

# **Radiation Resistance Evaluation of Phase Controlled and Power Amplifying Module for Solar Power Satellite**

**Yusuke Kishida<sup>1</sup>, Koji Tanaka<sup>2</sup>, Takaya Nakamura<sup>3</sup>, Takahisa Tomoda<sup>2</sup>, Naoki Sekiya<sup>1</sup>,  
Tatuya Yamagami<sup>2</sup>, Koichi Ijichi<sup>4</sup>, Kazuyoshi Arai<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Hosei University, 3-7-2 Kajino, Koganei 184-8584, Japan**

**<sup>2</sup>JAXA/ISAS, Soken-dai, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara 229-8510, Japan**

**<sup>3</sup>Tokyo University of Science, 6-3-1 Shinjuku, Katushika 125-8585, Japan**

**<sup>4</sup>Japan Space Systems, 3-5-8 Shibakoen, Minato 105-0011, Japan**

## **Abstract:**

**A solar power satellite (SPS) is defined as a system that generates electricity in orbit, and transmits it wirelessly to the earth by microwave beams. It has been required highly accurate and highly efficient beam forming technologies when transmitting energy by using microwaves. In order to satisfy these requirements, it has been considered to use a phased array antenna (PAA), which steers directions of the microwave beam by controlling excitation amplitude and phase of microwaves. To control them, a phase controlling and power amplifying module (PCPAM) consisting of RF power amplifier and phase shifter is mounted on the PAA.**

**The SPS and other experimental satellites will be exposed to severe space environments, including several factors such as radiation and thermal vacuum. These environmental factors have a potential to cause changes or damages to the characteristic of PCPAM. Hence, the PCPAM must withstand the severe space environment so as not to adversely affect beamforming. Therefore, it needs to be evaluated the space environmental resistance of the PCPAM.**

**Prototypes of the PCPAM was developed, and a total dose test using electrons to evaluate the radiation-resistant of prototype modules was carried out. In this total dose test, irradiation dose was set to the equivalent to the radiation dose on geostationary orbit. The maximum dose was equivalent to 40 years, and the minimum dose was 10 years.**

**According to obtained results, the electron irradiation has induced approximately 1 dB decreasing averagely at gain, but no dose-dependent has been confirmed. These results indicate that these decreases must be solved by somewhat ways since electron environment cause efficiency of the power transmitting and the electric energy lower than designated value. On the other hand, it is showed that the phase shift can be controlling sufficiently by means of a 6bit-digital phase shifter under the electron irradiation environment.**

**In this paper, we described the details of the experiments and evaluation.**

# 太陽発電衛星のための位相制御増幅器に関する耐放射線特性評価

## Radiation Resistance Evaluation of Phase Controlled and Power Amplifying Module for Solar Power Satellite

○岸田祐輔<sup>1</sup>, 田中孝治<sup>2</sup>, 中村剛也<sup>3</sup>, 友田孝久<sup>2</sup>, 関谷直樹<sup>1</sup>, 山神達也<sup>2</sup>, 伊地智幸一<sup>4</sup>, 新井和吉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>法政大学, <sup>2</sup>総合研究大学院大学・宇宙航空研究開発機構/宇宙科学研究所

<sup>3</sup>東京理科大学, <sup>4</sup>一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構

### 1 結論

近年, 埋蔵資源の有限性や地球温暖化などの諸問題への解決策として, CO<sub>2</sub> を排出しない再生可能エネルギーが注目されている. そこで, 太陽光を利用し, かつクリーンな大型基幹電力供給源として【太陽発電衛星】(SPS) が提案された [1]. SPS は静止軌道上に並べた太陽電池パネルによって得られる電力を送電アンテナからマイクロ波ビーム, 又はレーザーによって地上へ無線送電し, 利用することを目的とした数 km 規模の巨大な衛星である.

SPS のマイクロ波無線送電システムにおいては, ビームの高精度な方向制御, 送電効率の向上, 小型軽量化, 低コスト化などが重要な課題である. そこで, 数 km 四方の巨大アンテナ面に数十億個のアンテナ素子を配列したフェーズドアレイアンテナの研究開発が行われており, 各アンテナ素子の放射波の振幅と位相を位相制御増幅器と呼ばれる RF 回路によって制御することで, 極めて高いビーム形状および方向制御精度の実現を目指している.

加えて, SPS 用無線送電システムとして, 太陽電池を含む電源系, アンテナ素子, 位相制御増幅器を薄板形状に一体化した送電一体型パネルの開発を行っている. 位相制御増幅器に関しては, 低コストかつ民生用の集積回路(MMIC)を採用した試作品を製作し, この試作品をもとに送電一体型パネルに関する基礎的な検討を実施している. その検討の一つに耐宇宙環境性の評価がある.

SPS およびその実験用衛星は静止軌道または低軌道環境において放射線や熱真空環境などの厳しい宇宙環境に曝される. そのため, それらの環境に耐える構造でなくてはならない. また, 宇宙環境による RF 回路の特性変化が見込まれ, 結果として, マイクロ波ビームの制御精度に影響を及ぼす可能性が考えられる. そこで, 本研究では試作位相制御増幅器に関

して電子線環境に注目した耐放射線特性の試験・評価を行った.

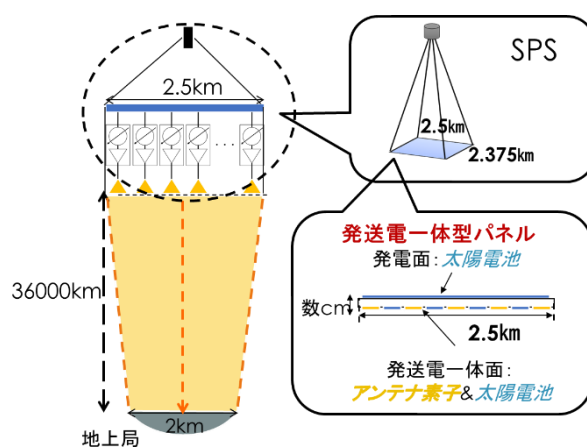


Fig.1 Solar power satellite (SPS).

### 2 位相制御増幅器

本研究で用いた位相制御増幅器を図 2 に示す. 本回路は 6bit デジタル移相器(PhS), 前段増幅器(DRV), 出力段増幅器(PA)から構成される. これらの構成素子は MMIC 化された民生品であり, DRV は GaAs/InGaP HBT 構造, PA は GaN HEMT 構造である. 各 RF 素子への供給電力は, PA に対しては +18 V, +5 V を供給し, DRV に対しては +5 V, PhS には ±5 V をそれぞれ供給した.

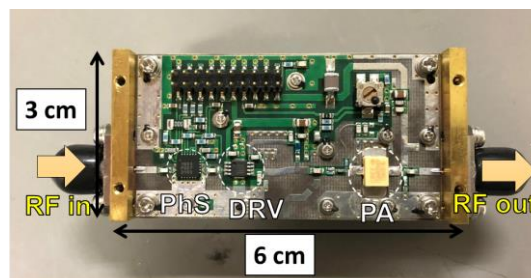


Fig.2 Phase controlled and power amplifying module.

### 3 電子線照射試験概要

本研究では、宇宙環境における電子線が位相制御増幅器に与える影響をトータルドーズによって評価した。今回の実験ではコバルト 60 をガンマ線源として用いた。ガンマ線は透過率が高いので、図 3 に示すように、線源と位相制御増幅器の間に厚さ 3 mm のアルミ板を介し、アルミ板より放射される二次電子を位相制御増幅器に対して照射した。また、図 4 より、線源と位相制御増幅器の距離は 10 cm であり、そこでの放射線量は 1560 Gy/h である。本実験では 5 台の位相制御増幅器に対して、静止衛星軌道における放射線量を  $10^2$  Gy/day [2] と仮定して、10, 20, 30, 40 年相当分のトータルドーズ試験を実施した。なお、40 年分に関しては 2 式のサンプルに対して試験を行った。

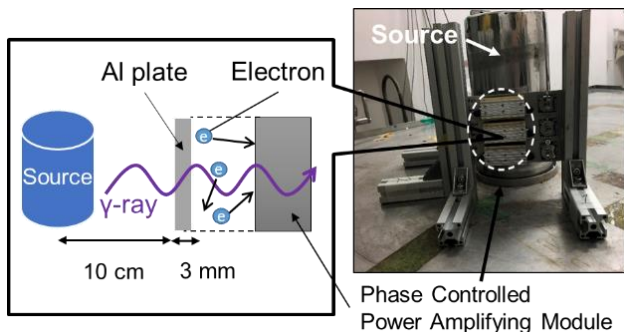


Fig.3 Configuration of the total dose test.

### 4. 測定構成

また、図 5 に本実験の測定構成系に関するブロック図を示す。本実験においては電子線照射前および照射後にベクトルネットワーク・アナライザ(VNA)を用いて、ゲインおよび移相器による位相制御量(移相と呼ぶ)をそれぞれ 3 回ずつ測定した。照射前後 3 回ずつの測定より得られた結果から、ゲインの平均、および移相の算術平均をそれぞれ取り、照射前後で比較を行った。なお、ゲインを測定する際の入力信号電力は 5~17.5 dBm であり、測定点は 200 点とした。移相を測定する際は、17.5 dBm の信号を入力し、-5.6deg., -11.2deg., -22.5deg., -45deg., -90deg., -180deg. の位相制御を実施した際の値を測定した。表 2 にゲインおよび移相を測定する際に位相制御増幅器に対して入力した信号に関する条件をまとめる。

Table2 Conditions of the input signal in measuring gain and phase shift.

	Input power[dBm]	Frequency [GHz]
Gain	5~17.5 (Number points:200)	5.8, 5.75
Phase shift	17.5	5.8, 5.75

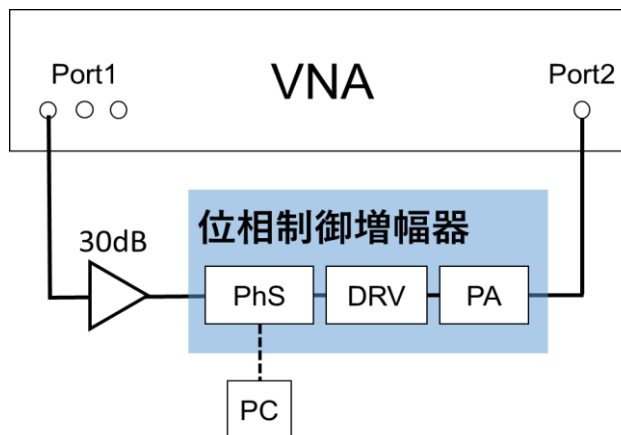


Fig.5 Block diagram of the measurement system.

## 5. 結果と考察

### 5.1. ゲインに関する測定結果と考察

図 6~9 に各周波数における、入力電力が 5 dBm および 16 dBm の場合のゲインを示す。これらの結果より、電子線を照射したのち、照射する前に比べて 0.5~2 dB 程度のゲイン低下が確認された。ゲインの低下は入力電力の大きい飽和領域(16 dBm)よりも、入力電力の小さい線形領域(5 dBm)において顕著であり、すべての年数において同様の傾向がみられた。また、ゲイン低下に電子線の照射年数との依存性は見られなかった。ゲイン低下の原因としては、電子線が回路内の MMIC パッケージを劣化させたことで誘電率が変化し、インピーダンスの整合が取れなくなったなどが考えられる。ただし、電子線照射後の測定結果にはばらつきがみられることが多く、測定構成の系統誤差である可能性も残されており、今後さらなる検討が必要である。また、今回の結果から電子線は位相制御増幅器に対して、破壊に至らしめるような致命的な影響は与えないことが明らかになった。

図 10,11 に出力信号電力に関する電子線照射前後比を示す。入力電力により異なるが、概ね出力電力の減少割合は信号周波数が 5.8GHz で 10~25%(ただし、20 年分のみ大幅な減少がみられた)、5.75GHz の場合 7~30%の減少割合がみられ、年数の依存性は確認で

きなかった。これらの出力電力の大幅な減少は SPS 全体の送電効率および送電電力量の低下に直結するものと考えられ、電子線に対して何らかの対策を講じる必要があることを示している。

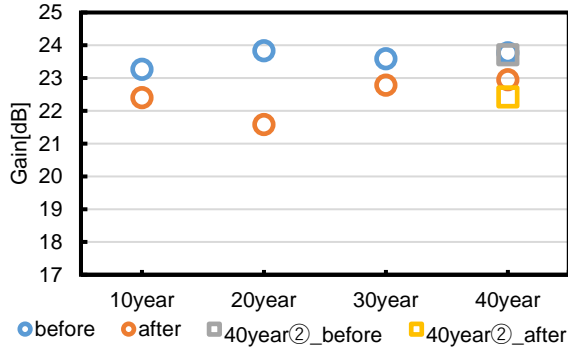


Fig.6 Comparisons of gain at input power of 5 dBm and frequency of 5.8 GHz.

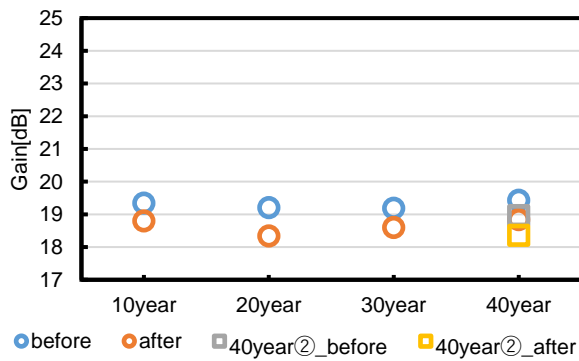


Fig.7 Comparisons of gain at input power of 16 dBm and frequency of 5.8 GHz.

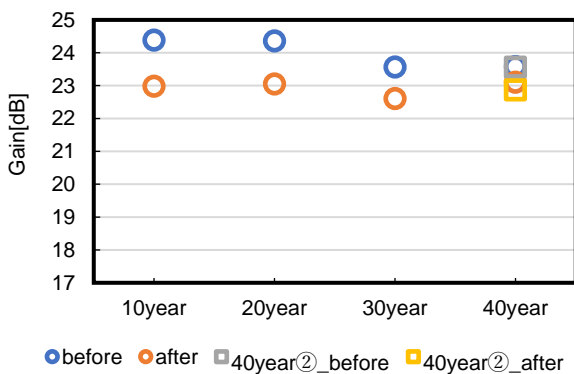


Fig.8 Comparisons of gain at input power of 5 dBm and frequency of 5.75 GHz.

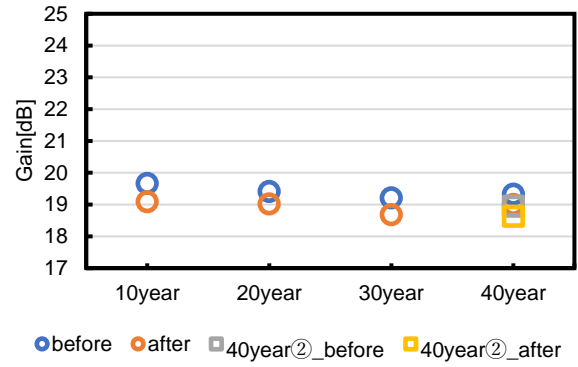


Fig.9 Comparisons of gain at input power of 16 dBm and frequency of 5.75 GHz.

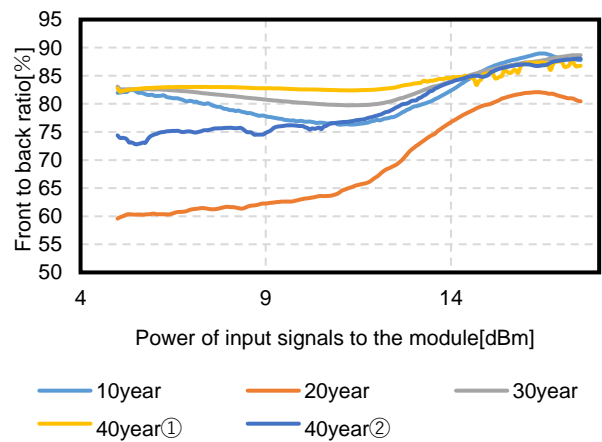


Fig.10 Ratio before and after irradiation test of output power at 5.8GHz frequency.

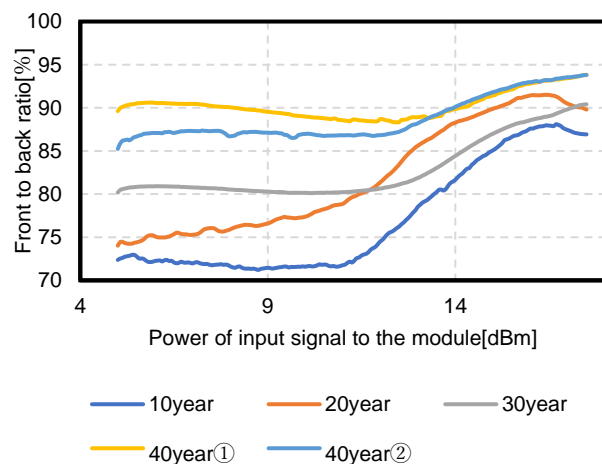


Fig.11 Ratio before and after irradiation test of output powers at 5.75GHz frequency.

## 5.2. 移相に関する測定結果と考察

表 3, 4 に電子線照射後の位相の測定結果から算出した, 移相の制御誤差を示す. これは, 移相の測定値と制御目標値との差の絶対値を取ったものである. ここで, SPS が静止軌道上から地上局に対してビーム制御を行う状況を考える. その際に許容される地上局からのビームのずれを 10 m とすれば, 移相制御時に許容される誤差は 5 deg. [3]未満である, という要求がある. 本要求と表 3, 4 の結果を比較すれば, 本実験における位相の制御誤差はすべて要求を満たしていることがわかる. 従って, 電子線環境下でもデジタル移相器による移相制御は十分に可能であることが明らかになった.

Table3 Control error of the phase shifter at the 5.8GHz frequency.

year	Phase shift error [deg.]					
	-5.6	-11.2	-22.5	-45	-90	-180
10year	0.52	2.13	1.3	1.3	0.06	1.94
20year	0.73	2.45	0.34	1.01	1.47	3.34
30year	0.55	1.85	1.35	1.21	1.98	0.99
40year①	0.73	2.2	0.98	0.57	0.45	1.3
40year②	0.03	1.94	1.63	0.37	0.11	1.39

Table4 Control error of the phase shifter at the 5.75GHz frequency.

year	Phase shift error [deg.]					
	-5.6	-11.2	-22.5	-45	-90	-180
10year	0.23	1.47	2.31	1.77	2.01	2.14
20year	0.65	1.98	1.42	1.21	0.47	1.53
30year	0.38	1.71	1.72	1.72	2.41	2.37
40year①	0.68	1.91	1.67	1.23	1.58	1.66
40year②	0.45	1.71	1.85	1.36	1.42	1.33

## 6. 結論

電子線照射によるトータルドーズ試験を行い, 電子線が位相制御増幅器に及ぼす影響に関して評価を行った. 電子線の照射によってゲインが低下し, 位相制御増幅器からの出力電力の減少が確認された. こ

れらの電力減少は SPS の送電量と効率低下につながる. 従って, 位相制御増幅器の耐放射線設計, あるいは遮蔽等の対策が必要であることが示された. 一方で, 破壊に至るような影響は確認されなかった. 今回の測定結果にはばらつきがみられることから, 測定システムの系統誤差である可能性も残されており, 今後さらなる検討が必要である. 位相制御に関しては, 電子線照射後も移相器は正常に動作しており, 放射線環境下においてもデジタル移相器による位相制御が可能であることが明らかになった.

## 7. 参考文献

- [1] Peter.E.Glaser, “Power from the Sun:Its future,” Science Vol.162,issue 3856,pp857-861 , America Assotiation for the Advancement of Science, 1968.
- [2] A. C. Tribble, The Space Environment. Implications for Spacecraft Design.Revised and Expanded Edition,p178, Princeton University Press, 2003.
- [3] 財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構, “平成 18 年度 太陽光発電利用促進技術調査成果報告書 別冊,” 2006.