

E
Electro

M
Magnetic

C
Compatibility®

No.372

2019 APRIL

科学情報出版

インフラを支えるIoT機器の誤作動とEMCは?
今、なぜ、EMCなのか。

■ 特 集

IoTと EMC

新製品とEMC

**ヤマハ株式会社
無線LANアクセスポイント**

Technology

**大電力ワイヤレス給電とEMC対策
全無響電波暗室 (FAR) の設計と評価**

New & Now 規格・規制

**IoT住宅における
機能安全国際規格開発の現状報告**

実践講座

**回路網を用いた広帯域PLCの
信号伝送特性と漏洩電磁界特性の解析②**

ブランド力UPとシェア率UPは設計技術力
<http://www.it-book.co.jp/>

QRコード





電気自動車におけるワイヤレス給電の実用化へ向けて

Technology



大電力ワイヤレス給電と EMC 対策

早稲田大学 高橋 俊輔

WASEDA University Shunsuke TAKAHASHI

Abstract

近年、地球温暖化や PM2.5 に代表される大気汚染および化石燃料枯渇の問題に対処すべく自動車メーカーから従来の内燃機関に代わるクリーンな電気自動車 (EV) やプラグインハイブリッド自動車 (PHEV) が発売されているが、搭載しているリチウムイオン電池のエネルギー密度と充電性能が満足できるレベルまで到達できておらず、本格的な普及には未だ至っていない。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幾つかの課題があり、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 (WPT) システムの国際標準化、規格化が進められている。

一方、欧州や中国では既にディーゼルバスに替わって、多くの電気バス (e-Bus) が導入されている。1 充電走行距離を長くするために大容量のリチウムイオン電池を搭載していて、ターミナルでの短い待ち時間に充電をするため大電力の充電システムが使われている。大電力用の重く、大きなコネクタを挿抜する運転手の省力化のため、大電力の WPT システムも開発されているが、まだ規格化などは行われていない。

WPT にも幾つか課題はあるが、その中でも WPT は電磁波を使用するので、その電磁波の放射による電磁両立性 (EMC: Electromagnetic Compatibility) 対策が必要とされている。本稿では EV および e-Bus における WPT の開発の現状と、大電力 WPT の電磁環境および対策について述べる。

1. ワイヤレス給電の原理

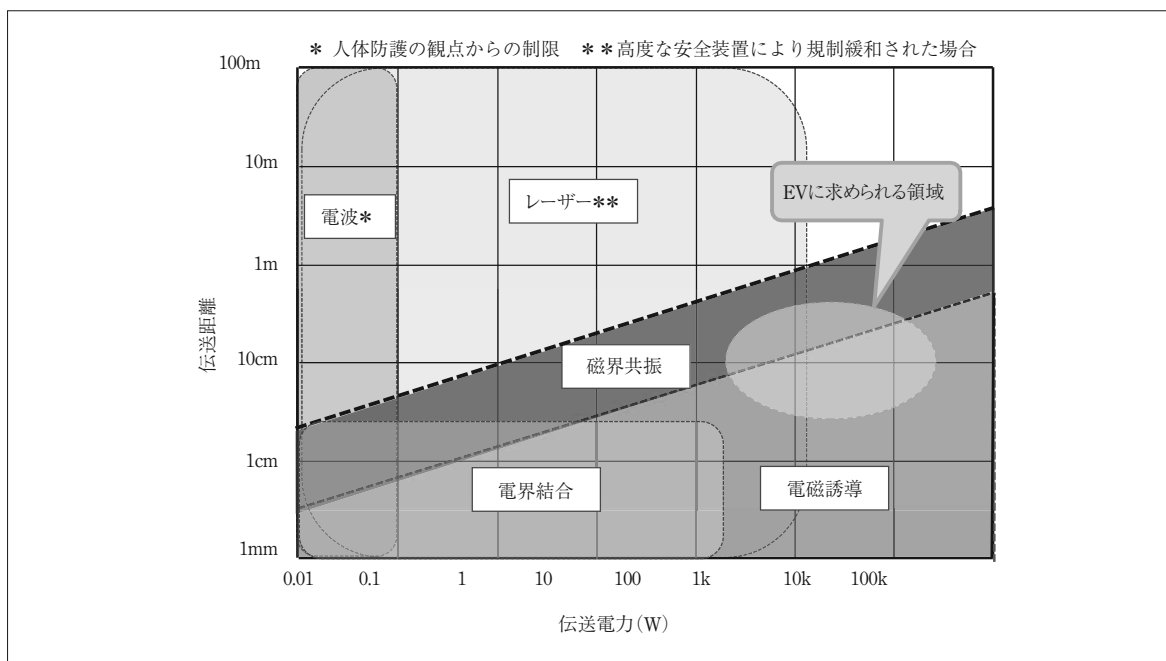
空間を介して非接触で電力を送る WPT には

- ① 磁界を利用するもの：電磁誘導、磁界共振
 - ② 電界を利用するもの：電界結合
 - ③ 電磁波放射を利用するもの：電波、レーザー
- に大別され、それらの伝送電力と伝送距離を図 1 に示す。EV 用として現状で実用域に達しているものは磁界を利用した磁界結合型と呼ばれる電磁誘導式と磁界共振式である。出力的には電磁誘導式では 200kW のものが実用に供され、送受電コイル間のギャップとしては磁界共振式で 50cm 程度のものが実証されている。

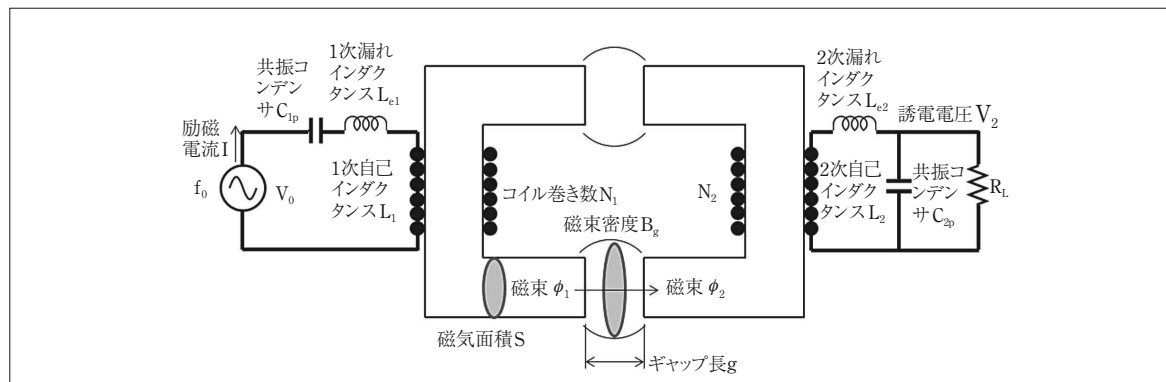
1-1 電磁誘導式

1831 年にイギリスの Michael Faraday が見出した、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、その変化を妨げる方向に電流を流そうとする電圧が生じると言うファラデーの電磁誘導法則に基づき、対向させたコイルと磁束収束用の磁性体を用い、1 次 / 2 次コイル間に共通に鎖交する磁束を利用する電磁誘導式は、図 2 に示すようにギャップのある変圧器である。

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



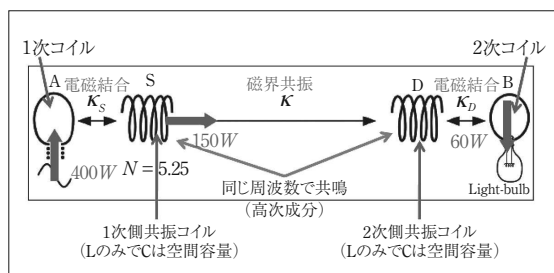
〔図 1〕 各方式の伝送電力と伝送距離



〔図 2〕 電磁誘導式の基本原理

変圧器では1次コイルの磁束は全て2次側に伝えられ、両コイルの磁束伝達度合い ϕ_2/ϕ_1 を示す結合係数 k は1である。しかし、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、WPT 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となるため、大ギャップでも電力を効率よく伝達するために、1次側の印加周波数を高周波にして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もしくは直列に接続した共振回路を設けている。ただ電磁誘導式は結



〔図3〕 MIT が発表したシステムの概要

合係数に大きく依存しているため、 k が 0.01 以下になるような、極端な大ギャップでは電力伝送ができない。

1-2 磁界共振式

磁界共振式は、2007 年にアメリカ Massachusetts Institute of Technology (MIT) の研究チームが、2m 離れた距離で 60W の電力伝送に成功したことで注目を浴びた。図 3 に MIT が発表したシステムの概要を示すが、先ず変圧器とインピーダンス変換器の役目をする 1 次側の 1 ターンループコイルから密な電磁結合により送電側のヘリカルコイルに電力伝送する。1 次／2 次側のヘリカルコイルの性能係数 Q を高い値にして、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利用する磁気共鳴の技術で電力伝送している。2 次側は 1 次側と同じコイル構成となっている。

当初のコイルは図のように送受電とも 2 コイル構造で、周波数も数 MHz だったが、現在使われているシステムではコイルは電磁誘導式と同じ 1 コイル構造であり、電源もインバータを使って、周波数も数十 kHz となっている。1 次コイルから放射される磁束を直接 2 次コイルに鎖交させれば前述の電磁誘導式となるが、1 次／2 次側の磁束が殆ど鎖交していない k が 0.01 以下となるよう両コイルを十分に離

した状態で、磁界共振式は電磁誘導式と殆ど同じシステムを使いながら両コイルサイズと波長、磁界分布をうまく制御してエネルギーを伝送している。そのためコイルサイズ、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くなる。そこで、今では磁界共振式は電磁誘導式の 1 種であると考えられている。

2. 自動車用ワイヤレス給電の動向

2-1 EV 用ワイヤレス給電

公道上で初めて使用された EV 用 WPT システムは 1995 年フランスの Tulip (Transport Urbain, Libre, Individuel et Public) 計画において、PSA (Peugeot/Citroen グループ) が発案した実証試験である。地上に設置した出力 6kW の送電コイル上に EV が跨り、車両底部に設置した受電コイルとの間で給電すると共に、通信システムにより地上側の電源と充電制御を行うと言う、現在の WPT システムと殆ど変わらないシステムが採用されたが、満充電に道路上で 4 時間が必要であり、また磁束漏洩が大きく、実験のみで終わった¹⁾。

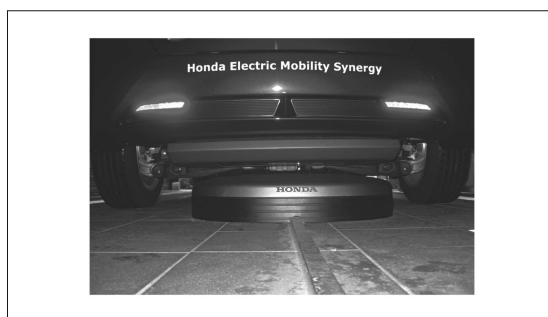
EV 用の WPT で製品化されたものとしては、アメリカの General Motors が開発した Magne Charge と呼ばれるパドル型のものがあり、周波数 130kHz ~ 360kHz、効率 86%、出力が 6.6kW であった。制御通信プロトコルはアメリカ自動車技術会 (Society of Automotive Engineers : SAE) の SAE J1773 に準拠していて、このプロトコルは J2954 が発表されるまでの EV 用 WPT は殆どが採用していた。アメリカ連邦通信委員会 (Federal Communications Commission : FCC) の FCC 規則パート 15 の Low-power, non-licensed transmitters の



〔図 4〕 GM が開発した Magne Charge システム

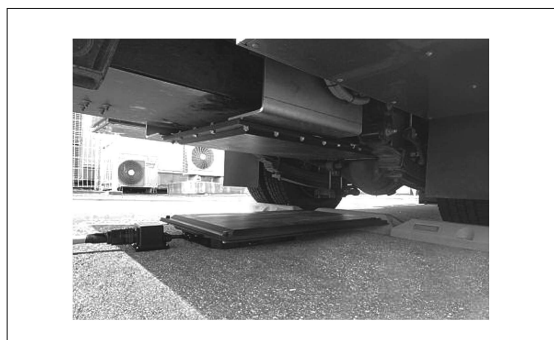
規定に適合し、他に混信を与えた場合は停止等の措置をするものとして認可されていたが、図 4 に示すように 1 次コイルに相当するパドルを 2 次コイルとなるインレット部に差し込む形状で、ギャップも少なくコイルの周りを金属で覆っていて、電磁放射は非常に少ないものであった²⁾。製造は当初 General Motors の子会社 Delco Electronics が行っていたが、1993 年に豊田自動織機にて国産化され、国内数百台、国外に数千台以上が販売された。ただ、コネクション操作が不要という WPT の特徴を損ねる構造をしていたため広く普及するには至らず、2002 年に General Motors は製品サポートを打ち切っている。

MIT の発表以来、国内外で EV 用 WPT の開発が進められ、MIT が開発した技術の商業化を目的に 2007 年に設立されたアメリカの WiTricity は、磁界共振式 WPT の製品化を進めていて、Delphi Corporation やトヨタ自動車、IHI、三菱自動車、TDK など多くの会社と技術提携している。IHI はギャップ 18cm、水平方向位置ずれ $\pm 20\text{cm}$ で 85% の効率を持つ 3.3kW 出力のものを 2013 年から千葉県で Peugeot ION を使い、2014 年には埼玉県で図 5 のようにホンダのフィット EV を使って実証試験を行った³⁾。日産自動車は



〔図 5〕 ホンダフィット EV に搭載したワイヤレス給電システム

2011 年の日産技術説明会で 3.3kW / 7kW、85kHz の WPT を発表し、翌 2012 年のニューヨークモーターショーで日産インフィニティ LE コンセプトに 3.3kW のコイルを搭載、2014 年には標準搭載で発売すると発表したが、未だ発売されていない^{4) 5)}。トヨタ自動車は、PHEV や EV 向けの 85kHz、2kW の WPT を開発、2014 年に 1 年間、愛知県内の PHEV 所有者の自宅などで 3 台の車両を使い実証実験を行った⁶⁾。TDK は 2012 年に独自に 3kW の WPT を Chevrolet Volt に搭載したが、その後 WiTricity と技術提携をし、2021 年の実用化を目指すと言う発表を 2018 年に行った⁷⁾。パイオニアが 2011 年に 85kHz、3kW の WPT を僅か 225 μm 厚の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た⁸⁾が、その後、この分野から撤退している。2013 年に住友電工が 85kHz、3kW の WPT を発表しているが、コイル形状は標準規格から外れたソレノイド型コイルであった⁹⁾。また、デンソーは経済産業省の次世代エネルギー社会システム実証プロジェクトにおいて 2014 年に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 4.5kW の送

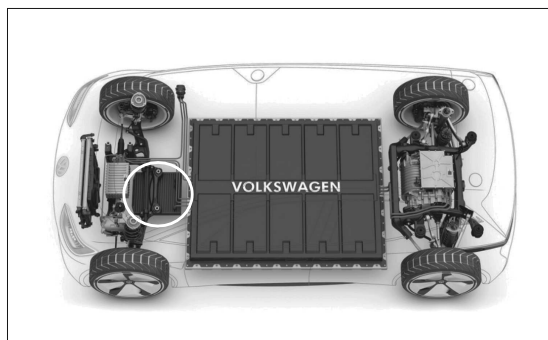


〔図 6〕 配送車へのワイヤレス給電

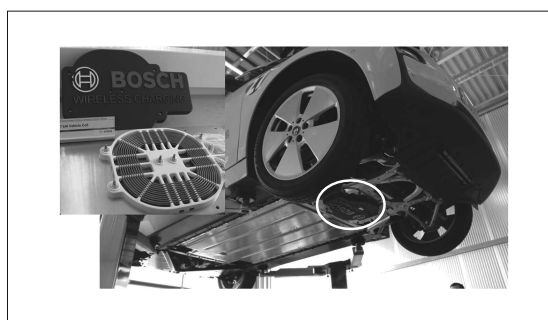
電コイルと送電設備からヤマト運輸の配送車の床下に設置した受電コイルに 25 ～ 30cm のギャップ、効率 85% で送電をし、集配作業などの間に配送車がアイドリングストップしていても、配送車の電動式冷凍機を駆動できるようにした（図 6）^{10) 11)}。

このように普通乗用車や小型トラック用のものとしては、国内では 2014 年頃まで自動車メーカーに限らず自動車メーカーに直接部品を供給するティア 1 企業でも EV や PHEV に搭載して発表、展示したり、各地で実証試験を盛んに行っていたが、最近では殆ど発表が見られなくなっている。

一方、海外では Audi は 2011 年に 3.6kW の Audi Wireless Charging (AWC) を A2 Concept に搭載、2015 年に地上側コイルを昇降させるシステムを発表し、それを 2017 年に A8 L e-tron に搭載してデモを行っている^{12) 13) 14)}。2013 年 Volvo Car は C30 Electric に対して 1 次コイル出力を 20kW 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¹⁵⁾。米国では 2012 年 Qualcomm Halo が一般乗用車向けに 3.3kW、大型車や商用車向けの 7kW、急速充電用の 20kW という 3 つの出力の WPT を発表している¹⁶⁾。2016 年のパリモーターショーで Daimler がコンセプトカー Generation EQ に Qualcomm / Brusa 製の



〔図 7〕 Volkswagen の EV コンセプト



〔図 8〕 Bosch が搭載したワイヤレス給電用受電コイル

3.6kW、85kHz のコイルを搭載して展示、Mercedes-Benz の PHV S550e に搭載して発売予定と言う発表¹⁷⁾をし、Volkswagen も図 7 の丸印のように受電コイルを EV 向け新プラットフォームの前軸のすぐ後ろに搭載するコンセプトを発表¹⁸⁾している。BMW は 2018 年に自動車メーカー初の WPT システムの販売を発表した¹⁹⁾。自動車メーカーだけでなく 2013 年から米国 Evatran が Bosch ASS と組んで日産リーフや Chevrolet Volt、Tesla Model S、BMW i3 を対象にした 3.3kW、19.5kHz の Plugless L2 Electric Vehicle Charging System を 3,000US\$ という安さで発売し、Bosch ASS が車両搭載の作業を行っている²⁰⁾。また、ティア 1 の Bosch は 2017 年に図 8 のように BMW i3 の前軸の直ぐ後ろの丸印の所に標準化ステージで取

り上げられている形状の 7kW コイルを搭載して発表し、2018 年には Mercedes-Benz の高級車に搭載して市販する予定との発表をしている²¹⁾。このように欧州では今も活発に発表が続いている。

日本と海外との対応の違いは WPT システムの標準化にある。グローバルな EV への WPT システムでは仕様の標準化・規格化が必要であり、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、コイル形状、周波数、出力、地面と車両コイルのギャップ、その他の規格も 2019 年末までにまとまる可能性がある。日本では既に自動車会社での開発は大方終了し、最初から標準化が済んだ仕様のものを搭載して、顧客に対応しようとしており、海外では標準化にデファクトスタンダード的に自らの仕様を押し込もうという考えがあるからと思われる。

2-2 e-Bus 用ワイヤレス給電

EV 用よりも e-Bus 用 WPT システムの方が早く製品化され、公道上で使用された。ドイツの Wampfler（現在の Conductix-Wampfler）が 1998 年に 20kHz、30kW の IPT（Inductive Power Transfer）システムを開発したが、コイル間ギャップが 5cm 程度であったため、1 次コイルを地面に埋設し、その上に車両側の 2 次コイルを昇降させるシステムであった。ギャップを小さくすることで大出力でも電磁漏洩は少なかった。海外では 2002 年に 30kW 型 IPT を 2 台並列に接続した 60kW システムがイタリアの Turin 市や Genoa 市の EV バス用として数十台が採用された²²⁾。日本でも 2004 年、早稲田大学の e-Bus WEB-1（Waseda Electric Bus-1）に採用され、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



〔図 9〕 WEB-3 とワイヤレス給電用地上コイル

電池でも走行距離を確保しつつ、車両重量が軽くなることでの省エネと Well to Wheel ベースの CO₂ 排出量減少が確認できた²³⁾。2008 年には国土交通省は 30kW 型 IPT を搭載した IPT ハイブリッドバスを開発、羽田空港や洞爺湖サミットで運用試験を行った。WEB-1 の成果をもとに、早稲田大学は昭和飛行機工業らとともに 2005 年から 4 年間掛けて IPT と同じ 30kW、コイル間ギャップ 14cm の IPS（Inductive Power Supply）システムを開発、図 9 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 年までの 3 年近く WEB-3、WEB-4 の 2 台の WPT 付き 7m 長の e-Bus を用いて日本初の有料運用試験を実施した²⁴⁾。更に WEB-3 に東芝製 44kW、85kHz の WPT システムを搭載して 2015 年から 2 年間、川崎市で実証運行を行った²⁵⁾。また、国土交通省や東京都も 2011 年以降、12m 長の路線バスに 50kW 型の IPS を搭載して東京ビッグサイトや東京駅で実証運行を行った²⁶⁾。これらの実証試験の結果、このような低電力ではターミナルでの充電に時間が掛かり過ぎダイヤを確保できないため、ディーゼルバスを e-Bus で置き換えるには、少なくとも 90kW 以上の



〔図 10〕 ワイヤレス給電地上コイルと 2 階建て PHEV バス

送電電力が必要と言う結論を得るに至り、実証試験のみで終わっている。

海外では殆どの事例が e-Bus に大電力 WPT システムを採用している。2014 年から英国 Milton Keynes 市は 8 台の 9m 長の e-Bus に Conductix-Wampfler の関連会社である IPT Technology の 120kW、20kHz の IPT を搭載して、24km の路線のディーゼルバスを全て e-Bus に置き換えて運用を続けている。また、図 10 に示すように London 市は 2016 年から出力 100kW の IPT を用いて郊外の 11km の路線で 12m 長の PHEV 2 階建てバスに給電して運用を行っている²⁷⁾。

Bombardier 社は 200kW、20kHz の WPT システムを 12m 長の e-Bus と 18m 長の連接 e-Bus に搭載して、2013 年以降ドイツの Braunschweig 市や Berlin 市、Mannheim 市、それとベルギーの Bruges 市で実運用を続けている²⁸⁾。

中国でも通信機器大手の ZTE が 2015 年から大ギャップの 120kW、85kHz の WPT システムを 9m から 12m の e-Bus に搭載し、道路上などで充電し、



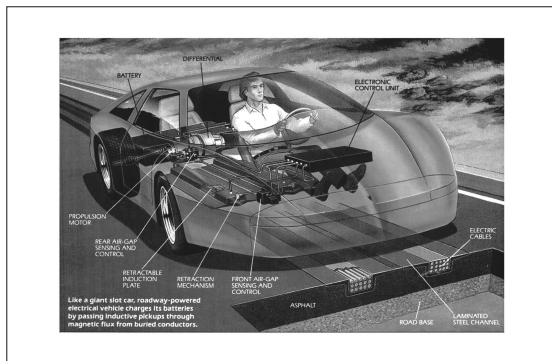
〔図 11〕 ZTE のワイヤレス給電地上コイルと e-Bus

1 充電で鄭州市では 44km、襄陽市では 23km の長距離運用を行っている²⁹⁾。図 11 は鄭州市の周回路線の終発着バス停留所の直ぐ横にあるバス運用会社鄭州公交の広い営業所内に 10 基設置された、60kW 2 台の 120kW 型地上コイルと充電中の e-Bus である。米国の Momentum Dynamics は 2017 年にメリーランド州 Columbia 市で 50kW の WPT システムを e-Bus に搭載して運用を始め、2018 年にはワシントン州 Wenatchee 市で 50kW × 4 台の 200kW 型 WPT システムを搭載して運用をしている³⁰⁾。

以上のように海外の 100kW 以上の WPT システムは全て実運用されていて、このままでは、この分野でも日本は世界から遅れてしまうことになる。CHAdemo 充電器の 150kW 大電力化が 2017 年から始まり、WPT でも早く大電力給電ができる環境が整うことを願うものである。

2-3 走行中大電力ワイヤレス給電

前記のように EV への静止型 WPT は、標準化の策定により互換性が確保されれば、直ぐにでも普及が始まる段階に来ている。しかしながら、EV が内



〔図 12〕 近未来の走行中給電 E V の記事

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、未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持った蓄電池が開発の途上のためである。将来的にこれらを解決する手段の一つとして考えられているのが、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 WPT である。

走行中 WPT の最初のものは、1980 年代にアメリカで行われた PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) プロジェクトで、道路に埋め込んだ 1.8cm 径のアルミニウム給電線からの 400Hz の低周波を用いた電磁誘導により走行中の 7.7m 長 e-Bus に 7.5cm のギャップで 10kW 程度を給電するシステムである。実験は成功し、図 12 のように当時の技術雑誌に EV にエネルギー補給できる道路の時代がすぐそこまで近づいていると紹介された³¹⁾ものの、非共振型 WPT であったため漏れインダクタンスにより力率が低下し総合効率が 60% 以下と低かった。また、漏れ磁束密度が 25cm 高さにおいて車内で 40 μ T、車外で 1500 μ T、1m 高さにおいて車内で 2.5 μ T、車外で



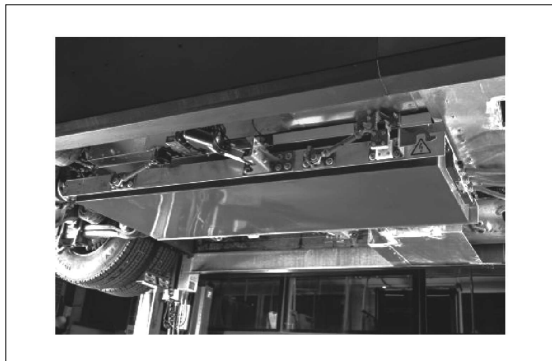
〔図 13〕 ユタ州立大での走行中給電 e-Bus

100 μ T と、当時は規定がなかったが、現在の国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) のガイドラインをはるかに超えるもので、実用には至らなかった³²⁾。

韓国科学技術院 KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) は、2013 年から Gumi (亀尾) 市で 24km のルートの途中 4 か所でそれぞれ 36m の 144m のみで e-Bus に走行中 WPT を行っているが、走行に必要な電力量の大部分は両端のターミナルの 200kW、20kHz の静止中 WPT というのが実情である³³⁾。

2015 年に米国 Utah 州立大学は、キャンパス内に長径 500 フィート、短径 300 フィートのオーバル形試験道路を作り、その 2 か所に 120 フィートの走行中 WPT コースを設置し、8 インチギャップを通して 20kHz、25kW の電力を送電して図 13 のような走行中給電 e-Bus を運行し、バスと道路設備それぞれの経過観察を行っている。送電コイル構造は静止型と同じものを一定間隔で並べ、車の進行に従いスイッチング回路で切り替えるシステムとしている³⁴⁾。

Bombardier は 2011 年から Flanders' DRIVE research project としてベルギー Lommel 市の 0.6 km の試験道路



〔図 14〕 大型トラック用走行中給電コイル

で e-Bus への走行中 WPT の実験を行った。電源は 10kV の高圧ラインから高周波電源装置により 20kHz、200kW を 3.6m 長の受電コイルに電力伝送させた³⁵⁾。2016 年に SCANIA はスウェーデン Södertälje 市にあるテストコースの 40m ずつ 5 か所の計 200m の区間で Bombardier の 200kW コイルを用いて、大型トラックにコイルの昇降装置を付けて、走行中は 100mm のギャップになるよう制御しながら走行中 WPT の試験を行った。トラックに搭載したコイルは静止中 WPT の e-Bus 用の 2m × 1m のものを使用している (図 14)³⁶⁾。

一方、日本では自動車会社では走行中 WPT に取り組む姿勢を見せず、幾つかの大学がミニカーへの走行中 WPT 実験を行っている程度で、この分野でも日本の取り組みの遅れがみられる。

EMC だけでなくインフラコストの面から、ハイウェイに大型車両向け WPT レーンを設けての走行中給電はかなり先の話となる。その前に空港のターミナル間循環バスやシャトルバスにおいて、走行中給電できるシステムとして設置されると思われ、これらを核にバスの電動化が進めば、地球温暖化や大気汚染の改善に大きく寄与するはずである。

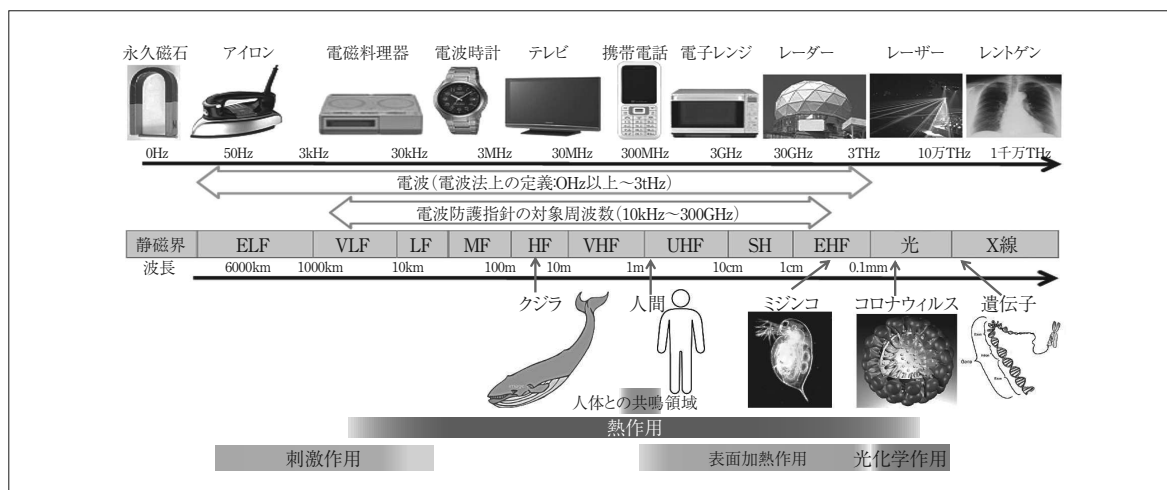
3. 大電力用ワイヤレス給電の EMC 対策

3-1 標準化と周波数

グローバルな普通乗用型 EV への WPT には送電コイルと受電コイル間の相互互換性 (Interoperability) が求められ、国際電気標準会議 (IEC) と国際無線障害特別委員会 (CISPR) が連携して日米欧を中心に IEC61980 としてコイル形状やコイル間ギャップ、出力、周波数などを含めた規格化作業を進めている。コイル形状としては円形コイルとニュージーランド Auckland 大学の John Boys が発明した DD 型コイルが EV 用コイルの標準仕様としてリファレンスコイルに取り上げられている。磁界共振式は伝送距離も共振の制約条件であるため、送受電コイル間のクロスリファレンスを取るために規格化が必要で、標準化のステージでは 100 ~ 250mm の間に 3 つのカテゴリー (Z1 から Z3 まで) が決められている。出力も 3.7kW ~ 22kW の間で 4 つのカテゴリー (WPT1 から WPT4 まで) が決まっている。

WPT は電力伝送に電磁波を使うため、使用に当たっては各国の電波法等の規制を受ける。米国では、製品化に対して FCC の認証が必要で、電力伝送と同じ周波数の通信機能を有する場合は、通信機器として Part15 などが適用されるが、通常の電力伝送機能のみの場合は Part18 が適用される。欧州では自己宣言による製品化が可能であるが、関連する欧州規格を遵守することが基本である。

日本での従来法令では WPT システムは高周波利用設備と解釈され、他の機器への妨害を与えることが予想されるため、個別に設置許可が必要であった。そこで WPT を対象にした明確な規制やカテゴリーを決めるため、2013 年 6 月から総務省の電波



〔図 15〕電磁波による生体への影響

利用環境委員会にて作業班が立ち上がり、利用可能な周波数と発生する電磁波の許容値などに対する制度化が検討され、2016 年 3 月に省令が改正された。この省令の中で、世界に先駆け EV 用 WPT システムの型式指定が行われる設備の条件として、電力伝送方式は磁界結合方式（電磁誘導式、磁界共振式）、伝送電力は 3kW 程度（最大 7.7kW）、コイル間距離は 0 ～ 30cm 程度で、周波数は 79kHz ～ 90kHz に相当するシステムとしている。国際的には 2018 年 6 月に Geneva 市で開催された ITU-R において EV 用 WPT の周波数として 79kHz ～ 90kHz を記載した Recommendation 案が承認された。

しかし、ローカルな商品である e-Bus ではまだ標準化・規格化が進んでおらず、コイル形状とコイル間ギャップは何も決まっていなく、出力については 2018 年 3 月に Chicago 市で開催された SAE J2954 の会議で送電電は 60kW から 600kW まで、4 つのカテゴリー（WPT5 から WPT8 まで）を設けることで合

意した。周波数については、この会議において来年末までに出す予定の TIR1 に 20kHz 帯を運用周波数候補と記すことになった。また、前述の ITU-R においても、大電力 EV 用として 20 kHz 帯と 60 kHz 帯が Recommendation 案に追記された。

3-2 生体への影響

WPT 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ため、EMC 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。

電波法上、電波は 0Hz 以上 3THz までの電磁波を指すが、わが国の電波防護指針において管理される電波は 10kHz 以上 300GHz までである。図 15 に示すように電磁波の生体への影響は電離放射線である X 線は遺伝子レベルで大きな損傷を与えるが、非電離

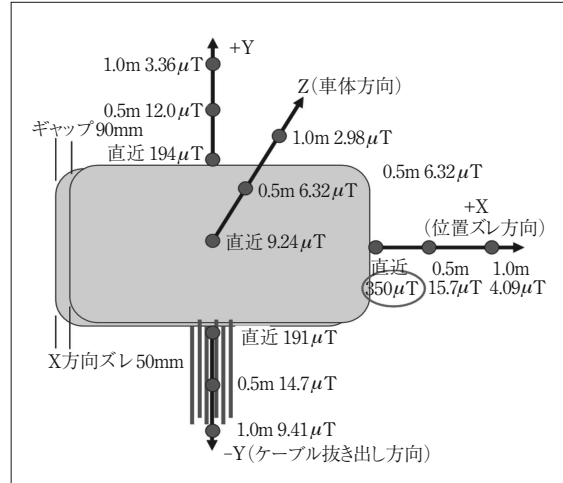


〔図 16〕 IPT Techonology のワイヤレス給電システム

放射線である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。

電磁波利用において、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、人体曝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：International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection）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。

Milton Keynes 市で運用している e-Bus の 120kW 型 WPT は充電時に昇降装置を使って車両側の受電コイルを図 16 のように送電コイルの上に降ろして数 cm のエアギャップで電力伝送するシステムを採用している。Bombardier 社の 200kW 型 WPT システムも受電コイルを昇降させる方式である。これには、①高価な昇降装置を車両台数分用意する、②コイルの昇降のため電池のエネルギーを消費する、③コイルの昇降時間分だけ充電時間が短くなる、④機械的な昇降装置のメンテナンス費用が掛かるなどの課題があるが、ギャップが小さくなることで k 値が大きくなり、同じ電力量を伝送するのにコイルサイズを小さくすることができコストと重量を軽減できる、



〔図 17〕 150kW システムの漏洩磁界の距離的影響

〔表 1〕 0.5m 地点でのギャップ変化に対する漏洩磁界

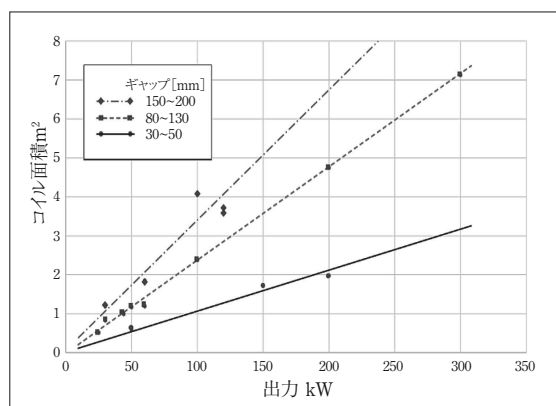
ギャップ		90mm	110mm
出力		150kW	120kW (*)
方向	X	12.6μT	15.2μT
	+Y	11.2μT	13.7μT
	-Y	13.7μT	14.4μT
	Z	5.85μT	6.92μT
(※) 110mm では 120kW しか出力できなかった			

また、漏れ磁束が減少し空中への電磁放射が少なくなり EMC 的にも楽になるというメリットがある。

実際に LRT（Light Rail Transit：次世代路面電車）用に開発をした 22kHz、150kW 出力の送受電コイルのギャップを 90mm にした状態で X 方向に 50mm 位置ずれさせた時のコイル周りの漏洩磁界の距離的影響の計測結果を図 17 に示す。漏洩磁界値は、ずれている X 方向で大きな値になり、コイル直近では 350μT と 2010 年の ICNIRP ガイドライン値 27μT の 13 倍にもなった。また位置ずれを 0 にした状態でギャップを 90mm から 110mm にした場合の 0.5m 離れた場所の漏洩磁界値を表 1 に示すが、110mm に

すると出力が150kWを維持できなくて120kWしか出ないが、出力が小さくなくても数値が大きくなった³⁷⁾。このことから出力が小さくてもギャップが大きくなると漏洩磁界が大きくなることが分かる。

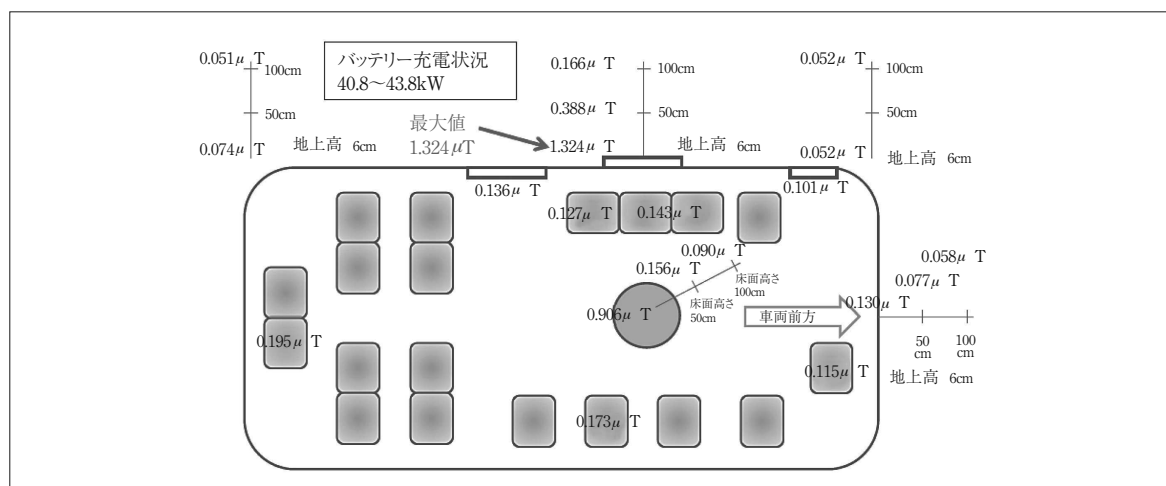
国内外の実際の大型車両用のWPTの出力と受電コイル面積、送受電コイル間ギャップの関係を調査した結果を図18に示す。出力の大きさに比例してコ



〔図18〕 出力とコイル面積およびコイル間ギャップの関係

イル面積が大きくなることは勿論のこと、昇降装置を使ってコイル間ギャップを30～50mmと小さくしたものに対し、同じ出力でギャップを80～130mmにするとコイル面積が約2倍になり、150～200mmにすると約3倍の大きさになることが分かる。送受電コイルが大きくなると、地面への設置性や車両への搭載性が悪くなるとともにコストも大きく掛かるようになる。さらに磁界発生源である送電コイルが大きいほど距離が離れても人体に及ぼす影響が強いという研究結果³⁸⁾があり、それによると1m径のコイルから0.5m離れた地点での雑音振幅が0.31mVの場合、同じ出力でコイル径が2倍の2mになると2.3倍の0.71mVとなることから、大出力ではあまり大きなギャップを取るの漏洩磁界の点で不利になる。

12m長の東京都向けPHEVバスの床下に受電コイル昇降方式でギャップが5cmの50kW、22kHzの円形コイルを搭載し、充電時のバス車内外での磁界測定をした結果を図19に示す。磁界の最大値は



〔図19〕 12m長 e-Busでの磁界計測結果

車外の送電コイル真横の地上 6cm の高さにおいて $1.324\mu\text{T}$ であり、2010 年の ICNIRP のガイドライン値 $27\mu\text{T}$ よりも十分小さい値であった。車内の磁界は床下に設置された受電コイルの直上での $0.906\mu\text{T}$ が最大で、他の地点では全て $0.1\mu\text{T}$ 台で、車体が磁界のシールド効果を果たしていることが分かる³⁹⁾。さらに 7m 長の小型 e-Bus に 85kHz、22kW の受電コイル 2 基、計 44kW 出力の電磁放射が大きいと言われるソレノイド型コイルを固定搭載し、ギャップ 10.5cm における充電時のバス車内での磁束密度を測定した結果、それぞれのコイルの磁束方向にある座席でその値が高かったが、最大値は約 $1.1\mu\text{T}$ と十分に小さいものであった²⁵⁾。

このことから電磁放射対策を十分に採用した WPT システムならば大電力で大ギャップであっても生体防護は十分にできると言える。

3-3 電磁干渉

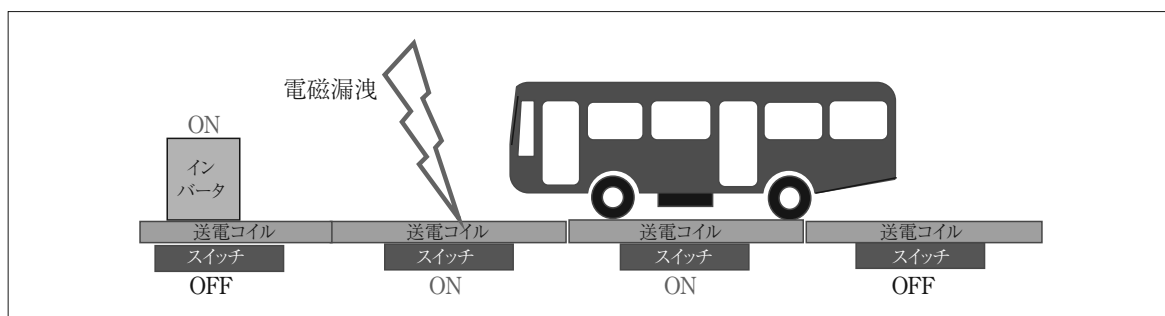
電磁放射による電磁干渉については、WPT は高周波利用設備として、電波法第 100 条 2 項と電波法施行規則第 45 条 3 項により 10kHz 以上の高周波電流を利用して出力が 50W を超えるものは、各地の総合通信局に設置許可申請を提出して許可を受ける必要がある。申請に当たっては無線設備 65 条 2 項に規定されている使用周波数 450kHz 以下の輻射電界強度が、100m 電界規制値で 1mV/m 以下、かつ高周波出力が 500W 以下の場合は 30m 電界規制値が 1mV/m 以下、500W 以上の場合は 30m 電界規制値が 1mV/m を超えない範囲で $\sqrt{P/500}$ (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ることは衆知である。しかし、WPT システムから 30m あるいは 100m 離して電界値を計測できる電波無響室

はなく、一般の野外の敷地境界内で計測を行うと周囲環境からの電界によるバックグラウンドノイズが乗り、正確に計測することが難しい。そこで電波無響室内にて 10m の距離で電磁界測定を行い、それを 30m と 100m 電界規制値に換算することで結果を得ている。

しかしながら、1 台ごとに申請をしていたのでは普及の足かせになってしまうため、3-1 で述べたように世界に先駆け 2016 年に現状の高周波利用設備の型式指定の一部を改正する告示が出され、家電機器用 WPT システムとともに EV 用 WPT システムにも型式指定の道が開かれたことは画期的なことである。施行規則第 46 条第 1 項により型式指定を受けようとする場合の主な申請項目は高周波出力、利用周波数、最大伝送距離、最大水平位置移動可能距離、電源端子における妨害波電圧の準尖頭値および平均値、高周波発生装置から 10m における磁界強度または電界強度、電波強度が人体に危害または物件に損傷を与えることがないように措置した内容、図面と写真（外観、構造、接続図）、漏えい電波の抑圧及び安全対策について設計上特に考慮を払った事項と試験成績表などである。

7kW を超える EV や e-Bus 用などの WPT はいまだに 1 台ごとの申請が必要であり、2-2 項で述べたように、海外では 100kW を超える大出力 WPT を搭載した e-Bus が数多く運用されているが、これらも設置に当たっては当該官庁に個別に設置申請しているものと思われる。早くこの分野も型式指定の道が開け、大電力 WPT システムが普及できるようにして欲しいものである。

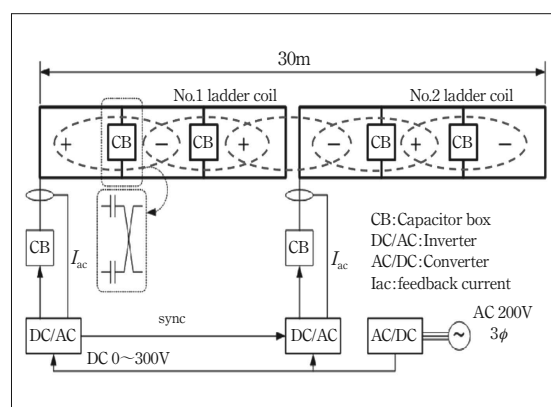
最後に大電力の走行中 WPT システムの EMC であるが、静止中の充電では送受電コイルをしっかり



〔図 20〕 セグメント化された送電コイルへの給電

と正対させると車体がシールドになって、外部への電磁放射を殆ど問題のないレベルに落とせるけれども、走行中給電では送電コイルの上を車体移動しシールド効果が十分には期待できない。PATH プロジェクトでは車体寸法に対して非常に長いアンテナ状のコイルであったため非常に大きな電磁漏洩があった。そこで図 20 のように Bombardier は PRIMOVE Technology、KAIST は Segment method と呼んでいる送電コイルを短く分割し、スイッチング制御により車体の下にあるコイルだけに通電するシステムを考案している。しかしながら、Bombardier の送電コイル長さは 8.1m で車体長 12m より短くなっているが、この上を 100km/h で通過するには 0.3 秒ほどしか掛からない。スイッチング制御回路の応答時間等を考えると、次のコイルくらいは同時に通電しておく必要が考えられる。このような場合には車体載っていないコイルからの電磁漏洩が発生する。これを解消する目的で昭和飛行機工業は、図 21 に示すように長いコイルを偶数回 5m ほどの区間毎に 180° 折り曲げるにより隣り合うコイルに互いに逆方向の磁束を発生させ、遠方から見ると互いに打ち消しあって電磁漏洩が少なくなる方法を開発⁴⁰⁾して、他にも各社がいろいろな方法で取組中である。

それと走行中給電においても不要放射電磁界を計測する必要があるが、従来の電波暗室やオープンサイトでの測定法は 10m 法を基準に作られているた



〔図 21〕 昭和飛行機工業の送電コイル構成図

め、車両を走行させながらの測定は困難である。新しい測定方法の確立、規格化が必要⁴¹⁾とされている。

おわりに

EV 用 WPT の開発は殆ど完成の域に入り、あとは国際標準化や電磁放射の規格化がまとまれば、いよいよ本格的な実用化が始まる状況になっている。一方、e-Bus 用などの大電力用 WPT は海外では実証を終えて実用が進んでいる。これらはいずれも EMC の抑制については、その規制範囲に入るよう必要な技術開発が行われている。ただ、走行中 WPT のように大電力で、送電コイル切り替え時の EMC については EMC の発生が十分に考えられ、この分野の研究開発、実用化に関わる関係者の今後の努力とその成果に大いに期待する

参考文献

- 1) 高木啓：NCV21 21 世紀は超小型車の時代，カースタイリング別冊 Vol.139 1/2,p99-105 (2000)
- 2) GM ATV: WM7200 Inductive Charger Owner's Manual, P/N27005584 (1998)
- 3) E. FUJIWARA：Wireless Charging System for Electric Vehicles / Plug-In Electric Vehicles by IHI Corporation, EVTeC2016 and APE Japan on May 26, 2016, 20169056 (2016)
- 4) <https://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/wcs.html> (2018 年 7 月 7 日アクセス)
- 5) <https://www.nissan-global.com/JP/MOTORSHOW/2012/NEWYORK/> (2018 年 7 月 7 日アクセス)
- 6) 非接触充電システムの概要，トヨタ自動車プレス発表資料 2014-2-13
- 7) <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO27277130S8A220C1TJ1000/> (2018 年 7 月 7 日アクセス)
- 8) 漆畑栄一：EV・PHV 向けワイヤレス給電システムの概要・開発動向と今後の課題，電子情報通信学会，信学技報 WPT2012-24, pp. 23-26 (2012)
- 9) 非接触給電システム，住友電気工業カタログ (16) Wireless Charging System
- 10) デンソー、非接触充電システムの実証実験を開始～非接触充電により商用車の車載冷凍機を駆動～，デンソープレス発表資料 2014-2-20
- 11) 経済産業省次世代エネルギー社会システム実証プロジェクト 2014 年度成果報告書非接触充電
- 12) <https://www.autoblog.com/2011/09/14/audi-urban-concept-sportback-wireless-charging/> (2018 年 7 月 10 日アクセス)
- 13) <https://www.audi-mediacycenter.com/en/audi-future-performance-days-2015-5097/fast-charging-and-audi-wireless-charging-5102> (2018 年 7 月 10 日アクセス)
- 14) <https://www.audi-mediacycenter.com/en/technology-lexicon-7180/drive-system-7227> (2018 年 7 月 10 日アクセス)
- 15) Volvo Car Corporation participates in a project for the development of inductive charging for electric cars, Volvo press release May 19,2011
- 16) G.Ombach：Wireless EV Charging, optimum operating frequency selection for power range 3.3 and 6.6kW, SMIEEE, VP Engineering(2013)
- 17) <http://www.webcg.net/articles/-/35200> (2018 年 7 月 10 日アクセス)
- 18) <https://www.caranddriver.com/news/volkswagen-id-ev-concept-photos-and-info-news> (2018 年 7 月 10 日アクセス)
- 19) <https://response.jp/article/2018/05/29/310227.html> (2018 年 7 月 10 日アクセス)
- 20) BOSCH-Eva Tran Press release, June 24,2013
- 21) Response 電子版：“ボッシュによるスマートモビリティ社会への探求…ワイヤレス充電”，データマイニング, 2017/7/6, http://response.jp/article/2017/07/06/297072.html?gp=1_email_20170706 (2018 年 7 月 12 日アクセス)
- 22) J.T. Boys, G.A. Covic: “ The Inductive Power Transfer Story at the University of Auckland” , IEEE Circuits and Systems Magazine Second Quarter 2015, 1531-636X/15©2015IEEE, pp.6-27. (2015)
- 23) 紙屋雄史, 大聖泰弘, 桑原史雄, 高橋俊輔：先進電動マイクロバス交通システムの開発と性能評価 (第 1 報), 自動車技術会論文集, Vol. 38, No. 1, 20074109, pp. 9-14 (2007)

- 24) 木村祥太, 田中健人, 永田祐之, 廣田寿男, 紙屋雄史, 大聖泰弘: 先進電動マイクロバス交通システムの開発と性能評価(第6報), 自動車技術会 2013 年秋季大会学術講演会前刷集, No. 148-13, 234, pp. 7-12 (2013)
- 25) 平成 28 年度環境省委託事業「EV バス早期普及にむけた充電設備を乗用車と共有するワイヤレス充電バスの実証研究 成果報告書」, 東芝 (2017)
- 26) 東京都建設局道路建設部: “非接触給電ハイブリッドバス運行に対応した道路上における給電装置検討委託報告書”, 平成 22 年 3 月
- 27) IPT Technology GmbH: Wireless Charging of Electrical Buses with IPT® Charge Bus, CAT9200-0003-EN (2014)
- 28) Neil Walker: PRIMOVE Wireless eMobility Inductive opportunity charging for convenient, emission-free mobility (2013)
- 29) Liu Hongjun, Liu Junqiang, Zhou Dong: “ZTE EV WPT Solution and Application”, CJK WPT WG #10 (2015)
- 30) <http://www.greencarcongress.com/2018/04/20180419-momentum.html> (2018 年 7 月 14 日アクセス)
- 31) Popular Mechanics, ‘Tech Update: Juiced-up roads to power Electric Cars’. Hearst Magazines, August 1990, Vol.167, Nr 8, page 17
- 32) PATH University of California Berkeley: “Roadway Powered Electric Vehicle Project Track Construction and Testing Program Phase 3D Final Report”
- California PATH Research Paper UCB-ITS-PRR-94-07, ISSN 10551425 (1994)
- 33) C.Rim: “The Development and Deployment of On-Line Electric Vehicles (OLEV)”, IEEE ECCE2013 SS3.2 (2013)
- 34) Charles Morris: “Utah State University builds a dynamic wireless charging test track”, January 7, 2015
- 35) Koebel: PRIMOVE-Inductive Power Transfer for Public Transportation, ETEV2012 Session2.3 (2012)
- 36) Jon Are Suul, Giuseppe Guidi: “Technology for dynamic on-road power transfer to electric vehicles”, The Research Council of Norway, Work package 2, pp.44-45, (2018)
- 37) 高橋俊輔: 非接触給電と周囲の電磁環境, 科学情報出版, EMC, Vol.23, No.1, p.54-68 (2010)
- 38) 豊島健: 植込み型心臓治療デバイスの EMI, 電波利用環境シンポジウム, 2015/06/10
- 39) 高橋俊輔: 自動車分野におけるワイヤレス電力伝送技術と EMC, 電子情報通信学会, 第 25 回 EMC ワークショップ論文集, pp. 67- 107.2013
- 40) 望月正志ほか: 2kW 走行中給電装置の開発, 自動車技術会 2015 年春季学術講演会フォーラム資料, 20-05-2015
- 41) 花澤理宏: ワイヤレス給電技術の実用化に向けた UL Japan の取り組み, 自動車技術会ワイヤレス電力伝送技術委員会資料, 09-12-2016

電界磁界 結合型	ワイヤレス給電技術	ワイヤレス給電技術の成書 執筆者20名の集大成!	
■ 電磁誘導・共鳴送電の理論と応用 ■			
【監修】京都大学 篠原 真毅			
科学情報出版(株) 有名書店に無いときは送料無料FAX(029-877-1030)で／月刊EMC読者は10%OFFでご注文			