

JAERI-Research

95-041



120GHz、500kW-0.1秒、
モード変換器内蔵型ジャイロトロンの開発

1995年6月

春日井敦・恒岡まさき・坂本慶司・前原 直・今井 剛・永島 孝
假家 強*・岡崎行男*・岡本 正*・林 健一**・満仲義加**・小室三男**

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、お申し越してください。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。

This report is 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, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷㈱

120GHz、500kW-0.1秒
モード変換器内蔵型ジャイロトロンの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合工学部

春日井 敦・恒岡まさき・坂本 慶司・前原 直
今井 剛・永島 孝・假家 強*・岡崎 行男*
岡本 正*・林 健一**・満仲 義加**・小室 三男**

(1995年5月8日受理)

本報告は準光学モード変換器を内蔵した高出力ジャイロトロンを開発し、実験を行った結果について述べたものである。発振モードであるTE_{12,2}ウィスパリングギャラリーモードは、ジャイロトロンに内蔵したモード変換器によってガウシアンビームに変換され出力される。実験ではほぼ設計値どおりの、120GHzにおいて、出力460kW、パルス幅0.1秒を得た。さらに長パルスのオペレーションにおいて、出力250kW、0.215秒のパルス幅を得た。0.1秒以上の長パルス実験において、出力窓においてRFブレークダウンやジャイロトロン内部での異常放電は観測されなかった。すなわち、目標である出力1MW、連続動作のジャイロトロンの開発の方向として、モード変換器内蔵型が非常に有効であることが示された。

Development of Built-in Mode Converter Type Gyrotron
with 120GHz, 500kW-0.1sec

Atsushi KASUGAI, Masaki TSUNEOKA, Keishi SAKAMOTO, Sunao MAEBARA
Tsuyoshi IMAI, Takashi NAGASHIMA, Tsuyoshi KARIYA*, Yukio OKAZAKI*
Tadashi OKAMOTO*, Kenichi HAYASHI**, Yoshika MITSUNAKA** and Mitsuo KOMURO**

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

(Received May 8, 1995)

High power gyrotron with the built-in quasi-optical mode converter was developed and it achieved the Gaussian beam output of 0.1sec, 460kW at 120GHz, which was converted from TE_{12,2} whispering gallery mode (WGM). Longer pulse operation of 0.215sec with the oscillation power of 250kW was made. Then, no evidence of RF breakdown at the output window and inside the tube was observed through the experiments for 0.1sec pulse duration.

Keywords: Gyrotron, Whispering Gallery Mode, Gaussian Beam, Built-in Mode Converter,
120GHz, 0.1sec, 460kW

* Electron Tube Division, Toshiba Corporation

** Research and Development Center, Toshiba Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. モード変換器内蔵型ジャイロトロン設計	2
2.1 全体設計	2
2.2 各要素の設計	2
3. モード変換器内蔵型ジャイロトロン動作実験	3
3.1 試験装置と測定装置	3
3.2 動作試験結果	5
4. まとめ	6
謝 辞	7
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Design of Built-in Mode Converter Type Gyrotron	2
2.1 Overall Design	2
2.2 Components Design	2
3. Test of Built-in Mode Converter Type Gyrotron	3
3.1 Test Facility and Diagnostics System	3
3.2 Test Results	5
4. Summary	6
Acknowledgment	7
References	7

1. はじめに

核融合炉に最も近いトカマクには、プラズマの加熱・電流駆動を行う手段が不可欠であり、その有効な方法として高周波が使用されてきた。その中でも低域混成波帯 (LHRF)、イオンサイクロトロン波帯 (ICRF) を用いたトカマクプラズマの加熱・電流駆動の進展は著しく、大型トカマクにおいて大きな成果を挙げている[1]。しかし、これらの周波数帯では、プラズマに効率良く結合させるためには、アンテナやランチャーをプラズマに充分接近させる必要があり、核融合炉では、高速中性子や高熱からの保護のための設計が非常に困難である。ところが、電子サイクロトロン波帯 (ECRF) を利用すれば、アンテナをプラズマから充分離しても、高温・高密度プラズマへの近接性が良く、また大きな入射ポートを必要としないことから、ECRFは実用炉における有力なプラズマの加熱・電流駆動の手段として考えられている。またECRFは、プラズマの初期立ちあげ、分布制御、不安定性の抑制などに利用でき、核融合におけるECRFの必要性は、今後ますます増大する傾向にある。

ITER (国際熱核融合実験炉) などの、大型トカマクの核融合実験装置では、周波数170GHz、全体で50MW程度の高周波電力が必要になり[2]、1本あたり1MW以上、連続動作可能な発振器が不可欠である。この必要性に応じ、電子サイクロトロン共鳴メーザ (CRM) の原理を利用した、ミリ波帯のジャイロトロンの開発が世界的に進められている。

各国のジャイロトロンの開発の現状を見ると、米国バリアン社では、最近110GHz、TE_{22,2}ジャイロトロンで出力470kW、パルス幅2.5秒を達成し[3]、ロシアでは140GHz、550kW、2.1秒の準光学モード変換器内蔵型ジャイロトロンを開発している。しかし、出力1MW、連続動作のためには、解決しなければならない問題も多くあり、そのための技術改良が各国で精力的に行われているのが現状である。

我々も、ITERで要求される性能を最終目標とした開発を進め、その第1ステップとして周波数120GHz、出力500kW級ジャイロトロンの開発を進めてきた。まず、軸対称モード (TE_{0,3}) を発振モードとする、120GHz、150kW級ジャイロトロン (E3958) を開発した。次に、発振モードTE_{12,2}、120GHz、500kW級、短パルスのウイスパリングギャラリモード出力ジャイロトロン (E3960) の開発に着手し[4]、さらにその後、準光学モード変換器内蔵型ジャイロトロン (E3970) を開発した[5]。

ジャイロトロン開発の第2ステップとして、出力500kW以上でパルス幅1秒以上のジャイロトロンの開発[6,7]、およびエネルギー回収型ジャイロトロン (CPDジャイロトロン, CPD: Collector Potential Depression) の開発を進めている[8]。この方式によりITERで要求される周波数100GHz帯、高効率、出力1MW、連続動作のジャイロトロンを開発し、大型トカマクでの適用を考えている。

本論文は、モード変換器内蔵型ジャイロトロン (E3970) の設計とパルス幅0.1秒の発振実験について

て述べたものである。第2章でジャイロトロンの基本設計、及び熱設計を中心に述べ、第3章でモード変換器内蔵型ジャイロトロンE3970の動作実験について述べる。第4章でまとめを述べる。

2. モード変換器内蔵型ジャイロトロン設計

2.1 全体設計

周波数100GHz帯の高出力ジャイロトロンでは、発振モードとしてウイスパリングギャラリーモード（回廊モード）を用いることが主流となっている。ウイスパリングギャラリーモードは、 $TE_{mn}(m \gg n, n=1,2,3)$ で表され、電磁波が導波管壁面近傍を回転しながら伝搬するモードである。その特長として、電磁界が空洞の壁面近傍に局在しており、空洞壁の熱負荷を軽減させるため空洞径を大きくしてもモード競合が少ない、また電子ビームの断面積を広くすることができるため、大口径カソードの採用が可能となり、低い電流密度で数10A以上の電子ビームが得られる、などが挙げられる。

Table 1 にジャイロトロン基本設計パラメータを、Fig. 1 に外観写真を示す。ジャイロトロン全長は約2.4m、重量は270kgである。モード変換器内蔵型ジャイロトロンE3970は、モード変換器内蔵の実証管とするため、ウイスパリングギャラリーモード出力ジャイロトロン（E3960）の実験結果を基に、空洞形状は変更せず準光学モード変換器を管内に内蔵する方針で設計を行なった。モード変換器を内蔵することにより、出力窓の周波数特性による反射の発振特性への悪影響が取り除かれ、設計計算に近い発振特性が得られるようになった[9]。周波数は、ITERの概念設計（CDA）において示された120GHzである。すなわちITER-CDAではトロイダル磁場を4.85Tで考え、電子サイクロトロン波を、主に周辺部のプラズマコントロール、初期立ち上げとして位置づけていたので120GHzが採用された。発振モードは $TE_{12,2}$ モードである。 $TE_{11,2}$ 、 $TE_{12,2}$ の2つのモードを候補としたが、モード競合が少なく、発振しやすい解析結果が得られた $TE_{12,2}$ モードを採用した。出力はE3960の実績と準光学伝送系の伝送効率を考慮し400kW・0.1秒を目標とした。以下にジャイロトロン各要素の設計について述べる。

2.2 各要素の設計

電子銃の設計には、電子ビームの空間電荷効果を考慮にいたした電子ビーム軌道計算コード [10,11] を使用した。ビーム電圧 $V_b=70\sim 80$ kV、アノード電圧 $V_a=32\sim 36$ kVの範囲で、 $\alpha=1.5$ （電子ビームのピッチ角、 v_{\perp}/v_{\parallel} ）、横方向速度分散5%以下の電子ビームが発生できる。カソード径は49.2mmで、熱遮蔽構造

て述べたものである。第2章でジャイロトロンの基本設計、及び熱設計を中心に述べ、第3章でモード変換器内蔵型ジャイロトロンE3970の動作実験について述べる。第4章でまとめを述べる。

2. モード変換器内蔵型ジャイロトロン設計

2.1 全体設計

周波数100GHz帯の高出力ジャイロトロンでは、発振モードとしてウイスパリングギャラリーモード（回廊モード）を用いることが主流となっている。ウイスパリングギャラリーモードは、 $TE_{mn}(m \gg n, n=1,2,3)$ で表され、電磁波が導波管壁面近傍を回転しながら伝搬するモードである。その特長として、電磁界が空洞の壁面近傍に局在しており、空洞壁の熱負荷を軽減させるため空洞径を大きくしてもモード競合が少ない、また電子ビームの断面積を広くすることができるため、大口径カソードの採用が可能となり、低い電流密度で数10A以上の電子ビームが得られる、などが挙げられる。

Table 1 にジャイロトロン基本設計パラメータを、Fig. 1 に外観写真を示す。ジャイロトロン全長は約2.4m、重量は270kgである。モード変換器内蔵型ジャイロトロンE3970は、モード変換器内蔵の実証管とするため、ウイスパリングギャラリーモード出力ジャイロトロン（E3960）の実験結果を基に、空洞形状は変更せず準光学モード変換器を管内に内蔵する方針で設計を行なった。モード変換器を内蔵することにより、出力窓の周波数特性による反射の発振特性への悪影響が取り除かれ、設計計算に近い発振特性が得られるようになった[9]。周波数は、ITERの概念設計（CDA）において示された120GHzである。すなわちITER-CDAではトロイダル磁場を4.85Tで考え、電子サイクロトロン波を、主に周辺部のプラズマコントロール、初期立ち上げとして位置づけていたので120GHzが採用された。発振モードは $TE_{12,2}$ モードである。 $TE_{11,2}$ 、 $TE_{12,2}$ の2つのモードを候補としたが、モード競合が少なく、発振しやすい解析結果が得られた $TE_{12,2}$ モードを採用した。出力はE3960の実績と準光学伝送系の伝送効率を考慮し400kW・0.1秒を目標とした。以下にジャイロトロン各要素の設計について述べる。

2.2 各要素の設計

電子銃の設計には、電子ビームの空間電荷効果を考慮にいたした電子ビーム軌道計算コード [10,11] を使用した。ビーム電圧 $V_b=70\sim 80$ kV、アノード電圧 $V_a=32\sim 36$ kVの範囲で、 $\alpha=1.5$ （電子ビームのピッチ角、 v_{\perp}/v_{\parallel} ）、横方向速度分散5%以下の電子ビームが発生できる。カソード径は49.2mmで、熱遮蔽構造

を取り入れ、エミッションベルト以外からの不要電流の発生を抑制した。

空洞は直径14.9mm、長さ11mmの開口型円筒空洞である。発振モードはTE_{12,2}、周波数は120GHz、外部Q値は579である [9]。Fig. 2 にジャイロトロンの空洞での発熱分布の計算値を示す。空洞でのピーク熱負荷は、出力400kWに対して3.6kW/cm²となる。計算では、空洞壁の電気伝導率として無酸素銅の250°Cのときの値 3.0×10^7 S/mを使用した。熱解析の結果では、初期温度を20°Cとすると、400kW-0.1秒動作後の壁面と冷却面の最高温度は、それぞれ269°Cと40°Cとなる。なお冷却面と冷却水との熱伝達率は3W/cm²°Cとした。このジャイロロンでは0.1秒動作を目標とし、比較的肉厚を大きくしたため、熱応力の最大値は660MPaとなり、パルス幅0.1秒での高い繰返し動作は望めない。

E3970ジャイロロンでは、モード変換器を内蔵することにより、電子ビームと出力ミリ波を分離することができた。したがってコレクターは、ミリ波導波路を兼ねる必要がないため、コレクター内径を180mmと大きくし、電子ビームによる熱負荷を小さく抑えることができた。熱負荷は従来のジャイロロンE3960の約1/4となり、2.4MW (80kV-30A) の電子ビームに対して、ビーム分散用補助コイルを用いない状態でも、2.0kW/cm²となり、0.1秒の動作には問題がない。

モード変換器は、Fig. 3 に示すように放射器と5枚の反射鏡で構成されている [9]。空洞で発振したTE_{12,2}モードのミリ波は、モード変換器によってガウシアンビームに変換され出力される。ジャイロロンに内蔵したモード変換器は、モード変換効率約80%である。したがって空洞出力の約20%はモード変換ロスとして回折によって管内に散乱されることになる。ジャイロロンE3970では、伝送鏡の側面に炭化硅素 (SiC) の電磁波吸収体を配置し、散乱電力を吸収するとともに、コレクターの上部にサファイア製の補助窓を配置し、回折電力を管外に取り出すようにした。さらにこの補助窓は管内の観察にも使用される。

出力窓は口径101.6mm、厚さ2.82mmのアルミナ製シングルディスクを使用し、電力反射率は、周波数120±0.5GHzで2%以下である。Fig. 4 に400kW、0.1秒動作時の応力および温度の径方向分布を示す。誘電損失による窓の温度上昇は窓中心で最大約41°Cとなる。また、このときの熱応力の最大値は、引張応力17MPa、圧縮応力49MPaとアルミナの強度に比べて問題のない値である。

3. モード変換器内蔵型ジャイロトロンの動作実験

3.1 試験装置と測定装置

ジャイロトロンの試験装置は、ジャイロロンに高安定高電圧を供給する直流電源、電子ビームを

を取り入れ、エミッションベルト以外からの不要電流の発生を抑制した。

空洞は直径14.9mm、長さ11mmの開口型円筒空洞である。発振モードはTE_{12,2}、周波数は120GHz、外部Q値は579である [9]。Fig. 2 にジャイロトロンの空洞での発熱分布の計算値を示す。空洞でのピーク熱負荷は、出力400kWに対して3.6kW/cm²となる。計算では、空洞壁の電気伝導率として無酸素銅の250°Cのときの値 3.0×10^7 S/mを使用した。熱解析の結果では、初期温度を20°Cとすると、400kW-0.1秒動作後の壁面と冷却面の最高温度は、それぞれ269°Cと40°Cとなる。なお冷却面と冷却水との熱伝達率は3W/cm²°Cとした。このジャイロロンでは0.1秒動作を目標とし、比較的肉厚を大きくしたため、熱応力の最大値は660MPaとなり、パルス幅0.1秒での高い繰返し動作は望めない。

E3970ジャイロロンでは、モード変換器を内蔵することにより、電子ビームと出力ミリ波を分離することができた。したがってコレクターは、ミリ波導波路を兼ねる必要がないため、コレクター内径を180mmと大きくし、電子ビームによる熱負荷を小さく抑えることができた。熱負荷は従来のジャイロロンE3960の約1/4となり、2.4MW (80kV-30A) の電子ビームに対して、ビーム分散用補助コイルを用いない状態でも、2.0kW/cm²となり、0.1秒の動作には問題がない。

モード変換器は、Fig. 3 に示すように放射器と5枚の反射鏡で構成されている [9]。空洞で発振したTE_{12,2}モードのミリ波は、モード変換器によってガウシアンビームに変換され出力される。ジャイロロンに内蔵したモード変換器は、モード変換効率約80%である。したがって空洞出力の約20%はモード変換ロスとして回折によって管内に散乱されることになる。ジャイロロンE3970では、伝送鏡の側面に炭化硅素 (SiC) の電磁波吸収体を配置し、散乱電力を吸収するとともに、コレクターの上部にサファイア製の補助窓を配置し、回折電力を管外に取り出すようにした。さらにこの補助窓は管内の観察にも使用される。

出力窓は口径101.6mm、厚さ2.82mmのアルミナ製シングルディスクを使用し、電力反射率は、周波数120±0.5GHzで2%以下である。Fig. 4 に400kW、0.1秒動作時の応力および温度の径方向分布を示す。誘電損失による窓の温度上昇は窓中心で最大約41°Cとなる。また、このときの熱応力の最大値は、引張応力17MPa、圧縮応力49MPaとアルミナの強度に比べて問題のない値である。

3. モード変換器内蔵型ジャイロトロンの動作実験

3.1 試験装置と測定装置

ジャイロトロンの試験装置は、ジャイロロンに高安定高電圧を供給する直流電源、電子ビームを

収束させ発振を行うための外部磁場を作るマグネット、そしてジャイロトロン、さらにジャイロトロンからの出力を取り出し測定を行う出力回路系に分けられる。外部磁場は電子銃部から最大磁場強度の空洞部にかけて緩やかに増大する配位を構成する。ジャイロトロンは電子サイクロトロン共鳴メーザの原理を利用しているので、発振周波数は空洞部の磁束密度に比例する。120GHzの発振を行うためには空洞中心部で約4.7Tの強磁場が必要であり、そのためマグネットは液体ヘリウムで冷却する超電導コイルを用いている。磁場は発振をコントロールする重要なパラメータであり、したがって高精度の磁場配位が要求される。

ジャイロトロンの運転に用いる電源は、従来クライストロンの運転に用いていた電源を改造したものである[12,13]。Fig. 5に高周波工学試験装置の電源系の結線図を示す。既設の高圧受電盤、降圧変圧器、特高直流発生器、平滑コンデンサー盤、クローバ盤をクライストロン系と共有化し、新たに交流GTOスイッチ、レギュレーターチューブ（4極管）、アノード分圧器を追備した。Table 2に電源の諸元を示す。最大35A-10秒までの運転が可能である。ジャイロトロンでは加速電圧のわずかな変化が発振に大きな影響を与えるので、高安定化電源が要求される。したがって本システムではレギュレーターチューブを用いることで電圧安定度を±0.2%以内に抑えている。さらにジャイロトロンには高速立ち上げ、高速遮断保護が要求され、そのための新しい技術として以下のアイデアを採用し、かつ成果を収めている。

(1) 3相交流入力にゲートターンオフサイリスタ（GTO）を逆並列接続したGTOスイッチを開発し、点弧位相角制御により特高直流電圧制御を行い、かつクローバ動作時にGTOを高速遮断することで、交流系システムを短絡から保護するものとした。

(2) レギュレーターチューブの制御系では、グリッド回路を半導体化し、高速保護検出回路を併用することで、高速、高安定制御と高速保護を実現した。

(3) アノード分圧器にツェナーダイオードを使用することで、ビーム電圧立ち上げ時にアノードとカソード間の電位差が生じない理想的な制御を実現した。

ジャイロトロンより出力されたミリ波はダミーロードで捕集される。ダミーロード内で、ミリ波は炭化硅素（SiC）に吸収され、SiCを冷やす水の温度上昇から、ジャイロトロンの出力を求めることができる。このタイプのダミーロードは、水に直接パワーを吸収する従来のものに比べて水の突沸が発生しないため、少量の冷却水で出力測定が可能である。また同時に、導波管壁に結合孔を開け、Dバンドの基本導波管を接続したサンプラーを経て、空洞周波数計で出力波の周波数の確認、検波器で出力波の波形モニターを行う。さらに、出力窓付近に設置した、光ファイバーを用いたフォトセンサーによって出力窓付近の放電を監視している。

3.2 動作試験結果

パルス幅1msの短パルスにおいて、発振周波数や出力モードの確認、出力のビーム電流依存性やモードマップなどの発振特性の測定を行なった。測定された発振周波数は119.7GHzであり、モードマップと感熱紙によるバーンパターンからTE_{12,2}モードの出力を確認した。モード変換器を内蔵したため出力窓での反射の影響が無くなったため、ほぼ設計値に近い発振特性が得られたと考えられる[9]。Fig. 6にビーム電流に対する出力と効率を示す。空洞における発振効率として約37%（モード変換効率80%を考慮）が得られ、モード変換器を内蔵していないE3960よりも発振効率が大幅に改善された。その結果、パルス幅1ms、ビーム電圧76.7kV、ビーム電流23Aで、最大出力548kW、出力効率30%を得た[14]。

長パルス動作については、フォトセンサーの波形を確認しながらパルス幅を延ばした。フォトセンサーはレンズと光ファイバーで構成され、可視光領域の光を電気信号に変換し測定している。フォトセンサーは出力窓付近と副窓付近に取付けられている。Fig. 7にフォトセンサーの代表的な波形を示す。出力を増加させパルス幅を伸ばすごとに、管内でのガス放出により真空度は劣化し、フォトセンサーの出力が大きくなったが、同じ条件で動作を続けると、ガス放出量の減少に伴い、しだいにフォトセンサーの出力がある値まで小さくなった。

Fig. 8にジャイロトロンのビーム電圧、ビーム電流、出力波の時間依存性を示す。出力窓と副窓のフォトセンサーの出力波形、パルス幅に対する傾向が良く類似し、出力窓のフォトセンサーの出力波形が発振波形と対応しないことから、これらの光は出力窓での高周波放電による発光ではなく、ジャイロロン内部での電子ビームに起因する定常的発光と考えられる。副窓の出力の方が出力窓に比べはるかに大きいのは、副窓のサファイアと出力窓のアルミナで、可視光領域での透過率が異なるためである。したがって、0.1秒のパルス幅では、出力窓での放電は確認されなかった。

Fig. 9にジャイロトロンの運転時間に対する、到達パルス幅の履歴を示す。ジャイロトロンの運転は、1日平均8時間程度行った。最初200から300kW程度の出力で管内のガス出し、耐電力向上のためのエージングを行った。その後出力を400kW以上に上げパルス幅を延ばしたところ、試験開始から約120時間で発振パルス幅0.1秒まで到達した。ダミーロード冷却水温度上昇波形をFig. 10に示す。ジャイロトロンの出力の測定は冷却水温度上昇波形の時間積分より以下の式で算出した。

$$P[W] = 4.18[J/\text{deg}\cdot\text{cc}] \times \frac{Q}{\Delta t} \int_0^{\infty} \Delta T dt$$

ここで Q は冷却水の流量、 Δt は発振パルス幅、 $\int_0^{\infty} \Delta T dt$ は冷却水温度上昇波形の時間積分値で測定結果より求めた。電子ビーム出力74kV-30Aにおいて、E3970の設計値400kWを越えた460kW、効率21%の出力を達成した。長パルス試験時の効率が、短パルス試験時（出力効率30%）に比べ低いのは、長パルス動作時の放出ガスによるカソードとアノード間のブレイクダウンを防ぐため、アノード電圧を下げて動作させたためである。

さらにその後、出力を250kW程度にとどめ、ジャイロトロン長のパルス動作を試みた結果、出力250kWで、パルス幅0.215秒まで到達した。これはダミーロードの許容エネルギー値50kJで制限される値である。

4. ま と め

120GHz、500kW級、0.1秒レベルのモード変換器内蔵型ジャイロトロン製作、試験を行なった。その結果、以下の成果を得た。（1）1msの短パルスにおいて、最大出力548kW、出力効率30%を得た。（2）長パルス動作において設計目標値を越えた、出力460kW、パルス幅0.1秒を得た。（3）さらに長パルス動作を試みた結果、出力250kW、パルス幅0.215秒を得た。（4）長パルス動作時において、出力窓での放電は認められず、モード変換器の変換損失パワーによる発振への悪影響がないことが明らかとなった。

今回のジャイロトロン長のパルス動作試験で得られた成果は、目標である出力1MW、連続動作のジャイロトロン開発の方向として、モード変換器内蔵型が非常に有効であることを示すものである。しかし、目標達成のためには解決しなければならない問題をさらに明らかにした。まず、空洞とコレクターの熱負荷の問題とジャイロロン内の放出ガスの低減化である。熱に関しては、コレクター、空洞を大型化し、出力窓をサファイアのダブルディスクにすることで熱負荷対策を強化した、長パルスジャイロトロンを開発中である。また放出ガスに関しては真空排気系の強化（イオンスパッタポンプの増強）を行う予定である。

ジャイロロン開発の今後のもう1つの課題として、出力窓の高性能化が挙げられる。誘電損失が小さく、熱伝導率が高く、熱強度、応力に強いものが望まれる。該当するものとして、ダイヤモンドディスクがあるが、現在大型で良質のディスクを製作する技術が困難であり、今後これらの技術開発が緊急を要する課題である。

ここで Q は冷却水の流量、 Δt は発振パルス幅、 $\int_0^{\infty} \Delta T dt$ は冷却水温度上昇波形の時間積分値で測定結果より求めた。電子ビーム出力74kV-30Aにおいて、E3970の設計値400kWを越えた460kW、効率21%の出力を達成した。長パルス試験時の効率が、短パルス試験時（出力効率30%）に比べ低いのは、長パルス動作時の放出ガスによるカソードとアノード間のブレイクダウンを防ぐため、アノード電圧を下げて動作させたためである。

さらにその後、出力を250kW程度にとどめ、ジャイロトロン長のパルス動作を試みた結果、出力250kWで、パルス幅0.215秒まで到達した。これはダミーロードの許容エネルギー値50kJで制限される値である。

4. ま と め

120GHz、500kW級、0.1秒レベルのモード変換器内蔵型ジャイロトロン製作、試験を行なった。その結果、以下の成果を得た。（1）1msの短パルスにおいて、最大出力548kW、出力効率30%を得た。

（2）長パルス動作において設計目標値を越えた、出力460kW、パルス幅0.1秒を得た。（3）さらに長パルス動作を試みた結果、出力250kW、パルス幅0.215秒を得た。（4）長パルス動作時において、出力窓での放電は認められず、モード変換器の変換損失パワーによる発振への悪影響がないことが明らかとなった。

今回のジャイロトロン長のパルス動作試験で得られた成果は、目標である出力1MW、連続動作のジャイロトロン開発の方向として、モード変換器内蔵型が非常に有効であることを示すものである。しかし、目標達成のためには解決しなければならない問題をさらに明らかにした。まず、空洞とコレクターの熱負荷の問題とジャイロロン内の放出ガスの低減化である。熱に関しては、コレクター、空洞を大型化し、出力窓をサファイアのダブルディスクにすることで熱負荷対策を強化した、長パルスジャイロトロンを開発中である。また放出ガスに関しては真空排気系の強化（イオンスパッタポンプの増強）を行う予定である。

ジャイロロン開発の今後のもう1つの課題として、出力窓の高性能化が挙げられる。誘電損失が小さく、熱伝導率が高く、熱強度、応力に強いものが望まれる。該当するものとして、ダイヤモンドディスクがあるが、現在大型で良質のディスクを製作する技術が困難であり、今後これらの技術開発が緊急を要する課題である。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、有益な助言、支援をしていただいた、島本進原研核融合工学部長に感謝いたします。また実験の準備、サポートをしていただいたRF加熱研究室の藤田秀男氏、菊池正也氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 今井剛、牛草健吉、池田佳隆、内藤磨、吉田英俊、関正美、伊丹潔、永島圭介、上原和也、永島孝：核融合研究 65 (1991).
- [2] T.Nagashima, et. al : *Proc. of 2nd. Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas*, edited by A.G.Litvak, (1993) to be published.
- [3] K.Felch, T.S.Chu, J.Feinstein, H.Huey, H.Jory, J.Nelson, and R.Schumacher: *Digest of 17th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves*, p184 (1992).
- [4] T. Sugawara, K.Hayashi, T.Higuchi, M.Komuro, Y.Mitsunaka, Y.Ohkubo, K.Ohya, T.Okamoto, Y.Okazaki, A.Yano, K.Sakamoto, T.Nagashima: *Digest of 14th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves*, p336 (1989).
- [5] 假家強、満仲義加、岡本正、大家圭司、岡崎行男、矢野充教、菅原亨、伊藤保之、林健一、小室三男、斎藤靖、永島孝、坂本慶司、恒岡まさき：信学技報 ED90-116, p1 (1990).
- [6] K.Sakamoto, M.Tsuneoka, S.Maebara, A.Kasugai, H.Fujita, M.Kikuchi, T.Yamamoto, T.Nagashima, T.Kariya, Y.Okazaki, N.Shirai, T.Okamoto, K.Hayashi, Y.Mitsunaka, Y.Hirata: *Digest of 17th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves*, p188 (1992).
- [7] 林健一、満仲義加、平田洋介、小室三男、菅原亨、假家強、安武浩人、岡崎行男、白井信行、岡本正、坂本慶司、春日井敦、恒岡まさき、前原直、今井剛、永島孝：信学技報 ED92-107, p7 (1992).
- [8] 恒岡まさき、藤田秀男、坂本慶司、今井剛、永島孝：プラズマ・核融合学会第10回年会予稿集、p111 (1992).
- [9] 林健一、満仲義加、小室三男、伊藤保之、假家強、岡崎行男、岡本正、斎藤靖、坂本慶司、春日井敦、恒岡まさき、前原直、今井剛、永島孝：ジャイロトロンへの準光学モード変換器の内蔵と発振特性の向上、(プラズマ・核融合学会誌に投稿中)。

謝 辞

本論文をまとめるにあたり、有益な助言、支援をしていただいた、島本進原研核融合工学部長に感謝いたします。また実験の準備、サポートをしていただいたRF加熱研究室の藤田秀男氏、菊池正也氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] 今井剛、牛草健吉、池田佳隆、内藤磨、吉田英俊、関正美、伊丹潔、永島圭介、上原和也、永島孝：核融合研究 65 (1991).
- [2] T.Nagashima, et. al : *Proc. of 2nd. Int. Workshop on Strong Microwaves in Plasmas*, edited by A.G.Litvak, (1993) to be published.
- [3] K.Felch, T.S.Chu, J.Feinstein, H.Huey, H.Jory, J.Nelson, and R.Schumacher: *Digest of 17th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves*, p184 (1992).
- [4] T. Sugawara, K.Hayashi, T.Higuchi, M.Komuro, Y.Mitsunaka, Y.Ohkubo, K.Ohya, T.Okamoto, Y.Okazaki, A.Yano, K.Sakamoto, T.Nagashima: *Digest of 14th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves*, p336 (1989).
- [5] 假家強、満仲義加、岡本正、大家圭司、岡崎行男、矢野充教、菅原亨、伊藤保之、林健一、小室三男、斎藤靖、永島孝、坂本慶司、恒岡まさき：信学技報 ED90-116, p1 (1990).
- [6] K.Sakamoto, M.Tsuneoka, S.Maebara, A.Kasugai, H.Fujita, M.Kikuchi, T.Yamamoto, T.Nagashima, T.Kariya, Y.Okazaki, N.Shirai, T.Okamoto, K.Hayashi, Y.Mitsunaka, Y.Hirata: *Digest of 17th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves*, p188 (1992).
- [7] 林健一、満仲義加、平田洋介、小室三男、菅原亨、假家強、安武浩人、岡崎行男、白井信行、岡本正、坂本慶司、春日井敦、恒岡まさき、前原直、今井剛、永島孝：信学技報 ED92-107, p7 (1992).
- [8] 恒岡まさき、藤田秀男、坂本慶司、今井剛、永島孝：プラズマ・核融合学会第10回年会予稿集、p111 (1992).
- [9] 林健一、満仲義加、小室三男、伊藤保之、假家強、岡崎行男、岡本正、斎藤靖、坂本慶司、春日井敦、恒岡まさき、前原直、今井剛、永島孝：ジャイロトロンへの準光学モード変換器の内蔵と発振特性の向上、(プラズマ・核融合学会誌に投稿中)。

- [10] K.Hayashi and T.Sugawara, *Ninth International Conference on Infrared and Millimeter Waves Digest* (1984)
P.286.
- [11] M.Caplan and C.Thorington, *Int. J. Electronics* 51, 415 (1981).
- [12] M.Tsuneoka, H.Fujita, T.Nagashima, Y.Cho, T.Yamane, S.Hayakawa, S.Ohtsuka, K.Harada, T.Yoshida,
T.Shibuya, M.Ishibashi: *Proc. of 14th Symp. on Fusion Engineering*, vol.1, p497 (1991).
- [13] 恒岡まさき、藤田秀男、永島孝、早川正平、大塚重夫、吉田利夫、人見信征：プラズマ・核融合学会
第8回秋季講演会予稿集、p206 (1991).
- [14] Y.Mitsunaka, K.Hayashi, Y.Hirata, Y.Itoh, T.Kariya, M.Komuro, T.Okamoto, Y.Okazaki, T.Sugawara,
A.Yano, T.Nagashima and K.Sakamoto: *Digest of 15th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves*, p318 (1990).

Table 1 Design parameters of the built-in mode converter type gyrotron (E3970)

型式	E3970
周波数	120GHz
発振モード	TE _{12,2}
出力	400kW
パルス幅	100ms
効率	30%
ピッチファクター	1.5
外部Q値	579
空洞平均熱負荷	2.3kW/cm ²
発振出力	500kW
発振効率	36%
モード変換効率	80%
コレクター内径	φ 180mm
全長	約2.4m
重量	約270kg

Table 2 Parameters of JAERI gyrotron test facilities

ビーム電圧	最大-90kV
ビーム電流	最大30A (ショートパルスでは40A)
電圧変動	±0.5%以下
パルス幅	最大10秒
立ち上げ時間	200μs以下
保護時間	9μs以下

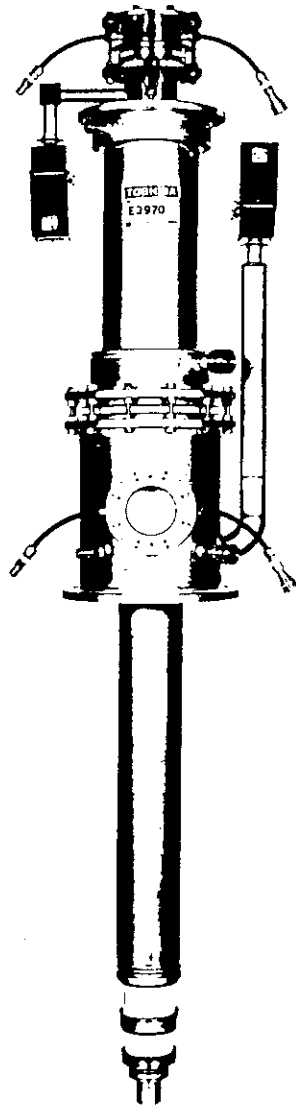


Fig.1 Photograph of the built-in mode converter type gyrotron (E3970)

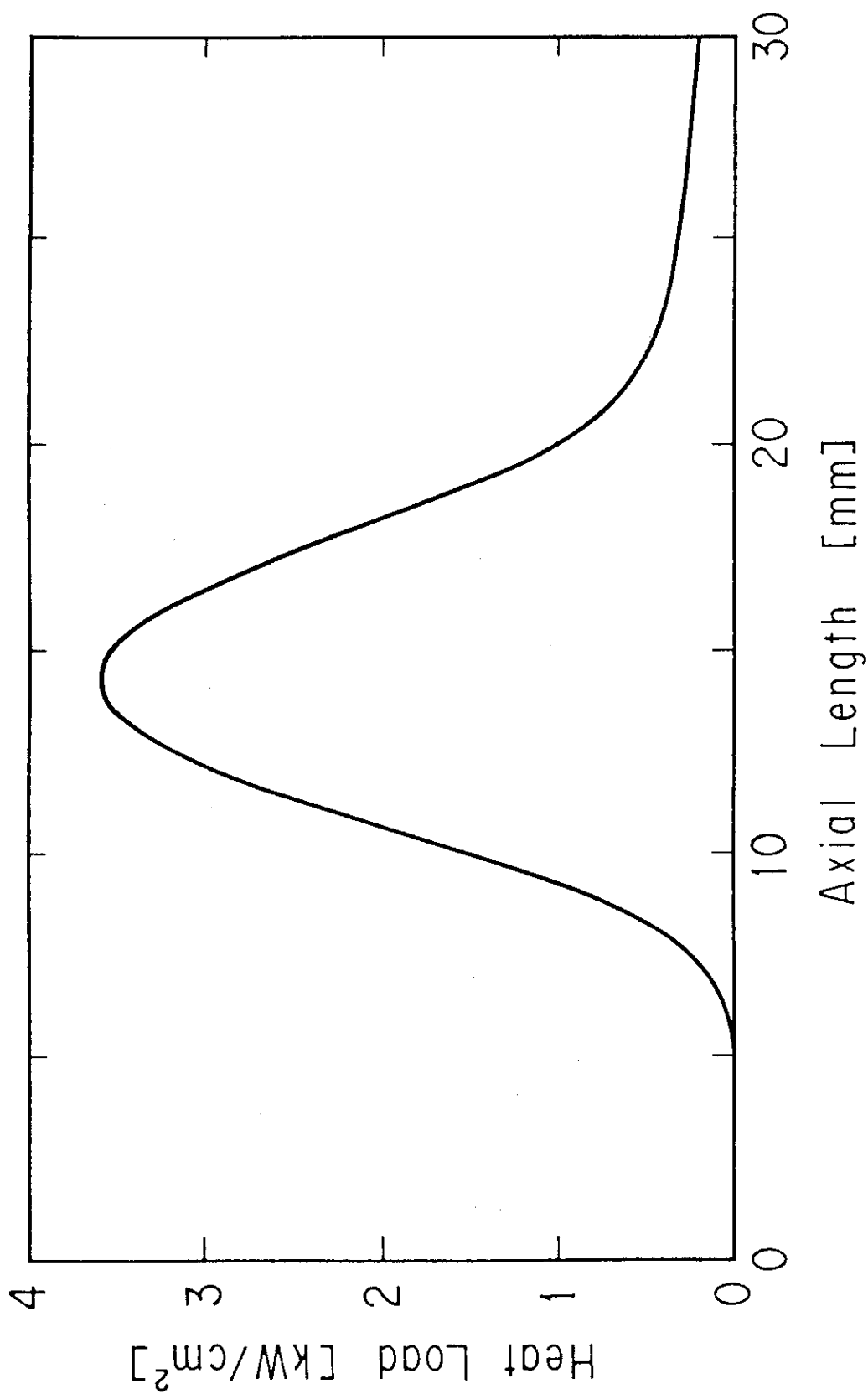


Fig. 2 Distribution of cavity heat load at 500 kW oscillation

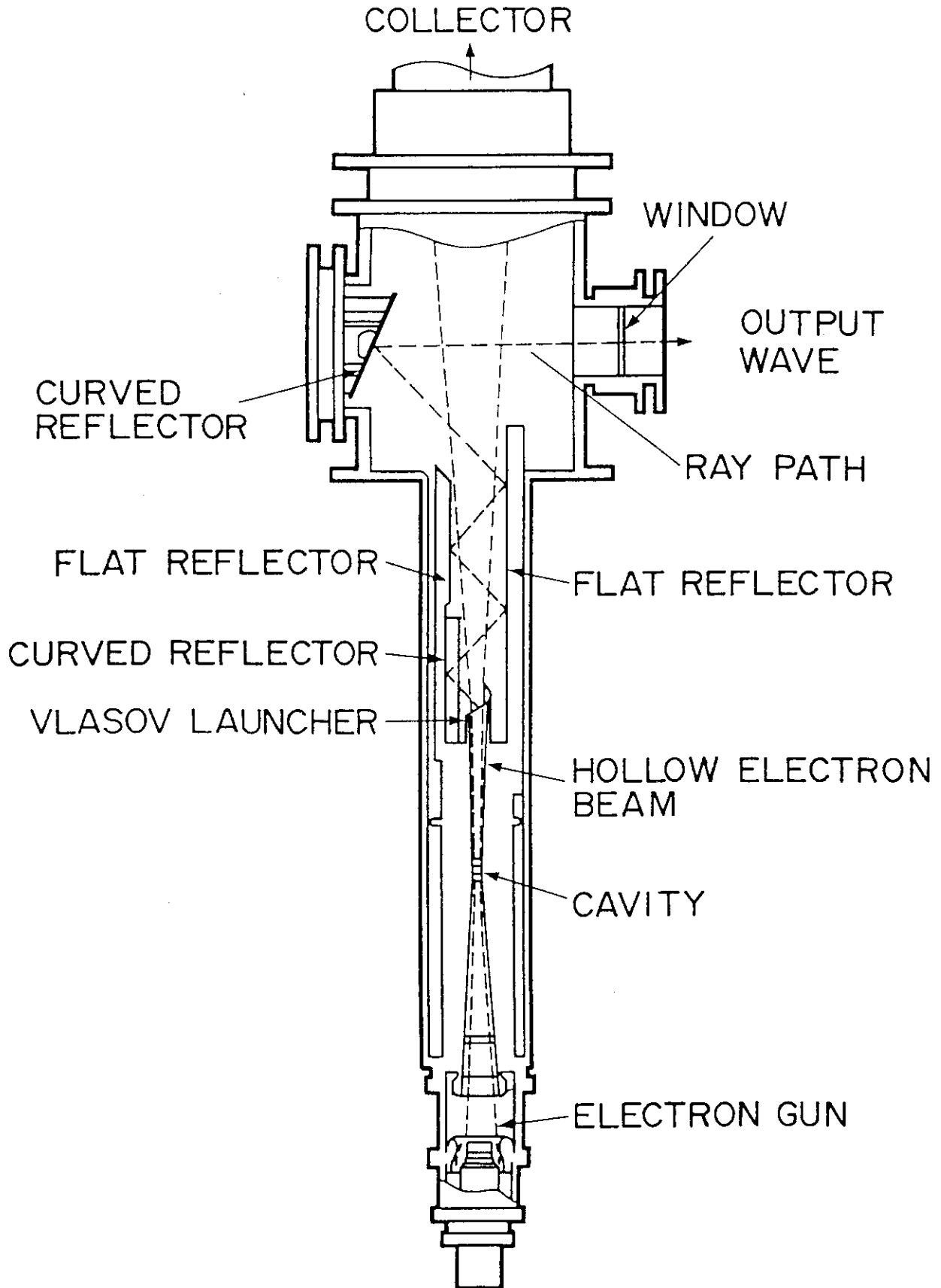


Fig.3 Cross sectional view of E3970 gyrotron

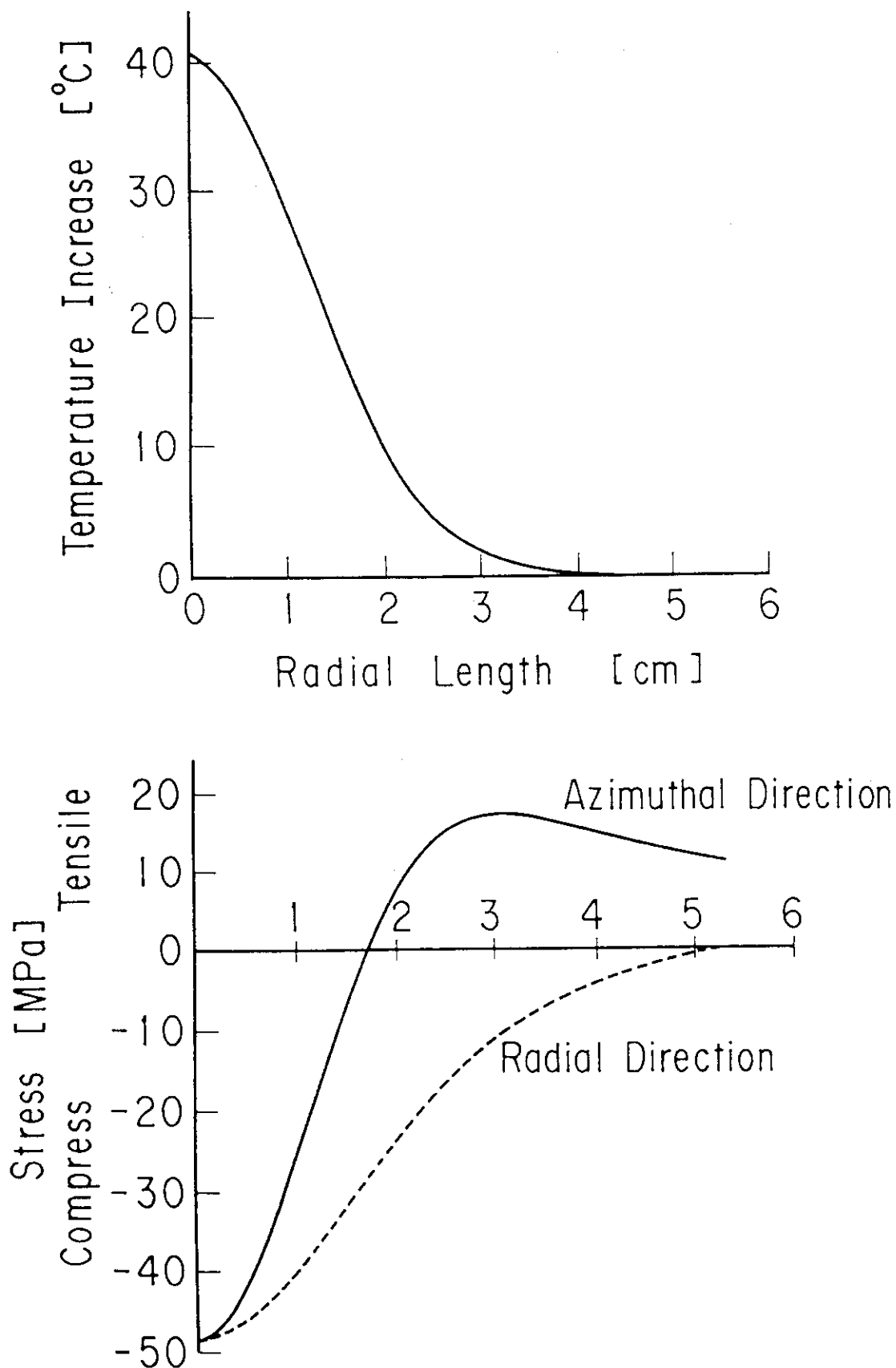


Fig.4 Radial distribution of temperature increase and stress of the window after 0.1 sec, 400 kW penetration of RF (120GHz)

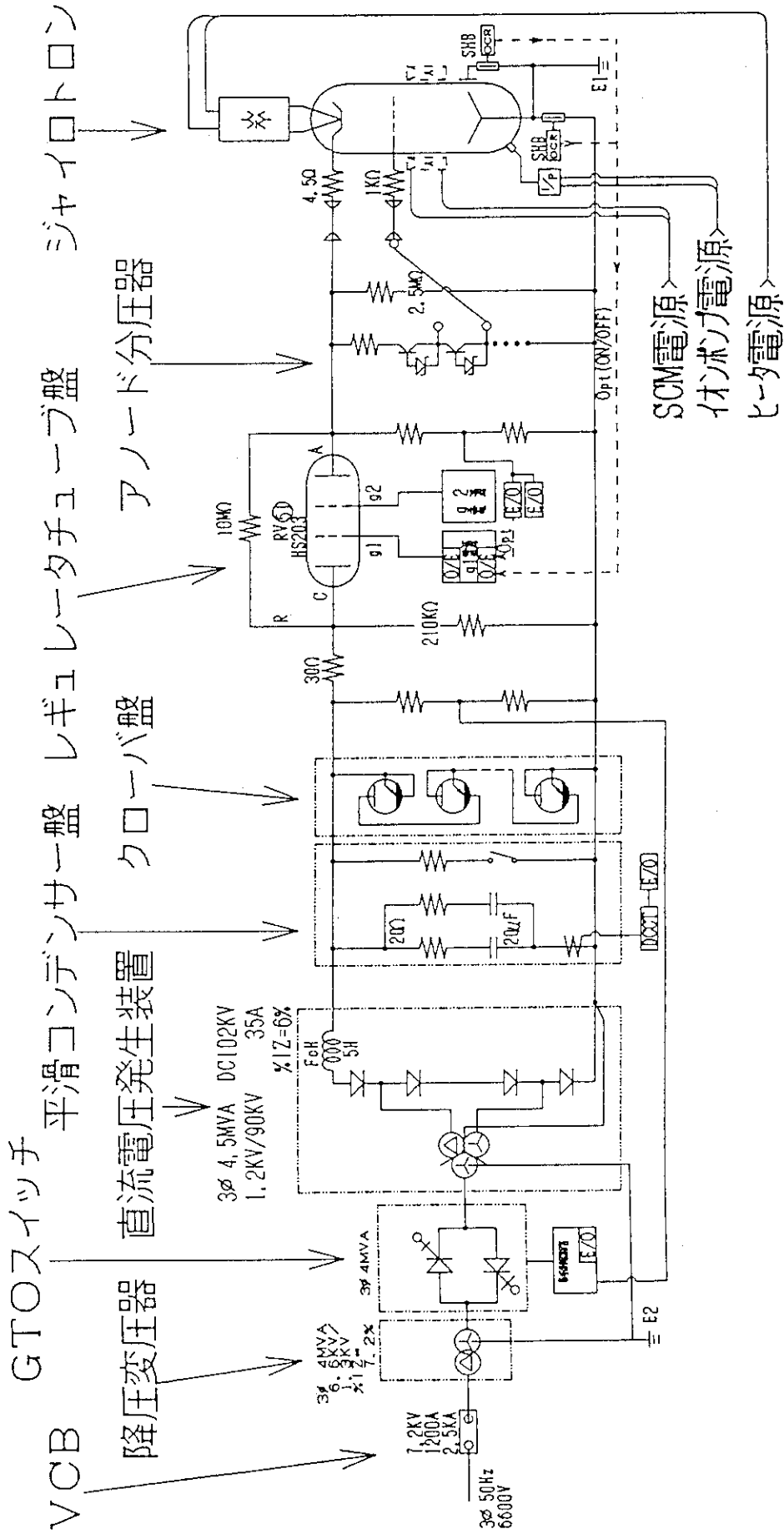


Fig. 5 Schematic diagram of JABRI gyrotron facilities

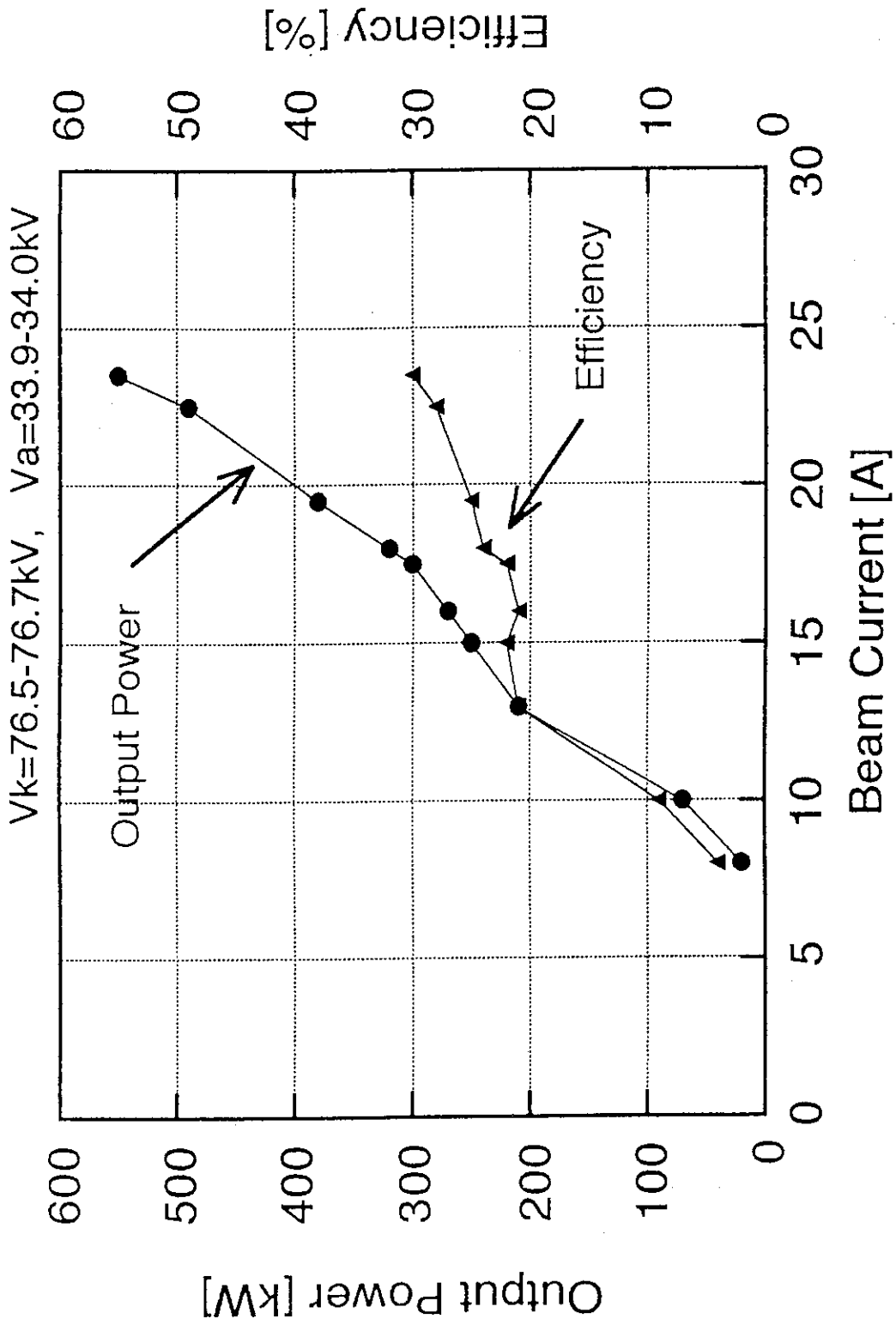


Fig. 6 Measured RF power and efficiency for TB12, 2 mode versus beam current in E3970 gyrotron

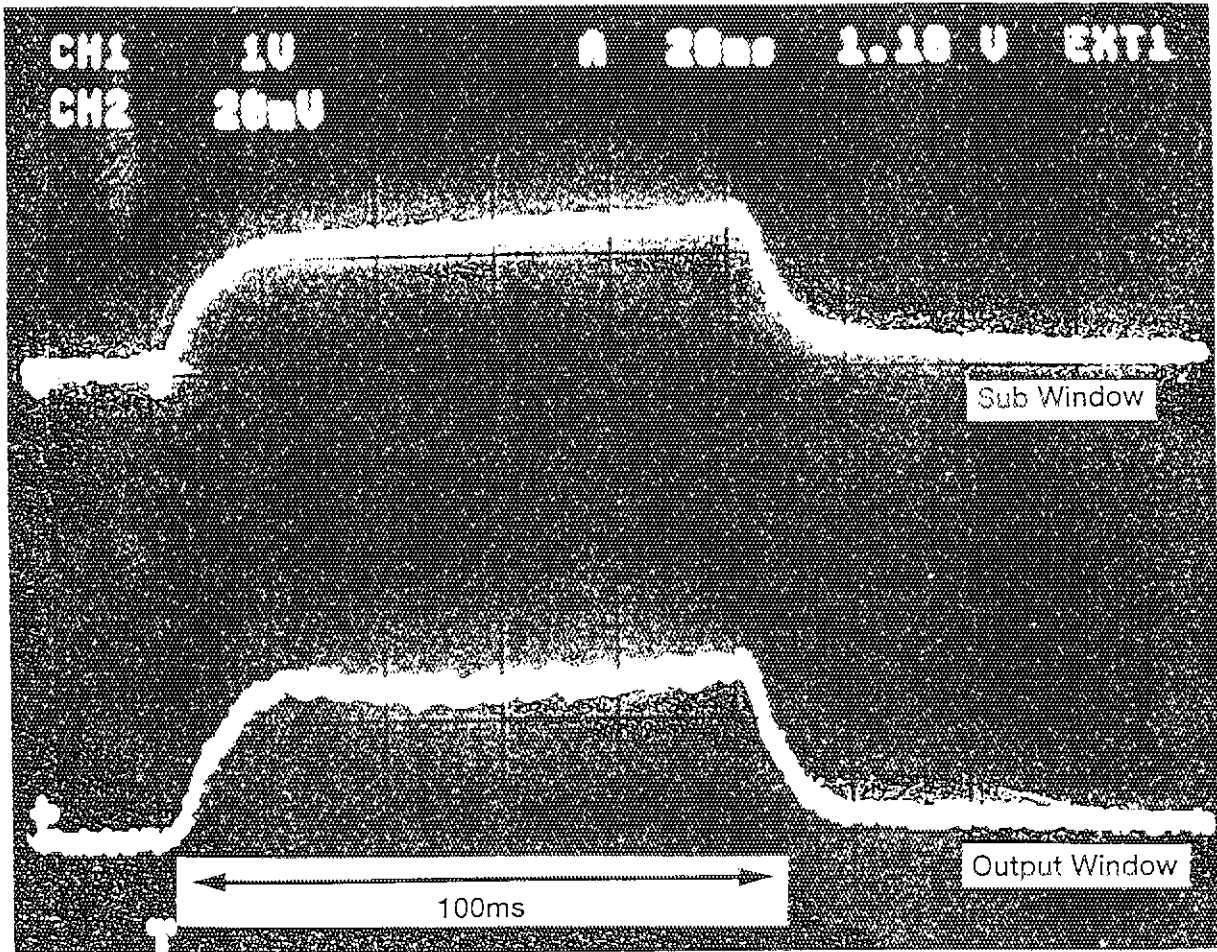


Fig. 7 Signal of photo-detectors in E3970 gyrotron,
(a) sub window, (b) output window

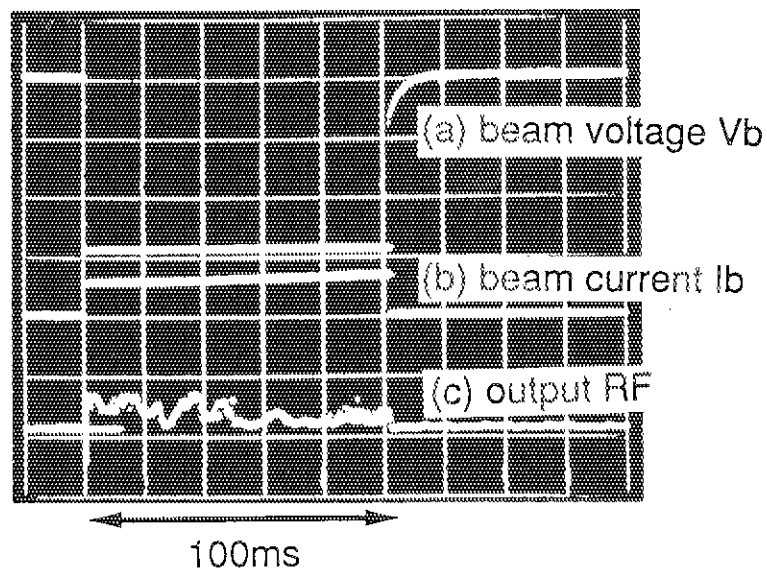


Fig. 8 Waveforms of (a) beam voltage V_b , (b) beam current I_b
and (c) output RF

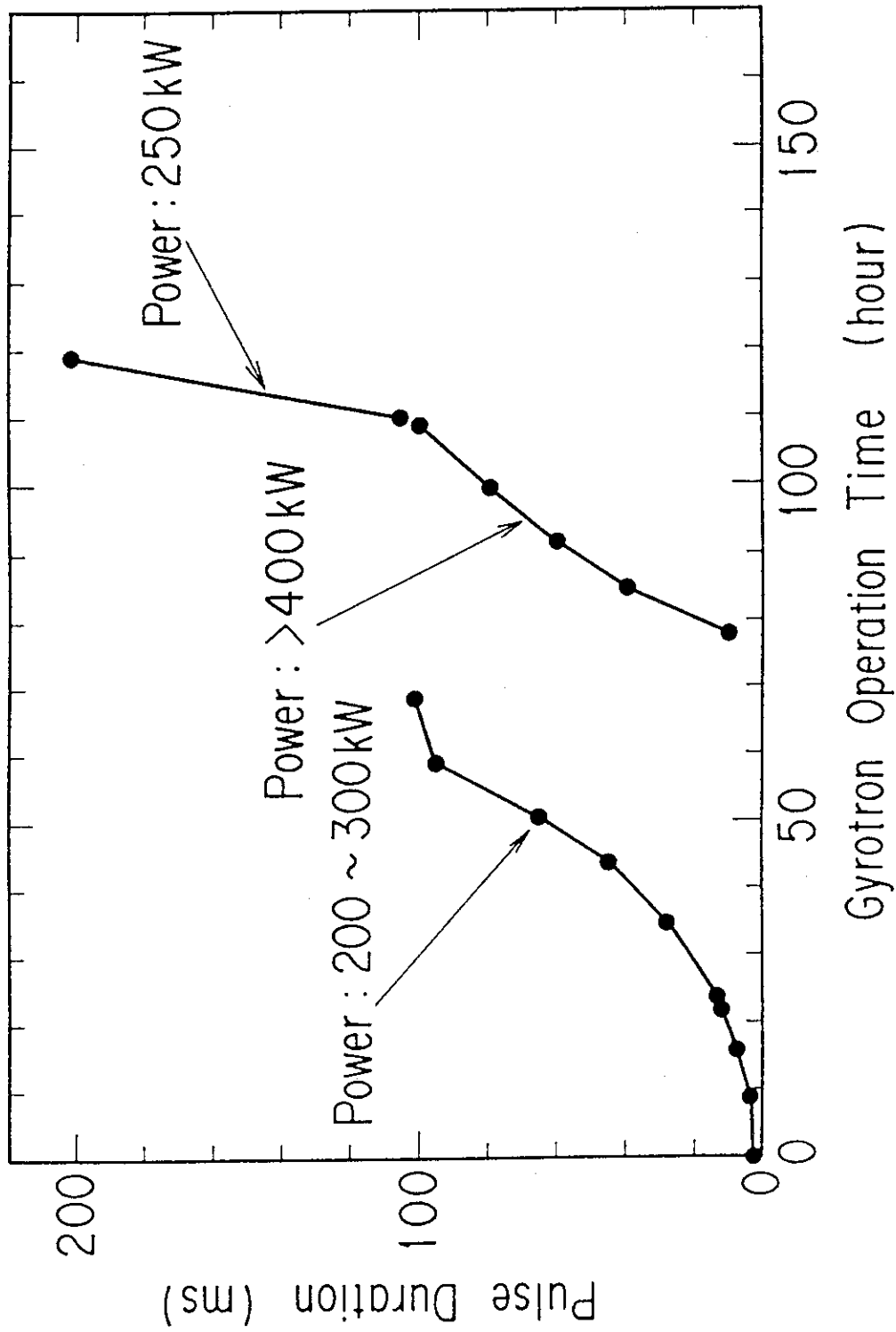
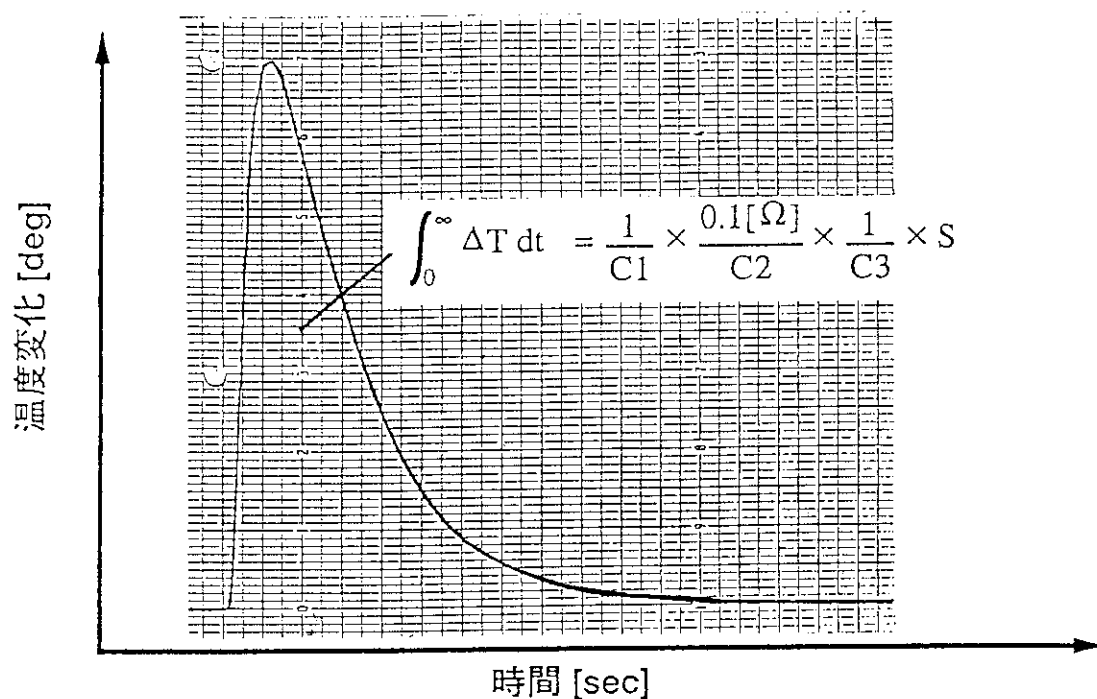


Fig. 9 Pulse duration history of E3970 gyrotron



$C1 = 0.39 [\Omega/\text{deg}]$: 測温抵抗体の抵抗変化率

$C2 = 3.4/4 [\text{cm}]$: 抵抗が 0.1Ω 変化したときのレコーダ上での変化

$C3 = 0.1 [\text{cm}/\text{sec}]$: チャートスピード

$S = 46.6 [\text{cm}^2]$: チャート紙上での面積

Fig. 10 Calorimetric data of output power with 0.1 sec pulse in E3970 gyrotron