JT-60 高周波加熱装置の真空排気系*

横倉 賢治**・池田 佳隆**・今井 剛**
菅沼 和明**・永島 孝**

(昭和62年12月25日 受理)

Vacuum Pumping System for the JT-60 Radio-Frequency Heating System

Kenji YOKOKURA, Yoshitaka IKEDA, Tuyoshi IMAI,
Kazuaki SUGANUMA and Takashi NAGASHIMA

(Japan Atomic Energy Research Institute, Naka, Ibaraki)

(Received December 25, 1988)

1. はじめに

JT-60 高周波加熱装置^{1,2)}は、低域混成波帯加熱装置 (LHRF $f=1.7\sim 2.3$ GHz) とイオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF $f=110\sim 130$ MHz) の加熱装置があり、合計10 MW 以上の電力をプラズマへ吸収させることができる。

高周波加熱装置では、大電力高周波を伝送する経路に導波管あるいは、同軸管を使用している。LHRF 系の導波管の経路には、セラミック封止窓があり、片側に SF_6 ガスが封入され、もう一方は真空に維持されている。クラストロンから出力された高周波は、セラミック真空封止窓および真空中の導波管を通して伝送される。この真空中を高周波が伝送する過程に導波管表面あるいは、セラミック窓表面壁から不純物ガスが発生して、種々の放電を引き起こすことが知られている。特に伝送電力を増すためのエージング処理 (ランチャー内の表面状態の凹凸や汚れを除き、大電力を入射させても大きな反射が返ってこないための操作) では、小さな放電を誘発させて表面をなめらかにしたり、表面の汚れを放出させる作用を強制的に実施しなければならない。これは、トカマクから入射してガスとこれ等の放出ガスがランチャー内に充満して排除されずにいると、異常放電が多発してセラミック窓を破壊させたり、安定なパワー伝送がで

きなくなるからである。

真空排気系では、これ等のガスをできる限り早い時間で排気させ、結合系ランチャー内を常に高真空に保って、安定に大電力高周波パワーを伝送させることを目的としている。JT-60 では他の大型トカマクと違って、真空窓がプラズマからかなり離れたところに位置しており、導波管内を差動排気してエージング効果を上げているのが大きな特徴である。また、高周波伝送により放出されるガスの種類や放出量を測定分析して、エージング効果の進展状況や、放電制御のための運転条件を決定する指針を得たり、真空漏れを検知する等の目的を持つものである。

JT-60 高周波加熱装置は、昭和61年7月より真空入射が開始され、同年10月よりプラズマへ入射が開始された。62年10月現在高周波加熱装置では、10 MW 以上のパワーがプラズマへ入射され、電流駆動、追加熱等に貢献している。

2. 基本設計

高周波加熱装置真空排気系を決定する上で考慮した主要内容を以下に示す。

(1) 高周波の印加に伴うガス放出に対して、可能な限り高速で排気し、ランチャー内を $10^{-2}\sim 10^{-3}$ Pa 以下の圧力に維持する。(セラミック窓部を 5×10^{-3} Pa 以下、JT-60 の漏れ磁場による電子共鳴領域を 1×10^{-2} Pa 以下にすることが重要で、実際にはランチャーマニホールド内に放出された 1×10^{-2} Pa の水素ガスを 1×10^{-3} Pa

* 昭和62年11月11日 第28回真空に関する連合講演会で講演 (11Ap-14)

** 日本原子力研究所 (茨城県那珂郡那珂町大字向山)

に排気できる時間として ≤ 1 secを想定して、排気ポンプの設計を行っている.)

(2) 強磁場、高圧力下 ($\geq 10^{-2}$ Pa) で使用できる、ガス分析システムを製作し、遠隔制御によるデータ収集処理機能の充実を図る。

(3) コストを下げ、多機能で高信頼性の両立を具体化する。特に制御系では、装置の保護と運転操作系を整理し、機能性と信頼性について役割を明確に区別した。装置の保護インターロックについては、誤動作による事故を防止するため、シーケンサ回路には入出力部にリレー接点を介して、2台のシーケンサを同じインターロックに使用する等、信頼性を重視したシステムとした。また、運転操作系とデータ管理は、パーソナルコンピュータとデータログ等を利用して、多機能化を実現しながら、コストを最小限に低減させることに目標をおいた。

3. 設備の概要と性能

真空排気系は、JT-60に付属する4ポート (800 ϕ)

のランチャーに各々設置されており、LHRF用3基、ICRF用1基から構成される。主排気ポンプは、LHRF用クライオポンプとICRF用ターボ分子ポンプより構成される。他の設備として粗引排気系、自動圧力調整弁とターボ分子ポンプおよびガス分析システム系、運転制御および運転データ処理を行う制御系、圧縮空気、圧縮窒素、圧縮ヘリウムから構成する圧空系と各機器からの発熱を除去するための冷却水系、ガス脱しを行うベッキング系から構成される。主排気周辺設備の系統図をFig. 1に示す。

3.1 主排気設備

3.1.1 低域混成波帯 (LHRF)

本排気設備は、主排気ポンプを中心に、ランチャーと電氣的に絶縁するための内径410 ϕ のアルミナ製絶縁継手とJT-60真空領域から隔離するための全金属製ゲートバルブ、各種真空度測定器等から構成される。

主排気ポンプの選択では、大排気量でありながら、定められたスペースに設置できるコンパクトな形状を保つ

Fig. 1 Schematic diagram of the vacuum pumping system for the JT-60 RF heating system.

Fig. 2 Dependence of cryo panel and shield panel temperature on the bake out temperature of launcher.

ことと、ポロイダル磁場等のトカマク本体からの漏れ磁場やノイズに対しても、シールド機能を有する単純な構造であることが条件であった。

これ等の条件に適したポンプは、チャコールを使用した18°Kトラップ型クライオポンプで、排気速度 ≤ 10 m³/sを目標に設計された。性能仕様をTable 1に示す。

本ポンプは、機能式冷凍機により冷却されるため、熱入力に対して制限があり、磁場および高周波漏れ (3~5 W)、ベーキング (~250°C)、ガス負荷 (10^{-3} ~ 10^{-2} Pa) 等の複合入熱に対して、諸定の性能を維持できなければならない。このため、クライオポンプの構造は、各種の模擬試験を実施しながら決定された。Fig. 2に示す実験結果は、模擬試験結果の一例であるが、250°C加熱を実施しながら、水素および窒素ガスをそれぞれ0.4 Pa·m³/s, 1.1 Pa·m³/s 排気している場合のクライオパネル平衡温度とシールドパネル温度を示したものである。これ等の複合条件においてクライオパネル温度は、16.5°K (H₂), 18.3°K (N₂) が維持されており、過酷な使用条件にも耐えることが認められた。

Fig. 3にランチャー内の真空構造を示す。主排気系とランチャーが接続するポートは内径400φで、周辺にはランチャーからのベーキング対策として、輻射率0.2以下の表面処理したルーバー (CN₂~15 m³/s) や導波管に設けた真空排気口からの高周波漏れを減衰させるため

Fig. 3 Vacuum construction of launcher.

Table 1 Specification of cryo-condensation pump

Pumping speed for N2	5.2 m³/s
H2	11.0 m³/s
Maximum throughput for N2	1.1 Pa·m³/s
H2	0.4 Pa·m³/s
Pumping capacity for N2	8×10^4 Pa·m³
H2	1.3×10^3 Pa·m³
Cooldown time to 18 K	100 min
Bake out temperature	65°C
Thermal load condition a) + b) + c) + d)	
a) Bake out temperature of launcher	250°C
b) Maximum throughput for N2	1.1 Pa·m³/s
(H2)	0.4 Pa·m³/s
c) RF leak and magnetic field leak	5 W
d) Pumping capacity for N2	8×10^4 Pa·m³
(H2)	1.3×10^3 Pa·m³

のメッシュ (CN₂~50 m³/s) が付属される。1台のランチャーには、32本の導波管が集合されており、導波管1本当たり平均20個の真空排気穴 (24φ) がある。これ等の穴は、高周波をできるだけ漏らさず、大きな排気コンダクタンスをとれる様設計を行っているが、必然的に漏れだす高周波があり、1個の穴当たり~0.5 W (導波管1本当たり250 kW 入射に対して) の漏れがある。この漏れ高周波がクライオポンプに直接入射すると、クライオパネルの温度上昇を引き起こす原因となる。したがって、真空排気口には高周波減衰用メッシュを設け、最大入射時でも3~5 Wの漏れに抑える設計を行っている。

ランチャーの主要材質は、ステンレス鋼 (SUS-316) である。導波管内部には銅コーティングが行われており、その一部 (JT-60のポロイダル漏れ磁場により、ECH放電領域ができる) には、放電抑制処理としてカーボンがコーティング (~5μm) されている。また、真空排気設備側では、クライオポンプ保護対策として、予想より大きなガス負荷 ($> 5 \times 10^{-2}$ Pa) が発生すると予測された場合に使用できる、負荷と同期して開閉動作

Fig. 4 Mass dependence of effective pumping speed estimated from the pumping time constants for H_2 , CH_4 , CO , CO_2 .

が可能なクライオポンプ用前段ゲートバルブが準備されている。

結合系ランチャーマニホールドにおける実効排気速度は、**Fig. 4** に〈●〉印で示す様に水素において $\sim 8 \text{ m}^3/\text{s}$ 、窒素において $\sim 3.2 \text{ m}^3/\text{s}$ の測定結果が得られている。この値は、クライオポンプ単体でのオリフィス法測定値に対して配管コンダクタンス補正計算により求めたものである。また、ランチャー内で発生したガス (H_2 , CH_4 , CO , CO_2) の排気時定数を測定した結果から算出した排気速度を〈○〉で示す。これ等の結果を総括して、ランチャー内の圧力を $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ Pa}$ に維持するため $10 \text{ m}^3/\text{s}$ (H_2) を目標として設計した主排気ポンプは予定通り作動して、 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ の放出ガス (H_2) が発生しても $\sim 1 \text{ sec}$ で $1 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ に排気できることが実証できた。

3.1.2 イオンサイクロトロン周波数帯 (ICRF)

本排気設備は、1台のランチャーに32個ものセラミック窓をもつLHRF系と異なり、ICRF系の場合は、4系統の同軸管伝送のみのためガス放出総量が少ない。よって大規模な差動排気は必要なく、ターボ分子ポンプのみで構成されている。また、ICRF系の特徴は、熱除去、電気絶縁等のためにランチャー内が SF_6 , N_2 , H_2O 用等の複雑な配管系統で構成されているので、真空リークの発生率が極めて高い。排気設備は、これ等の配管ラインをバルブ切換えのみの操作で、直ちに真空引きできる構造とし、二重真空の応急処置を可能にしている特徴がある。また、これ等の配管には He ガスが注入できる配管系があり、何処の場所からリークが発生してもリーク検知が敏速にできる構造としている。

3.2 エージング脱ガス測定システム

本システムは、ランチャーエージング過程で放出され

る不純物ガスを有効かつ広範囲の圧力状態 ($10^{-2} \sim 1 \text{ Pa}$) でも活用、検索するため、マスフィルターとパーソナルコンピューターおよび、ターボ分子ポンプとAPCコントロール付流量可変バルブから構成されている。この流量可変バルブは、ランチャー内の圧力値がマスフィルター作動可能圧力値 $7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ より上昇した時に威力を発揮するもので、過大な真空リークが発生した場合でも有効に利用できる。中央制御室に設置する、運転操作、監視用パーソナルコンピューターより開度設定値（ここでは測定室内の圧力値）を入力することにより、自動圧力調整あるいはコンダクタンス量の固定設定ができる。

4系統のランチャーのガス分析を行うマスフィルター系は、制御電源、分析管セレクター、装置レベルのパーソナルコンピューター2式と中央制御室での測定操作およびデータ処理を行うパーソナルコンピューター2式より構成される。具体的な機能は、定量測定に不可欠な質量補正、圧力補正、残電流補正の演算処理や、質量ピーク検出校正を含め、多チャンネル掃引モード、多チャンネルポイントモード、サンプルステップモード、スクロール実時間演算処理 He モード等の計測処理が可能で、計測データは、ハードおよびフロッピーディスクを利用して

Fig. 5 Time behaviours of produced gases in the launcher with and without cryo-condensation pump.

保存ができる。また、データ処理では、計測値を2画面処理して比較したり、時間軸等を自由に可変させ最適な結果を得ることができる。

本システムのポイントモードで測定した、プラズマ放電時の放出ガスの変化を、クライオポンプ作動時と非作動時において比較した結果を Fig. 5 に示す。プラズマ放電によりランチャー内に充満したガスは、クライオポンプの作動により、たちどころに排気され、定常の圧力値 $\leq 10^{-5}$ Pa まで排気されることが認められるが、クライオポンプ非作動の場合は、 H_2 , CH_4 , CO , CO_2 等がランチャー内に残留して、内部で放電が発生しやすい圧力条件になることが認められる。これ等のポイントモードの各チャンネルのサンプリング時間は、最小 5 msec までマスキング誤差 2% で計測できる。20 msec 以上のサンプリング時間では 1.3% 以下で計測できることを実験で確認した。

3.2 制御設備

制御設備は、中央制御室に設置されるパーソナルコンピュータと装置レベルに設置されるインターロック制御盤、入出力制御データの読みとり、ON/OFF 操作等に使用するデータローガー、および主排気設備現場に設置される真空計等の計測器が設置されている現場中継盤より構成される。

真空排気系の運転操作は、中央制御室に設置するパーソナルコンピュータを利用して、 GPIB 通信により実施する。また、誤操作があってはならない第 1 ゲート弁の開閉については、インターロック制御盤とハード線により直接の取合いを行っている。

インターロック制御盤では、リレーとシーケンサーが組み合わされて使用され、誤動作による事故を防止するため、シーケンサー回路には入出力部にリレー接点を介して、2 台のシーケンサーを同じインターロックに使用している。いずれかのシーケンサー 1 台が故障あるいは誤動作しても、正常なもう 1 台のシーケンサーにより、安全に停止させることができる。シーケンサーは、同じプログラムを実行させているが、自己診断機能によりチェックを行い、異常が発生した場合は出力を停止する機能を有する。

中央制御室におけるパーソナルコンピュータは、主に操作表示と運転データ管理およびクライオポンプの活性処理シーケンスを担当している。CRT 画面では、各機器の ON/OFF (開/閉) 状態はもとより、回転機器の回転数、積算運転時間、パルス開閉回数、各部の温度、各真空計の計測値、警報項目等の運転操作に必要なものは全て表示できる。また、警報項目や機器の ON/OFF (開/閉) 操作した場合は、日時と操作場所等が随時プ

ンターへ出力される。日報に関しては 24 時間毎に、全ての運転データーがプリンターに自動記録される。これ等の運転データーは、ハードおよびフロッピーディスクに保管され、後日データ整理が可能なシステムである。

4. ま と め

本装置を製作するにあたり、最も重要視したことは、多機能で高信頼性を両立させながら、低コストを実現することであった。JT-60 の様な大型プロジェクトではどうしても安全、高信頼性を重視するあまりに、コストの比重が大きな装置になってしまうことが時にある。したがって本装置では、これ等の反省点を踏まえながら、排気装置、保護インターロック、運転制御、計測器等の役割を明確に区別して、それぞれの重視ポイントを以下の様に整理して設計、製作を実施した。

(1) 排気装置

大排気量でありながら小型、シンプル (構造が簡単で複数台は使用しない) である主ポンプで構成する。

(2) 保護インターロック

現時点において最も信頼できる機器および回路構成でシステムを組み、高信頼性を重視する。

(3) 運転制御

保護インターロックの様な高信頼性は望まず、できるだけコストを下げ、多機能であるシステムにする。

(4) 計測器

真空計等の計測器は、信頼の高いものを選別し、必要低限数で構成する。また、ポンプの回数等を含め、多くの運転計測データーを運転制御系で表示あるいは集収できる構成とする。

以上の内容を重視して設計、製作した本装置の特徴は、 $\sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ (H_2) の排気速度を持つ機械式クライオポンプとパーソナルコンピュータを最大限利用した運転制御システムとガス分析システムにあり、以下の内容の成果をあげることができた。

(1) JT-60 高周波加熱装置では、セラミック窓がトカマク装置より離れた位置にあり、その間を差動排気して、効率的な高周波伝送を達成しようとする試みを実施した装置である。本例は世界的にも例がなく、原研特有の方式である^{3,4)}。本排気系は、高周波伝送中の真空中導波管内で発生するガスを $\leq 1 \text{ sec}$ の時定数で、放電現象を抑制できる圧力領域まで排気できる能力を持つもので、大電力高周波伝送やエージング処理の高効率化に貢献できることを示したものである。

(2) 低コストを実現しながら、多機能で高信頼性を両立させた制御設備を製作し、効率的な信頼ある運転

が可能になった。

- (3) 高周波加熱設備に適したガス分析システムを製作し、エージング効果のガス分析やリークテスト等が理想的な型で可能になり、データ収集処理機能の充実が図られた。

謝 辞

本装置の製作に当り、有益な助言と協力をしていただいたJT-60 第3試験室および加熱工学第2研究室の関係者に深く感謝する。また、建設するに当って協力をしていただいた日本電気(株)、住友重機械(株)、日本真空技術

(株)の各関係者に厚く御礼を申し上げたい。

終始御指導、御配慮いただいた吉川允二部長、飯島勉部長を始め白形弘文室長、太田充室長に御礼申しあげる。

〔文 献〕

- 1) T. Nagashima et al.: Fusion Engineering and Design 5 (1987) 101-115.
- 2) T. Fujii et al.: Proc. 3rd Varenna-Grenoble Int. Symp. Heating Toroidal Plasmas 3 (1982) 1133.
- 3) T. Fujii et al.: Jpn. J. Appl. Phys. 22 (1983) 319.
- 4) K. Sakamoto et al.: IEEE Trans. PS-14 (1986) 548.