

Overview of Studies on Space Solar Power Systems (SSPS) of Japan Aerospace Exploration Agency*

Hiroaki Suzuki¹, Tatsuhito Fujita¹, Masahiro Mori¹ and Masayuki Niino²

¹Advanced Mission Research Center, Institute of Aerospace Technology, Japan Aerospace Exploration Agency,
7-44-1 Jindaiji Higashimahi, Chofu, Tokyo 182-8522, Japan

²Foundation for Promotion of Japanese Aerospace Technology
1-16-6 Izumi-chuo, Izumi-ku, Sendai, Miyagi 981-3133, Japan

In the near future, energy and environmental problems will worsen by global warming and decrease of fossil fuels. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) has studied Space Solar Power Systems (SSPS) using laser and microwave beams for years since 1998. In this system, the space solar energy is converted into other optical energies in the geostationary orbit, and optical energies are transmitted to the earth without depending day and night. Therefore, this system is expected as a means to solve energy and environmental problems in the future.

We have examined two methods of laser based SSPS (L-SSPS) and microwave based SSPS (M-SSPS) in this system. We plan the laser energy transmission of 1GW to the earth. For the L-SSPS, solar condenser mirrors are put into the orbit and concentrates the solar energy. The concentrated solar energy is supplied to laser amplifiers. The low energy seed laser beam is amplified with the direct solar pumping solid-state laser diode, and then the amplified laser beam is transmitted to the earth. The waste heat of laser generator is radiated into the space with radiators. Moreover, hydrogen is produced by using the photocatalytic hydrogen generation system or the electrolytic system of water in the earth-based equipment. Also the electric source of electrolytic system is supplied from the photovoltaic device converting laser beam into electricity. In case of M-SSPS, the solar energy collected with the primary mirror is converted into electricity with the solar cell and then the electricity is converted into the microwave beam with the semiconductor device. The rectifying antenna on the ground collects the transmitted microwave beams and converts it into electricity. The electricity is supplied to commercial power grids.

In current research of L-SSPS, we have researched some elemental technologies such as the laser generator based on the direct solar pumping solid-state laser diode, the transmittal properties of high energy laser beam, the film mirror used for the solar condenser mirror, the space heat radiation technology, the high-efficiency photovoltaic device converting laser energy into electricity and the photocatalytic hydrogen generation system.

In the laser generator, an active mirror system is chosen as the laser amplification method, and Nd/Cr-YAG ceramics are chosen as a material. Because, the heat radiation of active mirror method is easier than that of other methods as the rod or the fiber, and the Nd/Cr-YAG ceramic can efficiently amplify the laser beam of 1064 nm compared with other materials. Therefore, a high-efficiency laser generator is expected.

In the research of photocatalytic hydrogen generation using the L-SSPS, we assume the directly hydrogen generation from the seawater to be an end goal. However, the search of this material is very difficult. Then the hydrogen generation at the sulfur circulation from the hydrogen sulfide by the laser beam of 1064 nm is researched.

*Presented at the 10th SPS Symposium, 2-3 August, 2007

JAXA における宇宙太陽光利用システム (SSPS) 開発の現状*

鈴木 拓明、藤田 辰人、森 雅裕

(独) 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
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

新野 正之

(財) 航空宇宙技術振興財団

〒981-3133 宮城県仙台市泉区泉中央 1-16-6

1. はじめに

近年、化石燃料の枯渇、温室効果ガス増加による地球温暖化などのエネルギー・環境問題が深刻化している。宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、エネルギー・環境問題を解決する手段として、太陽光エネルギーを宇宙空間で収集し、地球にエネルギー伝送し、地上で電力利用、水素製造などを行う宇宙太陽光利用システム (SSPS: Space Solar Power Systems) の研究開発を進めている^[1,2]。SSPSは宇宙空間で太陽光エネルギーを収集し、地球にエネルギーを伝送するため、昼夜天候に関係無く安定した量の太陽光エネルギーを得ることができ、地上では電力利用、水素製造が可能である。

エネルギーを伝送する方法は、太陽光エネルギーをマイクロ波に変換し地球に伝送するマイクロ波方式 SSPS (M-SSPS) とレーザー光に変換し伝送するレーザー方式 SSPS (L-SSPS) の2つを選択し、システム総合研究として、システムコンセプト、技術課題、実証シナリオ、経済性、安全性などの検討を行っている。また SSPS の研究開発においては、キーテクノロジーである太陽光集光技術、熱制御技術、フェーズドアレイ技術、レーザー増幅・発振技術、レーザー/光電変換技術、光触媒水素製造技術、大型構造物組立技術などを中心に、要素技術研究、地上実証実験を進めている。

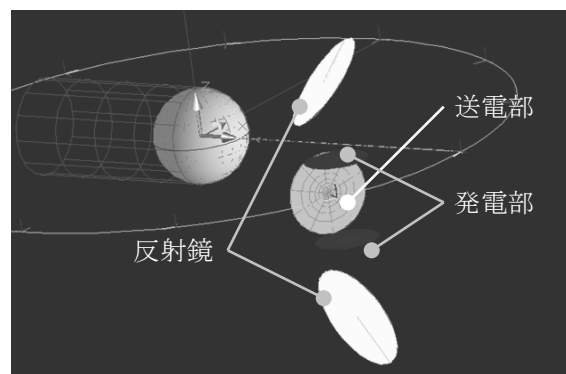
本論文では、JAXA が検討している SSPS 基準モデル及び要素技術研究の現状について紹介する。

2. SSPS について

SSPS は高度 36,000km の静止軌道上において、太陽光エネルギーを収集し、マイクロ波やレーザーに変換し、地球にエネルギー伝送する宇宙機システムと伝送されたエネルギーを電力や水素に変換する地上利用システムより構成される。また商用発電システムにおける伝送エネルギー量は 1GW 級、発電コストは 8円/kWh、商用化は 2030 年を目標としている。

2.1. M-SSPS の検討

M-SSPS のエネルギーフローは以下の順序である。初めに反射鏡により太陽光を太陽電池部に照射し、電力に変換する。次にその電力をマイクロ波に変換し、地球にエネルギー伝送する。地上では伝送されたマイクロ波エネルギーをレクテナにより電力に再変換し、商用電源網への電力供給、水 (海水) の電気分解による水素製造を行う。図 1 に M-SSPS 基準モデル及びシステム概要を示す。M-SSPS の現状モデルは、反射鏡 2 枚、発電部 (太陽電池) 2 枚、送電部



システム概要

- 送電出力 (地上) : 1GW
- 送電周波数 : 5.8GHz
- 反射鏡 : 長径 3.5km×短径 2.5km×2 枚
- 発電部 (太陽電池) : φ1.25km×2 枚
(集光率 4 倍を想定)
- 送電部 (アンテナ) : φ1.8km
- 総重量 : 10,000ton 以下

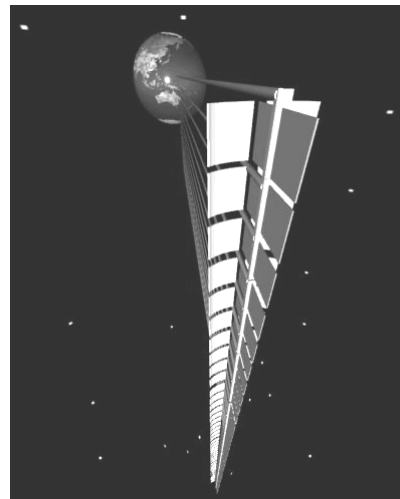
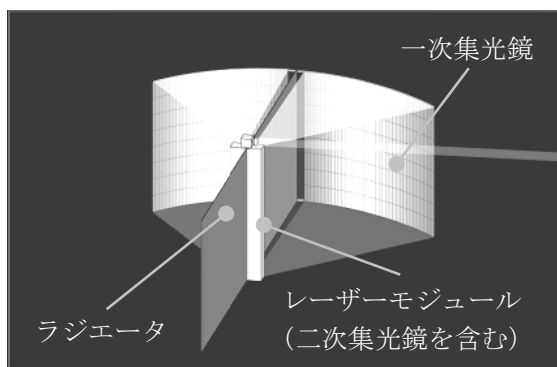
図 1 M-SSPS 基準モデル (上)、システム概要 (下)

*第 10 回 SPS シンポジウム, 東京大学, 2007 年 8 月 2, 3 日開催

より構成され、反射鏡は発送電部から分離した配置、発送電部は発電部・送電部裏面からの放熱及び電力供給用ケーブルの長さ・重量を考慮してコの字状の配置になっている。また M-SSPS の宇宙機システムは 1 機で 1GW 級のエネルギー伝送を想定している。

2.2. L-SSPS の検討

L-SSPS のエネルギーフローは以下の順序である。初めに一次集光鏡により太陽光を集光し、二次集光鏡によりレーザー増幅に必要な波長域と不必要な波長域に分離する。ここで二次集光鏡は主に波長選択膜より構成され、またレーザー増幅に不必要な波長域は、温度上昇によるレーザー増幅器の性能低下を防ぐため宇宙空間に放射される。次に波長分離された集光太陽光を用いて種レーザー光を増幅し、地球にエネルギー伝送する。地上では伝送されたレーザーエネルギーを電力や水素に変換する。商用電源網への電力供給はレーザー／光電変換システムから行い、水素製造は前述の電力による水（海水）の電気分解または光触媒による海水からの直接水素製造により行うことを想定、検討している。図 2 に L-SSPS 基準モデル（単位・全体システム）及びシステム概要を示す。全体システムは 100 機の単位システムより構成され、単位システムは一次集光鏡 2 枚、ラジエータ 2 枚、レーザーモジュールより構成される。またレーザーモジュールは二次集光鏡、種レーザー発振部、レーザー増幅部、送光部、制御部、発電部などを含んでいる。



L-SSPS システム概要

①単位システム

- ・レーザー出力：10MW
- ・レーザー波長：1.06 μ m
- ・一次集光鏡：縦 100～120m×横 200m×2 枚
- ・ラジエータ：縦 100～120m×横 100m×2 枚
- ・レーザーモジュール：縦 100m
- ・総重量：50ton 以下

②全体システム

- ・レーザー出力：10MW×100 機=1GW
- ・レーザー波長：1.06 μ m
- ・システムサイズ：400m（集光鏡方向）
200m（ラジエータ方向）
10～12km（接続方向）
- ・総重量：50ton 以下×100 機=5,000ton 以下

図 2 L-SSPS 基準モデル（単位システム（左上）、全体システム（右上）、システム概要（下）

3. L-SSPS の要素技術研究

現在、L-SSPS の要素技術研究では、太陽光集光技術として超軽量フィルムミラーの研究、レーザー発振・伝送技術として太陽光直接励起型レーザーの研究、レーザー地上伝送実験、レーザーエネルギーのエネルギー変換技術としてレーザー／光電変換素子の研究、レーザー／光触媒水素製造の研究、宇宙放熱技術を中心に研究開発を行っている。

3. 1. 太陽光直接励起型レーザーの研究^[3,4]

レーザー増幅・発振技術では、アクティブミラー方式による太陽光直接励起型レーザーを第一候補として採用している。アクティブミラー方式太陽光直接励起型レーザーとは、複数枚のレーザー媒質に太陽光を照射し、そのレーザー媒質に種レーザー光を通過させることによりレーザー光を増幅させ、レーザー発振を行うものである。本方式はレーザー媒質を薄くできるため、レーザー増幅・発振装置を軽量化でき、更に冷却の問題も解決できる。現在は（財）レーザー技術総合研究所、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心の協力を受け、擬似太陽光を光源とした太陽光直接励起型レーザーによる増幅・発振実験、Nd/Cr-YAG セラミックレーザー媒質材料の最適化を中心に研究開発を進めている。

3. 2. レーザー／光電変換素子の研究

レーザー／光電変換技術では、L-SSPSのレーザー波長である 1.06 μm に対して高い光電変換効率を持つ材料の探索及び大出力レーザー受電方法の把握・検討を中心に研究開発を進めている。前者の材料探索では、バンドギャップが 1.16eV付近の材料として $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 系、 $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ 系、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ 系を中心に材料調査を行っている。後者の受電方法の把握・検討は、現在JAXA角田宇宙センターで設置準備を進めているレーザーエネルギー地上伝送実験施設により実施予定である。本設備は、最大レーザー出力 800W、伝送距離 500mの地上伝送実験が可能である。

3. 3. レーザー／光触媒水素製造の研究^[5]

L-SSPSでは、地上利用システムにおける水素製造方法として、レーザーを電力に変換後水（海水）の電気分解により水素を製造する方法と水（海水）にレーザー光を照射し、光触媒材料を介して直接水素を製造する方法の 2 つについて検討・研究を行っている。前者の電気分解方式は、前段階のレーザー／光電変換素子の研究が中心となっている。後者の光触媒方式では、高効率に水から直接水素製造を行うことができる光触媒材料が見つかっていないため、レーザー光（ $\lambda=1.06\mu\text{m}$ ）照射による硫化水素からの水素製造が中心となっている。硫化水素からの水素製造の研究では、光触媒材料として $\text{Cd}_{1-x}\text{Cu}_x\text{S}$ を用いている。この材料系は、 $x=0$ では波長 500nm付近でしか水素製造を行えないが、Cuをドーピングすることでバンドギャップを小さくできるため対応波長の長波長化が可能となる。更に光触媒材料の構造をストラティファイド構造（ナノサイズの中空カプセル構造）にすることにより、光吸収効率を向上させている。本研究は東北大学環境科学研究科田路研究室の協力を受け進めている。

4. 今後の進め方

SSPS のシステム総合研究では、引き続きシステムコンセプト、技術課題、実証シナリオ、経済性、安全性などの検討を実施する。L-SSPS の要素技術研究では、引き続き太陽光集光技術として超軽量フィルムミラーの研究、レーザー発振・伝送技術として太陽光直接励起型レーザーの研究、レーザー地上伝送実験、レーザーエネルギーのエネルギー変換技術としてレーザー／光電変換素子の研究、レーザー／光触媒水素製造の研究、宇宙放熱技術を中心に研究開発を進める。

参考文献

- [1] Y. Saito, T. Fujita and M. Mori, 57th International Astronautical Congress, IAC-06-C3.1.04, (2006)
- [2] T. Fujita, M. Mori, Y. Hisada and Y. Saito, 57th International Astronautical Congress, IAC-06-C3. 3.08, (2006)
- [3] T. Saiki, K. Imasaki, S. Motokoshi, C. Yamanaka, H. Fujita, M. Nakatsuka and Y. Izawa, Opt. Comm., 268 (2006) 155-159
- [4] T. Saiki, S. Motokoshi, K. Imasaki, H. Fujita, M. Nakatsuka and C. Yamanaka, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.46 (2007) 156-160
- [5] 田路 和幸, 伝熱, Vol.44 (2005) 15-24