

宇宙発電所計画の現状

佐々木 進

1. はじめに

宇宙で発電し地上で利用するという宇宙発電所の構想が最近注目を浴びている。このアイデアそのものは30年以上も前に米国のピーター・グレーザー博士により出された¹⁾もので、既に米国で1970年代から1980年にかけてその実現可能性について総合的な研究が行なわれている²⁾。ただし当時は時期尚早として実現に向けての具体的な一歩を踏み出すことはなく、その後は宇宙発電所は遠い将来の夢物語とされてきた。しかし1990年代になってからは、宇宙発電所は21世紀の資源問題と地球環境問題に対する有力なエネルギーオプションと考えられるようになってきた。1995年から米国NASAは宇宙発電所の研究を再開し、我が国でも国レベルの検討が始まっている。

2. 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、太陽エネルギー利用ではいかにして大規模に太陽エネルギーを集め利用するかが重要な問題となる。この点で、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。現在私たちが利用している化石燃料は希薄な太陽エネルギーを長い時間スケールで蓄積したものであり消費すれば失われる。これに対し宇宙発電所は希薄な太陽エネルギーを宇宙空間という大きな空間スケールを利用して取得するものであり、仕掛けさえ作れば半永久的にエネルギーを獲得できる。

宇宙発電所の電力システムとしての構成を図1に示す。軌道上の宇宙発電所で太陽エネルギーを太陽電池で電力に変換しマイクロ波などの無線で地上に送電する。軌道上の宇宙発電所は宇宙開発の分野では太陽発電衛星（SPS; Solar Power Satellite）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存の電力網を通じ利用者へ配電する。宇宙発電所システムに必要な素材の製造、軌道上への輸送と構築を含む全てのプロセスで発生するCO₂量を考慮

しても、宇宙発電所システムの単位電力当たりのCO₂発生量は原子力発電と同レベルであり、化石燃料を用いる場合の数十分の一以下である³⁾。

3. 宇宙発電所の技術

宇宙発電所システムの構築には、宇宙への大量輸送、宇宙での大型構造物建造、宇宙での大電力太陽発電、宇宙から地上への無線送電の技術が必要である。しかし、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情報を伝送している。放送衛星の送電電力は微弱ではあるが、宇宙で発電した電力を地上に無線送電するという点で、電気的には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

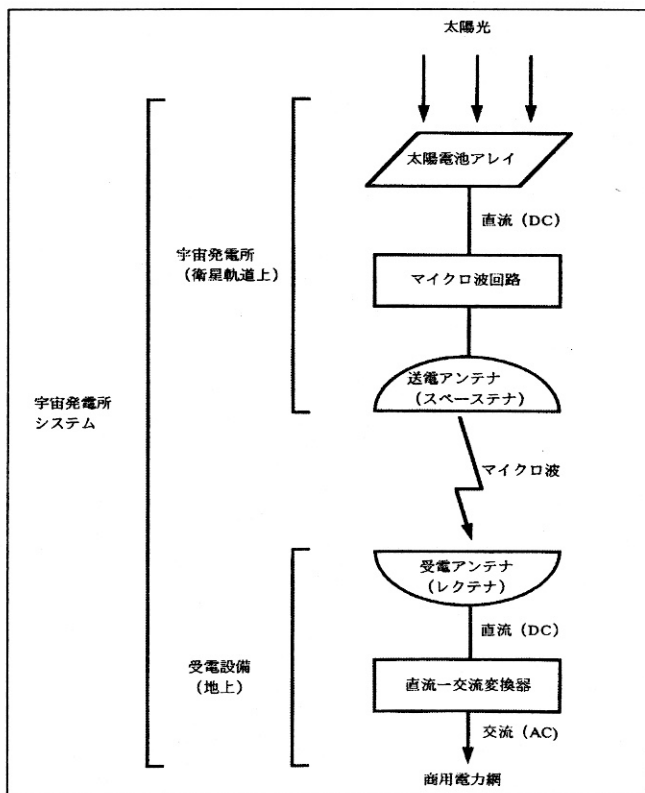


図1 宇宙発電所システムの基本的な構成。軌道上の宇宙発電所では太陽エネルギーを利用して発電し、電気エネルギーをマイクロ波に変換して地上へ送電する。地上の受電所ではアンテナで受電した電力を商用電力に変換し、既存の電力網を利用して、ユーザーに配電する。

表1 現状の技術レベルと本格的な宇宙発電所に必要なレベル

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)	GW
発生電圧 (バス電圧)	100~150V	1kV以上
マイクロ波送電	数十kW (地上)、1kW (宇宙)	GW
排熱	数十kW	数百MW
大型構造物	100mクラス (国際宇宙ステーション)	km
宇宙輸送のコスト	100~200万円/kg	1万円/kg

既に検証されているという点が、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長と言える。現在の技術をいかにして大規模な宇宙電力システムに応用するかが今後の課題である。表1に現状の各技術のレベルと本格的な宇宙発電所に必要なレベルを示す。

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100倍程度高いものとなる。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け入れられることはない。如何にすれば低コストで宇宙発電所を建設できるかも重要な課題である。

宇宙発電所の軌道は、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、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、その軌道は付加価値の高い衛星が優先して使用すべきであろう。重厚長大な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。太陽熱発電の場合は集光のため太陽への高い指向精度が要求される。宇宙発電所の最初の段階では、精密な太陽指向精度の不要な太陽電池が使用されると考えられる。宇宙用の太陽電池は現在では主に高効率の化合物半導体が用いられている。しかし大量に必要な宇宙発電所用の太陽電池としては資源の問題が無く低コスト化の可能なシリコン半導体の方が望ましい。その中でもロケットでの輸送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現在のところ有望である。このタイプの太陽電池の発電

層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、産業・科学・医療用に指定されているISMバンドの中で、2.45GHzまたは5.8GHz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ことが必要である。ギガヘルツ帯の周波数の位相制御技術は電力システムとしては実験室レベルの研究が開始されたばかりであり、その実用にはまだ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のマイクロ波を送電する場合は、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、ワイヤメッシュで構成される太陽光透過型のアンテナが必要とされている。

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合う軌道上は、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り、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kgあたり100～200万円という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、以前は輸送能力の向上に研究開発の方向がたより、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、現在では、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である。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1/100程度にすることを目指しており、今後10～20年程度で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。

4. 国内外の検討状況

我が国では米国での初期の研究が一段落した約20年前から、宇宙発電所に関する調査研究だけでなく、実証的な研究が実施され、独自の宇宙発電所構想も提案されてきた。これまでの主な研究の流れを表2に示す。宇宙発電所に関

表2 日本における宇宙発電所研究の経過

年	事項
1979	調査研究 未来工研(STA) 宇宙空間における太陽発電に関する基礎調査
1980	調査研究 S J A C 衛星発電システム概念開発評価プログラム報告書
1982	調査研究 未来工研(NASDA) 太陽発電衛星の経済性に関する調査
1983	調査研究 電力中央研究所 宇宙衛星発電方式の受電設備 洋上立地と発電可能電力の検討
1983	MINIX実験(観測ロケットによる電離層とマイクロ波の相互作用研究)
1987	宇宙科学研究所で太陽発電衛星ワーキンググループ設立
1988～9	調査研究 エネルギー総合研究所(日機連) 宇宙エネルギー技術研究調査
1991	太陽発電衛星ワーキンググループで4つの研究プロジェクトの設定 <ul style="list-style-type: none"> ・SFUを用いたエネルギーミッション計画 ・太陽発電衛星ストロマン設計研究 SPS-2000計画 ・ISY/METSロケット実験計画 ・マイクロウェーブガーデン
1992～4	調査研究 MRI(NEDO) 宇宙発電システムに関する調査研究 1GWシステムグラウンドデザイン
1992	MILAX飛行機実験(小型模型飛行機への送電飛翔実験)
1993	ISY-METS実験(観測ロケットによる宇宙空間でのマイクロ波送電実験)
1995	ETHER実験(飛行船への送電実験)
1997	太陽発電衛星研究会発足
1997～8	調査研究 MRI(STA, NASDA) LE-NET構想
1999～	調査研究 MRI(NASDA) 宇宙太陽発電システムの調査・検討
2000～	調査研究 USEF 宇宙太陽発電システム実用化検討委員会

連する技術の中では、マイクロ波送電に関する研究が特に盛んである。1983年及び1993年には、世界に先駆けて観測ロケットを用いた宇宙空間でのマイクロ波送電実験が実施され、マイクロ波と宇宙空間プラズマとの相互作用の研究が行われた。また模型飛行機や飛行船へのマイクロ波送電実験など地上での無線送電のデモンストレーションや位相制御によるマイクロ波のビームの方向制御の研究が行なわれている。マイクロ波送電アンテナについても独創的な素子が大学や研究所で研究されており、この分野の我が国の研究は他国の追従を許さない程レベルが高い。

1992年からは3年間にわたりNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)により宇宙発電所システムに関するこれまでで最も大がかりな調査研究が行われた。環境評価に関しては、マイクロ波が生態系へ及ぼす影響を調べるため、植物生態系への長期間にわたるマイクロ波照射実験が電子技術総合研究所で行われている。宇宙発電所の社会的な評価については、将来の社会状況を予測するシミュレーションモデルを使った定量的な評価がなされている。最近では宇宙発電所の構成要素を基にCO₂発生量を算出し他のエネルギーシステムと比較する研究も行われている。

我が国だけでなく国際的にも注目を集めた研究として宇宙発電所モデルSPS2000の設計研究がある⁴⁾。SPS2000とは、文部省(現・文部科学省)宇宙科学研究所の太陽発電衛星ワーキンググループの下に組織されたSPS2000タスクチームが設計研究を行った宇宙発電所のモデルである。このモデルは、10MW規模の送電能力を持ち、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1,100km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赤道諸国の現地調査も既に10ヶ国以上で実施されている。発電所の形状は、図2に示すような1辺約300mの三角柱である。上2面に太

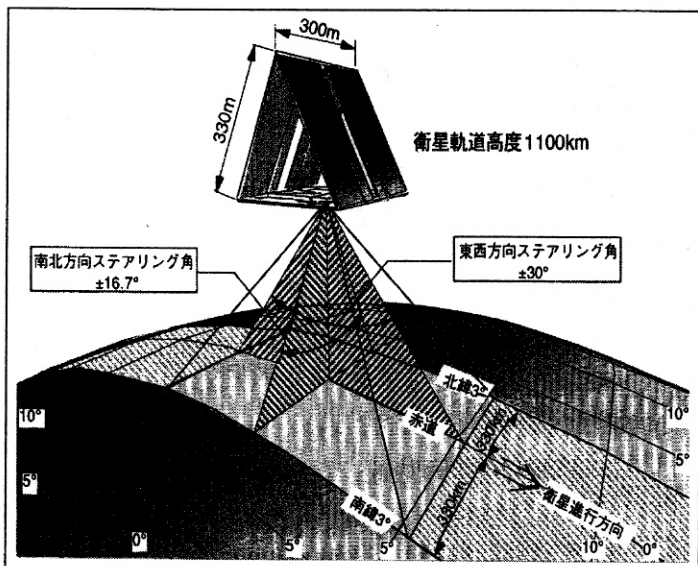


図2 SPS2000タスクチームが概念検討を行った太陽発電衛星SPS2000のモデル。高度1,100kmの赤道軌道に投入し10MWの電力を赤道諸国へ送電する。

陽電池を貼りつけ、下面中央に直径150mのマイクロ波送電アンテナ（スペーステナ）を取り付ける。重いスペーステナを三角柱下部に取り付けることにより、重力傾斜力で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し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1,000Vの高電圧である。送電は、2.45GHzのマイクロ波とし、キャビティ付きスロットアンテナと駆動アンプを一体化したアンテナ素子を用いる。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電力を増強するという建設シナリオとしている。

米国では1970年代にエネルギー省とNASAによる評価研究が行われ、図3に示すようなリファレンスシステムと呼ばれる宇宙発電所の雛形が設計されている²⁾。この研究が終了した1980年以降は、組織的な検討は長い間行われな

った。しかしNASAは1995年から宇宙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新しいコンセプト（図4）を発表している³⁾。このコンセプトでは、50~60m径のフレネル薄膜ミラー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15kmにわたって接続して100~300MWの発電を行う。地上へは直径200~300mの送電アンテナを用い、5.8GHzのマイクロ波で送電する。軌道は高度1,000kmの太陽同期軌道とし、地上では直径約4kmのアンテナで受電する。ただし最近では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。米国以外では、主にヨーロッパとロシアで研究が行われている。ヨーロッパでは欧州宇宙機関（ESA）で、数百W~数千kWの電力衛星実験と400MW級の宇宙発電所の概念検討が行われた。フランスでは10kWクラスの地上での小規模な無線送電実用化の企画がある。ロシア（旧ソ連）では、1993年に宇宙からのエネルギー輸送の第一ステップの実験として、軌道上の反射

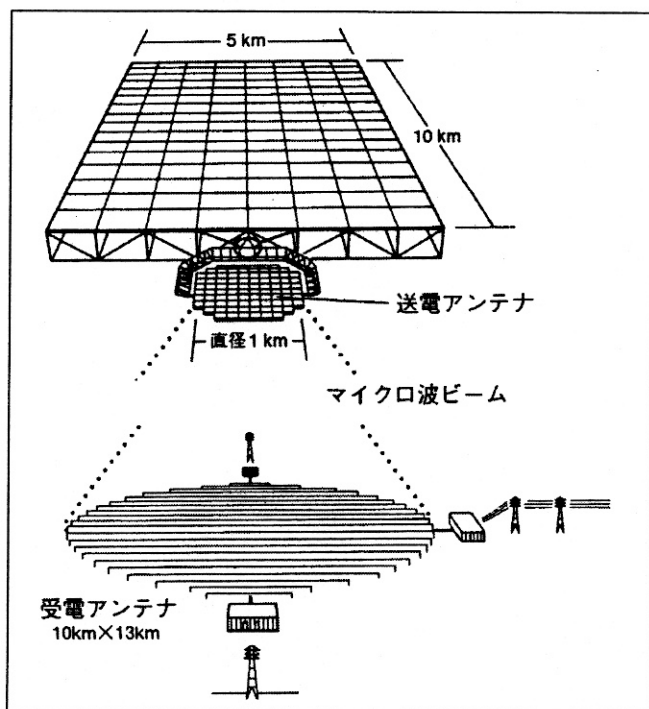


図3 NASAの設計した宇宙発電所（リファレンスシステム）。1基の大きさは5km×10km、出力は5GW。静止衛星軌道に60基配置し、総発電量300GWを想定した。

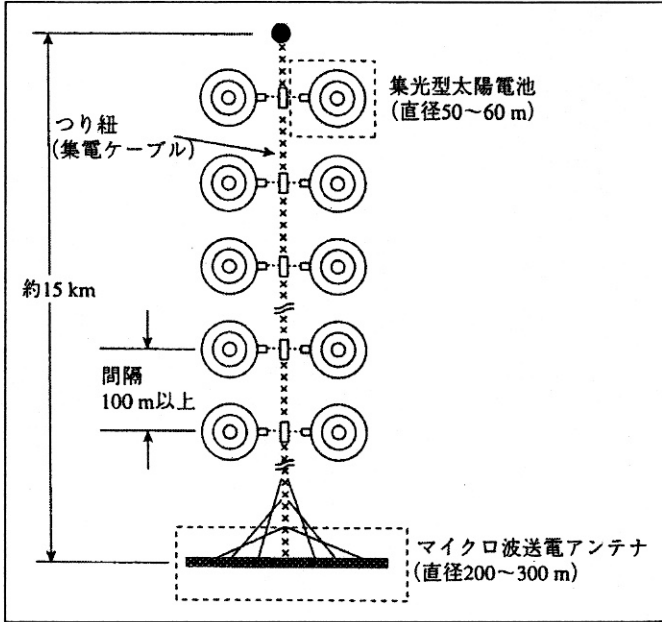


図4 NASAのサンタワーモデル。高度約1,000kmの太陽同期軌道で集光器付き太陽発電ユニットを全長15kmにわたって展開する。これにより100~300MWの発電を行い、直径200~300mの送電アンテナで地上に送電する。

板から太陽光を地上へ送る実験が行われた。最近では数MW級の宇宙発電所の検討や宇宙での無線送電実験が提案されている。

5. 今後の展望

宇宙発電所が人類の新しいエネルギーシステムとして一定の役割を果たすためには、ギガワット以上の規模の宇宙発電所が必要である。原理的には未検証の技術を必要としないとはいえ、最初からこのようなギガワット規模の宇宙発電所の建設に着手するには技術的、経済的なリスクが大き過ぎる。宇宙発電所システムについても、他のエネルギーシステムと同様に、小型のデモンストレーションモデルによる実験から始めて、試験発電所（パイロットプラント）を経て実用に至るのが望ましい。

宇宙発電所技術の中で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。これ以外の技術、例えば宇宙大電力発電、大型宇宙構造物、低コスト宇宙輸送の技術は、より広い宇宙開発の進展の中で技術開発が進められていくだろう。宇宙から地上への無線送電技術は、宇宙発電所に特有な技術であるため、この技術の開発は宇宙発電所用技術として最優先で行う必要がある。図5に示すように、基礎研究の段階でこの技術の実証実験をまず行った後、数MW~百MWクラスの試験衛星により宇宙発電所の技術を充分修得し、経済的な見込みと電力システムとしての環境評価を行った上で実用宇宙発電所の段階に移行するのが現実的なアプローチである。

米国では有人火星探査に必要な電力システムと関連させ

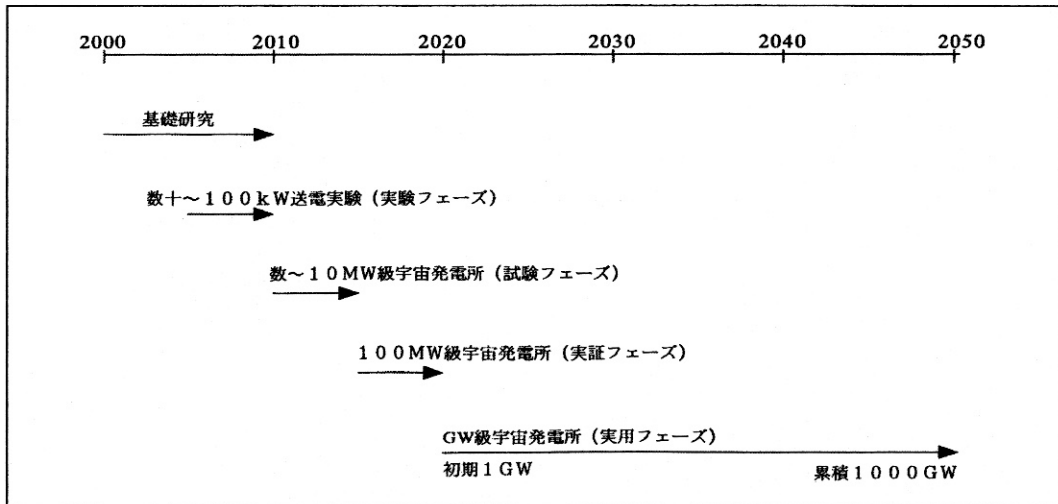


図5 実用宇宙発電所に至るまでの開発シナリオ（横軸は西暦年）

ながら宇宙発電所のための技術を確立し、20～25年先の商業的な宇宙発電所への展開を目指した開発シナリオを模索している。我が国では、大学や研究機関の実証的な研究をベースにして宇宙発電所実現に向けてのロードマップの検討が始まっている。通産省（現、経済産業省）からは本年度宇宙開発委員会へ宇宙太陽発電システム実用化技術の調査研究について見直し要望を出した。宇宙開発事業団（NASDA）においても本格的な技術開発の検討が始まっている。これらの動きの中で、やがて具体的なプロジェクトとして先行的な宇宙発電所のデモンストレーション実験の構想が浮かび上がってくるだろう。宇宙発電所は、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だろう。

参考文献

- 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) 吉岡完治、菅幹雄、野村浩二、朝倉啓一郎：SPSのCO₂負荷計算-NASA/DOEリファレンスシステムに基づいて-、第1回宇宙太陽発電システム（SPS）シンポジウム、pp.29-38、1999年1月
- 4) 太陽発電衛星ワーキンググループ SPS2000タスクチーム：SPS2000概念計画書 暫定版、1993年7月
- 5) J.C.Mankins: A Fresh Look at the Concept of Space Solar Power, Proc. of SPS '97 Conference, Montreal, August (1997)

佐々木 進（ささき すずむ）1949年生まれ

- 1975年 東京大学大学院理学系研究科中退、同年 東京大学宇宙航空研究所助手
- 1991年 宇宙科学研究所助教授
- 現職：宇宙科学研究所 宇宙エネルギー工学部門教授
- 専門分野：宇宙エネルギー工学、月探査、飛翔体環境科学