

宇宙開発事業団 (NASDA) の委員会活動について

松本 紘[†]

† 京都大学宙空電波科学研究センター 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄官有地

E-mail: † matsumot@kurasc.kyoto-u.ac.jp

あらまし 宇宙太陽発電システム検討委員会は、1998年、宇宙開発事業団の委託で株式会社三菱総合研究所に設置され、宇宙太陽発電システムの開発シナリオ、システム構成、技術開発課題について討議してきた。本稿では、4年間にわたる委員会活動の概要として、委員会構成、検討概要、SPRITZ、将来展望について示す。

キーワード 宇宙太陽発電システム、委員会活動、SPRITZ、システムコンフィギュレーション

Outline of the SSPS Committee Activities

Hiroshi MATSUMOTO[†]

† Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto University

Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011 Japan

E-mail: † matsumot@kurasc.kyoto-u.ac.jp

Abstract The Space Solar Power Systems (SSPS) committee was established in Mitsubishi Research Institute, Inc. (MRI) under contract with National Space Development Agency in Japan (NASDA) in 1998, and has discussed the development scenario of SSPS, the system configuration, and the technical development subjects. This paper shows the committee organization, study outlines, SPRITZ, and a future view as an outline of the committee activities in the past four years.

Keyword Space Solar Power Systems (SSPS), Activities of SSPS Committee, SPRITZ, System Configuration

1. はじめに

宇宙太陽発電システム検討委員会(以下 SSPS 委員会と略す)は 1998 年度宇宙開発事業団委託業務「宇宙太陽発電システムの調査・検討」により株式会社三菱総合研究所内に設置された。委員会は産学官からなる委員により構成されており、現在 29 名で構成されている。委員会の下に複数のワーキンググループが設置されており、委員会の指導の下に詳細な検討を行っている。

本委員会の目的は、2020 年に商用宇宙太陽発電システムを実現するための開発シナリオ、技術開発要素の抽出、経済性評価、社会へのインパクト等を検討することにある。

以下では本委員会の構成、活動内容、及びこれからの活動の展望について示す。

2. 委員会構成

SSPS 委員会は 1998 年に 9 名の委員で構成される小規模な委員会(委員長:京都大学松本教授、副委員長:宇宙科学研究所佐々木教授)として誕生した。その後毎年委員会は強化され、2002 年には 29 名に達している。また、委員会活動を支えるためにワーキンググループ(以下 WG と略す)が設置された。WG の数は 1999 年度の発足時には 1 つであったが、2000 年度には 11 グループに増強された。WG の活動も 2000 年度は年 4 回程度の開催であったが、2001 年度は 2 週間~1 ヶ月に一度の割合で開催され、活発な議論が行われている。

また、委員会、及び WG 活動を支援するための専用ホームページである VRDC(Virtual Research & Development Center)が 2000 年度に設置され、有効に利用されている。

表 1 に 2001 年度の委員会・WG 参加組織を、表 2 に WG 構成を示す。

表 1 SSPS 委員会・WG 参加組織一覧

所属	
学	京都大学
	宇宙科学研究所
	九州大学
	神戸大学
	大阪大学
	東北大学
	麻布大学
	(財)レーザー技術総合研究所
官	文部科学省
	総務省
	(独)通信総合研究所
	(独)航空宇宙技術研究所
	宇宙開発事業団
産	(株)アイ・エイチ・アイ・エアロスペース
	(株)東芝
	(株)翔エンジニアリング
	(財)電力中央研究所
	NEC東芝スペースシステム(株)
	シー・エス・ピー・ジャパン(株)
	シャープ(株)
	ダイヤモンドエアサービス(株)
	三菱商事(株)
	関西電力(株)
	三菱重工業(株)
	三菱電機(株)
	清水建設(株)
	西日本環境エネルギー(株)
	石川島播磨重工業(株)
	川崎重工業(株)
富士重工業(株)	

表 2 WG 構成

WG1	システム技術
WG3	発電技術
WG4	マイクロ波送受電技術
WG5	レーザー送受電技術
WG6	電力マネージメント技術
WG7	熱・構造・材料・柔構造制御技術
WG9	ロボット組立・保全・サービス技術
WG10	商用電力網接続技術
WG11	輸送技術
WG14	環境・安全
WG15	経済分析・市場分析

3. 委員会活動概要

以下に 1998 年度から 2001 年度における委員会活動の概要と、2002 年度の計画を示す。

3.1. 1998 年度

1998 年度は宇宙太陽発電システムに関するライフサイクルモデルの構築とその妥当性の評価を行った。

3.1.1. ライフサイクルモデルの構築

マイクロ波送電型 SSPS のライフサイクルモデルを構築した。ライフサイクルモデルは SSPS の構築、運用について、コストモデル、環境負荷モデル、エネルギー収支モデルをそれぞれ作成した。

- コストモデル
SSPS の製造、運用に係わるコストを計算し、それを元に発電コストを計算する。
- 環境負荷モデル
SSPS の構築・運用により排出される CO2 量を計算する。
- エネルギー収支モデル
SSPS の構築・運用に投入したエネルギーと、SSPS が発電したエネルギーを求め、エネルギーペイバックタイム、およびエネルギー収支を計算する。

なお、各モデルは、宇宙セグメント、地上セグメント、打上げ、メンテナンスから構成される。

3.1.2. モデルの妥当性の評価

1GW 級の SSPS を対象にモデルに用いた独立変数の発電単価、CO2 排出量、およびペイバックタイムに関する感度分析を行った。その結果を図 1 に示す。

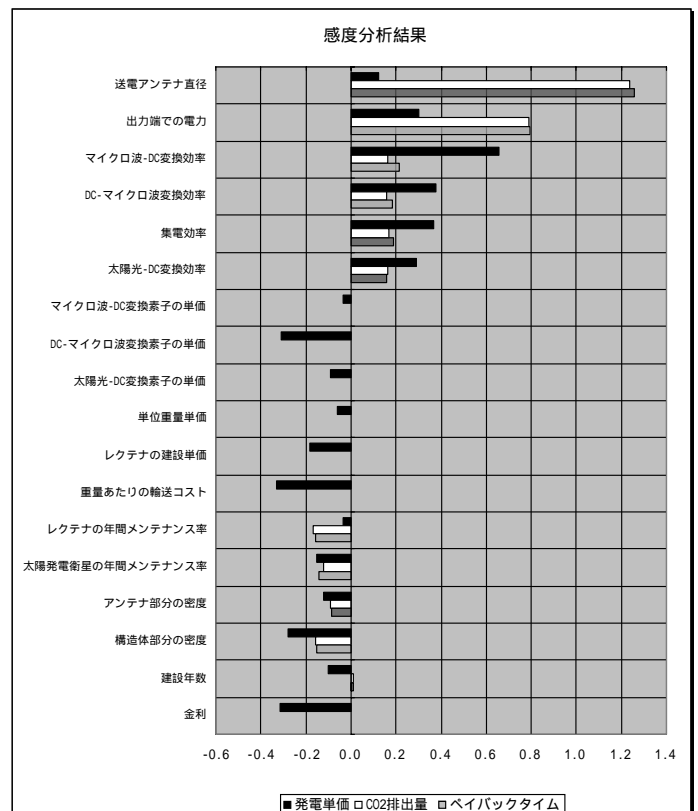


図 1 感度分析結果

この感度分析結果から、発電単価に関しては、マイクロ波-DC 変換効率を高めることが一番重要となる。次に DC-マイクロ波変換効率、集電効率を高めるとともに、打ち上げコストを下げることも重要となる。今後 SSPS の技術開発要素としては、マイクロ波-DC、DC-マイクロ波の変換効率を高める研究開発を進めるとともに、安価で大量の輸送手段を確立することが重要と考えられる。

他のエネルギーシステムとの比較であるが、発電単価に関しては現在の基幹電源の値はいずれもこのモデルにより算出される発電単価の約半値程度である。しかしながらこのうち化石燃料を用いるものは今後地球環境の保護の面から発生する CO₂ の処理コストが加算されることが予想される。

また CO₂ 排出量であるが、石炭、石油、LNG といった化石燃料による発電システムと比べ 1 桁少ない量である。また、地上の太陽光発電と比べても CO₂ 排出量は少なく、原子力発電とほぼ同等程度であった。

エネルギーペイバックタイムに関して、石炭火力、石油火力、LNG 火力、原子力と比較した場合 SSPS は 5 年と長い、地上での各種太陽利用発電システムが 6 年～11 年であることを考慮すれば回収効率は高いと言える。また、燃料を含めたエネルギー収支では石炭火力、石油火力、LNG 火力、原子力が 30% 台であるのに対し、SSPS は 600% と、投入エネルギー以上のエネルギーを生産することが可能である。このことは SSPS を一基構築すれば、SSPS の発生するエネルギーを用いて SSPS を製造できる可能性があり、自己増殖型のエネルギーシステムであるといえよう。

3.2. 1999 年度

1999 年度は全体システム及び要素技術の調査研究を行うとともに、技術実証の検討を行った。

3.2.1. 全体システムに関する研究

SSPS のシステム構成の検討を行い、その結果コンフィギュレーション案として以下の 3 案を考案した。

(1) コンフィギュレーション A (図 2)

[特徴]

- ・ 重力傾斜を利用した姿勢制御。
- ・ 太陽電池をモジュール化し交換可能とする。
- ・ 発電モジュールを交互に配置することで、影の部分を減少。
- ・ C60 型の太陽電池モジュール
- ・ 太陽電池モジュールを増設することで発電量を増加することが可能。

[主要諸元]

- ・ 発電電力(商用電源との接続端) 250MW
- ・ マイクロ波周波数 5.8GHz
- ・ 送電アンテナ直径 2.6km
- ・ 発電モジュール直径 50～60m
- ・ 全長 15 km

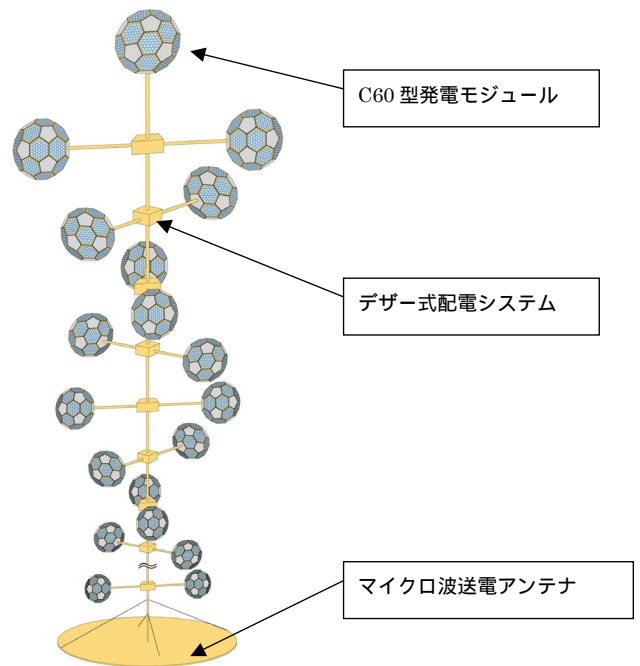


図 2 コンフィギュレーション A

(2) コンフィギュレーション B (図 3)

[特徴]

- ・ 光によるエネルギー伝送。
- ・ 発電部と送電部を一体としたサンドイッチ構造。
- ・ インフレータブル方式による軽量構造。

[主要諸元]

- ・ 発電電力(商用電源との接続端) 1GW
- ・ マイクロ波周波数 5.8GHz
- ・ 送電アンテナ直径 2.6km
- ・ 主反射ミラー直径 4～6km

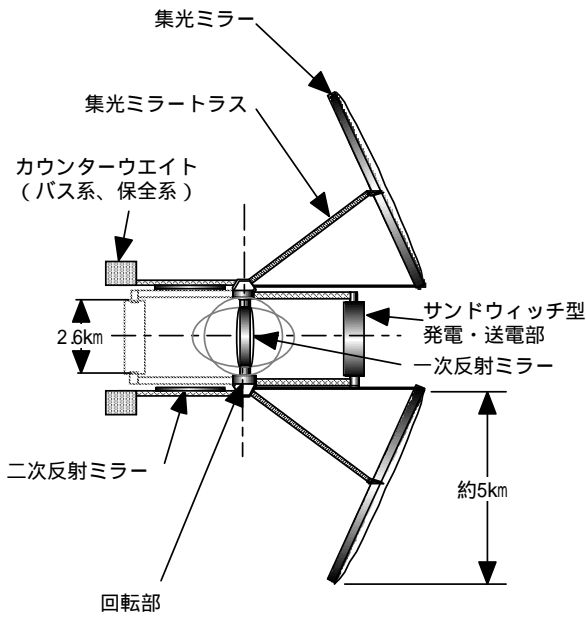


図 3 コンフィギュレーション B

(3) コンフィギュレーション C (図 4)

[特徴]

- ・ 遠心力を利用し、構造体の形状を維持する。
- ・ 集配電システムを複数に分散化する。
- ・ 太陽電池をモジュール化し交換可能とする。
- ・ 太陽電池に薄膜のレンズを装着する。
- ・ C60 型送電アンテナ内にマイクロ波発振器を設置し、地球方向に送電面を切り替える。

[主要諸元]

- ・ 発電電力(商用電源との接続端) 1GW
- ・ マイクロ波周波数 5.8GHz
- ・ 送電アンテナ直径 2.6km
- ・ 円盤部直径 5km

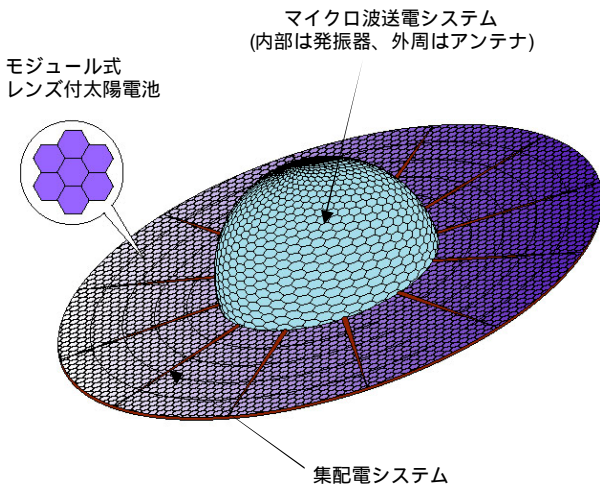


図 4 コンフィギュレーション C

3.2.2. 要素技術に関する研究

太陽光発電システムを構成する主要要素について検討を行った。

(1) マイクロ波送電システム

マイクロ波送電システムの検討としては、レクテナの半径を小さくするための検討を行った。検討は送電パターンと、送信周波数に関して行った。

検討の結果、送電周波数 5.8GHz、送電アンテナの直径を 2.6km、レクテナの直径 1.9km が最適となった。この場合のレクテナ効率率は 89.91%、レクテナ端での強度 0.96mW/cm² となる(図 5)。

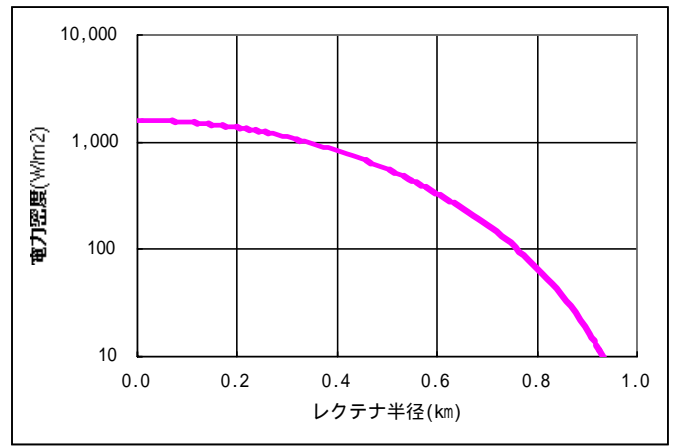


図 5 レクテナにおけるビームパターン

(2) 太陽光直接励起型個体レーザー

太陽光直接励起型レーザーとして固体レーザーを検討した。まず、フレネルレンズ等で太陽光を 1000 倍程度集光し、集光伝送部(クラッド)に入射する。クラッドには 10mm 級の径の希土類(Nd, Cr, Yb)をドープした光ファイバーが埋め込まれており、クラッドに入射した光は入反射を繰り返しながら最終的には光ファイバー内に入射され、単一モードのレーザー光を励起するシステムを検討した(図 6)。

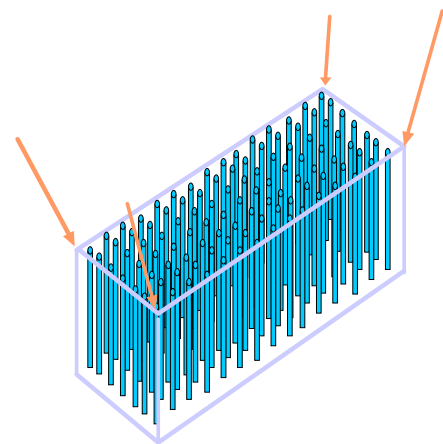


図 6 ファイバーアレイレーザー概念図

(3) 光発電システム

宇宙太陽発電システムに適用可能な太陽電池の種類について検討するとともに、発電・送電一体化モジュール(図 7)について検討した。これは、上面に太陽電池を貼り、その起電力を内部のマイクロ波発振器でマイクロ波に変換され、底面の送電アンテナより発振される。

各モジュールはハニカム状のフレームに取り付けられ、脱着可能とする。また、各モジュールは制御信号以外は独立であり、1 モジュールが故障しても他のモジュールには影響を与えない構成が可能である。

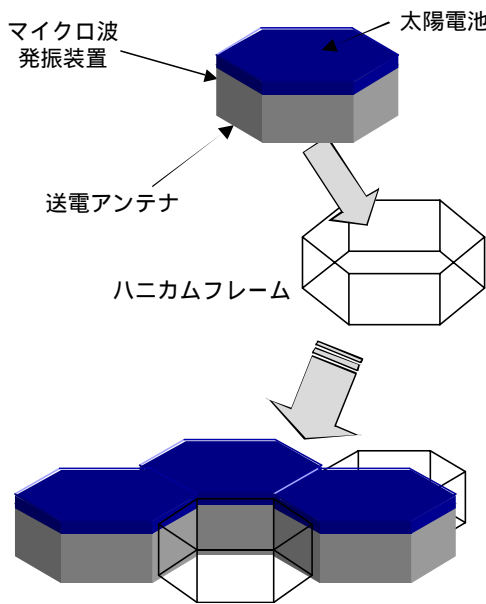


図 7 発電・送電一体化モジュール概念図

(4) 輸送システム

地上から LEO 上の組立軌道までの輸送システムについて、発電コストの観点より要求条件を検討した。その結果、輸送システムに対し、現在の打上げ費の 1/10 以下、航空機のような短いターンアラウンドタイムを実現することが求められた。

又、LEO 上の組立軌道から運用軌道である GEO までの軌道間輸送システムとして電気推進システムについて、軌道変換に必要とする速度増分、所要日数等について検討した。

(5) 運用軌道

SSPS は実用的には静止軌道が最適であるが、約 36,000km という遠方になり、初期段階の小規模の SSPS には必ずしもふさわしくない。低い目の高度の赤道軌道も考えられるが、日本への電力伝送には向かない。そこでモルニア軌道の利用について検討を行った。

(6) コスト、及び運用評価

コスト評価として建設コストと発電単価の関係、稼働率と発電単価の関係について検討を行った。

又、運用評価としては既存電力システムへの影響について検討を行った。

3.2.3. 技術実証の検討

宇宙環境から地上にエネルギー電送を行うための技術試験衛星及び受電システムの概念検討を行った。

本コンセプトは ETS-VII の概念をベースに宇宙セグメントを再使用型バス機器モジュール(マザー衛星)と再使用型ミッション機器モジュール(キッズ衛星)に再定義したものである。衛星間はレーザー又はマイクロ波による無線エネルギー伝送システム及び通信システムにより非接触結合されるものである。

キッズ衛星は長い太陽電池パネルを必要としないことから、加速度条件を $10^{-6}G$ 以下に改善させることが可能であり、ミッションとしては実験機器を自由に置き換えられる高精度宇宙環境利用実験、あるいは太陽電池パネルを必要としない利点を活かし、キッズ衛星を大気すれすれまで降下させ、災害などを高分解能でタイムリーに観測する高精度地球観測ミッションなどに最適である。更に実験頻度の多い軌道上実証実験のテストベッドとしても応用が可能である。

3.3. 2000 年度

2000 年度は宇宙太陽発電システムのシステム概念の検討を行うとともに、宇宙太陽発電システムの構成要素の試作試験を行った。

3.3.1. システム概念検討

(1) 発電技術

SSPS における大電力発電に関して、主要な技術項目の現状レベルを調査し、将来における可能性と特に太陽発電衛星実現のために実証が必要な技術要素に対する検討を行った。調査検討を行った技術項目は、SSPS 用太陽電池、宇宙機における高電圧発電・高電圧バス、太陽電池パドルの軽量化に関してである。

(2) 電力マネジメント技術

SSPS における電力マネジメントシステムに関して今後取り組むべき課題を明らかにするため、現在の宇宙機における大電力・高電圧システムを調査するとともに、太陽発電衛星における大電力送電システムの検討を行った。

(3) ロボット組立・保全・サービス技術

組立起動における組立支援システムとして、組立プラットフォーム上で専用機械+ロボット支援による構

成を検討した。運用は自動操作を中心とし、部分的なユニットを組み立てることを想定し検討を行った。

また、静止軌道における組立・保全・サービス支援システムとしては、複数の移動型作業ロボットによる構成を検討した。この運用は自律的、ロボット間協調操作が中心で、異常事に地上操作を介在させることを想定して検討を行った。

(4) マイクロ波送受電技術

衛星搭載を考慮し、電子管と半導体マイクロ波発振アンプの効率や重量の比較検討、アンテナの重量の検討を行った。

(5) 商用電力接続技術

商用電力網に SSPS を接続する際の問題点を中心に検討を行った。その結果、1GW クラスのレクテナは直接 50 または 22 万ボルトの送電網に接続しても問題はなく、送電に関する要素技術は成熟したものであることが判明した。

(6) 経済分析・市場分析

2020 年の日本の電力市場における SSPS のターゲット発電コストを 8 円/kWh と試算するとともに、ターゲットコストからプロジェクトの採算性について分析を行った。さらに、売電による収益以外に SSPS の社会的意義についても定性的に分析を行った。

(7) システム化技術

システム化技術として軌道上技術実証を中心に検討を行った。また、技術開発シナリオについても検討を行った(図 8 参照)。

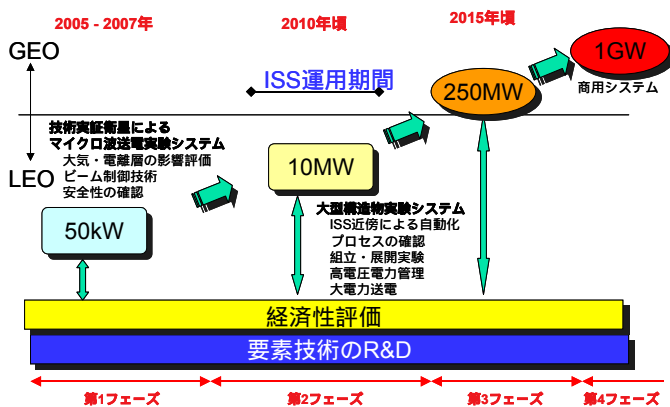


図 8 技術開発シナリオ

3.3.2. 要素試作試験

(1) 5.8GHz 送受信システム試作試験

5.8GHz のマグネトロンを用いた 500W 程度の送信機、

及び受信機を試作し、5.8GHz 送受信システムの各構成要素の特性データを測定した。

(2) 発電・送電一体化モジュールの試作試験

太陽電池、マイクロ波発振回路、及び送信アンテナを一体化した発電・送電モジュールを試作し、マイクロ波ビームのステアリング制御、及び送信アンテナを多数個のアレイにした際の問題点について検討した。詳細については「4.SPRITZ」に示す。

(3) 太陽光直接励起固体レーザー発振の可能性とそのシミュレーション

太陽光の固体レーザー媒体でのドーパントの吸収特性、形状効果、励起-発振-エネルギー変換効率に関するシミュレーションを行った。この結果太陽光からレーザーへの変換効率として 30%以上が得られることが示された。またこの結果に基づき、宇宙太陽発電における太陽光直接励起固体レーザー実用化の可能性について検討した。

3.4. 2001 年度

2001 年度は宇宙太陽発電システムのシステムコンセプトを明確にするために、技術課題、実証シナリオ、安全性、経済性等について検討を行った。検討の前提としたシステム概念図を図 9 に示す。

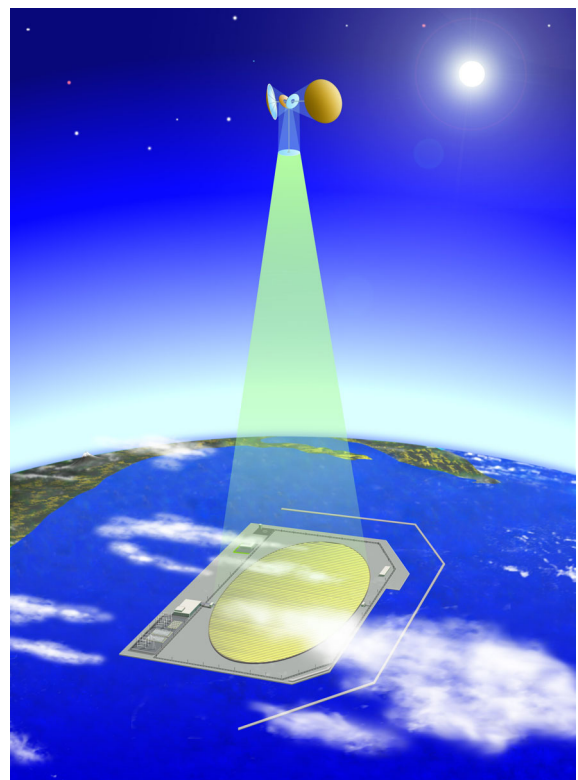


図 9 SSPS システム概念図(マイクロ波送電)

3.4.1. 10MW 級宇宙太陽発電システム概念検討

赤道周回軌道で構築する 10MW 級宇宙太陽発電システムの概念検討を行った。その結果、課題として以下の点が挙げられた。

- ・ 構造関連：集光用ミラーの構造および材料の選択
- ・ 発電関連：高効率太陽電池セルを集光太陽光で利用した場合の熱特性
- ・ 送電関連：光電変換部のサイジング、送電素子の冷却
- ・ レーザー送電関連：レーザー送電を行う場合の集光倍率、送電部の熱設計
- ・ 熱関連：光電変換部（太陽電池セル、送電素子）の冷却方法、二次ミラーの熱設計
- ・ 組み立て方式
- ・ 姿勢・軌道制御

3.4.2. システム化総合研究

(1) 技術課題

SSPS における技術課題としては、まず、太陽電池パドルの軽量化があげられる。また、発生した大電力をどのように管理し、配電するかは宇宙での高電圧の問題であり、軽量化とあわせて放電対策が重要となる。

マイクロ波の送信に関しても効率とともに重量の軽減が重要な課題である。また、発送電を一体化したモジュールとする場合、廃熱の問題が重要である。この問題は配電系とあわせてトレードオフすべき問題であることが判明した。

(2) 実証シナリオ

4 つのフェーズからなる実証シナリオを基本にフェーズ 2 の 10MW 級の実証シナリオの細部を検討した。従来 ISS 近傍でこの実証システムを構築することを想定していたが、この場合軌道傾斜角が大きいため、発電システムとしての実証にはあまり適しないことが判明した。その結果、ISS 近傍ではロボットによる全自動組み立てに関する要素試験を行い、発電システムとしての実証は赤道周回軌道で行うというシナリオを想定した。

(3) 安全性

マイクロ波とレーザーの安全性について調査した。調査した範囲ではマイクロ波は防護指針を守ることが安全であることが確認できた。また、レーザーに関しては 1GW クラスのレーザー光に対して 200m 程度離れることで散乱光による影響は安全基準を満たすことが計算により確かめられた。

(4) 経済性

SSPS のクリーン開発メカニズムとしての可能性およびコストモデルの見直しの検討を行った。また、産業連関分析により SSPS 構築に係る経済波及効果の分析を行った。その結果、1GW 級 SSPS1 基開発することによる経済効果は、2.7 兆円の投資に対して、産業波及効果が 7.1 兆円、雇用者数は延べ 37.7 万人と見積もることができることが分かった。

3.5. 2002 年度

2002 年度の計画としては、図 8 に示した第 2 フェーズの 10MW 級軌道上実証システムに関し、以下の調査研究を行う予定である。

(1) 10MW 級軌道上実証システム概念検討

昨年度実施した宇宙太陽発電システムの研究結果を基に、10MW 級軌道上実証システムについて、実証ミッションの内容、システム概念（システム規模、システム構成、基本コンフィグレーション等）、実験シナリオ等について検討を行う。

(2) 技術課題の抽出

上記検討結果を基に、10MW 級軌道上実証システムの実現に必要な既存 / 新規要素技術を抽出し、主要な技術課題等の検討を行う。

(3) 研究開発ロードマップの作成

上記検討結果を基に、10MW 級軌道上実証システム研究開発ロードマップを作成し、技術実証計画を策定する。

4. SPRITZ

太陽電池、マイクロ波発振回路、及びアンテナを一体化した発電・送電一体化モジュール SPRITZ(Solar Power Radio Integrated Transmitter '00)を試作し、マイクロ波ビームのステアリング制御、及び送信アンテナのアレイ化に関する問題点等を検討した。試作した SPRITZ の外観を図 10 に、主要諸元を表 3 に示す。また、評価の一環として、ビーム横方向の電磁密度の分布について設計値と計測値との比較を行った。比較は、ビームの方向が直下の場合(0,0)、左 20cm の場合(-20,0)、左 40 センチの場合(-40,0)、左 60cm の場合(-60,0)の 4 通り行った。その結果を図 11 に示す。

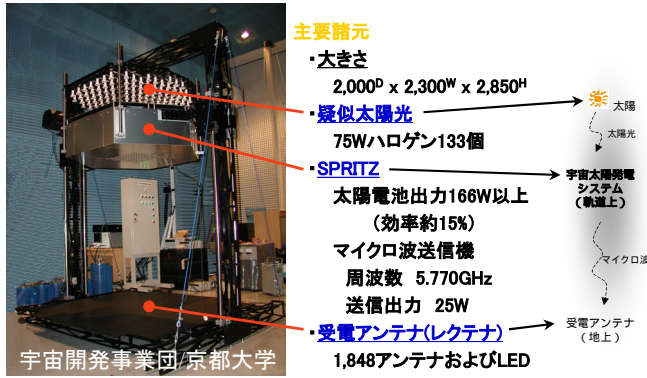


図 10 SPRITZ の概観

表 3 SPRITZ の主要諸元

項目	仕様	備考
周波数	5.770GHz	固定。
周波数安定度	± 5 ppm 以下	
送信出力	25W(44dBm)以上	フィーダの入口部、目標値
出力許容偏差	+20、-50%以下	
信号形態	CW	無変調
スプリアス強度	-75dBc 以下	
アンテナ方式	MSA アレイ	
アンテナゲイン	10dBi 以上	フィーダからアンテナまで含む。位相制御器の設定に依存。
エレメント数	10×10	アンテナ間隔 d=3/4λ (d=39mm) エレメントサイズ 15mm 角 (参考値)
ビーム幅	10 度以下	位相制御器の設定に依存。
偏波	右旋円偏波	
軸比	3dB 以下	正面方向においての値
消費電力	150W 以下	目標値
効率	規定せず	
外部接続		
寸法	厚み (40~50cm)	形状は6角形とする
重量	規定せず	
環境条件	規定せず	

5. 将来展望

宇宙太陽発電システム検討委員会の活動概要について 1998 年度から今年度の計画まで示した。

今後は、策定した開発シナリオ、技術開発ロードマップに従い試作試験を含めた研究開発を進めるとともに、計画の逐次見直しを実施することが重要である。

米国では要素試作を官民あげて取り組んでいる。我が国としても後れを取らないよう一刻も早く宇宙実証を行うべく研究開発を進める必要がある。

謝辞

本資料の準備に三菱総合研究所の長山博幸氏に感謝します。また、内容については委員会委員各位によるもので関係各位に謝意を表します。

文 献

- [1] 平成 10 年度宇宙開発事業団委託業務成果報告書「宇宙太陽発電システムの調査・研究」、株式会社三菱総合研究所
- [2] 平成 11 年度宇宙開発事業団委託業務成果報告書「宇宙太陽発電システムの研究」、株式会社三菱総合研究所
- [3] 平成 12 年度宇宙開発事業団委託業務成果報告書「宇宙太陽発電システムの研究」、株式会社三菱総合研究所
- [4] 平成 13 年度宇宙開発事業団委託業務成果報告書「宇宙太陽発電システムの研究」、株式会社三菱総合研究所

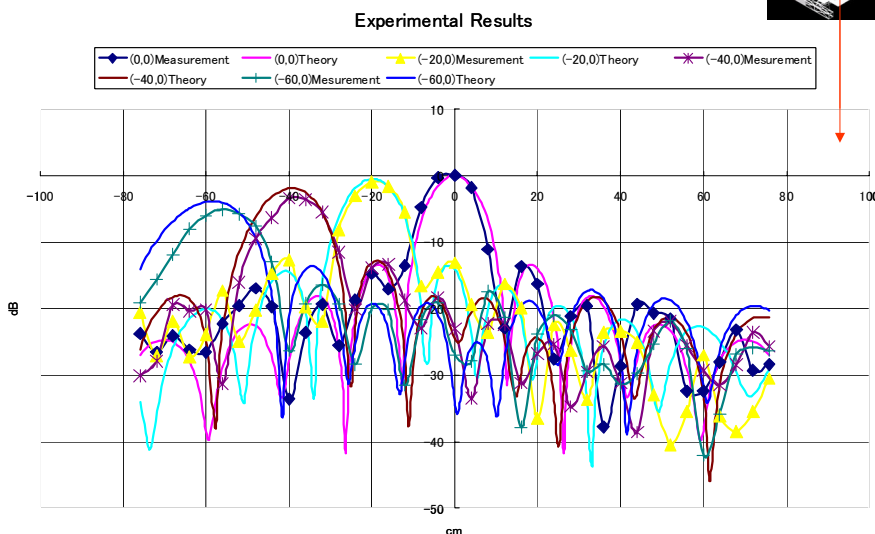
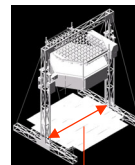


図 11 ビームの設計値と計測値の比較