

JAERI-M  
90-132

2GHz帯クライストロンの1.4MW,  
10秒出力試験

1990年8月

前原 直・三宅 節雄\*・恒岡 まさき・坂本 慶司  
池田 佳隆・小松 浩\*・小林 一雄\*・永島 孝

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

JAERI-M 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。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1990

---

編集兼発行　日本原子力研究所  
印 刷　山田軽印刷所

2 GHz 帯クライストロンの 1.4 MW, 10秒出力試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合研究部

前原 直・三宅 節雄<sup>\*</sup>・恒岡まさき<sup>†</sup>・坂本 慶司  
池田 佳隆<sup>†</sup>・小松 浩<sup>\*</sup>・小林 一雄<sup>\*</sup>・永島 孝

(1990年7月13日受理)

1 MW クライストロン (E 3778) の高出力化及び 1 MW 出力時における耐電圧劣化防止による高信頼性化の目的のために、クライストロンの電子銃部の高耐電圧化への改造を行った。その結果、従来の使用ビーム電圧 83 kV から 94 kV に上げることにより、周波数  $f = 2.17$  GHzにおいてこれまでの最大出力 1 MW を 1.4 MW へ高出力化することができた。本報告は、クライストロン電子銃部の高耐電圧化への改造及び改造管による出力試験の結果についてまとめたものである。

---

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山 801-1

+ JT-60 試験部

\* 株式会社 東芝

1.4MW Power Test of 2GHz Klystron

Sunao MAEBARA, Setsuo MIYAKE<sup>\*</sup>, Masaki TSUNEOKA<sup>+</sup>, Keishi SAKAMOTO  
Yoshitaka IKEDA<sup>+</sup>, Hiroshi KOMATSU<sup>\*</sup>, Kazuo KOBAYASHI<sup>\*</sup>  
and Takashi NAGASHIMA

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

(Received July 13, 1990)

Breakdown phenomena near an electron gun of 1MW klystron for the JT-60 LHRF heating system sometimes limits the output power due to lack of withstand voltage. To improve the electron gun and to realize an operation stable of 1MW level which is needed in the experiment of next stage, we designed a new electron gun.

Test results of the klystron with the modified electron gun show that the maximum operating beam voltage has increased from 84kV in the previous design to 94kV. RF output power has been increased from 1MW to 1.4MW at a frequency of 2.17GHz.

This report describes the design of a new electron gun and the high power test results of the modified klystron.

Keywords: Klystron, Ir-coated Dispenser Cathode, Perveance,  
Perpendicular Electric Field, Frequency, High Power Test,  
Long Pulse Test, Output Power

---

+ Department of JT-60 Facility

\* Toshiba Corporation

## 目 次

1. 序論	1
2. 電子銃部の改造	2
2. 1 概要	2
2. 2 設計計算	2
2. 3 Ir被覆含浸型カソード	3
3. 電子銃改造管での高周波出力試験	4
3. 1 概要	4
3. 2 高周波出力1 MW以上での問題点	4
3. 2. 1 出力空洞	4
3. 2. 2 高周波出力窓	4
3. 2. 3 コレクターの熱負荷	5
3. 2. 4 ドリフト管内放電	5
3. 3 高出力試験	5
3. 3. 1 インターロックとモニター	5
3. 3. 2 高出力試験および長パルス試験	5
4. 考察	6
5. まとめ	7
謝辞	7
参考文献	7

## Contents

1. Introduction	1
2. Improvement of an electron gun	2
2.1 Introduction	2
2.2 Design of the electron gun	2
2.3 Ir-coated dispenser cathode	3
3. High power test of the modified klystron	4
3.1 Methode of power test	4
3.2 Problems of the klystron above 1MW level	4
3.2.1 Output cavity	4
3.2.2 Output vacuum window	4
3.2.3 Thermal load of collector	5
3.2.4 Discharge at the drift tube	5
3.3 High power test	5
3.3.1 Internal lock and monitor	5
3.3.2 Results of high power test and long pulse test	5
4. Conclusions	6
5. Summary	7
Acknowledgements	7
References	7

## 1. 序 論

J T - 6 0 用 L H R F 加熱装置は、周波数 2 G H z 帯で出力 1 M W, 1 0 s e c のクライストロンを 1 ランチャー（結合系）あたり 8 本使用し、3 つのランチャー（総数 24 本のクライストロン）などから構成されている<sup>1)</sup>。大電力の高周波（R F）をプラズマに安定入射するためには、ランチャーの R F エージングを十分に行うとともに<sup>2)</sup>、システムを構成している全てのクライストロンが安定に動作しなければならない。

これらのクライストロンは、電子銃部のカソード・ヒータ点火時間がこれまで約 3 0 0 0 時間に達し、個々のクライストロンの電子銃部の耐電圧劣化などにより、単管当たりの出力電力 0. 7 M W 以上での安定動作が難しくなってきた。耐電圧劣化したクライストロンは、D C エージングおよび耐電圧処理により再復帰使用されるが、J T - 6 0 プラズマ実験における L H R F 加熱装置の運転効率からは、大きな妨げになっている。このため運転効率を維持するために、ビーム電圧を 8 3 k V から 7 3 k V に下げ最大出力の約 7 0 % に押さえて運転されている。

一方 J T - 6 0 高性能計画が進められるなか L H R F 加熱装置による単管出力 1 M W 級でのプラズマへの安定入射のために、電子銃部の耐電圧劣化防止による高信頼性などの対策が要求されている。このため電子銃についてカソードの動作温度の低減によりカソードからの金属スパッタリングによる経時変化による耐電圧の劣化を少なくするとともに、加速電極相互間の設計電界値の減少、絶縁セラミックス部での沿面距離の拡大などの改善を行った。その詳細を記述する。

この改良により、これまでの最大出力 1 M W が大幅に改善され、出力 1. 4 M W, パルス幅 1 0 秒までの出力試験を行うとともに、最大 1. 4 7 M W, パルス幅 2 秒までの試験を行うことができた。

## 2. 電子銃部の改造

### 2. 1 概要

耐電圧劣化し使用不能となったクライストロンの電子銃部を分解点検したところ、多数の放電跡と青色に変色した跡が、アノード電極とドリフト・チューブ入口にあたるボディー電極に観察された。この放電跡は、各電極間の電界強度の大きい場所に多く観察され、また青色に変色した跡は、ヒータ点火時間約3000時におよぶカソードからのBa蒸発物の付着によるものと推定される。このことから蒸発物の付着及び放電跡の突起が電界集中を引起こし、電子銃部の耐電圧劣化の原因となっていることが考えられる。そこで従来の電子銃よりもさらに高耐電圧化するために、以下に示す改良を行った。

- (1) 電子ビームの軌道が悪化しない範囲内で各電極間の距離と曲率面の曲率半径を大きくし、電極表面の垂直電界強度と垂直電界の集中を軽減した。
- (2) 含浸型カソードからのBaの蒸発量が少ないことが期待されるカソード表面にIrメタルをコーティングしたIr被覆含浸型カソードに変更した。<sup>3) 4)</sup>
- (3) セラミックスの形状をテーパ型に変更し電極間距離を大きくするとともに絶縁セラミックス内面のBaなどの金属スパッタリングの汚れによる絶縁及び耐電圧劣化を軽減するために、セラミック内面に四角い溝を設けた。

### 2. 2 設計計算

電極表面における垂直電界強度の計算は、カソード・アノード間（ビーム・オン時）とアノード・ボディ間（アノードとカソードが同電位でビーム・オフ（待機状態））につき、印加電圧130kVで行った。改造前の電界強度は、カソード・アノード間で、アノード先端、ウェーネルト先端およびアノード端子コロナ・リングに電界強度の大きい場所があり、最大値は、約15.3kV/mmである。またアノード・ボディ間では、ボディ内面R部、ボディ・コロナ・リングおよびアノード上端に電界強度の大きい場所があり、最大値は約19.5kV/mmである。これらの現状を考慮し電界強度の目標値を、カソード・アノード間では、ビーム・オン時の設定電圧以上には電圧が印加されないので、13kV/mmとし、アノード・ボディ間では、JT-60においては電源システムの構成上GCB投入時の待機状態には無負荷電圧が110kVにもおよぶので、10kV/mmとした。

目標値となる電界強度を得るために、ビーム軌道計算コード（EGUN）と高速表面電荷法による電界強度計算コード（HSSSM）を交互に使用し、計算を繰返し行った結果、Fig. 1に示すように、軸方向の距離では、ウェーネルト・アノード間で、17.2mmから23.7mmに、アノード・ボディ間で、21.0mmから26.0mmに、また半径方向の距離では、アノード・ウェーネルト間で、17.5mmから30.2mmに遠ざける電極形状を求めることができた。改造前と改造後の電界強度分布をFig. 2(a)と(b)に示す。(a)はアノード・カソード間に130kV印加した場合、

## 2. 電子銃部の改造

### 2.1 概要

耐電圧劣化し使用不能となったクライストロンの電子銃部を分解点検したところ、多数の放電跡と青色に変色した跡が、アノード電極とドリフト・チューブ入口にあたるボディー電極に観察された。この放電跡は、各電極間の電界強度の大きい場所に多く観察され、また青色に変色した跡は、ヒータ点火時間約3000時におよぶカソードからのBa蒸発物の付着によるものと推定される。このことから蒸発物の付着及び放電跡の突起が電界集中を引起こし、電子銃部の耐電圧劣化の原因となっていることが考えられる。そこで従来の電子銃よりもさらに高耐電圧化するために、以下に示す改良を行った。

- (1) 電子ビームの軌道が悪化しない範囲内で各電極間の距離と曲率面の曲率半径を大きくし、電極表面の垂直電界強度と垂直電界の集中を軽減した。
- (2) 含浸型カソードからのBaの蒸発量が少ないことが期待されるカソード表面にIrメタルをコーティングしたIr被覆含浸型カソードに変更した。<sup>3), 4)</sup>
- (3) セラミックスの形状をテーパ型に変更し電極間距離を大きくするとともに絶縁セラミックス内面のBaなどの金属スパッタリングの汚れによる絶縁及び耐電圧劣化を軽減するために、セラミック内面に四角い溝を設けた。

### 2.2 設計計算

電極表面における垂直電界強度の計算は、カソード・アノード間（ビーム・オン時）とアノード・ボディ間（アノードとカソードが同電位でビーム・オフ（待機状態））につき、印加電圧130kVで行った。改造前の電界強度は、カソード・アノード間で、アノード先端、ウェーネルト先端およびアノード端子コロナ・リングに電界強度の大きい場所があり、最大値は、約15.3kV/mmである。またアノード・ボディ間では、ボディ内面R部、ボディ・コロナ・リングおよびアノード上端に電界強度の大きい場所があり、最大値は約19.5kV/mmである。これらの現状を考慮し電界強度の目標値を、カソード・アノード間では、ビーム・オン時の設定電圧以上には電圧が印加されないので、13kV/mmとし、アノード・ボディ間では、JT-60においては電源システムの構成上GCB投入時の待機状態には無負荷電圧が110kVにもおよぶので、10kV/mmとした。

目標値となる電界強度を得るために、ビーム軌道計算コード(EGUN)と高速表面電荷法による電界強度計算コード(HSSSM)を交互に使用し、計算を繰返し行った結果、Fig. 1に示すように、軸方向の距離では、ウェーネルト・アノード間で、17.2mmから23.7mmに、アノード・ボディ間で、21.0mmから26.0mmに、また半径方向の距離では、アノード・ウェーネルト間で、17.5mmから30.2mmに達ざける電極形状を求めることができた。改造前と改造後の電界強度分布をFig. 2(a)と(b)に示す。(a)はアノード・カソード間に130kV印加した場合、

(b) はアノード・ボディー間に 130 kV 印加した場合である。この電極間の距離において、目標値の電界強度が得られていることが分かる。この電界強度の最大値を、主要な場所について Table 1 にまとめた。改造前の電界強度に比べ、アノード・カソード間に印加した場合、15.3~29.2 %、アノード・ボディー間に印加した場合、34.9~48.2 % 減少している結果が得られた。また改造前と改造後のビーム軌道計算結果を Fig. 3 に示す。計算条件としてビーム電圧 84 kV、外部磁場に集束磁場分布の実測値を用いて計算した。その結果改造前と改造後のパービアンスが約 1.32  $\mu$ P と 1.29  $\mu$ P とほぼ等しい値が得られ、ビーム電流値は、それぞれ 29.997 A と 29.443 A である。

## 2. 3 Ir 被覆含浸型カソード

今回の改造に用いた Ir 被覆含浸型カソードは、多孔質タンクステン (W) に、モル比で、BaO : CaO : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 4 : 1 : 1 の割合で含侵したものを基板に、カソード表面に Ir を被覆したものである。一般に、Os, Os-Ru, Ir, などの金属を被覆した含浸型カソードは、同じカソード温度の条件において、無コートタイプの含浸型カソードに比べてカソード表面の仕事関数が小さくなり、熱電子を多く取出すことができる。このためカソード温度を約 50~100°C 低くすることが可能とされている。このカソード温度と蒸発量との関係は、蒸発量の対数がカソード温度と直線的比例関係にあることから、電子銃部の耐電圧劣化に影響する Ba 蒸発を押さえる有効な手段と考えられる。採用した Ir 被覆含浸型カソードの動作温度とエミッションとの関係を Fig. 4 に示す。1 MW 程度の出力を得るのに必要な電流密度を約 0.8 A/cm<sup>2</sup> として、このカソードの推奨動作温度が、約 925°C であることがわかる。しかし改造前の無コートタイプのカソードでは、推奨動作温度 960°C に対して、1 MW 出力に必要なエミッションが取れる 900°C 近辺の温度制限領域で使用しているため、Ir 被覆含浸型カソードでも、さらに低いカソード温度約 850°C 近辺での使用を期待している。

### 3. 電子銃改造管での高周波出力試験

#### 3. 1 概要

1 MW以上での高周波出力試験において、クライストロンの電子銃部だけの改造では、出力空洞部の熱負荷、高周波出力窓の耐電圧、コレクターの熱負荷容量、ドリフト管内放電などの種々の問題がある。そこで出力空洞部の熱負荷を最小限に押さえるため、2. 17 GHz の周波数を選択し、またコレクターの熱負荷容量と出力試験装置の電源定格 (100 kV, 35 A, 10 sec) の制限から、電源容量の約 95% の範囲内で出力試験を行うことにした。さらに高周波出力窓の耐電圧とドリフト管内放電の懸念から、最初にパルス巾 2 sec にて十分な RF エージングを行った後、ビーム電圧を 2 kV ステップで増加させて高出力試験を行った。RF エージングの方法は、各ビーム電圧に対して高周波励振入力電力をパルス変調器にてパルス幅 100 μsec ~ 2 msec として、デューティを 20% から 80% まで徐々に上げ、最後に 2 sec、連続の運転を行い、種々の問題がなければビーム電圧を 2 kV 上げて試験を行った。次に最大ビーム電圧にてパルス幅を 1 sec ステップで伸ばす長パルス試験を行った。

#### 3. 2 高周波出力 1 MW 以上での問題点

##### 3. 2. 1 出力空洞

クライストロンの動作周波数が、周波数 1. 7 ~ 2. 3 GHz の広帯域内で、5 波 (1. 74, 1. 83, 2. 00, 2. 17, 2. 23 GHz) の周波数選択ができる仕様のために、出力空洞部の設計は、チューナーを駆動する構造となっている。このため動作周波数の選択により、1 MW 以上の出力試験時における出力空洞部への熱負荷を最小限に軽減することができる。特に出力空洞部のチューナー・シャフトの過熱は、チューナ部の上下方向の非対称性等でチューナ・シャフトに高周波電流が流れることによる高周波損失であり、チューナを空洞中心から遠ざける方向に動作周波数を上げることにより高周波損失を小さくでき、またチューナ・ベローズの過熱は、2. 23 GHz の第二高調波 (4. 46 GHz) に起因することやチューナ部の上下方向の非対称性などによるものであることが分かっているので、周波数 2. 23 GHz を避けることにより防止できる。これらの現象を避けるために周波数 2. 17 GHz において高出力試験を行うこととした。

##### 3. 2. 2 高周波出力窓

本クライストロンの高周波出力窓は、2 ポート化されており、出力電力の約 1/2 が一つの高周波出力窓の耐電力となる。現在高周波出力窓には、アルミナ・セラミックス内面（真空側）にマルチパクタリング放電を抑制するために TiN コーティングを施したものを使用しており、出力電力 1 MW (高周波出力窓の耐電力としては、500 kW), 10 sec, CW, 1 ショットに対して、セラミックス表面のジュール損による温度上昇は 2 ~ 4 °C であり、耐電力 1 MW 以内でのジュール損による破損はないと思われる。しかし局所的なマルチパクタ放電による温度上昇は、数 10 °C に達することがあるので、

十分なRFエージングの実施とマルチパクタリング放電の監視が必要となる。

### 3. 2. 3 コレクターの熱負荷

コレクターの熱負荷の設計容量は、高周波出力無しの場合、ビーム入力電力2. 7 MW, 4 sec, CWであり、高周波出力0. 5 MW以上の場合、ビーム入力電力2. 7 MW, 10 sec, CWを目安として設計されている。従ってコレクターの最大熱負荷電力は、高周波出力0. 5 MWを差引いた2. 2 MW, 10 secとなる。出力試験装置の電源定格をビーム入力電力の最大値とし、高周波出力1 MW以上でのRF変換効率を約50%と仮定すると、コレクターの熱負荷電力は、最大熱負荷電力以下の1. 75 MWとなり、コレクターの熱負荷容量について問題ないと思われる。しかしコレクターの蒸発冷却性能として、コレクター最高温度T = 130°C, 冷却水水位低によるインターロックが設置されているため、高出力試験における4 sec以上の長パルス試験がこのコレクター冷却能力から制限される可能性がある。

### 3. 2. 4 ドリフト管内放電

ビーム電圧およびビーム電流の増加とともに、ドリフト管内におけるジュール損の増加や管内放電の発生が懸念される。また電子銃部の耐電圧劣化による放電電流がドリフト管内に流れ込むことにより同様なことが懸念される。現在JT-60LHRF装置では、ドリフト管内を流れるボディ電流(リーク電流)をパルスCTやDCCCTにより100mAに制限しているが、ボディ電流の制限値を150mAに上げ、管内放電の有無を調べることとした。

## 3. 3 高出力試験

### 3. 3. 1 インターロックとモニター

クライストロンの保護インターロック項目として、高周波出力窓の放電による左右の反射電力検出器および左右のアーク検出器、ドリフト管内のボディ電流(設定150mA以上)、コレクターの熱負荷によるコレクター温度上昇異常(設定125°C以上)およびコレクター水位異常を設定した。また出力空腔部には、各冷却部の入口出口にサーマル・ジャングションを取付け冷却水の温度上昇を計測し、(Fig. 5参照)、高周波出力窓には、アーク検出器のインターロックのほかに赤外線温度計測器を設置し、RFエージング中のマルチパクタ放電の発生を監視した。

### 3. 3. 2 高出力試験および長パルス試験

設定周波数2. 17 GHzにおいて、ビーム電圧83 kV、ビーム電流26. 9 Aにて、従来のクライストロン性能(周波数2 GHzにおいて1 MW, 10 sec, CW, また2 GHz以外の周波数においては、900 kW, 2 sec, CW以上)を満足する高周波出力938 kW, 10 sec, CWを確認後、従来の最大ビーム電圧83 kVからさらに94 kVまで印加することができ、ビーム電流が26.

9 Aから31. 9 Aに達し、高周波出力が、従来の0. 94 MWから1. 46 MWの高出力化を達成した。このときのビーム電圧に対する高周波出力とRF効率の関係をFig. 6に示す。ビーム電圧90 kV以上にて変換効率が49%において飽和していることが分る。またFig. 7に励振入力電力と高周波出力電力との入出力特性を示す。励振入力電力5Wにおいて、最大高周波出力1. 46 MWより、飽和出力時の電力利得（ゲイン）は、約54. 7 dBとなる。

次にビーム電圧94 kVにてパルス幅を1 secステップ毎に延ばす長パルス試験を行った。その結果をFig. 8に示すように、平均高周波出力1. 4 MWにて10 sec, CWを達成した。この時の主な出力空洞近辺における冷却水温度上昇をFig. 9に示す。出力空洞冷却水の温度上昇は、約15°C、チューナ部冷却水の温度上昇は約8. 8°Cであり、その他の冷却水の温度上昇は最高でも1.0°C以下であり、パルス巾10 secにて、ほぼ飽和しており出力空洞近辺の冷却を満足していることを示す。

また補足的な結果として、TiNコーティングしたアルミナ・セラミックスの高周波窓が、十分なエージングのもとで、高周波耐電力750 kW, 10 sec, CWにて、マルチパクタリング放電およびジュール損による破損がないことが実証された。またビーム電圧83 kV時のボディ電流43 mAからビーム電圧94 kV時の130 mAに増加することにより、パルス巾10 sec, CWにてドリフト管内のジュール損が35. 7 kJから122. 2 kJにも達したが、これによるジュール損による破損および管内放電は発生しなかった。このことからJT-60 LHRF装置におけるボディ電流の制限値100 mAを、高周波出力1 MW, 10 sec, CW時においては、150 mAとしてもドリフト管内のジュール損による破損には、問題ないと思われる。ただし、このジュール損の換算は、ボディ電流と单一ビーム・エネルギー（ビーム電圧）との積から求めたもので、実際にはボディ電流には、エネルギー分布を持ち、正味のジュール損は、ここで求めた値の約1/2以下になると予想される。

#### 4. 考 察

電極表面での垂直電界を軽減するために、各電極間のギャップを大きくする新たな構造を計算コードでもとめたが、計算でもとめたパービアンス（1. 29 μP）に対して、計測では1. 11 μPであり、電流値として、12. 9%低めであった。これに対して調査した結果、製造工程においてウェネルト・アノード間において軸方向に2 mmの誤差があることが判明し、この誤差によりパービアンスの違いについて説明できることが再度計算により確認された。またカソード温度は、空間電荷制限領域において861°Cであり、推奨温度925°Cに対して、64°C低めであり、Ir被覆含浸型カソードの動作温度に対して有効な結果であった。また改造前のカソード温度を比較すると、カソード・ヒータ電力が約245 Wから約220 Wと約25 W低減することから、約28°C低めと想定される。これは改造前のBa蒸発量に対して約40%押さえられることが理論上求められるが、Irコートの合金化処理によりさらに押さえられることが期待される。さらに耐電圧試験結果、改造前のクライストロンでは、130 kV, 10 minを維持するのに、アノード・カソード間で、2. 5~6. 0日、アノード・ボディー間で、0. 5~1. 5日の耐電圧処理が必要であったのに対して、今回の改造では、アノード・カソード間で約0. 5日、アノード・ボディ間で約1時間と大幅に短縮された。これは改造前の100~110 kV印加電圧に相当する処理時間で、電子銃部の高耐電圧化の効果が十分に得られたものと考えられる。

9 Aから31. 9 Aに達し、高周波出力が、従来の0. 94 MWから1. 46 MWの高出力化を達成した。このときのビーム電圧に対する高周波出力とRF効率の関係をFig. 6に示す。ビーム電圧90 kV以上にて変換効率が49%において飽和していることが分る。またFig. 7に励振入力電力と高周波出力電力との入出力特性を示す。励振入力電力5Wにおいて、最大高周波出力1. 46 MWより、飽和出力時の電力利得（ゲイン）は、約54. 7 dBとなる。

次にビーム電圧94 kVにてパルス幅を1 secステップ毎に延ばす長パルス試験を行った。その結果をFig. 8に示すように、平均高周波出力1. 4 MWにて10 sec, CWを達成した。この時の主な出力空洞近辺における冷却水温度上昇をFig. 9に示す。出力空洞冷却水の温度上昇は、約15°C、チューナ部冷却水の温度上昇は約8. 8°Cであり、その他の冷却水の温度上昇は最高でも1.0°C以下であり、パルス巾10 secにて、ほぼ飽和しており出力空洞近辺の冷却を満足していることを示す。

また補足的な結果として、TiNコーティングしたアルミナ・セラミックスの高周波窓が、十分なエージングのもとで、高周波耐電力750 kW, 10 sec, CWにて、マルチパクタリング放電およびジュール損による破損がないことが実証された。またビーム電圧83 kV時のボディ電流43 mAからビーム電圧94 kV時の130 mAに増加することにより、パルス巾10 sec, CWにてドリフト管内のジュール損が35. 7 kJから122. 2 kJにも達したが、これによるジュール損による破損および管内放電は発生しなかった。このことからJT-60 LHRF装置におけるボディ電流の制限値100 mAを、高周波出力1 MW, 10 sec, CW時においては、150 mAとしてもドリフト管内のジュール損による破損には、問題ないと思われる。ただし、このジュール損の換算は、ボディ電流と单一ビーム・エネルギー（ビーム電圧）との積から求めたもので、実際にはボディ電流には、エネルギー分布を持ち、正味のジュール損は、ここで求めた値の約1/2以下になると予想される。

#### 4. 考 察

電極表面での垂直電界を軽減するために、各電極間のギャップを大きくする新たな構造を計算コードでもとめたが、計算でもとめたパービアンス（1. 29 μP）に対して、計測では1. 11 μPであり、電流値として、12. 9%低めであった。これに対して調査した結果、製造工程においてウェネルト・アノード間において軸方向に2 mmの誤差があることが判明し、この誤差によりパービアンスの違いについて説明できることが再度計算により確認された。またカソード温度は、空間電荷制限領域において861°Cであり、推奨温度925°Cに対して、64°C低めであり、Ir被覆含浸型カソードの動作温度に対して有効な結果であった。また改造前のカソード温度を比較すると、カソード・ヒータ電力が約245 Wから約220 Wと約25 W低減することから、約28°C低めと想定される。これは改造前のBa蒸発量に対して約40%押さえられることが理論上求められるが、Irコートの合金化処理によりさらに押さえられることが期待される。さらに耐電圧試験結果、改造前のクライストロンでは、130 kV, 10 minを維持するのに、アノード・カソード間で、2. 5~6. 0日、アノード・ボディー間で、0. 5~1. 5日の耐電圧処理が必要であったのに対して、今回の改造では、アノード・カソード間で約0. 5日、アノード・ボディ間で約1時間と大幅に短縮された。これは改造前の100~110 kV印加電圧に相当する処理時間で、電子銃部の高耐電圧化の効果が十分に得られたものと考えられる。

## 5. ま と め

クライストロン電子銃部のみの高耐電圧化への改造により、高周波出力について従来の最大1MWから1.46MWの高出力化を達成した。この時の電力利得（ゲイン）は、54.7dBであった。これは今回の出力試験期間が、約200時間のカソード・ヒータ点火時間であるため、カソードからのBa蒸発による耐電圧劣化が無視でき、電極表面の垂直電界を軽減したことが、高出力化に大きく寄与していると考えられる。またビーム電圧90kV以上において、RF変換効率が約49%にて飽和していることが確認された。さらに高周波出力1.4MW時の長パルス試験において、パルス幅10secのボディ電流によるドリフト管内のジュール損が1MW高周波出力時の35.7kJから122.2kJにも達したが、これによる管内放電等の問題がないことや、高周波出力窓のマルチパクタ放電や出力空洞部における熱負荷等に問題ないことが確認された。今回の電子銃部改造おいて電子銃部内のBa蒸発による耐電圧劣化については、Ir被服含浸型カソードや改造した絶縁セラミックスを採用したことにより多いに期待される。このことについては、JT-60LHRF加熱装置に設置して、約300時間のカソード・ヒータ点火時間におよぶ評価を行っている。

謝 舌辛

本報告書をまとめるに当たり、有益な御意見、御協力を戴きました太田充JT-60第三試験室室長および第三試験室の諸氏およびに加熱工学第二研究室の諸氏に深く感謝致します。また、御指導、御鞭撻していただきました細井真理東芝電子管技術部長、白形弘文JT-60試験部次長に深く感謝致します。

## 参 考 文 獣

1. Imai T., Ikeda Y., Maebara S., Fujii T., Sakamoto K., Saigusa M., Honda M., Yokokura K., Sawahata M., Uehara K. and Nagashima T. : to be publish in Fusion Engineering and Design.
2. 池田 佳隆 : JAERI-M 88-182.
3. Ouchi Y., Kimura S., Higuti T., Kobayashi K., Nikaido M., Homma K., Yanagibashi K. : Technical Report, ED85-118(1985).
4. Kimura S., Nikaido M., Homma K., Yanagibashi K., Ouchi Y. : J. Vac. Soc. Jpn 29, 378 (1986).

## 5. ま と め

クライストロン電子銃部のみの高耐電圧化への改造により、高周波出力について従来の最大1MWから1.46MWの高出力化を達成した。この時の電力利得（ゲイン）は、54.7dBであった。これは今回の出力試験期間が、約200時間のカソード・ヒータ点火時間であるため、カソードからのBa蒸発による耐電圧劣化が無視でき、電極表面の垂直電界を軽減したことが、高出力化に大きく寄与していると考えられる。またビーム電圧90kV以上において、RF変換効率が約49%にて飽和していることが確認された。さらに高周波出力1.4MW時の長パルス試験において、パルス幅10secのボディ電流によるドリフト管内のジュール損が1MW高周波出力時の35.7kJから122.2kJにも達したが、これによる管内放電等の問題がないことや、高周波出力窓のマルチパクタ放電や出力空洞部における熱負荷等に問題ないことが確認された。今回の電子銃部改造おいて電子銃部内のBa蒸発による耐電圧劣化については、Ir被服含浸型カソードや改造した絶縁セラミックスを採用したことにより多いに期待される。このことについては、JT-60LHRF加熱装置に設置して、約300時間のカソード・ヒータ点火時間におよぶ評価を行っている。

謝 舌辛

本報告書をまとめるに当たり、有益な御意見、御協力を戴きました太田充JT-60第三試験室室長および第三試験室の諸氏およびに加熱工学第二研究室の諸氏に深く感謝致します。また、御指導、御鞭撻していただきました細井真理東芝電子管技術部長、白形弘文JT-60試験部次長に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

1. Imai T., Ikeda Y., Maebara S., Fujii T., Sakamoto K., Saigusa M., Honda M., Yokokura K., Sawahata M., Uehara K. and Nagashima T. : to be publish in Fusion Engineering and Design.
2. 池田 佳隆 : JAERI-M 88-182.
3. Ouchi Y., Kimura S., Higuti T., Kobayashi K., Nikaido M., Homma K., Yanagibashi K. : Technical Report, ED85-118(1985).
4. Kimura S., Nikaido M., Homma K., Yanagibashi K., Ouchi Y. : J. Vac. Soc. Jpn 29, 378 (1986).

## 5. ま と め

クライストロン電子銃部のみの高耐電圧化への改造により、高周波出力について従来の最大1MWから1.46MWの高出力化を達成した。この時の電力利得（ゲイン）は、54.7dBであった。これは今回の出力試験期間が、約200時間のカソード・ヒータ点火時間であるため、カソードからのBa蒸発による耐電圧劣化が無視でき、電極表面の垂直電界を軽減したことが、高出力化に大きく寄与していると考えられる。またビーム電圧90kV以上において、RF変換効率が約49%にて飽和していることが確認された。さらに高周波出力1.4MW時の長パルス試験において、パルス幅10secのボディ電流によるドリフト管内のジュール損が1MW高周波出力時の35.7kJから122.2kJにも達したが、これによる管内放電等の問題がないことや、高周波出力窓のマルチパクタ放電や出力空洞部における熱負荷等に問題ないことが確認された。今回の電子銃部改造おいて電子銃部内のBa蒸発による耐電圧劣化については、Ir被服含浸型カソードや改造した絶縁セラミックスを採用したことにより多いに期待される。このことについては、JT-60LHRF加熱装置に設置して、約300時間のカソード・ヒータ点火時間におよぶ評価を行っている。

謝 舌辛

本報告書をまとめるに当たり、有益な御意見、御協力を戴きました太田充JT-60第三試験室室長および第三試験室の諸氏およびに加熱工学第二研究室の諸氏に深く感謝致します。また、御指導、御鞭撻していただきました細井真理東芝電子管技術部長、白形弘文JT-60試験部次長に深く感謝致します。

## 参 考 文 献

1. Imai T., Ikeda Y., Maebara S., Fujii T., Sakamoto K., Saigusa M., Honda M., Yokokura K., Sawahata M., Uehara K. and Nagashima T. : to be publish in Fusion Engineering and Design.
2. 池田 佳隆 : JAERI-M 88-182.
3. Ouchi Y., Kimura S., Higuti T., Kobayashi K., Nikaido M., Homma K., Yanagibashi K. : Technical Report, ED85-118(1985).
4. Kimura S., Nikaido M., Homma K., Yanagibashi K., Ouchi Y. : J. Vac. Soc. Jpn 29, 378 (1986).

Table 1 各電極表面における垂直電界強度の最大値について、改造前  
と改造後との比較

(a) アノード・カソード間に、電圧 130 kV を印加した場合  
(ビーム・オン時)

Unit ; kV/mm

	Anode	Wehnelt	Anode's corona-ring
Previous Design	13.7	15.3	10.6
Improved Design	11.6	12.7	7.5

(b) アノード・ウェーネルト間に、電圧 130 kV を印加した  
場合 (待機状態)

Unit ; kV/mm

	Body	Anode	Body's corona-ring
Previous Design	10.9	12.6	19.5
Improved Design	7.1	7.2	10.1

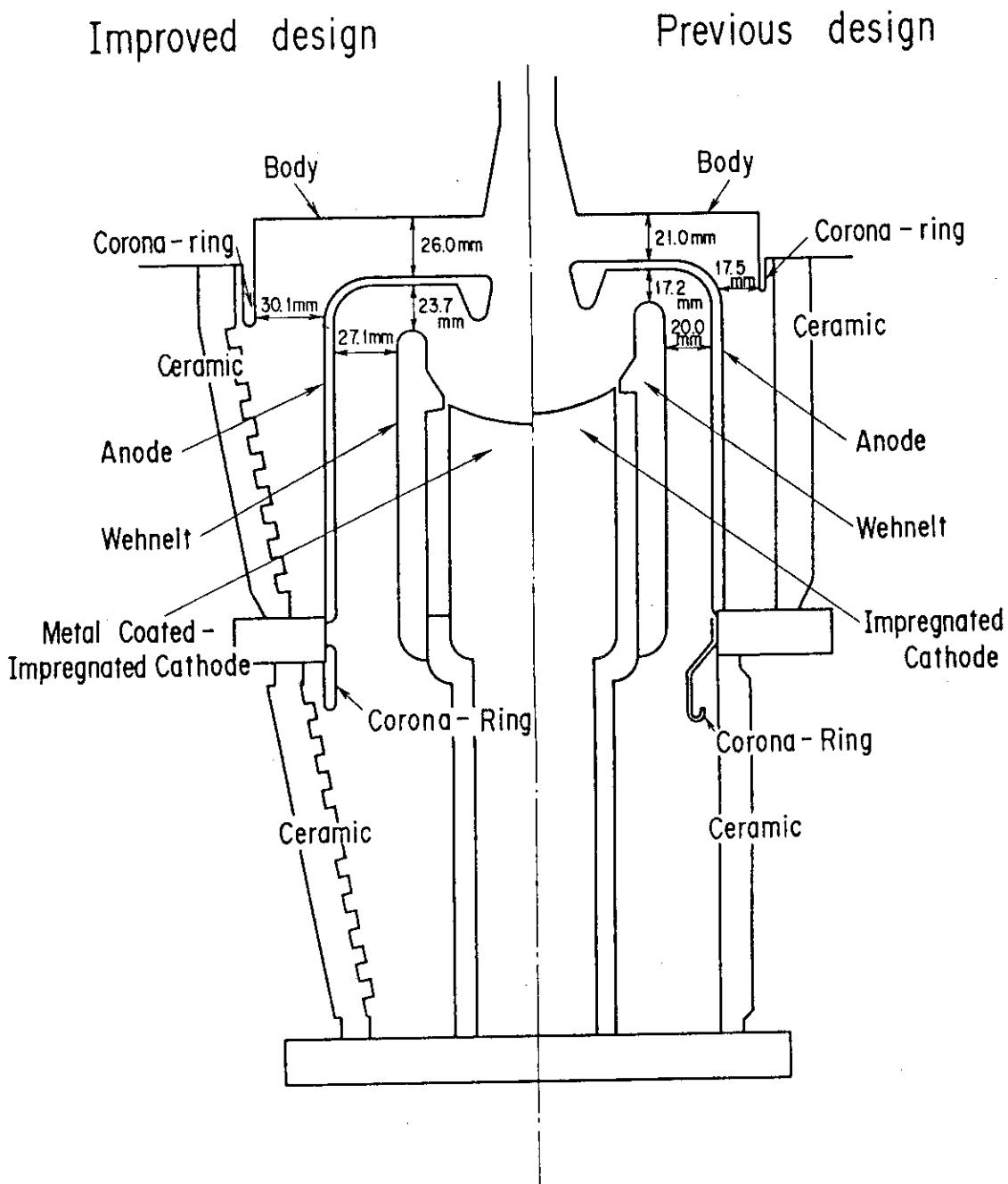


Fig. 1 電子銃部の改造前（右側）と改造後（左側）の断面図

(a) アノード・カソード間に、電圧130kVを印加した場合  
(ビーム・オン時)

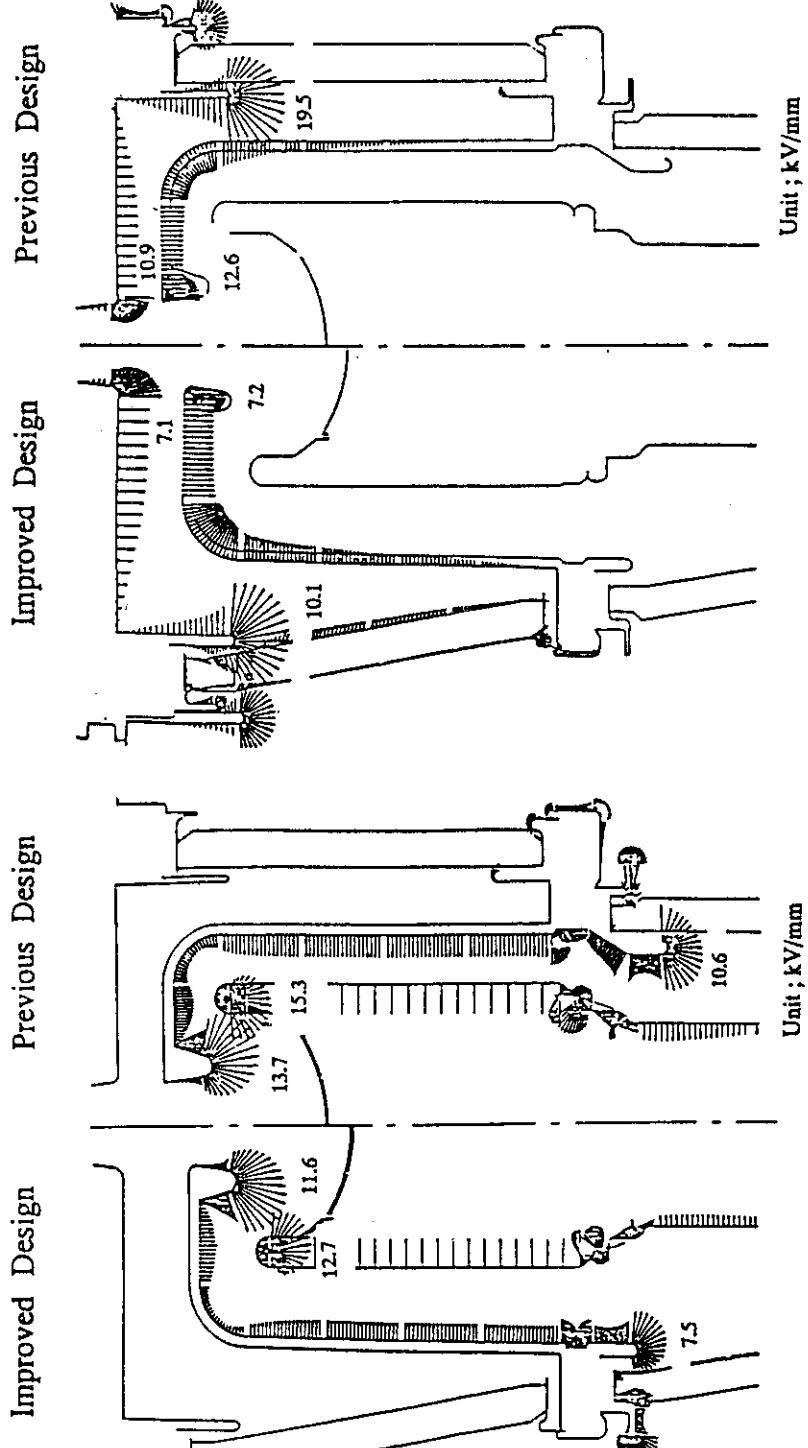


Fig. 2 電圧84kVにおける電界強度分布

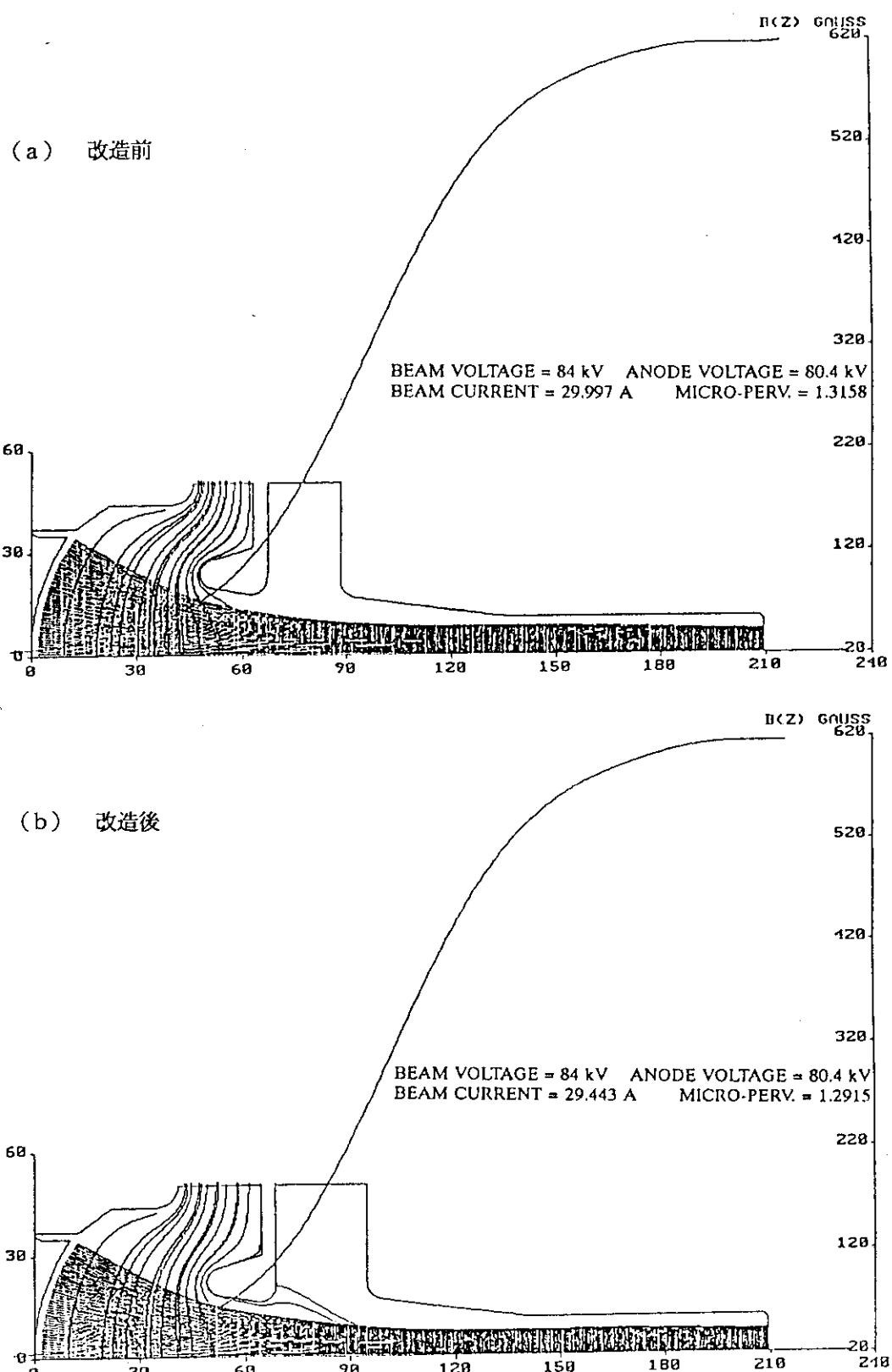


Fig. 3 ビーム電圧 84 kV における改造前 (a) と改造後 (b)  
とのビーム軌道計算結果

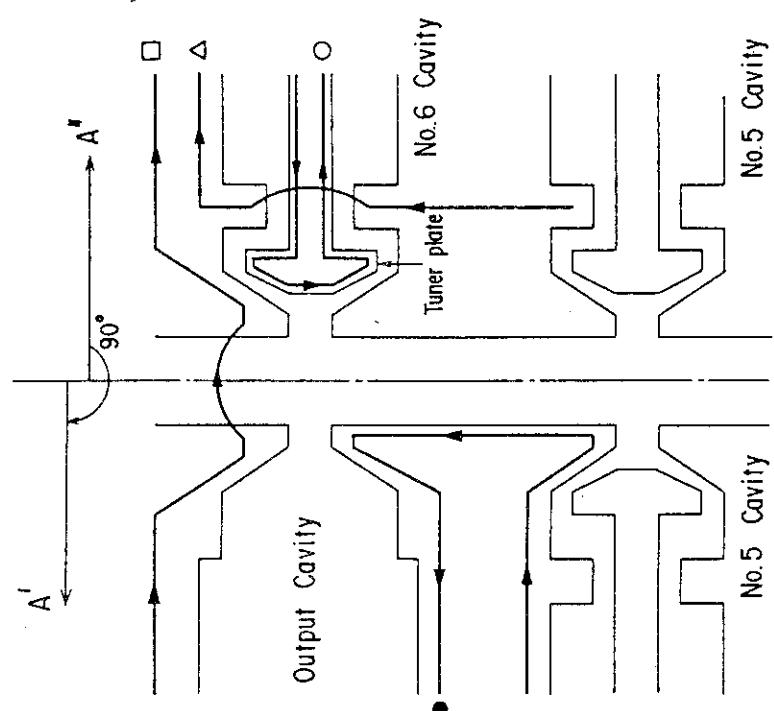


Fig. 5 出力空洞部周辺の冷却水系統図

- ; 出力空洞部上部およびドリフト管を冷却。
- △ ; 出力空洞外周部を冷却。
- ; 出力空洞部のチューナー・プレート内部を冷却。
- ; 第5空洞部上部および出力空洞部下部を冷却。

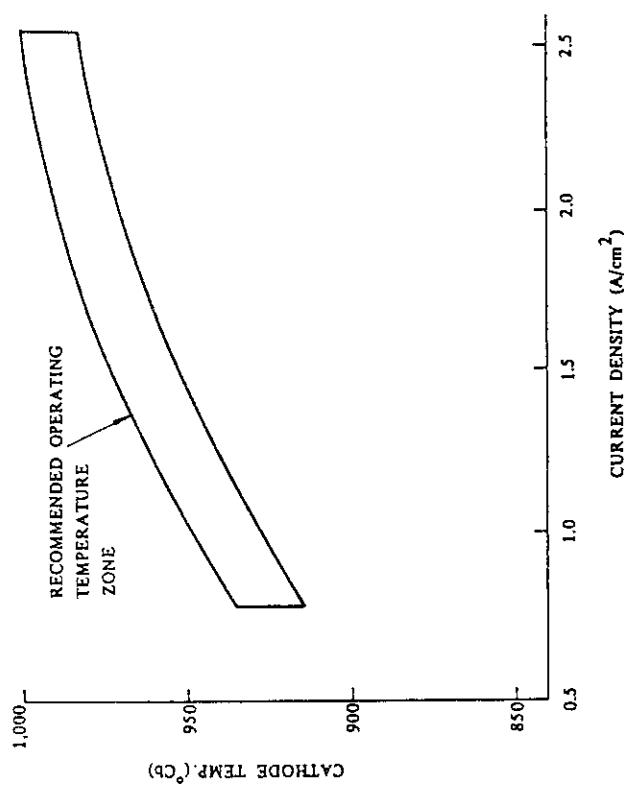


Fig. 4 Ir被覆合浸型カソードの動作温度特性

$\phi 70$  のカソード径を使用しているため、高周波出力 1 MW に必要な電流密度は、約  $0.8 \text{ A}/\text{cm}^2$  となり、したがって推奨動作温度は、約  $925^\circ\text{C}$  となる。

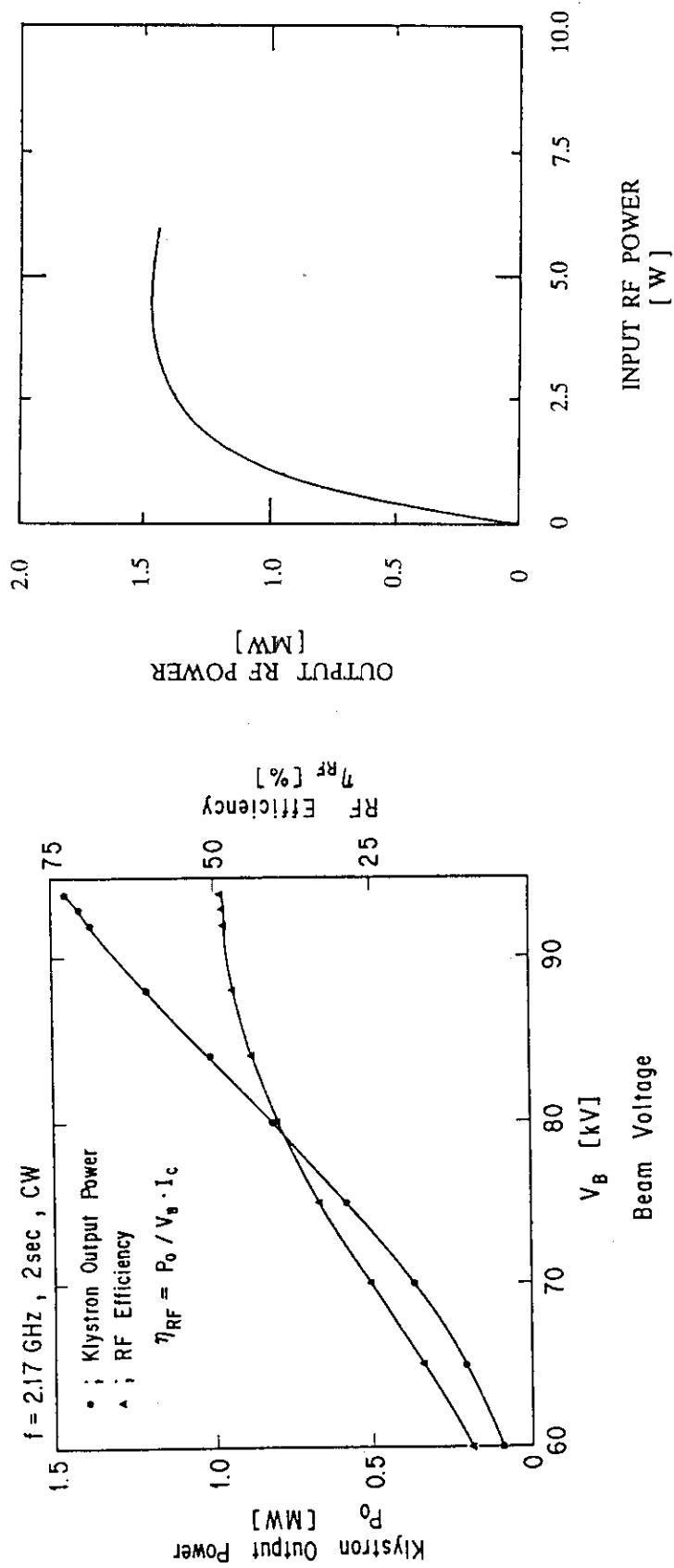


Fig. 6 ビーム電圧に対する高周波出力とRF変換効率特性

ビーム電圧 9.4 kVにて、高周波出力 1.46 MWに達し、  
ビーム電圧 9.0 kV以上において、RF変換効率が、約 4.9  
%で飽和している。

Fig. 7 励振入力電力に対する高周波出力特性

励振入力電力が約 5 Wにおいて、最大高周波出力 1.46 MW  
になり、この飽和出力時の電力利得（ゲイン）は、約 54.7  
dB となる。

