

電気自動車用ワイヤレス給電 —電気自動車の成功の鍵？

Qualcomm CDMA Technologies GmbH ニック・キーリング

抄録

今日の電気自動車 (EV) の欠点は、定期的には用途によっては毎日充電が必要な事です。プラグイン方式の充電は、ケーブルの取扱いが厄介で、汚く、損傷を受けやすく不便です。近年の磁界方式のEV用ワイヤレス給電 (WEVC) 分野における技術進展により、同方式は広範囲に受け入れられるようになりました。最先端の磁気コイル設計技術により、大きな位置ずれも許容し、高効率な給電を実現にします。安全対策では異物検知 (FOD) 及び生体保護 (LOP) といった要素技術開発も着々と進んでいます。FODおよびLOPは磁場内で過熱する可能性のある物体及び高周波暴露で害を受ける人や動物を検知します。不断の開発努力によりWEVCがどこにでもある将来も遠くありません。WEVCは見苦しいケーブルや充電作業の不便さを排除し、EVの保守および運用をより容易にします。そしてゆくゆくは走行中の幹線道路でのワイヤレス給電も可能にします。

序文

私は技術者の一人ですが実用的でないことを行うことは難しいことです。理解できないことはやりません。

私の車ホンダデルソル1993を例として挙げてみましょう。運転は楽しいことです。私は3週間に1回のペースで燃料を満タンにし、修理工場へはめったに行きません。私は毎日職場駐車場の空きスペースに入れ、エンジンを止めて立ち去ります。幼過ぎて目にしている事が理解できない子供たちは、私の車を見て「格好いいね」と言います。

これが私の今日の現実です。

次に隣の列にある電気自動車 (EV) 用の特別な充電用駐車スポットに入る人々を見てみましょう (空きがある場合)。エンジンを止め、トランクから充電コードを引っ張りだし、充電ガンを車に差し込み、他方を充電コンセントに差し込んでいます (図1)。2台の車の間に割り込み衣服を汚さずにこれらのコードを扱うことができれば幸運です。さらに雨が降ってなければよいのですが！ その後やっと立ち去ることができます。

それが電気自動車の有線充電の現実です。

そして帰る前にこれらを全部外し、充電コードを片付けるのを忘れてはいけません。



図1 有線の電気自動車 (EV) 充電

電気自動車は環境に良いと考えられています。私はいまだにガソリンを燃焼させて仕事場に行っていることを非常に申し訳なく思いますが、私は毎日停車するたびに電源コードと格闘する気にはなれません。電気自動車の販売台数の割合を大きく伸ばすためにはコードの抜き差しの手間をなくさなければなりません。

ありがたいことに、この問題には解決策があります。WEVC (Wireless Electric Vehicle Charging : 電気自動車用ワイヤレス給電) は、コードの使用を完全になくした実用に耐えうるまでに成熟したテクノロジーです。人々が日中を過ごす場所にWEVCを設置することができれば、電気自動車はローカルに利用可能なグリーンエネルギーで充電できます。

- ①電源
- ②送信パッド
- ③ワイヤレス電気 & データ転送
- ④受信パッド
- ⑤システムコントローラ
- ⑥バッテリー

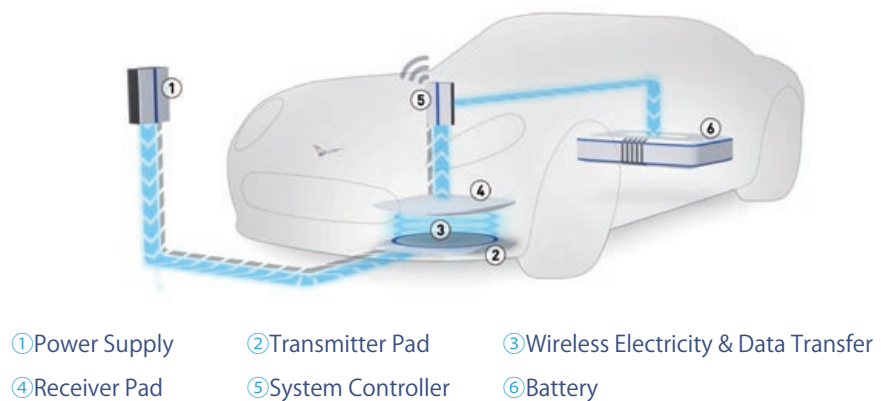


図2 EVワイヤレス給電システム

ビジョン

夢を持つことは重要です。歴史上の大きな進展のいくつかは、まだ実現されていない未来を想像することから生まれています。個々人が所有する移動手段で将来に望むものは一体何でしょうか？ これはより持続可能な輸送手段として大きな飛躍を望むために、私たち自身が問いかけなければならない問題です。ワイヤレス給電は、より魅力的で利便性の高い電気自動車の購入決定を行う上で鍵となるテクノロジーです。

Qualcommをはじめとする各社企業はコネクテッドカーの将来に尽力し、将来的に実現可能性を秘めたワイヤレス給電、通信、アプリケーション処理、ソフトウェア、コンテンツ配信の分野での投資を行っています。この将来性には新しい形の個人輸送が含まれます。つまり、輸送が持続可能なエンドツーエンドの資源循環に組み込まれる未来です。さらに、自動車が単に停止中に充電されるだけではなく、

幹線道路を走行中にワイヤレス給電が行われます。目標は、走行中の各車両への再生可能エネルギー資源からのエネルギー分配を、全国電力網上で管理することにあります。こうした未来を実現するためには、現実と将来的ビジョンのギャップを埋めるための技術開発に莫大な投資が必要になります。

ワイヤレス電力伝送技術の発達

ワイヤレス電力伝送技術は過去数年間に急速な発達を遂げました。2010年初期には、大幅な電力を損失することなく、エアギャップを利用してかなりの電力を送電できることを人々に理解してもらうことは困難でした。しかも当時オークランド大学の研究所において、0.5メートルのエアギャップで80%以上の効率で2kWを送電するデモシステムが稼働している、という事実があったにもかかわらずです(図3)。

ワイヤレス電力伝送は、既に2010年初期には半



図3 0.5mのエアギャップでの2kWワイヤレス電力伝送



図4 ワイヤレス電力伝送を使用したクリーンルーム用DAIFUKUマテリアルハンドリングシステム

導体製造におけるマテリアルハンドリング等の産業用途に幅広く利用されていましたが、こうした事実は広く知られていませんでしたし、これらの産業用途が注目を集めることもありませんでした。これらの産業用途のフォームファクタはまたWEVCの用途に必要なものとは大きな相違がありました。一般に、DAIFUKUシステム(図4)などのこれらのマテリアルハンドリングシステムは、モノレールタイプのトラックシステム上で最大1kWの連続的な電力供給をすることを目的に設計されていました。送電コイルはトラックに沿った大規模な一つのループで、受電装置は常にトラックに対して厳しい制約を受けていました。

一方、WEVCシステムはトラックという軌道制約のない車両に対して送電する能力が必要です(図2)。WEVCシステムは送電コイルと受電コイル間の位置ずれにも対応する能力を必要とし、公共エリアおよびプライベートガレージにおいて、充電作業を安全に運用する必要があります。これらの新しい要求は、開発すべきマグネティクス(磁気回路)技術とパワーエレクトロニクス技術への新しいアプ

ローチの必要性を意味しました。

WEVCシステムの鍵となる部分の一つに磁気設計があります。WEVCシステムは送電システムと受電システム間で、より高いレベルのカップリング(磁気結合)が必要なため、初期開発においては古典的な変圧器の設計からインスピレーションを得ていました(図5)。2つの主要な磁気トポロジーが実験対象になりました。そのうちの一つは円形コイルを使用したもので、垂直に偏向したフィールド(場)を生成しました。しかしながら、円形トポロジーは、大きなエアギャップで送電するときは非効率であるというデメリットがあります。別の磁気トポロジーとして2つのソレノイドコイルを使用し水平に偏向した磁気フィールドを生成する方式が開発されました。このトポロジーはより大きなエアギャップにおいてより良いカップリングを示しますが、車両の下に磁場を閉じ込めるのがより困難です。

これらの設計を改善するために現在DDコイルとして知られているハイブリッドコイルが作られました(図6)。DDコイルはコイルの片側だけに磁束通路を生成し、少ない放射でより高いカップリングを

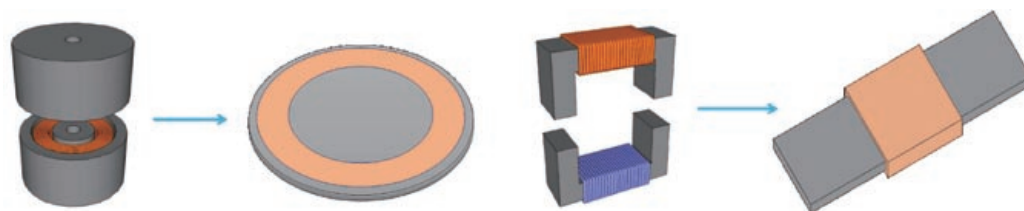


図5 変圧器設計のインスピレーション

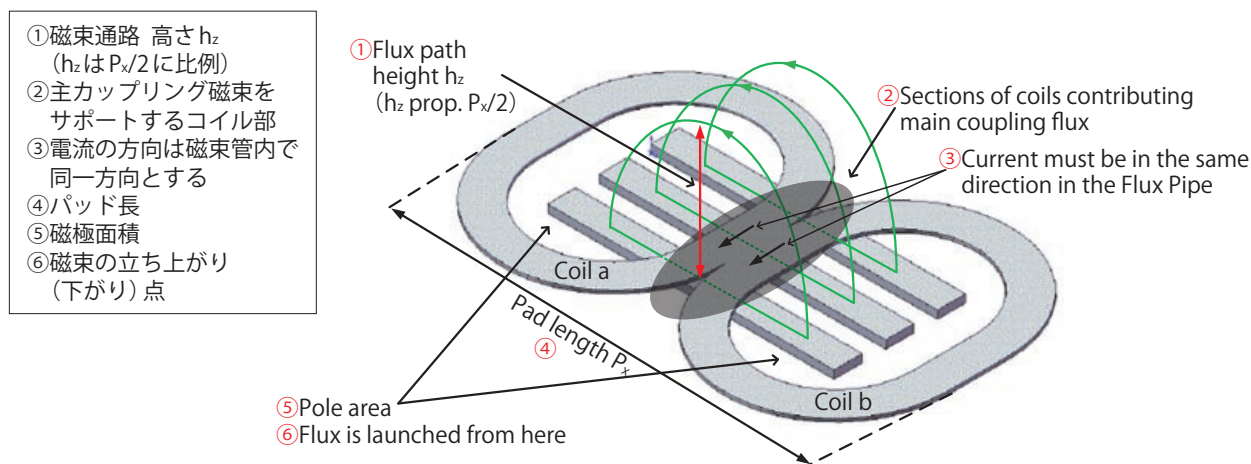
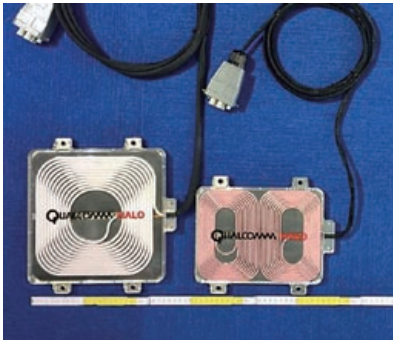


図6 DDコイル

3.6kW : 250 × 190mm



7.2kW : 340 × 270mm & 250 × 260mm



図7 円形コイルとDDコイルの比較

可能にします。DDコイルはまた同等の円形コイルに比べ、任意電力に対してより小さいパッケージサイズを実現します(図7)。

さらに開発が進み、送電システムが生成する垂直偏磁束および水平偏磁束を捕捉するのに磁氣的に分離されたコイルを使用する各種設計が生み出されました。マルチコイルトポロジーはアライメントの許容範囲に著しい改善を与える可能性があり、異なる単一コイル磁気設計と比較してインターオペラビリティのレベルを改善可能にしました。これらのテクノロジーは興味深く可能性を秘めていますが、複雑で高価です。この領域におけるさらなる発展が楽しみです。

磁気回路技術の開発に加え、送電コイルおよび受電コイルを流れる高周波電流を駆動するトポロジーもまた継続して洗練させなければなりません。炭化ケイ素(SiC)デバイスの出現により、稼働周波数を最大85kHzに上げ、インダクタンスおよびカップ

リングの変化に強いシステムに作り上げることが可能になりました。また高周波を利用することでセラミックキャパシタによるシステム同調ができるようになり、大幅なボリューム削減と高効率化が可能になりました。

静止中充電における市場要求と挑戦

WEVCテクノロジーが産業用途から公共の場における自動車用途に移行したため、パッケージング、機能、保護、安全システムに関して一連の厳しい要求を招きました。過去数年間に、高放射域への生体のアクセス検知、温度上昇を招く可能性のある異物に対する保護、アライメントおよびユーザー体験の改善を目的とするシステム開発に大きな注目が集まりました。ワイヤレス給電技術を成功させるためには、標準および規制適合対応の作業とともに極めて多くの補完技術を組み合わせる必要があります(図8)。

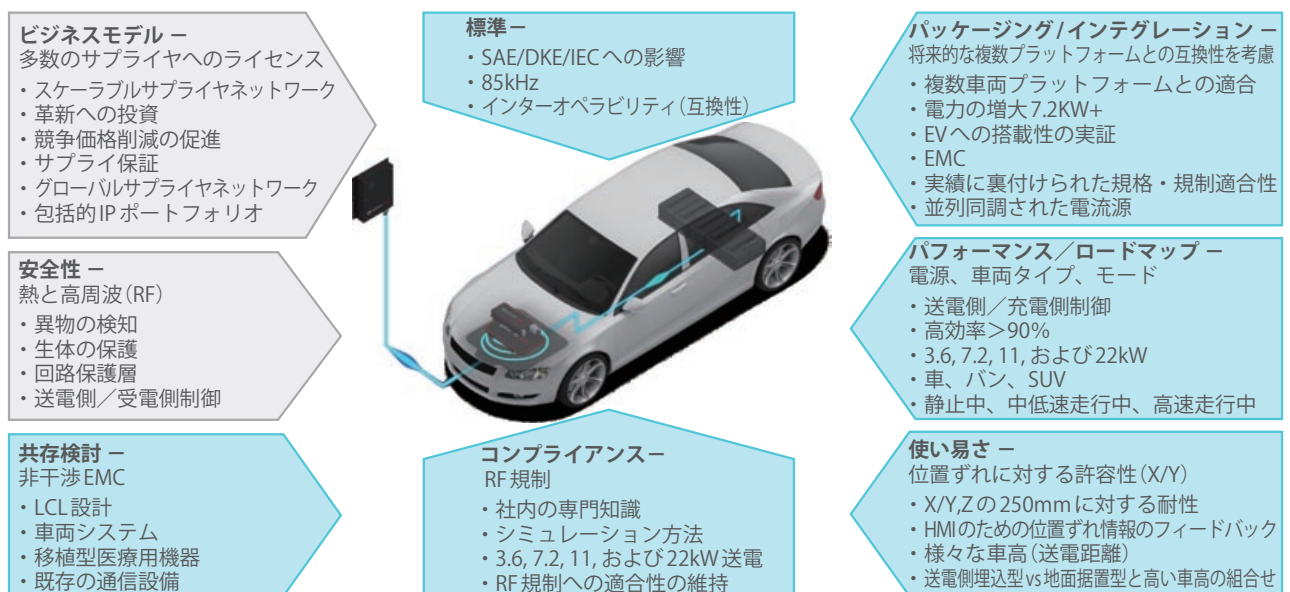


図8 ワイヤレス給電技術の検討事項

次の各節ではワイヤレス給電技術を製品化する上で私たちが直面している大きな技術的挑戦のいくつかに注目します。

伝送電力とパッケージング

WEVCは、導入初期段階においてはオプション機能として従来の有線充電システムとともに提供されると予想されます。第一世代のWEVCシステムは、コストに関して高度に最適化された3.7kWシステムと予想されます。これらのシステムは、車両のスペースの節約およびインテグレーションを容易にするために、電子部品や磁気パッドを統合して一つのパッケージ化する可能性があります。一方、バッテリー技術は継続して改善され、大容量バッテリーで走行距離を伸ばしたEVが近い将来登場します。自動車メーカーは現在短時間でフル充電が可能となる7.2kW、11kW、22kW等のより高い電力要求レベルを計画しています。

ワイヤレス給電システムが提供する電力量は、特に車両側において同システムが占有する物理的空間に極めて密接に関連します。すなわち、電力要求の増大に伴い、パッケージングの制約および磁界の封じ込めが非常に重要になります。

磁気への挑戦に加え、電力の整流や同調に必要なパワーエレクトロニクスが、より大きな電力と共により多くの熱を発生させます。7kW前後の電力レベルでは、受動的に電子部品を冷却し、一つのパッケージとして維持することが極めて困難です。トポ

ロジーおよび制御システムに関わる我々の開発作業の多くが、車両と基本電子部品間の調整の共有に集中しています。これはより安全で安定したシステムを作ります。また、様々な位置ずれ時での効率の最適化および車載バッテリーからの電圧変動への対応等のシステム能力を著しく改善します。この参考例を図9に示します。このトポロジーでは、倍電流回路と呼ばれる制御方法を利用して、直流電流の出力を引き上げて、車両側での電力制御を可能にする一方、バッテリーからの電圧変動の影響を最小化します。

インターオペラビリティ

高い送電電力の必要性和同時に、多様な車種および磁気トポロジーと互換性を有する単一のベースユニットを搭載したシステムへの要求があります。目標は、一種類のベーストランスミッタユニットでコンパクトカーからスポーツ用多目的車(SUV)まで幅広く異なる車種に充電できるようにすることにあります。この目標は、より車高の低い車両に小さなパッドを、より背の高い車高の高いSUVには大きなパッドを搭載する事で達成できます。異なる車両パッドであっても、それぞれの磁気的および電氣的構成をある一定範囲のカップリングとインダクタンスとなるようにベースシステムに設定することで設計でき、それによりベースユニットが車両のレンジ全体にサービス可能であることを保証することができます。

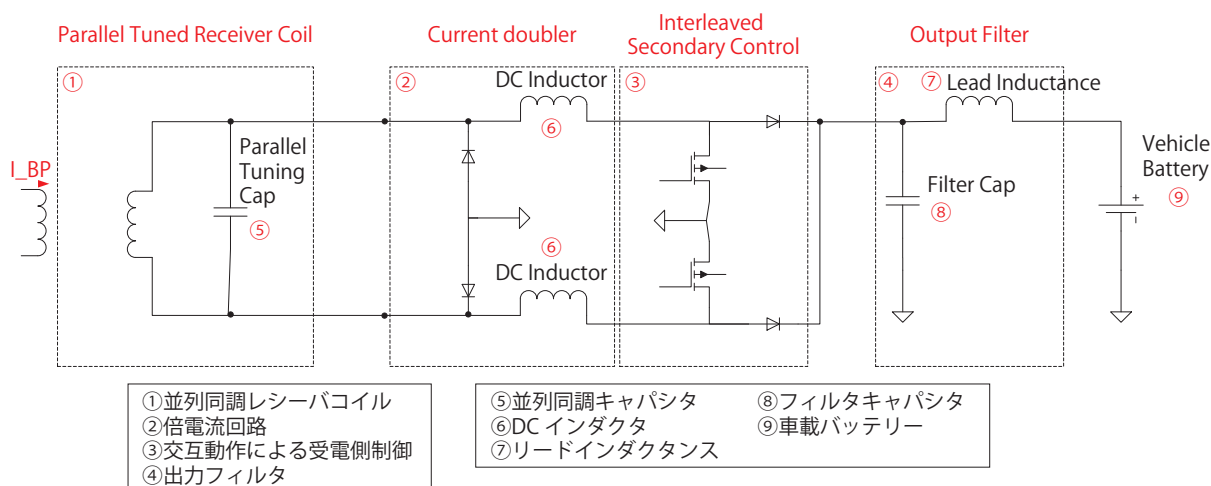


図9 電流ダブラ車両トポロジー

しかしながら、完全なインターオペラビリティは多くの様々な事柄を意味し、極めて複雑なトピックです。Qualcommは、これまで多様な車種およびZギャップの高さ（送電距離）の範囲にわたってインターオペラビリティが可能であり、車両およびベースシステムが相互に関連して設計されていることを示しました。真に独立した車両システム及びベースシステムの設計及び生産のためには、多くの要因を検討する必要があります。最初に、マグネティクスに互換性を持たせる必要があります。車両およびベースパッドと無関係に、任意の許容範囲において、各パッドのカップリングおよびインダクタンスをある一定の範囲内におさめる必要があります。単一コイルトポロジーについては、過度にコイル設計に制約を加えずにこれを実現することは極めて困難ですが、多くのマルチコイルを搭載した車両システム及びベースシステムがこの問題を解決できるように開発されています。最も有望な方法の一つが図10に示すバイポーラコイル設計です。極めて多様なコイルであっても磁気結合し、十分な電力レベルを確保する事ができます（図11）。



図10 バイポーラベースパッド

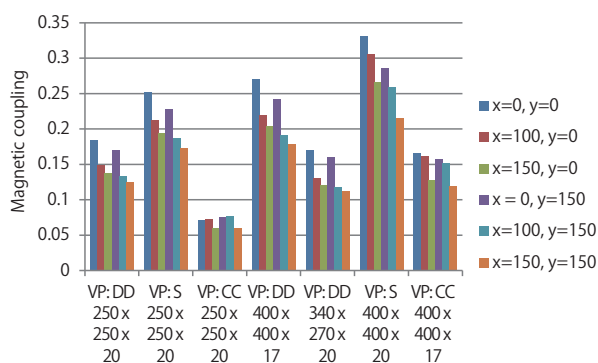


図11 異なる車両パッド技術とのバイポーラカップリング

インターオペラビリティはもちろんマグネティクスに関するものだけではなく、通信、制御、同調、および電力レベルを含める必要があります。オールチューニングトポロジーのためのユニバーサル制御戦略と個別に設計されたコンポーネント間の互換性の検証方法が、大きな挑戦として残されています。これらの事項は標準化が可能ですが、厳しすぎる仕様を作ること将来的な革新に制限を加えるのも危険です。

補助システム

ワイヤレス給電の安全を確保する補助システムもまた重要です。信頼性のあるFOD (foreign object detection: 異物検知)、LOP (living object protection: 生体保護) および位置ずれ検知システムは、安全なシステムの設計を実現します。

異物の検知

まず、金属製の物体が磁界により加熱されるリスクを最小にするために要求されるFODシステムについて説明します。

WEVCシステムにとって、多種多彩な金属および磁氣的物体は安全上の障害をとなりえます。なぜならば、これらの物体は磁界によりエネルギーが与えられると加熱する傾向があり、潜在的に過度の「寄生熱」を発生するからです。コインやペーパークリップ等の小さな物体であっても、皮膚への火傷の発生または紙などの可燃物がある場合には火事を招く温度に急速に加熱されます。これらの物体および図12に掲げる多種多彩な物体及びその他の一般的な物体を確実に検知できることが不可欠です。

ISO規則では、加熱表面に人が接触した場合の許容しきい値が設定されています。これらのレベルは、可燃性物質に接触して火が発生する場合よりもかなり厳しく保守的な値に設定されています。

異なる物体は、熱および検知に対して完全に異なる特性を有します。加熱の速度および程度は、充電パッド間または充電パッド周辺の異物の大きさ、質量、形状、位置に依存します。比較的大きな物体は、小さい物体よりも検知が容易です。ペーパークリップや延長用の電気コード等の金属ループを有する物

質は、特に磁界と強く結合して著しく加熱します。

ベースと車両パッド間のほとんどの浮遊物は、静止してベースパッドの表面に接触しているため、検知が比較的容易です。一方、シガレットパッケージ内のアルミ箔および上部がアルミ箔になっているプラスチック製ヨーグルト容器は、検知に問題があります。万一、ヨーグルト容器が、蓋が付いたままの状態充電パッドに直立した場合、その金属は地面から数センチも離れているため検知が難しくなります。



図12 導電性異物

車体底面の大きな金属は、ベースと車両パッド間のZ-ギャップにおける垂直方向の金属検知を非常に難しくしています。それにもかかわらず、自動車メーカーや、それらのコンポーネントおよびシステムサプライヤが、商用化に向けてWEVCが安全であると認められるように、FODシステムは確実に動作しなければなりません。

温度を直接的に測定する検知方法は明らかな限界があり、一般には80度以上の発熱をするしない異物にかかわらず、いくつかは検知できません。検知ミス（検知すべきものを検知しない）を緩和するために感度を上げて、誤検知（検知しなくてよいものを検知してしまう）または誤作動を招く可能性があります。例えば、ベースパッドの温度測定用熱電対は小さな物体は検知できない可能性があり、ヨーグルト容器上部の熱は検知できません。赤外線カメラの温度センサは、車両の上から降ってくるほこり、水、雪により動作しなくなる脆弱性があります。

寄生熱もまた、送電側（ベース側）と受電側（車両側）の充電パッド間の予期しない電力損失を測定するなどの間接的な方法で検知することができます。一般的な0.5ワットの潜在的に危険な寄生加熱

は、5ワットのスマートフォンの充電システムで10パーセントとなるため検知が可能です。しかし、3.7kW WEVCシステムでは僅か0.015%の電力変動しか示さず、位置、振動、その他の要因による任意変動を確実に検知できるというわけではありません。このように、温度変化または電力損失により異物を検知することには限界があります。

そこで図13に示すように、直接的な温度測定に依存しない、送電コイル上のベースパッドに埋め込まれた複数の電気ループアレーを用いる事で、より感度が高く効果的なFODを実現することが可能です。ループアレーを駆動し監視するための関連電子部品もまた、ベースパッドに組み込むことができます（図14）。伝導性または強磁性物質の存在および温度変化は、ループ配列の電気的特性に影響を与えます。それによって充電パッド上もしくは周辺、または送電ギャップ内の金属物またはその金属部分の確実な検知を可能にします。

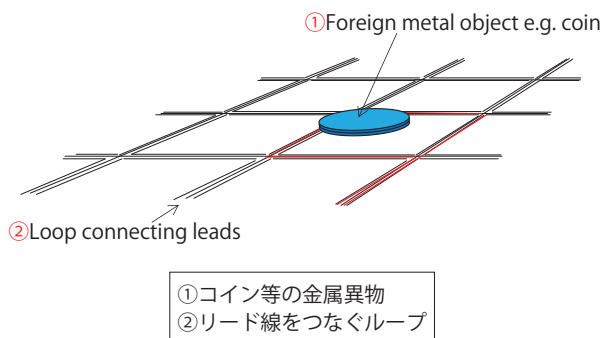


図13 異物の検知

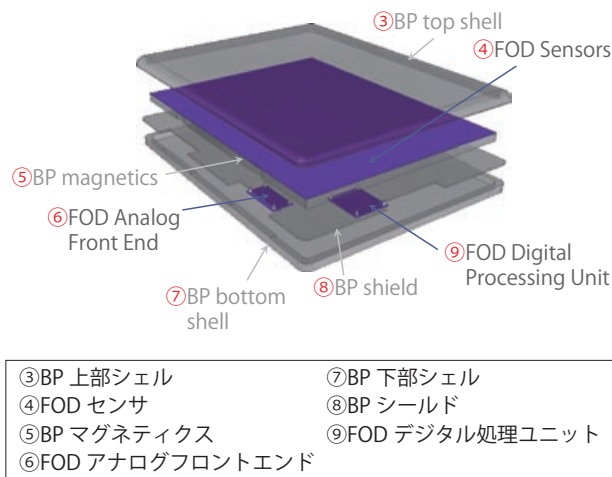


図14 ベースパッド (BP) に組み込まれた異物検知コンポーネント

生体保護

LOP (Living object protection: 生体保護) システムは、高い放射が発生する車両下部および車両近辺の領域を保護するために使用されます。LOPシステムは、生体が検知された場合に電力をシャットダウンするか安全なレベルに下げ、生体がいなくなった時に自動的に再始動する必要があります。

WEVCシステムは送電コイル近傍において、心臓ペースメーカー等の埋め込み医療機器 (IMD) の動作に影響を与える可能性がある磁場を発生させます (図15)。これらの放射は、パッド間およびパッド周辺において人体およびペット等のその他の脊椎動物に対して、潜在的に悪影響を及ぼし、IMDの誤作動を招く可能性があります。このことを調査するため、人体モデルおよび幅広いユースケースまたはシナリオを用いて正しく詳細なシミュレーションを実施する必要があります。このアプローチはリスクの特定および保護システムの妥当性を確認するために有効です (図16)。

WEVCシステムの電磁放射線レベルに関する標準化はまだ実施されていませんが、EMF (電磁場) 放射線は国際安全規制に準拠しなければなりません。ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing

Radiation Protection : 国際非電離放射線防護委員会) のガイドラインが、人体への悪影響を回避するために発行されました。このガイドラインは、職業上での暴露および一般公衆での暴露に関して電界と磁界の両方に対し基準となる安全制限を設定しています。各種規制は、安全規制を設定する上でICNIRPガイドラインを参照します。IMDの電磁環境耐性に関する規制が米国規格協会および医療器具開発協会によって設定されています。事例によっては、OEM自動車は、ICNIRPガイドラインに比べて車の様々な個所 (例: ドア枠) でより厳しい制限が課せられています。

安全規制は、IMDに対するものを含め、人体に対し設定されていますが、システムは家庭のペットを含む様々な動物に対しても防護措置を講じる必要があります。効果的なLOPシステムは、人体の一部 (例: 手、腕、足等) または動物が、磁界の強度が安全制限値を超えるZギャップゾーンに接近した時に確実にシャットダウンする必要があります。

初期のLOPシステムは、車両周辺の予期しない動きまたは車両の振動による誤検知や、動かないで眠っている動物に対する検知ミスなどの機能的な限界がありました。一部の初期LOPシステムは車上に配置される設計でしたが、自動車会社は、現在LOPシステムは車外に搭載すべきだとしています。

誤検知を除去または実質的に削減することでシステムの稼働性能を大幅に改善する、レーダー技術をベースとするLOPシステムが現在開発されています (図17)。検知と信号処理に関わる電子部品が最

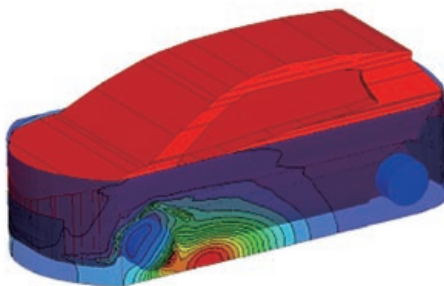


図15 放射シミュレーションによるワイヤレス給電の車両ボディへの影響

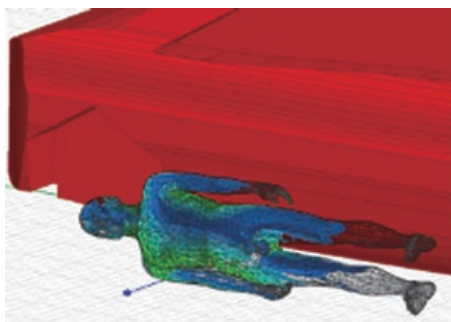


図16 最悪ケースでの人体モデルのシミュレーション

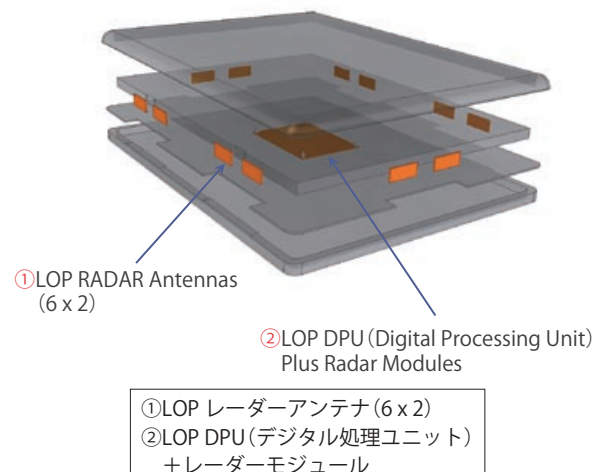


図17 ベースパッドに組み込まれた生体検知機構



図18 生体検知するレーダーゾーン

適な形でベースパッドに組み込まれ、対象物の速度とベースパッドからの距離に関する情報を提供します。対象範囲には、ベースパッドの周辺およびベースパッド表面の真上の特定の領域が含まれます。また、対象範囲はWEVCシステムおよび充電対象の車両モデルの属性により異なります。車両特有の対象領域を定義し、LOPシステムにプログラムすることも可能です(図18)。LOPシステムの感度制限値を適切に設定する事で、検知対象である生体の最小サイズを定義することができます。これによって、前述の誤検知と検知ミスという両方のリスクを調整します。

走行中ワイヤレス給電

Qualcommにおいて、私たちは従来のワイヤレス給電方式に満足しているわけではありません。現在の姿は単にプラグインケーブルに取って代わただけにすぎません。究極の目標は、ワイヤレス給電を



図19 走行中ワイヤレス給電

ユビキタス環境にし、走行距離に関わる不安を軽減することでユーザー体験を最大化にすることにあります。これが、走行中ワイヤレス給電が挑戦的で多面的な技術課題となっている点です。

幹線道路を走行中の車両への充電を可能にするシステムに関わる要求事項の検討を開始すると(図19)、技術的改善事項が途方もなく多いことがすぐに明らかになります。最大の挑戦は、進行方向において十分なカップリングを維持することができる磁気システム的设计です。20kW以上の連続的な給電が可能な設計にしなければなりません。さらに、横方向の大きな位置ずれを許容する必要があります。また、ベースシステムは、異なる車両を考慮に入れてより大きな送電ギャップ範囲に適合させる必要があります。

検討対象となるシステムおよび磁気トポロジーは多種多様になります。予想される利用シナリオは、最適なトポロジーは何か、どのくらいのコストを車両とベース側との間に配分すべきか、という問題に

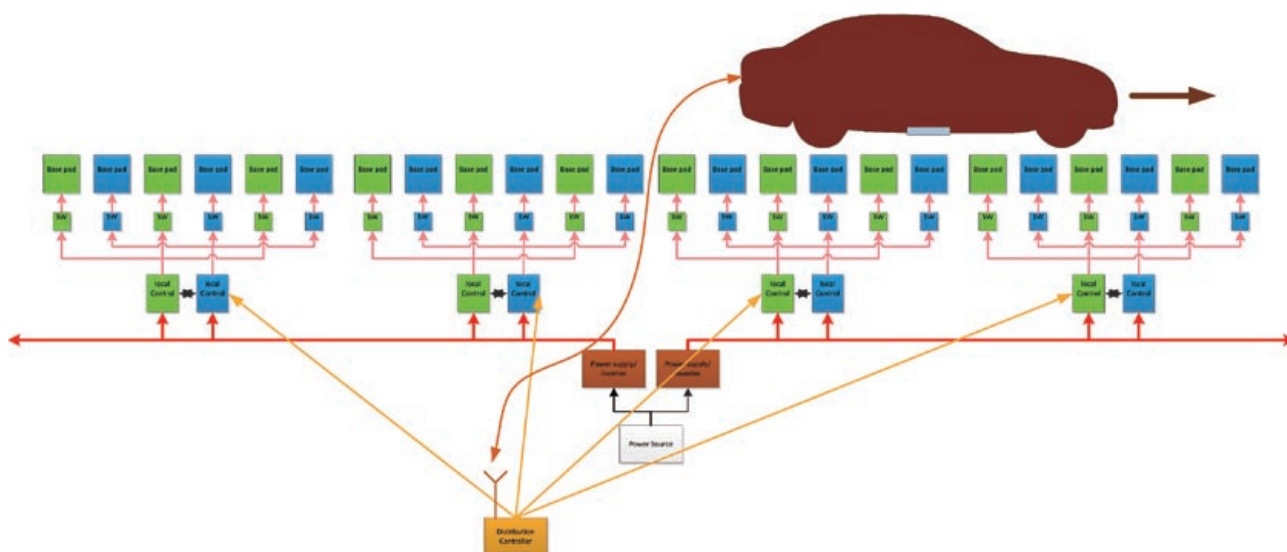


図20 走行中給電の電力配電/通信システム

大きな影響を与えます。私たちは完全な互換性に関心を抱いているため、7kWの静止中充電システムと互換性があり、道路上で20kW以上で走行中給電または充電可能な車両マグネティックスの開発を目的としています。当然ながら、これを実現するためには、同一の動作周波数に対して設計された、互換性のあるマグネティックスが必要です。また、互換性は、静止車両および走行車両の両方に適した単一の通信戦略を有することが必要であることを意味します。また、送受電コイル間で結合係数が急速に変化する状況や異なる電力要求レベルの両方に対応できる単一の制御システム戦略が必要です。ベースシステムのコストを最小化するためには、電力制御機構をシステム全体に最適配置する必要があります。究極的には、各コンポーネントの利用率を最大化し、要求ピーク値を最小化する電力配分トポロジーということになります(図20)。

Qualcommは走行中給電の研究開発に多額の投資をしています(図21)。ほぼすべての走行中給電のマグネティックスおよび様々な車速/高い送電電力レベルにおける制御コンセプトの試験が可能です。究極的には、商業的に実現可能な走行中給電システムにするためには、途方もなく多くの将来的開発が要求されますが、私たちはそれを実現するコンセプトとリソースを備えていると確信しています。



図21 走行中給電システムの研究施設

結論

現在市場は、自動車メーカーが彼らのEVにワイヤレス給電システムを搭載し進んで難題に取り組むことを求めています。その結果、広範囲の顧客層に魅力的な製品を持つことになります。

これが実現した時、私は、より快適で、効率的で、環境に優しい新車を購入する費用を正当化することができるでしょう。ガソリンスタンドに停車する必要はありません。仕事場に向かい駐車するだけです。厄介な電力コードも必要ありません。磁場の原理によって効率的にかつ自動的に充給電できます。

1993年型ホンダデルソルを手放すのは残念なことです。素晴らしい乗り心地だからです。新しいWEVC搭載型EVを購入し使い勝手を損なうことなく個人レベルでの二酸化炭素の排出量を削減することを楽しみにしています。

profile

Dr Nicholas Keeling (ニック・キーリング)

2010 Received PhD from University of Auckland Electrical Engineering specializing in Wireless Power Transfer
2010 Started Halo IPT Ltd to advance wireless power application into the electric vehicle market using the technology developed at the University of Auckland
2012 Halo IPT Ltd is bought by Qualcomm Inc and subsequently joined the Qualcomm Halo team as Senior Staff Engineer in the New Zealand research office
2015 Moved to Germany to work at the Qualcomm Halo Munich Office focusing on System Architecture and Dynamic Wireless Charging

PhD (Electrical Engineering)
Experience: Power Electronics, Magnetics, Control Systems, Software, Communications

