

宇宙太陽発電は可能か*

佐々木 進

1. はじめに

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。さらに近未来の深刻な問題として、化石燃料の大量消費は空気中のCO₂濃度の大幅な増大をもたらす。このような地球規模の問題は、地球閉鎖系の中で解決しようとするのではなく、地球の外、すなわち宇宙空間に解決の道を探るべきではないだろうか。古来人類は新天地を開発することにより閉塞状態を回避してきた。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。宇宙太陽発電は、衛星軌道上の太陽発電所で発電した電力をマイクロ波などの無線で地上に送電する概念である(図1)。宇宙太陽発電は、人類のフロンティアである宇宙空間を人類のエネルギー取得の場として利用しようとする構想であり、地球環境問題と資源問題を乗り越えて人類を新たな発展に導くエネルギーシステムとして大きな可能性を持っている。

2. 宇宙太陽発電の特長と歴史

宇宙空間での太陽光のエネルギー密度は、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。宇宙太陽発電は地上での太陽発電と比較して、無線送電の部分が余分なプロセスである。しかし、マイクロ波の送電・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宇宙太陽発電システムは地上の太陽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。また宇宙空間は広大で地上と異なり土地問題がなく、この点でも大規模な太陽エネルギー取得の場として優れている。

宇宙太陽発電の最初のアイデアは1960年代に、米国のピーター・グレーザー博士により出された¹⁾。その後、1970年代には、米国エネルギー省とNASAにより技術的な側面だけでなく、社会、経済、環境の立場からの総合的な評価研究が行われた²⁾。この時設計された宇宙太陽発電所はリファレンスシステムと呼ばれ、500万kWの送電能力を持っている(図2)。しかしながら、宇宙太陽発電は当時の米国の社会・経済状態の中で実施は時期尚早と判断され、実現のための一歩を踏出すこと無く検討は終了した。その後宇宙太陽発電の構想は遠い将来の夢物語とされ研究は停滞したが、近年次第に深刻化する地球環境問題への対応という観点から、宇宙太陽発電構想が再び注目を浴びるようになってきている。

3. 宇宙太陽発電の技術的な可能性と研究課題

宇宙太陽発電所の構築には、宇宙での太陽発電技術、電力管理技術、無線送電技術、構造物建造・制御技術、宇宙への輸送技術が必要である。これらの個々の技術は小規模なレベルであれば既に宇宙技術として実用化されており、大規模化は必要だが原理的に未検証の技術はない(表1)。しかし現在の高価な宇宙技術で宇宙太陽発電を実現する場合は、30年程度の運用寿命の場合で電力コスト

Feasibility of Space Solar Power Station

Susumu Sasaki

1975年 東京大学大学院博士課程物理学科
中退

同年 東京大学宇宙航空研究所に勤務
現在 宇宙科学研究所衛星応用工学研究
系宇宙エネルギー工学部門教授。

スペースシャトルでの日米共同宇宙科学実験(SEPAC計画)や回収型宇宙実験プラットフォームSFU計画に参加。太陽発電衛星の研究に従事すると共に月探査ミッションセレーネ計画に参加。日本物理学会、日本航空宇宙学会、日本地球電磁気惑星圏学会、日本惑星科学会、核融合学会、日本ロケット協会会員 理学博士

連絡先; 〒229-8510 相模原市由野台3-1-1
宇宙科学研究所

E-mail sasaki@newslan.isas.ac.jp



*2001年4月27日受理

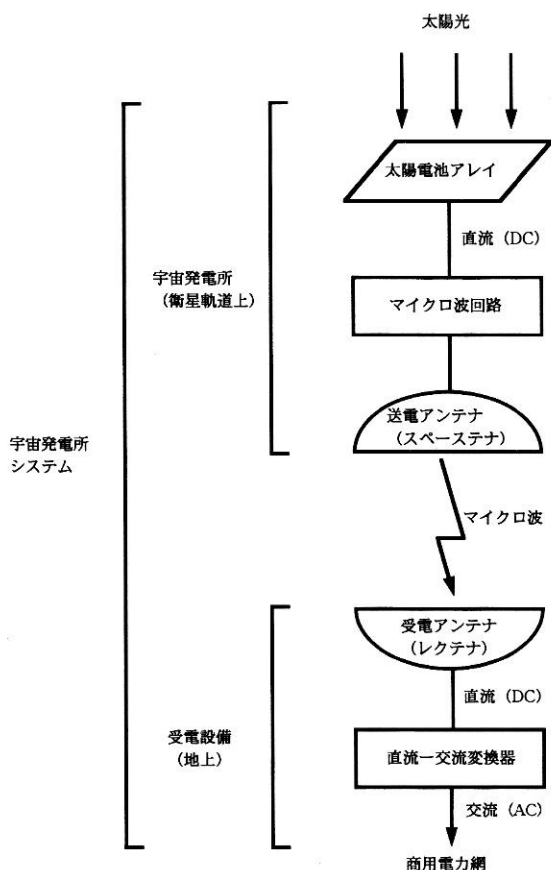


図1 宇宙太陽発電所と地上受電所の基本的な構成 (宇宙太陽発電所では太陽エネルギーを利用して発電し、電気エネルギーをマイクロ波に変換して地上へ送電する。受電所ではアンテナで受電した電力を商用電力に変換し、既存の電力網を利用して、需要者に配電する)

トは現在の地上発電所の電力コストと比べ100倍も高いものになる。宇宙太陽発電の実現には関連技術の大規模化と低コスト化が技術的な課題である。以下宇宙太陽発電実現のための技術的な可能性と研究課題について述べる。

3.1 発電

宇宙太陽発電用の太陽電池としては、1) 宇宙環境での劣化が少ないこと、2) ロケットでの輸送と宇宙空間での展開に便利なこと、3) 資源が充分あり大量生産が可能で低コストであること、が要求される。地上の太陽電池は今後薄膜タイプのものが主流となると予想されているが、薄膜太陽電池は大量生産が可能で重量当たりの出力が大きく、折り畳んでの輸送と宇宙での展開のしやすさから、宇宙太陽発電用の太陽電池としても有望である。地上と異なり宇宙では、太陽電池の劣化をもたらす宇宙放射線と10 km/s以上の高速で空間を飛び交う細かな宇宙塵や宇宙ゴミ(宇宙デブリと呼ばれる)の影響を避けることはできない。耐放射線性については光電層の厚みの薄い薄膜太陽電池は従来型の光電層の厚い太陽電池よりも強いことが期待できる。実際、薄膜タイプのアモルファスシリコン太陽電池は単結晶太陽電池よりも放射線耐性が高いことが放射線の照射実験で得られている。一方、宇宙塵や

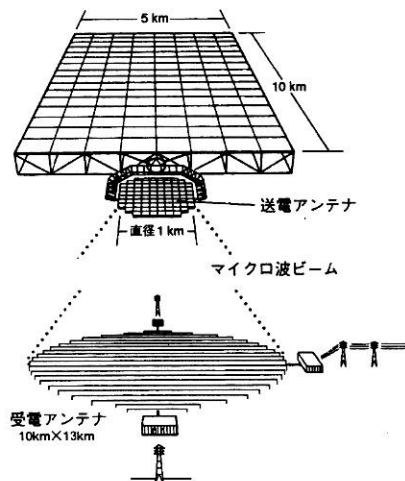


図2 NASAの宇宙太陽発電所概念図(リファレンスシステム)(1基の大きさは5km×10 km、出力は500万kW。静止衛星軌道に60基配置する)

表1 宇宙太陽発電に必要な技術の現状の到達レベルと目標レベル

クリティカルな技術	現状の到達レベル	目標レベル
宇宙太陽光発電	数十kW (国際宇宙ステーションで80kW)	100万kW
発電電圧 (バス電圧)	100~150V	1kV以上
マイクロ波送電	数十kW (地上), 1kW (宇宙)	100万kW
排熱	数十kW	数十万kW
大型構造物	100mクラス (国際宇宙ステーション)	数km
宇宙輸送のコスト	100~200万円/kg	1万円/kg

宇宙ゴミの衝突による太陽電池の破壊は、薄膜太陽電池の場合でも衝撃物のサイズよりもかなり大きな規模となることが高速衝突実験で示されている。太陽電池のユニット化を行い、破壊の影響が広く伝搬しないような設計を行うことにより、高速浮遊物の衝突の影響を最小限にとどめることができる。

3.2 無線送電

送電にはマイクロ波帯の電磁波を使う。周波数の高い(波長の短い)電磁波を使う程、送受電のアンテナは小さくてすむが、10 GHz以上の周波数になると大気中での減衰が大きくなる。宇宙から地上への無線送電には、数GHz付近の周波数のマイクロ波が、大気による減衰が少なく回路技術の成熟度からも適している。2.45 GHzのマイクロ波の場合、直流電力からマイクロ波、マイクロ波から直流電力への変換効率は各々80%程度、軌道上から地上への伝搬損失が数パーセントと考えられている。マイクロ波の回路素子は制御の点から電子管よりも半導体の使用が現実的であるが、半導体アンプの出力は1素子あたり高々数十W程度なので、膨大な量の素子が必要である。マイクロ波帯の半導体は近年携帯電話の普及で急速に性能が上がりコストも下がってきたが、宇宙太陽発電用としてはさらに大幅な低コスト化と高効率化が要求され、この点で今後研究開発が必要である。地上の受電アンテナ

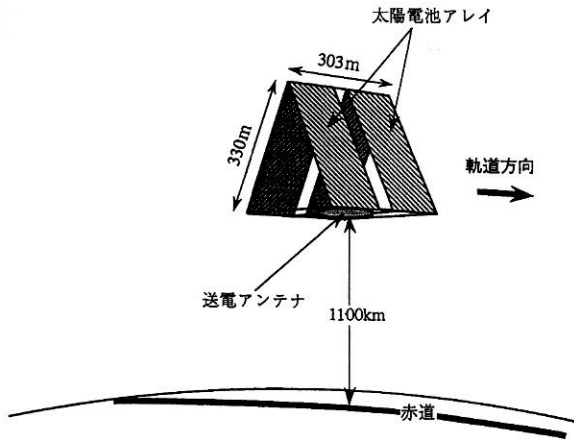


図3 宇宙科学研究所SPS2000タスクチームが検討を進めている宇宙太陽発電所SPS2000のモデル（赤道軌道高度1,100kmに投入し1万kWの電力を地上へ送電する）

ナヘマイクロ波ビームを正確に指向させるには、受電局からのパイロット信号を利用した送電波の位相制御を行う必要がある。位相制御技術は通信の分野では既に実際に使用されているが、大電力送電への応用には位相制御の方式検討を含め研究課題が残っている。

3.3 構築と機構

地上の電力供給に一定の役割を果たす宇宙太陽発電所の規模は100万kWクラスである。このクラスの宇宙太陽発電所のスケールはkm規模の宇宙構造物となる。スケールの大きい構造物の場合、重心から離れた場所では遠心力と地球重力のつり合いが崩れ、無視できない力（重力勾配力と呼ぶ）が働く。この力を利用することにより大型構造物の姿勢を自然に安定させることができるが、そのためには軌道上での建築手法と手順を確立する必要がある。大型構造物の構築には、安全のためのコストが大きく求められる有人の作業は必要最低限とし、できるだけ繰り返し単純作業による建設が可能となるようなシナリオを考案して自動組立方式をとることが必要である。

宇宙太陽発電所は送電アンテナを地上の受電所に向けながら地球のまわりを周回するので、発電面を常に太陽方向に指向させるためには、発電システムと送電アンテナを可動部（ロータリジョイント）で接続する必要がある。このための姿勢制御とロータリジョイントについては、これまで十分な検討が行われているとは言いがたい。一方太陽角に対し複数の太陽電池面を持つシステムは、一つの太陽電池面を太陽指向させるシステムと比較してより多くの太陽電池を必要とするが、ロータリジョイントを必要としない単純なシステム構成をとるという利点を持っており、技術的なオプションと考えられている。

3.4 軌道と軌道上への輸送

宇宙太陽発電所の軌道は、地上の特定の受電施設に常時電力を伝送できるという点では、アメリカのリファレ

ンスシステムが前提とした高度36,000kmの静止衛星軌道が望ましい。しかし静止衛星軌道は、通信、放送、地球観測など“電力”よりもはるかに付加価値の高い“情報”を扱う衛星にとっても理想的な軌道である。静止衛星軌道に配置できる衛星の数には上限があることを考えれば、宇宙太陽発電所はより低い軌道に建設すべきだという考え方もある。宇宙太陽発電所を低高度軌道に配備する場合は、地上の受電所から見て軌道上の発電所は時間とともに移動することになり、一つの受電所が電力を連続的に得るためには軌道上に多数の発電所を配備し連携した送電ビームの切替を行う必要がある。軌道の選定は、輸送コスト、建設コスト、運用コスト、半導体素子の劣化を支配する宇宙放射線環境、太陽電池パネルの破損をもたらす宇宙アプリ環境、を総合的に考慮して決める必要がある。

地上から軌道上への輸送コストは、低軌道に輸送する場合でも現在1kgあたり100～200万円かかる。このような宇宙輸送の高コストをそのまま適用した場合には、宇宙太陽発電所の電力コストは極めて高いものとなる。宇宙輸送のコストが高い理由は、現在のロケットは航空機などと異なり使い捨てであるためであり、輸送コストを大幅に下げるためには再使用型の輸送手段を開発する必要がある。現在研究が進められている完全再使用型の宇宙輸送システムは、輸送費を現在の1/100程度にすることを目指しており、今後10～20年程度でkgあたり1万円程度の低コスト打ち上げシステムの登場が期待できる。残念なことに米国では次世代のスペースシャトルとして開発の進められてきた低コストの単段式SSTO（Single Stage to Orbit）の実験機X-33の計画は最近頓挫したが、完全再使用型の輸送機の検討は精力的に行われている。一方宇宙への輸送コストの低減にはその需要が充分にあることが前提である。宇宙商業輸送に関する研究によると単位重量当たりのコストを現在の1/100にするためには、現在より100倍程度の輸送量を見込む必要がある。宇宙輸送の需要の大幅な増大には、微小重力や高真空などの宇宙環境を利用する宇宙産業だけでなく、最近では宇宙旅行産業も重要な役割を果たすと考えられるようになってきている。

4. 現在検討されている宇宙発電所の構築

米国では、エネルギー省とNASAによるリファレンスシステムの研究が終了した1980年以降は、組織的な検討は長い間行われなかった。しかしNASAは1995年から宇宙太陽発電所の概念の見直し検討を開始し、その中でサンタワーモデルと呼ばれるコンセプト³⁾を発表している。このコンセプトでは、50～60m径のフレネル薄膜ミラー

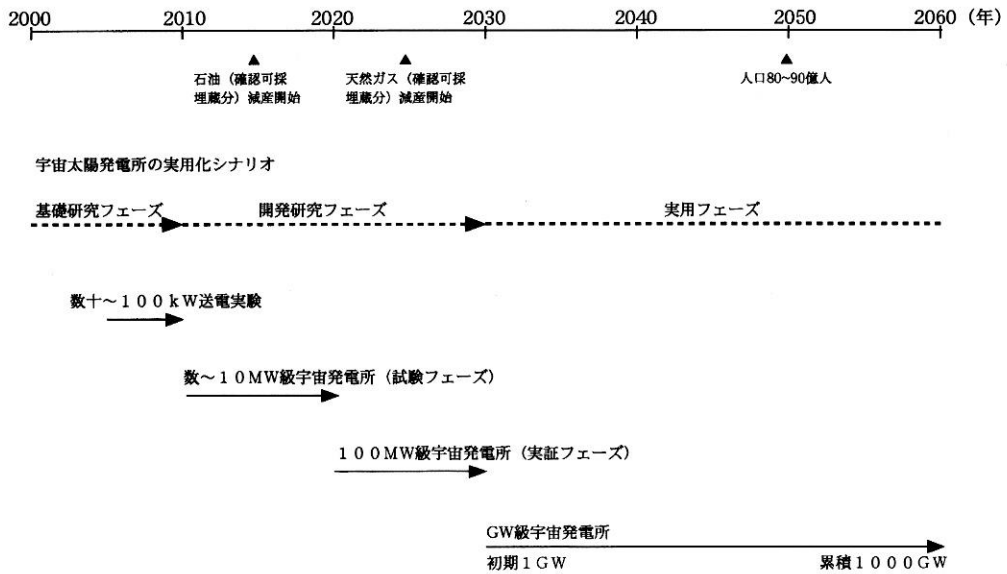


図 4 実用宇宙太陽発電所 (100 万 kW クラス) へ至るまでの技術開発シナリオの例

又はレンズで太陽光を集光し太陽電池で発電する。この発電ユニットを上下に全長 15 km にわたって接続して 10 万 kW ~ 30 万 kW の発電を行う。地上へは直径 150 ~ 250 m の送電アンテナを用い、5.8 GHz のマイクロ波で送電する。最近では ISC (Integrated Symmetrical Concept) と呼ばれる 2 セットの反射ミラーアレイと太陽電池アレイの組合せ方式も検討されている。

我が国でも、SPS2000 と呼ばれる宇宙太陽発電所⁴⁾ が検討されている。SPS2000 は、宇宙科学研究所に本拠を置く SPS2000 タスクチームが設計研究を進めてきた太陽発電所のモデルである。このモデルは、1 万 kW 規模の発電能力を持ち、将来の本格的な宇宙発電所を評価するための試験発電所と位置付けられている。SPS2000 の軌道は、赤道高度 1,100 km であり、赤道付近に設置される受電設備からの電力は、周辺の発展途上国の住民の電力として有効に利用される。受電アンテナの設置場所に関する海外現地調査も既に実施されている。発電所の形状は、図 3 に示すような 1 辺約 300 m の三角柱である。上 2 面に太陽電池を貼りつけ、下面中央に直径 150 m のマイクロ波送電アンテナを取り付ける。重力傾斜力により、送電アンテナは常に地上側を向く。構造の部材は軽量のアルミパイプとし、ロボットによる建設作業を容易に行うため、各パイプの接続はワンタッチ押込み式のジョイントとしている。送電は、2.45 GHz のマイクロ波とし、スリットアンテナと駆動アンプを一体化してアンテナ素子を構成する。SPS2000 の総重量は約 240 トンである。95% の電力を受け取るための受電アンテナのサイズは直径約 2 km である。

5. おわりに

3. で述べたように多くの研究課題はあるものの、私たちが既に持っている技術の延長上で宇宙太陽発電を実現することが可能である。宇宙太陽発電の技術の中で当面最も重点的に取り組むべき技術は宇宙から地上への無線送電である。図 4 に示すように 2030 年頃から本格的な商業用の 100 万 kW クラスの実用宇宙太陽発電所を実現するためには、2020 年代に 10 万 kW クラスの試験発電衛星 (パイロットプラント) を実現、2010 年代に試験的な小型の宇宙太陽発電所を実現し、技術実証、電力コスト評価、環境への影響評価を段階的に進めていくことが求められる。そのためには 2000 年代に宇宙から地上への送電実験を行う必要がある、ここ数年でこのためのプロジェクトをスタートする必要がある。宇宙空間の利用は、放送衛星、通信衛星、地球観測衛星などの情報伝達、情報取得の場としての利用が先行してきた。人類社会のためのより本格的な宇宙利用として、宇宙空間をエネルギー取得の場として利用するための研究に着手すべき時期に来ている。

引用文献

- 1) P.E.Glaser : Power from the Sun : Its Future, Science, Vol.162, pp.867-886 (1968)
- 2) DOE/NASA : Program Assessment Report Statement of Finding-Satellite Power Systems, Concept Development and Evaluation Program, DOE/ER-0085 (1980)
- 3) J.C. Mankins : Proc. of SPS '97 Conference, Montreal, August (1997)
- 4) M.Nagatomo and K.Itoh : "An Evolutionary Satellite Power System for International Demonstration in Developing Nations", Space Power, 12, 23-36 (1993)