窒素凝縮層によるクライオポンプの ヘリウム排気特性*

岩佐 康史**・内田 孝穂**・立川 信夫***

(受付1988年12月9日, 掲載決定1989年3月14日)

He Pumping Characteristics of a Cryopump with Condensed Layer of Nitrogen

Yasushi IWASA**, Takao UCHIDA** and Nobuo TACHIKAWA***

** (Heavy Apparatus Engineering Laboratory, TOSHIBA Corp.,
2-4 Suehiro-cho, Turumi-ku, Yokohama 230)

*** (Fusion Technology Development Office, TOSHIBA Corp.,
1-6 Uchisaiwai-cho, 1-chyome, Chibuya-ku, Tokyo 100)

(Received December 9, 1988, Accepted March 14, 1989)

1. はじめに

核融合装置のプラズマ排気系はDT燃焼中に生成されたヘリウムを排気し, 燃焼条件を維持することが要求されている¹⁾. このような真空ポンプとしてモレキュラシーブや生活性炭などの多孔質材料を吸着剤として利用したクライオソープションポンプや, アルゴンなどの気体凝縮層のクライオトラップ作用を利用したポンプが有望視されている^{2,3,4)}.

多孔質材料を吸着剤として用いるクライオポンプはヘリウムの吸着容量を大きくすることは比較的容易である. しかし高真空領域で排気速度を大きくするには, 粒状の吸着剤を一方の端は真空空間に露出させ他方の端は面積を広く展開した形状の冷却パネルに固着する必要がある. このため(1)吸着剤と冷却面の良好な熱接触を得ることが困難である. (2)吸着剤の展開固着のため冷却重量が増大する. (3)吸着剤が剥離し易い等の欠点を有する. これに対し気体凝縮層の多孔質性を利用したクライオソープションポンプ又はクライオトラッピングポンプでは

欠点として(1)気体凝縮層形成のため操作手順が複雑化する. (2)再生時に気体凝縮層の排出及び回収が必要となる. (3)ヘリウムに対する吸着量が相対的に小さい等がある. しかし多孔質材料の吸着剤を用いる場合の前述の欠点は解決される.

気体凝縮層の吸着作用を利用した真空ポンプとしてはアルゴン (Ar) の凝縮層を連続的に形成しつつヘリウムを排気する例や⁴⁾, 六沸化硫黄 (SF₆) の凝縮層をあらかじめ形成した後ヘリウムを排気する例⁵⁾が報告されている. 気体凝縮層として窒素を用いる場合は, ヘリウムの吸着等温線などが調べられているが^{6,7)}, 実用規模の真空ポンプとして応用した例は報告されていないようだ.

気体凝縮層の多孔性は希ガスのような球形分子よりも線形の分子の方が優れているとする報告がある⁸⁾. また窒素はその液化ガスがクライオポンプの熱輻射シールドの冷却に大量に使用されるなど入手容易な気体である. また真空容器を大気圧に戻す場合の導入気体として用いられており, 真空に害の少ない気体と考えられている.

本研究は窒素凝縮層を連続的に形成するクライオポンプを試作し, ヘリウムに対する排気実験を行い, この方式の大容量ヘリウム排気の可能性を実験的に調べることを目的としたものである.

* 昭和63年11月11日 第29回真空に関する連合講演会において講演 (11Ba-7)

** ㈱東芝 技術研究所 (横浜市鶴見区末広町2-4)

*** ㈱東芝 原子エネルギー開発室

Fig. 1 Appearance of the cryopump.

2. クライオポンプ及び実験装置

本実験に用いた窒素凝縮層によるクライオポンプの正面概観を Fig. 1 に示す。クライオポンプ全体は液体窒素で冷却された箱型の熱輻射シールドで覆われており、正面下部に気体入射口が開いている。気体入射口部の横断面を Fig. 2 に示す。本クライオポンプは気体入射口から液体ヘリウムで冷却されたクライオパネルに至る通過確率を高めるため、液体窒素冷却のパッフルとクライオパネルの形状及び相互配置を3次元モンテカルロ計算で検討して設計したものである。気体入射口の左右両側に熱輻射シールドとルーバースラインド形パッフルで囲われた部分が設けられ、この中に液体ヘリウムで冷却されるクライオパネルが奥行方向に設置されている。窒素ガス導入管はクライオパネルとルーバースラインド形パッフルの間に設置され、クライオパネルの側に指向性を付けて窒素ガスを導入するよう多数の細孔が設けられている。ヘリウムは気体入射口からポンプ内に入射し内部で反射を繰返しクライオパネル上に形成される窒素凝縮層にトラップされて排気される。気体入射口の開口面積は 528 cm^2 (300 mm 高さ×176 mm 幅)である。排気を担当するクライオパネル面積は 1363 cm^2 (284 mm 高さ×240 mm 幅×2)である。

排気実験は Fig. 3 に示す装置の配置で行なった。クライオポンプ前面には ISO 規格に準拠した形状のテストドームを配置した。窒素凝縮層によるヘリウム排気実

Fig. 2 Arrangement of cryopanel.

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.

験を行う手順は、補助真空排気後、(1)熱輻射シールド及びルーバースラインド形パッフルを液体窒素で冷却する、(2)クライオパネルを液体ヘリウムで冷却する、(3)窒素凝縮層をクライオパネル上に連続的に形成する、(4)テストドームにヘリウムガスをクライオポンプの負荷として導入する、である。

テストドーム内の圧力は、ヘリウムに対して感度補正されたヌード型 B-A ゲージにより測定した。さらにヘリウム成分の排気を確認するため四重極質量分析計によりテストドーム内の残留ガスを測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 水素排気

クライオパネルの気体捕獲確率が1の場合の排気速度を調べるため、ヘリウム排気実験の前に水素に対する排気速度を測定した。結果を Fig. 4 に示す。実験はクライオパネルの気体捕獲確率を1としてモンテカルロ計算により求めた分子通過確率と、水素蒸気圧の温度依存性⁹⁾により導出した水素排気速度の計算値である。計算値と測定値はクライオパネル温度 T_c の制御の誤差範囲

Fig. 4 Hydrogen pumpin gspeed (without nitrogen tubes).

Fig. 5 Helium pumping speed by Nitrogen layer.

内でよく一致している。水素蒸気圧の影響を無視できる圧力領域では $12.0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の排気速度が得られ、捕獲確率を1とした理想排気速度とよい一致を示した。この測定は水素に対する排気速度を最適化するために行ったので、クライオパネル前面には窒素導入管は取付けていず、前面開口部幅は190 mmである。(高さは同一)

水素排気実験の結果からコンダクタンスを補正してヘリウムに対する理想排気速度を予測すれば

$$12.0 \times 176 / 190 \times 1 / \sqrt{2} = 7.86 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

となるはずである。(通過確率は前面開口部幅の変化によらず一定とした。)

3.2 ヘリウム排気

ヘリウムに対する排気速度特性の測定を Fig. 5 に示す。この排気速度特性は、外部からの気体負荷を経験していない新鮮なクライオパネルに対して、窒素を $1.03 \times 10^{-1} \text{ Pam}^3 \text{ s}^{-1}$ (=クライオパネル単位面積当り $7.56 \times 10^{-1} \text{ Pam}^3 \text{ s}^{-1} / \text{m}^2$)の一定流量で導入し、ヘリウム導入量を微小流量から徐々に増加させて測定した。排気速度は圧力 $5 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 以上では圧力に反比例し、この圧力以下では圧力によらずほぼ一定となっている。排気速度の窒素・ヘリウム流量比率の依存性を Fig. 6 に示す。窒素ヘリウム比率が35以下ではヘリウム排気作用は弱い、40以上ではほぼ一定の排気速度 $4.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ が得られている。200以上では排気速度は減少傾向にあるが、これはテストドームに窒素分圧が漏洩する影響により全圧

Fig. 6 Helium pumping speed vs N_2/He gas flow ratio.

Fig. 7 Pumping capacity for helium.

計による圧力測定ではヘリウム分圧の測定誤差が大きいとためと考えられる。

ヘリウムに対する排気速度は、水素に対する測定値から計算した理想排気速度の予測値の58%に留まっている。この原因として窒素導入管を取付けたためバッフル効果により通過確率が減少している点や窒素凝固層形成面積が水素凝縮排気面積よりも小さい点が始る。全てが窒素凝固層のヘリウム排気効率の水素凝縮排気効率よりも低いととは考えられない。

ヘリウムに対する排気速度のヘリウム吸着量依存性を Fig. 7 に示す。窒素導入量は $1.96 \times 10^{-1} \text{ Pam}^3 \text{ s}^{-1}$ (クライオパネル単位面積当り $1.44 \text{ Pam}^3 \text{ s}^{-1} / \text{m}^2$)、ヘリウム導入量は $4.95 \times 10^{-3} \text{ Pam}^3 \text{ s}^{-1}$ ($3.65 \times 10^{-2} \text{ Pam}^3 \text{ s}^{-1} / \text{m}^2$)で各々一定に保った。排気速度は当初 $3.30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ でヘリウム吸着量が増加するにつれて徐々に減少するが急激な変動を示すことなく安定したヘリウム排気能力を示した。 61.8 Pam^3 ($454 \text{ Pa m}^3 / \text{m}^2$)のヘリウムを吸着した時点で、クライオポンプ内蔵の冷却液体ヘリウムの容量が限界に達したため排気能力を喪失した。このときもテストドーム内の圧力は不安定な上下動をするのではなく単調なヘリウム分圧の上昇を示した。排気速度の減少率は総ヘリウム吸着量の23%にあたる 14 Pam^3 ($2.8 \times 10^{18} \text{ molecules/cm}^2$)付近で変化している。排気を終了した時点の窒素凝縮量はヘリウムの40倍の 2470 Pam^3 ($4.8 \times 10^{20} \text{ molecules/cm}^2$)である。最終的な気体凝縮層厚さ

Fig. 8 (a) Mass pattern, (b) Mass pattern.

は、ヘリウム吸着量を無視し窒素凝縮層密度を 946 kg/m^3 と仮定すれば、 0.19 mm と推定される。窒素凝縮層中のヘリウム粒子濃度は 2.4% である。

ヘリウム排気中のテストドーム内のマスパターンをFig. 8に示す。ここでは補助排気系を作動させている。(a)はヘリウムを $4.78 \times 10^{-3} \text{ Pam}^3 \text{ s}^{-1}$ で導入し補助排気系とバランスした状態、(b)は窒素凝縮層をヘリウムの50倍の導入量で形成した状態である。(b)ではヘリウム分圧は約一桁低下したが、窒素分圧が漏洩してきている。このときも全圧は安定しており短時間周期の不規則な圧力変動は全く測定されなかった。

Table 1に得られた排気特性値と要約して示す。

4. まとめ

窒素凝縮層によるクライオポンプを試作し、ヘリウム排気実験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ヘリウムに対する排気速度は水素凝縮クライオポンプの約60%の値を示し十分実用的な性能が得られた。
- (2) ヘリウム吸着容量はプラズマ排気ポンプとして十分利用可能な値が得られた。
- (3) 窒素ヘリウム流量比率は40以上必要であった。
- (4) ヘリウム排気能力の安定性は優れていた。排気速度の不規則な短時間周期の変動は全く無く、内蔵の冷却用液体ヘリウムが消費されるまで安定な動作が可能であった。
- (5) アルゴントラッピング方式との比較では、排気速

Table 1 Helium pumping performance

	Total performance	Performance per unit pump inlet area	Performance per unit cryopanel area
Pumping speed	$4.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / \text{m}^2$	$33 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / \text{m}^2$
Sorption capacity	61.8 Pam^3	$1170 \text{ Pam}^3 / \text{m}^2$	$453 \text{ Pam}^3 / \text{m}^2$

度・吸着容量ともやや小さいがほぼ同等の範囲内にあった。排気の安定性は窒素凝縮層の方が優れていた。

〔文 献〕

- 1) 日本原子力研究所：JAERI-M 84-212
- 2) I. Arakawa, M. Kobayashi and Y. Tuzi: J. Vac. Sci. Technol., **16**(2), p738, 1979
- 3) H. C. Hseuh and H. A. Worwetz: J. Vac. Sci. Technol., **18**(3), p1131, 1981
- 4) T. H. Batzer, R. E. Patric and W. R. Call: J. Vac. Sci. Technol., **18**(3), p1125, 1981
- 5) 紫沼清, 中村和幸, 柴田猛順, 田中茂：真空, **31**(5), p311, 1988
- 6) V. B. Yuferov and P. M. Kobzev: Sov. Phys. Tech. Phys., **14**, p1261, 1970
- 7) V. B. Yuferov and P. M. Kobzev: Sov. Phys. Tech. Phys., **15**, p2041, 1971
- 8) 阿部仁志：真空, **22**(5), p191, 1979
- 9) C. Benvenuti, R. S. Calder and G. Passardi: J. Vac. Technol., **13** (6), p1172, 1979