SF₆ ガス凝縮層を用いた JT-60NBI 用大容量 クライオソーブションポンプによる He 排気*

柴沼 清**・秋野 昇**・大楽 正幸**・蛭田 和治**
飯田 一広**・菊池 勝美**・国枝 俊介**・栗山 正明**
松岡 守**・野本 弘樹**・小原 祥裕**・大内 章寿**
大内 豊**・関 昌弘**・田中 茂**・寺門 拓也**

(受付1990年2月5日, 掲載決定1990年3月3日)

Helium Pumping by a Cryosorption Pump with Condensed SF₆
Gas Layer as a Sorbent in JT-60 NBI System

Kiyoshi SHIBANUMA**, Noboru AKINO**, Masayuki DAIRAKU**
Kazuharu HIRUTA**, Kazuhiro IIDA**, Katsumi KIKUCHI**
Syunsuke KUNIEDA**, Masaaki KURIYAMA**, Mamoru MATSUOKA**
Hiroki NOMOTO**, Yoshihiro OHARA**, Shouju OHUCHI**,
Yutaka OHUCHI**, Masahiro SEKI**
Shigeru TANAKA** and Takuya TERAOKA**

(Japan Atomic Energy Research Institute, Naka Machi, Ibaraki)

(Received February 5, 1990, Accepted March 3, 1990)

1. はじめに

核融合実験炉では, D-T 燃焼により生じる He 灰の輸送, 排気が重要な研究課題の1つとなっている¹⁾. この He 灰の輸送, 排気をより現実的に模擬するためには, プラズマ中心にピークをもった He の密度分布を形成する必要がある. そのために, 粒子入射加熱装置(NBI)を用いてプラズマ中心へ He ビームの入射することが最も有効である. JT-60NBIを用いて He ビームの入射を行うためには, He ガス排気用大容量真空排気ポンプの開発が必要となり, その候補として, He ガスの吸着媒に SF₆ ガス凝縮層を用いたクライオソーブションポンプが挙げられる²⁾. この方式は, 既存の H₂ ガス排気用凝縮型クライオポンプ内に SF₆ ガス凝縮層形成用の導入管を設置するだけで改造可能であり, SF₆ ガス

凝縮層を形成しない場合には, 従来の H₂ ガス用凝縮型クライオポンプとしても使用できる.

ここでは, He ガス排気用 JT-60NBI 大容量クライオソーブションポンプへの改造と JT-60 プラズマへの He ビーム入射試験を含めた He ガスの排気試験について報告する.

2. He ガス排気用クライオソーブションポンプへの改造

JT-60NBI は14基から構成され, そのうちの1基分のクライオポンプを Fig. 1 に示す. クライオポンプは6個のクライオポンプモジュールより成る H₂ ガス排気用のシェブロンを有する凝縮型クライオポンプである. NBI 真空容器内は差動排気を構成するために, 仕切り板により仕切られた3つの部屋 P₁, P₂, P₃ に分割され, 各部屋にそれぞれ2個のクライオポンプモジュールが設置されている. H₂ ガスに対するクライオポンプ1基当

* 平成元年10月26日 第30回真空に関する連合講演会で講演

** 日本原子研究所 那珂研究所 (茨城県那珂郡那珂町向山)

Fig. 1 Upper cryopump unit for the JT-60 NBI.

りの排気速度は $1370 \text{ m}^3/\text{s}$ であり, H_2 ガス排気面となるクライオパネル面積は 15 m^2 である³⁾.

14基のNBIクライオポンプの1基(上ユニット)をHeガス排気用のクライオソーブションポンプに改造した。クライオパネル面に SF_6 ガス凝縮層を形成させるために、Fig. 2に示すように、ステンレス製 SF_6 ガス導入管をシェブロンとクライオパネル間に設置した。これらの導入管を、 P_1 , P_2 室内の大型クライオポンプモジュールには左右対称に2本ずつ、 P_3 室内の小型クライオポンプモジュールにはほぼ中央に1本設置した。なお、 SF_6 ガス導入時に、導入管内の SF_6 ガスが放射冷却により -50.8°C (2.21 atm)の凝固点以下にならないように、導入管自体を抵抗体として、直接通電することにより昇温する対策を施した。

3. 試験方法

Heガス排気試験を行う際の試験手順を以下に示す。

①シェブロン、クライオパネルを液体窒素、液体ヘリウムで冷却し、それぞれ 77 K , 3.5 K とする。② SF_6 ガス導入管を 20°C まで昇温する。③ P_1 , P_2 , P_3 の各部屋にそれぞれ規定量の SF_6 ガスを導入し、クライオパネル上に SF_6 ガス凝縮層を形成する。④HeガスをNBIイオン源より導入し、Heガスの排気実験を行う。

Fig. 2 Schematic diagram of cryopanel and SF_6 gas introduction pipe.

Fig. 3 Pressure changes in the NBI chamber when helium gas was introduced through the ion sources.

クライオパネル面での SF_6 ガス凝縮量は既報の小型クライオソーブションポンプでの実験結果を参考に、単位面積当り約 $2500 \text{ Pa m}^3/\text{m}^2$ とした²⁾。その結果、 P_1 , P_2 , P_3 の各部屋へそれぞれ 40000 Pa m^3 , 40000 Pa m^3 , 6000 Pa m^3 の合計 86000 Pa m^3 SF_6 ガスを導入した。 SF_6 ガス及びHeガスの流量はサーマルマスフローメータにより測定し、Heガス排気時における真空容器内の圧力はHeガスにより校正されたB-A型電離真空計により測定した。

4. 試験結果

4.1 Heガスの排気特性試験

JT-60プラズマへのHeビーム入射運転時におけるNBIイオン源よりのHeガス流量は $1.5 \sim 2.0 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ で最大10秒間である。これを考慮して、HeガスをNBIイ

(a) Simplified calculation model

(b) Equivalent circuits

Fig. 4 Calculation model for the pumping speed estimation.

オン源より導入し、真空容器内各部屋の圧力を測定した。その結果を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、30秒間 He ガスを導入しても圧力変動はほとんどなく、非常に安定な排気特性が確認できた。さらに、 $2 \text{ Pam}^3/\text{s}$ までの He 流量に対する試験においても、排気速度はほぼ一定値を維持することが確認された。

4.2 He ガスに対する排気速度評価

クライオソーブションポンプの He ガスに対する排気速度を評価するために、Fig. 4(a) のように真空容器を P_1, P_2, P_3 の 3 つの部屋に分割し、各部屋間及び各部屋内をコンダクタンスで連絡する構造に簡略化した。Fig. 4(a) の具体的な計算モデルは Fig. 4(b) に示す等価回路であり、ガス流量 Q 、圧力 P 、コンダクタンス C 、排気速度 S 間の各関係は次式となり、これらの式により排気速度が求められる。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (1)$$

$$P_{1C} = Q_1 / C_1 + P_1 \quad (2)$$

$$P_{1C} = (Q_2 + Q_3) / C_{12} + Q_2 / C_2 + P_2 \quad (3)$$

$$P_{1C} = (Q_2 + Q_3) / C_{12} + Q_3 / C_{23} + P_3 \quad (4)$$

$$S_1 = Q_1 / P_1 \quad (5)$$

$$S_2 = Q_2 / P_2 \quad (6)$$

$$S_3 = Q_3 / P_3 \quad (7)$$

ここで、各コンダクタンス C_1, C_2, C_{12}, C_{23} は以下の方法により求めた。円形管、矩形管にモデル化できる各部屋間のコンダクタンス C_{12}, C_{23} は、従来のコンダクタンスに関する簡易式⁴⁾により求めた。簡単形状にモデル化できない部屋内のコンダクタンス C_1, C_2 に関しては、 H_2 ガスに対するクライオポンプの排気速度が前もって

Fig. 5 Pressure changes in the NBI chamber when 31.5 keV, 41.8 A and 2.0 s helium beam was extracted from the ion sources.

予測できるので⁵⁾、まず、 H_2 ガスに対するコンダクタンス C_1, C_2 を式(1)~(6)より算出し、次に He ガスへの分子質量換算を行うことにより、He ガスに対するコンダクタンス C_1, C_2 を求めた。

以上のコンダクタンスを用いて排気速度の計算を行った結果、He ガスに対する NBI クライオソーブションポンプ 1 基当りの排気速度として $808 \text{ m}^3/\text{s}$ を得た。

4.3 He ビーム入射時における He ガスの排気特性

JT-60 プラズマへの NBI による He ビーム入射試験時における NBI 真空容器内各部屋の圧力変化を Fig. 5 に示す。Fig. 5 において、He ビーム入射時における P_1 室の圧力低下は、He ビーム相当分のガスがビームダンプ等の受熱機器に一旦捕えられるビームポンピング効果によるものである⁶⁾。また、He ビーム入射時の P_3 室における圧力上昇は、 P_3 室クライオポンプの異常ではなく、JT-60 本体と NBI 真空容器間を連結するドリフト管内で再電離した He イオンビームが内壁に衝突し、その時に壁から発生したアウトガスによるものである⁷⁾。Fig. 5 の結果は、JT-60 プラズマへのビーム入射が開始されて、数ショット後の結果であり、ドリフト管内の He ビームによるエージング不足の状態のものである (H_2 ビームの場合、エージングに 50 ショット要した⁷⁾)。

なお、今回の試験では、 SF_6 ガス導入量 86000 Pam^3 に対して、He ビーム入射に必要な He ガスを約 2000 Pam^3 導入したが、その間、クライオソーブションポンプの排気速度の低下はなく、まだ十分な He ガスの排気能力が残されていることが明らかとなった。

5. 結 論

既存の H_2 ガス排気用 JT-60NBI クライオポンプ 1 基

を、 SF_6 ガス凝縮層を用いた He ガス排気用クライオソープションポンプに改造し、JT-60 プラズマへの長パルス He ビーム入射実験を含めた He ガスの排気試験を行った結果、以下の結論を得た。

1) イオン源より $2 \text{ Pam}^3/\text{s}$ までの He ガス流量を NBI 真空容器内に導入した結果、 P_1, P_2, P_3 の各部屋内の排気速度は、ほとんど変化せず一定値を示した。

2) NBI 1 基の He ガスに対する排気速度は約 $800 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、He ガスに対する世界最大の排気速度を得た。

3) JT-60 プラズマへの He ビーム入射試験において、He ガスの安定な排気が行われ、JT-60 の実験目的である He 灰の挙動を調べるための実験が正常に行われた。

4) SF_6 ガス凝縮層 (SF_6 ガス導入量 86000 Pam^3) の

排気速度は、約 2000 Pam^3 の He ガスを吸着した後も変化せず、まだ十分な排気能力が残されていることが確かめられた。

〔文 献〕

- 1) H. Nakamura et al., Fusion Technology 投稿中.
- 2) 柴沼 清他：真空，31 (1988) 311.
- 3) K. Shibamura et al.: 11th sympo. on Fusion Engineering (1985) 1273.
- 4) 熊谷 寛夫他編：真空の物理と応用 (裳華房，1970) 378.
- 5) 柴田 猛順他：JAERI-M7869 (1978).
- 6) T. Shibata et al.: J. of Nuclear Materials, 128 & 129 (1984) 713.
- 7) M. Mizuno et al.: 12th sympo. on Fusion Engineering (1987) 281.