

地層処分におけるモニタリングのための 無線電力伝送の適用性に関する検討

長井千明*1*4 犬飼健二*1 小林正人*2 江藤次郎*2 田中達也*1 安藤賢一*1 居村岳広*3 堀洋一*3*4

放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングでは、計測機器やそ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。そのため、情報を無線伝送、電力をバッテリーで供給することでケーブルを利用しない地中無線モニタリング技術の研究が行われてきた。しかし、バッテリーの寿命のために数十年がモニタリング期間の限界となり処分場の開業から閉鎖まで、あるいは閉鎖後にわたってモニタリングを続けることは困難である。そこで、情報と電力の両方を無線で伝送する無線電力伝送をモニタリングに適用することで、長期間のモニタリングが可能なシステムを提案する。本論文では各種無線電力伝送方式の中からモニタリングに適した方式を選定し、電磁界解析を通して上記のシステムにおける適用可能性を示した。

Keywords: 地層処分, モニタリング, 無線電力伝送, 磁界共振結合

In monitoring geological disposal of radioactive waste, it is important that sensors and cables do not affect the performance of the engineered barrier. Therefore, underground wireless monitoring techniques using wireless data transfer in combination with batteries have previously been studied. However, when using batteries there is a limit to the monitoring period of a few decades at the most, and it is difficult to continue monitoring the disposal site during the operation phase and after final closure. A new monitoring system using wireless power and information transfer that can be deployed long-term is proposed. In this paper, a method suitable for monitoring was selected from various wireless power transfer systems, and the applicability in the selected system is shown by the electromagnetic field analysis.

Keywords: geological disposal, monitoring, wireless power transfer, magnetic resonance coupling

1 序論

核燃料サイクルに伴って発生する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) の処分方法として、地層処分が計画されている。地層処分では、処分場閉鎖後に長期にわたり放射性廃棄物を隔離し閉じ込める機能が求められる。閉じ込め機能について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、閉鎖後の安全性はモニタリングなどの人の管理に依存することなく提供される[1]。一方、海外や国際共同研究である MoDeRn2020 では社会科学的な観点を含め、人工バリアの状態を把握するモニタリングの必要性が議論されている[2][3]。

人工バリア内部でのモニタリングの実施においては、計測機器やそ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[4]。そのため、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ケーブルを用いずモニタリングを行う研究が進められてきた[5]。この研究では情報を無線伝送とし、電源供給を化学電池によるバッテリーで行うシステムが採用されている。しかし、化学電池では消耗に依存して計測期間が制限されるため、モニタリング期

間が地層処分場の建設から閉鎖までの 70 年程度[6]にわたる場合、その期間中の継続的なモニタリングは難しい。

そこで本論では、化学電池の寿命によるモニタリング期間の制限を解決する新しい手法として、ケーブルを利用せず電磁波や電磁界によってエネルギーを供給する無線電力伝送 (Wireless Power Transfer :以下 WPT とする) をモニタリングに適用することを提案する。これにより電源と情報の両方を無線で伝送できるため、潜在的な水みちの原因となるケーブルを必要としない上に、建設から閉鎖まではもちろんのこと、閉鎖後に至るまで利用期間の制限なくモニタリングを継続して行うことが可能なシステムを実現できる。

以下では、地層処分における長期モニタリングについて WPT を適用する有用性を述べた上で、各種 WPT の方式の中から最適な方式を選定する。そして電磁界解析を通してモニタリングへの WPT の適用可能性を示す。

2 モニタリングにおける WPT の有用性

2.1 無線化の検討箇所

地層処分において、モニタリングを行う場所の 1 つとしては人工バリアの緩衝材 (ベントナイト) 内が考えられる[6]。Fig. 1 に処分孔の概念図 (堅置き方式) を示す。緩衝材内にセンサを配置した場合、通常、緩衝材の外部にある電源と記録装置までのケーブルが必要となる。そのケーブルが人工バリアの工学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な水みちとなってしまう可能性があることから、ケーブルのないモニタリングが望まれている。

また、処分孔の緩衝材と同様に、ケーブルがあることで地層処分のシステムに影響を与える場所として、坑道に設置される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 (Fig. 2)。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

Applicability study on wireless power transfer in monitoring for geological disposal by Chiaki NAGAI (nagai.chiaki@obayashi.co.jp), Kenji INUKAI, Masato KOBAYASHI, Jiro ETO, Tatsuya TANAKA, Kenichi ANDO, Takehiro IMURA, Yoichi HORI

*1 株式会社大林組

Obayashi Corporation

〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2

*2 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター

Radioactive Waste Management Funding and Research Center

〒104-0052 東京都中央区月島 1-15-7

*3 東京大学大学院 工学系研究科 電気系工学専攻

Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

*4 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻

Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo

〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

(Received 16 August 2016; accepted 6 April 2017)

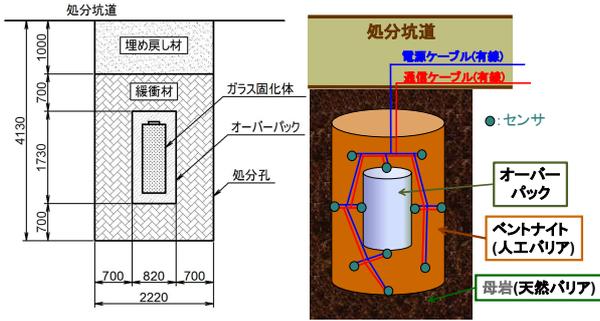


Fig. 1 The schematic of disposal pit

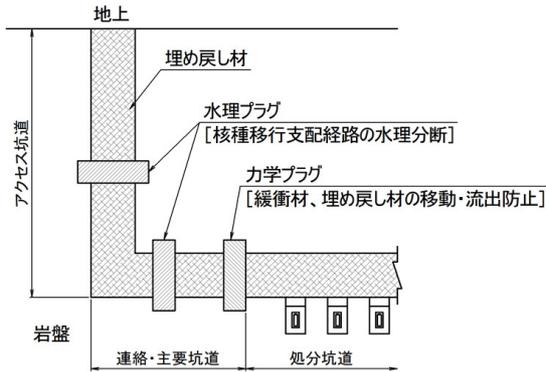


Fig. 2 The schematic of geological repository

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の存在がシステムに影響を与えるのは、水理プラグである。水理プラグは処分孔と同様にベントナイトが材料として考えられている[7]。

以上より、処分孔の緩衝材と水理プラグにケーブルを通すことは望ましくなく、この2ヶ所においてケーブルを利用せずにセンサに電力を供給し情報を受け取るシステムによりモニタリングが高度化すると考える。

2.2 無線化の方法

2.2.1 化学電池を用いた手法

地層処分に関わるモニタリングの既存研究としては、モニタリング用センサの電源供給にバッテリーとして化学電池、情報通信を無線で行うシステムが研究されている[5]。この研究では、ケーブルを利用しないモニタリングを実現できる。しかし、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、バッテリーの交換ができない完全に隔離された地層処分のモニタリングにおける利用では、測定期間に制限がある。

2.2.2 原子力電池を用いた手法

ケーブルを利用せずに長期間のモニタリングを行う手法として、バッテリーを化学電池ではなく原子力電池である放射性同位体熱電気変換器 (Radioisotope thermoelectric generator: RTG) やベータボルタイック変換器を用いた手法が検討されている[8]。RTGは放射性物質の崩壊熱を用いたゼーバック効果により電気エネルギーに変える変換器であり、衛星探査機等の電源として利用されてきた。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

[9]。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。

しかしながら、RTGは放射性同位体の数百℃におよぶ発熱の問題、ベータボルタイック変換は μW オーダー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問題など、課題がある。

2.3 WPTによる給電の提案

近年、電気自動車や携帯電話に対して、ケーブルを利用することなく電源を供給するWPTが注目されている。WPTは、電磁波や電磁界を利用することで、空間中を超えて無線で電力を伝送することが可能な技術である。この技術を適用することで、長期モニタリングを継続的に行う際のバッテリーの寿命による課題が解決できる。そこで本論では、このWPTと無線情報通信を用いたシステムを地層処分におけるモニタリングに適用することを提案する。Fig. 3に提案するWPTを適用したモニタリングシステムの概念を示す。本システムにより、処分孔とプラグにおいて、ケーブルを利用せずに長期間のモニタリングが可能となる。本論は、このシステムのうちWPTに焦点をあてたものであり、その適用性について次章以降で述べる。

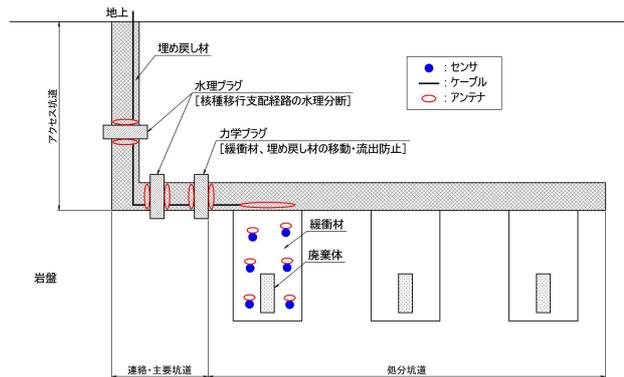


Fig. 3 The schematic of WPT for monitoring system

3 モニタリングに適したWPT方式の選定

3.1 WPTの各種方式

WPTは電磁波や電磁界を用いて無線で電力伝送する方式であるため、電界を用いた手法、磁界を用いた手法、電磁波を用いた手法の3つの方式に分類され、さらに磁界および電界を用いた手法では共振の有無がある。ここでは各種方式を紹介する。Table 1に方式の分類を示す。本章ではこれらのWPT方式の中から、伝送の効率や距離において地層処分におけるモニタリングに適した方式を選定した。

3.1.1 磁界を用いた方式

(1) 電磁誘導方式 原理は変圧器と同じで、送電側のコイルに流れる電流が作る磁束が受電側のコイルに鎖交して起電力が生じることで電力が伝わる。その際、損失の発生を少なくするために、コイル間の結合を強くする透磁率の高い鉄心が用いられる。また、コイル間の距離を短くする必要がある。電磁誘導方式は数百kWまでの電力伝送が実現されているが、コイル間距離は数十cmと大きくするこ

Table 1 Classification of WPT methods

WPTの媒介	方式	最大効率	伝送距離
磁界	電磁誘導	90%~	~数十cm
	磁界共振結合	90%~	~数m
電界	電界結合	90%~	~数十cm
	電界共振結合	90%~	~数m
電磁波	マイクロ波	~54%	km

とはできない。そのため、携帯電話の充電[10]、卓上のノート PC の充電[11]、搬送機などのレーンを使用した機器[12]への充電などで利用されている。

(2) **磁界共振結合方式** この方式は、新しい WPT の方式として電界共振結合とともに電磁界共振技術として 2007 年に発表された[13]。磁界共振結合方式は送受電用のコイルと容量成分（コンデンサ）による共振現象を用いることにより、電磁誘導方式よりもコイル間の距離を大きくとることができ、位置ずれに強く、高効率な方式として注目されている。電気自動車への電力伝送[14]や、家電などの身近な機器への応用[15]が期待されている技術である。

3.1.2 電界を用いた方式

(1) **電界結合方式** この方式は二つの電極（平板電極など）によりコンデンサを構成することで、電極間の電界により WPT を行う手法である。一般的なコンデンサは誘電体という素材が電極間にあるが、WPT においては誘電体でないため電極間距離は短くなる。一方、電極同士の位置がぴったりと合う必要がなく位置ずれに強い。タブレット端末の充電器で実用化されている。

(2) **電界共振結合方式** この方式は電界結合方式の電極にコイルを接続することで起こる共振現象により、電極間距離を大きくでき、高効率に電力伝送ができる。電気自動車への給電[16]などに応用されている。

3.1.3 電磁波を用いた方式

電磁波の放射を利用したマイクロ波により WPT を行う手法である。電磁波を用いることで超長距離の伝送を実現できるが、電磁波の拡散や、電磁波（高周波）と直流の変換機による損失が大きいため、他方式と比較すると数 m の伝送距離において効率は低い。この方式を用いて宇宙太陽光発電（SSPS）[17]と呼ばれる、宇宙空間にある太陽電池で発電を行い、電磁波により地球に送るといった技術の研究がなされている。

また、マイクロ波よりさらに周波数が高い電磁波を光として用いるレーザ方式などもあるが、本検討における伝送箇所において光は透過できないため本論の対象外とする。

3.2 モニタリングに適した WPT 方式の選定手法

地層処分のモニタリングにおいては、水理プラグや人工バリアを構成する緩衝材（ベントナイト）を介して WPT を行うことが必要であり、この伝送する媒体での損失ができるだけ小さいことが望ましい。よって、ベントナイト中における損失が小さい WPT の方式を選定する。電磁波や電磁界の媒体中で生じる損失の指標となるパラメータとし

て、複素誘電率や複素透磁率がある。これらを測定して評価することで、地層処分のモニタリングに適した WPT を選定する。以下に各パラメータと損失の関係を示す。

3.2.1 複素誘電率と損失

交流電界 E とすると、電束密度 D は電界変化に対して位相が遅れる。角周波数 ω 、位相の遅れ角 θ として、交流電界および電束密度を指数関数で表すと次のようになる。

$$\begin{cases} \dot{E} = E_0 e^{j\omega t} \\ \dot{D} = D_0 e^{j(\omega t - \theta)} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)より誘電率は次式となる。

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{D}}{\dot{E}} = \frac{D_0 e^{j(\omega t - \theta)}}{E_0 e^{j\omega t}} = \frac{D_0}{E_0} e^{-j\theta} \quad (2)$$

これよりオイラーの公式を用いて変換することで複素誘電率 ϵ が得られる。

$$\epsilon = \frac{D_0}{E_0} \cos\theta - j \frac{D_0}{E_0} \sin\theta = \epsilon_0 (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') \quad (3)$$

ここで ϵ_0 は真空中の誘電率であり、 ϵ_r' および ϵ_r'' は真空中に対する複素誘電率の比を表している比誘電率である。複素誘電率の実数部は外部電界からのエネルギーの蓄積、虚数部はエネルギー消費（損失）を表す指標である。複素誘電率より、媒体中の単位体積あたりの毎秒のエネルギー消費（損失） W は次式となる。

$$W = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' E_0^2 \quad (4)$$

つまり式(4)より、電波や電界を用いた WPT では複素誘電率の虚数部が小さければ損失が小さくなる。

3.2.2 複素透磁率と損失

交流磁界 H とすると、磁束密度 B は磁界変化に対して位相が遅れる。角周波数 ω 、位相の遅れ角 δ として、交流磁界および磁束密度を指数関数で表すと次のようになる。

$$\begin{cases} \dot{H} = H_0 e^{j\omega t} \\ \dot{B} = B_0 e^{j(\omega t - \delta)} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)より複素透磁率と同様に、複素透磁率 μ は次式となる。

$$\dot{\mu} = \frac{\dot{B}}{\dot{H}} = \frac{B_0}{H_0} \cos\delta - j \frac{B_0}{H_0} \sin\delta = \mu_0 (\mu_r' - j\mu_r'') \quad (6)$$

ここで μ_0 は真空中の透磁率であり、 μ_r' および μ_r'' は真空中に対する複素透磁率の比を表している比透磁率である。複素透磁率の実数部は外部磁界からのエネルギーの蓄積、虚数部はエネルギー消費（損失）を表す指標である。複素透磁率より、媒体中の単位体積あたりの毎秒のエネルギー消費（損失）は次式となる。

$$W = \frac{1}{2} \omega \mu_0 \mu_r'' H_0^2 \quad (7)$$

つまり式(7)より、磁波や磁界を用いた WPT では複素透磁率の虚数部が小さければ損失が小さくなる。

3.3 緩衝材の複素誘電率と複素透磁率の測定

WPTの各方式における損失評価の指標として、処分孔の緩衝材と水理プラグの材料として検討がな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の測定を行った。ベントナイトに含まれる水分量による影響を評価するために含水比は17±1%と28±1%の2種類を測定した。2つの試料ともに乾燥密度は同じである。Fig. 4に測定用に製作した試料を、Table 2に試料の含水比を示す。試料は測定するパラメータごとに測定機に合わせた形のものを作成した。複素誘電率は静電容量法、複素透磁率は測定試料にトロイダルコイルを巻き、それぞれのインピーダンスの測定結果から複素誘電率および複素透磁率を求めた。測定周波数は1kHzから1MHzとした。測定結果のうち1kHz, 10kHz, 100kHz, 1MHzの値をまとめたものをTable 3に、複素誘電率の測定結果をFig. 5およびFig. 6に、複素透磁率の測定結果をFig. 7およびFig. 8に示す。ここで示した測定結果は比誘電率と比透磁率であり、真空中に対する比を表していることに注意されたい。

3.4 モニタリングに適したWPTの考察

一般に個体の複素誘電率の虚数部/実数部は $10^{-3} \sim 10^{-4}$ オーダーの物質が多い。しかし、Fig. 5およびFig. 6よりベントナイトの虚数部/実数部は非常に高く、電界と磁界の相互作用により電力伝送を行う電磁波を用いた方式や、電界を用いたWPT方式では損失が大きい。また、含水比が増えると複素誘電率の虚数部/実数部が増加していることから、ベントナイトに地下水が染みわたり含水比が増加した



(a) For dielectric constant measurement. (b) For permeability measurement.

Fig. 4 Measurement samples of bentonite

Table 2 Measurement sample parameters

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	3.41	1.61	1.37	17.5
17% 複素透磁率測定用	3.18	1.56	1.33	17.3
28% 複素誘電率測定用	3.64	1.72	1.34	28.4
28% 複素透磁率測定用	3.54	1.74	1.36	27.9

Table 3 Measurement result of complex dielectric constant and complex permeability

含水比	パラメータ	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz
17%	ϵ_r'	2.87×10^4	7.64×10^3	1.44×10^3	1.48×10^2
	ϵ_r''	2.49×10^4	9.55×10^3	2.39×10^3	4.04×10^2
	μ_r'	1.01	1.00	1.00	1.00
	μ_r''	2.19×10^{-3}	3.90×10^{-4}	8.93×10^{-4}	3.42×10^{-3}
28%	ϵ_r'	1.36×10^5	2.71×10^4	1.57×10^3	1.09×10^2
	ϵ_r''	9.38×10^4	4.66×10^4	8.25×10^3	9.72×10^2
	μ_r'	1.00	1.00	1.00	1.00
	μ_r''	4.00×10^{-2}	3.01×10^{-3}	7.88×10^{-4}	2.71×10^{-3}

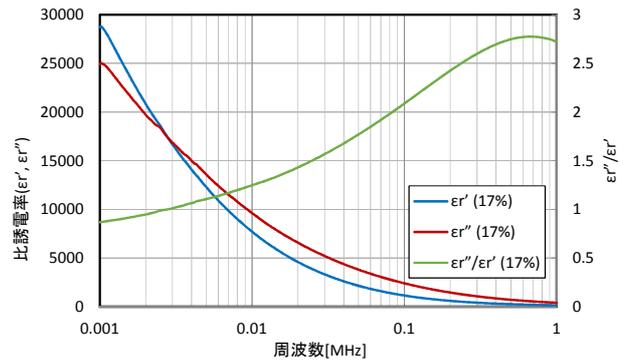


Fig. 5 Complex dielectric constant of bentonite (water content 17%)

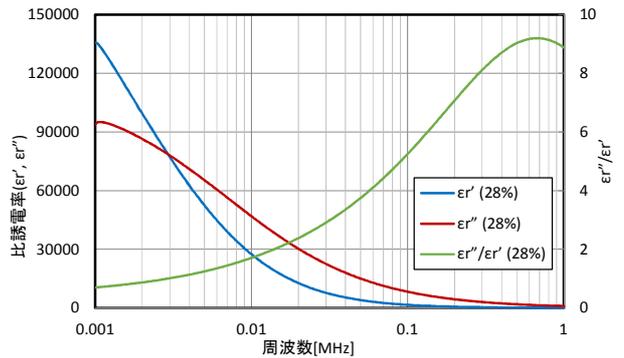


Fig. 6 Complex dielectric constant of bentonite (water content 28%)

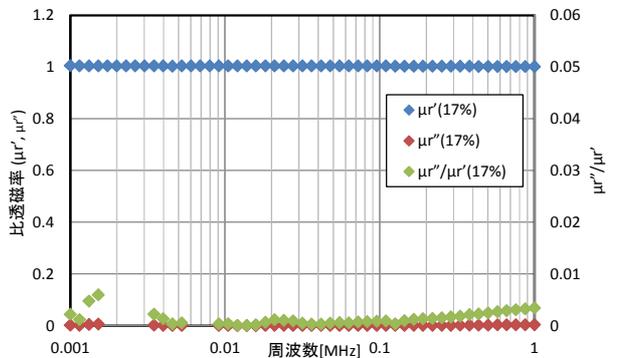


Fig. 7 Complex permeability of bentonite (water content 17%)

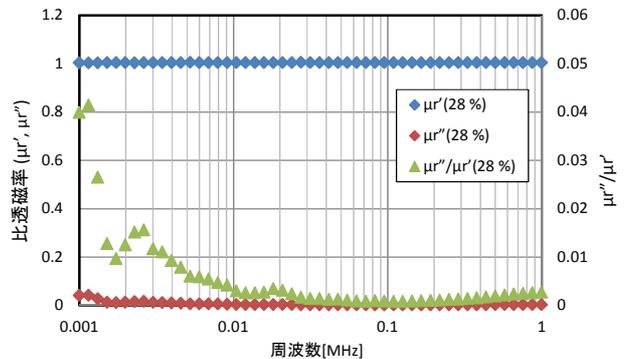


Fig. 8 Complex permeability of bentonite (water content 28%)

場合に、電磁波や電界を用いた WPT の損失も増加することが予想される。一方、Fig. 7 および Fig. 8 の複素透磁率の測定結果より、WPT によく利用される 10 kHz から MHz の周波数帯では虚数部/実数部は 10^{-3} 程度であり、磁界の損失がほとんど生じないことがわかる。磁界を用いた WPT は、送受電部間の伝送距離が波長に対して十分短く、電力伝送において磁界が支配的であり、電界はほとんどないため、電力伝送における損失は小さいと予想される。

よって、地層処分におけるモニタリングには、上記に示した 3 種類のうち、磁界を用いた WPT を適用する方法が適しているといえる。また、水理プラグの厚みが数 m であることを考慮すると、磁界を用いた WPT の中でもより長い送電距離を実現できる磁界共振結合方式が有効と考えられる。

4 WPT の適用性

前章にて、地層処分のためのモニタリングに WPT を適用する場合、磁界共振結合方式が有効な方式であることを示した。本章では磁界共振結合をモニタリングに適用した場合に電力を送電可能であるか、電磁界解析を行うことで検討する。

4.1 磁界共振結合方式による WPT の伝送効率

磁界共振結合方式の等価回路を Fig. 9 に示す。 L_1 および L_2 はそれぞれ送電側コイルおよび受電側コイルの自己インダクタンス、 L_m は送電側コイルと受電側コイルの間の相互インダクタンス、 C_1 、 C_2 はそれぞれ送電側および受電側の共振コンデンサの容量、 R_1 、 R_2 はそれぞれ送電側および受電側の等価直列抵抗、 R_L は給電の対象となる負荷抵抗を表している。磁界共振結合方式は共振現象によって高効率で電力伝送を行う手法であり、送電側と受電側がそれぞれ同じ周波数で共振する必要があるため式(8)の関係がある。 f は交流電源の周波数である。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (8)$$

このとき、伝送効率 η は負荷抵抗によって変動するが、伝送効率を最大化する最適負荷抵抗 R_{Lopt} と、その最大効率 η_{max} は以下の式となる[18]。

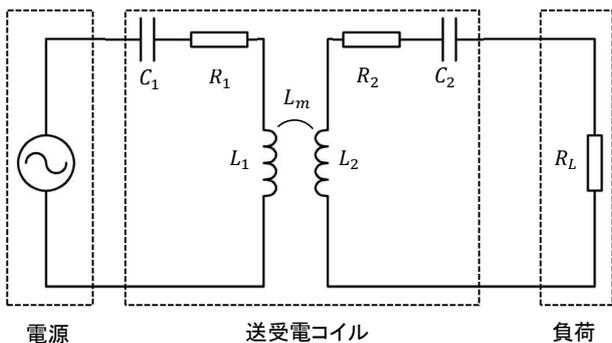


Fig. 9 Equivalent circuit of magnetic resonance coupling

$$R_{Lopt} = R_2 \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2} \quad (9)$$

$$\eta_{max} = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_1 Q_2})^2} \quad (10)$$

ただし、式中 k は送電コイルと受電コイルの間の結合係数 $(0 \leq k \leq 1)$ 、 Q はコイルの性能の指標である Q 値であり、それぞれ式(11)、式(12)で表される。

$$k = \frac{L_m}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (11)$$

$$Q_n = \frac{\omega L_n}{R_n} \quad (n = 1, 2) \quad (12)$$

式(10)より、これらの結合係数 k および Q 値が高くなるほど伝送効率も高くなる。

4.2 電磁界解析による適用性の検討

WPT の適用性の基礎検討として、水理プラグを想定した電磁界解析を行った。Fig. 10 に水理プラグにおける WPT の設置イメージを示す。また、Fig. 11 に電磁界解析に用いる水理プラグ用の送受電コイルのモデル、Table 4 に送受電コイルモデルの仕様を示す。

送受電コイルはともに坑道直径である 4 m まで設置可能であるため、本検討ではコイルの直径は 4 m とした。ベン

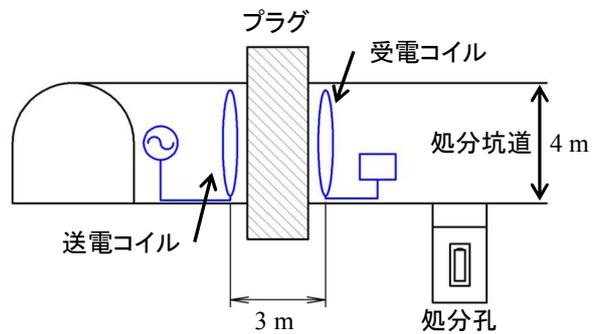


Fig. 10 The schematic of WPT for hydraulic plug

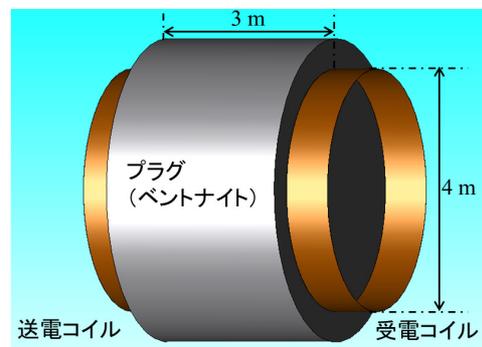


Fig. 11 Model of transmitter and receiver coils

Table 4 Coil parameters

コイルの直径	4 m
コイルの幅	0.4 m
巻数	80

トナイトのモデルとしては測定した含水比 18%の複素透磁率をパラメータとして入力した。電磁界解析ソフトには JMAG (株式会社 JSOL 製) を使用し, Fig. 11 のモデルにて磁界の周波数応答解析を行った。解析する周波数 (交流電源の周波数) は 100 kHz とした。WPT に使用する電源の周波数として 100 kHz 付近を利用する理由としては, MHz 帯の分布定数回路を扱う必要がある高周波に対して比較的 low 周波であり, 集中定数回路として Fig. 9 の回路の等価回路のように比較的簡単に扱えるためである。

解析は, 結合係数 k および Q 値を求めるためのインダクタンスの解析と, 式(9)より計算した最適負荷に対して 100 W の電力伝送を行う解析の 2 通りを行った。

解析結果をまとめたものを Table 5 に示す。解析より結合係数 k は 0.0475, コイルの Q 値は 250 となった。 k および Q から式(10)を用いて計算した最大の伝送効率の理論値は 84.5 % となった。次に, 最適負荷に対して 100 W の電力伝送を行った際の電力の伝送効率は 82.6 % となった。100 W の電力伝送の電磁界解析の結果は, 空気における最大伝送効率の理論値に比べ若干低い結果となったが, いずれの結果も伝送効率は 80 % 程度であり, 磁界共振結合方式による WPT を地層処分のモニタリングに適用することは, 十分に可能であると考えられる。

Table 5 Electromagnetic simulation results

結合係数 k	0.0475
Q 値	250
最大効率 η_{max} (k と Q による計算値)	0.845
効率 (シミュレーション結果)	0.826

本ケースにおいては, ベントナイトにおける損失の影響は小さく, 磁界共振結合による WPT で電力伝送可能という結論が得られた。現在, 地層処分事業における処分場の場所はまだ決まっていないため, 実環境のベントナイトや地下水を評価することはできない。今後候補地が決まった際には, ベントナイトや地下水の違いが電気的なパラメータおよび伝送効率にどの程度の影響があるか評価していきたい。

5 結論

本論では, 地層処分におけるモニタリングを長期的かつケーブルを利用せず行うことを可能とする方法として, WPT の適用を提案し, その適用可能性を示した。まず, 地層処分のモニタリングを無線化する方法として, 従来検討されている化学電池や原子力電池を取り上げ, それらではモニタリング期間に限界があることから WPT を適用する有用性を述べた。次に, 各種 WPT の方式の中で, モニタリングの媒体影響における電力伝送効率の観点から地層処分におけるモニタリングには磁界共振結合方式が適していることを示した。最後に電磁界解析を通して, 磁界共振結合による WPT の地層処分モニタリングへの適用可能性を示した。

提案した方法は, 処分場の建設から閉鎖までの 70 年程度

といった長期間を継続的にモニタリングすることを可能にする。また, 処分場の閉鎖などの意思決定には, モニタリングの結果も考慮されると考えられるため, 本論で提案した方法がそれに寄与できるといえる。本検討では水理プラグにおいて 1 対 1 のコイルで給電可能かといった基礎検討を行った。今後はベントナイトや地下水の違いの影響評価や, 複数のセンサに一括で給電するようなケースの検討, 実験的な検証からモニタリングのための WPT の適用可能性を広げていきたい。

謝辞

本研究は, 経済産業省資源エネルギー庁の「平成 26 年度および平成 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」の成果の一部である。

参考文献

- [1] IAEA : IAEA 安全基準シリーズ, No.WS-R-4, 「放射性廃棄物の地層処分」(2006).
- [2] 大内仁 他: 地層処分にかかわるモニタリングの研究—位置付け及び技術的可能性—, 原子力環境整備促進・資金管理センター, RWMC-TRJ-04003 (2004).
- [3] MoDeRn2020 Website: <http://www.modern2020.eu/>
- [4] 須山泰宏 他: 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, **17**, 71-84 (2010).
- [5] 高村尚 他: 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, **12**, 11-20 (2006).
- [6] 原子力発電環境整備機構: 処分場の概要, (2009).
- [7] 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-13 (2005).
- [8] 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報告書 (第 3 分冊) モニタリング関連技術の整備, (2014).
- [9] Christiana, H. et al.: GaN Betavoltaic Energy Converters. Proc of 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Orlando, Florida, January 3-7, pp. 102-105 (2005).
- [10] Yungtaek, J., Jobanovic, M. M.: A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers. IEEE Trans. Ind. Electrom. **50**, 520-527 (2003).
- [11] Abe, H. et al.: A Noncontact Charger Using a Resonant Converter with Parallel Capacitor of the Secondary Coil, IEEE Trans. Ind. Appl. **36**, 444-541 (2000).
- [12] Green, A. W., Boys, J. T.: 10 kHz inductively coupled power transfer-concept and control. Proc of IEEE Power Electronics and Variable Speed Drives conference, No. 399, London, October 26-28, 1994, pp. 694-699 (1994).
- [13] Kurs, A. et al.: Wireless Power Transfer via Strongly

- Coupled Magnetic Resonances. *Science*, **317**, 83-86 (2007).
- [14] Ahn, S. et al.: Charging up the road. *IEEE Spectrum*, **50**, 48-54 (2013).
- [15] 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, WPT2010-07, pp. 19-24 (2010).
- [16] 鈴木良輝 他：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, 電気学会論文誌 D, **134**, 675-682 (2014).
- [17] 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>
- [18] Li, S., Mi, C.C.: Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, **3**, 4-17 (2015).

