

地球環境シリーズ

電気自動車のための ワイヤレス給電とインフラ構築

Wireless Power Transfer and
Infrastructure Construction for Electric Vehicles

監修：堀 洋一，横井行雄

Supervisor : Yoichi Hori, Yukio Yokoi

HIGH TECHNOLOGY

INFORMATION

シーエムシー出版

電気自動車のための ワイヤレス給電とインフラ構築

**Wireless Power Transfer and
Infrastructure Construction for Electric Vehicles**

監修：堀 洋一，横井行雄

Supervisor : Yoichi Hori, Yukio Yokoi

シーエムシー出版

まえがき

電気自動車（EV）の普及という面で 2010 年は、三菱自動車の「i-MiEV」の一般向け販売に始まり、年末には、日産の「LEAF」の発売、米国での Ford「VOLT」の発売開始が相次ぎ、一方中国においては上海万博でキャパシタ・Li 電池バスの運行が行われ、本格的な EV 時代の幕開けの様相を呈した年になった。

一方で電気自動車の普及に向けての課題として、電力をどのような方法で供給し、貯め、有効に使うかという点が挙げられるが、最大の問題は航続距離の短さにある。そして、高性能電池を制するものが EV 化したクルマ社会を制するとまで言われる。しかし、500km を走る高性能電池は本当に必要だろうか。電気自動車が大きなエネルギーを抱えて走るのでは、そのコンセプトはガソリン車と同じである。高性能電池開発に注がれている情熱の数パーセントを使い、電力インフラから直接エネルギーを供給する最後の数メートルに着目すれば、未来のクルマは電池のもつ様々なデメリットから解放されるであろう。

将来のクルマが電気モータで動き電力インフラにつながることは確実である。もし電気自動車が電力インフラから直接エネルギーをもらうことができれば、航続距離とは「電力インフラから離れても安心できる距離」ていどの意味しかもたなくなる。そして少なくとも都市部では、「ちょこちょこ充電しながら走る電車のようなクルマ」が普通になり、そこでは「電池からキャパシタ」への移行と「ワイヤレス給電」が実現される。さらに、電気モータで走るクルマでは、モータの優れた制御性を生かした「モーション制御」が当たり前のように適用され、クルマの使うエネルギーはさらに少なくなり環境負荷を低減させるだろう。

電力は現状ではケーブルを介して電力インフラから供給を受けているが、ここ数年の間にワイヤレス給電技術開発が格段の進展を見ている。小型機器については既に WPC（Wireless Power Consortium）が 5 W 以下の給電についての規格を公開した。一方で、電気自動車への給電については本年から自動車技術会に「ワイヤレス給電システム技術部門委員会」（委員長 堀洋一）が設置されオールジャパンのメンバーを網羅し活動を開始している。

このような時期に、ワイヤレス給電から電気自動車の普及に向けたインフラ構築、さらには低炭素な未来社会まで網羅した本書が発刊されるのは時宜を得たものである。最後にそのようなタイミングで執筆していただいた諸氏の努力に感謝すると共に、この分野に関心を持たれる諸兄のお役に立てれば幸いである。

2011 年 3 月

東京大学
堀 洋一
長野日本無線㈱
横井行雄

監修者

堀 洋 一	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授
横 井 行 雄	長野日本無線㈱

執筆者一覧

横 井 行 雄	長野日本無線㈱
松 木 英 敏	東北大学大学院 医工学研究科 医工学専攻 教授
小 紫 公 也	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授
居 村 岳 広	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 助教
高 橋 俊 輔	昭和飛行機工業㈱ 特殊車両総括部 EVP 事業室 技師長
阿 部 茂	埼玉大学 工学部 電気電子システム工学科 教授
安 間 健 一	三菱重工業㈱ 名古屋航空宇宙システム製作所 宇宙機器技術部 電子 装備設計課 主席
篠 原 真 毅	京都大学 生存圏研究所 教授
竹 野 和 彦	㈱NTT ドコモ 先進技術研究所 環境技術研究グループ 主幹研究員
安 倍 秀 明	パナソニック電工㈱ 先行技術開発研究所 参事
佐 藤 文 博	東北大学大学院 工学研究科 電気・通信工学専攻 准教授
黒 田 直 祐	㈱フィリップス エレクトロニクス ジャパン 知的財産・システム標準 本部 システム標準部 部長
多 氣 昌 生	首都大学東京大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻 教授

丸 田	理	東京電力(株) 技術開発研究所 電動推進 G 主任研究員
岩 坪	整	日本ユニシス(株) エネルギー事業部 営業三部 次世代ビジネスグループ 担当課長
鈴 木	匠	JX 日鉱日石エネルギー(株) 小売販売本部 リテール販売部 部長
近 藤	信 幸	(株)アルバック カスタマーズサポート事業部 LC グリッド部 設計施工課 課長
青 木	新二郎	パーク 2 4 (株) パーキング総合研究所 所長
藤 川	博 康	三菱重工パーキング(株) 設計部 技術開発課
福 田	博 文	KDDI(株) ソリューション第 1 営業本部 電力営業部 2 グループ 課長補佐
高 山	光 正	オリックス自動車(株) カーシェアリング企画部 部長
古 川	信 也	三菱自動車工業(株) 開発本部 EV・パワートレインシステム技術部 エキスパート
朝 倉	吉 隆	トヨタ自動車(株) HV システム開発統括部 企画総括室 主査
水 口	雅 晴	大丸有地区・周辺地区環境交通推進協議会 副会長；三菱地所(株) 都市計画事業室 副室長・副理事
斉 藤	仁 司	神奈川県 環境農政局環境部 交通環境課 電気自動車グループ
宇佐美	由 紀	豊田市 都市整備部 交通政策課 係長
荻 本	和 彦	東京大学 生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター 特任教授
田 中	謙 司	東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻 助教
須 田	義 大	東京大学 生産技術研究所 先進モビリティ研究センター 教授

目 次

総論—電気自動車普及に向けた動き— 横井行雄

【第 I 編 ワイヤレス給電】

序論—ワイヤレス給電— 松木英敏

〈基礎〉

第 1 章 ワイヤレス給電の基礎 小紫公也

1 はじめに.....7	3.3 障害物と漏れ電磁界15
2 ギャップを有する電磁誘導給電.....8	4 電磁ビーム伝送給電15
3 磁気共鳴給電11	4.1 ガウシアンビーム15
3.1 基礎原理とインピーダンス整合 ...11	4.2 マイクロ波ビーム給電16
3.2 高 Q 値コイル14	4.3 レーザービーム給電18

〈電気自動車への応用〉

第 2 章 電気自動車とワイヤレス給電および電磁共鳴技術 居村岳広

1 電気自動車へのワイヤレス給電の需要21	課題24
2 電気自動車へのワイヤレス給電の発展22	4 電磁共鳴技術24
3 電気自動車へのワイヤレス給電の技術的	4.1 磁界共鳴技術の基本特性24
	4.2 磁界共鳴技術の等価回路30
	4.3 中継コイルと等価回路33

第 3 章 磁界共鳴方式によるワイヤレス給電 横井行雄

1 はじめに37	2 ワイヤレス給電方式の位置づけ38
----------------	--------------------------

第4章 電磁誘導方式による電気自動車向け ワイヤレス給電

高橋俊輔*

1 はじめに

充電装置において、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み合わせを、充電カプラという。この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、通電方法として金属同士のオーミック接触を用いて、電氣的に電力電送するものであり、非接触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電力伝送するものである。

EV に使用可能と考えられるワイヤレス給電システムとしては、①マイクロ波方式、②電磁誘導方式、③磁界共鳴方式の3種類が挙げられるが、出力、効率の点から現状において実用に最も近いシステムは電磁誘導方式である。

2 電磁誘導方式の原理

1831年に英国の Michael Faraday 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が生じるという電磁誘導現象を発見し、変圧器の基本となる原理であるファラデーの電磁誘導の法則を導き出した。1836年にアイルランドの Nicholas Callan が誘導コイルを発明し、これが変圧器として用いられる初めてのものとなった。それ以降、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いろいろ研究されたが、大電力半導体デバイスの普及により、安価で小型、高性能なインバータを容易に入手できるようになった1980年頃から、電磁誘導方式のワイヤレス給電システムの本格的な研究が始まった。EV 関連の研究は1986年、Lashkari らが EV への給電システム、1995年には Klontz らが鉱山機械への応用を提案した。2008年に紙屋らは EV への充電システムを、2010年に保田らも EV 用ワイヤレス給電システムを発表した。

電磁誘導方式のワイヤレス給電には、静止型（図1 a）と移動型（図1 b）の2つの方式が

* Shunsuke Takahashi 昭和飛行機工業(株) 特殊車両総括部 EVP 事業室 技師長

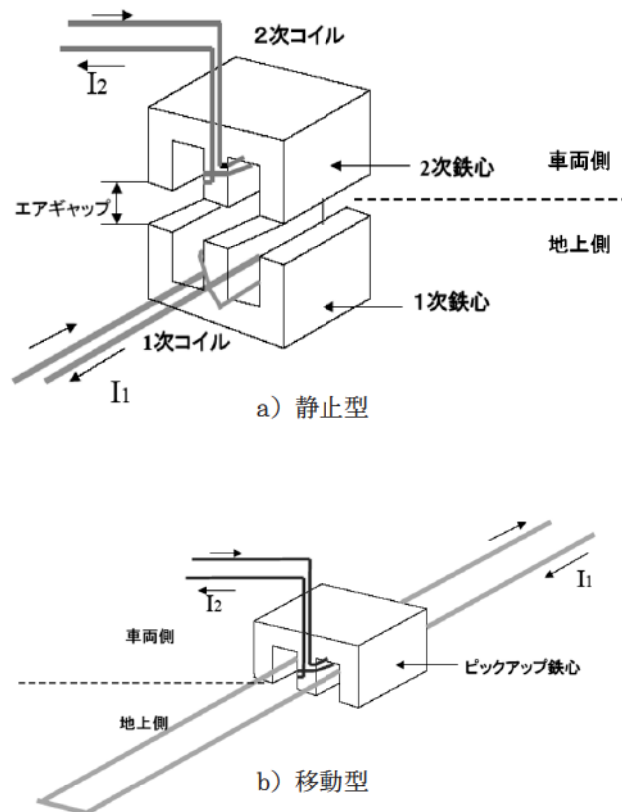


図1 電磁誘導式非接触給電の原理

ある。静止型はヒゲ剃りなどの家電品やEV用として使われるように、給電中は1次側コイルの直上にギャップを隔てて2次側コイルを置いておく必要があり、移動体側に搭載した電池に電気エネルギーを充電する。移動型は、静止型の1次側コイルのコアを取り去り、コイルをレール状に伸ばして給電線としたもので、ピックアップが給電線上にある限りは搬送車の移動中にも給電が可能である。

いずれの方式も、基本的にはコア間に大きなギャップ長のある変圧器である。変圧器のように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し、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。理想的な変圧器の磁束は全て主磁束で構成され、漏れ磁束がない。この場合の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である。しかし、非接触にするための大きなギャップ長により磁路が切れていて、漏れ磁束があるために結合係数は1よりも小さくなる。この漏れ磁束が変圧器の1次側、2次側にそれぞれ直列に接続された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。これが漏れインダクタンスである。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。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といえることができる。そ

ここで、電力を効率よく伝達するために、1次側の印加周波数を10kHz程度から数100kHzの範囲で最適な値の高周波にして2次誘起電圧を上げたり、漏れインダクタンスの補償のために、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用いる。1次コイルから出る磁束が2次コイルに鎖交しやすくするため、1次コイルに流す電流を低減させるため、コアとして磁性体を使用されるが、周波数が高いためフェライトを用いる。また周波数が高くなると、導線の表面近くしか電流が流れない表皮効果が現れる。電流が導体表面に集まって導体の中心部に電流が流れないと、導体の有効断面積が小さくなって導体抵抗が増加、損失となる。そこで、コイル抵抗が増大するのを防ぐため、径を細くした素線を絶縁して、多数撚り合わせ、導体の表面積を増やしたリッツケーブルを使用する。

3 電磁誘導方式の開発

実際に使われたEV用のワイヤレス給電システムとしては、1980年代の米国でのPATH (Partners for Advanced Transit and Highways) 計画で、図1b)の原理を使い、道路に埋め込んだケーブルからの電磁誘導により、走行中の車両に給電するシステムが最初のものであるが、実験は成功したものの漏れ磁束が大きかった。1995年仏国のPSA (Peugeot/Citroen グループ) が発案したTulip (Transport Urbain, Individuel et Public) 計画では図1a)の原理に従い、図2に示すように、地上に設置した送電コイル上にEVが跨り、床面に設置した受電コイルとの間で給電すると共に、通信システムで充電制御を行うという、現在のものとほとんど変わらないシステムが採用されたが、満充電に4時間が必要であった¹⁾。1997年仏国のCGEA社およびRenault社が、サンカンタン・イヴリーヌ市で実験を行ったPraxiteleシステムの構造は、高周波による電磁波漏洩問題から逃れるために床下につけた低周波トランスによるワイヤレス給電であったが、効率が悪く、車両の位置決めが難しいという課題があった。日本では1990年代に、本田技研工業がツインリンク茂木で、ICVS-シティパル用の自動充電ターミナルにおけるワイヤレス給電システムを一般公開した。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、米国GM社が開発したMagne Chargeと呼ばれるパドル型のもがあり、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。入力単相200V、周波数130kHz~360kHz、最大出力が6kWであったが、図3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、接続操作が不要というワイヤレス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。

電気自動車のためのワイヤレス給電とインフラ構築

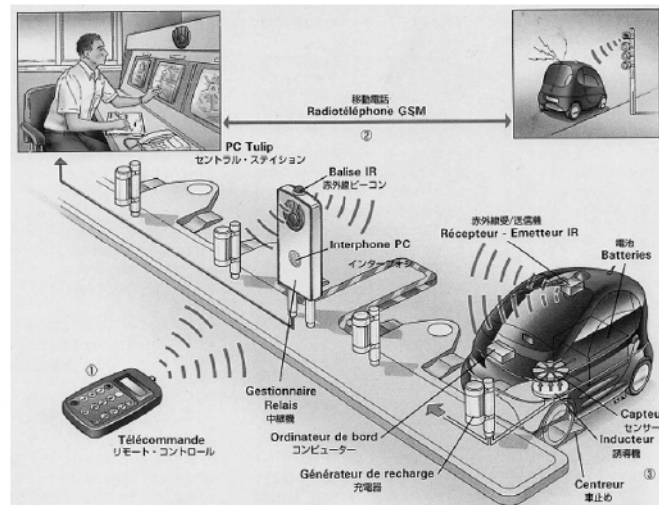


図2 Tulip 計画の非接触充電システム
(出典：カースタイリング別冊 NCV21)



図3 Magne Charge による充電の状況

大電力で、地上コイルに跨るだけで容易に給電できるものとしては図4に示すドイツ Wampfler 社のワイヤレス給電システム (IPT) があり、欧州ではトリノ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-1) などに採用された。仕様は入力 3 相 400V、最大出力 30kW である。WEB-1 では、必要最小限の容量の電池を搭載し、短いサイクルで充電を繰り返しながら使う、という考え方が導入された。これにより、高価な電池の搭載量が減るため、初期費用が大きく下がることになる。また、重い電池が減るため車両重量が軽くなり、内燃機関車の燃費に相当する電費が良くなるとともに、電費向上の分だけ Well to Wheel ベースの CO₂ 排出量も減少する。しかしながら良いことばかりではなく、電池の絶対搭載量が減るので 1 充電走行距離は短くなる。それを、充電操作が安全で、ケーブルの接続に時間の掛からないワイヤレス給電で短時間充電を

第4章 電磁誘導方式による電気自動車向けワイヤレス給電

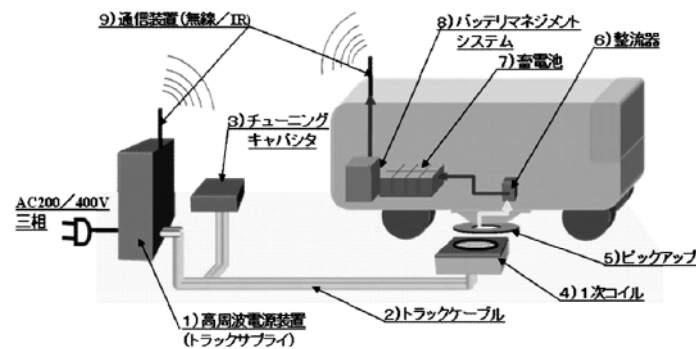


図4 Wampfler 社製電磁誘導式非接触給電システム

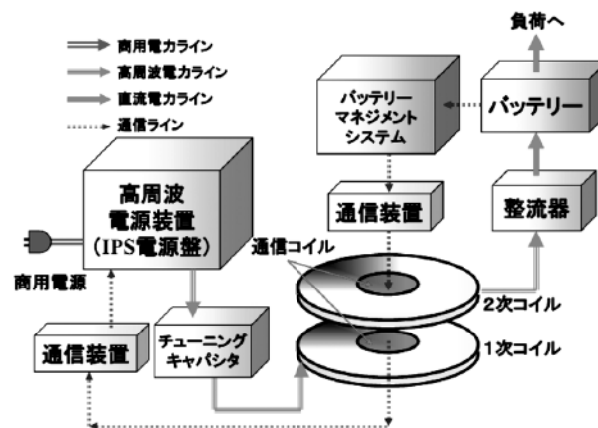


図5 電磁誘導式非接触給電システムの構成

行うことにより、小さな電池でも走行距離を確保できることになる。このコンセプトに従い、WEB-1にIPT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車両初期コストを低減することができた。しかしながら、IPTはWEB-1のようなサイズのEV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、効率が悪い等の、大きな改善課題が存在することが明らかになった²⁾。

そこで昭和飛行機工業らの研究グループは、EVへの充電を安全・簡便・短時間でできるワイヤレス給電システム(IPS)を2005年から4年間、(独)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。具体的な装置構成例は、図5にあるように地上側システムが高周波電源、1次コイル、高周波電源から1次コイルまでの給電線とインピーダンス調整用のキャパシタボックス、移動体側システムは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とりする通信装置からなる。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、方形波をサイン波に変える波形変換回路、安全対策の

電気自動車のためのワイレス給電とインフラ構築

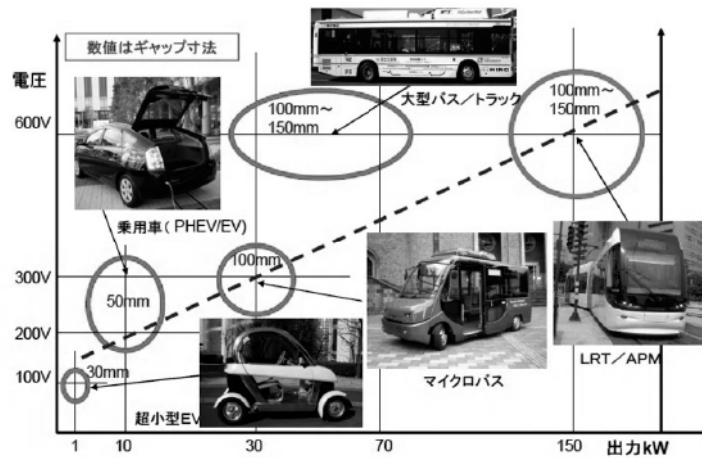


図6 電磁誘導式非接触給電システムの展開

ための波絶縁トランスで構成されている。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構造、高周波電源装置の最適化により、円形コア、片側巻線、1次直並列2次並列共振コンデンサシステムで、コイル間ギャップ50mmを100mmに増加、商用電源から電池までの総合効率は86%を92%に改善した。その他、2次側コイルの重量や厚みを半分にするなど小型、軽量化がはかられている。このシリーズは図6のように、一人乗りEV用の1kW、普通車サイズPHEVやEV用の10kW、マイクロバスなど中型車両用の30kW、IPSバスやトラックといった大型車両用の60kW、LRT（次世代型路面電車）や連接バス用の150kWを越える大電力まで、ラインナップされている³⁾。

4 電動バスによる実証走行試験⁴⁾

奈良県は奈良市内においてパークアンドライド（P&R）と電動バスを導入し、利便性を上げると共に環境への優しさで多くの宿泊観光客の導入を計画している。平成20年に少量電池搭載のWEB+非接触式急速充電器（IPS）と大容量電池搭載の電動バス+接触式急速充電器の2台の電動バスを使い、県庁をP&Rの起点として充電装置を設置し、走行ルートとして東大寺・春日大社を含む奈良公園一帯を巡回する観光用周遊バスの社会実験を実施した。実験の結果、どちらの電動バスでもCO₂排出削減効果の有効性は確認できたものの、充電の利便性の点ではWEB+IPSのシステムに軍配が上がった。そこで平成21年にはWEB-1の電池をリチウムイオン電池に換装したWEB-1adv.のみを使い、再度、奈良公園にて実証走行試験を行った。

試験では走行ルートにIPSを2か所、1つはターミナル駅での充電を想定して奈良県庁に設置、もう1つはバス停での充電を想定してルート途中の春日大社に設置、乗客が乗降する間に充電す

第4章 電磁誘導方式による電気自動車向けワイヤレス給電

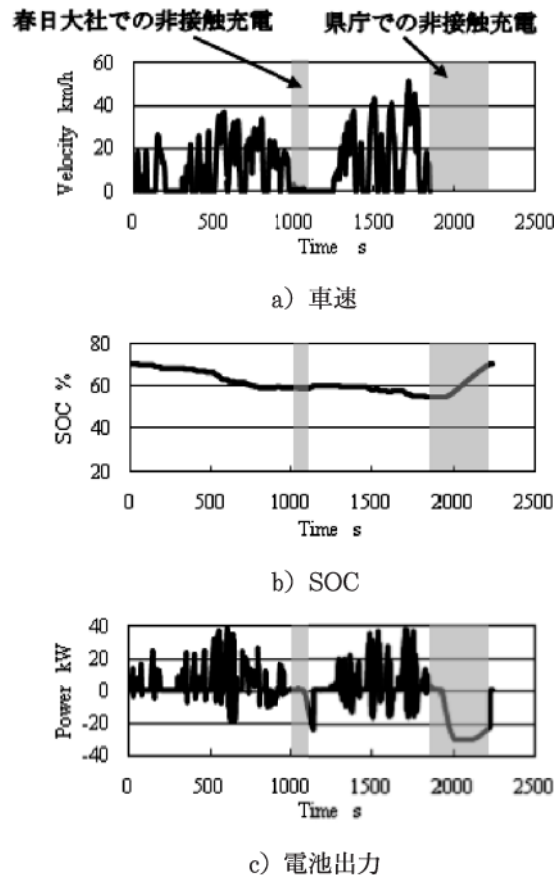


図7 奈良公園走行試験結果

ることにした。試験条件として、県庁では毎回必ずSOC70%まで充電を行い、春日大社では途中経路の渋滞度合いによって充電時間を充電無し・1分間充電・2分間充電の3パターン設定した。空調負荷については空調無し及びクーラー作動とした。

最も代表的なデータとして、春日大社1分間充電、空調無しの条件で試験を行ったときの結果を図7に示す。1周5.5kmのルートを図7a)のような速度で走行し、約30分要した。図7b)は循環中のSOC履歴を表している。図中1200秒付近は春日大社でのIPS充電で、SOCが回復したことが見て取れる。このときの充電電力は図7c)より確認できる。また、図中、1900秒以降は奈良県庁でのIPS充電である。これによると消費したSOCを回復するのに要した時間は約6分である。これで1周5.5kmのルートを走行した場合でも、1+6分の7分間のIPS充電を行うことで連続的に走行可能であることが示された。WEB-ladv.の電池総容量は12kWhである。単純に比較はできないが、4人乗りの三菱iMiEVは車両重量1080kgに16kWhの電池を搭載しているのに対し、定員12名のWEB-ladv.の車両重量は3倍近い3180kgあるのに電池容量は少ない12kWhで、充電は繰り返すもののアップダウンの大きな奈良公園内を1日中運用できる。すなわち、本車両のコンセプトである「短距離走行・高頻度充電」が実証された。

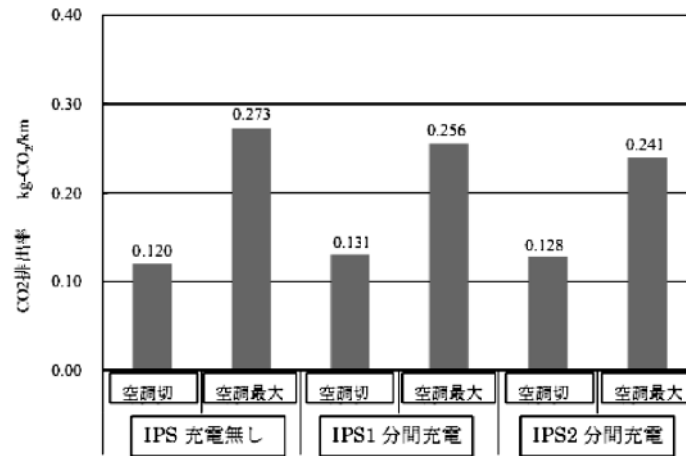


図8 CO₂ 排出率

試験結果より算出される CO₂ 排出率を図8に示す。CO₂ 排出原単位は 0.299kg-CO₂/kWh を使用している⁵⁾。今回の実験における CO₂ 排出率は 0.120kg-CO₂/km であった。WEB-1adv. に改造する前のディーゼルバスの M15 モードにおける CO₂ 排出率は 0.370 kg-CO₂/km (7.40km/l) であり、今回の試験結果と比較すると、67.6%CO₂ 排出率を削減できたことが確認できる。M15 モードは重量車向けの燃費計測用で、平均速度 15km/h の走行モードで、登坂は含まれていない。今回の走行試験では平均速度が 10km/h 前後であり、登坂を含んでいることを考慮すると、今回の走行試験は M15 モードに比し厳しい条件であると言える。このように WEB-1adv. はディーゼルバスに有利な条件下においても、CO₂ 排出率が少なく抑えられていることが示された。

5 おわりに

WEB-1adv.は板バネのため車両側のコイル下面は地上から 180mm に固定されており、また IPS のギャップはコイル間で 100mm、カバーを考慮したメカニカルギャップは 80mm であるため、地上側コイルは地上に 100mm 出っ張った状態で運用試験を行った。これでは実際に道路上にコイルを設置する場合において、車両の走行の邪魔になり、道路使用の要件を満たしていない。そこで図9に示すように WEB-1adv.に搭載した通常型 30kW コイル（外径 847mm）の 1.5 倍近い 1247mm の外径を持つ大ギャップ型コイルを開発した。道路交通法で規定されている軸重 10ton の耐荷重、すなわち片輪 5ton、車体が傾いた場合の偏荷重を想定し、コイルの表面を樹脂コンクリートで覆い 6ton の耐荷重を持つ地中設置型の地上コイルを製作した。厚い樹脂コンクリートで覆われながらも、メカニカルギャップは 120mm である。このコイルを平成 21 年度

第4章 電磁誘導方式による電気自動車向けワイヤレス給電

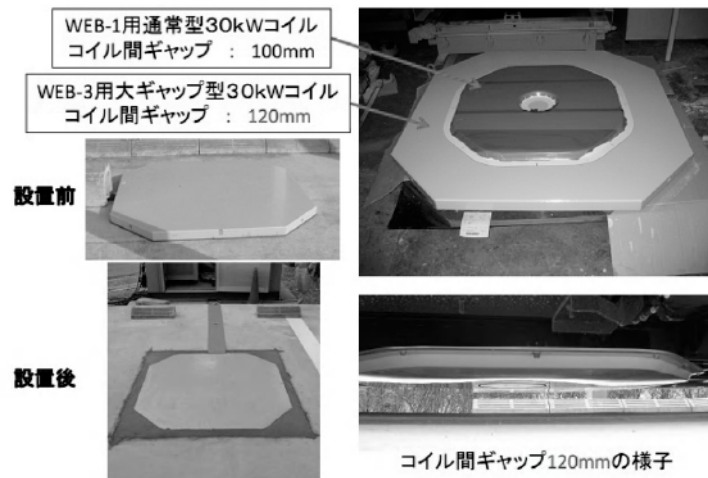


図9 WEB-3用埋込コイルとギャップの様子

の環境省の「地域産学官連携環境先端技術普及モデル策定事業」の補助金を受けて早稲田大学が開発した25人乗り先進電動バス（WEB-3）に搭載した。WEB-3はバリアフリーのため60mm車高を下げるニーリング機能を保有している。この機能を使うとバスの床面に固定した車両側のコイルの下面は、地表面と面一になるように設置した地上側コイルの上面から120mmとなり、問題無く充電ができた。

このような利便性の高いワイヤレス給電システムを搭載した電動バスがバス停で簡単充電をしながら、街中を走行しているシーンが近々見られるはずである。

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) 紙屋雄史ほか：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, p9-14 (2007)
- 3) 高橋俊輔ほか：非接触給電システム（IPS）の開発と将来性,自動車技術会シンポジウム前刷集 No.16-07, p47-52 (2008)
- 4) 荻路貴生ほか：先進電動マイクロバス交通システムの開発と性能評価,自動車技術会春季学術講演会論文集, No.1, 20105128, (2010)
- 5) 関西電力株式会社：環境レポート 2009, データ編, 環境関連データ, p.04 (2009)