

EV の非接触充電の技術動向

高橋 俊輔

早稲田大学 環境総合研究センター 参与／客員上級研究員(メールアドレス:stak@aoni.waseda.jp)

／元・昭和飛行機工業 技師長

電気自動車(EV)向けのワイヤレス給電に関する技術的な取り組みや今後の開発の方向性などについて、以下の5項目について解説する。

目 次



1. ワイヤレス電力伝送技術の概要
2. 電磁誘導式電力伝送システムの開発
3. 開発技術の実用化と他の開発状況
4. 課題
5. 今後の方向性

現在市販されているEVは基本的に、コンセプト車以外はすべて接触式の充電装置になっている。筆者も実はプラグイン・ハイブリッド車(PHEV)の「プリウス PHV」に乗っている。自宅で充電して、ちょっと乗って、また充電するのを繰り返している。東京都内だと長距離は乗らないので、非常に燃費がよく満足している。

充電は、200V 単相のコネクタでやっている。筆者はクルマが好きなのであまり気にならないが、面倒に思う人もいるのではないかと思うことがある。最近では、自宅だけでなく外出先にも充電コネクタが配備されるようになっている。例えば、トヨタ自動車のディーラーに行けば充電させてくれる。

接触式充電装置の課題



上の写真は日産自動車のグローバル本社の様子だ。広い車寄せの真ん中にぽつんと充電スタンドが立っていた。しかも屋根はなく、雨の中だとぬれながらコネクタをささないといけない。

この写真を撮った日はたまたま、日産自動車のEV「リーフ」が充電をしに来ていた。運転車がクルマから出てきて充電スタンドと格闘を始めた。しばらくしても充電のし方が分からず、スタッフを呼びに行った。結局、充電するまでに10分近くも経過していた。

面倒になることに加えて、有線による充電は感電の怖さを感じるユーザーが多い。EVの充電コネクタ規格「CHAdeMO」や「J1772」は雨でも感電しないように設計されているが、一般のユーザーには広く知られていない。もちろん、充電スタンドには「感電しない」旨が書かれている。

さらに、充電コネクタは接点が汚れたり、摩耗したりする。さらに、急速充電器の場合は、コネクタが非常に大きく取り回しが大変だ。これは、10年前に策定された規格をそのまま採用してしまっていることが原因である。また、特に女性にとっては硬くて汚いコードに触れることを嫌がるのは自然な反応だろう。

こうした課題の多くは、ユーザーの手を使わせる、というところに問題の根源がある。そこで、人間の手を使わない手法として、自動充電が出てきた。有名なのは「SemaConnect」という米国の技術。腕が伸びるようにして接続される。これは接触式で、接続までかなりの時間が掛かってしまう。値段も高そうで設置スペースの必要な印象だ。

こういったさまざまな理由から、EVの充電にはやはり、ワイヤレス給電が最適だろうと考えている。

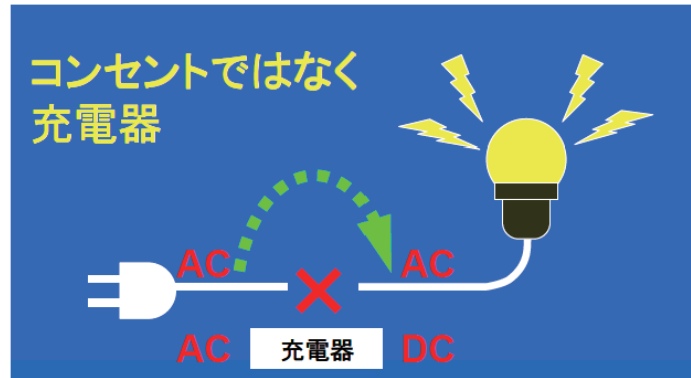
我々はワイヤレス給電を始めて8年ほどになる。各所にアピールして回っているが、どこへ行っても効率を聞かれた。「何パーセントですか」と。当時は出力が30kWのシステムで92%程度だった。すると、「コンセントは100%だ」という言葉が返ってきた。

ワイヤレス給電システムは基本的に、最後の出力は直流電流である。すなわち、交流を直流に変えて、2次電池に充電する充電器で、その総合効率が92%なのだ。そういう形で、我々はコンセントではなくて、充電器を開発していると説明してきた。

ワイヤレス給電とは



電磁誘導や電波を利用して、離れた場所へワイヤレスで給電する技術

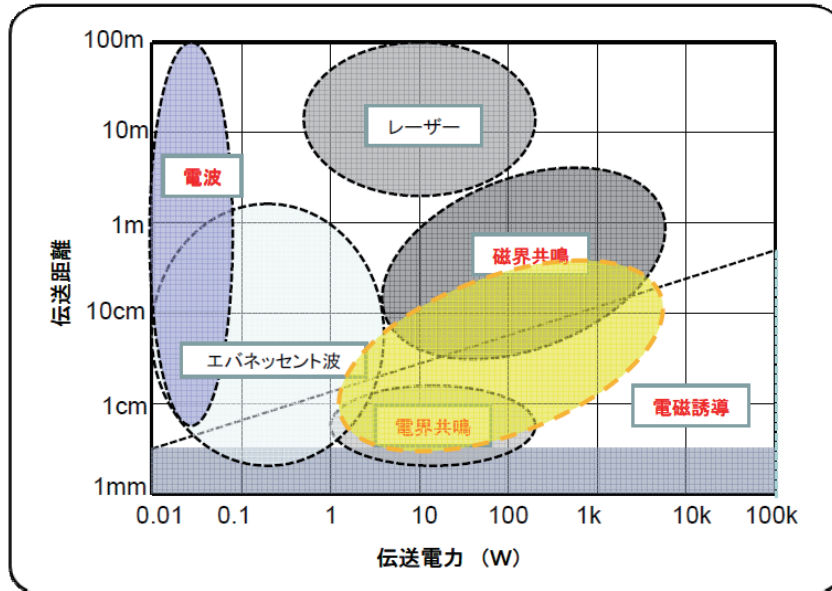


ワイヤレス電力伝送方式

- ①電磁誘導方式
- ②電波方式(マイクロ波など)
- ③磁界共鳴方式／電界共鳴方式
- ④エバネッセント波方式
- ⑤レーザー方式

ワイヤレス給電には大きく五つの方式がある。主として、上の三つがEV用である。

各方式の伝送電力と伝送距離

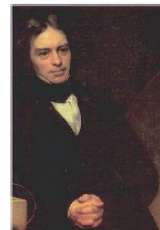


まず、代表的なのが電磁誘導方式である。これは 19 世紀にファラデーが電磁誘導の法則を見いだした。

電磁誘導方式



- ・19世紀のファラデーやカランの時代に発見された電磁誘導（トランス）の原理を利用
- ・コイル間に発生する電磁誘導を利用して給電
- ・近距離（数mm～数十cm）で
微小電力から100kW以上の大電力まで
効率良く（90%以上も可能）伝送できる
- ・給電方式としては
給電コイル上に静止して行うチャージ方式と
給電ライン上を移動しながら行うレール方式がある



マイケル・ファラデー
イギリス
電磁誘導現象発見
(1831年)



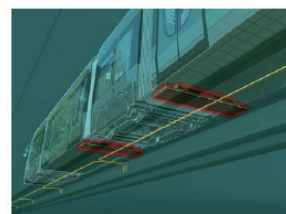
ニコラス・カラン
アイルランドの牧師
誘導コイル発明
(1836年)



パナソニック
親子電話の子機充電(1997年)



Plugless Power社
電気自動車への給電(2010年)



BOMBARDIER社
電車への250kW(2009年)

電磁誘導の法則とは、1 次側の磁界変化が 2 次側に磁界変化を起こす。1 次と 2 次が離れていてもでき

ということで、電磁誘導式のワイヤレス給電がこのころから頭の中では考えられていた。コイルを離すと2次起電圧が低くなるので、高い周波数にしないといけない。ところが、高い周波数を作るデバイスがなかった。高周波にできるようになったのは、1980 年ごろだった。

電磁誘導は数 mm から数十 cm の近距離のワイヤレス給電に向く。時々、電磁誘導の資料を見ると、1cm ぐらいのところに電磁誘導が 1W から 100kW まで対応できると記載されていることがあるが、これはあり得ない。100kW は磁束の飽和があるため、送受電コイルがものすごく大きくなる。昭和飛行機工業が開発した 150kW 品では、畳 1 枚ほどの大きさになった。電磁誘導の場合はコイル面積と電力伝送距離(ギャップ)が比例する。少し工夫すれば、40cm 程度のギャップでも十分電力を送れる。

方式としては二つある。まず、給電コイル上に静止して電力を伝送する「チャージ方式」は、現在クルマへの適用が真剣に検討されている。もう一つが「レール式」で、給電ライン上を移動しながら電力を受ける。レール式は、2 次電池を搭載していなくてもよい。



電波方式

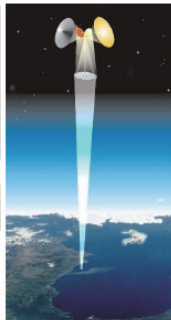
- ・19世紀に特斯拉が通信実験を行う
- ・マイクロ波などの電波をアンテナで受信、整流回路で直流に変換(レクテナ)
- ・電波のビームを絞ることで長距離大電力伝送も可能



ウォーデンクリフ・タワー



ニコラ・特斯拉 USA
テスラコイル発明 (1891年)



太陽光発電衛星 (SPS)



無燃料飛行機 MILAX
マイクロ波 (2.411GHz)
マイクロ波送電器

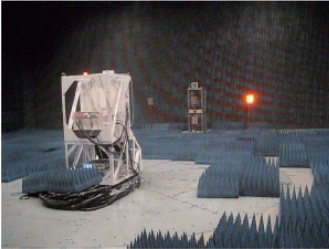
電気自動車への応用

- ・2009年2月のENEX2009に三菱重工業が展示
- ・現状、出力1kW、効率38%



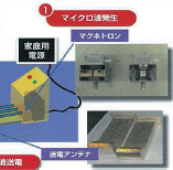
・4m以上離れて10kW電力伝送 (2012年日本電業工作とVolvoグループ)



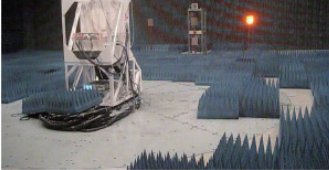


無燃料飛行機への給電 (1992年京都大学)









出典:NEDOカタログより

京都大学宇治キャンパス電波暗室

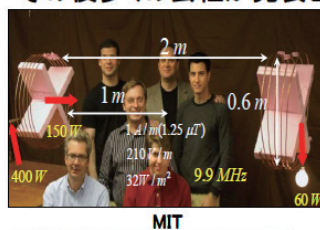
ワイヤレス給電方式の2番目が、電波方式である。こちらも19世紀に、特斯拉が発明した。実は、発明王のエジソンと同期である。特斯拉は、ウォーデンクリフタワーというところから 150kHz の周波数で電力を空中に出した。そして、それを受ければ、その位置で常に電力が使えと彼は考えた。これは技術的に可能だ。だが、あまりにも周波数が低すぎて拡散し過ぎてしまった。最近になって電波方式の用途として注目を集めているのが、宇宙太陽光発電 (SPS) である。宇宙に太陽光パネルを置いて、そこで蓄えた電力をマイクロ波で地上に落とし込むという形だ。下側から上側に向けてやっているのは、京都大学が実験している。電池を積まない飛行機に電力を送り、車と同時に一緒に走らせた。

クルマへの応用は、2009年に三菱重工業がNEDOからの委託事業で開発した。電子レンジに使われるようなマグネトロン管を4本使い、1kWの出力でワイヤレス給電する。マイクロ波をレクテナ(rectifying antenna)と呼ばれるアンテナで受け、直流に変換して電力を取り出す。レクテナ自体は巨大なものではないが、実はクルマの後ろ側にもものすごく大きな電源がある。6.6kVを直接充電して、直流にして、そのままこのマグネトロン管に送り込む。出力が1kWの試作品で効率は約38%しかない。最近では、Volvo社と日本電業工作が共同で4m離れた位置に10kWの電力を伝送する実験を成功させている。この方式の問題点は、非常に高い2.45GHzというマイクロ波を使う点にある。人体防護に関して非常に厳しい基準に対応しなければならない。

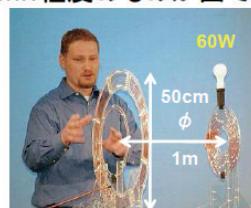
磁界共鳴方式



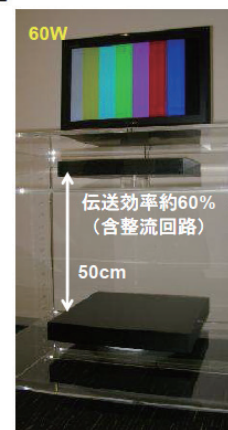
- 2007年6月米MITのMarin Soljacic教授の研究グループが発表
- 共振回路同士の共鳴現象を利用、2mの距離で60W送電伝送効率は40～45%
- 基本原理は新しくはないものの、給電方式としては新たな方式
- その後多くの会社が発表し、3kW程度のものが出てきた



MIT



インテル



ソニー
出典: 各社HPの写真より



IHI/WiTricity/三菱自動車



長野日本無線

磁界共鳴方式は、電波方式と同様にアンテナから出てきた電波を受けることで電力を伝送する。共振をさせた電力だけを取り込む。すなわち、アンテナと受電コイルの間を共鳴を取る。ただし、これは遠方界という話で、非常に遠いところへの給電を想定している。近傍界での無線電力伝送というものを考えるのがこの磁界共鳴方式ということになる。

2006年にMITから磁界共鳴方式に関する論文が出た。それを知って、我々(昭和飛行機工業)も非常に面白いと思ってすぐに開発を始めた。だが、2007年にMITの研究グループが自ら2m離れた位置の60W電球を光らせたと発表した。これには正直「やられちゃったな」と思った。最近ではMITの特許は研究者が中心になって設立したベンチャー企業 WiTricity 社で管理している。同社は三菱自動車や IHI、さらにはトヨタ自動車などと技術提携をして影響力を強めている。

今、ワイヤレス給電システムを開発するほとんどの会社が磁界共鳴方式に取り組んでいる。2007 年からまだ 6 年しか経っていない。最初の一步をやっと踏み出した程度なので、始めるとしたらここからだ。電磁誘導方式は枯れた技術なので、磁界共鳴方式から始めるべきではないかと思う。

電界共鳴方式



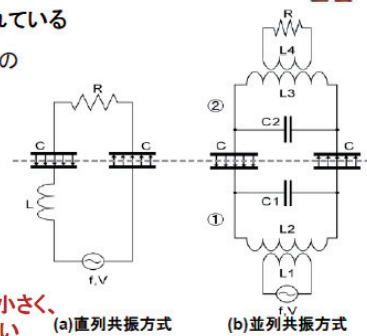
磁界結合だけでなく電界結合(誘電結合)共鳴方式も発表されている

送電側と受電側にそれぞれ電極を設置し、一種のコンデンサのように電極が近接したときに発生する「電界」を利用してエネルギーを伝送する技術

電界結合方式の特徴

- ・電磁誘導方式などに比べて伝送効率が高い
- ・機器の位置自由度が高い
- ・充電台と端末の電極をぴったり合わせなくても充電可能
- ・ひとつの充電台に対して複数の機器・端末を対応させることが可能
- ・ワイヤレス給電部の発熱が少ない
- ・電極の材料や在質、厚さの自由度が高い
- ・透明電極採用も可能

基本的にギャップが小さく、
未だ出力が小さい



電界共鳴方式の伝送回路図



豊橋技術科学大学(WTP2012)
(出力 50~80Wギャップ 10cm以上)



村田製作所の5W透明電極型
(WTP2012)



複数機器に給電できる電界共鳴方式
(出典: <http://www.nikkeibp.co.jp/>)

もう一つが、磁界があるなら電界共鳴方式もある。村田製作所が中心になっている。今のところは勢力として小さい。だが、最近では豊橋技術科学大学の太平教授がやっている、タイヤを通して給電をする。路面からの走行中給電を想定しており「EVER」と名付けている。今のところはまだ数十 W と小さいが、これも面白い技術かもしれない。

ただ、電界を使うので怖いところがある。雨が降っている道路上で高い電界が出ているものを本当に地絡させずに常に上側にだけ出せるのかどうか。どのぐらいの電圧をかけているか分からないが、かなり高い電圧をかけなければとても電力伝送できないはずなので、この辺は課題があると思っている。効率は 80 ~ 90% 出るようだ。

EV用ワイヤレス電力伝送方式の比較

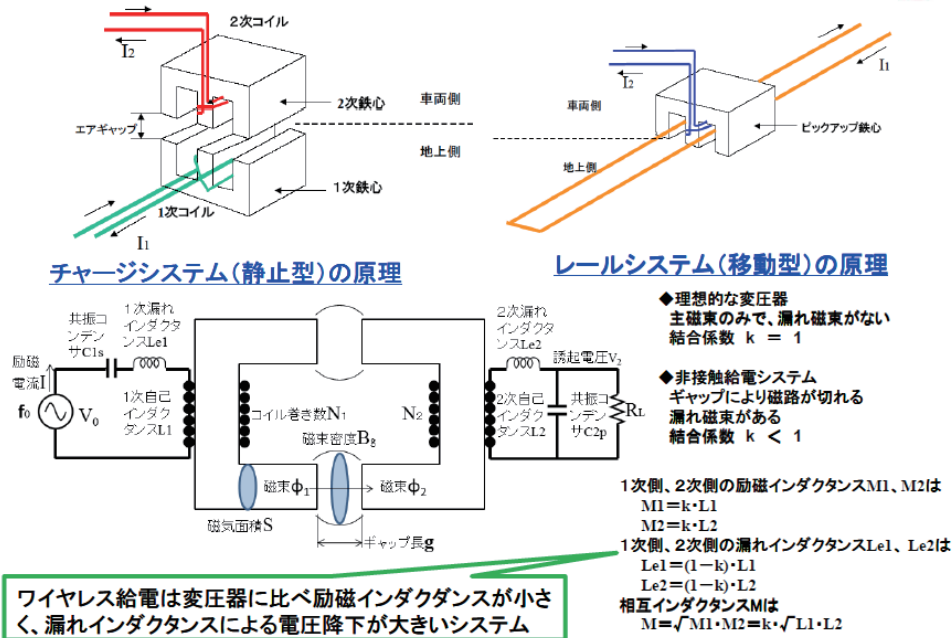


方式	磁界共鳴方式		マイクロ波無線式	電磁誘導方式			
	Magnetic Resonance Power Transfer		Microwave Power Transfer	Electromagnetic Inductive Power transfer			
開発会社	WiTricity / IHIL (米国/日本)	TDK (日本)	三菱重工業 (日本)	Qualcomm Halo (米国)	Vahle (ドイツ)	パイオニア (日本)	昭和飛行機工業 (日本)
モデル名		3D給電		IPT			SIPS
伝送電力	3.3kW	3kW	1kW	3kW	3.6kW	3kW	30kW
ギャップ	20cm	15~20cm	12.5cm	15cm	13cm	10cm	14cm
効率	90%	80~90%	38%	90%	90%	85%	92%
	DC入口~DC出口	総合効率	総合効率 (含む廃熱回収)	総合効率	総合効率	総合効率	総合効率
1次側 コイルサイズ	50cm × 50cm × 3.75cm	約50cm × 50cm × 4cm	6cm × 9cm × 10cm (4本)	80cm × 40cm × 3cm	80cm × 80cm × 3cm	46cm × 46cm × 3cm	139cm × 139cm × 5cm
サイズ/出力	2.8%/kW	3.3%/kW	2.7%/kW	3.2%/kW	5.3%/kW	1.9%/kW	3.2%/kW
周波数	145kHz	20~200kHz	2.45GHz	40kHz	140kHz ± 10kHz	95kHz	22kHz
発表年月	2011年6月	2012年10月	2009年2月	2012年	2012年10月	2010年10月	2009年3月
開発状況	実証段階	開発中	開発中	実証段階	開発中	開発中	実用化段階
画像							

ここで、EV用のワイヤレス給電方式を比較してみよう。電力伝送については通常の普通充電になる3kWを各社は意識している。マイクロ波は1kW程度だ。当社の開発品はバス用のため30kWと大出力である。ギャップもおおよそ10~20cmぐらいで、効率は90%ぐらいにそろってきた。基本的に今、電波(マイクロ波)方式以外はほぼ実用に近い領域に達した。だから、やろうと思えば、EVにそのままワイヤレス給電をするということは技術的にはかなり近づいている。

では、なぜまだ実用化されていないのかというのは、後で課題を整理する。

電磁誘導方式の原理

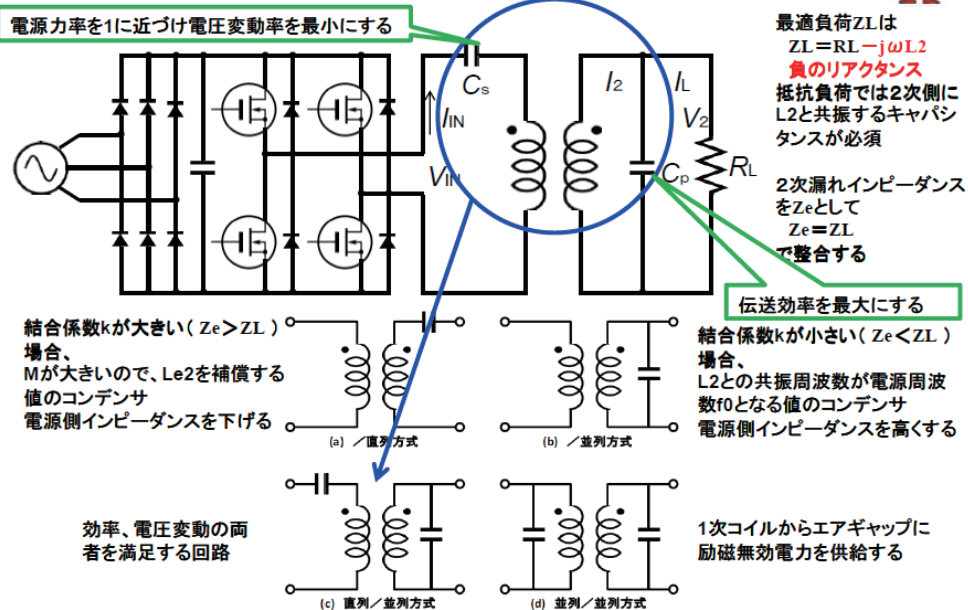


次に、我々が今、開発をしたものワイヤレス給電システムの内容を解説していきたい。この中には大電力用のものをやるときの課題というのがある。まず、原理と従来の開発状況だ。原理はここに書いてある通りで、簡単なトランスである。1 次側に交流を入れれば、同じ周波数の交流が 2 次側に生まれる。普通の 50Hz であれば、このギャップがほとんどゼロである。このエア・ギャップがゼロのときというのは、基本的には 1 次側の磁束が 2 次側に、鎖交と言うが、つながってしまうので漏れることはほとんどない。このため、1 次側と 2 次側の結合係数 k の割合はほぼ 1 になる。

ところが、これを離していくと漏れ磁束が発生する。その漏れ磁束は、1 次の漏れインダクタンスという格好で 1 次の自己インダクタンスに直列になるように付けたものとして考えられる。これが一つの損失になるわけだ。そのために、どうしても一部の磁束が 2 次側に鎖交しないため、 k は必ず 1 よりも小さくなってしまふ。

漏れインダクタンスに関して、1 次と 2 次の自己インダクタンスに $1-k$ 、すなわち k が、例えば、0.9 ならば、1 から 0.9 を引いて 0.1 倍というのが漏れインダクタンスで逃げてしまう。もし k が 0.1 になってしまったら、9 割は漏れとして逃げてしまうということになり、非常に電圧降下が激しいトランスになる。これは周波数 50Hz でやると、あっという間に 2 次側の電圧は低くなってしまふ。対応策としては、周波数を上げることが第一になる。高い周波数にすることによって、時間当たりの電力量を大きくして、2 次側の電圧を上げてあげる。これが設計の基本になる。

静止型の回路構成例とコンデンサ配置



基本的な回路はこのスライドのようになっている。AC-DC コンバータ部分である。平滑化しておき、インバータにつなげる。それを1次側のコイルに入れて、2次側のコイルに同じ周波数のものが励起される。回路図では抵抗負荷だが、これが2次電池や直流負荷であれば、整流して平滑化してやる。

では、これで作ればできるかというと、実はこれだけではほとんど電力伝送はできない。効率が極めて悪いシステムになる。理由は、最適負荷というのはこのRLの後ろ側のインダクタンス分があり、ここに負のリアクタンスが生じてしまうことによる。これを打ち消してやらないと最適負荷にならず、Lを打ち消すにはCを入れる。

それだけではなくて、1次側の方にも同じように共振をする部分を付けてないと電源効率が非常に悪いシステムになる。電源効率をなるべく1に近づけるようにするためには、1次側にもCを並列か直列に入れるという格好でやるので、SS方式やPP方式と呼ばれる形でコンデンサを配置して最適なシステムを作る。

EV用ワイヤレス給電システムの歴史

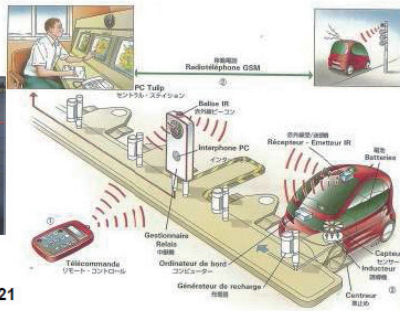


Tulip(Transport Urbain, Individuel et Public)計画

- ・1995年、フランス
- ・PSA(プジョー/シトロエングループ)
- ・モビル・チューリップの仕様
全長2.2m、全幅1.4m、全高1.6m
モーター出力9.4kW、最高速度75km/h
NiCd電池搭載、1充電走行距離60km以上
- ・電磁誘導式非接触式充電の仕様
位置合わせは半自動、充電は全自動
出力が小さく満充電に4時間が必要
プロメテウス計画と連動した赤外線ビーコンによる
双方向通信での情報通信、車両管理
電磁波漏洩が大きい



出典：カースタイリング別冊NCV21



Praxiteleシステム

- ・1997年、フランス
- ・CGEA社(公共交通運営受託会社)と
ルノー社
- ・パリ郊外サンカンタン・イヴリーヌ市
ルノーEVを使って実験
- ・構造
床下につけた低周波トランスによる非
接触充電
- ・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



出典：CAR & DRIVER(970526号P51)

ワイヤレス給電システムの歴史を振り返っておこう。有名なのが、フランスで 1995 年に実施され「Tulip」計画である。クルマが地面に置いたコイルの上にまたがったら、地上側の電源と通信をしてオンにする。何 kW よこす、CC でよこす、CV でよこす、電力伝送を停止する、といった信号を通信するシステムを備える。我々が現在開発している EV 用のワイヤレス給電システムの原型といえるほど基本形だ。Tulip 計画が今のワイヤレス給電の基本を固めたと言っても過言ではない。電磁漏洩量が多すぎて使えなかったのが最大の課題として残った。

そこで、その電磁波の漏洩を少なくしようということで、1997 年に「Praxitele」システムが作られた。これは 400Hz の低周波を使いる。周波数を低くすると位置ずれ特性が悪くなる。少しでもずれるとあつという間に電力が取れなくなるという問題だ。実際、効率が非常に悪いということがあって、このシステムは開発途中で実験が中止になってしまった。

製品化されたEV用ワイレス給電システム①



米国GMが開発したMagne Charge

- ・パドル型電磁誘導式充電器
- ・米国では2000年には1000台以上が導入
- ・1993年に豊田自動織機にて国産化
- ・入力単相200V、最大出力が6kWと容量が小さい
- ・対象車の満充電に2時間必要
- ・コネクション操作が必要で広く普及しなかった



出典:「TOYOTA TCG2000 Inductive Charger for RAV4L Owner's Manual」

製品化されたものとしては、パドル型のシステムがある。ガシャンとやるやつだ。実は、青山にある日産自動車の入り口のところに 2 年ぐらい前まで充電器が置かれていた。これは豊田自動織機が量産化し、世界中に 3000～4000 台売ったようだ。

パドル部はプラスチックでモールドイングされているので、コイルは接触しない。非常に狭いところで周りが囲まれていますから、電磁波の漏洩に対しても非常に強いというシステムである。ただし、パドルを自力で接続しなければならないため、ワイレス給電の利便性を生かしきれてはいない。

製品化されたバス用ワイレス給電システム②



ドイツWampfler社製のIPT

- ・大電力で地上コイルに跨るだけで容易に充電(30kW)
- ・欧州ではトリノやジェノバのEVバス用として数十台が採用
- ・日本でも4台が採用された
- ・車両サイズに比較して相対的に大きい、重い、効率が悪い、高価等の大きな改善課題が存在

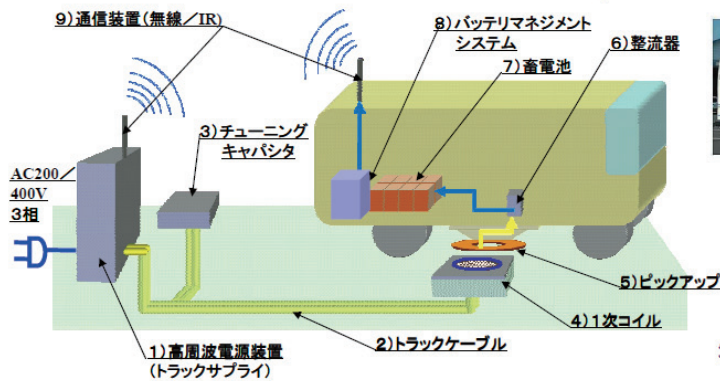


出典: Wampfler社のカタログより



トリノ電動バス

- ・2002年以来
- ・20台
- ・60kW



IPTバス; 日野自動車



先進電動バス; 早稲田大学

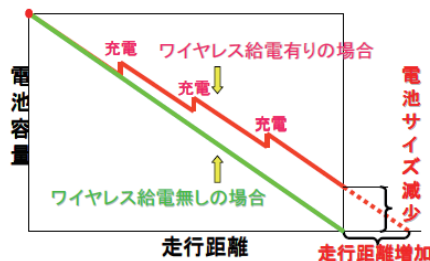
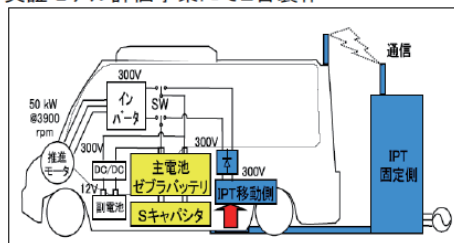
それから、製品化されたもので有名なのがドイツの Wampfler 社の IPT といわれているもの。これは「Inductive Power Transfer」と言っても、実は登録されているのだが、1次側のコイルに流して、2次側のコイルで受ける。出力は30kWだった。2次電池マネジメント・システムと地上側とで通信をして、充電および給電制御をしているというシステムである。

我々は、Wampfler 社のシステムを5台輸入し、販売したり実証実験に利用したりした。日野自動車のIPTバスや早稲田大学の先進電動マイクロバス、三菱重工業のAPMといわれている電車ではこのシステムを適用した。

先進電動マイクロバスWEB-1



平成16～17年度 NEDO民生部門等地球温暖化対策
実証モデル評価事業にて2台製作



早稲大学
昭和飛行機工業
東北大学
交通安全環境研究所

電池搭載量の最小限化による短航続距離の問題は
安全で操作が容易なワイヤレス給電により
充電回数を増やすことで対処

	WEB-1	WEB-1 Adv.
主電池	ZEBRA電池 18.9kWh	Liイオン電池 11.7kWh
補助電池	キャパシタ 170Wh	—
非接触給電システム	海外製IPT 30kW	国産IPS 30kW
推進電動機	水冷PM同期 50kW	→

平成17～20年度 NEDO補助金にて開発

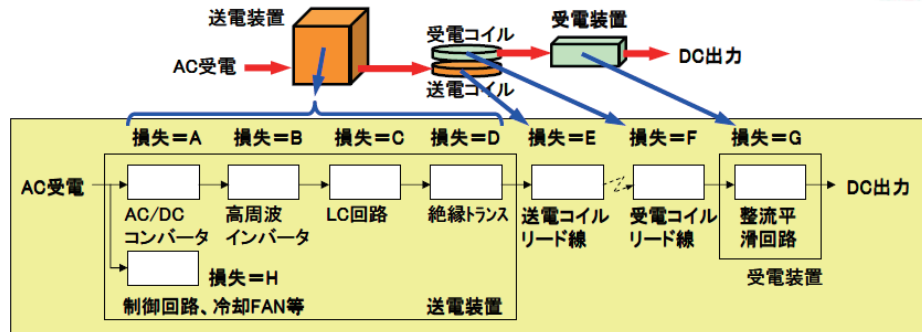
早稲田大学の先進電動マイクロバスは、初号機「WEB-1」をNEDOの委託事業として平成16年から17年にかけて造った。WEB-1は、搭載する2次電池の量をものすごく少なくしている。車載電池は高いため、減らせばインシタル・コストが安くなる。さらに、電池の重量分だけ軽くなるので、燃費がよくなる。ただし、いいことづくめではなく、走行距離は短くなる。そこで、ちょこちょこ充電することで走行距離を伸ばすコンセプトとした。

これがいい結果を得たことで、平成17年からNEDOの支援で、ワイヤレス給電システムを開発した。今、WEB-1はアドバンスという名前になっており、これには国産のLiイオン2次電池を採用した(初号機では海外製の電池を搭載)。容量は、12kWhである。

この開発では、効率の向上を意識した。回路には必ず効率があるので、1回通すたびごとにどんどん効率が悪くなっていく。AD変換器やインバータ、絶縁トランス、制御回路、そしてコイルなど。さらに、ファンや冷却水もある。そういった全ての部品が効率を落とす要因となる。



高効率化への取り組み



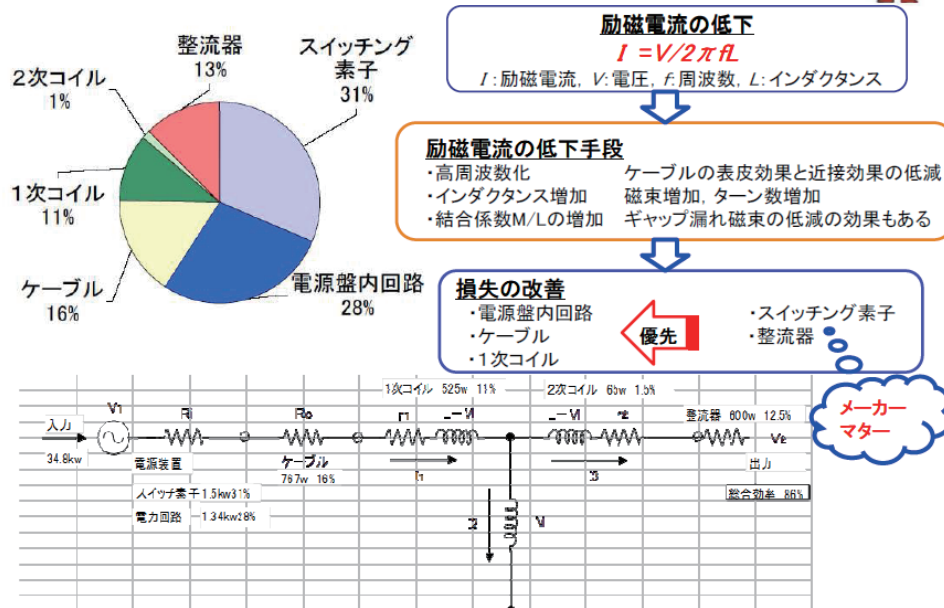
総合効率＝DC出力電力÷AC受電電力（％）

総合損失＝AC受電電力－DC出力電力＝A+B+・・・+H

- ・各回路ブロック(制御回路等を除き通過電力はほぼ同じ)毎に、損失が出来るだけ少なくなるように、回路設計や使用部品を工夫
- ・各回路ブロックの中で、突出して損失が多い所が無いように対策し、損失が一様に分散するようにすると良い
- ・例えばDC出力30kWの装置で、上記A～Hそれぞれを350Wに抑えることができれば、総合効率91.5%を実現できる

我々のバスは、試行錯誤によって 91.5%の効率を実現した。どこか一つでボトルネックになるほど悪い回路があると効率が上がらなくなってしまうため、全部が平均的に優れるシステムに仕上げた。

従来のワイヤレス給電装置の損失割合と改善

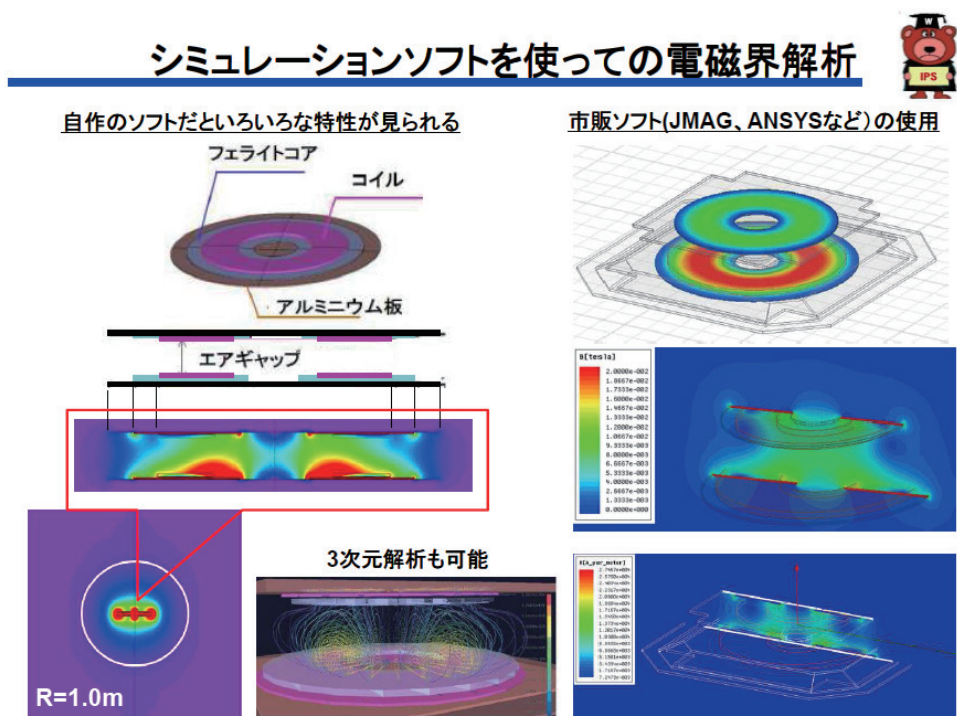


我々は、Wampfler 社の IPT のそれぞれの部分の損失割合を測定した。といっても、実は高周波分ってう

まく測れないので概算にはなるが、スイッチング素子による損失が最も大きそうだということが分かった。他の部品も合わせると、全体の 3/4 ほどが電子デバイスによる損失だった。この他、ケーブルが 15～16%。残りがコイルで 12%ぐらいということになる。

コイルも実はケーブルの銅損部分とフェライトの鉄損部分があるのだが、それを分けて計測することはできない。だが、ほとんどが銅損部分だろう。すなわちケーブルの効率を上げれば、かなり効率もよくなる。スイッチング素子は我々が決められない領域だ。デバイス・メーカーがいいものを開発してくれるのを待つしかない。このため、我々はまずは電源部の内部回路とケーブルと1次コイルに目を付けて開発を進めた。

開発の第一歩としては、シミュレーション・ソフトの活用が有効だ。市販ソフトウェアでもある程度の電磁界解析が可能だが、カスタマイズするとさまざまな特性を確認できる。

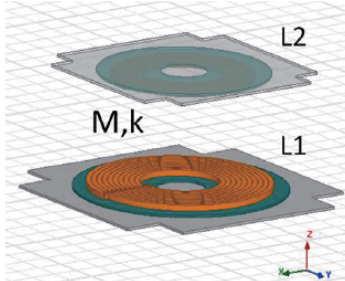


さらに、シミュレーション・ソフトを使って回路を設計することもできる。例えば、ケーブル素線の電流変化など巻き方による特性変化も把握可能である。

シミュレーションソフトを使っの回路設計



電磁界解析ソフト(ANSYSなど)を使っのモデル設計もできる



	Current_1	Current_2
Current_1	50.383	13.287
Current_2	13.287	11.991

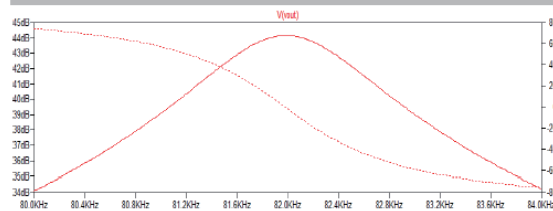
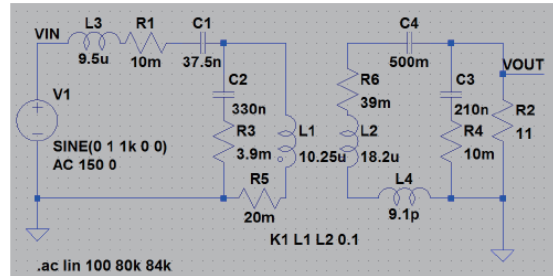
L1 M
M L2

	Current_1	Current_2
Current_1	1	0.54056
Current_2	0.54056	1

k=0.54

ケーブル素線の電流変化など巻き方による特性把握もできる

PSpiceを使っ共振回路定数設計ができる

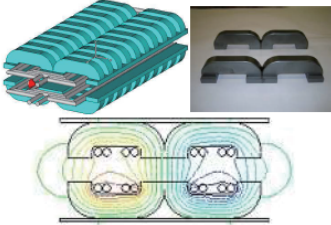
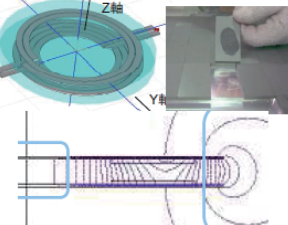


高周波電源回路や整流回路、DC/DCコンバータ回路の設計も容易にできるだけでなく、ケーブルの周波数特性など各種設計に使用できる

今、大きな関心事になっているのが送受電コイルの形状である。E字コアを使った角型方式と、平面コアを使った丸型方式である。Wampller社のシステムでは、角型コイルを用いていた。これに対して我々は、上側に蚊取り線香のような格好の丸型方式を採用していた。

対策① 磁心形状による比較



方式	E字コア角型方式	平面コア丸型方式
磁心構造／磁束形状		
結合係数	○	◎
コイル厚さ	△	◎
平面積	○	△
コアギャップ	△	◎
効率	◎	◎
コスト	△	◎
磁芯構造／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

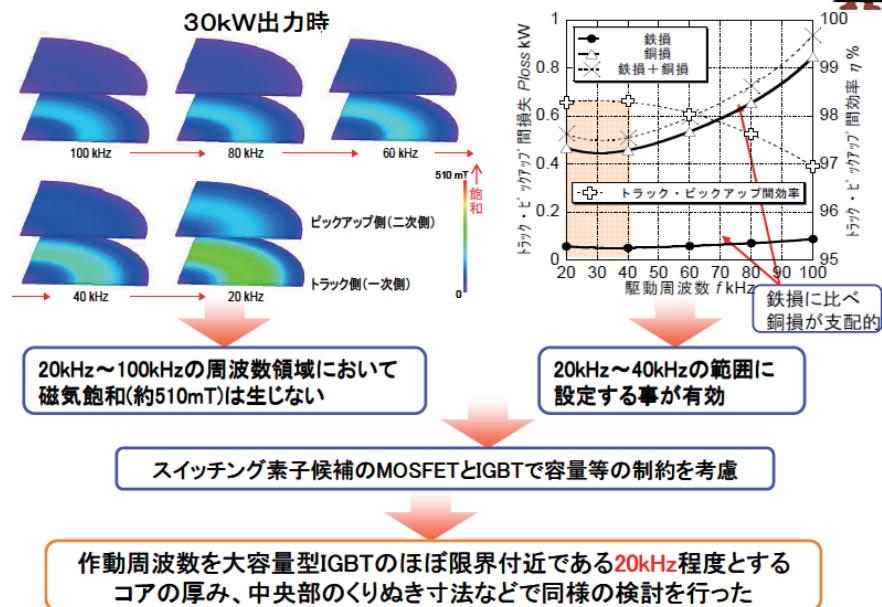
結合係数、コイル厚さ、コアギャップ、コストの点で平面コア丸形方式を採用

丸型方式のほうが結合係数を大きくできる上にコイルの厚さも薄い。さらに、コアギャップも大きく取れる。効率は角型コイル品と同等か、こちらの方が若干良いほど。さらに、何とも言ってもコストでは大きな優位性を打ち出せる。コアをフェライトで作るのは大変で、コストが掛かる。

加えて、我々はいろいろな大きさのコイルをラインアップしようと思っていた。この点で、丸型コイルは平たいフェライトを買ってきて張るだけでよい。フェライトとフェライトの継ぎ目にすき間があるのは良くないという指摘もあるが、高い周波数を用いるためこれはほとんど影響がない。

ワイヤレス給電システムの高効率化に関する取り組みの中で、我々が今、最も注力しているのがシミュレーションである。ワイヤレス給電システムの開発は、高性能なシミュレーション・ツールを持っているところが勝ちと言っても過言ではない。我々は電磁界解析ソフト「JMAG」を使っている。磁気解析をして、フェライトの磁気飽和がきちんとなるかはシミュレーションで分かる。シミュレーション・ツールを多用し、無駄な試作を極力少なくしている。

対策① 駆動周波数と磁束密度分布の関係

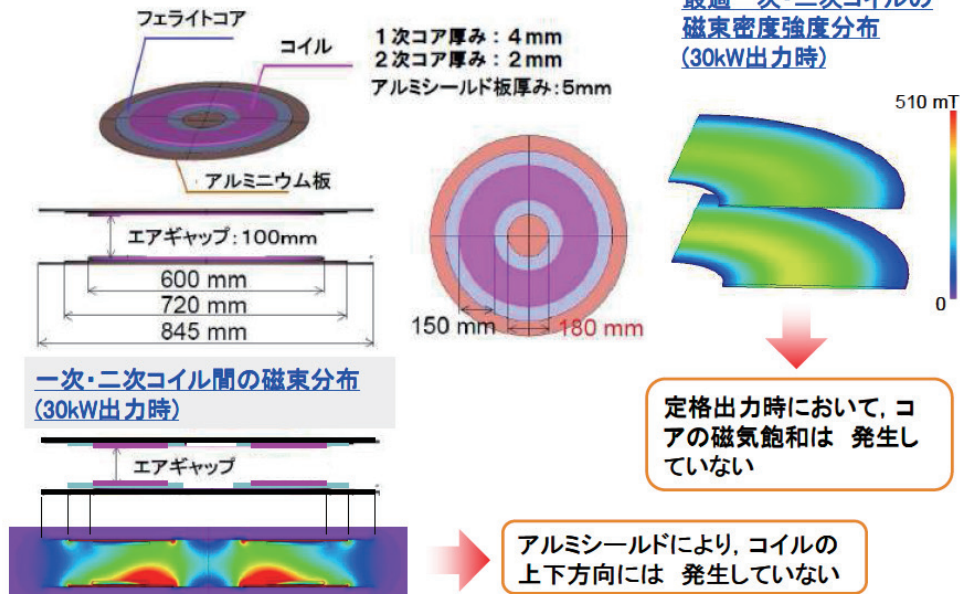


スライドの例は、30kW 出力で周波数を 20kHz から 100kHz まで振ってみた結果である。この領域では、磁気飽和(510mT)は生じない。コイルの部分だけを見ると、銅損と鉄損を比較できる。銅損の方が圧倒的に支配的なので、銅損が一番少なくなる周波数 20k~40kHz に設定することが有効であることが分かった。

対策① 最適一次・二次コイル形状



最適一次・二次コイル形状(30kW型)



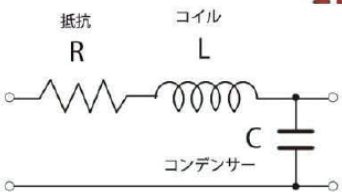
送受電コイルでは、コアの形状がカギを握る。コアの中心部をどの程度くりぬくべきか、フェライトの厚さはどうすべきかなど、全部シミュレーションをしながら、最適なところ探った。Al板の上にフェライトを敷いてコイルを載せ、上側にカバーをかぶせればできてしまう。Alから外には磁束が漏れていないことも、シミュレーションで確認できる。結果、30kW品だと845mm角という大きさになる。

次にケーブルの対策について。使用条件の中で最も支配的な要因を調べることで、最適な電線を選定できる。

周波数に依存する ESR を決定する要素、要因



ケーブルは純抵抗と線上に分布するインダクタンスと線間に分布するキャパシタンスから構成されるが、集中定数では右図のように表される



高周波で使用するケーブルでは、キャパシタ成分があるため ESR (等価直列抵抗) 要素と要因を検討する必要がある

周波数に依存するケーブルの ESR の要素、要因

要因	要素		
表皮効果	線径	周波数	
近接効果	縊り数 (他の導体との距離)		
自己共振 (浮遊容量)			線長

使用条件の中で最も支配的な要因を調べることで、最適な電線を選定できる

ケーブルは、直流だと基本的には抵抗は普通の抵抗となり、オームの法則でよいが、高周波を使うと表皮効果が出る。ケーブルの表面だけ電流が流れて、内部には流れなくなる。Cu 線の場合、50Hz では直径が 18mm であればほぼ全量にわたって電流は流れる。それを 20kHz にすると、18mm の径のうち表面の 1mm 分に流れるだけで、残りの 17mm は電流が流れない。すなわち、1mm の部分で全ての電流を流すので、ものすごい損失になる。対応策としては、ケーブルを細くしてたくさん集めたリッツ線を用いる。目的は、表面積を増やすこと。

対策② ケーブルの性質



導体抵抗

直流 : 使用する導体材料の導電率と断面積によって決まる
交流(とくに高周波) : 表皮効果、近接効果、渦電流損等によって上昇

① 表皮効果

導体を流れる電流は周波数が増えるにつれて導体の表面に集まろうとする性質がある
導体内部の高周波電流は表面からの距離が増すと指数関数的に減少、その割合は $1/e$
導体表面の電流振幅に対し、電流振幅が $1/e$ になる距離を表皮の厚さ(深さ) δ とすると

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}$$

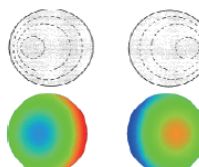
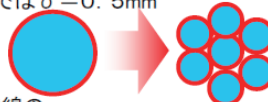
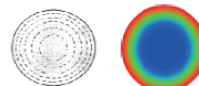
ここで ω : 角周波数 ($2\pi f$)、
 μ : 透磁率 (真空中では $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$)
 σ : 導体の導電率、 f : 周波数 (Hz)

銅の場合、 $\sigma = 5.8 \times 10^7 \text{S/m}$ なので 上式は

$$\delta = \frac{0.066}{\sqrt{f}}$$

即ち 50Hzでは $\delta = 9\text{mm}$ だが 20kHzでは $\delta = 0.5\text{mm}$

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する
表皮効果を減少させるため線を細く本数を増やしたリッツ線で、撚線の
各素線を絶縁(通常ポリウレタン焼付)して導体の表面積を大きくする



② 近接効果

隣り合った導体に流れる電流方向が同一の場合は互いに電流は
離れ、電流方向が逆の場合には互いに近づいて流れる性質がある
このように電流の流れが不均一になると導体抵抗は大きくなる

表皮効果を確かめるべく、リッツ線を比較した。我々は、当初、ケーブルに直径 0.25mm 品を 1100 本束ねたリッツ線を使っていた。それを、0.1mm 品で 5250 本束ねたものに変更した。すると、抵抗が 50% 以下になった。

そうすると、人間が次に考えるのは単純だ、5000 本を 1 万本にすればもっと抵抗は減らだろうと。実際に 1 万本を束ねたリッツ線を作った。結果は期待はずれで、ほとんど抵抗は減らなかった。今工場の片隅でひっそりと眠っている。

対策② 対策ケーブルの開発



表皮効果



海外製70sq リッツ線
0.25φ×1,440本撚り
外径18mm



開発41sqリッツ線
0.1φ×5,250本撚り
外径9.9mm



開発80sqリッツ線
0.1φ×10,290本撚り
外径13.8mm

0.1φ×5,250本撚りにすることで、100kHzでIPTケーブルの50%以下を達成、10,290本撚りにしても顕著な効果は見られない

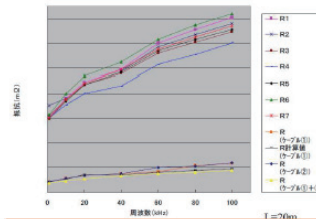
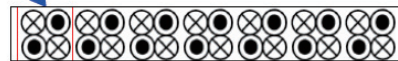
近接効果

リッツ線の
フラット化

7分割し、
上下左右で
ペア線化



リッツケーブル 11sq×7本



7分割し、配置を工夫することで、海外製ケーブルの38%以下を達成

期待はずれだった原因が、近接効果というのだ。これは、同じ方向に流れる電流は外にはじき合うというもの。逆方向に流れていれば引き合う。多量のケーブルを一つの中に巻き込んで給電線を作っても、近接効果でもものすごく抵抗が増えてしまう。そこで、ケーブルを7本に分け、なるべく上下左右ペアになるようなケーブル配置してみた。すると、コイルの抵抗は38%以下になった。それが大きな効率増加のもとになった。

これ以外にも、リッツ線のより方を工夫してみた。なるべく内側と外側に出てくる頻度を同じにするようにケーブルをよってあげる。逆に言えば、センターはよることができないので、センターは抜いてやったり、プラスチックのケーブルを入れてその回りに三つ編みのようによってみたり、いろいろな方法がある。こうした工夫で、効率はものすごく変わる。

こうした観点で、最近普及が始まった小型携帯機器のワイヤレス給電用コイルを見ると、いかにも効率が悪そうなものになっている。単なるエナメル線を巻いただけだ。100kHz程度の周波数を使っているのであれば、ケーブル径は細くてもいいがリッツ線にすべきだと思う。

対策③ 低損失電源システムの開発

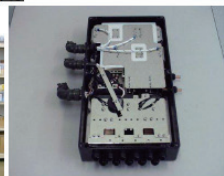


低損失システムの採用



IPS電源盤

- ・ラジエータ水冷方式採用
- 省エネルギー／ 小型化



整流器

- ・水冷方式採用
- 省エネルギー／ 小型化
- ・通信装置組み込み
- 省スペース

冷却機構



熱交換器(ポンプ+ラジエータ)



低ON電圧
(V_f)、高ス
イッチング
速度

低ON電圧
(V_f)、短逆
回復時間

低損失電力部品の採用

パワーコンデンサ



700V
250A

パワーコンデンサ



600V
40A

高周波パワーリアクトル



高周波パワートランス



500V
110kVA

IGBTモジュール



1200V
400A

FETモジュール



500V
140A

Fast Recovery Diode



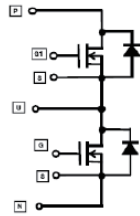
Schottky Barrier Diode



低ON抵抗
(RDS)、
高スイッチ
ング速度

次に電源について述べる。低損失電源システムも開発するということで、特にパワー・コンディショナ(パワコン)が重要になる。コンデンサはものすごく損失するので、できるだけ高性能な品種を選んだり、リアクトルにも気を使って欲しい。

対策③ SiCモジュールによる効率向上



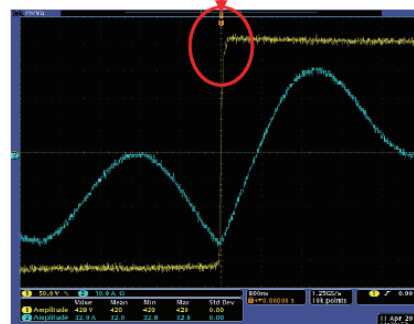
還流ダイオードの逆回復時間が長いとインバータの高力率運転時にブリッジに貫通電流が流れ、スイッチング損失増加による素子の過加熱、放射ノイズの増大などの問題があり、周波数が高くなるほど顕著
このため回路設計に当たっては、若干の遅れ力率となるよう設計せざるを得ない

Si素子の還流ダイオードの逆回復時間が約200~250nSなので、リングング発生が観測される

SiC素子の還流ダイオードの逆回復時間は約20nSなので、ほとんどリングングが見られず、効率の高い高力率運転が可能



従来のSi(MOSFET)モジュール



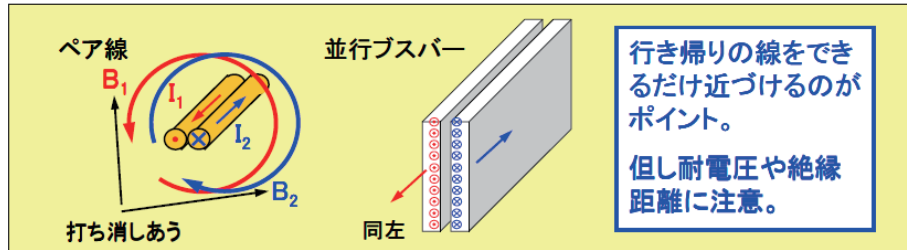
試作したSiC(DMOSFET)モジュール

ワイヤレス給電システムでは最近、次世代パワー半導体の炭化ケイ素(シリコン・カーバイド、SiC)に期待が寄せられている。SiCを用いると、従来のシリコン(Si)を還流ダイオードに使った場合に比べて逆回復時間を1/10程度にできる。Siでは200n~250nSの時間が、SiCでは20nSになる。効果として、SiCにするだけで「リングング」がほとんどなくなる。これで効率がぐんと上がる。今、我々は90kHzの周波数帯域を使って走行中給電システムの開発を進めている。これにはSiCを用いている。そうしないと効率が上がらないためだ。

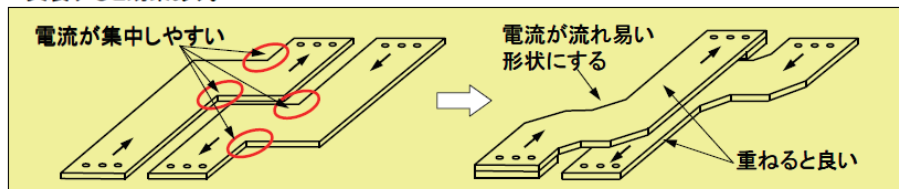
対策③ 高効率化のための配線手法



- ・並行したペアケーブルや、並行バスバーを使用し、行き方向の高周波電流と、帰り方向の電流を打ち消し合わせる事で、近接効果による送電ロスを抑制できる

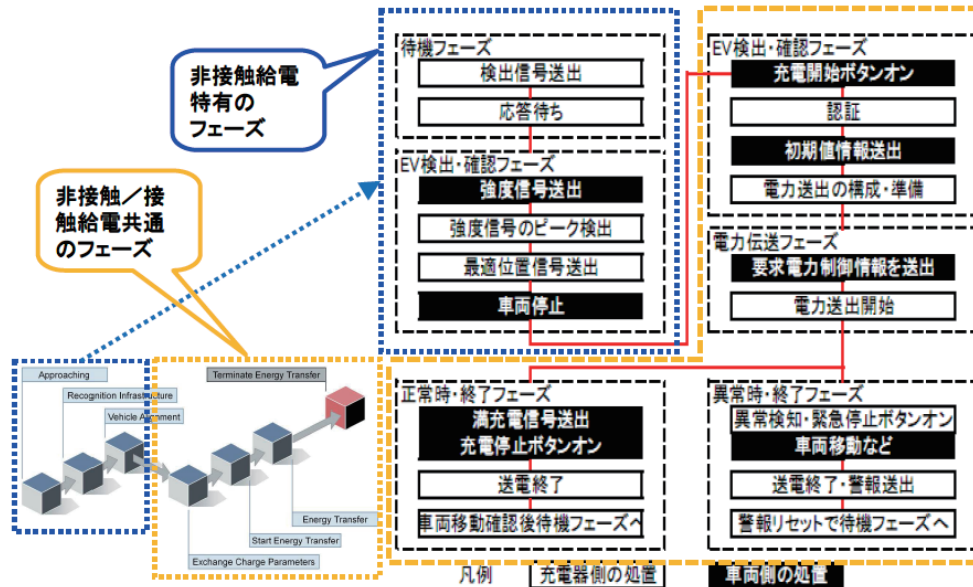


- ・配線の断面積確保のため、バスバーを利用する場合、電流の偏りによる局所加熱に注意
- ・表皮効果、近接効果の影響を低減するには、プラスマイナスor行き帰りのバスバーを重ねて実装すると効果あり。



効率に関しては、配線も重要になる。もちろんペア化をして、同じ方向に流れないようにして打ち消し合うとか、できれば並行バスバーにするといった対応を施す。バスバーを使うと効率を上げらるが、角があるところに電流が集中してしまう。そこで、近くに配置するバスバーはなるべく重ねるなどの工夫が必要になる。

ワイヤレス給電制御の流れ



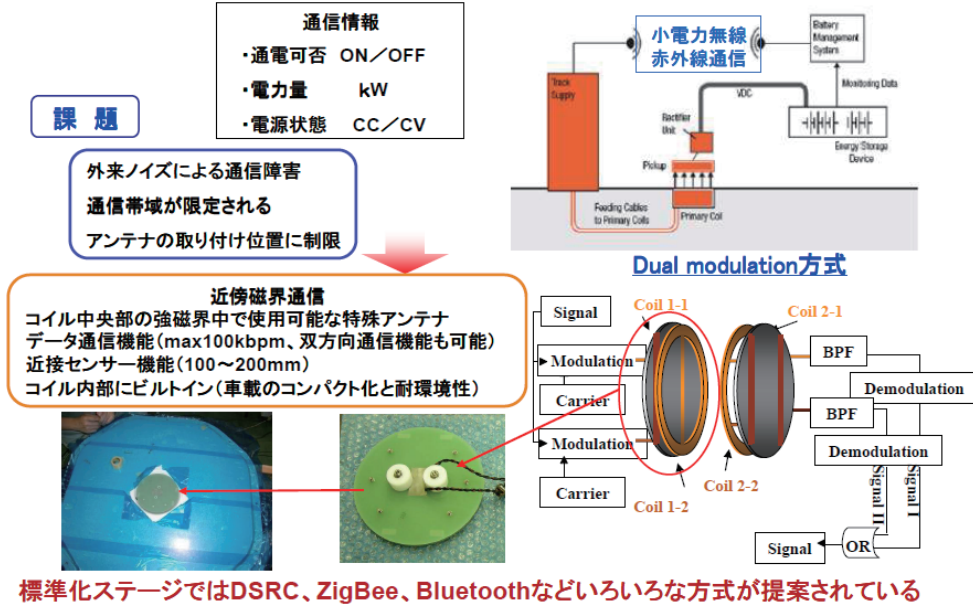
今度は給電制御についてだ。ワイヤレス給電には、接触式給電とは異なる特有のフェーズがある。共通点は、充電ボタンを押すと路車間で光ケーブルを使って通信をして、必要な情報に沿って電力を送る。最後、送電終了になれば、それでもう1回待機フェーズに戻る。異常だったら、異常の警報を出しておいて、リセットでアナウンスを消してあげる。

そこに非接触に必要な制御系を追加する。具体的には、1次側のコイルに常時、高周波電力を流さないようにする。ここから無駄に電磁波が漏洩してしまうと効率が悪くなるということがあり、周りに鉄板などがあれば加熱してしまうという問題があるためだ。基本的にはシステムは寝かせておき、アンテナから呼び出し信号を出す。ある時間を置いて時々出す。そうすると、それに対して車が来て応答する。コイルの真ん中にアンテナを付けているので、真上に来ると一番強度が強くなる。そのところで車を止めると位置がぴったり合ったと判断する。そこで自動に充電を開始してもよいが、運転者に一度押すという作業を与える。すなわち、ここまで来ると実際に運転手の席には「OK」といったランプを付けて状態を伝える。運転者がボタンを押したら充電を開始するように設計するのが望ましい。

開発④ 従来の通信システムの課題対策



地上電源装置とバッテリーマネジメントシステムとの通信



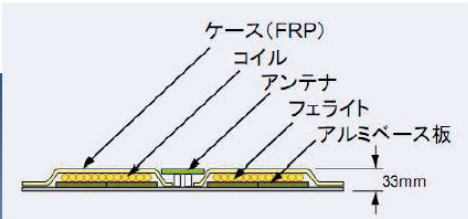
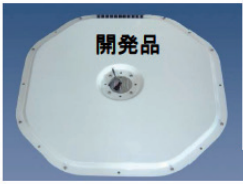
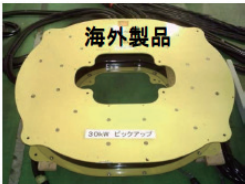
送電コイルと制御装置をつなぐケーブルには電流および磁束が流れる。アンテナを付ける位置としては、IPT は実は外側に小電力通信システムを付けている。これがしばしば妨害電波を受けて充電が止まってしまう。

それを何とかしなければと部署内でブ레인・ストーミングをやったら、若い人間が「コイルの真ん中に付けたらどうでしょうか」と提案してきた。みんな反対する。「こんな電磁波の強いところに銅板でできたようなアンテナを付けて大丈夫か」といった意見だった。だが、若い人の意見というのは聞くべきもの。結果的に、やってみたら非常にいい性能を示した。と同時に、さっき言ったように位置合わせの計測器にもなる。この発見以降、昭和飛行機工業の送電コイルはすべて、車用の場合はこの真ん中にアンテナ・コイルを付けている。

開発成果



出力 : 30kw
周波数: 22kHz

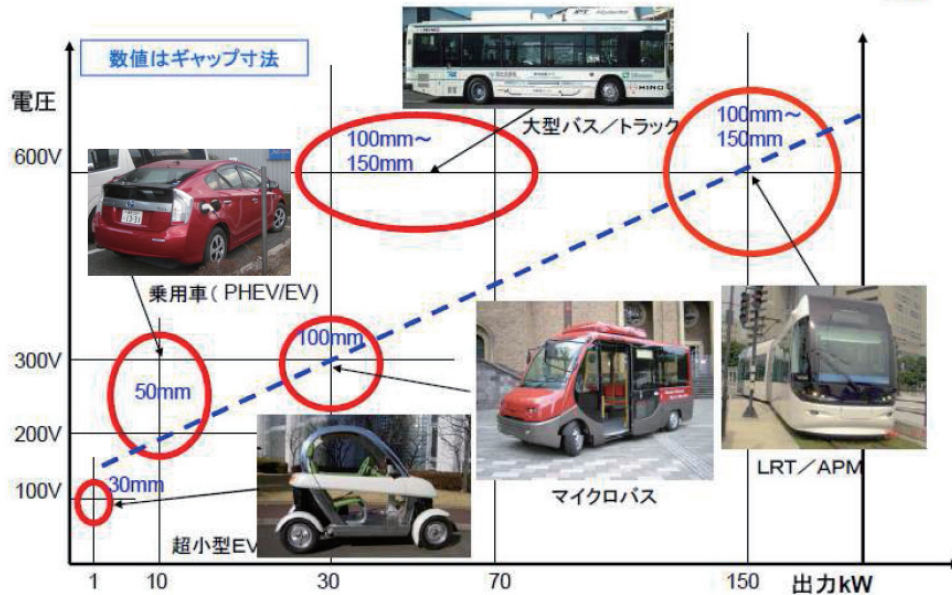


	効率 [%]	2次側ピックアップ重量 [kg]	2次側ピックアップ寸法 [mm]	コイル間ギャップ [mm]
海外製品の性能	86	70	短径 875 長径 1025 厚さ 61	50
IPSの性能 (平成20年度)	92	35	短径 847 長径 847 厚さ 33	100
ギャップ拡大IPS (平成21年度)	92	50	短径 1390 長径 1390 厚さ 50	140

出来上がったのがこのコイルである。左側の海外開発品と比較すると、中にアンテナが付いている我々の品種では効率が 92%と高いことが確認できた。

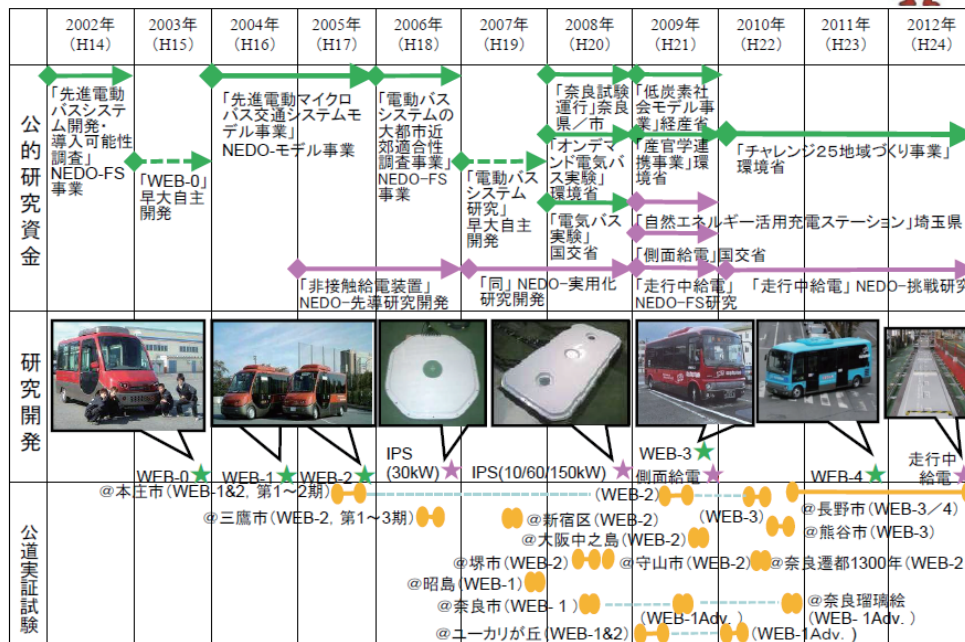
ちなみに、今回の講演で話をする昭和飛行機工業の効率はすべて総合効率である。電源の入り口から 2 次電池 (負荷) の入り口までの効率になっている。コイル間効率ではない

IPS開発成果と実用化開発展開



次に、開発技術の実用化と他の開発状況というところで、まず開発技術の実用化ということで、我々は1kW から150kW まで開発が進んでいる。1kW 品は1人乗り、10kW 以下は乗用車のEV。30kW がマイクロバス、50kW 品が日野自動車などが開発している大型のプラグイン・ハイブリッド・バスとなる。150kW になると路面電車がターゲットだ。

電動バス・IPS開発の年度別概要



電動バスの年度別の開発概要をここに示す。初めてワイヤレス給電機能を搭載したバスの開発に着手したのは、2002年のことだった。NEDOの資金を調達して開発を始め、並行して海外調査を進めた。次の1年間は早稲田大学の費用で「WEB-0」試作車を造った。この「0」というのは実は、ナンバーを取得できず校内しか走れない車だったことに由来する。さらに翌年、NEDOの力を借りて2台造った。非接触給電型の「WEB-1」と接触給電型の「WEB-2」である。

2台試作した理由は、接触型と非接触の比較をしたかったからだ。これ以降、あちこちの公道で実証試験をやり、電動バスのあるべき姿を考え、伝えていった。

ワイヤレス給電に関しては、平成17年から4年間支援を受けて実証した。その後、今現在は走行中給電の検討を進めて2013年3月に一段落した。

ワイヤレス充電とワイヤード充電の比較



平成20年度奈良公園交通社会実験

電気バス（WEB-1）＋IPS：早大



電気バス（三菱ローザ）＋接触式充電器：北陸電力

平成20年11月8日～11月10日実施



奈良県電気バス走行ルート

奈良市電気バス走行ルート



実証実験の一つとして、平成20年度に奈良公園でワイヤレス充電とワイヤード充電の比較をしている。奈良という場所は、11月には奈良国立博物館で正倉院展が開かれる。そうすると、JR奈良駅から正倉院までの間の登大路が大渋滞になる。そこで、この奈良県庁の駐車場をパーク&ライドの基点として、ここまで車で来てもらって電動バスに乗り換えて、この中をぐるぐる回るというコンセプトで実施した。

1台はワイヤレス給電付きのWEB-1です。もう1台がEVバスで、1日の走行に必要な電力量を蓄えられる大型のLiイオン2次電池を搭載した、三菱自動車の「ローザ」を改造した北陸電力のバスを使った。

平成20年度奈良公園社会実験での充電状況



ワイヤレス給電での充電準備で1次コイルに接近



ワイヤレス給電での充電状況



接触充電での充電準備でケーブル接続



接触充電での充電状況



実験では、道路に送電コイルを置き、バックしてこの上に乗って充電する。一方、接触式の場合は北陸電力の係員がガシャンと充電プラグを差し込む。これは実は大きな問題があり、50kW ではだめなのだ。「CHAdeMO」規格の問題点でもあるが、CHAdeMO はもともとの考え方が普通乗用車クラスまでしか考えていない。このため、最大でも30kW 程度が上限となる。このため、充電時間が40分を過ぎると、通電していると異常と判断して電源自身を切ってしまう。そこで、奈良公園での実証では、50kW のプラグを2口用意した。

翌年の平成21年はワイヤレス給電だけで社会実験をしました。県庁に1台配備し、6分間充電の充電でストップ＆ゴーを繰り返した。ターミナル駅は通常、5～6分は車両が停止する。山道を走って、途中の春日大社の駐車場で1分間充電。これはバス停での充電を想定した。このトータル7分の充電で、6kmの山道をぐるっと回ってこれるようなシステムに仕上げた。

2カ所での耐荷重型ワイヤレス充電

平成21年度奈良公園交通社会実験



6分間充電
(ターミナル
駅充電を
想定)



1分間充電
(バス停充電を想定)



1周6km30分の奈良公園山道で使用する電力量を
充電ポイント2ヶ所の合計7分間で充電するだけで
1日走行可能

最少電池搭載／高頻度充電／長走行距離の実現

参考データ

	車両重量	電池容量
WEB-1Adv.	3,180kg	11.7kWh
iMiEV	1,080kg	16kWh



実証に使った車両「WEB-1 Adv.」は、車両重量が3tある。これは三菱自動車のEV「i-MiEV」の3倍にも上る。1トン。だが、搭載するLiイオン2次電池はWEB-1 Adv.が12kWhで実はi-MiEVより小容量だ。だが、この程度の大きさの電池でも、ちょこちょこ充電することで十何人も乗れるバスを1日中走らせることができる。

大エアギャップ化で地面完全埋込みを実現



従来型車両・IPS

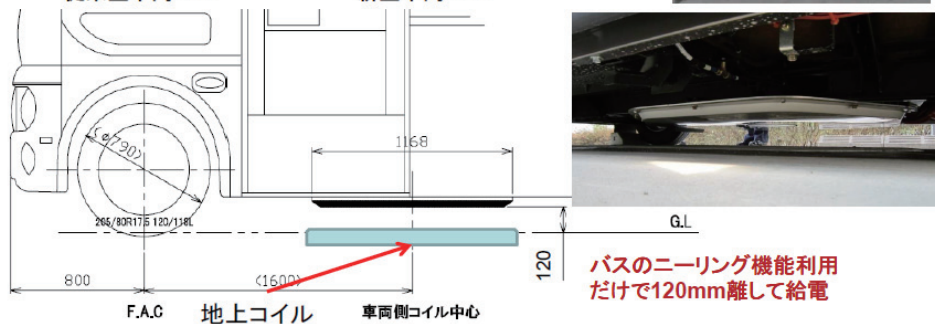


新型車両・IPS

設置前



設置後



送電コイルの設置手法についても検討を続けている。実証に使用したバスは、バリアフリーで車高がすーっと下がる「ニーリング」機能がない。このため、「マウンド方式」と称して1次側のコイルが地面にぽこっと飛び出ている。だが、こんなものを道路に据え付けると、2輪車が通ったらあっという間に事故が起きてしまう。このため、平にしなければならなかった。新しいバスでは、ニーリングできるようになり、車高を120mmまで下げてくれる。この程度のギャップであればワイヤレス給電できるので、1次側コイルは地面に真っ平らに埋めた。

実運用実証実験①



長野市街地循環バス「ぐるりん号」(運用 平成23年11月20日～平成26年3月31日)

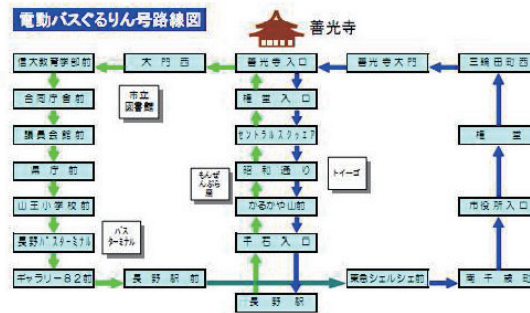
WEB-3実証実験車両(長電バス)



電動バスの事業性検証

1. メンテナンス上の問題把握
2. 空調システム評価
3. 電池性能劣化の最小限化の検討
4. 充電システムの評価
 - ・長期間運用でのメンテナンス上の課題
 - ・複数台数による連続稼働の実証
 - ・運用コストの把握

WEB-4実証実験車両(アルピコ交通)



出典: 路線図は長野市HPより

その実証実験を今、長野市街地で実施している。「ぐるりん号」という市街地循環バスで、長野駅から善光寺の間を回る。「WEB-3」「WEB-4」いう2台のバスを走らせている。

実運用実証実験②

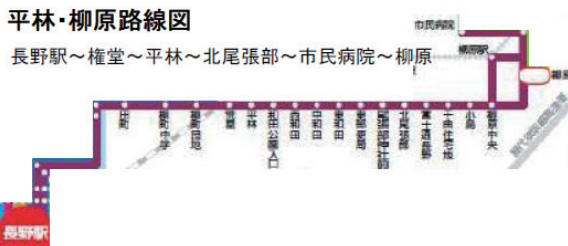
長電バス「平林・柳原線」(運用 平成24年12月1日～平成26年3月31日)



市内走行中のWEB-3(長電バス)

平林・柳原路線図

長野駅～権堂～平林～北尾張部～市民病院～柳原



充電中のWEB-3



充電電源盤とWEB-3

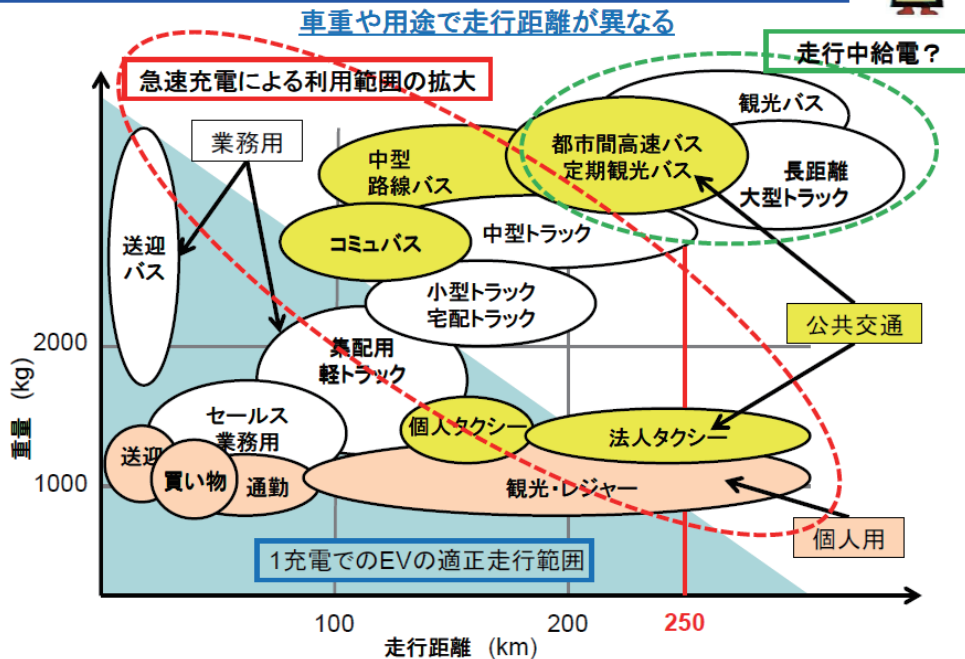


長電バス営業所の充電設備

出典:路線図は長電バスHPより

ここでは環境省の委託事業として進めているが、電動バスおよびワイヤレス給電のメンテナンスにどれだけのコストや費用が掛かるのかを 3 年間かけて実証している。ワイヤレス給電システムは接触部がないため部品が摩耗するところがなく、メンテナンスは不要といわれる。一番心配なのはコンデンサ。ここには 700～800V という非常に高い電圧がかかっている。すると、コンデンサが劣化していく懸念がある。劣化して、もし導通状態になるとあっという間に大電流が流れて火災を引き起こす危険は否定できない。だが、1 年半ほど運用して現在、問題なく使っている。現在、運賃として 100 円を利用者から徴収している。

EVの適正イメージ



このグラフは、横軸に走行距離を、縦軸に車両重量をとっている。EV が活躍できるのは、走行距離が短く車両重量が軽い領域である。個人用のクルマであれば、普通の乗用車 1～2t ほど。

バスに関しては、駅と会社行き来するような送迎バスであれば走行距離は短い。ところが、同じバスでも観光バスで 350k～400km を走行することも珍しくない。ここは EV の領域から外れる。

業務用のクルマを考えると、車両重量が重くなるとあつという間に EV ではだめになる。例えば長距離トラックを EV 化しようなんていうことを考えている企業はない。もう一つが公共交通。公共交通というのは、タクシーとバスがある。バスの中でも地域を走るコミュニティ・バスは適用範囲内に入る。ところが都市間の高速バスは難しい。タクシーも実は、個人タクシーは 1 日の走行距離の上限が 180km に定められている。法律上それ以上走ってはいけない。法人タクシーは 365km と長い。

ワイヤレス給電システムの開発動向①



パイオニア(CEATEC2013)



出力 : 3kW
ギャップ : 100mm
効率 : 85%
位置ズレ : ±100mm対応可
周波数 : 85kHz

パナソニック (ITS2013)

出力 : 3kW
ギャップ : 100mm
効率 : 85%
位置ズレ : 50mm程度
は可



日産リーフ(2011技術説明会)

出力 : 3k~6kW
ギャップ : 150mm
効率 : 80~90%
周波数 : 20~100kHz



日産インフィニティ「LEコンセプト」 (NYモーターショー2012)

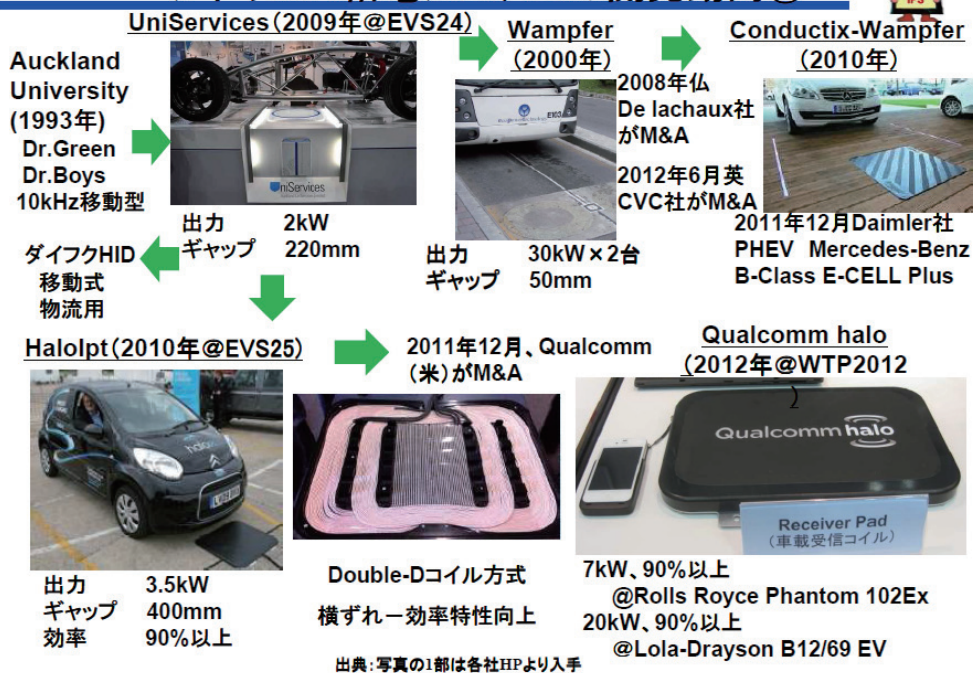


出力 : 3.3kW
特徴
・標準装備
・地上コイル
据え置き式
・自動駐車システム
装備

写真: 日産は日産HPより入手

今のワイヤレス給電の開発状況を見ると、国内では、パイオニアが「CEATEC 2012」で 3kW のシステムを展示している。ギャップが 100mm で、異物検知ができる。日産自動車は 2011 年の技術説明会で EV「リーフ」にワイヤレス給電システムを搭載してみせた。同社は 201 年 4 月 12 日にゴーン社長が「ニューヨークモーターショー」で「2 年以内に Infiniti ブランドの EV にワイヤレス給電機能に標準搭載する」と宣言した。オプションではなく、標準搭載すると断言したのが業界を驚かせた。日産自動車はパナソニックと組んで開発しており、CEATEC ではモックアップの展示だったが改良を進めている。

ワイヤレス給電システムの開発動向②



海外に目を転じると、UniServices 社という会社があるが、同社はもともと University of Auckland に在籍していた研究者が立ち上げたベンチャー企業である。先ほど説明した Wampfer 社は、源流は UniServices 社になる。UniServices 社が 2009 年の「EVS24」に出力 2kW の試作システムを展示した。同社は技術をまず Wampfer 社に渡した。現在はその Wampfer 社は、買収されまして Conductix-Wampfer 社という名前になった。現在は、Daimler 社や BMW 社などと共同開発している。

一方、同じ技術はレール式といわれているものはダイフクに「HID」という物流用のシステムとして実用化されている。さらに、EV 用には HaloIPT 社に技術提供し、出力 3.5kW で 400mm のギャップに対応するシステムを仕上げた。特徴は、Double-D コイル型という特殊な形状のコイルである。同社は 2011 年 12 月に Qualcomm 社が M&A をして、現在は「Qualcomm Halo」という形でアピールしている。出力は 3k~20kW まですystemを用意している。7kW 品は Rolls-Royce 社の「Phantom」に適用して試作車を展示会で披露している。3kW 品の受電コイルも披露しているが、非常に小型である。

ワイヤレス給電システムの開発動向③


Bosch ASS-Evatran
『Plugless L2 Electric
Vehicle Charging System』

(2013年)

出力 : 3.3kW
 ギャップ : 10cm
 効率 : 91.7%
 周波数 :
 かなり低い
 商用周波数
 ではない


SEW-EURODRIVE
(2011年)


出力 : 3kW
 効率 : 90%以上

Vahle
(2012年)


出力 : 3.6kW
 効率 : 90%以上
 周波数 : 140kHz±10kHz

Audi(2011年)
A2 Concept


Audi Wireless Charging (AWC)
 出力 : 3.6kW

GM(2013年@上海MS)
Buick「Riviera concept」


「Dual mode W-PHEV」
 車体フロア下から非接触充電

Volvo(2013年)
C30エレクトリック


出力 : 20kW
 写真: 各社HPより入手

海外でもう一つ有名なのが、米国の Evantran 社が展開している「Plugless Power」である。米国ならではのことで、車両底面のうち、前方に受電コイルがある。米国は、前止め駐車が基本だからである。筆者は以前、何で前止めにするんだと米国人に聞いたことがある。そうしたら「泥棒と間違われたいめだ」と言葉が返ってきた。つまり、後ろで入ったらずっと逃げやすくしているということで、“泥棒野郎”と思われてしまうと冗談を言われた。冗談はさておきだが、実際に米国人はほとんど頭から突っ込む。他にも、SEW-EURODRIVE 社や Vahle 社などがある。Vahle 社は効率が非常に高く、異物検知機能も備える。

自動車メーカーでは Audi 社や、最近では 2013 年 4 月に開幕した「上海モーターショー」で GM 社が Buick ブランドで「Dual Mode W-PHEV」というワイヤレス給電システムを披露した。ただ、GM 社は詳細をほとんど明らかにしていない。

ワイヤレス給電システムの開発動向④



磁界共鳴方式 (WiTricity社)の技術提携先

2010年10月 2011年4月 2011年9月 2012年3月
 デルファイオートモティブ(GM) トヨタ自動車 三菱自動車/IHI Audi

第42回東京モーターショー(H23-12-3~11)



三菱自動車 iMiEV用磁界共鳴式(Gap180mm、水平方向位置ずれ±200mmで85%の出力)



トヨタPHV用磁界共鳴式



ヤマハ 二輪車用磁界共鳴式



ここまで紹介してきたシステムは、実は全部、電磁誘導方式を用いたものだった。もう一つの勢力である磁界共鳴方式に関しては、WiTricity 社が開発の中心にいる。同社はまず、2010 年 10 月に Delphi 社と提携した。Delphi 社は GM 社と距離が非常に近い Tier 1 だ。続いて、2011 年 4 月にトヨタ自動車、2011 年 9 月に三菱自動車と IHI、さらに 2012 年 3 月には Audi 社とも手を組んだ。

2011 年の「東京モーターショー」では、三菱自動車が i-MiEV に、トヨタ自動車がプリウス PHV にそれぞれ磁界共鳴方式のワイヤレス給電システムを搭載した試作車を展示した。さらに、トヨタ自動車のブースには、ヤマハ発動機が試作した電動バイクも展示されていた。

ワイヤレス給電システムの開発動向⑤



TDK(CEATEC2012)



出力 : 3kW/20kW
ギャップ : 15~20cm
効率 : 80~90%
周波数 : 20~200kHz
位置ズレ : 20cm以下

TDK(CEATEC2013)



出力3.3kWで従来の1/4サイズ

三井ホーム柏の葉実証実験住宅 MIDEAS

公開期間 H24/9/10~H24/11/9
基礎実験 H24/11/12~H25/9/30
入居実験 H25/10/1~H27/11/30
IHI/WiTricity 3.3kW
プジョーのionに給電



トヨタ(CEATEC2013)



「プリウスPHV」
2014年中にも実証実験開始
出力 : 2kW
充電時間 : 90分
周波数 : 85kHz
充電制御用無線通信方式
Wi-FiもしくはZigbee



2012年のCEATECでは、TDKが独自に磁界共鳴方式のシステムを開発し、GM社のPHEV「Chevrolet Volt」に適用していた。出力は3kWもしくは20kWで、ギャップは15~20cmまで対応できるという。

右の写真は、前回の研究会でも紹介された、三井ホームが柏の葉で実証実験をしているものである。2013年3月の時点ではまだモックアップだった。この実証は2015年まで予定されているので、そのうちに通電するのだろう。

なかなか増えないEVタクシー

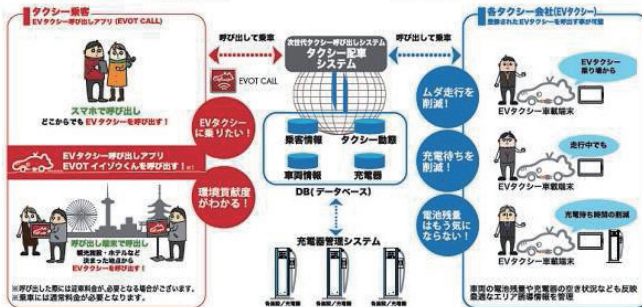


EVタクシーの問題点

- ・航続距離に制約があり、LPG車と同等の流し走行が困難
EVタクシー専用発着所
電話呼び出し(運転手の収入減)
近距離用(運転手の収入減)
- ・充電や充電待ちに要する時間のロス
急速充電器設置場所が都心に偏る
充電渋滞
- ・電池交換式
車種が限定される
ステーション設置費用が大きい
- ・価格が高い
個人タクシーには厳しい



充電中のEVタクシー



出典: http://monoist.atmarkit.co.jp/mn/articles/1201/26/news023_2.html および 大阪府



電池交換式EV

次に、公共交通や業務車で開発状況をこれから説明していこう。EV タクシーは少しずつ見かけるようになったが、なかなか増えていない。問題点がどこにあるかというと、EV タクシーは流しができない。車載電池を満充電にしても、最長でも 200km しか走れない。流しをしている間に“電欠”を起こしてしまう。タクシーの運転手の営業の立場では、効率が悪くて敬遠したくなるものだ。

さらに、充電待ちに要する時間ロスも非常にある。電池交換式にすればよいのだが、こうすると交換ステーションの設置費用が非常に高い。先ほど言ったように、個人タクシーは 180kmが走行限度なので理論的には適用できるが、車両価格が高いこともあって個人タクシーとは言えどもハードルは高い。

続々登場する電気バス



羽村市の「はむらん」



墨田区の「すみりんちゃん」



小松市EVバス



七戸町電気バス



サントリー白州工場見学者送迎バス



宮古市電気バス



秋田市「ELEMO-AKITA」



三菱重工業の電気バス



慶応大学の8輪電気バス

出典: 各HPより

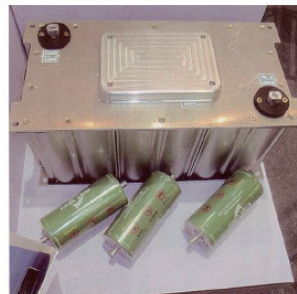
一方、EV バスはさまざまな自治体で公道を走るようになっている。例えば、日野自動車は「ポンチョ」を使った改造のEV バスがスカイツリーの周りを走っている。

電動バスへの接触式給電の取り組み



2010年、上海万国博覧会でのキャパシタバス「創新号」

- ・運転区間 : 第11路線の10停留所(5.25kmの環状線)
- ・走行距離 : 120km/日
- ・キャパシタセル数 : 360個(定格電圧1.65V、静電容量80,000F)
 - エネルギー密度 : 10Wh/kg
 - 出力密度 : 1,500Wh/kg
- ・キャパシタへの充電
 - 停留所で乗降中にパンタグラフを上げて30~90秒間で充電
- ・1充電走行距離 : 3.5~8km
- ・フル充電所要時間 : 3~5分
- ・最高時速 : 44km/h
- ・電圧 : DC600V
- ・電源 : AC10kV、200kA



使用キャパシタ

キャパシタは電動バスで走行用に使うのは問題ないレベル



電動バスへの給電は接触式もある。有名なのは、上海万博のときに走っていた車両だ。キャパシタを積んで走っているのだが、バス停の上側に2本給電線がある。電車の場合はパンタグラフ1個で、あとは帰線はレールがあればよいが、バスはゴム・タイヤなのそのまま転用はできない。とはいえ、街を走っていた車両は対策が施されて問題なく充電はできており、キャパシタで十分走れることを実感した。だが、大電流を流すと、アークが飛んで溶着する恐れがある。

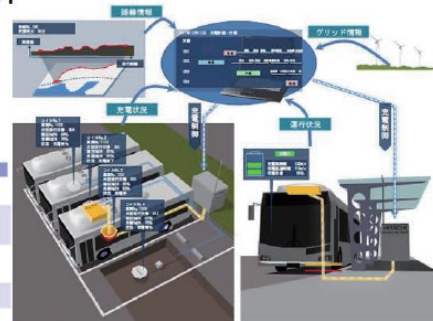
日立市スマートシティEVバス実証事業



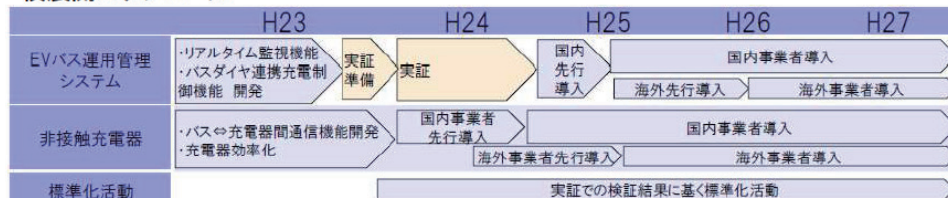
新エネルギー導入促進協議会 平成23年度次世代エネルギー技術実証事業
日立市スマートシティEVバス運用モデルプロジェクト

実施団体:日立製作所
協力:茨城大学、日立市、茨城県、日野自動車、
日立電鉄交通サービス、日立ビークルエナジー

実証事業スケジュール



横展開スケジュール



出典: http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004633/014_s01_00.pdf

ワイヤレス給電であれば、接点がないためこうした心配は無用だ。コイルにさえ電流を流せばよい。ワイヤレス給電に関する実証事業の例としては、日立市のスマートシティEVバスというものがある。これは実は、あまり情報がない。日立製作所による実証なのだが、日野自動車のバスを改造してワイヤレス給電機能を搭載しているが、実証の当初は Wampfler 社のシステムを採用していた。その後、昭和飛行機工業のシステムに変わった。さらに、最新のものでは日立製作所の内製システムを適用している。

日立製作所はワイヤレス給電システムの内容については一切明らかにしていない。しかも、関係者以外はバスに乗ることも見学することもできない。

米ユタ州立大EVバス実証事業①



ユタ州立大学のAggie Bus (2012年11月15日発表)

2014年Q2にユタ州立大キャンパスで商用運用を計画

ワイヤレス給電システム仕様

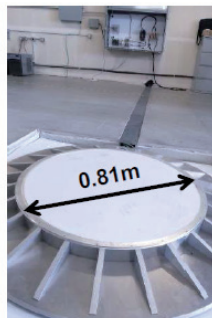
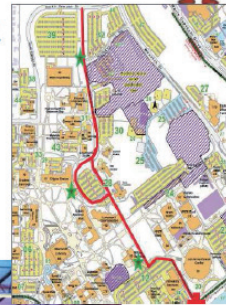
- ・出力 25kW (運用時には50kWの予定、括弧内は以下同じ)
- ・総合効率 90%以上 (90%以上)
- ・周波数 20kHz (23.4kHz)
- ・エアギャップ 150~165mm (178mm)
- ・許容位置ずれ 150mm (200mm、効率低下無し)
- ・12時間運用で48回充電<1.6マイルを10分間運転、5分間充電>

バス仕様

- ・長さ 6.7m (12.2m)
- ・電池搭載量 213kWh

プロジェクト費用 2.7百万ドル

EVバス
ルート



ローガンにあるユタ州立大学ガレージ
内でのワイヤレス充電ステーションと
充電中のAggie Bus

出典: Herald Journal



海外の事例では、米国のユタ州立大学で EV バスの実証実験を 2013 年度中に実施するとの発表があったばかり。1.6 マイルと短い距離だが、同大学のキャンパス内でワイヤレス給電システムを搭載する EV バスを運行させる。出力が 25kW で、運用時には 50kW に高める計画のようだ。総合効率は 90%という。12 時間の運行時間中で、5 分間の充電を 48 回行う予定。許容できる位置ずれは 200mm だが、実はこのバスは大きくて送電コイルはマウンド形式である。路面から大きく飛び出ている。

英Milton Keynes市EVバス実証事業



2012年11月、三井物産が「ワイヤレス充電式電気バス」による路線バス事業を公表

2013年夏から、英国南部のミルトンキーンズ市の1路線・全8台をこのバスに置き換えて運行

MBK Arup Sustainable Projects td.(MBK80%、ARUP20%)を設立、事業全体のマネジメント

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| Milton Keynes市 | : プロジェクトホスト、住民環境調査 |
| Arriva社 | : バスオペレーター、保守、乗客、運転手調査 |
| Conductix-Wampfer社 | : ワイヤレス給電装置製造 |
| Wright Bus社 | : 電気バス製造 |
| Western Power Distribution社 | : 電力インフラ提供 |
| Cambridge大学 | : データ収集、解析、報告書作成 |



海外事例でもう一つ、三井物産が2012年11月に、英国のミルトン・キーンズでEVバスの実証試験を、2013年の夏以降に行いますということを発表した。ワイヤレス給電システムは、Conductix-Wampfer社のものを採用する。1路線全8台をこのワイヤレス給電バスに置き換えるという。

独マンハイム市EVバス実証事業



マンハイムのBombardier MITRAC e-bus(2013年2月18日発表)



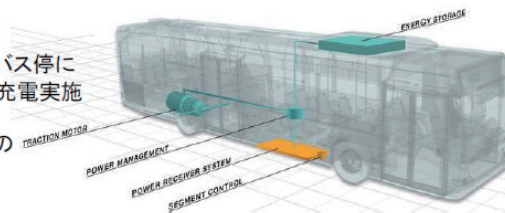
ドイツのライン・ネッカー交通(RNV)は、BombardierのPRIMOVE技術を使った電気バスをドイツのマンハイムの市街交通機関として運用することを発表。早ければ2014年の第2四半期より導入。



電気バスは都心のルート63に沿って通常のバス停に設置して乗客が乗り降りする間にワイヤレス充電実施

最初の12ヶ月の試運転期間で、12m~18mの2台の電動バスがテストされる予定

- ・出力190kW
- ・充電時間
 - SOC100%まで2分30秒
 - SOC94%まで15秒
- ・坂道ではコイルを並べて準走行給電



出典:<http://www.greencarcongress.com/smart-charging/>
<http://www.ecoeffect.org/media-library/latest-news/?id=6080&page=0>

この他、ドイツのマンハイムでも Bombardier 社が取り組んでいる。一番初めにやったときにレール式というのをやったのだが、ワイヤレス給電の適用も検討している。同社は走行中給電だけではなく、静止型でも開発しており、「MITRAC e-bus」という名前の EV バスを造っている。

これをマンハイムで 2014 年から動かす予定で、出力が 190kW という大出力品になるという。SOC94%までを 15 秒でできるという急速充電機能を備える予定だ。15 秒といったらもうほとんど乗り降りをしている間に充電できてしまう。坂道ではコイルを並べて準走行給電をやると発表している。

高速道路維持管理車両



日本の事例に戻り、高速道路維持管理車両というものを紹介しよう。長野日本無線が開発した磁界共鳴方式のワイヤレス給電システムを搭載する計画がある。標識車といわれるライトをつけて危険を予知させる車に付けて充電をする。2013年の10月14日から始まる「ITS世界会議」に出展を予定している。

2014年度以降に50kWの電磁誘導方式、これは昭和飛行機のものになると思うが、のワイヤレス給電システムを除雪車や巡回車に取り付けて実証しようとする動きも進んでいる。これは、中日本高速道路(NEXCO 中日本)と共同で実施する。

道路法の課題への対応



1. 法的規制

道路に施設を設置して継続して道路を占有することは、道路法第32条に規定(国交省)
また道路の使用許可は道路交通法第77条に規定されている(総務省)

2. 許可申請

道路上設置には所轄警察署と道路管理者の許可を受ける必要がある

★道路上設置のための各種道路要件規定
が無く、法的整備が待たれる

耐荷重性
スリップ性
メンテナンス性 等々

現状では
・駐車場
・バス営業所などの構内
・バスベイ
・特区
にしか地上コイルを設置できない

30kWタイプ



50kWタイプ

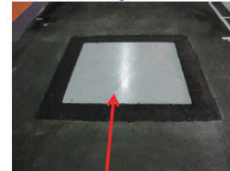


荷重試験



踏みつけの様子

設置後



地上面と面一になるように地中にコイルを埋め込む

ここからは、ワイヤレス給電システムを実用化する上で直面する課題を整理する。まず、道路設置の課題が出てくる。これまで紹介してきた事例では実は、駐車場や営業所の敷地内などに送電システムを設置していた。これは、道路上に設置するのが非常に難しいことを示している。日本の場合、縦割り行政があり、道路上に設置をする場合、物を設置する場合には占有という格好で道路法の対象となる。これは国土交通省の管轄で、届出が必要になる。もう一つは道路を使用する場合には、警察への届出も必要になる。道路の占有の使用の違いがあるとのことだ。

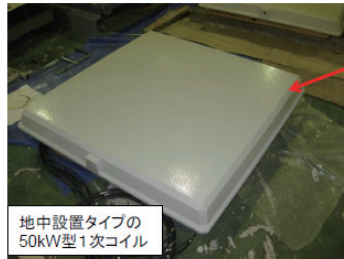
では、この二つの許可申請を両方出せばいいんだろうというので、何度も申請をしている。だが、現実には1回も通らない。なぜか。それは、道路上設置をするための道路要件が決まってないためだ。つまり、法律で決まってない。

なぜかという、耐荷重性やスリップ率、メンテナンスの方法に規定がない。規定がないもので道路を占有することはできないというのが国土交通省の主張だ。

H21年度東京都庁での地中設置型ワイヤレス充電



ハイブリッドバス(IPSバス)用50kW地中埋設型コイル@東京都庁(H22-3-26公開)



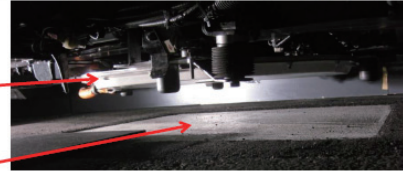
地中設置タイプの
50kW型1次コイル

初めてコイルを地中に埋め込んでの実証実験

地上面と面一になるように地中にコイルを埋め込む

車両側
コイル

地中
コイル



運用中の様子

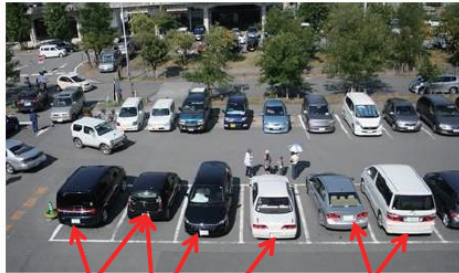


踏みつけの様子

そこで今、国土交通省とワイヤレス給電システムの耐荷重性やスリップ性について検討を進めている。例えば、平成21年度に都庁の下に1階にある大きな駐車場にコイルを埋め、バスで踏みつける実験をした。問題点がどこにあるかを見極めるのが目的である。

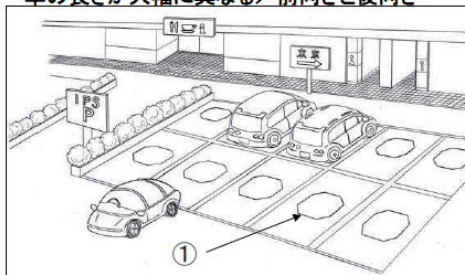
次に、正着性の課題可決に向けた取り組みでは、サービスエリアに送電コイルを埋め込んだ場合などを想定して検討を進めている。

サービスエリア駐車場利用イメージ図



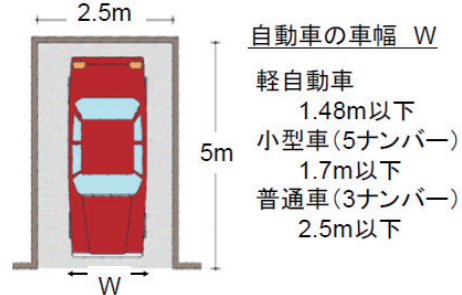
左寄り斜め駐車 一番正確 右寄り斜め駐車

車の長さが大幅に異なる／前向きと後向き



①地中埋め込み型非接触給電装置（送電側）

一般的な駐車場の寸法



コイルの位置ずれロバスト特性の拡大

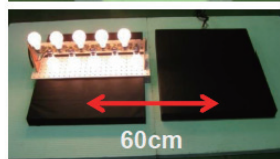
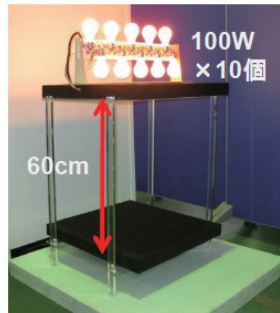
小型車の場合で
 $(2.5\text{m} - 1.7\text{m}) / 2 = 40\text{cm}$

給電コイルと受電コイルの位置関係

- ・横方向に40～50cm程度のずれの発生
- ・前後方向は車止めが必要
- ・前向き／後向き駐車 of 統一
- ・水平方向の回転(斜め駐車)

これは、国土交通省の交通安全環境研究所で作ったものだが、位置合わせようの補助線を工夫することでどの程度位置ずれを抑制できるかを検証した。グラフのこれは1辺が240mmで、この中で前後、左右方向にばらついている。

正着性への対応

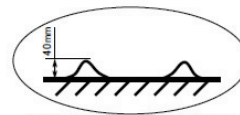
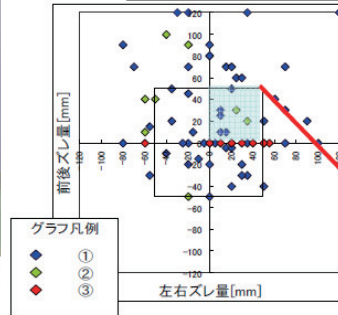
磁界共鳴式電力伝送方式
(中継コイル方式)

60cm離して1kW送電

実験室レベルではピーク5kW、
連続3kWを実現している

位置合わせ用補助線組み合わせ

- ① 車幅補助線(車両左側)及び車両前停止線
- ② 車両センタ線及び車両前停止線(車両前側バンパ合わせ用)
- ③ ①及びタイヤ位置決め用突起(ハンプ)



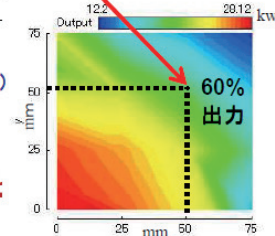
タイヤ位置決め用突起側面視

目視の場合、100mm程度位置がずれる可能性があり、その状態でも充電効率が高いシステムの開発が必要

出典:交通安全環境研究所公表資料

距離-出力試験

(IPT30kW型での試験結果)



→ コイル間ギャップが大きいとズレ許容度も大きくなる

位置ずれの一つの目安が、50mm である。50mm ずれると、効率は 60%まで落ちてしまう。スライドの写真は、昭和飛行機工業がやっている磁界共鳴方式の実験装置の例。これは 60cm 離して 1kW 電力が伝送されている。コイル径は 50cm。60cm ずらしても電力は送れる。すなわち、ギャップが大きくなれば、その分だけロバスト性は大きくなるということだ。

ハンプ設置非接触充電(動画:55sec.)



WEB-1@なら瑠璃絵
(H23-2-8～14公開)



夜間でも前後方向の正着性については確保できた



ハンプの設置



ハンプでの停止状況

これは奈良県の瑠璃絵というところで実施した実験の様子だ。あえて夜間に行っている。理由は、真っ暗で運転手が停車位置をつかめない状況で、どのようにして送受電コイルの位置を合わせるか、ということを検討するためだった。特徴は、ハンプを設置したこと。ハンプを設けることで、暗闇でも止める位置が一応見え、ハンプに当たったらこれで充電できる格好にした。

実験は成功で、無事ワイヤレス給電をすることができた。だが、これをそのまま公道に設置するわけにはいかない。私有地では、スピードが出ないように段差で据えつけてあるが、一般道はハードルが高い。



路上設置非接触充電の状況

第42回東京モーターショー(H23-12-3~11)



全体俯瞰



コイル配置前方から



コイル位置合せモニタ画面



バス停止状態



コイル格納状態



コイル昇降スイッチ

そこで、「東京モーターショー2011」で実証実験を行った。東京ビッグサイトの駐車場のところに送電コイルを埋め込んだ。この白い線は正着性を計測する目印で、その前方に黄色いラインを引いた。これはハンプではなくて単なるペイントのラインである。そのラインを車の中にあるモニターの赤い線と合ったら前が面が合ったということにした。これならば夜間でも全然問題なくできる。

運転手は、ラインに沿って入ってくる。運転手は車内のモニターを見ながら、この線に合っているかどうかを確認してハンドルを操作する。前後方向と左右方向が合ったところで停止し、コイル昇降スイッチを押して充電を開始する仕組みだ。

側面給電システム①



ICVS「シティパル」用自動充電装置

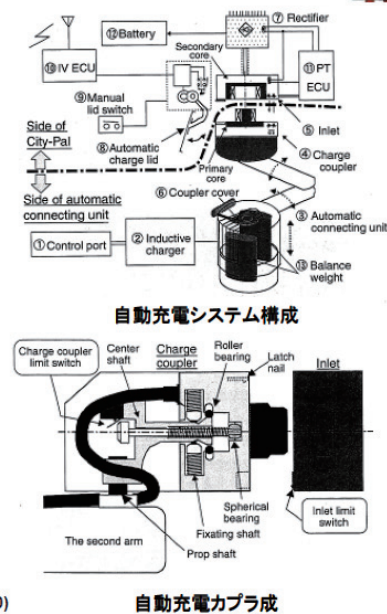


ワイヤレス給電システム

出力 : 6kW
周波数 : 100kHz
搭載電池 : DC288V、50AhNi-MH電池

- ・位置合わせが容易で手動対応も可能
- ・埋設工事が不要で工事費用が抑えられる
- ・雨泥で汚れにくく、信頼性向上が図れる
- ・停止位置の許容範囲が規定される

出典: HONDA R&D Technical Review Vol.12 No.1(April2000)



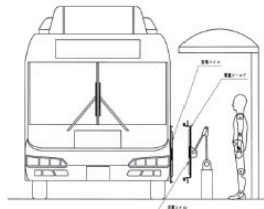
EVへの充電は、底面での電力のやり取りだけではない。ホンダは「ICVS シティパル」という名称で1998年に非接触自動充電システムを提案していた。

側面給電システム②

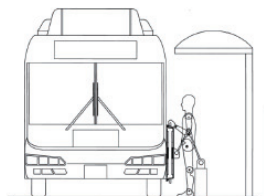


側面給電型ワイヤレス充電 @H22年度国交省PJ (都バス深川営業所)

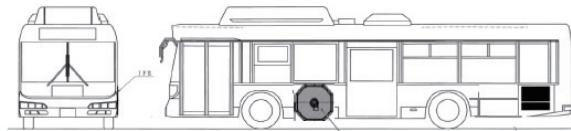
収納状態



受電状態



日野ブルーリボンシティIPS搭載バス概略図



- 2次側コイル 1次側コイル
 バランサーシステム
- ・位置合わせが容易で小型にできる
 - ・耐荷重や異物の加熱対策が不要
 - ・電磁波の遮蔽が容易
 - ・コネクション操作が必要
 - ・大型のシステムになる



利便性が損なわれる

昭和飛行機工業では、IPT バスの側面に受電コイルを取り付けてみた。1 次側コイルにはバランサー機構がある。運転手が手動で簡単にコイル同士を位置合わせすることができる。動作自体はシンプルだが、利便性は決してよくない。バスはワンマンカーのため、運転手はバス停に着いたら運賃を収受しなければならない。とてもコイルを合わせている時間はないのだ。

送電コイルと受電コイルの位置を正確に合わせる技術として、注目を集め始めているのが自動駐車である。

正着性対応への近未来技術



日産 ワイヤレス充電システム+アドバンスドパーキングシステム

ナビ画面(アラウンドビューモニター表示)で
地上コイルの真上にキチッと駐車するこ
とが可能となる



出典:<http://www.nissan-global.com/JP/TECHNOLOGY/OVERVIEW/wcs.html>
http://www.tdk.co.jp/techmag/knowledge/200708u_b/index2.htm

ワイヤレス給電システムの課題に関して、誘導過熱も重要である。異物の侵入が大きな問題だ。通電が始まると実は非常に低いインピーダンスのところで通電するため、なかなか異物が混入してもその物のインピーダンス変化を計測するのは難しい。

チャージシステムの異物挟み込みの影響度①



侵入異物の誘導加熱

大出力の装置ではコイル空間に金属があると誘導電力で加熱される

異物検知システム(FOD)の検討が必要

電磁誘導による金属試料の温度上昇

- ・透磁率の高い金属ほど発熱が大きい
- ・抵抗率の高い金属ほど発熱が大きい
- ・同一素材でも面積が大きいほど渦電流のループが大きくなり熱損失が大きい

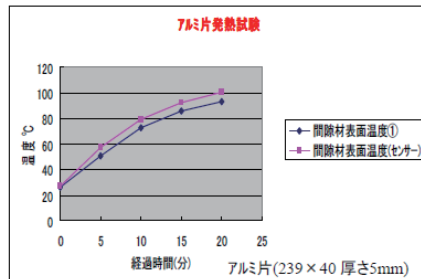
材質	比透磁率 (真空=1.0)	抵抗率 (Ω m)	サイズ (mm) t 1.0	温度上昇 (deg)
アルミニウム (A5052)	1.00002	2.65×10^{-8}	50×50 t 1.0	14
銅	0.999991	1.68×10^{-8}	50×50 t 1.0	6
鉄 (SPCC)	2000 (軟鉄)	1.00×10^{-7}	50×50 t 1.0	160
鉄 (SPCC)	2000 (軟鉄)	1.00×10^{-7}	25×25 t 1.0	80

条件 : 出力1.0kW 周波数 : 90kHz

出典: バイオニア資料(WPT2012-24)に筆者がデータを加えて作成

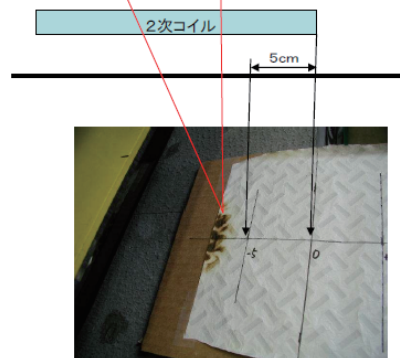
例えば硬貨は径が小さいので波長が長いのであまり熱くならないが、ステンレスのたわしが例えば風でころころと転がって車に下に入るかもしれない。くぎを引っ掛けて長さを測ってみたら、ちょうど 16 分の 1 波長の長さだった。

チャージシステムの異物挟み込みの影響度

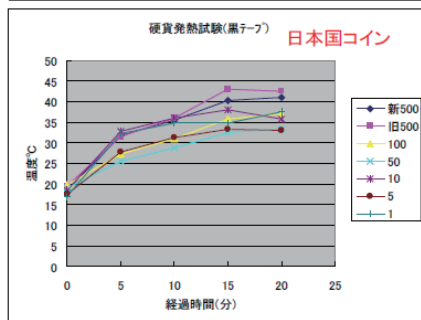


・異物侵入対策
コイル空間に金属があると誘導電力で加熱される大出力の装置では注意が必要

アルミ箔の場合、写真のように、アルミ箔に張られている紙が焦げるほど高温になる



誘導加熱装置やIH調理器と同じ注意が必要



異物の侵入への対応



平板や缶だけでなく線材にも注意が必要

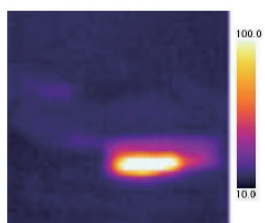
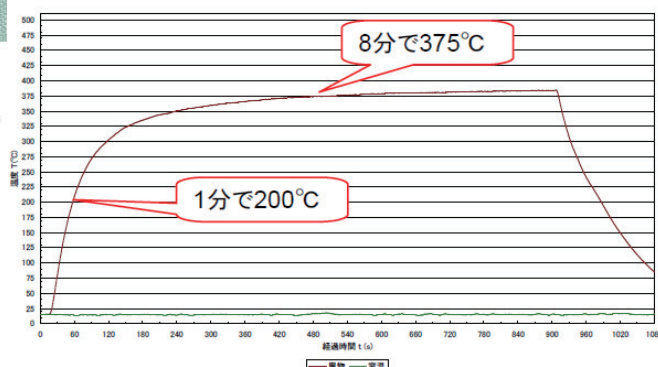


ステンレスたわし

渦電流だけでなくタワシのように細い線材ではインダクタンスによる共振も考えねばならない

10kW@22kHz試験結果

安全性評価 異物温度上昇グラフ
03 ステンレスたわし



サーモグラフ写真

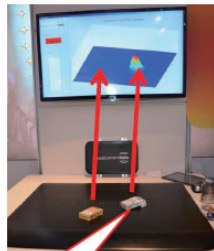
いろいろ考えられる異物検知法



パイオニア(CEATEC2012)

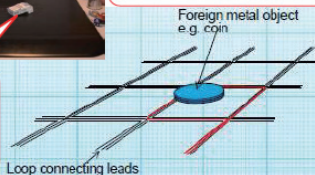


Qualcomm Halo



金属を検知すると警報マークが出て給電停止
金属検知式

メッシュに微弱な電流を流して検知



右の箱は
コイン入り、
左は空箱

出典: http://www.nikkei.com/article/DGXNASFK1103R_R10C13A1000000/

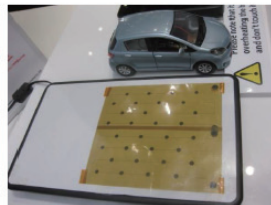
埼玉大学(平成24年電気学会論文)

提案している検知法

1. 給電前から異物が存在
 - ① 1次2次コイルの電圧比から推定される効率と実際の効率を比較
 - ② 2次コイル無しで1次コイルに定電圧を印加した時の電流を比較
2. 給電中に異物が混入
- ③ 伝送損失電力を定時でサンプリングして比較

村田製作所のFOD用サーミスタ (ITS japan 2013)

サーミスタ
チップ



サーミスタ
チップを
配列した
シート

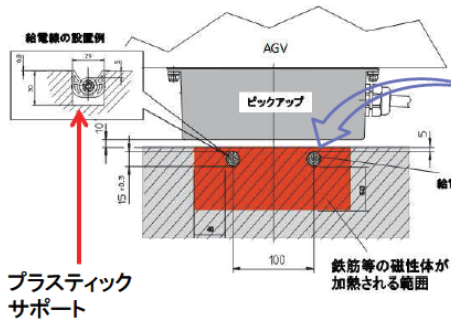
そうすると、共振してしまうので1分間で200℃まで加熱されてしまう。5～6分も停止していると、400℃近くまで上昇してしまう。これでは、大変だということで、パイオニアは、送電コイル上にコーヒー缶が載ると警報マークを出すようにした。Qualcomm社は、硬貨を入れたタバコの箱と硬貨が入ってない箱を見分ける技術を開発した。メッシュ状に微弱な電流を流して検知しているようだ。

誘導加熱対策はエンプラが最適



Wampfler社での製品例

コンクリート床盤埋め込みの場合



ワイヤレス給電は周囲にある金属を誘導加熱させるので、サポート部品は誘導が生じないエンプラの採用が最適

ワイヤレス給電の増加に伴い各種の部品需要が発生する

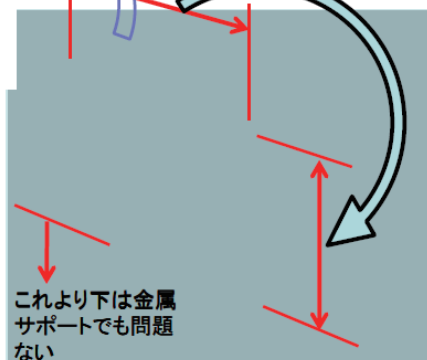
ダイフクでの製品例

レール式ケーブルのみならず電源盤内配線、コイルにも燃線式感熱線を沿わせる
・クリーンルームでの発煙は製品として致命傷
・80~100℃でシースが溶けてショート、電源断

感熱線

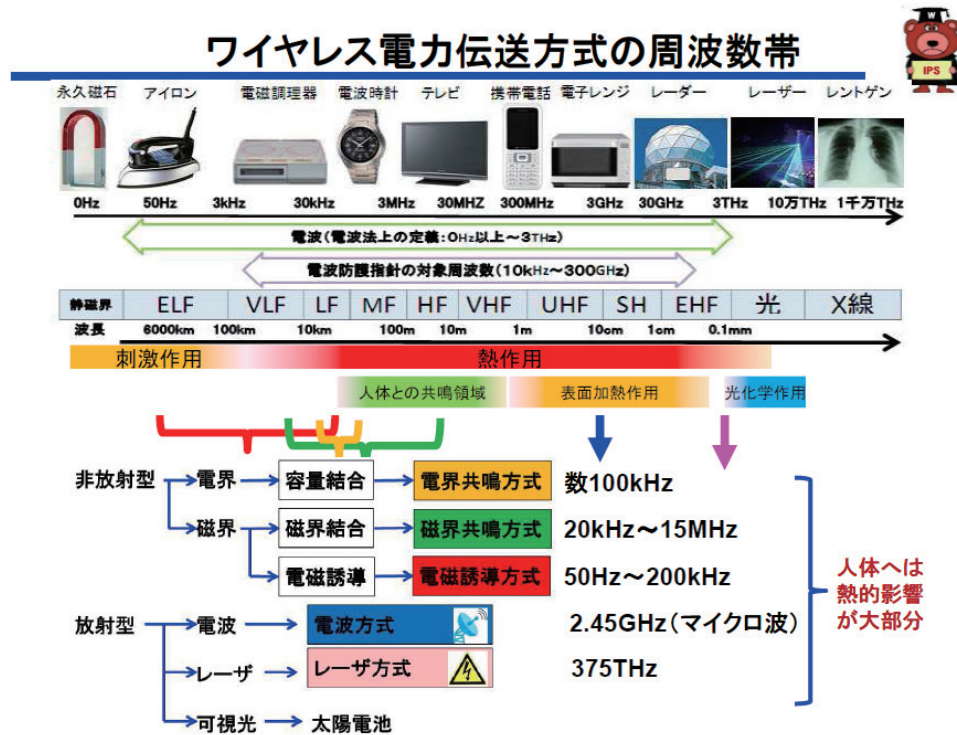


ケーブル間隔と同じ距離以内に金属を近づけると誘導加熱される



それからもう一つ、通電中にコイルが周りのものを暖めてしまう可能性がある。これは、コンクリートにケーブルを埋め込んでいる例。配筋材の鉄筋が熱くなってしまう。このため、イラストの赤い範囲内には鉄筋を入れていけないという設計指針を、必ずワイヤレス給電装置を導入する際に考慮する必要がある。

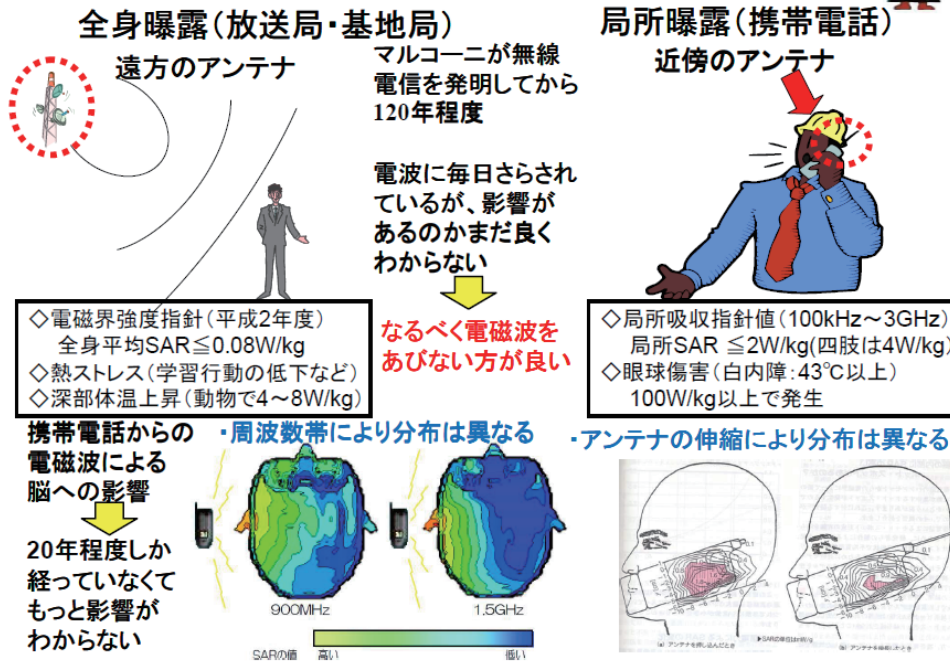
それからレール式の場合、上にケーブルを張るのだが、これはケーブル間隔よりも内側にあるものはすべて熱せられる。このため、この間隔と同じ間隔のところまでは、すべてプラスチックのサポートが必要になる。この下側は SUS でも鉄でも構わないが、内部は金属材料は使えない。こうした理由から、普通の平型のコイルでも、誘導加熱を車体にさせないようにするために電磁遮蔽用のアルミ板のサイズがコイルよりも大きくなってしま問題が起きる。



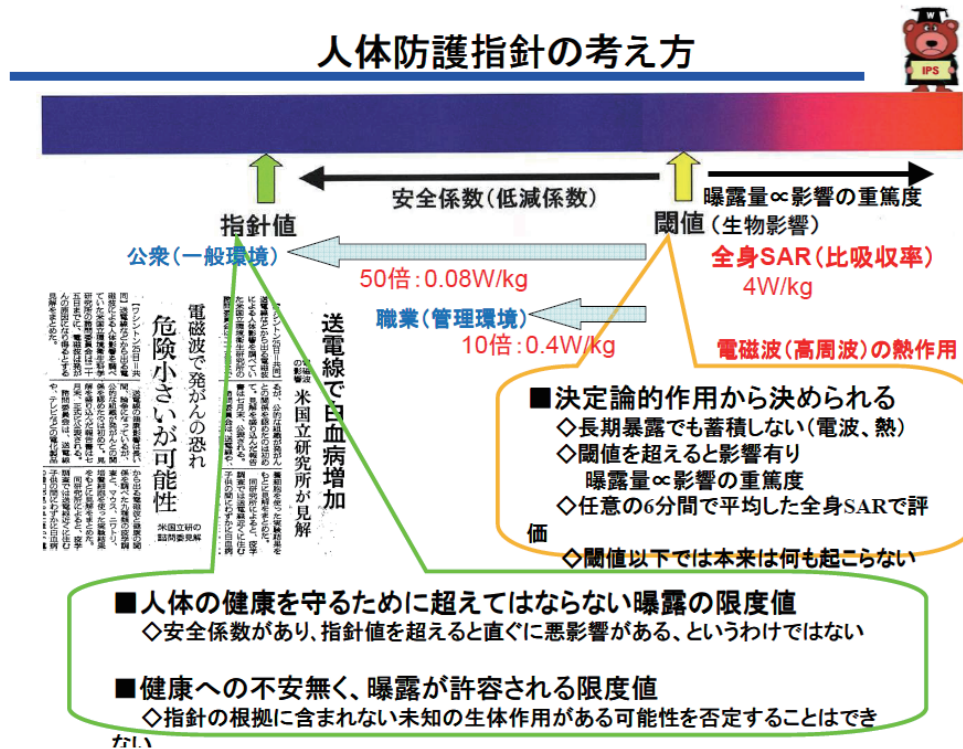
次に、電磁波の課題。電磁誘導方式は 50～200kHz 程度の周波数帯域を使う。もちろん総務省が許可している周波数帯域を使うわけだが、いろいろと考慮すべき項目がある。例えば、音の問題がある。音そのものが聞こえるわけではないが、コアが鳴るなどして人間の耳に聞こえてしまう可能性がある。このため、10kHz以上が一つの目安になる。磁界共鳴方式は20k～15MHzまでを使う。電界共鳴方式じゃ数百kHz前後から最近では10MHzぐらいまで伸びているということなので、もう少し伸びるかもしれない。

2.45GHzを使う電波(マイクロ波)方式や375THzを使うレーザ光方式は、いずれも光よりも下側、X線は上側のため人間の遺伝子に直接影響を与えるような問題はない。この下側は何が起きるかという、主としては熱作用である。あと低い周波数になると刺激作用になる。刺激作用で分かりやすい例は、100Vの電源を触ったときにびりつとくる刺激だ。

全身曝露と局所曝露



以上から、熱的影響が大部分となるが、やはりどこかの閾値から上側では重篤度が出てくる境界がある。それよりも下側で使わざるを得ないのだが、安全係数をということで、現在は、我々のようにその危険度を知っている人間は10分の1の値を指針値とし、一般の方には50分の1の値を指針値として、これが27μTあるいは6.85μTという形で定められている。



電磁界の影響はすぐには表面化しないが、今後未知の生体作用があると思う。例えば、送電線の下で白血病が増加するだとか、携帯電話機の電磁波によって脳にがんができるかもしれないなど。なるべく浴びない方がいいことだけは確かである。

電磁界に対する人体防護



人体に影響を及ぼさない電磁波の強さの指針が出されている

総務省電波防護指針

1990年 答申(10kHz-300GHz)

1997年 局所吸収指針の追加

ICNIRPとの整合が強まった

国際非電離放射線防護委員会

(ICNIRP)のガイドライン

1994年 静磁界防護指針

1998年 時間変動する電界、磁界、

電磁界防護指針0-300GHz

1999年 欧州理事会勧告

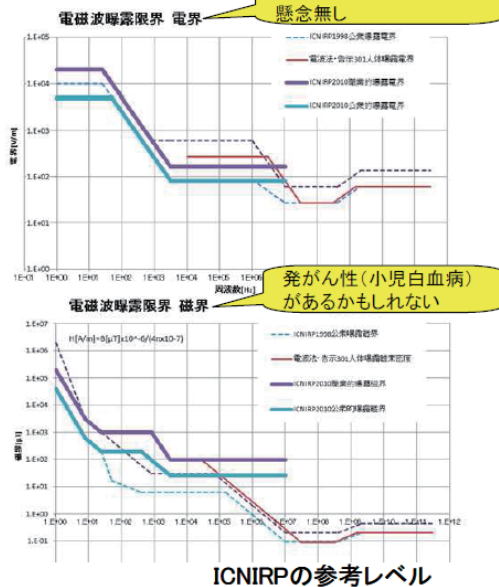
(公衆曝露を対象)

2004年 EU指令(職業曝露を対象)

2010年 100kHzまでの制限緩和

WHOはガイドラインにもとづき

リスク管理することを推奨

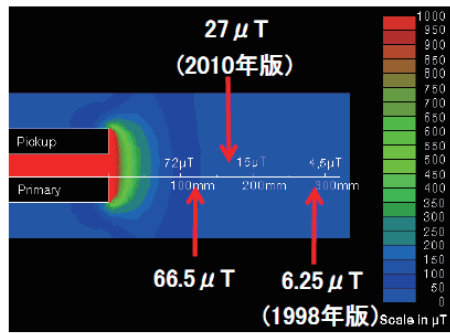


電磁界に対する人体防護に関しては、ICNIRP や総務省が基準を定めているが、我々は一番厳しいICNIRP を基準に設けている。

ICNIRPの人体防護ガイドライン



r=1 m地点における最大漏洩磁界
(30kWタイプの20kHzでのシミュレーション)



実際の電磁界計測結果

基準値(μT)	バス車内	バス車外
防護指針／91.5	1.5	4.5
ICNIRP／6.25		
条件: 距離0.5m ギャップ80mm 位置ずれ60mmにて		

2010年11月11日、Health Physics誌に改訂ICNIRPガイドラインが公表され、HP上にFact Sheetが掲載された

FACT SHEET

ON THE GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz ~ 100 kHz) PUBLISHED IN HEALTH PHYS 99(6):818-836; 2010.

基本制限値が改訂版では誘導電流密度ではなく、体内誘導電界強度に基づいている。これはIEEE規格と同様である。

100kHzまでで27 μ Tと約4倍、緩和の方向に向かっている

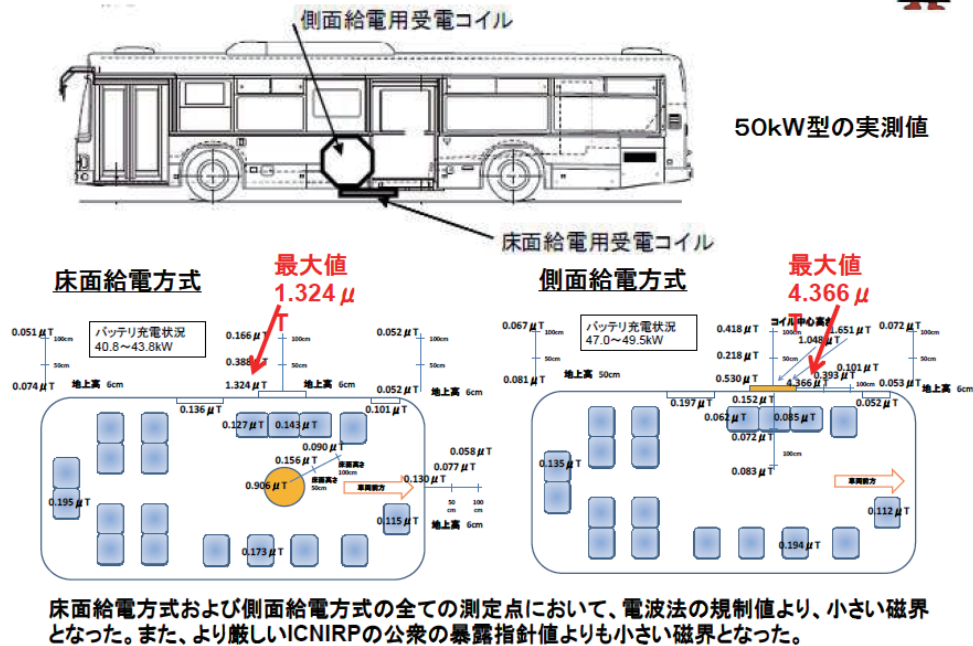
心臓ペースメーカーの最大許容磁束密度
(ドイツの規格)

周波数	磁束密度
15kHz	88.7 μ T
20kHz	66.5 μ T

これは 30kW のコイルの断面である。1 次側、2 次側、この中はものすごい強磁界である。ここを 6.25μT にしたら電力は送れない。遠方界では距離の 2 乗に比例して出力が減っていくが、近傍界では距離の 3 乗に比例し、あっという間に減衰してしまう。

心臓のペースメーカーの最大許容磁束密度も考慮している。日本にはこの基準はないが、ドイツの規格が 20kHz だと 66.5μT である。1998 年版の ICNIRP は 6.25μT で、これが 30cm だった。2010 年の改訂版で、100kHz 以下は 27μT に緩和され、約 150mm となった。

電動バスでの漏洩磁界測定結果例



電動バスでの漏洩磁界の測定結果例を示した。バスの幅 2m で、我々のコイルは直径約 1m である。真ん中に据え付けると両端が 50cm ずつ空くわけだ。すなわち、ここに車体の幅がここの辺に来ているので、下に潜り込むような人がいない限りは、そばに立っていても被曝の量が少ないということ saying。

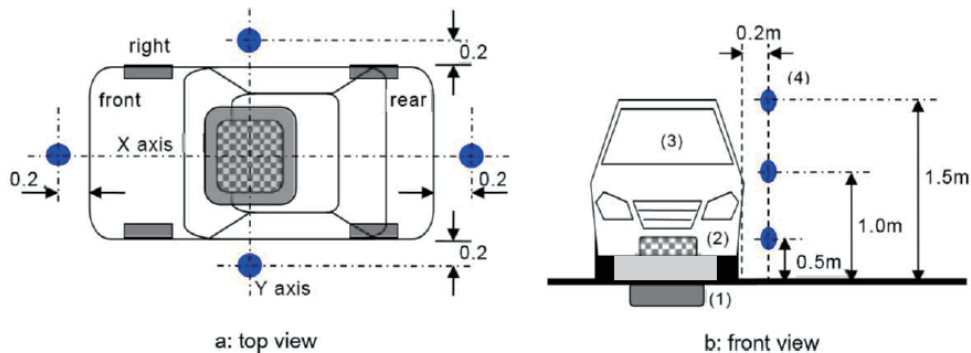
実際に計測してみたところ、床面だとその周り側にいる乗客が影響を受けやすく、長い時間乗っている運転手を守るコイル配置なども考慮した。受電コイルを床面におく場合は、乗降口の近くが 1.324 μ T と最大値だった。これは基準値の 6.25 μ T よりも小さい。側面の場合は、その真後ろに座っている人が背中に浴びる。そこが 4.366 μ T で、基本的には基準以下なので問題ないレベルになった。

EVでの漏洩磁界測定点の検討



SAEおよびIEC61980で測定法を検討中

- ◇前後左右4か所で車体から0.2m離れた地点
- ◇IEC62110(交流電力システム)を参考にしたJARI提案の高さ方向3点平均
- ◇下図のような領域において
 - (1) 物理的なバリアか、人体等の検出機能を設けて、人体が近傍にある場合には電力伝送を停止することで防護
 - (2) (3) 電力伝送動作時にも人体防護指針を遵守



次に、電波法について。実はこれは高周波利用設備という形で50Wを超える10kHz以上のものについては、すべて設置申請をしないといけない。それも簡単に設置申請を持っていったら受け付けてくれるわけではなく、きちんと計測データがいる。さらに、その計測値が非常に厳しい。これが一番大変だ。通信パートは微弱無線という問題も出てくる。

電波法の課題



1. 電力パート → 高周波利用設備

- 電波法第100条2項と電波法施行規則第45条3項に規定されている

無線設備及び前号の設備以外の設備であって **10kHz** 以上の高周波電流を利用するもののうち、総務省令で定めるもので **50W** を超えるもの

- に該当するため、各地の総合通信局に許可申請を提出して許可を受ける必要がある
- 無線設備65条2項に規定されている下記数値を満足している必要がある

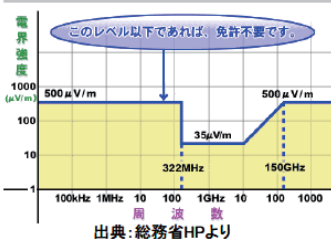
450kHz以下の使用周波数の輻射の電界強度は、
100m電界規制値 = 1mV/m 以下、かつ高周波出力が
500W以上の場合 30m電界規制値 = $\sqrt{\frac{P}{500}}$ mV/m 以下 (Pは装置の出力W)
500W以下の場合 30m電界規制値 = 1mV/m 以下

2. 通信パート → 微弱無線局

- 無線設備から3mでの電界強度が右図のレベル以下
- 無線設備から500メートルでの電界強度が200 μ V/m 以下で周波数などが総務省告示で定められているもの
これを超えると特定小電力無線局扱いになる

いずれも日本独自の規格で海外ではそれぞれの法律に合わせる必要がある

【図：微弱無線局の3mの距離における電界強度の許容値】

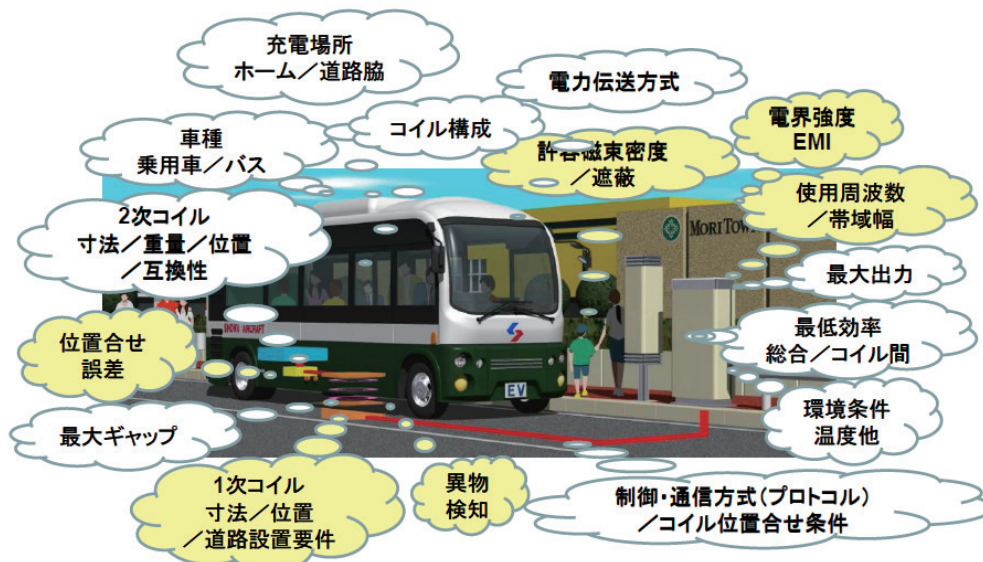


標準化に関しては、いろいろな項目で標準化をしないとイケない。

標準化が必要な項目



最低でもEVにおいては下記の項目で標準仕様の統一が必要



EV用充電器の標準化



WPC(Wireless Power Consortium) Qi規格



ベースの
組合せ



1次側が変わっ
ても充電可

利便性が高い



EV用ワイヤレス充電器規格

各国の電力配電の事情が色濃く反映され、
国際標準規格の統一化が難しい

EV用ワイヤレス充電システム

IEC61980-1,-2 (欧州では必須)

2003年にドラフトとしてCD発行、需要が無くストップ
2011年1月スイスが提案、3月パリでキックオフ会議
新WG(JARI/JSAE非接触給電標準化SWG)
Interoperability/車両の安全基準など
IEC・ISO・SAEのコラボ決議、日程未定

SAE J2954 (任意)

2011年にTechnical Paper発行、
2012年Recommendation Practice発行予定

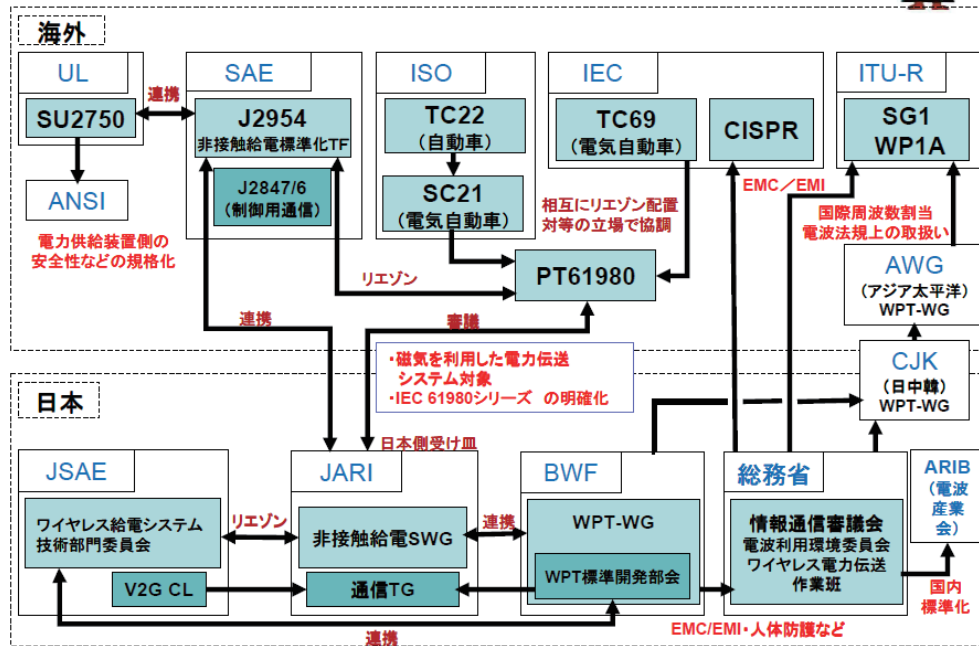
UL SU2750 (任意、必須のものもある)

2011年に第1次ドラフト原案発行、意見収集
2012年評価用ドラフト作成、評価認証開始予定

**ワイヤレス給電を対象とした国際的な展開も考
慮した標準化戦略の立案が必要**

EV用のワイヤレス給電規格に関しては、各国の電力配電の影響が色濃く反映され、国際統一化が難しい。

国内・国際標準化／法制化活動マップ(EV関連)

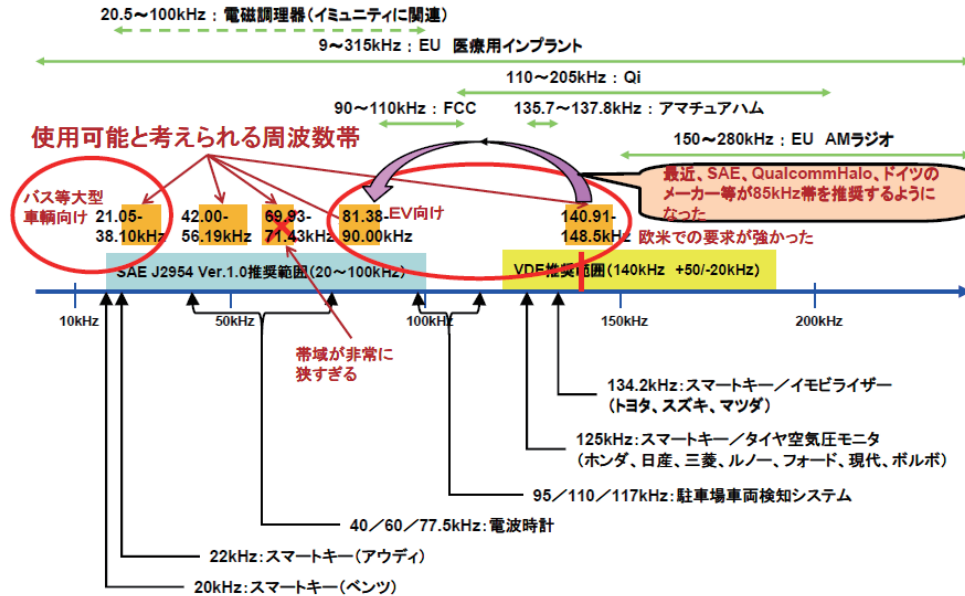


現在、日本や米国、欧州などで議論が進んでいる。2014 年か 2015 年ぐらいには、うまくやれば標準化ができるのではないだろうかというレベルのようだ。

使用周波数の標準化



国際／国内で既に多くの周波数に割り当てがあり、空いている周波数帯に限られる



使用周波数は、85kHzを採用することがほぼ決まった。2013年秋ごろまでは、42kHzから少し上ぐらいと、その下の30kHz前後、140kHzほど有力視されていた。2013年11月に米自動車技術会(SAE)が85kHzを使用することで合意したとの発表を受けて、議論は収束に向かいそうだ。

ワイヤレス式とワイヤード式給電の一体化



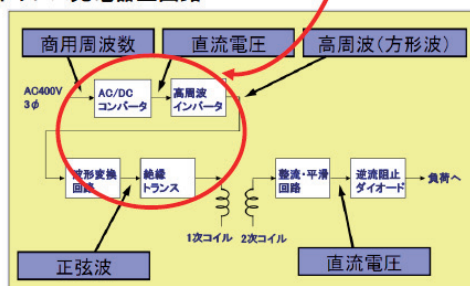
ワイヤード急速充電器主回路



接触式用コード
とコネクタ

非接触用1次コイル

ワイヤレス充電器主回路



回路構成殆ど同じ



Evatran社のワイヤレス給電システム

接触式と非接触式の2方式に対し 1
つの充電スタンドで充電できる

利便性・コスト

今後の方向性としては、静止充電の展開というので、一つは筆者が今いつも考えているが、今ガソリンスタンドに行くと車を止めたら、「レギュラーですか、ハイオクですか、軽油ですか」とこう聞かれる。だいたい車両を見れば分かると思うが必ず聞かれる。ワイヤレス給電ができたとして、もしガソリンスタンドと同じような充電ステーションがあって、接触式があるところに行ってもうたと思ってたら「うちは非接触はないから2km 先に行っちゃってください」となってしまうかもしれない。その間に電欠になってしまっただけは困るわけだ。

ただ、よくよく考えると、接触式も交流からコンバータとインバータを通過していく。ワイヤレス給電でもコンバータとインバータは変わらない。空間を通して整流を通すか、そのまま整流を通したものをコネクタを通してやるかの違いだけで、ここだけ同じであれば、切り替え式にして両方に対応できるようにすればいい。

V2Hを導入したスマートハウス



H2G(Home to Grid)、V2H(Vehicle to Home)等

発表されているEV用ワイヤレス給電システム、いずれも電源側からEVへの一方方向給電のみ
V2H対応となれば下記図のようにEV用インバータを用いた
双方向ワイヤレス給電システムが必要



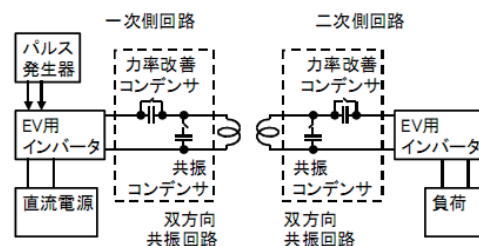
ダイムラーはメルセデスベンツのEV、『AクラスE-CELL』を使用して、ワイヤレス充電システムの日常的な実用性を検証中

2012年3月から、ドイツ国内の最新省エネ住宅に4人家族が居住、3台のEV(AクラスE-CELL、スマートフォーツーed、スマートeバイク)で1年3カ月間、ワイヤレス充電システムを利用して、その実用性を確かめる。(2011年12月7日発表)



日産自動車の太陽光発電・燃料電池・EVを組み合わせたスマートハウス(CEATEC2011)

双方向ワイヤレス給電システムの概念



今後の展開では、スマートハウスや V2G、V2H が話題になる。実は筆者は V2G をあんまり提唱しない。自分の大事なバッテリーを世の中のために寿命を減らすのかと言われると、嫌と、こう言いたくなるので。V2H は自分のクルマと家で電力を融通しあうのでまだよい。ところが、そのときにやはり双方向でやらないとできない。双方向の給電システムというのが、今後の方向性となりそうだ。

EVの「電車」化



1 充電走行距離の短いEV

搭載電池の増大

	電池容量／走行距離／充電時間
iMiEV	16kWh／180km／20分 (JC08モード)
↓	
LEAF	24kWh／200km／29分 (JC08モード)
↓	
EV Himiko	62kWh／587km／75分 (55km/h定速)
↓	
慶応8輪バス	120kWh／121km／2.5時間 (M15モード)



電池容量を増大して走行距離を伸ばしても充電時間が大幅に掛かる

EV/PHVの増加

公共充電設備での充電渋滞

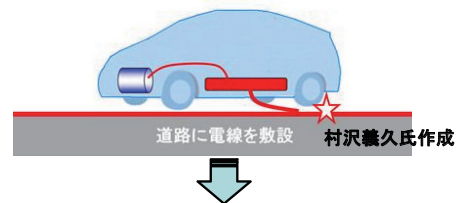


高速道路サービスエリアでの充電渋滞の状況

電気自動車の「電車」化＝走行中給電

接触式では多くの課題がある

現在の技術で可能
下向きのパンタグラフを取り付ける



ワイヤレス走行中自動充電システム

次に走行中給電。EV の電車化とも言われ、電池を搭載していけば距離は長く伸びる。ところが充電時間も延びてしまう。i-MiEV は 180kmを走るために 20 分、リーフは 200km走るが 24kWh の電池を積んでいるので 29 分かかる。EVの公共充電設備は増えつつあるが、同時に充電渋滞というのが起きている。筆者自身、厚木でこれにつかまって大変な目に遭ったことがある。こうした課題を解決して十分な走行距離を実現する一つの手段として、走行中給電に期待が寄せられている。

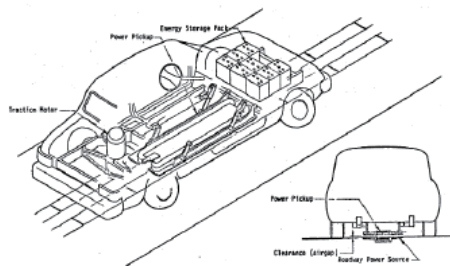
EV用走行中給電の実験システム



Lawrence Berkeley Laboratoryでの研究

- 1978年 J.G.Bolger, F.A.Kirsten, S.Ng
による研究
- 出力 20kW
- 周波数 180Hz
- ピックアップ 幅60cm、長さ 1.52m
- エアギャップ 2.5cm

•周波数が低くギャップが小さ過ぎる

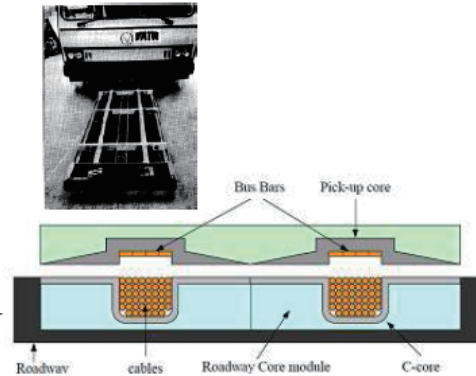


PATHプロジェクト

(Partners for Advanced Transit and Highways)

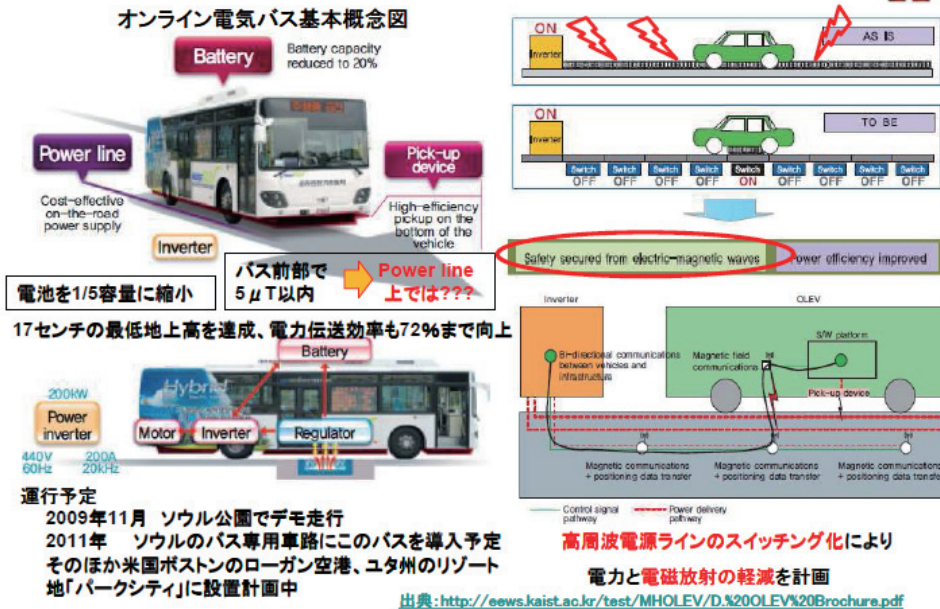
- 1982年 Santa Barbara Project
- ピックアップ 幅 1m、長さ 4.3m
- 重量 750kg
- エアギャップ 7.5cm

•漏れ磁束が大きく実用には至らなかった



米国では1978年ごろからコンセプトの提案がある。ローレンス・バークリーの研究所で実施されたものだが、これは2.5cmのギャップ。ギャップが小さすぎて、使い物にならなかった。もう一つ、「PATHプロジェクト」というものがある。サンタバーバラあったイベントだが、ギャップは7.5cmだった。実際にコイルを埋め込んでやったら全然問題なく給電ができるのだが、実はこれはものすごいループ状のコイルだ。ということは一つのアンテナだから、ここから電磁波が直接的に出る。この漏れ磁束が多すぎて、とても実用にはならなかった。

KAISTの走行中給電

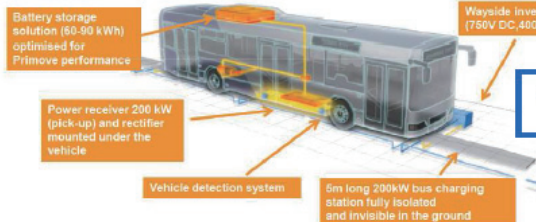


韓国の KAIST も走行中給電に力を入れる。2009 年に実験を始めた当初から磁界の漏れが指摘されてきたが、スイッチング方式にすることで電力のセーブと電磁放射の軽減の両立を狙って開発を進めているという。だが、まだ結果の公表がなく、どこかに技術的な難しさがあるのではないかな。

BOMBARDIER/VAHLEの走行給電システム



Flanders' DRIVE research project ベルギーロンメル市(2012年9月~10月)



コンクリート
舗装材

車両
検知線

給電線

ワイヤレス給電方式によるトラムオペレーションシステム
「PRIMOVE technology」を発表(2009年1月22日)

- ・電磁誘導式ワイヤレス給電システム
- ・PRIMOVE技術
 - 地上コイルは編成長より短い長さで、車両が上に来た時にだけ電流を流し電磁波の影響を最小限化(磁束密度はEU基準に適合)
 - インフラコストも架線の1.5倍程度に抑えることが可能
- ・MITRAC energy saver技術
 - 車上の電気二重層キャパシタに回生を行う
- ・両方の技術でエネルギー消費量を 30%軽減
- ・2010年末にドイツアウグスブルグ市で実証試験実施
 - 走行距離 0.8km
 - 出力 250kW
- ・2012年電気バスを使って0.6 kmの試験道路で実証
- ・アスファルトとコンクリートの異なる舗装材で試験実施
- ・報告書は2013年初頭

給電は10kVの高圧ラインから 変圧器で400V、3相にして供給



- ・ピックアップサイズ 3.6m
- ・周波数 20kHz
- ・電池容量 60kWh

これは Bombardier 社の取り組みである。電車のプリムーブ技術という、車体の長さよりも短いコイルを作って切り替えていけばそのコイルの外側からは電力が出ないという発想の技術である。給電線は路面の下に埋まっている。車両の検知線も埋め込んであり、真つすぐに走るようになっている。

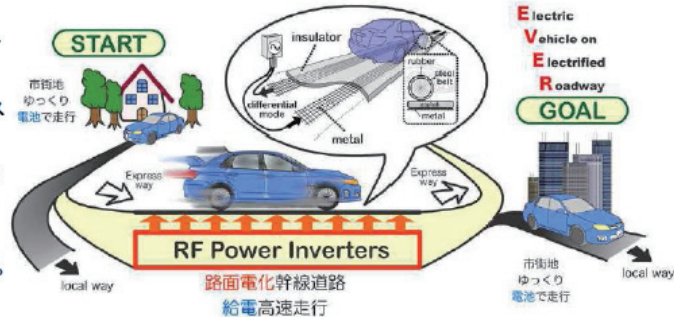
他にも、走行中のワイヤレス給電の開発に取り組む研究者は増えている。豊橋技術科学大学や国土技術政策総合研究((国総研)が試作したシステムを展示会などで披露している。

豊橋技術科学大学の走行中給電

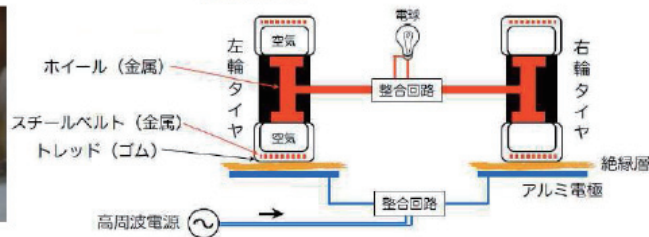


V-WPT (Via Wheel Power Transfer) 方式

- ・電界共鳴方式
誘電体であるタイヤやアスファルトを介した誘電結合
- ・路面下の電極板とタイヤ内のスチールベルト間でキャパシタンスを形成
- ・キャパシタンスを通して電極板とスチールベルト間に流れる高周波電流で電力伝送
- ・周波数は7~50MHz
- ・10cmのアスファルトを介して伝送
- ・電極板~タイヤ間の伝送効率70%
- ・現状は50Wの電力伝送



自動車タイヤ50W電力伝送実験



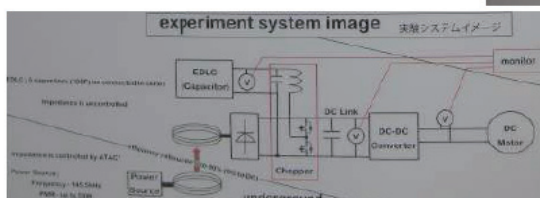
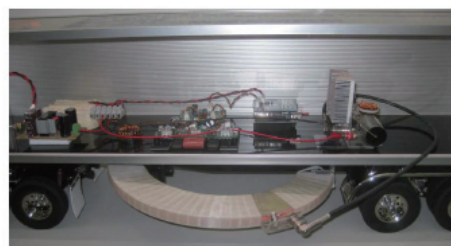
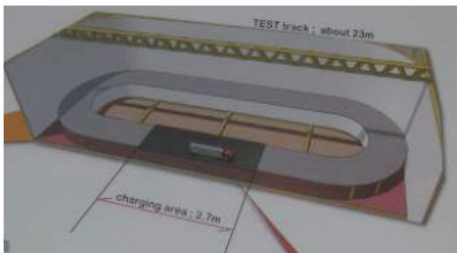
出典: 豊橋技術科学大学資料より

国総研のワイヤレス給電システム



ITS japan 2013(H25-10-14~18)

模型レベルだが23mのテストトラックの内2.7mの給電区間でキャパシタに給電
コイルの埋め込み深さは道路メンテナンスの点から最低0.6m、できれば1m



電磁波放射への対策



電磁誘導方式においてケーブルを伸ばす場合、電磁放射への各種対策が必要

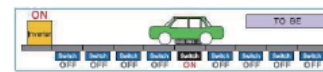
- BOMBARDIER/VAHLEは
PRIMOVE技術
地上のコイルは編成長より短い区間に区切られ車両が
上に来た時にだけ電流を流すPRIMOVE技術で電磁波
の影響を最小限化
磁束密度はEU基準に適合



PRIMOVE技術はボルドーのトラムで接触式だが、同
等のシステムが稼働中



- KAISTは
Segment method
下図に示すスイッチング技術を使い、走行に合わせて
コイルを切り替え、車両の下のコイルのみから給電
電磁波放射はICNIRP基準に適合



高度な制御システムが必要
コストの増加
電波防護指針の10kHz以下にする

Bombardier 社とKAISTの取り組みはいずれも、電磁誘導方式を採用している。電磁波放射への対策としては、先ほど述べたプリムーブ技術や KAIST の言うセグメント・メソッドという格好の切り替え方式で対応する。だが、切り替えがなかなか難しい印象である。

高度な制御システムは同時に、コストの増加も引き起こす。車体の長さよりも短いコイルを大量に路面内に埋め込んでいかなければならず、電源を切り替える制御装置も増えていく。

国土交通省の走行中給電システム

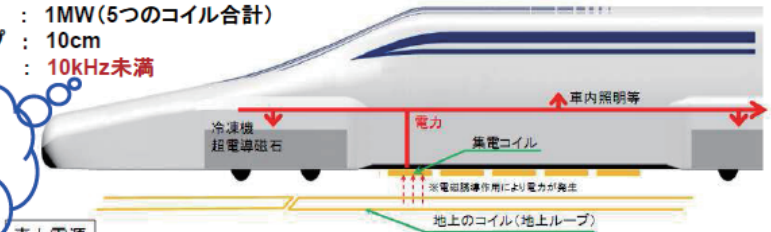


超伝導リニア用誘導羽州電方式による車上電源

2011年9月、実験線1km区間に設置し、0～505km/hの間で一定出力を確認
車内外の磁界実測値はICNIRP公衆ガイドラインの1%未満

出力 : 1MW(5つのコイル合計)
ギャップ : 10cm
周波数 : 10kHz未満

電波防護指針の対象から逃れるため



車上電源

超伝導磁石の冷却、車内の空調、照明等を稼働するため、車両に搭載する電源装置のこと。

これまでの車上電源装置としては、灯油を使用するガスタービン発電装置を搭載していた。

今回の誘導集電方式は、地上に設置されたコイル(地上ループ)と車両に設置された集電コイルとの電磁誘導作用を利用して、車両機器へ電力を供給するものであり、燃料を使用せず車両から排気ガスを出さない環境面で優れた電源装置である。

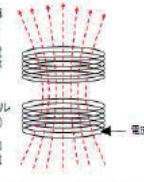
※ 電磁誘導とは、例えば右図の例のように離れた2つのコイルの片方に電流を流した際に生じる磁界の変化によって、もう片方のコイルに電力が発生する現象をいう。

② 車両の誘導集電コイル

磁界により集電コイルに電力が発生

① 地上のコイル(地上ループ)

電気を流すと地上のコイルに磁界が発生



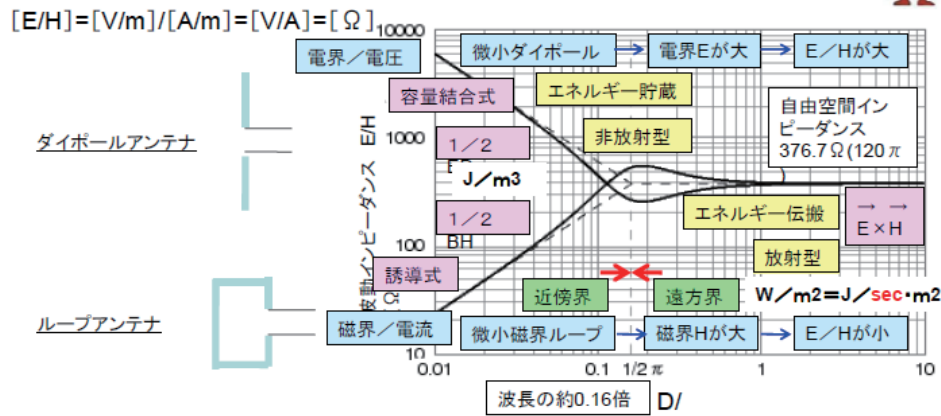
出典:第19回「超電導磁気浮上式鉄道実用技術評価委員会」の開催結果

コイルを敷き詰める考え方は、実は日本の国土交通省でも超電導のリニア・モーターカーで検討が進んでいる。2011年9月には、JR東海のリニア・モーターカーにワイヤレス給電で走行するデモを成功させている。リニア・モーターカーの一番の問題点は、止まっている場合や、スピードが時速50km以下と遅くなってくると、実は社内の電力を路面から取れなくなってしまうこと。動いてない限り、モーターと同じで磁界がないため電力が取れない。

解決策として、速度が遅くなってくると後ろ側に航空機用のガスタービンを積んでおり、発電機を回す。大事なのは、超電導の磁石のコンプレッサを動かしていること。それは困るからということで、実は200kWのコイルを5個付けて1MWにして、10cmのギャップで送る。この実験をやって成功している。



近傍界と遠方界の境界



- ・ダイポール・アンテナのように電界を放射する放射源の近傍においては電界成分Eが支配的で、その波動のインピーダンスE/Hは高くなる
- ・ループ・アンテナのように磁界を放射する放射源の近傍においては磁界成分Hが支配的で、従ってその波動のインピーダンスE/Hは低くなる
- ・どちらも放射源から遠ざかるにつれて、その波動のインピーダンスは自由空間インピーダンスに近づく
- ・放射源の近傍で波動のインピーダンスが自由空間インピーダンスと大きく異なる領域を近傍界と呼び、距離が十分に離れて波動のインピーダンスが自由空間インピーダンスに近付いた領域を遠方界と呼ぶ
- ・その境界は電磁界の波長を λ として $\lambda/(2\pi)$ までを近傍界と、それよりも遠くを遠方界と考える

今後、ワイヤレス給電システムを開発する上で必要になる知識として、近傍界と遠方界の境界という話題がある。遠方界というのは、自由空間インピーダンスが約377 Ω 一定になる領域で、近傍界はその値が大きかったり小さかったりする領域である。ワイヤレス給電は近傍界での電力伝送である。

電磁誘導伝送と磁界共鳴伝送



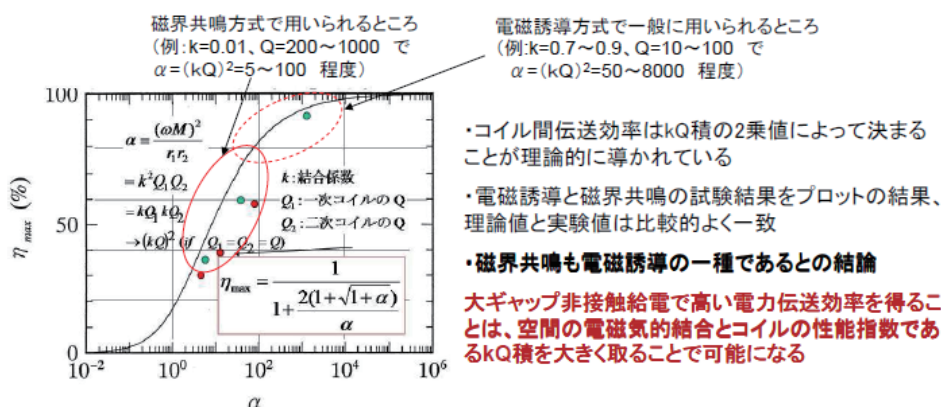
電磁誘導伝送(誘導電磁界)

- ・短ギャップ ($L/D < 1$) で結合係数 $k \sim 0.6$ 程度
- ・誘導電磁界はコイル(ループアンテナ)の電流と絶えず直接的に結びついている $\Rightarrow$ 電流が0になると同時に電磁界は0

ここで L :伝送距離
 D :コイル直径

磁界共鳴伝送(放射電磁界)

- ・長ギャップ ($1 < L/D < 10$) のため結合係数 $k \sim 0.01$
- ・高いQ値のコイルを利用して高効率を実現(共振周波数帯域が狭い)
- ・放射電磁界はコイルから一度放射されると時系列的に以後直接的な関連性を持たない
 $\Rightarrow$ 電流が0になっても一度発生した電磁界は消滅せずに波動となって限りなく伝搬

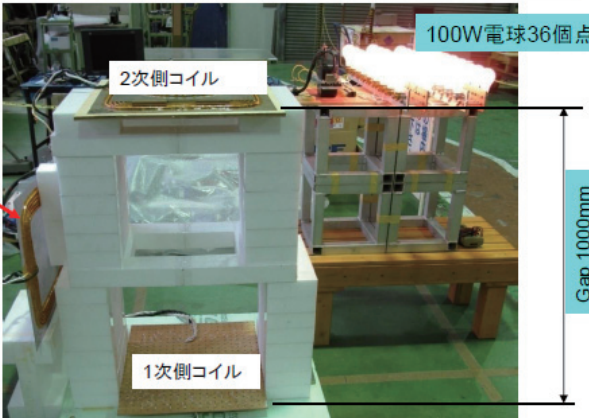


電磁誘導方式と磁界共鳴方式の関係も少し説明しておきたい。筆者は初め、これらは違う事象のものだと思っていた。だが最近、これらは同じ事象のものだと考えている。実は回路的にはまったく同じなのだ。我々はインバータでやるものの、インバータにコイルが付いていて、ただ、コイルを積極的に共振を取るか、取らないかだけであって、コイル間の共振は基本的には変わらない。

今これはよく言う「Figure of merit」といわれているもので、我々はこれを α を取っているが、 (kQ) の2乗だ。 k と Q を掛けて2乗したものを α と言っているが、これが一定であれば必ず同じ効率になる。グラフ中のプロットしている点は出力が30kWの電磁誘導方式のシステムだが、これが α 値で約1000となる。効率では92%ほどとなる。磁界共鳴方式のシステムで、 α 値が100になると効率が60%ぐらいになる。この他、両方式をパラメータを変えて測定をしていくと、結果はほぼ同一線上にプロットできた。

我々の見解としては、電磁誘導方式は k が0.7~0.9で、 Q は10~100ほど。 α 値は50~8000ほどが範囲となる。それよりも下側のところが磁界共鳴方式の領域。言い換えれば、基本的には回路的には大きな差はないと思っており、筆者は電磁誘導のうちの一部、ほんの一部の特殊なときが磁界共鳴だという認識である。

中継コイルによる大ギャップ伝送



コイル形式	ギャップ	特徴
一般的な電磁誘導 	約0.1 [m] ($k \approx 0.3$)	現状仕様、許容よこずれとギャップが小さく、プロ仕様である
対抗中継コイル式 	約0.6 [m] ($k \approx 0.1$)	比較的簡単な構成でよこずれとギャップが大きくとれるため、一般乗用車にも適用できる
凹型3コイル中継式 	約1.0 [m] ($k \approx 0.1$)	比較的低い周波数で大ギャップに対応が可能、走行給電の実現可能性の高い技術と考えられる

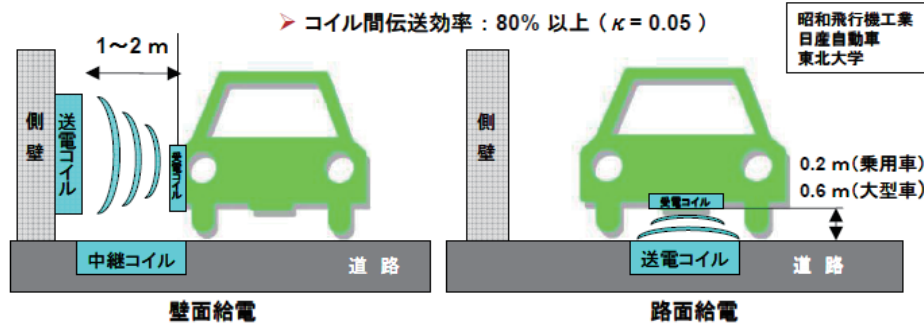
レピータコイルを水平型とし路肩に埋め込むことで、壁面給電で大ギャップの電力伝送が可能

これは昭和飛行機工業が取り組んでいる、中継コイルによる大ギャップの電力伝送のスライドである。中継コイルを立て、1 次コイルと 2 次コイルとコの字型にしている。こうすると、あっという間にギャップが伸びる。

走行中ワイヤレス給電システムの開発



平成21年度 NEDO省エネルギー革新技术開発事業 挑戦研究(事前研究)にて開発
平成22～24年度 NEDO省エネルギー革新技术開発事業 挑戦研究にて開発



給電面	コイルギャップ	コイル長さ	メリット	デメリット
壁面	1m～2m	比較的短い	設置性が良い 大型車両向け	距離変化が大きい ⇒車両に自動調整機能が必要
路面	0.2m:乗用車 0.6m:大型車	比較的長い	距離変化が小さい 乗用車両向け	道路要件を満たすコイルが必要 路面メンテナンス性が課題 軌道逸脱で充電不可 ⇒自動運転の必要性

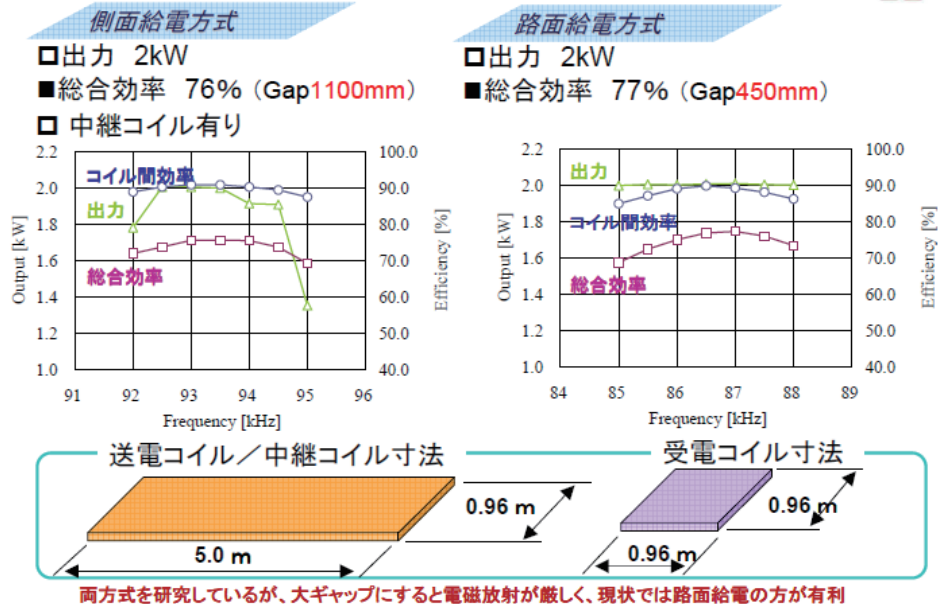
我々は中継コイルの技術を活用すれば、走行中給電も効率的に実現できるのではと考えている。平成21年度からNEDOから支援を受け、日産自動車と東北大学と共同研究を実施した。これは側面給電と言って、壁面からクルマの中に受電コイルを、中継コイルを路肩に置いた。一方、路面給電は下側からの給電となり、これはギャップが0.2～0.6mである。中継コイルを用いた壁面からの給電であれば、ギャップは1～2mまで伸ばせる。

中継コイル方式の大きな利点としては、道路に穴を掘らなくていいことがある。実は、磁界共鳴方式はコイルの径とコイルの周波数とギャップがある一定の関係でないといけない。どれかが1個ずれたら何かを変えてあげないと共振しない。例えばコイルの径は変えられないので、位置がずれたら周波数を変えて、もう一度共振を取ってあげないと電力が送れない。

ところが、周波数を変えてしまうと、長い距離の中で車のコイルが長いとすると、そこに車が2台入ったら、コイルとの距離が適切でないほうの車両には給電できない状況に陥る。このため、どうしても車側に自動調整機能が必要になる。これがなかなか難しい。一方、路面給電というのは距離変化は小さいが、軌道を逸脱するとあっという間に給電ができなくなる。



電力伝送試験結果



この比較実験は既に実施済みである。送電コイルは5×1mの大きさで、中継コイルも同じもの。受電コイルは1×1mほどとした。側面給電では、ギャップを1100mmにした場合に、出力2kWで総合効率が76%だった。一方、路面給電はギャップが450mmで出力を2kWにそろえると、総合効率77%で送れていた。以上から、ギャップだけを見れば、側面給電の分がある。だが、側面給電は、実は非常に電磁漏洩が激しく、対策が非常に難しい。このため、昭和飛行機工業では、今現在は路面給電を中心にやっている。

東亜道路が走行中給電可能舗装システムを確立



東亜道路工業は給電装置を埋め込んだ部分の舗装用特殊セメント材開発 2013/3/18

- ・給電コイルが舗装中に熱や圧力で破損しない弾力性のある特殊なセメント材
通常の舗装工事で行われる転圧作業が不要、装置の断線などを防げる
- ・深さ4cmほどの浅い層に給電コイルを埋められるようになった
従来手法(1m前後に埋設)に比べ、施工コストは3分の1
施工が簡単のため、既存の舗装道路を改良し易い
車両側で受電し易く、コイル自体の出力も小さく、コスト低下
先行する欧州、韓国などの海外勢に比べ大幅な低コスト化を実現
- ・実験に日産自動車がEVの提供で協力

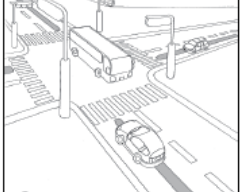
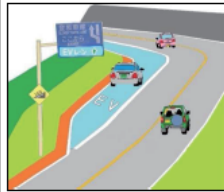


出典:<http://kensetsunewspickup.blogspot.jp/2013/04/ev.html>

走行中給電に関しては既に、日産自動車と東亜道路工業と共同で検討を進めている。既に舗装材のところまで踏み込んでおり、これは舗装中に舗装しても破損しない弾力性のある特殊セメントで、深さ 4cm ほどに埋めてもコイルを壊すことがないというもの。

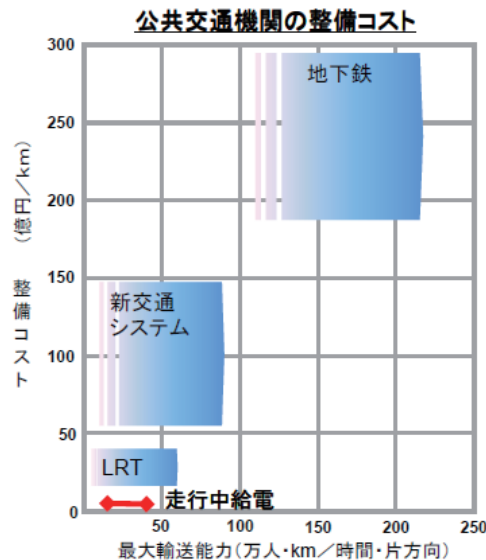
走行中給電の想定Roadmap



設置時期	FY'15	FY'20	FY'30	FY'50
実施内容	市街地実証実験	市街地実用	都市間実証実験	都市間実用
実施場所	市街地		高速道路	
シーン	交差点付近など 特定区間	タクシープ ールが最適か	登坂路など 特定区間	EVおよびワイヤレス 給電設備の普及が 鍵
設置長さ	25m	250m/車線	2km/車線	350km/車線
必要電力	6kW	6kW	20~30kW	30kW
イメージ	交差点付近 		登坂路 	高速道路走行車線 

我々としては、この2020年ぐらいまでの間に市街地で実用化したいと考えているが、これは実は交差点よりもタクシー・プールを想定している。駅前のタクシーの駐車場のところに付けて、EVタクシーが来るところにコイルを置いておく。コイルの上になければならないが、レーンにしておけばそこにいる間中ずっと充電ができる。それから2030年から2050年にかけては、まず登坂路、次に高速道路にという格好で考えてロードマップを描いている。

走行中給電のインフラコスト計算例



出典: <http://www.mlit.go.jp/crd/tosiko/guidance/pdf/06section3.pdf>
より作成

走行中給電の整備コスト

単位距離あたり概算コスト
2～3億円/km

参考例
KAIST 1.9億円/km

最大輸送能力

東名高速道路ベース
20～40万人・km/h

整備コストは自社資料、
輸送能力はNEXCOの資料を元に
EV普及と搭載される車種を
勘案して算出



**LRTや新交通システムに比べ
整備コストは非常に安価**

コストの試算もある。グラフの横軸が最大輸送能力で縦軸が整備コストである。地下鉄は非常に多くの人輸送できる一方で、コストもべらぼうに高い。一方、我々の走行中給電は、計算すると1km当たり2億円から3億円だと思う。KAISTは1km当たり1.9億円という数字を出している。

最大輸送能力も計算してみると20万人から40万人ということで、おおよそこのような状況である。非常に安くてある程度の人が運べる走行中給電ができると期待している。