

# 宇宙太陽発電所 SSPS による生存圏の持続的な発展に向けて

篠原 真毅

## 1. はじめに

人間は宇宙へと進出する必要があるのであろうか。宇宙は確かにロマンがあり、人類最後のフロンティアと言われている。ブラックホールなどの宇宙の神秘には胸躍り、通信衛星や気象衛星はいまやなくてはならないものである。しかしその一方、最新のロケットの打ち上げ費用は 1 機 80 億円(日本の H-IIA ロケット)、人工衛星は 1 機 400-800 億円の開発費用がかかるといわれている。特に日本では最近の平成不況と続いたロケットの失敗のせいもあり、宇宙開発の是非を問われるようになっている。たった数十人の冒険家や技術者を宇宙へ送り、日常の少しの便利さの向上のために何百億円、何千億円をかける意味があるのであろうか。

宇宙開発には重大な意味はあるのである。近視的にはこのような多大なコストの割りにリターンが少なく見える宇宙開発や宇宙科学は意味がないように思える。しかし、今地球は真綿で首を絞められるがごとく少しずつおかしくなっている。しかもその首を絞めているのは私達人類以外の何者でもないのである。地球上に人類が今の勢いで増え続ける限り、地球は破滅へ向かい続ける。宇宙空間を利用することは人類を地球の重力から解放し、生存のためにその活動を広げることを意味するのである。私達はこれを「生存圏の持続的発展」として捉えている。すぐにリターンが返らない宇宙開発は、近未来の人類や地球のために重要な意味を持っているのである。

地球環境問題の根本は人間の欲であろう。人間の欲望はおそらく抑えることができない。性善説を信じればいつか欲を減らすことが可能となり、人類がその生存圏を宇宙空間まで広げずとも地球と人類の共存は可能なようにも思える。しかし、それがいかに難しいことであるかはこれまで人類数千年の戦争の歴史を見れば明らかであろう。「地球に優しい」という免罪符で自らを誤魔化すことなく自分の欲を認めること、そして欲との共存を図りながら自滅しない方法を考えることが最良である。つまり、拡大する欲望、特にこれからは伸び行く発展途上国の人間の欲望、を満たしながら地球環境が破滅しないようにしなければならないのである。今後も人間はエネルギーを使い続け、快樂を追い求めると考えたほうがよい。

伸び行くエネルギー需要を石油に代わる天然ガスや石炭といった化石燃料に頼ることは、地球温暖化問題を悪化させることになる。大気中の温室効果ガスの増大が地球を温暖化し自然の生態系等に悪影響を及ぼすおそれがあることを背景に、大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることを目的として、1992 年の地球環境サミットで署名のため開放された気候変動枠組条約は 1994 年に発効され、2001 年 3 月 22 日現在、我が国を含む 186 力国が締結している。この条約の目的を達成するため 1997 年 12 月に京都で開催された気候変動枠組条約第 3 回締約国会議 (COP3) では、先進国及び市場経済移行国の温室効果ガス排出の削減目的を定めた京都議定書が採択された。この議定書では先進国等に対し、温室効果ガスを 1990 年比で、2008 年から 5 年間で一定数値 (日本 6%、米 7%、EU8%) を削減することが義務づけられている。この京都議定書は最大の CO<sub>2</sub> 排出国であるアメリカが脱退を表明するなど、まだ予断を許さない状況にある。仮に次の大統領選挙で民主党が勝利したとしてもアメリカの脱退の方針は変わらないと言われている。京都議定書が定めているのは即効性の高い“early action”であるが、中長期的に環境問題を解決する手法“delay action”に関する取り決めが欠如している

といわれている。アメリカは別に環境問題を考えていないわけではなく、この”delay action”に重きを置いた政策を取っているために京都議定書から脱退したと考えられている。京都議定書に沿うCO<sub>2</sub>削減と、世界の経済成長を両立させる為にはクリーンな新エネルギーの開発が必須であり、これから述べる宇宙太陽発電所SSPSはまさにその”delay action”であり、その研究は非常に重要となっている。

## 2. 宇宙太陽発電所 SSPS

SSPS(Space Solar Power System)は宇宙空間で超大型の太陽電池パネルを広げ、太陽光発電によって得られる直流電力をマイクロ波に変換して送電アンテナから地球や宇宙都市の受電所に設置されるレクテナと呼ばれる受電アンテナへ伝送し、再び直流電力に戻す方式の発電所である。SSPSは宇宙空間に浮かぶ発電所から地上に電力を送らなければならないため、無線による電力伝送技術が重要となってくる。SSPSは上空36,000 kmの静止衛星軌道にあり、常に地上から見えている。受電側ではマイクロ波をレクテナと呼ばれる整流アンテナで再び電気エネルギーに再変換して利用する。マイクロ波はISMバンド(産業・科学・医療用バンド)である2.45GHzや5.8GHzの周波数を用いることが検討されている。SSPSは宇宙空間で太陽光発電を行い、地上へマイクロ波送電するシステムであるため、他の新技術のように越えなければいけない技術ハードルはほとんどない。唯一発電所としてのビジネスモデルを考えた際に必要な技術の研磨及び量産性が求められている。

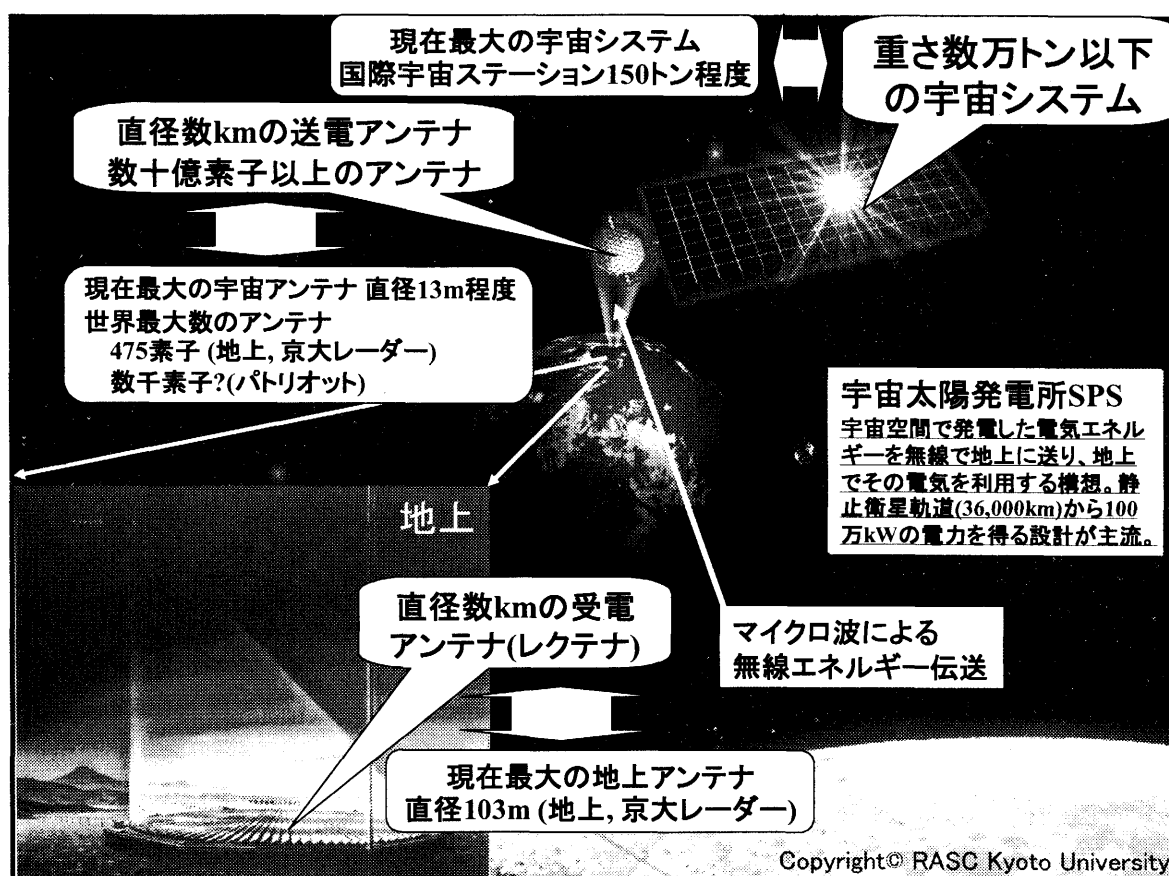


図1 宇宙太陽発電所 SSPS の概念図と特徴

SSPSは、地球上のエネルギー不足を補い、放射性廃棄物問題を抱える原子力発電所の不足を補い、環境破壊や地球温暖化をもたらす火力発電所に代わる大型基幹電力供給源となり得るものとして1968年に米国のピーター・グレーザーによって提案された<sup>1)</sup>。今日深刻になっている温暖化の元凶である

炭酸ガス排出抑制の切り札としての価値は当時認識されていなかったが、SSPSは温暖化ガス抑制に大きく貢献する発電方式でもある。例えば石油火力発電のCO<sub>2</sub>排出量は建設時に2g-CO<sub>2</sub>/kWh、運用時に844g-CO<sub>2</sub>/kWhであり、原子力発電のCO<sub>2</sub>排出量は建設時に3g-CO<sub>2</sub>/kWh、運用時に19g-CO<sub>2</sub>/kWhであるのに対し、SPSのCO<sub>2</sub>排出量は建設時に20g-CO<sub>2</sub>/kWhとなるが、運用時には0となるという試算がなされている<sup>2)</sup>。建設時のCO<sub>2</sub>排出量は既存発電電力による太陽電池生産等によるものであるため、SPSで発電した電力で太陽電池を生産し、新たなSSPSを生産する場合は11g-CO<sub>2</sub>/kWhとなる。

また、エネルギー源としてSSPSを考えた場合も、有用である。人類活動による地球生態・経済系への影響の長期的な動態を表すモデルとしてMITのForresterやMeadowsたちにより約25年前に開発されたワールドモデルがある。「ローマクラブからの警告」として有名なモデルであるが<sup>3)</sup>、このモデルでは、特別な制限無しに現在までの人口、経済の成長が続けば、主として資源の枯渇により、21世紀前半には地球生態・経済系は成長の限界を迎え、その後は衰退しかないことが示されている。このモデルに対し、エネルギーコスト解析に基づいたSSPSを含むワールド・ダイナミクス・シミュレーションモデルを作成し、SPSが地球生態・経済系に及ぼす影響が評価されている<sup>4)</sup>。論文によると、SSPSへのエネルギー投資が少ない場合は、SSPSの成長が地球上でのエネルギー消費の成長を支えきれないので、成長の限界を回避できないが、SSPSへの投資が大きい場合は、SSPSの成長が地球上でのエネルギー消費の増加を充分支えることが可能となり、地球上の人口、資本の継続的な成長を可能となるとされている。SPSのエネルギー投資が大きい場合、SSPS自体から地球への供給されるエネルギーによってSPSの成長が増進されるという“自己増殖状態”となり、一度この状態が達成されると、地球上での成長の限界は完全に回避できることが、シミュレーション結果によって示されている。

地上太陽光発電は、地上においては当然可能であるが、太陽光の大気及び気象状態による減衰、日変化、季節変化等に基づく供給の不安定性等の問題があり、現在の火力や原子力発電に代わる代替基幹電力には成り難い。これに対し、宇宙空間で静止衛星軌道上での発電は、大量の資材の宇宙への運搬、宇宙における大規模建設作業と保守運用、環境問題対策、通信網への電磁障害対策等の技術開発を必要とするにも関わらず、春分と秋分前後の短期間の地方時真夜中の短期間と、月等による日陰、及び地球公転軌道に起因する極僅かの太陽輻射強度の年変化以外、安定した太陽エネルギーが期待されるため、基幹電力として有望である。太陽電池に入射する太陽光エネルギー密度は、大気反射のため、地上の太陽光エネルギー密度に比べ宇宙でのそれは1.37kW/m<sup>2</sup>と、1.4倍強く、日照時間は宇宙では地上の4~5倍あるため、発電量を地上とSPSで比較すると5.5~7倍の差がある。

これまで、日米を中心に様々な技術検討が行われてきた。多数の人数が参加した詳細なSSPSの概念検討としては以下のようなプロジェクトが過去に存在する。

- ・ **1977-1980年 NASA/DOE SPS 技術的適合性検討とリファレンスシステムの設計 (アメリカ)<sup>5)</sup>**

その後のSSPSの検討の方向を定めた最も詳細なモデルの概念設計プロジェクト。1980年度予算には2500万ドルの調査費が認められている。リファレンスシステムは重量約5万トン、大きさ約10km×5kmの太陽電池で発電するSSPSから2.45GHz、500万kWの電力を送電する。マイクロ波送電はクライストロンをベースに検討されている。送電アンテナ直径1km、受電アンテナ10km×13km、太陽電池と送電アンテナは分離され、宇宙空間で集配電を行うモデルである。SSPS 60基で全米の全発電量をまかなうという試算もなされていた。非常に巨大なモデルであり、発電所として売電を考えた場合に採算が合わないと言われて以後アメリカでは一旦SPS研究が中断している。

- ・ **1992-1994年 NEDO 宇宙発電システムに関する調査研究 (日本)<sup>6)</sup>**

1980年代に本研究所の研究グループを中心に日本で盛んに行われるようになったSSPS研究を受け、行われた日本版SSPSの調査研究プロジェクト。発電量は100万kWとやや小型で、日本がリードしている半導体技術を取り入れている点が特徴である。

### 1995-1997年 NASA SPS フレッシュ・ルック・プログラム (アメリカ)<sup>7)</sup>

1980-90年代の日本のSSPS研究活動を受け、リファレンスシステム以後停滞していたアメリカが再び再開したSSPS「見直し」プロジェクト。これまでに提案された数十にもわたる様々なSPSを再評価し、受電側の都市サイズや電力需要も考慮して経済的に成り立つ「サン・タワー」と呼ばれるユニット型SSPSを提案している。その後、議会在後押しする形でSSP Concept Definition Study (CDS)プログラム(1998年)、Space solar power Exploratory Research & Technology program(SERT)プログラム(1999-2000年)<sup>8)</sup>、SSP Concept and Technology Maturation (SCTM)プログラム(2001-2002年)<sup>9)</sup>と検討が進んでいる。

### ・ 1998-現在 JAXA SSPS 検討委員会 (日本)<sup>10)</sup>

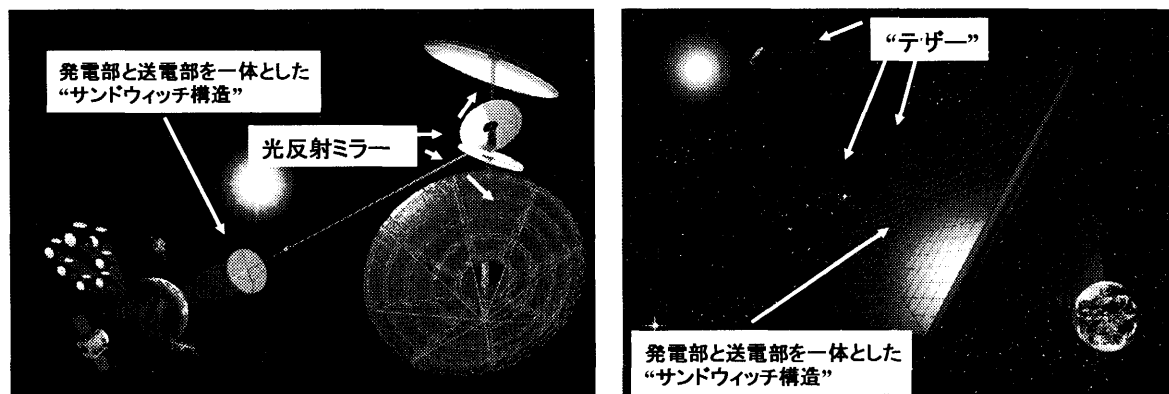
地球環境問題意識の高まり、宇宙産業の閉塞感、アメリカの動向等を受け、現在も行われているSSPS検討委員会。本研究所所長の松本紘教授が委員長となり、オール・ジャパンのメーカーを含む研究者で、発電—送電一体・ユニット型SSPS(図2(a))の設計と、SSPS実証試験衛星の概念設計を実施している。レーザーによる送電の検討も平行して行っている。2001年には発電—送電一体・ユニット型SSPSのマイクロ波送電基礎試作モデルSPRITZ(Space Power Radio Integrated Transmitter '00)を製作している<sup>11)</sup>。

### ・ 2000-2002, 2004- 経済産業省 SSPS 検討委員会 (日本)<sup>12)</sup>

現在行われているもう一つのSSPS検討委員会。JAXAが宇宙システムとして主にSPSを捉えていることに対し、エネルギーシステムとしてSSPSを捉え、発電—送電一体・ユニット型SSPSの設計(図2(b))と、SSPS実証試験衛星の概念設計を実施している。ユニット型SSPSに必須のマイクロ波送電基礎技術に関する試作を行った。

### ・ 2003-現在 ESA(European Space Agency) Advanced Concepts Team (ACT) (ヨーロッパ)<sup>13)</sup>

3段階のSSPS検討プログラム。2003年度(第1段階)にはSSPSのデザインではなく、地上太陽光発電とSSPSの比較検討を行っている。ESAは2004年7月には国際シンポジウムSPS'04も主催している。



(a) SSPS JAXA2001 モデル

(b) SSPS METI/USEF2002 モデル

図2 最新の日本版SSPS(周波数:5.8GHz,地上で1GWDC)

その他にも、日本の宇宙科学研究所で検討されている実験用中規模SSPS「SPS2000」<sup>14)</sup>等もあり、常に最新技術を取り入れながら様々なSSPSが検討され続けている。特に、SSPSの基盤技術であるマイクロ波送電は1960年代以降、様々な研究・実証実験が行われてきた<sup>15)</sup>。1960年代、70年代の研究の中心はアメリカのW. C. Brownであったが、1980年代以降は本研究所の研究グループが研究の中心

となり、世界初のマイクロ波送電ロケット実験 MINIX や無燃料飛行機へのマイクロ波送電実験 MILAX 等を実施してきた<sup>16)</sup>。本研究所では文部科学省の中核的研究機関（COE）プログラムの一環の支援を受け、SPS を目指した大型マイクロ波送受電実験装置 METLAB(Microwave Energy Transmission LABORatory)や SPSLAB(SPS LABORatory)を導入し、研究拠点として研究を推進している。近年は本研究所で開発した新方式のマイクロ波送電システムをベースとした SPORTS2.45, SPORTS5.8(Space Power Radio Transmission System)と呼ばれるマイクロ波送受電システムを導入し、マイクロ波送受電の基礎実験を進めている<sup>17)</sup>。本研究所の SSPS 研究グループは 2002 年度から文科省で導入された 21 世紀 COE プログラムにも選ばれ、SSPS の研究拠点化が進んでいる。

### 3. 研究所の研究 - マイクロ波送電を中心に -

電力輸送は有線に寄らずとも、無線でも行うことができる。基本的に光を含む電磁波は「エネルギー」であるため、無線でエネルギー伝送が行えることは、電磁波の発見とほぼ同時期から知られていた。無線によるエネルギー伝送の概念を始めて提唱し、実際に実験を行ったのは、20世紀初頭のニコラ・テスラである<sup>18)</sup>。Teslaは「電磁波のエネルギーは離れたところにある家の電球をともしることができる。」と述べ、実際に1899年に200フィートのマストの先に直径3フィートの球をつけた巨大なコイルを建造し、150kHz、300kWのエネルギー放射実験を行っている。しかし、電磁波は基本的に等方的に広がる性質を持っているため、Teslaの実験は不成功に終わり、その後の無線の歴史はエネルギーの輸送ではなく、「情報」の輸送となっていく。

無線によってエネルギーを伝送する為には、送電目標に電磁波エネルギーを集中させなければならない。集中させる為には電磁波の周波数を非常に高くする必要がある。第2次世界大戦以降、マイクロ波と呼ばれる1~10GHz程度の電磁波を発生させることができるようになって以降、無線電力伝送は再び注目され始め、研究が行われるようになった。SSPSの概念は1960年代のマイクロ波送電研究の進展によって初めて提唱されたものである。

マイクロ波送電技術のポイントは大きく3つに分類される。(1) マイクロ波発生技術、(2) 送電目標への電力集中のためのアンテナ技術、(3) マイクロ波から電力への変換技術である。ただ、異なっているのはマイクロ波送電では「効率」が重視される点である。マイクロ波送電における効率はこの(1)(2)(3)の効率の乗算で決定される。例えば(1)=80%、(2)=90%、(3)=80%とすれば $80\% \times 90\% \times 80\% = 57.6\%$ となり、マイクロ波送電における効率は通常50%程度である。普通の有線送電に比べると低い伝送効率であるが、マイクロ波送電は電気エネルギーの送電側と受電側が送電線でつながっていないという特徴があるため、

- (1) 送電側、受電側の移動の自由が飛躍的に大きくなる。送電点が1点とは限らない
- (2) 受電器を備えていればあらゆる送電器からの電気エネルギーを受けることができる

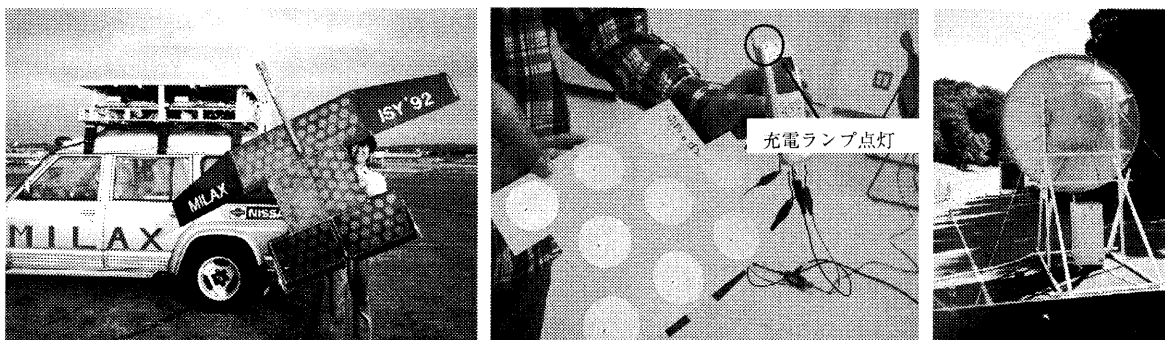


図 3 本研究所で実施されたマイクロ波応用技術 (a) 飛行体への送電 (1992) (b) 無線電力空間での携帯電話充電実験 (2004) (c) 地上 2 定点間送電実験 (1995-96)

- (3) 受電器は従来のバッテリーなどに比べて軽量にすることができる。また、基本的に電源は送電側の電源なので電気エネルギーの供給が途絶える可能性は少なく、バッテリー切れの心配が少ない
- (4) 空間をエネルギー伝送するため、有線送電のような負荷損による損失は小さく、マイクロ波を集中できれば数万kmでも高効率で送電可能である

といった多くの特徴を持ち、新しい電力輸送の形態として現在研究が行われている。

SSPS はマイクロ波送電の最大の応用例であるが、その他地上でもマイクロ波送電の応用は可能である。(1)や(3)の特徴を生かせば移動体、飛行機や電気自動車への送電が可能となる。燃料やバッテリーが不要となるこの技術は本研究所でも実証実験でその有用性を実証済(図 3(a))である。(2)の特徴を生かせば今話題のユビキタス(=いつでもどこでも)情報社会のための無線での電源として応用することもできる。本研究所ではこれを「無線電力空間」もしくは「ユビキタス電源」と呼び、現在研究を進めている(図 3(b))<sup>19)</sup>。(4)の特徴は SSPS で最大限に生かされるが、それ以外にも災害時や遠隔地、僻地へのマイクロ波送電にも応用可能である(図 3(c))<sup>20)</sup>。地上での送電ではおそらく直感よりも大きな送電システムが必要となるデメリットがあるが、(2)(3)の特徴とあわせ、柔軟性と即応性の高い電源供給が可能となるメリットが生まれる。

#### 4. おわりに

人間はすぐ目の前に締め切りが迫らないと実感は薄く何もしない生き物である。特に日本人は熱しやすく冷めやすい気質があるため、70年代のオイルショック、80年代の環境問題意識の高まりをもう忘れてしまったかのようなのである。しかし、地球の生存圏の危機は私達の子供の世代、孫の世代まで迫ってきており、その対応は私達の世代からはじめなければ到底間に合わない。幸い SSPS は既存技術を研磨することで実現可能な新しいクリーンな発電所であり、その核となるマイクロ波送電技術は本研究所を拠点として世界中で研究が行われている。マイクロ波送電の地上応用も今後の新しい産業を生む可能性もある。本研究所では生存圏の持続的発展のための一手法として SSPS 及びマイクロ波送電を選択し、今後も遠い目標へ向かって研究を行っていくが、大学だけでその目標を実現することは難しい。多くの市民の方との協力が必要であり、今後さらに有機的な産官学民の協力を目指したい。

#### 参考文献

- 1) Glaser, P. E.; "Power from the Sun ; Its Future", Science, 162, pp.857 - 886, 1968
- 2) 吉岡完治、管幹雄、野村浩二、朝倉啓一郎 ; “宇宙太陽発電衛星の CO<sub>2</sub> 負荷”, 学振未来 WG2-1, 1998
- 3) Meadows, D. H., D. L. Meadows, J. Randers, and W. W. Behrens III ; "The limits to growth - A report for THE CLUB OF ROME'S project on the predicament of mankind", Universe Books, New York, 1972
- 4) YAMAGIWA, Y. and M. Nagatomo, "An Evaluation Model of Solar Power Satellites Using World Dynamics Simulation", Space Power, vol.11, no.2, pp.121-131, 1992
- 5) DOE and NASA report ; "Satellite Power System ; Concept Development and Evaluation Program", Reference System Report, Oct. 1978) (Published Jan. 1979).
- 6) 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)、1992.3、1993.3、1994.3
- 7) Mankins, J. C. ; "A fresh look at the concept of space solar power", proceeding of SPS'97, S7041, (in Montreal), 1997
- 8) [http://procurement.nasa.gov/cgi-bin/EPS/sol.cgi?acqid=150#Amendment\\_01](http://procurement.nasa.gov/cgi-bin/EPS/sol.cgi?acqid=150#Amendment_01), "SPACE SOLAR POWER (SSP) EXPLORATORY RESEARCH AND TECHNOLOGY (SERT) PROGRAM, SOL NRA8-23"
- 9) <http://space-power.grc.nasa.gov/ppp/sctm/>
- 10) 株式会社三菱総合研究所, “宇宙航空研究開発機構委託業務「宇宙エネルギー利用システム総合研究」”, 2004.2

- 11) Mori, M., H. Matsumoto, N. Shinohara, and K. Hashimoto, "Solar Power Radio Integrated Transmitter (SPRITZ) Unit for SPS", Proc. of URSI2002, p.1441 (H Special P.4), 2002
- 12) 小林徹, "USEF における宇宙太陽発電システム(SSPS)検討状況", 第 4 回 SPS シンポジウム講演集, pp.127-130, 2001
- 13) Summerer, L., and F. Orgaro, "Solar Power from Space – Validation of Options for Europe", Proc. of SPS'04, p.17-26, 2004.7
- 14) SPS2000 タスクチーム ; "SPS2000 概念計画書", 宇宙科学研究所, 1993
- 15) Brown, W.C.; "The history of power transmission by radio waves", IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, MTT-32, No.9, pp.1230-1242, 1984
- 16) Matsumoto, H., "Research on Solar Power Station and Microwave Power Transmission in Japan : Review and Perspectives", IEEE Microwave Magazine, pp.36-45, December 2002
- 17) Shinohara, N., H. Matsumoto, and K. Hashimoto, "Phase-Controlled Magnetron Development for SPORTS : Space Power Radio Transmission System", The Radio Science Bulletin, No.310, pp.29-35, Sep. 2004
- 18) Tesla, N., "The transmission of electric energy without wires, The thirteenth Anniversary Number of the Electrical World and Engineer", March 5, 1904
- 19) 篠原真毅, 松本紘, 三谷友彦, 芝田裕紀, 安達龍彦, 岡田寛, 富田和宏, 篠田健司, "無線電力空間の基礎研究", 信学技報 SPS2003-18 (2004-03) pp.47-53, 2004
- 20) 下倉尚義, 賀谷信幸, 篠原真毅, 松本紘, "定点間マイクロ波送電実験", 電気学会部門誌(電力・エネルギーB分冊), Vol.116-B, No.6, pp.648-653, 1996