとともに、環境及び文化面での問題を取り扱うことで、より広範かつ国際的な観点での RK&M 問題への対処を容易にする。
- IAEA やユネスコなどの国際組織との協力により、資金確保の持続可能性の実現がより容易になる可能性もある。
- 将来この領域で何らかのメカニズムが設定された場合、メカニズムに参加する国は、1 つの共通目標を確認し、支持する必要がある。
- RK&M に関するメカニズムへの参加国の共通目標としては、世界遺産の概念（すなわち「顕著な普遍的価値」）に示された精神を持つ目標が適切なものであるように思われる。
- RK&M に関するメカニズムへの参加国において、「進化し続ける」条約を確立すること、加盟国の主体的な関与に依拠すること、国境と世代を超えた問題に対処することが、長期的な展望を念頭に置いた場合に有用である可能性がある。
- 国際、国及び地域レベルでの多層的なガバナンスの重要性に加え、加盟国の枠を超えてさまざまなステークホルダの関与を得ることの重要性が示された。
- 国際的な専門家のネットワークで構成される諮問組織の設立が専門知識の開発とその持続可能性の実現に寄与する。
- 地域レベルでは、当該地域の持続可能な社会及び経済的な開発計画に施設のモニタリングを組み込むことにより、施設の持続可能性が改善される可能性がある。
- 既存のシステムとしては、「国際原子力情報システム」(INIS) がさまざまな情報源をまとめ、各国のセンターを通じた情報の普及を目指している。
- 今回の調査では、多くのメカニズムによりさまざまなステークホルダによる多様な記録に登録される「能動的な記憶」の開発が促されていることが明らかになった。

表 4.2.3-1 「短・中期における記録、知識、記憶の保存」調査結果概要表[14] (1/6)

	目標	メンバー及び オブザーバ (存在 する場合)	資金の出所	責任及び 決定プロセス	専門知識の 動員及び研究	地域的な開発の持 続可能性	記憶保存組織
ユネスコ:記憶遺産 プログラム (1992 年)	主體的な関与。 特定の、また危険に さらされている文 書が、委員会によ り、次世代のために 保管されるべきも のとして選択され る。	100ヶ国以上の国 が、少なくとも1件 の MoW に列記さ れた文書を有して いる。	<i>国際レベル:</i> ユネス コの予算。 <i>その他:</i> 売上高、著 作権使用料及び援 助資金提供者。	<i>国際レベル:</i> 世界記 憶遺産を維持する こと。作業は、ユネ スコのその他のプ ログラムと結び付 けられている。 <i>国レベル:</i> — 国内の世界記憶 を維持すること。 — 支援を求めるこ と。 <i>地域レベル:</i> 地域委員会。	— 技術報告書:技 術委員会によって 発表される報告書。 — 作業は、専門家 NGOとの関係で実 施される可能性が ある。	—	— 狙いは、世界の 文書遺産に対する 恒常的なアクセス が達成されるよう にすることにある。 — デジタル化され たコピーの保存が 進められる。 — 記憶を保存する ためのリスク管理 に特別な注意が払 われる。
ユネスコ世界遺産 条約 (1972年)	主體的な関与。 政府間委員会:選任 されたメンバーで 構成され、保護対象 となる自然サイト 又は文化サイトを 選定する。	締約国は190ヶ国。	<i>国際レベル:</i> ユネス コ予算。 <i>国レベル:</i> 要請及び 主体的に <i>その他:</i> 主體的な援 助資金提供者。	<i>国際レベル:</i> 政府間 組織の成立。 <i>国レベル:</i> 加盟国 間での援助協定。 <i>地域レベル:</i> 関心の対象となる か危機にさらされ ているサイトへの 支援を通じて。	— 諮問及び専門家 組織。 — 評価規準及び指 針となる原則。	保護プログラムに 対する地域ステー クホルダの関与。	— 世界遺産リスト の持続可能性はき わめて重要である。 — 記憶を保存する ためのリスク管理 に対して特別な注 意が払われる。

表 4.2.3-1 「短・中期における記録、知識、記憶の保存」調査結果概要表[14] (2/6)

	目標	メンバー及び オブザーバ（存在 する場合）	資金の出所	責任及び 決定プロセス	専門知識の 動員及び研究	地域的な開発の持 続可能性	記憶保存組織
UNECE - エス ポー条約（1991 年）。	国境を越えた環境 問題に関する当事 者間の国際協力を 支援する対話プラ ットフォーム。環境 被害を防止し、軽減 し、モニタリングを 行う。	当事者数は45。	<i>国際レベル</i> ： UNECE の予算。 <i>国レベル</i> ：汚染者支 払い原則が適用さ れる。	<i>国際レベル</i> ：専門家 及び NGO が活動 に参加する。 <i>国レベル</i> ：環境面 で健全かつ持続可 能な開発を確保す る。	— 環境影響評価に 関する研究。 — 各国で展開され る研究に関する情 報交換。良好事例の 促進が目的とされ る。	実効性の高い方法 によって公衆の参 加を確保すること。 特に環境評価計画 及びプログラムに 関する決定への参 加が重視される。	—
UNECE - オル フス条約（1998 年）。	環境に関する情報 へのアクセス、意思 決定における市民 参加、そして司法へ のアクセスに関す る状況を改善する こと。	当事者数は46。	<i>国際レベル</i> ： UNECE の通常予 算。	<i>国際レベル</i> ：遵守委 員会は、当事者に対 して勧告を提示す ることができる。 <i>国/地域レベル</i> ：同 条約は、環境につい ての政府決定に関 する公衆と当局の 間で連携に基づく ものである。	各国が社会の遂行 能力の強化を可能 にするために専門 知識の拡充をはか る（またそれを社会 の関与の強化につ なげる）必要性が強 調される。	直接的に取り扱わ れてはいないが、地 域参加の実現を促 進することが目指 されている。	—
UNECE - オス パール条約（1992 年）。	主体的な関与。 締約当事者は協力 関係を築き、大西洋 東北部における全 ての汚染源を限定 することを票決す る。	欧州西海岸に位置 する15ヶ国の政府 と欧州委員会。非加 盟国と NGO はオ ブザーバとして参 加している。	<i>国レベル</i> ：出資額は 加盟国ごとに、それ ぞれの経済規模に 応じて異なるもの となる。	<i>国レベル</i> ：同条約を 遵守するために必 要な全ての方策が 講じられる。 — 定期的な間隔を おいて報告書が作 成される。	— 共同で科学及び 技術研究を実施す る。 — 科学刊行物及び 報告書を作成する。	—	当該情報は入手可 能な状態とされる べきである。

表 4.2.3-1 「短・中期における記録、知識、記憶の保存」調査結果概要表[14] (3/6)

	目標	メンバー及び オブザーバ (存在 する場合)	資金の出所	責任及び 決定プロセス	専門知識の 動員及び研究	地域的な開発の持 続可能性	記憶保存組織
IAEA - 使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する合同条約 (1997年)。	主体的な関与。 当事者における燃料及び放射性廃棄物の管理に関する良好事例の促進。	63 の当事者及び政府間組織。	<i>国際レベル</i> : IAEA の予算。 <i>国レベル</i> : 各国は、条約に示された目標を実現させるために適切な資源が利用可能な状況を確認すべきである(各国はそれぞれの費用を直接負担する)。	<i>国際レベル</i> : - 再検討プロセスによって状況評価が行われることになっている。 - さまざまな国がいくつかのグループにまとめられる。 <i>国レベル</i> : - 燃料及び廃棄物の管理は国に依存する。 - 定期的な報告書が作成され、再検討会合が開かれる。	国際協力を促進する可能性。	-	- 各国は、記録及びインベントリの保存を行うべきである。 - 受動的な制度的管理。
IAEA - 核兵器の不拡散に関する条約 (NPT) (1968年)。	主体的な関与。 拡散防止を防止し、軍縮及び原子力の平和利用を促す意図を宣言すること。	加盟国数: 189。	<i>国際レベル</i> : IAEA 技術協力プログラム資金調達。	<i>国レベル</i> : 誠意をもって行われる協力 (たとえば検査の受け入れなど)。	評価方法に関する専門知識の共有。	-	同条約は、寄託政府及び調印国の公文書館に保存される。

表 4.2.3-1 「短・中期における記録、知識、記憶の保存」調査結果概要表[14] (4/6)

	目標	メンバー及び オブザーバ (存在 する場合)	資金の出所	責任及び 決定プロセス	専門知識の 動員及び研究	地域的な開発の持 続可能性	記憶保存組織
IAEA - 使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する合同条約 (1997年)。	主体的な関与。 当事者における燃料及び放射性廃棄物の管理に関する良好事例の促進。	63 の当事者及び政府間組織。	<i>国際レベル</i> : IAEA の予算。 <i>国レベル</i> : 各国は、条約に示された目標を実現させるために適切な資源が利用可能な状況を確認すべきである(各国はそれぞれの費用を直接負担する)。	<i>国際レベル</i> : - 再検討プロセスによって状況評価が行われることになっている。 - さまざまな国がいくつかのグループにまとめられる。 <i>国レベル</i> : - 燃料及び廃棄物の管理は国に依存する。 - 定期的な報告書が作成され、再検討会合が開かれる。	国際協力を促進する可能性。	-	- 各国は、記録及びインベントリの保存を行うべきである。 - 受動的な制度的管理。
IAEA - 核兵器の不拡散に関する条約 (NPT) (1968年)。	主体的な関与。 拡散防止を防止し、軍縮及び原子力の平和利用を促す意図を宣言すること。	加盟国数: 189。	<i>国際レベル</i> : IAEA 技術協力プログラム資金調達。	<i>国レベル</i> : 誠意をもって行われる協力 (たとえば検査の受け入れなど)。	評価方法に関する専門知識の共有。	-	同条約は、寄託政府及び調印国の公文書館に保存される。

表 4.2.3-1 「短・中期における記録、知識、記憶の保存」調査結果概要表[14] (5/6)

	目標	メンバー及び オブザーバ (存在 する場合)	資金の出所	責任及び 決定プロセス	専門知識の 動員及び研究	地域的な開発の持 続可能性	記憶保存組織
IAEA - 核物質及び原子力施設の防護に関する条約 (1980年)。	主体的な関与。 核物質の物理的防護を強化するために当事国が定めた条約。加盟国における核物質の違法な取得及び使用によってもたらされうる危険に注意を向けるための取組み。	148 の当事者及び 44 の調印者。	国際レベル: IAEA の予算。	国際レベル: 情報の交換及び事象が生じた場合の協力。 国レベル: 法的枠組みの調和に関する提案。	専門知識の共有。	—	定期的 (5 年ごと) に実施される再検討。
IAEA - 国際原子力情報システム (INIS) (1966年)。	主体的な関与。 メンバー間で原子力分野に関するさまざまな情報を集積するための協力が行われる。	127ヶ国と 24 の国際組織。	国際レベル: IAEA の予算。	国際レベル: 事務管理面での支持。 国レベル: INIS センター (各国の遂行能力の開発を支援するためのもの)。	データ収集及び処理の分野において (INIS センター)。	地域センターの支援を通じて。	全ての刊行物を保存するために、国際的なデータベースが維持される。
EC - INSPIRE 指令 (2007年)。	EC 指令の 1 つであり、環境方針を支援するために欧州内の空間情報に関する 1 つのネットワークを実現することを目的とする。	27ヶ国の加盟国。 第三者が国内インフラストラクチャに寄与することができる。	国際レベル: 欧州委員会が、INSPIRE チームのための計上している専用予算。 国レベル: ネットワークの形成及び保守作業は各国に依存する。	国際レベル: INSPIRE ジオポータル の維持。 国レベル: 空間データの収集及び表示。 — 報告書は 3 年ごとに作成される。 地域レベル: 指令の履行は、場合によって地域協会に依存するものとなる。	データの評価及びデータ処理の支援を行う専門家のグループ。	—	— 記録は電子フォーマットで保管されなければならない。 — 記録はネットワークを通じて入手可能な状態にされるべきである。

表 4.2.3-1 「短・中期における記録、知識、記憶の保存」調査結果概要表[14] (6/6)

	目標	メンバー及び オブザーバ (存在 する場合)	資金の出所	責任及び 決定プロセス	専門知識の 動員及び研究	地域的な開発の持 続可能性	記憶保存組織
EC	<p>— 使用済燃料及び放射性廃棄物の責任ある安全管理に関する共同体 (ユーラトム) の枠組みを構築する EC 指令 (2011 年)。</p>	<p>加盟国数は 27 ヶ国。</p>	<p>国レベル：加盟国は、規制当局に対する十分な資金調達を保証することになっている。</p>	<p>国レベル：加盟国は、使用済燃料及び放射性廃棄物の管理に関する最終的な責任を負う。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— この分野に関する国の規制当局を設置する。</li> <li>— 欧州委員会に 3 年ごとに報告書を提出する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 意志決定プロセスにおける国際協力。</li> <li>— 安全管理を改善するための科学研究及び技術開発。</li> </ul>	<p>—</p>	<p>各国の規制枠組みでは、処分施設の存続期間に含まれる閉鎖後期間が考慮に入れられるべきである。</p>

### 4.3 まとめ

放射性廃棄物の地層処分における記録保存に関する動向、海外の記録保存に関する最新の考え方、方策について、OECD/NEA-RWMC（経済協力開発機構原子力機関-放射性廃棄物管理）が検討している Records, Knowledge and Memory（RK&M）イニシアチブに参画し、概要、位置付け、方針等に関する情報収集を行った。

本イニシアチブはフェーズ2の取りまとめを準備しており、各国にて実施される記録保存に共通して適用し得る記録の階層構造や、階層構造での上位の記録内容等について、報告書の作成に取り組んでいる。また、記録保存に関わる各種の手法の位置付けや相互関係についても取りまとめられる予定である。次年度も本会合へ出席し、わが国の地層処分事業に資するための情報の収集を継続して実施する予定としている。

地層処分の事業期間中は広範囲な情報が記録され、事業者により保存されるが、わが国では、これらの記録は、後に最終処分法に基づいて国（経済産業大臣）により「永久に」保存される。平成29年2月7日には、「原子力利用における安全対策の強化のための核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律等の一部を改正する法律案」が閣議決定されたが、この法案には、指定廃棄物埋設区域に関して原子力規制委員会規則で定める事項を記録し、これを原子力規制委員会に提出すること、及び原子力規制委員会は提出された記録を永久に保存することが条文として盛り込まれており、上述の最終処分法に基づく記録の永久保存に加え、炉規法においても記録の永久保存が規定されることとなった。このため、両方の法律に基づき長期に保存される記録の具体的な内容や保存方法を予め検討しておく必要がある。

長期保存すべき記録の内容や、記録の階層化については、RK&M イニシアチブ等により検討が進められているため、これらを基にわが国の状況を考慮して、今後、具体化していくことが可能と考えられる。

長期にわたり保存された記録を維持し、喪失を免れるための方法については、ある世代から次の世代に引き継いで保存していく方法と、マーカー等により、将来のある世代に直接情報を伝達する方法を並行して用いて、記録等の喪失を避けることや、耐久性のある記録媒体の開発、複数の場所に保存することなどが検討されている。しかし、記録を保管する組織の存続性や予算の継続性に関する不確実性に加え、人為的な記録の破壊等の可能性を排除することは困難である。これらは、将来の社会的な状況にも依存するため、記録の維持に向けて、複数の方法を組み合わせることで冗長性を確保するなど、記録が維持される可能性を高めて行く必要があると考えられる。

## 参考文献

- [1] 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会 (2009) : 放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究 (平成 22 年度～平成 26 年度)、  
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g91019d01j.pdf>
- [2] 原子力環境整備促進・資金管理センター (2013) : 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書 (第 3 分冊) -モニタリング技術の開発- 平成 25 年 3 月.
- [3] 原子力環境整備促進・資金管理センター (2014) : 平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書 (第 3 分冊) -モニタリング関連技術の開発- 平成 26 年 3 月.
- [4] 原子力環境整備促進・資金管理センター (2015) : 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書 (第 3 分冊) -モニタリング関連技術の開発- 平成 27 年 3 月.
- [5] OECD/NEA-RWMC (2013): Literature Survey on Markers and Memory Preservation for Deep Geological Repositories, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations (RK&M), NEA/RWM/R (2013)5.  
<https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2013/rwm-r2013-5.pdf>
- [6] OECD/NEA-RWMC (2014): Loss of Information, Records, Knowledge and Memory – Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/R(2014)3.  
<https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-3.pdf>
- [7] OECD/NEA-RWMC (2014): Markers - Reflections on Intergenerational Warnings in the Form of Japanese Tsunami Stones, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/R(2014)4.  
<https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-4.pdf>
- [8] OECD/NEA-RWMC (2014): Articles about strategic aspects of the preservation of Records, Knowledge & Memory (RK&M) across Generations, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/RKM(2014)5.  
<http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-rkm2014-5.pdf>
- [9] OECD/NEA-RWMC (2014): Monitoring of Geological Disposal Facilities: Technical and Societal Aspects, Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, NEA/RWM/R(2014)2.  
<http://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2014/rwm-r2014-2.pdf>
- [10] OECD/NEA-RWMC Web ページ 「An International Conference and Debate on the Preservation of Records, Knowledge and Memory of Radioactive Waste across Generations」

<https://www.oecd-nea.org/rwm/rkm/verdun2014/>

- [11] OECD/NEA-RWMC (2014): Expert Group on Preservation of Records, Knowledge and Memory across Generations, Phase-II Vision Document, NEA/RWM/RKM(2014)1/REV2
- [12] Jean-Noël Dumont et al.: Key Information File for Radioactive Waste Repositories – Preliminary Tests – 16169, WM2016 Conference, March 6-10, 2016, Phoenix, Arizona, USA
- [13] IAEA: Maintenance of records for radioactive waste disposal, TECDOC-1097, 1999.7
- [14] OECD/NEA-RWMC (2015): International Mechanisms to Support Records, Knowledge and Memory Preservation Over the Short and Medium Term, NEA/RWM/R(2015)2,  
<https://www.oecd-nea.org/rwm/docs/2015/rwm-r2015-2.pdf>

## 第5章 まとめ

### 5.1 モニタリングの枠組みに関する検討

処分場閉鎖後の安全性に関するモニタリング（性能確認モニタリング）を包含する性能確認プログラムの検討に資するため、国際機関（IAEA、OECD/NEA）、諸外国（米国、フィンランド、スウェーデン、フランス）、および国際共同研究（MoDeRn プロジェクト、MoDeRn2020 プロジェクト）での性能確認プログラムについて調査した。その結果、IAEA の特定安全要件、特定安全指針では性能確認プログラム、またはその一部であるモニタリングが要求されており、地層処分事例が先行する諸外国では、性能確認プログラムは規制要件との関係で国により異なった形で行われようとしている。また、MoDeRn プロジェクトや MoDeRn2020 プロジェクトではモニタリングのあり方について検討されている段階であることがわかった。国際的動向の調査結果から、以下のような要点が挙げられた。

- 処分場の構成要素（人工バリア等）の安全機能、性能や品質に影響する事象を対象として実施される。
- 処分概念や確認すべき事象の特性により、人工バリア等の製造時の品質管理、建設・操業時の品質管理、室内試験や現地試験、モニタリングという異なった手法を組み合わせる。
- このため、モニタリングや室内試験等の個別の計画のみでなく、性能確認プログラム、品質管理計画の全体を俯瞰し、個々の手法の役割を把握する必要がある。

今後の課題として、わが国における性能確認プログラムを検討するためには、処分事業の先行する各国の事例のうち、わが国で検討されている処分概念と共通した処分概念を有するスウェーデンとフィンランドについて具体的内容を調査し、わが国での品質保証／性能確認プログラムを検討するために必要な情報を整理する必要がある。

### 5.2 地中無線モニタリング技術の検討

地層処分場でのモニタリングに際し、配線による処分安全性能への影響を低減することが可能な地中無線通信技術について、モニタリングデータの無線伝送技術と、地層処分システムにおけるモニタリング関連機器へ無線で電力を供給する無線給電技術について検討した。

#### 5.2.1 無線伝送技術の開発

平成 27 年度の検討成果に基づき、地中無線通信技術の開発のうち中継装置について以下の項目を実施した。

### (1) 中継装置の製作および動作確認

中継装置の設計フロー図に従い、小型送信器 10 台分のデータを 100m 先に 10 年間継続して送信可能な内臓電池を確保するとともに、深度 500m の静水圧(5MPa 程度)に耐えられる筐体材料として硬質塩化ビニル樹脂(PVC)を用いた筐体の製作を行った。アンテナの寸法は直径 145mm、高さ 455mm となり、電源を内包する筐体の寸法は、直径 216mm、高さ 565mm で円筒部の肉厚を 35mm (蓋部厚 55mm) とすることで、静水圧等の前提条件を満足する結果となった。また、品質確認のため、製作した中継装置に対して温度試験と振動試験を行った後に、動作検証・ランニング試験を行って継続的なデータ通信ができることを確認した。

### (2) 地中無線伝送技術に関する開発状況の調査

平成 29 年度の取りまとめに向けた予備的調査として、地中無線伝送技術に関する国内外での開発状況について調査した。地層処分分野では、スペインとオランダの 2 事例を確認した。地層処分以外では、鉱山、ダム、河川堤防、斜面、トンネル現場等での適用事例を参考事例として概要を整理した。

### (3) 地下研究施設で実施中の適用試験の整理、確認

平成 26 年度から、日本原子力研究開発機構との共同研究による幌延深地層研究センターおよび瑞浪超深地層研究所の地下研究施設にて実施している地中無線伝送の適用試験に関して、動作状況等を整理した。

- 幌延深地層研究センター

試験開始から、平成 29 年 2 月末時点までの約 27 ヶ月間について、全てのセンサにおいて継続的にデータ取得(データ通信)ができていることを確認した。

- 瑞浪超深地層研究所

平成 29 年 3 月中旬まで継続的にデータ通信ができていることを確認した。その後に発生したデータ収録装置(パソコン)による一時的なデータ未取得に関しては、原因調査を行い、対策を実施した。

今後の課題として、無線伝送技術の動作確認は、2 週間の短い期間でのランニング試験であったため、より長期間における動作確認を行う必要がある。また、オーバーパックによる磁界を想定したデータ通信への影響について検討する必要がある。幌延深地層研究センターおよび瑞浪超深地層研究所の地下研究施設において実施している試験では、これまでに得られた知見や経験を踏まえた対応マニュアルの作成、また、国内外における技術動向や地層処分以外での活用事例の調査が挙げられる。

## 5.2.2 無線給電システム設計手法の検討

### (1) 設計手法の検討

結合係数 ( $k$ ) と  $Q$  値による計算値 (給電効率の算出) と実際の給電試験における実測値を比較し、設計手法 (給電効率の算出) の実証を行った。計算値と実測値が一致したことから、結合係数 ( $k$ ) と  $Q$  値によって給電効率を算出することが可能であることを確認した。

### (2) 変位、偏角による無線給電の影響評価

施工時に発生する送受電コイルの設置位置ずれによる給電効率への影響を室内試験で評価した。評価結果は、コイル間距離がコイル直径と同じ場合、コイル直径の 50% の変位ずれで 5% 程度の給電効率の低下、 $50^\circ$  の偏角ずれでも 2% 程度の給電効率低下であった。変位ずれおよび偏角ずれの給電効率への影響は小さく、送受電コイル施工時においては、変位、偏角に対して高い設置精度を必要としないことを確認した。

### (3) プラグを介した無線給電の影響評価

プラグを介した無線給電の影響評価として、鉄筋及びコンクリートがそれぞれの材料が無線給電に与える影響を評価した。プラグ内の鉄筋を模擬した金網を介する給電試験では、給電効率が 66% 低下する結果となった。この効率低下は、共振周波数や負荷抵抗を調整することで 34.4% まで改善ができるが、鉄筋などの金属がコイル間にあることによる給電効率の低下は無視できないと考えられる。一方、コンクリートを介した影響は、3% 程度の給電効率の低下であり、プラグを介した無線給電では、鉄筋に対する影響軽減策を検討することが重要である。

### (4) 処分孔を対象とした無線給電技術の調査

複数の受電コイルに給電する方法について分類し、処分孔への適用方法について検討した。また、調査結果および見つかった課題を基に、初期検討として単純な系における試験計画を立案した。

今後の課題として、無線給電技術を地層処分へ適用した場合の影響としては、変位・偏角、鉄筋、コンクリートの影響だけでなく、水 (塩水) への影響についても把握する必要がある。また、処分孔への適用については、試験計画(案)を作成しており、中継方式、インナー方式について適用性を検討し、地下調査坑道で実施すべく知見を収集する。

## 5.2.3 技術メニューの整備

これまでに整備した情報やデータ等の確認を行い、修正箇所等の整理を行った。また、技術メニューの操作性向上を目的に現状の課題を整理し、改良方法を検討した。

今後の課題として、MoDeRn 等で得られた情報を踏まえ、技術メニューの整備を図るとともに、改良方法を踏まえた操作性向上に取り組む必要がある。

### 5.3 記録保存に関する動向調査

地放射性廃棄物の処分における記録保存に関する動向、海外の記録保存に関する最新の考え方、方策について、OECD/NEA-RWMC（経済協力開発機構原子力機関・放射性廃棄物管理）が検討している Records, Knowledge and Memory（RK&M）イニシアチブに参画し、概要、位置付け、方針等の情報収集を行った。本イニシアチブはフェーズ 2 の取りまとめを準備しており、各国にて実施される記録保存に共通して適用し得る記録の階層構造や階層構造での上位の記録内容等について、報告書の作成に取り組んでいる。また、記録保存に関わる各種の手法の位置付けや相互関係についても取りまとめられる予定である。次年度も参画し、わが国の地層処分事業に資するための情報の収集を継続して実施する。