

JAERI-M  
7792

水素排気用 12,000ℓ/sec クライオポンプ  
の排気実験

1978年8月

柴田 猛順・松田 慎三郎・白形 弘文  
齊藤 正樹\*・水野 正保\*・小宮 宗治\*

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

水素排気用  $12000\ell/\text{sec}$  クライオポンプの排気実験

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

柴田 猛順・松田慎三郎・白形 弘文  
斉藤正樹\*・水野正保\*・小宮宗治\*

(1978年7月11日受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) 用中性粒子入射装置は1ユニットあたり約100万 $\ell/\text{sec}$ のクライオポンプを採用する予定でありこのための開発の第1段階として水素排気用  $12000\ell/\text{sec}$ の凝縮型クライオポンプを作り排気実験を行なった。ポンプはその一部が排気面になっている液体ヘリウム容器, そのまわりの液体窒素容器とシールド板, 液体窒素冷却のシェブロンで構成されている。排気面は直径30cm, 長さ32cmの円筒形の内面でこの内側に黒化処理されたシェブロンが同心円状にある。測定された排気速度は設計値と一致する値が得られ, また排気面に単位面積当り30Torr $\ell/\text{cm}^2$ の水素を凝縮させても排気速度の減少は見られなかった。さらに液体ヘリウム使用量の測定, ポンプ再生時の真空容器内圧力の上昇の観測を行なった。これらの結果, JT-60用中性粒子入射装置のポンプとして液体ヘリウム使用の凝縮型クライオポンプが使用可能なことが確かめられた。

12,000 l/sec Cryopump for Hydrogen Gas

Takemasa SHIBATA, Shinzaburo MATSUDA, Hirofumi SHIRAKATA,  
Masaki SAITO\*, Masayasu MIZUNO\*, and Soji KOMIYA\*

Division of Thermonuclear Fusion Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received July 11, 1978)

In the neutral beam injector of JT-60, cryogenic pumps with pumping rate  $10^6$  l/sec for hydrogen will be installed in the beam lines. To develop the cryopumps a small-scale pump of 12,000 l/sec was made and its fundamental pumping characteristics were measured. The cryogenic pump consists of liquid helium cooled panel, liquid nitrogen cooled chevron and radiation shields. The cryopanel is cylindrical form and the chevron is arranged concentrically within it. The measured pumping rate agrees with the design one. The pumping rate is not lowered by  $30 \text{ Torr} \cdot \text{l}/\text{cm}^2$  on the cryopanel. Liquid helium consumption rate was also measured and the pressure rise in the vacuum chamber in reactivation of the cryopanel was observed.

Keywords: Neutral Beam Injector, Cryopump, Liquid Helium, Hydrogen Gas  
Pumping Rate

---

\*) ULVAC Corporation

## 目 次

1. はじめに	1
2. 水素排気用 $12,000\ell/\text{sec}$ ポンプの概要	1
2.1 クライオポンプ本体	1
2.2 液体ヘリウム供給系と液体窒素供給系	2
2.3 補助排気系	2
2.4 温度測定および圧力測定	3
3. 設計排気速度および液体ヘリウム消費量の推定	4
3.1 設計排気速度	4
3.2 液体ヘリウム消費量の推定値	4
4. 実験結果	6
4.1 クライオポンプへの液体窒素，液体ヘリウムの導入	6
4.2 排気速度の測定	6
4.3 大容量水素ガス排気実験	7
4.4 クライオポンプの再生	7
4.5 液体ヘリウム消費量	8
5. 結 論	9
謝 辞	9
参 考 文 献	10

# 1. はじめに

臨界プラズマ試験装置(JT-60)の第二段加熱として約20MWの中性粒子入射加熱を行なうことになっている。<sup>1</sup> このための入射装置はJT-60本体真空容器に設けられた14個の入射孔に対応して、14ユニットのビームラインで構成されているが、各ユニットのビームラインで高速粒子生成のときに発生する大量の水素ガス数10Torr・ℓ/secを約10<sup>6</sup>ℓ/secの排気速度で排気して容器内圧力を10<sup>-5</sup>Torr台にする必要がある。このポンプとして、大排気速度で長時間運転が可能と考えられる液体ヘリウム使用の凝縮型クライオポンプを採用する予定である。<sup>2</sup>

このような大容量水素排気のクライオポンプは過去に例がなく、しかもわが国では水素排気のクライオポンプの経験がないため原研では第1段階として12,000ℓ/secのポンプを作り排気特性を測定した。さらに60,000ℓ/secのポンプを作り排気特性の測定を行なった。<sup>3</sup> 外国でもここ二、三年中性粒子入射装置用のクライオポンプの研究が数多く行なわれており、<sup>4</sup> これらの研究をもとに実際の中性粒子入射装置にクライオポンプが取り付けられ、正常に動いている。<sup>5</sup>

この報告では12,000ℓ/secポンプの概要と排気特性、特に排気速度、大容量の水素ガスを長時間排気できるかどうかについて述べる。さらに液体ヘリウム消費量の測定結果についても述べる。なお引き続き行なわれた60,000ℓ/secクライオポンプの排気実験の一部についてはすでに報告<sup>3</sup>したが詳しくは別のJAERI-Mレポート<sup>6</sup>に報告する予定である。

## 2. 水素排気用12,000ℓ/secポンプの概要

### 2.1 クライオポンプ本体

図1にクライオポンプ本体の鳥かん図、図2にポンプを中心軸から見た時の概略図、図3に横から見たポンプと排気速度測定系の概略図を示す。クライオポンプ本体は直径70cm、高さ1mの円筒状真空容器内に納められており、液体窒素、液体ヘリウム導入パイプで上ぶたから支えられている。排気面は直径30cm、長さ32cmの円筒形で液体ヘリウムで冷却されている。液体ヘリウムはポンプ内に貯蔵されその容器の一部分が排気面となっている。このため排気面の温度は液体ヘリウムの温度とほとんど同じである。この液体ヘリウム容器の回りには液体窒素容器、液体窒素で冷却されたシールド板があり室壁からの放射を受けなくなっている。排気面の内側にはシェブロンがあり、液体窒素が入っているパイプで支えられており、ほぼ液体窒素温度となっている。このシェブロンは、開き角120°の銅板でできており、表面は陽極酸化により黒化処理されている。これにより室温から排気面への放射をさきぎるだけでな

く、排気される水素ガスの冷却も行なう。組立や分解の容易さのため、シェブロンとこれをささえるパイプは液体窒素容器と金属ガスケットフランジで接続されている。また液体ヘリウム容器には、底までとどく液体ヘリウム導入パイプがあり、これは液体ヘリウム容器を予冷するための液体窒素の導入と追い出しに使われる。なおシールド板およびシェブロンとシェブロンを支えるパイプの材質は銅で、それ以外の低温部の材質はステンレス鋼である。

ここでポンプを円筒状にしたのは J-T-60 用中性粒子入射加熱装置の最初の設計では、中性粒子入射装置とトラスをつなぐドリフト部のところで中性粒子ビームの回りに円筒状の排気面を設けることになっていたためである。コンダクタンスの小さいドリフト部に排気面をつけると比較的小さい排気速度のポンプで必要な真空は得られるが、その後の設計で主にドリフト部の幾何学的制約からこの円筒状クライオポンプは採用しないことになった。<sup>7</sup>

## 2.2 液体ヘリウム供給系と液体窒素供給系

液体ヘリウムと液体窒素のクライオポンプへの供給はそれぞれの容器からサイホンを通して行なった。また両方とも自動供給が可能である。図4に液体ヘリウムと液体窒素供給の系統図を示す。液体ヘリウムの自動供給はつぎのようにして行なった。保持したい液面領域の両端に炭素抵抗の液面検出素子を置く。液面が下部液面素子より下がると液面制御装置からの信号により電動弁が開いてヘリウムの移送が始まり、液面が上部液面素子に達すると電動弁が閉じるようになっている。液面の位置を常に知るため超電導線の連続液面計が取り付けられている。液体ヘリウムを 4.2 K 以下にする時は排気速度 155ℓ/min のロータリーポンプによりヘリウム蒸気圧を 760Torr 以下の一定値に保つように減圧した。液体窒素の自動供給はつぎのようにして行なった。保持したい液面の上限に炭素抵抗の液面検出素子を置く。液面が検出素子の位置から下り始めてから自動補給装置に設定されてある一定時間後液体窒素デューワーに窒素ガス圧力が加わって液体窒素の移送が始まり、液面が検出素子まで達すると、デューワーの窒素ガス圧力が大気圧となり移送が終る。

## 2.3 補助排気系

真空容器の圧力を大気圧からクライオポンプ作動圧力まで排気するための補助排気装置として、油拡散ポンプ排気装置を用いた。<sup>\*</sup> これは 1200ℓ/sec の油拡散ポンプ、320ℓ/min のロータリーポンプ、6吋薄型ゲートバルブおよび6吋コールドトラップにより構成されている。あら引きのほか、クライオポンプ内に排気不能なヘリウムガスが入った時にもこの補助排気系を使用する。

\* 日本真空技術 (株) 製 YH 500

## 2.4 温度測定および圧力測定

クライオ面および液体窒素容器の温度測定のためクロメル対Au-0.07%Feの熱電対をそれぞれの容器に4個ずつ取り付け付けた。この熱電対は熱起電力の較正を行っていないことと、クロメル線、Au-0.07%Fe線をハーマチックシールに別々につないで真空容器から取り出したことのために、測定値には10 K前後の誤差があると考えられる。クライオパネルの温度を正確に測定するには、液体ヘリウム容器のヘリウム蒸気圧をブルドン管で測定しこの圧力より求めた。

容器内圧力の測定はポンプの排気性能を調べる上で最も重要なものである。図3の $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ は電離真空計で、このうち $G_3$ はスードゲージで $5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-11}$  Torrの測定が可能である。 $G_1$ 、 $G_2$ は、次節で述べるように水素ガス流量の測定に使用される。これらの電離真空計の感度較正は、一定量の水素ガスを真空容器内へ拡散させて行なった膨張法により行なった。この較正の詳細は、別のレポートに報告する。<sup>6</sup> なお本論文では、 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$ 、 $G_4$ により測定された圧力をそれぞれ $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ とする。

補助排気系には、760 Torr~1 Torrを測定できるガイヤフラム真空計、20 Torr~ $3 \times 10^{-3}$  Torrを測定できるピラニー真空計が各1個付いている。

残留ガス分析用に四重極マスフィルターがテストドームに付いている。



### 3. 設計排気速度および液体ヘリウム消費量の推定

#### 3.1 設計排気速度

シェブロンバッフル付きのクライオポンプの排気速度  $S$  は、排気される気体の圧力と温度をそれぞれ  $P_g, T_g$ , クライオ面の温度を  $T_s$ , このときの凝縮気体の蒸気圧を  $P_s$ , 気体分子のシェブロン通過確率を  $f$ , クライオ面に衝突した気体分子の凝縮係数を  $C_s$ , 凝縮気体の蒸発の確率を  $C_g$  とすると

$$S = A \left( \frac{RT_g}{2\pi M} \right)^{1/2} \frac{1}{f^{-1} + C_g^{-1} - 1} \left\{ 1 - \frac{C_s P_s}{C_g P_g} \frac{T_g}{T_s} \right\}^{1/2}$$

である。ここで  $A$  はクライオポンプの排気面積,  $R$  は気体定数,  $M$  は排気される気体の分子量である。前節で述べたように本クライオポンプは排気面が円筒状で上式をそのまま使うことはできないが、排気面積を最も小さく考えてシェブロン内側の面積として計算する。シェブロンの内径は 15 cm で長さ 32 cm である。21 枚のシェブロンの重なりが 0.5 mm ずつあり、4 本の直径 2 cm の液体窒素パイプが直径 20 cm の円周上にあり排気面積を小さくしているため、排気面積  $A$  としてつぎのように計算した。

$$A = (32 - 0.05 \times 20) \times (15 \times 3.14 - 4 \times 2 \times \frac{15}{20}) \quad (\text{cm}^2)$$

120° のシェブロンの通過率  $f$  を 0.25<sup>8</sup> と見積もり、 $C_g = 0.5$  と仮定すると 20°C の水素ガスに対する排気速度  $S$  は

$$S = 12000 \left\{ 1 - \frac{C_s P_s}{C_g P_g} \left( \frac{T_g}{T_s} \right)^{1/2} \right\} \quad (\ell/\text{sec})$$

となる。 $P_g \gg \frac{C_s}{C_g} P_s \left( \frac{T_g}{T_s} \right)^{1/2}$  すなわち、凝縮した水素の蒸気圧とつりあっている圧力（到達圧力）よりずっと高い圧力領域での設計排気速度は 12,000  $\ell/\text{sec}$  である。

#### 3.2 液体ヘリウム消費量の推定値

##### 3.2.1 水素排気時でない時の定常的消費量

水素排気時でない時の液体ヘリウム消費量に影響する主な要素は放射熱と固体による熱伝導である。

放射熱  $\dot{Q}$  は熱のやりとりを行なう面が同軸円筒や同心球の場合、次の式で与えられる。

$$\dot{Q} = \frac{\sigma A_1 e_1 e_2 (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{A_1}{A_2} e_1 + e_2 - \frac{A_1}{A_2} e_1 e_2}$$

ここで $\sigma$ はステファンボルツマン定数、 $e_1$ は液体ヘリウム容器の放射率、 $e_2$ は液体ヘリウム容器を囲む面の放射率、 $A_1$ は液体ヘリウム容器の表面積、 $A_2$ は液体ヘリウム容器を囲む面の表面積、 $T_1$ は液体ヘリウム容器の温度、 $T_2$ は液体ヘリウム容器を囲む面の温度である。 $T_2 = 80\text{K}$ 、 $T_1 = 4.2\text{K}$ 、シェブロン $e_2 = 0.9$ とし、シェブロン以外の $e_2$ と $e_1$ については、0.1の場合と0.2の場合について $\dot{Q}$ を計算した結果を表1に示す。

固体による熱伝導は液体ヘリウム容器にとりつけられたパイプからの熱流入で、

$$\dot{Q} = \frac{\bar{\lambda} A \Delta T}{L}$$

で与えられる。ここで $\bar{\lambda}$ は平均熱伝導度、 $A$ はパイプ肉厚断面積、 $\Delta T$ はパイプ両端の温度差、 $L$ はパイプの長さである。パイプには液体ヘリウム導入部の二重管、直接上ぶたと液体ヘリウム容器をつなぐパイプ二本があり、それぞれによる熱負荷は表2のようになる。ここで $\Delta T$ は液体ヘリウム導入部内側パイプ以外のパイプはパイプ上部で液体窒素容器と接触しているので $\Delta T = 80\text{K}$ とした。

以上の結果をもとに水素を排気していない時の定常的液体ヘリウム消費量の推定値を表3に示す。

### 3.2.2 容器の予冷に必要な液体ヘリウム量の推定値

液体ヘリウム容器は液体窒素で予冷されており、液体ヘリウムを導入するときの容器の温度は $80\text{K}$ である。これを $4.2\text{K}$ まで冷却するとき放出されるエネルギーを計算する。容器の材質はステンレス鋼であるが鉄とみなすとデバイ温度は $467\text{K}^9$ で、 $80\text{K}$ と $4.2\text{K}$ の内部エネルギー差<sup>9</sup>は、 $165\text{J/mol} = 2960\text{J/kg}$ である。液体ヘリウムの潜熱は $2610\text{J/l}$ であり、 $1\text{l}$ の液体ヘリウムが $4.2\text{K}$ の気体から $80\text{K}$ になるまでの熱量は $4.36 \times 10^4\text{J}$ である。 $1\text{kg}$ の鉄を $80\text{K}$ から $4.2\text{K}$ に冷却するのに完全熱交換の場合、 $0.09\text{l}$ の液体ヘリウムを必要とし、潜熱だけを利用すれば、 $1.13\text{l}$ の液体ヘリウムがいる。実際には、予冷のしかたにより $0.5 \sim 1\text{l/kg}$ が予冷に必要と言われている。液体ヘリウム容器の重量は $\sim 25\text{kg}$ なので $125 \sim 25\text{l}$ の液体ヘリウムが予冷に必要と考えられる。

## 4. 実験結果

### 4.1 クライオポンプへの液体窒素、液体ヘリウムの導入

油拡散ポンプにより  $3 \times 10^{-6}$  Torr に排気したあと、液体窒素を液体窒素容器に導入した。液体ヘリウム容器には液体窒素を予冷のため導入し、これを追いだした後液体ヘリウムを導入した。このときの液体窒素容器、液体ヘリウム容器の温度、真空容器の圧力の時間変化を図5に示す。

### 4.2 排気速度の測定

排気速度測定系は図3に示すように、クライオポンプに取り付けた半径45cm、長さ70cmのテストドーム、内径10cm、長さ22cmの二つの部屋とその間は直径1cmの孔でできている水素ガス流量計、および水素ガス導入部で構成されている。水素ガスのクライオポンプへの導入は高純度水素ガス(99.99999%)を可変リークバルブ、水素ガス流量計、テストドームを通して行なった。この流量計による流量 $Q$ の測定は次の式

$$Q = C (P_1 - P_2)$$

を用いて行なった。ここで $P_1$ 、 $P_2$ は電離真空計 $G_1$ 、 $G_2$ により測定した流量計の二つの部屋の圧力、 $C$ は直径1cm、厚さ1mmの孔の室温水素ガス(20°C)に対するコンダクタンスで32ℓ/secである。テストドームの圧力 $P_3$ をヌードゲージ $G_3$ で測定し、排気速度 $S$ は、

$$S = Q / P_3$$

から求めた。ここで流量 $Q = C (P_1 - P_2)$ は $P_1 > 3 \times 10^{-2}$  Torrで $P_1$ の指示が圧力と比例しなくなりさらに $P_1 > 10^{-2}$  Torrで測定不可能になるため、 $P_1 > 10^{-3}$  Torrになる時の流量は

$$Q = C' (P_2 - P_3)$$

により求めた。この $C'$ は $P_1 < 3 \times 10^{-3}$  Torrのときに流量一定を示す式

$$C (P_1 - P_2) = C' (P_2 - P_3)$$

から求めた。図6に $P_1 < 3 \times 10^{-3}$  Torrすなわち $P_3 < 1 \times 10^{-5}$  Torrのときの

$(P_1 - P_2) / (P_2 - P_3)$ を示す。図のようにこの値は140でありこれから $C' = 140C$ を得た。

排気速度測定結果を図7に示す。排気面の温度を4.2 K以下にすると凝縮した水素と平衡している圧力(到達圧力)よりずっと高い圧力領域では排気速度が一定の値になることが確かめられ、この時の排気速度は7500ℓ/secである。また排気面の各温度で、排気能力がなくなり凝縮した水素の蒸気圧とつりあう圧力(到達圧力) $(\frac{C_s}{C_g} \cdot P_s (T_g / T_s)^{1/2})$ は図のように報告されている値<sup>10</sup>とはほぼ一致した。

図7のように圧力によらず排気速度が一定のところでは $S = 7500 \ell / \text{sec}$ であり、一方設計値は12000ℓ/secである。しかし、設計値はシェブロン円筒内でみた排気速度であり、一方

実験はテストドームでの排気速度でありそのまま比較することができない。このため図9のように考えて設計値と実験値を比較した。ポンプの入口は2つあり、直径15cmのと考えるときこのコンダクタンス $S_1$ は $S_1=7800\ell/\text{sec}$ である。測定される排気速度 $S$ は、

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{2S_1} + \frac{1}{12,000}$$

$$S = 6700\ell/\text{sec}$$

となる。これを実験結果 $7500\ell/\text{sec}$ と比較すると、10%以上の違いがあるがほぼ一致していると言える。その理由は一つは排気速度測定の実験誤差が真空計の校正係数の誤差により10%近くあること、もう一つは設計排気速度の計算で実際のポンプ形状は円筒状なのに最もきびしく考えてシェブロン内側と等しい面積をもつ平面状のクライオポンプとしたことである。もしもこのクライオポンプ面積としてシェブロン平均径の円筒面積をとれば設計排気速度は $16,400\ell/\text{sec}$ になりこのとき測定排気速度予想値は $S=8,000\ell/\text{sec}$ となる。

#### 4.3 大容量水素ガス排気実験

大流量の水素ガスを長時間導入し、このときの排気速度に変化があるかどうかをみた。次の(イ)、(ロ)、(ハ)、(ニ)の水素を連続して導入した。

(イ)	2.6 Torr $\cdot\ell/\text{sec}$ で	32分
(ロ)	8.1       "	30分
(ハ)	8.0       "	60分
(ニ)	8.6       "	120分
合計	110,000 Torr $\cdot\ell$	

このときクライオ排気面あたりでは $34\text{Torr}\cdot\ell/\text{cm}^2$ である。このときのクライオ面の温度は4.2 Kである。(イ)、(ロ)、(ハ)、(ニ)いずれの場合にも排気速度の減少は見られなかった。

JT-60用中性粒子入射加熱装置のクライオポンプの寿命は真空容器内の一部に空気のリークが発生するような事故時を想定し、このとき容器内で水素が爆発する可能性のある最小値に水素凝縮量が達するまでの時間としている。<sup>2</sup> このときの単位面積当りの凝縮量は $1.6\text{Torr}\cdot\ell/\text{cm}^2$ であり、上の実験によりこの程度の水素凝縮量では排気速度の減少はないことがわかる。

#### 4.4 クライオポンプの再生

排気実験のあと水素ガスを流すのをやめ放置すると、液体ヘリウムがなくなっていく、クライオ排気面に凝縮した水素ガスは気化して、ポンプが再生される。このときのテストドームの圧力変化を図10に示す。テストドームの圧力は液体ヘリウムが少なくなっていくと単調に上昇するのではなく、高くなったり低くなったりし、液体ヘリウムがなくなると同時に急激に上昇する。これは、気化した水素のうち補助排気系によりポンプ外に排気されるのはわずかでほとんどがまだ液体ヘリウムのたまっているクライオ面に再び凝縮し、液体ヘリウムが完全にな

くなると、凝縮したすべての水素が一時に気化するためである。

#### 4.5 液体ヘリウム消費量

液体窒素による予冷後、液体ヘリウム容器に液体ヘリウムを導入したが、このとき35ℓの液体ヘリウムをためるのに使った液体ヘリウムは66ℓであった。トランファーラインでの損失も含め、液体窒素温度から液体ヘリウム温度までの液体ヘリウム容器の予冷に31ℓ使用したことになる。これはほぼ、予冷が液体ヘリウムの蒸発熱だけで行なわれたとしたときの計算値に近い。

水素ガス無負荷時の定常状態での液体ヘリウム消費量を連続液面計の指示により測定した。結果は1.3ℓ/hであった。このとき連続液面計には0.11Aの電流が流れ平均2.5Vの電圧がかかっており0.275Wの熱入力がある。これによる液体ヘリウム消費量は0.4ℓ/hである。連続液面計による消費量をさし引いた水素ガス無負荷時の液体ヘリウム消費量は0.9ℓであり、これはシェブロン以外の面の放射率を0.2としたときの消費量推定値0.82ℓ/h(表3)とほぼ一致している。

水素ガス排気時は4.3の $\lambda$ すなわち8.0Torr $\cdot$ ℓ/secの流量のとき2.1ℓ/hの消費量であった。液体窒素温度の水素ガスが液体ヘリウム温度のクライオ面に凝縮すると0.11J/Torr $\cdot$ ℓの発熱があり流量8.0Torr $\cdot$ ℓ/secで液体ヘリウム消費量の推定値は1.2ℓとなる。実験値は2.1-1.3=0.9ℓ/hであり推定値より小さいが、連続液面計による液体ヘリウム消費量の測定は誤差が0.2ℓ/hはありほぼ一致していると思われる。

水素のクライオ面への凝縮のさいの発熱量については60,000ℓ/secのポンプ報告で詳しく述べる。<sup>6</sup>

## 5. 結 論

ここで実験をしたポンプはJT-60用中性粒子入射装置用クライオポンプ開発の第1段階のもので設計排気速度が12,000ℓ/secのクライオポンプである。測定された排気速度は設計排気速度とほぼ一致したものが得られ、排気面の単位面積当り30Torr・ℓ/cm<sup>2</sup>の水素凝縮量でも排気速度の減少は見られず、JT-60用中性粒子入射装置のポンプとして液体ヘリウム使用の凝縮型クライオポンプが使用可能なことが示された。さらに液体ヘリウム使用量の測定、ポンプ再生時の真空容器内圧力上昇の観測でJT-60用中性粒子入射装置排気系の設計の基礎資料が得られた。

中性粒子入射装置は高エネルギー粒子が飛んでいるところで使用するので、ビームとクライオポンプの両立性について早急に知る必要がある。この12,000ℓ/secのポンプではポンプ内にビームを導入する実験を行なわなかったが、6,000ℓ/secポンプで行なった。この結果は別のところで報告する。<sup>11</sup>

## 謝 辞

この研究を行なっていく上で終始協力と議論をしていただいた加熱工学研究室の方々に感謝いたします。特に原稿を読んでいただいた桜庭順二氏に感謝いたします。

最後に、本研究の遂行にあたり終始御指導と激励を載きました森核融合研究開発推進センター長および小幡核融合研究部長に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) H. Shirakata, Proc. 3rd International Meeting on Theoretical and Experimental Aspects of Heating of Toroidal Plasma, Grenoble (1976) Vol. 2, P.219.
- 2) 松田等 JAERI-M 7655 (1978).
- 3) T. Shibata et al. Proc. 7th Symp. Engineering Problems of Fusion Research (IEEE, New York, 1977) P.544.
- 4) (イ) T. J. Duffy and L. D. Odden, Proc. 6th Symp. Engineering Problems of Fusion Research (IEEE, New York, 1975) P.805.  
 (ロ) H. J. Halama and J. A. Bamberger 同上 P.202.  
 (ハ) H. J. Halama, C. K. Lam, and J. A. Bamberger, J. Vac. Sci. Technol., 14, 1201(1977).  
 (ニ) B. S. Denhoy, T. H. Batzer, and W. R. Call, Proc. 7th Symp. Engineering Problems of Fusion Research (IEEE, New York, 1977) P.1045.
- 5) 吉川庄一 私信
- 6) 柴田, 奥村, 桜庭, JAERI-M投稿予定
- 7) S. Matsuda et al., "Conceptual design of the neutral beam injector for JT-60", Section 6-2 of the paper "Status of JT-60" Presented at the 2rd Large Tokamak Experiment. 1976, Princeton.
- 8) (イ) L. L. Levenson, N. Milleron, and D. H. Davis, 1960 7th Natl. Symp. Vac. Technol. Trans. (Pergamon, 1961) P.372.  
 (ロ) 桜庭, 柴田, JAERI-M 7611 (1978).
- 9) 理科年表, 昭和52年版 物60 (丸善)
- 10) C. Benvenuti, R. S. Calder, and G. Passardi, J. Vac. Sci. Technol., 13, 1172 (1976).
- 11) 桜庭, 大賀, 柴田, JAERI-M投稿予定

表1 液体ヘリウム容器への熱放射による熱負荷の推定値

	$A_1$ (cm <sup>2</sup> )	$A_2$ (cm <sup>2</sup> )	$\dot{Q}^{(w)}$ e=0.1のとき	$\dot{Q}^{(w)}$ e=0.2のとき
シェブロンからの放射熱	3250	2220	0.075	0.147
その他の面からの放射熱	7280	9740	0.101	0.247
計			0.176	0.394

表2 液体ヘリウム容器への固体熱伝導による熱負荷の推定値

	数	直径(cm)	厚さ(cm)	$\Delta T$ (K)	$\bar{\lambda}$ (W/cmK)	L (cm)	$\dot{Q}$ (w)
液体ヘリウム導入部内側パイプ	1	1.83	0.03	290	0.103	45	0.113
液体ヘリウム導入部外側パイプ	1	3	0.03	80	0.045	30	0.034
その他のパイプ	2	1.83	0.03	80	0.045	30	0.020
計							0.187

表3 水素無負荷時の液体ヘリウム消費量の推定値

	放射熱(w)	熱伝導(w)	合計(w)	ヘリウム消費量 ( $\ell/h$ )
シェブロン以外について e=0.1 としたとき	0.176	0.187	0.363	0.51
シェブロン以外について e=0.2 としたとき	0.394	0.187	0.581	0.82



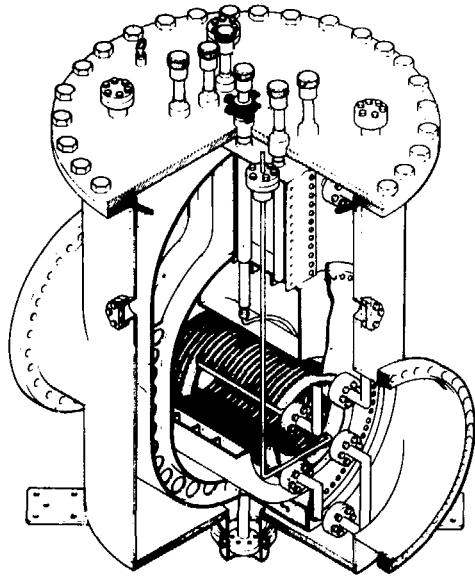


図1 12,000  $\mu$ /sec クライオポンプの鳥かん図

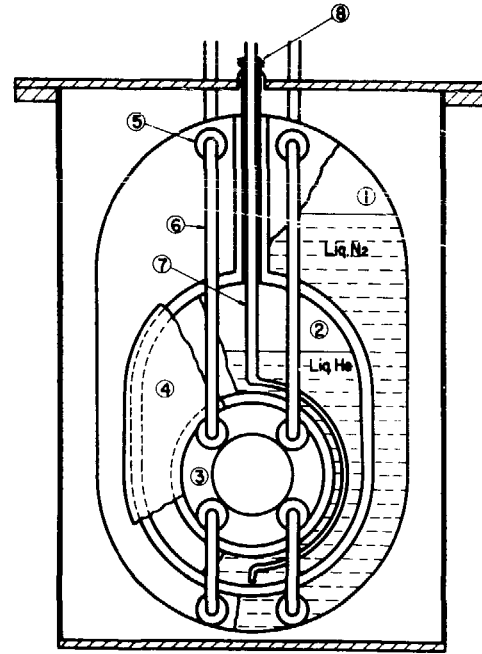


図2 中心軸からみたポンプの概略図

- ①液体窒素容器, ②液体ヘリウム容器, ③シェvron
- ④放射シールド板, ⑤金属ガスケットフランジ,
- ⑥シェvronささえタイプ, ⑦液体ヘリウム導入パイプ
- ⑧ベロー

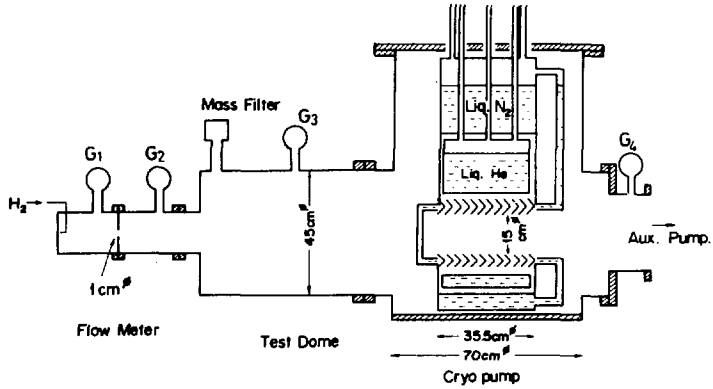


図3 排気速度測定系の概略図, G<sub>1</sub>, G<sub>2</sub>, G<sub>3</sub>, G<sub>4</sub> は電離真空計

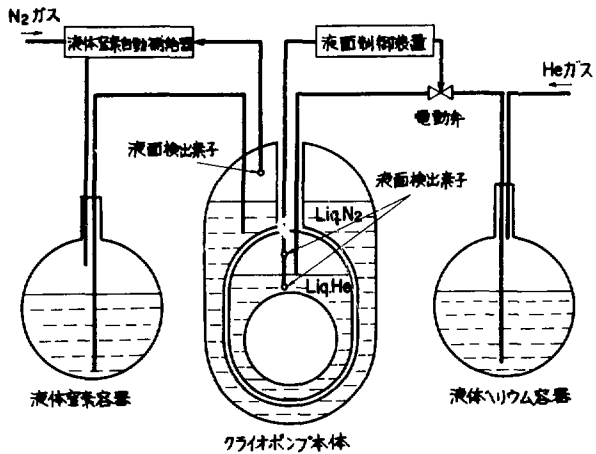


図4 液体ヘリウムおよび液体窒素の供給系統図

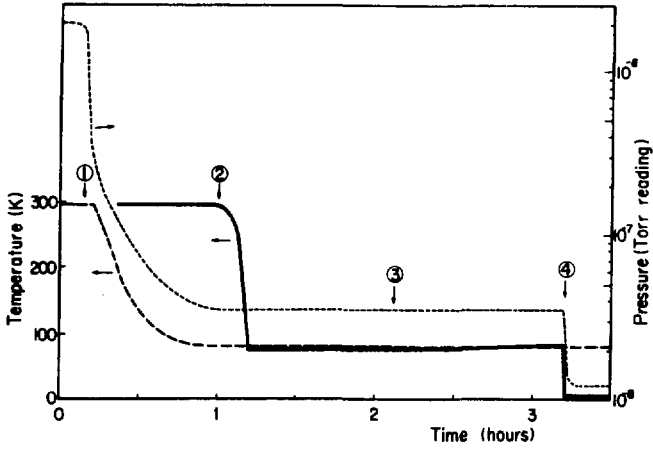


図5 液体窒素および液体ヘリウム導入時の真空容器内圧力と液体窒素容器、液体ヘリウム容器の温度変化  
 —：液体ヘリウム容器の温度， ---：液体窒素容器内の温度， .....：真空容器内圧力  
 ①液体窒素の導入を始めた時，②液体ヘリウム容器に液体窒素の導入を始めた時，③液体窒素の追いだしを始めた時，④液体ヘリウムの導入を始めた時

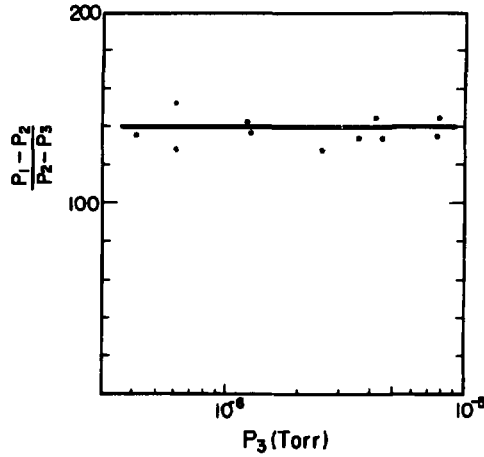


図6 テストドームの圧力  $P_3$  が  $P_3 < 10^{-5}$  Torr のときの  
 $\frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3}$  このグラフより  $\frac{C'}{C} = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3} = 140$  を得た。

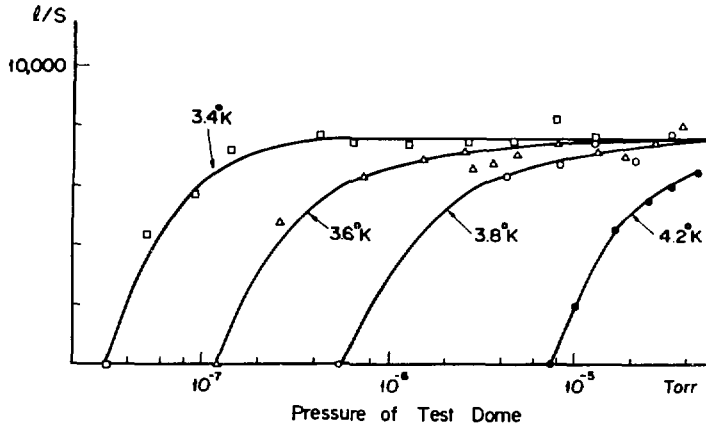


図7 12,000 l/sec クライオポンプのテストドームで測定した排気速度

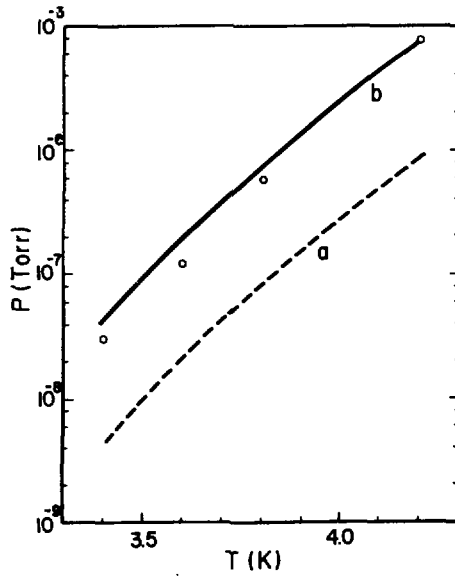


図8 水素の平衡蒸気圧 a : --- 平衡蒸気圧  $P_s$  (文献 11 より)

b : — : 熱遷移後の蒸気圧で  $\frac{C_s}{C_g} P_s \left( \frac{295}{T} \right)^{1/2}$

ここで  $\frac{C_s}{C_g} = 1$ ,  $P_s$  は文献 11 の値を使って計算した。

○ : 実験値

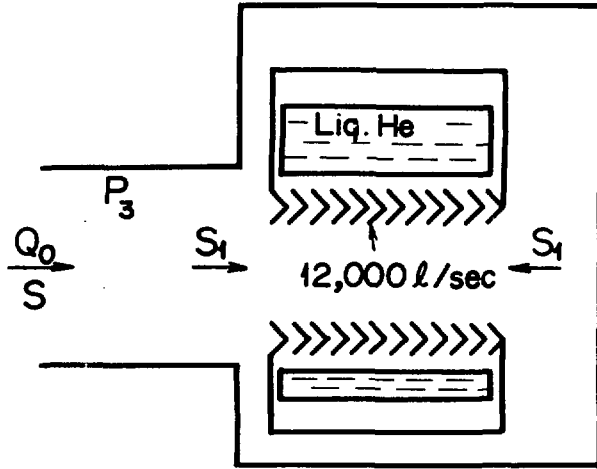


図9 排気速度の設計値と測定値を比較するためのモデル

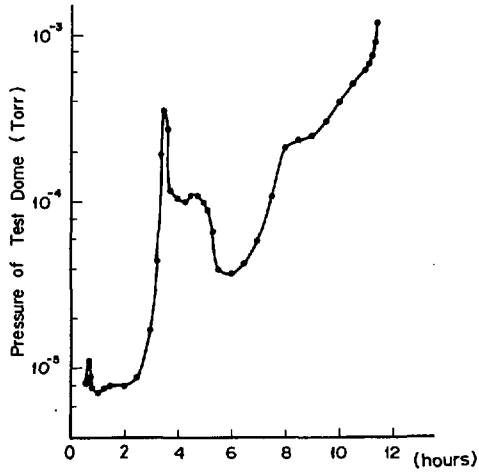


図10 クライポンプ再生時のテストドーム内圧力