

# SPS 建設に必要な軌道間輸送システム

佐々木進\*

## Orbit Transfer Vehicle for SPS Construction

By

Susumu Sasaki\*

**Abstract :** Solar Power Satellite (SPS) will be a large-scale clean energy system to resolve the “global energy and environmental problems”, by replacing the fossil energy plants in the future. This report describes the performance and cost target for the orbit transfer vehicle required for SPS construction based on the latest SPS model.

**Key words :** Solar power satellite, Orbit transfer vehicle

### 1. はじめに

エネルギーは人類の営みを支えている最も基本的な要素である。現在私たちが使用しているエネルギーの8割以上は、膨大な量の石油や天然ガス、石炭などの化石燃料を燃やすことにより得られている。しかし化石燃料を現在のペースで使用すると今後100~200年で枯渇する。さらに深刻な問題として化石燃料の大量消費は空気中のCO<sub>2</sub>濃度の大幅な増大をもたらす。地球環境への負担が大きい化石燃料に今後とも頼り続けた場合は、地球環境の悪化により今世紀の半ばには人類社会はその史上初めての本格的な衰退を余儀なくされ、未曾有の混乱と試練に直面する可能性がある。

SPS（太陽発電衛星）の構想は、このような地球規模の問題を地球閉鎖系の中で解決するのではなく、地球の外即ち宇宙空間に解決の道を求めようとするものである。宇宙空間には、地上と異なり広大な場と天候に左右されないふんだんな太陽エネルギーがある。宇宙空間に巨大な太陽電池パネルを展開しそのエネルギーを無線で地上に送ることにより、クリーンで大規模なエネルギーシステムを構築することができる。現段階ではSPSが将来の人類のエネルギーシステムとして最善の選択肢であることが示されている訳ではないが、原理の検証が未だなされていない核融合に比べて、極めて有力な選択肢であることは間違いない。

SPSが真に人類の将来のエネルギーシステムになるためには、その電力コストは地上の発電所からの電力コスト（10円/kWh程度）と同程度である必要がある。しかしながら現状の宇宙技術を適用する限りSPSからの電力のコストは地上発電所のコストの数十倍以上であると試算されており、このままでは社会に受け入れられることはない。高コストの要因の大きな部分は地上から軌道上への建設物資の輸送コストであり、SPSが成立するためには今後革新的な輸送系が実現することが大前提である。これまでのSPSの構想では、地上から低軌道まで再使用ロケット（RLV; Reusable Launch Vehicle）で建設物資を輸送し、更に軌道間輸送機（OTV; Orbit Transfer Vehicle）で低軌道から静止衛星軌道に物資を運ぶことが考えられている。この内再使用ロケットについては目標性能や目標コストの検討がある程度行われているが、軌道間輸送機については将来の課題とされ殆ど検討が行われていない。本報告では、最新のSPSのコンセプトを紹介するとともに、そのコンセプトを参照モデルとして、SPSを実現するにはどのような性能でどの程度の輸送コストの軌道間輸送機が必要であるかについて述べる。

---

\* The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS) /JAXA

## 2. SPS の概念と最近のモデル

### 2.1. SPS の概念

太陽光のエネルギー密度は地球近傍の宇宙空間で約 1.35kW/m<sup>2</sup> である。これは夜があり天候の影響を受ける地上での平均日射量の 5-10 倍に達する。SPS は衛星軌道上で太陽エネルギーを電力に変換し、その電気エネルギーをスペーステナと呼ばれるアンテナからマイクロ波など無線で地上に送電する電力設備である。地上では、無線送電された電力をレクテナとよばれるアンテナ設備で受電し、商用電力に変換して既存の電力網を通じて家庭や工場などの利用者へ配電する。図 1 に軌道上の SPS とその地上設備の基本的な構成を示す。このシステムは地上での太陽光発電と比較して、無線送電の部分が余分なプロセスである。しかし、マイクロ波の送受電のプロセスで失われる電力は 50%以下とすることが技術的に可能であり、平均日射量を考慮すると SPS システムは地上の太陽光発電システムと比較して数倍以上エネルギー効率の良いシステムと言える。

SPS の最初概念は、1968 年に米国のグレーザー博士により提案された。1970 年代には、米国エネルギー省と NASA (米航空宇宙局) により技術的な側面からだけでなく、社会、経済、環境の立場からの総合的な評価研究が行なわれた。この時概念設計された SPS は、リファレンスシステムと呼ばれている。その後図 2 に示すような様々な構成の SPS が提案されてきた。

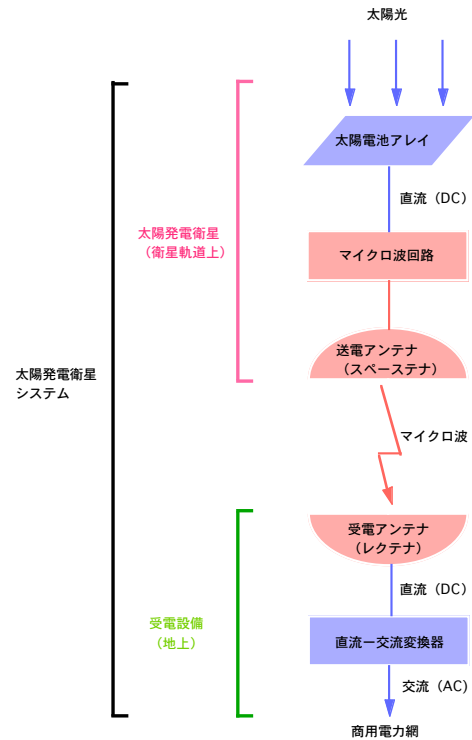


図 1 SPS (太陽発電衛星) の原理。宇宙空間と地上のインフラで構成されるエネルギーシステム。

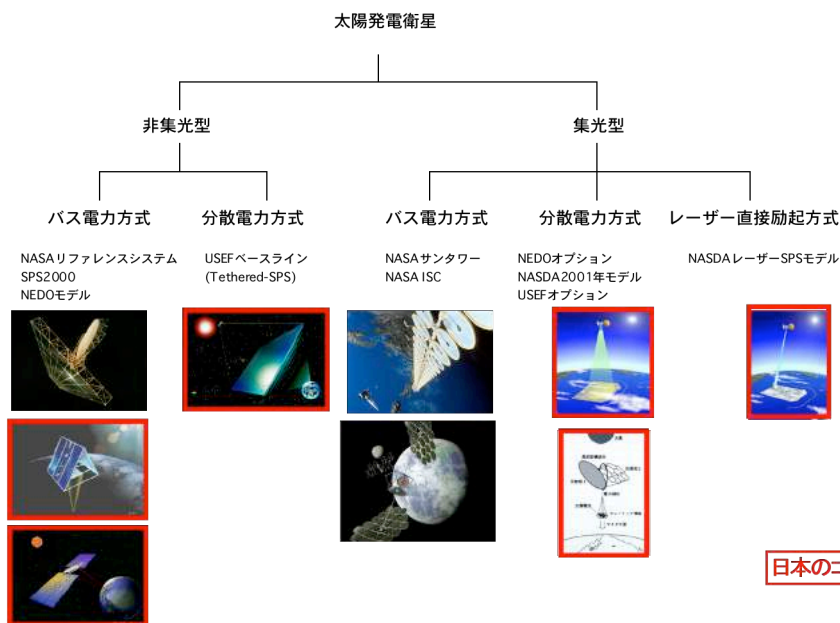


図 2 これまで世界で検討されてきた様々なタイプの SPS (太枠は日本で検討されたコンセプト)

## 2.2. 新しいSPSのコンセプト

我が国ではこれまで図2の太枠で囲った各種のSPSが検討されてきたが、非集光型分散電力方式のテザーSPSは技術的実現性が高いことからBasic Model、高いエネルギー収集効率が期待できるが技術的な課題の多いミラー集光型太陽指向方式はAdvanced Model、小型のシステムが期待できるが技術の未成熟な太陽光直接励起レーザ方式はLaser Modelと名づけられ、図3のようなロードマップ案のもとに本格的な研究開発が進められようとしている。

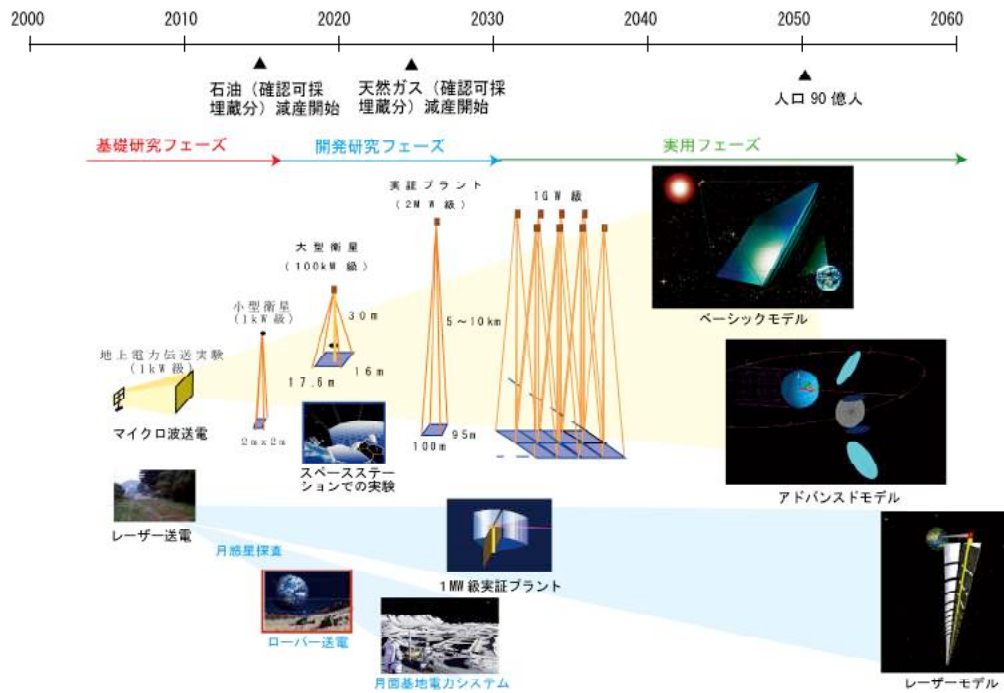


図3 我が国のSPS研究開発のロードマップ案

ここでは、輸送系の検討のためのリファレンスモデルとして、技術的検討の最も進んでいるテザーSPS[1]について述べる。太陽指向型のSPSは軌道上で常に発電面が太陽を追尾し同時に送電面が地上を向く必要があり、軌道上のインフラとしては技術的な壁が高い。そこで太陽追尾のための複雑で寿命に問題のある回転機構を持たず、そのために減少する取得エネルギーは低コストで長寿命の太陽電池の発電面の増加で補償しようとするのがテザーSPSのコンセプトである。テザーSPSは図4に示すようなテザーSPSユニットを多数連結して構成される。テザーSPSのユニットは発電送電一体型パネル(両面の太陽電池で発電した直流電力をマイクロ波に変換して下面から放射するパネル)を4隅のテザーで吊った発電送電システムである。広さ100mx95m、厚さ2cm~10cm、重量約45トンのテザーSPSは約2MWのマイクロ波電力を地上に送電する能力を持つ。この発電送電一体型パネルは発電、送電機能を持つ構造的にも電氣的にもまったく同じ発電送電パネル(5mx0.5m)3,800枚から構成され、各パネルは電氣的に等価な10枚の発電送電モジュールで構成される。先端のバス部でマイクロ波の基準信号を発生し、各モジュールへは無線LANで原振の周

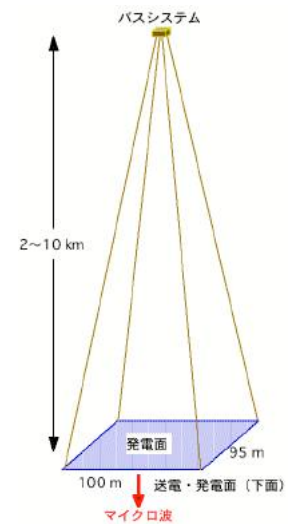


図4 テザーSPSのユニット

波数と位相同期信号を提供するため、モジュール間の有線のインターフェイスは不要である。

テザーSPS ユニットの 25x25 ユニット連結することにより実用型の 100 万 kW 級の SPS を構築する。連結方式として、シングルバス方式と、図 5 に示すようなバス部を独立分離したままでパネル部をラッチして連結するマルチバス方式がある。バス分離型の方式の場合は、システムの規模を自在に拡大することができる。100 万 kW 級の SPS の大きさは一辺約 2.5km となる。5.8GHz の周波数を使用する場合、地上に必要なレクテナの大きさは径 3.5km である。実用型の SPS としては出力変動型 (SPS に蓄電機能を持たず太陽角に応じて送電電力が変化するタイプ) と出力一定型 (SPS に蓄電機能を持ち太陽角が変化しても送電電力を一定に保つタイプ) の 2 種類が考えられる。

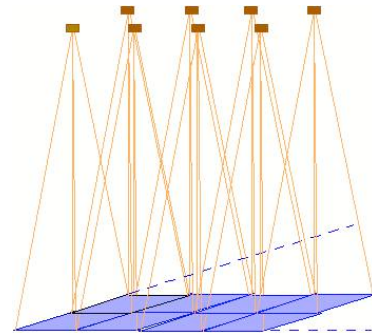


図 5 多数のテザーユニットをマルチバス方式で接続して構成するテザーSSPS

### 3. 構築と宇宙輸送

SPS を建設するための資材は、将来的には月資源の利用も考えられるが、初期の段階では、地上から輸送することが現実的である。輸送シナリオまで検討した SPS モデルの検討例は少ないが、表 1 に代表的な SPS のモデルの輸送シナリオを示す。

表 1 輸送シナリオ

モデル	LEO 輸送機	LEO ペイロード重量	GEO 輸送機	GEO ペイロード重量
NASA リファレンスシステム	HLLV	400 トン	EOTV(電気推進)、70N x 64 基 (総数 144 基)、スラスター径 76 cm、比推力 8200 秒、アルゴン、総重量 9000 トン (燃料 1000 トン、EOTV ドライ 1000 トン)	7,000 トン (NASA 報告書, 1980, [2])
テザーSPS	再使用型 総重量 2000 トン	50 トン	電気推進、推力 120N、比推力 3000 秒、アルゴン、総重量 150 トン、推進剤 20 トン、推進機重量 4 トン、往路 60 日	50 トン (静岡大学 山際芳樹、private communication, 2005 年)
JAXA SPS	再使用型 総重量 2500 トン	50 トン	電気推進、1N 級 17 台 (17N)、比推力 4800 秒、アルゴン、総重量 67 トン、推進剤 9 トン、太陽電池 8 トン、OTV 本体 17 トン、往路 239 日、復路 111 日	33 トン (三菱総研 2006 年 3 月報告書 [3])

テザーSPS の建設シナリオを図 6 に示す。1 基のテザーSPS ユニットの単位 (約 45 トン) として、折り畳んだ貨物を再使用型輸送機 (RLV) を用いて高度約 500km の低高度軌道へ輸送し、そこで軌道間輸送機 (OTV) に積み替えて静止衛星軌道まで輸送する。静岡大の山極によれば、120N 級の電気推進機を持つ総重量 150 トン級の軌道間輸送機であれば約 2 ヶ月で静止衛星軌道に到達する。貨物は軌道間輸送機のシールドコンテナ内に搭載し、放射線帯通過時の太陽電池の放射線劣化を防止する。静止衛星軌道ではテザーSPS ユニットの地上からのコマンドで自動展開し、テザーSPS ユニットの電気機能の健全性を確認した後、地上からの遠隔操作ロボットにより SPS 本体への結合を行なう。このシナリオであれば、建設に有人活動が不要であり、軌道間輸送システムは現実的な規模で良く、輸送時の半導体の劣化を回避でき、健全性を確認しながらの着実な建設 (フェーズドコンストラクション) が可能である。このようなユニット構造であれば、完成後もユ

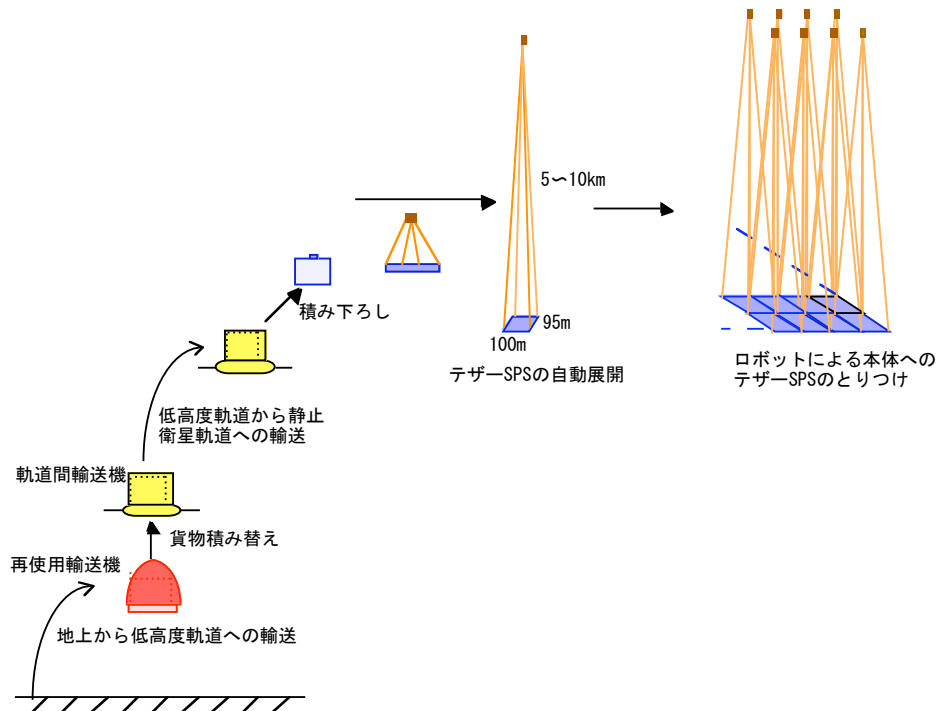


図6 テザーSPSの建設シナリオ

ユニット単位での交換が容易で、またサービス地域の電力事情に応じて増強（新たなユニットの追加）も容易である。

ペイロード重量 50ton、比推力 3000 秒、推進薬アルゴン、電源比重量 10kg/kW、スラスタ比重量 2kg/kW 時の、低軌道からの輸送時間と初期重量の関係を図7に示す。2ヶ月より早く輸送しようとする輸送機の重量が急速に大きくなる。地上から静止衛星軌道への物資の流れは、地上から低軌道までのRLVと低軌道から静止衛星軌道へのOTVをワンセットで考える必要がある。ここでは、RLVとして、ペイロード50トン、総重量2000トンの性能を考える。推進薬は1800トン（液体水素250トン、液体酸素1550トン）である。OTVとして、総重量144.6トン、構造重量50トン、燃料重量18.8トン、スラスタ重量11.6トン、動力源重量（太陽電池）21.5トン、ペイロード重量50トン、推力118.4N、電力2150kWの性能を考えた場合、58日で静止衛星軌道に到達する。SPS1基は625（25x25）ユニットで構成され、1ユニットを50トンとすれば、SPS1基を建設するためには、OTV、RLVともに625回往復が必要である。1年で1基建設するとすれば、RLVの打ち上げは3.1回/日（OTV本体、燃料輸送を含む）となる。RLV1回のフライトは2日、整備に3日程度要すると考えられる。OTVドライ重量150トン、荷物50トン（ユニット）、燃料30トン、合計230トンとし、OTV往復時間4ヶ月（行き2.5ヶ月、帰り1.5ヶ月、120日）、OTV寿命を1000往復とすれば、RLVの運行機数

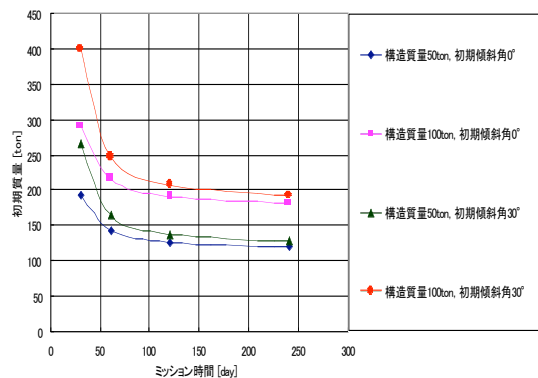


図7 テザーSSPSの輸送期間と初期質量の関係(静岡大学 山極芳樹、平成18年度USEF宇宙太陽発電システム実用化技術調査成果報告書) [4])

16機、OTVの運航機数は205機となり、1SPSあたりに必要なRLVの建造は1機、OTVの建造は0.63機と計算される。低軌道から静止衛星軌道への輸送コストについては、OTVの技術的な検討をベースとした評価は殆どなされていないが、SPSの電力コストを算出するときの想定値としては、NASAリファレンスシステムでは10,000円/kg(地上からの輸送コストを含む)、1994年のNEDOモデルでは2,000円/kg、2003年のUSEF報告書では10,000円/kg、2004年のJAXA/MRIの報告では2,100円/kgが使用されている。

静止衛星軌道は、SPSだけでなく、通信、地球観測にとっても有用な軌道である。静止衛星軌道は現在でも混み合っており、配置できる衛星数に限度がある。これは衛星を分離して配置することから生じる制約である。通信や地球観測の衛星も本構想で示したようなユニット構造とし、相互を緩やかに接続してベルト状に配置することにより、この制約を回避できる。図8にSPS、通信、地球観測のインフラを静止衛星軌道にベルト状に配置するスペースベルト構想を示す。現在の地球上の全ての一次エネルギー(13,000GW)はスペースベルト全周の約14%のテザーSPSで賄うことができる。

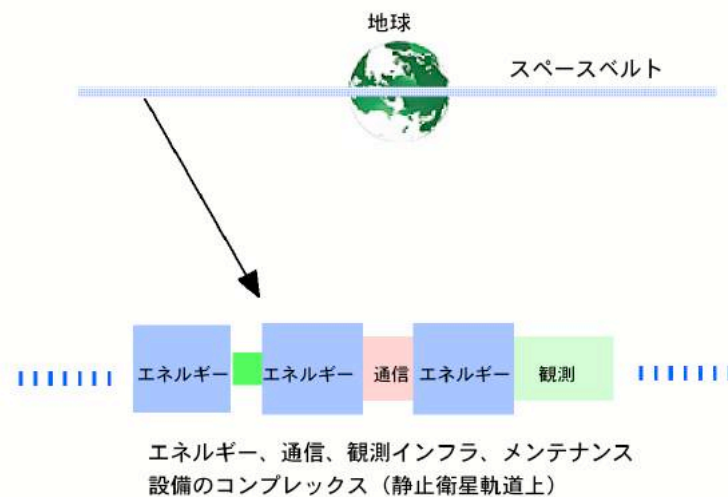


図8 静止衛星軌道に構築する社会インフラのスペースベルトの構想。

#### 4. まとめ

最近のSPSのコンセプトをベースに、その建設に必要な軌道間輸送システムを検討した。軌道間輸送システムとしては、高度500km程度の低軌道から静止衛星軌道へ、重量50トン、容積10mx5mx5m程度の貨物を、輸送期間2-4ヶ月で輸送できること、及び、輸送コストは10,000円/kg以下が期待されている。

#### 参考文献

- [1] 佐々木進、田中孝治、新しいタイプのテザーSPSの検討、第8回SPSシンポジウム講演要旨集、平成17年9月
- [2] SPS Concept Definition Study, Final Report(Exhibit D), Vol.III, Transportation Analyses, SSD 80-0108-3, Oct.1980.
- [3] JAXA 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、三菱総合研究所、2006年3月
- [4] 宇宙太陽発電利用促進技術調査成果報告書、無人宇宙実験システム研究開発機構、平成19年3月