

大電力ジャイロトロンの定常運転のための  
電子ビーム電流制御

2004年3月

南 龍太郎・小林 則幸・坂本 慶司  
春日井 敦・高橋 幸司・今井 剛

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

## 大電力ジャイロトロンの定常運転のための電子ビーム電流制御

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

南 龍太郎\*・小林 則幸\*\*\*・坂本 慶司・春日井 敦・高橋 幸司・今井 剛

(2004年1月30日受理)

ITER用大電力ジャイロトロンの秒レベルの長パルス運転時には、5 A/s の電子ビーム電流の減少が生じ、正常モードの発振条件が満たされず、ショット中に他モードへの移行が生じ、その結果パルス幅が制限された。この電流減少の物理機構について検討し、その改善のための方法について報告する。電子ビーム電流の評価は、電子錠部陰極に於ける熱移動のモデルを考え、電子放出と輻射による損失を考慮したパワー・バランス方程式を解くことにより行い、このモデルが、実験結果を良く説明できることを明らかにした。また、ジャイロトロンの安定・高性能な運転を維持するために、ショット中に電子錠部のヒータ電圧を上げ、電子ビーム電流を補償する実験を行った。これにより、電子ビーム電流の減少が抑制され、連続運転に向けた発振の安定化への見通しが得られた。

---

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

\* 博士研究員

\*\*\* 業務協力員

Control of Electron Beam Current of High Power Gyrotron for CW Operation

Ryutaro MINAMI\*, Noriyuki KOBAYASHI\*\*, Keishi SAKAMOTO,  
Atsushi KASUGAI, Koji TAKAHASHI and Tsuyoshi IMAI

Department of Fusion Engineering Research  
Naka Fusion Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 30, 2004)

In long pulse operation of the second level of high power gyrotron for International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), reduction of electron beam current of 5 A/s has been observed, and pulse width of RF oscillation is restricted for jump of the oscillation mode resulting from the mis-match of normal oscillation conditions. The physical mechanism of current reduction is examined and the method for the improvement is reported. Analysis of electron beam current is considered the model of heat transport in the cathode of magnetron injection gun, and performed by solving power balance equation with power loss due to electron emission and thermal radiation in the emission belt of magnetron injection gun. Experimental result can be explained well by this model. Moreover, in order to maintain stable and highly efficient operation of gyrotron, the heater voltage of magnetron injection gun is increased just before the onset of RF oscillation, and the experiments where the heater power boost recovers electron beam current is carried out. Thereby, reduction of electron beam current is controlled and the prospect of CW operation is obtained.

**Keywords:** High Power Gyrotron, CW Operation, Electron Beam Current, Power Balance Equation, Magnetron Injection Gun, Control of Heater Voltage

---

\* Post-Doctoral Fellow

\*\* Cooperative Staff

## 目次

1.	序論	1
2.	ITER用 170 GHz ジャイロトロンの概要	2
2. 1	ジャイロトロンの設計と性能	2
2. 2	ジャイロトロンの電子銃の特性	2
3.	パワー・バランス方程式による電子銃部陰極の熱移動の評価	4
4.	ヒータ電圧の制御による電子ビーム電流減少の補償実験	5
5.	結論	6
	謝辞	6
	参考文献	6

## Contents

1.	Introduction	1
2.	Summary of 170 GHz Gyrotron for ITER	2
2.1.	Design and Characteristics of Gyrotron	2
2.2.	Characteristics of Magnetron Injection Gun	2
3.	Analysis of Heat Transport of MIG Cathode by Power Balance Equation	4
4.	Experiment of Recovery of Electron Beam Current Depression by Control of Heater Voltage	5
5.	Conclusions	6
	Acknowledgment	6
	References	6

This is a blank page.

## 1. 序論

トカマク型装置に於いて効率的に核融合反応を持続するには、プラズマを1億度以上の高温に加熱し、プラズマに10 MA 級の電流を流し続けなくてはならない。その方法の一つにミリ波帯の周波数を用いた電子サイクロトロン加熱/電流駆動 (ECH/ECCD) がある。国際熱核融合実験炉 (ITER) では、170 GHz の周波数で、ECH/ECCD 及び不安定性の抑制や分布制御に用いるため、全入射電力 20 MW 程度のシステムを検討しており、1 MW 級大電力ミリ波源・ジャイロトロンを開発しなければならない。

日本原子力研究所（原研）では、ITER 用高周波 (RF) 加熱装置の技術開発として、核融合プラズマの加熱・電流駆動及び不安定性抑制のための大電力ミリ波源に用いるジャイロトロンの開発を行っている。これまでに、3つのブレーク・スルー技術開発 (①熱伝導、高周波損失に優れたダイヤモンド出力窓、②空洞共振器のオーバー・サイズ化と超高次発振モードの採用による大電力化、③大型絶縁セラミックの採用、電源技術の工夫、電子ビームの最適設計による電子ビームのエネルギー回収) により [1-6]、ITER 用ジャイロトロンの長パルス化研究の成果として、170 GHz の周波数において 0.9 MW/9 s、0.5 MW/100 s などの大電力、長パルス発振を達成した。しかしながら、長パルス運転時の初めの部分では、時間とともに、電子銃部で生成された電子ビーム電流が 5 A/s の割合で減少することが明らかとなった。電子ビーム電流の減少は、発振出力の低下や、正規モードの最適な発振領域からの逸脱を引き起こす。そのため正規モード発振から別モード発振へ移行し、長パルス発振を制限するため、その対策が必要となった。そこで、その解決の第一歩として、電子ビーム電流の減少の物理機構を調べるため、電子銃部陰極におけるパワー・バランス方程式を解くことにより、電子銃部陰極内のエミッション・ベルトの温度変化の評価を行った。また、ジャイロトロンの安定・高性能な運転を維持するために、ショット中に電子銃部のヒータ電圧を上げることによりヒータ入力電力を増加して、電子ビーム電流の減少を補償する実証実験を行った。

第2章では、今回解析を行った ITER 用ジャイロトロンの電子銃部の形状、動作特性について報告する。第3章では、電子銃部陰極に於ける熱移動のモデルと、パワー・バランス方程式による解析結果について報告する。第4章では、電子ビーム電流の減少を補償するための方法として、ショット中に電子銃部のヒータの電圧を追加する実験に関して報告する。

## 2. ITER 用 170 GHz ジャイロトロンの概要

### 2. 1 ジャイロトロンの設計と性能

ジャイロトロンは、大電力のミリ波帯電磁波を発生させることができる電子管の一種である。その発生原理は相対論効果を利用した電子サイクロトロン共鳴メーザーの原理に基づく。その内部構造を図 1 に示す。大電力電磁波を発生させる空洞共振器を取り巻くように強力な磁場を発生させる超伝導コイルが位置し、その空洞共振器に、マグネットロン入射型電子錠で生成されたジャイロ運動をする円筒状電子ビームが約 85 kV の加速電圧で打ち込まれる。その回転運動エネルギーが強磁場を印加した空洞共振器内でサイクロトロン共鳴メーザーの原理により電磁波のエネルギーに変換される。発生した電磁波は円筒導波管内の電磁波モード (TE 波) であるが、これを準光学モード変換器と数枚のミラー群によりガウス型パワー分布 (準光学モード) に変換し、出力窓から取り出す。一方、電磁波との相互作用を終えた電子ビームはコレクタに打ち込まれるが、約 30 kV の減速電界を空洞共振器とコレクタの間に印加することにより、この電磁波との相互作用を終えた電子ビームの運動エネルギーを静電的に回収し、総合効率を 50% まで向上させることにより、ジャイロトロンの効率が大幅に改善される。また逆バイアスの印加によりコレクタへの熱負荷が大幅に軽減されるという利点がある。これ以外に、熱伝導、高周波損失に優れたダイヤモンドを高周波の出力窓としてジャイロトロンに組み込むことにより、窓の温度上昇を抑制したり、空洞共振器のオーバー・サイズ化と超高次モードの採用により、熱負荷を大幅に軽減し、大電力の発振を可能にしている。

### 2. 2 ジャイロトロンの電子錠の特性

ジャイロトロンでは、電子錠部陰極内部に組み込まれているヒータに電力を供給し、熱伝導により電子錠の電子放出部 (エミッション・ベルト) を高温にして熱電子を放出させ、電子ビームを生成する。図 2、図 3 に、それぞれ、電子錠部の形状、ヒータ入力電圧に対するエミッション・ベルト温度を示す。図 2 に於いて、幅 3.1 mm のリング状の部分が、エミッション・ベルトである。エミッション・ベルトには、イリジウム被膜で仕事関数を下げた酸化バリウム含浸型タンクステンを使用している。

エミッション・ベルトの表面積を求めるとき

$$S = \pi \cdot \left( \frac{r_1 + r_2}{2} \right) \cdot t \cdot \frac{1}{\cos \alpha} = 1.02 \times 10^3 [mm^2]. \quad (1)$$

となる。ここで、 $r_1=95.4$  mm、 $r_2=92.38$  mm、 $t=3.1$  mm、 $\alpha=25.99^\circ$  である。半導体における熱電子放出による電子ビーム電流密度は、

$$I_C = S \cdot J = S \cdot A_i \cdot T^{5/4} \cdot \exp\left(-\frac{e\phi'}{kT}\right). \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 $I_c$  は電子ビーム電流、 $S$  はエミッション・ベルトの表面積、 $A_i$  は材料等で決まる定数、 $T$  はエミッション・ベルトの温度、 $\phi'$  は実効的な仕事関数である。図 4 に、エミ

ツション・ベルト温度に対する電子ビーム電流の実験データと計算の比較を示す。図4の実験データでは、実効的な仕事関数として、 $\phi' = 1.0 \text{ eV}$  が得られた。

電子銃部のヒータ入力電力の特性に関しては、図5に、ヒータの電圧値に対するヒータの電力値を示す。

### 3. パワー・バランス方程式による電子銃部陰極の熱移動の評価

ジャイロトロンの長パルス運転時には、パルス幅とともに、電子銃部で生成された電子ビーム電流が減少することが明らかとなった。電子ビーム電流の減少の物理機構を調べるために、電子銃部陰極におけるパワー・バランス方程式より電子銃部内のエミッション・ベルトの温度変化を考察した。図6に示す電子銃部陰極の熱移動のモデルを用い、パワー・バランス方程式を解くことにより電子ビーム電流変化の定量的な評価を行った。本モデルでは、ヒータからの入力電力を加熱項として、電子銃部陰極からの放射損失及び熱電子が放出される際に必要な仕事関数を損失項として考える。

本モデルに従いエミッション・ベルトに於けるパワー・バランス方程式は式(3)によって与えられる。

$$C \frac{dT}{dt} = W - \left( S' \cdot \sigma T^4 + S \cdot J \cdot \left( \phi' + \frac{2kT}{e} \right) \right) + P. \quad (3)$$

ここで、右辺の第1項はヒータからの入力電力、第2項はエミッション・ベルトからの放射損失で、 $S'$ は、放射の実効的な表面積で、電子ビーム電流の無いときの準定常状態（左辺、第3項、第4項が0）の時に、ヒータ入力電力と第2項がバランスするとして算出し、 $S'=1.7 \times 10^3 \text{ mm}^2$ とした（図7参照）。 $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ である。第3項は電子放出による損失、第4項( $P$ )は、過渡状態での入力パワーの補正項である。右辺第1項、第2項は、準定常状態におけるヒータの入力電力と温度の関係から決定した。右辺第3項、第4項は、電子ビーム電流値、電子銃部冷却水の温度変化からのパワー計測値より決定した。定数  $C$  は、エミッション・ベルトの体積が  $4690 \text{ mm}^3$ 、タングステンの密度が  $19.1 \times 10^3 \text{ g/mm}^3$ 、タングステンの比熱が  $0.15 \text{ J/g K}$  を用いて計算し、 $1/C$  は  $0.074$  とした。

図7に、温度に対するそれぞれの熱量を計算した結果を示す。これらの結果より、Runge-Kutta-Gill 法を用いて、電子銃部陰極の温度変化を計算し、電子ビーム電流の時間変化を算出した。計算結果と実際の計測データを比較したものを図8に示す。ここで、 $S'=1.7 \times 10^3 \text{ mm}^2$ 、 $S=1.02 \times 10^3 \text{ mm}^2$ 、 $\phi'=1.0 \text{ eV}$ 、 $1/C=0.074 \text{ K/J}$ 、 $P=10 \text{ W}$ とした。計算結果と実験データに良い一致が見られる。

以上より、電子ビーム電流の減少は、電子放出によるエネルギー損失により、電子銃部陰極の温度が低下し、電流密度が小さくなつた事が原因と考えられる。

#### 4. ヒータ電圧の制御による電子ビーム電流減少の補償実験

電子ビーム電流の減少を補償するためには、電子放出によるエネルギー損失分を補う必要がある。そこで、ヒータ電圧の制御を試みた。その方法は、ショット直前にヒータの電圧を増加させることにより、入力電力を増加させる。

ヒータ電圧増加の効果を調べるために、短パルス発振による実験を行い、電子ビーム電流によるエネルギー損失が少ない状態で、電子ビーム電流の時間変化を測定した。電子ビーム電流が無い場合、或いは、短パルス運転時の電流によるエネルギー損失が少ない場合には、増加分のヒータ電力を  $W_{\text{additional}}$  とすると、

$$C' \frac{dT}{dt} = W + W_{\text{additional}} - (S' \cdot \sigma T^4). \quad (4)$$

図9に、ヒータ電力 180 W から、時刻  $t=0$  において、それぞれの電圧増加を行い、入力電力を増加させた際の電子ビーム電流の時間変化の計測データを示す。また、式(4)により計算した温度変化より、ヒータ電圧増加を行ったときの電子ビーム電流の計算結果を図10に示す。ここで定数  $C'$  は、ヒータの電圧増加を行ったときの計測データと、定数  $C'$  をパラメータとした計算結果を比較して最適化し、 $1/C'=0.0046$  とした。ヒータの入力電力が一定の時の定数  $C$  と比較して定数  $C'$  は 1 オーダー大きい。電子放出によるエネルギー損失の場合には、エミッション・ベルトでの熱の輸送を考えれば良いが、ヒータ電圧増加を行う場合には、ヒータ部を含めた領域の熱の輸送を考える必要がある。ヒータ部の体積が、エミッション・ベルトの体積と比較して 1 オーダー大きいので、ヒータ部の熱容量が大きく、ヒータの電圧増加を行った場合、ヒータ自身の熱時定数も含まれるので、エミッション・ベルトに熱が伝わるのに時間がかかるためである。

次に、ヒータ電圧の制御による電子ビーム電流の増分の計測データを基に、電子ビーム電流減少の補償を行う実験を行った。ヒータ入力電力 180 W の準定常状態から、ショット直前  $t=0$  に於いて、ヒータ電圧を増加させ入力電力をさらに 100 W 加えた。図11に、ヒータ電力 180 W から、さらにヒータ電力を 100 W 加えた時と加えなかった時の、電子ビーム電流の時間変化を示す。ヒータ加電圧により、電子ビーム電流の減少を改善することができた。

## 5. 結論

電子ビーム電流の評価を、電子銃部陰極に於けるパワー・バランス方程式を解くことにより行った。その結果、長パルス運転時における電子ビーム電流の減少は、電子放出によるエネルギー損失に起因する電子銃部陰極の温度低下により、電流密度が小さくなつた事によると考えられる。従つて、これを補償するためには、電子放出によるエネルギー損失分を担う、入力パワーを加えればよい。これに基づき、ヒータの入力電力をさらに加える実験を行つた結果、電子ビーム電流の減少を改善することができた。熱時定数の差により、短時間での補償はできないが、数百秒以上の定常運転では、充分補償可能である。

以上により、定常運転に向けた電子ビーム電流の制御を行うための知見を得ることができた。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、終始、有意義な議論及び教示を頂きました加熱工学研究室の皆様、RF装置試験室 藤井常幸室長に感謝を申し上げます。また、ご支援を頂きました関省吾部長及び関昌弘所長に感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] T. Imai, et al., Fusion Eng. Des. 55 (2001) 281.
- [2] A. Kasugai, et al., Fusion Eng. Des. 26 (1995) 281.
- [3] K. Sakamoto, et al., J. Phys. Soc. Jpn. 65 (1996) 1888.
- [4] K. Sakamoto, et al., Phys. Rev. Lett. 7 (1994) 3532.
- [5] A. Kasugai, et al., Rev. Sci. Instrum. 69 (1998) 2160.
- [6] K. Sakamoto, et al., Nucl. Fusion 43 (2003) 729.

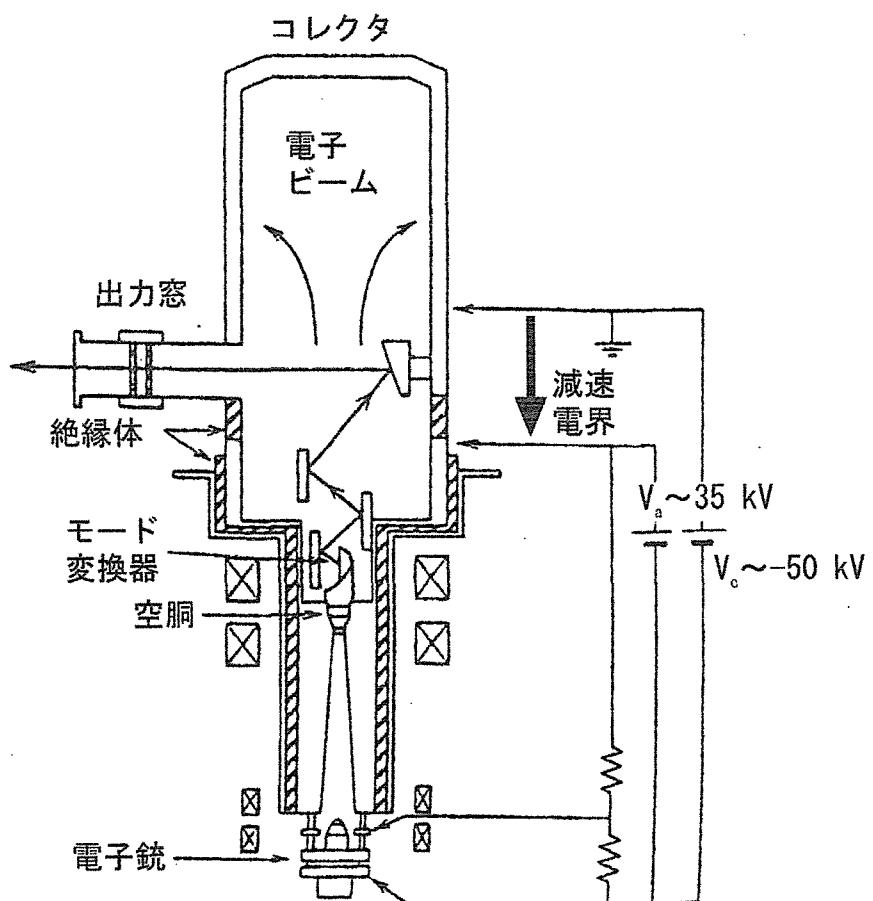


図1 ジャイロトロン内部構造

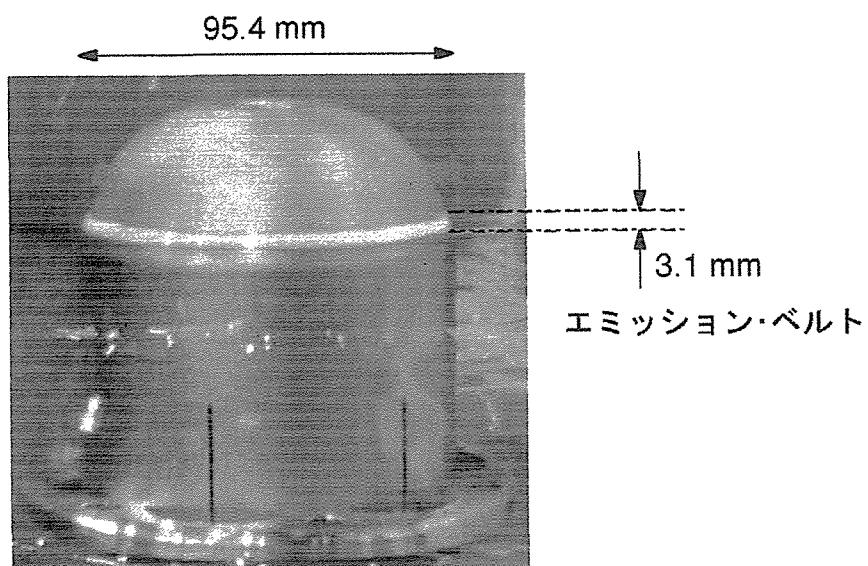


図2 ジャイロトロン電子銃陰極部

This is a blank page.

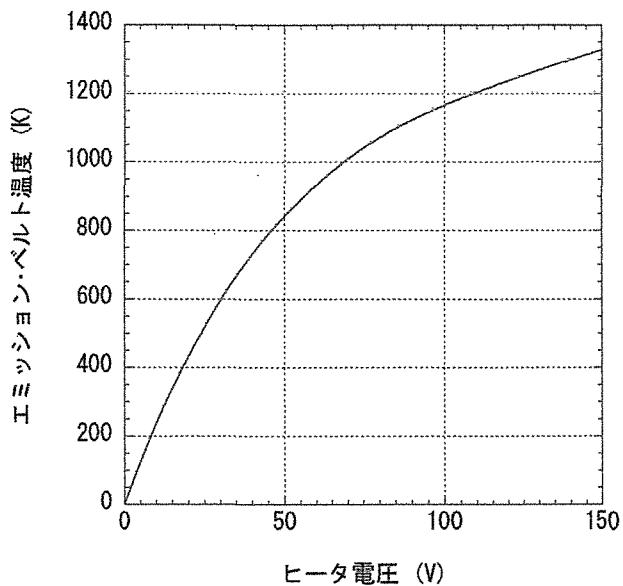


図3 ヒータ入力電圧に対するエミッショントベルト温度

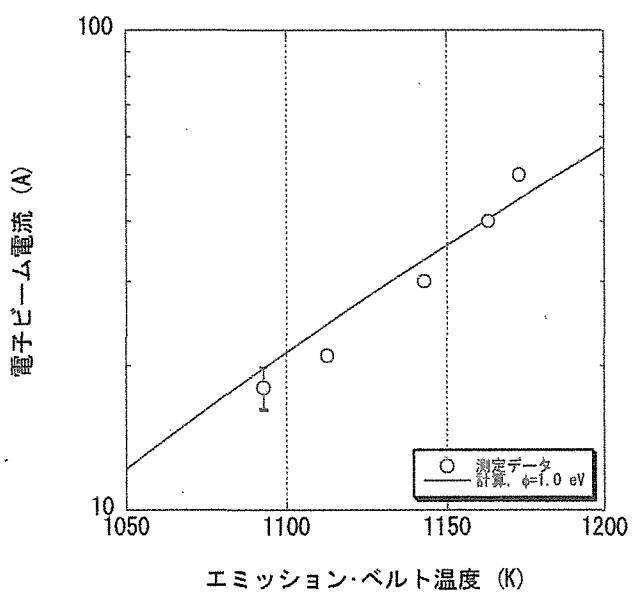


図4 エミッショントベルト温度に対する電子ビーム電流

This is a blank page.

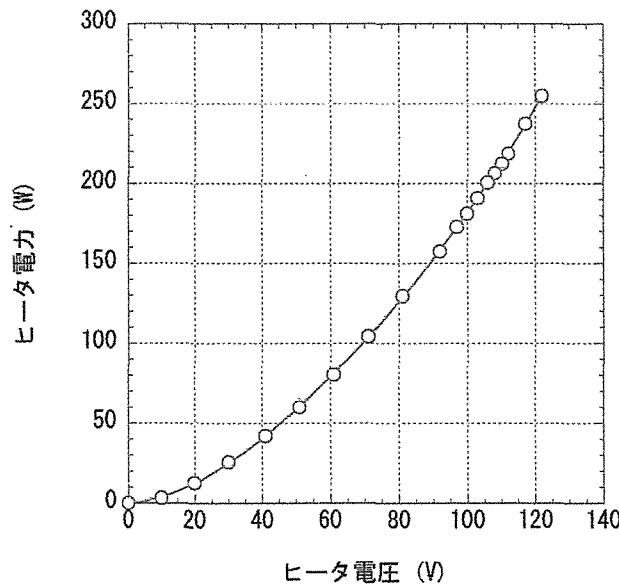
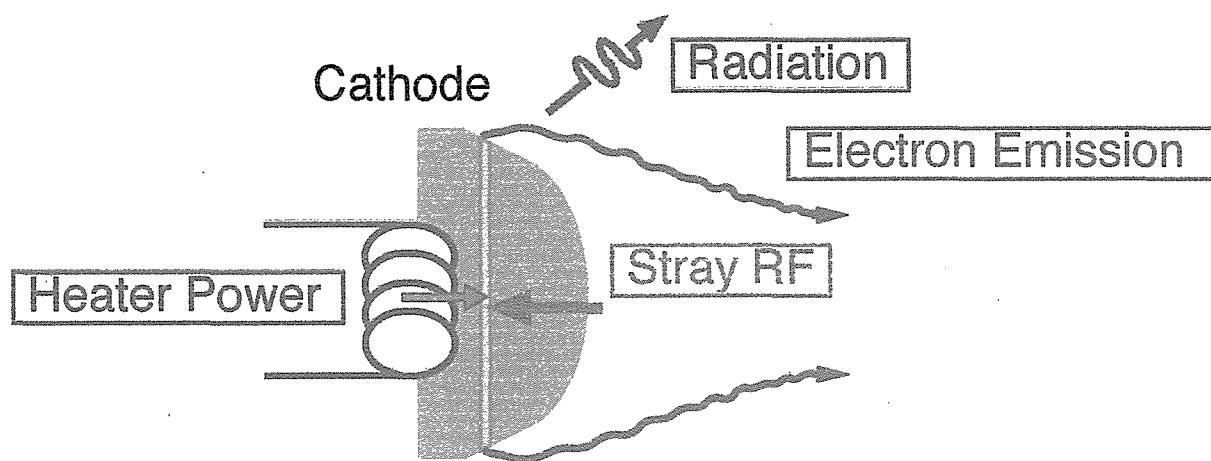


図5 ヒータの電圧に対する電力値



$$C \frac{dT}{dt} = W - \left( S' \cdot \sigma T^4 + S \cdot J \cdot \left( \phi + \frac{2kT}{e} \right) \right) + P.$$

図6 電子銃陰極部に於ける熱移動のモデル

This is a blank page.

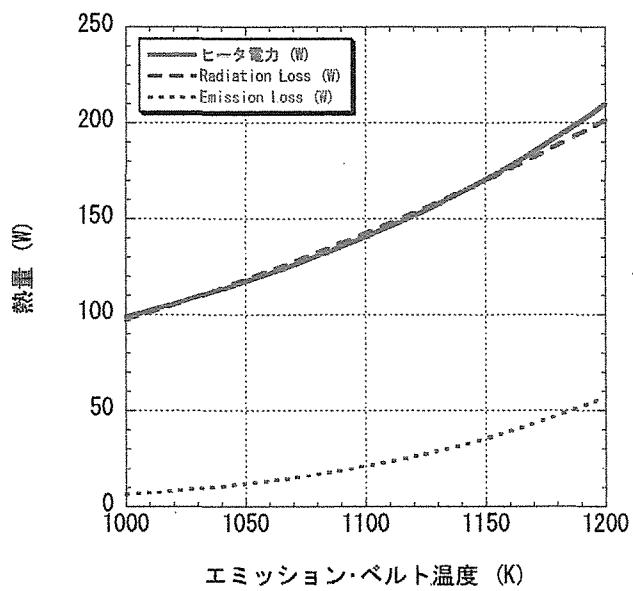
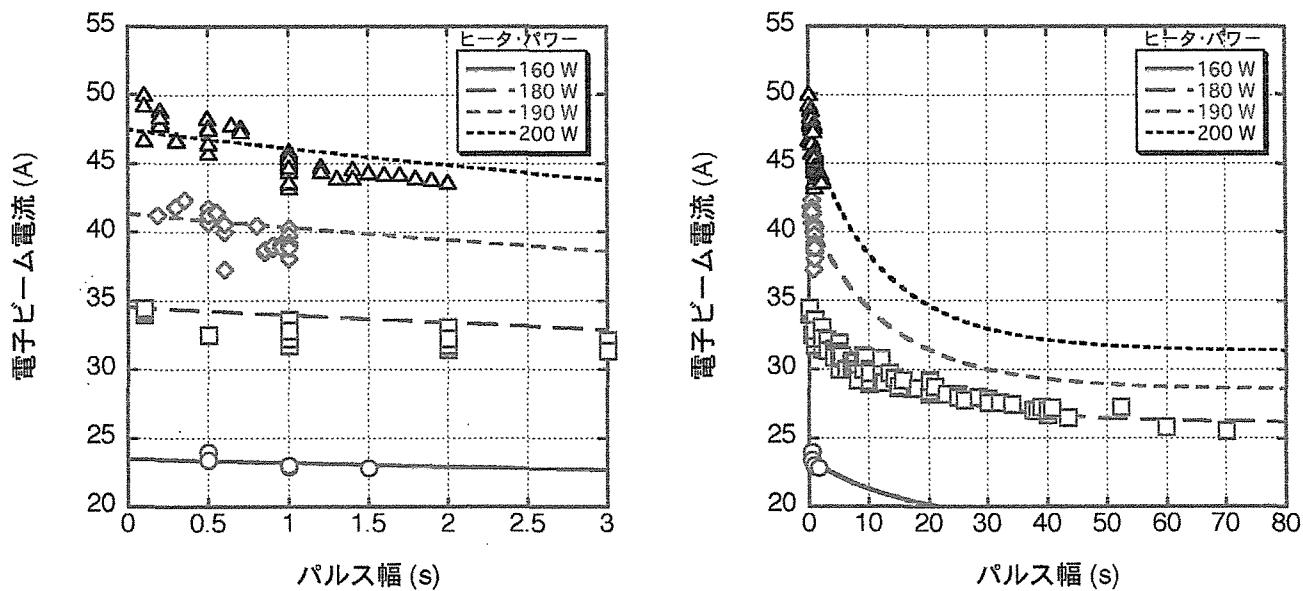


図7 エミッション・ベルト温度に対する各熱量の計算結果



計算に用いたパラメータ:

$$S=1.02 \times 10^3 \text{ mm}^2, \phi=1.0 \text{ eV}, S'=1.7 \times 10^3 \text{ mm}^2, 1/C=0.07 \text{ K/J}, P=10 \text{ W}$$

図8 電子ビーム電流の計算結果と計測データの比較

This is a blank page.

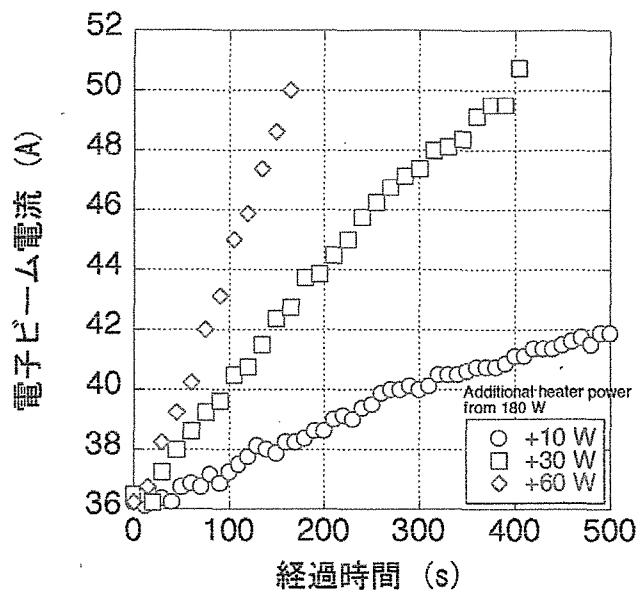


図9 ヒータ電圧増加時の電子ビーム電流の時間変化

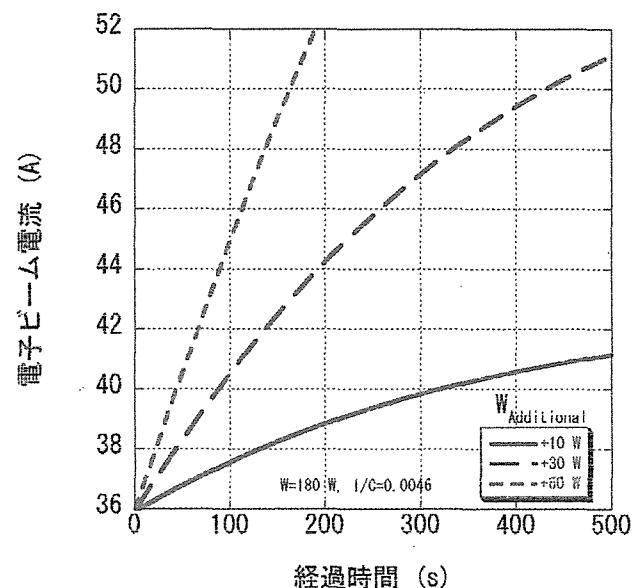


図10 ヒーター電圧増加を行った時の計算結果

This is a blank page.

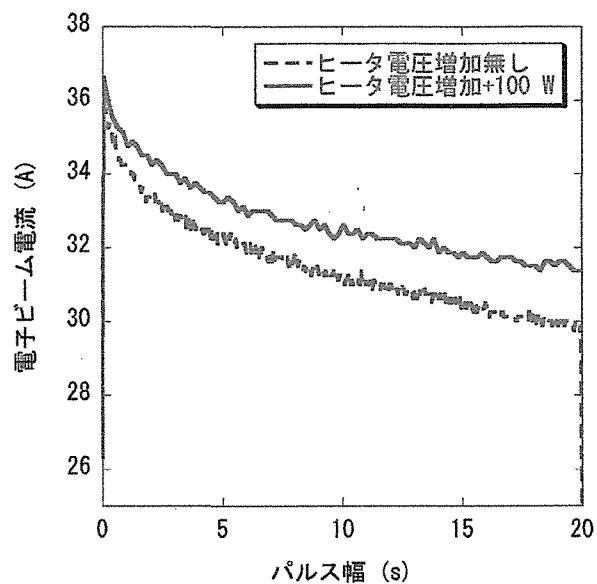


図 1 1 ヒータ電圧増加効果の実証実験の結果

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換 算 表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$	
$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{-18}$		= 4.184 J(熱化学)
9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{-19}$		= 4.1855 J(15 °C)
$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$		= 4.1868 J(国際蒸気表)
4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$		仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$		= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$		= 735.499 W
$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci
1	$2.70270 \times 10^{-11}$	
$3.7 \times 10^{10}$	1	

吸収線量	Gy	rad
1	100	
0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
$2.58 \times 10^{-4}$	1	

総量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

大電力ジャイロトロンの定常運転のための電子ビーム電流制御

R100  
古紙混合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています。