

Status of SSPS study at USEF¹

Takashi SAITO, Yoshiharu Fuse, Shoichiro MIHARA, Koichi IJICHI
Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF)
2-12 Kanda-Ogawamachi, Chiyodaku, Tokyo, 101-0052 Japan

Abstract

Institute for Unmanned Space Experiment Free Flyer (USEF) has been studying Space Solar Power System (SSPS) under Ministry of Economy, Trade and Industry (METI) since FY2000. Here we introduce some SSPS concepts and wireless power transmission (WPT) tests performed in this study. Also an outline of the ongoing WPT project at USEF is referred.

(1) SSPS concepts

- Single-bus Model (2002): '02 reference model is a simple, technically feasible and practically configured SSPS which consists of a power generation/transmission panel (sandwich panel) suspended by tether wires from a bus system above the panel.
- Multi-bus Model (2007): '07 reference model is Integrated tethered SSPS with multiple buses. This model is designed to facilitate the construction of large SSPS in incremental steps. Units of tethered SSPS are integrated in the geostationary earth orbit to the commercial plant of 1 GW level.

(2) WPT laboratory tests

- Active Integrated Array-antenna (AIA, 2002-2003) : Prototype active phased array panel with software retro-directive beam steering antenna(AIA#1) and hardware retro-directive antenna(AIA#2) had been manufactured and evaluated. The combination test with AIA#1&2 was performed. The purpose of the test was demonstration of basic phase synthetic characteristics and beam steering scheme.
- WPT to a Rover (2006): Microwave transmission to the moving object is one of the spin off fields of WPT technology. A light weight microwave transmission panel and a rectenna for a rover have been developed and the WPT test was successfully completed.

(3) WPT demonstration program (2009-2013)

- USEF has started a new R&D program under METI. The main purpose of the program is to develop a precise microwave beam control system using a retro-directive method and to build a WPT model to demonstrate its effectiveness.
- In this program, the following items will be verified;
 1. the accuracy of beam control (within 0.5 degrees at a distance of about 10m)
 2. the WPT demonstration at a distance of about 100m to show the feasibility of the power transmitter, rectenna and beam control system/method.

¹ Presented at the 12th SPS Symposium, 13-14 November, 2009

USEF における SSPS 検討活動と今後の展望²

斉藤孝、布施嘉春、三原荘一郎、伊地智幸一

財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構

〒101-0052 東京都千代田区神田小川町 2-12

E-mail: {saito, mihara, fuse, ijichi}@usef.or.jp

1. はじめに

財団法人 無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)では経済産業省および同省関連団体からの委託を受けて宇宙太陽発電システム(SSPS)に関連する調査研究を行ってきた(図1)。これらの中からシステム検討と要素試作試験を、また今後実施予定のマイクロ波による無線送受電技術開発について概要を紹介する。

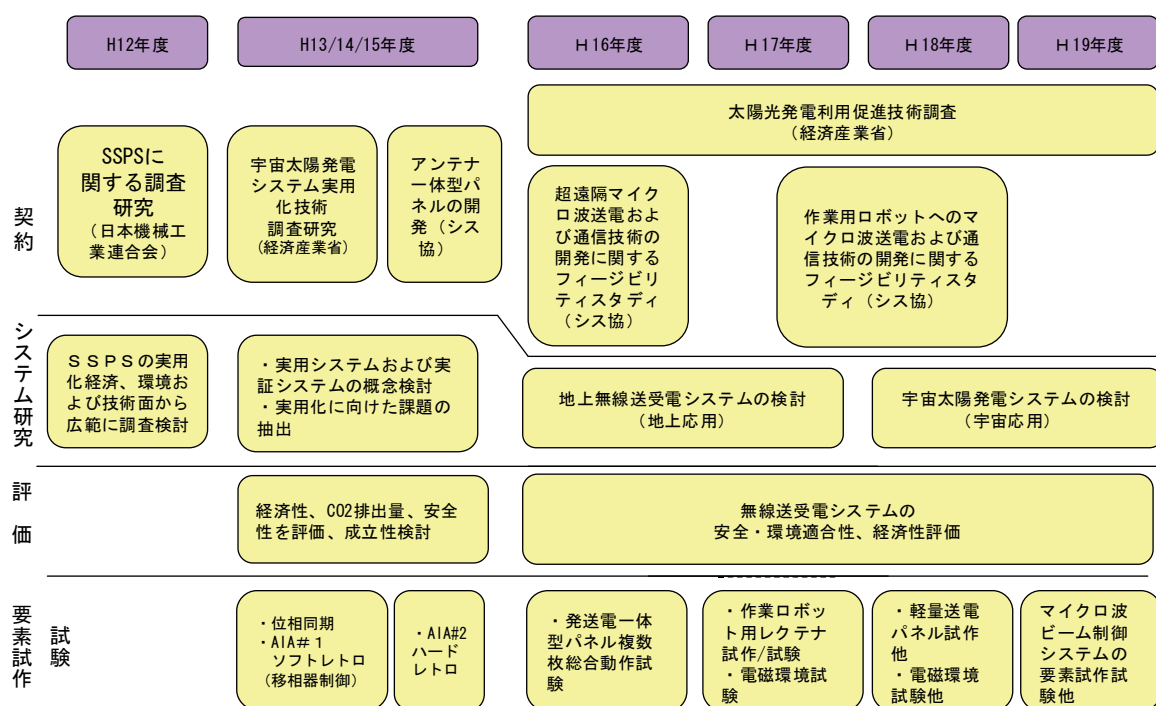


図1 USEFのSSPS活動状況(平成19年度まで)

2. 宇宙太陽発電システム検討

平成13~14年度に実施した宇宙太陽発電システム実用化技術調査研究の中で、USEF内に設置した専門委員会(主査:宇宙航空研究開発機構 佐々木進教授)により検討された参照モデルを図2に示す。これは平面状の送電一体型パネルと上方のバス部を複数のテザーによって結合し重力傾斜により姿勢安定を図るロバストな方式である。送電一体型パネルは上面が太陽電池セル、下面が送電用のフェーズドアレイアンテナと太陽電池セルから構成されている[1]。巨大なパネルは図3に示す階層的な構造から構成される[2]。

² 第12回SPSシンポジウム、京都大学にて2009年11月13、14日開催

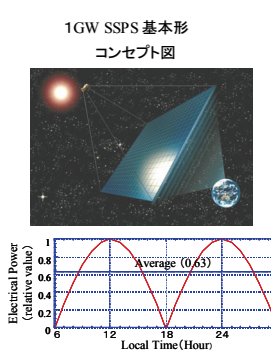


図2 参照モデル(シングルバス型)

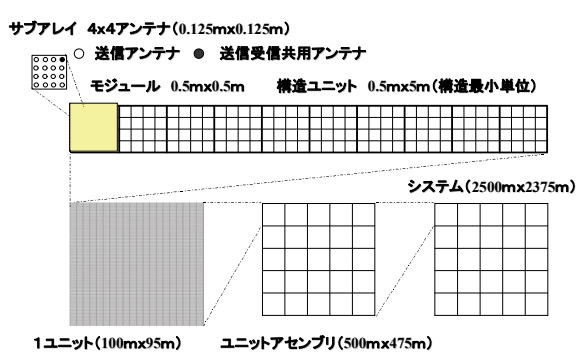
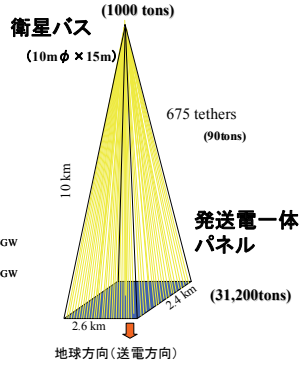


図3 発電電一体パネルの階層構造

平成 16~19 年度に実施した太陽光発電利用促進技術調査の中で、さらに段階的發展というコンセプトが付加され、より実現可能性を増したマルチバス型が提唱されている (図4)。

(ユニット) (ユニット・アセンブリ) (宇宙機システム)

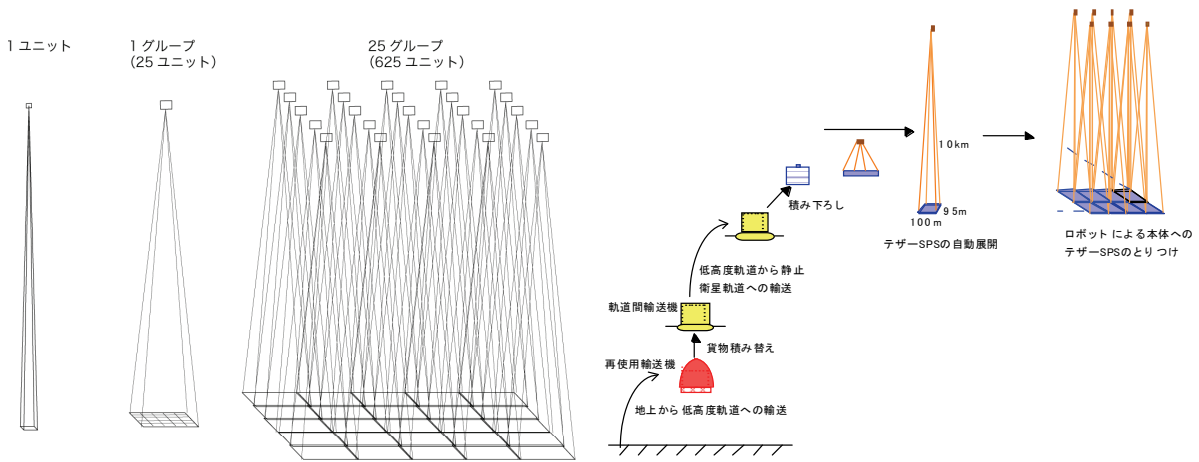


図4 参照モデル(マルチバス型)構成および構築シナリオ

3. 要素試作試験

これら SSPS モデルの中核を成す技術であるフェーズドアレーアンテナによるマイクロ波無線送受電技術に関して USEF では種々の要素試作試験を行ってきた。

(1) アクティブ集積アンテナ(AIA)の試作試験

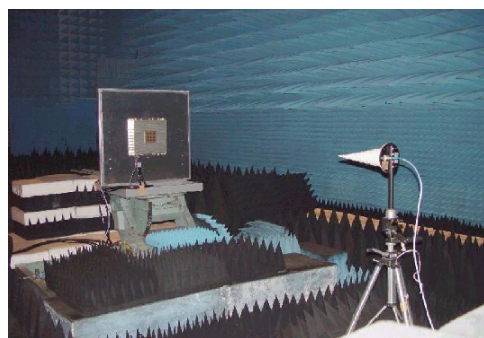


図5 AIA#1 (ソフトウェアレトロ)



図6 AIA#2 (ハードウェアレトロ)

平成 14 年度には、半導体アンプを用いた小型送電器に適用する場合を想定し、積層型の高効率アクティブ集積アンテナ(AIA#1)の試作試験を行った(図5)。平成 15 年度には、パイロット信号を受信し、パイロット信号方向へマイクロ波を放射するレトロディレクティブ機能を有するアンテナ(AIA#2)の試作試験を実施した(図6)。AIA#1 がソフトウェア的にレトロディレクティブ機能を実現することを目指しているのに対して、AIA#2 はこれをハードウェア的に実現している。

(2) ローバーに対する無線送電実験 [3]

平成 17~18 年度に、移動体への無線送受電技術適用例として、電動移動台(ローバー)に対する無線送電を行った(図7)。この実験においては、実際にローバーに搭載する受電パネルおよび、将来の宇宙での応用に向けて軽量化を考慮した送電パネルを試作した(図8)。使用した周波数は 5.8GHz である。走行は、前後往復運動と送電パネルから等距離に動く円弧往復運動とし、バッテリーへの充電状況をモニタすることで電力収支を確認した。(図9)

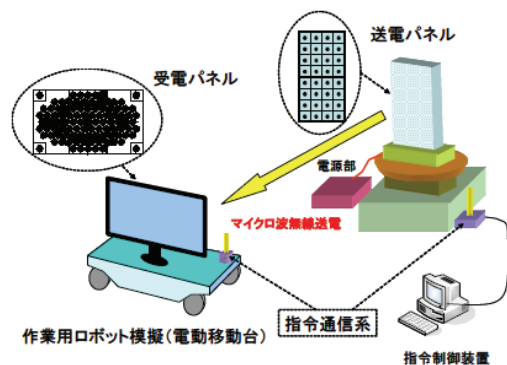


図7 システム構成

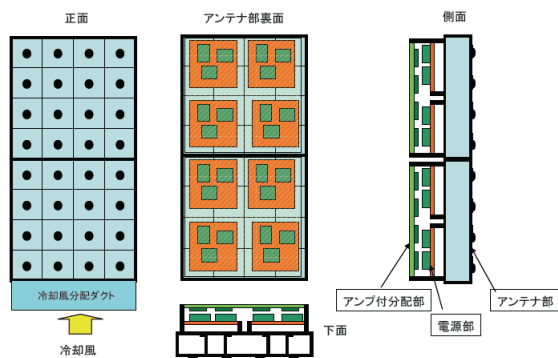


図8 送電部構成

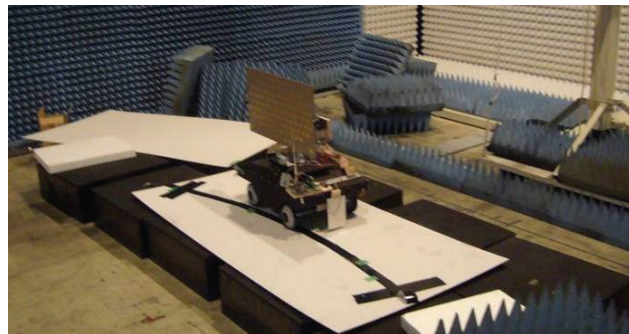
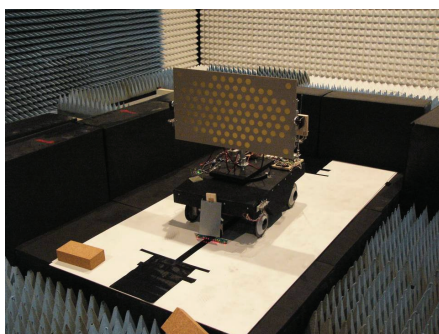


図9 実験風景 (@京大 METLAB)

4. 太陽光発電無線送受電技術の研究開発

平成 21 年 7 月 3 日、経済産業省より「太陽光発電無線送受電技術の研究開発」に係わる公募がなされた[4]。宇宙開発戦略本部決定の「宇宙基本計画」(平成 21 年 6 月 2 日)において、宇宙太陽光発電については「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」とされていることがその背景としてあげられる。

この事業の目的は、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による無線送受電技術の確立に向け、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行うこ

とにより、当該システムの実現を目指すことである。USEF ではこのうち「マイクロ波による精密ビーム制御技術の研究開発」が採択された（平成 21 年 9 月 1 日）。

その主な内容は、以下のようである。

- 1) 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。
- 2) 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）。
- 3) 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 100m 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、JAXA が実施することとしており、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こととされている。

①マイクロ波無線電力伝送試験モデル

試作する無線電力伝送試験モデルについての要求仕様を表 1 に、またモデルのイメージ図を図 10 に示す。

表 1 無線電力伝送試験モデルの仕様 [4]

送電部	要求仕様
使用周波数	5.8GHz(円偏波)
システム構成	複数モジュール(2モジュール以上)
モジュールサイズ	最大 1.0m × 1.0m まで
ビーム拡がり角	全システムで約 2 度のビーム形成(-3dB ビーム幅)
モジュール重量	40kg 以下
モジュール間の接続方法	可動ヒンジ(手動で±20 度可動なもの)
モジュール支持方法	全システムを支持し自立可能な枠構造(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)
モジュール電力	700W 以上(高出力モード)
アンテナ素子間隔	0.65 波長
マイクロ波増幅器効率	50%を目標
移相器	4bit 以上のもの
レトロディレクティブ方式	ソフトウェアレトロ方式を目標(ハードウェアレトロ方式とのトレードオフ)
運用時間	1 分間以上(高出力モード)
送電部総合効率	40%以上を目標
ビーム制御精度(屋内実証試験)	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。
受電部	要求仕様
レクテナアレイサイズ	最大 2.5 × 2.5m まで(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とする)
レクテナアレイ枚数	1 枚
レクテナ支持方法	レクテナを支持し自立可能な構造(屋外での電力伝送試験に耐え得る材質、剛性、重量等を設定する)
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	70%以上を目標

②マイクロ波無線電力伝送地上試験

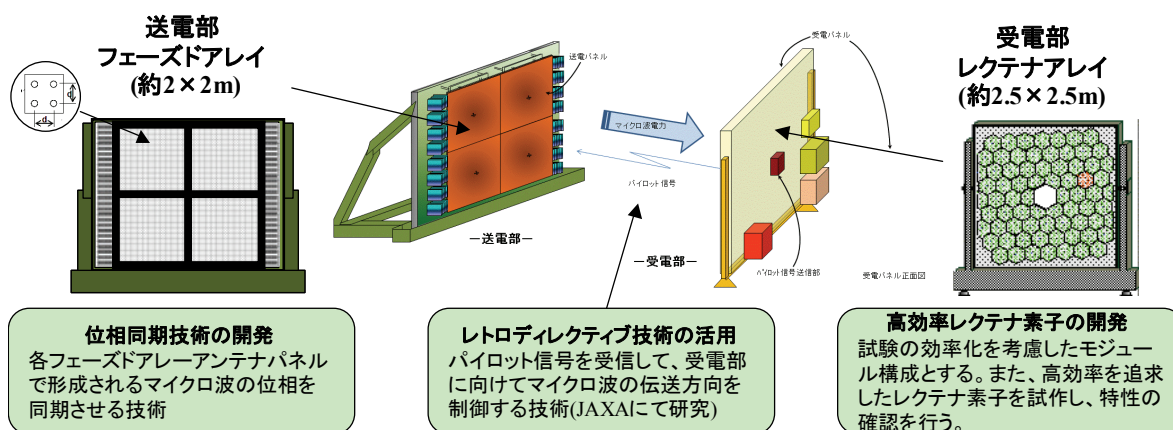


図10 マイクロ波無線電力伝送試験モデルのイメージ

マイクロ波無線電力伝送試験モデルを用いて、屋外において電力伝送試験を実施する。世界最先端の送電技術により、屋外伝送距離 100m 程度において kW 級電力伝送の実現を目標とする。

試験実施場所に望まれる要素として以下が考えられる。

- 1) 敷地（電波の広がりなどの安全性を配慮した大きさ）
- 2) ユーティリティ（電力、上下水道、装置格納場所等）
- 3) 実験環境（穏やかな気象環境、干渉の懸念のない電波環境）

5. 今後の展望

今後 5 年間以内にエネルギー伝送技術について上記の地上技術実証を行う予定である。

また「宇宙基本計画」では「(地上実証の)結果を踏まえ、十分な検討を行い、3 年程度を目途に、大気圏での影響やシステム的な確認を行うため、『きぼう』や小型衛星を活用した軌道上実証に着手する」とされていることから、今回の技術開発は次ステップを意識しつつ開発をおこなう所存である。

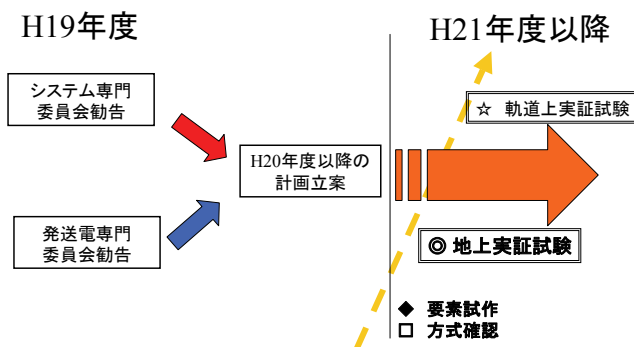


図11 今後の展望

参考文献：

- [1] USEF：「平成 14 年度 宇宙太陽発電システム実用化技術調査研究」（平成 15 年 3 月）
- [2] USEF：「平成 19 年度 太陽光発電利用促進技術調査」（平成 20 年 3 月）
- [3] USEF、(財) 機械システム振興協会：「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ェージビリティスタディ報告書」、(平成 18 年 3 月)
- [4] 経済産業省：「太陽光発電無線送受電技術の研究開発」公募要領（平成 21 年 7 月 3 日）