

エレクトロニクスシリーズ

# ワイヤレス給電技術の最前線

Frontiers of Wireless Power Transmission Technologies

監修：篠原真毅

Supervisor : Naoki Shinohara

HIGH TECHNOLOGY  
INFORMATION

シーエムシー出版

## はじめに

「どんな線をも使わずに施設から施設へ電力を送る」

この夢は 2012 年の今語られたものではない。1897 年にアメリカバッファローで講演した Nikola Tesla が語った夢である。実際彼はこの夢を実現するために巨大な実験設備を作り、実証実験を行い、そして失敗した。Tesla は早すぎた天才であった。Edison と交流/直流送電方式で一度は Edison の直流方式に敗北しそうになったものの最終的に Tesla の交流送電は世界のスタンダードとなり、同時に Tesla は Marconi と無線通信の特許をめぐって争っていた。Tesla は電気と電磁気現象と電波がすべて同じエネルギーであるということを見抜いていたのである。

Tesla の夢と挫折から 100 年余りが過ぎ、「どんな線も使わずに電力を送る」システムが 21 世紀に暮らす私達の身の回りに現れ始めた。電池を使わずに情報をやり取りする IC カード「Felica」や「RF-ID」、電磁誘導の Qi 規格に準拠した携帯電話非接触充電器、電界共鳴を用いたタブレット端末の非接触充電器、電気自動車の非接触充電システム、周辺電磁波からエネルギーを収穫（ハーベスト）するレクテナ（電磁波エネルギーハーベスター・アンテナ）等、Tesla は今頃ほくそ笑んでいるにちがいない。「やはり私は正しかった」と。

これらのワイヤレス給電の技術は Tesla からいきなり 100 年後の今にジャンプしたわけではない。電磁気学と電波工学の発展による電磁気・電磁波現象の応用の発展、通信技術の飛躍的な進歩による電波利用の爆発的な拡大、60 年代以降行われた数々のマイクロ波無線電力伝送実験とそれを利用した宇宙太陽発電所 SPS の提唱と研究、通信技術が発展させた共振結合を利用した共振器フィルターの技術、IC や LED という半導体・デジタルデバイスの発展によるユーザー消費電力の低下、ナノテクの発展により発展した MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の実現とエネルギーハーベスティングの概念の深化、等先人達の積み重ねの上に、Tesla の夢が 21 世紀に花開いたのである。今後は情報とエネルギーが融合したコードレスシステムがより一層普及し、宇宙に浮かぶ発電所からマイクロ波エネルギーで地上に電力が送られてくる、そんな未来となることであろう。

この本はそのような未来に向け、過去と現在の研究を網羅したものである。第 1 章では「ワイヤレス給電技術の基礎」として、これまでのワイヤレス給電の概要を述べた後に、エネルギーの伝播と変換に関する基礎理論と基本となる技術について解説する。同時にワイヤレス給電システムを開発する際に必ず問われる電磁界の安全性に関して低周波から高周波まで解説する。そしてエネルギーハーベスティングまで含めたワイヤレス給電の標準化動向の今についてまとめている。第 2 章では主に電磁波、特にマイクロ波を用いたワイヤレス給電の応用例についてまとめている。電磁波エネルギーハーベスティングも本章に含まれている。第 3 章では電磁気や共振現象を用い

たカップリング現象を利用したワイヤレス給電の応用例をまとめている。諸般の事情で最新技術や標準化動向のすべてを網羅できたわけではないが、すべてはマックスウェル方程式へ戻るワイヤレス給電の基礎から応用までを本書はまとめており、これからワイヤレス給電の研究や開発を行う読者に最適な解説書であると自負している。本書がTeslaと共に夢を見たい関係諸氏の一助となれば幸いである。最後になるが、多くの第一線の研究開発でご活躍される研究者、技術者の方々より玉稿をいただいたことに心よりお礼申し上げたい。

京都大学  
篠原真毅

## — 執筆者一覧 —

篠原 真毅	京都大学 生存圏研究所 教授
篠田 裕之	東京大学 情報理工学系研究科 システム情報学専攻 准教授
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
栗井 郁雄	(株)リューテック 代表取締役
陳 強	東北大学 大学院工学研究科 電気・通信工学専攻 准教授
大野 泰夫	徳島大学 ソシオテクノサイエンス研究部 教授
本城 和彦	電気通信大学 情報理工学系研究科 情報・通信工学専攻 教授
川崎 繁男	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授
三谷 友彦	京都大学 生存圏研究所 助教
藤森 和博	岡山大学 大学院自然科学研究科 助教
宮越 順二	京都大学 生存圏研究所 特定教授
黒田 直祐	(株)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
橋本 弘藏	(財)古代学協会 事務担当理事；京都大学名誉教授
竹内 敬治	(株)NTT データ経営研究所 社会・環境戦略コンサルティング本部 シニアスペシャリスト
阪口 啓	東京工業大学 大学院理工学研究科 電気電子工学専攻 准教授
古川 実	日本電業工作(株) 事業開発部 第1R・Dグループ グループ長
安間 健一	三菱重工業(株) 航空宇宙事業本部 宇宙事業部 宇宙システム技術部 電子装備設計課
丹羽 直幹	鹿島建設(株) 技術研究所 上席研究員
藤野 義之	情報通信研究機構 宇宙通信システム研究室 主任研究員
佐々木 進	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 教授
高橋 俊輔	早稲田大学 環境総合研究センター 参与
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
市川 敬一	(株)村田製作所 技術・事業開発本部 新規事業推進統括部
原川 健一	(株)竹中工務店 技術研究所 主任研究員
竹野 和彦	(株)NTTドコモ 先進技術研究所 環境技術研究グループ
北 真登	ソニー(株) 半導体事業本部 研究開発部門 先端信号処理研究2部 1課
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
松木 英敏	東北大学 大学院医工学研究科 医工学専攻 教授

# 目 次

## 第1章 ワイヤレス給電技術の基礎

1	ワイヤレス給電技術の概要 篠原真毅…1		
2	ワイヤレス給電の伝播技術…4		
2.1	アンテナと電波伝搬 篠原真毅…4		
2.1.1	電磁波の伝播…4		
2.1.2	開口アンテナ近似を用いたビーム 収集効率の計算…5		
2.1.3	アンテナと効率…11		
2.2	伝送シートを用いたワイヤレス給電 篠田裕之…16		
2.2.1	はじめに…16		
2.2.2	伝送シートによる選択的給電と使 用する周波数…16		
2.2.3	伝送シートの特性を記述するパラ メータ…18		
2.2.4	伝送シート周囲の電磁場…19		
2.2.5	金属共振体との相互作用…21		
2.2.6	保護層の導入…23		
2.2.7	電磁場閉じ込め構造による選択給 電…25		
2.2.8	給電の選択制と EMC…27		
2.2.9	おわりに…28		
2.3	共振器を用いたワイヤレス給電技術 —電磁誘導理論より— 小紫公也…29		
2.3.1	長ギャップを有する電磁誘導と漏 れインダクタンス…29		
2.3.2	電力伝送効率と指標関数 $kQ$ …31		
2.3.3	高 $Q$ 値コイルを用いたワイヤレ ス給電…32		
2.3.4	共振周波数の双峰性とインピーダ ンス整合…33		
2.3.5	高 $Q$ 値コイル…34		
2.3.6	交流周波数の選択…36		
2.4	共振器を用いたワイヤレス給電技術 —フィルター理論より— 粟井郁雄…37		
2.4.1	はじめに…37		
2.4.2	$0\Omega$ 電源に対する BPF 理論…38		
2.4.3	WPT 回路に対する条件…42		
2.4.4	設計例…43		
2.4.5	他の設計法との比較…45		
2.4.6	システムとしての伝送効率 —むすびに代えて…47		
2.5	共振器を用いたワイヤレス給電技術 —アンテナの視点より— 陳 強…51		
2.5.1	はじめに…51		
2.5.2	無線電力伝送効率の最大化条件 …51		
2.5.3	インピーダンス整合と電力伝送効 率…52		

2.5.4	アンテナの導体損失と電力伝送効率	55	3.4	位相制御マグネトロン 三谷友彦	85
2.5.5	整合回路の損失と電力伝送効率	56	3.4.1	はじめに	85
2.5.6	おわりに	57	3.4.2	マグネトロンの発振スペクトル	86
3	ワイヤレス給電の変換技術		3.4.3	位相制御マグネトロン	87
	—発生と整流—	59	3.4.4	振幅制御機能を有する位相制御マグネトロン	90
3.1	GaN 半導体 大野泰夫	59	3.4.5	位相制御マグネトロンを用いたフェーズドアレー	92
3.1.1	はじめに	59	3.4.6	おわりに	92
3.1.2	窒化ガリウム	59	3.5	レクテナ整流回路理論 藤森和博	95
3.1.3	トランジスタ構造	60	3.5.1	レクテナとは	95
3.1.4	電流コラプス	62	3.5.2	レクテナの構成	95
3.1.5	高耐圧化	63	3.5.3	高周波整流回路の基本動作	97
3.1.6	整流用ダイオード	63	3.5.4	様々なタイプのレクテナ	100
3.1.7	成長基板の選択	64	3.5.5	レクテナアレー	103
3.1.8	まとめ	65	3.5.6	レクテナ開発の今後の展望	105
3.2	半導体マイクロ波増幅回路		4	電磁界電磁波防護指針と生体影響	
	本城和彦	66		宮越順二	107
3.2.1	高電力効率化を実現する概念	66	4.1	電磁波の生体影響	107
3.2.2	F 級・逆 F 級増幅器を実現するための回路理論	68	4.1.1	はじめに	107
3.2.3	寄生素子を含むトランジスタに対する F 級・逆 F 級回路設計理論	70	4.1.2	電磁波による健康問題の歴史的背景	107
3.2.4	マイクロ波 F 級の設計試作例	72	4.1.3	電磁波影響の評価研究	108
3.3	アクティブ集積アレーアンテナ		4.1.4	国際がん研究機関 (IARC) や世界保健機関 (WHO) の評価と動向	112
	川崎繁男	76	4.1.5	電氣的 (電磁) 過敏症	115
3.3.1	概要	76	4.1.6	電磁波生体影響とリスクコミュニケーション	116
3.3.2	集積アンテナ	77	4.1.7	おわりに	116
3.3.3	要素技術	78			
3.3.4	アレーアンテナ	80			
3.3.5	まとめ	83			

5	標準化動向	119
5.1	ワイヤレスパワーコンソーシアムの活動(Qi規格) 黒田直祐	119
5.1.1	はじめに	119
5.1.2	WPCの標準化活動	119
5.1.3	ワイヤレスパワーコンソーシアム(WPC)について	120
5.1.4	Volume-1規格の概要	122
5.1.5	WPC規格充電システムの概要	123
5.1.6	電力の制御と通信	125
5.1.7	「規格書 Part-2」パフォーマンスに関する要求	128
5.1.8	「規格書 Part-3」規格適合認定試験について	128
5.1.9	規格適合認定試験のプロセスとライセンス製品の販売	128
5.1.10	おわりに	128

5.2	ITUでの無線電力伝送の議論状況	橋本弘藏	130
5.2.1	はじめに	130	
5.2.2	国際電気通信連合 (ITU)	130	
5.2.3	ITUにおける無線電力伝送に関する議論の概略	130	
5.2.4	これまでの干渉解析の概要	134	
5.2.5	むすび	135	
5.3	エネルギーハーベスティングコンソーシアムの活動 竹内敬治	138	
5.3.1	はじめに	138	
5.3.2	エネルギーハーベスティングとは	138	
5.3.3	ワイヤレス給電技術とエネルギーハーベスティング技術との関係	140	
5.3.4	エネルギーハーベスティングの標準化動向	142	
5.3.5	エネルギーハーベスティングコンソーシアムの活動	144	

## 第2章 応用技術—電磁波利用—

1	ワイヤレス給電の歴史 篠原真毅	147	
1.1	1960-70年代	147	
1.2	1980-90年代	150	
1.3	2000年代以降	152	
1.4	まとめ	154	
2	センサーネットワークへの給電	阪口 啓	158
2.1	はじめに	158	
2.2	ワイヤレスグリッド	159	

2.3	950MHz帯周波数スペクトル	159
2.4	センサーノードのハードウェア構成	160
2.5	面的なワイヤレス給電の設計項目	161
2.6	ワイヤレス給電の回線設計	161
2.7	ワイヤレス給電のカバレッジ拡大技術	161
2.8	ワイヤレス給電の特性評価	164

3	電磁波エネルギーハーベスティング		
		古川 実	167
3.1	エネルギーハーベスティングの概要		167
3.2	受電可能な電磁波エネルギー量		167
3.2.1	空間中の電磁波エネルギー		167
3.2.2	受電電力の予測		167
3.3	電磁波エネルギーハーベスティングの原理		169
3.3.1	ハーベスティングデバイス		169
3.3.2	高出力化手法		169
3.4	製品例		170
3.4.1	無線 LAN 波収穫用レクテナ (日本電業工作株)		170
3.4.2	地上デジタル放送波収穫用 (日本電業工作株)		171
3.5	まとめ		171
4	電気自動車無線給電システム		
		安間健一	173
4.1	開発背景, 目的について		173
4.2	無線充電システム原理		173
4.3	本システムの設備概要		175
4.4	本システムの特長・利点		177
4.5	現在の開発状況		178
4.6	課題と今後の展望		179
5	建築構造物を用いたマイクロ波無線ユビキタス電源	丹羽直幹	181
5.1	はじめに		181
5.2	システム概要		181
5.3	要素技術		183
5.4	実大空間試作・評価		189
5.5	おわりに		191
6	飛翔体への無線給電システム		
		藤野義之	194
6.1	飛翔体への無線給電の歴史および概論		194
6.2	マイクロ波送電小形模型飛行機実験 (MILAX 実験)		195
6.3	無人飛行船のマイクロ波駆動実験 (ETHER 実験)		197
6.4	まとめ		199
7	配管中移動ロボットへの無線給電システム		
		篠原真毅	201
8	宇宙太陽光発電システム		
		佐々木 進	205
8.1	はじめに		205
8.2	宇宙太陽光発電システムの仕組み		205
8.3	宇宙太陽光発電システムの研究の歴史		206
8.4	宇宙太陽光発電システムに必要な技術と課題		207
8.5	宇宙太陽光発電システムの研究の現状		207
8.6	宇宙太陽光発電システム実現への展望		208
8.7	おわりに		210

### 第3章 応用技術—カップリング利用—

1 電気自動車用ワイヤレス給電システム (電磁誘導) 高橋俊輔……………211	4 ワイヤレス電力伝送技術を統合した直流 給電システム 原川健一……………239
1.1 はじめに……………211	4.1 はじめに……………239
1.2 電磁誘導方式の原理……………211	4.2 理想の姿を考える……………239
1.3 電磁誘導方式の開発……………212	4.3 電力・通信統合層……………240
1.4 電動バスによる実証走行試験……………216	4.3.1 直流送電……………240
1.5 おわりに……………217	4.3.2 通信機能……………243
2 電磁共鳴を用いた電気自動車向け非接触 充電システムの開発 居村岳広……………218	4.4 ワイヤレス電力伝送……………243
2.1 はじめに……………218	4.4.1 直列共振電力伝送方式……………244
2.2 磁界共鳴と電気自動車へのワイヤレ ス充電の適応……………218	4.4.2 並列共振電力伝送方式……………246
2.3 MHz から kHz へ……………223	4.4.3 フリーポジション電力供給技術 ……………246
2.4 素早いインピーダンスマッチング……………225	4.4.4 通信機能……………247
2.5 まとめ……………228	4.4.5 安全性……………247
3 非対称結合構造を用いた電界結合型ワイ ヤレス給電システム 市川敬一……………230	4.5 適用イメージ……………247
3.1 はじめに……………230	4.6 まとめ……………248
3.2 基本構造と電力伝送システムの構成 ……………230	5 携帯電話用ワイヤレス充電器の試作概要と エネルギー効率評価 竹野和彦……………251
3.2.1 基本構造……………230	5.1 はじめに……………251
3.2.2 電力伝送システムの構成……………231	5.2 ワイヤレス充電器の概要……………252
3.3 等価回路……………231	5.3 位置と効率の関係……………255
3.3.1 電界結合部の等価回路……………231	5.4 充電場所と効率の関係……………256
3.3.2 電力伝送システムの等価回路 ……………233	5.5 充電時の放射雑音……………257
3.4 応用例……………235	5.6 環境(省エネルギー)分析……………258
3.4.1 給電システムの構成……………235	5.7 まとめ……………259
3.4.2 給電システムの組込み試作例 ……………236	6 非接触 IC カード技術「FeliCa」での電力 /信号伝送 北 真登……………261
3.5 おわりに……………237	6.1 FeliCa の概要……………261
	6.1.1 FeliCa とは……………261
	6.1.2 導入事例……………261
	6.2 FeliCa の技術……………261

6.2.1 FeliCa の仕組み.....	261	7.1 はじめに.....	269
6.2.2 ハードウェア構成とその課題 .....	263	7.2 人工臓器へのワイヤレス・エネルギー 伝送技術.....	269
6.2.3 ソフトウェア処理によるメモリ保護 .....	267	7.3 治療機器へのワイヤレス・エネルギー 伝送技術.....	272
7 医療用給電システム		7.4 計測機器へのワイヤレス・エネルギー 伝送技術 (ワイヤレス通信) .....	274
佐藤文博, 松木英敏...	269		

## 第3章 応用技術—カップリング利用—

### 1 電気自動車用ワイヤレス給電システム（電磁誘導）

高橋俊輔\*

#### 1.1 はじめに

電気自動車（EV）用充電装置において、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い、通電方式から接触式と非接触式に大別される。接触式は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、  
・マイクロ波方式、  
・電磁誘導方式、  
・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。

#### 1.2 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言う電磁誘導現象を発見し、変圧器の基本原則であるファラデーの電磁誘導の法則を導き出した。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開発が始まった。

電磁誘導方式のワイヤレス給電には、静止型（図1a）と移動型（図1b）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EVなど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。図2の変圧器のように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

---

\* Shunsuke Takahashi 早稲田大学 環境総合研究センター 参与

$k$  は 1 である。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することができる。そこで、電力を効率よく伝達するために、1 次側の印加周波数を 10 kHz 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 次コイルに鎖交し易くするためと、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、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、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線を使用する。

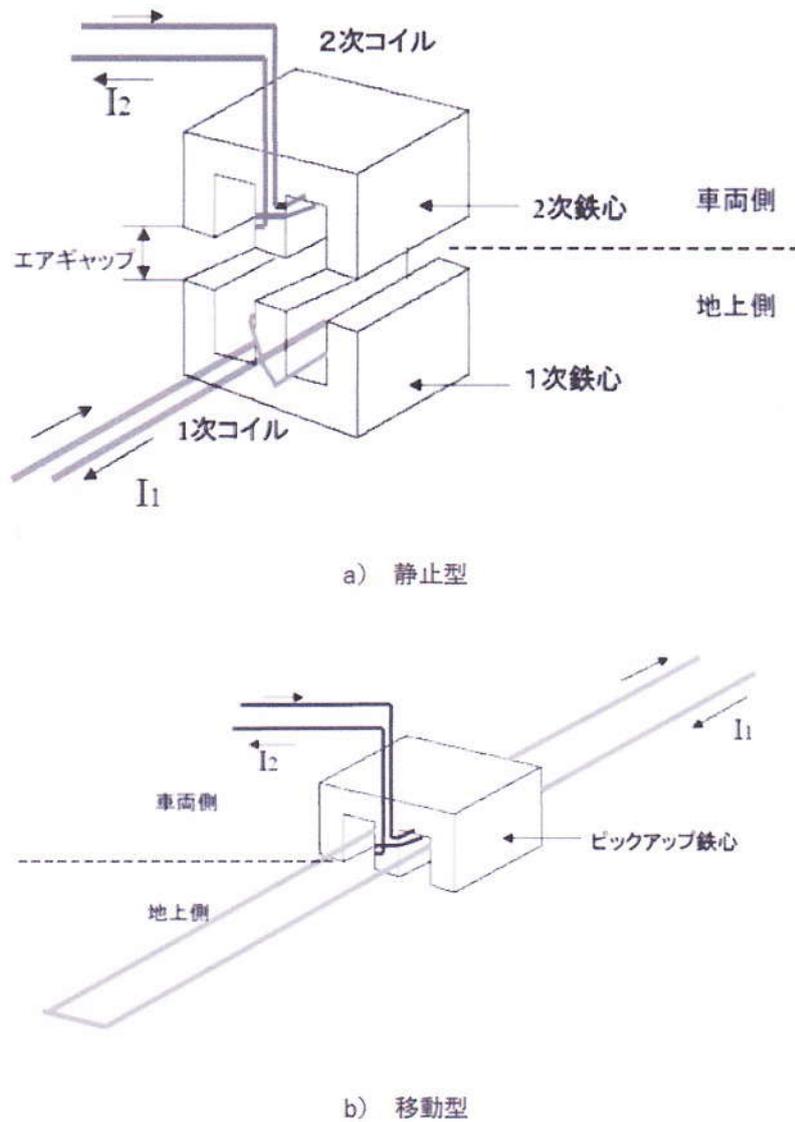


図 1 電磁誘導式非接触給電の原理

### 1.3 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最初のものは、1980 年代の米国での

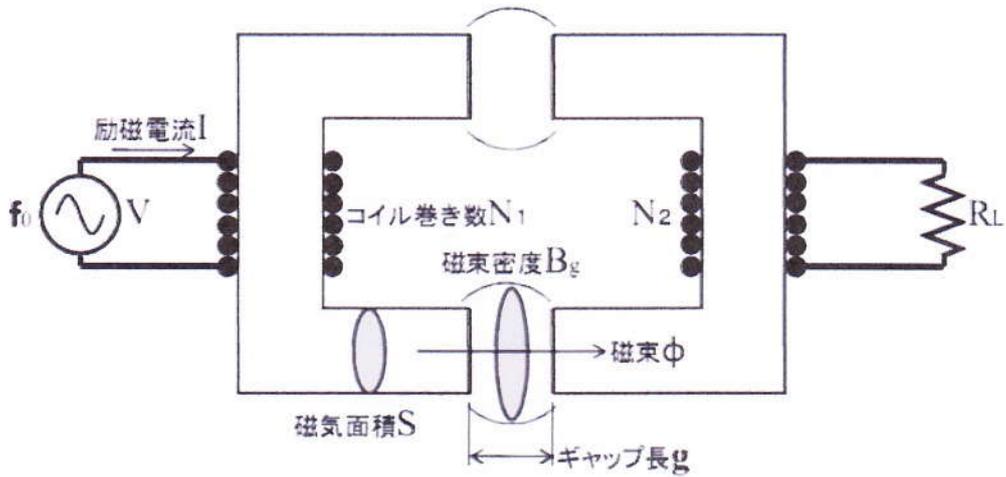


図2 トランスの磁路断面

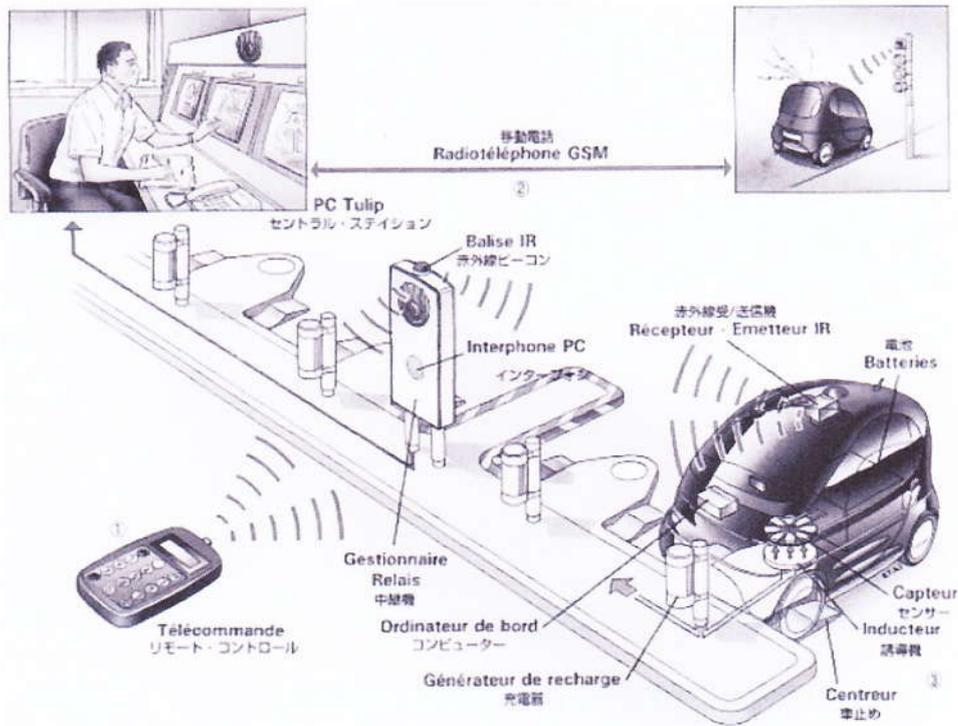


図3 Tulip 計画の非接触充電システム

(出典：カースタイリング別冊 NCV 21)

PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) 計画で、図1 b) 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である。実験は成功したが漏れ磁束が大きかった。1995年仏国の Peuseot/Citroen 社による Tulip (Transport Urbain, Individuel et Public) 計画では図1 a) の原理に従い、図3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言う、現在のものと殆ど変わらないシステムが採用された<sup>1)</sup>。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 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のがあり、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、出力 6kW であったが、1 次コイルのパドルを 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。

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) に採用された。仕様は入力 3 相 400V、周波数 20kHz、出力 30kW である。WEB-1 では、必要最小限の電池を搭載し、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下がる。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 CO<sub>2</sub> 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、充電操作が安全で容易なワイヤレス給電を用いて短時間充電を行うことにより、小さな電池でも走行距離を確保できることになる。この考えに従い、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 に搭載するには大きく、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<sup>2)</sup>。

そこで昭和飛行機工業らの研究グループはワイヤレス給電システム (IPS) を 2005 年から 4 年間、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 4 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、安全対策のための絶縁トランスで構成されている。IPT と同じ

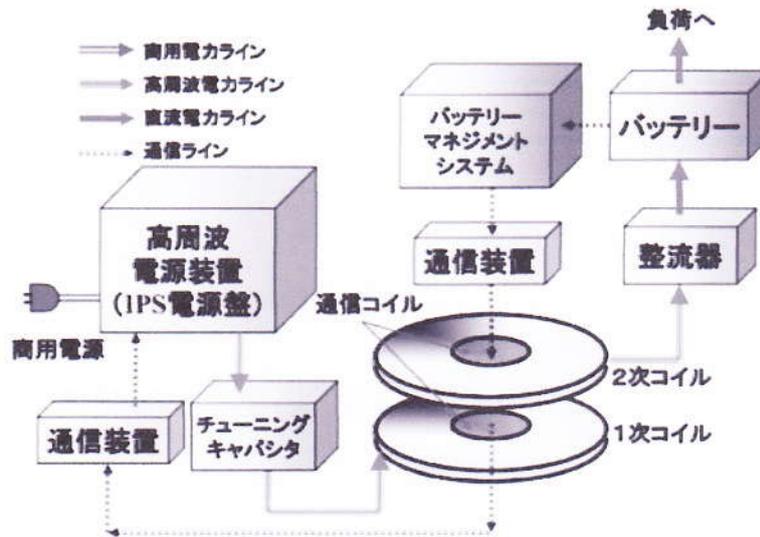


図4 電磁誘導式非接触給電システムの構成

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<sup>3)</sup>。

WEB-1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、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設置する場合において、他の車両走行の邪魔になり、道路上設置の要件を満たしていない。そこでWEB-1に搭載した通常型30kWコイル(外径847mm)より大きな径(外径1247mm)にはなるが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2009年に環境省の「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。この機能を使うと図5に示すように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る。

このシリーズは一人乗り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バスやトラックと言った大型車両用の60kW、LRT(次世代型路面電車)や接続バス用の150kWを越える大電力まで、ラインナップされている。

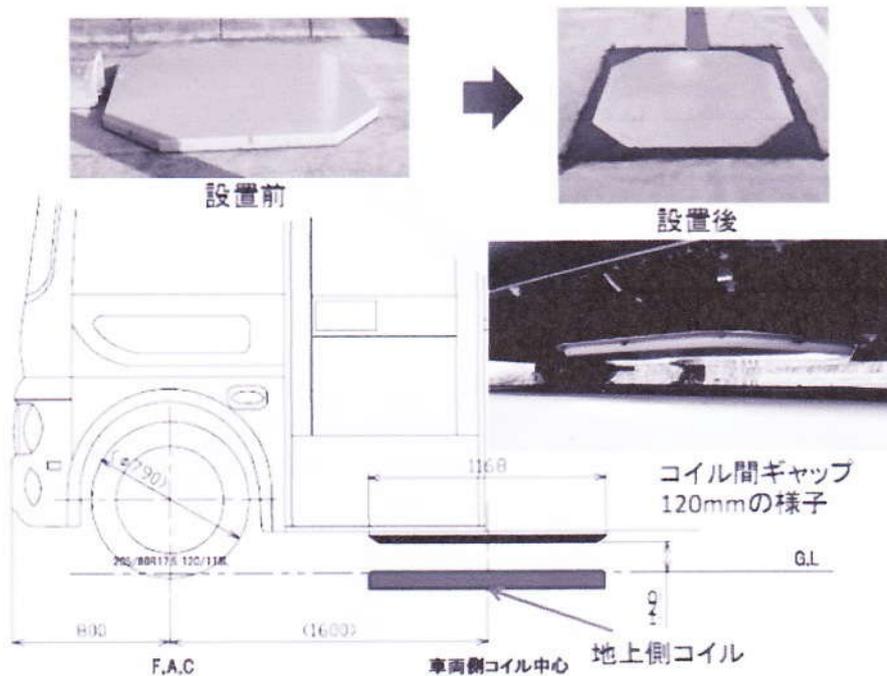


図5 WEB-3用埋込コイルとギャップの様子

#### 1.4 電動バスによる実証走行試験

奈良県は奈良市内に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招致を計画している。2008年に“少量電池搭載WEB-1+非接触式急速充電器（IPS）”と“大容量電池搭載電動バス+接触式急速充電器”の2式の電動バスシステムを使い、県庁に両方の充電器を設置し、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CO<sub>2</sub>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-1+IPS”の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、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ることにした。試験条件として、県庁では毎回必ずSOC（充電率）70%まで充電を行い、春日大社では途中経路の渋滞具合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パターンを設定、空調負荷については有り、無しとした。最も代表的な春日大社1分間充電、空調無しの条件で試験を行ったときの結果は、1周5.5kmのルートの走行に約30分を要し、消費したSOCを回復するのに要した充電時間は県庁で約6分、春日大社で1分の合計約7分であった。このIPS充電を行うことで12kWhという少ない電池容量でもアップダウンの大きな奈良公園内を1日中運用できることが示され、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。試験結果より算出されるM15モードでのCO<sub>2</sub>排出はWEB-1



図6 IPS ハイブリッドバスと埋込コイルの様子

に改造する前のディーゼルバスに比べ 67.6%削減できた<sup>4)</sup>。

WEB-3 を使った試験は 2010 年に埼玉県の本庄市 (1 周 12.5km) と熊谷市 (1 周 5km) の 2カ所で行った。どちらもターミナル 1カ所のみ IPS を設置して SOC 70%まで充電を行い、空調負荷有り、無しとし、比較のためベースのディーゼル車も走行させて試験を行った。試験結果として消費エネルギーは改造する前のディーゼルバスに比べ電動化により本庄市で 73%、熊谷市で 62%、CO<sub>2</sub> 排出はそれぞれ 60%、52%削減できた。空調負荷が電費に与える影響はクーラー最大で

15~19%、ヒーター最大で 32~37%消費エネルギーが増加した<sup>5)</sup>。

純粋な電動バスではないが日野自動車の IPS ハイブリッドバスにも 50kW 型 IPS を搭載し、2011 年に東京駅前に図 6 のように地上側コイルを設置し、東京駅前と晴海間路線で試験運用が行われた。

### 1.5 おわりに

現在、日本各地で電動バス導入の計画が進んでいて、省エネ、低公害を容易に実現できる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予定である。また、ワイヤレス給電システム標準化の動きも急速に進んでいて、通常の EV にもワイヤレス給電システムが搭載されるのも、そう遠い日ではないと思われる。

## 文 献

- 1) 高木啓, NCV 21 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, p 99-105 (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, p 9-14 (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論文集 No. 16-07, p 47-52 (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 (第 4 報), 自動車技術会春季学術講演会論文集, No.1, 20105128, (2010)
- 5) 小林王義ほか, 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 5 報), 自動車技術会秋季大会学術講演会前刷集, No. 108-11, 83 (2011)