

## 第 8 章 宇宙太陽光利用システムの研究開発動向

株式会社三菱総合研究所 科学技術研究本部 宇宙情報グループ  
長山 博幸

### 1 はじめに

1968 年にピーター・グレイザー博士によって提案された宇宙太陽発電衛星(Space Power System : SPS)の概念は 1970 年代に入り、米国エネルギー省(DOE)と米国航空宇宙局(NASA)によって共同研究が行われ、NASA リファレンスシステムとして 1979 年に発表された。その後、1980 年代のレーガン政権下の財政緊縮方針等により、「技術的に致命的な問題はないが、建設コストと発電価格の高い点が問題」として SPS に関する研究は中断された。

一方我が国では、1980 年代には科学技術庁(STA)や宇宙開発事業団(NASDA)の委託業務として、NASA リファレンスシステムに関する基礎的な調査や経済的な検討が行われた。1990 年代に入ると新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務として検討委員会が設置され、1991 年度～1993 年度の 3 年間に渡って将来の商用電源としての実現性についての検討「宇宙発電システムに関する調査研究」が行われた。またこの時期に宇宙科学研究所を中心とした SPS2000 という研究プロジェクトが開始された。

1995 年になると米国では SPS に関する再検討として Fresh Look と呼ばれる調査が行われ、これをきっかけに大規模な研究・開発が行われた。

我が国では NEDO の調査以降いったん下火になった SPS に関する研究活動も NASDA が 1998 年度に小規模な委員会を立ち上げ、その活動と予算を拡大させてきた。また、SPS の概念も拡大され、レーザーによるエネルギー伝送方式や、水素製造なども視野に入れた「宇宙太陽光利用システム(Space Solar Power Systems : SSPS)」と呼ばれるようになった。

経済産業省でも 2000 年に無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)に委員会を設置し調査を開始した。

さらに、SSPS 研究を取り巻く政治的な状況としても、2003 年 2 月に自由民主党所属議員 92 名からなる「宇宙エネルギー利用推進議員連盟」が発足した。また、2003 年 10 月 7 日に閣議決定された「エネルギー基本計画」の中で、宇宙太陽光利用は国際熱核融合実験炉(ITER)計画と並んで長期的視野に立って取り組むことが必要な研究開発課題として位置づけられた。

以下ではこれらの SSPS に関する国内外の主な動向についてその概要を示す。

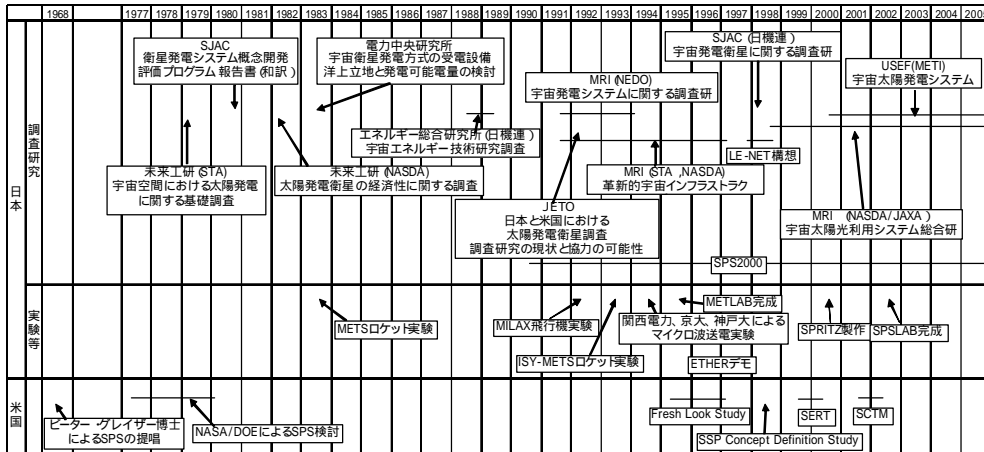


図 1 主な SSPS 研究活動

## 2 SSPS 研究の動向

### 2.1 我が国の主な活動

我が国では 1990 年代に行われた宇宙発電システムに関する調査研究、及びほぼ同時に開始された研究プロジェクト SPS2000 が初期の代表的 SSPS 研究といえよう。その後 2000 年頃に NASDA/JAXA、及び USEF による調査研究活動が開始され現在に至っている。以下ではこれらの概要を示す。

#### 2.1.1 宇宙航空研究開発機構(JAXA)での活動概要

JAXA では、図 2 に示すように 2020～2030 年の商用システム運用開始を目標に、マイクロ波による 1GW 級宇宙太陽発電システム及び宇宙レーザーによる高効率水素製造システムの研究開発を実施している。本研究は、旧 NASDA 時代の 1998 年に開始され、以後、活動と予算を徐々に拡大しながら現在に至っている。

JAXA の活動は、図 3 に示すように、システム総合研究、軌道上技術実証計画、及び要素試作試験の 3 つに分類される。



図 2 JAXA による SSPS 技術開発ロードマップ

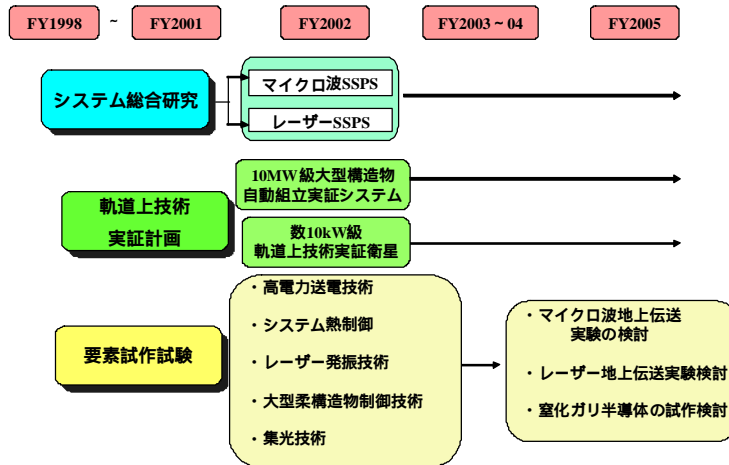


図 3 JAXA における SSPS 研究の流れ

### (1) システム総合研究

システム総合研究では、商用システムをターゲットとし、システムコンフィグレーション、技術課題、経済性評価等の実現性に関する検討を継続して行っている。

このシステム総合研究を実施する検討委員会として、1998年に三菱総合研究所内に9名の委員で構成される「宇宙太陽発電システム検討委員会」(委員長: 松本紘京都大学教授)が設置された。その後、毎年委員会は強化され、2002年には新たに「レーザーによる宇宙エネルギー利用システム検討委員会」(委員長: 中井貞雄大阪大学名誉教授)が設置された。現在、「マイクロ波による宇宙太陽光利用システム検討委員会」(委員数 24名)、「レーザーによる宇宙太陽光利用システム検討委員会」(委員数 11名)の2つの委員会が設置されており、それぞれマイクロ波による 1GW 級宇宙太陽発電システム及び宇宙レーザーによる高効率水素製造システムの実現性検討を実施している。さらに両委員会の下に 12 のワーキンググループ(WG)が設置されており、WG に所属するメンバーの総数は 180 余名となっている。図 4 に委員会と WG の関係を示す。

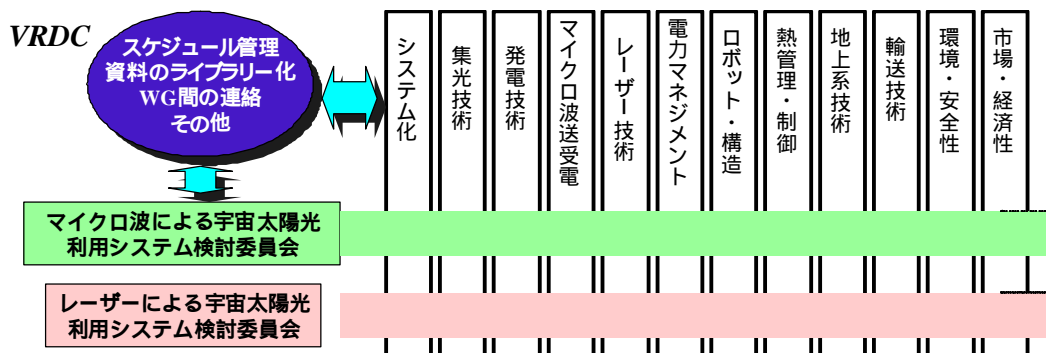


図 4 検討委員会と WG の関係

## (2) 軌道上実証計画

軌道上実証計画では、図 2 に示す技術開発ロードマップの第 1 段階である 50kW 級軌道上技術実証衛星の概念検討、システム設計、及びクリティカルミッション機器の要素試作試験を実施している。また、ロードマップの第 2 段階である 1 万 kW 級国際宇宙ステーション(International Space Station : ISS)近傍における大型構造物自動組立て実証システムに関する検討も上記委員会 / WG の中で検討を行っている。

50kW 級軌道上技術実証衛星に関しては、2001 年に国内宇宙関連企業に対しシステム検討業務を提示し、応募した 2 チームに対してコンペ形式でシステム検討が行われた。この検討結果は要素試作試験に反映されている。

## (3) 要素試作試験

要素試作試験では、SSPS に関する重要な要素技術のうち、地上で確認可能なシステム、部品などの試作試験及び技術開発を JAXA との直接契約の下実施されている。

### 2.1.2 経済産業省

経済産業省(旧通商産業省を含む)における宇宙太陽発電システムの検討は、1993 年から 1995 年に行われた「宇宙発電システムに関する調査研究」と 2000 年より開始された「宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術調査研究」があげられる。

#### 2.1.2.1 宇宙発電システムに関する調査研究

「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」では、産官学からなる研究委員会により、技術面、環境・生態への影響、及び経済性から SSPS を評価し、将来の商業電源としての我が国への実現性及び今後の検討課題についてまとめられた。この検討結果は以下のよう

#### ● 環境・安全面での評価

- マイクロ波の人体に与える影響は、現時点の研究では問題ない。
- マイクロ波の電離層に与える影響は、ほとんど影響がない。
- 通信に与える影響については、ほとんど影響ないことが明らかになった。
- レクテナが自然環境に与える影響に関しては、影響を事前に把握し、その対策をとることは十分可能である。
- SPS という新しいエネルギーシステムを導入するには、パブリックアクセプタンスを十分考慮する必要があり、このためにもマイクロ波の長期曝露や、電離層に与える影響などの基礎的な研究を引き続き行うことは重要である。

- 経済面での評価
  - SPS の発電コストは現在の基幹エネルギーシステムと比べて約 2 倍程度割高だが、CO<sub>2</sub> 削減対策や化石燃料の枯渇などから、今後既存のエネルギーシステムのコストは上昇する可能性が高いことを考慮すると、SPS は将来の商用電源としての候補となり得る。
  - システム構築に際して膨大なコストを必要とするため、コストを低減するための技術開発を進める必要がある。
- 総合評価
  - SPS は太陽エネルギーを地上で利用するよりも、エネルギーを効率的に利用することが可能なシステムであり、また、化石燃料を消費する既存の発電システムに比べて、温室効果ガスである CO<sub>2</sub> の排出も、ライフサイクルを通してきわめて低く、地球環境問題の観点から優れた電源であると言える。
  - 本調査研究で行った技術的、経済的、及び生態・環境へ与える影響評価の結果より、SPS の実現に向けて更なる研究開発は必要であるものの、SPS の商用電源としての可能性は十分にあると結論づけられる。

#### 2.1.2.2 宇宙太陽発電システム(SSPS)実用化技術調査研究

経済産業省は、2000 年度に茅陽一東京大学名誉教授を委員長とした委員会を USEF に設置し、我が国が「宇宙太陽発電システム」の実用化に向けた検討を行う意義を整理し、今後の実用化に向けた開発戦略についての検討を開始した。2000 年度の「宇宙太陽発電システムに関する調査研究」(日本機械工業連合会より受託)における SSPS の全般にわたる調査研究を行い、2001 年度からは 2 年間をかけて実用化技術調査として、経済性、環境及び技術面から SSPS の実用化に向けての検討を行うとともに、要素技術について試作等を行った。2003 年度は「マイクロ波による情報通信・電力伝送用電源・アンテナ一体型パネルの開発に関するフィージビリティスタディ (機械システム振興協会より受託) を実施した。具体的には、2001～2002 年度の作業でスタートした要素試作の延長として、電源・アンテナ一体型パネルの多機能インテリジェント構造体としての応用案の検討、電源・アンテナ一体型パネルの試作(ハードウェア・レトロディレクティブ方式)等の作業を実施した。2004 年度からは「宇宙光発電利用促進技術調査」を実施中であり、太陽光発電を新エネルギーの有効活用するための無線送受電技術の検討を行い、その発展的応用分野として SSPS を位置づけている。図 5 に最近の活動状況を示す。

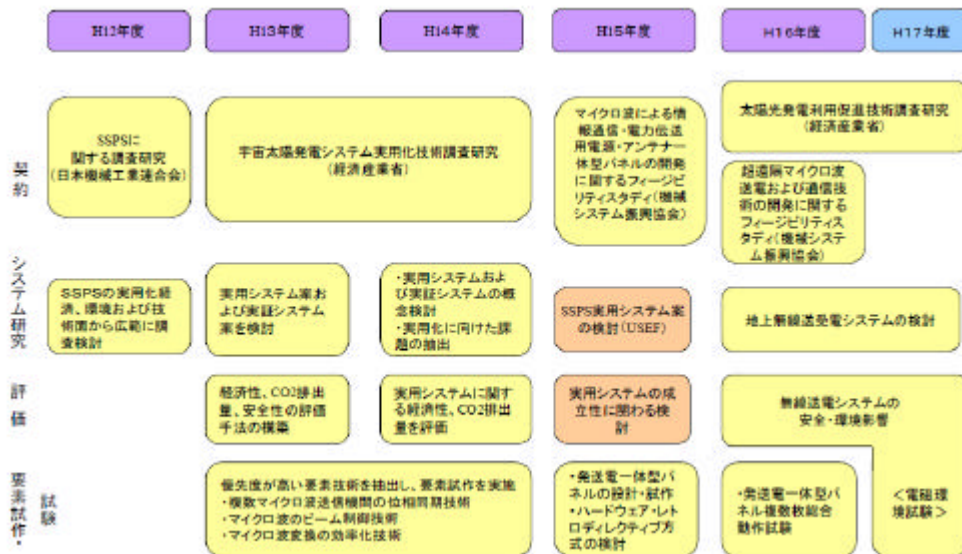


図 5 USEF における最近の活動状況

### 2.1.3 SPS2000

宇宙科学研究所 (ISAS、現在 JAXA 宇宙科学研究本部) では 1990 年から SPS2000 と呼ばれる研究プロジェクトを推進している。SPS2000 とは、ISAS に組織された太陽発電衛星 WG がその研究プロジェクトの一つとして設計研究を進めている太陽発電衛星のモデルである。この研究は、「太陽発電衛星とはどういうものか?」という素朴な質問に答えることのできる太陽発電衛星のイメージを描くこと、更に、「太陽発電衛星は地上で使うエネルギーの供給源となりうるか?」という今後の問題についても答えることのできる具体的な設計を行なうこと、を目的として実施された。1990 年からの 10MW 太陽発電衛星ストローマン設計研究に引き続いて、1992 年からは WG 以外の研究者をも含んだ広範な研究者で組織される研究組織により、SPS2000 の概念設計が実施された。

その後、科研費等をもとにレクテナ現地調査を 1994 年に開始し、2002 年には SPS 研究会の下部組織として専門分科会 (SPS2000 レクテナ分科会 (タスクフォース)) を編成し活動を開始している。以下に SPS2000 の概念の骨子を示す。

- 現在及び近未来の技術を前提とし、できるだけ早い時期に計画が実施できるものとする。当面、紀元 2000 年の建設開始を目途とする。
- 太陽発電システムの本質的な部分の検証が可能な範囲で、できるだけ小型の規模からスタートし、技術評価を行ないながらグレードアップする。SPS2000 の送電規模は、当初 1MW とし、最終的に 10MW までグレードアップする。
- 低軌道赤道周回軌道をとる。これにより打上げコストの低減と特定の地上アンテナ

への1日当たりの送電頻度を高くする。

- 打上げロケットは現存する商業ロケットを用いる。軌道及びコストの点から、当面SPS2000の打上げロケットとしてアリアン5を用いることを前提とする。
- できるだけ簡素なシステム構成とする。SPS2000では、ジンバル機構、蓄電機能を持たない。姿勢制御は、重力安定及び磁気トルク制御を基本とする。
- リファレンスシステムと同様、発電は太陽への精密なポインティングの不要な太陽電池とし、送電は2.45GHzマイクロ波を使用する。
- 組立作業は、無人で行なう。即ち自動展開及びロボットの組合せで組立を行なう。
- 実験システムではあるが発生電力の社会的な有効利用を図る。即ち赤道域の開発途上国への電力供給を行なう。

## 2.2 米国の主な動向

米国におけるSSPSの検討は1970年代の終わりに実施されたDOE/NASAとの共同研究である「SPSプログラム」から20年ほどの休止があり、1995年に実施された「Fresh Look Study」によりSSPSの検討が復活した。その後「SSP Concept Definition Study」, 「SSP Exploratory Research & Technology Program」, 「SSP Concept & Technology Maturation Program」が実施された。尚、NASAでのSSPSの名称を1995年以前はSPS、それ以降はSSP(Space Solar Power)と区別している。

### 2.2.1 SPS プログラム

1970年代のエネルギー危機のなかで、ピーター・グレイザー博士の提案したSPS構想がNASAの興味の引くところとなり、1977年からDOEにNASAが協力して研究を行った。

この共同研究はSPSプログラムと呼ばれ、SPSの技術的可能性、経済的実用性、社会面や環境面からの実現性について、2年間で1,960万ドルを投入して調査が実施された。作業はNSASがSPSの「リファレンスシステム(図6及び表1)」を作成し、DOEがこれを評価するという方式で行われた。

検討の結果、SPSには技術的に致命的な問題はないが建設コストと発電価格の高い点が問題だとされた。折しもレーガン政権下の財政緊縮方針や米国科学アカデミーの報告(1980年代のSPS研究開発投資の凍結勧告)により米国のSPS研究は休止状態となった。

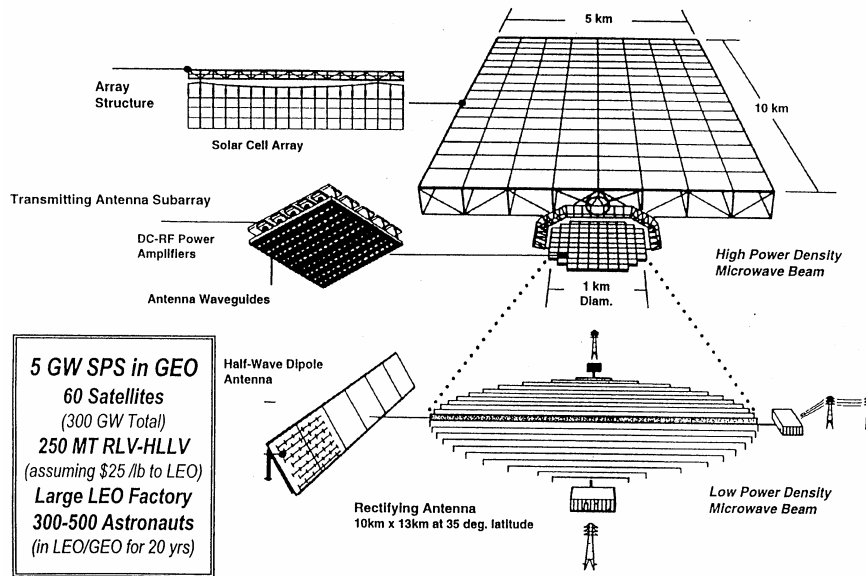


図 6 NASA レファレンスシステムの概念図

表 1 NASA レファレンスシステムの性能概略

システム性能	正味電力供給	300GW(5GW/基)
	衛星数	60
	耐用年数	30 年
	建設速度	2 基/年
衛星	概略寸法	10km × 5km × 0.5km
	衛星重量	35? 50 × 10 <sup>6</sup> kg
	構造材	炭素系複合材
	運用軌道	静止軌道(35,800km)
エネルギー変換システム	太陽電池	Si 系あるいは Ga-Al-As 系
電力伝送システム (マイクロ波送電)	送電アンテナ直径	1km
	周波数	2.45GHz
	受電アンテナ寸法	10km × 13km (楕円形)
	受電アンテナ建設日数	2 年
輸送システム	受電アンテナ 最大エネルギー密度	22mW/cm <sup>2</sup>
	地上?低軌道間	貨物：有翼 2 段式垂直離陸型打上機 (ペイロード 425t) 人員：改良シャトル (75? 80 人乗)
建設	低軌道間?静止軌道間	貨物：電気推進機 (400t) 人員：液酸/液水エンジン利用 2 段式宇宙機 (400t)
	建設軌道	低軌道(480km)
	最終設置軌道	静止軌道(35,800km)
	建設要員数	600 人
	建設日数	6 ヶ月



### 2.2.2 Fresh Look Study

産官学を交えて行われた Fresh Look Study の目的は、見通しが可能な将来迄に SPS を技術的にも経済的にも成立させるような新たなコンセプトや技術が存在するか否かを明らかにすることであった。この検討は、米国内だけでなく、全世界のエネルギー市場を対象としている。

同検討は、新しい SSP が経済的に成立するためには、商業的な発電を開始する迄に必要なコストが 10 億～100 億ドル、発電コストは 1～10 セント / kWh の範囲に収まる必要があると結論付けた。

検討チームは 1 年の大半を、29 件もの既存・新規のシステム・サブシステムのコンセプトを調査・分析に費やした。その結果、将来の SSP に向けた以下の設計戦略を発展させた。

- システムは可能な限り早く世界市場に電力を供給しなければならない。
- システムは自己組立が可能な程きわだったものであることが望ましく、大量の宇宙インフラストラクチャーを必要としない。
- コストダウンを促すため、大量生産が可能な同等の要素が数百～数千集まって構成されているようなシステムとなるべきである。
- システムの打上げは、SSP に固有のロケットではなく、他の市場でも商業的に使用される輸送システムで行うべきである。

最終的に検討チームは NASA の John C. Mankins が推奨する 2 つの新システムコンセプト「サン・タワー」<sup>1</sup>、「ソーラー・ディスク」<sup>2</sup>、そしてそれらにリレー機能を付加したモデルをケーススタディとして比較検討した。

特にサン・タワーは、宇宙インフラストラクチャーを要求せずに、自己建設的なシステムになっている。また、コンポーネントをモジュール化し、同じ物を大量生産するという手法は、NASA リファレンスシステムと比較して、初期に必要なハードウェアコストを大幅に低く抑えることができる。軌道への打上げも重量資材打上げ機(HLLV)を使用せずに、他のミッションと共有できるような輸送機を使用するため、打上げコストの低減にもつながっている。

表 2 スタディで検討されたコンセプト一覧

コンセプト名	ソース
Reference System	NASA/DOE/ボーイング
Sun Tower	NASA
Solar Disk	NASA
Solar Wigwam	SAIC
Laser Spiral	SAIC
Power Fleet	SAIC
Large Aperture Array Constellation	Gay Canough
Sun Star	NASA/LeRC
Airstat Power Transponder	JPL
Power Relay Satellite	Krafft Ehricke
Bicycle Wheel Integrated PV/RF SPS	NASA/LeRC
Sandwich Integrated PV/Microwave Transmission	Kaya, Woodcock, others
GEO with 20,000km Tether	Ohio Aerospace Institute
Libration Point Halo Orbit	Ohio Aerospace Institute
Flywheel Energy Accumulator	Research Institute of Machine Building
GEO mm Wave Dynamic System	NASA/LeRC
Insolation Focusing	Various
SPS2000	ISAS
Lunar Material Optimized SPS	Space Studies Institute
Deutsche Aerospace Laser Global Solar Energy Concept (GSEK)	MBB/DASA
Planetary Power Web	Gregg Maryniak, Futron Corp.
Japan SPS -Reference System	MRI
LEO Sun-synchronous with GEO Relay	Various
Sun-synch to MEO Equatorial Relay	SAIC
NASDA GEO LASER	NASDA/MRI
GEO SPS with Multiple Relays	Ohio Aerospace Institute

### 2.2.3 SSP Concept Definition Study (CDS)

SSP CDS は Fresh Look Study の継続研究として 200 万ドルの予算と 100 名以上の NASA を中心とした全米の研究者を投じて実施された。SSP CDS では以下に示す SSP GEO システムが検討された。

#### 重力傾斜安定方式?パワーバックボーン

- 単一パワーバックボーン (LEO SS オプション)
- 複数パワーバックボーン
- T 型 サン・タワー
- 統合された PV「サブ・アレイ」付きのサン・タワー

#### 能動的 GN&C 方式 (軌道平面に垂直な (POP) アレイ型)

- 1979 年リファレンスシステム (改訂版)
- T 型/中央 WPT 型

#### 重力傾斜安定方式?ミラー/サンドイッチ

- サンドイッチ SSP モノリシック型主鏡
- サンドイッチ SSP 分割した「花びら状」主鏡

#### その他

- HALO 概念
- ソーラーディスク概念
- その他

SSP CDS では経済分析、及び市場分析も行っており、以下に示す全般的所見を示している。

- エネルギー（特に電力）に対する世界需要は、今後 20～30 年も引き続き驚異的に伸びるであろう。
- 世界的気象変動政策に対してどのような決定がなされるか、また、再生可能な石炭燃料ベースの発電システムに対する影響がどのようなものであるかも現時点では明らかではない。
- 現時点では、重要な SSP 技術の不確定要素は存在する。それゆえ、SSP の開発は短期又は中期的には商業的に実現可能とは言えない。
- 政府は、SSP（あるいはその他長期的な）エネルギー技術の R&D に先導的な役割を果たすべきである。
- 現時点の R&D の目的のためには、政府 - 産業間の協力は可能である。
- 将来的（2020 年かそれ以降）に実現可能にするため、SSP は kWh 当り 5.5 セントから 7.5 セント以内の費用で世界市場に電力を供給できなければならない。

#### 2.2.4 SSP Exploratory Research & Technology (SERT) Program

SERT は SSP にかかわる先行的研究及び技術開発プログラムで、2,200 万ドルの予算で実施された。SERT の目的は、政府ミッション、及び商業市場における数 MW クラスの SSP、並びに無線伝送技術を実現するための戦略的技術研究・開発を行うことにあった。SERT では、以下に示す研究項目に基づき検討が行われた。

- A.0 宇宙太陽発電
- B.1 太陽発電
- B.2 無線送電
- B.3 電力の管理及び分配
- B.4 構造、材料、及び管制
- B.5 温度に関する材料及びその管理

- B.6 ロボットでの組立て、メンテナンス、及びそのサービス
- B.7 プラットフォームシステム
- B.8 地上発電システム
- B.9 地上から軌道への輸送及びインフラストラクチュア
- B.10 宇宙内の輸送及びインフラストラクチュア
- B.11 環境及び安全性要因
- B.12 システム統合（分析、エンジニアリング及びモデル化）
- B.13 応用化研究（科学/探査/商業）
- B.14 独立した経済及び市場分析

### 2.2.5 NRC での評価

NASA が行った SERT プログラムは NRC(National Research Council)により評価され、いくつかの勧告が出された。以下に評価の概要と出された勧告を示す。

*SERT 及びそれに続く 2000 年 12 月 15 日までの SSP の研究開発活動は国家にとって重要な商用、民事、軍事アプリケーションのための技術分野に方向が向けられている。最小限の予算で運営されている NASA の専門チームが、潜在的に価値のあるプログラム、つまり地上のベース電力発電に必要な積極的なパフォーマンス、重量及びコストの目標を達成するため高い資金レベルと安定性を要するプログラムを規定した。しかしながら、コスト競争力の高い地上ベース電力発電という最終的目標を達成するためには大きな進歩が求められる。地上電力アプリケーションの最終的な成功のためには地球から静止軌道への輸送コストを劇的に削減することが肝要である。SERT で立案された資金計画は、少なくとも 2006 年に行われる予定の最初のフライト実証までの 5 年間に關しては妥当である。しかしながら委員会が懸念していることは、この投資戦略が、不適切な投資決定を招くようなモデリングや個々の費用、重量及び技術性能目標に基づいている可能性があるということである。モデリング作業を強化し、更なる投資決定を下す前に目標に対する同領域の専門家の意見を募るべきである。さらに、SERT が NASA 以外の機関による技術進歩にも資本投入するという積極的な努力をすれば、その目標は近い将来当初より安いコストで達成することができるであろう。*

### 2.2.6 SSP Concept & Technology Maturation (SCTM) Program

2001 年～2002 年度にかけて、NASA は宇宙エネルギー利用技術向上のために、SSP コンセプト及び関連技術開発(SCTM)を実施した。実際には、複数の NASA のセンター、国立研究所、米国の産業界や大学などにまたがったチームが組まれ研究が行われた。特に、全米科学財団(National Science Foundation : NSF)と米国電力研究所 (Electric Power

Research Institute : EPRI)とは、共同で資金拠出を行い、パートナーシップを結んでいる (JIETSSP : NASA – NSF – EPRI Joint Investigation of Enabling Technologies for SSP)。2002年度には、NASAの2002年度SSP資金から150万ドル、NSFの4研究部門から150万ドル、EPRIから10万ドルの資金が拠出された。

SCTMは、以下の3本柱から構成されている。

1. システム研究及び分析

新しいシステム・ディフィニション・スタディ；システム分析；コンセプトの詳細モデリング；地上及び宇宙におけるマーケットの市場分析など

2. 実現性研究及び技術開発

長期的な目標をターゲットとした予備的研究と有力コンセプトの技術的実現可能性の評価・分析

3. 軌道上技術実証

近い将来に実現可能である技術を用いた小規模な技術実証；SSPや関連システムへの多目的な応用が可能であり、中長期的に実現可能な技術を用いた大規模な技術実証

SCTMの成果に関しては、2002年9月にNASA グレンリサーチセンターにおいて発表が行われたが、新規の検討としてレーザーによる伝送技術の検討結果等が紹介された。NASAとNSFとのパートナーシップは2003年度も継続された。

### 2.2.7 2002年度以降

2002年度以降は有人宇宙探査計画(HEDS)等5大戦略事業に分散させた形で、月・惑星エネルギー伝送、レーザー推進等のSSP関連技術を蓄積する計画となっており、SSPとしての予算が表に出てこない仕組みとなっているが、SSP研究は継続して実施された。

2004年1月にブッシュ大統領が発表した新宇宙探査計画の中で、有人月惑星探査に関する研究の一環としてSSPの研究開発が推進されていた。しかしながら現在NASAはプロメテウス計画等の原子力発電を積極的に推進しており、SSPに関する研究には資金が拠出されていない状況である。

## 2.3 その他

### 2.3.1 ESA

1999年5月に開催されたSPS-2000の会議で、200万ユーロを投じて行われた”Investing in Space”の研究報告が行われ、その中で宇宙エネルギーに関する研究についても言及された。この”Investing in Space”の研究がESAにおけるSSPS研究の先導的役割を果たすこととなった。

1998年のレポート”System Concepts, Architecture and Technologies for Space Exploration

and Utilization”では、(a)ISS 上でのビーム伝送実験、(b)地上間での無線パワー伝送実証、(c)400MW のセイルタワー・ユーロ SPS の実証を目標としたロードマップが示されている。

その後、2002 年 8 月に、ESA では SPS 研究に関する欧州ネットワークを設立し、以降、欧州 SPS プログラムに取り組んでいる。本ネットワークには大学や産業界も含まれているが、ESA がリードする形でアドバンスト・コンセプト・チームを結成して欧州 SPS プログラムを進めている。2003 年 1 月には、総合研究プログラム(General Studies Programme : GSP)の中で、2 年間 3 フェーズのプログラムとして採用された。各フェーズで行われる予定の研究内容を以下に示す。

< 第 1 フェーズ：妥当性検証フェーズ >

- ・ Alenia と Piemonte Orientale 大学による”SPARK” SPS モデルの開発（レーザーあるいはマイクロ波）
- ・ IDEST（パリ）による法律関連の検討
- ・ 地上プラントと SPS との比較
- ・ 宇宙探査アプリケーションとしての SPS

< 第 2 フェーズ >

- ・ 産業システムレベルでのトレードオフ
- ・ SPS 技術開発と既存技術との連関

< 第 3 フェーズ >

- ・ 実証ミッションの提案

### 2.3.2 フランス

インド洋に位置するレユニオン島では、1994 年から CNES 及びレユニオン大学等を中心とした地上での無線電力送電実験が計画されている。2001 年 5 月には、レユニオン島で WPT'01 会議が開催され、マイクロ波発生と放射、電力収集、安全と環境、WPT の可能性、円卓会議「SPS / WPT プロジェクト推進方策 法的規制障壁」、SPS への橋渡しなどのセッションが開かれ、レクテナコンテストも開催された。同計画は半民間組織で進められており、レユニオン大学は研究開発のパートナーとなっている。産業界も技術的、資金的援助を行い、規制や認可に関する問題の解決に努めている。

### 2.3.3 カナダ

カナダでは SSPS システムコンセプト、市場分析、ロボットによる組立・建設方法、配電技術、動的ビーム制御技術等に関してここ数年、検討を続けている。CSA は航空機等を用いた実証実験等も検討している。また、月・惑星探査ローバーにおけるレーザーパワーの利用や地上での短距離無線伝送等に関する計画の検討も行っている。

### 3 SSPS に関する FAQ

JAXA の 2003 年度に行ったアンケート調査によると、一般成人全体の 2/3 が SSPS を「まったく知らない」と回答しており、その認知度は高いとはいえない。そのため、SSPS に関していつも決まった質問が行われる。ここではその代表的な疑問について回答する。

#### (1) マイクロ波送電は安全か

マイクロ波の生体に及ぼす影響については熱的作用と非熱的作用について考えられているが、マイクロ波の生体への影響は熱的作用が支配的であるとの考え方が世界各国の電波防護指針の共通認識となっている。

熱的作用については、防護指針により安全基準値の電力密度の指針が、「管理環境では安全基準値  $5\text{mW}/\text{cm}^2$ 、非管理環境では  $1\text{mW}/\text{cm}^2$ 」と示されており、この安全基準を満足すれば、人体の安全性に問題はないと考えられる。

現在 JAXA で検討されている SSPS では、レクテナ周辺でのマイクロ波の電力密度を  $1\text{mW}/\text{cm}^2$  以下になるよう設計が進められている。

非熱作用について、癌細胞破壊に利用されている温熱療法(ハイパーサーミア)において非熱作用によると見られる現象の臨床報告は無く、また SSPS 用マイクロ波の波長は約  $5\text{cm}$ ( $5.8\text{GHz}$ )と遺伝子(遺伝子が吸収する波長は  $2.5 \times 10^{-3}\text{cm}$ )より遥かに長いため、その影響は考えがたい。

また世界保健機構(WHO)の国際癌研究機構(IARC)は携帯電話と脳腫瘍の因果関係について、それを裏付ける証拠が無いとして否定しており、長期的影響については研究することとしている。

以上よりマイクロ波送電は、電波防護指針を守ることで安全と言える。

#### (2) なぜ地上ではなく宇宙で発電するのか。

地上での太陽光発電や風力発電は自然条件に左右されるため出力が不安定であり、エネルギーを利用できる機会や地点が限られる。一方、宇宙では昼夜天候の別なく安定した量の太陽エネルギーを得ることができるため、地上に比べて単位面積あたり年平均 5 ~ 10 倍も多くの太陽光エネルギーを得ることができる。この安定性と稼働率の高さの点で宇宙での発電は地上に比べ有利である。

✓ 静止軌道	11.6 MWh/m <sup>2</sup> 年
✓ 日本	1.3 MWh/m <sup>2</sup> 年
✓ 太平洋	2.1 MWh/m <sup>2</sup> 年
✓ 中近東	2.7 MWh/m <sup>2</sup> 年

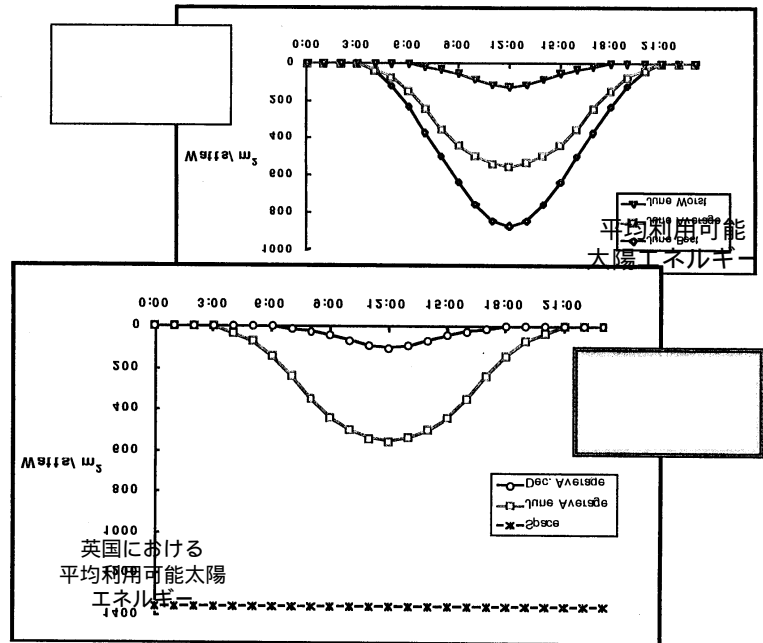


図 7 宇宙と地上での利用可能太陽エネルギーの比較

#### 4 おわりに

SSPS に関する国内外の動向を歴史的活動も含めて紹介した。

我が国はエネルギー小資源国だと信じられている。石油・石炭の化石燃料、ウランの埋蔵量は少なく、かつ海外に大きく依存している。風力発電、太陽光発電などの自然エネルギーの導入が進められているが、これらの自然エネルギーは希薄で、かつ不安定であり、原子力発電や火力発電の代替とはなりえないのが現状である。

しかしながら悲観することはない。宇宙には太陽という無尽蔵のエネルギー源がある。ここで紹介した SSPS が実現すれば、我が国、いや人類は無限でクリーンなエネルギーシステムを手に入れることができる。

JAXA では 2030 年頃に商用システムの運用開始を目指し研究開発が進められており、その第一段階として人工衛星を使った技術実証計画が検討されている。SSPS は、エネルギー資源の乏しい我が国が、科学技術によって無限のエネルギー資源を手に入れることの出来る夢のようなシステムである。この実現のため、実証衛星の打上げを早期に行い、世界の先陣を切って宇宙の灯をともしようではないか。



## 参考文献

- [1] 宇宙発電と SPS 計画、エネルギーレビュー、1980 年 8 月
- [2] 衛星発電システム概念開発 評価プログラム報告書（和訳）日本航空宇宙工業会、1980 年 11 月
- [3] 宇宙エネルギー技術研究調査、エネルギー総合研究所（日本機械工業連合会）1988 年 6 月、1989 年 3 月
- [4] 日本と米国における太陽発電衛星調査 調査研究の現状と協力の可能性、日本貿易振興協会、1992 年 3 月
- [5] 宇宙発電システムに関する調査研究、三菱総合研究所（新エネルギー・産業技術総合開発機構）1992 年 3 月、1993 年 3 月、1994 年 3 月
- [6] 宇宙発電衛星に関する調査研究、日本航空宇宙工業会（日本機械工業連合会）1998 年 3 月
- [7] 宇宙太陽発電システムの調査・検討、三菱総合研究所（宇宙開発事業団）1999 年 3 月
- [8] 宇宙太陽発電システムの研究、三菱総合研究所(宇宙開発事業団)、2000 年 2 月、2001 年 2 月、2002 年 2 月
- [9] 宇宙ステーション近傍における技術実証計画の検討、三菱総合研究所(宇宙開発事業団)、2003 年 2 月
- [10] 宇宙エネルギー利用システム総合研究、三菱総合研究所(宇宙航空研究開発機構)、2004 年 2 月、2005 年 2 月
- [11] USEF における宇宙太陽発電システム検討活動、第 49 宇宙科学技術連合講演会、2005
- [12] 電力中央研究所調査報告：183005 昭和 58 年 8 月、橋本 博
- [13] Satellite Power System, Concept Development and Evaluation Program, DOE/ER-0023, DOE/NASA, 1978,
- [14] A Fresh Look at Space Solar Power: New Architectures, Concepts and Technologies,
- [15] SSP Concept Definition Study, Technical Interchange Meeting 資料
- [16] SSP Exploratory Research & Technology Program, Technical Interchange Meeting 資料
- [17] Laying the Foundation for Space Solar Power: An Assessment of NASA's Space Solar Power Investment Strategy, National Research Council, 2001
- [18] JAXA SSPS ホームページ, <http://www.ista.jaxa.jp/ssps.html>