Anzlysis of radiation pattern of 300 GHz CW Gyrotron FU CWI

研究報告 4

300GHz CW Gyrotron FU CW I の放射パターン解析

Anzlysis of radiation pattern of 300 GHz CW Gyrotron FU CW I

中野智彰、小林一生、斉藤輝雄、立松芳典、光藤誠太郎
T. Nakano、I. Kobayashi、T. Saito、Y. Tatematsu、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

To know the characteristic of 300GHz CW Gyrotron FU CW I , we have measured and analyzed the radiation pattern of the output beam. As a result, it has been confirmed that the output beam propagates as a Gaussian beam. The beam waist radius has beam measered. However, when the cathode voltage is higher than 13kV, multi beam radiation pattern is observed within a range of the magnetic field strength at the cavity.

1．はじめに

サイクロトロン高速波管の一種であるジャイロトロンは，相対論的効果による電子の質量変化を利用した「サイクロトロン・メーザー作用」を発振原理とする高周波電磁波源である．ジャイロトロンは共振器構造が簡単であり，動作の特徴として，ビーム効率30-50%に至る高効率動作、高エネルギー大電流電子ビームの注入による高出力動作が可能である。

現在，遠赤外線領域開発研究センターでは、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 ジャイロトロンの開発を進めている。その一号機が「300GHz CW Gyrotron FU CW I」である．このジャイロトロンの連続動作での発振出力は，最高 1.75kW，発振効率 11.5%を得ている．しかし，この値は設計出力 3.5 kW の 1/2 である．今後さらに高出力発振が可能になれば，ジャイロトロンとアプリケーターをコルゲート導波管で接続し，シンタリング（セラミックの焼結等）により有効に応用することが出来る．しかし、現在の段階では出力と効率の向上方法や，出力ビームの放射特性、コルゲート導波管への結合の際の結合率などはよく分かっていない．

これらの問題に対して、ジャイロトロンの発振特性を把握する必要がある．これには，出力ビームの放射パターンを測定し解析することが有効である．本報告では、赤外線カメラを用いて出力ビームの空間分布を測定し、放射パターンを解析した結果を示す

2．FU CW I の仕様

本実験で用いた 300GHz CW Gyrotron は，ロシア科学アカデミー応用物理研究所でデザインされたものである．このジャイロトロンの動作モードは $TE_{22,8}$，設計出力は 3.5kW，ビーム電圧は最大 16kV，ビーム電流は最大 1.1A，出力窓材は BN で直径は 80mm である．

また、このジャイロトロンの特徴として、内臓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。これにより，$TE_{22,8}$ という超高次モードがガウスビームに変換され、CW I の真空窓を通して水平方向にビームが放射されるように設計されている．

3．赤外線カメラを用いた放射パターンの測定方法

FU CW I の放射パターンを，赤外線カメラを用いて測定する．CW 動作で出力を空中に放射して測定を行うのは非常に危険なので、今回はパルス動作での実験を行う。実験装置図を図 2-1 に示す．ジャイロトロンの出力ビームの進行方向に，吸収体(厚さ 1mm の塩化ビニル板)を設置して，出力ビームを吸収させる．その後方に赤外線カメラを設置して，塩化ビニル板の温度分布の変化を測定する．

赤外線カメラによって測定された温度分布は，主に出力ビームを照射した際の電力の分布を反映していると考えられる．この他にも，吸収体の電力吸収率の温度依存性，熱

の拡散による吸収体の温度分布の変化，吸収体の分光放射率ε_λの温度依存性による測定への影響が考えられる．これらの中では熱の拡散の影響が最も大きいと考えられるが，簡単な解析によると，今の測定条件では近似的に無視できると考えられる．よって，本研究では，これらの影響は出力ビームの電力分布に比べ小さいものと仮定して，測定データの解析を行う．

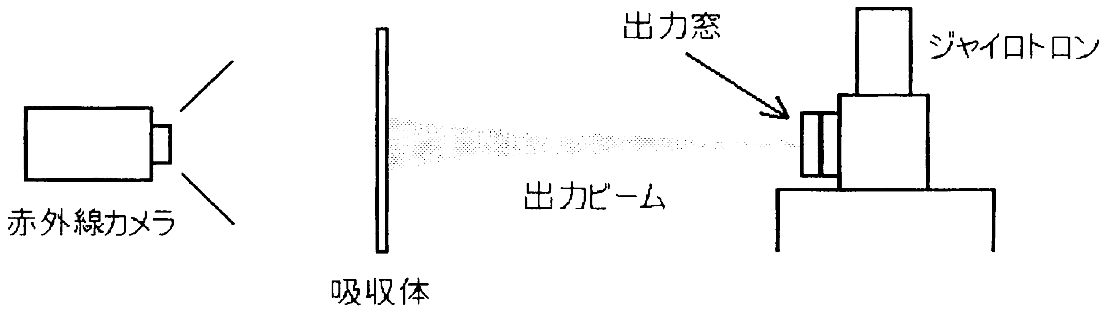

図 2-1　赤外線カメラを用いた出力ビームの測定配置図

3．放射パターン測定の結果

ヒーター電流 15A，補助磁場電流 120A，パルス幅 1msec，繰り返し 5Hz，デューティー比 1/200，の動作条件で発振させ，真空窓から吸収体までの距離を変えて測定した吸収体の温度分布の赤外線画像の例を図 3-1、図 3-2 に示す．図 3-1 は，カソード電圧 12kV，カソード電流 1 A 主磁場電流 145.5 A，真空窓~吸収体間の距離 80 cm，照射時間 60 sec での温度分布である．図 3-2 は，カソード電圧 15kV，カソード電流 1 A 主磁場電流 145.3 A，真空窓~吸収体間の距離 100cm，照射時間 60sec での温度分布である．

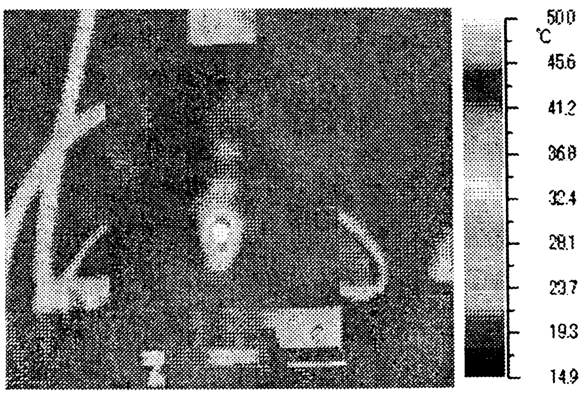

図 3-1　12kV での赤外線カメラ画像

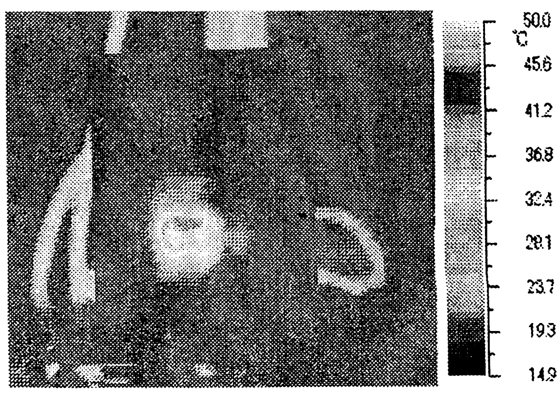

図 3-2　15kV での赤外線カメラ画像

FU CW I は内臓モードコンバータにより，出力ビームがガウスビームで出力されるように設計されている．そのため，吸収体上の電力分布は，y_0 をビームの電力分布とは無関係の吸収体の初期温度，A を電力に比例する規格化定数とすると，(3-1)式のガウス関数で与えられると期待される。

$$y = y_0 + \frac{A}{w_p\sqrt{\pi}}\exp\left(-\frac{(x-x_c)^2}{{w_p}^2}\right) \qquad (3\text{-}1)$$

測定した温度分布を(3-1)式にフィットすることにより，電力分布の $1/e$ 幅 w_p を求めることができる．実際に、図 3-1 と図 3-2 の温度分布のピーク点を通る垂直方向および水平方向の直線に沿っての温度分布を、(3-1)式でフィットした図を図 3-3，3-4，3-5，3-6 に示す．図 3-3、3-4、3-5 から，測定した温度分布は(3-1)式のガウス関数でうまく表現できることが分かる．このことから出力ビームはガウスビームであると考えられる．ただし、図 3-6 では温度分布は２つのピークを持つ。この場合も、２つのガウス分布の重ね合わせで測定値を再現できることから、２つのガウスビームが放出されていると考えられる。この場合、他の運転パラメータで与えられる，温度分布での水平方向のピーク位置から判断して右側を主ビームとし，左側を副ビームとする．２ビーム出力の問題は後で考察する。

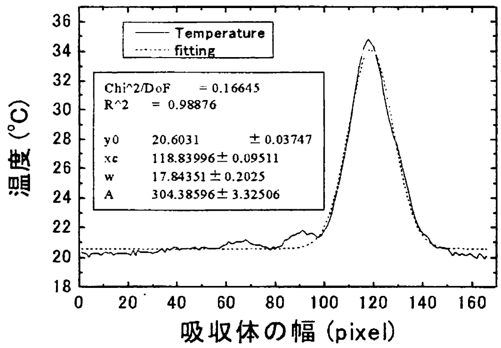

図 3-3　12kV 垂直方向の温度分布

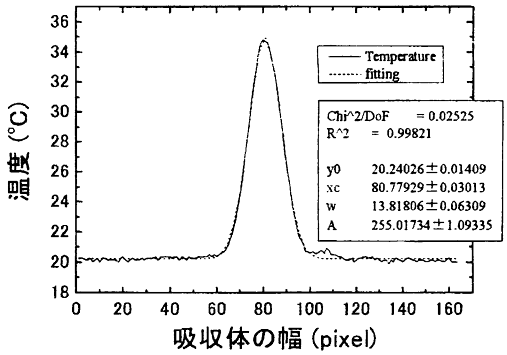

図 3-4　12kV 水平方向の温度分布

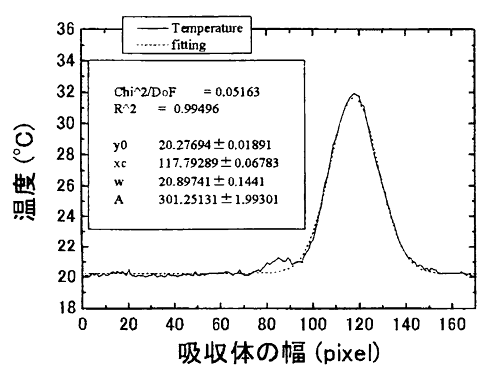

図 3-5　15kV 垂直方向の温度分布

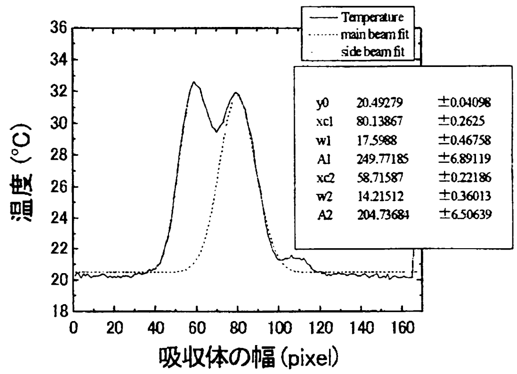

図 3-6　15kV 水平方向の温度分布

また，電力密度 P は電界 E の 2 乗に比例する．よって，$E \propto P^{1/2}$ であるから，(3-1)式より，

$$E \propto \exp\left(-\frac{(x-x_c)^2}{2w_p^2}\right) = \exp\left(-\frac{(x-x_c)^2}{(\sqrt{2}w_p)^2}\right) \qquad (3\text{-}2)$$

となり，電界分布の 1/e 幅 w と電力分布の 1/e 幅 w_p の関係は,

$$w = \sqrt{2}w_p \qquad (3\text{-}3)$$

となる．この，w をスポットサイズと呼ぶ．このようにして温度分布から電界分布を求めることが出来る．ガウスビームの理論から，ビームの伝播によるこのスポットサイズ w の変化は，z をビームの伝播方向である真空窓から吸収体までの距離とすると，

$$w(z) = w_0\sqrt{1+\left(\frac{\lambda(z-z_C)}{\pi w_0{}^2}\right)^2} \qquad (3\text{-}4)$$

で与えられる．このスポットサイズが最小値（最小スポットサイズ w_0）をとる位置（z_c）をビームウェストという．ただし，ビームウェストの位置が事前には分からないので，z は真空窓フランジ前面を座標原点にとっている．

ビームウェストの位置 z_c は解析により決定する．このために、真空窓~吸収体までの距離ごとに求めたスポットサイズの値を黒点でプロットし，さらに(3-4)式で実線によるフィットした図を図 3-7，3-8，3-9，3-10 に示す．ただし，図 3-10 は主ビームのものである．プロットした点は，多少ばらつきはあるが，フィットした関数に従っていることが分かる．このことから，出力ビームはガウスビームとして伝播していることが分かる．また，求めた最小スポットサイズの値とビームウェストの値を，表 3-1 に示す．

まず、最小スポットサイズについて着目する。垂直方向と水平方向で，最小スポットサイズの値に多少の違いがあるが、測定誤差の範囲内と考えられるので、最小スポットサイズの値は，垂直方向と水平方向によらず，ほぼ同じ値であることが分かる．また、最小スポットサイズの値はカソード電圧の値によらず，ほぼ同じ値であると考えられる．

一方，ビームウェストの位置について着目すると，水平方向と垂直方向ではビームウェストの位置が大きく異なる．しかし，データ点にばらつきがあること，ビームウェストの位置は誤差の影響を受けやすいこと等から，得られたビームウェストの位置がどれだけ正しいかを判断することは難しい．今後より精度の高い測定を進める必要がある。しかし，温度分布の画像では，ビームの断面は垂直方向に伸びているため，この水平方向と垂直方向のビームウェストの位置の相異が，ビーム断面の非円形化をもたらしているものと思われる．

表 3-1　　ビームウェストと最小スポットサイズの値

カソード電圧 (kV)	12		15	
方向成分	垂直	水平	垂直	水平
ビームウェスト (m)	-0.2846	0.2465	-0.3311	-0.0574
最小スポットサイズ (m)	0.01726	0.01561	0.01687	0.01669

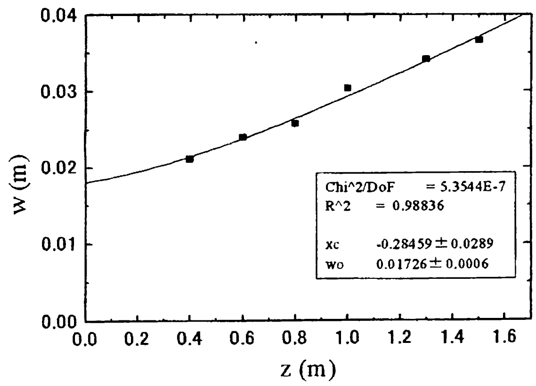

図 3-7　12kV 水平

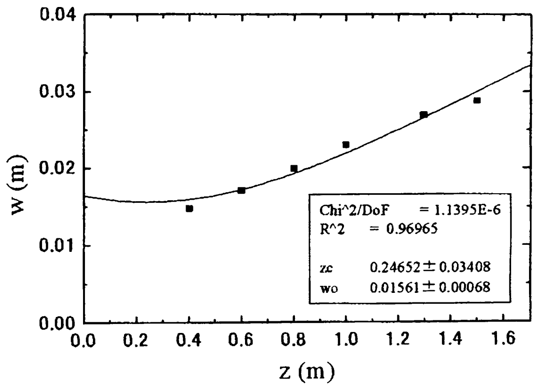

図 3-8　12kV 水平方向

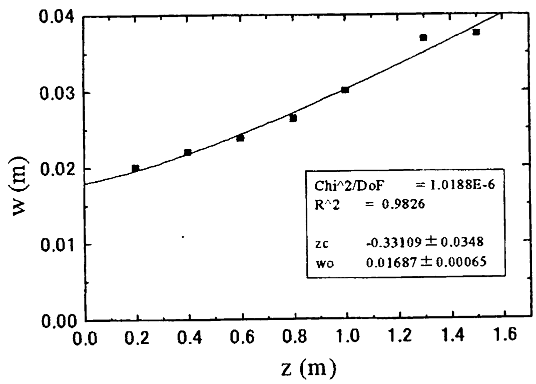

図 3-9　15kV 垂直方向

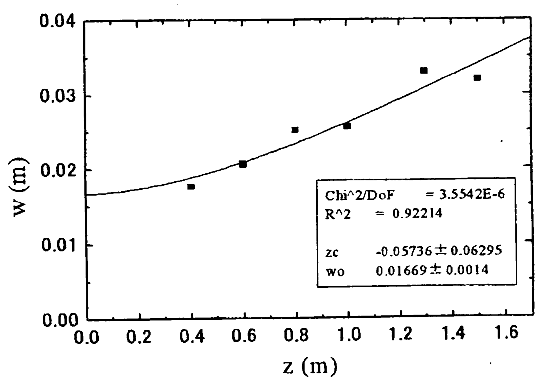

図 3-10　15kV 水平方向

5．出力ビームの主磁場電流依存性

次に、出力ビームの主磁場電流依存性を調べた．主磁場電流の値を 146.0A~144.8A の範囲で, 0.1A ずつ変化させてパルス動作で発振する．真空窓から吸収体の距離を 1m, カソード電圧 15kV, カソード電流 1A、補助磁場電流 120A, ヒーター電流 15A, パルス幅 1msec, 繰り返し 5Hz の動作条件で発振させ, 照射時間 20 秒で、温度分布の変化を、赤外線カメラを用いて撮影した．

主磁場電流を変化させて測定した温度分布のピーク点を通る水平方向の直線に沿っ

ての温度分布を図 3-11, 図 3-12, 図 3-13, 図 3-14 に示す. 図 3-11 は主磁場電流 146.0A で発振させて測定した図である. 図から, この主磁場電流値では, 主ビームのみが発振することが分かる. 今回の測定で、主ビームのみの発振は主磁場電流 145.9A 以上で得られることが分かった. また, この主ビームは主磁場電流 146.0 以上~145.1A の間で発振していることが分かった. 図 3-12 は主磁場電流 145.7A で発振させて測定した図である. 図 3-11 での主ビーム左側に副ビームが出ていることが分かる. この副ビーム(1)は測定の結果, 主磁場電流 145.8A~145.6A の間で現れることが分かった. 図 3-13 は主磁場電流 145.5A で発振させて測定した図である. 図 3-12 での副ビーム(1)とは別の副ビーム(2)が出ていることが分かる. この副ビーム(2)は, 145.3A 以下で主ビームよりピーク温度が大きくなる. また, 図 3-14 は主磁場電流 144.8A で発振させて測定した図である. この図から, 主ビームは発振せず, 副ビーム(2)のみの発振になっていることが分かる. この副ビーム(2)は 145.5A~144.8A 以下の間発振することが分かった. 結果のまとめを表 3-2 に示す.

また, 主磁場電流値と, 主ビームと副ビーム(2)のピーク温度の上昇値との関係を図 3-15 に示す. この図から, 主ビームは主磁場電流値が低下すると, 温度上昇値が減少していることが分かる. 温度上昇値の減少は, 出力ビームの出力の低下を示していると考えられるため, 主ビームの出力は主磁場電流に依存していることが分かる. また, 副ビーム(1)と副ビーム(2)は, 主磁場電流値の減少とともに温度上昇値が増大している. このことから, 副ビーム(1)と副ビーム(2)の出力も主磁場電流値に依存していることが分かる.

この測定の結果から, 主磁場電流に依存して発振するビームの種類が変わり, 出力ビームは主磁場電流値に依存していることが分かった. また, シンタリングに適用する場合, 主ビームのみで発振をし, 温度上昇の大きい主磁場電流値 146.0A 以上が適していると考えられる.

しかし、図 3-15 では測定した主磁場電流値の範囲が十分ではない。今後、さらに広い範囲でCW I の発振特性を調べる予定である。

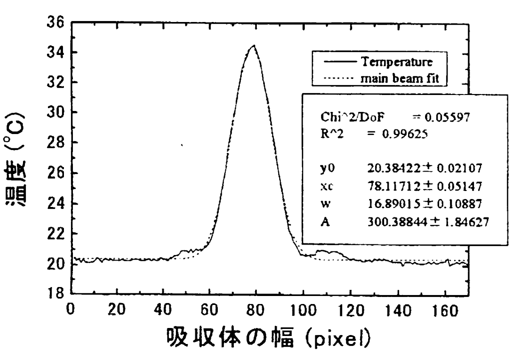

図 3-11 主磁場電流 146.0A の温度分布

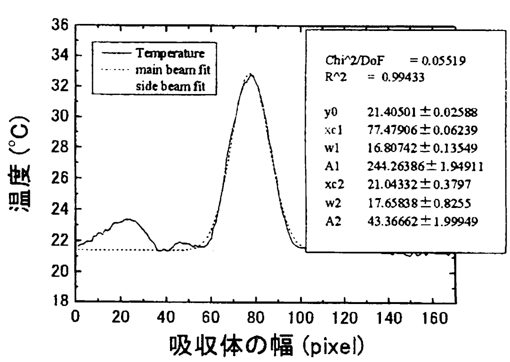

図 3-12 主磁場電流 145.7A の温度分布

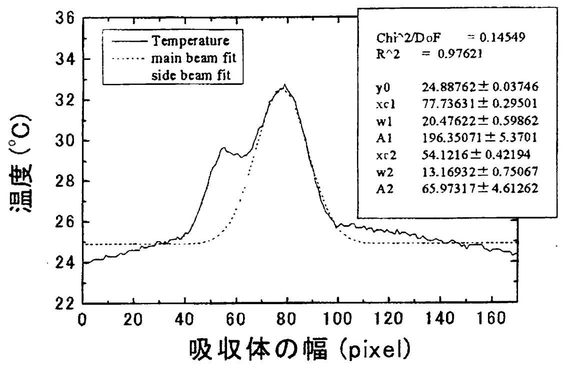

図 3-13 主磁場電流 145.5A の温度分布

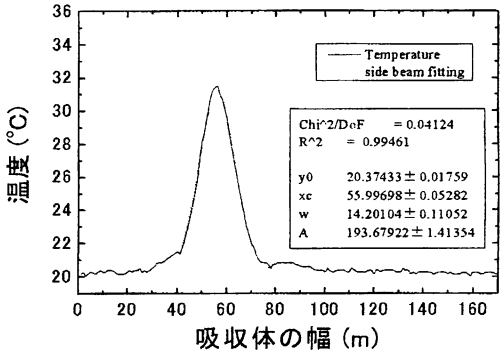

図 3-14 主磁場電流 144.8A の温度分布

表 3-2 主磁場を変化させた際の出力ビームの発振パターン

ビームの種類	主なピーク位置 (pixel)	発振可能な 主磁場電流値(A)	単独発振する 主磁場電流値(A)
主ビーム	78	146.0 以上~145.1	145.9A 以上
副ビーム(1)	23	145.8~145.6	なし
副ビーム(2)	52	145.5~144.8 以下	145.0~144.8 以下

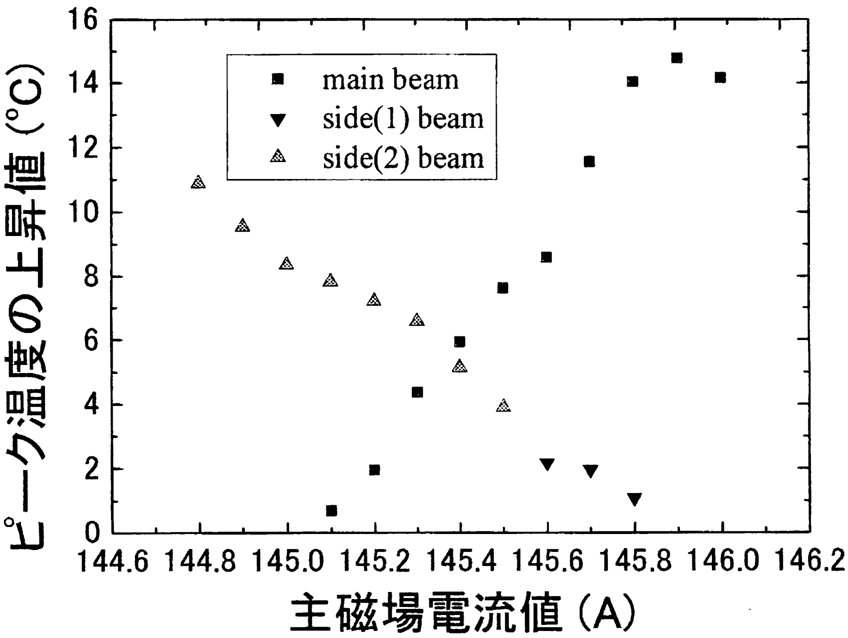

図 3-15 主磁場電流値とピーク温度の上昇値の関係

６．まとめ

今回，300 GHz CW Gyrotron FU CW I の放射パターンの解析を行った．

現在，このジャイロトロンは設計出力が達成されていない。これは、シンタリング（セラミックス焼結）の研究を行う際に，制約要素である。また出力ビームの振る舞いについても分かっていない．そのため，このジャイロトロンの出力を上げ，シンタリングに適切な出力ビームを送れるよう調整するために，出力ビームのデータの収集と解析を行った．

出力ビームの放射パターンを，赤外線カメラを用いて測定をした結果，出力ビームはガウス分布として伝播していることが分かった．またビームウェストを求めることができた．さらに，ビームの断面は非円形であることが分かった．

カソード電圧 15kV での発振で，主磁場電流値を変化させると，3 種類の出力ビームが放射することが分かった．この 3 種類の出力ビームは，3 種類の発振モードに対応していると考えられる．

以上の結果から，シンタリング時に適切な出力ビームを放射する主磁場電流値の条件を求めることが出来た．今後は引き続き，300 GHz CW Gyrotron FU CW I を，現在よりシンタリングに適する高出力動作を行うように調整していく．そのためには，さらに実験を行い，これまでに得られたデータの精度を上げることで，より詳細な出力ビームの解析を行う必要がある．また，これまでパルス動作で実験を行ってきたのに対して，実際のシンタリング時の動作である，CW（連続）動作での実験を行う．CW 動作時の出力ビームの振る舞いを測定し解析することで，シンタリング時に参考となる出力ビームのデータを集めることが出来る．更に発振モードの同定、モード競合の問題などにも取り組んでいく。

６．参考文献

１）内田禎二：電子技術者のための光学(電子通信学会誌 5/‘79 538 頁，1979)
２）村瀬浩規：300 GHz CW Gyrotron の開発(福井大学工学部卒業論文，2006)
３）中野智彰：300 GHz CW Gyrotron FU CW I の放射パターン測定
(福井大学工学部卒業論文)