

# JT-60 高周波加熱装置 真空排気設備の改良

平内慎一・横倉賢治・篠崎信一・鈴木康夫・石井和宏・森山伸一  
日本原子力研究所 核融合装置試験部 RF装置試験室

## 1. はじめに

JT-60 高周波加熱装置真空排気設備は、伝送系導波管及び JT-60 本体真空容器と真空領域を共有しているアンテナと真空窓の間を高真空領域に保つことを目的としている。JT-60 高周波加熱装置は、機器の調整等により大気にする回数が一般の高真空装置に比べて格段に多いため、真空排気設備には、系統別の独立排気能力と粗引き性能の向上が要求された。また、高周波加熱装置の改造に伴い、真空排気設備の変更と増設が繰返された。このため、運転方式や機器操作場所、制御方式に相違が発生し、運転操作性の改善も求められた。更に、制御系のシーケンサ及び操作 PC 等には、約 20 年の連続運転による経年劣化によって故障が頻発し、運転に支障を来していた。これらを改良するため、今回真空排気設備において真空排気機器の改良増力と制御系の改良更新を行った。

## 2. 真空排気設備の目的

JT-60 高周波加熱装置は、周波数 110GHz の電子サイクロトロン波帯加熱 (ECH) 装置、2GHz の低域混成波帯加熱 (LHRF) 装置、112MHz のイオンサイクロトロン波帯加熱 (ICRF) 装置があり、JT-60 プラズマの加熱及び電流駆動を行う。それぞれの高周波加熱装置の伝送系あるいはアンテナでは、大電力高周波 (MW 級) を伝送することにより、真空内表面に付着したガスが放出されて放電が発生する。この放電をできるだけ軽減するために排気装置が設置され、それぞれの高周波加熱装置の性質に合わせた排気方法を選択している。ECH 装置では、伝送系全域にわたり高真空に維持する。LHRF 装置では、特にアンテナと真空窓の間で発生するガスを大容量ポンプで短時間に排気する。運転の中では、アンテナや伝送系内の金属表面を高周波電流によって発熱させて、強制的にガスを放出させたり、故意に小さな放電を起こして、表面を滑らかにし、耐電圧特性を向上させるエージング作業がある。真空排気設備は、この時の放出ガスを効率よく排出する役割も担っている。

## 3. 真空排気設備の性能

### 3.1 ECH 装置の主排気系

ECH 装置の伝送系導波管には、アルミニウム製の内壁がコルゲート状に加工された円形の導波管を使用しており、その導波管は RF 増幅室 (大電力発振管等の設置してある高周波操作部) から中性子遮蔽壁を通り、JT-60 真空容器ポートまで接続されている。導波管の長さは、大電力発振管 (ジャイロトロン) 側の整合器からアンテナ側のダイヤモンド真空窓まで約 50-60m である。その導波

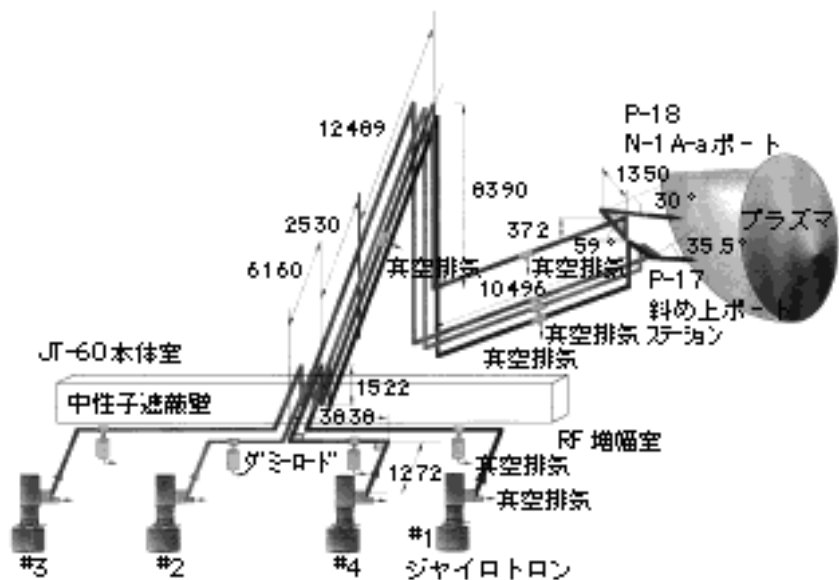


図1 JT-60ECH 装置伝送系と真空排気口部を示した鳥瞰図

管内を常に高真空に保つためにターボ分子ポンプ（公称排気速度 200l/s）を RF 増幅室側と JT-60 本体室側の 2 箇所を設置している。伝送系導波管の内径は、31.75mm で排気コンダクタンスが小さいため数箇所から排気することが望ましいが、初期の建設段階ではコスト削減のため、伝送路に 2 箇所、体積の大きいジャイロトロンエージング用の模擬負荷（ダミーロード）部に 1 箇所の真空排気口数とした。図 1 に JT-60ECH 装置伝送系と真空排気口部を示した鳥瞰図を示す。図 2 に導波管内からの放出ガスが理想的に小さい場合（ $4 \times 10^{-9}$  Pa m<sup>3</sup>/sec m<sup>2</sup>）の伝送系導波管内の圧力分布の計算結果を示す。

ECH 装置は、現在 4 系統稼働しており #1～3 系統は 2 箇所、#4 系統は 3 箇所の真空排気口を有する。理想的な条件の導波管内では  $10^{-5}$ ～ $10^{-4}$  Pa 台の圧力分布が予測される。しかし、実際の系統では伝送系機器が 1 系統に 20 箇所以上、導波管の接続箇所を含めると 50 箇所ある。その機器の中には、体積が大きく放出ガスの大きい整合器やダミーロードも含まれる。また、接続箇所からの微小の真空リーク、ジャイロトロンの交換のための大気操作、整合器

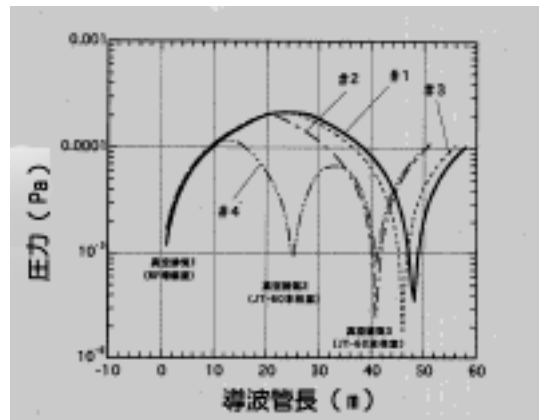


図 2 伝送系導波管内の圧力分布

内での高周波の軸調整（ミラー調整）により高真空領域を大気に開放する回数が多い。そのため、理想的な真空を維持することが難しく、実際の運転経験から真空排気部の真空度は  $10^{-4}$ ～ $10^{-3}$  Pa 台を推移することが多い。高周波を伝送した場合には導波管内で最も真空度が上昇する場所で、 $10^{-3}$  Pa 後半～ $10^{-2}$  Pa 前半台まで上昇する。今後、長パルス大電力の高周波伝送運転により伝送系内での放出ガスがより増加するため、#4 系統では、ジャイロトロンから 20～30m 付近に真空排気ポートを設けた。また、運転効率を改善するため粗引排気ポンプの排気能力を増力し、大気からの排気時間を短縮する改良を実施した。図 3 に改良された JT-60 高周波加熱装置真空排気設備の系統図を示す。

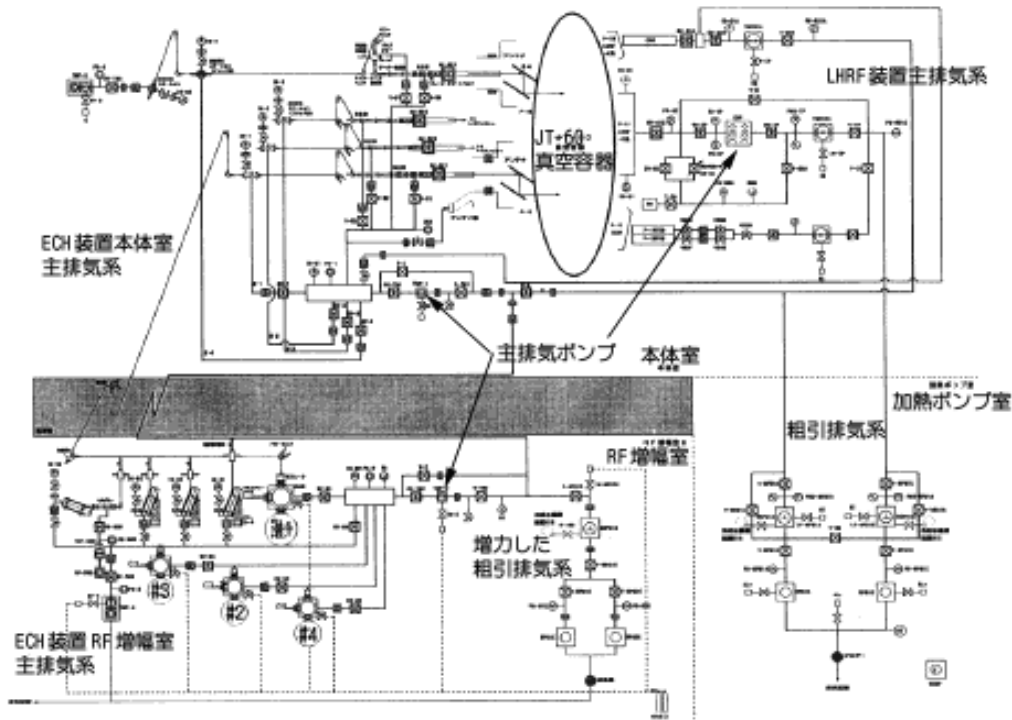


図 3 JT-60 高周波加熱装置真空排気設備の系統図

従来から使用してきた LHRF 装置の粗引排気系のラインを分岐し、ECH 装置の主排気系と近い場所に新たにロータリーポンプ（公称排気速度 40m<sup>3</sup>/h）2 台とメカニカルブースターポンプ（500m<sup>3</sup>/h）1 台を増力した。これにより、粗引時間が大きく改善され、運転効率の向上に加え複数化により予備ポンプ機能も得ることができた。今後は、主排気系の改造として 4 系統を個別に排気できるよう系統毎にターボ分子ポンプを設置し、系統毎に独立した（系統毎に大気操作が可能）高周波伝送運転ができる改造に着手する予定である。

### 3.2 LHRF 装置の主排気系

LHRF 装置の主排気系は、アンテナと真空窓の間で発生するガスを大容量ポンプで短時間に排気する目的で設計され、大排気容量でありながら限られたスペースに設置できる 18° K トラップ型のクライオポンプとターボ分子ポンプ（公称排気速度 500l/s）を用いている。

クライオポンプは、機械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、磁場及び高周波漏れ（3～5W）、ベーキング（～250℃）、ガス負荷（10<sup>-3</sup>～10<sup>-2</sup>Pa）等の大きな複合入熱に対して所定の排気性能が得られる設計である。

LHRF 装置のアンテナには 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 個の真空排気口（φ24mm）がある。これ等の排気口は、高周波をできるだけ漏らさないように高周波減衰用のメッシュを設け、排気コンダクタンスが大きくとれるように設計してある。

アンテナマニホールドにおける有効排気速度は、水素において～8m<sup>3</sup>/s、窒素において～3.2m<sup>3</sup>/s の測定結果を得ている。図 4 に LHRF アンテナにおける有効排気速度の関係を示す。図 5 にプラズマ放電時における真空排気作動時、非作動時のアンテナマニホールド内の放出ガスの変化を示す。高周波伝送時に発生した放出ガス（H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>）が、排気ポンプにより排気されて瞬時に定常の圧力 10<sup>-5</sup>Pa まで排気されることが認められる。

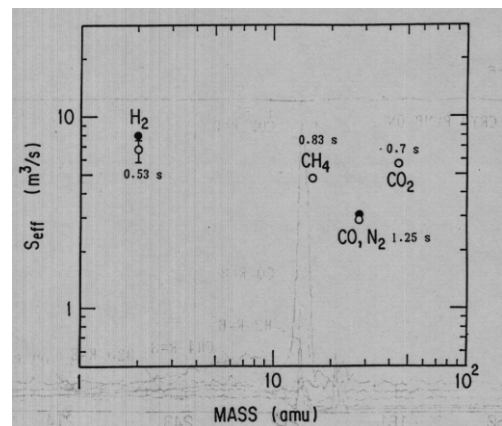


図 4 LHRF アンテナにおける有効排気速度の関係

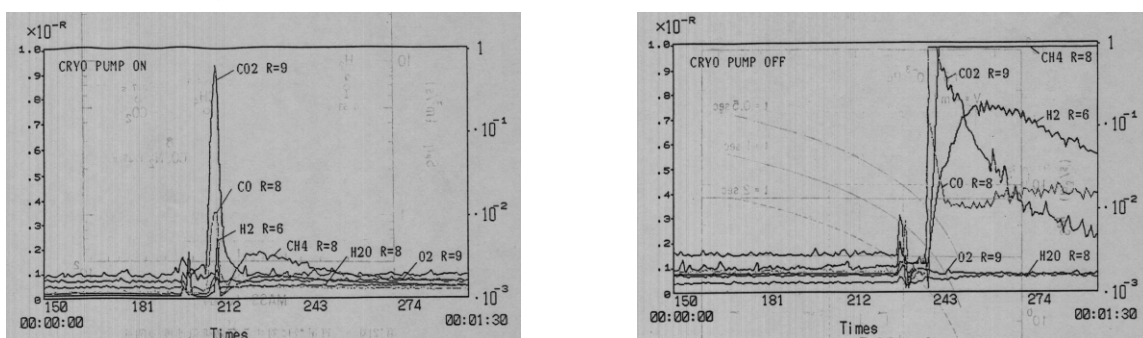


図 5 プラズマ放電時における真空排気作動時、非作動時のアンテナマニホールド内の放出ガスの変化

### 3.3 真空排気設備制御システム

JT-60 高周波加熱装置の真空排気機器は、主に加熱ポンプ室（JT-60 実験棟地下の現場装置制御部）に設置してあるシーケンサにより制御され、機器データはデータロガーを介し光伝送装置により中央制御室（JT-60 全体の操作、監視部）の操作 PC へ伝送される。ECH 装置については、RF 増幅室に設置してある VME コントローラ及びシーケンサにより制御され、現場操作パネルにて操作する。LHRF 装置の制御シー

ケンサ及び操作 PC は、稼働して約 20 年が経過しており不具合が頻発していたため、シーケンサ及び操作プログラムを一括して改良更新を行った。図 6 に真空排気設備制御系のシステム系統図を示す。既設取合い点は、200 点以上でこれまでの改造等で変更された内容も含めて改善した。シーケンサにリモート I/O ユニートを接続し、LHRF 装置の真空機器等と取合う加熱ポンプ室の現場制御部と、RF 増幅室に増設した粗引排気系と今後増力する機器と取合う現場制御部を一つの CPU でリンクさせ、制御できるよう改造した。操作、監視、計測は、新たにプログラミングした操作 PC により制御される。操作 PC とシーケンサ間の通信方式は、シリアルデータ通信とし、RS-232C 規格に準じている。マンマシンインターフェイスは、JT-60 高周波加熱装置の真空排気設備の複雑な系統を網羅し、分かりやすく一画面で直視出来るように改善した。また、加熱ポンプ室に設置される操作 PC は、TCP/IP 通信による遠隔操作を可能とした。これにより、今まで中央制御室、加熱ポンプ室、RF 増幅室と機器の設置場所毎に必要であった操作、監視がどこからでも出来るようになり、運転操作性能が格段に向上した。

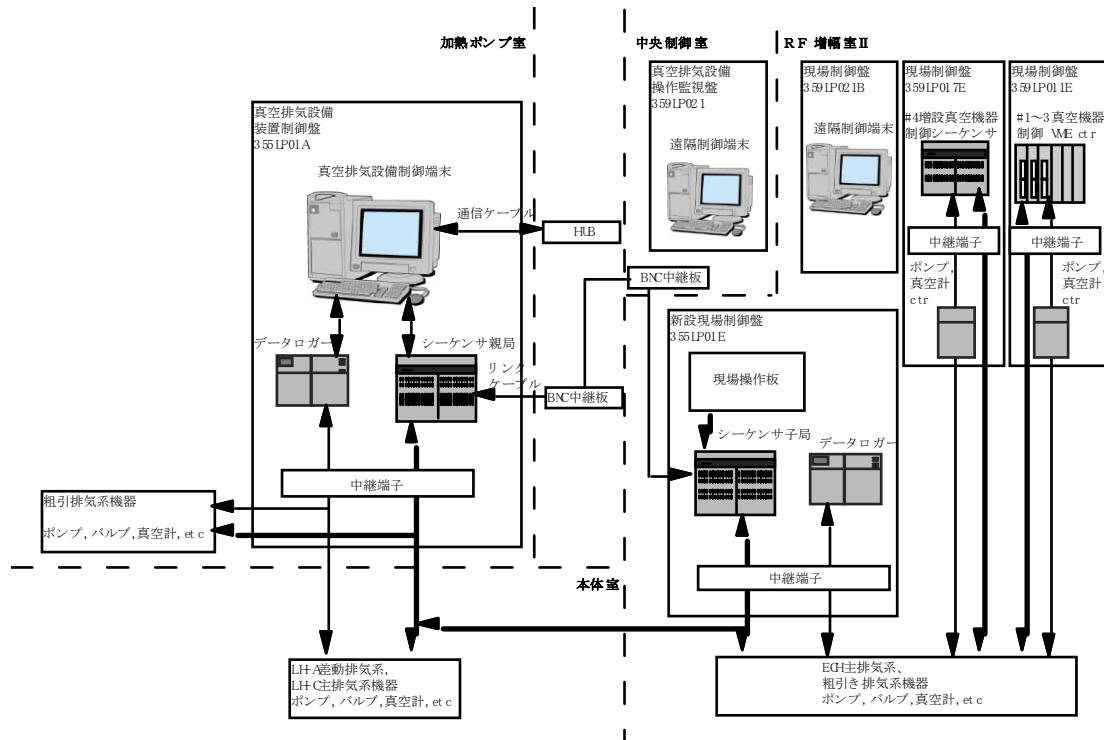


図 6 真空排気設備制御系のシステム系統図

#### 4. まとめ

JT-60 高周波加熱装置の真空排気設備は、運転効率の改善を目的とするとともに、JT-60 高周波加熱装置の改造に伴い改良を続けてきた。

ECH 装置では、細く (31.75 )、長い (50~60m) 導波管内を高真空に排気するため、複数台のターボ分子ポンプを配置し、特に大電力高周波伝送により放電が発生しやすい真空窓、整合器、ダミーロード等の伝送機器での放電を抑制した。また、粗引排気系を増力することで不具合対処後の運転再開が短縮し、運転効率が改善された。

LHRF 装置では、アンテナと真空窓の間における高周波伝送に発生する放出ガスを短時間 ( =0.5 秒 [ H<sub>2</sub> ]) で排気でき、主排気ポンプの目標性能を達成した。

真空排気設備制御系では、経年劣化により不具合が頻発していたシーケンサ及び操作 PC の改良更を行い、信頼性の高い安定した制御系へと改善した。また、真空排気設備の複雑な系統を一画面で直視、操作できるようにし、複数の機器設置場所毎で操作、監視が可能になり運転操作性能が格段に向上した。