

最近の J-spacesystems における SSPS への取り組み† SSPS activities at Japan Space Systems

中村 修治*1‡・前川 和彦*1・佐々木 謙治*1・三原 荘一郎*1
Shuji NAKAMURA, Kazuhiko MAEKAWA, Kenji SASAKI and Shoichiro MIHARA

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)では、平成 26 年度(2014 年度)より経済産業省(METI)から委託を受けて「太陽光発電無線送電高効率化の研究開発」事業を推進しており、これまでの研究開発の成果を活用しつつ、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電システムの更なる高効率化及びロードマップの作成等に取り組んでいる。ここでは我々が取り組んでいる研究開発の概要について紹介する。

Japan Space Systems (J-spacesystems) has been studying wireless power transmission (WPT) since the beginning of 2000 as a key technology for the realization of future Space Solar Power System (SSPS). From 2014, we have started new research and development project of the Microwave Power Transmission under the contract of Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). In this program, we have developed high power amplifiers with high efficient GaN HEMT, and the high efficient rectenna element. In this paper, status of this project is introduced.

Keywords : Microwave Power Transmission, Transmitting & Receiving Section, Ground Test

1. 宇宙太陽光発電システムについて

1.1 宇宙太陽光発電システムとは 宇宙太陽光発電システム (Space Solar Power System :SSPS) とは、宇宙空間に打ち上げた衛星が、太陽エネルギーを使って発電し電波で地上に送電し、地上で電力を利用する仕組みである。

(1) 特長 運用時に二酸化炭素を排出しないため、地球環境、温暖化対策としても有効である。また、地上の太陽光発電と比べて、昼夜や天候に左右されない安定な電力供給が可能であり、地上に比べて約 10 倍の太陽エネルギーを利用可能である。

(2) 意義 主な意義は以下のようである。

- エネルギー資源の多様化
- エネルギー輸出国への転換
- エネルギー安全保障への貢献

(3) 技術課題 技術課題として次が考えられている。

- 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
- 高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

1.2 送電方式 宇宙太陽光発電衛星から地上にエネルギーを送る方式として 2 通りが挙げられ、その特徴を第 1 表に示す。また、マイクロ波送電タイプの SSPS イメージを第 1 図に示す。

第 1 表 SSPS の送電方式

送電方式	特徴
マイクロ波送電	○ 大気 (雨や雲を含む) の影響を受けない全天候型
	○ ビーム方向制御は電子方向制御が可能
	○ レーザーに比べエネルギー密度は低く安全な運用が可能
	△ 宇宙と地上に大きなアンテナが必要となる
レーザー送電	○ エネルギー密度が高くシステムをコンパクトにできる
	△ 大気による吸収や雲による散乱影響を受ける
	△ エネルギー密度が高く安全性への十分な配慮が必要
	△ レーザービーム方向の機械的精密制御が不可欠

† 第 2 回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム, 2016 年 12 月 19-20 日, 東京にて発表

‡ Corresponding author: Shuji Nakamura.
E-mail: Nakamura-Shuji@jspacesystems.or.jp

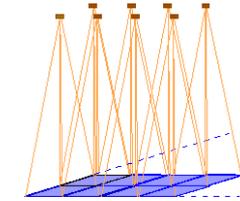
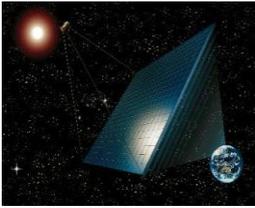
*1 一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8

Japan Space Systems,

3-5-8 Shibakoen, Minato-ku, Tokyo 105-0011, Japan

©SSPSS



USEF2002 モデル(シングルバス・タイプ) USEF2006 モデル(マルチバス・タイプ)

第 1 図 マイクロ波送電タイプの SSPS (ベーシックモデル)

2. マイクロ波電力伝送地上試験

J-spacesystems では、平成 21 年度(2009 年度)より経済産業省(METI)から委託を受けて「太陽光発電無線送受電技術研究開発 (マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発)」事業を推進し、平成 26 年度 (2014 年度) を以て目標を達成して終了した。

なお、レトロディレクティブ技術 (ビーム方向制御技術) の研究開発については、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が実施しており、双方が連携・協力して研究開発を実施した。

2.1 マイクロ波電力伝送試験モデル¹⁾

(1) **送電部** 送電部は半導体を使用したフェーズドアレイアンテナを使用して、4 枚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、約 1.8kW の送電出力を可能とした。送電部の外観を第 2 図に示す。



第 2 図 送電部の外観

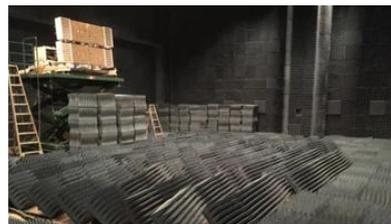
(2) **受電部** 受電部の整流用ダイオードには市販品の中から効率の良いものを選択して使用した。受電部は複数の受電モジュールから構成され、試験等における取扱いが容易なものとした。受電部の外観を第 3 図に示す。



第 3 図 受電部の外観

2.2 マイクロ波電力伝送試験¹⁾

(1) **屋内試験** マイクロ波無線電力伝送試験モデルを使用して、屋内試験地 (京都大学生存圏研究所 A-METLAB) において送電モジュールのビーム制御精度試験を実施し、伝送距離 10 メートル以上 (約 10.1m) において角度精度 0.5 度 rms (rms : 二乗平均平方根) の達成目標に対して、0.15 度 rms を確認した。屋内試験状況を第 4 図に示す。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た。マイクロ波を受ける側に設置している機器は、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。



(送電部)

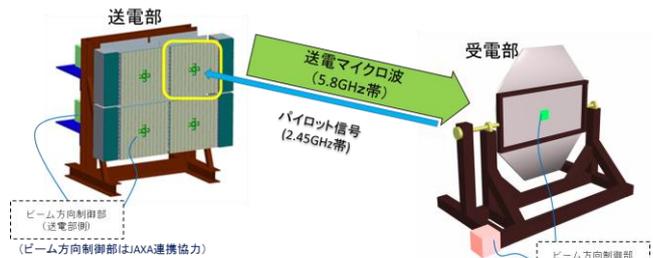


(X-Y スキャナー)

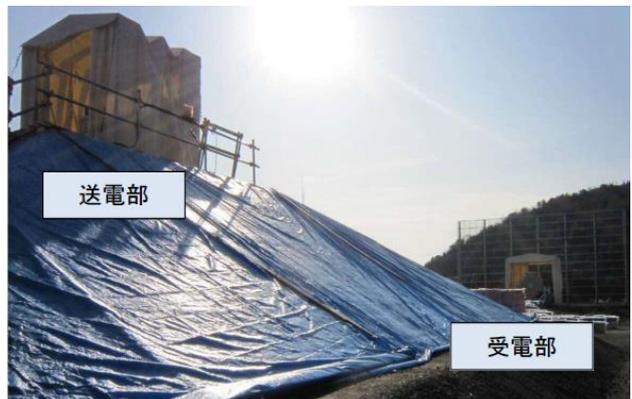
第 4 図 屋内試験状況 (伝送距離 : 10m 以上)

(2) **屋外試験** また、屋外試験地 (兵庫県内の試験場) において複数送電モジュールの協調動作試験を実施し、伝送距離 50 メートル程度 (約 54m) において平均約 340W の利用可能電力の取出しを確認した。

5.8GHz 帯でフェーズドアレイアンテナを用いて大電力マイクロ波のビーム制御を行う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に成功した。第 5 図にマイクロ波送受電イメージを、第 6 図に屋外試験状況を示す。



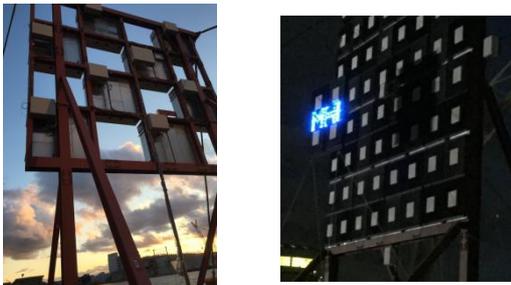
第 5 図 マイクロ波送受電イメージ



第 6 図 屋外試験状況

2.3 無線送電スピノフ技術の研究開発²⁾ 本研究開発では将来の宇宙利用を念頭に置きつつも、地上での直近の技術応用としての可能性を探り、既存技術の応用を目指して、無線送電スピノフ技術の実証システムを試作し、試験を実施した。

第7図にスピノフ技術実証システムの外観を示す。但し、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低減を図った。



(左：送電ユニット，右：計測ユニット)
第7図 スピノフ技術実証システム外観

本技術実証システムを使用して、2.45GHz 帯で伝送距離約 500m において約 10kW の送電出力試験を行い、制御された条件下での動作を確認した。これは国内では最長、最大級電力の屋外無線送電試験の成功となった。

2.4 開発状況と実用 SSPS で必要な値 マイクロ波電力伝送試験モデル送電部のモジュールは、将来の SSPS 構造ユニットのモジュールを模擬したものであった。

送電技術における開発状況と将来の実用 SSPS で必要な値との比較を第2表に示す。重量比電力は、実用 SSPS (発送電一体型パネル) 10g/W に対して約 36g/W (送電パネルのサブアレイ部) である。試験モデルの受電部総合効率 42% は、最大電力密度 366.5W/m² のビーム分布での値である。

第2表 開発状況と実用 SSPS で必要な値との比較

	2015年3月の 実証試験結果	実用 SSPS (宇宙で必要な値)
送電部総合効率	35%	80%
重量比電力	36g/W (送電パネル)	10g/W (発送電一体)
ビーム幅	1.9 度	0.001 度
システム位相誤差	最大 11.95 度	5 度
ビーム制御精度	0.15 度	0.0002 度
受電部総合効率	42%	80%

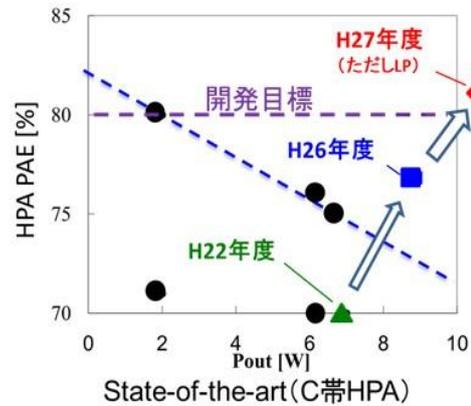
3. 現在の取り組み概要

これまでの成果を踏まえて、平成 26 年度より経済産業省から委託を受けて「太陽光発電無線送電高効率化の研究開発」事業を推進している。ここでは宇宙太陽光発電システムの実現に向けた技術開発ロードマップの作成を行うとともに、マイクロ波無線送電システムの更なる効率化、薄型軽量化に向けた研究開発を推進している。

3.1 無線送電高効率化

(1) 送電系 送電系の半導体増幅器向け HPA (High Power Amplifier) 高効率化素子を開発しており、試作品の詳細評価を実施している。

マイクロ波電力伝送用の高出力増幅器 (HPA) の電力負荷効率を向上させるために、HPA 素子の構造パラメータ (ユニットゲート幅とゲート・ドレイン間距離) の最適化を実施し、HPA の最大 PAE (Power Added Efficiency) として 81% の性能が得られた。但し、出力負荷インピーダンスは PAE 最大負荷インピーダンスで固定とした。第8図に H27 年度成果の位置づけを示す。引き続き、極限性能の確認と量産可能な HPA の性能見極めを実施している。

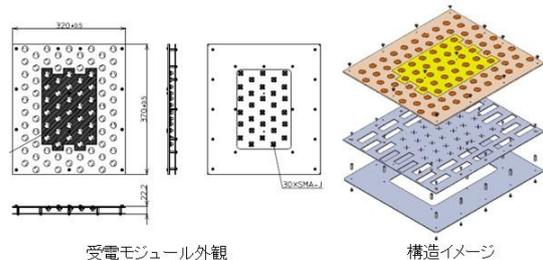


第8図 H27 年度成果の位置づけ

(2) 受電系 受電系の高効率化として捕集効率向上に向けた試作・評価に取り組んでいる。

アンテナ内部の低損失化、および捕集効率を最大化できるアンテナ間隔をシミュレーションで確認した。第9図に受電モジュール外観と構造イメージを示す。最適配置とした場合、捕集効率は既存品に対して 13% 程度改善する見通しが得られた。さらに、アンテナアレイ中心部付近のペア素子についてアンテナパターン、利得、軸比を測定評価する。

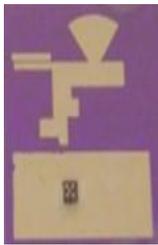
項目	仕様
素子間隔/素子数	0.7λ/90素子
基板厚	32mm
アレイ配列	三角配列
サブアレイ配列	ペア素子(90°)



第9図 受電モジュール外観と構造イメージ

3.2 送受電系の薄型・軽量化 最先端の半導体技術の適用例として受電レクテナアレーの試作・評価に取り組んでいる。

受電用 HySIC (Hybrid Semiconductor Integrated Circuit) によるレクテナアレー（アンテナ+HySIC, 厚み 10mm 以下）を試作している。昨年度, HySIC 適用レクテナ仕様を策定し, 整流デバイス, 整合回路の原型モデルを試作, 及び 4 mm 角テストチップの接合 (Si ウェハ上に GaN チップ) 等を実施した。第 10 図に常温接合したチップの外観を示す。引き続き, 10mW 級 Full-Si 整流回路の基本特性を取得し, 整流デバイス改良, 整合回路試作等を実施している。さらに HySIC 100mW 級, 1W 級整合回路の接合, 受電用 HySIC によるレクテナアレーを試作し, 電波暗室内で評価試験を行う。



第 10 図 Si 基板上に常温接合された GaN/SBD チップ

3.3 技術ロードマップの作製 マイクロ波無線送受電技術を中心とした, 宇宙太陽光発電システムの研究開発のためのロードマップ作成に向けて検討作業を実施している。ロードマップの検討にあつては, 専門家による委員会での議論のほか, 広く関係者の意見も伺いながら進めている。

3.4 マイクロ波無線送受電技術の産業応用

(1) **産業応用** ユーザ企業や行政機関, 専門家等との意見交換の場の設置や, 展示会等にて技術の PR を実施している。具体的には CEATEC Japan2016/IoT Japan2016/MWE2016 マイクロウェーブ展に出展した。

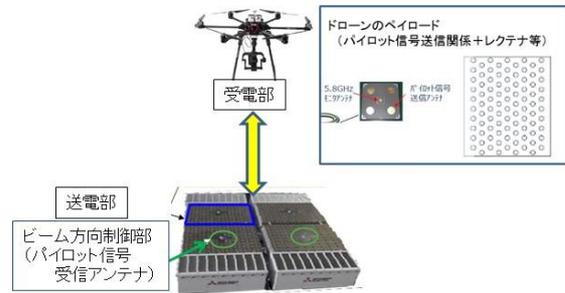
(2) **マイクロ波無線送受電技術ビジネス化推進勉強会** マイクロ波無線送受電技術の早期の事業化を目的として, 将来のビジネス化を目指す企業と専門家, 行政機関等が集まり, 具体的なビジネスモデルを検討し, 必要に応じて実証も行いながら, メリットを明確化し, 課題の解決方策について検討する場として, マイクロ波無線送受電技術ビジネス化推進勉強会を開催している。

これまで 8 月 25 日, 9 月 26 日, 12 月 1 日, 1 月 13 日の 4 回開催した。毎回 60 名を超える多くの参加者を得ており, 無線送受電技術に関する関心の高さを感じている。今後は 3 月 14 日に開催を予定している。

また, 実証試験・要素技術開発の提案募集において 5 件の応募があり, 審査の結果 2 件が採択されている。これらの実証試験等の結果を, マイクロ波無線送受電技術の実用化に向けた課題の解決に活用していく予定である。

4. 次期の地上試験案について

現在実施している高効率化の研究開発成果を生かして, 水平方向での実証で確認できなかった技術を確認することを検討している。第 11 図にイメージを示す。



第 11 図 地上実証 (垂直方向) イメージ

検討している内容としては, 計測センサー等を搭載したマルチコプタ等を使用して, 垂直方向へのマイクロ波送電における適切なビーム形成技術, 及びレトロディレクティブ方式による精度の高いビーム方向制御技術を検証する。また受電部を搭載したマルチコプタ等へのマイクロ波による無線給電を実施する。移動した受電部を追尾する技術を確認するための技術検証を実施する, などである。

5. おわりに

平成 28 年 4 月に閣議決定された宇宙基本計画では, 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 (略) 研究を推進する, とされている。

これまで J-spacesystems は関係機関と連携のもと, マイクロ波による宇宙太陽光発電の中核的技術である無線送受電技術の確立に向けて, 不可欠な精密ビーム制御技術の地上実証, およびそれら技術の産業応用を目指した実証システムを試作・評価してきた。また現在は, これまでの研究開発の成果を活用しつつ, 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小型・軽量化に取り組んでいる。

これらの事業が, 地上での様々な利用の場での活用と共に, 将来の宇宙利用につながるものと認識してさらに研究を進めてゆく所存である。

参考文献

- 1) 中村修治, 前川和彦, 佐藤正雄, 佐々木謙治, 三原荘一郎: 経済産業省/J-spacesystems による SSPS への取り組み, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 4D06 (2016).
- 2) 安間健一, 中村修治, 佐々木謙治, 佐藤正雄: 無線送受電技術の地上応用 (スピノフ) 実験, 第 59 回宇宙科学連合講演会, 1L11 (2015).

(2017. 1. 31 受付)