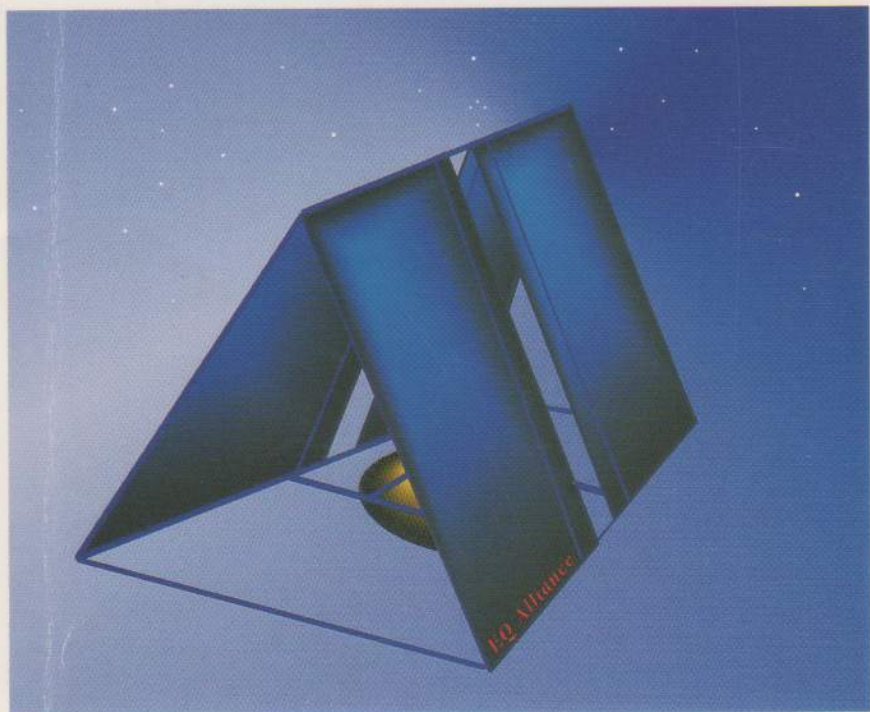


衛星通信研究 No.89

太陽発電衛星研究の現状



KEC
KDD ENGINEERING AND CONSULTING, INC.

(財) KDD エンジニアリング・
アンド・コンサルティング

本誌の概要

エネルギーの8割以上を得ている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。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し、地球環境の悪化により21世紀の半ばには人類社会はその史上初めての本格的な衰退を余儀なくされる可能性がある。

太陽発電衛星の構想は、エネルギー問題を地球閉鎖系の中だけで解決するのではなく、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もので、クリーンで大規模なエネルギーシステムとして大きな可能性を持っている。

本誌では、我が国の代表的な太陽発電衛星モデルであるSPS2000の研究紹介を軸に、太陽発電衛星に必要な技術について発電、無線送電、構築、輸送までの多方面にわたり解説し、さらに国内外の最近の研究状況と課題および今後の見通しについて解説する。

2001年1月

(財) KDD エンジニアリング・
アンド・コンサルティング

太陽発電衛星研究の現状

さ と き す す む
佐々木 進

略歴

昭和50年東京大学大学院博士課程物理学科中退。同年より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。現在は太陽発電衛星の研究に従事するととも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。

もくじ

はじめに	3
1. 太陽発電衛星の概念と意義	4
2. 国内外の太陽発電衛星の検討状況	13
2.1 国内の検討状況	13
2.2 国外の検討状況	17
3. 太陽発電衛星に必要な技術	20
3.1 発電技術と大電力技術	21
3.2 無線送電技術	25
3.3 構築技術と機構	29
3.4 軌道と軌道上への輸送技術	31
4. 太陽発電衛星モデルSPS2000の構想	34
4.1 研究の経緯と目的	34
4.2 システム概要	39
4.3 発電部	43
4.4 送受電部	47
4.5 組立	50
4.6 プロジェクトコストの目標	54
4.7 地上での実証的研究とレクテナの現地調査	55
4.8 残っている課題	68
5. 今後の展望	72
おわりに	76
参考文献	77

はじめに

エネルギーは人類の営みを支えている最も基本的な要素である。現在私たちが使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。地球環境への負担が大きい化石燃料に今後とも頼り続けた場合は、地球環境の悪化により21世紀の半ばには人類社会はその史上初めての本格的な衰退を余儀なくされ、未曾有の混乱と試練に直面する可能性がある。

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、地球の外即ち宇宙空間に解決の道を探るべきではないだろうか。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。太陽発電衛星 (SPS: Solar Power Satellite) の構想は、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ものであり、クリーンで大規模なエネル

ギーシステムとして大きな可能性を持っている。

太陽発電衛星については、1994年に北海道大学の伊藤精彦教授により本シリーズNo.48(宇宙太陽発電衛星)¹⁾で全般的な紹介が行われている。本書では、我が国の代表的な太陽発電衛星モデルであるSPS2000の研究紹介を軸に、太陽発電衛星に必要な技術、国内外の最近の研究状況と今後の見通しについて述べる。なおSPS2000とは、1991年に宇宙科学研究所の長友信人教授(当時)により組織されたSPS2000タスクチームが、2年間にわたり概念設計研究を行った1万kW級の太陽発電衛星のモデルである。

1. 太陽発電衛星の概念と意義

太陽光のエネルギー密度は地球近傍の宇宙空間で約 1.35kW/m^2 である。これ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。太陽発電衛星は、衛星軌道上で太陽エネルギーを電力に変換し、その電気エネルギーをスペーステナと呼ばれるアンテナからマイクロ波など無線で地上に送電する電力設備であり、宇宙発電所とも呼ばれている。地上では、無線

送電された電力をレクテナとよばれるアンテナ設備で受電し、商用電力に変換して既存の電力網を通じて家庭や工場などの利用者へ配電する。図1にこの太陽発電衛星と地上設備の基本的な構成を示す。このシステムは地上での太陽光発電と比較して、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太陽発電衛星システムは地上の太陽光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。別の見方をすれば、太陽発電衛星は宇宙空間で太陽光をマイクロ波という良質のエネルギー形態(電気に変換し易いエネルギー形態)に変換して地上に下ろす施設ととらえることができる。この場合のマイクロ波は地上の受電所から見れば図2に示すように空から降ってくる燃料とみなすことができよう。

太陽発電衛星の最初概念²⁾は、1968年に米国のグレーザー博士により提案された。グレーザー博士は図3に示すようなアイデアで1973年に特許を取っている。1970年代には、米国エネルギー省とNASA(米航空宇宙局)により技術的な側面からだけでなく、社会、経済、

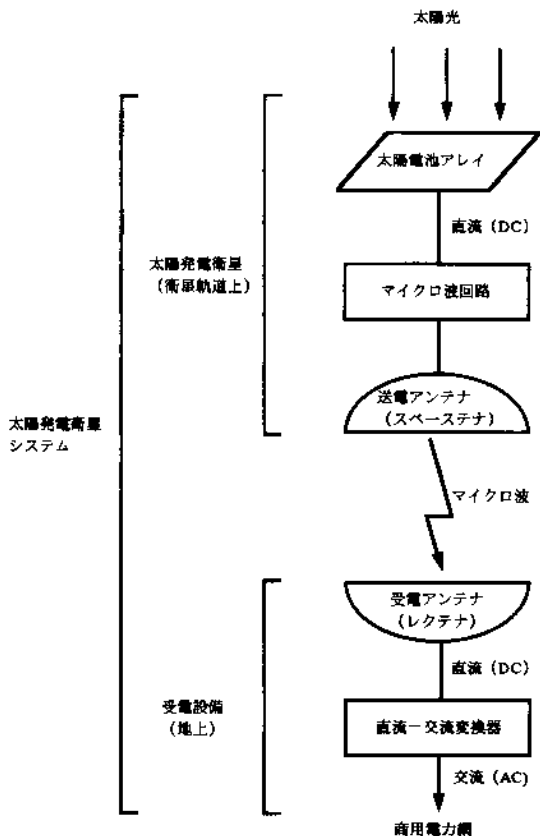


図 1 太陽発電衛星と地上受電設備の基本的な構成。軌道上の太陽発電衛星では太陽エネルギーを利用して発電し、電気エネルギーをマイクロ波に変換して地上へ送電する。地上の受電所ではアンテナで受電した電力を商用電力に変換し、既存の電力網を利用して、需要者に配電する。

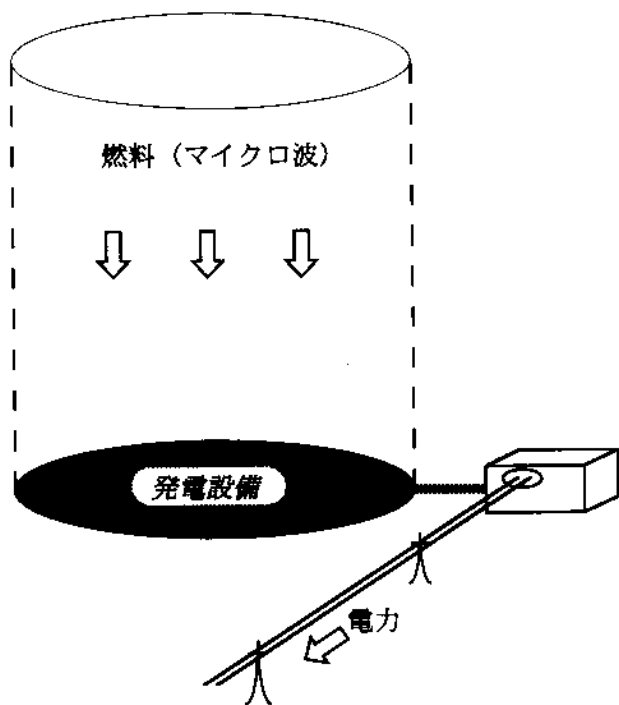


図 2 太陽発電衛星からのマイクロ波は地上の受電所にとっては空から降りてくる発電のための燃料と見なすことができる。

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太陽発電衛星は、リファレンスシステム³⁾と呼ばれている。この研究は21世紀初頭のアメリカの電力(約3億キロワット)を全て太陽発電衛星で賄うという前提で行われた。その規模は壮大で図4に示すような10km×5kmの大きさの衛星を静止衛星軌道に60基(1基5万トン程度の重さ)配備するというものであった。20年前のリファレンスシステムは現在建設中の国

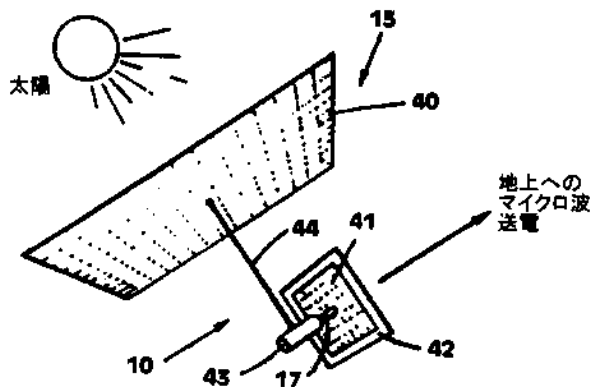


図3 グレーザー博士が特許を取得した太陽発電衛星のアイデア。

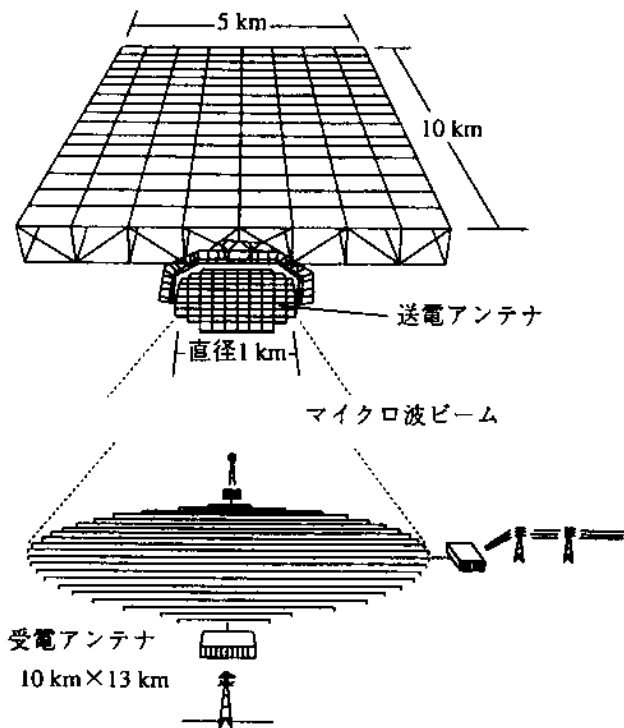


図4 NASAの設計した太陽発電衛星概念図（リファレンスシステム）。1基の大きさは5km x 10km、出力は500万kW。静止衛星軌道に60基配置し、総発電量3億kWを想定した。

際宇宙ステーション(約100mの大きさ)と比較してもはるかに大きい。この構築のための輸送用大型ロケットも新規に開発することが考えられた。リファレンスシステムは余りにも巨大なシステムを検討の対象としたため、技術的・社会的な飛躍が大きく未だその時機ではないと判断され、実現のための一步を踏出すことなく検討は終了した。技術的な実現の可能性が欠落したままイメージのみが固定したため、太陽発電衛星の構想はその後宇宙植民地構想と同列の遠い将来の夢物語として語られることになった。

しかし1980年代の終わり頃からは、21世紀の人類社会の最大の課題である地球環境問題とエネルギー問題が社会的に認識されるようになり、これらを解決するための有力な選択肢として、太陽発電衛星を現実のエネルギーシステムとして見直そうという機運が高まってきた。太陽発電衛星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排出するCO₂を考慮しても、太陽発電衛星からの単位電力当たりのCO₂排出量は原理的に非常に小さい。表1に慶応義塾大学の吉岡完治教授らによる各種の発電システムからのCO₂排出量の計算結果⁴⁾を示す。太陽発電衛星シス

テムの単位電力当たりのCO₂排出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と試算されている。

エネルギーシステムの第一義的な評価はエネルギー収支を基準としたエネルギーペイバックタイムである。エネルギーペイバックタイムとは、あるエネルギーシステムを構築するために投入した全エネルギーをそのシステムが生み出すエネルギーにより何年間で回収できるかを示す指標である。エネルギーシステムが正味のエネルギーを生み出すためには、エネルギーペイバックタイムはシステムの稼働可能年数より短く

表1 CO₂排出量⁴⁾(太陽発電衛星の場合は送配電などの経常運転からのCO₂の排出は含まない)

(g-CO ₂ /kWh)			
発電方式	経常運転時	建設時	合計
太陽発電衛星	0	20	20
石炭火力発電	1222	3	1225
石油火力発電	844	2	846
LNG火力発電	629	2	631
原子力発電	19	3	22

なければならない。信州大学の山田興一教授らの計算⁵⁾によれば太陽発電衛星のエネルギーペイバックタイムは1年以下であり、30年と考えられる太陽発電衛星の寿命と比べはるかに短い。一方エネルギー収支が正のシステムであっても、その構築と運転に投入される資金が稼働可能年数の間に回収される見込みがなければ、投資の対象にならず実現されることはない。現在の高コストの宇宙技術で太陽発電衛星を構築する場合は、その電力コストは地上のエネルギーシステムの電力コストの100倍程度となって経済的に成立しないため、現状のままでは太陽発電衛星は社会的に受け入れられることはない。しかし、現在の太陽発電衛星のコスト分析でその大部分を占める宇宙への輸送コストは、技術革新と輸送量の増大により将来1/100程度まで下がることが見込まれる状況にある。衛星本体の構築に低コストの民生品と民生技術を適用することにより、太陽発電衛星からの電力コストは地上の電力コストと比肩しうようになると予測されている。ふんだんなエネルギー資源、地球環境への優しさ、短いエネルギーペイバックタイム、低コスト化の可能性、技術的な実現の可能性の高さ、の点から太陽発電衛星は人類の将来エ

エネルギーシステムとして極めて有望であると言える。

2. 国内外の太陽発電衛星の検討状況

2.1 国内の検討状況

我が国では米国でのリファレンスシステムの研究が一段落した約20年前から、太陽発電衛星に関する調査研究がいくつかの機関で行われてきた。大学や研究機関では実証的な研究が実施され、独自の太陽発電衛星構想も提案されている。リファレンスシステム以後の太陽発電衛星の研究では我が国が世界の研究をリードしてきたと言って良い。

太陽発電衛星に関連する技術の中では、マイクロ波送受電に関する研究が特に盛んに行われている。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⁶⁾。図5に1993年に行われたロケット実験の様子をイラストで示す。親子に分離されたロケット間という10m程度の短い距離の送電実験ではあったが、これに

より大電力マイクロ波は電離層プラズマと非線形相互作用を行うものの、電力を大きく失うことなく電離層中を伝搬しうることが示された。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

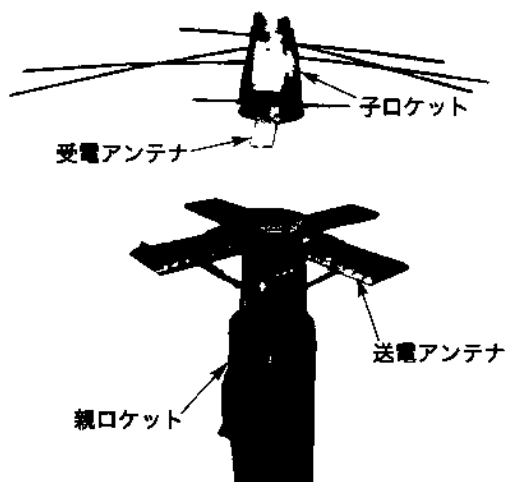


図5 観測ロケットで行われた高度200km付近の宇宙空間でのマイクロ波送電実験。親ロケット(下)の送電アンテナから子ロケット(上)の受電アンテナへ向けてマイクロ波の送電が行われ、その時の伝搬効率と周辺プラズマの応答が調べられた。

ビームの方向制御の研究が行なわれている。マイクロ波の送受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。マイクロ波送電だけでなくレーザー送電の方式や、レーザー送電とマイクロ波送電とを組み合わせた宇宙からの送電方式についても独自の研究が行われている。

太陽発電衛星のシステムについても早くから研究が行われている。1987年には宇宙科学研究所で太陽発電衛星ワーキンググループが結成され、我が国の太陽発電衛星に関連する研究の推進母体となってきた。1991年からは後述する太陽発電衛星モデルSPS2000の組織的な概念検討が開始された。また、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)により太陽発電衛星システムに関するこれまでに最も大がかりな調査研究が実施された。その中で図6に示すような100万kW級の太陽発電衛星の検討⁷⁾も行われた。宇宙開発事業団では太陽発電衛星のライフサイクルモデルを作ってケーススタディを行うとともに、実用に至るまでの研究開発シナリオの作成を手がけている。

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国の研究機関で行われている。太陽発電衛星の社会学的な評価については、将来の社会・経済・地球環境を予測するシミュレーションモデ

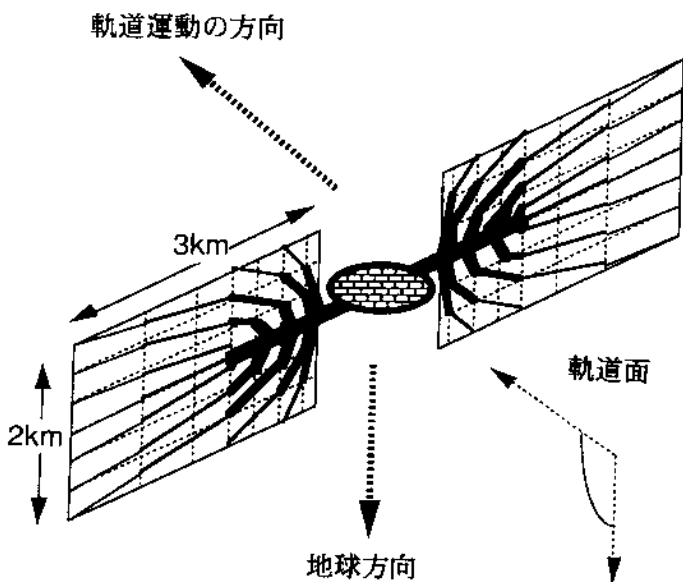


図6 NEDOの調査研究（1992~1994年）で検討された静止衛星軌道上の100万kW太陽発電衛星の概念。

ルを使った定量的な評価がなされている。最近では太陽発電衛星の構成要素を基に産業連関表を用いて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。

2.2 国外の検討状況

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年から太陽発電衛星の概念の見直し検討を開始し、その中でサンタローモデルと呼ばれる図7に示すようなコンセプト⁸⁾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10万kW~30万kW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。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。また将来

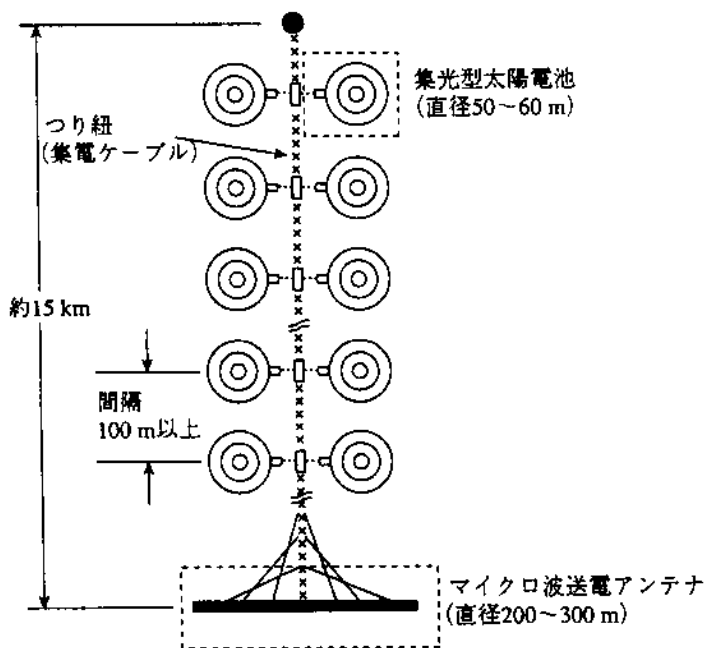


図7 NASAのサンタワーモデル。高度約1,000kmの太陽同期軌道で集光器付き太陽発電ユニットを全長15kmにわたって展開する。これにより10万kW~30万kWの発電を行い、直径200~300mの送電アンテナで地上に送電する。

の計画として、月面上に太陽発電所を建設し地球へ送電する構想についても大学の研究者を中心に検討が行われている。この構想のメリットは、月資源を利用するため原理的にエネルギーペイバックタイムを極めて短くすることができ、電力コストも地上の電力コストよりはるかに下げることができる点である。しかし技術的には軌道上の太陽発電衛星の次のステップの構想と考えられている。

米国以外では、主にヨーロッパとロシア(旧ソ連)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、沿岸設置の地上受電設備の検討、数百W~数kWの小型電力衛星のデモンストレーション、40万kW級の太陽発電衛星の概念検討が行われた。特にフランスはこれまで太陽発電衛星に関する国際会議を主催するなど研究意欲が高く、最近ではCNES(フランス国立宇宙研究センター)の研究者による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。ドイツでは数値シミュレーションによる太陽発電衛星の評価が行われている。ロシア(旧ソ連)では組織的な研究は行われていないが、個々の研究機関で太陽発電衛星に関連する技術の研究が行われている。1993年には宇宙か

らのエネルギー輸送の第一ステップの実験として、軌道上の反射板から太陽光を地上へ送る実験を行っている。最近では1,000kW級の太陽発電衛星の検討や宇宙での無線送電実験の提案が発表されている。特に電子管を使ったマイクロ波送受電方式の研究が伝統的に盛んである。

3. 太陽発電衛星に必要な技術

太陽発電衛星の構築には、宇宙での太陽発電技術、大電力技術、無線送電技術、大型構造物建造・制御技術、宇宙への大量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実用化されており、原理的に新たに検証の必要な技術はない。この点が未だ原理の検証されていない核融合発電と基本的に異なる点である。しかし現在の高価な宇宙技術で太陽発電衛星を構築する場合は、30年程度の運用寿命の場合で電力コス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。今後各技術の大規模システムへの応用と低コスト化が、太陽発電衛星実現のための主要な技術課題である。表2に主要技術の現状の

到達点と実用レベルの太陽発電衛星を実現するために必要な技術目標を示す。

3.1 発電技術と大電力技術

宇宙での太陽発電方式としては、太陽光発電と太陽熱発電の二方式がある。前者は太陽電池を用いる方式であり、後者は太陽光を集光してその熱で発電機を動作させる方式である。太陽発電衛星の初期の段階では、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採用され则认为られる。太陽

表2 太陽発電衛星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)	100～150 V	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)	km
宇宙輸送のコスト	100～200万円/kg	1万円/kg

発電衛星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、が条件である。この内、(1)と(2)は地上の太陽光発電にはない太陽発電衛星特有の条件である。表3に太陽発電衛星用の太陽電池に要求され

表3 太陽発電衛星用の太陽電池に要求される事項

項 目	要 求 事 項
モジュール効率	面積当たりよりも重量当たりの高効率 (1kW/kg以上)
物理的特性	輸送時の高い収納効率、宇宙空間での容易な展開
耐宇宙環境性	耐放射線強度(30年で20%以下の劣化) 高速宇宙浮遊物との衝突対策 (故障分離可能なモジュール化) 絶縁被覆 (高電圧動作でのプラズマとの干渉回避)
動作温度	高温動作(輻射による放熱)
インターフェイス	集電系との容易な電氣的、物理的インターフェイスまたは統合
材料	資源的な問題がないこと (10億kW相当以上のポテンシャル)

る事項をまとめた。1976年に開発された比較的新しいタイプのアモルファスシリコン太陽電池は、変換効率が現状10%弱と他のタイプの太陽電池と比べて効率が低い、薄膜のため大量生産が可能で重量当たりの出力が大きく、折り畳みでの輸送と宇宙での展開のしやすさから、太陽発電衛星用の太陽電池として大きな可能性を持っている。太陽電池の現在の年間総生産量は全世界で20万kW程度であり、実用レベルの100万kWクラスの太陽発電衛星を建設する為には桁違いの大量生産が必要である。シリコンは地球上に資源として大量に存在しているため、効率は高いが稀少元素を用いる化合物半導体の太陽電池よりもシリコン太陽電池の方が優れている。化合物半導体に用いられるGe, Ga, Inの資源量は地球上で最大でも数億kW分しか存在しない。太陽光発電の方式として集光ミラーと組み合わせた方式も考案されている。この場合は必要な太陽電池量は少なく済むが、ミラーの太陽方向への指向が高い精度で要求されるという難点がある。

宇宙環境については太陽電池の劣化をもたらす宇宙放射線と10km/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)の影響を考慮

する必要がある。これまでの放射線照射実験では、アモルファスシリコンの太陽電池は結晶シリコンの太陽電池よりも放射線に対する耐性が高いことが確かめられている。一方宇宙塵や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体のサイズよりもかなり大きな規模となることが実験で示されている。この破壊の影響が広く伝搬しないよう太陽電池のユニット化を設計におりこむ必要がある。

発電した電力は集電して無線送電システムに配電する。この場合集配電系での抵抗損失とそれに伴う熱の発生を極力抑えるため、できるだけ高い電圧を使用する必要がある。周辺環境が真空に近い宇宙空間では熱は深宇宙方向(地球と反対方向)への輻射でしか有効に除去されないため、宇宙電力システムでは熱管理と排熱が地上の電力システム以上に重要である。現在の数kWクラスの宇宙機では通常50V程度、100kWクラスの宇宙ステーションで100~150V程度のバス電圧が使用されるが、100万kWクラスの太陽発電衛星では1kV以上の高電圧の使用が想定されている。宇宙空間では電子とイオンから構成される電離気体が希薄ではあるが存在するため、高電圧の使用にあたってはアーク放電と電

流リークの防止対策をとる必要がある。負電位部分へのイオンの衝撃損傷(スパッタリング)による材料劣化についても評価し設計に反映する必要がある。一方このような集配電系での電力損失と熱の問題を回避するため、太陽電池と送電素子を一体型としたサンドイッチタイプの発送電素子のアイデアも提案されている。この場合は集光タイプの発電システムを考える必要があり、太陽への高い指向精度と集光部に集中する熱の除去を考慮する必要がある。

3.2 無線送電技術

送電はマイクロ波帯の電磁波を使うことが一般に考えられている。レーザーを使用する案もあるが、この場合は太陽光と同様気象の影響を受けやすいという問題がある。またレーザーの場合はエネルギーが細いビームに集中するため地上近くでは安全管理上の問題がある。使用する電磁波の波長を λ 、送電と受電のアンテナの直径をそれぞれ D_t 、 D_r 、伝搬距離を L とすれば、 $D_t D_r / \lambda L$ は一定の値となる。従って周波数の高い(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、10GHz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。この帯域で通信以外の高周波利用設備に優先的に割り当てられている周波数(工業用、科学用、医療用バンドと呼ばれる)は2.45GHzと5.8GHzである。2.45GHz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マグネトロンやクライストロン等の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。このため半導体アンプは太陽電池と同様シリコン半導体の使用が資源の点から望ましい。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、太陽発電衛星用としては更に大幅な低コスト化と大電力化が必要である。多数のアンテナ素子のマイクロ波の位相を制御することによりマイクロ波をビーム状にして所定の方に送ることができる。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。この場合パイロット信号がオフとなると、ビームの送電条件が自動的に成立しなくなりビームが発散するため保安上も望ましいフェールセーフ(トラブルが発生しても原理的に安全側に移行すること)の制御形態となる。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。

マイクロ波による送電では、軌道上の送電アンテナ、地上の受電アンテナともに相当大きなアンテナが必要である。例えば36,000km離れた静止衛星軌道の太陽発電衛星から2.45GHzのマイクロ波電力を送電する場合は、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、砂漠や海洋沿岸に設置することも検討されており、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も考案されている。

太陽発電衛星で考えられているマイクロ波ビームの地上付近でのエネルギー密度は、アメリカの500万kW

クラスのリファレンスシステムの場合、ビーム中央の最大強度部分で 23mW/cm^2 、ビームの端では 1mW/cm^2 である。ビームの最大エネルギー密度 23mW/cm^2 は、マイクロ波が高度数百kmの電離層で周辺プラズマとの強い非線形相互作用によりエネルギーを散逸しないための条件とされている。ただしこの値は理論的な値であり実証されたものではない。 23mW/cm^2 のエネルギー密度は太陽光の1/6程度、電子レンジ内部の数百分の1程度であるため、ビーム内を横切る動物や航空機に対する熱的な影響は殆どない。人間へのマイクロ波の許容レベルは国際的に 1mW/cm^2 とされているので、リファレンスシステムの場合は直径10km程度の受電設備領域内は立ち入り禁止区域として管理する必要がある。エネルギー密度から決まる熱的效果の定量的な評価と管理は比較的容易であるが、高周波の非熱的效果(電場や磁場の振動そのものが生態に及ぼす効果、特に長時間晒された場合の影響)についてはまだ分かっていない点も多く、今後さらに研究が必要である。マイクロ波帯は通信や電波天文観測にも用いられているので、送受電部で不要波を発生させないことも強く求められる。

3.3 構築技術と機構

地上の電力供給に一定の役割を果たす太陽発電衛星の規模は100万kWクラスである。このクラスの太陽発電衛星のスケールは太陽電池の効率にも依存するが、少なくともkm規模の宇宙構造物となる。現在建設中の国際宇宙ステーションのスケールは100m規模なので、太陽発電衛星はこの100倍以上の広がりを持つ構造物となる。衛星の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であり、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の場合、重心から離れた場所では遠心力と地球重力の釣り合いが崩れ、無視できない力(重力勾配力と呼ぶ)が働く。この軌道上で発生する力は地球中心方向又は逆地球中心方向に働くが、この力を利用して大型構造物の姿勢を安定させるような建築手法と手順を確立する必要がある。宇宙での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。大型構造物の構

築は部材をジョイントで結合して組み立てていくというのが一般的であるが、折り畳んだ薄膜を膨張硬化させる方法も近年新しい方法として注目されており、実際にテニス場程度の大きさの膨張方式のものがスペースシャトルで実験的に展開されている。

太陽発電衛星は送電アンテナを地上の受電所に向けてながら地球のまわりを周回するので、発電面を常時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。ロータリジョイントでの大電力の伝達方式としては、接触型のスリップリングや非接触型の電磁結合方式が考えられているが、構造、強度、熱、寿命など厳しい技術的な課題が残っている。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りう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技術

太陽発電衛星の軌道は、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、その軌道は経済的価値のより高い衛星が優先して使用すべきであるという考え方もある。大きなスケールのシステムとならざるを得ない太陽発電衛星は、資材輸送費の点から、より低い軌道の方が現実的である可能性がある。静止衛星軌道に太陽発電衛星を配備する場合は、いったん低高度軌道で建造した後、電気エネルギーを利用する電気推進の方式で静止衛星軌道へ上昇させるのが従来から考えられているシナリオである。但しこの場合は放射線強度の強い放射線帯の中をゆっくり通過することになるので、太陽電池や送電素子などの放射線劣化について考慮する必要がある。一方太陽発電衛星を低高度軌道に配備する場合は、送電距離が短かい

め送受電のアンテナの径は小さくて良いというメリットがある。しかし、この場合は地上の受電所から見て軌道上の発電衛星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衛星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デブリ環境、を総合的に考慮して決める必要がある。

太陽発電衛星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。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、太陽発電衛星の電力コストは極めて高いものとなる。太陽発電衛星からの電力を地上の電力コストと同等にするためには、革新的な低コスト宇宙輸送手段の開発が必要条件である。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。我が国でも宇宙科学研究所でこのような低コストの宇宙輸送の手段を開発するための実験が行われ始めている。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⁸⁾。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いる。大規模な宇宙のインフラストラクチャである太陽発電衛星の建設が始まれば、宇宙輸送量は高い水準に維持される。

4. 太陽発電衛星モデルSPS2000の構想

4.1 研究の経緯と目的

我が国だけでなく世界的にも注目された組織研究として、1990年代初頭から始まった太陽発電衛星モデルSPS2000の概念設計研究がある。この研究は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設置されたSPS2000タスクチームにより実施された。

ここで上記ワーキンググループの位置づけを示すため、我が国で科学衛星計画がどのようなプロセスで設定されるかを図8に示す。宇宙科学研究所は衛星やロケットなど宇宙飛翔体を用いた宇宙科学研究を実施する大学共同利用機関である。大学や研究機関の研究者グループが衛星を使った科学研究を行おうとする場合には、宇宙科学研究所の宇宙理学委員会または宇宙工学委員会の下にワーキンググループの設置を申請し、その学術的な意義が認められれば衛星計画名を冠したワーキンググループが設置される。このグループは大学や研究機関の研究者から構成され、具体的な衛星計画の提案を行うための検討作業を行う。この作業には特に予算はつかず、原則として研究者のボランティア

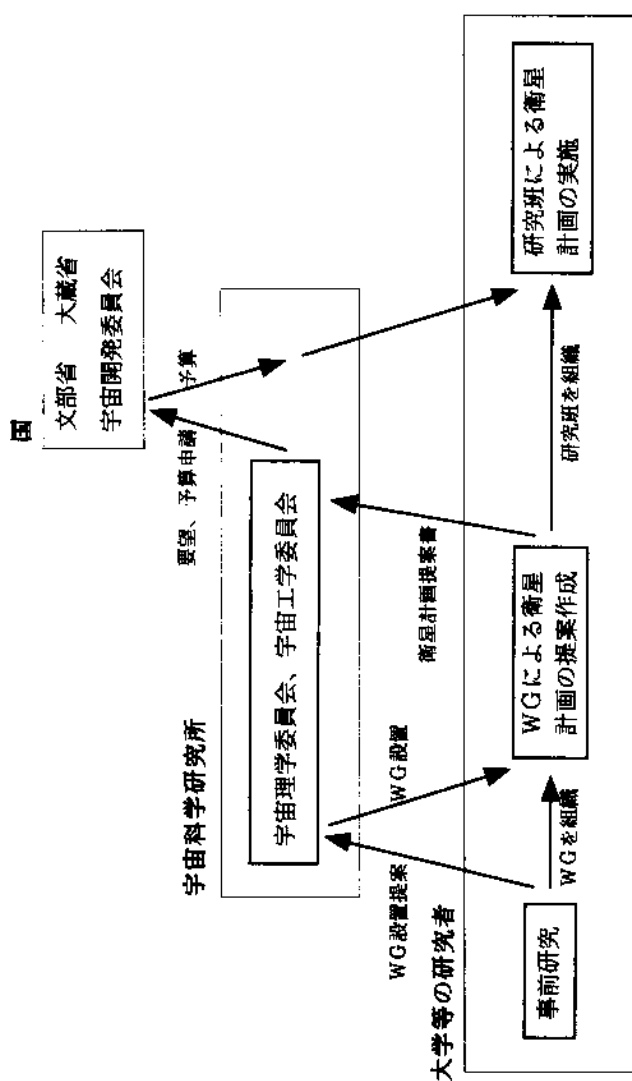


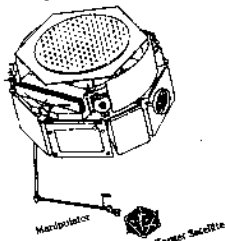
図8 科学衛星計画が提案から実施に移されるまでのプロセス。ワーキンググループ(WG)により衛星計画の提案書が作成される。

活動で検討が進められる。ワーキンググループでとりまとめられた衛星計画の提案は、理学的なミッションは宇宙理学委員会へ、工学的なミッションは宇宙工学委員会に提出され、認められれば文部省への予算申請が行われる。開発のための予算が認められればワーキンググループは衛星計画を実施する研究班に再編成される。

太陽発電衛星ワーキンググループは、上記のような枠組みの下に1988年宇宙工学委員会の下に設置された。ただしその活動は、具体的な一つの太陽発電衛星計画の提案をまとめあげるのではなく、関連する研究をプロジェクト化して推進するための母体となるという、他のワーキンググループとは異なった方針で運営された。ワーキンググループでは図9に示すように、SFU(Space Flyer Unit；我が国で開発された再使用型の無人宇宙実験プラットフォーム)を用いた宇宙エネルギー実験の検討、ISY/METSロケット実験、SPSストローマン設計研究、マイクロウェーブガーデンと名付けられたマイクロ波の生態系に対する影響の研究、の4プロジェクトが設定された。これらのプロジェクトはそれぞれリーダーを定め異なる体制で推進された。1万

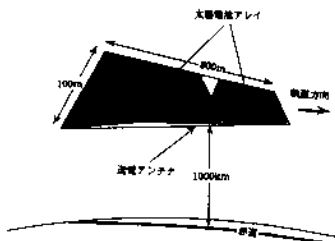
SFUエネルギーミッション計画

将来のSFUフリーフライヤーでの実験計画としてサブグループ毎に研究テーマをまとめ、それらをSFJのペイロードとして取りまとめる作業を行っている。現在のところ、次の3つのミッションが想定されている。1) 熱発電/電気推進、2) エネルギー伝送/デザー、3) レーザー推進/ロケット
個々の研究は宇宙基地利用研究に関連した枠組の予算で行われている。

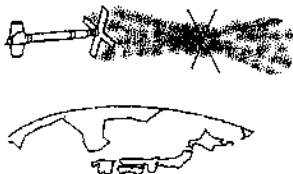


SPS ストローマン設計研究計画

本計画は、ワーキンググループの研究の目標がなく活動が停滞気味だったので、「百家争鳴」の議論を巻き起こすために提案され、1990年度から開始された。アメリカの研究とは違った現実的な設計を目指しており、現在模型の製作等を通じて個々の技術の検討に入っている。特に最近SPS2000と名付けられたモデルについて外部からの研究参加を呼びかけている。

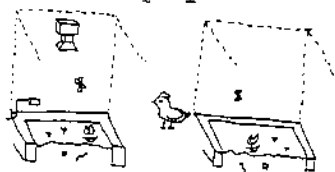


研究プロジェクト：研究活動は4つのプロジェクトの形で進められている。



ISY/METS ロケット実験計画

国際宇宙年を機会に将来の発電衛星に関連した宇宙実験を国際機関等で行うことになり、日本からは宇宙科学研究所の観測ロケットを使って宇宙空間での電力伝送実験とこれに伴う電離層内での電波の伝播の観測を行う。この種の実験は1983年にMINIX実験として実施された。今回は送受電の機器を半導体化するなど新しくなっている。本ワーキンググループの中に実施チームが置かれている。



マイクロウェーブガーデン計画

宇宙科学研究の一環としてユニークな発電衛星関連の研究を行うという観点から提案され、1990年度に宇宙科学研究所相模原キャンパス内に、電力伝送用のマイクロ波が生野菜に及ぼす影響を観察するための試験的な装置の設置を開始した。この研究は宇宙科学研究所の特定研究として開始された。

図9 宇宙科学研究所に組織された太陽発電衛星ワーキンググループが実施した4つの研究プロジェクト(太陽発電衛星ワーキンググループ紹介パンフレットより)。

kWクラスのSPSストローマン設計研究については、長友信人教授(当時)をリーダーとして大学の研究者だけでなく民間の研究者も巻き込んだ総勢50名のタスクチームが組織された。このプロジェクトは西暦2000年の建設開始を設計の基本要求としたことからSPS2000と命名され、タスクチームもSPS2000タスクチームと呼ばれた。この名付け親は現麻布大学教授のパトリック・コリンズ博士である。

当時太陽発電衛星といえば一般に米国のリファレンスシステムを指していた。事実、本格的な設計研究に基づく太陽発電衛星のモデルはリファレンスシステムが唯一のものであった。このモデルは前述のように将来の米国の国家電力を全て賄うという前提で研究されたため、壮大ではあったが、社会的にも技術的にもリアリティに欠けていた。遠い将来のターゲットを示したりリファレンスシステムの研究と対極的なアプローチとして、SPS2000の概念検討は現在実現可能なSPSとはどのようなものかを示すことを目的として行われた。ここで現在実現可能ということは、単に現在の技術で可能というだけでなく、現在の社会にも受け入れられるという意味である。社会に受け入れられるために

は、SPS2000の電力コストは合理的な前提の下で地上の発電システムと比肩しうるものであること、及び、その電力は社会に有効に利用されることが要件とされた。

SPS2000タスクチームは1991年に結成された後、約2年間にわたり組織的なグループ研究を行い、1993年に概念計画書⁹⁾をまとめた。その後SPS2000タスクチームメンバーは共同研究を個別に設定し、情報交換を行いながらそれぞれの分野の研究を続けている。宇宙科学研究所の太陽発電衛星ワーキンググループそのものは1997年に解散し、宇宙技術だけでなく、エネルギー、環境、関連する人文系の分野の研究も包含するより大きな枠組みの太陽発電衛星研究会(略称SPS研究会)に発展した。しかし、その後もSPS2000タスクチームの組織は存続し、ニュースレターの発行やシンポジウムの開催などを行っている。

4.2 システム概要

SPS2000の送電規模は電力システムとしての技術的、経済的評価が可能なレベルとして1万kWを設定した。SPS2000の軌道は、輸送コスト、軌道寿命、受電の頻

度、電力の有効利用の観点から、米国のリファレンスシステムの静止衛星軌道と異なり、低高度赤道軌道を選んだ。低高度軌道では夜と昼が地上と同様に訪れるという欠点があるが、低高度軌道への投入コストは静止衛星軌道の場合と比較し数分の一であるため、近未来に実施すべき試験用の太陽発電衛星としては低高度軌道が現実的と判断した。送電アンテナのサイズと半導体に対する宇宙放射線の影響の観点からはできるだけ低い軌道が望ましいが、余り低い軌道では空力抵抗により短期間で落下してしまう。SPS2000のような形状と重量の衛星が10年以上軌道上にとどまることができ放射線環境がそれほど厳しくない軌道高度は1,000km付近である。この付近で宇宙ごみ(デブリ)が比較的少ない軌道として高度1,100kmを選定した。軌道傾斜角を持つ軌道では1日の受電機会は1つの地上局について数回程度に限られるが、軌道傾斜角が0度の赤道軌道では約2時間毎に受電の機会が得られる。SPS2000はマイクロ波の放射を軌道方向±30度に制御するので、1回の受電時間は3.5分となり、受電所での平均的な取得電力は約300kWとなる。先進国では300kWの電力はごみのような量であるが、赤道付近の発展途上国では揚水などの

電力として有効に利用できる。

SPS2000の形状は、図10に示すような一辺330m、長さ300mの三角柱である。この形状は発電電力と姿勢安定の観点から決められた。当初SPS2000の形状は一辺100m、長さ800mの細長い三角柱であったが、後に姿勢安定の問題があることがわかり、現在のようなずんぐ

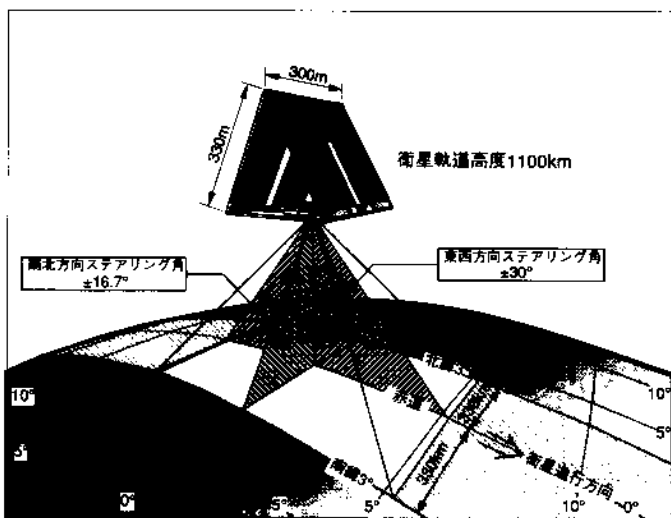


図10 SPS2000タスクチームが概念検討を行った太陽発電衛星SPS2000のモデル。高度1,100kmの赤道軌道に投入し1万kWの電力を赤道諸国へ送電する。

りとした三角柱の形状となった。SPS2000は三角柱の軸を南北に向け、送電アンテナ面を常時地上に向けて赤道を周回する。60度の角度を持つ上部2面の太陽電池パネルにより太陽角の時間変化に伴う発生電力の変化を平滑化する。SPS2000はバッテリーを持たず日照時のみ電力を地上に送ることとしてシステムを簡素化している。このような大型の構造物の姿勢を能動的に制御するには大型で複雑な制御システムが必要となるので、構体に働く重力傾斜トルクの作用で送電アンテナ面が自然に地上を向くような構造と質量分布としている。

打ち上げロケットは、現存する大型ロケットの中で赤道軌道へ投入するのに都合の良い打ち上げ基地を持つアリアンVを想定して、搭載性と輸送シナリオの検討を行った。ただし、実際には高度1,100kmの赤道軌道への投入が可能なロケットの中で最も低コストの打ち上げシステムを選ぶこととしている。表4にSPS2000の主要諸元を示す。

4.3 発電部

太陽電池セルとしては、大量生産が可能で近未来に低コスト化が期待でき、宇宙への輸送と展開に便利な薄膜フレキシブルアモルファスシリコン太陽電池を想定した。アモルファスシリコン太陽電池は現在我が国で年間わずか1万kW程度しか生産されていないが、結

表4 SPS2000 システムの主要諸元

事 項	諸 元
軌道	赤道軌道高度1,100 km
構造	断面330 mの正三角形、長さ300 m
姿勢制御	重力安定
組み立て	自動展開及び組み立てロボットの組合せ
発電電力	1万6千kW
発電電圧	1,000 V
地上受電電力	1万 kW
送電媒体	マイクロ波2.45 GHz
送電アンテナ	フェイズドアレイによるビーム方向制御
地上受電アンテナ	リフレクタ付きワイヤーアンテナ
総重量	240 トン
打ち上げロケット	アリアンV(16回のフライト)
運用	日照時のみ送電
寿命	10年以上

晶系シリコン太陽電池の次の世代の太陽電池として10万kW規模の生産が計画されている。現在の効率は10%弱であるが、将来的には15%前後が期待されている。SPS2000の概念設計では効率15%、重量比出力1kW/kgを仮定した。

SPS2000の太陽電池アレイは宇宙科学研究所の国中均博士により設計された。太陽電池アレイの電圧をいくりに設定するかについてはかなり議論があったが、集電ケーブルでの熱損失とプラズマとの干渉の問題、及び、より大電力システムへの発展性を考慮して1kVを選択した。1ユニットは90V、1.6Aの出力とし、12ユニットを直列に接続してサブアレイを構成する。110枚のサブアレイを並列に接続して1kV、180Aのアレイモジュールを構成する。アレイモジュールは幅3m、長さ330mの短冊状である。アレイモジュールの重量は集電ケーブルを含んで約270kgである。図11に示すようにアレイモジュールを45枚並列に接続して、北東、北西、南東、南西の翼(ウィング)を構成し、北東と北西のウィング、南東と南西ウィングをそれぞれ並列に接続した上で送電系に配電する。各アレイモジュールからの集電はポリマーの被膜を施した銅製のフラットケー

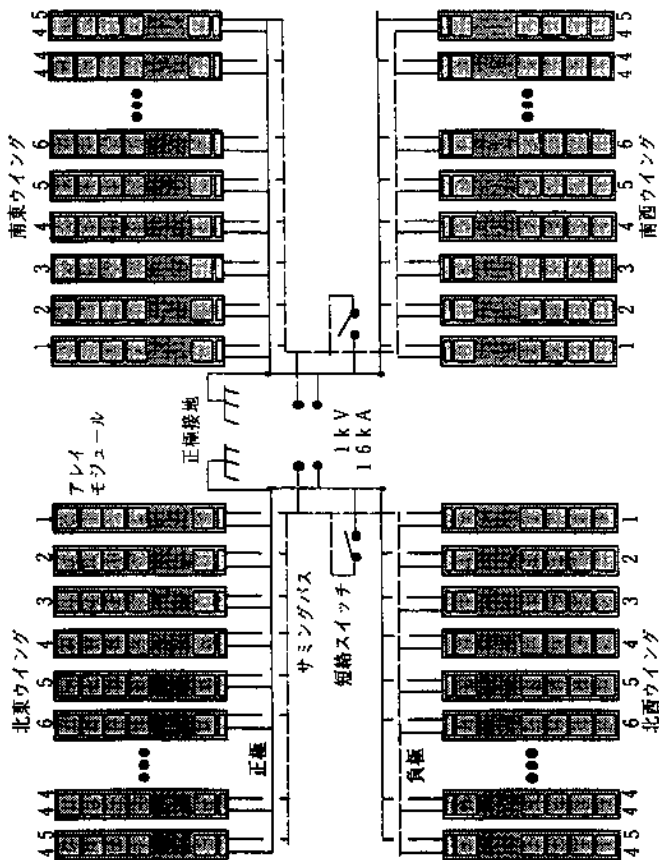


図 11 SPS2000 の太陽電池アレイの電気系統図。

ブルで行う。SPS2000の軌道運動に伴い太陽電池面への太陽光の入射角は変化する。現日本ハイテク研究所の今仁和武氏によって解析された発電電力の時間変化に伴う送電出力の時間変化を図12に示す。

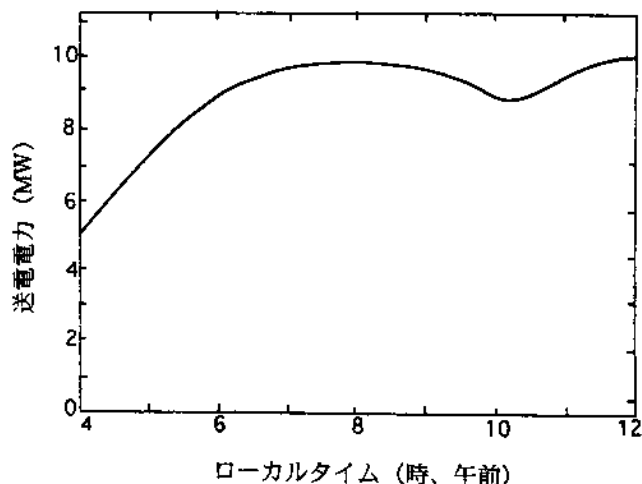


図 12 SPS2000の送電電力の時間変化。横軸は2時間で地球を周回する衛星の地方時間。午後12時を中心として左右対称のプロファイルとなる。

4.4 送受電部

電力伝送は2.45GHzのマイクロ波を使用する。マイクロ波ビームの指向制御は地上の受電所からのパイロット信号(誘導信号)による送電波の位相制御により行う。具体的な電力伝送システムの設計検討と試作は、北海道大学伊藤研究室により行われた。アンテナ素子はキャビティ付きスロットアンテナ素子であり、この中に増幅器を組み込む。アンテナ素子のサイズは75mm×90mm×12mm、出力は4Wである。増幅器の効率は設計上65%を使用している。約1,300ヶのアンテナ素子で3m×3mのサブアレイを構成し、約2,000枚のサブアレイで送電アンテナ(スペーステナ)を構成する。図13にサブアレイの電気ブロック図を示す。スペーステナのサイズは直径150mである。マイクロ波ビームの指向制御範囲は東西方向に±30度、南北方向に±16.7度とした。このスペーステナから送られるマイクロ波の地上での最大電力密度はビームの中央で最大1mW/cm²であり人体へのマイクロ波の安全基準を満たしている。図14に示すように地上の受電アンテナ(レクテナ)は直径2kmの大きさにビーム電力の95%の範囲をカバーできる。受電アンテナとしては、ワイヤメッシュ反射器と

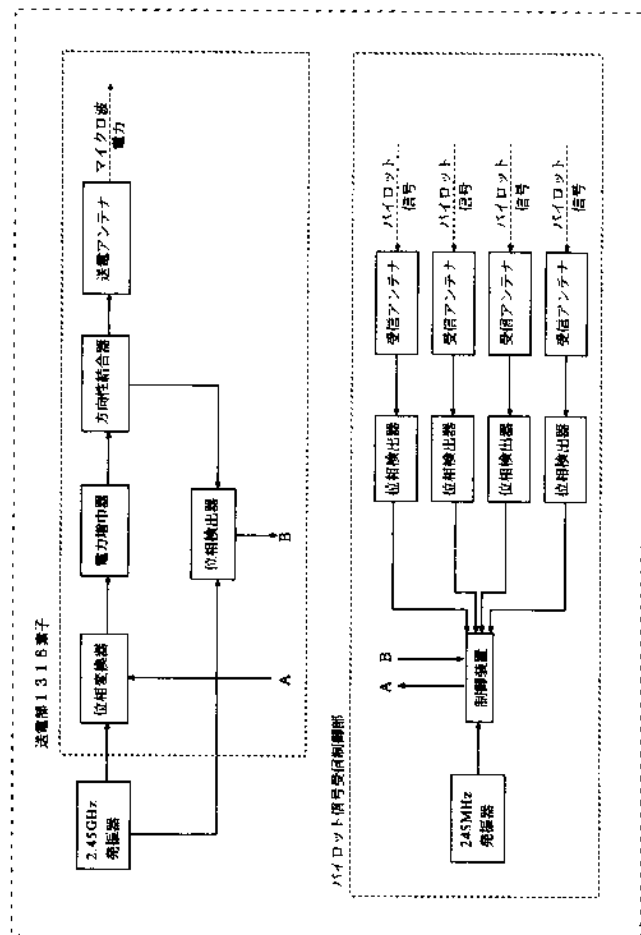


図 13 SPS2000のスペースステナのサブアレイの電気系統図。1サブアレイは1,320素子のアンテナから構成される。

円形マイクロストリップアンテナの組合せ方式と、メッシュ状ダイポールアンテナアレイ方式(魔法の絨毯と呼ばれる)が検討されている。前者は高効率、後者は低コストを狙ったもので、いずれも太陽光を80%以上透過するメッシュで集電するため設置場所での環境へのインパクトは殆どない。

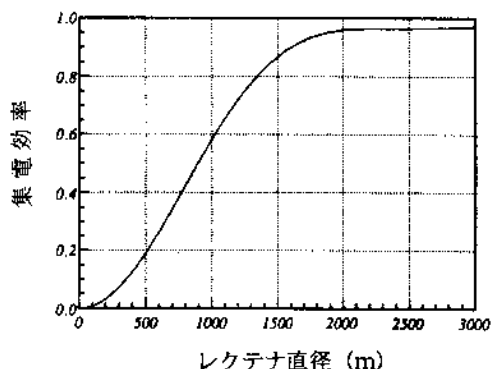


図 14 SPS2000のレクテナの直径に対するマイクロ波の集電効率 (井上悟志氏による)。

4.5 組立

SPS2000の総重量は組立支援装置及び予備重量を含んで約240トンである。その重量内訳を表5に示す。これらを16回に分けてロケットで打ち上げる。初回と2回目の輸送で、衛星のバスシステム部、初期組立のための台座、組立ロボット、トラスの部材、ドッキングポート、太陽電池、ケーブル、送電アンテナ部材、その他の建設用部品を打ち上げる。これによりSPS2000の中央部幅100m程度の部分が完成し、700kWの送電が可能と

表5 SPS2000の重量内訳

サブシステム	重量(トン)
送電アンテナ	134.4
太陽電池	37.5
輸送用機材	20.3
集配電ケーブル	17.4
主構造	9.5
建設ロボット	3.5
バス機器	0.5
ドッキングポート	0.5
合計	223.6

なる。初期組立は何もない空間にコアとなる構造を作り上げるという特殊な工程であるが、3回目以降は既存の構造に、トラスの部材、太陽電池、送電アンテナ部材、ケーブルを追加していくという標準的な工程となる。各打ち上げ毎に順次送電能力を上げて最終的に送電能力1万kWのシステムを構築する。

主構造は図15に示すような直径10~30mmの3種類のアルミパイプで構成するトラスのビームである。ビームは一辺3mの三角柱形状であり、ビーム上を走行するロボットにより素材のパイプから組み立てていく。パイプとパイプの接続はこの為に特に考案されたワンアクションで接続できるラッチ式の継ぎ手を用いる。太陽電池アレイのモジュール(幅3m、長さ330m)は、ロール状または屏風状に折り畳んで輸送され、トラス上を走行するロボットにより構体上2面に展開装着される。送電アンテナアレイも3m×3mの屏風状に折り畳んで輸送され、走行ロボットあるいは走行クレーンにより構体下部中央に展開、装着される。集電のための大電流フラットケーブルはロール状に巻かれて輸送され、走行ロボットで展開、装着、接続される。これらの役割を果たす走行ロボットについては各種の形態のものが

現北海道電力(株)の福澤修一郎博士によって検討されている。図16に走行機能を持ったトラスビーム組み立て用のロボットの一例を示す。

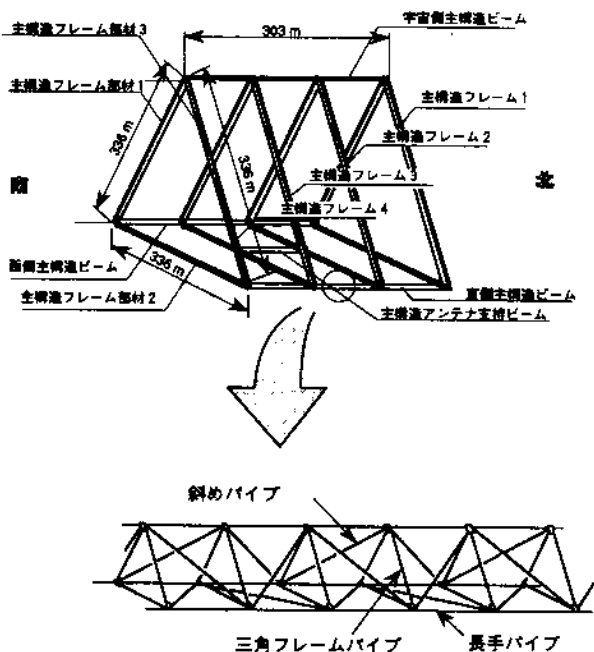


図 15 SPS2000 の主構造。トラスビームは 3 種類のアルミのパイプで構成する。

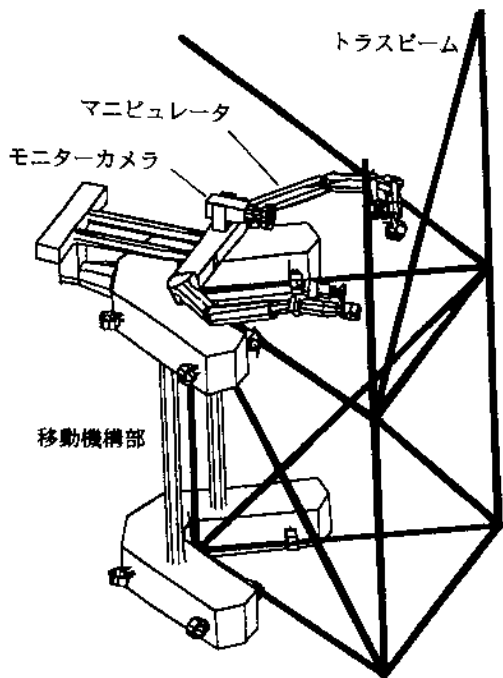


図 16 SPS2000 のトラス構築用の走行ロボットの例。

4.6 プロジェクトコストの目標

SPS2000のシステムを構築するために必要な経費は、打ち上げコスト、発電衛星の建設コスト、地上のレクテナの建設コストに区分される。打ち上げコストは、多数機調達によるディスカウントを見込んだ場合でも、現状で100万円/kg程度のため、輸送費のみで2,400億円かかることになる。ただし輸送費については百分の一を目指した新輸送系の開発が進みつつあることから、実験システムであるSPS2000で評価すべきコストからは切り離して考える。また地上のレクテナについても、受電地域での設置形態及び所要電力規模に様々なバリエーションが考えられるため、受電国の研究開発の一環として設備されるものとし切り離して考える。

SPS2000の衛星本体の建設コストについてはゼロ次の目標が設定されている。発電部(太陽電池と配線)と送電部(半導体部品)は送電電力1ワット当たり300円と想定する。1万kWで各々30億円となり、構造組立と運用支援機器は30億円を割り当て、開発費合計90億円を設定した。この数値は積算値ではなく目標値であるが、以下のような意味を持っている。SPS2000の試験実施期間は10年を想定しているが運用は30年行うとし、地上

の電力と同レベルの10円/kWhの売電を1日16時間を行うとすれば、年利子3.6%、借入期間30年の借入金でSPS2000の衛星本体を開発することができる。

4.7 地上での実証的研究とレクテナの現地調査

SPS2000の概念設計後は各研究グループが緩やかな連係と情報交換を行いながら個別の研究を進めてきた。以下にその代表的な研究を示す。

(1) 電気機能モデルの製作と試験

SPS2000の各サブシステムの電氣的インターフェイスとそのシステムの運用性を検討するため、SPS2000の形状とその電氣的な機能を模擬する小型のモデルを製作し試験した。これまで大小5種類のモデルを製作しているが、最も基本的なモデルは、SPS2000の1/300のスケールの三角柱フレームに太陽電池パネルとマイクロ波回路及びマイクロ波アンテナを組み込んだモデルである。太陽光はキセノンランプで模擬する。多結晶シリコンの太陽電池パネルで発生する電力で2.45GHzのマイクロ波の発振器と1Wのアンプを動作させる。アンプからのマイクロ波電力は4台のスロットアンテナから放射される。レクテナアレイ(受電アンテナ)は96セット

の半波長ダイポールアンテナと整流ダイオードで構成し、送電アンテナから2m離れた場所で100mWの電力が取得できる。このモデルの発展型として、4ワットの送電能力を持ちレクテナからのパイロット信号(800MHz)で誘導されるマイクロ波を放射する位相制御方式のモデル(図17)も製作した。これらのモデルのマイクロ波回路は北海道大学伊藤研究室で開発された。また最近ではSPS2000用の平面型アクティブアンテナの開発が東海大学川崎研究室で行われている。さらに大電力のモデルとして、図18に示すような300Wの発電機能をもつ1/100モデルを製作し、太陽入射角の変化に伴う発電電力の時間的変化を調べるフィールドテストを行った。

これらのモデルの一部は宇宙科学研究所の一般公開やフランスでの博物館等で展示され、一般の人たちに太陽発電衛星の仕組みを知ってもらうために使用されている。図19に宇宙科学研究所の一般公開での展示の様子を示す。これまで4回展示され、合わせて5万人以上の人々がこのモデルを見学している。1999年に宇宙科学研究所に客員教授として滞在したフランス国立宇宙研究センター(CNES)のピニョレ博士は、アタッシュケースにも収納可能な超小型(1/1,000サイズ)のSPS2000

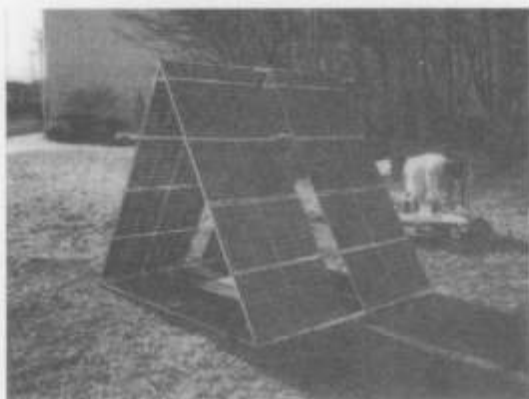


図 18 SPS2000 の 100 分の 1 モデルを用いて発電電力の時間変化を調べるフィールド実験の様子。



図 19 宇宙科学研究所の一般公開で展示されたSPS2000の電気機能モデル。

電気機能モデルを開発した。このモデルは8セット製作され、世界各国で開催された関連の学会や国際会議でのデモンストレーションに用いられたり、教育団体へ寄付されたりしている。

(2) トラス組立実験

SPS2000のトラス組立の基本的な考え方はロボットによりパイプとパイプをラッチ式の継ぎ手を用いて接続して行く方式である。その技術的な可能性については電力会社の電線保守ロボットを用いて確かめられている。一方別の考え方として三角形のトラスエレメントを部材として、それを次々と連結して行く方式のビームビルダーも考案された。ビームビルダー方式の技術的な可能性を調べるため、SPS2000のトラスの1/3の大きさのトラスを自動的に組み立てていく装置を試作して評価した。この装置は同時に上下方向へトラスビームの伸展を行うことにより重力の影響をキャンセルし、低重力下での組立を模擬することを狙った装置である。組立のためのモーターへの電力は太陽電池から定電圧源を介さず直接供給し、宇宙空間での作業を模擬した。この場合得られる電力に応じて作業スピードは変化するが、電力は無駄なく作業に利用されるとい

う特長をもつ。図20にこの装置をデモンストレーションした時の写真を示す。これらの研究は宇宙科学研究所の宇宙エネルギー工学部門に在籍した学生を中心に行われた。最近では、太陽電池からの電気エネルギーを圧縮空気の形で蓄積し利用する方式のトラスパイプ

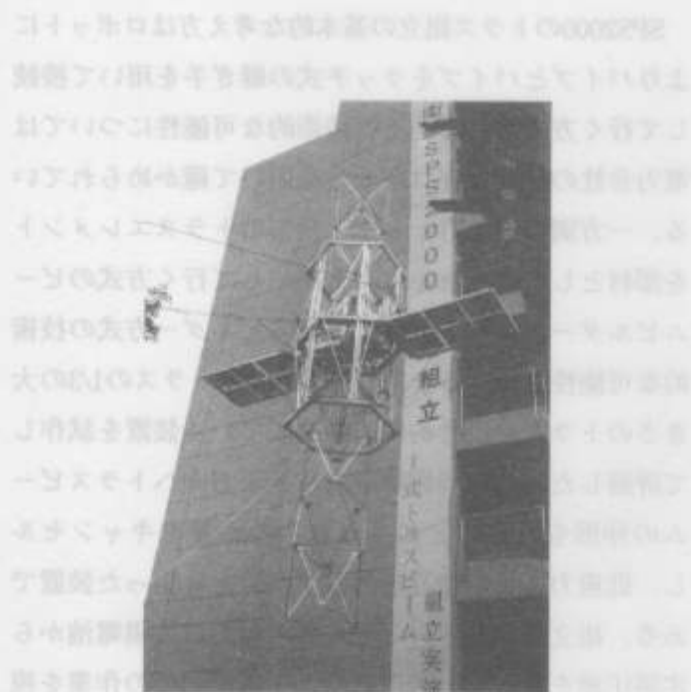


図 20 自動組立装置による SPS2000 のトラスビーム組立実験の様子。トラスビームを上下方向に10m組み立てる。

の自動組立装置の研究も行われている。

(3)高電圧によるプラズマの干渉

SPS2000では太陽電池の発生電圧として1kVを使用する。飛翔体の電位は、飛翔体の正電位部に流入する電子電流と負電位部に流入するイオン電流の釣り合いにより決まる。電子はイオンと比べてその質量がはるかに軽く移動度が大きい。このため通常の衛星のように太陽電池の負極を衛星構体に接地する場合には、図21

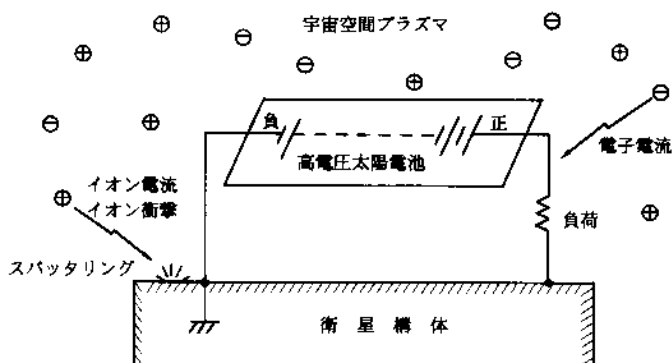


図 21 高電圧太陽電池を用いた時の宇宙空間プラズマとの干渉。電子電流とイオン電流が釣り合うように衛星構体の電位は決まる。電子は軽く集まり易いため、衛星構体の電位は宇宙空間プラズマに対し負になりイオン衝撃が発生する。

に示すように衛星構体の電位は周囲のプラズマ電位に対し太陽電池パネルの発電電圧に近い電圧まで負側に沈むことになる。1kVの発電電圧を使用する場合は、衛星構体は1kV近くの負電位となり、これにより加速された周囲のイオンが構体を衝撃することになる。このような高エネルギーのイオンが構体を衝撃する場合は、表面原子がたたき出されるため表面劣化が発生するとともに、二次イオンの再付着のために表面汚染や絶縁不良が発生する。SPS2000ではイオンが構体を衝撃しないよう正極接地の採用も考えている。この場合には電池面と集電ケーブルが負の高電圧となり、ダスト衝突などで電池面や集電ケーブルが露出した場合には露出部へのイオン衝撃が発生する。いずれにしても高電圧を使用する場合は負電位部に対するイオン衝撃の影響を考慮する必要がある。イオン衝撃による材料劣化量を評価するため、各種宇宙材料に100eV~1.5keVのエネルギーを持つイオンを照射しその劣化の程度を調べる実験を行った。実験結果をもとに推定した電離層各高度でのアルミの場合の質量欠損と再付着による汚染の量を図22に示す。これらの量は実際には高電圧部の形状に依存するが、SPS2000の高度付近では1kVの露出部

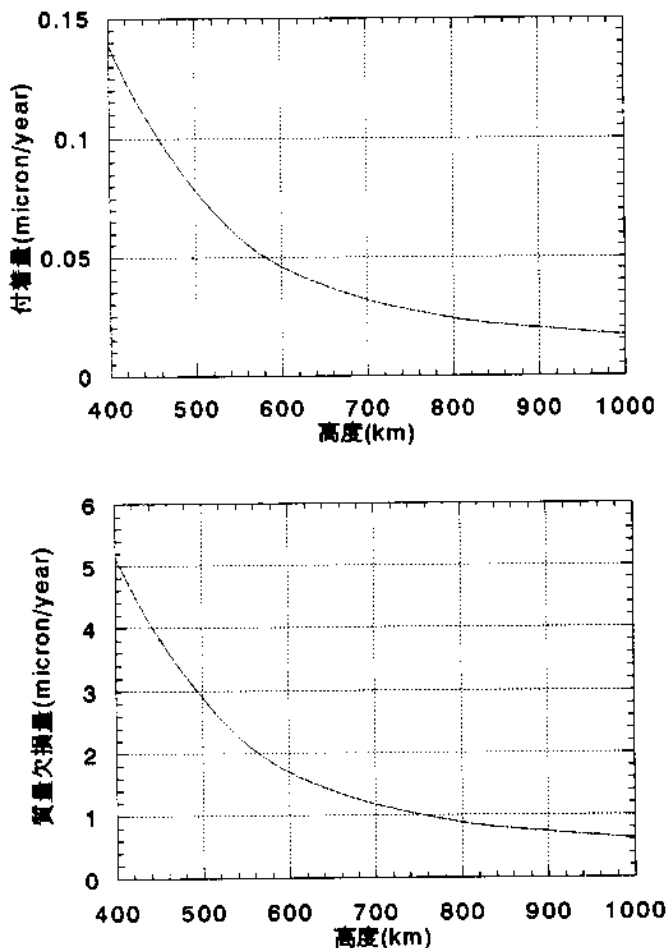


図 22 実験的に得られたスパッタリング率から計算した電離層各高度でのアルミ材の年間当たりの質量欠損量とコンタミネーションの付着量 (1kV の負電位の場合)。

の欠損は10年間で10ミクロン程度、二次イオンの付着による露出部周辺の汚染は0.2ミクロン程度と予想される。

(4) 太陽電池の耐宇宙環境性試験

SPS2000用の太陽電池としてはアモルファスシリコンの薄膜太陽電池を候補としている。入手可能なアモルファスシリコンの太陽電池について、宇宙空間の放射線環境下での劣化量を原子力研究所高崎研究所での放射線照射実験により評価した。10MeVのプロトンを照射した場合の結晶シリコンとアモルファスシリコンの劣化の比較を図23に示す。結晶系の電池と比べ光電層が薄いアモルファスシリコンの太陽電池は放射線に強いという結果が得られた。この程度の劣化量であれば、高度1,100kmのSPS2000軌道での太陽電池の劣化量は10年間で5%以下と見積もられる。ただしこの評価試験で用いたアモルファスシリコン太陽電池の効率は5~6%(安定化後の効率)でかなり低く、今後もっと効率の高い太陽電池で確認する必要がある。

一方18万m²にも及ぶ大面積の太陽電池面に対しては高速の宇宙塵やデブリの衝突を回避することはできない。衝突してもその影響がアレイモジュール全体に広

がらないようサブアレイを設計する必要がある。現在の設計では1回の衝突で破損する領域が25cm×75cm以下であれば、該当するサブアレイの電力は25%失われるが、アレイモジュール単位では0.25%の損失に止まるような設計となっている。薄膜の太陽電池に高速物体が衝突した時の破損の大きさを評価するため、アモルファスシリコンの薄膜太陽電池にレールガンからの高

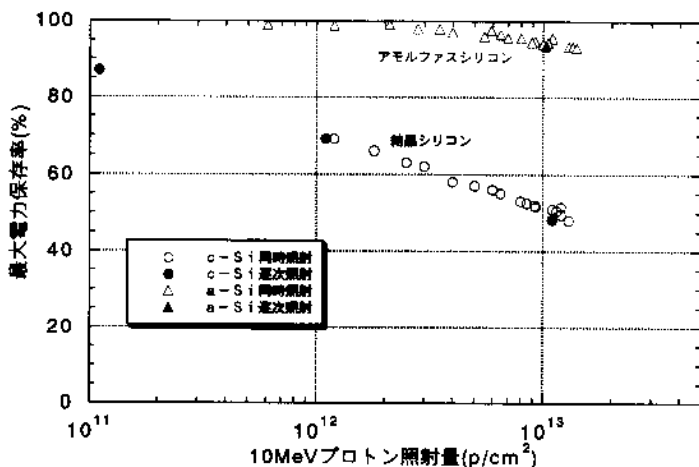


図 23 放射線に対する結晶シリコン太陽電池とアモルファスシリコン太陽電池の劣化の比較。アモルファスシリコン太陽電池は結晶シリコン太陽電池よりも放射線耐性が高い。

速弾(径1cm,重量1g,速度約7km/s)を衝突させその破壊状況を検査した。衝突破壊の例¹⁰⁾を図24に示す。破壊領域は弾の大きさに比べ予想外に大きかったが、それでも10cm程度の領域に止まり、サブアレイの設計が妥当なものであることが確認できた。SPS2000の軌道高度ではデブリの衝撃による10年間の電力損失量は1%以下と計算されている。

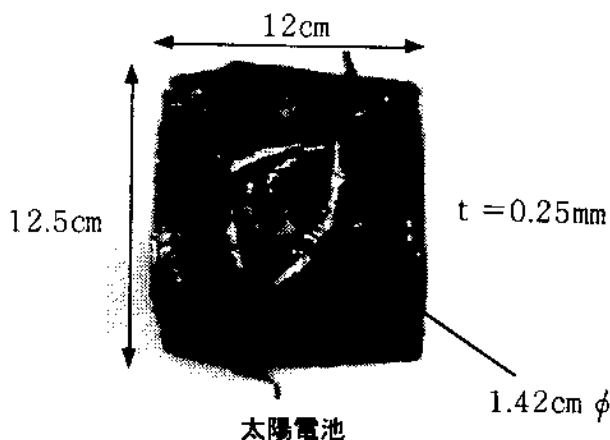


図 24 レールガンからの高速弾(約7km/s)をアモルファスシリコン薄膜太陽電池に衝突させた時の破壊の様子。1cmの大きさの弾の衝突に対し1.42cmの穴があき、直径10cm程度の破壊が生じた。

速弾(径1cm,重量1g,速度約7km/s)を衝突させその破壊状況を検査した。衝突破壊の例¹⁰⁾を図24に示す。破壊領域は弾の大きさに比べ予想外に大きかったが、それでも10cm程度の領域に止まり、サブアレイの設計が妥当なものであることが確認できた。SPS2000の軌道高度ではデブリの衝撃による10年間の電力損失量は1%以下と計算されている。



図24 レールガンからの高速弾(約7km/s)をアモルファスシリコン薄膜太陽電池に衝突させた時の破壊の様子。1cmの大きさの弾の衝突に対し1.42cmの穴があき、直径10cm程度の破壊が生じた。

(5) レクテナの現地調査

SPS2000は赤道軌道をとり、南北方向のマイクロ波ビームの制御範囲は ± 16.7 度なので、赤道から南北 $\pm 330\text{km}$ の領域に電力を送ることが出来る。SPS2000からの電力の受電候補領域を図25に示す。1994年から当時東京大学先端科学技術研究センターの、現在帝京平成大学の松岡秀雄教授と麻布大学のパトリック・コリンズ教授により、SPS2000のレクテナ設置の候補地につい

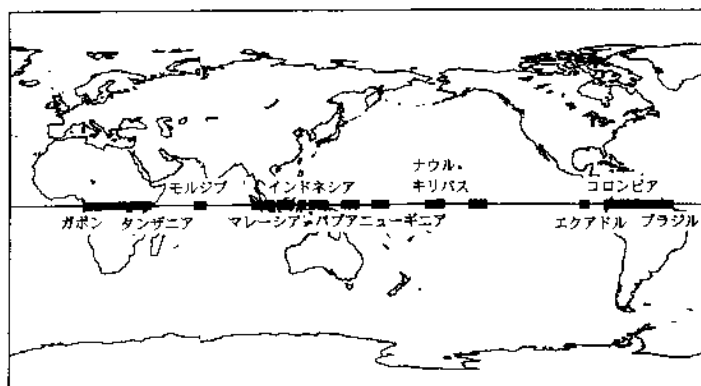


図 25 SPS2000 からの電力の受電可能地域（太線部）とこれまでレクテナ設置の可能性について現地調査が行われた赤道諸国 11ヶ国。

て現地調査が行われている。これまで調査を行った国はタンザニアを皮切りに図25に表記した11ヶ国にのぼる。調査では現地の研究者や行政担当官とともにレクテナ候補地の調査を行い、電力利用の可能性や今後の協力体制について討議を行っている。将来はこれら赤道諸国が共同してSPSの電力利用を推進する赤道諸国連合の可能性についても論議されている。

4.8 残っている課題

1993年にまとめられたSPS2000概念計画書の段階では、SPS2000の開発項目を、組立保守点検、太陽電池、送電アンテナ、送受電システム、と区分した時、組立保守点検と送受電システムに技術課題がより多く残っていると評価された。その後各分野の技術はそれぞれ進歩しているが、現段階では以下のような事項が具体的な研究課題として残っている。

(1) 最新のアモルファスシリコン太陽電池の耐宇宙放射線性の評価

比較的効率の低いアモルファスシリコンの太陽電池については耐宇宙放射線性が良好であるとの結果を得ている。今後、本格的な大量生産が開始されようとし

ている効率の高いアモルファス太陽電池について、耐放射線性を確認する必要がある。

(2)集電ケーブルとトラス構造の調和

現設計では大電力を集電するケーブルは17トンを占めアルミのトラスの主構造(10トン)よりも重い部材となっている。集電ケーブルを構造に調和的に取り込むための設計と構造解析が必要である。

(3)発電系と送電系との電氣的インターフェイス

発電系の電圧・電流特性(最適な負荷特性)は太陽電池面への太陽光入射角の時間変化とともに変化する。ダイナミックに変化する電源の出力特性に対し、送電系での電力損失が少なく動作範囲の広い回路構成を設計、試作する必要がある。

(4)マイクロ波のビーム制御技術

マイクロ波のビーム方向を制御するためのアレイの位相制御技術は電力システムとしては未だ技術的な課題が多い。10kWレベルの送電システムを試作して試験する必要がある。

(5)排熱

送電部で発生する大量の熱(最大6,000kW)は上部中央の太陽電池モジュールの開口(資材輸送機のドッキング

用の開口)から宇宙空間へ放射する。ただし現状では上部の一部の太陽電池の温度は動作温度を超えている。熱管理の観点からのシステム検討と熱解析が必要である。

(6) 自動組立とメンテナンスの方式

トラスの自動組立方式についてはある程度の試作研究を行ったが、太陽電池、送電アンテナ、ケーブル敷設の方法及び完成後のメンテナンス用ロボットの試作研究が必要である。

(7) 受電システム

レクテナについてはワットレベルの受電装置を試作したのみで、電力システムとしては評価ができていない。このため数十 m^2 程度のレクテナを試作し、キロワットレベルの電力を受電して電力システムとしての総合的な評価を行う必要がある。

これらSPS2000の現段階の主な研究課題のまとめを表6に示す。新しい世紀を迎えた今、SPS2000が設計条件として設定した建設開始時期の西暦2000年は既に超えた。SPS2000の区切りの年の平成12年には、SPS2000の研究成果をとりまとめるためのシンポジウムが開催され、今後の研究の進め方についても議論が行われた。

SPS2000の名称をどうするかはともかく、SPS2000の理念に基づいた太陽発電衛星の実現を目指した研究を今後も続けることが提案されている。

表6 SPS2000の現段階での具体的な研究課題

事 項	次のステップの研究課題
太陽電池	最新のアモルファスシリコン太陽電池の耐宇宙放射線性の評価(試験)
構造	集電ケーブルとトラス構造の調和(設計と構造解析)
電氣的インターフェイス	時間的に変化する発電系の出力特性に対し、電力損失が少なく動作範囲の広い送電系の回路構成(試作試験)
送電	10kWレベルのアレイの位相制御によるビーム制御技術(試作試験)
排熱	送電部で発生する大量の熱(最大6千kW)の処理(熱解析)
組立とメンテナンス	太陽電池、送電アンテナ、ケーブル敷設の方法及び完成後のメンテナンス用ロボット(設計、試作試験)
受電システム	1kWレベルのシステムによる電力システムとしての評価(試作試験)

5. 今後の展望

太陽発電衛星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、100万kW(原子力発電所1基分)以上の規模の太陽発電衛星が必要である。しかし、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100万kW規模の太陽発電衛星の建設に着手するには技術的、経済的なリスクが大きい。太陽発電衛星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)を経て実用に至る段階的なプロセスを踏む必要がある。

太陽発電衛星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。これ以外にも太陽発電衛星構築のためには、宇宙での大電力発電技術、宇宙大型構造物技術、低コスト大量宇宙輸送技術が必要であるが、これらは汎用技術としてより広い宇宙開発の中で技術開発が進められるだろう。宇宙から地上への無線送電技術は、太陽発電衛星に特有な技術であるため、太陽発電衛星を目指すグループが技術開

発を行わない限り進展はない。軌道上から地上への無線送電技術の実証をまず行った後、1万kW~10万kWクラスの試験衛星により太陽発電衛星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太陽発電衛星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ながら太陽発電衛星のための技術を確立し、20~25年先の商業的な太陽発電衛星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と調査研究をベースに、太陽発電衛星実現に向けてのロードマップの検討が始まっている。通産省は太陽発電衛星の研究について平成12年に宇宙開発委員会へ要望を提出し承認された。太陽発電衛星の研究が宇宙開発委員会で認められたのは初めてのことであり、画期的なこととされている。一方宇宙開発事業団においても以前から調査的な検討は進められてきたが、ここ数年、より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太陽発電衛星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。国内外いずれの将来構想も、図26に示すように2010年頃を目途に試験的な小型の太陽発電衛星を先行させ、段階的に大型化し、2020～2030年頃に本格的な商業用の実用太陽発電衛星に至るというシナリオは共通の認識になりつつある。

それぞれの国の資源という観点で国策として開発の進められてきた化石燃料や原子力などのエネルギーは、これまで国家間の利害関係のせめぎ合いの中で取り扱われ、しばしば国際的な争いの元となってきた。しかし宇宙空間という人類共有のフロンティアを利用する太陽発電衛星構想は、国際的な協調の下にのみ成り立つ構想である。国際協力を成立の要件とする太陽発電衛星は、人類にあまねくエネルギーを供給するだけでなく、国際的な平和共存を保障する社会基盤としての役割も果たすことになるだろう。

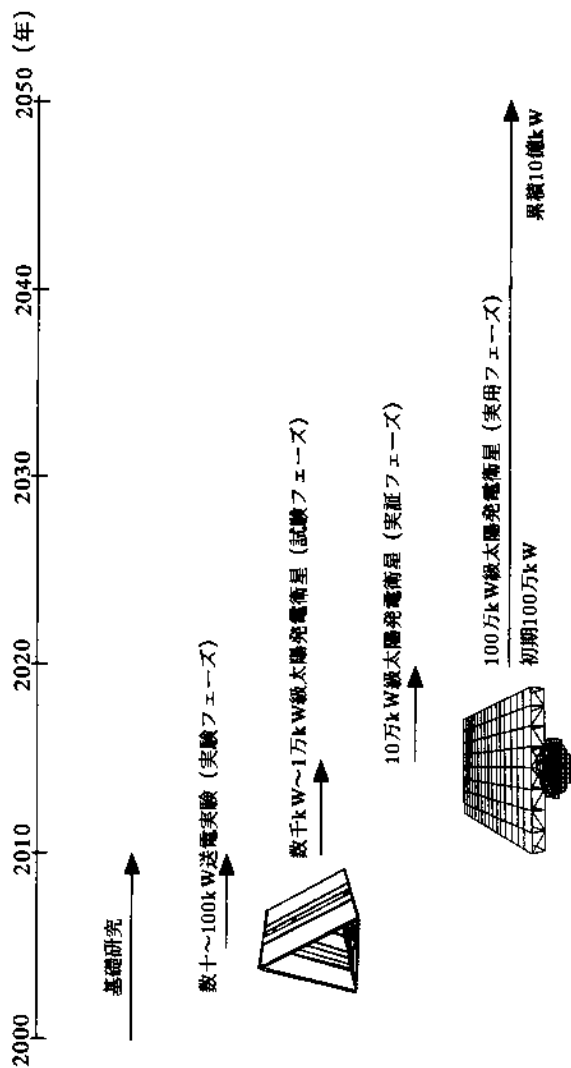


図 26 実用太陽発電衛星 (100 万 kW クラス) へ至るまでの技術開発シナリオの例。

おわりに

本冊子で紹介したSPS2000の研究成果はSPS2000タスクチームメンバーの共同作業によって得られたものである。また図の多くは同メンバーの成尾芳博氏により作成されたものである。

参考文献

- 1) 伊藤精彦：宇宙太陽発電衛星、衛星通信研究 No.48、(財)国際衛星通信協会(1994)
- 2) P.E.Glaser: Science, 162(1968)
- 3) DOE/NASA: Program Assessment Report Statement of Findings, DOE/ER-0085(1980)
- 4) 吉岡完治、菅幹雄、野村浩二、朝倉啓一郎：第1回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、1999年1月
- 5) 山田興一、加藤和彦：第1回宇宙太陽発電システム(SPS)シンポジウム、1999年1月
- 6) R.Akiba, K.Miura, M.Hinada, H.Matsumoto and N.Kaya: ISAS Report No.652(1993)
- 7) 太陽光発電システム実用化技術開発、太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発、宇宙発電システムに関する調査研究、(株)三菱総合研究所、1994年3月
- 8) J.C.Mankins: Proc. of SPS '97 Conference, Montreal, August (1997)

- 9) 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
- 10) 田中真、佐々木進、矢守章、横田俊昭、太田正
廣、遠山文雄：第13回宇宙エネルギーシンポジウ
ム、1994年1月

本誌の取扱書店

●全国の政府刊行物取扱書店

- ・霞が関政府刊行物センター 千代田区霞が関 1-2-1 (03-3504-3885)
 - ・大手町政府刊行物センター 千代田区大手町 1-3-2 (03-3211-7786)
 - ・大阪政府刊行物センター 東区大手前 1-5-63 (06-6942-1681)
 - ・名古屋政府刊行物センター 名古屋市中区三の丸 2-5-1 (052-951-9205)
 - ・札幌政府刊行物センター 札幌市北区北 8 条西 1-1-1 (011-709-2401)
 - ・仙台政府刊行物センター 仙台市青葉区本町 3-2-23 (022-261-8320)
-

- ・三省堂本店 (03-3223-3312)
- ・KDD ビル内の KDD 商事書店 (03-3347-7967)
- ・郵政省内の三省堂書店 (03-3591-3319)
- ・NHK の放文社売店 (03-3481-1677)

本号およびバックナンバーをご希望の方は直接当財団法人、または上記の政府刊行物取扱書店にご注文下さい。

衛星通信研究 No.89 2001年1月10日印刷 2001年1月15日発行

財団法人 KDD エンジニアリング・
アンド・コンサルティング

〒153-0061 東京都目黒区中目黒 2-1-23

TEL (03)3794-8078 FAX (03)3794-8209

<http://www.kdd-ec.or.jp>

印刷所

共同テレコムシステム株式会社

〒106-0074 東京都港区高輪 3-22-4

TEL 03-5420-4833 FAX 03-5420-4850

落丁の場合にはお取り替え申し上げます。上記印刷所にご連絡ください。

成層圏プラットフォーム (HAPS) と無線通信システム

高度約20kmの定点に滞空する大型の飛行船を無線基地局に使おうとする夢のアイデアが成層圏プラットフォームである。最近の技術の進展により、その夢が現実になんげ近づこうとしている。本稿では、その夢の成層圏プラットフォームがどのように現実に近づいてきたかの経緯を述べ、無線通信や放送に使った場合の具体的なアプリケーション、日本の研究開発計画とその進捗状況、世界の研究開発動向、実用段階での周波数分配の動向、開発に関する問題点等について解説する。

- ・発 売 日 2000年11月
- ・定 価 840円(本体800円、税40円、送料実費)
- ・サ イ ズ ポケットサイズ 50頁
- ・著 者 長谷 良裕 郵政省通信総合研究所
第2研究チームリーダー
通信・放送機構成層圏無線プラットフォーム研究開発プロジェクト統括
サブリーダー兼務

- ・申込方法 TEL (03) 3794-8078まで電話でどうぞ

(財) KDD エンジニアリング・
アンド・コンサルティング