

博士論文

放射性廃棄物の地層処分における
モニタリングのためのワイヤレス電力伝送
に関する研究

(Study on Wireless Power Transfer for
Monitoring in Geological Disposal of
Radioactive Waste)

長井 千明

要旨

本論文は、放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングを、ワイヤレス電力伝送（Wireless Power Transfer : 以下WPTとする）を利用してケーブルレスで長期間行うシステムを提案し、様々な問題を解決する方策を示して、理論と電磁界解析および実験で方策の課題を解決することで、実用化への道を大きく切り開いたものである。

核燃料サイクルに伴って発生する放射性物質を含んだ廃棄体である放射性廃棄物は、放射性物質の種類や濃度、発生する場所に応じていくつかの種類に分けられる。その中で、高レベル放射性廃棄物および低レベル放射性廃棄物のひとつである長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU廃棄物）の一部については、数万年以上といった長期にわたり人間の生活環境から隔離する必要があることから、地層処分が計画されている。この地層処分事業では、処分場の操業中や閉鎖後における人工バリアの状態などの確認のために、長期間のモニタリングが検討されている。モニタリングの実施時には、その機器のケーブルが人工バリアの工学機能に影響を与えないことが重要である。既存研究では、システムの安全機能に影響を与えるような放射性核種の移動に関わる潜在的水みちを発生させることのないケーブルレスの地中モニタリングを目指して、情報をワイヤレス伝送、電力供給をバッテリーで行うシステムが提案されているものの、モニタリング期間がバッテリーの消耗度に依存するため、長期間の利用には不向きである。消費電力が少ないシステムや劣化が少ないバッテリーを使えば、モニタリングの期間の延長は可能であるが測定期間には限界がある。そこで本研究では、電磁波や電磁界を用いてエネルギーをワイヤレスで供給するWPTにより、センサに必要な電力をワイヤレスで給電し、取得した情報は既存技術を利用したワイヤレス伝送を利用する。この2つにより、ケーブルレスで長期間のモニタリングを可能にするシステムを提案する。また、そのシステムの様々な課題を解決する方策を示し、理論と電磁界解析および実験で方策の課題を解決した。

本論文の内容及び構成を下記に示す。

第1章では、序論として放射性廃棄物の地層処分の現状を紹介して、モニタリングの位置づけを説明した。また、それを踏まえて、放射性核種の移動に関わる潜在的水みちを発生しないようなケーブルレスでの長期間モニタリングができるシステムが必要なことを示した。

第2章では、電力供給をケーブルレス化すべき場所をプラグおよび処分孔と設定し、適用場所を明確にした。また、地層処分におけるケーブルレス化の既存技術として化学電池、原子力電池を調査した。さらに、新しい手法としてWPTを検討し、既存技術との比較を行い、各手法のメリットとデメリットを明確にした。さらには、その結果からWPTが適した手法であることを示し、地層処分におけるモニタリングにWPTを適用するための研究課題を抽出した。最後に、WPTを利用してケーブルレスで長期間モニタリングを行うシステム構成案を示した。

第3章では、WPTの方式のうち、地層処分におけるモニタリングに最適な方式を選定するために、ワイヤレスで電力供給を行う場所（プラグおよび処分孔）の媒体における複素誘電率と複素透磁率を測定した。その結果、媒体における損失を考慮した場合には、磁界を用いたWPTを利用することが最適であることを示した。また、磁界を用いたWPTには、磁界結合（電磁誘導）と磁界共振結合（磁界共鳴）の2種類が考えられるが、伝送効率で優れている磁界共振結合を選定することがシステムを構築するために最適であることを示した。

第4章では、システム設計の見通しを立てるために、WPTの送受電コイルの概念設計手法を提案した。概念設計法とは、コイルサイズを設定し、そのサイズに応じたコイル形状を簡易に表現することで算出される、送受電コイル間の結合係数を利用して伝送効率を概算する方法である。磁界共振結合のWPTの構成のうち、高効率かつ十分な電力を伝送可能であるS-S方式を選定し、概念設計法によりプラグおよび処分孔におけるWPTの伝送効率を概算することで評価を行った。これらの結果より、磁界共振結合によるWPTのプラグと処分孔における適用可能性を示した。

第5章では、小型の送受電コイルの実験結果から大型のコイルの伝送効率の推定を目的とした、結合係数とコイルサイズにおけるスケール則を提案し、プラグと処分孔において必要と考えられる電力伝送距離を実現するために、必要なコイルのサイズ検討を行った。これにより、巨大な送受電コイルを実際に製作する前に、小型の送受電コイルを利用した実証実験結果を元に巨大コイルの評価を行うことができ、設計の初期段階におけるコストや手間の削減が可能であることを示した。さらに、スケール則の結果からプラグおよび処分孔において高効率の電力伝送を実現するために必要なコイルのサイズの見通しを立てた。

第6章では、地層処分のモニタリングにおける送受電コイル間の媒体が、磁界共振結合によるWPTに与える影響を電力伝送実験により評価した。実験では、送受電コイル間の媒体の有無による伝送効率の変化について確認した。その結果、地層処分のモニタリングにおける送受電コイル間の媒体は、磁界共振結合によるWPTの伝送効率に影響を与えないことを示した。

第7章では、第2章から第6章までの総括を行い、今後の展望について示した。

目次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1. 研究背景 | 1 |
| 1.1.1. 地層処分 | 1 |
| 1.1.2. 地層処分 | 2 |
| 1.1.3. モニタリング | 6 |
| 1.2. 研究目的 | 8 |
| 1.3. 論文構成 | 8 |
| 第2章 モニタリングにおけるケーブルレス化の手法とその研究課題抽出 | 10 |
| 2.1. モニタリングにおいてケーブルレス化すべき場所 | 10 |
| 2.2. ケーブルレス化の手法 | 12 |
| 2.3. WPT の方式 | 15 |
| 2.4. 電力供給のワイヤレス化のための課題の抽出 | 16 |
| 2.5. モニタリングのシステム概念 | 17 |
| 第3章 モニタリングに適した WPT 方式の選定 | 18 |
| 3.1. 概要 | 18 |
| 3.2. モニタリングに適した WPT の選定手法 | 18 |
| 3.3. 緩衝材の複素誘電率と複素透磁率の測定 | 21 |
| 3.4. モニタリングに適した WPT の選定 | 24 |
| 3.5. まとめ | 24 |
| 第4章 送受電コイルの概念設計手法 | 25 |
| 4.1. 概要 | 25 |
| 4.2. 磁界共振結合の回路構成 | 26 |
| 4.3. 伝送効率に基づいた設計手法 | 29 |
| 4.3.1. 結合係数の算出に用いるインダクタンス | 29 |
| 4.3.2. コイルの Q 値の設定 | 31 |
| 4.4. モニタリングのための送受電コイルの設計 | 33 |
| 4.4.1. 設置可能なコイルの大きさ | 33 |
| 4.4.2. WPT 時の設置イメージ | 36 |
| 4.4.3. 伝送効率の評価 | 37 |
| 4.5. まとめ | 42 |
| 第5章 長距離伝送用大型コイル評価のためのスケール則 | 43 |
| 5.1. 概要 | 43 |
| 5.2. WPT における結合係数とコイルサイズのスケール則導出 | 43 |
| 5.2.1. インダクタンスの導出 | 44 |
| 5.2.2. 結合係数とコイルサイズのスケール則 | 46 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 5.3. 検証に用いるコイルと理論値の計算 | 47 |
| 5.4. 電磁界解析によるスケール則の評価 | 49 |
| 5.4.1. スケール則の解析結果 | 49 |
| 5.4.2. コイル巻数と結合係数 | 51 |
| 5.5. 実験によるスケール則の検証 | 52 |
| 5.6. スケール則から得られる大型コイルの仕様と伝送効率 | 55 |
| 5.7. スケール則から得られる大型コイルの仕様と伝送効率 | 56 |
| 5.8. まとめ | 56 |
| 第6章 媒体が WPT の伝送効率に与える影響 | 57 |
| 6.1. 概要 | 57 |
| 6.2. 処分孔における送受電コイルと媒体 | 57 |
| 6.2.1. 送受電コイルのサイズの設定 | 57 |
| 6.2.2. 送受電コイルの製作 | 60 |
| 6.2.3. 媒体と実験環境 | 63 |
| 6.3. 媒体が伝送効率に与える影響の評価 | 65 |
| 6.3.1. 媒体が伝送効率に与える影響の評価方法 | 65 |
| 6.3.2. 電磁界解析による媒体の影響評価 | 69 |
| 6.3.3. 電力伝送実験による媒体の影響評価 | 73 |
| 6.4. まとめ | 74 |
| 第7章 結論 | 75 |
| 謝辞 | 77 |
| 参考文献 | 78 |
| 発表文献・研究実績 | 85 |

目次

| | | |
|--------|--------------------------------------|----|
| 図 1-1 | 核燃料サイクルの概念とそこで発生する放射性廃棄物[2] | 1 |
| 図 1-2 | 放射性廃棄物の処分深度と処分方法[2] | 2 |
| 図 1-3 | 現在操業中の低レベル放射性廃棄物処分場[3] | 3 |
| 図 1-4 | 地層処分に関する取組の歴史[5] | 4 |
| 図 1-5 | 多重バリアシステムの概念（高レベル放射性廃棄物の例） [7] | 4 |
| 図 1-6 | 地層処分場および処分坑道のイメージ | 5 |
| 図 1-7 | 現状技術でのモニタリング概念 | 6 |
| 図 1-8 | 幌延深地層研究所における人工バリアの性能確認試験状況 | 7 |
| 図 1-9 | 本論文の全体構成 | 9 |
| 図 2-1 | 処分孔の概念図 | 10 |
| 図 2-2 | 処分孔に設置したセンサから出るケーブルのイメージ図 | 10 |
| 図 2-3 | プラグの概念図 | 11 |
| 図 2-4 | ケーブルレス化したモニタリングの既往研究例[31] | 12 |
| 図 2-5 | 無線通信とバッテリーを利用したモニタリング | 13 |
| 図 2-6 | モニタリングのシステムイメージ | 17 |
| 図 3-1 | 測定用試料（左：誘電率測定用，右：透磁率測定用） | 21 |
| 図 3-2 | 複素誘電率の測定状況 | 22 |
| 図 3-3 | 複素透磁率の測定試料と測定状況 | 22 |
| 図 3-4 | 複素誘電率の実部と虚部（含水比 17 %） | 23 |
| 図 3-5 | 複素誘電率の実部と虚部（含水比 28 %） | 23 |
| 図 3-6 | 複素透磁率の実部と虚部（含水比 17 %） | 23 |
| 図 3-7 | 複素透磁率の実部と虚部（含水比 28 %） | 23 |
| 図 4-1 | 磁界共振結合方式の回路トポロジ | 27 |
| 図 4-2 | S-S 方式の等価回路 | 28 |
| 図 4-3 | ノイマンの公式 | 29 |
| 図 4-4 | 円形コイル | 30 |
| 図 4-5 | 送受電コイルの位置関係 | 30 |
| 図 4-6 | 試作したコイル | 31 |
| 図 4-7 | 試作したコイル Q 値の測定データ | 32 |
| 図 4-8 | 処分孔縦置き定置方式のレイアウト | 33 |
| 図 4-9 | 坑道断面（左：軟岩系，右：硬岩系） [84] | 34 |
| 図 4-10 | 試験坑道断面（概念図） [24] | 34 |
| 図 4-11 | 処分孔縦置き方式の人工バリアの寸法 | 35 |
| 図 4-12 | 電磁波によるプラグを跨いだ給電のイメージ | 36 |
| 図 4-13 | 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 | 36 |

| | | |
|--------|---|----|
| 図 4-14 | 結合係数とコイル間距離の特性..... | 37 |
| 図 4-15 | 伝送効率とコイル間距離の特性..... | 38 |
| 図 4-16 | 結合係数とコイル間距離の特性..... | 39 |
| 図 4-17 | 伝送効率とコイル間距離の特性 ($Q = 250$) | 39 |
| 図 4-18 | 伝送効率とコイル間距離の特性 ($Q = 500$) | 40 |
| 図 4-19 | 2段階 WPT の伝送効率とコイル間距離の特性 ($Q = 250$) | 41 |
| 図 4-20 | 2段階 WPT の伝送効率とコイル間距離の特性 ($Q = 500$) | 41 |
| 図 5-1 | Helical coil. | 44 |
| 図 5-2 | コイル間距離と結合係数の計算結果 | 47 |
| 図 5-3 | コイル間距離/コイル直径と結合係数の計算結果 | 48 |
| 図 5-4 | 電磁界解析のコイルモデル..... | 49 |
| 図 5-5 | コイル間距離と結合係数の解析結果 | 50 |
| 図 5-6 | コイル間距離/コイル直径と結合係数の解析結果 | 50 |
| 図 5-7 | 電磁界解析結果から算出した伝送効率..... | 50 |
| 図 5-8 | コイルの巻き数を変更した解析結果 (1/3 サイズのコイル) | 51 |
| 図 5-9 | コイルの巻き数を変更した解析結果 (1/6 サイズのコイル) | 52 |
| 図 5-10 | 作成したコイル (1/2, 1/4, 1/5, 1/6 サイズ) | 53 |
| 図 5-11 | 相互インダクタンス測定実験状況 | 53 |
| 図 5-12 | コイル間距離と結合係数の測定結果 | 54 |
| 図 5-13 | コイル間距離/コイル直径と結合係数の測定結果 | 54 |
| 図 5-14 | 測定結果から算出した伝送効率..... | 54 |
| 図 5-15 | コイルサイズと Q 値..... | 55 |
| 図 6-1 | 平成 23 年に開発されたボーリング孔対応型受信アンテナ[31] | 57 |
| 図 6-2 | 既存の無線モニタリング機器 (中継用アンテナ) [31] | 58 |
| 図 6-3 | 製作した受電コイル..... | 60 |
| 図 6-4 | 作成した送電コイル..... | 61 |
| 図 6-5 | 受電コイルと送電コイルの Q の積 | 62 |
| 図 6-6 | ベントナイトブロックを積み重ねた実験イメージ | 63 |
| 図 6-7 | アクリル板で作成した型枠..... | 64 |
| 図 6-8 | 締固めたベントナイトブロック | 64 |
| 図 6-9 | 実験環境の解析モデル (Y 軸対称, 5 度分のモデル)..... | 65 |
| 図 6-10 | 実験環境の解析モデル (X-Y 平面の断面図)..... | 66 |
| 図 6-11 | 解析モデルの受電コイル断面拡大図..... | 66 |
| 図 6-12 | 空気中での実験状況..... | 67 |
| 図 6-13 | ベントナイトでの実験状況..... | 68 |
| 図 6-14 | 電力伝送実験の構成..... | 68 |
| 図 6-15 | 磁束密度のコンター図 (受電コイルの軸: 空気, 媒体: 空気) | 70 |
| 図 6-16 | 磁束密度のコンター図 (受電コイルの軸: 空気, 媒体: ベントナイト) 70 | |

| | | |
|--------|---|----|
| 図 6-17 | 磁束密度のコンター図（受電コイルの軸：フェライト，媒体：空気） .. | 71 |
| 図 6-18 | 磁束密度のコンター図（受電コイルの軸：フェライト，媒体：ベントナイト） | 71 |
| 図 6-19 | ベントナイトの影響解析結果：フェライトなし | 72 |
| 図 6-20 | ベントナイトの影響解析結果：フェライトあり | 72 |
| 図 6-21 | 電力伝送実験結果（空气中） | 73 |
| 図 6-22 | 電力伝送実験結果（ベントナイト） | 73 |

表目次

| | | |
|-------|--|----|
| 表 1-1 | 放射性廃棄物の種類[2] | 2 |
| 表 2-1 | ケーブルレス電源供給方法のメリットデメリット | 14 |
| 表 2-2 | WRT の方式 | 15 |
| 表 3-1 | WRT の各方式と電気パラメータ | 19 |
| 表 3-2 | 測定用試料の含水比 | 22 |
| 表 4-1 | 試作したコイルのパラメータ | 31 |
| 表 4-2 | コンクリートプラグに対するパラメータ | 37 |
| 表 4-3 | 坑道路盤から試験孔内に対するパラメータ | 39 |
| 表 4-4 | 坑道路盤から試験孔内を対象とした伝送効率 (コイル間 1.7m, $Q = 250$) | 40 |
| 表 4-5 | 坑道路盤から試験孔内を対象とした伝送効率 (コイル間 1.7m, $Q = 500$) | 40 |
| 表 4-6 | 2段階 WPT の伝送効率 (コイル間 1.7m, $Q = 250$) | 42 |
| 表 4-7 | 2段階 WPT の伝送効率 (コイル間 1.7m, $Q = 500$) | 42 |
| 表 5-1 | 送受電コイルのパラメータ | 47 |
| 表 5-2 | 送受電コイルのパラメータ | 51 |
| 表 6-1 | 受電コイルと送電コイルの大きさの設定 | 59 |
| 表 6-2 | 1/3 にした受電コイルと送電コイルの大きさ | 59 |
| 表 6-3 | 製作した受電コイルのパラメータ | 60 |
| 表 6-4 | 作成した送電コイルの情報 | 61 |
| 表 6-5 | ベントナイトを締固めた密度表 | 64 |

第1章 序論

1.1. 研究背景

1.1.1. 地層処分

わが国では、資源の有効利用、高レベル放射性廃棄物の減容化・有害度低減などの観点から、使用済燃料を再処理し、回収されるプルトニウムなどを有効利用する核燃料サイクルの推進を基本的方針としている[1]。原子力発電後の使用済み燃料には、未だ核分裂していないウランや、原子炉で生成したプルトニウムが含まれている。これらを再処理により取り出し、燃料として再利用する（リサイクルする）一連の流れを核燃料サイクルと呼ぶ（図 1-1）。この核燃料サイクルに伴い、様々な放射性廃棄物が発生する。わが国による放射性廃棄物の種類と廃棄物例および発生源を表 1-1 に示す。放射性廃棄物は、再処理施設において使用済燃料からウラン・プルトニウムを回収した後に残る核分裂生成物を主成分とする「高レベル放射性廃棄物」と、それ以外の「低レベル放射性廃棄物」の二つに大別され、「低レベル放射性廃棄物」はさらに、放射性廃棄物の種類や発生源、放射能レベルによって様々な種類に分類されている[2]。

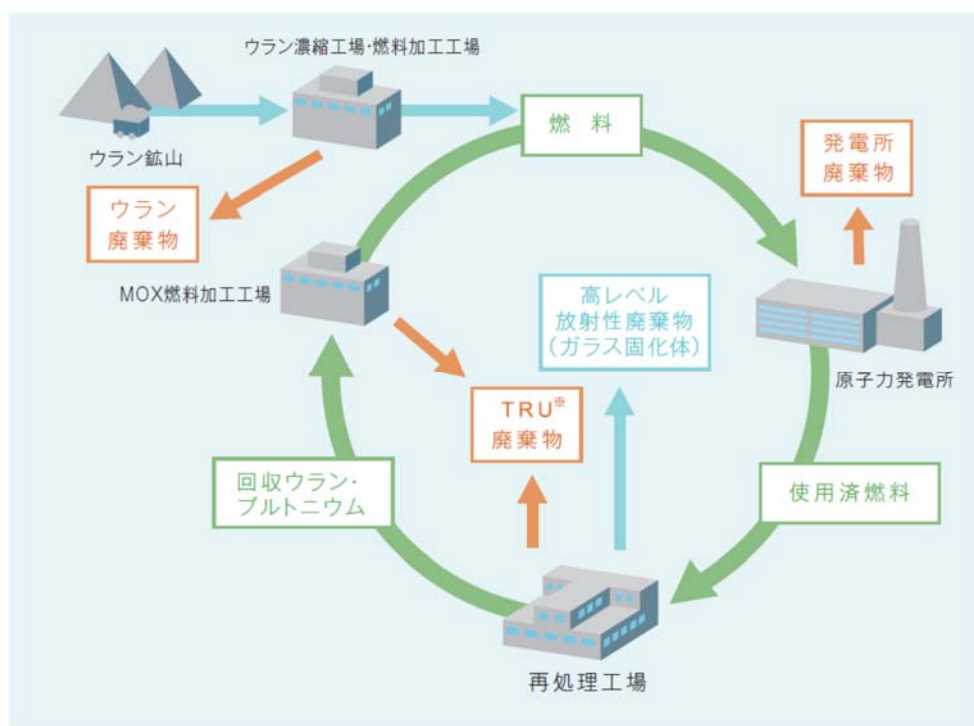


図 1-1 核燃料サイクルの概念とそこで発生する放射性廃棄物[2]

表 1-1 放射性廃棄物の種類[2]

| 廃棄物の種類 | | 廃棄物の例 | 発生源 | |
|------------|-------------------------|-------------------|--------|-------------------|
| 高レベル放射性廃棄物 | | ガラス固化体 | 再処理施設 | |
| 低レベル放射性廃棄物 | 発電所廃棄物 | 放射能レベルの比較的高い廃棄物 | 原子力発電所 | |
| | | 放射能レベルの比較的低い廃棄物 | | |
| | | 放射能レベルの比較的低い廃棄物 | | |
| | 長半減期低発熱放射性廃棄物 (TRU 廃棄物) | 燃料棒の部品, 廃液, フィルター | | 再処理施設, MOX 燃料加工施設 |
| | ウラン廃棄物 | 消耗品, 廃棄材など | | ウラン濃縮・燃料加工施設 |

1.1.2. 地層処分

放射性廃棄物は、その放射性レベルに応じてそれぞれ処分深度や障壁（バリア）が選択された上で、浅地中処分、余裕深度処分、地層処分など様々な処分方法が定められている（図 1-2）。図 1-2 で示した放射性廃棄物のうち、低レベル放射性廃棄物の浅地中処分場（トレンチ・ピット）については、茨城県東海村および青森県六ヶ所村で作業中である（図 1-3）。

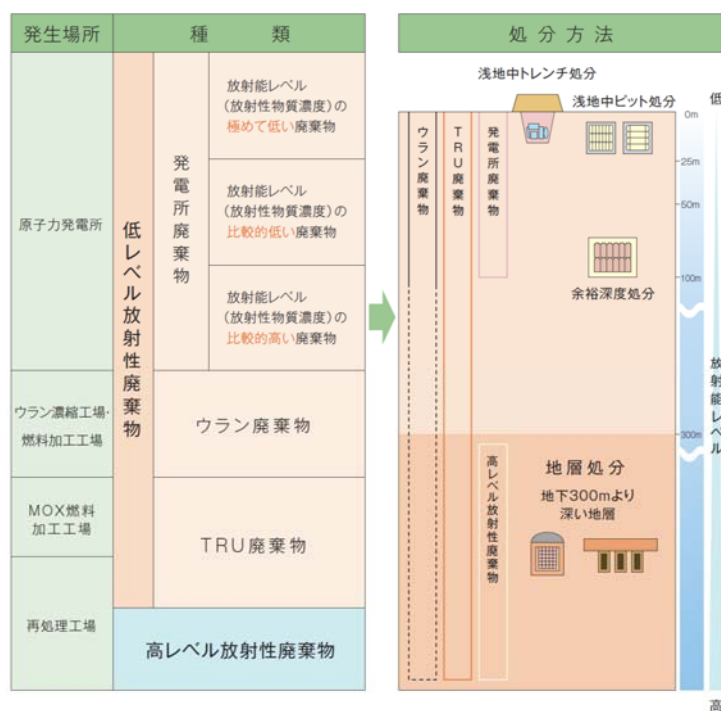


図 1-2 放射性廃棄物の処分深度と処分方法[2]

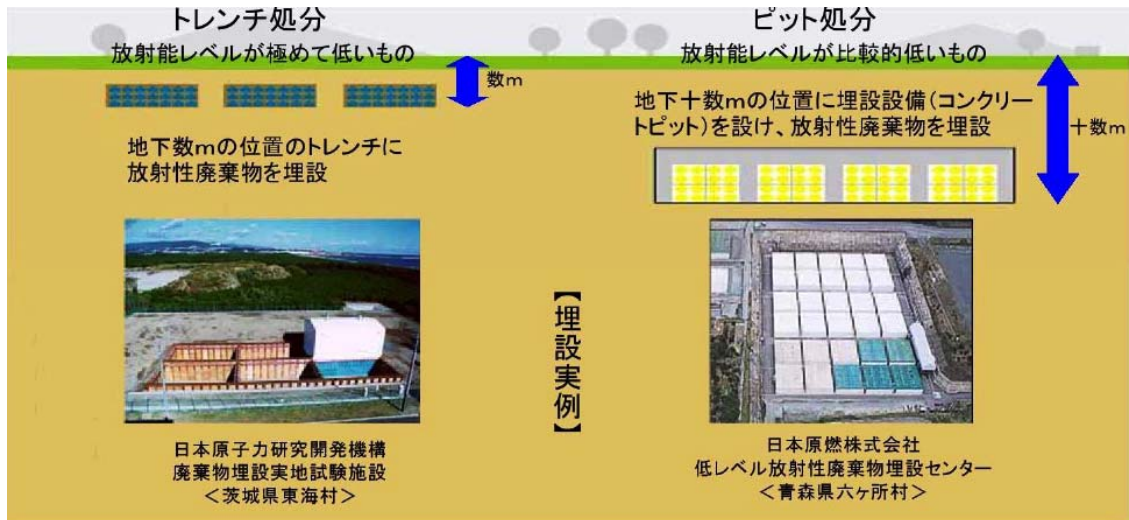


図 1-3 現在操業中の低レベル放射性廃棄物処分場[3]

また、高レベル放射性廃棄物および低レベル放射性廃棄物のひとつである長半減期低発熱放射性廃棄物（TRU 廃棄物）については、数万年以上といった長期にわたり人間の生活環境から隔離する必要があることから、地層処分が計画されている。

諸外国における地層処分について、例えば米国ではニューメキシコ州カールスバッド近郊の核廃棄物隔離試験施設（WIPP）が、国防活動で発生した TRU 廃棄物を対象とした地層処分施設として操業中である他、フィンランドでは 2001 年にエウラヨキ自治体のオルキオルトが最終処分地に決定しており、2012 年 12 月に処分場の建設許可申請が提出されている。またスウェーデンでは、2009 年に処分実施主体のスウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB 社）がエストハンマル自治体のフォルスマルクを処分場建設予定地として選定し、2011 年 3 月には立地・建設許可申請が提出されている[4]。

一方わが国では、1976 年に地層処分研究が開始され、1999 年には核燃料サイクル開発機構（現 日本原子力研究開発機構）の研究成果である「第 2 次取りまとめ」により、日本において地層処分は技術的に実現可能であることが確認された。その後、2000 年に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（最終処分法）が国会で成立されたことで、地層処分の実施主体として設立された原子力発電環境整備機構(NUMO)が、放射性廃棄物の地層処分に関わる計画を作成している（図 1-4）。2002 年からは NUMO が処分地の選定調査受入自治体の公募を開始しており、2007 年に高知県東洋町から正式に応募があったのみ（応募の賛否を巡って実施された町長選を経て、応募は取下げられた。）で、結局現在に至るまで調査を実施するには至っていない。

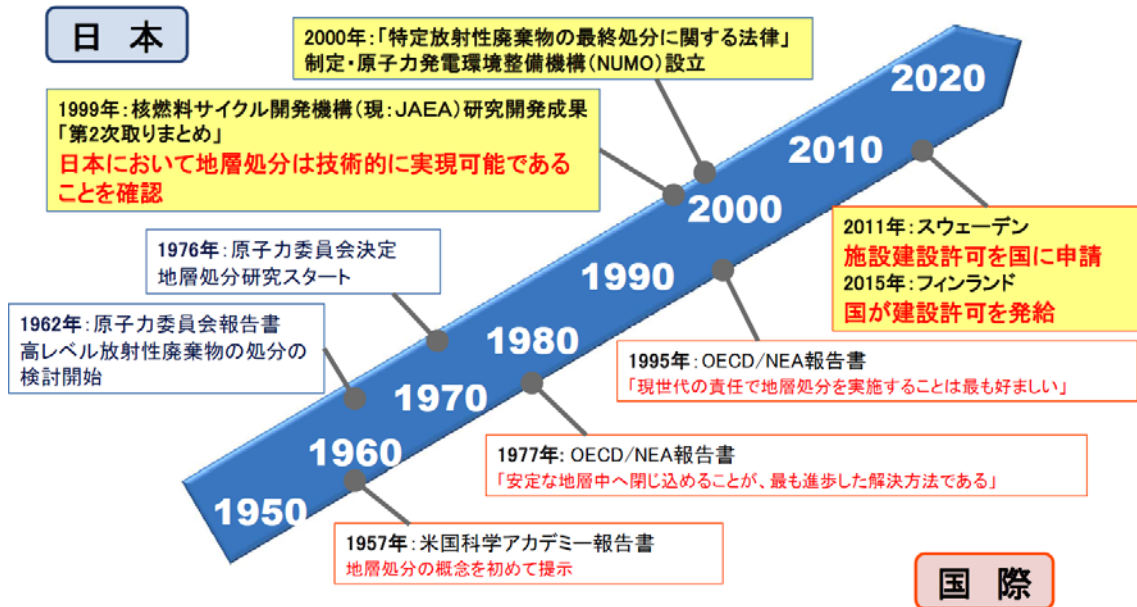


図 1-4 地層処分に関する取組の歴史[5]

地層処分において重要なことは、処分場閉鎖後の長期にわたり放射性廃棄物を閉じ込めることと、物理的に生活環境から隔離することである[6]。閉じ込め機能は、人工バリアおよび天然バリアを合わせた多重バリアシステムによって構築される。生活環境からの隔離は、適切な条件をもつ地質環境を処分場の場所として選定することで成立する。多重バリアシステム概念を図 1-5 に示す。

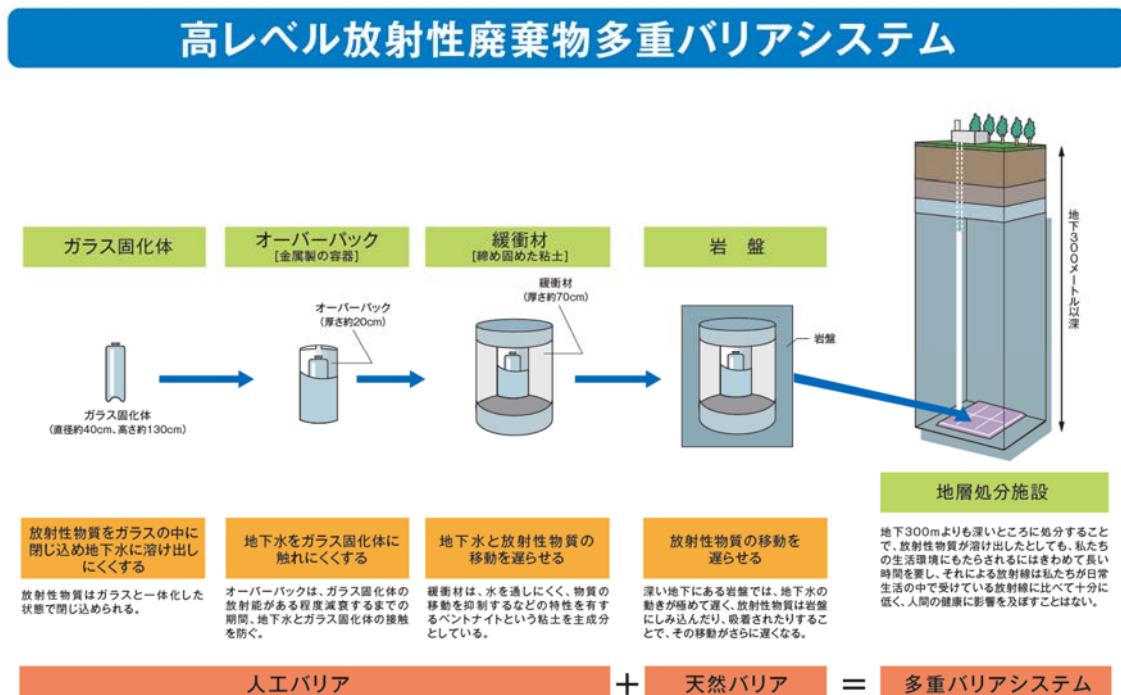


図 1-5 多重バリアシステム概念(高レベル放射性廃棄物の例) [7]

高レベル放射性廃棄物の地層処分場および処分坑道のイメージを図 1-6 に示す。最終処分法により、地層処分場は地下 300m 以深に建設することとされている。具体的には、地下の処分坑道に処分孔を掘削し、そこに高レベル放射性廃棄物処理したガラス固化体を金属で覆ったオーバーパックと緩衝材を設置する。図 1-5 にも示した通り、このようなガラス固化体・オーバーパック・緩衝材(ベントナイトなど)が人工バリアとよばれる。また処分場周辺の岩盤は、地下水の動きが極めて遅いため放射性物質の移動を遅らせる機能を持つことから、天然バリアとよばれる。

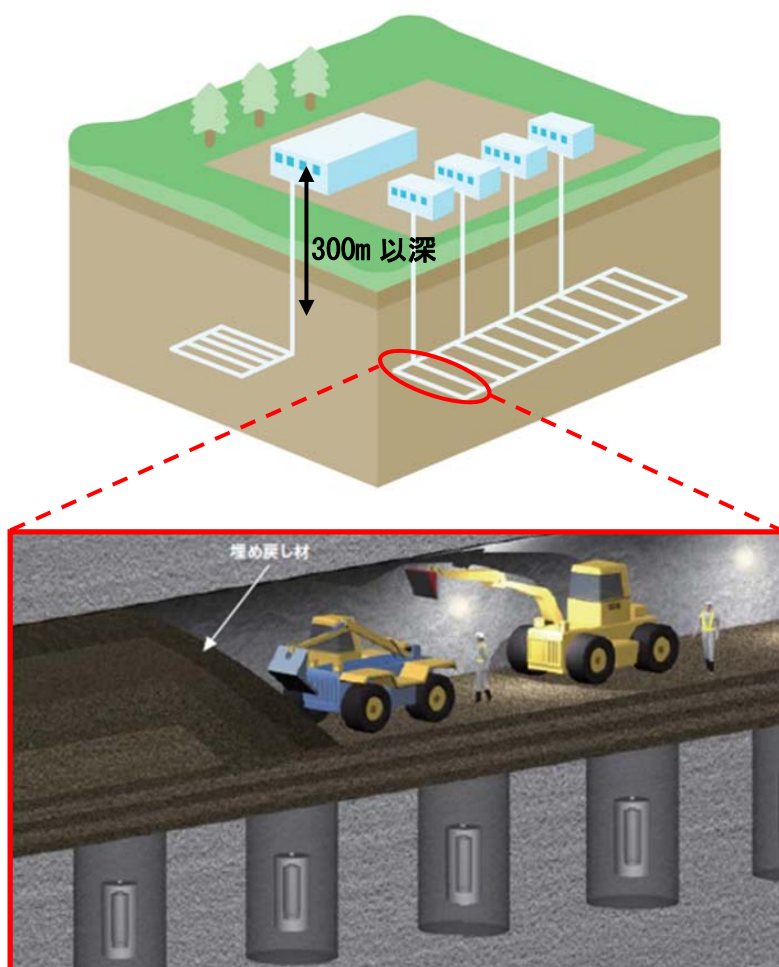


図 1-6 地層処分場および処分坑道のイメージ
([2][8][9]に加筆)

1.1.3. モニタリング

地層処分にあたっては、処分場の操業中や閉鎖後における人工バリアの状態確認のために超長期間のモニタリング計画が検討されている[9]ものの、「モニタリングの行為が地下の地質環境やバリア機能を損なってはいけない」という絶対条件がある[10][11]。

例えば、人工バリアの性能モニタリングを実施する部位としては、緩衝材が考えられるが、緩衝材のモニタリングを実施することによりバリア機能や性能を害する大きな因子として、モニタリング機器のケーブルの存在が挙げられる。具体的には、図 1-7 のように、処分孔に設置した緩衝材内にセンサを設置すると、そのセンサに電力を供給するケーブルや、センサから情報を受け取るケーブルが緩衝材内に配線されるため、ケーブル沿いにシステムの安全機能に影響を与えるような水みちが形成される可能性が高い。そのため、バリア機能を正確に測定することは難しいと考えられる。しかしながら、現行の技術では超長期間のモニタリングを行うためには電源ケーブル・通信ケーブルの存在が不可欠である。ゆえに、バリア性能を極力乱さず緩衝材の状態を正確に把握するためには、緩衝材の状況をケーブルレスでモニタリングする手法を確立することが必要となる。

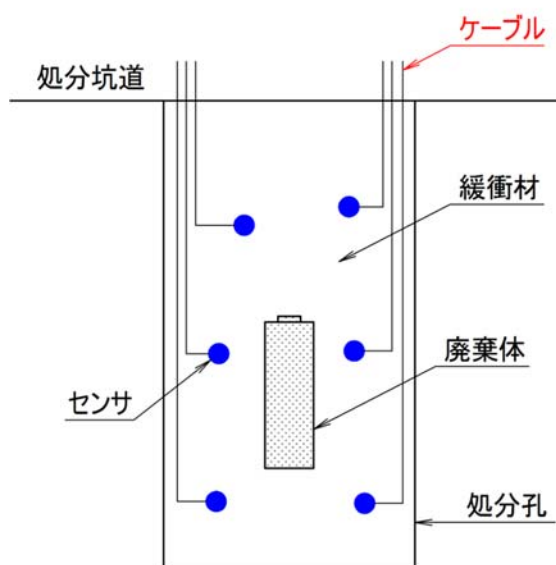


図 1-7 現状技術でのモニタリング概念

なお、人工バリアの性能に関わる既存の調査・研究については、当初は解析や基礎的室内実験などが行われていたが[12][13]、近年では北海道幌延町に建設された日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センター研究坑道を利用した、地下 300m 以深の地質環境下における人工バリアの性能確認の実証研究が進められている（例えば、[14]～[25]）。図 1-8 に、実際に幌延深地層研究センターで行われている人工バリアの性能確認試験の状況を示す。試験を行うための処分孔内に多くのケーブルが設置されているが、これらのケーブルを無くすることが必要となる。

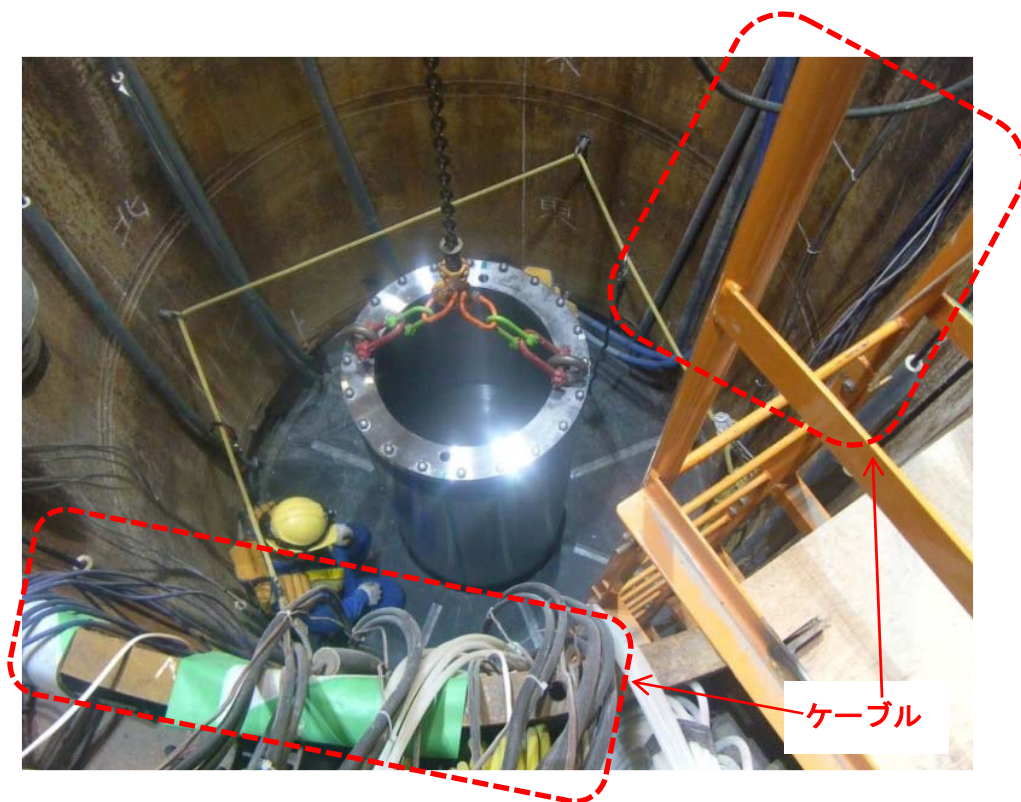


図 1-8 幌延深地層研究所における人工バリアの性能確認試験状況
([26]を修正)

1.2. 研究目的

研究背景で示したように、地層処分におけるモニタリングは、ケーブルレスで長期間行えるシステムが望まれている。そこで本研究では、それを可能にするシステムを提案する。さらに、そのシステムに必要な技術の様々な問題を解決する方策を示して理論と電磁界解析および実験により、方策の課題を解決し、システムの実用化への道を示すことを目的とする。

1.3. 論文構成

本論文の全体構成を図 1-9 に示す。各章で報告する検討内容の詳細について以下に示す。

第 1 章では、序論として放射性廃棄物の地層処分の現状を紹介し、そこでのモニタリングの位置づけについて説明した。またその上で、「モニタリングの行為が地下の地質環境やバリア機能を損わない」ようなケーブルレスで長期間モニタリングができるシステムが求められていることを示した。

第 2 章では、モニタリングを行う場所をプラグと処分孔に設定し、電力供給をワイヤレス化するべき場所を明確にした。また、地層処分におけるケーブルレス化の既存手法として化学電池、放射性同位体熱電気転換器、ベータボルタイック変換器、また電力供給のケーブルレス化の新しい手法としてワイヤレス電力伝送（Wireless Power Transfer: 以下 WPT とする）と 4 つの手法を調査し、メリットデメリットを明確にした。その結果から WPT が適した手法であることを示し、地層処分におけるモニタリングに適用するための研究課題を抽出した。最後に、WPT を適用したモニタリングのシステムを示した。

第 3 章では、WPT の方式のうち、地層処分におけるモニタリングに最適な方式を選定するために、ワイヤレスで電力供給を行う場所（プラグ、処分孔）の媒体における複素誘電率と複素透磁率を測定した。その結果、媒体における損失を考慮した場合には、磁界を用いた WPT を利用することが最適であることを示した。また、磁界を用いた WPT には、磁界結合（電磁誘導）と磁界共振結合（磁界共鳴）の 2 種類が考えられるが、伝送効率で優れている磁界共振結合を選定した。

第 4 章では、システム設計の見通しを立てるために、WPT の送受電コイルの概念設計手法を提案した。概念設計法とは、コイルサイズを設定し、そのサイズに応じたコイル形状を簡易に表現することで算出される、送受電コイル間の結合係数を利用して伝送効率を概算する方法である。磁界共振結合の WPT の構成のうち、高効率かつ十分な電力を伝送可能である S-S 方式を選定し、概念設計法によりプラグおよび処分孔における WPT の伝送効率を概算することで評価を行った。これらの結果より、磁界共振結合による WPT のプラグと処分孔における適用可能性を示した。

第 5 章では、小型の送受電コイルの実験結果から、大型のコイルの伝送効率を推定

する結合係数とコイルサイズにおけるスケール則を提案し、プラグと処分孔において必要と考えられる電力伝送距離を実現するために必要なコイルのサイズ検討を行った。この提案により、巨大な送受電コイルを実際に製作する前に、小型の送受電コイルを利用した実証実験結果を元に巨大コイルの評価を行うことができ、設計の初期段階におけるコストや手間の削減が可能であることを示した。さらに、スケール則の結果からプラグにおいて高効率の電力伝送を実現するために必要なコイルのサイズの見通しを立てた。

第 6 章では、地層処分のモニタリングにおける送受電コイル間の媒体が、磁界共振結合による WPT に与える影響を電力伝送実験により評価した。電力伝送実験では、送受電コイルの間の媒体の有無による伝送効率の変化について確認した。その結果、地層処分のモニタリングにおける送受電コイル間の媒体は、磁界共振結合による WPT の伝送効率に影響を与えないことを示した。

第 7 章では、第 2 章から第 6 章までの総括を行い、今後の展望について示した。

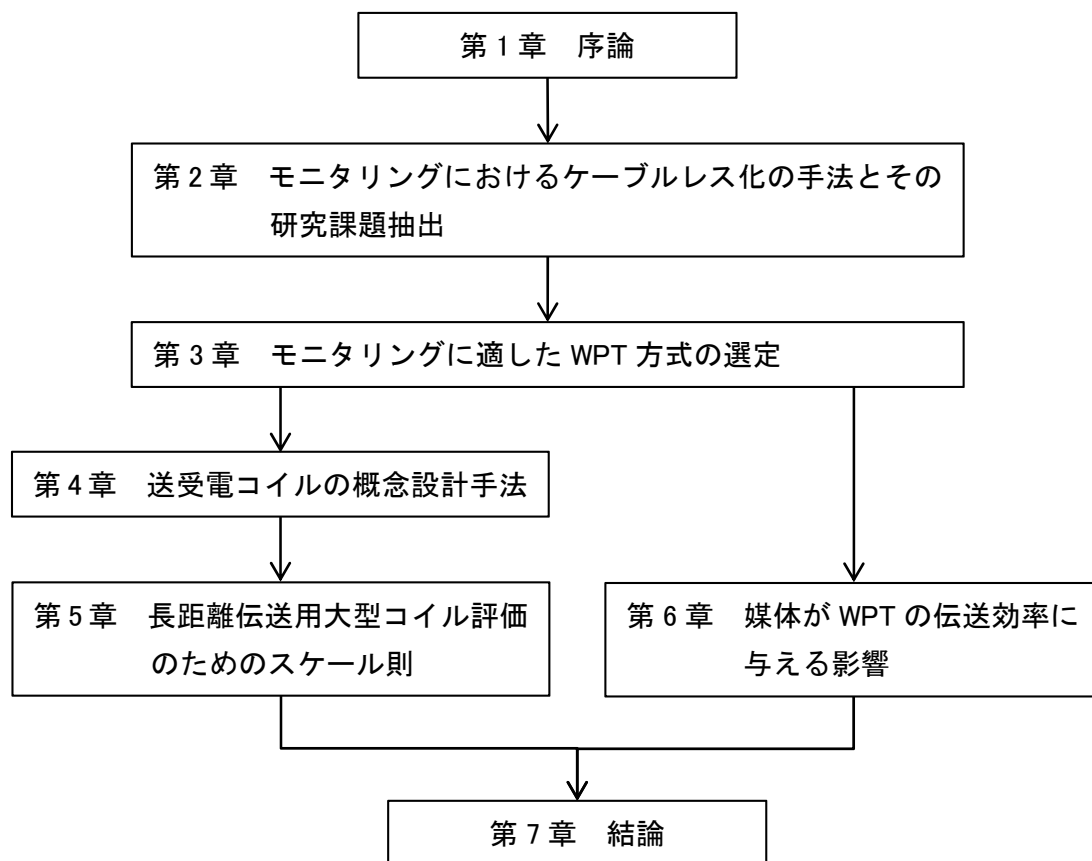


図 1-9 本論文の全体構成

第2章 モニタリングにおけるケーブルレス化の 手法とその研究課題抽出

2.1. モニタリングにおいてケーブルレス化すべき場所

地層処分事業では処分場の閉鎖に向け、建設および作業中に一部の廃棄体あるいは模擬廃棄体を対象とした現象理解を目的とするモニタリングが行われる可能性が指摘されている[11]。また、処分場の建設から閉鎖までは70年程度の時間を要するため、長期間のモニタリングを行うことが必要になる[8]。これらのモニタリングの実施にあたっては、地下の地質環境やバリア機能を損なわないことが絶対条件となる。

廃棄体設置後の処分孔のイメージを図2-1に示す。また、処分孔内部にセンサを設置して行うモニタリングのイメージを図2-2に示す。前述したとおり現状技術での実証試験は、図2-2のように緩衝材内にケーブルを設置して行われている。そのため、ケーブルを利用しないモニタリングの手法が求められる。

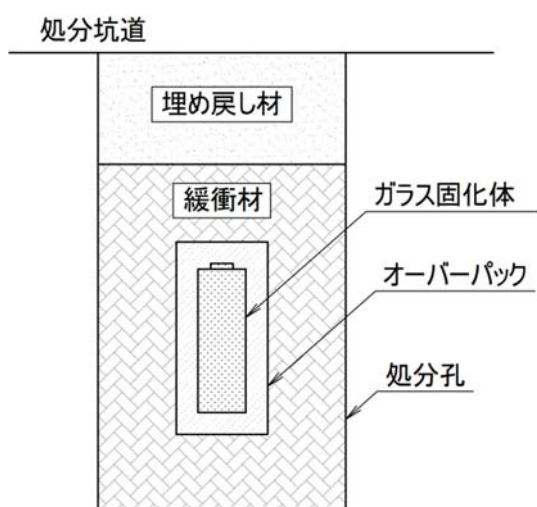


図 2-1 処分孔の概念図

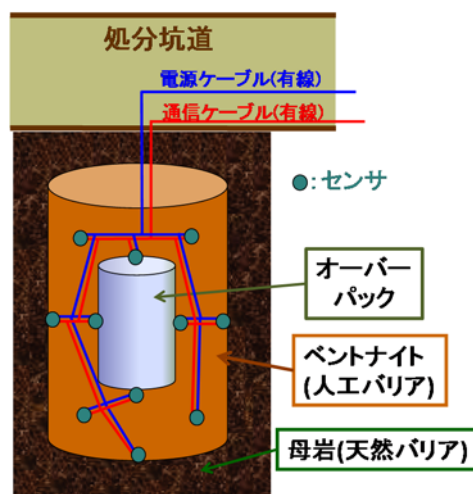


図 2-2 処分孔に設置したセンサから
出るケーブルのイメージ図

処分孔と同様に、ケーブルが設置されることでシステムの性能に影響を与える場所として、プラグが考えられる。プラグには、水理プラグと力学プラグの2種類がある。水理プラグは、坑道周辺に形成される掘削影響領域、劣化した支保工などによる連続した高透水領域を水理的に分断する目的で設置される。力学プラグは、緩衝材、埋め戻し材などの膨出防止を目的に設置される。2種類のプラグのうち、その特性からケーブルが存在することでシステムの性能に影響を与えるのは、水理プラグであるといえる。プラグの概念図を図 2-3 に示す。なお図 2-3 に示すとおり、水理プラグには水理分断機能（低透水性、自己シール性）が求められることから、その素材は処分孔と同様、ベントナイトが考えられている[27]。

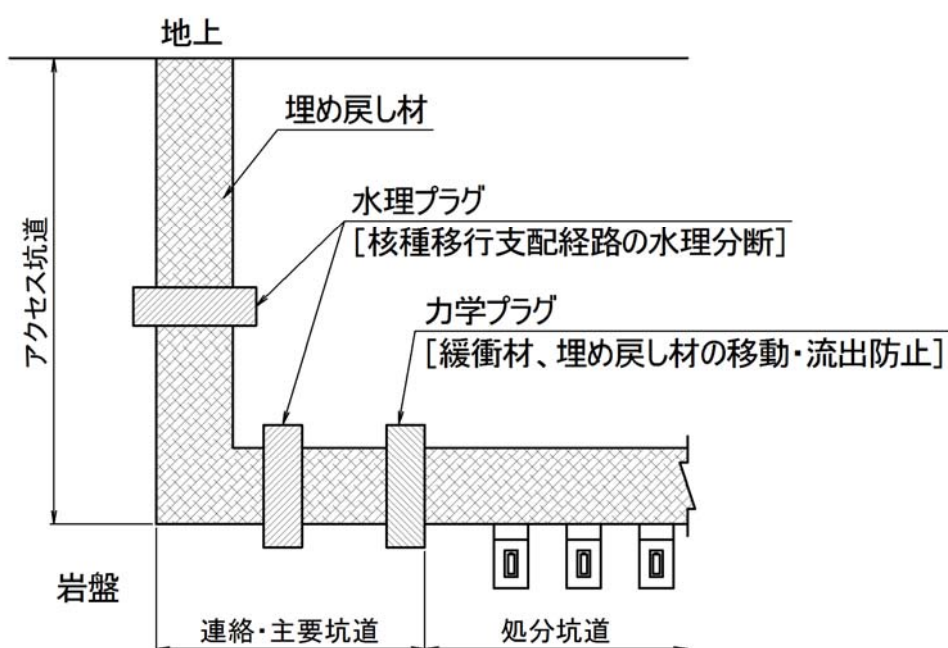


図 2-3 プラグの概念図

以上より、モニタリングの実施時にケーブルレス化が望ましい場所として、処分孔(中の緩衝材)および水理プラグの2カ所を選定した。今後の検討はこの2つについて行う。

2.2. ケーブルレス化の手法

2.1 では、モニタリングにおいてケーブルレス化の検討箇所を、処分孔と水理プラグの2つと設定した。本節では、モニタリングのケーブルレス化の手法について述べる。

モニタリングにおけるケーブルレス化の既存研究としては、電源供給をバッテリー、情報通信をワイヤレスで行うシステムが挙げられる（例えば[28]～[31]）（図 2-4）。これらの研究を利用すれば図 2-5 のように、モニタリングをケーブルレスで行うことが可能である。ただし、これらの検討ではバッテリーとして化学電池を利用しているために、処分孔の緩衝材内やプラグの内側のような、バッテリーの交換ができない場所でのモニタリングについては、バッテリーが尽きてしまうとセンサが稼働せず、強制終了となる。測定の間隔にもよるがバッテリーの寿命は最大 20 年程度と考えられるため、20 年を超える継続的な計測が必要なモニタリングには適用することができない。2.1 で示したように、建設段階から処分場の閉鎖完了までは 70 年を超える長い期間を要することから、長期間のモニタリングを可能とするための、ケーブルレスな電源供給法の確立が必要である。

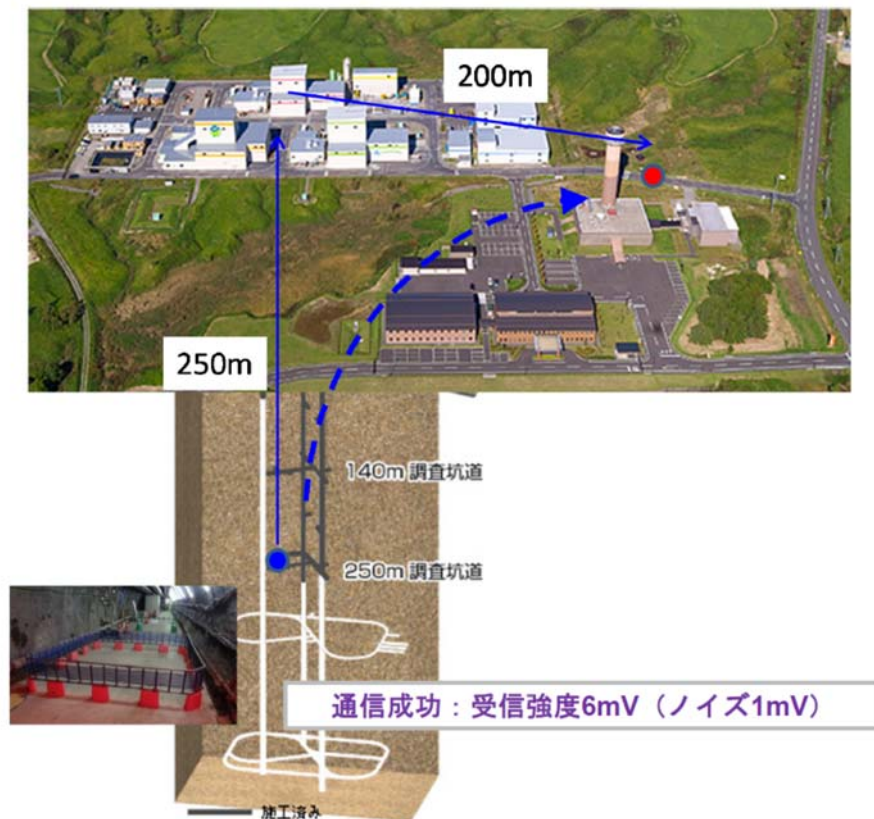


図 2-4 ケーブルレス化したモニタリングの既往研究例[31]

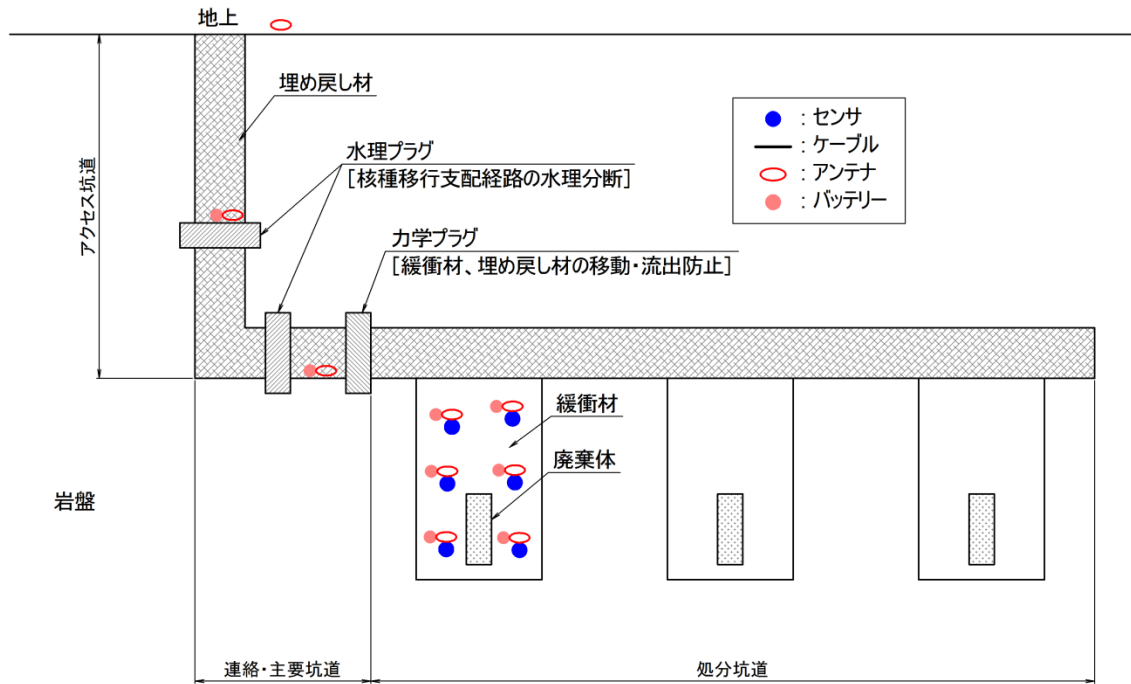


図 2-5 無線通信とバッテリーを利用したモニタリング

ケーブルレスで長期間稼働する電源供給方法としては、既往研究で利用されている化学電池を利用する他に、放射性同位体熱電気転換器（Radioisotope thermoelectric generator; 以下 RTG とする）、ベータボルタイック変換器といった、放射性同位体から放出されるエネルギーを電気に変換する原子力電池が考えられる。

RTG は、放射性物質の崩壊熱を用いてゼーベック効果により電気エネルギーに変える変換器であり、心臓のペースメーカーに応用する研究もおこなわれている[32]。また、衛星探査機のバッテリーとしても研究がされている。RTG は、利用している放射性物質の崩壊熱が続く限りバッテリーとして利用することができるため、長期間の利用という観点からは化学電池よりも利がある。また近年は、半減期が 432.2 年と長いアメリシウム-241 を利用した RTG の研究もおこなわれおり[33]、将来は、100 年以上と長期間稼働する機器の開発が期待される。

ベータボルタイック変換器は、放射性物質のベータ崩壊により放出されるベータ線を半導体にあてることで発電する方法である。近年では、GaN を用いた場合のベータボルタイック変換についての研究もおこなわれているが、稼働期間は 50 年程度が最大である[34]。

これらの方法は、放射性物質の崩壊熱やベータ線が放出される限り電源として利用できるため、化学電池と比較して長期にわたる利用の可能性が期待できる。しかし、放射性物質の半減期により利用できる期間が決まってしまう。また問題点として、RTG は放射性同位体の数 100°C におよぶ発熱、ベータボルタイック変換は μW オーダ程度の発電量のもが多く無線通信やセンサを稼働させるためには電力が小さい、などの課題がある。

そこで、電池の発想をやめ、外部から電源をケーブルレスで供給する WPT について考える[35]。電池は、電力を作る材料をバッテリーなどの機器内部に入れて利用するが、WPT は電磁波電磁界を用いて外部からエネルギーを送り、受電器を用いて電力を受け取る。そのため、電池と異なり外部から電力が供給される限り利用期間の制限がない。しかし、バッテリーはそれ単体で利用できることに對し、WPT は送電アンテナと受電アンテナが必要となるため、アンテナの配置などで利用条件がある。上記 4 つの方法について表 2-1 にまとめて示す。

表 2-1 ケーブルレス電源供給方法のメリットデメリット

| 手法 | 化学電池 | 原子力電池 | | WPT |
|------|----------|------------------|------------------|----------------|
| | | 放射性同位体 熱電気転換器 | ベータボルタ イック変換器 | |
| 利用条件 | 電池単体で稼働可 | 電池単体で稼働可 | 電池単体で稼働可 | 送受電アンテナ 1 対が必要 |
| 利用期間 | 20 年程度 | 将来的には 100 年程度 | 50 年程度 | 制限無し |

表 2-1 より、WPT のみが利用期間の制限がないことが分かる。そのため、地層処分におけるモニタリングのような、長期間かつケーブルレスで電源を供給する方法としては、WPT が一番適しているといえる。これより、本研究では WPT を利用してケーブルレスの電源供給を構築することとした。

また、表 2-1 では経年劣化は考慮していない。実際の利用においては、上記 4 つの手法すべてで劣化による影響を考慮しなければならないと考えられる。例えば、WPT のうち電磁誘導に関しては、油圧トランスやシリコン乾式トランスが一般的な製品として広く利用されているが 30 年程度が寿命の代表値であるといわれている[36]。その理由としては、外部環境によるトランス内部の絶縁体の劣化と開閉サージなどで発生する異常電圧による電氣的なストレスなどが考えられる。しかし、昭和初期から 80 年以上利用されている機器も存在する。

それを踏まえると、WPT の実際の利用において無制限での利用は難しいが、アンテナのパッケージング技術や、異常電圧を発生させないことなどにより、長期間（例えば 100 年以上）の利用は可能であると考えられる。

2.3. WPT の方式

WPT は、電磁波電磁界を用いて電力をワイヤレスで供給する方法であり、電界を用いた方式、磁界を用いた方式、電磁界を用いた方式の 3 種類と共振の有無が考えられる。表 2-2 にそれらの方式を示す。

表 2-2 WRT の方式

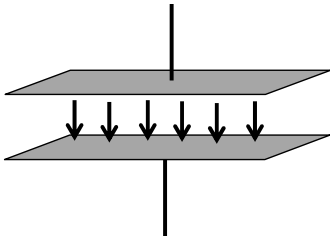

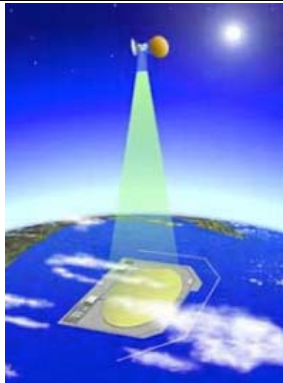
| WPT の媒介 | 電界 | 磁界 | 電磁波 |
|------------|---|---|--|
| 方式 | 電界を用いた WRT ○電界結合 ○電界共振結合 (電界共鳴) | 磁界を用いた WPT ○磁界結合 (電磁誘導) ○磁界共振結合 (磁界共鳴) | 電磁波を用いた WPT ○マイクロ波 |
| イメージ図 |  <p>平面電極などを利用して電界（容量結合）により電力伝送する方式</p> |  <p>コイルを利用して磁界により電力伝送する方式</p> |  <p>宇宙太陽光発電システム[60] 電磁波を利用して電力伝送する方法</p> |

表 2-2 に示した電界と磁界を用いた方式で共振現象を利用した電磁界共振結合方式[37]～[39]は、高効率の電力伝送と強い位置ずれの対応が可能である。これらの研究として電磁界共振結合の統一的な解釈[40]や、等価回路による解析[41]、伝送効率の公式化[42]などが行われている。

その中で電界を用いた方式は、電界共振結合を用いた基礎的検討[43][44][45]や、結合係数と電極位置の特性評価[46]、電気自動車のタイヤと道路に電極を用いたシステム[47]の開発が行われている。

磁界を用いた方式については、磁界結合（電磁誘導）による給電[48]が従来から研究

されてきたが、近年では磁界共振結合が注目されている。磁界共振結合方式は等価回路を用いた特性解析[49]、 kQ 積を用いた伝送効率の表現[50][51]、フィルタ理論による解析[52]、電磁誘導方式との統一的な理論[53]などの提案がされている。アプリケーションとしては走行中の電気自動車へ WPT を行う研究[54][55]や、電動アシスト自転車への給電[56]、家電などの身近機器へ応用が期待されている[57]。

また、電磁波を用いた方式は、マイクロ波を利用した WPT が注目されており研究がおこなわれている[58][59][60]。

2.4. 電力供給のワイヤレス化のための課題の抽出

地層処分におけるモニタリングに WPT を適用するときの課題のとして、下記の4つを抽出した。また、下記の項目のうち、①を第3章、②を第4章、③を第5章、④を第6章で示す。

①モニタリングに適した WPT の方式

2.3で示したように WPT には3つの方式と、共振の有無を考慮しないといけない。モニタリングにとって、どの手法が適しているのかを検討する必要がある。

②プラグや処分孔における WPT の設計手法

WPT をプラグと処分孔で行う場合、どのような設計すればいいのかを明確にしないといけない。また、その設計方法を示す必要がある。

③巨大な送受電器を用いた WPT の評価手法の検討

WPT を行う送受電器について、例えば坑道直径 4m に設置する場合、送受電器の大きさが最大 4m を設置することも考えられるが、巨大な送受電器の評価を行う場合の方針を示す必要がある。

④WPT の媒体影響

WPT を地層処分におけるモニタリングで利用するにあたり、送受電器間における媒体の影響を評価する必要がある。

2.5. モニタリングのシステム概念

モニタリングをケーブルレスで長期間行うために、電源供給を WPT で行うことを提案して課題を抽出してきた。それらの課題を解決することで、提案手法が実用化に向けて大きく前進できる。それにより、実際の地層処分場の作業中はもちろん作業後の長期間における人工バリア性能確認が可能となる。WPT とワイヤレス情報通信を利用したモニタリングのシステムイメージを図 2-6 に示す。センサと WPT およびワイヤレス情報通信のアンテナが一体となった機器を緩衝材内に設置することで、ケーブルレスの長期モニタリングが可能になる。また、水理プラグの前後にも WPT およびワイヤレス情報通信のアンテナが一体となった機器を設置することで、水理プラグ内にケーブルを設置せずにセンサの情報を、地上もしくは、地上よりのアクセス坑道で記録することが可能となる。

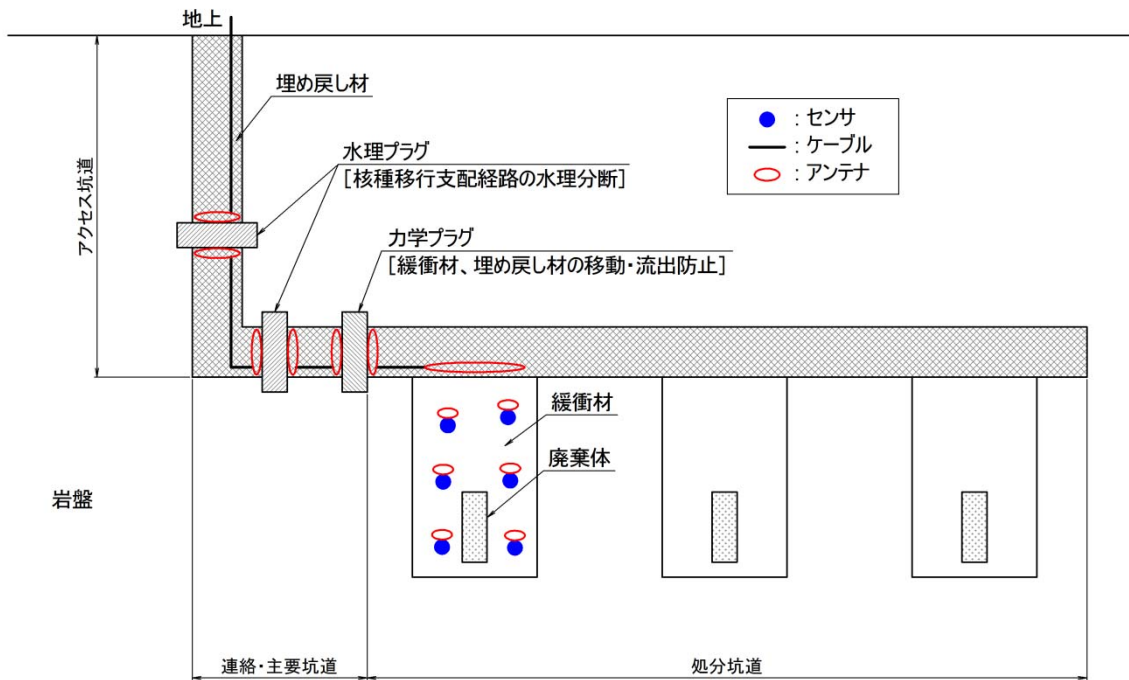


図 2-6 モニタリングのシステムイメージ

第3章 モニタリングに適した WPT 方式の選定

3.1. 概要

この章では、地層処分におけるモニタリングに最適な WPT 方式の選定における検討および結果を示す。

具体的な検討内容としては、まずワイヤレスで電力供給を行う場所(プラグ, 処分孔)の媒体(ベントナイト)における複素誘電率と複素透磁率を測定した。その結果、媒体における損失を考慮した場合には、磁界を用いた WPT を利用することが最適であることを示した。また、磁界を用いた WPT には、磁界結合(電磁誘導)と磁界共振結合(磁界共鳴)の2種類が考えられるが、伝送効率で優れている磁界共振結合を選定した。

3.2. モニタリングに適した WPT の選定手法

筆者の既存研究では、人工バリアを構成する緩衝材のうちベントナイトおよび、ベントナイトの水分飽和度 100%を模擬した水中での、磁界共振結合による WPT の基礎検討を行っており、WPT が可能であることを示した[61][62]。水中の給電に関しては、海水中での給電[63][64]、体内機器を想定した給電[65]といった塩分を含む場合での給電の検討、淡水と海水といった塩分濃度の違いによる影響の考察[66]などもされるようになってきた。また、水中における高効率な伝送などが研究されている[67]。

ここでは、水中における磁界共振結合による WPT の適用性を示すことに成功した上述の成果を踏まえ、電力伝送の媒体における WPT の方式の選定方法について述べる。

WPT の各方式と媒体が電力伝送に影響を与えるパラメータを表 3-1 に示す。表より、電磁波電磁界による電力供給については、電界を用いた方式(電界結合)、磁界を用いた方式(磁界結合)、電磁波を用いた方式(マイクロ波)の3つの方式が存在する。さらに、磁界および電界を用いた各方式には、送受電器を共振状態にさせ伝送効率を向上させた方式(電磁界共振結合)がある[38]。各方式において、電力供給を行う間の媒体の物性値としては誘電率(ϵ)および透磁率(μ)がある。これらは共に複素量で表されることから、複素誘電率および複素透磁率と記す。

表 3-1 WRT の各方式と電気パラメータ

| 方式 | 電界を用いた WPT | 磁界を用いた WPT | 電磁波を用いた WPT |
|-------|----------------------------|--------------------------------------|---|
| | ○電界結合 ○電界共振結合 (電界共鳴) | ○磁界結合 (電磁誘導) ○磁界共振結合 (磁界共鳴) | ○マイクロ波 |
| パラメータ | 電界を用いる ↓ 複素誘電率 | 磁界を用いる ↓ 複素透磁率 | 電磁波 (電界+磁界) を用いる ↓ 複素誘電率 + 複素透磁率 |

以下に、表 3-1 で示した複素誘電率および複素透磁率と、電界結合と磁界結合における関係性について、その詳細を記す。

① 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 3-1 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。

$$D = \epsilon E \quad \text{式 3-1}$$

交流における電場は式 3-2 で表される。

$$E = E_0 e^{j\omega t} \quad \text{式 3-2}$$

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 3-3 のように表される。

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

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。

② 磁界結合

磁束密度 (B) は磁界 (H) と媒質の透磁率 (μ) を用いて式 3-4 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。

$$B = \mu H \quad \text{式 3-4}$$

交流における磁界は式 3-5 で表される。

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{j\omega t} \quad \text{式 3-5}$$

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磁束密度 \mathbf{B} は式 3-6 で表される。

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 e^{j(\omega t - \delta)} \quad \text{式 3-6}$$

このときの複素透磁率は式 3-7 で表される。

$$\dot{\mu} = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} = \frac{\mathbf{B}_0 e^{j(\omega t - \delta)}}{\mathbf{H}_0 e^{j\omega t}} = \frac{\mathbf{B}_0}{\mathbf{H}_0} e^{-j\delta} = \frac{\mathbf{B}_0}{\mathbf{H}_0} (\cos \delta - j \sin \delta) = \mu' - j\mu'' \quad \text{式 3-7}$$

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。

よって、WPT の媒体の複素誘電率の虚部が大きく複素透磁率の虚部が小さい場合は、磁界を用いた WPT を選定すればよい。反対に複素透磁率の虚部が大きく複素誘電率の虚部が小さい場合は、電界を用いた WPT を選定すればよい。複素誘電率と複素透磁率の両方とも虚部が実部に対して大きい場合は、高効率での WPT は難しくなるが、アプリケーションの許容できる損失の要求を踏まえ損失が少なくなる方式の適用を検討すべきである。

3.3. 緩衝材の複素誘電率と複素透磁率の測定

地層処分におけるモニタリングへ WPT を適用した場合は、人工バリアを構成する緩衝材および水理プラグの材料として想定されているベントナイトを介して、電力伝送を行う必要がある。緩衝材およびプラグを設置したあとには地下水が浸透するため、その地下水により電界では誘電損が生じることが予想される。また、ベントナイトの主成分は約 70 % の二酸化ケイ素 (SiO_2) と約 14 % の酸化アルミニウム (Al_2O_3) であり、その他の成分として 1.5 % 程度の酸化鉄 (Fe_2O_3) などがあげられること [68] から、酸化鉄の結晶構造によっては磁界の損失が生じる可能性がある。電界および磁界の損失に影響を与える物質が含まれているため、緩衝材および水理プラグの材料と想定されている、水分を含むベントナイトの複素誘電率および複素透磁率の周波数特性の測定を行う。測定用に含水比 $17 \pm 1\%$ 、 $28 \pm 1\%$ の 2 通りのベントナイトを準備し、誘電率測定用と透磁率測定用の 2 種類の形状の計 4 種類の試料を製作した。測定用試料を図 3-1 に示し、その含水比を表 3-2 に示す。

測定方法として、複素誘電率は静電容量法、複素透磁率は測定試料に銅線を利用してトロイダルコイルのように巻き、インピーダンスを測定し、その実部と虚部から算出した。インピーダンスの計測には Agilent の E4980A を用いた。静電容量による複素誘電率の測定状況を図 3-2 に示す。複素誘電率を測定するためにトロイダルコイル状にした測定試料と測定状況を図 3-3 に示す。複素誘電率の測定結果を図 3-4 および図 3-5 に、複素透磁率の測定結果を図 3-6 および図 3-7 に示す。ここで、測定結果は比誘電率と比透磁率の測定結果であり、真空中に対する比を表していることに注意されたい。



図 3-1 測定用試料（左：誘電率測定用，右：透磁率測定用）

表 3-2 測定用試料の含水比

| 試料 | | 質量 (g) | 湿潤密度 (g/cm ³) | 乾燥密度 (g/cm ³) | 含水比(%) |
|-----|---------------|-----------|------------------------------|------------------------------|--------|
| 17% | 複素誘電率測定用(穴なし) | 3.41 | 1.61 | 1.37 | 17.5 |
| | 複素透磁率測定用(穴あり) | 3.18 | 1.56 | 1.33 | 17.3 |
| 28% | 複素誘電率測定用(穴なし) | 3.64 | 1.72 | 1.34 | 28.4 |
| | 複素透磁率測定用(穴あり) | 3.54 | 1.74 | 1.36 | 27.9 |



図 3-2 複素誘電率の測定状況



図 3-3 複素透磁率の測定試料と測定状況
(左：ベントナイトのトロイダルコア，右：測定状況)

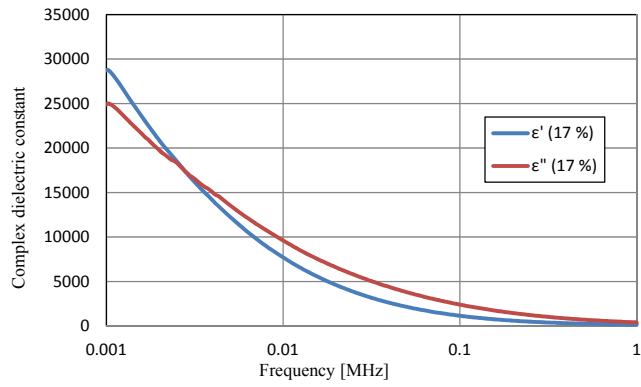


図 3-4 複素誘電率の実部と虚部（含水比 17 %）

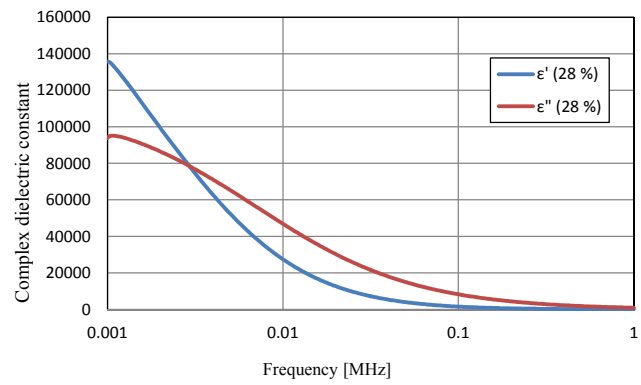


図 3-5 複素誘電率の実部と虚部（含水比 28 %）

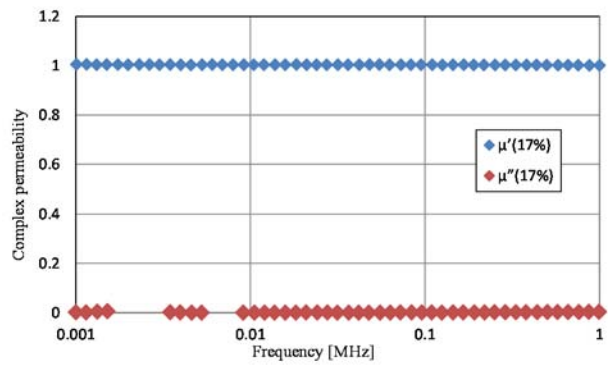


図 3-6 複素透磁率の実部と虚部（含水比 17 %）

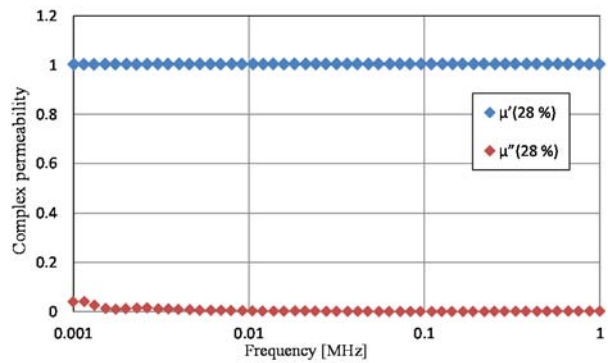


図 3-7 複素透磁率の実部と虚部（含水比 28 %）

3.4. モニタリングに適した WPT の選定

一般的に固体の誘電率における $\tan\delta$ (=虚部/実部) は、 $10^{-3}\sim 10^{-4}$ オーダーの物質が多い[69]。しかし、図 3-4 および図 3-5 よりベントナイトの誘電率における $\tan\delta$ はそれらの物質と比較して非常に高く、電界によってベントナイト中には大きな損失が発生する。また、含水比が増えると複素誘電率が変化していることから、ベントナイトに地下水が浸透して含水比が増加した場合に、電界の損失は変化する。この結果より、電磁波（電界+磁界）を用いたマイクロ波式や、電界を用いた電界結合方式の WPT は、送受電器間の媒体が水を含んだベントナイトである場合には不向きであるといえる。

一方、図 3-6 および図 3-7 の結果より、虚部はほぼゼロであり、磁界の損失はほとんどない。また、含水比によらず一定の値であり、地下水の浸透による影響がない。

よってベントナイトを介した電力伝送を行う場合、磁界を利用した WPT が最も適した手法であるといえる。また水理プラグの送電距離が数 m であることから、伝送効率の点で最も優れている磁界共振結合方式を選定した。

3.5. まとめ

地層処分におけるモニタリングに適した WPT 方式について検討を行った。選定方法としては、各方式における適用性評価の指標として、緩衝材の材料と想定されているベントナイトの複素誘電率および複素透磁率を測定し、評価することにより行った。その結果、ベントナイト中での磁界における WPT の損失は、電界で発生する損失と比較して非常に小さいことが分かった。ゆえに本研究では、磁界結合方式を選択した上で、さらにその中から伝送効率の点から優れている磁界共振結合方式を、最適な WPT 方式として選定した。

第4章 送受電コイルの概念設計手法

4.1. 概要

この章では、プラグおよび処分孔において、磁界共振結合方式による WPT の設計の見通しを立てるために、送受電コイルの概念設計法を提案する。

WPT におけるコイル設計としては、フィルタ理論に基づいたサイズの異なるコイル設計[70]や多段化設計[71], 走行中給電[72]やワイヤレスインホイールモータ[73]といった具体的なアプリケーションに落とし込んだ設計法などが提案されているが、いずれの手法も一度コイルを製作し、測定値をもとに設計を行う手法である。本来設計はコイルを作る前に見通しを立てることが要求される。そこで計算のみで簡易にコイル設計を行う手法を提案し、ここでは概念設計法と称する。

概念設計法とは、送受電コイル間の結合係数をループコイルで簡易算出し、それに基づき磁界共振結合における等価回路から伝送効率を概算する方法である。ループコイルを用いた伝送特性の設計手法[74]があげられるが、S パラメータを用いており多少煩雑である。提案する概念設計手法はシミュレーションや測定値などを使わない簡便な手法であり、さらに k や Q に基づいて設計することで、容易に WPT の見通しを立てることができる。磁界共振結合による WPT の方式の中でも、高効率かつ十分な電力を伝送可能な S-S 方式を選定し、プラグおよび処分孔において算出した結合係数をもとに伝送効率の概算値を求めた。概念設計による伝送効率の算出により、地層処分におけるモニタリングに対して WPT が十分に適用可能であることを示す。

4.2. 磁界共振結合の回路構成

磁界共振結合の概念設計手法における伝送効率の計算には、等価回路を用いる。等価回路から計算することで、電磁界解析やコイル製作をすることなく簡便に伝送効率の見通しをたてることができるため、検討段階におけるコストの削減につながる。

ところで、2007年にMITから磁界共振結合について発表された際には、共振コイルの周波数は約10MHzであった。しかし、近年研究が盛んに行われている電気自動車への給電の研究においては85kHz付近の周波数が用いられることが多くなっている[75]。85kHz帯を用いる利点としては、10MHz帯よりも波長が長く、比較的大きなコイルを集中定数として取り扱えることや、スイッチング損失が小さくできること等が挙げられる。

上記のように共振周波数が低く、波長がコイル全長より十分長ければ集中定数として扱え、簡易な等価回路を用いた計算が可能となるため、本研究においては100kHz程度の周波数帯を利用することとする。100kHz前後の周波数では、波長より十分に短い数100m程度のコイル長まで集中定数回路として扱える。一方、10MHz前後の周波数では数mのコイル長に制限されていしまう。後述するように、モニタリングにおいて利用するコイルは直径4m程度を想定するために、波長の長い100kHz前後の周波数が適していると考えられる。

ところで、磁界共振結合方式のWPTにおける集中定数系の等価回路では、送電側、受電側の共振コンデンサの接続方法として、コイルと直列か並列の4種類の回路構成が存在する。図4-1に共振回路の構成を示す。

各回路構成については2007年の磁界共振結合方式が発表される前から現在まで多くの研究がなされている[76]-[78]。例えば、フェーザ図を用いて電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一的解釈も行われている[53]。また、回路構成において、コイル間距離が大きく結合係数が小さい場合に伝送効率が最大となる負荷抵抗は、S-S方式とP-S方式が50Ω程度と小さく、S-P方式とP-P方式が20kΩ程度と大きいことが示されている。またS-P方式およびP-S方式では、大電流または高電圧に対応する回路素子が必要とされている[79]。

モニタリングにおいて、センサへ給電する電力は数W～数十W、電圧は数V～数十V程度が想定される。一例として、電池を用いた地中無線送信装置の電池出力は33W[80]、装置に使用されている水圧計の電源電圧は最大で24V[31]である。よって等価的な抵抗値 R_L は式4-1のように求めることができる。

$$R_L = \frac{V_L^2}{P_L} = \frac{24^2}{33} \cong 17.5 \quad \text{式 4-1}$$

よって等価的な抵抗値は数十Ωのオーダーであり、WPTにおける最適負荷抵抗はこの程度になることが望ましい。

これらから、モニタリングシステムへの応用にはS-S方式が最適であると考えられる。本研究では、S-S方式についてのみ取り扱うが、本章の概念設計法などは他方式を用いたWPTにも応用可能であると考えられる。

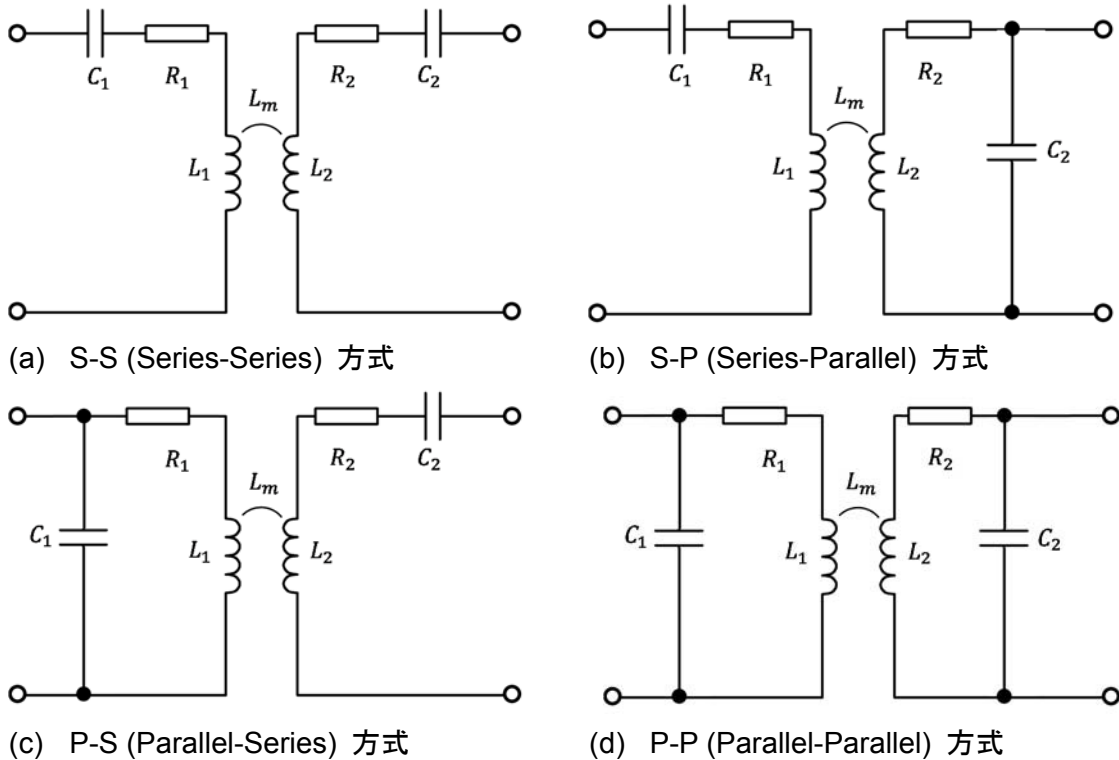


図 4-1 磁界共振結合方式の回路トポロジ

地層処分のモニタリングにおいて、磁界共振結合によるWPTでのコンデンサの接続をS-S, S-P, P-S, P-P方式の中でも、高効率かつ十分に大きな電力が伝送可能なS-S方式を選定した。図4-2にS-S (Series-Series)方式の等価回路を示す。 L_m は相互インダクタンス、 L は自己インダクタンス、 C はキャパシタンス、 R_L は負荷抵抗、 R は内部抵抗を表している。添え字の1は送電側、2は受電側を表す。S-S方式は、電力伝送用のコイルと共振用コンデンサが直列で接続されている方式である。この方式でのWPTの効率は、負荷抵抗 R_L が最適負荷 R_{Lopt} のときに最大効率 η_{max} となることが知られている。式4-2に最大効率、式4-3に最適負荷抵抗値を示す。

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad \text{式 4-2}$$

$$R_{Lopt} = R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} \quad \text{式 4-3}$$

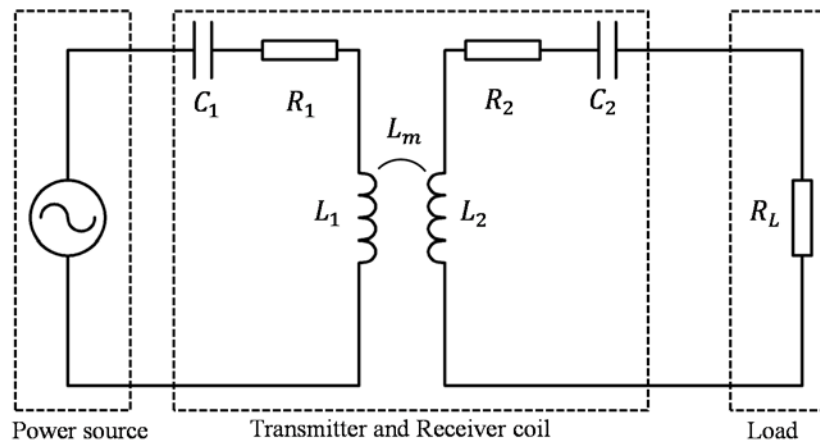


図 4-2 S-S 方式の等価回路

ここで、 Q 値はある周波数 f におけるコイルの性能を表す指標である。 Q 値は式 4-4 で表される。

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} \quad \text{式 4-4}$$

k は結合係数であり、 $0 \leq k \leq 1$ である。結合係数は式 4-5 で表される。

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \text{式 4-5}$$

式 4-2 に示されるように WPT における最大効率 η_{max} は k と Q により決まるため、送受電コイルの設計に依存する。また、DC-DC コンバータを用いることで、等価的に最適負荷 R_{Lopt} にすることが可能であるため[81]~[83]、最大効率 η_{max} は負荷抵抗によらず実現できる。よって、次節から最大効率 η_{max} に基づいた伝送効率の計算による送受電コイルの概念設計手法を提案する。

4.3. 伝送効率に基づいた設計手法

4.3.1. 結合係数の算出に用いるインダクタンス

相互インダクタンスはノイマンの公式より算出することができる。図 4-3 のように、回路 C_1 、 C_2 の線要素 ds_1 、 ds_2 の距離が r 、両要素の方向の間の角度を θ とすると、相互インダクタンスは式 4-6 で表すことができる。

$$L_m = \frac{\mu}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{ds_1 \cdot ds_2}{r} = \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{\cos \theta ds_1 ds_2}{r} \quad \text{式 4-6}$$

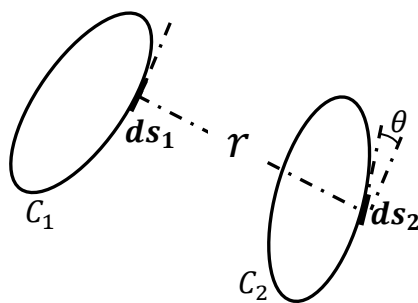


図 4-3 ノイマンの公式

スケール則の検討において、ノイマンの公式ではコイル形状の情報がないため検討が難しい。そこで簡易的に k を算出するために、送受電コイルを円形コイル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 L_m について示す。円形コイルを図 4-4、送受電コイルの位置関係を図 4-5 に示す。

円形コイルの自己インダクタンス L は、式 4-6 のパラメータを用いて式 4-7 で表される。

$$L = a \left\{ \mu_0 \left(\log \frac{8a}{\alpha} - 2 \right) + \frac{\mu}{4} \right\} \quad \text{式 4-7}$$

ここで、 μ_0 は真空中の透磁率、 μ は導体中の透磁率である。

図 4-5 のように、半径が a_1 、 a_2 の円形コイルが中心間距離で同軸上に正対している場合の相互インダクタンス L_m は、式 4-8 で表される。

$$L_m = \mu\sqrt{a_1 a_2} \left\{ \left(\frac{2}{x} - x \right) K(x) - \frac{2}{x} E(x) \right\}$$

$$x = \sqrt{\frac{4a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2 + d^2}}$$

式 4-8

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

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。
 これらの自己インダクタンスおよび相互インダクタンスの式を用いて、坑道内に設置可能なコイルサイズのパラメータより結合係数を算出する。

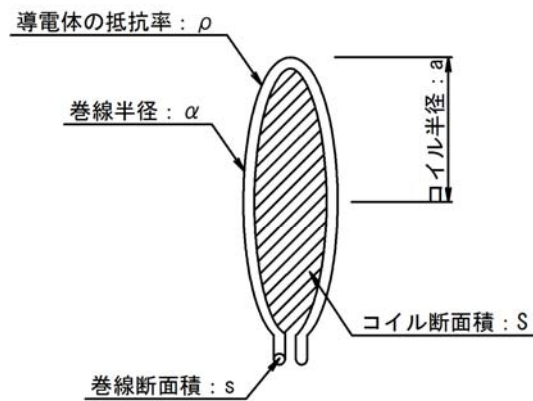


図 4-4 円形コイル

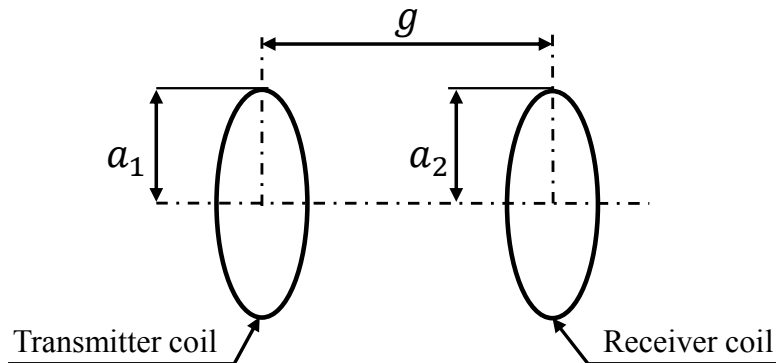


図 4-5 送受電コイルの位置関係

4.3.2. コイルのQ値の設定

磁界共振結合による WPT の伝送効率を算出するにあたり、コイルのQ値を設定する。コイルのQ値はコイルの性能を表す指標であり、Q値が高い場合に WPT における伝送効率は高くなる。また、Q値は式 4-4 で示すように、コイルの自己インダクタンス、交流抵抗、周波数により決定し、一般的にQ値は最大で 500 程度といわれている。

ここでは、製作したコイルのQ値をもとに概念設計に用いるQ値を設定した。試作したコイルを図 4-6 に、コイルのパラメータを表 4-1 に示す。また、Q値の測定結果を図 4-7 に示す。図 4-7 の結果より、本章ではQ値を 250 と設定した。



図 4-6 試作したコイル

表 4-1 試作したコイルのパラメータ

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

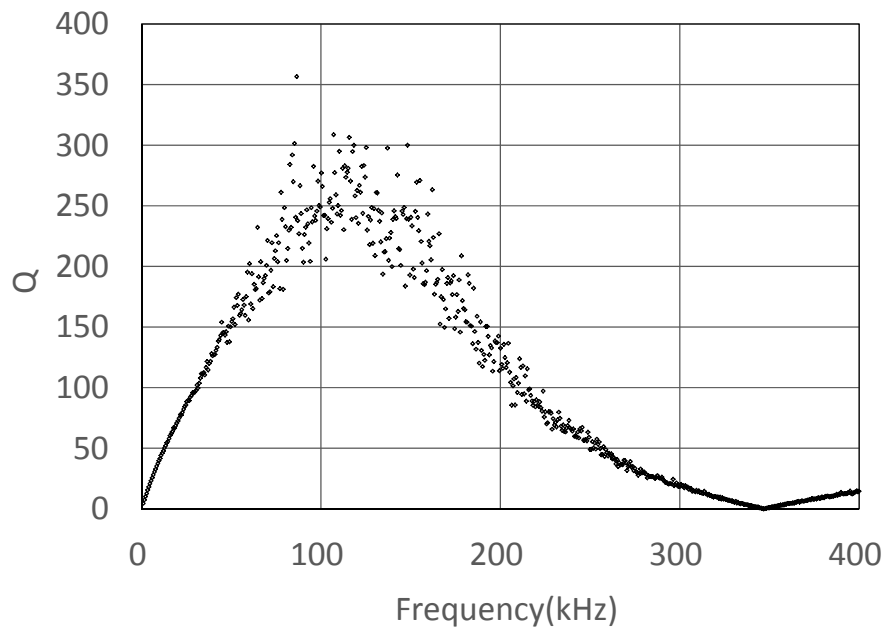


図 4-7 試作したコイルQ値の測定データ

4.4. モニタリングのための送受電コイルの設計

4.4.1. 設置可能なコイルの大きさ

ここでは、2.1 で設定したケーブルレス化すべき場所であるプラグと処分孔において設置可能な送受電コイルのサイズを設定する。無線通信とバッテリーを利用したケーブルレスでのモニタリングの検討は、処分孔などをターゲットとして検証されている[80]。図 4-8 に処分孔縦置き定置方式を想定した坑道レイアウトのイメージを示す。

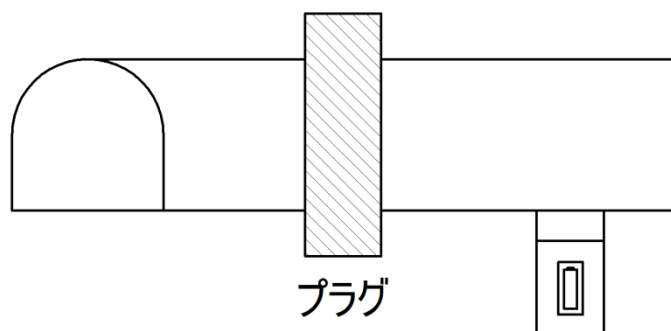


図 4-8 処分孔縦置き定置方式のレイアウト

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、処分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ことが望まれる。

(1) プラグに設置可能なコイルサイズ

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、コイル直径の最大は坑道直径となる。図 4-9 に坑道断面[84]を示す。これにより、プラグを跨ぐ WPT では設置するコイルの最大径を 4 m とした。コイル間の離間はプラグの厚さに対応する。先行研究での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が行われ、3 m の厚さのコンクリート製のプラグが打設された[24]。バリア性能試験の試験坑道断面（概念図）を図 4-10 に示す。そこで、プラグを越える場合のコイル間距離を 3 m とした。

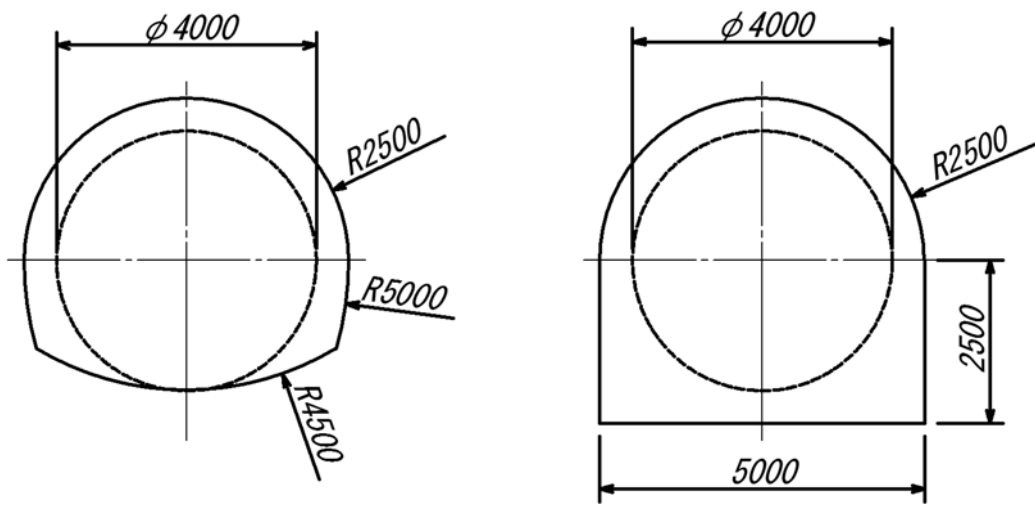


図 4-9 坑道断面（左：軟岩系，右：硬岩系）[84]

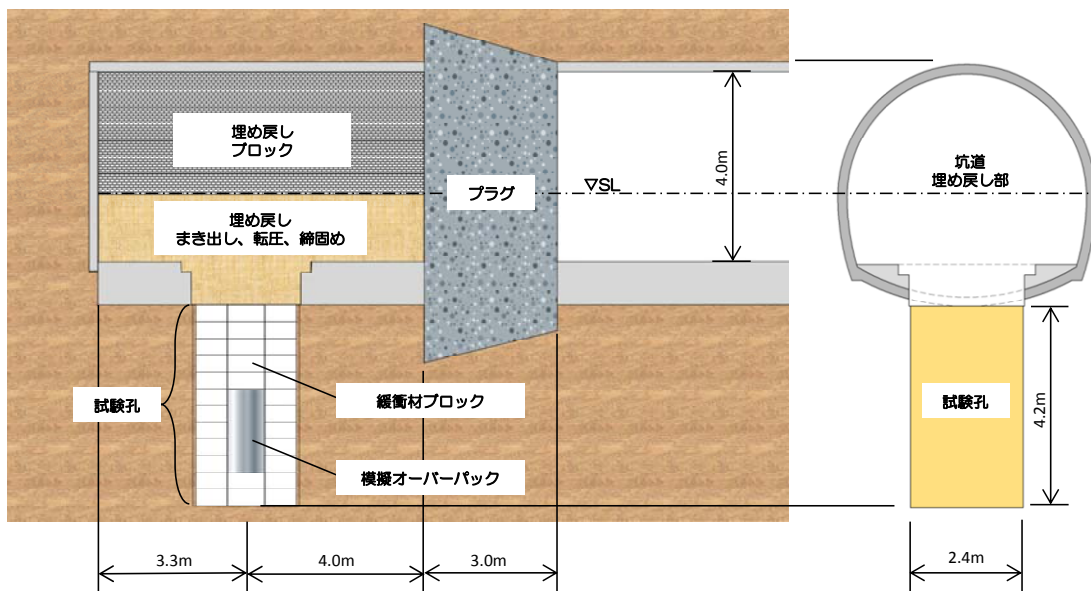


図 4-10 試験坑道断面（概念図）[24]

(2) 処分孔に設置可能なコイルサイズ

プラグと同様に、処分孔についても設置可能なコイルサイズについて検討した。処分孔は図 4-10 に示す坑道の路盤に掘削され、内部の構成は図 4-11 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[84]。本項では、処分孔の孔径と同径 2.2m の送電コイルを路盤上に設置すると仮定した。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受電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。

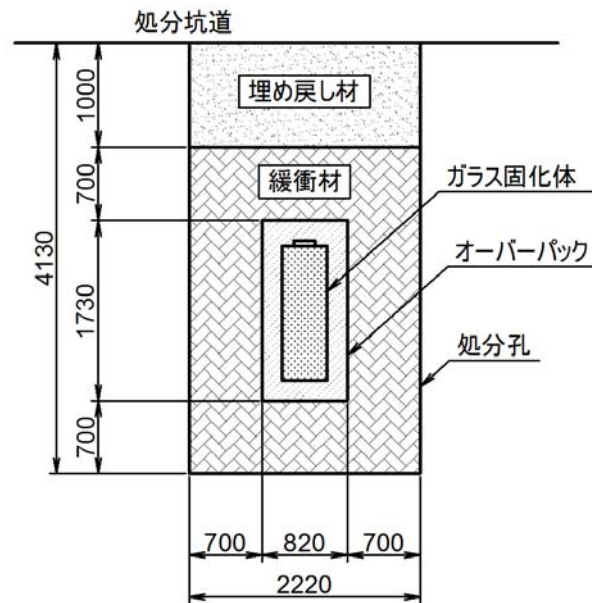


図 4-11 処分孔縦置き方式の人工バリアの寸法

4.4.2. WPT 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送電コイルと受電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。コイルの大きさは送受電コイルともに、最大で坑道直径(4m)まで設置可能である。受電コイルで受けた電力で坑道内に設置された機器の稼働やバッテリーの充電が可能である。図 4-12 にイメージ図を示す。

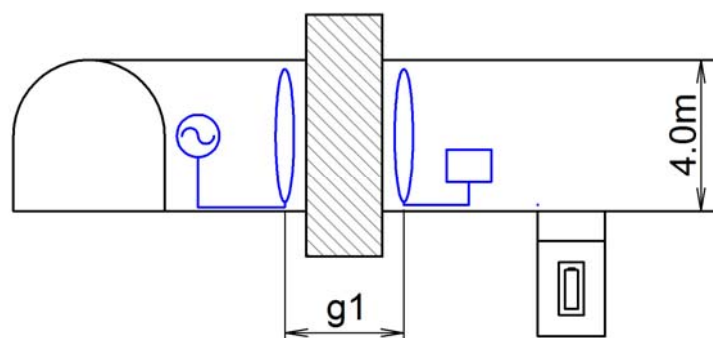


図 4-12 電磁波によるプラグを跨いだ給電のイメージ

(2) 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により、試験孔上に設置した2段階目の送電コイルを励起する。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段階目の受電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段階目の送電コイルに印加したエネルギーは2段階で減衰する。図 4-13 にイメージ図を示す。

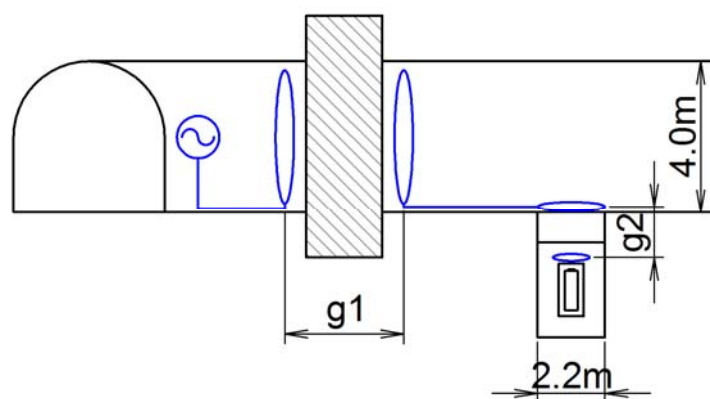


図 4-13 送受信コイルを2段階介した試験孔内への給電のイメージ

4.4.3. 伝送効率の評価

伝送効率は式 4-2 の理論式に、4.3.2 で設定したコイルの Q 値、4.4.1 で設定したコイルサイズや伝送距離を代入することで算出する。算出結果より、伝送効率を評価する。

(1) プラグに対する伝送効率

プラグを対象に、磁界共振結合による WPT 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、4.3.2 で設定した $Q = 250$ と、想定しうる最大の $Q = 500$ を利用した。また、結合係数は、4.4.1 で設定した送電コイルと受電コイル共に直径 4m とし、コイル間距離はプラグ幅 3m に対して、0.5~5 m の間を 0.5 m 刻みで計算した。パラメータを表 4-2 に示す。図 4-14 に結合係数を、図 4-15 に伝送効率を示す。

表 4-2 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) |

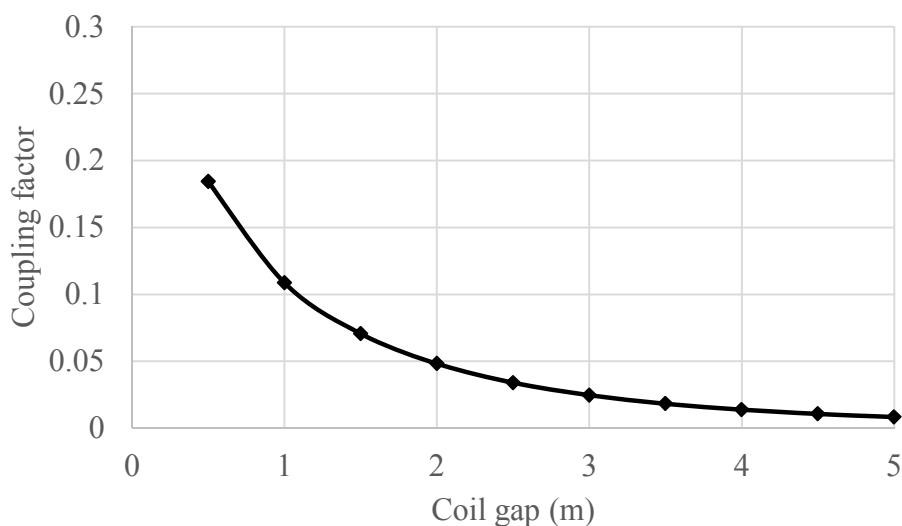


図 4-14 結合係数とコイル間距離の特性

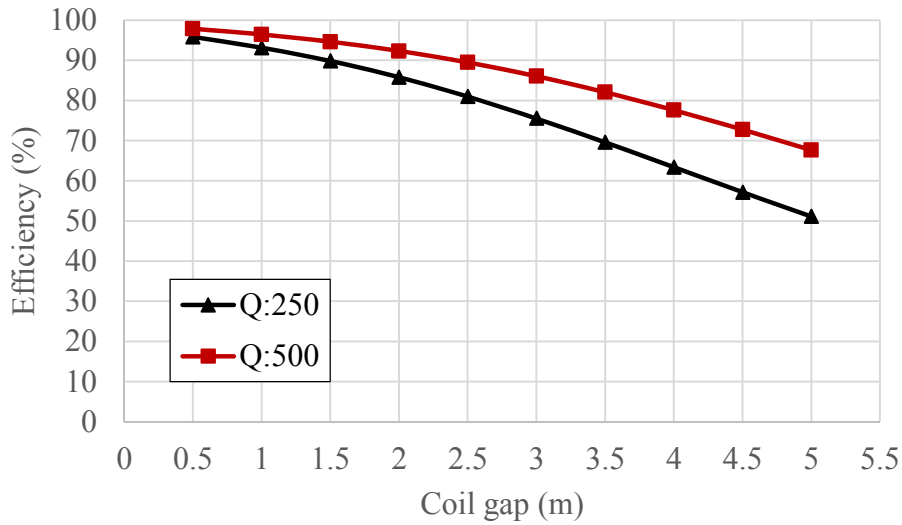


図 4-15 伝送効率とコイル間距離の特性

図 4-15 より、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 値が 250 の時に 76% であり、 Q 値が 500 の時に 86% であった。

(2) 坑道から試験孔内への伝送効率

坑道路盤から試験孔内を対象に、磁界共振結合による WPT の伝送効率について算出した。坑道路盤から試験孔内へ WPT を行った場合の伝送効率の算出を(a)に示す。図 4-13 のようにプラグから坑道路盤へ、さらに坑道路盤から試験孔内へ給電する 2 段階の給電における伝送効率の算出を(b)に示す。

(a) 坑道路盤から試験孔内への伝送効率 (1 段階の WPT)

坑道路盤から試験孔内を対象に、磁界共振結合による WPT を行った場合の伝送効率について算出した。 Q 値はプラグの伝送効率の計算と同様に $Q = 250$ と $Q = 500$ の二通りで計算した。結合係数は、4.4.1 で設定した送電コイルと受電コイル共に直径 2.2m、コイル間距離 1.7m に対して 0.5~3 m の間を 0.5 m 刻みで計算した。送受電コイルのパラメータを表 4-3 に示す。また、試験孔内に設置する受電コイルは小さいほうが望ましいため、直径を小さくした場合の検討も行った。具体的には、受電コイルを送電コイルの直径の 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6 サイズにした 5 パターンについても結合係数と伝送効率を算出した。図 4-16 に結合係数、図 4-17, 図 4-18 に伝送効率の結果を示す。

表 4-3 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, 500 |
| 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} ($KIV0.5^{sq}$ 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) | 1.7 (0~3 可変) |

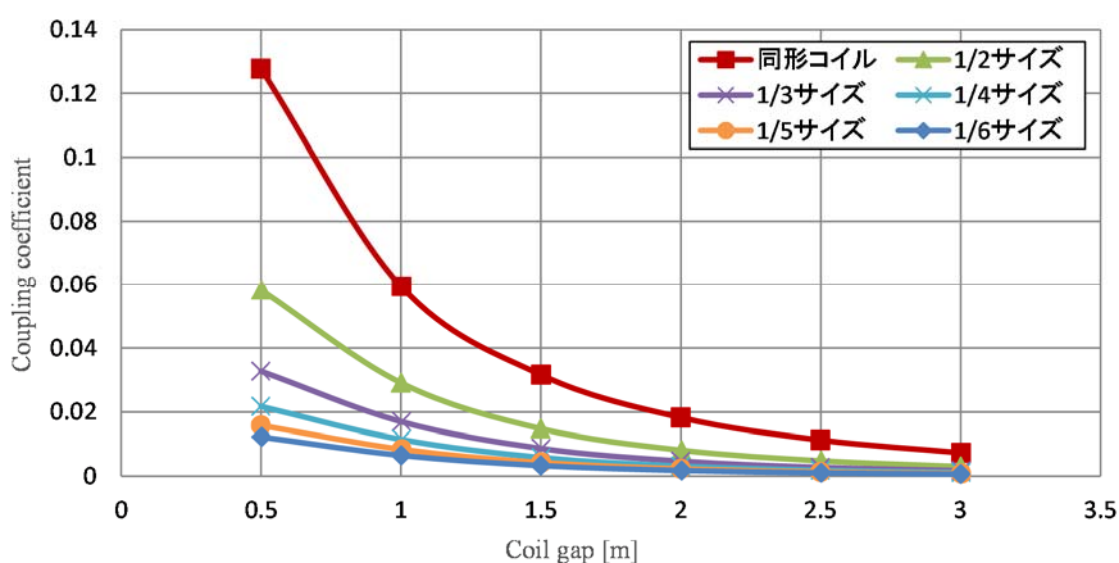


図 4-16 結合係数とコイル間距離の特性

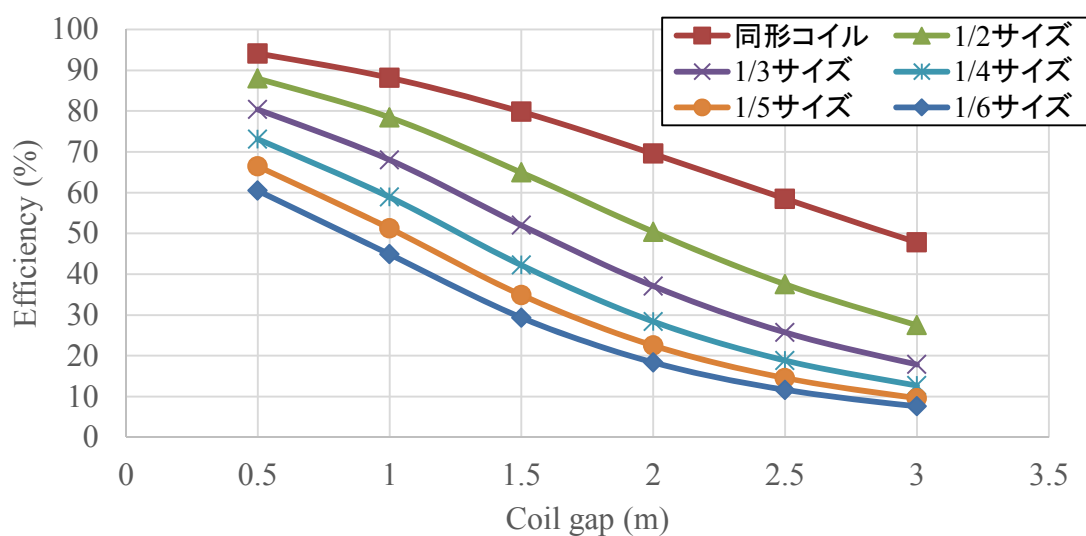


図 4-17 伝送効率とコイル間距離の特性 ($Q = 250$)

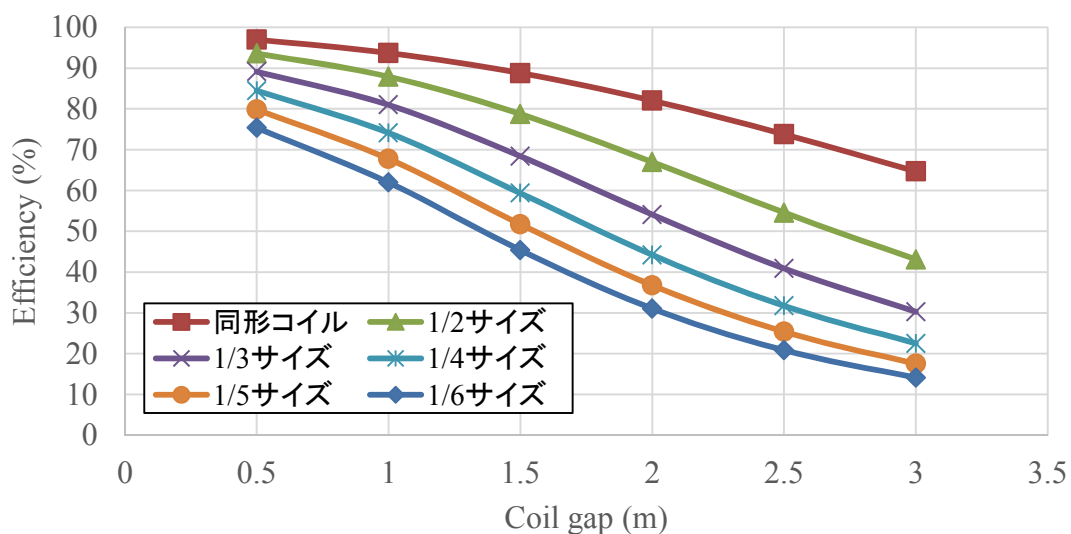


図 4-18 伝送効率とコイル間距離の特性 ($Q = 500$)

図 4-17 および図 4-18 より、坑道路盤から試験孔内を対象としたコイル間 1.7m における効率などのまとめを表 4-4 と表 4-5 に示す。これにより、受電コイルが送電コイルの 1/6 サイズの時の伝送効率は、 Q 値が 250 の時に 22%、 Q が 500 の時に 38%となる。

表 4-4 坑道路盤から試験孔内を対象とした伝送効率 (コイル間 1.7m, $Q = 250$)

| 受電コイル直径/送電コイル直径 | コイル直径 | | 伝送効率(%) |
|-----------------|----------|----------|---------|
| | 送電コイル(m) | 受電コイル(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 |

表 4-5 坑道路盤から試験孔内を対象とした伝送効率 (コイル間 1.7m, $Q = 500$)

| 受電コイル直径/送電コイル直径 | コイル直径 | | 伝送効率(%) |
|-----------------|----------|----------|---------|
| | 送電コイル(m) | 受電コイル(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 |

(b) プラグから試験孔内への伝送効率 (2 段階の WPT)

図 4-13 のように、プラグから試験孔内へ給電する 2 段階の給電を行った場合の、伝送効率を算出した。方法としては、図 4-15 で示したコイルの Q 値が 250、コイル間距離が 3m の伝送効率は 76% であるため、坑道路盤から試験孔内への伝送効率(図 4-17, 図 4-18) に 76% を乗じることで、2 段階の給電における伝送効率を算出した。図 4-19 ($Q = 250$) と図 4-20 ($Q = 500$) に 2 段階の給電における伝送効率の結果を示す。

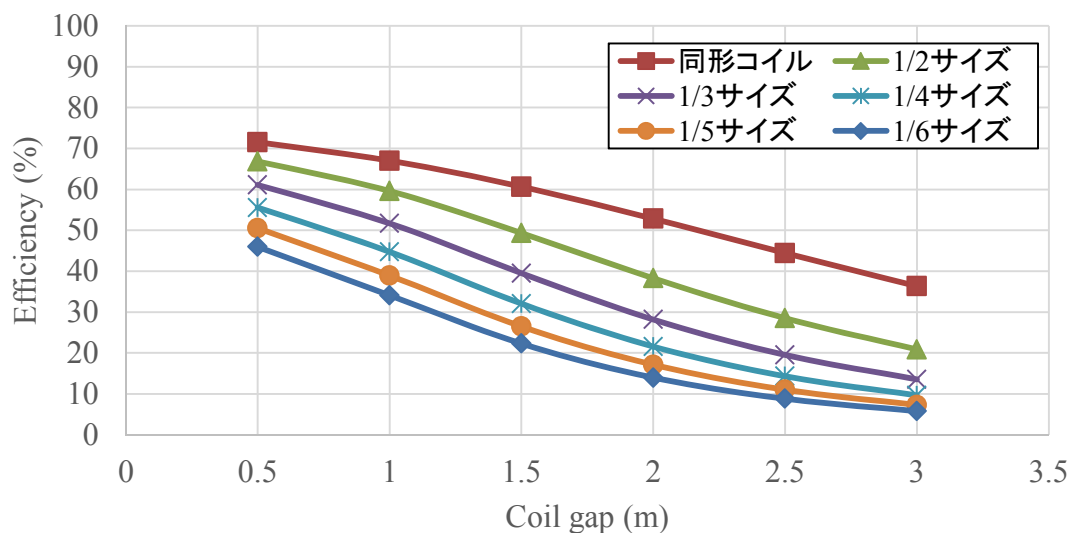


図 4-19 2 段階 WPT の伝送効率とコイル間距離の特性 ($Q = 250$)

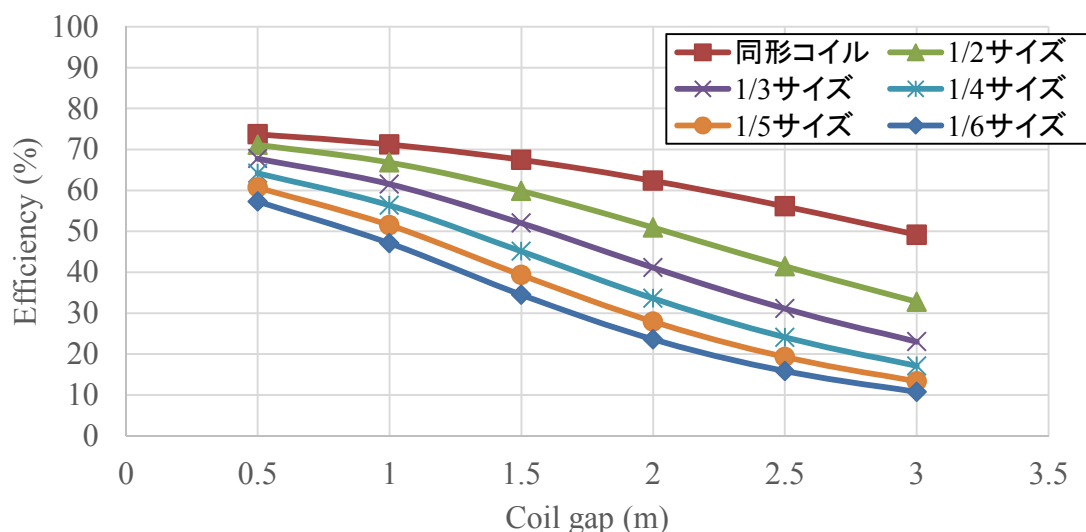


図 4-20 2 段階 WPT の伝送効率とコイル間距離の特性 ($Q = 500$)

図 4-19 および図 4-20 より, 2 段階の WPT (プラグから試験孔内へ) を対象とした, コイル間 1.7m における効率を, 表 4-6 と表 4-7 に示す。これにより, 受電コイルが送電コイルの 1/6 サイズの時の伝送効率は, Q が 250 の時に 17%, Q が 500 の時に 29% となる。

表 4-6 2 段階 WPT の伝送効率 (コイル間 1.7m, $Q = 250$)

| 受電コイル直径/送電コイル直径 | コイル直径 | | 伝送効率(%) |
|-----------------|----------|----------|---------|
| | 送電コイル(m) | 受電コイル(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 |

表 4-7 2 段階 WPT の伝送効率 (コイル間 1.7m, $Q = 500$)

| 受電コイル直径/送電コイル直径 | コイル直径 | | 伝送効率(%) |
|-----------------|----------|----------|---------|
| | 送電コイル(m) | 受電コイル(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 |

4.5. まとめ

本章では, プラグおよび処分孔における WPT の設計についての見通しを立てるために, 送受電コイルの概念設計手法を提案した。地層処分のモニタリングにおいて, コイルサイズを設定し, コイル形状より算出した結合係数と理論式から, 伝送効率を算出した。

算出した結果として, 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 値が 250 の時に 76%, Q 値が 500 の時に 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 において, 受電コイルが送電コイルの 1/6 サイズの時の伝送効率は, Q 値が 250 の時に 22%, Q 値が 500 の時に 38%であった。また, プラグ (コイル間距離 3m, 送電コイルと受電コイルは同径) から試験孔内 (コイル間距離 1.7m, 受電コイルが送電コイルの 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 値が 250 の時に 17%, Q 値が 500 の時に 29%であった。提案する概念設計法により, 地層処分のモニタリングにおいて WPT を適用した場合に, どの程度の伝送効率で電力供給が可能かを示し, これらの結果より磁界共振結合による WPT のプラグと処分孔における適用可能性を示した。

第5章 長距離伝送用大型コイル評価のためのスケール則

5.1. 概要

本章では、小型の送受電コイルの実験結果から、大型コイルの伝送効率を推定する結合係数とコイルサイズにおけるスケール則を提案し、プラグの厚さ 3m において電力伝送を実現するために必要なコイルの大きさの検討を行った。

概念設計では、プラグにおける設置可能な最大径である直径 4m の送受電コイルについて伝送効率の理論値を算出したが、詳細な伝送効率の評価は実験や電磁界解析を行うことが望ましい。しかし、4m もある大型のコイルを利用する場合、その検討の初期段階で送受電コイルの設計製作を行い評価することや、長い解析時間がかかる電磁界解析を行うことは、コストや手間を考えると賢明ではない。小型の送受電コイルを利用した実験結果から大型の送受電コイルを用いた WPT の評価が可能であれば、コストや手間が大きく削減できる。WPT におけるスケール則については、コイルの Q 値を中心とした検討[85]が行われているものの、結合係数に関する議論が十分になされているとは言い難い。そこで本章では、磁界共振結合方式を利用した WPT の最大効率について、結合係数に注目したスケール則に関する検討を行った。

また近年、磁界共振結合方式による WPT では、長距離の電力伝送の検討[86]や送電電力の大電力化が進んでおり、数 kW の給電が報告されている[87][88]。これらのように、伝送距離が長い場合や大電力を送る場合の WPT のアプリケーションを検討する際、大型の送受電コイルの利用が考えられるため、スケール則が提案できれば、モニタリングのシステムに限らずさまざまなアプリケーションへの応用も期待できる。

5.2. WPT における結合係数とコイルサイズのスケール則導

出

本節では、今まで議論がなされていなかった結合係数 k についてのスケール則を提案する。4章と同様にノイマンの公式のままでは式中にコイル形状の情報がないため、ここでは WPT でよく用いられており、モニタリングにおける処分坑道や処分孔に設置可能であるヘリカルコイルを対象としてスケール則を導出する。

5.2.1. インダクタンスの導出

(1) ヘリカルコイルの自己インダクタンス

本研究で対象とするヘリカルコイルを図 5-1 に示す。図中、 l はコイル長、 a はコイル半径、 N は巻数である。ヘリカルコイルの自己インダクタンス L は式 5-1 で表される[89]。

$$L = \frac{\mu\pi a^2 N^2}{l} K \quad \text{式 5-1}$$

$$K = \frac{4}{3\pi\sqrt{1-w^2}} \left[\frac{1-w^2}{w^2} K(w) - \frac{1-2w^2}{w^2} E(w) - w \right] \quad \text{式 5-2}$$

$$\frac{l}{2a} = \frac{\sqrt{1-w^2}}{w} \quad \text{式 5-3}$$

ここで、 K は式 5-2 で表されるコイル長 l とコイル径 a の比率で決定される長岡係数である。また w はコイル長 l とコイル径 a の比率で決まる定数であり、式 5-3 で定義される。 $K(w)$ は自己インダクタンスにおける第一種完全楕円積分、 $E(w)$ は自己インダクタンスにおける第二種完全楕円積分であり、式 5-4 で表される。

$$K(w) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-k^2\sin^2\varphi}}, \quad \text{式 5-4}$$

$$E(w) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1-k^2\sin^2\varphi} d\varphi$$

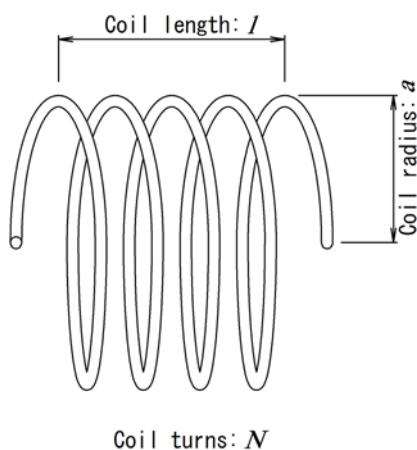


図 5-1 Helical coil.

(2) 相互インダクタンス

コイル長 l を考えた一対のヘリカルコイルにおける相互インダクタンスの理論式は非常に複雑であるため、相互インダクタンスの導出においては、図 4-7 のようなコイル長 l を無視したモデルで近似を行う。コイルが図 4-5 のような位置関係で中心軸を合わせて対向している場合を仮定すると、ノイマンの公式より相互インダクタンスは式 5-5 と求められる。式中 g はコイル間距離を表す。

$$L_m = \mu N_1 N_2 \sqrt{a_1 a_2} \left\{ \left(\frac{2}{x} - x \right) K(x) - \frac{2}{x} E(x) \right\} \quad \text{式 5-5}$$

$$x = \sqrt{\frac{4a_1 a_2}{(a_1 + a_2)^2 + g^2}} \quad \text{式 5-6}$$

x は送受電コイルの径 a とコイル間距離 g で決まる定数であり、式 5-6 で定義される。 $K(x)$ は相互インダクタンスにおける第一種完全楕円積分、 $E(x)$ は相互インダクタンスにおける第二種完全楕円積分である。ただし、この相互インダクタンスの導出に用いるモデルはコイル長を無視しているため、コイル同士が非常に接近しているような $l \gg g$ という条件では、コイル長 l を無視できなくなり、このように近似することが難しい。しかし、ワイヤレス電力伝送への応用を考えたとき、コイル間距離 g が非常に接近した状態での利用は考えにくいため、 $l \gg g$ の場合を考慮する必要はない。

5.2.2. 結合係数とコイルサイズのスケール則

送受電コイルは中心軸を合わせて対向配置し、送受電コイルは同形状である場合を考える。送受電コイルが同形とすると自己インダクタンスは $L_1 = L_2 = L$ である。相互インダクタンスはコイル直径 $a_1 = a_2 = a$ 、巻数 $N_1 = N_2 = N$ として相互インダクタンス式 5-5 を式 5-7～式 5-9 で表す。式 5-8 および式 5-9 より、 $J(x)$ はコイル間距離をコイル径で規格化した g/a によって決まる値である。

$$L_m = \mu N^2 a J(x) \quad \text{式 5-7}$$

$$J(x) = \left\{ \left(\frac{2}{x} - x \right) K(x) - \frac{2}{x} E(x) \right\} \quad \text{式 5-8}$$

$$x = \sqrt{\frac{4a^2}{4a^2 + g^2}} = \sqrt{\frac{4}{4 + \left(\frac{g}{a}\right)^2}} \quad \text{式 5-9}$$

よって結合係数 k は、式 4-5 に式 5-1 および式 5-7 を代入することで式 5-10 で示せる。

$$k = \frac{l}{\pi a K} J(x) \quad \text{式 5-10}$$

式 5-10 はコイル長 l とコイル径 a の比率により決定する分数部と、コイル間距離 g をコイル径 a で規格化した値 g/a によって決定する $J(x)$ に分けられる。

つまり、ある g/a における結合係数 k は、コイル長 l とコイル径 a の比率が一定であればコイルの大きさによらず決まる。これが結合係数 k とコイルサイズのスケール則である。このスケール則を用いれば、コイル長 l とコイル径 a の比率を保つことで、小型のコイルの結合係数 k の解析値や実験値から、大型のコイルの結合係数 k を推定できる。また、結合係数 k はコイルの巻数 N によらないことがわかる。スケール則でコイル長 l とコイル径 a の比率を一定とすれば、 Q 値は巻数 N と巻線径で決まる。つまり、提案するスケール則では結合係数を設計した後、 Q 値は独立して設計可能である。

5.3. 検証に用いるコイルと理論値の計算

結合係数のスケール則の検証では、表 5-1 に示す 4 種類の大きさの送受電コイル対を対象に評価を行う。処分孔の直径を基準として、コイルの直径 2.22 m，コイル長 0.4 m を実寸大と設定し、その 1/3，1/4，1/5，1/6 サイズを評価する。スケール則を確認するために、コイル径 a とコイル長 l の比率は一定である。また、同じ銅線を用いることを仮定し、巻数 N とコイル長 l の比率も一定に保っている。

表 5-1 のコイルパラメータを用いて、式 5-10 より結合係数 k の理論値を計算した。計算結果を図 5-2 に示す。これにより、同じコイル間距離の場合は、コイル径が大きいほうが結合係数 k は高いことを示している。次に図 5-2 の横軸のコイル間距離 g をコイル直径で規格化した結果を図 5-3 に示す。図 5-2 ではコイルサイズごとにばらばらの結合係数の値となっているように見えるが、図 5-3 のように横軸にコイル間距離をコイル直径で規格化した値を用いることで、どのコイルサイズにおいても結合係数 k が同じ曲線上にのることがわかる。よって、コイル径 a とコイル長 l の比率を一定とすると、コイルサイズによらずに結合係数 k が決まるスケール則が確認できる。

表 5-1 送受電コイルのパラメータ

| | Coil diameter [m] | Coil length [m] | Coil turns |
|----------|-------------------|-----------------|------------|
| 1/3 size | 0.74 | 0.13 | 54 |
| 1/4 size | 0.56 | 0.10 | 42 |
| 1/5 size | 0.44 | 0.08 | 33 |
| 1/6 size | 0.37 | 0.07 | 29 |

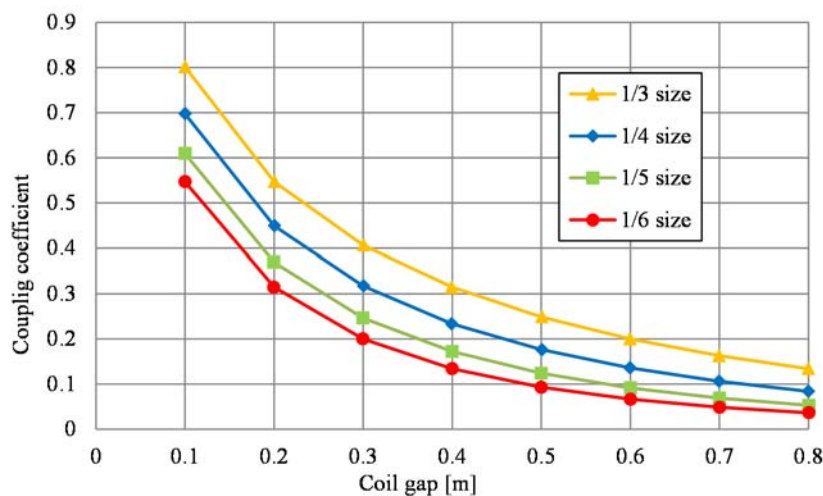


図 5-2 コイル間距離と結合係数の計算結果

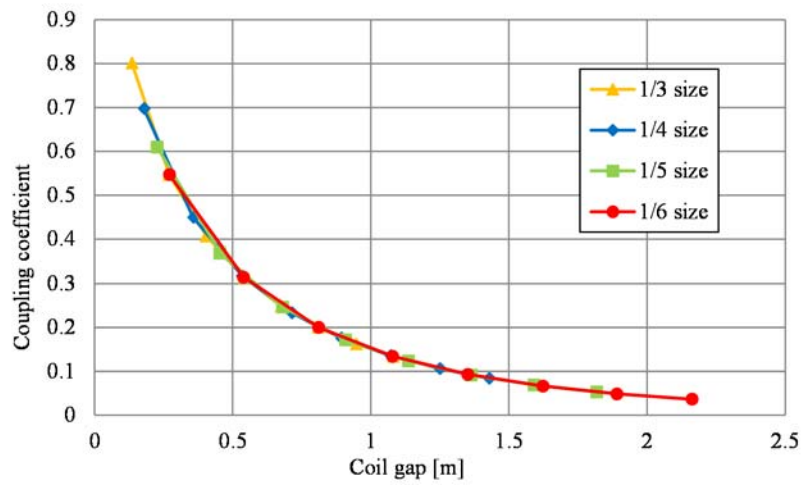
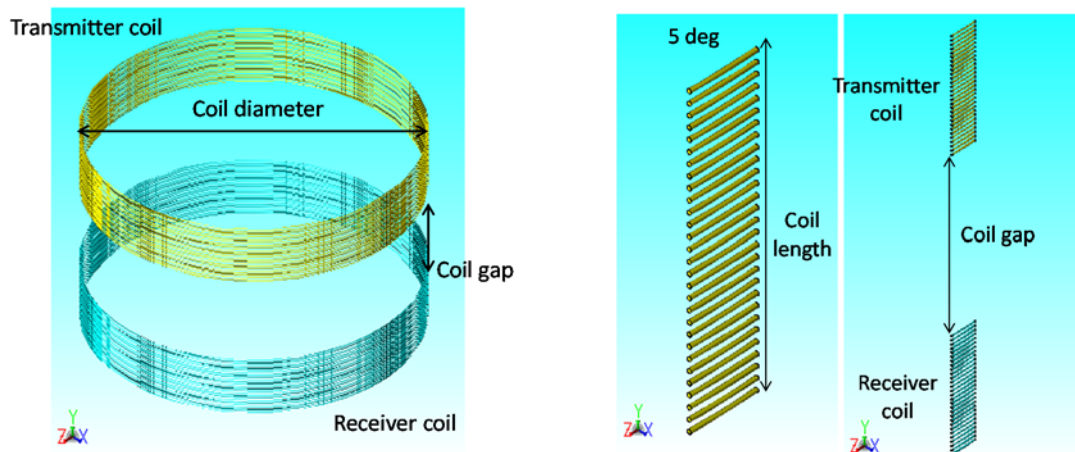


図 5-3 コイル間距離/コイル直径と結合係数の計算結果

5.4. 電磁界解析によるスケール則の評価

結合係数のコイルサイズに対するスケール則について、電磁界解析結果より評価を行う。表 5-1 のコイルパラメータをもとに 4 種類のコイルのモデルを製作し、電磁界解析を行った。電磁界解析ソフト JMAG (株式会社 JSOL 製) を用いて 100 kHz に対する周波数応答解析を行い、自己インダクタンス L および相互インダクタンス L_m を求め、そこから結合係数を算出した。相互インダクタンス L_m の解析は、それぞれの大きさでの送受電コイルを中心軸で合わせて対向配置し、コイル間距離 g が 0.1 m~0.8 の間を 0.1 m 間隔で行った。図 5-4 に解析に用いたコイルのモデルを示す。



(a) コイルのモデル

(b) 解析に用いた 5 度分のモデル
(軸対称, 倍率 72 で解析)

図 5-4 電磁界解析のコイルモデル

5.4.1. スケール則の解析結果

電磁界解析結果を図 5-5 に示す。また、図 5-5 の横軸のコイル間距離をコイル直径で規格化した結果を図 5-6 に示す。図 5-6 より、コイル間距離をコイル直径で規格化した値に対する結合係数は、コイルの大きさによらず同じ値をとる。理論式からの計算値である図 5-3 と、解析結果の図 5-6 を比べると、どちらもコイルサイズによらず曲線が重なっており、スケール則が確認できる。

一方、結合係数の絶対値は、理論値と比較して解析値が下回る結果となっているが、これは相互インダクタンス L_m の導出においてコイル長 l を無視したことが原因と考えられる。

次に、式 4-2 を用いて図 5-6 の結合係数の解析結果から最大効率を計算した結果を図 5-7 に示す。ここでは最大効率の計算において $Q=250$ を用いた。この結果は、 Q を一定と仮定すると、コイル間距離をコイル直径で規格化した値を用いれば、コイル直径が異なる場合でも伝送効率が推定できることを示している。

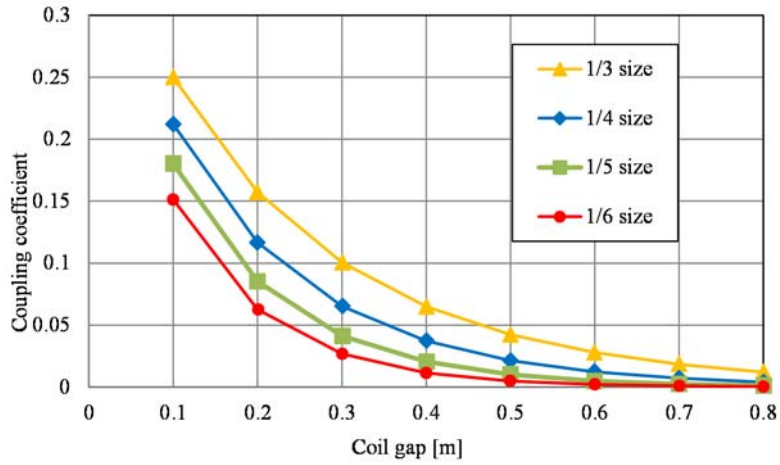


図 5-5 コイル間距離と結合係数の解析結果

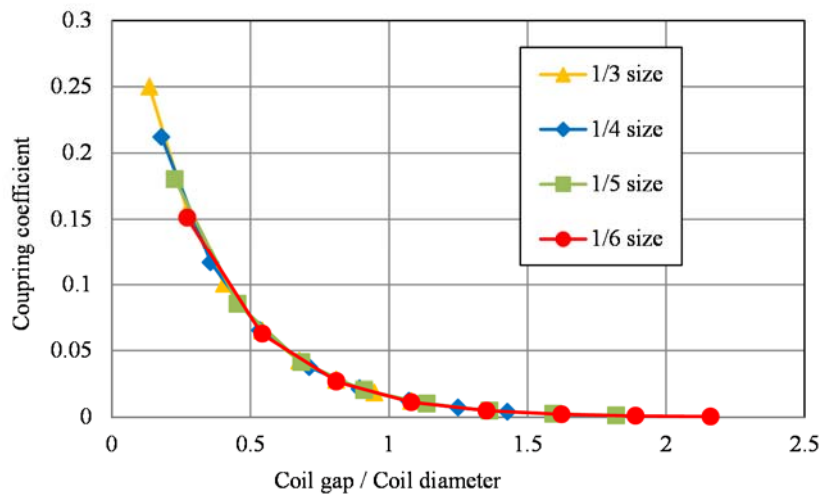


図 5-6 コイル間距離/コイル直径と結合係数の解析結果

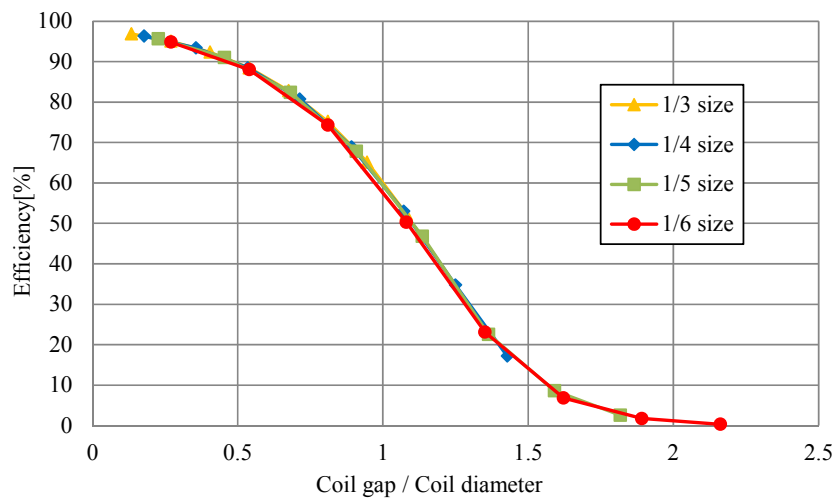


図 5-7 電磁界解析結果から算出した伝送効率

5.4.2. コイル巻数と結合係数

ここまでは、コイルの巻数 N とコイル長 l の比率を保って解析を行ったが、式 5-10 より結合係数 k についてはコイルの大きさとコイル間距離 g よって決まるため、コイルの巻数 N に関係なく設計が可能である。そこで、結合係数 k と巻数 N の関係を電磁界解析を用いて検討する。電磁界解析は1/3サイズと1/6サイズの2種類の送受電コイルに対して、それぞれ巻数 N を2/3, 1/3に変化させた場合について行う。検討した巻数 N を表 5-2 に示す。1/3サイズの解析結果を図 5-8, 1/6サイズの解析結果を図 5-9 に示す。これらの結果より、どちらのコイルにおいても結合係数 k は巻数 N によらないことを確認できる。このことから、対向したヘリカルコイルの送受電コイルにおける結合係数 k は、巻数 N によらずコイル形状とコイル間距離 g のみを考慮すればよいといえる。言い換えれば結合係数 k を設計した後に Q 値は独立して設計が可能である。

表 5-2 送受電コイルのパラメータ

| 1/3 size | | 1/6 size | |
|----------|------------|----------|------------|
| Case | Coil turns | Case | Coil turns |
| Case 1 | 54 | Case 1 | 29 |
| Case 2 | 36 | Case 2 | 20 |
| Case 3 | 18 | Case 3 | 10 |

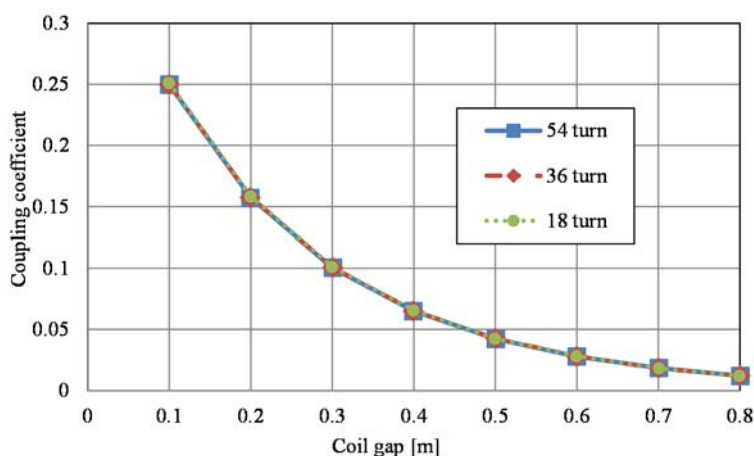


図 5-8 コイルの巻き数を変更した解析結果 (1/3 サイズのコイル)

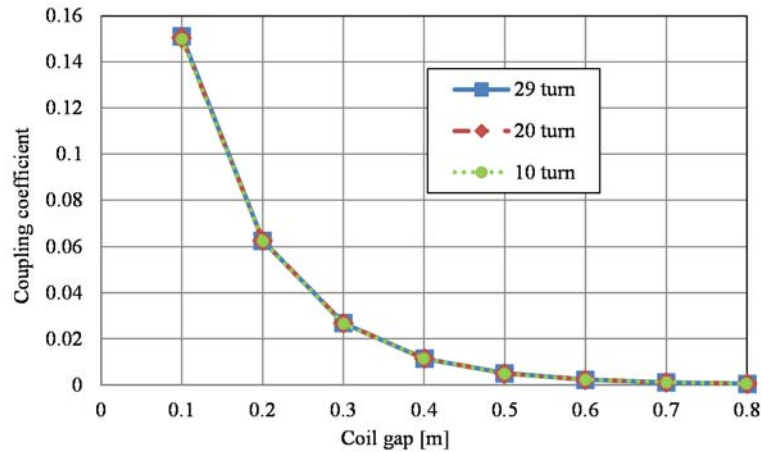


図 5-9 コイルの巻き数を変更した解析結果（1/6 サイズのコイル）

5.5. 実験によるスケール則の検証

実験においても同じようなスケール則が得られるか，表 5-1 に示す 4 つのサイズのコイルを製作し検証を行う。図 5-10 に製作したコイルを示す。巻線には KIV 線の 0.5^{sq}を使用した。実験状況を図 5-11 に示す。実験は電磁界解析と同様に送受電コイルの中心軸を合わせて対向配置し，コイル間距離 g が 0.1 ～0.8 m までの間を 0.1 m 間隔で相互インダクタンス L_m の測定を行った。測定では JIS-C5321 の手法を利用した。

実験結果を図 5-12 に示す。1/6 サイズの相互インダクタンスの計測において，コイル間距離 0.7 m と 0.8 m は値が小さく計測できなかったため，結合係数のプロットは行っていない。また図 5-12 の横軸のコイル間距離 g をコイル直径で規格化した結果を図 5-13 に示す。図 5-12 の結果は，電磁界解析の結果である図 5-5 と同程度の結合係数である。この結果からコイル間距離とコイル直径で規格化した値に対する結合係数 k はほとんど一致していることが確認できる。これにより，コイル間距離とコイル直径で規格化した値を用いれば，小型の送受電コイルからコイル直径とコイル長の比率が同じ大型の送受電コイルの結合係数 k を推定できる。

次に，式 4-2 を用いて図 5-13 の結合係数 k から最大効率を計算した結果を図 5-14 に示す。ここでは $Q=250$ とした。図 5-14 において，横軸が 1 以下では曲線が重なっているが，1 以上では効率の曲線にばらつきが大きくなる。これはコイル径に対してコイル間距離が大きくなると，相互インダクタンスの値が小さくなり，測定しづらくなるためである。この結果からも，図 5-7 と同様に Q を一定とした場合，コイル間距離をコイル直径で規格化した値を用いれば，コイル直径が異なる場合でも伝送効率が推定可能と考えられる。

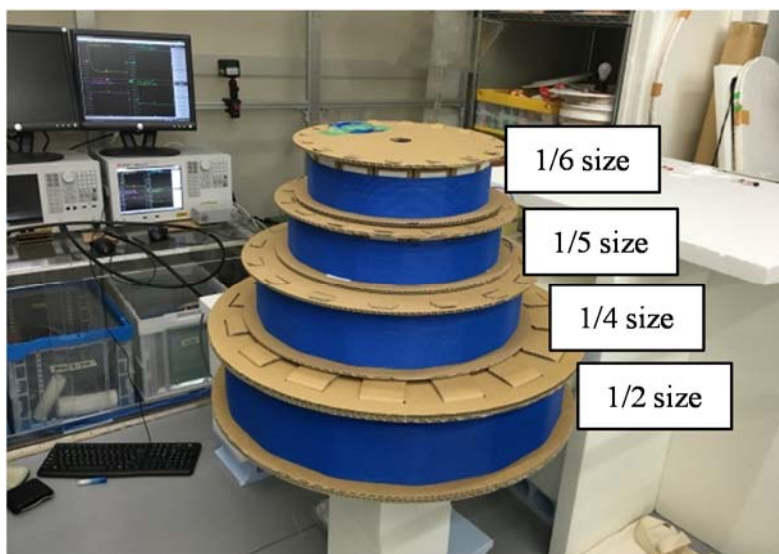


図 5-10 作成したコイル (1/2, 1/4, 1/5, 1/6 サイズ)

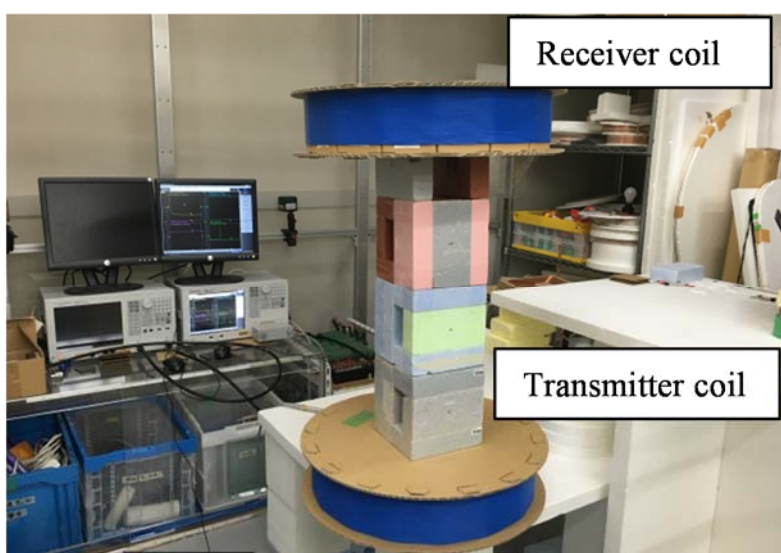


図 5-11 相互インダクタンス測定実験状況

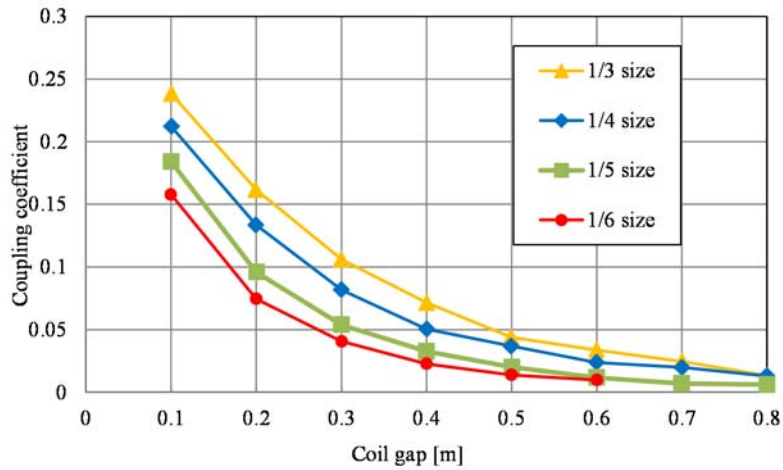


図 5-12 コイル間距離と結合係数の測定結果

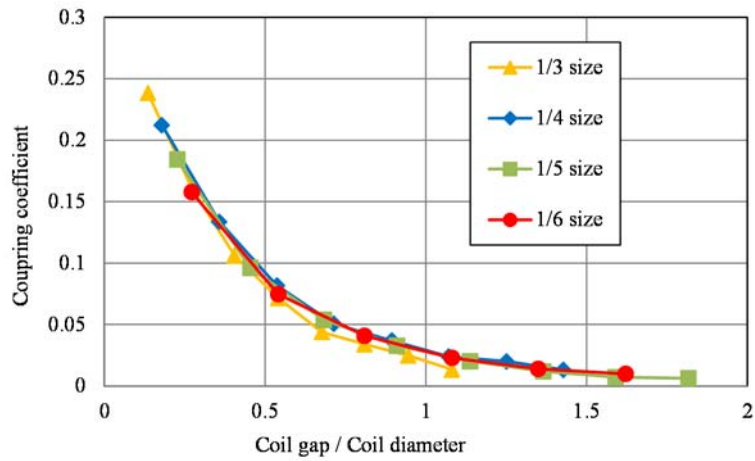


図 5-13 コイル間距離/コイル直径と結合係数の測定結果

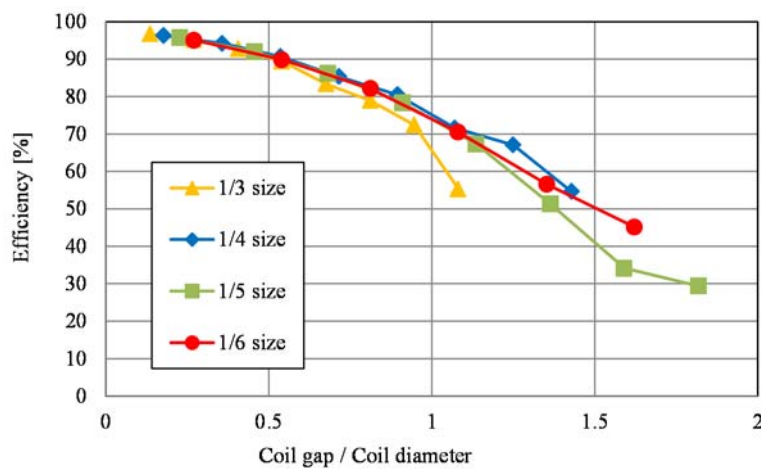


図 5-14 測定結果から算出した伝送効率

5.6. スケール則から得られる大型コイルの仕様と伝送効率

本スケール則の検討では、コイル直径を処分孔の直径である 2.2m の 1/3～1/6 に変化させて評価した。そのサイズにおける Q 値を図 5-15 に示す。図 5-15 より周波数依存はあるが、サイズが異なる場合にも Q 値は 250 程度になる。

Q 値は式 4-4 で示されるように、インダクタンスや交流抵抗などにより決まる。また、コイルサイズが大きくなるとコイル径や巻数が増加し、インダクタンスも大きくなる。よって、コイルの巻き方次第ではあるが、1/3 サイズ以上のコイルにおいては、インダクタンスの増加により Q 値は 250 程度、もしくは 250 以上になると考えられる。

上記の 2 点より、コイルの Q 値を 250 と設定した。

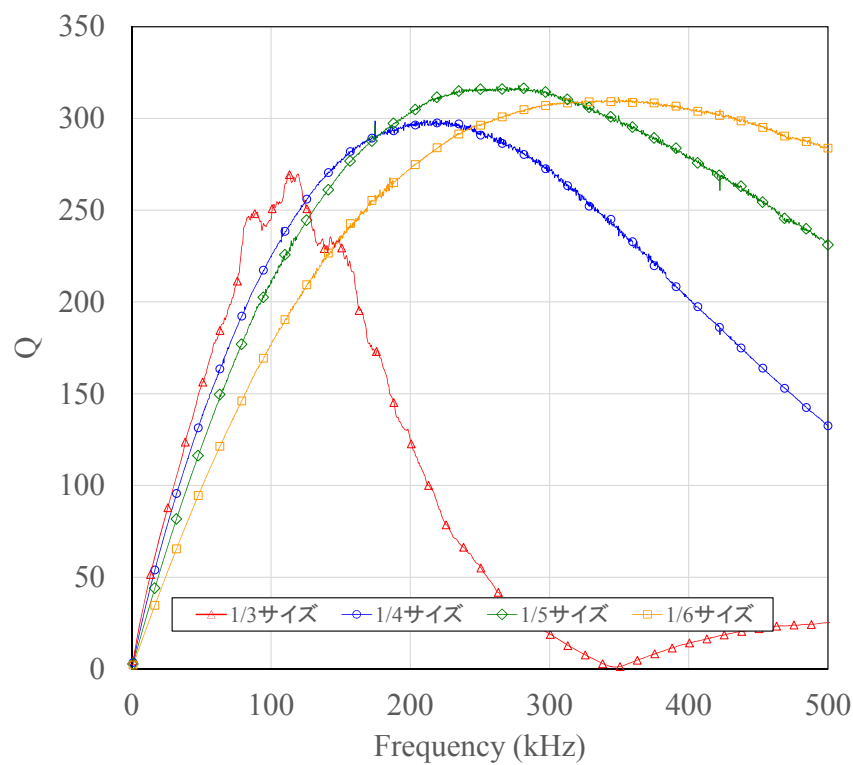


図 5-15 コイルサイズと Q 値

5.7. スケール則から得られる大型コイルの仕様と伝送効率

スケール則を利用した場合のプラグや処分孔に必要なコイルサイズを改めて考察する。例えば目標とする効率を 80 % と仮定すると、図 5-14 において効率 80 % 以上となるのは、コイル間距離／コイル直径が 0.8 以下程度である。プラグにおいては伝送距離 3 m、処分孔においては 1.7 m であるため Q 値が 250 程度とすれば、コイル直径はプラグでは 3.75 m 以上、処分孔では 2.13 m 以上の大きさにすれば効率 80% 以上になると言える。この成果を利用すれば、伝送距離が長いときにどの程度の大きさのコイルが必要になるか推定することができる。

5.8. まとめ

本章では、磁界共振結合を利用した WPT の 1 つの方式である S-S 方式において、最大効率に関連する結合係数とコイルの Q 値のうち、いままで検討されていなかった結合係数のスケール則を示した。具体的には、ヘリカルコイルを用いた磁界共振結合の WPT において、結合係数とコイルサイズのスケール則を提案し、解析と実験からコイル直径とコイル長の比率が同じであれば、コイルサイズによらず同じ結合係数になるということを確認した。

さらに提案するスケール則において、結合係数はコイルの巻数によらないことを確認した。これにより結合係数の設計の後に、 Q 値は独立して設計可能である。

これらの結果より、設計値の $1/n$ モデルで製作された小型の送受電コイルから得られた結合係数を利用して、実寸法やそれ以上の大型の送受電コイルの結合係数を推定することができるため、WPT による伝送効率の予測への応用が期待できる。これを地層処分のモニタリングへ応用した場合の計算例を挙げ、長距離の伝送に必要なコイルの大きさの見通しをたてた。

このスケール則は、ほかにも EV などの比較的大きなコイルを用いるさまざまなアプリケーションのコイル設計にも応用可能である。また、本章は結合係数に関する検討であるので、磁界共振結合に限らず磁界を用いる WPT であれば利用可能である。

第6章 媒体が WPT の伝送効率に与える影響

6.1. 概要

本章では、プラグおよび処分孔の媒体が、磁界共振結合方式による WPT の伝送効率に与える影響を、電磁界解析および実験により評価する。具体的には、処分孔を対象として、実際に電力伝送実験と電磁界解析を行い、磁界共振結合方式による WPT の伝送効率が、緩衝材を介して行った場合に受ける影響について評価した。また、高効率化の検討として、フェライトをコイル軸に用いた評価も行う。実験においては、実際のモニタリングを想定した送受電コイルと緩衝材を製作した。

6.2. 処分孔における送受電コイルと媒体

処分孔を対象としたモニタリングを想定した送受電コイルのサイズを設定し、コイルおよびコイル間の媒体である緩衝材（ベントナイト）を製作した。

6.2.1. 送受電コイルのサイズの設定

(1) 受電コイル

処分孔に設置される緩衝材の中に受電コイル埋め込むことを考えると、「モニタリングの行為が地下の地質環境やバリア機能を損なってはいけない」という考えから、受電コイルは小さいほどよい。そこで本研究では、既存の無線モニタリング機器と同程度のサイズとした。既存の無線モニタリング機器としては、平成 23 年に開発されたボーリング孔対応型受信アンテナ（ $\phi 6\text{ cm} \times$ 長さ 37 cm ）[31]を選定した。図 6-1 にボーリング孔対応型受信アンテナを示す。

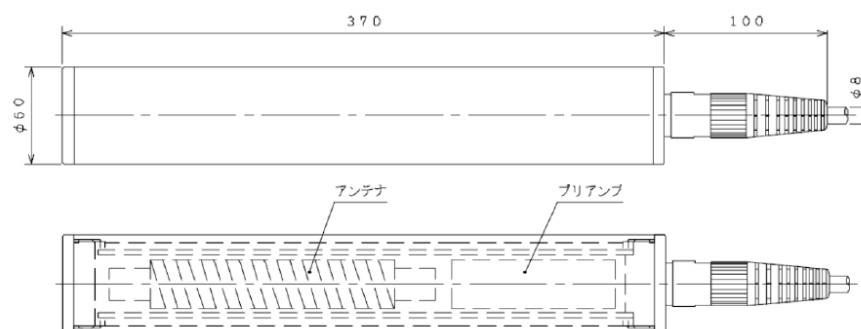


図 6-1 平成 23 年に開発されたボーリング孔対応型受信アンテナ[31]

(2) 送電コイル

送電コイルの大きさについては、処分孔における緩衝材の大きさと既存の無線モニタリング機器である中継用アンテナの大きさを考慮して設定した。

図 4-11 に示した処分孔[84]および、図 6-2 に示す既存のモニタリング機器の中継アンテナの情報を下記の①と②に示す。

① 処分孔の大きさ：直径2.22 m×高さ4.13 m

② 既存の無線モニタリング機器の中継アンテナ：3 m×3 m×0.4 m

以上から、本研究では、①と②を合わせた（直径 2.2 m×長さ 0.4 m）を設定した。

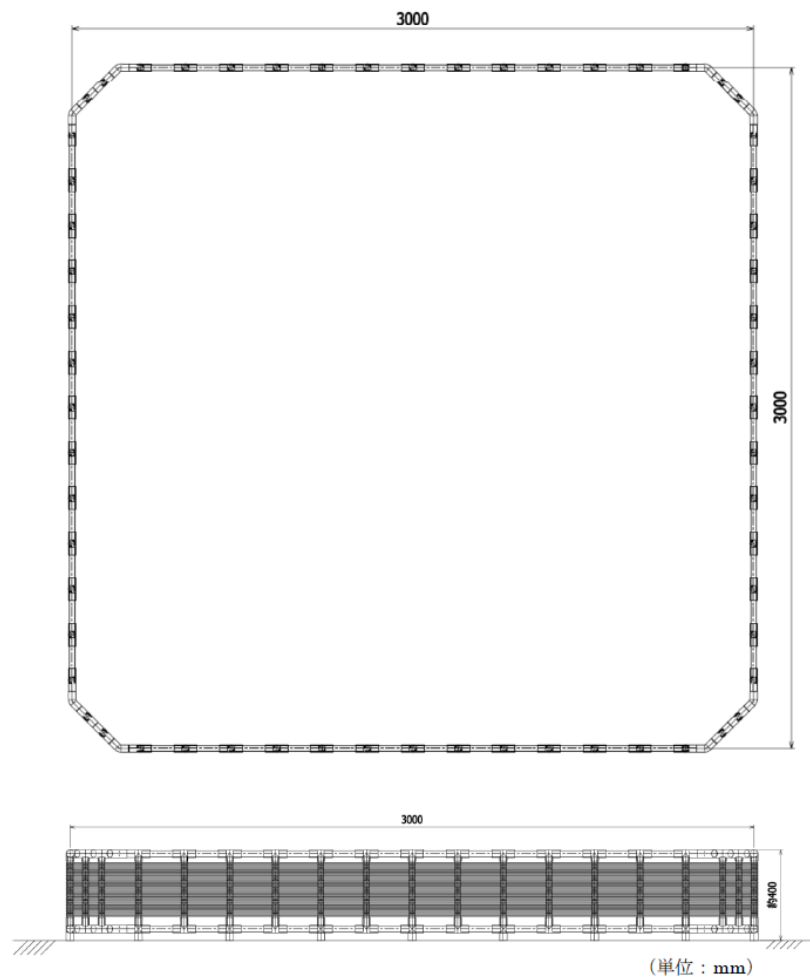


図 6-2 既存の無線モニタリング機器（中継用アンテナ）[31]

受電コイルと送電コイルのサイズ設定を表 6-1 に示す。今回設定した送電コイルのサイズが大きいため、1/3 サイズのコイルを作成して実験を行うこととした。1/3 のサイズにしたコイルのサイズを表 6-2 に示す。

表 6-1 受電コイルと送電コイルの大きさの設定

| | 直径 [m] | 長さ [mm] |
|-------|--------|---------|
| 送電コイル | 2.2 | 0.4 |
| 受電コイル | 0.06 | 0.37 |

表 6-2 1/3 にした受電コイルと送電コイルの大きさ

| | | 直径 [m] | 長さ [m] |
|-----|-------|--------|--------|
| 1/3 | 送電コイル | 0.73 | 0.13 |
| | 受電コイル | 0.02 | 0.12 |

6.2.2. 送受電コイルの製作

(1) 受電コイルの製作

6.2.1 で設定したコイルのサイズをもとに受電コイルを製作した。製作した受電コイルを図 6-3 に、コイルのパラメータを表 6-3 に示す。コイルを作成する軸としては塩ビ管 (VP16) を利用し、ポリエチレン線 0.56 mm を巻いた。塩ビ管を用いることで、フェライト (PE22) を挿入可能となっている。



図 6-3 製作した受電コイル

表 6-3 製作した受電コイルのパラメータ

| | |
|--------|-----------------|
| 直径 | 2 cm |
| 高さ | 12 cm |
| 利用ケーブル | ポリエチレン線 0.56 mm |
| 巻数 | 196 巻 |

(2) 受電コイルの製作

6.2.1 で設定したコイルのサイズにしたがって送電コイルを製作した。コイルの軸は木製とし、巻線には KIV 線 0.5^{sq} を利用した。送電コイルを図 6-4 に、コイルのパラメータを表 6-4 に示す。



図 6-4 作成した送電コイル

表 6-4 作成した送電コイルの情報

| | |
|--------|-----------------------|
| 直径 | 73 cm |
| 高さ | 13 cm |
| 利用ケーブル | KIV 0.5 ^{sq} |
| 巻数 | 50 巻 |

(3) Q 値の測定と周波数の選定

伝送効率の式 4-2 より、受電コイルの Q_1 と送電コイルの Q_2 の積が高い周波数が、電力伝送を行う時の最適な周波数である。そのため、測定した受電コイルと送電コイルの Q 値に、各周波数における積を算出した。受電コイルと送電コイルの Q 値の積を図 6-5 に示す。周波数は 100~120 kHz 周辺で $Q_1 \times Q_2$ が最大となると考えられるため、共振周波数としては 108kHz を利用することとする。

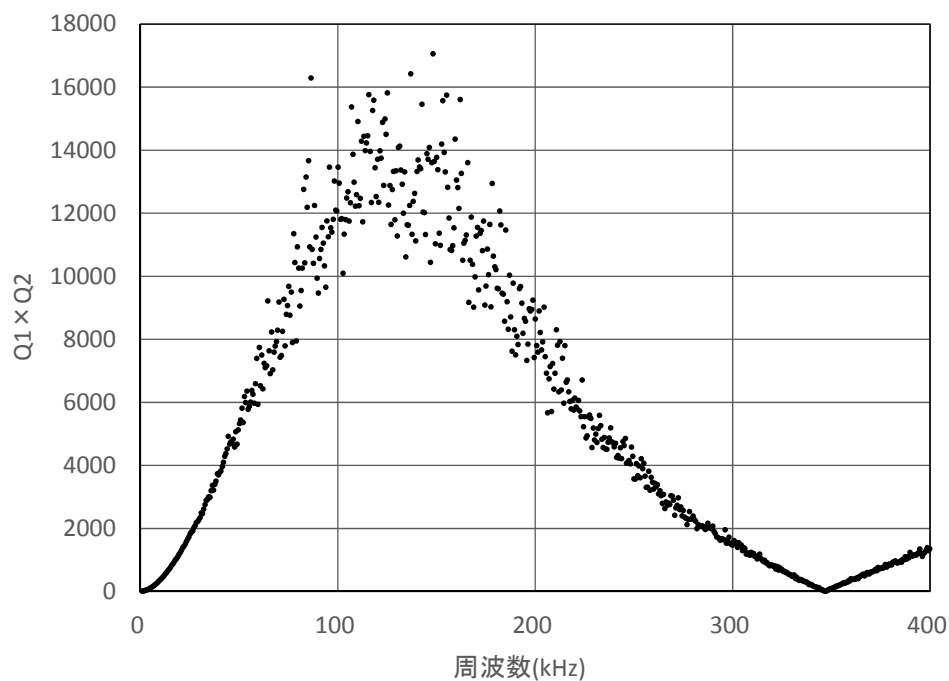


図 6-5 受電コイルと送電コイルの Q の積

6.2.3. 媒体と実験環境

媒体の影響を評価するために、緩衝材を模擬したベントナイトブロックを製作した。ベントナイトを媒体とした電力伝送実験では、ベントナイトブロックを図 6-6 のように重ねて測定を行った。ベントナイトブロックは、厚さ 10 mm のアクリル板を組み合わせた型枠（内寸：300 mm×400 mm×100 mm）を作成し、その中で含水比を 21% 程度に水分調整したベントナイトを締め固めることで製作した。アクリル板で作成した型枠を図 6-7 に示す。また、ベントナイトを締め固めたベントナイトブロックを図 6-8 に示す。締め固めは表 6-5 の密度になるように行った。また、ベントナイトブロックは重ねると崩壊してしまうため、アクリル型枠に入れたまま重ねることとした。

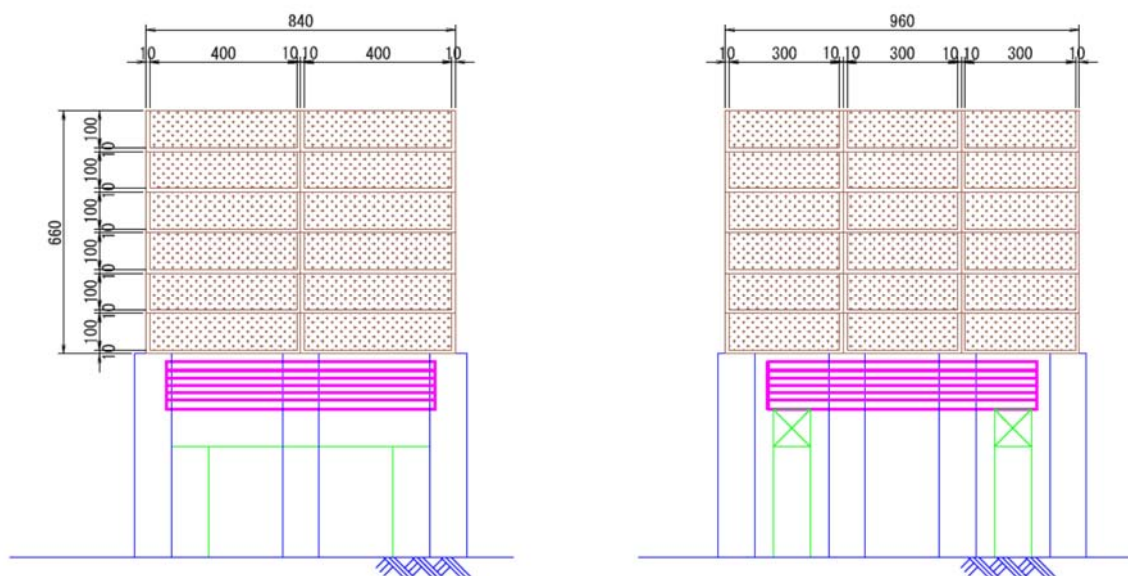


図 6-6 ベントナイトブロックを積み重ねた実験イメージ



図 6-7 アクリル板で作成した型枠

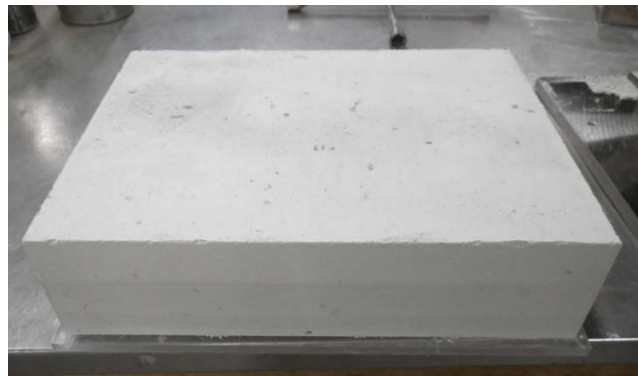


図 6-8 締固めたベントナイトブロック

表 6-5 ベントナイトを締固めた密度表

| 試料含水比 (%) | 湿潤密度 (g/cm ³) | 乾燥密度 (g/cm ³) | 備考 |
|--------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 21.0 | 1.63 | 1.35 | 最大乾燥密度 1.400g/cm ³ |

6.3. 媒体が伝送効率に与える影響の評価

6.3.1. 媒体が伝送効率に与える影響の評価方法

媒体が伝送効率に与える影響を評価するため、電磁界解析及び実際の電力伝送実験により評価を行う。本研究においては、受電コイルが小さいことから伝送効率が小さくなることが想定される。そこで、高効率化の検討として受電コイルにフェライトを利用した検討を行った。

(1) 電磁界解析

送電コイルおよび受電コイル間が空気である場合とベントナイトである場合について、電磁界解析により電力伝送効率を比較して評価する。解析には JMAG (株式会社 JSOL 製) を用いた。図 6-9 に電磁界解析用に作成した解析モデル、図 6-10 に解析モデルの断面図、図 6-11 に受電コイル部分の拡大図を示す。解析モデルは Y 軸対称の 5 度分のモデルを製作し、解析時に Y 軸対称に回転させ円柱状のコイルとして計算した。ベントナイトのモデルは、複素透磁率と複素誘電率の測定値、および物性値の近いベントナイトの導電率[90]を用いた。

送受電コイル間が空気である場合は 34 mm～634 mm を 100 mm 間隔、ベントナイトの場合は 134 mm～694 mm を 110 mm 間隔で解析を行った。

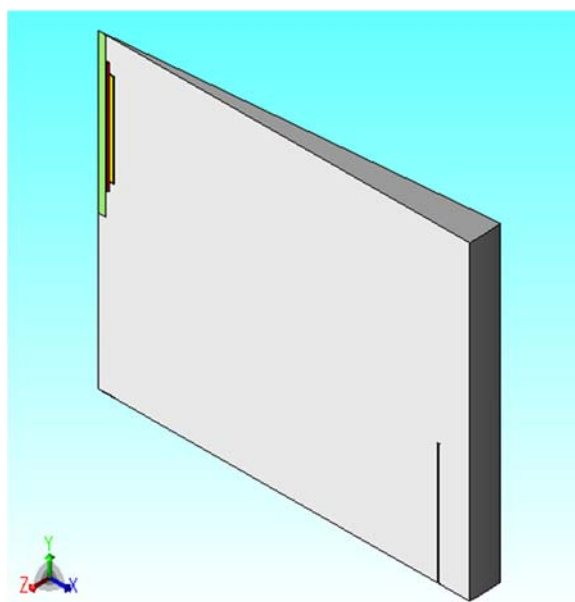


図 6-9 実験環境の解析モデル (Y 軸対称, 5 度分のモデル)

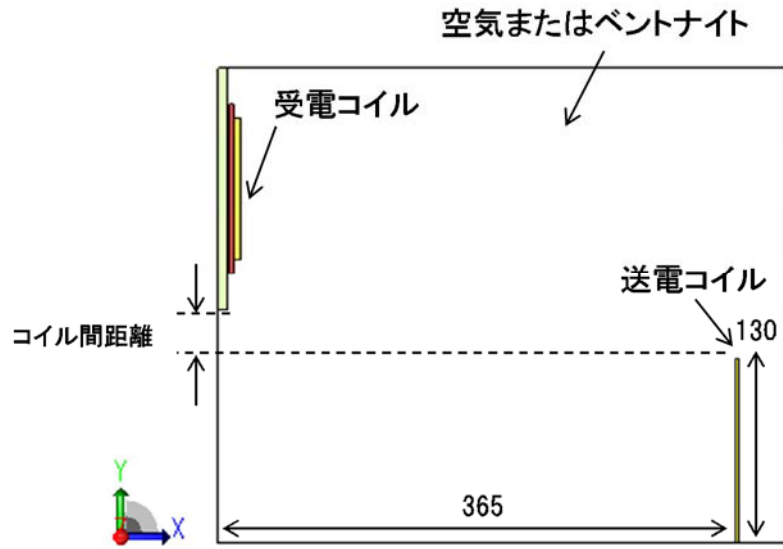


図 6-10 実験環境の解析モデル (X-Y 平面の断面図)

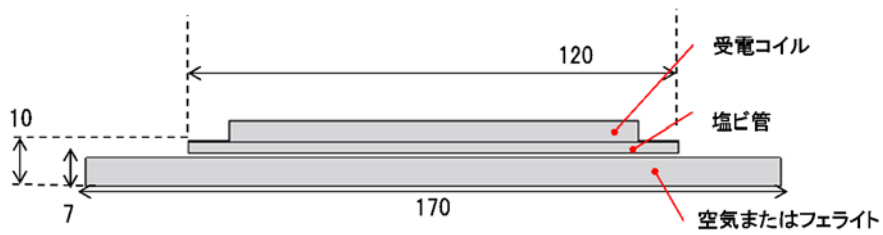


図 6-11 解析モデルの受電コイル断面拡大図

(2) 電力伝送実験

緩衝材を模擬したベントナイトブロックをコイル間に設置し、空気中とベントナイトがある場合の伝送効率を比較し評価する。空気中での実験状況を図 6-12 に、ベントナイトがある場合の実験状況を図 6-13 に示す。また、実験機器の構成を図 6-14 に示す。伝送効率の測定は電磁界解析と同様に、空気中では 34 mm～634 mm を 100 mm 間隔、ベントナイト中では 134 mm～694 mm を 110 mm 間隔で行った。



図 6-12 空気中での実験状況



図 6-13 ベントナイトでの実験状況

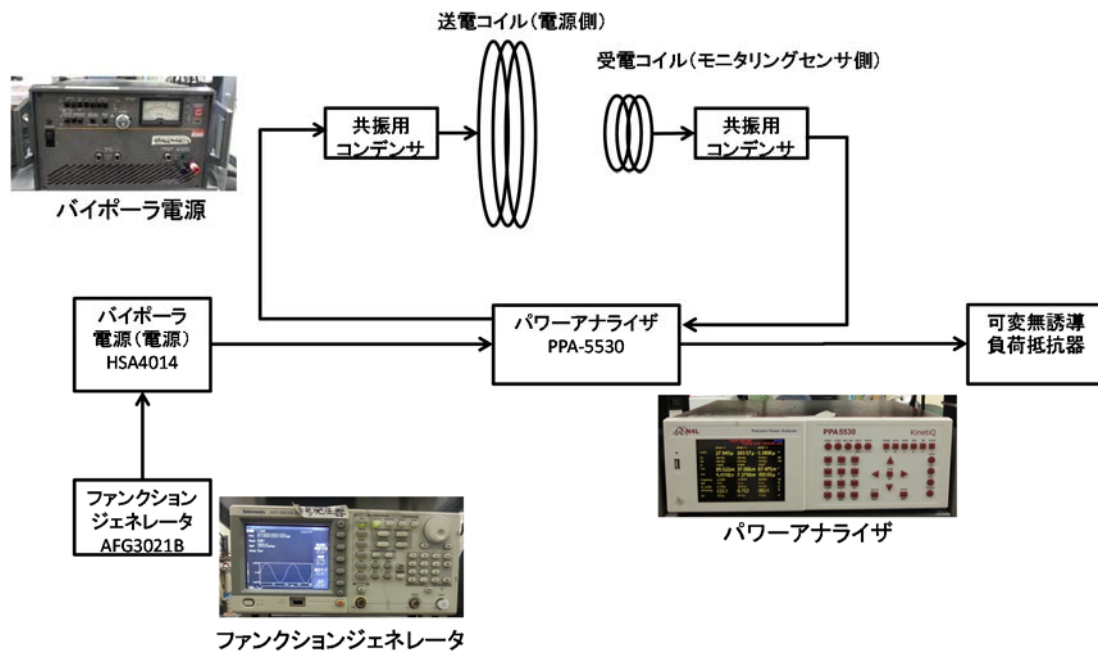


図 6-14 電力伝送実験の構成

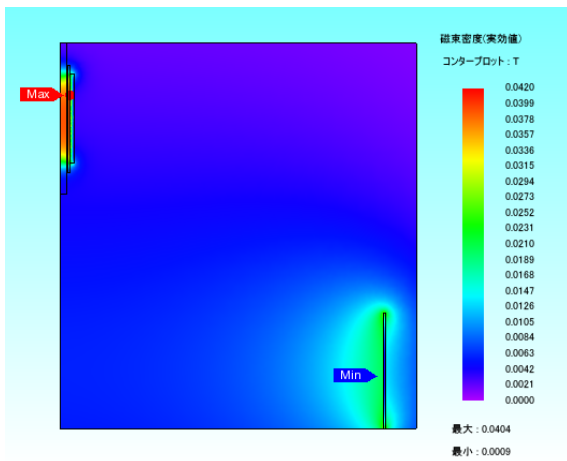
6.3.2. 電磁界解析による媒体の影響評価

電磁界解析結果を図 6-15～図 6-20 に示す。フェライトを利用せず電力伝送を行った磁束密度分布を図 6-15 および図 6-16 に示し、フェライトを利用した場合を図 6-17 および図 6-18 に示す。磁束密度分布はそれぞれの解析結果から距離の近い 2 点を抽出して示した。フェライトを利用しない伝送効率の解析結果を図 6-19 に示し、フェライトを利用した場合を図 6-20 に示す。

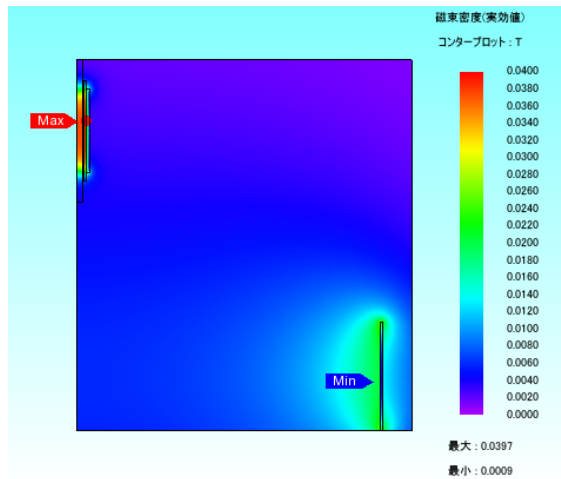
図 6-15 および図 6-16 より、フェライトを受電コイルに利用しない場合には、空気中およびベントナイト中において、磁束密度の分布および最大値はほぼ同じであるためベントナイトの影響はほぼないといえる。また、図 6-19 より、空気中とベントナイト中において伝送効率への影響はほとんどないことがわかる。

同様に、図 6-17 および図 6-18 より、フェライトを受電コイルに利用した場合にも、空気中およびベントナイト中において、磁束密度の分布および最大値はほぼ同じであるためベントナイトの影響はほぼないといえる。また、図 6-20 より、空気中とベントナイト中において伝送効率への影響はほとんどないことがわかる。

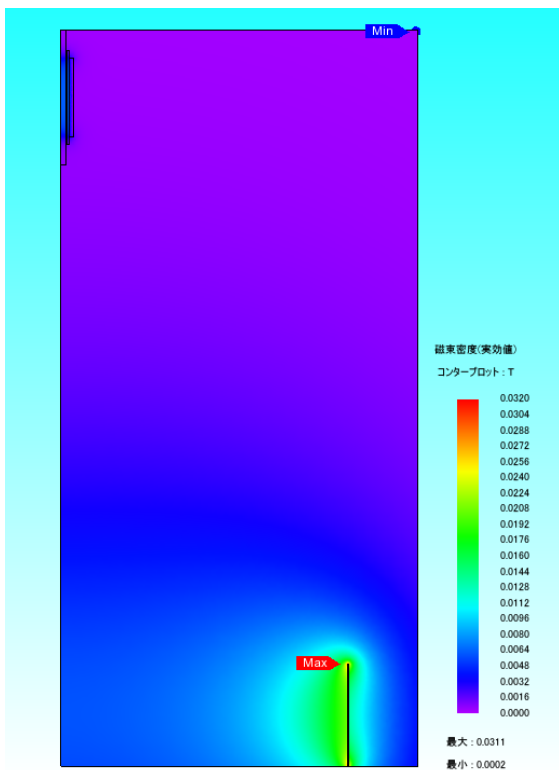
さらに、フェライトを用いることで電力効率は大幅に改善している。電力効率が改善できた理由としては、フェライトを用いることで受電コイルにおける磁束密度の最大値が 2 桁程度大きくなったためと考えられる。



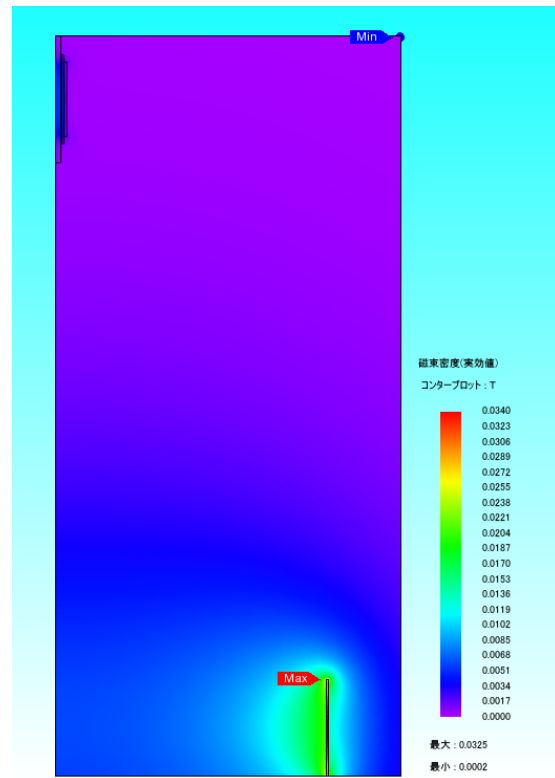
(a) コイル間距離 : 134 mm



(a) コイル間距離 : 144 mm



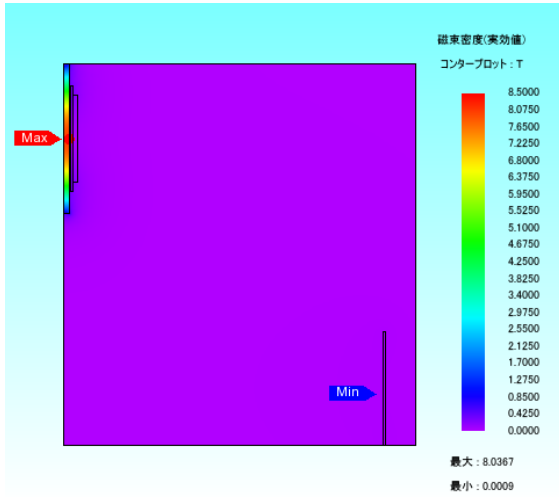
(b) コイル間距離 : 634 mm



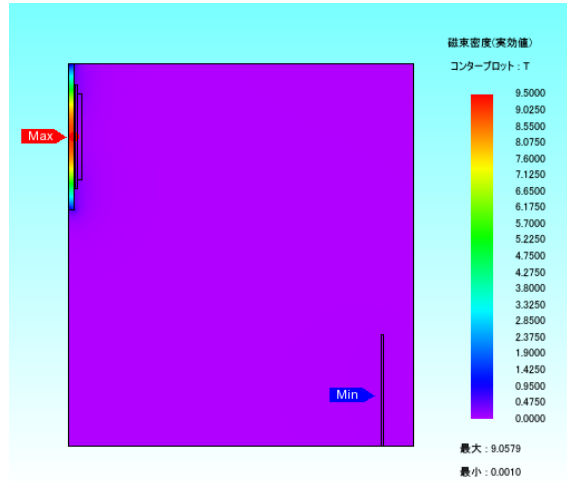
(b) コイル間距離 : 694 mm

図 6-15 磁束密度のコンター図 (受電コイルの軸 : 空気, 媒体 : 空気)

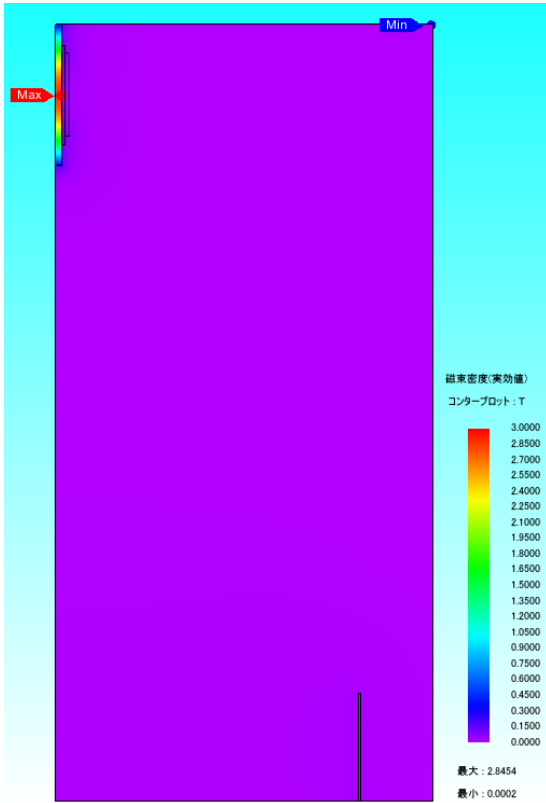
図 6-16 磁束密度のコンター図 (受電コイルの軸 : 空気, 媒体 : ベントナイト)



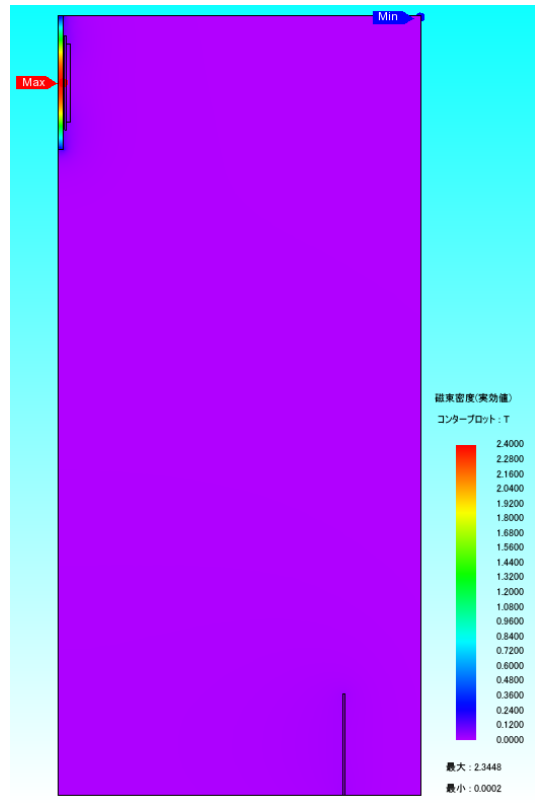
(a) コイル間距離: 134 mm



(a) コイル間距離: 144 mm



(b) コイル間距離: 634 mm



(b) コイル間距離: 694 mm

図 6-17 磁束密度のコンター図 (受電コイルの軸: フェライト, 媒体: 空気)

図 6-18 磁束密度のコンター図 (受電コイルの軸: フェライト, 媒体: ベントナイト)

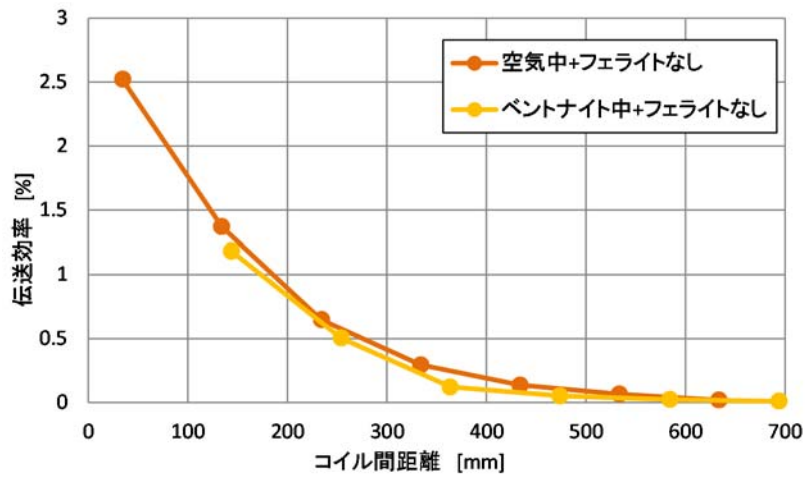


図 6-19 ベントナイトの影響解析結果：フェライトなし

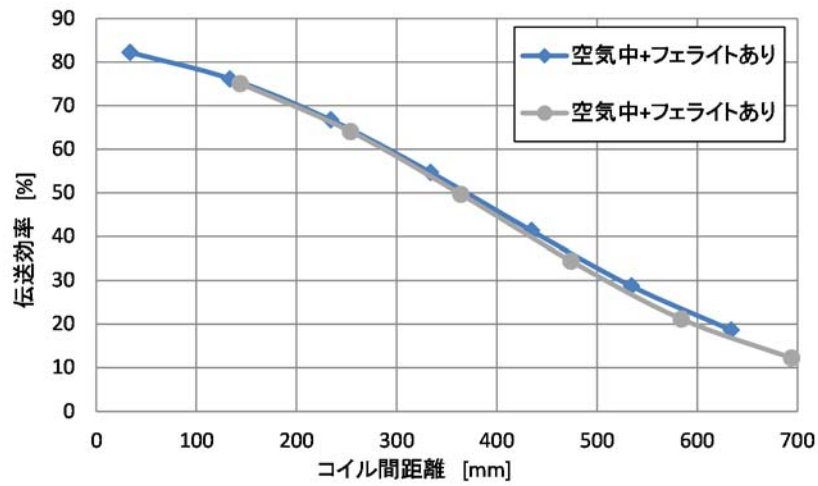


図 6-20 ベントナイトの影響解析結果：フェライトあり

6.3.3. 電力伝送実験による媒体の影響評価

フェライトを利用しない受電コイルを用いた実験結果を図 6-21 に、フェライトを利用した場合を図 6-22 示す。

図 6-21 および図 6-22 より、電力伝送は空気中でもベントナイト中でも可能であり、ベントナイトによる影響はほぼ無く、空気中とベントナイト中で同程度の伝送効率が得られた。また、フェライトを用いた場合、伝送効率は大幅に改善できることがわかる。

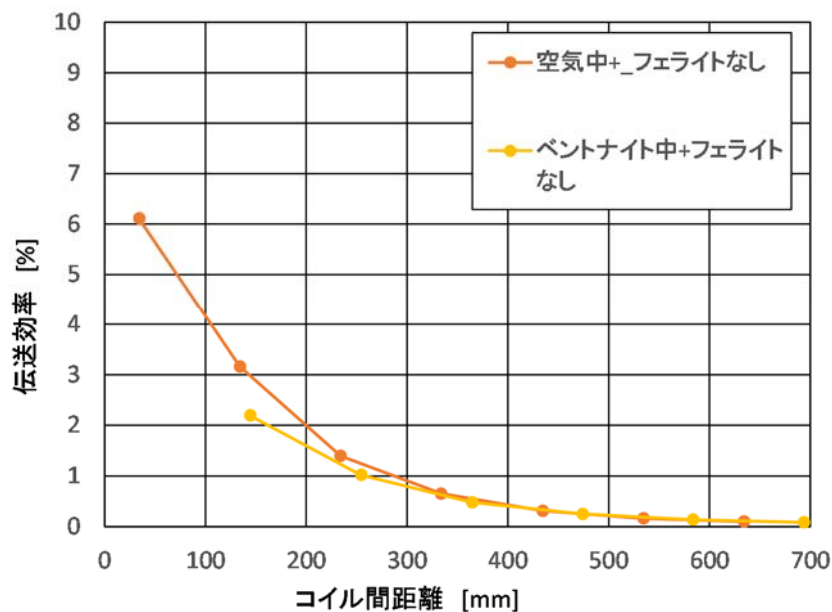


図 6-21 電力伝送実験結果（空気中）

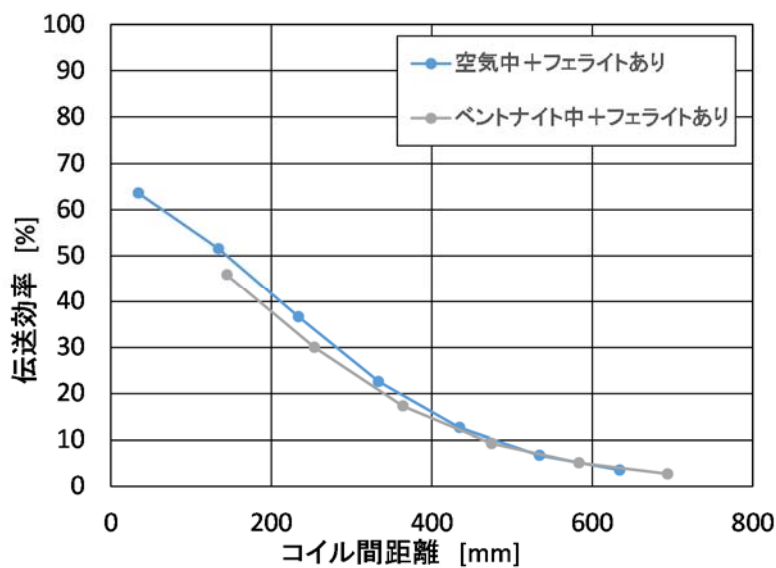


図 6-22 電力伝送実験結果（ベントナイト）

6.4. まとめ

処分孔において、磁界共振結合方式による WPT を行う場合に媒体となる緩衝材（ベントナイト）が、伝送効率に与える影響を、電磁界解析および電力伝送実験により評価した。具体的には、WPT を行う場合の媒体である緩衝材としてベントナイトブロックを製作し、送受電コイル間の緩衝材の有無による伝送効率の比較を行った。

電磁界解析結果と実験結果より、空気中とベントナイト中において、伝送効率はほぼ同じであり、ベントナイトが WPT へ影響を与えないことを確認した。

したがって、地層処分におけるモニタリングが考えられている処分孔において、WPT を行う場合に媒体となる緩衝材（ベントナイト）の影響はないため、磁界共振結合方式が適していることがわかった。

第7章 結論

放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングの課題であった、放射性核種の移動に関わる潜在的な水みちを発生させることのないモニタリングを行うために、情報をワイヤレス伝送、電力供給をWPTで行い、ケーブルレスで長期間モニタリング可能なシステムを提案した。そのシステムに向けた方策を示し、理論と電磁界解析および実験で方策の課題を解決することで、実用化への道を大きく切り開いたものである。

第1章では、序論として放射性廃棄物の地層処分の現状を紹介して、モニタリングの位置づけを説明した。また、それを踏まえて、放射性核種の移動に関わる潜在的な水みちを発生しない、ケーブルレスでの長期間モニタリングが可能なシステムが必要であることを示した。

第2章では、電力供給をワイヤレス化するべき場所としてプラグと処分孔を設定し、適用場所を明確にした。また電力供給する方法として、化学電池、放射性同位体熱電気転換器、ベータボルタティック発電、WPTの4つの手法を調査し、メリットデメリットを明確にした。その結果から、利用期間に制限のないWPTが一番適した手法であるとしたうえで、地層処分におけるモニタリングにWPTを適用するための研究課題を抽出した。最後に、WPTを適用したモニタリングのシステムを示した。

第3章では、WPTの方式のうち、地層処分におけるモニタリングに最適な方式を選定するために、ワイヤレスで電力供給を行う場所（プラグ、処分孔）の媒体における複素誘電率と複素透磁率を測定した。その結果、媒体における損失が少ない磁界を用いたWPTを利用することが最適であることを示した。また、磁界を用いたWPTには、磁界結合（電磁誘導）と磁界共振結合（磁界共鳴）の2種類が考えられるが、伝送効率で優れている磁界共振結合を選定した。

第4章では、プラグおよび処分孔においてWPTの設計の見通しを立てるために、送受電コイルの概念設計手法を提案した。概念設計法とは、コイル形状からどの程度の送受電コイル間の結合係数を実現できるか算出し、それに基づき伝送効率を概算する方法である。磁界共振結合のWPTの方式の中でも、高効率かつ十分な電力が伝送可能なS-S方式を選定し、処分孔およびプラグにおいてどの程度の効率で電力伝送が可能かを、概念設計法により評価を行った。これらの結果より、磁界共振結合によるWPTのプラグと処分孔における適用可能性を示した。

第5章では、小型の送受電コイルの実験結果から大型のコイルの伝送効率を推定する、結合係数とコイルサイズにおけるスケール則を提案し、プラグと処分孔において必要と考えられる電力伝送距離を実現するために必要なコイルのサイズ検討を行った。この提案により、巨大な送受電コイルを実際に製作する前に、小型の送受電コイルを利用した電力伝送実験結果を元に巨大コイルの評価を行うことができ、設計の初期段階におけるコストや手間の削減が可能であることを示した。さらに、スケール則の結果からプラグにおいて高効率の電力伝送を実現するために必要なコイルのサイズの見通しを立てた。

第6章では、地層処分のモニタリングにおける送受電コイル間の媒体が、磁界共振結

合を用いた WPT に与える影響を解析および電力伝送実験により評価した。電力伝送実験においては、送受電コイルの間の媒体の有無による伝送効率の変化について評価を行った。その結果、地層処分におけるモニタリングを前提とした媒体では、磁界共振結合による WPT の伝送効率の損失に影響を与えないことを示した。

上記より、放射性廃棄物の地層処分における重要技術である、多重バリアシステムの経年変化のモニタリングにおいて、ワイヤレス電力伝送と通信技術を用いた新しい手法を開発し、モニタリングに最適な電力伝送方式の提案、小規模実験での評価を大規模実験に適用するスケール効果の検討、媒体の影響評価などを体系的にまとめることで実用化への可能性を大きく進展させることができた。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，東京大学大学院新領域創成科学研究科教授の堀洋一先生には，研究の方向性と内部の細部にいたるまで具体的なご指導を頂くとともに，研究者としての姿勢も教育して頂きました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

東京大学大学院工学系研究科特任講師の居村岳広先生には，研究に関する詳細をご指導頂きました。深く感謝申し上げます。

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授の大崎博之先生，准教授の馬場旬平先生，准教授の藤本博志先生，東京大学大学院工学系研究科教授の古関隆章先生，東京大学大学院情報理工学系研究科准教授の川原圭博先生には，本論文の審査をお引き受け頂き，数多くのご指導，貴重なご意見を頂きましたことに対して，心から感謝いたします。また，藤本博志先生には，研究室の発表会でもご指導を頂き厚く感謝いたします。

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター処分工学調査研究プロジェクトの江藤次郎氏，小林正人氏には，受託研究を通じて，数多くのご指導，貴重なご意見を頂きましたことに対して，心から感謝いたします。

株式会社大林組の諸先輩，同僚の方々からのご指導，ご協力によりここまでこれたこと感謝いたします。特に，株式会社大林組土木本部部長の安藤賢一氏，原子力環境技術部部長の深谷正明氏，副部長の田中達也氏にはきっかけからはじまり，様々な経験の後押しと励まし，日ごろから親切なご指導を頂き心から感謝いたします。また，大林組原子力環境技術部副課長の鑑頭正氏，奥木さくら氏，犬飼健二氏には，本論文をまとめるにあたり大きなご支援を頂きました。この場を借りて厚く御礼いたします。

研究室で共に過ごした，堀・藤本研究室の皆様，卒業生の方々に感謝いたします。また，ワイヤレスチームの皆様にも感謝いたします。特に，加藤昌樹氏，谷川雄介氏，山本岳氏，畑勝裕氏，成田大輝氏，古里洸一氏には機器の製作や実験の面で大変お世話になりました。深く御礼申し上げます。佐藤基氏には社会人博士課程という同じ立場で相談に乗っていただきました厚く感謝いたします。

光昭株式会社顧問の地福健治氏，株式会社新光電舎の廣川美恵子氏には，実験機器の製作で大変お世話になりました。深く感謝いたします。

最後に，私生活を支えてくれた家族に感謝いたします。

参考文献

- [1] 経済産業省資源エネルギー庁：「エネルギー基本計画」（2016）
- [2] 経済産業省資源エネルギー庁放射性廃棄物等対策室：「TALK 考えよう，放射性廃棄物のこと」（2009）
- [3] 公益財団法人原子力バックエンド推進センター：「低レベル放射性廃棄物処分の現状と課題について」，自由民主党 資源・エネルギー戦略調査会放射性廃棄物処分に関する小委員会，（2014）
- [4] 経済産業省資源エネルギー庁：「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2016年度版）」（2016）
- [5] 原子力発電環境整備機構：「いま改めて考えよう地層処分」～科学的有望地の提示に向けて～，高レベル放射性廃棄物の最終処分全国シンポジウム 説明用参考資料，（2016）
- [6] International Atomic Energy Agency, “Disposal of Radioactive Waste” (2011)
- [7] 電気事業連合会：「原子力・エネルギー図面集」（2015）
- [8] 原子力発電環境整備機構：「処分場の概要（分冊－1）」，（2009）
- [9] 高橋美昭・北山一美・竹内光男「高レベル放射性廃棄物処分場におけるモニタリング概念の試構築その1－事業期間を通じたモニタリング全体像とモニタリング計画策定手法」，日本原子力学会 2006年秋の大会, B65 (2006)
- [10] 須山泰宏・田辺博三・江藤次郎・吉村公孝：「閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討」，原子力バックエンド研究, Vol. 17, No. 2, pp.71-84 (2010)
- [11] 原子力発電環境整備機構：「放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討」，NUMO-TR-10-01, (2010)
- [12] 鈴木俊一・青木広臣・川上博人・畑明仁・本島貴之：「多重人工バリアシステムを有する放射性廃棄物処分施設の安全性能評価手法に関する考察」，原子力バックエンド研究, Vol. 15, No. 2, pp. 87-98 (2009)
- [13] 山本幹彦・三原守弘・大井貴夫：「地層処分におけるガス移行影響評価－人工バリア内のガス移行解析手法とデータ取得－」，原子力バックエンド研究, Vol. 10, No. 1-2, pp.31-46 (2004)
- [14] 中山雅・澤田純之・棚井憲治・杉田裕：「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験(1)試験計画の全体概要」，日本原子力学会 2013年春の大会, A14, (2013)
- [15] 澤田純之・中山雅・棚井憲治・森川義人・城 まゆみ：「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験(2)堆積岩の掘削ズリを用いた坑道埋め戻し材の締固め特性と透水性に関する検討」，日本原子力学会 2013年春の年会, A15, (2013)
- [16] 菊池広人・棚井憲治・澤田純之・前川恵輔：「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験(3)堆積岩の掘削ズリを用いた坑道の埋め戻し材の膨潤圧特性に関する検討」，日本原子力学会 2013年春の年会, A16, (2013)

- [17] 白瀬光泰・丹生屋純夫・澤田純之・中山雅・棚井憲治・松崎達二「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 (4) 堆積岩の掘削ズリを用いた埋め戻し材ブロックの検討」, 日本原子力学会 2013 年秋の大会, O52, (2013)
- [18] 澤田純之・中山雅・棚井憲治・松崎達・本島貴之・城まゆみ「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 (5) 堆積岩の掘削ズリを用いた埋め戻し材転圧締固特性」, 日本原子力学会 2013 年秋の大会, O53, (2013)
- [19] 中山雅・澤田純之・棚井憲治・杉田裕・松崎達二・城まゆみ「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 (6) 堆積岩の掘削ズリを用いた埋め戻し材による抗道埋戻しの基本的考え方」, 日本原子力学会 2013 年秋の大会, O54, (2013)
- [20] 丹生屋純夫・下原正弘・城まゆみ・名合牧人・中山雅・棚井憲治・橋本祐太・捻金礎人「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 (7) 大口径掘削機による試験孔の掘削」, 日本原子力学会 2014 年秋の大会, F17 (2014)
- [21] 白瀬光泰・城まゆみ・本島貴之・丹生屋純夫・中山雅・棚井憲治「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 (8) 緩衝材中の計測計画」, 日本原子力学会 2014 年秋の大会, F18 (2014)
- [22] 中山雅・丹生屋純夫・城まゆみ・三浦律彦・石田知子・竹田宣典「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 ; (9) 低アルカリ性セメントのプラグコンクリートへの適用」, 日本原子力学会 2014 年秋の大会, F19 (2014)
- [23] 丹生屋純夫・白瀬光泰・中山雅「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, H56 (2015)
- [24] 中山雅・大野宏和・棚井憲治・白瀬光泰・下原正弘・丹生屋純夫「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 ; (11) 緩衝材, 埋め戻し材およびコンクリートプラグの施工」, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, H57 (2015)
- [25] 棚井憲治・菊池広人・中山雅・大野宏和・白瀬光泰・高橋博昭・丹生屋純夫「幌延 URL における人工バリアの性能確認試験 ; (12) 埋め戻し材の原位置締固め施工における品質管理手法の検討」, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, H58 (2015)
- [26] 日本原子力開発機構 幌延深地層研究センターHP :
<https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/cyousakenkyu2609.html#prettyPhoto>, (最終アクセス, 2016.7)
- [27] 日本原子力研究開発機構 : 「TRU 廃棄物処分技術検討書ー第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめー」 (2005)
- [28] 吉村公孝・杉山和稔・奥津一夫・新保弘・高村尚・賀原慶久・後藤知英 : 「地中無線通信技術の放射性廃棄物地層処分モニタリングへの適用性検討」, 物理探査学会学術講演会講演論文集, Vol. 109, pp. 202-205 (2003)

- [29] 高村尚・奥津一夫・Jean-Louis Gaussen・新保弘：「フランスの放射性廃棄物地層処分における無線モニタリング概念の構築」, 原子力バックエンド研究, Vol. 12, No 1-2, pp. 11-20 (2006)
- [30] 高村尚・奥津一夫・須賀原慶久・虎田真一郎・大内仁：「地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討」, 原子力バックエンド研究, Vol. 12, No 1-2, pp. 21-30 (2006)
- [31] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：「平成 25 年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発」 (2014)
- [32] 堀原一・今井健雄：「アイソトープ電池の ME における利用」, RADIOISOTOPES, Vol. 22, No. 9, pp.525-533 (1973)
- [33] R. M. Ambrosi, H. R. Williams, P. Samara-Ratna, A. Jorden, R. Slade, N. P. Bannister, J. Sykes, T. Deacon, K. Stephenson, K. Simpson, M. Reece, H. Ning, M. Stuttard, T. Rice, T. Tinsley, M. Sarsfield, M. Jaegle, J. Koenig, A. Edgington, H. Lerman, “Development and testing of an americium-241 radioisotope thermoelectric generator” in Conference Record of Nuclear and Emerging Technologies for Space, (2013)
- [34] C. Honsberg, W. A. Doolittle, M. Allen, C. Wang, “GaN betavoltaic energy converters,” in Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, (2005)
- [35] 春山かおる：「ワイヤレス電力伝送」, 映像情報メディア学会誌 65, pp142-146, (2011)
- [36] 福田真一郎：「受変電設備の寿命」, 電気設備学会誌, Vol. 26, No. 9, pp665-669 (2006)
- [37] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” in Science Express on 7 June 2007, Vol. 317. No. 5834, pp.83-86 (2007)
- [38] 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)
- [39] 居村岳広・岡部浩之・内田利之・堀洋一：「共振時の電磁界結合を利用した位置ずれに強いワイヤレス電力伝送 - 磁界型アンテナと電界型アンテナ - 」, 電学論 D, Vol. 130, No. 1, pp76-83 (2010)
- [40] 平山裕・菊間信良・榊原久二男：「電界結合と磁界結合から見た結合型無線電力伝送」, 信学技報, WPT2014-15, SCE2014-15, MW2014-15, (2014)
- [41] 居村岳広・岡部浩之・内田利之・堀洋一：「等価回路から見た非接触電力伝送の磁界結合と電界結合に関する研究」, 電学論 D, Vol. 130, No. 1, pp84-92 (2010)
- [42] 大平孝：「電界結合磁界結合ワイヤレス電力伝送の kQ 積と最大有能電力効率公式」, in 2014 年電子情報通院学会総合大会, BCS-1-1, (2014)

- [43] 原川健一・景山健二・三浦一幸：「電界結合技術によるワイヤレス電力伝送の可能性」, 竹中技術研究報告, No. 66, (2010)
- [44] 原川健一・景山健二・鶴田壮広・三浦一幸：「電界結合・共振型ワイヤレス電力伝送技術 - 並列共振型電力伝送回路 - 」, 信学技報, WPT2011-24, (2011)
- [45] 増田満・楠正弘・小原大輝・中山裕次郎・濱田浩樹・根上昭一：「電界共振結合型ワイヤレス電力伝送システム」, 信学技報, WPT2013-20, (2013)
- [46] 小丸堯・秋田英範：「電界結合を用いた無線電力伝送における結合係数の位置特性評価」, 信学技報, WPT2013-15, (2013)
- [47] 鈴木良輝・水谷豊・杉浦貴光・坂井尚貴・大平孝：「電化道路をタイヤ終電で走行する電気自動車の 1/32 スケールモデル試作実験」, 電学論 D, Vol. 134, No. 7, pp675-682 (2014)
- [48] 畠中紘一・佐藤文博・松木英敏・菊地新喜・村上純一・佐藤忠邦：「デスク型非接触電力伝送システムのコイル形状に関する基礎的検討」, 日本応用磁気学会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 1015-1018, (2001)
- [49] M. Kato, T. Imura, and Y. Hori, “New characteristics analysis considering transmission distance and load variation in wireless power transfer via magnetic resonant coupling” in IEEE INTELEC 34th International Telecommunications Energy Conference (2012)
- [50] 遠井敬大・金子裕良・阿部茂：「非接触給電の最大効率の結合係数 k とコイルの Q による表現」, 電学論 D, Vol. 132, No. 1, pp. 123-124 (2012)
- [51] S. Li and C.C. Mi, “Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications,” IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 3, pp. 4-17 (2015)
- [52] I. Awai, “BPF Theory-Based Design Method for Wireless Power Transfer System by Use of Magnetically Coupled Resonators,” IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol. 130, No.12, pp.2192-2197 (2010)
- [53] 居村岳広・堀洋一：「電磁誘導方式と磁界共振結合方式の統一理論」, 電学論 D, Vol.135, No. 6, pp. 697-710 (2015)
- [54] S. Ahn, N. P. Suh, and D. H. Cho, “Charging up the road” IEEE Spectrum, Vol. 50, pp. 48-54 (2013)
- [55] K. Throngnumchai, A. Hanamura, Y. Naruse, and K. Takeda, “Design and Evaluation of a Wireless Power Transfer System with Road Embedded Transmitter Coils for Dynamic Charging of Electric Vehicles,” in IEEE EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (2013)
- [56] 伊東淳一・野口健二・折川幸司：「非接触充電システムと電気二重層キャパシタを用いた電動アシスト自転車システムの開発」, 電学論 D, Vol. 135, No. 12, pp. 1225-1236 (2015)

- [57] 庄木裕樹：「ワイヤレス電力伝送の技術動向・課題と実用化に向けた取り組み」, 信学技報, WPT2010-7, (2010)
- [58] 齊藤孝・佐藤正雄・中村修治・三原壮一郎：「マイクロ波電力伝送試験の概要と現状」, 信学技報, WPT2014-4, SCE2014-4, MW2014-4 (2014)
- [59] 佐々木拓郎・後藤準・當山善彦・高橋智宏・鮫島文典・本間幸洋・佐々木謙治・中村修治：「マイクロ波電力伝送試験モデルの送電部開発」, 信学技報, WPT2014-49, (2014)
- [60] JAXA：「宇宙太陽光発電システム (SSPS) の研究」
<http://www.ard.jaxa.jp/research/ssps/ssps.html>, (最終アクセス, 2016.7)
- [61] 長井千明・安藤賢一・渡辺和哉・鶴山雅夫・ジワリヤウエートウィッター・居村岳広・堀洋一：「無線給電を利用したモニタリングへ向けて」, 日本原子力学会秋の大会, A04, p. 4 (2011)
- [62] 長井千明・安藤賢一・渡辺和哉・鶴山雅夫・ジワリヤウエートウィッター・居村岳広・堀洋一：「水を媒体として無線給電を利用したモニタリング」, 日本原子力学会秋の大会, B44, p. 44 (2012)
- [63] S. Yoshida, M. Tanomura, K. Shizuno, N. Kobayashi, H. Fukuda, and Y. Hama, "A compact 35-watt high-efficiency wireless power transmission system under seawater environment," European Microwave Conference (EuMC), pp. 904-907 (2013)
- [64] 二神大・澤原裕一・石崎俊雄・粟井郁雄：「スパイラル共振器を用いた海中 WPT システムの伝送特性」, 信学技報, WPT2014-60 (2014)
- [65] 石渡将己・岩下龍太郎・高口陽次・小池隆史・柴建次：「モニタリング装置への無線電力伝送 - NaCl 水溶液中に浸漬させた受電コイルの受電電力測定 - 」, 信学技報, WPT2014-64 (2014)
- [66] 粟井郁雄・澤原裕一・山口和也・堀田昌志・石崎俊雄：「水中のワイヤレス給電に関わる幾つかの新しい現象」, 電気情報通信学会学会誌 B, Vol. 96, No. 11, pp. 1284-1293 (2013)
- [67] K. Shizuno, S. Yoshida, M. Tanomura, and Y. Hama, "Long distance high efficient underwater wireless charging system using dielectric-assist antenna," 2014 Oceans - St. John's, pp. 1-3 (2014)
- [68] 伊藤雅和・岡本真由美・鈴木啓三・柴田雅博・佐々木康雄：「ベントナイトの鉱物組成分析」, 日本原子力学会誌, Vol. 36, No. 11, pp.1055-1058 (1994)
- [69] 文部省国立天文台編, 「理科年表(平成 21 年版)」
- [70] 石崎俊雄・深田大輔・粟井郁雄：「サイズの異なる非対称共振器を用いた無線電力伝送の検討」, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol. 2011, No. 1, pp. "S-29"- "S-30", (2011)
- [71] 粟井郁雄：「共振器結合型ワイヤレス給電システムの簡便な設計」, 電学論 C, Vol. 130, No. 12, pp. 2198-2203 (2010)

- [72] 佐藤文博・守田 淳・田倉哲也・佐藤忠邦・松木英敏：「ミアンダコイルによる電気自動車を想定した高効率走行中非接触電力伝送モデルに関する検討」, 日本学会誌, Vol. 36, No. 3, (2012)
- [73] 山本岳・居村岳広・藤本博志：「インホイールモータへのワイヤレス電力伝送における送受電コイルの設計」, 平成 26 年産業計測制御/メカトロニクス制御合同研究会, IIC-14-073, MEC-14-061, pp. 103-108 (2014)
- [74] 奥山祐樹・平山裕・菊間信良・榊原久二男：「磁界共鳴型無線電力伝送の導電率を考慮した等価回路」, 信学技報, WPT2010-09 (2010)
- [75] 居村岳広・加藤昌樹・堀洋一：「磁界共振結合によるワイヤレス電力伝送と EV への応用」, 日本磁気学会第 199 回研究会資料, pp. 21-27 (2014)
- [76] C.S.Wnag, G.A.Covic, and O.H.Stielau: "Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.51, No.1, pp. 148-157 (2004)
- [77] 藤田敏博・金子裕良・阿部茂：「直列および並列共振コンデンサを用いた非接触給電システム」, 電気学会論文誌 D, Vol.127, No.2, pp.174-180 (2007)
- [78] J. Sallan, J.L.Villa, A.Llombart, and J.F.Sanz:"Optimal Design of ICPT System Applied to Electric Vehicle Battery," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.56, No.6, pp.2140-2149 (2009)
- [79] 坪香雅彦：「磁界共振結合を用いたワイヤレス電力伝送における周波数制御システムの研究-受電共振器の設計と自己共振推定-」, 平成 24 年度東京大学修士論文
- [80] (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：「平成 26 年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発報告書 (第 3 分冊) モニタリング関連技術の整備」 (2015)
- [81] 宅崎恒司・星伸一：「非接触給電装置の共振回路高効率化のための受電側降圧コンバータの動作条件の検討」, 電学論 D, Vol. 132, No. 10, pp. 966-975 (2012)
- [82] M. Kato, T. Imura, and Y. Hori, "Study on Maximize Efficiency by Secondary Side Control Using DC-DC Converter in Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling" in IEEE EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (2013)
- [83] M. Fu, C. Ma, and X. Zhu, "A Cascaded Boost-Buck Converter for High Efficiency Wireless Power Transfer Systems," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, pp. 1972-1980 (2014)
- [84] 核燃料サイクル開発機構, 「わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—」, (1999)
- [85] J.P.K. Sampath, A. Alphones, L.Y.Y. Kenneth, and D. M. Vilathgamuwa, "Analysis on Normalized Distance and Scalability in Designing Wireless Power Transfer", in 2015 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power (WoW) (2015)

- [86] C. Park, S. Lee, G.-h. Cho, and C.T. Rim, "Innovative 5-m-Off-Distance Inductive Power Transfer Systems With Optimally Shaped Dipole Coils," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 2, pp. 817-827 (2015)
- [87] 名雪琢弥・福島健太郎・宜保直樹・根本孝七・池谷知彦：「双方向非接触給電システムの提案と基本性能の実証」, 電力中央研究所報告, No. H10007 (2011)
- [88] 藤本博志・山本岳・佐藤基・郡司大輔・居村岳広：「ワイヤレスインホイールモータを搭載した電気自動車の実車評価」, 自動車技術会 2015 年春季大会, S267, pp. 1389-1394 (2015)
- [89] H. Nagaoka, "The Inductance Coefficients of Solenoids" *The Journal of the College of Science, Imperial University*, vol. 27, pp. 1-33 (1909)
- [90] 高倉伸一・南大樹・伊藤雅和：「ベントナイトの比抵抗と物理的・化学的特性との関係」, 物理探査, Vol. 64, No. 5, pp. 359-366 (2011)

発表文献・研究実績

査読付き論文誌

1. 長井千明・犬飼健二・小林正人・田中達也・鑑頭正・居村岳広・堀洋一：「磁界を用いたワイヤレス電力伝送における結合係数とコイルサイズのスケール則」, 電学論 D (投稿中)
2. 長井千明・犬飼健二・小林正人・江藤次郎・田中達也・安藤賢一・居村岳広・堀洋一：「地層処分におけるモニタリングのためのワイヤレス電力伝送の適用性に関する検討」, 日本原子力学会原子力バックエンド研究 (投稿中)

国際会議発表 (査読あり)

1. C. Nagai, T. Tanaka, K. Ando, T. Imura, Y. Hori: “Development of a Monitoring Technology for Nuclear Waste Geological Disposal using Wireless Power and Signal Transfer”, Asia Oceania Geosciences Society 11th Annual Meeting, (2014)
2. C. Nagai, T. Tanaka, K. Ando, T. Imura, Y. Hori: “Development of a Monitoring Technology for Nuclear Waste Geological Disposal using Wireless Power and Signal Transfer”, The annual Waste Management (WM) Conference 2016, (2016)

国内学会

1. 長井千明・安藤賢一・田中達也・渡辺和哉・居村岳広・堀洋一：「ワイヤレス給電を利用したモニタリングの電磁界解析」, 日本原子力学会 2013 年秋の大会, O18
2. 長井千明・安藤賢一・田中達也・渡辺和哉・居村岳広・堀洋一：「磁界共鳴式ワイヤレス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, F15
3. 長井千明・田中達也・安藤賢一・江藤次郎・加藤昌樹・居村岳広・堀洋一：「地中無線モニタリング装置への磁界共鳴式電力伝送の適用試験」, 日本原子力学会 2015 年秋の大会, H27

学会以外の発表

1. K. Ando, C. Nagai, Y. Hori:
“Engineering Construction and Operating Repository -Long term monitoring-”,
Regional Training Course on Fundamentals of Geological Disposal, IAEA's
workshop on Mizunami, (2013)

取材・報道関係

1. 「放射性廃棄物ワイヤレス給電で監視」2014年9月1日 日刊工業新聞
2. 「放射性廃棄物の隔離でワイヤレス給電の可能性に期待」エネルギーレビュー8月号,
(2015)

受託研究

1. 「平成 26 年度地層処分技術調査等事業（処分システム工学確証技術開発）のうち
モニタリング関連技術の整備（電磁波による給電技術の検討）」
2. 「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
モニタリング関連技術の整備（電磁波による給電技術の検討）」

特許

1. 安藤賢一・長井千明・渡辺和哉・居村岳広・堀洋一, : 「飽和度計測システム」, 特開
2013-221875