

# EV用磁気ワイヤレス給電技術の動向と最前線

## Trends in Wireless Power Transfer Systems for EVs

高橋俊輔 早稲田大学環境総合研究センター・昭和飛行機工業(株)

S. Takahashi, Environmental Research Institute, Waseda Univ. and Showa Aircraft Industry Co., Ltd.  
Tel: +81-3-5286-3123, Fax: +81-3-5272-7384, E-mail: stak@aoni.waseda.jp

The spread of charging infrastructures is essential to the expanded use of electric vehicles (EVs), but some issues exist with the contact-type charging systems currently in wide use, and consequently, wireless charging systems are becoming more popular. However, there are some problems concerning the standardization and regulation of electromagnetic emissions of wireless power transfer systems, although much evidence has been obtained from evaluations using EVs or electric buses equipped with wireless power transfer systems from all over the world to solve these problems. This paper describes the typical system of wireless power transfer applied to EVs along with related issues, and discusses dynamic charging as a technique for the future.

**Key words:** EV, charging, wireless power transfer, electro-magnetic Induction, micro wave, resonance, electromagnetic compatibility, foreign object detection, dynamic charging

### 1. はじめに

近年、現実味を増しつつあった化石燃料資源枯渇の問題はシェールガス・オイルの開発で一息ついた感があるが、地球温暖化や大気汚染の問題はCOP19で示された気温や海面上昇だけでなく、年々酷くなる中国のPM2.5の問題のように今や待ったなしの状況である。それに対処すべく自動車メーカーからは従来の内燃機関に代わるクリーンかつ脱石油燃料の電気自動車(EV)や電気バス、プラグイン・ハイブリッド車(PHEV)が発売されているが、電池とその充電の性能が満足できるレベルまで到達できておらず、本格的な普及にはいまだ至っていない。EVの普及には充電システムの普及が不可欠であるが、現在広く使われている接触式充電システムにはいくつかの課題があり、それを解決する手段として安全、容易に充電できる各種ワイヤレス給電システムの開発が進んでいる。

ワイヤレス給電システムにも標準化や電磁波放射規制などいくつかの課題はあるが、EVに搭載して実証試験を行い、課題解決に向けた動きが活発化している。そこでワイヤレス給電システムの代表的な方式をEVへの応用で解説し、その課題と実証試験の動向および得られた成果について述べる。

また、EVに搭載される電池の性能向上が進まず、1充電走行距離の短いこともEVの普及を阻害している要因であり、高速道路や交差点などでの走行あるいは停車中に給

電するシステムが開発されれば、EVに搭載する電池の容量を減らすことができEVの価格を下げ普及を加速させるとともに省資源に大きく寄与する。そこで走行中給電の開発現状と実現の可能性についても述べる。

### 2. EV用ワイヤレス給電方式の開発動向

充電装置において、地上に置かれた電源装置から車両に電力を供給するコネクタ部のプラグとレセプタクルの組み合わせを充電カプラという。充電カプラは通電方式から、接触式と非接触式に大別される。接触式は金属同士のオーミック接触を用いて電氣的に伝送するものであり、非接触方式とは一般的にはコイルとコイルを向かい合わせ、その間の空間を介して電磁氣的に通電させて伝送するものである。

現在、実際のEV用に開発されているワイヤレス給電方式は①電磁誘導式、②無線(マイクロ波)式、③磁界共鳴式の3方式である。

#### (1) 電磁誘導式

1831年に英国のMichael Faradayが磁気の変動から電気が発生することを見いだした。これは、静止している導線の閉じた回路を通過する磁束が変化するとき、その変化を妨げる方向に電流を流そうとする電圧(起電力)が生じると言う、変圧器の基本原理解であるファラデーの電磁誘導法則の発見である。この電磁誘導の原理に基づき対向させたコイルと磁束収束用の磁性体を用い、送受電コイル間に共通に鎖交する磁束を利用するワイヤレス給電システムは、Fig. 1に示すようにギャップのある変圧器である。

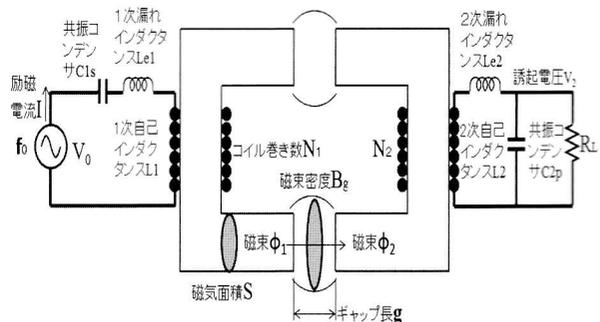


Fig. 1 Principles of electromagnetic power transfer system.

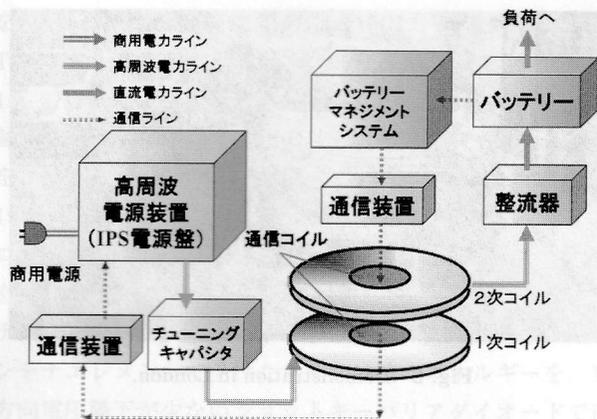


Fig. 2 Composition of wireless power transfer system.

1次コイルに交流電流を流すとコイル周囲に磁界が発生、1次/2次コイルを共通に鎖交する磁束により2次コイルに誘導起電力が発生する。理想的な変圧器では1次コイルの磁束はすべて2次側に伝えられる。この場合の両コイルの磁束伝達度合いを示す結合係数 $k$ は1である。しかし、非接触化のためギャップがある場合には漏れ磁束が発生、 $k$ は1よりも小さくなる。この漏れ磁束が変圧器の1次/2次側の自己インダクタンスにそれぞれ直列に接続された漏れインダクタンスとして、チョークコイルと等価な働きをする。

つまり、変圧器として働く励磁インダクタンスは自己インダクタンスのうちの $k$ 倍で、残りの部分は漏れインダクタンスになる。そのため、ワイヤレス給電は変圧器に比べ励磁インダクタンスが小さく、漏れインダクタンスによる電圧降下が大きいシステムである。そこで、電力を効率良く伝達するために、1次側の周波数を数十kHzの高周波にして2次誘起電圧を上げたり、コイルのインダクタンスにコンデンサを並列や直列に接続した共振回路を用いる。

電磁誘導方式のシステムとしては、Fig. 2に示すように地上側システムとして商用周波数から電磁誘導に必要な高周波を発生させる高周波電源装置、1次コイル、高周波電源装置から1次コイルまでの送電ケーブルとインピーダンス調整用のキャパシタボックス、それに車両側システムとしては2次コイルと高周波を直流に直す整流器、バッテリーマネジメントシステムと地上側の高周波電源との間で制御信号をやり取る通信装置から構成される。高周波電源装置の内部は、商用電源を直流に変換するAC/DCコンバータ、高周波(方形波)を出力する高周波インバータ、サイン波に変える波形変換回路、安全対策のための絶縁トランスで構成されている。

1995年フランスのTulip計画において、PSAが発案したワイヤレス給電システム付きのEVを用いた実証試験が実施された。Fig. 3に示すように地上に設置した送電コイル上にEVがまたがり、車両底部の受電コイルとの間で給

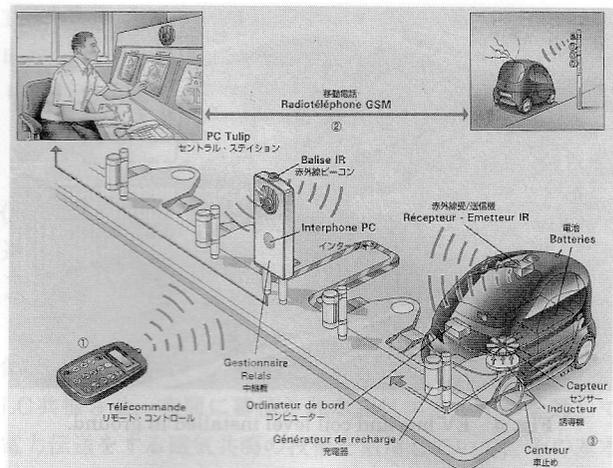


Fig. 3 Wireless power transfer system for Tulip Project.

電するとともに、通信システムで充電制御を行うと言う、現在のものとほとんど変わらないワイヤレス給電システムが採用されたが、出力6kWと小電力のため充電に時間がかかった<sup>1)</sup>。

30kWの大電力用としてはドイツのWampfler社(現在はConductix-Wampfler社)のInductive Power Transfer (IPT)があり、欧州では2002年からイタリアのトリノ市などの電気バス用として数十台が採用され、日本でも日野自動車のIPTハイブリッドバスや早稲田大学の先進電動マイクロバス(WEB)などに採用され、充電操作が安全、容易なワイヤレス給電を使って短いサイクルで充電を行うことにより、必要最小限の小さな電池でも走行距離を確保しつつ、少ない初期投資、車両重量が軽くなることでの省エネとWell to WheelベースのCO<sub>2</sub>排出量の減少が確認できた<sup>2)</sup>。

そこで、早稲田大学は昭和飛行機工業らとともに、電動バス用Inductive Power Supply system (IPS)を2005年から4年間、新エネルギー・産業技術総合研究開発機構(NEDO)の委託を受けて開発した。IPTと同じ30kW、22kHzの仕様で開発したIPSは、コイル形状やリッツケーブルなどの最適化により、コイル間ギャップを50mmから100mmに増加、商用電源から電池までの総合効率を86%から92%に改善した。また、2次側コイルの重量や厚みを半分にするなど小型、軽量化が図られている<sup>3)</sup>。その後、コイル間ギャップを140mmに増加することで、Fig. 4のように1次コイルを地面と面一に埋め込み、長野市で2014年3月までの3年間、2台の電動バスを用いて日本初の有料実証運用試験を実施した。運用が始まってワイヤレス給電装置設置許可が総務省から下りるまでの半月間、車外に出て接触式充電システムの重くて堅いケーブルをハンドリングしながらコネクタの脱着を繰り返した運転手からは、雨や寒い雪の最中でも1次コイルの上にバスを止め、室内でタッチパネルを押すだけで給電のON/



Fig. 4 EV bus and coil level installed in ground.



Fig. 5 Secondary coil taken down on primary coil.

OFFができる利便性が高く評価された<sup>4)</sup>。

海外では2014年1月、三井物産はArup社と組んで英国Milton Keynes市の1路線、全8台のバスをワイヤレス給電式のバスに置き換えて毎日17時間、計5年間運行し、商業化に向けたデータの蓄積を行うことになった。ワイヤレス給電システムはConductix-Wampfler社の子会社IT Technology社の120 kW、20 kHzのIPTを2カ所のターミナルに設置してバスを充電し、片道約30 kmの路線を走らせる。しかしながらコイル間ギャップが50 mm程度と小さく、トリノ市の場合と同じように充電時に懸架装置を使って車両側の2次コイルをFig. 5のように1次コイルの上に降ろすシステムを採っている。これには高価な懸架装置を車両台数用意せねばならない、コイルの昇降に大事な電池のエネルギーを消費する、コイルの昇降時間により充電時間が短くなる、機械的な懸架装置のメンテナンス費用がかかるなどの課題がある<sup>5)</sup>。

現在、開発中の普通乗用車用のものとしては、国内では日産自動車が出力3.3 kWで150 mmのギャップを隔て80~90%の効率で送電できるものを2014年頃にインフィニティへの標準搭載を目差し、パイオニアは出力3 kW、ギャップ100 mm、周波数85 kHzで効率85%のものをプリント基板コイルで実現し、2012年には実運用に向け金属や生物といった異物がコイル間に入ったことを検知する機能を搭載している。パナソニックも2013年にギャップ100 mm、周波数85 kHzで3 kW出力のシステムを発表し



Fig. 6 Demonstration in London.

ている<sup>6)</sup>。欧州では2011年にAudi社がAudi Wireless Charging (AWC)という出力3.6 kWのものをA2 Conceptに搭載、SEW-EURODRIVE社が出力3 kW、効率90%以上のものを、2012年にVahle社が出力3.6 kW、効率90%以上のものを発表している。2013年VolvoはC30エレクトリックに対して1次コイル出力を20 kWにして急速充電をすることを考慮に入れたものを発表している。米国では2012年Qualcomm Halo社が一般乗用車向けに3.3 kW出力、コイル間の許容位置ずれ15~20 cmで送電効率は80~85%というシステム、大型車や商用車向けの7 kW、急速充電用の20 kWという三つの出力のシステムを発表していて、当時の周波数は40 kHzであったが、今後は85 kHzにするとしている<sup>7)</sup>。2013年にEvatran社がBosch ASS社と組んで米国で日産リーフを対象にした出力3.3 kW、ギャップ7~15 cm、効率91.7%のPlugless L2 Electric Vehicle Charging Systemを3,000US\$という安さで発売、Bosch ASSが車両搭載の作業を行う<sup>8)</sup>。

グローバルなEV用途へのワイヤレス給電システムでは仕様の標準化が必要であり、上記のような動きを受けてIEC/ISOを中心に日米欧で標準化が進められていて、周波数はほぼ85 kHz帯に絞られ、そのほかのものも2015年にはまとまる可能性がある<sup>9)</sup>。

それに先駆けてQualcomm Halo社は、ロンドン市内のEast London Tech Cityで2012年7月から2年間、ランチアDelta E-4やルノーFluence EV、シトロエンの小型EVを使い電磁誘導式ワイヤレス給電システムの商用化を目指してのFig. 6のようにスマートEVシティー実証試験を行っている。ドライバーが駐車場の所定の位置に駐車すると、システム側で位置を合わせ、最適な充電状況を作り出せる技術を使っていて、コイル間の距離が離れていた場合でも効率良く電力を伝達できる。

## (2) 無線(マイクロ波)式

遠方にまで伝播する電磁波の存在は1861年に英国のJames Maxwellが予言、1888年ドイツのHeinrich Hertzが火花放電により遠くの受信リングの間隙に火花が生じることで実験的に証明した。この遠方にまで伝播する電磁波

を利用するのが無線式である。1901年に米国のNikola Teslaが電波塔から300 kWの電力伝送実験を行ったが、150 kHzと周波数が低すぎて電磁波が拡散、失敗した。無線電力伝送が可能になったのは、大電力のマイクロ波送信を使うレーダーが開発された第2次世界大戦以降である。1964年に米国のWilliam Brownが2.45 GHz帯のマイクロ波電力を、自身が発明したレクテナ(rectenna)で受信、直流に変換して電力伝送ができることを実証した。レクテナは、rectifying antennaの略で、格子状に配置されたアンテナエレメントで受けたマイクロ波のエネルギーを、順方向電圧降下が少ないショットキーバリアダイオードで直接、直流に変換するアンテナである。1975年に米国ジェット推進研究所が直径26 mのパラボラアンテナから450 kWのマイクロ波を送電、1.54 km離れた1.16 m×1.2 mのレクテナで30 kWの電力受電に成功し、1968年に米国のPeter Glaserが提唱した宇宙太陽発電所の実現の可能が見えてきた。

電磁波は距離により拡散するので、拡散した無線電力を収集するためアンテナを大きくする必要があり、EVなどのモバイル用途としては大きさの制約が出てくる。導体で囲われた閉鎖空間では電磁波の拡散がないため、空間放射よりも高密度、高効率にマイクロ波を伝送できる。この方法で、2006年に京都大学と日産自動車がEVにマイクロ波給電システムを搭載した。電波源として電子レンジ用の安価なマグネトロン5本で計1 kWの電力を放射、8 L素子のレクテナアレイで受電したが、効率が低く最大90 Wしか得られなかった<sup>10)</sup>。

三菱重工業は2006年から3年間、NEDOの委託を受けて、Fig. 7のEV用マイクロ波ワイヤレス給電システムを開発、効率向上のため、6.6 kVの商用電源を直接整流してマグネトロン用6.6 kV直流電圧を得たり、マグネトロンを水冷して発熱を回収、給湯に利用するなどエネルギー効率を高めたが、EVに1 kWの給電ができたものの総合効率は38%と低かった<sup>11)</sup>。

2012年、Volvoが日本電業工作と共同でFig. 8のようにトラックの上部から走行中給電をするシステムを目指して

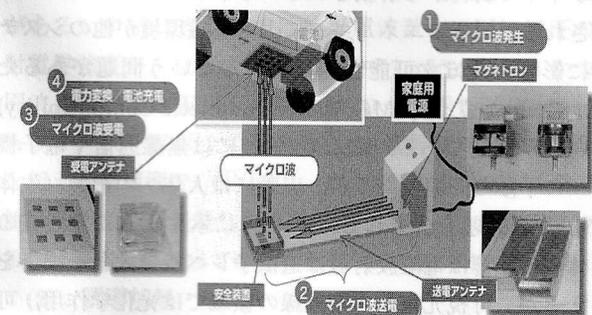


Fig. 7 Micro wave system for wireless power transfer to EV.

10 kWの電力を4 m離してマイクロ波送電を行うことに成功したが、人体への電磁放射の安全性検証の問題もあり、まだ電波暗室内でのレベルである<sup>12)</sup>。

### (3) 磁界共鳴式

2007年に米国Massachusetts Institute of Technology (MIT)の研究チームが、2 m離れた距離で60 Wの電力を送ることに成功したことで磁界共鳴式が一躍注目を浴びるようになった。

Fig. 9にMITが発表したシステムの概要を示すが、送信側と受信側のコイルを高Qにして磁氣的に同じ周波数でLC共振させ、空間に蓄積される磁気エネルギーを通して電力伝送をする磁気共鳴の技術を活用していて、その基本原理は新しくはないものの、給電方式としては新たな方式と言える。送電側コイルから放射される磁束を直接受電側コイルに鎖交させれば前述の電磁誘導式となるが、送信側の磁束が受信側にほとんど鎖交していない $k$ が0.01以下となるようにコイル間距離を十分に離れた状態で、磁界共鳴式は電磁誘導式と殆ど同じシステムを使いながら送受電コイルサイズと空間波長、空間磁界分布をうまく制御してエネルギーを伝送している。そのため伝送量を確保するためにコイル形状、サイズ、波長、伝送距離に一定の制約が生まれ、その制約条件が崩れると共鳴が起こらず電力伝送ができない。アンテナのインダクタンス(L)と静電容量(C)によるLC回路として共振する周波数の交流電界電力を送信

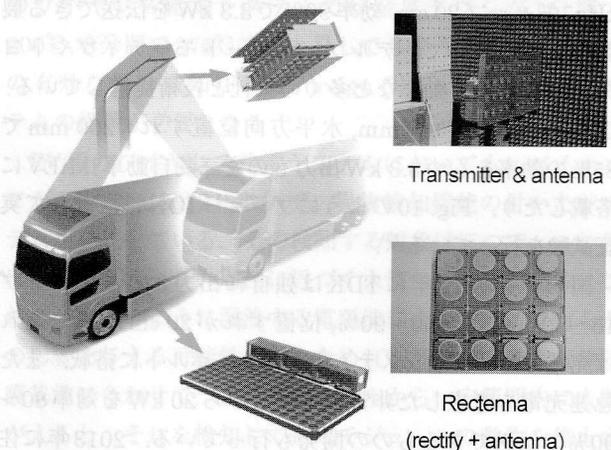


Fig. 8 Micro wave system for wireless power transfer to truck.



Fig. 9 System announced by MIT.



Fig. 10 Magnetic-resonance system of wireless power transfer.

側アンテナに印加すると、その周辺に振動磁場が発生し、共鳴現象によって数波長以内の距離にある受信側アンテナに電力が伝わる。すなわち共鳴方式の電力伝送は「近接場」の共鳴を利用するもので、電磁誘導式と比較して利用する磁場がずっと弱く、それでいてより長い距離を伝送できる。また、非放射型の共鳴方式は遠方に電磁波の形で流出するエネルギーが少ないため、放射電磁波を使用するマイクロ波式に比べ電力の伝送効率がよく、二つのアンテナコイルの間に障害物があっても利用可能である。

MITが開発した技術の商業化を目的に2007年に設立されたベンチャー企業の米国WiTricity社は、周波数145 kHz、ギャップ20 cm、効率90%で3.3 kWを伝送できる製品化を進めていて、デルファイオートモーティブやトヨタ、IHI、三菱自動車など多くの会社と技術提携している。IHIはギャップ180 mm、水平方向位置ずれ $\pm 200$  mmで85%の効率をもつ3.3 kW出力ものを三菱自動車iMiEVに搭載したり、Fig. 10のようにプジョーIONに搭載して実証試験を行っている<sup>13)</sup>。

国内でも2012年にTDKは独自に出力3 kW、ギャップ15~20 cm、効率80~90%、位置ずれが20 cm以下であれば充電可能と言うシステムをシボレーボルトに搭載、また急速充電を考慮した非常に小型ながら20 kWを効率80~90%で伝送できるものの開発も行っている。2013年に住友電工がソレノイド型コイルでギャップ140 mm $\pm$ 30 mm、周波数85 kHzで10 cm程度の位置ずれロバスト性をもつ3 kW出力のものを発表している<sup>14)</sup>。

トヨタ自動車は、PHEVやEVなど電気を使う車両向けの周波数85 kHz、出力2 kWのワイヤレス充電システムを開発、2014年2月から愛知県内のPHEV所有者の自宅などで3台の車両を使い1年間の実証実験を開始した。電磁波による周辺機器などへの影響抑制、送電側コイルは車両の乗り上げに耐えられる構造にするなど実用化を視野に入れた設計を施すとともに、最適な車両の位置合わせをガイドするために、駐車場に設置した送電側コイルの位置をナ

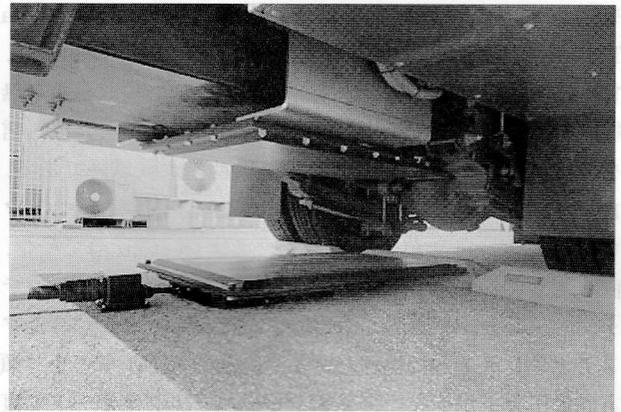


Fig. 11 Coils for delivery van.

ビ画面に表示する駐車支援機能も盛り込んだ。これらによる充電システムの満足度や利便性、駐車的位置ずれ量の分布、充電頻度などを検証し、ワイヤレス充電システムの実用化に向けた技術開発に生かす計画である<sup>15)</sup>。

また、デンソーは2010年から経済産業省が推進している「次世代エネルギー、社会システム実証プロジェクト」の一環として2014年2月から12月までセブンイレブン豊田市上野町店での集配作業の間に、駐車スペースに設置した4.5 kWの送電コイルと送電設備からヤマト運輸の配送車の床下に設置した受電コイルに250~300 mmのギャップ、効率85%でワイヤレス送電をし、集配作業などの間に配送車がアイドリングストップしていても、配送車の電動式冷凍機を駆動できるようにした(Fig. 11)。周波数は実証期間が短く総務省への設置申請が不要な9.5 kHzにしている<sup>16)</sup>。

### 3. 課題

#### (1) 電磁放射

ワイヤレス給電は電力伝送に電磁波を使うため、使用に当たっては電波法等の規制を受ける。電波法上、電波は0 Hz以上3 THzまでの電磁波を指すが、わが国で電波防護指針において管理される電波は10 kHz以上300 GHzまでである。ワイヤレス給電はエネルギー供給のために必要なワイヤの制約から解放されるメリットの反面、空間に放出される電磁界のエネルギーによる電磁環境が他のシステムに影響を及ぼす可能性が存在するという問題があるため、電磁両立性(EMC: Electromagnetic Compatibility)の確立が課題である。EMCは狭義には無線通信や電子機器への干渉の問題であるが、広義には人体への影響(生体EMC)の問題も含まれる。Fig. 12に示すように電磁波の生体への影響は電離放射線は遺伝子レベルで大きな損傷を与えるが、可視光線から紫外線の領域では光化学作用、可視光線の長波長領域から赤外線、電波領域では刺激作用と熱作用である。



Fig. 12 Effect of electromagnetic waves on human body.

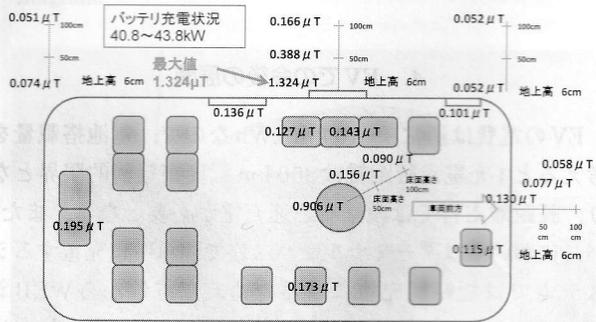


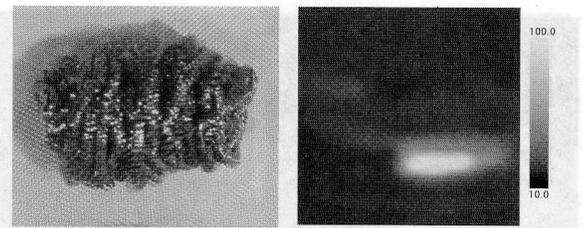
Fig. 13 Results from magnetic field measurement in electric bus.

電磁界利用において、生体EMCは重要な問題である。電磁界の生体安全性については、人体暴露に関する防護指針を満たすように、世界各国で法制化されている。電磁放射に対する人体防護はわが国では総務省の電波防護指針にも示されているが、一般的にはWHOが推奨する国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)のガイドラインに従い、使用周波数ごとのガイドライン数値以下にする必要がある。中型PHEVバスの床下に周波数22kHz、50kW出力のワイヤレス給電システムを搭載し、充電時のバス車内外での磁界測定をした結果をFig. 13に示す。磁界の最大値は車外のコイル真横の地上6cmの高さにおいて1.324μTとなり、1998年のICNIRPのガイドライン値6.25μTよりも十分小さい値であった<sup>17)</sup>。

電磁放射による電磁干渉については、電波法上、ワイヤレス給電システムは高周波利用設備として、10kHz以上の高周波電流を利用して出力が50Wを超えるものは各地の総合通信局に設置許可申請を提出して許可を受ける必要がある。申請に当たっては使用周波数450kHz以下の輻射電界強度が、100m電界規制値で1mV/m以下、かつ高周波出力が500W以下の場合には30m電界規制値が1mV/m以下、500W以上の場合には30m電界規制値が1mV/mを超えない範囲で $\sqrt{(P/500)}$  (Pは装置の出力W) を乗じた値以下の数値を満足している必要があり、これをクリアするのは製造に当たってかなりたいへんな努力が必要である。

## (2) 誘導加熱

ワイヤレス給電システムは、1次コイルから空間に放出される電磁界のエネルギーによる電磁環境が他のシステム



Stainless scrubber Thermography photograph

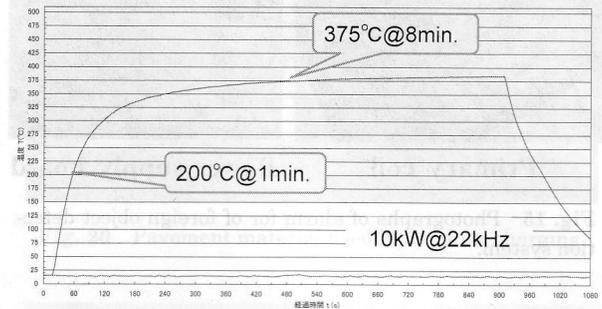


Fig. 14 Results from evaluations of inductive heating of foreign objects.

に影響を及ぼす可能性があるため、2次コイルがない状態では1次コイルに通電しないようなインターフェイスを付けることが多い。何らかの通信手段で1次コイルが直上にある2次コイルを認識、ハンドシェイクが成立してから電力伝送を始めると、コイル間に渦電流を生じやすい形状の金属を入れても、それを検知するのはかなり難しく、そのまま電力伝送を続けると、Fig. 14のように、10kW出力のワイヤレス給電システムでは金属タワシが1分間で200°C、8分間で375°Cまで上昇してしまう。そこで何らかの有効な異物検知(FOD: Foreign Object Detection)システムの搭載が必要となる<sup>18)</sup>。

EV用のワイヤレス給電システムにおいても、パイオニアがCEATEC2012において、異物検知機能の付いたシステムを発表している。その検知する対象は二つで、一つ目は送電モジュールの周囲に近づく人間への対応である。これは、前記のように漏洩する電磁波によって人体に何らかの影響を与える可能性があるためICNIRPが定める人体防護基準に合わせて、送電モジュールから一定範囲内に人間が入ると、それを検知して送電モジュールの動作を停止するようにしている。二つ目は金属の異物検知である。送電モジュールのコイル部に、空き缶などの金属が存在する状態でワイヤレス充電を行うと誘導加熱により金属は加熱され、送電モジュールの故障だけでなく、火災などの原因にもなりかねない。そこで、Fig. 15のように送電モジュールのコイル部に金属製の異物が存在する場合、ワイヤレス充電を行わずに警告を出すようにしている。人間とは異なり、金属が送電モジュールの周辺にあっても、ワイヤレス充電の影響をそれほど受けないため、金属異物検知機能は送電モジュールのコイルがある部分に金属が存在しない限り動作しないようになっている<sup>19)</sup>。



Primary coil Power supply board

Fig. 15 Photographs of alarm for foreign object detection system.



Fig. 16 IPS hybrid bus at bus stop at Big Site, Tokyo.

### (3) 道路上設置と正着性

EV用のワイヤレス給電システムの1次コイルを公道上に設置するにあたっては、道路法第32条、道路交通法第77条により道路管理者と所轄警察署の許可が必要であるが、コイルの耐荷重や表面のスリップ性、ケーブルの埋め込み深さなどの各種道路要件が明確に規定されていないため、現状ではすぐに道路設置できる状況ではなく、前述の長野でも駐車場(Fig. 4)やバス営業所に設置せざるをえなかった。そこで、東京都や国土交通省では、コイル全面を樹脂コンクリートで覆うなどの対策を施したコイルを使い、2011年2月東京駅南口バス停留所、2011年12月ビッグサイトバス停留所(Fig. 16)の道路上に1次コイルを設置しIPSハイブリッドバスにワイヤレス充電を実施し、道路上設置における課題の把握が行われた。その際には1次コイル上に正確にバスを止められるように、図に見られるように道路上に引いた2本のラインを車載カメラで撮影、車内モニター上の規定ラインと一致させることで正着性の試験も行い、十分に機能することの確認も行われた。

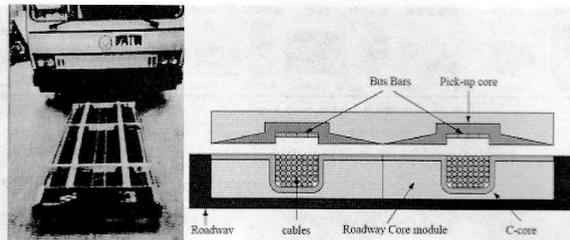


Fig. 17 Structure of primary & secondary coil in PATH project.

## 4. EVでの今後の展開

EVの電費は通常8~10 km/kWhなので、電池搭載量を考えると1充電走行距離は250 km程度が経済的限界となり、長距離走行では頻繁な急速充電が必要となる。また、バスにおいてはターミナルやバス停で停車中に充電するシステムでは短時間充電になるため、充電量からWEBシリーズのようなマイクロバスサイズか、大型バスの場合はIPSハイブリッドバスのようなPHEVを使用しての短距離ルート運用にならざるをえない。またEVが内燃機関自動車と同等の航続距離とエネルギー充填速度を実現するには、いまだかなりの時間がかかりそうである。これは長距離走行を実現するだけの高エネルギー密度と超急速充電性能をもった蓄電池が開発途上のためである。そこで、EVや大型電動バスを長距離走行させるの究極の充電機能は充電のために停止せずに必要なエネルギーを常時受け取れる走行中給電となる。

LRT(次世代型路面電車)のように道路下に埋め込んだ給電線から電磁誘導電力を受電するシステムの最初のものは1980年代に米国で行われたPATHプロジェクトでの磁誘導式である。Fig. 17のように道路に1 m間隔で埋め込まれた2本のケーブルからの高周波電力を、走行中のミニバスの底面に設置された幅1 m、長さ4.3 mのコイルで受けることにより、エアギャップ7 cmで6~10 kWの電力を効率60%で受電できたが、コイルからの漏れ磁束が大きく実用にはならなかった<sup>20)</sup>。その後の走行中給電の実証試験では電磁波漏洩の抑制が最大の課題となり、いろいろな方式が採られている。

Bombardier社は2010年にアウグスブルグ市で走行に成功したLRTで実証された車体下のコイルにだけ通電する電磁誘導式ワイヤレス給電方式「PRIMOVE technology」を応用して、2011年からFlanders' DRIVE research projectとしてベルギーロンメル市の0.6 kmの試験道路で電気バスによる実証を行った。Fig. 18のように電源は10 kVの高圧ラインから高周波電源装置により周波数20 kHz、200 kWにして供給、受電コイルサイズは3.6 m、電動バス搭載電池容量は60 kWhである。実用化を目指し、1次コイルを埋設した道路の舗装材もコンクリートとアス

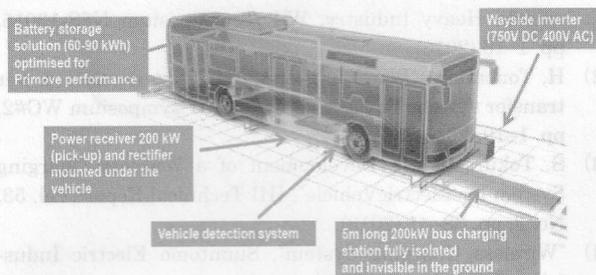


Fig. 18 System diagram of dynamic charging in Lommel, Belgium.



Fig. 19 Dynamic charging of electric bus in Gumi, South Korea.

ファルトをそれぞれ敷き詰めて実験を行った<sup>21)</sup>。

韓国科学技術院(KAIST)は、2009年にキャンパスで電磁誘導式の走行中給電の公開実験を行い、ソウル市公園や Yeosu City (麗水市) の Expo2012 で Demo 走行を行った。200 kHz, 200 kW のインバータから送電し、17 cm のギャップを介して 15 kW の受電コイル3台で受電し、総合効率は 76% である。当初の給電線は PATH プロジェクトのように 1 本の連続したケーブルで、電磁波漏洩が懸念されていたが、その後、KAIST が Segment Method と呼んでいる PRIMOVE 技術に似たスイッチングシステムを採用、Gumi City (亀尾市) で 2013 年 7 月から Fig. 19 のように実用運行を行っている<sup>22)</sup>。しかし走行中給電は運行距離 28 km のうち 4ヶ所の計 144 m のみで、充電量の大部分は 2ヶ所のターミナルでの静止中充電というのが実情である。

このように電磁誘導式の走行中給電では電磁波漏洩対策が最大の技術課題である。そこで昭和飛行機工業、東北大学、日産自動車のグループが NEDO の委託を受け 2009 年から 2013 年まで磁界共鳴式を用いた走行中給電に取り組み、電磁波漏洩を電波法の規定以内に抑えつつ出力 2 kW、ギャップ 450 mm、総合効率 77% で走行台車に給電しているが、構内での走行試験にとどまっている<sup>23)</sup>。2013 年、東亜道路工業は日産自動車と共同で給電装置を埋め込んだ部分の舗装用セメント材として、給電コイルが舗装工事での熱や圧力で破損しないように転圧作業が不要で弾力性の



Fig. 20 Pavement material used in dynamic charging.

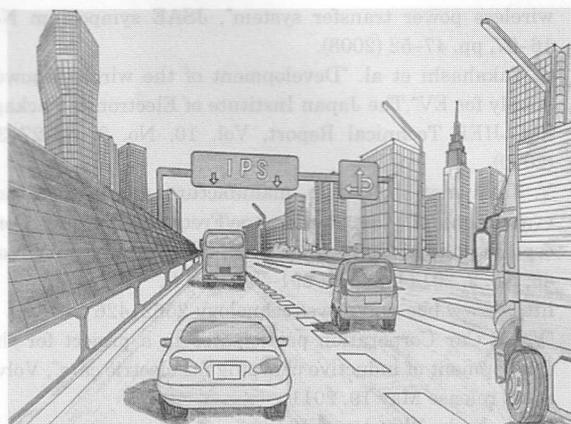


Fig. 21 Dynamic charging on future highway.

ある特殊セメント材を開発し、Fig. 20 のように実証試験を行っている<sup>24)</sup>。

これにより KAIST などの工法に比べ施工コストを 1/3 に抑えられるようになった。

電磁誘導式と比較して利用する磁場がずっと弱い磁界共鳴式の非接触給電技術は現状では課題も山積しているが、将来的にこの技術が確立すれば、EV の走行中給電が可能となる。ハイウェイのワイヤレス給電レーンにおいて走行しながら給電を受けることができれば、EV の進展を大きく加速させることが可能となる。2030 年以降の社会では、Fig. 21 のようにワイヤレスに給電を受けながら、電動化されたバスやトラック、乗用車がハイウェイを走行しているシーンが見られるはずである。

#### 4. おわりに

地球温暖化や大気汚染の問題とともに化石燃料資源枯渇にも対処すべく、ワイヤレス給電 EV の開発は各国で進められているが、グローバルな EV は標準化の壁に阻まれ実証試験はほとんど行われていない。一方、公共交通機関としてのバスは運行区域がローカルであるので標準化の影響

を大きく受け取らないため、海外に先駆けワイヤレス給電電動バスの実証試験が日本各地で始まっている。韓国や環境意識の高い欧州においてはバス停での停車中ワイヤレス充電だけでなく、走行中給電への取り組みも始まろうとしている今、日本においても早急に規制緩和をしてすでに実用化の域に達している日本発のワイヤレス給電電動バスの普及を進める必要がある。さらに、地球環境保全に不可欠なEVのいっそうの普及に向け、その利便性において大きな夢をもつ走行中給電システムが早急に実現されることを望むものである。

### References

- 1) K. Takagi, "PSA TULIP" Car Styling Vol. 139 1/2, p. 99-105 (2000).
- 2) S. Takahashi et al., "Development and possibilities of wireless power transfer system", JSAE symposium No. 16-07, pp. 47-52 (2008).
- 3) S. Takahashi et al. "Development of the wireless power supply for EV", The Japan Institute of Electronics Packaging, JIEP Technical Report, Vol. 10, No. 3, pp. 27-32 (2010).
- 4) Y. Kamiya et al. "Design, manufacture, and performance evaluations of the Short-range/Frequent-charging Concept Electric Medium Duty Bus", JSAE symposium, Vol. 45, No. 2, 20144280, pp. 291-296 (2014).
- 5) <http://www.bbc.com/news/technology-25621426>
- 6) "Volvo Car Corporation participates in a project for the development of inductive charging for electric cars", Volvo press release May 19, 2011.
- 7) G. Ombach, "Wireless EV Charging, optimum operating frequency selection for power range 3.3 and 6.6 kW", SMIEEE, VP Engineering (2013).
- 8) BOSCH-EvaTran Press release, <http://www.pluginow.com/plugless> June 24, 2013.
- 9) <http://www.techradar.com/news/car-tech/wireless-electric-vehicle-charging-explained-1094646>
- 10) K. Shinoda et al. "Assessment Study of Electric Vehicle Charging System with Microwave Power Transmission", Technical Report of IEICE, SPS2005-11, pp. 1-4 (2006).
- 11) "Development of wireless charging system for EV", Mit-

- subishi Heavy Industry, WiPoT symposium N8S-13015, pp. 1-16 (2013).
- 12) H. Tonomura, "Working group activity to wireless power transfer system for EV", Volvo, WiPoT symposium WG#2, pp. 1-10 (2013).
- 13) S. Tokura et al. "Development of a Wireless Charging System for Electric Vehicle", IHI Technical Report, Vol. 53, No. 2, pp. 38-41 (2013).
- 14) "Wireless Charging System", Sumitomo Electric Industries, Catalogue-16 (2013).
- 15) "Outline of Wireless Charging System", Toyota Motor Corporation Press release, 2014-2-13.
- 16) "Start the Assessment Experiment of Wireless Charging System", DENSO Corporation Press release, 2014-2-20.
- 17) S. Takahashi, "Wireless power transfer technology and EMC for Electric Vehicle", IEICE, EMCJ No. 25 Workshop, pp. 67-107 (2013).
- 19) E. Urusibata, "General outline of wireless charging system for EV/PHV as well as its development trend and the future", Technical Report of IEICE, WPT2012-24, pp. 23-26 (2012).
- 20) Adib Kanafani et al. "Status of Foreign Advanced Highway Technology", California PATH Research Paper, UCB-ITS-PRR-87-2 (1987).
- 21) C. Koebel "PRIMOVE-Inductive Power Transfer for Public Transportation", ETEV2012 Session2.3 (2012).
- 22) C. Rim: The Development and Deployment of On-Line Electric Vehicles (OLEV), IEEE ECCE2013 SS3.2 (2013).
- 23) M. Mochizuki et al. "Development of inductive power supply for moving electric vehicle (4<sup>th</sup> Report)", JSAE symposium, 53-20135710 (2013).
- 24) <http://kensetsunewspickup.blogspot.jp/2013/04/ev.html>

(2013年3月20日受理)

高橋俊輔 たかはし しゅんすけ  
 昭47 早稲田大学大学院理工学研究科熱力学専攻終了。同年 三井造船(株)入社、平15 三井造船(株)退職。同年 昭和飛行機工業(株)入社、平25 昭和飛行機工業(株)退職。平15 早稲田大学 環境総合研究センター参与、平24 同客員上級研究員。現在に至る。  
 専門 熱力学、電磁気応用工学