

K 太陽光発電無線送受電高効率化の 研究開発

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

用語集

用語	用語説明
モノリシックマイクロ波集積回路 (MMIC)	<p>数 GHz から数十 GHz の超高周波信号を発振，増幅，変調，周波数変換など信号処理する集積回路をマイクロ波集積回路 (MIC) と呼び，さらにこれを単一の半導体基板上に受動素子を一体に形成した回路がモノリシックマイクロ波集積回路 (MMIC) である。</p> <p>(出典) NTT 情報通信用語集 www.ntt-review.jp/yougo/word.php?word_id=1316</p>
HySIC	<p>HySIC とは Hybrid Semiconductor Integrated Circuit のことで、Si ベースのアナログ・デジタル混成 IC 上に、化合物の MMIC を融合させたシステムオンチップです。</p>

K-1 施策の目的・政策的位置付け

K-1-1 事業目的

太陽光発電は、CO₂の排出が少ないクリーンエネルギーであり、かつ、資源制約が少ない国産エネルギーであること、または、石油依存低減に資する石油代替エネルギーとしてその導入が進められてきたところであるが、エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題等への対応の観点から、より一層その導入拡大を図ることが重要となっている。さらに、世界全体の温室効果ガスの排出を2050年までに半減するといった低炭素社会を実現するためには、地上におけるこれら再生可能エネルギーの導入拡大に加え、長期的に抜本的な対策を講じることが必要である。

こうした状況の中、宇宙太陽光発電システム(SSPS: Space Solar Power System)は、発電時の温室効果ガスの排出がなく、地上太陽光発電と異なり昼夜・天候に左右されることなく発電が可能であることから、将来の新エネルギーシステムとしてその実現が期待されているところであるが、実用化に至るまでには長期の研究開発と段階的な技術実証を要する。

本事業では、将来の新エネルギーシステムとして期待される宇宙太陽光発電システムの中核技術であるマイクロ波による無線送受電技術を確立することにより、宇宙太陽光発電システムの実現並びにエネルギー源の多様化に資することを目的とした。

K-1-2 政策的位置付け

経済産業省では、宇宙太陽光発電システムを実現するため、平成21年度から無線送受電技術の研究開発に取り組んでおり、これまでの取組成果を踏まえ、平成26年度から本事業に取り組んでいる。

平成25年1月決定の宇宙基本計画には「宇宙太陽光発電システムについては、我が国のエネルギー需給見通しや将来の新エネルギー開発の必要性に鑑み、無線による送受電技術等を中心に研究を着実に進める」ことと位置づけられている。

その後、宇宙基本計画は平成27年1月に改訂されたが、同様に、宇宙太陽光発電システムの研究を推進することが位置づけられている。

また、エネルギー基本計画(平成22年、平成26年)においても、宇宙太陽光発電システムは将来の革新的なエネルギーとして、中長期的な技術開発を行うことが位置づけられている。

関連する閣議決定等における関係分の記述を以下に示す。

○宇宙基本計画(平成27年1月宇宙開発戦略本部決定)抜粋

エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能

性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組や、太陽活動等の観測並びにそれに起因する宇宙環境変動が我が国の人工衛星等に及ぼす影響及びその対処方策等に関する研究を推進する。

○エネルギー基本計画（平成 26 年 4 月閣議決定）抜粋

宇宙太陽光発電システム(SSPS)の宇宙での実証に向けた基盤技術の開発などの将来の革新的なエネルギーに関する中長期的な技術開発については、これらのエネルギー供給源としての位置付けや経済合理性等を総合的かつ不断に評価しつつ、技術開発を含めて必要な取組を行う。

○環境エネルギー技術革新計画（平成 25 年 9 月総合科学技術会議決定）抜粋

将来的な課題への対応や長期的な可能性として検討すべき技術として、核融合、宇宙太陽光発電や窒素循環の適正化等についても、長期的観点から取り組む。

K-1-3 国の関与の必要性

宇宙太陽光発電システムの実現には、先端的な半導体技術から高信頼性が求められる宇宙技術に至るまで、多岐にわたる専門技術と長期の取組が必要であり、民間企業だけで研究開発や技術実証を行うことは困難であることから、我が国の英知を集結して、政府が主導的に研究開発や技術実証を進めていくことが必要不可欠である。また、宇宙太陽光発電システムは、将来の新エネルギーシステムとなる可能性を有していることから、エネルギー政策を所管する経済産業省が我が国の宇宙機関である（当時）独立行政法人宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA という。）などと連携・協力し、研究開発や技術実証を進める必要がある。

K-2 研究開発目標

K-2-1 研究開発目標

本研究開発は、将来の新エネルギーとしての宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space Solar Power System）の実現に向け、その中核的技術であるマイクロ波無線送受電技術に係る研究開発を行うことにより、当該技術の高度化を目標とする。

太陽光発電は石油代替エネルギーとして導入が進められてきているが、エネルギーの安定供給の確保、地球環境問題への対応等の観点から、更なる導入拡大が重要となっている。さらに、世界規模の低炭素社会を実現のための抜本的な対策の一つとして、昼夜や天候に左右されることなく発電が可能な宇宙太陽光発電システムの実現が期待されている。

エネルギー基本計画（平成26年4月閣議決定）や宇宙基本計画（平成27年1月9日宇宙開発戦略本部決定）において、宇宙太陽光発電の実現に向けた技術開発及び検討を実施することが明記され、これまでも実現に向けた検討や技術開発を実施してきた。

平成21年度から26年度には「太陽光発電無線送受電技術研究開発」において、送受電の効率化と薄型・軽量化の研究開発に取り組み、高効率な薄型送電部等の開発に成果を上げ、また、地上実証試験によりマイクロ波無線送受電システムの実現性も確認した。しかし、実用化時点に必要とされる変換効率のレベルや送電部の厚さと、現状値にはまだ開きがあることから、本研究開発ではマイクロ波無線送受電システムの更なる高効率化及び最先端の半導体技術による大幅な薄型・軽量化を目標とする。

また、宇宙太陽光発電システムの実現には、様々な要素技術を必要とし、かつ取組が長期に及ぶことから、研究開発を着実に進めるためには、中長期的なロードマップが必要である。一方、現状のロードマップは、平成19年度に作成したもので、当時の見通しどおりに研究開発が進んでいないものもあり、現在の進捗との乖離が見られることから、現時点の技術レベルや今後の見通しに合わせたロードマップの作成を行う。

さらに、宇宙太陽光発電システムの実現に向け研究開発している最先端の無線送受電技術は、産業応用の可能性が期待できることから、本研究開発では、宇宙太陽光発電システム以外での応用の可能性について調査、分析及び潜在的な利用者に対する利用促進を実施する。

また、図 K-2-1-1 及び図 K-2-1-2 は本研究開発の主体となっている一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構が提案する、将来実用化 SSPS の構想図である。

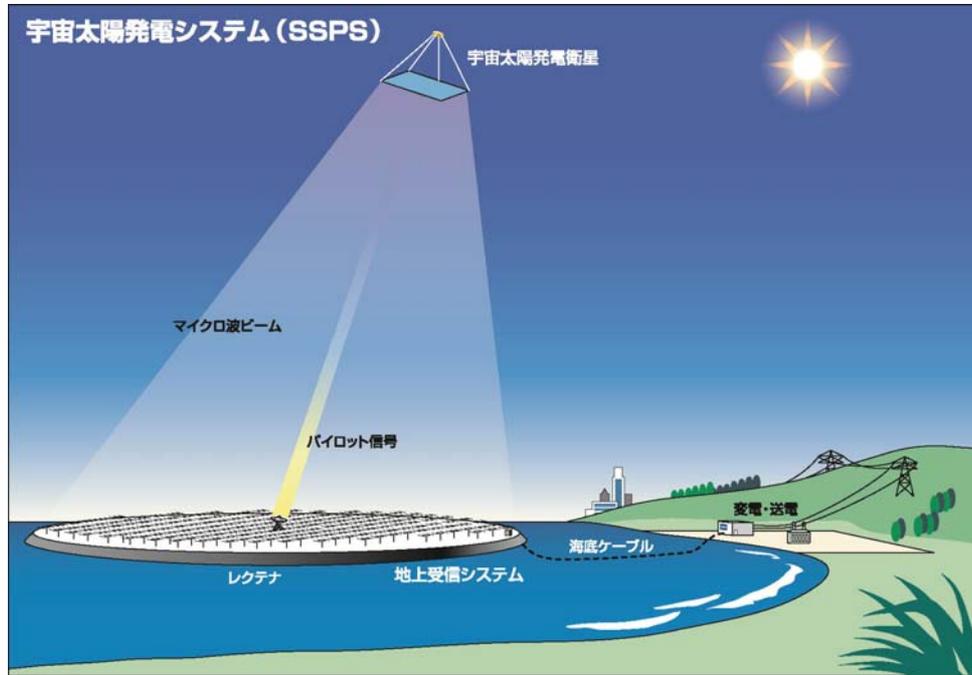


図 K-2-1-1 将来実用化 SSPS の構想図

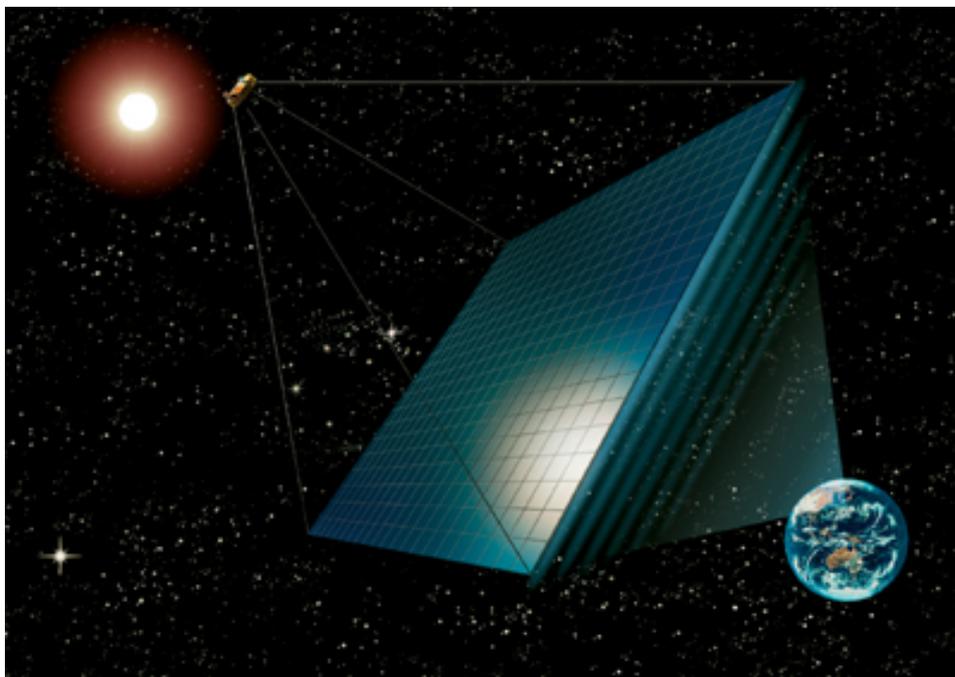


図 K-2-1-2 将来実用化 SSPS の構想図

K-2-2 全体の目標設定

表 K-2-2-1 全体の目標

目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
<p>マイクロ波無線送受電技術を基盤とする研究開発に係るロードマップを作成する。</p>	<p>ロードマップの作成に当たり、必要となる技術項目を抽出する。現時点での技術レベルを調査し、想定される将来の技術進展を踏まえ、本研究開発における目標を設定する。</p>	<p>宇宙太陽光発電システムの研究開発は長期に及ぶ取組となることから、実用化に向けた研究開発の見通しをロードマップとしてまとめる必要がある。</p>
<p>宇宙太陽光発電システムの実現に不可欠なマイクロ波無線送受電システムの更なる高効率化及び最先端の半導体技術による大幅な薄型・軽量化の技術を確認する。</p>	<p>送電系の半導体増幅器向け素子の高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。大幅な薄型・軽量化を可能とする HySIC 技術の実現性を明確にする。</p>	<p>現在のマイクロ波無線送受電システムの効率は、将来の宇宙太陽光発電システムで想定されている効率に比べ開きが大きく、更に改善する必要がある。また、宇宙太陽光発電システム構築の低コスト化に当たっては送受電システムの薄型・軽量化が必要不可欠である。</p>
<p>研究開発する最先端の無線送受電技術について、宇宙太陽光発電システム以外での応用の可能性について調査、分析及び潜在的な利用者に対する利用促進を実施する。</p>	<p>宇宙太陽光発電システム以外でのマイクロ波無線送受電技術の応用可能性について調査する。調査結果を踏まえて、可能性の高い産業領域を整理・分析する。</p>	<p>宇宙太陽光発電システムの実現に向け研究開発している最先端の無線送受電技術は、産業応用の可能性が期待できるため、産業応用を促進する。</p>

K-2-3 個別要素技術の目標設定

表 K-2-3-1 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
送電系高効率化	送電部に使用する GaN HPA の素子効率を 80% とする。	高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。	現在 70% を達成している GaN HPA の効率について、 <u>世界最高水準</u> を目指す。 (注 1)
受電系高効率化	捕集効率を 90% とする。	受電部高効率化に寄与する項目を抽出する。	捕集効率は現在約 70% である。アンテナの損失低減も考慮し、90% まで高効率化を図る。
薄型・軽量化	送電部の厚さ 10mm 以下	送電部の大幅な薄型化を実現するために必要となる HySiC 技術の実現の見通しを得る。	将来想定している SSPS 送電一体型パネルの構想案において、電氣的にコアとなる部分の厚みは約 4mm であることから、目標を一桁 mm として開発を進めることとした。この大幅な薄型・軽量化の実現の為に、HySiC の実用化が必要である。 (注 2)

(注1) HPA 高効率化目標設定

図 K-2-3-1 に C 帯 HPA の電力付加効率のトレンドを示す。出力 10W 程度の HPA に関して、「効率 80%」は現在の技術レベルでは世界最高水準であり、効率トレンドから見ても十分な開発目標といえることから HPA の電力負荷効率 80% を目標として開発を進めることとした。

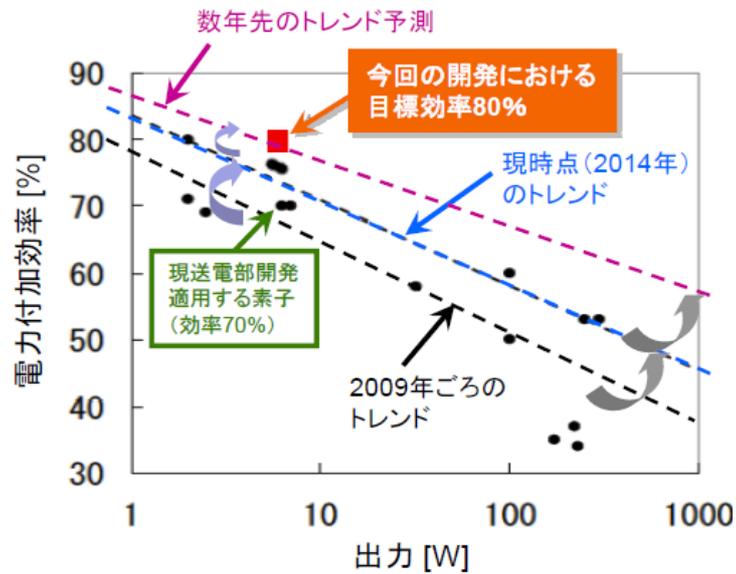


図 K-2-3-1 C 帯 HPA の State of the Art

(注2) 薄型・軽量システムの厚さの目標設定

図 K-3-1-1-5 に将来想定している SSPS 発送電一体型パネルの構想案を示す。サブレイの断面において電気的にコアとなる部分の厚みは約 4mm である。これと鑑みて一桁 mm の厚さとするとし、目標を 10mm 以下として開発を進めることとした。

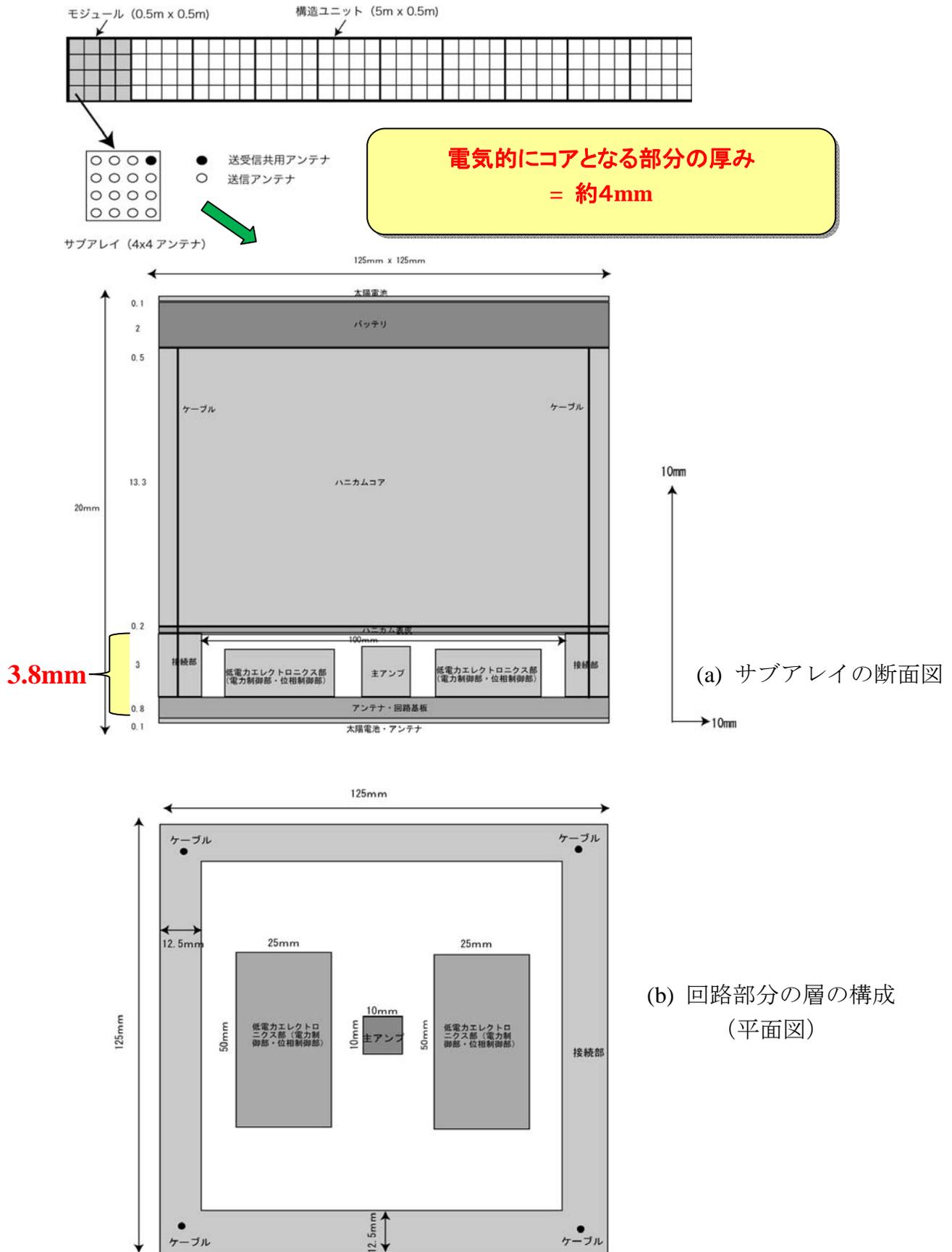


図 K-2-3-2 SSPS 発送電一体型パネルの構想案

K-3 成果、目標の達成度

K-3-1 成果

K-3-1-1 全体成果

本研究開発は平成 26 年 10 月から開始され、今回の中間時点での評価対象は、6 ヶ月間の事業内容と成果である。

初年度(平成 26 年度)には、本研究開発で扱う技術仕様の設定と作業計画の設定を行った。また、これらに基づき、具体的な設計検討作業、解析作業、調査作業を開始し、K-3-1-2 項以降に示す個別要素技術についても検討を開始した。

なお、これらの作業については専門学識経験者による技術委員会を組織し、技術内容を中心に評価と助言を頂き、作業に反映している。

具体的な成果については、以下の順で述べる。

- (1) 宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成
- (2) マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発
- (3) マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査

(1) 宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成

① 技術項目の抽出

宇宙太陽光発電衛星は、衛星軌道上で太陽光を用いて発電を行い、その電気エネルギーを無線で地上に送り、地上では送られたエネルギーを受電し利用するシステムである。宇宙太陽光発電衛星システムの概要を図 K-3-1-1-1 に示す。衛星軌道上に建設される、宇宙太陽光発電衛星と地上設備から構成される。

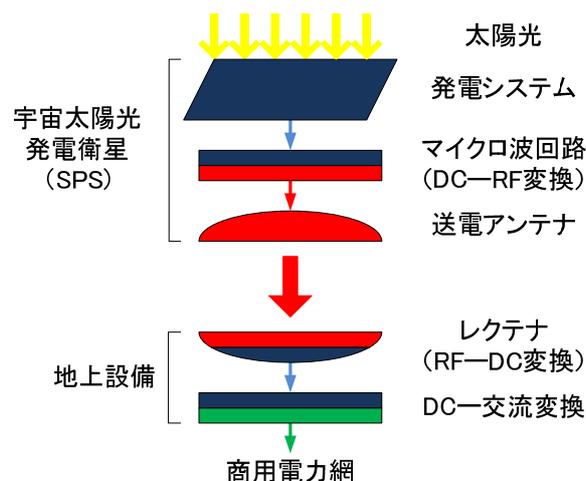


図 K-3-1-1-1 太陽光発電衛星システムの基本構成(マイクロ波型 SSPS)

宇宙太陽光発電衛星は、先に述べたように、衛星軌道上で発電し、マイク

口波に変換した後、地上の受電設備に向けて、エネルギーを無線で送る。太陽光発電衛星に必要な技術分野と課題を表 K-3-1-1-1 に示す。

表 K-3-1-1-1 技術分野と課題

分野	技術課題
システム技術	システム総合効率 経済性 環境・安全性
発電技術	太陽電池モジュール効率
送電技術	送電DC-RF変換効率 素子単体変換効率(半導体) 電力管理(大規模電力電送、送電素子数) 送電ユニット軽量化 ビーム制御精度
大型構造技術	パネル構造技術 パネル展開技術・テザー伸展技術 パネル・テザー・姿勢制御技術 パネル・テザー・衛星軌道維持技術
軌道上組み立て技術	ランデブー・ドッキング・ラッチ技術 ロボット・遠隔操作技術
受電技術	受電RF-DC変換効率 素子単体変換効率 補修効率 受電設備関連
輸送技術	新型基幹ロケット 低領域再使用型輸送機(~LEO) 再使用型軌道間輸送機(LEO-GEO)

発電技術分野では、高効率で低コストかつ耐宇宙環境性を有する太陽電池モジュールが要求される。発電部の面積は太陽光発電衛星のサイズを決める主な要因の一つである。

送電技術分野では、高い送電 DC-RF 変換効率が必要とされ、このためには半導体素子単体の高い変換効率が必要とされる。また、高度なマイクロ波ビーム制御技術が必要とされる。マイクロ波制御技術の中には、送電方向を探知する技術、送電方向制御技術、マイクロ波ビームの形状制御技術が含まれる。また、使用されるマイクロ波デバイスは太陽電池と同様に高効率で低コスト、耐宇宙環境性が要求され、また、デバイスの小型化は回路設計や搭載性の自由度が向上する。

構造・建設分野では、大型発電システム、大型送電アンテナ等の大規模宇宙構造物を極めて軽量に実現する必要がある。この時、形状の精度要求も、発生電力の許容変動、送電効率要求からのアンテナの平坦度から、考慮されなければならない。

輸送分野では、従来の宇宙輸送システムを一新する必要がある。平成 26 年度の H-IIA ロケットの打ち上げ回数は 5 回である。今後、4~5 年先の打上げ予定においても、年間多くて 5 回である。

②研究開発目標の設定

本研究開発で「高効率化に資する研究開発」及び「薄型・軽量化に資する研究開発」について、HPA 高効率化（電力付加効率）と薄型・軽量システムの厚さの目標設定を行った。（詳細はK-2-3参照）

(2) マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発

マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発として、以下を実施した。

a. 送電部高効率化

高効率化に係わる課題を抽出し、短ゲート化 HPA の試作を実施し、電力付加効率向上への効果を確認し、対処方針について見通しを得た。

詳細はK-3-1-2(1)に示す。

b. 受電部高効率化

受電部高効率化検討対象として補修効率の高効率化を選定した。

詳細はK-3-1-2(2)に示す。

c. 薄型・軽量化

薄型・軽量化のための HySiC 実現の見通しを得た。

詳細はK-3-1-2(3)に示す。

(3) マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査

a. ワイヤレスセンサの適用可能性

ワイヤレスセンサの適用を検討している大学、研究機関、及び企業へのヒアリングを実施して、“薄型・軽量化のマイクロ波無線送受電技術”の適用の可能性を確認した。

農業分野（フィールドサーバ）、防災分野、漁業分野、交通（ITS）分野で研究・実証実験が行われている。

b. 電力伝送の適用可能性

電力伝送の適用に関心の高い商社の協力を得て、その適用可能性の検討を実施した。

適用可能のある候補として、電動車いす、ドローン、農場、気象観測ブイがピックアップされた。

c. 実用化活動

国内で実用化活動を実施しているワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム（Wireless Power Transfer Consortium for Practical Applications: WiPoT）にて、具体的な事業化検討が進んでいるものを調査した。

実用化活動でも、ワイヤレスセンサ、電力伝送が先行しており、これらの適用性が高いものと考えられる。

K-3-1-2 個別要素技術成果

(1) 送電系高効率化

本研究開発では、宇宙太陽光発電システムの実現に不可欠なマイクロ波無線送受電システムの更なる高効率化に向け、マイクロ波電力伝送用の高出力増幅器（HPA : High Power Amplifier）の開発を行っている。HPA の基本性能は、供給された低電力のマイクロ波電力（ $P_{in}[W]$ ）と直流電力（ $P_{dc}[W]$ ）を、高出力のマイクロ波電力（ $P_{out}[W]$ ）に変換することである。この際、HPA の効率は式(1)のように定義され、電力付加効率（PAE[%] : Power Added Efficiency）と定義される。入力されたマイクロ波電力と直流電力が全てマイクロ波電力として出力された場合、電力付加効率は 100%となる。

$$PAE = (P_{out} - P_{in}) / P_{dc} \dots (1)$$

一方受電部も含めたマイクロ波電力伝送システムとしての電力効率は、送電部に供給された直流電力と受電部から出力される直流電力の比で定義され、介在する HPA の電力付加効率がシステムの電力効率に直接影響する。このため HPA の高効率化はシステムの高効率化に特に重要である。

本節では、HPA の高効率化（電力付加効率の目標 80%）に向けた技術的取り組みについて概要を説明する。

ア. HPA 高効率化の方針検討

HPA の効率は大きく 2つの要因によって決定される。

- ・ HPA を構成するトランジスタ自体（HPA 素子）の効率
- ・ HPA 素子の性能を引き出す回路の損失

図 3-1-2-J-1 に HPA の構成を示す。本研究開発では高出力と高効率を達成するために HPA 素子として GaN HEMT（Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor）を使用している。

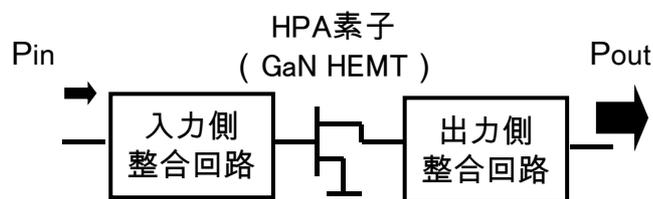


図 K-3-1-2-1 HPA の構成

HPA 素子の効率は HPA 素子の基本波および高調波での負荷インピーダンス（HPA 素子から入力側、出力側整合回路を見込んだインピーダンス）により決定される。したがって、入力側、出力側整合回路は基本波および高調波に

て HPA 素子の効率最適負荷インピーダンスを実現するように注意深く設計しなくてはならない。

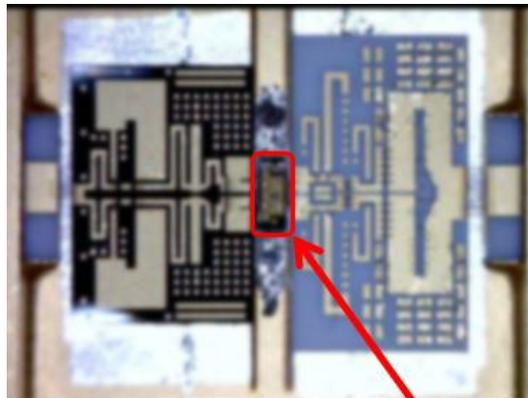
イ. 要素検討

HPA 素子ドレイン効率 (ED^{FET}) を向上させるには HPA 素子の電流利得遮断周波数 (fT) を向上させる必要がある。fT はおよそトランジスタのゲート長に反比例する。(出典：『マイクロ波半導体回路 基礎と展開』日刊工業新聞社、P. 12)

また、HPA 素子の利得 (G^{FET}) は理論的にはゲート長に反比例する。

そこで、トランジスタプロセスの改良によりゲート長 $0.15\mu\text{m}$ の HPA 素子を試作し、従来 HPA 素子 (ゲート長 $0.7\mu\text{m}$) と比較した。

短ゲート化の効果を実験に確認するため、ゲート長 $0.7\mu\text{m}$ mHPA 素子に対して設計した整合回路をそのまま用いて、HPA 素子のみゲート長 $0.7\mu\text{m}$ からゲート長 $0.15\mu\text{m}$ に換装した HPA を試作し (図 3-1-2-J-2)、電気特性を測定した。なお、ゲート長 $0.7\mu\text{m}$ mHPA 素子とゲート長 $0.15\mu\text{m}$ mHPA 素子では基本波の最適負荷インピーダンスが大きく異なることから、測定に際しては基本波ロードプル装置を使用し、電力付加効率最大の負荷インピーダンスで測定を行った。



0.15 μm GaNチップ

図 K-3-1-2-2 ゲート長 $0.15\mu\text{m}$ mHPA 素子を用いた HPA

(整合回路はゲート長 $0.7\mu\text{m}$ mHPA 素子に対して設計したもの)

本測定にて、HPA での PAE 76.8% という最先端の性能が得られており、短ゲート化による効果を確認することができた。

平成 28 年度に PAE 80% 達成の目途が得られた。

(2) 受電系高効率化

受電部効率は以下で示される。

$$\cdot \text{受電部効率} = \text{捕集効率} \times \text{変換効率} \times \text{統合効率} \times \text{整合効率}$$

$$\text{捕集効率} = \frac{\text{整流回路へ入力される総高周波電力}}{\text{受電面を照射する総マイクロ波電力}}$$

$$\text{変換効率} = \frac{\text{整流回路から出力される総直流電力}}{\text{整流回路へ入力される総高周波電力}}$$

$$\text{統合効率} = \frac{\text{統合動作の整流回路から出力される総直流電力}}{\text{整流回路から出力される総直流電力}}$$

$$\text{整合効率} = \frac{\text{負荷整合された総直流電力}}{\text{統合動作の整流回路から出力される総直流電力}}$$

これらのうち、現状の技術レベルを踏まえると、受電部高効率化に大きく寄与する項目は捕集効率と変換効率である。

平成21年度から26年度に実施された「太陽光発電無線送受電技術研究開発」において、変換効率の向上に向けて取り組んでいるため、本研究開発では捕集効率の高効率化を図ることとする。

捕集効率は、過去の文献では、アンテナを適切な間隔で配置し、かつアンテナ内の損失を0にできれば、理論上100%となることが示されている。

アンテナ内の誘電体損・偏波損等の損失低減も考慮し、捕集効率の目標値を90%とする。

(3) 薄型・軽量化

無線電力伝送とエネルギーハーベスト分野の一つとして、SSPSの送受電システムの開発が行われてきた。本研究開発において薄型・軽量化のために技術目標を10mm以下の薄さのパネルで実現することで、受電系システムを構築することにある。また、これは相反技術である送電系にも適用できると考えられ、送受電系が相互に技術発展を行うことで技術進展を図り、エネルギーハーベストを含む無線電力伝送技術分野とこれに関わる新たな市場開拓にちなげようと努力がなされている。

この薄型・軽量化した10mm以下のパネルの実現については、半導体を用いた集積回路技術を用いるのがもっとも可能性が高くなると思われる。これには、半導体チップをメインのデバイスとし、その周りの整合回路や制御回路等を単一の半導体基板に形成することで、小型軽量化が達成されてきた。現在では、これをSi基板上で形成することにより、デジタル信号処理LSI、アナログ電子回路の集積回路、そして、RFやマイクロ波などの高周波アナログ集積回路などが研究開発されている。一方で、Siを用いた集積回路では実現できない高周波高出力高効率の送受信回路などは、GaAsやGaNなどの化合物

半導体を用いる。現在では、これら集積回路は小型・薄型・軽量化のために誘電体基板を用いてシステムインパッケージ（SiP：System in Package）として、また、Si 基板上にアナログ・デジタル集積回路を形成するシステムオンチップ（SoC：System on Package）の開発が行われている。本研究開発に関わる JAXA 宇宙研川崎研では、これら Si および化合物半導体を用いた集積回路群を、さらに、半導体基板上で形成する混成半導体集積回路（HySIC：Hybrid Semiconductor Integrated Circuit）を提唱している。この技術のメリットは、高周波回路、制御回路、信号処理回路、アンテナなど通信系に関わる全ての要素をワンチップで超小型で実現できることである。また、すべての要素を半導体で作るため、半導体ファインプロセスがあれば、その信頼性のもと大量生産が可能となり、低コスト化につながると考えられる。この HySIC は制御回路や信号処理回路のファーム（IC に密着したその動作のためのソフトウェア）を書き換えることで、iPS 細胞のように、いろいろな用途に対応できる、いわゆる電子万能細胞チップの実現を目指す。

本研究開発では、ハードウェアとして HySIC の作製、実用を行うことが目標である。前述したように、実際の集積回路として HySIC を構成する要素に Si による MMIC があり、これには Si・RF-CMOS の作製が必須である。

検討結果

電子線描画装置によりモノリシックマイクロ波集積回路（MMIC）の整合回路等を基板上に製作する。また、自動パターン形成装置により基板上に周辺回路等の形成を行い評価した。

具体的な検討事項には、下記のとおりである。

- ① 定された小型化・軽量化のターゲットに対して、それを実現するために適用すべき半導体集積技術を検討し、その基本仕様を策定した。
- ② さらに、基本仕様の中核となる部分（整流デバイス及び整合回路）について、その有効性を確認するための評価試験に向けた供試体仕様の検討を行なった。
- ② 用すべき半導体集積技術としては、モノリシックマイクロ波集積回路技術（MMIC）、及びこれを半導体基板、例えばシリコン（Si）基板上に接合してワンチップ化する技術（HySIC）を検討した。
- ③ 入された製作用器材につき、使用上の実用性を評価した。

なお、以下の報告は受電系を中心として報告するが、送電系は検波器を高出力増幅器（High Power Amplifier：HPA）へと展開することで達成できる。

試作概要を図 K-3-1-2-3 に示す。

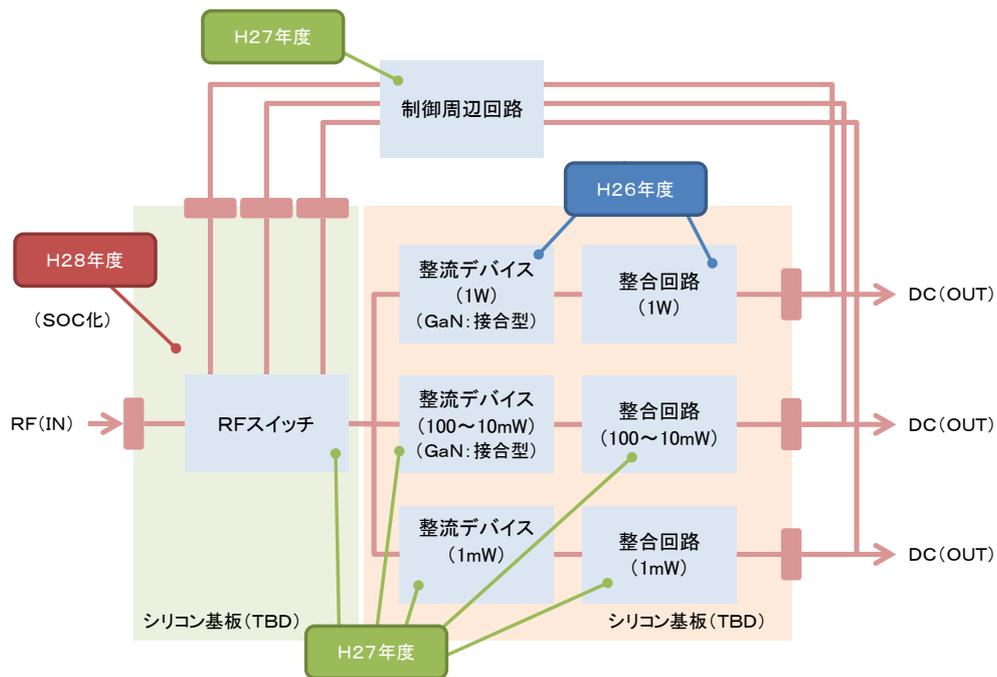


図 K-3-1-2-3 試作概要

a. 半導体集積技術

求められる SSPS のための薄型・軽量化に関しては、10 mm の厚みに RF デバイス・整合回路部、小型アンテナ部、信号処理部、制御回路を形成し (HySIC)、システムオンチップ形状で実現することを目指す。

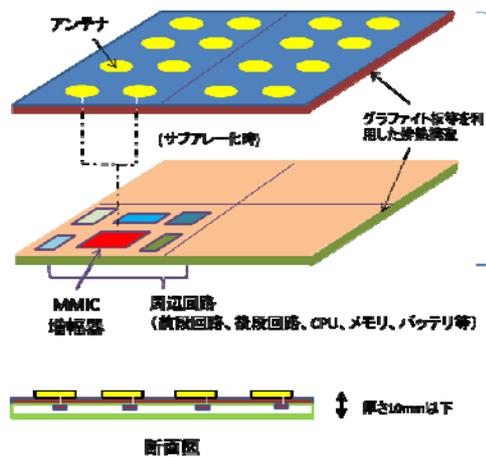


図 K-3-1-2-4 オール MMIC 化した SoC による HySIC 集積化アンテナアレーのイメージ

b. 整流デバイス及び整合回路の有効性確認

整流デバイスは GaN ダイオードである。整流デバイスの特性評価について、特性評価治具の作製と評価を行った。（図 K-3-1-2-5 参照）ダイオードの密着性や電圧印加法など、基礎的な測定ノウハウは確立できた。ダイオードの特性としては、5.8GHz 帯で動作しており、平成 27 年度以降の HySIC の要素デバイスとして、使用可能であると思われる。

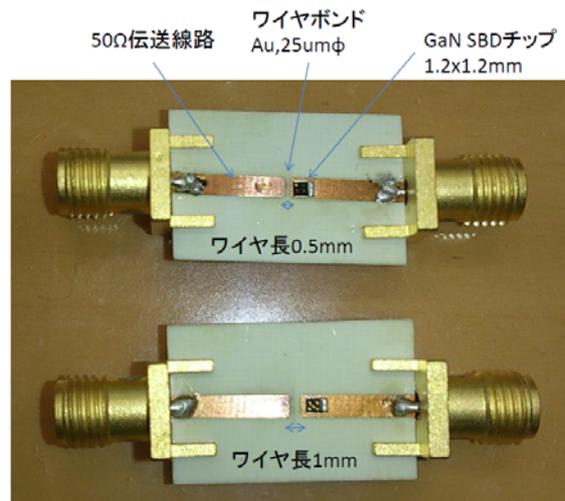


図 K-3-1-2-5 整流ダイオードと特性測定用検波回路

整合回路については、上記 GaN ダイオードが高効率・高出力でコンパクトな形状で実現することを念頭に設計・作製・評価を行わなくてはならない。上記整流ダイオードを用いる場合、最適負荷電力すなわち最適負荷インピーダンスを実現するために、RF 受電電力の合成が必要となるが、これについて誘電体基板による電力合成器の試作を行い、HySIC に向けた基本設計データは取得できた。（図 3-1-2-J-6 参照）

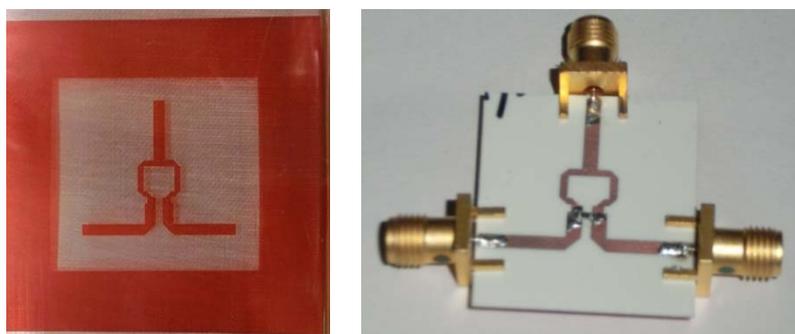


図 K-3-1-2-6 RF 電力合成の回路作製用マスクと誘電体基板を用いた C 帯電力合成器

以上により整流デバイス及び整合回路の有効性を確認した。

c. HySIC の実現性

現在、高周波、特に、マイクロ波ミリ波でよく用いられる集積回路は、MMIC である。これには、デバイス材料として Si の他 GaAs や GaN などの化合物半導体を用いるのが一般的である。化合物半導体を用いた回路モジュールは、すでにミリ波帯まで利用可能であり、本研究開発で必要な特性を持つ C 帯動作の集積回路 MMIC は、ファンダリーを用いて実現可能である。Si ベースの高周波デバイス、集積回路は RF-CMOS を用いたシステムインパッケージ (System in Package : SiP) やシステムオンチップ (System on Chip : SoC) で実現できるところまで技術が進んできている。

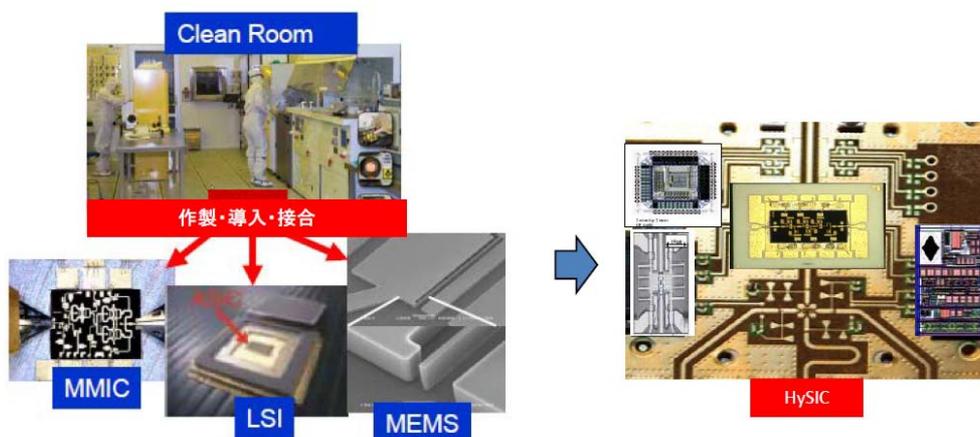


図 K-3-1-2-7 HySIC の構成

(RF デバイス・整合回路部、小型アンテナ部、
信号処理部、制御回路の集積化集合体)

本研究開発による HySIC の実現性であるが、上記のように各機能ブロックをどの半導体材料に分担させるかがポイントとなる。HySIC 中央の部分は、化合物半導体による MMIC で構成され、例えば RF デバイス・増幅回路の役目を果たす。そのほか、RF 整合回路や信号処理部、制御回路部は Si の CMOS 技術を用いるが、それぞれ RF 高周波、デジタル信号処理、低周波アナログ回路の役目を分担することとする。

各機能ブロックをそれぞれの MMIC 技術で小型化することに対しては技術的ステップを踏んでいく必要がある。各 MMIC について、機能分担を行い、Si については宇宙研ナノエレクトロニクスクリーンルーム (相模原 CR) を使い、化合物についてはファンダリーを使って実現する方法とそれらを接合させる常温や固相接合技術があるので、これらの導入と組み合わせ技術を確立していく。

相模原 CR の装置（本研究開発により導入したプロセス装置も含む）の製作熟練度に依存するところが大である。Si を用いた RF-CMOS 作製については、デザインルールブック、手引書等を作成し、相模原ナノ CR にて実施する。

以上により HySIC 実現の見通しを得た。

K-3-1-3 特許出願状況等

表 K-3-1-3-1 特許・論文等件数

要素技術	論文数	論文の被引用度数	特許等件数(出願を含む)	特許権の実施件数	ライセンス供与数	取得ライセンス料	国際標準への寄与
マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発							
薄型・軽量化に資する研究開発	4						

表 K-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	信学会総合 「S帯低雑音増幅器と誘電体マイクロカロリメータのX線検出システム基礎実験」	H27.3
	信学会総合 「宇宙機内WiCoPTのためのMPT用GaN HPAの設計・開発」	H27.3
	信学会総合 「5.8GHz帯MPTシステムを用いて電力を供給する2.4GHz帯ワイヤレスセンサネットワークシステムの基礎検討」	H27.3
	応用物理学会 「エネルギーハーベスト用ショットキーダイオードの検討その1」	H27.3
発表	第2回ナノエレクトロニクスワークショップ 「ナノRF技術の展望」	H27.3
	第2回ナノエレクトロニクスワークショップ 「MOSFET作製を目指した熱拡散プロセスについて」	H27.3
	第2回ナノエレクトロニクスワークショップ 「宇宙ナノエレクトロニクスクリーンルームでのMOSFET作製に向けて」	H27.3
	第2回ナノエレクトロニクスワークショップ 「電源も無線化したワイヤレスセンサネットワークシステムの再使用ロケット実機内での実証実験」	H27.3
	第2回ナノエレクトロニクスワークショップ 「地上局搭載のためのアップリンク用20W級GaN HPAの設計・試作」	H27.3
	第58回宇宙科学技術連合講演会 「太陽光発電無線送受電技術開発の状況」	H26.11

K-3-2 目標の達成度

K-3-2-1 全体の目標の達成度

表 K-3-2-1-1 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 (中間評価時点)	成果 (中間評価時点)	達成度
宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成	ロードマップの作成に当たり、必要となる技術項目を抽出する。 現時点での技術レベルを調査し、想定される将来の技術進展を踏まえ、本研究開発における研究開発の目標を設定する。	本研究開発後のステップに必要となる技術項目を抽出した。 本研究開発における研究開発の目標を設定した。	達成
マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発	送電系の半導体増幅器向け素子の高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。 大幅な薄型・軽量化を可能とする HySIC 技術の実現性を明確にする。	高効率化に係わる課題を抽出し、短ゲート化 HPA の試作を実施し、電力付加効率向上への効果を確認し、対処方針を明確にした。 薄型・軽量化のための HySIC 実現性を明確にした。	達成
マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査	宇宙太陽光発電システム以外でのマイクロ波無線送受電技術の応用可能性について調査する。 調査結果を踏まえて、可能性の高い産業領域を整理・分析する。	宇宙太陽光発電システム以外でのマイクロ波無線送受電技術の応用可能性について調査した。 調査結果を踏まえて、可能性の高い産業領域を整理・分析した。	達成

K-3-2-2 個別要素技術の目標の達成度

表 K-3-2-2-1 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 (中間評価時点)	成果 (中間評価時点)	達成度
送電系高効率化	高効率化に係わる課題を抽出し、対処方針を明確にする。	高効率化に係わる課題を抽出し、短ゲート化 HPA の試作を実施し、電力付加効率向上への効果を確認し、対処方針を明確にした。	達成
受電系高効率化	受電部高効率化に寄与する項目を抽出する。	受電部高効率化に寄与する項目を抽出し、研究開発目標を設定した。	達成
薄型・軽量化	送電部の大幅な薄型化を実現するために必要となる HySIC 技術の実現の見通しを得る。	整流デバイスの特性評価治具の作製と評価を行い、整合回路の誘電体基板による電力合成器の試作を行い、有効性を確認した。 上記により HySIC 実現の見通しを得た。	達成

K-4 事業化、波及効果について

K-4-1 事業化の見通し

宇宙太陽光発電システム（SSPS）の商用システムとしての事業化は、政策的に期待される目標（石油代替エネルギーとしての導入、2050年までの温室効果ガス排出量半減）の規模からも長期的な取り組みを行っている。平成27年の宇宙基本計画でも、4. 我が国の宇宙政策に関する具体的アプローチ（2）具体的取組 ②個別プロジェクトを支える産業基盤・科学技術基盤の強化策 iii）将来の宇宙利用の拡大を見据えた取組において、「エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組」と述べており、本研究開発はまさにそれに符合する。本研究開発の成果が次なる宇宙実証ステップに向けての技術インプットとなり、ひいては、本研究開発は事業化に向けての一里塚であるとの位置づけである。

本研究開発は、表 K-3-1-1-1 に示した太陽光発電衛星に必要な技術分野のうち送受電（高効率化）及び輸送（薄型・軽量化）にかかる技術に貢献することを目的に実施されている。

開発される HPA によれば送電のエネルギー効率が大幅に向上するため、送電の際に発生する熱量が減少し、排熱の為に必要となる構造等を大幅に削減することができる。

開発される HySIC によれば、送電システムが一段と薄型・軽量化され、将来 SSPS の商用化で想定する打ち上げ質量に近づけることができる。

K-4-2 波及効果

K-4-2-1 マイクロ波無線送受電技術の波及効果

K-3-1-1(3) マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査から、以下の分野で波及効果が期待できる。

(1) ワイヤレスセンサ

本研究開発を活用することにより送受電装置が薄型・軽量化、高効率化すると、電源部設置に必要な容積の低減、架台の簡略化による設置コストの低減がなされ、よりワイヤレスセンサの活用が広がることを期待できる。

バッテリーレスとすることにより更に電源部を小型・軽量とすることができる。

a. 農業分野（フィールドサーバ）

i) 農場モニタリング

ア. 計測項目

温度、湿度、日射量、CO2 濃度、降水量、風速、外注カウント、
土壌水分等

イ. 実用ステータス

政府機関、民間企業がフィールドサーバ（センサネットワーク）
の実証実験中



図 K-4-2-1 ワイヤレスセンサ 研究例（農業分野）

b. 防災分野

i) 土砂災害監視システム

ア. 計測項目

雨量、伸縮、傾斜

イ. 実用ステータス

民間企業が土砂災害監視システム（センサネットワーク）の実証
実験中

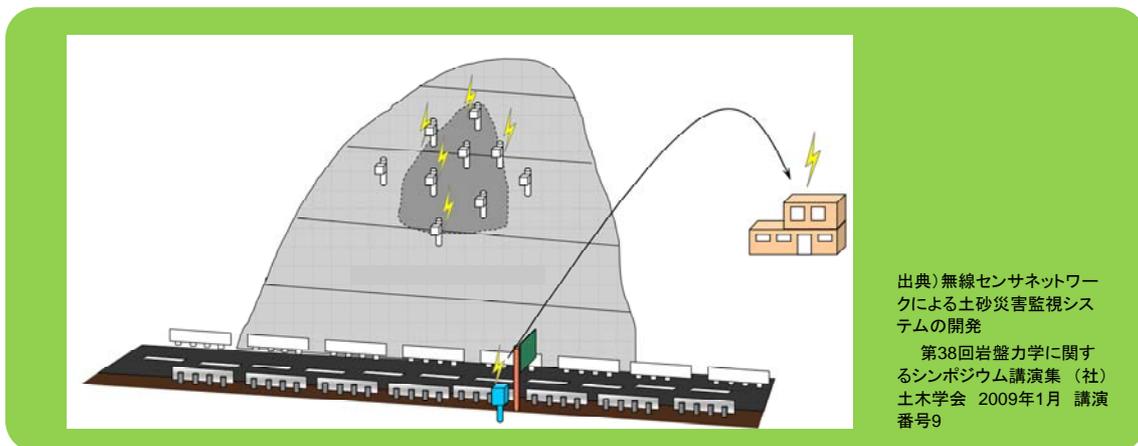


図 4-2-J-2 ワイヤレスセンサ 研究例（土砂災害監視システム）

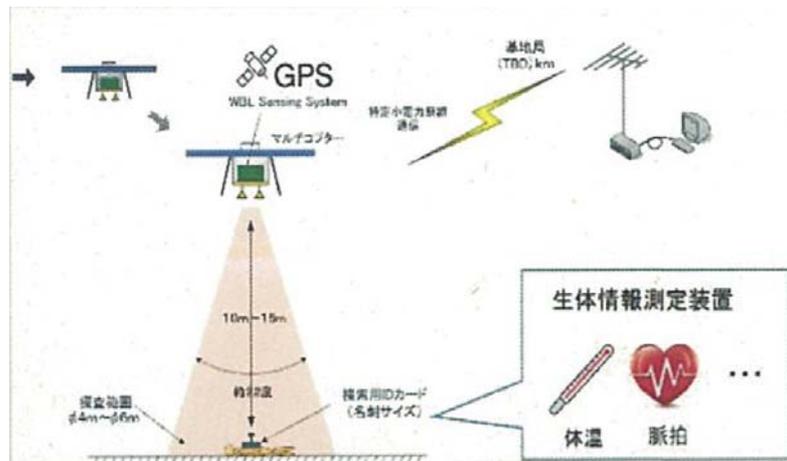
ii) 遭難者探索システム

ア. 計測項目

体温、脈拍、遭難者識別 ID 等

イ. 実用ステータス

産学連携にてマルチコプターによる実証実験中。



出典：福島県商工労働部医療関連産業集積推進室

図 K-4-2-3 ワイヤレスセンサ 研究例（遭難者探索システム）

c. 漁業分野

i) 養殖／水産資源管理システム

ア. 計測項目

水温、潮流

イ. 実用ステータス

大学機関が養殖／水産資源管理システム（センサネットワーク）
の実証実験中（民間も参入可能）

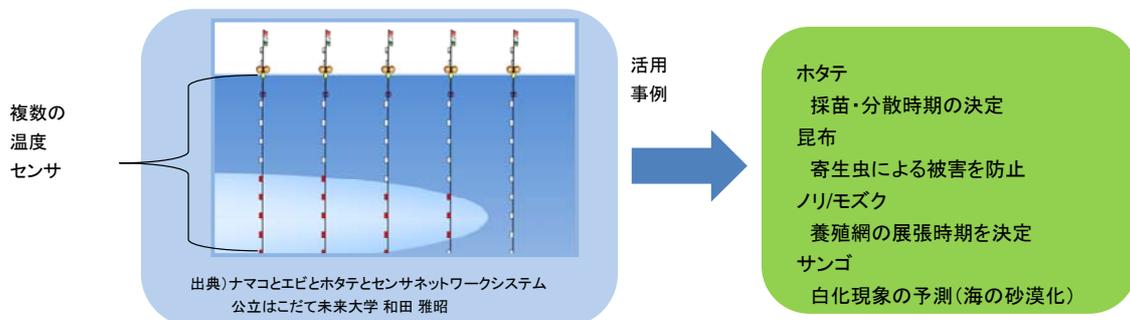


図 K-4-2-4 ワイヤレスセンサ 研究例（漁業分野）

d. 交通（ITS）分野

i) 交通情報システムの構築

ア. 計測項目

車両、車両間の距離等

イ. 実用ステータス

政府機関、民間企業、大学機関が交通情報システム（センサネットワーク）の実証実験中

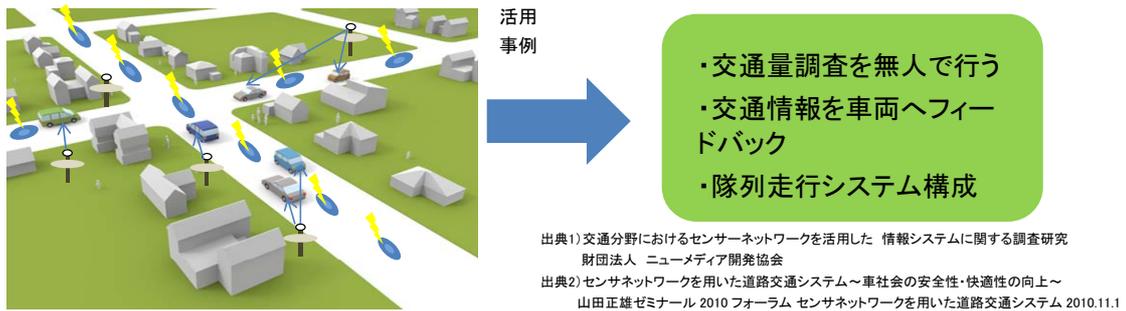


図 K-4-2-5 ワイヤレスセンサ 研究例（交通（ITS）分野）

(2) 電力伝送

受電装置に HySIC を利用することにより、受電装置の小型軽量化が出来、搭載制約・持ち運び時の不便さが緩和される。

a. 電動車両向け無線充電システム

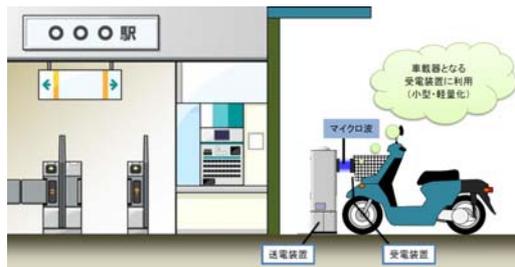
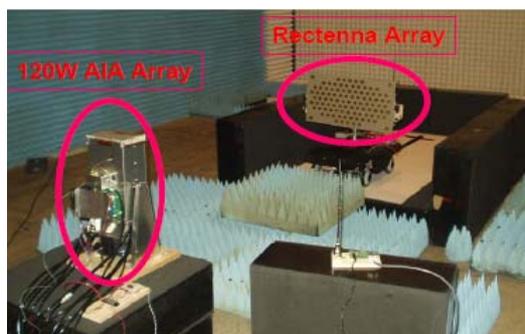


図 K-4-2-6 電力伝送 研究例（電動車両向け無線充電システム）

b. ローバへの無線給電



(出典：作業用ロボットへのマイクロ波送電および通信技術の開発に関する
フィージビリティスタディ報告書 平成19年3月 財団法人機械システム
振興協会)

図 K-4-2-7 電力伝送 研究例（ローバへの無線給電）

c. ユビキタス電源による無線電力空間



(出典：信学技報 SPS2003-18, 2004 京都大学生存圏研究所)

図 K-4-2-8 電力伝送 研究例（無線電力空間）

K-4-2-2 高効率化に資する研究開発の波及効果

高効率化に資する研究開発で開発したCバンド増幅デバイスの主な関連利用用途として、以下に示す継続市場がある。本研究開発の成果は、以下のように関連分野に大きな効用をもたらす見込みである。

(1) 衛星通信用機器

衛星搭載機器の例として通信衛星用トランスポンダがある。本研究開発のHPAと同種(GaN)のCバンド高効率増幅素子の宇宙機器への適用が現在、進められている。従来のGaAs素子SSPA(半導体増幅器)より、高出力化・高効率化を図り、市場拡大を目指している。

新たな半導体増幅器による小型・軽量化、高効率化、高出力化により、従来と同等の性能を小型・軽量・低消費電力で実現出来る。



図 K-4-2-2-1 衛星搭載用 GaN C-band SSPA
(提供：三菱電機株式会社)

(2) 地上のレーダ、中継器等

レーダ市場でアクティブフェーズドアレイ方式化を促進し、電子走査やビーム制御の多様化などの高機能化を実現する。また、高効率化、高出力化により、従来の管球デバイスを置換え、搭載機器の信頼性向上・維持コスト低減に寄与する。

各種レーダ(気象レーダ)、地上無線通信機器(マイクロ波中継器)、衛星通信用機器(VSAT 端末)等の適用例を図 K-4-2-2-2 に示す。



各種レーダの例
(気象レーダ)



地上無線通信機器の例
(マイクロ波中継)



衛星通信用機器の例
(VSAT 端末)

図 K-4-2-2-2 Cバンド増幅デバイスの主な適用例

K-5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、再委託先として国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が参加した。
(図 K-5-3-1 参照)

また、研究開発の実施に当たっては、助言・評価のため、表 K-5-3-1 からなる無線送受電高効率化技術委員会委員会を設置した。

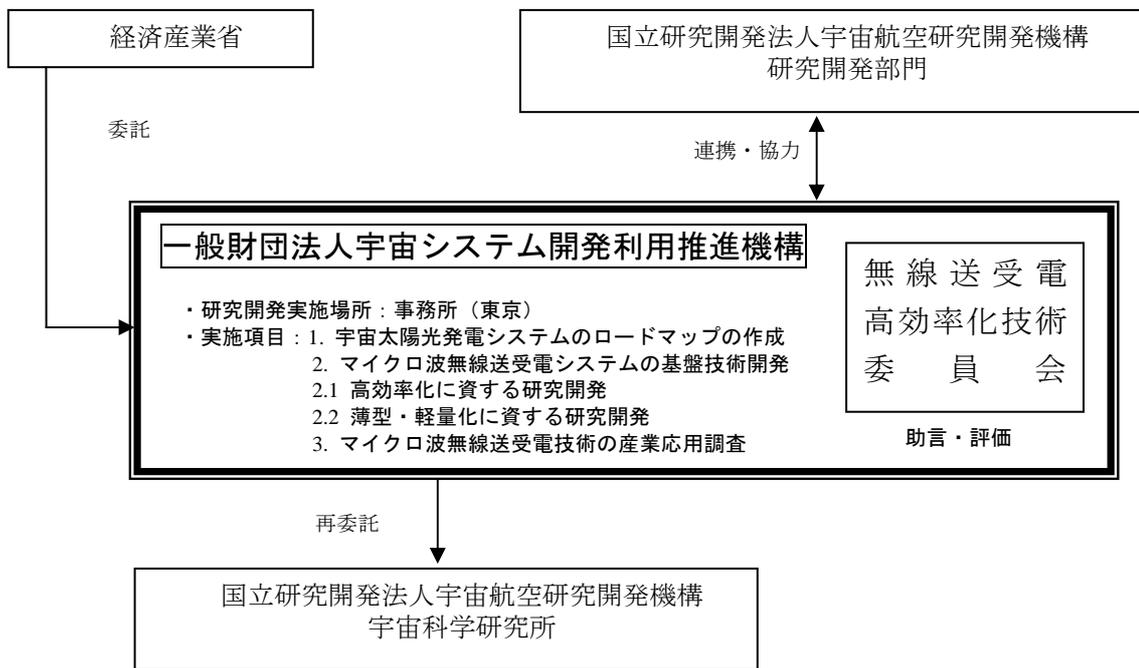


表 K-5-3-1 無線送受電高効率化技術委員会委員会 名簿

氏名	所属
川原 圭博	国立大学法人東京大学大学院情報理工学系研究科 准教授
佐々木 進	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 名誉教授
篠原 真毅	国立大学法人京都大学生存圏研究所 教授
末松 憲治	国立大学法人東北大学電気通信研究所 ブロードバンド工 学研究部門 先端ワイヤレス通信技術研究室 先端ワイヤ レス通信技術研究分野 教授
藤島 実	国立大学法人広島大学大学院先端物質科学研究科半導体集 積科学専攻 教授
藤野 義之	学校法人東洋大学理工学部電気電子情報工学科 教授
星 裕	九州電力株式会社技術本部総合研究所副所長
本城 和彦	国立大学法人電気通信大学情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 教授

K-5-3 資金配分

中間評価時点における資金配分（実績）を表 K-5-3-1 に示す。

表 K-5-3-1 資金配分

（単位：百万円）

年度 平成	2 6	合計
宇宙太陽光発電システムのロードマップの作成	12	12
マイクロ波無線送受電システムの基盤技術開発	—	—
高効率化に資する研究開発	76	76
薄型・軽量化に資する研究開発	160	160
マイクロ波無線送受電技術の産業応用調査	2	2
合計	250	250

K-5-4 費用対効果

本研究開発においては、マイクロ波無線送電の送受電効率の改善及び送受電システムの薄型・軽量化に向けた研究開発を実施するとともに、マイクロ波無線送電による宇宙太陽光発電システム（SSPS：Space Solar Power System）の実現に向けた研究開発の中長期ロードマップの作成等を行う。

中長期ロードマップの作成等については、SSPS 研究機関である、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構（JAXA）と連携・協力をを行い、効果的、効率的に実施している。また、この分野で世界をリードする京都大学をはじめとする大学、SSPS の想定ユーザも含め、協力して実施している。

マイクロ波無線送電の送受電効率の改善及び送受電システムの薄型・軽量化については、特に最新技術である HySIC の制作を行うため、新たな装置の導入が必要であるが、必要最小限の設備により試作・評価するなど効率化を図っている。

本研究開発では、SSPS 用や民生用通信機に適応可能な次世代集積回路技術としてシリコンと化合物半導体の良さを複合した混成半導体集積回路（HySIC：Hybrid Semiconductor Integrated Circuit）を採用した。この技術を用いることにより、SSPS の送電部を 20mm 以下で実現することが期待できるとともに、最先端の微細加工技術ではなく、ニッチ的な高密度実装技術を用いることで比較的開発コストが抑えられる。

世界的に見ても、このような視点で SSPS の無線電力伝送や高性能コンパクト通信機をコンパクトな混成集積回路で実現する技術開発には手が付けられておらず、これが早期に実現できれば、日本の電子立国の優位性が得られる。

薄型・軽量化のシステムオンチップを実現するために、材料、回路技術、接合技術など多くの先端技術を取り入れた本研究開発は、高度な最先端の集積回路技術の混合体であるため、リスクもかなり大きい。これに対しては、異種半導体接合技術をもってチャレンジすることを、世界で初めて取り組んでいる。

本研究開発は、その波及効果は非常に大きく、少なくとも SSPS のスピンオフとして、宇宙機や航空機、自動車などの通信、センサ、エネルギー伝送分野への広範囲な応用が期待できる取り組みである。

K-5-5 変化への対応

現状において特に社会情勢等の変化はない。