

J 太陽光発電無線送受電技術 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

三菱重工業株式会社

株式会社三菱総合研究所

J-1 施策の目的・政策的位置付け

J-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必要がある。

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。

J-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いる。

平成21年6月決定の宇宙基本計画には「地政学的な影響を受けず、安定的でクリーンなエネルギーを利用可能な宇宙における太陽光発電システムに関して、実現に必要な技術の研究開発を進め、地上における再生可能エネルギー開発の進捗とも比較しつつ、10年程度を目途に実用化に向けた見通しをつけることを目標」とし、そのため「関係機関が連携し、総合的な観点からシステム検討を実施する。並行して、エネルギー伝送技術について地上技術実証を進める。」と位置づけている。

その後、宇宙基本計画は2度改訂されているが、いずれも、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。

宇宙分野の技術ロードマップ(エネルギー利用分野)を図 J-1-2-1 に示す。

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。

J-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。

J-2 研究開発目標

J-2-1 研究開発目標

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 SSPS の実現が期待されている。

SSPS の実現にあたっては、宇宙発電・送電部の薄型軽量化技術、高効率な発電・送電・受電技術、効率と安全な運用を実現するエネルギー伝送ビーム制御技術、大型構造物を宇宙空間に輸送し組み立て運用・維持する技術などが技術課題として挙げられる。

本研究開発は、将来の新エネルギーとしての SSPS の実現に向け、その中核的技術であるマイクロ波による送電部の高効率及び薄型軽量技術を含む無線送受電技術を確立することを目標として、安全性や効率性等の確保に不可欠な精密ビーム制御技術の研究開発を実施する。その他の大型構造物を宇宙空間に輸送し組み立て運用・維持する技術などについては、主に JAXA が取り組んでいる。

長距離間を無線でエネルギー伝送する媒体としてマイクロ波とレーザーが存在する。マイクロ波はレーザーに比べて、大気の影響を受けず(全天候型)、ビーム方向制御に電子方向制御が可能であり、エネルギー密度が比較的安く安全な運用が可能であることから、本研究開発ではマイクロ波による無線送受電技術に取り組んでいる。

また、マイクロ波による無線送受電技術は、長距離間のエネルギー安定供給が期待されることから、地上での応用の可能性が高い技術でもある。宇宙用途での小型化、薄型化の要求を緩和し、ハードウェア構成には成熟度の高い技術を活用したスピンオフ技術実証を実施した。

本研究開発の実施体制はJ-5-2項で述べるとおりであるが、その区分はおよそ

表 J-2-1-1 のとおりである。

表 J-2-1-1 太陽光発電無線送受電技術研究開発

実施内容	実施担当
<p><u>マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発*</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・全体システムの研究開発、トータルシステムによる試験実証の実施 ・送電系システムに関する要素技術研究と試験モデル送電部の開発 ・受電系システムに関する要素技術研究と試験モデル受電部の開発 ・無線送受電スピノフ技術の研究開発 	<p>一般財団法人 宇宙システム 開発利用推進 機構 (J-spacesystems)</p>
<p><u>電送制御技術に関する研究開発</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・位置・角度補正法及び並列化法に関する研究開発 	<p>三菱重工業 株式会社(MHI)</p>
<p><u>無線送受電技術研究開発支援業務</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・マイクロ波電力伝送試験候補地に関する調査 ・宇宙太陽光発電関連研究に関する調査 	<p>株式会社 三菱 総合研究所 (MRI)</p>

*ビーム方向制御部に関する事項は JAXA が連携/協力して実施

また、図 J-2-1-1 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(以下、機構という。)が提案する、将来実用化 SSPS の構想図である。

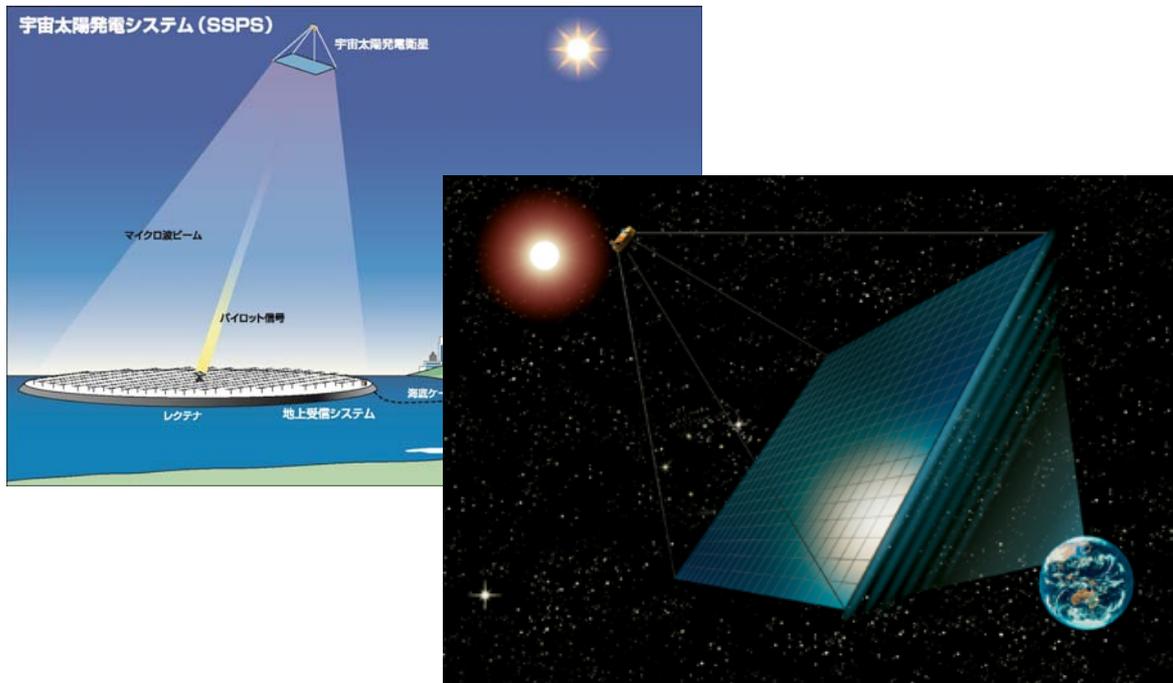


図 J-2-1-1 将来実用化 SSPS の構想図

J-2-2 全体の目標設定

本研究開発の全体の目標を表 J-2-2-1 に示す。

将来の宇宙太陽光発電システムの中核的技術であるマイクロ波無線送受電技術の確立に向け、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えたマイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。また、当該技術の地上での応用を図る。

表 J-2-2-1 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
<p>総合システム： 無線送受電技術の確立に向け、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えた精密ビーム制御マイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。</p>	<p>将来 SSPS 用マイクロ波電力伝送技術を念頭に、地上実証課題や技術実現性を考慮して課題を抽出して研究開発を行う。また取り組むべき技術に取り残しが出ないように、各系を組み合わせたシステム全体としての送電実験を計画する。なお、技術成果を高める為、送電部、受電部、ビーム方向制御部は、それぞれ専門性の高い部署で担当させる。</p>
<p>送電部： 将来の軌道上実証への応用を考慮し、小型・薄型・高効率化を志向した半導体を使用し、複数の送電モジュールによるフェーズドアレイアンテナを開発する。マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとする。</p>	<p>商用 SSPS の送電部は宇宙に設置された大量のアンテナパネルを組み合わせた巨大なシステムとなるので、小型化・薄型化・高効率化が求められる。また、通信用フェーズドアレイの域から脱するためにも送電出力電力はキロワット級とする。</p>
<p>受電部： 伝送されてくるマイクロ波を複数の受電モジュールで受け、効率よく電力として取り出す整流アンテナ(レクテナ)を開発する。あわせて変換効率の高い整流素子(ダイオード)を開発する。</p>	<p>伝送されるマイクロ波エネルギーを測定するだけではなく、利用可能な電力に変換して高効率で取り出す技術が求められる。また高効率化実現のための整流素子ダイオードの技術開発が必要である。</p>

表 J-2-2-1 全体の目標(続き)

目標・指標	設定理由・根拠等
<p>ビーム方向制御部【参考】: 将来の宇宙利用を念頭に、高精度のビーム制御方式として、ソフトウェアレトロディレクティブ方式(振幅モノパルス方式)の研究開発に取り組む。試験モデルでは受電電力が最大となるよう、送電部からのマイクロ波の位相を制御する素子電界ベクトル回転法(REV法)を採用する。</p>	<p>注)ビーム方向制御部の研究開発は、JAXA が実施する。</p>
<p>送電制御技術: 精密なビーム制御技術の研究開発として、位置・角度補正法(PAC法)及び並列化法による送電制御技術に取り組み、実現性や有効性を明らかにする。</p>	<p>超遠距離送電を行う将来のSSPSを見据えた精密なビーム制御技術が求められる。複数の技術から選択できる余地を確保しておく必要がある。JAXAの方法(REV法)とは異なる手法についても並行して検討する。</p>
<p>試験候補地調査: 国内における屋内・外の試験候補地調査を行い選定する。また、マイクロ波電力伝送試験実施に必要な課題を抽出してその対応法を見出す。</p>	<p>試験作業を円滑に遂行するための周辺作業の実施が本研究開発の成否に大きく寄与する。</p>
<p>関連技術調査: 本研究開発と密接に関連する国内外の研究動向について明らかにする。</p>	<p>本研究開発に関連する技術情報や動向を広く収集し、必要に応じて本研究開発計画に反映する。</p>
<p>無線送受電スピンオフ技術: 成熟度の高い技術を活用して、産業応用を目指した低コスト実証システム(送電出力 10kW 程度、送電距離 500m 程度)を試作評価する。また、電力事業者の観点から適用可能性を検討する。</p>	<p>マイクロ波無線送電は他方式と比べ長距離間の送受電が可能であり、低コスト化システムを試作することで産業応用に大きく寄与する。また、電力事業者による適用可能性検討は実施意義が大きい。</p>

本研究開発を通じてマイクロ波による無線送受電技術の確立を目指すにあたり、次のコンセプトを取り上げた。

- 技術的に新しい一歩(世界で初めて)
- 軌道上実証実験に技術的につながる試作

マイクロ波による電力伝送についての技術検討は数十年前からなされているが、過去に行われた実験などを見ても、マグネトロンやクライストロンをマイクロ波発生源としてパラボラアンテナを使って送電しているのが多い。技術的なブレークスルーを通して技術の確立に努めている。

- 1) マイクロ波ビーム方向を任意に制御可能な半導体増幅器を使用したフェーズドアレイアンテナ。キロワット級電力伝送技術で、かつ受電方向からの信号に基づく精密方向制御を組み込んだ電力送電は世界初。
- 2) 半導体増幅器自体にも、窒化ガリウムを基板にしてF級増幅回路技術を採用した、電力付加効率で世界最高水準の素子を適用した送電用サブアレイアンテナ。
- 3) システムの小型化を指向して送電周波数に 5.8GHz を適用し、かつ回路構成を工夫した薄型送電用サブアレイアンテナ。従来実績の約 1/10 程度の画期的な薄さ。
- 4) 窒化ガリウムを採用し RF-DC 変換効率80%以上を目標とした素子(ダイオード)の試作評価。世界最高水準の効率。

また、将来の宇宙利用を念頭に置きつつも、直近の技術応用としての可能性を探るため、宇宙用途での小型化・薄型化の要求を緩和し、ハードウェア構成には成熟度の高い技術を活用してコストの低減を図った無線送受電実証システムを試作する。

J-2-3 個別要素技術の目標設定

前項の目標を達成する上で必要な個別要素技術の達成目標を表 J-2-3-1 に示す。

表 J-2-3-1 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
高効率薄型送電部の開発	(1)送電効率 主アンプ等に GaN 素子を利用した F 級増幅器を使用して増幅器単体で 60%以上、及び送電部としての効率は 30%以上の送電システムを実現する。	研究室レベルの State-of-the-Art 技術を、効率を落とすことなく適用する。
	(2)薄型軽量化 送電モジュールは薄型化および高効率化に適したアクティブ集積アンテナ(AIA)で構成し、その厚みは 40mm 以下とする。	厚みを追求した研究事例は無く、既存概念での想定厚さ(実力値)は 300~400mm と考えられることから、1桁小さな目標値を設定して取り組む。
高効率受電用整流ダイオードの開発	(1) 高効率受電整流素子 任意の電力レベルのマイクロ波を整流するダイオードの設計手法及び製作技術を取得するとともに、電力伝送試験時相当の電力束密度に適した高効率整流ダイオードを試作する。半導体には GaN等を利用し、RF-DC 変換効率は 80%を目標とする。	現時点でレクテナに適した GaN を使用したダイオードはないことから、システムの要求に応じた受電電力設定に対応でき、かつ世界最高水準の効率の整流ダイオードを設計製作できる技術を培う。
位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による送電制御技術	(1) 送電制御技術 実用システムの送電制御技術として PAC 法及び並列化法が有効であることを見極め、実現のための基本技術を確立する。有効性の目安としては、伝送効率低下量 1%以下、不要波発生レベル 0.3W/m ² 以下を目標とする。	有効性目標設定根拠は以下の通りである。 ・経済性を考慮して、伝送効率のノミナル値から 1%レベルを許容低下量とした。 ・航空機の EMC 基準(0.3W/m ²)とした。

J-3 成果、目標の達成度

J-3-1 成果

J-3-1-1 全体成果

本研究開発は平成21年9月に開始し、平成27年3月まで実施した。

なお、実施にあたっては、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、反映した。

具体的な成果については、以降、以下の順で述べる。

(1) マイクロ波電力伝送試験モデル

- ① マイクロ波無線送受電システムの概要
- ② 送電部
- ③ 受電部
- ④ 各部間のインターフェース

(2) マイクロ波電力伝送試験

- ① 試験概要
- ② 屋内試験
- ③ 屋外試験
- ④ 実用化実証試験

(3) 無線送受電技術研究開発支援業務

- ① マイクロ波電力伝送試験候補地に関する調査
- ② 宇宙太陽光発電関連研究に関する調査
- ③ その他関連技術に関する調査

(4) 無線送受電スピンオフ技術の研究開発

- ① スピンオフ技術実証システムの試作評価
- ② 電力インフラへの適用可能性の検討

(1) マイクロ波電力伝送試験モデル

実用レベルでのマイクロ波による宇宙太陽光発電システムでは、静止軌道上の送電設備から地上の受電設備に向けて、数多くのマイクロ波を合成し、ビームを形成して高精度で指向制御する技術が必要となる。これらは今後、軌道上実証を行う際にも必要不可欠な技術である。本研究開発では将来の発展性をも考慮して以下の技術を組み合わせた地上実証を行った。表 J-3-1-1-1 にマイクロ波電力伝送試験モデルの特徴を示す。

表 J-3-1-1-1 マイクロ波電力伝送試験モデルの特徴

項目	将来の発展性・利点
フェーズドアレイアンテナを使用	従来のパラボラアンテナに比べ、将来の宇宙での大型アンテナ構築につながる技術
電力伝送周波数に5.8GHzを使用	従来の2.45GHzに比べてシステムの小型化が可能となり、将来の宇宙への輸送に有利
半導体増幅器を使用	従来のマグネトロン(電子管)方式に比べて薄型化に有利。また低電圧での動作も宇宙での使用に向く
ソフトウェアレトロディレクティブ方式を使用	送受電の周波数が任意に選択可能であり、パイロット信号に変調波や鍵機能を付与することも可能

①マイクロ波無線送受電システムの概要

本研究開発では、マイクロ波電力伝送試験モデル(以下、試験モデルという。)を試作し、それを使用して電力伝送試験を行う。試験モデルは送電部、受電部、ビーム方向制御部から構成され、これらを組み合わせた状態で、屋外での電力伝送試験が実施できるものとする。ビーム方向制御部は、将来の宇宙利用を念頭に、高精度のビーム制御方式として、ソフトウェアレトロディレクティブ方式(振幅モノパルス方式)を、また、受電電力が最大となるよう、受電部でのマイクロ波受電強度測定結果をもとに、送電部からのマイクロ波の位相を制御する素子電界ベクトル回転法(REV法)を採用した。

- 送電部は軽量薄型のマイクロ波フェーズドアレイアンテナで構成され、電気エネルギーを高効率でマイクロ波に変換する。
- 受電部は、複数のモジュールで構成され、空間を伝播してきたマイクロ波を安定的かつ効率的に電気エネルギーに変換する。
- ビーム方向制御部は、マイクロ波が送電部から受電部に向けて精度よく送られるよう、ソフトウェアレトロディレクティブ機能、REV 機能などで実現するマイクロ波ビーム制御を行う。(なお、このビーム方向制御部の研究開発は JAXA が実施した。)

試験モデルの概念を図 J-3-1-1-1 に示す。

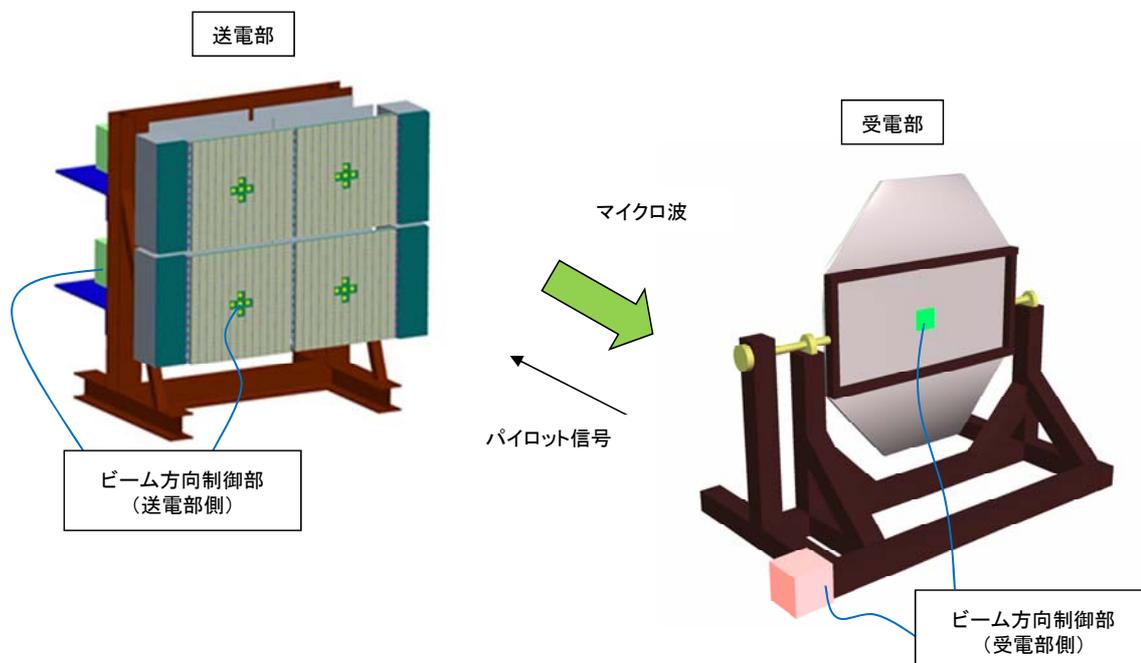


図 J-3-1-1-1 マイクロ波電力伝送試験モデル概念図

試験モデルのシステム構成ツリーを図 J-3-1-1-2 に示す。

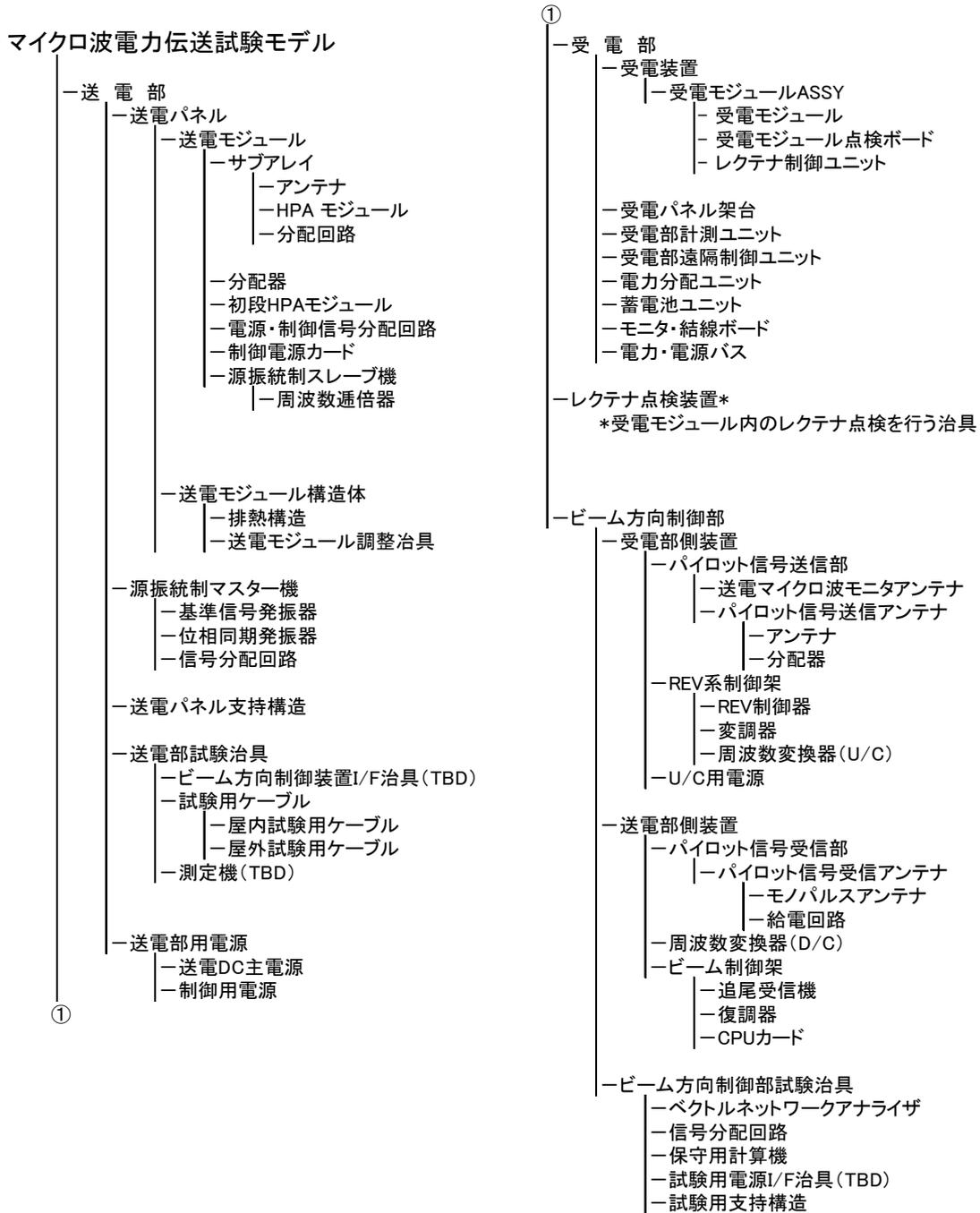


図 J-3-1-1-2 システム構成ツリー

また、マイクロ波電力伝送試験モデルのシステムブロック図を図 J-3-1-1-3 に示す。

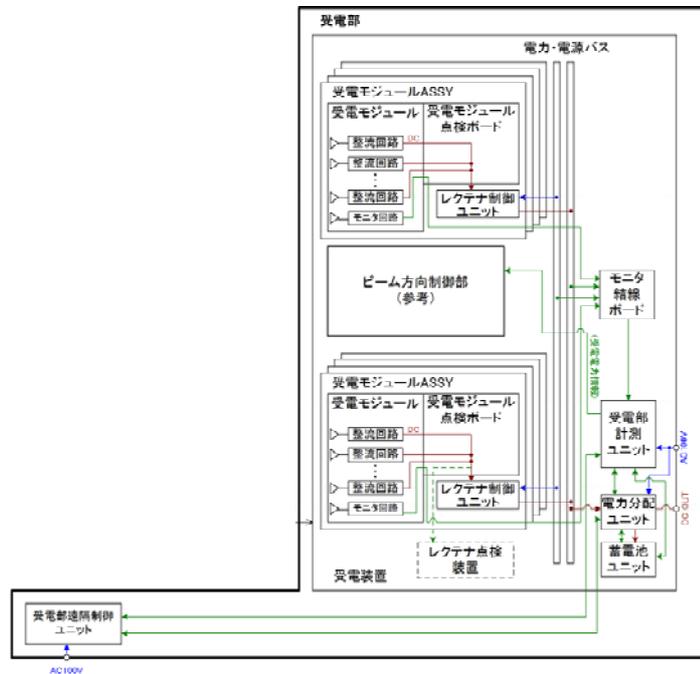
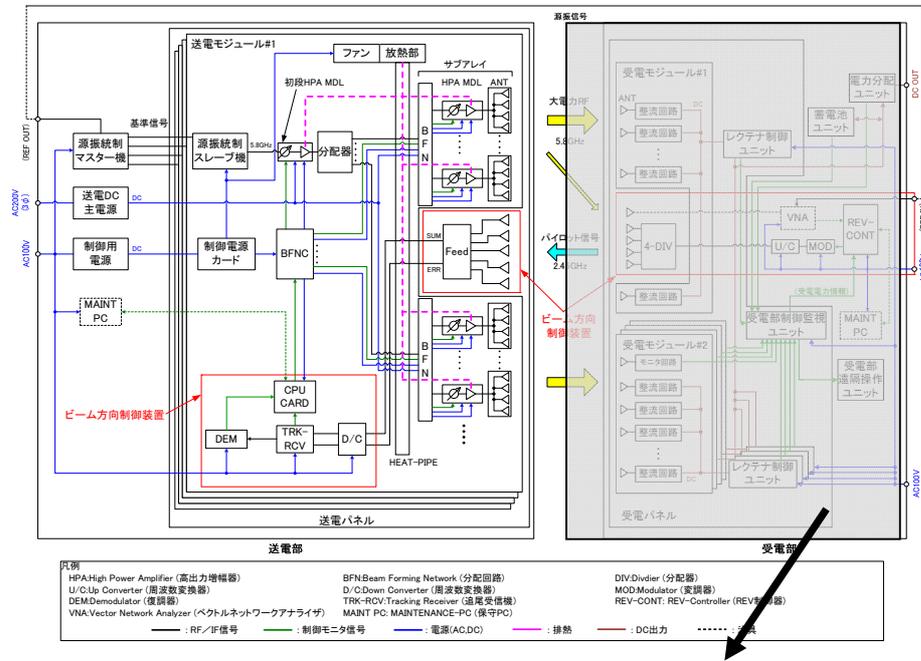


図 J-3-1-1-3 マイクロ波電力伝送試験モデル システムブロック図

②送電部

送電部は、将来の軌道上実証への応用も考慮し、小型・軽量・高効率化が望める半導体を使用したフェーズドアレイアンテナを使用し、複数の送電モジュールでアレイアンテナを構成し、マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとした。マイクロ波送出方向は、ビーム方向制御部からの位相制御信号を受けて定めるものとし、さらに、受電部側での受電電力を最大にするためのマイクロ波移相器を持ち、ビーム方向制御部からの位相制御信号を受けて位相を変化させる機能を持たせた。

送電部の主要諸元を表 J-3-1-1-2 に示す。

表 J-3-1-1-2 送電部主要諸元

項目	主要諸元
使用周波数	5.8GHz±75MHz(円偏波)
システム構成	4 モジュール構成
モジュールサイズ	約 0.6m × 0.6m
ビーム拡がり角	全システムで約3度のビーム形成(-3dB ビーム幅)
モジュール重量	19kg 以下
モジュール間の接続方法	手動で±10 度(縦方向のみ)可動な接続方法
モジュール支持方法	4枚の送電モジュールを支持し自立可能な枠構造とする。 (晴天時における屋外でのマイクロ波電力伝送試験を想定した設計とする)
送電出力	400W 以上/モジュール 1,600W 以上/システム(4モジュール) 別途、低出力モードを持つこと
アンテナ素子間隔	0.65 波長±0.02 波長(λ)(33.6mm±1mm) λ は中心周波数に対応
マイクロ波増幅器効率	60%以上
移相器	5bit (MMIC 移相器)
運用時間	1 分間以上(送電出力 400W/モジュールの高出力モードにおいて)
送電部総合効率	30%以上
基準信号の配信	有線配信
アンテナ素子数	300 素子以上/モジュール。中心部にビーム方向制御部用にアンテナ 20 素子分の設置スペースを確保する。
マイクロ波増幅器個数	76 個以上/モジュールとして、1 増幅器で4素子アンテナに給電する
サブアレイ厚さ	サブアレイ厚さ: 40mm 以下
排熱構造	送電部とは別構造の排熱構造を設置し、熱対策とする。

送電部の外観図を図 J-3-1-1-4 に、外観(前面)を図 J-3-1-1-5 に示す。

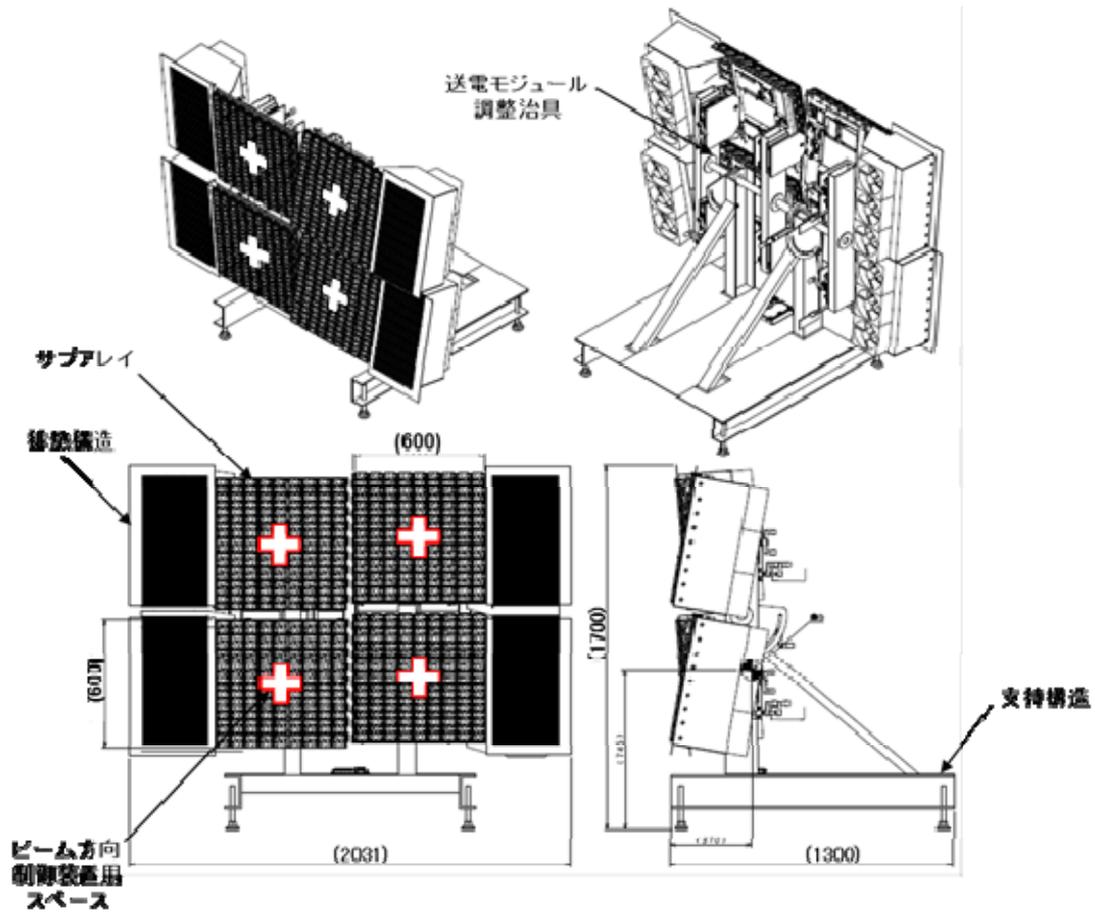


図 J-3-1-1-4 送電部 外観図

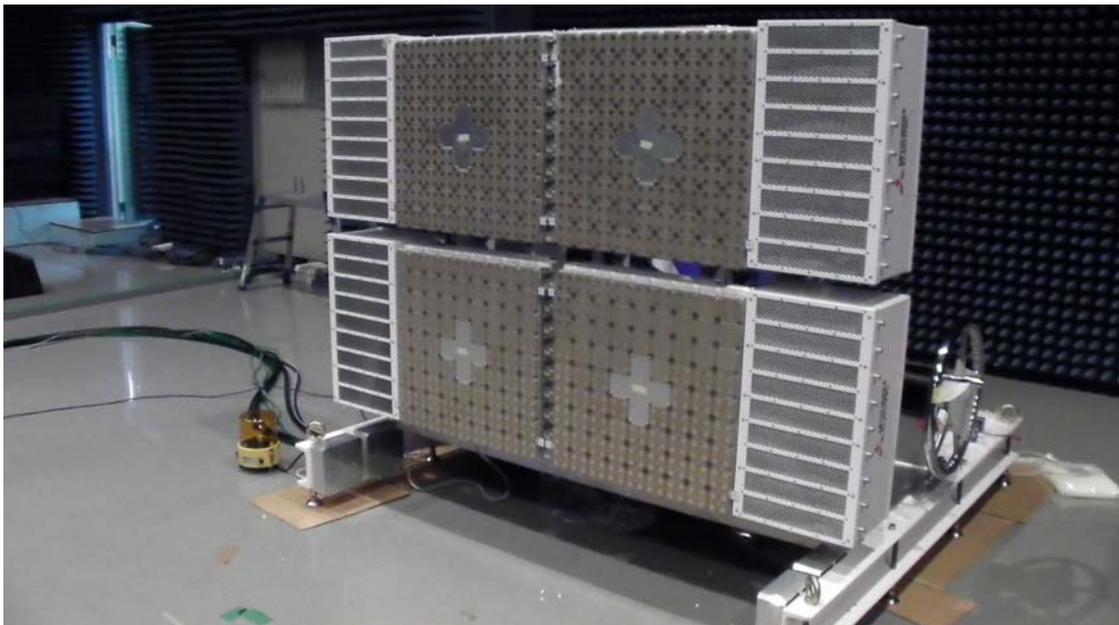


図 J-3-1-1-5 送電部 外観(前面)

表 J-3-1-1-3 に送電部に要求されている主な仕様に対する検査結果を示す。全ての試験項目について仕様値を満足し、受電部やビーム方向制御部との組合せ試験の前に、送電部がシステム要求を満足することを確認した。

送電部検査結果サマリを表 J-3-1-1-3 に示す。

表 J-3-1-1-3 送電部検査結果のサマリ

項目	仕様値	試験結果
使用周波数	<ul style="list-style-type: none"> ・ 屋内試験 : 5.8GHz (右旋円偏波) 周波数偏差±5ppm 以内 ・ 屋外試験 : 5.8GHz (右旋円偏波) 	5.8GHz (右旋円偏波)、周波数偏差+0.1ppm 以下
モジュールサイズ	約 0.6m×0.6m	0.599m×0.600m
サブアレイ部質量	19kg 以下	16.1kg
サブアレイ部厚さ	40mm 以下	25mm (突起部を含めると 33mm)
送電出力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高出力モード : 400W 以上 / 送電モジュール 1.6kW 以上 / 4 送電モジュール ・ 低出力モード (最大出力の約 5%) を持つこと 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高出力モード 最大値 : 460.7W 最小値 : 423.3W 平均値 : 449.8W (約 1.8kW/4 送電モジュール) ・ 低出力モード : 高出力モードの約 5%
増幅器効率	60%以上 (最終段増幅器の電力付加効率)	平均 60.3%
送電部総合効率	30%以上	35.1%
運用時間	60 分以上 (最大出力時)	60 分以上

③受電部

受電部は、マイクロ波の効率的な電気エネルギーへの変換を考慮し、ショットキーバリアダイオードを使用した受電パネル(レクテナアレイ)とした。レクテナアレイは、複数の受電モジュールから構成され、試験等における取扱いが容易なものとした。

受電部の主要諸元を表 J-3-1-1-4 に、外観(正面)を図 3-1-1-I-6 に示す。

また、受電部の艤装・組立図を図 J-3-1-1-7 に示す。(レクテナ点検装置は治具のため除く。)

表 J-3-1-1-4 受電部主要諸元

項目	主要諸元
受電パネルサイズ	受電パネル:約2.6m×2.3m(突起物を除く) (晴天時における屋外マイクロ波電力伝送試験を想定した設計)
受電パネル枚数	1枚(受電パネルは、36個の受電モジュールで構成)
受電パネル支持方法	受電パネルを支持し自立可能な架台を有する。 (角度調整機能、可搬機能)
ダイオード	ショットキーバリアダイオード
RF-DC 変換効率	・50%以上(アンテナ～レクテナ制御ユニット出力)
電磁再放射抑制	受電パネルで発生する2次～4次高調波再放射を抑制する入力フィルタを有する。
自動点検計測機能	故障したレクテナを含む受電モジュールの特定、故障レクテナの特定を行う。



図 J-3-1-1-6 受電部外観(正面)

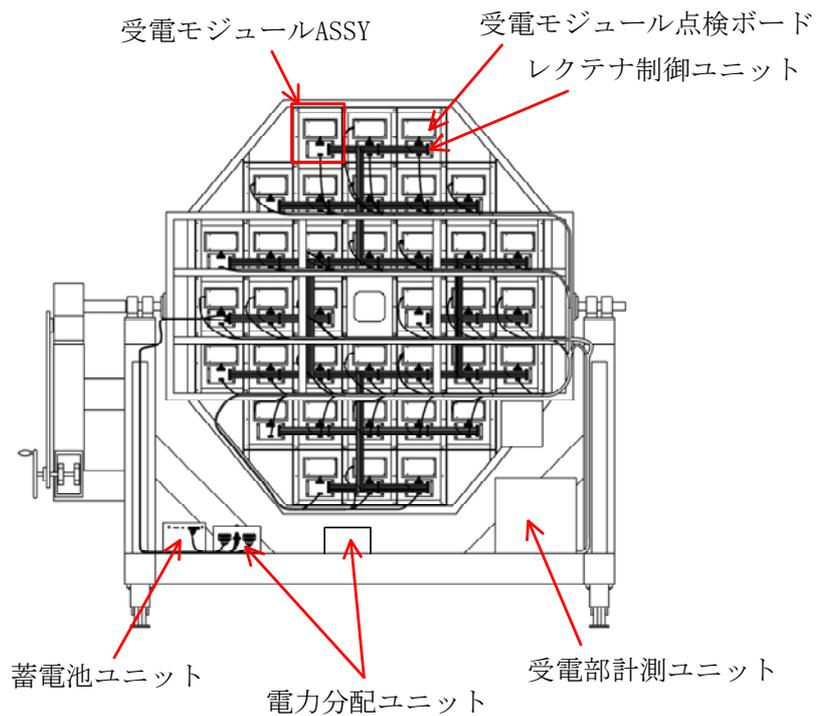
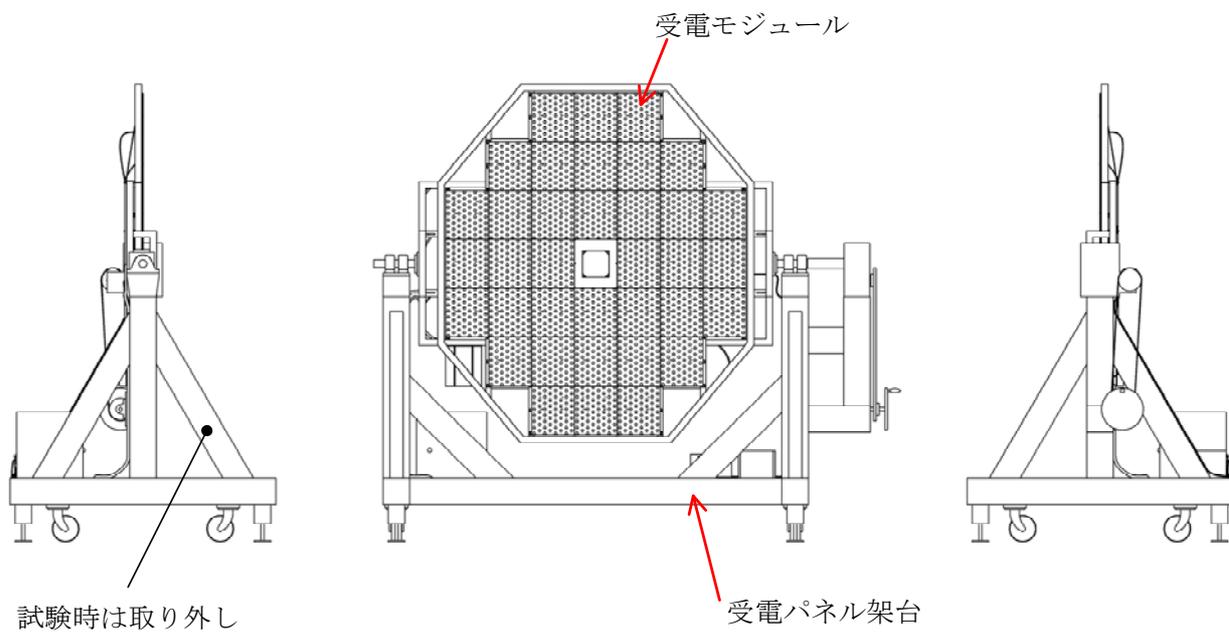


図 J-3-1-1-7 受電部 艀装・組立図

表 J-3-1-1-5 に受電部に要求されている主な仕様に対する検査結果を示す。全ての試験項目について仕様値を満足し、送電部やビーム方向制御部との組合せ試験の前に、受電部がシステム要求を満足することを確認した。

表 J-3-1-1-5 受電部検査結果のサマリ

項目	仕様値	試験結果
周波数	中心周波数 5.8GHz	5.8GHz においてリターンロスは全て -20dB 以下。 受電モジュールにて DC 出力が得られることを確認。
受電パネルサイズ	約 2.6m × 2.36m	2603mm × 2259mm
受電パネル枚数	1 枚（受電パネルは 36 枚の受電モジュールで構成）	36 枚の受電モジュールで構成される受電パネル 1 枚
受電パネル支持方法	受電パネルを支持し自立可能な画題を有する（角度調整機能、可搬機能）	角度調整範囲：±30° 以上 車輪／レベルアジャスタ：あり
ダイオード	ショットキーバリアダイオードを使用	左記の通り
RF-DC 変換効率	50%以上（アンテナ～レクテナ制御ユニット出力）	59%～62% （受電モジュール ASSY 1 系統ごとの効率）
電磁再放射抑制	受電パネルで発生する 2 次～4 次高調波再放射を抑制する入力フィルタを有する。	入力フィルタ挿入損失測定結果。 ・ 2 次高調波：41dB ・ 3 次高調波：45dB ・ 4 次高調波：41dB
自動点検計測機能	故障したレクテナを含む受電モジュールの特定、故障レクテナの特定を行う。	受電部遠隔制御ユニットの画面に異常検出が表示されることを確認。レクテナ点検装置によってレクテナ整流回路の I-V 特性を取得できることを確認。

参考として、ビーム方向制御部の主要諸元を表 J-3-1-1-6 に示す。

表 J-3-1-1-6 ビーム方向制御部主要諸元(参考: JAXA 担当)

項目	主要諸元
レトロディレクティブ方式	ソフトウェアレトロ方式に属する振幅モノパルス方式を使用。 ビーム方向制御方式としては、素子電界ベクトル回転法 (REV 法) を使用する。
ビーム制御精度	伝送距離 10m 以上で角度精度 0.5 度 rms を目標とする。 (rms: 二乗平均平方根)

④各部間のインタフェース

マイクロ波電力伝送試験モデルの送電部、受電部、ビーム方向制御部間のインタフェース仕様についての検討を実施した。主な内容は表 J-3-1-1-7 のとおりである。

これらのインタフェースの定義や技術仕様を詳細化し、インタフェース管理仕様書(ICD)としてまとめた。

表 J-3-1-1-7 各部間のインタフェース概要

インタフェース	内容
送電部～受電部	主にマイクロ波の周波数、偏波、受電パネル部での電力束密度分布及びビームパターンである。
送電部～ ビーム方向制御部	パイロット信号受信アンテナの送電モジュールへの物理的な取り付けに関するインタフェースの他、アンテナアレイ位相制御信号の受け渡しなどがある。
受電部～ ビーム方向制御部	パイロット信号送信アンテナの受電パネルへの物理的な取り付けに関するインタフェースの他、マイクロ波受電強度レベル情報の受け渡しなどがある。

(2) マイクロ波電力伝送試験

① 試験概要

マイクロ波電力伝送システムの機能性能を総合的に検証するために、送電部、受電部、ビーム方向制御部を組み合わせ、屋内試験および屋外試験を実施した。なお、屋外試験に続いて、JAXA と連携協力のもと、実用化実証試験を JAXA 主体にて実施した。

屋内試験は、電波暗室内に設置した屋内試験設備を用いた。伝送距離 10m 以上において、ビーム方向制御精度 0.5 度 (rms) 以下の達成を目標として、送電マイクロ波のビーム方向制御精度を確認した。

屋外試験は、電波法等の法的制約準拠の下、4 枚の送電モジュールを協調動作させ、地面反射等の影響を回避しつつ、伝送距離 50m 程度の間で、受電部にて計画された電力相当を受電することにより、無線電力伝送システムとしての性能確認を実施した。

実用化実証試験は、屋外試験に続いて、無線伝送した電力により、アマチュア無線局の運用を行う実用化実証を行った。本試験項目は、JAXA が取り纏め、J-spacesystems が支援した。

なお、屋外試験地は、マイクロ波電力伝送試験候補地の要件に基づき、選定された候補地から、次の試験場所を選択した。

・三菱電機株式会社 通信機製作所 試験場(兵庫県)

表 J-3-1-1-8 に、試験に係る設定条件、および試験候補地に望まれる要件を示す。

表 J-3-1-1-8 マイクロ波電力伝送試験候補地の要件
(要件欄の●は、候補地選定に係わる項目を示す。)

要件	項目	設定条件
	送電部大きさ	1.2m × 1.2m (0.6m × 0.6m モジュール 4 枚)
	送電部重量	1,000kg
	受電部大きさ	受電パネル 2.5m × 2.5m
	受電部重量	1,500kg
	送電部出力電力	1,600W 以上 (400W/モジュール × 4)
	送電距離	50m 程度
	中心部電力密度	電力束密度 330W/m ² =33mW/cm ² (最大値@50m)
	受電部取出し電力	350W 程度
	マイクロ波周波数	5.8GHz ± 75MHz、(右旋円偏波)
	パイロット信号周波数	2.45GHz

表 J-3-1-1-8 マイクロ波電力伝送試験候補地の要件(続き)

(要件欄の●は、候補地選定に係わる項目を示す。)

要件	項目	設定条件
	デモンストレーション	・視覚的にアピールする負荷 ・エネルギー伝送が理解できる負荷 の2種類を想定する。
	技術データ取得	ビームパターン等
	運用時間	定常状態で10分間(暖気時間 TBD)
●	試験時 天候	晴天または曇り時(雨天等の悪天候除く)
●	試験時 風速	平均風速 3.0m/sec 以下(注1)
●	試験時 温度	3~20℃(約2時間の試験中の温度変動±3℃以内) (*1)
●	試験時 湿度	10~90%RH
●	電波環境	周辺に電波ノイズ源が少ないこと。 電波を利用する設備が少ないこと。
●	試験コンフィギュレーション	送電部と受電部は斜めに配置>(*2)
●	安全性等	試験実施の規準を設ける(雨天や強風時は避ける)。 また、必要に応じ器材の防護用テントなど設ける。 マイクロ波の取扱いに関しては法令を遵守する(電波管理法、電波防護指針など)。
	試験場設備等	
●	試験エリア面積	送電距離として50m以上を確保できること。 また、マイクロは防護指針に基づき十分な安全区域を確保できること。
●	電源	周波数 50/60Hz (*3)
	AC 単相 100V	送電部:80A程度、受電部:20A程度
	AC 三相 200V (デルタ結線)	送電部:30A程度、受電部:—
	接地	A種(第一種)
●	上下水道	水冷設備は不要。
●	装置格納場所	雨露をしのげる場所で保管>(*4) 温度環境 -10~20℃、湿環境度 5~95%RH(結露なきこと)
	その他	
●	宿泊施設	試験場の近くに宿泊施設があり、交通の便が良いこと。
●	インターネット環境	インターネットのインフラが利用できることが望ましい。
●	公共対策	近隣住民の理解が得られること。

- (*1)温度や風速の条件が、機器の性能に大きく影響する。装置を防護用テント等で囲う場合は、条件が緩和される。
- (*2)上方に向けての送電の場合、航空機への影響等、電波法上の課題の有無を検討。
- (*3)大電力を扱うので十分な電源設備や設置の設備が備わっていることが重要である。
- (*4)悪天候時を考えた場合、雨露を凌げるシェルター等に退避する必要がある、十分なスペースとプレハブやシェルターなどの設備が備わっている場所であることが望ましい。

②屋内試験

屋内試験は、伝送距離 10m 以上において、ビーム方向制御精度 0.5 度 (rms) 以下の達成確認を目標として、送電マイクロ波のビーム方向制御精度確認試験を実施するものであり、天候や周囲環境(地形・構造物など)に左右されない安定した電波環境下(電波暗室内)で試験を実施した。

・期間:平成 26 年 12 月～平成 27 年 2 月

・場所:京都大学生存圏研究所 高度マイクロ波エネルギー伝送実験棟 (A-METLAB)(京都府)

図 J-3-1-1-8 に屋内試験(機器レイアウト)を、図 J-3-1-1-9 に伝送距離 10m の試験実施状況を示す。

マイクロ波を受ける側に設置している機器は受電部ではなく、マイクロ波送電ビームの方向制御精度を計測するための X-Y スキャナーである。電波暗室の高対電力電波吸収体の方向に送電するような機器レイアウトとしている。

本研究開発の目標である「伝送距離 10m 以上において 0.5° (rms)以下」のビーム制御精度については、伝送距離 10.06m において 0.15° (rms)が得られ、目標を達成することを確認した。なお、ビーム幅は 2.3° (平均値)であった。

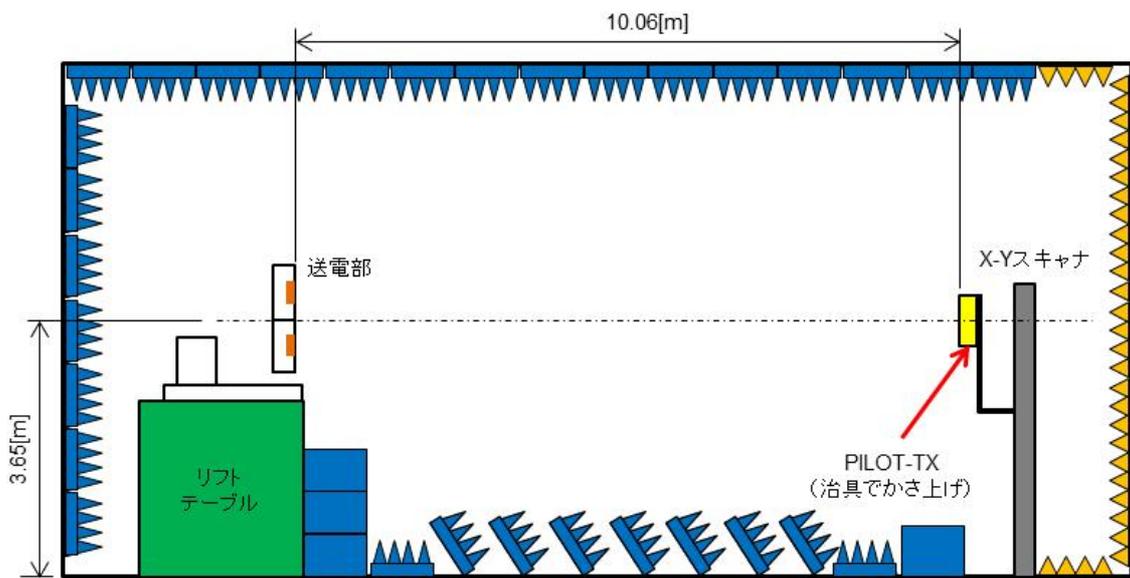


図 J-3-1-1-8 屋内試験(機器レイアウト)

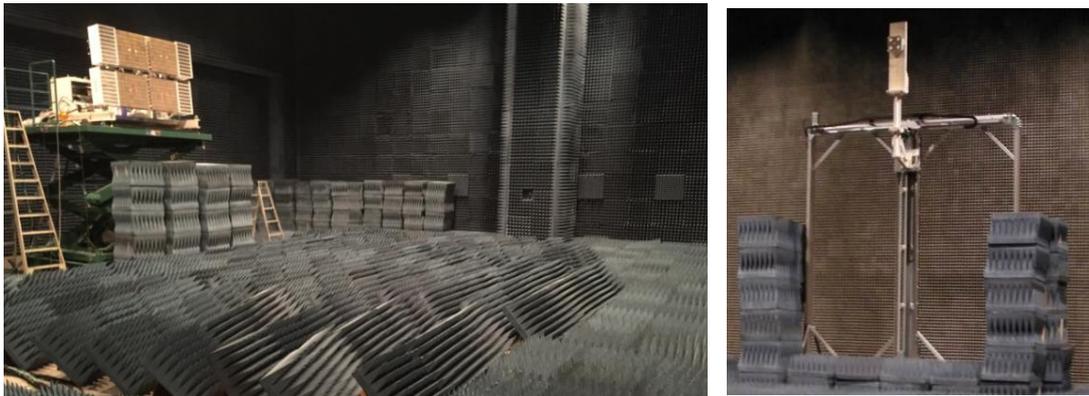


図 J-3-1-1-9 屋内試験状況(伝送距離:10m)

③屋外試験

複数のフェーズドアレイアンテナ間の位相同期を行い、レトロディレクティブ技術を活用し、マイクロ波ビームを受電部に向けて指向制御する精密ビーム制御技術を実証するために、屋外においても電力伝送試験を実施し、ビーム制御による電力伝送を確認し評価した。

・期間:平成 27 年 2 月～平成 27 年 3 月

・場所:・ 三菱電機株式会社 通信機製作所 試験場(兵庫県)

図 J-3-1-1-10 に試験場のレイアウトを、図 J-3-1-1-11 に屋外試験のコンフィギュレーションをそれぞれ示す。本試験場は、送電部が設置される送電エリア、受電部が設置される受電エリア、各機器を操作するオペレータエリアからなり、地面反射等の影響を低減する目的で送電部は盛り土の上に設置されている。図 J-3-1-1-12 に屋外試験風景を示す。ビーム指向制御のためのパイロット信号(2.45GHz)送信時に、地面反射等の周囲環境の影響が低減できるよう電波吸収体を配置した。図 J-3-1-1-13 に送電部設置状況を、図 J-3-1-1-14 に受電部設置状況を示す。

マイクロ波電力伝送距離は水平距離 53.8m、垂直距離 2.9m であり、送受間距離は 53.88m であった。送電部から約 1.8kW を出力し、受電部から約 340W 平均の利用可能電力の取出しを確認した。

5.8GHz 帯での屋外無線送電試験は世界で初めての取組であり、フェーズドアレイアンテナを用いてキロワット級マイクロ波ビームの制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない実験の成功となった。

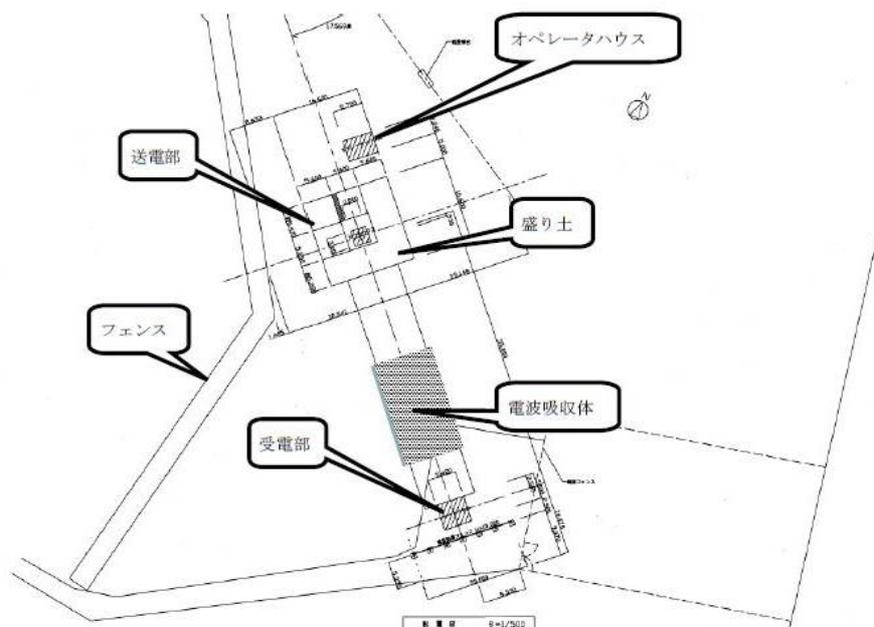


図 J-3-1-1-10 屋外試験場レイアウト

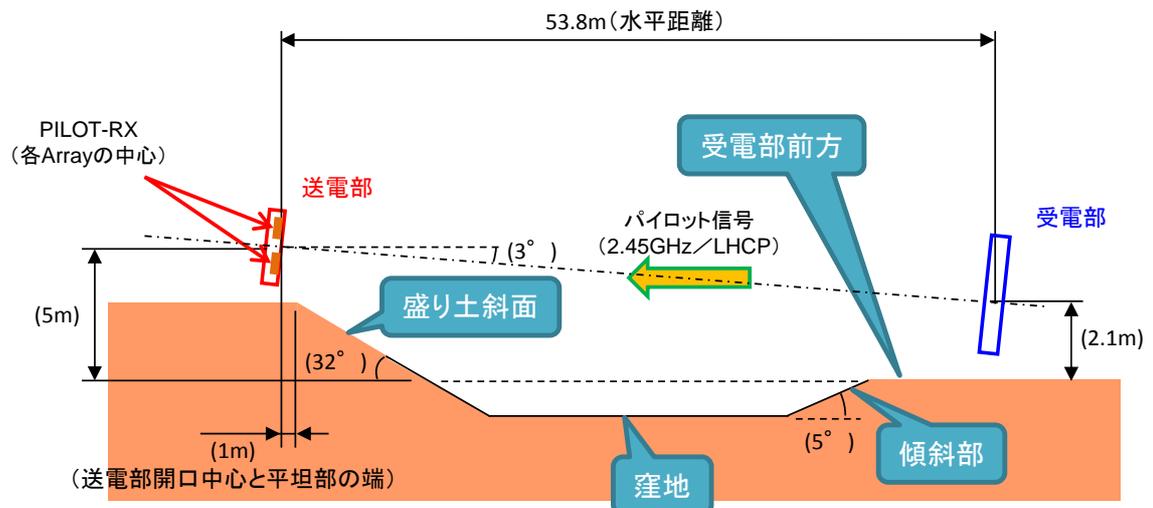


図 J-3-1-1-11 屋外試験コンフィギュレーション



図 J-3-1-1-12 屋外試験風景



図 J-3-1-1-13 送電部設置状況



図 J-3-1-1-14 受電部設置状況

④ 実用化実証試験

マイクロ波電力伝送試験モデルを用いて、連携協力を行なっている JAXA の主体により実用化実証を行なった。これは、受電部出力電力を実証機器(アマチュア無線機)に供給して、アマチュア無線家による交信を可能にしたものである。送電部から受電部にマイクロ波無線電力伝送を実施し、実用化実証中、受電部の蓄電池ユニットに充電するとともに、実証機器への電力供給が行われていることを確認した。

図 J-3-1-1-15 に JAXA 研究開発部広報サービスからの引用を示す。

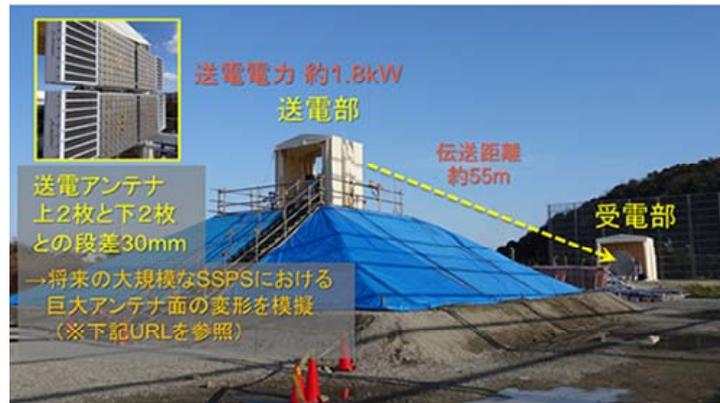


図 J-3-1-1-15 マイクロ波無線電力伝送地上試験／実用化実証(デモンストレーション)
(JAXA 研究開発部広報サービスからの引用)

(出典: <http://www.ard.jaxa.jp/publication/event/2014/150301.html>)

(3) 無線送受電技術研究開発支援業務

無線送受電技術研究開発支援業務は平成21年9月に開始され、平成24年度末まで実施された事業内容と成果である。

初年度(平成21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、調査作業を開始した。平成22年度から平成23年度は主にマイクロ波送電試験候補地の調査を実施し、候補地の絞り込みを実施した。平成23年度からは主に宇宙太陽光発電関連研究に関する調査を実施し、地上技術のSSPSへの応用、効果的なデモンストレーションの検討およびSSPS関連技術の応用について検討を行った。

無線送受電技術研究開発の支援的な業務として以下の2つの調査を行った。

- マイクロ波電力伝送試験候補地に関する調査
主要成果) 候補地を調査し、JAXA 種子島宇宙センターと三菱電機赤穂工場を試験候補地として選定した。
- 宇宙太陽光発電関連研究に関する調査
主要成果) 国内外の関連技術動向を調査した。海外では、米国及び中国にマイクロ波SSPSに関する動きがあり、動向を注目する必要がある。

① マイクロ波電力伝送試験候補地に関する調査

マイクロ波電力伝送試験を安全かつ効率的に実施するため、国内における屋内及び屋外試験候補地について情報収集や現地調査を行い、適切な試験候補地を提案するとともに、マイクロ波電力伝送試験の実現に必要な各種関係法令等に基づく手続き、安全対策、試験候補地が所在する自治体及び周辺地域住民の理解・協力を得るための方策等の課題抽出を行い、その対応方法を検討することを目的とした。

国内の試験候補地について調査を行い表 J-3-1-1-7 の試験候補地の要件に照らして評価し種子島宇宙センターと三菱電機赤穂工場が選定した。なお、試験実施時期は現時点で未確定のため、1 か所に試験場所を限定するより、複数の候補を残しておき、試験実施時期確定時に、それらの候補から選定することとした。

候補場所の調査結果を表 J-3-1-1-9、表 J-3-1-1-10 に示す。

表 J-3-1-1-9 調査結果概要(種子島宇宙センター)

項目	調査結果
試験エリア面積	<ul style="list-style-type: none"> ・50m 以上の試験距離確保可能 注)センター内候補地は他にもあり (候補地 A:縦約 40m×横約 130m(約 5200 m²)) (候補地 B:縦約 30m×横約 130m(約 3900 m²)) ・ただし、縦幅が狭いため土地制約を受ける可能性 ・その他、打上げ期間中は警戒区域内のため利用不可
電源	隣接する建屋等から供給可能
上下水道	隣接する建屋等から供給可能
装置格納場所	隣接する建屋への格納が可能
温度環境	年間を通じて温度環境を満足する。(最低 10℃～28℃程度)
電波環境	周辺環境に影響を及ぼすものは特になし
宿泊施設	<ul style="list-style-type: none"> ・種子島宇宙センター周辺(南種子町)の宿泊施設利用可能 ・センター最寄りの南種子町までは車で約 30 分の移動距離 ・センター内にはゲストハウスが設置(食堂利用可能) ・センター最寄りの南種子町の食堂等も利用可能
インターネット環境	JAXA から借用
公共対策	<ul style="list-style-type: none"> ・両試験候補地の前方は公共の海岸となっており、サーフィン等の利用客への対応として立ち入り禁止区域設定等の対策を行う必要がある ・試験候補地後方の広場も一般に開放されており、影響評価や電波の伝送方向の調整等を実施する必要がある
フォークリフト、クレーン	JAXA 等から借用
候補地概要 (候補地 A:南側、 候補地 B:北側)	 <p style="text-align: right;">(Google 地図)</p>

表 J-3-1-1-10 調査結果概要(三菱電機赤穂工場)

項目	調査結果
試験エリア面積	50m 以上の試験距離確保可能 (縦約 120m×横約 100m(約 12000 m ²))
電源	供給可能(最大 500kVA)
上下水道	供給可能(隣接する建屋にトイレ設備等あり)
装置格納場所	三菱電機赤穂工場内倉庫や近隣業者の仮設テント借用を想定
温度環境	年間を通じて温度環境を満たす。(平均気温 5℃～27℃)
電波環境	<ul style="list-style-type: none"> ・北側約 3.5km の高速道路(赤穂 IC)ETC への影響考慮が必要 ・北方向の航空機の航行への考慮が必要 ・東側には黒崎播磨株式会社の赤穂工場が隣接、東側対岸 2km には関西電力の赤穂発電所(南赤穂変電所)が立地 ・隣接する第 3 試験場の試験との日程調整も必要 ・電波遮蔽用フェンスの反射の可能性も考慮する必要 ・斜め設置の場合静止衛星(放送衛星)方向の確認も必要
宿泊施設	JR 播州赤穂駅周辺(1 駅 5 分)、赤穂御崎温泉、姫路駅等の宿泊施設が利用可能
インターネット環境	三菱電機赤穂工場のインターネット環境利用を想定
公共対策	<ul style="list-style-type: none"> ・チラシ等による市役所、近隣住民への連絡が必要 ・その他、試験場近辺の家屋(北東方向約 150m)の居住状況の確認が必要
フォークリフト、クレーン	近隣の業者から借用可能
候補地概要	 <p style="text-align: right;">(Yahoo 地図)</p>

②宇宙太陽光発電関連研究に関する調査

有意義かつ効果的に本研究開発を進めるにあたり、本研究開発以外の関連研究の実施状況について把握することを目的として国内外の調査を行った。調査の結果、技術的な情報交換や体制やスケジュールの見直し等を必要に応じて実施することも考えてゆく。

a) 国内の研究動向

国内では、本研究開発の他には大学での要素技術を主眼にした研究開発以外に目立った活動はない。国内の研究動向の状況を表 J-3-1-1-11 にまとめる。

表 J-3-1-1-11 SSPS関連の国内研究動向

分野		調査結果の概要
システム 関連	全般 状況	国内では、本研究開発の他には大学での要素技術を主眼にした研究開発以外に目立った活動はない。ただしレーザーについては JAXA が太陽光直接励起型レーザーの研究開発を行っている。
	軽量 システム	三菱重工業が商用 SSPS で課題とされる輸送単価を現状程度に抑える代わりに SSPS の衛星重量を大幅に軽減することで、全体的に低コストで実現させる案を発表している。これは商用 SSPS の仕様に踏み込んだ、これまでとは異なる発想に基づくものである。
	屋内 試験 設備	京都大学では、生存圏研究所(京都府・宇治キャンパス)に平成22年度に高度マイクロ波エネルギー伝送実験装置(具体的には電力規模対応電波暗室及びマイクロ波ビーム計測解析処理設備他)並びに関連送受電設備を導入した。これらの設備は、本研究開発にとっても利用価値の高い試験設備である。
送電 技術	半導体	GaN などの高効率半導体及びそれを用いた F 級増幅器などが新しい動きである。これらが地上の通信網に利用されれば、その波及効果として SSPS 実現に応用可能と思われる。

b) 海外の研究動向

海外では、米国及び中国にSSPSに関する動きがあり、今後の動向を注目してゆく必要がある。海外の研究動向の状況を表 J-3-1-1-12 にまとめる。

表 J-3-1-1-12 SSPS関連の海外研究動向

国名	関連機関	調査結果の概要
米国	NASA	米国での SSPS 研究は、NASA を中心に 1970 年代の終わりから断続的に行われてきた。最新の情報によれば、NASA が SSPS に興味を持ち始めており、2011 年 NIAC (NASA Innovative Advanced Concepts) の研究テーマの一つに選定され、小規模ながら研究開発に予算を割り振った。初年度は机上検討であるが、その後は技術実証試験や軌道上デモンストレーションも視野に入れていると言われている。今後の動向に注目する必要がある。
	民間企業	Boeing 社、Lockheed Martin 社、Raytheon 社といった大企業での活動は見られない。2009 年に、電力会社 Pacific Gas & Electric (PG&E) と SSPS による電力を供給する買電契約 (PPA) を結んだ中小企業の Solaren 社は、ロサンゼルス空港近くに施設を所有しているが、詳細は不明である。
欧州	ESA	SSPS は、総合研究プログラム (GSP、2003 年 1 月) の中で、2 年間 3 フェーズのプログラムとして採用され、第 1 フェーズの地上プラントと SSPS との比較等の研究が行われたが、それ以来目立った活動は見られない。
	民間企業	SSPS 研究を行っている EADS 社では、1.5 μ 帯の赤外線レーザーを用いる方がマイクロ波より効率が良いとしている。EADS Astrium は 2020 年までに 20-25kW のレーザーを使ったネットワークが運用可能と考えている。また 5 年以内には国際宇宙ステーションを利用したレーザー方式による 10-20kW の軌道上実証を行うことも検討している。マイクロ波方式に関する検討は報告されていない。

表 J-3-1-1-12 SSPS関連の海外研究動向(続き)

中国	全般	<p>近年、中国において、SSPSおよび関連の研究開発における活動は数多く存在する。その中には、重点的な国内SSPS研究開発の取り組みや、特別な国際的アウトリーチ活動が含まれる。欧州企業「Space Energy Group (SEG)」が関係するものが多いが、日本におけるこれまでの研究成果等についても調査を進めている。今後は中国の動向を意識した研究開発の加速や、技術情報の保護も考えていく必要があるかもしれない。</p>
	CAST	<p>●中国における SSPS 研究開発の中心は、中国空間技術研究院 (China Academy of Space Technology: CAST)とされている。CAST は、SSPS の最初のフィージビリティ・スタディや概念設計を行い、Ministry of Industry and Information Technology (MIIT)から研究開発のための資金が与えられている。CAST では、SSPS開発について以下の4つの重要課題を選定している。</p> <p>(1) 地球対軌道輸送、(2) 宇宙空間における組み立ておよび構築 (モジュラーシステム要素を使用)、(3) 高効率な太陽エネルギー変換、(4) 無線電力伝送</p> <p>このうち(1)の宇宙への輸送の問題のみ解決する必要がありその他は対応可能と報告している。</p> <p>●CAST では最初の SSPS の商業化を達成するための 5 つのステップを提示している。第一に、CAST は Chinese Reference System の設計を 2010 年の間に完了する。その後、2020 年までに、軌道上構築および WPT 技術の産業レベル試験を終わらせる。第三に、2025 年までに、低軌道での最初の 100kW SPS の実証を完了する。2035 年までに、100 MW SPS の試験機で電力供給を実証する。最後に、2050 年までに、静止軌道(GEO)システム上で、最初の商用 SSPS を運用する。</p>
	国際活動	<p>2010 年春、四川省成都において開催された、四川国際クリーンエネルギーサミット(SICES 2010)では、米国、欧州および中国から多数参加し、中国、欧州、米国およびその他から一流の専門家を集め、中国のハイテク由来のクリーンエネルギープロジェクトの戦略的選択について議論された。特に SSPS を含む先端技術の商業化による、クリーンおよび持続可能なエネルギー開発のパラダイムチェンジ・アプローチが議論された。</p>

c) SSPS 関連技術の応用

SSPS 関連技術の応用として調査した。その結果マイクロ波電力伝送技術の地上応用に関する期待は高く、まずは数 m 程度の送電距離が要求される B to B 機器でのセンシングデバイス向け送電やエネルギー・ハーベストとしての利用で、市場が立ち上がると予想されている。更に、電動バスや電気自動車向けの応用が期待されている。無線電力伝送技術が製品化されれば利便性の高さから一気に搭載が進む可能性もあると予測されている。その結果国内で100億円規模、全世界で2兆円規模の市場に成長するという予測も出されている。

d) 効果的なデモンストレーション

効果的なデモンストレーションを実施するために、過去に行われた SPRITZ の公開(平成12年)、レーザー伝送実験施設の公開(平成16年)、ハワイ電力伝送実験(平成20年)を調査した。その結果、デモンストレーションの内容をメディアに取り上げられるためには、わかりやすい説明資料を準備するだけでなく、放映時間、入稿時間等を考慮したスケジュールを設定することが重要である。

また、SSPS に関する知名度を上げるためには一過的なデモンストレーションだけでなく、恒常的なイベント化する事が重要である。その一例として日本全国学生室内飛行ロボットコンテストへのアプローチを提案した。

③その他関連技術に関する調査

その他の関連技術として「植物へのマイクロ波の影響」を調査し、データを取得した。

人体への電磁波の健康影響については、総務省の電波防護指針のように安全基準が設定されているが、動植物については現在のところ基準が定められていない。SSPS、あるいは無線送受電技術の普及においては、受電部(レクテナ)近傍の動植物への影響をあらかじめ調査しておくことは有意義である。特に、植生は食物環境の基礎であり、動物のように自由に移動できないことから、影響度を定量的に調べる事が出来る。

屋内実験設備(図 J-3-1-1-16)は、マイクロ波周波数は 5.8GHz を主とし、照射対象としては短時間で成長の様子を観察できるカイワレダイコン(双子葉植物)等を使用した。また屋内実験では、土壌温度変化の影響を除くため、土の代わりに水で栽培し、水温一定に保っている。これらの手法により、マイクロ波の植物に及ぼす影響について調査を行った。調査結果を表 J-3-1-1-13 に示す。



図 J-3-1-1-16 屋内実験設備および植物育成容器

表 J-3-1-1-13 植物へのマイクロ波の影響調査 実施状況

対 象	実施状況(マイクロ波周波数は 5.8GHz)
双子葉植物	<ul style="list-style-type: none"> ・双子葉植物に影響が現れる電力密度について、段階的に照射実験を繰り返した。その結果、マイクロ波照射による温度上昇により成長促進が見られた(屋内実験) ・次世代への影響を調べるために、双子葉植物に連続したマイクロ波を照射し、種子を採取し、その種子を育てたが、異常は見られなかった。屋内実験と同様温度上昇による成長促進が見られた(屋外実験)
単子葉植物	<ul style="list-style-type: none"> ・双子葉植物に見られる育成容器の包み込み現象を避けるため単子葉植物についてマイクロ波照射実験を行った。その結果、マイクロ波照射がある一定値以上の場合生育が良くなる傾向が見られた(屋内実験)

(4) 無線送受電スピノフ技術の研究開発

非接触給電技術としてのマイクロ波送電は、マイクロ波を制御することにより電磁誘導等の他の方式と比べて長距離間の送受電が可能となることから、様々な利用の場での活用が期待されている。

①スピノフ技術実証システムの試作評価

短期間に事業化／製品化が期待される無線送受電スピノフの実証システムを試作し、実証実験を実施した。

本研究開発では以下の2つの技術を導入して低コスト化を目指した。スキヤッタードシステム方式(間引き方式)は送電装置の数を減らすことが可能となる技術であり、送電装置の低コスト化に寄与する。次に焦点化アンテナ方式は受電装置の数を減らすことが可能となる技術であり、受電装置の低コスト化に寄与する。

設計にあたっては下記を目標とした。

- ・周波数 2.45GHz
- ・送電出力 10kW 程度
- ・送電距離 500m (最大)
- ・構成 スキヤッタードシステム方式

また、試作にあたっては下記を採用した。

a. 送電ユニット試作

- ・位相制御マグネトロン
- ・位相同期システム

b. ビーム制御ユニット試作

- ・レトロディレクティブ / クローズドループ 併用方式

c. 計測ユニット試作

計測ユニットは送電するマイクロ波の電界強度を送電距離にあわせて計測できる。

主要なシステム仕様は、以下の通りである。

図 J-3-1-1-17 実証システム 基本形状

図 J-3-1-1-18 実証システム 基本構成

表 J-3-1-1-14 実証システム 主要諸元

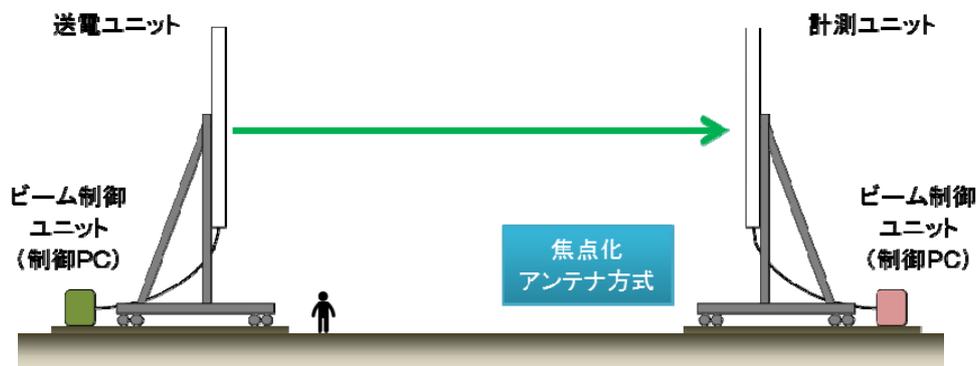
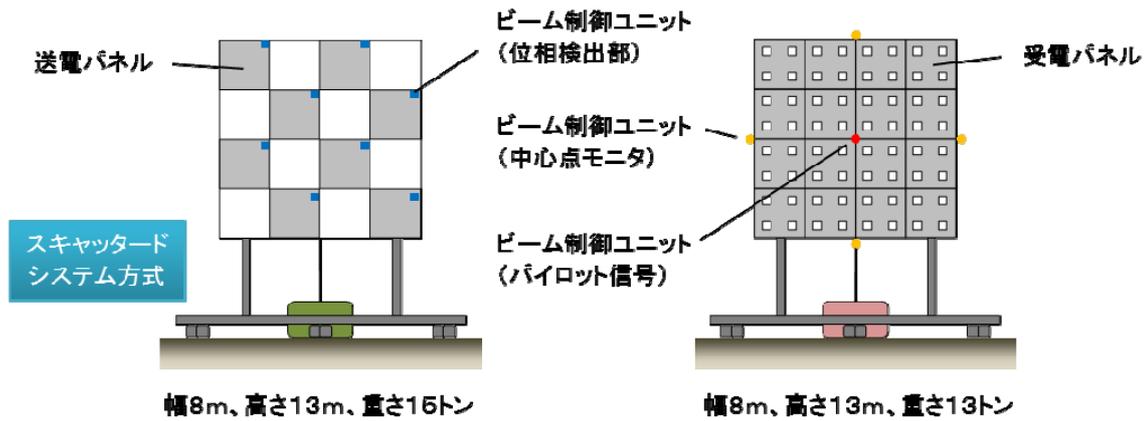


図 J-3-1-1-17 実証システム 基本形状

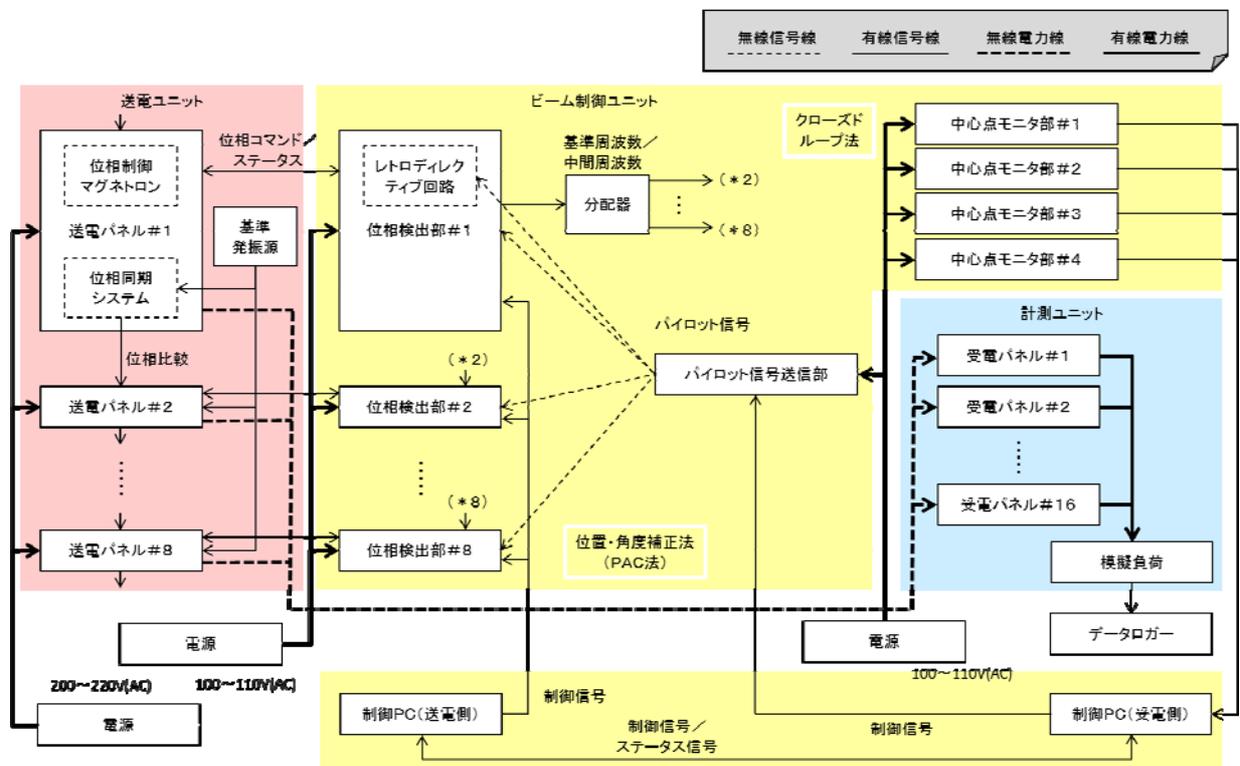


図 J-3-1-1-18 実証システム 基本構成

表 J-3-1-1-14 実証システム 主要諸元

項目	性能		備考
	値	単位	
送電ユニット			
・送電パネルのサイズ	2	m	
・マグネトロン発振周波数	2.45	GHz	
・位相制御回路効率	80	%以上	
・アンテナ効率	85	%以上	
・位相制御マグネトロン位相制御精度	17°	以下	3σ値
・位相同期システム位相制御精度	17°	以下	3σ値
ビーム制御ユニット			
・位置・角度補正法位相制御精度	17°	以下	3σ値
・ビーム方向制御精度	0.1°	以下	3σ値
計測ユニット			
・受電パネル数	16	枚	
・受電パネルのサイズ	2	m	
・アンテナ効率	80	%以上	
・整流回路効率	80	%以上	
・受電面積に対するレクテナ面積	11	%以上	
・送受電効率	12	%以上	

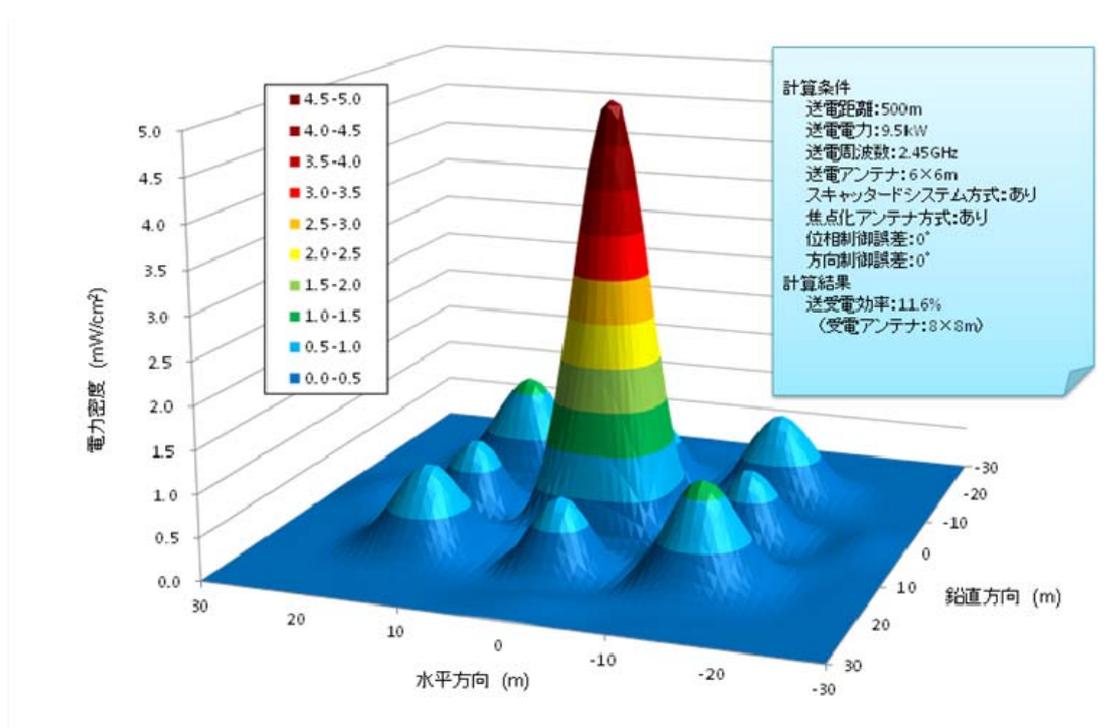


図 J-3-1-1-19 実証システム 主要諸元(付図)

実証システムを用いて無線送受電スピノフシステムの有効性を確認するための試験を実施した。試験結果は以下の通りである。本試験結果から、無線送受電技術のスピノフ技術は、短期間で事業化／製品化可能であることが、実証できたものと考えられる。

- ・実証システムを用いて、送電距離500m、送電出力約10kWの無線送受電試験を実施した。
- ・PAC法による位相角度制御は、目標の $\pm 17^\circ$ 以下の精度を達成した。
- ・ビーム方向制御精度は、レトロディレクティブ法／クローズドループ法併用方式により、目標の $\pm 0.1^\circ$ 以下の精度を達成した。

送電ユニット



計測ユニット



図 J-3-1-1-20 実証システム試験 試験風景

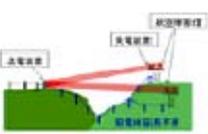
2.45GHz 帯で電送距離約 500m において約 10kW の送電出力実験を行い、制御された条件下での動作を確認した。国内では最長、最大級電力の屋外無線送電実験に成功した。(受電約 32W)

②電力インフラへの適用可能性の検討

マイクロ波無線送受電技術について、電気事業者の観点から電力インフラへの適用可能性について検討した。

様々な適用可能性が考えられる中、無線送受電技術の特徴を活かせる活用用途として、航空障害灯、応急送電、離島送電、洋上風力発電を選定し、その各々に対して、現行の設備・運用実態や課題を踏まえた無線送受電の適用可能性について検討した。表 J-3-1-1-15 に無線送受電技術の適用用途を示す。

表 J-3-1-1-15 無線送受電技術の適用用途

	航空障害灯	応急送電	離島送電	洋上風力発電
設備・運用実態と課題	<ul style="list-style-type: none"> 航空障害灯の消費電力は 1 基あたり僅か 1kW 未満 郡部鉄塔の場合、配電線延長等、航空障害灯供給工事に多額の費用が発生 代替手法もあるが、低出力のため供給対象が限定される 	<ul style="list-style-type: none"> 台風・豪雨・地震・津波・雪害など自然災害による電力設備被害が甚大化 様々な被災状況に対応するため、電力設備の応急復旧のほかに出来るだけ多くの応急送電技術の確立が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ①本土と離島を海底ケーブルで連系する方式と、②離島の内燃力発電所から供給する方式が存在 運用上②→①への切替が望ましいが、長距離、小規模離島の場合、採算が合わない 	<ul style="list-style-type: none"> 欧州では数百 MW、陸上から 100km 以内の洋上風力が増加 再エネへの関心の高まりや固定価格買取制度の適用対象となったため日本も今後普及の見込み
送電電力	1kW 未満	数百 kW	5MW~40MW	数百 MW
送電距離	500m 程度	—	30km~150km	100km 以内
難易度	低	中	大	大
無線送受電適用のイメージ				
無線送受電技術適用時の課題	<ul style="list-style-type: none"> 安全性に問題がないこと、代替手法と同等若しくはそれ以上のコストメリットと供給信頼度が得られること 風荷重増加に伴う鉄塔補強の軽減のための、鉄塔搭載設備のコンパクト化 鉄塔の揺れによる指向性への悪影響防止 	<ul style="list-style-type: none"> 無線送受電設備の搬送性の向上 	—	—

上記4つの適用対象のうち、必要とされる送電電力と送電距離が「小電力、近距離」になるほど難易度が低く、逆に「大電力、長距離」になるほど難易度は高くなる。今回、最も難易度が低い「航空障害灯」への適用可能性について検討した。

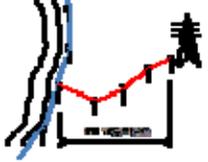
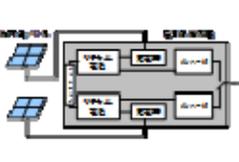
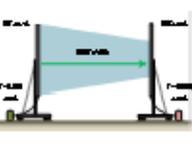
表 J-3-1-1-16 に、航空障害灯の電源供給方式の得失比較を示す。

航空障害灯の電源は、配電線から供給するのが一般的であるが、鉄塔は一般的に僻地に建設されるため、以下の課題が見受けられる。

- ・周辺に既設配電線がなく、長亘長の配電線新設が必要となるケースが多い。

- ・山間部等地理的条件が悪く、配電線建設コストが割高となる。
- ・設備巡視や電線に接近する樹木伐採等、設備の保守・運用に労力を費やす。

表 J-3-1-1-16 航空障害灯の電源供給方式の得失比較

	配電線供給	静電誘導方式	太陽光+蓄電池方式	無線送受電
形式構成		 《高圧電力へのHP》		
建設費用	225百万円 〔塔等1基あたりの航空障害灯供給平均工事費〕	要求仕様の設定や現場の設置状況等に大きく影響するものと見われ、数えて未記入	29百万円 PV : 2.5百万円 蓄電池 : 4.5百万円 制御盤等 : 1.2百万円 設置工事費 : 10百万円	80百万円 〔送電部 : 40百万円 受電部 : 30百万円 設置費用 : 10百万円〕 ※無線送受電装置の設置規模や施工方法次第では、本数値を除外した勘定計算や設置の箇所費用が新たに発生
供給信頼度	台風等による配電線事故の影響を受ける	鉄塔建設時(未充電時)や送電停止時の電源供給が課題	連続不日照日数への考慮が必要	鉄塔設置の場合は、鉄塔の揺れによる指向性への影響が懸念

航空障害灯の電源供給方式として、配電線供給の他に、静電誘導方式や「太陽光+蓄電池」方式が存在する。配電線供給以外の2方式は、配電線事故の影響を受けないというメリットを有する一方で、静電誘導方式は、送電線電圧を課電しないと発電電力が得られない他、発電電力が一般的に小さいとの課題を有し、また、「太陽光+蓄電池」方式は、発電電力が天候に左右されるため、供給信頼度の担保が難しいとの課題がある。

2.4GHz帯のマイクロ波無線送受電技術を航空障害灯の電源供給に適用する場合、鉄塔の揺れに伴う指向性の悪化・供給信頼度低下、代替手法と比べて割高な建設費用、風荷重増加に伴う鉄塔補強の軽減のための鉄塔搭載設備のコンパクト化などの課題が見えた。それらへの対策の一案として、マイクロ波の周波数帯を高めること(例:24GHz帯)により、鉄塔搭載装置の大きさ縮小(8m×8mから直径3mへ)、正面の受風面積縮小(64m²から7m²へ)、重量軽減(数百kgから50kgへ)が考えられるなど、具体策も抽出できたことから、電力インフラへの適用可能性が見えた。

J-3-1-2 個別要素技術成果

マイクロ波エネルギー送受電技術の確立に向け、高効率・軽量薄型・高精度を実現するための個別要素技術の要素技術開発を行った。いずれの目標も、世界的に類のないもの、あるいは最高水準の効率を目指した。

具体的な成果については、以降、以下の順で述べる。

(1) 高効率薄型送電部の開発

① 送電効率

- 1) サブアレイアンテナ
- 2) 垂直給電回路
- 3) 電力増幅器(HPA)

② 薄型軽量化

- 1) 給電部(BFN)
- 2) 実装

(2) 高効率受電用整流ダイオードの開発

① 高効率受電用整流ダイオードの必要性

② 高効率受電用整流ダイオードの検討

- 1) 基礎試験
- 2) GaN ショットキーバリアダイオードの整流回路への適用検討

(3) 位置・角度補正法(PAC 法)及び並列化法による送電制御技術開発

① 開発の課題、各方式の概要

② 開発目標

③ 開発内容

- 1) 実現性の検討
- 2) 有効性の検討

④ 今後の課題・実施予定事項

(1) 高効率薄型送電部の開発

将来のSSPSでは宇宙に設置される送電部にとって、高効率や薄型化のための技術確立は必須である。本研究開発では各々に対して具体的な数値目標を設定し、さらにそれを実現する技術要素を小項目に分類して取り組み、目標を達成した。

送電効率最終目標

- ・GaN 素子を利用した F 級増幅器を使用して増幅器単体で 60%以上
- ・送電部としての効率は 30%以上

薄型軽量化最終目標

- ・アクティブ集積アンテナで構成して送電モジュールは厚み 40mm 以下

①送電効率

以下、送電部の効率向上に関与する要素に関わる検討結果を示す。

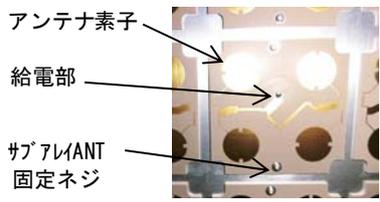
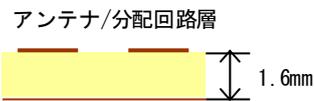
1) サブアレイアンテナ

HPA モジュールからの出力電力を効率良く空間に放射させる必要があるため、アンテナ素子部には高放射効率特性が求められる。また、本サブアレイは 1 つの HPA モジュール出力に対して 4 つのアンテナ素子に分配給電を行うことから、低損失の分配回路部が必要となる。

サブアレイ薄型化のためには、アンテナ素子層と分配回路層を同じ層上に構成する 2 層基板構成が望ましい。これにより、サブアレイ ANT 基板厚を 1.6mm まで薄型化することができた。さらに、多層積層基板を用いる必要がないため PTFE 系の低損失基材を用いることができ、放射効率の改善も可能となる。

高放射効率及び薄型化の両立を目的とした 4 素子サブアレイの設計を行い、部分試作で性能確認を行い、損失は -0.27dB を得た。表 J-3-1-2-1 に本サブアレイアンテナ 2 層基板モデルを示す。

表 J-3-1-2-1 サブアレイアンテナ 2 層基板モデル

	2層基板モデル
外観図	
層構成	 アンテナ/分配回路層 基材：PTFE
厚さ	1.6mm
放射効率(設計値)	-0.27dB

2) 垂直給電回路

送電部で採用する薄型 HPA モジュール構造は、図 J-3-1-2-1 に示すように、従来の一般的な構想では薄型化には限界があることから、HPA モジュール内部の平面回路方向と RF 電力の給電方向が垂直の関係を持つような構造を採用した。アンテナ基板と接続する HPA モジュールの出力部を垂直給電回路と呼ぶ。

図 J-3-1-2-1 に示した構造以外に薄型 HPA モジュール構造として放熱板をアンテナと HPA モジュールで挟み込む HPA・アンテナ背面合わせ構造がある。この構造では、HPA モジュールの取り外しが困難になるといった問題とともに、HPA モジュールの出力部からアンテナまでの経路が長くなることから電力損失が増加する欠点があるため、採用しない。

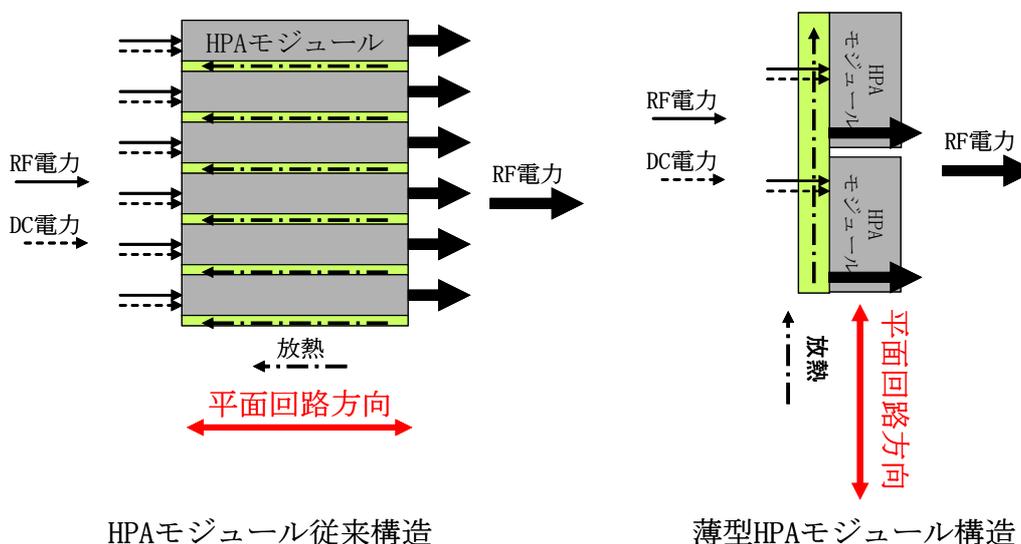


図 J-3-1-2-1 従来モジュール構造と薄型 HPA モジュール構造の差異概念

垂直変換回路については、HPA モジュールの薄型化という観点から将来性がある、カバー同軸方式を採用した。カバー同軸方式とは、HPA モジュールのカバーに導体芯線を誘電体で円筒状に覆った端子を挿入し、カバーと一体で同軸線路を形成する方式である。導体芯線は両端ともアンテナ基板や HPA モジュール内の基板とはんだ付けで接続する。

HPA モジュール内部の平面回路方向と、垂直な関係になる RF 電力給電方向を結びつける低損失(設計目標値 -0.2dB 、解析値 -0.1dB)な垂直給電回路を HPA モジュールの設計に適用した。

3) 電力増幅器 (HPA)

GaN 半導体素子単体用の評価系を構築し、素子レベルでの電力付加効率を検証した。さらに、性能実証用モデル HPA を開発し、最適条件で電力付加効率 70%程度が可能であることを確認し、その結果、送電モジュールに使用する HPA で電力付加効率 60%以上の成果を得た。

HPA モジュール用に GaN 素子を新たに開発し、高効率化のために F 級増幅回路を採用するなどして出力および効率の最適化を図った。また、入出力整合回路基板も HPA モジュール用に最適設計を行い、GaN 素子と入出力整合基板をメタルパッケージに収納し、部品レベルの HPA 開発を行った (HPA パッケージ)。

図 J-3-1-2-2 に HPA の回路構成を示す。C 帯ではトランジスタの寄生成分が高調波整合に大きな影響を及ぼす。そこで、高調波ロードプル測定により素子最大効率を与える負荷インピーダンスを入力側、出力側ともに 3 倍波まで求め、実測で得られた最適負荷インピーダンスに基づいて回路設計を行った。

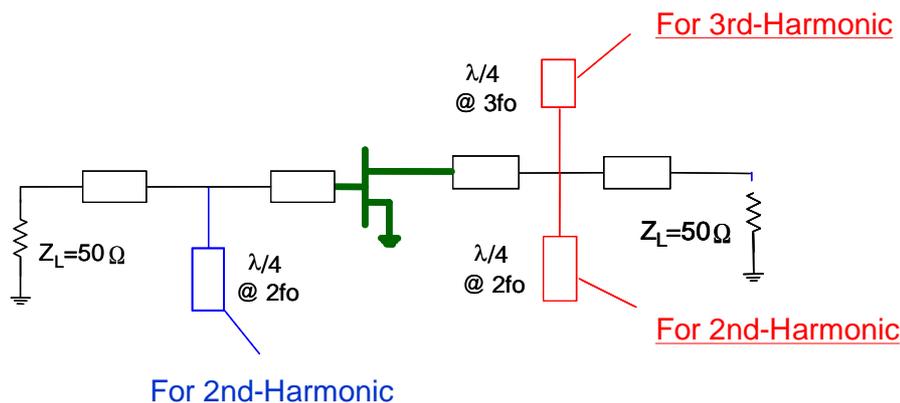


図 3-1-2-1-2 HPA パッケージの回路構成

高調波ロードプル測定の結果、素子効率は出力側では 2 倍波、3 倍波双方の反射位相に依存するのに対して入力側では 2 倍波の反射位相にのみ依存することが分かったため、入力側には 2 倍波の反射回路のみ、出力側には 2 倍波、3 倍波双方の反射回路を取り付けている。高調波反射回路は 1/4 波長のオープンスタブで構成し、反射係数を大きくするために GaN HEMT 直近に配置し、反射回路から GaN HEMT までの電気長を調整することで反射位相を調整している。

図 J-3-1-2-3 に HPA の外形と内部の様子を示す。パッケージの外寸は 21mm × 12.9mm (高さは 4.3mm)、整合回路の実効寸法は 6.4mm × 8mm である。

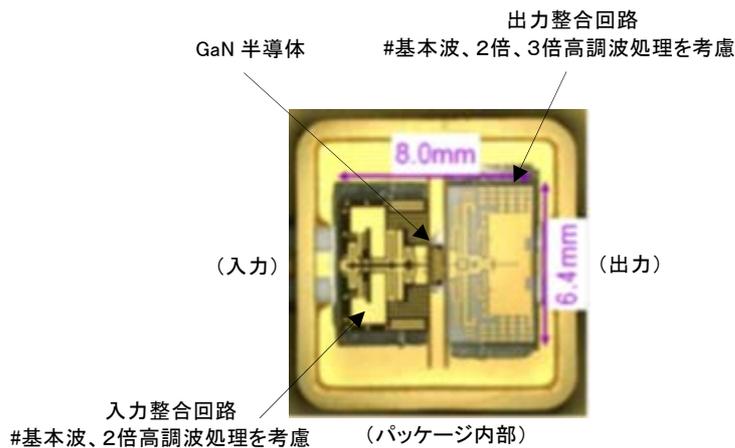


図 J-3-1-2-3 性能実証モデル HPA

図 J-3-1-2-4 に HPA 評価結果を示す。HPA パッケージ単体の電力付加効率 (PAE)の仕様 60%以上に対して、70.5%の良好な結果が得られた。

また、高調波についても-60dBc 以下の良好な結果が得られた(図 J-3-1-2-5)。

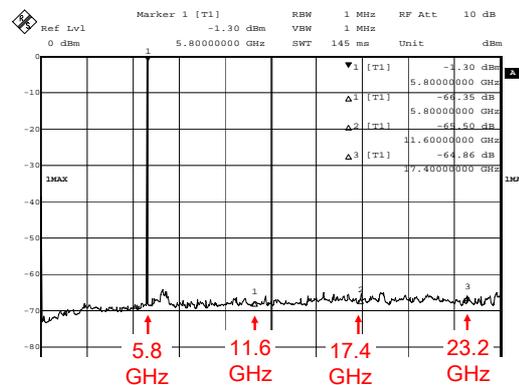
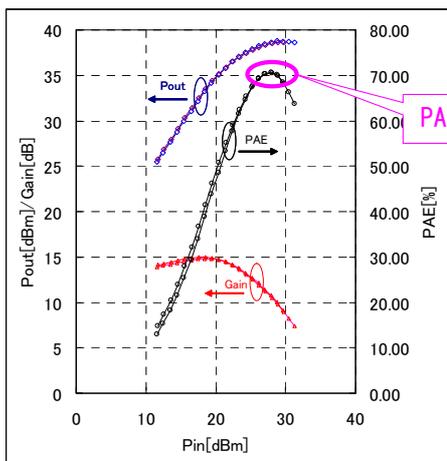


図 J-3-1-2-4 HPA 評価結果

図 J-3-1-2-5 HPA の高調波/スプリアス特性の評価結果

試作した最終段増幅器の電力負荷特性が電力付加効率(PAE)最大 70%を達成した。また素子の特性および製作時のばらつき等を考慮しても PAE 平均 60%以上を達成した。

②薄型軽量化

将来、宇宙用としての送電部には、高度の薄型軽量化が求められることから、既存の概念にとらわれず、大幅な成果が期待できる方式を模索した。本件に関する要素に関わる検討結果を示す。

1) 給電部(BFN: Beam Forming Network)

給電部は、送電モジュール(76 サブアレイ)において、サブアレイ内の各 HPA モジュールへのマイクロ波電力および電源・制御信号を供給するための回路である。

給電部は、図 J-3-1-2-6 に示すように、送電モジュールごとに 4 セットの 19 分配器で構成され、それぞれ 2 層トリプレート線路構成を用いた。トリプレート線路では、基板厚が薄くなるにつれて、線路幅が細くなる。サブアレイの薄型化を図るため、想定される基板作製誤差を与えた場合の各ポートの透過振幅バランスから基板厚を選定した。また、図 J-3-1-2-7 に、19 サブアレイの外観を示す。

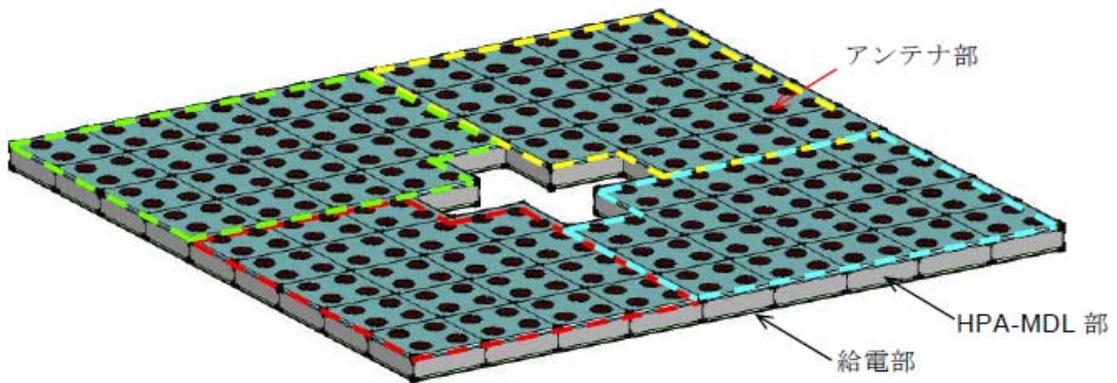
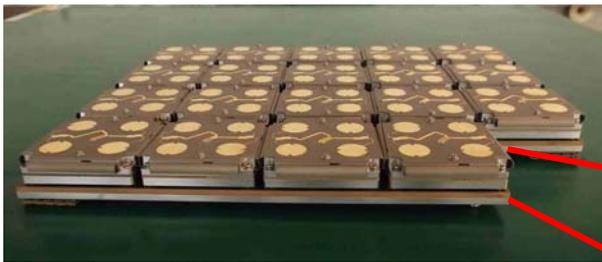
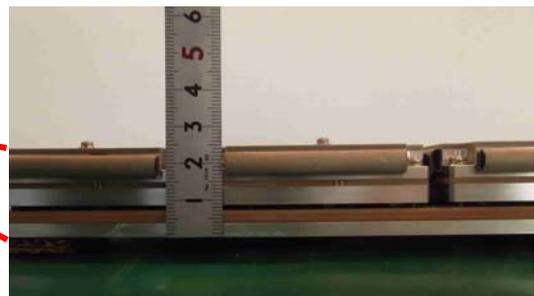


図 J-3-1-2-6 送電モジュール(76 サブアレイ)構成



19 サブアレイの外観

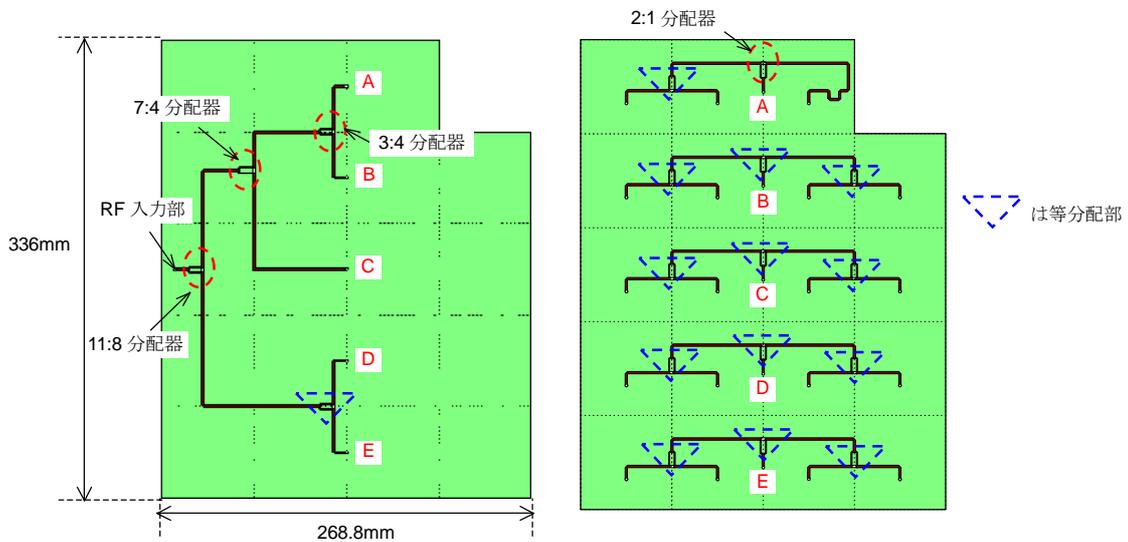


サブアレイの厚み

図 J-3-1-2-7 19 サブアレイの外観

19 分配部を構成する線路レイアウトは図 J-3-1-2-8 のようになり、1 層目で 1 入力を 5 分配し、2 層目で 5 入力を 19 分配する回路構成とした。配線に際し、それぞれの出力で等振幅、等位相特性が得られるよう配線してある。回路としては複数種類の不等分配回路、および等分配回路から成り、それぞれウィルキンソン型分配回路を用い

ることで、端子間のアイソレーションを確保してある。



(a) 1層目パターンレイアウト (b) 2層目パターンレイアウト

図 J-3-1-2-8 給電部構成図

給電部は薄型化を実現するため、RF部と制御部を同一基板内での配線とし、RF/制御部を含めた薄型化を図った。図 J-3-1-2-9 にサブレイ番号と給電部番号を示す。

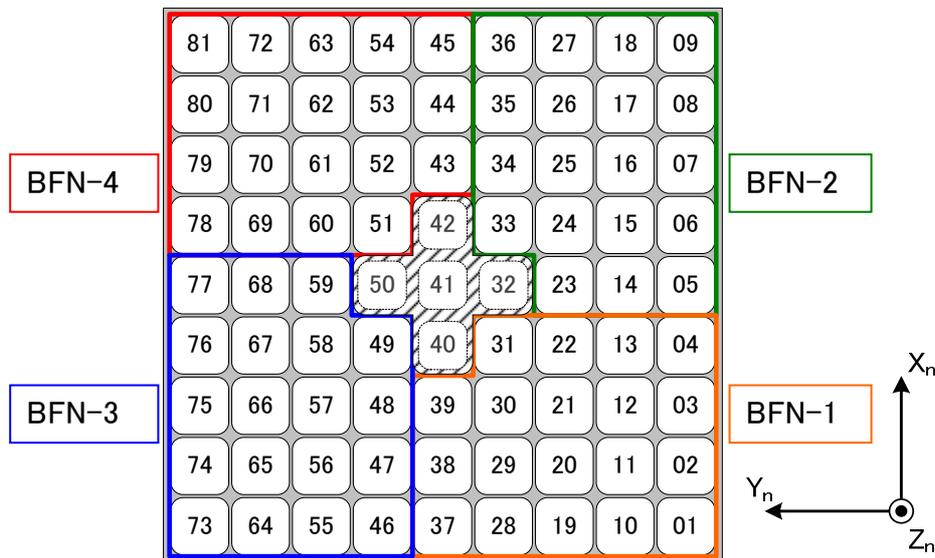


図 3-1-2-I-9 サブレイ番号と給電部番号

HPA モジュールの前段に位置している給電部は、薄型化を重視した設計を行い、部分試作で設計の妥当性を確認した。この結果、サブレイ厚さは仕様 40mm に対して、突起部を除き 25mm を達成した。

2)実装

HPA モジュールの実装では、既述の垂直給電構造で HPA モジュールの薄型化を図るとともに各デバイスの性能を安定して実現させるための小型アイソレーション構造を考慮した。

- デバイス間のアイソレーションを確保できるよう導体のシールド構造となる壁を設ける構造とする。
- 空間の高さや幅に不要な共振が発生しない構造とする。構造が複雑な箇所や部品寸法の関係で空間が広くなる箇所については、シールドチューブ等を用いて高周波の回り込みを抑制する。

図 J-3-1-2-10 に HPA モジュールの HPA 出力部のアイソレーション構造を示す。HPA 出力部は全体のカバーとは別に小型カバーで覆う複雑な構造であり、HPA モジュールの性能に大きく影響を与える部位であるため、HPA 出力部に着目して検討を進めた。

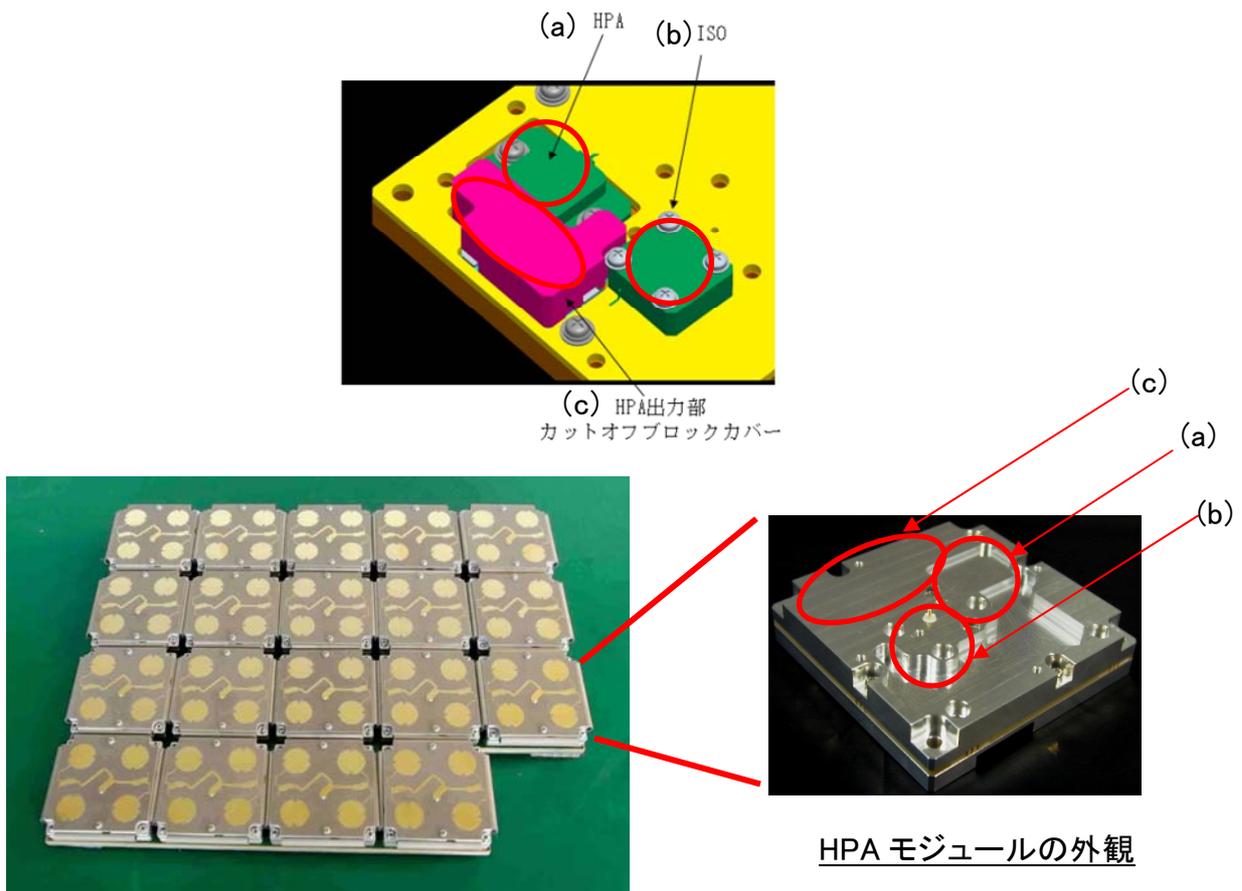


図 J-3-1-2-10 HPA 出力部アイソレーション構造

システムから入力された RF 信号を 5 ビット移相器で位相を制御し、DA(ドライバーアンプ)と HPA(ハイパワーアンプ)で増幅してアンテナに出力する構成となっている。

HPA モジュールの主な機能を以下に示す。また、HPA モジュールのブロック図を図 J-3-1-2-11 に示す。

ア. RF 電力増幅機能

HPA モジュールに入力された信号を規定の出力レベルまで増幅する機能

イ. 位相制御機能

HPA モジュールに入力された信号に応じて透過位相をデジタル位相制御する機能(5 ビット移相器)

ウ. ON/OFF 機能

外部制御信号により上記アの機能を ON/OFF する機能

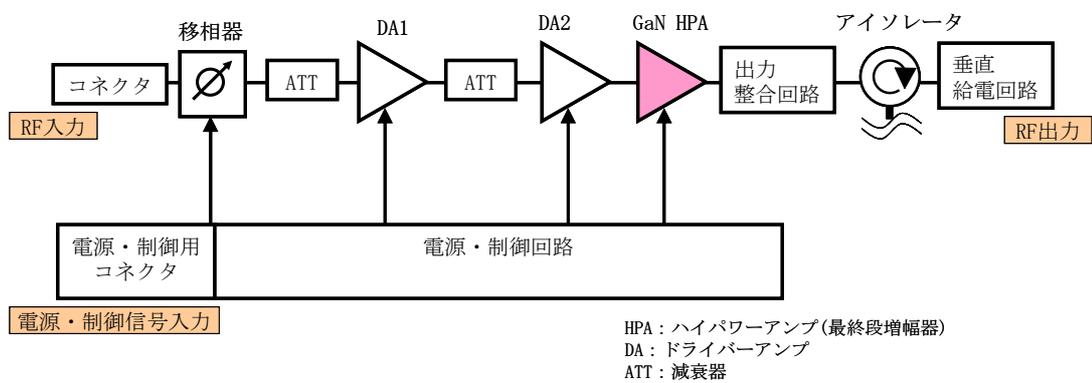


図 J-3-1-2-11 HPA モジュールのブロック図

HPA モジュールの薄型化を図り、かつ各デバイスの性能を安定させるための小型アイソレーション構造を設定した。

(2) 高効率受電用整流ダイオードの開発

マイクロ波を直流電力として取り出すための整流回路の基本回路は図 J-3-1-2-13 のとおりであり、中でも効率を左右する主要構成部品は整流ダイオードである。多数の整流ダイオードを使用するマイクロ波電力伝送試験モデル用の受電部では、コスト効率の観点から Si 半導体等を利用した市販のダイオードを使用する計画が進めたが、それとは独立して高効率の整流ダイオードの開発に取り組んだ。

本研究開発を始める前の知見として、レクテナアレイを定格電圧近くで使用すると、素子単体のときとは異なり、変換効率の劣化や、場合によっては破壊されるといった現象が見られた。そこで、将来の実用 SSPS で必要な高い目標につなげるため、より高効率が期待できる GaN 半導体等を利用したマイクロ波受電用整流ダイオードを試作した。このダイオード単体の RF-DC 変換効率は 80% 以上を目標とした。

① 高効率受電用整流ダイオードの必要性

レクテナ素子は高い動作電圧で高い変換効率を得られるため、通常は整流ダイオードの耐電圧の定格近くで使用される。レクテナアレイでは、高い変換効率を達成するために、レクテナ素子を高い電圧で動作させ、極力電流を減らし、変換回路で損失を低減することが要求される。

この要求に適合する整流方式として、図 J-3-1-2-12 に示す単一の伝送線路上、整流ダイオードと入出力フィルタで構成される自己バイアス整流方式を採用する。

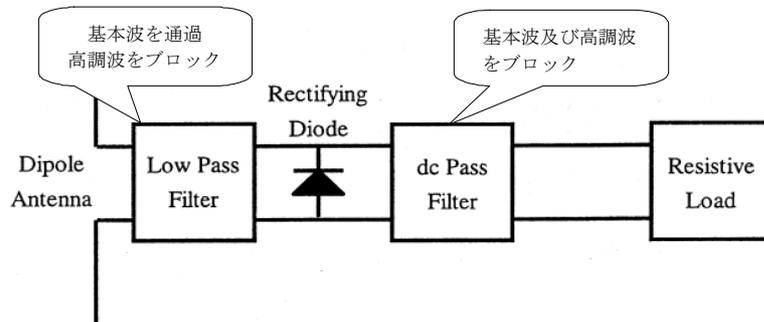


図 J-3-1-2-12 自己バイアス整流方式レクテナ素子

この時、自己バイアス整流方式の能力を最大限に発揮するために、高効率受電用整流ダイオードには、基本的には、高い逆耐電圧(V_{br})、低いオン抵抗(R_s)、低い立上り電圧(V_{bi})等が要求される(図 J-3-1-2-13)。

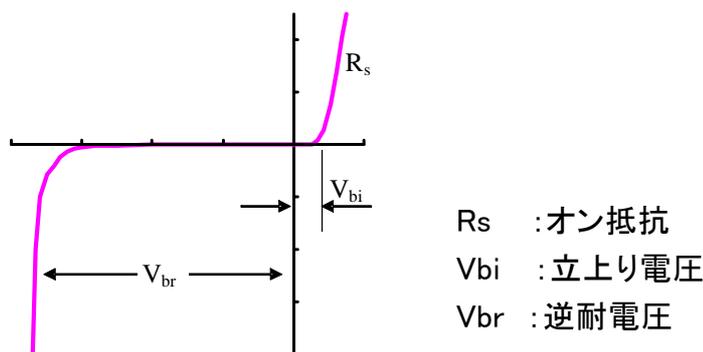


図 J-3-1-2-13 整流ダイオードのパラメータ

このような要求に対して、耐圧や高温特性に優れた特性を有する窒化ガリウム (GaN) が、これまでのシリコンやガリウム砒素に代わり、物性面、プロセスの成熟度から見て有望な材料と考えられている¹。

ここで、受電電力の大小により整流ダイオードの特性パラメータに対する要求は相反したものとなるが、それらを同時に満足する GaN 系ショットキーダイオードの例を図 J-3-1-2-14 に示す。

ここでは、アノード電極が電極①と電極②の二重電極を構成し、AlGaN/GaN ヘテロ接合の負のしきい値電圧の絶対値を、アノード電極①の逆方向耐圧より小さく選ぶ。それにより、アノード電極①による逆方向漏れ電流がカソード電極に到達することが抑制され、低いオン抵抗 R_s と高い逆方向電圧 V_{br} の実現を目指す。

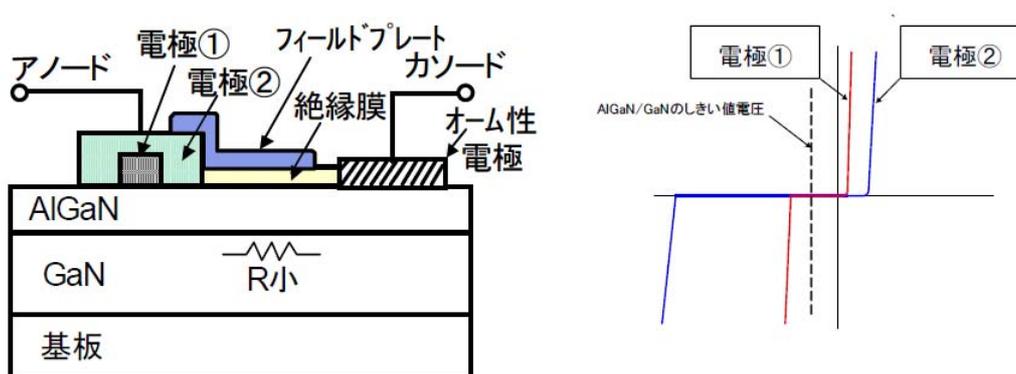


図 J-3-1-2-14 高効率整流ダイオードの例²

¹ 「レクテナ用整流ダイオードに関する調査」、平成17年度、JAXA

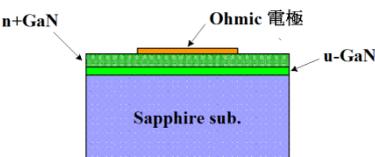
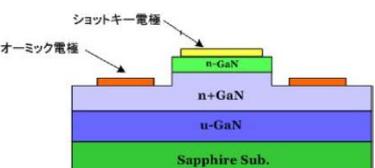
² 「ショットキーダイオード」；特許出願番号：2007-003952、公開番号：2008-172035

②高効率受電用整流ダイオードの検討

1) 基礎試験

レクテナ整流回路の RF-DC 変換効率を改善するためには、そこに用いるショットキーバリアダイオードの特性として、低抵抗(2[Ω]程度)、低容量(1[pF]程度)、低立上り電圧(0.5[V]程度)、高耐圧(40[V]程度)が要求される。これらを実現させるための各要素の基礎試験を実施した。試験結果概要を表 J-3-1-2-2 に示す。

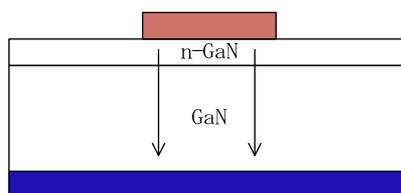
表 J-3-1-2-2 基礎試験結果概要

試験	項目	内容	結果
1	低抵抗化のための基礎試験	<p>【評価内容】 TLM によるコンタクト抵抗 (R_c) の評価</p> <p>【評価構造】</p> 	熱処理を施すことによって 1[Ω]以下程度の低減効果が認められた
2	低 V_{bi} 化のための基礎試験	<p>【評価構造】 I-V 特性取得による立上り電圧 (V_{bi})</p> <p>【評価構造】</p> 	試験 1 のショットキー電極では V_{bi} と V_{br} の関係からバランスの良い値に設定できる可能性があるが、条件出しが難しい。一方、試験 2 では概ね特性が安定。

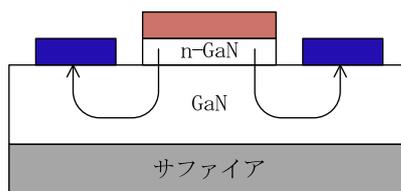
2) GaN ショットキーバリアダイオードの整流回路への適用検討

ショットキーバリアダイオードの構造は大きく分けて「縦型構造」と「横型構造」がある。図 J-3-1-2-15 に構造の概要を示す。これらの構造の GaN ショットキーバリアダイオードのレクテナ整流回路への適用について検討した。

縦型ダイオード



横型ダイオード



■ : ショットキー電極 (アノード)

■ : オーミック電極 (カソード)

→ : 電流の流れ

図 J-3-1-2-15 ダイオード構造概要

a. 性能向上ダイオードの試作と評価

縦型電極構造の基本形ダイオードを試作して、変換効率 71.4% (5.8GHz、入力電力 1W) を実測した。この値は、5.8GHz 帯における GaN 半導体を用いたレクテナ整流回路では世界最高水準である。

b. 更なる性能向上に向けて

目標効率 (80%) を実現するためのダイオードパラメータは、パラメータごとに実現できることを、試作を通して確認した。表 J-3-1-2-3 にダイオードパラメータ (目標値) を示す。

表 J-3-1-2-3 ダイオードパラメータの目標値

No.	項目	目標値
1	立上り電圧 V_{bi}	0.5 [V] 以下
2	逆耐電圧 V_{br}	40 [V] 以上
3	等価直列抵抗 R_s	2 [Ω] 以下
4	接合容量 C_{jo}	1 [pF] 以下

それらのパラメータを、ダイオードとして実現することで目標効率達成の見込みが

得られた。これを実現するためには主に以下の研究開発が必要となる。

- －立上り電圧が低いショットキー電極材料の選定と特性把握および特性安定化の研究。
- －損失要因となる抵抗を低減するために、低抵抗 GaN 層の厚みを薄くする製造技術の開発

以上から、GaN 半導体を用いたレクテナ整流回路の RF-DC 変換効率 80[%]を実現するために必要な課題と改善策を抽出することができた。

(3) 位置・角度補正法(PAC法)及び並列化法による送電制御技術の開発

① 開発の課題、各方式の概要

宇宙太陽光発電システムでは、数百～千万枚の送電パネルから送電されるマイクロ波の位相を同期させる技術が必要である。

本研究開発では、2つの送電制御技術の実現性及び有効性の評価・検討を行って技術の確立を行い、将来の宇宙太陽光発電システムの実現に資することを目的とする。

位置・角度補正法(PAC法)とは、地上からのパイロット信号を利用して、各送電パネル部の位置ズレを推定し、ズレている分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正しておく方法である。(図 J-3-1-2-16)

並列化法とは、送電パネル部毎に送電電波の周波数変調を行ない、受電側で基準となる周波数との重ね合わせをすると、位相の誤差分だけ変調周波数に出力が発生する原理を利用して、送電パネル部毎の位相の誤差を検知し、検知した誤差分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正しておく方法である。(図 J-3-1-2-17)

位置・角度補正法は、地上からのパイロット信号を利用して、各送電パネル部の位置ズレを推定し、ズレている分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正する。

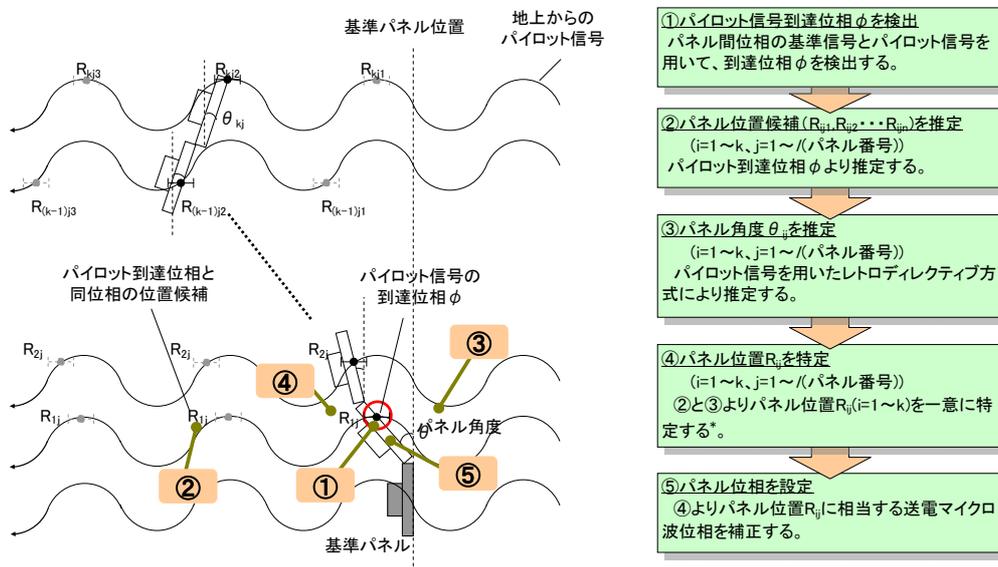


図 J-3-1-2-16 位置・角度補正法(PAC法)

並列化法は、送電パネル部毎に送電電波の周波数変調を行ない、受電側で基準となる周波数との重ね合わせをすると、位相の誤差分だけ変調周波数に出力が発生する原理を利用して、送電パネル部毎の位相の誤差を検知し、検知した誤差分だけ各送電パネル部の基準信号の位相を予め補正する。

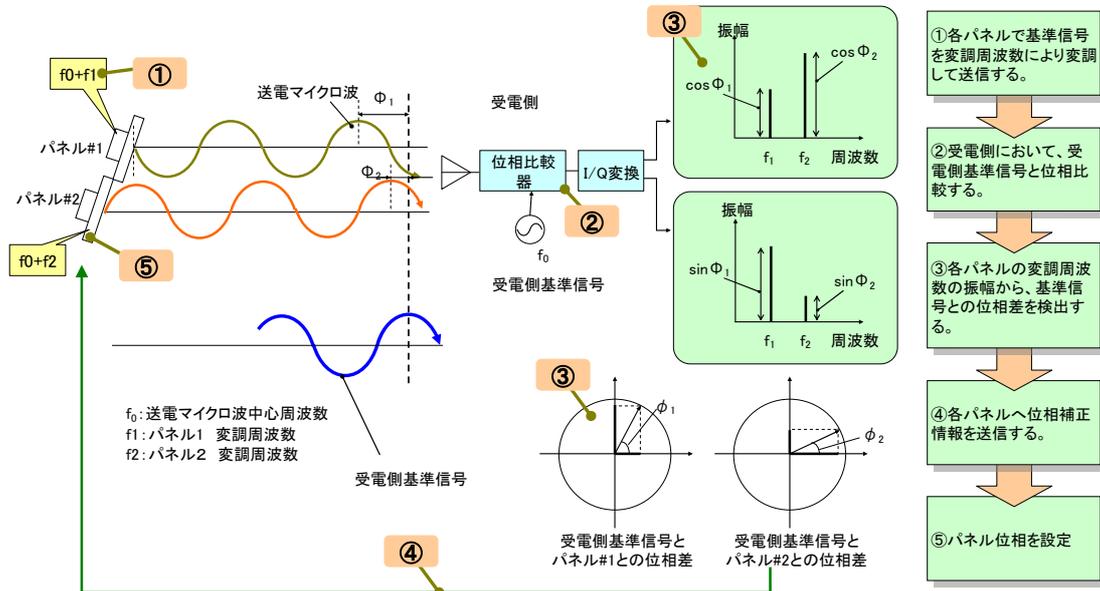


図 J-3-1-2-17 並列化法

②開発目標

“位置・角度補正法(PAC法)”及び“並列化法”の実現性及び有効性を評価するための目標値を以下に示す。

(a) 送電制御性能の実現性

【目標値】送電制御性能(精度)	: $\pm 12^\circ$ 以下
送電制御性能(処理速度)	: 400 秒以下/サイクル

(b) 実用システムに適用した場合の有効性

【目標値】無線電力伝送効率の低下量	: 1%以下
不要波の発生レベル	: $0.3\text{W}/\text{m}^2$ 以下

③開発内容

1) 実現性の検討

PAC法及び並列化法の各々について基本原理の整理、送電制御性能向上の対策の具体化を行い、これらから、基本仕様として、機能ブロック図及び処理ロジックを設定した。機能ブロック図については、基本原理を実現するための電気回路として具体的なRF機器の主要特性をまとめ、機器の校正までブレークダウンした。また、処理ロジックについては、送電制御を行う1サイクルの処理ロジックとして、処理に要する

時間の大きい送電パネルごとにソフトウェアや詳細通信処理ロジックを設定した。

上記の基本仕様に基づき、PAC法及び並列化法の送電制御性能として、処理速度及び精度について解析による評価を実施した。処理速度の解析では、通信処理ロジックに基づき、各通信ステップに必要な処理時間を既存品ベースで見積り、積み上げ計算した。精度の解析では、各構成機器の精度誤差を既存品ベースで見積り、高周波回路シミュレータ(Microwave Office)で各精度誤差が送電制御精度に与える影響を求めた。解析結果を踏まえて、PAC法及び並列化法の送電制御性能のキーとなる要素を試作し試験評価(要素試作試験:図 J-3-1-2-18)を行った。更に、要素試作試験の結果を踏まえて、PAC法及び並列化法の送電制御性能をタートルで評価できる原理モデルを試作し試験評価(原理モデル試作試験:図 J-3-1-2-19)を行った。

解析、要素試作試験、原理モデル試作試験の結果を表 J-3-1-2-4 に示す。位相精度については、理想的な解析評価に対して、実際に機器の製作を行った原理モデルでは各種誤差の影響により、PAC法で目標値を若干オーバーするものの、並列化法で目標値を満足する結果となった。処理速度については、理想的な解析評価に対して、通信のプロトコル等の製作を行った原理モデルでは通信の待ち時間などの影響で、並列化法で目標値を若干オーバーするものの、PAC法で目標値を満足する結果となった。

表 J-3-1-2-4 送電制御性能(実現性検討)結果サマリ

	目標 (確定)	PAC 法			並列化法		
		解析	要素 試作 試験	原理 モデル 試作 試験	解析	要素 試作 試験	原理 モデル 試作 試験
位相 精度	±12° 以下*1	±9.1°	±8.2°	±18.8°	±4.6°	±2.8°	±2.7°
処理 速度	400 秒/ サイクル*1 以内	1.2 秒/ サイクル	90 秒/ サイクル	256 秒/ サイクル	14.5 秒/ サイクル	70 秒/ サイクル	459 秒/ サイクル



図 J-3-1-2-18 供試体外観(PAC法の例)

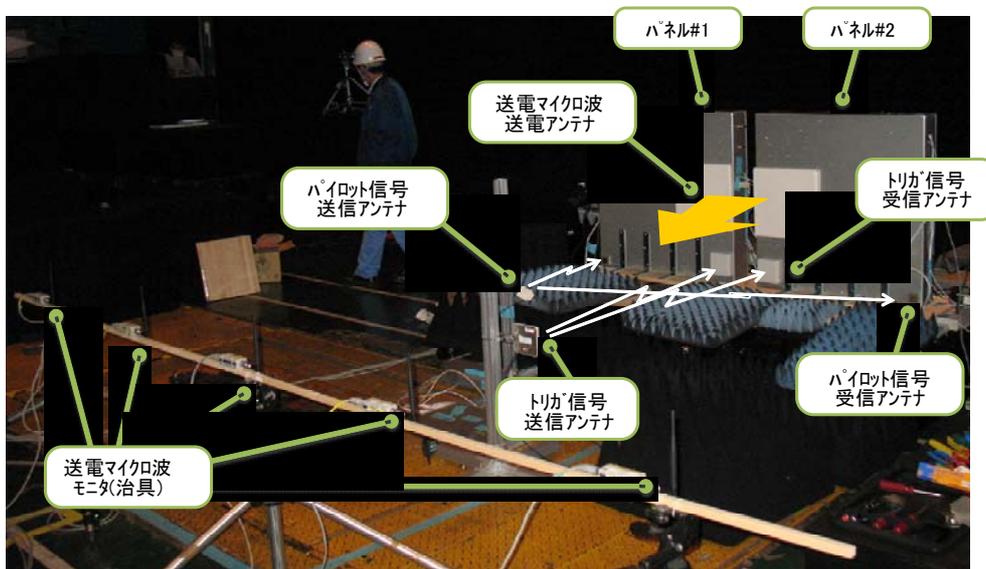


図 J-3-1-2-19 原理モデル試作試験の様子(PAC法の例)

2) 有効性の検討

1) 項の実現性の検討結果から予測される送電制御性能(精度、処理速度)に基づき、実用システムに適用した場合の効果(無線電力伝送効率の低下量、不要波の発生)について解析評価を行う必要がある。また、目標値を達成するために必要となる送電制御性能(精度、処理速度)を明確化する必要がある。本研究開発では、1GW級のSSPS実用システムを想定し、同システムに適用した場合の効果について、大規模なモデルを構築し、電磁界シミュレーションを実施した。

なお、伝送効率の低下量は、ノミナル値(宇宙太陽光発電システムの総合伝送効率 70%程度の内訳として、ビーム制御の影響による低下量)から、1%レベルを許容低下量の目安とした。また、不要波発生については航空機の EMC 基準($0.3\text{W}/\text{m}^2$)を目安とした。

SSPS実用システムのモデルの整理(図 J-3-1-2-20)、解析モデル、解析パラメータの具体化を実施したうえで、PAC法及び並列化法のSSPS全体性能として、無線電力伝送効率の低下量及び不要波の発生レベルについて、解析による評価を実施した。

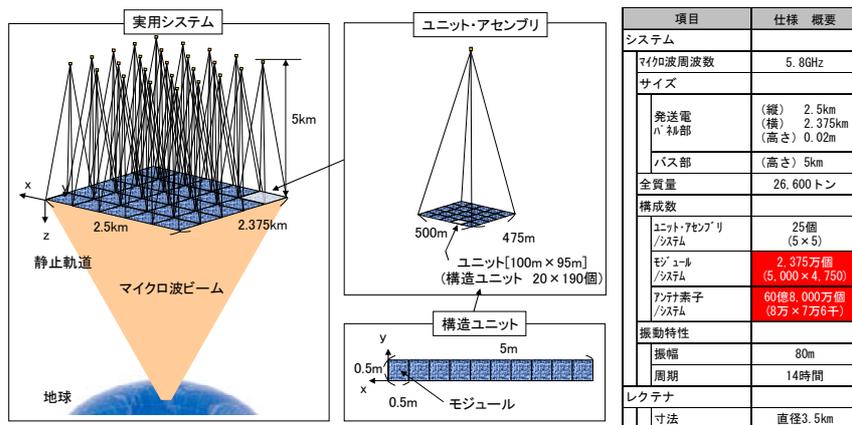


図 J-3-1-2-20 SSPS実用システムのモデルの整理

本解析評価の結果は表 J-3-1-2-7 の通りであり、PAC法及び並列化法の双方について、無線電力伝送効率の低下量、不要波の発生レベルとも、目標に近い性能を確保していることを確認した。

表 J-3-1-2-7 有効性検討結果サマリ

	目標値	PAC 法	並列化法
伝送効率低下量	1.0% 以下	2.5% *1	1.1% *1
不要波発生レベル	$0.3\text{W}/\text{m}^2$ 以下	$0.5\text{W}/\text{m}^2$ *2	$0.3\text{W}/\text{m}^2$

*1) 宇宙太陽光発電システムの伝送効率の低下量の目標は、総合で 70%程度以下である。その内訳として、ビーム制御の影響による低下量を 1%以下と目標設定したため、本目標は満足できなかったものの、総合的には十分な性能と考えられる。

*2) 目標値に対して、約 2dB 超えているレベルであり、今後の改善で十分対応していけるものと考えられる。

④まとめ

本研究において、“宇宙太陽光発電システム”の実用化に必要なキー技術である精密ビーム制御技術として、“位置・角度補正法(PAC法)”及び“並列化法”についてトータルに評価できる原理モデルを試作して確認した。PAC法にやや課題があるものの、並列化法の有効性が明らかになった。上記補足説明の通り、目標に近いビーム制御性能が達成可能であることを確認できた。その結果として宇宙太陽光発電システムのマイクロ波による無線送受電の安全性や効率に対しても目標に近い効果を実現できることを確認し、十分有効であることを確認した。

J-3-1-3 特許出願状況等

特許・論文等件数を表 J-3-1-3-1 に、論文・投稿・発表・特許リストを表 J-3-1-3-2 に示す。

表 J-3-1-3-1 特許・論文等件数

技術	論文数	特許等件数 (出願を含む)
総合システム	18	
高効率薄型送電部の開発	7	1
受電部、高効率受電用整流ダイオードの開発	10	0
位置・角度補正法及び並列化法による電送制御技術	5	0
無線送受電スピンオフ技術	1	
計	41	1

表 J-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	三菱電機株式会社 技報 「無線電力伝送のための高効率高出力 GaN 増幅器」 (MELCO)	H25.1
	電子情報通信学会論文誌 C Vol.J96-C No.9 「マイクロ波によるエネルギー伝送技術の研究開発」 (J-spacesystems)	H25.9
論文・ 発表	60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea: 「Consideration Of Next Logical Step for Wireless Power Transmission of SSPS Based on Activities at USEF」(USEF)	H21.10
	60th International Astronautical Congress, Daejeon, Republic of Korea: 「Improvement Study on Rectenna Efficiency」(IA)	H21.10
	URSI International Symposium on Radio System and Space Plasma 2010, Sofia, Bulgaria: 「Current Status of Space Solar Power System at USEF」(USEF)	H22.8
	IAA 50th Anniversary Celebration Symposium On Climate Change/Green Systems, Nagoya: 「KW-Power Phased Array Microwave Wireless Power Transmission Experiment Project」(USEF)	H22.8
	IAA 50th Anniversary Celebration Symposium On Climate Change/Green Systems, Nagoya: 「Study on High Accuracy Phase Control Method for Space Solar Power System」(MHI)	H22.8

表 J-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト(つづき)

	題目・メディア等	時期
論文・ 発表	The 61st International Astronautical Congress: 「STUDY ON HIGH ACCURACY PHASE CONTROL METHOD FOR SPACE SOLAR POWER SYSTEM」(MHI)	H22.10
	第 13 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「USEF における SPS への取り組み」(USEF)	H22.10
	第 13 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「5.8GHz 高調波整合型内部整合 GaN 高効率増幅器」(MELCO)	H22.10
	第 13 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「マイクロ波無線送受電システム 受電部開発計画」(IA)	H22.10
	第 54 回宇宙科学技術連合講演会、静岡: 「USEF における無線送受電技術実証への取り組み」(USEF)	H22.11
	第 54 回宇宙科学技術連合講演会、静岡: 「マイクロ波無線送受電技術研究開発用送電部の開発」 (MELCO)	H22.11
	第 54 回宇宙科学技術連合講演会、静岡: 「受電部技術実証モデルの検討」(IA)	H22.11
	第54回宇宙科学技術連合講演会、静岡: 「宇宙太陽発電システム 送電制御技術 (PAC法、並列化法) の開発」(MHI)	H22.11
	Asia Pacific Microwave Conference (APMC): 「Internally-matched GaN HEMT High Efficiency Power Amplifier for Space Solar Power Stations」(MELCO)	H22.12
	IEEE IWMS-IWPT 2011、京都: 「Outline and Progress of the Japanese Microwave Energy Transmission Program for SSPS」(USEF)	H23.5
	URSI GASS 2011 シンポジウム、トルコ: 「Microwave Energy Transmission Program for SSPS」(USEF)	H23.8
	第 14 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「マイクロ波電力伝送地上実験に向けての進捗」(USEF)	H23.10
	第 55 回宇宙科学技術連合講演会、愛媛: 「マイクロ波無線電力伝送地上実験に向けた開発検討」(USEF)	H23.11
	第 55 回宇宙科学技術連合講演会、愛媛: 「マイクロ波無線電力伝送試験用送電部の開発」(MELCO)	H23.11
	第55回宇宙科学技術連合講演会、愛媛: 「宇宙太陽発電システム 送電制御技術(PAC法、並列化法) の基本実験ユニットの開発」(MHI)	H23.11
	電子情報通信学会 宇宙・航空エレクトロニクス研究会、三重: 「マイクロ波電力伝送地上実証システムの開発」(MELCO)	H24.2
	第 11 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会 (METLAB 研究会)／電子情報通信学会第 10 回無線電力伝送 時限研究専門委員会(通算 38 回)研究会、京都: 「レクテナアレイシステム特性評価」(IA)	H24.3

表 J-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト(つづき)

	題目・メディア等	時期
論文・ 発表	電子情報通信学会 無線電力伝送研究会(WPT)、京都: 「マイクロ波地上エネルギー伝送実験の概要と進捗」 (J-spacesystems)	H24.5
	1st International Conference on Telecommunications and Remote Sensing(ICTRS) 2012, Bulgaria: 「Microwave WPT Technology Developments for SSPS Application」(J-spacesystems)	H24.8
	第 15 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、宮城: 「マイクロ波電力伝送試験(地上)の概要」 (J-spacesystems)	H24.9
	第 56 回宇宙科学技術連合講演会、大分: 「マイクロ波無線電力伝送試験モデル用送電部の開発」 (MELCO)	H24.11
	第56回宇宙科学技術連合講演会、大分: 「宇宙太陽発電システムにおける送電制御技術(PAC法、並列化法)の実現性実証」(MHI)	H24.11
	第 12 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会、京都: 「レクテナアレイシステム特性評価」(IA)	H25.3
	第57回宇宙科学技術連合講演会、鳥取: 「マイクロ波電力伝送試験モデル受電部の開発」(IA)	H25.10
	第57回宇宙科学技術連合講演会、鳥取: 「無線送受電スピンオフ技術の研究開発」(MHI)	H25.10
	第 16 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、静岡: 「地上無線送電実-位置づけと今後の展望」 (J-spacesystems)	H25.10
	第 13 回宇宙太陽発電と無線電力伝送に関する研究会、京都: 「マイクロ波電力伝送試験モデルの受電部 レクテナアレイシステムの特性評価」(IA)	H26.3
	電子情報通信学会／無線電力伝送研究会(WPT)、東京: 「マイクロ波電力伝送試験の概要と現状」(J-spacesystems)	H26.4
	電子情報通信学会／無線電力伝送研究会、東京: 「レクテナ用 GaN ショットキーバリアダイオードの試作」(IA)	H26.6
	第 17 回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、東京: 「地上無線送電実験-位置づけと今後の展望」 (J-spacesystems)	H26.10
	電子情報通信学会／無線電力伝送研究会(WPT)、大分: 「レクテナ高効率制御装置の開発」(IA)	H26.12
電子情報通信学会／無線電力伝送研究会(WPT)、京都: 「宇宙太陽光発電システムのためのマイクロ波電力伝送地上試験」(J-spacesystems)	H27.3	

表 J-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト(つづき)

	題目・メディア等	時期
論文・発表	電子情報通信学会／無線電力伝送研究会(WPT)、京都: 「マイクロ波電力伝送試験モデル用送電部開発」(MELCO)	H27.3
	電子情報通信学会／無線電力伝送研究会(WPT)、京都: 「マイクロ波電力伝送試験モデル 受電部の開発」(IA)	H27.3
発表	第12回 SPS シンポジウム(京都): 「USEFにおけるSSPS検討活動と今後の展望」(USEF)	H21.10
	International Symposium on Solar Energy from Space SPS-2009, Toronto, Canada: 「WPT Technology Demonstration Options at USEF」(USEF)	H21.11
	第5回無線電力伝送時限研究専門委員会(通算33回)研究会、 京都:「マイクロ波地上エネルギー伝送実験の概要と進捗」 (USEF)	H23.3
	第6回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム、京都:「マ イクロ波エネルギー伝送技術の応用システムの検討」(MELCO)	H24.10
	第6回京都大学発新技術セミナー 産学連携によるマイクロ波 無線電力伝送実用化シンポジウム、東京: 「宇宙太陽光発電技術の産業応用について」(MELCO)	H25.1
	日本電磁波エネルギー応用学会 第1回マイクロ波エネルギー 応用技術実践セミナー、京都: 「マイクロ波電力伝送技術と産業への応用」(MELCO)	H25.2
	第4回テクノフォーラム、東京: 「宇宙太陽光発電システム(SSPS)の研究動向」 (J-spacesystems)	H25.3
	ワイヤレス電力伝送実用化コンソーシアム立ち上げ公開シンポ ジウム、東京: 「宇宙太陽光発電技術の産業応用の提案と宇宙利用WGの活 動について」(MELCO)	H25.3
	火力原子力発電技術協会九州支部総会、福岡: 「宇宙太陽光発電システム(SSPS)について」(J-spacesystems)	H25.5
	兵庫県立豊岡総合高等学校、兵庫: 「無線送受電スピンオフ技術の研究開発」(MHI)	H25.10
	SPS 2014 International Symposium and Workshop in Kobe, Japan: 「Current Status of Ground WPT program」(J-spacesystems)	H26.4
	ISDC 2014 SSP Track in Los Angeles (ビデオ発表): 「Summary of SSPS study and Ground WPT program in J-spacesystems.」(J-spacesystems)	H26.5
	第275回 生存圏シンポジウム、京都: 「宇宙太陽光発電所SPSのためのマイクロ波電力伝送地上試験」 (J-spacesystems)	H27.2

表 J-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト(つづき)

	題目・メディア等	時期
発表	flash 「「明日」を発電する技術たち！」	H23.9
	山陽新聞 「宇宙で太陽光発電一歩ずつ」	H23.12
	西日本新聞 「宇宙で太陽光発電へ」	H23.12
	信濃毎日新聞 「宇宙で太陽光発電へ」	H23.12
	室蘭民報 「宇宙で太陽光発電」	H23.12
	毎日新聞 「国産エネルギー発掘 膨らむ期待と可能性」	H25.1
	日経産業新聞 「宇宙で発電、地上へ送電」	H25.2
	電気新聞 「離島、無線送電実証へ」	H25.5
	日本経済新聞 「宇宙発電実用化へ一歩」	H26.11
	日刊工業新聞 「マイクロ波で送電実証」	H27.2
	朝日新聞 「宇宙で発電 地球に送電」	H27.2
	日経産業新聞 「無線送電実験」	H27.3
	日本経済新聞 「送電もワイヤレス」	H27.3
	東京新聞 「宇宙太陽光発電の実現性は」	H27.3
	毎日新聞 「無線で最大・最長の送電実験成功」	H27.3
	読売新聞 「無線送電 500メートル成功」	H27.3
	日経産業新聞 「500メートル先に無線送電」	H27.3
	日刊工業新聞 「無線送電に成功」	H27.3
	朝日新聞 「三菱重工が 500メートル無線送電」	H27.3
	朝日新聞 「電気が飛んだ」	H27.3

表 J-3-1-3-2 論文、投稿、発表、特許リスト(つづき)

	題目・メディア等	時期
発表	朝日新聞 「無線送電の実験成功」	H27.3
	日本経済新聞 「三菱重、無線送電に成功」	H27.3
	産経新聞 「500メートル無線送受電 三菱重工が成功」	H27.3
	電気新聞 「500メートルの無線送電成功」	H27.3
	電気新聞 「宇宙太陽光発電の無線送受電を実証」	H27.3
	産経新聞 「「無線送電」の実験に成功」	H27.3
	日経テクノロジー online 「電力を宇宙から地上へ」	H27.3
	読売新聞 「太陽光発電 宇宙から送電」	H27.4
	日本経済新聞 「宇宙太陽光発電 実用化へ一歩」	H27.5
	朝日新聞 「宇宙太陽光発電 どう送る？」	H27.6
	日経ビジネス 「無尽蔵のエネルギーを地上へ」	H27.7
	TBS テレビ 夢の扉+ 「宇宙に発電所を作れ！」	H27.2
	関西テレビ (17時30分からのニュース)	H27.3
	FM放送 J-WAVE 「JK radio Tokyo United」 (Feature Focus のコーナー)	H27.4
特許	出願 No.2010-254963 高周波モジュール及びこれを用いたアレイアンテナ装置	H22.11 出願

J-3-2 目標の達成度

(1)全体目標に対する成果・達成度

本研究開発の全体の目標達成度を表 J-3-2-1 に示す。

表 J-3-2-1 全体目標に対する成果・達成度

目標・指標	成果	達成度
<p>総合システム： 無線送受電技術の確立に向け、送電系・ビーム方向制御系・受電系をトータルに考えた精密ビーム制御マイクロ波送受電技術の研究開発を行う。最終年度には試験モデルによるシステム実証を兼ねた伝送試験を行う。</p>	<p>マイクロ波電力伝送試験モデルを試作した。本試験モデルを用いて、マイクロ波電力伝送試験を実施した。5.8GHz 帯でフェーズドアレイアンテナを用いてキロワット級マイクロ波ビームの制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない実験の成功となった。</p>	達成
<p>送電部： 将来の軌道上実証への応用を考慮し、小型・薄型・高効率化を志向した半導体を使用し、複数の送電モジュールによるフェーズドアレイアンテナを開発する。マイクロ波の位相同期を図りつつ、キロワット級のエネルギーを送電可能なものとする。</p>	<p>薄型・高効率のフェーズドアレイアンテナからなる送電モジュールを開発した。 送電部は4枚の送電モジュール(アンテナ数 1216 素子)を組み合せ、約 1.8kW の電力を送電可能である。</p>	達成
<p>受電部： 伝送されてくるマイクロ波を複数の受電モジュールで受け、効率よく電力として取り出す整流アンテナ(レクテナ)を開発する。あわせて変換効率の高い整流素子(ダイオード)を開発する。</p>	<p>市販のショットキーバリアダイオードを使用し、36個の受電モジュール(アンテナ数 2304 素子)で構成する、大規模で高効率動作する受電部を開発した。これと並行して、窒化ガリウム(GaN)を使用した高効率整流素子(ダイオード)を試作評価した。</p>	達成
<p>ビーム方向制御部【参考】： 将来の宇宙利用を念頭に、高精度のビーム制御方式として、ソフトウェアレトロディレクティブ方式(振幅モノパルス方式)の研究開発に取り組む。試験モデルでは受電電力が最大となるよう、送電部からのマイクロ波の位相を制御する素子電界ベクトル回転法(REV法)を採用する。</p>	<p>(評価対象外)</p>	

表 J-3-2-1 全体目標に対する成果・達成度(つづき)

目標・指標	成果	達成度
<p>送電制御技術： 精密なビーム制御技術の研究開発として、位置・角度補正法(PAC法)及び並列化法による送電制御技術に取組み、実現性や有効性を明らかにする。</p>	<p>両手法の伝送効率の低下量や不要波の発生レベルについて解析・試験を行い、将来のSSPSへ適用可能である見通しを得た。</p>	<p>達成</p>
<p>試験候補地調査： 国内における屋内・外の試験候補地調査を行い選定する。また、マイクロ波電力伝送試験実施に必要な課題を抽出してその対応法を見出す。</p>	<p>国内における屋内・外のマイクロ波電力伝送試験候補地調査を行い、要件に適合する試験地を選定した。また、試験実施に係わる課題を抽出し、対処法を考えた。</p>	<p>達成</p>
<p>関連技術調査： 本研究開発と密接に関連する国内外の研究動向について明らかにする。</p>	<p>国内外のSSPS研究開発動向を調査し、本研究開発との関連などについてまとめた。 また、「マイクロ波の植物への影響」に関する研究動向について整理した。</p>	<p>達成</p>
<p>無線送受電スピノフ技術： 成熟度の高い技術を活用して、産業応用を目指した低コスト実証システム(送電出力 10kW 程度、送電距離 500m 程度)を試作評価する。また、電力事業者の観点から適用可能性を検討する。</p>	<p>2.45GHz 帯で電送距離約 500m において約 10kW の送電出力実験を行い、制御された条件下での動作を確認した。国内では最長、最大級電力の屋外無線送電実験に成功した。また、電力事業者の観点から、航空障害灯等の電力インフラへの適用可能性を検討した。</p>	<p>達成</p>

(2)個別要素技術目標に対する成果・達成度

本研究開発の個別要素技術の目標達成度を表 J-3-2-2 に示す。

表 J-3-2-2 個別要素技術に関する目標に対する成果・達成度

要素技術	目標・指標	成果	達成度
高効率薄型送電部の開発	(1)送電効率 主アンプ等に GaN 素子を利用した F 級増幅器を使用して増幅器単体で 60%以上、及び送電部としての効率は 30%以上の送電システムを実現する。	GaN 素子を利用した F 級増幅器を使用して増幅器単体で 60%以上、及び送電部としての効率は約 35%の送電システムを実現した。	達成
	(2)薄型軽量化 送電モジュールは薄型化および高効率化に適したアクティブ集積アンテナ(AIA)で構成し、その厚みは 40mm 以下とする。	アンテナ面と回路基板を平行に配置し、給電回路等の工夫により、送電モジュール厚み 25mm(突起部除く)を達成した。	達成
高効率受電用整流ダイオードの開発	(1)高効率受電整流素子 任意の電力レベルのマイクロ波を整流するダイオードの設計手法及び製作技術を取得するとともに、電力伝送試験時相当の電力束密度に適した高効率整流ダイオードを試作する。半導体には GaN等を利用し、RF-DC 変換効率は 80%を目標とする。	窒化ガリウム(GaN)を使用した高効率整流素子(ダイオード)を試作評価して変換効率 71.4%を確認した(5.8GHz 帯 GaN ダイオードで世界最高水準)。なお、今後の目標達成のための課題および改善策を抽出した。	未達成
位置・角度補正法(PAC法)及び並列化法による送電制御技術	(1)送電制御技術 実用システムの送電制御技術として PAC 法及び並列化法が有効であることを見極め、実現のための基本技術を確立する。有効性の目安としては、伝送効率低下量 1%以下、不要波発生レベル 0.3W/m ² 以下を目標とする。	将来 SSPS での有効性確認を行い、PAC 法にやや課題があるものの、並列化法の有効性が明らかになった。実現性についても解析、要素試作試験、原理モデル試作試験を行い、総合的に十分な制御性能を確認した。	達成

【未達成】高効率受電用整流ダイオードの開発

①成果

窒化ガリウム(GaN)を使用した高効率整流素子(ダイオード)を試作評価して変換効率 71.4%を確認した(5.8GHz 帯 GaN ダイオードで世界最高水準)。なお、今後の目標達成のための課題および改善策を抽出した。

②達成に向けて

目標効率(80%)を実現するためのダイオードパラメータ(表 3-1-2-I-5)は、パラメータごとに実現できることを、試作を通して確認した。それらのパラメータを、ダイオードとして実現することで目標効率達成の見込みが得られた。これを実現するためには主に以下の研究開発が必要となる。

- 立上り電圧が低いショットキー電極材料の選定と特性把握および特性安定化の研究。
- 損失要因となる抵抗を低減するために、低抵抗 GaN 層の厚みを薄くする製造技術の開発

J-4 事業化、波及効果について

J-4-1 事業化の見通し

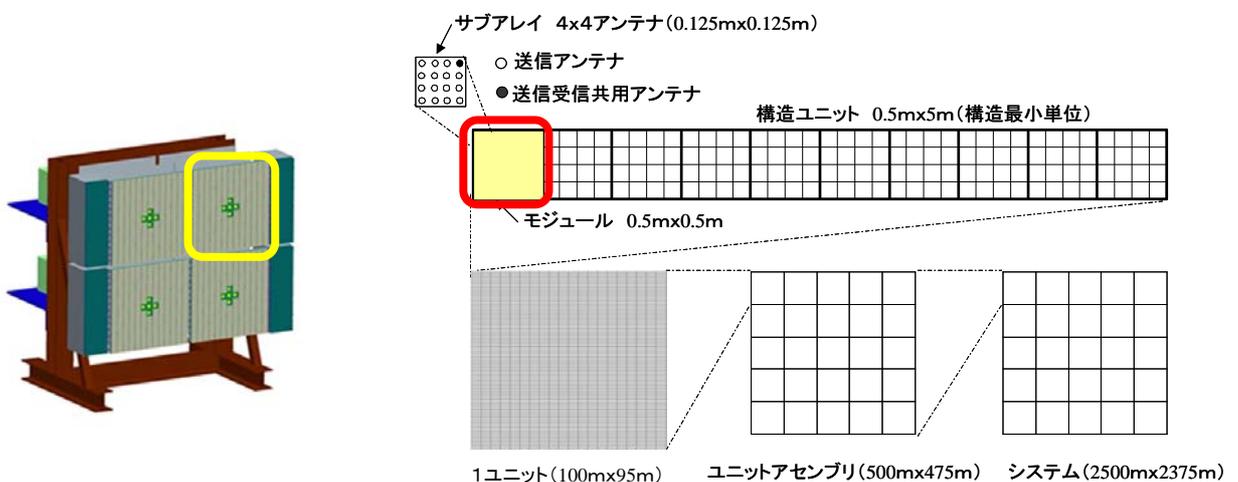
宇宙太陽光発電システム(SSPS)の商用システムとしての事業化は、2-1-I項の研究開発目標の冒頭にも記した通り、政策的に期待される目標(石油代替エネルギーとしての導入、2050年までの温室効果ガス排出量半減)の規模からも長期的な取り組みを行っている。平成27年の宇宙基本計画でも「エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、宇宙の潜在力を活用して地上の生活を豊かにし、活力ある未来の創造につながる取組」と述べられており、本研究開発はまさにそれに符合する。本研究開発の成果が次なる宇宙実証ステップに向けての技術インプットとなり、ひいては、本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。

以下には、(1) マイクロ波電力伝送試験モデルの位置づけ、(2) 事業化に至るまでのロードマップ案を示す。

(1) マイクロ波電力伝送試験モデルの位置づけ

本研究開発を通じてマイクロ波による無線送受電技術の確立を目指すにあたり、次のコンセプトを取り上げたことは、2-2-I項の全体の目標設定でも記した。

- 技術的に新しい一歩(世界で初めて)
- 軌道上実証実験に技術的につながる試作



図J-4-1-1 試験モデル送電部のモジュール

図J-4-1-2 SSPS 構造ユニットのモジュール

マイクロ波電力伝送試験モデル送電部のモジュール(図 J-4-1-1 に示す)は、商用SSPS構造ユニットのモジュール(図J-4-1-2に示す)を模擬したものである。本研究開発では、半導体増幅器を使用した複数のフェーズドアレイアンテナ間の位相同期を行い、レトロディレクティブ技術を活用し、キロワット級のマイクロ波ビームを受電アンテナに向けて指向制御(精密ビーム制御)し、受電部で利用可能な電力を取り

出しに成功した。

また、理論的に送電アンテナ規模の拡大に応じてビーム制御精度も向上することから、約 1.2m 四方の送電パネルから伝送距離 10m 以上で 0.15 度のビーム制御精度が得られたことは、商用 SSPS が静止軌道上からキロメートルサイズで送電する場合にも、適用できる可能性が裏付けられた。

送電部、受電部における効率は商用 SSPS 各部の総合効率約 80%に比べて、およそ 35%と 42%である。

送電部は、輸送に大きく影響を与える薄型・軽量化において、商用 SSPS 電気的コア部分約 4mm に対して 25mm(サブアレイ厚さ)、同 10g/W に対して約 36g/W(サブアレイのみ)である。今後の課題として更なる高効率化や薄型・軽量化が必要であり、「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」事業において取り組んでいる。

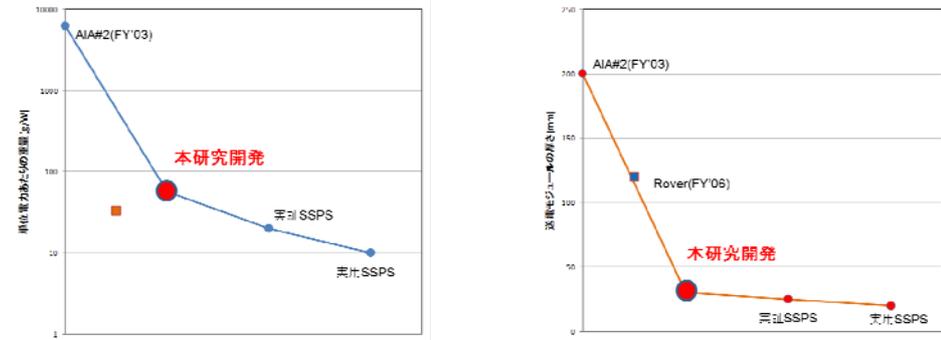


図 J-4-1-3 送電モジュール厚さ(mm)と単位電力重量(g/W)

(2) 宇宙太陽光発電システムの実現までのロードマップ案

図 J-4-1-4 に2030年代のSSPS実現ロードマップ案を示す。現在は地上実証フェーズであり、次段階としては衛星による無線電力伝送を目指す。

なお、宇宙太陽光発電システムのロードマップについて、「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」事業において見直しに取り組んでいる。

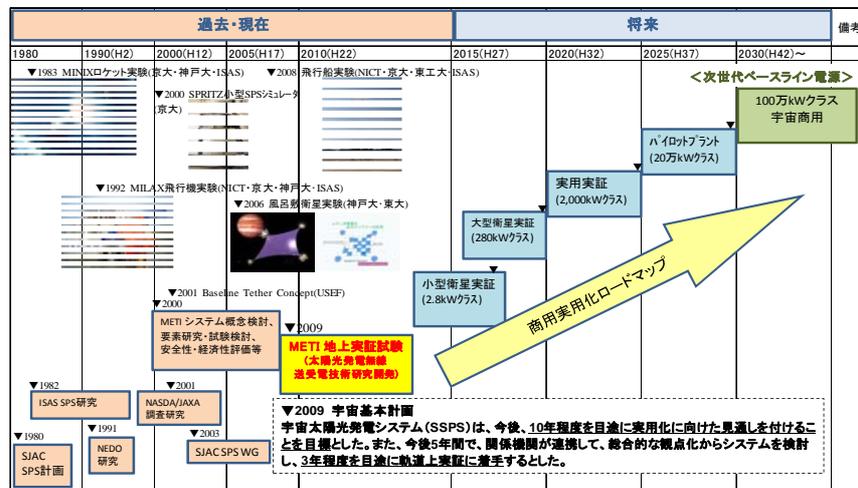


図 J-4-1-4 SSPSロードマップ案

J-4-2 波及効果

電力伝送は、これまでは有線による方法であるが、近年、家電製品などを対象とした無線電力伝送が注目を集めている。電気シェーバーや携帯電話等は既に専用のパッドに置くだけで充電できたり、家電製品でもコードレステレビ等が製品化されたりしている。無線電力伝送の技術方式としては、(1)電磁誘導方式、(2)共鳴方式、(3)マイクロ波方式があり、電磁誘導方式の普及が先んじているが、伝送距離が短い等の制約があり、その欠点を補う共鳴方式においても10m程度の伝送距離が対象である。これに対して、マイクロ波方式は宇宙太陽光発電が示す通り、中長距離のエネルギー伝送として特徴を持っている。

企業の研究所レベルでは、電気自動車への電力伝送、ビル内施設の電力利用端末への電力伝送、離島への電力伝送等へのアプリケーションについて製品化に向けての取り組みが行われている。京都大学・篠原教授等は電波暗室内において、マルチローター・ヘリコプター(ドローン)に小規模マイクロ波送電部を搭載して、地面に置いたバッテリーレス・センサーに無線給電するとともに計測データを受信し基地局に転送するという模擬実験を公開した。

本研究開発で取り組んだマイクロ波半導体増幅器などは携帯電話やマイクロ波通信で使用される増幅器と同列の技術であり、高効率化技術がこの分野に寄与する可能性も高い。同じく、高効率受電整流ダイオードについては、電子レンジ内の無用マイクロ波の回収や、空間電波のエネルギーハーベスト機器に必須な回路素子として活用される技術である。

また、本研究開発のスピノフ技術実証では、ハードウェア構成に成熟度の高い技術を活用することで、低コスト・短期間で実証システムを試作し、伝送距離500m程度で約10kW送電出力という、国内で最長、最大級電力の屋外無線送電試験に成功した。

それらマイクロ波無線電力伝送試験の成功は、新聞やテレビ等マスコミに広く取り上げられ注目された(表J-3-1-3-2を参照)。実験後には、外国を含む多方面から問合せがあり、無線によるエネルギー伝送、宇宙太陽光発電に関心を集めた。

なお、マイクロ波無線送受電技術の産業応用の可能性についての調査、分析および利用促進は、「太陽光発電無線送受電高効率化の研究開発」事業において取り組んでいる。

(1) 電気自動車用無線充電システム(図 J-4-2-1)

「駐車するだけで自動的に充電」の実現は、今後の電気自動車のさらなる普及促進に貢献するものと期待される。

❖ 電気自動車無線給電システムへの応用（有線からの脱却）

- 航続距離の伸張
- 電池の軽量化



- ・ 大電力&高効率化レクテナ技術
- ・ 高効率フェーズドアレイ技術



- ❖ 電気自動車充電インフラの整備
- ❖ 建設機械への応用



電気自動車無線充電システム [京大]

図 J-4-2-1 電気自動車用無線充電システム

(2) 屋内での無線給電(ユビキタス電源) (図 J-4-2-2)

モバイル機器などの充電量を気にしない環境として考えられているユビキタス電源には、マイクロ波無線電力伝送方式の適用が適している。

❖ 建物内無線給電（ユビキタス電源）

- モバイル機器などの充電量を気にしない環境の創生
- 人間の活動空間に電力を供給



- ・ ビーム制御技術
- ・ 高効率フェーズドアレイ技術
- ・ 高効率化レクテナ技術



ユビキタス電源のイメージ [京大]

図 J-4-2-2 屋内での無線給電(ユビキタス電源)

(3) 屋外での無線給電(図 J-4-2-3～図 J-4-2-4)

マイクロ波を拡散して広範囲に送電し、離散的に存在する不特定多数のレクテナ（省電力で駆動するセンサー、携行型省電力電子機器などに取付け）が必要なだけ電力を取得するようなインフラ整備に技術適用可能であり、広い応用用途があると期

待される。



図 J-4-2-3 都市部への送電例



図 J-4-2-4 郊外への送電例

(4) 災害時の緊急無線電源(図 J-4-2-5)

前項が屋外での日常的な無線給電の例であったのに対し、災害等や緊急時の特設電源としての応用も期待されている。一例として、ライフラインが寸断されたような場所へ通信インフラと電源を備えたような飛行船を飛ばしマイクロ波で地上へ電力を無線で供給することも可能である。2009 年には京都大学で実際の飛行船を用いた実験が行われている。



図 J-4-2-5 災害時緊急無線電源

J-5 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

J-5-1 研究開発計画

中間評価時点における研究開発計画を表 J-5-1-1 に示す。

表 J-5-1-1 研究開発計画(中間評価時点)

実施項目／年度	H21	H22	H23	H24	H25	H26
全体スケジュール	基本設計・要素試験			詳細設計・維持設計		試験準備・実施
マイクロ波電力伝送試験						屋外試験
マイクロ波電力伝送試験モデル(送電部/受電部)の製作	予備設計	基本設計・要素試験			詳細設計	製作/試験
高効率薄型送電部の開発		設計/試験試作	試作評価			
高効率受電用整流ダイオードの開発	開発法評価/予備試作	二次試作評価	試作評価	GaN ダイオード試作/評価		
位置・角度補正法(PAC法)及び並列化法による電送制御技術	解析評価	PAC法要素試作評価	並列化法要素試作評価	原理モデル実証評価		
無線送受電技術研究開発支援業務	開発支援調査・研究作業			植物影響調査		
無線送受電スピノフ技術				設計/試作/試験		

J-5-2 研究開発実施者の実施体制・運営(図 5-2-I-1)

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、機構、三菱重工業株式会社、株式会社三菱総合研究所の3社が経済産業省からの委託を受けて実施した。また、機構が行う研究開発におけるビーム制御に関わるレトロディレクティブ技術については、JAXA が連携・協力して実施する体制で進めている。

また、研究開発の実施にあたっては、学識経験者等から構成されるマイクロ波無線送受電技術委員会(委員長:篠原真毅 京都大学教授)を機構が統括して開催・運営し、本研究開発に係る開発計画・研究の妥当性、進捗状況、成果等の全般について指導を頂いている。

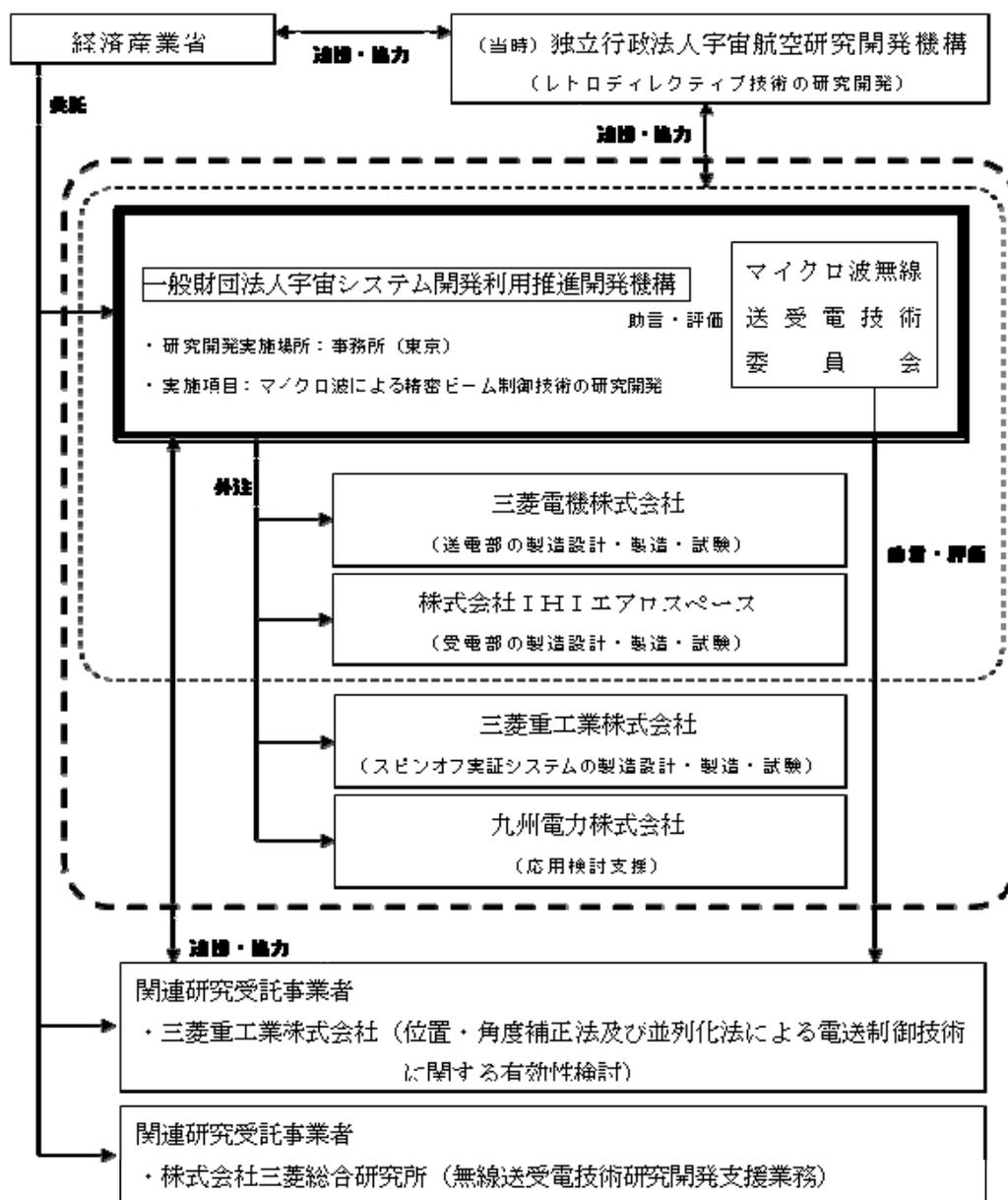


図 J-5-2-1 研究開発実施体制

J-5-3 資金配分

中間評価時点における資金配分(実績)を表 J-5-3-1 に示す。

表 J-5-3-1 資金配分(中間評価時点) (単位:百万円)

年度 平成	21	22	23	24	25	26	合計
マイクロ波による 精密ビーム制御 技術	130	170	125	130	369	597	1521
位置・角度補正法 (PAC 法)及び並列 化法による電送制 御技術	8	16	15	10	20	0	69
無線送受電技術 研究開発支援業 務	12	22	10	10	0	0	54
合計	150	208	150	150	389	597	1644

J-5-4 費用対効果

マイクロ波による地上での無線送受電試験は、宇宙太陽光発電システム(SSPS)の実現に向けたひとつのステップと位置づけられている。

SSPSは将来の新エネルギーシステムとなる可能性を有することから、本研究開発では、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 JAXA と連携し研究開発を進めている。

特に、精密ビーム制御技術のうちREV法によるビーム方向制御方式については、技術実証衛星ETS-VIIIなどで研究実績のあるJAXAの担当とし、JAXAと連携することにより費用面でも効率化を図った。

マイクロ波を利用したエネルギー伝送技術の地上での無線送電試験は、これまで国内・国外でいくつかの実施例があり、いずれも将来の宇宙太陽光発電システム(SSPS)への応用を目指して開発され、実施されている。これまでににおける大出力の試験の特徴としては、次の組合せが主体であった。

- ・パラボラ型送電アンテナ
- ・電子管(マグネトロン)方式増幅器
- ・電力伝送周波数 2.45GHz 帯

前述J-2-2項の全体の目標設定でも記したとおり、本研究開発を通じてマイクロ波による無線送受電技術の確立を目指すにあたり、次のコンセプトを取り上げた。

- 技術的に新しい一歩(世界で初めて)
- 軌道上実証実験に技術的につながる試作

試作したマイクロ波電力伝送試験モデルの送電部サブアレイの厚さは、それまでの約 300mm から、約 25mm(突起部含まず)と、十分の一以下を達成した。

マイクロ波電力伝送試験モデルを用いた電力伝送試験は、5.8GHz 帯でフェーズドアレーアンテナを用いてキロワット級マイクロ波ビームの制御システムの屋外無線送電としては、世界的に類を見ない試験の成功となった。

また、無線送受電スピノフ技術実証システムの試作試験は、2.45GHz 帯で電送距離約 500m において約 10kW の送電出力実験を行い、制御された条件下での動作を確認した。国内では最長、最大級電力の屋外無線送電実験に成功した。

それらマイクロ波無線電力伝送試験の成功は、新聞等に加えてテレビ番組でも広く取り上げられ(表J-3-1-3-2を参照)、今年度に入ってから、引き続き新聞取材、ラジオへの電話生出演、雑誌特集記事掲載依頼など注目が続いている。

J-5-5 変化への対応

基本設計でシステムの詳細化設計検討を行う中で、総開発コスト及び年度毎のコストの削減が課題となり、平成22年度に柔軟な対応策として計画の修正を行い、限られた予算範囲内で基本的な研究開発目標は達成できるよう工夫した。見直しに当たっての基本方針は表 J-5-5-1 のとおりである。

表 J-5-5-1 見直し基本方針

プロジェクト方針	<ul style="list-style-type: none"> ・開発期間は、当初の5年から6年間に延長する。(H26 まで) ・最終年度には送電電力 kw 級の屋外試験を実施する。
見直しの考え方	<ul style="list-style-type: none"> ・宇宙へのつながりとしての位置づけは変更しない。 ・将来につなげるための要素技術の研究開発は今回で1ステップ向上させる。 ・大電力、高効率化、軽量・薄型化(送電部)などの定性的目標は変更しない。
仕様設定方針	<ul style="list-style-type: none"> ・屋外試験での伝送距離は 50m 以上とする。(取り出し電力は 100w 以上とする) ・マイクロ波電力伝送試験モデルの受電パネルには市販の(既存)ダイオードを使用する。 ・開発する高効率ダイオードは素子開発までとし、受電レクテナへ適用した場合の効果は解析で補い明らかにする。
その他	<ul style="list-style-type: none"> ・性能向上のための技術的試作項目・回数はコストに応じて削減し、相応する性能目標定量値は一定範囲において許容する。 ・治具関連では大幅なコスト削減に取り組む。