

Status of Ground Microwave WPT Demonstration at J-spacesystems*

Shuji Nakamura, Takashi Saito ,Masao Sato , Shoichiro Mihara, Koichi Ijichi

Japan Space Systems (J-spacesystems)

Space Systems Engineering Division

3-5-8 Shiba-Koen Minato-ku, Tokyo, 105-0011

Abstract

In the past few years, wireless power transmission (WPT) technology attracts attention towards the electric power supply to home electronics, electric vehicles and so on. Japan Space Systems(J-spacesystems), formerly known as Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF), has been studying WPT from the beginning of 2000s. J-spacesystems has focused on the microwave power transmission, which is capable for long-distance application, as a key technology for the realization of future Space Solar Power System (SSPS).

In Japanese New Space Basic Plan, which was issued in 2009, SSPS was noted as one of the research and development program to be promoted. J-spacesystems is now conducting this program with industries and academic organizations under the contract of Ministry of Economy, Trade and Industry (METI). The goal of SSPS is to be a commercial energy plant which transmits 1GW level electric power from space. As the space segment of an SSPS will be large (large transmission antenna on geostationary orbit), the phased array transmission system should be light and highly efficient. We are now developing thin and very efficient sub-array antenna using GaN HEMT and class-F amplifier. The target thickness and weight ratio of this sub-array are less than 40mm and 50g/W respectively.

We are now planning a ground Microwave WPT(MPT) demonstration. The microwave power transmitted from the power transmitting section (four independent transmitting modules) is 1.6kW(total) , and the power receiving section(rectenna) at about 50m distance from it collects RF power and converts to DC power. Though the diodes used in the rectenna modules are existing commercial product, we are developing a high efficient diode using GaN Schottky barrier diode in parallel for future applications.

* Presented at the Sixth SPS Symposium, 3-4 October, 2013

地上無線送電実験-位置づけと今後の展望*

中村修治、斉藤孝、佐藤正雄、三原荘一郎、伊地智幸一
一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構 技術開発本部 システム開発部
〒101-0011 東京都港区芝公園三丁目 5-8
E-mail: {Nakamura_Shuji, Saito_Takashi, Sato-Masao, Mihara_Shoichiro,
Ijichi_Koichi }
@jspacesystems.or.jp

1. はじめに

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構(J-spacesystems)〈旧、無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)〉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)」事業を推進している。ここではマイクロ波電力伝送試験モデルを試作し、屋内(電波暗室)及び屋外における電力伝送試験を実施することなどを計画してきた。現在取り組んでいる研究開発の概要について紹介する。

2. マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発[1][5]

「マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発」の主な内容は、以下のようである。

- 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アンテナに向けて指向制御する精密ビーム制御技術の研究開発を実施する。
- マイクロ波電力伝送試験モデルを試作し、屋内(電波暗室)において伝送試験を実施し、マイクロ波ビーム制御の角度精度を測定し評価する(伝送距離10m以上において角度精度0.5度のビーム制御の達成を目標とする)。
- また屋外において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する(伝送距離50m程度において電力伝送の実現を目標とする)。

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、独立行政法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)が実施しており、本事業の計画立案から屋内及び屋外でのマイクロ波電力伝送試験に至るまで、双方が連携・協力して研究開発を実施する。

(1) 本研究開発におけるマイクロ波電力伝送試験(地上)の特徴

マイクロ波を利用したエネルギー伝送技術についての地上での無線送電試験については、これまで国内外でいくつかの実施例がある[2]。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たものであるが、これまでの大出力の試験は、

- 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

の組合せが主体であった。また、マイクロ波ビーム方向制御についても屋外での定量的検証は行われていない。

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う。(表1参照)

*第16回SPSシンポジウム、2013年10月3-4日に発表

表1 本研究開発におけるマイクロ波電力伝送試験（地上）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。

(2) マイクロ波電力伝送試験モデル [1][3]

試作する電力伝送試験モデルのイメージを図1、2に示す。各送電モジュールの中心部および中央の受電モジュール中心部には、パイロット信号受信、送信アンテナがそれぞれ取り付けられている。

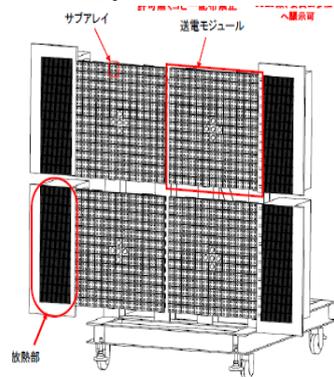


図1 送電部

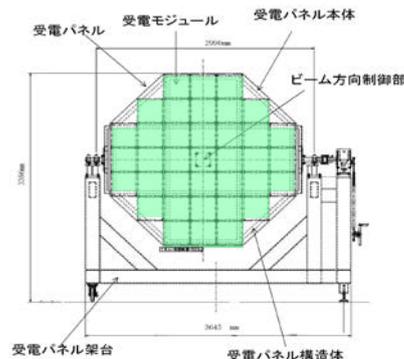


図2 受電部

①送電部

送電部の主要諸元を表2に示す。

表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)
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
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
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
マイクロ波増幅器効率	60%以上
移相器	5bit (MMIC 移相器)
送電部総合効率	30%以上
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)
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。
サブアレイ厚	サブアレイ厚さ: 40mm以下

②受電部

受電部の主要諸元を表3に示す。

表3 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2.5×2.5mの円状配列 (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)
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	<ul style="list-style-type: none"> 50%以上 (アンテナ～レクテナ制御装置出力) 80%以上 (改良型ダイオード)
電磁再放射抑制	受電パネルで発生する高調波再放射を抑制する
自動点検計測機能	受電パネルの点検を短時間で実施可能な自動点検計測機能を有する。

受電面における電力束密度分布(50m位置)は図3に示すように同心円状である。はじめに正方形(約2.5×2.5m)のレクテナアレイを考えたが、コスト効率の観点から、四隅の受電モジュールの削減を行い、空間電力収集効率は58.5%となった。レクテナアレイおよび受電モジュールの形状を図4に示す。

受電モジュールについては、数は極力少なく、かつ部品は自動実装したほうがコスト面では有利であることから、部品の自動実装可能な最大サイズ(360mm×360mm)程度とした。

なお、マイクロ波電力伝送試験では、受電部には既存のレクテナ素子を使用するが、将来の利用を見据えた高効率の改良型ダイオードの開発もあわせて行っている。

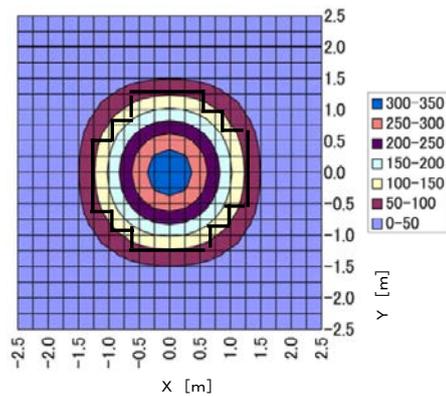


図3 受電面における電力束密度分布(黒枠はレクテナアレイ形状)

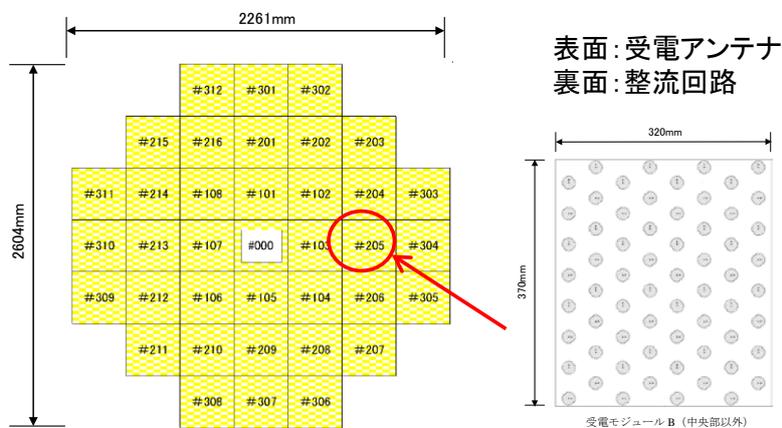


図4 レクテナアレイ(2.5×2.5m)および受電モジュール形状

(3) マイクロ波電力伝送試験[3]

屋外伝送距離 50m 程度においてキロワット級電力伝送の実現を目標とする。50m 付近でのビーム中心部電力束密度は、約 0.3 kW/m² となる見込みである。(図 5)

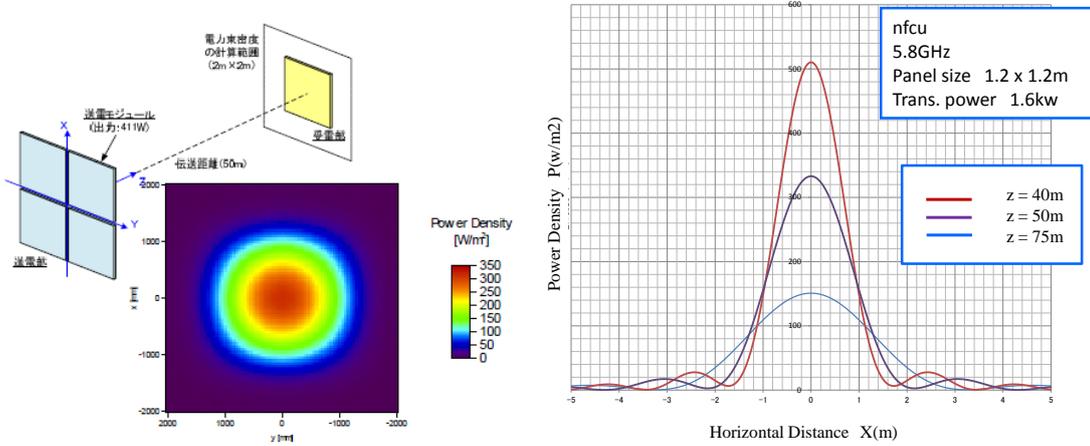


図 5 ビーム中心部の電力束密度

3. 将来の宇宙利用への発展に向けて [5]

METI/J-spacesystems で現在開発中のマイクロ波電力伝送試験モデルと将来の SSPS で想定する送電・受電効率は表 4 のようである。素子単体としては高効率であっても、システムとして組み上げたときの損失（効率低下）をいかに低減するかが今後の課題である。

表 4 目標効率

	現状目標	将来 SSPS 想定目標
半導体増幅器	60%以上*	80%以上
送電部 (DC-RF)	30%以上	80%
レクテナ素子	80%以上 (改良型)	90%以上
受電部 (RF-DC)	50%以上 (既存のレクテナ素子使用)	90%

*製造上のばらつきも考慮した平均値

また、SSPS のコスト低減に向けては、送電部の軽量化・薄型化も重要な指標となってくるが、現状および将来の目標値は表 5 のようである。

表 5 軽量・薄型化目標

	現状目標	将来 SSPS 想定目標
モジュール単位重量	47.5g/W 以下	10g/W 以下
モジュール厚	40mm 以下 (サブアレイのみ)	20~100mm (電源他含む)

図 6 および図 7 は J-spacesystems (USEF) が行った過去の無線電力伝送試験[4]で使われた送電システムと現状および将来目標の比較である。マイクロ波電力伝送試験モデルと将来の商用 SSPS のギャップを埋めるために、今後も継続して努力してゆく必要がある。

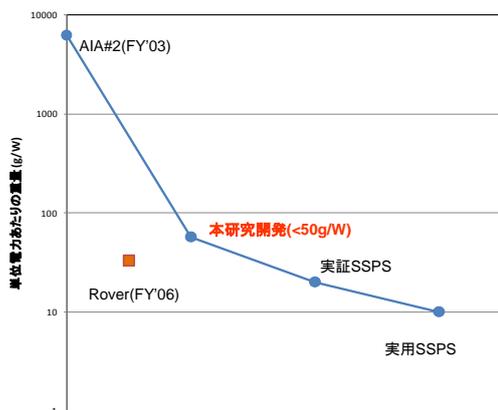


図6 モジュール単位重量 (g/W)

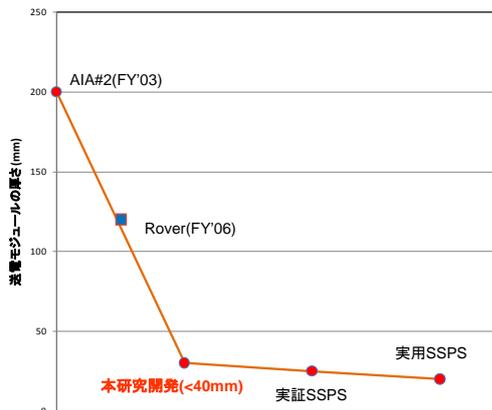


図7 モジュール厚

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磁界結合方式と比べ長距離間の送受電が可能となることから社会活用が期待されている。

本研究開発では、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、2.45GHz帯による無線送電実証システムを試作評価する。試作するスピノフ技術実証システムのイメージを図8に示す。

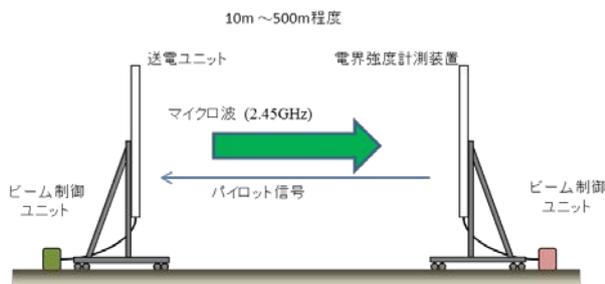


図8 スピノフ技術実証システムイメージ

5. おわりに

平成25年1月に宇宙戦略本部が打ち出した「宇宙基本計画」では「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」とされている。

本研究開発においては、マイクロ波による精密ビーム制御技術を地上において実証することに加えて、地上応用を目指した実証システムを試作・評価する。この目標達成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進めてゆく所存である。

参考文献：

- [1] 齊藤、三原、布施、伊地智：「マイクロ波電力伝送地上実験に向けての進捗」、第14回SPSシンポジウム、2011年10月25-26日
- [2] 賀谷：「宇宙発電と宇宙の送電」、電学誌、114巻7/8号、p467、1994年
- [3] 齊藤、三原、中村、伊地智：「マイクロ波地上エネルギー伝送実験の概要と進捗」、第11回無線電力伝送時限研究専門委員会(通算39回)研究会、2012年5月24-25日
- [4] 齊藤、布施、三原、伊地智：「USEFにおけるSSPS検討活動と今後の展望」、第12回SPSシンポジウム、2009年11月13-14日
- [5] 中村、齊藤、佐藤、三原、伊地智：「マイクロ波電力伝送試験(地上)の概要」、第15回SPSシンポジウム、2012年9月25-26日