

920MHz 帯ワイヤレス給電システム設計の基礎

Basics of 920MHz WPT System Design

田中 勇気
Yuki TANAKA

パナソニック ホールディングス株式会社
Panasonic Holdings Corporation

概要

920MHz 帯 空間伝送型ワイヤレス給電(WPT: Wireless power transmission)システムは、様々なユースケースで活用が進みつつある。WPT システムはハードウェアとソフトウェア (ファームウェア) から構成されている。ハードウェアに関しては、送電側と受電側に明確に区別できる。送電側については、高周波信号発生部、電力増幅部、アンテナが主な構成要素となる。送電側の送電機 (送信機) は無線局として取り扱われることから各種規準・規格を満足する必要がある、このためには位相雑音レベルの低い PLL(Phase locked loop)の採用やスプリアスおよび高調波の輻射を抑制するフィルタの活用が求められる。加えて、電力効率やサイズ、発熱等の課題を解決する必要がある。受電側については、アンテナ、整流回路 (レクテナ)、電源回路部、蓄電部、負荷部が主な構成要素となる。受電側においては WPT システムの動作エリアを拡大するために、各コンポーネントはより小さな受信電力で効率的に動作する必要がある。例えば、低電力領域においては、整流回路や DC-DC コンバータ等の回路は入力電力が高いほど変換効率が向上するという特性がある (図 2)。したがって、アンテナ (レクテナ) の性能を向上することによりシステム全体の効率を効果的に改善することができる。

本講座では、WPT システムを構成する各要素ブロックに注目し、高い性能を実現するための設計手法について述べる。



図 1 WPT 送電機とアンテナ

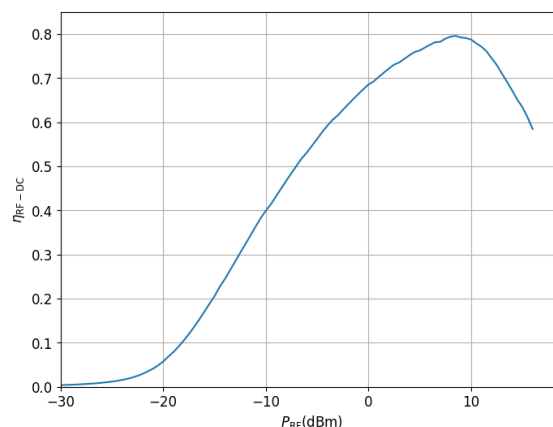


図 2 整流回路の変換効率の特性

Abstract

920MHz-band wireless power transmission (WPT) systems are increasingly utilized for a variety of applications. The transmitter must comply with standards and regulations. The receiver's main components are antenna, rectifier, power management, and energy storage. To expand the operating area of the WPT system, each component must operate efficiently with lower received power. In this course, we will focus on each element block that makes up a WPT system and discuss design methods for achieving high performance.

920MHz帯ワイヤレス給電システム設計の基礎

Basics of 920MHz WPT System Design

田中 勇気

Yuki TANAKA

パナソニック ホールディングス株式会社

Panasonic Holdings Corporation

tanaka.yuki012@jp.panasonic.com

- 920MHz帯WPTシステムの概要
 - 法改正
 - 電力伝送効率
- 送電側技術
 - 送電アンテナ設計
 - 回路設計
 - 規格・規準
- 受電側技術
 - アンテナ設計
 - 整流回路設計
 - 受電回路設計
- まとめ

■ 920MHz帯WPTシステムの概要

■ 法改正

■ 電力伝送効率

■ 送電側技術

■ 送電アンテナ設計

■ 回路設計

■ 規格・規準

■ 受電側技術

■ アンテナ設計

■ 整流回路設計

■ 受電回路設計

■ まとめ

■ 2022年 国内法制度化

- 920MHz帯WPTは導入ハードルが低く、IoTデバイスに最適

| 諸元 | 920 MHz帯 | 2.4 GHz帯 | 5.7 GHz帯 |
|----------------------|------------------|----------------------------|--|
| チャンネル | 918.0, 919.2 MHz | 2412, 2437, 2462, 2484 MHz | 5740, 5742, 5744, 5746, 5748, 5750, 5752, 5758, 5764 MHz |
| 送信出力 | 1 W(30 dBm) | 15 W(41.8 dBm) | 32 W(45 dBm) |
| 送信EIRP (等価等方輻射電力) | 4 W(36 dBm) | 3.76 kW(65.7 dBm) | 10.1 kW(70 dBm) |
| キャリアセンス | 不要 | 要 | 要 |
| 有人環境での送信 | 可 | 不可 | 不可 |
| 所要遮蔽レベル | 10 dB | 14 dB | 16 dB |
| 設置環境 | 制限なし | 地下・1Fのみ ビーム方向制限あり | ビーム方向制限あり |

■ 2025年度下期～2026年度上期に規制緩和の計画

- 1W型 WPTシステムの屋外利用の解禁
- 免許不要の特定小電力型の新設

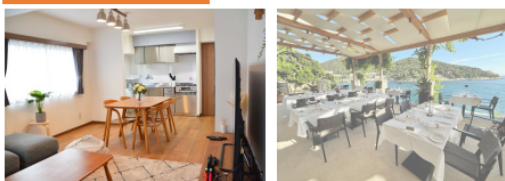
検討の背景等

①

検討の背景

- 空間伝送型ワイヤレス電力伝送（WPT）システムは、電波により5～10メートルの距離を無線で電力伝送するものであり、工場や倉庫内などで利用されるセンサ機器等への給電での利用が期待されている。
- 総務省では、令和4年5月、920MHz帯、2.4GHz帯、5.7GHz帯の3周波数帯において、制度整備を実施（いずれも屋内限定の構内無線局）。
- このうち、920MHz帯WPTシステムは、数十mW程度の小電力の給電用として使用されているが、普及に伴い、設置場所の自由度向上や活用範囲の拡大等が求められている。
- こうした状況を踏まえ、920MHz帯WPTシステムについて、構内における屋外利用及び出力を制限することで特定小電力局として導入するために必要な技術的条件について検討を行った。

利用シーンの拡大



開放部のある倉庫や一般家屋、屋外での給電を想定（IoTセンサやセキュリティセンサ用途）

構内無線局（屋外利用）



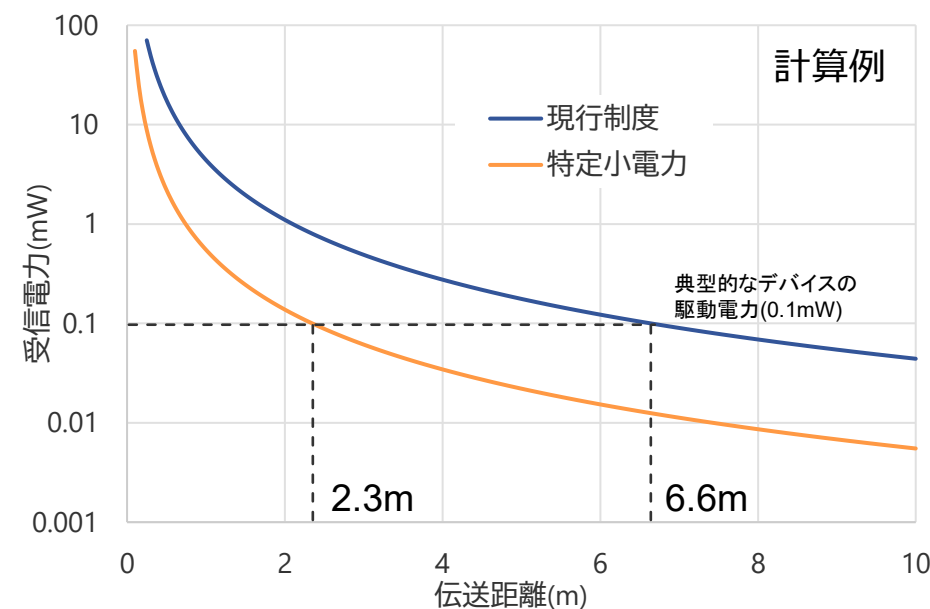
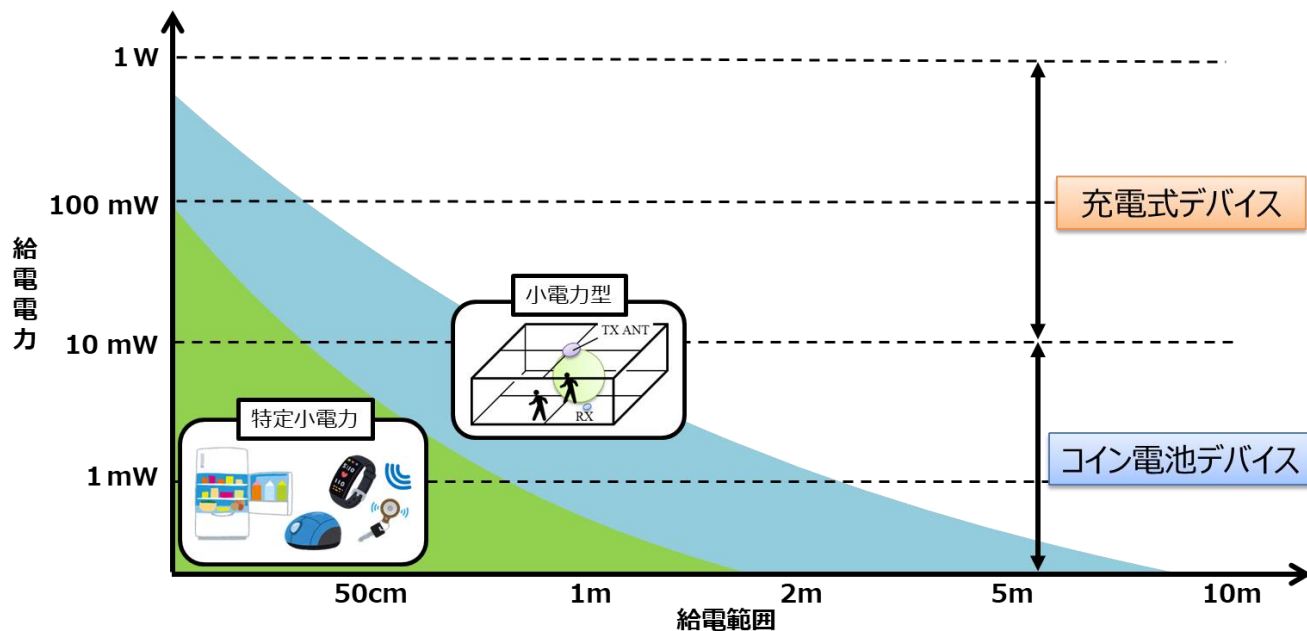
特定小電力無線システム

検討の経緯

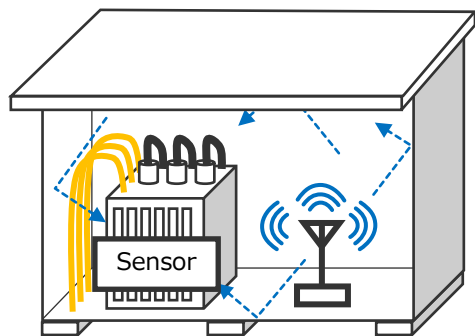
- ・令和7年3月 情報通信審議会 陸上無線通信委員会で検討開始（報告）
- ・令和7年4月～ 空間伝送型ワイヤレス電力伝送作業班（主任：三谷 政昭（東京電機大学））において検討
- ・令和7年夏～秋頃 技術的条件案のとりまとめ

令和7年7月23日 総務省 情報通信審議会 陸上無線通信委員会 空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班 報告

- 免許・申請不要
- 免許型WPTに比べて出力を低減
 - 出力1/4 (1W→250mW), アンテナ指向性1/2 (6dBi→3dBi)
- 25年度～26年度前半に解禁見込み



インフラ・生産設備



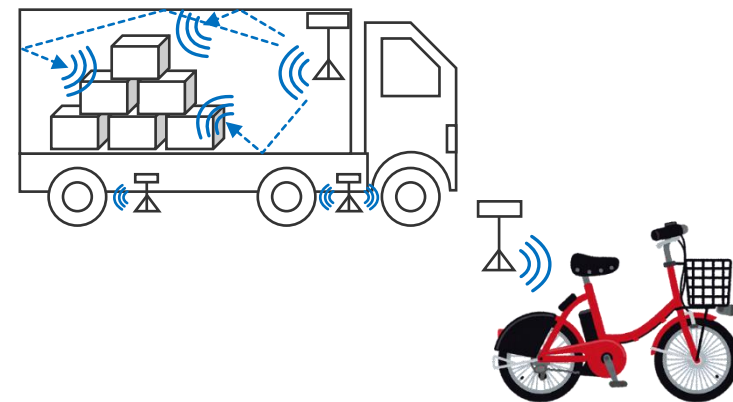
- 電池交換困難なセンサデバイスへの給電において、送電機の複数設置、即時運用、柔軟な構成変更を可能とする
- 閉空間・反射環境の特性を利用して高効率に給電を行う

家庭・オフィス・公共



- 1m未満といった比較的短距離において小型デバイスへの給電を行う
- 免許不要化することにより、導入ハードルを下げ普及を促進する

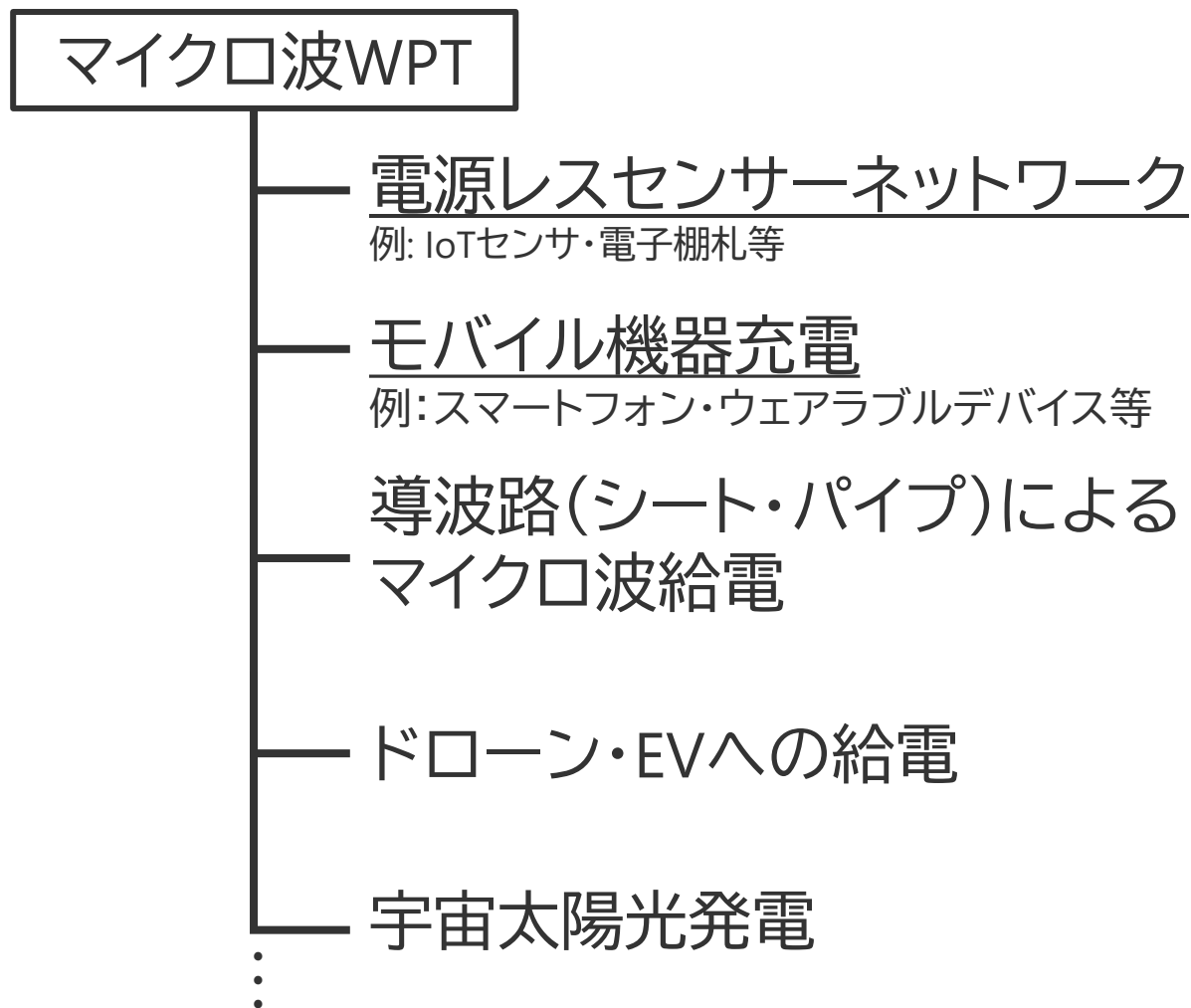
物流・移動体



- 物流トラック内や冷蔵コンテナ内のセンシング等、移動体内外における給電を可能とする

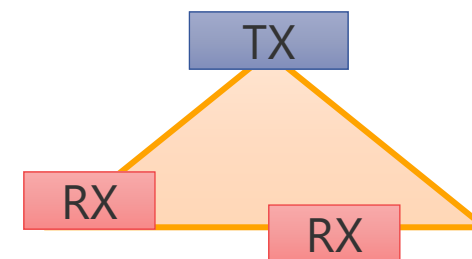
特定小電力型WPTの解禁によりユースケースが大幅に拡大

■ アプリケーションによる分類



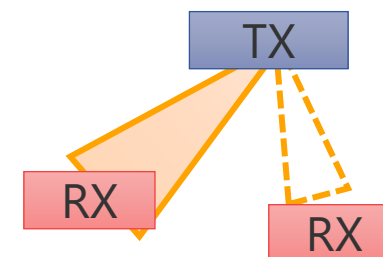
Wide-beam WPT

- ・ 広角のビームでの給電

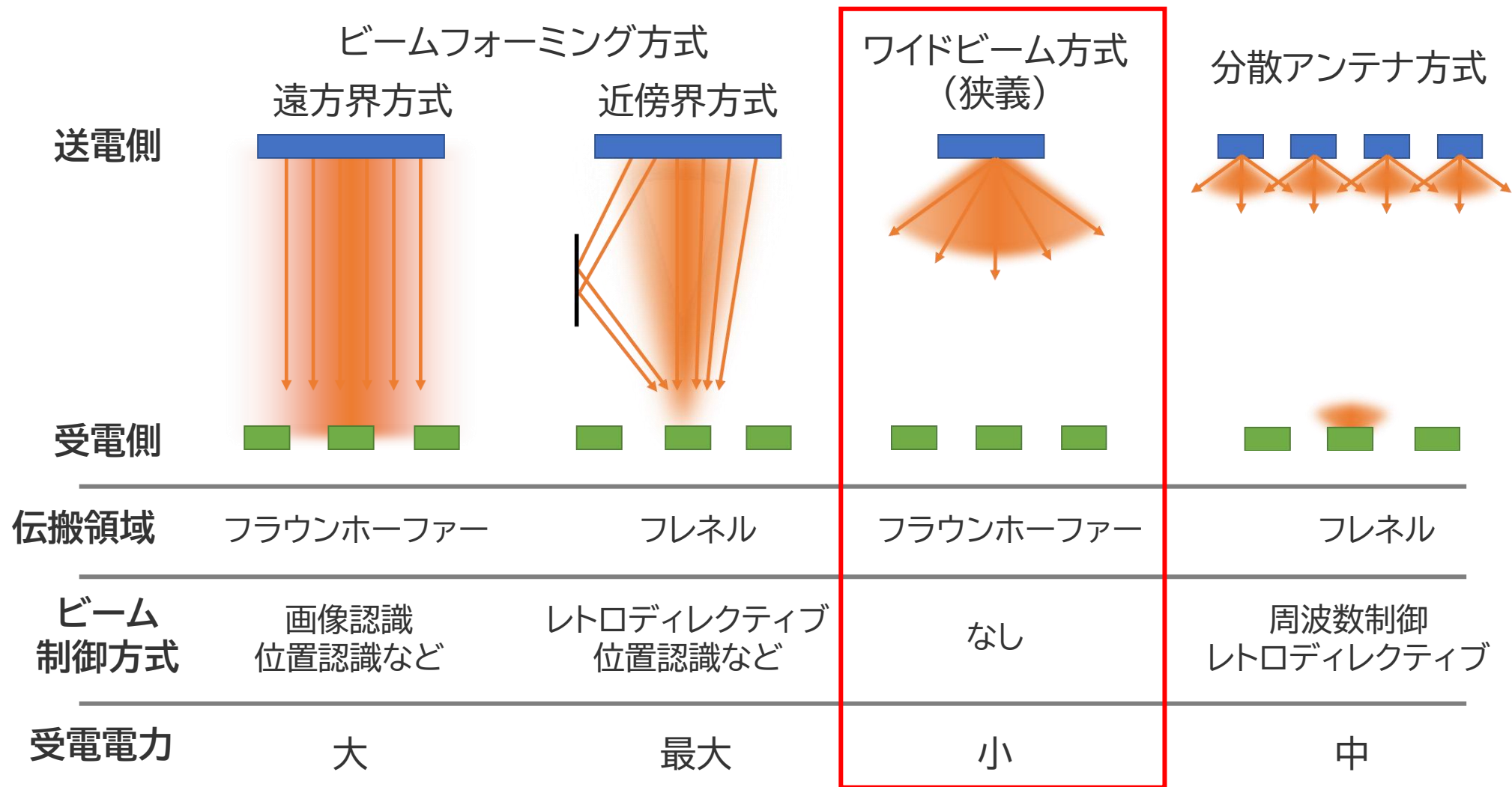


Narrow-beam WPT

- ・ ビームフォーミング
等により広範囲に給電



■ 技術による分類



■ アンテナ間効率

■ フリスの公式

TX 利得 G_T

RX 利得 G_R

$$\eta_{\text{Friis}} = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

アンテナ利得一定の場合:
効率は f^2 に **反比例**

開口面積が同じなら
利得は f^2 に比例

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A$$

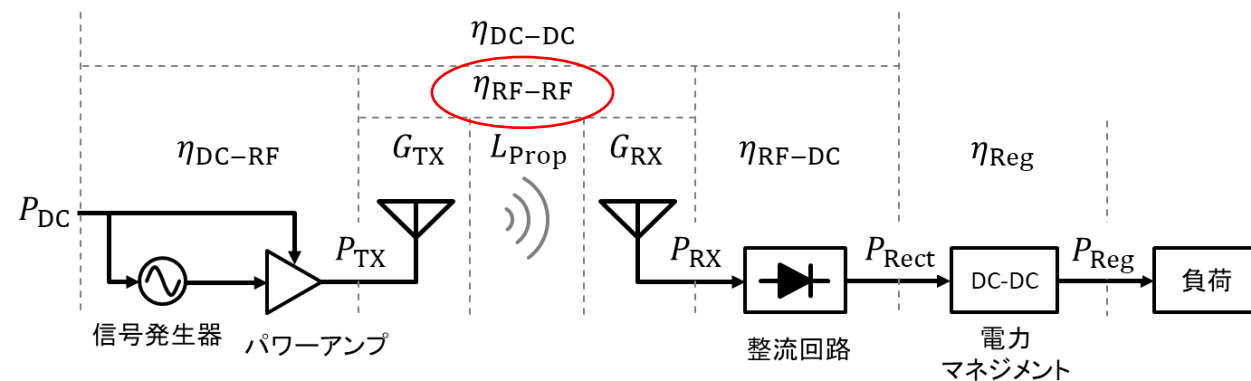
TX 面積 A_T

RX 面積 A_R

$$\eta_{\text{Friis}} = A_T A_R \left(\frac{1}{\lambda d} \right)^2$$

アンテナ面積一定の場合:
効率は f^2 に **比例**

※ $\eta_{\text{Friis}} > 0.1$ では効率の式は $1 - e^{-\eta_{\text{Friis}}}$ がより正確



TX 面積 A_T

RX 利得 G_R

$$\eta_{\text{Friis}} = A_T G_R \frac{1}{4\pi d^2}$$

送電アンテナ面積一定
受電アンテナ利得一定
の場合:効率は f に **依存しない**

- 高利得アンテナの場合高周波化により高効率化が可能
- 小形(低利得)アンテナの場合、
物理的な面積 A_p について $G > \frac{4\pi}{\lambda^2} A_p$
→ 回路効率を考慮すると低周波数が有利

- 920MHz帯WPTシステムの概要
 - 法改正
 - 電力伝送効率
- **送電側技術**
 - **送電アンテナ設計**
 - 回路設計
 - 規格・規準
- 受電側技術
 - アンテナ設計
 - 整流回路設計
 - 受電回路設計
- まとめ

■ 仕様

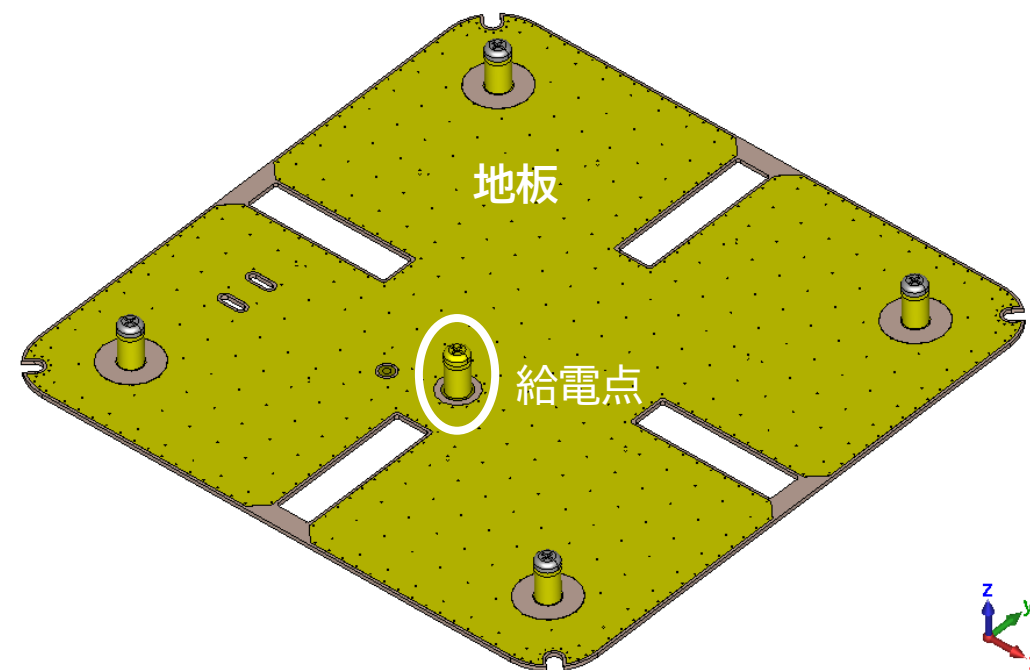
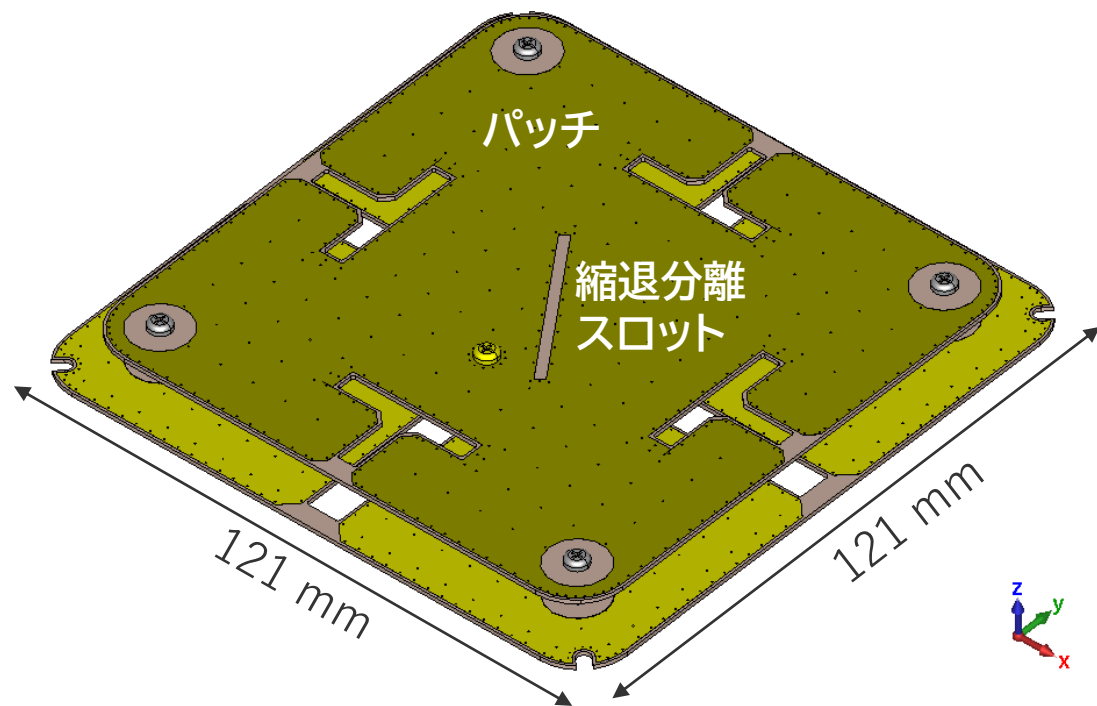
- 6dBi以下
- 円偏波 … 受電アンテナが直線偏波のため

■ 設計方針

- 軽量・低コスト
→ 高誘電率材料を使用しない
- 小型・薄型
→ リフレクタアンテナ($\lambda/4=82\text{mm}$)は使用困難
- パッチアンテナ
→ GNDサイズ($0.5\lambda \sim 1\lambda$)が大型である課題
- GNDを小型化した空気層パッチアンテナを設計

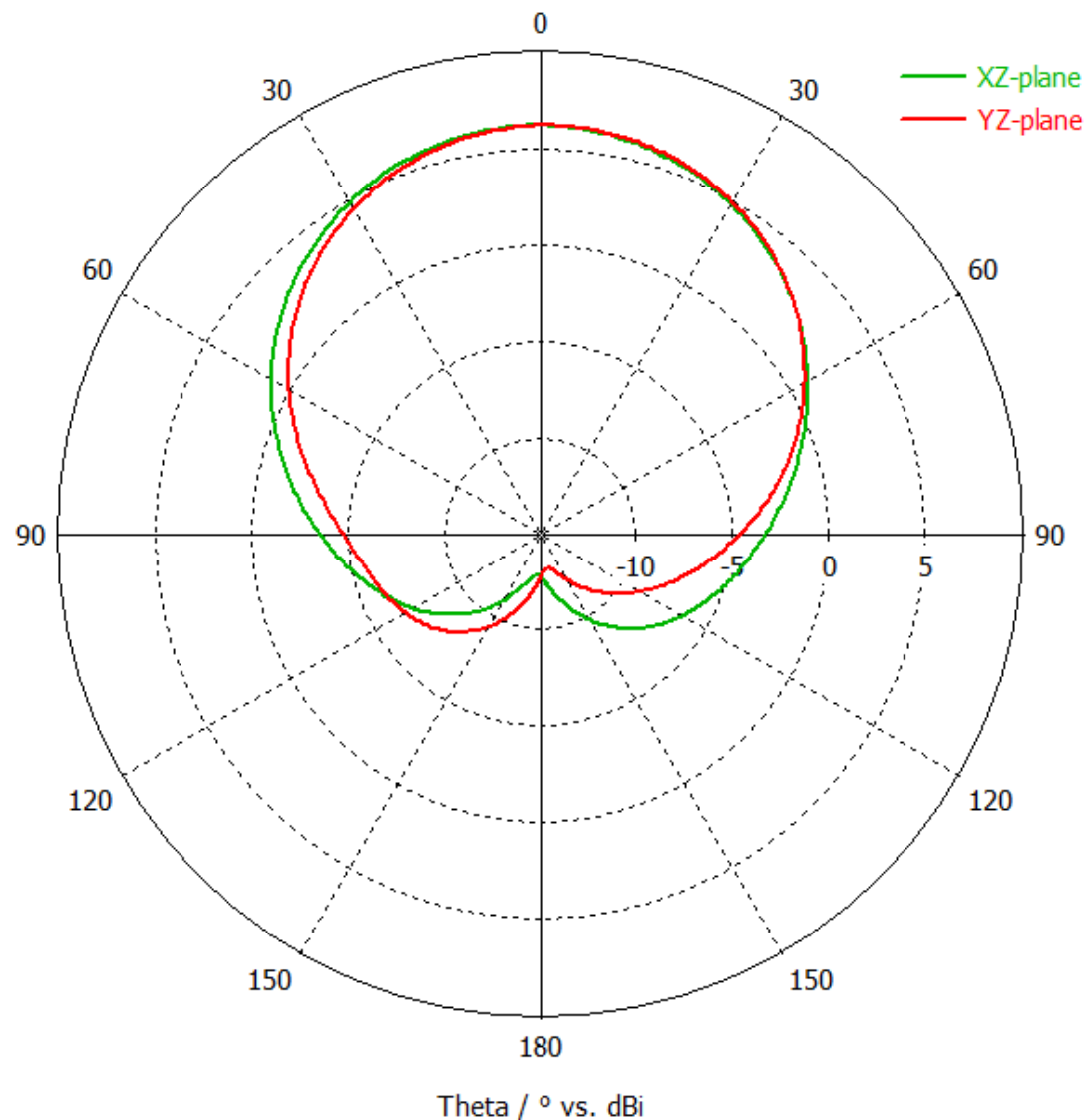
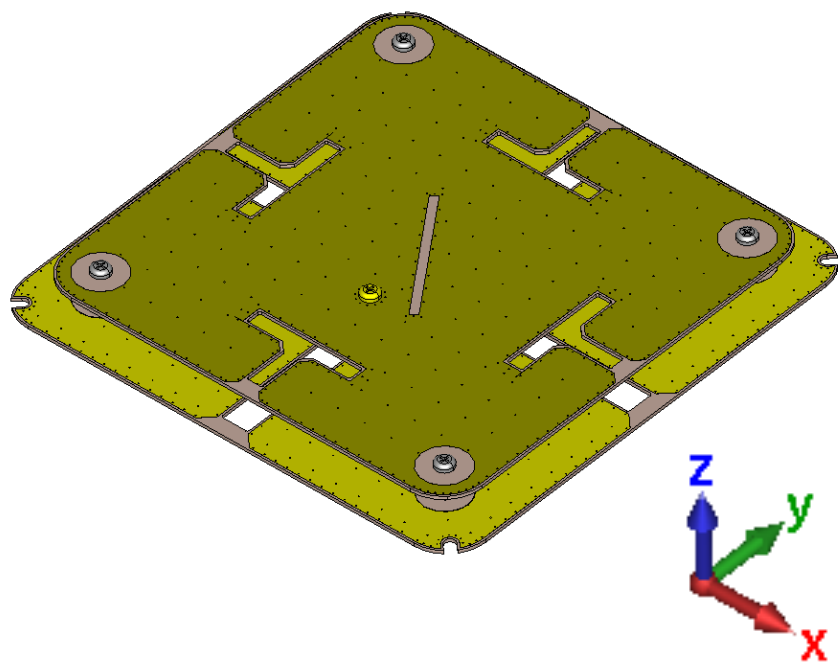


- F/B比を改善するためGNDに対して地板を小型化
- 共振長を確保するため、パッチにT形のスロットを配置
- 誘電損を低減するため、FR4基板をくり抜いて製作



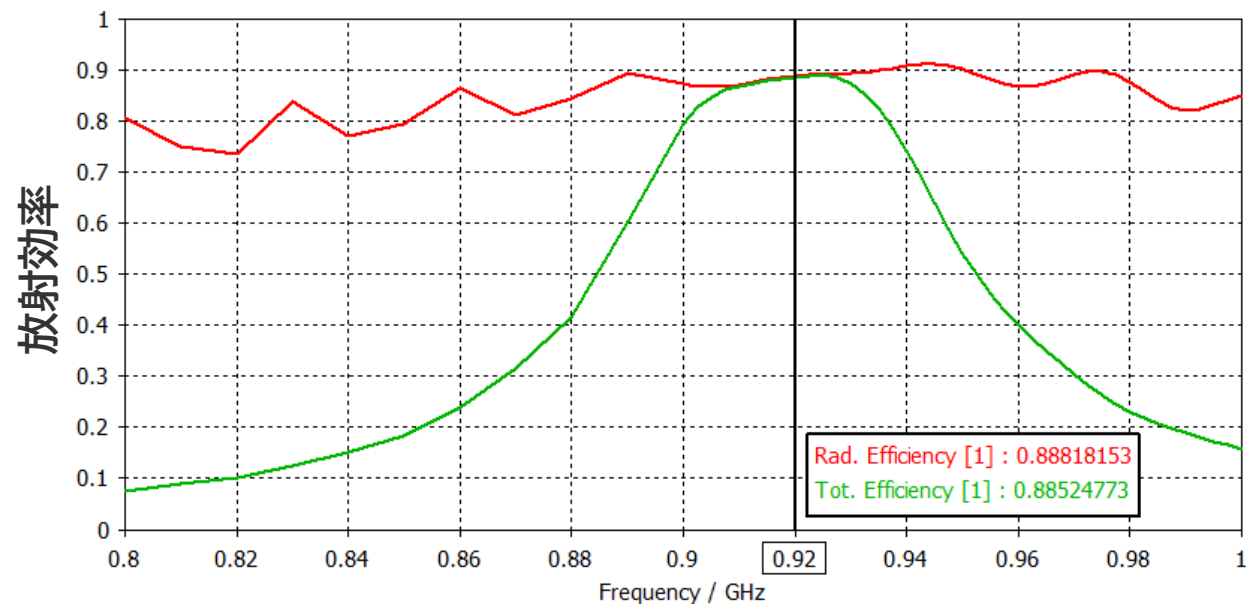
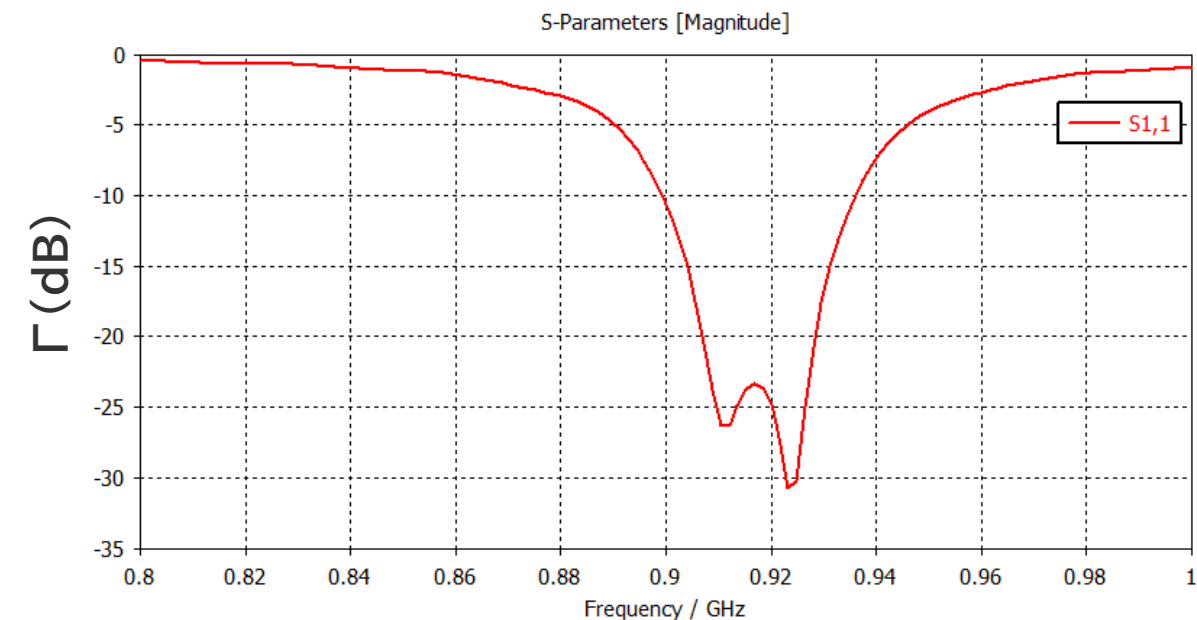
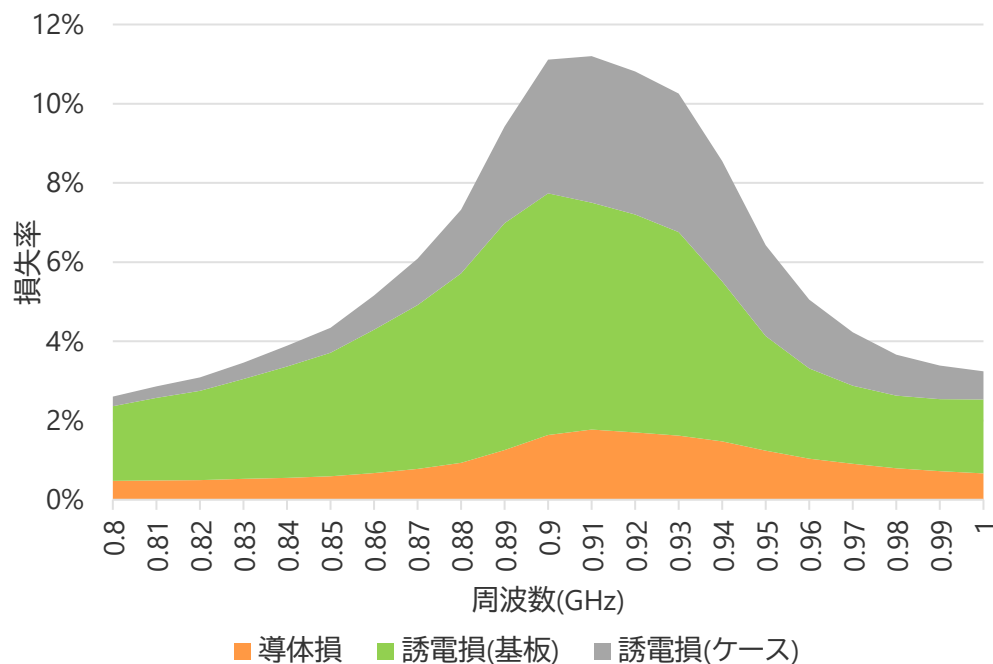
■ アンテナ指向性

- 利得:約6dBi
- バックローブレベル<-10dBi
- 小型ながら良好な特性を実現



■ インピーダンス・効率

- 電磁界解析結果
- 放射効率 > 88%
- 帯域幅 > 38MHz (VSWR < 2)
- 良好な特性を確認



- 920MHz帯WPTシステムの概要
 - 法改正
 - 電力伝送効率
- **送電側技術**
 - 送電アンテナ設計
 - **回路設計**
 - 規格・規準
- 受電側技術
 - アンテナ設計
 - 整流回路設計
 - 受電回路設計
- まとめ

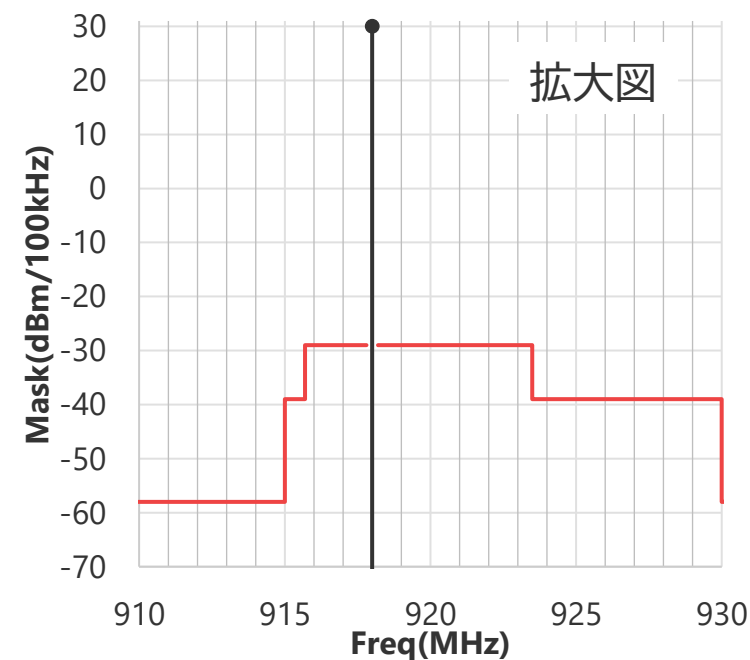
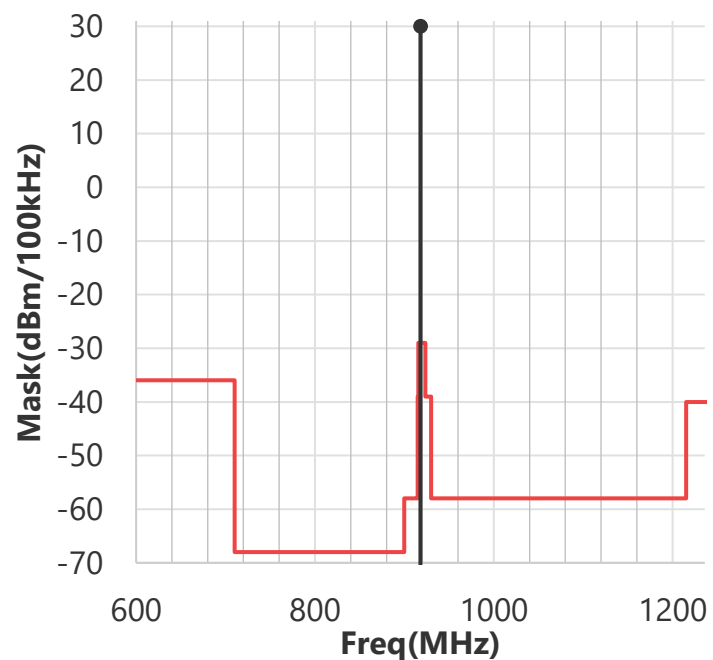
■ 送電器

- 12V/USB入力
- 920MHz帯 1W出力
- 制御・センサデータ収集用Bluetooth通信

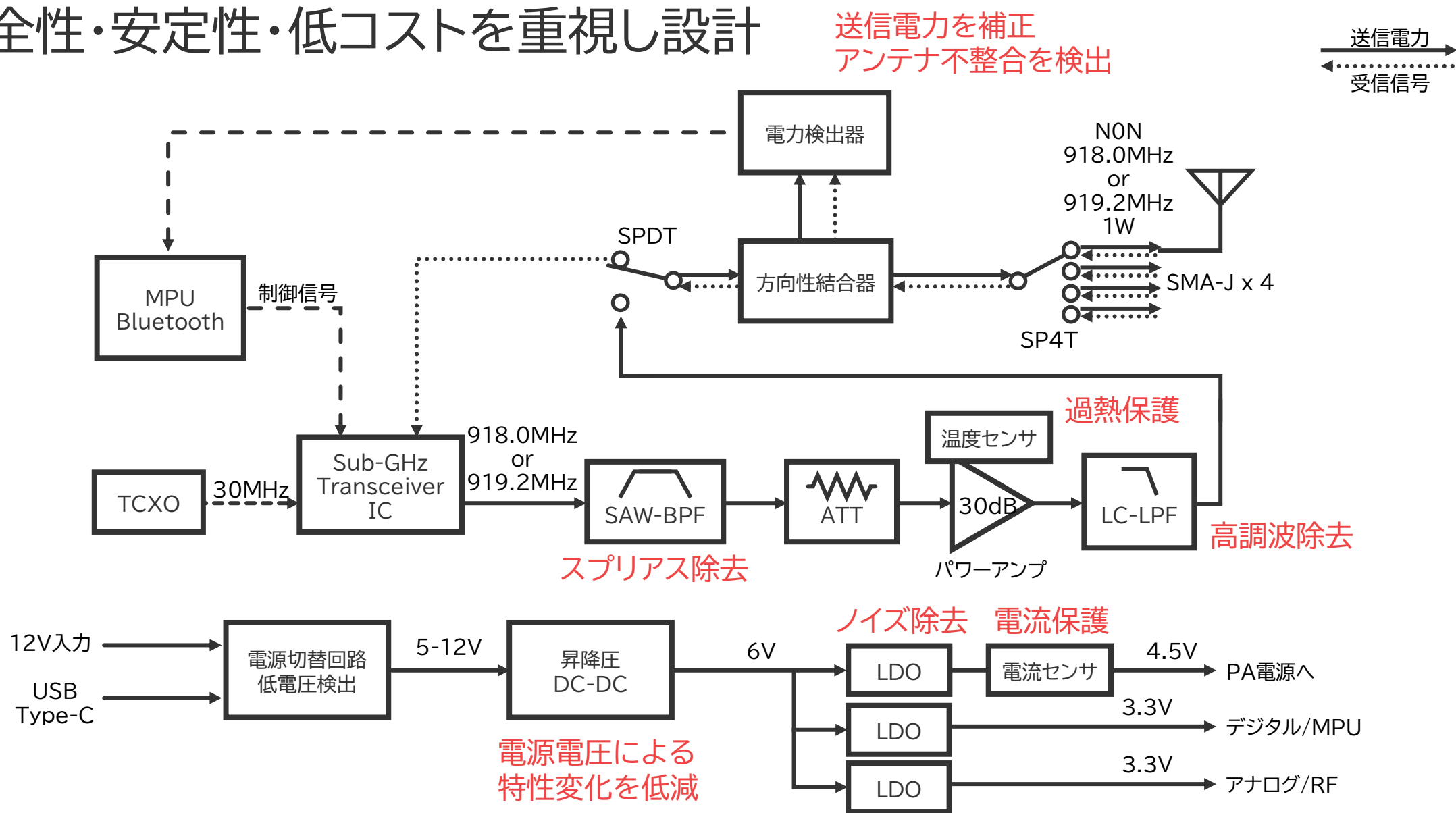


■ 送電機の要件

- 受信機能は不要
- 送信時間制限機能
(4秒送信/50ms休止)
- 近傍のスプリアス許容値が
厳しい

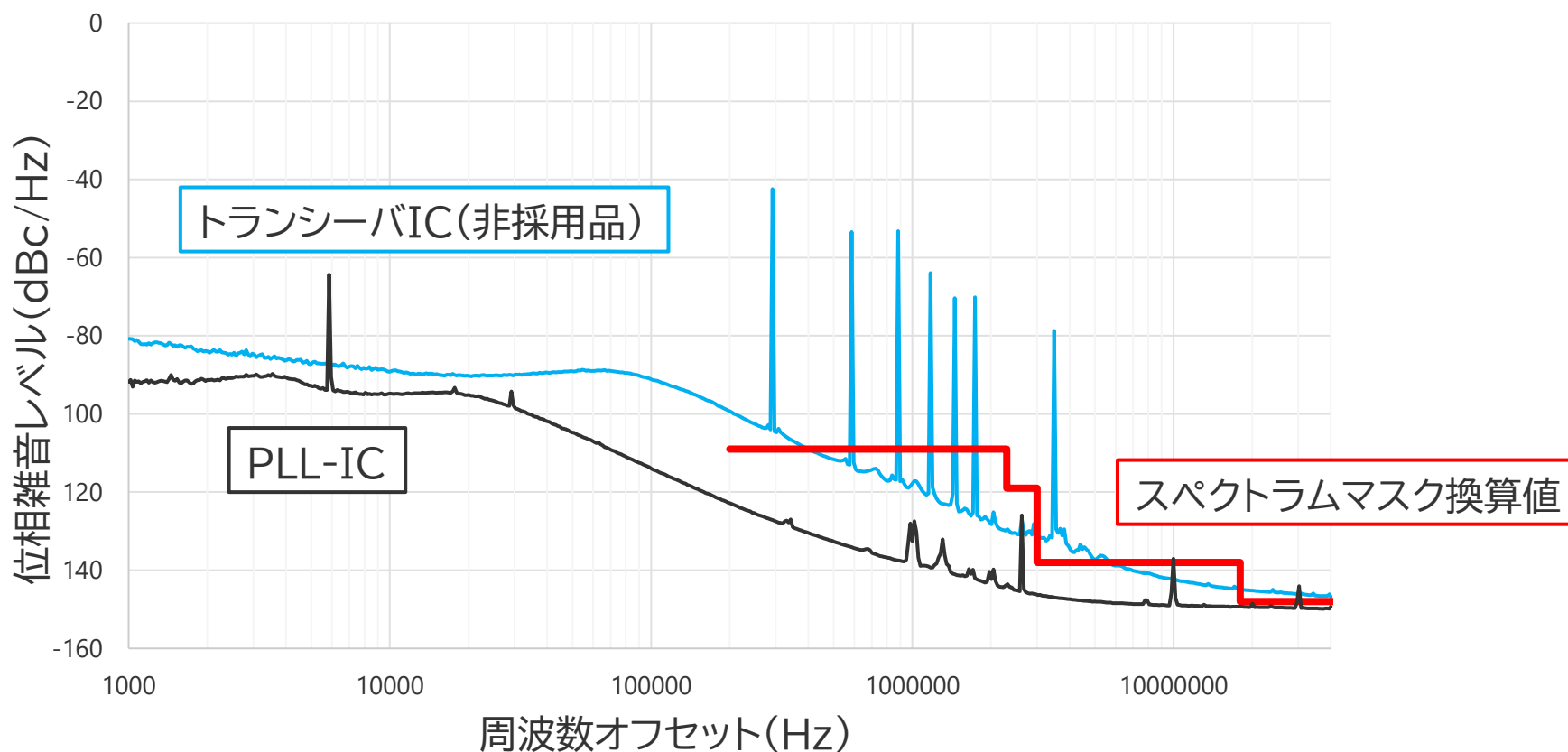


■ 安全性・安定性・低コストを重視し設計

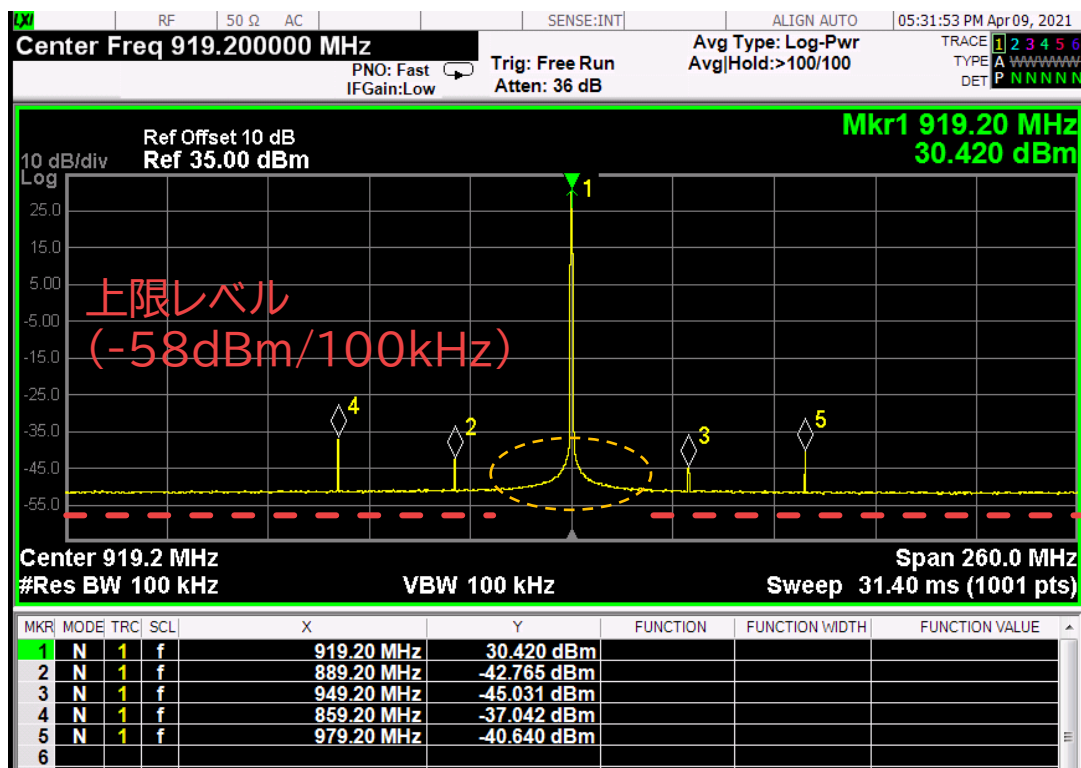


■ RFトランシーバ由来のスプリアス

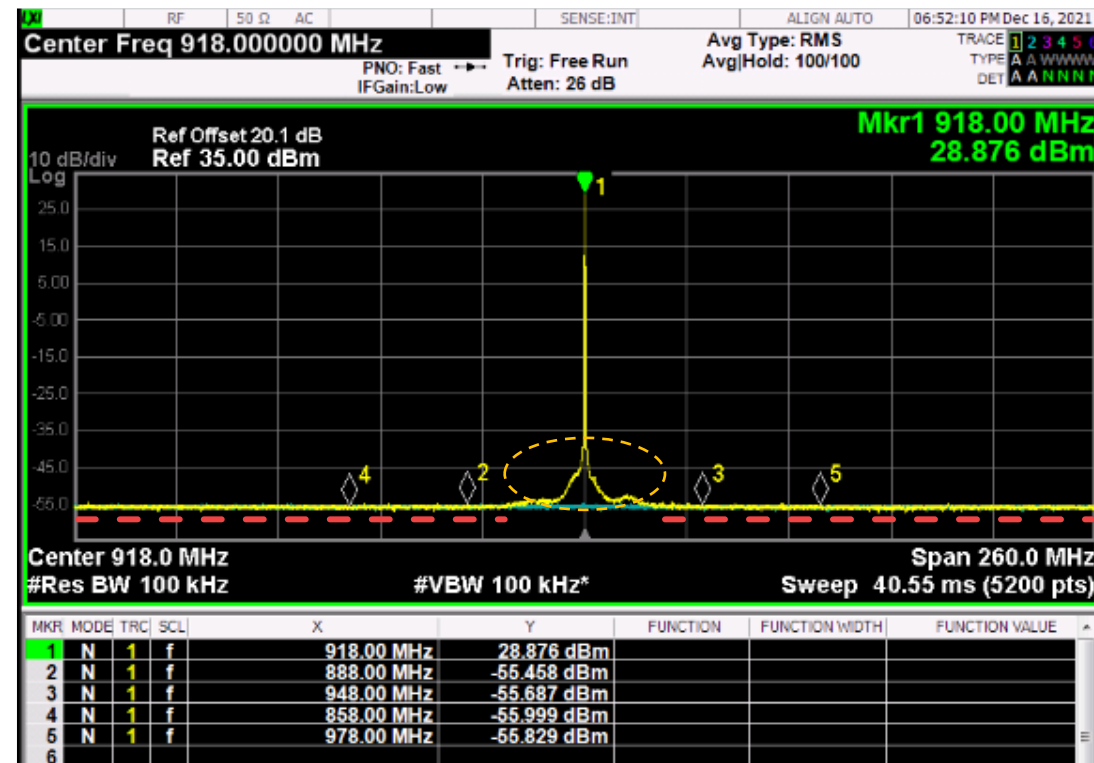
- FSK変調等を前提に開発されたトランシーバICは低コスト・小型である一方汎用のPLLシンセサイザICと比較して近傍雑音性能が劣る
- IC選定時の十分な評価・SAWフィルタの追加等の対策が必要



- RFトランシーバ由来のスプリアス
 - キャリア近傍にスプリアス信号が存在
 - SAWフィルタによる遮断が必須



SAWフィルタ挿入前

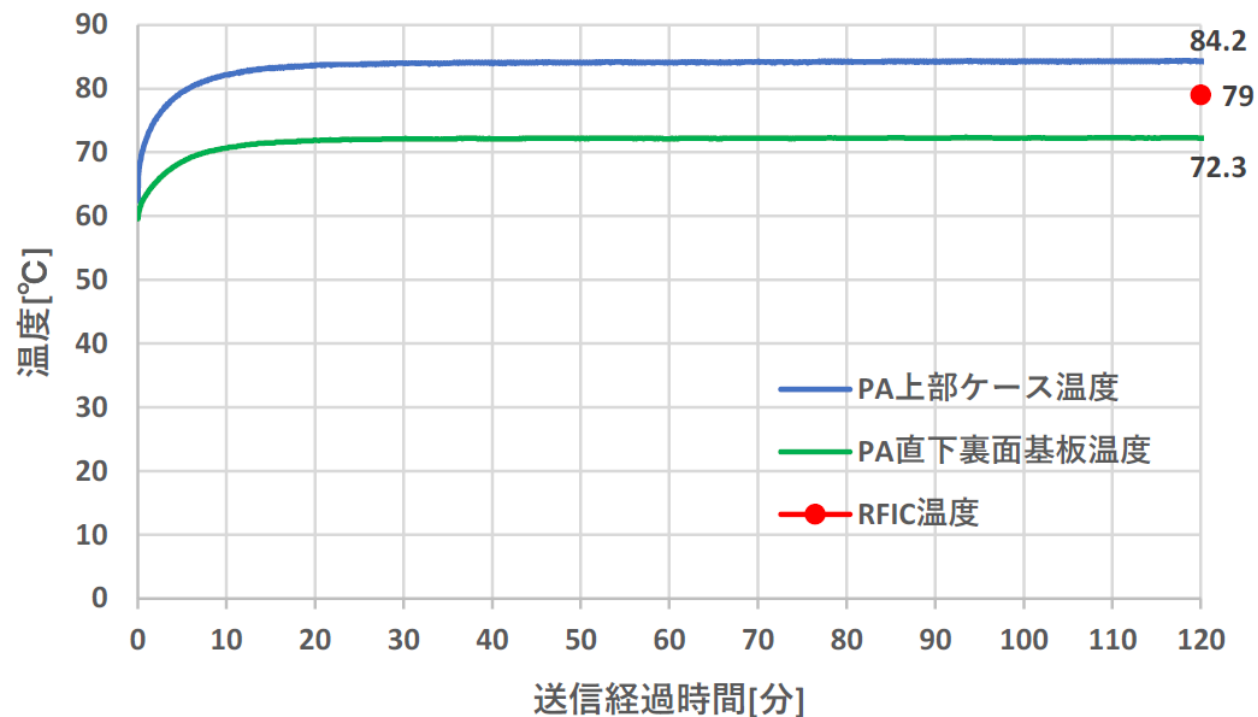


SAWフィルタ挿入後

■ 発熱・消費電力問題

- ファンによる冷却不要で、周囲温度60℃まで動作確認
- 1W送信時の消費電力は約6.5Wであり、約5.5Wが熱として消費されている
- 大部分はPA部による損失であり、効率向上が求められる

周囲温度60℃における発熱評価



- 920MHz帯WPTシステムの概要
 - 法改正
 - 電力伝送効率
- **送電側技術**
 - 送電アンテナ設計
 - 回路設計
 - **規格・規準**
- 受電側技術
 - アンテナ設計
 - 整流回路設計
 - 受電回路設計
- まとめ

■ 規準

- 電波法(無線設備規則)にて規定
 - 無線設備規則第49条の9第1号のハ など

■ 規格

- 2025年9月現在、標準規格は存在しない
- 1W パッシブRFID(移動体識別用無線設備) と仕様の大部分が共通
 - ARIB STD-T106[4] … 英語版は無料でダウンロード可能

■ 試験方法の例

- TELEC-T240[5]
 - 規準の各項目における測定方法が規定されている

■ 特に注意すべき点

- スプリアス(副次的に発する電波の許容値)
- 設計・実装・評価に十分な配慮が必要

表 4.1.1 不要発射の強度の許容値 (給電点)

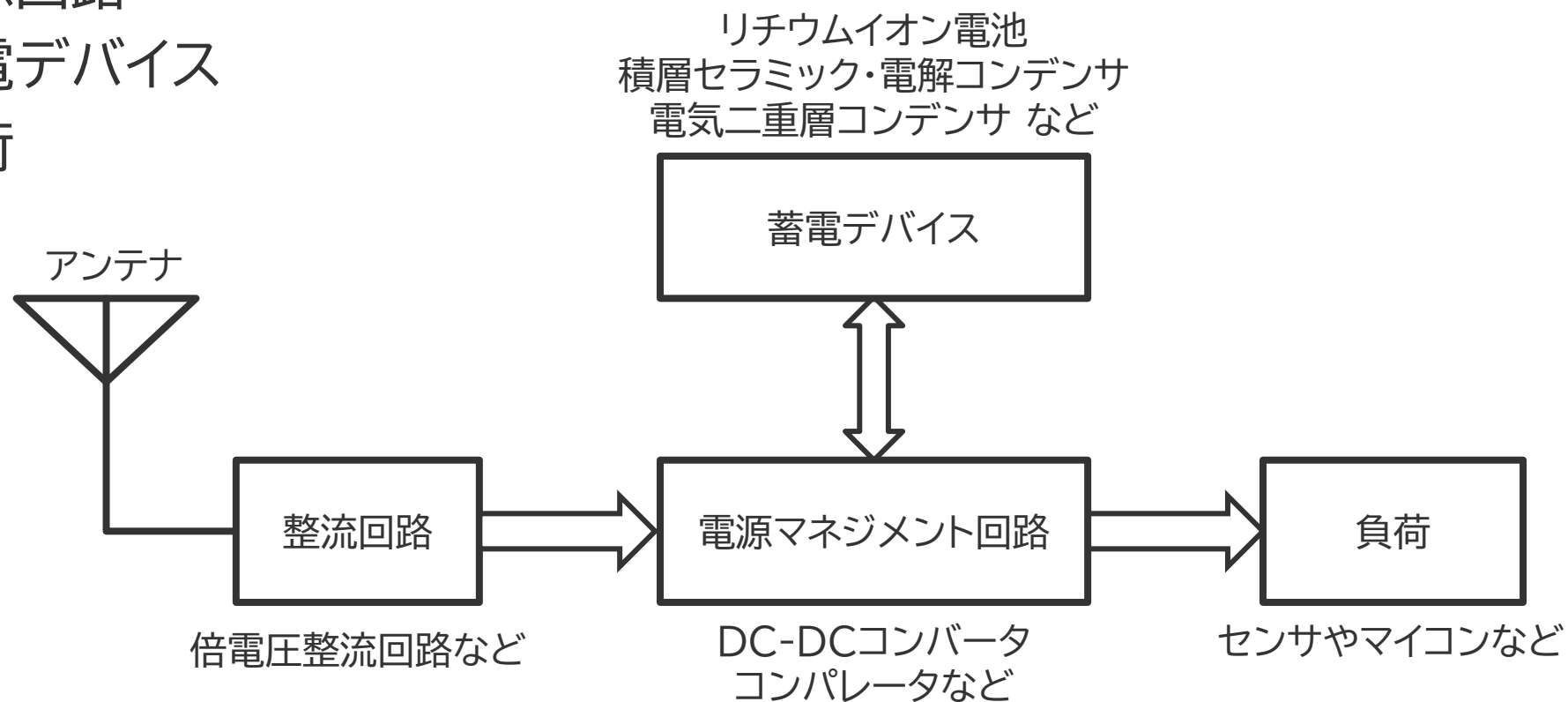
| 周波数帯 | 不要発射の強度の許容値 (平均電力) | 参照帯域幅 |
|--|-----------------------|--------|
| 710MHz 以下 | -36dBm | 100kHz |
| 710MHz を超え 900MHz 以下 | -58dBm | 1MHz |
| 900MHz を超え 915MHz 以下 | -58dBm | 100kHz |
| 915MHz を超え 915.7MHz 以下及び 923.5MHz を超え 930MHz 以下 | -39dBm | 100kHz |
| 915.7MHz を超え 923.5MHz 以下 | -29dBm | 100kHz |
| 930MHz を超え 1GHz 以下 | -58dBm | 100kHz |
| 1GHz を超え 1.215GHz 以下 | -48dBm | 1MHz |
| 1.215GHz を超えるもの | -30dBm | 1MHz |

「空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」のうち
「構内における空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの技術的条件」より抜粋

- 920MHz帯WPTシステムの概要
 - 法改正
 - 電力伝送効率
- 送電側技術
 - 送電アンテナ設計
 - 回路設計
 - 規格・規準
- **受電側技術**
 - アンテナ設計
 - 整流回路設計
 - 受電回路設計
- まとめ

■ WPTの受電側構成要素

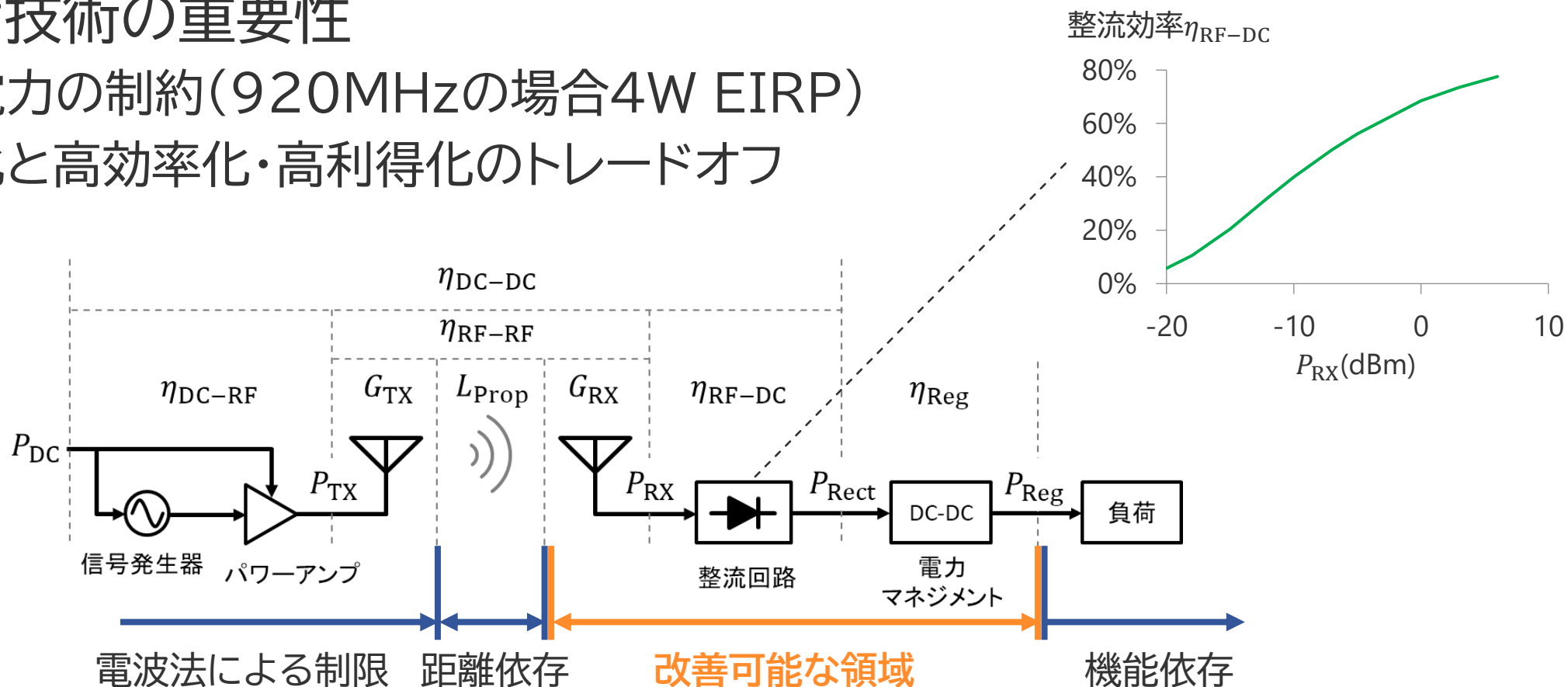
- 受電アンテナ
 - 整流回路
 - 電源回路
 - 蓄電デバイス
 - 負荷
- レクテナ



- 920MHz帯WPTシステムの概要
 - 法改正
 - 電力伝送効率
- 送電側技術
 - 送電アンテナ設計
 - 回路設計
 - 規格・規準
- **受電側技術**
 - **アンテナ設計**
 - 整流回路設計
 - 受電回路設計
- まとめ

■ アンテナ技術の重要性

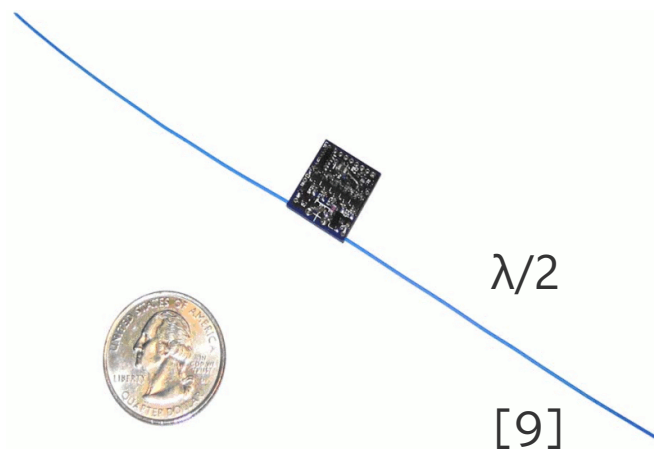
- 送電電力の制約(920MHzの場合4W EIRP)
- 小型化と高効率化・高利得化のトレードオフ



受電アンテナで如何に電力を集めるかが重要

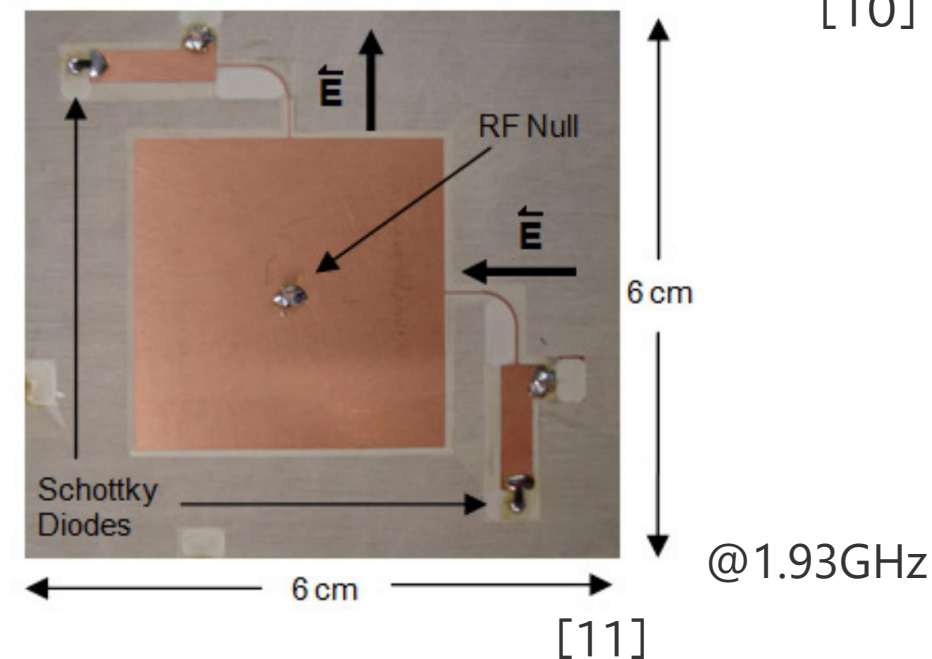
■ ダイポールアンテナ

- 小形
- 高効率・広帯域
- × 人体や金属近傍で動作不可
- × 小型化困難



■ パッチアンテナ

- 高利得
- 金属・人体近傍で使用可能
- × 面積が大きい
- × 高コストな材料が必要

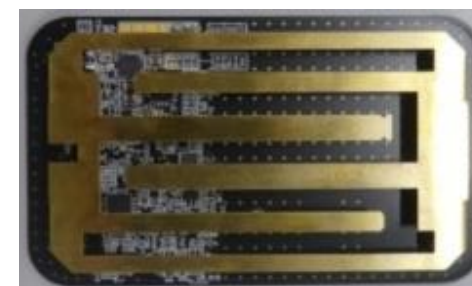
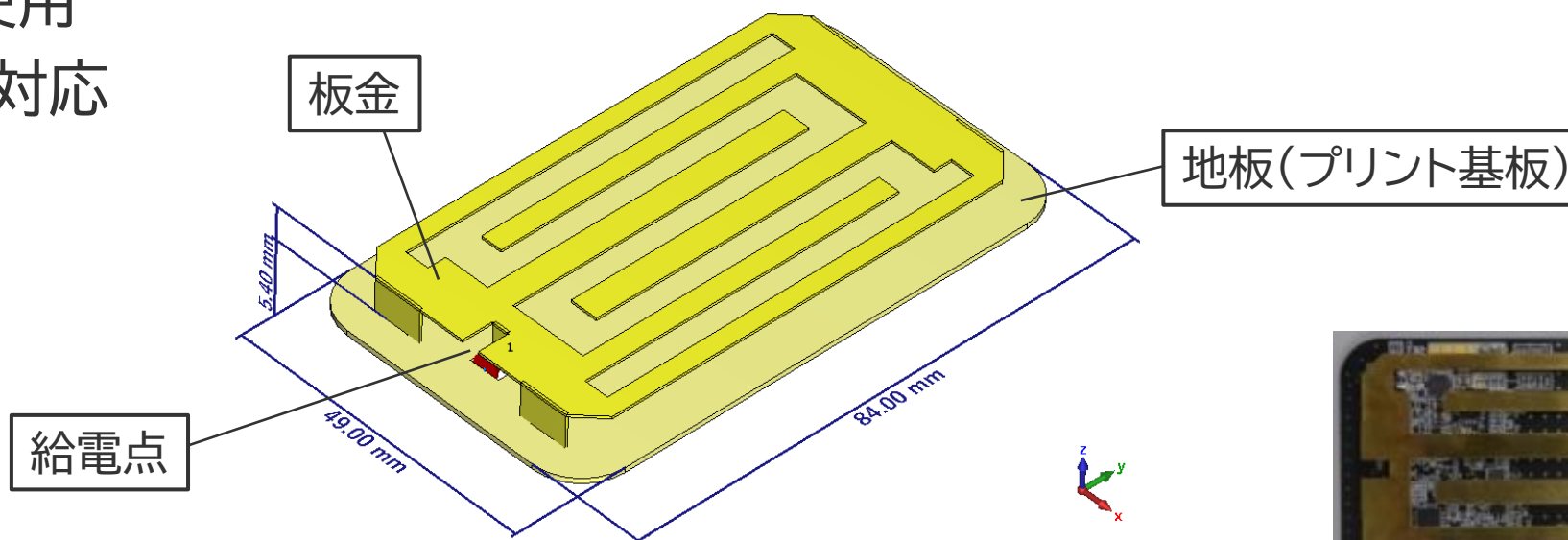


従来アンテナは人・モノ近傍での利用に不適

- 受電アンテナは規制なし
→環境に合わせた様々なアンテナが利用可能

- 例: 薄型キャビティスロットアンテナ

- 名刺サイズ
- 誘電体不使用
- 金属・人体対応



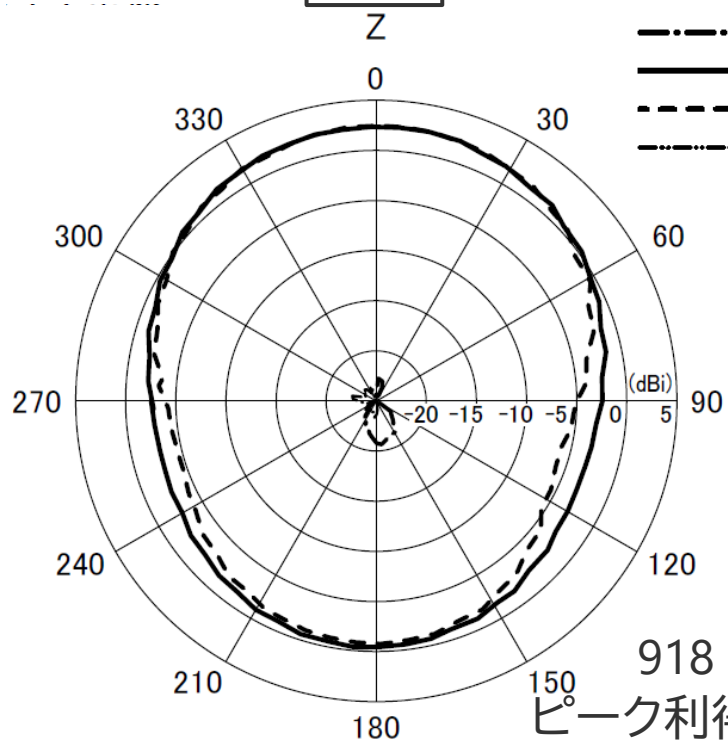
■ 周波数特性

- 50Ωに対して良好に整合が可能

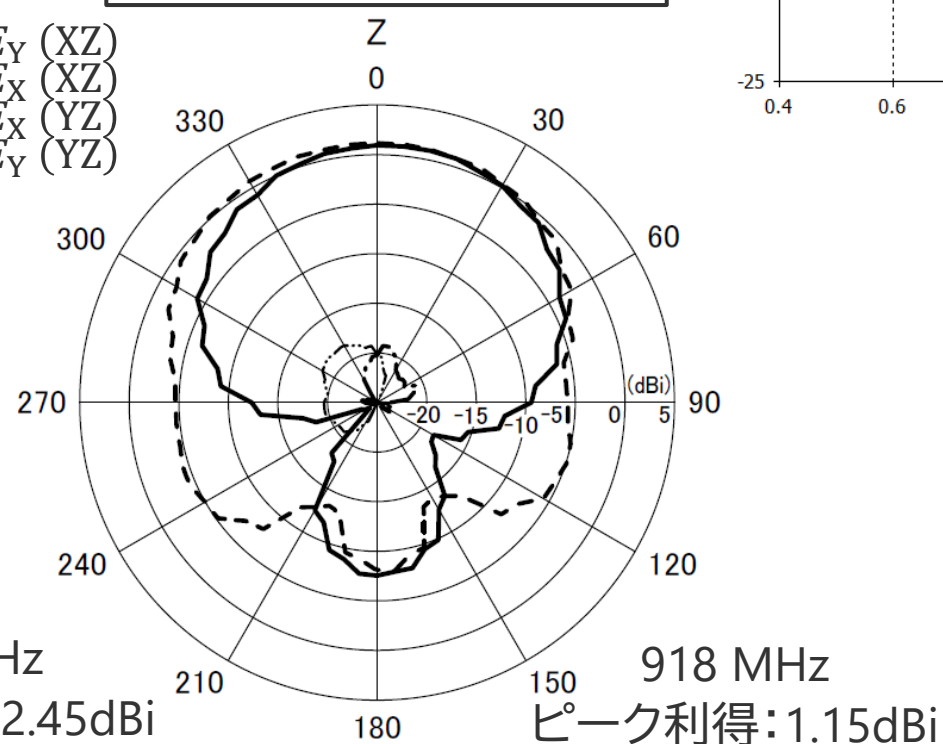
■ 指向性

- 人体近傍においても良好な特性を実現

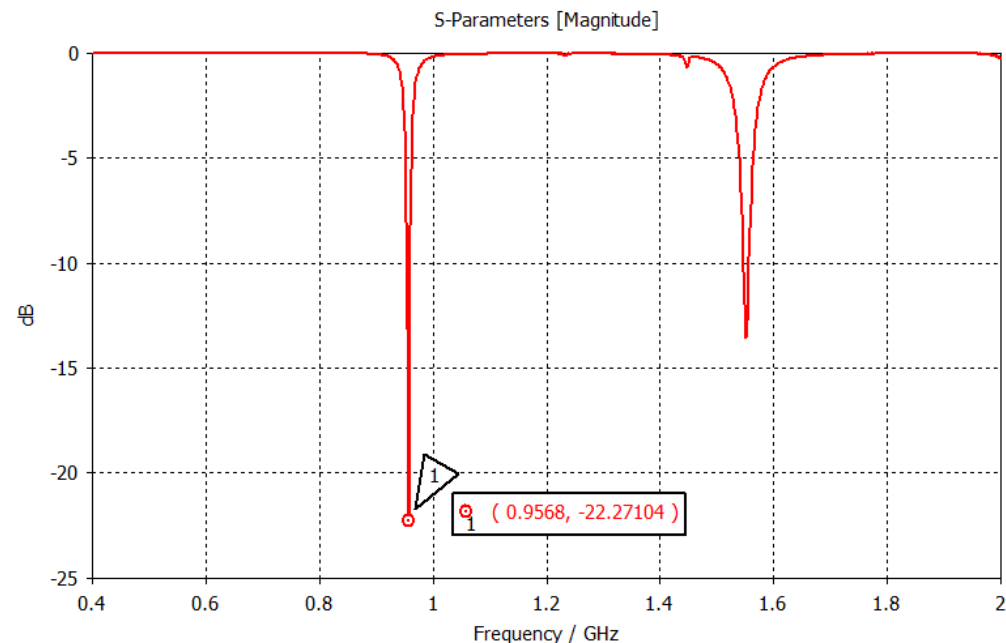
単体



人体ファントム近傍(5mm)

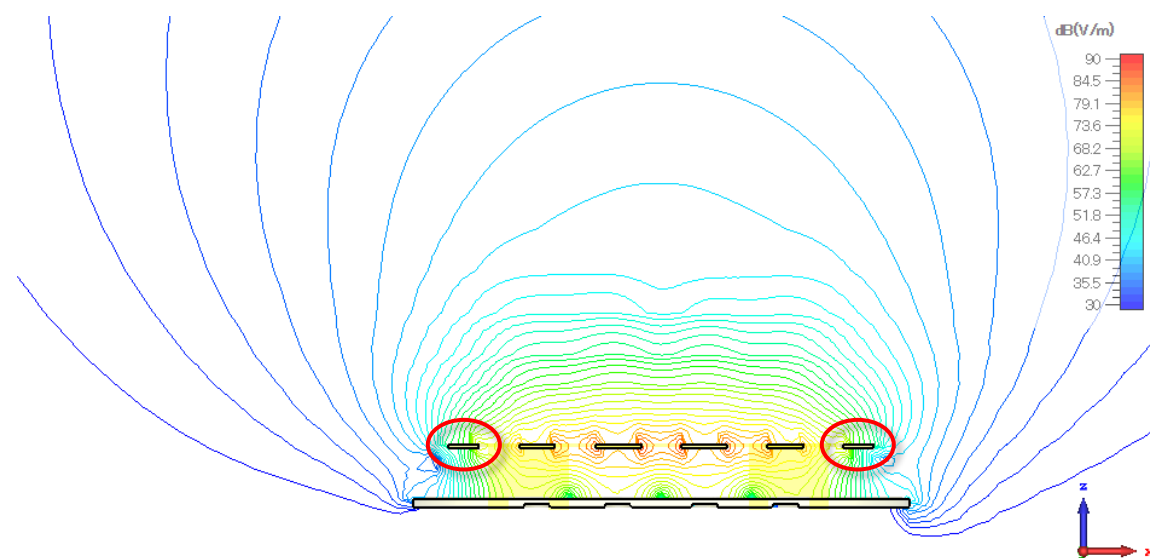
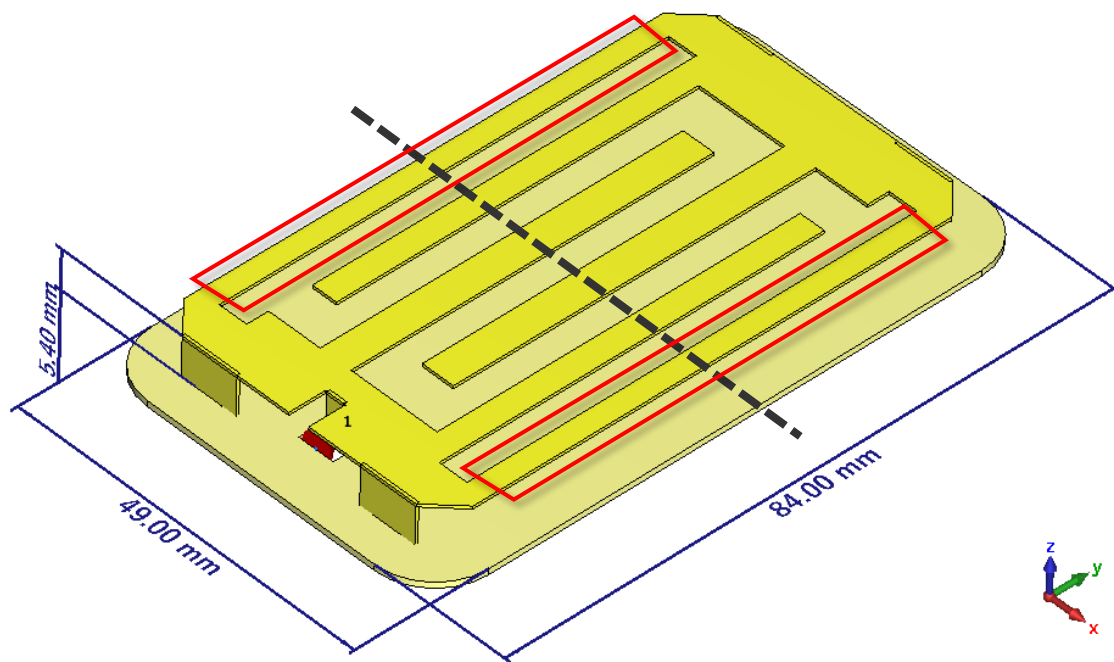


--- E_Y (XZ)
— E_X (XZ)
- - - E_X (YZ)
- · - E_Y (YZ)



■ 電界分布の考察

■ 人体・金属方向に漏れる電界



側面の導体により
電界が正面方向に集中
→ 人体近傍での良好な特性に寄与

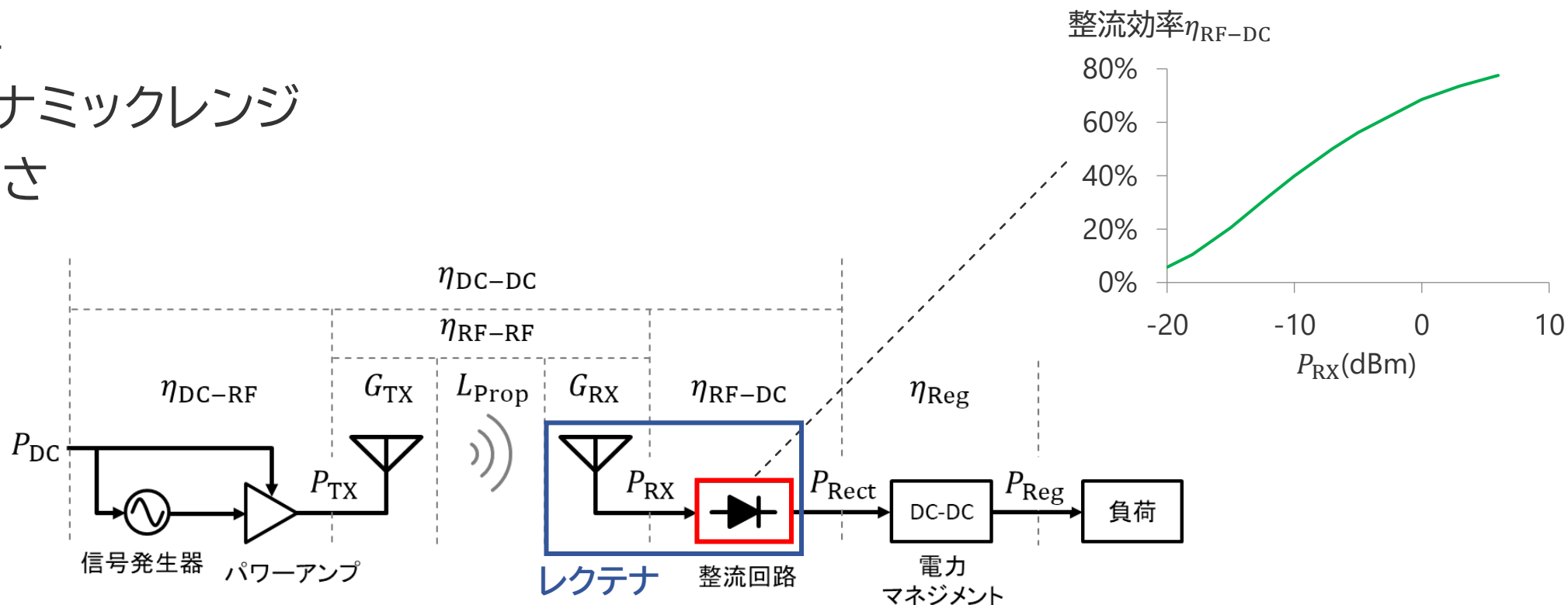
- 920MHz帯WPTシステムの概要
 - 法改正
 - 電力伝送効率
- 送電側技術
 - 送電アンテナ設計
 - 回路設計
 - 規格・規準
- **受電側技術**
 - アンテナ設計
 - **整流回路設計**
 - 受電回路設計
- まとめ

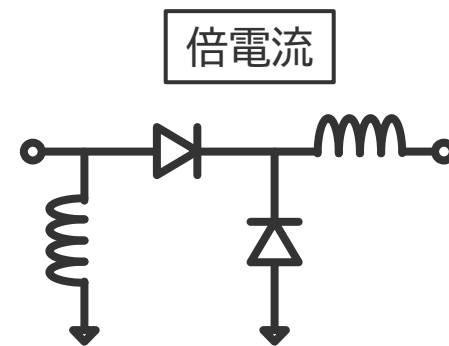
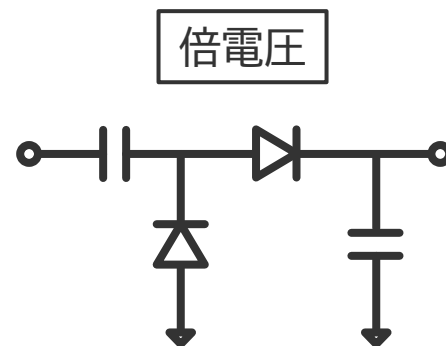
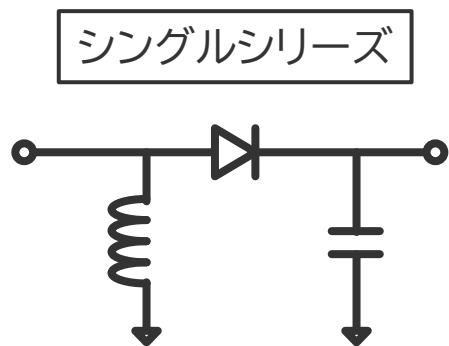
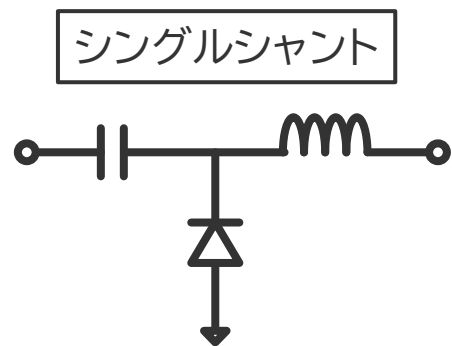
■ 整流回路とは

- アンテナで受電したマイクロ波を直流に変換
- アンテナと組み合わせたものはレクテナ (Rectenna) と呼ばれる

■ 整流回路の要件

- 効率
- ダイナミックレンジ
- 大きさ





メリット

- ダイオード数少
- 放熱が容易
- ダイオード数少
- アンテナと一体化時 DCカット不要

- 出力が高電圧
- 偶数次高調波処理不要

- 出力が大電流
- 偶数次高調波処理不要

デメリット

- 偶数次高調波の処理が必須
- 高効率化には分布定数回路が必要

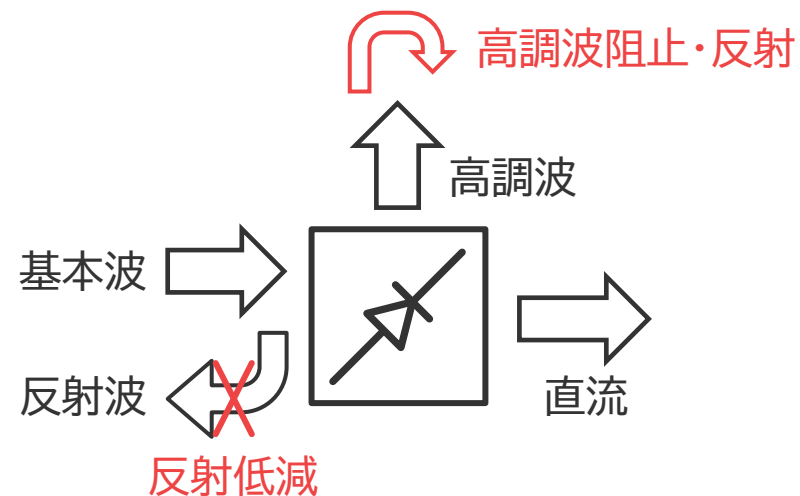
- 出力が高インピーダンス
- 入力が低インピーダンス

- 高いQ値のインダクタが必要

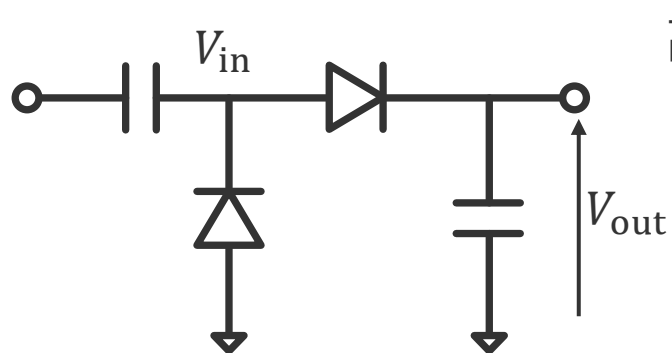
倍電圧整流回路は扱いやすく特性がよい

■ 周波数領域での考察

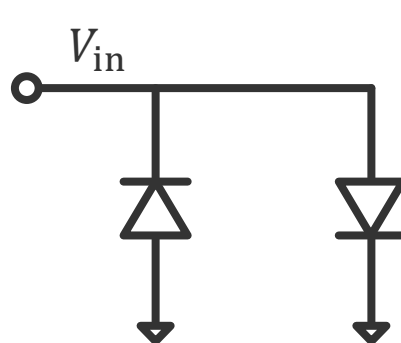
- 非線形素子に正弦波を印加すると直流と高調波が生じる
- 基本波の反射と高調波の漏洩を低減させることが重要



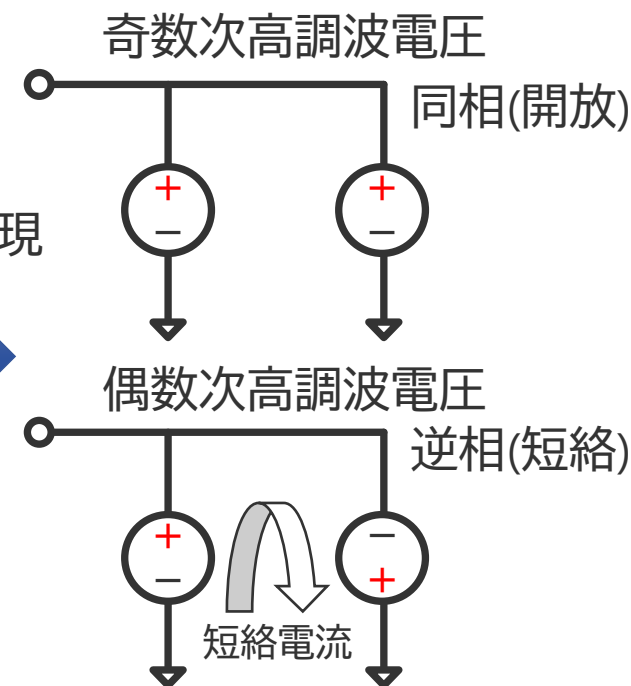
■ 倍電圧整流回路の場合



高周波における
等価回路



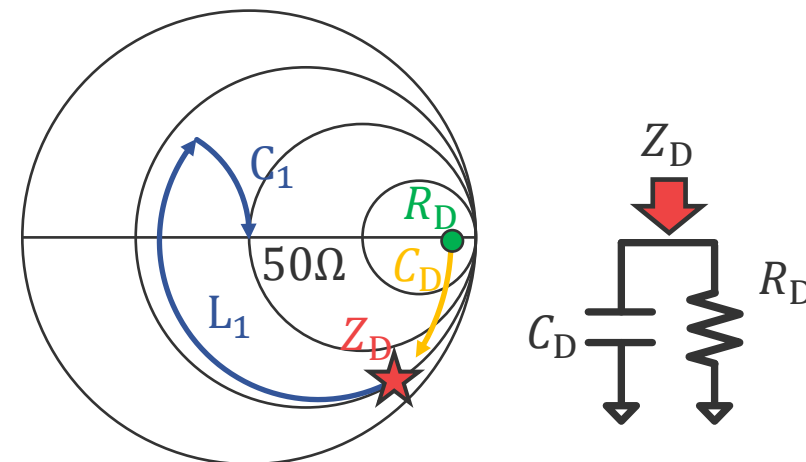
電圧源で表現



偶数次高調波が短絡となるのでF級動作となる
偶数次高調波は再放射されず高効率

■ 倍電圧整流回路の具体設計

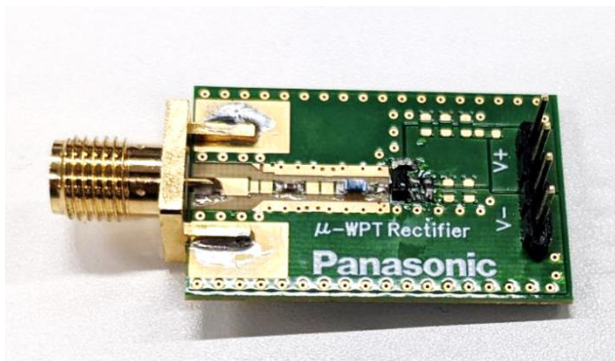
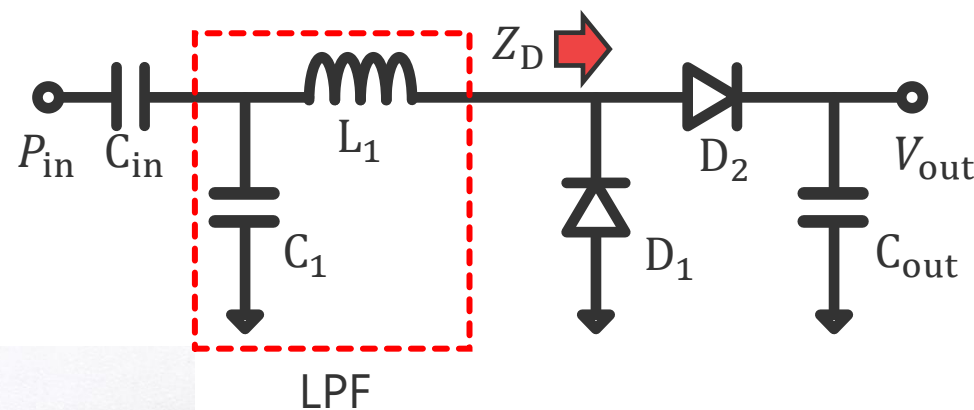
- 整流回路は抵抗成分と容量成分の並列で表現可能
- L型LC回路(LPF)により容易に50Ωへ整合



- LPF型とすることにより奇数次高調波の再放射を抑制可能

- チップLCで小型実装が可能

- 入力インピーダンスは50Ωに設計



■ 整流回路の測定時の変数

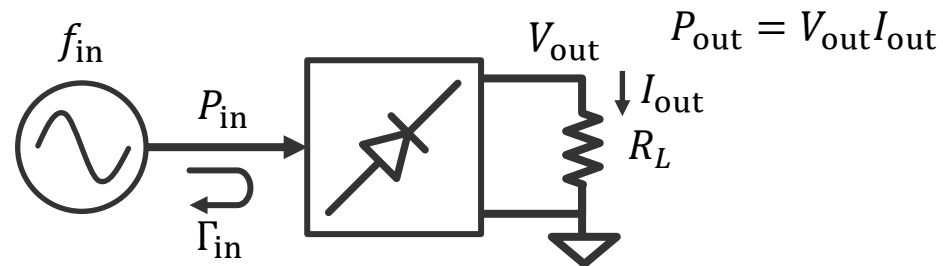
- 周波数 f_{in}
- 入力電力 P_{in}
- 負荷抵抗 R_L

■ 測定項目

- 入力インピーダンス(反射係数 Γ_{in})
- 出力電力 P_{out} (効率 η_{RF-DC})

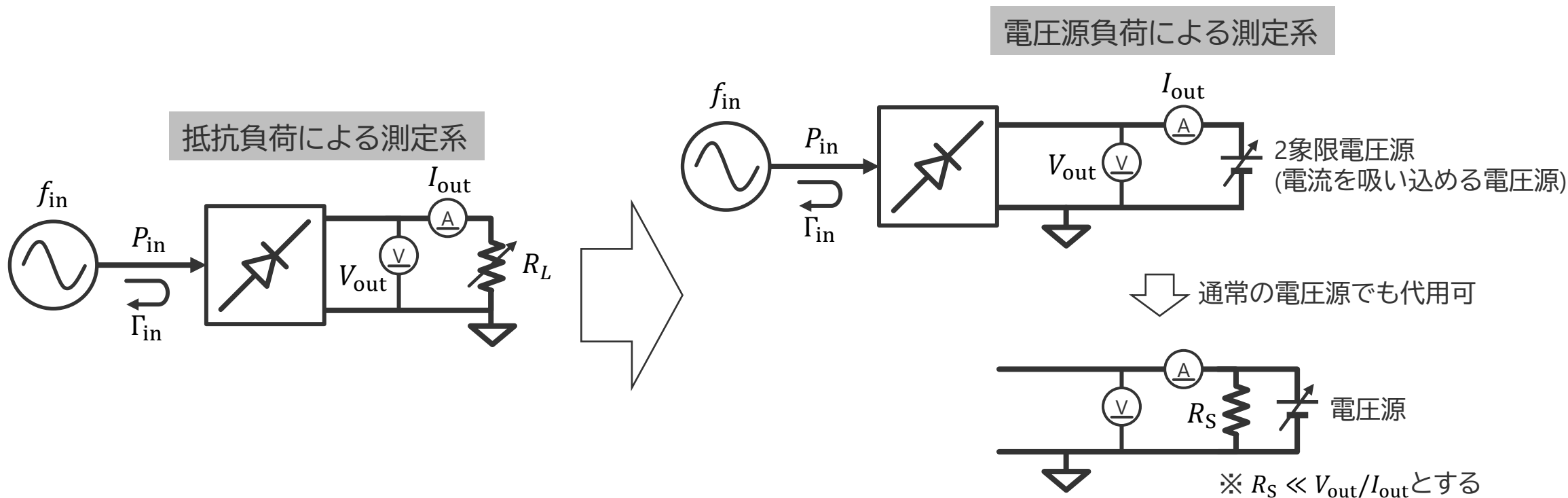
■ 測定方法

- SG等を用いて入力電力をスイープ
- 抵抗または電子負荷を用いて出力電力を評価
 - 入力電力・抵抗値の変更後、平滑コンデンサの電圧が安定するまで待つ必要がある
→ 評価に時間がかかる



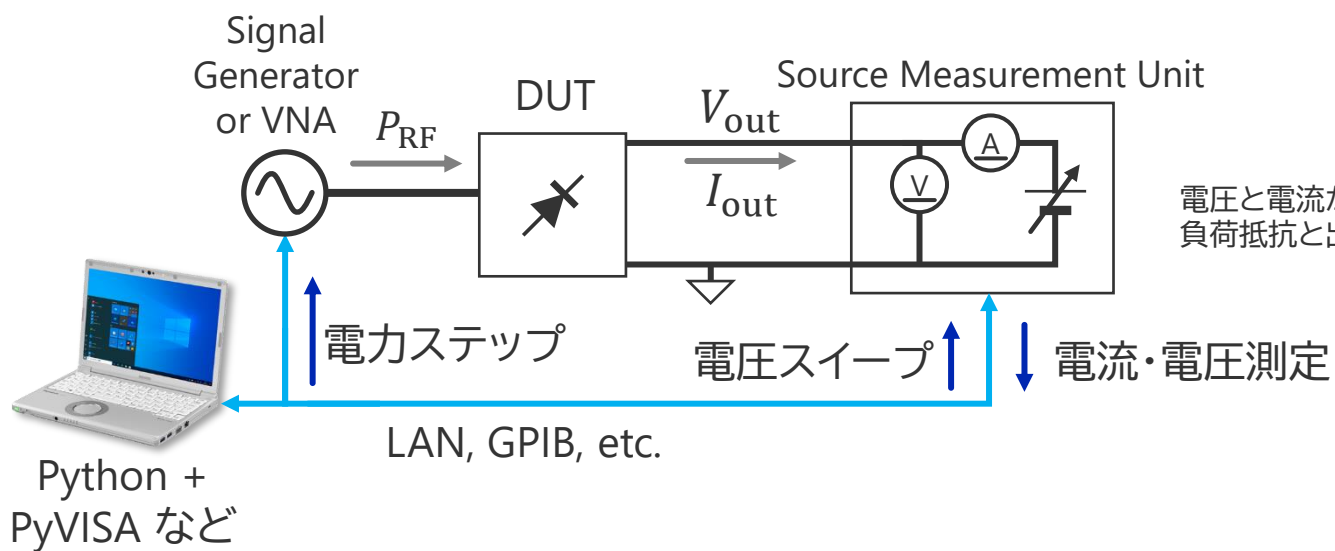
■ 高速な評価方法

- 電圧源を負荷として平滑容量を外部から充電する
→ 測定を高速化可能
- 可変抵抗や電子負荷は不要
- 自動化が容易

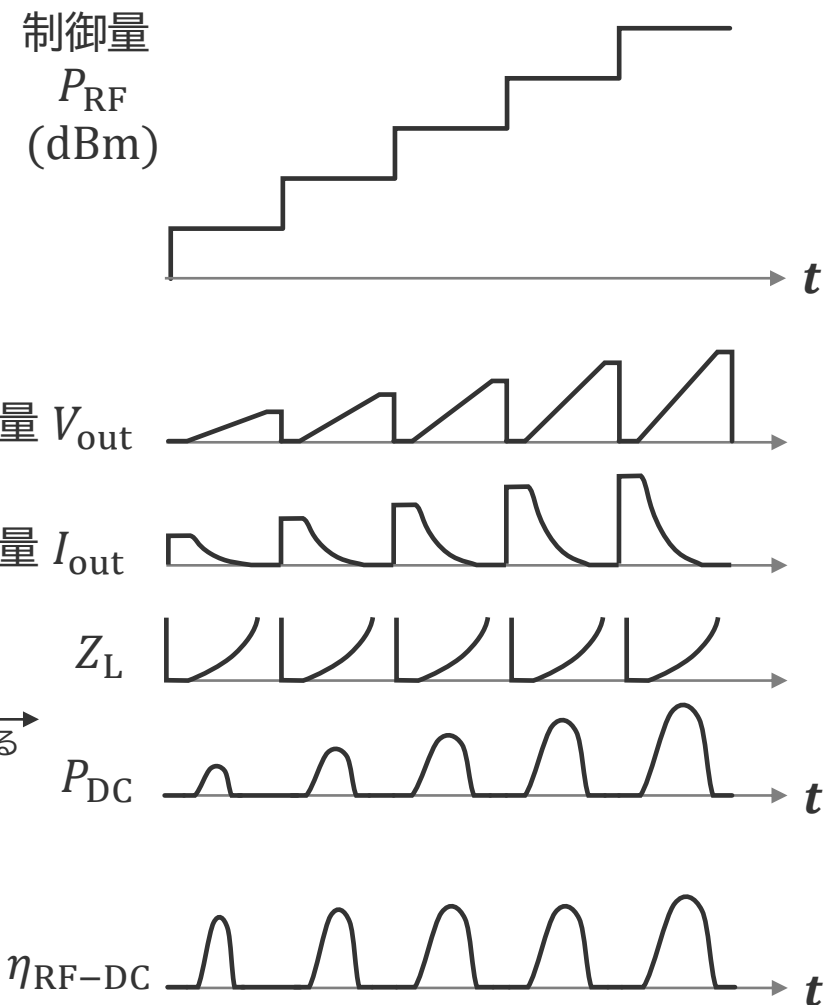


■ 自動測定システム

- 電圧源を負荷とすることで高速な自動測定系を構築可能

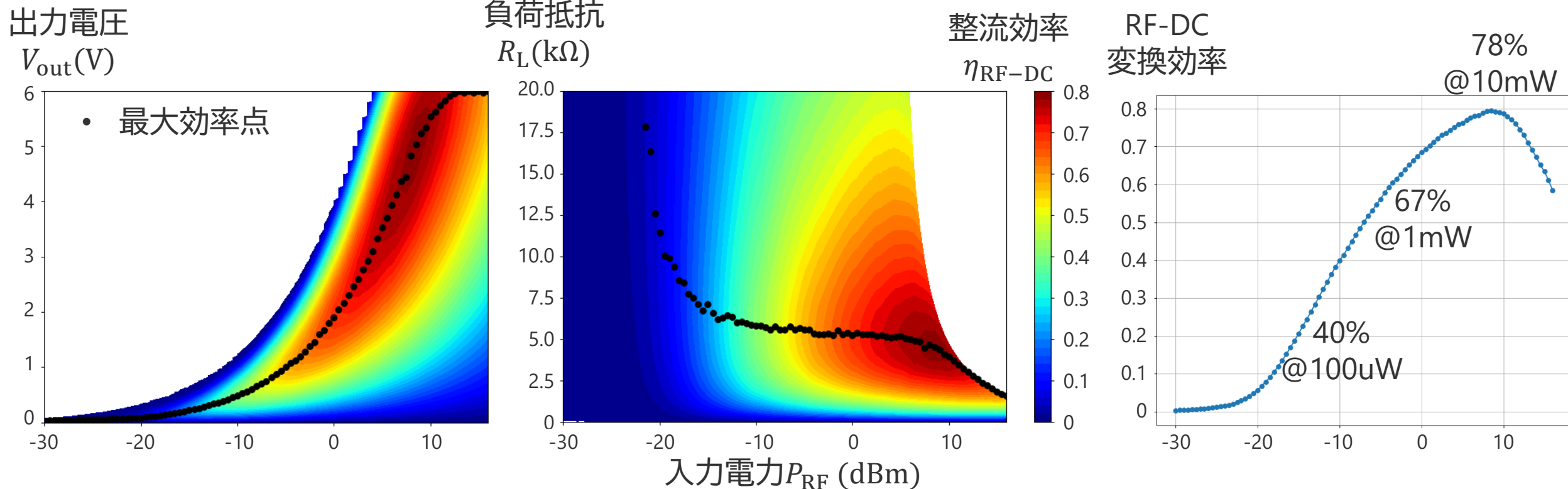


電圧と電流から
負荷抵抗と出力電力を計算する



■ 整流回路の特性

- 負荷に対する効率特性は2次元で表現できる

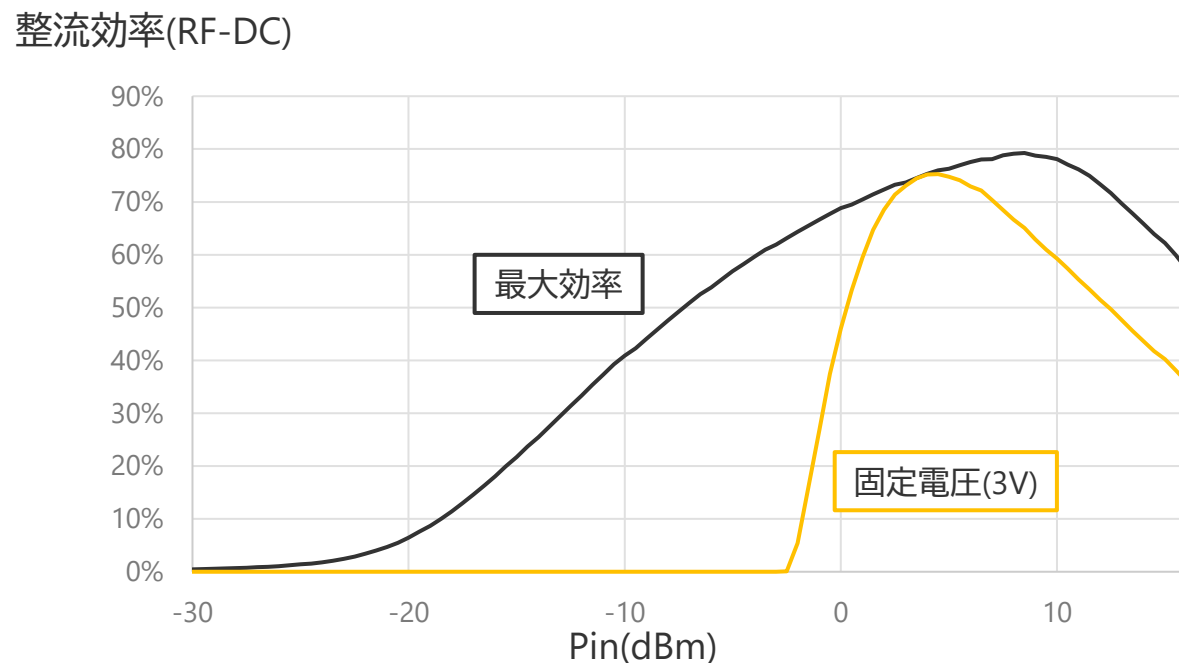
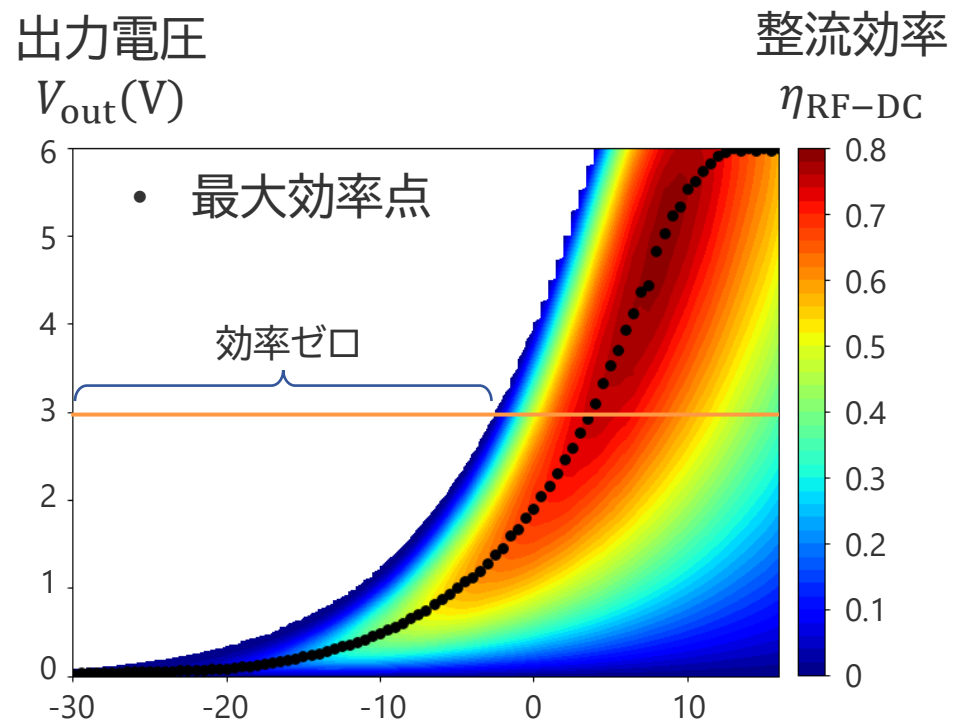


最大効率・最適負荷は入力電力に応じて変動する

- 920MHz帯WPTシステムの概要
 - 法改正
 - 電力伝送効率
- 送電側技術
 - 送電アンテナ設計
 - 回路設計
 - 規格・規準
- **受電側技術**
 - アンテナ設計
 - 整流回路設計
 - **受電回路設計**
- まとめ

■ 整流回路の特性

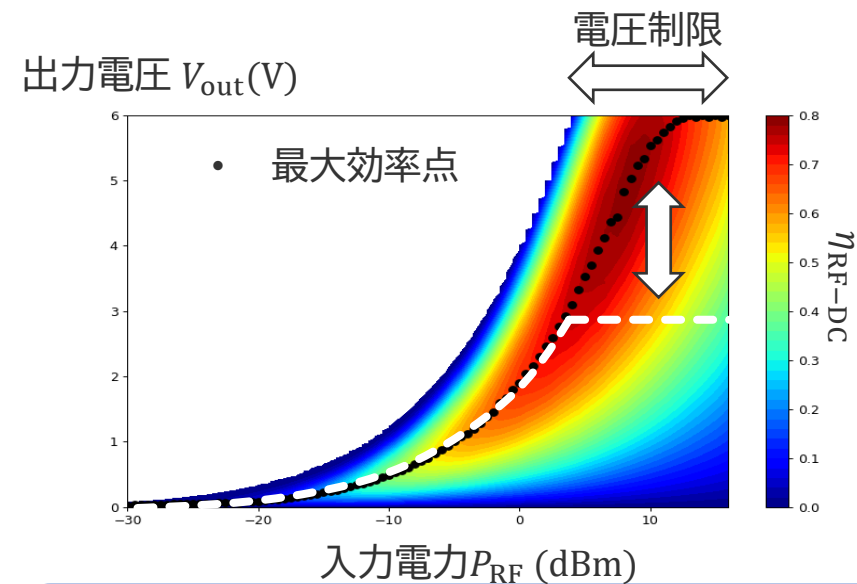
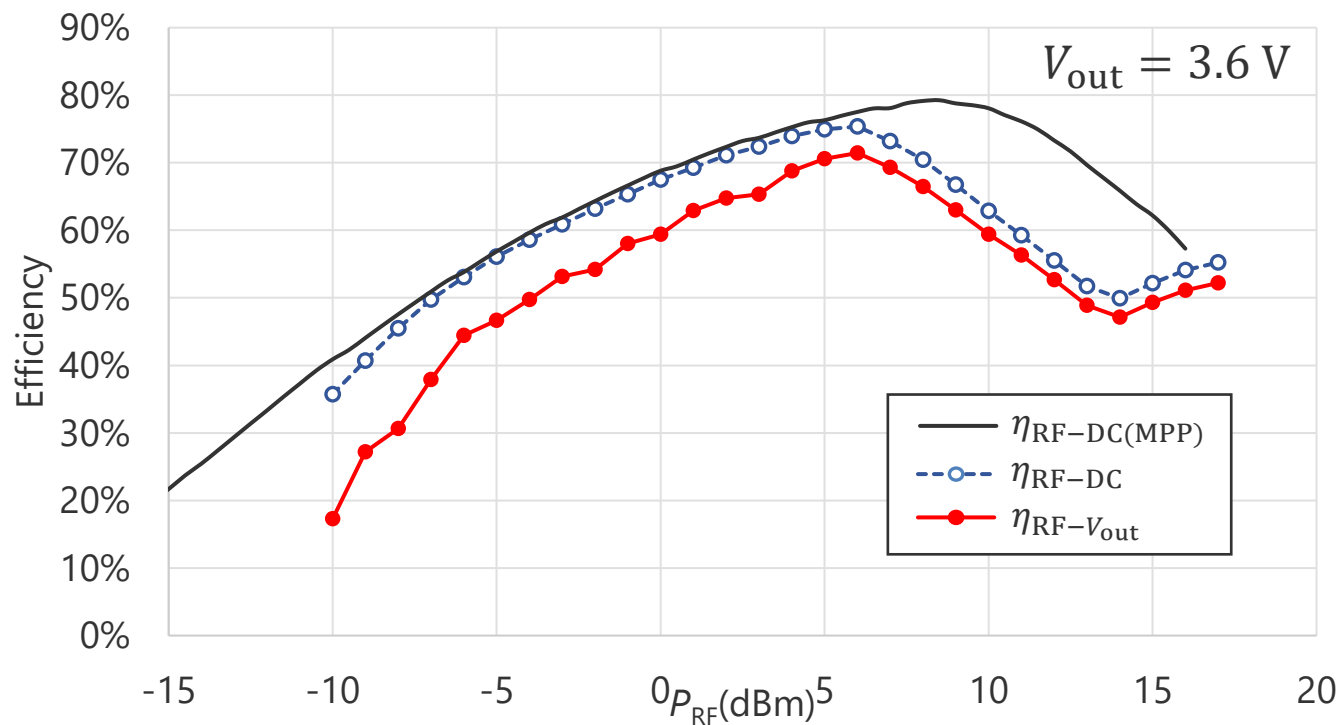
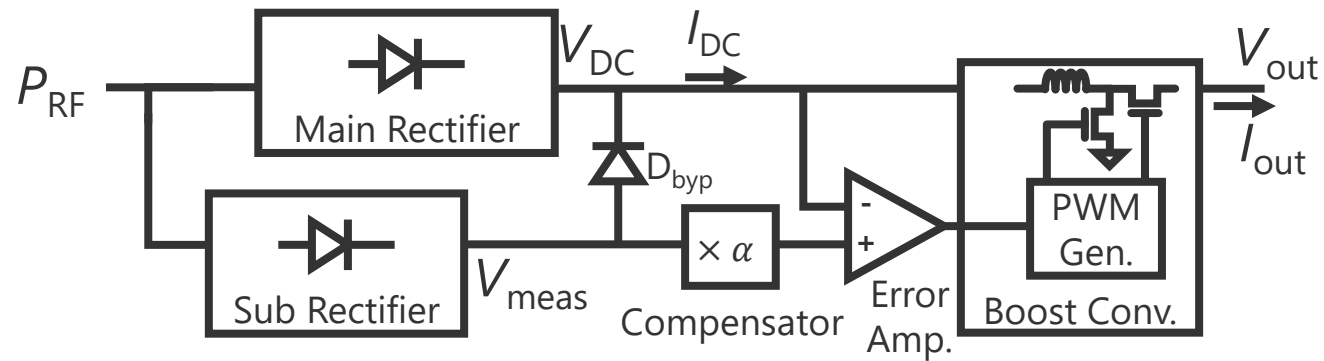
- 負荷に応じて変換効率が変動
- 例：出力電圧が3V固定の場合



入力電力に合わせて出力電圧(負荷インピーダンス)を最適に調整する必要がある

リアルタイムMPPT回路

- 入力電力の変化に追従し、整流回路の動作点を制御



20dB以上の範囲で
RF-DC-DC変換効率40%以上を実現

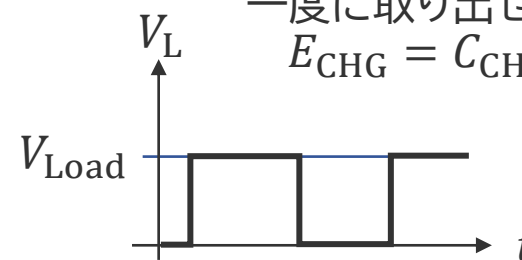
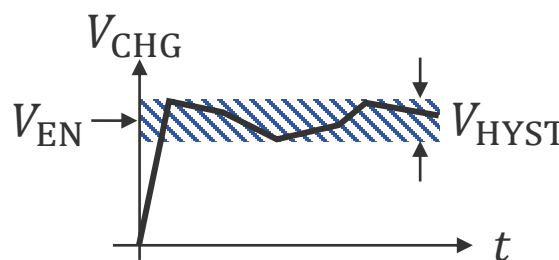
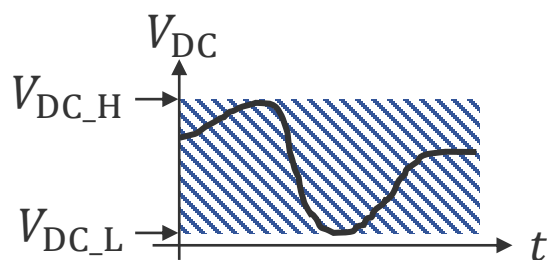
■ 課題

- 整流回路の出力電圧は入力電力に対して大きく変動する
- 一般に負荷の電力消費は一定ではなく時間変動する

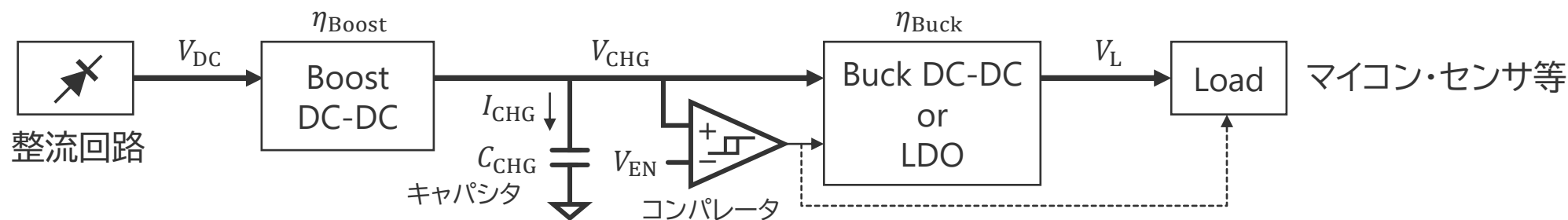
■ 課題を解決する回路構成

- 整流出力をDC-DCコンバータにより昇圧(または降圧)
- キャパシタに蓄電し間欠的に負荷に供給

- 入力電力の変動を負荷の動作間隔に変換
- 安定した電圧を負荷に供給

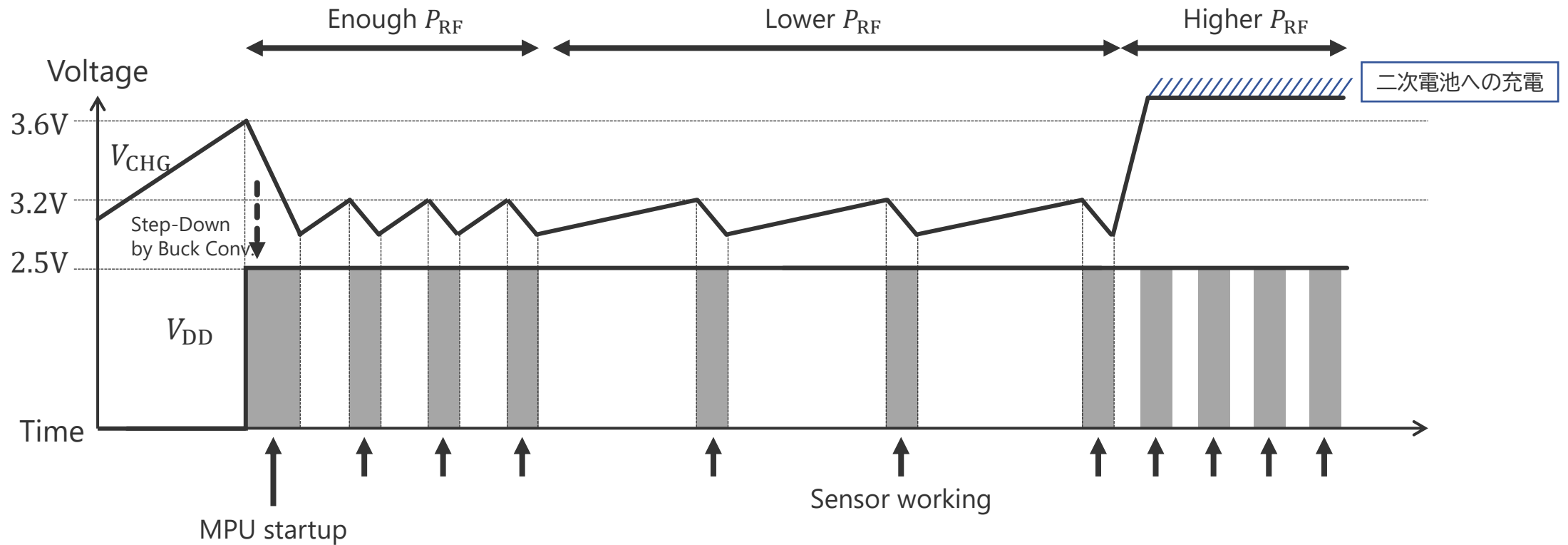


キャパシタから一度に取り出せるエネルギー
 $E_{CHG} = C_{CHG} V_{EN} V_{HYST}$



■ 動作シーケンス

- 入力電力に応じて動作を調整
- 駆動中のキャパシタ電圧を一定範囲に保つ
- 余剰電力を二次電池に蓄電



■ 送電側

- パッチアンテナをベースに、スロットにより小型化と低バックローブ化を実現
- シンセサイザ部に市販のトランシーバICを採用することで低コスト化
- スプリアス規格が厳しく、十分な対策と評価が必要

■ 受電側

- 金属上で動作可能な小型高効率アンテナ
- 倍電圧整流回路の動作原理・設計法・測定法
- MPPT回路の採用により整流回路の特性を引き出せる

■ 今後の展望

- 規制緩和により屋外利用・免許不要局が解禁され、WPTシステムの応用がさらに拡大する見込み
- WPT産業・研究への国内企業・大学の参入による国際競争力の拡大を期待

文献および著者紹介

- [1] 官報, “電波法施行規則等の一部を改正する省令,” 号外第112号, 令和4年5月26日.
- [2] 総務省, “情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班(第1回),” 平成31年2月20日.
URL: https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/kaisai/b_wpt_wg_01st_data.html
- [3] 総務省, “情報通信審議会 情報通信技術分科会 陸上無線通信委員会 空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム作業班(第11回),” 令和7年7月23日.
URL: https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/denpa_kankyuu/wpt/wpt_wg_11th_data.html
- [4] 標準規格の入手について(STD-T106) | 一般社団法人 電波産業会, URL: https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku_tushin/std-t106.html
- [5] 特定無線設備の技術基準 | TELEC 一般財団法人テレコムエンジニアリングセンター, URL: https://www.telec.or.jp/services/tech/criterion/t240_01.html
- [6] 池田 拓磨 ほか, “閉空間における複数負荷へのマイクロ波無線電力伝送の実験検討,” 電子情報通信学会 総合大会, B-20, Mar. 2021.
- [7] 濱政 光 ほか, “マイクロ波無線電力伝送を用いたアプリケーションに関する一検討,” 電子情報通信学会 総合大会, B-20-21, Mar. 2023.
- [8] 田中 勇気 ほか, “920MHz帯空間伝送型WPTシステムの開発,” 信学技報, vol. 125, no. 90, WPT2025-13, pp. 21-25, 2025年6月.
- [9] A. P. Sample, et al., “Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 57, no. 11, pp. 2608–2615, 2008.
- [10] “SMKが「CESイノベーションアワード」受賞ワイヤレス給電関連製品で | 電波新聞デジタル,” URL: <https://dempa-digital.com/article/254394>
- [11] T. Paing, et al., “Custom IC for Ultra-low Power RF Energy Harvesting,” 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, pp. 1239-1245, 2009.

田中 勇気 パナソニック ホールディングス株式会社
MI本部 マニファクチャリングソリューションセンター
実装技術開発部 設計技術課 リードエンジニア, tanaka.yuki012@jp.panasonic.com