

マイクロ波(5.8GHz)を用いた無線電力伝送受電回路で
世界最高の電力変換効率と世界最短の応答時間を達成。
信州大学宮地准教授と金沢工業大学伊東教授らの研究グループ。

ファクトリー・オートメーション機器などへの高効率・低コスト給電の実用化へ大きく前進

【概要】

信州大学大学院 総合理工学研究科 工学専攻 電子情報システム工学分野 宮地幸祐准教授と金沢工業大学 電気電子工学科 伊東健治教授らの研究グループは、このたびマイクロ波(5.8GHz)による無線電力伝送に用いる受電回路において、世界最高の電力変換効率となる 64.4%と世界最短の応答時間である $45.2\mu\text{s}$ を達成しました。本成果は、2024年2月18日から22日にかけてアメリカ サンフランシスコにて開催される、International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)にて発表されます。

【屋内マイクロ波無線電力伝送について】

マイクロ波を用いる無線電力伝送は遠方への電力伝送が可能で、国内外の様々な機関で熾烈な研究開発が進められています。本研究は屋内での使用を想定しており、具体的には、ファクトリー・オートメーションなど工場、産業・物流用途、充電スポット等でのセンサーへの給電が応用として検討されています。図1に示すように、送電器からマイクロ波(5.8GHz)のビームをカメラやセンサーなどの受電端末に当て、バッテリーや機器を充電することが可能です。これにより、多数のセンサーへの電源配線やバッテリー交換が不要となります。建設、ものづくり、物流等の現場

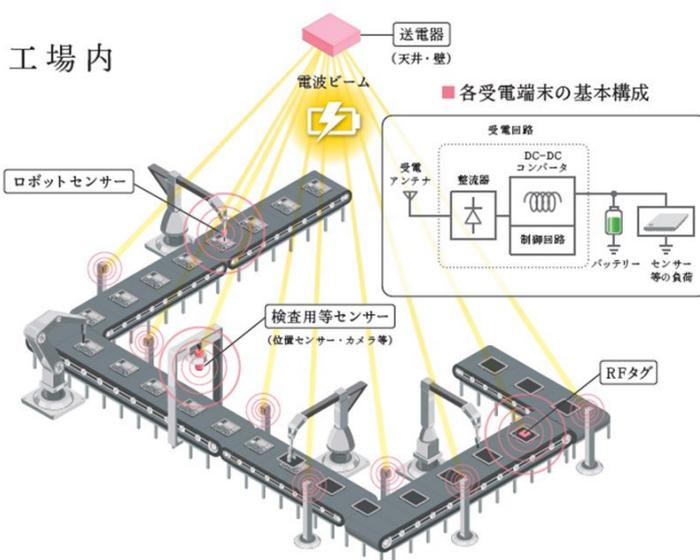


図1 マイクロ波無線電力伝送の応用例

の工数削減による生産性の抜本的向上や、配線やバッテリー資材の節約に伴う二酸化炭素排出量と環境負荷の低減効果が期待されています。マイクロ波無線電力伝送は社会実装に向けて国内制度化が進めら

れており、ステップ 1 (既存技術での実用化)として屋内で人のいない環境で 3 帯域 (920MHz 帯、2.4GHz 帯、5.8GHz 帯)で無線電力伝送専用の電波を割り当てる省令が令和 4 年に施行されました。現在はステップ 2 (人や他の無線システムが存在する状況での利用)の制度化が進められています。また、国際標準化についても活発な活動が行われています。

センサーなどの各受電端末には、マイクロ波を受けるアンテナと、アンテナで受けた電力で機器を充電する受電回路が搭載されています。受電回路はマイクロ波整流器(用語(1))と、DC-DC コンバータ(用語(2))で構成されます。受電回路は電力変換効率が高いことと、マイクロ波を受けてから効率よく受電できるようになるまでの応答時間が短いことが求められます。

【成果の内容】

<技術的背景と課題>

先の法整備に伴い、屋内無人環境下では受電回路のアンテナに 1W(30dBm)近くの電力が入るようになり、より高機能で高性能なセンシングや計算処理が可能なセンサーノードの実現が期待されます。そのためには受電回路は高い電力変換効率が必要で、これはマイクロ波整流器と DC-DC コンバータの両方の電力変換効率が高くなければならないことを意味します。また、マイクロ波を受けてから高効率な電力変換ができるようになるまでの応答時間である Maximum Power Point Tracking (MPPT) (用語(3))時間も $100\mu\text{s}$ 以下と極めて短くする必要があります。これはマイクロ波のビームが受電回路に輸入される時間が細切れで、ビームが当たっている時間が最短数 ms 程度になることも想定されるためです。

これまでシリコンプロセスで IC チップ化されているマイクロ波電力受電回路は、エネルギーハーベスティングを想定した 1mW 未満の入力電力で、DC-DC コンバータの入力電圧は 5V 未満が中心でした。受けられるマイクロ波の周波数はシリコンプロセスのマイクロ波整流器でも効率が比較的確保しやすい 400MHz から 900MHz 帯と低いものが多く、そのためにアンテナサイズが 10cm を超えるほど大きく、今回想定している小型センサーのノードへの無線電力伝送用途には適していませんでした。周波数が 5.8GHz 帯であればアンテナのサイズは 2 から 3cm と十分小さくなりますが、シリコンプロセスのマイクロ波整流器ではシリコン基板が高損失で効率が低いため、主に個別半導体部品のショットキーバリアダイオード(SBD)とマイクロストリップ線路による分布定数回路で構成されたものが使用されていました。そのため今度は回路サイズが大きく、集積化が困難でした。

また、整流器の高効率化には同じ出力電力でも整流器の出力インピーダンスを高くして出力電圧を高くすることが望ましく、整流器の降伏電圧付近(本研究では 15V)を出力しながら DC-DC コンバータへ入力する必要があります。このため、マイクロ波受電用途向けのシリコン IC DC-DC コンバータはこれまでより高い入力電圧に対応する必要があります。ここで、単純に高入力電圧に対応する DC-DC コンバータは太陽光発電向けなどありますが、応答時間(MPPT 時間)が数 $100\mu\text{s}$ から数 ms と長い課題がありました。MPPT 時間が短い方式としては Fractional Open Circuit Voltage (FOCV) 法(用語(4))が良く知られています。しかし、この手法はマイクロ波整流器の開放端電圧 V_{oc} を直接取得する手法であり、電力変換効率が最も高

い降伏電圧付近で動作しているマイクロ波整流器をこの手法で開放すると回路が破損してしまいます。このため、マイクロ波整流器を開放せずに V_{OC} を高速に予測する回路を新たに開発しました。

<提案 DC-DC コンバータ>

提案 DC-DC コンバータの主回構造路を図 2 に示します。Single Inductor Dual Input Triple Output (SIDITO) コンバータ(用語(5))というアーキテクチャを採用しており、マイクロ波整流器出力を主たる入力 (V_{IN_DC}) とし、リチウムイオンバッテリー (V_{BAT}) を主たる出力としています。それ以外に出力には DC-DC コンバータ内部の制御回路のアナログ・ドライバブロックおよびデジタルブロックに供給する内部電源 (V_{DDH} と V_{DDL}) があります。マイクロ波が到来している時は昇降圧コンバータとして V_{IN_DC} から V_{BAT} を充電します。その際、マイクロ波整流器を最大電力点で効率的に動作させるために、MPPT 制御で V_{IN_DC} を V_{OC} の半分になるようにフィードバック制御を行います。 V_{OC} の情報は後述する V_{OC} 予測回路を使って取得します。また、DC-DC コンバータは内部電源 V_{DDH} と V_{DDL} の電荷を使って動作しますが、 V_{DDH} または V_{DDL} が動作に必要な目標電圧を下回ると V_{BAT} への充電を取りやめて優先的にこれらの電源を回復させる動作が時々入ります。マイクロ波が来なくなると、DC-DC コンバータ回路機能を維持するために V_{BAT} を入力として V_{DDH} と V_{DDL} を供給する Internal Power Supply (IPS) モードという待機状態に移行します。IPS モードの詳細は関連する学会発表情報(1)にて信州大学より過去に発表しています。 M_{N1} と M_{N2} のスイッチに使うトランジスタおよびは高耐圧素子を用います。

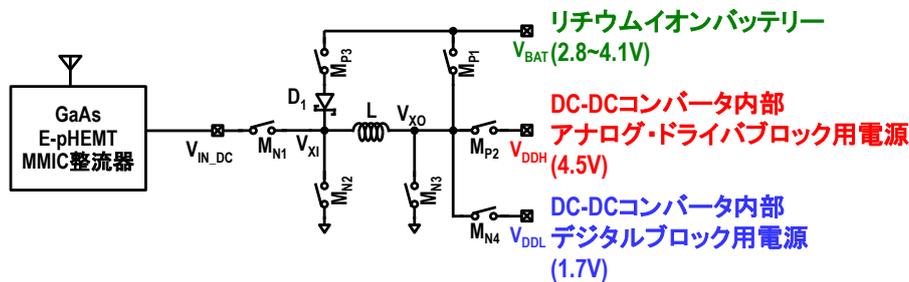
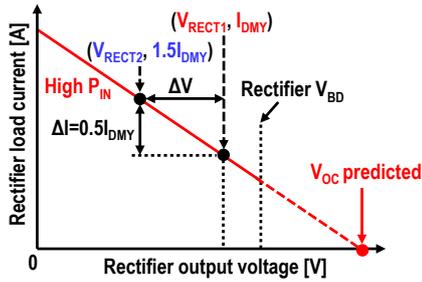


図 2 提案 SIDITO DC-DC コンバータの主回路図の概要

マイクロ波整流器を開放せずに短時間で V_{OC} 情報を取得して MPPT 時間を短縮する提案 V_{OC} 予測回路の基本原理を図 3(a) に示します。マイクロ波整流器の出力電流と出力電圧の関係は、図 3(a) に示すような線形な関係をおおよそ持つため、この直線上の 2 つの動作点情報が得られれば V_{OC} が予測算出可能です。まず、マイクロ波整流器の降伏電圧を超えないように既知の負荷電流 I_{DMY} を発生させてマイクロ波整流器に接続し、その時の V_{IN_DC} (DC-DC コンバータの入力電圧兼マイクロ波整流器の出力電圧) の電圧 V_{RECT1} を $3/16$ 倍した電圧をサンプリングします(図 3(b))。その後 I_{DMY} を 1.5 倍した電流を流し、その時の V_{IN_DC} の電圧 V_{RECT2} を $2/16$ 倍した電圧を別途サンプリングします。そしてこれらのサンプリングした電圧の減算処理を行うことで $(3/16 \times V_{RECT1} - 2/16 \times V_{RECT2})$ 、図 3(a) の計算式に示す通り、 V_{OC} を 16 分の 1 にした値を得ることができ、マイクロ波整流器を開放せずに V_{OC} の値を高速に算出することができます。

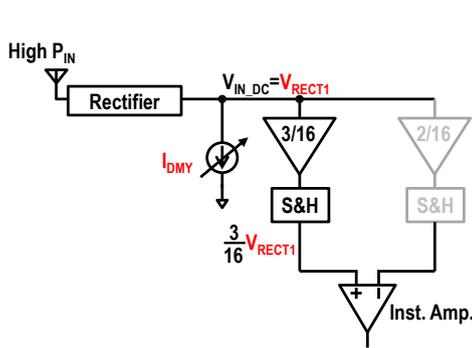


$$V_{OC} = -\frac{\Delta V}{\Delta I} I_{DMY} + V_{RECT1} \quad \left[\begin{array}{l} \Delta I = 0.5I_{DMY} \\ \Delta V = V_{RECT2} - V_{RECT1} \end{array} \right]$$

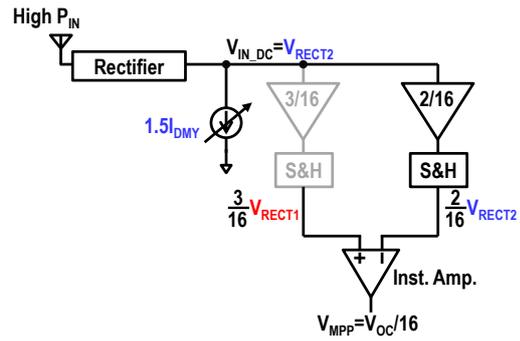
$$\rightarrow V_{OC} = 3V_{RECT1} - 2V_{RECT2}$$

$$\frac{1}{16} V_{OC} = \frac{3}{16} V_{RECT1} - \frac{2}{16} V_{RECT2}$$

(a)



(b)



(c)

図3 提案 V_{OC} 予測回路 (a)原理 (b) V_{RECT1} 取得時 (c) V_{RECT2} 取得時

<提案マイクロ波整流器>

本発表のマイクロ波整流器では、GaAs E-pHEMT(用語(6))のゲートとドレインを接続し構成した Gated anode diode(GAD)を用いる整流器を採用しています。金沢工業大学が関連する学会発表情報(2)にて新たに提案した構成で、ワット級のマイクロ波を高効率に整流することができます。一般的な GaAs ファンダリイで製造可能で、 $0.87 \times 0.91 \text{mm}^2$ の GaAs チップに 5.8GHz で動作する整合回路を含めすべてを集積化しています。

<実測評価>

本発表の DC-DC コンバータは $0.25 \mu\text{m}$ 高耐圧 BCD プロセスを、提案マイクロ波整流器は $0.5 \mu\text{m}$ GaAs プロセスを用いて試作しています。図 4 にそれぞれのチップ写真を示します。図 5 に V_{OC} 予測動作による MPPT 制御の様子を示します。2.67ms という短い間隔で V_{OC} 予測回路が動作し、 V_{OC} 情報を更新しています。また、 V_{OC} 予測動作により MPPT 時間は $45.2 \mu\text{s}$ となっており、これは無線電力伝送向け受電回路として世界最速です。これにより高速に変動するマイクロ波電力に無駄なく追従することが可能になります。また、図 6(a)に DC-DC コンバータ、図 6(b)にマイクロ波整流器、図 6(c)に DC-DC コンバータとマイクロ波整流器を接続した受電回路全体の電力変換効率測定結果を示します。DC-DC コンバータ単体とマイクロ波整流器単体の最高電力変換率はそれぞれ 86.4%と 78.5%であり、受電回路全体では最大 64.4%となりました。これは IC チップの受電回路として世界最高の電力変換効率です。

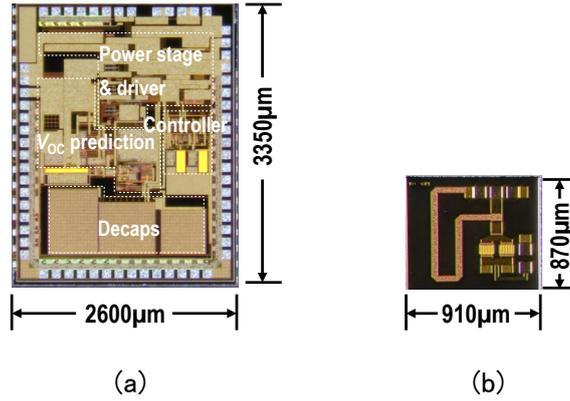


図 4 チップ写真 (a)DC-DC コンバータ (b)マイクロ波整流器

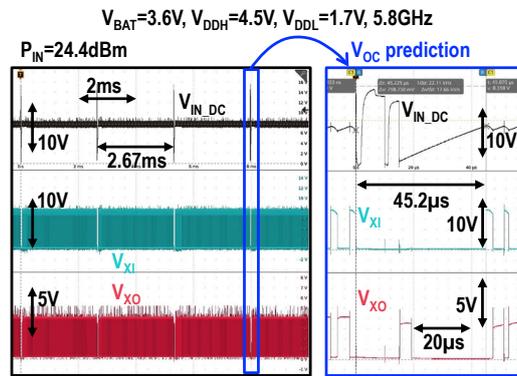


図 5 DC-DC コンバータの実測動作波形と MPPT 時間

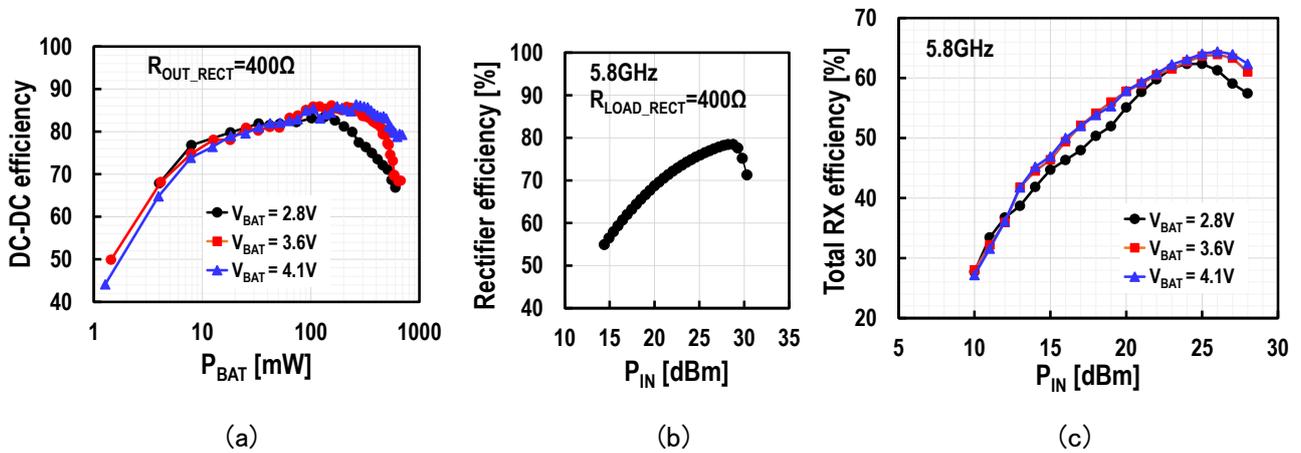


図 6 実測電力変換効率 (a)DC-DC コンバータ (b)マイクロ波整流器 (c)受電回路全体

【成果の意義】

より高度なセンシングと計算処理が可能なセンサーを動かすマイクロ波電力を受電可能な世界最高の電力変換効率と世界最短の応答時間をもつ受電回路を、小型のマイクロ波整流器 IC チップと DC-DC コンバータ IC チップで実現しました。従来は本用途に適した IC チップが存在せず、同様の受電回路を実現しようとすると多くの個別部品を使う必要があり、コストが高だけでなく、サイズも大きく、さらに効率や応答時

間の性能も足りませんでした。これは受電端末の製品化、ひいてはマイクロ波無線電力伝送の普及に大きな障害となっていました。本成果は、高効率かつ低コストな受電回路の実用化に大きく貢献し、マイクロ波無線電力伝送の社会実装を加速させます。

【国際会議 International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)に採択された意義について】

本成果が発表される ISSCC は、米国電気電子学会 IEEE が主催する最大級の国際学会の一つです。「世界初」や「世界最高性能」の最先端半導体チップが発表される半導体集積回路の分野で最も権威ある国際学会で、半導体チップのオリンピックとも呼ばれます。例年 200 件前後の発表があり、採択率は 30%前後と低く、国内・海外の大手半導体メーカーや大規模な大学に所属する研究員や博士課程学生からの発表が一般的です。近年、日本からの採択件数は伸び悩んでおり、日本全体でも 10 件程度しか採択されていません。そのような中で、この研究で使用されたチップは、信州大学大学院修士課程学生の市川響平君と岩田竜季君、金沢工業大学大学院修士課程学生の廣瀬裕也君をはじめとする学生が教員の指導を受けながら設計と評価したものです。地方大学から修士課程学生らが中心となって行った研究が ISSCC に採択されたことは大変な快挙です。

【本研究開発事業と実施体制について】

この研究は、平成 30 年度から令和 4 年度まで実施された内閣府・戦略的イノベーションプログラム (SIP) 「IoE 社会のエネルギーシステム」(PD: 柏木孝夫/東工大)のもとで行われたものであり、同研究プログラム内のテーマ C-①「センサネットワークおよびモバイル機器への WPT システム」(代表:五閑学/パナソニック HD)およびテーマ B-②「WPT システムへの応用を見据えた IoE 共通基盤技術」(代表:天野浩/名古屋大学)の一環として実施されたものです。

信州大学は次項体制のもと、テーマ C-①: センサネットワークおよびモバイル機器への WPT システム (代表:五閑学/パナソニック HD)に参画しています。

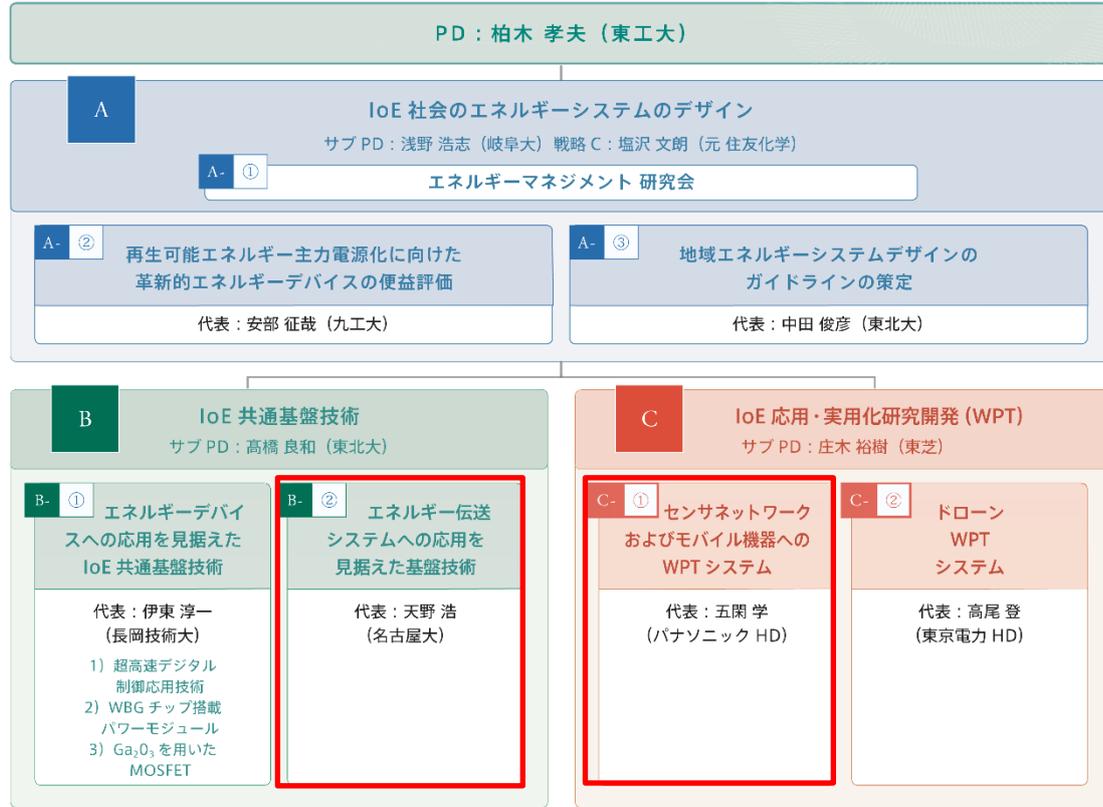
金沢工業大学は次項体制のもと、テーマ B-②: エネルギー伝送システムへの応用を見据えた基盤技術 (代表:代表:天野浩/名古屋大学)に参画しています。

テーマ B-②の成果をテーマ C-①に組み込み、さらに高い水準の研究成果に結びつけることに成功いたしました。

戦略的イノベーションプログラム (SIP) 「IoE 社会のエネルギーシステム」については以下の HP を参照ください。

<https://www.jst.go.jp/sip/p08/index.html>

一 研究開発体制



一 研究開発参画機関一覧 (44 機関、産 :20、学 :23、官 (公的機関):1)

テーマA IoE 社会のエネルギーシステムのデザイン

サブテーマ	研究代表者	参画機関
A-② 再生可能エネルギー主力電源化に向けた革新的エネルギーデバイスの便益評価	安部 征哉 (九州工業大学)	九州工業大学、中部大学、(一財)電力中央研究所、(国研)産業技術総合研究所
A-③ 地域エネルギーシステムデザインのガイドラインの策定	中田 俊彦 (東北大学)	東北大学、(一財)日本エネルギー経済研究所、早稲田大学、宇都宮大学

テーマB IoE 共通基盤技術

サブテーマ	研究代表者	参画機関
B-① エネルギーデバイスへの応用を見据えたIoE 共通基盤技術	伊東 淳一 (長岡技術科学大学)	長岡技術科学大学、東京電機大学、京都大学、北海道大学、東京農工大学、ヘッドスプリング(株)、日立 Astemo (株)
B-② エネルギー伝送システムへの応用を見据えた基盤技術	天野 浩 (名古屋大学)	名古屋大学、富士電機(株)、シャープ(株)、(国研)産業技術総合研究所、古河電気工業(株)、長岡技術科学大学、芝浦工業大学、(株)ダイヘン、ポニー電機(株)、名古屋工業大学、三菱電機(株)、 金沢工業大学

テーマC IoE 応用・実用化研究開発

サブテーマ	研究代表者	参画機関
C-① センサネットワークおよびモバイル機器へのWPTシステム	五関 学 (パナソニックホールディングス(株))	パナソニックHD(株)、(株)東芝、岩手大学、電気興業(株)、千葉大学、 信州大学 、オムロン(株)
C-② ドローンWPTシステム	高尾 登 (東京電力ホールディングス(株))	東京電力ホールディングス(株)、豊橋技術科学大学、(株)デンソー、(株)東芝、東芝エネルギーシステムズ(株)、京都大学、(株)プロドローン

【無線電力伝送について】

電気をワイヤレス(無線)で伝送する技術で、センサーや電気自動車などへの新たな充電方式として、世界中の研究者が取り組む今一番ホットな研究分野の一つです。

現在は以下の3種類の方式があります。

(1) 電磁誘導方式

スマートフォンなどの給電などで実用化されている方式。数 kHz の交流を用います。電力伝送距離はミリメートル。

(2) 磁界共鳴方式

MIT が開発した方式。数 10MHz の高周波を用います。伝送距離は数メートル。

(3) マイクロ波方式

電気を電波に変換してアンテナを介して送受信する方式。電波に変換するため、例えば宇宙空間の太陽光発電衛星で発電した電気を地上に伝送することも可能です。使用する電波は、RFID、WiFi あるいは電子レンジなどに使用される 920MHz、2.4GHz、5.8GHz などを使用します。世界中の研究者が実現にむけた研究開発にしのぎを削っている方式です。本研究は 5.8GHz での成果です。

なお本方式の関しては、ステップ 1(既存技術での実用化)として屋内で人のいない環境での利用に向けて、令和 4 年 5 月 26 日官報にて公示、省令が施行されました。屋内で人のいない環境での利用のため、限定的ですが、世界初の制度対応です。

<https://kanpou.npb.go.jp/old/20220526/20220526g00112/20220526g001120000f.html>

さらに令和 4 年 7 月 14 日に総務省へステップ 2(本 SIP の成果技術による人や他の無線システムが存在する状況での利用)制度化の要望書を提出しており、SIP 事業終了以降も引き続き、制度面の取組を継続しています。このような背景もあり、社会実装に向けた技術開発が盛んに行われています。

【用語説明】

用語(1) マイクロ波整流器

アンテナ出力のマイクロ波電力を直流電力に変換する電力変換回路です。内部にはダイオードをはじめとする整流素子が用いられており、出力電圧が高くなりすぎると整流素子の耐圧を超えて大きな短絡電流が流れる(降伏と呼ばれる現象)ため、効率が著しく低下するだけでなく、素子が破損する恐れがあります。

用語(2) DC-DC コンバータ

入力の直流電圧を別の直流電圧に変換する電力変換回路です。本発表の DC-DC コンバータはバッテリー充電を行うことからバッテリーチャージャーとも呼ばれます。

用語(3) Maximum Power Point Tracking (MPPT)

最大電力点追従とも呼ばれます。電力を生成している回路(本発表の場合はマイクロ波整流器)と後段の DC-DC コンバータとのインピーダンス整合を行うことで、最大の電力を電力生成回路から引き出させる制御のことです。最大電力点に到達するまでに要する時間を MPPT 時間と呼びます。いくつか手法があり、後述する FOCV 法はシンプルかつ高速な手法として代表的な方法です。

用語(4) Fractional Open Circuit Voltage (FOCV) 法

マイクロ波整流回路の場合、その出力電圧が開放端電圧 V_{oc} の半分付近となる負荷が接続された時にインピーダンス整合し、最大電力が得られます。このため、マイクロ波整流器を開放して V_{oc} を取得し、マイクロ波整流器の出力電圧、すなわち DC-DC コンバータの入力電圧が V_{oc} の半分になるように DC-DC コンバータを制御する手法です。ただし、最大電力点がマイクロ波整流器の降伏電圧付近まで高い場合は、マイクロ波整流器を開放してしまうと破損してしまうため、この方式は使えません。到来マイクロ波電力が変動すると開放端電圧も変動するため、それに追従するように V_{oc} の情報の更新が必要です。

用語(5) Single Inductor Dual Input Triple Output (SIDITO) コンバータ

入力電圧が 2 つ、出力電圧 3 つの電力変換回路を 1 つのインダクタで実現する方式です。多入出力を少ない受動部品数で実現できます。

用語(6) GaAs E-pHEMT

化合物半導体である GaAs(ヒ化ガリウム)の半導体プロセスで作製したエンハンスメント型(しきい値電圧が正)の擬似格子整合高電子移動度トランジスタ Pseudomorphic High Electron Mobility Transistor (pHEMT)です。シリコンプロセスのトランジスタより非常に高速で、高周波回路用途に適しますが、たくさんのトランジスタを集積する用途には不向きです。

【学会発表情報】

学会名： IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) 2024

開催期間： 2024年2月18日－22日

開催場所： アメリカ合衆国 サンフランシスコ マリオット・マルキスホテル

ウェブサイト： <https://www.isscc.org/>

論文タイトル：

A 64.4% Efficiency 5.8GHz 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

セッション： 12.6

著者：

Kyohei Ichikawa¹, Tatsuki Iwata¹, Saya Onishi¹, Tomohiro Higuchi¹, Yuya Hirose², Naoki Sakai², Kenji Itoh², and Kousuke Miyaji¹

1 Shinshu University(信州大学), 2 Kanazawa Institute of Technology(金沢工業大学)

【関連する学会発表情報】

(1) 学会名： IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (ASSCC) 2021, Paper 2.4

論文タイトル：

A 5.7GHz RF Wireless Power Transfer Receiver Using 84.5% Efficiency 12V SIDO Buck-Boost DC-DC Converter with Internal Power Supply Mode

著者：

Tomohiro Higuchi¹, Dai Suzuki¹, Ryo Ishida¹, Yasuaki Isshiki¹, Kazuki Arai², Kohei Onizuka², Kousuke Miyaji¹

1 Shinshu University(信州大学), 2 Toshiba(東芝)

(2) 学会名： 2020 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT 2020)

論文タイトル： Highly efficient high-power rectenna techniques (招待講演)

著者： Kenji Itoh, Naoki Sakai (金沢工業大学)

【研究に関わるお問い合わせ先】

<信州大学>

信州大学大学院 総合理工学研究科 工学専攻 電子情報システム工学分野

准教授 宮地 幸祐

Tel: 026-269-5266

E-mail: kmiyaji@shinshu-u.ac.jp

<金沢工業大学>

金沢工業大学 広報課

担当者: 志鷹 英男

Tel: 076-246-4784

E-mail: koho@kanazawa-it.ac.jp

【報道に関わるお問い合わせ】

<信州大学>

信州大学 工学部 総務グループ 研究支援係

担当者: 太田 純平

Tel: 026-269-5028

E-mail: eng_kenkyu@shinshu-u.ac.jp

<金沢工業大学>

金沢工業大学 広報課

担当者: 志鷹 英男

Tel: 076-246-4784

E-mail: koho@kanazawa-it.ac.jp