



日本が最先端 究極の再エネ？！

宇宙太陽光発電の実用化に向け、2022年度から本格実証はじまる

本 橋 恵 一

宇宙太陽光発電は、静止軌道上に設置し、天候の影響を受けることなく、昼夜とは無関係に24時間365日安定した発電を行なう、再生可能エネルギー発電設備である。1968年には概念が論文として発表され、欧米では断続的に、日本でも継続して研究がすすめられてきた。人工衛星としての課題は、大規模な構造物を宇宙空間で建設し、静止軌道上に設置することであり、発送電の技術としてはマイクロ波を活用した無線送電だ。このうち、後者について、積極的な研究がすすめられている。概念設計の状況とマイクロ波送電について、時系列的に紹介する。

キーワード：宇宙太陽光発電、マイクロ波送電

1. はじめに

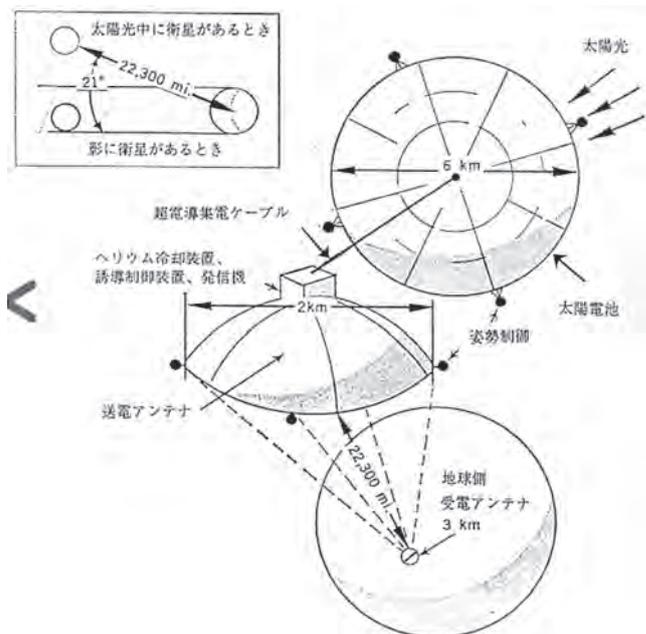
再エネといえば変動するエネルギーであり、安定した利用は難しいとされている。だが、そもそも太陽安定してエネルギーを放射している。宇宙で太陽光発電をおこない、電気を地上の送ることができれば、24時間安定したエネルギーとして利用可能となる。壮大なプロジェクトとなる「宇宙太陽光発電システム(SSPS)」だが、日本では継続的な研究が進められている。また、中国でも最近になって実験設備がつけられている。

鍵となる技術は、マイクロ波送電である。電気を電磁波の一種であるマイクロ波（波長で0.1mmから10cm、周波数では0.1GHzから100GHzくらいの電波で、FM放送やテレビ放送、電子レンジなどに利用されている）に変換して送るというものだが、長距離での正確な送電や損失の削減など、課題は少なくない。とはいえ、受電側の設備を複数の拠点に設置することができれば、ディスパッチ（必要に応じた給電）が可能な電源として活用可能という点でも期待されている。

2. 宇宙太陽光発電の概念の登場

宇宙太陽光発電のアイデアは、1968年まで遡ることができる。Peter E. Glaserが基本的なアイデアを論文として発表したということだ。“Science”に発表した論文では、地上3万6,000kmの静止軌道上に衛

星を打ち上げ、直径6kmの太陽電池で発電し、直径2kmのパラボラアンテナで送電、地上では直径3kmのアンテナで受電するという（図—1）。当時はまだ米国や旧ソビエト連邦が初めて人工衛星を打ち上げてから、わずか10年後のことだ。すでに人工衛星には太陽電池が搭載されていたとはいえ、アイデアの段階であったといえるのではないだろうか。また、それ以前には、SF作家のIsaac Asimovが1941年に発表した短篇『われ思う、ゆえに…』に登場しているという。なお、この作品は短編集『われはロボット』で読むこ



図—1 Glaserによる概念図のJAXAによる翻訳
出典：太陽光宇宙発電学会ホームページ

とができる。

その後、70年代の石油危機をきっかけとして、あらためて米国などで研究が進められるようになる。具体的な開発が優先されたのは、マイクロ波送電の技術の確立だった。そもそも、送電できなければ、宇宙に太陽光発電設備を打ち上げても、効果的な実証試験を行うことができない。

マイクロ波送電の研究そのものは、宇宙太陽光発電に先立つ形で行われていた。1904年には発明家の Nikola Tesla が米国ニューヨーク州で実験を行なった。残念ながらこの実験は失敗に終わった。

1975年には米国で Richard M. Dickinson が 450 kW の送信機を用いて 1.54 km 先に送電している。このときは、30 kW 以上の電力を受電できたということだ。

1978年には米国エネルギー省 (DOE) と NASA が Glaser のアイデアに対し、概念設計と評価を行ない、リファレンスシステムを作っている。これは、10.4 km × 5.2 km の太陽電池パネルで発電し、2.45 GHz で 6.72 GW のマイクロ波を放射する。受電部は直径 10 km におよび、出力は 5 GW となる。これは原子力発電 5 基分に相当する。

国際宇宙ステーション (ISS) が幅約 100 m であることを考えると、宇宙太陽光発電がいかに巨大な宇宙構造物かわかるだろう。また、ISS の軌道は地上約 400 km 上空となっており、距離の点でも、大きな差がある。

その後、米国での SSPS の研究は下火になるが、日本では継続的な研究が続けられる。研究が下火となった背景には、石油危機から一転して、原油安の時代になったということがあると考えられる。

3. 日本における SSPS の概念研究

日本では、SSPS の研究は当初は宇宙科学研究所 (ISAS) が行っていた。ISAS は 2003 年に他の機関と統合され、現在は宇宙航空研究開発機構 (JAXA) となり、SSPS の研究が続けられている。

ISAS は 90 年代には、米国で作られたリファレンスシステムをもとに、技術的な可能性を示すため、設計要求などを分析し、仮想に基づく概念設計を行っている。実際には打ち上げないという前提で、1万kW = 10 MW の太陽光宇宙発電所の打ち上げの概念上の計画が作成されたということだ。

そもそも、リファレンスシステムにおける 5 GW の宇宙太陽光発電所は当時としては現実に打ち上げることは技術的にも予算的にも不可能だ (現在もだが)。

その上で、技術的に可能な範囲として、宇宙ステーションの技術を応用することで建設可能な 10 MW の宇宙太陽光発電の概念設計を行なったことになる。ただしこれも、実際に製作して打ち上げるということは想定されていなかった。また、10 MW という規模となったのは、発電所としての特性を失わない規模ということである。これは最終的に「SPS2000」という名称がつけられ、1993年には概念計画書までまとめられている。形状は三角プリズム型というユニークな形をしている (図-2)。この計画書では、2000年までに組立が開始されることとされているが、そもそも打ち上げを前提としたものではなく、実際に打ち上げられたわけではない。

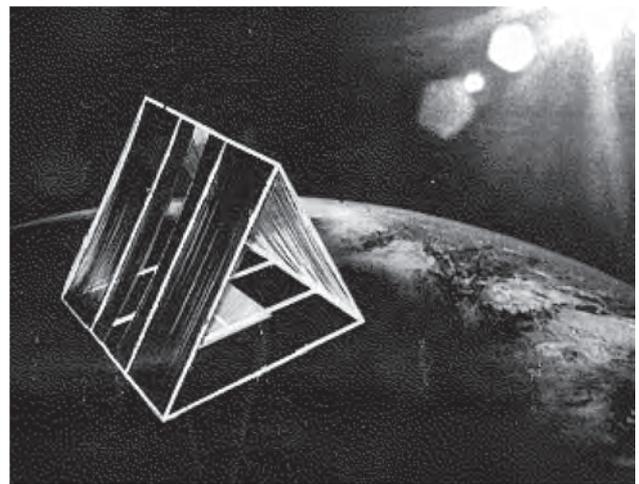


図-2 SPS2000 の概念図の1つ
出典：Space Future ホームページ

その後 2000 年代には、JAXA などにおいて、100 万 kW = 1 GW 級の SSPS の検討が行われている。JAXA が中心となって検討したのは、反射鏡を利用したモデルだ (図-3)。2.5 km × 3.5 km の 2 枚の反射鏡によって太陽光を集光し、直径 1.25 km の太陽電池で発電する。入射する太陽光のエネルギーが 11.71 GW、発電電力が 2.03 GW であるのに対し、地上で供給される電力が 1 GW となる。さまざまな変換ロスによる。建設コストはおおよそ 1 兆 2,000 億円と試算している。しかし、輸送コストは現状では 1 トンあたり 10 億円程度 (H-IIA ロケット) とされており、1 万トンの構造物を運ぶとしたら、10 兆円と試算され、建設コストだけでも目標の 10 倍以上となってしまう。そのため、輸送コストの削減が課題となってくる。1 トンあたり 1,700 万円というのが、要求される輸送コストだ。

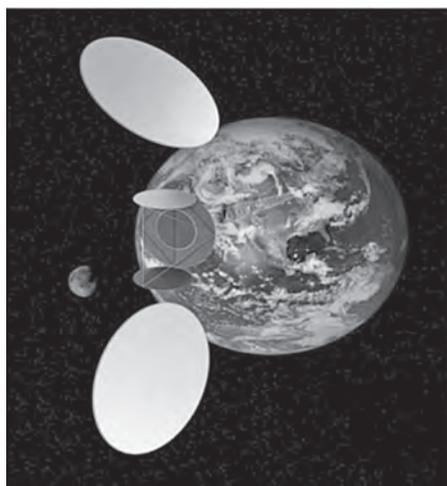
JAXA と平行して、経済産業省と無人宇宙実験システム開発機構 (USEF) も同規模の SSPS のモデル

の概念設計を進めていた。こちらは、2.5 km×2.375 kmの太陽電池パネルで送電アンテナと一体型となったものが採用されている(図一4)。受電アンテナは3.5 km×4.0 kmだ。8 GWの太陽光エネルギーで2.75 GW発電し、地上で供給される電力は1GWとなる。建設コストは1兆2,716億円としているが、宇宙構造物は2万トンとなっており、JAXAのモデルの2倍だ。そのため、輸送コストがより大きな影響を与えることになる。

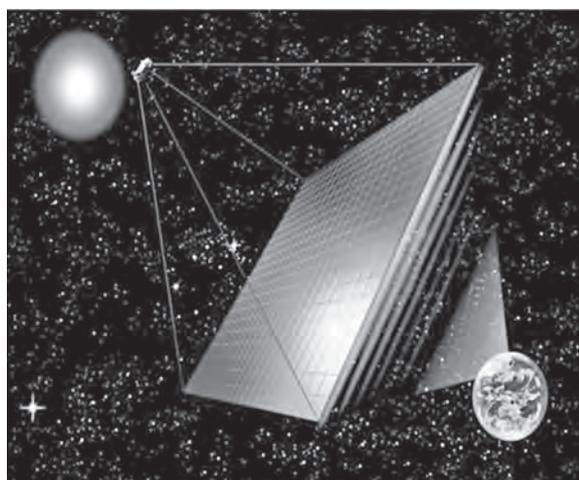
SSPSの研究プログラムは現在も進んでおり、2014年にスタートした現在のプログラムは、2023年度まで続く予定だ。主に、マイクロ波無線送電技術に係る研究開発が行われている。

4. マイクロ波送電技術の開発

宇宙太陽光発電の中核的技術となるのは、マイクロ波送電技術だといっていだろう。もちろん、資材を



図一3 反射鏡を利用したSSPS
出典：JAXA ホームページ



図一4 発電パネルと送電パネルが一体となったSSPS
出典：JAXA ホームページ

宇宙に送る技術の開発も必要だが、これは宇宙太陽光発電に限った課題ではない。

JAXAが宇宙システム開発利用推進機構(J-Spacesystems)と連携して行っている実証試験の装置は、最大1.8 kWの電力を55 m先にある受電部までマイクロ波によって送電するというものだ。受電側からのパイロット信号を受けて、高出力のマイクロ波が55 m先の受電設備に送られる(図一5)。2015年に行われた実用化実証の実績によると、約1.8 kWの送電電力に対し、受電電力は320~340 Wだった。送電ロスが80%を超えており、実用化まではまだ遠いという印象だ。

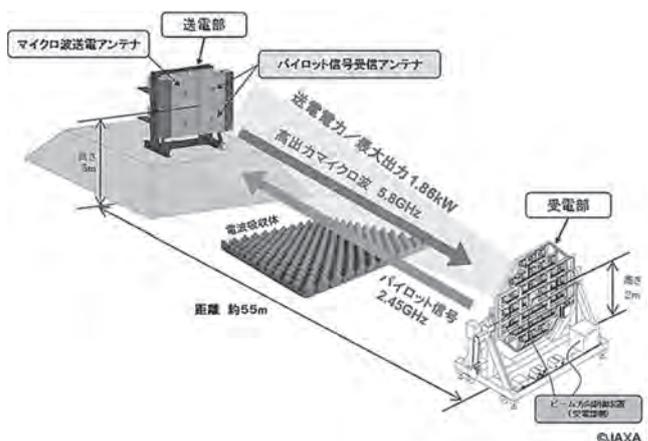
とはいえ、マイクロ波による送電技術は身近な利用も可能であり、これを目的とした開発もすすめられている。例えば、工場内のIoTセンサー向けの給電というのもその1つだ(図一6)。関西電力が出資するスタートアップ企業のSpace Power Technologiesがこうした技術の実用化に向けた開発を進めている。

宇宙太陽光発電には、この他にも課題となる技術開発は少なくない。そもそも、静止軌道上で大きくて軽量の構造物を運用することそのものが、これまで経験していないことだ。宇宙デブリ対策も必要となる。

マイクロ波による送電も、3万6,000 kmという距離ともなれば、高い精度が要求される。許容される誤差はわずか0.001°程度だ。

宇宙太陽光発電の設備内での有線送電も課題だ。宇宙の真空状態で高電圧を使用すると放電してしまうからだ。

2016年に策定されたロードマップでは、2030年以降に実用化フェーズに入るとされているが、現段階ではさらに先になると考えられる。



図一5 マイクロ波送電実証設備
出典：JAXA ホームページ



図一六 無線送電の身近な利用の可能性
出典：関西電力プレスリリース

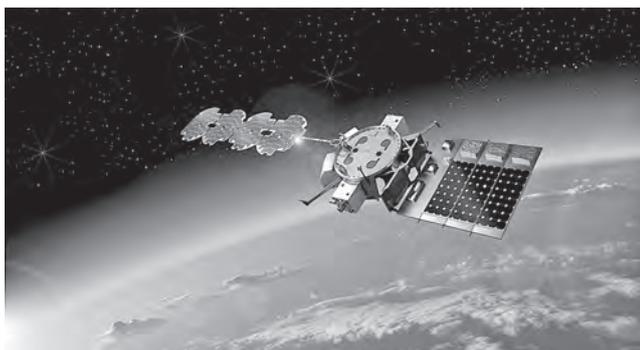
5. 欧米および中国の動向

2000年以降、欧米や中国でも再び宇宙太陽光発電の研究開発に取り組むようになってきた。

米国では2001年にNASAが宇宙太陽光発電の軌道上実証を検討していることが伝えられている。2020年にはISSにおいて、マイクロ波送電のデモも行っている。さらに、2021年には、空軍研究所（AFRL）が軌道上実証試験を2023年～2024年に計画していることが発表された。プロジェクトはSSPIDRとよばれており、飛行実験はArachneと命名されている（図一七）。蜘蛛にかけられた命名だ。AFRLの研究の目的は、前線基地に電力を供給することだが、もちろん将来の宇宙太陽光発電所としての運用も視野に入っている。

欧州では、2020年に欧州宇宙機関（ESA）が宇宙太陽光発電に関するアイデアを公募。同じく2020年に英国宇宙局（UKSA）は2031年の衛星実証、2039年の初期運用、2043年の実用化を目指すということを発表している。

中国でも2018年に宇宙太陽光発電の実験基地の建設を開始しており、今年になってマイクロ波送電の実証試験が成功したことが報道されている。



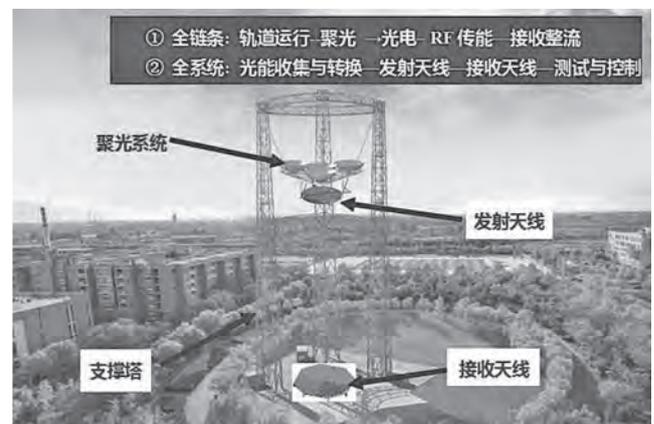
図一七 Arachneで運用される軌道上実証試験設備のイラスト
出典：AERL ホームページ

実証試験を行なったのは、西安電子科技大学のチームで、2022年6月5日に、地上55mの位置に設置した太陽光発電から、地上にマイクロ波で送電したという（図一八）。太陽光発電の電気をマイクロ波で送電したことは世界初だという。一方、電送効率は9.88%となっており、かなり低いものとなっている。

それでも、中国では今回の実験の成功を受けて、最初の宇宙太陽光発電の設置目標を、これまでの2030年から2028年に前倒ししたと伝えられている。

6. おわりに

宇宙太陽光発電そのもののアイデアは決して新しいのではない。最初の人工衛星が打ち上げられてからわずかに10年後にはそのアイデアが論文として発表されている。これを受けて米国などでは研究に着手、石油危機があった1970年代は研究が進められたが、1980年代に入り、日本以外では継続的な研究は途絶え、2000年代となって、欧米では研究が再開されたという状況だ。中国もこの時期から研究が活発化している。また、ビデオゲーム「シムシティ2000」という都市開発の



図一八 西安電子科技大学の実証試験設備
出典：西安電子科技大学ホームページ

シミュレーションゲームでは、発電所のオプションとして宇宙太陽光発電が取り入れられている。

概念設計としては、日本で1990年代に10 MW級の設備が概念設計されたが、さらに2000年代には1 GW級までスケールアップされている。ただし、実際に建設する計画にはいたっていない。コスト面では静止軌道に1万トンを超える物資を運ぶコストが膨大なものであり、実用化には50分の1まで低減する必要があること。技術的にはマイクロ波送電を含めた無線送電の技術の確立ということにある。このうち、技術開発は主にマイクロ波送電の技術開発にフォーカスされている。

現状では、わずか50 m程度の距離であっても、高い電送効率が実現されているとはいえない。それでも、中国では最初の宇宙太陽光発電衛星を2028年に打ち上げることを予定しており、米国では低い高度の衛星軌道における軌道上実証試験を2023年～2024年に計画しているという状況だ。

本格的な実用化・商用化はまだまだ遠い未来だといえるだろう。それでも、2040年以降、24時間安定して発電する再生可能エネルギーとして、静止軌道上に数多く設置されていくという可能性はあり、遠い将

来のカーボンゼロで大きな役割を果たすことが期待されている。

JCMA

《参考文献》

- ・ <https://www.sspss.jp/%e5%ae%87%e5%ae%99%e5%a4%aa%e9%99%bd%e5%85%89%e7%99%ba%e9%9b%bb%e3%81%a8%e3%81%af/%e5%b9%b4%e8%a1%a8/>
- ・ <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/ssps.html>
- ・ <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/pdf/discussion.pdf>
- ・ <https://www.kenkai.jaxa.jp/research/ssps/150301.html>
- ・ <https://www.jspacesystems.or.jp/project/observation/ssps/>
- ・ https://www.jspacesystems.or.jp/jss/files/2021/07/SSPS_H28_Roadmap_a.pdf
- ・ https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C000000R03/220114_space_1st/space_1st_08-6.pdf
- ・ <https://afresearchlab.com/technology/space-power-beaming/>
- ・ <https://news.xidian.edu.cn/info/2106/220926.htm>
- ・ https://www.kepco.co.jp/corporate/pr/2019/pdf/0605_2j_01.pdf

【筆者紹介】

本橋 恵一 (もとはし けいいち)

(株) afterFIT

afterFIT 研究所 シニアリサーチャー、

Energy Shift シニアマネージャー

