

エレクトロニクスシリーズ

ワイヤレス電力伝送技術の 研究開発と実用化の最前線

Frontiers of Research and Development
of Wireless Power Transfer

監修：篠原真毅

Supervisor : Naoki Shinohara

HIGH TECHNOLOGY
INFORMATION

シーエムシー出版

執筆者一覧（執筆順）

篠原真毅	京都大学 生存圏研究所 生存圏電波応用分野 教授
平山裕	名古屋工業大学 工学部 准教授
高橋俊輔	早稲田大学 大学院環境・エネルギー研究科 環境調和型電動車両研究室 客員上級研究員
松木英敏	東北大学 未来科学技術共同研究センター 次世代移動体グループ 教授
藤野義之	東洋大学 理工学部 電気電子情報工学科 教授
庄木裕樹	(株)東芝 技術統括部 技術企画室 参事
Nuno Borges Carvalho	Instituto de Telecomunicações, Dep. Electrónica Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, Full Professor
Apostolos Georgiadis	Heriot-Watt University, School of Engineering and Physical Sciences, Institute of Sensors, Signals and Systems, Associate Professor
Pedro Pinho	Instituto de Telecomunicações, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Ana Collado	Heriot-Watt University, School of Engineering and Physical Sciences, Institute of Sensors, Signals and Systems
Alírio Boaventura	Instituto de Telecomunicações, Dep. Electrónica Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro
Ricardo Gonçalves	Instituto de Telecomunicações, Dep. Electrónica Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro
Ricardo Correia	Instituto de Telecomunicações, Dep. Electrónica Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro
Daniel Belo	Instituto de Telecomunicações, Dep. Electrónica Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro

Ricard Martinez Alcon	Escola d' Enginyeria de Telecomunicacio I Aeroespacial de Castelldefels, Universitat Politecnica de Catalunya
Kyriaki Niotaki	Benetel Ltd.
大 西 輝 夫	(株)NTT ドコモ 先進技術研究所 ワイヤレスフロントエンド研究 グループ 主任研究員
平 田 晃 正	名古屋工業大学 大学院工学研究科 電気・機械工学専攻 教授
和 氣 加奈子	(国研) 情報通信研究機構 電磁波研究所 電磁環境研究室 主任研究員
日 景 隆	北海道大学 大学院情報科学研究科 助教
横 井 行 雄	京都大学 生存圏研究所 研究員
Seungyoung Ahn	Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) Associate Professor
大 平 孝	豊橋技術科学大学 電気・電子情報工学系 教授, 未来ビークルシ ティリサーチセンター センター長
石 野 祥太郎	古野電気(株) 技術研究所
中 川 義 克	インテル(株) 政策推進本部 主幹研究員
Hatem Zeine	OSSIA INC. CEO
Alireza Saghati	OSSIA INC.
鶴 田 義 範	(株)ダイヘン ワイヤレス給電システム部 部長
細 谷 達 也	(株)村田製作所 技術・事業開発本部 シニアリサーチャー
原 川 健 一	(株)ExH (イー・クロス・エイチ) 代表取締役
張 兵	(国研) 情報通信研究機構 ワイヤレスネットワーク総合研究セン ター ワイヤレスシステム研究室 主任研究員
牧 野 克 省	(国研) 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 宇宙太陽光発電シ ステム研究チーム 主任研究開発員

目 次

第1章 総論

1	ワイヤレス給電の理論 —電磁誘導とマイクロ波送電の関係性— 平山 裕...	1	5	ワイヤレス給電, 日本と世界はどう動くのか—標準化の最前線から— 庄木裕樹...	50
1.1	そもそも, 電力とは	1	5.1	はじめに	50
1.2	そもそも, ワイヤレス電力伝送とは	2	5.2	制度化・標準化における課題	50
1.3	ワイヤレス給電システムの分類 ...	3	5.3	我が国における制度化	51
1.4	ワイヤレス給電システムの構成要素	5	5.4	利用周波数の国際協調	53
2	電磁誘導方式ワイヤレス給電技術の歴史—EV— 高橋俊輔...	11	5.5	CISPRにおける EMC 規格の標準化 状況	56
2.1	はじめに	11	5.6	IEC TC106における電波暴露評価, 測定方法の検討	56
2.2	移動型ワイヤレス給電	11	5.7	標準規格化の動向	57
2.3	静止型ワイヤレス給電	15	6	Far-Field Wireless Power Transmission for Low Power Applications Nuno Borges Carvalho, Apostolos Georgiadis, Pedro Pinho, Ana Collado, Alírio Boaventura, Ricardo Gonçalves, Ricardo Correia, Daniel Belo, Ricard Martinez Alcon, Kyriaki Niotaki, 篠原真毅...	61
2.4	おわりに	23	6.1	概要—小電力応用のための遠距離ワイヤレス電力伝送—	61
3	電磁誘導方式ワイヤレス給電技術の歴史—医療応用— 松木英敏...	25	6.2	Introduction	62
3.1	はじめに	25	6.3	Far Field WPT - Rectenna Design: Recent Progress and Challenges ...	62
3.2	非接触電力伝送方式	25			
3.3	医療分野への応用	32			
3.4	生体影響の考え方	34			
4	マイクロ波方式ワイヤレス給電の歴史 藤野義之...	40			
4.1	マイクロ波方式ワイヤレス給電の歴史	40			
4.2	実証試験を中心としたマイクロ波受電技術	44			
4.3	まとめ	49			

6.4 Novel Materials and Technologies - Use of Cork as an Enabler of Smart Environments	75	7 ばく露評価と国際標準化動向 … 大西輝夫, 平田晃正, 和氣加奈子…	96
6.5 Applications - Batteryless Wireless Sensor Networks	83	7.1 はじめに	96
6.6 Applications - Batteryless Remote Control	87	7.2 評価指標	97
		7.3 ばく露評価手順	98
		7.4 ばく露評価例	101
		7.5 国際標準化の動向	105
		8 ワイヤレス給電と EMC—ペースメー カを一例に—	108
			日景 隆…

第2章 自動車への展開

1 EV 用ワイヤレス給電の市場概要と今 後の標準化ロードマップ …………… 横井行雄…	113	3.1 概要—韓国における電気自動車への ワイヤレス給電技術— OLEV	141
1.1 はじめに	113	3.2 Wireless Power Transfer Technology in Korea	142
1.2 ワイヤレス給電の市場概要とロード マップ	114	3.3 Vehicular Wireless Power Transfer System	142
1.3 ワイヤレス給電と法制度と規則 …	117	3.4 Future Wireless Power Transfer System in Korea	151
1.4 EV 向けワイヤレス給電の国際標準 化	121	4 電化道路電気自動車 (EVER) …………… 大平 孝…	154
1.5 今後の展開	123	4.1 ワイヤレス 3 本の矢	154
2 EV バスへのワイヤレス充電システム の開発動向	127	4.2 ワイヤレス電力伝送	154
2.1 はじめに	127	4.3 電気自動車	159
2.2 バス用ワイヤレス充電システムの初 期の歩み	128	5 管内ワイヤレス電力伝送技術の車載応 用	164
2.3 EV バス用ワイヤレス充電システム の開発動向	130	5.1 車載ワイヤレス技術の動向と要求 ……………	164
2.4 おわりに	138	5.2 管内ワイヤレス電力伝送	165
3 Korean WPT to EV - OLEV …………… Seungyoung Ahn, 篠原真毅…	141	5.3 ワイヤレス電力・通信伝送	170
		5.4 今後の展望と課題	172
			石野祥太郎…

第3章 携帯電話他への応用展開

1 AirFuel Alliance の現状と今後の展開 中川義克... 176	キャパシタ (EDLC) 利用の利点に ついて 203
1.1 はじめに 176	3.7 実用例 204
1.2 AirFuel Alliance の組織構成 177	3.8 まとめ 207
1.3 AirFuel Inductive WC の活動 178	4 小型 MHz 帯直流共鳴ワイヤレス給電 システムの設計開発 細谷達也... 208
1.4 AirFuel Resonance WC の活動 179	4.1 はじめに 208
1.5 AirFuel Uncoupled WC の活動につ いて 181	4.2 直流共鳴ワイヤレス給電システムと 高周波パワーエレクトロニクス 208
1.6 AirFuel Infrastructure WC 182	4.3 6.78 MHz 帯磁界結合方式直流共鳴 ワイヤレス給電システム規格 216
1.7 最後に 183	4.4 直流共鳴ワイヤレス給電システムの 設計 218
2 Remote Wireless Power Transmission System 'Cota' Hatem Zeine, Alireza Saghati, 篠原真毅... 185	4.5 共鳴結合回路の統一的設計法 (MRA/HRA/FRA 手法) 222
2.1 概要—遠隔ワイヤレス電力伝送シス テム「Cota」..... 185	4.6 まとめ 229
2.2 Abstract 185	5 電界結合方式を用いた回転体への電力 伝送技術 原川健一... 231
2.3 Introduction 186	5.1 まえがき 231
2.4 Operation Concepts 187	5.2 電界結合方式 231
2.5 System 193	5.3 在来技術との比較 235
2.6 Applications 194	5.4 実施例 238
2.7 Conclusion 195	5.5 まとめ 241
3 工場内自動搬送台車 (AGV) へのワイ ヤレス給電 鶴田義範... 197	6 2次元 Surface WPT 張 兵... 243
3.1 はじめに 197	6.1 はじめに 243
3.2 磁界共鳴方式によるワイヤレス給電 の電力伝送原理 198	6.2 2次元 Surface WPT 技術の概要 243
3.3 AGV の市場について 200	6.3 電力伝送をする周波数とその共用検 討 244
3.4 AGV のワイヤレス給電化の利点に ついて 200	6.4 Q 値の算出方法 245
3.5 AGV で使用されている蓄電デバイ ス 202	6.5 電力供給制御方式 247
3.6 蓄電デバイスとしての電気二重層	6.6 表層メッシュパターンへの検討 247

6.7 レトロディレクティブ方式による電力伝送	250	7.3 過去に世界各国で検討された代表的な宇宙太陽光発電システム (SSPS)	256
6.8 おわりに	252	7.4 日本において検討されてきた代表的な宇宙太陽光発電システム (SSPS)	257
7 宇宙太陽光発電システムを想定したマイクロ波ビーム方向制御技術の研究開発	牧野克省 254	7.5 宇宙太陽光発電システムの実現に向けて (マイクロ波無線電力伝送地上実証試験の実施)	260
7.1 はじめに	254	7.6 おわりに	265
7.2 宇宙太陽光発電システム (SSPS) の概要	254		

2 電磁誘導方式ワイヤレス給電技術の歴史 — EV —

高橋俊輔*

2.1 はじめに

電気と磁気を結びつける関係として1820年にデンマークの Hans C. Oersted により電流による磁気作用は発見されていたが、磁気から電気が発生することは1831年にイギリスの Michael Faraday によって見出された。これは、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（起電力）が生じるという電磁誘導現象の発見であり、この発見から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が導き出され、後のイギリスの James C. Maxwell による電磁方程式の確立に多大な影響を与えた。1836年にアイルランドの Maynooth 大学 Nicholas Callan 牧師が誘導コイルを発明し、これが変圧器として広く用いられる初めてのものとなった。

それ以降、電磁誘導の原理に基づき、対向させた一対のコイルと磁束収束用の磁性体を用い、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・エネルギー伝送技術がいろいろ研究されたが、この技術を用いた製品が具体的に身の回りで見られるようになったのは1980年代になってからである。これは電磁誘導による電力伝送に高周波電力を用いるため、商用周波数の電源を高周波にするためのインバータ技術が必要となるが、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のが、1980年頃であることによる。この頃から、電磁誘導方式のワイヤレス・エネルギー伝送システムの本格的な研究が始まった。

本稿では、この電磁誘導方式のワイヤレス給電技術の開発の歴史について EV 用を中心に述べる。

2.2 移動型ワイヤレス給電

電磁誘導式を含む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。ワイヤレス給電の当初は、蓄電池の性能が低く大きく重いものであったため EV や搬送台車への走行中連続給電の研究が主で、静止型はかなり後になって蓄電池性能の向上に伴い出現してくる。

1978年、米国 Lawrence Berkeley Laboratory の J. G. Bolger らによって行われた EV 用ワイヤ

* Shunsuke Takahashi 早稲田大学 大学院環境・エネルギー研究科
環境調和型電動車両研究室 客員上級研究員

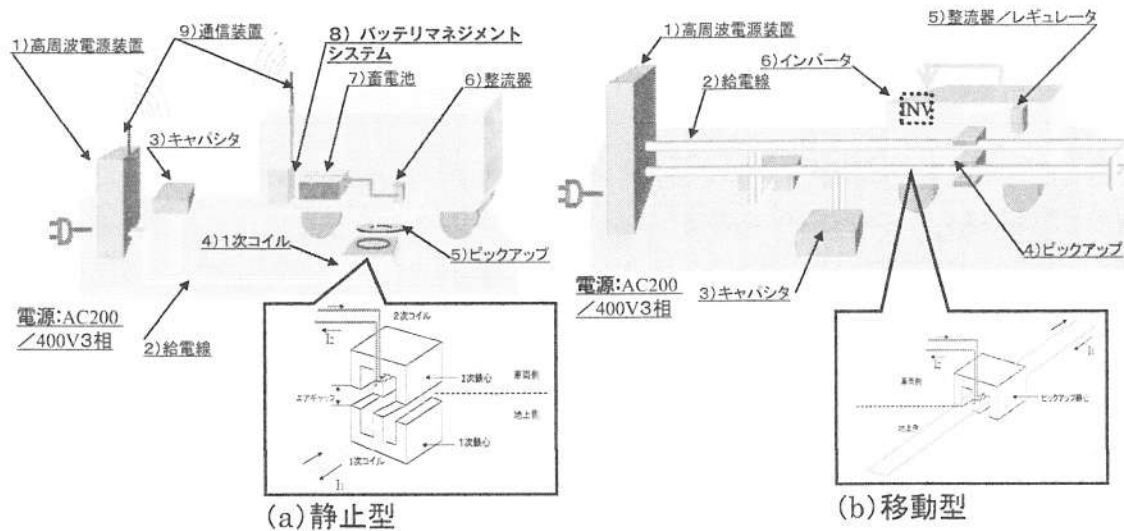


図1 ワイヤレス給電システムの方式

レス給電システムの実験が電磁誘導式ワイヤレス給電システム開発の始まりと言える。20 kW の出力を幅60 cm、長さ1.52 m のピックアップに伝送できたが、使用周波数が180 Hz と低かったため、伝送効率は非常に低く、エアギャップも1インチと短く、当初考えていた走行中給電の実現は難しく、室内での台上試験のみで終わった(図2)¹⁾。

1986年に同じく米国の K. Lashkari らが発表した道路に埋設した給電線から EV に走行中給電する実験システムは PATH (Partners for Advanced Transit and Highway) プロジェクトに使われ、3 インチのギャップ長で6~10 kW / モジュールの電力を伝送できたが、漏れ磁束が大きく、また共振回路、特に1次側について十分な検討がなされていなかったため、漏れインダクタンスにより電源力率が悪く効率が60%以下であったため実用には至らなかった(図3)²⁾。

1989年に A. W. Kelley らが飛行機の座席が移動しても機体側から椅子に給電できる可動疎結合トランス式のワイヤレス給電システムについて発表した。1次側、2次側共に磁性コアを設け

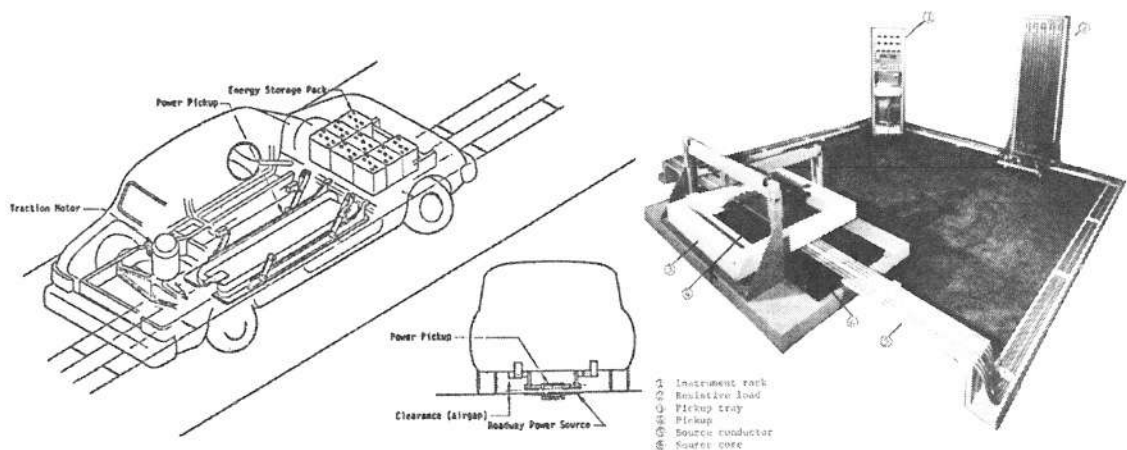


図2 EV 用走行中給電の実験システム

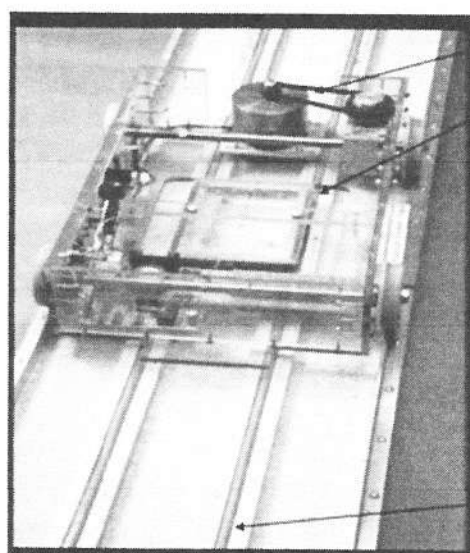


図3 EVバスと受電モジュール

て結合係数と Q 値を高め効率の上昇を図っているが、共振回路の検討については十分ではなく、可動距離は短かった³⁾。

ニュージーランドの Auckland 大学では1970年代初めから Don Otto がワイヤレス給電の研究を始め、それを受けて A. W. Green と J. T. Boys が1988年から研究を進めて、1990年には本格的に共振回路の検討を行って試作機を作った(図4)。1993年に現在の移動型の基本となる IPT システムを発表し、1次側、2次側共に共振回路を持つ電磁誘導方式のワイヤレス電力伝送システ

1990: Our first IPT System



- Brushless DC Driving Motor
- 2mm Operating air-gap
- Alignment non critical
- No power regulation
- Maximum 1 trolley/track
- Large pick-up coil
- Low efficiency
- But it worked!!!

100 pair telephone cables

図4 Auckland 大学での IPT システム

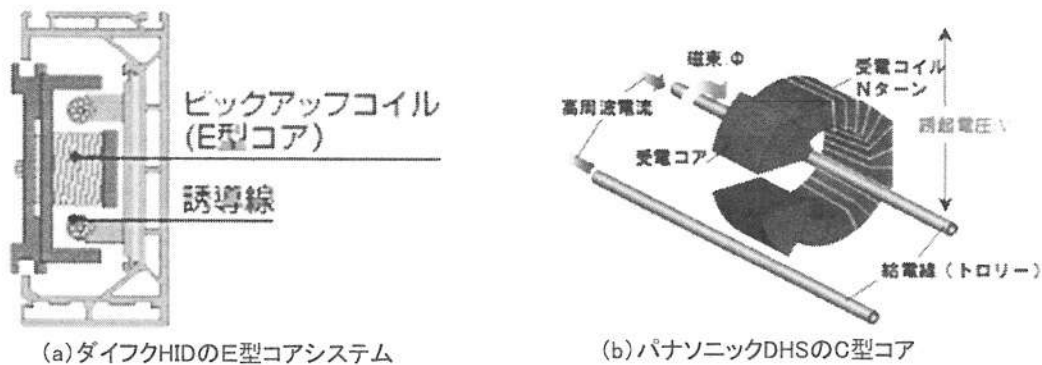


図5 移動型のコア形状

ムの形がほぼできあがった。Auckland 大学が1988年に特許ホールディング会社として設立した Auckland UniServices がこれらの技術の特許を、日本の搬送システム製造会社のダイフクには全世界の自動車組立、クリーンルーム（半導体・液晶）ライン向けに、ドイツのクレーンリールメーカーの Wampfler に対しては前記以外の全ての分野に対し使用許諾をした^{4~6)}。

ダイフクは1993年、Auckland 大学の技術をベースに、使用周波数を日本の電波法に抵触しない10 kHz 以下にし、移動型に特化した図5(a)のE型コアを持つHIDシステムを開発し、半導体・液晶パネル製造クリーンルームや自動車の塗装・組み立てライン向けの搬送システムを製品化して1万システム以上を納入し、業界のデファクトスタンダードと見なせる大きな成功を収めた⁷⁾。ダイフクの特許は非常に強力なもので、同じような製品を開発していた神鋼電機（現、シンフォニアテクノロジー）は最終的には特許訴訟でダイフクに勝訴したものの、訴訟途中でこの分野から撤退した。またパナソニックはダイフクとの特許訴訟から逃れるために、給電線の片側だけから電力供給を受けるC型コアを持つDHSシステムを開発している（図5(b)）。

一方、Wampfler は1996年に移動型のIPT（Inductive Power Transfer）レールシステムを開発し、本業のコンテナクレーン用リールシステムの代替システムやAGV、ソーターなどの搬送ライン、エレベータおよびアミューズメント施設での水中ライドなどの移動体への給電システムで成功を収めた。2002年にWampfler は三井造船と Exclusive Distributorship Agreement を締結し、日本国内でのダイフクの分野を除くすべての領域での使用許諾を与え、つくばの土木研究所（現、国土技術政策総合研究所）の舗装耐久性試験台車用に当時世界最大の120 kW のIPTレールシステム（図6）やシールドトンネル内電気機関車、炭鉱内移動監視ロボットへの給電などのフィールド分野に応用されたが、IPTの使用周波数が15~20 kHz で日本では設置申請が必要なうえ、給電線を長くすると電磁放射が大きくなり、その抑制が難しく、あまり普及することなく2008年に契約を終了している。物流部品総合メーカーを目指すフランスのDelachaux グループは2006年にWampfler を買収し、既に1975年に買収していたスリッピング大手のIER、1976年に買収した導体レールメーカーのInsul-8と合併させて物流における接触と非接触の給電分野に特化したConductix-Wampfler を設立、物流分野に特化したIPTレールシステムを販売している。

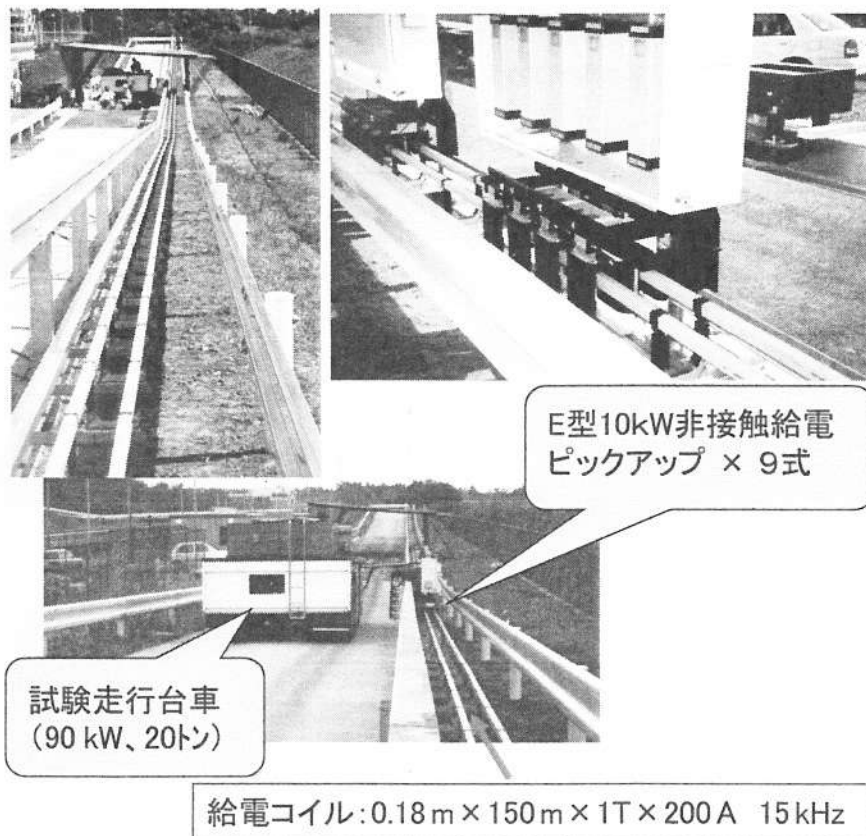


図6 土木研究所（つくば）の舗装耐久性試験用台車システム

ドイツの物流機器電源と導体レールメーカーである Vahle は1997年に独自技術の移動型ワイヤレス給電システム CPS (Contactless Power Supply) を開発し、Wampfler と同じような分野や中国上海市のトランスラピッド給電用など広く世界に販売し、Wampfler に相前後して2000年代に日本に進出しファーレ・ジャパンを設立したが、使用周波数がやはり20 kHz であったことから、なかなか販売が伸びず極東貿易に商権を譲り、その子会社として販売を続けている。

2.3 静止型ワイヤレス給電

移動型ワイヤレス給電システムは1次側の給電線と2次側のピックアップコイルが近接していて結合係数が高いことと、移動体の位置によってコイル間の共振条件が大きく変わるため殆ど電磁誘導方式が採用されている。一方、EV 用大電力静止型ワイヤレス充電システムには電磁誘導方式と磁界共鳴方式の両方が使われているが、両方のシステムとも等価回路のみならず実際の電源システムや両コイルの共振回路構成も殆ど同じで、1次側と2次側のコイルを積極的に共振させる程度の違いしかなく、最近は磁界結合型と括られることが多いが、ここではメーカーが電磁誘導方式と称しているものを取りあげる。

EV 用の静止型ワイヤレス給電システムとしては、1995年フランスの PSA (Peugeot/Citroen グループ) が発案した Tulip (Transport Urbain, Individuel et Public) 計画で、地上に設置した

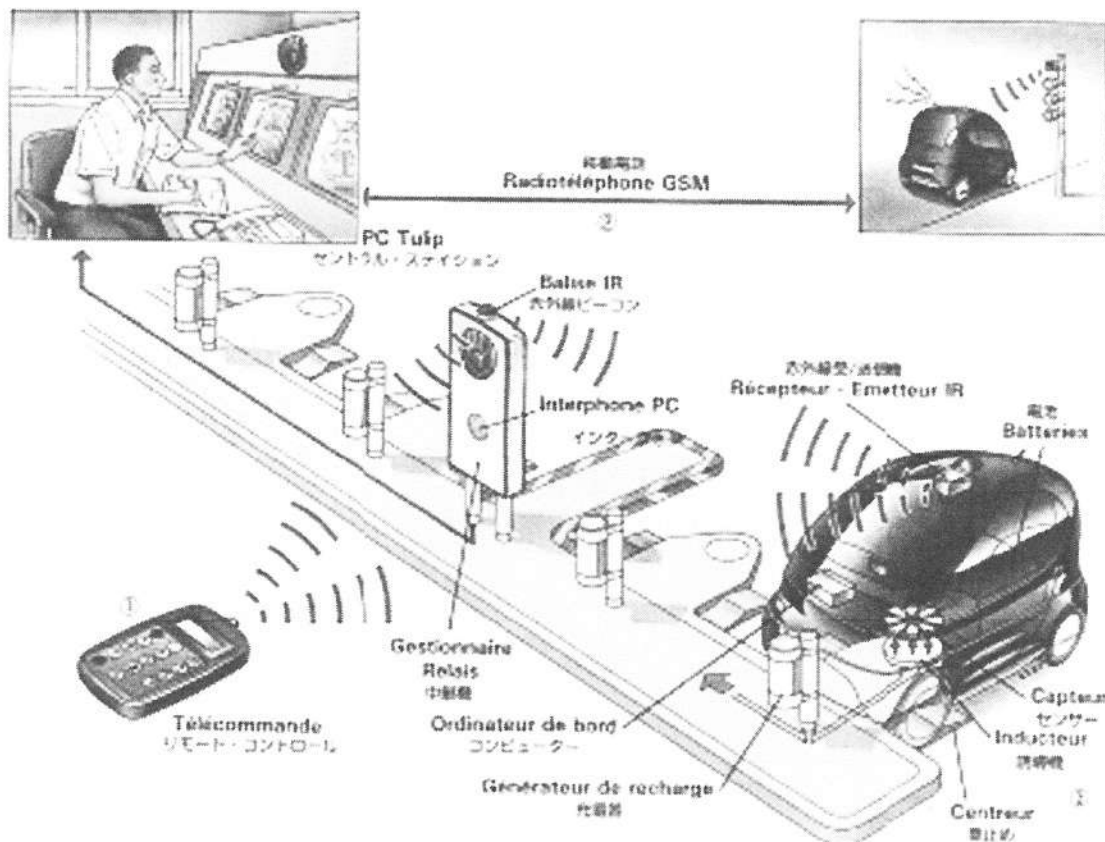


図7 Tulip (Transport Urbain, Individuel et Public) 計画のシステム

最大出力 6 kW の円形送電コイル上に 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 (図 7)⁸⁾。1997 年、同じくフランスの CGEA および Renault がパリ郊外のサンカタン・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克服できなかった。コイルの位置決めの問題を解決するため、1998 年に本田技研工業がツインリンクもてぎで、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充電システムの試験運用を一般公開した。その構造は棒状の分割トランスの 1 次コイルをロボットアームにより車両の 2 次コイルに差し込むもので、入力 AC200 V、周波数 100 kHz、最大出力 6 kW、効率 87% 以上で Ni-MH 電池を充電率 (SOC) 20% から 100% まで 2 時間で充電可能であったが、製品化には至らなかった (図 8)⁹⁾。

EV 用の静止型ワイヤレス給電システムで製品化されたものとしては、米国 General Motors が開発した Magne Charge と呼ばれるパドル型のものがあり、入力単相 200 V、周波数 130 kHz~360 kHz、効率 86%、最大出力が 6.6 kW であった。FCC 規則パート 15 の Low-power, non-licensed transmitters の規定に適合し、他に混信を与えた場合は停止などの措置をするもの

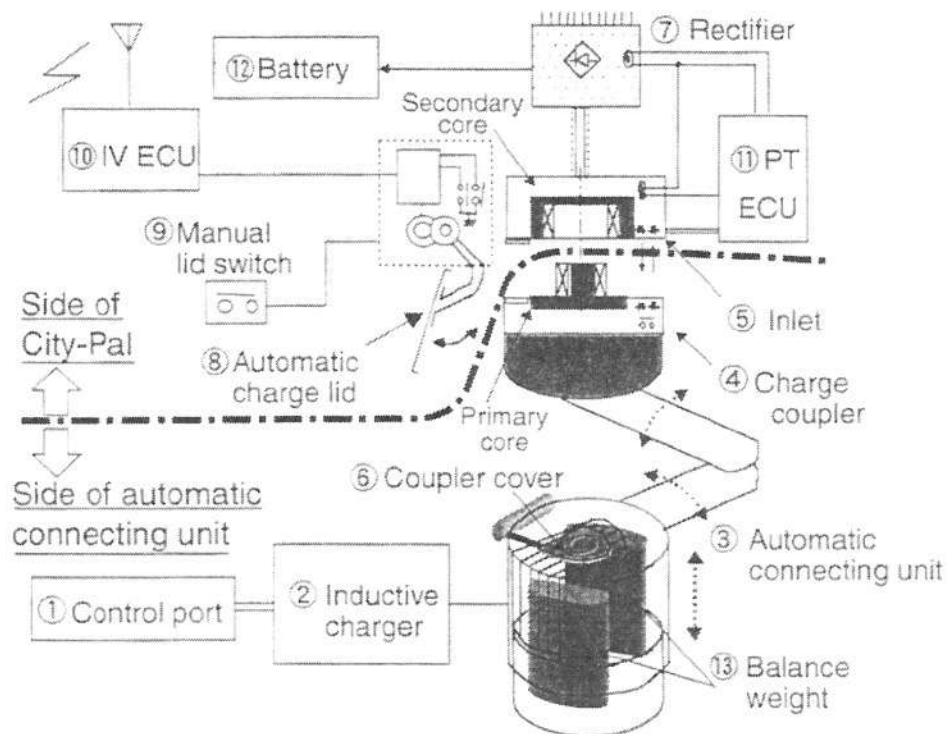


図8 本田技研工業のワイヤレス自動充電システム構成

として認可されていた。制御通信プロトコルはSAE J1773に準拠していて、これ以降のEV用ワイヤレス給電システムも殆どがこのプロトコルを採用している¹⁰⁾。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。しかしながら、図9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ワ



図9 GMが開発したMagne Charge



図10 ジェノア市に設置された IPT システム

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ず、2002年に General Motors は製品サポートを打ち切っている。

Wampfler は IPT レールシステムの電磁誘導技術をベースに、1998年に地上コイルに跨るだけで容易に給電できる入力 3 相400 V、周波数20 kHz、最大出力30 kW の円形コイル式静止型ワイヤレス給電システム IPT チャージシステムを開発し、2002年に 2 台並列に接続した60 kW システムがイタリアのトリノ市やジェノア市の数十台の EV バスに採用された (図10)¹¹⁾。日本でも国土交通省の次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクトでの IPT ハイブリッドバスや新エネルギー・産業技術総合研究開発機構 (NEDO) での早稲田大学先進電動マイクロバス (WEB-1) などに採用された。2006年に Wampfler から Conductix-Wampfler になると買収した Delachaux グループの経営方針に沿って交通系よりも物流系のワイヤレス給電システムに力を入れるようになった。しかし EV、EV バス用ワイヤレス給電システム供給の要望に押されて、Auckland UniServices は2010年に Halo IPT を設立し、J. T. Boys らが考案した DD-Q コイルを使用した EV を発表するなど活発に活動したが、2011年12月に米国 Qualcomm に買収され Qualcomm Halo になった。Qualcomm Halo は2012年以降、EV 分野のワイヤレス給電事業に積極的に進出、3.7 kW / 7.4 kW / 22 kW のラインアップで DD-Q コイルのほかマルチコイルシステムにも取り組み、円形コイルとの互換性を含め標準化の世界でも存在感を示している。Halo IPT を失った Auckland UniServices/Conductix-Wampfler グループは2014年に交通系分野に特化する会社として IPT Technology を Conductix-Wampfler から独立させ、英国ロンドン近郊のミルトン・キーンズ市で 1 路線 8 台の EV バスに30 kW 型コイルを 4 基並列にした120 kW 型ワイヤレス給電システムを搭載し、2014年 1 月から運行を行っている。この他にも2012年にオランダのスヘルトーヘンボス市の EV バスにミルトン・キーンズ市と同じシステムを、2015年にはロンドン市内



図11 2次コイル昇降式 IPT システム

の2階建て EV バスなどに出力を100 kW にして、それを2台並列接続にしたシステムを搭載している。これらのシステムでは2次側コイルを地上給電コイルの上に機械的に降ろしてエアギャップ4～5 cm 程度で電力伝送をするという Wampfler の開発当初からの方法を踏襲している(図11)¹¹⁾。

早稲田大学による IPT 搭載 WEB-1 の運用試験で省エネに効果があることが判明し、NEDO は2005年から4年間、昭和飛行機工業らの研究グループに委託をして IPT と同じ出力30 kW、周波数22 kHz の仕様で開発した円形コイル式 EV バス用ワイヤレス給電システム IPS (Inductive Power Supply) を開発し、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、コイル間ギャップを50 mm から100 mm に増加、商用電源から電池までの総合効率を86%から92%に改善した。その他、2次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。30 kW 以外に一人乗りのミニカーから LRT などの大型車両向けに1 kW、10 kW、50 kW、150 kW の大電力までシリーズで開発した¹²⁾。環境省の補助金を得てコイル間ギャップを140 mm にした30 kW 型 IPS を2009年に WEB-3、2011年に WEB-4 の床下に固定搭載、地上側コイルは地面に面一に設置して、WEB のニーリング機能を使って大ギャップ充電を行い、長野市内で3年間運用した(図12)¹³⁾。

Auchland 大学の電気・電子および生体工学の博士コースを出た H. Wu は2012年ユタ州立大学



図12 WEB-4の1次コイルと2次コイルの設置

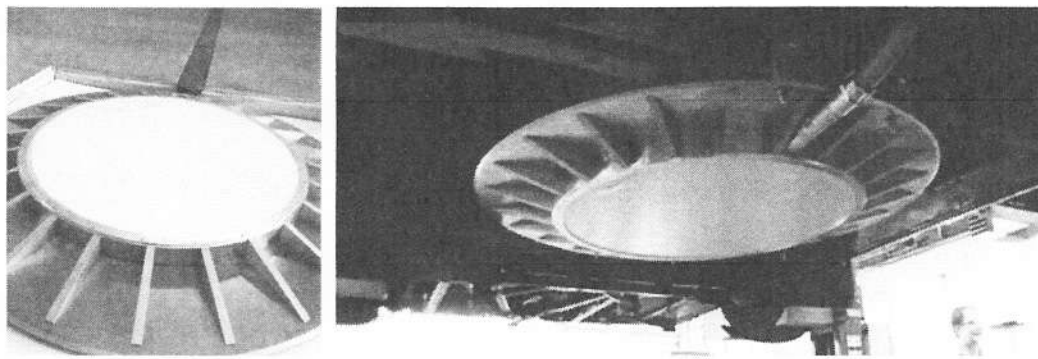


図13 Aggie Bus の1次コイルと2次コイルの設置

で図13の周波数20 kHz、出力25 kW の円形コイルのワイヤレス給電システムをキャンパスバスの Aggie Bus に搭載運用してデータを蓄え、このシステムを製造するために設立された WAVE (Wireless Advanced Vehicle Electrification) は改良を加え周波数23.4 kHz、エアギャップ7インチ、出力50 kW のワイヤレス給電システムをバスに搭載し、2015年6月からカリフォルニア州モントレイ市で4マイルの走行ルートをも10分間充電、30分間走行の運用を行っている¹⁴⁾。

鉄道車両や航空機のメーカーでコングロマリット企業の Bombardier は自社で開発した周波数20 kHz、エアギャップ6.5 cm で効率92%、出力250 kW の電磁誘導式ワイヤレス給電システムである PRIMOVE 技術と、車両搭載の電気二重層キャパシタに回生を行う MITRAC energy saver 技術と合わせてエネルギー消費量を30%軽減するシステムをドイツのアウグスブルグ市の路面電車へ搭載して、2010年末に0.8 km の走行中ワイヤレス給電実証試験を成功裏に実施した。2012年に Flanders' DRIVE research project において同じシステムをベルギーのロンメル市の1.2 km の道路に埋め込んで EV バスへの走行中給電の実証をした。地上のコイルは車体長より短い区間に区切られ、車両が上に来た時にだけ電流を流す PRIMOVE 技術で電磁波の影響を最小限化していて、磁束密度は EU 基準に適合している。2014年にドイツのブラウンシュバイク市の全長12 km の環状ルート M19のターミナルとバス停の2カ所に200 kW のワイヤレス給電システムを設置し、乗客が乗り降りする間に12 m と18 m 接続の EV バスに静止中充電をしている。ベルギーの世界遺産都市ブルージュ市やドイツのマンハイム市でも運用が始まっている。Bombardier のシステムも IPT Technology と同じように2次側コイルを地上給電コイルの上に

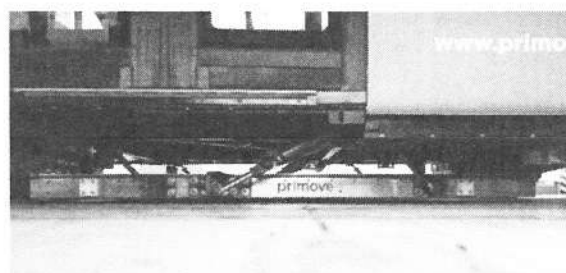


図14 2次コイル昇降式 PRIMOVE システム

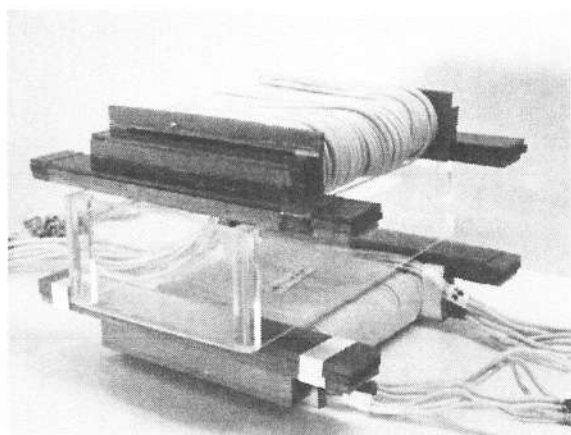


図15 埼玉大学の10 kW ソレノイドコイル

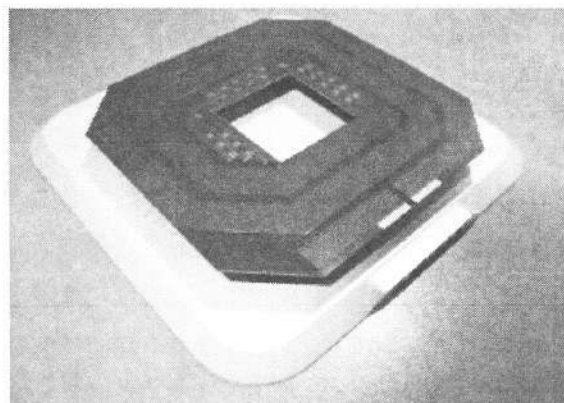


図16 パイオニアのEV用プリント基板コイル

機械的に降ろして数 cm のエアギャップで電力伝送をしている (図14)¹⁵⁾。

コイル移動式は耐久性やコストの点から不利であるが、エアギャップを小さくすることでコイルサイズを小さくできることと電磁放射を少なくできるメリットがある。

EV 用としては、2009年に埼玉大学とテクノバグループは NEDO の委託を受けてソレノイドコイル式 EV 用ワイヤレス給電システムを開発した。仕様としては周波数30 kHz、7 cm ギャップで総合効率90%、出力1.5 kW と10 kW である (図15)¹⁶⁾。その後も開発を続け最近ではインバータ周波数85 kHz、コイル間ギャップ175~220 mm、効率89.6%で送電出力25 kW、受電電力3 kW の走行中給電システムを開発中である¹⁷⁾。パイオニアは2011年に出力3 kW、ギャップ100 mm、周波数85 kHz で効率85%のものを図16に示すように僅か225 μ m の厚さ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¹⁸⁾が、その後、この分野から撤退している。Audi はフランクフルトモーターショー2011で Audi Wireless Charging というシステム名で出力3.6 kW のものを自社の EV である A2 Concept に搭載し、CES2015で周波数85 kHz、出力3.6 kW の1次コイルに蛇腹状の可動部を設けて昇降させる方式のデモ展示をしている¹⁹⁾。SEW-EURODRIVE は出力3 kW、効率90%以上のもの²⁰⁾を、2012年に Vahle が出力3.6 kW、効率90%以上のもの²¹⁾を発表している。2013年 Volvo 社は自社 EV の C30 Electric に対して1次コイル出力を20 kW にして急速充電用として使えるものを発表している (図17)²²⁾。2013年に米国の Evatran が Bosch ASS と組んで日産リーフと General Motors のプラグインハイブリッド車 Chevrolet Volt を対象にした出力3.3 kW、周波数19.5 kHz、ギャップ7~15 cm、効率91.7%の Plugless L2 Electric Vehicle Charging System を3000 US\$ という安さでネットを通じて発売、Bosch ASS が車両搭載作業を行っている²³⁾が、現在のところ米国内の販売のみである (図18)。

EV 用ではないが電動車両用に、ダイフクは2012年に Auckland UniServices と技術提携およびライセンス契約を新たに再締結し、静止型の電磁誘導方式ワイヤレス給電システム D-PAD の実用化に向けた開発と使用用途を進め、産業用小規模 (出力電力連続10 W) の給電システム、

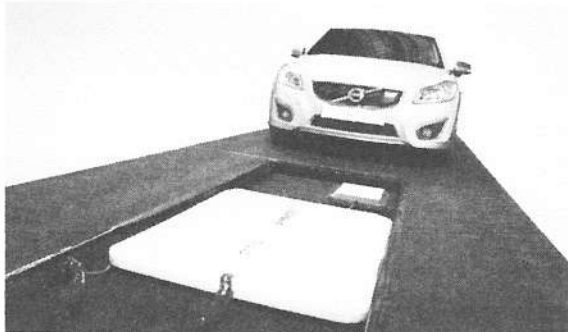


図17 Volvo の20 kW ワイヤレス給電システム

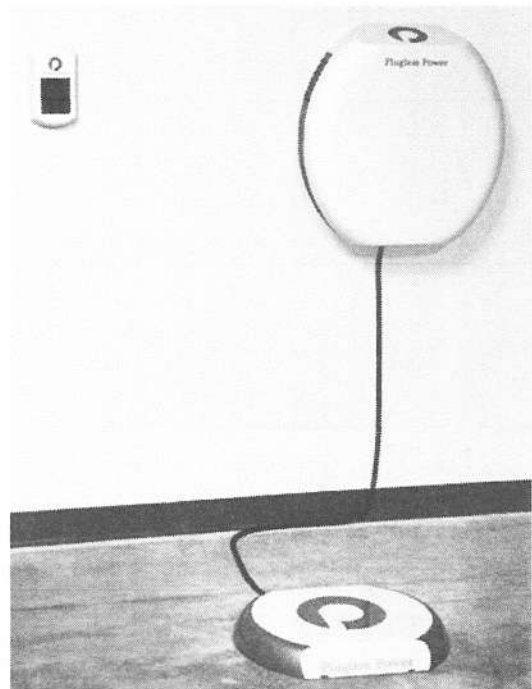


図18 Evatran のワイヤレス給電システム

中規模（同0.5～1.5 kW）と大規模（同3.5 kW）に向けた充電システムを開発，テクノフロンティア2016で電動フォークリフトへのワイヤレス給電システムとして完成させている²⁴⁾。その仕様はエアギャップ70 mm において効率80%で3.5 kW を送電できる。図19のコイル形状は，フェライトの中心部は水平にコイルを巻き，その後空間を空けて，端面近くでは垂直に重ねてコイルを巻くと言う特殊な構造をしていて，コイルが巻かれていない2カ所の間，それも表側だけで磁束が飛ぶため，伝送距離が長くなり，効率も高くなる。伝送周波数が10 kHz 未満のため，高周波利用設備としての電波法に基づく申請が不要で様々な現場に導入し易い²⁵⁾。

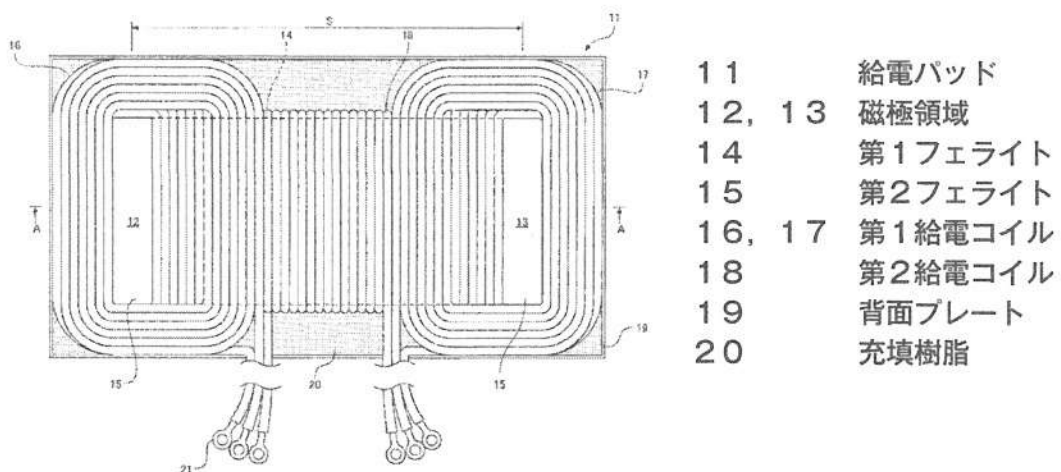


図19 D-PAD のコイル構造

2.4 おわりに

1980年代のワイヤレス給電の黎明期から30年、ようやく実用の領域に入った最近のEV用ワイヤレス給電システムは電源力率改善のための1次側の共振および効率改善のための2次側共振を別々に採る歴史的な電磁誘導型だけではなく、電磁誘導型と変わらない回路システムでありながら1次側と2次側のコイル間の共振もしっかり採ることで、エアギャップを大きく、許容位置ずれ寸法も大きくできる最新の磁界共振型のシステムも数多く発表されてきている。

電磁誘導型と磁界共振型をまとめて磁界結合型と呼ぶが、これらEV用ワイヤレス給電システムの標準化、規格化が早急にまとめあげられ、その利便性の高さから広くEVやEVバスに搭載され、街中を走行しているシーンを早く見たいものである。

文 献

- 1) J. G. Bolger, F. A. Kirsten, and L. S. Ng, Vehicular Technology Conference, 1978. 28th IEEE, pp. 137-144 (1978)
- 2) K. Lashkari, S. E. Schladover, and E.H. Lechner, Proc.8th Int. Electric Vehicle Symp.1986, pp. 258-267 (1986)
- 3) A. W. Kelley, and W. R. Owens, *IEEE Trans. Power Electronics*, 4(3), 348-354 (1986)
- 4) A. W. Green, and J. T. Boys, IEE PEVD, No. 399, pp. 694-699 (1994)
- 5) G. A. Covic, Auckland Uniservices, pp. 1-126 (2010)
- 6) J. T. Boys, and G.A. Covic, *IEEE circuits and systems mag.* 15(2), 6-27 (2015)
- 7) <http://eetimes.jp/ee/articles/1604/27/news094.html> (2016)
- 8) 高木啓, カースタイリング別冊, 139 1/2, 99-105 (2000)
- 9) 山本章善, 内堀憲治, 林清孝, 今井裕道, 瀧澤敏明, 曾根利浩, HONDA R&D Technical Review, 12(1), 1-6 (2000)
- 10) GM ATV, WM7200 Inductive Charger Owner's Manual, P/N27005584 (1998)
- 11) IPT Technology GmbH, Wireless Charging of Electrical Buses with IPT[®] Charge Bus, CAT9200-0003-EN (2014)
- 12) 高橋俊輔, 大聖泰弘, 紙屋雄史, 松本英敏, 成澤和幸, 山本喜多男, 自動車技術会シンポジウム前刷集, No.16-07, pp.47-52 (2008)
- 13) 永田祐之, 木村祥太, 飯田ひかり, 紙屋雄史, 高橋俊輔, 大聖泰弘, 自動車技術会2014年秋季大会学術講演会前刷集, No.149-14, 298, pp.13-18 (2014)
- 14) <http://www.metro-magazine.com/sustainability/news/410998/wave-secures-funding-for-wireless-power-transfer-growth-development> (2016)
- 15) Neil Walker, PRIMOVE Wireless eMobility Inductive opportunity charging for convenient, emission-free mobility (2013)
- 16) 阿部茂, 電学誌, 133(1), 25-27 (2013)

- 17) 藤田稔之, 保田富夫, 岸洋之, 金子裕良, 自動車技術会2016年春季大会学術講演会講演予稿集, No. 065, pp. 342-346 (2016)
- 18) 漆畑栄一, 電子情報通信学会, 信学技報, WPT2012-24, pp. 23-26 (2012)
- 19) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20150217/404565/?ST=eleizing&P=1> (2016)
- 20) Mobilitat weitergedacht, 80Jahre Kompetenz in Antriebstechnik, SEW_EURODRIVE_brochure_17058406
- 21) F. Turki et al., Inductive Charging of Electric Vehicles, ETEV2012 Session3.2 (2012)
- 22) Volvo Car Corporation participates in a project for the development of inductive charging for electric cars, Volvo press release (May 19, 2011)
- 23) BOSCH-EvaTran Press release (2013)
- 24) <http://eetimes.jp/ee/articles/1604/27/news094.html> (2016年5月28日アクセス)
- 25) 西野修三, 田中庸介, 渡辺義孝, 布谷誠, 土井善雄, 大西宏, 二宮大造, 公開特許番号 2015-179704 (2015)

2 EVバスへのワイヤレス充電システムの開発動向

高橋俊輔*

2.1 はじめに

環境問題に注目が集まっている昨今、地球温暖化防止や省エネルギーを目的に、電気自動車（EV）やプラグインハイブリッド自動車（PHEV）、それに電動やプラグインハイブリッドのバスが開発されつつある。外部から給電される電気を電池に蓄え電動機により走行するEVやPHEVは、自動車単体では排ガスを出さないことから、環境対策として大きな期待を寄せられているが、現状では大量普及という状況には及んでいない。この原因のひとつとして、充電の煩雑さがあげられる。このため運転者に作業負担を強いない、簡便かつ感電などの危険を伴わない効率の良い電池への充電技術が求められている。

このような技術として絶縁性が高く、地上のコイル上に駐車するだけで充電ができるワイヤレス充電が注目されている。従来の接触式充電システムに比べ利便性の高いEV用ワイヤレス充電システムはほぼ完成した技術になっているが、未だそれを搭載したEVが市場に現れてこない。これはEVがグローバルな商品で、搭載するワイヤレス充電システムの互換性確保のため世界的な標準化・規格化が求められるからである。一方、EVバスやPHEVバスは地域公共交通手段としての路線バスの台数が圧倒的でローカルな商品であるため、早くからワイヤレス充電システム搭載バスが出現している。

路線バスはバス停では乗降時間の数十秒間停車、ターミナルでも10分程度の停車時間で、1日200km近く走行する。EVバスを通常のディーゼルバスと同様に運用しようとする、充電時間はこの短い停車時間内に行う必要がある。また車両重量が大きく電費はEVの1/10の1km/kWh程度になるため、搭載電池量も非常に大きくなる。大容量電池に短い停車時間で充電するには大出力の充電システムが必要になる。2013年から2年間、環境省の地球温暖化対策技術開発・実証研究事業により東京都港区の「ちいばす」芝ルートで実施されたEVバスの運用において、東芝製の160kWコネクタ式超急速充電器を使うとディーゼルバス並みの運用が可能であることが確認された¹⁾。しかし使用されているコネクタは米国J&B AviationのAppolo400Aコネクタ²⁾で、航空機のAPUへの陸電供給用コネクタとして信頼性が非常に高いが、図1に見られるように大きく重く、最近増えている女性バス運転手が扱うには非常に不便である。

雨や雪の中を車外に出てコネクタを挿抜する必要も無く、コイルの上に停車し、車内で充電ボタンを押すだけで充電が可能なワイヤレス充電システムになれば、安全性や操作性、利便性が高まり、運転手への負担が軽減される。それを確認するため、世界各地でワイヤレス充電式EVバスの運用試験が行われている。そこで、国内外のEVバスに使用されている大電力ワイヤレス充電システム開発の動向を紹介し、今後の検討資料の一助とする。

* Shunsuke Takahashi 早稲田大学 大学院環境・エネルギー研究科
環境調和型電動車両研究室 客員上級研究員



図1 160 kW 超急速充電用コネクタ

2.2 バス用ワイヤレス充電システムの初期の歩み

バスに限らず EV 用のワイヤレス充電システムとして最初に挙げられるものは1986年に米国の k. Lashkari らが発表した PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) プロジェクトでの周波数400 Hz という今では考えられないような低周波を用いた電磁誘導により、道路に埋め込んだ1.8 cm 径のアルミニウム給電線から走行中の7.7 m 長ミニバスに充電するシステムである。これは長さ4.4 m、幅1 m で545 kg もの重量のある受電モジュールに7.5 cm のギャップ長で6~10 kW の電力を送電でき、実験は成功したものの非共振型ワイヤレス給電であったため、漏れインダクタンスにより電源からみた力率が低下し総合効率が60%以下と低かった(図2)。また、漏れ磁束密度が25 cm 高さにおいて車内で40 μ T、車外で1500 μ T、1 m 高さにおいて車内で2.5 μ T、車外で100 μ T と、当時は規定がなかったものの現在の ICNIRP の規定値を考えると大きく超えるもので、実用には至らなかった。なお、コイルの位置ずれを補正するために、車両側に油圧式ピックアップ支持装置が搭載されていて、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20 cm、上下方向10 cm 動かすことができ、最適位置の2.5 cm 以内になるよう位置合わせをしているシステムであった^{3),4)}。

大電力で地上コイルに跨るだけで容易に充電できる静止型ワイヤレス充電システムとしてはドイツ Wampfler の IPT (Inductive Power Transfer) システムがある。ニュージーランド Auckland 大学の A. W. Green と J. T. Boys によって1993年に開発された移動式 IPT レールシステムの電磁誘導技術をベースに、Wampfler は研究を進め1998年に入力3相400 V、周波数20 kHz で最大出力30 kW の円形コイル静止型ワイヤレス充電システム IPT チャージシステムを開発した。エアギャップが5 cm 程度であったため、2次コイルを昇降させるシステムを搭載する

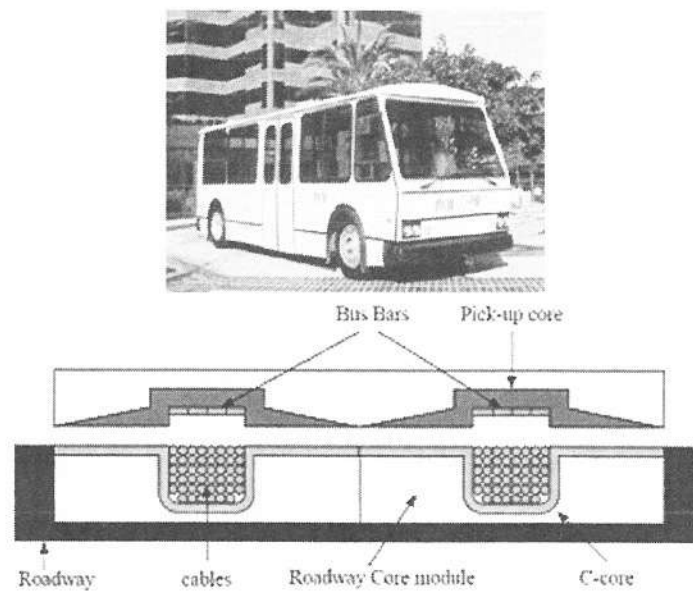


図2 PATH プロジェクトでのEVバスとコイル構造

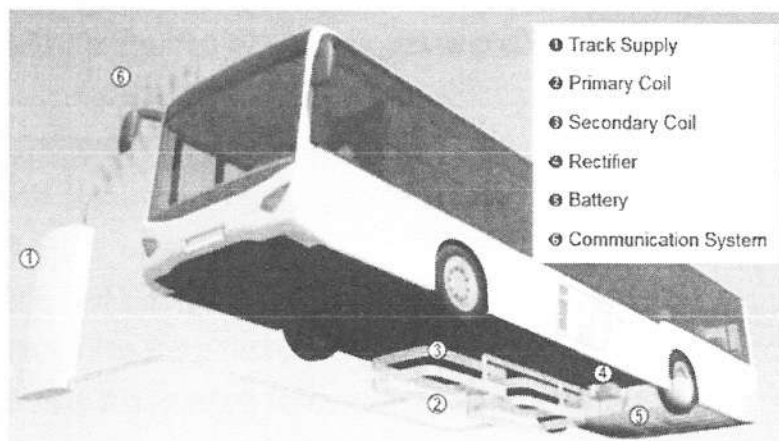


図3 Wampflerが開発したIPTシステム

ことで1次コイルは地面に面一に埋設され、EVバスはその上に停車し受電すると共に、SAE J1773に準拠する制御通信プロトコルを持つ通信システムを通して車上の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システムとの間で充電制御を行うシステムが採用された。海外では2002年に30 kW 型 IPT を2台並列に接続した60 kW 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(図3)⁵⁾。日本でも2004年に早稲田大学が新エネルギー・産業技術総合研究開発機構(NEDO)の先進電動マイクロバス交通システムモデル事業において初代日野ポンチョ改造EVバスWEB-1に30 kW 型 IPT を採用し、各地で運用試験を行い、2008年には国土交通省の次世代低公害車開発・実用化促進プロジェクトモデル化事業(次世代低公害車プロジェクト)において30 kW 型 IPT を搭載した日野ブルーリボン改造 IPT ハイブリッドバスが羽田空港や洞爺湖サミットなどで運用試験を行った。

この IPT システムはその後のバス用のワイヤレス充電システムのベースとなった。

2.3 EV バス用ワイヤレス充電システムの開発動向

EV バス用ワイヤレス充電システムは送受電コイルの設置状況により、①マウンド方式：2 次コイルは床下に固定設置され、コイル間ギャップのところまで 1 次コイルが地表から飛び出ている、②1 次コイル可動方式：2 次コイルを固定設置し、1 次コイルが 2 次コイルに向かって移動する、③2 次コイル昇降方式：地表と面一に設置された 1 次コイルの上に 2 次コイルが降りてくる、④大ギャップ方式：最適化によりコイル間ギャップを大きくして、1 次コイルは地表と面一に、2 次コイルは床下に固定設置されている、の 4 方式がある。

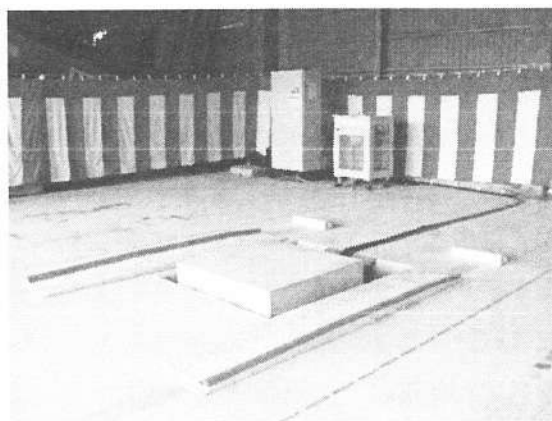
2.3.1 マウンド方式

交通安全環境研究所や日野自動車が国交省の次世代低公害車プロジェクトで開発した IPT ハイブリッドバスを 2008 年に羽田空港や洞爺湖サミットで運用したが、搭載している Wampler 製の周波数 20 kHz、出力 30 kW の IPT システムはコイル間ギャップが 5 cm と小さく、バスの大きな地上高を相殺するために 1 次コイルを地表より出っ張らせるマウンド方式を採用した。また 1 次コイルは欧州仕様の軸荷重の大きな車両にも耐えられるように、112.5 cm × 107.5 cm × 26 cm、730 kg のコンクリートの塊の中に埋設されている。バス営業所のコンクリート床の配筋を切らないように設置したため床から大きく飛び出ることになり、バス床下の 2 次コイル厚みとエアギャップを確保するために、平均台のような車高調整台の上に乗って充電することになった(図 4)⁶⁾。

コイル間ギャップ 5 cm の IPT を搭載した早稲田大学の WEB-1 は最低地上高の低い小型バスであったが固定バネのためエアサスペンション搭載バスのように車高を下げられず、2005 年の本庄市での運用試験では 1 次コイルは地表に設置するマウンド方式を採用した。WEB-1 を使った運用試験で省エネに効果があることが判明し、NEDO は 2005 年から 4 年間、昭和飛行機工業らの研究グループに委託をして IPT と同じ出力 30 kW、周波数 22 kHz の円形コイル型 EV バス用

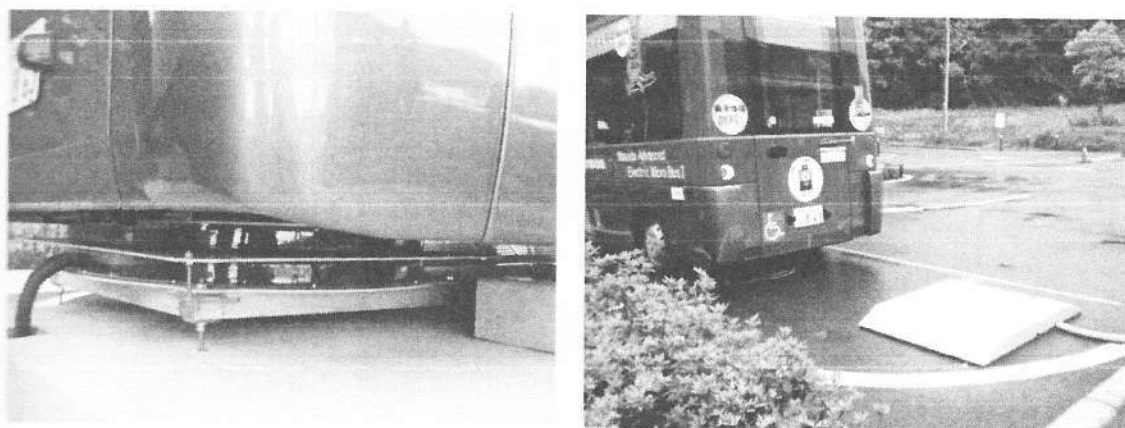


a) 羽田空港



b) 洞爺湖サミット

図 4 IPT ハイブリッドバス用 1 次コイルの設置



a) IPT搭載WEB-1(本庄市)

b) IPS搭載WEB-1Adv.(ユーカリが丘)

図5 WEB-1用1次コイルの設置

ワイヤレス充電システム IPS (Inductive Power Supply) を開発し、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設計を行うことで、コイル間ギャップを5 cm から10 cm 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次コイルの重量や厚みを半分にするなど小型、軽量化が図られている。IPT に換えて IPS を WEB-1 に搭載した WEB-1Adv.も車体構造そのものは WEB-1 と変わっていないため、コイル間ギャップ10 cm でも最低地上高をカバーできず2008年から2010年にかけて3回行われた奈良市での運用試験や2010年の千葉県ユーカリが丘での運用試験では1次コイルは地表に設置するマウンド方式を採用している(図5)⁷⁾。

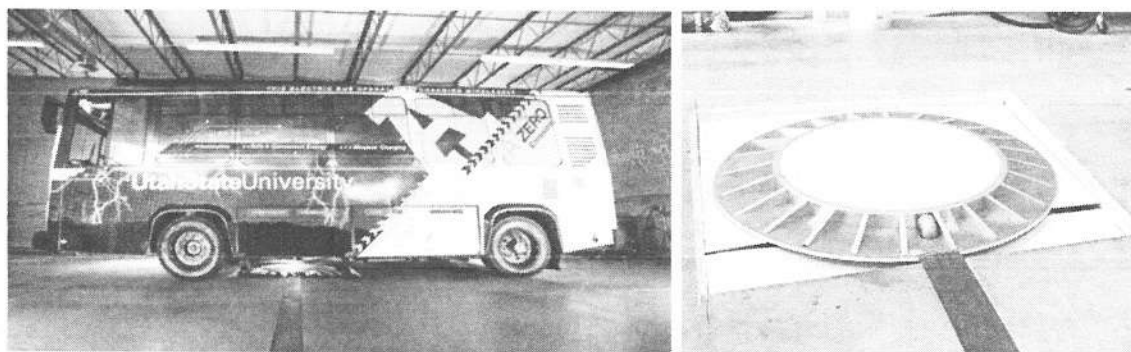
Auchland 大学出身の H. Wu が2012年にユタ州立大学で周波数20 kHz、出力25 kW の円形コイル型ワイヤレス充電システムをキャンパスバスの Aggie Bus に搭載運用したが、エアギャップが17.8 cm とバスの地上高に比べ小さいために、やはりマウンド方式としている(図6)⁸⁾。

マウンド方式は上に車両が乗ることはないので、1次コイルを設計する際に耐荷重やスリップ性などを考慮する必要はないが、大きなコイルが地表より飛び出ているため、他の車両が通行する一般の道路上に設置することができず、路線バス用での設置はバス営業所や駐車場程度で汎用性がなく、最近の EV バス用ワイヤレス充電システムで使われている事例はない。

2.3.2 1次コイル可動方式

CES2015で AUDI がデモ展示を行った周波数85 kHz、出力3.6 kW の1次コイルを蛇腹状の可動部を使って昇降させる方式である。最近では Bombardier も EV 用にこの方式を提案している。EV バス用としては国交省の次世代低公害車プロジェクトにおいても検討されたが、大出力ワイヤレス充電システムではコイルが大きく、重いためこの方法は採用されなかった。

また、1次側コイルを可動させる方式として電磁誘導方式の位置合わせ精度および道路上設置の課題を解決するために、2009年、次世代低公害車プロジェクトにおいて IPS ハイブリッドバスの側面に2次コイルを固定設置し、 balancer 機能を装備した周波数22 kHz、出力50 kW の



a) 充電中のAggie Bus

b) 1次コイル

図6 ユタ州立大学での1次コイルの設置

1次コイルを人力で押し付けてワイヤレス給電を行う運用試験をEVバスの営業所で行った。ギャップも小さく1次コイルの周囲にシールド枠を設置したこともあり、コイル直近でも人体防護を含め電磁漏洩も基準値内に入り問題はなかったが、コネクション操作が不要というワイヤレス給電の特徴を損ねる構造とバランスーの大きさとコストに課題があると評価されている(図7)⁹⁾。

これら1次コイル可動方式は国交省の検討のようにEVバス用としては1次コイルが大きく重いことから、その駆動システムが高価であること、また地面に穴を掘って設置するため雨や雪に対する防水対策と排水設備の必要性、メンテナンスコストが大きいなど課題が多く、採用される可能性は今後も少ないと思われる。

2.3.3 2次コイル昇降方式

WampllerはIPTの開発当初から2次コイルを1次コイルの上に降ろすシステムを採用していて、前述のイタリアのTurin市やGenoa市の電気バスに搭載されたIPT(30kWが2台並列で60kWの電力伝送)は2次コイル昇降方式となっている。そのIPTを採用した次世代低公害車プロジェクトのIPTハイブリッドバスでは2次コイル昇降式を取り入れ、その後、大ギャップ

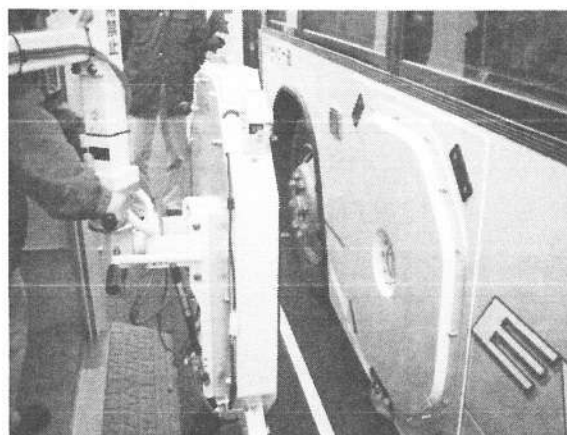
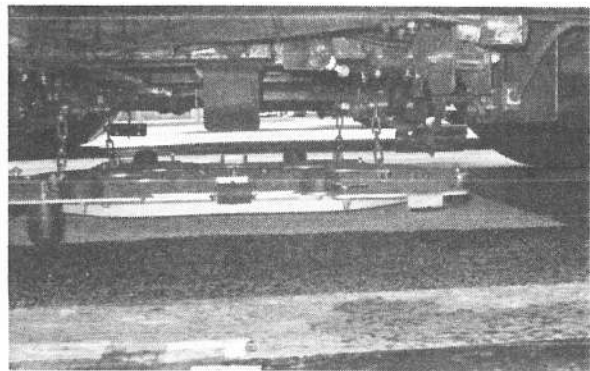


図7 IPSハイブリッドバスへの側面給電



a) IPSハイブリッドバス



b) 1次コイル上に下降した2次コイル

図8 東京駅南口でのIPSハイブリッドバスと充電状況

が可能である昭和飛行機工業の周波数22 kHz、出力50 kWのIPSを採用してからも、2009年4月の東京駅南口と晴海埠頭、2011年12月の東京ビッグサイトと豊洲駅に設置したワイヤレス充電システムでは1次コイルを地面に埋め込み、2次コイルを昇降させエアギャップ数cmで充電するシステムであった(図8)⁹⁾。

2014年1月から三井物産は英国のコンサルティング会社 Arup と組んで London の北西80 kmにある Milton Keynes 市のルート No. 7において全8台のバスを Wright Bus 製のワイヤレス給電式EVバスに置き換えて毎日17時間、片道57便で計5年間運行し、商業化に向けたデータの蓄積を行っている。ワイヤレス充電システムは Conductix-Wampfler の関連会社 IT Technology の周波数20 kHz、出力120 kW (30 kW 型を4台並列接続)のIPTを両ターミナル駅と中央駅の3ヶ所に設置して、両ターミナル駅で10分間の充電を行い、片道24 kmの路線を走らせている。中央駅ではEVバスのSOC(充電率)の状況に応じて充電をする計画になっているが、中央駅ではほとんど充電をしたことがなく、両ターミナル駅の充電だけで賄えている。しかしながらコイル間ギャップが5 cm程度と小さく、Turin 市の場合と同じように充電時に懸架装置を使って車両側の2次コイルを図9のように1次コイルの上に降ろすシステムを採用している。ギャップが小さくなることで結合係数が大きくなり、漏れ磁束の減少により電磁放射が少なく EMC 的には楽になるというメリットの方が大きいと思われる¹⁰⁾。この他にも2012年にオランダの s-Hertogenbosch 市の12 m 長 PHEV バスに Milton Keynes 市と同じシステムを、2015年には London 市内ルート No. 69の11 kmの路線に3台の2階建 PHEV バスなどに、出力を1モジュール100 kWにして2台並列接続の200 kWにしたシステムを搭載し、運用している¹¹⁾。

鉄道車両や航空機のメーカーの Bombardier は自社開発の PRIMOVE 技術と呼ぶ周波数20 kHzのワイヤレス式走行中給電システムを、2012年に Flanders' DRIVE research project においてベルギー Lommel 市の1.2 kmの道路に埋め込んで自社の MITRAC e-bus への走行中給電の実証をした。地上のコイルは車体長より短い区間に区切られ、車両が上に来た時にだけ電流を流す PRIMOVE 技術で電磁波の影響を最小限化していて、磁束密度は EU 基準に適合している¹²⁾。

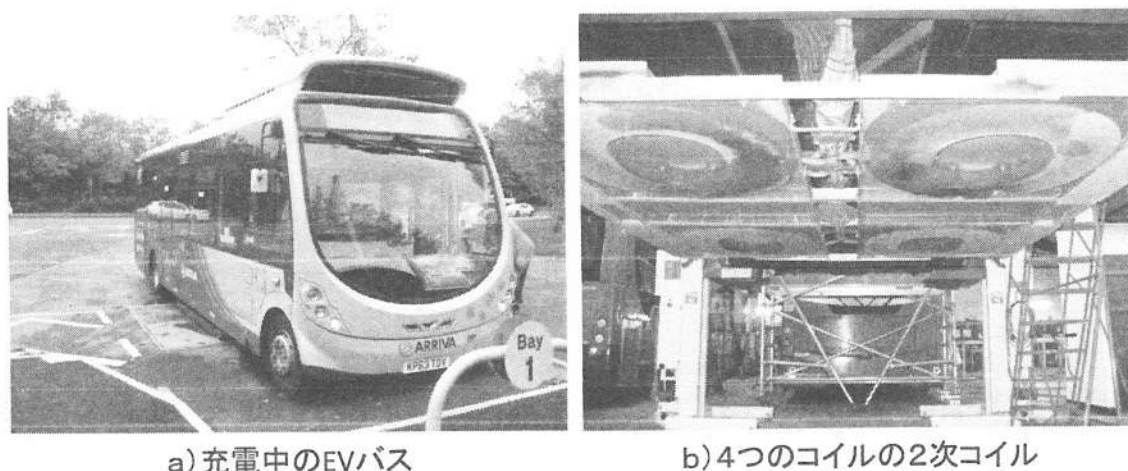


図9 Milton Keynes 市での充電とコイル配置

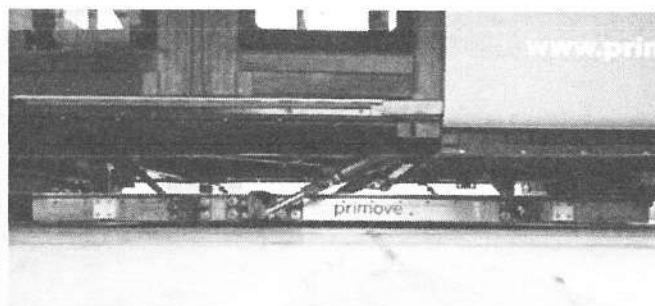
また、2014年に Braunschweig・Verkehr はドイツの Braunschweig 市の全長12 km の環状ルート M19のターミナル駅に2か所と反対側のバス停1か所の計3か所に Bombardier の周波数20 kHz、効率92%、出力200 kW の電磁誘導式円形コイル型ワイヤレス充電システムを設置し、ターミナルでは11分間、バス停では乗客が乗り降りする30秒間に Solaris 製の12 m バスと18 m 連接バスに充電し、平日10分間隔で39分を掛けて1周する運用をしている。2015年10月からベルギーの Bruges 市で DeLiJN は PRIMOVE を搭載した3台の Van Hool 製 EV バスを世界遺産となっている中世の雰囲気を残した石畳の都市を走らせている。充電場所は世界遺産の街中には設置が難しく、駅近くのバス営業所に2基の200 kW 型ワイヤレス充電システムと3基のコンボタイプの接触式急速充電器を設置して充電を行っている。またドイツの Mannheim 市でも Rhein-Neckar Verkehr が2台の12 m 長 EV バスを使って、都心のルート63に沿っての9 km の間のターミナル2か所と通常のバス停4か所に出力190 kW のワイヤレス充電システムを設置し、両ターミナルで5分間、バス停では乗客が乗り降りする15秒間に SOC94%までの充電をする運用が始まっている¹³⁾。これら Bombardier のシステムも IPT Technology と同じように2次側コイルを地上充電コイルの上に機械的に降ろして数 cm のエアギャップで電力伝送をしているが、2次コイルサイズは200 kW 型にかかわらず220 cm × 90 cm と小型である(図10)。

これらのシステムにおける2次コイルの下降時間と上昇時間はそれぞれ2～5秒程度で、これによって充電時間が大幅に伸びるようなことはない。

この方式は①高価な懸架装置をバス台数分用意する、②コイルの昇降のため大事な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機械的な懸架装置のメンテナンス費用が掛かる、などコスト高になる課題があるが、2次コイルが1次コイルに近づきエアギャップが小さくなることで結合係数が大きくなるため、また大出力になっても電磁放射を抑制できると共にコイル設計が楽になりコイルサイズを小さくできるためトータルコスト的には安くなる。図11に国内外の2次コイル昇降方式と次目の大ギャップ方式のワイヤレス充電式 EV バ



a) 1次コイルに向かうEVバス



b) 1次コイル上に下降した2次コイル

図10 Braunschweig 市での EV バスと充電状況

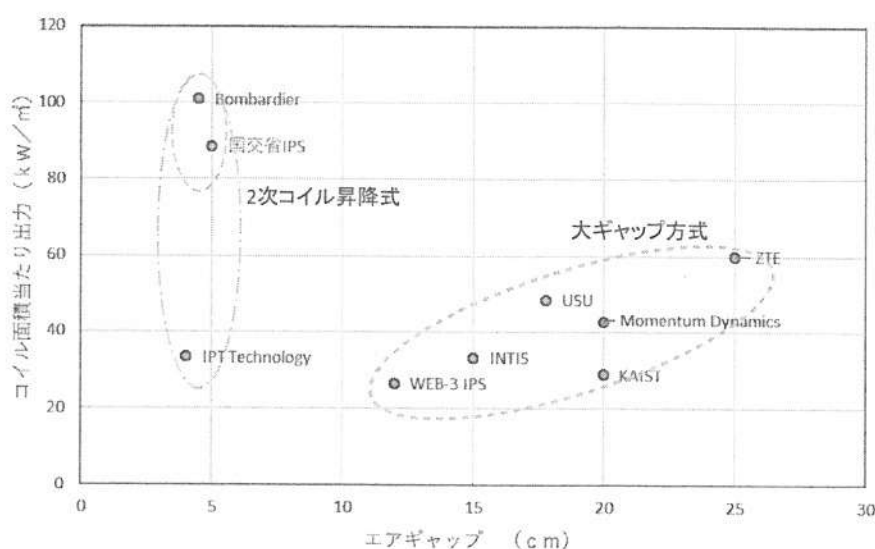


図11 エアギャップとコイル単位面積当たりの出力

スのエアギャップとコイル単位面積あたりの出力の関係を示す。この図で国交省 IPS は30 kW 型と同じコアサイズの受電コイル (0.847 mφ) で50 kW を送電できることから、2次コイル昇降方式は大ギャップ方式に比べ単位面積あたりの出力が大きいことがわかる。ここで IPT Technology は図9に見られるように4台のコイル間の隙間が多く単位面積あたりの出力が小さくなったものと思われる。

2.3.4 大ギャップ方式

早稲田大学は最適化設計を行うことでコイル間ギャップを大きくして、1次コイルは地表と面一に、2次コイルは床下に固定設置する大ギャップ方式を追及していて、IPS を搭載した初代日野ポンチョを改造した WEB-1Adv. が固定バネのため、エアサスペンションによるニーリング機能を装備し、バリアフリーのため車高を下げられる第2世代日野ポンチョを採用することにした。昭和飛行機工業とともに環境省の産官学連携事業の委託を受けて、IPS に改良を加え周波数 22 kHz, 総合効率92%, 出力30 kW を維持したまま、コイル間ギャップを10 cm から14 cm とし、



a)WEB-4と1次コイル

b)大ギャップ充電状況

図12 1次コイルの設置と大ギャップ充電

2009年に床下に2次コイルを固定搭載したWEB-3を開発し、地面に面一に設置した1次コイルに対してニーリング機能によりエアギャップ12 cmまで最低地上高を下げるだけでワイヤレス充電できるシステムを作り、各地で運用試験を実施した。2011年に環境省のチャレンジ25地域づくり事業でWEB-4も製作、1次側コイルを長野駅前の駐車場とバス営業所の地面に設置して、2台のEVバスを使って長野市内で3年間運用し、雨や雪が降っても、また盆地特有の酷暑の中でも問題なく運用できることを確認した(図12)¹⁴⁾。

2014年から3年間、環境省のCO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業で早稲田大学は東芝とともに新たなワイヤレス充電システム搭載のEVバスの開発に取り組んでいる。絶対数が必要なEV用のワイヤレス充電システムを複数個並列接続させてEVバス用ワイヤレス充電システムを構築することでシステムを安価にし、バスへのワイヤレス給電の普及を図ることを目的としている。東芝が開発した周波数85 kHz、出力7 kWのソレノイド型磁界共振式ワイヤレス充電システムを22 kWにパワーアップし、2台並列接続することで44 kW型EVバス用ワイヤレス充電システムとしてWEB-3の30 kW型IPSの代わりに搭載、電池も東芝製SCiBとしたWEB-3Adv.を早稲田大学と東芝で共同開発した。エアギャップは10.5 cmでニーリングだけで充電できる。川崎市殿町のANAビジネスセンターに充電設備を設置し、2016年度にマイクロバスのWEB-3Adv.と日野メルファを改造した中型EVバスおよびEVとの充電システムの共用運用を実施する(図13)¹⁵⁾。

中国の総合通信機器メーカーのZTE(中興通訊)は2011年6月からワイヤレス給電の研究を開始、2012年に携帯電話用を開発するとともに高出力用も研究開始、2013年に携帯端末へのワイヤレス給電標準化団体であるPMA(Power Matters Alliance)に参加し、その僅か2年後の2015年4月に深圳で開かれた第3回中国電子情報博覧会に業務提携をしているバス製造大手の宇通客車のEVバスにワイヤレス充電システムを搭載して発表するなど、4年ほどで急速な開発を行った。引き続き戦略的パートナーシップを38都市と締結し、2015年から深圳本社だけでなく長春、張家口、フフホト、鄭州、惠州、恵東、襄陽、成都、大理、麗江、貴陽の11都市の公共交通



a) 充電中のWEB-3Adv.

b) 1次コイルと電源装置

図13 大ギャップ充電と1次コイルの設置状況

機関とともにワイヤレス充電式EVバスの運用を行っている。周波数85 kHzの円形コイル型磁界共振式を採用し、エアギャップ16~25 cm、非常に小型の出力120 kWの高周波電源で60 kW型2台もしくは120 kW型1台を総合効率90%で駆動するシステムである。基本的には大ギャップ方式であるが、どうしてもエアギャップが足りない時には2次コイル昇降式も採用している(図14)。路車間通信はWiFi+3G/4G、充電規格はGB17626を採用している¹⁶⁾。

ユタ州立大学でマウンド方式のワイヤレス充電システムを搭載したAggie Busを開発したH. Wuが技術部長をしているWAVE(Wireless Advanced Vehicle Electrification)は周波数23.4 kHz、50 kWのワイヤレス充電システムを2台のEVバスに搭載し、Monterey Salinas Transitが全米で初めて2015年6月からカリフォルニア州のMonterey市で6.5 kmの距離を30分間走行して、10分間充電するという運用を行っているが、実用を考えて1次コイルはマウンド方式ではなく地表と面一に設置され、2次コイルを床下から吊り下げてエアギャップ17.8 cmに設置している(図15)¹⁷⁾。



a) ミニバスと地上コイル

b) 地上コイルと昇降式2次コイル

図14 ZTEのワイヤレス充電システム



図15 WAVEの一次コイル設置状況

韓国の KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) は2009年5月から 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 と呼ばれる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、キャンパス内シャトル用の EV バスや Yeosu (麗水市) Expo 2012での EV バスに搭載して実績を積み、2013年7月から Daejeon (大田) 市の東90 km にある Gumi (亀尾) 市で24 km のルートの両端のターミナルで静止中充電、途中の4か所でそれぞれ36 m の走行中給電の運用を始めた。幅80 cm の給電コイルから周波数20 kHz、効率85%で200 kW 送電し、17 cm ギャップを通して容量15 kW、サイズ125 cm×69 cm の2次コイル5台で受電している。しかし、送電路長さが計144 m と短く、ほとんどの電力は両ターミナルでの静止中充電で賄われているのが現状である(図16)¹⁸⁾。

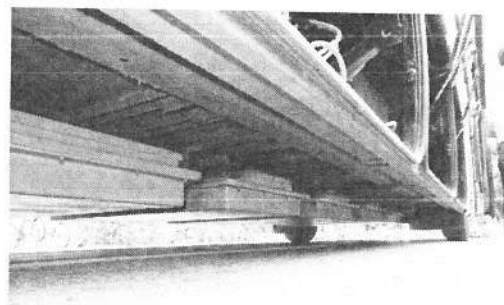
その他に米国の Momentum Dynamics は2013年に周波数23.5 kHz、出力50 kW、エアギャップ15~20 cm で効率91%の円形ワイヤレス充電システムをバスに乗せて運用試験を行った¹⁹⁾。また INTIS は2014年に周波数35 kHz で出力60 kW をエアギャップ15 cm でワイヤレス給電するシステムを発表している²⁰⁾。

2.4 おわりに

EV バス用のワイヤレス充電システムの開発動向をみてきたが、コイルを普通に道路設備の一部として設置ができ、車両側も床下に固定設置できる大ギャップ方式が使い易く、初期費用とメンテナンスコストも低くでき、一番普及させ易いシステムであると考えられる。ワイヤレス充電システムの研究開発が進み、大ギャップでも電磁漏洩が少なく、安全で運転手への負担が少ない



a) 走行中給電バスと地上コイル



b) 2次コイルの設置とギャップ

図16 KAIST の走行中ワイヤレス充電システム

EV バス用ワイヤレス充電システムが早く出現し、EV バスに搭載され広く普及されることを願っている。

文 献

- 1) <https://www.city.minato.tokyo.jp/chikyukankyou/kankyo-machi/kankyo/kehatsu/ev-fukyusokushin.html>
- 2) J&B Aviation Services, "Apollo™ Power Connectors", 3030 JBA102109
- 3) K. Lashkari, S. E. Schladober, E. H. Lechner, "Inductive power transfer to an electric vehicle" Proc. 8th Int. Electric Vehicle Symp. 1986, pp. 258-267 (1986)
- 4) 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)
- 5) IPT Technology GmbH, Wireless Charging of Electrical Buses with IPT® Charge Bus, CAT9200-0003-EN (2014)
- 6) 河合英直, 電気動力ハイブリッドシステムの評価に関する取組, 交通安全環境研究所講演会資料 (2008)
- 7) 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)
- 8) H. Wu, "A High Performance 50 kW Inductive Charger for Electric Buses", IEEE ECCE2013, SS3. 3 (2013)
- 9) 国土交通省都市・地域整備局街路交通施設課, 電気自動車等の導入による低炭素型都市内交通空間検討調査報告書, 平成22年3月, pp. 2-53 (2010)
- 10) Maq Alibhai, "Wirelessly charged electric buses in Milton Keynes", Eurotransport, Volume

- 12, Issue 2 (2014)
- 11) P. Grand, U. Guida, T. Raitaluoto, "EBUS CHARGING SYSTEMS STANDARDIZATION PROCESS", CEN/CENELEC Workshop 02/02/2016, pp. 27 (2016)
 - 12) H. Perik, "Feasibility research of wireless power transfer for electric vehicles", Flanders' DRIVE report (2012)
 - 13) FTA Research, "Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications", FTA Report No. 0060, Aug. (2014)
 - 14) 永田祐之, 木村祥太, 飯田ひかり, 紙屋雄史, 高橋俊輔, 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9報), 自動車技術会2014年秋季大会学術講演会前刷集, No. 149-14, 298, pp. 13-18 (2014)
 - 15) http://www.toshiba.co.jp/about/press/2016_05/pr_j3101.htm
 - 16) LIU Hongjun, LIU Junqiang, ZHOU Dong, "ZTE EV WPT Solution and Application", CJK WPT WG #10, December, 16~17 (2015)
 - 17) <http://www.montereyherald.com/article/NF/20150608/NEWS/150609796>
 - 18) CHUN, Yangbae, "Korean OLEV Update", CJK-WPT05-016_TTA, APR, 15~17 (2014)
 - 19) <http://momentumdynamics.com/momentum-dynamics.html>.
 - 20) R. Effenberger, "Inductive Energy Transfer on the move Solutions for Bus, Logistics and Taxi Traffic", Informationsreise Singapur 2014, 02.06 (2014)