

JAERI-Tech

JP0350572

2003-075



JT-60U LHRF 加熱装置用  
クライストロンの低出力・長パルス試験

2003年9月

下野 貢・閔 正美・寺門 正之・五十嵐 浩一・石井 和宏  
高橋 正己・篠崎 信一・平内 慎一・佐藤 文明・安納 勝人

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒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

# JT-60U LHRF 加熱装置用 クライストロンの低出力・長パルス試験

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部  
下野 貢・関 正美・寺門 正之・五十嵐 浩一※・石井 和宏※  
高橋 正己※・篠崎 信一・平内 慎一・佐藤 文明※・安納 勝人

(2003年7月22日 受理)

第一壁洗浄に有効な電子サイクロトロン共鳴(ECR)放電洗浄(DC)を JT-60U で実証するため、高周波源として JT-60U 低域混成波(LHRF)加熱装置用クライストロンの低出力・長パルス試験を行った。

LHRF 加熱装置用クライストロンは、2GHz 帯で単管当たり 1MW-10 秒出力性能を持つが、長パルス運転のために動作条件を変更しなければならない。そのために、先ず電源性能から長パルス運転が可能となるビーム電流を評価した。この結果、ビーム電圧 72kV、ビーム電流 4.4A、において電源は定常運転が可能であることが判明した。このビーム電圧及び電流において空洞共振器を調整した結果、クライストロン出力 40kWを得た。さらに、出力 40kW レベルで模擬負荷を用いて 60 秒の長パルス試験を行い、クライストロンのコレクター温度が約 20 秒で 120°C の飽和温度になり、コレクター冷却性能から定常運転が可能と判断した。

JT-60U での ECR-DC 実験では、約 30kW-45 分の運転に成功した。

Low-power and Long-pulse Test of a Klystron of the JT-60U LHRF Heating System

Mitsugu SHIMONO, Masami SEKI, Masayuki TERAKADO, Koichi IGARASHI<sup>\*</sup>,  
Kazuhiro ISHII<sup>\*</sup>, Masami TAKAHASHI<sup>\*</sup>, Shin-ichi SHINOZAKI,  
Shinichi HIRANAI, Fumiaki SATO<sup>\*</sup> and Katsuto ANNO

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

(Received July22, 2003)

Low-power and long-pulse test of a klystron of the JT-60U LHRF heating system was done, which was needed as a Radio-Frequency (RF) source to demonstrate the effectiveness of electron cyclotron resonance (ECR) discharge cleaning (DC) in cleaning first walls.

The klystron was tuned for high-power and short pulse operation of 1 MW, 10 s but its operational conditions had to be changed. Then, at first, available beam currents were estimated for long-pulse operation from the performance of its power supply. It was clarified that the power supply could be operated continuously at the beam current 4.4 A for the beam voltage 72 kV. The output of 40 kW was obtained for the above conditions when resonant cavities of the klystron were actually tuned. The Operation at 40kW was tested for 60 s with a dummy load. The temperature of klystron collector was saturated at about 120 ° C after 20 s. Therefore, the continuous operation was concluded to be available at this power level from the capability of collector cooling.

In the ECR-DC experiment on JT-60U, the operation of 30kW-45 min was successfully done.

Keywords: JT-60U,LHRF,ECH,ECH-DC,Klystron,Low-power,Long-power

---

<sup>\*</sup> Cooperative Staff

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	低出力・長パルス運転のための検討と装置の変更	2
2. 1	LHRF 装置の概要	2
2. 2	運転領域の検討	9
2. 3	運転可能範囲	10
2. 4	長パルス運転へ向けての装置の変更	10
3.	模擬負荷を用いた低出力・長パルス調整試験結果	13
3. 1	試験の進め方	13
3. 2	ビーム電流調整	14
3. 3	空洞共振器の調整	15
3. 4	長パルス試験	17
4.	ECR 放電洗浄における運転結果	20
4. 1	運転の概要	20
4. 2	エージング手法	20
4. 3	各部の温度上昇	21
4. 4	ECR-DC の効果	25
5.	まとめ	26
	謝辞	27
	参考文献	27
	付録	28

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Considerations and System Modifications for Low-power and Long-pulse Operation .....	2
2.1 Overview of the LHRF System .....	2
2.2 Considerations for Operation Conditions .....	9
2.3 Available Operation Conditions .....	10
2.4 System Modifications for Long-pulse Test .....	10
3. Results of Low-power and Long-pulse Test with a Dummy Load .....	13
3.1 Course of the Test .....	13
3.2 Adjustment of the Beam Current .....	14
3.3 Adjustment of Resonant Cavities .....	15
3.4 Long-pulse Test .....	17
4. Operational Results in ECR-DC .....	20
4.1 Outline of the Operation .....	20
4.2 Conditioning Method .....	20
4.3 Temperature Rise of Components .....	21
4.4 Effectiveness of ECR-DC .....	25
5. Conclusion .....	26
Acknowledgment .....	27
References .....	27
Appendix .....	28

## 1. はじめに

JT-60Uでは、真空容器内(第一壁)の洗浄方法として、小さなトカマク放電を繰り返すティラー型放電洗浄(TDC)やグロー放電洗浄(GDC)を行っている。しかし、超伝導トロイダルコイルを用いた次世代トカマク型装置では、TDCやGDCによる洗浄が定常磁場のために難しいと考えられている。電子サイクロトロン共鳴(ECR)放電洗浄(DC)では、定常磁場の問題を解決又は避けることができ、次世代トカマク型装置の第一壁洗浄に有効な方法として考えられている。そこで、JT-60UのLHRF加熱装置<sup>1)</sup>で使用している2GHz帯クライストロンを高周波源として、ECR-DCの有効性を調べることが計画された。このためには、LHRF加熱装置の低出力・長パルス化への改良が必要であり、既設の電源設備の性能から長パルス化が可能なビーム電流値を評価した。また評価した電流値におけるクライストロンの出力の最適化調整を行い、クライストロン・コレクターの冷却性能から定常運転が可能かどうかの判断するため長パルス試験を行った。さらに実際JT-60Uにおいて定常化ECR-DCの運転を行い、既設の電源設備に問題ないかどうか調べた。

本報告書は、第2章において低出力・長パルス出力試験のための検討と装置の変更について記述し、第3章では模擬負荷を用いた長パルス出力試験を記述する。第4章ではECRを用いた放電洗浄運転について記述する。最後に、第5章ではまとめを行う。

## 2. 低出力・長パルス運転のための検討と装置の変更

### 2. 1 LHRF 装置の概要

JT-60 高周波(RF)加熱装置は、図2-1に示すように低域混成波帯(LHRF)加熱装置(ユニットⅠ・Ⅲ)、電子サイクロトロン波帯(ECRF)加熱装置及び主にイオン加速を行うイオンサイクロトロン周波数帯(ICRF)加熱装置から構成されている。

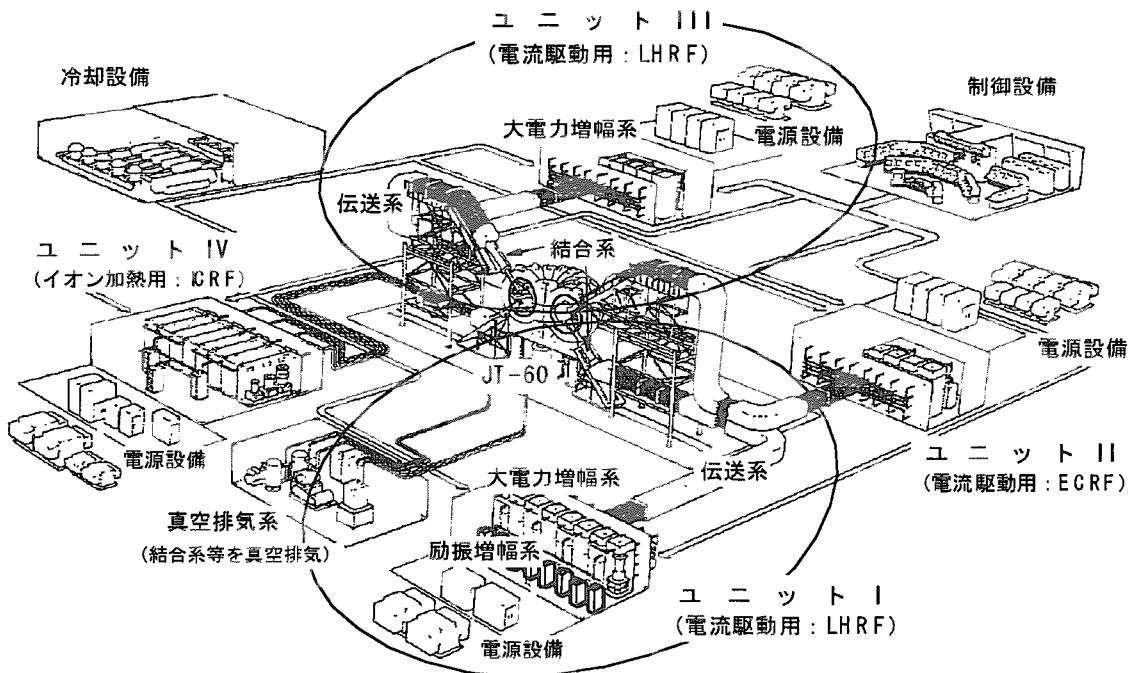


図2-1 JT-60 高周波加熱装置の模式図

LHRF 加熱装置は、主な設備として電源設備、高周波設備(励振増幅系、大電力増幅系、伝送系、結合系(アンテナ))および制御設備から構成されている。特に、高周波設備は、2GHz 帯において単管当たり 1MW-10 秒の大電力高周波を発生して、プラズマへ入射する重要な設備である。図2-2に示すように励振増幅系を除くと8系統から構成され、低電力部で位相、高周波出力の制御を行い、結合系(アンテナ)から電流駆動に適した高周波をプラズマへ入射する。低出力・長パルス運転を行う上で、電源設備、模擬負荷、大電力増幅系(冷却系)についての検討が必要である。これらの装置の概要について以下に記述する。

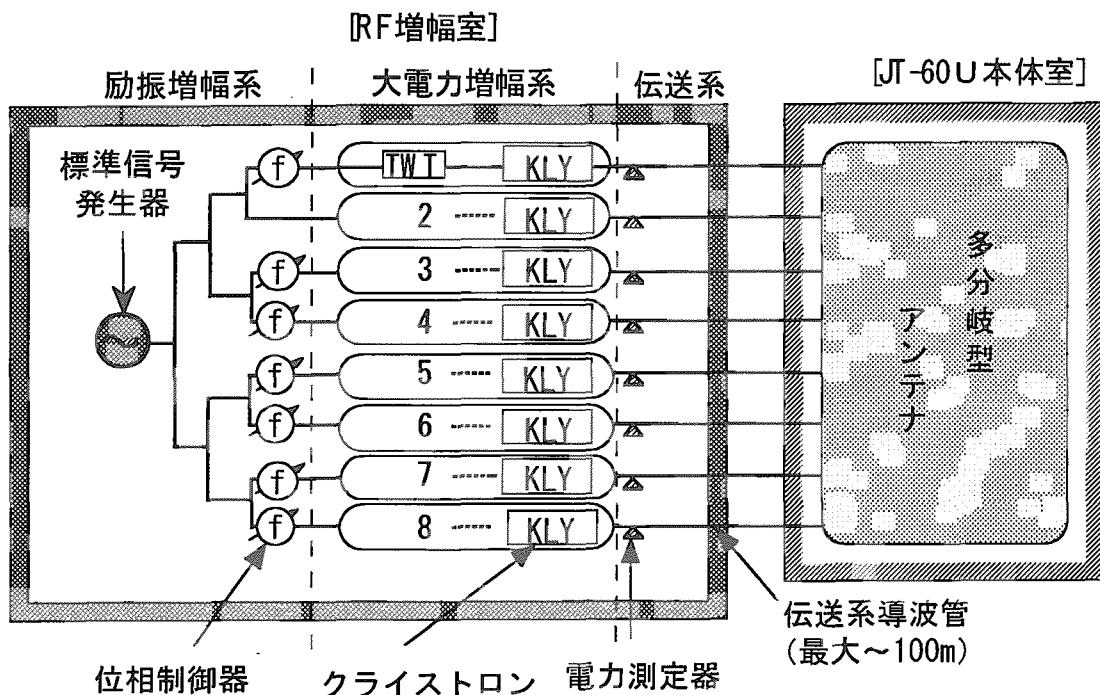


図2-2 LHRF 加熱装置のブロック構成図

最初に高周波設備の大電力増幅系に使用されているクライストロンの構造を図2-3に示す。

クライストロンの動作原理としては、電子ビームが入力空洞共振器を追加するときに低電力の高周波( $\sim 5\text{W}$ )により、その速度が加速あるいは減速され、加速あるいは減速が強調されるように調整された増幅空洞共振器を経て電子ビーム中の電子は密あるいは疎になって行く(電子の集群)。疎密のある電子ビームが出力空洞共振器を通過する時、疎密に応じて空洞側に誘導電流が発生し、高周波電界が発生する。出力空洞でのRF損失は小さく高周波は共振により大電力に増幅されて、高周波窓を通して取り出される。LHRF 加熱装置用クライストロンの仕様は、ビーム電圧 72kV、ビーム電流:26.5A、パービアンス P:  $1.06 \times 10^{-6}\text{AV}^{-1.5}$ 、空洞共振器の駆動方式:パルスマータ、空洞数:5個により、2GHz帯(1.74GHz、1.83、2.00、2.17、2.23)において、 $>900\text{kW}$ -10秒の高周波出力する。

LHRF 加熱装置の電源設備には、図2-4に示すように、中央変電所から直接 AC6.6kV を受電し、降圧トランスを介して制御設備、ヒータ電源やマグネット電源等へ定常的に電力を供給する系統がある。また、加熱用発電設備から AC18kV を受電し、最大 90kV の直流高圧を発生する直流発生装置(DCG)へ電力を供給する系統がある。さらに、平成12年度に、高周波加熱装置の調整運転のために中央変電所の系統系から AC18kV を受電できるように設備を改善した。電源設備は、2つの直列DCGと4つの直並列DCGとで構成されている。直列DCGは DC90kV-130A の電力容量で4本のクライストロンへ電力を供給している。また、

直並列 DCG は DC90kV-65A の電力容量で2本のクライストロンへ電力を供給している。双方の電源トランスのタップ位置を操作(手動)により、クライストロンのビーム電圧は DC87kV、84kV、72kV 及び 60kV から選択することができる。また、クライストロンのアノード電圧を定電圧制御できる。アノード電圧は、ビーム電圧を抵抗( $100\text{k}\Omega$ )とレギュレータチューブ(RT)により分圧する分圧回路から構成されている。LHRF 加熱装置は、最大パルス幅 10 秒でデューティ 1/55 の準定常的な運転ができる。

次に、模擬負荷について記述する。模擬負荷は高周波を水に吸収させる装置で、主目的は装置の健全性を確認するためのものである。この模擬負荷へ高周波を導くためには、伝送系の導波管の接続変更作業が必要である(図2-5、6参照)。通常は、高周波は導波管によりアンテナへ導かれているが、低出力・長パルス用に調整するため、高周波を模擬負荷へ吸収させる。そして、模擬負荷の下部には水漏れセンサー及び水抜き用安全弁を設置し、広帯域、耐電力の向上のためステップ形の多モード導波管となっている。また、模擬負荷への過入力防止のため入力端子には方向性結合器を設置し、励振増幅系と保護インターロックを取っている。模擬負荷の仕様は、耐電力 1.4MW- 1 秒、デューティ 1/240 または、350kW-10 秒、デューティ 1/60 かつ、入力 VSWR 1.7~2.26GHz で 1.15 以下となっている。

最後に、冷却系について記述する。図2-7に、大電力クライストロン盤辺りの冷却装置の系統図を示す。冷却系統は大きく分けて、水冷系と蒸気冷却系の2つに分けられる。水冷系については、クライストロン本体、電磁石と合成用マジック T の付属の不平衡パワー吸収用ダミー冷却である。これらは常時の冷却である。蒸気冷却系としては、クライストロン・コレクターの冷却系がある。この冷却系は、コレクターの水位が低下したときに電磁バルブが動作して冷却水を給水(～20 リットル/分)するようになっている。コレクターの熱負荷は、クライストロン出力 1MW-10 秒の時、コレクターロス 3MW と設計されている。さらに、クライストロンを保護するためのインターロックとして、「クライストロン・コレクター最高温度( $T=150^{\circ}\text{C}$ )」と「クライストロン・コレクター冷却水水位低」がある。

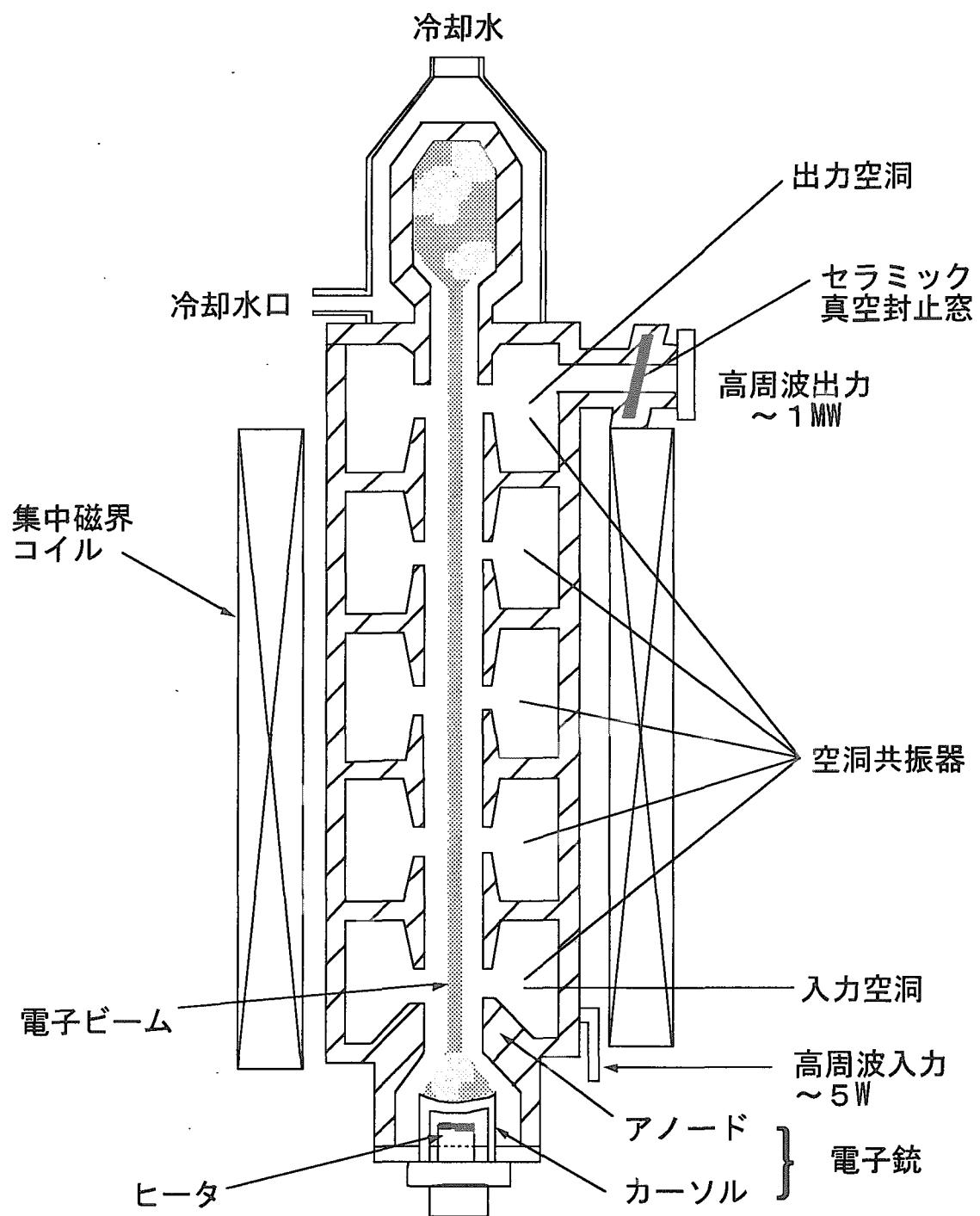


図2-3 JT-60U LHRF 加熱装置用クライストロンの構造図

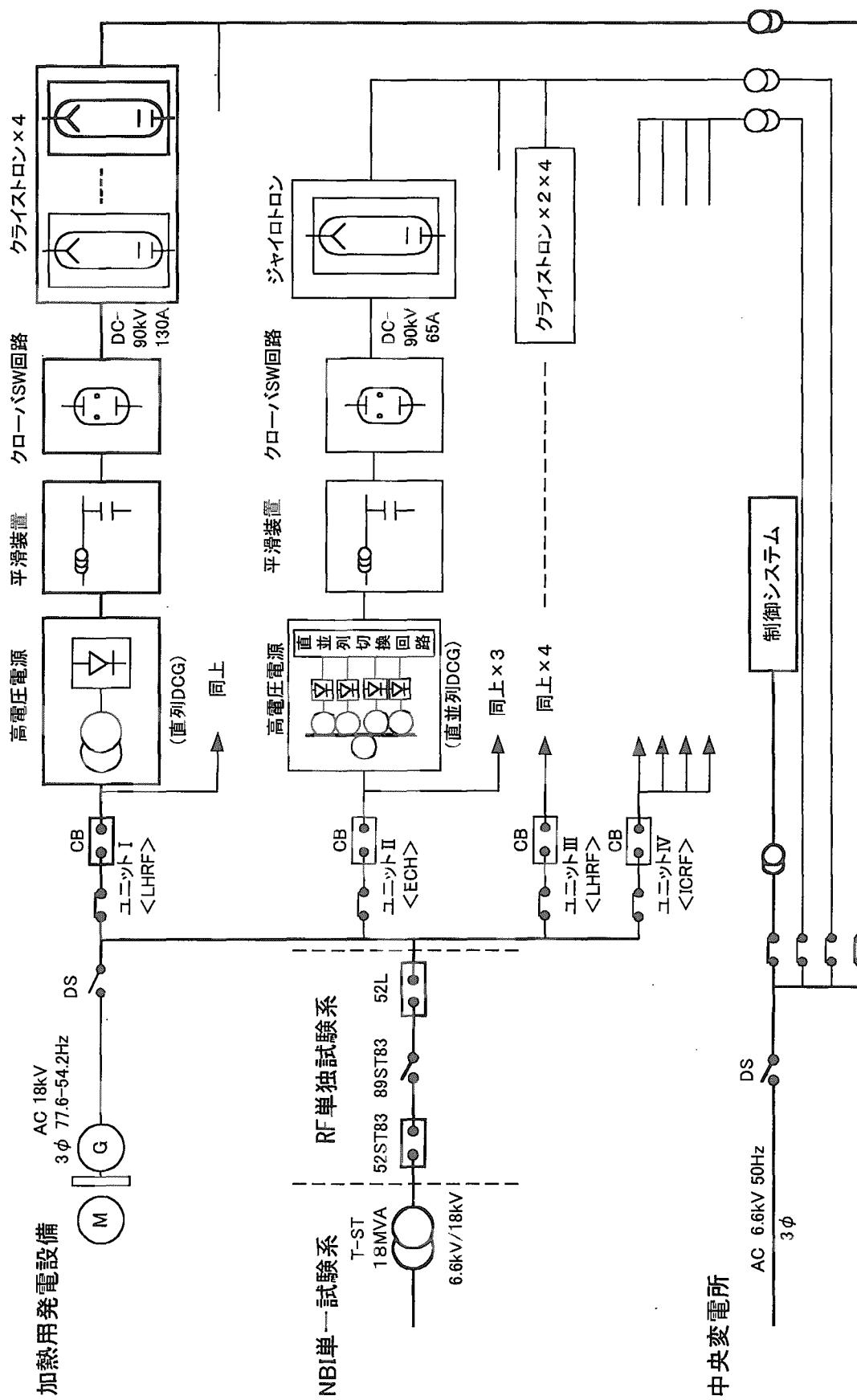


図2-4 JT-60U LH RF加熱装置の電源設備

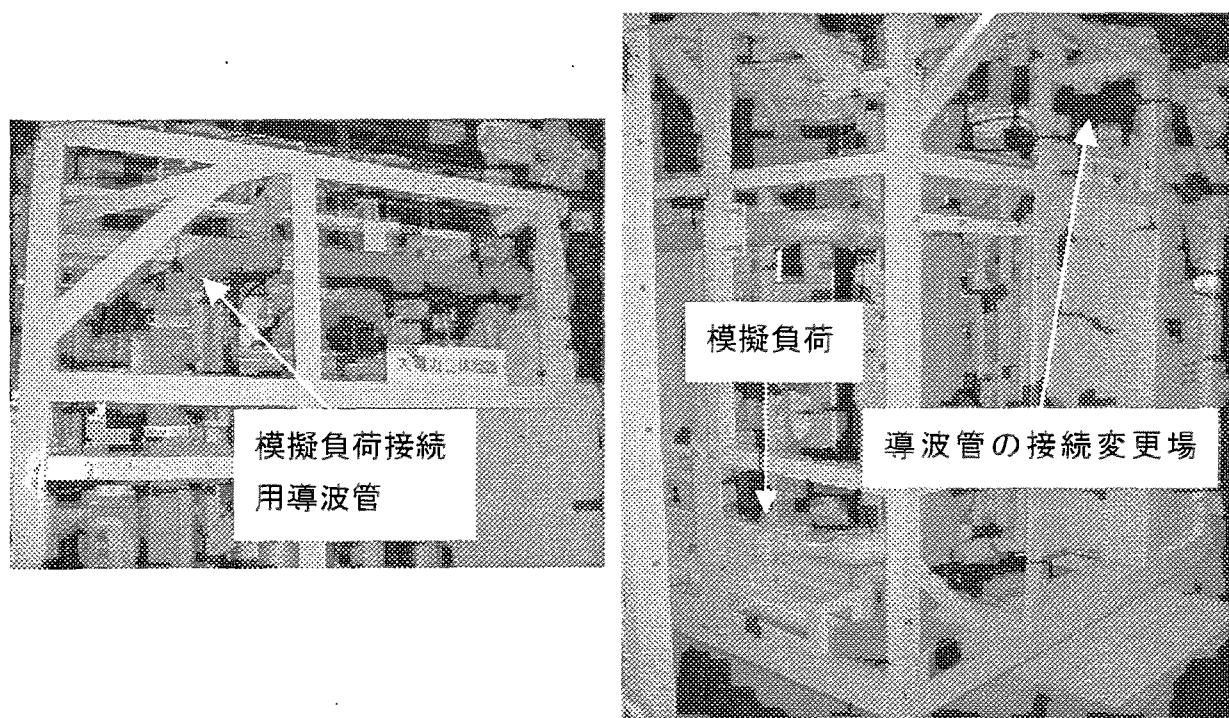


図2-5 導波管接続状態(模擬負荷側)



図2-6 導波管接続状態(真空容器側)

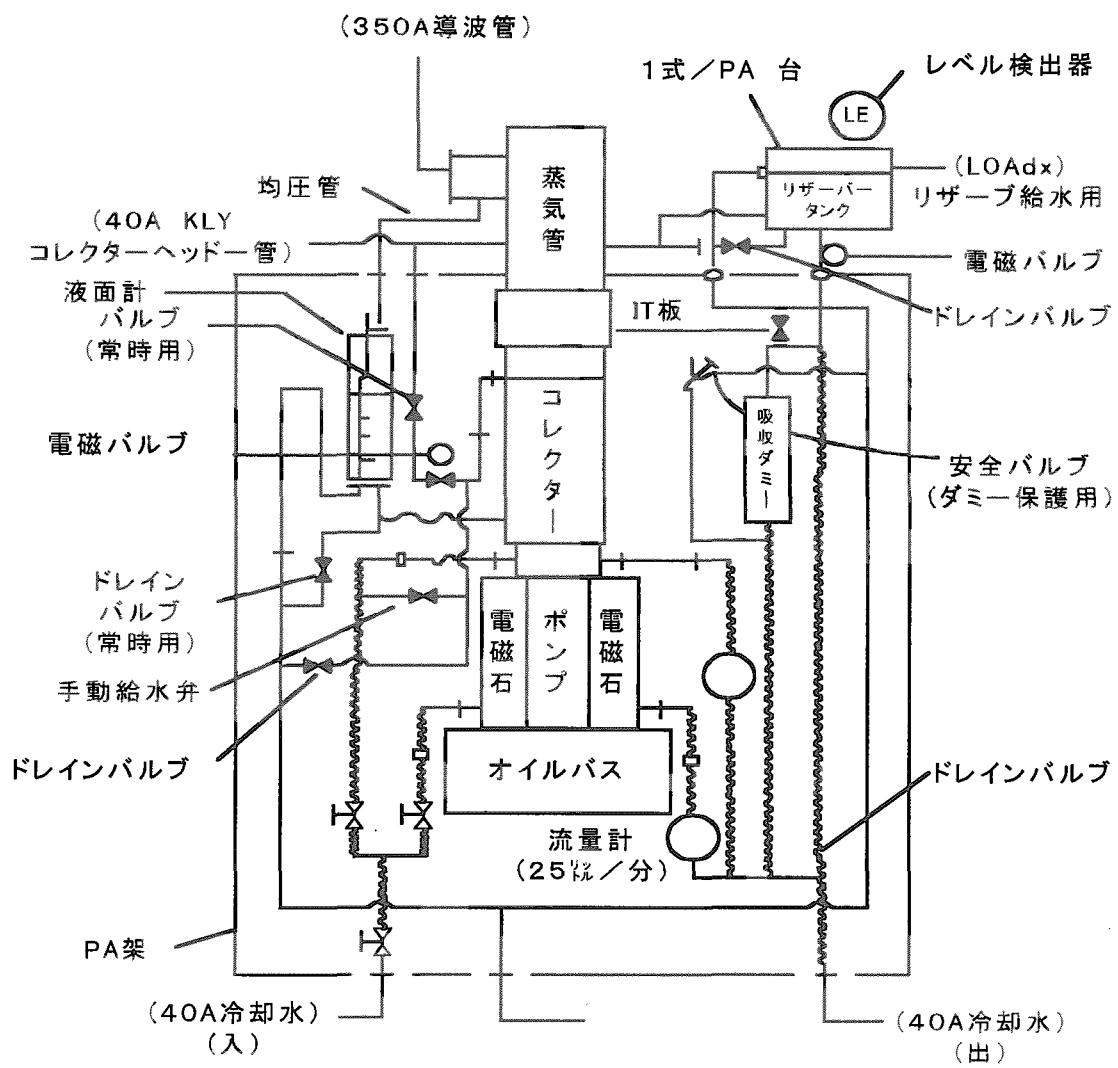


図2-7 冷却装置系統図

## 2. 2 運転領域の検討

現在 LHRF 加熱設備の最小限の改造で定常運転を実施するための負荷電流条件を評価し、この条件におけるクライストロンの出力試験を行うとともに、定常化にむけたコレクターの冷却性能を評価した。

既設設備を大きく改造すること無く、定常的に流せる最大電流(ビーム電流)は、電流のジュールロスによる発熱で制限されている。LHRF 加熱装置は最大 10 秒間大電力の高周波を発生して、 $1/55$  のディーティーにて休止するように設計されている。直列 DCG 内等の抵抗を  $R$  とし、短パルスで流す電流を  $I$ 、定常に流す電流を  $i$  とすると、 $P(\text{loss}) = R \cdot I^2 / 55 = R \cdot i^2$  から、 $i = I / \sqrt{55}$  となる。 $I$  は、直列 DCG の電流が最大 130A であるので  $i$  は約 17.5A ( $= 130A / \sqrt{55}$ ) となる。直列 DCG は最大 4 本のクライストロンに電力を供給できる。従って、1 台の直列 DCG を使ってクライストロン 4 本同時に運転した場合には、1 本のクライストロン当たりには 4.4A が定常に流せる最大電流となる。なお、平成 11 年に、ユニットⅢの 4 台の直並列 DCG 最大電流 65A を用いて 8 本のクライストロンやケーブルなどに対して 4.4A-1 分間通電した実績がある。

直列 DCG を使用して 1 本のクライストロンを運転する場合にはビーム電流は 17.5A 流すことができる。もし、この定常運転可能な最大電流 17.5A を用いると運転実績(効率～45%)から約 550kW が出力できる。しかし、長パルス運転を行うとクライストロンや伝送系等の方が高周波による発熱に耐えられない。これまでの入射実績から最大出力を計算する。1 本のクライストロンは通常の運転(高出力・短パルス)では、300kW-8 秒程度までのプラズマ入射の実績がある。1 分間の低出力・長パルス運転での出力を評価すると、少なくともこの実績と同等のエネルギーまで耐えることができるので 40kW ( $300kW \times 8 \text{ 秒} / 60 \text{ 秒}$ ) である。これより長パルスでのクライストロンの最大出力 50kW と見積もる。

次に、模擬負荷を用いた運転について検討を行う。模擬負荷の性能は耐電力 350kW-10 秒、デューティ  $1/60$  である。この条件で、入射時間とデューティを求める。デューティ  $1/60$  の場合は、入射時間は、入射時間(秒) =  $350kW / 50kW \times 10$  秒から 70 秒が得られた。次に、出力を 50kW、最大パルス幅 10 秒とした場合のデューティ( $1/T_d$ )について計算する。計算式  $T_d = 50kW \times 60 / 350kW$  から、 $T_d$  は約 8.6 となった。

最後に、低出力(50kW)-長パルス運転を行ったときのクライストロンの健全性を確認するため、クライストロン・コレクターの冷却能力について検討を行う。コレクターへの熱負荷は、最大 3MW-10 秒と設計されている。クライストロンが 50kW の出力を発生させるための効率を約 15% と仮定すると、コレクター電圧は 72kV、ビーム電流は 4.5A となる。従って、出力時間は、 $93 \text{ 秒} ((3MW \times 10 \text{ 秒}) / (72kV \times 4.5A))$  となる。このとき、蒸発する水の量は約 13 リットルとなる。一方コレクターへは 20 リットル/分で水が補給されるため、クライストロン出力 50kW のときは、連続運転が可能である。

クライストロンには「クライストロン・コレクター最高温度( $T=150^{\circ}\text{C}$ )」と「クライストロン・コレクター冷却水水位低」によるインターロックが設置されているので、万が一ここで検討以外の不測のことが低出力・長パルス運転時に発生しても、これらのインターロックが動作して、クライストロンを保護することができる。

## 2. 3 運転可能範囲

低出力・長パルス運転を行うまでの制限項目については、下記に示す。

### ① 電源の制限項目

コレクター電圧	$72\text{kV}$ (タップ3)
ビーム電流	$\leq 17.5\text{A}$
RT盤内抵抗温度	$\leq 200^{\circ}\text{C}$

### ② 模擬負荷を使用した運転時の制限項目

入射時間	$\leq 70\text{秒}$ (デューティ1/60において)
入射電力	$\leq 50\text{kW}$
デューティー	$\leq 1/8.6$ (パルス幅10秒において)

### ③ ライストロン・コレクター最高温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$

### ④ 真空窓最高温度 $\leq 100^{\circ}\text{C}$

## 2. 4 長パルス運転へ向けての装置の変更

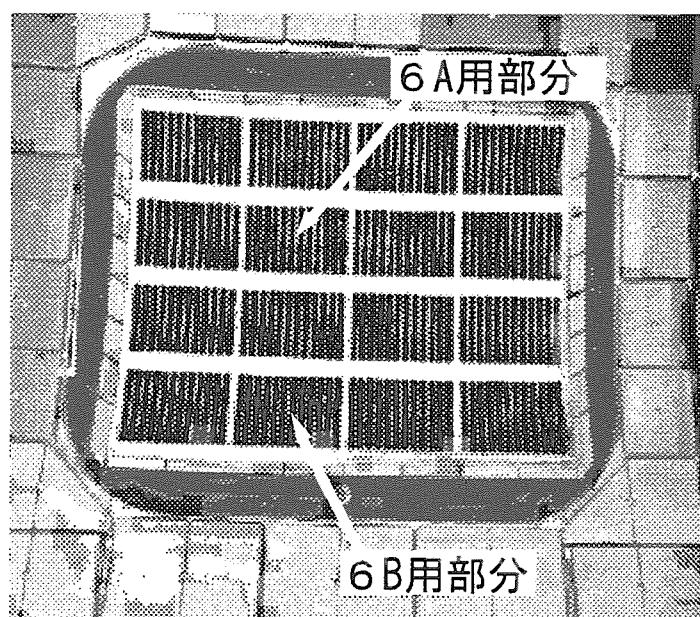
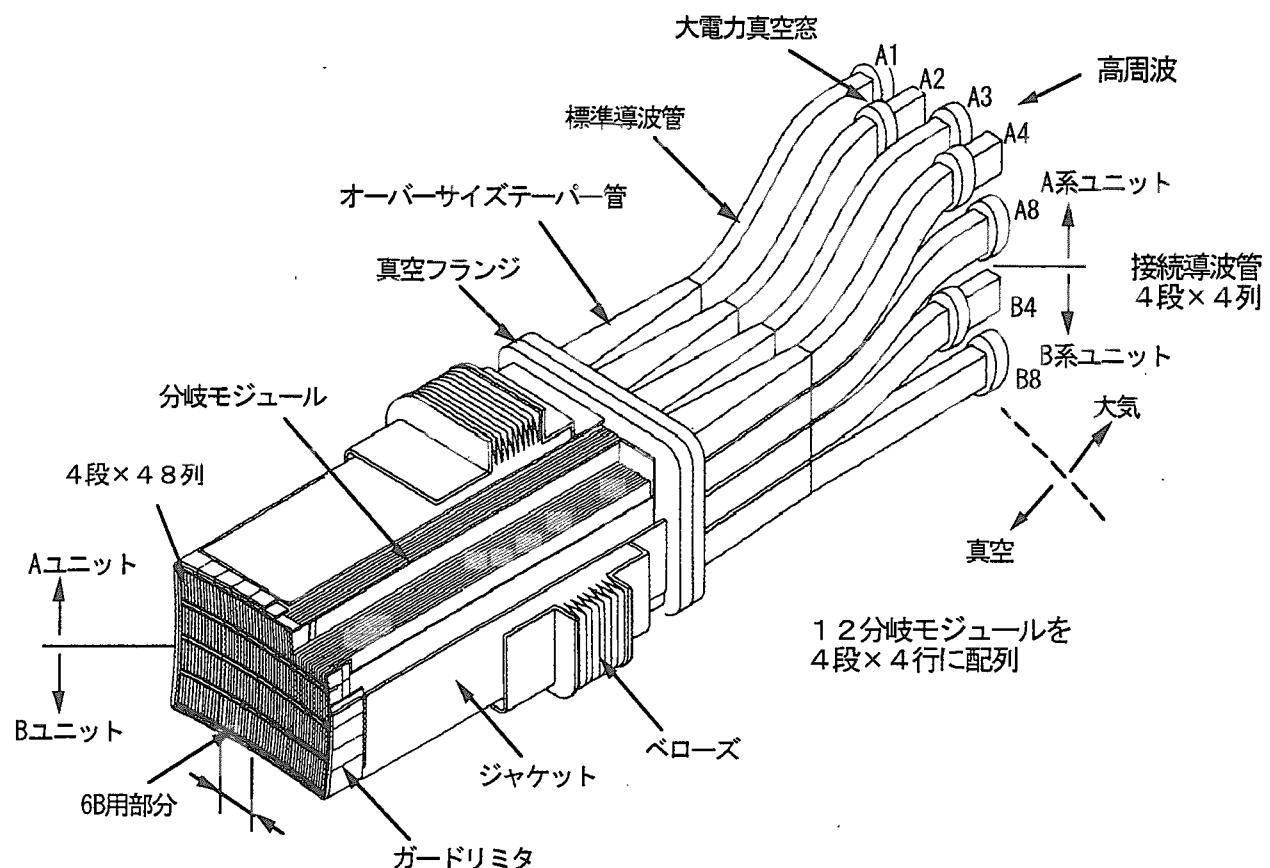
既存の制御設備では、最大入射時間 10 秒までの制御となっている。そこで、最大入射時間 3600 秒まで設定できるタイミング・パルス生成回路を製作した。また、平成 13 年度に既設設備の制御系の更新を行った(これを新制御系と呼ぶ)が、新制御系には周波数切り替えの機能がないため切り替え信号発生用スイッチを設置した。

模擬負荷を用いた調整運転のときには、高周波の入射方向をアンテナ側から模擬負荷側へ切り替え、クライストロン・コレクターに付いている熱電対(3ヶ所)の信号をモニターし、コレクターの温度上昇を監視した。

ECR を用いた長パルス放電洗浄運転(クライストロン1本のみ使用)では、高周波による温度上昇が考えられるフレキシブル導波管と真空窓の2ヶ所に熱電対を取り付け、温度管理を行った。また、ECR-DC 中に高周波放電によりアンテナ先端部の溶融、変形等の損傷

が発生し、将来の実験に支障(電流駆動性能劣化)をきたすおそれがあった。そこで、大電力入射用電力分岐型アンテナの不使用部分の(B系ユニット)の6B部分を使用することとした。そのために、JT-60 実験棟本体室内の導波管6B(アンテナ側)と導波管6A(クライストロン側)の接続作業を行った。さらに、導波管接続作業に伴って、アンテナ側の高周波出力窓のインターロック(アーク検出器)<sup>4)</sup>及び計測系の変更を行った。

図2-8は、大電力入射用電力分岐型アンテナの概略図である。概略図に示すように、A系ユニットとB系ユニットの高周波をアンテナへ供給し、プラズマの加熱を行うようになっている。現在、B系ユニットは 110GHz帯の電子サイクロトロン加熱装置へ変更され、2GHz帯の励振増幅系と大電力増幅系は存在しないためアンテナの下側半分は使用していない。今回、A系ユニットのクライストロン6A(6:クライストロンの番号、A:A系ユニットを示す。)を使用してECR-DC運転を行った。



真空容器内からアンテナ先端部を撮影

図2-8 大電力入射用分岐型アンテナ概略図

### 3. 模擬負荷を用いた低出力・長パルス調整試験結果

#### 3.1 試験の進め方

模擬負荷を用いた低出力・長パルス調整試験では、次のことに注意して行った。

##### (1) クライストロン・コレクター冷却能力の確認

蒸気発生がうまくいかない場合、バーンアウトする危険がある。そのため、蒸発量を補う水量が自動給水されることを、テレビモニタによる液面計の監視とリザーブ給水用電磁バルブの動作音を聞くことで確認した。

##### (2) 真空度の確認

高周波の発生によってクライストロンに付いているイオンポンプの真空度が劣化した場合は、 $1 \mu\text{A}$  ( $1.3 \times 10^{-5}\text{Pa}$  に相当) 以下になるまで真空度が回復するのを待った。

##### (3) クライストロンの空洞共振器<sup>5)</sup>の調整

空洞共振器の調整不具合による共振器部分の破損をさけるためにパルス幅100msにて、空洞共振器(5ヶ所)の値をそれぞれ少しづつ変更した。これは調整による共振器の共振周波数が発生する高周波の周波数に近づきすぎて、空洞内に過大な高周波電界が成長して放電が発生し、放電により空洞共振器部分に穴を開けてしまうからである。

### 3. 2 ビーム電流調整

図3-1は、長パルス運転のために、クライストロンのビーム電流を通常の 20A から連続運転が可能となる約 4.4A 程度まで下げた時のアノード電圧とビーム電流の関係を測定したものである。この結果、電源設備での検討で求めた電流値(4.4A)を流すために必要なアノード電圧は、24.9kV(レギュレータチューブ(RT)電圧 26kV)であることが判った。図3-2は、RT 電圧 70kV、印加時間は 150ms を設定し、その時のアノード電圧とビーム電流の計測波形である。

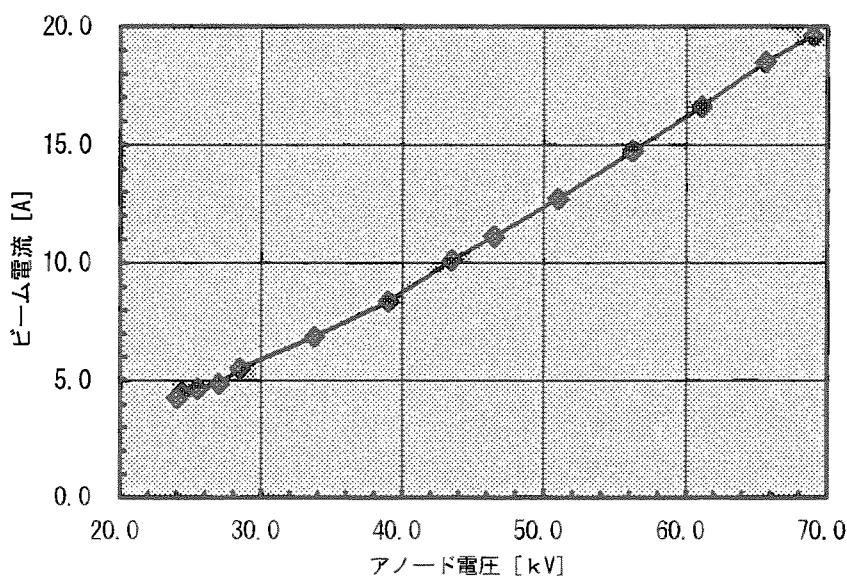


図3-1 アノード電圧 - ビーム電流

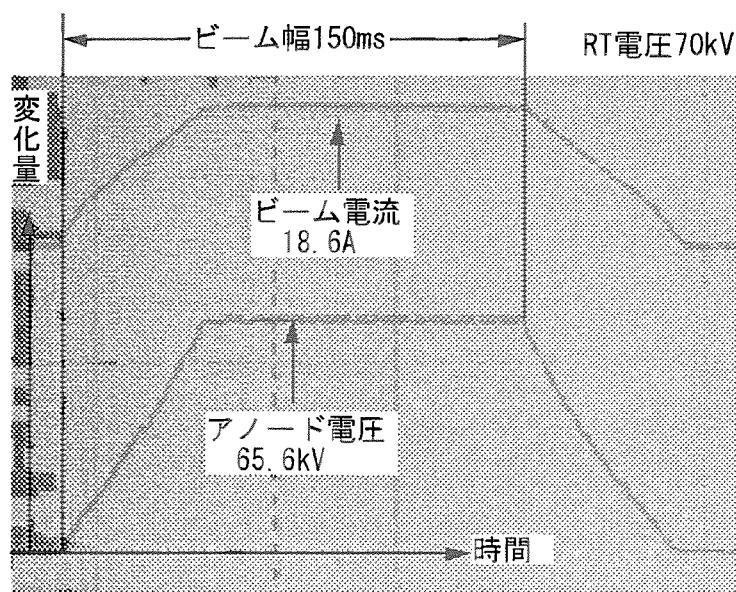


図3-2 ビーム電流波形

### 3. 3 空洞共振器の調整

前節のビーム電流調整から得たビーム電流 4.4A(クライストロン4本使用)から 17.5A(クライストロン1本使用)の範囲で、直列 DCG は定常運転が可能である。ここでは、この範囲内のビーム電流に対して、クライストロン出力が最大となるようにクライストロン空洞共振器の調整を行った。低ビーム電流時では、ECR-DC 運転に必要なクライストロン出力が 50kW(目標)となる条件を探した。

その方法について下記に示す。

- (1) クライストロンの発振時間(パルス幅)を 100ms に固定する。
- (2) クライストロン周波数を決める。このとき、励振増幅系の標準信号発振器の発振周波数と出力を調整する。
- (3) 高出力・短パルス運転(周波数)に最適化された空洞共振器値を初期設定する。
- (4) RT によりアノード電圧を制御して、ビーム電流を設定する。
- (5) クライストロン出力が最大となるように、空洞共振器の同調値を求める。
- (6) クライストロン出力が 50kW 以下の場合は、順次(3)～(5)繰り返す。

実際は、クライストロン空洞共振器の1つ共振器(CV-2)を動かしてクライストロン出力が上がる方向に少しずつ動かした。あるところで出力が下がる所まできたら1つ前の値に戻した。そして、違う共振器(CV-3)を動かしクライストロン出力が上がる方向に動かした(付録1参照)。その結果を表3-1として纏めた。表3-1から分かるように、ビーム電流が 18.6A と 4.5A のとき、最適な同調制御器設定値を比べると、同調制御器の変化量は、空洞共振器 CV-1(-1)、CV-2(+3)、CV-3(-9)と CV-4(-13)となった。このことから同調制御器を設定する場合は、主に CV-2、3、4 の設定を変更すれば良いことが判明した。また、周波数が 1.74GHz の場合は、CV-2と3を、2.23GHz の場合は、CV-3を変更すれば良いことが判った(付録2参照)。

表3-1 同調制御器設定と出力の関係(周波数:2.00GHz)

ATT [dB]	RT 電圧 [kV]	ビーム 電流 [A]	出力 [kW]	効率 [%]	同調制御器設定値				
					CV-1	CV-2	CV-3	CV-4	CV-5
0.25	26	4.5	40.7	11.5	132	146	162	153	152
	27	4.8	49.8	13.4					
	28	5.1	59.0	15.0					
	70	18.6	546.9	38.4	133	143	171	166	152
同調制御器の変化量					-1	+3	-9	-13	0

図3-4は、周波数 2.00GHz、ビーム電流 18.6A(アノード電圧 70kV)でのビーム電流とクライストロン出力の関係を表す。調整前データは、ビーム電流 20A で最大のクライストロン出力が出せるように調整された同調(制御器)値のままで、ビーム電流を順次下げた場合に取得されたクライストロン出力値である。調整後データはビーム電流値毎に同調(制御器)値を最適化したときのクライストロン出力値である。図3-4から分かるように、ビーム電流に合った同調(制御器)値することでクライストロン出力が増大することが分かる。特に、低ビーム電流ほど、クライストロン出力の比(調整後／調整前)は大きくなった(最大約 20倍)。その他の周波数では、約5倍程度であった(付録2参照)。この出力調整試験により、周波数 2.00GHz、ビーム電流 4.5A で出力 40.7kW を得ることができた。

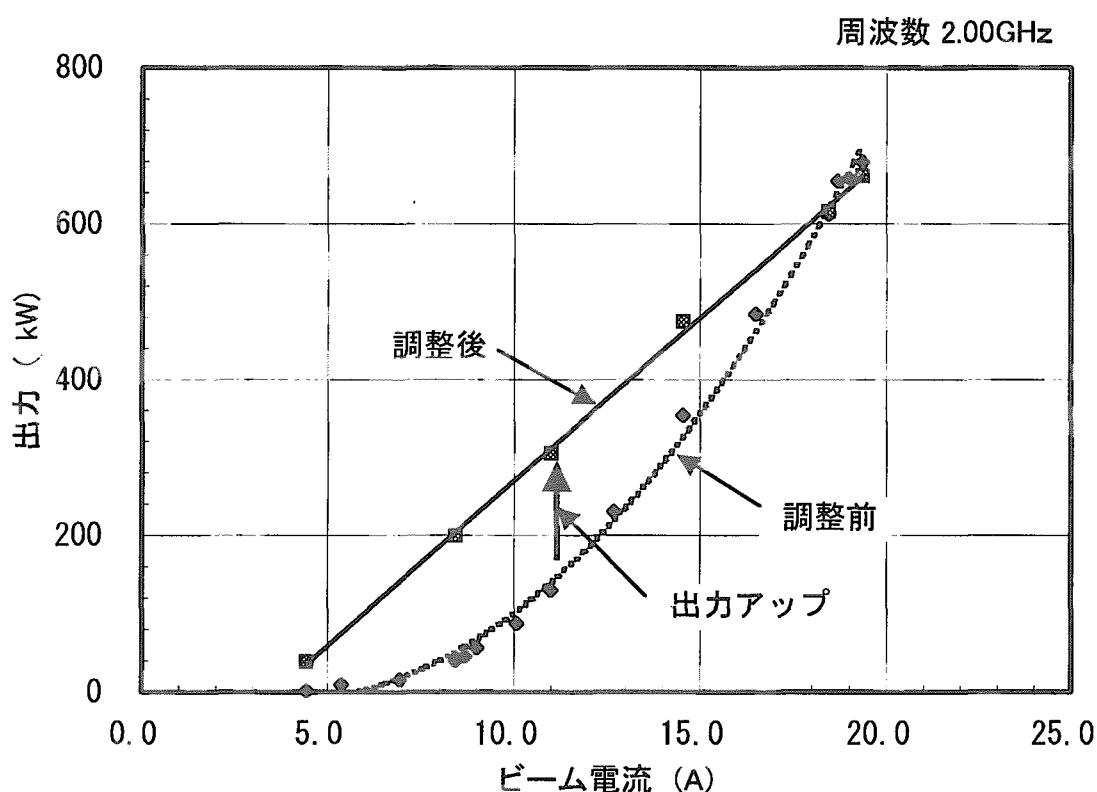


図3-4 同調制御器の調整前後のビーム電流と出力

### 3. 4 長パルス試験

ここでは、前節で得た条件(周波数、ビーム電流、空洞共振器)を用いて実施した、長パルス試験について記述する。

長パルス試験では、電源設備以外の機器において、予測しがたい共鳴現象などによる過大な熱負荷のために異常な温度上昇が発生することが心配されるため、温度監視を行うことが大事であると考えて試験を行った。

試験方法としては、クライストロンが設置されている場所での現場制御盤からは、パルス幅が最大 10 秒までの運転を行った。次に、タイミング・パルス生成回路を用いて、中央制御室からはパルス幅が最大 60 秒までの運転を行った。このときのクライストロン・コレクタ一温度を計測し、安定なクライストロン出力を確認した。

図3-5は、ビーム電流 4.5A、パルス幅 10 秒設定で運転を行ったときのクライストロン出力の異常波形を示す。エージングが十分でなかつたために、クライストロン出力が急に低下した。このような状態になった場合にはすぐにビーム電圧を切らなければならない。このような状態が発生した場合は、空洞共振器などで放電が発生したと推測されるので、耐電圧性能を回復するためにエージングを実施しなければならない。

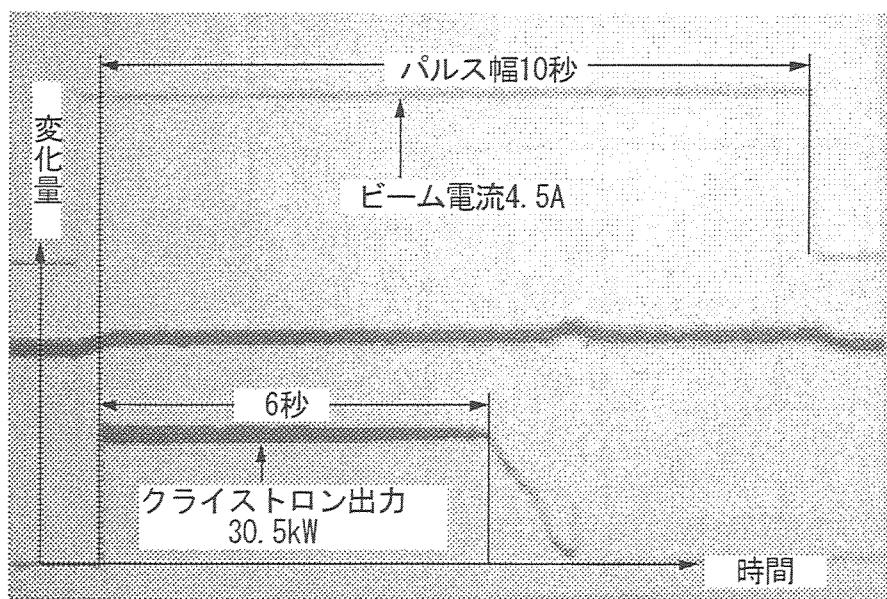


図3-5 クライストロン出力の異常波形

図3-6は、パルス幅とコレクター温度との関係を示す。クライストロン出力周波数2.00GHz、ビーム電流4.5A、出力電力(40~45kW)において、パルス幅を順次延ばし最大60秒まで運転し、このときのクライストロンのコレクター温度(3ヶ所)を熱電対により計測したものである。図3-6からわかるように、パルス幅が20秒以上になると、コレクター温度の上昇変化が少くなり、ほぼ最高温度に達していると思われる。この試験を行っている間に、「クライストロン・コレクター温度高(150°C)」によるインターロックは動作していない。

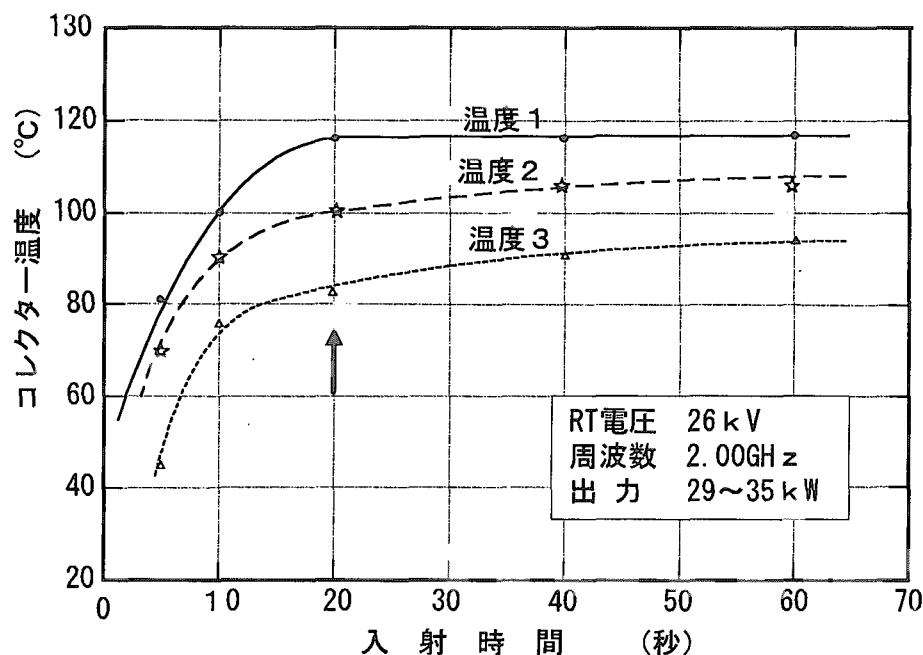


図3-6 入射時間 — コレクター温度

図3-7はクライストロンの発振周波数をスペクトルアナライザーで測定したときの波形である。この波形から中心周波数は 2.00GHz であることが確認できた。2.00GHz で 40kW の出力をピークを持ち  $2.00 \pm 0.02\text{GHz}$  で出力は-30dB 程度(1/1000)である。ほぼ期待通りの出力波形が得られた。なお、クライストロン出力周波数 1.74GHz と 2.23GHz については、パルス幅 10 秒までの試験を実施した。

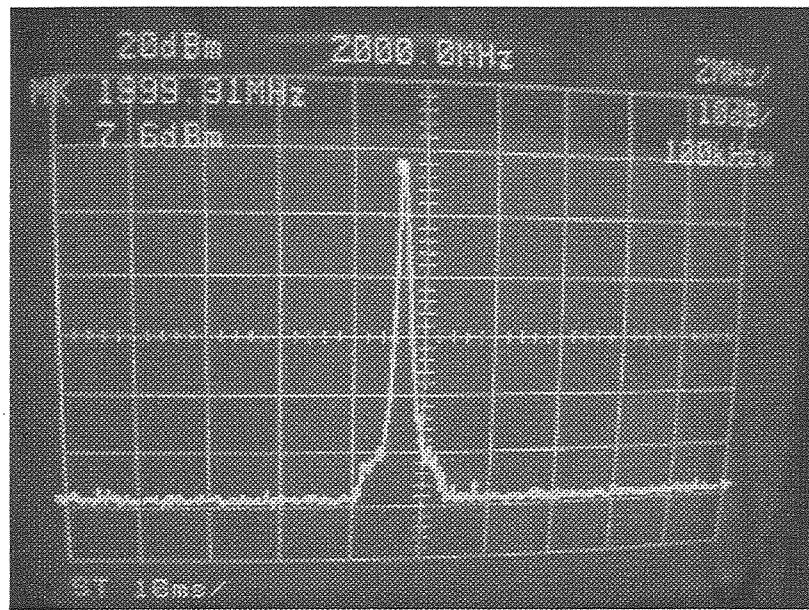


図3-7 スペクトロアナライザーワーク

模擬負荷を使用した長パルス試験を実施して、コレクター温度が 20~30 秒で飽和し、最大温度でも  $120^{\circ}\text{C}$  以下であることからクライストロンの冷却能力は十分に働いていることが確認ができた。また、クライストロン周波数がずれていないことが測定波形から確認できた。これらのことから、JT-60U において ECR-DC ための運転が実施できることが明らかとなつた。

## 4. ECR 放電洗浄における運転結果

### 4. 1 運転の概要

ECR 放電洗浄用の運転では、導波管を切り替えて高周波出力を長時間(約 30 分以上)アンテナから真空容器へ入射して ECR プラズマを生成する。この場合、導波管、真空窓やアンテナの温度上昇が懸念され、模擬負荷を使用した試験(最大 60 秒)に比べ発振時間が長くなることから温度等の監視が必要となった。放電洗浄運転時、クライストロン出力が下がるような場合、またはアンテナ先端部の温度が急激に上昇したときには、すぐにクライストロンへ供給している高周波入力を止める、あるいはクライストロンへのビーム電圧を切るなどにより、機器が破損しないようにインターロックを設置した。さらにセラミック製の真空窓の温度が管理値 100°C 以下であることを監視しながら運転を行った。

### 4. 2 エージング手法

JT-60U の実験条件に合わせて、LHRF 加熱装置の出力とパルス幅を変えることが要請された。すなわち、「高出力・短パルスマード」と「低出力・長パルスマード」である。この切り替えは、空洞共振器の設定と RT 電圧の変更を行う。さらに、出力周波数(2.00, 1.74, 2.23GHz)の変更を行う場合は、切り替え信号発生用スイッチの操作、空洞共振器の設定と励振増幅系の標準信号発振器(周波数と出力)の調整を行う。この操作終了してから出力及び入射時間を増加させるエージングを開始する。

中央制御室に設置されている、LHRF 加熱装置の制御設備(真空入射装置)に設定する出力値は、クライストロン 8 本が同時に出力する合計出力値を設定する。なお高出力のエージング手法(RT:70kV)としては、出力／パルス幅を～1000kW/100ms 程度から～4000kW/2s-連続波までエージングを行うことができればエージング終了である。アンテナ先端部の放電が確認された場合は、真空入射装置にて 1000kW/100ms を設定し、出力を断続的に入射する変調(10msON/OFF)を利用してエージングを行う。まず、出力を 200～500kW ステップで 1000kW から 4000kW へ高くしていく。出力アップやパルス幅伸長の判断は、オシロでの波形に乱れがないことである。次に出力を 2000kW 程度に下げ、連続波にして同様に出力アップしていく。出力が安定したら、パルス幅を 1～3 秒程度まで伸ばしていく。順調であれば、15～20 分程度で済む。

具体的なエージングは以下のように行った。主にエージングを効率良く実施するために開発された制御装置である真空入射装置を用いて、最初に高周波出力設定 320kW、RT 電

圧設定26kVを入力し、また空洞共振器の設定を確認した。真空入射にて100ms程度から2～3秒まで繰り返しエージングを実施し、オシロ等で高周波出力をチェックした(0.5Vの信号なら出力は約30kW)。その後RF放電洗浄入射用タイミング・パルス生成回路を用いて、パルス幅30秒-RF停止時間30秒(30秒RFあり/30秒RF休止)の設定で繰り返しエージングした。ここで、高周波出力が10秒程度で減衰するのが観測されたら、出力を断続的に入射する変調モードの制御器についている「RF切り」スイッチを利用して～5秒程度、クライストロンへの高周波入力を止めた。出力の減衰は空洞共振器内での放電と推測されるため、この休止により放電を素早く制御することができる。これにより空洞での耐電圧性能が回復し、高周波出力を復帰させることができた。30秒間安定して出力が出るようになると、さらに60秒RFあり/30秒休止を繰り返してエージングを行った。

#### 4. 3 各部の温度上昇

LHFR 加熱装置のクライストロン1本を用いて真空容器内の第一壁の放電洗浄を実施し LHFR 加熱装置の温度上昇のデータを取得した。

図4-1は、入射時間と各部温度上昇の関係を示している。クライストロン・コレクター温度の最高温度は約 120°Cで飽和した。コレクター液面計をテレビモニタにより監視していた。クライストロン発振中に気泡が発生し、液面計ではその状態では液面を正確に確認することができなかつたが、入射を停止すると気泡が消え液面を確認できた。最高温度が 120°Cであるため「コレクター最高温度 T=150°C」のインターロックは動作しなかつた。また、検討通りクライストロン・コレクターでの水蒸気発生は約 8 ル/分であったため、十分補給(20 ル/分)が間に合い、「クライストロン・コレクター冷却水水位低」のインターロックも動作しなかつた。

運転を行う上で RT 盤内抵抗( $100\text{k}\Omega$ )の温度上昇が懸念されたため、抵抗温度を測定した。図4-1から判るように入射を 29～35kW-45 分間連続しても、放射温度計とサーモラベル(135～200°C)の測定による抵抗温度は約 125°Cであり、抵抗使用値(最大 200°C以下)より低いことが確認できた。また入射時間に比例してフレキシブル導波管と真空窓の温度が上昇している(測定例を図4-2に示す)。そこで、真空窓温度制限値(100°C)以下で放電洗浄時間を求めた。真空窓温度上昇率は  $6^{\circ}\text{C}/20$  分であるから入射時間は 333 分となる。従って伝送系は 30kW であれば数時間の運転も全く問題ないと考えた。

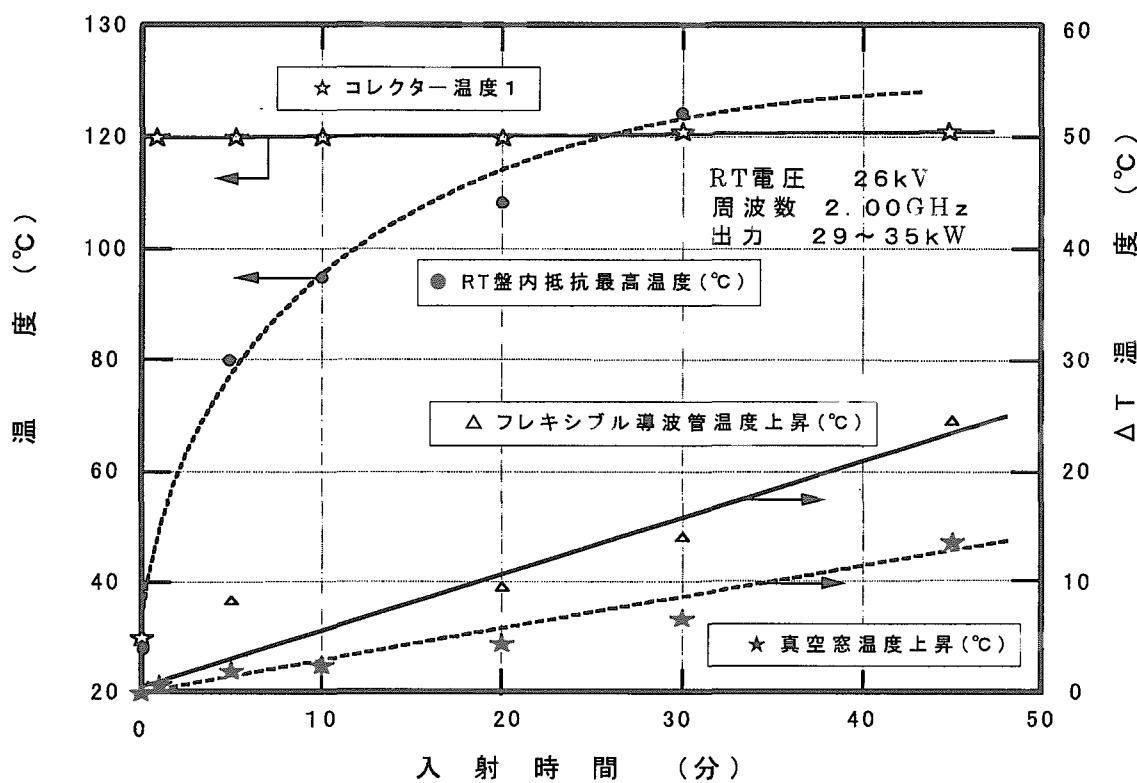


図4-1 入射時間 一 各部温度

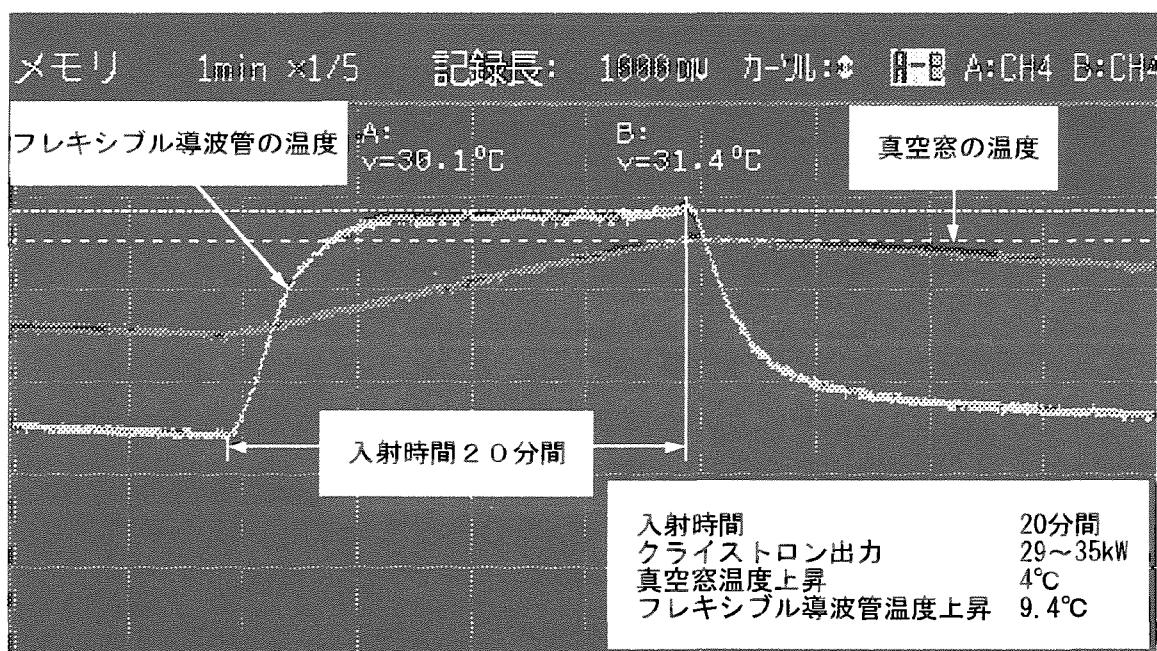
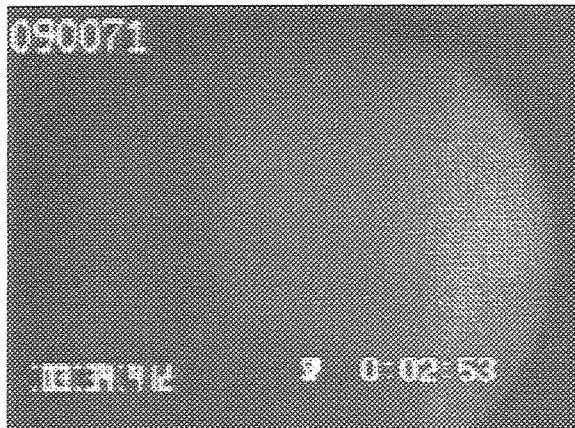


図4-2 入射時間 一 温度測定波形

図4-3は、ECR-DCによりプラズマが正常に生成されている時の写真である。真空容器全体にプラズマが生成されている場合、アンテナ先端(6B)の熱負荷が小さいことが分かる。

可視カメラの画像



赤外線カメラの画像

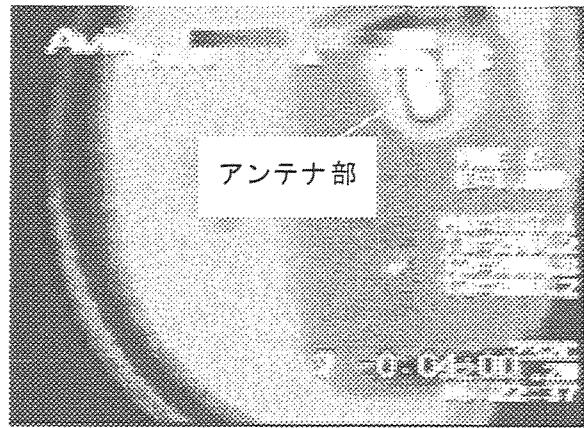


図4-3 プラズマ正常時の写真

図4-4は、ECR-DCによりプラズマが正常に生成されない時の写真である。このとき、アンテナ前面でベルト状のプラズマが生成される。このようなプラズマの場合、アンテナ先端部において急激な温度上昇が観測された。

真空容器内がアルゴンガスで満たされている時には、クライストロン出力が数 kW でプラズマが生成されることが可視テレビで確認できた。

可視カメラの画像



赤外線カメラの画像



図4-4 プラズマ異常生成時の写真

図4-5は、～24kW-20分の連続入射を行った時のクライストロン出力進行波を測定した結果である。この結果から、クライストロン出力が時間とともに減少する傾向が見られた。このときのクライストロンのビーム電圧とビーム電流は一定であった。最初の進行波出力と入射を停止する直前の進行波出力の比較すると最初の進行波出力の約60%まで低下している。これは長時間の運転で空洞共振器の温度が上昇し、共振条件が変化し、出力が低下するものと推測される。

# 90126

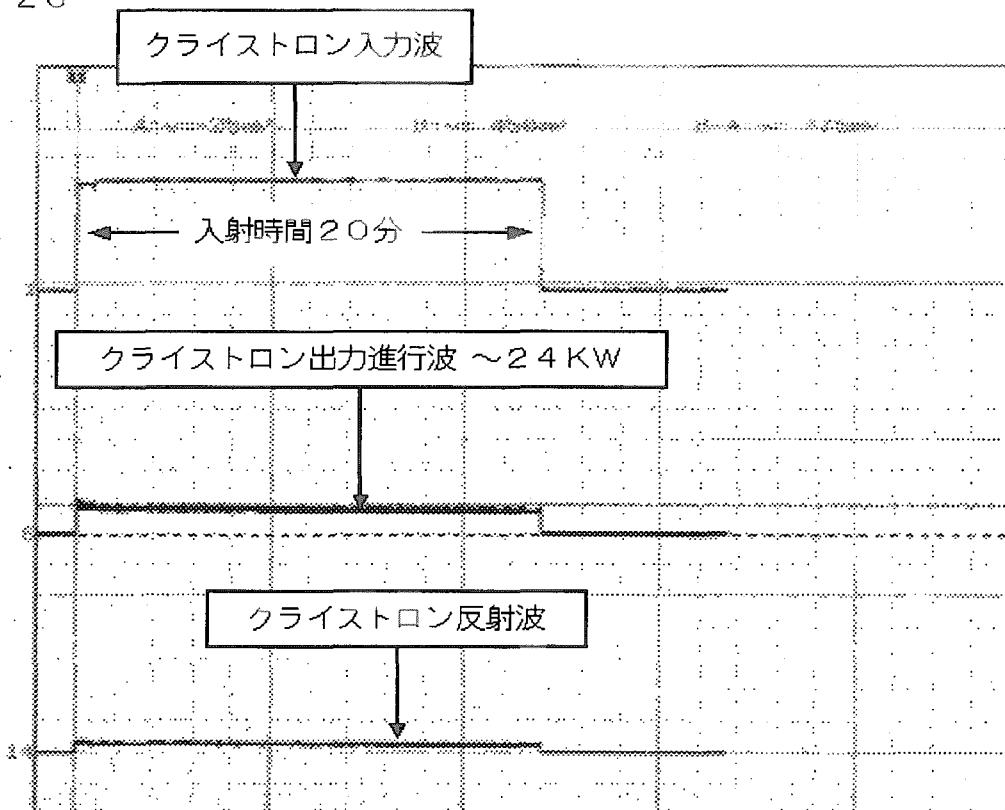


図4-5 入射時間 - クライストロン出力

#### 4. 4 ECR-DC の効果

低出力・長パルス用に調整されたクライストロン1本を使用して、真空容器内の第一壁の放電洗浄を行った。この時の ECR-DC の効果について下記に述べる。

ECR-DC(RF連続入射)を実施し、排出されるトリチウム量を計測した。クライストロン周波数を1.74/2.00/2.23GHzと変更し、ECRの共鳴面の位置を変えた。しかし、入射する高周波の周波数を変えててもトリチウム排出に大きな差は見られなかった。

次に、動作ガスに軽水素、ヘリウム、アルゴンを用い、TDCやGDCとの性能比較を行った。この結果、ヘリウムやアルゴンガスの場合ではトリチウムの排出効果は少なく、軽水素ガスを用いた場合では、GDCの排出量と同程度であり、中性ガス圧が高い(生成されるプラズマが多い)方がより効果的であった。以上の結果から、軽水素ガスを用いたECR-放電洗浄は、真空容器内(第一壁)の洗浄のために大いに有効であると言える。

## 5. まとめ

本報告書では JT-60ULHRF 加熱装置用クライストロンの低出力・長パルス試験についてまとめた。

LHRF加熱装置用クライストロンは、本来、1MW-10 秒の高出力・短パルス使用で調整されているため、低出力・長パルス運転が可能となるように、電源性能から使用可能なビーム電流を評価し、さらに、伝送系、クライストロンの冷却能力から適切な運転領域を検討した。その結果、ビーム電圧 72kV、ビーム電流 4.4A の定常運転が可能であることを明らかにした。

実際には、上記のビーム電圧、ビーム電流で出力が最大となるように、クライストロンの空洞共振器を調整した。調整前は数 kW の出力であったが、調整後は 40 kW の出力を得た。模擬負荷を使用し、60 秒までの試験運転を行い、クライストロンのコレクター温度が約 20 秒後に 120°C 程度で一定となることを確認し、コレクター冷却性能から定常運転が可能と判断された。

JT-60UでのECR-DCの効果を調べる実験では、約30kW-45分の運転に成功した。クライストロン出力は時間とともに数10%と減少した。この出力減少は空洞共振器の温度が上昇し同調が外れることによると推測された。このとき、LHRF加熱装置のなかで最も危惧された電源設備のRT盤内抵抗の温度は約20分で飽和し、120°Cまで上昇したが、使用温度上限は200°Cで問題がなかった。また、他の凶慮すべき機器であるフレキシブル導波管及び真空窓の上昇温度も10~30°Cで問題なかった。JT-60UにおけるECR-DC実験では、ヘリウムやアルゴンよりも軽水素を用いた方が、真空容器内(第一壁)の洗浄に有効であることがわかった。

### 謝辞

本報告書をまとめるにあたり、有益な御意見、御協力を戴きました開発電気株式会社清水達夫、また、終始指導、配慮して頂いた藤井常幸 RF 装置試験室室長にお礼申し上げます。およびRF装置試験室の諸氏に深く感謝いたします。

### 参考文献

- 1) JT-60 設計報告書・第 11 編 一RF 加熱装置一
- 2) K.Ushigusa,etal.,Fusion Engineering and Design 45 (1999) 137-144  
(Electron cyclotron resonance discharge cleaning by using LHRF system on JT-60U)
- 3) 池田 佳隆 : JAERI-M 88-182
- 4) JT-60 運転経験IV p246-251
- 5) 臨界プラズマ試験装置 JT-60 高周波加熱装置 取扱説明書④-2／22

## 付録1

出力調整試験(2.00GHz)の実際(手順)

ATT [dB]	RT設 [kV]	ビーム 電流[A]	出力 [kW]	効率 [%]	同調制御器設定値				
					CV-1	CV-2	CV-3	CV-4	CV-5
1.50	26	4.4	1.5	0.4	133	143	171	166	152
1.50	26	4.4	1.5	0.4	133	143	170	166	152
1.50	26	4.4	2.3	0.7	133	143	169	166	152
1.50	26	4.6	2.3	0.6	133	143	168	166	152
1.50	26	4.4	2.3	0.7	133	143	167	166	152
1.50	26	4.5	3.2	0.9	133	143	165	166	152
1.50	26	4.4	6.2	1.8	133	144	165	166	152
1.50	26	4.4	9.8	2.9	133	145	165	166	152
1.50	26	4.4	11.1	3.3	133	146	165	166	152
1.50	26	4.5	12.5	3.6	133	146	164	166	152
1.50	26	4.4	15.4	4.5	133	146	163	166	152
1.50	26	4.4	18.0	5.2	133	146	162	166	152
1.50	26	4.4	18.6	5.4	133	146	162	164	152
1.50	26	4.4	19.9	5.8	133	146	162	163	152
1.50	26	4.4	20.3	5.9	133	146	162	162	152
1.50	26	4.5	17.3	5.0	133	147	162	162	152
0.50	26	4.5	21.9	6.2	133	147	162	162	152
0.50	26	4.6	18.8	5.3	133	148	162	162	152
0.50	26	4.6	25.3	7.1	133	146	162	161	152
0.50	26	4.6	25.6	7.2	133	146	162	160	152
0.50	26	4.5	24.2	6.8	132	146	162	160	152
0.50	26	4.6	25.6	7.2	132	146	162	159	152
0.50	26	4.6	26.8	7.5	132	146	162	158	152
0.50	26	4.5	27.2	7.8	132	146	162	157	152
0.50	26	4.6	29.8	8.4	132	146	162	156	152
0.50	26	4.6	32.2	9.1	132	146	162	155	152
0.50	26	4.5	35.8	10.1	132	146	162	154	152
0.50	26	4.5	39.7	11.2	132	146	162	153	152
0.50	26	4.6	37.5	10.5	132	146	163	153	152
0.50	26	4.6	31.9	9.0	132	146	163	154	152
0.50	26	4.6	33.6	9.4	133	146	163	154	152
0.25	26	4.5	37.3	10.7	132	146	163	153	152
0.25	26	4.5	40.7	11.5	132	146	162	153	152
0.25	27	4.8	49.8	13.4	132	146	162	153	152
0.25	28	5.1	59.0	15.0	132	146	162	153	152

注意: 同調制御器設置値表の中で太字(網掛け)部分は、  
前の設置値と変わっていることを示す。  
時間的流れは、表の上から下である。(矢印方向)

## 付録2

### 出力調整試験結果

#### 1. 同調制御器設定値の調整前後の出力変化

##### 1-1) 1. 74GHz

調整 前／後	RT電圧 [kV]	ビーム 電流[A]	コレクタ 電圧[V]	クライストロン	効率 [%]	同調制御器設定値				
						CV-1	CV-2	CV-3	CV-4	CV-5
前	26	4.5	78.4	2.7	0.8	17	22	43	38	14
後	26	4.5	78.0	13.5	3.8	17	23	35	38	14

##### 1-2) 2. 00GHz

調整 前／後	RT電圧 [kV]	ビーム 電流[A]	コレクタ 電圧[V]	クライストロン	効率 [%]	同調制御器設定値				
						CV-1	CV-2	CV-3	CV-4	CV-5
前	26	4.5	76.5	2.0	0.6	133	143	171	166	152
後	26	4.5	78.0	40.7	11.5	132	146	162	153	152

##### 1-3) 2. 23GHz

調整 前／後	RT電圧 [kV]	ビーム 電流[A]	コレクタ 電圧[V]	クライストロン	効率 [%]	同調制御器設定値				
						CV-1	CV-2	CV-3	CV-4	CV-5
前	26	4.5	78.8	7.9	2.2	267	275	302	297	333
後	26	4.4	78.6	39.9	11.4	267	276	291	295	333

注意: 前はビーム電流18.6(A)に合わせ同調制御器設定されている値

後はビーム電流4.5(A)に合わせ同調制御器設定されている値

#### 2. ビーム電流(A) vs 出力電力(kW)

##### 2-1) 1. 74GHz

ATT [dB]	RT電圧 [kV]	ビーム 電流[A]	コレクタ 電圧[V]	クライストロン	効率 [%]	同調制御器設定値				
						CV-1	CV-2	CV-3	CV-4	CV-5
0.25	26	4.5	78.0	13.5	3.8	17	23	35	38	14
	27	4.8	78.4	17.4	4.6					
	28	5.1	78.4	21.2	5.3					
	29	5.3	77.6	25.8	6.3					
	30	5.6	78.0	31.1	7.1					
	70	18.6	77.3	423.6	29.4		17	22	43	38

##### 2-2) 2. 00GHz

ATT [dB]	RT電圧 [kV]	ビーム 電流[A]	コレクタ 電圧[V]	クライストロン	効率 [%]	同調制御器設定値				
						CV-1	CV-2	CV-3	CV-4	CV-5
0.25	26	4.5	78.0	40.7	11.5	132	146	162	153	152
	27	4.8	77.6	49.8	13.4					
	28	5.1	78.0	59.0	15.0					
	70	18.6	76.5	546.9	38.4		133	143	171	166

##### 2-3) 2. 23GHz

ATT [dB]	RT電圧 [kV]	ビーム 電流[A]	コレクタ 電圧[V]	クライストロン	効率 [%]	同調制御器設定値				
						CV-1	CV-2	CV-3	CV-4	CV-5
0.50	26	4.4	78.6	39.9	11.4	267	276	291	295	333
	26	4.4	78.6	68.3	19.6		267	275	288	297
	70	18.9	76.9	667.0	45.8		267	275	302	297

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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
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	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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 <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
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	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 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(注)

1. 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。

2. 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。

3. 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。

4. E.C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。

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> 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 <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322×10 <sup>-4</sup>	1.35951×10 <sup>-3</sup>	1.31579×10 <sup>-3</sup>	1	1.93368×10 <sup>-2</sup>	
6.89476×10 <sup>-3</sup>	7.03070×10 <sup>-2</sup>	6.80460×10 <sup>-2</sup>	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605J (計量法)
1	0.101972	2.77778×10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813×10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150×10 <sup>18</sup>	= 4.184J (熱化学)	
9.80665	1	2.72407×10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487×10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082×10 <sup>19</sup>	= 4.1855J (15°C)	
3.6×10 <sup>6</sup>	3.67098×10 <sup>5</sup>	1	8.59999×10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522×10 <sup>6</sup>	2.24694×10 <sup>25</sup>	= 4.1868J (国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279×10 <sup>-6</sup>	1	3.96759×10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272×10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仮馬力)	
1055.06	107.586	2.93072×10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515×10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616×10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506×10 <sup>-3</sup>	1	8.46233×10 <sup>18</sup>	= 735.499W	
1.60218×10 <sup>-19</sup>	1.63377×10 <sup>-20</sup>	4.45050×10 <sup>-26</sup>	3.82743×10 <sup>-20</sup>	1.51857×10 <sup>-22</sup>	1.18171×10 <sup>-19</sup>	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270×10 <sup>-11</sup>	1	0.01	100	1
3.7×10 <sup>10</sup>	1				

照射線量	C/kg	R
1	3876	1
2.58×10 <sup>-4</sup>	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

R100  
古紙配合率100%再生紙を使用しています