

MOTOR

エレクトロニクス

NO.
8

用途・動作仕様・設置環境により種類選定と設計が変わる

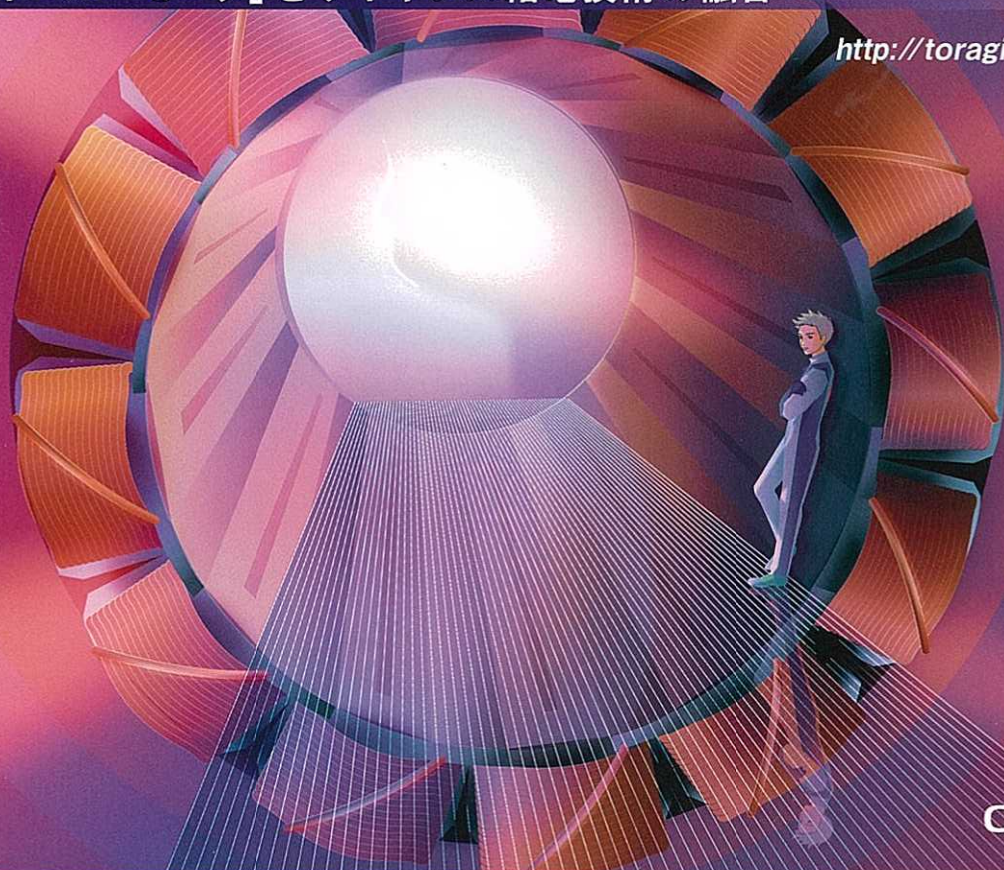
モータ特性はどのようにして決まるか

永久磁石を使わず高速回転する「SRモータ」

直流用・交流用・交直両用がある「整流子モータ」

「インホイール・モータ」とワイヤレス給電技術の融合

<http://toragi.cqpub.co.jp>





～欧州での脱エンジン車加速で 実用化が近い？～ 究極のEV充電－ 走行中ワイヤレス給電への挑戦

高橋 俊輔

2016年末から、欧州の自動車メーカ各社は、一斉にEVやPHVのラインナップを発表した。また、欧州各国(独、仏、英など)では、2025年～2035年にはエンジン車の販売を全面禁止する方向で法制化を進めるらしい。欧州でEV/PHVの普及が進むとなると、クルマへの給電技術の動向が注目される。コネクタによる給電では、機構部周囲のトラブル発生がある程度は避けられない。そこで、ワイヤレス給電が一気に普及すると予測されている。まだ技術的問題が全て解決されているわけではないが、社会インフラにもつながる問題でもあり、その世界標準化動向が気になる。ここでは、ワイヤレス給電の基礎技術を示しながら、その技術動向を探る。欧州の開発は、日本以上のアグレッシブさがあるという。(編集部)

はじめに — EVへのワイヤレス給電

● 安全で簡便な給電方式としてのワイヤレス給電

日本は、世界の中でもEVやHVの開発と市場投入では10年～20年も先行してきたのですが、給電インフラの点では、まだまだの感です。世界標準化を目指した高速充電規格CHAdeMOも、規格化は先行したのですが、世界普及の点ではもう一つでした。何よりCHAdeMOは、家庭向けの充電規格とはいえません。

EV乗用車普及の鍵の1つは明らかに簡単で安全な「給電設備」です。コネクタ接続は、何より面倒ですし、耐久性の点でもよくなく故障・事故の元になりかねません。給電操作の拘束時間も少なくしたいです。対してワイヤレス給電は、そうした問題が小さくなるでしょう。

● 路線バスに求められるワイヤレス給電

一方、環境対策で考えるとバスのEV化は重要です。バスは、馬力の出るディーゼル・エンジン車が多いし、それをEV化するのに重い電池を大量に搭載するより、ワイヤレスでチョコチョコ給電(高速性が求められる)すると、搭載電池も小量ですむし、路線バスであれば給電ポイントを決めることできるので、ワイ

ヤレス給電の採用は効果的です。

● 走行中ワイヤレス給電

さらに利便性・簡便性から考えると、究極の充電方式は走行中ワイヤレス給電になるでしょう。これが実現できると、自動運転とも親和性がいいいでしょう。

また、将来の技術である“走行中”ワイヤレス給電技術について、その必要性和その技術変遷、将来の展望についても述べていきます。

1. ワイヤレス電力伝送各方式の原理

● ワイヤレス電力伝送は波動エネルギーを利用する

まず、ワイヤレス電力伝送の基本について考えてみましょう。電力を空間中に伝送するのに使う媒体は何でしょうか？

ワイヤ(ケーブル)なしに、非接触でエネルギー伝送する“ワイヤレス電力伝送システム”は、空間を伝わる波動エネルギーを利用しています。波動する“音波”でもエネルギー伝送はできるため、実際に超音波を利用したワイヤレス給電を開発している企業もあります。しかし、ここでは“電磁波”を利用したワイヤレス給電システムについて取り上げます。

電磁波を使ったワイヤレス伝送システムは、エネルギーを伝える媒体により、以下のように分類されます。

- ①磁界を利用するもの：電磁誘導と磁界共振
- 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(マイクロ波)、レーザ

■ 1.1 電磁誘導方式

● 19世紀からある電磁誘導式

1831年に英国のMichael Faradayが発見した電磁誘導の法則に基づき、1836年にアイルランドのメイヌス大学Nicholas Callan牧師が誘導コイルを発明、これが変圧器として広く用いられる初めてのものとなりました。一般的には“トランス”と呼ばれる変圧器は、対向させた一対のコイルと磁束収束用の磁性体を接触

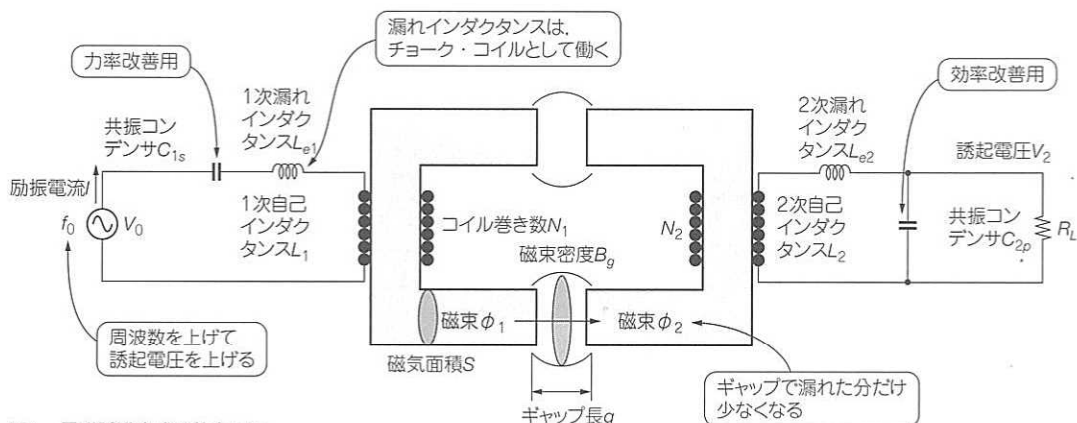


図1 電磁誘導方式の基本原理

基本はトランスだが、漏れ磁束対策で効率を上げるのがミソ

あるいは非常に狭いギャップで対抗させる構造です。基本的には1次側と2次側のコイルは電氣的に絶縁され、非接触で電力が伝送できるので、ワイヤレス給電といえます。

● 電磁誘導方式の基本原理はトランスにある

トランスの原理を応用したのが、電磁誘導方式ワイヤレス給電です。この基本原理を図1に示します。

図を見て分かるように、1次側コイルに交流電流を流すとコイル周囲に磁界が発生し、1次/2次コイルを共通に鎖交する磁束により2次側コイルに誘導起電力が発生します。

ここで理想的な変圧器(トランス)を考えると、磁束は全て主磁束で構成され、漏れ磁束がありません。漏れ磁束がない場合の1次コイルと2次コイルとの結合の度合いを示す結合係数 k は1です。

● ワイヤレス給電では1次コイルと2次コイルは距離があるので…

非接触(ワイヤレス給電)の場合もトランスと同様で、送電用コイルと受電用コイルに共通に鎖交する鎖交磁束が伝送の要です。つまり、両コイルの結合度が高いことが望ましいのです。

しかし、ワイヤレス給電では大きなギャップにより磁路が切れていて漏れ磁束があるため、結合係数は1よりもかなり小さくなります。

エネルギーの伝達効率を上げる工夫はあります。1次側の印加周波数を高周波にしたり、分割トランスのように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最適設計したりすることで、1次側と2次側のコア間のギャップを広げることができます。

しかしながら、電磁誘導式は結合係数に大きく依存しているため、結合係数が0.01以下になるような、極端に大きなコイル間ギャップで電力伝送することはできません。

EVでのワイヤレス給電方式としては実用的ではありません。

■ 1.2 磁界共振方式

● 昨今の隆盛は磁界共振方式から

磁界共振方式(共鳴方式)は、2007年に米国MIT(Massachusetts Institute of Technology)の研究チームが、2m離れた距離で60Wの電力を送ることに成功し一躍注目を浴びました。なんと21世紀での発明・発見でした。とても単純なシステムだったので、センセーショナルな報道がされました。「これまで多くの研究者が追求していたテーマなのに、どうして気付かなかったのだろう」と訝る人も多かったのだと思います。

現在のワイヤレス給電の技術開発は、この磁界共振方式の発明から活発になります。もしも、この発明がなければ、ワイヤレス給電は今の姿はなかったのではないのでしょうか。

● 磁界共振方式の基本原理

図2にMITが発表したシステムの概要を示しますが、これは、まず送電側の1ターン・ループ・コイルから、密な電磁結合で送電側のヘリカル・コイルに電力伝送をします。

送電側と受電側のヘリカル・コイルの性能係数 Q を高い値にして、電磁的に同じ周波数で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界共鳴の技術を活用しています。受電側は送電側と同じコイル構成にしています。実はその基本原理は新しくはありません。通信機器では昔から使われているものですが、“給電方式”としては新たな方式といえます。

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りますが、送信側と受信側のコイルがほとんど鎖交していない結

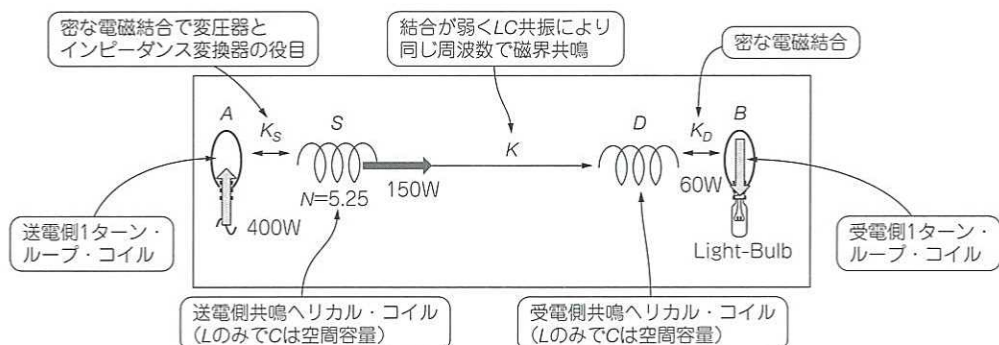


図2 MITが発表したシステムの概要
コイル・サイズ、波長、伝送距離のどれが変わっても共鳴が起こらない

合、係数 k が0.01以下となるよう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ほとん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ます。

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くなります。

1.3 電界結合方式

● 磁界だけでなく電界結合式もある

磁界と同じように「場」を媒介とするものに「電界」があります。前記のように、送電側と受電側のLC共振器間の「磁界」エネルギーを媒介にしてワイヤレス電力伝送が可能であれば、送電側と受電側にそれぞれ電極を設置し、電極が近接したときに発生する「電界」のエネルギーを媒介にした方式もまた成り立ちます。これが電界結合方式です。

● 電界結合方式の基本原理解

図3に示すように、対向する電極はまさにコンデンサであり、極板間の静電容量（接合容量）に変位電流として高周波の交流電圧を印加し、静電誘導の作用によってワイヤレスに電力伝送を行うシステムです。

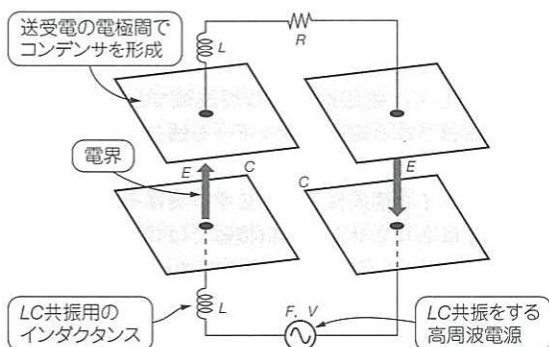


図3 電界結合式の伝送回路図
コンデンサの極板間にたまった電界エネルギーで電力伝送

LC共振を用いる点では、回路的には磁界結合式と同様ですが、電流を流すことで磁界を作らねばならない磁界結合式に対し、電界を利用するため電極間に電圧を印加するだけでよく、磁界結合式に比べ装置が小型化する特色があります。

しかし、空気中への放電を避けるために電界強度に上限が存在し、静電エネルギーは数J/m³程度であり、小電力機器が対象になります。つまり、EVの給電システムには向きません。

1.4 マイクロ波による電力伝送方式

● 電波（マイクロ波）式は遠くまで届く

放送や通信で使われる電波は、アンテナから空中線電力を放出しています。

本来は、遠方にまで伝搬する遠方界の電磁波を利用する方式で、1901年に米国のNikola Teslaが電波塔から300kWの電力伝送実験を行いました。150kHzと周波数が低すぎて電磁波が拡散して失敗しました。無線電力伝送が可能になるのは、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次世界大戦以降です。

1964年に米国のWilliam Brownが2.45GHz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ました。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・バリア・ダイオードで、直接、直流に変換するアンテナです。2.45GHzや5.8GHzの周波数を用いるのが一般的で、マイクロ波の発振源である電子レンジ用のマグネトロン管が大量に生産されていることから、非常に安価にシステムを構成できます。最近ではGaNなどのパワー半導体も手に入る価格になり、使う事例が増えています。

● 無線電力伝送システムの例

そのシステム構成は図4のように基本的にはマイク

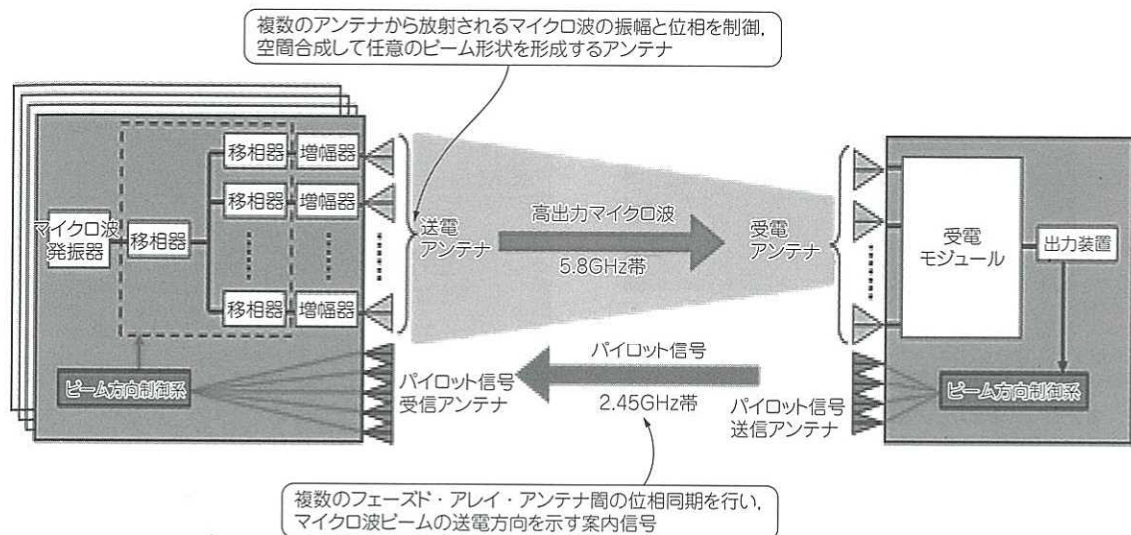


図4 無線方式の系統図例 [JAXA広報資料⁽¹⁾から]
マイクロウェーブ通信と基本は同じ

ロウエーブ通信と同じようになります。

電波自体は原理的に真空中も伝搬する性質を持っていて、遠方にも大電力を到達させることができる反面、電磁波のエネルギーが拡散するので、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きますし、伝送効率も上がりません。

電磁波による生体への影響など懸念すべき課題もあります。受電後の直流への整流についても小電力であれば、かなりの高効率を保つことができるため、小電力のワイヤレス給電においてマイクロ波は強力なツールとなると考えられます。EVを含めた大電力のワイヤレス給電系では、逆に受電後の整流の高効率化が課題と言えます。

■ 1.5 光電力伝送方式

● 光（レーザー）だって電磁波だ

レーザー方式はTHz帯のレーザーで送信し、ソーラー・セルと同じように半導体で受信し、半導体の光起電力効果を利用して光エネルギーを直接電気に変換することで電力を伝送する技術です。レーザー光はビームを形成でき、飛散角が小さく、少ない減衰で長距離にまでエネルギーを伝搬できます。したがって、マイクロ波と同様に宇宙エレベータといった航空宇宙分野を中心に研究が進められてきましたが、近年はより近距離の移動体が対象となり、図5のような災害監視用無人飛行機、月面探査ローバーや一般のロボットなどへの給電が試みられています。

● 指向性が鋭いが位相制御が難しい

空間をエネルギーで満たすという考え方は、レーザー

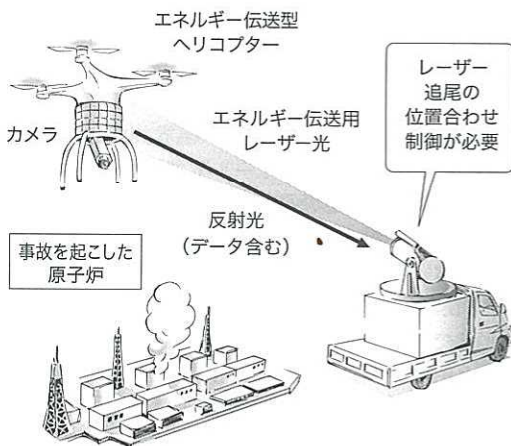
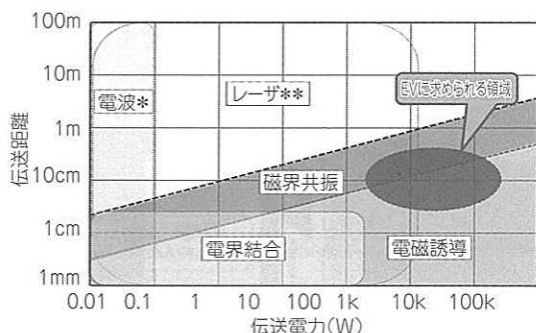


図5 レーザ式の応用例 [近畿大学特許第4928203号⁽²⁾から]
太陽光パネルの太陽光をレーザーに替えただけ

では難しいでしょう。しかし、ビーム形成となるとMHz帯のマイクロ波よりも周波数の高いレーザーが得意分野であり、数百mの距離であれば発散角が小さく、そのビーム径もほとんど拡大しない特徴があります。

ただ、マイクロ波などで通常行われているフェーズド・アレイ方式のような位相制御が困難であるため、高精度の追尾技術が必要となるといった問題があります。もし、半導体レーザーなどでフェーズド・アレイができるようになれば、これまで考えられなかったような長距離伝送が高効率、高出力で可能となります。しかし、雲、霧など気象条件に左右され、優れた収束性や遠距離伝送能力を十分に活用できないことにも留意する必要があります。



*人体防護の観点からの制限

**高度な安全装置により規制緩和された場合

図6 各方式の伝送電力と伝送距離

今のところEV用に使えるのは電磁誘導式と磁界共振式

1.6 EV用で使えるのはわずか

● 人体防護性も勘案すると

上記のワイヤレス給電方式ごとの伝送電力と伝送距離を図6に示します。ここで放射型の電波式は人体防護の観点からの値に制限された範囲を示し、レーザー式は高度な安全装置を使用するなどで規制緩和された場合の範囲を示しています。

● 可能性があるのは電磁誘導・磁界共振方式だけ

EV用として実際のフィールドで運用されているものは、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、そして電界結合式です。ただ、電界結合式は電界強度の制限からミニカーのような小電力EVで使われた例があるだけです。

現状で乗用車用の実用域に達しているものは電磁誘導式と磁界共振式だけです。出力的に電磁誘導式では200kWのものが実用に供され、送受電コイル間のギャップ的には磁界共振式で50cmのものが実証されています。

2. EV用ワイヤレス給電の動向

2.1 全乗用車用ワイヤレス給電システム

● 世界標準規格化作業が進行中

— IEC/ISOPT98510

乗用車は、今ではとてもグローバルな商品です。地域性が出るのはハンドル位置の左右が違うくらいです。あとはほとんど同じ仕様のものが世界中で使われています。したがって、乗用車EVに搭載されるワイヤレス給電システムも世界的標準の規格が必要となります。

現在、IEC/ISOのPT98510において日・米・欧を中心とした各国が協議を続けています。2019年6月頃にはCircular型のコイルを使って出力3.5/7kW、周波

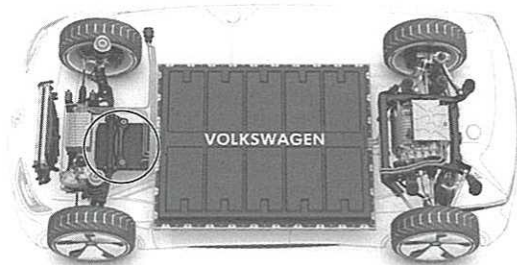


図7 フォルクスワーゲン社のEV向けの新プラットフォーム（前軸下の枠内に受電コイル）⁽³⁾

数85kHz帯の規格が決まる見込みで、それに向けて国内外の自動車各社が開発を続けています。

● MIT系ワイトリシティ社の動きに注目

MITが開発した磁界共振式ワイヤレス給電技術の商業化を目的に、2007年に設立されたMIT系ベンチャー企業の米ワイトリシティ (WiTricity) 社があります。同社は、米デルファイ (Delphi) 社や日本のトヨタ、IHI、TDKなど多くの会社と技術提携し、各社が製品化を目指しています。

例えば、2016年10月には独ダイムラー (Daimler) 社がMercedes-Benz S550eとコンセプト・カー Generation EQへの搭載を、また、独フォルクスワーゲン (Volkswagen) 社が図7のEV向けの新プラットフォームで前部のステアリング軸のすぐ下に標準的に設置する案を発表しています⁽³⁾。

● 独ボッシュの動き

2017年7月には、独ボッシュ (Bosch) 社が写真1のように、出力7kW、周波数85kHzの車側受電コイルを (フォルクスワーゲン社のEV向け新プラットフォームと同様)、BMW i3のステアリング軸のすぐ後ろに搭載したものを発表しています。受電コイルは、標準化ステージで討議されているISO D-PAS 19363:2016のAnnex C MF-WPT2にとっても良く似ていて、2017年末か2018年にMercedes-Benz Sクラスのような高級車にオプションとして搭載される見込みです⁽⁴⁾。

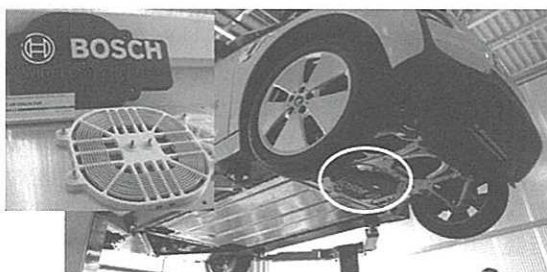


写真1 BMW i3に搭載されたボッシュ社の受電コイル
ステアリング軸下に装備された受電コイルの内部は標準コイルの巻き方に近い

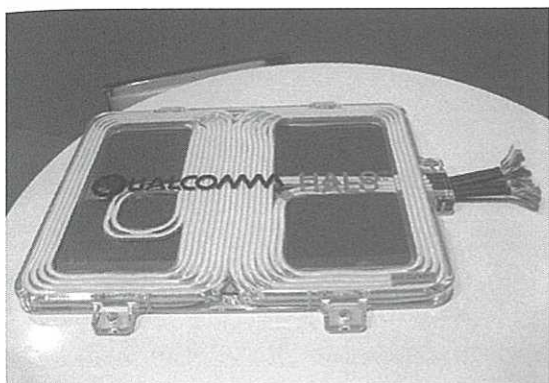


写真2 クアルコム・ハロ社のDD型コイル
オークランド大学で考案した独特のコイル構造

● 米クアルコム・ハロの動き

米クアルコム・ハロ (Qualcomm Halo) 社は、同じく ISO D-PAS 19363:2016 の Annex B と D に採用されている DD 型コイルを使って、周波数 85kHz で出力 3.3/7kW (それ以外に大型車や急速充電用の 11/20kW も) を発表しています。

● 米と独の

標準仕様とは少し違っていますが、米エヴァトラン (Evatran) 社が独ボッシュ ASS 社と組んで米国で出力 3.3kW、周波数 19.5kHz の Plugless L2 System を日産リーフや米 GM 社の Chevrolet Volt 向けを 2,699 ~ 2,850US\$ で、米テスラ (Tesla) 社 Model S と独 BMW i3 用に 3,499US\$ という安さでネット発売、ボッシュ ASS が車両搭載の作業を行っています⁽⁵⁾。

海外でのワイヤレス給電システムは、自動車メーカーや部品メーカーともに標準化が決まる前から活発に発表をしていて、その存在感が大きくなってきています。また、その他のメーカーのものを含め、車両の前部に受電コイルを設置するなど、設置場所でも統一感を強めています。これは、前進駐車をするドライバーが多い米欧への対応を考えているものと思われます。

● 音無しの構え(?)の日本勢

一方、日本では EV 用ワイヤレス給電システムの黎明期から 2014 年頃までは、部品メーカーを含め自動車メーカー各社が展示会等で積極的に発表を行うなど、この分野を牽引していましたが、最近では著名な展示会でもワイヤレス給電システムの発表はなくなっています。WTP2017 で、久しぶりにトヨタ自動車矢崎総業製の送電コイルと受電コイルを搭載した PHEV プリウスを展示しましたが、これは 2014 年に愛知県で実証試験を行った当時のものの再展示です。

最近では日本の多くの自動車メーカーはワイヤレス給電システムを自社開発するのではなくワイトリシティ社のものを購入して搭載するような方向に進んでい

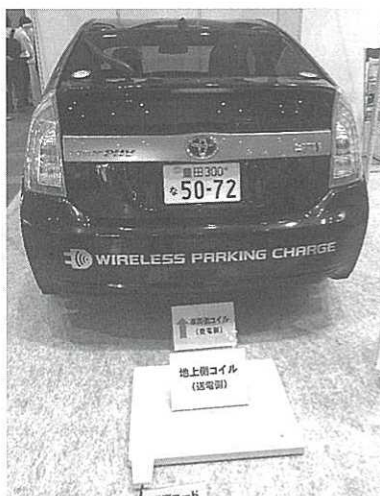


写真3 トヨタのワイヤレス給電システム
WTP2017 で矢崎総業製受電コイルと展示

て、世界から一步遅れているような印象が強くなってきています。

また、日本では一般的な後進駐車を考慮するかのよう、受電コイルの設置位置もほとんどが車両後部トランクルーム下となっていて、海外での設置と異なった対応となっています。

すでに開発も終わり、販売に向けて世界標準が策定されるのを待っているのならよいのですが、EV の車種数が欧州や中国に比べてとても少ないことと併せて、大いに気掛かりです。

■ 2.2 海外の公共バス用ワイヤレス給電

● バス用ワイヤレス給電の標準化は進んでいない…

乗用車に比べるとバスは地域性のある商品です。特に公共交通の路線バスでは、同じターミナル駅でもバス停留所の位置がバス運用会社により異なり、また同じバス運用会社でも路線が違えば異なることは一般的です。したがって、公共バスに使用するワイヤレス給電システムは、バス運用会社あるいは路線によって異なっていたとしても、相互接続性についてあまり問題はありません。

このことから IEC/ISO の PT98510 において、バス用の使用周波数すら協議が始まっていないようです。にもかかわらず、世界的にはワイヤレス給電バスの実運用化が進められています。

● 英国でのワイヤレス給電バス

欧州では、英ミルトン・キーネズ (Milton Keynes) 市の公共路線バスの例があります。同市の 7 号線用の全 8 台の 9m 長のバスを三井物産が英アラップ (Arup) 社と組んでワイヤレス給電を装備した電動バスに置き換えたのです。2014 年 1 月から毎日 17 時間、計 5 年間



写真4 IPT Technologyのワイヤレス給電システム
昇降装置で送電コイル上に受電コイルが降りて充電する

運行し、商業化に向けたデータの蓄積を行っています。

この電磁誘導式ワイヤレス給電システムは、独IPT Technology社の30kW型IPT (Inductive Power Transfer) 注1を4台並列接続した出力120kW、周波数20kHzのIPTを2カ所のターミナル(毎回必ず充電)と中間のバス停留所(電池残量に応じて臨時充電)の3カ所に設置してバスを充電し、片道24kmの路線を走らせています。充電時に懸架装置を使って車両側の受電コイルを写真4のように送電コイルの上に降ろすシステムを採用し、コイル間ギャップは50mmです。

このほかにもIPT Technology社のシステムを使用したバスとして、出力を100kWにした受電モジュールを2基搭載した2階建て電動バスが、ロンドン市69号線の11km間で走行しています。

● ドイツ、ベルギーでのワイヤレス給電バス

また、カナダのボンバルディア(Bombardier)社は、MITRAC e-busと呼ばれる自社製の12mの大型電動バスと18mの連接電動バスに、自社製の電磁誘導式200kW型ワイヤレス給電システムを搭載して、ベルギー・ブルージュ市やドイツ・ブラウンシュヴァイク市、マンハイム市、ベルリン市などで運用を始めています。これもIPT Technology社と同様に懸架装置を使って受電コイルを下げるシステムになっています。

このシステムには、

- ①高価な懸架装置を車両台数分用意
- ②コイルの昇降のため電池のエネルギーを消費
- ③コイルの昇降時間分だけ充電時間が短くなる
- ④機械的な懸架装置のメンテナンス費用が掛かる

などの課題があります。後述のWEB-3のように、コイル間ギャップを大きくし懸架装置をなくす方向が望ましいのですが、ギャップを小さくすることで結合係

注1：IPTはIPT Technology GmbHの商標でもある。



写真5 ZTEのワイヤレス給電コイルと電動バス
広い営業所敷地に10基のシステムが運用されている

数 k が大きくなり、空中に漏れる磁束が減少して電磁放射的には楽になるメリットもあります。

● 中国のワイヤレス給電バス

お隣中国では通信機器大手のZTE社が2015年から大ギャップの120kWワイヤレス給電システムを9mから12m長の電動バスに搭載し、道路上などで充電し、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ます。

写真5は、鄭州市の周回路線の終発着バス停留所のすぐ横にある、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 120kWの地上コイルと充電中の電動バスです。

● 路線バスには120kW以上の充電出力が必要

海外でディーゼル・バスに完全に置き換えて運用されているワイヤレス給電式バスの多くは120kW以上の充電出力のものです。60kW以下のものも実験されていましたが、それらは全て運用が中止になっています。

これはターミナル駅での充電に時間が掛かり過ぎて、ディーゼル・バスに置き換えての定時運行ができないためです。

■ 2.3 日本のバス用ワイヤレス給電

● 長野で行われた小型バスでの実証試験

現在、日本で運用されている電動バスは20台以下で、欧州や中国に比べ極めて少数です。さらに電動バスにワイヤレス給電システムを搭載して実際に運用した例は、早稲田大学と昭和飛行機工業が関連するプロジェクト以外にはありません。それも約2年間の実証試験レベルで終わっています。

試験場所は長野市で、2014年までの2年間、7m長のWEB-3とWEB-4の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ものでした。昭和飛



写真6 長野市のワイヤレス給電コイルとWEB-4
地面に埋め込まれたコイルに向かう緑ナンバーのWEB-4

行機工業の30kWワイヤレス給電システムIPSのコイル間ギャップを、14cmと大ギャップにさせることで写真6のように地上コイルを地面一面に埋め込んだシステムでした。

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、接触式給電で試験走行していたのですが、車外に出て接触式充電装置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地上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/OFFができる利便性が高く評価されました。

● 東京羽田での実証試験

もう1つの長期運用事例は、電池とワイヤレス給電システムを東芝製に一新させ、WEB-3Adv.と9m長の電動メルファを使って2015年末から1年間、羽田空港近隣で実証試験を行ったものです。

写真7のように川崎市殿町のANAビジネスセンター駐車場に22kW 2台 44kWの地上コイルを設置し、WEB-3Adv.は東横谷のANA訓練センターまでの一般道の約6km、電動メルファは自動車専用道路を通過して羽田空港第2ターミナルビルまでの約11kmを1日3～4往復してANAの職員の送迎に当たりました。

同じサイズのディーゼル・バスに比べ、WEB-3Adv.は42%、電動メルファは約60%のCO₂削減を実現することができました。しかし、充電に時間が掛かり、ディーゼル・バスと同じダイヤで運行することはできませんでした。

その他にも、国交省がPHVバスに50kW型IPSを搭載して東京駅や東京ビッグサイトでデモ運用を行っています。

● 日本での実証試験の結果は

現在、ワイヤレス給電を使った公共バスの実証試験が行われる計画があるのでしょうか。

上記の日本での試験では、いずれも出力が50kW以



写真7 殿町のワイヤレス給電コイルとWEB-3Adv.
右回りで地上コイルに向かい、最後は後進で正着

下と小さく、ディーゼル・バスに置き換えての実運用には至っていません。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ります。これには大電力を容易に給電できる環境が整っている場所が少ないうえに、法的にもいろいろ制約のあることも影響しています。

CHAdeMO充電器の150kW大電力化が今年度から始まる見込みなので、ワイヤレス給電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す。

3. 走行中ワイヤレス給電の必要性

● テスラは環境対応車？—航続距離を延ばすため—

図8のように、EVの電気消費量は一般的には8～10km/kWh、軽量化を進めた車種では12km/kWh程度になります。これを車の販売価格およびスペースに見合った搭載電池量を考慮すると、1充電走行距離は250km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ります。

テスラ社のEVのように、内燃機関車と同等の500km以上走れるものもありますが、その電気消費量を見てみると、6km/kWhと最新の軽量のEVの1/2程度でしかありません。10年ほど前の第2次EV時代並みの性能なのです。これは重い電池を多量に積んで走行距離を延ばしているためで、CO₂削減を目指してのEV普及の点からは逆方向に向かっていることになります。

● EVバスは短距離用か…

また、バスにおいて、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、充電量からマイクロバス・サイズになるか、大型バスの場合はPHVバスを使用している短距離EV走行運用にならざるを得ません。

● 走行中ワイヤレス給電ができれば—EVの電車化—

上記のようにEVがエンジン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

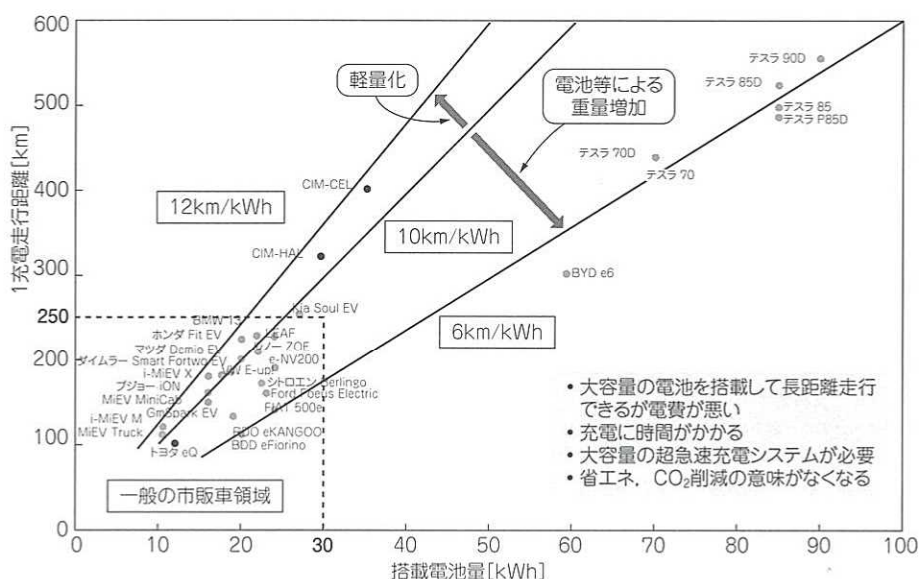


図8 EVの電池搭載量と走行距離の関係
長距離走行には軽量化が電池をたくさん積むしかない

間がかかりそうです。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途上のためです。

そこで、EVや大型電動バスを長距離走行させる究極の充電機能は、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ります。

● 走行中ワイヤレス給電を考えるための基本パラメータ

高速道路を100km/hで走行中の4人乗り乗用車の動力は道路勾配が0%において15kW程度、マイクロバスで50kW程度、勾配が3%になるとそれぞれ30kW、95kW程度になると算定されます。つまり、道路からの必要供給電力は、重量車まで考えると10～200kW程度になると考えられます。

また、車の最低地上高は軸距によって変わりますが9～16cmで、市販大型トラックの実際の地上高は30cm程度です。走行中給電に求められる伝送電力10～200kWで伝送距離9～30cmの範囲を図6に示しています。

これを見ると、磁界結合型と呼ばれる電磁誘導式と磁界共振式で対応できることが分かります。ただ、条件によっては電波(マイクロ波)式、レーザ式や電界結合式でも走行中給電は可能です。

4. 走行中ワイヤレス給電の変遷

■ 4.1 走行中給電のアイデアは100年以上前から

● 最初は車に搭載できなかった

1894年に米国でMaurice HutinとMaurice Le-Blancによって初めて走行中給電の特許が出されました。が、これは電車を対象にしたもので、実際に製作はされませんでした⁽⁶⁾。

1978年、米ローエンス・パークレイ研究所のJ.G. Bolgerらによって行われたEV用電磁誘導式ワイヤレス給電システムの実験が走行中ワイヤレス給電開発の始まりと言えます。20kWの出力を幅60cm、長さ1.52mのピックアップに伝送できましたが、使用周波数が180Hzという低周波のため伝送効率はとても低く、エア・ギャップも1インチと短いため、実用的とは言えません。

当初考えていた走行中給電の実現は難しく、室内で

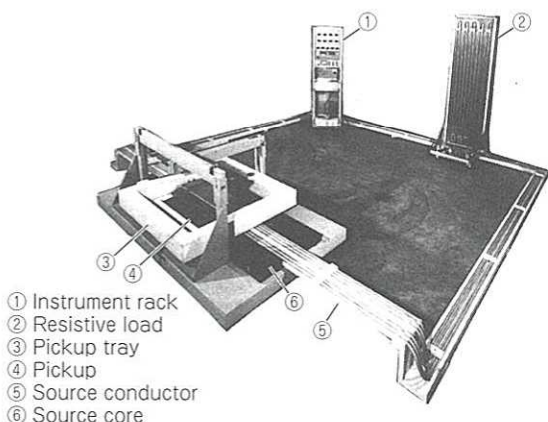


写真8 Bolger達による走行中給電実験システム⁽⁷⁾
インバータ技術の黎明期で野外運用はかなり難しかった

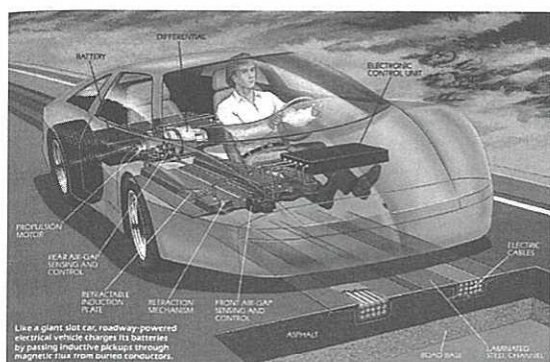


図9 近未来の走行中給電EVの記事⁽⁹⁾
30年掛かって、ようやくこの世界が来る予感

の台上試験のみで終わっています(写真8)⁽⁷⁾。

● 最初に実現した走行中ワイヤレス給電は約40年前
実際に屋外で使われた最初のもは、1980年代に米国で行われたPATH (Partners for Advanced Transit and Highway) プロジェクトになります。400フィートのテスト・コースのうちの200フィートで、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実験システムでした。

道路に1m間隔で埋め込んだ2本の1.8cm径アルミニウム給電線からの周波数400Hzを用いた電磁誘導により、3インチのエア・ギャップを通して、走行中の7.7m長の電動バスの底面に設置された幅1m、長さ4.4mで545kgもの重量のある受電モジュールに6～10kWの電力を供給できました⁽⁸⁾。

● 実用化に至らなかった理由

走行中給電ができたというニュースを受けて、図9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の時代がすぐそこまで近づいていると紹介されました⁽⁹⁾。

しかし、共振回路、特に1次側について十分な検討がなされなかったため、漏れインダクタンスにより電源率が悪く、効率は60%以下でした。さらに、地上から25cm高でのコイルからの漏れ磁束密度も、車内で40 μ T、車外で1,500 μ T、1m高さでもそれぞれ2.5 μ T、100 μ Tと大きく、結局は実用には至りませんでした。

● 人体防護性はどうかだったか...

ちなみに、1998年に制定された国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)における時間的に変化する電界および磁界への公衆の曝露に関する磁束密度のガイドライン値は、 $f = 25 \sim 800$ Hzの周波数範囲では50/f (μ T)と規定されていますが、400Hzでは0.125 μ Tでしかなく、今ではとても許容できるレベルではありませんでした。

なお、コイルの位置ずれを補正するために、車両側



図10 コンクリート舗装路への埋設状況⁽¹⁰⁾

不要な電磁放射を避けるため、上に車体がないコイルには電流を流さない

に油圧式ピックアップ支持装置が搭載されています。地面に埋め込まれた信号線からの信号をトレースして、左右方向に20cm、上下方向に10cm動かせる。最適位置の25mm以内になるよう位置合わせができるシステムでした⁽⁸⁾。

■ 4.2 電磁放射との戦い

● 不要な電磁波を出さない方式が2012年に

PATHプロジェクトの結果から、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ました。その対策として、いろいろな方式が検討されました。

ボンバルディア社は、独ファーレ (Vahle) 社の電磁誘導式ワイヤレス給電システムに、自社開発のPRIMOVE Technologyと呼ぶ車両が上に来た送電コイルにだけ電流を流すスイッチング技術を織り込んだ走行中給電システムを開発しました。

● ベルギーでの実験

ボンバルディア社は、2012年にFlanders' DRIVE research projectにおいて、ベルギー・ロンメル市の0.62kmの道路に125mにわたってこのコイルを埋め込んで、自社の12m長MITRAC e-busへの走行中給電実証を行いました。10kVの商用電源ラインから、高周波電源装置により出力200kW、周波数20kHzにして送電コイルに供給、2m×1mサイズを受電コイルで80kWを受電、60kWhの搭載電池を充電しました。

地上の送電コイルは車体長より短い8.1m長さに区切られ、PRIMOVE技術により車体の下にあるコイル以外のコイルへの電力をカットすることで漏洩電磁波の影響を最小限化していて、磁束密度はEU基準に適合していました。

おのおの送電コイルの脇に沿って車両検知線を設置し、コイルへの給電のスイッチング・タイミング信号を送出しています(図10)。実用化を目指し、送電

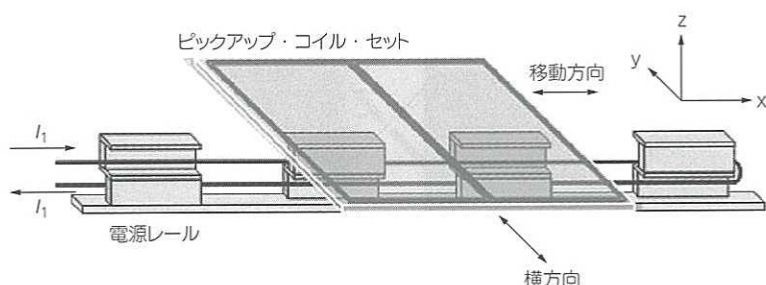


図11 KAISTのS字型コア⁽¹¹⁾

水平に置くコイルを縦にすることで、道路の開削寸法を小さくしている

コイルを埋設した道路の舗装材の効果を見るために、2カ所でコンクリートとアスファルトをそれぞれ敷き詰めて、実験を行いました⁽¹⁰⁾。

● 韓国での実験

韓国科学技術院(KAIST: Korea Advanced Institute of Science and Technology)は、2009年以来、電磁誘導式のOLEV(On-Line Electric Vehicle)と呼ぶ走行中給電システムについて研究を進め、Segment methodと呼んでいるPRIMOVE技術に似たコイルのスイッチングにより電磁放射を少なくしたシステムを開発しました。

キャンパス内シャトル用の電動バスやYeosu(麗水)市でのExpo 2012で、電動バスに搭載して実績を積み、2013年7月からDaejeon(大田)市の東90kmにあるGumi(亀尾)市で、24kmのルートの両端のターミナルで、静止中充電、途中の4カ所でそれぞれ36mの走行中給電の運用を始めています。

周波数20kHz、出力200kWのインバータからの電力を幅80cmの送電コイルから送電し、20cmギャップを通して容量20kW、サイズ170cm×80cmの受電コイル5台で最大100kWを受電、総合効率は約82%です。しかし、運行距離24kmのうちのわずか144mの間で走行中給電を行っているのみで、走行に必要な電力量の大部分は2カ所のターミナルでの静止中充電というのが実情です。



写真9 ユタ州立大での走行中給電⁽¹²⁾

静止型と同じコイルを埋設して、スイッチング回路で切り替えて給電している

開発中の第4世代は、送電コイル設置時間の短縮と建設コストを下げるため、図11のようにS字コアにして給電線を縦に配置することで、ギャップは同じ20cmで効率が80%とやや低くはなるものの、道路の開削幅を10cmほどにしています。同時に電磁波漏洩量を従来の1/5以下に抑えられました⁽¹¹⁾。

■ 4.3 欧米で続々と始まった走行中給電の実証

● ユタ州での実験

2015年に米ユタ州立大学では、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(楕円形)の試験道路を設置し、写真9のような走行中ワイヤレス給電電動バスを運行し、バスと道路設備それぞれの経過観察を行っています。

1/4マイルのテスト・コースの2カ所に120フィート走行中給電コースを設置し、8インチ・ギャップを通して周波数20kHz、最大25kWの電力を効率85%で送電していて、最適点から6インチ離れても定格出力を維持できるようになっています。送電コイル構造は、静止型と同じものがある間隔で並べ、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にしています⁽¹²⁾。

● スウェーデンでの実験

FABRIC(Feasibility analysis and development of on-road charging solutions for future electric vehicles)という、欧州9カ国の25のパートナー組織が2014年から2017年にかけて実施している、走行中給電の大規模統合プロジェクトが下記のように動いています。

2016年6月からスウェーデン南部のセーデルテリエ市において、スウェーデンの自動車メーカーであるスカニア(Scania)社とスウェーデン王立研究所が、ワイヤレス充電式PHVバスの運行を開始しました。

実コンディションでのシステム検証が目的で、本運行に先立って実験されたスカニア製大型電動トラックに搭載された受電コイルは1m×2mの大きさで、出



写真10 大型電動トラックと受電コイル⁽¹³⁾

エア・ギャップが大きいので、大電力受電コイルも小さく感じられる

力が140kWから200kW、ギャップは30cm以上、効率は80～90%でした(写真10)⁽¹³⁾。

● フランスでの実験

フランスのヴェルサイユ近郊のSatoryテスト・コースでクアルコム社と仏ヴェデコム(Vedecom)社が一緒に2016年10月から走行中給電の実験を進めています。

3相200kVAの商用電源から、85kHzで100kWの電力が100mのテスト・コースに印加され、定常で60km/h(最高90km/h以上)で走る2台のEVに50kWずつ供給されています。車の検知信号をトリガにして静止スイッチが送電コイルを切り替えるシステムになっています(写真11)⁽¹⁴⁾。

● スペインでの実験

2015年末からスペインのアンダルシア・エネルギー省がマラガ市において電動バスへの走行中給電、静止中充電などの各種充電システムの検証を行うProject Victoriaを実施しています。

コンソーシアムとしては、アンダルシア・エネルギー省が補助を行い、マラガ市、大手エネルギー会社のEndesa社、情報通信プロバイダーのIsotrol社と運用を行うEmpresa Malagueña de Transportes社それにデータ解析をするマラガ大学が組み、5.3m長のGulliver U520 ESP/LR電動バスを使って走行中給電を実施しています。

充電システムとしては、接触式充電(夜間充電)1カ所、50kW静止型ワイヤレス充電2カ所、走行中ワイヤレス給電1カ所が設置されています。

● イタリアでの実験

図12に示すように、100mの長さの走行中給電道路に0.8m長×0.6m幅の送電コイルが12.5mごとに8基埋設され、50kWインバータから切り替えて給電されるシステムになっています。車両側の受電コイルは、



写真11 乗用車での走行中給電⁽¹⁴⁾

ルノー社のSatoryテスト・コースで同社KANGOOへの走行中給電実験を継続中

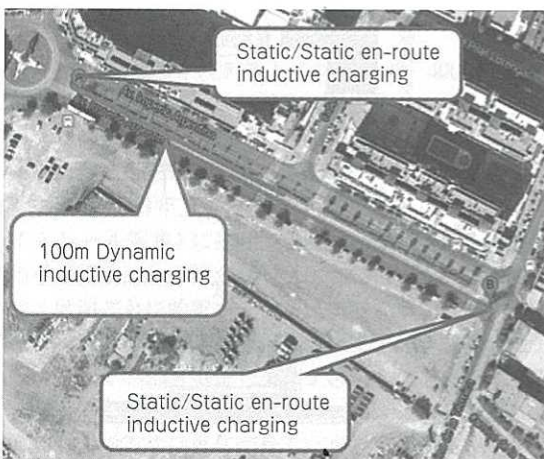


図12 マラガ市のProject Victoria実施図⁽¹⁵⁾

200mのテスト・コースに静止型ワイヤレス給電と走行中給電を設置している

2.5m長×0.6m幅のものを搭載しています⁽¹⁵⁾。

イタリアのトリノ市ではPolitecnico di Torino社とCRF社が周波数150kHz、出力20kWの電力により200mのテスト・コースで、また同市でSaet社が周波数10～150kHzの電力により50mのテスト・コースで走行中給電の実証を計画しています。それが実証される前の2017年7月に、イタリアのトリノ工科大学教授のPaolo GuglielmiとFabio Freschiが率いるエネルギー学科電力工学グループの研究者チームが「Charge While Driving」と呼ばれる高速道路を走行中のEVにワイヤレスで充電するシステムを開発したとのプレス発表がありました。

ピエモンテ州スーザにあるテスト・コースには50基の地上コイルが設置され、実験車両に取り付けられた受電コイルに電力を送っています⁽¹⁶⁾。

■ 4.4 ここでも出遅れる日本勢

日本でも大学が企業と組んで走行中給電の実証が以下のように進められていますが、ミニカーや軽自動車

を使つての短距離コースでの実験のみです。

● 豊橋技術科学大学と大成建設の実験

誘電体であるタイヤやアスファルトを利用した電界結合式ワイヤレス給電システムには、豊橋技術科学大学と大成建設が共同で開発設置した実験システムがあります。

これは図13(a)に示すように、路面下の電極板と10cmのアスファルトを通しタイヤ内のスチール・ベルト間でキャパシタンスを形成し、キャパシタンスを

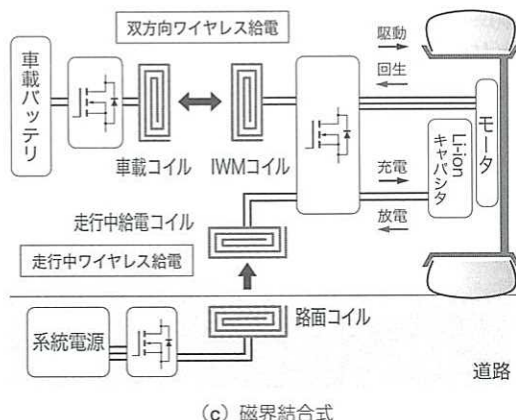
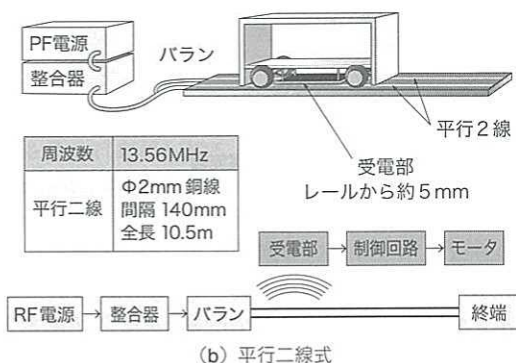
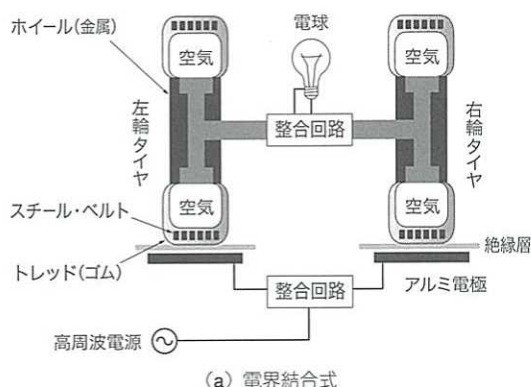


図13 日本で実施されている走行中給電のワイヤレス給電方式 (17)-(19)
標準化が進められている静止型コイルではなく、各種方式、各種コイルを使つての実験的な取組みのみ

通して電極板とスチール・ベルト間に流れる高周波電流で電力伝送するものです。

2016年5月に豊橋技術科学大学のキャンパス内において周波数13.56MHz、出力5kWで送電し、電池を搭載していないトヨタ車体のコムス^{注2}を10km/hの速度で走らせることに成功しました。ただ、車軸や地中電極の絶縁と雨に対する安全性検討はこれからとのことです⁽¹⁷⁾。

● 奈良先端科学技術大学院大学とダイヘンの実験

移動中の機器やEVなどにワイヤレスで給電できる平行二線路を用いたワイヤレス電力伝送方式を奈良先端科学技術大学院大学とダイヘンが共同で開発しています。

この方式は、磁界共鳴方式に基づく線路型ワイヤレス給電技術の一種ですが、送電器としては一般的な送電コイルを多数並べるのではなく、平行に並べた2本の導電線(平行二線路)に13.56MHzの高周波電圧を印加しています。

線路の先はつながっていても離れたままでも良く、受電器の構成は、円形コイルを用いた一般的なものです^[図13(b)]⁽¹⁸⁾。

2016年12月にダイヘンの大分工場内にテスト・コースを作って、トヨタ車体のコムスによる実証実験を予定しています。しかし、総務省からワイヤレス給電システムの設置許可が下りず、半年以上、実験ができない状態になっています。

● 東京大学と東洋電機製造・日本精工の実験

2017年4月に東京大学は東洋電機製造や日本精工と共同で、三菱自動車のi-MiEVをベースとした実験車両に配置したインホイール・モータ(IWM)に道路から直接給電する走行中給電の屋外実車走行に成功しました^[図13(c)]。

道路には、寸法1.0×0.5mの送電コイルを3基×2列配置し、ギャップ10cmで前二輪のIWMの下に配置した受電コイルに85kHzの周波数で電力を送り、約15km/hのスピードで走行できることを確認しています。路面から8.2kWを送り、2基の受電コイルで7.4kWの電力を受け取れました。

IWMの最大出力は12kWで、全タイヤに装着すれば市販EVと同等の性能になるとのことです⁽¹⁹⁾。

● 海外と日本の差は…

海外の実証実験では乗用車、バス、トラックなどに通常の静止充電用受電コイルを搭載して、それへの給電を行っています。EVの標準化が決まり、オプショ

注2: コムスは、トヨタ車体が開発・販売している1人乗りの超小型EVで、道路運送車両法上は第1種原動機付自転車(四輪)、道路交通法上は普通自動車となる(運転には普通自動車運転免許が必要)。



写真12 Scaniaの接触式走行中給電 (20)
トロリーバスよりいかめしいパンタグラフ・トラック



写真13 ボルボ社のSlide Inシステム (21)
雨の日に他の車や二輪車が電極上でスリップするかも

ンでもワイヤレス給電システムが搭載されればいつでも走行中給電に向かえる体制になっています。

しかし、日本では自動車会社などは全く手を出しておらず、大学での独自の研究実験が主で、この分野でも日本は後れを取っていると思います。

■ 4.5 その他の走行中給電システム

● スウェーデンのパンタグラフ接触式給電方式

ワイヤレス給電ではありませんが、パンタグラフなどによる接触式走行中給電システムの最新動向について記述しておきます。

パンタグラフ接触式は、電車やトロリーバスで古くから見られます。2016年6月にスウェーデン中部のイエヴレ市で片側2車線の公道のうち外側の1車線の上に電力を供給する2kmの架線が張られ、スカニア製HVトラックによる運用が始まりました(写真12)。

パンタグラフが架線から外れても、容量5kWhのリチウムイオン電池に充電した電力を使いながら最長3kmの走行が可能で、その距離を超えると通常のエンジンによるハイブリット走行となります。電力関連の技術は独シーメンス社が開発しています(20)。

● スウェーデンのスライド・イン式の給電システム

2013年5月、ボルボ(Volvo)社はスウェーデンの

ヨーテボリ市近くのテスト・コースで、400mの長さで道路面に敷設した給電線から電動トラックへ接触給電するスライド・イン(Slide In)と呼ぶシステムのデモを公開しました(写真13)。

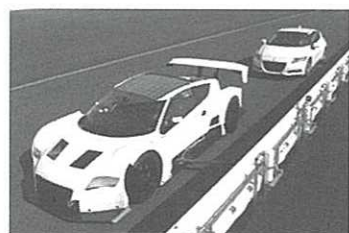
これは2003年、フランス・ボルドー市のLRT(ライトレール電車)に採用されたフランスのAlstom社の子会社Innorail社が開発した地表集電方式と同様に、区間ごとに給電ゾーンを区切って車がない場所では給電しない方式を採用しています。つまり、地上敷設されていても感電しないシステムになっているのです(21)。

これらの方式は車体が長く、また車高の高いバスやトラック、トレーラなどの大型車には適用できますが、乗用型EVでの運用が難しく、限定された区間での、限定された車両への適用しか考えられません。

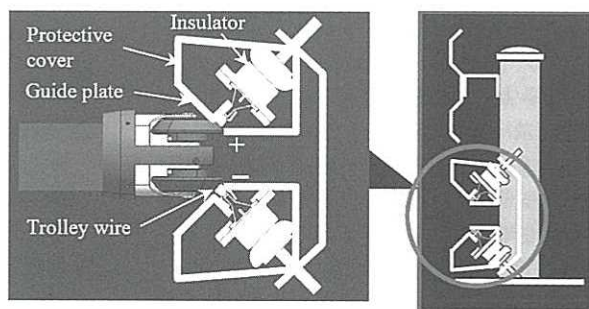
● ホンダのダイナミック・チャージ・システム

2017年、本田技術研究所は自動車技術会春季大会で「ダイナミック・チャージ・システム」と呼ぶ接触式走行中給電システムを発表しています(図14)。

これは充電時にダイナミック・チャージ・レーンにおいて、車の床下に格納された集電アームをスイングさせてガードレールに設置された給電トロリー線に接触させて電力を受け取るというものです。車とガード



(a) 充電構想図



(b) 集電メカニズム

図14 ホンダのダイナミック・チャージ・システム (22)

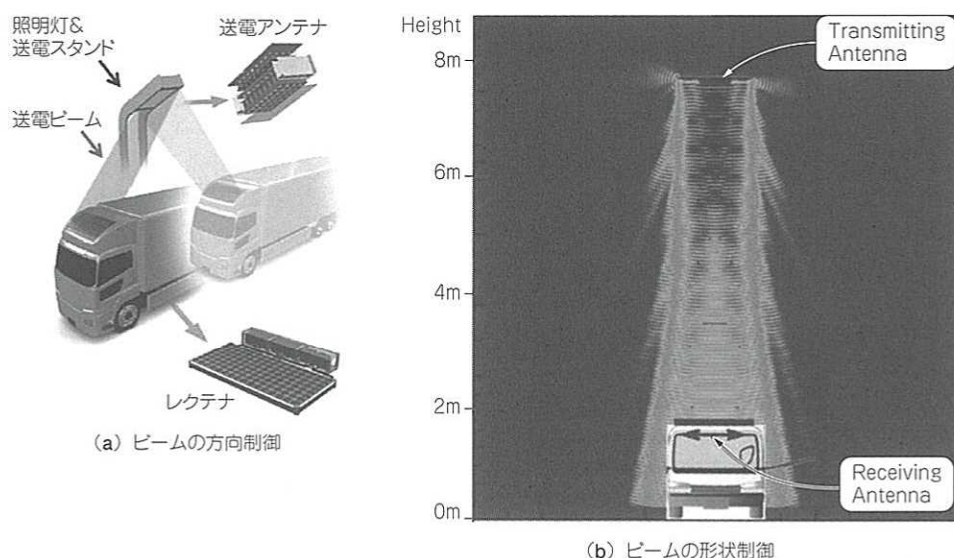


図15 マイクロ波式走行中給電システムの構成図 (23) (24)

レール間距離0.1～1.3m、車速100km/hで70秒間(距離にして2km程度)充電することで、50kmの走行を目標にしています。すなわち高速道路の50kmごとに2km設置(充電距離割合は25:1)するだけで、停止中の充電なしで走り続けられることになります。

送電側はガードレールに取り付けられた1対のトロリー線電極にDC750V/750kWを印加します。充電側は集電アームとその先端のローラー状の1対の集電電極およびスイング装置の構成です[同図(b)]。実証に向けての台上試験で450kWの電力が得られています。ただ、車両により異なる車高での充電対応については言及がなく、大きな課題と思われます(22)。

■ 4.6 マイクロ波による追尾式走行中給電

● フェーズド・アレイ・アンテナ機能で追尾する

無線式には、複数のアンテナ素子から放射されるマイクロ波の振幅と位相を制御、空間合成して任意のビーム形状を形成できるフェーズド・アレイ・アンテナ機能、およびマイクロ波ビームの送電方向を示す案内信号により任意の方向にビームを向けられる機能があります。

この任意のビーム方向を制御できる機能を使用すると、図15(a)に示す照明灯のように、空中に設置したマイクロ波送電アンテナから走行中のトラックの動きに合わせてトラックの上部に設置したレクテナに連続して給電できます。

また、ビーム形状も任意に絞れるため図15(b)に示すように、レクテナの上にだけビームを絞って当てるシステムも構築できます。これにより、電磁界結合式の走行中給電における給電コイルを道路面上に設置

する問題点を克服できる可能性があります。

● 課題は人体に対する影響と効率

しかし、とても高い高周波を扱うため、デバイス損失が大きく全体効率が低くなるという課題と、人体への電磁放射の安全性検証の問題があり、まだ電波暗室内での実験レベルです(23)(24)。

5. 走行中ワイヤレス給電の課題

● 電磁放射からは逃れられない?

マイクロ波給電の課題として、人体の影響について述べましたが、この方式だけの問題ではありません。

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というメリットの反面、空間に放出される電磁界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、電磁両立性(EMC: Electromagnetic compatibility)の確立が課題です。EMCは狭義には無線通信や電子機器への干渉の問題ですが、広義には人体への影響の問題も含まれます。

■ 5.1 不要放射の課題

● 走行中給電では完全なシールドが難しい

静止中の充電で送受電コイルをしっかりと正対させると、車体がシールドになって外部への電磁放射をほとんど問題のないレベルに落とせます。しかし、走行中給電では送電コイルの上を車体が移動し、大きなシールド効果が期待できません。

● スイッチング制御で対応しても…

米国のPATHプロジェクトでは、車体寸法に対し

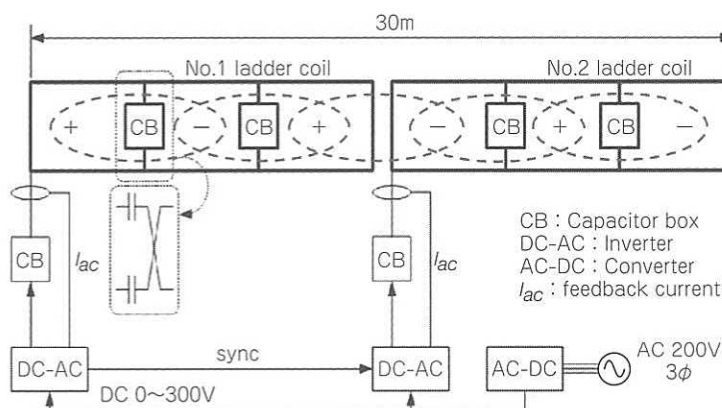


図16 昭和飛行機工業の送電コイル構成 (25)
クロスポイントで隣り合うコイルの磁界は逆方向で双極子を形成している

とても長いアンテナ状のコイルのため、とても大きな電磁漏洩を生じました。そこで、PRIMOVE TechnologyやSegment methodでは、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が考案されました。

しかし、ボンバルディア社の送電コイルの長さは8.1mで、車体長12mよりは短くなっていますが、この上を100km/hで通過すると時間は0.3秒ほどしか掛かりません。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ます。

このような場合には、車体が載っていないコイルからの電磁漏洩が発生します。

● コイルの構造で改善する

昭和飛行機工業はこれを解消する目的で、図16に示すように、長いコイルを5mほどの区間ごとに偶数回180°折り曲げることににより、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合って電磁漏洩が少なくなる方法を開発しています (25)。

● 走行給電の測定方法の確立も重要

そして走行中給電における不要放射電磁界を計測する必要があります。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め、車両を走行させながらの測定は困難です。そこで、新しい測定方法の確立、規格化が必要とされています (26)。

■ 5.2 耐久性能の課題

● 道路上設置と耐久性能の標準化は

ワイヤレス給電の送電コイルを公道上に設置するにあたっての耐荷重性能として、EVではIEC61980のPart3において5,000 ± 250N、通過する車の速度を8 ± 2km/hとする規格化が進められています (27)。

一方、バスは、まだ使用周波数帯をどうするかという入り口の段階で、耐荷重等の議論には至っていません。

そこで、国内では、コイル全面を樹脂コンクリートで覆うなどして、T10クラス対応、すなわち軸重10トン、輪重5トンに道路の傾斜による偏りを考慮して6トン以上の耐荷重対策を施したコイルとしています。

欧州ではIPT Technology社もボンバルディア社も同様の6トン以上の耐荷重としています。中国ZTE社はT25クラスの適用で13トンの耐荷重にしています。

しかしながら、これらは静止中給電において車が低速で送電コイル上に乗り上げることを想定している場合であり、走行中給電では他の重量車での動荷重、段差がある場合には衝撃荷重、ブレーキング時を含む耐摩耗性、スリップ特性などの規定が求められます。

● メンテナンス対策も考慮してコンクリート？

道路表層と基層は、舗装打ち替えなどのメンテナンスで、掘削埋め戻しが路盤以下の層よりも頻繁に繰り返されます。そのため、送電コイルを表層や基層に埋設すると、送電コイルの管理に必要な経費がメンテナンス・コストを押し上げることになります。

2013年、国土技術政策総合研究所は大型模型での検討結果から、図17のように送電コイル埋め込み深さを道路メンテナンスの点から最低0.6m、できれば1mと結論付けました (28)。しかし、この寸法+エア・ギャップの距離で電力電送を確保するのは至難です。

また、アスファルト舗装の施工は、碎石を転圧後、150℃前後のアスファルトを引きならしてから、何回も転圧をしています。送電コイルをアスファルト内に設置するとこの熱と転圧に耐えねばなりません。

そこで2016年、高速道路総合技術研究所は路面表面近くに送電コイルを配置するため、図18のように、コイルを入れた収納箱を組み込んだコンクリート・パネルを路盤の上に置き、周囲もコンクリートを打設す

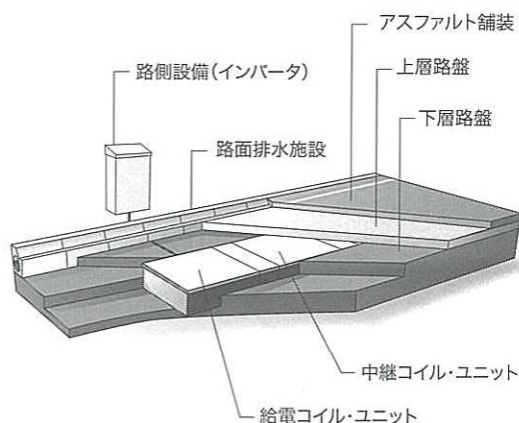


図17 国総研による送電コイル埋設道路構造 (28)
この埋設距離を通してのワイヤレス給電は非常に困難

る方式を発表しています。実験の結果、耐荷重と基準値 ($\mu 80 \geq 35$) を超える滑り抵抗を持つコンクリート材料として超速硬ポリマ・セメント・モルタルを選定しています (29)。

しかしながら最近の高速道路もハイドロブレン現象による事故率減少に効果のある通水性アスファルト舗装が一般的に実施されていて、コンクリート被覆コイルとの経年性不陸による段差発生の問題があります。コイルと道路舗装材との間には無収縮モルタルを流し込んで不陸や剥がれが起きないようにしています。これも、直線では踏み付け荷重で無収縮モルタルにひび割れ等が発生しやすくなるので、新たな工法が必要と考えられます。

■ 5.3 送受電コイルの位置ズレの課題

● 正着性は自動運転で担保できるか？

ワイヤレス給電では、送受電コイル間に位置ズレがあると、出力および効率の低下、電磁漏洩の増加といった問題が生じます。特に走行中給電では、送電コイル上を正確にトレースして走行しないと受電できず、途中で電欠を引き起こすことにもなります。

ボンバルディア社のように車両検知線を設置する、車体搭載カメラと画像処理でコイル位置あるいはラインをトレースするなどが考えられていますが、今、自動車メーカ各社が熱心に取り組んでいる自動運転技術が実用化されれば、一気に解決される可能性があります。

■ 5.4 建設コストについて

● 走行中給電実現のコストはかなり上がる！？

走行中給電を行うには、長い距離にわたって送電コイルを埋め込み、電源装置の設置、外部電源インフラとの接続など、かなりの建設コストが掛かることが考

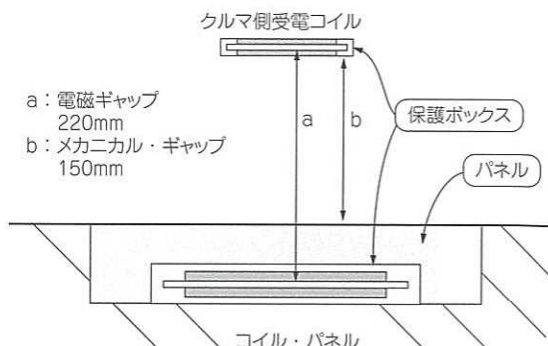


図18 高速道路総合技術研究所の地上コイル構造 (29)
コンクリート・パネル構造を敷設するのは容易だが、道路舗装材との継ぎ目の段差が問題

えられます。

最初に建設コストを算出したのは、米国のPATHプロジェクトでした。100～150万ドル/マイル (現在価値ではなく、現時点での換算レートで0.7～1.0億円/km：以下同様) と示されています (9)。

韓国KAISTも第3世代のDual-type rail方式では106.9万ドル/km (1.18億円/km)、道路開削幅を狭くした第4世代のI-type rail方式では84.852万ドル/km (0.93億円/km) と積算しています (11)。

新しい見積もりでは、英国政府が公営企業ハイウェイ・イングランドとともに実現可能性調査を行った“Electric Highways”の結果をもとに、2015年にTRL社が建設から20年間の費用を現在価値に引き直して算出した数値は、建設費が3.9百万ポンド/km (換算レートで5.5億円/km)、維持管理費が1.2百万ポンド/km (1.7億円/km)、電気代が12百万ポンド/km (16.8億円/km) となっています (13)。

筆者が2010年に行った試算では、条件にもよりますが、2～3億円/kmかかるという結果が得られていて、一般的には1～5億円/kmの費用が必要と思われる。

初期の建設コストを誰が負担し、建設コストと建設コストの3.5倍にもなる維持管理費および電気代を、EV走行するユーザーに課金するとして、納得してもらえる金額になるかどうか非常に疑問です。

6. まとめ

コイル構造の最適化で電磁漏洩が押さえられるようになり、コイルの埋設についてもいろいろな技術が検討・開発されつつあります。

また、受電コイルが地上コイルからずれると受電できなくなる問題も、今、自動車会社が熱心に取り組ん

でいる自動運転技術が実用化されれば解決されると思います。

残る課題は建設コストで、耐久性が充分で簡単に設置できるシステムが開発されれば、近い将来に高速道路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EVや電動バス・トラックを見ることができ、車の電動化の進展を大きく加速させるであろうと考えています。

◆ 参考文献またはURL ◆

- (1) <http://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps-mssps.html>
- (2) 河島信樹他：レーザーエネルギーおよび情報供給システム、近畿大学、特許第4928203号、17-02-2012
- (3) <http://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/264450/101100045/>
- (4) 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 10:30
- (5) <https://www.pluglesspower.com/shop/>
- (6) M. Hutin et al.: Transformer System for Electric Railways, United States Patent Office, No.527, 857, Oct.23, 1894.
- (7) J.G. Bolger et al.: Inductive Power Coupling for an Electric Highway system, 28th IEEE Vehicular Technology Conference (1978)
- (8) 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)
- (9) Popular Mechanics, "Tech Update: Juiced-up roads to power Electric Cars", Hearst Magazines, August 1990, Vol.167, Nr 8, page 17
- (10) C. Koebel: PRIME-Inductive Power Transfer for Public Transportation, ETEV2012 Session2.3(2012)
- (11) C.Rim: The Development and Deployment of On-Line Electric Vehicles(OLEV), IEEE ECCE2013 SS3.2(2013)
- (12) Z. Pantic: Review of Recent Advances in Dynamic and Omnidirectional Wireless Power Transfer, IEEE Industry Applications Society 201, pp.27-36(2016)
- (13) D. Naberezhnykh: Latest Developments in Wireless Power Transfer for EVs, European Electric Vehicle Congress(2015)
- (14) E. Brandt: Qualcomm Demonstrates Road-to-Car Wireless Charging for EVs: May 18, 2107
- (15) H. Bludszweit: Project VICTORIA The first Spanish showcase for DWPT, FABRIC Conference, Brussels, 2 Feb. 2016(2016)
- (16) <https://www.wired.it/lifestyle/mobilita/2017/06/14/prototipo-autostrada-wireless-ricarica-auto-elettriche/>
- (17) 日本経済新聞電子版：EVの屋外走行中給電、豊橋技科大が実験に成功、2016/3/23
- (18) <http://www.synthesis.co.jp/product/wpt/>

- (19) 日経テクノロジーonline：道路からインホイールモーターにワイヤレス給電、東大らのEV、2017/04/07
- (20) <https://www.scania.com/group/en/worlds-first-electric-road-opens-in-sweden/>
- (21) <http://www.businessinsider.com/volvos-electric-road-for-charging-cars-2013-6>
- (22) 田島孝光、田中秀興、野口渉、有賀友恒(本田技術研究所)：走行中給電システムの研究、自動車技術会2017年春季大会学術講演会講演予稿集、No.20175054
- (23) 外村博史：マイクロ波方式のワイヤレス給電、商用車への適用の可能性、自動車技術会ワイヤレス電力伝送技術委員会資料、05-10-2012
- (24) 篠原真毅：A new microwave power supply system, 第3回マイクロ波無線送受電技術ビジネス推進勉強会、01-12-2016
- (25) 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
- (26) 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
- (27) ELECTRIC VEHICLE WIRELESS POWER TRANSFER (WPT) SYSTEMS - Part 3: Specific requirements for the magnetic field wireless power transfer systems: IEC/TS 61980-3 /Ed.1, 2015/8/21
- (28) <http://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bunya/foundation/wtps.html>
- (29) 神谷恵三他：走行中非接触給電システム送電コイルの道路敷設技術開発、自動車技術会、2016年春季大会学術講演会資料、pp.347-351(2016)

筆者紹介

たかはし しゅんすけ
高橋 俊輔

早稲田大学 電動車両研究所



1972年 早稲田大学大学院 理工学研究科卒

1972-2003年 三井造船株式会社 商船の機関部基本設計、双胴船やLNGなどの特殊船舶企画、水中ロボットシステム開発、各種メカトロシステム営業に従事

2003-2013年 昭和飛行機工業株式会社 EV、電池、非接触給電の開発に従事

2003年 学校法人早稲田大学 環境経

合研究センター参与 電動バスの開発に従事

2012年 参与兼客員上級研究員、非接触給電の開発に従事

2017年 招聘研究員、現在に至る

2014-2017年 京都大学 生存圏研究所研究員 EVへの充電技術とその普及のための調査研究に従事

自動車技術会 ワイヤレス電力伝送技術委員会 幹事

電気情報通信学会 無線電力伝送研究委員会 専門委員