

Summary of Studies on Space Solar Power Systems of Japan Aerospace Exploration Agency *

Masahiro Mori¹⁾, Hideshi Kagawa¹⁾, Yuka Saito¹⁾ and Hiroyuki Nagayama²⁾

1) Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
2-1-1 SENGEN, TSUKUBA, IBARAKI, 305-8505 JAPAN

2) Mitsubishi Research Institute, Inc.
3-6, OTEMACHI 2-CHOME CHIYODA-KU, TOKYO, 100-8141 JAPAN

(E-mail: mori.masahiro@jaxa.jp)

Abstract:

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has been conducting studies on Space Solar Power Systems (SSPS) using microwave and laser beams for years since FY1998 organizing a special committee and working groups. JAXA is proposing a roadmap that consists of a stepwise approach to achieve commercial SSPS in 20-30 years. The first step is tens of kW class Technology Demonstration Satellite to demonstrate microwave or laser power transmission. The second step is to demonstrate robotic assembly of 10MW class large scale flexible structure in space on ISS co-orbit. The third step is to build a prototype SSPS in GEO. The final step is to build commercial GW class SSPS in GEO.

Current SSPS study undertaken by JAXA consists of three main subjects, SSPS concepts and architectures study, technology flight demonstration and major technology development. In SSPS concepts and architectures study, special committee and working groups which include 180 or more persons participate from industrial, administrative and academic sectors are organized. And some configurations of both microwave based SSPS and laser based SSPS has been studied. From the past experiences of the conceptual design of the 1GW class microwave based SSPS, it is clear that system with the mirrors and modularized unit which integrated solar cells and microwave power transmitters is promising. By using mirrors, the solar lights are directed to the energy conversion unit integrated solar cells and microwave power transmitters. Since solar cell panel and the Earth looking microwave antenna are two sides of the same modularized unit, length of power cables connected solar cells to the power transmitters would become short and this would reduce mass of whole system. And the modularized unit is also preferable because it is easy to assemble by robots automatically. The key factor in designing systems is feasibility of thermal system. Considering above these factors, some reference models are being considered now. In case of laser based SSPS, the laser beam would be directly produced from the solar light using the direct solar pumping solid-state laser device. This laser beams would be collected on ground and used to produce hydrogen from seawater. The receiving / energy conversion station is settled on an ocean, and producing hydrogen can be stored and transported by ships to consumers. In designing laser based SSPS, conversion efficiency of the direct solar pumping solid-state laser and feasibility of thermal system are critical factors.

This paper presents the results of these study effort of JAXA and from those results, identifies the most promising SSPS concepts, including their key technologies.

* Presented at 7th SPS Symposium, 16-17 September, 2004

JAXA における宇宙エネルギー利用システムの研究状況^{注1}

森雅裕¹⁾、香河英史¹⁾、斉藤由佳¹⁾、長山博幸²⁾

1) 宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部 高度ミッション研究センター

2) 株式会社三菱総合研究所 宇宙・地球管理研究部

(E-mail: mori.masahiro@jaxa.jp)

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、委員会/ワーキンググループ形式によりマイクロ波方式宇宙エネルギー利用システム (SSPS : Space Solar Power Systems) およびレーザー方式 SSPS に関するシステム総合研究を実施しており、システムコンセプト、技術課題、実証シナリオ、経済性等の検討を行っている。また、高電力送電技術、レーザー発振技術、熱制御技術、大型構造物制御技術など重要な要素技術のうち、地上で実証可能であるものに対して要素試作試験等を継続して実施している。本論文では、JAXA における SSPS 研究の現状とそれを取りまく状況および今後の展望等について示す。

2. 研究概要

2.1 技術開発ロードマップ

JAXA における SSPS に関する研究では、2020~2030 年の商用システム運用開始を目標に、1GW 級マイクロ波方式 SSPS 及びレーザー方式 SSPS の研究開発を実施している。これらのシステムの技術開発ロードマップを図 1 に示す。

2.2 研究の流れ

JAXA では 1998 年より委員会/ワーキンググループ(WG)形式によりシステム総合研究を実施しており、商用システムに関するシステムコンセプト、実証シナリオ、技術課題等の検討を実施している。また、レーザー発振技術、熱制御技術、大型構造物制御技術など重要な要素技術のうち、地上で実証可能であるものに対して要素試作試験等を継続して実施している。さらに、技術開発ロードマップの第一段階である軌道上技術実証衛星に関する検討やミッションクリティカルな機器等の部分試作試験も実施している。図 2 に JAXA における SSPS 研究の流れを示す。

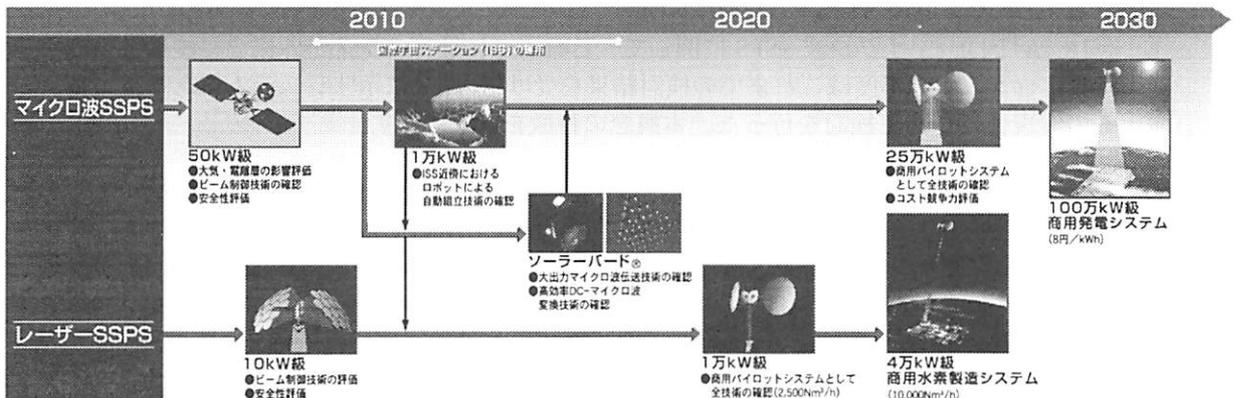


図 1 SSPS 研究開発ロードマップ

注1 第7回 SPS シンポジウム、九州工業大学にて 2004 年 9 月 16、17 日開催

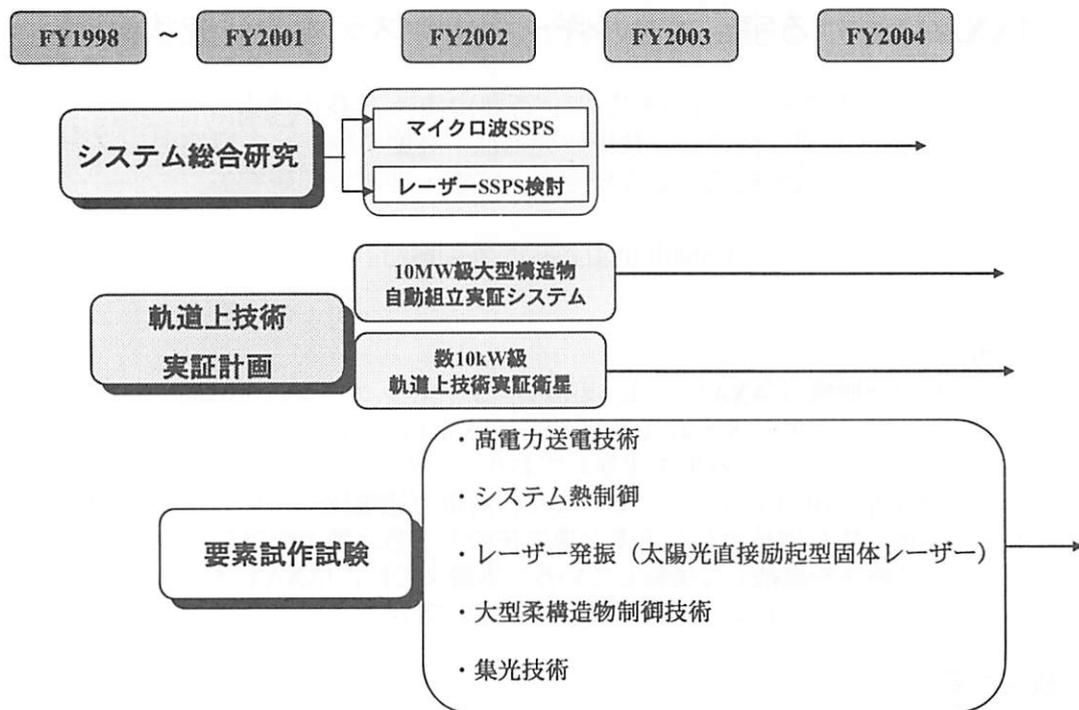


図2 JAXAにおけるSSPSに関する研究の流れ

3. 主な研究の内容

3.1 システム総合研究

(1) 研究体制

1998年度より宇宙太陽発電システム検討委員会（座長：京都大学松本教授）およびワーキング・グループ（WG）を設置しているが、2002年度より新たに宇宙レーザーによるエネルギー利用システム検討委員会（座長：中井阪大名誉教授）を立ち上げた。現在は、両委員会および12のWGに産官学より180名を超える研究者が参加し、2020～2030年の実用化を目標とした商用システムのシステムコンセプトを明確にするために、技術課題、実証シナリオ、安全性、経済性等について検討を行っている。

(2) マイクロ波SSPSのシステム検討

JAXAでは、マイクロ波SSPSに関して、これまでに種々のシステム概念について検討を行ってきた。2003年度はこれまでの検討結果を受けて、図3に示すシステム概念を提案し、その実現性について検討を行った。本概念の特徴を以下に示す。

- ① 発電部と送電部が表裏一体となった発送電一体化モジュールを使用する。一体化モジュールとすることにより、従来の発電部と送電部が分離した各種のモデルに共通する発電部から送電部への長距離送電に伴う様々な課題（電力ケーブルの質量、電力ロス等）の回避を狙うと共に、組立保守を容易にすることが可能である。
- ② 発送電一体化モジュールは送電面を地球方向とする姿勢で静止軌道上に配置される。
- ③ 発電面へ太陽光を導くために一次／二次反射鏡を使用する。二次反射鏡は発送電一体化モジュールと一体構造とするが、一次反射鏡は太陽輻射圧を揚力として利用することに

より、独立して飛行するものとする。これにより巨大な反射鏡を単一のジンバルで支えて太陽方向に指向させる必要がなくなるため、SSPS の単一故障点を排除することができる。

- ④ 一次反射鏡は、静止軌道に配置される二次反射鏡および発電電一体化モジュールの上下（南北）方向に配置され、編隊飛行を行う。これにより一次反射鏡は静止軌道に対し僅かに軌道傾斜角を有する軌道上に配置されるが、一次反射鏡が連続的に太陽輻射圧を受けることにより、結果的に静止軌道面とは平行な軌道を飛行することになる。

簡易解析の結果、一次反射鏡の編隊飛行の軌道力学的な可能性については示すことができた。しかしながら、発電部と送電部を一体構造とすることに関しては、発電電部からの発熱を適切に排熱して発電電部を適切な温度範囲に維持することが容易でないこと等の問題点が上げられている。今後は、発電電部を分離した方式も含めて種々の形状案について比較検討を行う予定である。

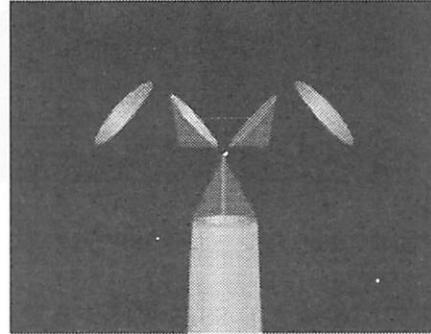


図3 2003年マイクロ波SSPS基準モデル

（3）レーザーSSPSのシステム検討

マイクロ波SSPSと同様に、レーザーSSPSについてシステム概念、基本コンフィグレーション、主要機能等の検討を行った。図4にレーザーSSPSの基本ユニットモデルを示す。

基本ユニットは一次/二次光学系、レーザーモジュール（レーザー発振部、送信ビーム整形、指向部を含む）、ラジエータから構成される。レーザー発振には太陽光直接励起型固体レーザーを使用し、太陽電池を不要とすることで高効率なエネルギー変換が期待できる。ただし、効率よくレーザーを励起するためには太陽光を高倍率に集光する必要があるため、高性能排熱技術が重要となってくる。本基本ユニットでは、ラジエータ内部の熱移送距離及び軌道上での組立作業性等を考慮して、ラジエータは100m×100mとし、この規模のラジエータで排熱できる熱量は最大10MWと仮定した。太陽光直接励起型固体レーザーでは、レーザー媒質に入射する太陽光エネルギーの1/3程度がレーザー光に変換され、1/3程度が熱となると見込まれているため、本ユニットのレーザー出力も10MW程度となる。必要な一次集光鏡は100m×100m×2式となる。

レーザー媒質としては、大気伝送効率のよい1.06μmの波長のレーザーを発振するNd:YAGレーザーが有望であるが、ディスク型、ファイバー型等の複数の選択肢があるため、今後比較検討を行う予定である。

また、大出力（1GW級）のシステムを構築するためには、本基本ユニットを多数、直列接続して全体として棒状のシステムとする。（図5）静止軌道上で長手方向を軌道面垂直に太陽指向の姿勢で飛行することで、太陽方向から見たシステムの形状は対称となり姿勢安定上も大きな問題はない。また、互いのユニットの影になることもない。個々の基本ユニットで生成されたレーザー光は一本のレーザービームに集約して地上に伝送するか、あるいは個々の基本ユニットから独立に送出するかの選択になるが、独立に送出する場合、地上におけるレーザー受光方法に工夫が必要である。

今後は、レーザー媒質の組成・形状、レーザー発振部の構成、集光倍率と方法、排熱方法、組立方法等の詳細について検討を重ねる予定である。

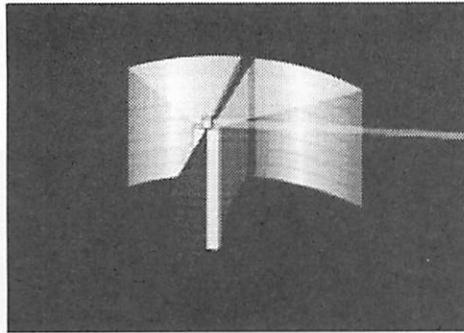


図4 2003年レーザーSSPS基本ユニット

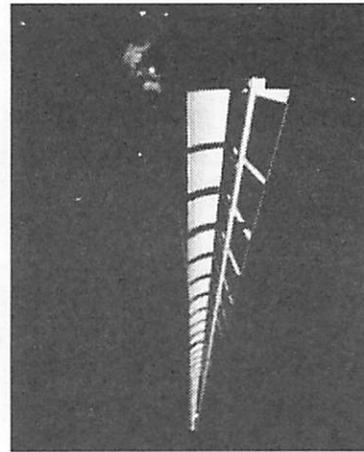


図5 1GW級レーザーSSPSのイメージ図

(4) 一般成人のSSPSに関する意識調査

SSPSのパブリック・アクセプタンス（PA：社会的受容性）活動のあり方を検討するために、SSPSに対する一般成人の意識を明らかにすることを目的としてアンケート調査を実施した。本調査の実施に当たっては、20歳以上64歳以下の一般成人2,741名を対象とし、インターネットを利用して2004年3月1日～4日に調査を実施した。対象者は年齢、性別で階層化し抽出を行い、国勢調査の構成に合わせたサンプリングの調整を行った。回収数は1,007名、回収率36.7%であった。以下に結果の概要を示す。

- ・ 宇宙の太陽（光）エネルギーを地上に送り利用することに対して、必要と考える成人は80%に上った。
- ・ SSPSの研究・開発を進めるべきかどうかに対しては、「大いに進めるべきである」52%、「やや進めるべきである」29%となり、80%以上の成人がSSPSの研究開発の推進が必要であると認識していた。
- ・ 一方で、SSPSの認知度に関しては、成人全体の3分の2が「全く知らない」と回答しており、いまだに低い状況であった。
- ・ 今後は十分な情報提供、広報活動を行い、SSPSの認知度を高めた上で、安全性などに対する意見の評価を行っていく必要がある。

3.2 要素試作試験

SSPSに関する重要な要素技術のうち、地上で確認可能なシステム、部品などの試作試験及び技術開発を実施している。具体的には以下の技術に関する要素試作試験／予備検討を実施している。

- ・ 高電力送電技術
- ・ 高出力マグネトロン
- ・ 熱制御ループ
- ・ 太陽光直接励起型固体レーザー
- ・ 超大型軽量構造の制振技術
- ・ インフレータブル構造／テンセグリティ構造
- ・ 太陽光集光技術

特に太陽光直接励起型固体レーザーの部分試作試験では、レーザー媒質にセラミック YAG を使い、レーザー活性元素として従来のネオジウムに加えてクロムを添加した新レーザー媒質を開発し 37% という高効率のレーザー発振を達成した。

4. SSPS を取り巻く状況と今後の展望

2003 年 2 月 27 日、自由民主党に 52 名の衆・参両議院が発起人として参加し、党所属議員 92 名から成る「宇宙エネルギー利用推進議員連盟」が発足した。（会長：甘利明衆議院議員、事務局長：加納時男参議院議員）。また、2003 年 10 月 7 日閣議決定された「エネルギー基本計画」の中で、宇宙太陽光利用は長期的視野に立って取り組むことが必要な研究開発課題として位置づけられた。SSPS のような長期的かつ大規模なプロジェクトの実現に向けては、国家レベルでの政策・取り組みが必要不可欠であり、SSPS 研究を取り巻くこのような環境の変化は、今後の SSPS 研究の推進を大いに期待させるものである。

一方 NASA では、2004 年 1 月にブッシュ大統領の「米国新宇宙探査計画」が発表された。今年度、当該計画推進の一環として先端技術の研究開発（H&RT：Human & Robotic Technology）などに既に \$ 700 M の予算が投入され、当該研究開発の中には活動インフラとしての SSPS 関連技術開発も盛り込まれている。よって SSPS 関連技術の研究開発は水面下で加速し、2020 年頃までに実用フェーズに到達するものと考えられる。

我が国としては、今後はさらに、国家政策・戦略として宇宙エネルギー利用を位置付け、産官学およびユーザーが一体となった全日本的活動および体制を整えて研究開発を推進していく必要がある。特に、世界に先駆けて技術実証衛星を打ち上げ、世界初の宇宙エネルギー伝送実証を実現させることが強く求められる。

参考文献

- [1] 森雅裕, 香河英史, 斉藤由佳, 長山博幸 “宇宙エネルギー利用研究の現状と展望”, 第 47 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2003 年 11 月
- [2] 平成 15 年度宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書
「宇宙エネルギー利用システム総合研究」, 株式会社三菱総合研究所
- [3] 平成 15 年度宇宙航空研究開発機構委託業務成果報告書「太陽光直接励起型固体レーザーの部分試作試験」, 財団法人レーザー技術総合研究所