

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

专門 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

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(http://www.jaea.go.jp/index.shtml) 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

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

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

⁺ Division of Advanced Plasma Research

Research Staff on Loan

目 次

1.	はじめ	I C	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1	ı
2.	ECH 装置	置用電	源																									3	3
	2.1	110G	Ήz	用氵	ブヤ	イ		۲		ン	,	•	•		•			•	•			•			•	•	•	3	3
	2.2	ジャ	1	ㅁㅏ	. 🗖	ン	用'	電	源		•	•	•												•	•	•	5	ō
	2.3	アノ	_	ド分	圧	器					•														•	•	-	6	ò
	2.4	分圧	基	板の	動	作	原	理			•	•	•												•	•	•	8	3
	2.5	アノ	_	ド分	圧	器(のf	制	御:	方	法		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1 ()
3.	出力変				•																							1 1	
	3.1	アノ				の)	原	理							•													1 1	
	3.2	回路				•									•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1 1	
	3.3	ジャ						_							•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	1 2	2
	3.4	変調	調			•																				•	•	1 2	
	3.5	変調	度	•	٠	•	•																			•	•	1 9)
	3.6	各電	極(の電	流		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	٠	•	•	٠	•	•	•	2 2	2
	3.7	放射	器(の温	度	上	昇		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	2 2	2
4.	今後の	課題				•																						2 4	1
	4.1	発振	停.	止検	出	回	路		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	٠	•	•	٠	•	•	•	2 4	1
	4.2	分圧	.基	板の	動	作	速	度		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	26	3
5.	まとめ				•		•	•			•	•	•	•	•				•		•				•	•	•	2 7	7
謝	辞																											2 7	7
参考	文献														•		•	•	•				•				•	2 8	3

Contents

1. Introduction	1
2. Power supply in ECH system	3
2.1 110GHz-gyrotron	3
2.2 Gyrotron power supply	5
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

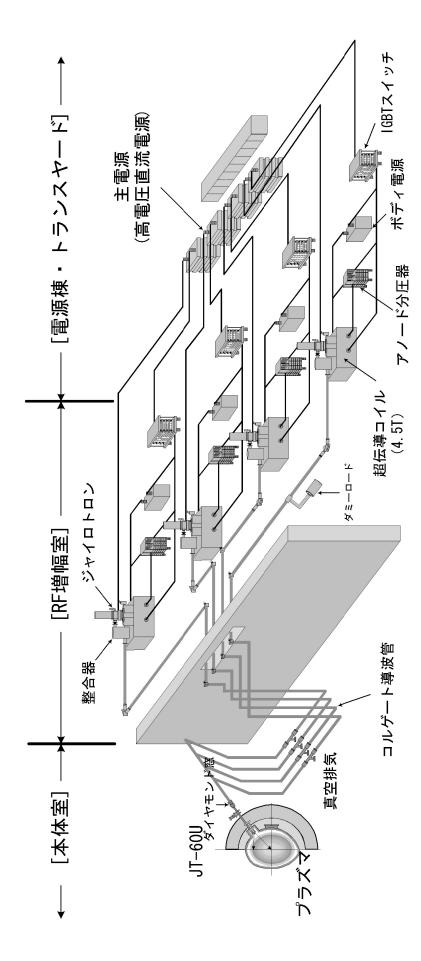
臨界プラズマ試験装置(JT-60U)では、周波数が $110 {\rm GHz}$ の電子サイクロトロン波(ECRF)帯の電磁波(高周波(RF))を使用してプラズマ中の電子を共鳴させることで、プラズマの局所的な加熱と電流駆動による安定性改善や予備電離の実験を行うことを目的として、平成10年度から電子サイクロトロン加熱(ECH)装置を導入した。1)2)

日本原子力研究開発機構では、これまで発振周波数が $100 \, \mathrm{GHz}$ 帯で発振出力が $1 \, \mathrm{MW}$ 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 - $60 \, \mathrm{U}$ 用として、発振周波数 $110 \, \mathrm{GHz}$ 、発振出力 $1 \, \mathrm{MW}$ 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 - $60 \, \mathrm{U}$ の ECH 装置は、そのジャイロトロンを $4 \, \mathrm{d}$ 使用しており、最大で $3 \, \mathrm{MW}/5$ 秒または $1.5 \, \mathrm{MW}/20$ 秒の RF を JT - $60 \, \mathrm{U}$ 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³⁾。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 JI6-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。

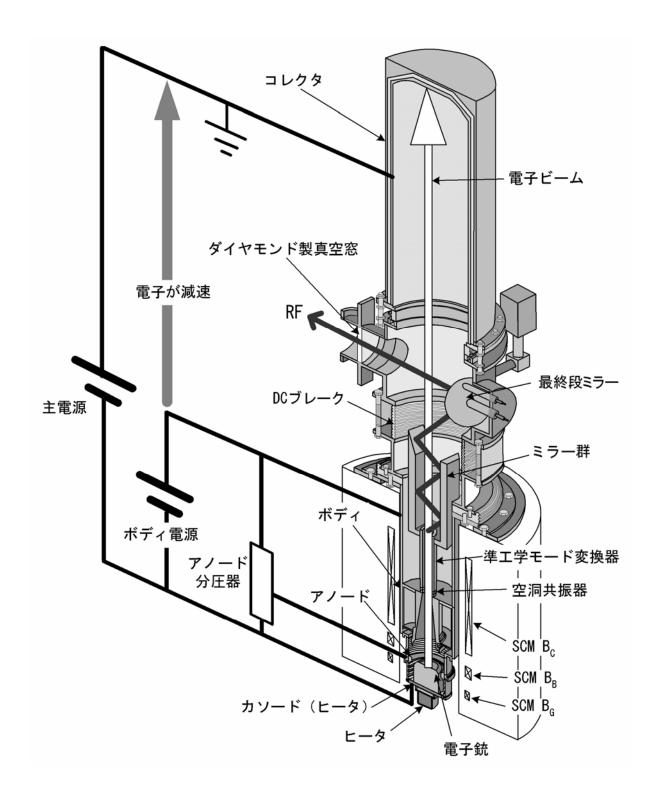
第2.1図に、ジャイロトロンの内部構造と電源給電図を示す。

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

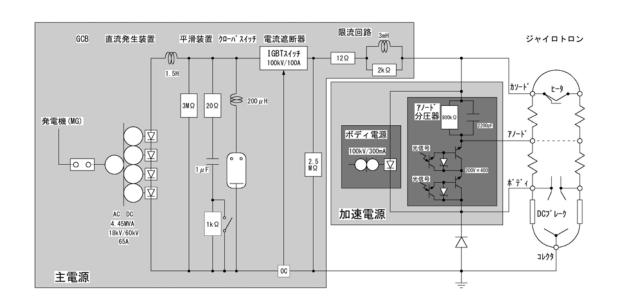
2.2 ジャイロトロン用電源

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。

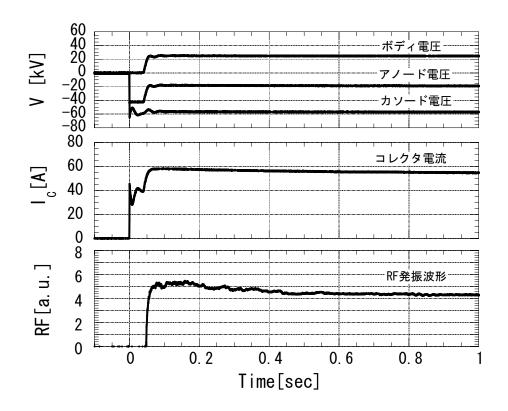
ジャイロトロンの発振には、主電源から給電される約 60A の大電流を高速で入り切りする必要がある。さらに、ジャイロトロン内で放電が発生した場合には、最大で 300A 近くなる電流を瞬時 (約 $10\,\mu$ sec 以下) に遮断する必要がある。これらを実現するスイッチとして、JT-60U の ECH 装置では Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) 素子を使用した IGBT スイッチを設けている。IGBT スイッチは、定格電圧 $1.7\,\mathrm{kV}$ 、定格遮断電流 $360\mathrm{A}$ の IGBT 素子を $100\,\mathrm{d}$ 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 $100\,\mathrm{kV}$ 、定格電流 $100\mathrm{A}$ 、遮断電流 $350\mathrm{A}$ 、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 図に、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。



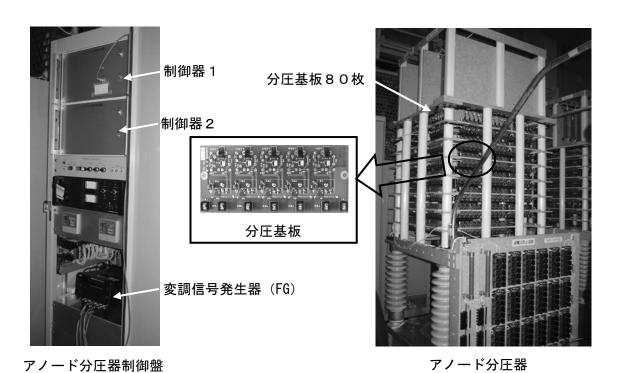
第2.3図 ジャイロトロンの一般的な発振波形

2.3 アノード分圧器

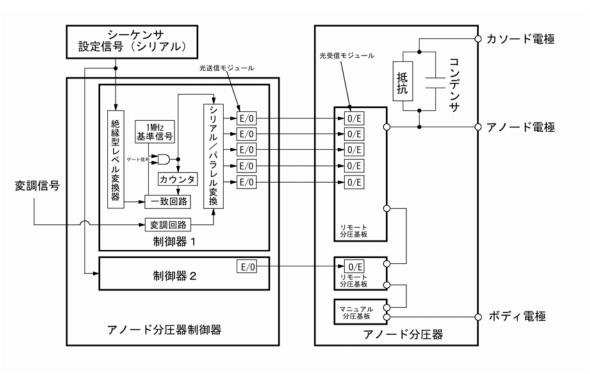
アノード分圧器は、アノード電極へ給電するためのものである。アノード分圧器は、B-K 間に接続されツェナーダイオードにて B-K 間の電圧を分圧してアノード電極に給電している。第 2. 4 図にアノード分圧器の全体写真を、第 2. 5 図にアノード分圧器のブロック図を示す。第 2. 4 図と第 2. 5 図に示すように、アノード分圧器はアノード分圧器本体とアノード分圧器制御盤から構成されている。アノード分圧器本体に取り付けられた分圧基板には、1 枚あたりツェナー電圧 200V のツェナーダイオードが 5 個直列に取り付けられている。分圧基板は全部で 8 0 枚取り付けられており、800k Ω の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。



第2.4図 アノード分圧器の全体写真

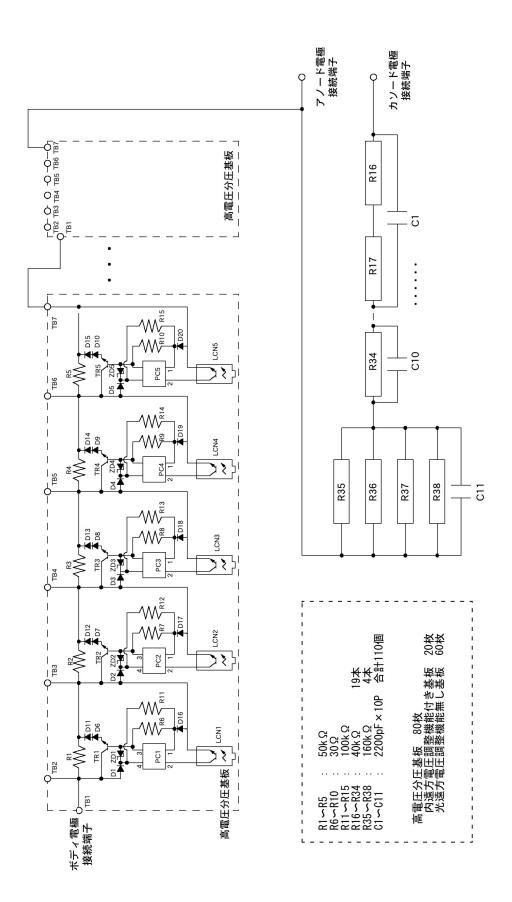


第2.5図 アノード分圧器ブロック図

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。



第2.6図 アノード分圧器回路図

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 6 0 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 $50k\Omega$ 、シース線が $10k\Omega$ 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160k Ω に、シース線の抵抗器を50k Ω 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_{A-K} 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。

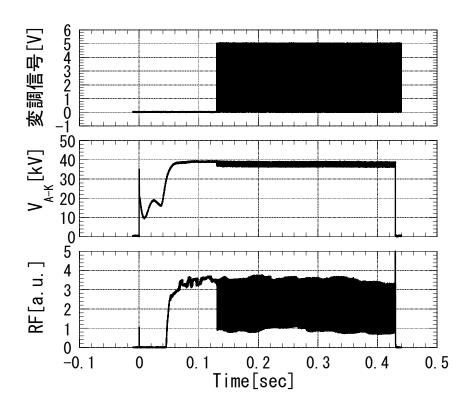
第 5. 「私 Trounz フャ・		と他と 友媧连払时の改定他(无派时)
設定項目	一般的な設定値	変調運転時の設定値(発振時)
BPS 電圧	82kV	82kV
アノード分圧器電圧	45. 2kV	44. 2kV
ヒータ電流	1.88A	1.84A
SCM B _C 電流	-103. 65A	-103. 60A
SCM B _B 電流	-0.53A	-0. 26A
SCM B _G 電流	0. 30A	0. 30A

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)

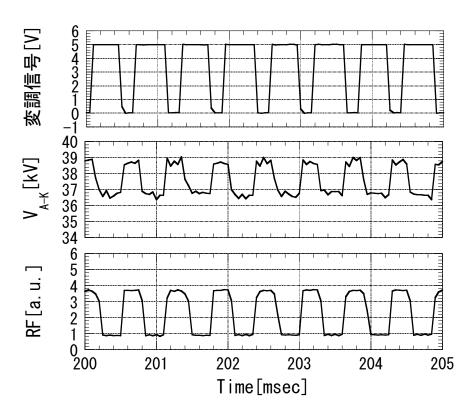
3.4 変調調整

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。



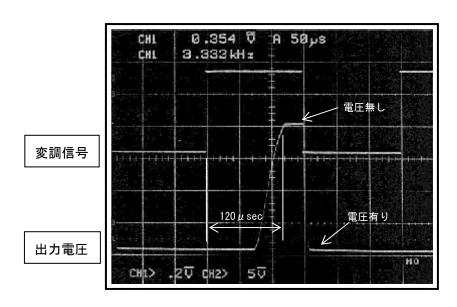
第3.1図 1.6kHz 変調時の発振波形



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

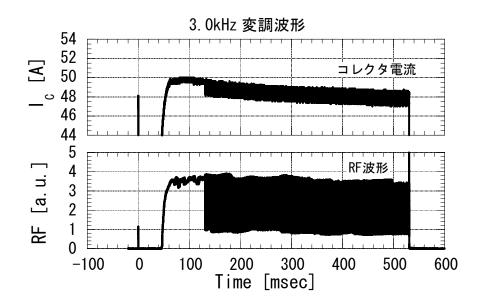
発振変調運転において、1.6kHz からさらに周波数を上げる調整を行い、2.0kHz/500msec、2.5kHz/400msec、3.0kHz/400msec の発振調整に成功した。また、変調幅が60msec と短いながら、3.5kHz の発振調整にも成功した。それぞれの発振変調運転時の設定を第3.2表に示す。第3.2表の各周波数における設定値の違いは僅かであるが、その違いが発振に大きく影響する。調整は、発振時間と発振停止時間の幅が出来るだけ同じとなるように、変調信号のデューティを変えながら行った。

第3.4図に、周波数3.0kHz で変調した時の I_c 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_c 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

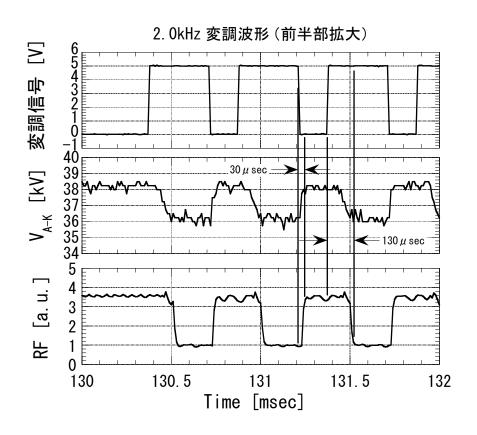
波数が高くなると発振時間と発振停止時間の幅を同じとなるように変調信号のデューティを高く しても、分圧基板の動作速度の限界となり調整しきれなくなってくる。現状の分圧基板のままで は、3.5kHz 以上の周波数での発振変調は難しい。

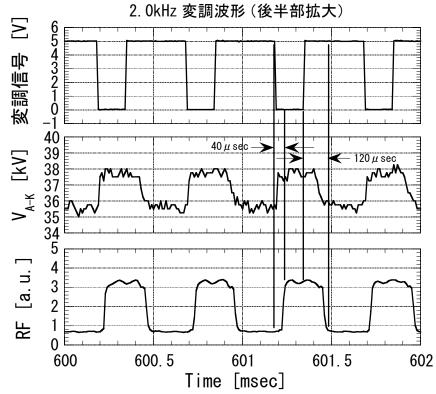
設定項目	2.0kHz 変調の 設定	2.5kHz 変調の 設定	3.0kHz 変調の 設定	3. 5kHz 変調の 設定
BPS 電圧	81kV	81kV	81kV	81kV
アノード分圧器電圧 (発振時)	44. 0kV	44. 0kV	44. 2kV	44. 2kV
アノード分圧器電圧 (発振停止時)	46. 6kV	46. 6kV	46. 4kV	46. 4kV
ヒータ電流	1.85A	1.85A	1.85A	1.85A
SCM B _c 電流	-103. 5A	-103.5A	-103. 45A	-103. 45A
SCM B _B 電流	-0. 26A	-0. 26A	-0. 26A	-0.26A
SCM B _G 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



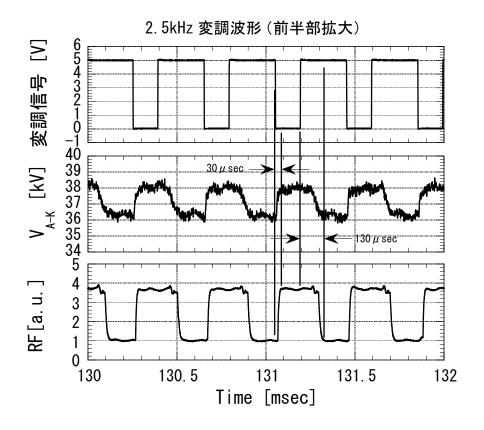
第3.4図 3.0kHz 変調時のコレクタ電流と RF 波形

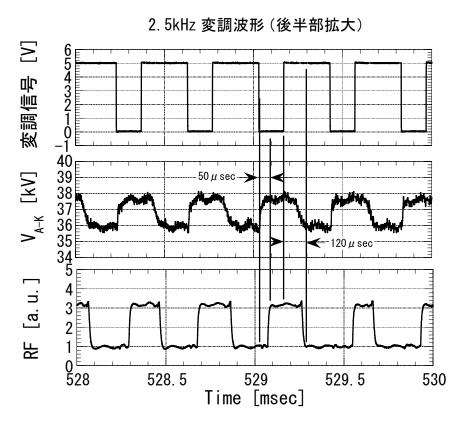




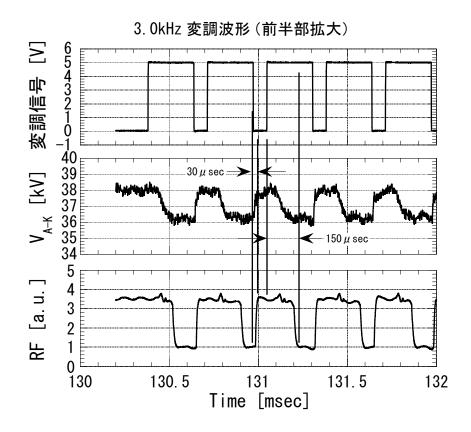
パルス後半は、パルス前半と比べると約 20 μ sec 程度発振幅が短くなっている。

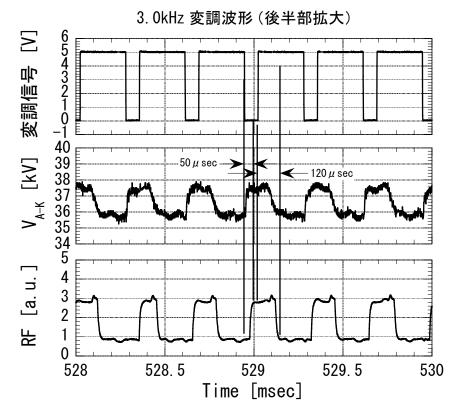
第3.5図 2.0kHz 変調時の発振波形



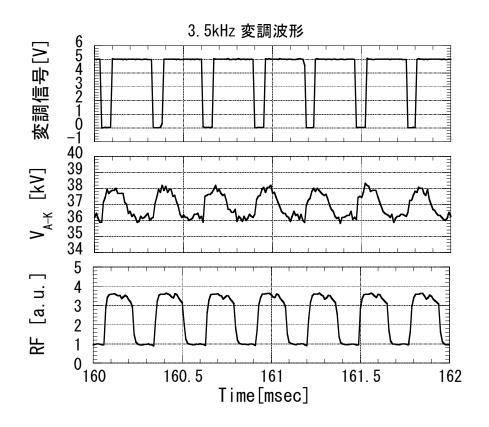


パルス後半は、パルス前半と比べると 30 μ sec 程度発振幅が短くなっている。 第 3 . 6 図 2.5kHz 変調時の発振波形





パルス後半は、パルス前半と比べると約 50 μ 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

流量Q	[cc/min]	アンプGAIN	温度電圧係数 dT/dV [deg/V]
	7000	200	12.5
流量([cc/s]	整合器効率 [%]	
[116. 67	0. 92	

出力 P [kW]
799. 0
効率 [%]
19. 51

	25. 0		350
	20. 0	—■—ΔS ———Δh	- 300
			- 250
ΔS [V·s]	15. 0		- 200 [/wil] 4V
	10.0		- 150 - 100
	5. 0		- 50
	0.0	50 100 150 パルス幅 [msec	200 250

00	. 00				
_					
パルス幅	レコーダ出力	パルス幅	レコーダ出力		
∆tp [ms]	∫∆Vdt [Vs]	∆tp [ms]	Δh [mV]		
100	8. 0484	100	131. 560		
130	11. 5870	130	192. 500		
160	15. 3920	160	252. 810		
200	20. 0470	200	331. 250		
0. 12051	-4. 0067	1. 99688	-67. 509		
Vbk [kV]	lc [A]	Vak [kV]	la [mA]		
81. 75	50. 10	38. 20	1. 00		
Vb [kV]	Va [kV]	Vk [kV]	lb [mA]		
23. 50	-20, 00	-58. 20	0.00		

SCM(BC) [A]	103. 40	SCM(BG) [A]	0. 30
SCM(BB) [A]	-0. 26		
アノード固定	アノート゛リモート 1	7/-ドリ モ -ト 2	合計「kV]
41.0	2.0	0.2	44 0

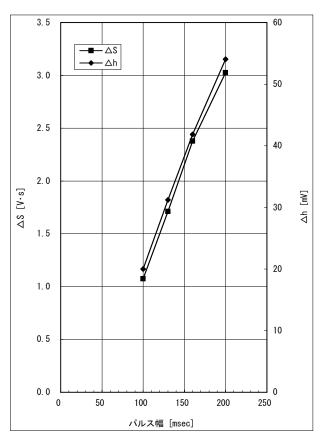
41.0	2. 8	0. 2	44. 0
BPS [kV]	81		
ヒータSV [A]	1. 85	ヒータPV [A]	1. 83

【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

第3.4表 変調により出力が低下した時のパワー測定表

流量Q [cc/mi	n] アンフ	⁹ GAIN	温度電圧係数	dT/dV	[deg/V]
700	00	200	12	. 5	
流量 Q [cc/s]	整合器	効率 [%]			
116. 6	67	0. 92			



無発振幅 ∫∆Vdt [ms]	出力 P [kW]
43. 31	126. 6
無発振幅 Δh [ms]	効率 [%]
39. 47	3. 21
平均無発信幅 TO [ms]	
41. 39	

パルス幅	レコーダ出力	パルス幅	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	アノート゛リモート 1	7/-ドリ モ -ト2	7/-ド (kV)
41.0	5. 0	0. 2	46. 2

=: = (:::)

ヒータSV(A)	1. 85	ヒータPV(A)	1. 83

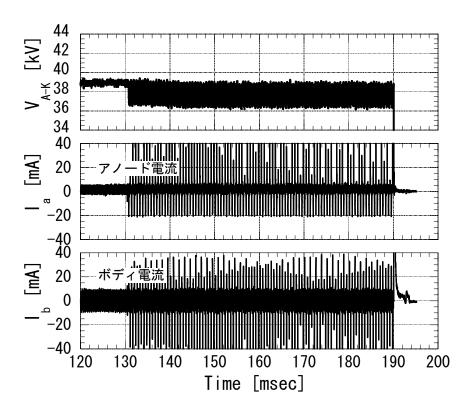
【備考・注意事項】

計算式 $P=4.1855 \times Q \times (dT/dV) \times ((\int \Delta V dt)/(パルス幅-平均無発振幅))/整合器効率$

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50μsec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。

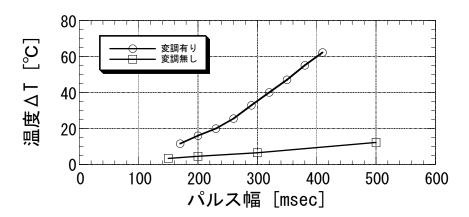


第3.9図 変調周波数 1.6kHz による発振変調運転時のアノード電流とボディ電流の波形

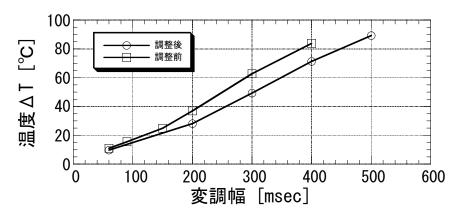
3.7 放射器の温度上昇

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が分かっている。



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。

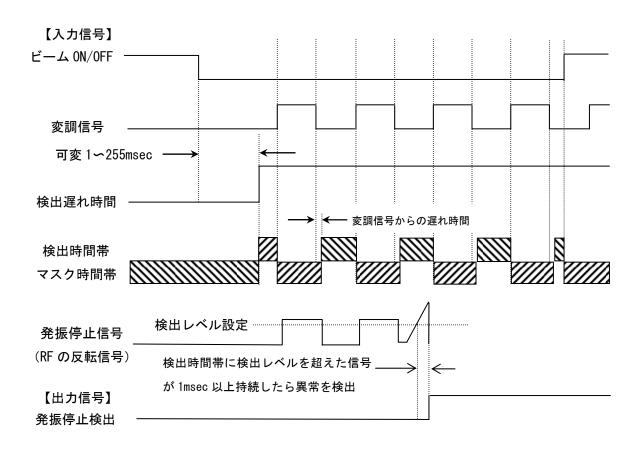
しかし、アノード変調は意図的にジャイロトロンを発振停止状態にしているため、既設の発振停止検出回路は使用出来ない。そこで、新たにアノード変調に対応した発振停止検出回路を製作する必要があるが、変調周波数は数Hzから数kHz と幅があるため、全周波数帯をカバーする発振停止回路を製作するのは非常に難しい。

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、検出時間も数十 μ sec 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十 μ sec 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。

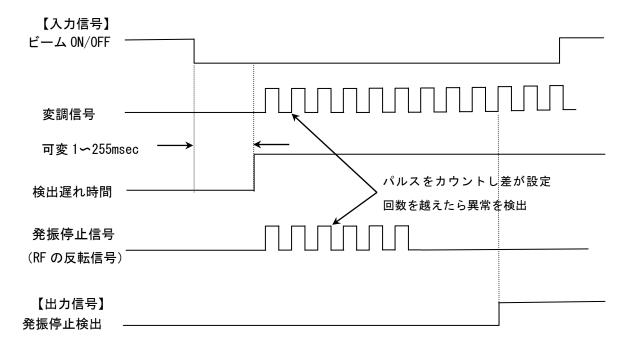
周波数が高い時は、変調信号と発振停止信号をカウントし、その回数の差が或る回数を越えた場合には正常に発振していないとして特高電圧を遮断する方式が有効である。第4.2図に、発振変調周波数が高い時の発振停止検出回路タイムチャート図を示す。しかし、この方法は変調周波数が低い場合には検出に時間がかかる。例えば、変調周波数が10Hz の時は1パルス当たりの発振時間が約50msec と長いためカウントの差が生じてから遮断しても最低50msec 以上必要となり、遮断時間がかなり遅くなってしまう。

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 $3.5 \,\mathrm{kHz}$ 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 $3.3 \,\mathrm{QC}$ 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 $120 \,\mu$ 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 $4.16 \,\mathrm{kHz}$ 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_c 電流、SCM B_b 電流、SCM B_c 電流、SCM B

- (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

- 1) 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)

国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

基本量		SI 基本単位					
			名	称		記号	
長		7	メ	_	1	ル	m
質		量	キ	ロク	ブラ	4	kg
時		間		币	少		S
電		流	ア	ン	\sim	ア	A
熱力	力学温	度	ケ	ル	F.	ン	K
物	質	量	モ			ル	mo1
光		度	力	ン	デ	ラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量 SI 基本単位	SI 基本単位				
名称 記号	-				
面 積平 方 メ ー ト ル m ²					
体 積立 法 メ ー ト ル m ³					
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/n	3				
質量体積(比体積) 立法メートル毎キログラム m³/k	g				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル A/m	2				
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/s	n ³				
輝 度 カンデラ毎平方メートル cd/n					
屈 折 率 (数 の) 1 1					

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

表 5. 固有の石林とての弧白の記りで表される31種立中区					
	SI 組立単位				
組立量	to the	∌n P.	他のSI単位による	SI基本単位による	
	名称	記号	表し方	表し方	
平 面 角	ラジアン (a)	rad		m • m ⁻¹ =1 (b)	
立 体 角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² · m ⁻² =1 (b)	
周 波 数	ヘールーツ	Hz		s^{-1}	
力	ニュートン	N		m·kg·s ⁻²	
圧 力 , 応 力	パスカル	Pa	$\mathrm{N/m}^2$	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$	
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N • m	m ² · kg · s ⁻²	
工率,放射束	ワ ッ ト	W	J/s	m ² · kg · s ⁻³	
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 • kg • s ⁻³ • A ⁻¹	
		F	C/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
		Ω	V/A	m ² · kg · s ⁻³ · Λ ⁻²	
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$	
磁東		Wb	V · s	m ² • kg • s ⁻² • A ⁻¹	
磁 東 密 度	テスラ	T	Wb/m²	kg • s ⁻² • A ⁻¹	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	m ² · kg · s ⁻² · A ⁻²	
	セルシウス度 ^(d)	$^{\circ}\!\mathbb{C}$		K	
光 束		1 m	cd • sr (e)	m² ⋅ m ⁻² ⋅ cd=cd	
////		1x	1m/m^2	$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$	
(")\(\sigma_1 \) \(\sigma_1 \)		Bq		s ⁻¹	
吸収線量,質量エネル	ガ レ イ	Gv	J/kg	m ² • s ⁻²	
ギー分与、カーマ		, ,	37.88	III 3	
線量当量,周辺線量当	33 3 1		T /1	2 -2	
量,方向性線量当量,個 人線量当量,組織線量当	シーベルト	Sv	J/kg	m ² • s ⁻²	
八 짜 里 = 里, 粗 敝 짜 里 =					

- (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 単位の由に田右の名称レその独自の記号を含むSI細立単位の例

表4. 単位の日	Pに固有の名称とその独目の	記号を含むSI組立	単位の例
組立量		SI 組立単位	
和立里	名称		本単位による表し方
粘	度パスカル秒	Pa·s m ⁻¹ ·kg	g • s ⁻¹
力のモーメン	トニュートンメートル	N·m m²·kg	• s ⁻²
表 面 張	カニュートン毎メートル	N/m kg·s	2
角 速	度 ラ ジ ア ン 毎 秒	rad/s m·m ⁻¹	• s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速	度ラジアン毎平方秒	rad/s ² m·m ⁻¹	• s ⁻² =s ⁻²
	度 ワット毎平方メートル	W/m² kg⋅s≒	
	一ジュール毎ケルビン	J/K m²⋅kg	• s ⁻² • K ⁻¹
質量熱容量(比熱容量)質量エントロピ	, ジュール毎キログラム ー 毎ケルビン	J/(kg • K) m ² • s ⁻²	• K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー		J/kg m ² ·s ⁻²	• K ⁻¹
熱 伝 導	率 ワット毎メートル毎ケ ルビン	W/(m • K) m • kg	· s ⁻³ • K ⁻¹
体積エネルギ	_ ジュール毎立方メート ル	J/m³ m⁻¹⋅kg	
電界の強	さボルト毎メートル	V/m m·kg	· s ⁻³ • A ⁻¹
体 積 電	荷 ル クーロン毎立方メート	C/m³ m⁻³⋅s	• Л
電 気 変	位ルクーロン毎平方メート	C/m ² m ⁻² · s	• A
誘電	率ファラド毎メートル	F/m m ⁻³ • ks	g ⁻¹ • s ⁴ • A ²
透磁	率ヘンリー毎メートル		· s ⁻² · A ⁻²
モルエネルギ	ージュール毎モル	J/mol m ² ·kg	• s ⁻² • mo1 ⁻¹
モルエントロピーモ ル 熱 容	· , ジュール毎モル毎ケル 量 ビン	J/(mol·K) m²·kg	\cdot s ⁻² \cdot K ⁻¹ \cdot mol ⁻¹
	() クーロン毎キログラム	C/kg kg ⁻¹ · s Gy/s m ² · s ⁻³	s • A
吸収線量	率グレイ毎秒	Gy/s m ² ·s ⁻³	
放 射 強	度ワット毎ステラジアン	W/sr m ⁴ · m ⁻²	• kg • c ⁻³ =m ² • kg • c ⁻³
放 射 輝	度 ロット毎平方メートル 毎ステラジアン	$W/(m^2 \cdot sr) m^2 \cdot m^{-2}$	$\cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨ タ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10-9	ナーノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р
10^{6}	メーガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	丰 口	k	10 ⁻¹⁸	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	Z
10 ¹	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	y

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

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
目	d	1 d=24 h=86400 s
度	0	$1^{\circ} = (\pi/180) \text{ rad}$
分	,	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad
秒	"	1' = $(1/60)^{\circ}$ = $(\pi/10800)$ rad 1" = $(1/60)$ ' = $(\pi/648000)$ rad
リットル		$11=1 \text{ dm}^3=10^{-3}\text{m}^3$
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーパ ベル	Np	1Np=1
ベル	В	1B=(1/2)1n10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI単位で表される数値が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 ⁻¹⁹ J		
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{kg}$		
天 文 単 位	ua	lua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m		

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と 併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1海里=1852m
ノット		1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	$1 \text{ a=1 } \text{ dam}^2 = 10^2 \text{m}^2$
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バ ー ン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名	称	記号	SI 単位であらわされる数値
エ	レグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダー	イ ン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポ	アズ	P	1 P=1 dyn·s/cm²=0.1Pa·s
ストー	- クス	St	1 St = $1 \text{cm}^2/\text{s}=10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$
ガ	ウ ス	G	1 G 10 ⁻⁴ T
エルス	テッド	0e	1 Oe ^(1000/4π)A/m
マクス	ウェル	Mx	1 Mx ^10 ⁻⁸ Wb
スチ	ルブ	sb	1 sb =1cd/cm 2 =10 4 cd/m 2
ホ	1	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガ	ル	Gal	1 Gal =1cm/s 2 =10 $^{-2}$ m/s 2

丰10 国際単位に属されいその他の単位の例

表10. 国際単位に属さないての他の単位の例						
名称	記号	SI 単位であらわされる数値				
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq				
レントゲン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$				
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy				
ν Δ	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv				
X 線 単 位 ガ ン マ		1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm				
	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$				
ジャンスキー	Jу	1 Jy=10 ⁻²⁶ W • m ⁻² · Hz ⁻¹				
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m				
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10^{-4} kg				
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa				
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa				
カ ロ リ ー	ca1					
ミ ク ロ ン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m				

