SF₆凝縮層のHeガス排気特性とJT-60NBI用クライオソーブションポンプへの応用

柴 沼 清, 大 楽 正 幸

(日本原子力研究所那珂研究所)

(1991年5月9日受理/1991年9月17日改訂原稿受理)

Characterization of Condensed SF₆ Layers for He Gas Pumping and Their Application in the JT-60 NBI Cryosorption Pump

Kiyoshi Shibamura and Masayuki Dairaku

(Received May 9, 1991/Revised Manuscript Received September 17, 1991)

Abstract

Pumping characteristics of condensed SF₆ layers for He gas have been measured in a small-size cryosorption pump. From the experimental results, He pressure dependence of the effective adsorption coefficient of He on condensed SF₆ layers is estimated with the aid of numerical simulation.

In the next stage of developing a large-scale cryosorption pump, which is a modification of the cryopump of the JT-60 neutral beam injector (NBI), the experimental results and numerical simulations are used to control the pumping performance of the SF₆ layers on pump modules. The He pressures measured as a function of the He gas flow rate in the NBI chamber are in good agreement with the numerical calculations.

Keywords :

cryosorption pump, He gas pumping, JT-60 NBI, condensed SF₆ layers, Monte Carlo method, He beam, effective adsorption coefficient, pumping speed, He accumulation,

1. はじめに

核融合実験炉では、D-T 燃焼時に生成される 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⁾。D-T 燃焼を行わない既存の装置を用いて、この He 灰の輸送、排気をより現実的に模擬するには、He ガスの密度分布をプラズマ中心にピークをもつように形成する必要がある。JT-60では、図1に示す粒子入射加熱装置²⁾ (Neutral Beam Injector, 以後 NBI という) を用いてプラズマ中心へ He ビームを入射することが考えられている。しかし、NBI の He ビーム入射時に導入される数 Pam³/s の He ガスを排気して、NBI

真空容器内の圧力を 10^{-3} Pa 程度にする必要があり、そのために、He ガスに対する排気速度として $500\text{m}^3/\text{s}$ 以上の大容量真空排気ポンプの開発が必要となる。この要求を満足する実現可能なポンプとして、クライオパネル表面に He ガス排気用の吸着媒をもつクライオソーブションポンプが挙げられる。

現存の H₂ ガス排気用 JT-60NBI クライオポンプを He ガス排気用クライオソーブションポンプに改造するに当たり、He ガス排気用吸着媒を選定する必要がある。活性炭に代表される多孔質個体吸着媒は、He ガスに対する排気特性が優れた最も一般的な He ガス用吸着媒であり、小型クライオソーブションポンプに広く使用されている。しかし、個体吸着媒の場合、吸着媒をクライオパネルに接着するために通常使用されている接着剤は、

熱疲労により劣化し剝離することが重大な問題である。低融点金属を接着剤として用いる場合でも大面積のクライオパネルに吸着媒を一樣に接着することは難しく、さらに重量が大幅に増加することからクライオポンプの冷却に長時間を要する欠点がある。また、これらの個体吸着媒を用いる方法は、吸着媒をクライオパネル上に形成する際に現存のクライオポンプの大幅な改造が必要となる。これに対して、He ガス吸着媒にガス凝縮層を用いるならば、接着剤は不要で大面積のクライオパネルに対しても適用可能であり、しかもガス凝縮層自体が劣化した場合でも運転サイクル毎に新しいガス凝縮層を形成することができるので、大容量クライオソーブションポンプを開発する上で利点が多い。しかし、ガス凝縮層を He ガスの吸着媒に用いる場合、単に He ガスに対する排気特性が優れているだけでなく、ここでは、JT-60によるプラズマ実験を考慮して、ガス凝縮層の選定を行う必要がある。例えば、ガス凝縮層を利用した He ガスの排気として有名な Ar ガスを用いたクライオ・トラッピングは、排気しようとする He ガスの50倍以上の Ar ガスを He ガスの排気時に導入する必要がある³⁾。この場合、NBI 真空容器内の圧力が上昇し、JT-60プラズマ中へ常温の Ar ガスが大量に流入する可能性があり、プラズマに対して悪影響を及ぼすことが考えられることから、あまり有効な方法とは言えない。

これらの状況を考慮して、He ガス排気用吸着媒は以下の条件を満足する必要がある。

- (1) 約 4m^2 の大面積に対して吸着媒を形成することができる。

図1. JT-60用粒子入射加熱装置。

- (2) 接着剤の熱疲労によって吸着媒がクライオパネルから剥離する可能性が高い活性炭やモレキュラシーブ等の個体吸着媒は信頼性が低いことから、吸着媒はガス凝縮層とする。
- (3) ガス凝縮層として、炭化水素系の可燃性ガスは爆発の問題があり、安全上の立場から不活性ガスとする。
- (4) プラズマに対して影響の少ないガスとする。
- (5) NBI 真空容器内の圧力上昇及びそれに伴うプラズマ中への常温ガスの流入の原因となる Ar ガス等を用いたクライオ・トラッピングは採用しない。
- (6) He ガスに対する排気特性が優れていること。
- (7) 既存の JT-60NBI 用クライオポンプの改造が容易であること。

これらの条件を満足する He ガス排気用吸着媒として、 CO_2 , N_2 , Xe, Ar, Kr, SF_6 等のガスをクライオパネル上に形成したガス凝縮層が挙げられ、ここでは、これらのガス凝縮層の中で、阿部^{4,5)}により He ガスの排気特性が最も優れていることが指摘された SF_6 ガス凝縮層を選定した。しかし、 SF_6 ガス凝縮層による He ガスの排気の研究は少なく、わずかに阿部によって行われているだけであり、十分とは言えないのが現状である。すなわち、阿部により得られた実験結果は、排気面積が JT-60NBI クライオパネル 1 枚の面積に比べ 3 桁以上小さい 21cm^2 で、かつ SF_6 ガス凝縮層が形成された排気面と周囲の常温物体との間に液体窒素に冷却されたシェブロンバッフル等の熱シールドのない条件の下で得られた結果であり、また実験の数も少ない。よって、これらの結果を液体窒素により 77K に冷却されたシェブロンバッフルをもち、1 枚当たりの面積約 4m^2 のクライオパネルにそのまま適用することはほとんど不可能である。そこで、著者らは、数年前より SF_6 ガス凝縮層による He ガスの排気特性の総合的な基礎データを取得するために研究を開始した⁶⁾。

なお、He ガスの吸着媒として、 SF_6 ガス凝縮層を用いる方式は、既存の JT-60NBI の H_2 ガス排気用凝縮型クライオポンプに SF_6 ガス凝縮層形成用の導入管を追加するだけで改造が可能であり、 SF_6 ガス凝縮層を形成しない場合には、従来の H_2 ガス用凝縮型クライオポンプとしても使用できる。

本報では、まず、 SF_6 ガス凝縮層の He ガス排気特性に関する基礎データを系統的に取得するために、小型円筒型クライオソーブションポンプを用いて実験を行った。He ガスの排気特性に及ぼす SF_6 ガス凝縮層の形成速度の影響は既に文献 6 で報告したので、ここでは、He ガス排気特性の①クライオパネル温度、② SF_6 ガス凝縮量及び③He ガス流量に対する各依存性を調べる実験を行った。次にこれらの基礎データから、He ガスの安定な排気にとって重要となる NBI 用クライオソーブションポンプの各クライオパネル上に形成される SF_6 ガス凝縮量の凝縮量分布の最適評価を行い、さらに、クライオソーブションポンプの排気特性を評価する上で必要となる SF_6 ガス凝縮層への He ガスの実効吸着係数を求めた。最終的に、以上の結果を用いて、JT-60NBI 用クライオソーブションポンプ運転時の NBI 真空容器内の圧力をモンテカルロ法^{7,8)}により求め、実験結果と比較した。

2. SF₆ガス凝縮層による He ガスの排気特性

2.1. 実験装置及び実験方法

小型クライオポンプを用いた He ガスの排気実験装置を図2に示す。クライオポンプは真空容器（内容積 0.8m³, φ800mm×1600mm）上部に取り付けられ, SF₆ガスまたは He ガスは真空容器下部より導入される。クライオポンプの構造は図3に示すように, 円筒型クライオポンプであり, 約4 K に液体ヘリウムにより冷却され, SF₆ガス凝縮層が形成される円筒型クライオパネルと, その周囲に設置されている77K の液体窒素により冷却されたシェブロンバッフルから構成される。He ガスを排気するためのクライオパネルの面積は, 従来の $2 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 程度の小面積^{4,5)}に比べより実用規模に近い0.128m² (φ110mm×370mm) とした。SF₆ガス凝縮層を用いたクライオソーブションポンプによる He ガスの排気実験を行う際の実験手順を以下に示す。特に, SF₆ガスの凝固点が-50.8℃であることから, SF₆ガスをシェブロンバッフルに凝縮させることなく, クライオパネルのみに均一に凝縮されるために, ここでは, シェブロンバッフルを液体窒素で77K に冷却する前に, クライオパネルを液体ヘリウムで約4 K に冷却し, SF₆ガス凝縮層をクライオパネルのみに形成させる手順とした。

図2. 小型クライオポンプ付き He ガス排気実験装置.

図3. 小型クライオポンプの構造.

- (1) 真空容器内圧力を 10^{-3} Pa以下とする。
- (2) クライオパネルを液体ヘリウムにて冷却する。
- (3) SF_6 ガスを真空容器内に一定流量で規定量導入し、 SF_6 ガス凝縮層をクライオパネルのみに形成させる。
- (4) シェブロンパッフルを液体窒素で冷却する。
- (5) クライオソーブションポンプ内の冷却用液体Heの圧力を加圧または減圧することにより、クライオパネル温度を所定の温度とする。
- (6) Heガスを真空容器内に一定流量で連続的に導入し、Heガスの排気実験を行う。

真空容器内に導入される SF_6 ガスまたはHeガスの流量はサーマルマスフローコントローラにより測定した。また、クライオパネルに SF_6 ガス凝縮層を形成した後及びHeガス排気時において、四重極質量分析計を用いて、Heガス導入時の感度レベルで SF_6 ガスの残留ガス分析を行った結果、 SF_6 ガスは検出限界以下であり、実質的にクライオパネルからの SF_6 ガスの脱離はないことが確認された。これにより、クライオソーブションポンプによるHeガス排気時の真空容器内の圧力は、Heガスに対して校正されたB-A型電離真空計により測定した。

なお、Heガス排気特性のHeガス流量依存性を調べる実験以外の模擬実験におけるHeガスの標準流量は、JT-60NBIでのHeビーム入射時の予想Heガス流量 $1.5\text{Pam}^3/\text{s}$ 、JT-60NBIのクライオパネル面積 15m^2 及び模擬実験用小型クライオソーブションポンプのクライオパネル面積 0.128m^2 より得られる値 $0.0128\text{Pam}^3/\text{s}$ を基に、 $0.02\text{Pam}^3/\text{s}$ ($0.156\text{Pam}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$)とした。また、 SF_6 ガス凝縮層の形成速度はHeガスの排気特性にほとんど影響しないことから⁶⁾、今回の一連の実験では、 SF_6 ガス凝縮層の形成速度を $3.1\text{Pam}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ 一定とした。さらに、JT-60NBIでのHeビーム入射時間は最大で10sであるが、Heガスに対する排気の安定性をより厳しい条件の下で確認するために、Heガスの排気実験はHeガスが SF_6 ガス凝縮層内から脱離し排気不能となるまで連続して行われた。

2.2. 実験結果

(a) クライオパネル温度依存性

Heガス排気特性のクライオパネル温度依存性を明確にするために、クライオパネル温度を変えた以下の実験を行った。クライオパネル温度はクライオソーブションポンプ内の冷却用液体Heの圧力を調節することにより設定され、3.0から4.5Kの間の7通りの温度について、それぞれHeガスの排気実験を行った。その結果を図4に示す。なお、 SF_6 ガス凝縮量及びHeガス流量は一定とし、それぞれ $1720\text{Pam}^3/\text{m}^2$ 、 $0.156\text{Pam}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ とした。

図4より、最大排気速度のクライオパネル温度依存性はほとんどなく、一定値約 $7.7\text{m}^3/\text{s}$ を示したが、この最大排気速度の持続時間及びHeガスの飽和吸着量に対しては、大きなクライオパネル温度依存性を示した。すなわち、クライオパネル温度が3.5K以下の場合、Heガスの排気速度は飽和吸着量の約80%まで最大

値を維持し, He ガスの飽和吸着量は $1000 \text{ Pa m}^3/\text{m}^2$ を越えた。これは, SF₆ ガス凝縮量に対する He ガスの飽和吸着量の割合としては 60% 以上である。これに対して, クライオパネル温度が 4.0 K 以上では, 最大排気速度の持続性は悪くなり, 排気速度は He ガスの吸着量の増加に伴い低下した。また, 本実験において, 排気速度が比較的一定で, 実際の使用が想定される排気速度 $6 \sim 8 \text{ m}^3/\text{s}$ の範囲では, 例えば, He ガスの吸着媒に CO₂ ガス凝縮層を用いた場合に発生する凝縮層の間欠的熱発生 (通常, サーマルスパイク⁹⁾ と呼ぶ) による凝縮層からの不安定な He ガスの放出現象は全くなく,

He ガスが SF₆ ガス凝縮層により安定に排気されることが確認された。なお, 既存の JT-60 NBI 用クライオポンプのクライオパネル温度は 3.5 K で運転されていること及び排気特性のクライオパネル温度依存性が高いことから, 以後の実験におけるクライオパネル温度は全て 3.5 K とした。

(b) SF₆ ガス凝縮量依存性

一般に, クライオソープションポンプの排気速度は He ガスの吸着量の増加に伴い低下する。これにより, He ガス吸着量が規定量に達した場合, 吸着媒から He ガスを強制的に放出させ, 吸着媒を He ガスの存在しない初期状態に戻す, いわゆるクライオソープションポンプの再生を行う必要がある。この再生時期を考える上で, SF₆ ガス凝縮量と He ガスが飽和するまでの He ガス吸着量の関係を明確にする必要があり, 844 から $24000 \text{ Pa m}^3/\text{m}^2$ の間の 7 通りの SF₆ ガス凝縮量について, それぞれ He ガスの排気実験を行った。その結果を図 5 に示す。なお, He ガス流量は一定とし $0.156 \text{ Pa m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ とした。図 5 より, He ガスの飽和吸着量は SF₆ ガス凝縮量に強く依存した。すなわち, He ガスの飽和吸着量は SF₆ 凝縮量 $5590 \text{ Pa m}^3/\text{m}^2$ までは SF₆ ガス凝縮量の増加に伴い増大し, 5590 から $7970 \text{ Pa m}^3/\text{m}^2$ の範囲で, He ガスの飽和吸着量は最大値約 $2500 \text{ Pa m}^3/\text{m}^2$ を示したが, それ以上の SF₆ ガス凝縮量に対しては He ガスの飽和吸着量が低下する傾向を示した。これにより, SF₆ ガス凝縮量が少なく He ガスの飽和吸着量が最も多くなる条件の SF₆ ガス凝縮量は

図 4. He ガス排気速度のクライオパネル温度依存性。

図 5. He ガス排気速度の SF₆ ガス凝縮量依存性。

5590Pam³/m²付近であることが示された。また、SF₆ガス凝縮量が比較的多い15700Pam³/m²以上では、He ガスの飽和吸着量が減少するだけでなく、排気速度もHe ガス吸着量の少ない段階から低下する傾向を示した。しかし、実際にJT-60NBIで必要とされるHe ガスの吸着量は、1週間毎にクライオソーブションポンプの再生運転が行われることから、1500Pam³と評価され、単位面積当たり高々100Pam³/m²である。この値を図5で見ると、クライオパネルに形成されるSF₆ガス凝縮量が今回の実験範囲内であれば、ほぼ最大で一定値の排気速度を確保できることが結論できる。

(c) He ガス流量依存性

He ガス排気特性のHe ガス流量依存性を明確にするために、

0.063から1.56Pam³/s・m²の間の6通りのHe ガス流量について、それぞれHe ガスの排気実験を行った。He ガスが飽和するまでの連続的な排気速度を図6に、また、最大排気速度とそのときの圧力の関係を図7にそれぞれ示す。なお、SF₆ガス凝縮量は一定とし1720Pam³/m²とした。図6、図7より、最大排気速度は、He ガス流量により多少異なり、0.78Pam³/s・m²程度まではHe ガス流量が多いほど、すなわち圧力が高いほど大きくなる傾向を示した。また、JT-60NBIによるHe ビーム入射時の標準He ガス流量である0.156Pam³/s・m²及びそれ以下では、最大排気速度が長く持続するのに対して、He ガス流量が0.31Pam³/s・m²以上になると、排気速度はHe ガスの吸着量の増加に伴い徐々に低下する傾向を示した。特に、He ガス流量が0.78Pam³/s・m²以上では、He ガス吸着量に対する排気速度の低下傾向が強く、He ガス飽和吸着量も大きく低下した。

図6. He ガス排気速度のHe ガス流量依存性.

図7. 最大排気速度とその時のHe ガス圧力の関係.

3. JT-60NBI 用クライオソーブションポンプへの適用

3.1. SF₆ガス凝縮層の形成

(a) クライオポンプの改造と運転法

JT-60NBIは、図1に示すように上ユニットと下ユニットが対となって7箇所を設置され、全体で14基から成っている。1基分のクライオポンプを図8に示す。このクライオポンプは、図8からわかるように4個の大型クライオポンプモジュール（クライオパネルの大きさ、幅900mm×長さ3900mm）と2個の小型クライオポンプモジュール（クライオパネルの大きさ、幅530mm×長さ890mm）で構成されており、それぞれはシェブロンバッフル付きのH₂ガス排気用凝縮型クライオポンプである。NBI 真空容器全体は中性粒子ビームの経路に沿って3つの部屋P₁, P₂, P₃に仕切り板により分割され、P₁, P₂室ではそれぞれ2個の大型クライオポンプモジュールにより、またP₃室では2個の小型クライオポンプモジュールにより差動排気が行われる。

14基のNBIのうち上ユニットの1基をHeガス排気用クライオソーブションポンプに改造した。ここで、クライオパネルにSF₆ガス凝縮層を形成するための方法として、前述した小型クライオソーブションポンプと同様に、シェブロンバッフルを液体窒素で冷却する前に、クライオパネルを液体ヘリウムで冷却する方法は、クライオパネルへの熱負荷が大きくなることから不可能となる。そこで、ここでは、SF₆ガスの凝固点（-50.8℃）以下である77Kにシェブロンバッフルを冷却した状態で、シェブロンバッフルにSF₆ガスを凝縮させることなく、クライオパネル上にSF₆ガス凝縮層を形成させるために、図9に示すようなステンレス製SF₆ガス導入管をシェブロンバッフルとクライオパネル間に設置した。この導入管を図10に

図8. JT-60NBIの上ユニット用クライオポンプ。

図9. SF₆ガス導入管の構造. 図10. SF₆ガス導入配管の概略図.

示すようにP₁, P₂室の大型クライオポンプモジュールには450mm 間隔で左右対称に2本, P₃室の小型クライオポンプモジュールには中央に1本設置した. この導入管には, 図9に示すようにクライオパネル面に対して0°及び±60°の3個のSF₆ガス導入孔が導入管長手方向に対して20mm ピッチで設置されている.

なお, SF₆ガス導入時には, 導入管内の SF₆ガスがクライオパネルとシェブロンバッフルからの輻射冷却により SF₆ガスの凝固点である -50.8°C 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。

NBI 用クライオソーブションポンプによる He ガス排気実験の実験手順を以下に示す。

- (1) シェブロンバッフルとクライオパネルを液体窒素及び液体ヘリウムで冷却し, それぞれ 77K, 3.5K とする。
- (2) SF₆ガス導入管に通電し, 導入管を 20°C まで昇温する。
- (3) P₁, P₂, P₃の各部屋にそれぞれ規定量の SF₆ガスを導入し, クライオパネル面上に SF₆ガス凝縮層を形成する。
- (4) SF₆ガス導入管への通電を停止する。
- (5) He ガスを NBI イオン源より導入し, He ガスの排気実験を行う。

なお, SF₆ガス及び He ガスの流量はサーマルマスフローコントローラにより測定し, He ガス排気時の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。

(b) クライオパネル上への SF₆ガス凝縮層の最適制御

NBI 用クライオソーブションポンプの起動から再生までの 1 サイクル当たり $100\text{Pam}^3/\text{m}^2$ の He ガスをクライオパネル上の SF₆ガス凝縮層に安定に吸着させるためには, SF₆ガス導入管から導入され, クライオパネル上に形成される SF₆ガス凝縮層の凝縮量分布を求め, 必要となる SF₆ガス導入量を決定する必要がある。クライオパネル上への SF₆ガス凝縮層の凝縮量分布を評価する際, 計算を容易にするために以下の仮定を置く。

- (1) SF₆ガスは, SF₆ガス導入管の導入孔より, 余弦則に従う方向分布でクライオパネルに凝縮される。
- (2) クライオパネルに衝突した SF₆ガスは, 全てクライオパネル面上に凝縮される。
- (3) SF₆ガス導入孔の導入管長手方向ピッチは, 導入管の間隔及びクライオパネル幅に対して十分小さいことから, クライオパネル幅方向の 2 次元問題とする。
- (4) SF₆ガス導入孔は, SF₆ガス分子の発射面とし, その面積は十分小さいとする。
- (5) SF₆ガス導入管長手方向に対しては, SF₆ガスの偏流はないものとする。

以上の仮定の基に, 図11の計算モデル

を用いて, 1 つの SF₆導入孔がクライオ

パネルに対して, 距離 l で傾き θ_0 で設

図11. SF₆ガス凝縮層の凝縮量分布の計算モデル。

置された一般的な場合について、 SF_6 ガス凝縮層の凝縮量分布を評価する。1個の粒子が SF_6 導入孔の法線方向に対して角度 θ で SF_6 導入孔から発射する確率は、余弦則に従うことから $\cos \theta$ である。一方、 SF_6 導入孔を角度 θ で発射した1個の粒子がクライオパネル上のA点に入射する確率は $\cos(\theta_0 + \theta)$ である。よって、1個の粒子が SF_6 導入孔から角度 θ で発射しクライオパネル上の到達点Aに入射する確率 P は、以上の独立に求められた2つの確率の積として表され式(1)となる。また、入射位置 a は、粒子の発射方向とクライオパネルとの位置関係により求められ式(2)となる。

$$P = \cos(\theta_0 + \theta) \cos \theta \quad (1)$$

$$a = \ell \tan(\theta_0 + \theta) \quad (2)$$

また、 SF_6 ガス導入量のうち、図11の場合、 $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ までがクライオパネル上に凝縮されるが、それ以外は熱シールド板やシェブロンバッフル上に凝縮されてしまい無効となる。なお、 θ_1 及び θ_2 は図11における SF_6 ガス導入孔とクライオパネルとの幾何学的位置関係により容易に求められる。

クライオパネルの任意の位置における SF_6 ガス凝縮層の凝縮量分布は、上述した式(1)、(2)より求められる。この凝縮量分布は、 SF_6 導入孔の前面に強いピークをもち、クライオパネル端部で最も低い分布を示した。このピーク部を除いてほとんどが平坦であることから、必要最低の SF_6 ガス凝縮量は凝縮量分布の最も低いクライオパネル端部で規定する必要がある。このクライオパネル端部における SF_6 ガス凝縮量と必要最低 SF_6 ガス凝縮量から各クライオパネルに凝縮される SF_6 ガス導入量が決定される。すなわち、JT-60NBIでのHeビーム入射で必要とされるHeガス吸着量 $100\text{Pam}^3/\text{m}^2$ に対して、Heガスの安定排気を行うために必要となる最低の SF_6 ガス凝縮量は、図5より約 $210\text{Pam}^3/\text{m}^2$ となる。しかし、上述した SF_6 ガス凝縮層の凝縮量分布を評価する上で仮定があること、及び SF_6 ガス凝縮量が $210\text{Pam}^3/\text{m}^2$ の約25倍である $5590\text{Pam}^3/\text{m}^2$ まで比較的安定な排気特性を示すことから、図5から得られた理想的 SF_6 ガス凝縮量約 $210\text{Pam}^3/\text{m}^2$ に対してその約4倍の SF_6 ガスを導入し、クライオパネル端部での SF_6 ガス凝縮量を $800\text{Pam}^3/\text{m}^2$ 以上とした。その結果、 P_1 、 P_2 室の各クライオポンプモジュールにはそれぞれ平均 20000Pam^3 ($5700\text{Pam}^3/\text{m}^2$)、 P_3 室の各クライオポンプモジュールにはそれぞれ平均 3000Pam^3 ($6360\text{Pam}^3/\text{m}^2$)を導入し、その時の P_1 、 P_2 及び P_3 室の各クライオパネルへの SF_6 ガス凝縮層の凝縮量分布をそれぞれ図12、図13に示す。なお、 SF_6 ガス導入に当たっては、全ての SF_6 ガスがクライオパネルに凝縮するわけではなく、クライオパネルに凝縮される割合は、上述の θ_1 及び θ_2 から求められ、 P_1 、 P_2 及び P_3 室の場合それぞれ83%、83%、82%であった。

図12、図13より、最も低い SF_6 ガスの凝縮量分布を示したクライオパネル端部で $800\text{Pam}^3/\text{m}^2$ 以上の SF_6 ガスを導入することを決定したことから、 SF_6 ガス導入孔の前面の強いピーク部の SF_6 ガス凝縮量は、 P_1 、 P_2 及び P_3 室の各クライオパネルでそれぞれ $48000\text{Pam}^3/\text{m}^2$ 、 $48000\text{Pam}^3/\text{m}^2$ 、 $61000\text{Pam}^3/\text{m}^2$ となった。これは、図5における実験での最大値 $24000\text{Pam}^3/\text{m}^2$ の2倍以上であり、実験結果から直接排気特性を評価する

図12. P₁, P₂室用クライオパネルのSF₆ガス凝縮層の凝縮量分布.

図13. P₃室用クライオパネルのSF₆ガス凝縮層の凝縮量分布.

ことはできないが、このピークをもつ領域は全体の4%以下であることから、Heガスの排気特性に大きな影響はないものと考えられる。

3.2. SF₆ガス凝縮層へのHeガスの実効吸着係数の評価

JT-60NBI用クライオソープションポンプの排気特性を次節で述べるモンテカルロ法により評価するために、ここでは、前章で得られた実験結果を用いて、SF₆ガス凝縮層へのHeガスの実効吸着係数を求める。そのために、まず、円筒型シェブロンパッフルを通過する粒子の通過確率を求める必要があり、図14に示す解析モデルを用いて、モンテカルロ法^{7,8)}による通過確率の計算を行った。粒子の発射場所はシェブロンパッフルの外側とし、シェブロンパッフルを通過しクライオパネルに到達する粒子の通過確率P₁₂を求め

図14. 円筒型シェブロンバッフルの通過確率の解析モデル.

た. その結果, $P_{12}=0.19$ を得た. また, 反対に, シェブロンバッフルの内側から外側への通過確率 P_{21} は, シェブロンバッフルの外側と内側の各開口部面積 A_1 , A_2 を用いて, 通過確率の相互関係より次式によって求めることができ, $P_{21}=0.28$ を得た.

$$P_{12}A_1 = P_{21}A_2 \quad (3)$$

図15. 吸着確率の計算モデル.

これらのシェブロンバッフルの通過確率 P_{12} , P_{21} を用いて, 1個のHeガス粒子がシェブロンバッフルを通過し, SF_6 ガス凝縮層に吸着される確率 P_E は, 図15に示すように無限級数で表され次式となる.

$$P_E = \frac{\alpha P_{12}}{1 - (1 - \alpha)(1 - P_{21})} \quad (4)$$

ここで、吸着係数 α は SF₆ ガス凝縮層に He ガス粒子が衝突し吸着される確率である。この式 (4) を用いることにより、排気速度は次式によって与えられる。

$$S = A_1 \sqrt{\frac{RT_g}{2\pi M}} \frac{\alpha P_{12}}{1 - (1 - \alpha)(1 - P_{21})} \left(1 - \frac{\alpha_s P_s}{\alpha P_g} \sqrt{\frac{T_g}{T_s}} \right) \quad (5)$$

ここで、 R 、 M 、 T_g 、 T_s 、 α_s 、 P_g 、 P_s はそれぞれガス定数、ガスの分子量、ガス温度、クライオパネル温度、吸着ガスの脱離の確率、排気されるガスの圧力、吸着ガスの平衡圧力である。式 (5) における第 1 頁、第 2 頁及び第 3 項の具体的内容は、それぞれ理想排気速度¹⁰⁾、式 (4) で求められた 1 個の He ガス粒子が SF₆ ガス凝縮層に排気される確率、SF₆ ガス凝縮層に排気される He ガス粒子数と SF₆ ガス凝縮層から脱離する He ガス粒子数の比で実際に排気される正味の量¹¹⁾を表す。式 (5) の第 3 項における He ガスの脱離による排気速度の低下は、排気という観点から見た場合、吸着係数の実質的低下と見なすことができ、実効吸着係数 α_E を用いることにより、式 (5) を次式で近似する。

$$S \sim A_1 \sqrt{\frac{RT_g}{2\pi M}} \frac{\alpha_E P_{12}}{1 - (1 - \alpha_E)(1 - P_{21})} \quad (6)$$

式 (6) より、排気速度 S は、SF₆ ガス凝縮層への He ガスの実効吸着係数 α_E により容易に求めることができ、小型クライオソーブションポンプ ($A_1 = 0.223 \text{ m}^2$) の場合の排気速度と実効吸着係数との関係を図 16 に示す。さらに、この図 16 の排気速度と実効吸着係数との関係を用いて、図 7 の排気速度の実験結果から実効吸着係数を求め図 7 に併記した。なお、図 7 は圧力と実効吸着係数の関係を示すものであり、この図 7 を用いることにより、次節で述べるモンテカルロ法による JT-60NBI 用クライオソーブションポンプの排気特性の評価に必要となるクライオソーブションポンプ前面の圧力に対応した実効吸着係数を求めることができる。

図16. 排気速度と実効吸着係数との関係。

3.3. モンテカルロ法による NBI 真空容器内の圧力分布の解析

(a) 解析モデル

JT-60NBI 用クライオポンプをクライオソーブションポンプに改造した上ユニットの真空容器内の圧力分布を解析するために、モンテカルロ法を用いた既報の方法^{7,8)}により解析モデルを構築した。解析モデルは、図17に示すように対称性を考慮することによ

り片側半分についてモデル化したものであり、真空容器の境界形状を規定する真空境界壁面、真空容器内の構造物の形状を規定する真空領域内壁面、圧力の算出面及び粒子の発射面となる仮想面から構成され、その数はそれぞれ22, 93, 28で、全壁面の合計は143である。この中で仮想面の設置位置は、図17に示すように P_1 , P_2 , P_3 室の各圧力測定点の3箇所、イオン源からドリフト管までの He ビームが通過する領域の22箇所、及び各クライオソーブションポンプモジュール前面の3箇所とした。ここで、 P_1 , P_2 , P_3 室に実際に設置

図17. JT-60NBI の上ユニットの構造モデル。

されている真空計は、ヌード型電離真空計であり¹²⁾、直径38mmのポートを介して真空容器に設置されている。これらの真空計に対応する各仮想面の設置場所を各真空計の設置場所近傍とした。すなわち、分子流であり一定温度が仮定されたガスの平衡状態において、真空計での圧力と真空計設置場所近傍の真空容器内圧力とは、真空計の形状やその取り付け方法に関係なく等しくなることから¹³⁾、仮想面を真空計設置場所近傍に設置することにより、真空計での圧力を仮想面を通過する粒子数により評価することができる。なお、これらの仮想面の大きさは、真空計が設置された近傍で大きな圧力勾配がないこと及び限られた試行粒子から仮想面を通過する粒子数を増大させ精度を向上させるために直径600mmとした。また、イオン源からドリフト管までのビームが通過する領域に設置された仮想面はリミター等の開口部の大きさ又はそれと同等の大きさとした。このうち、粒子の発射面となる仮想面の設置場所は、イオン源の出口、すなわち、解析モデルでは2本の中性化セル入口とした。

真空境界壁面と真空領域内壁面の各壁面と粒子との相互作用を示す反射、吸収、通過の各確率は、クライオソーブションポンプ排気面、ビームダンプ上下面、対称面、ドリフト管先端面を除いて、全て余弦則に従う反射とした。ビームダンプ上下面の構造はルーバーであり、前もってモンテカルロ法により計算された通過確率0.68を用いて壁面の条件を設定した。すなわち、ビームダンプ上下面の条件は、余弦則に従う散乱通過確率0.68、余弦則に従う散乱反射確率0.32とした。対称面は全て鏡面反射とし、ドリフト管先端面は全て吸収とした。クライオソーブションポンプ排気面の条件は、前もってモンテカルロ法により計算されたシェ

ブロンバッフルの通過確率 $P_{12}=P_{21}=0.24^{14)}$ と各クライオソーブションポンプモジュールの実効吸着係数により, 式(4)から算出した。すなわち, 各クライオソーブションポンプの排気面の条件は, 各排気面毎に式(4)より求めた吸着確率を排気面の吸収確率とし, 1.0からこの吸収確率を差し引いた値を余弦則に従う散乱反射確率とした。なお, 実効吸着係数は, 図7のように圧力依存性を示すことから, 予備解析を1度行った後, 各クライオソーブションポンプモジュール前面の圧力から図7を用いて実効吸着係数を決定した。その結果, P_1 , P_2 , P_3 室の各クライオソーブションポンプモジュール前面の平均圧力はそれぞれ 3.2×10^{-3} Pa, 6.6×10^{-4} Pa, 8.6×10^{-4} Pa となり, これらの圧力に相当する実効吸着係数として図7よりそれぞれ 0.37, 0.32, 0.32 を得た。これらの実効吸着係数と, モンテカルロ法により求めたシェブロンバッフルの通過確率 0.24 を用いて, 式(4)から各クライオソーブションポンプモジュール排気面の吸着確率が求められ, これにより, 各クライオソーブションポンプモジュール排気面の条件として, P_1 室の場合, 吸収確率 0.17, 余弦則に従う散乱反射確率 0.83, P_2 及び P_3 室の場合, 吸収確率 0.16, 余弦則に従う散乱反射確率 0.84 とした。

(b) 解析結果

試行粒子数を多くすれば計算精度は上昇するが, 解析モデルの構造がかなり複雑であるために, 1 ケース当たりの計算時間は長時間を必要とする。そこで, 試行粒子数は, 同じ試行粒子数毎に 3 ~ 5 回の乱数列を変えた計算を行い, これらの計算結果の平均値に対する誤差が $\pm 10\%$ 以下となる条件により必要最少限の試行粒子数を決定した。その結果, 試行粒子数は $N=1.6 \times 10^4$ 個となり, この試行粒子数の平均値を解析結果の代表値として採用する。なお, 試行粒子数 1.6×10^4 個で 1 ケース当たりの計算時間は, 大型計算機 FACOM M-780 を用いた場合, 約 80 分であった。図18に解析モデル内の各粒子の軌跡を追跡した結果を示し, また, 図19に P_1 , P_2 , P_3 室の各圧力の実験結果と解析結果とを併記して示す。なお, イオン源からの He ガス $1.5 \text{ Pam}^3/\text{s}$ 導入時におけるイオン源部の圧力の測定値 3.1×10^{-1} Pa を圧力の境界条件とした。図19から, P_2 室の圧力に関しては, 解析結果は実験結果と良い一致を示したが, P_1 室と P_3 室の圧力に関しては, 解析結果は実験結果に対して約 $\pm 30\%$ の誤差が生じた。

しかし, 解析モデルが非常に複雑であること及び SF₆ ガス凝縮層への He ガスの吸着特性が各種の要因により変化することを考慮すれば, 解析結果は実験結果と比較的良好一致を示していると判断できる。なお, P_1 , P_2 , P_3 室の各クライオソーブションポンプモジュール前面の平均圧力はそれぞれ 3.2×10^{-3} Pa, 7.0×10^{-4} Pa, 9.5×10^{-4} Pa となり, 予備解析でのこれら各々に対応する圧力 3.2×10^{-3} Pa, 6.6×10^{-4} Pa, 8.6×10^{-4} Pa と少し異なった

図18. JT-60NBI の上ユニット内粒子の軌跡。

値を示した。しかし、以上の本解析で得られた圧力を用いて図7より求めた実効吸着係数の値は、予備解析で求めた値とほとんど同じであることから、予備解析で求めた実効吸着係数は本解析においても有効であることが確認された。さらに、JT-60NBI から要求されている He ガスの吸着量 $100 \text{ Pam}^3/\text{m}^2$ 以上の $123 \text{ Pam}^3/\text{m}^2$ まで、He ビーム入射実験を含めた He ガスの排気実験を行った結果、He ガスに対する排気速度の劣化はほとんどなく、He ビーム入射中においても排気速度は十分安定であることが確認された。

以上、小型クライオソーブションポンプによる基礎データと既報^{7,8)}で開発したモンテカルロ法により、JT-60NBI 用クライオソーブションポンプのように複雑な構造物内に設置された大容量クライオソーブションポンプに対して、その設計手法を確立することができた。

図19. JT-60NBI の上ユニット内圧力の解析結果と実験結果との比較。

4. 結論

小型クライオソーブションポンプを用いて、 SF_6 ガス凝縮層による He ガスの排気特性を系統的に測定し、さらに、JT-60NBI の H_2 ガス排気用クライオポンプを改造した He ガス排気用大容量クライオソーブションポンプにこれらの実験結果を適用した。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 3.0から4.5K のクライオパネルの温度範囲で、最大排気速度のクライオパネル温度依存性はほとんどない。しかし、最大排気速度の持続性及び He ガスの飽和吸着量に対しては、大きなクライオパネルほど温度依存性を示し、クライオパネル温度が低いほど優れた排気特性を示す。
- (2) He ガスの飽和吸着量は、 SF_6 ガス凝縮量 $7970 \text{ Pam}^3/\text{m}^2$ までは SF_6 ガス凝縮量の増加に伴い増大するが、 $15700 \text{ Pam}^3/\text{m}^2$ 以上では減少するとともに、He ガス吸着量の増加に伴い排気速度の低下も早い。しかし、JT-60NBI で要求されている $100 \text{ Pam}^3/\text{m}^2$ までの He ガス吸着量に対しては、いずれの SF_6 凝縮量においても最大排気速度を安定に持続することが確認された。
- (3) 0.063 から $1.56 \text{ Pam}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ の He ガス流量に対して、最大排気速度は多少異なり、He ガス流量が多いほど大きくなる傾向を示す。また、JT-60NBI での He ビーム入射時に予想される He ガス流量 $0.156 \text{ Pam}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$ では、He ガスの飽和吸着量の約80%まで最大排気速度が持続することが確認された。
- (4) JT-60NBI 用クライオソーブションポンプのクライオパネル上に凝縮される SF_6 ガス凝縮層の凝縮量分布のモデル計算を行い、クライオパネル単位面積当たり $800 \text{ Pam}^3/\text{m}^2$ 以上の SF_6 ガス凝縮層を形成するように、各クライオポンプモジュールへの SF_6 ガス導入量を決定した。

- (5) モンテカルロ法により求めたシェブロンバッフルの通過確率を用いて, SF₆ガス凝縮層への He ガスの実効吸着係数と排気速度との関係を解析的に明らかにした.
- (6) 上述の (5) で得られた解析結果及び実測の排気速度とその時の圧力の関係から, 圧力と SF₆ガス凝縮層への He ガスの実効吸着係数との関係付けを行った.
- (7) 上述の (6) で得られた実効吸着係数を用いて, モンテカルロ法による NBI 真空容器内の圧力の解析を行った結果, 実験結果と比較的良好一致を示した. これにより, JT-60NBI 用クライオソーブションポンプのように複雑な構造物内に設置された大容量クライオソーブションポンプに対して, その設計手法を確立することができた. その結果, JT-60NBI から要求されている He ガスの吸着量 100 Pam³/m²以上の 123 Pam³/m²まで, He ビーム入射実験を含めた He ガス排気実験を行った結果, He ガスに対する排気速度の劣化はほとんどなく, He ビーム入射中においても排気速度は十分安定であることが確認された.

謝 辞

この研究を行っていく上で, 終始激励をいただいた日本原子力研究所の飯島 勉那珂研究所所長, 島本進核融合工学部部長, 松田慎三郎核融合実験炉特別チームリーダー, 小原 祥裕 NBI 加熱研究室室長, 国枝 俊介 NBI 装置試験室室長に感謝いたします. また, 多くの有益な議論をしていただいた NBI グループの諸氏に感謝いたします.

参 考 文 献

- 1) H. Nakamura, K. Tobita, T. Hirayama, Y. Koide, T. Arai, M. Kuriyama, H. Kubo, Y. Kusama, T. Sugie, M. Sugihara, T. Takizuka, K. Tani and S. Yamamoto: Fusion Technol. **18** (1990) 578.
- 2) S. Matsuda, M. Akiba, M. Araki, M. Dairaku, N. Ebisawa, H. Horiike, T. Itoh, T. Kanai, M. Komata, M. Kuriyama, S. Kitamura, M. Matsuoka, K. Mizuhashi, T. Ohga, H. Ohhara, Y. Ohuchi, Y. Ohara, Y. Okumura, K. Shibamura, T. Shibata, H. Shirakata, T. Sugawara, S. Tanaka and K. Watanabe: Fusion Eng. Des. **5** (1987) 85.
- 3) 岩佐康史, 内田孝穂, 立川信夫: 真空 **33** (1990) 157.
- 4) 阿部仁志: 真空 **22** (1979) 190.
- 5) H. Abe: Chem. Phys. **68** (1982) 89.
- 6) 柴沼 清, 中村和幸, 柴田猛順, 田中 茂: 真空 **31** (1988) 311.
- 7) 柴沼 清, 柴田猛順: 真空 **32** (1989) 296.
- 8) 柴沼 清: 真空 **34** (1991) 645.
- 9) I. Arakawa, M. Kobayashi and Y. Tuzi: J. Vac. Sci. Technol. **16** (1979) 738.
- 10) 熊谷寛夫, 富永五郎, 辻 泰, 堀越源一: 真空の物理と応用 (裳華房, 1980).
- 11) 荒川一郎, 辻 泰: 生産研究 **31** (1979) 597.
- 12) 柴田猛順, 水橋 清, 柴沼 清, 田中 茂: 真空 **30** (1987) 350.
- 13) 林主税: 真空技術 (共立出版, 1985).
- 14) 柴沼 清, 秋野 昇, 大楽正幸, 国枝俊介, 栗山正明, 松田慎三郎, 大内 豊, 柴田猛順, 白形弘文: 原子力誌 **33** (1991) 960.