

2.4 GHz 帯／5.7GHz 帯 WPT の 社会実装に向けた挑戦

Challenges for Social Implementation of 2.4 GHz/5.7 GHz Band WPT System

勝永浩史

Abstract

マイクロ波を用いた WPT システムは日本において内閣府が提唱する Society 5.0 の進展に大きく寄与する技術であると期待されている。サイバー空間とフィジカル空間をつなぐセンサのデータ収集、カバレッジの拡大を実現するための電力供給の切り札として求められている。このような背景の下、2022 年 5 月総務省から電波法施行規則等の一部を改正する省令が施行され、日本での WPT システムの実用化が可能となった。本稿では 2.4 GHz 帯／5.7 GHz 帯 WPT システムの概要を示すとともに、社会実装に向けた取組みを紹介する。

キーワード：マイクロ波、ワイヤレス電力伝送、WPT、ワイヤレス給電、IoT

1. は じ め に

1.1 IoT デバイスの無線化（ワイヤレス IoT）要求

我が国が目指すべき未来社会の姿として、第 5 期科学技術基本計画において、「サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会」として Society 5.0 が提唱された⁽¹⁾。入力としてのセンサ、出力としての表示器及びアクチュエータが、サイバー空間とフィジカル空間の間を取り持つ役割を担うこととなる。これらセンサ、表示器、アクチュエータは近年 IoT (Internet of Things) デバイスと呼ばれ注目を集めている。Society 5.0 の実現には、多数の IoT デバイスを場所の制約なく設置できることが望まれる。つまり IoT デバイスの無線化は Society 5.0 実現の必要要件の一つである。

IoT デバイスは以下の四つの機能で実現される。

- ・ IoT の目的機能(センサ, ディスプレイ, モータ等)

- ・ 制御機能 (MCU: Micro Controller Unit)
- ・ インターネットに接続するための通信機能
- ・ 動力源としての電源

更に、IoT デバイスを無線化するためには、以下が求められる。

- ・ センサ、ディスプレイ等の低消費電力化
- ・ MCU の低消費電力化
- ・ 通信機能の無線化
- ・ 電源の無線化

ここで、ボトルネックは電源の無線化である。電源の無線化を実現するための方法は幾つか考えられる。

- ・ 一次電池の利用
- ・ 二次電池若しくはキャパシタ等の蓄電素子+環境発電 (Energy Harvesting)
- ・ 二次電池若しくはキャパシタ等の蓄電素子+空間伝送方式 WPT (Wireless Power Transfer) システム

勝永浩史 丸文株式会社ディオネカンパニー
E-mail: hiroshi_katsunaga@marubun.co.jp
Hiroshi KATSUNAGA, Nonmember (Dione Company, Marubun Corporation, Tokyo, 103-8577 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.107 No.12 pp.1130-1138 2024 年 12 月
© 2024 電子情報通信学会

一次電池の容量は有限であるため、一次電池を利用する場合、電池交換を想定する必要がある。

環境発電は、周辺環境エネルギーを収集することにより電気エネルギーを生成する技術である。そのため、特別なエネルギー源を必要としない。しかし、収集できるエネルギー効率が低く、環境に依存することから万能的な解決策とは言い難い。

本稿のテーマであるマイクロ波を用いた空間伝送方式 WPT システムは、空間にエネルギーを積極的に放射しそれを収集するという性質上、環境発電より大きなエネルギーを供給することが可能である。これが第 1 の WPT システム実用化のモチベーションである。

1.2 デジタルデバイスの利便性追求

もう一つの潜在的な要求として、スマートフォン、タブレット、ノート PC 等のデジタルデバイスの利便性追求として、空間伝送方式 WPT システムが期待されている。近年これらの発展や利用範囲の拡大は著しいが、唯一充電という行為が利便性を阻害している。先述の IoT デバイスと比較して要求するエネルギーは大きい、これが第 2 の WPT システム実用化のモチベーションである。

1.3 空間伝送方式 WPT システムの社会実装状況

以上のような背景の下、2022 年 5 月総務省から電波法施行規則等の一部を改正する省令⁽²⁾が施行され、日本での空間伝送方式 WPT システムの実用化が可能となった。空間伝送方式 WPT システムに解放された周波数帯は 920 MHz 帯、2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯の 3 周波数帯である。このうち、920 MHz 帯は社会実装が進みつつある。しかしながら、2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯は 2024 年 6 月現在、国内において社会実装に至った事例がない。この背景には経済合理性を含むエンジニアリング問題、制度的な問題等、複雑で多様な問題が存在する。2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯の空間伝送方式 WPT システムの社会実装にはこれらの潜在する問題を一つ一つ整理し解決していくことが求められる。

本稿では制度化された 3 周波数帯の空間伝送方式 WPT システムの概要と特徴（ニーズ）を改めて整理し

■ 用語解説

CW 連続波または搬送波。Continuous Wave または Carrier Wave の略。振幅と周波数が一定の電磁波のことであり、典型的には正弦波のこと。

PCB プリント基板。Printed Circuit Board の略。

MPPT 最大電力点追従制御。Maximum Power Point Tracking の略。整流回路入力レベルの変化で常に変動する最適動作点（最大電力点）に追従しながら動作する制御機能のこと。

たのち、2.4 GHz 帯／5.7 GHz 帯に焦点を当て空間伝送方式 WPT システムに求められる要求事項（ニーズ）を確認の上、社会実装に向けた課題を明らかにする。その上で、課題を解決する筆者らのエンジニアリング的な方策を紹介する。なお、誌面の都合上、以降ではマイクロ波を用いた空間伝送方式 WPT システムを単に WPT システムと呼ぶこととする点御容赦頂きたい。

2. WPT システムの概要と各周波数帯の特徴

2.1 WPT システムの概観

WPT システムの構成を図 1 に示す。WPT システムは電波（マイクロ波、ミリ波等）を用いて電力を伝送するシステムである。送電器（PTx:Power Transmitter）と受電器（PRx:Power Receiver）で構成され、空間に電波を媒体としてエネルギーを伝送する。

送電器は通常系統（AC100V/200V）からエネルギーを供給し、AC-DC、DC-DC を経て CW^(用語) 信号源と電力増幅器から成る DC-RF で高周波電力に変換したのち、アンテナを介して電波としてエネルギーを放射する。

受電器はアンテナにより電波のエネルギーを電気エネルギーに変換し、整流回路（RF-DC）にて直流に変換したのち、充電回路（DC-DC Charger）でバッテリー等の蓄電素子に充電する。負荷へは蓄電素子から DC-DC を介してエネルギーを供給する。ここまでの概観は周波数帯によらず共通である。

2.2 周波数による特徴

周波数帯の特徴を理解することは、各周波数帯の WPT の特徴を理解する上で非常に重要である。

2.2.1 波長

真空中の波長（ λ ）は以下の式で表すことができる。

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

ここで c は光速 299,792,458 m/s、 f は周波数（Hz）である。参考として、各周波数帯の真空中の波長を以下に示す。

- ・ 920 MHz 帯：32.6 cm
- ・ 2.4 GHz 帯：12.2 cm
- ・ 5.7 GHz 帯：5.2 cm

2.2.2 アンテナ

一般的にアンテナのサイズと波長は比例関係（周波数とは反比例の関係）にある。ダイポールアンテナの場合

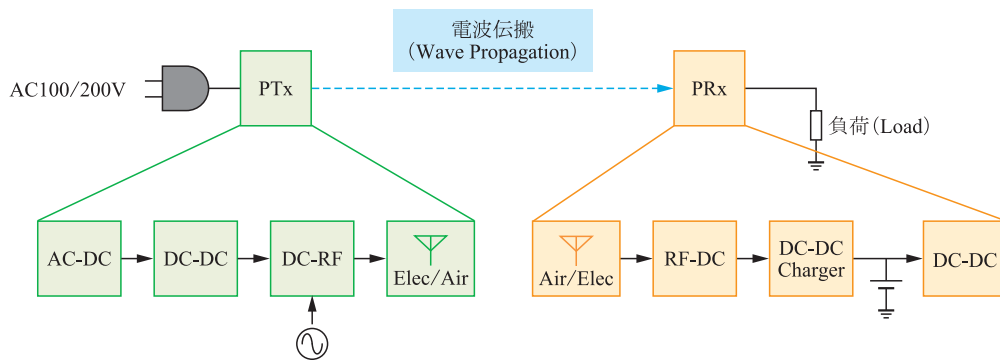


図1 WPT システムの構成

合、エレメント長は $\lambda/4$ 、全長は $\lambda/2$ であり、パッチアンテナの場合、放射導体板長は $\lambda'/2$ である。ここで、 λ' は誘電体基板による波長短縮を考慮した波長である。よって、同じアンテナ（同じアンテナ利得）の場合、周波数が高い方がサイズは小さくなる。

また、アンテナ利得（ g ）とアンテナ有効開口面積（ a ）の関係は以下の式で表すことができる⁽³⁾。

$$a = \frac{\lambda^2}{4\pi} g = \left(\frac{c}{f}\right)^2 \frac{g}{4\pi}$$

この式から、アンテナ有効開口面積（サイズ）が同じ場合、周波数が高い方が利得は大きくなる。

2.2.3 電波伝搬

電波が空間を伝搬することを電波伝搬（Wave Propagation）と呼ぶ。

（1） フリスの伝達式と自由空間損

電波伝搬を表現するフリスの伝達式（Friis transmission equation）を以下に示す⁽³⁾。

$$p_r(\theta_t, \phi_t, \theta_r, \phi_r, d) = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 p_t \cdot g_t(\theta_t, \phi_t) \cdot g_r(\theta_r, \phi_r) \\ = \left(\frac{c}{4\pi d f}\right)^2 \cdot p_t \cdot g_t(\theta_t, \phi_t) \cdot g_r(\theta_r, \phi_r)$$

ここで、 p_r は受信電力（mW）、 d は送信アンテナと受信アンテナ間の距離（m）、 p_t は送信電力（mW）、 g_t は指向性減衰量を考慮した送信アンテナ利得（）、 g_r は指向性減衰量を考慮した受信アンテナ利得（）、 θ_t/θ_r は送信／受信アンテナの方位角、 ϕ_t/ϕ_r は送信／受信アンテナの仰角である。この式は遠方界、かつ自由空間における電波伝搬を表す式であるが、経験的に1m以上の距離におけるWPTシステムの能力の概算には有効である。また、以下を自由空間伝搬損（ L_p ）と呼ぶ。

$$L_p(d, f) = \left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{4\pi \cdot d \cdot f}{c}\right)^2$$

周波数帯に依存しない特性として以下のことが分かる。

- ・ 受信電力は送信電力に比例する
- ・ 受信電力は送信アンテナ利得に比例する
- ・ 受信電力は受信アンテナ利得に比例する
- ・ 受信電力は距離の二乗に反比例する（自由空間損は距離の二乗に比例する）
- ・ 送信アンテナ、受信アンテナ共に指向性による利得の角度依存性が存在する

周波数帯に依存する特性として以下のことが分かる。

- ・ 受信電力は周波数の二乗に反比例する（自由空間損は周波数の二乗に比例する）

1mにおける自由空間伝搬損は以下のとおりである。

- ・ 920 MHz 帯：31.7 dB $\div$ 32 dB
- ・ 2.4 GHz 帯：40.2 dB $\div$ 40 dB
- ・ 5.7 GHz 帯：47.6 dB $\div$ 48 dB

よって、2.4 GHz 帯を基準とした場合、920 MHz 帯は8dB有利であり、5.7 GHz 帯は8dB不利である。

（2） 回折

電波は光と同様、反射、屈折、回折、干渉といった性質を持つ。ここで周波数による違いが顕著な性質として回折を取り上げる。送電器と受電器間に障害物がない場合（見通しがある場合）、送電器から受電器へは直接電波が到達する。この電波を直接波と呼び、このような電波伝搬を見通し内伝搬と呼ぶ。送電器と受電器間に障害物がある場合（見通しがない場合）、障害物に跳ね返って届く電波を反射波、障害物を回り込むようにして届く

電波を回折波と呼ぶ。このような電波伝搬を見通し外伝搬と呼ぶ。この回折現象は周波数が低いほど顕著であり、周波数が高くなるにつれて直進性が増加する。よって、920 MHz 帯は回折による見通し外伝搬が期待でき、5.7 GHz 帯は直接波による見通し内伝搬を想定する必要がある。

(3) 伝搬領域

アンテナ周囲の空間は通常以下の三つの領域に細分化される⁽³⁾ (図 2)。

- ・ Reactive Near-Field
- ・ Radiating Near-Field (放射近傍界、フレネル領域)
- ・ Far-Field (遠方界、フラウンホーファー領域)

放射近傍界と遠方界の境界は $2D^2/\lambda$ であり、 D は (波長より大きい) アンテナの最大寸法である。アンテナサイズが同じ場合、波長が短い (周波数が高い) 方がこの境界は長くなる。マイクロ波を用いた WPT システムは

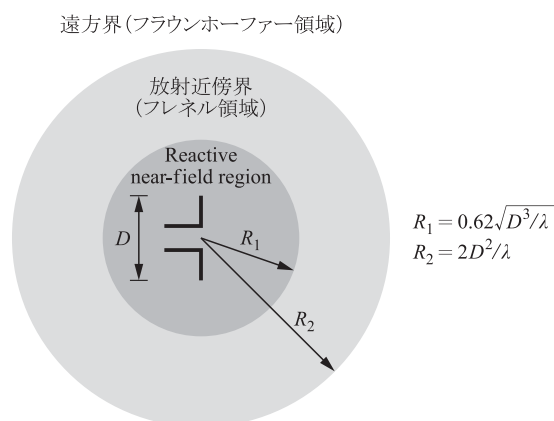


図2 アンテナの伝搬領域⁽³⁾

放射近傍界若しくは遠方界での使用を想定する。

2.2.4 PCB 設計

一般的に PCB^(用語) 設計の難易度は周波数が高いほど高くなる。例えば、比誘電率 4 の基板におけるマイクロストリップラインを想定する。1 mm の配線長における各周波数帯の位相は以下のとおりである。

- ・ 920 MHz 帯：1.9 度
- ・ 2.4 GHz 帯：5.0 度
- ・ 5.7 GHz 帯：11.9 度

また、基板材料の誘電損は周波数が高いほど大きくなる。WPT は電力を主として扱う性質上、損失を最小化したい。そのため、特に 5.7 GHz 帯は誘電損の小さい基板材料の使用を検討したい。

2.2.5 半導体・回路

一般的に、周波数が高いほど、損失は増加する。現在最も注目されている研究分野の一つが高周波整流回路の高効率化である。高周波特性に優れた GaAs, GaN を整流素子とした研究⁽⁴⁾やアンテナと整流回路を一体としてとらえ最適化を試みる研究⁽⁵⁾等が報告されている。また、整流回路を最適な負荷で動作させるための MPPT^(用語) 回路も研究対象の一つである⁽⁶⁾。

2.2.6 同一周波数の他システム利用状況 (周波数共用)

電波は有限の資源であり、多くのシステムが周波数を共用し有効利用していく必要がある。WPT に割り当てられた 3 周波数帯、特に ISM バンドである 2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯は多くの既存システムと共存する必要があることを念頭に置いておく必要がある⁽⁷⁾。

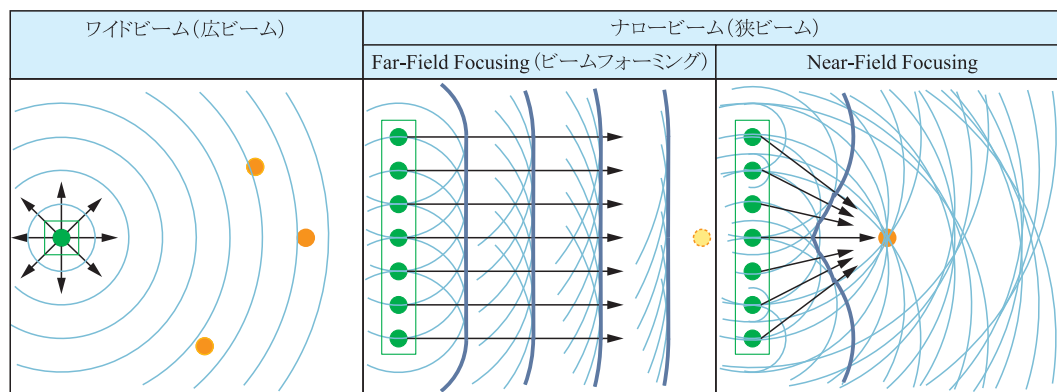


図3 WPT 送電方式 送電器を□、放射源を●、各波源から放射される波の波面を青細線、複数の波源により合成された波面を青太線、波の進行方向を→、受電器を●で示す。Far-Field Focusing における受電器の本来の位置は、図示した位置より遠方であるが紙面の都合上枠内に示している。

2.3 送電方式

送電方式は以下の2種で分類できる(図3)。

(1) ワイドビーム(広ビーム)

送電器は一つの指向性の低い(理想的には無指向性)アンテナを用いて広域に電波を放射する。受電器は特別な制御なく放射エネルギーを収集する。広域に電波を放射する性質上、同じ周波数帯を使用する他システムとの共存を考慮すると送電出力を上げることは難しい。しかしながら、送電器1に対し受電器 N の多数同時送電が可能である。電波伝搬は遠方界を想定する。

(2) ナロービーム(狭ビーム)

送電器は指向性の高いアンテナを用いて、一つの受電器に対しエネルギー(ビーム)を集中させて電力を伝送する。複数の受電器にエネルギーを伝送する場合、時分割にビーム方向を切り換える。一つの受電器にビームを集中させるためには、対象の受電器の位置を推定する機能が必要である。これは、受電器からのビーコン信号を用いた到来方向推定(レトロディレクティブ方式)、画像認識等で実現できる。複数の受電器にエネルギーを時分割に分配するためには、送電器は時間を管理するスケジューリング機能と、ビーム方向を切り換える機能が必要である。ビーム方向を切り換える機能は、電子的に制御可能な、波の干渉を利用したフェイズドアレーアンテナが多く用いられる。限定した空間にエネルギーを集中させる方式であることから、ワイドビームと比較して送電出力を上げやすい。電波伝搬は放射近傍界若しくは遠方界を想定する。放射近傍界で一定の条件を満たすと、小学校の理科の実験でおなじみの虫眼鏡の集光により紙を燃やす実験のように、受電器に焦点を当てたようなビームを形成することができる。この場合、受電電力を最大化することが可能である^{(8),(9)}。

2.4 人体の安全

総務省は安心、安全な電波利用のため、無線設備から発射される電波について、科学的知見に基づき、十分な安全率を考慮した安全基準として、電波防護指針を定めている⁽¹⁰⁾。電波を利用するWPTシステムも本規定に準拠し、安心、安全な社会の実現に貢献する義務がある。(各国で同様の規制が存在する。)

2.5 各周波数帯のWPTシステムの特徴と仕様

以上の背景から、制度化された3周波数帯のWPTシステムはそれぞれ以下の特徴を有する。

2.5.1 920 MHz 帯

アンテナが大きくなりやすいが、伝搬損が小さく、回折する性質から、一つのアンテナで広域に電波を拡散さ

せるワイドビーム方式が適している。他システムとの周波数共用を考慮すると送電出力は上げにくい。よって受電電力が小さくなることは許容する必要がある。送電出力が小さいため、電波防護指針への対応は容易である。システム構成がシンプルになるため、低コストで実現できる。送電アンテナ、受電アンテナ共に無指向性が好ましい。

2.5.2 5.7 GHz 帯

アンテナの小形化が期待できるが、伝搬損が大きい。そのため、送電器に小形で利得の大きなフェイズドアレーアンテナを使用することができるナロービーム方式が適している。回折は期待できないため、基本的には見通し内伝搬を想定する。920 MHz 帯と比較して高出力、高利得送電器となるため、高い受電電力を期待できる。高指向性により空間における高エネルギー分布は限定的ではあるが、送電出力が大きいため電波防護指針への対応に工夫が必要である。920 MHz 帯と比較してシステム構成が複雑であるため、導入コストは高くなる。受電アンテナは設置自由度を優先する場合、無指向性が望ましいが、伝搬損を補償し、より高い受電電力を嗜好する場合、指向性アンテナを選択する。

2.5.3 2.4 GHz 帯

920 MHz 帯、5.7 GHz 帯の間に位置するため、正反対の特徴を持つ両者のどちら側にも寄せることは可能であるが、他システムとの共存の観点から空間への放射を制限するナロービーム方式が適している。5.7 GHz と比較して波長が長いため送電器のアンテナサイズが大きくなるが、伝搬損は8 dB 有利である。

2.5.4 制度化されたWPTシステムの仕様

表1に制度化されたWPTシステムの仕様を示す。制度は主に放射に対する規制であることから、主に送電器の仕様が制限される。

2.5.5 制度化されたWPTシステムの能力

制度化されたWPTシステムの送電器仕様とフリスの伝達式から求められるRF受電電力と距離の関係を図4に示す。受電アンテナは0 dB_i 若しくは開口面積10 cm×10 cm の2通りを示している。送電器:受電器=1:1の計算であることに注意する必要がある。また、2.4 GHz 帯/5.7 GHz 帯に関しては放射近傍界となる距離においてもフリスの伝達式を適用してプロットしていることも注記しておく。この計算結果から分かることを以下に示す。

- ・ 920 MHz 帯で1 mW 以上の受電能力は難しい
- ・ 受電アンテナ利得を一定とした場合、2.4 GHz 帯

表1 制度化された WPT システムの主な仕様（筆者による一部抜粋）

	920 MHz 帯	2.4 GHz 帯	5.7 GHz 帯
チャネル	2 チャネル	4 チャネル	9 チャネル
変調方式	規定しない	無変調 (NON)	無変調 (NON)
送電方式	ワイドビーム	ナロービーム	ナロービーム
送電器設置方法	規定しない	天井設置, 下向き	天井設置, 下向き
空中線電力	≤ 1 W (30 dBm)	≤ 15 W (41.8 dBm)	≤ 32 W (45 dBm)
等価等方放射電力 (空中線利得)	≤ 36 dBm (≤ 6 dBi)	≤ 65.8 dBm (≤ 24 dBi)	≤ 70 dBm (≤ 25 dBi)
水平方向の等価等方 放射電力	規定しない	≤ 47 dBm	≤ 47 dBm
キャリアセンス	不要	要	要
送信時間制限	要	不要	不要
人体検出 + 送電止	不要	要	要
電波防護指針	管理環境 一般環境	管理環境	管理環境
設置環境	WPT 管理環境 WPT 一般環境	WPT 管理環境	WPT 管理環境
免許	要 (構内無線局)	要 (構内無線局)	要 (構内無線局)
運用調整	要	要	要

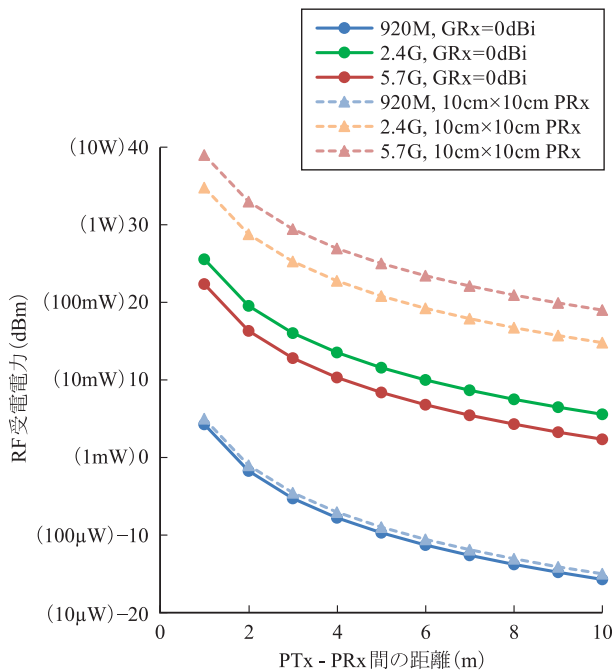


図4 RF 受電電力 vs 距離

が優位

- ・ 受電アンテナの開口面積を一定とした場合, 5.7 GHz 帯が優位

3. WPT システムに求められる要求事項

次に WPT システムに求められる要求事項（ニーズ）を整理する。

3.1 アプリケーションからの要求

アプリケーション（WPT システムの負荷）は WPT システムに対し概ね以下を要求する。社会実装において、WPT システムはこれら全てを同時に満足することが求められる。

- ・ アプリケーションの消費電力
 - 平均消費電力
 - 最大消費電力
- ・ アプリケーションへの電力供給の安定性
- ・ 受電器（受電機能）許容サイズ
 - 受電アンテナ配置可能領域
 - 受電回路配置可能領域
- ・ 受電器設置場所・設置方法・固定／移動
- ・ 1 台の送電器でサポートする受電器数量
- ・ 送電器設置場所・設置方法
- ・ WPT システム設置環境
- ・ WPT システムコスト
- ・ 各国規制への対応

3.2 WPT システム仕様への落とし込み

社会実装には、上記アプリケーションからの要求を WPT システム仕様へと落とし込む必要がある。

受電機能の概念を図5に示す。受電器は送電器から受け取った受電エネルギー（受電電力×時間）を蓄電素子に充電し、蓄電素子から負荷にエネルギー（消費エネルギー＝消費電力×時間）を供給する。アプリケーションへの電力供給の安定性の観点から、蓄電素子は社会実装において必須である。

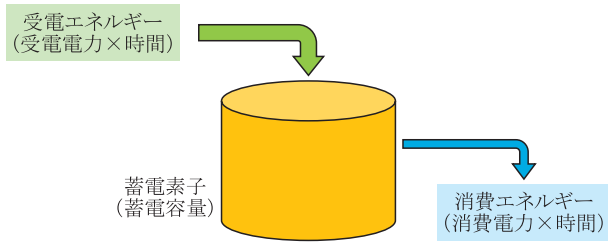


図5 受電機能の概念

1分, 1時間, 1日等, 単位時間的な目線では以下を満足する必要がある.

- ・ 受電エネルギー $\geq$ 消費エネルギー
これは以下のように言い換えることもできる.
- ・ 平均受電電力 $\geq$ 平均消費電力
瞬時的な目線では以下を満足する必要がある.
- ・ 蓄電素子の最大放電電力 $\geq$ 最大消費電力

平均消費電力は負荷の消費電流プロファイルより得られる. 平均受電電力 (p_{ave}) は以下の式で求められる.

$$p_{ave}(\theta_t, \phi_t, \theta_r, \phi_r, d) = p_t \cdot g_t(\theta_t, \phi_t) \cdot \frac{1}{L_p(d, f)} \cdot g_r(\theta_r, \phi_r) \cdot \eta_{rect}(p_t, g_t, L_p, g_r) \cdot g_{radd} \cdot \eta_{chg} \cdot \eta_{duty}$$

ここで, η_{rect} は整流回路効率, g_{radd} は受電器追加利得, η_{chg} は充電回路効率, η_{duty} は受電デューティサイクルを示す.

送電電力は, 制度による規制値, フェイズドアレーのアンテナ素子ごとに使用される電力増幅器の最大出力で制限される.

送電アンテナ利得は制度による規制値, 送電器設置場所・設置方法及び受電器設置場所・設置方法で制限される. 制度による規制値で送電電力とともに等価等方放射電力の最大値が制限され, 送電器と受電器の相対的な位置関係から送電アンテナ利得の指向性減衰量が決定する.

自由空間損は周波数と送電器, 受電器間の距離により求まる.

受電アンテナ利得の制約条件として, 受電器許容サイズ, 受電器設置場所・設置方法及び送電器設置場所・設置方法がある. 受電器許容サイズから受電アンテナの種類やアンテナ最大利得が決定し, 送電器と受電器の相対的な位置関係から受電アンテナ利得の指向性減衰量が決定する.

整流回路は能動素子を用いた開ループ回路であるため, 整流回路入力電力により整流効率は変化し通常

10~70% 程度である.

受電器追加利得とは, 例えば複数のレクテナ (受電アンテナ+整流回路) を用いて出力を加算した場合に発生する利得を意味する.

充電回路はスイッチングチャージャーカリニアチャージャーかによるが, 効率は 70~90% 程度である.

受電デューティサイクルは1サイクル当りの対象受電器に電力伝送可能な時間割合を意味する. 920 MHz 帯は送信時間制限により規定されているので, 特に見積もりに難しさはないが, 2.4 GHz 帯, 5.7 GHz 帯は以下の要素を考える必要がある.

- ・ キャリヤセンス機能の動作による Dead Time
- ・ 受電器からのビーコン信号発出, 検知動作による Dead Time (Optional)
- ・ 受電器へのビーム形成演算による Dead Time
- ・ 送電器, 充電器間の通信による Dead Time (Optional)
- ・ 他の受電器へ電力伝送している時間 (1 サイクルにおいてサポートする受電器数量に依存)

以上の検討をまとめる.

- ・ $p_t \cdot g_t(\theta=0, \phi=0)$ は制度により制限され, 送電器設計により若干の味付けを調整できる
- ・ $\theta_t, \phi_t, \theta_r, \phi_r, d, \eta_{duty}$ はアプリケーションに依存する
- ・ $g_r(\theta_r=0, \phi_r=0), \eta_{rect}(p_t, g_t, L_p, g_r), g_{radd}, \eta_{chg}$ は受電器設計による味付け次第で性能が左右する

3.3 その他

社会実装に向けて, WPT システムコストは性能とともに重要な要素である. 満足できる RoI (投資対効果) が得られなければ社会実装は実現できない. 2.4 GHz 帯, 5.7 GHz 帯は, 送電器の構成が 920 MHz 帯と比較して複雑であり, より多くの投資を必要とする. したがって, 2.4 GHz 帯, 5.7 GHz 帯は 920 MHz 帯や環境発電等と比較して圧倒的な効果を示す必要がある.

4. 2.4 GHz 帯/5.7 GHz 帯 WPT システムの社会実装に向けた課題

以上から, 筆者らは 2.4 GHz 帯, 5.7 GHz 帯の受電器設計において, 920 MHz 帯や環境発電等と比較して圧倒的な受電性能を示すことをエンジニアリング課題として抽出した.

本稿はその性質から, 効果=受電性能と単純化して抽出したが, WPT システムによる効果の定義, 及びその測定方法も課題であることを参考として付記しておく.

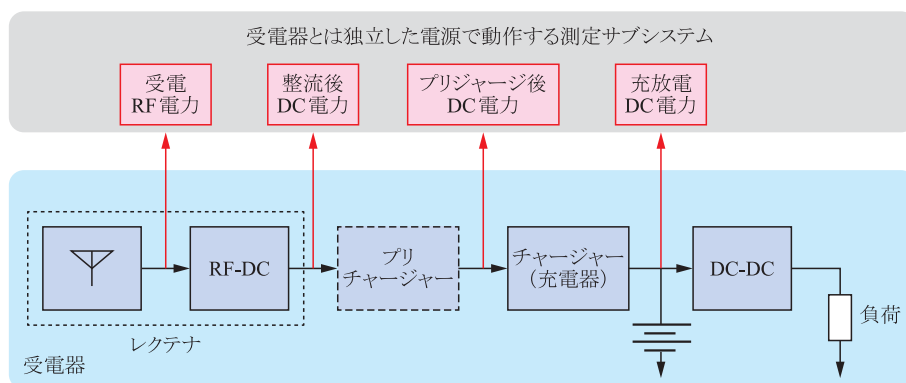


図6 受電性能を見える化したブロック図



図7 開発した 5.7 GHz 帯レクテナ

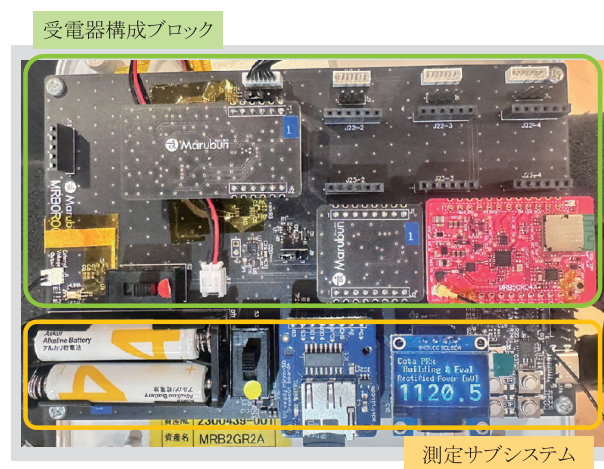


図8 開発した受電回路と測定サブシステム

5. 2.4 GHz 帯／5.7 GHz 帯 WPT システムの 受電器に対する取組み

筆者らは抽出した課題を解決するため、次に示す二つの取組みを実施した。

5.1 受電性能の見える化

まず、受電性能の見える化を試みた。ブロック図を図6に示す。受電の各ポイント（RF 受電電力、整流出力電力、プリチャージャー出力電力、バッテリー充電／放電電力及びバッテリー残量）で電力を計測することができるため、目標とする受電性能のボトルネックを特定することができる。一定周期で計測をし、タイムスタンプ付きのデータログを保存することにより、詳細評価・解析を可能とした。また、測定サブシステムは受電機能から独立した電源で動作する。

5.2 1 W 受電器の開発

次に、前項の受電性能を見える化したプラットフォームを基に、圧倒的な受電性能を目指して開発した事例を示す。

筆者らの独自技術により、等価等方放射電力(EIRP)＝

67 dBm の 5.7 GHz 帯レトロディレクティブ方式送電器を用い、 $\theta_t=0$, $\phi_t=0$, $\theta_r=0$, $\phi_r=0$, $d=1\text{m}$, $\eta_{\text{duty}}=100\%$ の代表条件で 1 W のバッテリー充電電力性能を実現した。これは 920 MHz 帯と比較して 1,000 倍程度の受電性能であり、同様の 2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯の受電器としてもクラス最高性能である。本レクテナで用いた整流素子はシリコンダイオードを用いているが、GaAs ダイオードを用いることで更なる性能向上が見込まれる。また、 $g_r(\theta_r=0, \phi_r=0)$ を抑えつつ、 g_{radd} を効果的に増加させる設計としたことにより、角度依存性を低減した。開発したレクテナ及び受電回路と測定サブシステムを図7及び図8に示す。

6. お わ り に

本稿では、制度化された3周波数帯のWPTシステムの概要と特徴（シーズ）を整理し、WPTシステムに求められる要求事項（ニーズ）を確認した。2.4 GHz 帯、5.7 GHz 帯の WPT システムを社会実装する上でのエンジニアリング課題を“920 MHz 帯や環境発電等と比較

して圧倒的な受電性能を示すこと”とした上で、課題を解決するための二つの取組みを紹介した。本開発によって目標とする性能を達成し 5.7 GHz 帯の効果の一端を示すことに成功したと考えている。今後は本成果をベースとした実アプリケーションへの実装を予定している。

WPT システムは、機器の設計においても、運用においても、本稿で紹介したような多様な観点でのトレードオフを考慮する必要がある大変興味深い技術分野である。こういったテーマは技術者の問題解決能力を飛躍的に向上させることに寄与すると考える。本稿が、次代を担う若手技術者の一助になれば幸いである。

文 献

- (1) 内閣府, “Society 5.0,”
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html
- (2) インターネット官報, “電波法施行規則等の一部を改正する省令 (総務三八).”
<https://kanpou.npb.go.jp/old/20220526/20220526g00112/20220526g001120001f.html>
- (3) C.A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design 4th Edition, Wiley, 2016.
- (4) N. Sakai, N. Furutani, K. Uchiyama, Y. Hirose, F. Komatsu, and K. Itoh, “5.8 GHz band 10 W rectenna with GaAs E-pHEMT gated anode diode on the aluminum nitride antenna for thermal dispersion,” IEEE/MTT-S International Microwave Symposium, pp. 1003-1005, 2023.

- (5) N. Sakai, K. Noguchi, and K. Itoh, “A 5.8-GHz band highly efficient 1-W rectenna with short-stub-connected high-impedance dipole antenna,” IEEE Wireless Power Transfer Conference, 2021.
- (6) K. Ichikawa, T. Iwata, S. Onishi, T. Higuchi, Y. Hirose, N. Sakai, K. Itoh, and K. Miyaji, “A 64.4% efficiency 5.8 GHz RF wireless power transfer receiver with GaAs E-pHEMT rectifier and 45.2 μ s MPPT time SIDITO buck-boost converter using VOC prediction scheme,” IEEE International Solid-State Circuits Conference, pp. 228-230, 2024.
- (7) 総務省, 電波利用ホームページ, “我が国の電波の使用状況.”
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/>
- (8) P. Nepa and A. Buffi, “Near-field-focused microwave antennas: Near-field shaping and implementation,” IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 59, no. 3, pp. 42-53, 2017.
- (9) A. Hajimiri, B. Abiri, F. Bohn, M. Gal-Katziri, and M.H. Manohara, “Dynamic focusing of large arrays for wireless power transfer and beyond,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 56, no. 7, pp. 2077-2101, July 2021.
- (10) 総務省, 電波利用ホームページ, “電波防護指針.”
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/medical/protect/>

(2024 年 6 月 28 日受付 2024 年 7 月 16 日最終受付)



かつなが ひろし
勝永 浩史

2000 法政大・工・電気電子卒。同年(株)豊田自動織機入社。RFIC の回路/システム設計及び磁界共鳴方式 WPT の研究開発に従事。2012 丸文株式会社入社, アナログ/RF IC 支援を経て 2.4G/5.7G WPT の研究開発に従事。第一級陸上無線技術士。