

宇宙からのクリーンエネルギーの獲得に向けて —宇宙太陽光発電研究の現状—

研究開発本部
佐々木 進

1. はじめに

現在私たちが使用しているエネルギーの 8 割以上は、石油、天然ガス、石炭などの化石燃料を燃やすことにより得られている。今後も引き続き化石燃料の大量消費を続けた場合には、エネルギー資源の枯渇と地球環境の悪化という人類社会の存続に係わる深刻な問題に直面する可能性が高い。人類社会を持続的に維持していくためには、化石燃料に代わる新しい CO₂ フリーのエネルギーシステムが必要である。太陽から地球近傍に供給されるエネルギーは、人類社会が使用する総エネルギーの 1 万倍以上である。宇宙空間には地上と異なり天候に左右されない太陽エネルギーとそれを大規模に獲得するための広大な場がある。宇宙太陽光発電は、宇宙空間でふんだんな太陽エネルギーを利用して発電しその電力を地上に無線で送電する構想であり、クリーンで大規模なエネルギーシステムとして大きな可能性を持っている。

2. 宇宙太陽光発電の構想と必要な技術

太陽光のエネルギー密度は地球近傍の宇宙空間で約 1.35kW/m² である。これは夜があり天候の影響を受ける地上での平均日射量の 5～10 倍に達する。宇宙太陽光発電システムは、衛星軌道上で太陽エネルギーを電力に変換し、その電気エネルギーをマイクロ波やレーザーなど無線で地上に送電する電力設備である。地上では、無線送電された電力を受電し、商用電力に変換して既存の電力網を通じ家庭や工場などの利用者へ配電する。図 1 に無線送電としてマイクロ波を用いた場合の軌道上設備と地上設備の基本的な構成を示す。このシステムは地上での太陽光発電と比較して、無線送受電の部分が付加されたシステムである。しかし、送受電の過程で失われる電力は 50% 以下とすることが技術的に可能である。このため平均日射量を考慮すると宇宙太陽光発電システムは地上の太陽光発電システムと比較

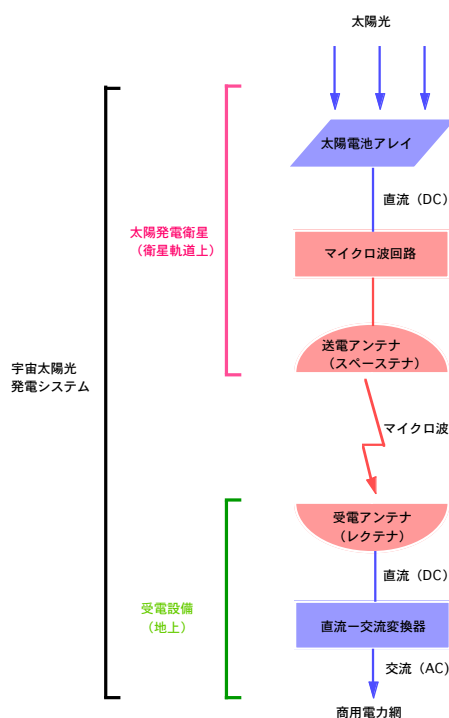


図 1 宇宙太陽光発電システムの原理。軌道上と地上のインフラで構成されるエネルギーシステム。

して、なお数倍以上エネルギー収集効率の良いシステムと言える。さらに重要な点は、天候や季節の影響を受けず安定したエネルギーを供給できること、宇宙空間は広大であることから実質的に無尽蔵の太陽エネルギーを取得することができることである。

宇宙太陽光発電の歴史は古く、1970 年代には米国で盛んに研究が行われた^[1]。米国での研究が一段落した 1980 年代以降は、我が国で宇宙太陽光発電システムの構想に注目した研究者たちにより観測ロケットによる無線送電技術の宇宙実験^[2]や、早期の実現をめざした実証システムの設計研究^[3]が行われた。1980 年代の終わり頃からは、地球環境問題が世界的に認識されるようになり、これを解決するための有力な選択肢として、宇宙太陽光発電システムを現実のエネルギーシステムとして見直そうという機運が高まってきた。1990

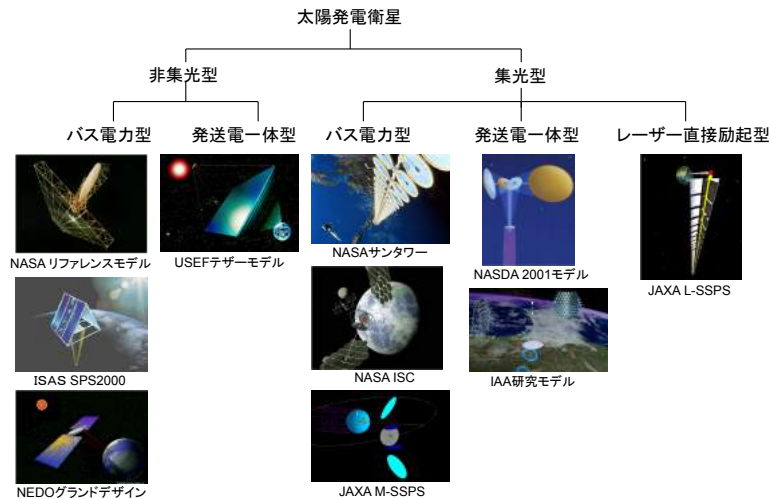


図2 これまで各国で設計研究が行われた各種の太陽発電衛星（宇宙太陽光発電システムの軌道上部分）

年以降、米国、日本、欧州で様々なタイプの宇宙太陽光発電システムが設計研究されてきた。図2にその代表例を示す。

現在の高コストの宇宙技術で太陽発電衛星を構築する場合は、その電力コストは地上の電力システムの電力コストの50倍以上となって経済的に成立しないため、現状のままでは宇宙太陽光発電システムは社会的に受け入れられることはない。しかし、宇宙への輸送コストを大幅に下げ、衛星本体の構築に低コストの民生品と民生技術を適用することにより、宇宙太陽光発電システムからの電力コストは地上の電力システムのコストと同レベルになる可能性がある。ふんだんなエネルギー資源、地球環境への優しさ、短いエネルギーペイバックタイム、低コスト化の可能性、技術的な実現可能性の高さ、の点から宇宙太陽光発電システムは人類の将来エネルギーシステムとして極めて有望であると言えよう。

宇宙太陽光発電システムの構築には、宇宙での太陽発電技術、電力管理技術、無線送電技術、大型構造物建造・姿勢制御・軌道維持技術、宇宙への大量輸送技術が必要である。

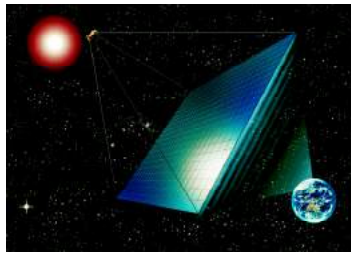
これらの個々の技術は小規模なレベルであれば既に実用化されており、原理的に新たな検証を必要とする技術はない。この点が未だ原理が検証されていない核融合発電と基本的に異なる点である。今後各技術の大規模システムへの応用と低コスト化が宇宙太陽光発電システム実現のための主要な技術課題である。表1に主要技術の現状の到達点と実用レベルの宇宙太陽光発電システムを実現するための技術目標を示す。

3. 宇宙太陽光発電の研究現状と将来展望

我が国ではこれまで様々なタイプの宇宙太陽光発電システムの設計研究が行われてきた。図3に比較的詳細な検討が行われた最近の3つの代表的なシステムの例を示す。これらは、JAXA、経産省、各大学の研究者により設計研究が行われてきたものである。Basic Model^[4]は発電電一体型パネルを地球指向させるモデルで、太陽指向方式と比較してエネルギー取得効率は低い構成が単純で技術的な実現性が高い。Advanced Model^[5]は編隊飛行するミラーを太陽指向させるモデルで技術的なバリ

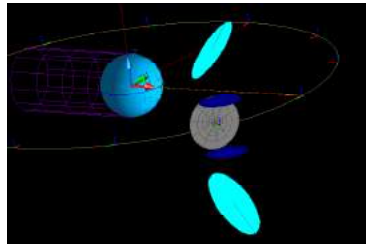
表1 宇宙太陽光発電システム実現のために必要な技術とその規模

主要な技術	現状の到達レベル	目標レベル	ファクター
宇宙太陽光発電	百 kW (国際宇宙ステーション)	GW	10,000
マイクロ波送電	数十 kW (地上)、1kW (宇宙)	GW	100,000
レーザー送電	百 W (地上)、0.1W (宇宙、通信)	GW	10,000,000
排熱	百 kW	数百 MW	1,000
大型構造物	100m クラス (国際宇宙ステーション)	数 km	10
宇宙輸送のコスト	50-100 万円/kg	1 万円/kg	1/50~1/100



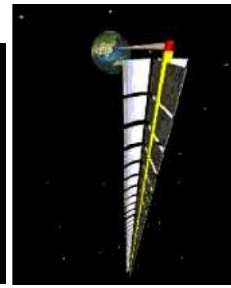
Basic Model

太陽非追尾マイクロ波型
 送電一体型パネルのモジュール構成
 テザーによる重力安定
 総重量2万トン
 単純、低い電力効率(64%)



Advanced Model

太陽追尾マイクロ波型
 ミラー(反射集光鏡)は編隊飛行
 送電分離型
 総重量:10,000トン(目標)
 複雑、高い電力取得効率



Laser Model

太陽光直接励起レーザー型
 高倍率反射集光鏡・送電・
 放熱部のモジュール構成
 総重量:5,000トン(目標)
 複雑、システムが小型

図3 我が国で設計研究の行われている代表的な太陽発電衛星モデル

ヤーは高いがエネルギー取得効率が高い。Laser Model^[5]は複雑でエネルギー取得効率が低いが生産部が小型となりうる。

JAXA では現在これらのモデルの成立性に係る基本的な技術について、大学の研究者や無人宇宙実験システム研究開発機構等と連携して、地上での実証的なアプローチで研究を進めている。それらは、

- 1)無線送電技術:狙ったターゲット(受電部)にマイクロ波あるいはレーザー電力ビームを制御して集中できるか、
 - 2)太陽光直接励起レーザー技術:太陽光から直接レーザーを発生させる先端技術についての程度までの高効率化が可能か、
 - 3)どのような技術を適用すれば数百m~km級の大型構造(厚みのあるパネル及び軽量反射ミラー)を実現できるか、
- である。

マイクロ波送電については、約3kWの電力を100m離れた受電ターゲットに0.5度の制御精度で送電を行うこと(図4)、レーザー送電については約1kWの電力を500m離れた受電ターゲットに10マイクロラジアン程度の制御精度で送電を行うこと(図5)、太陽光直接励起レーザーについては20%以上の効率で発振させること、大型構造については100m級のパネル及び反射ミラーの展開構築を可能とする技術の地上での部分実証(反射ミラーについては光学性能実証を含む)を目指して研究を進めている。

これらの地上実証実験を本中期(平成24年度)までに完了し、次期中期では小規模な軌道上実証実験を行うことが当面の目標である。初期の軌道実証のテーマとしては、現在

技術的研究が先行しているマイクロ波送電をその候補の一つとして提案している。小型衛星を用いた場合の実証実験の検討例を図6に示す。本実験により、マイクロ波ビームの長距離(数百km)での制御実証、電離層通過実証が行われる。

小型の宇宙実証から先の開発研究についてはまだ研究者レベルの提案であるが、図7に示すようなロードマップを描いている。小型の実証実験が終了後、地上での研究結果も合わせて、無線送電の方式としてマイクロ波を採用するかレーザーを採用するかの判断を行



図4 地上のマイクロ波送電実験の構想。約3kWのマイクロ波ビームを100m先の受電パネルに送電する。



図5 地上のレーザー送電実験。約1kWのレーザービームを500m先の受電パネルに送電する。

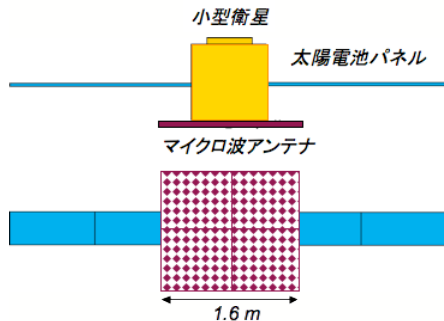


図 6 小型衛星を利用したマイクロ波送電実験の構想。

う。その後選択された方式で 100kW 級の本格的な軌道上実証を行う。これにより宇宙太陽光発電システムの電力システムとしての end/end の実証が行われシステムとしての評価が定まる。宇宙太陽光発電システムが実用的なものだという技術的・社会的評価が固まれば、その後 2020 年代に MW 級から数百 MW 級のプラント実証を行い、2030 年代の実用化が可能となる。

4. おわりに

エネルギー・環境問題などの地球規模の問題は、地球という閉鎖系の中での解決は本質的に困難であり、開かれた宇宙空間にその解決の道を探るべきである。宇宙空間には広大

な場とふんだんな太陽エネルギーが存在する。地球近傍の宇宙空間はフロンティアの場からエネルギー取得の場とするパラダイムシフトが必要である。現段階では宇宙太陽光発電システムが人類にとっての最良のエネルギーシステムとまではいえないが、将来エネルギーシステムとして極めて有力な選択肢であることは間違いない。宇宙太陽光発電システムが真に人類社会の救世主になりうることを検証する為、早い段階で本格的な軌道上実証実験に着手することが望まれる。

参考文献

- [1] DOE/NASA: Program Assessment Report Statement of Findings, DOE/ER-0085, 1980.
- [2] R.Akiba, K.Miura, M.Hinada, H.Matsumoto and N.Kaya, ISAS Report No.652, 1993.
- [3] M.Nagatomo and K.Itoh: An Evolutionary Satellite Power System for International Demonstration in Developing Nations, Space Power, Vol.12, 1993, pp.23-36.
- [4] S.Sasaki, K.Tanaka, S.Kawasaki, N.Shinohara, K.Higuchi, N.Okuizumi, K.Senda, K.Ishimura and the USEF SSPS Study Team, Conceptual Study of SSPS Demonstration Experiment, Radio Science Bulletin, No.310, 2004., pp.9-14.
- [5] M.Mori, H.Kagawa and Y.Saito, Summary of Studies on Space Solar Power Systems of Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 56th IAF Congress, Oct.2005.

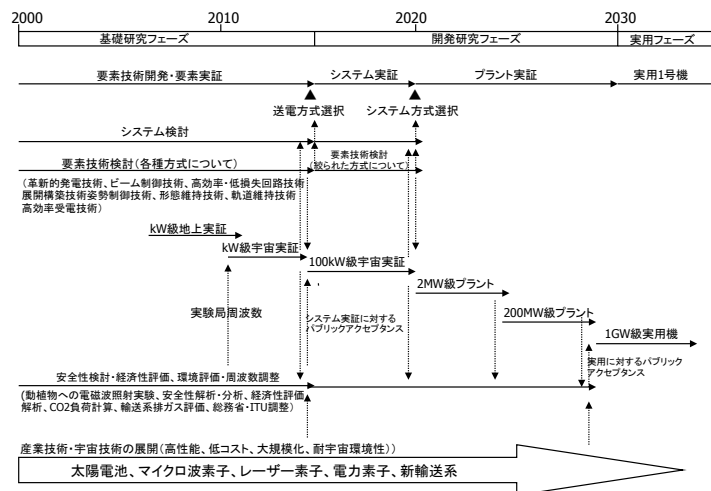


図 7 宇宙太陽光発電システム実用に至る研究開発のロードマップ