

# 宇宙太陽光利用システム(SSPS)総合研究

Summary of Studies on Space Solar Power Systems (SSPS)

高度ミッション研究センター(Advanced Mission Research Center)

斉藤由佳、藤田辰人、森雅裕

Yuka Saito, Tatsuhito Fujita and Masahiro Mori

## Abstract

Advanced Mission Research Center has been conducting studies on Space Solar Power Systems (SSPS) using microwave and laser beams for years organizing a special committee and working groups. In SSPS concepts and architectures study, system concepts and architectures of commercial type of microwave based SSPS (M-SSPS) and laser based SSPS (L-SSPS) has been studied for years. In this study, a major focus is on identifying system concepts, architectures and key technologies that may ultimately produce a practical and economical energy source. This paper presents the results of these study effort of JAXA and the most promising SSPS concepts, including their key technologies.

## 1 はじめに

本研究は平成 10 年より実施しており、地球温暖化、エネルギー問題など人類が直面する地球規模の諸問題を解決する可能性を秘めた宇宙太陽光利用システム (SSPS : Space Solar Power Systems) の実現性に関する研究を行っている。マイクロ波方式およびレーザー方式の SSPS に関してシステム構成やコンフィグレーションを検討し、技術課題の抽出、研究開発ロードマップの作成、経済的フィージビリティの検討等を継続して実施している。

## 2 研究の概要

平成 17 年度は以下の項目について研究を行った。

### (1) マイクロ波方式 SSPS の実現性検討

1GW 級のマイクロ波方式 SSPS (M-SSPS) に関しては、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。平成 17 年度は発電部と送電部を分離する方式のシステム概念の検討を詳細に実施し、その技術的成立性や輸送シナリオおよび経済性等について検討を行った。

## (2) レーザー方式 SSPS の実現性検討

レーザー方式 SSPS(L-SSPS)に関しては、比較的小さい規模のシステム (10MW 級) を複数接続して大出力システムとするコンフィグレーションを提案し、姿勢/軌道制御方法や排熱システムの検討等を行った。また、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。

## 3 成果の概要

### (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、2030 年頃の商用システム運用開始を目標に、1GW 級 M-SSPS 及び 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 Fig. 1 に示す。

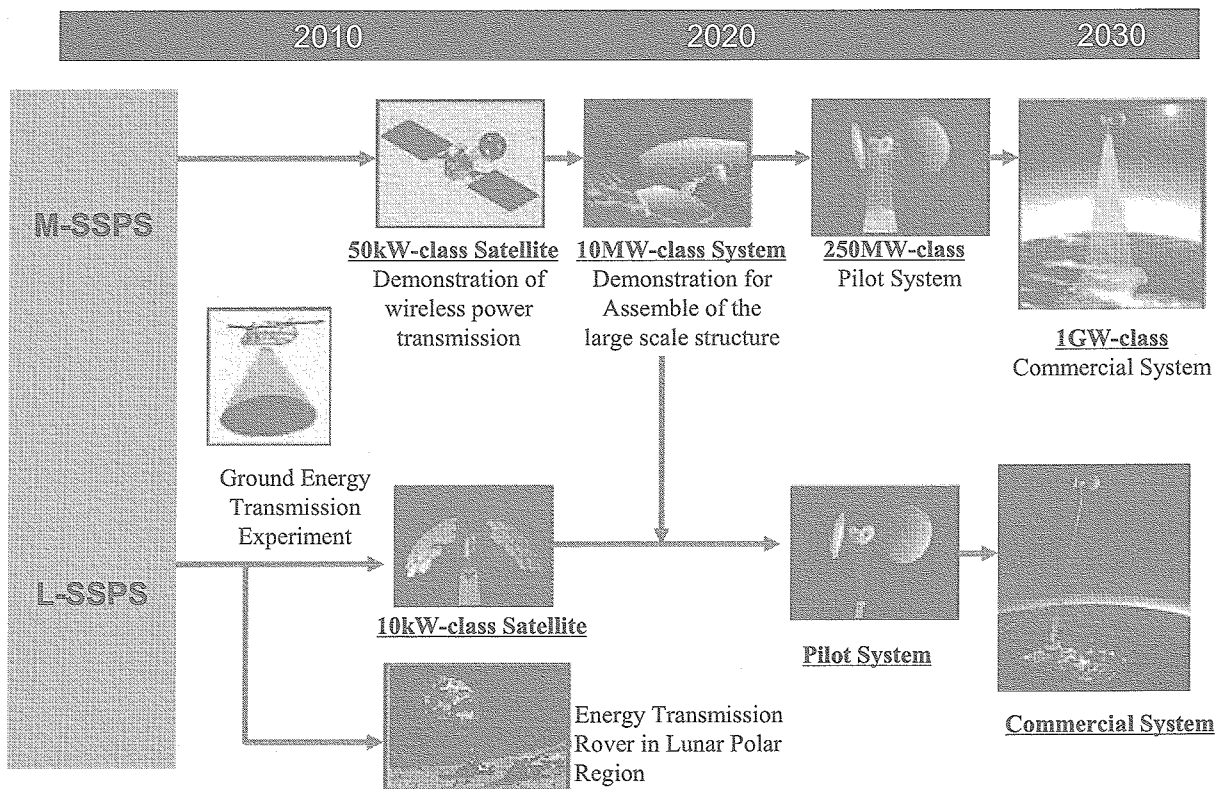


Fig.1 SSPS Roadmap of JAXA

### (2) M-SSPS の実現性の検討

M-SSPS に関しては、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。数年前までは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中心として検討を行ってきたが、発電部からの発熱を適切に排熱して発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ため、平成 16 年度より発送電部を分離した方式を中心に検討を行っている。Fig.2 に 2004 年型 / 2005 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発送電部の上下（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、波長選択膜等の使用により、不要な熱入力をカットすることができれば、さらに集光倍率を高めることができる可能性はある。
- ④ 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配電系が必要となるが、10kV 送電の場合、損失 5~6%、電力ケーブル重量 500ton 程度に抑えることが可能である。ケーブル絶縁被覆の高耐圧化と軽量が技術課題である。

今後は、本モデルの課題を見直し、これを改良・発展させる形で検討を継続する予定である。

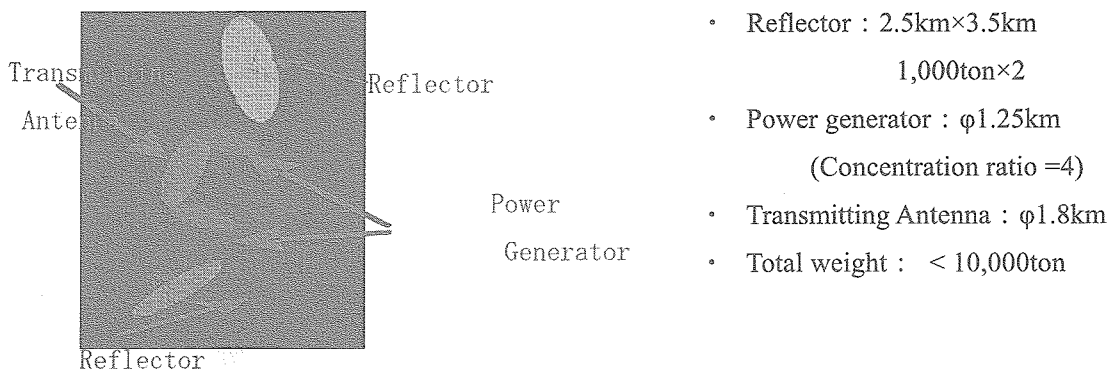


Fig.2 Microwave based SSPS (2004 / 2005 M-SSPS Reference model)

### (3) レーザー方式 SSPS の実現性検討

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。(Fig.3) 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 $\mu$ m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。近年、Cr<sup>3+</sup>をドープしたNd : YAGセラミックが開発されており、短い吸収長で高効率なレーザー発振が可能である。Cr<sup>3+</sup>ドープNd : YAGセラミックはSSPSに有望なレーザー媒質であると考えられる。

また、レーザー方式としては、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を行った。これらの成果を踏まえて、平成 18 年度はCr<sup>3+</sup>ドープNd : YAGセラミックを媒質としたアクティブミラー型のレーザー装置に関して検討を深める予定である。

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。(Fig.3) 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、軌道制御 (太陽輻射圧により離心率が変化するのを防止) 及び姿勢制御 (重力傾斜トルクのキャンセル) を電気推進 (比推力 3000 秒を仮定) で行うものとし、必要な燃料量を求めたところ、年間で約 18.7 トン (大半が姿勢制御用) であり、L-SSPS の全質量 (5000 トン : 目標) に比べて十分に小さい値となっていることが明らかとなった。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を選択になるが、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。

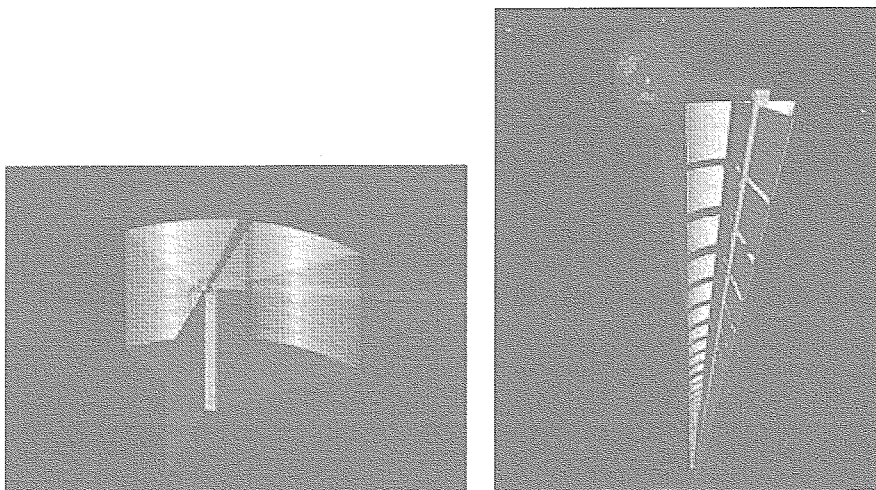


Fig.3 Laser based SSPS (Left: one base unit/Right:1GW-class)

#### (4) コストモデルによる経済性評価

SSPSの実現性を検討する上では、システムの技術的成立性と同様に経済的成立性を十分に確認する必要がある。具体的には、2030年頃に他のエネルギー供給システムと競争し得るコストで電力供給が行える必要があり、発電コスト8円/kWh以下を達成することを目標に研究開発を行っている。

JAXAでは、SSPSを建設・運用する上でのコスト構成や、上記の目標値を達成するために今後注力していくべき開発要素等を把握することを目的として、98年にSSPS建設・運用のライフサイクル全体を考慮したコストモデルを作成した。その後、毎年、リファレンスモデルのコンフィグレーションやシナリオの変更を反映させた改修を続け、現在に至っている。平成17年度は、全WGメンバーが本ツールを活用することにより、システム構成パラメータのコストへの感度を知り、WGの検討の際に役立ててもらおうことを目的として、上述のモデルの計算ツールの整備を行った。全WGメンバーが本ツールを使用することにより、モデルで用いている計算式やパラメータ値を専門家の目でチェックしてもらおうことができ、パラメータとして使用している値やコストモデルの精度が高まっていくことが期待される。計算ツールはM-SSPS Evaluation Modelと名づけられ、コスト計算部と環境負荷(CO<sub>2</sub>排出量)計算部とエネルギー収支計算部とで構成される。今後は、WGの全メンバーに活用してもらい、そこからの意見等を反映していくことで、改良を重ね精度を高めていくことが期待される。

#### 4 要素試作試験／地上実験

システム検討と並行して、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。平成17年度は、主に以下に示す要素試作試験を実施した。

- ・ 窒化ガリウム素子の試作
- ・ 電気二重層キャパシタの研究
- ・ 大規模アレーアンテナの研究
- ・ レクテナ素子の研究
- ・ 高電力放電抑制技術の研究
- ・ アクティブ集積アレーアンテナの研究
- ・ 太陽光直接励起型固体レーザーの開発

また、マイクロ波およびレーザーを用いた大出力・長距離エネルギー伝送実験による実用技術としての無線エネルギー伝送技術のデモンストレーションを行い、システムとしての成立性や技術課題の検討を行うことを目的として、平成17年度は地上エネルギー伝送実験のシステム設計、サブシステム設計等を行った。本実験は、平成18年度に装置の製作等

を行い、平成 19 年度からの実験開始を目指しているものである。

## 5 まとめ

本研究では、マイクロ波方式およびレーザー方式 SSPS のシステムコンフィグレーションを提案し、その実現性や技術的課題等の検討を行った。現在は、本検討結果に基づき、2030 年頃に技術的にも経済的にも成立し得る商用化システムを実現させるための課題を掲げ、要素技術開発ロードマップを作成しているところである。

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。また、平成 19 年度以降に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する検討としては、月面極域氷探査ローバーへのエネルギー伝送衛星等に関する検討を継続して実施する予定である。

## 参考文献

- [1] M.Mori, T.Fujita, Y.Saito, “SUMMARY OF STUDIES ON SPACE SOLAR POWER SYSTEMS OF JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA)”, 25<sup>th</sup> International Symposium on Space Technology and Science, 2006-r-1-03, (2006)
- [2] 齊藤由佳, 香河英史, 森雅裕, ”JAXA における宇宙太陽光利用システム研究概要”, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会講演集(2005)
- [3] 藤田辰人, 森雅裕ほか, ”JAXA における宇宙太陽発電システム (SSPS) の研究の現状”, 電子情報通信学会信学技法, SPS2005-24, 平成 18 年 4 月