

# SSPS（宇宙太陽光発電システム）の新たなロードマップ構築 と早期実現ミッション案

○後藤 大亮、上土井 大助、牧野 克省、藤田 辰人、吉田 裕之、大橋 一夫（JAXA）

SSPS new roadmap with the social contribution idea of the SSPS technology

Daisuke Goto, Daisuke Joudoi, Katsumi Makino, Tatsuhito Fujita, Hiroyuki Yoshida,  
Kazuo Ohashi (JAXA)

## Abstract

The idea of Space Solar Power Systems (SSPS) was conceived by Dr. Peter Glaser in 1960's, and R&D activities have been continued mainly in US, Europe and Japan. Japanese activities started in 1980's. The universities and the Space Agencies have spent its resources for SSPS. For example, the researchers in ISAS (Institute of Space and Astronautical Science) conducted their own conceptual study, known as SPS2000. JAXA conducted the 1GW ground output microwave SSPS concept study in 2000's, and also USEF conducted the 1GW microwave SSPS concept study. JAXA and Japan Space Systems conducted the joint demonstration of ground wireless power transmission in 2015. However, there are still many hurdles of technological, social and economic issues. It is difficult to predict when the SSPS is realized.

The development scenarios of SSPS which were built in the past, don't obtain the persuasiveness to governmental bureaucrats or engineers of space sectors.

JAXA started the two committees for building a new scenarios or roadmaps of SSPS. One of the committees is the committee on SSPS Business Implementation, which members are an executive of the private company, social scientists, a journalist, and a venture capitalist. The other committee is the committee on SSPS System Engineering, which members are an senior engineers on private companies on space sectors as well as other technology areas. The new scenario will be built by March, 2016.

The argument points of the two committee are described in this paper.

## 1. はじめに

宇宙太陽光発電システム（SSPS）は、宇宙空間に大規模な太陽光発電装置を配置し、マイクロ波又はレーザーにより地上に送電して、電力として利用するシステムであり、1960年代に Dr. Peter Glaser（米国）が提唱<sup>[1]</sup>してから、主に米・欧・日で研究開発が進められてきた。日本では、1980年代より、20年以上にわたり大学や研究機関で研究が進められてきた。

これまでの国内の主な成果のうち、とりまとめられた概念設計の例として、1990年代に宇宙科学研究所の研究者がとりまとめた SPS2000、2000年代に JAXA がとりまとめた 100 万 kW 級マイクロ波 SSPS、同じく 2000 年代に USEF（財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構、現 J-spacesystems：一般財団法人 宇宙システム開発利用推進機構）がとりまとめた、同じく 100 万 kW 級のマイクロ波 SSPS 等がある。

また、技術開発の例として、2015 年に行われた J-spacesystems と JAXA の連携による距離 55m のマイクロ波無線エネルギー伝送の地上実験などがある。

しかし、Glaser による最初の着想から 50 年近く、国内の研究開発開始から 30 年が経過したにも関わらず、未だ SSPS 実現の目処は立っていない。また、過去に作成された研究開発ロードマップについても、広く理解と支持が得られているとは言えない状況である。

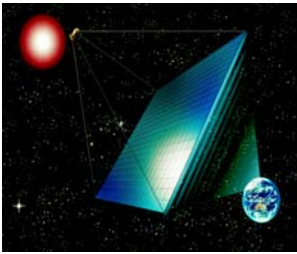
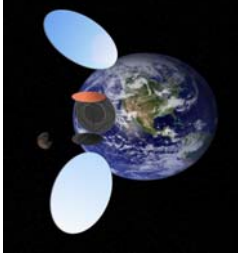
JAXA は、SSPS の研究開発を適切に推進するためには、これまでの進め方を見直し、新たなロードマップを作成する必要があると考え、2013 年度から SSPS 事業性検討委員会、これに加えて 2014 年度から SSPS システム検討委員会という外部有識者による 2 委員会体制を構築し、ロードマップの検討を進めてきた。本発表ではその概要と検討の状況について解説する。

## 2. これまでの実用 SSPS 構想

表 1 に、国内でとりまとめられたマイクロ波 SSPS の例を示す。36000km（静止軌道の場合）を越える距離のマイクロ波無線エネルギー伝送を実現するため、高精度のビーム方向制御能力、地上の受電アンテナ面積、そして軌道上の送電アンテナ面積を考慮に入れつつシステム設計を行うと、宇宙機の規模は km オーダーとなる。そのため、必然的に送電電力も巨大となり、結果として地上の受電電力は 100 万 kW 級である。現時点での宇宙機の質量の見積もりは 1 万トンもしくはそれを越えるため、宇宙輸送コストの大幅な削減、かつ、大量の輸送を実現する必要がある。

なお、レーザーによる無線エネルギー伝送を用いた SSPS の構想は検討途上である。

表 1 実用 SSPS 構想の例

 <p>軌道：静止軌道（高度3万6000km 赤道上）</p> <p>パネル寸法：2.5km × 2.375km × 0.02m 全重量：26600ton 地上レクテナ寸法：3.5km × 4.0km （周囲2kmに緩衝地帯を設ける）</p> <p>太陽光入射エネルギー：8GW 発電電力：2.75GW（効率35%） マイクロ波送電電力：1.40GW 交流出力：1.00GW（おおよそ原発1機分） 再使用型輸送系要求（低軌道）：貨物重量 45ton 打ち上げ頻度 3.1回/日 必要機体数 16機 打ち上げコスト 1700万円/ton</p> <p>建設期間：1年 建設コスト：1兆2716億円（目標） 稼働期間：40年 メンテナンスコスト：年あたり建設コストの3% 売電価格：15円/kWh 累積資金収支：建設後29年で黒字化</p>	 <p>軌道：静止軌道（高度3万6000km 赤道上）</p> <p>反射鏡寸法：2.5km × 3.5km 発電部寸法：Φ1.25km 送電部寸法：Φ1.8km 全重量：10000ton 地上レクテナ寸法：Φ2.45km 太陽光入射エネルギー：11.71GW（反射鏡使用） 発電電力：2.03GW（効率17%） マイクロ波送電電力：1.40GW 交流出力：1.00GW（おおよそ原発1機分） 再使用型輸送系要求（低軌道）：貨物重量 50ton 打ち上げ頻度 0.84回/日 必要機体数 7機 打ち上げコスト 1700万円/ton</p> <p>建設期間：1年 建設コスト：1兆2000億円（目標） 稼働期間：40年 メンテナンスコスト：年あたり建設コストの3% 発電コスト：8円/kWh</p>
<p>100 万 kW マイクロ波 SSPS 構想（J-SpaceSystems）</p>	<p>100 万 kW マイクロ波 SSPS 構想（JAXA）</p>

### 3. 宇宙基本計画の推移

2008年に成立した宇宙基本法に基づき、2009年から、国の宇宙開発の基本方針を定める宇宙基本計画が、政府（宇宙開発戦略本部）によってとりまとめられている。表2に、おおよそ2年おきに改訂されてきたそれぞれの宇宙基本計画について、SSPSが記述されている部分を抜き出したものを示す。<sup>[2]</sup> 改訂を経るたびに、記述の具体性が下がってきており、SSPSの研究開発に対する政府の姿勢は低下しつつあると見ることができる。

表2 宇宙基本計画の推移（SSPS記述部分）

旧々宇宙基本計画 (平成21年6月決定)	旧宇宙基本計画 (平成25年1月決定)	現行宇宙基本計画 (平成27年1月決定)
実現に必要な技術の研究開発を進め、地上における再生可能エネルギー開発の進捗とも比較しつつ、 <u>10年程度を目途に実用化に向けた見通しをつける</u> ことを目標	<u>「将来の宇宙開発利用の可能性を追求する3つのプログラム」の一つとして、</u> 「宇宙太陽光発電研究開発プログラム」を位置づけ	(2) 具体的取組 ② 個別プロジェクトを支える産業基盤・科学技術基盤の強化策 iii) 将来の宇宙利用の拡大を見据えた取組 の中に語句記載
関係機関が連携し、 <u>総合的な観点からシステム検討を実施</u> する。並行して、 <u>エネルギー伝送技術について地上技術実証を進める</u> 。	宇宙太陽光発電システムについては、我が国のエネルギー需給見通しや将来の新エネルギー開発の必要性に鑑み、 <u>無線による送電技術等を中心に研究を着実に進める</u> 。	<u>エネルギー、気候変動、環境等の人類が直面する地球規模課題の解決の可能性を秘めた「宇宙太陽光発電」を始め、</u> ・・・ (中略)・・・に関する <u>研究を推進する</u> 。
その結果を踏まえ、十分な検討を行い、 <u>3年程度を目途に、大気圏での影響やシステム的な確認を行うため、「きぼう」や小型衛星を活用した軌道上実証に着手する</u> 。	<u>宇宙空間での実証に関しては、その費用対効果も含めて実施に向けて検討する</u> 。	※宇宙実証に関する記述なし

### 4. SSPSに対する問題意識

これまでに述べたような状況の原因として、SSPSの特徴、過去のSSPSの研究開発、そして今後の見通し等から、宇宙開発の専門家及び政府関係者などには、下記のように捉えられ、懐疑的意見を抱かれていると考えられる。

#### ○エネルギー源としてのSSPSの特徴

- 低CO2排出である（放射性廃棄物もない）
- 電源として安定している（再生可能エネルギーにありがちな制御不能な変動がない）
- 海外への依存度が低い（自在性が高い）
- 地上と隔離している（宇宙からのエネルギーである）
- 無線による送電（送電先の即時切り替えが可能）

※これらの特徴から、「夢の電源」のように扱われることが多い。

#### ○人類未到の宇宙技術としてのSSPSの特徴

- 宇宙への低コスト大規模輸送技術が必要
- 大規模・大出力の（宇宙での）無線送電技術が必要
- 宇宙用の太陽電池の大量生産が必要
- 巨大宇宙構造物の低コスト建造・維持技術が必要

※これらの特徴から、「人類の宇宙進出、未来技術のシンボリック的存在」のように扱われることが多い。

## ○懐疑的意見

- 輸送系を含めた、技術的実現可能性（コスト面を含む）に対する確度が明らかになっていない。
- 期待値（得られる効果×実現可能性）、もしくは費用対効果が低いのではないか。
- 切迫性が低いのではないか。
- 国民、政治家等に対して、都合の良い説明をしていないか。

このような状況のもとで、JAXAはSSPSの研究開発を推進するにあたり、国民に対しさらなる説明責任を果たす必要があると認識し、以下の考えをもとに外部有識者委員会を設置<sup>[3]</sup>した。

- ①無線エネルギー伝送技術等のSSPS要素技術について、「早期に社会に還元できる技術」として、産業界等からも認知される状況を作る。
- ②「SSPSは将来的には有望な商用電源」であると広く認知してもらえるような技術開発シナリオ、ロードマップを作成することで、SSPSの研究開発が社会的に支持を受けるような状況を作る。

## 5. 委員会体制

図1に委員会の体制を示す。事業性検討委員会は、主に、事業、経営、経済等の社会科学の観点から、ユーザー、ニーズの視点に立って議論を行うことを重視しており、いわゆる宇宙開発関係者ではない方から6名に参加いただいている。システム検討委員会は、技術に重点を置き、宇宙機システムおよび地上技術の産業界経験者を中心に6名に参加いただいている。

2015年3月末の時点で、事業性検討委員会を8回、システム検討委員会を2回開催した。JAXAは委員会事務局として、議論のベースとなる資料の作成とその説明者として参加している。ロードマップ、シナリオ一次案の完成は2015年度内を予定している。

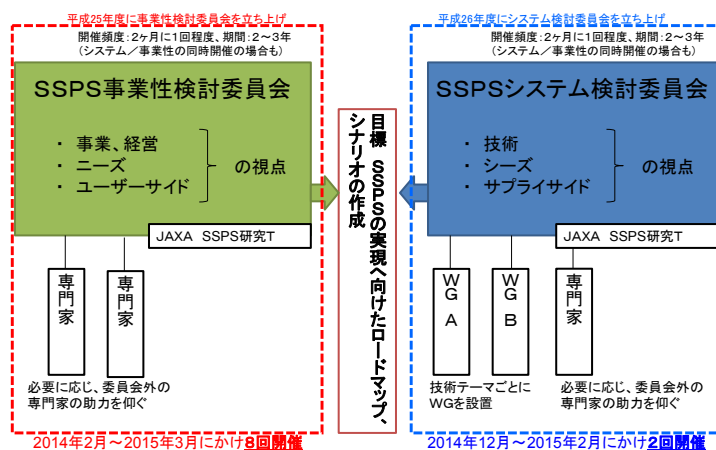


図1 SSPS委員会体制図

## 6. 早期実現ミッション

過去のSSPSの研究開発ロードマップでは、経済的に成立する将来のSSPSミッションを想定し、システムの概念設計を行い、必要となる技術要素を識別し、JAXAが行うべき研究開発領域を特定して軌道上実証を含めた研究開発のシナリオを作成してきた。

いわゆる「正統的な研究開発シナリオの作成手法」と言えるが、この進め方をSSPSに適用するには、下記のような問題点がある。

- ▶ 輸送コストを現状の数十分の一まで削減し、かつ大規模輸送が可能な宇宙輸送システムが実現するまでに少なくとも数十年以上の期間が見込まれるのに対し、それまでに生じる社会システム（国際情勢、経済を含む）の変化を見通すことは現実的に不可能なため、必要な技術が揃う将来のタイミングにおいて経済的に SSPS が成立するか、他技術の発展により陳腐化しないかどうかの見通しが見つからないまま、研究開発を継続すること。
- ▶ 数十年先までには、地上技術、宇宙技術に、様々な革新が生じると想定されるのに対し、現時点の既存の保有技術、アイデアをもとにシステムの概念設計を行うこと。
- ▶ 研究開発を継続し、多額の費用を要する軌道上実証を経て実現に至るシナリオの場合、最終形態の SSPS の実現まで、数十年に渡り、研究開発成果を社会に還元する機会が得られないこと。

これらの問題点の認識をもとに、新しいロードマップには、早期実現ミッションを経ることで先へ進むという考え方を取り入れる方向で委員会での議論が進んでいる。

この考え方では、将来を想定した SSPS のシステム設計やそれに基づく研究開発テーマの絞り込みは必ずしも必要としない。過去に検討された SSPS の概念設計結果を参考に、必要な技術を「無線エネルギー伝送技術」程度の大枠で捉え、それらの技術が、現時点では SSPS に直接関係しなくても、社会課題の解決に貢献する（社会実装する）複数の応用段階を経ることで当該技術分野の進歩に貢献し、ひいては SSPS の実現に貢献していくというものである。

この考え方には以下のような特徴がある。

- ▶ 社会実装を経ながら前へ進むことで、民間企業等、国以外の投資を促進できる。また、関連する技術分野の研究者、技術者の層の厚みを増し、投資家の注目を集めることでイノベーションを促進する効果を期待できる。
- ▶ 複数の適切な段階を設定することで、短期と中長期の両方の研究開発を指向することができる。
- ▶ 社会や経済の変化、新たな革新的技術の登場等の状況に柔軟に対応できる。
- ▶ 数十年先が想定される SSPS の実現と比較して、かなり早期の段階で、研究開発成果を社会に貢献することができる。国費の投入に対して説明責任を果たせる。

一方、通常の技術開発、研究開発と異なるアプローチとなるため、その意図するところをステークホルダーに正確に理解してもらうために、今後も様々な機会を捉えて、議論・説明を行っていく必要があると考えている。

本発表時点で、委員会が識別した早期実現ミッション（踊り場成果）の候補として、①回転翼型無人機（マルチコプター）へのエネルギー伝送、②月面探査ローバーへのエネルギー伝送がある。それらの技術検討を進めているところであるが、本資料での説明は割愛する。また、この2つに限らず、さらに多くの候補を設定するべく検討を進めていく。

## 参考文献

- [1] P.E.Glaser, “Power from the Sun: Its Future”, Science, vol.162, pp.857-866,1968.
- [2] 「宇宙基本計画」平成27年1月 宇宙開発戦略本部決定
- [3] 後藤大亮他, “2M01 宇宙太陽光発電システムの開発シナリオ”, 第47回宇宙科学技術連合講演会