



Title	太陽発電衛星SPS2000研究の概要と今後の展望
Author(s)	伊藤, 精彦; Itoh, Kiyohiko; 小川, 恭孝 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 175, 113-123
Issue Date	1995-10-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/42457">https://hdl.handle.net/2115/42457</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	175_113-124.pdf



## 太陽発電衛星 SPS2000研究の概要と今後の展望

伊藤 精彦 小川 恭孝 大宮 学

(平成7年6月30日受理)

### Project Overview and Prospect of Solar Power Satellite, SPS2000

Kiyohiko ITOH, Yasutaka OGAWA, Manabu OMIYA

(Received June 30, 1995)

#### Abstract

The most famous solar power satellite system (SPS) is the SPS Reference System, a quite large-scale power system for the United States of America proposed for construction in the 21st century. This would produce as much electricity as five current atomic power stations. SPS2000 is much smaller than the Reference System with only 0.2% or two-thousandths of the power generation capacity. Because of its smallness, the SPS2000 project can avoid many difficult problems facing the Reference System; it would be easier and take less time to build. In several respects, SPS2000 is completely different from the SPS Reference System. This paper introduces a conceptual study on SPS2000.

#### 1. ま え が き

1968年 P. E. Glaser(以下, グレーザと略称)は将来の地球規模でのエネルギーと地球環境を解決する方法として, 衛星軌道上に太陽光発電所を設け電力を作り, これをマイクロ波に変換し, 地上に無線送電する構想を発表した。これが太陽発電衛星(Solar Power Satellite, SPS)である。SPSは第一回オイルショックの1973年に米国において特許化されている。図1はその特許公報の一部である。その後, SPSは米国エネルギー省(Department of Energy, DOE)の目にとまり, 米国航空宇宙局(NASA)の協力を得て, 約二千万ドルを投じて4年間の歳月をかけて大規模なフィージビリティスタディが行われた。これはCDEP(Concept Development and Evaluation Program)「太陽発電衛星の概念作成と評価」と称されている。このCDEPでは21世紀において米国が必要とする3億kWの電力を地上に供給するためのSPSシステムが設計された。これがDOE/NASAレファレンスシステムである。DOE/NASAレファレンスシステムでは一基当たり500万kWまたは1,000万kWの電力を地上で使用可能とした。したがって, 米国では60ないし30基のSPSを所有することになる。500万kW SPS(5GW SPS)システムの概念図を図2に示す。5GW SPSは $10 \times 5 \text{ km}^2$ の太陽電池パネルにより発電した電力を直径1kmの送電アンテナ(スペーステナ)で2.45GHzを使

用し送電することになる。DOE/NASA レファレンスシステムはSPSの代表的具体例である。

DOE/NASA レファレンスシステムが余りにも巨大であったため問題点だけが浮き彫りにされた。ところで、SPSに関する我が国独自の研究を行うことを目的としてSPS WGを文部省宇宙科学研究所に設置した。SPS WGの目標等は文献1)に示されているが、SPS WGの研究範囲は太陽発電衛星システムを実現するための理工学的課題とそれが引き起こす環境現象を解明することである。SPS ストローマン設計研究計画からその叩き台とも言うべきSPS2000と名付けられるモデルが生まれた。

ストローマン(藁人形の意)は具体的プロジェクトとしての要求はないが、実現を想定して作り上げたモデルである。DOE/NASA レファレンスシステムが余りにも非現実的なモデルであることへの反省に立っている。SPSが必要とされるのは21世紀である。そのとき、5GW級SPSが実現できれば良い。エジソンが1882年にサービスを開始した発電所は200馬力の蒸気エンジンであることから、ストローマンもこの程度で十分であると言える。

本論文においては、ストローマンモデルの一つとして提案されているSPS2000の概略を述べる。

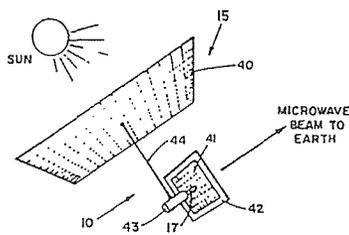


図1 太陽発電衛星

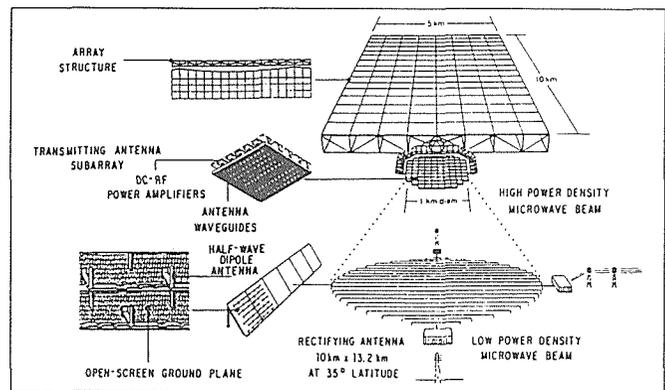


図2 米国エネルギー省を中心として研究された5 GW級衛星電力システム (SPS)

## 2. SPS2000システム

### 2.1 システム構成

#### (1)全システム

SPS2000の全体構成図は図3に示した通りであり、図中点線で囲んだブロックが発電衛星に相当する。発電衛星は発電電部と送電部、通信制御機能を司るバス部、骨格を形成する主構造部および組立、保守に用いるロボット等によって構成される。また、地上設備はマイクロ波を受電して変換するレクテナと、衛星追跡管制や受電管制を行うレクテナ管制部、送電、貯蔵施設等から構成される。

SPS2000の主要諸元と電力供給範囲を表1および図4に示す。高度1100km、軌道傾斜角0度(赤道上空)の軌道を設計の標準軌道とする。SPS2000衛星の外観形状は正三角形状である。その柱の

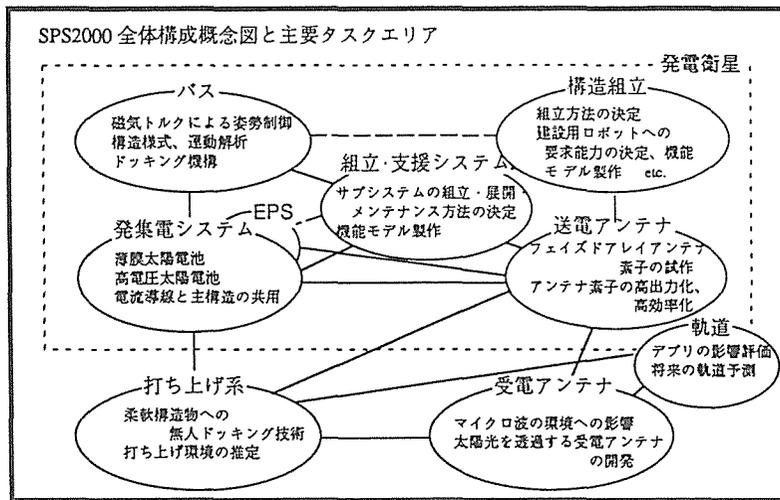


図3 SPS2000の全体構成概念図と主要タスクエリア

軸を南北方向に向け、アンテナが取り付けられている側面を常に地心方向に向けて軌道運動をする。上面の2面に太陽電池を展開しているが、特に太陽方向への指向制御は行わない。

(2)スペーステナ

システム電力は10MWとする。本システムの名目(ノミナル)電力値は送電アンテナ(スペーステナ)から放射されるマイクロ波の電力として定義する。電力伝送は2.45GHzのマイクロ波により行うものとする。軌道高度と同様暫定的に送電アンテナは1辺が132mの正方形とする。アンテナは送電側を先に決めて、後でレクテナを決めることにする。その理由の一つは送電側のアンテナの方が技術的に難しいことと、地上の方が選択の自由度が多く、また、レクテナ毎に異なった要求もあるのでこちらを一意的に決めることは難しいからである。ビーム制御は地上の受電所から送信されるパイロット電波によってフェーズドアレイアンテナの位相制御を行う、いわゆるレトロディレクティブビーム制御方式である。また、必要に応じてコンピュータ制御も行う。ビームの指向制御範囲は鉛直方向からのふれ幅で表す。指向方向は東西および南北で独立にそれぞれ30度および16.7度である。これに相当する地上での受電可能範囲は図4に示す通りである。

(3)レクテナ構成要素

レクテナの構成要素を図5に示す。レクテナはSPSと「パイロット電波の送信と電力の受信」という基本的なインタフェースを有するが、それ以外については地上の電力ユーザの要求によって決められる設計要求が多い。ここでは、レクテナの構成要素について規定するが、これは各レクテナの需要条件によって違いがある。

### 3. SPS2000電力送電システム

発電システムに比べると電力伝送システムは課題の多い分野である。実際に設計を進めてみると、当初基本要素として掲げた項目のいくつかは変更せざるを得ないことが分かった。それらは主として、高出力・高効率のアンテナ素子の実現目処が現時点ではまだついていないことによるもので、結果として重量が増え、アンテナ面の電力密度分布も理想的なものからかけ離れたものとなった。本章では、西暦2000年に軌道上での組み立てを開始する、としたSPS2000の電力伝送

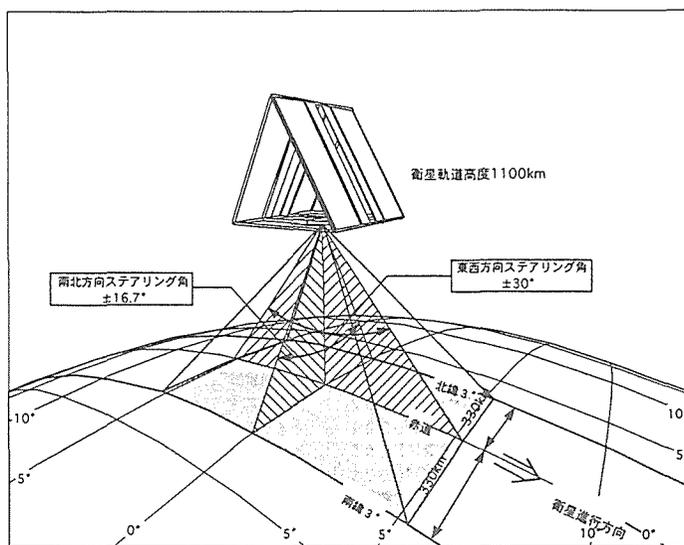


図4 SPS2000ビーム指向制御範囲指定図

表1 SPS2000の主要諸元(目標値)

寸法, 形状	336 m × 336 m × 303 mの正三角柱
重量	約240ton
打上げロケット	Ariane V / Proton
軌道	軌道傾斜角0度の地球低軌道
姿勢制御方式	地心指向, 重力傾斜安定, 地磁気トルク
発電方式	太陽光発電
送電方式	マイクロ波による無線送電
建設方式	無人での展開, 組立

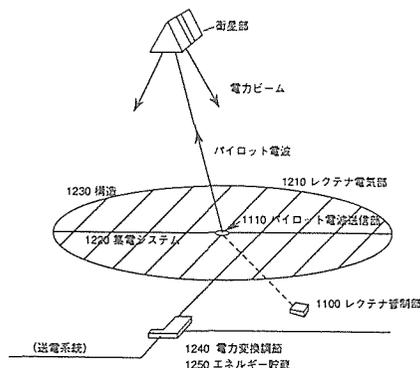


図5 代表的なレクテナシステム構成

システムについて, その概念設計結果を記述する。

### 3.1 基本要 求

設計の前提となった基本要 求を以下に示す。この中には, 冒頭に述べたように設計の進展にと もなって見直さざるを得なくなった項目もいくつか含まれている。送電は2.45GHzのマイクロ波 を使用して行うものとし, 波長λは122.45mmである。入力電力は太陽電池パネルからの出力が常 時直結されているものとし, インピーダンスマッチングのためにアンテナ側で適宜回路を変更し て対応できるようにする。発電部(太陽電池パネル)からスペーステナに供給される電力のノミ ナル値は1kV, 16kAとする。したがって, スペーステナの効率は62.5%以上でなくてはならない ことになる。ビーム走査範囲は東西方向±30°以上, 南北方向±16.7°以上とする。アンテナ 素子間隔はビーム走査を行ったときにグレーティングローブを発生させない距離とする。アンテ ナは主構造体の三角柱の面内の中央に納まる最小寸法とする。この要 求はアンテナ形状を円形と

想定したものであったが、組立方法、組立ロボットとのインタフェース、配電ケーブルのルート、地上での電力密度等を総合的に判断した結果、SPS2000では正方形アンテナを採用することにした。アンテナ電力分布はDOE/NASA レファレンスシステム（正規分布10dB テーパー）を基準にする。高出力・高効率アンテナ素子の開発目処が立たないため、SPS2000ではアンテナ面の電力分布を一様分布とすることにした。アンテナ素子のパワーレベルは3段階とし、最低レベルのアンテナ素子の出力は商品化されている最大級のを想定している。上記項目に関連して、SPS2000では同じ出力のアンテナ素子を2次元配列することにした。

### 3.2 アンテナ設計

本論文の目的は設計手順を示すことではなく、現時点で採用した設計や技術に基づく電力伝送システムの構想を示すことにある。このため、実際の設計とは逆に、大きなものから順次小さいものへと記述を進めることにする。

#### (1)全システム設計

電力伝送システムとしての諸元およびスペースステナの諸元を表2に示す。本システムの構成要素は以下の通りである。アンテナアレー（完成した全体、スペースステナを示す）、アレーモジュール、サブアレーおよびパネルである。これらは階層的に構成されており、それぞれすぐ下のレベルの構成要素から成る。サブアレーはさらに送電素子、パイロット電波受信素子、方向検知部、送信周波数基準発振器および受信周波数基準発振器からなる。

アレーモジュールは軌道上でスペースステナを組み立てる際の最小単位で、サブアレーの集まりである。サブアレーは送電素子、パイロット電波受信素子、方向検知部等からなり、フェーズドアレーアンテナとして動作する最小構成単位である。サブアレーには送電周波数とパイロット電波受信周波数の基準発振器をそれぞれ一つずつ取り付ける。また、サブアレー間の周波数と位相を合わせるために、各アレーモジュールにも一つずつ送信、受信の基準発振器を取り付ける。さらに、アレーモジュール間の周波数と位相を合わせるために、スペースステナにも送信周波数とパイロット電波受信周波数の基準発振器を一つずつ取り付ける。

レクテナサイトを含めた電力伝送システムのブロック図を図6に示す。スペースステナ内部のフィードバックループにより位相を整えて送電しても、地上へそのまま届くとは限らない。このため、レクテナサイトを含めた大きなループを構成し、地上でモニタリングした位相情報をスペースステナに送り返し、位相補正できるシステムを目指すことにする。

サブアレー単位でパイロットビームの位相を検出し、アンテナ素子の位相制御を行う。スペースステナの位相制御システムブロック図を図7に示す。アンテナ素子1個当たりの給電電圧は15V DCで、これをサブアレー内で66個直列にすることにより太陽電池パネルからの出力を直結できるようにしている。1つのサブアレー内では同様の直列回路が20回路できている。また、同図には示していないが、直列接続された増幅器のバイパススイッチを設けて、太陽電池の出力変動に対応することができるようにする。今回の設計では、送電周波数との深刻な干渉を避けるため、パイロット電波周波数を送電周波数の十分の一の245MHzとした。ただし、電離層および大気による擾乱を考慮して、パイロット電波の周波数が決定される。

#### (2)サブアレー設計

サブアレーは送電素子、パイロット電波受信素子、方向検知部からなり、フェーズドアレーアンテナとして動作する最小単位である。表3にサブアレーの諸元を示す。素子配列を決定するに当たっては次のような前提条件を設けた。

表2 電力伝送システム諸元およびスペーステナ諸元

電力伝送システム諸元		
送電周波数	2.45	(GHz)
ビーム指向制御方式	フェーズドアレイアンテナ方式	
ビーム走査範囲	東西南方向ステアリング角	±30.0°
	南北方向ステアリング角	±16.7°
スペーステナにおける電力密度分布	一様	
スペーステナにおける最大電力密度	574	(W/m <sup>2</sup> )
地上における最大電力密度	0.9	(mW/cm <sup>2</sup> )
発電システムからの入力電力	16	(MW)
スペーステナから放射されるマイクロ波のエネルギー	10	(MW)
スペーステナ諸元		
寸法、形状	132m×132mの正方形	
重量	134.4	ton
アレイモジュール数(44×2)	88	セット
サブアレイ(22×44×2)	1,936	枚
アンテナ素子の数	2,547,776	個
パイロット電波受信素子数	7,744	個

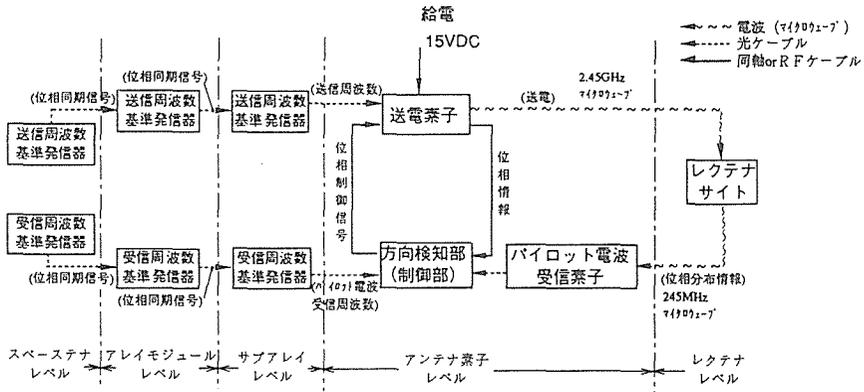


図6 電力伝送システム全体ブロック図

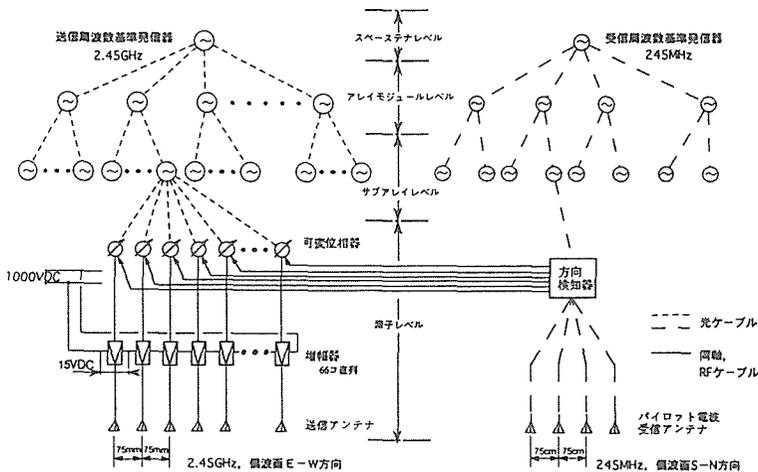


図7 スペーステナの位相制御システムブロック図

(a)ビーム走査を行ったときグレーティングローブが発生しないこと。

(b)給電系の回路作成が容易なこと。

サブアレーの入力電圧を1kV とするためには、アンテナ素子を直列および並列接続する必要がある。この場合、割り切れない数だと回路作成が困難になる。

(c)パイロット電波受信素子を適宜配置できること。

(d)サブアレーの大きさは3m×3mとする。

ビーム走査に伴うグレーティングローブの発生を押さえるには、素子間隔をある値より小さくすればよく、その上限値はビーム走査角度のみに依存する。上記の(a), (b), (c), (d)を総合的に判断して、SPS2000では

$$\text{東西方向素子間隔 } d_x=75.00\text{mm} \quad (0.612\lambda)$$

$$\text{南北方向素子間隔 } d_y=90.91\text{mm} \quad (0.742\lambda)$$

を採用することにした。また、パイロット電波受信素子はサブアレーの南北方向中央線に沿って10素子毎に配列されている。したがって、パイロット電波受信アンテナの素子間隔は東西方向および南北方向がそれぞれ75cm, 3mである。方向検知器は素子の中に埋め込む(アンテナ素子のスペースを方向検知器に当てる) 方向で検討を進める。

表3 サブアレーの諸元

送電周波数	2.45	(GHz)
ビーム走査範囲	南北方向ステアリング角	±30.0°
	東西方向ステアリング角	±16.7°
サブアレーにおける電力密度分布	574	W/m <sup>2</sup> 均一分布
サブアレー入力電圧 (ノミナル値)	1	kV
パイロット電波受信周波数	245	MHz
方向検知可能範囲	東西方向	±30°
	南北方向	±17°
送電素子間隔	東西方向	75.0 mm (0.612λ)
	南北方向	90.91 mm (0.742λ)
サブアレー一枚当りの素子数	1,320	個 (40×33)
内訳:	送電素子	1,316 個
	パイロット電波受信素子	4 個
パイロット電波受信素子間隔	東西方向	750 mm
	南北方向	3,000 mm
サブアレー一枚当りの寸法	3m×3m×40mm (突起物含まず)	
サブアレー一枚当りの重量	68.0	kg

### (3)アンテナ素子

アンテナ素子にはキャビティ付スロットアンテナ素子を採用する。この形式のアンテナ素子は、ダイポールアンテナに比べて、反射地板を必要としない分(約0.24λ (30mm)程度)だけ薄くできる。また、ダイポールを支える支柱が必要ない。円形パッチアンテナのように誘電体で周囲を覆わなくてすむため、放射熱を効率よく逃がすことができる等の長所がある。

図8にキャビティ付スロットアンテナ素子の構造模式図を、図9にSPS2000用アンテナ素子構造図を示す。さらに、表4に送電アンテナ素子の諸元を示す。1素子当たりのアンテナ面は90.9mm×75mmの長方形である。これは波長λ に対しては0.742λ と0.612λ に相当する。素子の厚さは約37mm(0.3λ)を目標とする。アンテナはキャビティ付スロットアンテナで、中央部に約0.5λ の電氣的開口スリットを持つ構造とする。アンテナ開口部のない側、すなわち上面を放射板として使用する。各素子に接続する電力線と通信ラインには送信周波数信号ライン(光ケーブル)、増幅器用電力ライン(フラットケーブル)、位相制御信号ライン(同軸ケーブルまたはRFケーブル)さらに方向検知回路との間で位相情報を授受するライン(同軸あるいはRFケーブル)が必要となる。

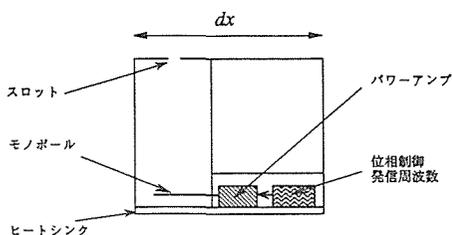


図8 キャビティ付スロットアンテナ素子の構造模式図

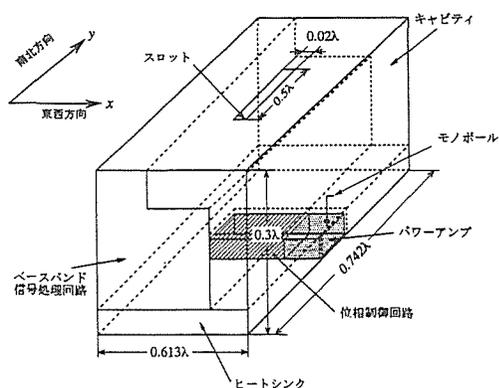


図9 SPS2000用アンテナ素子構造図

表4 送電素子の諸元

送電周波数	2.45 GHz	
素子の形式	キャビティ付きスロットアンテナ	
一素子当りの出力 (ノミナル値)	3.93 W	
増幅器入力 (ノミナル値)	15 VDC	0.406A (6.09W)
増幅器効率 (ノミナル値)	64.5 %	
位相制御信号	0~15 V	電流はほとんど流れない
一素子当りの面積	$0.613\lambda \times 0.742\lambda = 68.18\text{cm}^2$	
素子の厚み (目標値)	0.3λ (約37mm)	
一素子当りの重量	45.8 g	
重量配分 (一素子当り)		
放熱板	14.7 g	Al 等価厚さ0.8mm
半導体 (Si ベース)	18.3 g	Al 等価厚さ1.0mm
回路 (含むアンテナ)	12.8 g	Al 等価厚さ0.7mm

## 4. SPS2000レクテナと電力供給

### 4.1 レクテナ基本技術

米国のDOE/NASA レファレンスシステムでは各種のレクテナが提案されている。しかし、SPS2000のレクテナとは以下の点で異なっている。第一に、受電面がDOE/NASA レファレンスシステムでは傾いているが、ここでは水平である。第二に、レクテナの受ける単位面積当たりの電力が小さいので、コストを大幅に下げることが必要である。第三は、5ないし10年の寿命でもよい。

#### (1)ワイヤメッシュ反射式

高効率の受電のために、反射器と円形マイクロストリップアンテナ(CMSA)を使用する方法が提案されている。赤道直下でこれを使用するには東西方向に伸びたワイヤメッシュが南北方向に並ぶように配置する。図10に構成図を示す。この形式の特徴はワイヤでできている反射器が安くて、面積が大きくとれることである。反射器の面積はCMSAの面積より数倍大きいので、CMSAが受けるマイクロ波の密度は高く、集電の効率も高くなり、保守管理も容易である。この形式は試験用として、SPS2000からの受電が最大になる。また、将来商業用の大型のものに発展できる。

#### (2)魔法の絨毯

これは最小コストを目指したもので、地上設備を最小限にできる。構造物は耐久性のある強化プラスチックが使用され、これがプリント配線回路を支える。効率は低コストに見合って比較的

低い。図11に構成図を示す。

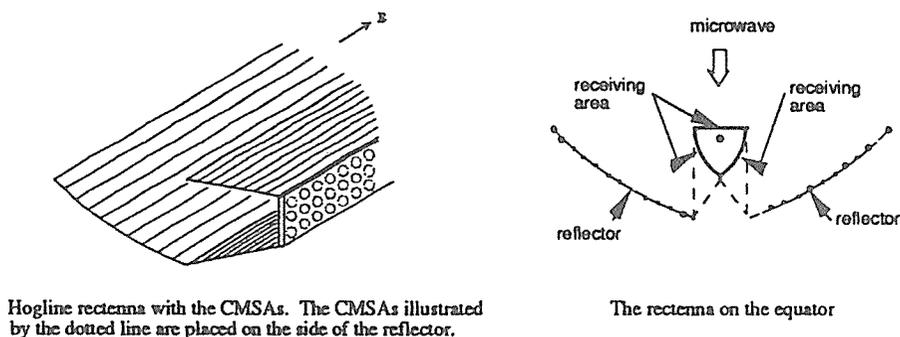


図10 反射器と円形マイクロストリップアンテナ (CMSA) を組み合わせたレクテナ

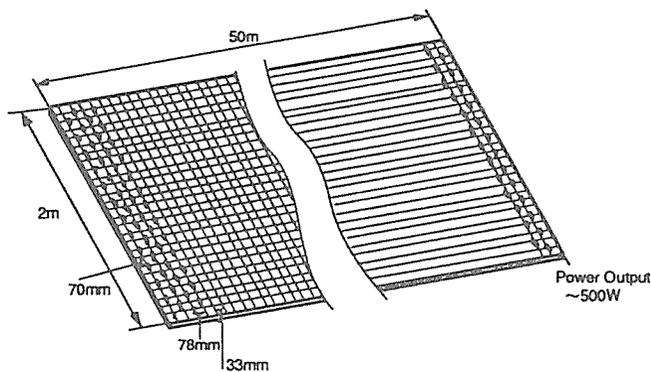


図11 魔法の絨毯

#### 4.2 レクテナサイトと電力供給システム

SPS からの電力を地上の商用電力系統に送電し、その後には負荷に配電する方法である。現在の地上の商用電力系統は主として水力、火力、原子力の各発電所で構成され、発電された電力は図12に示す連系回路網で結ばれて、必要なときに必要な量だけ負荷側に送られる。電力の供給者は常に負荷の状態を監視し、負荷が増加した場合にはどこの発電所の出力をどれだけ増やすかを指示する。

西暦2010年頃には発電衛星からの送電電力も含めて電力系統の運用を考える必要があるだろう。その場合には、発電衛星からの送電電力の信頼性は、現在の水力、火力、原子力の各発電方式と同等に保たれることが必要である。発電衛星からの送電電力の故障により電力系統に擾乱を与えることのないよう、高い信頼性を保つよう SPS を運用しなければならない。

SPS が静止衛星でない場合には、SPS からの供給電力は連続的にはならず、パルス状の電力となる。このため、3分程度の時間に得られる SPS からの電力を貯蔵しておく必要が生じる。図12は受電レクテナから供給される直流電力を、直流交流変換装置で既存の電力系統に送電する回路であるが、SPS からの電力がパルス状であるため、これをエネルギー貯蔵装置に一旦貯蔵する回路構成である。

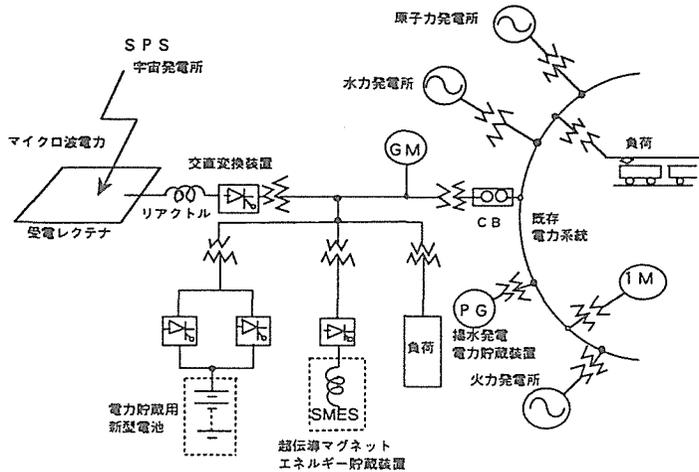


図12 宇宙発電所と地上商用電力との連携構想図

### 4.3 設置条件

レクテナの設置場所の選定には多くの要素があるが、その基本的なものは衛星の能力である。SPS2000は高度1100kmあたりの赤道上で運用される。電波の指向制御角度は垂直から30度であり、地球上では半径600kmの円内に送電できる。したがって、赤道上のレクテナには軌道に沿って1200km移動する間時間にして約200秒間送電できる。他の条件が同じならば、受け取るエネルギー当たりのコストから考えて、各レクテナの受電できる時間が長い方が望ましい。赤道から南北へずれたレクテナでは距離とともに連続送電の時間が短くなる。ただし、赤道から200km離れた位置ではその時間の減少は10%以下である。図13には参考のために電力供給可能地域の地図が示されている。同図の網掛け部分は赤道から3度以内を表す。

以上述べたように、各レクテナの受電時間を最大にするためには東西方向に1200kmの間隔をとる必要がある。この制約条件から、理論的には34箇所がレクテナの最大設置位置となる。表5には世界の各地で可能な最大数（深海に設置する場合は含まない）を示す。このように、実用最大数は34よりむしろ19に近い。この上限に近づくかどうかはSPS2000の運用に依存する。

表5 レクテナ設置可能数

アフリカ	4
東南アジア	4
南アメリカ	5
太平洋	4
大西洋	1
インド洋	1
合計	19

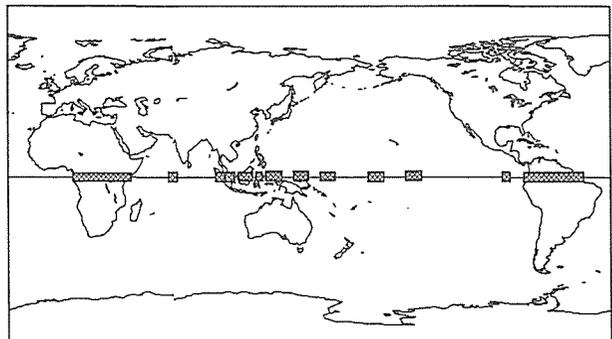


図13 電力供給可能地域

## 5. むすびと今後の展望

SPS2000の概念設計は、現実の衛星の打ち上げを想定してはいない。このため、衛星からの送電用電波の周波数配分のプロセス、軌道設定の国際間調整については考慮していない。ISMバンドとは言え、ここで検討の対象とした2.45GHzのS帯は移動衛星等通信衛星業務にとっても貴重な周波数である。一方、SPS2000を引き継ぐ研究として平成5年度および6年度に文部省科学研究費補助金を得て、SPSの研究領域を明確に定義する作業が行われた。この科学研究では将来の人類の宇宙活動を視点に入れ、エネルギー供給の地球閉鎖系からの解放をSPSの導入は意味するとの観点から広く人文社会科学系の研究者の協力を得て、研究を進めて行く方向を明確にした。このことは、SPSは単に科学技術のみの問題ではなく、広くパブリックアクセプタンスに関わり、国際法体系等を含むべきとの見解に立っている。SPSが実用されるのは21世紀である。この間には、デルタクリッパに見られるような新しいロケット技術、高温超電導に代表される科学上の発見等科学技術の革新が期待される。SPSはこれらを組み入れながら、進化して行くものと考えられる。1970年代末に米国が行ったCDEPに相当するプロジェクトを1990年代に行う必要がある。また、CDEPのレファレンスシステムに相当する例えばSPS2000のような各種実験衛星計画が提案され、概念設計され、このうちの何れかが実験衛星になるよう基礎研究を現在に行う段階と考えている。

## 謝 辞

本研究は文部省科学研究費補助金試験研究(A)(2)06505002により行われている。また、この研究の一部は文部省宇宙科学研究所長友信人教授のグループとの共同研究として行われている。種々資料を頂いた同教授に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) 宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループ概要 (1991年9月)。
- 2) 宇宙太陽エネルギー利用計画のための太陽発電衛星 SPS2000研究(発電衛星ストロマン設計研究), 宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループ SPS2000タスクチーム (1991年9月)。
- 3) SPS2000 News Letter, No.1~8.
- 4) 「SPS2000概念計画書」(暫定版), 宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループ (1993年7月)。
- 5) 科学研究費補助金「重点領域研究」平成7年発足重点領域申請書, 申請領域名「宇宙太陽発電システム-地球閉鎖系からの脱却の可能性-」(平成6年2月)。
- 6) 科学研究費補助金「重点領域研究」平成8年発足重点領域申請書, 申請領域名「宇宙太陽エネルギーの利用」(平成7年2月)。
- 7) P. E. Glaser, F. P. Davidson and K. I. Csigi, ed.: "Solar Power Satellites - the emerging energy option", The Ellis Horwood library of space science and space technology, Ellis Horwood Limited, New York, 1993.