JAEA-Technology 2010-031



JT-60U 電子サイクロトロン加熱装置の 長パルス入射における問題点と対策

Measures of the Trouble on the Long Pulse in JT-60U Electron Cyclotron Heating System

平内 慎一 鈴木 貞明 佐藤 文明 小林 貴之 長谷川 浩一 横倉 賢治 森山 伸一

Shinichi HIRANAI, Sadaaki SUZUKI, Fumiaki SATO,Takayuki KOBAYASHI Koichi HASEGAWA, Kenji YOKOKURA and Shinichi MORIYAMA

> 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

Division of Tokamak System Technology Fusion Research and Development Directorate

September 2010

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人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</u>) より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2010

JAEA-Technology 2010-031

JT-60U電子サイクロトロン加熱装置の 長パルス入射における問題点と対策

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

平内 慎一・鈴木 貞明・佐藤 文明・小林 貴之・長谷川 浩一・横倉 賢治・森山 伸一

(2010年7月1日 受理)

JT-60U 電子サイクロトロン加熱(ECH)装置は、周波数 110GHz の高周波により JT-60U プ ラズマに対し局所加熱/電流駆動を行い、閉じ込め性能を向上させるものである。ECH 装置 は、大電力の高周波を発生する大電力発振系、発生した高周波を伝送する伝送系及びプラ ズマに入射するアンテナ等から構成される。ECH 装置の長パルス入射運転には、伝送系機器 での高周波放電を抑制して高周波を効率良く伝送させることが重要な課題である。

本報告では、実際の長パルス入射試験(0.5MW,30秒)における、伝送系機器の放出ガス の増加、温度上昇、エージング過程で発生した真空窓での放電等の問題点と、それを解決 するために行った真空排気系の改良、冷却系の整備、アーク検出装置の整備等の放電防止 対策及び、新ダミーロードの導入について記載する。

那珂核融合研究所(駐在):〒311-0193 茨城県那珂市向山 801-1

i

JAEA-Technology 2010-031

Measures of the Trouble on the Long Pulse in JT-60U Electron Cyclotron Heating System

Shinichi HIRANAI, Sadaaki SUZUKI, Fumiaki SATO, Takayuki KOBAYASHI, Koichi HASEGAWA, Kenji YOKOKURA and Shinichi MORIYAMA

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

> > (Received July 1, 2010)

The JT-60U electron cyclotron heating (ECH) System injects a millimeter wave at 110 GHz into the JT-60U Plasma, and heats the plasma or drives a current locally to enhance the confinement performance of the JT-60U plasma. The ECH System of high power gyrotrons, transmission lines and antenna that launch millimeter wave beams toward the plasma. On the long pulse injection, one of the most important purposes is to prevent arcing in the transmission lines and to transmit millimeter wave beams efficiently. This report describes the problems occurred in a long pulse injection test (0.5MW, 30s), e.g., increase in released gas, temperature rise of the transmission line and an arcing at the vacuum window during the conditioning process. It also describes measures for the problems, e.g., improvements in vacuum pumping system, cooling system, and arc detector and introduction of the new dummy road system.

Keywords: JT-60U, ECH System, RF Conditioning, Millimeter Wave Transmission Line, Released Gas, Arcing

目 次

1. (;	よじめ	ات ۲۰۰۰ (۲۰۰۰) (۲۰۰۰) (۲۰۰۰) (۲۰۰۰) (۲۰۰۰) (۲۰۰۰) (۲۰۰۰)
2. J	JT-60U	ECH 装置の概要······2
2.	1	ミリ波大電力発振系 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
2.	2	ミリ波伝送系 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
2.	З	ECH アンテナ · · · · · · · · · · · · · · · 2
2.	4	RF コンディショニング・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
3. 2	ェージ	ングにおける問題点抽出とその対策・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・4
З.	1	真空排気系の改良による放出ガスの増加対策4
З.	2	冷却系の整備による伝送系機器の温度上昇対策6
З.	3	導波管型ダミーロードシステムの導入とその改良6
4. 7	プラズ	マ入射における長パルス入射試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・17
4.	1	真空窓での発光・放電 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.	2	真空窓の点検結果 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.	3	真空窓の高周波試験 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
5. 7	まとめ	
謝辞		
参考了	文献	

Contents

1. Introduction
2. Outline of the JT-60U ECH System2
2.1 High-Power Millimeter Wave Generator2
2.2 Millmeter Wave Transmission Line2
2.3 ECH antenna ······2
2.4 Technique of RF conditioning2
3. Measures for the trouble on the aging4
3.1 Improvement of Vacuum Pumping System for the increase of the released gas \cdots 4
3.2 Improvement of cooling System by the temperature rise of
the Transmission Line6
3.3 Introduction of the Waveguide Dummy Load System and its improvement
4. A long pulse tests in the JT-60U plasma injection
4.1 Arking or emission of light at the Vacuum window17
4.2 Inspection of the Vacuum window17
4.3 RF test of the Vacuum window 18
5. Summary23
Acknowledgments24
References24

1. はじめに

JT-60U 電子サイクロトロン加熱(ECH)装置は、周波数 110GHz の高周波により JT-60U プラズマに対し局所加熱/電流駆動を行い、閉じ込め性能を向上させるものである。1)現 在 JT-60U では、コイルを超伝導化してプラズマを 100 秒間維持する JT-60SA(JT-60 Super Advanced)の設計と改造の準備が行われており、ECH 装置でもこれに対応するための設計と 開発が進められている。ECH 装置で 100 秒間の長パルス入射運転を行うためには、伝送系機 器での高周波放電を抑制して高周波を効率良く伝送させることが重要な課題である。 JT-60SA ECH 装置の設計では、既設の伝送系機器も使用する予定であり、長パルス入射運転 に対応するために一部の機器で改造が必要不可欠となる。

今回、改造に必要なデータを得ることを目的として JT-60U での 30 秒入射を目指した長 パルス入射試験を行い、エージング過程で発生した問題点への対策を施した結果、JT-60U での最長入射記録となる 0.5MW、30 秒のプラズマへの入射に成功した。

本報告は、この長パルス入射試験において発生した問題点と対策について記したもので ある。次章では、JT-60U ECH 装置の概要について、3章ではエージング過程の問題点抽出 とその対策について、4章ではプラズマ入射おける長パルス試験の結果について述べ、5章 にまとめを記す。

2. JT-60U ECH 装置の概要

JT-60U ECH 装置は、現在4系統で稼動しており、大電力発振系で発生させた大電力高周 波を、内部を高真空に保たれた伝送系でアンテナまで導き、JT-60U プラズマへ入射する。 図.1に JT-60U ECH 装置のシステム構成図を示す。

2.1 ミリ波大電力発振系

大電力発振系は、周波数 110GHz、最大出力 1MW、パルス幅 5 秒の能力を持つ発振管(ジャイロトロン)とそれを発振させるためにジャイロトロンの電極に給電を行う主電源及び加速電源、ジャイロトロン周波数に対応した強力な磁場を発生させる超伝導コイル、出力 高周波を低損失な高周波モードに変換する整合器、発振出力測定時に使用する模擬負荷(短 パルスダミーロード)等がある。

2.2 ミリ波伝送系

伝送系は、ジャイロトロンからアンテナまでの約 60m の経路であり、内面に微細溝のあ るコルゲート導波管、アルミナ分散強化銅を鏡面仕上げした鏡を用い高周波を 90 度曲げる マイターベンド、高周波電力のモニタを行う方向性結合器、高周波の偏波(偏波角度、楕 円度)を変える偏波変換器、JT-60U 真空容器と伝送系との真空境界を形成するための人工 ダイヤモンドを使用した真空窓、高周波を効率良く伝送する特殊機能を有した真空ゲート バルブ、伝送路を電気的に絶縁する DC ブレーク、真空窓での放電を検出するアーク検出器、 伝送系内部を真空排気するための真空排気導波管及びジャイロトロンエージング時に使用 する模擬負荷(長パルスダミーロード)等の低損失高周波伝送機器からなる。

2.3 ECHアンテナ

JT-60U P-17(第17番ポート)、P-18(第18番ポート)斜め上ポートに2基のアンテナ を備えている。P-17アンテナからは3系統(#1~3系統用)P-18アンテナからは1系統(#4 系統用)で入射される。各アンテナは、入射系導波管、焦点鏡、平面鏡、駆動機構で構成 されており、入射系導波管から導かれた高周波は、焦点境で高周波のビームを収束させ、 平面鏡によりその入射方向を制御する構造となっている。

2. 4 RF コンディショニング

ECH 装置でプラズマへ安定した入射を行うためには、真空管であるジャイロトロンの管内

放電や、導波管や真空窓等の伝送系機器での高周波放電を抑制するためにエージングが必 要となる。エージングは、短パルスの発振及び伝送を繰返し行って、機器の温度上昇及び 小放電を意図的に起こして伝送系機器の真空表面からガスを放出させ、耐電力を向上させ ることを目的としている。その際に最も注意しなければならない点が、圧力(真空度)上 昇と温度上昇である。圧力上昇によるジャイロトロンの管内放電や伝送系機器での放電、 また急激な温度上昇は機器に損傷を与える可能性があるため、ジャイロトロンの発振パワ ーを短いパルス幅から徐々に延ばし、慎重にエージングを進める必要がある。



図.1 JT-60U ECH 装置システム構成図

3. エージングにおける問題点抽出とその対策

JT-60SA ECH 装置では、既設の伝送系機器を一部利用する予定であり、JT-60U ECH 装置 建設時の 1MW-5 秒(5MJ)の設計目標を超えた性能を実現するため、一部の機器で改造が必 要不可欠となる。今回、その改造に必要なデータを得ることを目的に JT-60U での 30 秒入 射を目指した長パルス入射試験を行った。このエージング過程においてはさまざまな問題 点が抽出された。第一に伝送系内の放出ガスの増加と伝送系機器の温度上昇の問題である。 長パルス入射により伝送系内の圧力が上昇し放電が発生した。また、高周波損失のあるマ イターベンド等の伝送系機器で急激な温度上昇が観測された。第二にジャイロトロンのエ ージング手段の問題である。従来使用していた長パルスダミーロードは、性能に限界があ った(5MJ)。また、JT-60U への真空入射エージングでは、JT-60U の計測器を保護するため に 1MJ の入射制限があり、それ以上のエージングが困難であった。

以下にこれらの問題点を解決するために行った対策について記す。

3.1 真空排気系の改良による放出ガスの増加対策

JT-60U ECH 装置の伝送系には、限られたスペースへの設置に有利なこと等から内径 φ 31.75mm のコルゲート導波管を使用している。一方欠点としては、排気コンダクタンスが 1m あたり 41/s と非常に小さいことがある。したがって、真空度を良好に保つためには出来 るだけ多くの箇所からの排気が望ましいが、排気ポートの高周波損失、放電の可能性、コ ストの問題から設置箇所は限られる。#1~3 系統では伝送路に2箇所、ダミーロード部に1 箇所の真空排気口を設け、ジャイロトロン付近とアンテナ付近の2箇所にターボ分子ポン プを設置し排気した。最後に増設した#4系統には、それまでの運転経験から伝送路の中間 地点と放出ガスの多い長パルスダミーロード部の排気用にターボ分子ポンプを追加した。 図.2にJT-60U ECH 装置の真空排気系統図を示す。

伝送系内の圧力は、導波管内の放出ガス量によって変化するが、設計では導波管材料(ア ルミニウム)表面からの単位面積あたりの放出ガスが理想的に小さい場合、すなわちエー ジングが進んだ脱ガスした状態(4×10⁻⁹Pa m³/s m²)では、その圧力は10⁻⁵~10⁻⁴Pa 台と見 積もっていた。しかし、実際の導波管圧力の計測箇所では10⁻⁴~10⁻³Pa 前半台を推移するこ とが多く、高周波を伝送した場合には10⁻³Pa 後半~10⁻²Pa 前半台に達して放電する場合が あった。最も圧力が上昇する箇所では、更に一桁以上圧力上昇したと考えられる。図.3 に 計算によるエージング進んだ状態の伝送系圧力と実際の圧力との比較を示す。2)

放電を防止するためには、伝送系内の圧力を低く保つことが必要であるが、これまでの

運転(1MW-5秒)で高周波の軸ずれあるいは、整合器内部で発生する導波管に導かれない漏 れ高周波や不要モードの高周波が導波管外に散乱して、周辺機器であるDCブレーク(絶縁 セラミック)、真空ベローズ配管で温度、圧力が上昇し、放電を起こして真空リークを経験 した。整合器は、ジャイロトロンから出力されるガウスモードの高周波を導波管の伝送モ ードであるHE₁₁モードに変換するものであるが、変換に伴う高周波損失(~7%)により発 熱するため放出ガスの多い機器であった。図.4 に整合器の内部構造と整合器出口の高周波 出力温度分布を示す。また、高周波軸の調整にはジャイロトロンの内部ミラーと整合器の 内部ミラーを高精度で調整する必要があるが、微妙な軸ずれにより正規な軸を外れて放電 を起こし、機器を損傷させる恐れがある。対策として、整合器の高周波入口と出口に高周 波の吸収体であるSiC(炭化ケイ素)セラミックのリングを設置し、整合器底面にSiCのブ ロックを敷き詰めた。更にDCブレークの保護には反射板(アルミ板)を設置した。対策後 に真空リークは発生してないないが、設置したSiCリングにクラックが生じたことがあっ た。これも整合器内の漏れ高周波や不要モードの高周波の散乱によるものと考えられる。

ECH 装置は通常の真空装置とは異なり、ジャイロトロンの交換や整合器のミラー調整等に 必要な大気開放が頻繁にあり、理想的な真空を維持することが困難であった。また、その 大気開放後に再排気する際、他系統を封じ切り、その系統のみ粗引排気を行う必要があり、 その間の他系統の運転が出来なくなる不都合も生じていた。更に、ECH 装置の伝送系は、高 周波伝送を短パルスから行い導波管温度を徐々に上昇させるエージングを主なガス出し手 段としているが、そのために大気開放操作は運転効率の悪化にも繋がり問題となっていた。

これらのことを踏まえて長パルス入射運転を行うに当り、伝送系内の放出ガスが増加し て放電が発生する可能性が懸念されたため、対策として放出ガスが多く体積の大きい整合 器の出来るだけ近い位置(各系統〜2m付近)に真空排気系を増力し、実効排気速度の増力 及び排気の系統毎独立化を行った。(図.5)増力した真空ポンプには、ターボ分子ポンプを 使用した。これにより、配管コンダクタンス(分子流)は51/s(20m)から451/s(2m)に 改善し(#3系統)、伝送系の圧力計測箇所は、10⁻⁵Pa〜10⁻⁴Pa 台となった。また、系統毎に 独立した真空排気系を設置したことにより、系統毎のメンテナンスと運転を並行して出来 るようになり運転効率も向上した。更に、従来から使用してきた粗引排気系のラインを分 岐し、主排気系と近い場所に新たにロータリーポンプ2台とメカニカルブースターポンプ1 台を設置したことにより粗引排気速度を増力した結果、エージング開始までの排気時間が 約6時間から2時間程度と大幅に短縮出来た。実際の長パルス入射運転(0.5MW-30秒)で も、10⁻³Pa前半台に保つことに成功し、整合器の圧力も一桁以上改善されて放電を抑制する ことが出来た。図.6に改良後の整合器内圧力比較と伝送系各部圧力を示す。5)6) 3.2 冷却系の整備による伝送系機器の温度上昇対策

JT-60U ECH 装置の伝送系機器は、導波管にアルミニウム、マイターベンドのミラー部に 分散強化銅等を使用しているが、これまでの運転(1MW-5秒)ではこれらの機器の急激な温 度上昇は観測されず冷却は不要であった。長パルス入射運転を行うに当り、高周波損失(〜 1%)のあるマイターベンド等の伝送系機器の温度上昇が懸念されたため、水冷却の有無で 比較し冷却効果の確認を行った。7~8 秒程度のパルス幅では、冷却/非冷却共に温度上昇 は伝送系機器からの急激なガス放出をさせない温度(50℃~100℃)の範囲内であった。し かし、冷却時にはジャイロトロンや電源機器が必要とする休止時間中に十分な温度降下が 確認出来たが、非冷却時には長いショット間隔が必要となる結果となった。図.7 に伝送系 機器の冷却効果を示す。JT-60U では、デューティ 1/60 サイクルで実験放電を行っており、 その間隔(15 分あるいは 30 分)で入射を行う必要があり、対策として今までの運転条件 (1MW-5 秒) で冷却不必要と思われた機器についても冷却系を整備し、繰返し入射での温度 上昇を防止した。実際の長パルス入射運転でも、各機器の温度上昇は高周波損失によって 違いはあるが、許容範囲内に抑えることに成功した。実験運転時のデューティサイクルに も冷却効果により対応出来た。図.8 に伝送系機器の温度上昇を示す。3)4) 今後、JT-60SA で想定する 1MW、100 秒入射、デューティ 1/18 サイクルの範囲で導波管が溶ける温度(600℃) に達することはないと思われるが、急激な温度上昇による放出ガスを防ぐことが放電を防 止する上でも重要であり、継続して温度監視を行う共に導波管の冷却を検討する必要があ る。

3.3 導波管型ダミーロードシステムの導入とその改良

JT-60U ECH 装置は、ジャイロトロンの発振調整及び電力測定に使用する 1MW-200ms 仕様 の全金属製短パルスダミーロードと長パルスのエージングに使用する 1MW-5s 仕様のタンク 型ダミーロードを模擬負荷として使用している。

タンク型ダミーロードは、内部で高周波に反射を繰返させることで抵抗損失により高周 波電力を熱に変え、冷却水で除熱する構造のものである。またタンク型ダミーロードは、 1MW の高周波電力伝送時に真空排気ポートへの入力を 0.1W 以下になるようなメッシュシー ルドを設けている。これによりコンダクタンスが 61/s 程度になる。タンク型ダミーロード 入射運転では、反射電力が若干大きく(5%程度)ジャイロトロンの調整がしにくいという 問題があったほか、圧力上昇による放電、若しくは局所的な熱入力により真空排気ポート が損傷しての真空リークを経験した。図.9 に ECH 装置のダミーロードと真空リーク時のメ ッシュシールド損傷を示す。

既設のタンク型ダミーロードは 5MJ 仕様で、0.5MW、30 秒の長パルス入射は性能の限界を

上回るため、#3 系統に新ダミーロードを導入した。新ダミーロードは、1MW-連続仕様の導 波管型ダミーロードで、導波管内部の溝の深さを変えたコルゲート形状を設けて意図的に 高周波損失を増加させ、高周波伝送電力の約 75%を管壁の発熱として水で除熱する構造であ る。これにより既設のタンク型ダミーロードと組合わせることで〜20MJ までの長パルス入 射を可能とした。また、導波管型ダミーロードの冷却水の流量と出入口の温度変化を計測 することにより長パルスでの電力計測が可能となった。これまでの電力計測は、短パルス ダミーロードを使用し、冷却水流量と出入口の温度変化を計測する熱量計法を用いていた。 また、ジャイロトロンから出力される高周波には 20ms 程度の無発振時間が存在するため、 それを考慮して短パルスダミーロードの仕様である 200ms 以下でパルス幅を変えた電力を4 ~5 ショット求め、平均化したものを電力として算出するものであった。この導波管型ダミ ーロードでは、無発振時間を無視出来るパルス幅の入射で計測が可能であり、1 ショットで 電力算出を行う。これにより、電力計測にかかる時間も従来の短パルスダミーロードを使 用した方式と比較すると 1/4 に短縮出来る。

図.10 に導波管型ダミーロードの構造図を示す。この導波管型ダミーロードの使用に当っ ては、熱伸びと放電防止に対する対策が鍵であった。従来熱伸びの吸収には、ベロー導波 管が使用されてきたが、コストが高いことや温度上昇が懸念されることから、ダミーロー ドのサポート架台にスライド機構を用いて低コストで熱伸びを吸収出来るようにした。ま た、放電防止対策にはギャップ式の真空排気導波管を接続することで、差動排気を出来る ようにした。図.11 に導波管型ダミーロードの接続系統図を示す。

ギャップ式真空排気導波管は、導波管間に約 1mm のギャップを設けて(排気コンダクタ ンスは、51/s 程度)高周波損失を極力小さくして(約0.01%)真空排気を可能としている。 これにより実際に導波管型ダミーロードを使用したエージングでは、放出ガスを素早く排 気出来るようになり 0.5MW、30 秒までエージングを迅速にでき達成、プラズマ入射への準 備を完了することが出来た。図.12 に導波管型ダミーロードへの 30 秒入射データを示す。

またその後、他系統でもこの導波管型ダミーロードが使用出来るように伝送系導波管ル ートの変更を行い、長パルスエージング及び電力計測を行えるようにした。図.13 にダミー ロード系の導波管ルートを示す。

-7-





図.3 計算による伝送系圧力と実際圧力との比較



図.4 整合器内部構造と整合器出口高周波出力温度分布



図.5 真空排気系の増力・独立化



図.6 改造後の整合器内圧力比較と伝送系各部圧力



図.7 伝送系機器の冷却効果





図.9 ECH 装置のダミーロードと真空リーク時のメッシュシールド



図.10 導波管型ダミーロードの構造図



図.11 導波管型ダミーロードの接続系統図



図.12 導波管型ダミーロード 30 秒入射データ



4. プラズマ入射における長パルス入射試験

エージング過程において抽出された問題点は対策により改善され、これによりエージン グが順調に進んだ1系統(#3系統)がジャイロトロン発振出力0.5MW、プラズマ入射幅30 秒(15MJ)に成功した(図.14)。しかし、実際のプラズマ入射において真空窓の放電を示 すアークが頻繁に検出され、#2系統のパルス伸長が困難になった。

以下に、実際のプラズマ入射における真空窓の放電の問題について記す。

4.1 真空窓での発光・放電

JT-60U ECH 装置の真空窓は、JT-60U 真空容器との真空境界として伝送系に設置している もので高熱伝導率、低誘電体損失の人工ダイヤモンドを使用している。#1、#4 系統には、 ϕ 83mmの大口径ダイヤモンドディスクを使用し、#2、#3 系統は据付けスペースの問題から ϕ 42mmのダイヤモンドディスクを使用している。図.15 に真空窓の構造図を示す。真空窓 の放電検出には、高周波を 90 度曲げるマイターベンドミラー部に光ファイバーを内蔵した アーク検出器を使用している。この検出器は真空窓での放電光を検出し、その光信号を検 出器に取込み高周波入射を高速で遮断する保護インターロックを整備して、真空窓に損傷 を与える大きな放電を防止している。図.16 にアーク検出装置の系統図を示す。

今回、φ42mmのダイヤモンドディスクを使用した#2系統において、プラズマ入射時に真 空窓での放電を示唆する発光が頻繁に検出され、長パルス入射が困難になった。アーク検 出信号には、急激な強い発光と定常的に高周波入射と同時に弱い発光を続けるものがあっ た。急激な強い発光を検出した場合には、圧力上昇が観測されたが、定常的な発光の場合 には観測されなかった。図.17に急激な発光時アーク検出波形を示す。アーク検出装置のイ ンターロックレベルは、この定常的な発光を回避した設定で運転を行った。急激な発光を 検出した直後は、アーク検出装置のインターロックレベルを厳しくし、伝送電力を低減す る設定に変更して慎重にエージングを行った。アーク検出装置により、当面実験運転で必 要な電力設定まではエージングすることが出来たが、発光レベルは他系統と比較すると放 電が再発する傾向にあったため、パルス伸長には障害となってしまった。図.18 に真空窓エ ージングにおけるパワーとパルス幅の進展を示す。

4.2 <u>真空窓の</u>点検結果

運転休止期間を用いて内部点検を行ったが、いくつかの変色等が観測されたものの、ア

ーク検出装置が素早く動作したこともあり、放電の原因に繋がる大きな損傷や放電痕等は 見つからなかった。図.19に放電した真空窓を示す。

4.3 真空窓の高周波試験

これまでの運転、点検の結果を受け、真空窓を予備品と交換して実験運転を再開するこ とにした。これに伴い、真空窓単体での高周波試験をダミーロードを用いて行い、真空窓 の健全性確認と発光・放電の原因調査を行った。単体試験は、はじめに低電力 0.5MW で行 ったが、急激な圧力、温度上昇は観測されず、放電も発生することなく目標であった 5 秒 を達成した。その時のアーク検出信号は検出されず正常であった。その後、高電力 0.75MW において試験を行ったが、運転時と同様な定常的発光が見られた。その際、アーク検出装 置のインターロックが動作したこともあり、圧力上昇は観測されず放電を抑制出来た。最 終的には、パルス幅を 2 秒まで伸長し終了した。次に、アーク検出器が検出した光の発生 源を特定するために、真空窓を取り外して試験を行った。設定 1MW、2 秒までにおいてアー ク検出信号は観測されなかった。よって、発光は真空窓が原因であったことが判った。単 体試験において発光・放電の原因特定にまでは結び付かなかったが、交換した真空窓を使 用して実験運転を再開した。実験運転再開後、パルス伸長の障害となっていた定常的発光 と放電光の分離を目的に、アーク検出器の検出部に赤外線フィルタを挿入し分光測定を行 った。その結果、定常的発光は放電光ではなく赤外線であることが判った。これにより、 インターロックレベルを放電光のみに照準し、慎重にパルス伸長を行い、0.95MW、5秒入射 を達成した。また、JT-60U 初となる 4 系統同時入射、4MW、5 秒に成功した。図.20 にエー ジングの進展を示す。しかし、このエージング過程における真空窓の発光は、放電光と真 空窓自体の含有不純物からとみられる発光があることが判った。JT-60SA では、実績のある 大口径真空窓を採用するが、今後更に大口径真空窓と比較した発光現象、ガス分析等実験 を行う予定である。



図.14 30 秒プラズマ入射データ



図.15 真空窓の構造図



図.16 アーク検出装置の系統図



ショット数

図.18 真空窓のアーク進展



図.19 放電した真空窓



図.20 エージングの進展

5. まとめ

JT-60U ECH 装置で長パルス入射運転を行うには、伝送系機器での高周波放電を抑制して 高周波を効率良く伝送させることが重要な課題である。今回、エージング過程で発生した 問題点の抽出とその対策を行い、JT-60U 最長記録となるジャイロトロン発振出力 0.5MW、 30 秒のプラズマ入射に成功した。また、真空窓の放電を抑制し JT-60U 初となる4系統同時 入射 4MW、5 秒に成功した。

- (1) 長パルス入射運転に伴い、真空排気能力の増力及び真空排気系の系統毎独立化を行い、放電を抑制することが出来た。
- (2) 伝送系機器冷却を整備することで、伝送系機器の温度上昇を許容範囲内に抑え、実験運転のショット間隔に対応した。
- (3)新しく導波管型ダミーロードを導入し、反射を小さくして長パルスエージングを可能とした。また、差動排気導波管を設けて放出ガスを素早く排気出来るようにし、
 0.5MW、30秒までエージングすることが出来た。
- (4) エージング過程で発生した真空窓での発光・放電について、アーク検出装置のイン ターロックにより真空窓を損傷させる大きな放電を防止し、運転することが出来た。

今後は、更に JT-60SA での 100 秒間伝送に向けて長パルス試験を行い、伝送系機器の真 空排気方式と冷却方式の開発を進めると共に真空窓の改良を行う計画である。

謝 辞

JT-60U ECH 装置の長パルス入射運転を行うにあたり、多くの技術的支援を頂きました JT-60RF 開発グループ員の方々に感謝致します。また、終始ご助言、ご指導を頂きました故 藤井常幸研究主席に厚くお礼申し上げます。

参考文献

1) 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

Y.Ikeda

JAERI-Research 99-061 (1999)

2) JT-60U 電子サイクロトロン加熱装置の伝送系システム

K. Yokokura, et al.,

JAERI-Tech 2003-047 (2003)

3) JT-60Uにおける電子サイクロトロン加熱・電流駆動技術の進展

S. Moriyama, et al.,

Journal of plasma and fusion Res. Vol.79, No.9, PP.935-944 (2003).

4) Performance and development of heating and current drive systems in JT-60U

T. Fujii, et al.,

Proceedings of the 20th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering (SOFE 2003) (2004).

5) Development and contribution of rf heating and current drive systems to long pulse, high performance experiments in JT-60U

S. Moriyama, et al.,

Fusion Engineering and Design, 74/1-4, PP.343-349(2005).

6) 日刊工業新聞社, 真空技術ハンドブック(1990)

表1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
巫平里	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	А			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例						
_{知力是} SI 基本	5単位					
和立重 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方メ	ートル kg/m ³					
面 積 密 度キログラム毎平方メ	$- \vdash \nu = kg/m^2$					
比体積 立方メートル毎キロ	グラム m ³ /kg					
電 流 密 度 アンペア毎平方メ・	$- h \mu A/m^2$					
磁界の強さアンペア毎メート	ル A/m					
量濃度(a),濃度モル毎立方メート	$\nu mol/m^3$					
質量濃度 キログラム毎立法メ	ートル kg/m ³					
輝 度 カンデラ毎平方メ・	ートル cd/m ²					
屈折率()(数字の)1	1					
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1					

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 組立甲位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 鱼	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
· 協 方 立 体 鱼	ステラジア、/(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 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	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{\cdot 2} A^{\cdot 1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2}\text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
カーマ				
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{2}$
性線量当量, 個人線量当量		2.		
酸素活性	カタール	kat		s ¹ mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 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である数字の1は明示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性抜種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を種の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	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 kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	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	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$	
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	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg 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 mol ⁻¹	
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^2 K^1 mol^1$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA	
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	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表 5. SI 接頭語					
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	э 9	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}	ピョ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	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	У

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位						
名称	記号	SI 単位による値				
分	min	1 min=60s				
時	h	1h =60 min=3600 s				
日	d	1 d=24 h=86 400 s				
度	۰	1°=(п/180) rad				
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad				
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad				
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²				
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³				
トン	t	$1t=10^{3}$ kg				

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣される剱旭が夫缺的に待られるもの								
名称	記号	SI 単位で表される数値						
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J						
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg						
統一原子質量単位	u	1u=1 Da						
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m						

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値			
バ	1	ル	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa			
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	オングストローム			1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m			
海		里	М	1 M=1852m			
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²			
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	-	パ	Np	ar送佐1			
ベ		ル	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.			
デ	ジベ	N	dB -				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx				
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{\cdot 2} = 10^{\cdot 2} \text{ ms}^{\cdot 2}$				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{2} = 10^{4} \text{T}$				
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹				

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例							
		3	名利	尓		記号	SI 単位で表される数値
	キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
	$\boldsymbol{\nu}$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
	ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
	$\boldsymbol{\nu}$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
	ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
	フ	I		N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
	メー	- トル	/系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
	\mathbb{P}				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
	標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
	力			IJ	1	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
	Ξ	ク		П	\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています