

宇宙発電システム

Solar Power Satellite System



佐々木 進

Susumu SASAKI

©1949 年 1 月生まれ

©1975 年東京大学宇宙航空研究所入所。1981 年文部省宇宙科学研究所
惑星研究系配属。1991 年同所衛星応用工学研究系配属。研究・専門テ
ーマは、宇宙エネルギー工学

©文部省宇宙科学研究所 (〒229 相模原市由野台 3-1-1)

1. はじめに

宇宙発電システムとは、宇宙空間で太陽エネルギーを電気エネルギーに変換し、マイクロ波などの無線で地上に電力を送る新しい概念のエネルギー供給システムである。このシステムの実現には、低コスト宇宙輸送、大型宇宙構造物建設、大電力無線送電などの新しい技術を必要とするが、化石燃料にかわる 21 世紀のクリーンエネルギーシステムとして、核融合と並び有望なシステムとして期待されている。本稿では、このエネルギーシステムの原理、特徴、必要な技術について解説する。

2. 宇宙発電システムとは

現代社会が必要としているエネルギー量は膨大ではあるが、それでも太陽から地球に供給されるエネルギーのわずか 1/15 000 に過ぎない。宇宙発電システムは、この豊富な太陽エネルギーを直接電気エネルギーに変換して利用する（太陽エネルギー利用）、地球生態系外の広大な宇宙空間をエネルギー取得の場として利用する（宇宙空間利用）、という二つの特徴を持つ概念である。このシステムは、地球環境問題から人類社会を解放し、その新しい発展を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。

宇宙発電システムは、軌道に構築する発電・送電設備と、地上に配置する受電・配電設備から

構成される（図 1）。発電・送電設備は、太陽エネルギーを太陽電池や熱発電装置を用いて電気エネルギーに変換し、マイクロ波などの無線で地上に送電する。この軌道上設備は、一般に、宇宙発電所または太陽発電衛星（SPS：Solar Power Satellite）と呼ばれている。地上の受電・配電設備では、宇宙から無線送電された電力をアンテナで受電し、商用電力に変換した後、既存の電力網を通じて利用者へ配電する。

このような宇宙発電システムの最初概念は、1968 年アメリカのピーター・グレーザー氏により発案され、“宇宙空間における電力プラント”として、雑誌サイエンスに掲載された⁽¹⁾。その後、1977 年から 1980 年にかけてアメリカエネルギー省により宇宙発電システムの本格的な研究が行わ

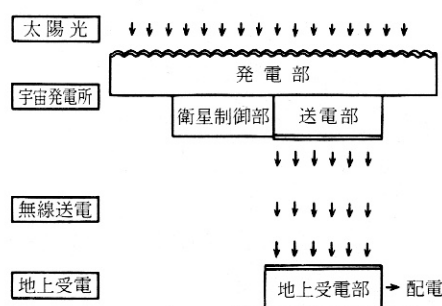


図 1 宇宙発電システムの基本的な構成（軌道上の宇宙発電所では太陽エネルギーを利用して発電し、その電力を地上の受電設備に無線送電する。受電所では、商用電力に変換し既存の配電網を通じて需要者に電力を供給する）

れた。このとき、NASA を中心として設計された宇宙発電システムは、リファレンスシステム⁽²⁾ (図2) と呼ばれ、現在でも宇宙発電システムのひな形として広く引用されている。

一方我が国においても、1980年代以降、太陽発電衛星のデモンストレーションモデルの概念検討、マイクロ波送受電アンテナの技術研究、マイクロ波と電離層の相互作用実験、マイクロ波送電が地上環境に及ぼす影響の調査などが行われている。文部省宇宙科学研究所に組織されている太陽発電衛星ワーキンググループでも、SPS 2000 と名付けられた太陽発電衛星モデル (図3) の設計研究を、大学、国公立、民間の研究者の共同研究により実施している⁽³⁾。1990年に地球環境問題への政府の対応としてまとめられた「地球再生計画」では、宇宙太陽発電は、核融合とともに次世代を担う革新的エネルギー技術として位置づけられている。

3. 宇宙発電システムの技術

3.1 発電 宇宙発電の方法としては、太陽電池による光発電または太陽ふく射熱による熱発電が利用される。太陽電池の場合は、宇宙環境での使用実績が豊富で、精密な太陽指向が不要であるという利点がある。太陽電池の効率は近年急速に改善され、単結晶シリコンの場合は20%に達

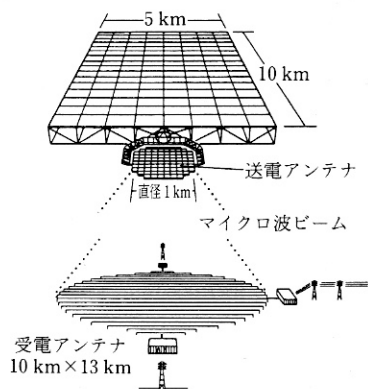


図2 NASA が設計した太陽発電衛星 (リファレンスシステム) (1基の大きさは5 km×10 km, 出力は5 GW. 静止衛星軌道に60基配置し、総発電量300 GWを得る構想)

している。宇宙発電所用の太陽電池としては、効率だけでなく、輸送や展開方法、コスト、資源量、耐宇宙環境性も考慮する必要がある。薄膜アモルファスシリコン太陽電池は、ガリウムヒ素系などの化合物半導体に比べ効率は低いが、資源量の問題がないこと、低コストであること、宇宙放射線に対する耐性が期待できること、折り畳めるためロケットでの輸送に便利なこと、から有力な候補となっている。

一方、集光熱を利用した太陽熱発電は、集光鏡に高精度の太陽指向制御が必要であるが、原理的には、太陽電池の数倍の変換効率が可能である。また太陽電池の場合と比べて発電システムをコンパクトに建設できるという利点がある。宇宙発電所への応用には、集光器の展開方式、熱機関の長寿命化と排熱方式、軽量化について今後研究を進める必要がある。

3.2 送受電 宇宙発電所の電力は無線で地上の受電所に送られる。送電媒体としては、将来的には光 (レーザー) も候補となりうるが、当面は、送受電効率の点からマイクロ波が利用されると考えられている。マイクロ波ビームの拡がりりは、その周波数が高いほど小さくなるので、地上の受電アンテナのサイズの点からは、周波数が高いほど望ましい。一方、送電の周波数の選定には、送受電の高周波回路での電力効率、素子のコスト、雲や雨による減衰率も考慮する必要がある。現段階では、電子レンジ等に使われている

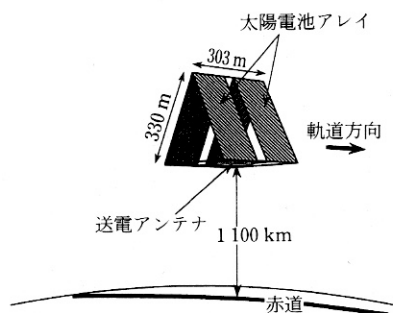


図3 宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループが検討を進めている太陽発電衛星 SPS 2000 のモデル (各辺約303 mの三角柱形状で、赤道軌道高度1100 kmに投入し、10 MW 規模の発電を行う)

2.45 GHz 付近の周波数（産業、医学、医療用バンド）が、大気による減衰も少なく、素子の技術的成熟度の点からも、マイクロ波送電に適していると考えられている。この周波数帯のマイクロ波を使用する場合、送電変換効率、および受電変換効率はそれぞれ 80%、大気中の伝送効率は 97% が達成できると予測されている。

宇宙発電所から遠く離れた地上の受電アンテナ（レクテナ）へマイクロ波ビームを正確にターゲットさせるため、地上受電局からのパイロット信号を検出してフェーズドアレイによるビームの方向制御を行う。36 000 km 離れた静止衛星軌道上の径 1 km の送電アンテナから、2.45 GHz のマイクロ波で送電する場合、地上には直径 10 km 規模のレクテナが必要となる。巨大なレクテナによる生態環境への影響を最小限に抑えるため、80% 程度の太陽光を透過するワイヤタイプのレクテナが考案されている。

3.3 輸送と建設 アメリカのリファレンスシステムでは、宇宙発電所を静止衛星軌道に建設することを前提としているが、輸送費が小さくほかの衛星との干渉も少ない、より低い軌道のオプションも有り得ると現在では考えられている。

商業的にも成立するような宇宙発電所の建設には、低コスト打上げ手段の開発が大前提である。現在の宇宙輸送系の延長線上で考える限り、その電力コストは、現在の地上電力よりもはるかに高いものとなる。アメリカで開発が進められている、再使用形単段式ロケット（SSTO）では、従来の 1/10 から 1/100 以下の輸送費が期待されている。

一般に無重力の世界と考えられている宇宙空間であるが、大型構造物の建設と制御にとっては地上と同様、重力の影響が無視できない。従来の小

形の衛星では必要のなかった“宇宙土木工学”とも呼ぶべき新しい分野の技術が要求される。大型構造物の建設は、単純繰返し作業が多いため、できるだけロボットを利用し、制約条件の厳しい有人作業は必要最低限とすべきである。この場合、現在考えられているような、高価で複雑な宇宙用ロボットではなく、機能的に地上の商業用ロボットに近い自動機械が用いられると考えられる。

4. 今後の展望

宇宙発電システムは、我が国の SPS 2000 計画以外にも、ヨーロッパ、ロシア、アメリカのグループによりいくつかの構想が提案されている。宇宙発電システムのキーテクノロジーであるマイクロ波による電力伝送については、カナダやフランスで、数十 kW 級の地上デモンストレーション実験が検討されている。宇宙発電システムは、地球規模の環境問題の解決をめざしたものであり、宇宙空間という人類共通のフロンティアを利用することから、これからの本格的な研究開発は、国際的な共同研究の枠組みで実施されていくものと考えられている。

文 献

- (1) Glaser, P.E., Power from the Sun : Its Future, *Science*, **162** (1968), 867-886.
- (2) DOE/NASA, *Program Assessment Report Statement of Finding—Satellite Power Systems Concept Development and Evaluation Program*, DOE/ER-0085 (1980).
- (3) Nagatomo, M. ほか, An Evolutionary Satellite Power System for International Demonstration in Developing Nations, *Space Power*, **12** (1993), 23-36.

(原稿受付 1995年4月12日)