

Evaluation of Basic Performance of 5.8GHz Magnetron*

Kei Fukutani, Tomohiko Mitani, Naoki Shinohara, Hiroshi Matsumoto
Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University
Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011

Abstract

In the present study, we have measured and evaluated basic performance of a 5.8GHz magnetron, such as DC-RF conversion efficiency, a curve of anode current vs. free-running frequency, a Q value, etc.

Studies on a magnetron for Wireless Power Transmission (WPT) have mainly been conducted with a cooker-type 2.45GHz magnetron. On the other hand, recent researches on SPS models have been designed at a frequency band of 5.8GHz. The present study contributes to system designs of WPT for recent 5.8GHz SPS models.

From experimental results, DC-RF conversion efficiency of a current 5.8GHz magnetron was measured to be about 40%; on the contrary, a current cooker-type 2.45GHz magnetron has around 70% DC-RF conversion efficiency, when a magnetron is operated by a DC stabilized power supply.

Next, we confirmed that the variation of the oscillation frequency is large enough to set up a Phase-Controlled Magnetron (PCM), so that a 5.8GHz PCM can be stably controlled as well as a 2.45GHz PCM.

With regard to a Q value of a 5.8GHz magnetron, it degraded more than 10 times compared to that of a 2.45GHz magnetron. One of the causes is overheat of the cathode filament due to excessive back bombardment energy. The back bombardment energy in a current 5.8GHz magnetron was calculated to be generated twice more than that in a current cooker-type 2.45GHz magnetron from experimental results.

The problems of both decrease of DC-RF conversion efficiency and excessive back bombardment energy are necessary to be solved, since they will bring other problems such as thermal problems and longevity problems of a SPS transmitting system.

* Presented at the 8th SPS Symposium, 16-17 September, 2005

5.8GHz帯マグネトロンの基礎特性評価^{注1}

福谷 景, 三谷 友彦, 篠原 真毅, 松本 紘 (京都大学生存圏研究所)

611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

mitani@rish.kyoto-u.ac.jp

要旨：無線電力伝送システムの送電器としてのマグネトロン研究は、これまでは主に 2.45GHz 帯のものであった。しかし、近年の SPS 設計の多くは 5.8GHz 帯の周波数で検討されており、これらの SPS 設計を具体化するためにも 5.8GHz 帯マグネトロンの研究は必要である。本研究では、その基礎研究として 5.8GHz 帯マグネトロンの基礎特性の測定および評価を行った。

測定結果より、直流安定化電源駆動時の 5.8GHz マグネトロンの DC-RF 変換効率は 40%程度であり、2.45GHz マグネトロンと比較して 30 ポイント低下していることがわかった。陽極電流に対する発振周波数の変化量に関しては、位相制御マグネトロンを構築する上で十分であることが確認された。また、陰極フィラメントの過熱要因である陰極逆衝撃エネルギーが、5.8GHz マグネトロンでは 2.45GHz マグネトロンと比較して 2 倍以上に増加していることが推算された。この陰極フィラメントの過剰加熱は、5.8GHz マグネトロンのスペクトル Q 値が 2.45GHz マグネトロンに比べて 10 倍以上劣化している原因の一つと考えられる。DC-RF 変換効率の低下および逆衝撃エネルギーの増加は、SPS 送電システムの熱処理問題、寿命問題に対して悪影響となるため、今後の改善が必要とされよう。

1. はじめに

マグネトロンは電子管の一種であり、70%以上の高い変換効率・低コスト・マイクロ波出力 1Wあたりの重量が軽量であるという長所から、SPS実証試験衛星/商用衛星のマイクロ波送電システムにおけるマイクロ波発振器の有力候補の1つである。我々の研究グループでは、これまでに位相制御マグネトロン(Phase-Controlled Magnetron: PCM)^[1]及び位相振幅制御マグネトロン(Phase-and-Amplitude-Controlled Magnetron: PACM)^[2]を開発し、PCMを用いたアクティブフェーズドアレーの研究を行ってきた。これは、SPS送電システムのマイクロ波出力を唯一のマイクロ波発振器で賄うことは事実上不可能であり、無数のマイクロ波発振器を用いた大規模なフェーズドアレー化によるマイクロ波ビーム制御が必須とされているためである。また、SPS送電システムから放射されるマグネトロン雑音が、他の通信機器に影響を及ぼす可能性がある。この雑音問題の解決のために、マグネトロン自体の低雑音化に関する研究^{[3][4]}も行われている。

これらの SPS に対するマグネトロン応用の研究のほとんどは、周波数 2.45GHz 帯の民生用マグネトロンが用いられている。これは 2.45GHz 帯マグネトロンが既にマイクロ波加熱用として世界に広く普及しており、安価かつ大量に入手可能であったためである。これに対し近年の SPS モデルは、送電周波数が高くなることによる送電システム寸法の縮小、および送電システムの軽量化に繋がるという理由から、周波数 5.8GHz 帯で設計されているものがほとんどである。従って、周波数 5.8GHz 帯での SPS 設計を具体化するためにも 5.8GHz 帯マグネトロンの研究は必要である。

5.8GHz帯マグネトロンに関しては、既にサンプルベースで市販されており、また我々の研究グループにより、5.8GHz帯の宇宙太陽発電所発送受電システム (Solar Power Radio Transmission System: SPORTS)^[5]が 2001 年に京都大学に導入されている。しかし、5.8GHz 帯マグネトロンの SPS 用途としての基礎的な測定及び評価は行われていなかった。

そこで本研究では、5.8GHz 帯マグネトロンの基礎特性の測定及び評価を行った。本報告では、今回行った基礎特性測定である、DC-RF 変換効率、陽極電流-発振周波数特性、発振スペクト

^{注1} 第 8 回 SPS シンポジウム, 帝京大学にて 2005 年 9 月 16, 17 日開催

ル Q 値の測定結果, および 2.45GHz 帯マグネトロンとの比較検討結果について述べる.

2. 測定概要

図 1 に 5.8GHz 帯マグネトロンの基礎特性測定実験の概略図を示す. 5.8GHz 帯マグネトロンは, パナソニック半導体ディスクリートデバイス (略称 PSCDD, 旧松下電子応用機器) で開発されたマグネトロンを用い, 同じ条件下で 3 個 (No.1~No.3) 測定する. マグネトロンは高電圧直流安定化電源で駆動する. 直流電力はそれぞれオシロスコープ及び電流計で測定された陽極電圧値と陽極電流値の積で表される.

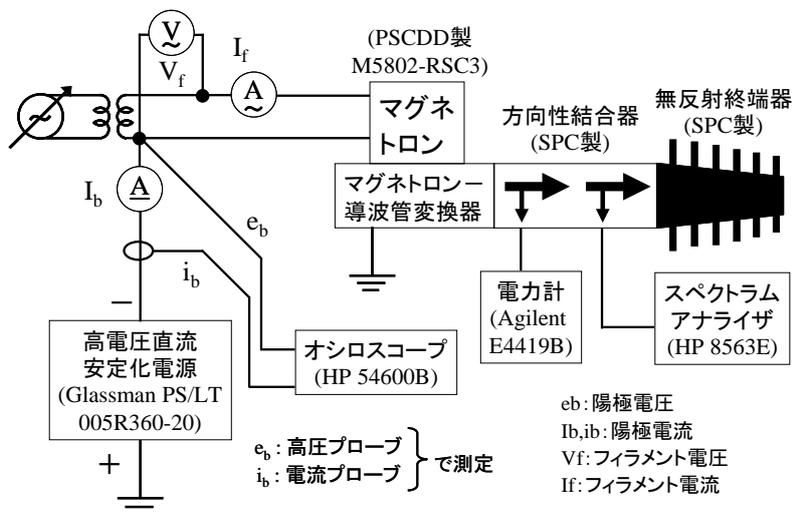


図 1 5.8GHz 帯マグネトロン測定概略図

マイクロ波出力電力は, 方向性結合器を介してその一部の電力が分配され, 電力計で測定される. 残りのマイクロ波電力は無反射終端器により消費され, 負荷の整合が保たれる. またマグネトロンの発振周波数スペクトルは同じく方向性結合器を介してスペクトラムアナライザで測定される.

3. 測定結果

3. 1. DC-RF変換効率

図 2 に陽極電流値とDC-RF変換効率の関係を示す. DC-RF変換効率は, マグネトロンの入力直流電力を P_i , 陰極フィラメントでの消費電力を P_f , マイクロ波出力電力を P_o としたとき, $(\text{DC-RF変換効率}) = P_o / (P_i + P_f) \times 100\%$ で計算される. 図 2 の実線は定格フィラメント電流を流したとき, 点線はフィラメント電流を発振後に off にしたときの実験結果である.

測定結果より, 5.8GHz マグネトロンの DC-RF 変換効率はおよそ 40% である. 一方, 今回の実験に用いたマグネトロンの仕様値によると DC-RF 変換効率は 60% であり, 仕様値と実験値との間には 20 ポイントの差が見られる. この差の原因はマグネトロン駆動電源の違いによると考えられる. 今回の実験ではマグネトロンは直流安定化電源で駆動されており, マグネ

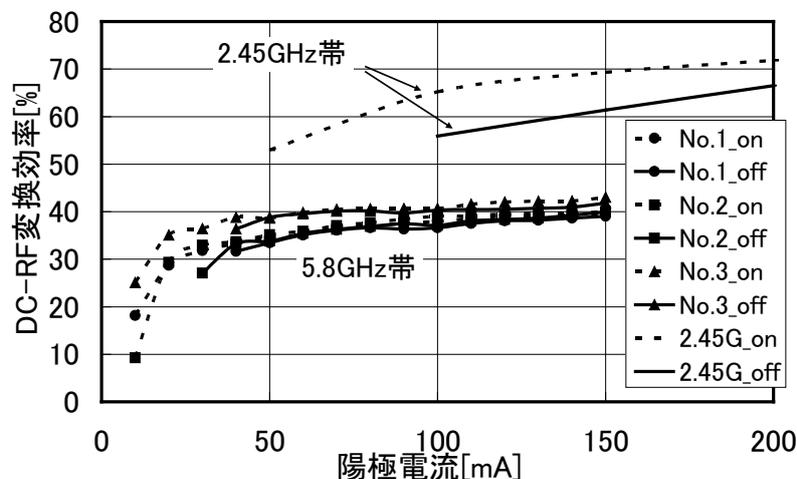


図 2 DC-RF 変換効率の測定結果

トロンの動作点は一定である. 一方, マグネトロンの仕様値を決定する計測においては, マグネ

トロンは全波整流非平滑電源で駆動されており、陽極電流値が 0~1A の間を変動するためマグネトロンの動作点も変動している。現在のところ、この駆動電源の違いによる動作点変化の差異のため、マグネトロンの DC-RF 変換効率が異なる結果を示すと考えられる。

また、2.45GHz マグネトロンは、図 2 に示すとおり 70%前後の DC-RF 変換効率が過去の実験結果より得られており、5.8GHz 帯マグネトロンの変換効率は 2.45GHz マグネトロンより 30 ポイント程度低下していることがわかる。この原因は、周波数が高くなるにつれマグネトロン管内の系の寸法が小さくなり、製作上の難易度が増加したためと考えられる。なお、最新の 5.8GHz マグネトロンでは、DC-RF 変換効率の標準仕様値が 66%まで改善されており、発振周波数の違いによる変換効率の差は徐々に小さくなっている。

3. 2. 陽極電流—発振周波数特性

我々のグループで開発されている位相制御マグネトロンは、陽極電流制御によるマグネトロン発振周波数の変化を利用している。従って、陽極電流変化に対する発振周波数の変化量は重要な要素であり、発振周波数が広範囲に変化する方が、位相制御マグネトロンをアレー化する場合により柔軟に対応できる。

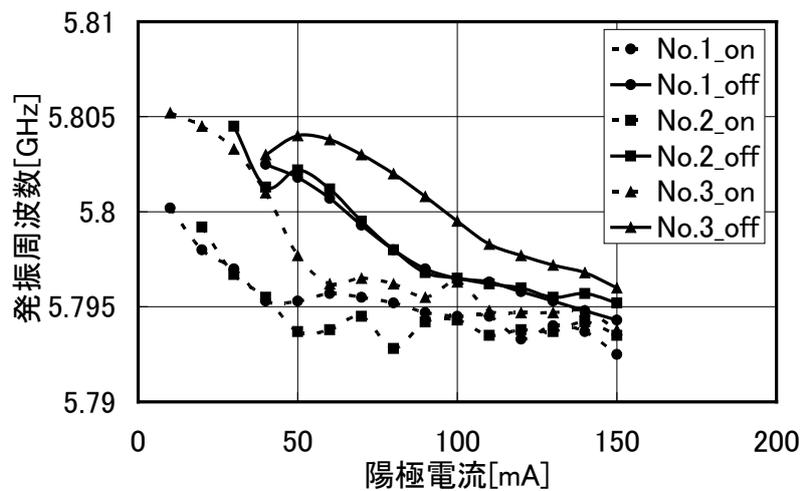


図 3 陽極電流—発振周波数特性の測定結果

図 3 に 5.8GHz マグネトロンの陽極電流—発振周波数特性の測定結果を示す。図 3 より、5.8GHz マグネトロンの発振周波数の変化量は約 10MHz/100mA と見積もることができる。一方、2.45GHz マグネトロンの発振周波数の変化量は過去の実験結果より 10MHz/250mA である。このことから、5.8GHz 帯マグネトロンの発振周波数の変化量は、その動作範囲内においては 2.45GHz マグネトロンと同程度得られているといえる。また 5.8GHz マグネトロンの場合、変化の傾きが 2.45GHz マグネトロンと比較して急峻であり、符号が逆転しているが、これらの要素は位相制御マグネトロンを構築する上での支障とはならない。従って、5.8GHz マグネトロンは位相制御マグネトロンを構築する上では、十分な周波数変化を持っていると結論づけられる。

3. 3. スペクトル Q 値

スペクトル Q 値は発振周波数帯域幅を知るための指標であり、(スペクトルの Q 値) = (スペクトル半値幅) / (発振周波数) で表される。スペクトル半値幅とは、発振周波数スペクトルのピーク値と比較して -3dB 以上のスペクトル強度が得られる周波数範囲のことを示す。Q 値が大きいほど狭帯域で発振していることを示しており、SPS 送電システムにとっては、Q 値が大きいほど良い。

図 4 に陽極電流—スペクトル Q 値の測定結果を示す。図 4 の実線は定格フィラメント電流を流したとき、点線はフィラメント電流を発振後に off にしたときの結果である。

図4より、定格フィラメント電流を流したときのQ値は陽極電流の増加とともに低下しており、一方でフィラメント電流 off 時の Q 値は陽極電流の増加とともに上昇している。陽極電流 150mA 時には、フィラメント電流によらずほぼ同じ Q 値を示している。

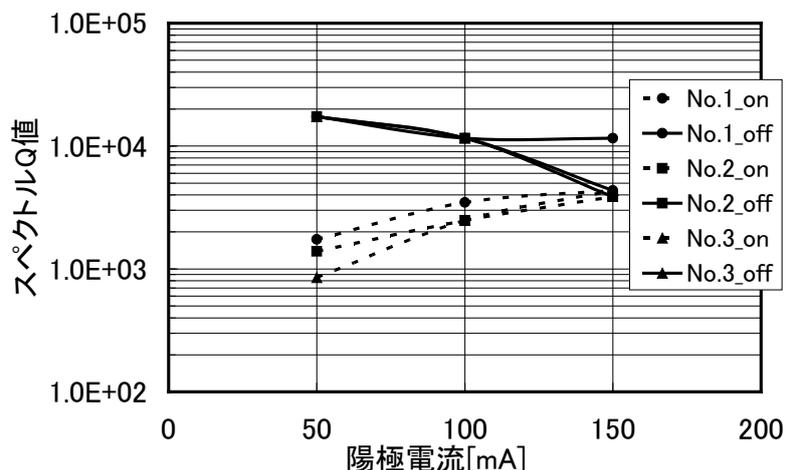


図4 スペクトル Q 値の測定結果

ここで過去の実験結果より、2.45GHzマグネトロンのQ値

は、フィラメントoff時において 10^5 程度を示している。この 2.45GHzマグネトロンのQ値と比較すると、5.8GHzマグネトロンのQ値は 10 倍以上劣化していることがわかる。

Q 値の劣化要因の一つはフィラメント温度の上昇による熱雑音の増加である。次節では、フィラメント温度の上昇と密接に関係する陰極逆衝撃エネルギーの推算結果について示す。

3. 4. 陰極逆衝撃エネルギー

陰極逆衝撃とは、陰極から放出された電子の一部が再び陰極に戻るとき、マイクロ波から電磁界エネルギーを与えられるため、放出時よりも大きなエネルギーで陰極に衝突する現象である。この陰極逆衝撃エネルギーにより陰極フィラメントが加熱される自己陰極加熱、あるいは2次電子放出といった現象が発生する。このとき、過剰な自己陰極加熱が発生すると、熱雑音によるマグネトロンの発振スペクトルの広帯域化、および過剰なフィラメント温度上昇によるマグネトロンの短寿命化に繋がる恐れがある。従って、陰極逆衝撃エネルギーは小さいほど良い。

図5に陽極電流－陰極逆衝撃電力の推算結果を示す。陰極逆衝撃電力は、同じフィラメント抵抗値における（非発振時のフィラメント消費電力）－（発振時のフィラメント消費電力）で推算することができる。

推算結果より、5.8GHz マグネトロンの陰極逆衝撃電力は陽極電流の増加とともに増大し、陽極電流 150mA においては、およそ 40W の陰極逆衝撃電力が発生している。一方、2.45GHz マグネトロンの陰極逆衝撃電力は、過去の測定結果より、陽極電流 400mA の時でも 16W 程度である。従って 5.8GHz マグネトロンの陰極逆衝撃エネルギー

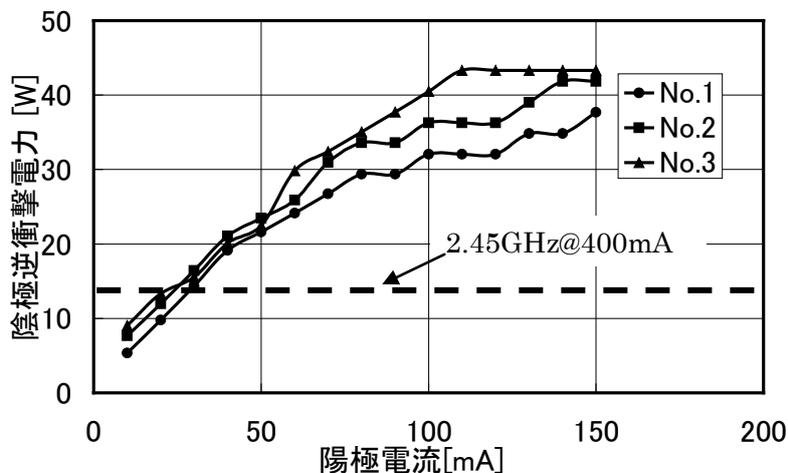


図5 陰極逆衝撃電力の推算結果

は 2.45GHz マグネトロンのそれより 2 倍以上を示しており、この過剰な陰極逆衝撃電力が、スペクトル Q 値の劣化の原因の一つであるといえる。

5. おわりに

本研究では、5.8GHz マグネトロンの基礎特性測定を行った。測定結果より、発振周波数変化量に関しては、動作範囲内において十分であり、位相制御マグネトロンを構築する上での支障はない。しかし、DC-RF 変換効率、陰極逆衝撃エネルギーに関しては、いずれも 2.45GHz マグネトロンより悪化しており、今後解決する必要がある。

ここで、表 1 に入力電力を 100%としたときのマグネトロンの電力消費の内訳を示す。表 1 に示すように、現状の 5.8GHz マグネトロンでは、半分以上の入力電力が陽極での熱損失として消費されている。従って、SPS 送電システムの熱問題を軽減するためにも、また送電システム効率そのものを向上させるためにも、DC-RF 変換効率の向上は極めて重要な課題であるといえる。

表 1 入力電力を 100%としたときのマグネトロンの消費電力の内訳

	5.8GHz	2.45GHz
マイクロ波電力	40%	70%
陰極逆衝撃電力	6%	2%
陽極での熱損失	54%	28%

参考文献

- [1] 篠原 真毅, 三谷 友彦, 松本 紘, “位相制御型マグネトロンの開発研究”, 信学論(C), Vol.J84-C No.3, pp.199-206, 2001 年 3 月
- [2] 加藤 紳一郎, 篠原 真毅, 松本 紘, “位相振幅制御マグネトロンの開発研究”, 第 6 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 pp.81-86, 静岡大学, 2003 年 10 月
- [3] 三谷 友彦, 篠原 真毅, 松本 紘, 橋本 弘藏, “フィラメント電流遮断後のマグネトロンの発振特性に関する実験的研究”, 電子情報通信学会論文誌(C), Vol.J85-C No. 8, pp.983-990, 2002 年 11 月
- [4] T. Mitani, N. Shinohara, H. Matsumoto, and K. Hashimoto, “Improvement of Spurious Noises Generated from Magnetrons Driven by DC Power Supply after Turning off Filament Current”, IEICE Transactions (C), Vol. E86-C No.11, pp.1556-1563, Aug. 2003
- [5] 篠原 真毅, 松本 紘, “マイクロ波送電の実現可能性 II –京大の取り組みとロードマップ–”, 第 5 回宇宙太陽発電システム (SPS) シンポジウム講演要旨集 pp.113-118, 神戸大学, 2002 年 11 月