

¹Prospects of Phased Array Microwave Power Transmission System for SPS

Naoki Shinohara

Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University

Uji, Kyoto 611-0011, Japan

Abstract

Solar Power Satellite/Station (SPS) is expected as future space utility for a long time. In order to realize the SPS, various advanced technologies are required ; rocket technologies, space structure, power management in plasma circumstance, and wireless power transmission (WPT) via microwave. Recently, the wireless power transmission technologies are applied for commercial products. The WPT technologies via microwave are applied as energy harvesting from broadcasting radio waves and wireless charging of an electric vehicle. It is connected to the SPS technologies, however, it is not enough for the SPS. Phased array beam forming technology is most important for the SPS. The SPS can not be realized without the phased array technologies. The phased array technologies are advanced with radar technologies and SAR technologies, however, it is not enough for the phased array for the WPT. We need a thin and light weight phased array with high efficiency.

In FY1992, the first WPT field experiment with the phased array was carried out in Japan. It was called MILAX fuel-free WPT experiment. 96 HPA-phase shifter modules were used. The efficiency of the GaAs HPA was approximately 40% at 2.411GHz and the output microwave power was approximately 13W. Totally over 1.2kW microwave power was transmitted from 288 antennas which was composed of 3in1 sub-arrays. In FY2000, JAXA SPS research committee conducted to develop a sandwich-type SPS demonstrator which was composed of solar cells in front and phased array in back. The efficiency of the system was approximately 15% at 5.8GHz and the total output microwave power was approximately 25W. In FY2010, new phased array research equipment with GaN semiconductor technology was installed in Kyoto University. The efficiency of the HPA is over 70W with 7W, 5.8GHz. Thickness of the phased array is below 30cm and total microwave power is over 1.9kW. From FY2009, METI's SPS project started with JAXA and it conducts development of thin and high efficiency phased array for ground experiment. The developing phased array will be below 3cm thickness and 70% efficiency of the GaN HPA. The ground experiment will be carried out in FY2014.

Japan is only one country which has developed the phased array for the WPT. We have to advance the phased array technologies along technological roadmap toward the SPS.

宇宙太陽発電のための マイクロ波送電用フェーズドアレーの展望

京大・生存圏研 篠原 真毅

1. はじめに

宇宙太陽発電所SPSの実現性の鍵を握る技術はたくさんある。ロケット技術は最も重要な技術であるし、巨大な宇宙構造物の建築保守やプラズマ中での電力制御、安価軽量の太陽電池も必須である。そして無線電力伝送技術もSPS実現の鍵を握る技術の一つである。近年共鳴送電やエネルギーハーベスティングといったコードレス・バッテリーレスの技術の民生応用が広がり、10年前には想像できない市場規模にまで成長し始めている[1][2]。SPSで必須のマイクロ波無線電力伝送も、電磁波エネルギーハーベスティング[3]や電気自動車の無線充電[4]等、少しずつ実用化の芽が育ち始めている。しかし、これらマイクロ波無線電力伝送の民生応用は研究者の裾野を大幅に拡大し、技術を飛躍的に向上させるものの、SPSにつなげるためには不足している技術がある。フェーズドアレーである。

フェーズドアレーはSPSにおいて36,000km上空から2km以下のレクテナサイトに正確にエネルギー送電をするために必須の技術である。フェーズドアレーと共に目標位置の推定とアンテナ形状の推定のためにパイロット信号を用いたレトロディレクティブシステムも同様に重要である。フェーズドアレーはこれまでレーダーや合成開口レーダーと共に発展してきた[5]。レーダーはパルス波を用いるものが多く、正確なビーム制御と目標位置推定アルゴリズム、雑音に埋もれない電波処理技術等が重要視される。無変調連続波を何十年にも渡り送り続けるSPSやマイクロ波無線電力伝送用として考えた場合、現在のレーダー用のフェーズドアレー技術は効率、システム重量や大きさ、熱処理等の面で不足である。本稿ではこれまで20年以上に渡り実証されてきたSPSのための無線電力伝送用フェーズドアレーをレビューし、今後の研究のあり方を探る。

2. これまでの無線電力伝送用フェーズドアレー(半導体システム)

図1はこれまでの無線電力伝送用フェーズドアレーの主なものをまとめた図である。筆者の知る限り「マイクロ波無線電力伝送用実証実験」に限れば無線電力伝送用フェーズドアレーは日本ででしか開発例がない。1992年に実施されたMILAX飛行機実験が実証実験としては世界初の無線電力伝送用フェーズドアレーとなる。2.411GHzで13WGaAsアンプ-移相器モジュールを96素子用い、3アンテナをサブアレーとして合計288素子のフェーズドアレーを構築していた。合計出力は1.2kW以上となり、HPAの効率

は40%以上であった[6]。同HPA-移相器モジュールは次年に実施されたISY-METSロケット実験でも用いられ、プラズマ波動の実験で必要だった磁場に対してマイクロ波ビームの角度を制御する実験で成果を出した[7]。

Semi-Conductors

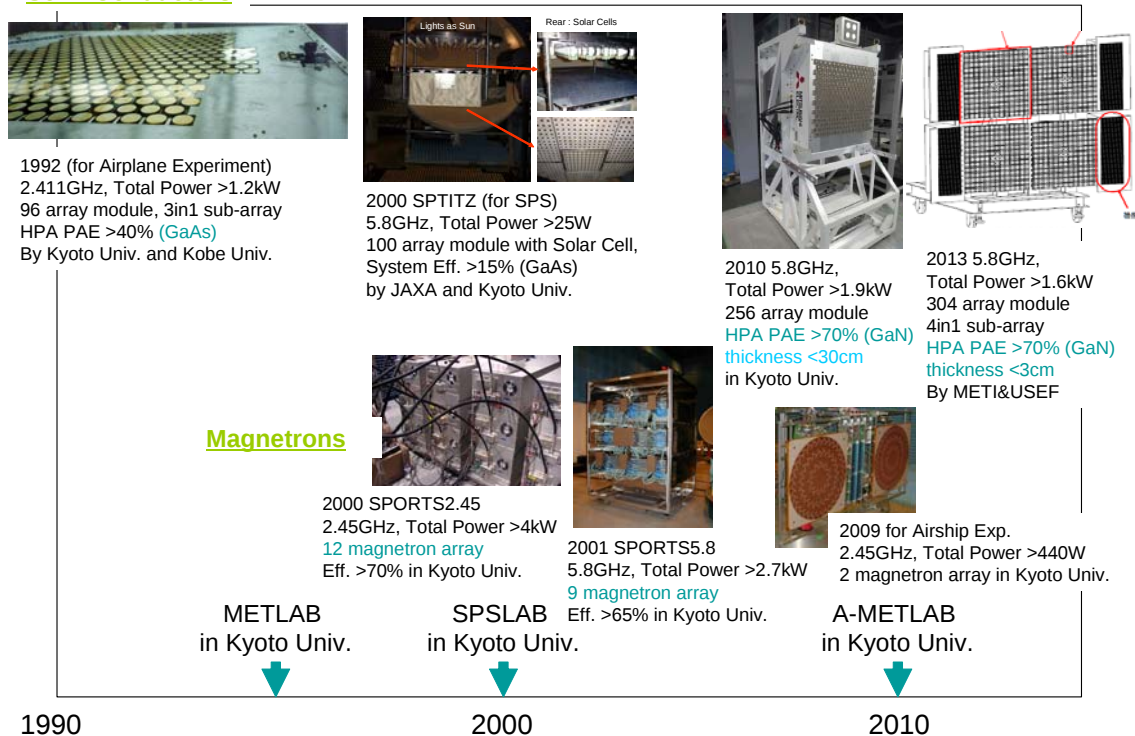


図1 これまでに実証実験で用いられた主な無線電力伝送用フェーズドアレー

MILAX、METSの前後に移相器のないレトロディレクティブシステムの開発も行われている[8]。1996年には当時公募のあった国際宇宙ステーションのJEM曝露部でのフェーズドアレー実験の提案が行われたが、不採用となっている[9]。その後1990年代後半にはNASDA(現JAXA)主導でSPSの検討委員会が行われるようになり、そのSPS検討委員会主導で2000年度に当時有望だったSPSシステムであったサンドイッチ構造(太陽電池-マイクロ波無線電力伝送一体型)のフェーズドアレーの試作が行われている。SPRITZと名づけられたこのサンドイッチ構造フェーズドアレーは、1つのHPAの出力を100分配し、アンテナ直前に移相器を挿入する構造をしており、5.8GHzCWで出力25W以上、効率15%以上を実現した[1]。2001年度には京都大学の研究設備として3素子のフェーズドアレーを1次放射器としたパラボラアンテナを3つアレー化したパラボラフェーズドアレーも開発された[10]。1次放射器をフェーズドアレーとしたパラボラアンテナは通信用でよく用いられているが[11]、さらにパラボラアンテナを複数用いたフェーズドアレーは世界に例がない。このパラボラフェーズドアレーのもう一つの特徴はHPA-移相器という

構成ではなく、発振器段階で高出力を発生させると同時にPLLで位相制御も行うというDSS/PLL半導体モジュールを用いていた点であった。効率はHPAほど出なかったことは残念であるが、取り組みは評価されても良いと思う。

2000年代に入り、経済産業省のSPS検討の取り組みが始まり、(財)USEFが中心となって様々なフェーズドアレーの開発が行われた。2002年度にはActive Integrated Antenna (AIA)の概念を取り入れた5.77GHzCWの9素子フェーズドアレーの開発が行われた。HPAはAB級増幅を行い2W, 51%以上のPAEを実現している[12]。このフェーズドアレーはSPSに向け、薄型構造を実現すべくAIAのための受信アンテナ層-回路層-送電アンテナ層の3層構造で構成されている。USEF SPS検討委員会ではその後レトロディレクティブシステム[13]や、ローバーへの無線給電システム[14]等の開発も行っているが、これらは移相器レスの送電システムであった。2006年にはISASのロケットを用いて神戸大、ISAS、ヨーロッパの研究グループがレトロディレクティブシステムのロケット実験を成功させ、2008年には神戸大とアメリカの研究グループがハワイ島において150kmの無線電力伝送実験をフェーズドアレーを用いて行っている。

これら半導体を用いたフェーズドアレーとは別に高効率安価なマグネトロンを用いたフェーズドアレーの開発も京都大学を中心に行われてきた。日本では20年近くにわたり、様々な異なる半導体増幅器、様々な異なるシステムでフェーズドアレーの開発が行われてきたが、その時々の実証実験の目的を達成するために最適なシステムが開発されており、SPS実現に向けたロードマップとして考えると一本道になっていない。2000年代後半になり、宇宙基本計画[15]にSPSが記載されるようになるとSPS実現に向けた技術ロードマップに沿った開発が求められるようになり、「薄型」「軽量」「高効率」をキーワードにしたフェーズドアレー開発が行われるようになって来た。まず2010年度に開発された京都大学導入のフェーズドアレーが薄さ30cm、GaN半導体F級HPAで70%以上@7W、5.8GHzを実現し[16]、研究の方向性を示した[17]。総出力は1.9kW以上であり、このフェーズドアレーは全国共同利用設備として多くの研究者が利用できる。さらに2009年度より経済産業省のSPS検討としてUSEFが進めているSPS検討委員会では2014年の地上実証を目指し薄さ4cm以下、5.8GHzCWでHPA70%以上、合計1.6kW以上の薄型フェーズドアレーの開発が進んでいる[18]。これはまだ宇宙実証用を目指した開発とはなっていないため、熱制御等に課題は残るが、世界最薄、最高性能のフェーズドアレーであり、次のSPS宇宙実証につなげなければならない。

3. おわりに

SPSはいつか実現すると言われ続けながら30年以上が過ぎ、10年前の研究ロードマ

ップは年を先送りにしただけで同じロードマップが使われている。このままでは SPS は「いつかはできる」けれども「いつまでたってもできない」システムとなってしまう。本稿でまとめたフェーズドアレーもその都度の最適なシステムとして開発されているものの、SPS に向けたロードマップに沿って発展しているようには捉えにくい。宇宙基本計画と低迷する日本の雰囲気の後押しされた SPS は、今こそフェーズドアレーのみならず、ロケットも太陽電池も宇宙構造も宇宙技術のすべての発展とともに研究・実証を進めていかなければならない。

参考文献

- 1) Shinohara, N., "Power without Wires", IEEE Microwave Magazine, Vol.12, No.7, pp.S64-S73, 2011
- 2) 篠原真毅監修, "ワイヤレス給電の最前線", シーエムシー出版, 2011
- 3) 篠原真毅, "3 編 エネルギーハーベスティング技術 1 章 電磁エネルギー利用 5 電波エネルギーハーベスティング", 「エネルギー・ハーベスティングの最新動向」, 監修: 桑原博喜, シーエムシー出版, pp.62-72, 2010
- 4) 篠原真毅, "マイクロ波ワイヤレス給電(電気自動車)", 「電気自動車のためのワイヤレス給電とインフラ整備」監修: 堀洋一, 横井行雄, 第 I 編 7 章シーエムシー出版, pp.78-88, 2011
- 5) Brookner, E., "Phased Arrays and Radars —Past, Present and Future", Microwave Journal, Cover Feature, 2006.1.
- 6) Kaya, N., H. Kasai, K. Murayama, A. Watanabe, T. Fujiwara, and H. Matsumoto, "Power Transmitter for MILAX Demonstration", Proc. of 12th ISAS Space Energy Symposium, pp.53-56, 1993
- 7) 松本紘, 賀谷信幸, 小嶋浩嗣, 藤田正晴, 藤野義之, 難田元紀, 秋葉鎌二郎, "METS 実験の概要と観測結果の速報", 第 12 回宇宙エネルギーシンポジウム, pp.69-75, 1993
- 8) 松本紘, 篠原真毅, 橋本弘藏, "京都大学における SPS 研究への取り組み", 信学技報 SPS2002-07 (2002-11), pp.9-14, 2002
- 9) 松本紘, 橋本弘藏, 篠原真毅, 藤田正晴, 伊藤精彦, 佐々木進, 片木孝至, T. Itoh, J. G. Hawkins, F. E. Little, "JEM 曝露部におけるマイクロ波エネルギー伝送実験提案", 第 16 回宇宙エネルギーシンポジウム, pp.55-59, 1997
- 10) Ikematsu, H., T. Mizuno, H. Sato, K. Takada, and I. Mikami, "SPS Concept with High Efficiency Phase Control Technology", Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference 2002, WS-9-2, 2002
- 11) 織笠光明, 藤野義之, 佐藤正樹, 浜本直和, 辻宏之, "地上衛星共用電話システム用小規模受信 DBF 装置の基礎実験", 信学技報 WPT2011-37, pp.61-66, 2012
- 12) Kimura, T., K. Yamamoto, T. Nakada, and USEF SSPS Study Team., "Development of Highly Efficient Active Integrated Antenna", Proc. of the 4th Int. Conf. on Solar Power from Space – SPS'04, pp.125-130, 2004
- 13) Mizuno T., K. Nishida, H. Okegawa, K. Takada, H. Ikematsu, H. Satoh, and USEF-SSPS Study Team., "Development of a PLL-Heterodyne Hardware Retro directive Antenna (in Japanese)", 1B06, Proc of the 48th Aerospace Science and Technology Conference, 2004
- 14) Shinohara, N., K. Nagano, T. Ishii, S. Kawasaki, T. Fujiwara, S. Nakayama, Y. Takahashi, S. Sasaki, K. Tanaka, Y. Hisada, Y. Fujino, S. Mihara, T. Anzai, and Yu. Kobayashi, "Experiment of Microwave Power Transmission to the Moving Rover", Proc. of International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2007), CD-ROM 3B1-1.pdf, 2007
- 15) 宇宙基本計画
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/utyuu/keikaku/keikaku_honbun.pdf
- 16) Yamanaka, K., Y. Tuyama, H. Ohtsuka, S. Chaki, M. Nakayama, and Y. Hirano, "Internally-matched GaN HEMT High Efficiency Power Amplifier for Space Solar Power Stations", Proc. of Asia-Pacific Microwave Conference 2010, pp.119-122, 2010
- 17) Homma, Y., T. Sasaki, K. Namura, F. Sameshima, T. Ishikawa, H. Sumino and N. Shinohara, "New Phased Array and Rectenna Array Systems for Microwave Power Transmission Research", Proc. of IMWS-IWPT2011, pp.59-62, 2011
- 18) 斉藤孝, 三原荘一郎, 布施義春, 伊地智幸一, "マイクロ波電力伝送地上実験に向けての進歩", 第 14 回 SPS シンポジウム, pp.9-14, 2011