

一般論文

高電位部への電力供給に適した非接触給電技術の開発

Development of Wireless Power Transfer Technology Suitable for Power Supply to High Voltage Region

久保 敏 裕* 松原 克 夫*
 T. Kubo Y. Matsubara
 権藤 亮 太** 高橋 康 人**
 R. Gondo Y. Takahashi
 藤原 耕 二**
 K. Fujiwara

概要

電子線照射装置やイオン注入装置などでは、加速電圧に充電された高電位部へ、電子やイオンを生成するための電力を供給する必要がある。このような用途に、近年電気自動車などの充電技術として注目されている非接触給電技術が適用できないか検討を行った。通常、高電位部は電界緩和のため静電シールドで覆われており、非接触給電を適用する場合も受電コイルをシールド内に配置することになるため、給電を阻害しにくいシールド形状を検討する必要がある。本稿では、はじめに送受電コイル単体の場合のギャップ 300 mm での給電特性を示し、続いて、模擬的な静電シールド内に受電コイルを配置し、シールド形状を工夫した場合の実験・検証結果を示す。

Synopsis

In electron beam processing system and ion implanter, it is necessary to supply electric power to their high acceleration voltage region to generate electrons or ions. This paper investigates whether a wireless power transfer technology, recently notable for charging electric vehicles and so on, can be applied to that use. Generally, the high voltage region is covered by an electrostatic shield for mitigating the electric field, a shape of the shield not to disturb power transfer must be investigated because receiver coil is arranged in such shield in case of wireless power transfer. In this paper, a characteristic of the transmitter/receiver coils 300mm distant is come out at first, then the simulation and experimental results are discussed in case of the receiver coil is placed within the simulative electrostatic shield and that shape of the shield is contrived to improve the efficiency.

1. はじめに

電子線照射装置 (EPS: Electron beam Processing System) やイオン注入装置などでは、加速電圧に充電された高電位部で電子やイオンが生成され、このための電力を外部から供給する必要がある。

近年、電気自動車の分野などでは、新たな充電方式として電磁誘導方式や磁界共鳴方式などの非接触給電技術が注目されており、数百mmから数mの長距離給電が研

究されている。もし、このような非接触給電技術を適用し、接地電位部から一定の絶縁距離に隔てられた高電位部に、電子やイオン生成のための電力を給電できれば、電源レイアウトの自由度が大きくなり、容易にコンパクト設計が可能になる。

通常、高電位部は電界緩和のため静電シールドで覆われており、非接触給電を適用する場合も受電コイルをシールド内に配置することになるが、このシールドに

* 日新電機(株) 研究開発本部
 ** 同志社大学大学院 理工学研究科

本稿は、「電子情報通信学会技術研究報告、IEICE, Vol.112, No.396, pp.123-128, EE2012-49(2013.01)」¹⁾に掲載の論文に、一部加筆したものである。Copyright ©2013 IEICE, 許諾番号: 13GA0007

よって給電が阻害される恐れがある。

本稿では、EPSのフィラメント電源を対象に、これに適した非接触給電方式の検討を行い、送受電コイル単体の場合の給電特性を示すとともに、静電シールド内に受電コイルを配置し、シールド形状を工夫した場合の給電特性の実験・検証結果を報告する。

2. 対象機器 (EPS) と非接触給電方式

2. 1 電子線照射装置 (EPS) と給電目標値

図1(a)に従来構造のEPSを示す⁽²⁾⁽³⁾。加速電圧に充電された高電位部にはフィラメントがあり、これを加熱することで電子を生成し、この電子を加速管で加速して電子ビームを形成している。従来方式では、接地電位に置いたモータで高電位部の発電機を回し、フィラメントの加熱電力を得ている。この方式では、モータと発電機をつなぐ回転棒を、コンデンサとダイオードからなる昇圧回路や加速管の間に通す必要があり、設計に自由度が無く、コンパクト化を阻害するなどの課題がある。

これに対し、フィラメントの加熱電力を非接触で給電することができれば、図1(b)に示すようにタンク上部からフィラメントに直接電力を給電するなど、設計自由度が向上し、回転棒などを無くして装置のコンパクト化を図ることができる。ただし図に示したように、高電位部に配置した受電コイルは、所定の絶縁耐力を有するように静電シールド内に配置して、電界集中を防ぐ必要がある。しかしながら、通常シールドは電磁遮蔽効果を有するため、そのままでは非接触給電を阻害する恐れがある。そこでシールドの形状を工夫し、給電特性の向上を試みた。

なお、EPSの加速電圧としては150 kV~5MVなどがある。今回は、図1(b)に示すように、送受電コイル間の距離を300 mm、給電電力 (フィラメントの加熱電力) を100 Wで試験した。

2. 2 非接触給電方式

非接触給電の主な方式として、電磁誘導や磁気共鳴方式がある。この中で磁気共鳴方式は、数m以上の長距離給電が可能で送受電コイルの位置ずれにも強く、電気自動車などの充電装置として盛んに研究されている。しかしながらこの方式では、一般に運転周波数が数MHzと高く高周波電源が高価になる、或いは、受電コイルの周囲にシールドなどの金属物があると共振周波数が影響を受け、給電が困難になるなどの問題が懸念される。そこで今回は、電磁誘導方式、特に当社が従来から技術的なベースを有する空心トランスの技術を発展させた方式について検討を行った。以下に詳細を示す。

単純化のため送、受電コイルの抵抗を無視すると、

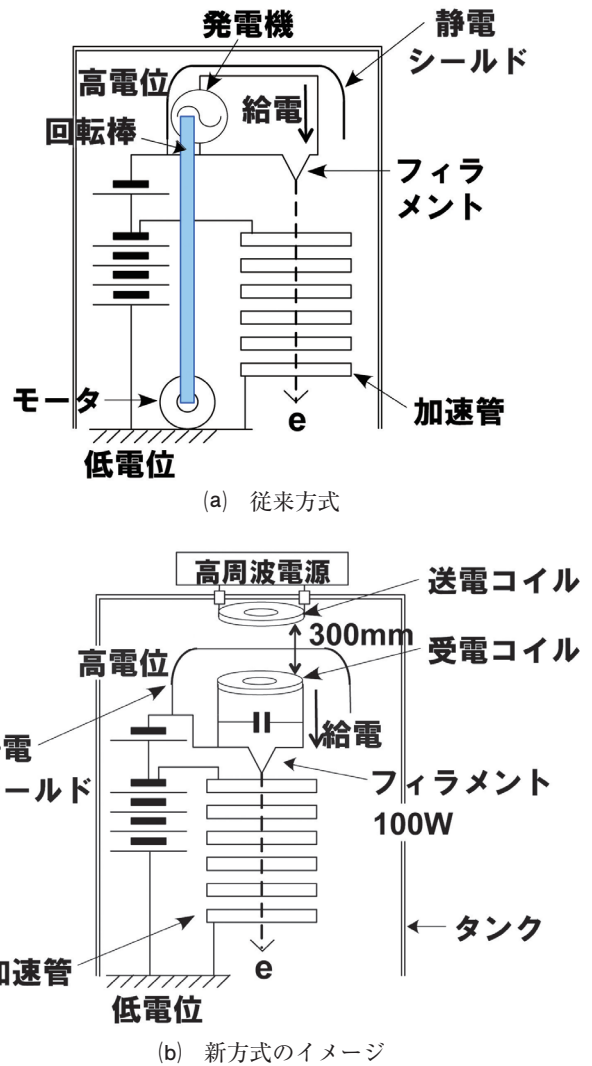


図1 電子線照射装置内概略図

今回使用した非接触給電システムは図2(a)のように表される。図の点線で囲んだ部分が空心トランスであり⁽⁴⁾⁽⁵⁾、 C_s は、送受電間のギャップが長くなると無視できなくなる残留インダクタンス分を補償するため、今回新たに追加したコンデンサである。

文献(4)(5)で述べられているように図2(a)は、図2(b)のように変形できる。ここで、

$$k = M / \sqrt{L_1 L_2} < 1 \quad (1)$$

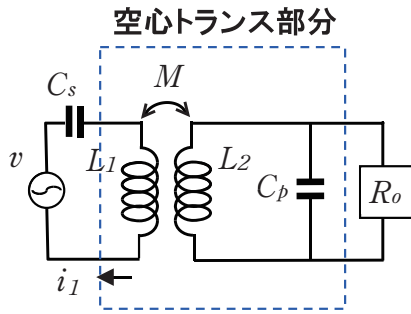
であり、送受電コイル間の結合係数を示す。

図2(b)で L_2 と C_s を並列共振するようにすると、文献(4)の空心トランスとなるが、今回のように送受電コイル間の距離が長い場合は k が小さいので、残留インダクタンス $L_2(1-k^2)/k^2$ が大きくなり、無視できなくなる。そこで、これを C_s で補償している。すなわち、 ω_0 を運転角周波数とすると、

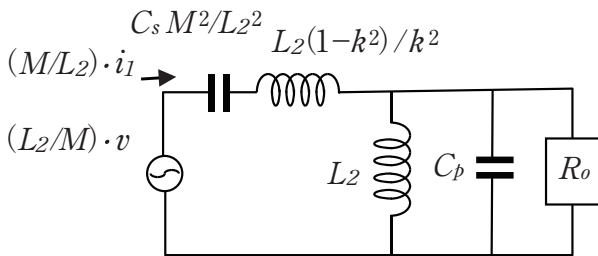
$$\omega_0^2 = \frac{1}{L_2 C_p} \quad (2)$$

$$C_s = \frac{1}{(1-k^2)L_1\omega_0^2}, \quad C_p = \frac{1}{L_2\omega_0^2} \quad (3)$$

となる。



(a) 使用した回路



(b) 二次側から見た等価回路

図2 磁気誘導方式のワイヤレス給電システム

図2の回路の効率 η は負荷 R_o の値で変化し、最適負荷抵抗 $R_{o,max}$ と最高効率 η_{max} (%)は文献(6)(7)に示されており、以下の式で与えられる。

$$\eta_{max} = \frac{100}{1 + 2\sqrt{\frac{1}{k^2} \left(\frac{r_1}{\omega_0 L_1} \right) \left(\frac{r_2}{\omega_0 L_2} \right) + \left(\frac{r_2}{\omega_0 L_2} \right)^2}} \quad (4)$$

$$R_{o,max} = \omega_0 L_2 \sqrt{1 + \frac{1}{k^2} \frac{L_2 r_1}{L_1 r_2}} \quad (5)$$

ここで、 r_1 、 r_2 は、それぞれ送電コイルと受電コイルの巻線抵抗である。

2.3 実験回路

図3に、実験に使用したハーフブリッジインバータ回路を示す。 v_i 、 v_o は入出力電圧、 i_i 、 i_o は入出力電流を示す。スイッチ Q_1 、 Q_2 はMOSFETを用い、ダイオード D_1 、 D_2 は寄生ダイオード、キャパシタンス C_1 、 C_2 は出力容量を示し、 i_{Q1} 、 i_{Q2} は各スイッチの電流を示す。 C_s 、 C_p はそれぞれ、

直列コンデンサ、並列コンデンサを示す。 L_1 、 L_2 は送受電コイルの自己インダクタンス、 v_1 、 v_2 は各コイルの電圧、 n_1 、 n_2 は各コイルの巻数を示す。また、 M は相互インダクタンスである。

図3の回路の動作波形を図4に示す。図4の v_{gs1} 、 v_{gs2} は、スイッチ素子 Q_1 、 Q_2 のゲート・ソース間電圧を示す。また、伝送電力の制御は、矩形波電圧のピーク値 v_i で行った。図に示すようにスイッチ素子 Q_1 、 Q_2 の直後の電圧波形 v_1' は矩形波であるが、受電コイルの電圧波形 v_2 は、設定した周波数でのコイルとキャパシタンスとの共振現象により基本波成分のみ現れるため、ほぼ正弦波となる。

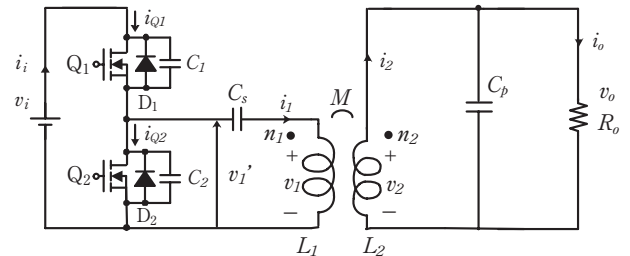


図3 提案回路

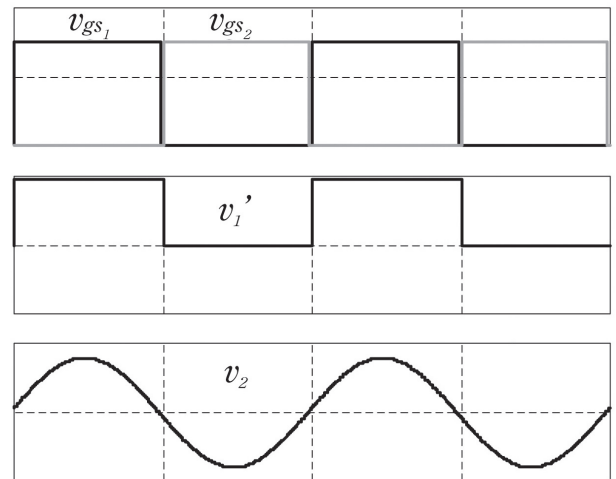


図4 動作波形

3. コイル単体の給電特性

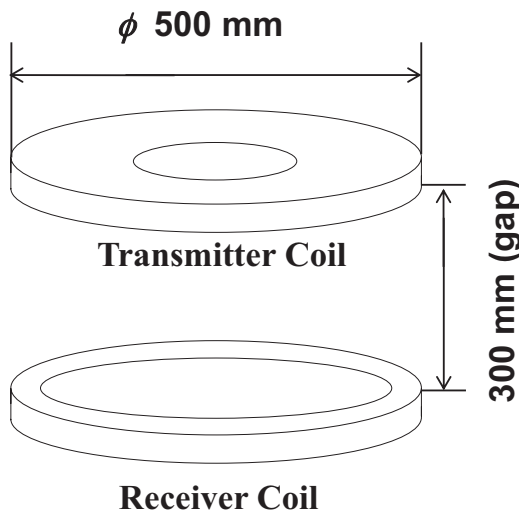


図5 送受電コイル

図5に、実験に使用した送受電コイルを示す。外径500 mm、コイルの巻数比3で、前述したようにコイル間距離300 mmとした。表1にLCRメータを用いて測定したコイルのパラメータを示す。

表1 パラメータ測定結果 (コイル単体)

Parameter	Value
Self inductance L_1 [μ H]	435
Self inductance L_2 [μ H]	89.2
ESR r_1 [Ω]	0.14
ESR r_2 [Ω]	0.04
Coupling coefficient k	8.16×10^{-2}
Mutual inductance M [μ H]	16.1

給電の条件として、出力電力100 W一定とし、シミュレーション、実験を行った。運転周波数 f_0 としては、汎用的な半導体素子が使用可能な20 kHzに設定し、この周波数で共振するよう(3)式から各コンデンサを、また、(5)式からそのときの最適抵抗 R_o を決定し、 $R_o = 125 \Omega$ 、 $C_s = 145 \text{ nF}$ 、 $C_p = 710 \text{ nF}$ とした。

図6・表2にシミュレーション結果を示す。図6より、 v_2 が共振現象によりほぼ正弦波となっていることが確認できる。 v_1' と v_2 の波形が同位相となっていることから、 C_s による力率改善の効果も確認できる。

表2に示すように、シミュレーションにより、コイル間ギャップ300 mmの場合、効率90.7%で出力電力100 Wが得られることがわかった。

図7・表2に、実験結果を示す。図7に示すように各部の電圧は、シミュレーションと同様な波形が得られた。また、表2に示すように、出力電力100 W時の効率は88.7%となった。

入力電圧 $v_i = 20 \text{ V}$ 一定とし、スイッチング周波数を5 ~ 70 kHzに変化させたときの v_1 、 v_o の電圧一周波数特性を図8に示す。設定した共振周波数20 kHzでの共振が確認でき、これより、(3)式の妥当性が確認できた。

表2 シミュレーション・実験結果 (コイル単体)

Parameter	Simulation	Experiment
Input voltage V_i [V]	47.0	43.7
Input current I_i [A]	2.33	2.59
Input power W_i [W]	110	113
Output voltage V_o [V]	112	107
Output current I_o [A]	0.894	0.898
Output power W_o [W]	100	100
Efficiency η [%]	90.7	88.7

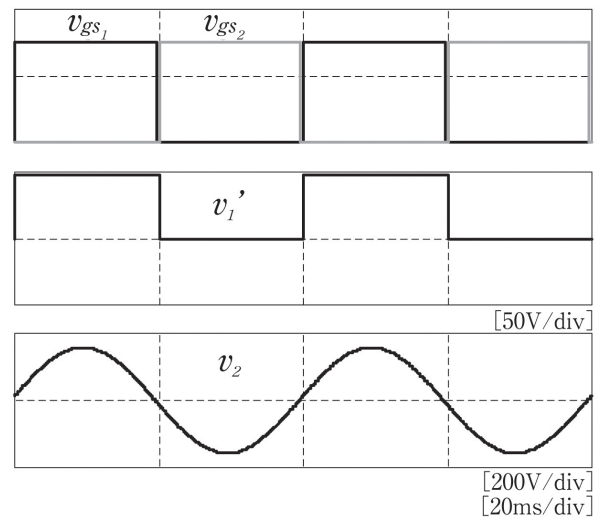


図6 シミュレーション波形 (コイル単体)

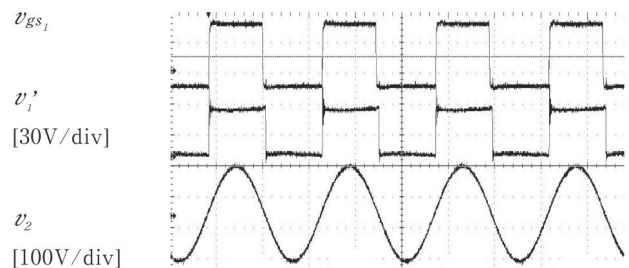


図7 実測波形 (コイル単体)

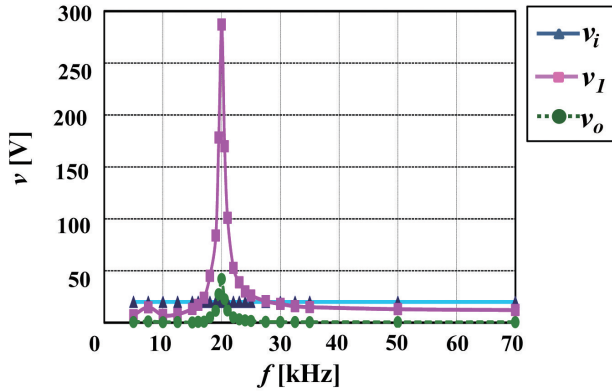


図8 周波数特性 (コイル単体)

4. シールドを設けた場合の給電特性

4. 1 全面をシールドする場合

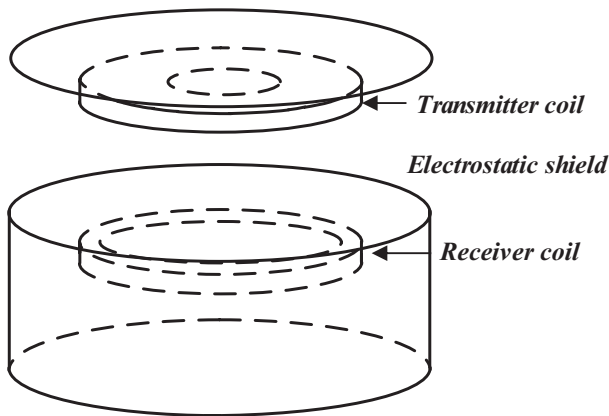


図9 シールド形状 (パターン1)

図9に、受電コイルを全面模擬シールドで覆った場合のコイル、シールドの設置状況図を示し、以後パターン1とする。なお、送電コイルの上面には電子線照射装置のタンク上部を模擬するため、アルミ板を配置している。また、シールドは簡単化のため、厚さ1mmのアルミの板と筒で模擬している。

表3に、パラメータの測定結果を示す。コイル単体時と比べると、送受電コイルの自己インダクタンス L_1 、 L_2 、結合度 k に減少が見られる。 L_1 は上部のアルミ板の影響、 L_2 は、静電シールドによる影響が大きく、特に結合度 k はコイル単体時の0.2%程度しかなく、このままでは給電が困難であると推定される。

表4に、シミュレーション結果を示す。出力電力100W時の効率が $1.3 \times 10^{-2}\%$ となり、実用的な給電が不可能なことが判る。

表3 パラメータ測定結果 (パターン1)

Parameter	Value
Self inductance L_1 [μH]	364
Self inductance L_2 [μH]	63.9
ESR r_1 [Ω]	0.14
ESR r_2 [Ω]	0.05
Coupling coefficient k	1.6×10^{-4}
Mutual inductance M [nH]	25

表4 シミュレーション結果 (パターン1)

Parameter	Simulation
Input voltage V_i [V]	42.8
Input current I_i [A]	25
Input power W_i [W]	1068
Output voltage V_o [V]	7
Output current I_o [A]	0.028
Output power W_o [W]	0.14
Efficiency η [%]	1.3×10^{-2}

以下に電界緩和効果を保ちつつ、電磁遮蔽効果を減少させるようなシールド形状の例として、4. 2には、開口部を設けたシールドの場合、4. 3には開口部とスリットを設けたシールドの場合を示す。

4. 2 開口部を有するシールドの場合

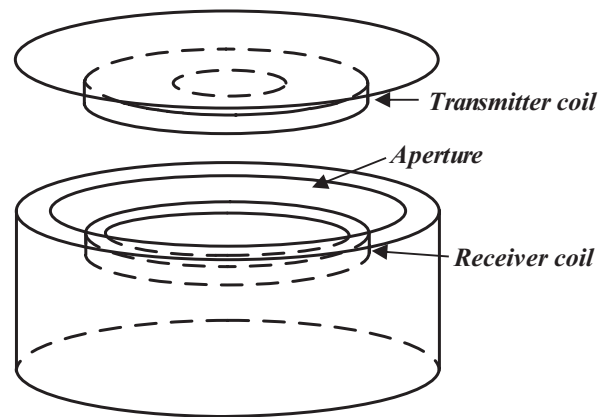


図10 シールド形状 (パターン2)

図10に、開口部を設けたシールドの場合のコイル、シールドの設置状況図を示し、以後パターン2とする。受電コイルの送電コイル側に開口部を設けた構成としている。なお、開口部の径は、受電コイルの径より多少大きくしている。

図11に、実験系の外観写真の例（次節パターン3の場合）を示す。

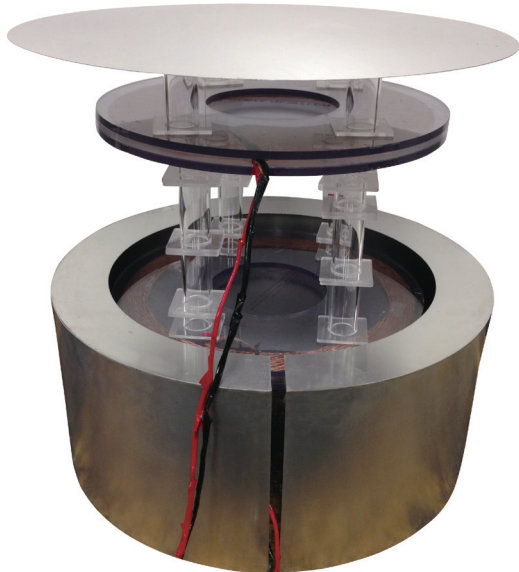


図11 送受電コイル・シールド外観写真

表5 パラメータ測定結果（パターン2）

Parameter	Value
Self inductance L_1 [μ H]	365
Self inductance L_2 [μ H]	72.9
ESR r_1 [Ω]	0.155
ESR r_2 [Ω]	0.068
Coupling coefficient k	1.97×10^{-2}
Mutual inductance M [μ H]	3.25

表5に、パラメータの測定結果を示す。コイル単体時と比べると、前節と同様、送受電コイルの自己インダクタンス L_1 、 L_2 、結合度 k に減少が見られるが、結合度 k がコイル単体時の24%となり、開口部を設けることで、全面シールドを設けた場合と比べると、磁気遮蔽効果が減少し、送受電コイル間の結合に多少改善が見られる。この場合の出力抵抗、共振キャパシタンスは、 $R_o = 300 \Omega$ 、 $C_s = 173 \text{ nF}$ 、 $C_p = 868 \text{ nF}$ とした。

表6に、シミュレーション結果を示す。出力電力100 W時には効率55.3%となった。

図12・表6に、実験結果を示す。コイル単体時と同様な波形が得られた。表6より、出力電力100 W時には効率54.9%となり、コイル単体時と比べると効率は低下するが、ある程度の給電が可能となっている。

表6 シミュレーションと実測の比較（パターン2）

Parameter	Simulation	Experiment
Input voltage V_i [V]	24.0	25.6
Input current I_i [A]	7.6	7.1
Input power W_i [W]	182	182
Output voltage V_o [V]	174	173
Output current I_o [A]	0.580	0.578
Output power W_o [W]	100	100
Efficiency η [%]	55.3	54.9

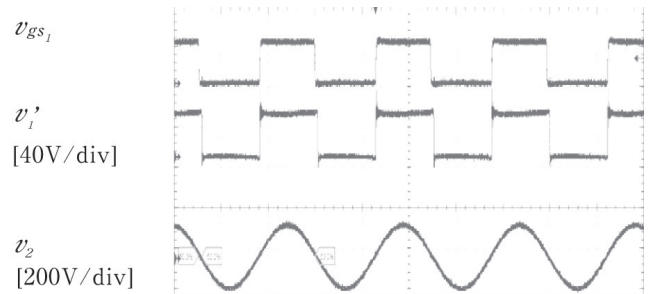


図12 実測波形（パターン2）

4. 3 開口部とスリットを有するシールドの場合

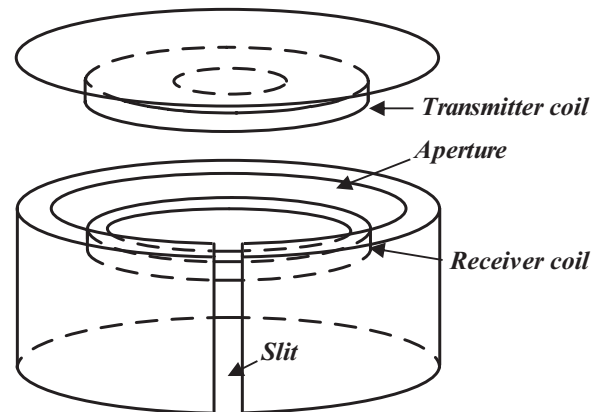


図13 シールド形状（パターン3）

図13に、開口部とスリットを設けたシールドの場合のコイル、シールドの設置状況図を示し、以後パターン3とする。送電コイルと対向する静電シールドの部分に開口を設けるとともに、側面に沿ってスリットを設け、シールドを周回する渦電流路を分断することで、さらなる磁気遮蔽効果の低減を図っている。なお、シールドの開口部の径は、図10のモデルと同様とした。

表7 パラメータ測定結果 (パターン3)

Parameter	Value
Self inductance L_1 [μ H]	368
Self inductance L_2 [μ H]	86.2
ESR r_1 [Ω]	0.15
ESR r_2 [Ω]	0.068
Coupling coefficient k	5.31×10^{-2}
Mutual inductance M [μ H]	9.45

表7に、パラメータの測定結果を示す。コイル単体時と比べると、送受電コイルの自己インダクタンス L_1 、 L_2 、結合度 k に多少の減少が見られるが、結合度 k がコイル単体時の65%となり、開口部、スリットを設けることで、全面シールド、開口部を設けたシールドの場合と比べ、改善が見られる。この場合の出力抵抗、共振キャパシタンスは、 $R_o = 150 \Omega$ 、 $C_s = 172 \text{ nF}$ 、 $C_p = 734 \text{ nF}$ とした。

表8に、シミュレーション結果を示す。出力電力100 W時には効率82.4%となった。

図14・表8に、実験結果を示す。表に示すように、静電シールドにスリットを設けることで磁気結合度が改善し、出力電力100 W時に効率81.1%となり、コイル単体時と比べると、90%以上の効率で100 Wの給電ができることが確認できた。

表8 シミュレーションと実測の比較 (パターン3)

Parameter	Simulation	Experiment
Input voltage V_i [V]	33.4	31.4
Input current I_i [A]	3.64	3.92
Input power W_i [W]	122	124
Output voltage V_o [V]	123	123
Output current I_o [A]	0.816	0.816
Output power W_o [W]	100	100
Efficiency η [%]	82.4	81.1

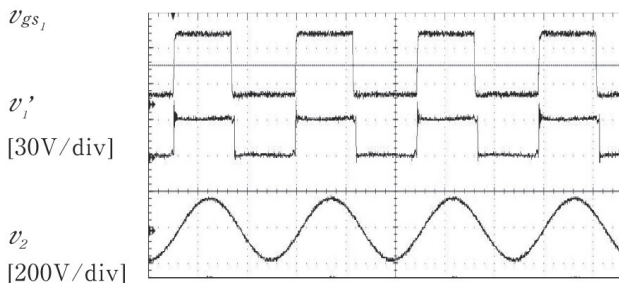


図14 実測波形 (パターン3)

5. まとめ

空心トランスの技術を発展させた磁気誘導型の非接触給電方式により、コイル間ギャップ300 mm、出力電力100 W時に、コイル単体で効率88.7%での給電を確認できた。また、高電位部に配置することを想定し、静電シールド内に受電コイルを配置した場合について、各種シールド構造での給電特性の実験検証を行い、シールドに開口部とスリットを設けた構造にすると、効率81.1%で100 Wの電力を供給できることを検証できた。これにより、受電コイルに静電シールドを設けた場合でも、シールドの形状に工夫を施すことで、コイル単体時の90%以上の効率で給電できることを示すことができた。

以上のように、本稿で述べた技術は非常に有用な技術であり、今後は、実際の電子線照射装置に組み込み、長期安定性などの検証を行い、実製品への適用を図りたい。さらに、送受電コイル間の長距離化や給電電力量の向上を図り、広い用途に本技術を応用して行きたい。

参考文献

- (1) 権藤、久保、松原、高橋、藤原：“高電位部への送電に適した長ギャップ非接触給電方式の検討”、IEICE, Vol.112, No.396, pp.123-128 (2013.1)
- (2) 杉田、島岡、今西、濱野：“S型電子線照射装置”、日新電機技報, Vol.54, No.2, pp.26-31 (2009.10)
- (3) 日本国特許公開公報 特開2001-305296号、“電子線照射装置のフィラメント電源装置”
- (4) 松原、大西、杉田、栗澤、穂田、濱野、中里：“電子線照射装置用直流高電圧電源への共振型空芯トランスの適用”、電機設備学会誌 Vol.26, No.5, pp.351-356 (2006.5)
- (5) 松原、大西、村岡、杉田、栗澤、穂田、濱野、中里：“高周波空心トランスを用いたコッククロフト・ワルトン型高圧直流電源の開発”、電学論B, Vol.126, No.3, pp.379-385 (2006)
- (6) 宅崎、星：“非接触給電装置の共振回路高効率化のための受電側高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)
- (7) 遠井、金子、阿部：“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)

執筆者紹介



久保 敏裕 Toshihiro Kubo
研究開発本部 電力技術開発研究所
電力機器・システム研究部
系統技術グループ



松原 克夫 Yoshio Matsubara
研究開発本部
電力技術開発研究所 技師長



権藤 亮太 Ryota Gondo
同志社大学大学院
理工学研究科 電気電子工学専攻



高橋 康人 Yasuhito Takahashi
同志社大学
理工学部 電気工学科 助教



藤原 耕二 Koji Fujiwara
同志社大学
理工学部 電気工学科 教授