

宇宙発電所の 実現に向けて

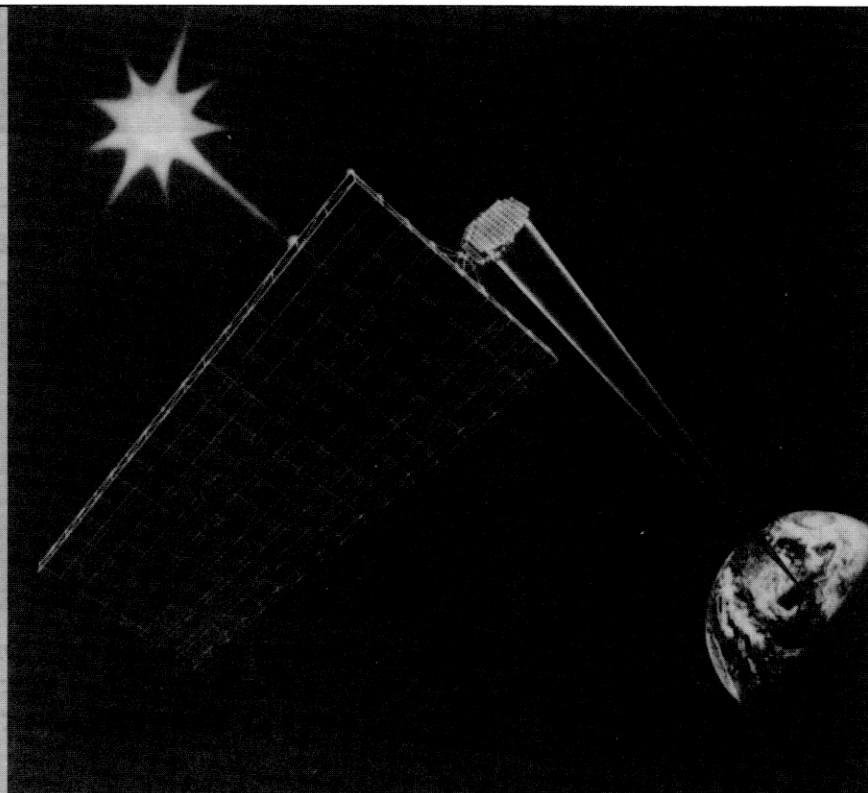


図1 DOE/NASAの太陽発電衛星概念図(リファレンスシステム)。発電部5 km×10 km, 出力5 GW。静止衛星軌道に60基配置し、総発電量300 GWを想定した。

佐々木 進*

成尾 芳博**

長 友 信 人***

地球温暖化に代表される地球環境問題は、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料の大量消費により引き起こされている。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、必要な技術の研究現状、将来の展望について述べる。

1. 宇宙発電所とは

地球近傍での宇宙空間の太陽エネルギー密度は、 1.4 kW/m^2 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倍に達する。この太陽エネルギーを、太陽電池または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宇宙電力設備を、宇宙発電所または太陽発電衛星と呼んでいる。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。

宇宙発電所のアイディアは、すでに20年以上も前に、アメリカのグレーザー博士によって発案された⁽¹⁾。1970年代には、米国エネルギー省(DOE)によって組織的な概念設計が行われ、技術的な可能性の追求だけでなく、社会、経済、環境の立場からの広範な評価研究が行われた。このとき、NASAを中心として設計された太陽発電システムは、リファレンスシステム⁽²⁾と呼ばれている(図1)。しかしながら当時の検討では、21世紀に必要とされるアメリカの電力のすべてを賄うとい

宇宙科学研究所 衛星応用工学研究系 *助教授 理博(ササキ ススム),
助手(ナルオ ヨシヒロ), *教授 工博(ナガトモ マコト)

う、あまりにも巨大な規模のシステム（発電総量 300 GW、総重量 300 万トン）を検討の前提としたため、実現性に飛躍がありすぎ、将来のための継続的な研究の必要性は認められたものの、具体的な計画としては受入れられなかった。

その後、宇宙発電所は遠い将来の計画と位置づけられ、その研究は、世界各国の個々の研究者レベルで細々と進められてきた。現在でも、一般に宇宙発電所と言えば、15 年近くも前のリファレンスシステムが“ひな型”となっているが、このことは、リファレンスシステムの研究が偉大であったことを示すと同時に、その後の研究がいかに貧弱であったかを示している。しかしながら、1980 年代の後半になってからは、深刻化する地球環境問題を動機として、新しい技術と発想に基づく、より現実的な宇宙発電所の構想が生まれつつある。

現在、人類の総需要エネルギーの 8 割以上は化石燃料で賄われており、地球温暖化の主因である炭酸ガスの約 9 割は、化石燃料の消費によりもたらされると言われている。化石燃料の消費による、地球環境の急速な悪化をくいとめるには、真の意味でクリーンな、化石燃料に代わるエネルギー供給システムを、早期に開発する必要がある。

現代社会が必要としているエネルギー供給量は膨大であるが、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。宇宙発電所構想は、豊富な太陽エネルギーをそのエネルギー源として利用すること、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こと、発電にともなう廃棄物がないことから、人類社会が直面している地球環

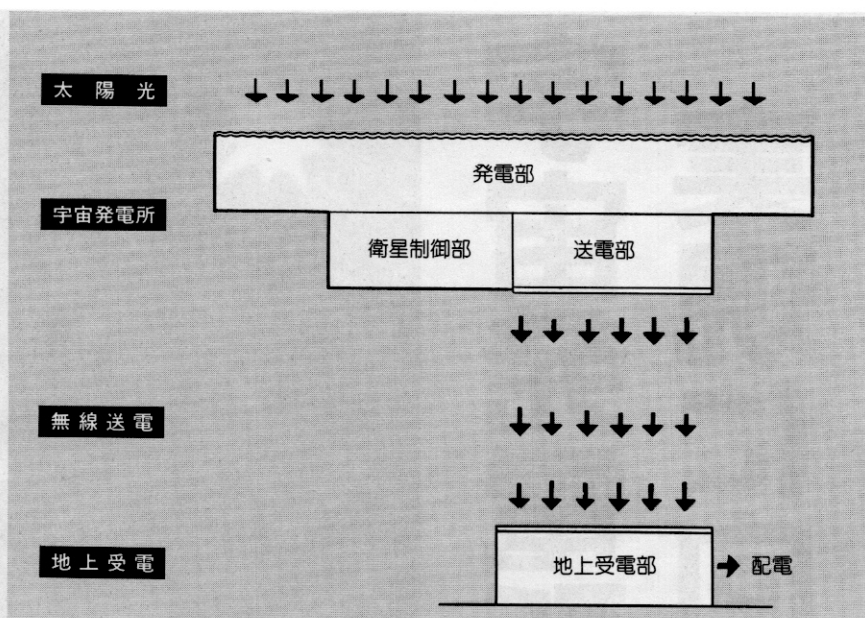


図2 宇宙発電所の基本的な構成と地上での受電。宇宙発電所では太陽エネルギーを利用して発電し、電気エネルギーを電波に変換して地上の受電設備に無線送電する。受電所からは、既存の配電網を利用して、需要者に電力を供給する。

境問題を根本的に解決し得る、エネルギー供給システムとして大きな可能性を持っている。

宇宙発電所の構築には、宇宙への打ち上げ輸送技術、宇宙での大形構造物建造、太陽発電、電力伝送技術が必要である。これらの技術開発には、今後とも新規の研究が必要ではあるが、いづれも核融合のような未踏の原理の検証を前提とした技術ではなく、現在の科学技術の延長上にある。この点が、近未来のエネルギーシステムとしての宇宙発電所の大きな特徴である。

宇宙発電所は、技術的には手の届くところにあるとは言え、現在の宇宙技術と宇宙開発体制の延長上に宇宙発電所を描く限り、その電力コストは地上での発電より桁違いに高価なものとなる。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かぎり、代替エネルギーシステムとしては“絵に描いた餅”に過ぎない。いかにすれば低コストで宇宙発電所を建設できるか

が、現在の最大の技術的課題である。

2. 宇宙発電所の技術

宇宙発電所は、図2に示すように、発電部、送電部、衛星システム制御部、構体から構成される。

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では高度 36 000 km の静止衛星軌道が望ましい。アメリカのリファレンスシステムも、静止衛星軌道に発電所を建設することを前提としている。しかしながら、静止衛星軌道は、現在でも通信、地球観測衛星で混み合っている。宇宙発電所を静止衛星軌道に配置する場合には、宇宙発電所とこれら通信、地球観測衛星との複合システムを考えるべきであろう。また、重厚長大システムとならざるを得ない電力システムは、資材輸送費の点からは、より低い軌道の方が望ましいとも言える。ただし、宇宙基地のような高度 1 000 km

以下の軌道は、空気抵抗による落下率
が大きいので、宇宙発電所のような大
型構造物の建設には適していない。

発電部は、太陽電池を用いた光発電、
または太陽輻射熱を利用する太陽熱発
電が候補である。太陽電池の場合は、
すでに宇宙での使用実績も豊富で、し
かも精密な太陽指向精度が不要である
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%に達している。各国で
競って高効率化の開発研究が行われて
いるが、それでも最大効率は、25~30%
が限度とされている。宇宙発電所用には、
低コストでロケットでの輸送に便
利な薄膜アモルファスシリコン太陽電
池が望ましいが、効率は現状で10%
程度である。ガリウム-ヒ素系は高効
率であるが、高コストであり資源も限
られているので、大量の太陽電池を必
要とする宇宙発電所ではシリコン系が
本命である。

一方、太陽熱発電は、反射鏡を用い
た高精度の太陽指向が必要であるが、
原理的には、太陽電池の数倍の変換効
率が期待できる。また太陽電池の場合
のような広範囲にわたる集電ケーブル
の展開が不要であるという特徴があ
る。宇宙発電所への応用には、長寿命
化と放熱対策、軽量化が今後の課題で
ある。

送電は、マイクロ波と光（レーザー）
が候補である。電力伝送ビームの広が
りが大きいほど、地上に大がかりな受
電のための道具立てが必要となる。
ビームの収束性が高いという点では、
レーザー送電が有利であるが、電力変
換効率の点から、マイクロ波送電が当
面有力と考えられている。レーザー送
電の場合、特に受電部でのレーザーか
ら電気への変換効率が低く現状で

20%以下である。

マイクロ波ビームの広がり角 θ は、
 $\tan\theta=\lambda/Dt$ （ λ :マイクロ波波長、 Dt
:送電アンテナ径）で与えられるので、
ビームの広がり角を小さくするには、
波長の短いマイクロ波を使用するのが
望ましい。波長の選定には、送受電の
高周波回路での電力効率、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、電子レンジに使われ
ている2.45 GHz付近の周波数が、大
気による減衰が少なく、技術の成熟度
から、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%と見
積もられている。

地上受電アンテナへのマイクロ波の
正確なビーム指向を行うため、地上受
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ことが
必要である。この方式では、パイロ
ット信号が途絶えたときは、ビーム送電
が停止するフェールセーフ機能が容易
に確保される。

マイクロ波の地上アンテナはレクテ
ナと呼ばれ、静止衛星軌道からの
2.45 GHz送電の場合、送電アンテナ
径を1 kmとしても、地上では、直径
10 km規模のレクテナが必要である。
レクテナは、マイクロ波通信での受信
アンテナの場合のような、おわん形の
ものではなく、平面的なワイヤー構成
のものが提案されている。このタイプ
のアンテナは、80%程度の太陽光を
透過するので、地上の生態環境へのイ
ンパクトが少ないという利点がある。

宇宙発電所を構築するためには、宇
宙空間に大形構造物を建造する技術が
必要である。アメリカのリファレンス

システムの場合は、5 GWの発電所と
して、5 km×10 kmのスケールの構造
物が検討された。このような大形構造
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て、
有人作業は必要最低限とすることが望
ましいとされている。ロボットは、建
設だけでなく、建設後のメンテナンス
作業にも使用される。
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、大形構造物に
とっては地上と同様、地球方向に働く
重力の影響が無視できない。大形構造
体の姿勢制御は、できるだけ重力に逆
らわない重力安定方式をとることが基
本とされている。

本格的な商業用宇宙発電所の建設に
は、低コスト打ち上げ手段の開発が大
前提である。現在、比較的安い打ち上
げ手段と考えられているアリアンV
の場合でさえも、トン当たり10億円
以上の輸送費がかかる。これでは、宇
宙発電所本体を如何に低コストで製作
しても、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。商業用発電所の実現には、アメリ
カなどで研究が進められている再使用
形単段式ロケット（SSTO）のような、
画期的な低コストの宇宙輸送手段の実
用化が必須である。SSTOでは、輸
送費が現在の1/10から1/100以下に
なると期待されている。

3. 太陽発電衛星 SPS 2000 の設計研究

宇宙発電所の構想は、現在、主とし
て、日本、アメリカ、ヨーロッパ、ロ
シアで検討が進められている。いづれ
も、アメリカのリファレンスシステム
の研究成果を引き継ぎつつも、実現に

至らなかった点への反省に立って、より現実的な宇宙発電所を目指している。特に、わが国のこの分野の研究は活発で、最近では世界的にも注目をあびるものとなっている。

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では、そのひとつの活動として、太陽発電衛星“SPS 2000”の設計研究を大学、国立研究機関、民間の研究者と共同で進めている。この研究は、現在および近未来の技術をベースとして、社会的にもより現実的な、エネルギーシステムとしての太陽発電衛星を、新たに設計することを目指したものである⁽³⁾。

SPS 2000 では、(1) 西暦 2000 年初頭の建設開始を目標とする、(2) 発電規模は将来の本格的な発電システムとしての評価が可能な 10 MW 規模とする、(3) 低高度赤道軌道を利用する、(4) エネルギー供給システム

として低コスト化を図る、ことを基本方針として、概念設計を行っている。

図 3 に SPS 2000 の概念図、以下にその設計研究の概要を示す。

軌道は、赤道上高度 1100 km 円軌道とした。この軌道では、静止衛星軌道のように固定の受電局に常時電力を送電することはできないが、各地地上局は約 110 分おきに受電できる。軌道傾斜角をもつ軌道では、1 局当たり 1 日に数回しか受電のチャンスがない。軌道高度は、輸送コストとマイクロ波の広がりからの立場からは、できるだけ低高度が望ましいが、空気抵抗による落下率、宇宙デブリ(人類の宇宙活動に伴って発生しつつある宇宙のごみ)との衝突確率を考慮して、高度 1100 km を選定した。赤道付近に設置される受電所からの電力は、周辺の発展途上国の住民の電力として有効に利用することができる。

発電所の形状は、図 4 に示すような

1 辺約 300 m の三角柱とした。上 2 面に太陽電池をはりつけ、下面に 150 m×150 m のマイクロ波送電アンテナを取り付ける。これにより、能動的な姿勢制御を行わなくても、重力安定により、アンテナは常時地球中心を向き、三角柱の軸は南北に向くことになる。

トラスは、直径 12 mm、長さ 3 m 程度のアルミパイプを部材とし、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。このような構造的にあそびをもつ大形構造物の宇宙空間でのダイナミックスについては、これまでほとんど研究されていない。このため、長さ 24 m のトラスの実物大の部分モデルを製作し、その振動特性の試験を行いデータを得ている(写真 1)。

太陽電池は、アモルファスシリコンの薄膜太陽電池を使用する。アモルファス太陽電池は、宇宙用としては使用実績がほとんどなく、宇宙環境特に放射線環境での劣化を評価する必要がある。このため、現段階で入手可能なアモルファス薄膜太陽電池について高エネルギー電子線の照射試験を実施した。この結果、アモルファス太陽電池は、従来の単結晶太陽電池と比較して、放射線耐性が高いことが判明した。

SPS 2000 では、幅 3 m、長さ 330 m の太陽電池アレイ 180 本で発電を行う。発電電圧は、集電ケーブルでのジュール損を抑えるためできるだけ高い方が望ましいが、周辺プラズマとの電氣的干渉を考慮して、1000 V に設定した。

SPS 2000 では、デブリの存在確率が相対的に低い軌道を選んでいるとはいえ、デブリ衝突による太陽電池の部分的な破壊は不可避である。そのため、薄膜太陽電池を模擬したフィルムに

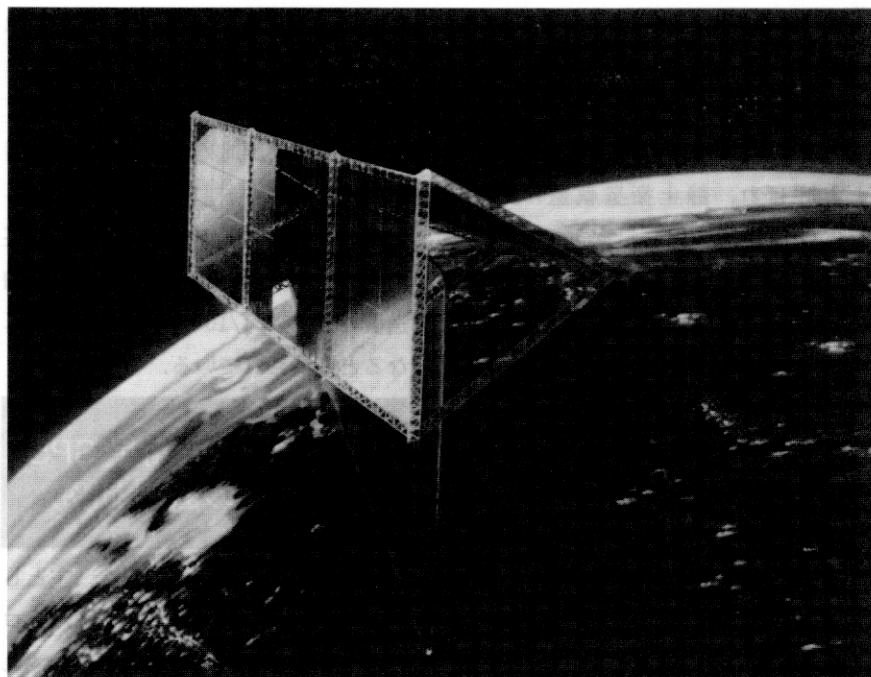


図 3 宇宙科学研究所の太陽発電衛星ワーキンググループが検討を進めている太陽発電衛星 SPS 2000。赤道軌道高度 1100 km に投入し 10 MW の発電を行う。

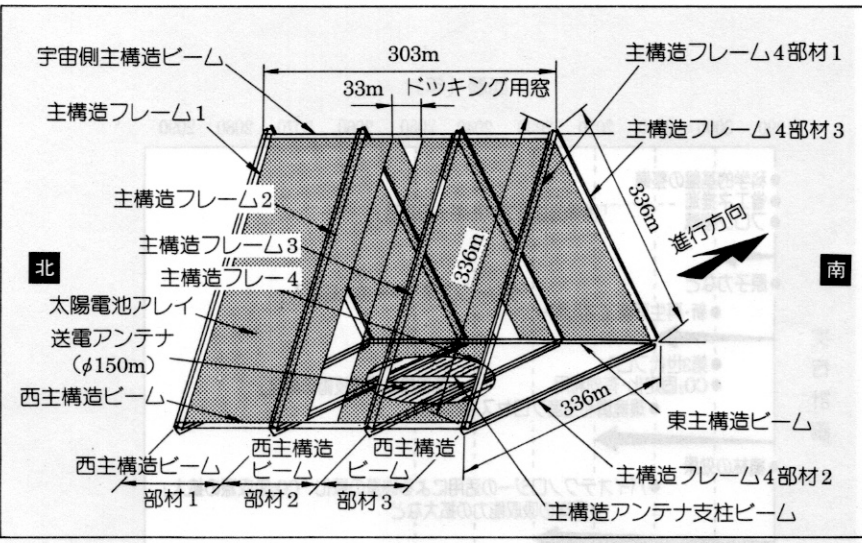


図4 SPS 2000 の形状と構造

レールガンからの高速飛翔体 (5 km/s) を衝突させる実験を行っている。その破壊形状 (図5) に基づき、太陽電池のユニットサイズを選定するとともに、破壊部の露出電極で発生するアーク放電頻度をコンピュータシミュレーションで計算し、10年間で90%の発電性能が維持されることを確認した。

送電は、2.45 GHz のマイクロ波を使用する。送電アンテナは、スリットアンテナと駆動アンプを一体化したものを素子としている。アンテナとアンプの設計は現在、北海道大学の伊藤研究室と東北大学の安達、澤谷研究室で行われている。送電ユニット総数は、約百万個となり、スペースステナと呼ばれる 150 m スケールのフェーズドア

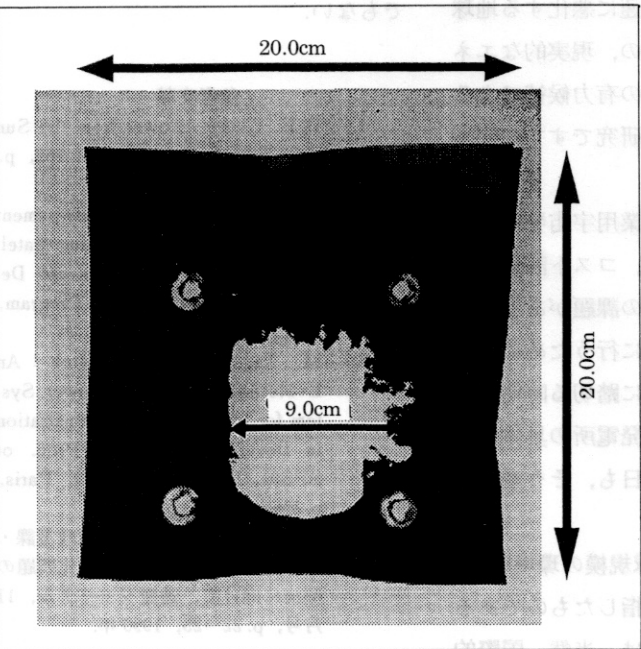


図5 フレキシブル薄膜太陽電池を模擬したポリエステルフィルムへのデブリ衝突実験。直径1 cmの高速弾 (5 km/s) の衝突により、9 cmスケールの破壊が生じた。

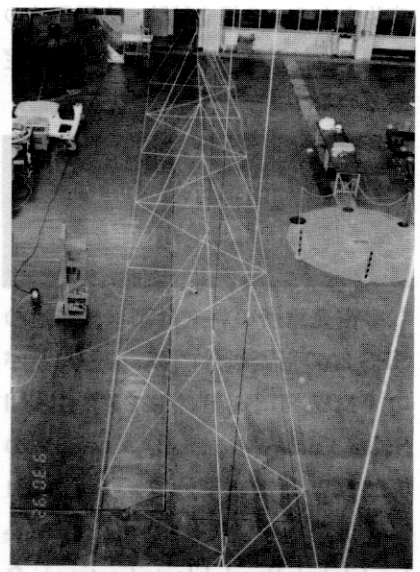


写真1 SPS 2000 実物大トラスの部分モデル (全長 24 m) の振動特性試験の様子

レイアンテナを構成する。SPS 2000 の総重量は約 200 トンである。現存するロケットでは、SPS 2000 の資材を 1 回で軌道に輸送することは不可能であり、20 回程度に分割して輸送する。ただし、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 1 MW 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伴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、軌道およびコストの点から、現状ではアリアン V の使用が最も現実的である。建設は、無人とし、ロボットを利用する。ロボットは、三角トラスの建設、トラス間への太陽電池アレイの展開・取り付け、送電アンテナの設置を行うとともに、完成後は、消耗品である太陽電池の張替えなどのメンテナンス作業を行う。このためのロボットについては、現在、電力会社の高圧線メンテナンス用ロボットを参考に、2 腕式 6 自由度の地上試験モデルを製作中で、

実物大トラスの組立試験、太陽電池の展開・取付試験を実施することを予定している。

4. 宇宙発電所の今後の展望

宇宙発電所の将来計画は、前述のSPS 2000計画以外にも、ヨーロッパの1 MW 発電衛星（GSEK：Global Solar Energy Concept）、ロシアの0.25 MW 発電衛星、アメリカの0.1 MW 発電衛星（IGRE：the Institute for Global Rural Electrification）などの構想が提案されている。

また、宇宙から地上への電力伝送の前段階として、発電衛星から電力消費衛星への衛星間の電力伝送の構想も、ヨーロッパとわが国で検討されている。いずれも、将来の本格的な商業用宇宙発電所に先立つ、技術検証用の試験発電所として位置づけられているが、現在のところ、実施のための予算が認められた計画はない。

宇宙発電所の一つ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、地上での本格的な実験が計画されている。カナダでは、Alaska' 21と名づけられた1.6～24 kmの距離での50 kW～1 MWクラスの送電実験が計画されている。フランスでは、離島への送電実験（3 km、100 kW）の計画が提案されている。

わが国では、平成2年6月18日の「地球環境保全に関する関係閣僚会議」において、産業革命以来変化してきた地球を再生することを目指した「地球再生計画」が申し合わされている⁽⁴⁾。

その内容は、当時の海部首相によりヒューストンサミットで提案され、経

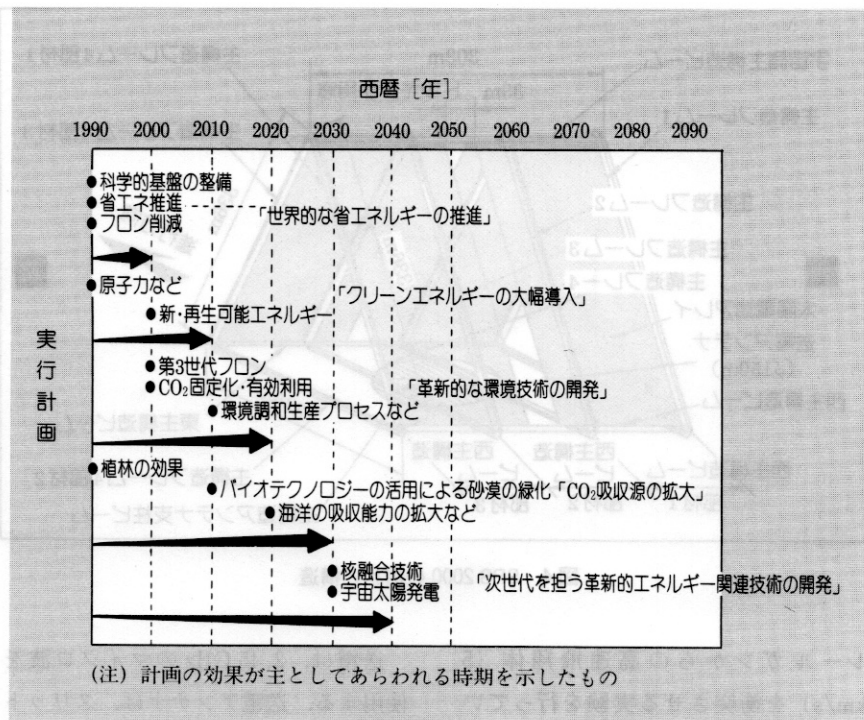


図6 地球再生計画の概念⁽⁴⁾。宇宙太陽発電は、「次世代に担う革新的エネルギー関連技術」として取り上げられている。

済宣言に盛り込まれた。「地球再生計画」では、図6に示すように、宇宙太陽発電は、次世代に担う革新的エネルギー関連技術の開発として取り上げられている。

宇宙発電所が、急速に悪化する地球環境問題解決のための、現実的なエネルギー供給システムの有力候補であることは、これまでの研究ですでに明らかにされている。

無論、本格的な商業用宇宙発電所の建設には、技術評価、コスト評価、環境への影響評価などの課題があるが、これらの評価を正確に行うために、宇宙試験発電所の建設に踏切る時期にきている。実際、試験発電所の具体的な計画がスタートする日も、そう遠くないであろう。

宇宙発電所が、地球規模の環境問題、資源問題の解決を目指したものである以上、その研究開発は、当然、国際的

な枠組みの中で実施されなければならない。資源小国でありながら、大量の地球資源を消費しているわが国が、宇宙発電所の実現に向けた国際協力の先陣をきって貢献すべきことは、言うまでもない。

参考文献

- (1) P. E. Glaser : Power from the Sun : Its Future, Science, Vol.162, p. 867～886, Nov. 1968.
- (2) DOE/NASA : Program Assessment Report Statement of Finding-Satellite Power Systems Concept Development and Evaluation Program, DOE/ER-0085, 1980.
- (3) M. Nagatomo and K. Itoh : An Evolutionary Satellite Power System for International Demonstration in Developing Nations, Proc. of SPS91, Power from Space, Paris, p. 356～363, Aug. 1991.
- (4) 通商産業省立地公害局環境政策課・地球環境対策室：地球温暖化問題の解決に向けて、通産ジャーナル、11月号、p.22～25、1990年。