

SSPS 研究開発シナリオ（初版）の紹介† R&D Scenarios of Space Solar Power Systems

後藤 大亮*1‡
Daisuke GOTO

宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、SSPS 事業化及び開発のシナリオを議論するため、SSPS 事業性検討委員会、SSPS システム検討委員会という、2つの外部諮問委員会を開催してきた。このたび、両委員会での議論を通じて、SSPS 中核技術を社会実装（踊り場成果）しながら、社会的なコンセンサスを積み重ね、研究開発を前へ進めるという考え方に基づく「SSPS 研究開発シナリオ 初版」がとりまとめられたので、その内容を紹介する。

JAXA has run the two committees with the outside member, the SSPS Economic Feasibility Committee and SSPS Technical Committee, and managed the discussion about how to promote the SSPS R&D activities which needs long and uncertain investments. Two committees concluded that practical applications of SSPS technologies have to be pursuit and the consensus of investment into SSPS technologies have to be kept. The whole discussion was concluded in “R&D Scenarios of Space Solar Power Systems”, and the outline is described in this paper.

Keywords : Economic feasibility, Investment

1. はじめに

SSPS (Space Solar Power Systems : 宇宙太陽光発電システム) は、1960 年代に Peter.Glaser 博士が提唱してからおよそ 50 年、日本国内で研究開発がスタートしてから 30 年近くが経過しているが、未だ実現の目処がたっていない^{1,2)}。

JAXA では、SSPS の実現へ向け、SSPS 研究開発の方向性を議論するため、JAXA 研究開発部門長の外部諮問委員会として、SSPS 事業性検討委員会、SSPS システム検討委員会という 2 委員会体制を構築し議論を継続してきた^{3~8)}。議論の結果は「SSPS 研究開発シナリオ（初版）」という、JAXA 研究開発部門長への答申文書として、2016 年 11 月にとりまとめられた。

本発表では、SSPS 研究開発シナリオ（初版）の概要を解説する。

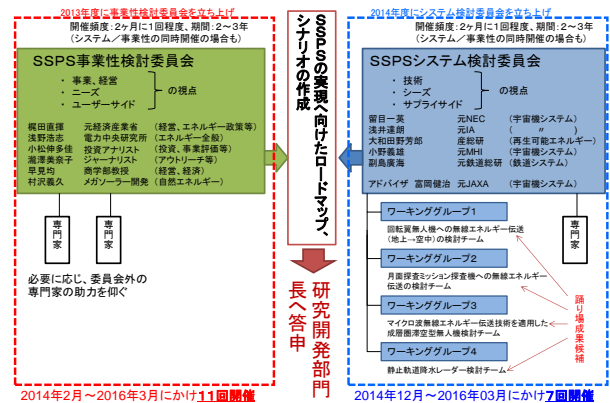
2. 外部有識者委員会

第 1 図に 2 つの委員会からなる SSPS 研究推進体制を示す。SSPS のシナリオ、ロードマップを検討するにあたり、①社会的・経済的な観点、②技術的な観点、の 2 つの観点からの検討が必要と考えた。

特に①の議論では、従来の SSPS 研究開発関係者及び宇宙開発関係者の視点や価値観を離れた目で SSPS の事業性

を客観的に検討する必要があると考え、宇宙開発利用/SSPS の技術系バックグラウンドを持たない方に参加いただき、SSPS 事業性検討委員会を 2013 年度の後半から 11 回開催してきた。②の観点の議論は、幅広い技術分野にまたがるシステム開発および運用、維持、管理の経験を保有する宇宙開発利用分野、鉄道システム分野、それに加えて再生可能エネルギー分野の方に参加いただき、SSPS システム検討委員会を 2014 年度の後半から 7 回開催してきた。それらのうち 2 回は合同委員会として開催し、それ以外の回でも、両委員会メンバーは、互いの委員会に相互乗り入れできる形で運営し、両委員会間でのコミュニケーションを促進してきた。

また、システム検討委員会の下部組織としてワーキンググループを設置し、無線エネルギー伝送技術等の専門家を交え、より詳細な技術検討を行ってきた。



第 1 図 2 つの委員会からなる SSPS 研究推進体制

† 第 2 回宇宙太陽発電シンポジウム, 2016 年 12 月 19-20 日, 東京にて発表

‡ Corresponding author: Daisuke Goto. E-mail:goto.daisuke@jaxa.jp

*1 宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 SSPS 研究チーム

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1 筑波宇宙センター

©SSPSS

3. 委員会で議論された SSPS の課題

SSPS の実現までに複数の課題が存在していることは、2013年版の宇宙基本計画で、技術、安全性、経済性の観点から以下のように示されている⁹⁾。

- ①技術（大型構造物を宇宙空間に輸送し、組み立て、運用・維持する技術、高効率で安全な発電・送電・受電技術等）
- ②安全性（健康、大気・電離層、航空機、電子機器等への影響）
- ③経済性（特に地上から宇宙への輸送費低減が大きな課題。）

委員会では、これらの課題のさらに上位概念として、以下の課題が SSPS の実現を目指すにあたり、最も本質的であると整理した。

SSPS は、その実現までに必然的に大きなリソース（投資金額）の投入と長期間の研究開発を伴う。長期間に、社会や経済の状況が変化し、SSPS が解決しようとする社会課題が別の手段で解決されてしまうリスクが存在する。莫大な投資金額、それについて回る巨大なステークホルダーの存在、そしてステークホルダーからのコンセンサスが継続できなくなることが本質的な課題である

両委員会では、この本質的な課題を正面から捉え、この課題のもとで、SSPS の研究開発をどう進めるべきかについて議論を行った。その結果、SSPS 中核技術を社会実装しながら、社会的なコンセンサスを積み重ね、研究開発を前へ進めることが必要であるという結論に達し、その内容を SSPS 研究開発シナリオ（初版）という文書にまとめた。

次項からその内容について述べる。

4. SSPS 研究開発シナリオ（初版）の骨子

4.1 社会状況の変化 SSPS を取り巻く、エネルギー・環境、およびそれに関わる社会・経済等の状況が、2010年代以降、大きく変化している。近年、特に変化が著しい諸点について第1表に示す。

第1表 SSPS を取り巻く社会状況の変化

エネルギー、環境に関する状況の変化	<ul style="list-style-type: none"> ●非在来型化石燃料 ●原子力発電 ●二酸化炭素の濃度上昇、気候変動リスク ●地上の再生可能エネルギーのコスト低下と導入量増加 ●系統サポート技術（含：蓄電技術）
日本国内に着目した社会、経済の状況の変化	<ul style="list-style-type: none"> ●国内の発電量、エネルギー消費量頭打ち&減少傾向 ●電力自由化（発送電分離）の実施

4.2 従来の SSPS の意義・価値とその評価 100万 kW のマイクロ波 SSPS 概念設計モデルに代表される従来の SSPS は、現在の大型ダム水力発電所や原子力発電所と同様に、電力会社が保有する大規模発電所として、SSPS から電力供給が行われることが想定されていた。

その後、SSPS の機数を徐々に増やしていき、究極的に

は以下の第2表に示す社会課題の解決（意義・価値）に貢献することが期待されていた^{10,11)}。

なお、想定将来については、30年後に1GW級のSSPS

第2表 従来の SSPS の意義・価値

意義・価値	想定将来
1) 二酸化炭素排出量削減	30～50年後
2) 我が国のエネルギー自給率の向上	30～50年後
3) 枯渇へ向かう化石燃料の代替	30～50年後

初号機が実現し、その後、1)～3)の社会課題に有意に貢献できる軌道上機数まで増加するのに必要な年数を仮に20年とすると、実際に貢献できる時期はおおよそ50年後となる。という考え方である。

しかし、4.1項の第1表に記したとおり、SSPS を取り巻くエネルギー・環境、社会・経済等の様々な状況変化が加速しつつある。たとえば

- 非在来型の化石燃料（シェールガス・オイル）の掘削技術の進歩と化石燃料埋蔵量の大幅な増加
- 再生可能エネルギー技術が急速に進歩（コストが低下）し今後も導入量が増加し続けると予想されること
- 国内の消費エネルギーと電力消費が既に減少傾向にあり、再生可能エネルギーの大量導入と併せむしろ過剰発電が課題となり始めていること
- 電力自由化により送配電網と大規模発電所（SSPS）の両方を巨大な電力会社が保有するという図式が成立しなくなる

等を考慮して再評価すると、第2表の1)～3)の SSPS の意義・価値は、SSPS 研究開発を加速させるだけのリソース投入の根拠とするのは難しくなっていると考えられる。

また、今後の状況変化がさらに激しくなることを想定すると、SSPS の意義・価値を絞らず、短/中期、長期、超長期のタイムスパンでの複数の意義・価値を設定し、状況の変化に応じてそれらの見直しを図りながら、研究開発を柔軟に進めて行くことが重要であると考えられる。これらを考慮し、SSPS の意義・価値を、次項の第3表 4)～6)に示す内容に、新しく整理・検討した。

第3表 SSPS の新たな意義・価値

意義・価値	想定将来
4) 無線エネルギー伝送技術/宇宙技術の発展等への貢献	近々～SSPS 実現まで
5) 地球規模のエネルギー安全保障/電力システム安定化	数十年後
6) 二酸化炭素排出量削減（超長期）	50～100年後

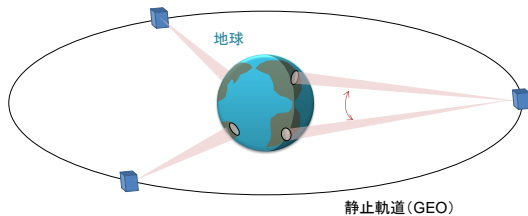
4.3 SSPS の新たな意義・価値 意義・価値の4)について解説する。SSPS を実現するには、従来の宇宙技術の常識を覆し社会の状況を一変するような、革新的な、かつ難

易度の高い技術課題を解決する必要がある。これは、SSPSの実現を目指すことで、様々な無線エネルギー伝送技術、および宇宙技術の発展を促進することが可能となる、と言い換えることができる。

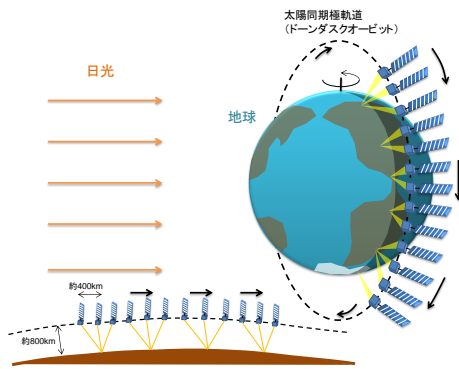
たとえば、SSPS が実現する前の段階で、無線エネルギー伝送技術に関する研究開発成果を、地上の移動体、飛行機、モバイル機器への給電等の様々な用途に有効活用することで、関連産業の発展、および技術の進歩の加速が期待できる。また、宇宙空間の巨大構築物である SSPS は、プラットフォームとして捉えれば、通信、地球観測、有人滞在基地（観光）、宇宙工場、深宇宙への中継基地等、本来用途である発電所以外に、様々な活用ができると考えられる。SSPS の建設に先んじて、あるいは建設と併行してそれらの収益を獲得し、SSPS の売電収入と組み合わせることで SSPS の採算性を向上させることができる。

意義・価値の 5) について解説する。第 2 図に地球規模のエネルギー安全保障や電力システム安定化に貢献する SSPS のアイデアをイメージとして示す。

世界に3機配置(ミニマム)することを狙った SSPS



(a) SSPS アイデアイメージ 1



(b) SSPS アイデアイメージ 2

第 2 図 地球規模のエネルギー安全保障や電力システム安定化に貢献する SSPS のアイデア

イメージ 1 の SSPS のように、軌道上からの無線エネルギー伝送を活かし、電力需給が逼迫している地域や、災害等でエネルギーインフラが破壊された地域等に柔軟に送電先を切り替えることで、世界規模でのエネルギー安全保障に貢献できる可能性がある。また、イメージ 2 は、地上の太陽光発電システムの出力が夕刻に急速に低下し、同時に電力需要が高まるダックカーブ現象¹²⁾が生じる、現地時間夕刻の送電に特化した SSPS である。電力システムの安定化に寄与しつつ、電力需給が逼迫している（高い電力購入単価を期待できる）地域に集中的に送電することで、社会課題を解決しつつ、SSPS 建設費用を早期に償却できる可能性がある。

このように、先に社会実装が進みつつある地上太陽光発電を SSPS の競合技術と捉えて否定せず、それらと共存し、補完し合うことで、双方の導入を促進する方法を模索することが、将来のエネルギー安全保障に貢献する未来を構築するために重要である。

前頁図のイメージ 1、イメージ 2 はアイデアレベルであり、宇宙セグメント/地上セグメントのサイズ、発電規模、宇宙機設計、軌道解析等の精緻なシステム検討は未実施である。これらの SSPS は、従来想定されていたビジネスモデル（電力会社が保有し、自身の送電網に供給しながら建設コストを償却する）とは異なり、グローバルに分散する電力購入者に対し、電力市場で「量り売り」するビジネスモデルおよびそれを可能とするインフラを構築する必要がある。また、技術的な難度も併せて考えると、実現までには少なくとも数十年以上かかると考えられ、その間に必ず生じる社会状況の変化に対して、イメージ 1/イメージ 2 に固執すること無く、柔軟に対応することが重要である。

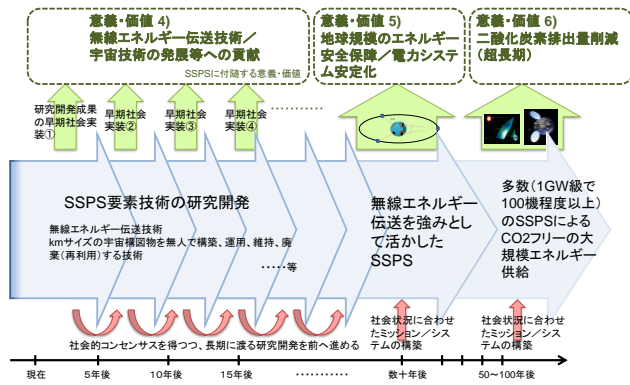
意義・価値の 6) について解説する。二酸化炭素排出量を効果的に削減するためには、原則として、排出削減費用曲線に基づき¹³⁾、削減費用がマイナス、もしくは小さなものから優先して導入していくことが重要である。SSPS は現時点で実現の目処、研究開発に必要な費用の目処、建造費用の目処が立っておらず、排出削減費用曲線を元に、省エネ促進や再生可能エネルギーの導入等のさまざまな方策と比較したり、有効性の多寡について議論することができない。（従来から示されている約 1 兆 2000 億円という金額^{14,15)} は、SSPS 建造コストの目標であって、予想/見込みではないことに注意が必要である。）

しかし、CO₂ を初めとする温室効果ガスの人為的排出は増大し続けており、気候変動のリスクが高まる中で、COP21（2015 年）では今世紀後半の人為起源 CO₂ 排出を実質ゼロを目指すという非常にチャレンジングな目標が採択された¹⁶⁾。

この実現のためには、CO₂ 排出削減費用が相当高価な手段を含め、あらゆる削減手段を総動員する必要があると考えられる。削減手段を使い尽くしてなお、今世紀後半から来世紀にかけて温室効果ガス排出削減の必要に迫られる可能性がある。そのような、50 年～100 年程度を見越した超長期の削減手段の候補の 1 つに、SSPS はなり得る。

なお、超長期的に、省エネ技術や再生可能エネルギー技術、CO₂ 回収・貯蔵技術等に対し、現時点では想定し得ない飛躍的な技術革新が生じ、SSPS を上回る有効な削減手段となっている可能性がある。何らかの社会状況の変化は必ず起きることを念頭におき、状況に応じて検討内容を更新していくことが重要である。

ここに示した意義・価値 4)～6) をもとに、SSPS の研究開発の進め方をイメージとして以下に示す。SSPS の実現のためには、革新的な、かつ難易度の高い技術課題を解決するために長期に渡る研究開発を継続する必要がある。そのために、SSPS の要素技術の研究開発成果をいち早く社会に還元し、社会からの SSPS 研究開発をコンセンサスを得る。加えて、SSPS 要素技術への民間企業等からのリソース投入が期待でき、プレーヤーが増え、その次の段階の研究開発へさらに加速していく（プラスのスパイラルを回していく）ことができる。そして長期的に将来、SSPS が実現し、意義・価値を持つ（社会課題へ貢献していく）ことへつながっていく、という考え方が、SSPS 事業性/システムの両検討委員会での議論を経て達した結論である。



第3図 SSPSの研究開発の進め方と意義・価値

4.4 SSPSの中核技術と成果の早期社会実装 SSPSの製造から廃棄・再利用までのライフサイクル全体を俯瞰した場合、地上におけるSSPS構成部品の製造、地上の輸送、宇宙への輸送を経て、軌道上における構築、ミッションの遂行(無線エネルギー伝送)、SSPSの維持・管理から廃棄・再利用までを含め、SSPSを社会に実装するために必要な技術は多岐にわたる。そのうち、SSPSの機能・性能を規定する重要技術であり、かつ、SSPS以外の用途で研究開発に取り組みられる可能性が小さい(民生技術分野等で興味をもたれにくい)と考えられる以下の3つの技術を、SSPS事業性/システムの両検討委員会では、「SSPS中核技術」と位置づけた。

- 無線エネルギー伝送技術(レーザー)
- 無線エネルギー伝送技術(マイクロ波)
- 大型宇宙構造物を軌道上で構築する技術(展開/組立技術)

これらの3つのSSPS中核技術については、当面JAXAが主導的に研究開発を進め、かつ、4.3項で述べられたとおり、研究開発成果の早期社会還元に取り組む必要があるとの意見が、「SSPS研究開発シナリオ初版」に記された。

また、具体的な社会還元の候補についても議論が行われ、初版の段階では4件が選定された。ここでは、それらについて簡単に述べる。

①回転翼無人機への無線エネルギー伝送(レーザー)

近年、急速に研究開発が進み、その将来性が期待される回転翼タイプの無人航空機(マルチコプター)は、揚力をプロペラだけに頼っているため、バッテリーでのフライト時間が短時間に限られるという課題がある。SSPSの中核技術である無線エネルギー伝送技術(レーザー)の研究開発を進めることで、回転翼無人機のフライト時間の制約を無くしてイノベーションにつなげることで、新産業の育成や産業競争力強化等へ貢献する。

②月面探査ローバーへの無線エネルギー伝送(レーザー)

月面の科学探査対象として、極域に存在する永久陰内の土壌に堆積していると考えられている水やその他揮発性物質が有力視されている。採取、分析のため、ローバーによる探査が有効だが、エネルギーを確保する有効な手段が(原子力電池を除けば)無い。SSPSの中核技術である無線エネルギー伝送(レーザー)の研究開発を進めることで、

日射域のランダーから永久陰域のローバーへエネルギー伝送を可能にし、このミッションの実現により宇宙科学および技術の発展に貢献する。

③成層圏高高度滞空型無人機への無線エネルギー伝送(マイクロ波)

成層圏滞空型の無人機を成立させるためには、電源システム(搭載太陽電池と蓄電システム等)を含んだ機体重量の軽量が重要となる。SSPSの中核技術である無線エネルギー伝送(マイクロ波)の研究開発を進めることで、地上から無人機へのエネルギー伝送により高高度無人機の電源システムの軽量化を実現し、社会実装可能なシステムとして成立させる。このミッションにより、通信・放送、国土監視、航空産業の発展等の分野に貢献する。

④静止降水レーダー

地球温暖化、気候変動等の問題により台風が巨大化したり、極端気象による災害が頻発しており、雲の分布だけでなく降水分布を直接軌道上から観測することは、気象予報精度や洪水予測精度を向上させるために有効である。SSPSの中核技術である大型宇宙構造物展開/組立技術を適用した大型フェーズドアレイアンテナの研究開発を進めることで、現在実現している低軌道周回型降水レーダー衛星の発展型として、静止軌道からの降水観測ミッションの実現を目指す。このミッションにより、宇宙技術、気象予測、防災等の分野に貢献する。

ここに示した4つの早期社会実装の候補は、SSPSを目指す途中の中間技術目標として、かつ、研究開発成果の社会還元の視点からも相応しいとJAXAが判断し、両検討委員会に諮って絞りこんだものであるため、宇宙航空分野に偏っている。早期社会実装は、宇宙航空分野に限定されるものではなく、社会のあらゆる分野で広く活用されることが望ましい。SSPSの実現のためには、さらに多くの、そして良質の早期社会実装が必要であり、今後とも新たな「早期社会実装候補」を見出すための活動を進めて行くべきであるとの意見が、「SSPS研究開発シナリオ初版」には記されている。

6. まとめ

JAXAでは、新たなSSPS研究開発ロードマップ、シナリオを構築することを目的として、外部有識者による2つの委員会を運営し、議論を重ねてきた。その結果、SSPS中核技術の研究開発成果を中間段階で社会実装しながら、社会的なコンセンサスを積み重ね、研究開発を前へ進めるという考え方に基づき、JAXA研究開発部門長への答申文書として、「SSPS研究開発シナリオ初版」がとりまとめられた。

今後、JAXAでは、本文書を念頭に置き、SSPSの研究開発を推進していきたいと考えている。

今後とも引き続き、産・官・学の広い分野の皆様からのご協力をいただきたいと考えている。

参考文献

1) Glaser, P. E.: Power from the Sun: Its Future, Science, **162** (1968), pp.857-866.
 2) JAXA WebSite「宇宙太陽光発電システム(SSPS)について」
<http://www.ard.jaxa.jp/research/ssps/ssps-ssps.html>, 2017年1月20

目録

- 3) 後藤大亮, 上土井大助, 池田人: 宇宙太陽光発電システムの開発シナリオ, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2M01 (2013).
- 4) 後藤大亮他, “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”, 第 34 回宇宙エネルギーシンポジウム, 2015.
- 5) 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: 「踊り場成果」をキーワードとした新たな SSPS 研究開発ロードマップの構築, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1L17(2015).
- 6) 後藤大亮: 宇宙太陽光発電研究開発の新たなシナリオ／ロードマップ, 第 1 回宇宙太陽発電(SSPS)シンポジウム, 宇宙太陽発電 1(2016), pp. 8-15.
- 7) 後藤大亮: SSPS 事業性／システム検討委員会における議論の状況と SSPS 研究開発シナリオ初版, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 4D04 (2016).
- 8) 鈴木拓明, 後藤大亮, 上土井大助: SSPS 踊り場成果候補の紹介, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 4D05(2016).
- 9) 「宇宙基本計画」平成 25 年 1 月 25 日宇宙開発戦略本部決定
- 10) 松本紘: 宇宙太陽光発電所, ディスカヴァー・トゥエンティワン, 東京(2011).
- 11) 高野忠: エネルギーの未来宇宙太陽光発電, アスキー・メディアワークス, 東京(2012).
- 12) 蓮池勝人, 前田一樹: 電力システムにおける即応性の価値とパラダイム変化, 知的資産創造, 23 (12) (2015), pp.8-19.
- 13) 秋元圭吾: 排出削減に関するコスト面からの分析, 経済産業省産業構造審議会環境部会地球環境小委員会政策手法ワーキンググループ第 5 回資料, 2010 年 9 月 13 日.
- 14) 財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構: 平成 19 年度太陽光発電利用促進技術調査成果報告書, 平成 19 年度経済産業省委託事業.
- 15) 齊藤由佳, 長山博幸, 松岡巖, 森雅裕: JAXA SSPS コストモデルによる宇宙太陽光利用システムの経済性評価, 第 49 回宇宙科学技術連合講演会, 1D06(2005),.
- 16) 全国温暖化防止活動推進センター WebSite 「パリ協定, 採択! その内容とは?」
http://www.jccca.org/trend_world/conference_report/cop21/2-1212.html, 2017 年 1 月 20 日閲覧.

(2017. 2. 8 受付)