

JAERI-Tech  
2003-080

JP0350709



JT-60U ECH装置用  
110GHzジャイロトロンの運転実績

2003年11月

高橋 正己・関 正美・下野 貢・寺門 正之・五十嵐 浩一・石井 和宏  
春日井 敦

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）で複写による実費領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.

# J T - 6 0 U E C H 装置用 1 1 0 G H z ジャイロトロンの運転実績

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

高橋 正己\*・関 正美・下野 貢・寺門 正之・五十嵐 浩一\*・石井 和宏\*  
・春日井 敦<sup>†</sup>

(2 0 0 3 年 8 月 2 9 日受理)

J T - 6 0 U では、局所的な加熱・電流駆動によるプラズマの安定性改善や予備電離の実験を行うことを目的として、電子サイクロトロン加熱 (E C H) 装置を導入してきた。J T - 6 0 U の E C H 装置は、動作周波数 1 1 0 G H z ・ 高周波出力約 1 M W の発振管（ジャイロトロン）4 基を持ち、2 基の可動ミラー型アンテナを使用して J T - 6 0 U プラズマへ入射するシステムである。

1 1 0 G H z を含む極めて高い周波数のミリ波帯での高出力発振は 1 0 年前まではなく、近年 I T E R 用に開発されてきたジャイロトロンで初めて実現された。そのため、ジャイロトロンの運転には様々な調整が必要である。ヒーターエージング後に、磁場調整、アノード電圧調整により 1 M W の発振条件を見つけ、その後、パルス幅を伸ばすエージングを行い、秒オーダーの運転を実現した。さらに、高出力、長パルスで安定な運転を行うため、ジャイロトロン管内で発生する不要高周波を吸収する R F 吸収体を内蔵する改良を行った。その結果、1 M W - 5 秒の設計目標を達成するとともに、4 基のジャイロトロンでプラズマに約 1 0 M J の世界最高のミリ波エネルギーを入射できた。

---

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1  
+ 核融合工学部 ※ 業務協力員

## Performance and Experience of a 110 GHz Gyrotron Operation on the JT-60U ECH System

Masami TAKAHASHI\*, Masami SEKI, Mitsugu SHIMONO, Masayuki TERAKADO,  
Koichi IGARASHI\*, Kazuhiro ISHII\* and Atsushi KASUGAI<sup>†</sup>

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

(Received August 29,2003)

The JT-60U electron cyclotron heating (ECH) system has been introduced to suppress MHD instabilities via a current profile control by local heating or current drive and to start-up plasma current. The ECH system consists of four 1 MW-110 GHz gyrotrons, four 60 m transmission lines composed of a corrugated waveguide with a diameter of 31.75mm and two steerable type mirror antennas.

Recently, a gyrotron developed for ITER has realized high power in an extremely high frequency range of millimeter waves although there was no high power source around 110 GHz ten years ago. Therefore, it requires many techniques to operate the gyrotron. The oscillation conditions had to be found at output power 1 MW by adjusting the magnetic field parameters and anode voltage after heater aging. Then conditioning of the gyrotron was done, where the pulse length is gradually extended in order to operate for 1 sec level of pulse length. Beside, the gyrotron was improved by installing RF absorber inside the gyrotron, which absorbed unnecessary RF waves, to be operated stably at high power for long pulse. Consequently, 1 MW-5sec of the designed value was achieved and the ECH system with four gyrotrons successfully injected the millimeter wave energy of 10MJ into plasmas, which is the world record.

Keywords: JT-60U, ECH, Gyrotron, High Power, Long Pulse

---

\* Department of Fusion Engineering Research   ※ Cooperative Staff

## 目次

1. はじめに	1
2. JT-60U ECH装置の概要	2
3. ジャイロトロンの運転	8
3. 1 ジャイロトロンの立ち上げ手順	8
3. 2 発振調整	11
3. 2. 1 超伝導コイルの磁場強度の調整	11
3. 2. 2 アノード電圧の調整	11
3. 3 ジャイロトロンのエージング	12
3. 4 エージング後の運転方法	13
3. 5 ジャイロトロンのパワーアップ	14
3. 6 トラブル対策	15
4. ジャイロトロンの高パワー化改良	17
4. 1 吸収体による不要高周波の抑制	17
4. 2 電子銃部セラミックの過熱対策	18
4. 3 改良の成果	19
5. まとめ	21
謝辞	22
参考文献	22
付録	23

**Contents**

<b>1. Introduction</b> -----	<b>1</b>
<b>2. Overview of ECH System on JT-60U</b> -----	<b>2</b>
<b>3. Operation of Gyrotron</b> -----	<b>8</b>
<b>3.1 Set-up Operation of Gyrotron</b> -----	<b>8</b>
<b>3.2 Adjustment of Oscillation Conditions</b> -----	<b>11</b>
<b>3.2.1 Adjustment of Magnetic Amplitude of SCM</b> -----	<b>11</b>
<b>3.2.2 Regulation of Anode Voltage</b> -----	<b>11</b>
<b>3.3 Aging of Gyrotron</b> -----	<b>12</b>
<b>3.4 Operation of Gyrotron after Aging</b> -----	<b>13</b>
<b>3.5 Increasing Gyrotron Output</b> -----	<b>14</b>
<b>3.6 Counter-measures for Troubles</b> -----	<b>15</b>
<b>4. Improvement of Gyrotron for High Power Operation</b> -----	<b>17</b>
<b>4.1 Suppression of Unnecessary RF Waves with Absorber</b> -----	<b>17</b>
<b>4.2 Counter-measure for Overheat Electron-gun Ceramic</b> -----	<b>18</b>
<b>4.3 Performance of Gyrotron after Improvement</b> -----	<b>19</b>
<b>5. Summary</b> -----	<b>21</b>
<b>Acknowledgements</b> -----	<b>22</b>
<b>References</b> -----	<b>22</b>
<b>Appendix</b> -----	<b>23</b>

## 1. はじめに

トカマク型装置では、核融合反応を効率良く起こすためにプラズマを数億度の超高温まで加熱し、プラズマに10MA程度の大電流を流さなければならない。その方法の一つに電子サイクロトロン加熱（ECH）装置を用いた加熱／電流駆動がある。現在、検討が進められている国際熱核融合実験炉（ITER）では、電子サイクロトロン加熱／電流駆動（ECH／ECCD）および不安定性の抑制や電流分布の制御を行うため、周波数170GHz、単管出力1MW、連続動作、効率50%以上の大電力ミリ波発振源（ジャイロトロン）が要求されている<sup>1)</sup>。原研の大型トカマク装置（JT-60U）では、局所的な加熱・電流駆動によるプラズマの安定性改善や予備電離の実験を行うことを目的として、平成10年度からECH装置を導入してきた<sup>2)</sup>。JT-60UのECH装置は、周波数110GHz・高周波出力約1MW・5sの発振管（ジャイロトロン）4基を持ち、内径31.75mmのコルゲート導波管約60mにて高周波電力を伝送し、人工ダイヤモンド製真空窓<sup>3)</sup>を介して、2台の可動ミラー型アンテナを使用しJT-60Uプラズマへ入射するシステムである。

ミリ波帯の110GHzと言う極めて高い周波数での高出力発振は従来になく、近年ITER用に開発されたジャイロトロンで初めて実現された。そのため、ジャイロトロンの運転には様々な調整が必要である。ヒーターエージング、磁場調整、アノード電圧調整により1MWの発振条件を見つける必要がある。さらにその後、徐々にパルス幅を伸ばすエージングが必要となる。これらの調整、エージングを行って初めて1MWで秒オーダーの運転を可能とした。また、ジャイロトロンの高パワー運転において、ビーム電流の急増現象やジャイロトロン電子銃部セラミックの過熱などの問題点が発生し、プラズマへの入射パワーが制限された。そこで、本論文で述べるジャイロトロンの改良を始めとし電源の最適化、伝送系の敷設精度の改善を実施して、世界最高レベル(2.8MW-3.6s~10MJ)の入射を実現できた。

本報告書は、JT-60U ECH加熱装置用110GHzジャイロトロンの運転実績に関するものである。第2章では、ECHのシステムの概要を述べる。第3章で、ジャイロトロンの運転について述べる。第4章では、ジャイロトロンの高パワー化改良を述べ、改良の成果を報告する。第5章でまとめと今後を報告する。

## 2. JT - 60U ECH装置の概要

ECH装置は、図2-1に示すように大電力発振系（ジャイロトロン、超伝導コイル等）、ジャイロトロン電源系、伝送系（真空排気装置を含む）およびアンテナ系の主設備からなり、それらを補助する冷却系、制御系がある。ECH装置は、平成10年度の#1号機の建設から3年をかけて整備され、現在#1号機～#4号機までの4系統からなる。なお、#1号機にはジャイロトロンJT-D1M、#2号機にはジャイロトロンJT-D3M、#3号機にはジャイロトロンJT-D2M、#4号機にはジャイロトロンJT-D4が設置されている。

付録-1に110GHzジャイロトロンの主な改良点、付録-2～6に各ジャイロトロンの履歴を示す。

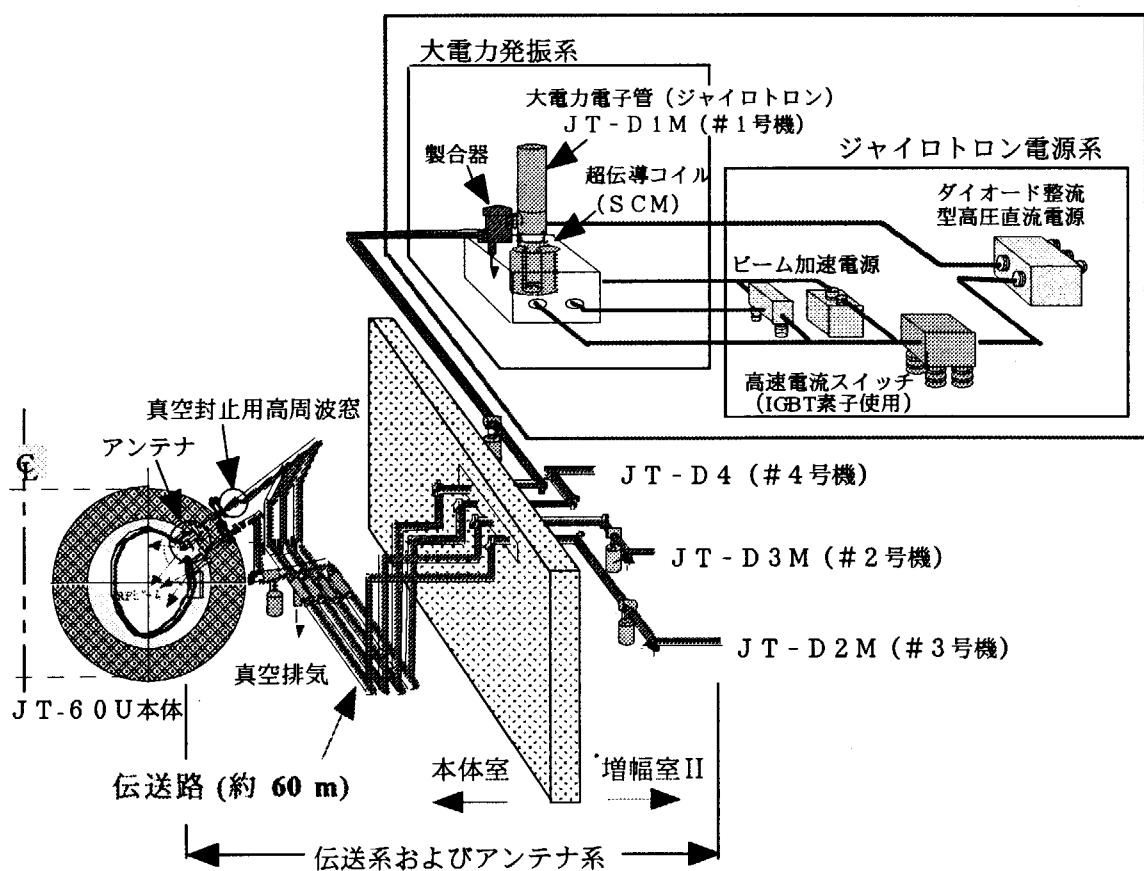


図2-1 JT-60U ECH加熱装置の概要

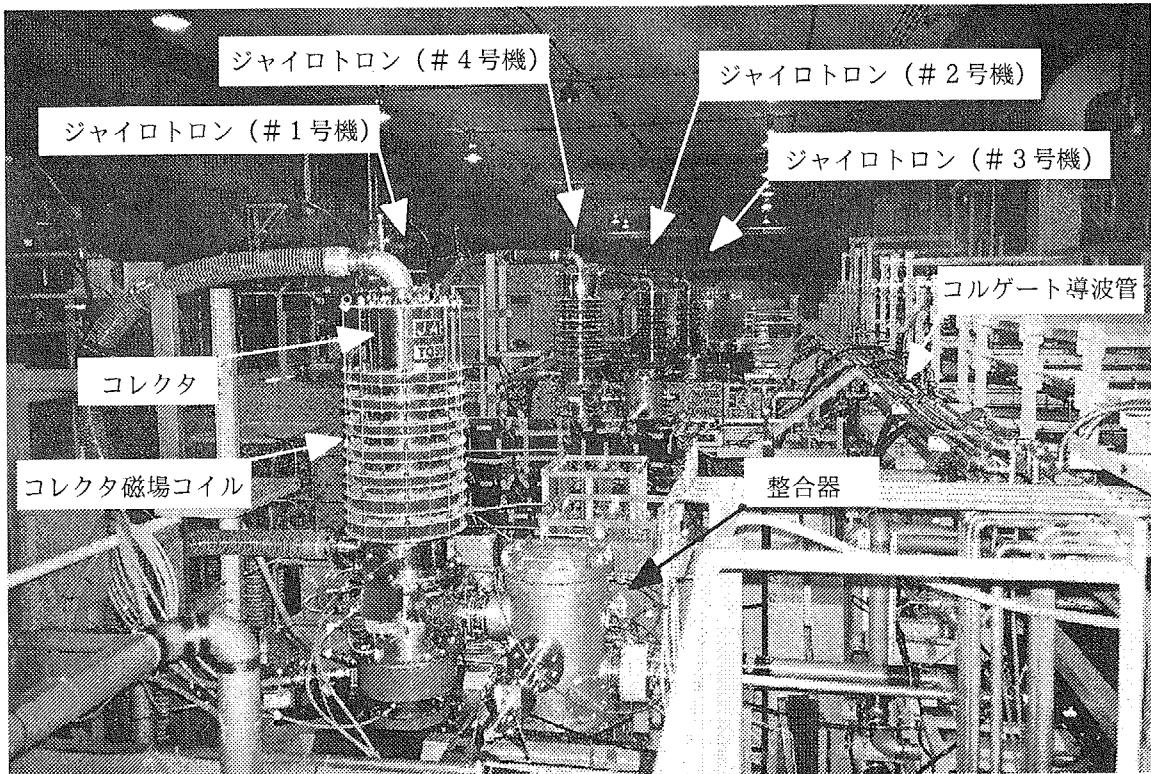


図2-2 RF増幅室に設置された大電力発振系の写真

図2-2にRF増幅室に設置されている大電力発振系の写真を示す。JT-60U EC H加熱装置の主設備の1つである大電力発振系は、周波数110GHz・約1MWの大電力高周波を発生するジャイロトロンと超伝導コイル、コレクタ磁場コイル、ジャイロトロン給電用電極（ソケット）を収納したオイルタンクとオイル循環ポンプ等で構成される。ジャイロトロンの内部構造を図2-3に示す。ジャイロトロンは、大電力高周波を発生させるための空洞共振器が内蔵されている。この空洞共振器を取り巻くように、発振周波数に対応した強力な磁場（4.5T）を発生させる超伝導コイル（SCM）が位置する。電子銃から円筒状電子ビームを発生させ、約85kVの加速電圧で空洞共振器に打ち込む。空洞共振器では固有の高周波モードのみが発振し、通過して行く電子ビームとの電子サイクロトロン共鳴メーラーによりマイクロ秒オーダーの極めて短時間でその発振パワーは1MWまで増大する。この高パワーで発振された高周波を準光学モード変換器で、断面が円形で中心部にパワーを集中したガウス分布状のビームに変換する。モード変換器から放射された高周波ビームを準光学ミラーで反射させて、ダイヤモンド製真空窓より出力する。一方、高周波と共に鳴した電子ビームは、そのエネルギーを高周波の発振のために与えた後もまだ十分な速度でコレクタに突入し、コレクタ（ビーム）電流となって加速電源へ戻る。JT-60のジャイロトロン

はコレクタに逆電圧がかけることができ、電子を減速することで電気的にエネルギーを回収できるコレクタ電位低減 (Collector Potential Depression : CPD) 運転ができる。これにより発振効率は通常運転の約 25 %からコレクタ電位低減運転では約 40 %と大幅に改善できる。

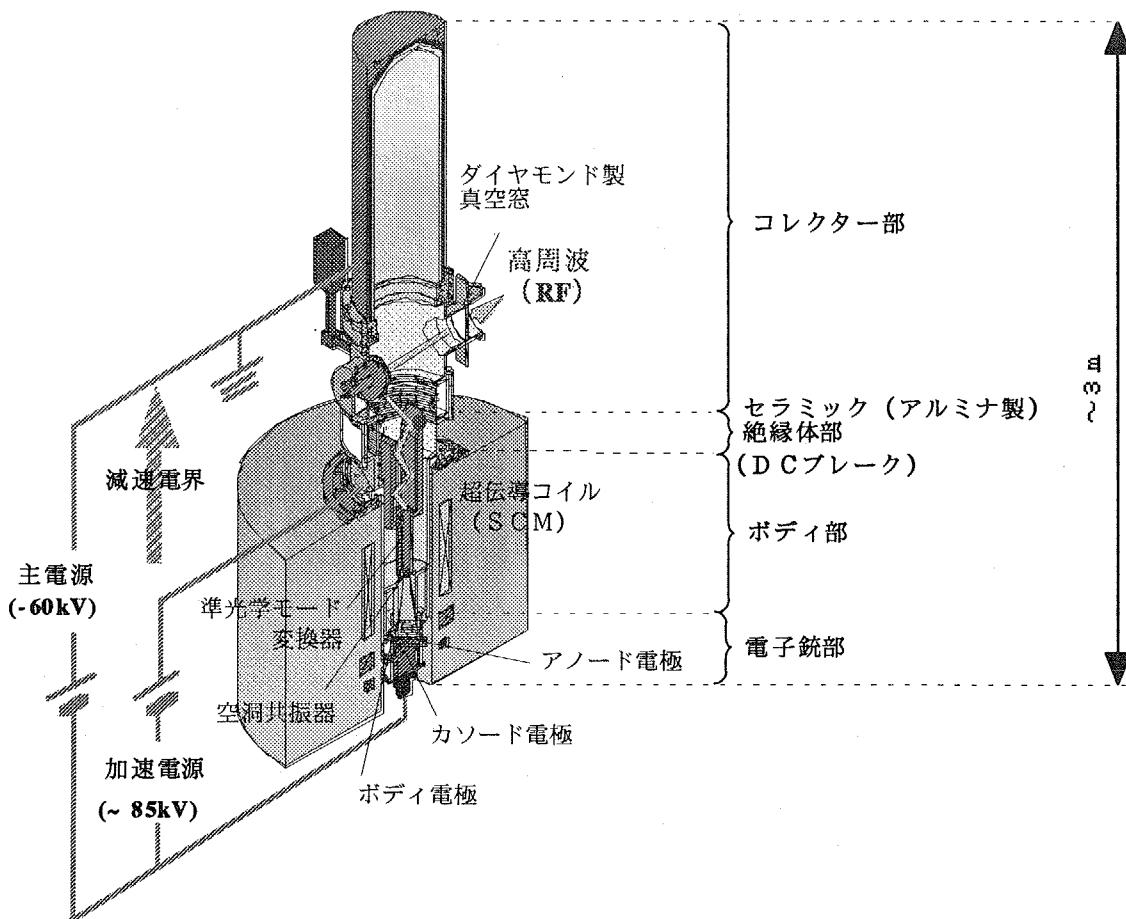


図 2 - 3 ジャイロトロンの内部構造と電圧印可の概要

ジャイロトロンの外観を図2-4に示す。コレクタに逆電圧をかけることができる原因是、コレクタとボディ間に絶縁用のセラミック製DCブレークを設けているからである。セラミックの両端には金属の耳がロー付けされており、この部分でコレクタ、ボディと溶接により接続し、高真空に封じている。電子ビームを発生する電子銃部は、電子を放出するカソード電極、電子を加速するアノード電極及びボディ電極からなる。アノード電圧とボディ電圧を個別に印加し、きめ細かく発振条件を調整できる。この高い調整性能は、世界最高出力の実現に寄与している。

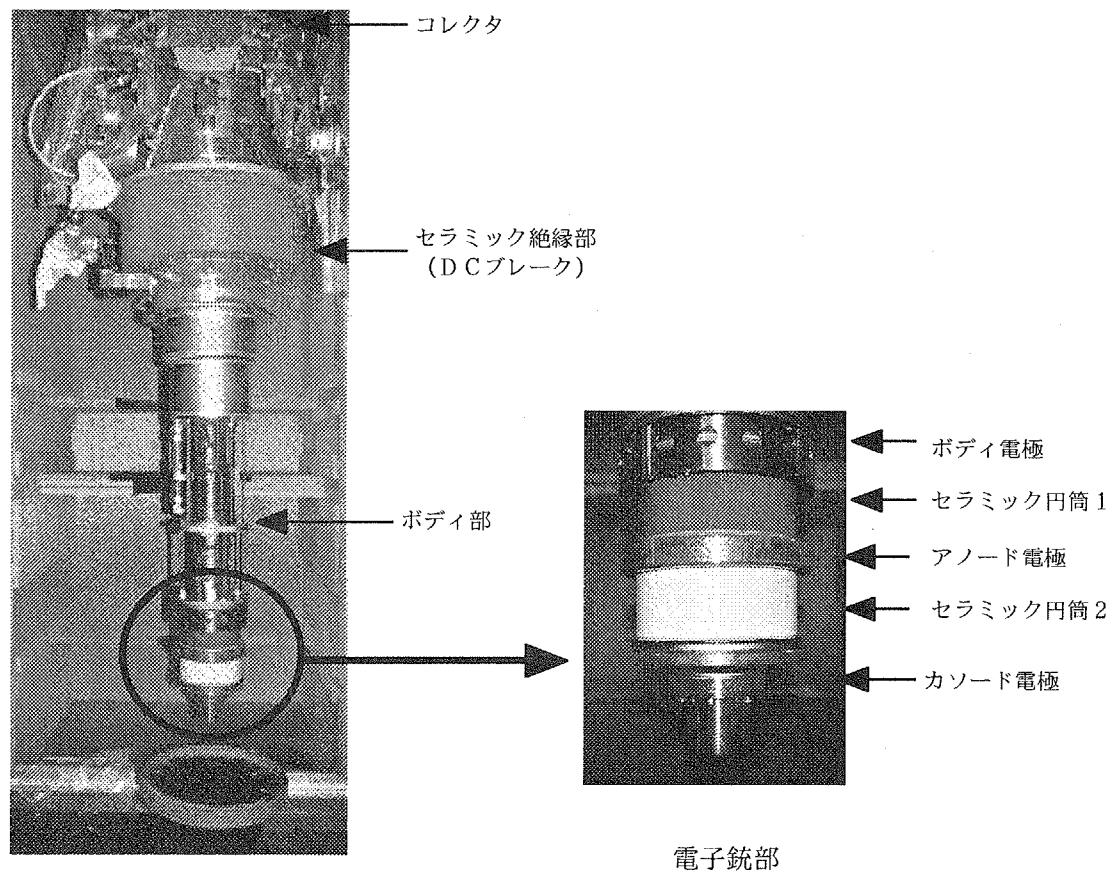


図2-4 ジャイロトロンの外部構造

また、ジャイロトロン用電源系は、ジャイロトロンのビーム電流を流す「主電源」とビーム電流を引出す「加速電源」からなる。図2-5にJ T - 6 0 U E C H用電源設備を示す。主電源は、既設の低域混成波帯加熱装置で用いられていた高圧直流電源に、高速で高電圧の大電流をスイッチングできる固体素子（Insulated Gate Bipolar Transistor : I G B T）を使用したI G B Tスイッチを追加している。I G B Tスイッチは、電圧100kVで、電流100Aのスイッチング性能を有する。また、350Aの大電流を10μsで遮断できる。加速電源は、定格電圧100kV、定格電流100mAの高安定度の電源である。この電圧をアノード分圧器で分圧し、アノードに給電している。アノード電圧は、アノード分圧器で制御でき実時間では最大10kV可変できる。

そして、伝送系は、直径約32mmの円形のパイプ状で内面が特殊形状（内面をコルゲート加工：0.5mm深さの溝が約0.5mmおきにある）の導波管で構成される。この導波管は、この工夫によりミリ波を極めて低い高周波損失（～5%/100m）で伝送することができる。すなわち導波管中心部に高周波が集中した、導波管壁での伝送損失が少ない電界モード（H E<sub>11</sub>モード）を用いている。全長約60mの導波管で伝送された高周波電力は、入射角度を変えられる可動ミラー型のアンテナ（2基）からJ T - 6 0 Uプラズマへ入射される<sup>4)</sup>。

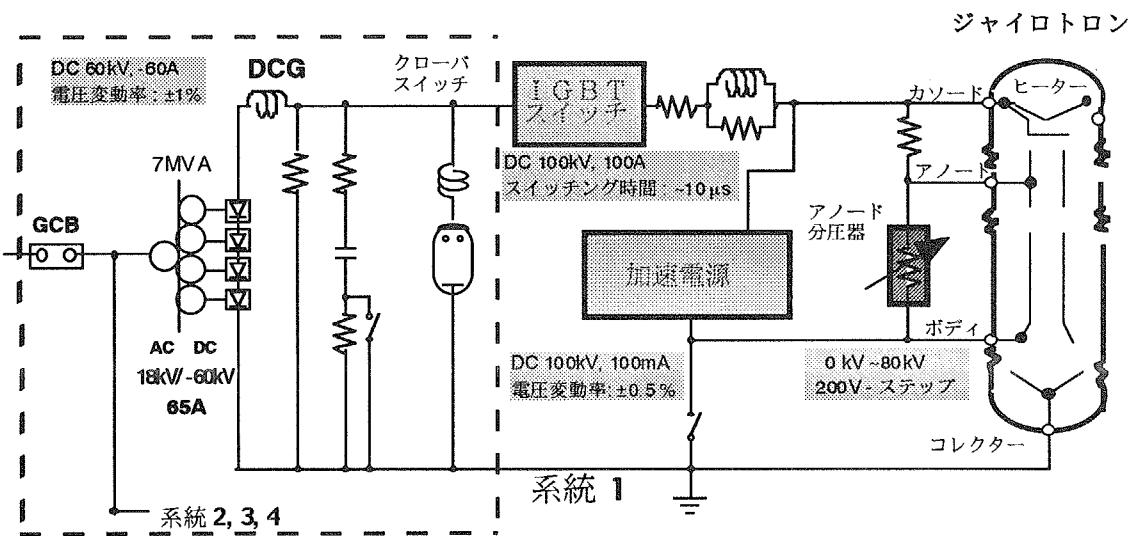


図2-5 J T - 6 0 U E C H用電源設備

補助設備の1つである冷却系は、ジャイロトロンの各部（特にコレクター）やダミー負荷を冷却水（各 $1000 \text{ l/min}$ ）にて除熱している。ジャイロトロンのコレクタ電極とボディ電極を絶縁するDCブレークは、高い絶縁性を有するフロリナートにて冷やされている。また、制御系には信頼性の高いシーケンサーを使用し、保護回路にはハードワイヤードのインターロックを採用している。

### 3. ジャイロトロンの運転

#### 3. 1 ジャイロトロンの立ち上げ手順

##### 1) ヒーターエージング

- ・ヒーターエージング（高電圧の印可無し）

コレクタ磁場コイルスイープ無し、高電圧を加えない（GCB-OFF）状態でヒーターエージングを行う。

（目安としては、ヒータ電流が2.2Aで、イオンポンプ電流が約1マイクロA以下となるまでヒータ電流を徐々に増加させるヒーターエージングを行う。）

- ・ヒーターエージング（高電圧の印可有り）

コレクタ磁場コイルスイープ有り、高電圧（約60kV）を加えた（GCB-ON）状態でヒーターエージングを行う。

（目安としては、ヒータ電流が2.2Aで、イオンポンプ電流が約1マイクロA以下となるまでエージングを行う。）

##### 2) ビームエージング

- ・ジャイロトロン出力を短パルスダミー向けとし、加速電源（BPS）電圧やアノード分圧器、ヒータ等の設定を適当な値にする。

（例：加速電圧を81kV、アノード電圧を42.4kV、ヒータ電流を1.81Aに設定）

- ・RFパルス幅を1msにセットし、ボディ電圧遅れ時間（TUP）を1msから始め、徐々に21msまで伸ばす。

（その時のジャイロトロン管内圧力が、イオンポンプ電流で約2マイクロA以下となるまで繰り返し電子ビームを引き出すエージングを行う。）

- ・RFパルス幅を10msまで徐々に伸ばし、ビーム電流Ic = 30~35Aになるように、ヒータ電圧を調整する。管内圧力の様子を見ながら、徐々に休止時間を詰めて、デューティ1/1000で電子ビームを引き出せるようにする。

##### 3) SCM水平位置調整

- ・ジャイロトロン出力を短パルスダミー向けとし、10ms、1/1000デューティで運転し、ダミー水温が上昇する方向へSCMを動かし、発振を確認する。
- ・短パルスダミーに出力を入射し、SCMのX-Y座標とダミー水温をグラフにプロットして、温度がもっと上昇する最適位置を探す。図3-1にSCM水平位置調整の例を示す。

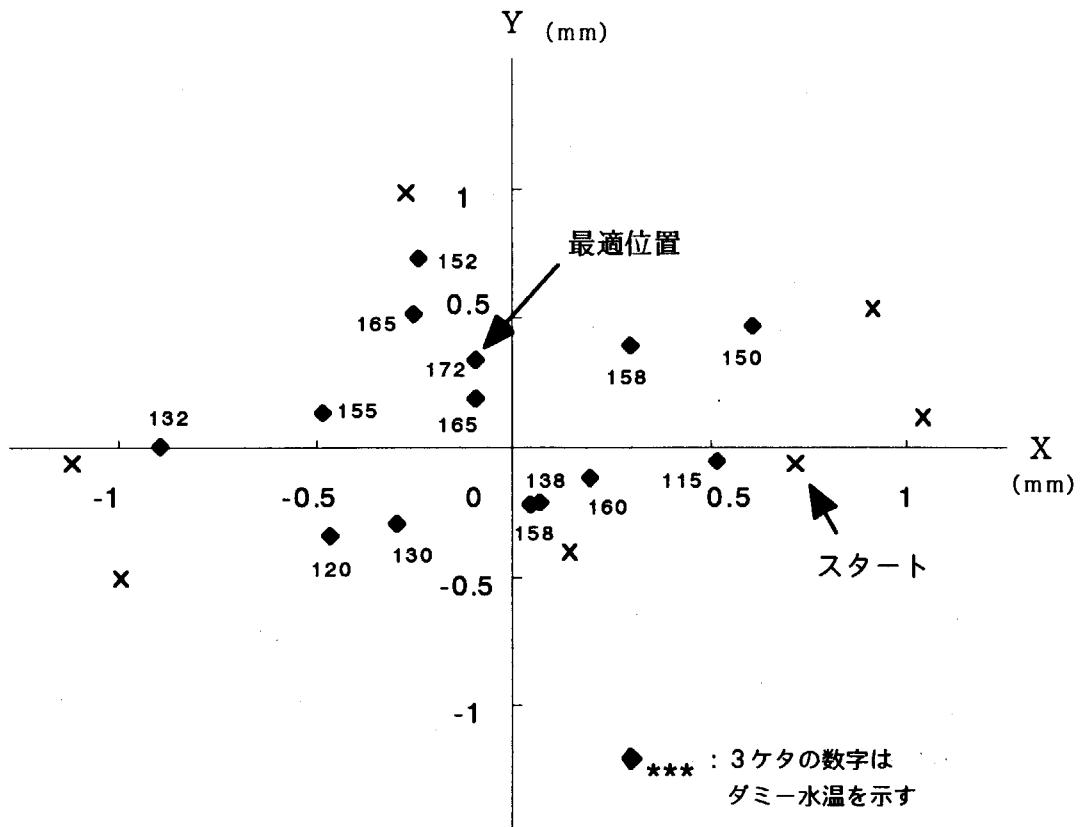


図3-1 SCM水平位置調整の例

## 4) 周波数確認

- ・長バルスダミーへ入射し、方向性結合器に接続された検波器にて発振を確認する。
- ・検波器の前に周波数計を入れて、周波数を測定し正常な発振（主モード）かどうか（110GHzであるかどうか）を確認する。

## 5) バーンパターン確認、ミラーの傾き調整

- ・磁場あるいはヒータを調整して、200～300kWにパワー調整する。
  - ・導波管入口のバーンパターンを確認する。（バーンパターンとは、導波管径と合わせた感熱紙で測定する出力パワーの管断面分布のことである。）
- パワー中心が導波管中心とずれている場合は、以下の手順で整合器（MOU）内のミラーの傾きを調整する。図3-2にバーンパターンの例、図3-3に整合器の構造を示す。

- (1) 上ミラーにエコソープ（RF吸収材）、感熱紙を取り付けたテフロンホルダーを装着し、バーンパターンを確認する。ずれている場合は、ジロトロン最終ミラーの傾きを調整する。
- (2) 下ミラーにエコソープ、感熱紙を取り付けたテフロンホルダーを装着し、バーンバタ

ーンを確認する。ずれている場合は、上ミラーの傾きを調整する。

- (3) 導波管入口に感熱紙を取付け、バーンパターンを確認する。ずれている場合は、下ミラーの傾きを調整する。
- (4) マイターベンドミラーを取り外し、導波管に感熱紙を貼り付けて、バーンパターンを確認する。ずれている場合は、下ミラーの傾きを微調整する。
- (5) パワー中心が導波管中心に調整できたら、マイターベンドミラーを組み込み、伝送系の真空引きを行う。

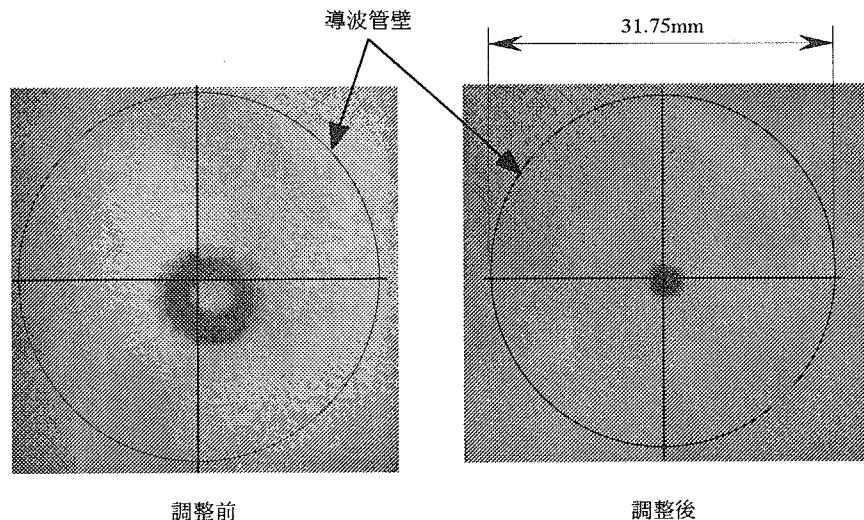


図3-2 バーンパターンの例

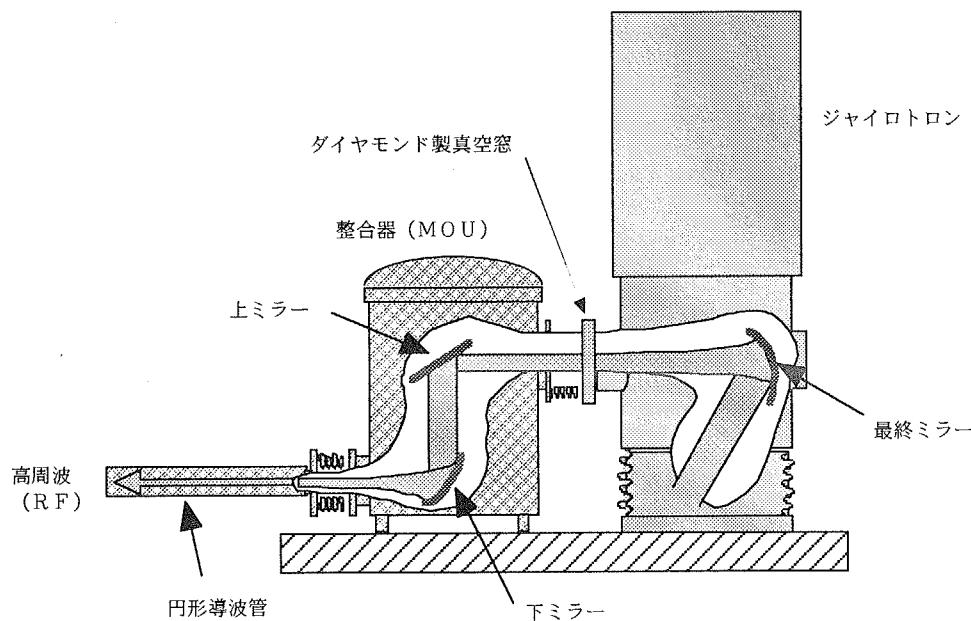


図3-3 整合器の構造

### 3. 2 発振調整

超伝導コイル（S C M）の主磁場（ $B_c$ ）、S C Mの補助磁場1（ $B_B$ ）、S C Mの補助磁場2（ $B_G$ ）及びアノード電圧を振って、パワーが最大になるように発振条件を最適化する。

#### 3. 2. 1 超伝導コイルの磁場強度の調整

S C Mの主磁場（ $B_c$ ）電流を 0.1A ステップで上げたり下げたりして、短パルスタミーの温度差信号が最大となるように、S C Mの主磁場（ $B_c$ ）電流を調整する。

また、アノード電流値が最小になるように、S C Mの補助磁場1（ $B_B$ ）電流を、0.01A ステップで上げたり下げたりして調整する。

#### 3. 2. 2 アノード電圧の調整

アノード分圧器は、カソードとボディ間の電圧を分圧しアノードに給電して、アノード電圧を最適化する装置である。この装置でアノードの印加電圧を調整し、短パルスタミーの温度差信号が最大となるようにする。

この調整の場合は、高電圧回路に過電流や過電圧が発生する場合を考えられるので、インターロック動作に注意をして慎重に調整する必要がある。

### 3. 3 ジャイロトロンのエージング

ジャイロトロンを安定に運転するためには、発振パワーを短いパルス幅から徐々に延ばしていく「エージング」という作業が必要である。

エージングを実施するのにもっとも注意しなければならない点は、真空管であるジャイロトロンの管内真空度である。その真空度は、ジャイロトロンに取り付けられているイオンポンプ電流値によって示されている。真空度が低下すると管内放電が発生しやすくなり、ジャイロトロンが損傷する可能性が高くなる。そこで、ジャイロトロン内の真空度に注意して慎重にエージングを実施する。

真空度としてペンレコーダにより連続監視している。イオンポンプ電流の波形を図3-4に示す。

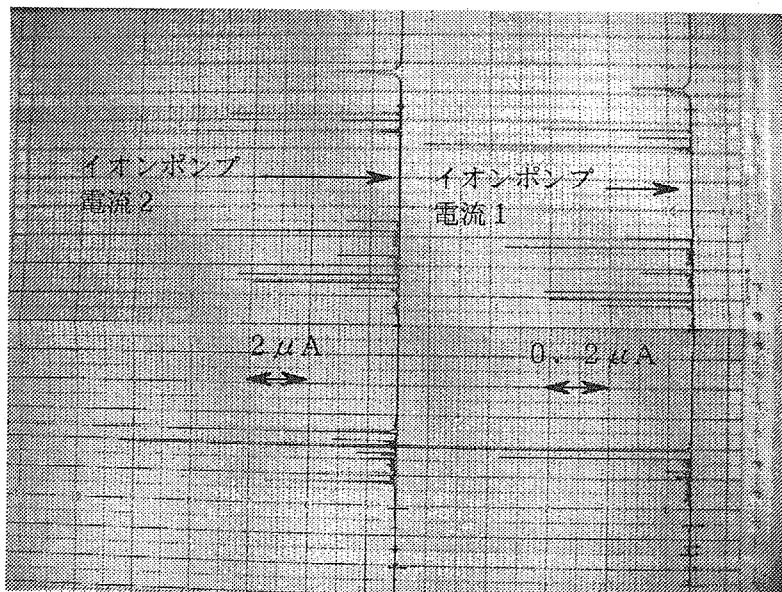


図3-4 イオンポンプ電流の波形

- ・ジャイロトロンが正常に発振しているか、各種の計測された波形からそれらの量を確認する（計測された波形例を図3-5に示す）。その時にイオンポンプ電流が $4 \sim 5 \mu A$  を越えず、発振後10秒程度で $1 \mu A$  以下になるような状態で徐々にパルス幅を延ばしていく。パルス幅が1秒でイオンポンプ電流が $1 \mu A$  以下（真空度 $1 \times 10^{-7} Pa$  オーダー）となるとエージングはほぼ完了となる。

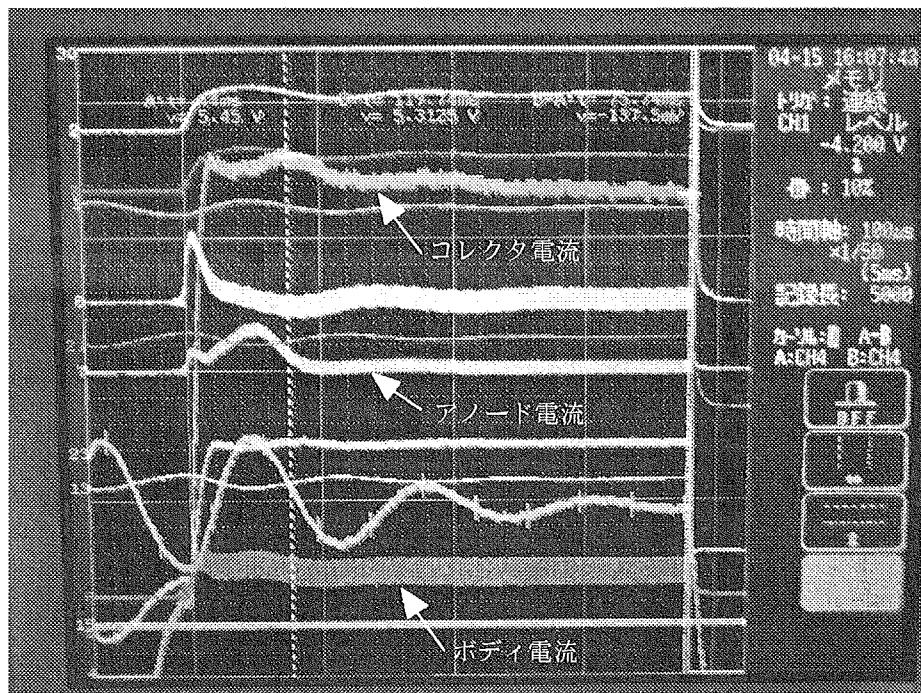


図3-5 計測された波形例

- ・数百m s 以上のパルス幅でイオンポンプ電流値（真空度）がなかなか低下しない場合は、数十m s デューティ  $1/600$  程度のパルスで 20 回程度繰り返すことにより、エージングが進展する場合が多い。

### 3.4 エージング後の運転方法

通常の運転方法は、起動前点検および起動操作を実施して正常に装置が立ち上がっていることを確認して、ジャイロトロンに高電圧を印加する。

立ち上げ直後は、ジャイロトロンのヒータが安定していないので発振が不安定となる。そのため、イオンポンプ電流値に注意して、計測系の波形を確かめながら、数十m s デューティ  $1/600$  程度のパルス幅で数回発振させる。それを発振が安定するまで実施する。発振が安定するまでは、100m s 以上の発振をさせないようにする。

発振が安定した後は、徐々にパルス幅を延ばして行く。数百m s 以上のパルス幅になったとき、最も注意しなければならないことは、発振の途中で発振出力が急に下がったままで高電圧を印加した状態になることである。この状態は、ジャイロトロンを損傷させる可能性が高い。それを防ぐためには、パルス幅を伸ばす前に発振出力が急に下がったことを検知して発振を停止するインターロックが正常に動作することを確認することである。

### 3. 5 ジャイロトロンのパワーアップ

ジャイロトロンの設計発振パワーは、1 MW - 5秒である。1 MWの出力パワーを得るには、これまで述べたジャイロトロンに関するパラメータを最適化して、出力パワーが1 MWになるように調整しなければならない。

このようなパワーアップの方法は、パワー測定用の短パルスダミーに出力ビームを入射し、そこで計測される温度上昇信号を確認しながら実施する（温度上昇信号の波形を図3-6に示す）。パワーアップを実施するのにもっとも注意しなければならない点は、アノード電流値である。アノード電流が10mA以上流れるときジャイロトロンが破損する可能性が非常に高くなる。そこで、ジャイロトロンのアノード電流値に注意してパワーアップを実施する。

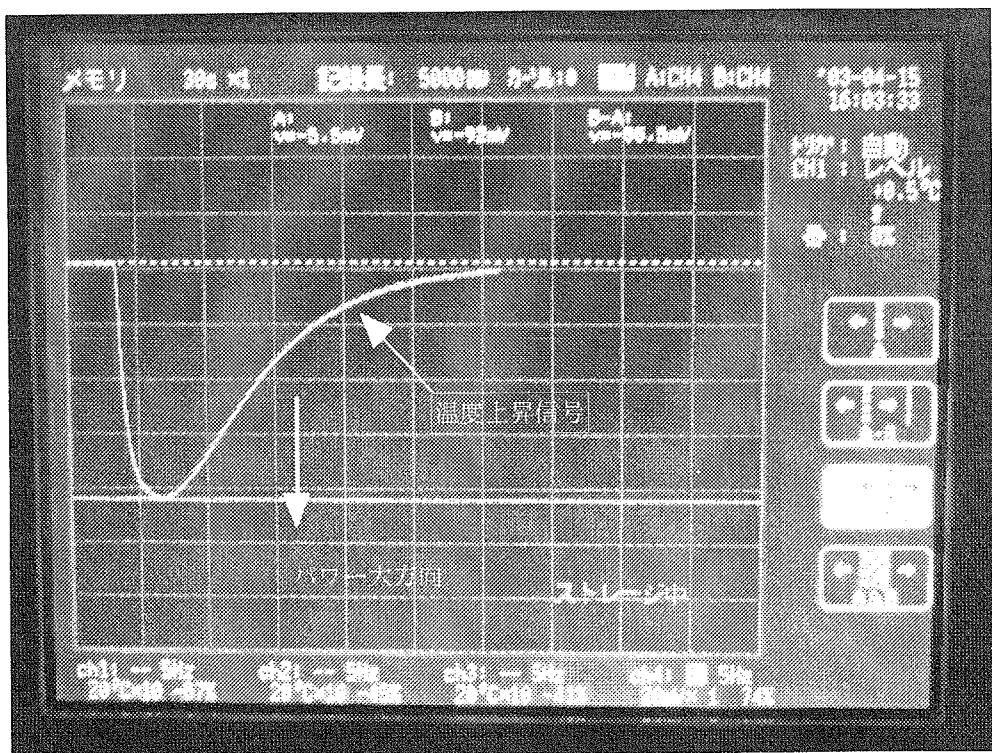
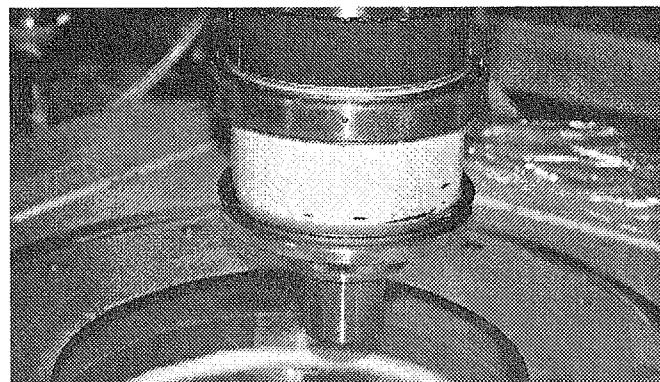


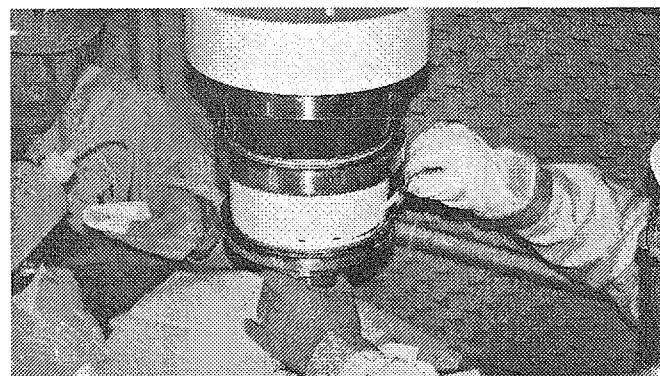
図3-6 温度上昇信号の波形

### 3. 6 トラブル対策

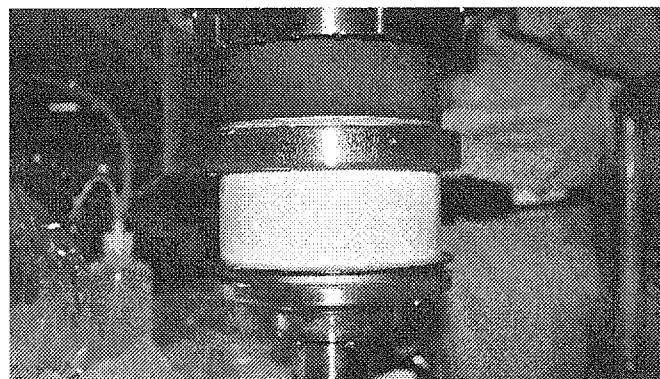
不要高周波（次章に記述）により、電子銃部セラミックが加熱され、セラミック表面に焦げ跡が付いた。セラミックが割れるまでに至らなかつたため、図3-7に示すように、セラミックの焦げをヤスリ等で取り除く補修作業を行った。



(a) 補修前



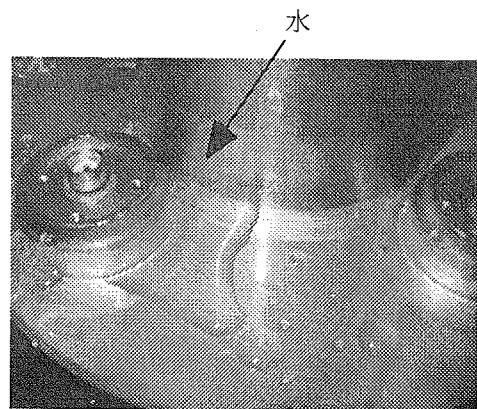
(b) 補修中



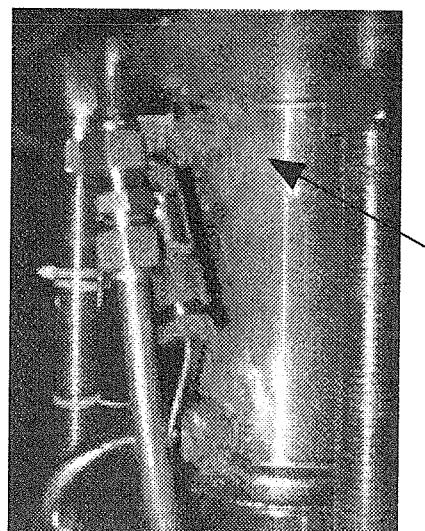
(c) 補修後

図3-7 セラミック修復作業

ジャイロトロンの運転中に放電音があり、オイルタンク内での放電光を観測した。その原因は、図3-8 (a) に示すようにジャイロトロンボディ内部の放射器の温度を測定する熱電対からの水漏れであった。漏れた水がオイルタンク内に混入して放電したものであった。水漏れ部の増し締めを行い、図3-8 (b) のようにシール材で補修を行った。



(a) 水漏れ部



(b) シール材で補修

図3-8 ジャイロトロンボディ内部の放射器からの水漏れ

#### 4. ジャイロトロンの高パワー化改良

##### 4. 1 吸収体による不要高周波の抑制

ジャイロトロンを高パワーで運転するとビーム電流 ( $I_b$ ) が急増する現象が発生した。図4-1に示すように発振周波数 110 GHz 以外の不要高周波は、共振器より手前側のビームトンネル内で発生する場合がある。実際、この部分で発生した不要高周波が電子銃の方へ伝搬し、電子銃のカソード電極等が加熱されビーム電流が増加したものと判明した。ビーム電流が増加すると発振条件がずれ高周波 (RF) 出力が減少した。この対策として、ビームトンネルの内表面に RF 吸収体 (SiCセラミック) を取り付ける改良を行い、不要高周波の発生を抑制した<sup>5)</sup>。図4-2に示すように改造前には、1秒以上のパルスでビーム電流が急激に増加し、インターロックレベル (60 A) を越えることがしばしば発生した。一方、図4-3に示すように RF 吸収体 (SiCセラミック) を取り付けた改造後には、ビーム電流が安定し、長パルスではほぼ一定出力での発振が可能になった。

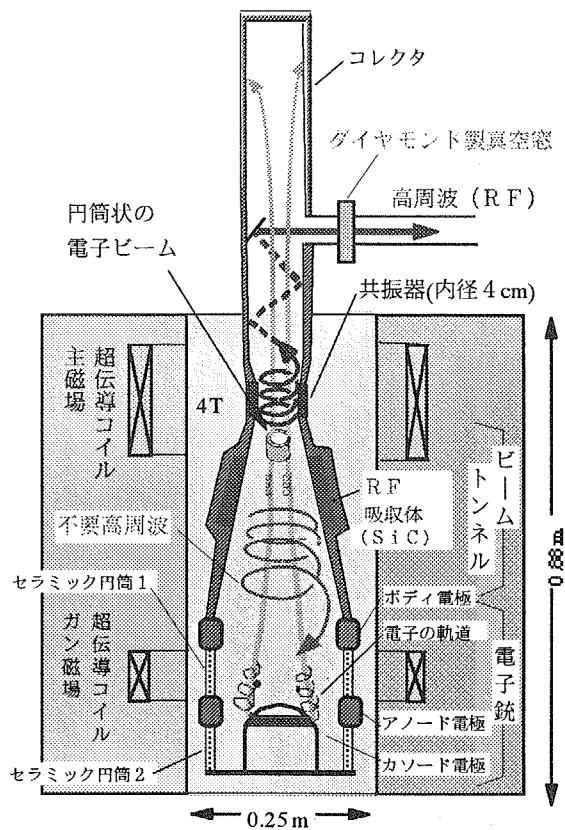


図4-1 不要高周波発生の模式図

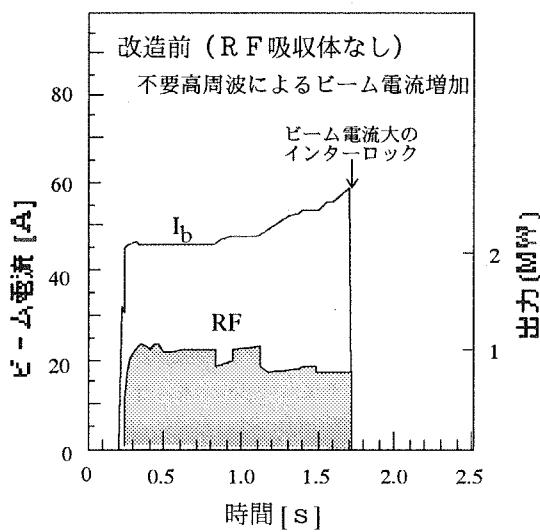


図4-2 ビーム電流の急増現象

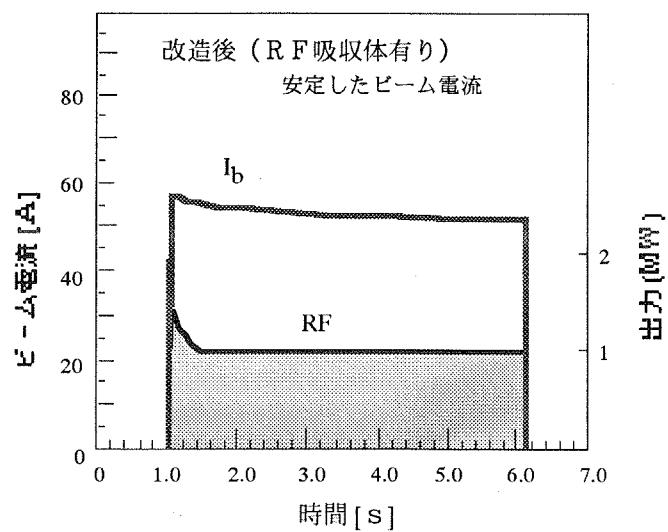


図4-3 安定な発振の達成

#### 4. 2 電子銃部セラミックの過熱対策

前説で述べた不要高周波により、

パルス幅を1秒以上に伸ばした時に電子銃部セラミックが強く加熱され、クラックが発生し真空リークに至った。ダメージを受けた電子銃部セラミックの様子を図4-4に示す。セラミックのダメージは、図4-5(a)に示すように釉薬のない内部には、変化が見られなかった。しかし、図4-5(b)に示すようにセラミックの外表面に釉薬を塗った部分には変色(焦げ)が見られ、割れていた。

したがって、セラミックの釉薬が不要高周波を吸収し、その部分のみが局所的に加熱されたことによりセラミックが割れ、真空リークが発生したと考えられる。

この対策として、ジャイロトロン電子銃の電極部には、釉薬を使用していないセラミックに変更した。対策以降は、セラミックの表面に焦げや変色は見られなくなった。さらにその後前節に記述したようにRF吸収体を内蔵したため、セラミックでの高周波吸収は激減し、セラミックの加熱はなくなった。

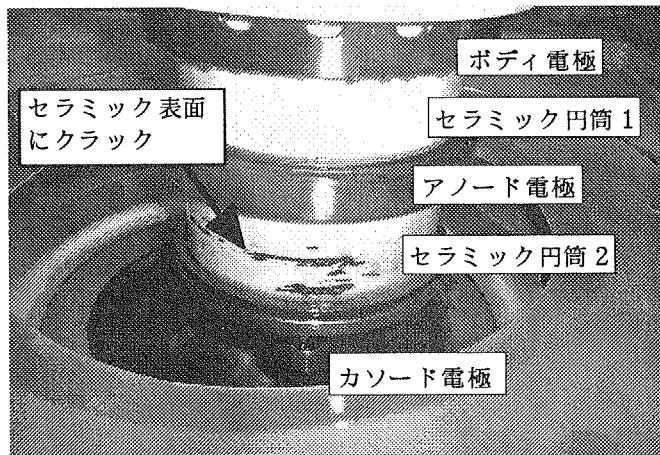
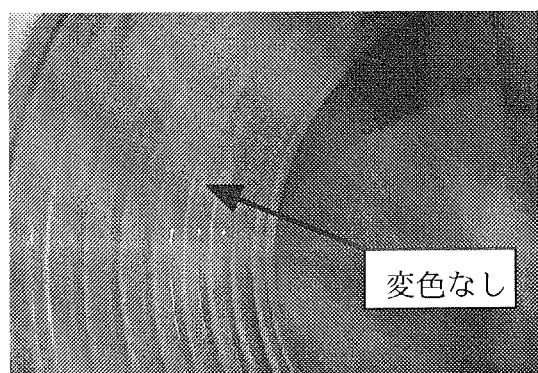
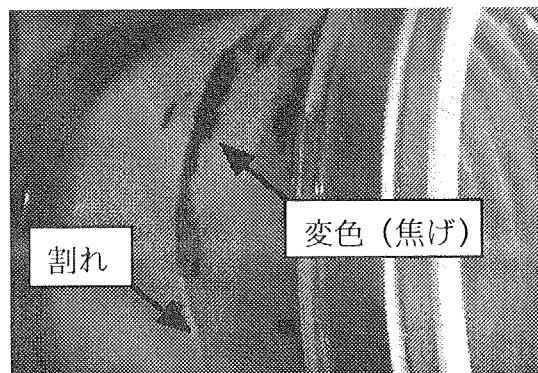


図4-4 不要高周波による電子銃部のダメージ



(a) セラミック内部



(b) セラミック外部

図4-5 セラミック円筒写真

#### 4. 3 改良の成果

プラズマへの大電力入射を目指して、4. 1 および 4. 2 で述べたジャイロトロンの高パワー化の改良を行った結果、表 4 - 1 に示すような出力状態を達成できた。ジャイロトロン JT-D 2 M では、設計目標の 1 MW を上回る 1.3 MW を達成できた。1 MW の出力では、設計目標のパルス幅 5 秒まで入射できた。

表 4 - 1 各号機の最高出力状態

	最高パワー (MW) / パルス幅 (秒)	パワー (MW) / 最長パルス幅 (秒)
JT-D 1 M (#1号機)	1.15 / 1.10	1.10 / 3.03
JT-D 2 M (#3号機)	1.27 / 1.20	1.04 / 5.03
JT-D 3 M (#2号機)	1.00 / 2.27	0.90 / 4.12
JT-D 4 (#4号機)	1.12 / 1.20	1.03 / 4.96

JT-60U ECH 装置は、平成 10 年度に 1 系統を建設し、11 年度には 2 系統、12 年度にさらに 1 系統を追加して、現在までに 4 系統で 4 基のジャイロトロンを有している。図 4 - 6 に、世界の ECH 装置のプラズマへのパワー入射性能を示す。平成 12 年度から 13 年度に、電源の最適化や伝送系の敷設精度の改善を実施した結果、図 4 - 6 からわかるように 2.8 MW - 3.6 s (10 MJ) の世界最高レベルのプラズマ入射を実現した。

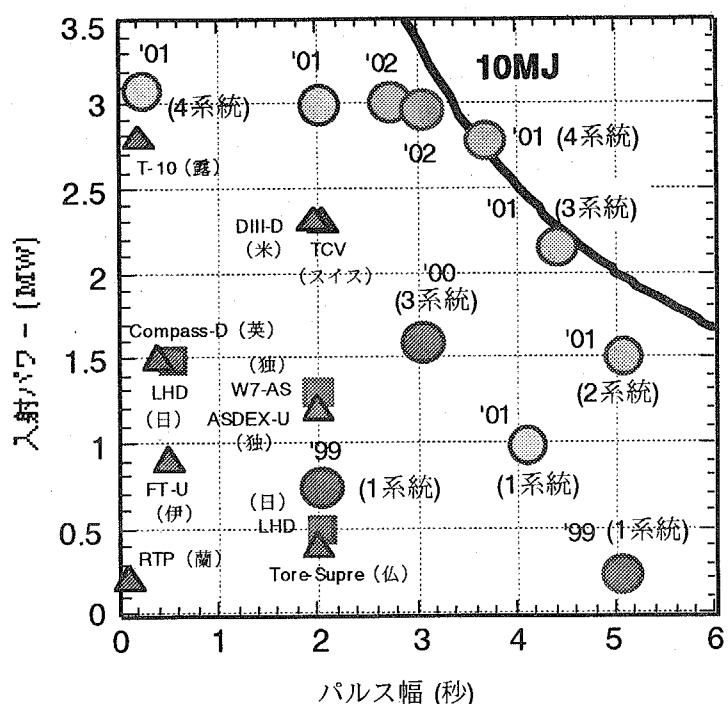


図 4 - 6 各 ECH 装置の入射パワー性能

現在、国際熱核融合実験炉（ITER）の設計研究が進められており、JT-60Uで開発されたECH装置は、ITERのECHシステムの研究開発に貢献している。表4-2は、JT-60UでのECHシステムの達成値とITER用ECHシステムの設計値の比較を表す。それぞれのECH装置は、JT-60Uでは4系統、ITERでは24系統で構成されており、系統ごとではほぼ同一のシステムである。表から分かるように系統当たりでは、JT-60Uでの入射パワーはITERの入射パワーの設計値を上回る0.84MWを達成した。パルス幅に関しては、JT-60Uでは連続入射を達成していないが、5秒入射によりECH装置の主要機器の熱平衡を確認し、連続運転に向けた技術的見通しを得た。

表4-2 ITERでのECH装置との比較

系統当たりの性能	JT-60Uでの達成値	ITERでの設計値
周波数 (GHz)	110	170
電子管出力 (MW)	1.05	1.0
パルス幅 (s)	5	連続
伝送効率 (%)	80	80
伝送路長 (m)	60	70
入射パワー (MW)	0.84	0.8

## 5. まとめ

本報告書は、 JT - 60 U ECH 装置用 110 GHz ジャイロトロンの運転とその改良についてまとめた。

ジャイロトロンはミリ波帯での高出力発振を実現した唯一の発振器で、その運転には様々な調整が必要である。1 MW、秒オーダーの出力を得るには次のような調整、エージングが必要となる。(1) ヒーターエージング、(2) ビームエージング、(3) バーンパターン確認、(4) 磁場の強度及び軸位置の調整、(5) アノード電圧の調整である。さらに、高出力でパルス幅を徐々に伸ばすエージングを行い、秒オーダーの出力が実現できた。

エージング終了後の通常運転では、発振の途中で出力が急に低下する現象が発生した場合は高電圧を瞬時に遮断することが最も重要である。これを始めとしてインターロックを運転前に必ず確認する必要がある。運転中に、電子銃部セラミックの焦げや変色、ジャイロトロンのボディ部からの水漏れ等が発生したが、補修等の対策を行った。

高出力で 1 秒以上の長パルスの運転を行なおうとしたとき、ビーム電流が急増する、電子銃部が破損するなどの問題が発生した。これは、ジャイロトロン管内で発生した不要な高周波が電子銃のカソードやセラミックを過熱させたことが原因であることが判明した。この対策として、RF 吸収体をジャイロトロンに内蔵する改良を行った。これにより、設計目標の 1 MW - 5 秒の出力を達成した。また、4 基のジャイロトロンでプラズマに約 10 MJ の世界最高のミリ波エネルギーを入射できた。これらの成果は、ITER の ECH 装置実現に大いに貢献するものである。

### 謝辞

J T - 6 0 U E C H 装置のジャイロトロンの運転、調整、保守において技術的な支援をしていただきました R F 装置試験室員、加熱工学研究室員の皆様に感謝いたします。また、(株) 東芝 D D C 社の假家強氏、満仲義加氏には改良についての多くの助言をいただき、感謝申し上げます。また、運転実績をまとめるにあたり、助言や議論をしていただきました藤井常幸 R F 装置試験室室長に感謝いたします。

### 参考文献

- 1 ) M.Makowski, ECRF systems for ITER, IEE Trans. Plasma Sci., vol.24, 1023(1996).
- 2 ) Y.Ikeda, Basic Design of the RF Injection System of the 110GHz Local Heating and Current Drive System for JT-60U, JAERI-Research 99-061(1999).
- 3 ) A.Kasugai, et al., Chemical vapor deposition diamond window for high-power and long pulse millimeter wave transmission, Rev. Sci. Instrum 69,2160 (1998).
- 4 ) Y.Ikeda, et al., The 110-GHz Electron Cyclotron Range of Frequency System on JT-60U: Design and Operation, Fusion Science and Technology 42,435(2002).
- 5 ) A.Kasugai, Improvement of Gyrotron by Suppression of Undesirable Waves, JAERI-Research 02-027(2002).

## 付録 - 1 110 GHz ジャイロトロンの主な改良点

	変更前	変更後	備考
ジャイロトロン	J T - D 1	J T - D 1 M	
ボディ電極長	302 mm	320 mm	ボディ電極を長くした
ボディ電極径	Φ66 mm	Φ70 mm	径を太くした
カソード電極径	先端フラット	先端R大	先端を丸くした
電子銃部A - K間	釉薬あり	釉薬なし	京セラ製A 479へ変更
電子銃部A - B間	釉薬あり	釉薬なし	京セラ製A 479へ変更
ビームトンネル	R F吸収体なし	R F吸収体あり	S i Cセラミック製
D Cブレーク	アルミナ製	アルミナ製	
最終ミラー	ペローズ保護板なし	ペローズ保護板なし	
ジャイロトロン	J T - D 2	J T - D 2 M	
ボディ電極長	340 mm	340 mm	
ボディ電極径	Φ76 mm	Φ76 mm	
カソード電極径	先端R大	先端R大	
電子銃部A - K間	釉薬あり	釉薬なし	京セラ製A 479へ変更
電子銃部A - B間	釉薬なし	釉薬なし	S i N製
ビームトンネル	R F吸収体なし	R F吸収体あり	S i Cセラミック製
D Cブレーク	アルミナ製	アルミナ製	
最終ミラー	ペローズ保護板なし	ペローズ保護板なし	
ジャイロトロン	J T - D 3	J T - D 3 M	
ボディ電極長	320 mm	320 mm	
ボディ電極径	Φ70 mm	Φ70 mm	
カソード電極径	先端R大	先端R大	
電子銃部A - K間	釉薬あり	釉薬なし	京セラ製A 479へ変更
電子銃部A - B間	釉薬なし	釉薬なし	京セラ製A 479へ変更
ビームトンネル	R F吸収体なし	R F吸収体あり	S i Cセラミック製
D Cブレーク	アルミナ製	S i N製に変更	平成15年3月変更予定
最終ミラー	ペローズ保護板なし	ペローズ保護板ありに変更	形状変更予定
ジャイロトロン	J T - D 4		
ボディ電極長	320 mm		
ボディ電極径	Φ70 mm		
カソード電極径	先端R大		
電子銃部A - K間	釉薬なし		京セラ製A 479
電子銃部A - B間	釉薬なし		京セラ製A 479
ビームトンネル	R F吸収体あり		S i Cセラミック製
D Cブレーク	アルミナ製		
最終ミラー	ペローズ保護板なし		

## 付録 - 2 JT-D1/D1M (#1号機) の履歴

- H10年度 JT-D1製作 (#1号機)  
 ↓  
 H13年1/29 #1副窓から水しみだし (断続監視)  
 ↓  
 H13年2/26 JT-D1電子銃の点検 (点検結果; 問題なし)  
 ↓  
 H13年4/20 JT-D1電子銃破損 (真空入射1s)  
     電子銃交換、RF吸収体取り付け; JT-D1Mへ  
 ↓  
 H13年6/20 JT-D1M (RF吸収体付) エージング開始  
 ↓  
 H13年7/4 DCブレーク冷却用フロリナート漏れ  
 ↓  
 H13年8/1 #1ボディ～接地間リーク電流検出  
     フロリナート漏れが原因、オイルタンクよりフロリナート摘出  
 ↓  
 H13年8/30 #1ボディ～接地間絶縁不良発生  
 ↓  
 H13年9/3 絶縁不良は、ビームトンネル用冷却水の水漏れが原因  
     水漏れ部の増し締、絶縁油を交換  
 ↓  
 H13年10/31 #1放電音あり (絶縁油から放電光)  
     ジャイロトロンボディ部内放射器の熱電対から水漏れ  
 ↓  
 H13年11/1 水漏れ部の増し締、シール材で補修  
 ↓  
 H13年11/12 絶縁油を交換  
 ↓  
 H14年5/29 #1整合器内テフロンチューブから真空リーク発生  
     テフロンチューブ貫通端子の増し締、テフロンチューブ端部にゴム板を用いて  
     封止  
 ↓  
 H14年6/12 #1整合器内テフロンチューブから真空リーク発生  
     ・スローリークの原因である整合器内のテフロンチューブを撤去  
     ・整合器内の散乱RF吸収のためにSiCセラミックを整合器底面に入れる

付録 - 3 JT-D2/D2M (#2号機→#3号機) の履歴

H11年度 JT-D2増設 (#2号機)  
↓  
H12年8/23 #2 IGBT故障  
↓  
H12年9/20 JT-D2を#2号機から#3号機へ移動  
↓  
H12年10/2 JT-D2の点検  
    真空窓にリークあり、樹脂系のシール材で補修  
↓  
H13年1/17 JT-D2の点検  
    セラミックの焦げをヤスリ等で補修  
↓  
H13年5/1 JT-D2の点検  
    点検の結果問題なし  
↓  
H13年7/9 JT-D2の点検  
    RF吸収体取付け改良；JT-D2Mへ  
↓  
H13年8/20 JT-D2M (RF吸収体付) を#3号機でエージング開始

## 付録 - 4 JT-D3/D3M (#3号機→#2号機) の履歴

H 1 1 年度            JT - D 3 増設 (#3号機)  
 ↓  
 H 1 2 年 7 / 5       JT - D 3 の 3 秒入射にてセラミックに真空リーク発生  
 電子銃交換、イオンポンプ交換、管内超音波洗浄； JT - D 3' へ  
 ↓  
 H 1 2 年 1 0 / 2 3   JT - D 3' エージング開始  
 ↓  
 H 1 3 年 1 / 1 7      JT - D 3' の点検  
 点検の結果問題なし  
 ↓  
 H 1 3 年 5 / 1       JT - D 3' の点検  
 点検の結果問題なし  
 ↓  
 H 1 3 年 8 / 7       JT - D 3' の点検  
 点検の結果問題なし  
 ↓  
 H 1 3 年 1 0 / 9      #2 伝送系の真空リーク発生  
 原因は、 JT - D 3' の真空窓に少量のリーク  
 ↓  
 H 1 4 年 1 / 2 4      JT - D 3' に R F 吸収体取付け改良； JT - D 3 M へ  
 ↓  
 H 1 4 年 3 / 4       JT - D 3 M (R F 吸収体付) を #2 号機でエージング開始  
 ↓  
 H 1 4 年 6 / 2 6      #2 の JT - D 3 M 真空窓で真空リークが発生  
 V A C シール塗布

## 付録 - 5 JT-D4 (#4号機) の履歴

H12年度 JT-D4増設 (#4号機)  
 ↓  
 H13年3/12 JT-D4エージング開始  
 ↓  
 H13年4/17 JT-D4プラズマ初入射 (真空入射~70ms)  
 4本同時入射成功

## 付録 - 6 #1～#4の履歴

H12年5 3系統1.5秒入射成功 (JT-D1、D2、D3)  
 ↓  
 H12年7/5 不要高周波によりJT-D3電子銃破損 (3秒入射) のため、全系統パルス幅  
 を2秒に制限  
 電子銃の周りにMCナイロンスリーブを設置し対処  
 ↓  
 H12年11/8 MCナイロンが熱で溶け絶縁油あふれ  
 全系統のMCナイロン取り外し、低コレクター電流化運転へ  
 ↓  
 H13年5/8～ JT-D1電子銃セラミックリークのため、ビーム電流初期値を~45A  
 以下に  
 ↓  
 H13年10/1 #3伝送系DCブレークにて真空リーク発生  
 全系統の整合器内にRF反射板 (アルミ製) の取り付けて対処  
 ↓  
 H13年10/29 #1～4 タイミング制御板ノイズ対策  
 ↓  
 H14年6/19 4系統の同時入射 3.1MW×2.9秒のプラズマ入射成功

**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
光强度	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	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
干率、放射束	ワット	W	$J/s$
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
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	$^{\circ}C$	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$
放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
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
トント	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	$\mu$
$10^{-9}$	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、1eVおよび1u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開催理事会指令では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( $=10^5$ dyn)	kgf		lbf	
		1	0.101972	0.224809	9.80665
	4.44822	0.453592	1		

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

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

圧力	MPa( $=10$ bar)	kgf/cm <sup>2</sup>		atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
		1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
力	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( $=10^7$ 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					$= 4.184 \text{ J (熱化学)}$	
	9.80665	1	2.72407 $\times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{-19}$	$= 4.1855 \text{ J (15 }^{\circ}\text{C)}$			
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{-25}$	$= 4.1868 \text{ J (国際蒸気表)}$			
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{-19}$	$= 1 \text{ PS (仮馬力)}$			
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{-21}$	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$			
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{-18}$	$= 735.499 \text{ W}$			
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1				

放射能	Bq		Ci		吸収線量	Gy		rad	照射線量	C/kg		R	線量当量	Sv	rem
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$	1	$100$		1	$2.58 \times 10^{-4}$			1	$2.58 \times 10^{-4}$				
	$3.7 \times 10^{10}$	1												1	100

(86年12月26日現在)

CO6-MCC装置用 ハードウェアの運転実績



古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています