

宇宙太陽発電システムの開発・実用化の戦略について

○高野 忠，三枝健二，宮崎康行（日本大学），篠原真毅（京都大学）
坂井真一郎，牧謙一郎（宇宙航空研究開発機構），藤野義之（東洋大学）

1. まえがき

現在人類は、エネルギー危機に直面している。なぜならエネルギー源のうち、石油や天然ガスは埋蔵量により使用期間が制限される。さらに石炭などの化石燃料は、CO₂やMP2.5の排出規制のため、多くを望めない。また原子力発電は、福島における事故によって、その危険性とさらには高コスト性が明らかになった。そのため、新しいエネルギー源を手に入れる必要がある[1]。

その有力な候補が、太陽発電衛星（SPS）を用いた電力システムである。ここでは、地球周囲の軌道上で太陽電池により発電し、その電力をマイクロ波に変換し、搭載アンテナ（スペーステナ）から地球上のアンテナ（レクテナ）に電力を送る。レクテナでは整流し、商用電力網に注入する[2]。

最終的にSPSは重さ2万トン程度になり、宇宙構造物として従来のもの（ISSでも419トン）にくらべ、極めて大きい[3]。しかも電波機器を見ると、従来のものと比べて、格段に優れた性能が要求される。また放射エネルギービームを、極めて精密に制御する必要がある。いわば人類が経験したことが無い技術を、実現する必要がある。従ってその研究開発（R&D）には、従来のR&D管理を基にしつつも、新しい観点が必要である。またシステム実現に対し、国民や事業会社の理解が必要である[4]。

本論文では新しい宇宙太陽発電学会の誕生を記念して、上記の現状を踏まえ、研究開発の進め方を考察する。まず、SPSシステムのニーズ（必要性）について検討する。特に、電力網の中での位置づけについて考える。次にそのシーズ〈技術基盤〉について、その特殊性に重きを置いて分析する。最後にその実用を可能とするべく、戦略を含んだ計画を提案する。

2. SPSと電力網

SPSを電波機器と見た時、その特徴はエネルギーを電波ビームで送ることである（図1）。送電部に直流あるいは交流のエネルギーを注入し、需要地に受電部を設置し、エネルギーを供給する。これにより、送電線を張ることなく電気エネルギーを供給することができる。

この時、ビーム全体を受電アンテナに入れる必要がある。このように細いビームを遠方まで送ることは人類が経験した事が無い。比較のため従来の通信システムを考えると、その電波は受信アンテナの数100万倍も広いビームで送る[5]。従ってビームによる電力伝送は、新たな革新技術のシーズを発掘することになる。以上から、本研究ではじめて取り組む高危険な技術が、解決できることを国民に示す必要がある。

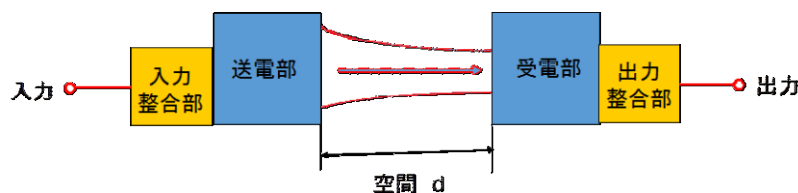


図1 ビーム電力伝送システムの構成

このSPSシステムは、図2のように、電力送電網（グリッド）に組み入れられる。この網には原子力発電や火力発電、水力発電が繋がっており、最近では風力発電や地上太陽発電もある。それらの発電と共に、ダイバーシティ効果でもって送電網の高信頼化と経済化に資することになる[6]。このインターフェースは検討する必要があるが、SPSは安定に発電できるので、既存の再

生可能エネルギーよりも、グリッドとの親和性が良いのである。

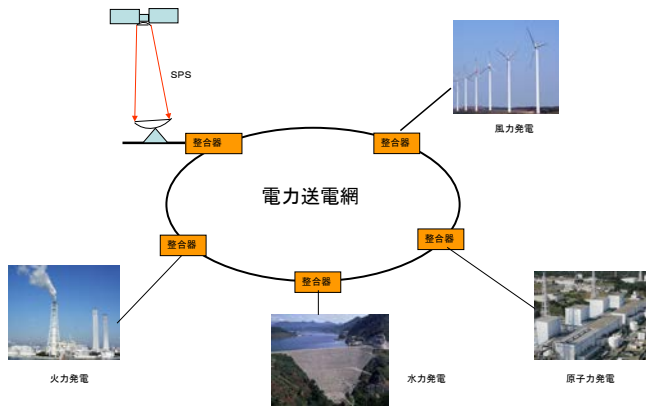


図2 SPSと電力網

次に電力のビーム伝送について、より広くその社会的意義を考えよう。現在の送電網では、

電力輸送は送電線すなわち有線により行われている。この電力業界を通信業界と対比させると、表1のように意義深い。すなわち通信は最初有線だけであったが、最近は携帯電話や飛行機・船の通信のように、電波すなわち無線で行われることが多い。すなわちエネルギー輸送の世界も、通信の世界と同じく、有線のみから有線と無線が混在したネットワークに移っていくと思われる。従って本稿で扱うR&Dは、この流れをサポートするものである。

表1 電力と通信の業界における無線と有線の技術比較および典型的会社例(カッコ内)

業界	通信	電力
有線	電話線 ファイバー通信 (例:NTT)	送電線 (例:東京電力)
無線	マイクロ回線 携帯電話 飛行機や船の通信 (例:ドコモ)	無接触充電 (例:パナソニック) マイクロ波電力伝送 (例:無線電力会社?)

3. 必要技術

システムを作るために、必須な技術とそうでない技術がある。後者には、システムから要求されるレベルをすでに満たしているものや進歩速さから見て満たしそうなもの、代替があるものが含まれる。この2技術は、想定するシステムモデルにより変わってくる。例えば軌道上実証には、現状のロケットを使うしかない、いや現状のロケットに合わせてシステム設計する必要がある。それに対し商用段階では、2万トンの機材を打ち上げることになるので、大幅に低価格にした専用ロケットが必要になる。

次の3点は、人類が経験したことがないことをするので、きわめて重要である[7]。

(1) 超大型アンテナ

これまで実現された大型の展開アンテナとしては、日本のはるか衛星[8]やきく8号衛星の搭載アンテナ(各々実効直径8mと10m)がある。しかしこれらはパラボラアンテナであり、ビームの電氣的走査性が無く、かつ展開構造が複雑で拡張性が低い。

これに対しSPS用アンテナとしては、ビームの走査性が高い移相配列アンテナ(Phased array antenna)を用いる。その設計の目的・課題は、下記である。

- i) 送電アンテナ径を大きくすることにより、受電アンテナを小さくする[9]。
- ii) 送電アンテナのユニットを、ロケットなどで運べる限界の大きさとする。

iii) 収納と展開の体積比を大きくするよう、新たな展開構造を実現する。
多重折り畳みアレーアンテナは、その有力な候補である。ただしこのアンテナ面には著しい段差ができて、アンテナ放射特性が劣化する。これを電子的に補正する必要がある[10]。

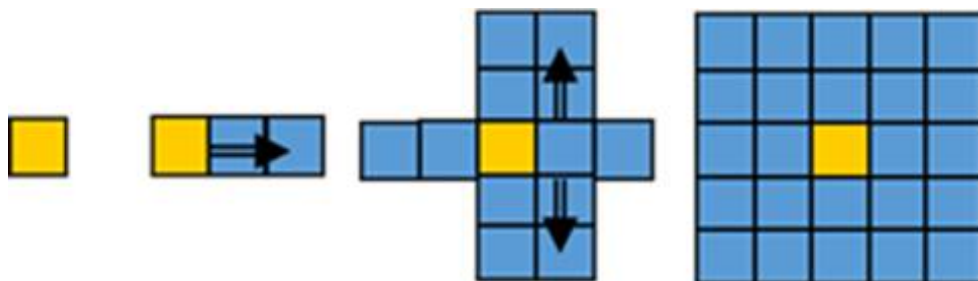


図4 多重折り畳み配列アンテナと展開手順(左から右へ)

(2) 狭いビームの制御

従来から平面波の方向制御は検討されてきたが、極めて狭いビームに対しては、十分検討されているとは言い難い。ビームをエルミート・ガウス関数で展開する、などの方法でビーム偏向特性を明らかにする。

SPS用にビーム波を形成するアンテナとして、パラボラアンテナよりもPAAが有利である。そのPAA放射素子の振幅と移相を変えてビーム偏向特性を明らかにする [11][12]。

(3) 半導体素子

半導体素子の要求性能は、想定するシステムモデルにより変わる。またシステムは、素子の現状レベルを基に設計しなければならない。

送電側では電力増幅器からの電力を、放射素子を通してアンテナ全体で空間合成する。SPSでは放射素子が極めて多いので、各素子当に50W程度の増幅素子と回路を付ければ良く、問題が少ない。逆に受電側では、半波長素子のアレーアンテナを用いる場合素子当たり電力が小さすぎるので、数素子分を合成して整流素子に入れる必要がある。

4. 外部条件

(1) ロケット

搭載物寸法は、ノーズフェアリング寸法で厳しく抑えられ、H-IIA 4S型ロケットで直径4mである。収納時寸法をこれに合わせなければいけない。

ロケット搭載の機会、非常に少ない。宇宙理工学の研究のためとすると、各分野10年弱に1回程度である[13]。しかし実用化・ビジネス化になると、衛星を使用する企業・組織が製作費を負担することになるので、より柔軟になる。問題は本格的ステークホルダが出てくる前の、R&Dをどうするかである。

(2) 姿勢制御

衛星を概念的に頭で考えても、姿勢や温度の制御ができなければ、絵に描いた餅である[14]。システムはまた、故障状態にも対応して姿勢制御できなければならない。

(3) 国の電力政策

SPSシステムの推進体制は、前述した諸発電に対するコスト優位性の他に、国際収支構造、自給率踏まえた安全保障、国防も絡んだ安全問題、科学の進歩見通し、などを基にした国の電力政策で決定される[15]。特に原子力発電については、廃棄物問題、強度安全性(ジャンボ機突っ込み、火山弾降り注ぎ、大地震に対し)、などの問題がある。そのコストについても、建設費、燃料代、廃棄物処理費、災害補償費、これまで表に出ていなかった交付金や研究開発費なども企業が払うとすれば、コストは高いものとなる。電力需要は過剰品質を省けば切迫していないので、R&Dに時間的余裕を持って良いと思われる。

5. 考えられる線表

R&Dの線表では外部条件を考慮しつつ、以上述べた未成熟な技術を解決し、かつ外部に技術到達度を見せることが重要である。そのためR&Dは、次のように4段階で分ける。

(1) 地上実証

ビーム電力伝送の有効性と、増幅器と移相器を放射素子に接続したいわゆる能動型移相配列アンテナ (APAA) の実現性、大電力の生成・整流技術を実証する。具体的には、次のようにする。

- 1) 周波数はとりあえず、2.45GHzとする。
- 2) APAAは、一辺5mの正方形アンテナ面。一辺1mのパネル25枚で形成する。このアンテナを、人が補助して展開する。スペースステナのBBMとする。
- 3) 放射素子を約6000個で、アンテナビーム幅(半値全幅)1.6degを実現する。
- 4) 1MWのRF(電波)電力を送る。

(2) 軌道上実証#1

衛星から細いマイクロ波ビームを、送って制御する技術を実証する。放射素子数は4.9万個にもなり、従来のアンテナ技術・構成法では不可能である。ちなみに京大のミューレーダでも、475素子である。従ってアンテナ工学では、1品生産から大量生産へパラダイムを変えなければならない。このAPAAを軌道上で、実証する。

1) APAAは、一辺13.5mの正方形アンテナ面。一辺2.75mの正方形のパネル25枚で形成する。パネル厚さ2cmで、枚収納状態厚さは1mとなる。

このアンテナを、軌道上で遠隔制御により自動展開する。

2) 放射素子約5万個。ビーム幅(半値全幅)0.6deg。100W送電する。

3) 膨大な給電回路を簡略化するため、数素子を単位とした副アレーに増幅器と移相器を装着する。9素子に1個の移相器で済む[11]。さらに間引き給電により、副アレー中で素子の半分程度を無給電素子にできる[16]。

4) 軌道は低地球軌道(LEO)で、その高さは600kmとする。

5) このアンテナは、H2-Aまたはイプシロンのロケット1回で打ちあげる。

6) ビーム指向精度は、衛星揺らぎや伝搬路変動がある状態でビーム幅の1/10である。これを検証するため、衛星の姿勢精度は、さらに1/10とする。

7) 非常時対策を施す。

設計した衛星の外観を、図5に示す。電力は少なくてすむので、太陽電池パドルはアンテナに比べて小さい。ミッションとして複雑な機能を要しないので、衛星本体も小さい。従って極めて薄い構造物が、地表に平行に飛ぶ事になる。

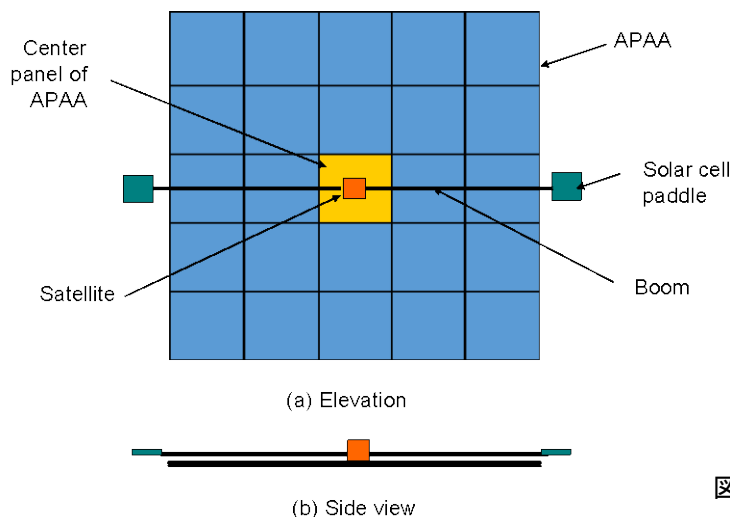


図5 軌道上実証#1のSPS構成

(3) 軌道上実証#2

衛星から細いマイクロ波ビームを、地上レクテナにぴったり納める技術を実証する。100kW送電衛星により、大電力伝送のデモを行なう。電力会社から関心を取り付ける。技術的にはマイクロ波工学において、小電力から大電力へとパラダイムを変えなければならない。

- 1) APAAは、一辺67.5m (13.5m x 5) の正方形。一辺2.75mの正方形パネル125枚で形成する。パネル厚さを2cmで、収納状態厚さは5mとなる。
- 2) 放射素子は、約25万個。ビーム幅(半値全幅)0.12degを実現する。
- 3) 太陽電池は、300 m²の広さになる。
- 4) 軌道は低地球軌道(LEO)で高さ600kmとする。
- 5) レクテナ直径は、1.2 km。整流回路の簡略化のため、パラボラ配列アンテナとする。

(4) 商用化

1GW送電衛星で、商業運用する。設計段階から、電力会社を入れる。

- 1) APAAは、一辺1kmの正方形。軌道上実証#2のアンテナを225個、軌道上の枠組みの所定位置まで、打ち上げて自動展開して構成する。
- 2) 放射素子総数は、約2億個。ビーム幅(半値全幅)6.9 x 10⁻³ degを実現する。
- 3) 太陽電池は、5 x 1.2 km²の広さになる。
- 4) 軌道は低地球軌道(GEO)で高さ36000kmとする。
- 5) レクテナ直径は、4.3 kmとなる。パラボラ配列アンテナが候補である。

研究開発は図6に示すように、段階的に進めるべきである。各段階終了時に次段階への移行の可否判断を行なう。軌道上実証#1では宇宙技術が使えることを、軌道上実証#2では大電力伝送できること、各々示して電力会社に出資を決断させる。商用化では電力系会社が主になり事業に取り組む。このように最終的にユーザに益することを条件に進めることは、巨額の研究開発には不可欠である。

この進め方は特に、リスクが大きい宇宙活動において有効である。その結果として、新しい宇宙産業を創出し経済成長に貢献できる。また国の研究開発支援としては、開始時点から巨額の開発資金を積んでおく必要がない。また途中で技術的可能性が無くなったり市場性が変わった場合、無駄な資金を投入し続ける弊を改められる。

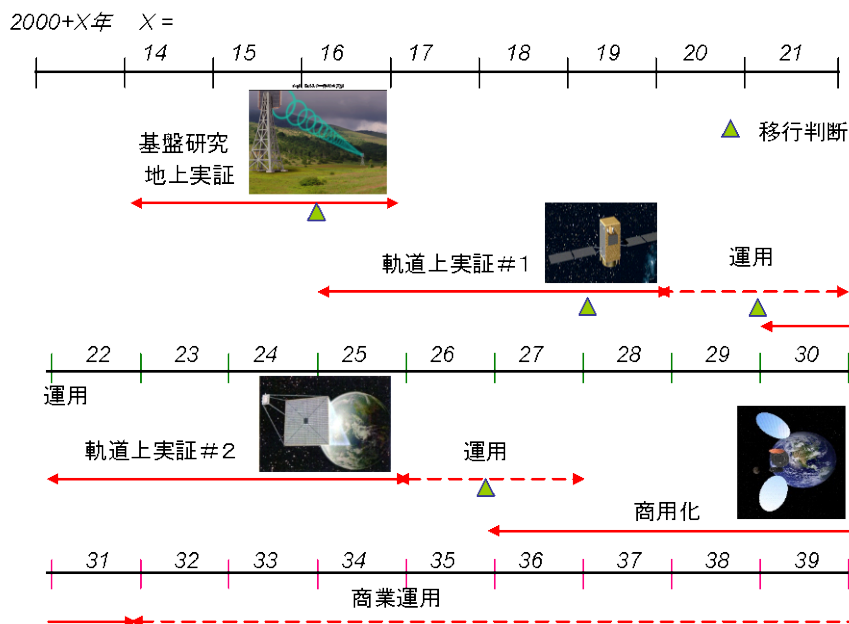


図6 開発線表(案)

6. まとめ

以上SPSにはニーズがあり、将来の電力網にインパクトを与える可能性があることを示した。しかし現時点では、SPS実現のためのシーズが一部実現されていない。あるいはそれを、国民に十分説明してこなかった感がある。今後は、国民の理解と支持を得るのに適して、研究開発(R&D)の計画を立てることが重要である。

参考文献

- [1] 高野忠、“エネルギーの未来宇宙太陽光発電—宇宙の電気を家庭まで—”、アスキー新書、アスキー・メディアワークス、2月、2012.
- [2] P. E. Glaser, “Power from the Sun: Its Future”, Science, vol.162, pp.857-866, 1968.
- [3] 吉岡、松岡(編)、“宇宙太陽発電衛星のある地球と将来”、慶応義塾大学出版会、2009.
- [4] 長山博幸、吉田裕之、福室康行、佐々木進、“一般成人、及び技術者のSSPSへの意識調査”、第13回宇宙太陽発電システムシンポジウム、東京(日本大学)、10月、2010.
- [5] T. Takano, A. Sugawara and S. Sasaki, “System Considerations of Onboard Antennas for SSPS”, The Radio Science Bulletin, No. 311, pp.16-20, December, 2004.
- [6] 高野忠, “宇宙太陽光発電とその電力網への適用”, 電気設備学会誌, Vol. 34, No. 10, pp. 736-742, 2014.
- [7] Tadashi Takano, “Wireless Power Transfer from Space to Earth”, IEICE Trans. Electronics, Vol. E96-C, No. 10, pp. 1218-1226, Oct. 2013.
- [8] 高野忠, 名取通弘, 大西晃, 三好一雄, 井上登志夫, 水溜仁士, 箭内英雄, 広沢春任, “ケーブルで構成した展開形の大口径衛星搭載アンテナ”, 電子情報通信学会論文誌, vol. J81-B-II, No. 7, pp. 673-682, 1998.
- [9] 高野 忠、三枝健二, “SPS用アンテナの設計指針について”, 第15回宇宙太陽発電システムシンポジウム講演集, pp. 16-21, 仙台, 9月, 2012年.
- [10] 高野忠、三枝健二、細野裕行、宮崎康行、内山賢治、荒木友太, “多重折り畳み型フェーズドアレイアンテナ”, 電子情報通信学会総合大会, B-1-170, 東京, 3月, 2011.
- [11] 高野 忠、三枝健二, “副アレー集合概念による大規模アレーアンテナの特性”, 電子情報通信学会総合大会, B-1-134, 岐阜, 3月, 2013.
- [12] 篠原真毅 監修, “現代電子情報通信選書「知識の森」 宇宙太陽発電”, 電子情報通信学会知識ベース, 7月, 2012.
- [13] “宇宙科学研究所の科学ミッション一覧”, ISAS 広報資料, <http://www.isas.jaxa.jp/j/enterp/missions/catalogue.shtml>
- [14] 高野 忠, 三枝健二, 宮崎康行, 篠原真毅, 坂井真一郎, 牧謙一郎, 藤野義之, “無線電力伝送用大型展開アンテナの実現法と応用”, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 3H16, 長崎, November 2014.
- [15] エネルギー白書 2014, http://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014gaiyou/whitepaper2014pdf_h25_nenji.pdf
- [16] 柴田国明、細野裕行、三枝健二、高野忠, “半波長伝送路結合による印刷ダイポールアレーの提案”, 電子情報通信学会総合大会, B-1-126, 岐阜, 3月, 2013.

On the Strategy for the Development and Realization of Space Solar Power Systems

Tadashi Takano¹, Kenji Sieges¹, Yasuhisa Miyazaki¹, Naoki Shinohara²,
Shin-ichiro Sakai³, Ken-ichiro Maki³, and Yoshiyuki Fujino⁴

1) Nihon University, 2) Kyoto University, 3) JAXA, 4) Toyo University

Abstract

Mankind is faced with energy problems. Namely, oil and natural gas will be exhausted in decades. Fossil fuels undesirably discharge CO₂ gas and MP 2.5. Atomic power generation is dangerous as shown in Fukushima disaster, and is revealed quite expensive. Therefore, we have to get new energy sources.

Most probable candidate to solve this situation is a power system using a solar power satellite (SPS). The system generates power with solar cells in the orbit around the earth, converts the DC power to microwave, and transmits it from an onboard antenna (spacetenna) to a terrestrial antenna (rectenna). The rectenna rectifies the received power, and put it into a commercial power grid.

The commercial SPS may weigh 2×10^4 ton, which is much heavier than a conventional space structure, e.g. 419 ton of ISS. Moreover, radio devices require far more excellent performances than a conventional communication or radar uses. The radiated energy beam must be controlled quite accurately and precisely. Therefore, we have to realize technologies which mankind has never experienced. Accordingly, the relevant research and development (R&D) needs a new prospect in addition to traditional R&D management.

In this paper, we study the R&D of SPS based on the above-mentioned status, on the commemorative occasion of the foundation of the new academic society "Space Solar Power Society (tentative)". We first analyze the needs of the SPS system, especially its role in the commercial grid. Then, the seeds or technological background is analyzed focusing on its peculiarities. Finally, a strategic plan is proposed to put the system for practical uses.