

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

Masahiro Mori, Hideshi Kagawa, Tatsuhito Fujita, Hiroyuki Yoshida and Yuka Saito

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

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 plan-making 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. FY2003 microwave based SSPS reference model consists of the formation flying mirrors and energy conversion unit integrated solar cells and microwave power transmitters. In this system, the possibility of thermal system design is diminishing since solar cell panel and the Earth looking microwave antenna are two sides of the same modularized unit. So FY2004 reference model that separates solar cells and microwave power transmitters was proposed. Using this model as basis, we are carrying out examination from various viewpoints aiming at the cost minimum to build and maintain the systems.

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. A laser based SSPS reference model consists of solar condenser mirrors, radiators, laser generator, laser beam irradiator and support structures. In designing system, 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 8th SPS Symposium, 16-17 September, 2005

JAXA における宇宙太陽光利用システム (SSPS) 研究概要

森雅裕、香河英史、藤田辰人、吉田裕之、斉藤由佳
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

E-mail: { mori.masahiro, kagawa.hideshi, fujita.tatsuhito, yoshida.hiroyuki, saitoh.yuka }
@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太陽光利用システム (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 (M-SSPS) 及びレーザー方式 SSPS (L-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。

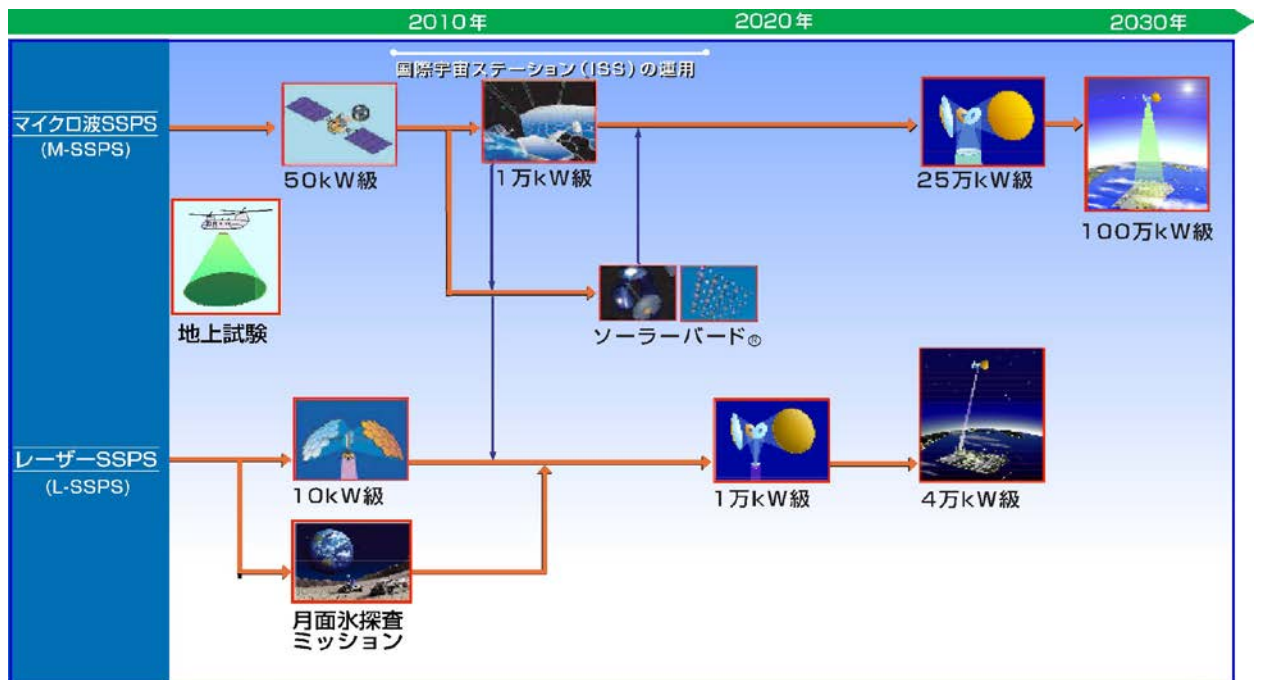


図 1 SSPS 研究開発ロードマップ

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、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。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検討を続けている。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。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等も実施している。

3. システム総合研究

3.1 M-SSPS システム総合研究

(1) 過去の検討内容

JAXA では、M-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 年度までは主に、発電部と送電部が一体型となったシステム概念を提案し、その実現性について検討を行ってきた。送電一体化モジュールシステムの特徴を以下に示す。

- ① 送電部を一体化モジュールとすることにより、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 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、独立して飛行することが可能である。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。

検討の結果、発電部と送電部を一体構造とすることに関しては、送電部からの発熱を適切に排熱して送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た。

(2) 2004 年型基準モデルの検討

2004 年度は送電部を分離した方式を中心に検討を行った。図 2 に 2004 年型 M-SSPS 基準モデルを示す。本モデルの特徴は以下のようにまとめられる。

- ① 発電部と送電部を分離（構造的には接続）して排熱面を確保する。
- ② 一次反射鏡は、静止軌道に配置される送電部の上下（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の上に配置されるが、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。
- ③ 発電部の大きさは集光倍率に依存するが、発電面の温度の観点からは集光倍率は 2～3 倍に制限される。ただし波長選択膜の使用、発電面の光学特性の工夫等により改善の可能性はある。
- ④ 発電部と送電部がコの字型に配置されているため、発・送電部の熱的結合は小さい。そのため、送電部の温度はほぼ送電電力分布で決まる。

- ⑤ 送電アンテナの直径が 2.5km、集光倍率が 2～3 倍の場合、送電電力分布は 20dB でも熱的に成立し得る。ただし、送電面内温度差が大きくなるため、周辺部温度が低くなりすぎる可能性がある。送電アンテナの表面特性の工夫やヒーターの追加等が必要である。
- ⑥ 発電電分離型とすることにより、発電部から送電部への送電距離 2km 程度の送電系が必要となるが、その質量は 200ton 程度に抑えることが必要である。

今後は、発電電一体モジュール型／2004 年型の課題を見直し、これを改良・発展させる形で検討を継続する予定である。

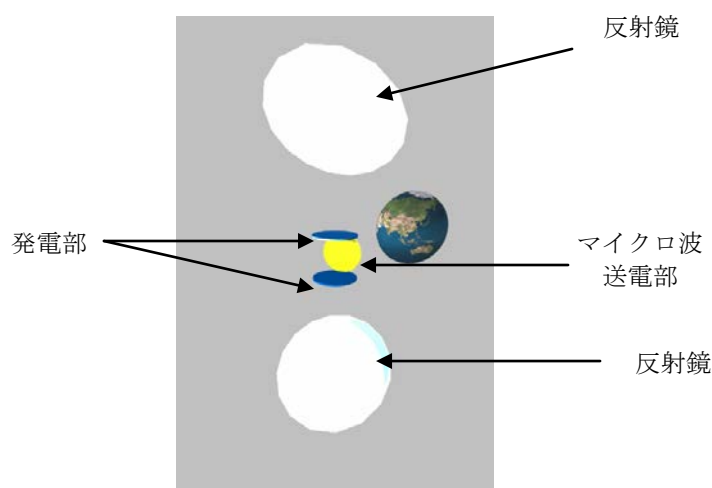


図2 2004 年型 M-SSPS 基準モデル

<システム概要>

- ・ ミラー（反射鏡）：2.5km×3.5km
1,000ton×2 式
- ・ 発電部：直径 1.7～2km (TBD)
- ・ 送電部：直径 1.8km～2.5km (TBD)
- ・ 総重量：10,000ton 以下

(3) 周波数確保に向けての取り組み

2004 年度は、マイクロ波伝送を行うに際して生じる周波数確保問題に関して、「周波数干渉問題検討委員会」（委員長：京都大学生存圏研究所 松本紘所長）を設立し、2.45／5.8GHz 帯の周波数の共用に関する検討を開始した。また、国際電気通信連合無線通信部門（ITU-R）第 1 研究委員会（SG1：スペクトラム管理）ワーキングパーティ 1A（WP1A：新技術）に、ITU-R における“電波によるエネルギー伝送（MPT）”を主題とした研究課題（Q.210/1）の維持のため、上記検討委員会での検討結果をまとめた寄与文書を提出した。

3-2. L-SSPS システム総合研究

(1) 商用システム検討

M-SSPS と同様に L-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 3 に L-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 1.06 μm 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、比較検討を実施中である。また、2004 度は集光倍率を抑えながら、かつシステムの効率を高く維持する方法として発振器と増幅器を組み合わせたレーザーシステムについても検討したが、適用性等については今後も継続検討の予定である。

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 4) 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太陽輻射圧による姿勢擾乱トルクは発生しない。反太陽方向に流す力が常時作用し、周期的な重力傾斜トルクが発生するが、定量的な解析によると制御用の燃料は少量でよい。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。

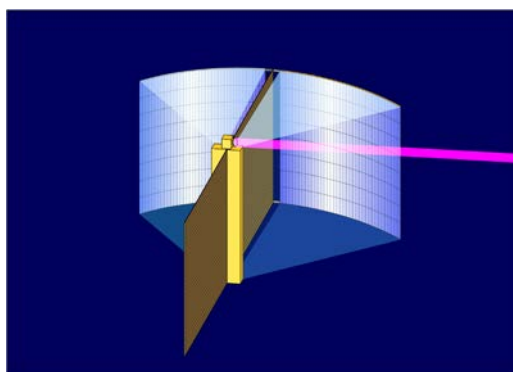


図 3 L-SSPS 基本ユニット

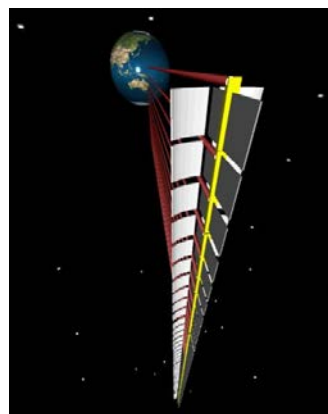


図 4 L-SSPS 1GW 級システム

(2) 月周回型技術実証衛星

L-SSPS の実現性検討として、商用システムを開発していく途中の段階での技術実証のひとつとして、月極域探査ローバーへのエネルギー伝送を実現する月周回型技術実証衛星を提案し検討を行った。現在、注目を浴びている月探査では地球の約 2 週間にわたる昼と夜が交互にあり、昼夜の温度差が大きくなるため、ロボットや人類が長期間にわたり活動や探査を行う環境を整えるためにはエネルギー確保および伝送技術が必要不可欠である。月周回型技術実証衛星についてミッション内容/軌道/規模/レーザー方式/回線の成否性等の検討を実施した。

3-3. 要素技術開発ロードマップの作成

SSPS 商用化までのシステム全体の開発ロードマップは図1に示したが、2004年度には、主要要素技術ごとに現状と将来（2005年～2025年）の性能や価格等について整理し、技術開発ロードマップを精緻化した。要素技術ごとにSSPSに必要な「システム／サブシステム／コンポーネントあるいは要素技術」および「方式／種類」を洗い出し、それらについて主な「指標軸（課題）」を抽出した。さらにその指標軸に対応して、2005年～2025年までの技術や価格のステータスを可能限り定量的に整理した。紙面の制約上、本稿に記載することはできないが、今後はシステム全体の検討や経済性検討との間でフィードバックを繰り返しながら、より精度の高いロードマップを継続して作成していく予定である。

4 要素試作試験

システム総合研究と並行して、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／予備検討等を実施している。

- ・ 集光技術
- ・ 光触媒技術
- ・ 蓄電技術
- ・ 高電力送電技術
- ・ レクテナ素子
- ・ 太陽光直接励起型レーザー技術
- ・ 熱管理技術 など

5 今後の進め方

今後もシステム総合研究、要素試作試験、軌道上技術実証に関する研究を、それぞれの技術成果を有機的に共有しながら推進していく。要素試作試験では、2005年度はマイクロ波およびレーザーのエネルギー地上伝送実験を開始する予定である。さらに、軌道上技術実証に関しては、50kW級マイクロ波伝送技術実証衛星および月面極域氷探査ローバーへのエネルギー伝送衛星に関する検討を実施していく。

<参考文献>

- [1] 平成17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
- [2] 森雅裕, 香河英史, 斉藤由佳, 長山博幸 ”JAXAにおける宇宙エネルギー利用システムの研究状況”, 第7回宇宙太陽発電システム (SPS)シンポジウム講演要旨集, 平成16年9月
- [3] 斉藤由佳, 香河英史, 森雅裕 ”JAXAにおける宇宙エネルギー利用システム実現性検討”, 電子情報通信学会信学技法, SPS2005-01, 平成17年4月
- [4] Yuka Saito, Masahiro Mori, Hideshi Kagawa, “Summary of Studies on Space Solar Power Systems of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)”, 56th International Astronautical Congress (Oct 2005)