

[招待論文] JAXA における宇宙エネルギー利用システム実現性検討

斉藤 由佳 森 雅裕 香河 英史

宇宙航空研究開発機構 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

E-mail: {saitoh.yuka, mori.masahiro, kagawa.hideshi}@jaxa.jp

あらまし 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。本稿では、JAXA における SSPS 技術開発ロードマップを示すとともに、主にマイクロ波方式 SSPS に関して JAXA における研究の概要を示す。

キーワード 宇宙エネルギー利用システム (SSPS)、マイクロ波方式、技術開発ロードマップ

Summary of Studies on Space Solar Power Systems (SSPS) of JAXA

Yuka SAITO Masahiro MORI and Hideshi Kagawa

Japan Aerospace Exploration Agency 2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8505 Japan

E-mail: {saitoh.yuka, mori.masahiro, kagawa.hideshi}@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. 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 SSPS has been studied. This paper presents the results of these study effort of JAXA.

Keyword Space Solar Power Systems (SSPS), microwave based SSPS, SSPS roadmap

1. 宇宙エネルギー利用システム研究概要

1.1. 技術開発ロードマップ

宇宙エネルギー利用システム (SSPS : Space Solar Power Systems) とは、宇宙空間で得られる太陽光エネルギーをマイクロ波やレーザーにより地上に無線伝送し、地上でそのエネルギーを電気や水素等の無公害燃料に変換し利用するシステムである。SSPS を実現させることは、環境問題の解決策とエネルギー源の多様化を図る上で極めて重要である。宇宙航空研究開発機構 (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。

1.2. 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。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。

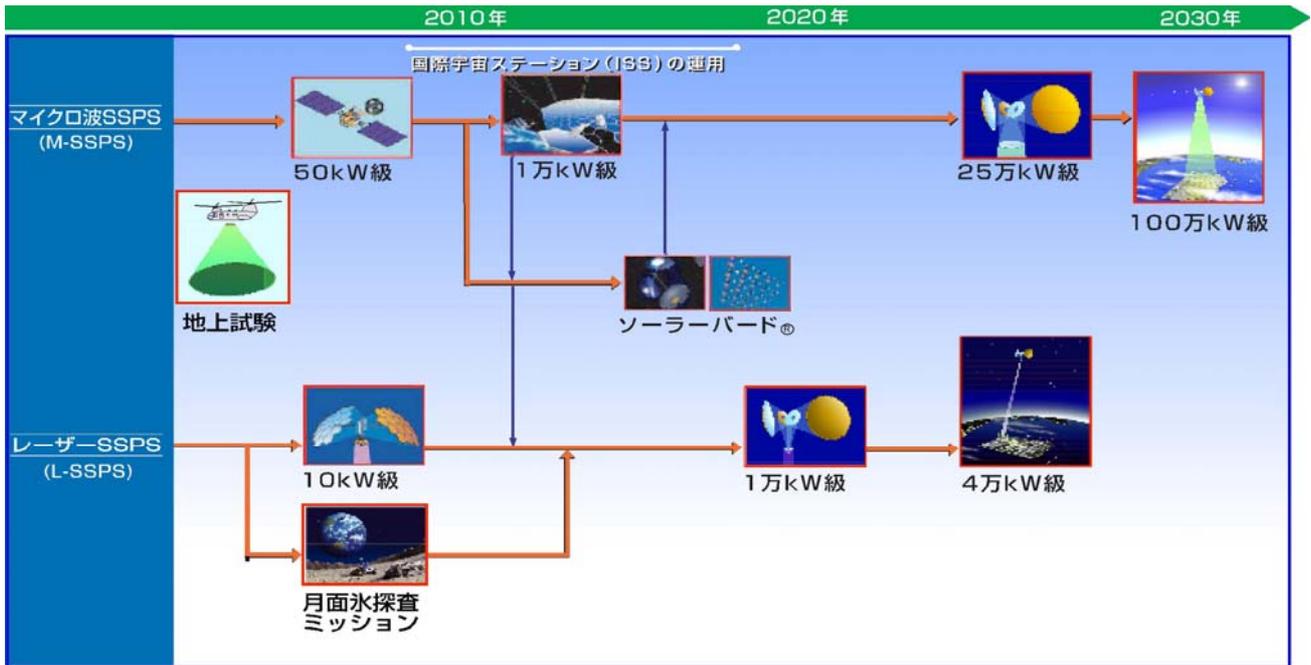


図1 SSPS 技術開発ロードマップ

2. システム総合研究

1998年度より「マイクロ波による宇宙エネルギー利用システム検討委員会」(座長: 京都大学生存圏研究所 松本紘所長) 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「レーザーによる宇宙エネルギー利用システム検討委員会」(座長: 中井貞雄 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。以下では、主にマイクロ波方式SSPS (M-SSPS) に関して、システムコンフィグレーション、技術課題等について示す。

2.1. M-SSPS システム検討内容

2.1.1. 2003年度検討内容

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年度はこれまでの検討結果を受けて、図2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電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 発電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。二次反射鏡は発電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。

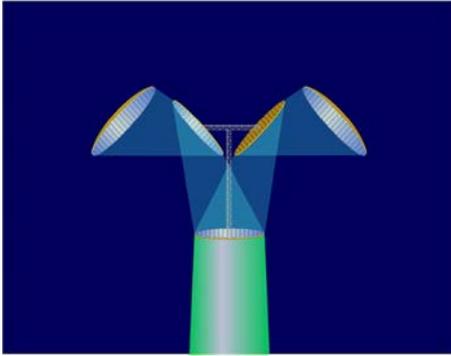


図2 2003 年型 M-SSPS 基準モデル

2.1.2. 2004 年度検討内容

2003 年度の検討結果を受けて、2004 年度は発電部を分離した方式を中心に検討を行った。図3に2004 年型 M-SSPS 基準モデルを示す。

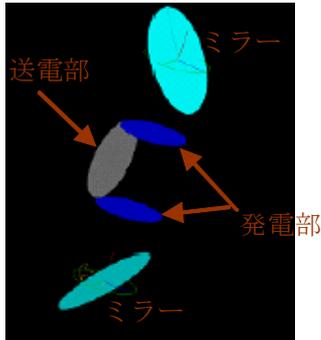


図3 2004 年型 M-SSPS 基準モデル

<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

- 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 2003 年型と同様、反射鏡は発・送電部とは独立、編隊飛行するものとする。
- 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 発送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、2003 年型／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。

2.2. 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。

2.3. 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. 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。2004 年度は、具体的に以下の技術に関する要素試作試験／予備検討を実施した。

- ・ 集光技術
- ・ 光触媒技術
- ・ 蓄電技術
- ・ 発電技術
- ・ 高電力送電技術
- ・ 太陽光直接励起固体レーザー技術
- ・ システム熱制御
- ・ 大型柔構造物制御
- ・ ロボット技術
- ・ 推進技術 など

特に、高電力送電技術では、以下に示す項目の検討および実験等を実施した。

- ・ バス電圧の高電圧化によって懸念されている宇宙環境にてプラズマ干渉や帯電による放電の抑止技術として、1)300V 発電用放電抑制型太陽電池アレイの試作・地上試験、2)静止軌道宇宙機の表面帯電の緩和試験、3)デブリ衝突により誘起される宇宙機表面の放電現象の地上試験、4)RF 照射された太陽電池アレイ表面の放電現象の地上試験を行い、マルチパクター放電に関する初の実験データを取得した。
- ・ マグネトロンに代わる高出力・高効率半導体増幅器 (F 級/E 級増幅) に関する現状技術のレベルを調査・確認 (含む計算機シミュレーション) した。
- ・ 大規模アレーアンテナの計算機シミュレーションにおいて、初の 10,000 素子を超越する計算結果を得た。
- ・ 半導体アンプを用いた高出力・高効率・アンテナ一体型送電部へ適応可能な世界の最新技術を調査し、SSPS 用アクティブ集積アンテナ原型モデルの試作研究に必要な設計情報を収集し、技術課題項目確認のための高出力半導体アンプを用いた電力合成器とこれに平面アンテナを接続したアクティブ集積アンテナ原型モデルの回路設計・試作・評価した。

4. 軌道上技術実証計画

システム総合研究、要素試作試験と並んで、技術開発ロードマップの初期フェーズに位置づけられる軌道上技術実証計画に関する検討を実施している。マイクロ波伝送に関する実証としては、実証の第 1 段階として、50kW 級軌道上技術実証衛星による無線電力伝送実験が計画されている。H-IIA または同等の性能を有するロケット 1 機により、5~7t 程度の実証衛星を地球周回軌道に打ち上げ実証を行うもので、以下に示すような具体的なミッション要求を掲げ、システム検討が行われている。

1. 地上での受電実証
 - 地上伝送時のビーム制御、ビームパタンや電離層の影響評価
 - 数百 km の長距離でレトロディレクティブ実証
2. 親衛星、子衛星近傍の電磁環境及びプラズマ環境計測

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。加えて、2005 年度はマイクロ波による kW 級のエネルギー伝送実験の地上実証試験を開始する。

また要素試作試験に関しては、デモンストレーションを目的とした試作試験を中心に行っていく予定である。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宇宙エネルギー (レーザー) 伝送衛星に関する検討を実施する予定である。

文 献

- [1] 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
- [2] 平成 16 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] 森雅裕, 香河英史, 齊藤由佳, 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
- [4] M.Mori, H.Kagawa, Y.Saito, H.Nagayama, “CURRENT STATUS OF STUDY ON HYDROGEN PRODUCTION WITH SPACE SOLAR POWER SYSTEMS (SSPS)”, Proceedings of The 4th International Conference on Solar Power from Space -SPS'04- together with The 5th International Conference on Wireless Power Transmission -WPT5, July 2004.