

New Type Tethered-SPS

S.Sasaki and K.Tanaka

The Institute of Space and Astronautical Science (ISAS)
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
3-1-1 Yoshinodai, Kanagawa 229-8510, JAPAN

We have investigated a simple, technically feasible, and practical configuration SPS which consists of a power generation/transmission panel suspended by tether wires from a bus system above the panel. The left panel of Fig.1 shows a unit of Tethered-SPS, in which a power generation/transmission panel of 100 m x 95 m is suspended by four 10 km tether wires extended from a bus system. The weight is about 45 MT. The important point is that the unit has the SPS function with a power transmission capability of 2.2 MW. The essential technologies required for this concept are deployment of the long tether of 10 km scale and the large panel of 100 m scale in orbit. The basic parts of these technologies have been already demonstrated in orbit. Space tether has been deployed up to 20 km three times in 1990's. The solar array panels of 4.6 m x 32 m on the International Space Station were successfully deployed in 2000.

In the former concept of the Tethered-SPS, the units are integrated to the commercial system of 1 GW level by connecting each bus system and unit panels to each other. In the new Tethered SPS concept, only power generation/transmission panels are connected, leaving each bus system unconnected as shown in the right panel of Fig.1. The new configuration of separated bus system greatly enhances flexibility, expansibility, and maintenance performance of the Tethered-SPS. Since this system has no capability to track the sun for the power generation, the total power efficiency is 36 % lower than that for the sun-pointing type SPS even when the solar cells are attached to both sides of the panel. However, the simple configuration resolves almost all the technical problems in the past SPS models. The new Tethered-SPS has a lot of advantages over the past SPS models in attitude stability, construction, modularization, thermal characteristics, and robustness.

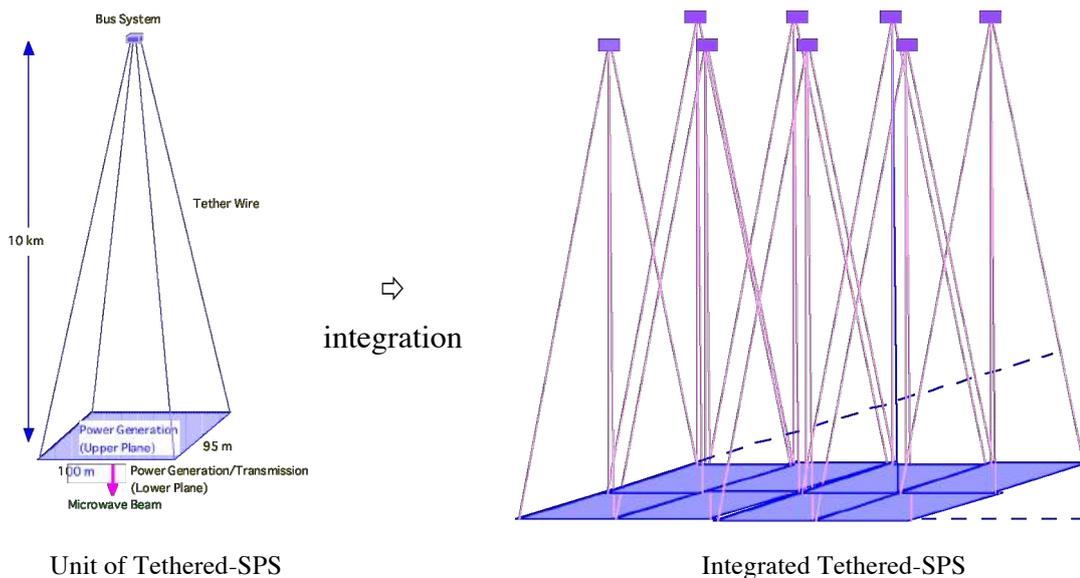


Fig.1 New type of Tethered-SPS

新しいタイプのテザーSPSの検討

佐々木進、田中孝治 (ISAS/JAXA)
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
〒229-8510 相模原市由野台 3-1-1
sasaki@isas.jaxa.jp

発電電一体型パネルを4隅のテザーで吊った2MW級テザーSPS(9,500モジュール構成、100m×95m、45トン)を一つのユニットとし、パネルの辺部をラッチして連結することにより規模を自由に拡大することができる新しいタイプのテザーSPSを検討した。625基のテザーSPSを正形状に結合し一辺2.5km程度の大きさにすれば、出力1GW級の実用型SPSを構築することができる。このテザーSPSは、(1)能動的な姿勢制御が不要、(2)構成モジュールは構造的にも電氣的にも全く同じとすることができるので低コストの大量生産が可能、(3)各モジュールからの熱放射により排熱が可能なので能動的な熱制御が不要、(4)ユニットは構造的にも電氣的にも同じなのでユニット単位での保守・交換が可能、(5)建設に有人活動が不要、(6)現実的な規模の軌道間輸送システムで輸送可能、(7)健全性を確認しながらの着実な建設が可能、(8)テザーSPSユニットのミニチュア版(20m四方規模のパネル)で近未来に軌道上実証実験が可能、(9)ユニット単位で資力とエネルギー事情に応じた異なる組織間の分担投資が容易、(10)他の通信インフラ、地球観測インフラとの複合インフラとして構築することにより静止衛星軌道を有効に利用することが可能、といった多くの特長を持っている。

1. 新しいテザーSPSの概念

1968年にピーター・グレーザーがSPSを発案して以来すでに40年近く経過した。SPSは多くの方が人類のエネルギーシステムとして有望だと直感しているにもかかわらず、いまだ実現への第一歩さえ踏み出すに至っていない。その理由は、技術的な実現性の点で説得力のあるSPSのコンセプトをこれまで描くことができなかったためである。SPSの最大の技術的困難さは、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ような大型のシステムの構築にある。このようなシステムを実現するためにはシステムに何らかの可動機構を組み込む必要がある。これまで工夫を凝らした様々なタイプの太陽追尾機能を持つSPSが考案されてきたが、軌道上のインフラとしては技術的に実現が困難と思われるようなコンセプトであった。また太陽電池の本質的な特長は“可動部を持たないために実現される半永久的な発電素子”であることから寿命が制約される可動部を太陽電池と組み合わせることは太陽発電の特質を損なうことになる。そこで太陽追尾のための複雑で寿命に問題のある可動機構を止め、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することを考えた。このような概念のテザーSPSは、発電面が太陽を追尾しないシステムのため太陽追尾タイプのSPSよりエネルギー取得効率は劣るが、構築と運用の観点から技術的には充分実現可能なシステムである。

テザーSPSのユニットは図1に示すような発電電一体型パネル(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システムである。広さ100m×95m、厚さ2cm、重量45トンのテザーSPSにより

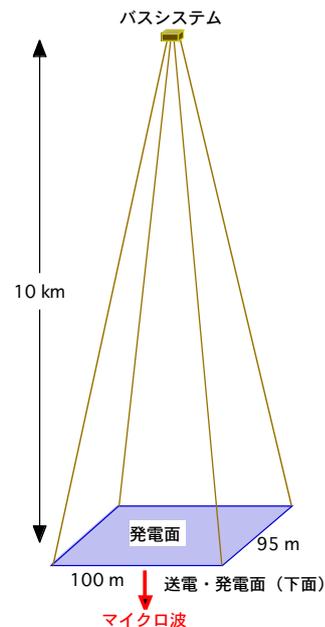


図1 テザーSPSのユニット

2. 2MW のマイクロ波電力を地上に送電することが出来る。この発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送電モジュール (1mx1m) 9,500 枚から構成される。先端のバス部でマイクロ波の基準信号を発生し、各モジュールへ原振の周波数と位相同期を無線 LAN で提供するため、モジュール間の有線のインターフェイスは不要である。

以前のテザーSPS の検討では、多数のユニットのパネル部とバス部を接続した単一バスの実用型 1GW クラスのシステムを対象とした[1]。新しい概念のテザーSPS は、図 2 に示すように、バス部は独立分離としたままでパネル部をラッチして緩やかに連結するシステムである。バス分離型の方式を採用することにより、システムの規模を自由に拡大することができる。625 基のテザーSPS を正方形に結合し一辺を 2.5km 程度の大きさにすれば、出力 1GW (地上の受電所からの実効出力) の実用型 SPS を構築することができる。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。表 1 に出力一定型の 1GW 級 SPS の特性を示す。

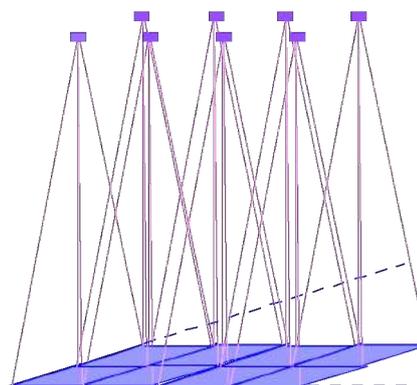


図 2 多数のテザーユニットを接続して構成するテザーSPS

2. 新しいテザーSPSの特長

表 1 1GW級テザーSPS (出力一定型) の特性

システム構成	発送電一体型パネルを2500本のテザーワイヤーで吊り下げ
パネル寸法	2.5 km x 2.375 km x 0.02 m
テザー長	約10 km
全重量	26,500 トン
パネル重量	25,000 トン
バス部重量	1,500 トン
サブパネル	発送電一体型パネルを4本のテザーワイヤーで吊り下げ
パネル寸法	100 m x 95 m x 0.02 m
サブパネル総数	625 (25x25)
構造パネル	10 m x 1 m x 0.02m
構造パネル数/サブパネル	950 (10x95) 枚
モジュール	発送電機能
発電	473 W max (1,350x0.35)
送電	222 W一定 (473x0.95x0.97x0.6x0.85)
寸法	1 m x 1 m x 0.02 m
モジュール数/構造パネル	10
マイクロ波周波数	5.8 GHz
レクテナでの最終出力 (DC)	1 GW (一定出力)

2. 1 高い姿勢安定度

テザーSPS の姿勢は重力傾斜力を利用して安定させているので、能動的な姿勢制御は不要である。静止衛星軌道では姿勢擾乱の主要原因は太陽輻射圧であるが、パネル面への最大輻射圧は最大約 20N に対し、重力傾斜力は全体で 150N である。北大石村の計算によると、テザーSPS の場合ピッチ角周りの変動が最も不安定であるが、定常状態では姿勢安定が保持されることが示されている。ただし、各ユニットを接続して建設するフェーズでは初期段階において動的な安定性に欠けることが指摘されている[2]。

2. 2 高度なモジュール構成

発送電一体型モジュール（1m×1m×0.02m）は、上面が薄膜太陽電池、下面がマイクロ波アンテナと薄膜太陽電池で構成され、モジュール内部に電力処理回路、マイクロ波位相制御回路、マイクロ波増幅回路、蓄電部（一定電力タイプのSPSの場合）が収納される。モジュールのモックアップを図3に示す。モジュールで発生した電力はモジュール内でマイクロ波に変換されて放射されるため、モジュール間の電力ケーブルは不要である。このモジュール（出力一定型の場合のマイクロ波出力 220W）は構造的にも電氣的にも全く等価であり、大量生産が可能である。モジュール出力が一定であるため、一般のSPSのようにアンテナ面で電力密度にテーパをつけてメインローブに電力を集中させる（10dB Gaussianの場合約95%）ことはできないが、第一サイドローブまでの電力を捕集することにより、地上で90%以上の電力を捕集することができる。電力密度をフラットにしてアンテナ中央部に電力を集中しないという考え方は、2.3項で述べるように能動的な排熱を考えなくても良いという点でもメリットがある。

2. 3 高い熱的成立性

各モジュールで発生する熱は各モジュールからの熱放射により排熱が可能である。熱的には、

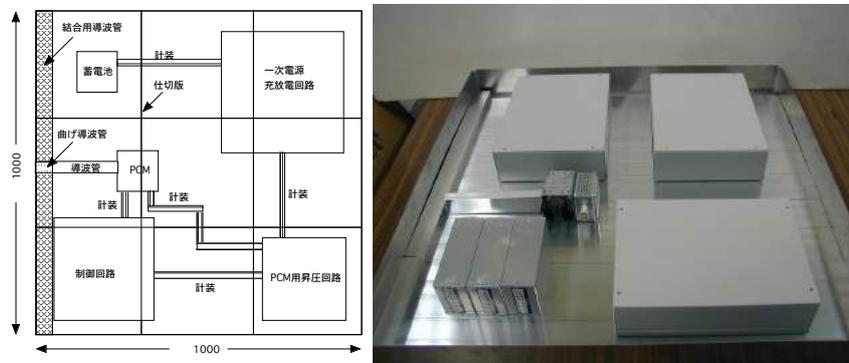


図3 発送電一体型モジュールのモックアップ

昼は発送電、夜は待機となる出力変動型SPSの方が条件が厳しいが、その場合でもモジュール内部の温度を -50° ~ $+60^{\circ}$ の範囲に保つことができることが予備的な計算の結果示されている[3]。熱設計を最適化することによりモジュール内部の温度を民生品の使用温度範囲に保つことが可能である。テザーSPSでは全てのモジュールが熱的に等価でありモジュール間を断熱することができるため、モジュールの単位で熱的に成立すればシステム全体でも熱的に成立することになる。一方、これまでのSPSのようにアンテナ面で電力密度にテーパをつける場合は、内側の高電力モジュールの排熱のため周辺部への熱輸送と周辺部での排熱が必要となり、システムが複雑になるとともにシステムコストを引き上げる要因となる。

2. 4 現実的な建設シナリオと高いメンテナンス性及び拡張性

テザーSPSの建設シナリオを図4に示す。1基のテザーSPSユニットを単位(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

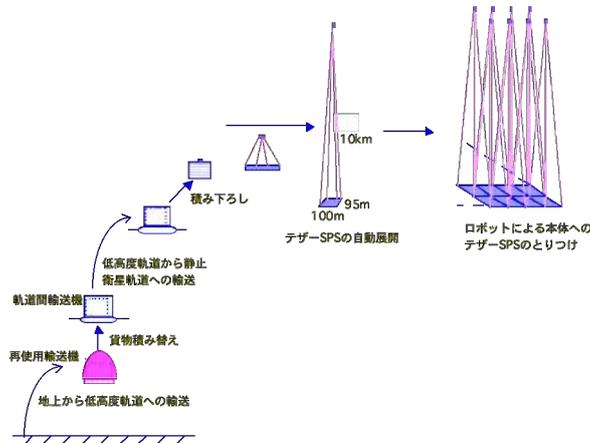


図4 テザーSPSの建設シナリオ

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。80N級の電気推進機を持つ総重量200トン級の軌道間輸送機であれば約4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、放射線帯輸送中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ユニットを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、完成後もユニット単位で容易に交換が可能で、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)も可能で

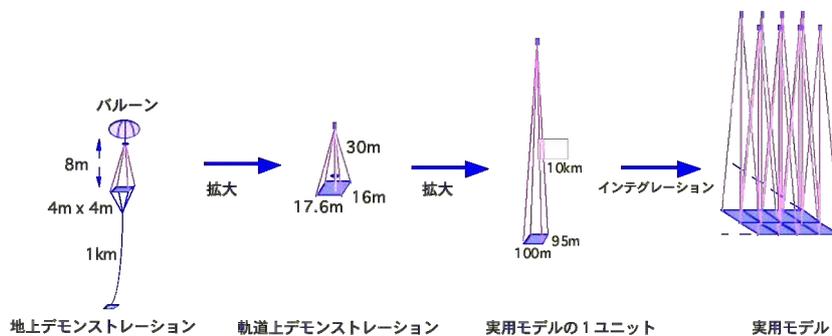


図5 テザーSPS開発のロードマップ

ある。

2.5 実証から実用までの一環した開発シナリオ

1基のテザーSPSユニットのスケールモデルを用いて近未来に実証実験を行うことができる。地上では4m x 4mの発送電一体型パネルと8m長のテザーを用いたバルーン実験、軌道上(約400km)では、17.6m x 16mの発送電一体型パネルと30m長のテザーを用いたデモンストレーション実験が考えられる[4]。これにより近未来の実証実験システムをスケールアップして実用型に発展させるといふ図5に示すような技術的に継続性のあるロードマップを設定することが可能となる。

2.6 分担投資の容易さ

SPSの構築には多大の投資が必要であり、複数のパーティが参加することが考えられる。ユニ

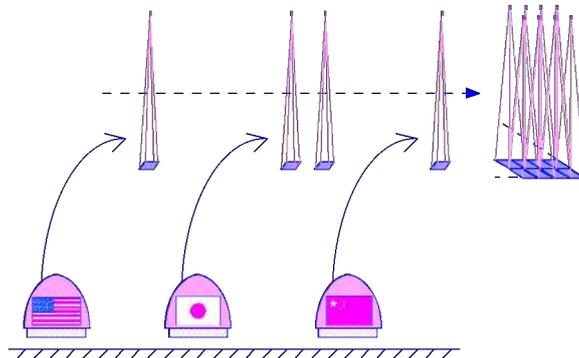


図6 各パーティの分担投資によるテザーSPSの構築

ット構成のテザーSPSの場合、パーティ間のインターフェイスと責任分担を明確に規定することができる。1基のテザーSPSユニットは2MW、20億円規模である。ユニット構造のテザーSPSでは、図6に示すように資力とエネルギー事情に応じた各国間の分担投資、会社間の分担が容易である。

2. 7 静止軌道資源の有効な利用

静止衛星軌道は通信衛星、放送衛星や地球観測衛星にとっても有用な軌道であり、現在でもこの軌道上で多くの衛星が稼働している。多数のテザーSPSを静止衛星軌道に配備するためには、これらの衛星との共存が必要である。他の通信・放送インフラ、地球観測インフラもテザーSPSユニットと同一の形状とすることにより、異なる機能のパネルを接続して情報とエネルギーインフラの複合体とすることができ、静止衛星軌道を有効に利用することが可能となる。

3. テザーSPSの成立する条件

以上のようにテザーSPSは実現性の点で多くの特長を持っているが、テザーSPSが技術的にも経済的にも成立するためには表2のような技術とコストの実現が前提である。これらの技術レベルは現在の技術レベルの数倍から1桁高い（宇宙輸送については2桁高い）ものであり、その達成は非常にチャレンジングではあるが、20年程度のタイムスパンで考えれば実現の可能性は十分ある。特にマイクロ波制御技術については、SPSの成否を握るキー技術であり、できるだけ早い段階で軌道上からの実証実験を行うことが必要である。

表2 テザーSPSを成立させるために必要な技術・コストレベル

太陽電池技術	発電効率35%, 2kW/kg, 0.5kW/m ² , 50円/W
マイクロ波送電技術	効率85%, 10g/W, 100円/W, 静止衛星軌道から3.5km径のレクテナへ90%の効率で電力を送るマイクロ波制御技術
蓄電技術（蓄電型テザーSPSの場合）	1.5kWh/kg, 10円/Wh, 充放電効率90%, DOD50%, 充放電寿命30,000回
マイクロ波受電技術	効率85%, 50円/W
輸送コスト	15,000円/kg（地上から低軌道、低軌道から静止軌道衛星）

参考文献

- [1] S.Sasaki, K.Tanaka, S.Kawasaki, N.Shinohara, K.Higuchi, N.Okuizumi, K.Senda, K.Ishimura and the USEF SSPS Study Team, Conceptual Study of SSPS Demonstration Experiment, Radio Science Bulletin, No.310, 9-14, 2004.
- [2] 石村康生, 高井伸明, 佐々木進, 重力傾斜安定型太陽発電衛星の外乱環境下での組立手順の検討, 日本航空宇宙学会論文集, オンラインジャーナル"宇宙技術", 技術ノート Vol.4, pp15-20, 2005年
- [3] S.Sasaki, K.Tanaka, K.Higuchi, N.Okuizumi, S.Kawasaki, M.Shinohara, K.Senda, K.Ishimura, A

New Concept of Solar Power Satellite:Tethered-SPS, ISAS Research Note, March 2005.

[4] S.Sasaki and USEF SSPS Study Team, Tethered Solar Power Satellite for the Near-Term Demonstration Experiment, Proc. of International Conference on Solar Power from Space, SPS'04, Granada, June 30-July 2, 2004.