

JT-60U LHRF 加熱装置用クライストロンの低出力・長パルス調整試験

○ 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

日本原子力研究所 那珂研究所 核融合装置試験部

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イラー型放電洗浄（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による洗浄が難しいと考えられている。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は、電子サイクロトロン共鳴（ECR）放電洗浄（DC）が考えられている。そこで、JT-60UのLHRF加熱装置を利用して、ECR-DCの有効性を調べることが計画された。そのため、低出力・長パルスのECR-DCに適した運転が可能となるように、高出力・短パルス用に設計されたLHRF加熱装置を調整し、模擬負荷を用いて試験を行った。ここで、低出力とは、過去のECRプラズマ生成に必要とする電力約50 kWであり、長パルスとは、定常的に運転できることである。

今回の報告では、模擬負荷を使用した中心的な装置であるクライストロンの「低出力・長パルス調整試験」のために行ったLHRF加熱装置の検討、調整方法及び試験結果について述べる。

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

原研の大型トカマク装置 JT-60U には、プラズマを高周波により加熱するための装置として、低域混成波（LHRF）加熱装置ユニットがある。各ユニットは、電源設備、高周波設備および制御設備から構成されている。高周波設備の主要な構成は、図1に示すように励振増幅系、大電力増幅系、伝送系、結合系（アンテナ）の4つの系である。各ユニットは、大電力の高周波を発生する最も重要な1MWクライストロンを8本持ち、2ユニット合計では最大16MWの高周波を発生する。このLHRF加熱装置用に開発されたクライストロンは、2GHz帯で1MW・10秒の高周波を発生し、2GHz帯の準CW級としては、世界最大出力である。

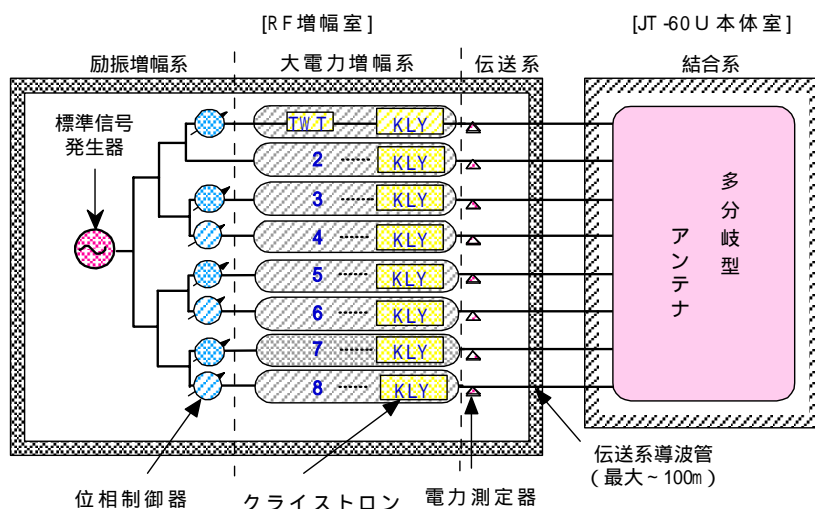


図1 LHRF 加熱装置のブロック構成図

2.2 運転可能範囲の検討

現有 LHRF 加熱設備の最小限の改造で定常運転を実施するために、クライストロンのビーム電流条件を評価し、過去の実績から伝送系、模擬負荷及びクライストロンの冷却能力について評価・検討を行った。

さらに、クライストロンの定常運転の可能性を判断するために、最低でも模擬負荷へ入射する時間として1分としている。

既設電源設備で、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 のデューティにて休止するように設計されている。直列直流発生装置（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、 $i = I / 55$ となる。 I は、直列 DCG の電流が最大 130A-10 秒であるので i は約 17.5A(=130A/ 55)となる。この直列 DCG は最大 4 本のクライストロンに電力を供給できる（クライストロン当たり約 4.4A）。なお、平成 11 年に、ユニット の 4 台の直並列 DCG（最大電流 65A-10 秒）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、ビーム電流=4.4A-1 分間通電した実績がある[1]。

伝送系については、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伝送系は耐えることができるのでクライストロン出力は 40kW(300kW×8 秒/60 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値 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 350 kW-10 秒、デューティ 1/60 である。この条件で、入射時間を求めると 350 kW/50kW×10 秒から 70 秒となる。

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保するために、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 秒((3MW×10 秒) / (72kV×4.5A))となる。このとき、蒸発する水の量は約 13 ㍓となる。一方コレクターへは 20 ㍓/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、定常運転が可能である。

クライストロン 1 本を使用して、低出力・長パルス運転を行う上での制限項目を下記にまとめる。

電源の制限項目	
コレクター電圧	72kV (タップ 3)
ビーム電流	17.5A
RT盤内抵抗温度	200
模擬負荷を使用した運転時の制限項目	
入射時間	70秒 (デューティ 1/60において)
入射電力	50kW
クライストロン・コレクター最高温度	150

2.3 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

を新たに設置した。

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) クライストロンのコレクター冷却水補給の監視

冷却水の補給がうまくいかない場合、コレクターが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、テレビモニタにより液面計を監視した。但し、万一の場合のためにコレクター温度が 150 になると高電圧を遮断するインターロックを設けている。

(2) 真空度の確認

高周波の発生によってクライストロン内の真空度が劣化した場合は、イオンポンプ電流が $1\mu\text{A}$ ($1.3 \times 10^{-5}\text{Pa}$ に相当) 以下になるまで真空度の回復を待った。

(3) クライストロンの空洞共振器の調整

通常クライストロンの空洞共振器は、1MW-10s 用に調整されているが、より低ビーム電流で出力を発生するために空洞を調整し、増幅率を上昇させる必要がある。

空洞共振器の調整においては、空洞共振器の位置を一度に大きく変えないで空洞共振器(5ヶ所)の位置をそれぞれ少しずつ変更し、100ms 程度の短パルスから始めた。なぜならクライストロンの空洞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、クライストロンの空洞内に過大な高周波電界が成長して放電が発生し、空洞の可動部が焼き付き、調整不能になるからである。

3.2 空洞共振器の調整

ここでは、クライストロン1本を使用し各ビーム電流(4.5、8.4、11.1、14.8、18.5(A))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。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設定する(1.74、2.0、2.23GHz)。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) 空洞共振器の位置を、高出力・短パルス運転に最適化された空洞共振器の位置に設定する。
- (4) レギュレータチューブ(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、空洞共振器の同調位置を求める。

図2に、ビーム電流(A)に対するクライストロン出力(kW)を示す。図には、「1MW-10s」用に最適化された同調器の位置での出力(調整前)と、各ビーム電流において最適化された同調器の位置での出力(調整後)を示す。図2から分かるように、ビーム電流に合った同調器位置にすることでクライストロ

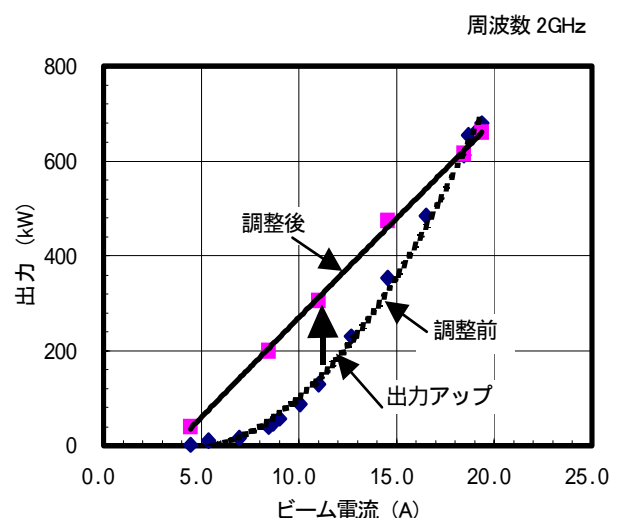


図2 ビーム電流に対するクライストロンの出力

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）。この出力調整により、周波数 2GHz、ビーム電流 4.5A で出力 40.7kW を得ることができた。

3.3 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、模擬負荷へクライストロン出力を最大 60 秒まで入射した。その試験の結果について記述する。

長パルス試験とは、元々の設計である 10 秒運転を越えて長時間高周波を発生させた場合での LHRF 加熱装置（クライストロン）の健全性を見ることである。試験方法としては、まずクライストロンの安定な発振を確認した。模擬負荷を使用した長パルス試験を実施してクライストロン・コレクター温度を計測した。図 3 に示すようにコレクター温度が入射時間 20～30 秒で飽和し、最大温度でも 120 以下であることからクライストロンの冷却は十分であることを確認できた。また、クライストロン出力をスペクトルアナライザで測定し中心周波数がずれていないことを確認した。

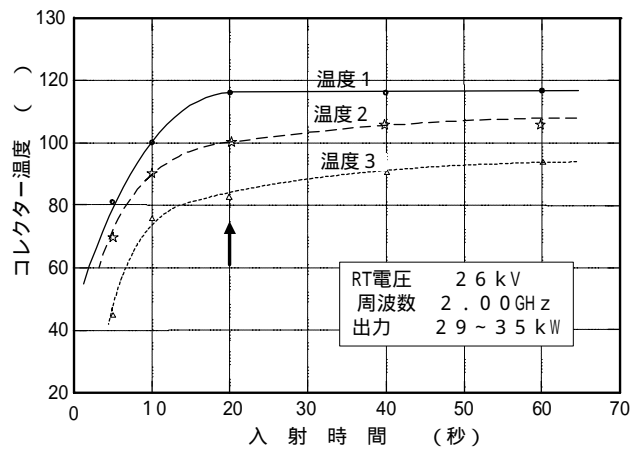


図 3 入射時間とコレクタ温度の関係

4. まとめ

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、運転実績から伝送系や、クライストロンの冷却能力から適切な運転範囲を検討した。その結果、ビーム電圧 72kV、ビーム電流 4.4A、周波数 2GHz で、出力 50kW の定常運転が可能であることを明らかにした。

試験の結果、ビーム電圧 72kV、ビーム電流 4.5A 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 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目的とするクライストロンの定常運転が可能と判断された。

参考文献

- [1] K.Ushigusa, et al., Fusion Engineering and Design 45 (1999) 137-144
(Electron cyclotron resonance discharge cleaning by using LHRF system on JT-60U)