

3 宇宙発電は地球を救えるか

宇宙科学研究所 佐々木進

1. はじめに

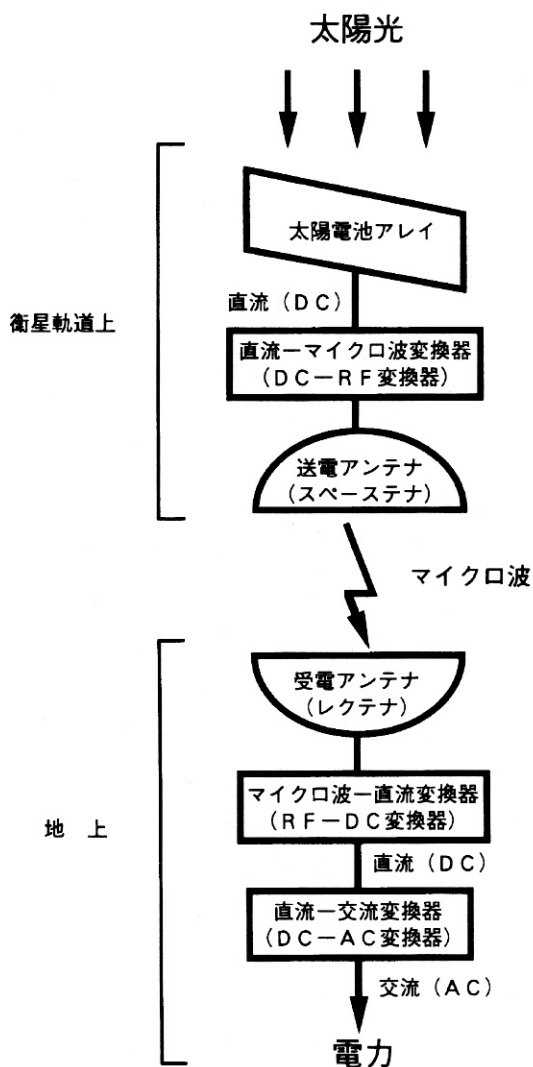
はるか夜空に浮かぶ宇宙の発電所。そこから地上へ送られるクリーンでふんだんな電気エネルギー。増え続けてきた二酸化炭素の大気中の濃度もようやく減少に転じ始めた…。21世紀半ばには、このような夢が現実のものになるかも知れない。

2. 地球環境問題と人類の将来シナリオ

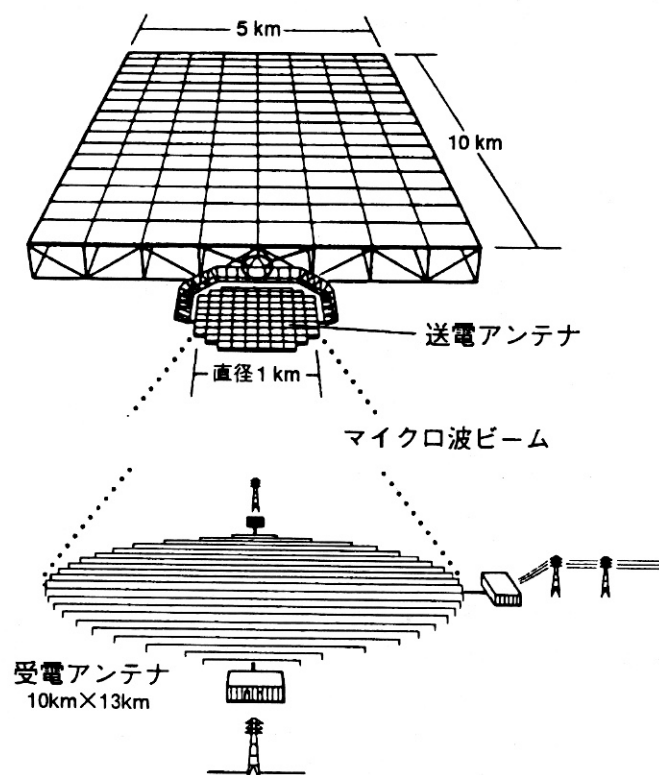
エネルギーは現代社会の営みを支えている最も根源的な基盤である。現在人々が利用しているエネルギーの8割以上は、膨大な量の石油や天然ガス、石炭などの化石燃料を燃やすことにより得られている。しかし、化石燃料の使用は、空気中の炭酸ガス濃度の増大をもたらす最大の原因となっている。このような環境への負荷が大きい化石燃料に今後とも頼りつづけた場合、21世紀の半ばには、地球環境の悪化により、人類は成長の限界を迎える可能性が高い。

21世紀における人類の生存については、3つのシナリオがある。第一は成り行きにまかせ限界に到達した結果大きな混乱に陥ること、第二はダウンサイジングした新たな生活様式を生みだし決定的な破局を回避すること、そして第三は技術的なイノベーションにより成長の限界を乗り越えることである。

人類の将来にとって最も望ましいと思われる第三のシナリオを実現するためには、化石燃料に代わる新しいエネルギー源を開発する必要がある。ここでは、化石燃料の代替エネルギーシステムとして有望な宇宙発電所について、その原理、特徴、必要な技術を紹介し、人類の将来のエネルギー源としての可能性について述べる。



第1図 宇宙発電所と地上受電設備の基本的な構成[1]。宇宙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、ユーザーに配電する。



第2図 NASAの太陽発電衛星概念図（リファレンスシステム）。1基の大きさは5km x 10km、出力は5GW。静止衛星軌道に60基配置し、総発電量300GWを想定した。

3. 宇宙発電所とは

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15,000分の1に過ぎない。太陽エネルギーは大規模でクリーンなエネルギー源として大きな可能性を持っている。しかしながら、総量として大きな太陽エネルギーも、エネルギー密度という点では希薄なため、いかにして大規模に太陽エネルギーを集め利用することができるかが重要な問題となる。

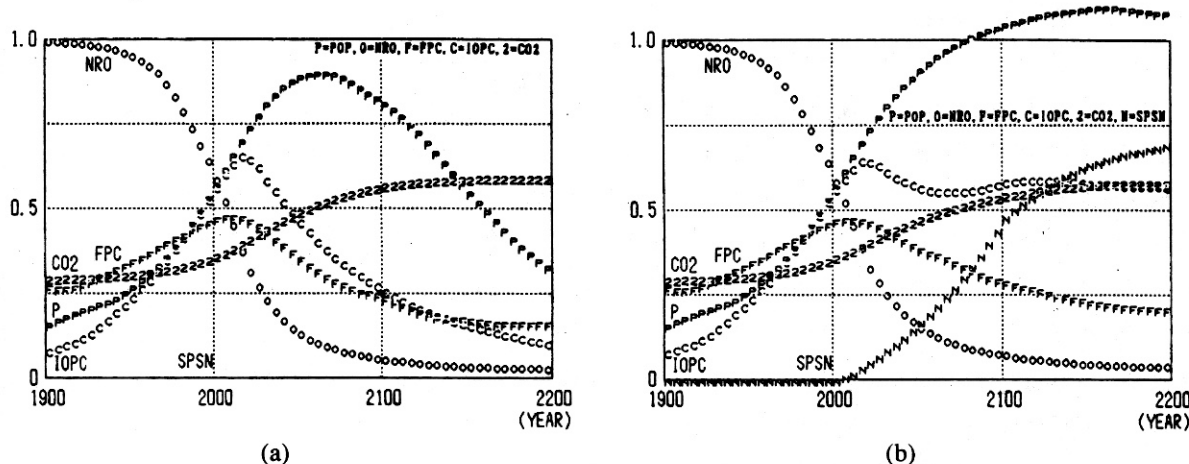
地球近傍での宇宙空間の太陽エネルギー密度は平方メートルあたり約1.35キロワットであり、夜があり天候の影響を受ける地上での平均日射量の5～10倍である。地上と異なり土地問題のない広大な宇宙空間は、大規模な太陽エネルギー取得の場として優れている。宇宙発電所は、宇宙空間で太陽エネルギーを電力に変換し、マイクロ波などの無線で地上に送電する電力設備であり、太陽発電衛星（SPS）とも呼ばれている。地上では、無線送電された電力を受電し、商用電力に変換して、既設の地上電力網を通じ利用者へ配電する。第1図にこの電力システムの基本的な構成を示す。

宇宙発電所の最初のアイディアは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[2]。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なわれた。この時概念設計された宇宙発電所は、リファレンスシステム[3]と呼ばれ、現在でも宇宙発電所のひな形となっている（第2図）。しかしながら、この研究は21世紀初頭のアメリカの全電力を宇宙発電所で賄うという巨大なシステムを対象としたため技術的な飛躍がありすぎ、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、実現のための一步を踏出すこと

無く検討は終了した。その後宇宙発電所の構想は遠い将来の夢物語とされ研究は停滞したが、1980年代の後半になってからは、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、宇宙発電所構想が再び注目をあびるようになった。

宇宙発電所が、地球環境問題の解決にいかなる役割を果たし得るかについては、山極によりワールドダイナミックスモデルを用いた将来予測シミュレーションが行われている[4]。第3図の (a) は現在の延長上にある人類社会の将来予測である。地球環境の悪化により、21世紀半ばには人類は成長の限界を迎え、その後衰退に向かうことを示している。一方同図 (b) は、西暦2000年から大規模な宇宙発電所を計画的に建設し、地球環境の悪化をくい止め得た場合のシナリオを示している。この場合は、人類社会は成長の限界を回避して緩やかではあるが成長を維持できることを示している。無論コンピューターシミュレーションで人類の将来を決定的に予測することは不可能ではあるが、このシミュレーション結果は、宇宙発電所が環境保全とエネルギー供給の面から人類社会の持続的な成長を支えることのできる可能性を示している。ただしこのシミュレーションは、地球の全エネルギー消費量に対するSPSへの年間エネルギー投資量の割合が1%の場合であり、人類の大きな宇宙発電所への取り組みが前提となっている。

宇宙発電所の構築には、宇宙への大量輸送技術、宇宙での大型構造物建造、大電力太陽発電と無線送電技術という新しい技術が必要である。しかしながら、いずれの技術も、核融合のような未踏の原理の検証を必要とするものではなく、現在の科学技術の延長上にある。実際、例えば放送衛星は、衛星の太陽電池パネルで発電した電力を電波という形で地上に送ることにより信号を伝送している。放送衛星の送電電力は微弱ではあるが、電気的には、宇宙で発電した電力を地上に無線送電するという点で、宇宙発電所と同じ機能を果たしている。技術の原理的な部分が既に検証されているという点が、近未来のエネルギー



縦軸のフルスケール 人口：POP=1x10¹⁰ (人)、一人当たりの工業資本生産：IOPC=1000 (ドル／年・人)
石油資源：NRO=2x10¹² (バレル)、CO₂量：CO2=1000 (PPM)
一人当たりの食料：FPC=1000 (kg／年・人)、SPS 台数：SPSN=4000 (台)

第3図 人類社会の将来予測 [4]。(a) は地球エネルギー資源のみの場合の予測で、地球環境の悪化のため21世紀中盤には人類は成長の限界を迎える。一方、(b) は西暦2000年から大規模な宇宙発電所の建設に着手した場合であり、人類社会は成長を持続しうることを示している。

システムとしての宇宙発電所の大きな特長と言える。

4. 宇宙発電所の構築のための技術

宇宙発電所は、技術的には手の届くところにあるとはいえ、現在の高価な宇宙技術で構築する場合は、その電力コストは地上での発電コストと比べ桁違いに高いものとなる。宇宙発電所の電力コストが地上発電コスト並みとならない限り、宇宙発電所は現実のエネルギーシステムとして社会に受入れられることはない。結局、如何にすれば低コストで宇宙発電所を建設できるかが、重要な技術的課題ということになる。

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に注目する限り、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の静止衛星軌道が最も望ましい。しかしながら、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、その軌道は単位体積当たりの経済的価値の高い衛星が優先して使用すべきであろう。大きなスケールのシステムとならざるを得ない宇宙発電所は、資材輸送費の点からも、より低い軌道の方が現実的である可能性がある。

宇宙での発電方式としては、太陽光発電と太陽熱発電の二方式がある。宇宙発電所の最初の段階では、宇宙での使用実績が豊富で、精密な太陽指向精度の不要な太陽光発電が使用されると考えられている。宇宙発電所用の太陽電池としては、ロケットでの輸送と宇宙空間での展開に便利なフィルム状のアモルファスシリコン太陽電池が望ましい。このタイプの太陽電池は極めて薄く作ることができるため、結晶シリコンのタイプに比べて宇宙放射線にも強いことが実験的に示されている。ただし、アモルファスシリコン太陽電池の効率は現状で最大10%程度であり、他のタイプの太陽電池に比べ低いため、今後高効率化のための研究が必要である。

送電は、電子レンジに使われている2.45GHz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。地上の受電アンテナへマイクロ波ビームを正確に指向させるため、受電局からのパイロット信号を利用した送電アンテナの位相制御を使う必要がある。ギガヘルツ帯の周波数の位相制御技術は実験室レベルの研究が開始されたばかりであり、その実用には多くの解決すべき電子工学分野の課題がある。

宇宙からのマイクロ波電力を低損失で受電するためには、地上に大きなアンテナが必要である。例えば、静止衛星軌道から2.45GHzのマイクロ波で送電する場合は、送電アンテナの直径を1kmとしても、地上では直径10km規模の受電アンテナが必要である。受電アンテナは、環境へのインパクトを最小限に抑えるため、ワイヤーメッシュで構成される太陽光透過型のアンテナを新たに開発する必要がある。

宇宙発電所を構築するためには、宇宙空間で大型の構造物を建造するための新しい技術が必要である。周回運動による遠心力と地球重力が釣りあう軌道上は、通常、微小重量の世界と考えられており、実際、小さなスケールの物体を移動したり伸ばしたりする時には重力の影響を考える必要はない。しかし、スケールの大きい構造物に対しては、軌道上で無視できない重力が働く。大型構造物の建設にあたっては、軌道上で働く重力を考慮に入れた建築手法と手順を確立する必要がある、いわば、”宇宙建築学”とも呼ぶべき新しい学問分野の展開が必要とされる。

宇宙発電所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。現在の宇宙輸送の高コストをそのまま適用した場合には、宇宙発電所は経済的に成立し得ない。宇宙発電所からの電力を地上の電力コストとほぼ同等にするためには、革新的な低コスト打ち上げ手段の開発が必要条件である。宇宙開発の分野では、従来、輸送能力の向上に研究開発の方向がかたより、宇宙輸送のコストを下げるための努力は不十分であった。しかしながら、最近では、宇宙輸送の低コスト化は、宇宙開発の分野の中心的な課題となりつつある。例えば、米国を中心に研究が進められている再使用型単段式ロケット (SSTO) は、輸送費を現在の1/10から1/100程度にすることを目指しており、今後革新的な低コスト打ち上げシステムの登場が期待できる時代になっている。

5. 現在検討されている宇宙発電所の構想

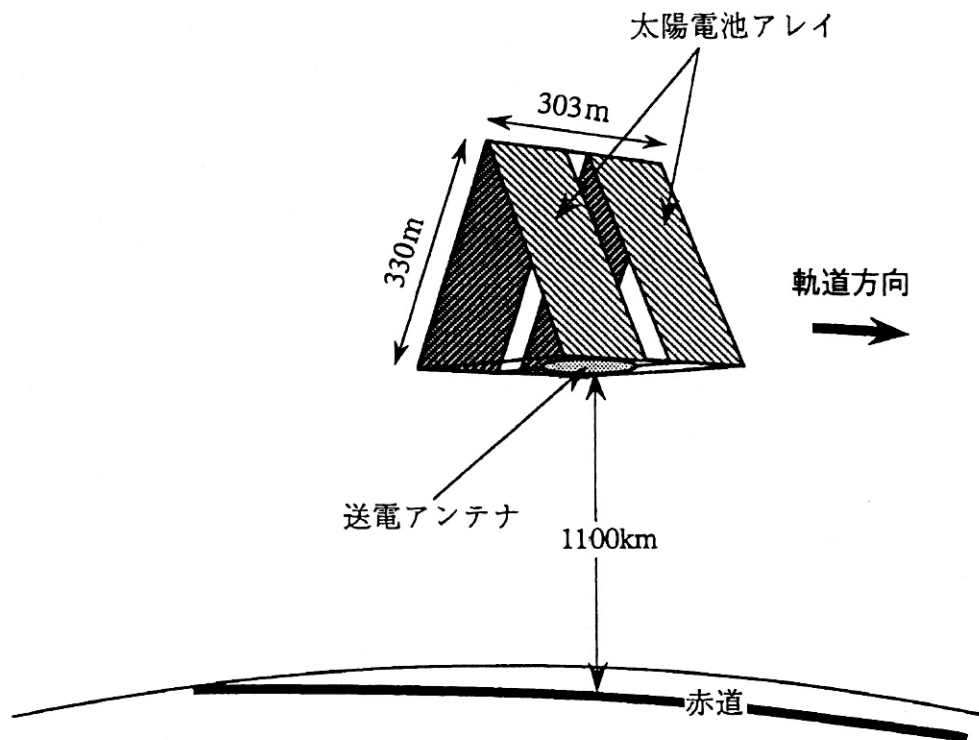
宇宙発電所の最近の構想としては、ヨーロッパの1MW発電衛星、ロシアの0.25MW発電衛星、米国の0.1MW発電衛星等が検討されている。我が国でも、SPS2000と呼ばれる太陽発電衛星 [5] が検討されており、その活発な研究活動により、世界的にも注目をあびる構想となっている。

SPS2000は、文部省宇宙科学研究所に設置されている太陽発電衛星ワーキンググループが設計研究を進めている太陽発電衛星のモデルである。このモデルは10MW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1100km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、第4図に示すような1辺約300m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130mx130m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。発電部は幅3m、長さ330mのアモルファスシリコンの薄膜太陽電池アレイ180本で構成する。発電電圧は、集電ケーブルでの抵抗損失を抑えるため1000Vの高電圧である。送電は、2.45GHz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。現存するロケットでは、SPS2000の資材を1回で軌道に輸送することは不可能なため、10～20回程度に分割して輸送する。但し、全資材を輸送してから、発電所としての機能を持つのではなく、初期の数回の打ち上げで1MW程度の発電所として運転を開始し、その後順次資材の輸送にともない発電力を増強するという建設シナリオを想定している。輸送ロケットは、軌道及び打ち上げコストの点から、現状ではヨーロッパのアリアンVの使用が現実的である。

6. おわりに

宇宙発電所は、3で述べたように、地球環境問題を解決し人類社会を持続的な成長に導くためのエネルギーシステムとして大きな可能性をもっている。また、4で述べたように宇宙発電所を構築するための技術には原理的な問題点もない。しかしながら、宇宙発電所を実現するためには、関連技術、コスト評価、環境への影響評価のための科学研究を強力に推進する必要がある。特にマイクロ波などの電磁波が生態系あるいは生体に与える影響



第4図 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 SPS2000 のモデル。赤道軌道高度 1100km に投入し 10MW の電力を地上へ送電する。

は最近マスコミにも取り上げられ、その許容レベルは研究者によって見解が大きく分かれている。マイクロ波受電領域は立ち入り禁止の管理区域とすることが必要であるが、ビームをできるだけ絞るための技術研究とともに、生態系へ与える影響についても科学的な評価が可能なデータを蓄積する必要がある。宇宙発電所は、これまで遠い将来の夢として語られることは多かったが、その実現へ向けての具体的な研究は必ずしも充分であるとは言えない状況にあった。しかし我が国でも、平成2年に政府レベルで提案された「地球再生計画」で、宇宙太陽発電は核融合と並んで次世代を担う革新的エネルギー関連技術の開発として取上げられ、その現実的な可能性が社会一般に受入れられつつある。宇宙発電所に関わる研究を行う研究者や学生の数も次第に増え、少しずつではあるがこの分野への研究費もつくようになってきた。宇宙発電所の実現に必要な研究体制もようやく整いつつあり、21世紀半ばに宇宙発電所を実現する夢も次第に現実のものとなりつつあると言えよう。

参考文献

- [1] 太陽発電衛星ワーキンググループ SPS2000 タスクチーム、太陽発電衛星 SPS2000 概念概要、成尾芳博編集、1994 年
- [2] P.E.Glaser : Power from the Sun : Its Future, Science, Vol.162, (1968) , pp.867-886.
- [3] DOE/NASA : Program Assessment Report, Statement of Finding - Satellite Power Systems Concept Development and Evaluation Program, DOE/ER-0085, 1980.
- [4] 山極、金田、石川、WORLD-3 による太陽発電衛星開発評価モデル、第 12 回宇宙エネルギーシンポジウム講演集、pp.103-109、1993 年
- [5] M.Nagatomo and K.Itoh, An Evolutionary Satellite Power System for International Demonstration in Developing Nations, Space Power, Vol.12, pp.23-36, 1993.