トカマク実験装置 JFT-2 の真空システム*

横倉 賢治**・藤沢 登**・豊島 昇**・松崎 諒**

(昭和54年12月9日 受理)

Vacuum System for the JFT-2 Tokamak

Kenji YOKOKURA, Noboru FUJISAWA, Noboru TOYOSYIMA
and Yoshimi MATSUZAKI(Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai Research Establishment,
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan)

(Received December 9, 1979)

1. はじめに

原研の JFT-2 トカマクは、以下の目的のために改造を行ない、54年8月に工事を終えた。

- (1) 高密度加熱 (RF, NBI) 実験と実験の能率化のために加熱ポートと測定孔を増大する必要が生じたので、シェルを去除くとともにプラズマ位置制御が可能な電源制御系を設置する。
- (2) 350℃ベーキング装置や清浄第一壁面生成装置の組み込み、真空排気装置の大幅な改造等を行ない、プラズマ不純物制御の研究を行なう。

ここでは改造した JFT-2 真空システムの中から、トーラス真空容器、排気系及び清浄第一壁生成系 (Taylor 型放電洗浄装置と in-situ コーティング装置) の概要を報告する。

2. トーラス真空容器

真空容器は、大半径900 mm、小半径320 mmのトーラス状で、14個の厚肉リングとベローズ (1 mm 厚) より構成されている。厚肉リングには5種類あり、真空排気、高密度加熱、プラズマ計測用のポートなどが設けられている。真空容器の材質は SUS-304 L である。測定用非円形ポート (437 mm×117 mm、他) のフランジ接続には銀コーティングステンレス鋼 (SUS-321) オリング、円形ポートは無酸素銅ガasketが使用されている。真空容器は全溶接製で、最低3回までの解体組立てが可能な構造である。ベーキングは変流器抵抗加熱方式により行ない、ベローズ部は350℃、厚肉部は250℃まで加熱ができる。真空容器の容積は、各測定器用ボック

ス、高周波加熱容器等を含め、約3500 l、表面積は約 $5 \times 10^5 \text{cm}^2$ である。JFT-2 装置の縦断面と真空容器を Fig. 1 に示す。

3. 真空排気系

真空排気系の設計に際して要求された条件は次の通りである。

- (1) 不純物の少ないプラズマを形成するため、清浄な超高真空を作成し、維持できること。
- (2) 放電洗浄に放出される軽元素不純物を有効に系外へ排出できること。
- (3) ポンプ系からの不純物の逆流が少ないこと。
- (4) 真空容器の洩れ検知など、真空診断に必要な条件を満足していること。

これらの条件を考慮して、JFT-2 トカマクでは以下の排気系とした。系統図を Fig. 2 に示す。排気系は、エクステンションポート ($C_{N_2} \sim 2.9 \times 10^3 \text{l/s}$) から振動を吸収するためのベローズ、真空容器と電気絶縁するためのアルミナ管を経て、トーラス真空容器に接続されている。本排気系の主ラインは、直結型冷凍機式18Kクライオトラップとターボ分子ポンプの直列結合で構成されている。この主ラインのトラップは、3段のシェブロンで構成され、中段が14~18Kのクライオパネル、上下段が液体窒素冷却の77K熱シールである。冷凍機は CTI-MODEL 1020 CRYODYNE (20 K-8 W)、ターボ分子ポンプは BALZERS-MODEL TPH-2000 ($S_{N_2} = 1900 \text{l/s}$) を使用している。この背圧系は、77Kフォアライントラップ、メカニカルブースタ (500 m^3/h)、油回転ポンプ (960 $\text{l/min} \times 4$ 台) より構成されている。付属設備として、非常用電源で運転できるスバタイオンポンプ (500 l/s) 及びオリフィスバルブを有する圧力測定系が

*第20回真空に関する連合講演会の講演 (14a-4)

**日本原子力研究所 (茨城県那珂郡東海村)

ある。圧力測定系は、差動排気により広範囲のリークが検出できるように設計されている。またマスフィルタは異状診断用のコンピューターに結合されており、リーク判定にも用いられる。本排気系のA、B両ラインを加えたトラス部における実測排気速度はほぼ全ての気体に対して 1×10^3 l/s 以上あり、ベーキング後クライオトラップを使用したときの到達圧力として 4×10^{-7} Pa、水素以外の残留ガス分圧として $\sim 10^{-8}$ Pa が得られた。

JFT-2 にはトカマク装置にはじめて採用される機械式冷凍機によるクライオトラップが設けられている。クライオトラップではプラズマからの熱侵入が問題になると考えられるので、クライオパネルにおけるプラズマの影響を調べた。一般に高温プラズマ (JFT-2 の場合, $T_e \leq 1.5 \text{ keV}$, $T_i \leq 0.6 \text{ keV}$) からの放射機構として以下のものが考えられる。

- (1) 作動ガスである水素原子による放射
- (2) 不純物（酸素・炭素，鉄，モリブデン等）による放射
- (3) 制動放射
- (4) シンクロトロン放射

4. 清淨第一壁面生成系

真空容器の350℃ベーキングの他に低電子温度水素プラズマによる放電洗浄が行なえるようにした。また、in-situ コーティングを行なうために、“Ti-Ball”とモリブデン、炭素等の蒸発源として RF スパッタリング装置を設置した。これらにより真空容器壁のほぼ全面にコーティングができる。

JFT-2 の放電洗浄条件は, $I_p \sim 5$ kA, $T_e \sim 5$ eV, $P_{H2} \sim 2.7 \times 10^{-2}$ Pa, 周期 $\sim 1/0.7$ PPS である. この放電洗浄により $Z_{eff} = 3 \sim 4$ のプラズマが得られるまで

Fig. 3 Typical evacuation characteristic in the JFT-2 vacuum chamber

には3～4時間を要するが、これは高電子温度放電洗浄 ($I_p=80\sim100$ kA, $T_e=200\sim300$ eV) で要する時間に比較し、約1/10の時間である。

チタンを真空壁にコーティングした直後とそうでない場合の放電特性比較を **Fig. 4** に示す。いずれもプラズマ電流は100 kA、プラズマの平均電子密度は 1.3×10^{13} cm $^{-3}$ 、プラズマ電子温度800～900 eVであり、これらのプラズマパラメータにおいてはチタンコーティング有無による差異は認められない。しかしプラズマにかかる一周電圧はチタン蒸着により2.7 V から1.4 V に低下し、ジュール入力にして 300 kW から150 kW に減少してい

Fig. 4 Comparison between discharges with and without titanium coating on a vacuum wall

る。この減少分は明らかにプラズマからの不純物による放射損失が減少したことによるものである。

5. まとめ

- (1) JFT-2 トカマクにおけるプラズマ不純物制御の研究を発展させるため、真空容器、真空排気装置、放電洗浄装置、コーティング装置の改造を行なった。
- (2) 350℃ベーキングが可能な全金属製真空容器と、18Kクライオトラップターボ分子ポンプ直列配置システムにより、不純物の少ない超高真空の達成を可能にした。
- (3) ガス不純物の流入の少ない超高真空系と、チタンコーティング、低電子放電洗浄により、軽元素不純物の少ないプラズマが長時間、安定に維持できることが可能になった。