JAEA-Technology 2007-053



# JT-60U ECH 装置出力変調技術の開発

Development of the Power Modulation Technique in JT-60U ECH System

	寺門 正之	下野 貢 🎽	睪畠 正之	篠崎 信一
五十嵐 浩一	佐藤 文明	和田 健次	関 正美	森山 伸一

Masayuki TERAKADO, Mitsugu SHIMONO, Masayuki SAWAHATA Shinichi SHINOZAKI, Koichi IGARASHI, Fumiaki SATO Kenji WADA, Masami SEKI and Shinichi MORIYAMA

> 核融合研究開発部門 高周波加熱システム開発グループ

RF Heating Group Fusion Research and Development Directorate

September 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp/index.shtml</u>) より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行っ ております。

**〒319-1195** 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan

Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2007

## JT-60U ECH 装置出力変調技術の開発

日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門トカマクシステム技術開発ユニット

## 寺門 正之・下野 貢・澤畠 正之・篠崎 信一

五十嵐 浩一\*・佐藤 文明\*・和田 健次\*・関 正美+・森山 伸一

#### (2007年6月4日 受理)

臨界プラズマ試験装置(JT-60U)では、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、電子サイクロトロン加熱(ECH)装置の高周波出力を数十 Hz 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の ECH 装置の高周波出力変調は、高周波源であるジャイロトロンのアノード電圧を制 御することによりジャイロトロンの主電源である特高電力を遮断することなく出力を変調させる もので、変調周波数が 12.2Hz~500Hz において変調度が約 80%の出力変調運転を行っている。

しかし、今後予定されている JT-60 Super Advanced (JT-60SA) 計画において、電磁流体力 学(MHD) 的不安定性である新古典的テアリングモード(NTM) を抑制するための手法として、そ の周波数に合わせて変調入射する必要性が生ずる。そこで、ジャイロトロンの高周波出力を数 kHz 程度に変調する技術の検証を行った結果、周波数 3.5kHz で変調度が 84%の発振変調に成功した。 実用レベルのパルス幅としては、3.0kHz までの発振変調が可能である。次のステップとして、ア ノード分圧器基板の素子をより高速なものと交換して、さらに変調周波数を上げる試験を計画し ている。

那珂核融合研究所(駐在):〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

+ 先進プラズマ研究開発ユニット

※ 出向職員

#### JAEA-Technology 2007-053

## Development of the Power Modulation Technique in JT-60U ECH System

Masayuki TERAKADO, Mitsugu SHIMONO, Masayuki SAWAHATA, Shinichi SHINOZAKI, Koichi IGARASHI<sup>\*\*</sup>, Fumiaki SATO<sup>\*\*</sup>, Kenji WADA<sup>\*\*</sup>, Masami SEKI<sup>+</sup> and Shinichi MORIYAMA

> Division of Tokamak System Technology Fusion Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Naka-shi, Ibaraki-ken

> > (Received June 4, 2007)

Millimeter waves at 110 GHz of the electron cyclotron heating (ECH) system are sometimes injected to JT-60U plasmas with pulse modulation at dozens to hundreds of Hz in order to measure heat conductivity of the plasma to investigate plasma confinement. The JT-60U ECH system has a unique feature to realize the pulse modulation by controlling the anode voltage of the triode gyrotron without chopping the main acceleration voltage. The typical depth of the modulation is 80% at the modulation frequency range of 12.2 Hz to 500 Hz. However in the JT-60 super advanced (SA) project, higher modulation frequency of some kHz will be required to stabilize neoclassical tearing mode (NTM) as a magneto hydro dynamic (MHD) instability. The modulation techniques have been investigated and the modulation frequency of 3.5 kHz with the modulation depth of 84% has been achieved. The modulation frequency up to 3 kHz is available in the pulse widths of the practical operation. As a next step, replacement of the parts in the anode voltage divider circuit is planned to achieve higher modulation frequency.

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

<sup>+</sup> Division of Advanced Plasma Research

<sup>※</sup> Research Staff on Loan

# 目 次

1.	はじめ	12	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1	
2.	ECH 装置	<b>置</b> 用	電源	亰		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•		•	•	З	}
	2.1	110	)GHz	<u>」</u> 用	ジ	ヤ	イ		۲		ン	,	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	3	}
	2.2	ジー	ャイ		۲		ン	用的	電	源		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	5	;
	2.3	アノ	/_	・ド	分	圧	器		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	6	;
	2.4	分月	王基	板	の	動	作り	亰	理		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	8	3
	2.5	アノ	/_	۰ド	分	圧	器(	のf	制	御	方	法		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1 0	)
З.	出力変	調試	験		-	-			•			•	•	•	•	•					•	•	•	•			•	•	11	
	3.1	アノ	/_	・ド	変	調	ກ	亰	理		•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	11	
	3.2	回路	烙の	変	更		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	11	
	3.3	ジー	ャイ		۲		ン	の	調	整		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1 2	,
	3.4	変調	周調	]整		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1 2	,
	3.5	変詞	周度		•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	19	)
	3.6	各冒	電極	の	電	流		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2 2	,
	3.7	放	討器	の の	温	度.	Ŀ	昇		•	•	-	-	•	-	-	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2 2	) -
Д	今後の	運題	i		-																								24	L
••	4 1	经	辰僖	; iF	梌	H۲I	न	路																					24	L
	4 2	分下	∓其	듒板	ገ ጠ	動	伯子	□    東	<del>立</del>																				26	\$
	7.2	/ [/				<b>T</b> 7J	1,		×																				20	
5.	まとめ			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2 7	,
謝	辞	•						•	•			-	-	•	-	-				•	•	•	•		•	•	•	•	2 7	,
参考	文献	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	28	3

## Contents

1. Introduction	1
2. Power supply in ECH system	3
2.1 110GHz-gyrotron	3
2.2 Gyrotron power supply	<b>5</b>
2.3 Anode voltage divider circuit	6
2.4 Principle of the voltage divider circuit	8
2.5 Control method of anode voltage divider circuit	10
3. Test of power modulation	11
3.1 Principle of anode modulation	11
3.2 Modification of the circuit	11
3.3 Adjustment of gyrotron oscillation condition	12
3.4 Adjustment of modulation condition	12
3.5 Depth of the modulation	19
3.6 Currents on gyrotron electrode	22
3.7 Temperature rise at the radiator	22
4. Future plan	24
4.1 Detector of oscillation termination	24
4.2 Response of voltage divider circuit	26
5. Summary	27
Acknowledgement	27
References	28

## 1. はじめに

臨界プラズマ試験装置(JT-60U)では、周波数が 110GHz の電子サイクロトロン波(ECRF) 帯の電磁波(高周波(RF))を使用してプラズマ中の電子を共鳴させることで、プラズマの局所 的な加熱と電流駆動による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。<sup>1)2)</sup>

日本原子力研究開発機構では、これまで発振周波数が 100GHz 帯で発振出力が 1MW 級の大電 力電子管(ジャイロトロン)の開発を行ってきたが、多くの改良を重ねた結果、JT-60U 用として、 発振周波数 110GHz、発振出力 1MW の RF を出力することが出来るジャイロトロンを開発した。 JT-60U の ECH 装置は、そのジャイロトロンを4台使用しており、最大で 3MW/5 秒または 1.5MW/20 秒の RF を JT-60U のプラズマ中に入射することが出来る。

第1.1図に、JT-60U ECH 装置の概要図を示す。JT-60U ECH 装置は、ジャイロトロンに高電 圧を印加し大電流を供給する電源設備、ジャイロトロンとジャイロトロンに高磁場を供給する超 伝導コイルからなる大電力 RF 源、ジャイロトロンにて発生させた RF を内径 31.75mm、全長約 60m のコルゲート導波管で JT-60U 真空容器まで伝送する伝送系、伝送された RF を 2 枚のミラーで構 成されるアンテナでプラズマ中に入射する結合系、ジャイロトロンやコルゲート導波管類を冷却 する冷却設備、コルゲート導波管内を真空排気する真空排気設備、そしてこれらを制御する制御 設備から成る。

JT-60Uでは、プラズマの熱伝導率を評価し熱拡散(閉じ込め性能)を系統的に評価する実験 を行うために、ジャイロトロンの高周波出力を数十Hzから数百Hz程度に変調し、パルス的なECRF をプラズマ中に入射する実験を行ってきた<sup>3)</sup>。しかし、今後予定されているJT-60 Super Advanced (JT-60SA)計画において、プラズマの電磁流体力学(MHD)的不安定性を抑制するための手法と して、新古典的テアリングモード(NTM)の周波数に合わせてECRFを入射することが求められて いる。これは、プラズマ中にプラズマ電流が減少する部分が周期的に発生するため、その部分に 対してECRFを入射し、電流を流すことで安定化を狙うというものである。JT-60SAにおけるNTM の周波数は5kHz程度と推測されるため、ECH装置においても発振変調の周波数を数kHzまで高く するために、回路の改良と調整を行った。

本報告書は、JT-60U ECH 装置においてジャイロトロンの高周波出力を変調するにあたり、よ り高い周波数で変調するための変調技術についてまとめたものである。次章で、ECH 装置用電源 の概要について、第3章で出力変調試験について、第4章で今後の課題について述べ、第5章で 本報告のまとめを述べる。



第1.1図 JT6-U ECH 装置概要図

## 2. ECH 装置用電源

JT-60U ECH 装置の電源設備は、ジャイロトロンが安定に RF 発振し、かつ安全に動作するためのもので、数十キロボルトの高電圧で数十アンペアの大直流電流を安定して供給しなければならない。

#### 2.1 110GHz 用ジャイロトロン

ジャイロトロンは、内部が真空封じされた電子管の一種で、ミリ波帯の RF を発振すること が出来る。ジャイロトロンには、カソード電極(K)とコレクタ電極(C)を備えた2極管のもの と、カソード電極とコレクタ電極の間にアノード電極(A)を設けた3極管のものがある。JT-60U で使用している 110GHz ジャイロトロンは、カソード電極、アノード電極、コレクタ電極の3極 に加えて、コレクタ電極の下部側を絶縁して新たにボディ電極(B)を設けた Collector Potential Depression (CPD)法を採用し、高周波の発振効率の改善を図っている。

第2.1図に、ジャイロトロンの内部構造と電源給電図を示す。

ジャイロトロンの発振には、カソード電極から電子ビーム(コレクタ電流)を安定に引き出 すことが重要であり、通常はコレクタ電極とカソード電極(C-K)間に約90kVで約60Aという高 電圧の大電流を安定に供給する必要がある。しかし、CPD 法を採用したジャイロトロンはボディ 電極とカソード電極(B-K)間に約90kVで1A以下の電力を加えることで、C-K間に加える電圧を 約60kVと通常より30%以上小さくすることができ、それによりコレクタ電極とボディ電極(C-B) 間で電子ビームの減速されたエネルギーが回収され、より高効率の運転が可能となる。また、C-K 間に加えるメインの電圧変動がある程度大きくても、B-K 間に加える電圧の変動を小さくするこ とで電子ビームを安定に引き出すことが出来る。

ジャイロトロンのカソード電極部にはヒータが設置されており、ヒータに通電することでカ ソード電極が加熱され、そこへ高電圧を加えることで電子ビームが引き出される。カソード電極 から引き出された電子ビームは空洞共振器に入り、そこで電子サイクロトロン共振メーザーの原 理により RF が発振する。発振した RF は、準光学モード変換器、ミラー群で準光学モードに変換 されダイヤモンド製の真空窓より出力される。RF が発振された電子ビームは、コレクタまで到達 し電源に戻る。

空洞共振器の外側に位置する部分には、RF を発振するために必要となる強磁場を、最大で 4.5T まで励磁することが出来る超伝導コイル(SCM)が設置されている。

ジャイロトロンは、アノード電圧や SCM の磁場強度を変更することで電子のピッチ角(らせん運動の回転方向と進行方向の成分比)等を変化させ、発振調整をすることが出来る。



第2.1図 ジャイロトロンの内部構造と電源給電図

#### 2.2 ジャイロトロン用電源

第2.2図に、JT-60U ECH 装置の 110GHz ジャイロトロン用電源設備の概要図を示す。JT-60U 用 110GHz ジャイロトロンの電源は、主電源と加速電源から構成されている。さらに、加速電源 は、ボディ電源(BPS)とアノード分圧器を組み合わせている。主電源は C-K 間に接続され、ジ ャイロトロンに大電力を給電している。BPS は B-K 間に接続され、電子ビームの引き出しに使用 されている。同じく B-K 間に接続されたアノード分圧器にて、B-K 間の電圧を分圧してアノード 電極へ給電している。

ジャイロトロンに給電する-60kV/65A 定格の主電源は、専用のフライホイール付き発電機 (MG)を使用して発電し、そこで発電された交流 18kV の高電圧の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。

ジャイロトロンの発振には、主電源から給電される約 60A の大電流を高速で入り切りする必要がある。さらに、ジャイロトロン内で放電が発生した場合には、最大で 300A 近くなる電流を瞬時(約 10 $\mu$  sec 以下)に遮断する必要がある。これらを実現するスイッチとして、JT-60U の ECH 装置では Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) 素子を使用した IGBT スイッチを設けている。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 個直列に接続して、それらを同時に動作させることで、定格電圧 100kV、定格電流 100A、遮断電流 350A、動作時間 10 $\mu$  sec 以下(実測値 7 $\mu$  sec)を実現している。

BPS はジャイロトロンのカソード電極とボディ電極へ加速電圧を与えるための電源で、定格 出力電圧 DC100kV、定格出力電流 300mA、出力刻み 1kV、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る。



第2.2図 JT60U ECH 装置電源設備概要図

第2.3回に、ジャイロトロンの一般的な発振波形を示す。初めに、主電源で C-K 間に電圧 を加えてコレクタ電流が 30A〜40A まで引き出される。次に、加速電源で B-K 間に電圧を加える ことでコレクタ電流が 60A 近くまで引き上げられ RF が発振する。この時、カソード電圧は大き く振動しているが、加速電源が立ち上がってからの B-K 間の電圧は安定している。



第2.3図 ジャイロトロンの一般的な発振波形

#### 2.3 アノード分圧器

アノード分圧器は、アノード電極へ給電するためのものである。アノード分圧器は、B-K 間 に接続されツェナーダイオードにて B-K 間の電圧を分圧してアノード電極に給電している。第2. 4 図にアノード分圧器の全体写真を、第2.5 図にアノード分圧器のブロック図を示す。第2.4 図と第2.5 図に示すように、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 ら構成されている。アノード分圧器本体に取り付けられた分圧基板には、1枚あたりツェナー電 圧 200V のツェナーダイオードが5 個直列に取り付けられている。分圧基板は全部で80枚取り 付けられており、800kΩの抵抗器と直列に接続されている。さらに、抵抗器には 2200pF のコン デンサが並列に接続されている。

アノード電極への給電は、分圧基板と抵抗器の中間にある端子から行い、A-B 間が一定電圧 となるようにバイアスする。バイアスする電圧を変えるには、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いる。つまり、A-K 間の電圧は B-K 間の電圧から A-B 間の 電圧を引いた値となる。また、カソード電極の電圧は主電源の電圧に応じて変動するが、A-B 間 の電圧は BPS により安定に供給されているためジャイロトロンの発振には問題ない。なお、ジャ イロトロンでは、カソード電極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電極に 達し、ボディ電極へ流れ込む量は数 mA 以下と低く抑えられている。



アノード分圧器制御盤

アノード分圧器





第2.5図 アノード分圧器ブロック図

## 2.4 分圧基板の動作原理

第2.6図にアノード分圧器の回路図を示す。第2.6図に示すように、分圧基板1枚につき ツェナーダイオードが5個直列に接続されており、短絡するツェナーダイオードの数を変えるこ とで、分圧電圧を変更する仕組みとなっている。

分圧基板には、リモート制御機能付きのものとそうでないものとがある。リモート制御機能 付きの分圧基板は、ツェナーダイオードと並列にフォトカプラが接続されており、光受信モジュ ールが光信号を受信するとフォトカプラが動作しツェナーダイオードの両端を短絡する回路とな っている。リモート制御がないものは、ジャンパー線によりツェナーダイオードをジャンパーす ることで、分圧電圧を変更している。





## 2.5 アノード分圧器の制御方法

アノード分圧器は、20kV 分の設定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 分ずつ制御している。リモート制御の設定は、ECH 装置を制御しているシーケンサにて行 っている。シーケンサに A-B 間に対応する電圧値を入力すると、その値に応じた信号がシーケン サからアノード分圧器制御盤内のリモート制御器に8ビットのバイナリ方式で送られる。リモー ト制御器内で、レベル変換器、カウンタ、一致回路、シリアルー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信号変換され、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 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。変調機能は、リモート制御器に 0-5V の矩形波信号を入力すると、その信号に同期して分圧基板に送られる設定信号が設定 値と 10kV の間で変化する。つまり、あらかじめリモート制御にて変更したい電圧を設定して、 次に変調したい周波数の矩形波信号を入力すると、その矩形波信号に同期して設定値が変化する というものである。この時、アノード分圧器の電圧はシーケンサにより設定された電圧と 10kV の間で交互に変化する。

リモート制御できない 60kV 分(分圧基板60枚分)については、マニュアル操作で使用しない分圧基板を短絡することで出力されるアノード電圧を変更している。

ジャイロトロンの発振パラメータをスキャンするには、初めに適当なアノード電圧の設定を 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 御器を使用して、設定電圧が10kVの時に正常に発振しそれより数kV下げた時に発振が停止する ように電圧を設定し、変調させたい周波数の矩形波信号を入力するものである。

## 3. 出力変調試験

ジャイロトロンは、原理的には主電源の出力を変調することで、電子ビームをオン/オフさ せて発振を変調することが出来る。しかし、高電圧で大電流の主電源を高速で連続的に入り切り するスイッチを導入するためには、大きな改造が必要でありコストが懸かる。そこで、JT-60Uの ECH 装置ではアノード電極があるジャイロトロンを使用しているメッリットを生かし、アノード 電極の電圧を変調することにより電子ビームを引き出したまま発振を変調する方法を採用してい る。

#### 3.1 アノード変調の原理

ジャイロトロンは、C-K間に主電源を加えている状態でアノード電極に電圧(アノード電圧) を加えることで、電子ビームが正常に引き出され発振する。しかし、アノード電圧が多少変化し て発振条件から外れてしまうと発振が停止してしまう。アノード変調運転は、この特性を利用し てアノード電圧を変化させて意図的に発振条件から外すことで、ジャイロトロンの出力を変調し ている。

ただし、アノード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、電子ビームが増加し電子銃で放電が発生する可能性があるため、A-K 間の電圧が小さくなる ようにバイアス電圧を変化させて出力を変調している。

#### 3.2 回路の変更

アノード分圧器にはブリーダー抵抗とコンデンサが取り付けられている。ブリーダー抵抗は、 BPS からジャイロトロンに電流が供給された時の電圧降下を抑えるために設けられ、コンデンサ は BPS のリップルを抑える役目がある。しかし、コンデンサの容量があまり大きいと、発振変調 のためにアノード電圧を変えた時に、コンデンサに充放電する電流で BPS に取り付けられた過電 流の保護回路が動作してしまう。そのため、今回の発振調整では通常コンデンサの容量が 2200pF であるところを 1100pF に変更した。

また、ジャイロトロンは、カソード、アノードとボディの各電極に給電するために専用のソ ケットを設けているが、各電極間が接近しているため、ソケットを絶縁油の入ったオイルタンク 内に設置している。そして、オイルタンクの側面から特高同軸ケーブルを用いて電力を給電して いる。特高同軸ケーブルの心線を使用して電力を給電し、リターン線及びシース線は抵抗器を介 して接地している。抵抗器の値はリターン線が 50kΩ、シース線が 10kΩ である。

しかし、特高同軸ケーブルには静電容量があり、ジャイロトロン内の静電容量と合わせると 無視出来ない値となる。この静電容量もまた、BPS に取り付けられた過電流の保護回路が動作し やすくなってしまう原因となるため、急激な電流の変化を抑えるためにリターン線の抵抗器を 160kΩに、シース線の抵抗器を 50kΩに変更した。この抵抗器を大きくすると時定数が大きくな り変調周波数の制限になる可能性があるが、今回試験した周波数範囲では問題なかった。

#### 3.3 ジャイロトロンの調整

ジャイロトロンには、調整するパラメータとして、BPS 電圧、アノード分圧器電圧、ヒータ 電流、SCM キャビティコイル ( $B_c$ ) 電流、SCM バッキングコイル ( $B_B$ ) 電流、SCM ガンコイル ( $B_c$ ) 電流がある (それぞれの配置は第2.1図参照)。BPS 電圧とアノード分圧器電圧を設定すること で A-K 間の電圧 ( $V_{A-K}$ ) と A-B 間の電圧 ( $V_{A-B}$ ) が設定され、さらに、ヒータ電流を設定すること で電子ビームの電流 (コレクタ電流 ( $I_c$ )) が決定される。次に、SCM  $B_c$ 、SCM  $B_B$ 、SCM  $B_c$ の電流 値を調整することで磁場強度が変化し、最適な発振条件とすることが出来る。

通常の運転では、ジャイロトロンの出力が 1MW 程度となるように調整されているが、発振変 調運転では若干出力を下げた調整としている。これは、ジャイロトロンが発振停止から回復する ときに V<sub>A-K</sub>を通常より若干大きくなるように BPS 電圧とアノード分圧器電圧を調整する必要があ るためである。また、SCM の設定も発振時は発振しやすく、発振停止時は発振停止しやすい設定 としなければならず、より細密な調整が必要となるために、安定に発振させるためにはどうして も出力を下げる必要がある。第3.1表に、110GHz ジャイロトロンの一般的な設定値と 1.6kHz で の発振変調運転時の設定値(発振時)を示す。

設定項目	一般的な設定値	変調運転時の設定値(発振時)
BPS 電圧	82kV	82kV
アノード分圧器電圧	45.2kV	44. 2kV
ヒータ電流	1.88A	1.84A
SCM B <sub>C</sub> 電流	-103.65A	-103. 60A
SCM B <sub>B</sub> 電流	-0.53A	-0.26A
SCM B <sub>G</sub> 電流	0. 30A	0.30A

第3.1表 110GHz ジャイロトロンの一般的な設定値と変調運転時の設定値(発振時)

#### 3.4 変調調整

前回の調整では低い変調周波数を中心に調整し、500Hz 以下での変調に成功した。今回は、 周波数の高い方を中心に変調調整を行った。

変調周波数は、1.6kHz から開始した。変調信号のデューティを 70%とし、ヒータ電流、BPS 電圧、SCM 各電流を調整し、アノード分圧器電圧を 2.6kV 変化させた。また、パルスの立ち上り は発振が安定していないため、特高電圧を加えてから 130msec 程度遅らせて変調を開始すること により 300msec までの変調に成功した。第3.1 図はその時の発振波形、第3.2 図は変調部の拡 大波形である。第3.2 図に示すように、変調信号に同期してアノード電圧が変化し、RF が変調 されているのが分かる。なお、RF 信号はコルゲート導波管に設置された方向性結合器と検波器に てモニタしている。







第3.2図 1.6kHz 変調時の発振波形拡大図

発振変調運転においては、RFのオン/オフの時間を50%ずつとするには変調信号のデューティを調整する必要がある。これは、アノード分圧器分圧基板の0FFから0Nになる時と、0Nから0FFになる時の動作速度に違いがあるためである。

分圧基板単体での動作試験の波形を第3.3図に示す。第3.3図は、変調信号を3.33kHz と した時の分圧基板の出力電圧の波形である。変調信号が変化してから分圧基板の出力電圧が出力 されるまでの時間差は  $10 \mu$  sec 以下であるが、変調信号が変化してから出力されていた電圧が出 力されなくなるまでには  $120 \mu$  sec 程度を要している。この違いは、分圧基板にて使用している フォトカプラの特性に依存していると思われる。



第3.3図 分圧基板単体での動作波形

発振変調運転において、1.6kHz からさらに周波数を上げる調整を行い、2.0kHz/500msec、 2.5kHz/400msec、3.0kHz/400msecの発振調整に成功した。また、変調幅が 60msec と短いなが ら、3.5kHz の発振調整にも成功した。それぞれの発振変調運転時の設定を第3.2表に示す。第 3.2表の各周波数における設定値の違いは僅かであるが、その違いが発振に大きく影響する。 調整は、発振時間と発振停止時間の幅が出来るだけ同じとなるように、変調信号のデューティを 変えながら行った。

第3.4図に、周波数3.0kHz で変調した時の I<sub>c</sub>と RF の波形を示す。また、第3.5図、第3. 6図、第3.7図、第3.8図に、それぞれ変調周波数が2.0kHz、2.5kHz、3.0kHz、3.5kHz の時 の拡大波形を示す。発振幅にはバラつきがあるものの、変調周波数が2.0kHz の時に比べると、 変調周波数が3.0kHz の方が、パルス前半とパルス後半での発振幅の違いが大きくなってくる。 発振は、パルスの後半はパルスの前半に比べて I<sub>c</sub>が減少する(第3.4図参照)ため発振条件が 狭くなりその分発振幅も狭くなるが、周波数が高くなると一つのパルスの幅が短くなるため、パ ルスの立ち上りと立ち下がりが同じように短くなっても、周波数の高い方が発振停止時間のパル ス全体に占める割合が多くなる。さらに、周波数が高くなると発振時間帯に発振させ、発振停止 時間帯に発振を停止させる調整がより難しくなり、発振幅の違いか目立つようになる。また、周 波数が高くなると発振時間と発振停止時間の幅を同じとなるように変調信号のデューティを高く しても、分圧基板の動作速度の限界となり調整しきれなくなってくる。現状の分圧基板のままで は、3.5kHz 以上の周波数での発振変調は難しい。

設定項目	2. 0kHz 変調の 設定	2. 5kHz 変調の 設定	3. 0kHz 変調の 設定	3.5kHz 変調の 設定
BPS 電圧	81kV	81kV	81kV	81kV
アノード分圧器電圧 (発振時)	44. 0kV	44. 0kV	44.2kV	44. 2kV
アノード分圧器電圧 (発振停止時)	46.6kV	46. 6kV	46. 4kV	46.4kV
ヒータ電流	1.85A	1.85A	1.85A	1.85A
SCM Bc 電流	-103.5A	-103.5A	-103.45A	-103. 45A
SCM B <sub>B</sub> 電流	-0.26A	-0.26A	-0.26A	-0.26A
SCM B <sub>G</sub> 電流	0.30A	0. 30A	0.30A	0.30A
デューティ	68%	65%	77%	80%

第3.2表 変調運転時の設定



第3.4図 3.0kHz 変調時のコレクタ電流と RF 波形



パルス後半は、パルス前半と比べると約 20 µ sec 程度発振幅が短くなっている。

第3.5図 2.0kHz 変調時の発振波形



パルス後半は、パルス前半と比べると 30 μ sec 程度発振幅が短くなっている。 第3.6図 2.5kHz 変調時の発振波形



パルス後半は、パルス前半と比べると約50μ sec 程度発振幅が短くなっている。 第3.7図 3.0kHz 変調時の発振波形



第3.8図 3.5kHz 変調時の発振波形

#### 3.5 変調度

発振変調時の、高周波出力の高いところと低いところの比を変調度(m)で表すことが出来る。理想的には変調度が1となるように発振変調運転をすることが望ましいが、アノード制御による発振変調では難しい。

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により推定することが出来る。しかし、変調周波数が高くなると、パルス前半と後半でデューティが変化してしまう。また、ある程度のパルス幅がなければ温度上昇が小さく、正確な測定が難しくなってくる。

そこで、変調していない時の設定と、変調によって出力が低下した時の設定の2つの設定に おいて、短パルスダミーロードを使用してパワー測定を行い、その割合から変調度を求めること とした。短パルスダミーロードは 1MW の RF を 200msec まで入射することが可能で、入射された RF は内部で散乱を繰り返し全て熱として吸収され、冷却水にて除熱される構造となっている。そ のため、冷却水の温度上昇から吸収された電力を計算することが出来る。その出力から、伝送損 失を引いた値がジャイロトロンの出力となる。

変調していない時のパワー測定の結果を第3.3表に、変調により出力が低下している時の パラメータで出力を出し続けた時のパワー測定の結果を第3.4表に示す。変調していない時の 出力は約800kWであったのに対し、変調によって低下した出力は約127kWであった、よって、変 調度は約84%となる。



第3.3表 変調していない時のパワー測定表

【備考・注意事項】

計算式 P = 4.1855×Q×(dT/dV)×((∫ΔVdt)/(パルス幅-平均無発振幅))/整合器効率

_					
	流量Q	[cc/min]	アンプGAIN	温度電圧係数 dT/dV [deg/V]	ţ
ſ		7000	200	12. 5	
	流量(	) [cc/s]	整合器効率 [%]		
		116.67	0. 92		



	3.5						60	
	3. 0	-	- ΔS - Δh			-	50	
	2. 5				<b>F</b>		40	
	2. 0				/			
∆S [V·s]				Ħ		-	30	Δh [mV]
	1.5						20	
	0.5					-	10	
	0.0							
	0.0 0	50	0 10	0 15	0 20	0 25	0	
			パル	レス幅 [mse	ec]			

無発振幅	∫∆Vdt [ms]	出力	P [kW]			
43.	31	126	<b>6</b> . 6			
無発振幅	∆h [ms]	効率[%]				
39.	47	3. 21				
平均無発信	幅 TO [ms]					
41.	39					
0 · · · · <b>· · ·</b>		0 . – I <b>–</b>				
バルス幅	レコーダ出力	バルス幅	レコーダ出力			
∆tp [ms]	∫∆Vdt [Vs]	∆tp [ms]	∆h [mV]			
100	1.0733	100	20.000			
130	1. 7135	130	31. 250			
160	2. 3775	160	41.875			
200	3. 0255	200	54.063			
0.01965	-0.8511	0. 34062	-13. 444			
Vbk (kV)	Ic (A)	Vak (kV)	la (mA)			
81.25	48. 50	36.00	2.00			
Vb (kV)	Va (kV)	Vk (kV)	lb (mA)			
23. 20	-22. 20	-58. 20	0.00			
SCM (BC)	103. 40	SCM (BG)	0. 30			
SCM (BB)	-0. 26					
アノード固定	7/-ドリ <del>Ⴈ</del> -ト 1	7/-ドリ <del>エ</del> -ト 2	7/-ŀ` (kV)			
41.0	5.0	0.2	46. 2			
BPS (kV)	81					
ヒータSV (A)	1. 85	ヒータPV (A)	1.83			

【備考・注意事項】

計算式 P = 4.1855×Q×(dT/dV)×((∫ ΔVdt)/(パルス幅-平均無発振幅))/整合器効率

#### 3.6 各電極の電流

ジャイロトロンは、アノード電極に流入する電流(アノード電流)とボディ電極に流入する 電流(ボディ電流)が、連続して上昇しないように運転している。これは、流入する電流が大き くなると電極間での放電などの原因となり、ジャイロトロンが損傷する恐れがある。

発振変調運転では、通常の発振状態ではない条件で運転するため、各電極の電流にも普段以 上の注意が必要である。第3.9図は、変調周波数1.6kHz での発振変調運転時のアノード電流と ボディ電流の波形である。両電流ともに、連続した電流(帯状に見える)は 0A 近辺で安定して おり問題ない。スパイク状の電流は、A-K 間の電圧の変化に同期して、電圧が変化した瞬間(約 50μ sec の間)一時的に大きく流れているが、連続していないので問題ない。



第3.9図 変調周波数1.6kHzによる発振変調運転時のアノード電流とボディ電流の波形

#### 3.7 放射器の温度上昇

パルス伸長の制限になっているものの一つに、ジャイロトロン内の放射器(モード変換器) の温度上昇がある。放射器の温度上昇の原因の一つは、ジャイロトロン内の寄生発振である。こ れは、空洞での主モード発振効率が低下すると、放射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し温度が上昇する ものである。温度が上昇したままで放置すると、最悪の場合放射器の変形や破損につながる恐れ があるため、目安として温度の上昇が120℃を越えない範囲で運転している。 発振変調運転は、設定をわざと発振条件からずらして発振を停止させているため、通常の運転よりかなり放射器の温度上昇が激しい。第3.10図は、通常の運転と1.6kHz で発振変調運転した時の放射器出口部の温度上昇の比較である。第3.10図に示すように、通常運転時に比べると変調運転時は温度が急激に上昇しているのが分かる。しかし、最適な発振調整を行うことによりある程度は温度上昇を抑えることが出来る。第3.11図は、2.0kHz で発振変調運転した時の放射器の温度上昇である。第3.11図に示すように、始めは変調幅が 400msec の時の温度上昇が 80℃を超えていたが、最適な発振調整を行うことにより同じ変調幅での温度上昇を約 70℃ と、10℃以上抑えることが出来た。しかし、発振幅が 500msec での温度上昇は約 90℃で、まだ上昇傾向にあるため、途中で飽和すれば問題ないが、これ以上伸長する場合は注意が必要である。 ただし、現在では放射器の構造を改良することで、ある程度温度上昇を抑えることが出来ること



第3.10図 発振変調運転の有無による放射器出口部の温度上昇の比較



第3.11図 発振変調運転時における、発振調整前と発振調整後の 放射器出口部の温度上昇の比較

## 4. 今後の課題

変調調整を行った結果、周波数 3.5kHz までの変調運転に成功した。しかし、問題点も明らかになった。今後の課題を以下に示す。

#### 4.1 発振停止検出回路

ジャイロトロンは、特高電圧を加えているにもかかわらず RF が発振しない無発振状態が長 く続くと、コレクタに大きなダメージを受ける。そのため、通常のジャイロトロンの運転には発 振停止検出回路を設けている。発振停止検出回路は、ジャイロトロンに特高電圧を加えているに もかかわらず何らかの原因で発振が停止した場合に、特高電圧を遮断する回路である。

しかし、アノード変調は意図的にジャイロトロンを発振停止状態にしているため、既設の発振停止検出回路は使用出来ない。そこで、新たにアノード変調に対応した発振停止検出回路を製作する必要があるが、変調周波数は数Hzから数kHzと幅があるため、全周波数帯をカバーする発振停止回路を製作するのは非常に難しい。

変調周波数が低い範囲では、変調信号と発振停止信号(RFの反転信号)をモニタし、両者の 信号を比較する方式が有効ある。第4.1図に、発振変調周波数が低い時の発振停止検出回路タ イムチャート図を示す。両者の信号を比較し、RFが発振されるべき時間帯で発振停止信号が検出 されれば発振停止と判断し特高電圧を遮断する。この場合、検出時間は1msec程度で十分である。 これは、検出速度をあまり速くするとノイズなどに敏感になり誤動作の原因となるためである。 また、1msec程度であれば無発振時間が持続してもジャイロトロンにはほとんどダメージが無い。 しかし、変調周波数が高くなると1パルス当たりの発振時間が短くなるため、検出時間を早くす る必要がある。例えば、変調周波数が2kHzでは1パルス当たりの発振時間が約 0.25msecとなる ため、検出時間も数+μsec程度にする必要がある。しかし、第3.5図、第3.6図、第3.7図 でも分かるように、変調信号と発振波形には数+μsecの時間差があるため、不感時間帯を設け るか感度を鈍くする必要があるが、発振時間帯が短くなると現実的には困難になってくる。

周波数が高い時は、変調信号と発振停止信号をカウントし、その回数の差が或る回数を越え た場合には正常に発振していないとして特高電圧を遮断する方式が有効である。第4.2図に、 発振変調周波数が高い時の発振停止検出回路タイムチャート図を示す。しかし、この方法は変調 周波数が低い場合には検出に時間がかかる。例えば、変調周波数が10Hz の時は1パルス当たり の発振時間が約50msec と長いためカウントの差が生じてから遮断しても最低50msec 以上必要と なり、遮断時間がかなり遅くなってしまう。

そこで、全周波数帯域をカバーするために2つの回路を適切な周波数で切換えることで対応 することが望ましい。

ジャイロトロンを安全に運転するためにも、この発振停止検出回路の整備が必要である。



第4.1図 発振変調周波数が低い時の発振停止検出回路タイムチャート



第4.2図 発振変調周波数が高い時の発振停止検出回路タイムチャート

## 4.2 分圧基板の動作速度

既存の装置のままでは、変調周波数は 3.5kHz が限界である。その原因の一つは分圧基板の 動作速度である。変調基板の動作速度は、第3.3図に示したように変調信号が変化してから出 力されていた電圧が出力されなくなるまでの時間は 120 µ sec を要する。この時間は周波数の高 い変調を行う上での制限となる。つまり、変調信号のデューティが 50%とすると、周波数を 4.16kHz より高い変調は出来ないことになる。計算上はデューティの調整で多少は高くすること も可能であるが、あまり期待は出来ない。

この動作速度は、基板にて使用している素子(フォトカプラ)の動作速度に依存している可 能性が高いので、周波数を高くするためには、動作速度の速い部品の選定が必要である。

## 5. まとめ

本報告書は、JT-60U ECH 装置のアノード電圧制御を用いたジャイロトロンの高周波出力の変 調運転において、その変調周波数を数 kHz 程度まで高くするために行った調整や、技術検証の結 果をまとめたものである。

ジャイロトロンの変調周波数を高くするために、電源回路を変更した。変更内容は、アノー ド分圧器のコンデンサ容量の変更と、特高同軸ケーブルのリターン部とシース部の抵抗器の変更 である。回路変更の目的は、変調周波数に同期してアノード電圧が変化する時の充放電電流を少 なくするためである。

発振変調の調整運転では、BPS 電圧、アノード分圧器電圧、ヒータ電流、SCM B<sub>c</sub>電流、SCM B<sub>b</sub> 電流、SCM B<sub>c</sub>電流を細かく調整した。また、RF のデューティを 50%にするためには、変調信号の デューティを調整する必要があった。原因は、分圧基板の電圧の立上りと立下りの動作時間に違 いがあるためである。さらに、調整中は、各電極の電流やジャイロトロン内の放射器温度に注意 を払いながら運転した。以上のような調整運転を行い、以下の結果を得た。

- (1) 変調周波数 1.6kHz/変調幅 300msec、2.0kHz/500msec、2.5kHz/400msec、3.0kHz/
   400msec、3.5kHz/60msecの出力変調に成功した。
- (2)発振変調運転の変調度は、約84%であった。

今回の発振変調調整では、既存の装置のままでの調整であったため変調周波数は 3.5kHz が 限界であったが、アノード分圧基板内の素子の高速化等を行うことによりさらに周波数を上げる ことは可能であると思われる。また、ジャイロトロン内外の浮遊容量を調査し、小さくする対策 も必要になる。

さらに、定常的に発振変調運転を行う場合は、変調周波数 1Hz~5kHz 程度をカバー出来る発振停止検出回路の整備が必要である。

#### 謝 辞

発振変調運転を行うにあたり、多くの技術的支援を頂きましたトカマクシステム技術開発ユ ニット高周波加熱システム開発グループ員の方々に感謝致します。また、終始御助言、御指導を 頂きました藤井常幸トカマクシステム技術開発ユニット高周波加熱システム開発グループリーダ ーに厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 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)
- 2) Y. Ikeda, et al., Fusion Science and Technology 42, 435 (2002)
- 3) 寺門正之, JAERI-Tech 2003-053, 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)

表1. SI 基本単位								
其木-		SI	基	本	単位			
25/ <del>1</del> * 1		名	称		記号			
長	Q	メ	_	F	ル	m		
質	量	キ	ロク	ブラ	$\mathcal{L}$	kg		
時	間		耟	少		S		
電	流	P	$\boldsymbol{\succ}$	$\sim$	$\mathcal{P}$	А		
熱力学	昷度	ケ	ル	ビ	$\boldsymbol{\mathcal{V}}$	Κ		
物質	量	モ			ル	mol		
光	度	力	$\boldsymbol{\mathcal{V}}$	デ	ラ	cd		

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の
-------------------------

如去量	SI 基本単位	
和业里	名称	記号
面 積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体 積	立法メートル	m <sup>3</sup>
速 さ , 速 度	メートル毎秒	m/s
加 速 度	メートル毎秒毎秒	$m/s^2$
波 数	毎 メ ー ト ル	m-1
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	$kg/m^3$
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	$mo1/m^3$
輝 度	カンデラ毎平方メートル	$cd/m^2$
屈 折 率	(数 の) 1	1

表 5. SI 接頭語 乗数 接頭語 記号 乗数 接頭語 記号  $10^{24}$ V  $10^{-1}$ d  $10^{21}$ ゼ Ą Ζ  $10^{-2}$ セ 2 с Ŧ  $10^{18}$ サ  $10^{-3}$ Т カ Е 1 IJ m  $10^{15}$ タ Р  $10^{-6}$ マイ クロ μ 10-9  $10^{12}$ テ ラ Т ナ n 10<sup>9</sup> ギ ガ G  $10^{-12}$ Ľ р  $10^{-15}$ × ガ フェム  $10^{6}$ М f  $10^{3}$ 丰 k  $10^{-18}$ 7 а  $10^2$ ク  $10^{-21}$ ゼ ブ ŀ h z

## 表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

	SI 組立単位							
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による				
	<ul> <li>()</li> </ul>	10.0	表し方	表し方				
半 面 角	ラジアン	rad		$m \cdot m^{-1} = 1^{(0)}$				
立 体 角	I ステラジアン <sup>(a)</sup>	$sr^{(c)}$		$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$				
周 波 数	、ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>				
力	ニュートン	Ν		m•kg•s <sup>-2</sup>				
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	$N/m^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$				
エネルギー,仕事,熱量	ビジュール	J	N•m	m <sup>2</sup> • kg • s <sup>-2</sup>				
工 率 , 放射 東	マット	W	J/s	m <sup>2</sup> • kg • s <sup>-3</sup>				
電荷, 電気量	クーロン	С		s•A				
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$				
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$				
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot \Lambda^{-2}$				
コンダクタンフ	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$				
磁床	[ウ エ ー バ	Wb	V•s	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$				
磁東密度	テスラ	Т	$Wb/m^2$	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$				
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$				
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C		K				
光	ローメン	1 m	$cd \cdot sr^{(c)}$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot cd = cd$				
照度	ルクス	lx	$1 \text{m/m}^2$	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$				
(放射性核種の) 放射龍	ベクレル	Bq		s <sup>-1</sup>				
吸収線量, 質量エネル	J V X	Gv	τ/kα	m <sup>2</sup> · c <sup>-2</sup>				
ギー分与, カーマ		U y	J/ng	m · 5				
線量当量,周辺線量当								
量,方向性線量当量, 個	シーベルト	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> • s <sup>-2</sup>				
人線重当重,組織線重当								

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号"1"は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m℃のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

知力量	SI 組立単位				
粗立里	名称	記号	SI 基本単位による表し方		
粘	度パスカル 秒	Pa•s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$		
力のモーメン	トニュートンメートル	N•m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$		
表 面 張 二	カニュートン毎メートル	N/m	kg • s <sup>-2</sup>		
角 速 /	夏ラ ジ ア ン 毎 秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$		
角 加 速 』	夏 ラ ジ ア ン 毎 平 方 秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$		
熱流密度, 放射照 [	<b>度</b> ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg · s <sup>-3</sup>		
熱容量,エントロピー	ージュール毎ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$		
質量熱容量(比熱容量)	、ジュール毎キログラム	T/(1 IZ)	2 -21		
質量エントロピー	- 毎ケルビン	J/ (Kg • K)	m"•s"•K"		
質量エネルギー		т /1	2 -2 -2 -2		
(比エネルギー)	シュール母イログラム	J/Kg	m"•s"•K"		
劫 仁 道 。		W/(m + V)	1 -3 v-1		
	<sup>#</sup> ルビン	₩/ (Ш•K)	m•kg•s•k		
休蒔エネルギー	ジュール毎立方メート	т /3	m <sup>-1</sup> , 1, m , m <sup>-2</sup>		
平頂エイルイ	ル	ј/ш	m • kg • s		
電界の強さ	さボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$		
休 積 雷 7	<sub>祟</sub> クーロン毎立方メート	$C/m^3$	m <sup>-3</sup> • • • •		
叶 頂 电 1	N	0/ш	m · S·A		
雪雪灰(	クーロン毎平方メート	$C/m^2$	m <sup>-2</sup> • • • •		
	" µ	0/ш	m · S·A		
誘 電 音	氧ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$		
透磁	率ヘンリー毎メートル	H/m	$\mathbf{m} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-2} \cdot \mathbf{A}^{-2}$		
モルエネルギー	- ジュール 毎 モル	J/mo1	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mo1^{-1}$		
モルエントロピー	, ジュール毎モル毎ケル	$I/(mol \cdot K)$	$m^2 + kg + g^{-2} + W^{-1} + m g^{-1}$		
モル熱容	重ビン	J/ (mor n/			
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> • s • A		
吸 収 線 量	軽グレイ 毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$		
放 射 強 !	更ワット毎ステラジアン	W/sr	$\mathbf{m}^{*} \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3} = \mathbf{m}^{2} \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{s}^{-3}$		
放 射 輝	g 「ワット毎平方メートル」 毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr)$	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$		

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

 $10^{1}$ 

 $10^{-24}$ 

カ

Ξ

名称         記号         SI 単位による値           分         min         1 min=60s           時         h         1h=600 min=3600 s           日         d         1 d=24 h=86400 s           度         °         1° = ( $\pi$ /180) rad           分         '         1' = (1/60)° = ( $\pi$ /10800) rad           秒         "         1' = (1/60)° = ( $\pi$ /648000) rad           リットル         1、L         11=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> トン         t         t=t=10 <sup>3</sup> kg           ネーバ         Np         Np=1           ベル         B         1B=(1/2) ln10 (Np)						
分         min         l min=60s           時         h         lh=60 min=3600 s           日         d         l d=24 h=86400 s           度         °         l°=( $\pi$ /1800 rad           分         '         i°=( $\pi$ /1800 'rad           分         '         i'=(1/60)°=( $\pi$ /10800) rad           沙         トル         1、L           トン         t, L=10 $^3$ kg           ネーバ         Np           NP=1           ベル         B           1B=(1/2) ln10 (Np)	名称	記号	SI 単位による値			
時         h         1h =60 min=3600 s           日         d         1 d=24 h=86400 s           度         °         1° = (π/180) rad           分         '         1' = (1/60) ° = (π/1800) rad           秒         "         "           リットル         1、L         11=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> トン         t         tt=10 <sup>3</sup> kg           ボーパ         Np         1Np=1           ベル         B         1B=(1/2) ln10 (Np)	分	min	1 min=60s			
日 d $1 d=24 h=86400 s$ 度 $^{\circ}$ $1^{\circ} = (\pi/180) rad$ 分 $^{\circ}$ $1' = (1/60)^{\circ} = (\pi/1800) rad$ 秒 $^{\circ}$ $1' = (1/60)^{\circ} = (\pi/18000) rad$ $1' = (1/60)^{\circ} = (\pi/16100) rad$ $1' = (1/60)^{\circ} = (\pi/161000) rad$ $1 = 10^{3} kg$ $^{\circ}$ $^{\circ}$	時	h	1h =60 min=3600 s			
度 ° $l^{\circ} = (\pi/180) \text{ rad}$ 分 " $l' = (1/60)^{\circ} = (\pi/10800) \text{ rad}$ 秒 " $l'' = (1/60)^{\circ} = (\pi/10800) \text{ rad}$ リットル 1、 L $l^{\circ} = (\pi/618000) \text{ rad}$ トン t $l^{\circ} = l^{\circ} \frac{1}{3} \log^{\circ} 1$	日	d	1 d=24 h=86400 s			
分 ', l' = (1/60)° = ( $\pi$ /10800) rad 形 '' = (1/60)° = ( $\pi$ /10800) rad 1" = (1/60)° = ( $\pi$ /648000) rad リットル 1, L 11=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> トン t 11=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> トン Np 1Np=1 ベル B 1B=(1/2) ln10 (Np)	度	0	1° =(π/180) rad			
秋 " $1" = (1/60)' = (\pi/648000)$ rad リットル 1、L L $11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{ m}^3$ トン t $1t=10^3 \text{ kg}$ ホーバ Np B $1B=(1/2) \ln 10 \text{ (Np)}$	分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad			
	秒	"	1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad			
トン t $1t=10^{3}$ kg ネーバ Np $1Np=1$ ベル B $1B=(1/2) \ln 10$ (Np)	リットル	1. L	$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$			
ネーバ Np $1Np=1$ ベル B $1B=(1/2) \ln 10 (Np)$	トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg			
ベル B 1B=(1/2)1n10(Np)	ネーパ	Np	1Np=1			
	ベル	В	$1B=(1/2)\ln 10(Np)$			

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で

S1単位で表される数値か実験的に得られるもの					
名称	記号	SI 単位であらわされる数値			
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 <sup>-19</sup> J			
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 <sup>-27</sup> kg			
天 文 単 位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 <sup>11</sup> m			

表8.国際単位系に属さないが国際単位系と

(所用されるての他の単位					
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値	
海		里		1 海里=1852m	
1	ツ	ŀ		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s	
ア		N	а	$1 a=1 dam^2=10^2 m^2$	
$\sim$ :	ウター	N	ha	$1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{m}^2$	
バ	-	N	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa	
オン	グストロ・	-4	Å	1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m	
バ	-	$\sim$	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>	

事 0 固右のを称を今ねCCS組立単位

衣 5. 回有の石がを音び003組立単位							
	名称		記号	SI 単位であらわされる数値			
I.	N	グ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J			
ダ	イ	$\sim$	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N			
ポ	P	ズ	Р	1 P=1 dyn • s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa • s			
ス	トーク	ス	St	1 St =1 cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s			
ガ	ウ	ス	G	1 G ^10 <sup>-4</sup> T			
I	ルステッ	F	0e	1 Oe ^(1000/4π)A/m			
$\checkmark$	クスウェ	$\mathcal{N}$	Mx	1 Mx ^10 <sup>-8</sup> Wb			
ス	チル	ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$			
朩		ŀ	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> 1x			
ガ		ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{m/s}^2$			

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例						
	彳	「称		記号	SI 単位であらわされる数値	
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq	
$\nu$	ン	トゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ			F	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy	
$\scriptstyle  u$			Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv	
Х	線	単	位		1X unit=1.002×10 <sup>-4</sup> nm	
ガ		ン	7	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9}T$	
ジ	ヤン	スキ	-	Jy	$1 \text{ Jy}=10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$	
フ	л.	ル	11		1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m	
メートル系カラット					1 metric carat = 200 mg = $2 \times 10^{-4}$ kg	
F			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
力		リ	-	cal		
3	11	17	×2		$1 \dots -1 \dots -1 0^{-6} \dots$	

