

JAERI-Tech
2003-053



JP0350382



JT-60U ECH装置用ジャイロトロンにおける
アノード電圧制御による出力変調運転

2003年6月

寺門 正之・関 正美・下野 貢・五十嵐 浩一
溝伸 義加*・諫山 明彦・安納 勝人・池田 佳隆

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.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

J T - 6 0 U E C H 装置用ジャイロトロンにおける アノード電圧制御による出力変調運転

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

寺門 正之・関 正美・下野 貢・五十嵐 浩一*

満仲 義加*・諫山 明彦⁺¹・安納 勝人・池田 佳隆⁺²

(2003年4月9日 受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60U) では、電子サイクロトロン加熱 (ECH) 装置を用いて、局所的にプラズマを加熱あるいは電流駆動しプラズマの性能向上実験を実施している。また、プラズマの熱伝導率を測定し閉じ込め性能を調べるため、ECH装置の高周波源であるジャイロトロンの高周波出力を数十から数百Hz程度に変調し、プラズマ中へパルス的に入射している。

JT-60Uでは、ジャイロトロンのアノード電圧を制御することで高周波出力の変調運転に成功した。アノード電圧を約10%変化させることで、変調度が約80%の出力変調運転を行うことができる。変調周波数は、12.2Hz～500Hzである。なお、出力変調運転中に主モードの発振効率が低下することにより放射器が加熱される。この原因是、放射器入口部における寄生発振と推測される。しかし、放射器の温度を監視することでジャイロトロンを保護することができる。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山801-1

+ 1 炉心プラズマ研究部

+ 2 原研・機構統合準備室

※ 業務協力員

* 株式会社東芝

Power Modulation by Changing Anode Voltage of the 110GHz-gyrotron on JT-60U ECH System

Masayuki TERAKADO, Masami SEKI, Mitsugu SHIMONO, Koichi IGARASHI^{*}
Yoshika MITSUNAKA^{*}, Akihiko ISAYAMA⁺¹, Katsuto ANNO and Yoshitaka IKEDA⁺²

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

(Received April 9, 2003)

The Electron Cyclotron Range of Frequencies (ECRF) system having four 110 GHz-gyrotrons has been successfully operated on JT-60U to locally heat a plasma (ECH) and drive a plasma current (ECCD) for high plasma performance owing to suppressing MHD activities. For investigation of plasma confinement the ECRF power is intermittently injected into plasmas to evaluate thermal conductivity.

We have successfully performed power modulation by changing the anode voltage. The power modulation ratio of 80 % is attained changing the anode voltage by only about 10%. Modulation frequency is from 12 Hz to 500 Hz. The mode converter is heated when oscillation efficiency of the main mode decreases in changing the anode voltage. This seems to be due to the parasitic oscillation at the entrance of the converter. The gyrotron will be able to be protected by monitoring the temperature rise in the converter.

Keywords: JT-60U, ECRF, ECH, ECCD, Power Modulation, Anode Voltage, Parasitic Oscillation

⁺¹ Department of Fusion Plasma Research

⁺² Preparation office for JAERI-JNC

^{*} Cooperative Staff

^{*} Toshiba Corporation

目 次

1.	はじめに	1
2.	110GHzジャイロトロン用電源の概要	3
2. 1	主電源	3
2. 2	加速電源	4
2. 3	アノード分圧器	4
2. 4	分圧基板	5
2. 5	リモート制御の改良	6
3.	アノード電圧制御による出力の変調	13
3. 1	出力変調の制御方法	13
3. 2	電源立ち上がり時の変調信号の最適化	14
3. 3	変調周波数	14
3. 4	変調度	15
4.	運転上の注意点と問題点	19
4. 1	ジャイロトロン放射器の温度上昇	19
4. 2	ジャイロトロンの耐電圧劣化	19
4. 3	発振停止検出回路の整備	20
5.	JT-60Uでの出力変調の実験への適用	22
6.	まとめ	24
	謝 辞	24
	参考文献	25

Contents

1. Introduction -----	1
2. Outline of Power Supply for a 110 GHz-gyrotron -----	3
2.1 Power Supply for Main Power Supply -----	3
2.2 Acceleration Power Supply -----	4
2.3 Anode Voltage Divider -----	4
2.4 Circuit of the Voltage Divider -----	5
2.5 Improvement of Remote Control -----	6
3. Power Modulation by Changing Anode Voltage -----	13
3.1 Control Method of Power Modulation -----	13
3.2 Optimization of Modulation Signal at Start-up of the Acceleration -----	14
3.3 Frequency of Power Modulation -----	14
3.4 Modulation Ratio -----	15
4. Attention on Power Modulation for Stable Operation -----	19
4.1 Temperature Increase of the Mode Converter -----	19
4.2 Decrease in Withstanding Voltage of Gyrotron -----	19
4.3 Adjusting of Protection Circuits for Anomalous Oscillation -----	20
5. Application of Power Modulation in JT-60U Experiment -----	22
6. Summary -----	24
Acknowledgements -----	24
References -----	25

1. はじめに

核融合実験では、プラズマの性能向上をめざして電磁波（高周波（RF））の入射で、プラズマの加熱等を行っている。RF加熱は、使用する周波数帯により3つに分類できる。周波数が数百MHz以下のイオンサイクロトロン波帯（ICRF）加熱や、数GHzの低域混成波帯（LHRF）加熱、および数十GHzから数百GHzの電子サイクロトロン波帯（ECRF）加熱がある。

臨界プラズマ試験装置（JT-60U）では、LHRF加熱装置やICRF加熱装置を有していたが¹⁾、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年度から電子サイクロトロン加熱（ECH）装置を導入した^{2) 3)}。図1.1に、JT-60U ECH装置の概要図を示す。JT-60U ECH装置は、発振周波数が110GHzで約1MWの高周波出力を大電力電子管（ジャイロトロン）で発生し、内径31.75mm、全長約60mのコルゲート導波管で高周波電力を伝送し、ミラー型のアンテナからJT-60Uプラズマへ入射するシステムである。なお、ジャイロトロン用の高電圧電源は、従来のLHRF加熱装置の電源を基にして構成し、追加機器を製作し完成させた。JT-60U ECH装置は、平成10年度に1基を建設し、平成11年度に2基、平成12年度に更に1基を追加して、現在までに4台のジャイロトロンを有している。

JT-60Uにおいて、プラズマの熱伝導率を評価し閉じ込め性能を調べる実験を行うためには、ジャイロトロンの高周波出力を数十から数百Hz程度に変調し、パルス的な高周波をプラズマ中に入射する必要がある。ジャイロトロンの出力を変調するには、主電源（ビーム電流を供給する電源）を入り／切りする方法と、アノードの電圧を変えることによりジャイロトロンの発振条件を変え出力を変化させる方法とがある。しかし、高電圧で大電流の電源を連続で入り／切りする高速スイッチは、現状では困難である。たとえそのような高速スイッチを設置したとしても、JT-60U ECH装置の電源では主電源の平滑回路や加速電源を改良しなければジャイロトロンの安定な発振ができない可能性がある。そこで、JT-60U ECH装置では後者のアノード電圧制御による出力変調方式を採用した。

本報告書は、JT-60U ECH装置においてアノード電圧を変化させることによりジャイロトロンの出力を変調する運転の結果についてまとめたものである。次章に、ジャイロトロン用電源設備の概要を述べる。第3章に、アノード電圧制御による出力の変調について、第4章に運転上の注意点と問題点について述べる。第5章に、出力変調した高周波をプラズマ中に入射したときの実験結果について簡単に述べる。第6章に本報告をまとめる。

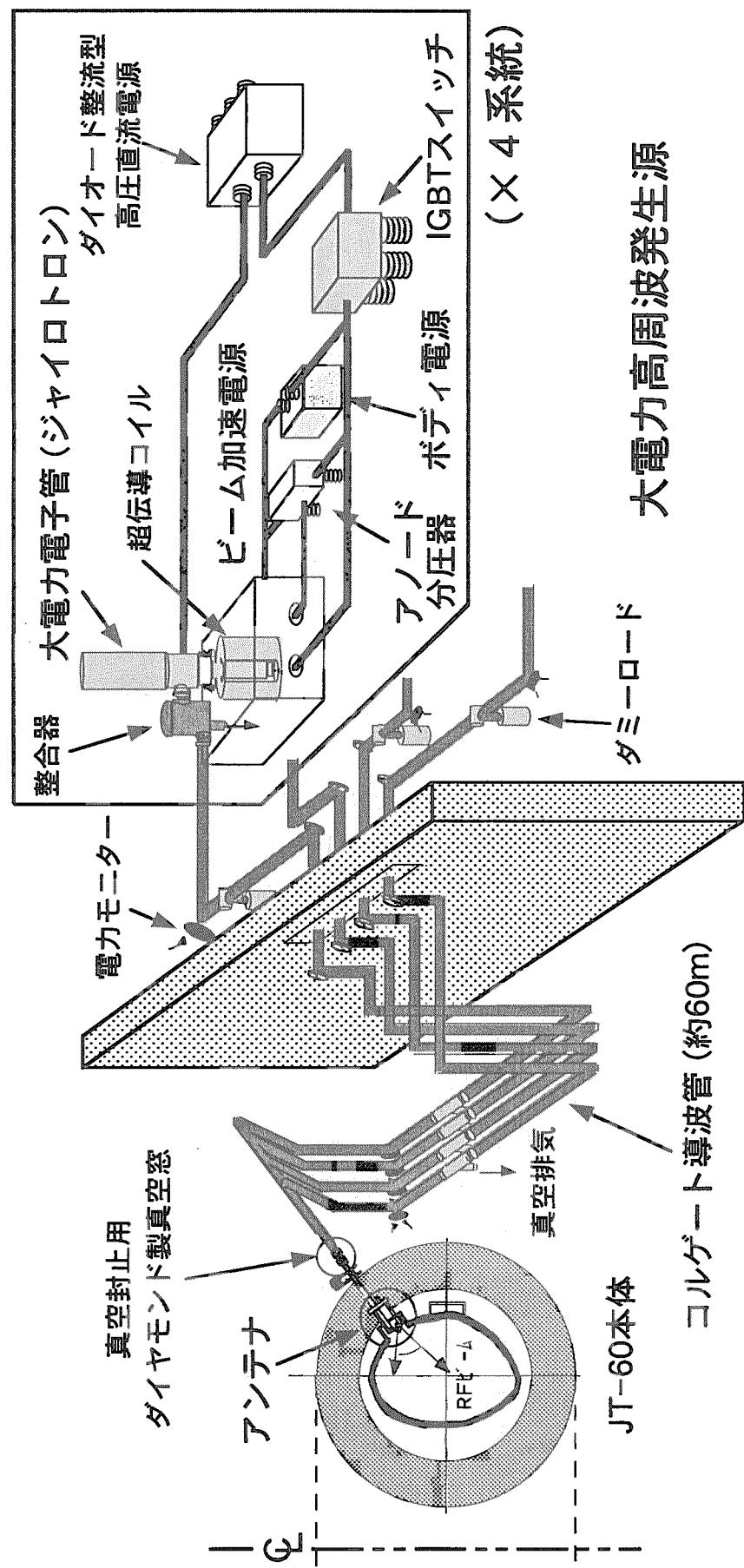


図 1.1 JT-60U ECH装置概要図

2. 110GHzジャイロトロン用電源の概要

図2.1に、JT-60Uジャイロトロン用電源設備の概要図を示す。JT-60UでECH装置を導入するにあたり、従来のLHFR加熱装置用電源に使用していた直並列コレクタ電源に、高電圧の大電流を入り／切りする電流スイッチ（IGBTスイッチ）を新たに加えて、約60Aのビーム電流を流す電源とした。さらに、電子ビームを安定に加速させる加速電源を設けた。

ジャイロトロンには、カソード（K）、アノード（A）、コレクタ（C）電極があり、主電源でコレクタとカソード電極（C-K）間に、加速電源でアノードとカソード電極（A-K）間に給電している。ジャイロトロンの発振には、電子ビームを安定に流すことが必要であり、通常C-K間に約90kVで約60Aという、高電圧の大電流を電圧変動率±0.5%以下で給電しなければならない。

JT-60U ECH装置では、コレクタ電極と絶縁して新たにボディ（B）電極を設けた、Collector Potential Depression (CPD) 法を採用したジャイロトロンを使用している⁴⁾。CPD法を採用することにより、電圧変動の大きい直並列コレクタ電源を利用し、最小限の改造でジャイロトロンの安定な発振に成功した。すなわち、加速電源をボディとカソード電極（B-K）間に電圧が約90kVで電流約数十ミリアンペアという、高電圧の少電流を電圧変動率±0.5%以下で給電することによって電子ビーム電流が安定に引きだされるため、たとえ主電源の電圧変動率がある程度大きくても（電圧が安定した後のリップル電圧が約±1%）安定した発振が可能となった。さらに、コレクタ電圧をボディ電圧より低くすることができ、コレクタとボディ電極（C-B）間で電子ビームからエネルギーが回収され、従来より高効率の運転が可能となった。

2. 1 主電源

ジャイロトロンの主電源は、専用のフライホイール付発電機（MG）を使用し、そこで発電された交流18kVの高電圧電流をダイオード整流型高電圧直流電源（直流発生装置）にて直流-60kVに昇圧、変換して給電している。定格容量は4.54MVA（タップ4の時）である。ジャイロトロンの発振と保護のためには、通常で約60Aの電流を入り／切りするとともに、負荷短絡時には、最大で300A近くになる短絡電流を10 μ sec以内で遮断する必要がある。そのためのスイッチとしてInsulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) 素子を用いたIGBTスイッチを設けている⁵⁾。

図2.2にIGBTスイッチのブロック図を、図2.3にIGBTスイッチの全体写真を示す。

IGBTスイッチは、定格電圧1.7kV、定格遮断電流360AのIGBT素子を100個直列に接続した構造となっている。さらに、光ケーブルで同時にIGBT素子へゲート信号を送り動作させることで、定格電圧100kV、定格電流100A、ON/OFF時間 $10\ \mu\text{sec}$ 以内（実測値 $7\ \mu\text{sec}$ 以下）を実現している。

2.2 加速電源

加速電源は、ボディ電源⁶⁾とアノード分圧器で構成されている。図2.4にボディ電源のブロック図を、図2.5にボディ電源の全体写真を示す。ボディ電源は、定格出力電圧100kV、定格出力電流100mA、電圧変動率±0.5%以下の電圧安定度の非常に良い定電圧電源であり、ジャイロトロンのB-K間に給電している。

アノード電極への給電は、B-K間に接続したアノード分圧器により行っている。アノード分圧器は、ツェナー電圧200Vのツェナーダイオード5個が取り付けられた分圧基板80枚と、約2000pFのコンデンサを並列接続した800kΩの抵抗器を直列に接続した構成である。ツェナーダイオードと抵抗器の中間にある端子からアノード電極へ給電する。アノードの電圧を変えるには、使用するツェナーダイオードの数を変えることで分圧電圧を変化させて行っている。なお、カソードから高電圧で加速された電子ビームのほとんどはコレクタに達し、ボディ電極へ流れ込む量は低く抑えられているため、ボディ電源の定格出力は100mAとした。

2.3 アノード分圧器

アノード分圧器は、アノード分圧器本体とアノード分圧器制御盤からなる。分圧電圧の設定は、ECH装置を制御しているシーケンサにて行う。図2.6にアノード分圧器のブロック図を、図2.7にアノード分圧器の全体写真を示す。

アノード分圧器は200Vステップで80kVの設定が可能である。そのうち20kV分（分圧基板20枚分）はリモート制御が可能であり、2台のリモート制御器により10kV（分圧基板10枚分）ずつ制御している。リモート制御の設定信号は、シーケンサからアノード分圧器制御盤内の制御器へ8ビットのバイナリ方式で送られる。制御器内で、レベル変換器、カウンタ、一致回路、シリアル-パラレル変換回路等の素子で構成される制御回路により分圧電圧を決定する。分圧電圧信号は、光送信モジュールでアノード分圧器の分圧基板へ送られ分圧電圧

が変化する。

また、リモート制御器の1台については変調機能を設けている。リモート制御できない60kV分（分圧基板60枚分）については、マニュアル操作で設定値を変更している。つまり、ジャイロトロンの発振パラメータをスキャンするには、適当なアノードの設定電圧をマニュアル操作で設定し、次にリモート制御においてアノード電圧の微調整を行い、発振パラメータを決定する。そして、アノード電圧制御による出力変調を行うときは、もう1台のリモート制御器において変更する電圧を設定し変調を行っている。

2.4 分圧基板

図2.8に、分圧基板回路図を示す。アノード分圧器のリモート分圧電圧の変更は、制御盤から出されるリモート信号にて、動作させるツェナーダイオード（図2.8中(a)部）の数を変えて実行している。送信されたリモート信号は、アノード分圧器分圧基板の光受信モジュール（O/E）（図2.8中(b)部）にて受信され電気信号に変換される。その信号は、ツェナーダイオードと並列に取り付けられたフォトモスリレー（図2.8中(c)部）を動作させ、ツェナーダイオードの両端をジャンパーした状態とし、ツェナー電圧が発生しないようにする。

つまり、ボディとアノード電極（B-A）間に加えられる電圧のうちリモート制御にて設定される電圧 V は、

$$V = 200V \times \text{光を受信していないツェナーダイオードの数} \quad (1)$$

となる。

ここで問題となるのが、分圧基板に取り付けられた電子部品の制御電源である。分圧基板取り付け部は高電圧部にあるため、制御電源を給電するには、バッテリーで給電するか、絶縁トランジスタを介して給電するかになる。しかし、バッテリーは定期的に交換する必要がありメンテナンスが非常に大変である。絶縁トランジスタを取り付ける方法では、約100kV以上の耐電圧が必要であり、設置スペースとコストがかかる。そこで、B-K間に加えられた電圧の一部を利用する方法を採用した。アノード分圧器はB-K間に接続され、その電圧を分圧してアノード電極に給電するため、B-K間に電圧が加えられない場合は動作する必要がない。したがって、両電極間に加えられた電圧を利用してその一部を制御電源としても問題はない。

2.5 リモート制御の改良

アノード分圧器を実際に動作させるにあたり、いくつかの問題点があった。

1つは、分圧基板に取り付けられたフォトモスリレー（図2.8中(c)部）が破損することがあった。これは、ジャイロトロン内にて短絡が発生することにより、各電極間の電圧が大きく変動し、これによりアノード分圧器に加わる電圧が急激に変動したためであった。その結果、フォトモスリレーに過大な逆電圧が加わり破損したものである。対策として、ダイオード（図2.8中(d)部）を追加し、フォトモスリレー、および光受信モジュールに逆電圧が加わらないようにした。この改良により、アノード分圧器に加わる電圧が急激に変動してもフォトモスリレー等の破損は発生しなくなった。

また、ある設定においてフォトモスリレーが正常に動作しない場合があった。図2.9に、アノード分圧器が誤動作してアノード電圧が変化している波形を示す。図中(a)部のように、ジャイロトロンに電圧を加えている途中でアノード電圧の設定が変わってしまい、ジャイロトロンの安定した発振ができなくなった。原因は、B-K間に加える電圧とアノード分圧器の設定との関係で、フォトモスリレーの動作電圧が確保できることであった。対策として、以下の事項を行った。

- (1) 従来1つであった動作電圧確保用のダイオードに、もう1つ追加し2つとした（図2.8中(e)部）。
- (2) フォトモスリレーを、動作電圧のより小さいフォトカプラに変更した。
- (3) 新たに抵抗器（図中(f)部）を設けた。

これらの改造により、フォトカプラの両端に掛かる電圧を高くできた。その結果、フォトカプラの十分な動作電圧を確保でき、アノード分圧器の動作が安定した。また、フォトカプラの動作速度は約 $3\mu\text{sec}$ であり、フォトモスリレーの動作速度約 2msec よりはるかに早い。これは、高い周波数でアノード電圧変調を行う場合に非常に有利である。

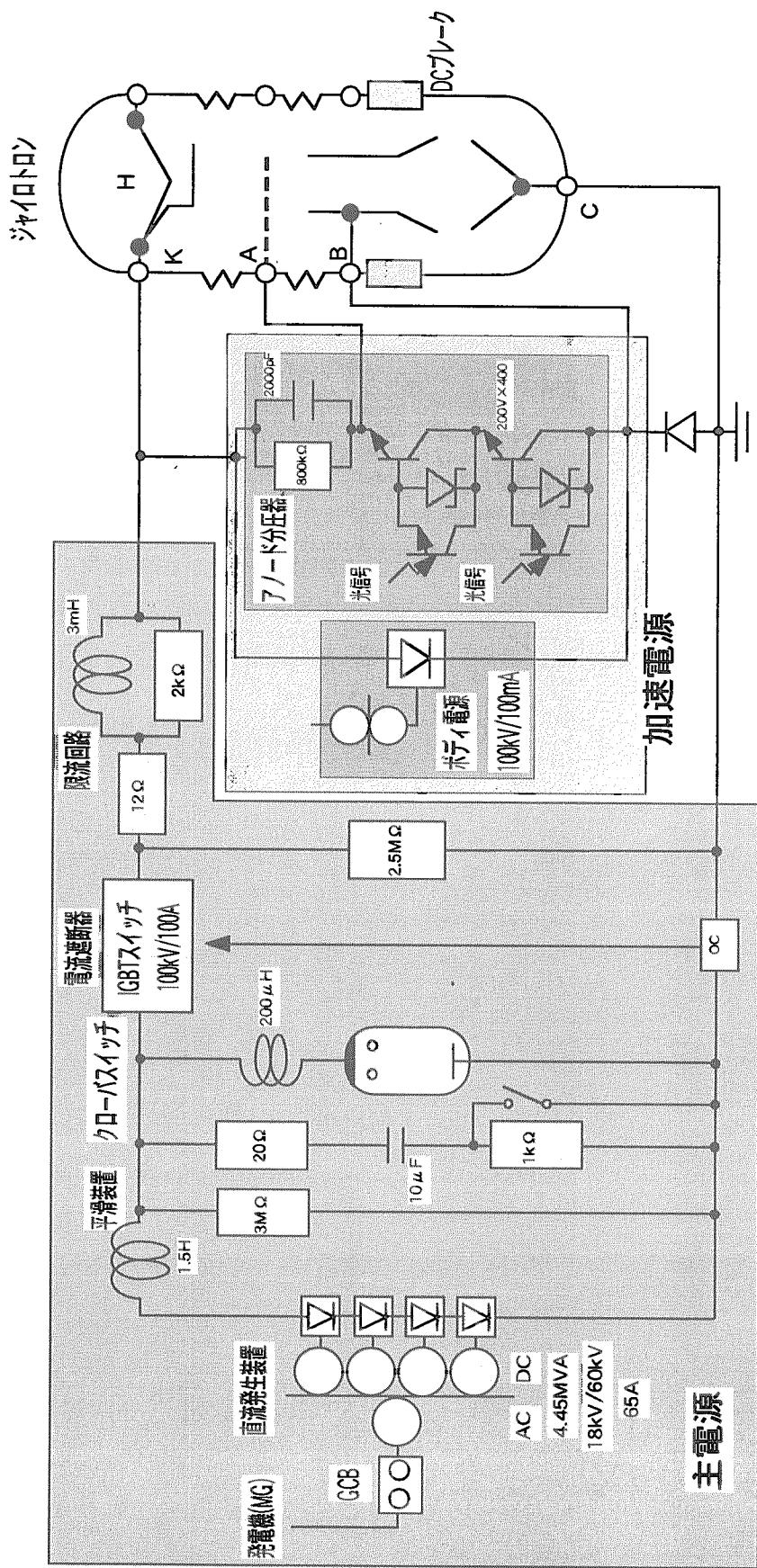


図 2.1 ジャイロトロン用電源設備概要

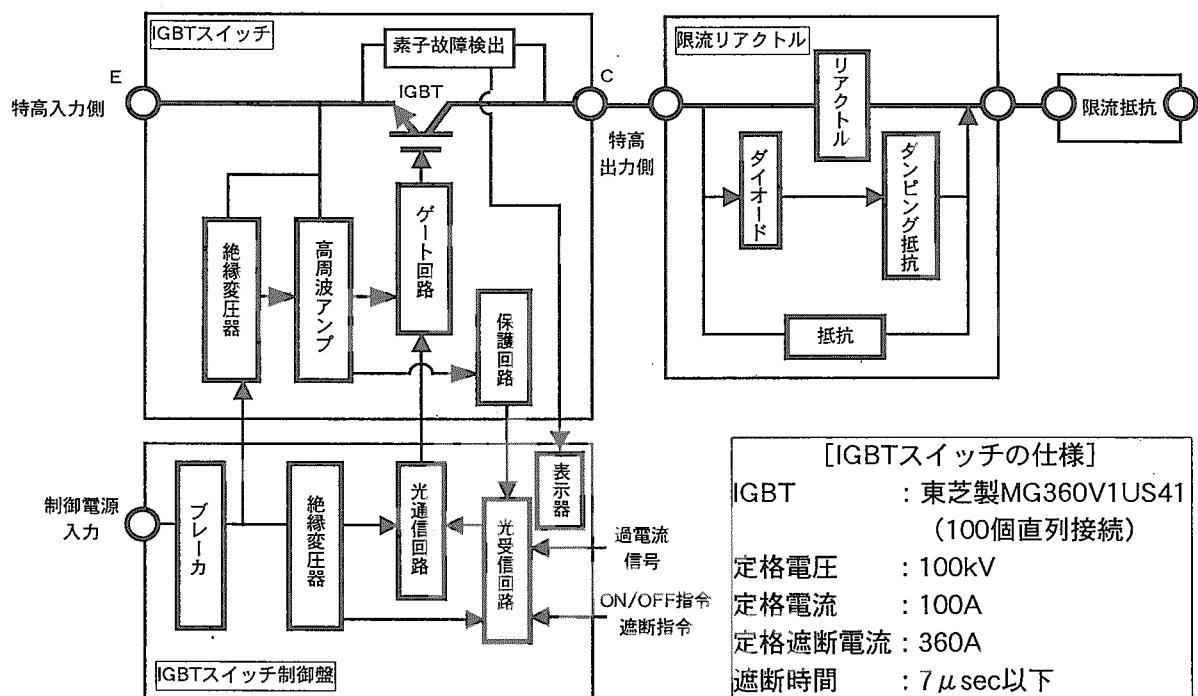


図 2.2 IGBTスイッチブロック図

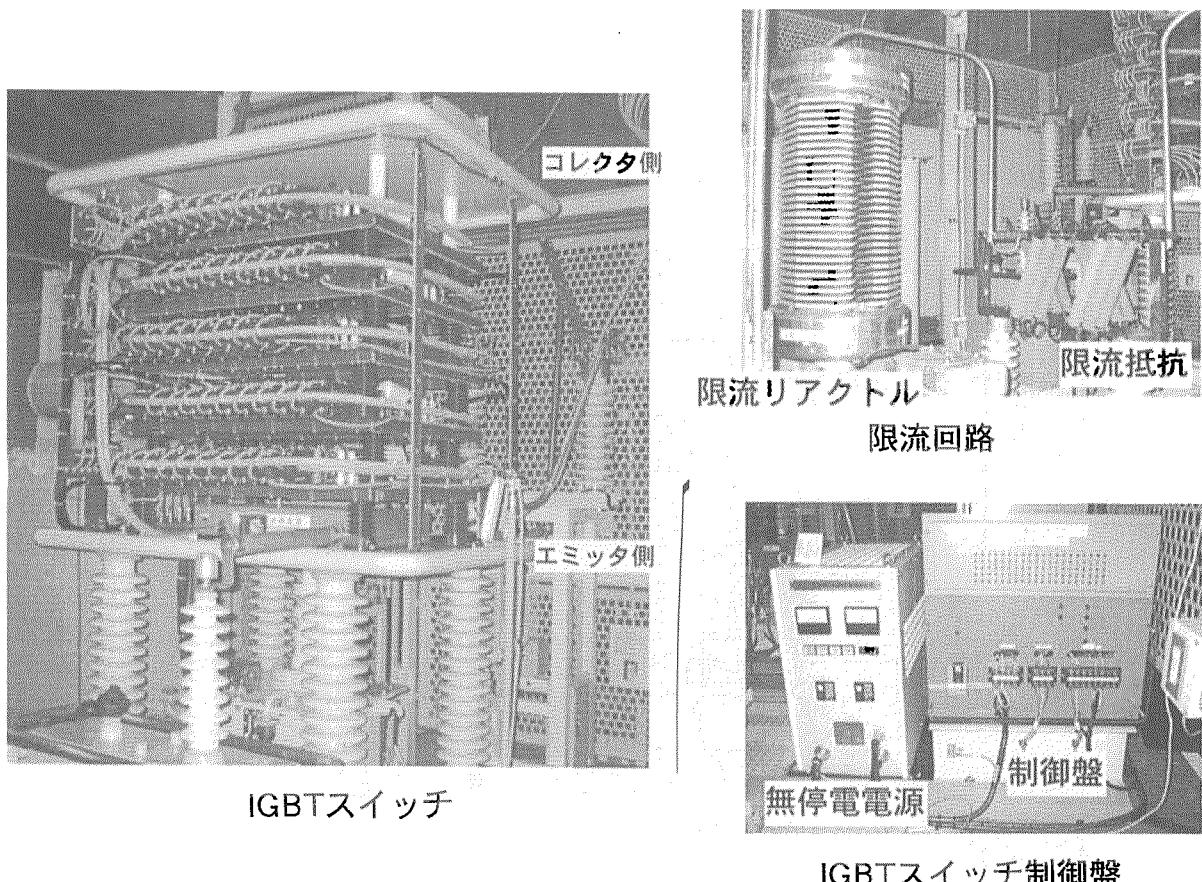


図 2.3 IGBTスイッチ全体写真

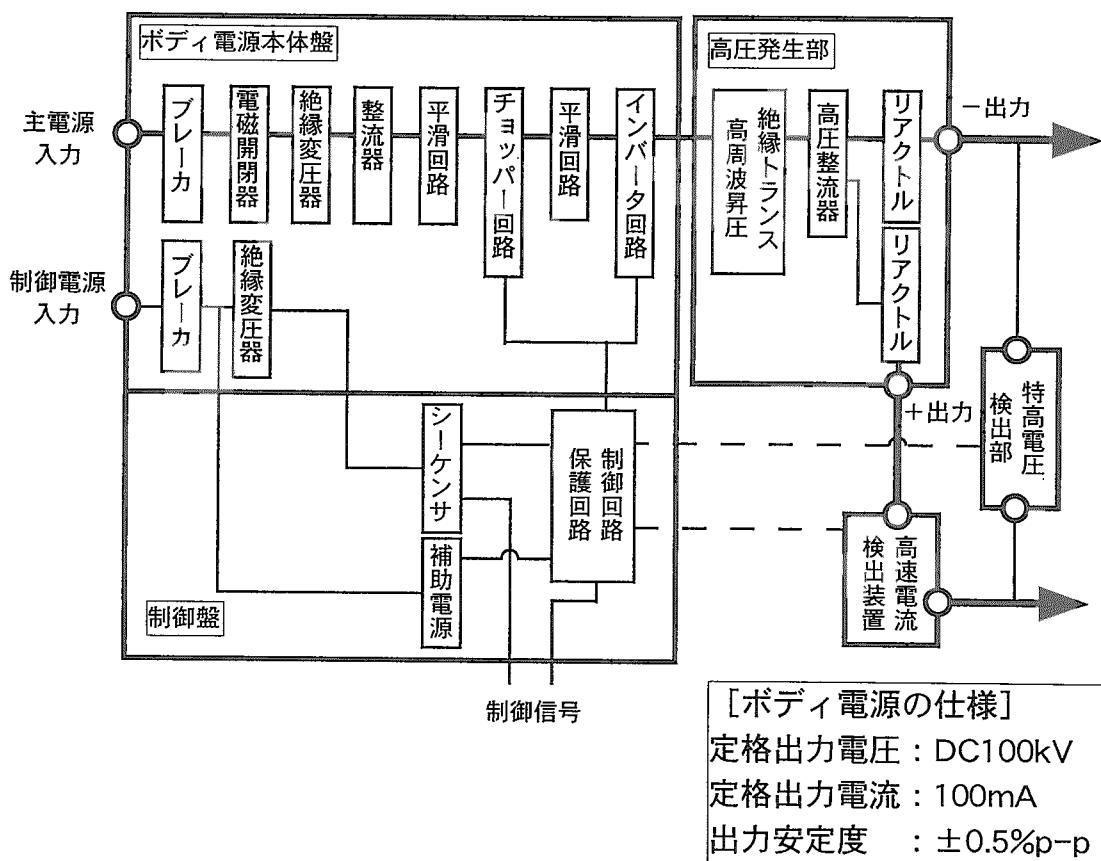


図 2.4 ボディ電源ブロック図

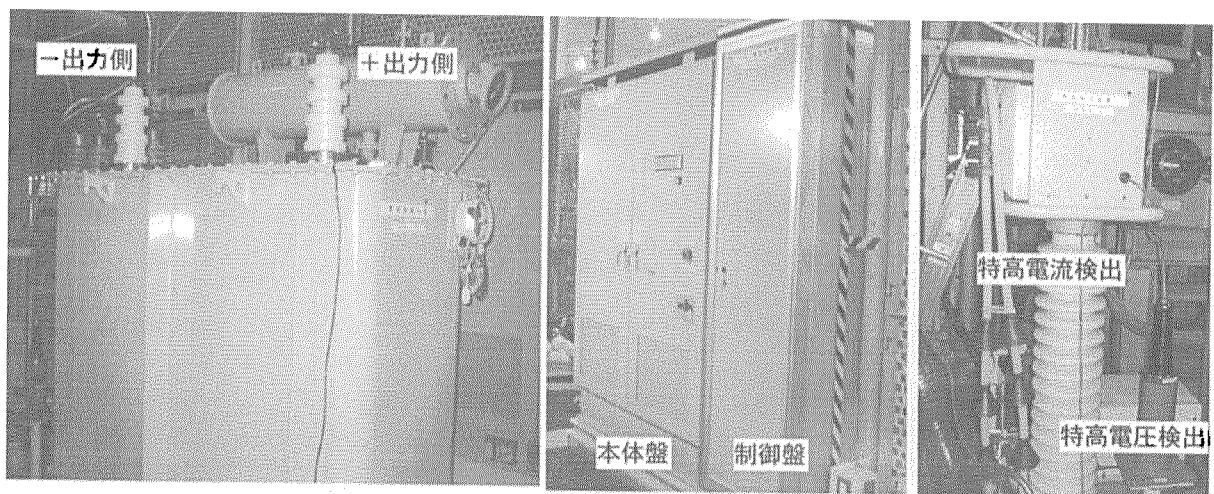
ボディ電源
本体盤／制御盤特高電流検出装置
／特高電圧検出部

図 2.5 ボディ電源全体写真

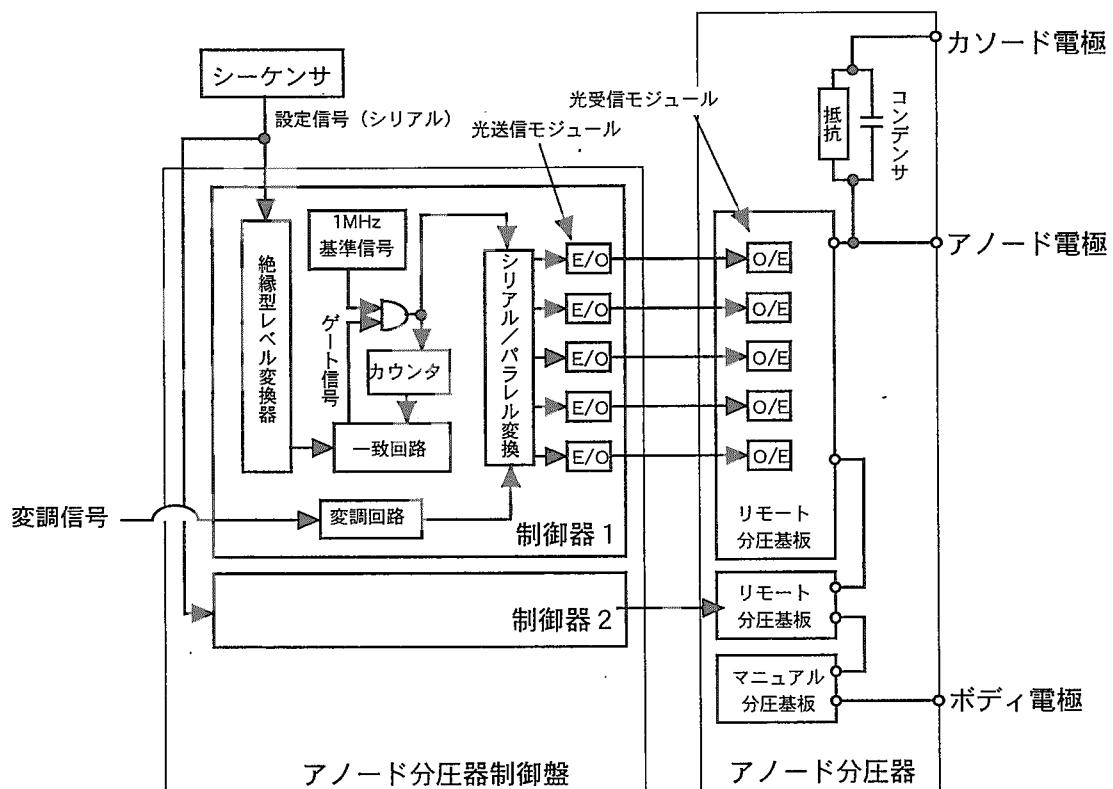


図 2.6 アノード分圧器ブロック図

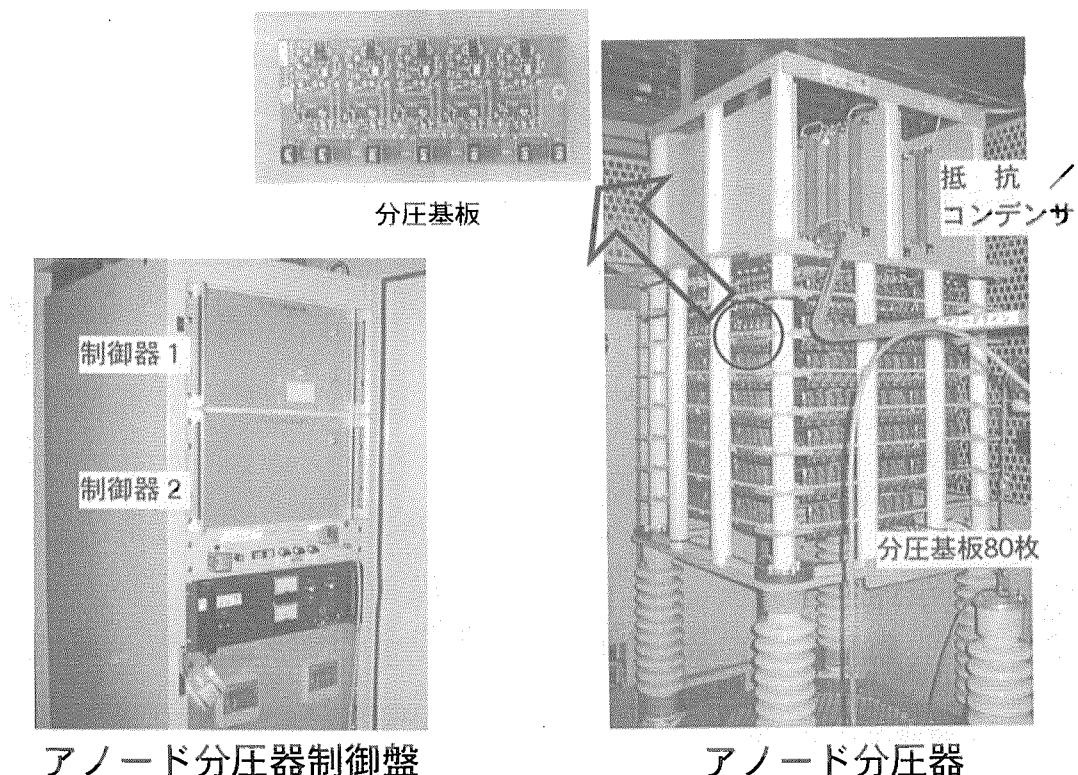
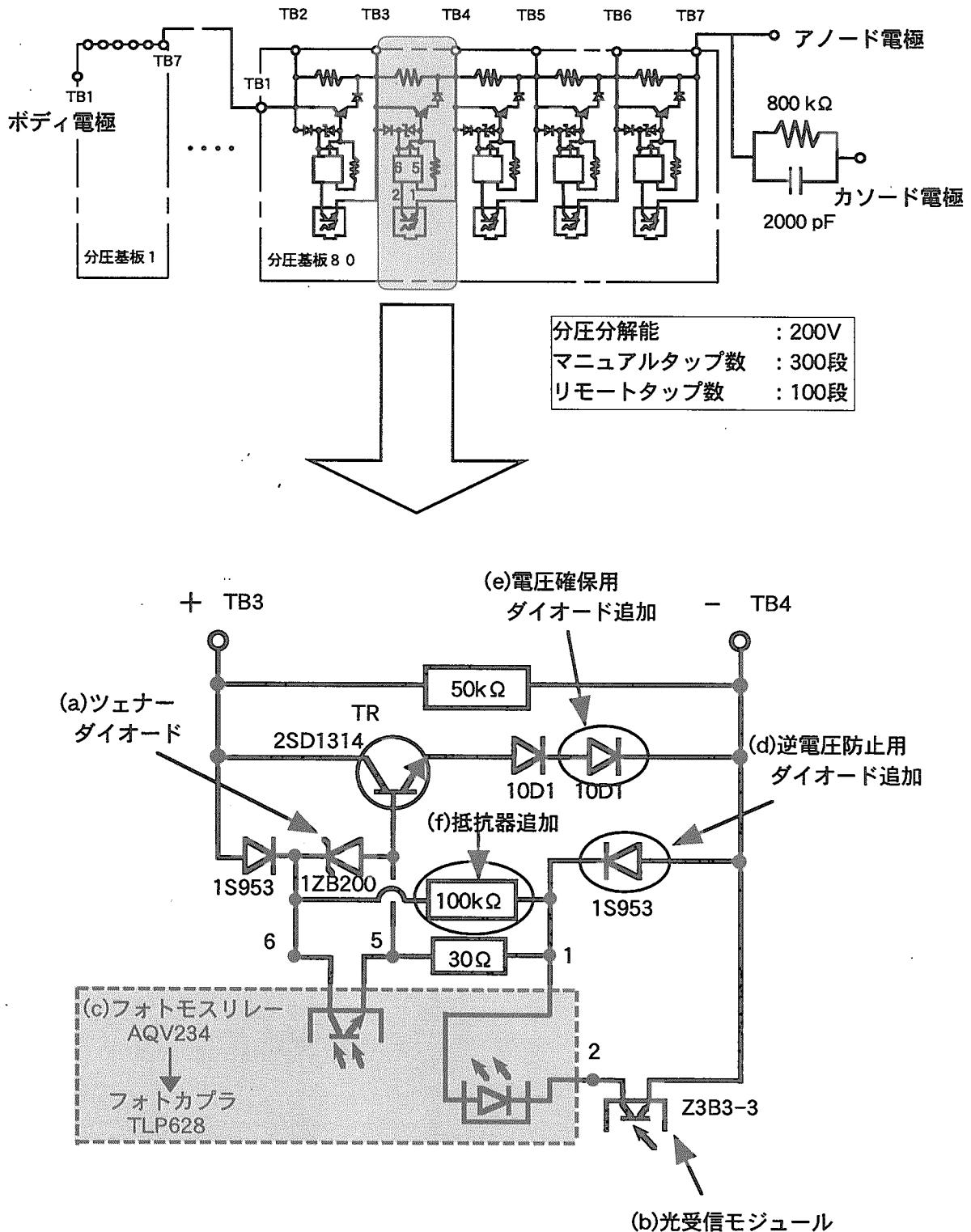


図 2.7 アノード分圧器全体写真



第2.8図 分圧基板回路図

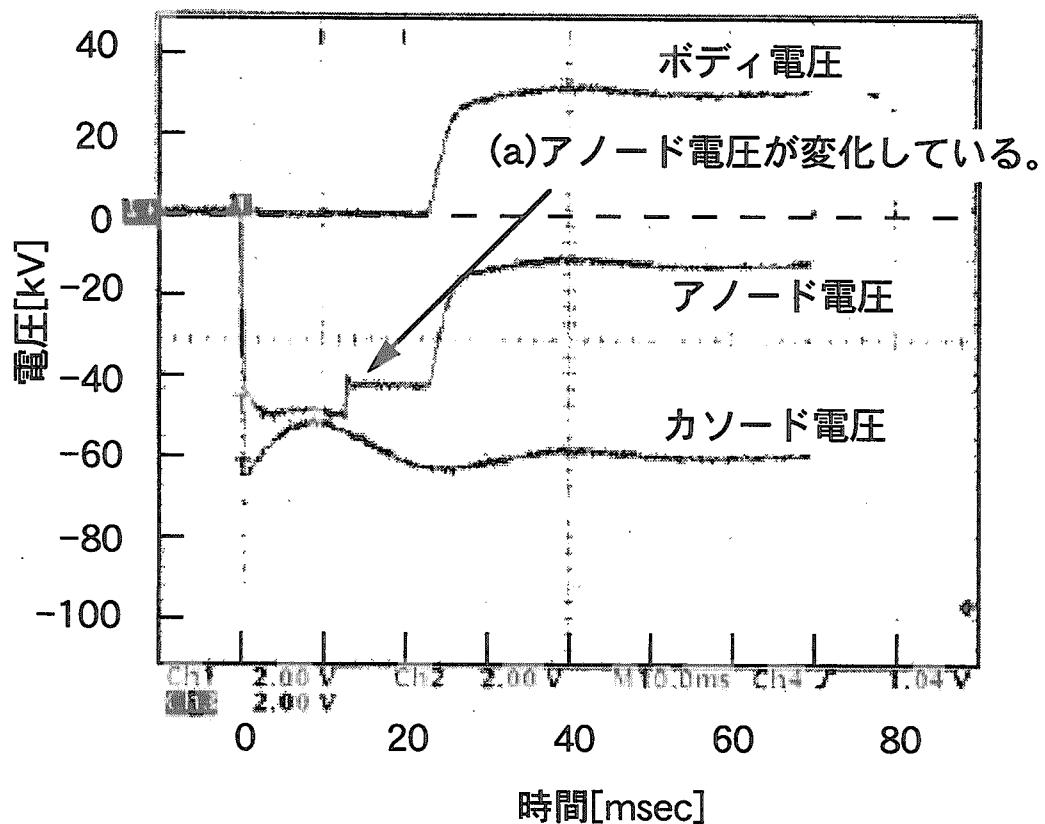


図 2.9 アノード分圧器の誤作動波形

3. アノード電圧制御による出力の変調

ジャイロトロンの出力を変調させるための方法として、アノード電極に加える電圧を変調することにより高周波出力を変調する方式を採用した。出力を調整するには、アノード電圧を調整するとともに、ヒータ電流値、超伝導コイルの磁束密度なども微調整する必要があるが、ここではアノード電圧について詳しく記述する。

3.1 出力変調の制御方法

図3.1に、アノード電圧に対する出力変化の例を示す。図3.1に示すように、ジャイロトロンはアノード電圧（A-K間の電圧）が最適値から多少ずれただけで発振出力が低下してしまう特性を持っている。この特性を利用して、A-K間の電圧を変動させて出力変調の制御方法としている。ただし、A-K間の電圧を変化させるにあたり、A-K間の電圧が大きくなるように変化させると、ビーム電流（コレクタ電流）の増加や電子銃での放電を招く恐れがある。そのために、A-K間の電圧が小さくなるように変化させ（すなわち、ビーム電流を小さくして）発振を低下させるようにした。

アノード電圧の変調は、ファンクションジェネレータ（FG）にて変調したい周波数の0～5Vレベルの矩形波（変調信号）を作り、アノード分圧器制御盤に入力する。変調電圧は、シーケンサの設定電圧と制御器1台分のツェナー電圧が発生した状態（10kV）での電圧とに交互に変化する。ただし、現在は、1台分の変調電圧が最大5kVとなるように調整している。変調周波数の制限は制御器内、および分圧基板内の電子部品の動作速度で決まり、アノード分圧器単体では最大1kHz程度である。

調整は、まずジャイロトロンの正常な発振を確認する。次に、変調したい周波数の変調信号を制御盤に入力する。そして、アノード分圧器の設定にてアノード電圧を少しづつ変更し発振調整を開始する。さらに各電極や出力波形を見ながら、アノード電圧やヒータ電流等を調整する。その時のアノード電圧は、通常のアノード分圧器の設定電圧を大きくする方向、つまり、A-K間の電圧が小さくなる方に変更する。なお、出力変調の調整は数百ミリ秒以下の短パルスから始める。

3.2 電源立ち上がり時の変調信号の最適化

アノード電圧制御のブロック図を図3.2に、タイムチャートを図3.3に示す。ジャイロトロンにおいて、高周波の発振前にアノード電圧を変調すると正常な発振が得られないため、図3.2に示すように、高周波の検波出力をトリガとしてFGを動作させ変調信号を入力することとした。つまり、ジャイロトロンを正常に出力させた状態でアノード電圧の変調を開始し、出力を変化させるものである。

しかし、高周波の発振直後はまだ各電極の電圧が安定しないため、その状態で変調を開始するとジャイロトロンの動作が不安定になり、発振が停止してしまう場合があった。また、仮に発振したとしても、非常に不安定であるため、アノード電圧やヒータ電流などのより細かな調整ができない。そこで、ディレーパルサーを用いてトリガ信号をさらに数十ミリ秒遅らせることとした。これにより、各電極の電圧が安定してから変調が開始され、ジャイロトロンの出力変調時の動作が安定した。

図3.4にアノード電圧制御による出力変調を行ったときの電圧、電流と高周波出力波形を示す。図3.4中(a)部より変調を開始することにより、高周波出力の安定した変調に成功した。

3.3 変調周波数

アノード分圧器の変調制御は、分圧器単体では最大1kHz程度まで可能であるが、実際にジャイロトロンを安定に変調できるのはもう少し狭い範囲となる。アノード電圧制御による出力変調の周波数の下限および上限は以下のように考えられる。

周波数を低く設定すると、A-K間の電圧が低い時間帯（図3.4中(b)部）が長く続くことになるため、この間にジャイロトロン内のビーム電流が少なくなる（図3.4中(c)部）。そのため、次に発振しようとA-K間の電圧を高くしたときには、ジャイロトロンは発振条件から外れてしまい発振しなくなる。

また、周波数の高いほうでは、500Hz程度をこえるとジャイロトロンと組み合わせた場合のアノード電圧の制御が安定に動作しなくなる現象が現れた。これは、アノードの初期電圧や主磁場の値等の発振条件を調整する時間が十分に取れなかつたためと考えている。原理的な最高周波数を評価するには回路の応答解析が必要となるが、既述のように分圧器単体では1kHz程度まで可能であると見積もられる。

現在、アノード電圧制御による出力変調運転が正常にできたのは、12.2Hzから500Hzまでである。しかし、十分な調整運転を行うことにより変調できる周波数の範囲を広げることは可能と考えている。

3.4 変調度

変調していないときの高周波出力に対して、変調によって低下した高周波出力の割合を変調度 (m) という。また、高周波出力はJT-60U真空容器のポートに設置されたダイヤモンド製真空窓の温度上昇より求めることができる。真空窓の温度は、同じパルス幅であれば通過した電力に比例して上昇する。今回の変調はデューティ2分の1で行っているため、変調度は

$$m = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{(\Delta T_1 - \Delta T_3)/2} \times 100 \quad (2)$$

で求められる。

ただし、

ΔT_1 : 変調していない時の温度上昇 (°C)

ΔT_2 : 変調時の温度上昇 (°C)

ΔT_3 : 変調が開始されるまでの間の温度上昇 (°C)

(2) 式に、実験から得られたデータ

$$\Delta T_1 = 5.4^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = 3.6^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_3 = 0.9^\circ\text{C}$$

を代入し変調度を求ると、 $m=80\%$ となる。

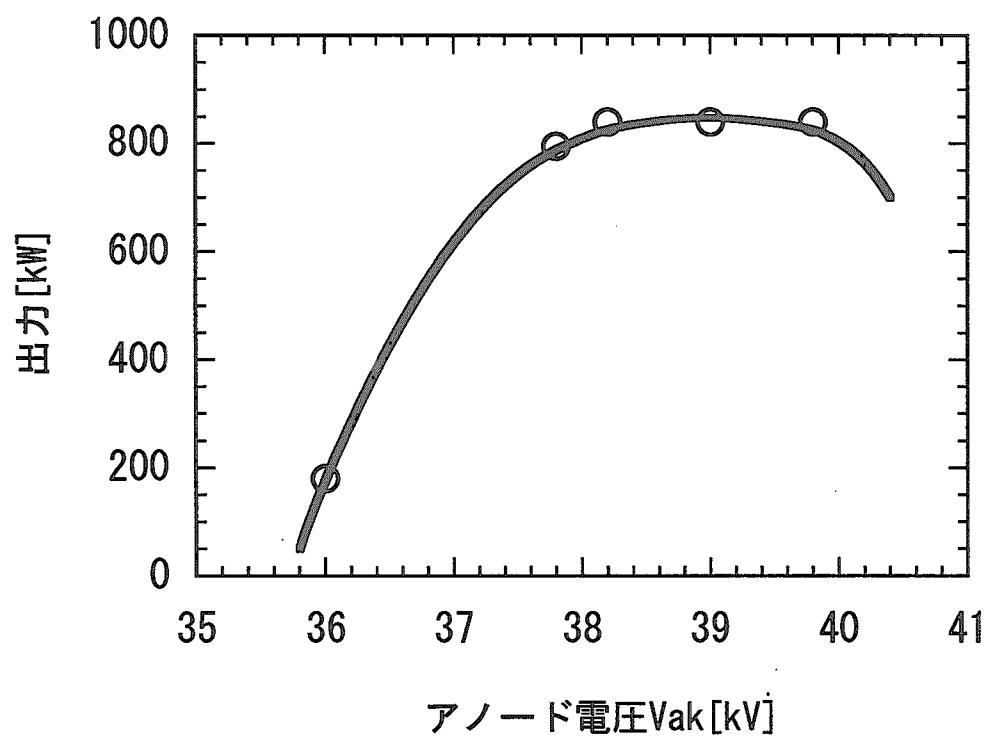


図3.1 アノード電圧に対する出力変化の例

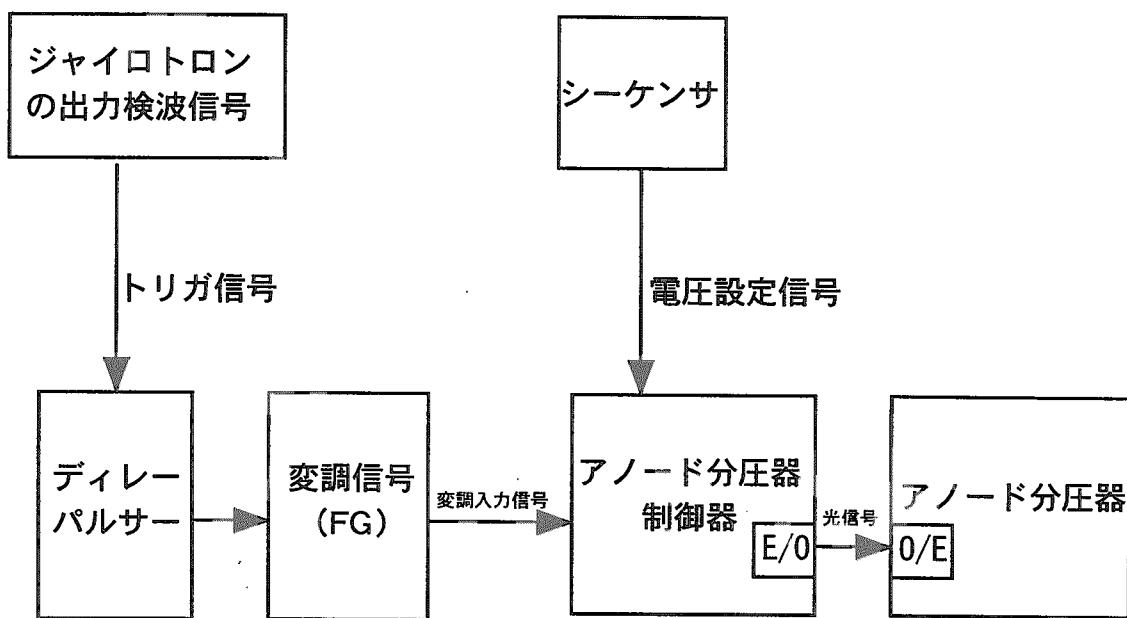


図 3.2 アノード電圧制御ブロック図

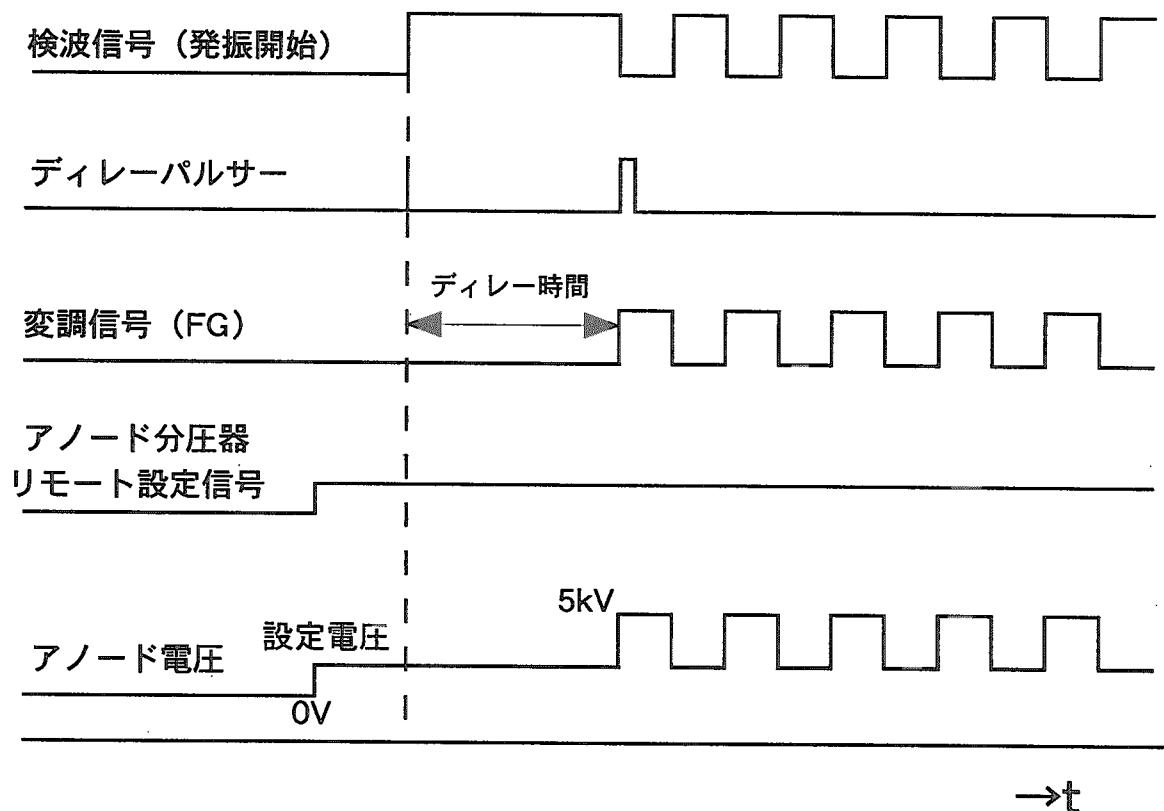


図 3.3 タイムチャート

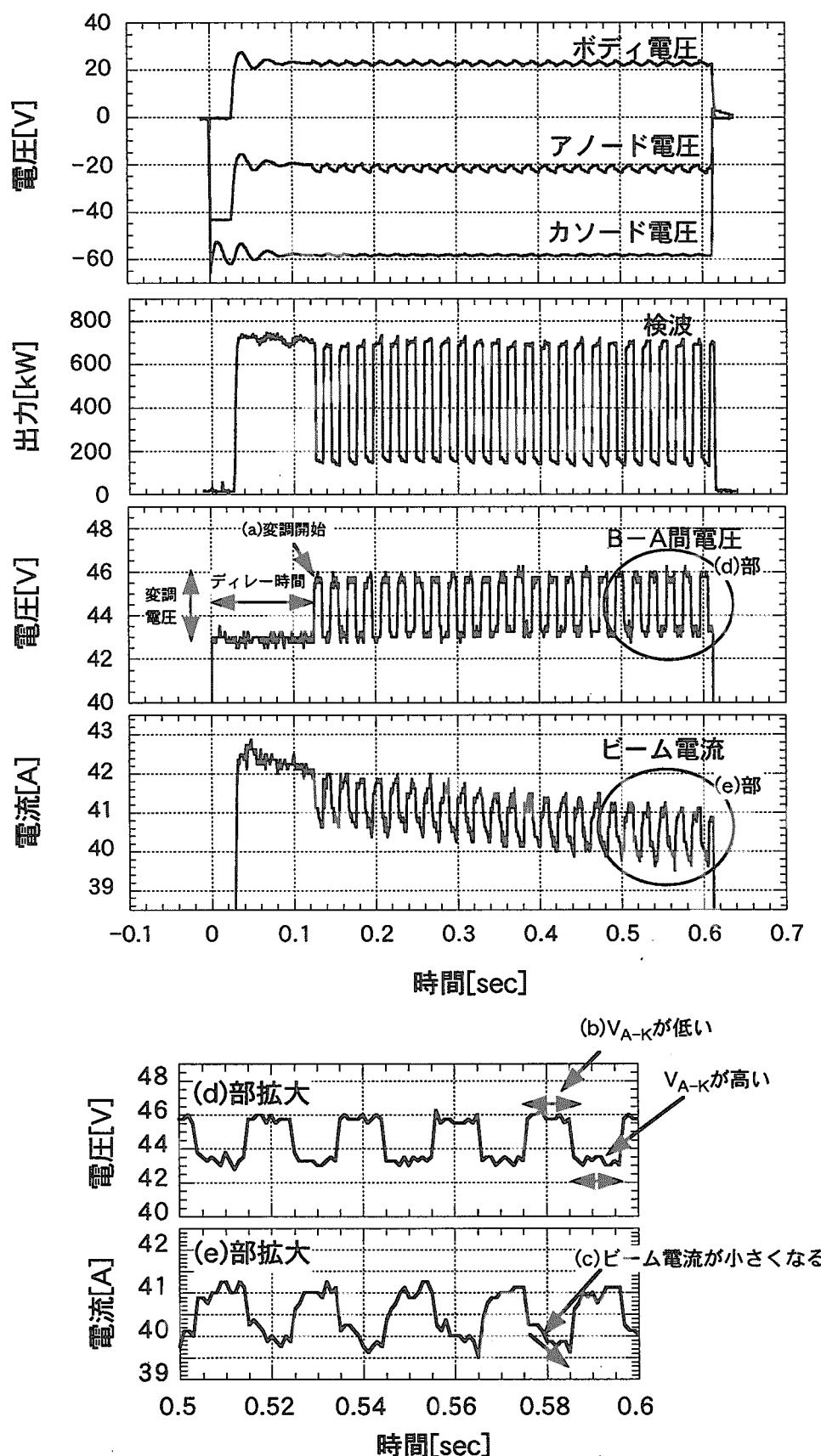


図 3.4 アノード電圧制御時の出力変調波形例

4. 運転上の注意点と問題点

JT-60U ECH装置用のジャイロトロンを使用して出力調整を行った結果、変調周波数12.2Hz、24.4Hz、48.8Hz、500Hzについて、安定した出力変調に成功した。しかし、いくつかの問題点も確認された。

4.1 ジャイロトロン放射器の温度上昇

ジャイロトロンは、空洞での主モード発振効率が低下すると、モード変換器を通過する電子ビームの質（エネルギー、分散）が良いままであるため、円筒形に近い形状の放射器入口付近で寄生発振を起こし、放射器を損傷する場合がある。このような寄生発振が発生した場合には、放射器での温度上昇が観測されることが報告されている⁷⁾。

ジャイロトロン内の寄生発振の発生量の目安として、モード変換器（放射器）の温度を測定することとした。図4.1、図4.2は、出力変調運転時のパルス幅と放射器入口部、および出口部の温度上昇の関係のグラフである。図中のパルス幅は、加速電源がONしているときの時間幅であり、高周波の発振は約30msec遅れて開始される。

パルス幅600msecの時の温度上昇（ ΔT ）は、変調していない時では放射器入口部が約4°Cであったのに対して、出力変調運転時は放射器入口部で約20°C、放射器出口で約10°Cであった。変調していない時の温度上昇は、放射器内表面での出力高周波のジュール損失に相当している。出力変調運転を行うことにより放射器の温度が上昇していることから、放射器入口付近で寄生発振が発生していると推定されるが、この程度の温度上昇では放射器の損傷までは到らず問題とならない。また、変調周波数が変化しても温度上昇は大きくは変わらない。これは、放射器の温度上昇は変調周波数に依存しないことを示しており、発振の休止時間に比例している。今後、出力変調を行うにあたり、放射器の温度上昇を測定することで寄生発振やパルス幅の限界を監視することができる。なお、放射器出口部の温度上昇は、寄生発振が起こっている放射器入口部からの熱伝導が原因と推測される。

4.2 ジャイロトロンの耐電圧劣化

ジャイロトロンでは、ビーム電流が存在しても発振しない状態を長い時間持続すると、寄生発振が発生することがあり、管内の加熱や耐電圧の劣化などを招く。最悪の場合にはジャ

イロトロンの破損に到り、ジャイロトロンにとっては危険な状態となる。

アノード電圧制御による発振の変調制御は、ビーム電流を連続で流している間に、意図的に発振のON／OFFを繰り返す状態である。したがって、ジャイロトロンにとって非常に過酷な制御といえる。

例えば、何らかの原因でA-K間に大きな電圧が加わってしまった場合に、ジャイロトロンの耐電圧が劣化してしまう。試験中にも、ジャイロトロンの出力変調を数多く行った後に、出力が低下する現象が見られた。すなわち、各電極の電圧、ヒータなどの設定を通常と同じにして運転しているのにもかかわらず、過電流が発生しやすくなつた。安定に発振させるためには出力を20%程度低くして運転しなければならなくなり、出力が回復するまでに数日の調整運転（コンディショニング）を要した。

4.3 発振停止検出回路の整備

ジャイロトロンには、電圧を加えても発振しない現象が現れたら、瞬時に電源を遮断する保護回路（発振停止検出回路）を設けている。この回路は、カソード電圧と高周波の検波波形をモニタし、電圧が加えられている最中に検波波形がモニタされなくなった場合に発振停止と判断し、電源を遮断してジャイロトロンを保護するものである。しかし、出力変調運転時は意図的に電圧を加えても発振しない時間帯（発振停止検出回路の検出レベル以下となる時間帯）があるため、保護回路の機能を停止して運転している。したがって、連続的に発振停止状態になっても保護が働かないという欠点がある。

ジャイロトロンのより一層の安全な運転を行うため、保護回路に変調信号を加え、異常事とそうでない時の切り分けができる発振停止検出回路の整備が早急に必要である。

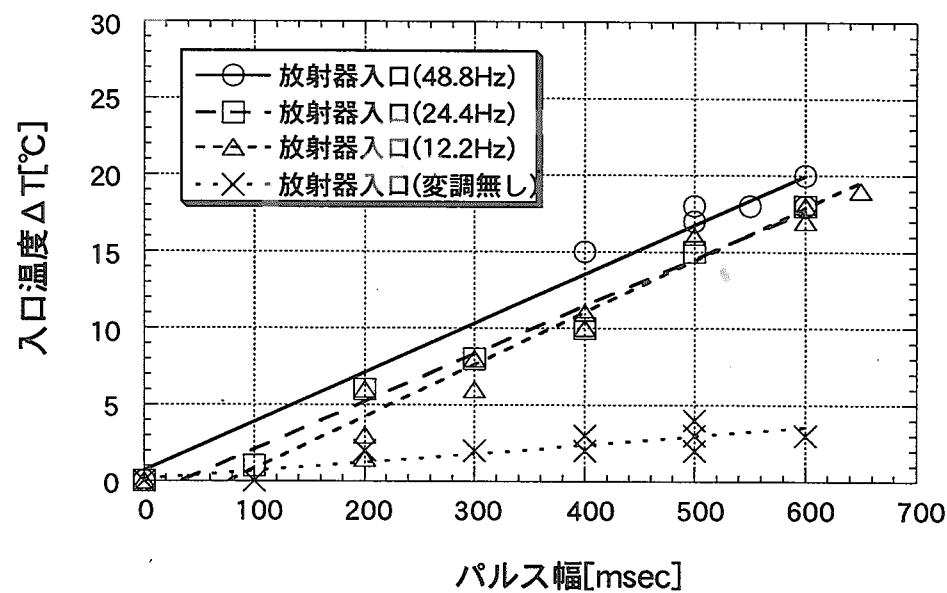


図 4.1 放射器入口部温度上昇

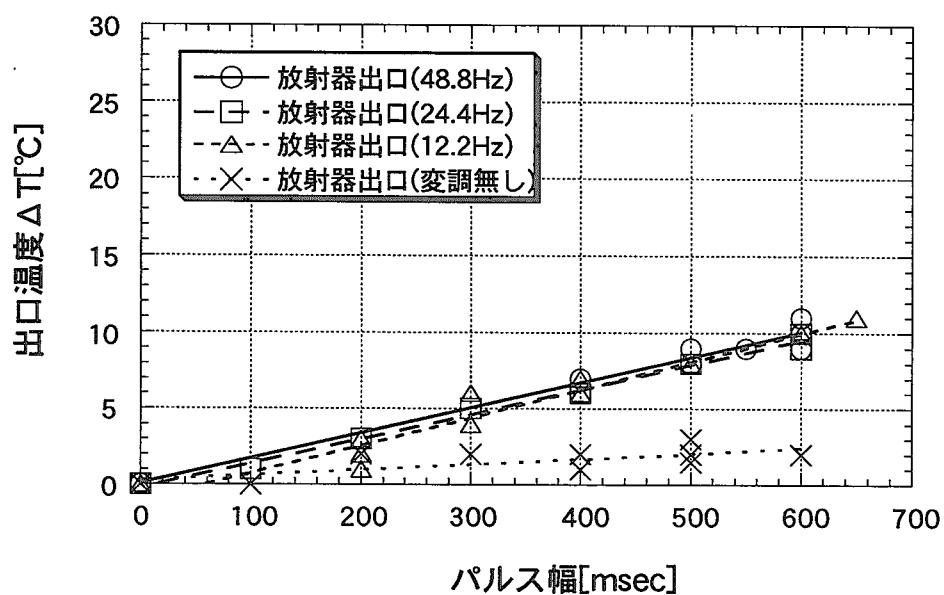


図 4.2 放射器出口部温度上昇

5. JT-60Uでの出力変調の実験への適用

ECRF入射は、プラズマ中の電子のみを加熱し、しかも局所的な共鳴加熱に優れている。そこで、JT-60Uにおいてジャイロトロンの出力変調運転を利用してパルス的に高周波を入射することにより、中性粒子（NBI）入射中のプラズマの熱拡散（閉じ込め性能）を系統的に評価する実験が行われた。

12.2Hzでパルス変調された約0.7MWの高周波をプラズマ中に入射したときの、電子温度の時間変化を図5.1に示す。プラズマのパラメータは、プラズマ電流=1MA、トロイダル磁場=3.7T、プラズマの大半径=3.32m、小半径=0.88m、ECH入射前のプラズマの線平均密度= $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ である。また、約13MWのNBI入射後、密度や内部エネルギーが一定になった3.5秒からECRFパワーが入射され、規格化半径 $\rho = 0.1$ の位置に幅 $\Delta \rho = 0.05$ の範囲で吸収されている。図のように、電子温度は高周波入射に同期して大きく変化している。高周波を入射すると、まず共鳴領域の中心部の電子温度が上昇し、時間的に遅れて周辺部へ熱伝導で伝わっていくのが見える。図5.2は、同じショットの電子温度振動の周波数スペクトルである。12Hz付近に見られる周波数のピークは、高周波出力の変調周波数と一致しているのが分かる。

このように、出力変調運転を用いて、JT-60Uプラズマの閉じ込め性能の評価に貢献できた。

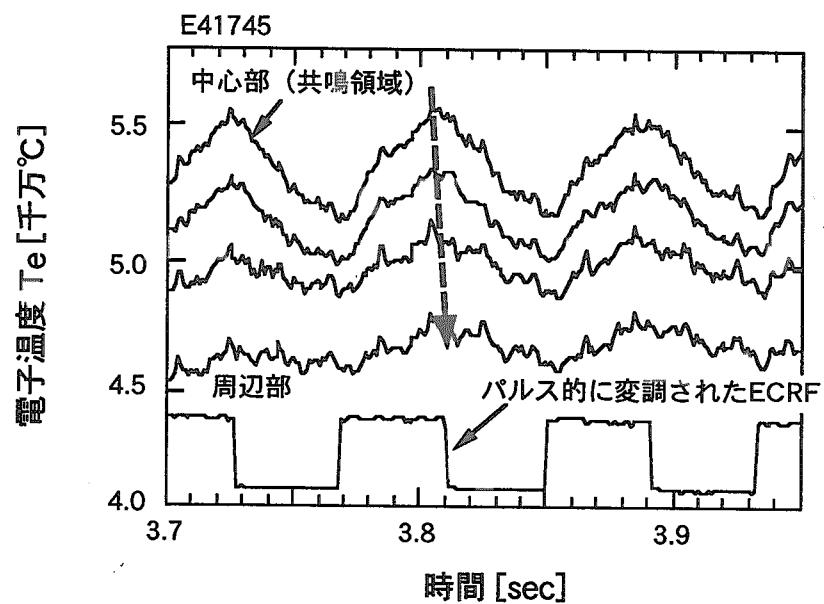


図 5.1 ECH入射時の電子温度

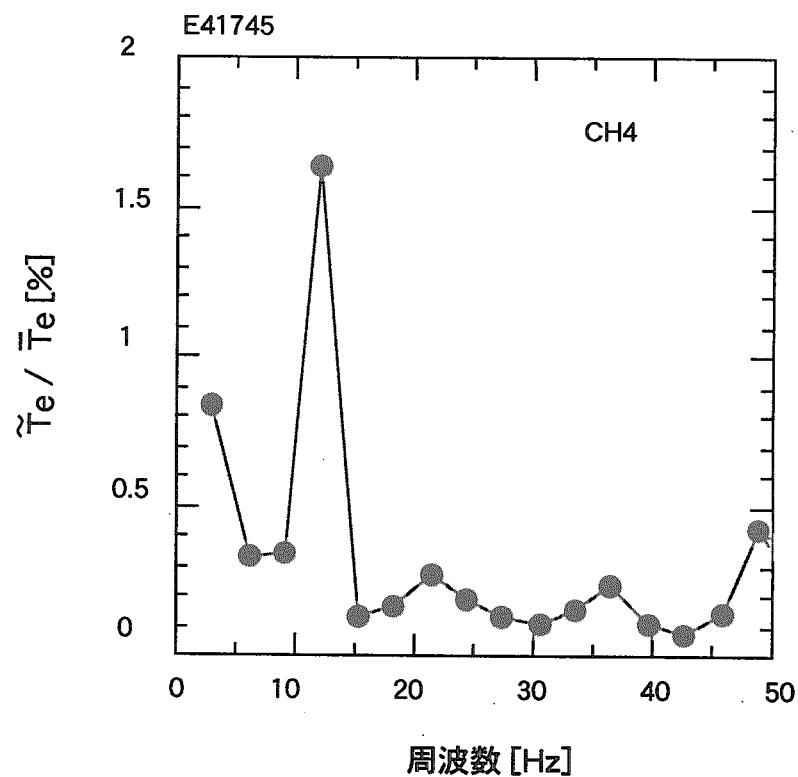


図 5.2 電子温度揺動の周波数スペクトル

6. まとめ

本報告書では、JT-60U ECH装置におけるジャイロトロンのアノード電圧制御による高周波出力の変調の方法、およびその結果をまとめた。

JT-60U ECH装置において、ジャイロトロンのアノード電極に加える電圧をパルス的に制御することにより、周波数12.2Hz、24.4Hz、48.8Hz、500Hzについて、変調度約80%の出力変調運転に成功し、以下の結果を得た。

- (1) 発振開始の数十ミリ秒後から変調を開始することにより、安定した出力変調ができる。
- (2) 放射器の温度上昇をモニタすることにより、寄生発振やパルス幅の限界を監視することができる。
- (3) 変調運転時にA-K間の過電圧が発生し管内での耐電圧が劣化すると、発振出力は低減され、回復には数日のコンディショニングを要する。
- (4) より安全な出力変調運転を行うため、発振停止検出回路の整備が必要である。

また、JT-60Uにおいてプラズマの熱伝導率を測定し閉じ込め性能を調べる実験に対して、アノード電圧制御による高周波出力のパルス変調運転が大いに貢献した。

今回の変調周波数は、12.2～500Hzの間であったが、さらにアノード電圧やディレー時間調整することにより、変調周波数幅を広げることが可能であると思われる。

謝　　辞

出力変調を進めるにあたり、多くの技術的支援を頂きました核融合装置試験部RF装置試験室員の方々、および核融合工学部加熱工学研究室員の方々に感謝いたします。また、終始御助言、御指導を頂きました藤井常幸核融合装置試験部RF装置試験室長、今井剛核融合工学部加熱工学研究室長に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) JT-60試験部・臨界プラズマ研究部・核融合研究部, JT-60設計報告書・第1編—RF加熱装置— (1988)
- 2) 池田佳隆, JAERI-Research 99-061, JT-60Uにおける110GHz局所加熱／電流駆動システムの高周波入射系の基本設計 (1999)
- 3) Y. Ikeda, et al., Fusion Science and Technology 42, 435 (2002)
- 4) M. Tsuneoka et al., Fusion Engineering and Design 36 (1997) 461-469
- 5) 恒岡まさき他, 電気学会論文誌D, 116巻4号, 平成8年, 497-498
- 6) 恒岡まさき他, 電気学会論文誌D, 115巻5号, 平成7年, 539-544
- 7) 春日井敦他, JAERI-Research 2002-027, 不要RFの抑制によるジャイロトロンの高性能化 (2002)

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·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·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·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	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバー	Wb	V·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	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·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
線量等量	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 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、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。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

換 算 表

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

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

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

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038	
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²	
6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 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 = 4.18605J (計量法)	
								= 4.184J (熱化学)	
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		= 4.1855J (15 °C)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		= 4.1868J (国際蒸気表)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		仕事率 1 PS(仏馬力)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		= 75 kgf·m/s	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		= 735.499W	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸			
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1			

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	
						1	100
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		0.01	1	2.58 × 10 ⁻⁴	1
	3.7 × 10 ¹⁰	1					

照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	3876		1	
	2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

電圧制御用ヒューリストンアーティファクトの開発と運転調査装置用ジャイロアーム

R100

古紙配合率10%
白色度70%再生紙を採用しています。