

平成27年度
地層処分技術調査等事業
処分システム工学確証技術開発

報告書
(第4分冊)

モニタリング関連技術の整備

平成28年3月

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のうち、処分システム工学確証技術開発 モニタリング関連技術の整備の開発成果を取りまとめたものです。

報告書の構成

平成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
	第5分冊	自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発

目次

第1章	研究の目的及び概要	1-1
1.1	処分システム工学確証技術開発の背景及び目的	1-1
1.1.1	開発の背景	1-1
1.1.2	開発の目的	1-1
1.2	モニタリング関連技術の整備に関するこれまでの開発成果	1-2
1.2.1	第1フェーズ（平成12年度～18年度）	1-2
1.2.2	第2フェーズ（平成19年度～平成24年度）	1-4
1.2.3	第3フェーズ（平成25～26年度）	1-5
1.3	モニタリング関連技術の整備に関する計画	1-8
1.3.1	長期健全性の確認等に関する検討	1-8
1.3.2	状態確認技術の検討	1-8
1.4	本年度の実施内容	1-9
第2章	モニタリングの技術的実現性向上に関する検討	2-1
2.1	はじめに	2-1
2.1.1	状態把握の方法	2-1
2.1.2	計測手法の課題	2-1
2.1.3	遠隔計測技術の課題	2-3
2.2	無線によるデータ伝送技術	2-6
2.2.1	無線伝送の多段多システムによる信頼性向上	2-6
2.2.2	中継装置を構成する回路、及びプログラムの作成	2-11
2.2.3	各回路の製作、電気回路の組立て	2-38
2.2.4	機能確認試験	2-44
2.2.5	地下調査施設における地中無線通信試験	2-68
2.2.6	まとめ	2-77
2.3	非接触による電力供給に関する検討	2-78
2.3.1	目的	2-78
2.3.2	調査研究の計画の見直し	2-78
2.3.3	無線給電における効率の理論限界	2-88
2.3.4	要素試験による解析パラメータの取得	2-108
2.3.5	効率の実験的評価手法の検討	2-116
2.3.6	まとめ	2-123
第3章	記録保存に関する調査	3-1
3.1	目的および実施概要	3-1
3.2	OECD/NEAの検討状況の調査・整理	3-1
3.2.1	RK&M イニシアチブの概要	3-2
3.2.2	RK&M イニシアチブ会合における検討状況	3-5

3.2.3	記録保存媒体としてのタイムカプセルの検討	3-13
3.3	まとめ	3-17
第4章	まとめ	4-1
4.1	平成27年度の調査研究業務のまとめを示す。	4-1
4.1.1	研究計画の更新	4-1
4.1.2	無線通信技術の検討	4-1
4.1.3	無線給電技術の検討	4-1
4.1.4	記録保存に関する調査.....	4-2

目 次

図 2.1.2-1	計測技術の関連図	2-2
図 2.2.1-1	複数段の中継のイメージ	2-6
図 2.2.1-2	中継器が故障した場合の通信経路確保の手順	2-7
図 2.2.1-3	検証のために設定した通信システムの構成	2-8
図 2.2.2-1	省電力受信回路の概要	2-12
図 2.2.2-2	省電力受信回路のブロック構成	2-14
図 2.2.2-3	省電力化に関する検討	2-15
図 2.2.2-4	省電力受信回路の動作フロー	2-17
図 2.2.2-5	RTC 温度特性	2-19
図 2.2.2-6	採用した RTC の温度特性	2-19
図 2.2.2-7	RTC の温度特性の計算値と実測結果	2-19
図 2.2.2-8	RTC 補正手順	2-20
図 2.2.2-9	同期通信概念	2-21
図 2.2.2-10	中継器の同期通信タイムチャート	2-22
図 2.2.2-11	単方向小型送信器の同期タイムチャート	2-23
図 2.2.2-12	定期通信	2-24
図 2.2.2-13	同期通信	2-25
図 2.2.2-14	健全性確認通信	2-25
図 2.2.2-15	指令通信	2-26
図 2.2.2-16	中継動作のフロー	2-27
図 2.2.2-17	系統変更の手順	2-28
図 2.2.2-18	マルチホップシーケンスのプログラムフロー (全体)	2-29
図 2.2.2-19	定期通信時の動作フロー	2-30
図 2.2.2-20	同期通信時の動作フロー	2-31
図 2.2.2-21	健全性確認通信の動作フロー	2-32
図 2.2.2-22	指令通信の動作フロー	2-33
図 2.2.2-23	異常復旧動作のフロー	2-34
図 2.2.2-24	異常状態の把握と対処の流れ	2-36
図 2.2.2-25	異常復旧動作フロー	2-36
図 2.2.2-26	異常復旧動作の手順	2-37
図 2.2.3-1	中継装置制御基板ブロック構成	2-38
図 2.2.3-2	中継装置制御基板回路パターン	2-39
図 2.2.3-3	中継装置制御基板実装回路	2-40
図 2.2.3-4	低消費受信基板回路ブロック	2-41
図 2.2.3-5	低消費受信基板回路パターン	2-42
図 2.2.3-6	低消費受信基板回路実装	2-43

図 2.2.4-1	RTC の E ₂₅ 校正結果と温度特性曲線.....	2-45
図 2.2.4-2	温度試験装置.....	2-46
図 2.2.4-3	温度試験状況.....	2-46
図 2.2.4-4	通信同期試験の機器構成.....	2-47
図 2.2.4-5	通信同期試験状況.....	2-48
図 2.2.4-6	通信同期試験結果.....	2-49
図 2.2.4-7	中継器内の時刻調整時間.....	2-49
図 2.2.4-8	省電力受信回路の通信機能確認試験.....	2-50
図 2.2.4-9	省電力受信回路の通信機能確認試験状況.....	2-50
図 2.2.4-10	GOLAY コードの距離に対する受信レベル.....	2-51
図 2.2.4-11	定期通信中継動作試験装置.....	2-52
図 2.2.4-12	定期通信中継動作試験状況.....	2-52
図 2.2.4-13	定期送信中継動作状況（全体）.....	2-53
図 2.2.4-14	小型送信器の定期送信受信状況（詳細）.....	2-53
図 2.2.4-15	中継器 1 台目から 2 台目への中継動作状況（全体）.....	2-54
図 2.2.4-16	中継器 1 台目から 2 台目への中継動作状況（詳細）.....	2-54
図 2.2.4-17	中継器 1 台目が受信した小型送信器 110 局のデータのログ.....	2-56
図 2.2.4-18	中継器 1 台目が受信した小型送信器 111 局のデータのログ.....	2-57
図 2.2.4-19	中継器 2 台目が受信した小型送信器のデータのログ.....	2-58
図 2.2.4-20	試験装置.....	2-59
図 2.2.4-21	試験結果.....	2-60
図 2.2.4-22	試験結果（拡大図）.....	2-60
図 2.2.4-23	試験装置.....	2-60
図 2.2.4-24	試験結果.....	2-61
図 2.2.4-25	指令通信の詳細.....	2-62
図 2.2.4-26	異常復旧試験の機器構成.....	2-62
図 2.2.4-27	同期異常復旧試験結果.....	2-63
図 2.2.4-28	系統変更試験構成.....	2-64
図 2.2.4-29	経路変更前の状況.....	2-64
図 2.2.4-30	経路変更後の状況.....	2-65
図 2.2.4-31	屋外通信試験構成.....	2-65
図 2.2.4-32	試験に用いた各機器.....	2-66
図 2.2.4-33	屋外通信試験状況.....	2-66
図 2.2.4-34	中継器と小型送信器の通信能力比較.....	2-67
図 2.2.5-1	緩衝材ブロックへの小型送信器の設置状況.....	2-69
図 2.2.5-2	埋戻し材ブロックへの地中無線送信装置及びセンサの設置状況.....	2-69
図 2.2.5-3	ケイ砂中の間隙水圧（002 局）.....	2-70
図 2.2.5-4	緩衝材の全圧（003 局）.....	2-70

図 2.2.5-5	緩衝材中の間隙水圧 (004 局)	2-70
図 2.2.5-6	埋戻し材中の間隙水圧 (005 局)	2-71
図 2.2.5-7	埋戻し材中の全圧 (006 局)	2-71
図 2.2.5-8	埋戻し材中の間隙水圧 (007 局)	2-71
図 2.2.5-9	埋戻し材中の全圧 (008 局)	2-72
図 2.2.5-10	地中無線モニタリング装置の設置場所の全体図 (平面図)	2-73
図 2.2.5-11	装置の設置場所、及び設置高さの模式図 (縦断面)	2-73
図 2.2.5-12	送信器の設置状況	2-73
図 2.2.5-13	012 局の変更後の動作スケジュール (右: 変更前、左: 変更後)	2-74
図 2.2.5-14	定期送信確認状況 (レベルメータ・サーマル接続)	2-74
図 2.2.5-15	定期送信の受信結果	2-75
図 2.2.5-16	受信レベルの距離減衰特性	2-76
図 2.2.5-17	水圧の経時変化	2-77
図 2.3.2-1	電界共振結合のイメージ	2-81
図 2.3.2-2	磁界共振結合のイメージ	2-81
図 2.3.2-3	複素誘電率の実部と虚部	2-83
図 2.3.2-4	複素透磁率の実部と虚部	2-83
図 2.3.2-5	ソレノイドコイル単体の図	2-84
図 2.3.2-6	円形コイル単体の図	2-84
図 2.3.2-7	1 次コイルと 2 次コイルの関係 (コイル中心合わせ)	2-85
図 2.3.2-8	1 次コイルと 2 次コイルの関係 (偏心した場合)	2-85
図 2.3.2-9	1 次コイルと 2 次コイルの関係 (偏角した場合)	2-85
図 2.3.2-10	磁界共振結合のイメージ図	2-86
図 2.3.3-1	磁界共振結合の等価回路	2-88
図 2.3.3-2	処分孔縦置き定置方式の試験坑道レイアウト	2-89
図 2.3.3-3	坑道断面 (左: 軟岩系、右: 硬岩系)	2-91
図 2.3.3-4	試験坑道断面(概念図) [5]	2-91
図 2.3.3-5	処分孔縦置き方式の人工バリアの寸法	2-92
図 2.3.3-6	電磁波によるプラグを跨いだ給電のイメージ	2-92
図 2.3.3-7	電磁波による上部埋戻材を跨いだ給電のイメージ	2-93
図 2.3.3-8	送受信コイルを 2 段介した試験孔内への給電のイメージ	2-93
図 2.3.3-9	コイル寸法、および離間に対する給電効率のイメージ	2-94
図 2.3.3-10	平成 26 年度に製作したコイル	2-95
図 2.3.3-11	平成 26 年に製作したコイル Q の測定データ	2-95
図 2.3.3-12	結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 2.0\text{m}$, $a_2 a_1 = 1$)	2-96
図 2.3.3-13	伝送効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 2.0\text{m}$, $a_2 a_1 = 1$)	2-97
図 2.3.3-14	結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2 a_1 = 1$)	2-98
図 2.3.3-15	給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2 a_1 = 1$)	2-98

図 2.3.3-16	結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 12$)	2-99
図 2.3.3-17	給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 12$)	2-99
図 2.3.3-18	結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 13$)	2-100
図 2.3.3-19	給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 13$)	2-100
図 2.3.3-20	結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 14$)	2-101
図 2.3.3-21	給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 14$)	2-101
図 2.3.3-22	結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 15$)	2-102
図 2.3.3-23	給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 15$)	2-102
図 2.3.3-24	結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 16$)	2-103
図 2.3.3-25	給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2a_1 = 16$)	2-103
図 2.3.3-26	給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $Q = 250$)	2-104
図 2.3.3-27	給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $Q = 500$)	2-104
図 2.3.3-28	2段階の無線給電の場合の試験孔内の2次コイルの受電効率 η ($Q = 250$)	2-105
図 2.3.3-29	2段階の無線給電の場合の試験孔内の2次コイルの受電効率 η ($Q = 500$)	2-106
図 2.3.3-30	給電効率 η におよぼすコイル直径の影響 ($Q = 250$)	2-107
図 2.3.4-1	製作したコイル軸	2-109
図 2.3.4-2	利用ケーブル	2-110
図 2.3.4-3	製作したコイル (4種類)	2-110
図 2.3.4-4	計測に利用したインピーダンスアナライザ	2-111
図 2.3.4-5	製作したコイルの自己インダクタンス L の周波数依存性	2-111
図 2.3.4-6	製作したコイルの内部抵抗 r の周波数依存性	2-112
図 2.3.4-7	製作したコイルの Q 値の周波数依存性	2-112
図 2.3.4-8	結合係数 k の測定方法 (JIS C5321)	2-113
図 2.3.4-9	結合係数 k の測定状況	2-114
図 2.3.4-10	結合係数 k の測定結果	2-114
図 2.3.4-11	効率の計算結果	2-115
図 2.3.5-1	正対するコイルによって構成される円筒	2-116
図 2.3.5-2	コイル間距離/コイル直径と給電効率 ($a_2a_1 = 1$ の場合)	2-117
図 2.3.5-3	コイル間距離/コイル直径と伝送効率の関係図	2-119
図 2.3.5-4	コイル間距離/コイル直径で整理したコイルの種類の影響	2-119
図 2.3.5-5	給電効率に及ぼすコイル間距離/コイル直径のイメージ	2-120
図 2.3.5-6	考慮すべき他のパラメータのイメージ	2-121

表 目 次

表 1.3.1-1	5 年間の研究計画の更新 (1 / 2)	1-8
表 1.3.2-1	5 年間の研究計画の更新 (2 / 2)	1-9
表 2.1.3-1	計測値の伝送の観点からみた課題の整理	2-5
表 2.2.1-1	冗長性検証結果 (r=0.3 の場合)	2-9
表 2.2.1-2	冗長性検証結果 (r=0.5 の場合)	2-9
表 2.2.1-3	冗長性検証結果 (r=0.7 の場合)	2-9
表 2.2.1-4	冗長性検証結果 (r=0.774 の場合)	2-9
表 2.2.2-1	現状送信器の消費電流量比	2-11
表 2.2.2-2	各回路の処理分担	2-11
表 2.2.2-3	GOLAY コードの種類	2-12
表 2.2.2-4	全台起動用 GOLAY コード	2-13
表 2.2.2-5	各中継器用 GOLAY コード	2-13
表 2.2.2-6	代表的な RTC の精度と消費電流	2-18
表 2.2.2-7	異常内容と復旧方法	2-35
表 2.2.4-1	回路の消費電流	2-44
表 2.2.4-2	RCT の E ₂₅ 校正結果 (実測時温度 22°C)	2-44
表 2.2.4-3	温度補正試験結果	2-46
表 2.2.4-4	運用期間ごとの最短送信インターバル	2-47
表 2.2.4-5	省電力受信回路通信試験結果	2-51
表 2.2.4-6	中継前と中継後のデータの比較	2-55
表 2.2.4-7	屋外通信試験結果	2-67
表 2.2.5-1	計測センサ諸元 (002 局、004 局、005 局、008 局)	2-68
表 2.2.5-2	計測センサ諸元 (003 局、006 局)	2-68
表 2.2.5-3	計測センサ諸元 (007 局)	2-68
表 2.2.5-4	計測センサ諸元	2-74
表 2.2.5-5	定期送信の受信レベル	2-76
表 2.3.2-1	給電方式の分類 (太線は本節での検討対象)	2-79
表 2.3.2-2	地層処分事業でのコイル間の媒体と成り得るもの	2-80
表 2.3.2-3	コイルについてのパラメータ表	2-84
表 2.3.3-1	平成 26 年度に製作したコイルの情報	2-95
表 2.3.3-2	コンクリートプラグに対するパラメータ	2-96
表 2.3.3-3	坑道路盤から試験孔内に対するパラメータ	2-97
表 2.3.3-4	給電効率とコイル径の関係	2-107
表 2.3.4-1	1/1 サイズと各サイズのまとめ表	2-109
表 2.3.4-2	各サイズの巻数	2-110
表 2.3.4-3	各サイズのコイルにおけるピークの Q と周波数	2-113

表 2.3.5-1	コイル間距離／コイル直径と給電効率	2-117
表 2.3.5-2	コイル間距離／コイル直径と伝送効率	2-118

第1章 研究の目的及び概要

1.1 処分システム工学確証技術開発の背景及び目的

1.1.1 開発の背景

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

処分場の操業期間中におけるガラス固化体のオーバーパックへの封入・検査技術、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術及び人工バリアのモニタリング技術等の要素技術について、必要となる基盤技術が整備されてきた。今後、さらなる処分技術の信頼性向上のためには実際の深部地下環境での活用を通して、これらの工学的な要素技術の信頼性を高める必要がある。さらに、東京電力福島第一原子力発電所事故を踏まえ、操業期間中における自然災害である巨大地震や巨大津波等の操業期間中の安全対策に関する基盤技術の整備も喫緊の課題となっている。本事業では、上記状況を踏まえ、平成 25 年度から 5 年程度の期間で処分場の操業期間中における人工バリアの製作・施工技術及びモニタリング技術等の工学技術を、地下研究施設を活用して確証していくとともに、自然災害に対する操業期間中の工学的対策に関する基盤技術の整備を行う。

1.1.2 開発の目的

平成 25 年度に立案した 5 か年計画の 3 年目として、以下の研究開発を実施する。本年度はこれまでの検討を踏まえ、年度計画を更新する。

(1) 処分システム工学確証技術開発

- 1) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－オーバーパック
- 2) 人工バリア品質／健全性評価手法の構築－緩衝材
- 3) 人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築
- 4) モニタリング関連技術の整備

(2) 自然災害に対する操業期間中の安全対策に関わる基盤技術の開発

1.2 モニタリング関連技術の整備に関するこれまでの開発成果

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

1.2.1 第 1 フェーズ（平成 12 年度～18 年度）

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

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

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

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

さらに、地層処分環境での計測やデータ通信技術は、処分場の安全性能への影響を最小にしつつ、適切に情報取得することが必須であると考え、これを実現するための中核的な技術として、地中無線通信技術及び光ファイバセンサ技術等のモニタリング技術の調査を実施した。海外の地下研

究施設での地中無線通信試験では結晶質岩・堆積岩中でのデータ送受信に成功した。また、温度及び圧力を検知する光ファイバセンサは既存の汎用計器と遜色ないことを実験室試験で確認した。平成 18 年度に原環センターが開催した国際ワークショップ[3]では、無線データ伝送技術と光ファイバセンサを用いたモニタリング技術の開発の重要性が国際的に認識され、本研究が国際的に最も先行している地中無線通信技術は高く評価された。

これらの成果を取りまとめ、以降の主要な課題として下記が示された。

- ・モニタリング技術の調査と技術メニューの整備：地層処分において実施される幅広いモニタリングのうち、操業時安全及び廃棄体の品質管理のためのモニタリングについて、機器の等の調査と技術メニューへの反映を行なうこと、性能評価からの重要性の高いオーバーパック金属腐食量、緩衝材の間隙水化学の検出技術について調査を行うこと、これらを踏まえて、さらに詳細に個々の測定方法、データ伝送方法等を整理し、今後の技術開発の対象とするモニタリング技術を抽出すること。
- ・技術開発：無線モニタリング技術について、第 1 フェーズの開発成果をベースに周波数帯を最適化し、アクティブな低周波無線技術により短距離及び中（長）距離の伝送機器を調査研究すること、パッシブセンサの性能評価等のフィージビリティを調査すること、及び緩衝材及びその中のオーバーパックへの光ファイバ等の配線敷設を伴う温度・応力の検出技術を調査研究すること。
- ・埋設廃棄体の回収可能性：埋設廃棄体の回収可能性への対処として、回収の原因となる事象の抽出、回収するとなった場合の技術的対応可能性等の検討を行うこと、また、回収の原因事象を技術的に排除するための課題を抽出すること。

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

- ・意義：地層処分に対する社会的合意に向けた方策として、社会的・倫理的観点から記録保存は重要な位置付けを持つという考えを示した。
- ・目的：記録保存の目的として、「将来世代の処分場への接近・侵入行為の抑制」及び「将来世代の意思決定に資する情報提供」の 2 つを挙げた。
- ・方策：異なる複数の方策を組み合わせ、情報伝達に冗長性を持たせ、部分的な損傷があっても全体の機能が保たれる頑強性を保持し、将来の背景条件の変化にも対応し得る柔軟性を持った記録保存システムの概念を示した。このような記録保存システムを構築するために、記録保存・伝達を社会制度の中に維持する「リレーシステム」と、社会制度や人間の管理に依存しない記録保管庫や媒体などに委ねる「永続システム」により、記録を保存する考えを示し、文書及びマーカー・モニュメントにより記録を保存するための具体的内容について検討した。
- ・技術的可能性：記録媒体としては上質紙の技術開発が進んでおり、保存環境に配慮することにより数百年～千年程度の耐用年数が期待できることがわかった。一方、インクについては耐久性の評価に関する研究例が見当たらず、今後の研究課題が示された。また、記録の長期保存媒体として、強度、耐食性、耐磨耗性等に優れ、レーザーによる刻印精度も良好な炭化珪素が実用的であることを示した。

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

1.2.2 第2フェーズ（平成19年度～平成24年度）

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

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

- ・ ベースライン構築（サイト調査と密接に関係）
- ・ 環境データベース構築（サイト調査と密接に関係）
- ・ 規制等遵守（放射線学的、非放射線学的、防護措置の遵守）
- ・ 性能確認（安全評価結果に影響を及ぼす FEPs（特質(Features)、事象 (Events)、プロセス (Processes)）に関連するパラメータの確認）

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

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

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

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

地中無線通信技術の開発においては、先ず、地下施設を含む岩盤中の電磁波の伝播特性を判断す

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

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

1.2.3 第3フェーズ（平成25～26年度）

平成25年度は当該年度から5年間のモニタリング関連技術の整備に関する計画を、目的や実施場所、パラメータ、そして結果の反映方法などの枠組みに関する検討と、技術的実現性の向上に関する検討に分けて計画した。計画にあたっては、第2フェーズの取りまとめにあたり抽出した課題に加え、原環センターが参画した共同研究である MoDeRn プロジェクトにおいて抽出した課題を参照した。これに加え、モニタリング結果を含む地層処分に関する様々な記録の保存についても調査計画を示した。

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

人工バリアの性能確認については、室内や地下研究所等で行なわれる各種の試験を含む性能確認プログラムの一部として、モニタリングによる確認が行なわれる。モニタリングにより人工バリアの性能確認を行う際には、モニタリング機器の設置による水みちの形成によりバリア機能を損ねる可能性があり、この可能性を十分に検討し、モニタリングにより得られるデータの重要性和比較してモニタリング対象や方法を決定する必要がある。ここでは、地下特性調査施設、パイロット施設、処分パネルの各箇所で行なわれる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、バリア機能の障害、地質学的・水理学的な代表性、放射線影響の観点から比較し、その得失を示した。また、性能確認モニタリングの結果の反映方法については、人工バリアの構成要素の品質とこれにより達成される性能に関するモデルにより、事前に予測されたあるパラメータの範囲とモニタリング結果の比較による対応について検討した。この結果、モニタリング結果が許容値を満たしている場合であっても、モニタリング結果を踏まえたモデルの再検討により、モニタリング対象

である人工バリアの構成要素が性能を保持すべき期間内に性能を維持できなくなると予測され、かつ処分の安全性に影響を及ぼすと判断された場合には、リスクに対応するために工学的対策や廃棄体の回収等が検討されることを示した。

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

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

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

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

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

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

地中無線技術に関する重要な課題である長寿命化について、各種の電源供給技術の文献調査を実施した。地中無線モニタリング装置に現在用いている電源である、化学反応による一次電池につ

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

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

これらに加え、高レベル放射性廃棄物の地層処分における記録保存について最新動向の調査を実施した。OECD/NEA-RWMCが2009年より実施している記録保存に関するプロジェクトの3文書についてその内容を整理した。本プロジェクトは現在進行中であるが、議題となる内容は、制度的管理の一環である記録保存、マーカー・モニュメント等に加えて、閉鎖までの記録管理について含むこととなる予定であり、今後公開される報告書等の情報は、非常に重要であると考えられる。また、英国の地層処分に関する記録保存について、2009年の規制要件及び事業者の対応策を整理するとともに、わが国に於いて平成23年に施行された「公文書管理法」について、内閣府等により公表された具体的な運用方法についての文書（管理法施行例や運用マニュアル等）の内容を調査・整理した。

1.3 モニタリング関連技術の整備に関する計画

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

1.3.1 長期健全性の確認等に関する検討

これまでの長期健全性の確認は、FEP によるパラメータの抽出、各パラメータの測定場所、時期の観点から検討が進められてきた。しかしながら、計測した結果をどのように性能確認反映してくのかという検討が不足している。今後は人工バリア品質／健全性評価手法の構築 - オーバーバック／緩衝材で検討中の、判断指標の提示に向けた検討密接に連携する必要がある。平成 28 年度からの調査研究計画を表 1.3.1-1 のように更新した。

表 1.3.1-1 5 カ年の研究計画の更新 (1 / 2)

当初	H25	H26	H27	H28	H29	
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	<ul style="list-style-type: none"> ・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 ・MoDeRn成果取りまとめ 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	<ul style="list-style-type: none"> ・状態確認結果の反映方法に関する検討 ・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の検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリア長期健全性の状態確認に関するシステムの例示 	<ul style="list-style-type: none"> ・実現可能な技術による人工バリア長期健全性の確認に関する計画の例示 ・地層処分の信頼性向上への状態確認の役割の提示
	ii) その他の状態確認に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> ・詳細計画検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・操業安全及び回収可能性に係るモニタリングの調査・検討 		<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・詳細計画検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・技術メニューへの記録保存成果反映 	<ul style="list-style-type: none"> ・調査・開発成果の反映 	<ul style="list-style-type: none"> ・モニタリングシステム反映方法検討 	<ul style="list-style-type: none"> ・人工バリアモニタリングシステムの反映

更新	H28	H29	
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	<ul style="list-style-type: none"> ・実際の操業段階に留意した、5W1H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 	<ul style="list-style-type: none"> ・段階的な進捗、それに伴う様々な状態が混在する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
		<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・操業安全、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	<ul style="list-style-type: none"> ・性能確認プログラムに基づく、対象・技術の整理、 	<ul style="list-style-type: none"> ・技術メニューへの実装 	

1.3.2 状態確認技術の検討

状態確認技術の検討では、地中無線通信技術に係わる技術開発を主に進めてきた。地中無線通信技術は計測データをワイヤレスで伝送する技術であり、それ単体では状態確認を行うことはできない。ケーブルによる系の擾乱と有線で取得できるパラメータの重みを比較して、計測を行うか否かは決定される。そのため本事業においても地中無線通信技術以外の状態把握技術についても知見を拡充することが必要である。平成 28 年度からの調査研究計画を表 1.3.2-1 に示した。

表 1.3.2-1 5カ年の研究計画の更新（2 / 2）

		H25	H26	H27	H28	H29
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 ・ 中継機等耐圧化検討 ・ 小型送信機水分計アダプタ開発	・ 国際WS共催 ・ 多段中継方法検討	・ 進捗確認、計画更新 ・ 多段中継機詳細設計	・ 改良型中継機製作・試験	・ 頑健性、冗長性を備えた無線モニタリングシステムの提示
	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	・ 地中無線装置への電源実装方法検討	
	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	・ 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	

更新	H28	H29	
②長期健全性の確認等に関する検討	i) 地中無線モニタリング技術の開発	・ 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使用の推奨例	・ 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
	ii) 電源供給技術等の調査	・ 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	・ 地下調査施設における地中無線伝送技術の実証 ・ 計測計画の実践的検討 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
	iv) その他状態把握技術の検討	・ 性能確認に適用可能な原位置調査やサンプリング分析、地中無線送信器に接続出来ない計測技術の検討	・ 計測値の伝送方法（無線／有線）による制約と、性能確認上の重要度との比較

1.4 本年度の実施内容

地層処分事業におけるモニタリング技術の整備、諸外国の検討事例情報収集等を実施した。

- ・ 無線通信技術では、多段多系統によるデータ伝送技術の冗長性の定量化を図った。電力消費を抑えるためのプログラムの作成、電子回路の設計、製作、伝送試験を実施した。
- ・ 幌延と瑞浪の地下研を活用した無線通信試験を継続して実施した。
- ・ 無線給電技術の検討では、無線給電の理論的限界値を計算で算出した。
- ・ OECD/NEA の RK&M に参画し、大阪万博のタイムカプセルの事例を紹介した。

参考文献

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

第2章 モニタリングの技術的実現性向上に関する検討

2.1 はじめに

2.1.1 状態把握の方法

計測、測定とは、対象の品質や性能などを評価（確認、判断）するため、観測者が対象の状態を把握する行為と位置付けると、以下のような方法が考えられる。

(1) 原位置計測

観測者が対象近傍まで赴き、その場において5感（視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚）で判断、またはセンサ等の装置で数値化する。観測者が原位置で対象を直接評価することが出来る。対象をその場で評価出来るとともに、持ち込むことが可能であれば手法は問わない。一方、観測者のアクセラルートを確保する必要があり、対象によっては擾乱が無視できない可能性がある。

(2) サンプリング

原位置で対象を採取し、実験室等において5感（視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚）で判断、またはセンサ等の装置で数値化する。原位置の採取若しくはボーリング孔での採水など、評価対象を試料という形で採取する。観測者が到達できない場合でも試料が採取出来れば評価出来るが、試料の移送経路での変質等を考慮する必要がある。

(3) 遠隔計測

対象物の近傍にセンサ等を設置し、対象物の状態を電気信号で離れた観測者に伝送する。センサと電源や計測器をケーブルで接続し離れた場所から制御や計測値を取得する方式が一般的である。センサの故障やケーブルの断線が計測不能の主な要因である。またケーブルは系を擾乱したり、水みちなどの弱部となる可能性がある。一方、ケーブルを使用せず内蔵電池で駆動し、計測値を無線で伝送する方式もある。

これらの方法は、性能確認プログラムの対象や計測パラメータに応じて、選択することが重要である。

2.1.2 計測手法の課題

図 2.1.2-1 に観測者が対象の状態把握をする際の手法について、計測値の伝送と電源、システムの劣化要因、計測対象への影響等の関連を示す。(1)原位置計測や(2)サンプリングは、対象にアクセス可能な経路が確保出来ることが成立の前提である。アクセス出来るが故に、計測技術は持ち込めるものであれば適用可能であり、装置の劣化についても適切な維持管理、交換等の対策が取りやすい。経路の維持や、系の解放による擾乱が主な課題となる。一方で(3)遠隔計測は、センサと計測値の伝送が主要な要素であり、伝送を無線にした場合は電源が要素に加わる。センサを系に埋め込むことで系が受ける擾乱を低減することが出来、また遠隔からの計測システムの管理が可能である。センサや設備の更新については埋め込んだ場合は系を破壊する必要があり。更新が出来ない場合はセンサやケーブルの故障や劣化、電池の消耗が計測システムの寿命の決定要因となる。

2.1.3 遠隔計測技術の課題

(1) 計測システムの構成要素

遠隔計測技術は、主にセンサ、計測値の伝送手段、それらを動かすための電源の3つで構成されている。

1) センサ

ここでは、対象の状態を何らかの科学的な原理を用いて、人間や装置が扱うことが出来る信号に変換するもの、特に遠隔地までの信号の伝達のため、電気信号として出力出来るものと定義する。温度、圧力、変位等を一旦電気信号に変換して伝送し、装置側で原理に基づいて計測値に変換して利用する。センサの原理を以下の3種類に分類した。

・センサが対象と反応するもの

センサ自体が対象と反応し信号を出力する。酸素濃度、pH、化学種の濃度といった化学的なパラメータの計測に主に用いられる。それ自身が反応するため、反応物質の消耗がセンサの寿命に影響する。

・対象の挙動でセンサの特性が変化するもの

温度、変位、変形、圧力など、対象の挙動によってセンサ自体の特性が変化することを原理とする。抵抗、振動弦、差動トランス、熱起電力などがある。特性の変化を電気信号に変換する回路も含む。

・外部からの入力に対する応答を利用するもの

電圧、打撃など外部から対象やセンサに何らかの入力を与え、その応答を信号として取得する。腐食速度の測定に用いられる電気化学インピーダンスなど。入力部と検知部は一体型、または独立型とがあるが、外部から対象への入力が必要である。

2) 伝送

センサからの信号を伝送用の電気信号に変換し、観測者（人間、装置）側のデータロガー等まで届けるもの。センサー観測者間に設けられたケーブルで電気信号を送受信する有線方式と、電磁波を用いて送信器と受信器間で送受信する無線方式がある。伝送する信号の方式としてはアナログとデジタルがある。有線方式の場合はケーブルの存在による系の擾乱に伴う計測値の信頼性や対象物への影響、断線による送受信の途絶が課題となる。無線方式の場合は送受信機器間に存在する媒体による電磁波の減衰を考慮したシステム構成が課題である。

3) 電源

センサの出力を電気信号に変換するための電気回路の駆動、外部からの入力に対する応答を計測する場合はその入力機器を駆動、無線伝送の場合は電磁波を発生させる機器の駆動、およびそれらの制御回路の駆動のためには動力源として電気が必要である。計測値の伝送方式が有線の場合は電源を常時外部から得ることが可能である。一方、無線方式の場合は機器に内蔵された電池、放射性同位体熱電気転換器（RTG: Radioisotope thermoelectric generator）、非接触で必要な電源を確保する必要がある。

(2) 有線／無線の観点からの課題の整理

遠隔計測技術を構成する3つの主要素のうち、センサは取得したい物理量の値の範囲、精度、分解能、期間等、モニタリングの目的に合わせて選定されるため、最も上位に位置付けられると考えられる。センサ自体の信頼性向上や長寿命化は計測の目的に応じた検討が必要である。

一方、計測値の伝送技術としては無線方式の方が系への擾乱の影響が少なく計測値自体の信頼性は高いと考えられるが、伝送された計測値の信頼性、電源の確保、動作原理でのセンサ選定上の制約などに課題がある。そこで地層処分事業におけるデータ伝送の有線方式／無線方式についてそれぞれの特徴や課題を整理し、基盤研究としての技術開発の位置付けを明確にした。

表中青字の課題は一般産業界と共通するもの、赤字は地層処分特有の課題、緑字は一部共通の課題を示す。表 2.1.3-1 に有線方式／無線方式の観点からの課題を整理したものを示す。

表 2.1.3-1 計測値の伝送の観点からみた課題の整理

青字：一般産業界と共通 緑字：一部一般産業界と共通 赤字：地層処分特有

大項目	対象	データ伝送方法	
		有線	無線
処分場への設置	安全機能	撤去しない場合、核種の移行経路となり得る。	撤去しない場合、核種の移行経路となり得る。
	労働安全	設置作業に要する時間が長い。	設置作業に要する時間が有線より短い。
	劣化(機器)	放射線により構成部材が劣化する。 →耐放射線性の素材を使用する	放射線により構成部材が劣化する。 →耐放射線性の素材を使用する
データ信頼性	系の擾乱	ケーブルによって系が擾乱を受ける。 ケーブルが水を引き込む。→適切なケーブル貫通部の養生 ケーブルを熱が伝わる。→導電体の特性に依存	送信器によって系が擾乱を受ける。 機器周辺に不連続部が形成される。 →送信器の小型化 センサー・送信器の一体化
	ノイズ耐性	ケーブルが周囲のノイズを拾う。 アナログ通信：データが荒れる。 →適切にシールドを施す デジタル通信：送受信エラー→送受信アルゴリズムの検討	伝送方式によって影響を受ける。 アナログ通信：十分なS/N比が必要 →適切な信号強度の確保 ←電池の消耗 デジタル通信：送受信エラー→送受信アルゴリズムの検討
運用	電源	外部より有線で継続的に供給される。	内蔵、若しくは近傍に設置した電池（電源） →電池自体の性能向上 適用可能な電源の検討 →省電力モードでの動作 外部からの給電 →無線給電技術 地層処分事業への応用
	施工性	測定箇所と収集装置間ケーブルの取り扱い →作業時間の増大 →労働安全（放射線） ケーブル周辺の止水 →適切なケーブル貫通部の養生	計測対象付近への設置
	寿命	計測用センサーの劣化 →センサーの長寿命化 センサーの更新 ケーブルの断線 周囲の変形に伴い力が加わる →適切な強度のケーブルの選定 →適切な設置方法の検討	計測用センサーの劣化 →センサーの長寿命化 センサーの更新 内部電池の消耗 →十分な容量の確保 電池自体の性能向上 →設置場所の制約 外部からの給電
	送信距離	ケーブルの抵抗値に応じた距離 ⇒導電体の特性に依存	一段当たりの無線送信強度に依存 →送信強度を上げる←電池の消耗 多段・多系統中継
	計測間隔	外部に設置したロガー等で自由に設定可能	予め設定した時間間隔で計測 →双方向通信でプログラムを書換え 電池の消耗 →目的に合わせた適切な間隔の設定 電源の検討
	データ収集	外部に設置したロガー等で自由に設定可能	予め設定した時間間隔で送信 →内部メモリ容量に依存 ←計測間隔 電池の消耗 →目的に合わせた適切な間隔の設定 電源の検討
適用可能 センサ (実績)	消費電力	外部から有線で供給されるため、制約はない。	電池（内蔵or外付け）から供給されるため、省電力な計測技術を推奨
	パラメータ	電気信号に変換可能なもの	間隙水圧、水圧、土圧、傾斜、変位、温度、荷重、応力、温度、湿度
	原理	電気信号に変換可能なもの	差動トランス、振動弦

2.2 無線によるデータ伝送技術

2.2.1 無線伝送の多段多系統による信頼性向上

(1) 中継の多段多系統化

小型送信器や中継器の通信距離は電磁波の出力と通信経路での減衰によって決まるが、内蔵電池を電源とする機器において、出力を上げることは電池をより早く消耗することに繋がる。そのため計測や通信の頻度、計測値の無線伝送を期待する期間や内蔵電池の容量等から、電磁波の出力増大による通信距離の長距離化には限界がある。これまでの基盤研究開発における通信距離の実績として、センサが繋がる小型送信器は 20m 程度である。この距離を超える距離を地中無線によってデータ伝送を行う場合、通信経路に中継器を配置し多段化により所定の距離の確保する方法が検討されている。しかしながら中継による多段化は経路を構成する機器が一台でも不具合を起こすとデータの伝送が出来なくなり、その確率は多段化することで高くなる。この課題に対して、平成 26 年度に長距離化と伝送の信頼性向上を狙った中継の多段多系統化の検討を実施した。に 4 段 2 系統の中継装置を 2 グループ配したイメージを示す。

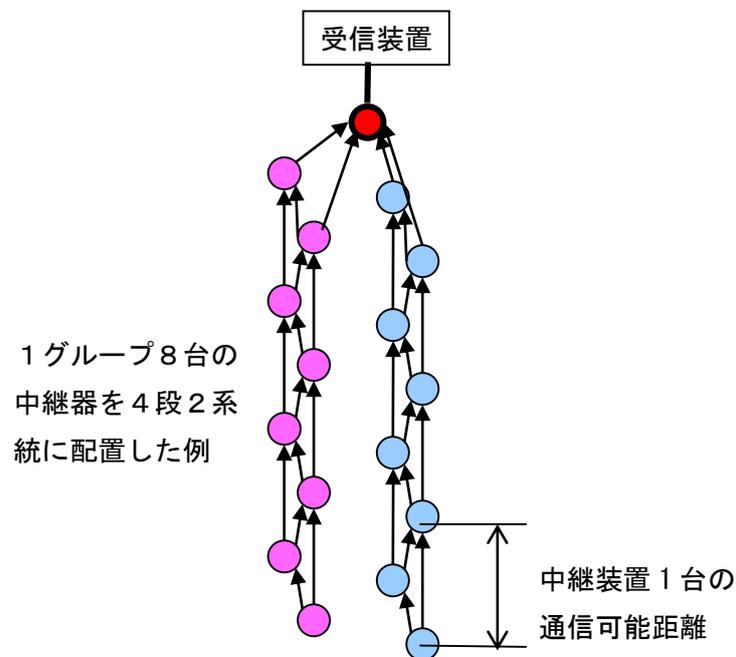
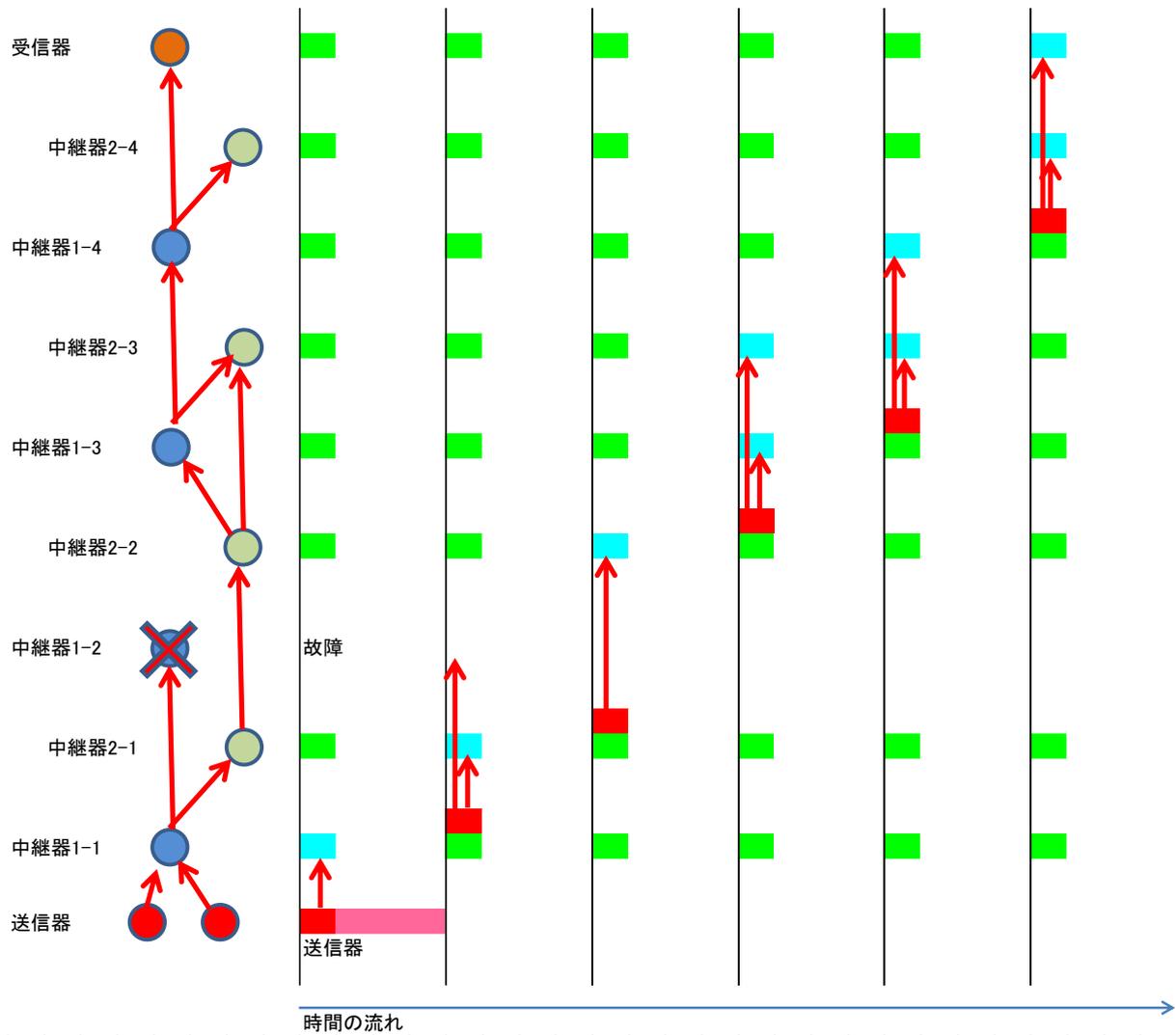


図 2.2.1-1 複数段の中継のイメージ

図中左右は各々独立した伝送グループであるが、それぞれ 2 つの経路が構築されている。そのため途中の中継器が故障した場合でも、一方の経路で肩代わり出来るような配置となっている。

中継装置の一つが故障した場合の通信経路の確保について、図 2.2.1-2 に示す。ここでは中継装置 1-2 が故障したと仮定する。すると、系統 1 の中継装置 1-3 にはデータが届かない。そこで、中継装置 1-1 の信号を受信している中継装置 2-1 が中継装置 2-2 に送信し、中継装置 2-2 は中継装置 1-3 及び 2-3 に伝送する。中継装置 1-3 は 2-2 から来た信号を系統 1 のデータとして、通常通り受信機に向けて伝送する。結果、中継装置 1-2 の故障により、中継装置 2-1、2-2 が経路を負担してデータを伝送することができる。



- 受信待機時間
- データ受信
- データ送信時間
- データ送信可能時間
(同期ずれによる他送信を阻害するまでの猶予時間)

図 2.2.1-2 中継器が故障した場合の通信経路確保の手順

(2) 多段多系統化による通信経路の冗長性の評価

このように多段化が通信長距離化の手法として有効であり、多系統化することで中継器が故障した場合でも通信経路が確保できる。通信経路を複数系統にすることの有効性について、ある期間でシステムや機械が正常に稼働している確率をシステム全体の信頼性として検証した。

1) 冗長性の定量化

中継システム全体の信頼性： R を計算するため、以下の方法で計算式を導出した。図 2.2.1-3 に示すような小型送信器と受信器の間に中継装置から成る中継システムが組み込まれた機器構成を仮定する。

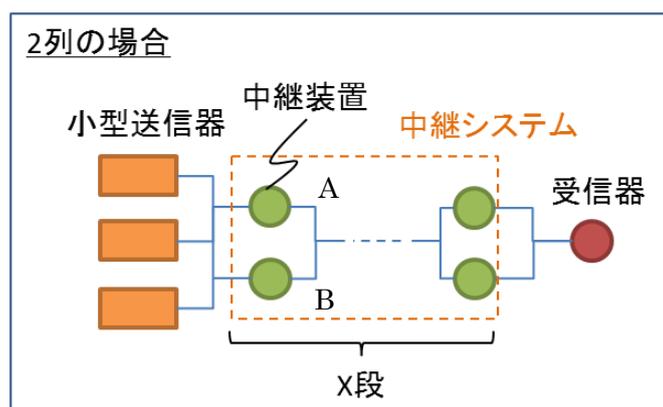


図 2.2.1-3 検証のために設定した通信システムの構成

中継装置 A と B について、ある期間中の信頼性をそれぞれ r_A と r_B とする。A と B が壊れる確率は、それぞれ $(1-r_A)$ 、 $(1-r_B)$ なので、A と B の両方が壊れる確率は $(1-r_A) \times (1-r_B)$ である。したがって、A と B の内、少なくとも一つが稼働している確率は $(1 - (1-r_A) \times (1-r_B))$ となる。ここで、 $r=r_A=r_B$ とすれば、 $(1 - (1-r)^2)$ である。よって、これが 2 段あれば、 $(1 - (1-r)^2)^2$ である。これを、系統数： N (単位：列)、段数： X (単位：段) で一般化すれば、次式が導かれる。

$$R = (1 - (1 - r)^N)^X$$

次に、10 年運用する場合の中継システムの信頼性について検討する。仮定として、10 年運用時の中継装置の信頼性： r を 0.3、0.5、0.7 とする。なお中継装置の信頼性は 0.774 である。この値は、使用している部品点数および主要部品の故障率等を調査し、平均故障時間等を求めて、約 10 年運用時の信頼性として算出されたものである。以上の 4 ケースについて、並列数と中継数を種々に変えて、計算を行った。

表 2.2.1-1～表 2.2.1-4 に、計算結果を示す。太枠で囲った値は、中継装置の信頼性 (r) 以上の値である。全てのケースにおいて 1 系統よりも 2 系統以上の方が、信頼性が飛躍的に向上することを定量的に確認した。

表 2.2.1-1 冗長性検証結果 (r=0.3 の場合)

信頼性		0.3						
		中継の段数						
		1	2	3	4	5	6	7
系統の列数	1	0.300	0.090	0.027	0.008	0.002	0.001	0.000
	2	0.510	0.260	0.133	0.068	0.035	0.018	0.009
	3	0.657	0.432	0.284	0.186	0.122	0.080	0.053
	4	0.760	0.577	0.439	0.333	0.253	0.193	0.146
	5	0.832	0.692	0.576	0.479	0.399	0.332	0.276

表 2.2.1-2 冗長性検証結果 (r=0.5 の場合)

信頼性		0.5						
		中継の段数						
		1	2	3	4	5	6	7
系統の列数	1	0.500	0.250	0.125	0.063	0.031	0.016	0.008
	2	0.750	0.563	0.422	0.316	0.237	0.178	0.133
	3	0.875	0.766	0.670	0.586	0.513	0.449	0.393
	4	0.938	0.879	0.824	0.772	0.724	0.679	0.637
	5	0.969	0.938	0.909	0.881	0.853	0.827	0.801

表 2.2.1-3 冗長性検証結果 (r=0.7 の場合)

信頼性		0.7						
		中継の段数						
		1	2	3	4	5	6	7
系統の列数	1	0.700	0.490	0.343	0.240	0.168	0.118	0.082
	2	0.910	0.828	0.754	0.686	0.624	0.568	0.517
	3	0.973	0.947	0.921	0.896	0.872	0.849	0.826
	4	0.992	0.984	0.976	0.968	0.960	0.952	0.945
	5	0.998	0.995	0.993	0.990	0.988	0.986	0.983

表 2.2.1-4 冗長性検証結果 (r=0.774 の場合)

信頼性		0.774						
		中継の段数						
		1	2	3	4	5	6	7
系統の列数	1	0.774	0.599	0.464	0.359	0.278	0.215	0.166
	2	0.949	0.900	0.854	0.811	0.769	0.730	0.693
	3	0.988	0.977	0.966	0.955	0.944	0.933	0.922
	4	0.997	0.995	0.992	0.990	0.987	0.984	0.982
	5	0.999	0.999	0.998	0.998	0.997	0.996	0.996

2) 適切な中継段数、系統列数の選定

中継系統の列数を増やせば信頼性は向上するが、ある列数を超えるとその寄与度が飽和状態になる。また中継器数が増えるため設置場所やコストの面でも適切な列数を設定することが重要である。

通信距離を 100 m とした場合について、必要な系統数と段数について試算した。中継装置 1 台当たりの通信距離は、アンテナの大きさや電流の他に、周囲の媒体（空気、水、岩盤、鋼材など）の影響を受けるが、ここでは 80 m、40 m、20 m の 3 ケースを仮定した。この場合、必要な段数は、それぞれ 2 段、3 段、5 段となる。このとき、中継システムの信頼性が中継装置の信頼性以上になるための中継段数と系統列数は、表 2.2.1-1～表 2.2.1-4 より以下のように見積もることが出来る。

- 機器の信頼性 $r=0.3$:
 - 通信距離 80m の中継器 : 中継段数 : 2、系統列数 : 3
 - 通信距離 40m の中継器 : 中継段数 : 3、系統列数 : 4
 - 通信距離 20m の中継器 : 中継段数 : 5、系統列数 : 5
- 機器の信頼性 $r=0.5$:
 - 通信距離 80m の中継器 : 中継段数 : 2、系統列数 : 2
 - 通信距離 40m の中継器 : 中継段数 : 3、系統列数 : 3
 - 通信距離 20m の中継器 : 中継段数 : 5、系統列数 : 3
- 機器の信頼性 $r=0.7、0.774$:
 - 通信距離 80m の中継器 : 中継段数 : 2、系統列数 : 2
 - 通信距離 40m の中継器 : 中継段数 : 3、系統列数 : 2
 - 通信距離 20m の中継器 : 中継段数 : 5、系統列数 : 3

中継器数は中継段数×系統列数になる。同じ通信距離を確保する場合、機器ごとの信頼性（故障率低減）と一段当たりの通信距離が、中継器数の設定に寄与する。

以上から、地中無線の冗長化を図るために、データの伝送経路を複数確保することは有効な方法であることを定量的に示した。こうした計算により、要求される通信距離や信頼性に対して、必要な中継数と並列数を決めることができる。

2.2.2 中継装置を構成する回路、及びプログラムの作成

(1) 中継装置の省電力化

中継装置は複数の送信器のデータの中継するため、単体の送信と比較して伝送するデータ量が増える。そのため、中継装置を長期間使用するためには、省電力化に取り組む必要がある。表 2.2.2-1 に、現状の送信器の消費電流量比を示す。表から、消費電流量が最も高いのは、③の受信待機機能で、全体の 7 割を占める。平成 26 年度の基本設計では、受信待機機能での消費電流量を減らすための新たな機能として低消費起動コードを追加することとした。低消費起動コードを実現するために、本年度は、省電力受信回路の回路図を作成し、基板を作成、動作確認を実施した。

表 2.2.2-1 現状送信器の消費電流量比

機能要素	動作時間比 (年)	消費電流量比 (年)
①スリープ機能	81.05%	0.43%
②測定機能 (4 回/日)	0.02%	7.96%
③受信待機機能 (月火水木金土日)	18.91%	69.75%
④送信機能 (1 回/週)	0.02%	21.86%

1) 省電力回路の概要

地中無線通信処理には高性能な CPU が必要であるが、CPU の動作周波数が高いため消費電力が大きくなることは避けられない。そこで省電力化の対策として、受信回路を中継装置制御回路と省電力受信回路に分け、処理能力は低い省電力な CPU でも対応できる処理を省電力受信回路に分担させる構成とした。実際の通信を開始するまでは、処理能力の低い省電力受信回路でも受信処理が出来るよう、ビットレートを 10bps に落とした GOLAY コードの受信処理をおこない、GOLAY コードを受信時に中継装置制御回路を起動してデータフレーム受信処理とした。各回路の処理分担を、表 2.2.2-2 に示す。省電力受信回路は、上記以外にデータフレームの送信や中継装置制御回路が時間待ちする際の外部タイマ処理を行う。これらの動作は、中継装置制御回路からの指令より実行される。

表 2.2.2-2 各回路の処理分担

	中継装置制御回路	省電力受信回路
処理内容	<ul style="list-style-type: none"> ・データフレーム受信(75bps) ・データフレーム編集 ・送信するデータフレームを省電力受信回路に設定 	<ul style="list-style-type: none"> ・起動コード送信(10bps) ・起動コード受信(10bps) ・データフレーム送信(75bps) ・5 分間隔で起動コード受信 ・中継装置制御回路起動用タイマ

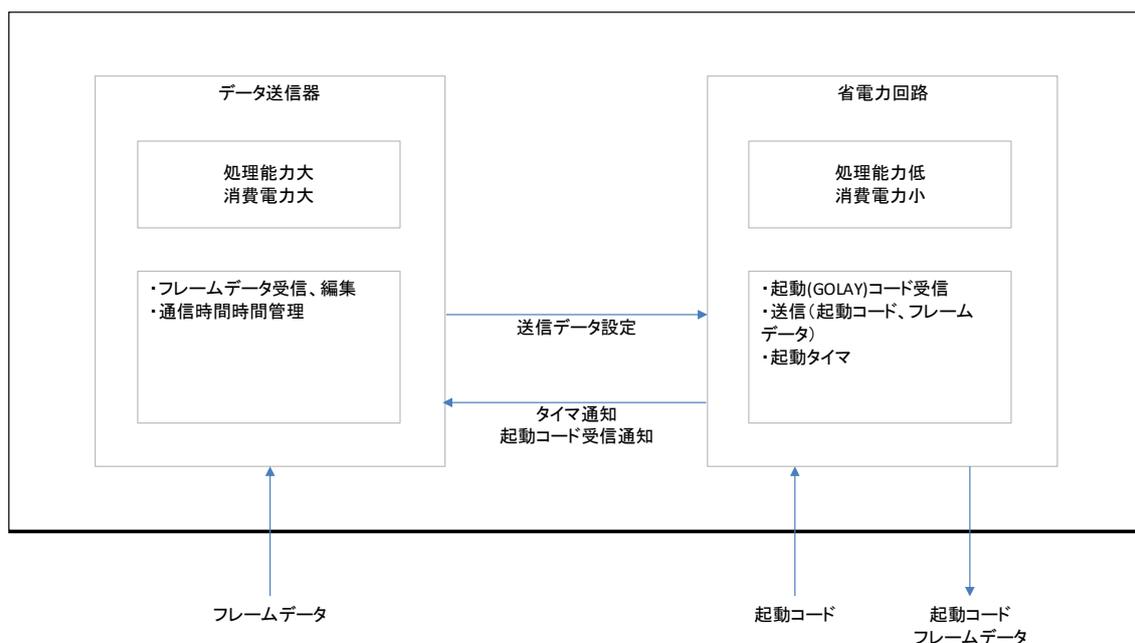


図 2.2.2-1 省電力受信回路の概要

2) GOLAY コード

GOLAY コードはスイスの数学者のゴレイ博士により 1949 年に考案されたコードで、無線通信で広く使われている。GOLAY コードのコード長は 23 ビットであり、情報ビットが 12 ビットとパリティビットが 11 ビットで構成され、3 ビット以内のビット誤りであれば別のコードと誤認識されず、誤った情報が伝送されにくい符号となっている。本コードはスタートビットの指定がなく、連続的に繰り返して送信されるため、受信器でどのビットから受信するか不確定のため巡回コードを省き、139 種類のコードを利用する構成とした。その中から全中継器向けのコード 2 種類と、各中継器に個別に 2 種類ずつ割り振り、全部で 50 台までの中継器に対応できるように個別起動用に 100 種類割り当てた。

表 2.2.2-3 GOLAY コードの種類

用途	数	説明
同期通信用 全台起動コード	1 種	同期送信時に送信するコードで、受信したすべての受信器は同期受信状態になる。
健全性確認通信用 全台起動コード	1 種	健全性確認時に送信するコードで、受信した中継器は健全性確認指令受信状態となる。
指令用 宛先指定起動コード	50 種	中継器に 1 台 1 台個別に割り当てられ、自身のコードを受信した中継器は指令受信状態となる。
同期復旧用 宛先指定応答要求コード	50 種	中継器に 1 台 1 台個別に割り当てられ、自身のコードを受信した中継器は受信コードを返答する。

表 2.2.2-4 全台起動用 GOLAY コード

種別	番号	局番	ゴレイコード
同期通信用 全台起動コード	-	-	0x000631F3
健全通信用 全台起動コード	-	-	0x00064D67

表 2.2.2-5 各中継器用 GOLAY コード

種別	番号	局番	ゴレイコード	種別	番号	局番	ゴレイコード
指令用 宛先指定コード	1	0x89	0x0010F55E	同期復旧用 応答要求コード	1	0x89	0x001F67DE
	2	0x8A	0x0011D5AA		2	0x8A	0x0020A9F9
	3	0x8B	0x0011DF49		3	0x8B	0x0020B6DC
	4	0x8C	0x00126CF1		4	0x8C	0x0020D56D
	5	0x8D	0x001273D4		5	0x8D	0x0021CBD3
	6	0x8E	0x0012D707		6	0x8E	0x0021E05F
	7	0x8F	0x00131B1D		7	0x8F	0x0022674E
	8	0x90	0x00132FB4		8	0x90	0x0022C97E
	9	0x91	0x00136D6A		9	0x91	0x0022E2F2
	10	0x92	0x0013724F		10	0x92	0x0023527C
	11	0x93	0x0013D69C		11	0x93	0x00236C36
	12	0x94	0x00142B75		12	0x94	0x00237313
	13	0x95	0x001457E1		13	0x95	0x0023951E
	14	0x96	0x0014B1EC		14	0x96	0x0023D7C0
	15	0x97	0x00152AEE		15	0x97	0x002456BD
	16	0x98	0x001535CB		16	0x98	0x0025E633
	17	0x99	0x0015495F		17	0x99	0x0026D037
	18	0x9A	0x0015567A		18	0x9A	0x00271C2D
	19	0x9B	0x00158E3D		19	0x9B	0x0027757F
	20	0x9C	0x00159BFB		20	0x9C	0x0027CE89
	21	0x9D	0x0015B077		21	0x9D	0x0029693B
	22	0x9E	0x0015CCE3		22	0x9E	0x0029B17C
	23	0x9F	0x0015E76F		23	0x9F	0x002BAD6F
	24	0xA0	0x00163766		24	0xA0	0x002CCA1F
	25	0xA1	0x00166A9D		25	0xA1	0x002D967F
	26	0xA2	0x0016ADFF		26	0xA2	0x002E1B8D
	27	0xA3	0x0016CE4E		27	0xA3	0x002E53B0
	28	0xA4	0x0016D16B		28	0xA4	0x002E9E31
	29	0xA5	0x001736FD		29	0xA5	0x002ED60C
	30	0xA6	0x00174A69		30	0xA6	0x002F6682
	31	0xA7	0x00177423		31	0xA7	0x0030D3F8
	32	0xA8	0x0017AC64		32	0xA8	0x00311FE2
	33	0xA9	0x0017CFD5		33	0xA9	0x0031AEF7
	34	0xAA	0x001857B6		34	0xAA	0x0033E5FC
	35	0xAB	0x00185D55		35	0xAB	0x0034B625
	36	0xAC	0x0019562D		36	0xAC	0x0035B7BE
	37	0xAD	0x0019AF05		37	0xAD	0x003773EA
	38	0xAE	0x001A75EF		38	0xAE	0x0037A14E
	39	0xAF	0x001AB28D		39	0xAF	0x0037C81C
	40	0xB0	0x001B36AA		40	0xB0	0x0038507F
	41	0xB1	0x001BAC33		41	0xB1	0x00389DFE
	42	0xB2	0x001CD466		42	0xB2	0x00393255
	43	0xB3	0x001D64E8		43	0xB3	0x00396FAE
	44	0xB4	0x001D9723		44	0xB4	0x0039A22F
	45	0xB5	0x001E52EC		45	0xB5	0x003C35A2
	46	0xB6	0x001E9F6D		46	0xB6	0x003DA443
	47	0xB7	0x001EC875		47	0xB7	0x003F1C83
	48	0xB8	0x001ED750		48	0xB8	0x00409FE8
	49	0xB9	0x001EE3F9		49	0xB9	0x0040D7D5
	50	0xBA	0x001F1B4A		50	0xBA	0x00411BCF

3) 省電力受信回路の設計

設計した省電力受信回路の回路構成を図 2.2.2-2 に示す。本省電力受信回路は、メイン CPU と受信信号処理回路、送信回路、電源制御回路などから成り立っている。各回路は受信起動インターバルタイマにより電源を制御され、決められた間隔で起動コードが送られてきていないか確認している。本回路により中継器の起動コードの受信を確認した場合、中継装置制御回路を起動させる。

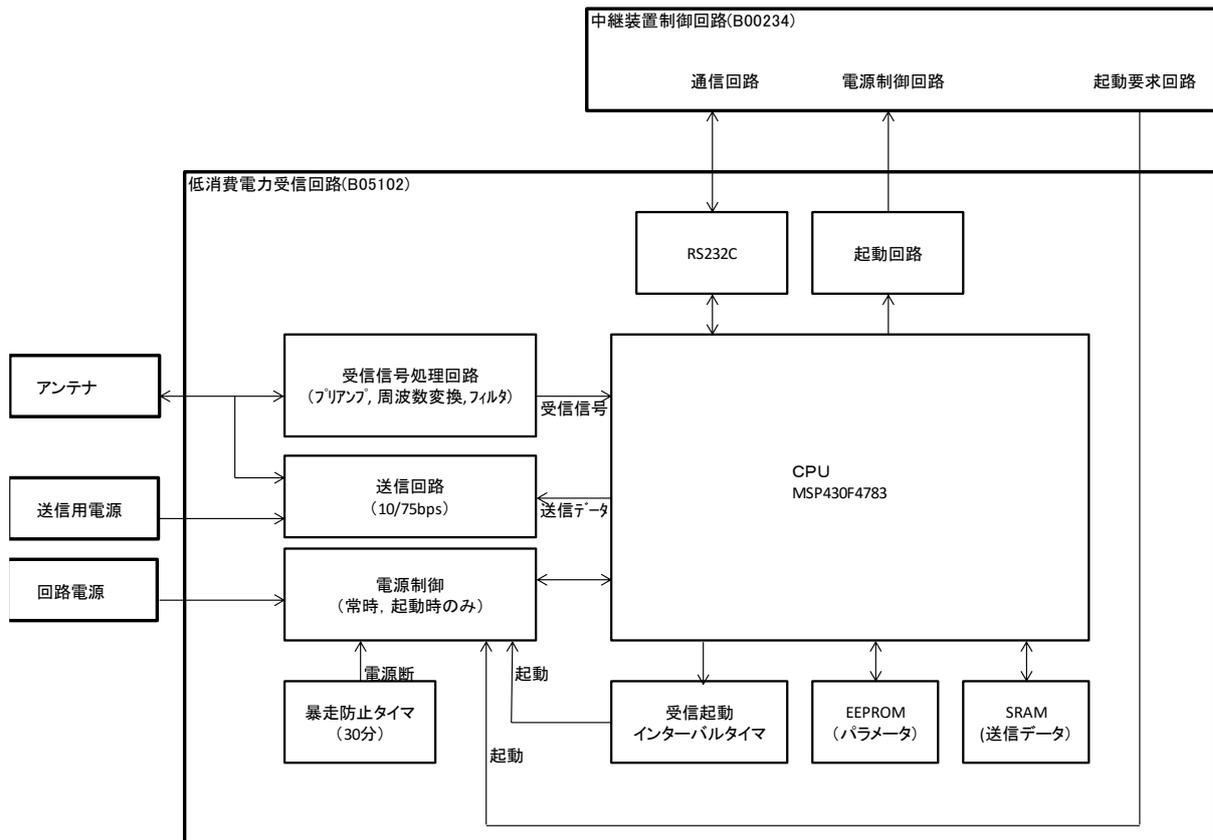


図 2.2.2-2 省電力受信回路のブロック構成

(2) 省電力動作シーケンスプログラミング

中継器単体の動作に関するメインプログラムを作成する。各機能を動作させるに当たり、必要な機能を必要な時に動作させることで、不要な消費を抑えることができる。(1)で設計した省電力受信回路をベースに、低消費起動コードを追加したシーケンスとした。従来の方法では、受信時刻になると、スリープ状態から受信待機機能状態に直接切り替わっていた。受信待機機能は、起動すると、CPUが動作し、信号の受信、受信データの波形処理などの演算を行い、データ化してメモリに保存する。このCPUが最も電力を消費する。そこで、必要なタイミングまでCPUを起動させないように低消費起動コードを追加した。これにより、受信時刻になると、スリープ状態から低消費起動コードにまず切り替わる。この状態では、送信器や前段の中継装置からの起動コードのみが受信できる。起動コードを受信したら、受信待機機能に切り替わり、受信できなければ、そのままスリープ状態へ戻る仕組みになっている。これにより、受信待機機能の動作時間を減らし、省電力化を実現する。

1) 省電力シーケンスの概要

上記通信を省電力で実現するため、以下の動作を行なう。

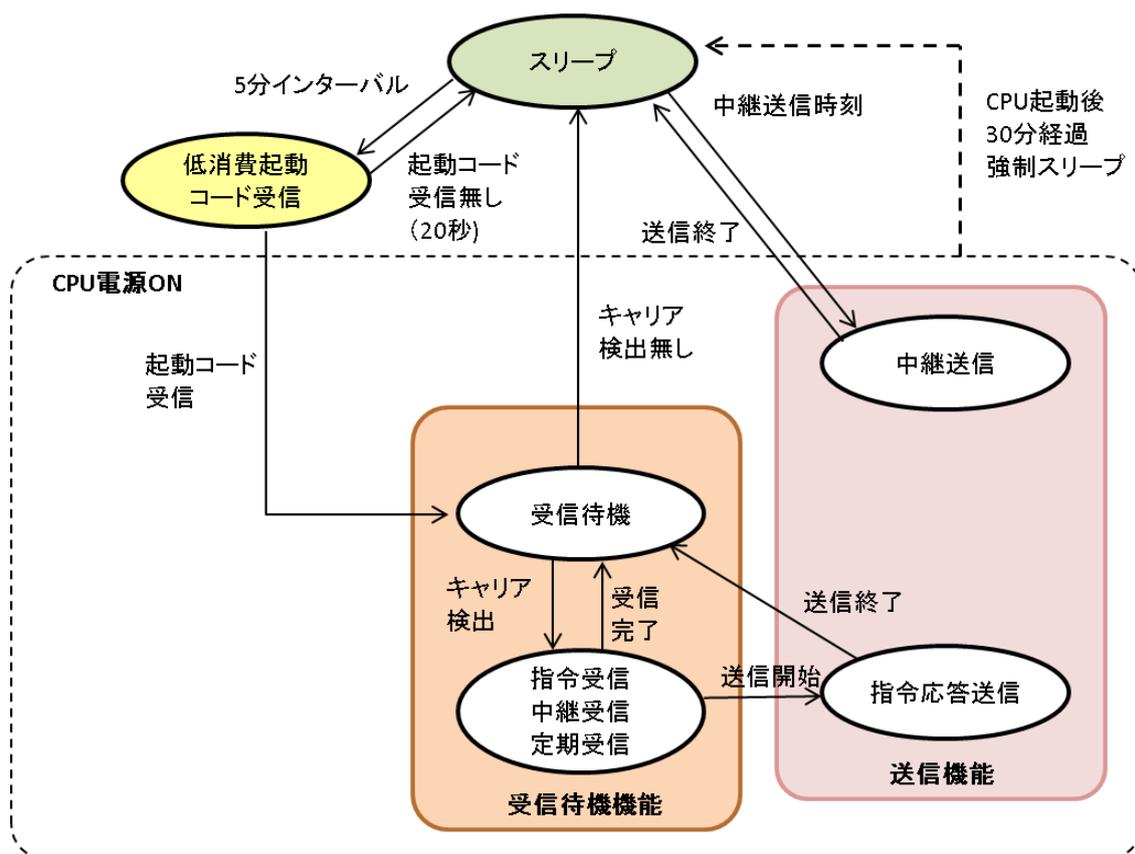


図 2.2.2-3 省電力化に関する検討

2) 省電力シーケンスプログラミング

① 全体

省電力受信回路は常時スリープ動作しており、中継装置制御回路または5分インターバルタイマ回路にて起動される。起動された要因により動作が異なり、5分インターバルタイマにて起動された場合には起動コード受信処理を開始する。この時に起動コードを受信出来なければスリープして次の起動に備える。起動コードを受信した場合は、中継装置制御回路を起動させた後、中継装置制御回路からの通信指令待機状態となる。中継装置制御回路から起動された場合にも通信指令待機状態となる。

② 起動コード受信処理

5分インターバルタイマで起動した場合、省電力受信回路は起動コード受信処理を開始する。タイムアウト(20秒)までの期間は、常時受信を行い、登録されている起動コードと一致するかを判断している。起動コードを検出すると中継装置制御回路を起動させ、以後の通信指令に備えて待機状態となる。

③ 中継装置制御回路-省電力受信回路間通信処理

5分インターバルタイマで起動後に起動コードを受信した場合、および中継装置制御回路から起動された場合には中継装置制御回路間通信状態となる。この間は中継装置制御回路からの通信指令に従って動作を行う。通信指令には、送信するデータ(送信フレームデータ・送信起動コード)の登録や実行指令、5分インターバルタイマの開始/停止等が存在する。

④ 送信処理

送信処理は、中継装置制御回路からの通信指令によって開始される。中継装置制御回路からの送信指令の内容(起動コードのみ、フレームデータのみ、起動コードとフレームデータの両方の3パターン)にしたがって送信をおこなう。起動コードのビットレートは10bps、フレームデータのビットレートは75bpsである。

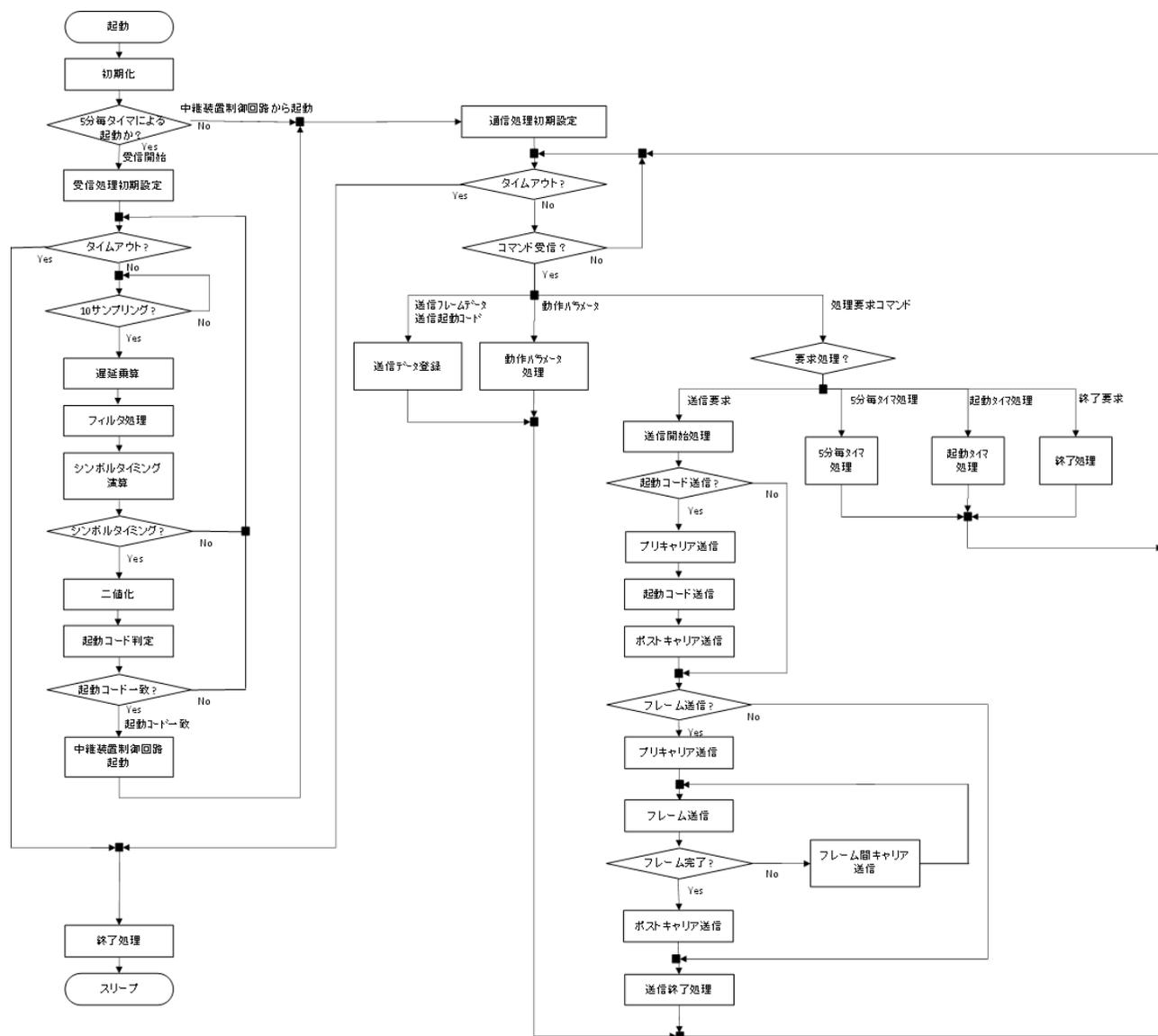


図 2.2.2-4 省電力受信回路の動作フロー

(3) 単方向送信器の時計同期方法詳細設計・プログラミング

送信装置、中継装置の動作は、装置内部の時計（RTC：リアルタイムクロック）で制御される。それぞれの装置の時計の時刻がずれると、データの送受信のタイミングがずれるので、正常にデータの伝送が行えなくなる。そこで、時計の高精度化と、通信の同期方法について設計・プログラミングした。

1) RTC の高精度化

RTC の高精度化を実現するため、市場に出回っている高精度な RTC を調査した。調査結果の一例を、表 2.2.2-6 に示す。表から、精度を表す水晶発振子の周波数安定度が高ければ高いほど、消費電流が大きくなることが分かる。例えば、KT2016A は、NC-38 と比べて、精度は 40 倍高いが、消費電流は 2000 倍となる。送信装置や中継装置に組み込まれた RTC は、24 時間動作する部品であり、また、省電力化を図るためにスリープ等の機能を追加することもできない。そのため、高精度な RTC を採用すると、消費電力が大幅に増えてしまうので、本件では、消費電流の小さい NC-38 を採用することとした。

一方、水晶発振子の振動数の誤差を生じさせる最大の要因は、温度変化である。そこで、別途、装置内部の温度を測定する機能を組み込み、測定した温度から、水晶発振子の振動数のずれを補正することで、RTC の高精度化を実現することとした。なお、温度補正を行っても、ずれてしまう時刻に関しては、「第 2.3.3 項 中継器の通信同期方法」にて対応することとした。

表 2.2.2-6 代表的な RTC の精度と消費電流

型式	NC-38	KT2016A	NT2016SA	DGOF5S3	AOCJYR
メーカー	九州電通	Kyocera	NDK	Connor-Winfield	Abracon
種別	水晶振動子	TCXO	TCXO	OCXO	OCXO
消費電流	0.8 μ A	1.5mA	2.0mA	300mA	122mA
周波数安定度	± 20 ppm	± 0.5 ppm	± 0.5 ppm	± 0.25 ppm	± 0.05 ppm

2) RTC の温度補正方法

採用した水晶発振子の温度による周波数誤差：e は、式(1)、及び図 2.2.2-5 で表される。

$$e = -0.036(t - 25)^2 + E_{25}[\text{ppm}] \quad (1)$$

ここで、t は温度[°C]、 E_{25} は頂点温度 25°C における周波数誤差[ppm]である。

E_{25} は、水晶発振子固有の値であるので、製品製造時に校正を行う必要がある。製品動作時には、温度を測定して、式(1)を使って周波数誤差を求めることで、時刻誤差を最小に抑えることが可能となる。本 RTC の場合、前述の方法により求めた補正値を RTC に入力する際、3 ppm 単位となるため、誤差を最小 3 ppm 程度に抑えることが出来る。3 ppm の誤差であれば、1 年間運用した場合の時計のずれは 2 分以内となる。

採用した RTC（NC-38）の温度特性について調査した結果を、図 2.2.2-6 に示す。調査は 7 台

のRTCで実施しており、それぞれ固有の温度特性を持つことが分かる。そのうちの1台について、実測値と温度特性式による計算結果を図 2.2.2-7 に示す。この図からも概ね計算式に従って温度特性が変化していることが分かる。

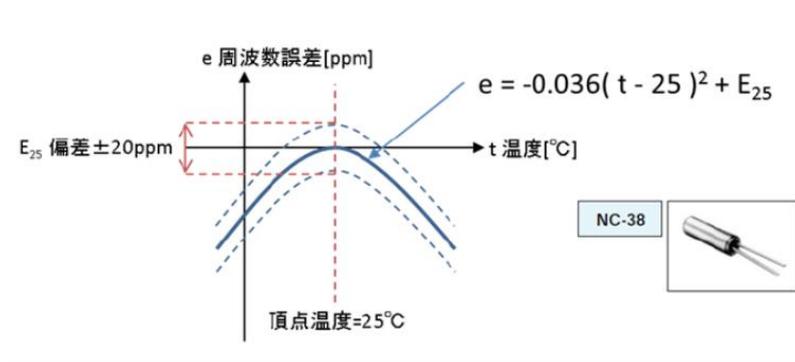


図 2.2.2-5 RTC 温度特性

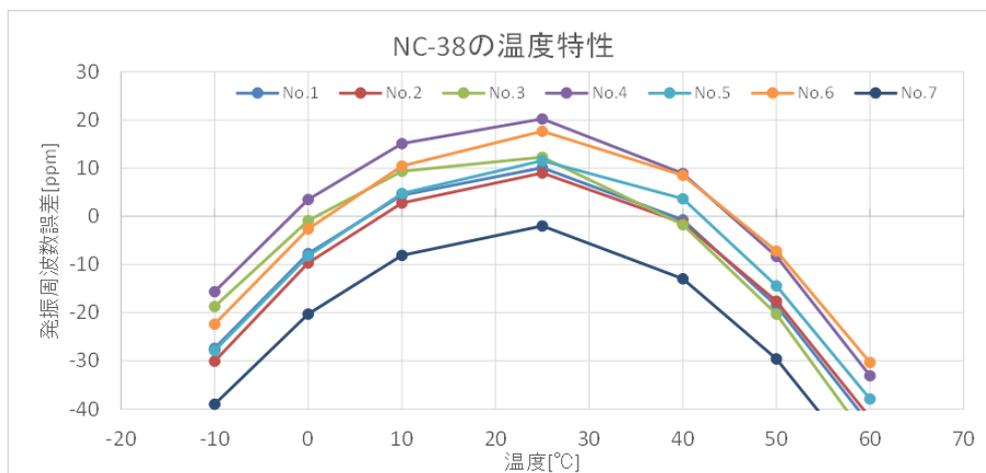


図 2.2.2-6 採用した RTC の温度特性

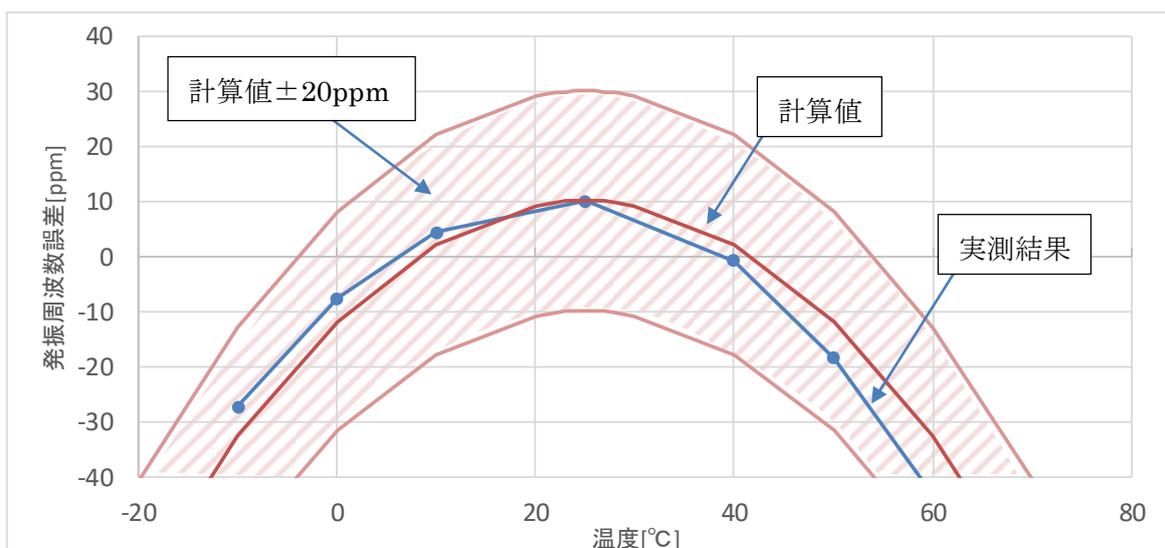


図 2.2.2-7 RTC の温度特性の計算値と実測結果

図 2.2.2-8 に補正の手順を示す。回路が起動し各種処理を実施した後、毎回最後に時計の補正設定を実施する。この際、補正に使用する温度データは最新の 10 回分の測定データの平均値から求めることとした。これは、本回路は最低でも 24 時間に 1 度は起動することから、埋設環境を考慮すると急激な温度変化を伴うケースは考えにくいこと、温度測定に異常が発生した場合の影響を小さくすることを目的としている。

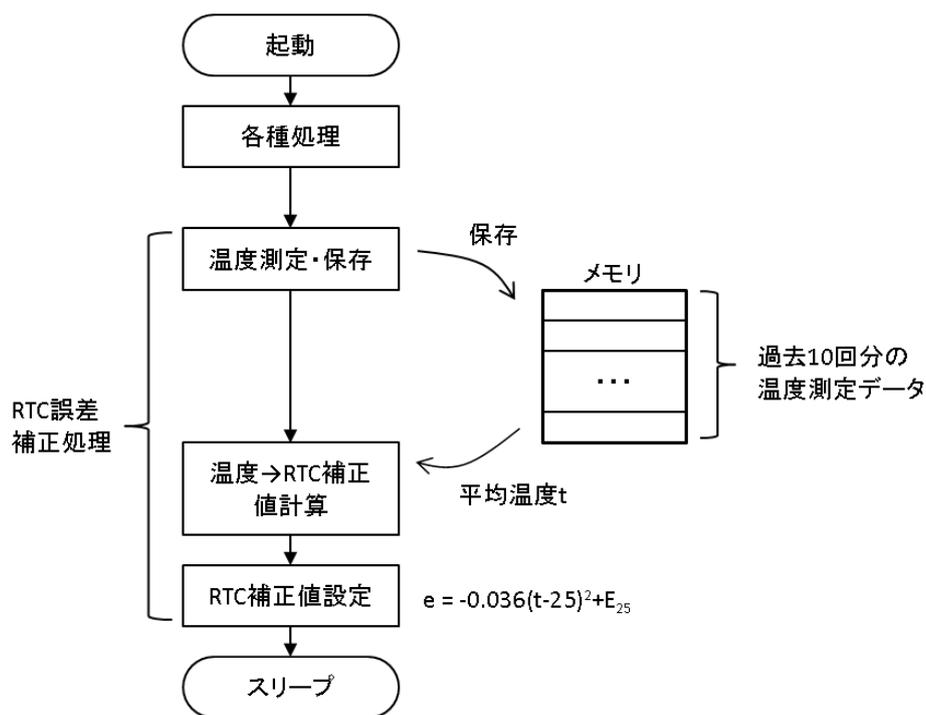


図 2.2.2-8 RTC 補正手順

中継器一台で 10 台程度の小型送信器の中継を行う場合、1 日 1 回の通信を実施することを考えると、各送信器の発信間隔は概ね 2 時間程度となる。時計誤差は進・遅両方に考えられるため、少なくとも全運用期間で最大 1 時間程度の誤差に抑える必要がある。運用期間を 10 年と仮定した場合、上記を達成するためには、 $(60 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒}) / (10 \text{ 年} \times 365 \text{ 日} \times 24 \text{ 時間} \times 60 \text{ 分} \times 60 \text{ 秒}) = 11.4 \text{ ppm}$ 以内にする必要がある。そこで補正方法の目標値を $\pm 10 \text{ ppm}$ とした。

3) 中継器の通信同期の方法

通信の同期方法は、相互通信が可能な中継装置と、送信機能しか有しない単方向送信器で、それぞれ別の方法を採用する。

中継装置については、双方向の通信が可能のため、定期的に時計同期のための同期通信を行うことで相互の時計を一致させることが出来る。同期通信は図 2.2.2-9 のように、受信器 (R) を起点として、下位の中継装置 (Lx) に対して自身の時計を下位の中継装置に設定していくものである。図中の各中継装置に書かれた時刻は、あらかじめ設定された同期通信送信時刻である。この時刻になると、各中継装置は同期通信の送信処理を行う。下位の中継装置は、省電力受信待機状

態でこの同期通信を受信することができ、同期通信フレームから時刻情報を取得し、自身の RTC に時刻を設定する。また、同期通信は、宛先を指定するものではなく、通信が届く範囲にある全ての中継装置で受信される。図中の実線は同期通信が下位へ中継されていくメインの経路を示し、破線はメインの経路の中継装置が故障した場合の迂回の通信経路である。

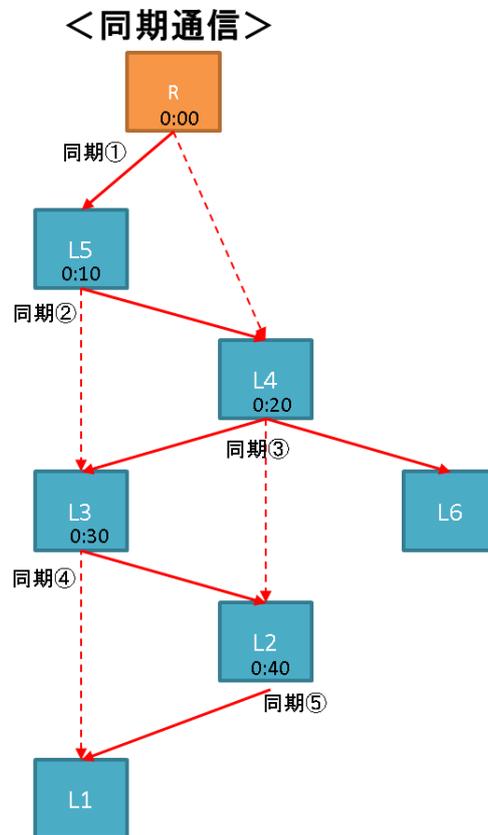


図 2.2.2-9 同期通信概念

図 2.2.2-10 は、図 2.2.2-9 の同期①から③について示したタイムチャートである。同期①では、受信器が 0:00 に起動コードの 1 種である同期起動コードを送信する。中継装置 L5 および L4 は低消費受信待機動作を行っており、この同期起動コードを受信すると、メインの回路を起動し、同期フレームの受信待機状態となる。受信器は、同期起動コードの直後に同期フレームを送信する。L5 および L4 はこの同期フレームを受信し、同期フレームから時刻情報を取得し、自身の RTC に設定する。同様に、中継装置 L5 は設定された同期送信時刻になると送信動作を開始し、L4 は同様に受信処理を行う。

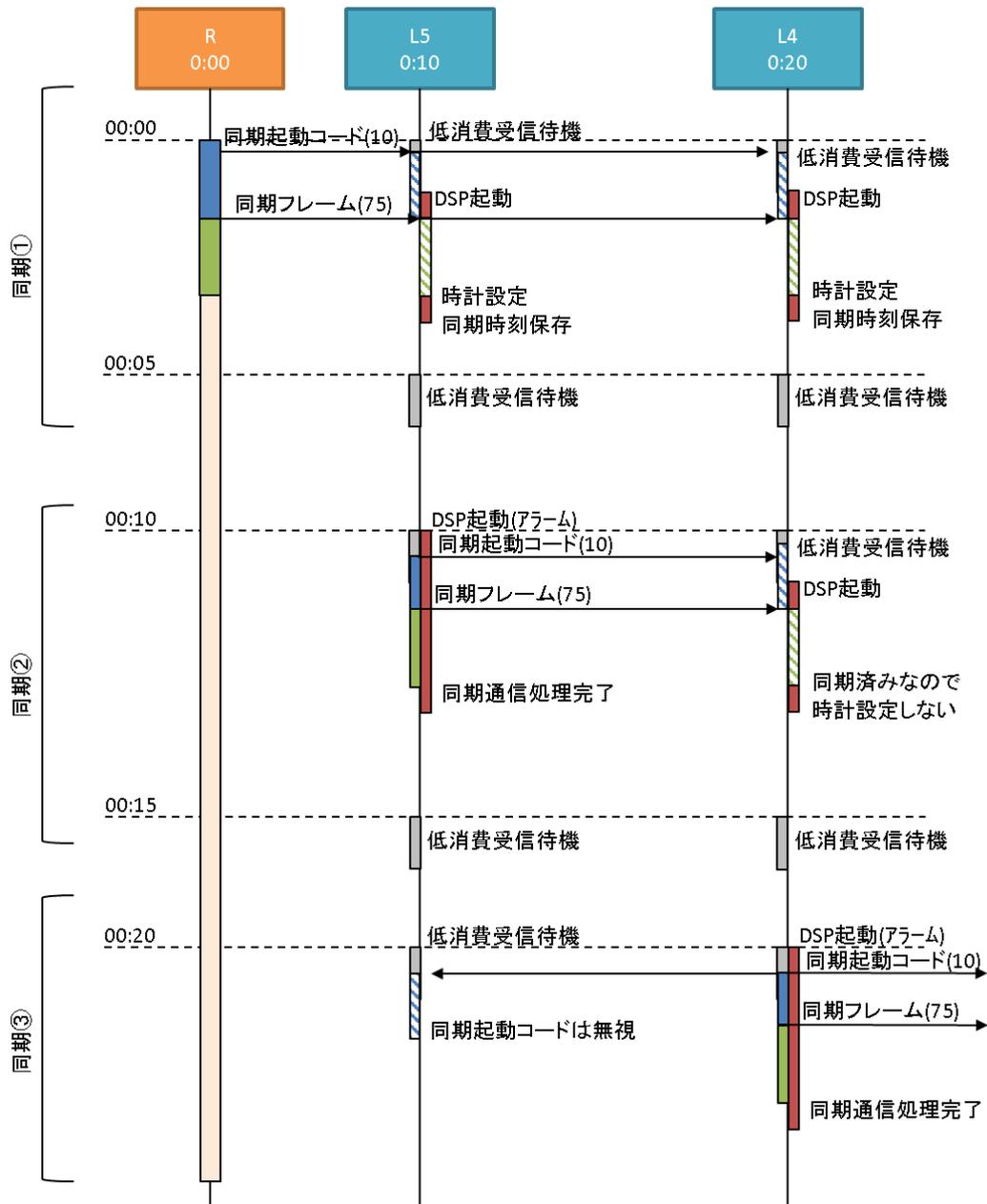


図 2.2.2-10 中継器の同期通信タイムチャート

単方向送信器の場合は、中継装置のように、通信による時計の同期を行うことが出来ない。そこで図 2.2.2-11 に示すように、受信側の中継装置で送信器との時刻のずれを把握し、中継装置の受信時間を調整することで、対応することとした。

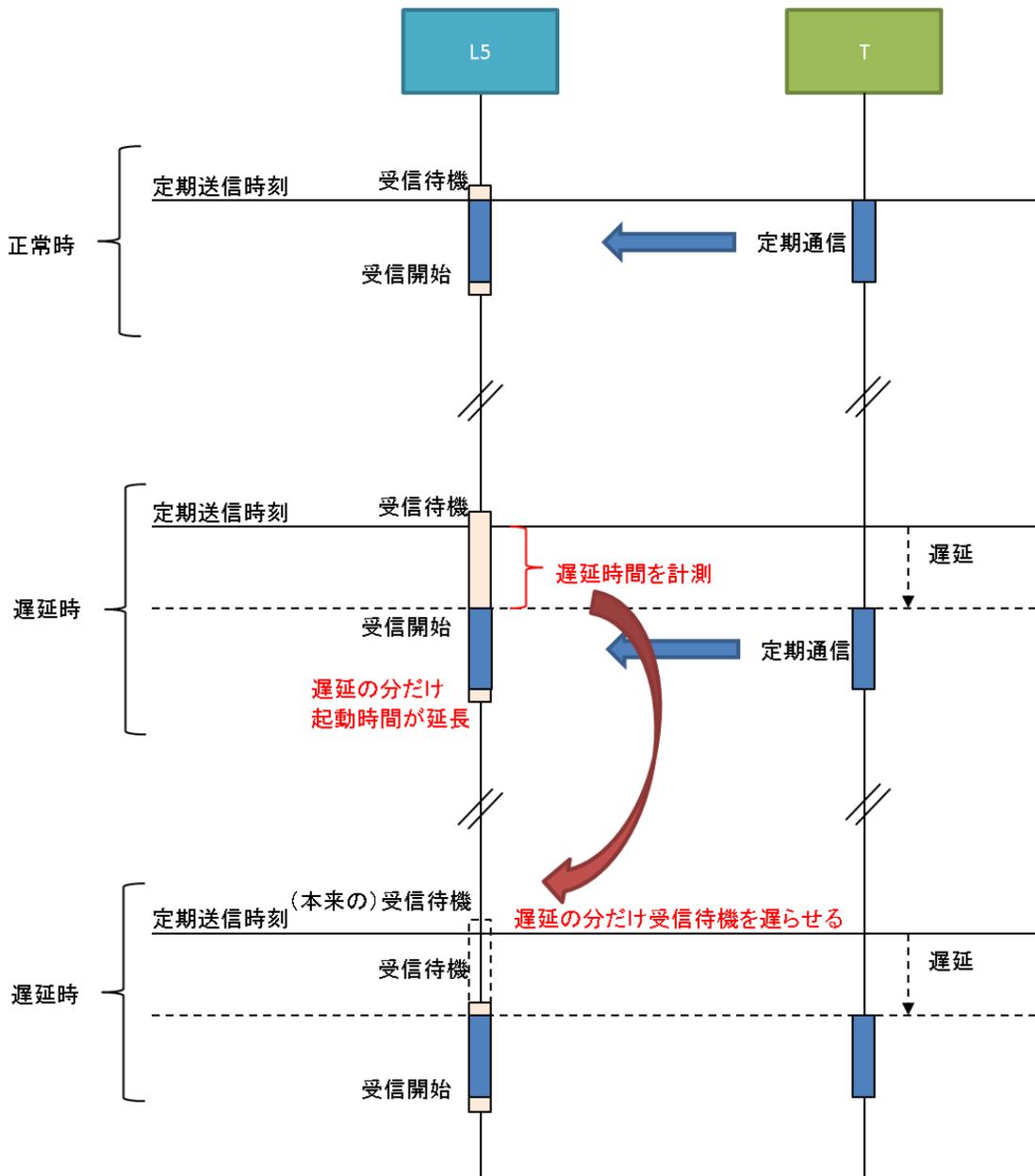


図 2.2.2-11 単方向小型送信器の同期タイムチャート

(4) マルチホップシーケンスのプログラミング

マルチホップ通信とは、端末同士が直接通信するだけでなく、他の端末を経由することでより広い範囲の端末と通信を可能にする無線ネットワークである。2.2.1 では通信経路を複数にするこの有効性について、システム全体の信頼性を定量的に検証した。その結果を考慮したマルチホップシーケンスを構築し、プログラミングをした後に中継装置の制御回路へ実装した。

1) マルチホップシーケンスの概要

中継装置は、末端の送信器からの測定データの中継伝送を実現するためと、中継装置間の同期、及び健全性を維持するために、以下の4種類の通信が行われる。

① 定期通信

定期通信は、末端の単方向送信からの測定データを定期的に中継伝送し、地上の受信器までデータを回収するための通信である。

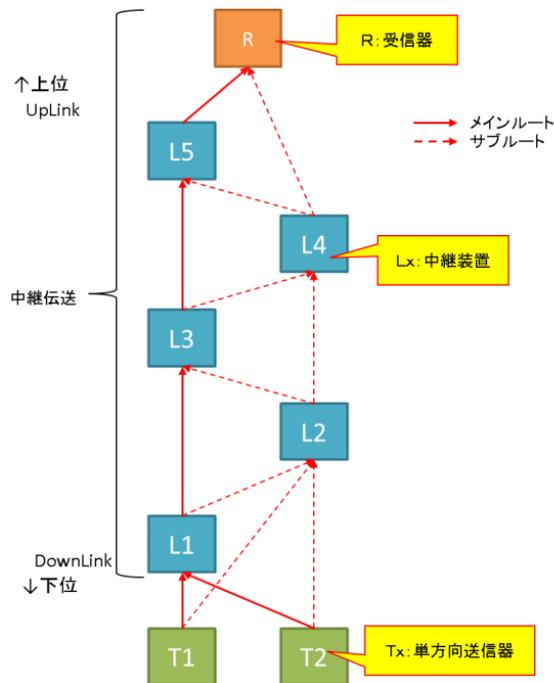


図 2.2.2-12 定期通信

② 同期通信

同期通信は、全ての中継装置の時計を受信器と同期させるための通信である。設定された時刻に受信器を起点に同期通信を開始し、末端の中継装置まで中継伝送され、全ての中継装置に同期通信がいきわたる。

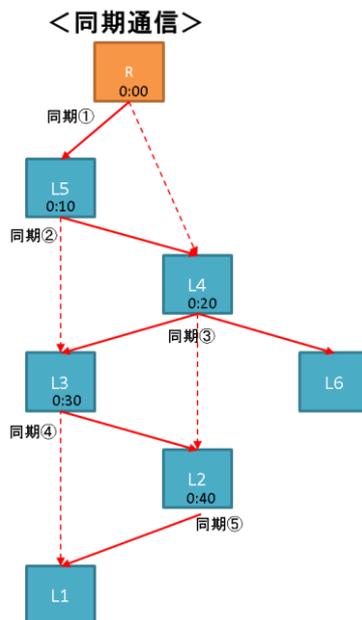


図 2.2.2-13 同期通信

③ 健全性確認通信

健全性確認通信は、それぞれの中継装置が正常に動作していること、また同期がとれとり通信可能な状態であることを確認するための通信である。末端の中継装置から、それぞれ設定された時刻に自身の健全情報を送信し、それぞれの中継装置の健全情報が集約されながら地上の受信器に伝送される。

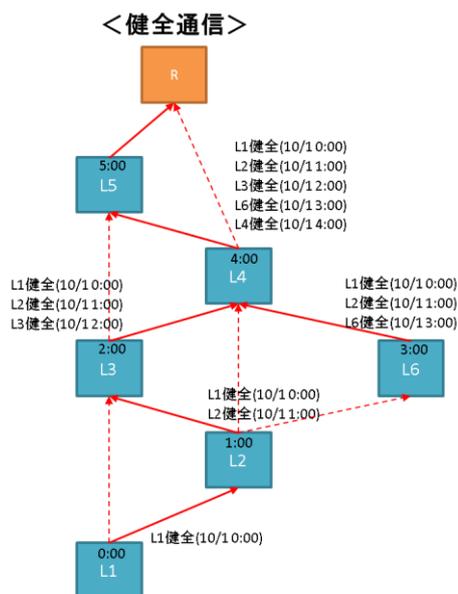


図 2.2.2-14 健全性確認通信

④ 指令通信

指令通信は、データ回収に失敗した場合など、定期通信とは別に任意のデータを回収したい場合や、ある中継装置に異常が発生し、中継経路を変更したい場合などに、特定の中継装置に対して指令を送る場合に行う通信である。

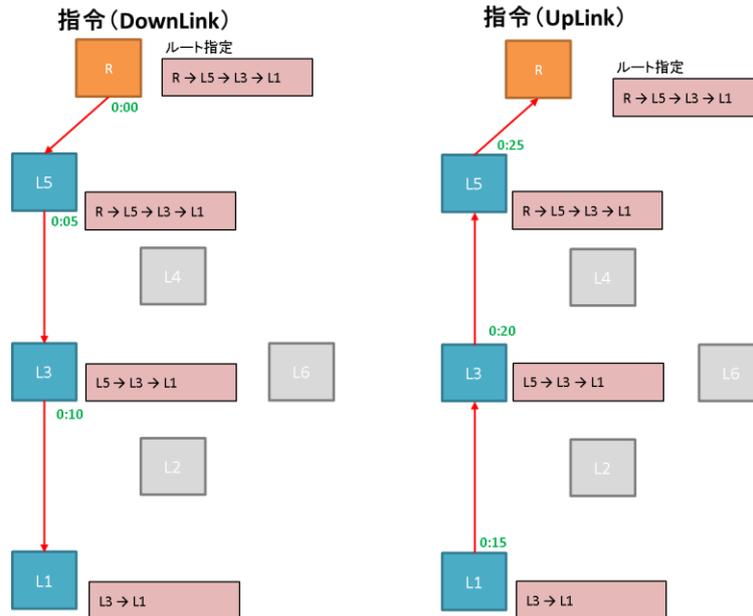


図 2.2.2-15 指令通信

2) 中継動作の手順

中継動作のフローを図 2.2.2-16 に示す。中継装置には、下位からの定期通信を受信するための定期受信時刻と、下位から受信した定期通信データを上位へ伝送するための定期送信時刻がそれぞれ設定されている。これらの設定時刻は、末端の単方向送信器から上位の受信器へ伝送されていくように設定する必要がある。また、図中の破線で示すサブルートに存在する中継装置 L2 および L4 は、通常、受信は行っているが、送信は行わない。中継伝送は、メインルート上の中継装置が行い、サブルートの中継装置は、メインルートの中継装置に異常が発生した場合のサブとして存在する。

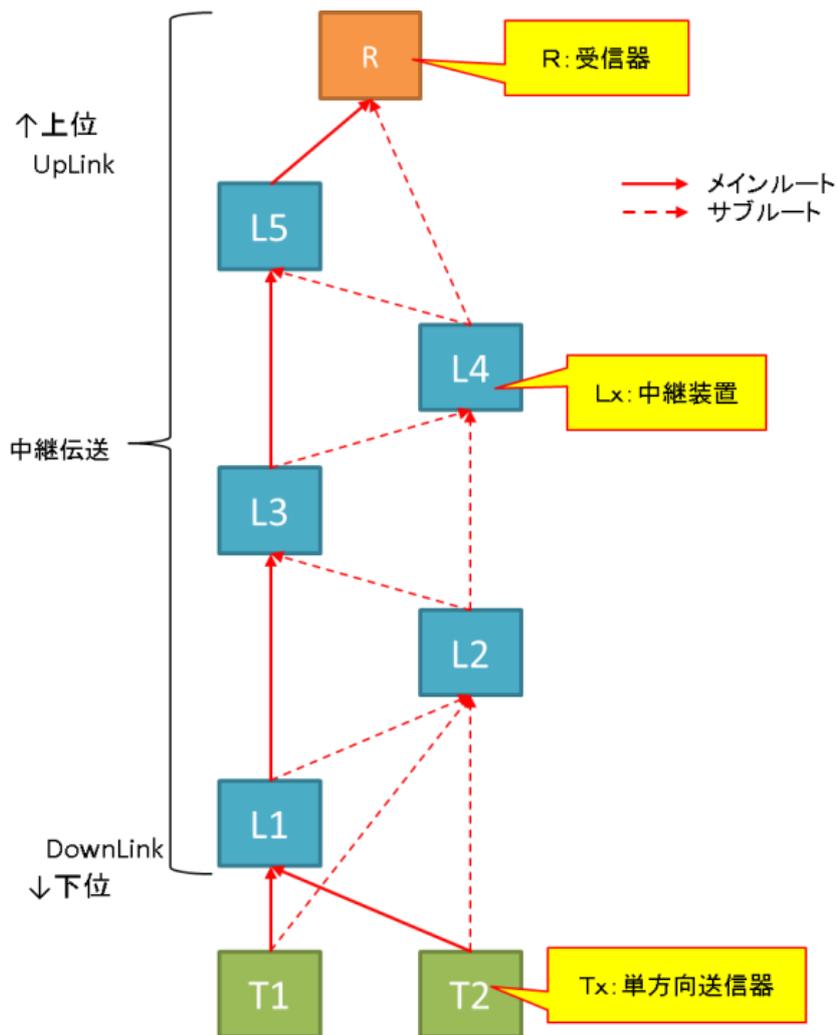


図 2.2.2-16 中継動作のフロー

3) 冗長化のための複数系統対応と系統変更の手順

通信系統を複数系統構築して冗長化を高めた場合、系統の途中の中継器が故障した場合でもデータを中継する系統を変更することで、計測を継続することができる。図 2.2.2-17 に通信系統の変更手順を示す。この図では、小型送信器 2 台のデータを 2 つの系統で中継している。ここで、L1 が故障した場合、L2 にデータの中継を肩代わりさせる。手順としては、L2 に系統を担当させる指令を、受信器から各中継器を介して L2 に伝送する。L2 はもともと小型送信器の通信圏内なので、受信した小型送信器の測定データを L1 に代わって、L3 へ伝送する。L3 以降はこれまで通りの手順で中継する。

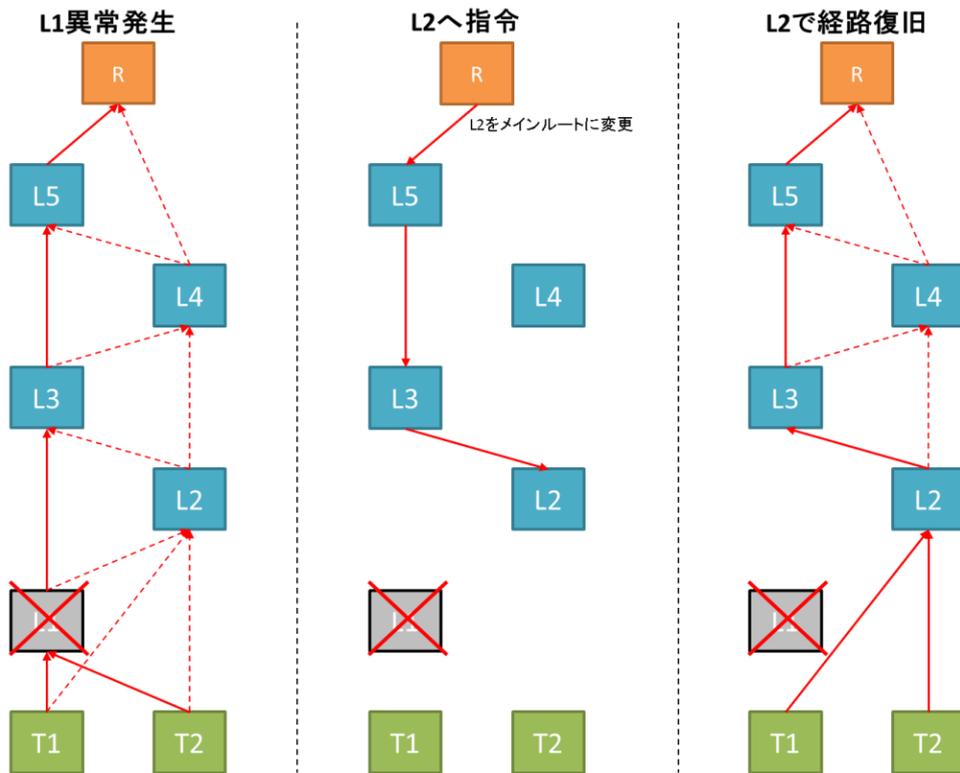


図 2.2.2-17 系統変更の手順

4) マルチホップシーケンスのプログラミング

① 全体

中継装置本体の CPU プログラムは、RTC によるアラームおよび省電力受信回路が GOLAY コードを受信することによって起動し、起動時刻あるいは GOLAY コードの種別によって、各種処理を実行する。図 2.2.2-18 に、CPU プログラム全体の動作フローチャートを示す。また、各種処理ごとのフローチャートについても順に示す。

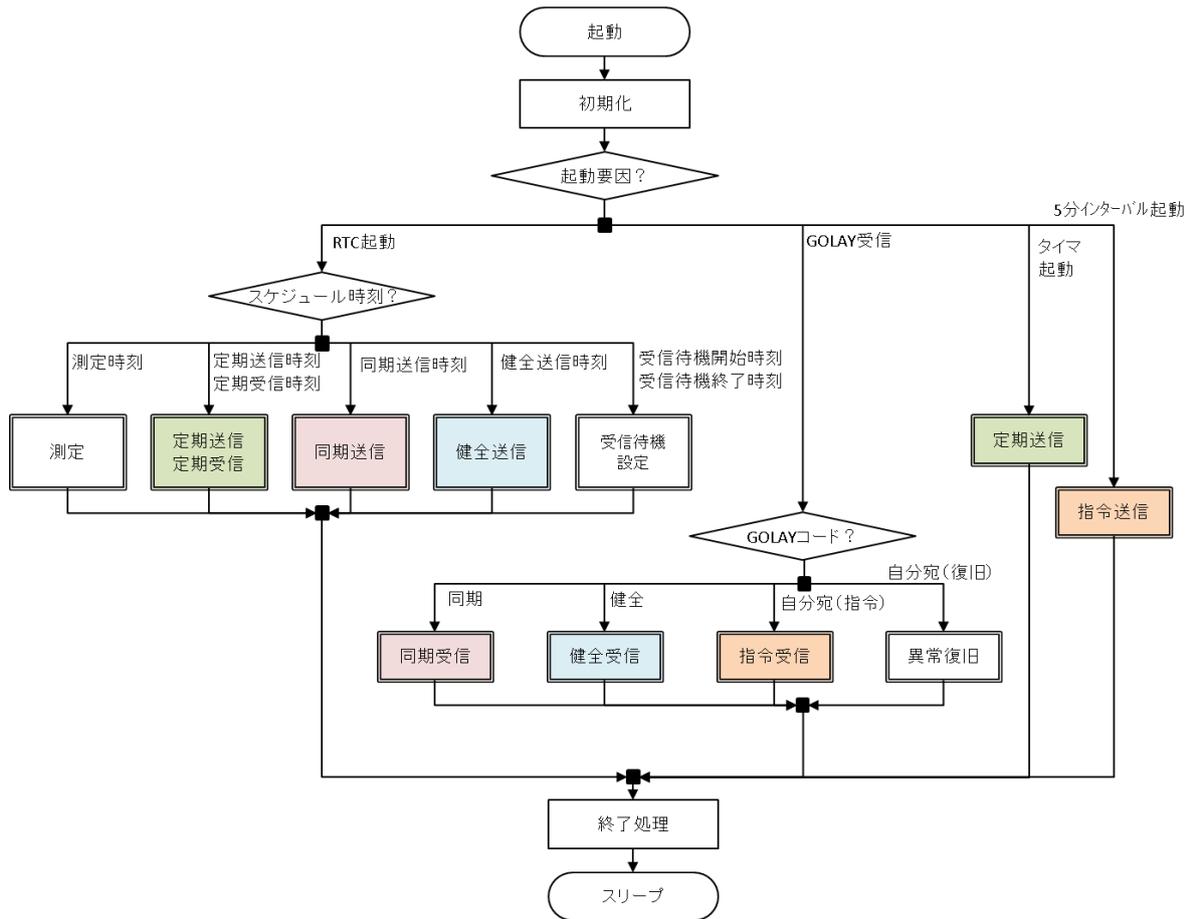


図 2.2.2-18 マルチホップシーケンスのプログラムフロー（全体）

② 定期通信

定期通信は、下位からの定期通信フレームを受信する定期受信と、上位へ定期通信フレームを中継送信する定期送信の2種類の動作を行なう。図 2.2.2-19 に、定期送信および定期受信のプログラムフローを示す。

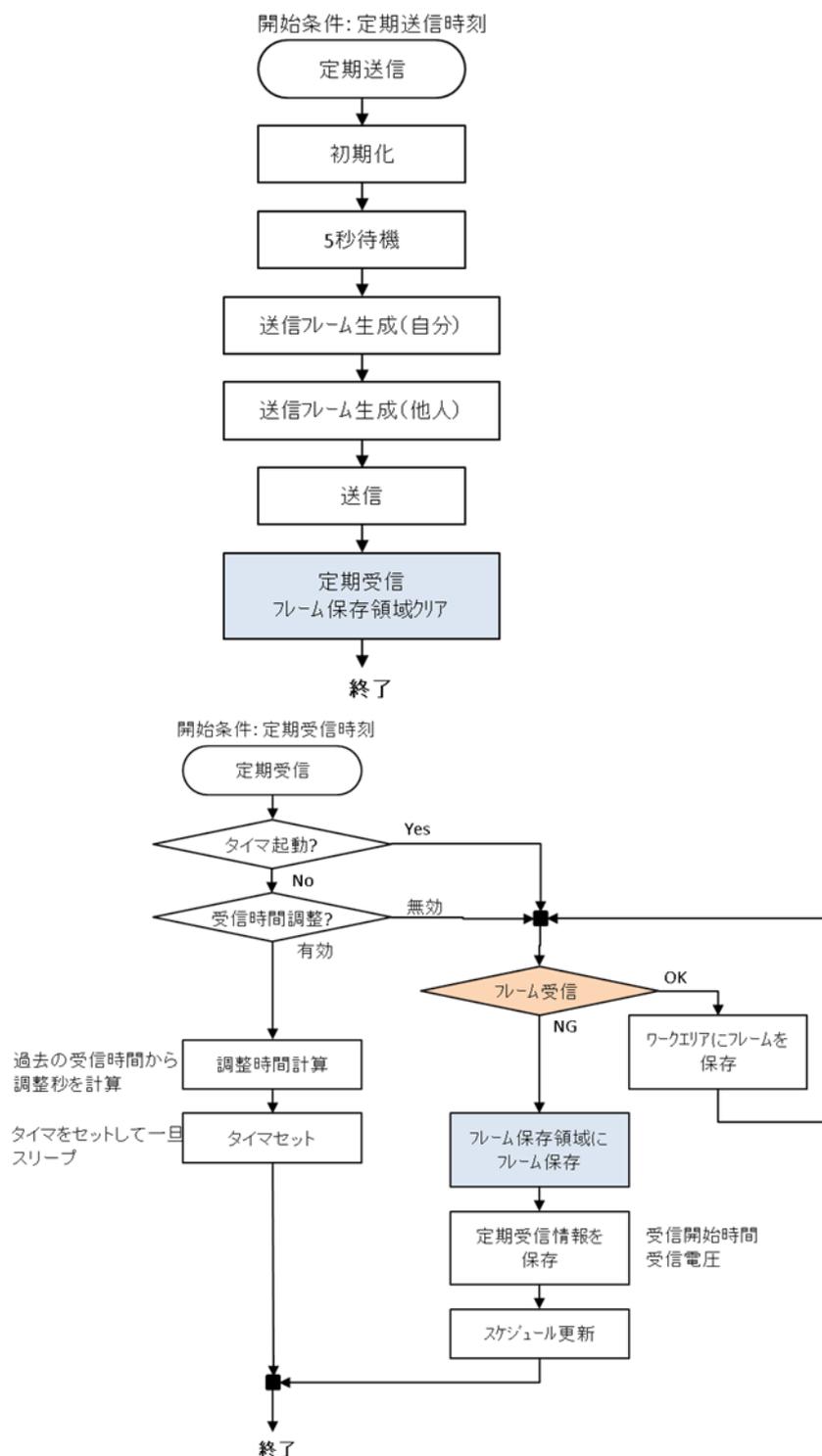


図 2.2.2-19 定期通信時の動作フロー

③ 同期通信

同期通信は、上位から下位へ同期通信フレームを送信する同期送信と、上位からの同期通信フレームを受信する同期受信の2種類の動作を行なう。図 2.2.2-20 に、同期送信および同期受信のプログラムフローを示す。

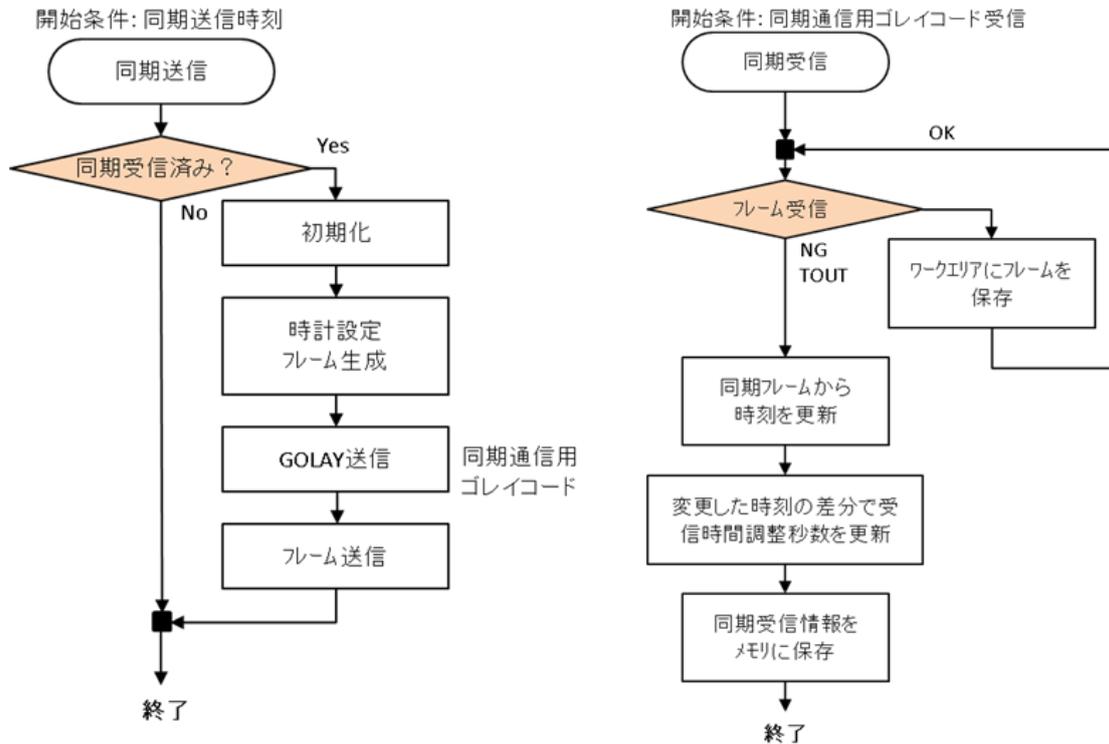


図 2.2.2-20 同期通信時の動作フロー

④ 健全性確認通信

健全性確認通信は、下位から上位へ健全通信フレームを送信する健全送信と、下位からの健全通信フレームを受信する健全受信の2種類の動作を行なう。図 2.2.2-21 に、健全送信および健全受信のプログラムフローを示す。

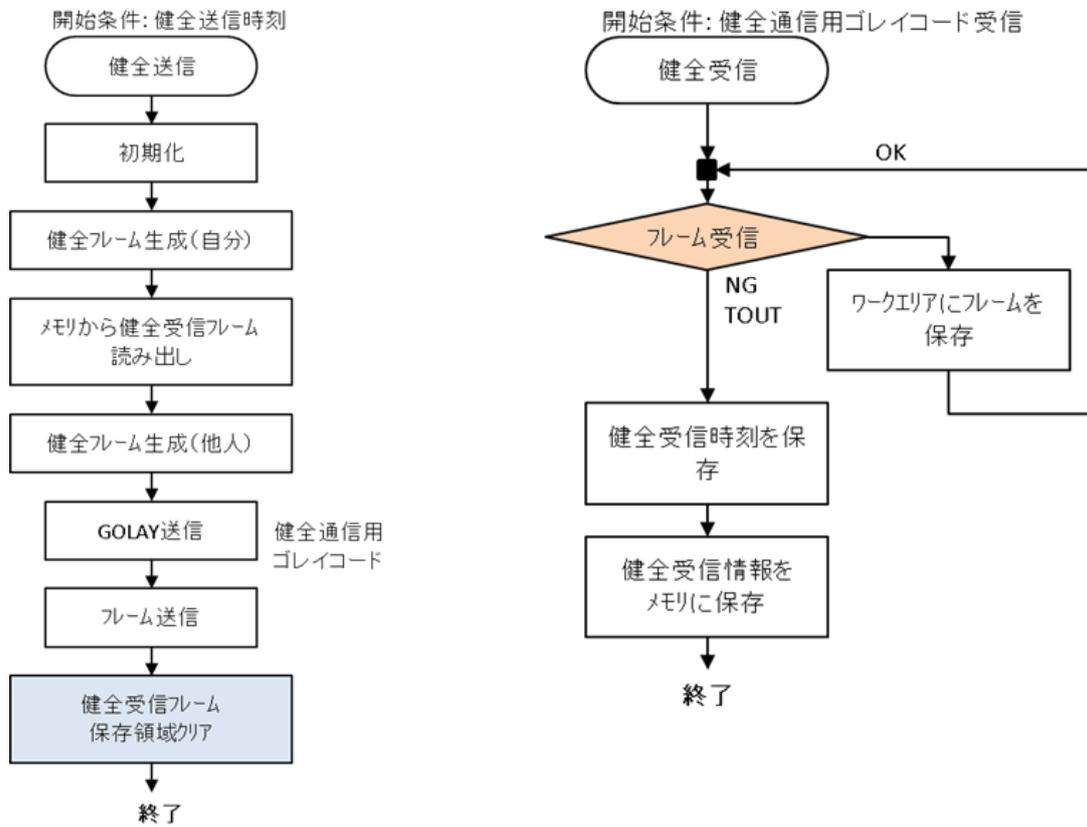


図 2.2.2-21 健全性確認通信の動作フロー

⑤ 指令通信

指令通信は、上位から下位へ指令通信フレームを送信する指令送信と、上位からの指令通信フレームを受信する指令受信の2種類の動作を行なう。図 2.2.2-26 に、指令送信および指令受信のプログラムフローを示す。

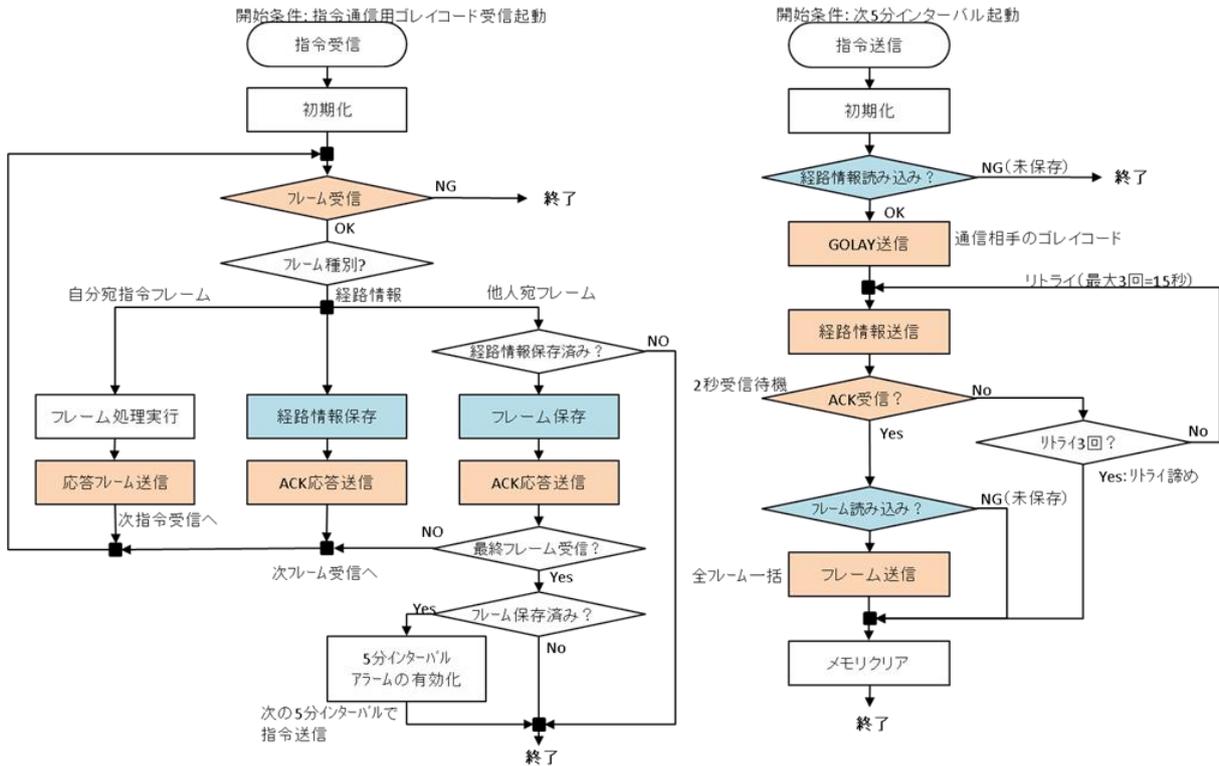


図 2.2.2-22 指令通信の動作フロー

⑥ 異常復旧

異常復旧は、異常が発生した中継装置に対して異常復旧シーケンスを送信する異常復旧送信と、上位からの異常復旧シーケンスを受信する異常復旧受信の2種類の動作を行なう。図 2.2.2-23 に、異常復旧受信および異常復旧送信のプログラムフローを示す。

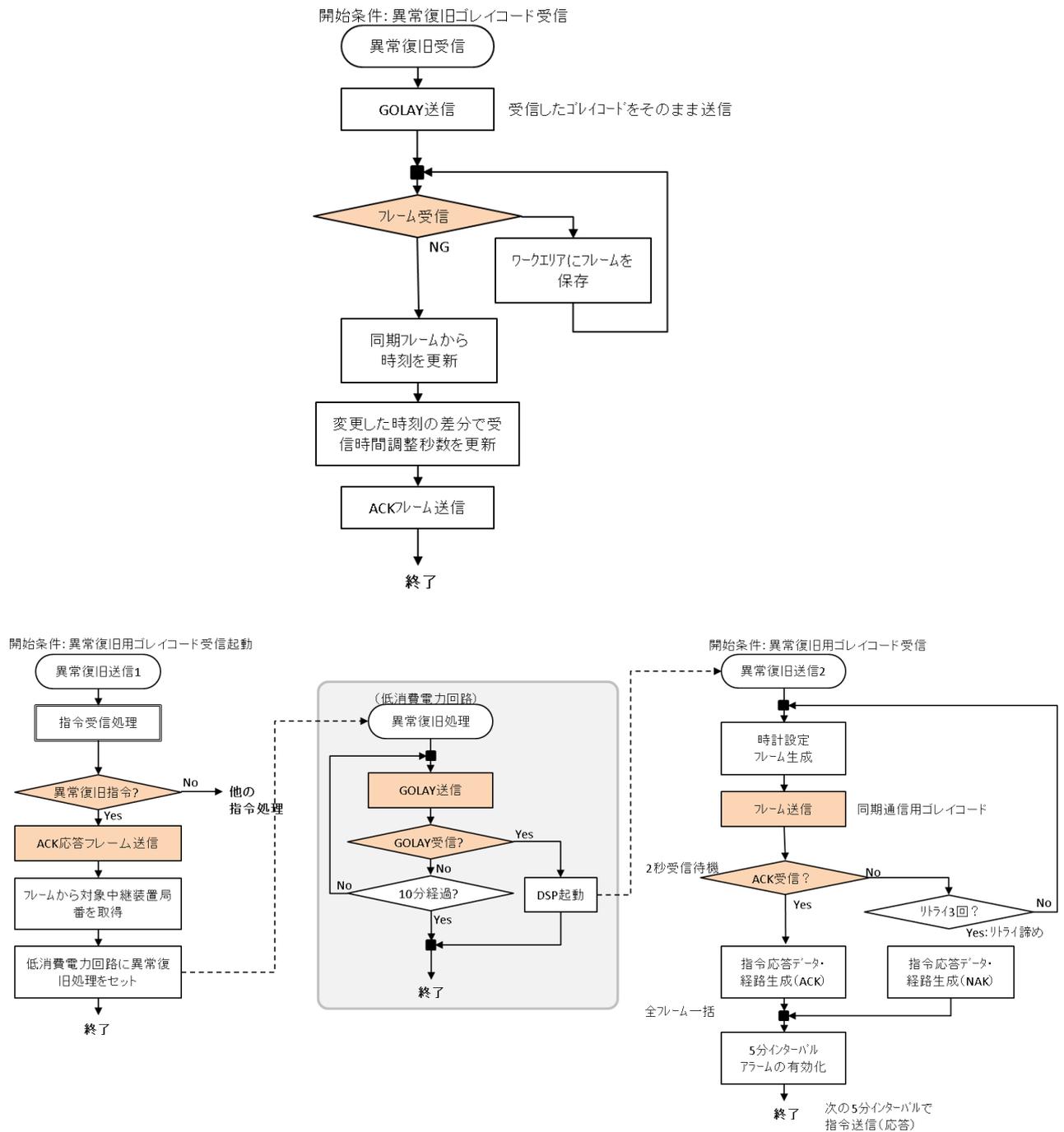


図 2.2.2-23 異常復旧動作のフロー

(5) 異常復旧シーケンスの詳細回路設計

観測システムを構成する機器には、センサおよび小型送信器、中継器、受信器および解析処理装置（PC）の3種類が存在する。このうち受信器および解析処理装置は、多くの場合、地表もしくは観測担当者がアクセス可能な場所に設置するため、異常発生時には交換を含めた対応が可能である。しかしながら、センサおよび小型送信器、または中継器は、埋設された環境下で使用されることが前提であり、異常発生時には観測担当者による直接のアプローチが不可能な場合が多い。そこで、埋設機器に想定される異常状態を分類し、それぞれに対して異常を復旧する手順を設計し、その対処法を設計した。

埋設機器に考えられる異常と対処方法を、表 2.2.2-7 に示す。また、異常状態の把握と対処の流れを図 2.2.2-24 に、異常復旧の動作手順を図 2.2.2-25、図 2.2.2-26 に示す。

表 2.2.2-7 異常内容と復旧方法

異常内容	対処方法
センサおよび小型送信器の物理的故障	冗長性を確保するようにセンサを配置し、故障時には近傍に配置された同等の計測目的のセンサで代用する。
小型送信器のハングアップ	WDT*の強化により、ハングアップ時には強制リセットして小型送信器の機能回復を図る。
小型送信器の時計ずれ	中継器の通信同期機能および小型送信器のRTC高精度化により対応する。
中継器のハングアップ	WDT*の強化により、ハングアップ時には強制リセットして中継器の機能回復を図る。
中継器の時計ずれ	受信器、または上位の中継器からの同期通信により対応する。
中継器の物理的故障	冗長性を確保するように中継器を配置し、故障時には別系統の中継器に経路を変更することで計測を継続する。

*WDT（ウォッチドックタイマ）：コンピュータなどが正常に機能しているかどうかを監視するためのタイマで、CPU などから一定間隔で信号を WDT に出力し、WDT はその信号が途絶えたら、対象の機器をリセットさせる。WDT は、可能な限り独立性を持たせる必要がある。

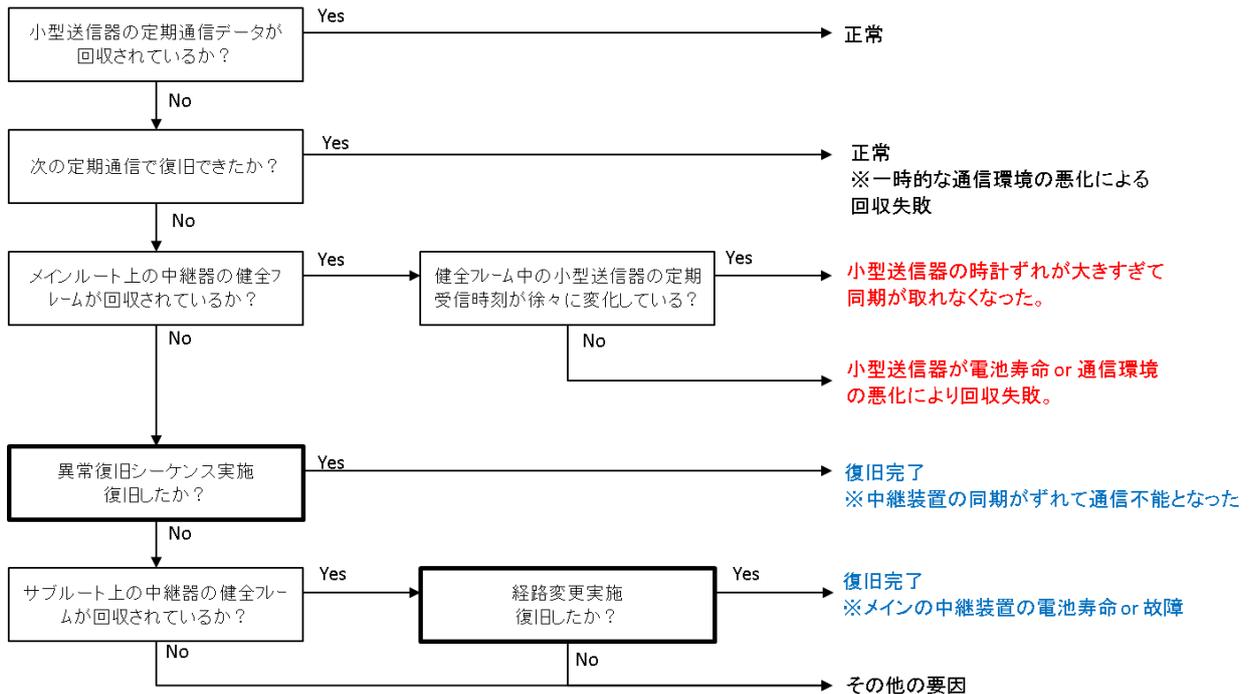


図 2.2.2-24 異常状態の把握と対処の流れ

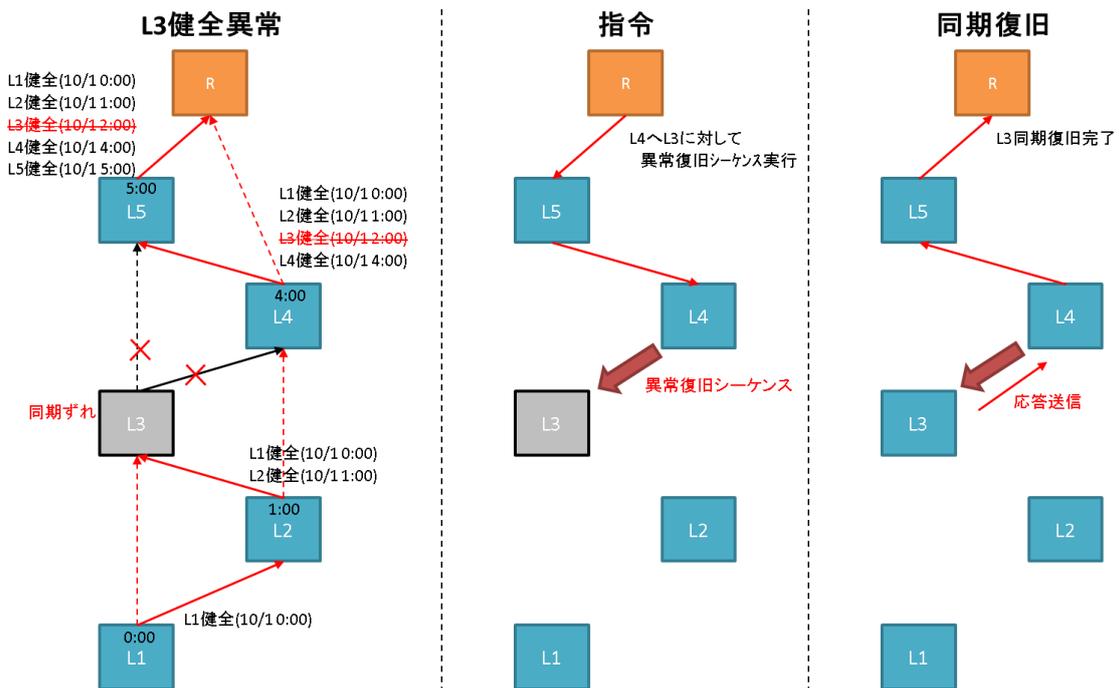


図 2.2.2-25 異常復旧動作フロー

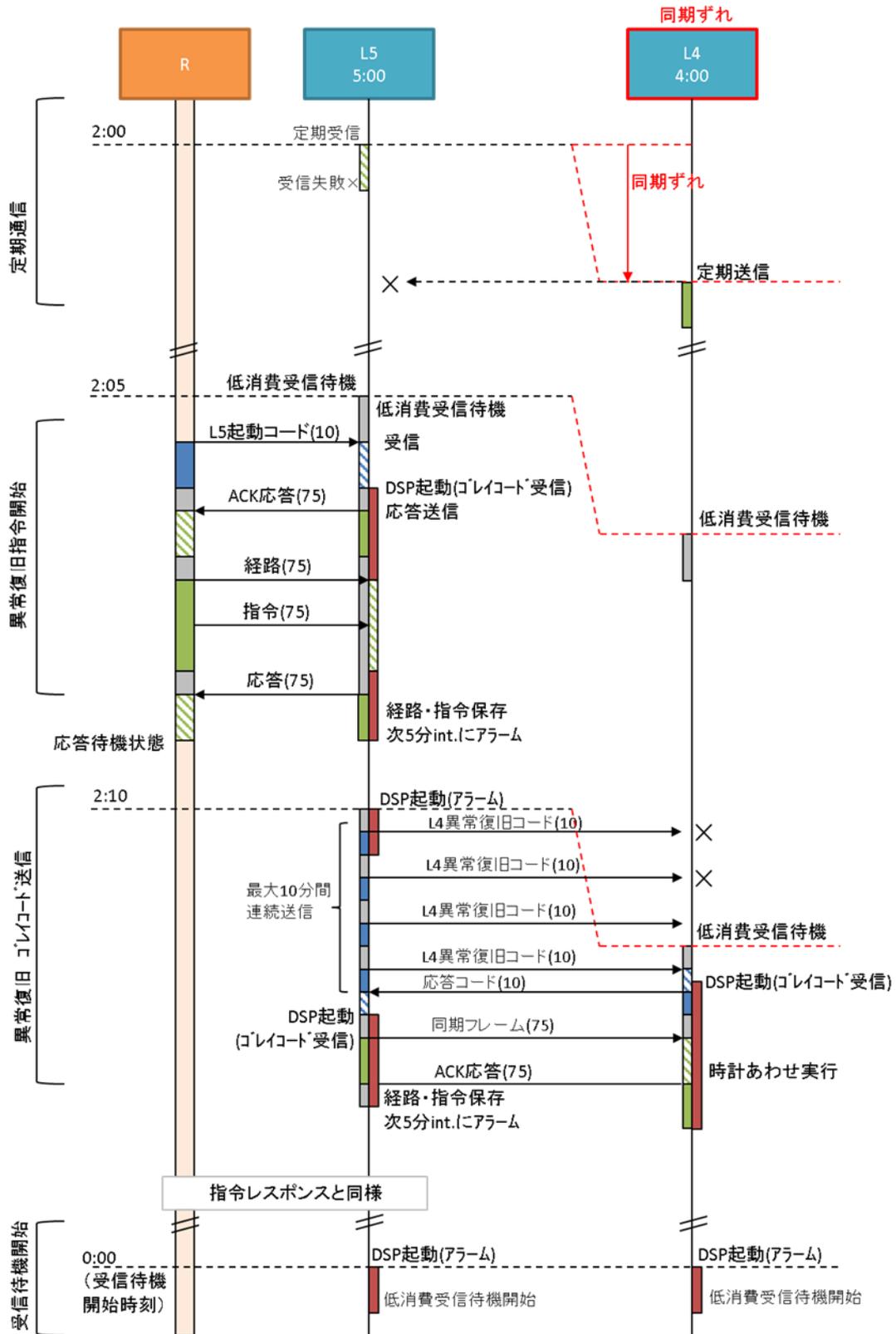


図 2.2.2-26 異常復旧動作の手順

2.2.3 各回路の製作、電気回路の組立て

(1) 中継装置制御基板

1) 回路ブロック

2.2.2 で開発した各機能を搭載した中継装置制御基板の回路ブロックを、図 3-1 に示す。

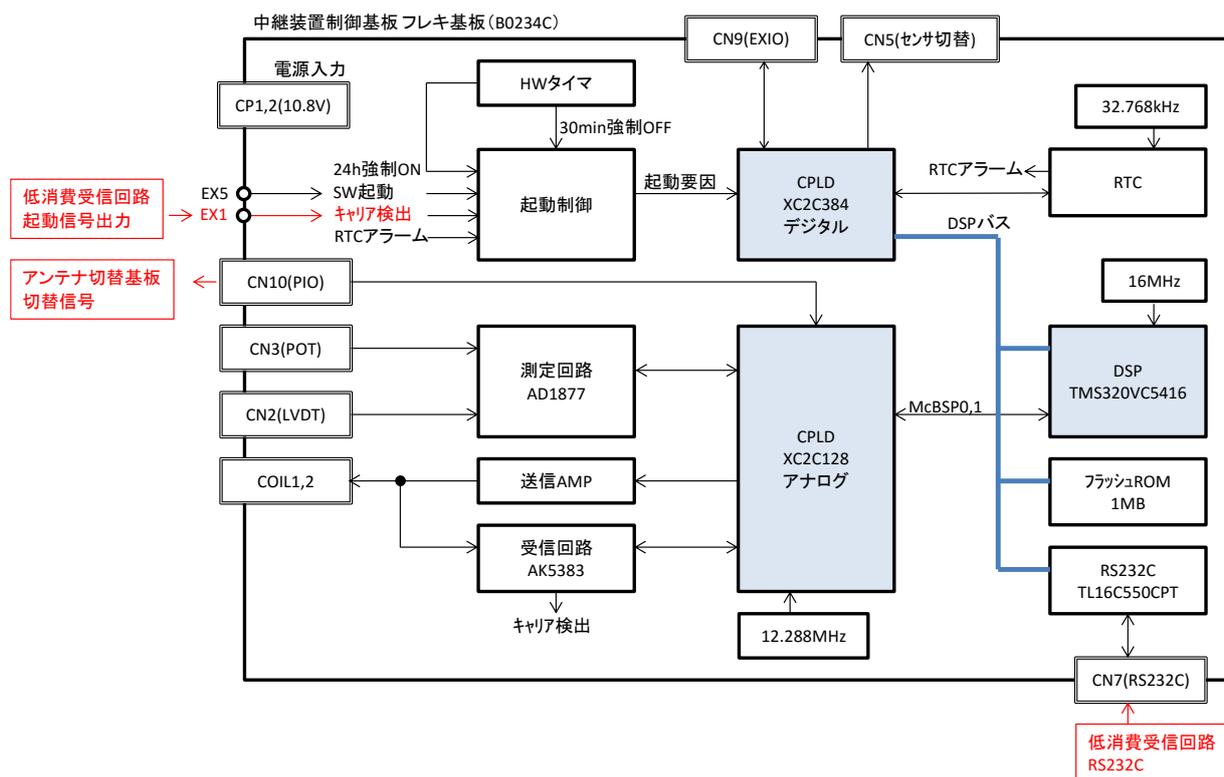


図 2.2.3-1 中継装置制御基板ブロック構成

2) 回路パターン

作製した基板の回路パターンを図 2.2.3-2 に示す。

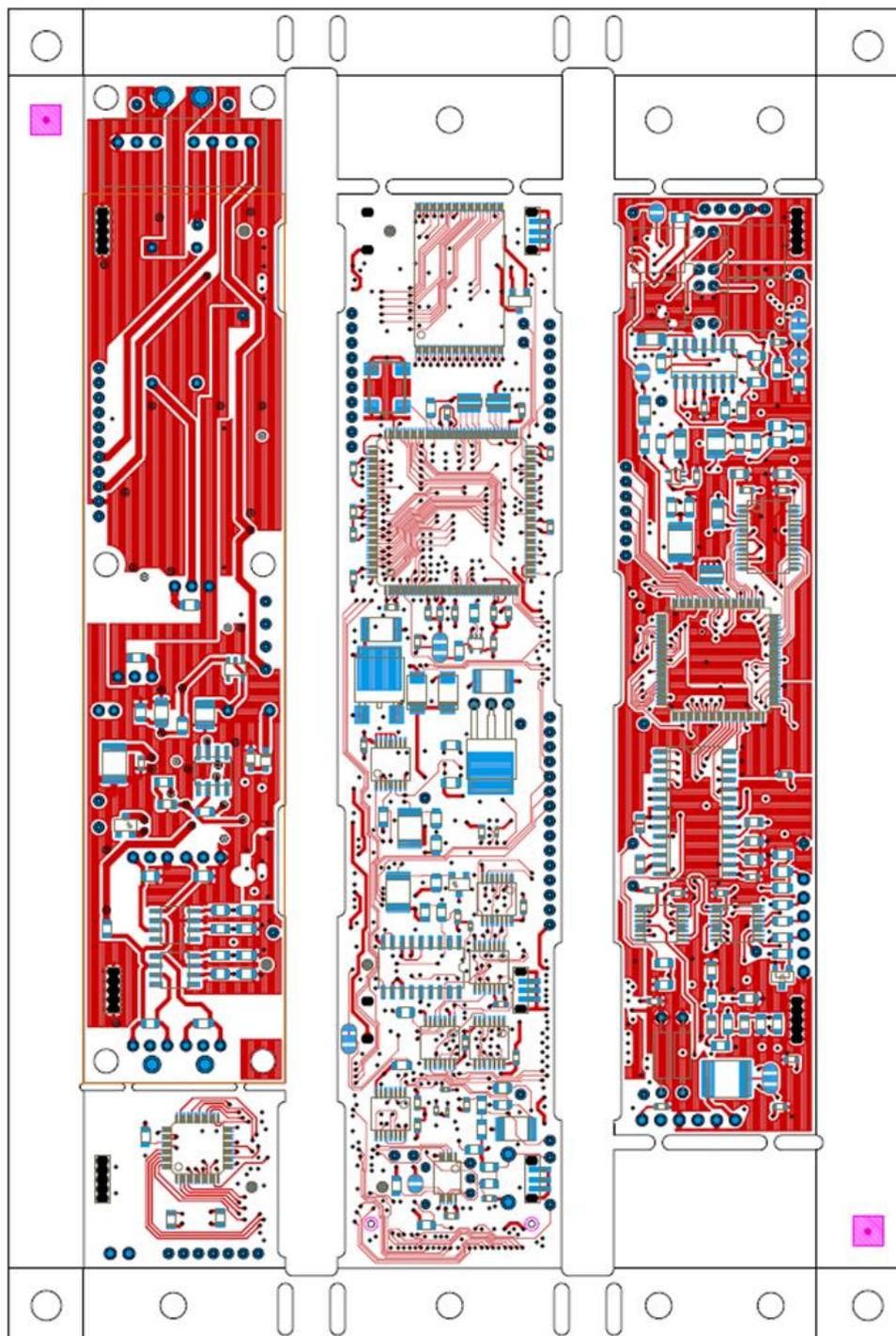


図 2.2.3-2 中継装置制御基板回路パターン

3) 回路実装

作製した基板に各電子部品を実装した様子を、図 2.2.3-3 に示す。

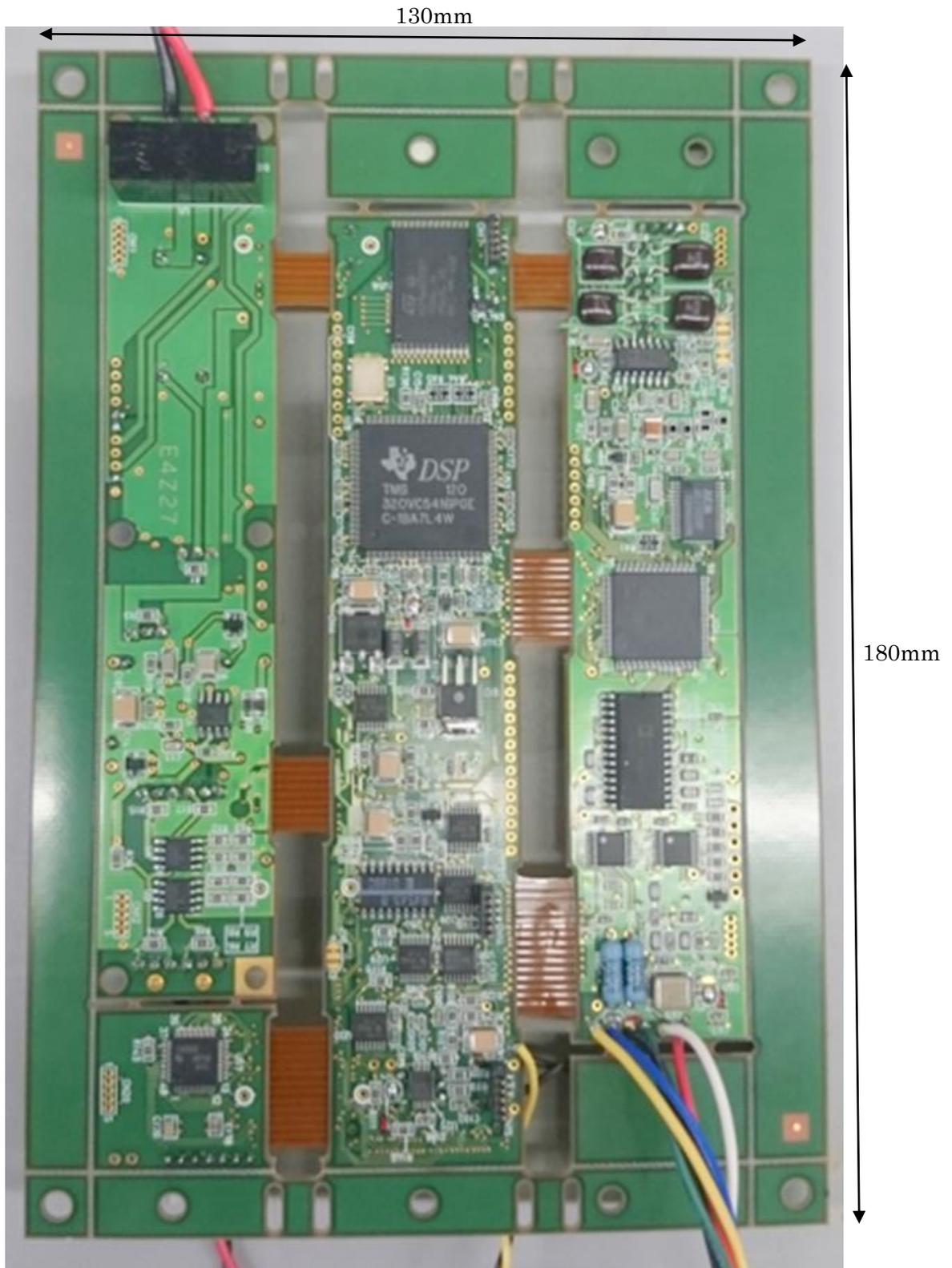


図 2.2.3-3 中継装置制御基板実装回路

(2) 低消費受信基板

1) 回路ブロック

2.2.2 で開発した省電力受信回路の回路ブロックを図 2.2.3-4 に示す。

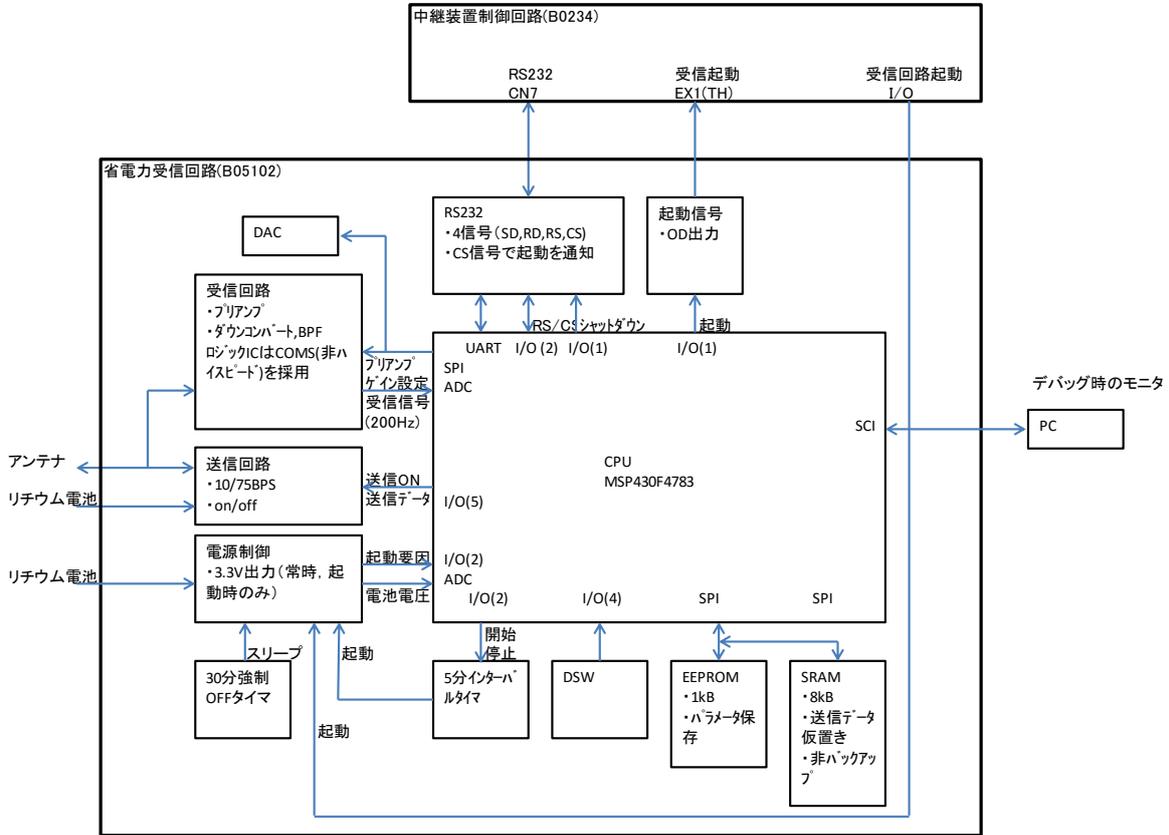


図 2.2.3-4 低消費受信基板回路ブロック

2) 回路パターン

作製した基板の回路パターンを図 2.2.3-5 に示す。

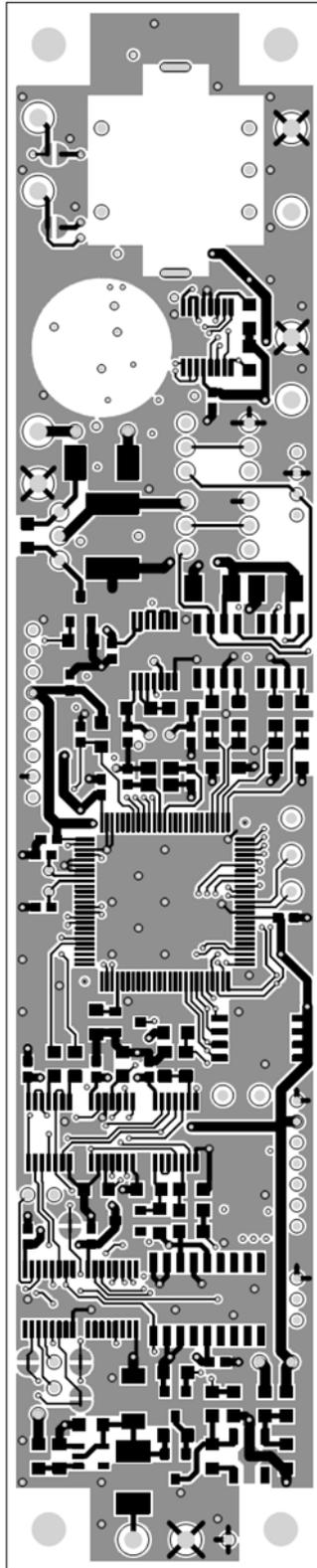


図 2.2.3-5 低消費受信基板回路パターン

3) 回路実装

作製した回路に各電子部品を実装した様子を図 2.2.3-6 に示す。

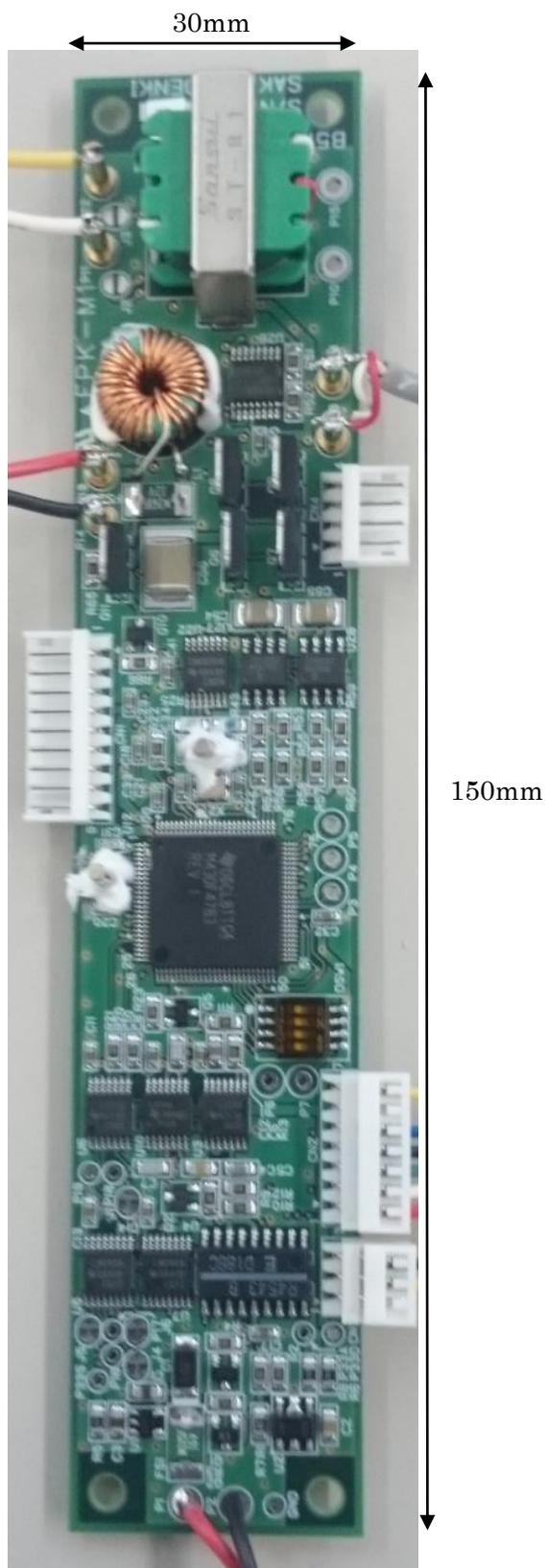


図 2.2.3-6 低消費受信基板回路実装

2.2.4 機能確認試験

(1) 回路の消費電流確認

作成した省電力受信回路と中継装置制御回路を接続し、中継器として動作するように組み立てたのちに、回路の消費電流を測定した。その結果を表 2.2.4-1 に示す。表より、従来の受信待機である中継装置制御回路の待機中消費電流 123mA に対して、省電力受信回路は 4.0mA と大幅な省電力効果が実現できた。なおその際の中継装置制御回路はわずか 0.003mA の消費となった。

表 2.2.4-1 回路の消費電流

	中継装置制御回路 [mA]	省電力受信回路 [mA]	合計 [mA]
スリープ	0.003	0.002	0.005
5分毎タイマ受信待機中	0.003	4.0	4.003
待機中・地中無線受信	123	16	139
地中無線送信中	123	490	613

(2) RTC 高精度化確認試験

1) RTC の校正

RTC 高精度化のための補正方法を実際の単方向小型送信器に組み込み、時計ずれの検証を行った。はじめに、頂点温度 25℃ 付近（実測時の温度 22℃）における周波数誤差 E_{25} (ppm) を測定した結果を表 2.2.4-2 に示す。また、校正結果を温度特性曲線に当てはめた結果を図 2.2.4-1 に示す。

表 2.2.4-2 RCT の E_{25} 校正結果（実測時温度 22℃）

RTC No.	発振周波数 [Hz]	誤差 [ppm]
1512001S	32768.30	9.16
1512002S	32768.20	6.10
1512004S	32768.21	6.41
1512005S	32768.19	5.80

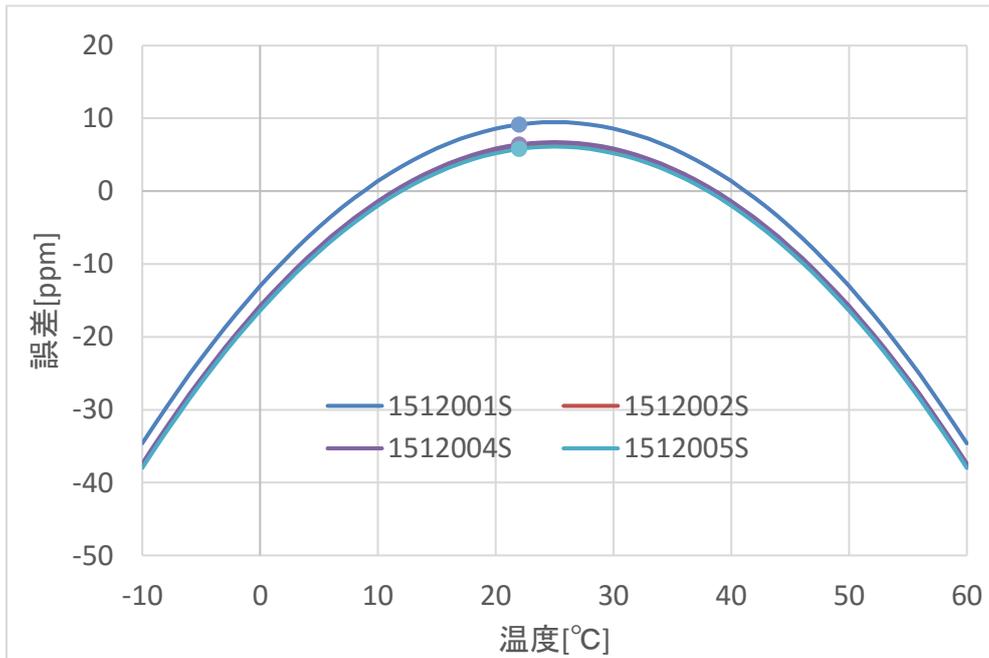


図 2.2.4-1 RTC の E₂₅ 校正結果と温度特性曲線

2) RTC の高精度化確認試験

図 2.2.4-2 に示す温度試験装置に温度補正機能を搭載した小型送信器の基板を入れ（図 2.2.4-3）、装置内を -7°C および $+66^{\circ}\text{C}$ の一定温度条件にして、それぞれ 1 週間試験した。温度補正は 1 時間に 1 回実施されるように設定し計 170 回の補正を行った。比較のため、低温時に補正を実施しない場合の時計ずれも確認した。

試験実施前と実施後で内蔵時計のずれを確認した結果を、表 2.2.4-3 に示す。補正なしの場合で、最大 23ppm の誤差が生じるどころ、補正することにより 6.6ppm の誤差になっており、温度補正の有効性を確認できた。

また、本試験結果で求めた最大誤差 6.6ppm をもとに、運用期間ごとに送信器の送信時間の最短間隔を求めた結果を表 2.2.4-4 に示す。これは、運用期間中に発生しうる誤差をもとに、運用期間中に他の送信器の送信時間とかぶらないように求めた送信器毎の発信時間間隔に運用台数をかけて求めた、各送信器の最短送信間隔を示している。

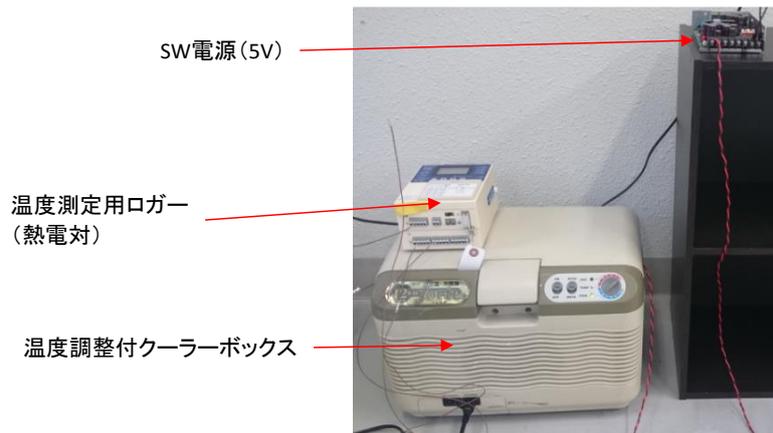


図 2.2.4-2 温度試験装置

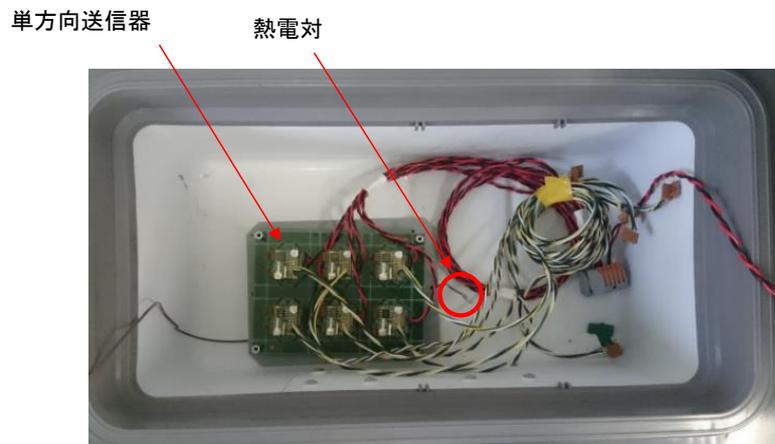


図 2.2.4-3 温度試験状況

表 2.2.4-3 温度補正試験結果

RTC No.	低温 (-7℃)		高温 (+66℃)
	補正なし	補正あり	補正あり
1512001S	-11 秒 / -18.2ppm	0 秒 / 0.0ppm	-2 秒 / -3.3ppm
1512002S	-8 秒 / -13.2ppm	4 秒 / 6.6ppm	-4 秒 / -6.6ppm
1512004S	-14 秒 / -23.1ppm	-2 秒 / -3.3ppm	2 秒 / 3.3ppm
1512005S	-13 秒 / -21.5ppm	0 秒 / 0.0ppm	-1 秒 / -1.7ppm

表 2.2.4-4 運用期間ごとの最短送信インターバル

誤差	6.6 ppm			
	最短インターバル(全送信器の通信に必要な時間)			
	小型送信器5台	小型送信器10台	小型送信器15台	
運用期間	1年	0.6 h	1.2 h	1.7 h
	2年	1.2 h	2.3 h	3.5 h
	5年	2.9 h	5.8 h	8.7 h
	10年	5.8 h	11.6 h	17.3 h
	15年	8.7 h	17.3 h	26.0 h

(3) 単方向小型送信器の通信同期の確認

1) 試験方法

小型送信器の時計がずれた場合、中継器の受信開始時刻を各送信器の送信時刻に合わせる通信同期の試験を行った。2台の小型送信器を用意し、両送信器ともあえて時刻がずれるように、設定可能な最大時刻誤差 189ppm を設定した。この際、1台目の小型送信器については通信同期を行わず、2台目の小型送信器についてだけ通信同期を行うように中継器を設定し試験した。本設定では、小型送信器の時計は概ね1時間に1秒進む。そこで、試験状況を把握しやすいように予め5秒程度遅らせた状態から試験を実施した。図 2.2.4-4 に試験の機器構成の模式図、図 2.2.4-5 に試験を示す。

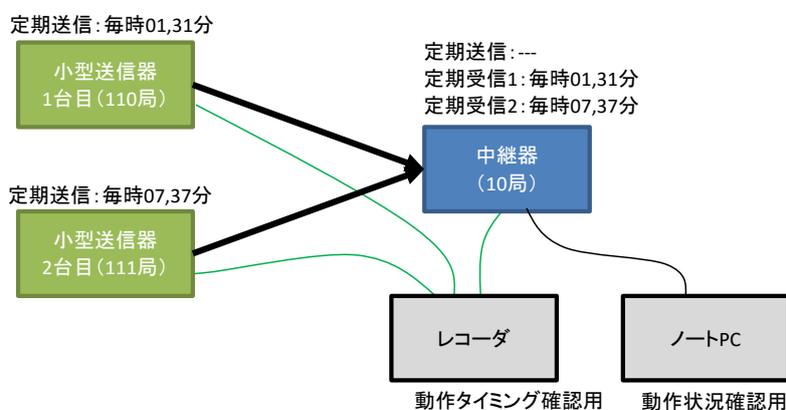


図 2.2.4-4 通信同期試験の機器構成

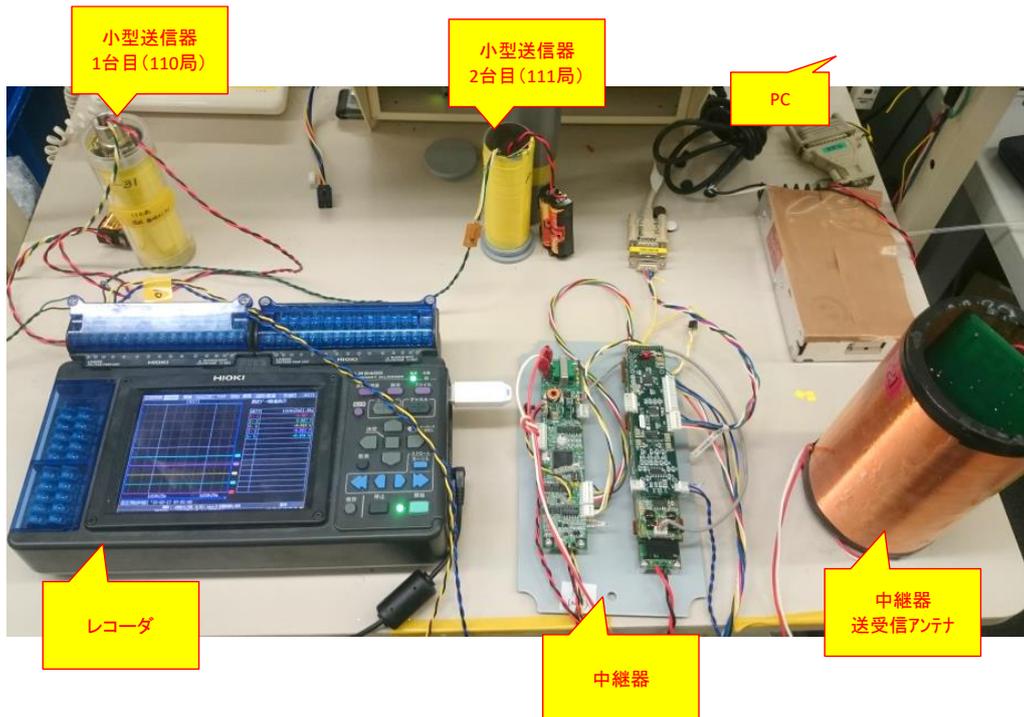


図 2.2.4-5 通信同期試験状況

2) 試験結果

中継器の動作状況の記録から、各小型送信器の定期送信を認識した時刻をまとめた結果を図 2.2.4-6 に示す。

同期を行っていない調整なしの小型送信器（110 局）は、時間の経過とともに中継器の受信開始時刻に対して送信時間が早まった。中継器は 6 秒以上のずれがある場合受信できないように設定しており、13：30 以降に小型送信器と中継器の時刻差が 6 秒以上となたため、以降は通信が行われていない。一方、調整有りの小型送信器（111 局）は、中継器の受信開始時刻に対して、ほぼ同時刻にデータを送信している。このことは、中継器が受信を開始する時刻を小型送信器の送信時刻に同期させていることを意味している。中継器が受信開始時刻を調整した秒数は図 2.2.4-7 に示すように、小型送信器の時刻が時間とともに大きくなるにつれ、調整時間も大きくなっていることが分かる。

以上の結果から、中継器は適切な時間マージンを設けておけば、小型送信器の時計がずれたとしても同期して通信を継続することが可能であることが確認された。

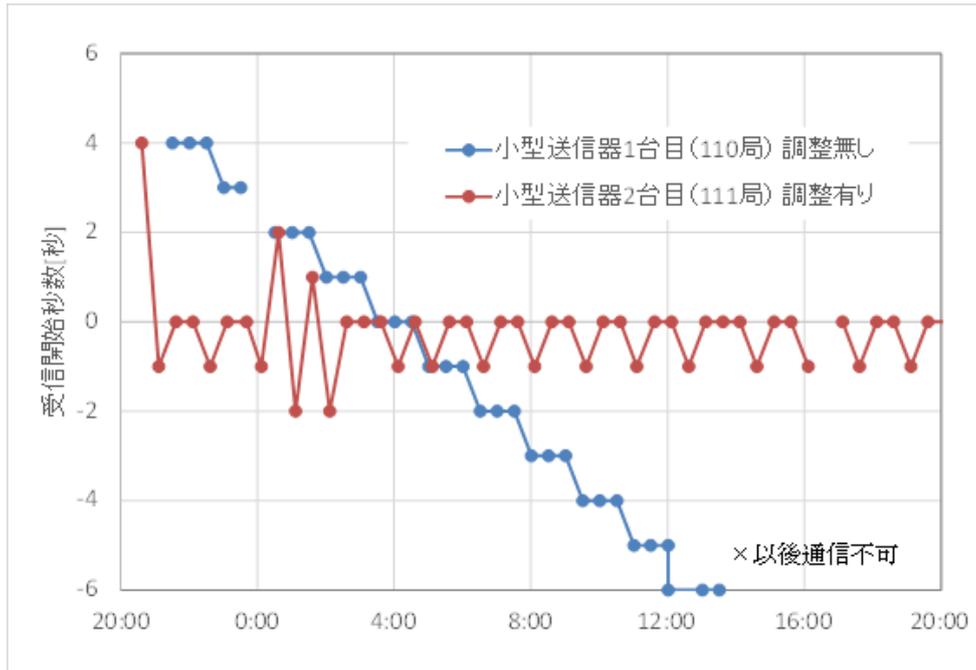


図 2.2.4-6 通信同期試験結果

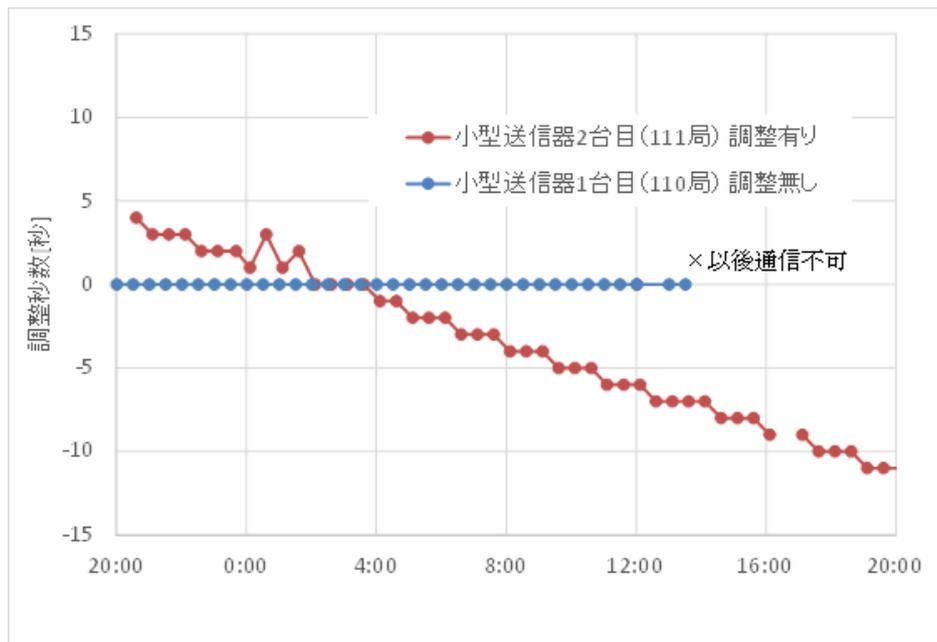


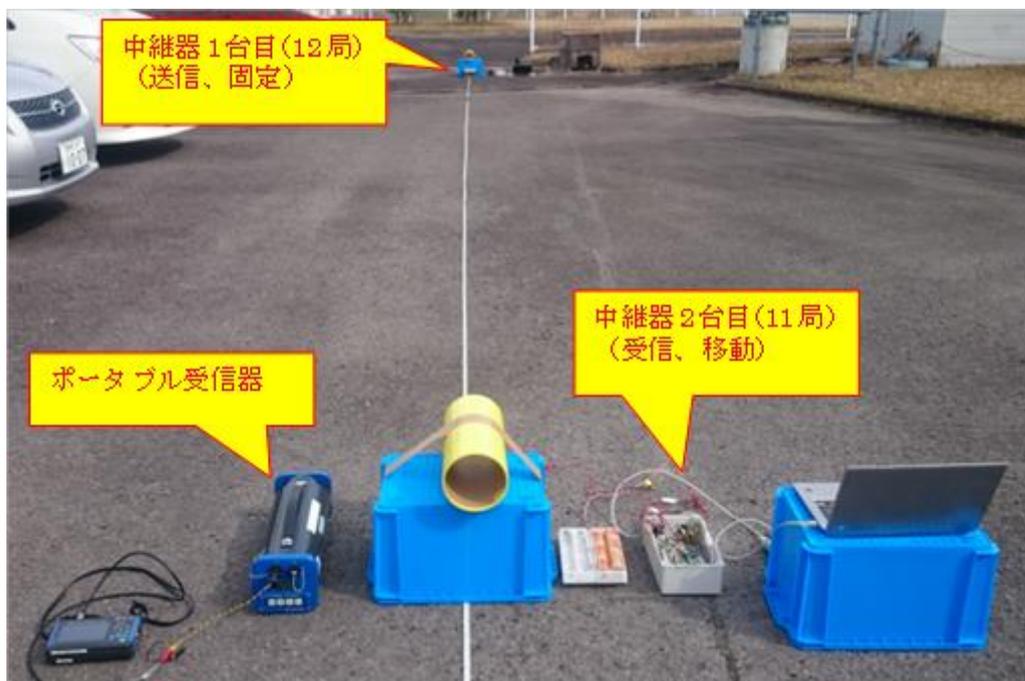
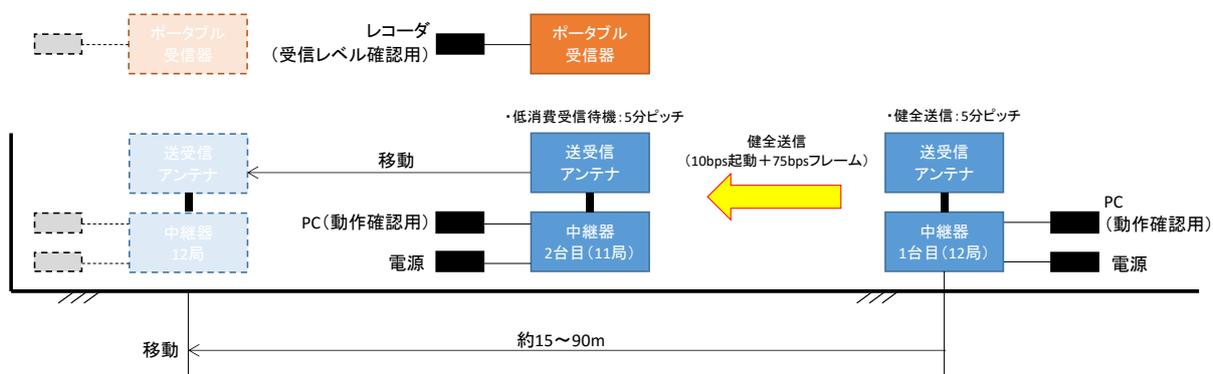
図 2.2.4-7 中継器内の時刻調整時間

(4) 省電力受信回路の通信機能確認試験

1) 試験方法

省電力受信回路は、通常の中継装置制御回路に搭載されている受信機能を動作させる前段として運用するため、同等の通信能力が必要である。そこで、開発した省電力受信回路の動作の確認および通信能力の確認を行った。

試験概要を図 2.2.4-8 に示す。中継器 1 台目より GOLAY コードの健全性確認通信用コードを発信させ、中継器 2 台目で受信させる。中継器 1 台目～2 台目間距離を変化させ、GOLAY コードを正常に受信できたかどうかを判定する。合わせて中継装置制御回路を使用した通信も同じアンテナを使用して行い、各距離における通信可否を合わせて比較することで、省電力受信回路の通信能力の判断とする。図 2.2.4-9 に試験の様子を示す。



2) 試験結果

通信試験の結果を表 2.2.4-5 に示す。開発した省電力受信回路を用いた GOLAY コードの通信は本通信試験環境下で 80m まで通信できた。通常の受信回路である中継装置制御回路の受信機能を用いた通信では、本通信環境下で 75m まで通信できた。本結果から、省電力を実現した GOLAY コードの通信は、十分な通信能力を実現できたことが分かった。また、各通信距離における GOLAY コード受信レベルを図 2.2.4-10 に示す。この結果から、通常の地中無線通信と同様に、受信レベルが距離の 3 乗根に比例していることが確認できた。

表 2.2.4-5 省電力受信回路通信試験結果

距離 (m)	GOLAYコード 受信起動 (10bps)	フレーム受信 (75bps)	信号 (mVrms)	ノイズ (mVrms)
15	○	○	2188	8.4
20	○	○	913	8.5
25	○	○	453	11.4
30	○	○	276	12.1
40	○	○	114	9.9
50	○	○	65.1	7.0
60	○	○	43.4	8.9
65	○	○	36.5	8.2
75	○	○	25.6	7.6
80	○	×	22.6	6.3
84.5	×	×	20.8	8.1
90	×	×	18.4	6.8

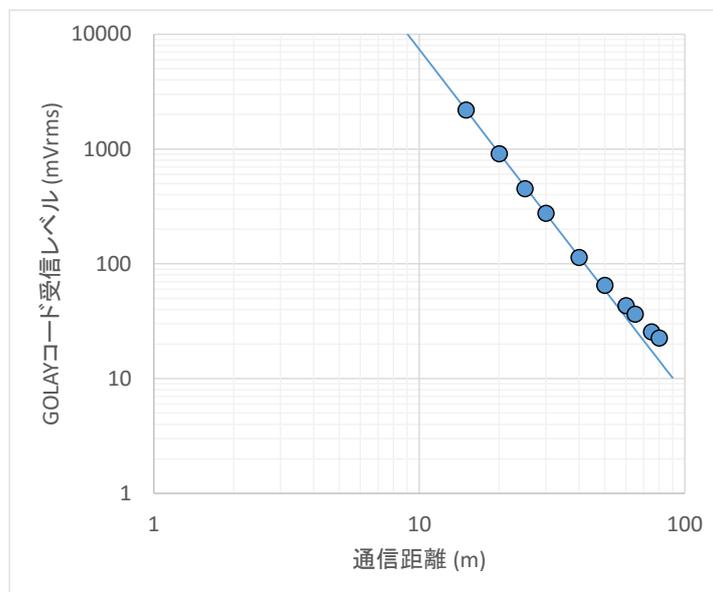


図 2.2.4-10 GOLAY コードの距離に対する受信レベル

(5) 定期通信中継確認試験

1) 試験方法

小型送信器から送信したデータの中継器が受信し、次の中継器にデータの中継できるか、定期通信中継確認試験を行った。試験装置の機器構成を図 2.2.4-11 に、試験状況を図 2.2.4-12 に示す。

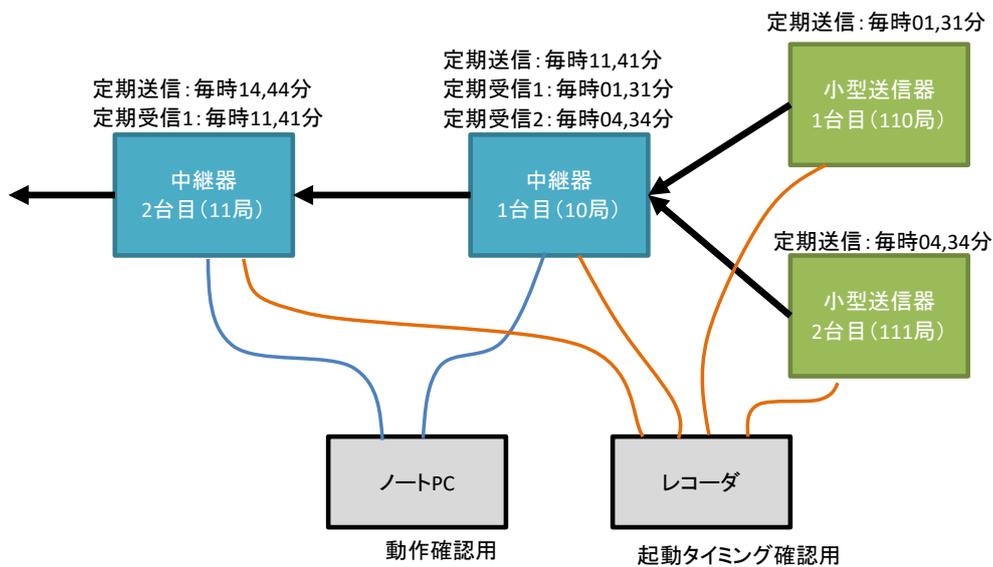


図 2.2.4-11 定期通信中継動作試験装置

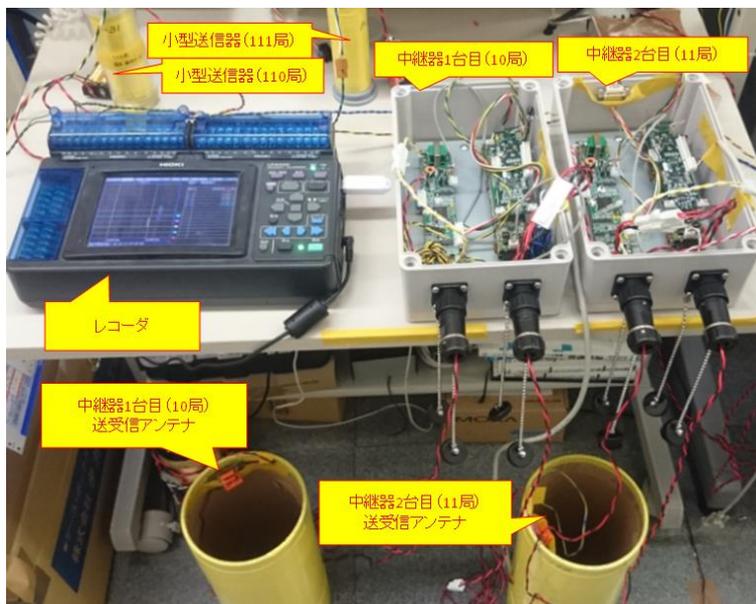


図 2.2.4-12 定期通信中継動作試験状況

2) 試験結果 (小型送信器→中継器 1 台目)

2 台の小型送信器と 2 台の中継器の動作状況を図 2.2.4-13 に示す。小型送信器は毎正時に測定のために起動し、その後スリープする。1 台目の小型送信器は、毎時 1 分と 31 分に定期送信を行い、2 台目の小型送信器は、毎時 4 分と 34 分に定期送信を行う。図 2.2.4-13 のうち、2 台の小型送信器の定期送信と中継器 1 台目の受信動作を図 2.2.4-14 に示す。これらの結果から、各小型送信器の時刻ずれに合わせて中継器が起動し、正常に定期送信を受信できている様子が分かる。

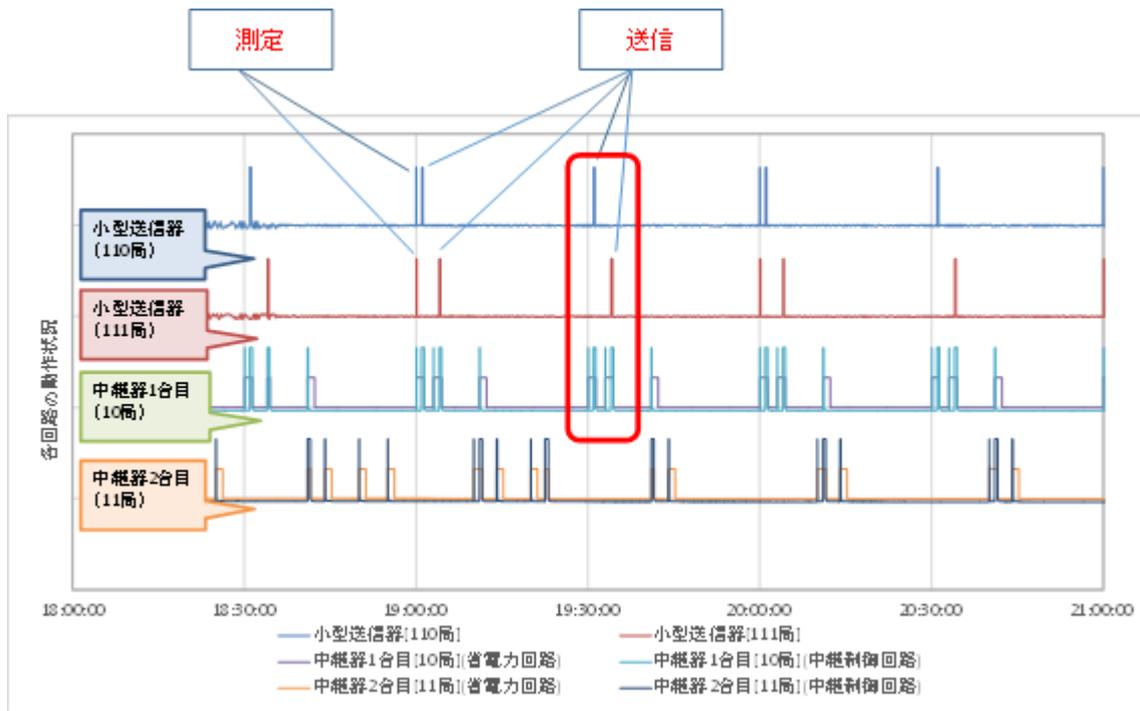


図 2.2.4-13 定期送信中継動作状況 (全体)

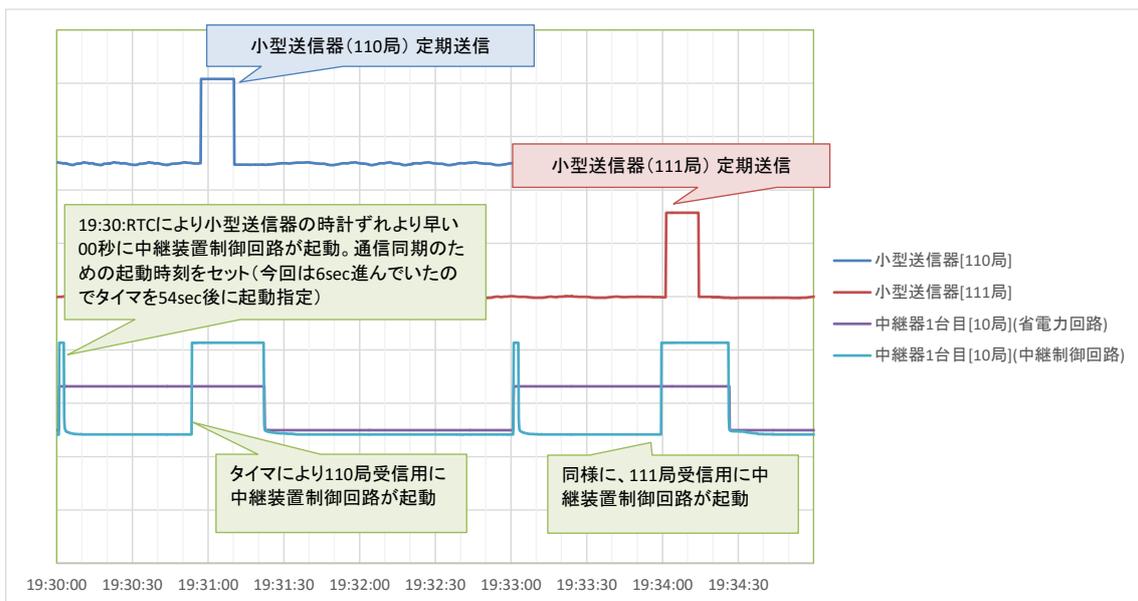


図 2.2.4-14 小型送信器の定期送信受信状況 (詳細)

3) 試験結果（中継器 1 台目→中継器 2 台目）

次に、小型送信器の定期送信を受信した中継器 1 台目が、中継器 2 台目に対してデータを中継する様子を以下に示す。

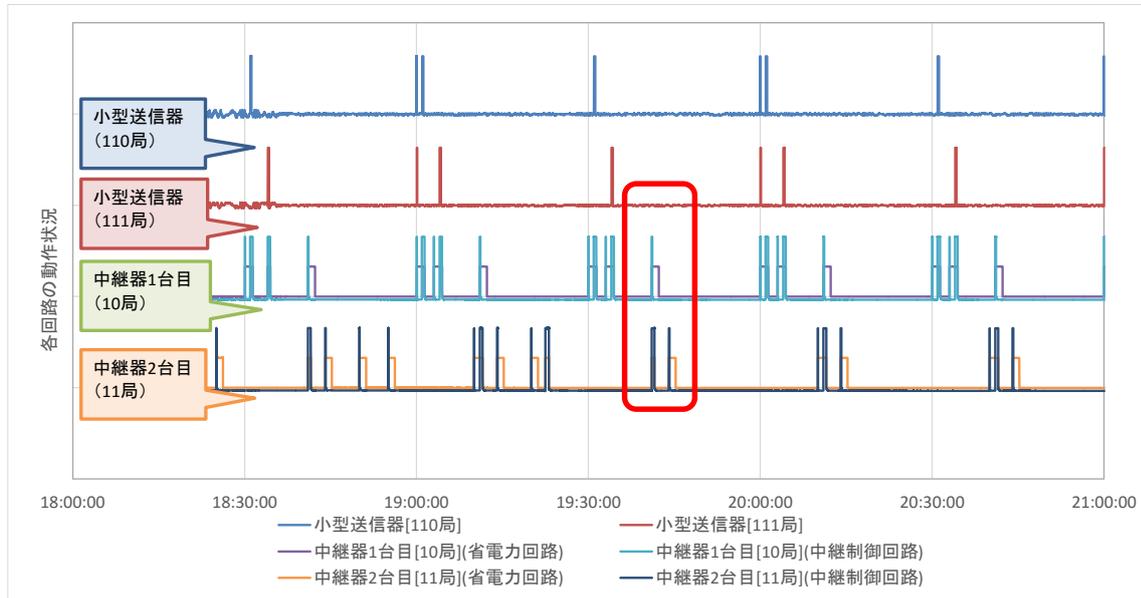


図 2.2.4-15 中継器 1 台目から 2 台目への中継動作状況（全体）

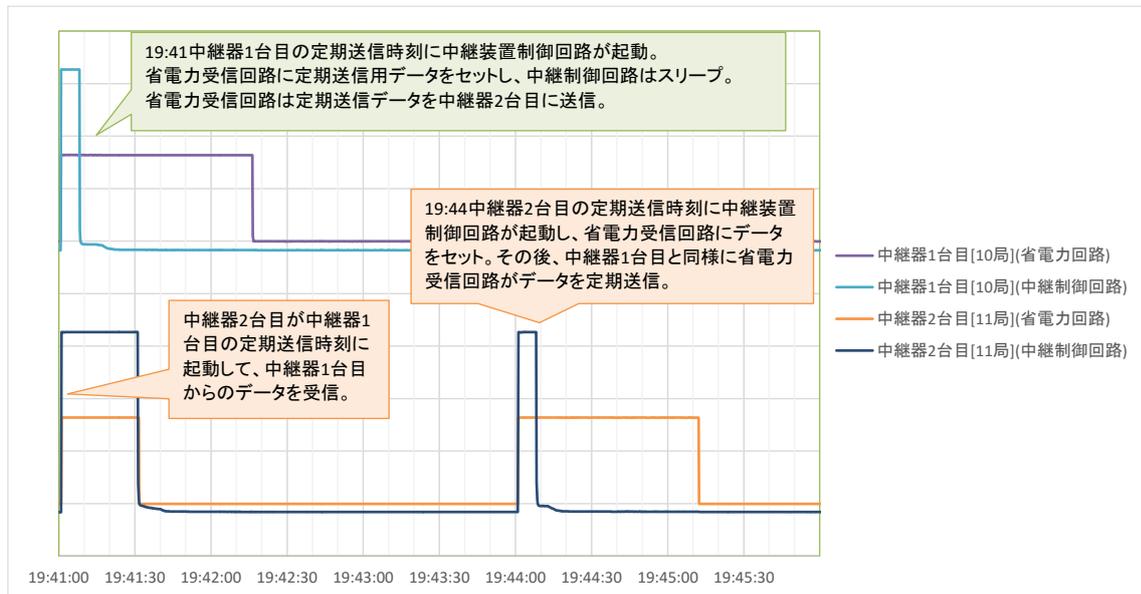


図 2.2.4-16 中継器 1 台目から 2 台目への中継動作状況（詳細）

中継器 1 台目が定期送信時刻になると中継装置制御回路が起動し、合わせて省電力受信回路が起動する。中継装置制御回路が小型送信器から受け取ったデータを定期送信するために、省電力受信回路にデータをセットし、その後スリープする。省電力受信回路は、中継器 2 台目に対してデータを送信している。中継器 2 台目は、中継器 1 台目の定期送信時刻に合わせて中継装置制御回

路と省電力受信回路を起動し、中継装置制御回路でデータを受信する。その後、中継器 2 台目の定期送信時刻に中継装置制御回路と省電力受信回路を起動し、中継装置制御回路が中継器 1 台目から受信したデータを省電力受信回路にセットし、その後スリープ。省電力受信回路はその次の中継器、もしくは受信器に対する定期送信でデータを送信し、スリープする。以上から、小型送信器の測定データを受信した中継器 1 台目が正常に動作して、中継器 2 台目に対してデータの中継している様子が確認された。

4) 通信データの確認

中継器を介して通信したデータが正しいかどうか確認を行った。中継器 1 台目が受信した各小型送信器の送信データと中継器 2 台目が受信した中継器 1 台目が送信したデータの比較を表 2.2.4-6 に示す。この結果から、中継器は正常に受信したデータを次の中継器に伝送できていることを確認した。

参考データとして、中継器 1 台目が受信した小型送信器 110 局のデータを記録したログを図 2.2.4-17 に、中継器 1 台目が受信した小型送信器 111 局のデータを記録したログを図 2.2.4-18 に、中継器 2 台目が受信した中継器 1 台目の送信したデータを記録したログを図 2.2.4-19 にそれぞれ示す。

表 2.2.4-6 中継前と中継後のデータの比較

中継器1台目の受信した小型送信器110局の測定データ																												
7E 81	F6	03	01	01	01	7E	02	14	D6	00	00	06	B6	06	C3	06	D6	06	DC	06	DC	80	00	FF	46	16	FF	7E
ヘッダ	送信	他	フレーム	他	最新測定データの日付							データ(温度)					パリティ・フッタ											
局番	全	No.	年	月	日	曜	時	分	1	2	3	4	5															
110	1	1	2016	2	20	6	22	0	17.18	17.31	17.50	17.56	17.56															

中継器2台目の受信した中継器1台目が送信した小型送信器110局の測定データ																												
7E 81	F6	03	01	01	01	7E	02	14	D6	00	00	06	B6	06	C3	06	D6	06	DC	06	DC	80	00	FF	46	16	FF	7E
ヘッダ	送信	他	フレーム	他	最新測定データの日付							データ(温度)					パリティ・フッタ											
局番	全	No.	年	月	日	曜	時	分	1	2	3	4	5															
110	1	1	2016	2	20	6	22	0	17.18	17.31	17.50	17.56	17.56															

中継器1台目の受信した小型送信器111局の測定データ																												
7E 81	F7	03	01	01	01	7E	02	14	D6	00	00	06	9D	06	A4	06	AA	06	B0	06	B0	80	00	FF	89	55	FF	7E
ヘッダ	送信	他	フレーム	他	最新測定データの日付							データ(温度)					パリティ・フッタ											
局番	全	No.	年	月	日	曜	時	分	1	2	3	4	5															
111	1	1	2016	2	20	6	22	0	16.93	17.00	17.06	17.12	17.12															

中継器2台目の受信した中継器1台目が送信した小型送信器111局の測定データ																												
7E 81	F7	03	01	01	01	7E	02	14	D6	00	00	06	9D	06	A4	06	AA	06	B0	06	B0	80	00	FF	89	55	FF	7E
ヘッダ	送信	他	フレーム	他	最新測定データの日付							データ(温度)					パリティ・フッタ											
局番	全	No.	年	月	日	曜	時	分	1	2	3	4	5															
111	1	1	2016	2	20	6	22	0	16.93	17.00	17.06	17.12	17.12															

```

[Sat Feb 20 22:01:57.299 2016] -----
[Sat Feb 20 22:01:57.315 2016] +   Wakeup UnderComm Relay   +
[Sat Feb 20 22:01:57.315 2016] -----
[Sat Feb 20 22:01:57.331 2016] ==>Startup state...
[Sat Feb 20 22:01:57.331 2016] Program build date:Feb 20 2016 11:08:44
[Sat Feb 20 22:01:57.346 2016] Status OK!
[Sat Feb 20 22:01:57.346 2016]       Current Mode =       1
[Sat Feb 20 22:01:57.346 2016]       Status No. =       1547
[Sat Feb 20 22:01:57.362 2016]       Status Page. =       1
[Sat Feb 20 22:01:57.362 2016]       Measure Count =       0
[Sat Feb 20 22:01:57.377 2016] Parameter loading...OK!
[Sat Feb 20 22:01:57.377 2016] Startup date : <16/02/20 22:01:58>
[Sat Feb 20 22:01:57.393 2016] Low Power Board checking...   OK.
[Sat Feb 20 22:01:57.908 2016] Scheduler loading... OK
[Sat Feb 20 22:01:57.908 2016]       Next Schedule Date(id:name)[adj] = 16/02/20 22:04:00(   3:CONST RX1 )[-   1]
[Sat Feb 20 22:01:57.939 2016] Wakeup by LowPowerBoard[Timer]
[Sat Feb 20 22:01:57.955 2016] ==>Main state...
[Sat Feb 20 22:01:57.955 2016] *ConstCommRx_main0:STEP_INIT
[Sat Feb 20 22:02:08.563 2016] --RxFrame:7E81F6030101017E0214D6000006B606C306D606DC06DC8000FF4616FF7E   Frame
OK!
[Sat Feb 20 22:02:23.788 2016] *ConstCommRx_main0:save frame OK.(TX=0x00F6,Frame=   1)
[Sat Feb 20 22:02:23.819 2016] Schedule execute bit =0x0000, 16/02/20 22:04:00
[Sat Feb 20 22:02:23.835 2016] *Receive start time =       7, total adjust sec = -   3
[Sat Feb 20 22:02:23.851 2016] *Receive level =       0
[Sat Feb 20 22:02:23.851 2016] *ConstCommRx_main0:STEP_FINISH
[Sat Feb 20 22:02:23.960 2016] ==>Finish state...
[Sat Feb 20 22:02:23.975 2016] Low Power Board state =       0
[Sat Feb 20 22:02:23.991 2016] Low Power Board shutting down.
[Sat Feb 20 22:02:24.303 2016]       Next Schedule Date(id:name)[adj] = 16/02/20 22:04:00(   3:CONST RX1 )[-   1]
[Sat Feb 20 22:02:24.334 2016]       [0]Next meas date : 16/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.334 2016]       [1]Next const tx date : 16/02/20 22:10:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.350 2016]       [2]Next rx wait0 date : 16/02/20 22:21:00[-   1]
[Sat Feb 20 22:02:24.365 2016]       [3]Next rx wait1 date : 16/02/20 22:04:00[-   1]
[Sat Feb 20 22:02:24.381 2016]       [4]Next rx wait2 date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.397 2016]       [5]Next rx wait3 date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.412 2016]       [6]Next rx wait4 date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.428 2016]       [7]Next rx wait5 date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.443 2016]       [8]Next rx wait6 date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.459 2016]       [9]Next rx wait7 date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.459 2016]       [10]Next rx wait8 date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.475 2016]       [11]Next rx wait9 date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.490 2016]       [12]Next sync tx date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.506 2016]       [13]Next health tx date : 01/01/01 00:00:00[   0]
[Sat Feb 20 22:02:24.521 2016]       [14]Next rxwait start date : 16/01/01 00:00:00[   0]
- - - - -

```

図 2.2.4-17 中継器 1 台目が受信した小型送信器 110 局のデータのログ

```

[Sat Feb 20 22:04:58.291 2016] -----
[Sat Feb 20 22:04:58.307 2016] +   Wakeup UnderComm Relay   +
[Sat Feb 20 22:04:58.307 2016] -----
[Sat Feb 20 22:04:58.322 2016] ==>Startup state...
[Sat Feb 20 22:04:58.322 2016] Program build date:Feb 20 2016 11:08:44
[Sat Feb 20 22:04:58.338 2016] Status OK!
[Sat Feb 20 22:04:58.338 2016]       Current Mode =       1
[Sat Feb 20 22:04:58.353 2016]       Status No. =       1549
[Sat Feb 20 22:04:58.353 2016]       Status Page. =       1
[Sat Feb 20 22:04:58.353 2016]       Measure Count =       0
[Sat Feb 20 22:04:58.369 2016] Parameter loading...OK!
[Sat Feb 20 22:04:58.369 2016] Startup date : <16/02/20 22:04:59>
[Sat Feb 20 22:04:58.385 2016] Low Power Board checking...   OK.
[Sat Feb 20 22:04:58.899 2016] Scheduler loading... OK
[Sat Feb 20 22:04:58.899 2016]       Next Schedule Date(id:name)[adj] = 16/02/20 22:10:00(   1:CONST TX   ) [   0]
[Sat Feb 20 22:04:58.931 2016] Wakeup by LowPowerBoard[Timer]
[Sat Feb 20 22:04:58.946 2016] ==>Main state...
[Sat Feb 20 22:04:58.946 2016] *ConstCommRx_main0:STEP_INIT
[Sat Feb 20 22:05:08.993 2016] --RxFrame:7E81F7030101017E0214D60000069D06A406AA06B006B08000FF8955FF7E   Frame
OK!
[Sat Feb 20 22:05:24.218 2016] *ConstCommRx_main0:save frame OK.(TX=0x00F7,Frame=   1)
[Sat Feb 20 22:05:24.249 2016] Schedule execute bit =0x0000, 16/02/20 22:10:00
[Sat Feb 20 22:05:24.265 2016] *Receive start time =       7, total adjust sec = -   2
[Sat Feb 20 22:05:24.281 2016] *Receive level =       0
[Sat Feb 20 22:05:24.296 2016] *ConstCommRx_main0:STEP_FINISH
[Sat Feb 20 22:05:24.390 2016] ==>Finish state...
[Sat Feb 20 22:05:24.405 2016] Low Power Board state =       0
[Sat Feb 20 22:05:24.421 2016] Low Power Board shutting down.
[Sat Feb 20 22:05:24.733 2016]       Next Schedule Date(id:name)[adj] = 16/02/20 22:10:00(   1:CONST TX   ) [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.764 2016]       [0]Next meas date : 16/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.764 2016]       [1]Next const tx date : 16/02/20 22:10:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.780 2016]       [2]Next rx wait0 date : 16/02/20 22:21:00 [   1]
[Sat Feb 20 22:05:24.795 2016]       [3]Next rx wait1 date : 16/02/20 22:24:00 [   1]
[Sat Feb 20 22:05:24.811 2016]       [4]Next rx wait2 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.827 2016]       [5]Next rx wait3 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.842 2016]       [6]Next rx wait4 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.858 2016]       [7]Next rx wait5 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.873 2016]       [8]Next rx wait6 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.873 2016]       [9]Next rx wait7 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.889 2016]       [10]Next rx wait8 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.905 2016]       [11]Next rx wait9 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.920 2016]       [12]Next sync tx date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.936 2016]       [13]Next health tx date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.951 2016]       [14]Next rxwait start date : 16/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:05:24.967 2016]       [15]Next rxwait end date : 16/01/01 00:00:00 [   0]

```

図 2.2.4-18 中継器 1 台目が受信した小型送信器 111 局のデータのログ

```

[Sat Feb 20 22:09:58.935 2016] -----
[Sat Feb 20 22:09:58.935 2016] +   Wakeup UnderComm Relay   +
[Sat Feb 20 22:09:58.950 2016] -----
[Sat Feb 20 22:09:58.950 2016] ==>Startup state...
[Sat Feb 20 22:09:58.966 2016] Program build date:Feb 20 2016 11:08:44
[Sat Feb 20 22:09:58.966 2016] Status OK!
[Sat Feb 20 22:09:58.981 2016]      Current Mode =      1
[Sat Feb 20 22:09:58.981 2016]      Status No. =      2705
[Sat Feb 20 22:09:58.981 2016]      Status Page. =      1
[Sat Feb 20 22:09:58.997 2016]      Measure Count =      0
[Sat Feb 20 22:09:58.997 2016] Parameter loading...OK!
[Sat Feb 20 22:09:59.013 2016] Startup date : <16/02/20 22:10:00>
[Sat Feb 20 22:09:59.028 2016] Low Power Board checking...   Reset setting.
[Sat Feb 20 22:09:59.215 2016] Scheduler loading... OK
[Sat Feb 20 22:09:59.215 2016]      Next Schedule Date(id:name)[adj] = 16/02/20 22:10:00(   2:CONST RX0 ) [   0]
[Sat Feb 20 22:09:59.247 2016] Wakeup by RTC.
[Sat Feb 20 22:09:59.247 2016] ==>Main state...
[Sat Feb 20 22:09:59.262 2016] Schedule next alarm date =16/02/20 22:15:00
[Sat Feb 20 22:09:59.262 2016] Execute schedule ID      2
[Sat Feb 20 22:09:59.278 2016] Schedule execute bit =0x0004, 16/02/20 22:10:00
[Sat Feb 20 22:09:59.293 2016] *ConstCommRx_main0:STEP_INIT
[Sat Feb 20 22:10:09.527 2016] --RxFrame:7E81F6030101017E0214D6000006B606C306D606DC06DC8000FF4616FF7E      Frame
OK!
[Sat Feb 20 22:10:19.979 2016] --RxFrame:7E81F7030101017E0214D60000069D06A406AA06B006B08000FF8955FF7E      Frame
OK!
[Sat Feb 20 22:10:35.220 2016] *ConstCommRx_main0:save frame OK.(TX=0x00F6,Frame=      1)
[Sat Feb 20 22:10:35.236 2016] *ConstCommRx_main0:save frame OK.(TX=0x00F7,Frame=      1)
[Sat Feb 20 22:10:35.252 2016] *Receive start time =      7, total adjust sec =      255
[Sat Feb 20 22:10:35.267 2016] *Receive level =      0
[Sat Feb 20 22:10:35.267 2016] *ConstCommRx_main0:STEP_FINISH
[Sat Feb 20 22:10:35.392 2016] ==>Finish state...
[Sat Feb 20 22:10:35.408 2016] Low Power Board state =      0
[Sat Feb 20 22:10:35.423 2016] Low Power Board shutting down.
[Sat Feb 20 22:10:35.688 2016]      Next Schedule Date(id:name)[adj] = 16/02/20 22:15:00(   1:CONST TX  ) [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.735 2016]      [0]Next meas date : 16/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.735 2016]      [1]Next const tx date : 16/02/20 22:15:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.751 2016]      [2]Next rx wait0 date : 16/02/20 22:30:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.751 2016]      [3]Next rx wait1 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.782 2016]      [4]Next rx wait2 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.782 2016]      [5]Next rx wait3 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.798 2016]      [6]Next rx wait4 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.813 2016]      [7]Next rx wait5 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.844 2016]      [8]Next rx wait6 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.844 2016]      [9]Next rx wait7 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.860 2016]      [10]Next rx wait8 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.860 2016]      [11]Next rx wait9 date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.891 2016]      [12]Next sync tx date : 01/01/01 00:00:00 [   0]
[Sat Feb 20 22:10:35.891 2016]      [13]Next health tx date : 01/01/01 00:00:00 [   0]

```

図 2.2.4-19 中継器 2 台目が受信した小型送信器のデータのログ

(6) 異常復旧機能の試験

1) WDT 動作試験

中継器は中継装置制御回路で動作するプログラムが異常状態になった場合に備えて、30秒間プログラムが動作不能になった場合に強制リセットするためのWDT(ウォッチドックタイマ)を搭載している。これは、回路的に独立して動作することで、回路の動作を監視している。

試験装置の構成を図 2.2.4-20 に示す。中継装置制御回路上の DSP(デジタルシグナルプロセッサ)上で動作するプログラムに試験的に異常を発生させるには、クロックを止めるか、メモリアクセスを失敗させる方法がある。今回は、メモリアクセスのための回路パターンを切除することで異常を再現させた。

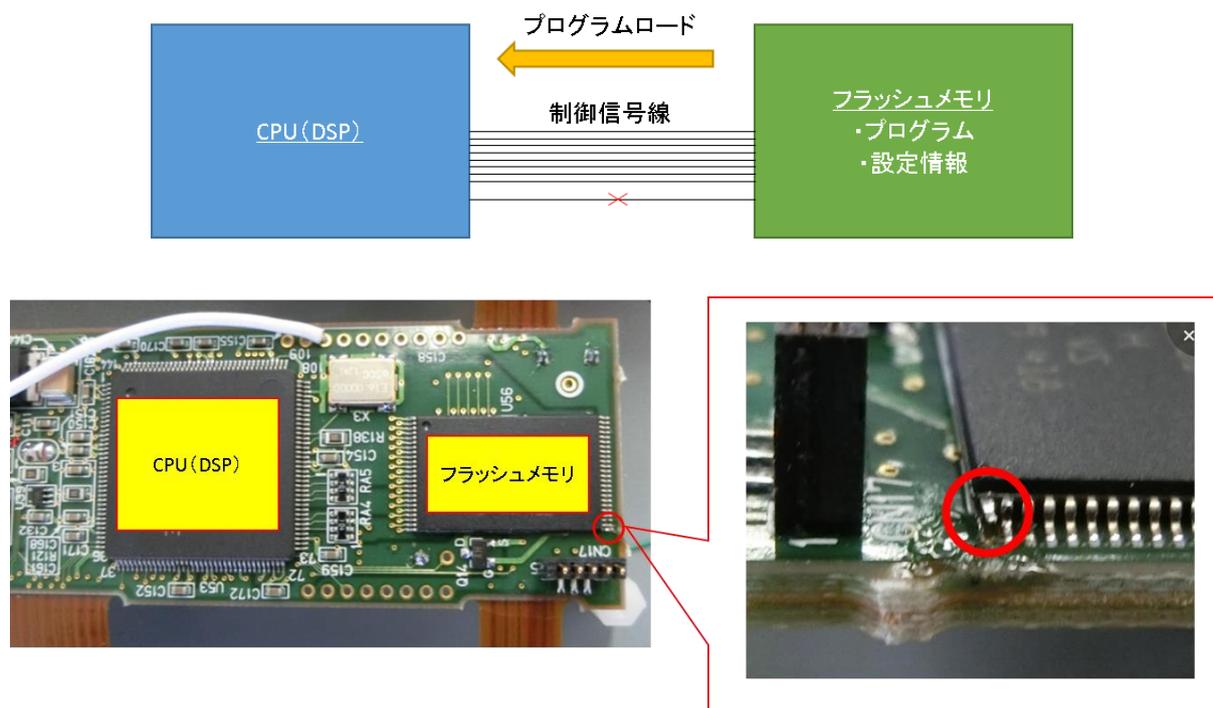


図 2.2.4-20 試験装置

試験結果を図 2.2.4-21、図 2.2.4-22 に示す。11:43 に制御信号線を異常状態にした。なお、試験用に DSP は 2 分間隔で動作するようにしている。11:42 までは正常に動作しており、異常にさせた 11:44 の起動時に異常が発生し、30 秒後に電源が一旦落ち、再起動している。その後、回路上の線を再接続し、異常状態を復旧させたら正常状態の動作に戻った。

この結果より WDT が正常に機能していることを確認した。

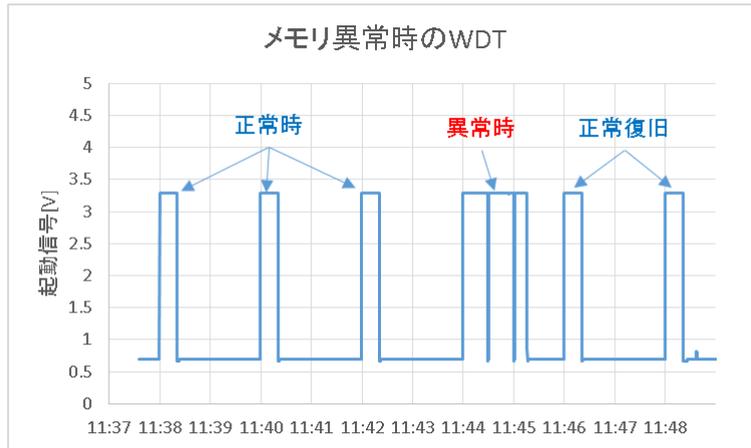


図 2.2.4-21 試験結果

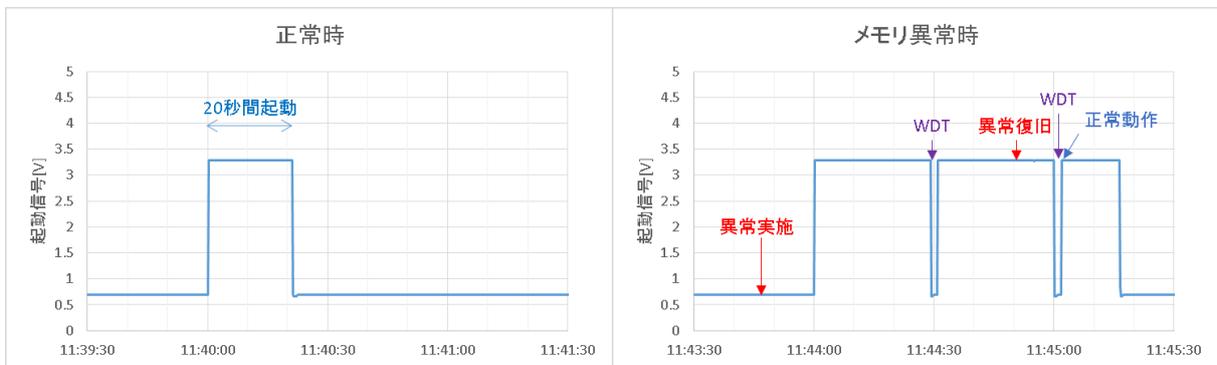


図 2.2.4-22 試験結果 (拡大図)

2) 指令送信試験

受信器から中継器 1 台目 (RY1) を経由して中継器 2 台目 (RY2) に対して指令通信を行う。試験装置を図 2.2.4-23 に示す。各受信器は 5 分毎のタイマにより省電力受信回路によって GOLAY コードによる指令を受信できるように受信待機している。そこで、指令通信では、受信器より宛先指定起動 GOLAY コードを送信し、中継器の中継装置制御回路を起動させ、指令内容が中継器 2 台目まで到達することを確認した。

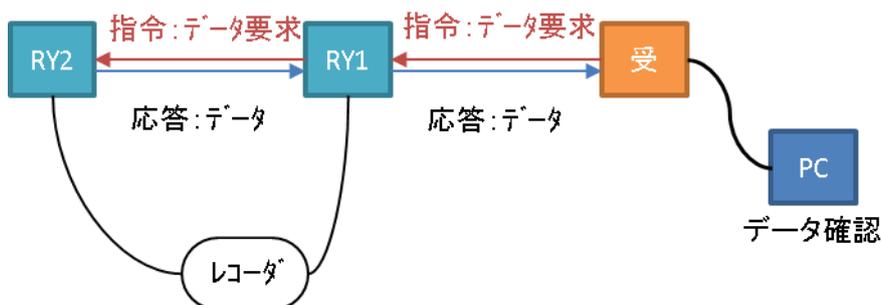


図 2.2.4-23 試験装置

試験結果を図 2.2.4-24 に示す。各中継器が 5 分毎に GOLAY コードを受信できるように待機している様子が分かる。そこに受信器から RY1（中継器 1 台目）に対し、宛先指定起動コマンドを送信した。受信した RY1 は RY2（中継器 2 台目）に対して宛先指定起動コマンドを送信する。これにより指令コマンドが受信器から中継器 1 台目を經由して、中継器 2 台目まで到達していることが分かる。中継器 2 台目は、送られた指令に従い、その応答を 1 台目に返し、1 台目は受信器に反している。

この結果から、指令通信が正常に動作していることを確認した。

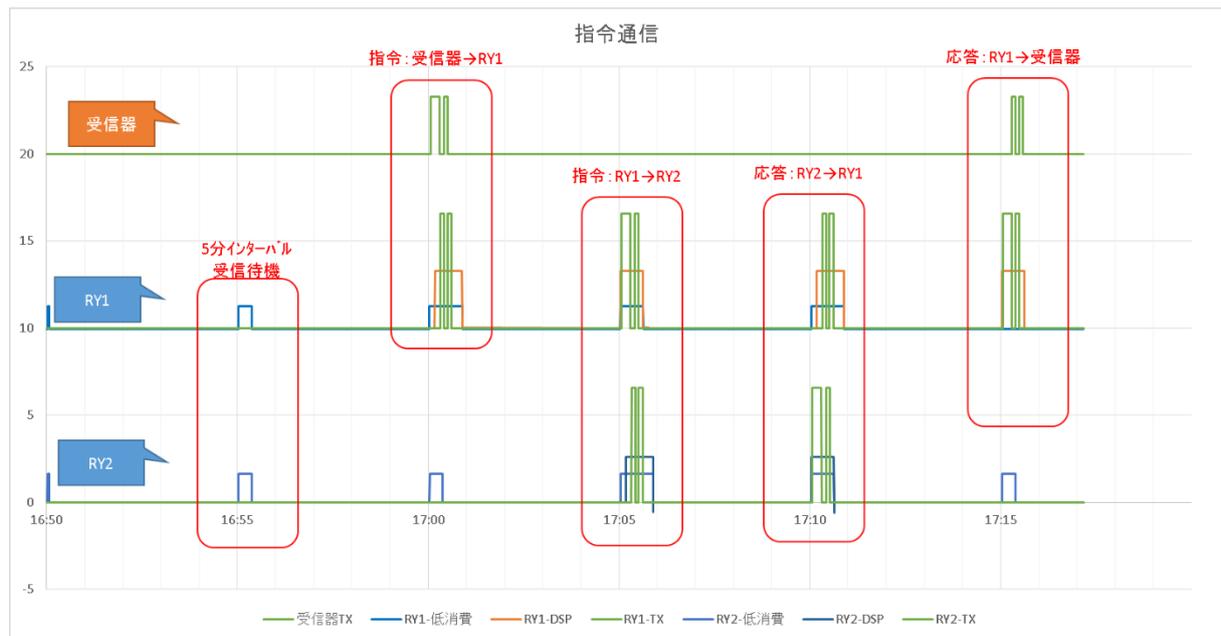


図 2.2.4-24 試験結果

通信のやり取りの詳細として受信器から中継器 1 台目への指令送信の詳細を以下に示す。受信器は 17:00 に省電力受信回路を受信待機させている中継器 1 台目（RY1）に対し、GOLAY コードを送信している。RY1 は、その GOLAY コードを受信すると、中継装置制御回路を起動していることが分かる。その後、RY1 は受信したことを受信器に返信（受信確認）し、それをもって受信器は指令内容を送信している。この指令内容とは、経路の変更や時計の設定などである。指令を受信した RY1 は正常に受信したので受信確認を返信している。

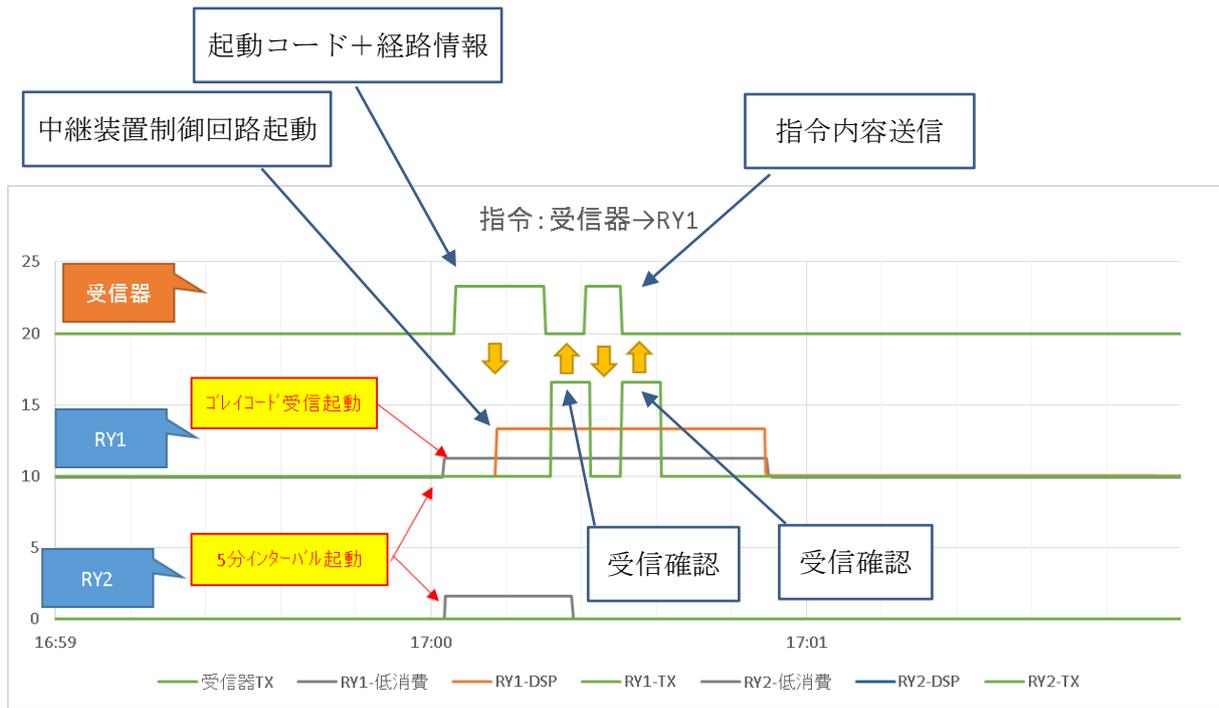


図 2.2.4-25 指令通信の詳細

3) 時計ずれによる同期異常復旧試験

中継器に異常が発生し、時計の同期がずれ、通信ができなくなった場合の復旧について確認した。中継器は5分毎に受信待機を実施している。そこで、最大10分間上位の中継器が異常復旧用に宛先指定応答要求 GOLAY コードを送信し、異常発生中継器が起動したら別途指令を行って時計を設定しなおして通信を回復する。中継器は内部時計に合わせて5分間タイマを1日1回リセットしている。よって、時計が正常になれば翌日には正常な通信に復旧する。

試験の構成を図 2.2.4-26 に示す。ここでは、中継器 RY2 の時計をずらして異常を模擬する。異常を認識したら受信器を操作し、上位の中継器 RY1 に対して復旧命令を送る。RY1 は RY2 に対して異常復旧を実施する。

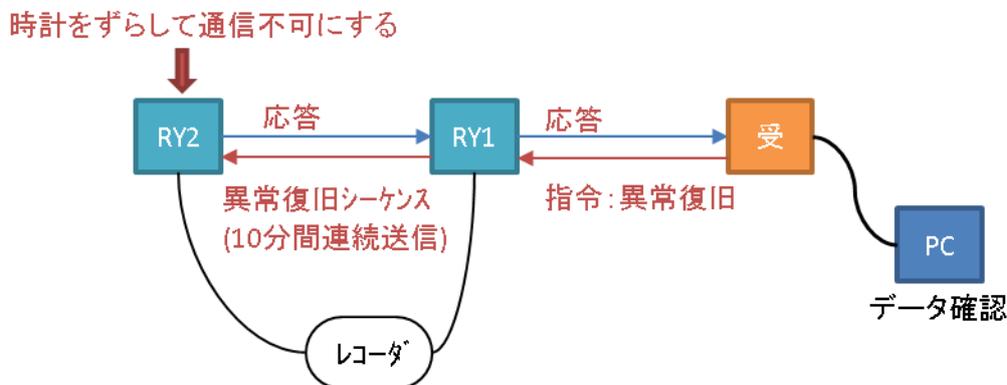


図 2.2.4-26 異常復旧試験の機器構成

試験結果を図 2.2.4-27 に示す。異常を模擬する RY2 の時刻を 2 分ほどずらす。1 日 1 回の 5 分間タイマのリセットは、通常 0 時ごろに設定されるが、今回は試験用に 18:25 にリセットするよう設定した。

はじめに、受信器から RY1 に対し RY2 の異常復旧指令を送る。RY1 は RY2 が応答するまで最大 10 分間異常復旧のために宛先指定応答要求 GOLAY コードを送信する。その結果、約 2 分後に RY2 が応答した。その際、RY1 から正常な時刻が RY2 に送信され、この時点で RY2 の時計が回復する。しかしながら、5 分毎のタイマは本試験の場合 18:25 にリセットされるため、それまでは省電力受信回路の受信待機時刻はずれたままである。18:25 に 5 分間タイマがリセットされ、中継器の内部時計および省電力受信回路の 5 分間タイマ共に正常な時刻に復旧することが確認できた。

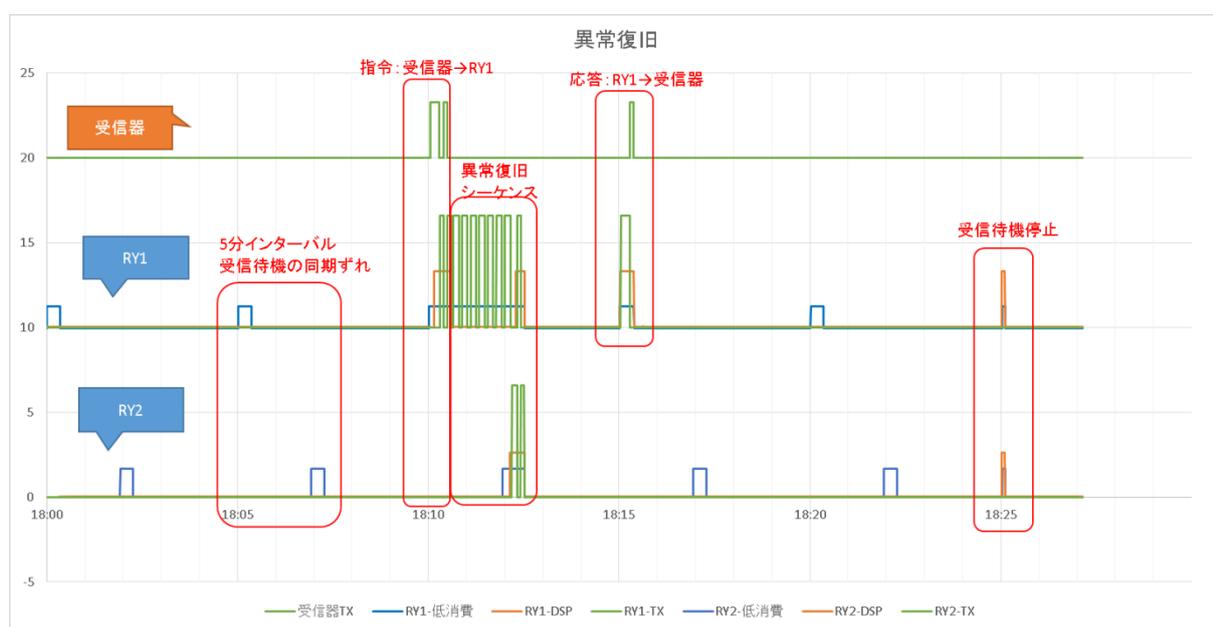


図 2.2.4-27 同期異常復旧試験結果

4) 系統変更試験

系統変更試験の試験構成を図 2.2.4-28 に示す。2 台の小型送信器は、中継器 RY1 および RY2 の通信圏内に存在する。通常は RY1 を経由して受信器にデータを中継するように設定して運用しているが、ここで、RY1 に不具合が発生したと仮定し、RY2 に系統を引き継ぐように系統変更の指令を行い、その動作の確認を行った。

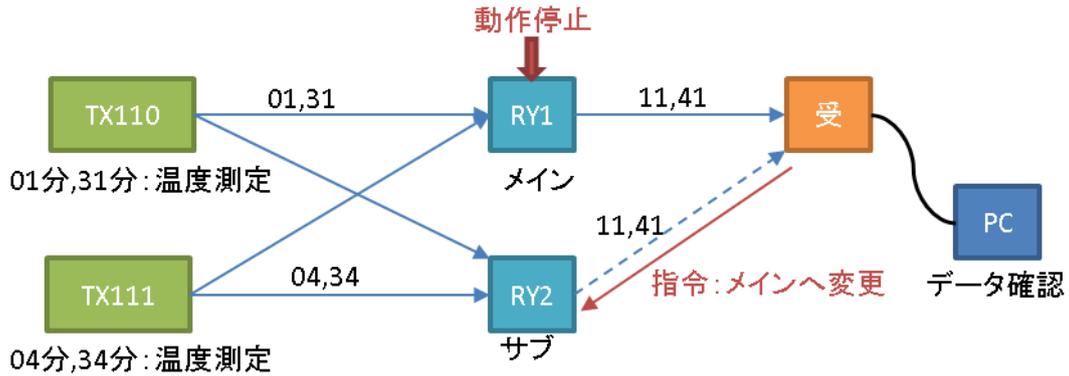


図 2.2.4-28 系統変更試験構成

系統変更前の動作状況を図 2.2.4-29 に示す。RY1 および RY2 の両方で小型送信器 TX110 と TX111 の定期通信を受信している。受信したデータは RY1 のみが上位の機器（受信器）に中継通信している。

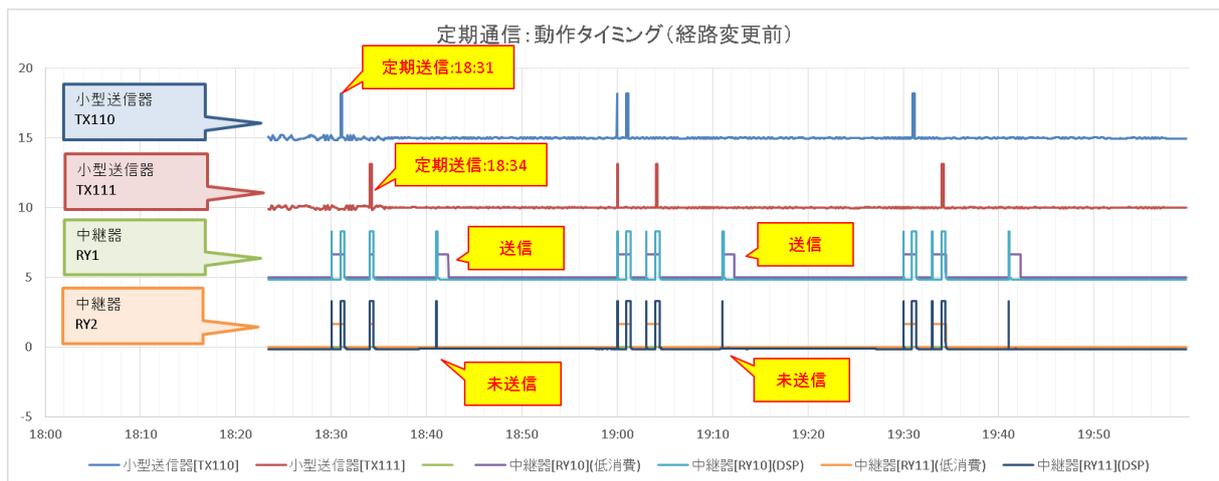


図 2.2.4-29 経路変更前の状況

この後、RY1 の電源供給を停止して故障を模擬した後、RY2 に対して系統変更の指令を行った。変更後の状況を図 2.2.4-30 に示す。RY1 の動作が停止して全く動いていない状況が分かる。また、RY1 が本来データの中継する時刻に、RY2 が受信器に対してデータを伝送している様子が確認できた。

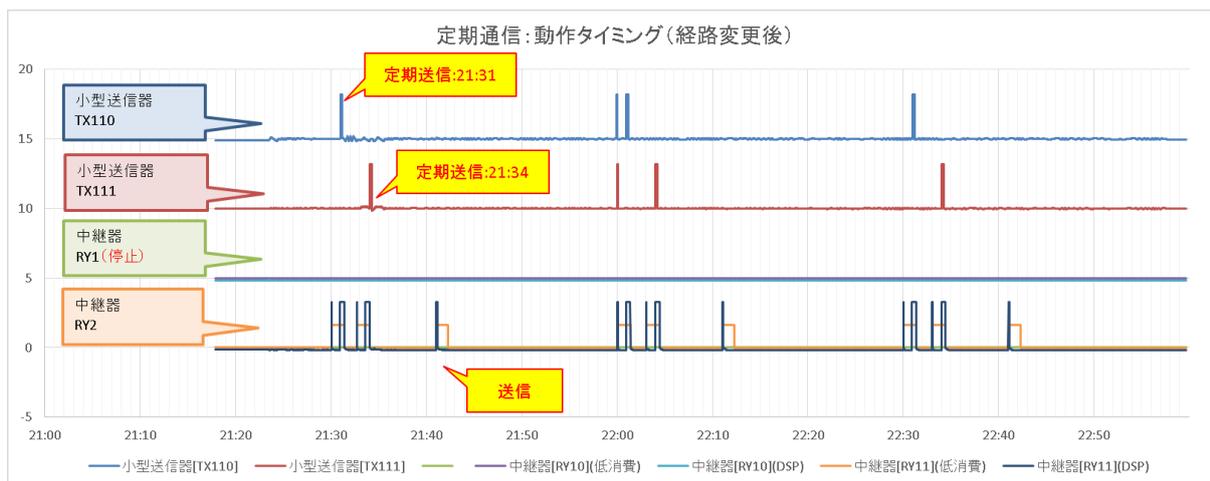


図 2.2.4-30 経路変更後の状況

(7) 屋外での通信試験

1) 試験方法

開発した中継装置を使用して、実際に小型送信器の定期送信データの中継装置で中継し、受信器に受信できることを確認した。試験の模式図を図 2.2.4-31 に、試験に使用した機器を図 2.2.4-32 に示す。屋外通信試験では、小型送信器から送信されたデータを 2 台の中継器で中継し、受信器で受信した。なお、小型送信器の通信能力と比較検討するために、中継器 2 台目ー受信期間距離を変化させ、通信距離に対する受信レベルの特性を測定した。

図 2.2.4-33 は、試験状況である。小型送信器は、測定したデータを 10 分に 1 回、毎 2 分（2 分、12 分、22 分、32 分、42 分、52 分）に中継器 1 台目に送信する。中継器 1 台目は受信したデータを 10 分に 1 回、毎 4 分（4 分、14 分、24 分、34 分、44 分、54 分）に送信する。中継器 2 台目は 10 分に 1 回、毎 9 分（9 分、19 分、29 分、39 分、49 分、59 分）に送信する。受信器は常時起動させておき、中継器 2 台目からのデータを受信した。

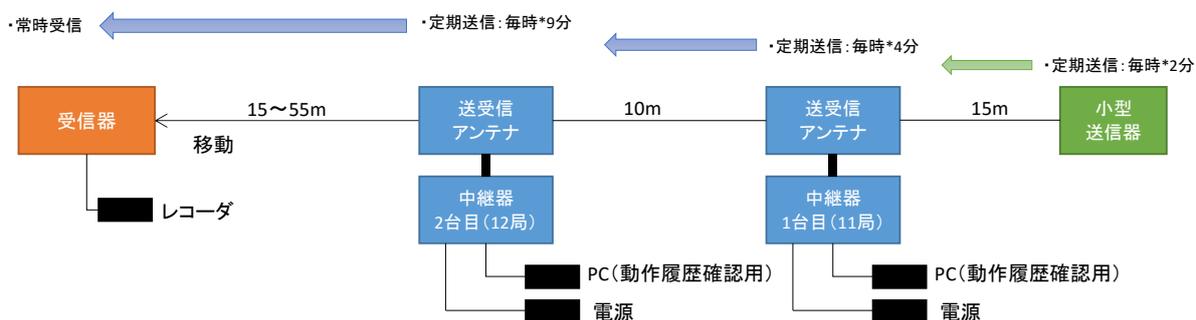
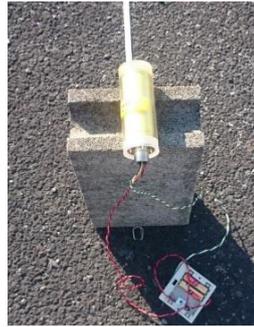


図 2.2.4-31 屋外通信試験構成



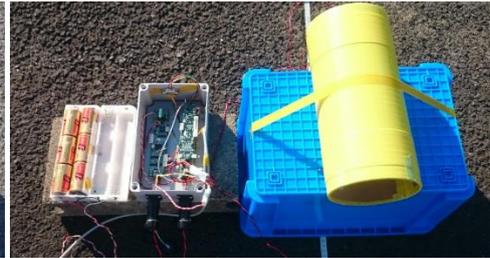
受信器



小型送信器



中継器 2 台目 (12 局)



中継器 2 台目 (11 局)

図 2.2.4-32 試験に用いた各機器

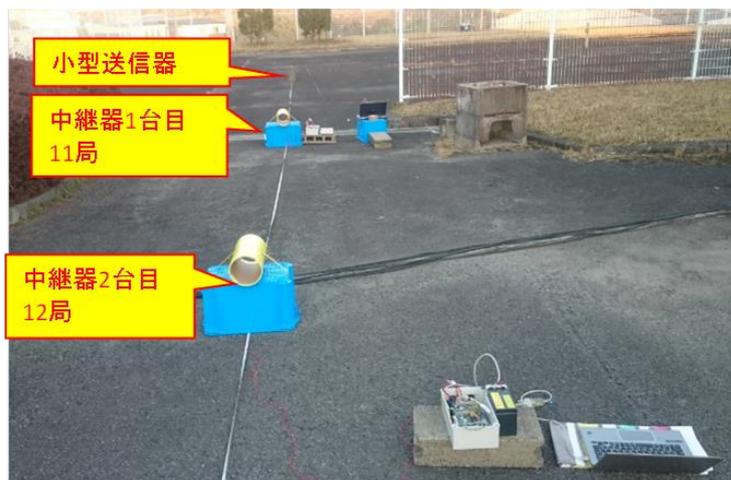
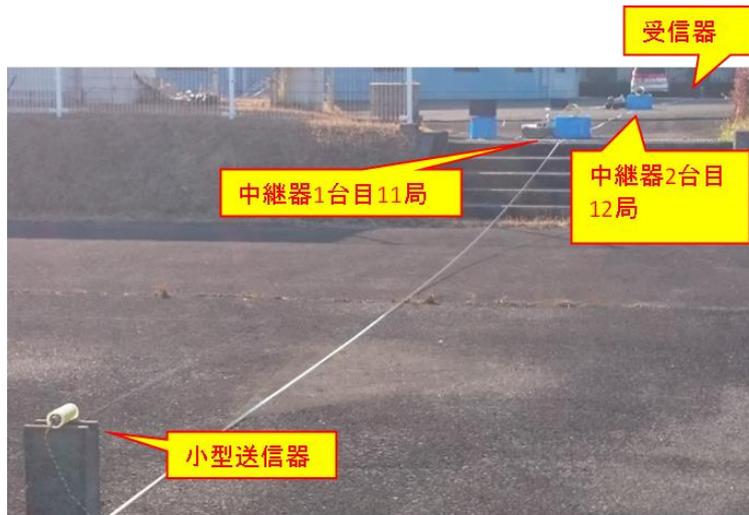


図 2.2.4-33 屋外通信試験状況

2) 試験結果

屋外試験は、約 1 時間の間に 7 回実施した。その際、受信器の位置を変化させ、小型送信器—受信期間距離を 40m から 80m に、すなわち中継器 2 台目—受信器間距離を 15m から 55m に変化させて、それぞれの距離における受信レベルを測定した。試験結果を表 2.2.4-7 に示す。小型送信器から送られたデータは、全て受信器まで中継できたことが確認できる。通信距離は、最大 80m で問題なく通信できた。また、小型送信器と比較し、概ね 100 倍の出力、通信距離で約 4.5 倍の通信能力が確認された。本通信能力であれば、ノイズレベルが 3mVrms 程度であれば 100m 程度の通信距離が得られることになる。

表 2.2.4-7 屋外通信試験結果

時刻	小型送信器	中継器 11局	中継器 12局	ポータブル受信器	
				位置	送受信
15:32	定期送信	受信成功		40	
15:34		定期送信	受信成功	40	受信成功
15:39			定期送信	40	受信成功
15:42	定期送信	受信成功		45	
15:44		定期送信	受信成功	45	受信成功
15:49			定期送信	45	受信成功
15:52	定期送信	受信成功		50	
15:54		定期送信	受信成功	50	受信成功
15:59			定期送信	50	受信成功
16:02	定期送信	受信成功		55	
16:04		定期送信	受信成功	55	受信成功
16:09			定期送信	55	受信成功
16:12	定期送信	受信成功		65	
16:14		定期送信	受信成功	65	受信成功
16:19			定期送信	65	受信成功
16:22	定期送信	受信成功		75	
16:24		定期送信	受信成功	75	受信成功
16:29			定期送信	75	受信成功
16:32	定期送信	受信成功		80	
16:34		定期送信	受信成功	80	受信成功
16:39			定期送信	80	受信成功

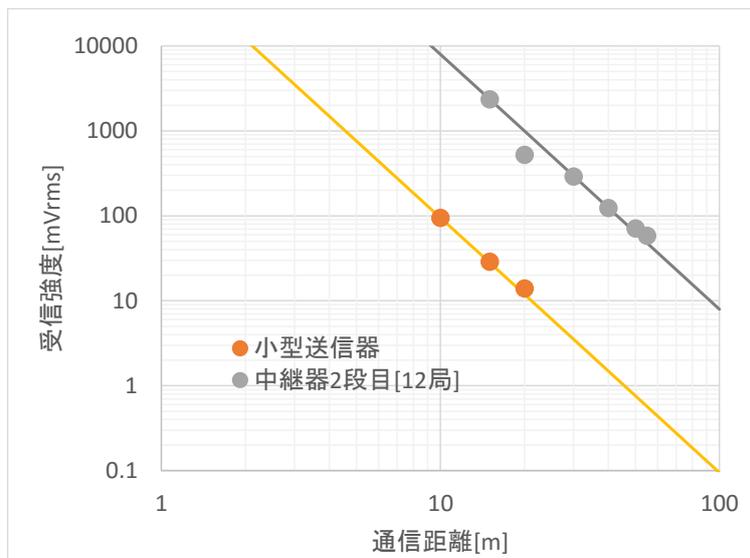


図 2.2.4-34 中継器と小型送信器の通信能力比較

2.2.5 地下調査施設における地中無線通信試験

平成 26 年度から、幌延深地層研究センターおよび東濃地科学センターの地下調査坑道にて、地下環境での地中無線伝送試験を実施している。それぞれの試験における地中無線システムの動作状況を述べる。

(1) 幌延深地層研究センター：人工バリア性能試験への適用

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 年度にセンサ付きの小型送信器を緩衝材ブロック（土圧計 1 台、間隙水圧計 2 台）と埋戻し材ブロック（土圧計 2 台、間隙水圧計 2 台）にそれぞれ設置した。

1) センサ諸元

表 2.2.5-1～表 2.2.5-3 に、計測センサの諸元を示す。

表 2.2.5-1 計測センサ諸元（002 局、004 局、005 局、008 局）

種類	間隙水圧計
メーカー	Geokon 社（米）
型式	Model 4500SH-3-3MPa
測定範囲	3MPa
精度	0.5%F.S.
材質	SUS316
サイズ	径 25.5 mm、長さ 194mm

表 2.2.5-2 計測センサ諸元（003 局、006 局）

種類	全圧計（土圧）
メーカー	Geokon 社（米）
型式	Model 4800-1X-3MPa
測定範囲	3MPa
精度	-
材質	SUS316
サイズ	受圧部：径 76.2 mm、長さ 17.9mm

表 2.2.5-3 計測センサ諸元（007 局）

種類	全圧計（土圧）
メーカー	Geokon 社（米）
型式	Model 4800-1X-3MPa
測定範囲	3MPa
精度	0.5%F.S.
材質	SUS316
サイズ	受圧部：径 100mm 変換部：径 25.4 mm、長さ 139.7mm

2) 設置位置

緩衝材ブロックの11段目に小型送信器を3台設置した。図 2.2.5-1 に小型送信器の設置状況を示す。002 局はケイ砂中の間隙水圧、003 局は緩衝材の土圧、004 局は緩衝材中の間隙水圧を計測する目的で設置した。



図 2.2.5-1 緩衝材ブロックへの小型送信器の設置状況

埋戻し材ブロック中には小型送信器を4台設置した。図 2.2.5-2 にセンサ付き小型送信器の設置状況を示す。埋戻し材へは土圧計と間隙水圧計を一組（005 局と 006 局、007 局と 008 局）として、2カ所に設置した。



図 2.2.5-2 埋戻し材ブロックへの地中無線送信装置及びセンサの設置状況

3) 計測結果（緩衝材ブロック）

緩衝材ブロック中に設置したセンサが計測し、小型送信器が伝送した計測値の経時変化を図 2.2.5-3～図 2.2.5-5 に示す。横軸は受信器設置時からの経過時間（日）を示している。センサのフルスケールに対して計測値が小さいためか、圧力については計測期間中での大きな変化は確認出来ない。一方温度については中心部の模擬オーバーパックの加熱に伴う温度上昇を捉えてる。

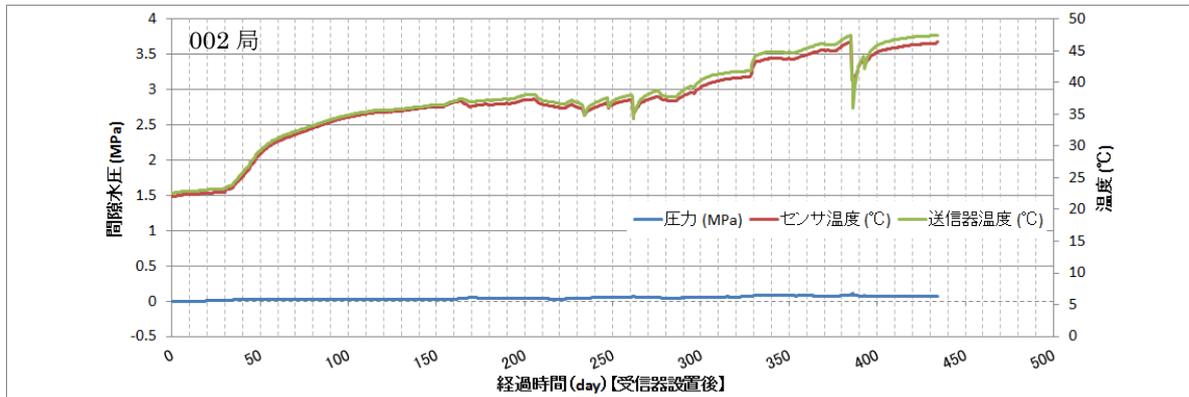


図 2.2.5-3 ケイ砂中の間隙水圧（002局）

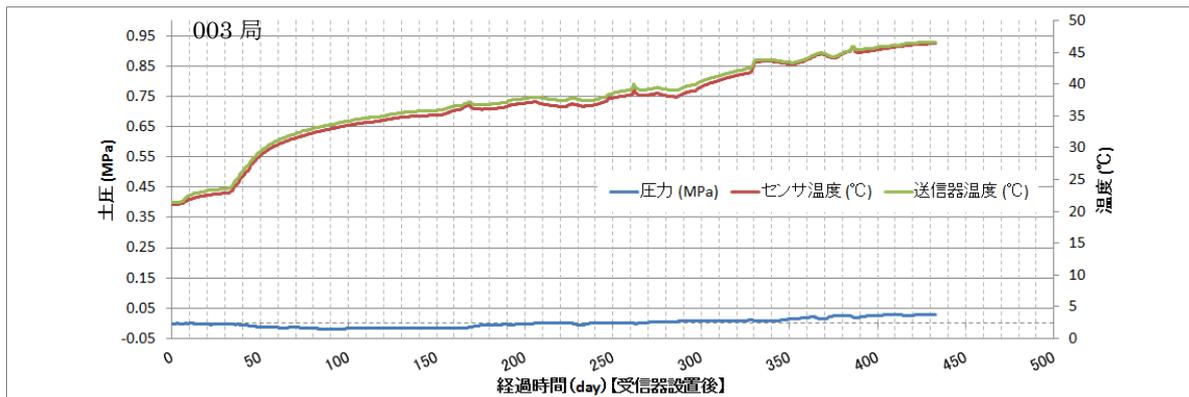


図 2.2.5-4 緩衝材の全圧（003局）

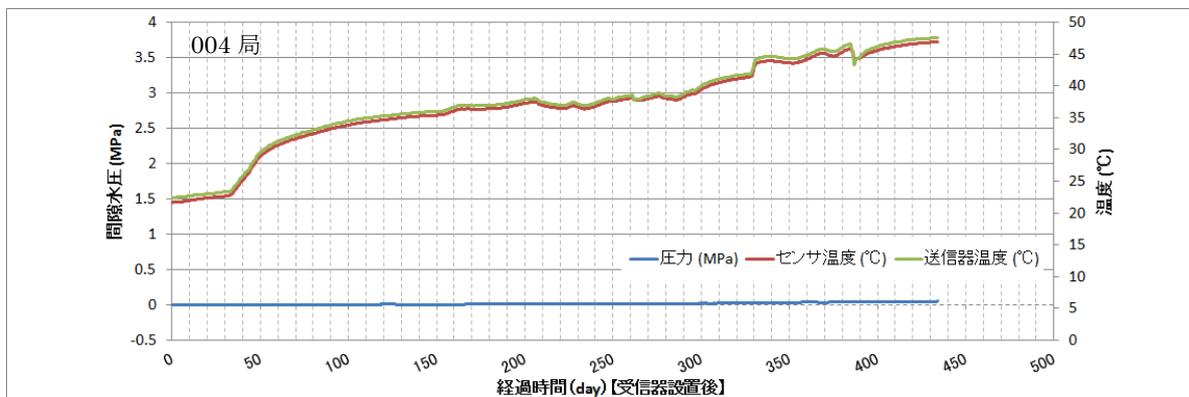


図 2.2.5-5 緩衝材中の間隙水圧（004局）

4) 計測結果（埋戻し材ブロック）

埋戻し材ブロック中に設置したセンサが計測し、小型送信器が伝送した計測値の経時変化を示す。埋戻し材中の圧力についてもセンサのフルスケールに対して計測値が小さいためか、圧力については計測期間中での大きな変化は確認出来ない。温度については熱源の模擬オーバーパックから距離があるため、緩衝材中ほど温度の上昇は見られない。また試験坑道4内で上に位置する007局と008局の方が模擬オーバーパックからの距離があるため、僅かではあるが低い温度を示した。

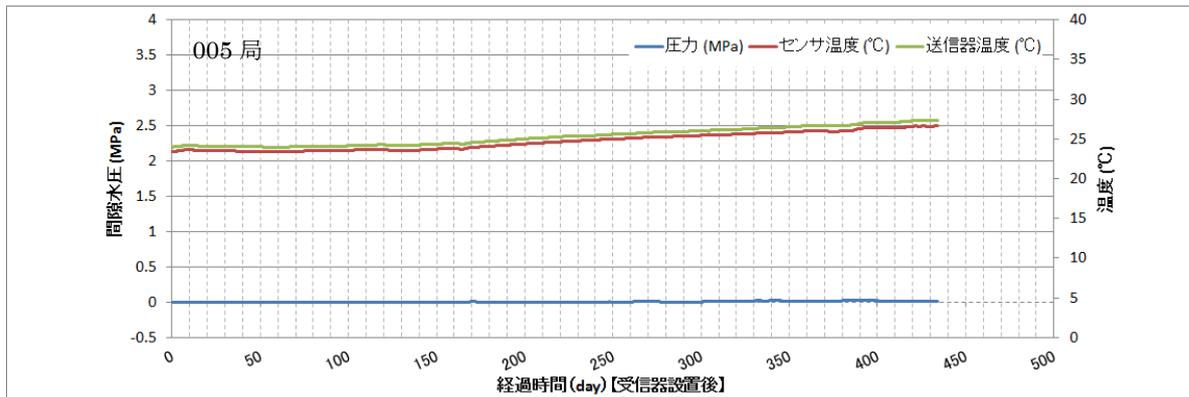


図 2.2.5-6 埋戻し材中の間隙水圧（005局）

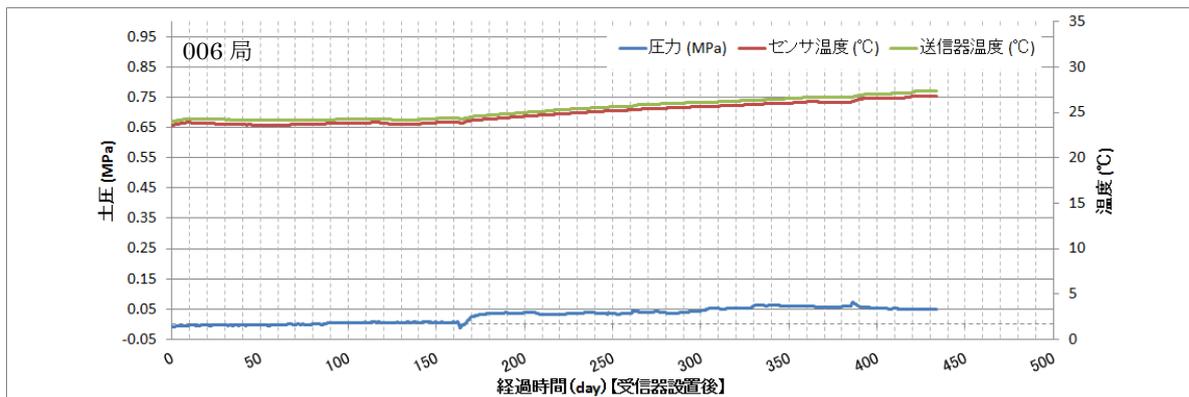


図 2.2.5-7 埋戻し材中の全圧（006局）

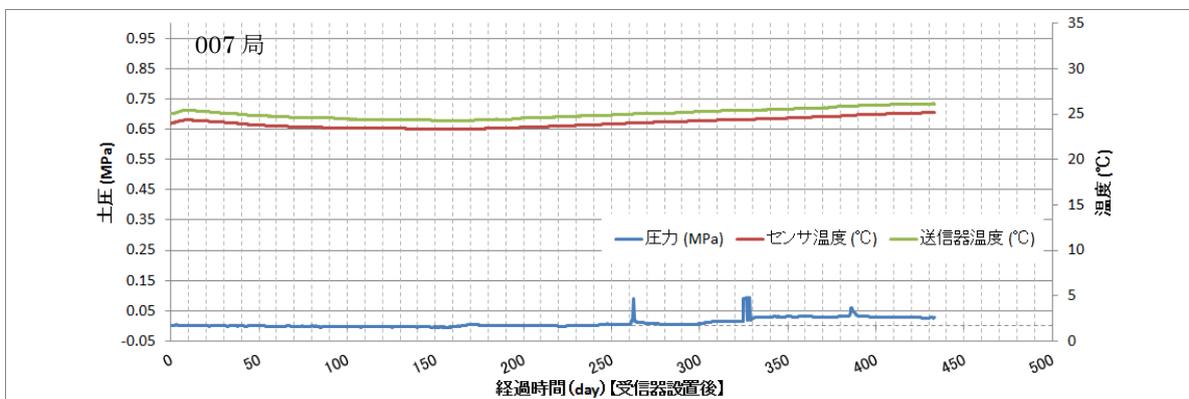


図 2.2.5-8 埋戻し材中の間隙水圧（007局）

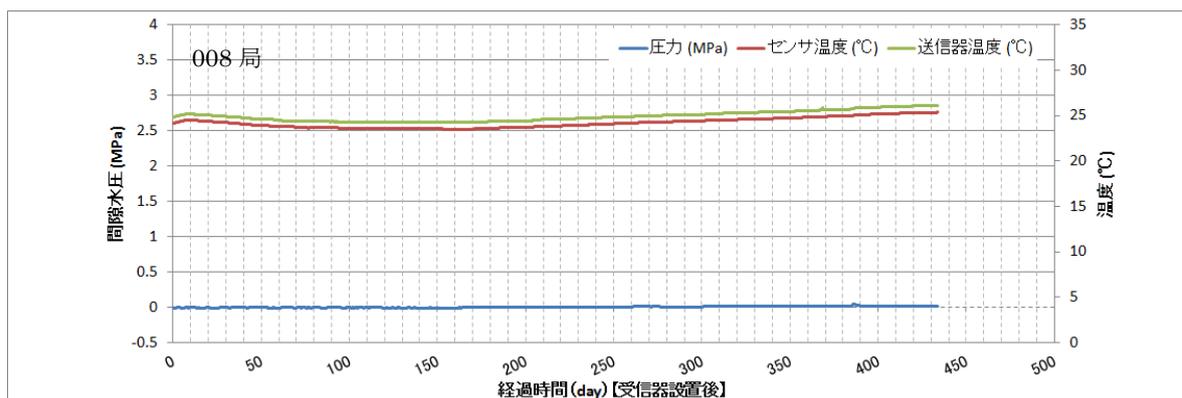


図 2.2.5-9 埋戻し材中の全圧 (008 局)

緩衝材ブロック、埋戻し材ブロック内に設置した各小型送信器からのデータを分析した結果、所定の頻度 (2 回/日) で計測が行われており、また定時のデータ送信を動作しており、小型送信器は正常に動作していることを確認した。

一方で、装置の設置後、約 1.5 か月を経過したところから通信障害による一部の計測データの欠損が確認された。通信障害の発生頻度は、2 回の通信で 1 回程度であり、測定した週のデータ収録率は 80%である。通信障害の発生原因は、ノイズレベル上昇に伴う SN 比の低下と推定される。したがって、対応策としては、①受信アンテナを孔口に近づける (受信レベルの上昇が期待できる)、②坑道内の機械類や動力線などのノイズ源の配置位置を変更する、の 2 つが挙げられる。ただし、本システムでは、毎週の定期送信で過去 4 週分のデータを重複して送信しているため、通信障害によるデータ欠損が生じて、4 週以内に受信ができれば欠損データは自動的に補完される。現状、4 週以内のデータ復元率は 100%であるため、上記の対応策①②については、必要ないと考えている。

今年度はセンサや小型送信器が正常に動作していることの確認に留まっているが、原子力機構が有線で取得している他の計測データと合わせ、人工バリア材料の性能確認における無線伝送技術の利点や運用上の改善点等を抽出、整理して必要がある。

(2) 東濃地科学研究センター：冠水試験への適用

瑞浪超深地層研究所の地下 500m 研究アクセス北坑道で実施され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) を実施するため、平成 26 年度、坑内に装置類の設置作業を行った。

1) 小型送信器の設定変更

本年度は地中無線を利用したモニタリングの適用性を検証するため、地中無線の送受信間距離と受信レベルの関係調査を目的として、昨年度坑道内に設置した 2 台 (011 局と 012 局) の内、1 台 (012 局) の設置場所と動作スケジュールの変更を行った。

まず 012 局の設置場所を、止水プラグから 1.1 m、高さ 1.3 m に変更した。011 局の設置場所は、平成 26 年度の位置から変更していない。011 局、012 局と受信アンテナ間の送受信距離は、それぞれ 8.3 m、3.6 m となった。図 2.2.5-10 に地中無線モニタリング装置の設置場所の全体図

(平面図)、図 2.2.5-11 に装置の設置場所、及び設置高さの模式図(縦断図)を示す。図 2.2.5-12 に送信器の設置状況を示す。

次に 012 局の測定間隔を 12 時間毎(0 時と 12 時)として、測定回数を増やした。また、データの確認頻度も増やすために、通信も一週間に 2 回(火曜日と木曜日)とした(図 2.2.5-13)。なお、小型送信器に取り付けた水圧センサの諸元を表 2.2.5-4 に示す。

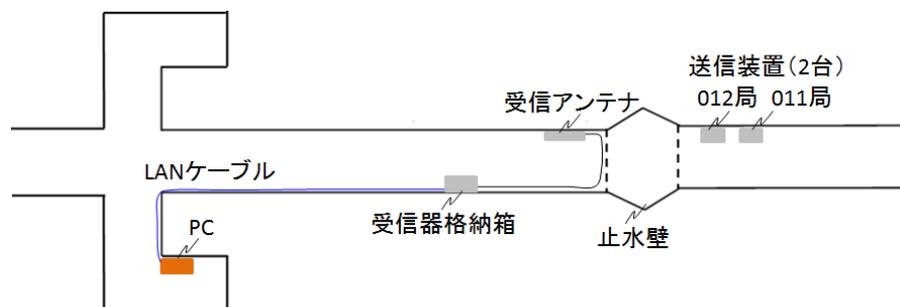


図 2.2.5-10 地中無線モニタリング装置の設置場所の全体図(平面図)

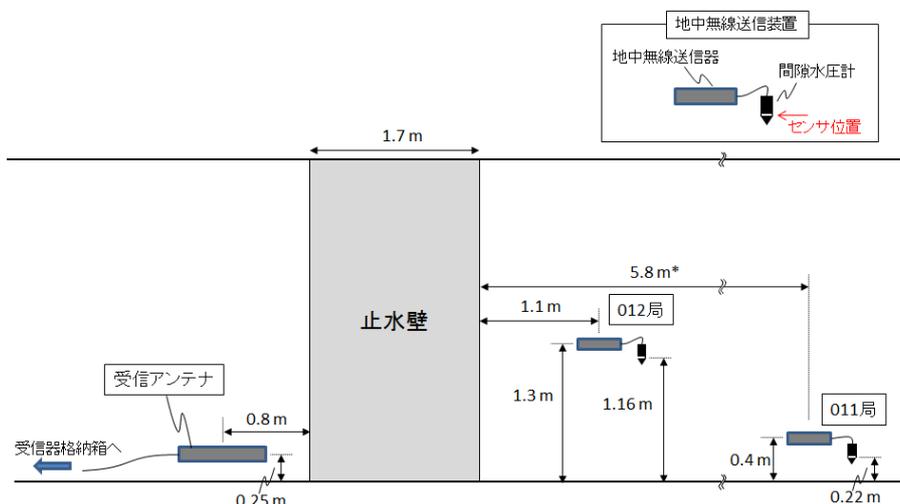


図 2.2.5-11 装置の設置場所、及び設置高さの模式図(縦断図)



図 2.2.5-12 送信器の設置状況

011局		012局		PCデータ 回収時刻
計測時刻	通信時刻	計測時刻	通信時刻	
毎日	毎日	毎日	毎週火曜日	毎日
0:00	14:30	12:00	15:30	14:50
2:00				15:50
4:00				
6:00				
8:00				
10:00				
12:00				
14:00				
16:00				
18:00				
20:00				
22:00				



011局		012局		PCデータ 回収時刻
計測時刻	通信時刻	計測時刻	通信時刻	
毎日	毎日	毎日	毎週火、木曜日	毎日
0:00	14:30	0:00	15:30	14:50
2:00		12:00		15:50
4:00				
6:00				
8:00				
10:00				
12:00				
14:00				
16:00				
18:00				
20:00				
22:00				

図 2.2.5-13 012局の変更後の動作スケジュール（右：変更前、左：変更後）

表 2.2.5-4 計測センサ諸元

種類	間隙水圧計
メーカー	坂田電機
型式	EPP-5850
測定範囲	5MPa
精度	0.5%F.S.
サイズ	約 35mm×150mm

2) 計測結果（受信強度）

012局の再設置後、011局、012局それぞれからの定期送信を確認した。確認作業は、受信器本体にレベルメータとサーマル（記録機）を接続して行った（図 2.2.5-14）。

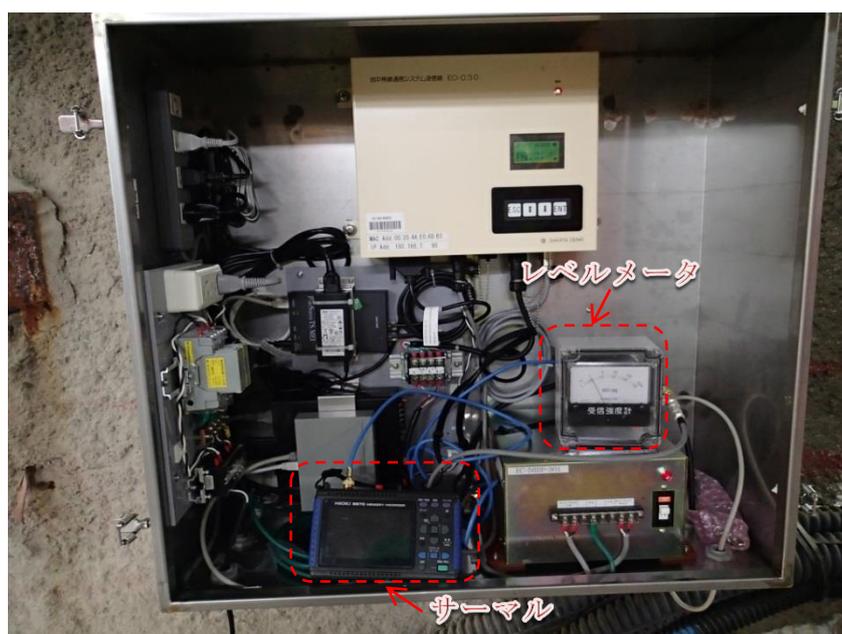


図 2.2.5-14 定期送信確認状況（レベルメータ・サーマル接続）

定期送信の受信結果を図 2.2.5-15、表 2.2.5-5 に示す。試験当時の坑内のノイズレベルは 1.2 mVrms に対し、定期送信の受信レベルは、011 局で 74.2 mVrms (SN 比 61.8)、012 局で 501.6 mVrms (SN 比 418) であった。

図 2.2.5-16 に発受信間距離と受信レベルの関係を示す。小型送信器は工場出荷検査として、地上にて周囲に鋼製部材等がない大気環境下で受信レベルを確認している。送受信間距離 10m、送信器と受信アンテナを対面するようにセットして同様の計測を行ったところ、011 局が 70mVrms、012 局が 60mVrms であった。伝搬経路の媒質が大気で電磁波の伝搬を乱すものが無い出荷検査と比べ、地下坑道での受信レベルは半分以下に減衰していることを確認した。図中の直線は、均一な岩盤中における電磁界が距離の三乗に反比例して減衰する、理論的な距離減衰曲線を示している。地下坑内での計測結果は 012 局の受信レベルを基準に理論曲線を描いている。この理論曲線と 011 局の受信レベルは、オーダー的には一致しているものの、理論値の方が小さな値となっている。その理由として、坑道内の鋼製部材、止水壁の影響のほか、アンテナの設置高さの違いが考えられる。受信アンテナの設置高さは 0.25m に対し、011 局は 0.4m、012 局は 1.3m であり、受信アンテナと 012 局の高さの差が約 1m あり、その分、受信レベルが減衰した可能性がある。

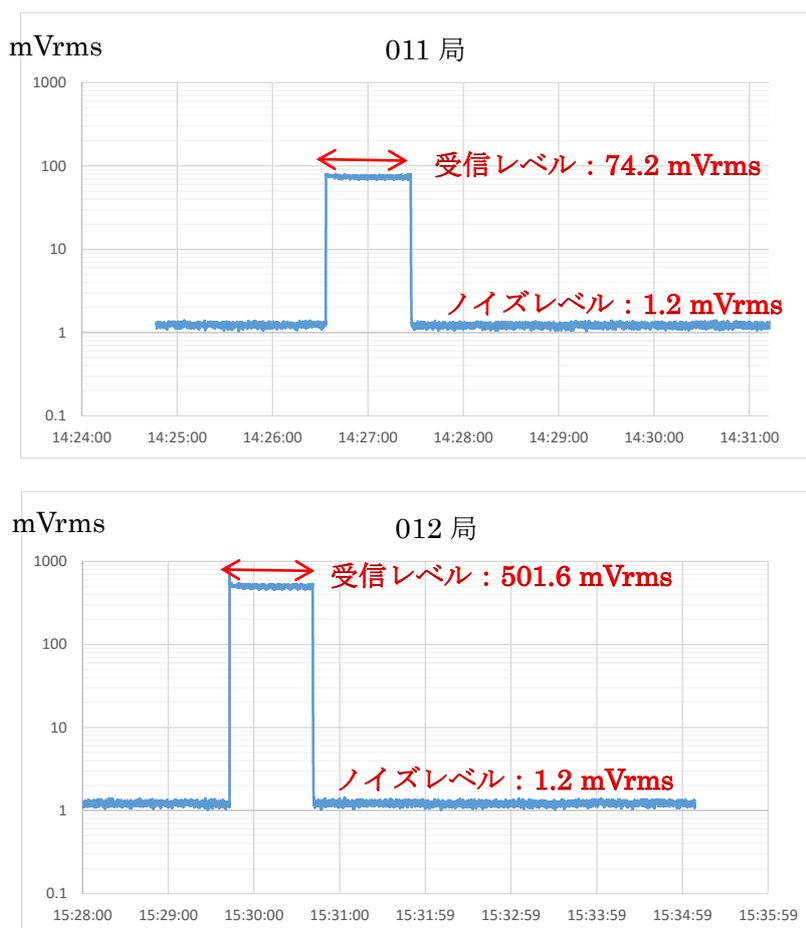


図 2.2.5-15 定期送信の受信結果
(上 : 011 局 (通信距離 3.6m)、下 : 012 局 (通信距離 8.3m))

表 2.2.5-5 定期送信の受信レベル

	定期送信（坑内設置後）			大気中での計測（工場出荷時）	
	発受信間距離 (m)	ノイズレベル (mVrms)	受信レベル (mVrms)	発受信間距離 (m)	受信レベル (mVrms) *
012 局	3.6	1.2	501.6	10	60
011 局	8.3	1.2	74.2	10	70

*受信レベルは、10 mV 刻みの読み値。

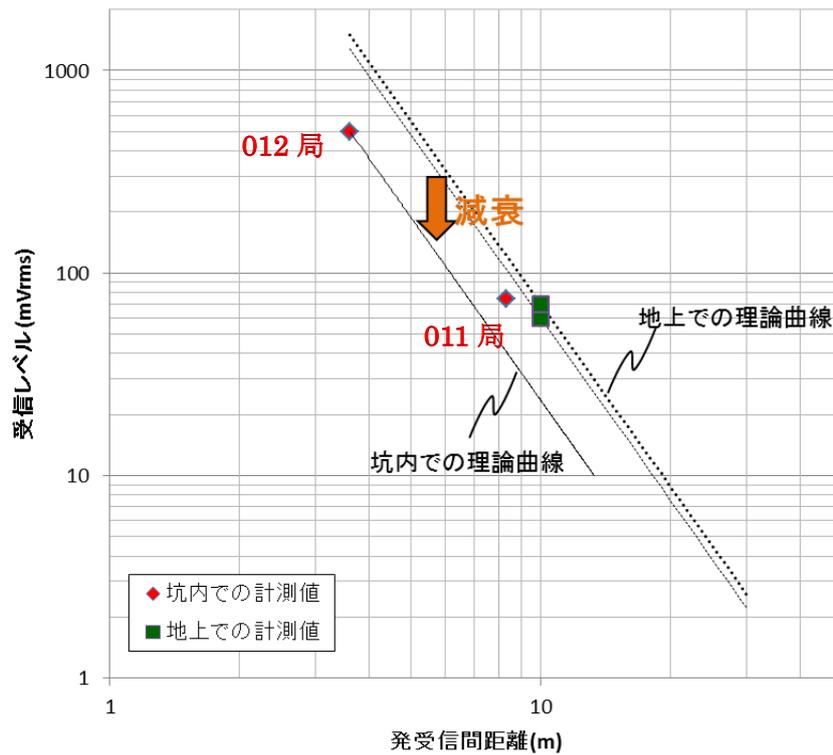


図 2.2.5-16 受信レベルの距離減衰特性

図 2.2.5-17 に水圧の経時変化を示す。設置後から、正常に通信が行われ、データ取得できていることを確認した。瑞浪での計測についても、原子力機構が別途有線計測しているす相次データと比較して、無線による通信の適用性について評価を進める予定である。

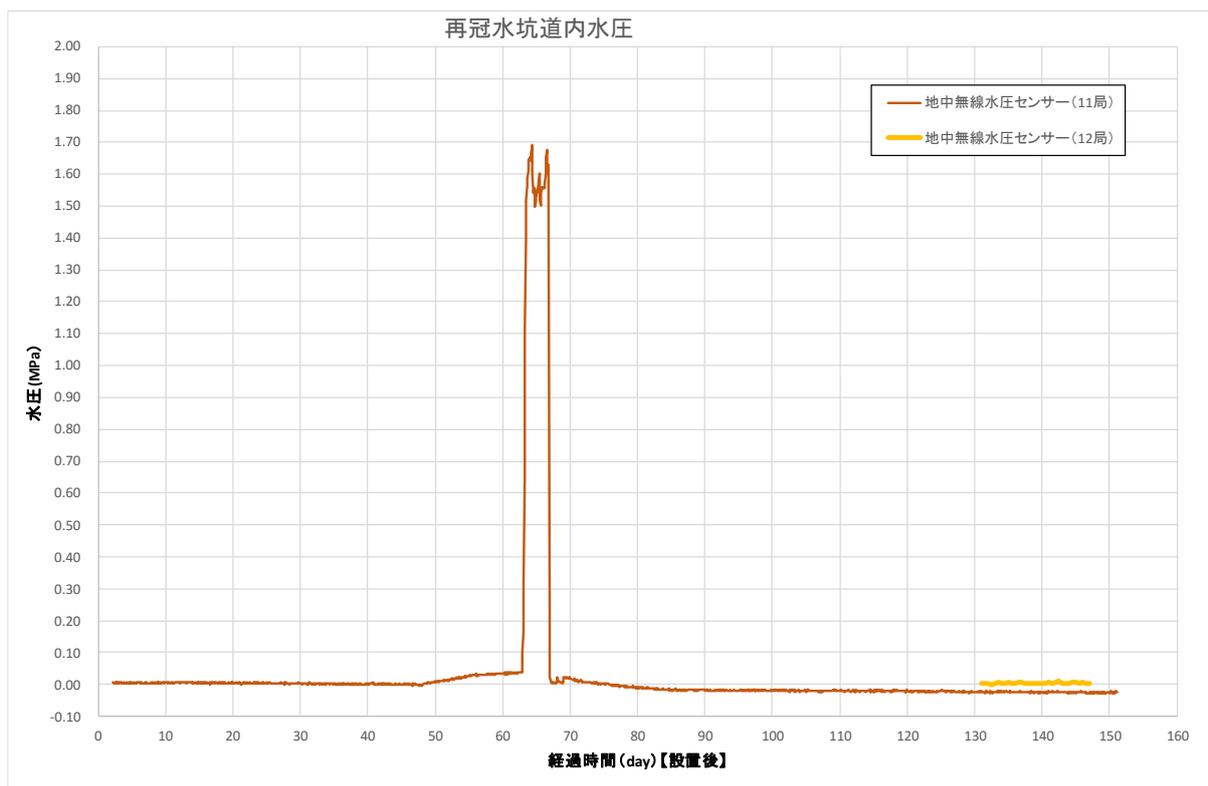


図 2.2.5-17 水圧の経時変化

2.2.6 まとめ

地中無線の冗長化を図る上で、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、複数のほうが、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、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。

各回路および各プログラムに関しては、昨年度の開発課題および検討結果をもとに詳細設計およびプログラムの開発を行った。その結果、省電力回路、省電力動作シーケンスのプログラム、単方向小型送信器の時計同期プログラム、RTC の高精度化、マルチホップシーケンスのプログラム、各種想定した異常事態の復旧における回路とプログラムおよび手順について詳細設計及び開発を行い、回路を実際の基板として製造し各種電子部品を実装して動作の確認を行った。その結果、省電力受信回路の効果は非常に大きく省電力化に貢献できることを確認した。また、RTC の高精度化、単方向小型送信器の通信同期、省電力受信回路の通信、定期送信の中継動作、異常復旧時の指令通信や系統変更、時計同期復旧、WDT の動作について、実際に動作試験を行うことで、機能することを確認した。

URL 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。

2.3 非接触による電力供給に関する検討

2.3.1 目的

前項では無線による計測値の伝送技術についての検討を述べた。小型送信器や中継器にはセンサ、データ処理、次段への伝送などの機器や電気回路を駆動させるための動力として、電池を内蔵している。この電池の容量は、センサの計測頻度やデータ送受信頻度で算出される消費電力に期待する運用期間を掛け合わせた必要容量に、電池自体の自己放電等の劣化による容量低下を考慮して設定している。容量は電池自体の大きさに関係するため、機器の設置場所によっては制限がある。そのため現状で小型送信器に取り付け可能なセンサは、振動弦、差動トランス、摺動抵抗などの消費電力が少ない動作原理のものに限られており、計測可能なパラメータとしては変位や圧力などが主体である。電源に係わるこれらの課題が改善されれば、ケーブルの擾乱を低減した計測値の取得、計測パラメータの多様化による計測対象の挙動評価の信頼性向上に繋がる。

このように、ケーブルを用いない計測技術において計測対象や使用可能なセンサ類の選定上の制約条件となる電源について、平成 26 年度より放射性同位体熱電気変換器 (RTG : Radioisotope thermoelectric generator) や非接触による給電等の技術の調査を開始した。本節ではこれらのうち、ケーブルを用いない非接触方式の給電の適用性についての検討結果を述べる。

2.3.2 調査研究の計画の見直し

地層処分事業での評価対象の計測において、非接触方式による給電の検討を行う上で考慮すべき項目を整理し、調査研究の年度計画の見直しを行った。(1)で項目を整理し、(2)~(6)にて各項目の具体化、(7)に更新した計画を示す。

(1) 検討で考慮すべき項目の整理

非接触方式による給電技術の平成 26 年度までの成果踏まえ、課題を以下のように整理した。

- ・非接触による給電技術の分類
- ・送受電機器間の媒体の整理
- ・電磁界を用いた供給方式の選定
- ・送受電機器の主要素のコイルのパラメータの整理
- ・コイルの周波数依存性

(2) 非接触による給電技術の分類

給電技術を、接触／非接触、分類したものを表 2.3.2-1 に示す。

表 2.3.2-1 給電方式の分類（太線は本節での検討対象）

給電方式	非接触				接触	
給電方法	電磁界			電磁波	電流	
	磁界		電界		光、電波	導体
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	レーザー マイクロ波	ケーブル コネクタ

非接触による電力供給の仕組みは、電力（エネルギー）を送受電機器間にある媒体を伝達する形に変換して発信し、受信側で電力に再変換するものである。機器間の媒質を伝達するものとして、電磁波（レーザー、電波）、電磁界などがげられる。以下に、各方式の特徴を示す。

電磁誘導方式は近距離で小さな電力を伝送するのに適しており、電磁誘導方式は IC カード、IH 調理器などで用いられている。

電界結合方式は近距離で小さな電力を伝送するのに適しており、携帯電話やモバイル端末の充電に用いられている。

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

電波方式ではマイクロ波を使い長距離電力伝送が可能な方式である。高軌道（上空 36,000km）上の静止衛星での宇宙太陽光発電により得られた電力をマイクロ波に変換して地球上に伝送するシステムが検討されている。また、この技術を応用したマイクロ波方式による自動車の充電システムが開発されている。地層処分での媒質は岩盤や土であるため、減衰が激しい電磁波や光は適用出来ない。

(3) 送受電機器間の媒体の整理

非接触による電力供給を行いたい1次コイルと2次コイル間に存在し、電磁界の媒体となるものである。この媒体の物性を示す係数として誘電率 (ϵ) と透磁率 (μ) がある。地層処分事業で電磁界の媒体となりうるものを表 2.3.2-2 に示す。天然バリアである岩盤、人工バリアである緩衝材、その他の部材である埋戻し材、プラグや支保の構成部材であるコンクリートや鋼材が挙げられる。誘電率や透磁率は材料そのものだけではなく、鋼材であれば空間的な配置、粘土系材料やコンクリートであれば配合、密度、含水率等に影響を受ける。

表 2.3.2-2 地層処分事業でのコイル間の媒体と成り得るもの

媒体	部位
岩盤	坑道間
	-
人工バリア (緩衝材)	処分孔
	-
人工バリア (埋戻し材)	坑道内
	-
コンクリート	プラグ
	支保
鋼材	プラグ (鉄筋)
	支保 (H型钢)

本検討における、送受電機器の設置個所の具体例は、次節「2.3.3 無線給電における効率の理論限界」に示した。

(4) 電磁界を用いた給電方式の選定

非接触方式での給電技術の検討では、送受電機器間の距離や媒体での減衰が重要な課題となる。距離は給電の目的やそれに伴う設置個所から決まるものである。給電方式の原理の観点から給電方式ごとの媒体の影響を評価し、地層処分事業での給電に適した方式を選定した。

1) 電磁界共振結合方式

非接触による給電のうち、電磁界を用いた方式は磁界を用いた方式、電界を用いた方式に分類され、送受電器を共振状態にさせ給電効率を向上させた磁界共振結合（図 2.3.2-2）と電界共振結合（図 2.3.2-1）がある[1]。これら電磁界共振結合方式による給電技術は 2007 年に発表された技術であり[2]、電界共振結合は電界を用いてエネルギーを伝える方法である。

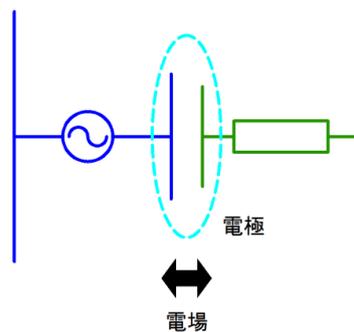


図 2.3.2-1 電界共振結合のイメージ

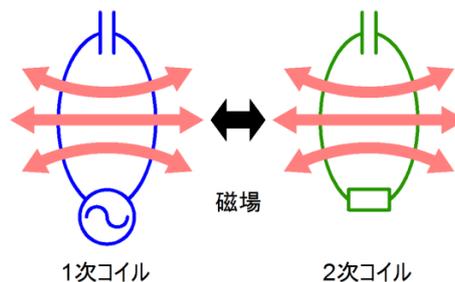


図 2.3.2-2 磁界共振結合のイメージ

2) 結合方式ごとの給電効率

電力を非接触で供給したい部位（媒体）における物性値として、誘電率（ ϵ ）と透磁率（ μ ）がある。電界結合、磁界結合の効率を比較する理論式上における2つの物性値の関係を示す。

a 電界結合

電束密度（ D ）は電場（ E ）と媒質の誘電率（ ϵ ）を用いて式 2-1 のように表される。 ϵ は真空中の誘電率（ ϵ_0 ）と媒体の比誘電率（ ϵ_r ）を用いて $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ と表される。

$$D = \epsilon E \quad \text{式 2-1}$$

交流での電場は

$$E = E_0 e^{j\omega t} \quad \text{式 2-2}$$

交流の電場では、電束が電場に対して位相の遅れを示す。位相が遅れたときのエネルギー損失を含んだ誘電率は複素量であり、式 2-3 のように表される。

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' + j\epsilon'' \quad \text{式 2-3}$$

ここで実数部（ ϵ' ）は外部電界からのエネルギーの蓄積量、虚数部（ ϵ'' ）は損失を表す指標である。

b 磁界結合

磁束密度（ B ）は磁場（ H ）と媒質の透磁率（ μ ）を用いて式 2-4 のように表される。 μ は真空中の透磁率（ μ_0 ）と媒体の比透磁率（ μ_r ）を用いて $\mu = \mu_0 \mu_r$ と表される。

$$B = \mu H \quad \text{式 2-4}$$

交流磁界は

$$H = H_0 e^{j\omega t} \quad \text{式 2-5}$$

磁界の変化に磁束の追従が出来なくなり、 δ だけ位相が遅れると B は

$$B = B_0 e^{j(\omega t - \delta)} \quad \text{式 2-6}$$

複素透磁率は

$$\dot{\mu} = \frac{B}{H} = \frac{B_0 e^{j(\omega t - \delta)}}{H_0 e^{j\omega t}} = \frac{B_0}{H_0} e^{-j\delta} = \frac{B_0}{H_0} (\cos \delta - j \sin \delta) = \mu' - j\mu'' \quad \text{式 2-7}$$

ここで実数部（ μ' ）は外部磁界からのエネルギーの蓄積量、虚数部（ μ'' ）は損失を表す指標である。

3) 結合方式ごとの効率の比較

長井ら[3]は、含水率 21% のベントナイトの複素誘電率、複素透磁率の虚数部の大小で両結合方式の効率を比較した。図 2.3.2-3 に複素誘電率、図 2.3.2-4 に複素透磁率の実部と虚部を周波数に対して示す。複素誘電率の結果より、ベントナイトを媒体として電場を発生させると、虚数部が実数部に対して大きくなり印加したエネルギーの大半が損失した。一方ベントナイトを媒体として磁場を発生させると、複素透磁率の虚数部は全周波数領域に対してほぼゼロとなり、損失がほとんど生じないことが分かった。

以上より、磁界結合方式を原理とすることとした。また、磁界結合方式に共振を加えた磁界共振結合方式が伝送効率の点からは優れているため、磁界共振結合方式を無線給電の原理として選定した。

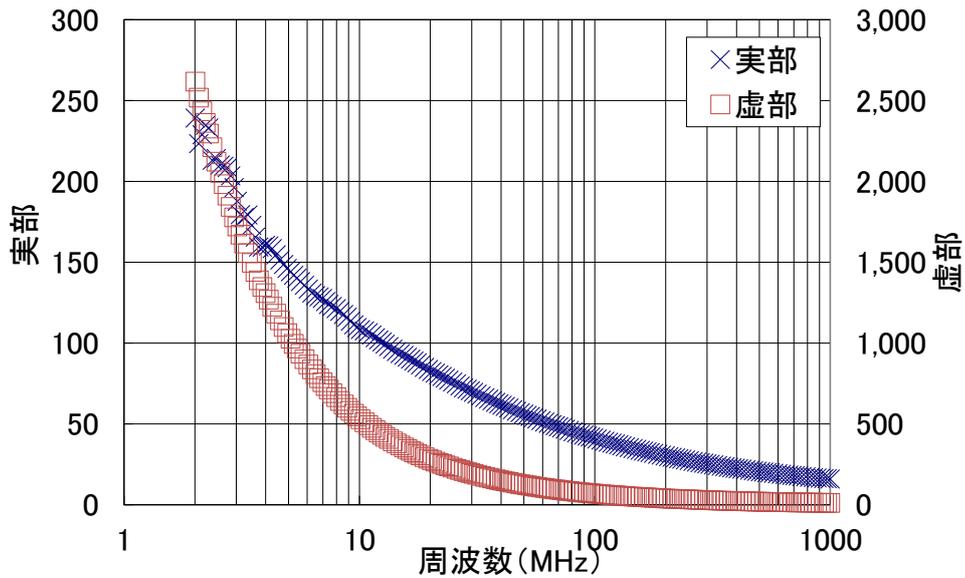


図 2.3.2-3 複素誘電率の実部と虚部

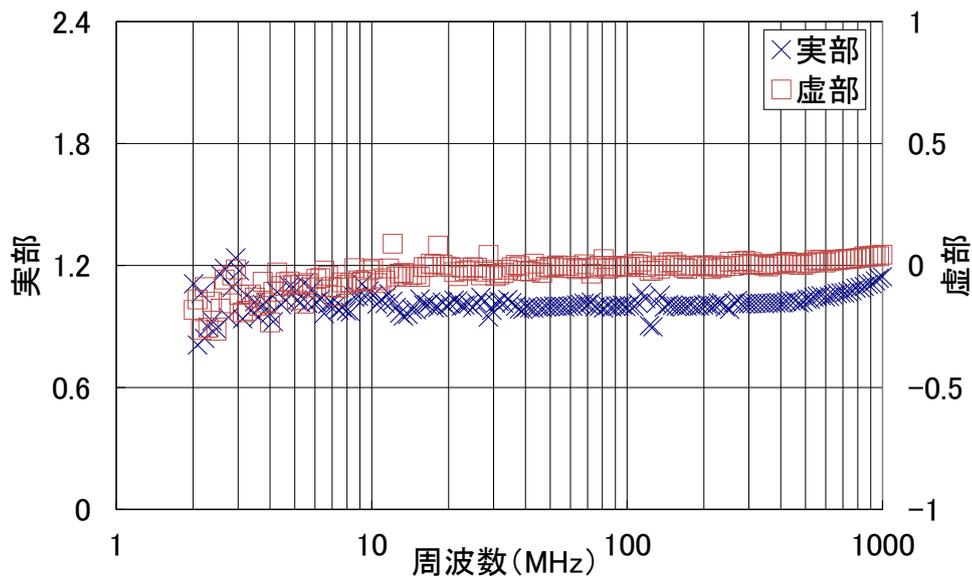


図 2.3.2-4 複素透磁率の実部と虚部

(5) 送受電機器の主要素のコイルのパラメータの整理

磁界共振結合による無線給電の大まかな原理は、送電側のコイル（1次コイル）から発した電磁界を受電側のコイル（2次コイル）で捉えて電力を送るものである。そのためコイルは無線給電の最も重要な構成要素である。コイルは巻線（被覆付きの良導電体）をらせん状に巻いたものである。コイルについてのパラメータを表 2.3.2-3 に示す。図 2.3.2-5 にソレノイドコイル、図 2.3.2-6 に円形コイルの各パラメータの関係を示す。また、1次コイルと2次コイルの関係でコイル中心を合わせて正対させた場合を図 2.3.2-7 に、コイル中心を偏心させた場合を図 2.3.2-8 に、コイル面を偏角させた場合を図 2.3.2-9 に示す。

表 2.3.2-3 コイルについてのパラメータ表

コイル半径(m)	a
コイル長(m)	l
コイル断面積(m ²)	S
巻線導体太さ(m)	α
巻線導体断面(m ²)	s
巻線導体の抵抗率(ohm·m)	ρ
巻数(巻)	N
コイル間距離(m)	G
偏心距離(m)	h
偏角(deg)	θ

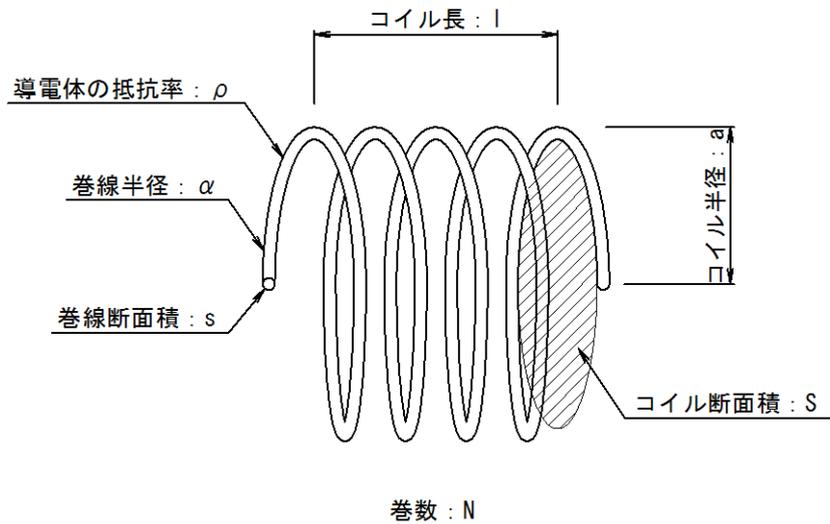


図 2.3.2-5 ソレノイドコイル単体の図

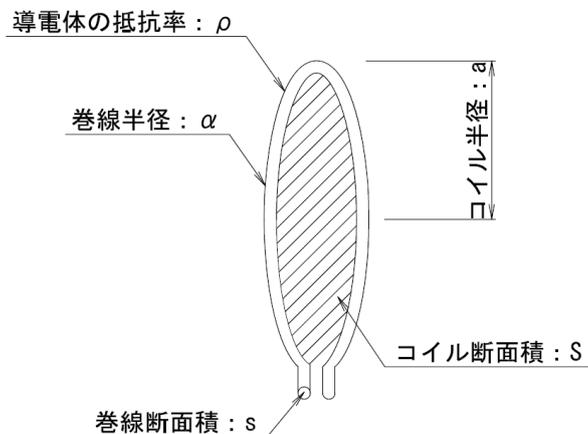


図 2.3.2-6 円形コイル単体の図

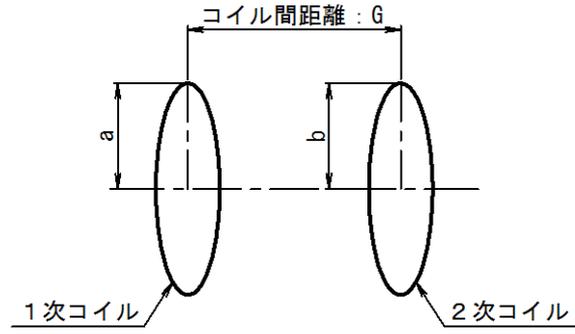


図 2.3.2-7 1次コイルと2次コイルの関係 (コイル中心合わせ)

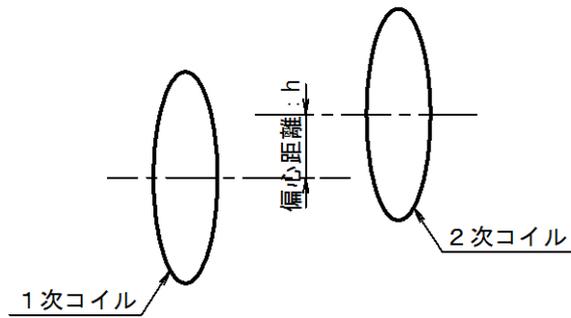


図 2.3.2-8 1次コイルと2次コイルの関係 (偏心した場合)

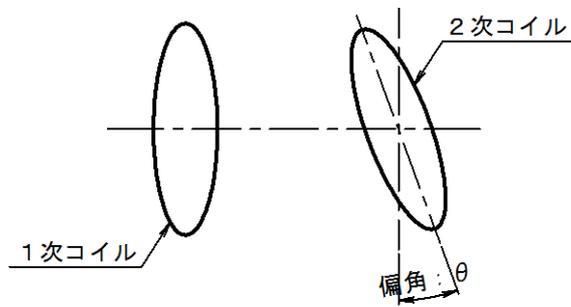


図 2.3.2-9 1次コイルと2次コイルの関係 (偏角した場合)

(6) 送信に使用する周波数

(2)で選定した磁界共振結合は、共振現象を利用するため図 2.3.2-10 のように電源の周波数、送電器の共振周波数、受電器の共振周波数の3つの周波数を一致させる必要がある。

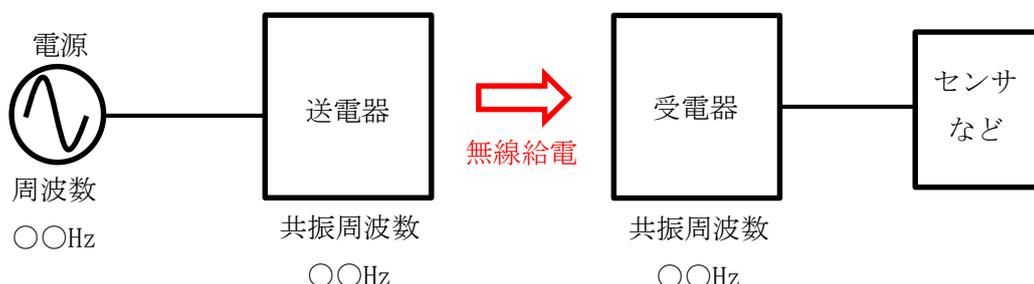


図 2.3.2-10 磁界共振結合のイメージ図

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 3-8 で示される。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{式 2-8}$$

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、1次コイルに交流を流すことにより磁束を発生させ、2次コイルでそれを受け取ることで、電力を送受電している。そのため、1次コイル2次コイルには交流を用いることになるが、以下に示すような現象により導体を流れる電流等が影響を受けるため、各パラメータへの影響を考慮する必要がある。

・表皮効果

コイル巻線導体に電流が流れたときに作られる磁界により導体自らが受ける影響で、導体断面に流れる電流密度が表面付近に集中するため、交流抵抗が増加する現象である。

・近接効果

近接効果はコイル巻線導体同士が近くに存在するため、巻線導体に流れる電流により生じた磁界が、近くの巻線導体に影響を及ぼすことで、交流抵抗が増加する現象である。

これらの効果により、コイルの抵抗成分(r)や自己インダクタンス(L)は周波数依存性を示す。これらの効果はコイルのパラメータから解析である程度推定することも可能だが、正確に取得するのは困難である。そのためには要素試験を実施による実測が有効である。

(7) 計画の更新

給電方式として磁界結合方式が効率の観点から有効であることを示した。現段階では必要となる場面や供給量が未定のため、具体的なコイル形状や設置方法について提示することが出来ない。一方、実際の地層処分事業での性能確認の計画を策定する際には、技術選定のために既存の技術の適用範囲や能力等示されている必要がある。

そこで技術選定や給電システムの設計に資するため、以下の項目について検討を行う。

- 1) 非接触による給電技術の理論的限界の取得
- 2) 要素試験によるパラメータの取得
- 3) 効率の実験的評価方法の検討
- 4) 実コイルを用いた給電試験、理論値との比較による課題、対応策の整理
- 5) コイルの設計・製作のパラメータの設定方法
- 6) 給電方式のロバスト性評価
- 7) 地層処分場での施工管理

本年度は、1)から 4)までを実施した。

2.3.3 無線給電における効率の理論限界

磁界共振結合の無線給電における伝送効率の理論限界値を算出した。(1)で伝送効率の理論を示す。(2)(3)で地下調査施設におけるコイルの設置イメージなどを示した。(4)で想定するコイルのQ値を示し、(5)で伝送効率の提示方法を示した。(6)で伝送効率の解析方法を示し、(7)で解析結果を示した。

(1) 磁界結合の効率

図 2.3.3-1 に示す、インダクタンス (L) とコンデンサ (C) が直列で接続されている SS 方式 (Serial-Serial) における磁界共振結合の無線給電の効率 (η_{ss}) は式 2-9 で表される。

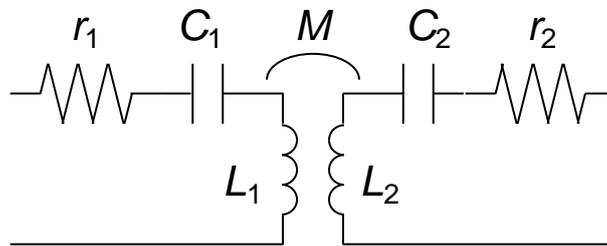


図 2.3.3-1 磁界共振結合の等価回路

$$\eta_{ss} = \frac{1}{1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}} \quad \text{式 2-9}$$

ここで、 Q 値はある周波数 (f) におけるインダクタの性能を表す指標である。

Q 値は式 2-10 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 での損失を表す抵抗成分である。

$$Q = \frac{2\pi f L}{r} = \frac{\omega L}{r} \quad \text{式 2-10}$$

k は結合係数である。

結合係数 k は1次コイルから出た磁束が2次コイルに入る割合であり、 $0 \leq k \leq 1$ である。また、1次コイルと2次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 2-11 で表される。

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \text{式 2-11}$$

これらより、 Q 値と結合係数 k が既知であれば伝送効率の理論値を算出することが出来る。

無限長のソレノイドコイルの自己インダクタンス (L) のは、表 2.3.2-3 のパラメータを用いて式 2-12 で表される。ここで、 μ_0 は真空中の透磁率である。

$$L = \mu_0 l N^2 S \quad \text{式 2-12}$$

有限長のソレノイドコイルの交流場における自己インダクタンス (L) の算出は、電磁界解析上で

は容易な課題ではない。簡易的に k を算出するために、1次コイルと2次コイルを円形コイル ($N = 1$) とした場合の、自己インダクタンス (L) と、相互インダクタンス (M) について示す。

円形コイルの自己インダクタンスは (L) は、表 2.3.2-3 のパラメータを用いて式 2-13 で表される。 μ は導体中の透磁率である。

$$L = a \left\{ \mu_0 \left(\log \frac{8a}{\alpha} - 2 \right) + \frac{\mu}{4} \right\} \quad \text{式 2-13}$$

図 2.3.2-7 のように、半径が a_1 、 a_2 の円形コイルが中心間距離 G で同軸上に正対している場合の相互インダクタンス (M) は、式 2-14 で表される。ここで、 $K(x)$ は第一種完全楕円積分、 $E(x)$ は第二種完全楕円積分である。

$$M = N^2 \mu \sqrt{a_1 a_2} \left\{ \left(\frac{2}{x} - x \right) K(x) - \frac{2}{x} E(x) \right\} \quad \text{式 2-14}$$

$$x = \frac{\sqrt{4a_1 a_2}}{(a_1 + a_2)^2 - G^2} \quad K(x) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - x^2 \sin^2 \varphi}} \quad E(x) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - x^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

円形コイルのため、 $N = 1$ として式 2-15 を得る。

$$M = \mu \sqrt{a_1 a_2} \left\{ \left(\frac{2}{x} - x \right) K(x) - \frac{2}{x} E(x) \right\} \quad \text{式 2-15}$$

(2) 設置可能なコイルの大きさ

無線給電による電力の供給先は、2.2 にて検討した無線データ伝送システムである。地下調査施設での小型送信器の実証的検討では、人工バリア内、坑道埋戻し材内、坑道壁面に設置されており、それぞれ、緩衝材、坑道埋戻し材、プラグ、止水壁に水みちを形成しないことを意図している。無線給電の検討においても、これらの部位に水みちを形成することを避けることを目的とする。我が国の地層処分事業におけるモニタリング計画等は未策定であるため、実廃棄体を性能確認の対象とするか否かは現時点では不明である。ここでは地下環境で実規模スケールの周辺岩盤の緩み領域を含めた性能確認を実施することを想定し、電磁波による無線給電を適用することが望ましい部位を設定した。図 2.3.3-2 に処分孔縦置き定置方式を想定した性能確認試験の試験坑道レイアウトのイメージを示す。

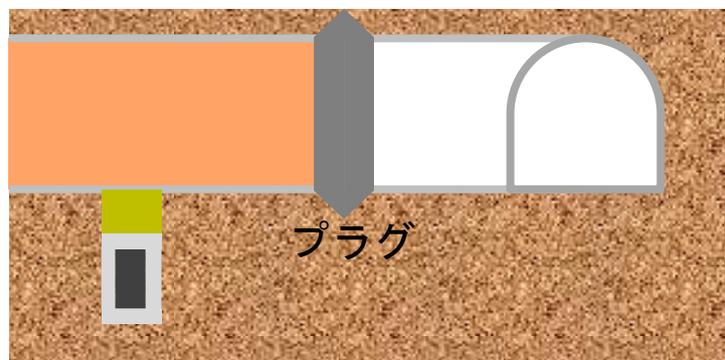


図 2.3.3-2 処分孔縦置き定置方式の試験坑道レイアウト

プラグは坑道内の埋戻し材の膨出や止水を抑制する目的で設置されるため、水みちや不連続面と

成り得る貫通するケーブルは減らすことが望ましい。また試験孔に設置した人工バリアの性能確認では状態を正確に把握するためにも、系の擾乱と成り得るケーブルが緩衝材を貫くことを避ける

1) プラグ

プラグは坑道端部に構築される。プラグを挟んで同軸上に2つのコイルを正対させる場合、コイル径の最大は坑道直径である。図 2.3.3-3 に HLW 第2次取りまとめで示されている坑道断面を示す。プラグを跨ぐ無線給電では設置するコイルの最大径を 4m とした。コイル間の離間 (G_1) はプラグの厚さに対応する。幌延 URL 地下 350m の試験坑道 4 で実施されている人工バリア性能確認試験において、試験坑道に設置するプラグについて検討し 3m の厚さのコンクリート製のプラグを打設した[5]。プラグを越える場合のコイル間距離を 3m とした。

2) 上部埋戻材

人工バリアの影響をケーブルの擾乱を避けて計測するため、孔内に設置した無線計測機器に電源を供給する場合を想定した。試験孔は図 2.3.3-3 に示す坑道の路盤に掘削され、内部の構成は図 2.3.3-5 のように人工バリアの上に 1m の上部埋戻材が施工される。試験孔径と同一の直径 2.2m の 1 次コイルを路盤上に設置することを想定した。試験孔に設置された中央のオーバーパックは金属であり電磁波の伝搬に影響する。検討を容易にするため 2 次コイルはオーバーパックよりも浅い位置に設置することとし、コイル最大直径を試験孔径と同一の 2.2m、コイル間距離は最大 1.7m とした。

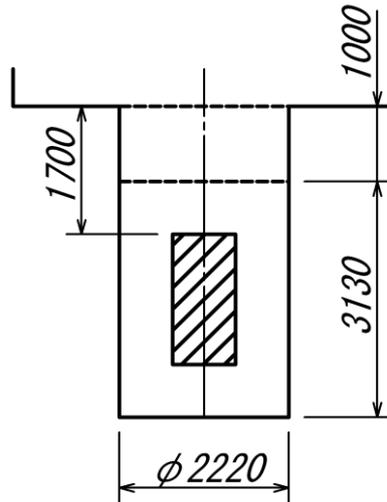


図 2.3.3-5 処分孔縦置き方式の人工バリアの寸法

(3) 無線給電時の設置イメージ

1) プラグを介した坑道内への給電

プラグをケーブルが貫通することを避けるために、プラグを挟むように 1 次コイルと 2 次コイルを同軸上に正対させた状態である。媒体はコンクリートまたは鉄筋コンクリートで、コイル間距離 (G_1) はプラグ厚さに相当する。1 次 / 2 次コイルともに、坑道直径のものまで設置可能である。2 次コイルで受けた電力で坑道内に設置された機器を駆動、若しくは 2 次電池を充電することが出来る。

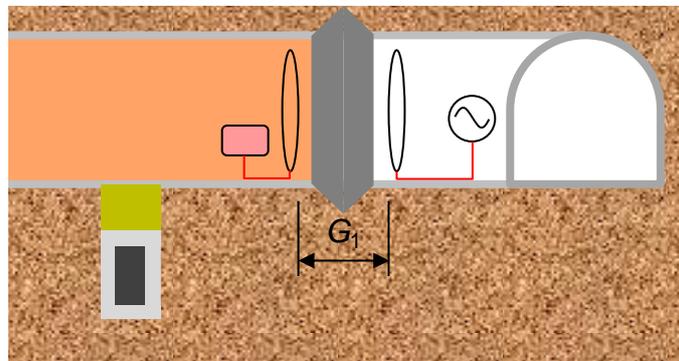


図 2.3.3-6 電磁波によるプラグを跨いだ給電のイメージ

2) 上部埋戻材を介した試験孔内への給電

上部埋戻材をケーブルが貫通することを避けるために、1次コイルを路盤上、2次コイルを試験孔内に設置し、同軸上に正対させた場合である。媒体は緩衝材と同一配合の上部埋戻材であり、コイル間距離 (G_2) は最大 1.7m である。

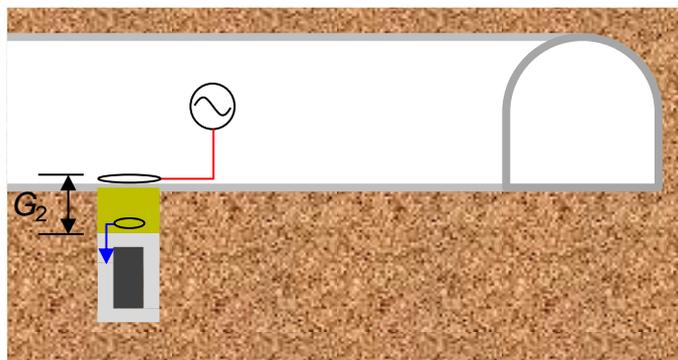


図 2.3.3-7 電磁波による上部埋戻材を跨いだ給電のイメージ

3) 送受電コイルを2段階にした試験孔内への給電

プラグを介して給電した電力でにより試験孔上に設置した2段階目の1次コイルを励起する。2段階目の媒体は緩衝材と同一配合の上部埋戻材であり、コイル間距離 (G_2) は最大 1.7m である。試験孔内に設置した2段階目の2次コイルで受けた電力で試験孔内に設置された機器を駆動させる。1段階目の1次コイルに印加したエネルギーは2段階で減衰する。まだコイルの寸法が異なるため、周波数特性の違いによる損失も考慮する必要がある。

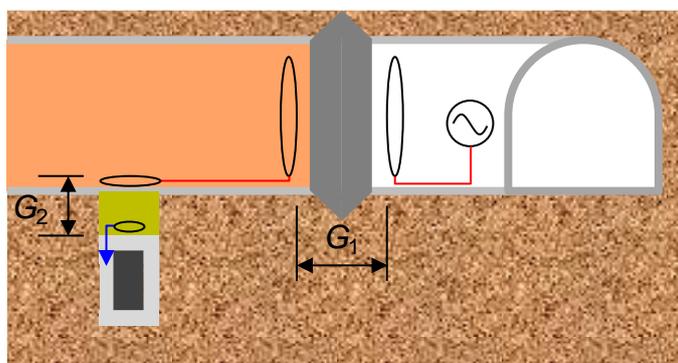


図 2.3.3-8 送受信コイルを2段階介した試験孔内への給電のイメージ

(4) 給電効率の提示のイメージ

(2)で設定した設置可能なコイルの大きさと、(3)で設定したコイルの設置イメージを利用して、磁界共振結合の無線給電における伝送効率の理論限界値を提示するイメージを図 2.3.3-9 に示す。横軸には、1次コイルと2次コイルコイル間距離、1次コイルと2次コイルの寸法比 a_2/a_1 を示す。縦軸には給電効率を示す。

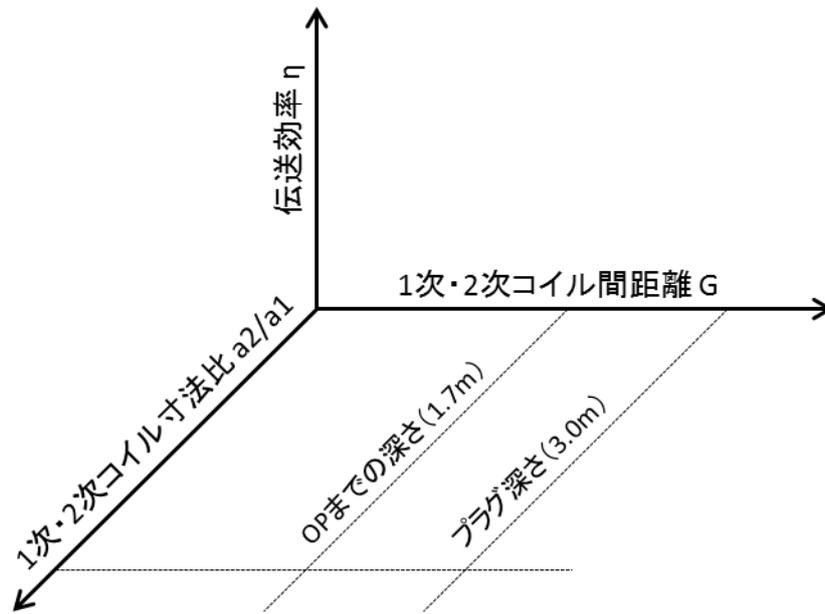


図 2.3.3-9 コイル寸法、および離間に対する給電効率のイメージ

(5) コイルの Q 値の設定

磁界共振結合の無線給電における伝送効率の理論限界値を算出するためには、式 2-9 に示すようにコイルの特性を表す Q 値が必要である。一般的に Q は ~ 500 といわれているが、平成 26 年度の成果より Q を 250 とした。平成 26 年度に製作したコイルを図 2.3.3-10 に、コイルの情報を表 2.3.3-1 に示す。また、 Q の測定データを図 2.3.3-11 に示す。



図 2.3.3-10 平成 26 年度に製作したコイル

表 2.3.3-1 平成 26 年度に製作したコイルの情報

直径	73cm
高さ	13cm
利用ケーブル	KIV 0.5sq
巻数	50 巻

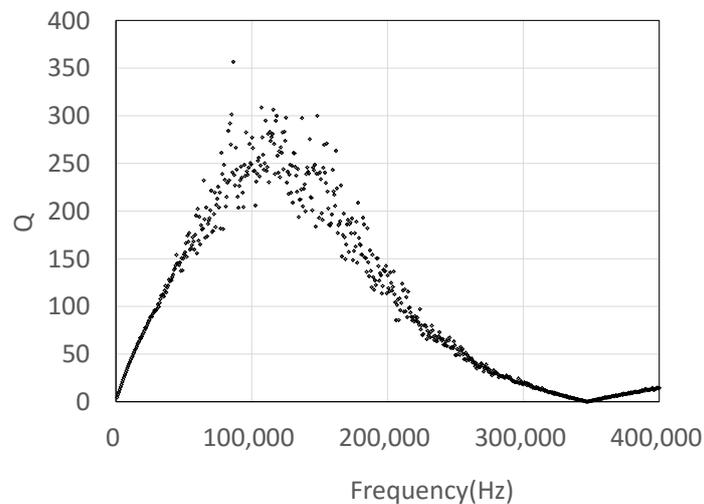


図 2.3.3-11 平成 26 年に製作したコイル Q の測定データ

(6) 評価方法

伝送効率(1)の理論式に、(2)(3)で設定したコイルサイズや伝送距離、(5)で設定したコイルの Q 値を入力することで算出した。

(7) 解析結果

1) コンクリートプラグに対する伝送効率

コンクリートプラグを対象に、磁界共振結合の無線給電の伝送効率について算出した。コイルのパラメータとしては、(5)で設定した $Q=250$ を利用した。また、結合係数のパラメータとして、(2)で設定した1次コイルと2次コイル共に直径4m、(3)で設定したコイル間距離3m(0~5mとして50cm刻みと設定)として算出した。パラメータを表2.3.3-2、図2.3.3-12に結合係数を、図2.3.3-13に伝送効率を示す。

表 2.3.3-2 コンクリートプラグに対するパラメータ

コイルの Q	250
コイル半径(m)	2
コイル断面積(m ²)	4π
巻線導体半径(m)	0.4×10^{-3} ($KIV0.5^{sq}$ を想定)
巻線導体断面(m ²)	0.5×10^{-6} ($KIV0.5^{sq}$ を想定)
コイル間距離(m)	3 (0~5 可変)

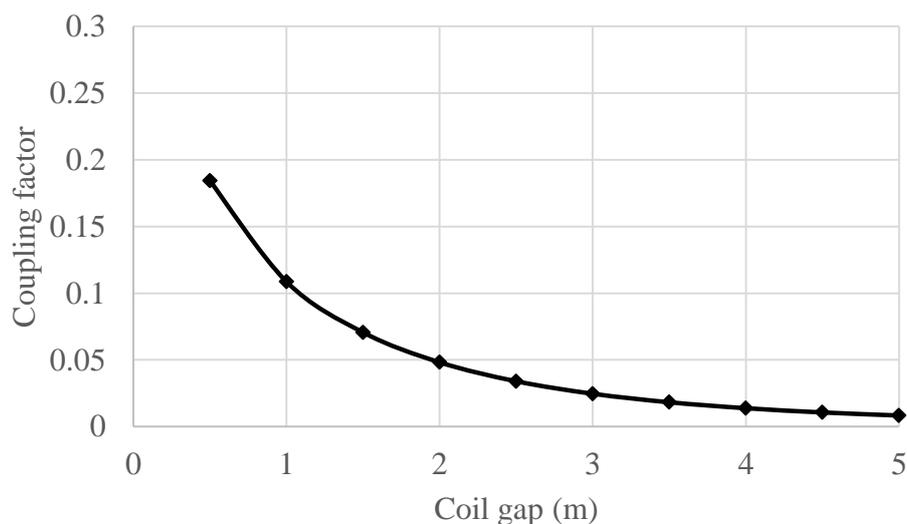


図 2.3.3-12 結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 2.0\text{m}$, $a_2/a_1 = 1$)

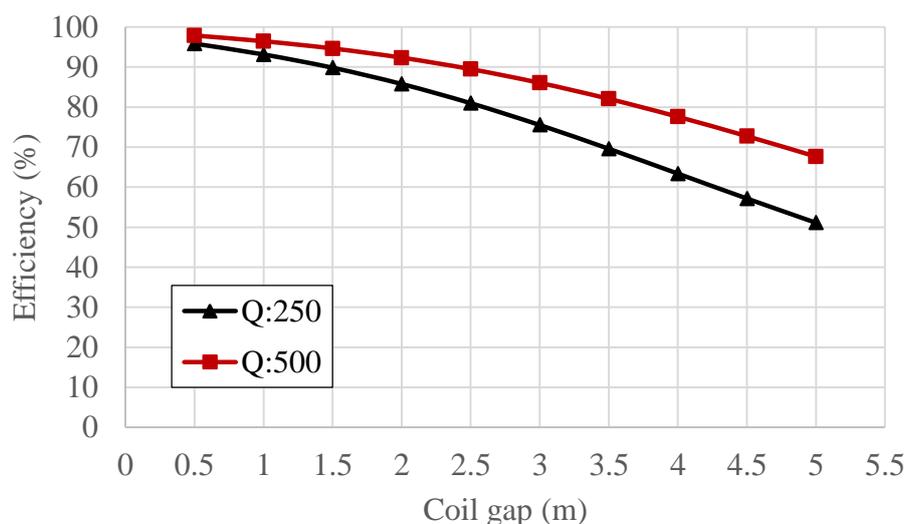


図 2.3.3-13 伝送効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 2.0\text{m}$, $a_2/a_1 = 1$)

解析の結果、コンクリートプラグを対象としたコイル間距離 3m における給電効率 η の理論値は、 $Q=250$ の場合 76%、 $Q=500$ の場合は 86%であった。

2) 坑道路盤から試験孔内への給電の効率

坑道路盤から試験孔内を対象に、磁界共振結合の無線給電の伝送効率について算出した。パラメータを表 2.3.3-3 に示す。また、試験孔内に設置する 2 次コイルは小さいほうが望ましい。そのために、2 次コイルを 1 次コイルの直径の 1/2、1/3、1/4、1/5、1/6 サイズにした 5 パターンについて結合係数 k と給電効率 η を算出した。図 2.3.3-14~図 2.3.3-25 にそれらの結果を示す。

表 2.3.3-3 坑道路盤から試験孔内に対するパラメータ

コイルの Q	250
コイル半径(m)	1.1
コイル断面積(m ²)	1.21π
巻線導体半径(m)	0.4×10^{-3} (KIV0.5sq を想定)
巻線導体断面(m ²)	0.5×10^{-6} (KIV0.5sq を想定)
コイル間距離(m)	1.7 (0~3 可変)

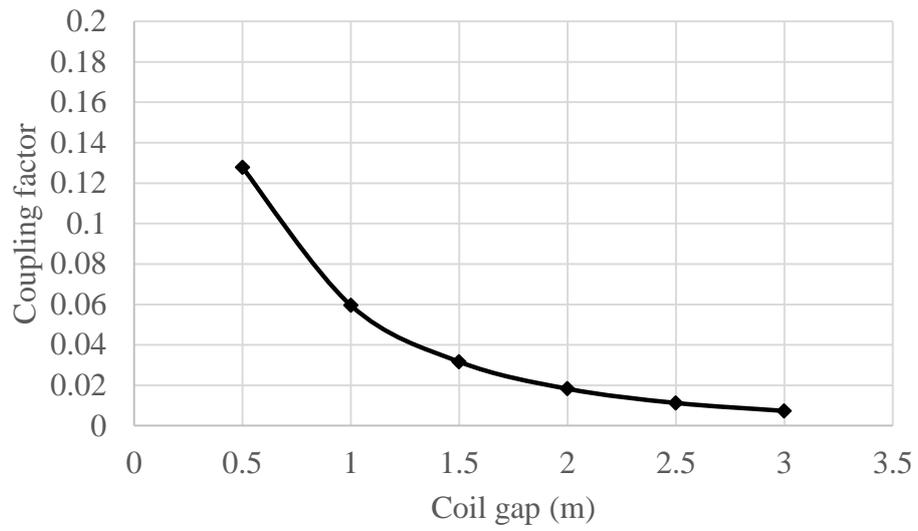


図 2.3.3-14 結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1$)

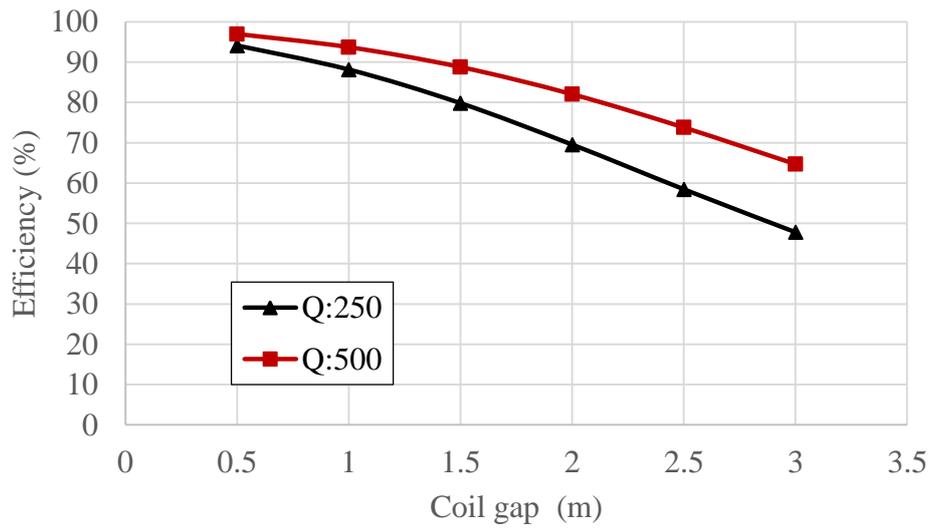


図 2.3.3-15 給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1$)

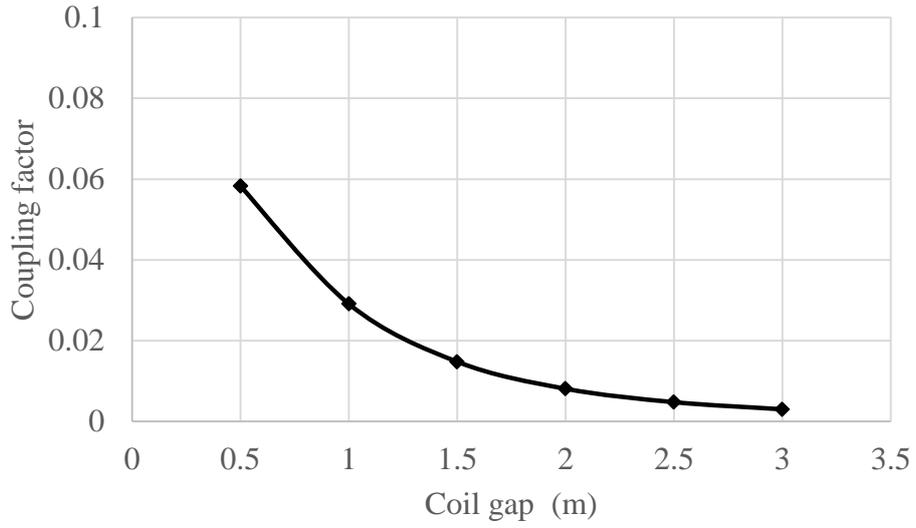


図 2.3.3-16 結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/2$)

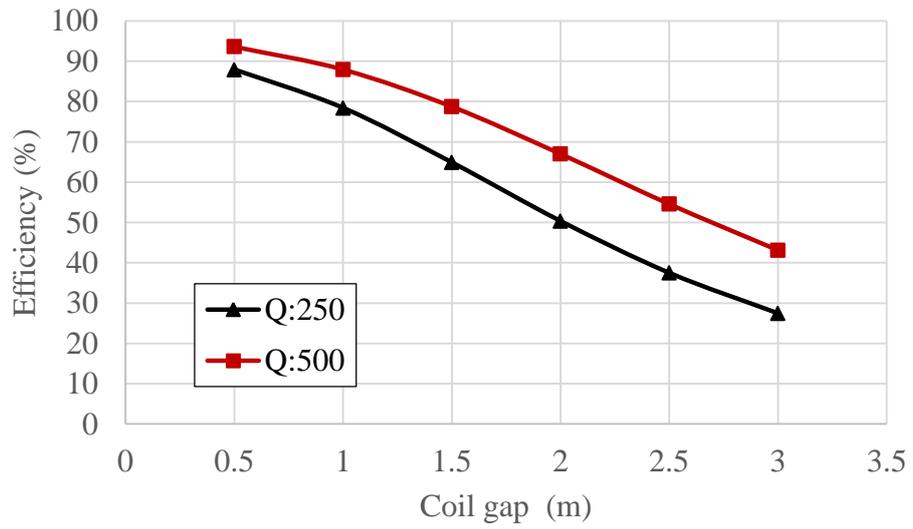


図 2.3.3-17 給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/2$)

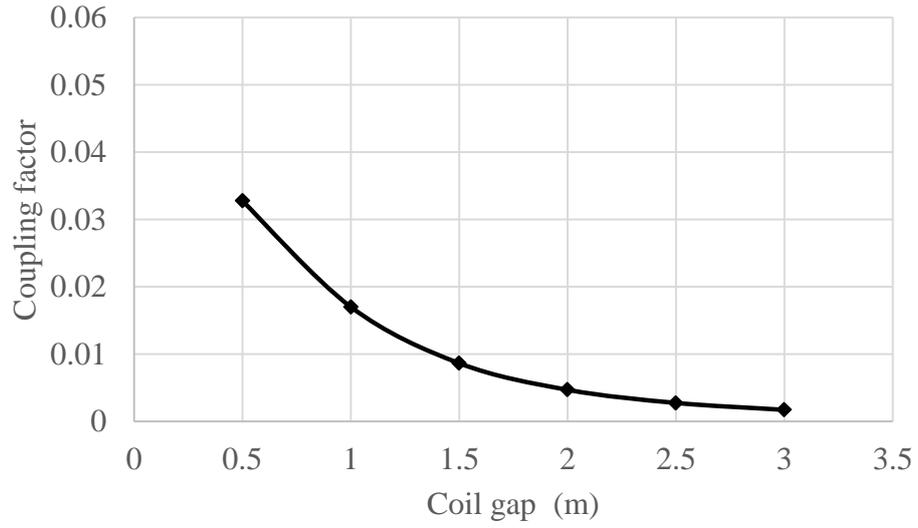


図 2.3.3-18 結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/3$)

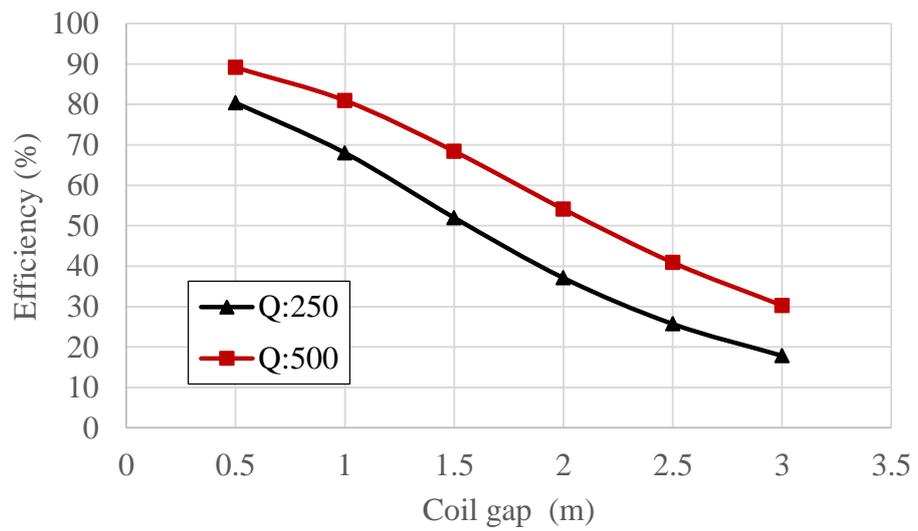


図 2.3.3-19 給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/3$)

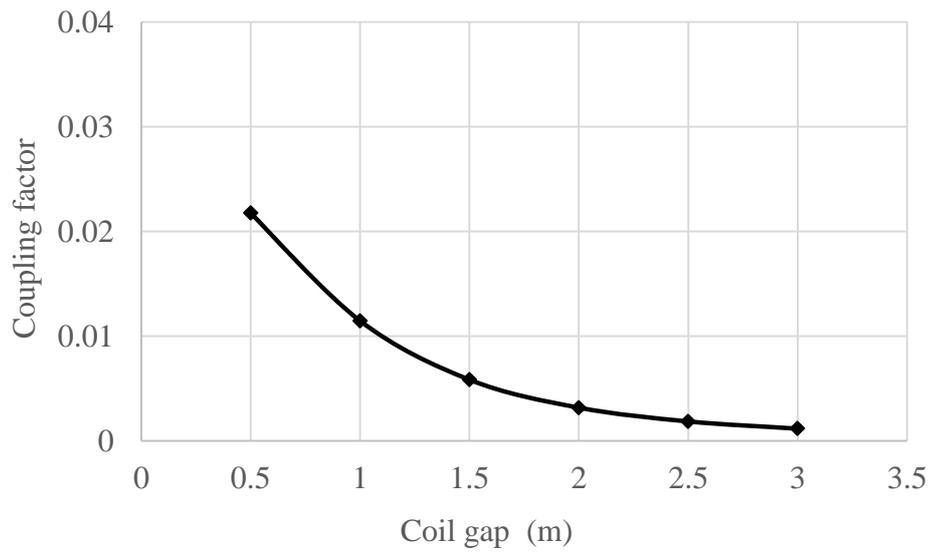


図 2.3.3-20 結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/4$)

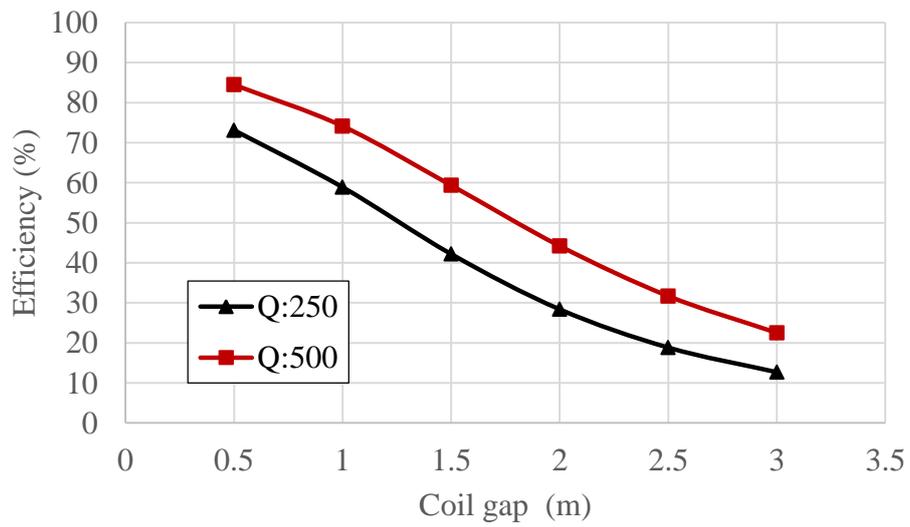


図 2.3.3-21 給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/4$)

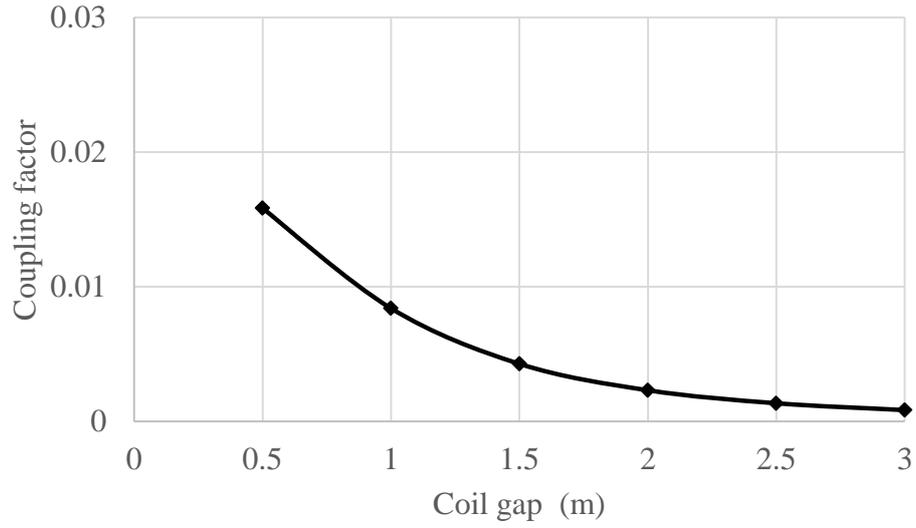


図 2.3.3-22 結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/5$)

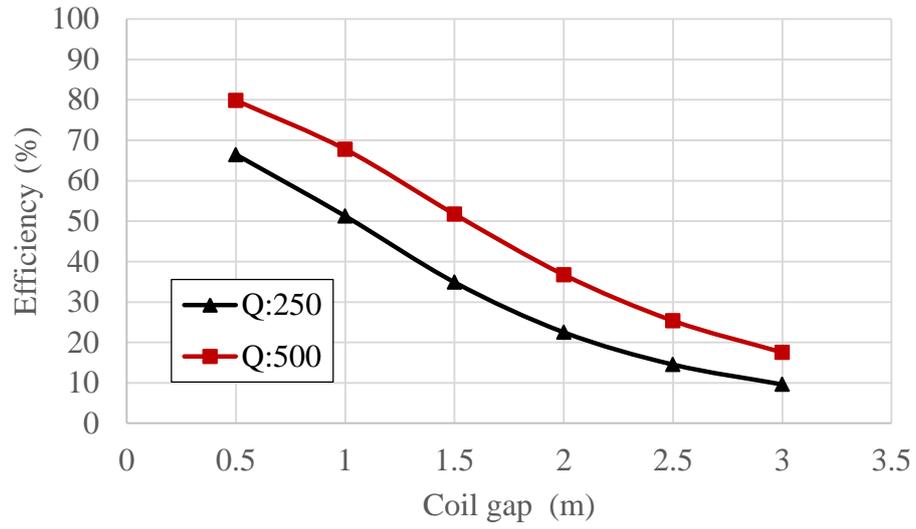


図 2.3.3-23 給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/5$)

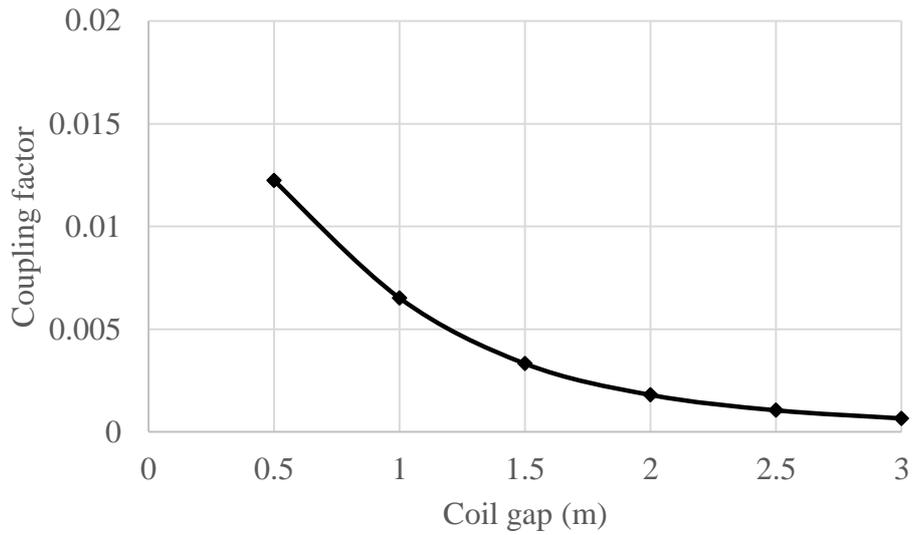


図 2.3.3-24 結合係数 k とコイル間距離 G の関係 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/6$)

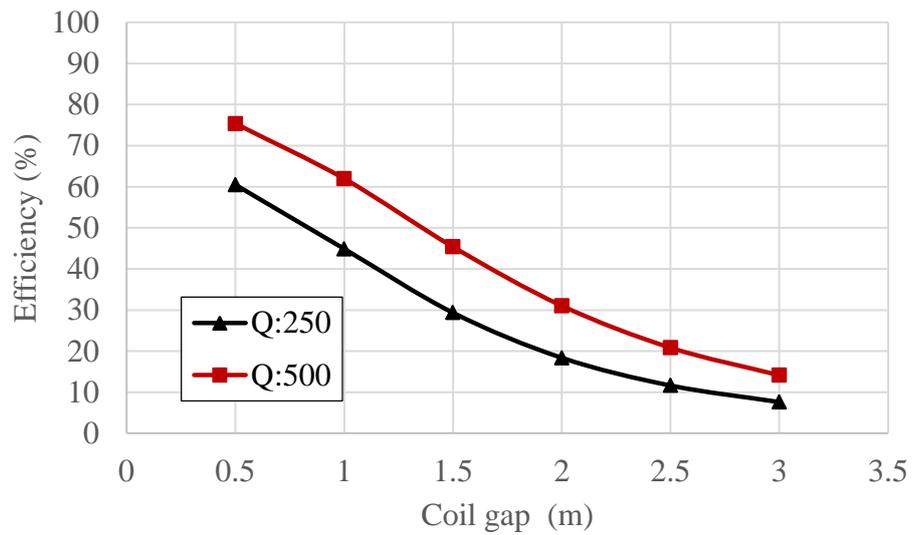
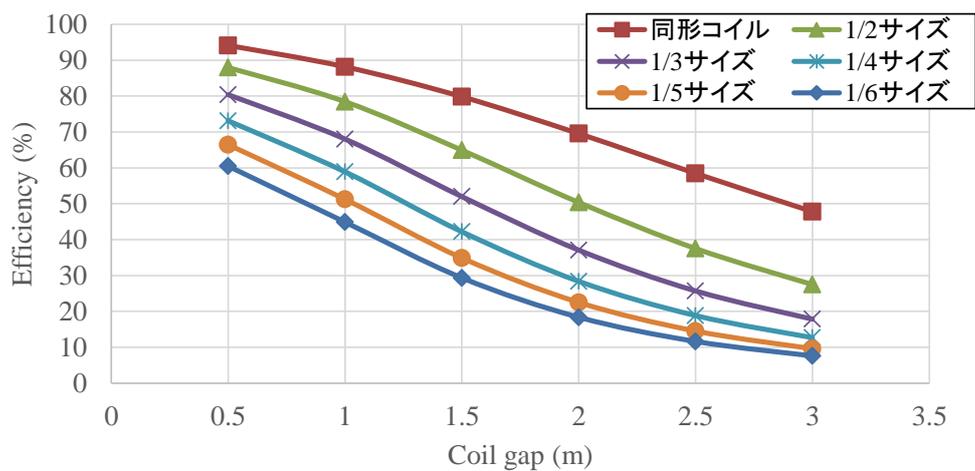


図 2.3.3-25 給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $a_2/a_1 = 1/6$)

2次コイル直径/1次コイル直径	コイル直径		伝送効率(%)
	1次コイル(m)	2次コイル(m)	
1/1	2.2	2.20	86
1/2	2.2	1.10	72
1/3	2.2	0.73	61
1/4	2.2	0.55	51
1/5	2.2	0.44	43
1/6	2.2	0.37	38

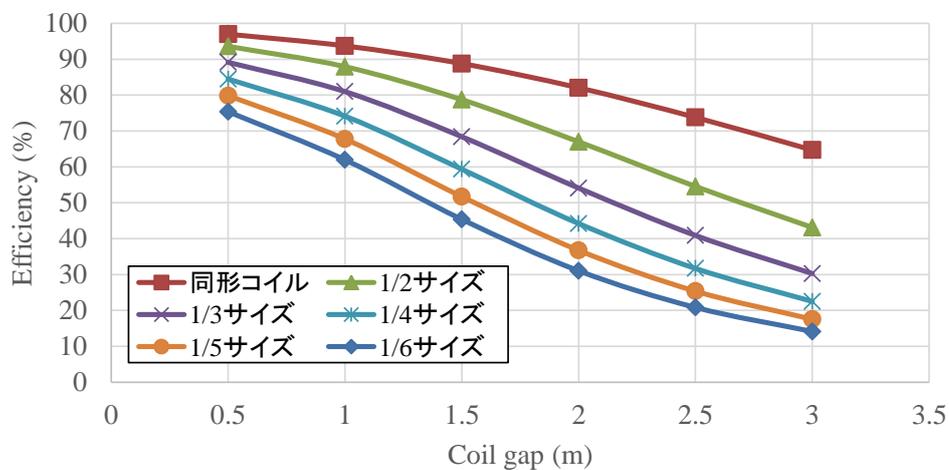
図 2.3.3-26、

図 2.3.3-27 に、 Q 値が 250 および 500 の場合の給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響をまとめたものをそれぞれ示す。



2次コイル直径/1次コイル直径	コイル直径		伝送効率(%)
	1次コイル(m)	2次コイル(m)	
1/1	2.2	2.20	75
1/2	2.2	1.10	57
1/3	2.2	0.73	44
1/4	2.2	0.55	35
1/5	2.2	0.44	28
1/6	2.2	0.37	22

図 2.3.3-26 給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $Q = 250$)



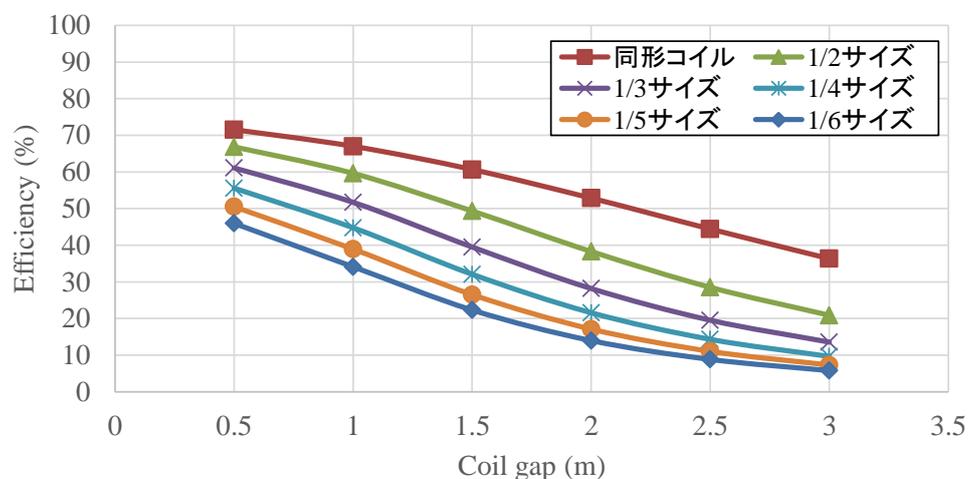
2次コイル直径/1次コイル直径	コイル直径		伝送効率(%)
	1次コイル(m)	2次コイル(m)	
1/1	2.2	2.20	86
1/2	2.2	1.10	72
1/3	2.2	0.73	61
1/4	2.2	0.55	51
1/5	2.2	0.44	43
1/6	2.2	0.37	38

図 2.3.3-27 給電効率 η におよぼすコイル間距離 G の影響 ($a_1 = 1.1\text{m}$, $Q = 500$)

3) プラグー上部埋戻材の2段階の給電の効率

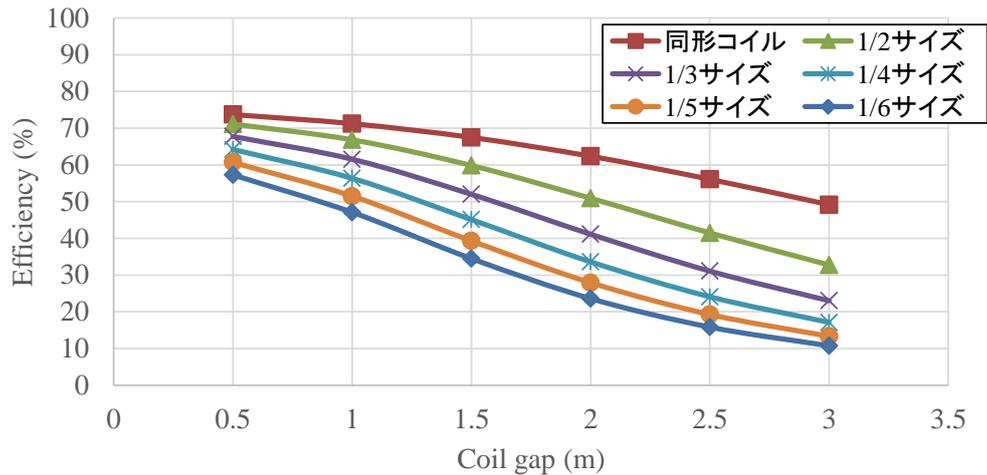
図 2.3.3-8 に示したように外部からプラグを介した1段階目、さらに上部埋戻材を介した2段階目の無線給電を実施した場合の給電効率である。1段階目の給電効率 η については1次/2次コイルともに直径4m、コイル間距離4mの場合の1)の解析結果を踏襲し、図 2.3.3-13 より、 $Q=250$ の場合76%、 $Q=500$ の場合は86%を用いた。次に2段階目の給電効率 η については2)の解析結果を用いた。ここでは給電効率を簡易的に算出するため、周波数の違いによる結合係数、自己インダクタンス、相互インダクタンスの影響は無視し、2段階の給電効率を $\eta_{12} = \eta_1 \times \eta_2$ で求めた。

結果を図 2.3.3-28 と図 2.3.3-29 に示す。2段階目の無線給電で最も効率が低い $a_2/a_1 = 1/6$ の場合の給電効率は、 Q が250の時に17%、 Q が500の時に29%となった。



2次コイル直径/1次コイル直径	コイル直径		伝送効率(%)
	1次コイル(m)	2次コイル(m)	
1/1	2.2	2.20	57
1/2	2.2	1.10	43
1/3	2.2	0.73	33
1/4	2.2	0.55	27
1/5	2.2	0.44	21
1/6	2.2	0.37	17

図 2.3.3-28 2段階の無線給電の場合の試験孔内の2次コイルの受電効率 η ($Q = 250$)



2次コイル直径/1次コイル直径	コイル直径		伝送効率(%)
	1次コイル(m)	2次コイル(m)	
1/1	2.2	2.20	65
1/2	2.2	1.10	55
1/3	2.2	0.73	46
1/4	2.2	0.55	39
1/5	2.2	0.44	33
1/6	2.2	0.37	29

図 2.3.3-29 2段階の無線給電の場合の試験孔内の2次コイルの受電効率 η ($Q = 500$)

4) 大きさの影響

図 2.3.3-9 では、1次コイルと2次コイルの寸法の比率 a_2/a_1 をパラメータとしたため、コイルの大きさの要素は大きさの比率で規格化されている。そのため a_2/a_1 が同じであれば、効率に大きさには影響しないと評価されることになる。しかしながら式 2-13 のようにコイルの自己インダクタンスはコイルの断面積（半径 a ）に比例する。そのためコイル自体の大きさの影響について定性的に評価する必要がある。

1)と2)の解析結果のうち、1次コイルと2次コイルが同一直径となる表 2.3.3-4 に示した解析ケースについて、コイル半径 $a = 2.0\text{m}$ と $a = 1.1\text{m}$ の伝送効率を比較した。図 2.3.3-30 に伝送効率を比較した結果を示す。コイル直径が 4m の方が 2.2m の伝送効率よりも高く、コイル間距離が増加していくほど顕著に表れる。これはコイル直径が大きいほうが、1次コイルから出た磁束が2次コイルに結合しやすく、結合係数が大きくなるからである。よってコイル間距離 G が同じ場合は出来るだけ大型のコイルを用い、かつ1次コイルと2次コイルの寸法差を小さくし、 a_2/a_1 を1に近づけることが給電効率向上に繋がる。

表 2.3.3-4 給電効率とコイル径の関係

ケース	給電箇所	コイル直径(m)		コイル間隔(m)	寸法比	効率(%)
		1次	2次	G	a_2/a_1	h
①	1)プラグ	4	4	0.5	1	96
②	2)緩衝材	2.2	2.2	0.5	1	94
③	1)プラグ	4	4	1	1	93
④	2)緩衝材	2.2	2.2	1	1	88
⑤	1)プラグ	4	4	1.5	1	90
⑥	2)緩衝材	2.2	2.2	1.5	1	80
⑦	1)プラグ	4	4	2	1	86
⑧	2)緩衝材	2.2	2.2	2	1	70
⑨	1)プラグ	4	4	2.5	1	81
⑩	2)緩衝材	2.2	2.2	2.5	1	58
⑪	1)プラグ	4	4	3	1	76
⑫	2)緩衝材	2.2	2.2	3	1	48

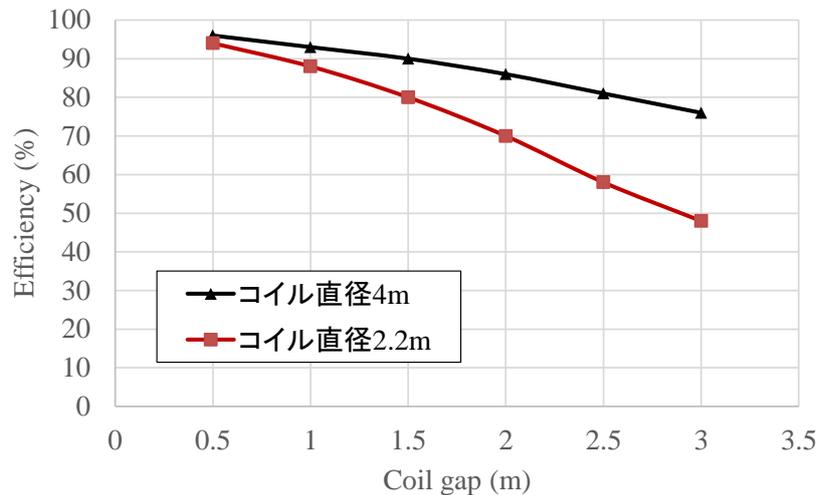


図 2.3.3-30 給電効率 η におよぼすコイル直径の影響 ($Q = 250$)

(8) まとめ

文献から設定した、地下調査施設におけるコイルの設置イメージや、伝送効率の理論式から、磁界共振結合の無線給電における伝送効率の理論限界値を算出した。

算出した結果として、コンクリートプラグを対象としたコイル間距離 3m における伝送効率は、 Q が 250 である場合 76%、 Q が 500 である場合は 86%であった。坑道路盤から試験孔内を対象としたコイル間距離 1.7m における伝送効率は、 Q が 250 の時に 22%、 Q が 500 の時に 38%であった (2次コイルが1次コイルの 1/6 サイズ)。また、コンクリートプラグ (コイル間距離 3m、1次コイルと2次コイルは同径) から試験孔内(コイル間距離 1.7m、2次コイルが1次コイルの 1/6 サイズ)へ2段階で給電を行った場合の伝送効率は、 Q が 250 の時に 17%、 Q が 500 の時に 29%であった。

2.3.4 要素試験による解析パラメータの取得

(1) 実際のコイルの考慮事項

前節では理論式に基づいて、1次コイルと2次コイルの直径や間隔が効率に及ぼす影響を評価した。一方で、実際のコイルでは以下に挙げる影響を考慮する必要がある。

- ・コイルの大きさが変わっても基本的には同じ巻線を使うことがある。
- ・同一コイル長さの場合、コイル直径が大きくなると巻線が長くなる。
- ・巻線の太さが同じである場合、巻線が長くなるとコイル自体の対抗値も上がる。
- ・抵抗値が上がるため、熱等による損失が発生する。
- ・コイルの交流抵抗では表皮効果や近接効果がある。
- ・コイルの特性は周波数依存性がある。

これらを解析で再現することは難しい。よって式 2-9～式 2-14 における効率の理論的算出上必要となるコイルのパラメータである、 Q 値、結合係数 k 、自己インダクタンス L 、内部抵抗 r に取得するため、実際にコイルを作製して要素試験を実施した。

(2) 要素試験の方法

要素試験は以下の①～⑦に示す順番で実施した。

①図 2.3.3-7 に示した上部埋戻材を介した無線給電を検討対象とし、コイル直径は設置可能な最大の直径とする。この場合コイル直径は $a_1 = a_2 = 2.2\text{m}$ 、最大コイル間距離は $G_2 = 1.7\text{m}$ （※コイル長を無視した場合）である。コイルの長さは平成 26 年度と同様に 40cm とした。この形状を 1/1 サイズ（実規模サイズ）と定義し、相似である各サイズ（1/3、1/4、1/5、1/6）のコイルの軸を作製した。

②製作したコイルの軸に、ケーブルを巻きコイルを製作した。

③製作したコイルの自己インダクタンス L 、内部抵抗 r 、 Q 値を実測した。

④コイル間距離 G を 0～60cm の間で変化させ、結合係数 k を実測した。

(3) コイル軸の作製

巻線を巻くためのコイルの軸を、各サイズで1組、それぞれ2つずつ作製した。コイルの直径、長さは 1/1 サイズを縮小し、小数第三位を四捨五入して計算した。表 2.3.4-1 に各縮尺におけるコイル軸の直径およびコイル高を、図 2.3.4-1 に製作した各縮尺のコイル軸を示す。

表 2.3.4-1 1/1 サイズと各サイズのまとめ表

縮尺	コイル軸の直径(m)	コイルの高さ(m)
1/1 サイズ	2.22	0.40
1/3 サイズ	0.74	0.13
1/4 サイズ	0.56	0.10
1/5 サイズ	0.44	0.08
1/6 サイズ	0.37	0.07



1/3 サイズ $2a=0.74\text{m}$



1/4 サイズ $2a=0.56\text{m}$



1/5 サイズ $2a=0.44\text{m}$



1/4 サイズ $2a=0.37\text{m}$

図 2.3.4-1 製作したコイル軸

(4) コイルの製作

製作したコイル軸にケーブルを巻き、サイズ毎に1組のコイルを製作した。全てのコイルは図 2.3.4-2 に示す被覆直径は 2.4mm の KIV5mm²を使用した。コイルの高さ/ケーブル被覆直径より、各コイルの巻数を表 2.3.4-2 のように設定した。作製したコイルを図 2.3.4-3 に示す。



図 2.3.4-2 利用ケーブル

表 2.3.4-2 各サイズの巻数

	コイル軸の直径(m)	コイルの高さ(m)	巻数
実サイズ	2.22	0.40	167
1/3 サイズ	0.74	0.13	54
1/4 サイズ	0.56	0.10	42
1/5 サイズ	0.44	0.08	33
1/6 サイズ	0.37	0.07	29

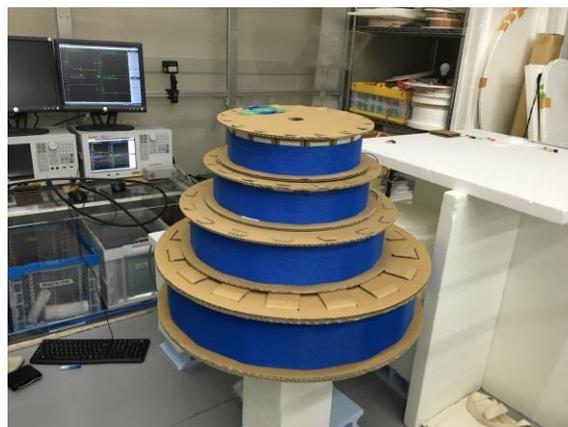


図 2.3.4-3 製作したコイル (4 種類)

(5) コイル毎の特性の計測

製作したコイルに対し、自己インダクタンス L 、内部抵抗 r 、結合係数 k 値を計測した。計測にはインピーダンスアナライザ (E4990A : キーサイト) を利用した。また、1k~500kHz の周波数範囲を 1601 のサンプル数で計測した。図 2.3.4-4 に利用したインピーダンスアナライザを示す。

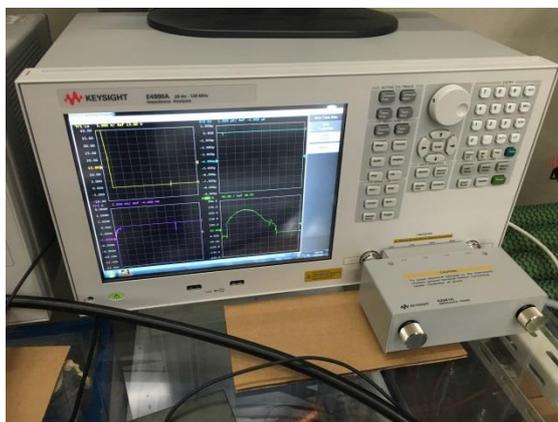


図 2.3.4-4 計測に利用したインピーダンスアナライザ

実測したコイルの自己インダクタンスを図 2.3.4-5 に、コイルの内部抵抗を図 2.3.4-6 に示す。

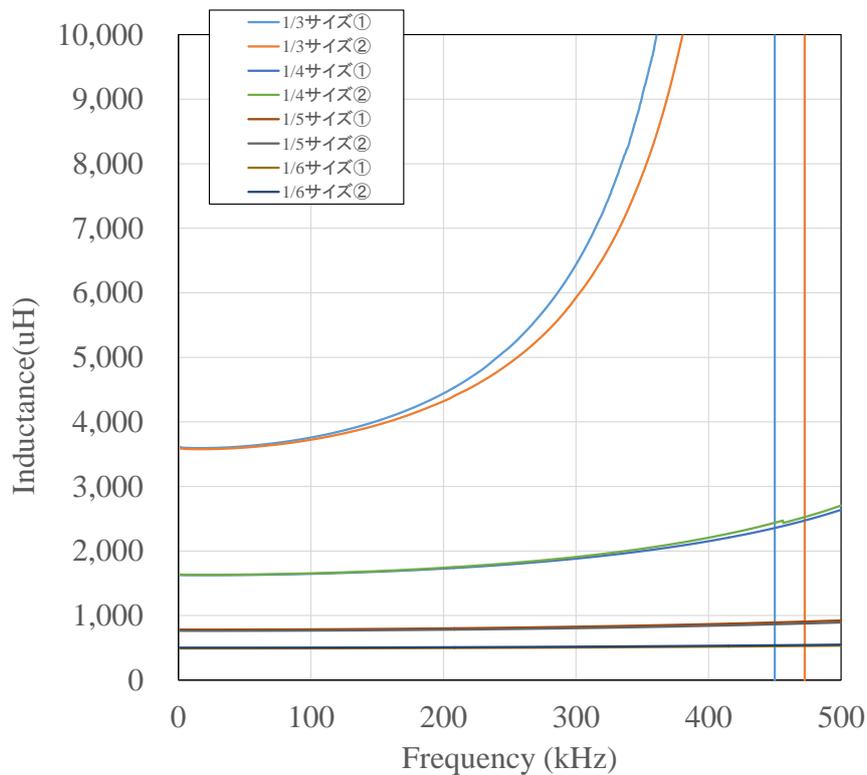


図 2.3.4-5 製作したコイルの自己インダクタンス L の周波数依存性

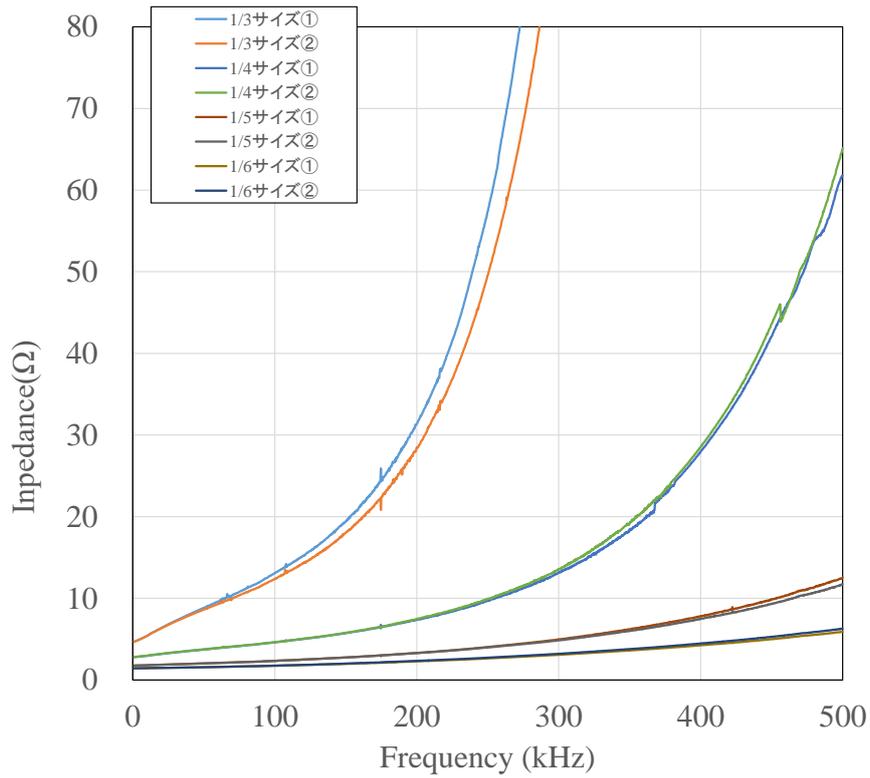


図 2.3.4-6 製作したコイルの内部抵抗 r の周波数依存性

実測した L と r を式 2-10 に代入し、 Q 値の周波数依存性を算出した結果を図 2.3.4-7 に示す。

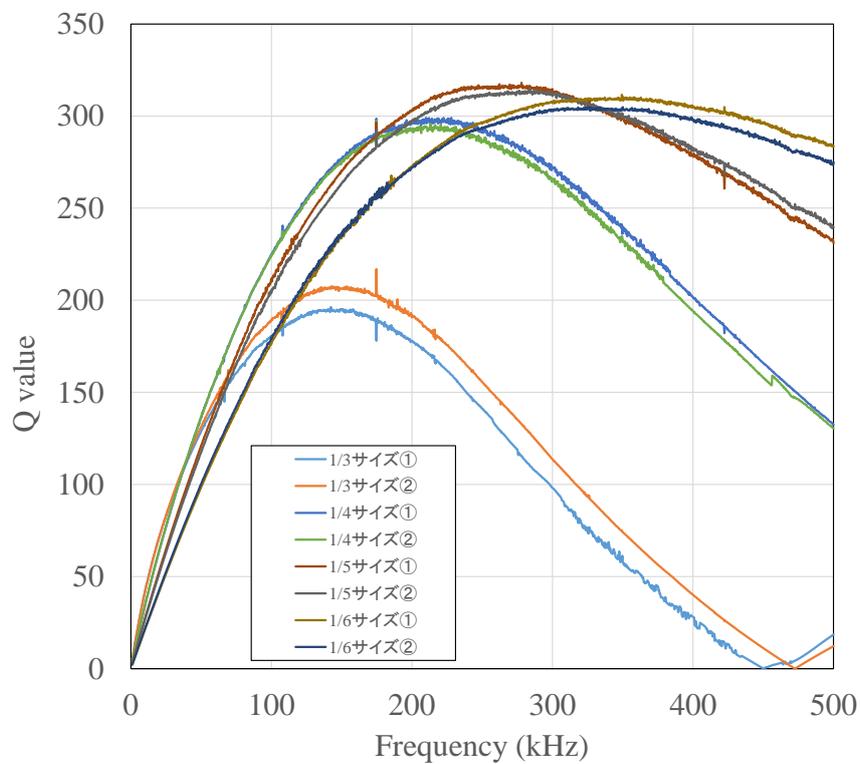


図 2.3.4-7 製作したコイルの Q 値の周波数依存性

自己インダクタンスはコイルのサイズが大きいほど値が大きい。これは、コイルのサイズが大きい方が巻数とコイルの直径が増加するからである。コイルの内部抵抗についても同様に、コイルのサイズが大きい方の値が大きい。これは、コイルのサイズが大きいほうが、コイルの製作に利用したケーブル長が長くなり内部抵抗が増加するからである。また、周波数が高くなると内部抵抗も増加していく。これは、周波数が高くなると表皮効果と近接効果が卓越し、コイルの交流抵抗が増加するからである[6]。

図 2.3.4-7 よりコイルの Q 値にはピークの周波数が存在する。 Q 値のピーク周辺の代表的な周波数を表 2.3.4-3 に示す。コイルのサイズが小さいほうが Q の最大値における周波数が高い。このピークの周波数を利用することで伝送効率を最適化することが可能である。

表 2.3.4-3 各サイズのコイルにおけるピークの Q と周波数

	周波数(kHz)	Q 値
1/3 サイズ	150	200
1/4 サイズ	230	290
1/5 サイズ	280	310
1/6 サイズ	350	300

周波数に対する Q 値は2つずつ製作した各サイズでほぼ同じ傾向であり、各組とも同程度の性能を有するコイルが製作できたことを確認した。

(6) 結合係数の計測

製作した各縮尺のコイルに対し、 $G_2=1.7m$ の 1/3 である 57cm ($\approx 60cm$) を最大として 0~10cm ずつ離して結合係数 k を計測した。計測時の周波数は表 2.3.4-3 に示した各コイルの最適な値とし、(5)と同様にインピーダンスアナライザを利用した。計測は JIS-C5321 に準拠し、コイルの片側を短絡/短絡させない場合を計測して、その結果から結合係数 k を計算した。計測は図 2.3.4-9 に示すように正対させて実施した。計測結果を図 2.3.4-10 に示す。

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

- k : 結合係数
- L_o : 1次側開放時のインダクタンス
- L_s : 1次側短絡時のインダクタンス
- P, P' : 1次側端子
- S, S' : 2次側端子

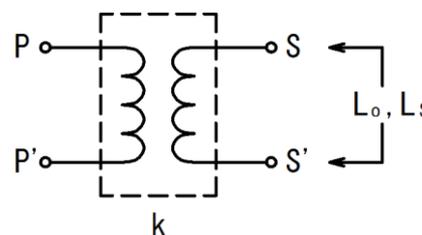


図 2.3.4-8 結合係数 k の測定方法 (JIS C5321)

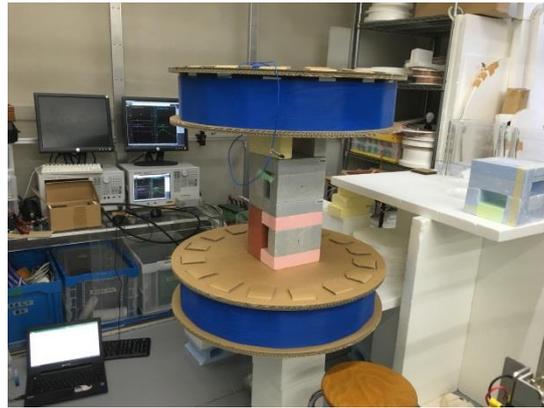


図 2.3.4-9 結合係数 k の測定状況

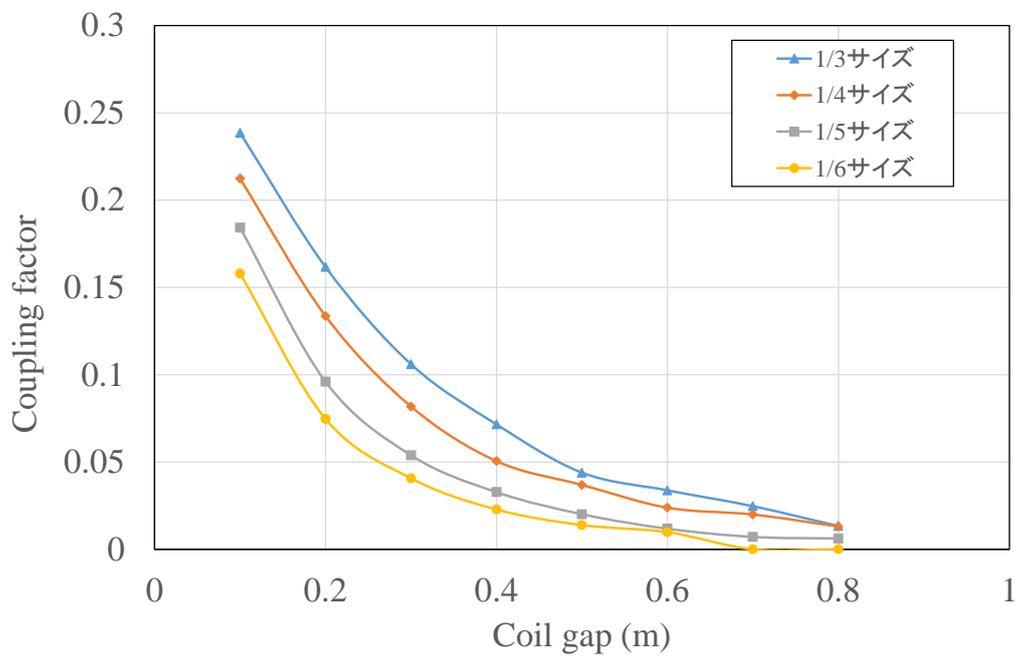


図 2.3.4-10 結合係数 k の測定結果

(7) 実測値を用いた伝送効率の算出

前節では要素試験を実施してコイルの効率を評価するために必要な各パラメータを取得した。表 2.3.4-3 に示した Q 値の最大値と、図 2.3.4-10 の結合係数 k を用い、式 2-9 を利用して効率を算出した。結果を図 2.3.4-11 に示す。1次コイルと2次コイルが同径の場合、同じコイル間距離 G ではコイル径が大きい方が効率は高い。

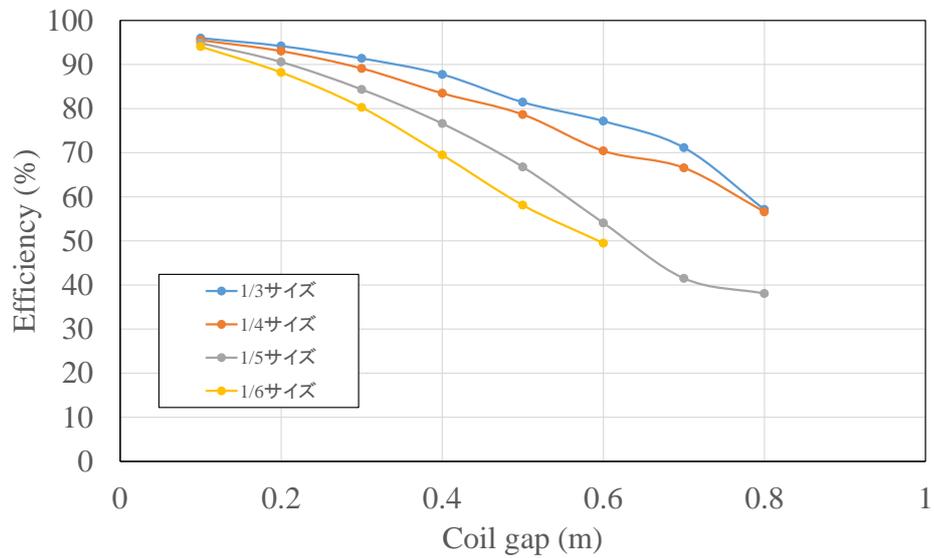


図 2.3.4-11 効率の計算結果

2.3.5 効率の実験的評価手法の検討

2.3.3(3)では効率の理論値を計算するため、試験坑道のコンクリートプラグや試験孔内の埋戻し材を設置場所や媒体して仮定し、必要な送受電コイル間隔や設置可能なコイル直径を設定した。しかしながら、実際に実規模スケールの直径数メートルのコイルを試作し、その都度給電効率を計測し理論値と比較・評価する方法は製作方法として効率が悪い。実規模スケールコイルの各パラメータを予め大まかに知ることが出来れば、適用箇所に応じた柔軟なコイルの設計が可能になると考えられる。

そこで、非接触給電において最も重要な給電効率について、各コイルの大きさとコイル間距離の観点から整理し、実験的に評価する手法について検討した。

(1) 相似則によるコイルの効率の整理

図 2.3.4-11 は 1 次コイルと 2 次コイルが同径で、かつ正対している場合の給電効率におよぼすコイル径とコイル間距離の関係である。ここで正対する 1 次コイルと 2 次コイルで形成される図 2.3.5-1 に示すような円筒を考える。同一距離では、コイル寸法が小さい組ほど円筒形状は長細くなる。

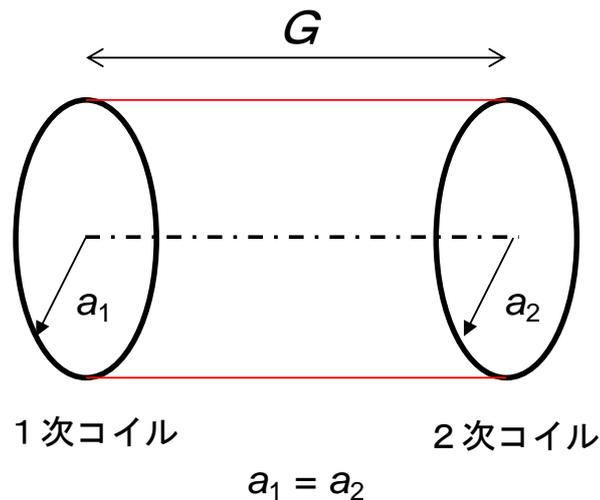


図 2.3.5-1 正対するコイルによって構成される円筒

2.3.3 に示した効率の理論値の計算結果において、コイルの直径 $2a$ に対するコイル間距離 G で、給電効率 η を整理したものを表 2.3.5-1 に示す。この表は $G/2a$ の比率、言い換えれば図 2.3.5-1 に示す円筒のアスペクト比に対する効率を示したものである。

表 2.3.5-1 コイル間距離／コイル直径と給電効率

ケース	給電箇所	コイル直径(m)		コイル間隔(m)	コイル間距離／コイル直径	寸法比	効率(%)
		1次	2次	G	-	a_2/a_1	h
①	1)プラグ	4	4	0.5	0.13	1	96
②	2)緩衝材	2.2	2.2	0.5	0.23	1	94
③	1)プラグ	4	4	1	0.25	1	93
④	2)緩衝材	2.2	2.2	1	0.45	1	88
⑤	1)プラグ	4	4	1.5	0.38	1	90
⑥	2)緩衝材	2.2	2.2	1.5	0.68	1	80
⑦	1)プラグ	4	4	2	0.50	1	86
⑧	2)緩衝材	2.2	2.2	2	0.91	1	70
⑨	1)プラグ	4	4	2.5	0.63	1	81
⑩	2)緩衝材	2.2	2.2	2.5	1.14	1	58
⑪	1)プラグ	4	4	3	0.75	1	76
⑫	2)緩衝材	2.2	2.2	3	1.36	1	48
⑬	1)プラグ	4	4	3.5	0.88	1	70
⑭	1)プラグ	4	4	4	1.00	1	63
⑮	1)プラグ	4	4	4.5	1.13	1	57
⑯	1)プラグ	4	4	5	1.25	1	51

比率に対して効率をプロットしたものを図 2.3.5-2 に示す。

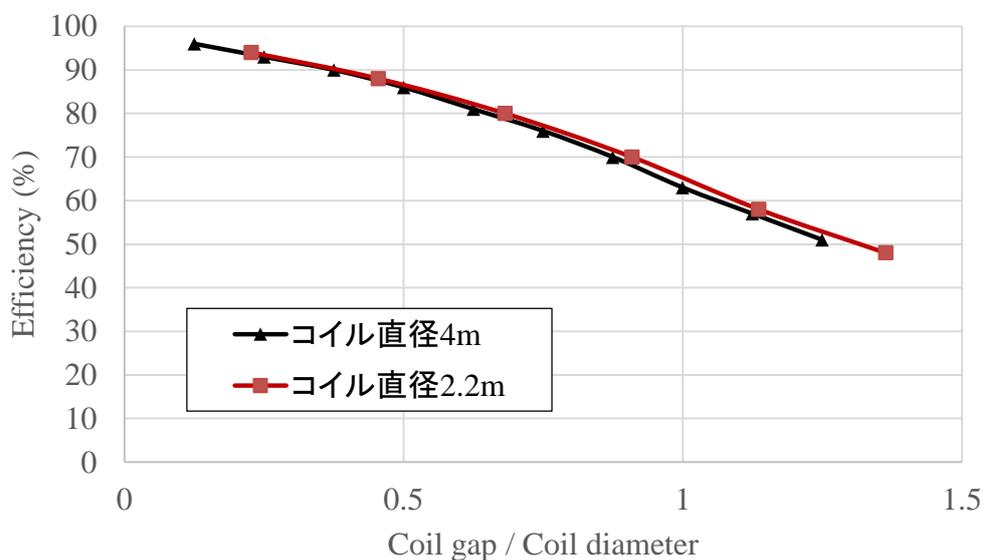


図 2.3.5-2 コイル間距離／コイル直径と給電効率 ($a_2/a_1 = 1$ の場合)

このように、比率で整理するとコイル直径 4m とコイル直径 2.2m における給電効率はほとんど同じ傾向であった。円形コイルを用いた場合の給電効率の理論値はコイル間距離／コイル直径に依存していることが分った。

一方、2.3.4 で取得したパラメータを用い、同様にコイル直径とコイル間距離の比率で、伝送効

率を評価した。表 2.3.5-2 にコイルの直径 $2a$ に対するコイル間距離 G で、給電効率 η を整理したものを、図 2.3.5-3 に図示したものを示す。コイルサイズが 1/3、1/4、1/5、1/6 と異なると 2.3.4 で取得したようにコイルの各パラメータ r 、 L 、 k 等が異なるにも関わらずコイル間距離とコイル直径をパラメータとして効率を整理すれば同じ傾向となった。

表 2.3.5-2 コイル間距離/コイル直径と伝送効率

送受電コイル のスケール	コイル直径 (m)		コイル間隔 (m)	コイル間距離/コイル直径	寸法比	効率 (%)
	1次	2次	G		a_2/a_1	η
1/3	0.74	0.74	0.1	0.14	1	96
1/3	0.74	0.74	0.2	0.27	1	94
1/3	0.74	0.74	0.3	0.41	1	91
1/3	0.74	0.74	0.4	0.54	1	88
1/3	0.74	0.74	0.5	0.68	1	81
1/3	0.74	0.74	0.6	0.81	1	77
1/4	0.56	0.56	0.1	0.18	1	96
1/4	0.56	0.56	0.2	0.36	1	93
1/4	0.56	0.56	0.3	0.54	1	89
1/4	0.56	0.56	0.4	0.71	1	83
1/4	0.56	0.56	0.5	0.89	1	79
1/4	0.56	0.56	0.6	1.07	1	70
1/5	0.44	0.44	0.1	0.23	1	95
1/5	0.44	0.44	0.2	0.45	1	91
1/5	0.44	0.44	0.3	0.68	1	84
1/5	0.44	0.44	0.4	0.91	1	77
1/5	0.44	0.44	0.5	1.14	1	67
1/5	0.44	0.44	0.6	1.36	1	54
1/6	0.37	0.37	0.1	0.27	1	94
1/6	0.37	0.37	0.2	0.54	1	88
1/6	0.37	0.37	0.3	0.81	1	80
1/6	0.37	0.37	0.4	1.08	1	69
1/6	0.37	0.37	0.5	1.35	1	58
1/6	0.37	0.37	0.6	1.62	1	49

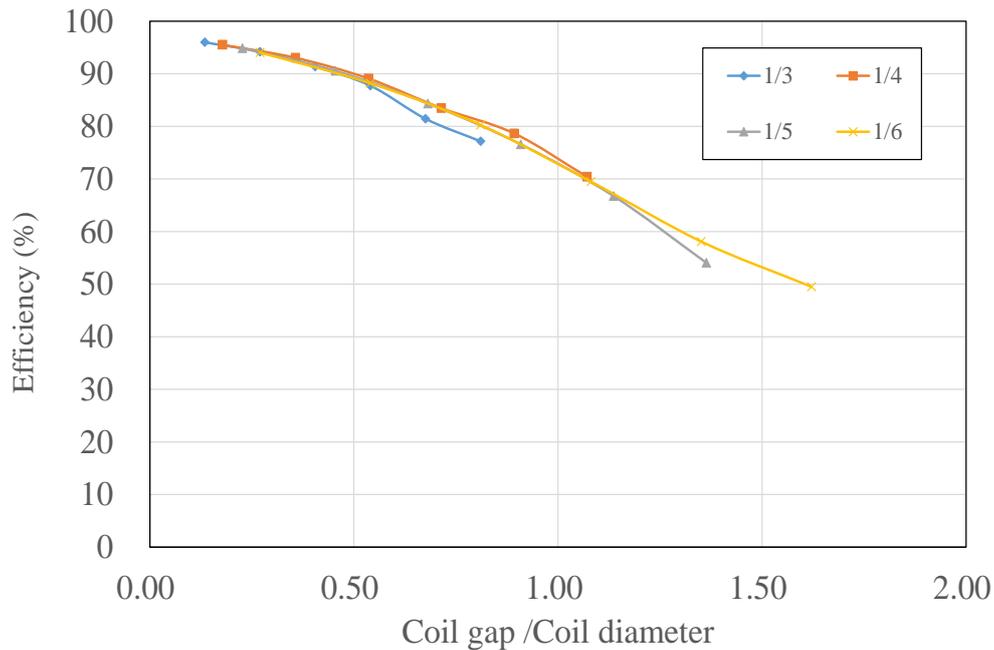


図 2.3.5-3 コイル間距離/コイル直径と伝送効率の関係図

(2) コイル形状の違いの比較

図 2.3.5-2 は円形コイルの結果である。一方、図 2.3.5-3 は長さが有限のソレノイドコイルで、大きさが 4 種類あり要素試験にて取得した値を用いた結果である。これらはコイルの種類や大きさが異なるにも関わらず、同じ傾向を示す。2つのグラフを重ねたものを図 2.3.5-4 に示す。

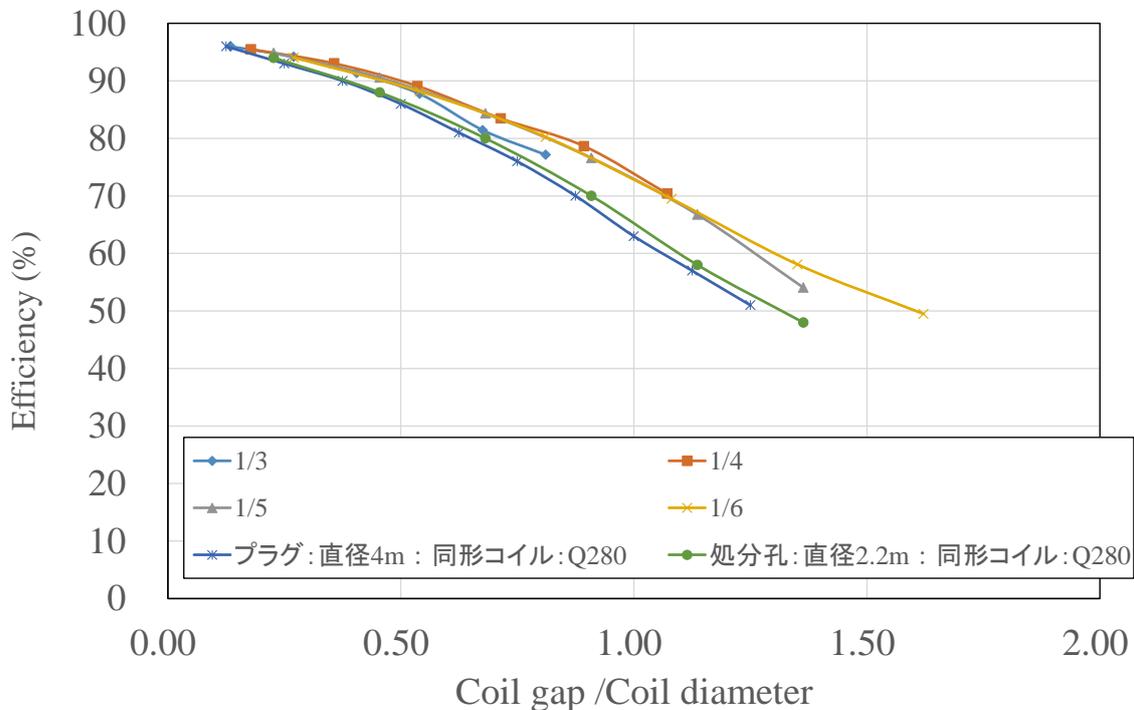


図 2.3.5-4 コイル間距離/コイル直径で整理したコイルの種類の影響

要素試験の結果を用いた結果と理論値を用いた結果とのズレは、円形コイルとソレノイドコイルの違い、表皮効果や近接効果、それに伴うコイルの内部抵抗、巻き数などが影響していると考えられる。

(3) 小規模試験による給電効率の評価手法

円形コイルの直径や巻き数といったコイルの製作時に必要なパラメータについて、実規模スケールでコイルを試作しながら検証することが最も確実な手段である。しかしながら、実規模スケールのコイルの製作し、都度効率を実測して検証する手法は非常に煩雑である。一方、コイルを縮尺したとしても、コイル同士が正対し図 2.3.5-1 に示すような円筒としてモデル化し、円筒の直径と長さの比率で効率を整理すれば、効率は図 2.3.5-4 のように比率と相関を示す。これは、実規模サイズの送受電コイルの評価を、図 2.3.5-5 のようにコイル間距離／コイル直径を同一にした小規模の給電試験による効率の評価で、代替出来ることを示唆している。

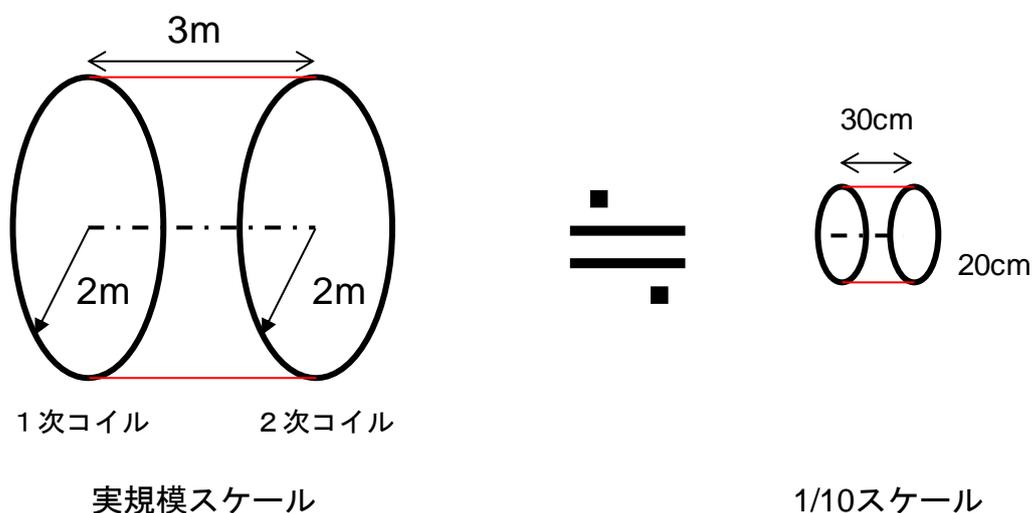


図 2.3.5-5 給電効率に及ぼすコイル間距離／コイル直径のイメージ

この仮説に基づき、図 2.3.3-6 実規模スケールの直径 4m のコイルを 3m の間隔で配置したと例では、コイル間距離／コイル直径は 0.75 となる。図 2.3.5-4 上から給電効率を読み取ると、およそ 80% となった。すなわち、坑道に定置された厚さ 3m のコンクリートプラグの両面に直径 4m のコイルを配置すれば、非接触で 80% の効率で給電出来ることを示している。給電効率はあくまでも入力電力に対する比率であるから、大電力を 1 次コイルに与えればそれだけ多くの電力を非接触で給電出来ることになる。しかしながら 20% の損失があり、最終的には熱としてコイルの発熱を引き起こす。コイルの特性、特に抵抗値は温度が高くなれば大きくなり、更なる損失を生む。よって 1 次コイルに供給可能な電力は、発熱とコイルを設置した箇所の熱伝達が律速する。今後は、実際に小規模のコイル同士の給電試験を実施し、相似則の適用範囲や発熱の影響等を検証する必要がある。

(4) 他のコイルパラメータの影響

ここまでは1次コイルと2次コイルが同一サイズの場合について、図 2.3.5-5 のように小規模の給電試験で今回はコイルの直径と長さの比率を固定し、コイル間距離を変化させて

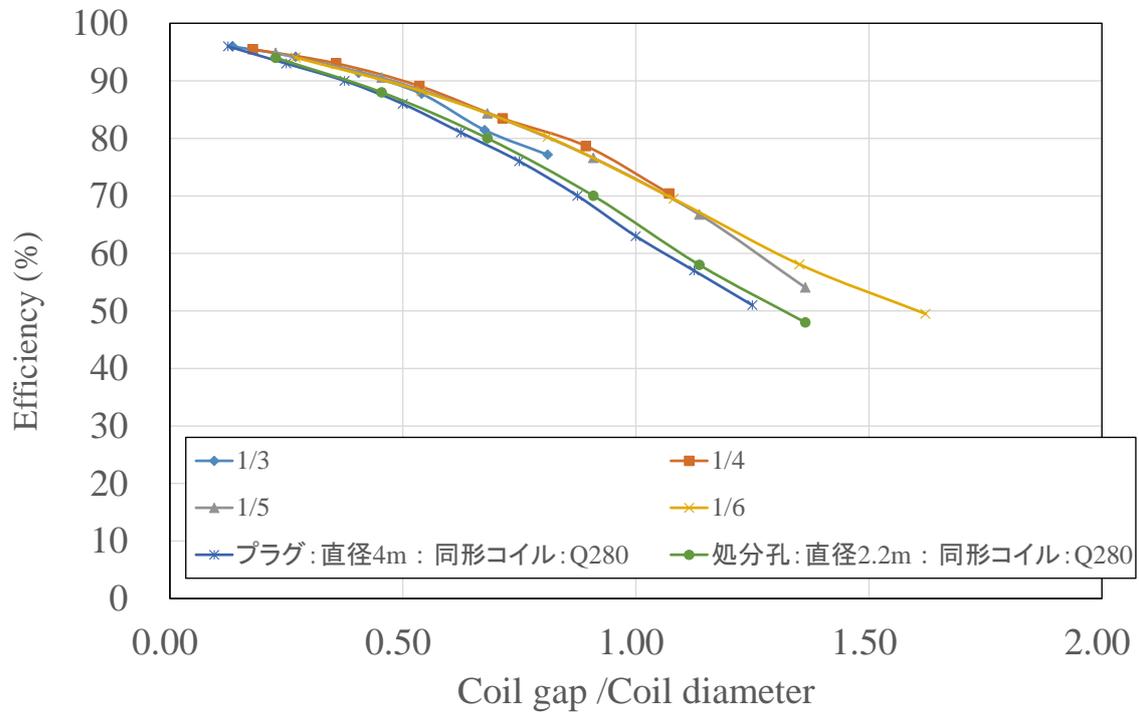


図 2.3.5-4 のような相関図を作成した。コイルの直径、長さ、巻き数等を変化させ、同様の実験を行ってデータを拡充することで、小規模スケールの給電試験で実規模スケールの効率を予測することが可能になると考えられる。

一方図 2.3.5-6 に示すように、設置場所の制約による1次コイルと2次コイルの大きさの違い、設置精度上の偏芯や偏角などもパラメータとして考慮する必要がある。

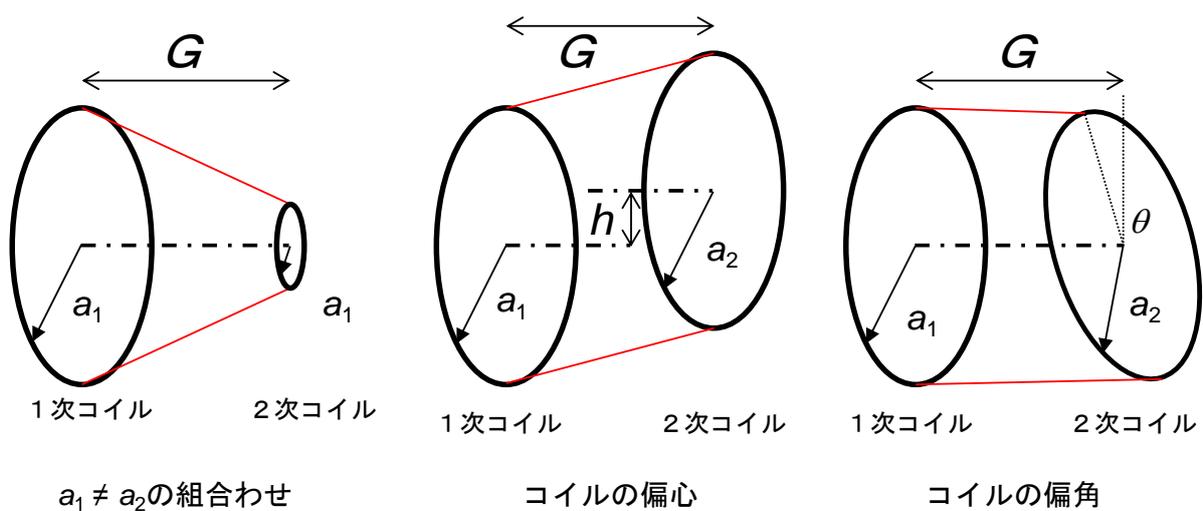


図 2.3.5-6 考慮すべき他のパラメータのイメージ

1) コイルの寸法の違いの影響

例えば図 2.3.3-7 のように、2次コイルの設置場所に制約があり $a_1 \neq a_2$ となる場合である。2.3.3(7)2)にて数値計算結果を示している。 a_1 、 a_2 、 G をパラメータとして、図 2.3.5-5 相似則の成立性を検討する必要がある。

2) コイルの偏芯、偏角の影響

選定した磁界共振結合方式は、1次コイルと2次コイルが共振により結合することで高い給電効率を得る方式である。そのため、偏芯や偏角はこの現象に大きく影響する。コイルが正対しているケースを基本として偏芯や偏角が効率に影響を定量的に評価することで、実際の設置作業時の精度の範囲を示すことが必要である。給電方式のロバスト性の提示、施工管理上の許容値を設定できると考えられる。

2.3.6 まとめ

地層処分事業における無線計測技術システムの電源確保の課題に対し、非接触による給電技術の検討を実施した。

- ・平成 26 年度の予備的検討を踏まえ、非接触給電の適用に向けた課題を整理し、試験計画を更新した。
- ・開発目標を明確にするため、給電効率の理論値を算出した。算出には実際に給電を行う場面を仮定し、コイル直径やコイル間隔をパラメータとした。計算の結果、以下の見通しを得た。
 - ①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 に対する効率は 76%であった。
 - ②試験孔内部分に設置可能な最大寸法である直径 2.2m の 1 次コイルと 2 次コイルにおいて、寸法比 = 1 の場合、離間距離 1.7m に対する効率は 75%程度であった。一方、2 次コイルのサイズを小さくした場合、寸法比 1/2 では効率が 57%、1/3 で効率 44%、1/4 で効率 35%、1/5 で効率 28%、1/6 で効率 22%であった。
- ・理論値の計算結果の信頼性を向上させるため、実際にコイルを製作して必要なパラメータを取得する要素試験を実施した。寸法の異なるコイルについて自己インダクタンス L や抵抗成分 r の周波数依存性を取得した。取得したパラメータを用いて給電効率におよぼすコイル間距離 G の影響を評価した結果、コイル寸法が小さいほど、コイル間距離が広がるほど効率が低下することを確認した。
- ・1 次コイルと 2 次コイルが同一径でかつ同軸上で正対している場合の給電効率をコイル間距離とコイル直径の比率で規格化して整理した。その結果、コイルの大きさが異なりコイルパラメータが異なる場合でも、円形コイルとソレノイドコイルとコイルの種類が異なる場合でも、ほぼ同じ線上に乗る傾向を得た。これは、比率を揃えた小規模のコイルによる給電試験で実規模スケールのコイルの給電効率を評価出来る可能性を示唆している。

今後の課題

- ・本年度製作したサイズの異なるコイルを利用した給電試験を行い、理論値との差を取得・評価し、非接触給電の課題、対応策を提示する。
- ・コイルの寸法やコイル間隔を変えた給電試験を実施し、
- ・今回実施した給電効率の評価では、1 次コイルと 2 次コイルの偏心や偏角については考慮していない。これらを考慮した効率を調査し、施工管理における目標値の提示に繋げる。

第2章 参考文献

- [1] 居村岳広、堀洋一：電磁界共振結合による伝送技術、電気学会誌 Vol.129 No.7 pp.414-417 (2009).
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic: Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances, Science, vol. 317, No. 5834, pp. 83-6 (2007).
- [3] 長井千明、安藤賢一、田中達也、渡辺和哉、居村岳広、堀洋一：磁界共鳴式無線給電を利用したモニタリングに関する検討、日本原子力学会 2014 年秋の大会 (2014).
- [4] 日刊工業新聞社：電気材料の進歩 (1959).
- [5] 丹生屋純夫、佐藤伸、中山雅、白瀬光泰、名合牧人：幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 (10) プラグ部形状に関する解析的検討、日本原子力学会 2015 年秋の大会 (2015).
- [6] 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 Vol.27 (7)、pp.29-34 (2013).

第3章 記録保存に関する調査

3.1 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、具体的方策及び技術的可能性を検討し、国及び関連機関等が地層処分に対する社会的信頼性の向上につながる計画を策定する際の判断材料を整備するものである。

我が国の記録保存方策、特に制度的管理としての記録保存に関して、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会の「放射性廃棄物処理・処分に係る規制支援研究（平成 22 年度～平成 26 年度）」[1]において「廃棄物埋設地は、生活環境から隔離され、長期的な制度的管理に依存しなくても安全性が維持されるよう閉鎖されることが必要である一方で、閉鎖後の制度的管理は、廃棄物への不注意な干渉など、人間活動の発生可能性を低減し、安全性や地層処分の社会的受容性を高めるものと考えられる。具体的な制度的管理として、処分に係る記録の保存、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「種々の管理やモニタリングのあり方に関する基本的考え方の整理」をすることとなっており、本調査はこのような制度的管理の一環としての記録保存に関する意義の検討材料となるものである。

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（以下、本会合という。）の概要、位置付け、方針、話題等を本章で紹介する。

3.2 OECD/NEA の検討状況の調査・整理

RK&M イニシアチブに関しては、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ている[2]~[4]。

本年度は、同イニシアチブの会合に出席し、最新の動向について調査を実施するとともに、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タイムカプセルに関する調査を実施した。

3.2.1 RK&M イニシアチブの概要

(1) フェーズ1における主な成果

OECD/NEA-RWMC では 2011 年より Records, Knowledge and Memory (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)。

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、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り、潜在的な資源を構成している。
- ・処分場の閉鎖に続く 1～2 世紀の間は、RK&M の用語では中期と定義されるが、文献に於いて取り扱われることが稀である。
- ・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については平成 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 (OECD/NEA-RWMC, 2013、以下、「マーカーに関する文献整理」という。) [5]
- ②Loss of Information, Records, Knowledge and Memory - Key Factors in the History of Conventional Waste Disposal (OECD/NEA-RWMC, 2014a、以下、「記録の喪失に関する検討」という。) [6]
- ③Markers - Reflections on Intergenerational Warnings in the Form of Japanese Tsunami Stones (OECD/NEA-RWMC, 2014b、以下、「津波石碑の考察」という。) [7]
- ④ Monitoring of Geological Disposal Facilities: Technical and Societal Aspects (OECD/NEA-RWMC, 2014d、以下、「モニタリングと記録との関連」という。) [9]

以下に、これらの RK&M による報告書の概要を平成 26 年度の処分システム工学確証技術開発報告書より再掲する。

「マーカーに関する文献整理」[5]は、2008～2010 年にスイス連邦エネルギー局 (BFE) の委託により、原子力安全検査局 (ENSI) の Marcos Buser を中心としたグループにより作成された文献の改訂英語版である。本報告書の目的は、主として、放射性廃棄物処分に責任を有する様々な組織、国家機関、及び関心を有する公衆に情報を提供するように、また、テーマの複雑さ及び将来対処しなければならない多様な問題を伝達することにある。この目的のもと、1990～2000 年代を中心にマーカーの概念、実施あるいは要件等に関する技術報告書、学術論文、国の規制等を

調査し、マーカースystemに関連する下記の課題や問題点が整理され、特に議論が必要な課題として下記の検討が実施された。

- ・ マーカーに関する基本的な課題
- ・ 人間及び社会に関する問題点
- ・ 地表環境及び地下空間
- ・ マーカーと構造物
- ・ 経時的な情報伝達
- ・ マーカーシステムの喪失に対する感受性

マーカースystemに関する基本的な課題については、全ての文献でマーカースystemには、警告機能を有すべきであるとされていること、複数の文書類では処分場の認知を維持するためには“記憶の文化”の必要性も言及されていることが示された。一方、警告の伝達には非常に大きな構造的かつ経済的な課題を有する可能性があることが示唆された。

人間及び社会に関する問題点に関しては、将来の誰に向けて警告すべきか、マーカースystem設計に関し、記憶の保存を維持すべき期間について調査結果が示されるとともに、マーカースystemプログラムを検討する際の考慮事項として、処分場への侵入に対する動機についての分析がなされ、その侵入低減措置の提案を行っている。

地表環境及び地下空間に関しては、マーカースystemに関して予測される時間枠における地表環境の変化について述べられ、情報の耐久性及び安定性の問題に関し、適切な材料の選定や開発課題が議論された。また、処分場は忘却されるべきかについても議論されている。

マーカースystemと構造物については、地表設置されたマーカースystemの耐久性について言及されるとともに、マーカースystem技術の要件が整理されている。なお、マーカースystem単独での処分場への侵入阻止は困難であるとの結論に達している。

経時的な情報伝達については、知識の保存のための伝達方法については、統一的な見解はみられないこと、言語及び文字を介した情報伝達の技術及び問題点について議論しているものの、記号論的な伝達が優位であるとの見解もなされていないことが記載されている。

マーカースystemの喪失に対する感受性については、情報が喪失することは広く認識されており、意識的及び無意識な行為を通じて、情報が損失する多くのエラー源が存在すること、中央集権化されている際には、情報管理が意図的に操作され得ることが示されている。

「記録の喪失に関する検討」[6]では、NEA イニシアチブを実施するための参考情報として、スイス、米国及びドイツにおける埋立地並びに有害廃棄物の旧工業用地又は処分サイトの事例を参考に情報の喪失に係る調査・整理が行われている。また、情報の調査・整理結果から、情報、記録、知識及び記憶の喪失に関する共通の主要要因が特定され、各事例との対照も行われた。本研究から、廃棄物処分に関する全ての情報が喪失することは稀であるが、細部が最初に失われる傾向にあること、及び、多くの記録は、不十分なデータを用いて作成され、一旦失われると記録を再構築することは非常に困難であることが指摘されている。また、知識の喪失の要因分析の結果、特に以下に示す4つの理由が、調査事例の全てにおいて関連寄与要因として特定されたとし

ている。

- ・ 記録なし又はアーカイブス不足
- ・ 記録の更新なし／不十分
- ・ 職務遂行のための予算なし／不十分
- ・ 人事異動

さらに、稀ではあるが防止の困難な要因として下記の 2 つを挙げている。

- ・ 不法行為
- ・ 社会的不連続性（断絶）

このような事例検討を踏まえ、本報告書では、「将来に向けて関連知識を保管するために、原子力を利用している諸国の既存の法令を補完することが肝要である」ことが示唆されている。

「津波石碑の考察」[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ーの潜在的有効性への理解を深めることを目的として、日本の北東部沿岸に数百個設置されている津波に関する石碑 (stone marker) の役割について検討された。その結果、日本の石碑の寿命 (最長で千年) は、類似の時間スケールにわたるマーカーの残存可能性を例証していること、目に見えるマーカーは記憶の保持に寄与するが、継続的警戒に実質的影響を及ぼすことのない、歴史的及び文化的な物体になる可能性があることが述べられている。また、記憶は安全性を保証しないが、特別な環境下で命を救う可能性がある。さらに、記憶以上に、知識は命を救うと結論している。

「モニタリングと記録との関連」[9]については記録保存に関連の深い内容を中心に整理した。記録保存に関連する結論として、地元ステークホルダが、施設におけるモニタリングと RK&M の保存に関心を持っており、モニタリング及び RK&M の保存は、ステークホルダとの協議を通じて明確化をはかり、共通理解を実現してゆかなければならないこと、また、RK&M については、様々な国々において、地元自治体が放射性廃棄物管理プログラムの様々な段階への関与を深めるにつれ関心が向けられることが明確になってきていることが述べられている。さらに、モニタリングと RK&M の保存を包含する有益な概念的な枠組みとして「監視 (oversight)」を挙げた上で、「監視 (oversight) の組織化や推移に関する決定についてはステークホルダとの議論がなされるべきであるとしている。

(2) フェーズ 2 の概要

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 3 年間 (2014 年 4 月～2017 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。

以下に、フェーズ 2 のイニシアチブの概要について、趣意書[11]に基づいて記載する。

実施方法

実施方法はフェーズ 1 のものを継続する。これはイニシアチブを OECD/NEA 加盟国における記録保存の領域における考え方や目標、実施のリファレンスとなるコミュニティとすることで

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-technology)による、内部にメニューを持つ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。

参加機関

現在、12 カ国からの 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。

期間

3 年間 (2014 年 4 月～2017 年 4 月)

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の作業が実施される。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

3.2.2 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 9 回会合が開催された。原環センターでは、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タイムカプセルに関する調査を実施した。本項では、会合での検討状況について報告し、タイムカプセルに関する調査については次項にて報告する。

(1) 会合の概要

会議名： OECD NEA RWMC RK&M イニシアチブ 第9回会議

日時： 2015年9月1日～9月2日

会場： OECD Conference Centre、CC20 会議室

議参加機関

- ・ ベルギー：ONDRAF/NIRAS（ベルギー放射性廃棄物・濃縮核分裂物質管理機関）、CEN/SCK（ベルギー原子力研究センター）
- ・ チェコ共和国：RAWRA（放射性廃棄物処分機関）、チェコ共和国国立公文書館
- ・ フランス：Andra（放射性廃棄物管理機関）
- ・ ドイツ：GRS（施設・原子炉安全協会）、BfS（連邦放射線防護庁）
- ・ ハンガリー：Public Limited Company for Radioactive Waste Management
- ・ イタリア：SOGIN 社(放射性廃棄物を管理する国有企業)
- ・ 日本：原環センター、原子力機構
- ・ スペイン：ENRESA（放射性廃棄物管理公社）
- ・ スウェーデン：Linnaeus 大学、国立公文書館、SKB（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）
- ・ スイス：SFOE (Swiss Federal Office of Energy)、Nagra（放射性廃棄物管理共同組合）
- ・ 英国：ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドン、RWM 社（放射性廃棄物管理会社）
- ・ IAEA
- ・ OECD/NEA
- ・ その他：CECILE MASSART 氏（芸術家）、Claudio PESCATORE 氏
（前 RK&M 議長、コンサルタント）

議事

- ・ 運営体制について
- ・ 対外発表について
- ・ マーカーについて
- ・ タイムカプセルについて
- ・ 文化遺産について
- ・ 責任の移管について
- ・ 国による公文書保管(National archive) について
- ・ 鍵となる情報ファイル（Key Information File）について
- ・ システムチェックアプローチ
- ・ 国際機構について
- ・ RepMet との協力について
- ・ CECILE MASSART 氏の活動紹介
- ・ RK&M イニシアチブのデータベースについて

・次回会合について

(2) 対外発表について

RK&M イニシアチブより、2016年3月開催の Waste management (米国、フェニックス) へ 3編を投稿する。

- ・ Time Capsules、著者 Claudio Pescatore and Abe Van Luik
- ・ Key Information File (KIF)、著者 Jean-Noël Dumont and Sofie Tunbrant
- ・ Markers and Beyond、著者 Stephan Hotzel and Simon Wisbey

(3) マーカーについて

2016年3月開催の Waste management (米国、フェニックス) に投稿予定の論文について、アブストラクトを用いて説明が行われた。なお、RK&M イニシアチブでは、マーカーについては上述の、「マーカーに関する文献整理」[4]、及び「津波石碑の考察」[6]の2編の報告書を公開している。

Waste management への投稿予定論文の概要

表題：Markers and Beyond

著者：Stephan Hotzel and Simon Wisbey

概要：マーカーは通常、不注意による人間侵入に対して警告を与えるために設置され、注意深い（意図的な）人間侵入は考慮しないものとされているが、人間侵入の防止を首尾一貫して検討する場合には、注意深いか否かという分類は必ずしも適切ではない。ここでは「意図的でない人間侵入」、「不必要／不適格な人間侵入」、「敵意のある人間侵入」に分類し、それぞれに適切なマーカーと記憶の保存について検討した。検討にあたっては地層処分場に関する記憶の喪失の程度も考慮した。この結果、新たな分類方法は、地下に設置するマーカーのコンセプトに影響することが分かった。ケーススタディーとして、WIPP における処分場閉鎖後のマーカーのコンセプトを検証する。

(4) タイム・カプセルについて

本会合ではタイム・カプセルについて、原環センターからの発表を含む3編の発表を実施した。内容の詳細は、3.2.3節にて詳述する。

(5) 文化遺産について

本会合では、文章の保存に対する伝統的な文化の影響について報告が行われた。する検討について報告が行われた。

報告では、永続性の概念に対する地域による差異に関し、チベット僧による曼荼羅の砂絵の作製と、作製後ただちに行われる消却が、永続するものは何もないとする考え方の事例として紹介され、一方でフランスのラスコー洞窟の壁画が永続的なものの存在を信じる事例として紹介され

た。また、西洋の石板に彫りこんだ文章と、東洋の木簡に書かれた文章を比較し、オリジナルによる情報伝達を重視する文化と、コピーによる情報伝達を重視する文化という解釈が述べられた。

(6) 責任の移管について

RK&M イニシアチブでは、処分場閉鎖後の処分実施主体から政府等への責任の移管時に、処分場に関する記録が失われるリスクを懸念している。このため、記録保存等の責任の移管について、国際機関の文章や合意事項をレビューし、今後の規制者による議論 (RWMC による Regulators' Forum) 等の議論に資するための報告書を作成している。本報告書では、例えば、使用済燃料管理及び放射性廃棄物管理の安全に関する条約 (IAEA, 1997) []において、加盟国は処分場の閉鎖後の記録、知識、記憶の保存や放射性物質の予期せぬ放出への介入を含む、制度的管理に関し適切な措置を講じることを要求されていること等について述べている。

本会合では報告書の改定を行った旨の報告が行われ、今後は事務局が Regulators' Forum への働きかけを行うこととなった。

(7) 国による公文書保管(National archive)について

それぞれの国に於いて重要な公文書は各国の法令に従って保管されるが、放射性廃棄物の処分に関する文書も、その重要性から公文書と同様に保管される可能性を持つ。

本会合では、チェコ共和国の公文書保管の取り組みについて報告が行われた。チェコ共和国における公文書保管に関する最新の法律は 2012 年に制定されている。しかし、公文書保管施設に関する取り組みは 1970 年代から行われており、現在の施設は 2002 年に建設されたものである。放射性廃棄物の処分に関する書類として、この施設に保管される書類には、処分実施主体である RAWRA による環境や地質の調査に関する書類や処分のスケジュールに関する書類が含まれている。また、書類の保管方法は記録管理に関する国際基準である ISO15489 に則ったものとされている。記録のデジタル化は 2011 年から行われており、現在、従来のマイクロフィルムによる記録保管とデジタルデータによる記録保管の双方が実施されている。記録の索引については、欧州のメタデータに関する標準を参照しており、英文への翻訳が進められている。

(8) 鍵となる情報ファイル (Key Information File) について

放射性廃棄物の処分場に関する記録は膨大な量となるため、情報を適切に伝えるためには重要事項を少ない分量で取りまとめた文章が必要となる。RK&M イニシアチブでは、このような文章を KIF (Key Information File) と呼び、40 ページの文章にまとめることを目標に、その内容を検討している。

各処分場に共通するひな形である KIF の目次案を以下に記載する。

0. 本書の目的と目次 (数種の言語にて提供)

1. 処分に関する背景

1.1 放射能と放射性廃棄物の性質

1.2 この廃棄物はどのようにして形成されたか

- 1.3 なぜこの廃棄物は地層処分を必要としたか
- 1.4 重要な日付
- 1.5 施行された規制条項
- 2. 施設の位置
 - 2.1 処分場の座標（緯度、経度、深度）
 - 2.2 地質環境
 - 2.3 閉鎖時の水理 - 地質 - 化学パラメータのベースライン
 - 2.4 敷地のモニタリングに関する措置（範囲と時間枠）
- 3. 容器及び施設の配置
 - 3.1 使用された容器の形式
 - 3.2 工学的特性
 - 3.3 接近手段と閉鎖
- 4. 処分された廃棄物のインベントリ
 - 4.1 放射性核種
 - 4.2 有害成分
 - 4.3 擾乱がない場合の放射能の変遷に関する分析結果
 - 4.4 情報の再生方法
- 5. セーフティーケース
 - 5.1 閉鎖後セーフティーケースの原則（隔離と閉じ込め）
 - 5.2 予測される影響（通常の変遷）
 - 5.3 人為的擾乱の影響（侵入への警告）
- 6. 処分に関する記録
 - 6.1 KIF の更新計画
 - 6.2 KIF の配置
 - 6.3 詳細記録の位置と配置
- 7. 世界各国における類似処分場のリスト（数種の言語にて提供）
 - 7.1 処分場の座標
 - 7.2 保存された記録の座標

本会合では、フランス・Andra 及びスウェーデン・SKB による KIF の構造の検討結果について報告された。Andra の検討は、現在監視段階にある、低レベル放射性廃棄物を浅地中に処分したラマンシュ処分場（CSM）を対象としたものであり、SKB による報告では対象とする処分場は明記されなかった。また、これらの発表では以下のような点が指摘された。

- ・読者の設定をどうするか。
 - 専門家ではないが十分な教育を受けた人とすべき。
- ・目次と他の処分場の情報の章は他言語での記載となっているが、どの言語で記載すべきか。
 - 現地地の言語と英語は含めるべき。他にフランス語、ドイツ語、スペイン語、日本語等の意見あり。

- 40 ページという設定は適切か。複数の言語での記載を考えると困難ではないか。
→分かりやすく情報を記載することと、少ない分量でまとめることのどちらを優先すべきか。
→分かりやすく記載するためには写真や図表のを多用することになるが、分量は増える。
- 図表の説明文を多言語で記載すべきか。
- KIF は、人から人に情報を伝える方式 (Mediated transmission) と長時間経過後の人に直接情報を伝える方式 (Non-mediated transmission) のどちらか。
- KIF の内容は社会変化に合わせて更新すべきか。

(9) システムチックアプローチ

RK&M イニシアチブにおけるシステムチックアプローチとは、下記の観点で整理された戦略的要素（手法等）の統合的な組み合わせ（Ensemble）と定義されている。

- ・RK&M の範囲（Dimension）：記録（R）、知識（K）、記憶（M）
- ・RK&M の時間スケール：ST（直接的監視）、MT（間接的監視）、LT（監視なし）
- ・RK&M の伝達方法：人から人に情報を伝える方式（Mediated transmission）、
- ・長時間経過後の人に直接情報を伝える方式（Non-mediated transmission）

現在の目標は、下記の事項に関する方法論を公式化することである。

- ・戦略的要素を RK&M の範囲、時間スケール、伝達方法を関係付けること。
- ・対となる戦略的要素の組み合わせを確認すること。（どの程度統合されているか、どの程度統合可能か。）
- ・情報をシステムチックに、ユーザーフレンドリーに伝えること。
- ・新たな情報を加え、容易に更新することができること。

今回の会合では、上記の事項のうち、戦略的要素を RK&M の範囲、時間スケール、伝達方法を関係付けることと、対となる戦略的要素の組み合わせを確認することに取り組んだことが報告された。報告に於いては、RK&M の範囲(Dimension) に対し、新たに「発見による認識」(awareness upon discovery :AuD) を加えることが提案された。これは地下に設置したマーカー等に関するものである。

(10) 国際機構について

RK&M イニシアチブでは、記録、知識、記憶の保存に関する、国際協力に基づいた機構の潜在的有用性について検討するため、UNESCO、国際連合欧州経済委員会（UNECE）、IAEA、EC における 11 の国際機構を分析した。分析に於いては、国際機構をコーディネートする組織の特徴の確認と、記録、知識、記憶の保存に関する機構への寄与を目標とした。本検討内容に関しては、2015 年 2 月に報告書が完成した。

(11) RepMet との協力について

OECD/NEA RWMC では、放射性廃棄物の処分の記録に関する取組として、RK&M イニシアチブの他に、Radioactive Waste Repository Metadata Management Initiative (RepMet) という取り組みを実施している。RK&M が処分場閉鎖後の記録保存に焦点を当てているのに対し、RepMet では処分場操業時、あるいは準備期間に於ける情報に焦点を当てている。この 2 つの取り組みは相互補完的であるため、協力内容を検討している。

RepMet では、放射性廃棄物の貯蔵施設における廃棄体パッケージに関するメタデータのライブラリについて検討を行っており、以下の内容について取り組みを行ってきた。なお、メタデータとは、データについてのデータであり、例えば論文に対する著者名、表題、発表年月日等のデー

タが相当するが、RK&M イニシアチブにおける本用語の定義については未確定である（後述）。

- ・ 質問票
- ・ ジェネリックなワークフロー
- ・ 適用規格
- ・ 用語集
- ・ 概念的データモデル
- ・ 関連するメタデータ

本会合では、協力の対象となる可能性のある活動として、以下の内容が挙げられた。

RK&M

- ・ 鍵となる情報のファイル (KIF)
- ・ 責任の移管
- ・ 用語集

RepMet

- ・ 適用規格
- ・ 用語集
- ・ 関連するメタデータ

今回の会合では具体的な協力内容を決定することはできなかったが、そのための準備として、RepMet による質問票を RK&M の事務局に送付してもらうこと、相互の書類にアクセスできるよう Web サイトを整備することを RepMet 側に打診することとなった。

(12) CECILE MASSART 氏の活動紹介

CECILE MASSART 氏は芸術家として長年放射性廃棄物の処分に関係した活動を行っている。本会合では、これまでの活動が報告された。氏の活動には日本の六ヶ所村をテーマにした写真の展示（2003 年、東京、Gen gallery）や、フランスのラマンシュ処分場を対象としたマーカールのデザイン等が含まれる。また、2016 年 5 月 9-21 日にも東京の Gen gallery にて展示を予定している。

(13) RK&M イニシアチブのデータベースについて

RK&M イニシアチブでは、記録、知識、記憶の保存に係る用語集、法令集を web 上から編集可能なデータベース (Wiki) として整備している。

用語集については、「Metadata」、「Cultural/Industrial Heritage」、「Systematic Approach」の 3 つの用語が議論の対象となった。特に「Metadata」については RK&M の用語集に現在記載されている内容と、上述の RepMet の用語集の記載内容とが異なっているため、調整を行うこととなった。また、「Cultural/Industrial Heritage」については Wiki を用いて意見を募ることとし、「Systematic Approach」については原案が承認された。

法令集については、各国からの参加者がそれぞれ記入したものであり、原環センターからは高レベル放射性廃棄物の処分に関する法令のうち記録保存に関連する箇所を、法務省による日本法令外国語訳データベースシステムでの英訳に基づき記載を行った。本会合では、今後事務局が内容を確認し、各国の記載を調和的に編集するためのフォーマットを次回会合にて提案することとなった。

また、これらを収録した Wiki の公開について OECD の担当部署と交渉を行うこととなった。

(14) 次回会合について

次回の会合は 2016 年 2 月 23 日～25 日に開催される。

3.2.3 記録保存媒体としてのタイムカプセルの検討

RK&M イニシアチブでは、放射性廃棄物処分処分、特に地層処分に関する記録、知識、記憶の保存のための新たな手法として、タイムカプセルの利用に関する検討を実施している。

本会合の開催に先立ち、原環センターでは記録保存媒体としてのタイムカプセルの検討の一環として、大阪万博のタイムカプセル「タイム・カプセル EXPO'70」に関する調査を実施した。この調査は RK&M イニシアチブのメンバーとして原子力機構とともに実施したものである。

本会合ではタイムカプセルに関する検討を主導する、RK&M イニシアチブの前議長である Pescatore 氏による概要報告、大阪万博のタイムカプセルを管理する文部科学省による「タイム・カプセル EXPO'70」の概要説明に加え、原環センターと原子力機構による「タイム・カプセル EXPO'70」からの学習事項に関する発表と議論を実施した。なお、RK&M イニシアチブでは、今後、タイムカプセルに関する報告書を完成させるための作業を実施する。

(1) タイムカプセルの概要

RK&M イニシアチブの前議長である Pescatore 氏より、タイムカプセルに関する全体概要の説明が行われた。主な内容は以下の通り。

- ・タイムカプセルとは、目的を持って作られた、歴史的な記録を貯蔵する封印された匣体であり、ある特定の時期に、あるいは故意でない発見により、将来世代に情報を伝える手段である。
- ・将来世代に情報を伝えるための、ポピュラーな、広く理解された手段である。
- ・科学的な試みとして、数千年後に開封されることを意図したタイムカプセルとしては以下の事例がある。このうち、大阪万博のタイムカプセルを最新かつ周到な準備が行われ、情報の入手性の高い事例として、集中的に調査を行った。

-Crypt of Civilization, USA

-Osaka Castle Time Capsule, Japan (タイム・カプセル EXPO'70)

-Memory of Mankind, Austria

-Westinghouse Time Capsules, USA

・Helium Centennial Time Columns Monument, USA

- ・放射性廃棄物の記録・知識・記憶の保存に関するタイムカプセルの概念として下記を挙げた。

1) Millennial Time capsule:

- ・多量の書類と物を内包する。
- ・容易に動かせない質量と大きさにより盗難等を防止する。
- ・処分場近傍または他の場所に設置することができる。
- ・数世紀間にわたり定期的に開けて中身を確認する儀式を提供する。
- ・情報を保存するものとして容易に理解できる。
- ・記録、知識、記憶をともに保存する機会を提供する。
- ・人から人に情報を伝える方式 (Mediated transmission) と長時間経過後の人に直接情報を伝える方式 (Non-mediated transmission) を融合することができる。

なお、原環センターでは上記の Mediated transmission / Non-mediated transmission に類似した、下記の分類をおこなってきた。

- ・リレーシステム (文書等の永久保存) : 記録の保存、更新、伝達等を行う制度を社会で維持すること。
- ・永続システム (マーカー・記録保管庫) : 人間の管理・伝承等に依存しない永続的な記録保管庫や媒体を設置すること。

2) Small Time capsule:

オーバパック等と同じ材料で作った小型のタイムカプセル内に処分場や廃棄体に関する情報を保存するという新規の概念であり、地下の処分場周辺に設置し、人間侵入時に警告を与えるものである。

この発表に対し、Small Time capsule について、タイムカプセルは開封の日時を予め設定すべきものであり、偶然見つかることを目的としたものはタイムカプセルと言い難いとの意見があった。

(2) タイム・カプセル EXPO'70 の概要

本タイムカプセルを管理している機関として、文科省よりタイム・カプセル EXPO'70 の概要が紹介された。以下は発表内容に Panasonic の Web ページ等に基づき加筆したタイムカプセルの概要である。

- ・毎日新聞社とパナソニック (当時: 松下電器産業株式会社) により作成され、現在は文科省、大阪市が管理している。収納品にプルトニウムを含むため原子力規制委員会も管理に参与している。

- 1970年当時の事物、日本の事物、実際の物品、経年変化がないこと、経年変化が他の収納物に影響を与えないこと、分野（自然科学、社会科学、芸術）間のバランスを取ることが収蔵品の選択方針である。
- 収納品は、36カ国、632人の専門家（自然科学、社会科学、芸術）にアンケート調査、一般公募（120,000件の応募）をもとに、選定委員会が技術委員会の助言を参考としながら選定した。
- タイム・カプセル EXPO'70の全収納品の数は、317件、2,098点である。これらは、大別すると、物品と記録に分けられる。また内容別には、自然科学分野、社会分野、芸術分野、その他、の4分野になっている。
- タイムカプセル本体は内径1mの球形で、厚さ35~70mmの鋳造ステンレス製(NTK-22AT)で、蓋を電気溶接で接合したものである。内部にはアルゴンガスを充填、内部に29の箱を収納し、それぞれは内容物に応じた状態に調整されている（石英ガラス管に封入し、内部の湿度を収納物に応じたものとするなど）。
- タイムカプセルはコンクリートの埋設管内に設置、埋設管とタイムカプセルの間はベントナイト、ステンレス容器、珪砂を撒設している。
- 埋設深度は9.5m及び14.5m、タイムカプセル直上の地表にはモニュメントを設置している、モニュメントの下に開封、再封印の方法の説明書をステンレス容器に入れ設置している。
- 自然災害からの保護に加え、人災からの保護、管理を容易するため、公共施設であり歴史的価値を持つ大阪城公園に設置した。
- 同一のタイムカプセルを2個設置している。1個は100年ごとに開け内容を確認するもの、もう1個は一度も開封せずに5000年間埋設し続ける。5000年という期間は文明発祥から現在までの期間から設定されている。
- 2000年に一度開封している。内容物のうち炊飯器やテレビなどの電化製品は正常に作動、植物の種子が実験で発芽するなど、大多数が封入時の性能や状態を維持していた。但し、細菌の一部は死滅し、プルトニウムを用いた時計に誤差がみられた。
- さらに2個のレプリカを製作し、一般に展示している（現在、大阪歴史博物館及びパナソニックミュージアム 松下幸之助歴史館に展示中）。

(3) タイム・カプセル EXPO'70 からの学習事項

タイム・カプセル EXPO'70 からの放射性廃棄物処分の記録保存への学習事項(Lessons)について検討を実施し、その内容を本会合にて発表した。以下の記載は発表内容の概要に、背景情報等を加えたものである。なお、検討内容は本タイムカプセルの特徴と考察からなるものであるが、特徴のうち上記の内容と重複するものは省略して記載する。

- タイム・カプセル EXPO'70 の内容物の選定過程に見られる、自然科学、社会科学、芸術の専門家の関与、社会（公衆）の関与等が、放射性廃棄物の処分に関する記録保存を主目的としたタイムカプセルにもあり得るものと考えられる。
- □ 処分関連施設への芸術家の関与については、フランスの記録保存施設や高レベル放射性廃棄物中間貯蔵施設に実例がみられる。また、記録保存に関する本会合に芸術家が出席していることも、この考えを支持するものと考えられる。
- タイム・カプセル EXPO'70 に収容された「ロゼッタストーン」に見られる、一つの文章を複数の言語で記録することで、ある言語が失われた場合に対応するという考え方は処分場の記録保存にも有効と考えられる。
- 但し、本タイプカプセルでの多言語記録は「ロゼッタストーン」のみであり、これにより他の書類を読み解くことは困難と考えられる。また、本タイムカプセルの開封方法のマニュアルも日本語での記載である。
- 本会合における「鍵となる情報ファイル (Key Information File)」や「国による公文書保管 (National archive)」に関する発表でも複数言語での記録に関する議論が行われていることから、複数言語での記録は、放射性廃棄物の記録保存に携わる者に共通する関心事項と考えられる。
- タイム・カプセル EXPO'70 に収容されたマイクロフィルムと読み取り装置、磁気テープと再生装置のような、記録媒体とその再生装置を組み合わせることは、放射性廃棄物の処分に関する記録保存を目的としたタイムカプセルにも必要である。また、複数の種類の記録媒体を用いることは、再生装置の故障に対し冗長性を確保することとなる。但し、上記の「ロゼッタストーン」に見られるステンレス板への文字の食刻や、和紙（中性紙）への記録等のように、耐久性のある媒体に文字情報を記録した場合には再生装置の収容を省略できるものと考えられる。
- 耐久性が有り、高密度な文字記録方法としては、原環センターが開発した珪化炭素板へのレーザー光線による記録、Andra によるサファイア板への記録がある。両者ともに解読は拡大鏡のみで可能。
- タイム・カプセル EXPO'70 に収容された、放射性核種の崩壊を利用した時計（ ^{239}Pu の核分裂生成物である He のガス圧により時計の針を作動）や、収容した放射性核種（ ^{14}C 、 ^{239}Pu ）を開封時に分析することでタイムカプセルの封入年代を推定する仕組みは、放射性廃棄物の記録に関するタイムカプセルに適用する場合、廃棄物中の核種組成の情報とともに用いるこ

とで、放射性廃棄物の状態遷移を正確に伝えることができる可能性がある。

- タイム・カプセル EXPO'70 に見られる、同じ内容を収納した複数のタイムカプセルを設置し、そのうち 1 個を定期的に開けて内容を確認することは、開封が儀式化され、歴史的、文化的価値を高めることができれば、記憶の継承に有効と考えられる。但し興味を持たれず、記憶が消失する可能性もある。
- 周期的な儀式による記憶の継続について、発表では茨城県に 78 年ごとに開催する祭礼が西暦 851 年より継続していること、出雲大社の約 60 年ごとの遷宮が西暦 1667 年より継続している事例を合わせて紹介。他には、住吉大社の 30 年ごと、伊勢神宮の 20 年ごとの遷宮の事例がある
- 記憶の消失の事例として、2014 年の広島における土砂災害の被害地の地名が、土砂災害を警告する「八木蛇落地悪谷」から「八木」に改名され、警告情報が消失していたことを紹介。他には、RK&M イニシアチブの過去の報告書に於いて指摘されているように、津波を警告する石碑に関し、警告文であるという認識が消失し、津波の被害を受けた事例がある。
- タイム・カプセル EXPO'70 に見られる、政府への管理の移管は、永続的な管理と、記録の正当性の保証に有効であると考えられる。
- 但し、本タイムカプセルの事例では、定期的な開封等の費用は毎日新聞社と Panasonic が負担することとなっており、私企業が 5000 年間継続するという仮定を置いているように思われる。
- タイム・カプセル EXPO'70 に見られる、レプリカの公共の場所での展示は、タイムカプセルに関する知識と記憶を広めることに役立つものと考えられる。
- レプリカの一つは当初、大阪市立博物館に展示されていたが、この博物館の閉館に伴い大阪歴史博物館に移転され展示を継続している。このことは、レプリカあるいはタイムカプセル本体が価値あるものと認められた場合には、当初意図した保管手段が継続できなくなった場合にも、他の手段により保管が継続される可能性を示している。

3.3 まとめ

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、話題等の情報収集を行うとともに、EXPO.70 のタイム・カプセルの事例を整理し報告した。

今後も本会合へ出席し、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。

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] パナソニック web ページ内の「タイム・カプセル EXPO' 70」に関する記述（和文）、
<http://www.panasonic.co.jp/history/timecapsule/index.html>
- [13] パナソニック web ページ内の「タイム・カプセル EXPO' 70」に関する記述（英文）、
<http://panasonic.net/history/timecapsule/index.html>

第4章 まとめ

4.1 平成27年度の調査研究業務のまとめを示す。

4.1.1 研究計画の更新

平成25年度に策定した調査研究計画について、性能確認技術の検討および長期健全性の確認等に関する検討の観点から更新した。

4.1.2 無線通信技術の検討

地中無線の冗長化を図る上で、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、複数のほうが、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、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。

各回路および各プログラムに関しては、昨年度の開発課題および検討結果をもとに詳細設計およびプログラムの開発を行った。その結果、省電力回路、省電力動作シーケンスのプログラム、単方向小型送信器の時計同期プログラム、RTCの高精度化、マルチホップシーケンスのプログラム、各種想定した異常事態の復旧における回路とプログラムおよび手順について詳細設計及び開発を行い、回路を実際の基板として製造し各種電子部品を実装して動作の確認を行った。その結果、省電力受信回路の効果は非常に大きく省電力化に貢献できることを確認した。また、RTCの高精度化、単方向小型送信器の通信同期、省電力受信回路の通信、定期送信の中継動作、異常復旧時の指令通信や系統変更、時計同期復旧、WDTの動作について、実際に動作試験を行うことで、機能することを確認した。

URL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。

4.1.3 無線給電技術の検討

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、試験計画を更新した。

- ・開発目標を明確にするため、給電効率の理論値を算出した。算出には実際に給電を行う場面を仮定し、コイル直径やコイル間隔をパラメータとした。計算の結果、以下の見通しを得た。
 - ①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に対する効率は76%であった。
 - ②試験孔内部分に設置可能な最大寸法である直径2.2mの1次コイルと2次コイルにおいて、寸法比=1の場合、離間距離1.7mに対する効率は75%程度であった。一方、2次コイルのサイズを小さくした場合、寸法比1/2では効率が57%、1/3で効率44%、1/4で効率35%、1/5で効率28%、1/6で効率22%であった。
- ・理論値の計算結果の信頼性を向上させるため、実際にコイルを製作して必要なパラメータを取得する要素試験を実施した。寸法の異なるコイルについて自己インダクタンスLや抵抗成分rの

周波数依存性を取得した。取得したパラメータを用いて給電効率におよぼすコイル間距離 G の影響を評価した結果、コイル寸法が小さいほど、コイル間距離が広がるほど効率が低下することを確認した。

・1次コイルと2次コイルが同一径でかつ同軸上で正対している場合の給電効率をコイル間距離とコイル直径の比率で規格化して整理した。その結果、コイルの大きさが異なりコイルパラメータが異なる場合でも、円形コイルとソレノイドコイルとコイルの種類が異なる場合でも、ほぼ同じ線上に乗る傾向を得た。これは、比率を揃えた小規模のコイルによる給電試験で実規模スケールのコイルの給電効率を評価出来る可能性を示唆している。

4.1.4 記録保存に関する調査

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、話題等を紹介した。