

空間伝送型ワイヤレス電力伝送の干渉抑制・高度化技術に関する研究開発
R&D on Interference Suppression Technology and Advanced Technology for wireless power
transmission via radio frequency beam

研究代表者

向井 敬 電気興業株式会社
Takashi MUKAI DKK Co., Ltd

研究分担者

関野 昇^{†1} 大島 一郎^{†1} 佐藤 啓介^{†1} 三浦 進^{†1} 原 信二^{†2} 牛田 泰久^{†2} 作野 圭一^{†2}
丹波 憲之^{†2} 川村 博史^{†2} 安藤 裕二^{†2} 高橋 英匡^{†2} 新井 学^{†2} 水野 紘一^{†2} 伊東 健治^{†3}
野口 啓介^{†3} 津留 正臣^{†3} 坂井 尚貴^{†3} 分島 彰男^{†4} 横山 浩之^{†5} 長谷川 晃朗^{†5} 庄木 祐樹^{†5}
藤本 卓也^{†5} 江森 洋都^{†5} 二宮 康之^{†5} 松村 武^{†6} 板谷 聡子^{†6} 中島 健智^{†6} 古川 実^{†6}
大堀 文子^{†6} 大須賀 徹^{†6} 大西 健夫^{†6} 平栗 健史^{†7} 松田 崇弘^{†7} 木村 共孝^{†7} 丸田 一輝^{†7}
末松 憲治^{†8} 芝 隆司^{†8} 古市 朋之^{†8} 遠藤 哲夫^{†9} 花澤 理宏^{†9} 山口 晃治^{†9} 林 俊光^{†9}
崎原 孫周^{†9} 石島 透^{†9} 須賀 良介^{†10} 橋本 修^{†10} 本間 幸洋^{†11} 佐々木 拓郎^{†11}
片瀬 徹也^{†11} 山崎 高日子^{†11}

Noboru SEKINO^{†1} Ichiro OOSHIMA^{†1} Keisuke SATO^{†1} Susumu MIURA^{†1} Shinji HARA^{†2}
Yasuhisa USHIDA^{†2} Keiichi SAKUNO^{†2} Noriyuki TANBA^{†2} Hiroshi KAWAMURA^{†2} Yuji ANDO^{†2}
Hidemasa TAKAHASHI^{†2} Manabu ARAI^{†2} Koichi MIZUNO^{†2} Kenji ITOH^{†3} Keisuke NOGUCHI^{†3}
Masaomi TSURU^{†3} Naoki SAKAI^{†3} Akio WAKISHIMA^{†4} Hiroyuki YOKOYAMA^{†5} Akio HASEGAWA^{†5}
Yuki SHOKI^{†5} Takuya FUJIMOTO^{†5} Yoto EMORI^{†5} Yasuyuki NINOMIYA^{†5} Takeshi MATSUMURA^{†6}
Satoko ITAYA^{†6} Taketoshi NAKAJIMA^{†6} Minoru FURUKAWA^{†6} Fumiko OHORI^{†6} Toru OSUGA^{†6}
Takeo ONISHI^{†6} Takefumi HIRAGURI^{†7} Takahiro MATSUDA^{†7} Tomotaka KIMURA^{†7}
Kazuki MARUTA^{†7} Kenji SUEMATSU^{†8} Takashi SHIBA^{†8} Tomoyuki FURUICHI^{†8} Tetsuo ENDO^{†9}
Masahiro HANAZAWA^{†9} Koji YAMAGUCHI^{†9} Toshiteru HAYASHI^{†9} Sonshu SAKIHARA^{†9}
Toru ISHIJIMA^{†9} Ryosuke SUGA^{†10} Osamu HASHIMOTO^{†10} Yukihiro HOMMA^{†11} Takuro SASAKI^{†11}
Tetsuya KATASE^{†11} Takahiko YAMAZAKI^{†11}

^{†1}電気興業株式会社 ^{†2}東海国立大学機構 ^{†3}金沢工業大学 ^{†4}熊本大学
^{†5}株式会社国際電気通信基礎技術研究所 ^{†6}国立研究開発法人情報通信研究機構 ^{†7}日本工業大学
^{†8}東北大学 ^{†9}大成建設株式会社 ^{†10}青山学院大学 ^{†11}三菱電機株式会社
^{†1}DKK Co., Ltd. ^{†2}Tokai National Higher Education and Research System
^{†3}Kanazawa Institute of Technology ^{†4}Kumamoto University
^{†5}Advanced Telecommunications Research Institute International (ATR) ^{†6}National Institute of
Information and Communications Technology (NICT) ^{†7}Nippon Institute of Technology
^{†8}Tohoku University ^{†9}Taisei Corporation ^{†10}Aoyama Gakuin University
^{†11}Mitsubishi Electric Corporation

研究期間 令和4年度～令和7年度

概要

本研究開発では、干渉抑制と空間伝送型 WPT システムの高度化技術により、利用効率の向上を目指すものである。研究開発にあたっては、大容量・多数給電が可能なワイヤレス電力伝送システムを適切な電波環境を維持しつつ実現できるよう 3 つの要素技術に関して実施することで、他の無線局に与える干渉レベルを抑制しつつ給電能力を向上させ、現状の空間伝送型ワイヤレス電力伝送時に比して周波数利用効率を向上させる。(現行の WPT と比較したときに、他の無線システムとの共用条件を満たした上で、WPT の給電能力(時間当たり給電量)を 10 倍以上)

Abstract

This R&D project aims to improve frequency utilization efficiency through interference suppression and advanced technologies for spatial wireless power transfer (WPT) systems. By implementing three core elemental technologies to realize high-capacity, multi-device WPT systems while maintaining an appropriate radio frequency environment, we will enhance power delivery capabilities and improve frequency utilization efficiency compared to existing spatial WPT systems, all while suppressing interference to other radio stations. (Specifically, we aim to increase power delivery capacity per unit of time by at least 10 times compared to current WPT, while satisfying sharing conditions with other wireless systems.)

1. まえがき

電波より電力を伝送する空間伝送型ワイヤレス電力伝

送システム(以下、「空間伝送型 WPT システム」という。)は、配線が不要で多数の機器に給電が可能であるため、IoT

センサ等の給電無線化ニーズ等の高まりを受け、920MHz帯、2.4GHz帯、5.7GHz帯の各周波数帯域を使用するシステムにおいて、屋内限定で使用可能とすることや出力制限等、一定の制約の下における技術的条件の答申（「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」答申書（令和2年7月14日））を受け、制度化が図られた。

最近では、5Gの高速・低遅延な無線通信技術を活用した多様なモバイル機器や、多数のIoT向けセンサ等に対し、利用環境に制限のなく給電可能なWPTの実現に期待が高まっている。これに伴い、ワイヤレス電力伝送技術についても現行システムより大容量化・多数化を図った給電方式の確立が求められている。しかし、空間伝送型WPTの社会実装と普及拡大に向けては、依然として以下の課題が存在する。

- ① 共存性の欠如：人体や他の無線通信システムとの共存が困難であり、導入場所が限定される。
- ② 運用ルール不在：メディアアクセス制御（MAC）の規定がないため、同一空間内における複数システムの併存ができない。
- ③ 安全性評価の不透明性：人体や無線通信への影響を正確に推計する手法が未確立であり、安全性の担保が困難である。
- ④ 環境評価手法の未整備：周囲の電波環境を評価する標準的な手法がなく、新規導入先での影響予測が極めて難しい。

本研究開発では、干渉抑制と空間伝送型WPTシステムの高度化技術により、これらの課題を解決し、利用効率の向上を目指すものである。研究開発にあたっては、大容量・多数給電が可能なワイヤレス電力伝送システムを適切な電波環境を維持しつつ実現できるよう3つの要素技術に関して実施することで、他の無線局に与える干渉レベルを抑制しつつ給電能力を向上させ、現状の空間伝送型ワイヤレス電力伝送時に比して周波数利用効率を向上させる。（現行のWPTと比較したときに、他の無線システムとの共用条件を満たした上で、WPTの給電能力（時間当たり給電量）を10倍以上に向上。技術課題ア、イ、ウによる、給電の大容量化・多数化、送電スケジューリング等の向上による達成を想定。）



図 1.1 目標とするユースケースと研究課題の位置づけ

2. 研究内容及び成果

2.1. 研究課題ア「新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術」

2.1.1. 概要、到達目標及び達成状況

本研究課題では、24GHz帯を用いたUSB Type-C相当（7.5W）の給電実現および利用範囲の拡大を目的とし、評価基盤の整備と制度化・標準化を推進した。

研究成果の要点は、制度化・標準化の着実な進展、高効率な送受電性能の実証、ならびにシステム共用と装置最適化の達成である。本研究により、実用化の障壁であった制度および熱管理上の課題が大きく改善され、屋外や有人環境におけるWPTシステムの社会実装に向けた基盤が整った。一方で、24GHz帯の実用化に向けた新たな課題も抽出された。今後は、これらの解決に向けて研究開発をさらに加速させる。

2.1.2. 研究課題ア-(a)-1 「WPTシステム構成設計と全体最適化」

○研究開発の背景と管理体制

本サブテーマでは、要素技術の統合・体系化を図るため、独自の「成果のロードマップ（成果の木）」を策定した。設定したマイルストーンに基づき計画的な進捗管理を徹底した結果、当初目標に合致する成果を得た。

○技術的成果：給電能力の飛躍的向上

各要素技術の相乗効果により、現行システムを大幅に上回る給電性能を実証した。

- ・給電能力の向上：給電電力の4.1倍向上と4倍効率化を達成。
- ・総合評価：他の研究課題成果の統合により、時間当たりの給電能力を従来比で合計16倍に向上させることに成功した。

○社会実装に向けた課題の整理とロードマップ

研究終了後の円滑な社会実装を見据え、以下の4項目を軸としたロードマップを制定し実施した。

- ・技術・製造：次世代技術の確立、デバイスの量産化およびサプライチェーンの構築。
- ・運用・標準：設計・運用手法の標準化。
- ・安全性：人体曝露や干渉低減を含む安全性評価基準の策定と環境構築の標準化。
- ・制度：各周波数帯の特性に応じた利用環境の整備。

○制度化・標準化に向けた具体的取組と進捗

WPT普及に向け国内外で規制緩和・標準化を主導。BWFを通じ技術的条件の合意形成を推進し、国内では920MHz帯や24GHz帯の標準化に着手した。また、ITU-R等への参画により国際ルール形成に寄与した。

○今後の展望

本研究により、高効率な給電技術の確立と制度的基盤の整備が大きく進展した。今後は、研究過程で明確となった量産化コストの低減や安全性の理解といった課題に対し、策定したロードマップに基づき、課題の着実な解決に向けて取り組む。

2.1.3. 研究課題ア-(a)-2 「WPTシステム全体の定量的評価」

本課題では、WPTの実用化および普及を目的とし、実証試験の実施、干渉評価システムの構築、ならびに実証フィールドでの統合評価を通じた制度化・標準化に向けた活動を推進した。

○実証評価試験と標準化に向けた調整

研究課題ア-(a)-1と連携し、外部機関やメーカーとの連携を通じて研究成果の公開、評価パラメータの定量評価に向けた関係機関との調整を実施した。

具体的には、4年間の実証期間において、計4バンド・32種類の既存無線システムを対象とした実証評価試験を遂

行した。本試験により、各無線システムへの干渉影響を詳細に把握するとともに、許容基準値の策定等、制度化に向けた技術的根拠を明確化した。

表 2.1.3.1 実証実験を実施した被干渉無線システム

周波数帯	被干渉の無線システム	種類	備考
920MHz帯	・高圧MCAシステム移動局 ・デジタルMCAシステム移動局 ・RFID特定小電力無線局システム ・RFIDアレータリ、テレセント ・ローカルデータ伝送用無線設備	2機種 3機種 3機種（3メーカー） 3機種（3メーカー）	
2.4GHz帯	・2.4GHz帯無人移動体画像伝送システム ・N-STAR携帯移動局 ・2450MHz帯帯内無線局（特定小電力） ・無線LANシステム	1機種 1機種 2機種（2メーカー） 3機種	ATR暗室 ATR暗室
5.7GHz帯	・5.7GHz帯無人移動体画像伝送システム ・無線LANシステム ・気象レーダシステム	1機種 3機種 1機種	筑波気象研究所
24GHz帯	・自動車用車両検知レーダシステム ・24GHz帯レーダモジュール ・移動体検知センサ ・空対空探知レーダ	2機種（2車両）/1システム 3機種 3機種 1機種	JARI施設 つば/城里 伊丹空港

○干渉評価システムの構築と検証

実運用環境を想定した評価手法として、JWPT と連携し、今後設置される WPT 局に適用可能な「干渉評価システム」の構築を行った。本システムの活用により、周辺無線環境に対する影響の定量的な評価が可能となり、より信頼性の高い運用調整プロセスの確立に寄与するものである。



図 2.1.3.1 WPT による干渉影響コンタクト図の例

○実証フィールドによる成果確認

開発された各要素技術を統合的に評価するため、実証フィールドでの成果確認を実施した。ここでは、個別の技術評価に留まらず、各評価手法の連携を図ることで、システム全体としての整合性を検証し、フィールド実証を通じて、実運用環境における技術の有効性を最終的に確認した。

2. 1. 4. 研究課題ア-(b)-1 「高出力鋭角ビームの送信技術」

24GHz の可搬型 WPT 送電装置の高出力化装置を試作した。256 素子構成で空中線電力 12.85W を実現し、高出力かつ鋭角ビーム構成を実現した。なおアンテナ内で 2 分岐構成としているため、論理的には 2 倍の約 25W まで電力拡大が可能となる。図 2.1.4.1 に、アンテナから 0.5m 離れた 10cm 角の平面における電界分布を示す（シミュレーション値）。さらに可搬型 WPT 装置として、移動ロボット（AGV）に搭載した形で、PC で WPT の指向性を自由に制御できるようにした。ロボットの移動と指向性の制御の組み合わせにより、給電範囲の拡大が確認できた。

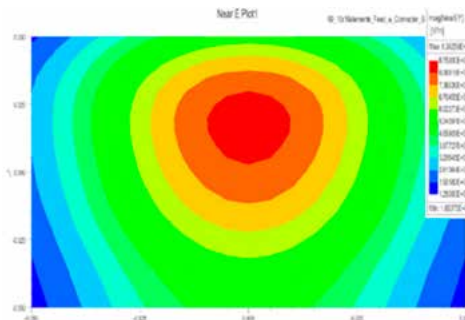


図 2.1.4.1 256 素子アンテナにより 0.5m 地点での電界の様子（シミュレーション）

2. 1. 5. 研究課題ア-(b)-2 「高効率パワーアンプ IC に関する研究開発」

GaN HEMT プロセス (Lg=0.1μm) を用いて、出力 1W、ドレイン効率 60%、電力負荷効率 51% のパワーアンプを実現し、電力損失を従来比 16.6%削減した（目標 15%）。

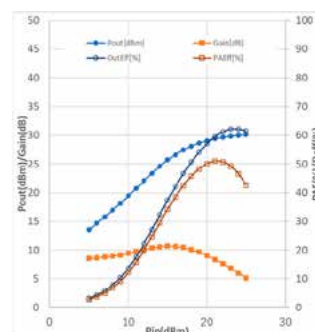


図 2.1.5.1 試作パワーアンプ IC の入出力特性

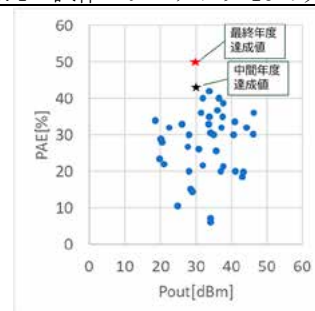


図 2.1.5.2 他機関発表パワーアンプ IC との特性比較

2. 1. 6. 研究課題ア-(b)-3-1 「大電力高効率受電レクテナに関する研究」

本研究課題では、USB 相当の DC 電力 7.5W 以上を出力可能なレクテナアレーを実現することが目標である。これに適用する 24GHz 帯 1WGAs レクテナの開発を行った。図 2.1.6.1 に構成を示す。

特長は以下の通り：

- (1) GaAs SBD よりも高電流密度である GaAs E-pHEMT により Gated anode diode (GAD) を構成し、これを整流用ダイオードとして用い、大電力化した。
- (2) アンテナと整流用ダイオードを直接接続する Diode on Antenna (DoA) 構成を適用し、回路損失を抑制。世界トップの整流効率 72.7%@入力電力 1W を得た。
- (3) GaAs MMIC 上のループアンテナとワイヤアンテナを電磁結合させ非接触給電を実現。アンテナとダイオードの接続損失を抑制し、放射効率 95%、利得 8.1 dBi を得た。
- (4) ワイヤアンテナを窒化アルミニウム基板に構成し、その上にレクテナ MMIC を搭載する放熱構造とした。

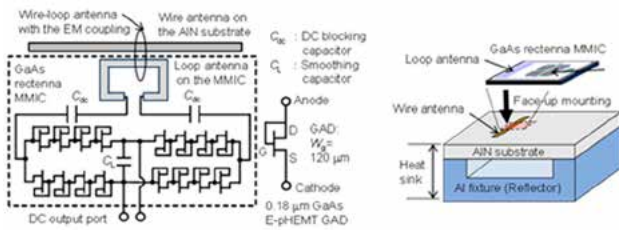


図 2.1.6.1 24GHz 帯 1W レクテナの構成

このレクテナにより、16 アレーを構成し、24GHz 帯電力 15.9W 照射時に DC 出力 11.4W (効率 72%) を得た。さらにこれを用い、電気興業製 1024 素子アレーアンテナ (EIRP: 82dBm) と対向させ、DC 出力 7.58W を得、所期の目標を達成した。

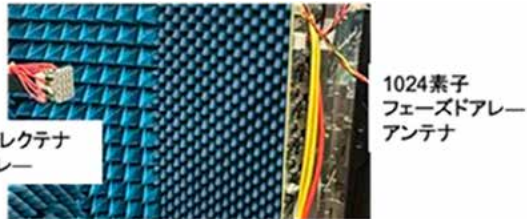


図 2.1.6.2 24GHz での無線電力伝送実験

大電力受電時に課題となる発熱を抑え、高効率に動作するレクテナ実装技術の高度化に取り組んだ。具体的には、GaN 素子をグラファイトおよび AlN+グラファイト複合構造へ安定に実装する圧着技術を確認するとともに、凹凸のある基板にも対応できる専用のチップ押し付けジグを開発した。その結果、10W 級 GaN 素子において、従来の AuSn ソルダ接着と比べて約 25% の熱抵抗低減を確認した。さらに、複合構造基板は AlN 単体より温度上昇を抑えられることもシミュレーションで示され、受電レクテナの高出力化・高信頼化に有効な基盤技術を得た。

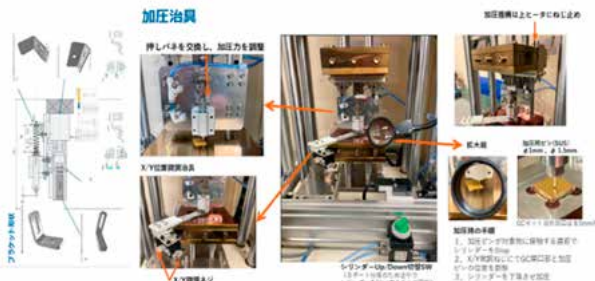


図 2.1.6.3 GaN 素子の圧着装置

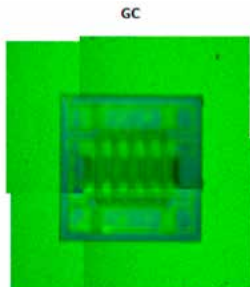


図 2.1.6.4 圧着装置を用いて実装した GaN チップ

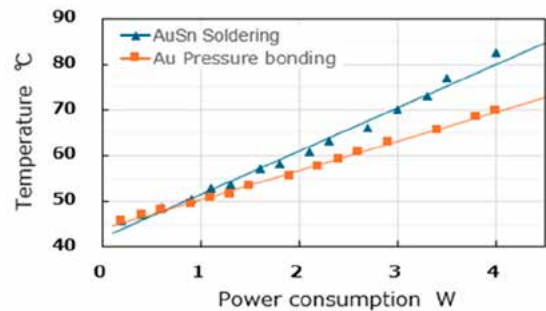


図 2.1.6.5 従来の AuSn 接着剤と圧着技術を用いて作製した GaN 実装基板の温度上昇比較

2. 1. 7. 研究課題ア-(b)-3-2「大電力受電素子の開発」

準ミリ波帯 GaN-GAD の基本デバイスを作製し、良好な DC 特性を確認した。実測 I-V と S パラメータに基づいて GAD の SPICE モデルを抽出した。ワット級 GAD を設計し、シミュレーションにより 1 W 受電動作可能であることを確認した。ワット級 GAD 整流器の試作を完了し、24 GHz ソースプル評価のため、熊本大学にウェアハを提供した。レクテナ評価のため、金沢工業大学に個片化チップを提供した。

熊本大学と共同で 10 W 級 GAD のレイアウトを設計し、試作を完了した。DC、S パラメータの温度特性の測定結果に基づいて自己発熱導入 GAD モデルを開発した。GAD モデルに基づいて 10 W 級倍電圧回路 ($W_g = 1.2 \text{ mm}$) の整流特性を計算した結果、40dBm 入力時の変換効率 73.3%、38dBm 入力時の変換効率 77.0% を予測した。

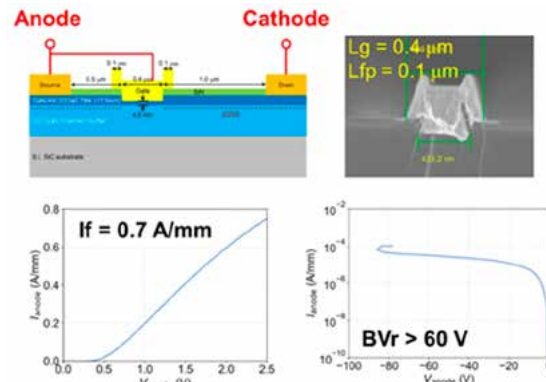


図 2.1.7.1 準ミリ波 GaN-GAD の素子構造と DC 特性

表 2.1.7.1 24 GHz 整流特性のゲートピッチ依存性 (計算結果)

ゲートピッチ	12.5 μm	20 μm	30 μm	40 μm
出力整合	73.3% @ 40dBm	71.0% @ 40dBm	70.3% @ 40dBm	68.0% @ 40dBm
効率整合	77.0% @ 38.0dBm	75.4% @ 38.2dBm	75.7% @ 38.1dBm	74.3% @ 37.2dBm

既存のロードプル・ソースプル評価装置を活用することで、整流器特性を効率的に評価できる測定系を整備し、構造設計から実測評価までを短期間で回せる体制を構築した。その結果、試作した GaN-GAD の 25GHzRF 入力条件で最大 35% の変換効率を確認しており、大電力受電素子の実用化に向けた有望な成果が得られた。

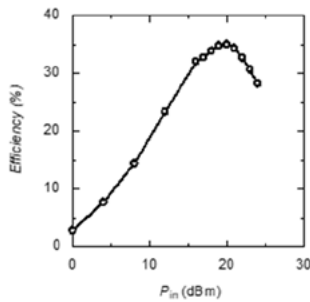


図 2.1.7.2 準ミリ波 GaN-GAD の 24GHz 入力
における変換効率-入力電力特性

2. 1. 8. 研究課題ア-(c)「5G 準ミリ波との共用化技術」

本研究課題では、メタマテリアルアンテナ技術を活かし、円偏波複偏波アンテナによる可変偏波を可能とした 1024 素子アレーにより構成される、WPT 送電装置を開発し、OTA (Over the Air) 設備評価にて、目標 EIRP+82 dBm 以上を実現した。また、金沢工業大学との評価では、レクテナ全面に平均化し、高い効率を得るフラットビーム成形により、7.58W の DC 出力を達成した。

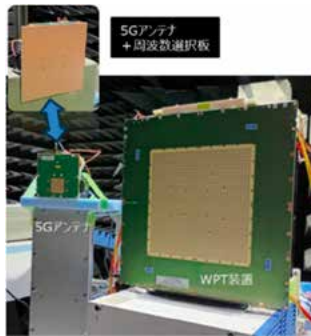


図 2.1.8.1 24GHz 帯 1024 素子 WPT 装置と 5G 装置検証

28GHz 帯 5G 基地局との共用化において、WPT 反射波による 3dB 以上の受信レベル圧縮が課題となったが、5G 装置前面への周波数選択板の配置により影響をほぼ解消し、両システムの共用化を可能とした。

次世代 WPT 用の空冷化と高効率化の実現に向け、東海国立大学機構（名古屋大学）との連携により PA および通信部の構成を最適化し、WPT に最適な BFIC の回路設計を推進した。

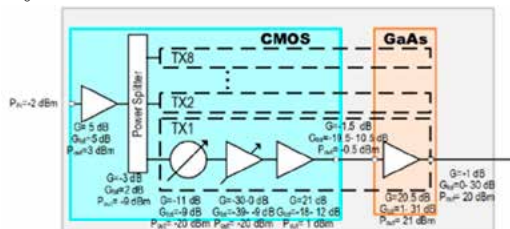


図 2.1.8.2 WPT 用 BFIC の構成概要

2. 2. 研究課題イ「空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術」

2. 2. 1. 概要、到達目標及び達成状況

本研究課題では、漏洩電力量を最小化し、給電時間割合 80%を実現することを目標とした。WPT システム全体の定量的評価および共存性評価技術と連携し、漏洩電力スペクトラム観測技術により評価環境を整備した。実証評価試験の実測に基づいて、キャリアセンス不要で WPT を運用でき

る条件を明確化した。漏洩電力量可視化技術を用いた人体暴露指針遵守の給電停止運用を行うと共に、通信給電混在型メディアアクセス制御技術や、MAC 層のアクセス技術による時分割多重等により効率的な給電制御を実現することで、目標を達成した。

2. 2. 2. 研究課題イ-(b)-1 「給電用メディアアクセス制御」

本課題では、複数端末に対して効率的かつ安定的に電力を供給するための給電用メディアアクセス制御 (MAC) 手法の検討と、グループ給電の実現を目的として研究を行った。電力供給を通信ネットワークの資源配分問題として捉え、図 2.2.2.1 に示す電力をパケットとして扱う「パワーパケット」モデルを導入した。

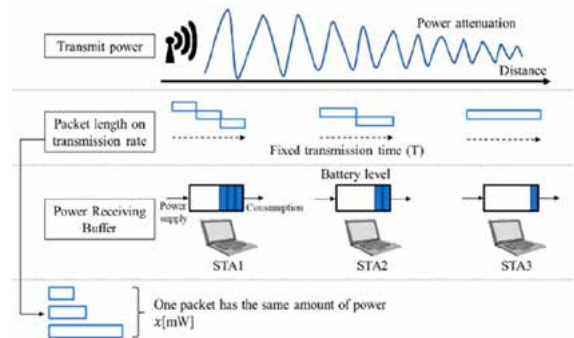


図 2.2.2.1 電力パケット変換方式の概要図

これにより、複数端末からの給電要求をキューとして管理し、スケジューリングに基づいて電力を分配する MAC 制御を構築した。さらに、時間分割給電 (PTDD) に対して、RR (Round Robin) 方式を基準とし、これを拡張した MFQ (Multilevel Feedback Queue) 方式を提案した。MFQ 方式では、端末のバッテリー状態や消費電力に応じて優先度を動的に変更することで、給電機会を適応的に制御する。シミュレーション評価の結果、RR 方式では公平な給電機会は確保されるものの、条件差に対する適応性に課題があるのに対し、提案する MFQ 方式では端末間の電力偏りや枯渇を抑制し、より安定した給電制御が実現できることを確認した。

また、本研究では、シミュレータを用いた給電制御設計手法を確立し、その結果を実機に実装して実証実験を行った。実験結果より、提案手法により端末間の電力偏りが抑制され、安定したグループ給電が実現できることを確認した (図 2.2.2.2)。

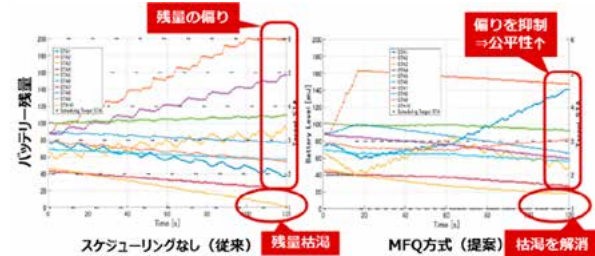


図 2.2.2.2 実証実験による方式の効果比較

2. 2. 3. 研究課題イ-(b)-2「通信給電混在型メディアアクセス制御技術」

WPT 送電システムと通信システムの共存方式の開発を行った。現場に設置したセンサで検知した電波情報に基づいて、制御サーバで機械学習を用いて WPT 電波を識別し、無線通信の状況に応じて以下の制御することで、WPT と共

存可能な無線通信制御機能を開発した。

- ・無線通信の占有率が低い場合：

WPT との時分割制御により同一周波数で棲み分ける

- ・無線通信の占有率が高い場合：

無線通信の周波数を切り替える

時分割制御により WPT と無線 LAN とを共存させた様子を、図 2.2.3.1 に示す。図より 130ms ごとに WPT と無線 LAN とを切り替え、共存を行っていることを確認できた。

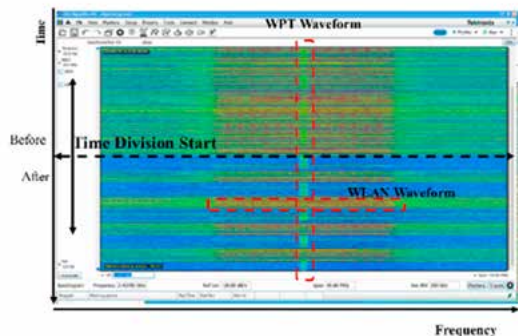


図 2.2.3.1 時分割共存の様子

2. 2. 4. 研究課題イ-(c)-1 漏洩電力量可視化技術

本研究課題では、建築資材の透過・反射特性等を考慮し、空間内の電界状況を可視化する技術を確立した。これに基づき、WPT と通信の共存に向けた伝搬解析（レイトレース法）による「相互影響エリアの特定」や「キャリアセンス閾値の調整」等の機能を備えた可視化プラットフォームを構築した。同プラットフォームでは、複数システムの連続切り替え表示機能等の有効性を検証し、相互影響の効率的な把握を可能とした。

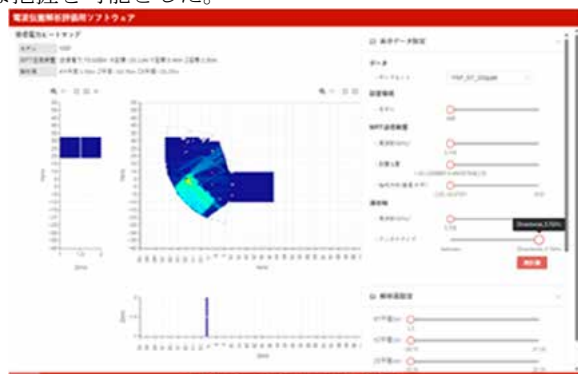


図 2.2.4.1 可視化プラットフォーム

伝搬解析においては、レイトレース法を「経路探索部」と「電界計算部」に分離し、計算負荷の高い経路探索結果を再利用することで、精度を維持したまま計算を高速化する手法を提案した。大規模な実証評価試験環境（YRP）において、本手法により計算時間を従来比で 60～80%削減しつつ、計算結果の再現誤差を同室内で 1dB 以内、室外で 2dB 以内に抑えることが可能であることを確認した。

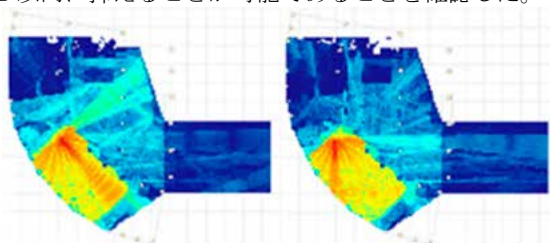
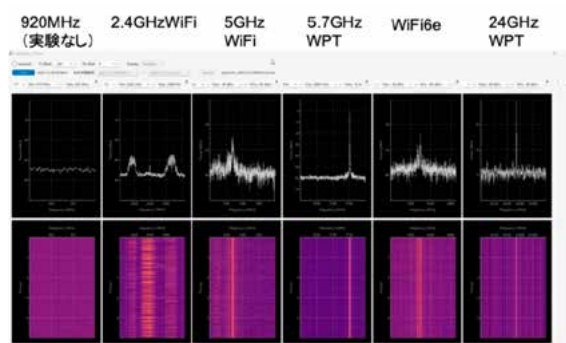


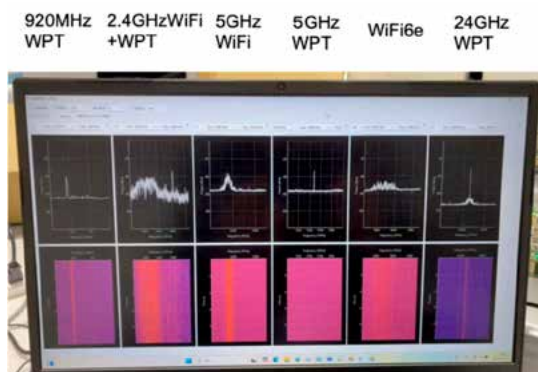
図 2.2.4.2 実証評価試験環境（YRP）での評価例

2. 2. 5. 研究課題イ-(c)-2「漏洩電力スペクトラム観測技術」

漏洩電力スペクトラム観測技術は、無線帯域への妨害を考慮し、無線 IoT+WPT スペクトラム周波数を同時に観測する事を目標とした。低コスト化を念頭にしたダイレクト RF アンダーサンプリング法による試作したスペクトラムモニタを用いて、実証フィールド実験にて、2.4GHzWiFi、5GHzWiFi、5.7GHzWPT、WiFi6e、24GHzWPT のスペクトラム観測を行った。その結果、上記信号帯スペクトラムの観測に成功し、さらに、WLAN 信号の周波数チャンネル変更の状況もスペクトログラムとして観測に成功（図 2.2.5(a)）した。実証フィールド実験では 920MHz 帯の実験が無かったため、920MHz 帯スペクトラムは得られていないが、暗室内事前確認実験では、920MHz 信号の観測に成功（図 2.2.5(b)）している。これにより、本研究の目標（無線 IoT+WPT スペクトラム周波数を同時に観測）を達成した。



(a) 実証フィールド実験での結果



(b) 事前実験での結果

図 2.2.5.1 スペクトラム、スペクトログラム観測結果

2. 3. 研究課題ウ「共存性評価技術」

2. 3. 1. 概要、到達目標及び達成状況

「(a) 共存性評価に係る基盤データ整備」、「(b) 干渉評価システム技術」を確立し、シミュレーションにより共用可能要件（出力、離隔、時間等）の精緻化を実現するとともに、「技術課題ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術」、「技術課題イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術」と連携し、共用可能要件の緩和について実証を交えて検証を行った。

シミュレーション評価、共存制御技術での利用を想定し、24 種類の建材の電波透過・反射特性に関するデータや建物・構造物特性に関する基礎データを実測した。収集したデータは、国内外の学会や報道発表を通じて広く公開した。建材の電波透過・反射特性をデータベースとして活用し、屋外等のエリア外の電波強度を予測し、他の無線システムと共用可能な要件（出力、離隔、時間等）を解析することが可能なシステムを開発し実証試験により検証した。

技術課題ア、技術課題イと連携して、「特定空間への漏洩電力の影響を最小化するための技術」の評価技術として、上記の実証実験での検証により、電波伝搬シミュレーションシステムの精緻化したシミュレーション活用を可能とした。

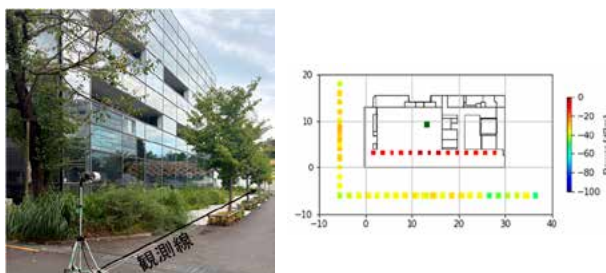
2. 3. 2. 研究課題ウ-(a)-1/2「建築材料、建物構造物の電気特性実験」

屋外漏洩電力評価のためのレイトレース法によるシミュレーションの高精度化に向けて、実施工状態を模擬した24種の建材の920MHz、2.4GHz、5.7GHz、24GHzにおける透過および反射特性を評価した。なお、屋外漏洩の主要因と考えられる窓ガラス材料については24GHz帯の複素比誘電率についても測定し、建材特性データベースを構築した。

またこのデータベースを反映した電波伝搬シミュレーションの解析精度評価のため実物件2件において、屋外漏洩電力分布を測定した。測定の結果、目標精度である±10dB以内の計算精度が得られていることを明らかとした。



(a) 透過特性 (b) 反射特性
図 2.3.2.1 自由空間法による建材の透過反射係数の測定系



(a) 屋外の受信系 (b) 920MHzにおける受信電力分布

図 2.3.2.2 屋外漏洩電力の測定

2. 3. 3. 研究課題ウ-(a)-3「実験用 5.75GHz WPT 送信システムの試作」

屋外等のエリア外の電波強度のシミュレーションモデルを検証するため、送電出力とアンテナ素子数・開口径の異なる2種の5.75GHz WPT 送信システム（16素子・21W出力と36素子・216W出力）を開発し、実物件2件における電波伝搬・屋外漏洩電力分布を測定評価する実証試験を行った。また、これらの装置を用いてWLANと5.75GHz帯WPT送信波との干渉評価試験を行い、共存性に関する技術要件案を策定し、制度化検討推進団体に提案を行った。



(a) 16素子送電装置 (b) 36素子送電装置

図 2.3.3.1 試作した実験用 5.75GHz WPT 送信システム

2. 3. 3. 研究課題ウ-(a)-4「国内外規格の調査、提案書作成」

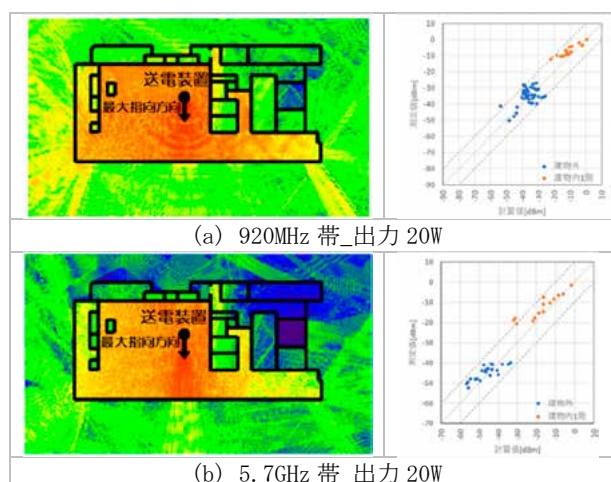
2025年4月、日本建築学会において「空間伝送型ワイヤレス給電システムを使用する建築部材の電磁波特性評価ガイドライン・同解説」の策定を開始し、2026年3月時点で、WD (Working Draft)の策定を完了した。2027年の発行を目指して検討を進める予定である。

2. 3. 4. 研究課題ウ-(b)「干渉評価システム技術」

24種類の建築部材の測定値をデータベース化した。本研究では、実際の建築物に利用する実物大の建設資材および実際の建築物と同様の施工法で製作した建物・構造物試験体の透過減衰量の周波数特性、反射減衰量の角度特性を実測し、自由空間透過法を利用して、透過・反射減衰量の角度特性をデータ化した。これにより、測定のみでは把握が困難な透過・反射減衰量の角度特性に対応した電波特性データベースを整備した。

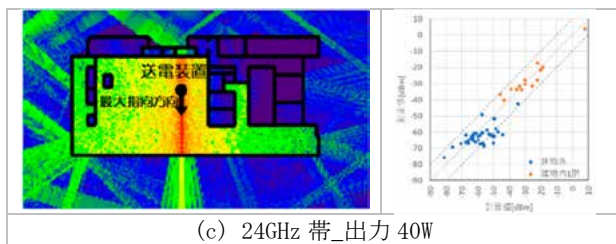
また、他の研究機関との連携を目的として、構造計画研究所がリリースしているレイトレース法による電波伝搬解析ツール Wireless InSite に本研究で開発した電波特性データベースおよびアンテナ指向性を実装した。

電波特性データベースを用いて4周波数帯の建物内外の漏洩電力をシミュレーションし、測定値との比較を実施した。920M、2.4G、5.7GHz帯では概ね±10dB以内に収まり非常に高い精度でシミュレーションできることを確認した。24GHz帯ではメインビーム方向は精度よくシミュレーションできる傾向を確認したが、送電装置のバックローブ側について、測定値と計算値の精度検証を行う余地がある。



(a) 920MHz 帯_出力 20W

(b) 5.7GHz 帯_出力 20W



(c) 24GHz 帯_出力 40W
図 2.3.4.1 電波伝搬シミュレーション結果(左)
計算値と測定値の比較(右)

2. 4. 全体研究による推進

2. 4. 1. 課題連携と成果に向けた取り組み

本研究は 11 の研究機関と 18 のサブテーマで構成されており、空間伝送型 WPT システムにおける総合的な利用効率を現行の 10 倍以上にするという共通目標を掲げている。この達成には、各課題の連携と要素技術の出口戦略を初期段階から明確化することが不可欠であった。そこで研究中盤、要素技術の具体化に合わせて、これらを統合・体系化した「成果のロードマップ（成果の木）」を策定した。あわせて適切なマイルストーンを設定し、計画的な進捗管理を徹底した結果、当初の目標に合致する成果を得ることができた。



図 2.4.1.1 研究テーマの連携図

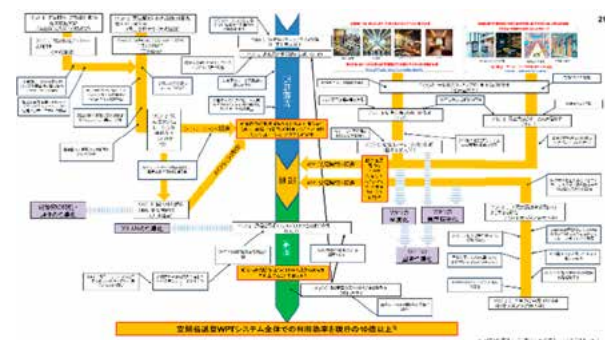


図 2.4.1.2 成果の木

2. 4. 2. 実証フィールドによる成果

本研究では、各機関の要素技術を統合評価し、評価手法の連携を図るため、最終年度に横須賀 YRP にて実証評価（24GHz/5.7GHz 帯 WPT 装置）を実施した。本評価の狙いは、評価条件の妥当性や手法の有効性を多角的に検証することにより、研究成果を社会実装へと効果的に結びつけるための重要なプロセスである。

実証の結果、建物素材の影響に関する考え方などを、他機関の評価結果と照合・検討することで修正した。これにより、評価の整合性について良好な結果を得るとともに、研究開発した装置の動作についても期待通りの性能を確認することができた。

認することができた。



図 2.4.2.1 実証フィールドによる評価

2. 4. 3. 全体研究成果

本研究開発では、空間伝送型 WPT システムの高度化と利用効率の向上を目指し、各技術課題において当初の想定を上回る顕著な成果を得ることができた。主要な成果は以下の通りである。

要素技術における主要成果としては下記が挙げられる

- ①給電電力の向上（研究課題ア）：1 対 1 の環境下における動作必要電力を、現行の 2W から 8.5W（平均値）へと 4.25 倍に向上させることに成功した。
- ②給電効率の改善（研究課題イ）：給電時間割合を、現行の 20%程度から 80%へと 4 倍まで向上させ、より連続的かつ効率的な給電を可能とした。
- ③共存検討のための基盤構築：建材の電波透過・反射特性に関する基盤データベースを構築した。これにより、エリア外への電波強度予測の精度が向上し、電波伝搬シミュレーションの精緻化を実現。他の無線システムと共用するための具体的な要件（出力、離隔、時間等）の策定を可能とした。

総合評価では、給電能力の大幅な向上が可能となり、上記要素技術の相乗効果（4.1 倍 × 4 倍）により、現行の WPT システムと比較して、時間当たりの給電能力を約 16 倍に向上させた。これは当初目標としていた「10 倍以上」を大幅に上回る成果である。

また、次世代基盤技術の確立として、24GHz 帯において、制度化の次のステップを見据えた基盤技術（半導体技術）を確立し、将来のさらなる高度化への布石を打った。

今後の社会実装への貢献として、精緻化したシミュレーションと建材データベースの整備完了により、実環境における共存検討が容易になった。

2. 4. 4. 社会実装に向けた課題

本研究を通じて、空間伝送型 WPT システムの本格的な普及を実現するために解決すべき重点課題が明確となった。今後は、本研究で得られた知見を基盤とし、以下の課題解決に向けた取り組みを強力に推進していく必要がある。

①制度化の推進と次世代技術の確立

- ・第 2 ステップに向けた制度化の加速：24GHz 帯を含む本研究成果を反映した、空間伝送型 WPT システムの「第 2 ステップ」としての制度化を関係機関と協力して強力に推進する。
- ・第 3 ステップを見据えた継続開発：制度化後の「第 3 ステップ」を見据え、24GHz 帯送電装置の空冷化による低コスト化や、さらなる高度な要素技術の確立に向け、産学官の協調体制のもと研究開発を継続する。

②デバイスの量産化とサプライチェーンの構築

- ・デバイス等の量産技術確立：受電素子をはじめとする主要な半導体部品について、社会実装に耐えうるコストパフォーマンスを実現するため、量産化プロセスの構築およびサプライチェーンの整備を図る。

性解析”、2024 年電子情報通信学会ソサイエティ大会 C-2A-05（埼玉県、2024 年 9 月 10 日）

【誌上発表リスト】

- [1] 関野昇、“24GHz 帯を使用した WPT 実現に向けた取り組み”、科学情報出版株式会社 月刊 EMC No.452 pp63-83（2025 年 12 月 5 日）
- [2] 本間幸洋、“マイクロ波を用いたワイヤレス電力伝送システム”、日刊工業新聞社 工業材料、Vol.71、No.1、pp.50-55、Jan. 2023.
- [3] 花澤理宏 “WPT に関する規制・規格の動向について”、“工業材料 2023 年冬号、Vol.71、No.1、pp.30-36（Jan. 2023）

【申請特許リスト】

- [1] 発明者：伊東健治、坂井尚貴、津留正臣、“放熱性に優れたレクテナ装置”、申請国：日本、申請年月日：2025 年 3 月 13 日
- [2] 大須賀徹、板谷聡子、大堀文子、松村武、無線通信制御装置及び無線通信システム、日本、令和 5 年 3 月 29 日
- [3] 桐山水響、宮本進生、長谷川晃朗、横山浩之、“干渉エリア解析システム、および、干渉エリア解析装置”、日本、（令和 5 年 3 月 14 日）

【受賞リスト】

- [1] 伊東健治、佐藤亮輔、廣瀬裕也、坂井尚貴、津留正臣、野口啓介、IEEE WPTCE2025 Best Paper Award”、受賞者、“A24GHz band highly efficient GaAs 1W rectenna MMIC electromagnetically coupled with an external AlN antenna for thermal dispersion”、2025 年 6 月 6 日
- [2] 澤田優菜、電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会、学生ワークショップ最優秀ポスター賞、“無線電力伝送におけるバッテリー残量を考慮した時分割スケジューリング手法の検討”、2024 年 8 月
- [3] Y. Sawada、Best Paper Award、“TDM Scheduling Based on Receiver Grouping. for Indoor Wireless Power Transfer”、Proc. 28th IEEE Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2023)、Sydney, Australia、November 2023

【報道発表リスト】

- [1] “「MWE2025」出展のご報告”、<https://denkikogyo.co.jp/12741/>、2025 年 12 月 3 日
- [2] “YRP、WPT の干渉抑制・高度化技術の研究開発で評価試験”、電波タイムズ、2026 年 1 月 1 日
- [3] “マイクロ波ワイヤレス給電システム「TiPower® Beam」によるオフィスでの送受電を実証 | 大成建設株式会社”、日刊建設工業、日刊建設通信他、2025 年 12 月 15 日

【国際標準提案リスト】

- [1] APG・AWG-31・TG-WPT、AWG-31-INF-03、“Presentation_on_Institutionalization_of_Beam-WPT_in_Japan”
- [2] APG・AWG-31、INP-31、“PROPOSALS FOR THE FINALIZATION OF A DRAFT NEW APT REPORT ON RADIO FREQUENCY BEAM WIRELESS POWER TRANSMISSION (WPT)”
- [3] CJK-WPT20-009、“Development of STEP-2 Regulation for RF Beam WPT in Japan”

【参加国際標準会議リスト】

- [1] ITU-R・SG1 ブロック会合、ジュネーブ、2024 年 6 月 12 日～20 日
- [2] AWG-31 会合（バンコク＋オンライン、2023 年 5 月 22 日～28 日）

[3] CJK・第 21 回 WPT-WG 会合、深セン（中国）、2024 年 10 月 29 日～30 日