

SPS 2000 のシステムコンセプトとあるべき展開

長友 信人

Development of the SPS 2000 System Concept and its Future

By

Makoto NAGATOMO

Abstract : The ISAS Solar Power Satellite (SPS) Working Group made a critical review on the SPS Reference System conceived in the United States and found it essential for their research to have firm bases on realistic demand and practical technologies to be presented by an SPS concept more practical than the Reference System. For this purpose, a concept of SPS named SPS 2000 was developed, assuming its construction to be started in 2000. The concept helped the SPS researchers to make comprehensible research plans for their research community to support their activities in this new research field. The success of the conceptual study has resulted from the fundamental requirements for the study. To extend the successful study of the SPS 2000 for the next century, it is more important to vitalize the requirements for a new system design than to improve the conceptual design itself.

概 要

太陽発電衛星 (SPS) ワーキンググループは、研究課題を特定することを目的にアメリカのリファレンスシステムの問題点を検討した。その結果、研究者としてより身近な、実現性のある太陽発電衛星のコンセプトの必要性を感じ、西暦2000年実現を念頭に置いてSPS 2000と呼ばれるSPSシステムを構想化した。この構想を基に研究者は具体的な研究目標を立てることができたが、その成功の理由はそのシステム設計の基本的要求としてエネルギーシステムの持つ社会的な要件を強く意識した結果と考えられる。これを踏まえてSPS 2000の次の展開を予想すれば、現在馴染みになったSPS 2000の設計にこだわらず、基本要求进行しつつ新しい技術と本格的なエンジニアリングによる実現できるシステムを提示することが必要であろう。

重要語 : 太陽発電衛星, SPSワーキンググループ, SPS 2000, ポストSPS 2000

1. 序

太陽発電衛星に関する宇宙科学的な研究を行うことが宇宙工学委員会に提案されたのは1987年11月30日で、翌年3月にこのための太陽発電衛星 (Solar Power Satellite, 略してSPS) ワーキンググループ (以下略してWG) の設置が認められた。その参加者の多くは、現在の国際宇宙ステーションの予備的なミッション解析のために、エネルギーや宇宙構造物の宇宙実験を提案した研究者であった。これらの研究課題はエネルギーと環境というカテゴリーに分類されたSEEL (Space Energetics and Environment Laboratory) 計画 [1] にまとめられていた。当時、多くの研究者が持っていた太陽発電衛星の具体像は1970年代に作成されたアメリカのリファレンスシステムであり、SEELの研究課題もその影響を受けていたが、WGとして太陽発電衛星そのものを作る意図はなかった。したがって、その名称は「宇宙エネルギー」で十分だと言う議論もあったが、太陽発電衛星の名前を冠することになったのは研究者の意気込みを反映したものとと言えるであろう [2]。結局、SEELの研究課題の一部は国際宇宙年METS、宇宙ステーションおよびSFU (1987年発足) に関する宇宙でのエネルギーがらみのミッションとして実施されることになり、SEELは発展的に消滅した。太陽発電衛星そのものの研究には予算がつかず、SPS WGは研究者の情報交換を主目的にした集まりとなり、1997年まで存続して解散した。

SPS 2000はSPS WGの一つの研究活動として始まり、その解散後も続けられたが、今年はその名称の由来である西暦2000年を迎えて研究にも一つの区切りをつける時期にきている。ここではその研究の流れを要約し、今後とも維持すべき特徴を述べておきたい。以下、文中では敬称略。

2. ストローマン作成

宇宙研のWGは、通常、予算の申請も含め承認された研究計画に関する研究者の組織である。この点で、発電衛星そのものは打上げないことを前提条件としたSPS WGの設置と運営は異例のことであった。SPS WGではSPSのサブシステム毎に固有な技術等を中心にサブグループが構成されたが、予算はないので、各研究者が宇宙観測事業や科研費など別途配分された研究費を各自が属すサブグループの研究に充当する形になった。しかし、SPSを看板に掲げたからにはそれにふさわしいこともする必要があるという意見により、WGの中に工藤勲、狼嘉彰および筆者からなる企画グループを作り、WGの研究者の描く現実的な発電衛星の全体像をストローマンとして作成することになった。ストローマンとは米国の宇宙プロジェクト実施の最初の段階、フェーズAにおいて、主に技術的な可能性を示すために、設計要求やコストの分析等は仮想して設計する概念のことである。

リファレンスシステムの非現実性は、一つの発電衛星の電力が5GWで重量は5万トンという巨大さにあると判断したWGでは「より小さな」規模を模索した結果、かつて日機連の宇宙開発専門委員会 (委員長: 喜連川) で検討された「10,000kW宇宙発電所 (SPS) の概念」[3] をストローマン作成のたたき台とした。その理由は1万kWの電力は発電所としての特性を失わない十分な大きさであるとともに、宇宙で建設する上で宇宙ステーションの技術を発展させることで実現できる範囲内にあると判断されたからである。この専門委員会には筆者も委員として参加したが、作成されたのは図1に示すような箱形の太陽電池パネルにジンバル支持のマイクロ波送電アンテナがついた構成で、リファレンスシステムの影響を強く受けていた。これを改善するために、このシステム要素毎にWGのサブグループに意見を求め、出来ればより現実的な代案を示すように要請した。これに対する反応はサブグループによって異なったが、積極的な対応をしたサブグループの提案を中心に一通りストローマン全システムの技術的な方針 [4] がまとまった。

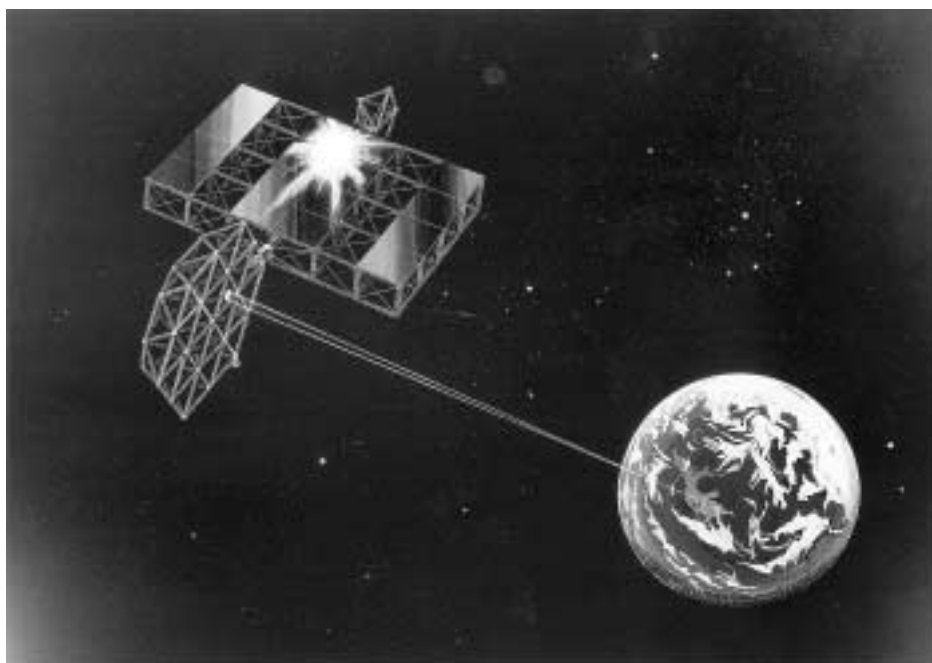


図1 ストローマンのモデルとなった 10000 kW宇宙発電所の概念（作者不詳）

3. SPS 2000

ストローマンとはいえ、設計して検討すべき問題点があり、そのいくつかはそのまま大学院修士や学部学生の卒業論文のテーマとして取り上げられた。このことは、SPS WGの目的の一つである「SPSの研究課題を探し出し、明確にする」ことを研究教育のレベルで実行できることを示したので、ストローマンの設計研究はWGの4つの研究計画の中の1つとして位置付けられることになった。さらに、そのためのサブグループはより広範囲の産業レベルにまで研究基盤を拡大しようと外部の関心を持つ人達にも声をかけて、義務のない参加を前提としたSPS 2000タスクチームを結成して勉強会的な活動を行った。このボランティアな官民共同活動は手弁当であったが、参加者は熱心で民間会社からの善意の研究費の申し出さえあったが、宇宙科学研究所では奨学寄付金以外の受け入れは困難なため残念ながら新たな発展はなかった。

ストローマンが形を現わし始めた1990年頃、これに名前を付けることが提案され、2000年であれば何らかの形で実行されるのではないかと期待をこめて「SPS 2000」と言う名前になった。この名前は、当時、概念設計をしていたプリズム型のモデルにつけたつもりであった[5]が、後にこれに関連した研究活動全体を指す研究プロジェクト名のようにになった。

このモデルは新しいSPSのイメージとして学生のみならず広く研究対象となり、電気や構造等の設計のためにシステムの一部の実物あるいは縮尺模型の実験的製作が行われた。その際、あいまいだった設計要求を具体的に書き表す必要が出てきて、その集大成としてSPS 2000の計画要求が整備されてきた。その結果はSPS 2000の概念計画書[6]の中に「基本要件」と言う節にまとめられた。その項目のみを表1に示す。

原文には、各要件毎に具体的な対応方針が付されていた。これらのうち主なものを以下に説明する。

要求2では、SPSが将来は地球環境問題にも対処できる規模に拡大することまで考慮して、ガリウム/ヒ素など稀少資源を原料とする衛星用太陽電池やマイクロ波の半導体素子は使用せず、将来とも資源が豊富で安価なシリコンの部品を使うことを確認した。

要求3はコスト目標を示すにとどまったが、その目標は具体的に計画中の原子力発電所の建設コストなどを参考にした。その後、地上の太陽光発電が補助金などで普及が進み、少なくとも太陽電池に関する限り、SPS 2000

表1. SPS 2000 の概念計画作成「基本要項」6項目 [6]

- 要求 1 : 遅くとも 2000 年までに最初の軌道上での組立が開始されること .
- 要求 2 : 実現時期までに商業的に使用できる技術を , さらに将来の大規模化にも対応できる技術を比較選択する .
- 要求 3 : コストの目標は地上の発電所が供給する電力に競争できること .
- 要求 4 : 発電衛星の軌道は赤道上 1000 キロメートル程度の円軌道とし , 軌道の保守管理は行わない . また , 打ち上げ時期までに実用化されるロケットによる .
- 要求 5 : 電力の使用者は赤道直下帯の開発途上国の住民とする .
- 要求 6 : 発電衛星の規模は軌道からの送電能力が 10 MW 程度とする . 打ち上げを単位とするモジュール化を行うとともに , 発電衛星完成の後より大規模なシステムへの発展性を持たせること .

は地上用のものと同程度の値段のものを使わなければならないという最初の方針の正しさが確認された .

要求 4 は , 財産としての安全性と維持費の削減を考慮した要求で , 前者についてはデブリによる破壊の危険を小さくするためデブリの密度が低い高度 1100 km 付近を選択したということであり , 後者に関しては , 地上の太陽光発電 (1000 kW 西条試験用プラント) では保守要員は 0.5 名であることを参考にした結果 , 平均電力がこれより小さい SPS 2000 では運用の人員費はゼロを目標にすべきであると考えた . そこで , レクテナによる受電運転確認以外の軌道管理はせず , またパッシブな姿勢安定システムにすることを目指した . 打ち上げ用ロケットはリファレンスシステムのような自前のものは考えず , ロケット輸送業者に頼むことにした . しかし , 現状はコスト的に引き合う機種がないので , 搭載性の検討のみ行う目的でアリアン V 型を想定した .

要求 5 に関しては , SPS 2000 用レクテナとして考えられるモデルを潜在的ユーザーに例示するところまでを本研究の範囲とした .

要求 6 では電力を SPS の規模の指標として使っている . ただし , 発電衛星とレクテナが 1 対 1 のリファレンスシステムではシステム単位で電気出力が決められるが , SPS 2000 では複数のレクテナを異なった所有者がそれぞれ運用して出力電力を決めるので , 普通の発電所の出力と同じような意味ではなくなってしまう . そこで , 後にはレクテナ側にとっても意味のある発電衛星の送電マイクロ波電力を基準にする考え方 [7] を採用することにした . すなわち , 地上で実用的に利用できる最大限のマイクロ波電力を 10 MW として , 発電衛星のサブシステムの性能を決めることが適当であると理解したが , そのときは既に設計が進んでいて , この数値は関係するサブシステム間の電力受け渡しなどで , 設計に反映されるような使い方はされずに今回の検討は終わっている .

全体をまとめてみると , 通常のエンジニアリング作業では設計は基本的な要求の下に行われるが , SPS 2000 の概念設計作業では逆に , 設計し始めてから要求を見直した . つまり , あいまいな設計要求で設計を開始して , 疑問が生じた時点で , さかのぼって設計要求を確立する手法を使ったわけである . 実例がない新しいシステムとその周辺条件の関係を明らかにするという点で , この手法はたいへん有効であった . これは設計研究としての SPS 2000 研究の工学的成果の一つと考えて良いであろう .

4. SPS 2000 研究の波及

プリズム型の SPS 2000 と呼ばれるようになったモデルの検討は , 概念計画書 [6] が暫定的に完成した 1993 年に事実上終了した . その「暫定」の意味は「その時点での最終案」のつもりであって , その後「最終版」を出す予定ははっきりしていなかった . 当時 , このモデルは唯一ではなく , これ以外の形状やサブシステムの方式に

関する研究発表もあったが、それらはテクニカルなアイデアで、これらを全体的な構想に発展させてシステムレベルの設計にまで踏み込むには至らなかったということである。そのなかで、SPS 2000は必ずしもエンジニアリング的に最適とは言えないが分かりやすいモデルで、これに良く解析された原理の技術をシステムにまとめてみたと言うことになる。

このようにモデルは一つであったが、一般的にSPSに含まれるいろいろな技術および一部の非技術分野の研究が、このモデルをもとにして具体的に、科研費や宇宙研の基礎開発研究費へ申請しても受け入れられるようになったようである。一つの構想からなるべく多くの研究が出てくることはその構想が優れている証拠である。これを技術の波及効果に例えれば、一つの研究や構想が多くの波及的研究を産み出したということであろう。このような波及的な研究を産み出したSPSの構想には、グレーザーの最初の提案[8]、および、最初から構想研究の一部として多くの関連研究が企画されていたCDEPのリファレンスモデル[9]があった。SPS 2000は意図したわけではなく、むしろ不完全ゆえに研究者が興味を持つ問題点が多かったのかもしれない。かつて太陽発電衛星の研究課題を整理して、科研費の総合研究として申請したことが何回もあったが全て却下されたことを考えると、SPS 2000の未整理なシステムの中でこれらの研究が小さいながらも成果を上げていることは興味深い。

予算を決める側の立場に立てば、小さくてもSPSの研究予算を認めることは「地球環境と新エネルギー」の枠組みの中で国家のエネルギー開発のオプションの一つとしてSPSを認知することになり、将来の巨額の研究開発予算を約束することを意味するのであろう。この点、太陽発電衛星の研究は未知の技術にチャレンジする研究とは性格を異にするが、SPS 2000の研究を振り返ると、SPSの試験システムを従来のような産業界主導の新エネルギー開発プロジェクトとして実施するには研究的な要素が多すぎると思われる。しかし、その研究は宇宙科学や宇宙開発の枠組みで行うには限界があることも示している。

5. 21世紀に引き継がれるべきもの

グレーザーは地球規模の環境とエネルギー問題の解決案としてSPSを提案したが、世間はこれを夢と受けとった。これを電力事業として実現するイメージが湧いてこなかったのである。問題は、この夢をいかにして商業的に魅力的な事業にするかという点にあった。SPS 2000はプロジェクトとして実現するにはいたらなかったが、ストロマンが最初に目指したモノのイメージ化に成功し、それをはるかに越えて技術以外の先行的な課題にも迫ったと思われる。それは夢を実現する商業的な動機を見出す方向を探り、魅力的な技術目標を立てようと試みたからである。

具体的に言えば、SPSの電力を商品化する単位をレクテナが受けるマイクロ波の電力とすること、および宇宙輸送は商業化された宇宙輸送サービスを利用することの2点である。これらはリファレンスシステムとSPS 2000の異なる点である。

前者については先に規模の設定のところでも述べたが、SPS 2000が低高度軌道を利用するために採用した考え方である。これによって複数のレクテナを各ユーザー側の事業計画にして発電衛星の計画から切り離すことが出来る。マイクロ波電力の値段でSPS事業の収入が決まるので、発電衛星の建設にかかわる財政計画がこれを根拠にして作成され、太陽光発電、マイクロ波送電、輸送と組み立て等に使える費用の目安が立てられる。レクテナは赤道上各地に散在することになるが、各レクテナはマイクロ波を購入して最終ユーザーに電力を売るため、各地の社会経済状態に適したシステムを計画するであろう。現にこの点を取り上げた「レクテナの現地調査研究」[10]に科研費が交付されたことは意義深い。

後者は、商業衛星の打上げは商業的な打上げロケットサービスを利用していることに習ったもので、従来の国家の宇宙プロジェクトではロケットの開発と打ち上げまでプロジェクトの内部経費としていた考えを採用しないことにしたものである。リファレンスシステムでは専用のロケットを開発する検討をしているが、これは国家宇

宙プロジェクトの考え方を踏襲したものである。SPS 2000 では商業的な宇宙輸送サービスの価格と輸送条件をもとにして発電衛星の輸送と組み立ての条件を設計に盛り込むことにした。ただ、現状の打ち上げサービスは商業的なSPSを受け入れられないような高価格なので、SPS 2000 では採算ベースに乗る輸送費の算出をして将来の宇宙輸送のコスト低減の目標を示す結果となった。

2000年が終わって21世紀を迎える現在、SPS 2000 を評価すれば、ここにまとめたようなSPSの実現の条件をリアルに示したことが最も優れた成果だと筆者は考える。もちろんプリズム型の概念設計はユニークであったが、その立場から今後さらにこの研究を発展させるにはそれを温存するより、設計の前提条件となった「基本要件」を更新して時代に合ったものとし、より広い基盤に立って設計し直すことではないかと思う。先に述べた「基本方針」今でも新鮮で有効だと思われるが、2000年と決めた要求1はもちろん変更が必要であり、他の要求も例えば次に述べるような点を改訂する必要がある。

要求2は基本的に変更ない。太陽電池は地上の生産量が増えたので、10 MW位の電力に驚く様なことはなくなり、有望な製品の耐宇宙環境性を研究する段階になった。一方、電力伝送はこれまで携帯電話技術に依存した半導体方式をシリコンでパワーアップすることを考えたが、技術的な可能性と限界も予想できそうになれば、変換効率の高いマグネトロン等の方式も見直して両者を比較できるようにしておく必要があるだろう。

要求3も基本的な変更はないが、今後さらに太陽電池の普及が進む気配なので、地上の太陽光発電所を競争相手と指定してコスト目標を立てるべきであろう。一方、送電と組み立てに関しては、高コストの宇宙技術をベースにする傾向があるので、SPS 2000 で仮定したように送電部と組立構造はそれぞれ発電部と同じコストという0次目標を設定して、これを満足する技術を開発するアプローチは不可欠である。ロケットの輸送はSPS 2000 と同様に打ち上げ費用は外枠扱いとする。

要求4の軌道と姿勢に関する要求は変更する必要はないが、搭載計画を立てる場合は輸送費の抜本的な削減が期待できるエアライン型の運航が出来るロケットを予想する必要がある。

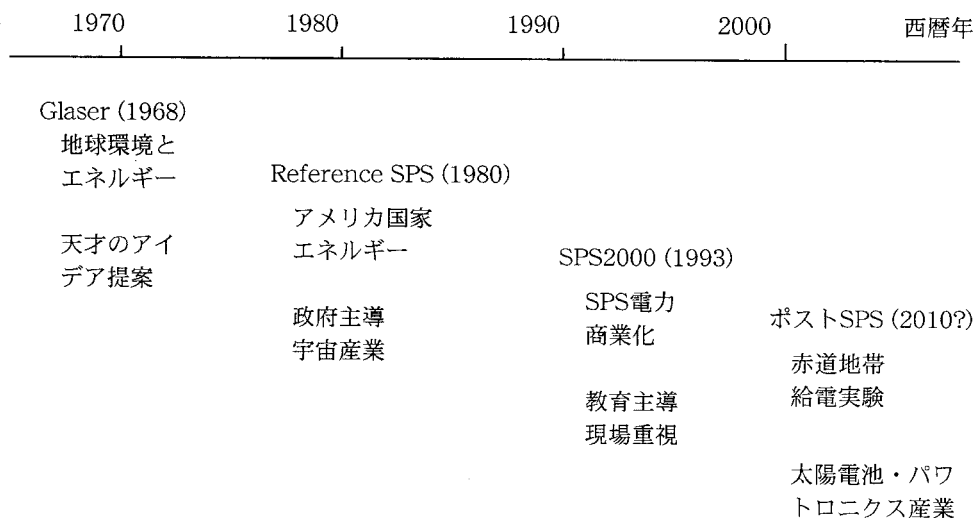
要求5では、「レクテナは地域性が重視されるので、計画や設計は現地の組織が行うものとし、宇宙発電所のグループはそのための技術データを提供する」というように検討範囲をさらに明白に限定する。

要求6については、電力は、地上で利用できるマイクロ波電力が最大10 MW程度であることを明記するが、レクテナの電力事業者はレクテナの面積に比例した電力代金を払えばいいのか、あるいは送電した全電力10 MW相当の代金を支払うのか等、決めておく必要があるかもしれない。このことは前項とも関連するが、実際にレクテナの検討グループを海外も含めて研究組織外に結成してもらうことを検討すべきであろう。このような問題に比べると、本要求中で触れている将来の発展性についての要求は後回しにしてもよい。

以上のような見直しをすれば、研究の枠組みの拡大が見えてくる。SPS 2000 を特徴づけたのは個々の研究者の「研究と教育」に役立つモデルであったが、次の段階ではこの枠を越えて、技術の進歩と産業動向を踏まえた認識が必要であるし、赤道諸国へのエネルギー供給実験実施と言う点から、地球温暖化時代のわが国の発展途上国との関係にも及んでくる。研究すべきは大きなシステムの問題である。太陽電池を使用するSPSでは同じ規模の地上の太陽電池発電所より昼夜と大気圏での日照条件の差だけ有利で、この有利さが宇宙に建設する不利を上回るかどうかをSPS2000程度のシステムで技術的に判定できるであろう。もし成功すれば、人類は新エネルギーのオプションを一つ増やしたことになる。その時、SPSの研究開発はその目標を達成したことになる。ただ、SPSは同じ太陽光発電産業を基盤にしているにもかかわらず、地上の太陽光発電に対抗するものであるというようなあまり好意的でない見方もあるようなので、SPS 2000 の次の段階では産業界の協力体制が整えられることが望まれる。そこではじめて、地球規模の問題解決に宇宙を利用する可能性を検討することが出来るようになる。

6. 太陽発電衛星の概念計画の系譜

図2はGlaserに始まるSPS研究のマクロ視的な流れを示す．ここにはSPSの一要素を論じた研究やアイデアの提案に類するものは除外し，検討対象が公共的な電力を前提としたもので，しかもシステム設計から発生電力の利用まで，バランスのとれた検討が実施された研究に限っている．その結果，Glaser以降は，リファレンスシステムとSPS 2000だけがこれに該当すると判断される．規模の違いはあるが，SPS 2000はリファレンスシステムのアンチテーゼとして出発したので当然といえば当然である．



*ここで言う太陽発電衛星とはエネルギーシステムとして需給関係や経済的配慮など社会的な位置づけが研究の中に含まれている場合に限る。

図2 太陽発電衛星概念設計研究の系譜：ポストSPS 2000のありかたの予想

図2にはそれぞれの検討の主題とその検討にかかわりあって人々の指向がキーワード的に記されている．最初に，Glaser [8] は地球環境とエネルギーを主題としていたが，基本的には天才のアイデアであり，技術的に当時は未開発であった太陽電池技術の将来を予想して，地球と人類の技術の将来を指し示した．次に，リファレンスシステムは周知のように，21世紀の米国の主たる電力システムとなるSPSとはいかなるものかという観点から設計されたもので，この設計作業はNASAと宇宙産業が担当して「SPSの概念作成と評価計画」(The Satellite Power System: Concept Development and Evaluation Program,略してCDEP)の一部として実施された．全体計画のCDEPは，主幹政府機関であったエネルギー省の指導の下に産官学の組織が全米規模で参加して実施された．この計画は大規模で，膨大な資料を調査すると「木をみて森を見ず」ということになりかねない．むしろ，当時の計画マネジャー，Koomanoff等が取りまとめた報告的な記録のほうが簡潔でわかりやすい．その意味で数多い文献の中から敢えて一つを参考文献9として紹介した．その中にはリファレンスシステムはあくまでも参考用の概念であって，最適化されたものでも，最善の案でもないと明記されている．リファレンスシステムを唯一のSPSと考えてSPSの実現を論じる人々には，この点を良く理解するために一読をおすすめする．

SPS 2000は米国のCDEPの数多くの成果を尊重する一方，リファレンスシステムの目指した「一国家の主エネルギーとしての」SPSではなく，既存の電力に価格の面で対抗できる電力を供給することを目標にした．この場合，新エネルギー開発にかかわる政府の審議とは違い，小規模の商業用電力システムとして目標を絞ることが出来る．とは言うものの，実行する主体は研究者であるため教育的な側面が強く，技術は研究現場で出来ることに重点が置かれるので，資本投入まで考えた商業化のための新規の開発目標の設定はもちろん行うべくもなく，中間的な

技術評価とその後の作業の推測をする程度で終わっている。

このようにして21世紀を迎えようとしている。次の段階はパイロットプラントの開発と運用ではないかと思われる。この一つの方向は、リファレンスシステムの流れを引き継いだ国家的なエネルギー開発の試験プロジェクトを企画することである。一方、SPS 2000では、赤道上低軌道を利用することのグローバルな性格と技術の致命的な困難さがなく、むしろ技術オプションは多様であると予想されたので、この方向を延長してポストSPS 2000研究として位置付けることも出来る。すなわち、図2に示すように「ポストSPS 2000」の主題は「赤道地帯への給電実験」に置き、パイロットプラントの性格上、実行主体は将来この産業を支える産業界、太陽電池産業と半導体を使った先端電力技術（図では、パワートロニクスという造語を使った）であると考えた。

7. 結 び

SPS 2000は、リファレンスシステムでは大きすぎて非現実的であるとの判断から10MW規模のシステムを前提として概念計画を開始したが、具体的な概念設計を考える段階では、電力システムとして商業的、社会的に受け入れられる条件を計画の要求として重視した。この結果、それぞれの技術開発に具体的な目標が立てられるようになって、それらが達成できれば「夢のような」アイデアの登場を待たずとも、エジソンの最初の発電所程度の電力システムは出来るであろうと思われるようになった。

しかし、SPS 2000のモデルは作成後10年近くが経過して、この間の電気電子技術の進歩はめざましく、これに合わせたシステムの新規の設計が必要である。この場合、エネルギー問題で無視することが出来ない政治・社会・経済を優先的な周辺条件と位置付けたSPS 2000の前提条件は基本的に踏襲し、新しく可能な技術を導入したモデルを考えることは、より広範囲の産業と研究分野を巻き込むことが出来ると予想されるので、従来のSPS 2000のモデルの詳細設計を続けるより大きな成果が得られるであろう。

それがSPS 2010となるか、2015となるかは問題ではない。次のモデルは研究のためだけではなく、商業資本が投資したくなるような魅力あるものにすべきである。そのための組織として現在のSPS 2000タスクチームは研究に片寄っているので、新たに地味な技術開発を行ういくつかの専門の技術グループと財務に詳しい事業企画者が必要となるであろう。そして、その周辺を取り巻くように宇宙平和利用という大命題と資源とエネルギー開発が絡んだ国家間の駆け引きが一気に表に出てくる予感がする。

参 考 文 献

- [1] K. Kuriki, M. Nagatomo and T. Obayashi : Space Energetics and Environment Laboratory, Space Solar Power Review, Vol. 5, pp.197-205, 1985.
- [2] 長友信人：宇宙エネルギー工学をふりかえって、第19回宇宙エネルギーシンポジウム（平成11年度、2000年2月18日開催）講演集、宇宙科学研究所、2000年3月、pp.28-33
- [3] 日機連、宇宙開発専門委員会（委員長：喜連川）「わが国の宇宙産業の将来展望」、昭和58年7月発行
- [4] 宇宙科学研究所SPSワーキンググループ：10 MW SPSストローマン（1989年8月28日付、SPSワーキンググループ・企画グループ：狼、工藤、長友から同サブグループチーフ宛の依頼状に添付された別紙2）
- [5] 長友信人：ストローマン研究に関する提案、第10回宇宙エネルギーシンポジウム（平成2年度、1991年2月14、15日開催）講演集、宇宙科学研究所、1991年3月、pp. 80-86.
- [6] 宇宙科学研究所太陽発電衛星ワーキンググループ・SPS 2000タスクチーム：SPS2000概念計画書、暫定版、1993年7月30日。
- [7] P Q Collins and R Tomkins : A Method for Utilities to Access the SPS Commercially, presented at SPS 91 Power from Space, Paris 27-30 Aug. 1991, included in the preprints, pp.132-141.

- [8] Peter E. Glaser : Power from the Sun: its Future, Science, vol.162, pp.857-866 (1968)
- [9] Frederick A. Koomanoff and Charles E. Bloomquist : The Satellite Power System: Concept Development and Evaluation Program, Chapter 1.2 in 'Solar Power Satellite' edited by Glaser, Davidson and Csigi, Ellishorwood, 1993, pp.26-59.
なお、同書の改訂版, 'Solar Power Satellite: A Space Energy System for Earth' edited by Glaser, Davidson and Csigi, John Wiley & Sons Ltd in association with Praxis Publishing Ltd, 1998にも収録されている . pp. 23-56.
- [10] 例えば, 松岡秀雄, 長友信人, バトリックコリンズ : SPS2000現地調査の意義, 第1回太陽発電衛星システム (SPS) シンポジウム (平成11年1月8日開催) 講演要旨集, pp. 61 - 66.