

[特別講演] EV用ワイヤレス給電システムにおける効率向上

高橋 俊輔

昭和飛行機工業株式会社 IPS・EV 開発室 〒196-8522 東京都昭島市田中町 600

E-mail: s-takahashi@showa-aircraft.co.jp

あらまし

近年、地球温暖化や大気汚染の問題に並んで現実味を帯びてきた化石燃料資源の枯渇の問題に対処すべく、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動力源を搭載した電動車両(EV)が発売されている。しかし、電池ならびにそれへの充電の性能が十分に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の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ワイヤレス給電システムが使われるようになってきた。ワイヤレス給電システムでも接触式充電システムと同等程度の電力伝送効率が得られるようになってきており、その効率向上に向けての方策について述べる。

キーワード ワイヤレス給電システム, 電磁誘導, 効率, インバータ, リッツケーブル

Efficiency Improvement in Wireless Power Transfer System for EV

Shunsuke TAKAHASHI

Showa Aircraft Industry, IPS/EV business Department 600 Tanaka-cho, Akisima-shi, Tokyo, 196-8522 Japan

E-mail: s-takahashi@showa-aircraft.co.jp

Abstract

Although the spread of charge infrastructures is indispensable to the spread of EV, there are some subjects in the contact-type charging system used widely now, and a wireless charging system has come to be used. The electric power transmitting efficiency of the latest wireless charging system is the same grade as it of a contact type charging system. So, this paper describes the way of the efficiency improvement.

Keyword Wireless Power Transfer, Electro-magnetic Induction, Efficiency, Invertor, Ritz Cable

1. 電磁誘導式ワイヤレス給電システムの概要

地域交通手段としての路線バスにおいて、省エネルギー、地球温暖化防止、乗車環境改善に寄与することを目的として先進電動バス WEB-1(図 1)や IPS ハイブリッドバスなどが開発されつつある。これらのバスでは充電効率の良い電池充電技術が求められると同時に、運転者に作業負担を強くない、簡便で且つ感電などの危険を伴わない電磁誘導式ワイヤレス給電システムが採用されている。バリアフリーの観点から低床型のバスが求められている昨今、小型化の面では床下取り付け面積の少ない薄型の装置が望まれている。また省エネルギーの促進のために車載重量軽減、効率の更なる向上が望まれている。更にこのようなバスシステムを普及させるために、低価格化を実現しなければならないという課題もあげられている。

これらを満足するものとして Inductive Power Supply(IPS)と呼ばれるシステムが開発された。この装置は図 2 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

ある。WEB-1 に搭載されたシステムの仕様は出力 30kW、総合効率 92%、コイル間ギャップ 100mm である。¹⁾



図 1 先進電動バス WEB-1

2. IPS 開発における効率向上対策

2.1 従来型システムの効率調査

どこの部分に注目して効率向上に取り組むべきかを知るために、従来の海外製ワイヤレス給電システム

の構成要素毎の損失割合を調査した結果を図 3 に示す。

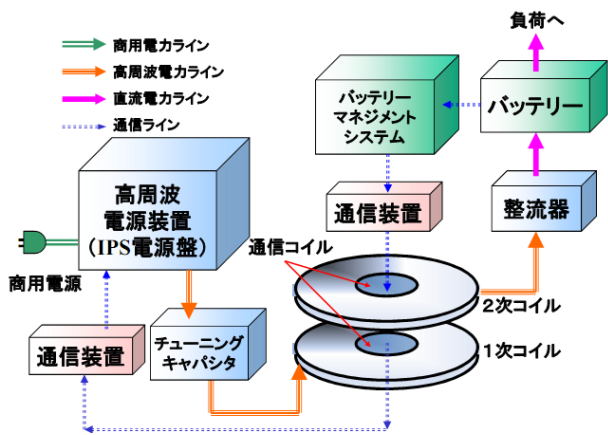


図 2 IPS システムの構成

ここで電源、整流器等のパワーエレクトロニクス部分が大きい割合となっているが、スイッチング素子や整流器と言ったデバイスは周波数、出力により使えるものが限られるため、電源盤内回路の改善で効率向上をめざす。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ことが予想される。

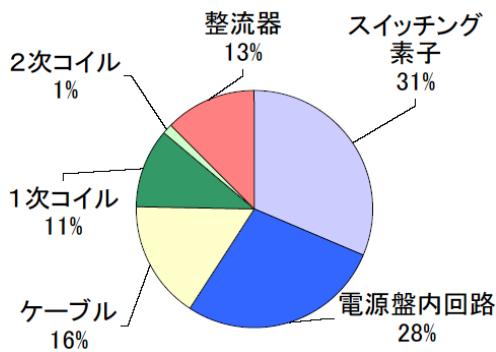


図 3 従来型ワイヤレス給電システムの損失割合
励磁電流は次の式で得られる。

$$I = V / 2 \pi f L \dots (1)$$

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。

式(1)で励磁電流を減らすには高周波数化があり、これはケーブルの表皮効果と近接効果を低減することで得られる。また磁束増加、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。結合係数 M/L の増加も効果があるが、これはギャップ漏れ磁束低減の効果もある。

2.2 平面コア丸型方式 IPS の設計最適化

IPS を開発するにあたり、コアの基本構造について検討した。図 4 に示す E 字コア角型方式は、一般的な変圧器のように E 字のコアを 2 個正対させた構造となっている。一方、図 5 に示す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、初期検討として結合係数等の電気的な特徴の比較、ならびに形状寸法等の詳細な比較 (表 1) と、実機での試験結果 (図 6) を検討した結果、結合係数や薄型化性能の面および大きなコアギャップが得られることから、平面で丸形のコア形状を採用することとした。

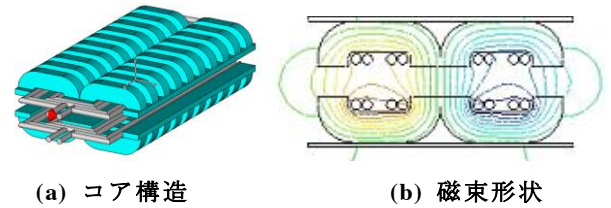


図 4 E 字コア角型方式

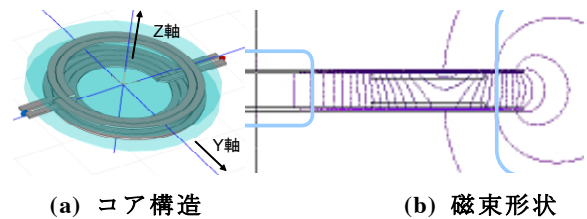


図 5 平面コア丸型方式

表 1 コア形状による比較

	結合係数	寸法	厚み	重量
E 字コア角形	○	○	△	○
平面コア丸形	◎	△	◎	○

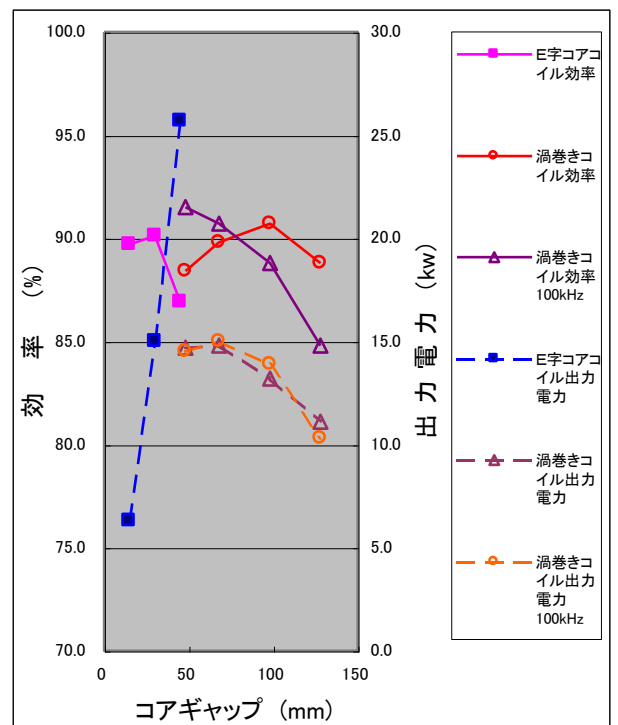


図 6 コア形状による効率と出力の比較

平面コア丸型方式の詳細設計を外部駆動回路連成有限要素法電磁界解析法^{(2),(3)}にて行い、駆動周波数と磁束密

度分布の関係について検討した。フェライトコア内の磁束密度強度分布を図7に示す。20kHz~100kHzの周波数領域において磁気飽和(使用したフェライトでは約510mT)は生じないことが確認できた。次に、駆動周波数と一次・二次コアの鉄損および銅損の関係について検討し、一次・二次コイル間効率の周波数依存性を図8に示す。鉄損に比べ銅損が支配的であり、また、駆動周波数を20~40kHzの範囲に設定する事が有効だと判断できる。本周波数領域においては、高周波電源で用いるスイッチング素子としてMOSFETとIGBTが候補としてあげられるが、容量等の制約を考慮すると極力後者を採用したい。そこで、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。

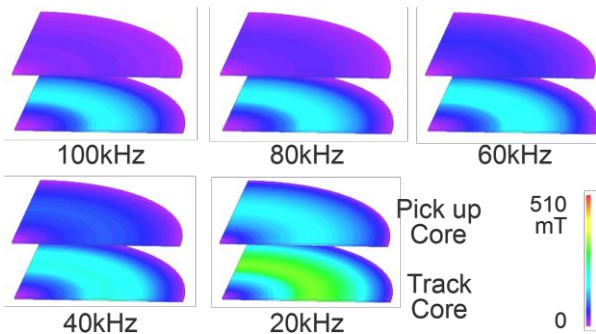


図7 コア内の磁束密度強度分布(30kW出力時)

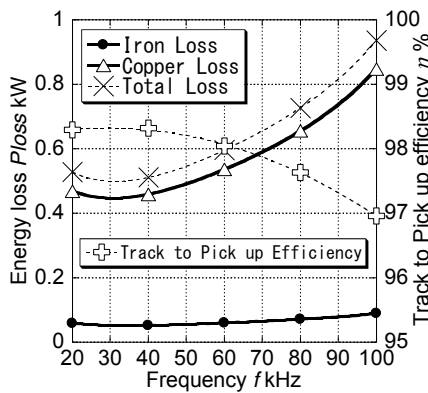


図8 一次・二次コイル間効率(30kW出力時)

車載の容易さおよび通信の安定性と2次コイルの位置検出のためコア中央部に通信装置を埋め込むこととし、挿入部の最適内径について検討した。はじめに、30kW一定出力条件で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について解析した結果、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。つぎに、コア内径を変化させた際の鉄損と銅損の変化を検討したところ、内径を大きくした場合、鉄損はほぼ横ばい、また銅損は増大することが確認できた。解析結果から、コア内径(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ため、本寸法でくりぬくこととした。ちなみにこの際、約0.5kgの軽量化が達成される。

車載部の更なる薄型化・軽量化を実現するために、コア薄型化の可能性について検討した。はじめに、30kW一定出力条件でコア厚さを変化させた際のフェライトコア内最大磁束密度分布について解析した。検討結果より、一次コアの厚さは4.0mm未満で、また二次コアの厚さは2.0mm未満で磁気飽和することが確認できた。つぎに、損失評価を行い、一次コア厚さを4.0mm固定で二次側の厚さを変化させた際の鉄損と銅損の解析結果から、厚さが2.0mm程度までならば損失はほぼ変化しないため、この厚さで設計可能と判断した。二次コア厚さ半減により3.9kgの軽量化が達成される。

これまでの検討により、駆動周波数(22kHz)、コア内径(半径90mm)、コア厚み(送電側4.0mm、受電側2.0mm)等を決めた。最適化された一次・二次コイル形状を図9に示す。ここで、コアやコイルを取り付けるベースとしてアルミ板を採用し、これによる磁気シールド効果にも期待した。アルミ板の抵抗率は $2.6 \times 10^{-8} \Omega m$ である。本モデルにて出力30kW時のシミュレーションを行った際の、フェライトコア内の磁束密度強度分布を図10に示す。定格出力時において、コアの磁気飽和は発生していないことが確認できた。

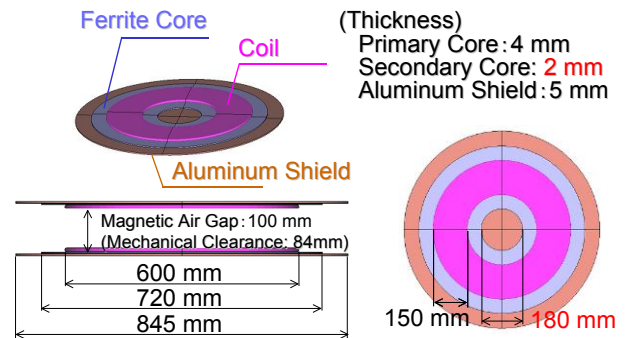


図9 最適一次・二次コイル形状

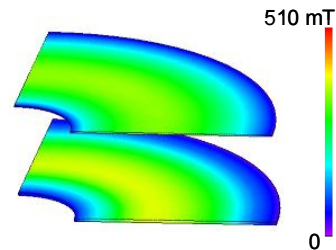


図10 最適コアの磁束密度強度分布(30kW出力時)

2.3 リッツケーブルの設計最適化

励磁電流を減らすため高周波数化すると表皮効果等により、ケーブルの抵抗が増加する。ケーブルのインダクタンス減少のため、表皮効果と近接効果の低減を検討した。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。そこでIPTケーブルの70sq.径に0.25φで1,440本撚りであったものを41sq.径に0.1φで5,250本撚りにすることにより、図11のように100kHz

で IPT ケーブルの 50%以下とすることができた。

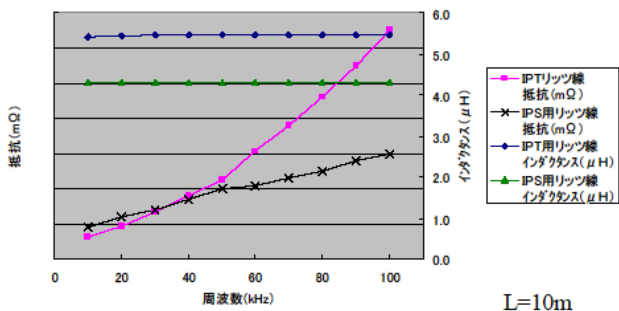


図 1 1 表皮効果対策による低減

しかし、80sq.径にして 0.1φで 10,290 本撚りまで増やし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。これはケーブル間の近接効果に依るものと考えられる。そこで、ケーブルを7分割し配置を工夫してペア線化をはかった。その結果、海外製のリッツケーブルの 38%以下に抵抗を抑えることができた。

図 12 のように、ケーブルの内側と外側の素線が交互にその位置をローテーションするように、しっかりと撚りを掛けて電流密度を均一化をはかるとともに、撚りを設けられない中心部のケーブルに 逆位相電流が集中して流れるのを防ぐため空芯にすることで、図 13 に示すように更に 15%抵抗値を低減できる。

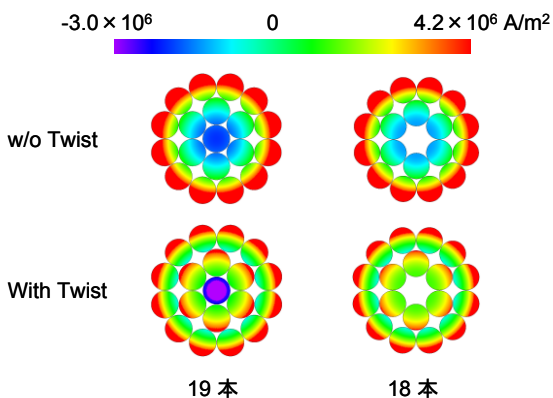


図 1 2 電流密度均一化ケーブル

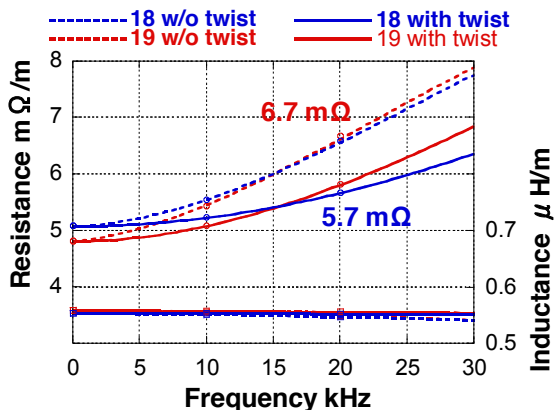


図 1 3 電流密度均一化対策による低減

2.4 高周波電源装置の設計最適化

高周波電源装置はコンバータ、インバータ等で構成されるが、それらの回路設計上の最適化ポイントは以下の通りである。

- 1) 各回路ブロックでの電圧電流配分をできるだけ高電圧低電流にすることで損失を少なくできる。
- 2) 交流部分では、各回路ブロックでの力率ができるだけ 1 に近づくよう設計上留意する。
- 3) 高周波回路の周波数は出来るだけ低い方が、表皮効果や近接効果が起因の損失増加やスイッチング損失を下げられる。
- 4) 一般的な部品定格や発熱状況から決まる量に対し、できるだけ必要以上の素子の並列数や電線の断面積の増加、磁性体の大型化を行うと損失を抑えられるが、コストとの絡みで決定せねばならない。
- 5) 高周波電流配線の近傍に高周波磁界ができるだけ発生しないように配線取り廻しすることが不要輻射や誘導加熱等の低減だけでなく、表皮効果や近接効果の抑制と損失低減に有効。
- 6) 電力回路の構成はシンプルの方が、一般的には低損失となる。
- 7) スナバなどのサージ対策回路ができるだけ少なくなるように工夫すると、損失低減に有効。
- 8) 使用する周波数（高調波成分を含む）での部品性能を把握し、適切な部品選定や設計を行う。

これらのポイントを踏まえての具体的対策としては

- 1) 半導体：高速素子の採用、低順方向電圧 V_F / 低コレクタ・エミッタ飽和電圧 V_{CE-SAT} / 低オン抵抗 R_{DS-ON} のデバイスの採用、並列化、ゼロ電圧スイッチングの採用
- 2) コンデンサ：損失は $I^2 \times R_{ESR}$ (等価直列抵抗) なので周波数特性の良い部品を使用、低等価直列抵抗 ESR 部品の選定、並列化の採用
- 3) リアクトル：損失は $I^2 \times R_{ESR}$ (等価直列抵抗) なので周波数特性の良い部品を使用、原因（銅損・鉄損）を見極めて対策
- 4) トランス：周波数特性、結合係数、等価直列抵抗等の性能が良いものを使用
- 5) 配線：高周波有効断面積の確保、高周波磁界低減（並行ブスパー、ペア配線等）
- 6) コイル：素線間の電流の均等化、渦電流対策等の検討が必要である。

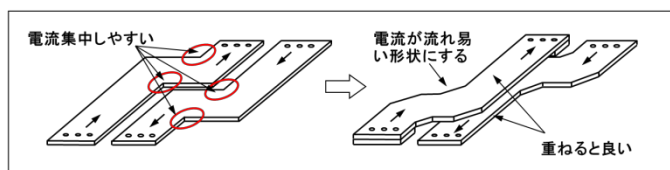


図 1 4 ブスパーの構造

一例として配線の断面積確保のためブスバーを利用する場合、図14のように角部を作らず電流が流れやすい形状にするなど電流の偏りによる局所加熱に注意が必要である。また、表皮効果、近接効果の影響を低減するには、プラス、マイナスあるいは行き、帰りのブスバーを重ねて実装すると大きな効果がある。

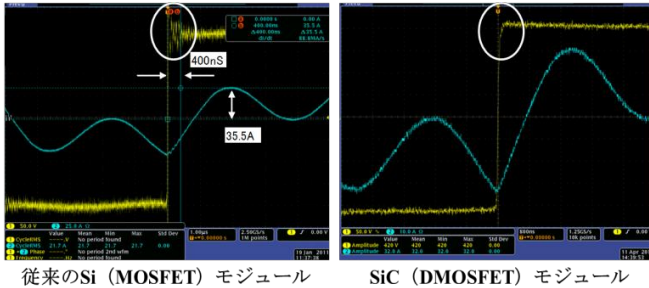


図15 Si素子とSiC素子のスイッチング波形

まだ実機での事例はないが、半導体メーカーが研究開発し実用化しつつあるSiC素子の採用も効果がある。従来のSi素子は還流ダイオードの逆回復時間が200~250[nS]であり、インバータの高力率運転時にブリッジに貫通電流が流れ、スイッチング損失増加による素子の過加熱、放射ノイズの増大などの問題がある。この問題は周波数が高くなるほど顕著になる。このため回路設計に当たっては、若干の遅れ力率となるよう設計せざるを得なかった。SiC素子を還流ダイオードに用いると、逆回復時間は従来品の1/10程度に短縮される。そこでSiC素子によるパワーモジュールを試作し試験したところ、図15に見られるようにスイッチングによるリンギング電圧発生がほとんどなくなった。従って100kHz帯でのインバータの高力率運転が可能となり、効率向上に大きく寄与する。

3. IPSシステムの性能評価

3.1 負荷試験結果

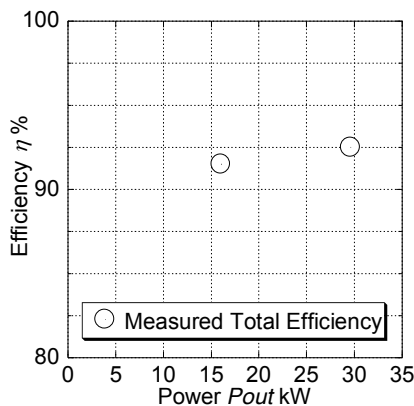


図16 総合効率(コイル間ギャップ100mm)

負荷試験によって得られた総合効率実測値を図16に示す。ここで総合効率とは、図2における高周波電源装置の入力を基準とした、整流器の出力までの効率を意

味する。

30kWの定格運転時において効率約92%を達成できた。これは、接触充電方式の充電効率(約95%)にあと一歩と迫る、極めて優れた値と言える。また1/2部分負荷時の効率もそれほど悪化は見られない。

3.2 運用試験から見える利便性と成果

グローバルなEVに比べローカルなコミュニティバスは標準化の進展にかかわらず、ワイヤレス給電システムの採用が容易なため、海外を含め幾つかの運用実績がある。

奈良県は宿泊観光客の増加のため奈良市内における交通の利便性と環境向上に向け、パークアンドライド(P&R)と電動バスの導入を計画している。2008年に少量電池搭載のWEB-1+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1周5.5kmの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。実証走行試験の結果、

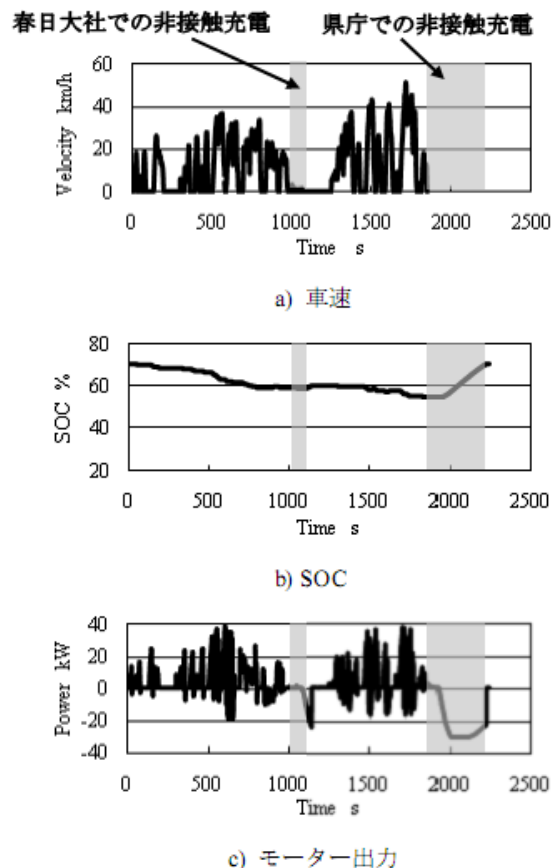


図17 奈良公園走行試験結果

どちらの電動バスでもCO₂排出削減効果は確認できたものの、充電の利便性の点ではワイヤレス充電システムに軍配が上がった。そこで2009年にはWEB-1のみを使い、再度、実証走行試験を行った。

試験では IPS を 2 か所設置した。1 つはバスターミナルでの充電を意識して奈良県庁に、もう 1 つはバス停で乗客が乗降する間の充電用として春日大社に設置した。充電条件として、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り充電時間を"充電なし・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なしおよびクーラー作動とした。

春日大社 1 分間充電、空調なしの条件で試験を行ったときの結果を図 17 に示す。1 周 5.5km のルートを図 17a) のような速度で走行し、約 30 分を要した。図 7b) は走行開始から春日大社での充電を経て、県庁にて SOC70%まで充電した際の 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、1 分間で SOC が若干回復したことが見て取れる。この時の充電電力は図 17c) より確認できる。図中、1900 秒以降は県庁にて IPS 充電を行っている部分である。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。よって、1 周 5.5km のルートを約 7 分の 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-1 の Li イオン電池容量は三菱自動車の 4 人乗り iMiEV の 16kWh より少ない 12kWh で、さらに 3 倍の車両重量と定員 12 名でありながら、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、WEB-1 のコンセプトである"少量電池・高頻度充電・航続距離延長"が実証された⁴⁾。



図 18 WEB-3 と 1 次側コイルの設置状況

環境省チャレンジ 25 事業の補助を受け、平成 24 年 2 月 9 日から平成 26 年 3 月 31 日までの予定で、長野駅と善光寺間を結ぶ長野市街地循環バス「ぐるりん号」に新規に開発された WEB-3 と WEB-4 が投入され、有料で運用されている。このワイヤレス給電システムの仕様は出力 30kW、総合効率 92%、コイル間ギャップ 140mm で、バリアフリーのためのバスのニーリング機能を利用して車体側のコイルを地表面から 120mm まで

下げることができるため、図 18 のように 1 次側のコイルは地面と面一に設置することができ、充電における運用の利便性が上がっている。搭載している Li イオン電池のタイプや、容量、電圧などの違う 2 台の電動バスが共通の 1 台の IPS において、路車間通信を行うことで問題なく充電できることも確認されている。

この事業では電動バスの事業性検証のため、電動バスとワイヤレス給電システムのメンテナンス上の課題把握を行っており、ワイヤレス給電システムでは共振用コンデンサの経年変化度合、給電量と走行距離を計測することにより効率の変化を計測中である。

4. おわりに

ワイヤレス給電システムは電子機器の発達とともに開発が進み、効率の点では接触式給電システムと遜色ない性能まで来ている。自宅や特定の駐車場で駐車車が高度に自動化されるようになればコイルの位置合わせに気を使わずに済むようになり、コストと標準化の問題をクリアできればそう遠くない将来において自宅のガレージにも設置されると思われる。さらに、ワイヤレス給電システムには走行中給電の可能性があり、この開発が成功すれば EV の普及が一層進むものと思われる。地球環境保全に不可欠な EV の普及に向け、その利便性において大きな夢を持つワイヤレス給電システムのさらなる発展を望んでいる。

最後に本機器の製作にあられた東洋エレクトロニクス株式会社の洲崎泰利氏から各部の効率に関して多大な助言をいただいたことに謝意を表する。

文 献

- [1] 高橋俊輔, 大聖泰弘, 紙屋雄史, 松木英敏, 成澤和幸, 山本喜多男: 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)
- [2] Yushi KAMIYA, Takashi Onuki: 3D eddy current analysis by the finite element method using double nodes technique, IEEE transactions on magnetics, Vol. 32, No. 3, pp. 741- 744 (1996)
- [3] 小貫天, 紙屋雄史, 田宇鎮: 三次元有限要素法によるリニア誘導機二次導体スリットの解析, 電気学会論文誌 D, Vol. 114-D, No. 11, pp. 1122- 1129 (1994)
- [4] 荻路貴生, 佐藤公彦, 小林王義, 紙屋雄史, 石太郎, 大聖泰弘, 高橋俊輔, 出井惣太, 鈴木直司, 三野秀方: 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.52-10, 20105128, p.5-8(2010)