

エレクトロニクスシリーズ

# 非接触電力伝送技術の最前線

Frontier of Wireleses  
Electric Power Transmission

監修：松木英敏

Supervisor :Hidetoshi Matsuki

HIGH TECHNOLOGY  
INFORMATION

シーエムシー出版

## 第2章 産業機器応用技術

### 1 電気自動車用非接触充電システム (IPS)

高橋俊輔\*

#### 1.1 電気自動車用充電装置に求められる機能

モータ駆動の電気自動車 (EV) で燃料を搭載して走るハイブリッド車や燃料電池車は別にして、プラグインハイブリッド車 (PHEV) やピュアな電気自動車 (BEV) は、推進エネルギーの電力を外部から給電し搭載電池に蓄えねばならない。この電気エネルギーの補給が、いわゆる充電で、この電力変換装置が充電器である。PHEV や BEV を普及させる上で、家庭や賃貸駐車場のコンセントからの普通充電の他に、ガソリンスタンドのように街中や高速道路のサービスエリアで急速充電できる設備の充実が欠かせない。

普通充電、急速充電のどちらにおいても必要とされる充電装置の基本機能は、

- ◇商用交流電源からの電力を電力変換により直流として出力する
- ◇電池の定格電圧・電流、残存容量といった条件に対応した電圧・電流で電力を供給する
- ◇電池の満充電を検知して充電を停止する

の3項目で、これらの機能を果たすために様々な方式の充電装置が検討され、実用化されている。

電池への充電方法には定電圧充電方式、定電流充電方式、定電流・定電圧充電方式、定電力充電方式、多段充電方式や均等充電方式などがある。一般に電池は充電が進むにつれ電池電圧が上昇する。充電の前半は定電流で定電圧設定値になるまで充電し、後半は自動的に充電電圧を調整、充電電流を減少させていき、最後は電池を満充電状態に回復させる定電流・定電圧充電方式が一般に採用されている。いずれの充電方法においても、過充電、過電流など電池の許容動作範囲を超えないように、充電器の電子回路は設計されている。EV用充電器は、特定の車の電池を充電する場合は設計しやすいが、各種のEVを対象とする場合は、搭載する電池の種類、特性、電圧、電流、容量のほか充電時の残存容量、環境温度などを全て検知して、その電池にとって最適な条件で充電を行わねばならず、電子回路の設計は複雑になるため、電池のマネジメントシステムから最少限の必要項目を取り込んで処理するシステムとならざるを得ない。

商用交流電源については短時間での急速充電を行うような大出力のものは3相の200Vもしくは400V電源を使用し、夜間電力を利用して長時間充電をする普通充電では100Vの家庭用電源

---

\* Shunsuke Takahashi 昭和飛行機工業(株) EVP 事業室

## 非接触電力伝送技術の最前線

の他、一般家庭にも引き込みの容易な単相 200V 電源を用いる。

充電装置の心臓部である電力変換部は、従来は商用交流電源を直流に変換し力率調整用のアクティブフィルタを通したあとインバータで高周波の交流に変え、再び整流して所定電圧で電池に充電する方式が多く、スイッチング回路が直列に 2 回路接続された形のため回路構成が複雑で小型・軽量化や高効率化にも限界があった。最近では商用電源を直流に変換したあと一つのインバータで力率調整と高周波交流への変換を並行して行うタイプが出てきていて、スイッチング回路が 1 回路で済み、低コスト化と小型・軽量化、高効率化が可能となっている。電力変換部は一般的に急速充電方式では車両外に設置され、電力変換後の電力が車両に供給される。一方、普通充電では電力変換部は車両に搭載され、車両には商用交流電源が直接供給されるのが普通である。

充電装置はこの電力変換システムおよび電池を制御するマネジメントシステムの ECU と充電装置の電力変換部の制御用 CPU を結ぶ通信システムから構成されている。

車両外の電源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合せを充電カブラと言ひ、その通電方式から、接触（コンダクティブ）式と非接触（インダクティブ）式に大分される。接触式は充電カブラの通電方法として金属と金属のオーミック接触を用いるものであり、非接触方式とは一般的にはコイルとコイルの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電力伝送するものである。接触式と非接触式の特徴を表 1 に示す。

ところで、充電器と自動車のバッテリーマネジメントシステム間で通電可否、電力量、電源状

表 1 充電装置における接触式と非接触式の特徴

|     | 接触式充電装置   | 非接触式充電装置   |
|-----|---|--|
| 搭載性 | 充電装置は地上設置または車載。<br>別置きの場合車載部品はレセプタクル部のみで良い。                                       | 充電装置は地上設置部と車載部に分割。<br>車載部品の小型軽量化が必要。<br>大電力化が比較的容易。          |
| 操作性 | プラグの抜き差しにある程度の力が必要。<br>コネクタ部の位置合わせに注意が必要。<br>急速充電装置のプラグは大きく重い。<br>充電ケーブルの取り扱いが大変。 | プラグの抜き差しをしなくても良い。<br>コイル部の位置合わせはラフで良い。<br>スイッチを押すだけで充電が開始する。 |
| 信頼性 | 電源部は使用実績が多く、安定している。<br>コネクタの接触部のメンテナンスが必要。  | 金属接点を持たず、電気部品のみなので信頼性が高い。                                    |
| 安全性 | コネクタ部の水分付着に注意が必要。<br>プラグが抜かれたりケーブルの切断と言ったいたずら対策が必要。                               | 雨中の取り扱いも問題ない。<br>電磁波の漏洩防護に注意が必要。<br>充電中にコイル間に金属が入らないよう注意が必要。 |
| 経済性 | 電力変換部の回路構成が 1 回路構成も取れるためコスト低減が可能。   | 電力変換部回路構成が 2 分割となりコスト高<br>操作要員コストは不要。                        |

態などの通信が求められるが、その充電通信プロトコルの標準化が必要である。非接触式充電器ではSAE (Society of Automotive Engineering) の標準としてSAE1850という通信規格をベースにして作られていて、日本ではそれを元にしてJEVS108に制定されている。接触式急速充電ではSAEでは通信ライン用のピンを決めただけでプロトコルの標準化までには至らなかったが、現在の急速充電装置は全てJEVSに準拠して作られているのである程度標準化がなされている。

### 1.2 非接触式給電の方式

自動車等に使用可能な非接触給電方式としては3種類が上げられる。まずは、2007年に米国マサチューセッツ工科大学の研究チームが2m離れた距離で60Wの電力を送ることに成功したとニュース等で報じられた磁場結合共鳴方式のものがある。これは、電力の送信側と受信側を電磁的に同じ周波数で共振させる磁気共鳴の技術を活用していて、コイルの間に障害物があっても利用可能、生体などへの影響も弱いことなど利点も多いが、伝送電力がまだ小さく効率も2mでは40%と低く、今後の開発が待たれる技術である。次は、マイクロ波無線式と呼ばれるもので、これは宇宙空間の太陽発電システムで発電した電気エネルギーをマイクロ波に変換して地上に降ろす電力伝送に用いるべく各社が研究開発を続けていて、自動車用への応用システムでは伝送距離12.5cmで1kWの電力が送れるものが開発中であるが、効率が10%台で低いことと生体などへの影響が懸念されている。3番目が電磁誘導方式で、現在、実用的な出力、効率を有する非接触式充電器はほとんどがこの方式を採用している。

そこで電磁誘導方式の非接触充電装置を取り上げていくが、その基本原理は図1に示す一般的にはトランスと呼ばれる変圧器であり、印加周波数を高周波にすることで1次側と2次側のコア間のギャップを上げたものである。身近な製品としてはSuicaやPASMOに代表されるRFID (Radio Frequency Identification) があるが、自動車等の充電器では小型軽量で、長いギャップ

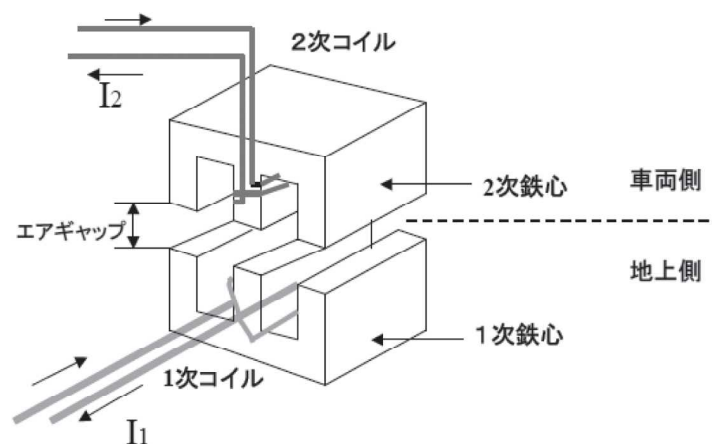


図1 電磁誘導方式の基本原則



長を持ちながら効率の良い大出力伝送能力が求められる。

### 1.3 電気自動車用電磁誘導型非接触式充電装置の事例と技術的な課題

電気自動車用の非接触式充電システムとしては、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ケーブルからの高周波の電磁誘導で走行中の車両に充電するシステムを嚆矢とするが、実験は成功したものの漏れ磁束が大きく実用にはならなかった。1995年フランスのPSA (プジョー/シトロエングループ) が発案したTulip (Transport Urbain, Individuel et Public) 計画でも電磁誘導式の非接触式充電器が使われたが、満充電に4時間が必要でやはり電磁波漏洩がひどかった。1997年フランスの公共交通運営受託会社の一つCGEA社およびルノー社がパリ郊外のサンカンタン・イヴリース市で実験を行ったPraxiteleシステムの構造は床下につけた低周波トランスによる非接触充電であったが、効率が悪く車両の位置決めが難しいという課題が克服できず、運用は中止された。日本では90年代にホンダがツインリンク茂木で非接触充電のデモを一般公開した。その構造は、棒状の分割トランスをロボットアームで車両に差し込むものであったが、製品化には至らなかった。

製品化されたものとしてはGMが開発したMagne Chargeと呼ばれるパドル型電磁誘導式充電器があり、米国では2000年には1000台以上が導入された。これは1993年に豊田自動織機にて国産化されたが、入力単相200V、最大出力が6kW、最大出力電圧430Vと容量が小さく満充電に2時間必要なうえ、図2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まねばならず、コネクション操作が不要という非接触給電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なかった。大電力で地上コイルに跨るだけで容易に充電



図2 パドル型非接触式充電器

できる非接触式充電装置としては図3に示すドイツの Wampfler 社製電磁誘導式電力伝送システム (IPT) が、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) などに採用されている。仕様は入力3相400V、最大出力30kW、最大出力電圧600Vである。しかしながら、このIPTはWEBのようなミニバス以下のサイズの電気自動車に搭載するには、車両サイズに比較して相対的に大きい、重い、効率が悪い、高価である等の大きな改善課題が存在することが明らかになっている。



図3 Wampfler 社製の電磁誘導式充電システム

#### 1.4 電気自動車用非接触充電システム (IPS) の開発内容

IPT の課題を解決すべく、平板コイル間で電動車両への充電を安全・簡便・短時間で行える非接触急速誘導充電装置 (non-contact rapid charging type Inductive Power Supply (IPS) system, IPS) が NEDO からの補助金を得て開発されたので、その概要を以下に示す。

##### 1.4.1 システム構成

この装置は図4のような構成になっていて、高周波電源装置、送電ケーブル、調整用コンデンサ、1次/2次コイル、整流器、地上側/車上側通信装置からなるシステムで、この中の高周波電源装置は、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、方形波を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。

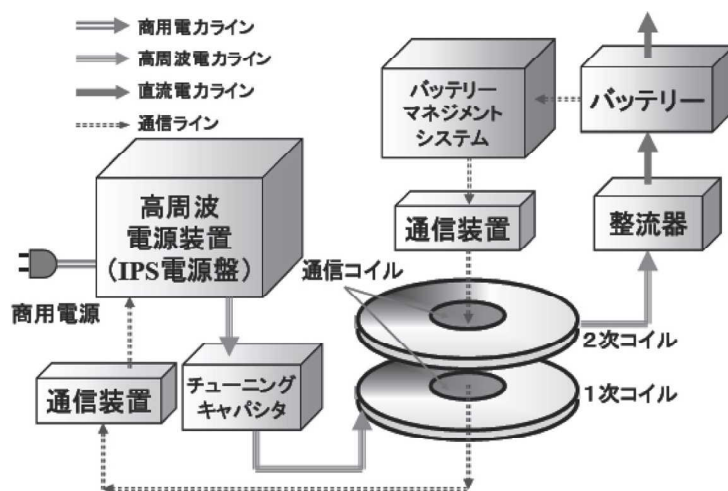


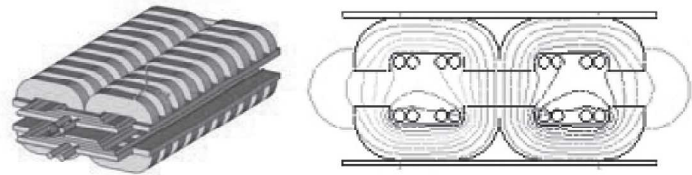
図4 電気自動車用非接触充電システムの構成

同じ構成要素を持つ IPT の各部ごとの損失割合を調査した結果、電源、整流器の損失はパワーエレクトロニクス部分が72%、ケーブル16%、コイル12%であった。パワーエレ部分はスイッチング素子や回路の改善による効率向上、またケーブルやコイルは励磁電流を減らすことにより大幅な改善が見込める。その励磁電流は  $I = V / (2\pi fL)$  の式で得られる。ここで  $I$ : 励磁電流,  $V$ : 電圧,  $f$ : 周波数,  $L$ : インダクタンスである。この式から励磁電流を減らすには高周波数化が効果があることがわかる。またコイルの磁束増加, ターン数増加によるインダクタンスの増加によっても電流を減少できる。コイルの結合係数  $M/L$  の増加も効果があり, これはギャップ漏れ磁束低減の効果もある。これらの改善対策を以下に示す。

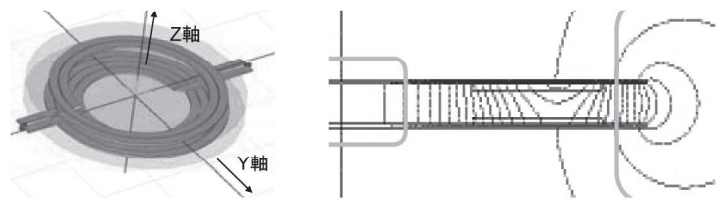
#### 1.4.2 コイル形状

電磁誘導式の非接触給電システムではコイルの開発が重要であり, 2種類の磁心の基本構造について検討した。図5のようにE字コア角型方式は, 一般的な変圧器の形状に似せE字のコアを2個正対させた構造となっている。一方, 平面コア丸型方式は, 薄く広いコアと渦巻き状のコイルからなる構造を有する。これらについて, 結合係数等の電気的特徴比較, ならびに形状寸法等の詳細な比較

##### E字コア角型方式



##### 平面コア丸型方式



(a) 磁心構造

(b) 磁束形状

図5 磁心形状と磁束形状

と, 実機での試験結果を検討した結果, 表2のように結合係数や薄型化性能, 大きなコアギャップが得られることおよびコストの面から, 平面コア丸形の磁心形状を採用することとした。

表2 E字コア角型方式と平面コア丸型方式の比較

|           | E字コア角型方式   | 平面コア丸型方式    |
|-----------|------------|-------------|
| 結合係数      | ○          | ◎           |
| コイル厚さ     | △          | ◎           |
| 平面積       | ○          | △           |
| コアギャップ    | △          | ◎           |
| 効率        | ◎          | ◎           |
| コスト       | △          | ◎           |
| 磁心構造/出力対応 | 出力毎に専用型が必要 | 汎用平板の数で出力対応 |

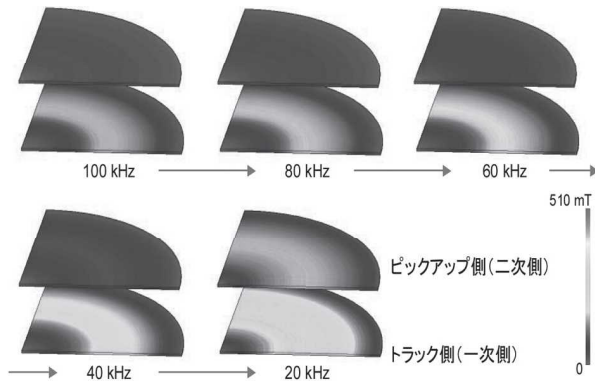


図6 コア内の磁束密度強度分布 (30kW 出力時)

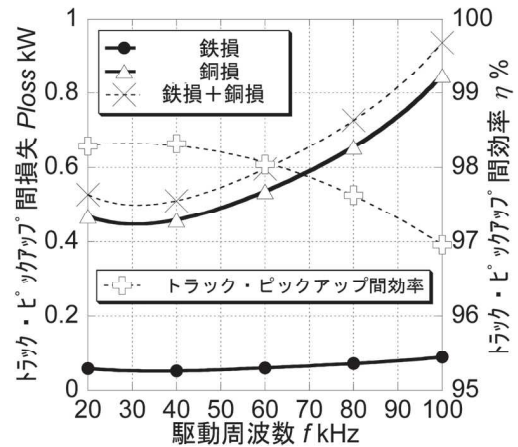


図7 コア損失の周波数依存性

平面コア丸型方式の詳細設計を電磁界解析にて行った。駆動周波数に対するフェライトコア内の磁束密度分布を図6に示す。これより20kHz~100kHzの駆動周波数領域において30kW出力時で一次・二次コアに磁気飽和(使用したフェライトでは約510mT)は生じないことがわかった。さらに図7に示す駆動周波数とコアの鉄損および銅損の関係について検討した結果、鉄損に比べ銅損が支配的であり、駆動周波数を20~40kHzの範囲に設定することが有効と確認できた。この周波数領域における高周波電源用スイッチング素子としてIGBTとMOS-FETが考えられるが、容量等の制約からIGBTの採用となり、作動周波数を大容量型IGBTのほぼ限界付近である20kHz程度とすることにした。次に通信装置を埋め込むコア中央部の最適内径を求めるため、コア内径を変化させた際のフェライトコア内最大磁束密度分布を解析し、コア内径(半径)150mm以下であれば磁気飽和が生じないことを確認した。またコア内径を変化させた際の鉄損と銅損の変化を検討し、内径を大きくしていくと鉄損はほぼ横ばい、銅損は増大することが確認でき、半径が90mm程度までならば一次・二次コイル間効率の低下も小さいことが確認でき、本寸法でくり抜くこととした。車載部の更なる薄型化・軽量化を実現するためにコア薄型化を検討した結果、一次コアの厚さは4.0mm未満で、二次コアの厚さは2.0mm未満で磁気飽和することが確認でき、この厚みで設計可能であることが確認できた。これらの結果から得られた最適コイル形状例を図8に示す。

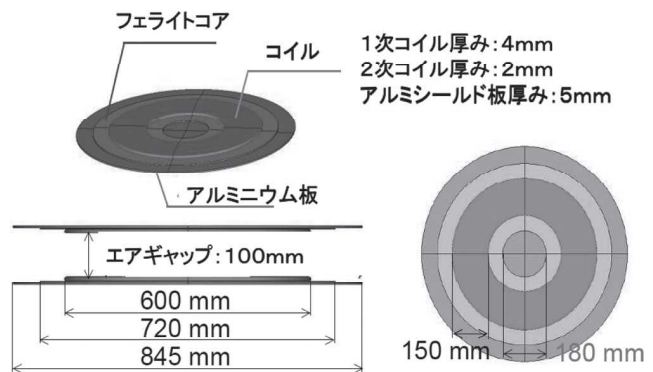


図8 最適一次・二次コイル形状 (30kW 出力用)



### 1.4.3 リッツケーブル

ケーブルに高周波電流を流すと、インピーダンスが増加して流れにくくなるとともにケーブルの表面だけを流れる表皮効果が発生する。インピーダンスの増加はコンデンサを直列もしくは並列に入れて共振回路を形成することにより流れやすくできるが、表皮効果減少のためにはケーブルの表面積を増やす必要がある。IPTのケーブルは70sq.径に0.25φワイヤーを1,440本撚りにしているが、IPSケーブルでは41sq.径に0.1φワイヤー5,250本撚りにすることで100kHzにおいてIPTケーブルの50%以下の抵抗値にすることができた。しかし、80sq.径にして0.1φワイヤーで10,290本撚りまで増やしてみたが、表皮効果の減少はそれほど顕著なものが見られなかった。これは、ケーブル間を同方向に流れる高周波電流が互いに反発し合って流れにくくなる近接効果に依るものと考えられ、12,600本のワイヤーを7分割し、さらに配置を工夫してペア線化をはかった。その結果、IPTでのケーブルの38%以下に抵抗を抑えることができた。

### 1.4.4 通信システム

送電電力の制御は、車上の電池制御システムの要求に従い地上の高周波電源装置内のインバータの方形波出力パルス幅を可変するPWM制御により行っている。IPTでは、電力コイルとは別個に設置した無線もしくは赤外線通信装置で電池制御システムからの要求を受け取り制御を行っている。そのため、外来ノイズによる通信障害が大きな問題となっている。

そこで、IPSでは車載部のコンパクト化を図るために電力コイルの中央部という強電磁場内に設置されても安定して、位置検出と電力制御通信が同時にでき、かつ耐環境性の高い通信システムとして特殊アンテナコイルによる近傍磁界通信方式を開発した。これは8の字巻きアンテナと直交巻きアンテナという2種類のアンテナの感度の零点がずれていることを利用し、2つのアンテナコイルを同心に配置、それぞれのコイルに同じ信号を異なるキャリア周波数で変調を掛けて送り、受信信号をそれぞれバンドパスフィルタを通して復調し、得られた2つの信号でORを取るDual Modulation方式を採用した。この通信装置を使って30kWの定格出力時、ギャップ100mmで地面に水平な方向にアンテナ位置をずらした場合、車の前後進方向55mm、車幅方向120mmずらしても最大100kbpsのデータ通信が可能であるとともに、送受信アンテナのマッチングが取れることで、2つのコイルの中心が合ったということがわかる位置センサーとしても使えることがわかった。

### 1.4.5 試験結果

前記検討結果をもとに30kW出力のIPSを製作した。負荷試験によって得られた総合効率実測値は30kWの定格出力時において92%を達成でき、寸法等の緒元もIPTと比較して薄型化(33mm)、軽量化(35kg)ならびに長ギャップ化(100mm)が得られた。図9のように開発したIPSを先進電動マイクロバスWEB-1に搭載し、各種試験を実施した。

IPS 単体およびバス車載時における漏洩磁界・漏洩電界の程度について、防護指針として定められている総務省ならびに国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）の両値で確認を行った。出力電力が13～20kWという条件下で、総務省の指針値は問題なくクリアしたが、車外のコイル直近ではICNIRPの指針値を上回る結果となった。しかし、コイルから0.5mの位置においては最低でもICNIRPの職業的暴露指針(30.7  $\mu\text{T}$  @ 22kHz)を下回ることが、また、1m離れることにより公衆的暴露指針(6.25  $\mu\text{T}$  @ 22kHz)を下回ることが確認できた。また、客室内ではどの条件においても公衆的暴露指針値を下回ることが確認できた。バスへのIPS設置にあたっては、バス側面においてコイルからの距離が0.5m以上離れることになるため、安全上問題無いものと思われる。なお、同様に漏洩電界についても検討を行ったが、こちらも防護指針を大幅に下回るものであった。



図9 WEB-1 への搭載と地上コイル

実際の走行・充電試験では東京都昭島市の9km/週の周回コースを5回/日、毎回充電ステーションで非接触給電を行い、乗車人員、暖冷房などの負荷条件を変えて運用を行った結果、僅か18.9kWhという少量の電池で充電率（SOC）を45～70%程度に維持させながら走行できることが確認された。途中で急速充電を行わず、1日分の走行距離を同じようなSOC範囲で運行させようとする4倍近い量の電池を搭載せねばならず、WEBの開発コンセプトであるIPSを搭載し、路線1往復毎にターミナルで急速充電を行うことで電池搭載量を必要最小限に削減、大幅な車重減による走行エネルギー削減と初期コストを低減することが証左された。

### 1.5 電気自動車用非接触充電システムの今後の展開

平成17年から2年間、NEDOの先導研究開発を行って、図10の30kW（ギャップ100mm）のマイクロバス用と1kW（ギャップ30mm）の超小型EV用を開発した。この先導研究を受け平成19年から更に2年間、NEDOの実用化研究を行い、プラグインハイブリッド乗用車や普通サイズEV用の10kW型（ギャップ50mm）、IPTバスやトラックと言った大型車両用の60kW型（ギャップ150mm）とLRTや新交通システム用の150kW型（ギャップ150mm）などを実用に供するレベルまで開発した。現在、これらの各種非接触給電システムを耐候、耐荷重型のものに作り上げ軽自動車からバスのサイズのものにそれぞれ搭載し、各地の低炭素やコミュニティ

非接触電力伝送技術の最前線

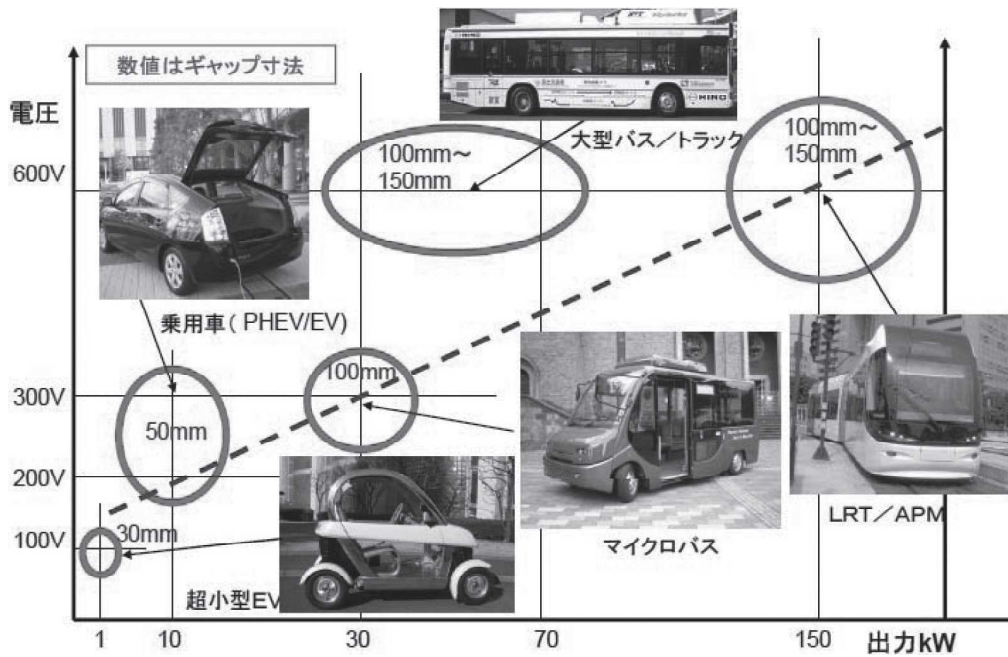


図 10 非接触充電システムの展開

バスの実証実験プログラムに提供して検証を続けている。

電気機器やデバイスの性能向上につれ接触式急速充電器や非接触式充電器が安価に手に入れられるようになってきたが、普及に向けてその構造と通信システムでの早急な標準化が必要である。充電装置が普及しないからEVが普及しない、逆にEVが普及しないから充電装置が普及しないという難しい問題を、充電装置においてまず、どう解決するかがEVの普及にかかっていると言える。