

300 GHz CW Gyrotron FU CW I の動作特性解析

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2010-01-07 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中野, 智彰, 橋本, 秀一, 立松, 芳典, 斉藤, 輝雄, 光藤, 誠太郎, NAKANO, T, HASHIMOTO, S, TATEMATSU, Y, SAITO, T, MITSUDO, S メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/2339

300 GHz CW Gyrotron FU CW I の動作特性解析

Analysis of oscillation characteristic of 300 GHz CW Gyrotron FU CW I

中野智彰, 橋本秀一, 立松芳典, 斉藤輝雄, 光藤誠太郎
T. Nakano, S. Hashimoto, Y. Tatematsu, T. Saito, S. Mitsudo

福井大学遠赤外領域開発研究センター
Research Center for Development of Far-Infrared Region,
University of Fukui, Fukui 910-8507, Japan

Abstract

A 300 GHz CW Gyrotron FU CW I has been developed and installed as a power source of a high frequency material processing system. Its performance test was carried out and the maximum power of 1.7 kW/CW has been attained at the beam voltage V_k of 15 kV and the beam current I_k of 1 A. However, the obtained power is only a half of the designed value of 3.5 kW. Anode current and fluctuation of beam current increased with the beam voltage. To reduce them, a large anode resistance was inserted, and they have been controlled by enlarging the anode resistance. In result, we obtained 2.3 kW, a new record of the output power. The present radius of electron beam in the cavity has been shifted from that in design owing to the addition of the auxiliary magnetic coils. To optimize the beam radius determined the relation between the radius of the electron beam and auxiliary magnetic field, by utilized transition of rotational direction of oscillation mode in the cavity.

1. はじめに

遠赤外領域開発研究センターでは、高周波ジャイロトロンの実用的利用を目指して長時間の連続動作可能な CW ジャイロトロンを開発を進めている。その中の一つとして「300 GHz CW Gyrotron FU CW I」がある。このジャイロトロンは、シタリング（セラミックの焼結等）を目的に、ロシア科学アカデミー応用物理学研究所で設計・製成され、当センターに設置され、発振試験が行われた。このジャイロトロンは、CW 動作で定格ビーム電圧 16 kV、ビーム電流 1.1 A で出力は 3.5 kW、動作モードは TE_{22,8} で、出力窓からガウスビームで出力されるように設計されている。

前年度までに行った FU CW I の発振特性の実験結果について示す[1-3]。CW 動作で、ビーム電流 1.0 A、主磁場電流 146.1 A、補助磁場電流 0 A、150 A で各ビーム電圧に対して、アノード電流の測定を行った結果を図 1-1 に示す。ビーム電圧を大きくすると、アノード電流が増大する。また、補助磁場電流を大きくすることで、アノード電流を抑えることが出来ることが分かる。しかし、補助磁場を印加してもビーム電圧 12 kV 以上でアノード電流は 10 mA を超えてしまう。これではアノード部に 100 W 以上の負荷がかかってしまい、ジャイロトロン状態に悪影響を及ぼす可能性がある。そのため、更にアノード電流を抑える必要がある。

また、パルス動作で、ビーム電圧 15 kV、主磁場電流 146.1 A、補助磁場電流 150 A、パルス幅 1 msec、繰り返し 5 Hz、デューティ比 1/200 の動作条件で、時間に対するビーム電流の波形を測定した結果を図 1-2 に示す。図 1-2 から、ビーム電流の揺動の振幅は 0.15 A であり、ビーム電流の値に対して 10 %以上に及んでいる。これより、ジャイロトロン動作においてなんらかの不安定性が起きていると考えられる。

次に、CW 動作で、各ビーム電圧に対する最大出力の測定を行った結果を図 1-3 に示す。図 1-3 から、前年度までのこのジャイロトロン連続動作での出力は、最高 1.7 kW、発振効率 11.5 %であり、設計出力の 1/2 であることが分かる。このジャイロトロンに応用目的であるシタリングの研究をより有効に行うためには、出力の向上を行う必要がある。

出力不足の原因として、ビーム電流の揺動にみられるジャイロトロン動作の不安定性、アノード電流抑制のために追加した補助磁場による空洞共振器入口での電子入射位置の変化等が考えられる。そこで本報告ではこの問題の解決のために、アノード・アース間へ高抵抗を挿入する。これによりアノード電流の抑制とビーム電流の揺動の抑制を行う。その後、出力の補助磁場依存性の測定を行い、キャビティ部での電子ビーム半径を求め、補助磁場電流値の調節による電子ビーム半径の最適化が可能であるか検証する。

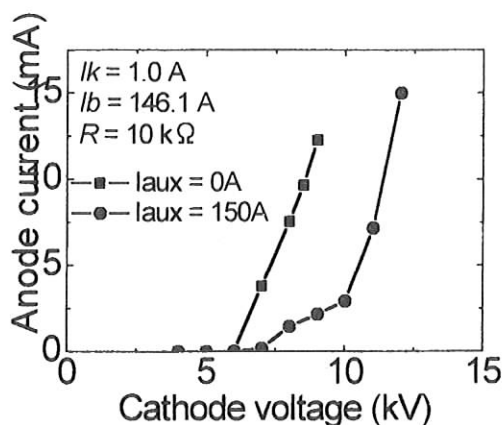


図 1-1 アノード電流測定結果

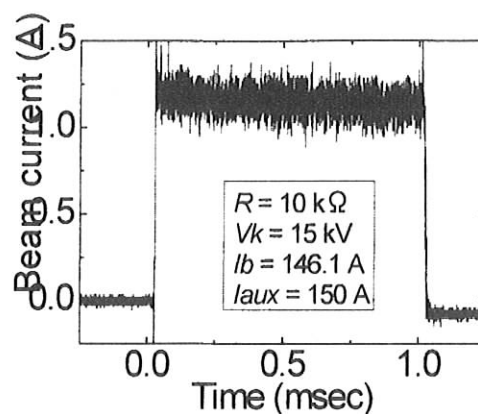


図 1-2 ビーム電流波形

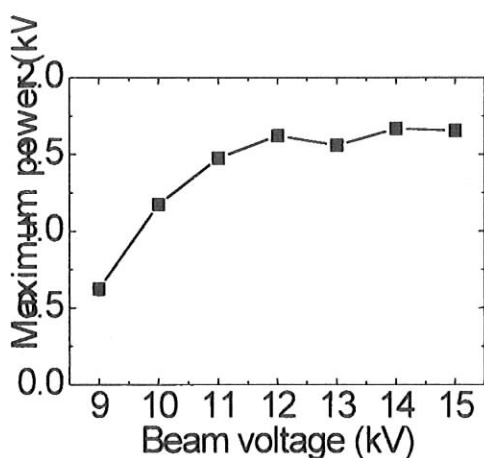


図 1-3 各ビーム電圧に対する最大出力

2. FU CW I の仕様

本実験で用いた 300 GHz CW Gyrotron FU CW I は、福井大学とロシア科学アカデミー応用物理研究所(IAP RAS)および Gycom との共同開発である。このジャイロトロンの動作モードは TE_{22,8}、設計出力は 3.5 kW、ビーム電圧は最大 16kV、ビーム電流は最大 1.1 A、出力窓材は BN で直径は 80 mm である。また、本来の設計にはない補助磁場コイルの増設を行っている。

このジャイロトロンの特徴として、内蔵モードコンバータがある。この内蔵モードコンバータは準光学放射器と 4 枚の分布整形ミラーで構成されている。モードコンバータによって、共振器で発振した TE_{22,8} という超高次モードはガウスビームに変換され、CW I の真空窓を通して出力が水平方向にビーム状に放射される。さらに、この内蔵モードコンバータはジャイロトロン軸に対して下から見て右回りの回転モードのみを外

部に出力する。現在の FU CW I の磁場の向きは下向きのため、共振器で発振するモードのうち真空窓から出力されるのは、電磁波の回転方向が電子の回転方向と反対方向のモード (counter-rotating mode) のみであり、同方向のモード (co-rotating mode) は出力されない。

3. 実験方法

FU CW I の CW 動作での真空窓からの出力測定は、水負荷を用いて行う。水負荷をジャイロトロンに取り付けた際の写真を図 3-1 に示す。水負荷をジャイロトロンの真空窓に取り付け、真空窓から放出される電磁波を水負荷内部の SiC で吸収する。SiC で発生する熱は外周部に流れている冷却水に移動する。冷却水の出口に測温抵抗体を置く。測温抵抗体は抵抗の温度変化で抵抗値が換わる。抵抗値の変化 $\Delta\Omega$ [Ω] から、ジャイロトロンの発振出力 P [kW] への変換は、冷却水の流量が l [l] のとき、

$$P = 0.179 \cdot \Delta\Omega \cdot l \quad (3-1)$$

によって行う。

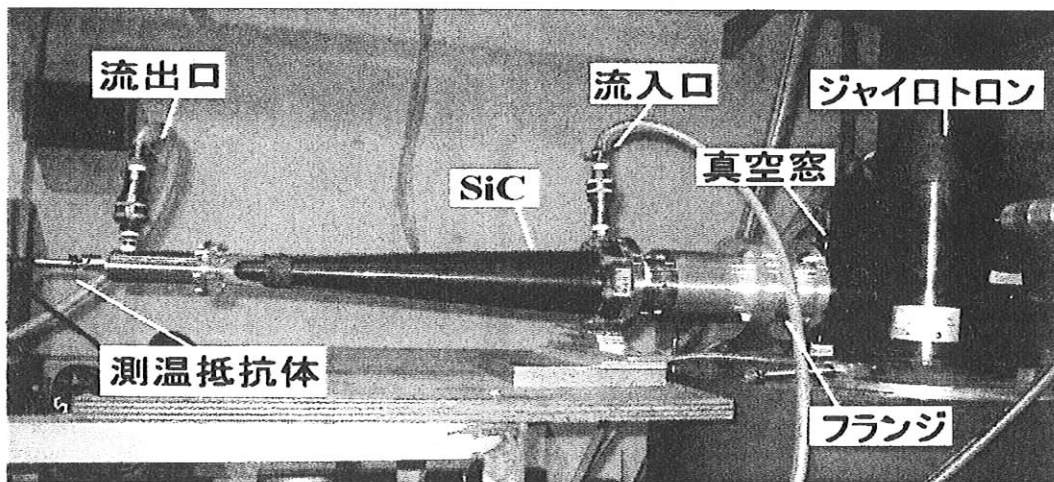


図 3-1 出力測定実験

4. アノード電流とビーム電流の揺動の抑制[4]

FU CW I は、アノードに流れる電流を測定するための回路が、アノード・アース間に挿入されている。図 4-1 にその簡単な回路図を示す。アノード・アース間には抵抗値の大きい $R_a = 10 \text{ k}\Omega$ と抵抗値の小さい $R_b = 400 \text{ }\Omega$ の抵抗が直列に挿入されている。このうち、 R_a の抵抗によって、アノード・アース間に流れる電流を決めている。以後はこの抵抗をアノード抵抗と呼ぶ。一方、 R_b は、ジャイロトロンの発振時に抵抗両端の電位差

からアノード電流値を求めるモニター抵抗の役割を果たす。 R_β にかかる電圧を V_a [V], アノード電流を I_a [mA], として, アノード電流の計算式は,

$$I_a = 2.5V_a \quad (4.1)$$

となる。

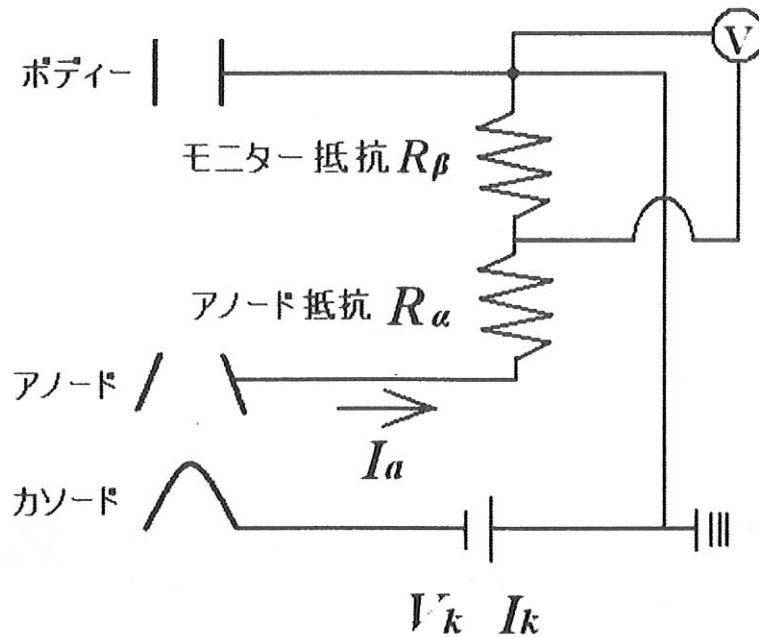


図 4-1 アノード抵抗の回路図

FU CW I は図 1-1 で示したように, ビーム電圧を定格値まで上げるとアノード電流が著しく増大する. そのため, 更にアノード電流を抑える必要がある. アノードに流れ込む電力 P_a [W] と電流 I_a [mA], ビーム電圧 V_k [kV] の関係は,

$$P_a = V_k I_a \quad (4.2)$$

となる. 電圧が一定のとき, 抵抗を大きくすれば, 電流は相対的に小さくなるので, 電力は小さくなる. そこで, R_α を大きくすることで, アノード電流の更なる抑制を行った.

R_α を大きくするに伴いモニター抵抗 R_β の大きさも $10 \text{ k}\Omega$ に変更した. アノード抵抗 R_α に $150 \text{ k}\Omega$, $300 \text{ k}\Omega$, $500 \text{ k}\Omega$, $1 \text{ M}\Omega$ を用意して抵抗を変更できるようにした. $10 \text{ k}\Omega$ のモニター抵抗の両端の電位差が V_a [V] のとき, アノード電流 I_a [mA] は,

$$I_a = 0.1V_a \quad (4.2.3)$$

である. CW 動作で, ビーム電流 1.0 A , 主磁場電流 146.0 A , 補助磁場電流 150 A の動作条件でアノード抵抗に対するアノード電流の測定を行った結果を図 4-2 に示す. 図 4-2 から, アノード抵抗 $300 \text{ k}\Omega$ 以上でアノード電流は 10 mA 以下となり, アノード抵抗を大きくすることで, アノード電流を大きく抑えることが出来た.

また、アノード抵抗を変更し、パルス動作で、主磁場電流 146.1 A、補助磁場電流 150 A、パルス幅 1 msec、繰り返し 5 Hz、デューティ比 1/200、ビーム電圧 15 kV の動作条件で、アノード抵抗 500 k Ω でのアノード電流波形の測定結果を図 4-3 に示す。図 4-3 のように、アノード抵抗を大きくすることでビーム電流の揺動は小さくなった。

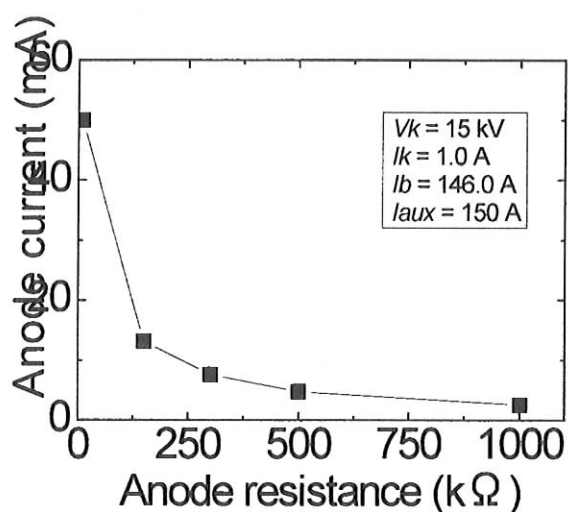


図 4-2 アノード抵抗に対するアノード電流

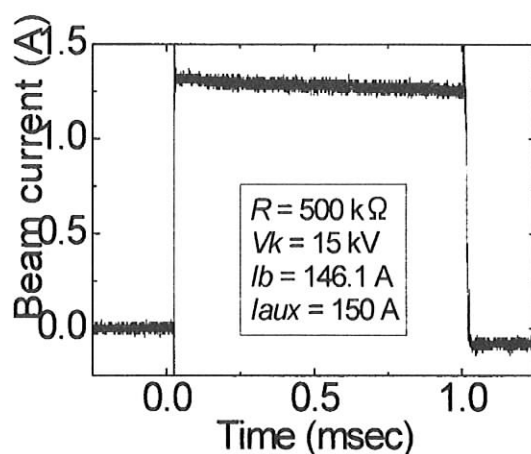


図 4-3 アノード抵抗 500 k Ω 時のビーム電流波形

次に、各アノード抵抗に対して主磁場電流を変えたときの出力の測定を行った。動作条件はビーム電圧 15 kV、補助磁場電流 150 A で主磁場電流に対するアノード抵抗ごとの出力測定の結果を図 4-4 に示す。図 4-4 から、アノード抵抗変更前、即ち $R = 10$ k Ω

での出力に比べ、アノード抵抗を変更した $R > 150 \text{ k}\Omega$ での出力の方が大きいことが分かる。また、アノード抵抗 $500 \text{ k}\Omega$ で、前年度までに得られた最高出力 1.75 kW を更新して最高出力 2.3 kW を得ることが出来た。これは、アノード抵抗を変更したことによりビーム電流の揺動が抑えられ、ジャイロトロン発振の不安定性が緩和されたためであると考えられる。

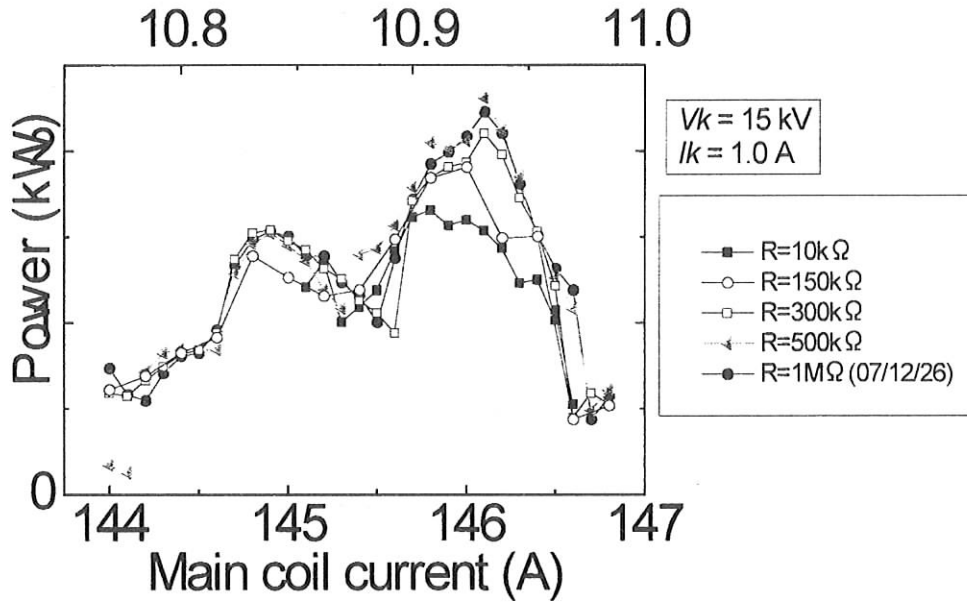


図 4-4 アノード抵抗ごとの出力

5. 電子ビーム半径の決定[4,5]

発振出力に影響を与える重要なパラメータの一つに、空洞共振器入口での電子ビーム半径 R_b がある。電子ビームと空洞共振器内の電界との結合の強さを表す結合係数は、共振器半径と結合モードを定めたとき、 R_b に依存する。

設計段階において、FU CW I の電子ビーム半径は、TE_{22,8} に対して結合係数が最も大きくなる 3.71 mm 付近に選ばれている。しかし、FU CW I はビーム電圧を定格値まで上げるとアノード電流が著しく増大するため、これまではアノード電流を抑えるために補助磁場を印加していた。電子ビーム半径と磁場の関係は、共振器領域の磁場強度 B_c 、電子銃領域の磁場強度 B_k 、エミッタリングエリアの半径 R_k とおくと

$$R_b = R_k \sqrt{\frac{B_k}{B_c}} \quad (5.1)$$

で表せる。式(5.1)から分かるように、補助磁場を印加すると空洞共振器における電子ビ

ーム半径は変化する。よって、補助磁場の印加によって、現在の実験での R_b は当初の設計の値からずれていると考えられる。

先に述べたように、アノード抵抗を大きくすることで、アノード電流を抑えることができ、補助磁場を下げてもジャイロトロンを運転することが可能になった。そこで出力の向上のために、現在の電子ビーム半径の値を求め、補助磁場電流を変えることで電子ビーム半径を最適化することを考える。まず、コイル配位から現在の実験での R_b と補助磁場電流 I_{aux} の関係は、

$$R_b = 0.0173R_k \left(1 + \frac{7.49 \times 10^{-3} I_{aux}}{B_c} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$$

となる。実験では主磁場コイルと補助磁場コイル間の引力が大きくなりすぎないように、装置の安全のため $I_{aux} \leq 150A$ と制限している。式(5.2)の右辺括弧内の第二項 $\ll 1$ として展開し、 $R_k = 21.5 \text{ mm}$ を代入すると、式(5.2)は、

$$R_b = 3.72 + 0.0139 \times \frac{I_{aux}}{B_c} \quad (5.3)$$

となる。式(5.3)が、設計上のコイル配位から求めた電子ビーム半径である。式(5.3)の第一項は、補助磁場設置前の初期ビーム半径を表しており、結合係数が最大となる 3.71 mm に近い。式(5.3)に、 $B_c = 10.93 \text{ T}$ 、 $I_{aux} = 150 \text{ A}$ を代入すると $R_b = 3.91 \text{ mm}$ となり、補助磁場の印加により電子ビーム半径が有意に変わる。そのため、結合係数が変わり、発振動作に変化が現れることが予測される。

実際に、補助磁場電流に対する FU CW I の出力変化を測定する。CW 動作で、ビーム電圧 15 kV 、ビーム電流 1.0 A 、アノード抵抗 $500 \text{ k}\Omega$ で補助磁場電流の値ごとに、主磁場電流を 141.0 A から 149.0 A まで 0.1 A ずつ変化させた際の出力の測定結果を図 5-1 に示す。図 5-1 から、同じ主磁場電流値でも補助磁場電流の値が異なると、出力に変化が現れることがわかる。設計モードである TE22,8 が発振すると考えられる主磁場電流 146.1 A に注目すると、補助磁場電流 120 A と 80 A で出力は大きく異なる。より詳しく出力の変化を測定するために CW 動作で、ビーム電圧 15 kV 、ビーム電流 1.0 A 、主磁場電流 146.1 A 、アノード抵抗 $500 \text{ k}\Omega$ で補助磁場電流 90 A から 120 A に対して出力の測定を行った結果を図 5-2 に示す。図 5-2 から、補助磁場電流 105 A 付近で出力に急激な変化があることがわかる。

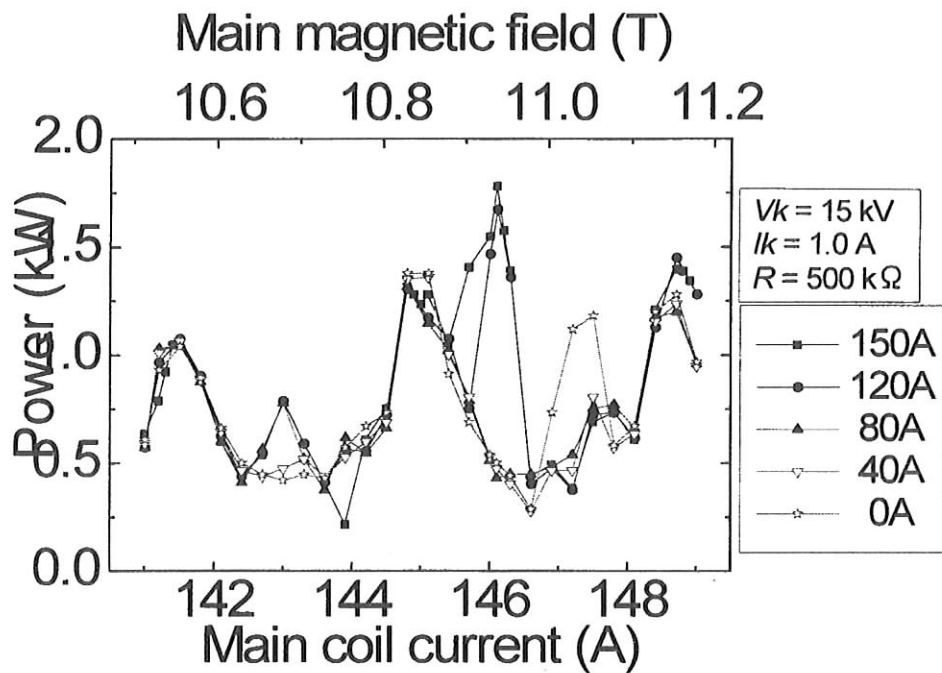


図 5-1 補助磁場電流ごとの主磁場電流に対する出力の変化

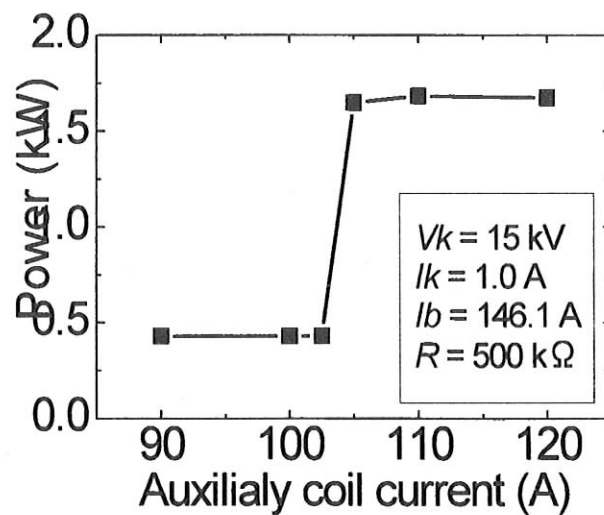


図 5-2 補助磁場電流に対する出力変化

図 5-2 で示したように、真空窓からの出力は補助磁場電流のある値に対して急激に変化する。この結果を説明するために、FU CW I の空洞共振器に対して、TE_{22,8} の co-rotating mode (TE_{22,8,co}) 及び counter-rotating mode (TE_{22,8,count}) の結合係

数の電子ビーム半径 R_b 依存性を計算する。その結果を図 5-3 に示す。各 R_b に対して co-rotating mode と counter-rotating mode のうち結合係数の値が大きい方が発振するが、FU CW I はモードコンバータによって、counter-rotating mode のみが出力される。このことから、図 5-2 に見られる出力のとびは、補助磁場電流を変えたことで電子ビーム半径が変わり、空洞共振器内で発振する TE22,8 のうち回転モードが co-rotating から counter-rotating へ入れ替わったためであると考えられる。

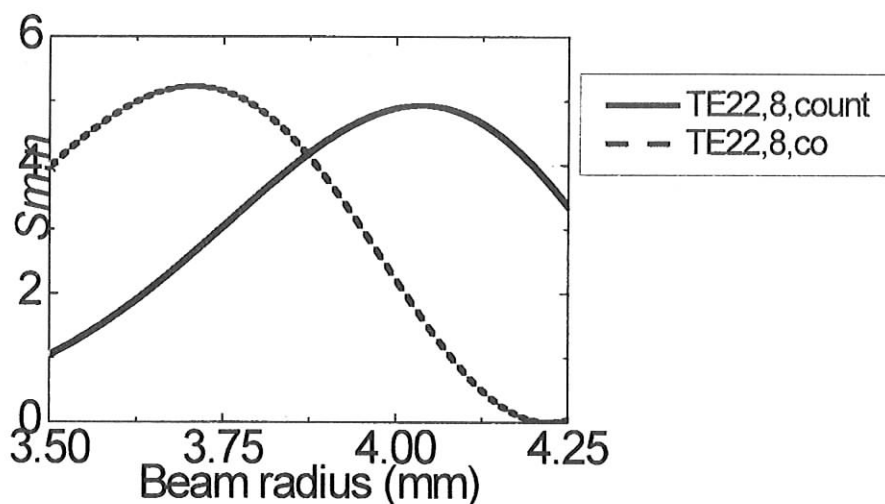


図 5-3 TE22,8 の結合係数

そこで、図 5-2 の出力が変化する $I_{aux} = 105$ A 時の電子ビーム半径を、図 5-3 の回転モードが入れ替わる $R_b = 3.87$ mm として、図 5-2 と図 5-3 を重ね合わせてプロットした図を図 5-4 に示す。式(5.3)の第二項を用いて、図 5-4 の結果から初期ビーム半径の値を計算すると $R_b = 3.74$ mm となり、式(5.3)式的设计上の初期ビーム半径 3.72 mm と近い値となる。今後は、実験から求めた初期ビーム半径 3.74 mm を採用し、電子ビーム半径を求める式として、

$$R_b = 3.74 + 0.0139 \times \frac{I_{aux}}{B_c} \quad (5.4)$$

を用いることにする。

出力向上のために、結合係数に対して補助磁場を用いた電子ビーム半径の最適化が可能であるか考える。図 5-3 から、TE22,8 の counter-rotating の結合係数が最大になる電子ビーム半径は 4.03 mm である。図 5-1 で出力が最大になる $I_b = 146.1$ A、即ち $B_c = 10.93$ T では、式(5.4)から $R_b = 4.03$ mm のとき $I_{aux} = 228$ A である。現在は装置の安全上 $I_{aux} \leq 150$ A としているので、counter-rotating に対して最適な電子ビーム半径で実

験を行うには主磁場コイルと補助磁場コイル間の引力に耐える対策をまず行う必要がある。

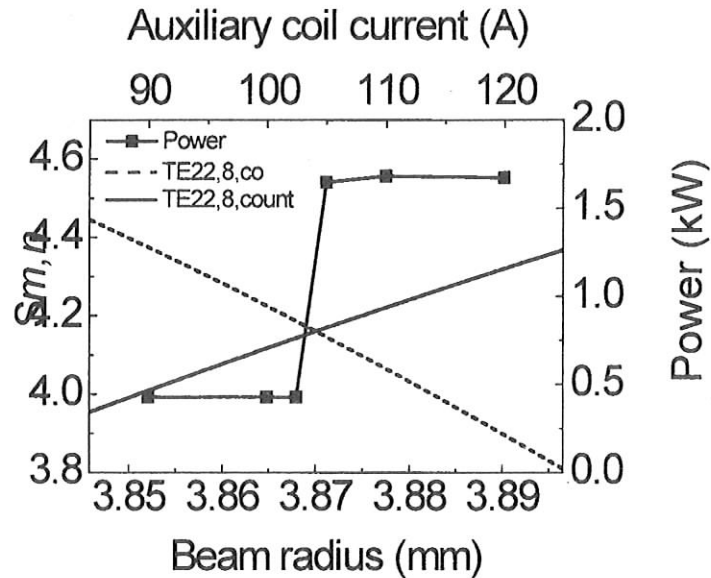


図 5-4 出力変化と結合係数の比較

6. まとめ

今回、300 GHz CW Gyrotron FU CW I の出力向上に関する研究を行った。

現在、このジャイロトロンは、シンタリング（セラミックス焼結）の研究を行う際に、必要な出力の達成がなされていない。設計出力に達しない原因として、ビーム電流の揺動によるジャイロトロン動作の不安定性、アノード電流抑制のために追加した補助磁場による空洞共振器入口での電子入射位置の変化等の問題を考えた。そこで、この問題の解決のために、アノード・アース間への高抵抗の挿入によってアノード電流の抑制とビーム電流の揺動の抑制を行った。また、出力の補助磁場依存性の測定を行い、キャビティ部での電子ビーム半径を求め、補助磁場による電子ビーム半径の最適化が可能であるか検証を行った。

アノード抵抗の挿入を行ったところ、アノード電流を抑えることが出来た。また、同時にビーム電流の揺動を抑制することができ、最高出力を 1.75 kW から 2.3 kW に向上させることが出来た。これは、ビーム電流の揺動の抑制により、FU CW I の動作の不安定性が改善されたためであると考えられる。

次に、補助磁場電流を変化させると、ある電流値を境に出力に急激な変化が現れることが分かった。これを結合係数と比較することで、急激な出力の変化は共振器内で発振する電磁波モードの回転方向の入れ替わりであるとして説明できた。この結果を利用し

て、キャビティ入り口での電子ビーム半径は式(5.4)で表せることが分かった。現在の磁場の向きでは結合係数から考えられる電子ビーム半径の最適値を得るには $I_{max} = 228$ A とすればよいが、そのためには主磁場コイルと補助磁場コイル間の引力に対する対策が必要である。

今後は引き続き、300 GHz CW Gyrotron FU CW I の出力の向上化を目指す。出力向上の方法として、上に述べたコイル間の引力に対する対策を行い、最適電子ビーム半径での動作運転を目指す。

7. 参考文献

- [1] 中野智彰：遠赤外領域開発研究第9巻 p9(2008)
- [2] T. Saito, T. Nakano, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Idehara, Plasma Fus. Res. Rapid Communication 2, 024 (2007)
- [3] T. Saito, T. Nakano, H. Hoshizkuki, K. Sakai, Y. Tatematsu, S. Mitsudo, I. Ogawa, T. Idehara, V. E. Zapevalov, Int. J. Infrared Millimeter waves, 28, 1063 (2007)
- [4] 中野智彰：300 GHz CW Gyrotron FU CW I の出力向上に関する研究 (福井大学大学院工学研究科物理工学専攻修士論文, 2009)
- [5] 橋本秀一：300 GHz CW Gyrotron FU CW I の電子ビーム半径の決定 (福井大学工学部卒業論文, 2009)