

衛星発電をめぐる最近の動向

Current Study on Solar Power Satellite

長 友 信 人*
Makoto Nagatomo

1. はじめに

衛星発電には、人工衛星の原子力発電所や将来の核融合発電所を人工衛星にしたようなものも考えられるが、ここでは人工衛星において太陽光により発電した電力を、電波や光に変換して地上に送電し、地上でこれを商業用の電力に再変換して利用するものを取り上げる。また、この種の衛星発電のことを太陽発電衛星 (Solar Power Satellite) といい、通常これを略して SPS といっているので、ここでもその略語を使用する。

2. 太陽発電衛星 (SPS) の位置づけ

SPS の重要な性格の一つは SPS による発電システムが現在の電力エネルギー源の主流である石油および原子力に代って太陽エネルギーを用いることを目標としていることである。この目標は発明者であるピーター・E・グレイザー博士がその構想をはじめて発表した (1) 時に SPS の実現の最も強い動機としてあげているものである。

グレイザーによると、今世紀はじめに太陽エネルギーを利用する技術が開発される動きがあったが、より手軽な石油がこの方向の研究開発熱をさめさせてしまった。そして最近の増大したエネルギー消費によって、エネルギー源の確保と熱を含む燃焼生成物の地球への影響の懸念から再び太陽エネルギーが見直されるようになった。その一つの動きは原理的に今世紀はじめと同一技術レベルの地球上の太陽エネルギーの利用である。この方法は天候や昼夜のサイクルに左右されるのが欠点である。これに対して宇宙技術を利用したより安定な電力供給のできる太陽発電衛星が可能になったのである。

SPS は太陽エネルギーを地上の設備により小規

模に利用する方法に対抗するものではない。むしろ、それでカバーし切れない既存の大型発電所とその給電システムの役割りを SPS に果させようとしているのである。それはわが国の場合ざっと5000万キロワットの規模と考えるとよいであろう。それは従来の人工衛星での電力発生と比べると途方もなく大きなものである。

その大きさと革新さのゆえに SPS はその実現にかかわる諸々のテクノロジーだけでなく経済的、社会的な影響が大きい。この点から総合的に SPS を計画する必要があるが出てきた。この方向からの大型システムのアプローチがマクロエンジニアリングといわれる方法である。マクロエンジニアリングは「その時代の最大級の工学的事業を計画、実行し、管理する方法」として最近その重要性が認識されてきたものであるが、SPS はそれが適用できる課題の一つとしてすでにとり上げられている (2)。ここではそれをくり返し紹介するのも意味がないと思われるが、SPS においては個々のテクノロジーを追求する時、そのマクロエンジニアリング的背景に十分注意を払うことが必要であるとつけ加えて本文に入ることにする。

3. リファレンス・モデルについて

構想の段階を経たにすぎない SPS の最近の動向といえば、この未経験の分野について具体的な数値を出して検討したことによって量的質的にはっきりしなかったことが明らかにされたことであろう。それは宇宙先進国の米国がカーター政権時代に行った SPS の評価研究である。この研究の持つ側面をここでやや詳しく紹介する。

これは米国の NASA (航空宇宙局) と DOE (エネルギー省) との共同計画として行われ、

- ・システム定義
- ・環境、健康、安全
- ・社会・経済問題

* 宇宙科学研究所衛星応用工学研究系教授

〒153 東京都目黒区駒場4-6-1

・比較検討

の4つの分野の研究を行った。この研究範囲の広さはSPSが困難な事業であることを意味するよりむしろ、SPSを全面的に採用する方向で考えた時に起りうる大きな社会的な変革を予想しようとする意図が見られる。これは現在のエネルギー消費に伴って生じた色々な社会問題を考えたとき当然だったかも知れないが、SPSのもたらす社会的影響は在来の発電方式によるものとは性格の異なったものとなる。

次に「システム定義」という余り見なれない言葉についてふれておこう。「システム定義」の内容は「SPSとはどのようなものか」というごく一般的な問いに対するぼう大な解答ということができる。つまり概念の良く分らない新しいモノを人々が分るようにするのが「定義」なのである(3)。

NASAの定義した代表的なSPSのシステムは静止衛星軌道にあって、太陽エネルギーを半導体の光電変換素子つまり太陽電池セルによって電力に変換し、これを2450MHzのマイクロウェーブのビームにして地上の受電アンテナに送り、ここでマイクロ波を再び直流に変換し、さらに商用の交流周波数の電力にして供給する方式である。

3.1 1基の大きさ

重要なパラメータは1基の大きさをいくにするかということであるが、ここでは500万キロワットを単位とし、その2倍のものも考えている。ここでいう電力は通常の発電所の能力と同様最終的に商業的に供給できる電力である。

この電力レベルがこの研究において技術実績によらず、需要側から決められているのも興味深い点である。従来の発電所の場合、技術の進歩とともに実用機のユニット出力が増大する傾向があった。このことは見方を変えると、これまでの電力の需要と供給とがお互いに可能性を拡大してそれぞれの技術開発に拍車をかけたからだということも出来よう。たとえば、よく言われる最大電力消費を押し上げてきた炊飯器、そしてテレビ、次にクーラーといった家庭用品技術の高度化とこれを支える大型火力、原子力発電所の大型化の関係はこのことを表す。

SPSにはこのようなステップが踏めるチャンスは少いので現状の電力需要に即応できなくてはならないという課題がある。実績といえば、宇宙における発電は人工衛星において消費する電力を太陽電池で供給しているのが唯一の実績であるが、これまで最大のものは

はおそらくスカイラブに用いられたもので、7.5kWの電力出力が宇宙船内で得られ利用された。また計画のものには同じくNASAの25kW電力モジュールといわれるものが、太陽電池出力約100kWである。しかしこれらを含め従来の人工衛星は発電することが目的ではないから、この比較は参考程度である。

このような前提を経て定義されたSPSをリファレンスモデル(reference model)という。このモデルはいくつかの研究グループが別々にそれぞれの方式によって「定義」をした。太陽電池を用いる場合、太陽電池の種類によって形状が異なってくるが、これが各グループ毎に異なっている。

3.2 太陽電池の選択

ヒ素化ガリウムの太陽電池を用いたものは、その高温特性が良い点を利用して反射板により約3倍に集光してその分だけ太陽電池の面積を減らしコスト低減を狙っている(4)。一方シリコン電池を用いて、集光しないで、一面に広げている案では集光用反射鏡の宇宙空間での耐久性に疑問があるとしているが、この違いが両者の構想の大きな差となって表われている。

太陽電池展開用構造物はこれらの特性を反映し、反射板をつける方が立体的となっており、反射板のない方は平面的に見える。しかし構造材としては両方とも良く似ている。これは従来の人工衛星や、これから登場するであろう宇宙ステーションなどに似ても似つかぬもので、地球上の橋桁や鉄骨構造物に近いものである(図-1)。

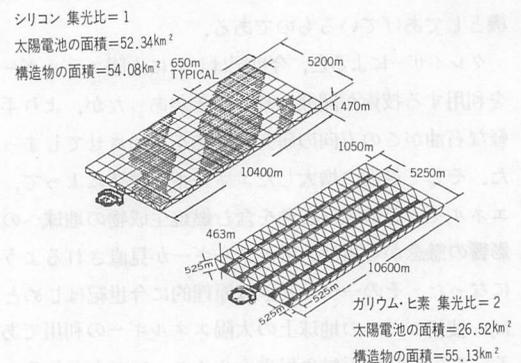


図-1 NASAのリファレンス・システムSPSの太陽受光部の構造二案、左上はシリコン太陽電池を用いたもの、右下はガリウム・ヒ素太陽電池を用いたもの

3.3 大型構造物

この SPS は約50平方キロの太陽光をうけるように出来ており、重量は 30,000トンと計算されている。通常の人工衛星の太陽電池は複合材料のサンドウィッチ構造のパネルの上にはられており、このサンドウィッチ構造は現在1平方メートルあたり1kg ないし0.8kg である。SPS の太陽受光の構造物の重量を計算すると、この値は0.6kg / 平方メートルとなり、重そうに見える構造物そのものは人工衛星で使用するサンドウィッチ構造材を広げたより軽い。

構造物の基本要素となるものは三角の薄板チャンネル材である。その板厚は10分の数ミリといった非常に薄いものであるが、このことはこの構造物が自重を支える必要がないためであり、設計基準は別の面から与えられる。(SPS 等の大型構造物については文献(5)を参照されたい)

非常にうすい板材を用いるために加工エネルギーは小さくすむ。このため加工用の機械を宇宙に運んで「建設現場」でこれを製造するとい考え方が支配的である。この方法を詳しく考察することによって、SPS の構造および建設の過程が明らかになってくる。素材を薄板のロールとして運搬し、これを圧延して型材を作っていくと同時にトラス構造も製造する機械を組合せて大規模な構造物を自動的に作り上げていくことになろう。

3.4 建設速度

SPS の立案にあたって、特に強調しなければならないのは、その巨大さだけでなく、比較的短かい工期である。この NASA / DOE の研究では総数 60基の発電所を30年の周期で更新する考え方から半年間で一基を完成することにした。そのほかの点からいっても建設中のSPSは未完成の人工衛星であるから、余り長い間かかって完成するのは副次的な問題が生じるであろうから、更新する年数などは別としても半年というのは適当な長さである。

そうすると、前の重量計算と同様に太陽光面積の建設スピードとして、これを表わすと500万キロワットの場合は毎分200平方メートルとなる。別の表現をすると1分間にマイホーム1戸の建設速度である。

3.5 打上げロケット

重量的にいうと地上からの運搬能力がこの位必要ということである。これをもしスペースシャトルで打上げるとすれば、スペースシャトルの SPS の軌道までの打上げ能力は1回で4トンにすぎないから材料

だけでも7,500回の打上げが必要となる。しかし、これはいかにも打上げの頻度が高すぎる。それはスペースシャトルが SPS の建設には小型すぎることを示している。

そこで SPS の定義の中ではこの輸送手段のことにふれられている。これは専ら宇宙への大量貨物輸送を目的としたものなので、HLLV (High Lift Launch Vehicle) というような略語で呼ばれている。その一例によると打上げの重量は10,000トンで435トンを低高度軌道の SPS の建設現場に輸送するものがある。この種の HLLV にはスペースシャトルのオービターの様に翼がついているものもあれば、ついていない従来のロケットに似たものもあって、構想は固まっていない。いずれにしてもスペースシャトルとは違って人より貨物を運搬するものとして経済的に最適の設計が採用されるであろう。

SPS システムは太陽発電衛星と地上の受電施設から成り立っている。SPS の最大の課題は太陽発電衛星を軌道に作ることであるが、それだけではなお半分しか出来上がっていない。しかし DOE と NASA の研究では地上施設に関しては特に目新しいものはない。

4. わが国での研究の動向

以上のような動向はわが国でも「調査」の対象としていくつかの機関で「研究」が行われた(6, 7)が、いずれも同一材料を扱っている。一方個々の「研究」の目的があり、「調査」として不十分であるから、直接原資料にあたる方が良いであろう。

このような調査以外の SPS に関する研究は、今の所地上の太陽エネルギー利用計画のようにまとまったものはない。しかし他の研究課題から関連したものをさがし出すことは出来るであろうと考えて、とりあえず、全国大学共同利用機関である宇宙科学研究所のシンポジウムの一つとして「宇宙エネルギー」を取り上げていただき、昨年度第1回を開催したところ、SPS に関して多くの興味ある発表が行われたのでこれについてふれておきたい(8)。

4.1 システムのアイデア

まず、SPS のシステムについて、グレイザー原案と異なった方式、あるいはこれを変形したものが2つ考えられた。その一つは SPS システムが将来赤道上の静止衛星軌道に数多く分布してしまうのを避けるために集中化した SPS を4ヶ所にまとめて

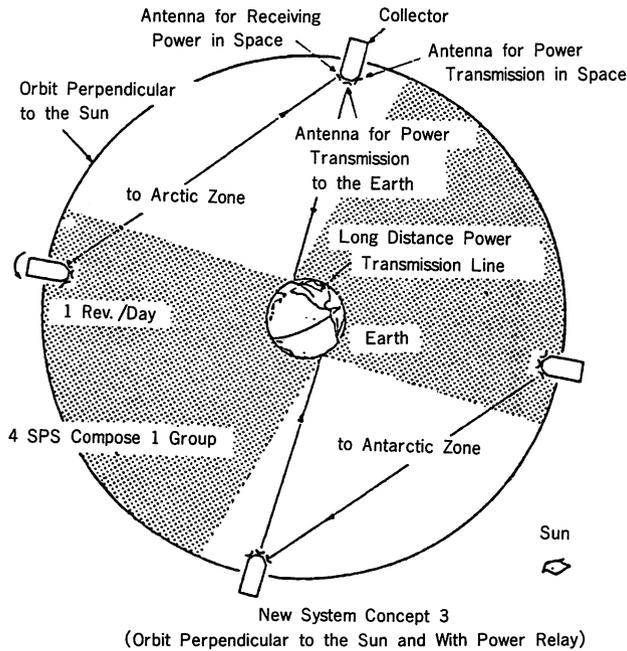
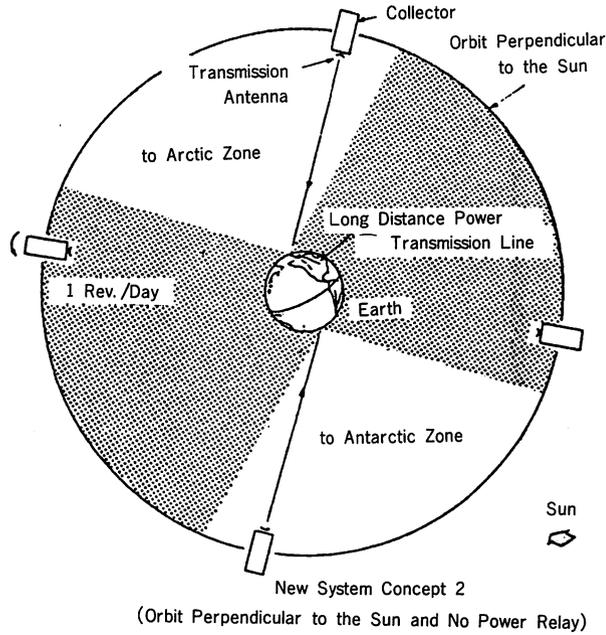


図-2 新しいSPS のシステム. SPS の軌道面を太陽の方向に向けることによって地球の日陰による電力中断をなくす. 上は衛星間の電力中継を行わないもの, 下は行うもの. (参考文献 8 中の " SOME NEW SPS SYSTEM CONCEPTS " by H. Saito et al より)

しまう構想で, その軌道も赤道上だけではなく極軌道型が考えられた (図-2).

もう一つの案は静止衛星軌道には反射アンテナのみ

をおき, より低い軌道に SPS をおいてここから電波を出して反射アンテナ経由で地上に送電する方式で, これはロケットで運搬する重量が少なくていいとい

うメリットがある。

4. 2 送電と電離層加熱実験

MINIX と呼ばれる実験は観測ロケットを用いて電離層のマイクロ波による加熱実験を行おうとするもので、SPS で、マイクロ波送電を行うときに発生するかも知れない環境問題についての基礎実験である。

4. 3 サブシステム技術と支援技術

ロボットは SPS の開発にとって不可欠であろうと考えられている。10MW のパイロットプラントを作る場合のロボット設計要求がまとめられた。

システム構成エレメントについては、衛星側の送電用アンテナを硬式で剛にして精度を出す方式が従来主であったのに対して柔軟構造にして形状を制御する方式が提案された。これは大型通信衛星技術の応用であるが一考に値するであろう。

マイクロ波関係では国内のクライストロンおよびマグネトロン技術が紹介されて、SPS への対応が検討されたが、SPS の特徴の一つである大量生産によるコスト低減の方向を示唆する上で、わが国の民需といわれる一般用電気機器の生産実績は大変参考になる。その将来への期待は地上用の太陽電池生産にもかけられている。今回は主として人工衛星の太陽電池が取り上げられ、SPS を目標したものも1つしかなかったが、今後サンシャイン等地上用の太陽エネルギー利用計画の実績が上がるにつれて、SPS の実現性が強まってくるであろう。

このような点から考えると SPS の個々の技術は確立されたものが多く、その原理的な部分で検証できていないものは一つもない。この点は核融合エネルギーなどと比べて格段の差がある。また宇宙工学固有の問題も少ない。そういうわけで宇宙関係の研究者からの提案はむしろ SPS 実現へのアプローチの方向が多く論じられた。

SPS がどの位大型のロケットを必要とするかは宇宙開発関係者の最大の関心事であり、この立場からの提案があったが、これは今後も取り上げられるであろう。現に宇宙開発計画においてはロケット能力が常に人工衛星側のニーズを下まわる状態である。

4. 4 10MWモデルの研究

現在の数kW の宇宙での発電能力をいかにして1000万kW まで高めるかというステップについての考察は筆者自身が行ったものであるが、この中には短期の中間目標として10MW (1万kW) モデルの建設を示唆し

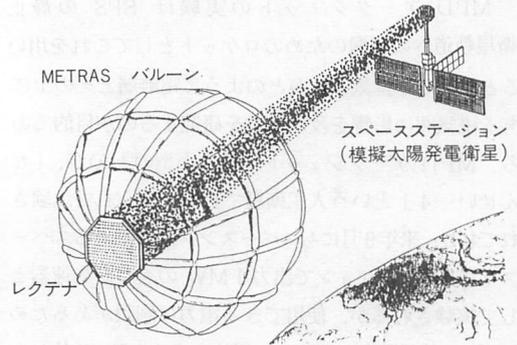


図3 MINIX / METRAS 実験の構想図。宇宙ステーションから送られた電波を手前にあるバルーン衛星のレクテナで受電する。バルーンの中は模擬電離層大気が入っていて電波の散乱・吸収等を計測する。本図はMINIX グループによる。(参考文献10より)

てみたが、これはさらに発展されるべきものと思う。

NASA の行った定義は一面では SPS のイメージを人々に与えるのには成功したが、反面大きすぎてどうにもならないものだという印象を与えてしまった。その結果、地道な研究がやりにくくなったことは否定できないと思われる。

これに対して最近具体化しつつある宇宙ステーションは SPS に関連した地道な研究が出来る最小限の施設を提供してくれそうである。スペースステーションは数人の科学者等が長期に宇宙に滞在して実験が出来るように考えられている。ここでは SPS の基礎実験のために必要な電力、実験室、宇宙空間での大型構造物実験の足場などの資源、資材、設備が用意されるであろう。

とくに電力は100kW までが使用出来るのではないかと予想されている。このような電力はこれまでの宇宙の施設では実現できなかったのをこれを用いた提案が早くも2, 3準備されている。その一つは宇宙空間での電波伝播と電離層の加熱実験 (MINIX / METRAS), MPD アークジェット実験である。これらはいずれも SPS のマイナス面を研究テーマとしており、原子力などの教訓が効きすぎたかと思われる位である。

MINIX / METRAS 実験は図-3 に示すように本来地上におくべき受信アンテナを宇宙ステーションの近くにおいてそのアンテナの前に大きな気球において人工電離層を作り、これによってマイクロ波による電離層加熱の模擬実験を行おうとするものである。

MPD アークジェットの実験は SPS の静止衛星軌道への運搬のためのロケットとしてこれを用いるとき、その排気ガスがどのように電離層とその上にある磁気圏に影響を及ぼすかを研究するのが目的である。MPD アークジェットはごく小型のものが、「たんせい-4」という人工衛星で打ち上げられて試験されており、来年9月にもスペースシャトルによるスペースラブ1号ミッションで出力1 MW のものが加速器として実験されるが、使用できる電力に制限があるためにパルス的に動作させており平均すると1.3 MW 位しかになっていない。これが100 kW 使用できればようやく SPS の基礎実験が出来る位になる。

5. 国連宇宙会議でのSPS—結びにかえて

最新の SPS の話題は8月にウィーンで開かれた宇宙探査と平和利用の第2回国連会議略して UN ISPACE '82 の非政府組織 (NGO) 会議の中の「宇宙発電部会」[Energy from Space] のシンポジウムである。これは SPS の提案者のグレイザーが組織してマクロエンジニアリングの立場から、広範囲な課題毎に講演が行われた。

SPS はアメリカでも多国間国際事業として行うべきであるという意見が大勢をしめており (9)、関係国の足並みがそろおうを待っているという所であるが、とくに印象に残ったのは「SPS 1 基の電力はアメリカにとっては国の必要量の数%であるがインドでは60%になる」というインドの発表者の統計、および財政と保険の専門家が参加してこの問題が論じられたことであった。

筆者はここで前述の国内の研究の状況を紹介するとともに SPS の開発のためのフェイズド・プロジェクト・プランの方法について、これまでの NASA の方法と全く異なった基準でフェイズ化するマクロフェイズングを提案した (10)。

6. あとがき

SPS は将来の大プロジェクトである。したがって急に研究費がつくことは期待できない。まだどのようにして研究をしていいかという方法自身が研究の緒についた所である。従来のエネルギーに比べて、SPS の価値の高さはすでに認められている。不可能なテクノロジーは一つも含まれていない点も明らかにされた。あとは出来る方向をさがしつつ、関係者自身が勉強することであろうと思う。現在、行っている10 MW モデ

ルの計画研究をもう少し深く掘り下げることがその一つの方向であろう。御関心のある方は是非参加していただきたい。

参考文献

- 1) P. E. Glaser ; Power from the Sun ; Its Future, Science, Vol. 162 No. 3856 PP357—861, 1968 邦訳 ; エネルギーレビュー 1982年1月号
- 2) P. E. Glaser ; Solar Power Satellite ; The Promise and Challenge, Macro—Engineering and the Infrastructure of Tomorrow Westview Press. PP 177—206 1978. 邦訳 ; デビットソン・中川編 ; マクロエンジニアリング, 東海大学出版会
- 3) 長友信人 ; 日本はNASAに学べ, エコノミスト 3/30, 1982
- 4) G. M. Hanley ; Rockwell Satellite Power System (SPS) Concept Definition Studies, Space solar Power Review Vol. 1 No. 112 1980
- 5) Astronautics & Aeronautics Vol. 16, No. 10 は大型構造物・特集号である。
- 6) 衛星発電システム (SPS) および民用実用地表遠隔探査衛星システムの研究, (社) 日本機械工業連合会, 昭和56年9月
- 7) 昭和56年度宇宙開発事業団委託業務成果報告書, 太陽光発電衛星の経済性に関する調査, 未来工学研究所, 1982年3月
- 8) Proceedings of the First ISAS Space Energy Symposium, Jan. 1982 (これは宇宙科学研究所から入手できる)
- 9) Solar Power Satellite, Congress of the United States, Office of Technology Assessment August 1981
- 10) M. Nagatomo ; Space Station ; the Eearly Solar Power Satellite, Presented at Unispace '82 NGO Vienna 1982

