

Proposal of Microwave Power Transmission Experiment on JEM-EF¹

Naoki Shinohara

Research Institute for Sustainable Humanosphere (RISH), Kyoto University

Postal address: Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan

I present an outline of previous proposal of a Space Station Experiment on Microwave Power Transmission. The proposed experiment is planned to be conducted on the Japanese Experimental Module Exposed Facility (JEM-EF). This experiment was proposed in 1996. Members who proposed it were H. Matsumoto, K. Hashimoto, and N. Shinohara of Kyoto University, M. Fujita of CRL (present NICT), K. Itoh of Hokkaido University, S. Sasaki of ISAS, T. Katagi of Mitsubishi Electric Corporation, T. Itoh of UCLA, J. G. Hawkins of University of Alaska Fairbanks, and F. E. Little of Texas A&M University.

The experimental setup was as follows: A power transmitting antenna array with a size of 2 m x 1.6 m will be deployed vertically from the container base after being installed to the JEM-EF. The transmitting array antenna consists of 340 antenna elements, each of which radiates 2 watts maximum yielding the maximum transmitted power of 680 watts. The microwave frequency used for the power transmission is 2.45 GHz, though the frequency might be changed into 5.8 GHz depending on the station EM requirement.

The transmitting system hires a hybrid method of combining computer controlled retrodirective beam control and the REV (rotating-element Electric field Vector) method. The latter REV method provides information of possible deformation of the antenna plane and/or malfunctioning of individual elements. As the transmitting array antenna panel is composed of four sub-panels which can be moved semi-independently, One set of a pilot signal receiver and one phase detector will be installed on each sub-panel, reducing the number of the set down to 4 instead of 340. The information of the necessary phase shift of each transmitting antennas computed by combining the phase information by the pilot detector set and the antenna plane deformation or deviation from the nominal plane. A power receiving rectenna panel will be loaded on the top of an extended boom. The microwave power transmission test is to be carried out between the TX and RX sub-sets of our system which are separated about 2.5 m.

The experimental objectives are not only to conduct the above-mentioned technological tests of the microwave power transmission with the newly developed system, but also to carry out scientific experiments concerning the interaction of the high power density microwave beam with the surrounding space plasma environment. This scientific experiment will be conducted by changing the power density of the microwave power beam via the control of the beam radius at the focal point. The phased array for the power transmission has a capability of focusing the power beam around a preset spatial point, thereby giving a very high microwave power density. The maximum attainable power density will be more than 5 kW/m².

The examination of the maximum usable power density of the energy carrying microwave is significant because the higher power density will provide smaller power beam radius, and thereby could reduce the size, weight and cost of the transmitter and receiver systems. Further the scientific experiment will bring in interesting academic knowledge on nonlinear interaction of strong electromagnetic wave with magnetized plasma.

¹ Presented at the 16th SPS symposium, 3-24, October, 2013.

JEM 曝露部上でのマイクロ波送電実験²

篠原真毅

京都大学 生存圏研究所 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

1. はじめに

SPS を実現する前にはその宇宙実証が不可欠である。これまでに日本では MINIX(Microwave Ionosphere Nonlinear Interaction eXperiment)ロケット実験(1983)¹⁾²⁾³⁾、ISY-METS(International Space Year - Microwave Energy Transmission in Space)ロケット実験(1993)⁴⁾、そして Furoshiki ロケット実験(2005)⁵⁾の わずか3例、数十分程度しか行われておらず、決定的にデータが不足している。そこで京都大学松本紘教授(当時)のグループは1996年に宇宙ステーションの JEM 曝露部でのマイクロ波エネルギー伝送実験を提案した。当時の提案メンバーは松本紘、橋本弘藏、篠原真毅(京大)、藤田正晴(CRL)、伊藤精彦(北大)、佐々木進(ISAS)、片木孝至(三菱電機)、T. Itoh(UCLA)、J. G. Hawkins(Univ. of Alaska Fairbanks)、F. E. Little(Texas A&M Univ.)であった。残念ながら本提案は最終選考には残ったものの、採択には至らなかった。本稿は当時の提案に関し紹介するものである。本稿は参考文献⁶⁾を元としている。

2. 実験システム

本研究の実験目的は、技術的要素の検証・確立を目指す工学的(技術的)研究目的と宇宙でのマイクロ波エネルギー伝送に必然的に付随する理学的(学術的)研究目的の二つを擁していた。工学的目的は宇宙空間での長期間のマイクロ波エネルギー伝送技術の開発とその実証であり、理学的目的は大振幅マイクロ波と宇宙プラズマの非線形相互作用に関する研究であった。

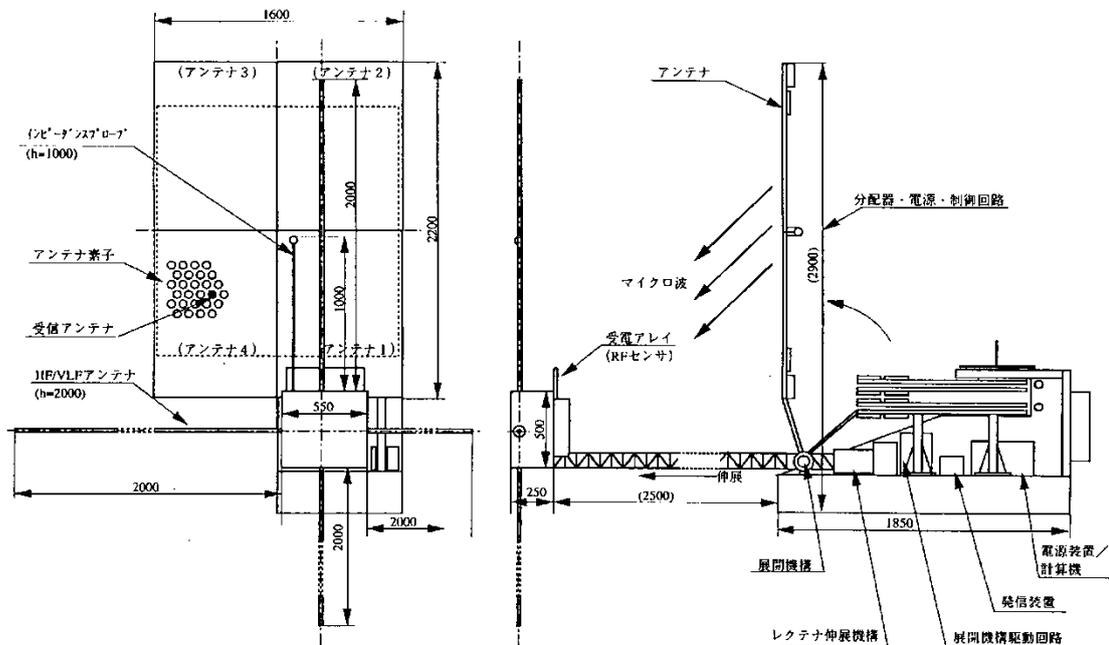


図1 提案した JEM 曝露部のマイクロ波エネルギー伝送実験モジュール

² 第16回 SPS シンポジウム、静岡大学にて2013年10月3,4日開催

これらの大きな2つの実験目的のために、図1に示す実験モジュールを提案していた。このモジュールは当時の以下の制限の下で設計されたものであった。

- ・ 1箱あたり供給電力は3kW (120VDC)
- ・ 有人設備が近いので、電磁波の安全性への要求が厳しい。
- ・ 同通信途絶にセンシティブなので電磁波の EMC 要求も厳しい。
- ・ JEM の実験スペース縛りがある。展開構造はエクストラで、展開したとしても実験前後は箱に収納しなければならない。 = アンテナサイズの限界

この提案実験モジュールは JEM 曝露部上に大きさ 2m×1.6m の送電アンテナを展開し、長さ約 2.5m の伸展トラスの先端に取りつけられたマイクロ波受電素子レクテナに対して約 680W のマイクロ波を送電するように設計されていた。展開動作は図2に示すようになっていた。マイクロ波周波数は ISM バンドである 2.45GHz を想定していたが、他の ISM バンドである 5.8GHz も考慮していた。

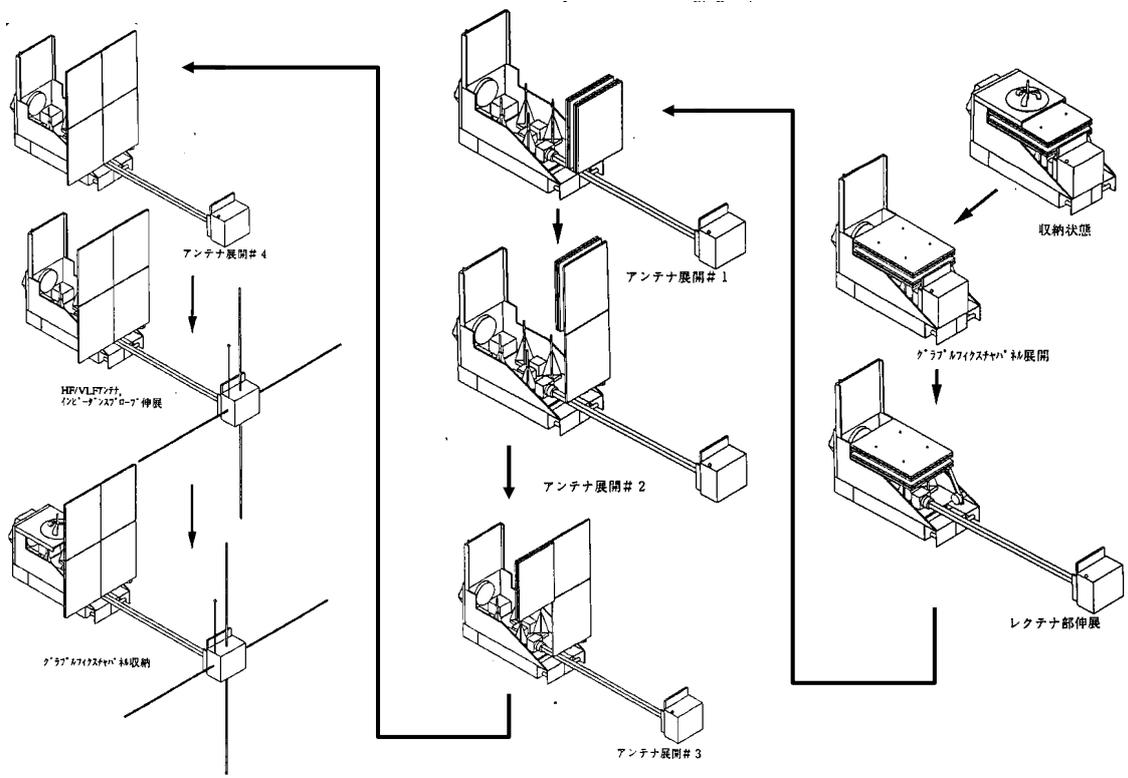


図2 実験モジュールの展開の様子

3. 工学実験

工学実験は JEM 曝露部上に展開する送電アンテナから伸展ブーム先端の送電目標(レクテナ)に向けてのマイクロ波送電実験が基本であった。本実験に関する実証技術項目は(1) マイクロ波ビーム制御技術 (2) DC-RF 変換・RF-DC 変換技術 (3) 放熱技術 (4) アンテナ展開・収納技術等である。これらの技術項目は地上での開発を行い、宇宙空間での実証実験を行うものであった。本研究で実証された技術は近い将来の電力衛星や宇宙太陽発電所に応用される技術であるはずであった。

(1) マイクロ波ビーム制御技術

宇宙太陽発電所 SPS や電力衛星でマイクロ波エネルギー伝送を行う場合に、電力を効率良くターゲットに伝送するために不可欠な、正確なビーム制御技術がある。ビーム制御の方法としては様々なものが提案されているが、本実験ではレトロディレクティブ方式と REV (Rotating-element Electric-field Vector)法の併用方式を採用したマイクロ波ビーム制御法の開発・実験を行う予定であった。本実験の特色はこの2つの異なったビーム制御方式を組み合わせ、計算機制御による、両者の特長を生かした新しいマイクロ波ビーム制御方式を開発する点にあった。REV法ではもともと計算機を用いたビーム制御を行っており、計算機制御によるレトロディレクティブ方式の送電システムの開発実績もあり、両システムを併用することは可能であると考えていた。

(2) DC-RF 変換技術、C-RF 変換技術

RF-DC 変換技術 DC-RF 変換技術は、主として送電モジュールに用いる SSPA(半導体マイクロ波増幅器)の変換効率の向上が目標であった。SSPA は MMIC 化し、F 級動作での効率 70% を目標としていた。同様にマイクロ波受電素子レクテナの RF-DC 変換効率の向上も目指していた。また、構成要素の動作等の耐宇宙環境特性評価等も行わなければならないと提案していた。

(3) 放熱技術

宇宙空間という真空環境で大電力を発生・輸送・直流変換を行うために、その熱輸送技術の確立は必須である。マイクロ波発振器、レクテナなど構成要素からの高能率排熱システムを確立し、発熱箇所の熱バランスの確認を行う予定であった。

(4) アンテナ展開・収納技術

アンテナの展開・収納技術は、宇宙空間でのエネルギー伝送や通信コミュニケーションをはかる上で必須の技術である。実験は、展開・収納機能の確認、剛性・固有振動数の確認、送電時・受電時の熱変形に関する問題の確認などをあげていた。

これらの技術実証のために、アンテナ展開試験、REV法を用いたアンテナ面校正、ビーム制御実験、レトロディレクティブを用いたビーム制御実験という順序で実験を行う計画であった。ビーム制御実験では、アンテナ面とレクテナを正対させての送電実験、アンテナ面にある傾斜角をもたせての送電実験、アンテナ面を人為的に折たたんでの送電実験等を行い、ビーム制御の確認を行いたかった。レクテナを移動させて実験を行う代わりに、アンテナ面に傾斜角を与えることで送電アンテナとレクテナの相対的な位置関係を変化させ、ビーム制御の確認を行う計画もあった。また、アンテナ面を人為的に折り畳んでの実験では、アンテナ面に様々な条件を与えてのビーム制御の実験を行う計画であった。このようにアンテナとレクテナの位置の変化、アンテナの形状の変化をもたせることによりビーム制御に関する各種データを取得し、さらに長期送電実験等も行い、DC-RF、RF-DC 変換技術や熱輸送技術等の技術検証、システム検証を進める計画であった。

4. 理学実験

以上の技術開発、検証、実験に加え、マイクロ波とプラズマの非線形相互作用に関する物理実験も併せて行うことを考えていた。通過するマイクロ波の強度がプラズマとマイクロ波の非線形相互作用を支配する重要なパラメータである。本実験では通常 340W、最大 680W のマイクロ波電力を 1.6m 角の送電

アンテナから放射するが、送電アンテナアレイの位相制御によりマイクロ波ビームを空間の1点に集中させることにより10kW/m²以上の強いマイクロ波電力密度を実現することができるはずであった。さらに移相器を用いて位相制御を行うことによりマイクロ波電力密度を変化させ、各密度に応じたプラズマ応答を定常的に実現できると予測していた。これによりマイクロ波がプラズマに対して影響を与える限界の電力密度を定量的に研究することが可能で、これに応じたマイクロ波非線形応答の研究を行う計画であった。

プラズマ加熱、低周波波動励起、プラズマの穴開き、マイクロ波ビームの自己集束等、様々な現象が理論予測されているが、本実験では低周波波動励起現象を中心にデータ取得を行い、その他の現象についても解析を行うことを提案していた。具体的な観測事項としては、VLF、HF帯の波動、プラズマ密度・温度、マイクロ波強度等マイクロ波パラメータの時間変化等であった。励起されると予測されるHF帯やVLF帯の静電波のモードを特定するために、直交2アンテナを用いて直交2成分の電界を測定し、FFTを行い振幅情報と位相情報を得る計画であった。また、マイクロ波送電を行っていない時間帯でもプラズマ観測機器の電源を落とすことなくデータを取得し続けることで、高度400kmでの電離層環境の観測も行いたいと考えていた。

5. まとめ

本提案は残念ながら採用には至らなかった。唯一不採択後に、(財)日本宇宙フォーラムからの受託研究として「JEM搭載用マイクロ波送電実験システムの開発研究」を1997-99の3年間行ったのみである。この受託研究では搭載システムの要素開発を行ったが、JEM暴露部での実験公募の次がなく、実験計画自体が消滅して今に至る。過去のこの提案が、3つのロケット実験を踏まえた次のSPSのための宇宙実証を考える際の礎となれば幸いである。

参考文献

- [1] Matsumoto, H, and T. Kimura, "Nonlinear Excitation of Electron Cyclotron Waves by a Monochromatic Strong Microwave : Computer Simulation Analysis of the MINIX Results", Space Power, vol.6, (1986), pp.187-191.
- [2] Kaya, N, H. Matsumoto, S. Miyatake, I. Kimura, M. Nagatomo and T. Obayashi, "Nonlinear interaction of Strong Microwave Beam with the Ionosphere : MINIX Rocket Experiment", Space Power, vol.6, (1986), pp.181-186.
- [3] Nagatomo, M, N. Kaya and H. Matsumoto, "Engineering Aspect of the Microwave-Ionosphere Nonlinear Interaction Experiment (MINIX) with Sounding Rocket", Acta Astronautica, vol.13, (1986), pp.23-29.
- [4] 松本 紘, 賀谷 信幸, 和田 財太, 篠原 真毅, 秋葉 量次郎, 雛田 元紀, "ISY-METS ロケット実験で観測されたプラズマ-マイクロ波の相互作用", 第13回宇宙エネルギーシンポジウム, (1994), pp.59-62
- [5] Nakasuka, S., T. Funane, Y. Nakamura, Y. Nojiri, H. Sahara. F. Sasaki, and N. Kaya, "Sounding Rocket Flight Experiment for Demonstrating "FUROSHIKI SATELLITE" for Large Phased Array Antenna", Proc. of IAC2005,(2005), IAC-05-C3.3.01.pdf
- [6] 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暴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プロシーディング集, (1997), pp.55-59