

JAERI-M
7869

水素排気用60,000ℓ/secクライオポンプの
排気実験

1978年9月

柴田 猛順・奥村 義和・桜庭 順二*

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 60,000 ℓ /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・奥村義和・桜庭順二*

(1978年8月24日受理)

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) 用中性粒子入射装置では, $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr の水素ガスを約 100 万 ℓ /sec の排気速度で排気する必要があり, 液体ヘリウム冷却のクライオポンプの使用を予定している。このポンプの開発のため原研では 12,000 ℓ /sec のポンプに続き 60,000 ℓ /sec のクライオポンプを製作し, 排気特性, 液体ヘリウム消費量を調べた。このポンプは二組からなり, それぞれ液体ヘリウム槽, 液体窒素槽, シェブロン, およびクライオパネル (60 cm \times 60 cm) で構成されている。排気速度の測定結果は設計値とよく一致し, クライオパネルに 13 Torr $\cdot \ell$ /cm² の水素ガスを凝縮させた後も排気速度の減少はみられなかった。さらに液体ヘリウム消費量の測定も行ないクライオパネルへの熱負荷の原因について考察した。特に水素凝縮によるクライオパネルへの熱負荷については排気される気体と凝縮水素のエンタルピー差でないことを明確にして熱負荷を計算しこれが測定値 0.12 ± 0.02 J/Torr $\cdot \ell$ と一致することを確認した。

* 住友重機 外来研究員

JAERI-M 7869

Cryopump of 60,000 l/sec for Hydrogen Gas

Takemasa SHIBATA, Yoshikazu OKUMURA and Junji SAKURABA*

Division of Thermonuclear Fusion Research,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 24, 1978)

In neutral beam injection for the JT-60, the condensation cryopumps of 10^6 l/sec for hydrogen will be used. In development of the cryopumps a small scale cryopump of 60,000 l/sec has been constructed following on that of 12,000 l/sec. It consists of a pair of liquid-helium cooled panels (60cm x 60cm), liquid-nitrogen cooled chevrons and radiation shields. The measured pumping speed agrees with the design one and after condensation of 13 Torr·l/cm² no drop in the pumping speed is observed. The rate of liquid helium consumption was obtained and the sources of heat loading to the cryopanel were investigated. The heat loading due to hydrogen gas in particular is 0.12 ± 0.02 J/Torr·l, which is explainable by the energy difference of normal hydrogen between 80 K and 4.2 K; this energy difference is not internal energy nor enthalpy.

Keywords: JT-60 Tokamak, Neutral Beam Injection, Cryopump,
Liquid Helium, Pumping Speed, Heat Loading

* On leave from Sumitomo Heavy Industries Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 水素排気用 60,000ℓ/secポンプの概要	1
2.1 ポンプ本体	1
2.2 液体ヘリウムおよび液体窒素供給系	2
2.3 補助排気系	2
2.4 温度および圧力測定	2
2.5 電離真空計の校正	2
3. 設計排気速度および液体ヘリウム消費量の推定	3
3.1 設計排気速度	3
3.2 液体ヘリウム消費量の推定	3
4. 排気実験の結果	4
4.1 排気速度の測定	4
4.2 大容量水素を排気したあとの排気速度	5
4.3 クライオポンプ再生時の圧力上昇	5
5. 液体ヘリウム消費量の測定	6
5.1 予冷量	6
5.2 水素を排気しない時の液体ヘリウム消費量	6
5.3 水素排気後の液体ヘリウム消費量の増加	7
6. クライオパネルへの水素凝縮による熱負荷	8
6.1 分子流領域での気体のクライオ面への凝縮による熱負荷	8
6.2 水素凝縮による熱負荷の計算	9
6.3 水素凝縮による熱負荷の測定	10
6.4 水素排気による液体ヘリウム消費量の増加	10
7. 結 論	11
謝 辞	11

Contents

1. Introduction.....	1
2. Outlines of 60,000 /sec cryopump for hydrogen.....	1
3. Design value of Pumping Speed and Estimation of Liquid Helium Consumption.....	3
4. Experiment of Pumping.....	4
5. Consumption of Liquid Helium.....	6
6. Heat Load due to Hydrogen Condensation on the cryopanel.....	8
7. Conclusion.....	11
Acknowledgement.....	11

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) の第二段加熱のため約 20 MW の中性粒子入射加熱を行なうことになっている¹。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。各ユニットの排気装置は数 10 Torr \cdot l/sec の水素を 10⁶ l/sec の排気速度で少なくとも数日以上という長時間排気することが求められている。この条件を満たす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を採用する予定である²。

外国でも近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³⁻⁶、さら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ことが報告されている⁷。

原研でも上記のような大容量クライオポンプを開発するためすでに報告した 12,000 l/sec のクライオポンプ⁸に続き 60,000 l/sec のポンプを作り排気特性の測定を行なった。12,000 l/sec のポンプは排気面が円筒形で、設計排気速度と測定された排気速度の比較が容易ではなかったので今回はパネルを平面型にした。中性粒子入射装置のクライオポンプは、その付近を大電流の高速粒子が通過するので、本クライオポンプは、イオン源テストスタンド ITS-2⁹ のビームラインと接続可能にしてポンプ付近に高速水素ビームが存在するときの排気性能も調べることができる構造とした。

本クライオポンプの排気速度の測定、クライオパネルへの熱負荷の測定についてすでに一部報告したが¹⁰ここでは詳細に報告する。なお水素のクライオパネルへの凝縮による熱負荷の推定は、これまでの考え方と違うので詳しく述べた。

ITS-2 のビームラインに本クライオポンプを接続し水素イオンビームをポンプ内に導入した実験は別に報告する¹¹。

2. 水素排気用 60,000 l/sec ポンプの概要

2.1 ポンプ本体

図 1 に本クライオポンプの鳥瞰図、図 2 にポンプの面図、図 3 に排気速度測定系の概略図を示す。ポンプは図 1 ~ 3 に示すように二組からなりそれぞれ液体ヘリウム槽、液体窒素槽、シェブロン、放射シールド板、クライオパネルで構成されていて、縦 1 m、横 1.2 m、高さ 1.3 m のステンレス鋼製真空容器に入っている。各組のポンプは、真空容器の上ふたと溶接されている液体ヘリウム導入パイプ、および液体窒素導入パイプにより支持されている。二組のポンプの間の空間はイオンビームの通過する場所である。水素を排気するクライオ面はステンレス鋼板を 2 枚合わせて、等間隔にスポットウェルド (ピッチ 8.7 cm) してキルティング状に

1. はじめに

臨界プラズマ試験装置 (JT-60) の第二段加熱のため約 20 MW の中性粒子入射加熱を行なうことになっている¹。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。各ユニットの排気装置は数 10 Torr \cdot ℓ/sec の水素を 10⁶ ℓ/sec の排気速度で少なくとも数日以上という長時間排気することが求められている。この条件を満たす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を採用する予定である²。

外国でも近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³⁻⁶、さら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ことが報告されている⁷。

原研でも上記のような大容量クライオポンプを開発するためすでに報告した 12,000 ℓ/sec のクライオポンプ⁸に続き 60,000 ℓ/sec のポンプを作り排気特性の測定を行なった。12,000 ℓ/sec のポンプは排気面が円筒形で、設計排気速度と測定された排気速度の比較が容易ではなかったので今回はパネルを平面型にした。中性粒子入射装置のクライオポンプは、その付近を大電流の高速粒子が通過するので、本クライオポンプは、イオン源テストスタンド ITS-2⁹ のビームラインと接続可能にしてポンプ付近に高速水素ビームが存在するときの排気性能も調べることができる構造とした。

本クライオポンプの排気速度の測定、クライオパネルへの熱負荷の測定についてすでに一部報告したが¹⁰ここでは詳細に報告する。なお水素のクライオパネルへの凝縮による熱負荷の推定は、これまでの考え方と違うので詳しく述べた。

ITS-2 のビームラインに本クライオポンプを接続し水素イオンビームをポンプ内に導入した実験は別に報告する¹¹。

2. 水素排気用 60,000 ℓ/sec ポンプの概要

2.1 ポンプ本体

図 1 に本クライオポンプの鳥瞰図、図 2 にポンプの面図、図 3 に排気速度測定系の概略図を示す。ポンプは図 1～3 に示すように二組からなりそれぞれ液体ヘリウム槽、液体窒素槽、シェブロン、放射シールド板、クライオパネルで構成されていて、縦 1 m、横 1.2 m、高さ 1.3 m のステンレス鋼製真空容器に入っている。各組のポンプは、真空容器の上ふたと溶接されている液体ヘリウム導入パイプ、および液体窒素導入パイプにより支持されている。二組のポンプの間の空間はイオンビームの通過する場所である。水素を排気するクライオ面はステンレス鋼板を 2 枚合わせて、等間隔にスポットウェルド (ピッチ 8.7 cm) してキルティング状に

したもので、巾 60 cm、高さ 66 cm である。液体ヘリウム槽は、クライオ面の上部と直接つながっておりこの容積は 24 l である。この液体ヘリウム槽は 3 本のパイプで上ぶたからつるされている。シェブロン（巾 67 cm、高さ 60 cm）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がなされている。組立や分解の容易さのためシェブロンを支持する液体窒素入りの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。液体窒素槽も 3 本のパイプで支えられており、容量は 31 l である。液体ヘリウム槽、液体窒素槽の支持パイプは冷媒の導入口、蒸発ガスの出口、液面の測定口として用いられる。放射シールド板は銅板にニッケルメッキしたものである。なお液体ヘリウム槽、液体窒素槽、クライオパネル、の材質はステンレス鋼である。

2.2 液体ヘリウムおよび液体窒素供給系

クライオポンプ本体以外の（イ）液体ヘリウム供給系および液体窒素供給系、（ロ）補助排気系、（ハ）温度測定および圧力測定系はすべて 12,000 l/sec ポンプの排気実験⁸で使用したものを使用しており、詳しくは文献 8 で述べているのでここでは簡単に述べる。なお電離真空計の較正については文献 8 で述べていないので詳しく述べる。

液体ヘリウムと液体窒素のポンプへの供給はそれぞれのデューワーよりサイホンを通して行なった。両方とも自動供給も可能になっている。液体ヘリウム槽には連続液面計が取り付けられている。クライオ面を 4.2 K 以下にする時は、ロータリーポンプでヘリウム蒸気圧を 760 Torr 以下の一定圧を保つように減圧した。

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に補助排気装置として油拡散ポンプ排気装置を用いた。これは 1200 l/sec の油拡散ポンプ、320 l/min のロータリーポンプ、液体窒素コールドトラップ、6 吋薄型ゲートバルブにより構成されている。

2.4 温度および圧力測定

クライオ面およびシェブロンの温度測定のためクロメル対 Au-0.07% Fe の熱電対を 1 対のポンプにつきクライオ面、シェブロンのそれぞれに 2 個ずつ取り付けられた。正確なクライオパネルの温度は液体ヘリウム槽のヘリウム蒸気圧をプルドン管で測定しこの圧力より求めた。

2.5 電離真空計の較正

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 はヌードゲージである。 G_1 , G_2 は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中に拡散させる膨

張法により行なった。図4に真空計感度校正に用いた装置の系統図を示す。図のように13.27cm³のガラス球に水素を入れ、この圧力を水銀マンノメーターで測定した。ガラス球内の水素をあらかじめ排気された2.95m³の真空容器内に拡散させ、このときの真空容器内絶対圧力をボイルの法則により計算し、これと電離真空計の指示値の比すなわち校正係数を求めた。なお真空容器はあらかじめ排気した後ゲートバルブを閉じてポンプと切り離すと容器内圧力は一定速度で上昇する。電離真空計の校正は、一定速度の圧力上昇に相当する部分を真空計の指示値よりさし引いて行なった。図5に一例としてG₂の電離真空計の校正の結果を示す。図より校正係数は3.4であることがわかった。G₁, G₃, G₄についても校正係数を求めた。

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, 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_g, 凝縮気体の蒸発の確率をC_sとすると

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

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。クライオポンプの排気面積として、シェブロンの開口面積すなわちシェブロンの面積(67cm×60cm)からシェブロンのフィンの重なり(1枚で2mm)と2本の液体窒素パイプ(直径2.2cm)の断面積をさしひいたものとする。両方のポンプで

$$A = 2 \times (67 - 2 \times 2.2) \times (60 - 0.2 \times 30) = 6,760 \text{ cm}^2$$

となる。開き角120°のシェブロンの通過確率fを0.25と見積もり^{12,13}、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

$$S = 60,000 \left\{ 1 - \frac{C_s P_s}{C_g P_g} \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^{1/2} \right\} \quad (\text{l/sec})$$

となる。P_g ≫ $\frac{C_s}{C_g} P_s \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^{1/2}$ 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60,000 l/secである。

3.2 液体ヘリウム消費量の推定

3.2.1 水素を排気しない時の定常的消費量

水素無負荷時の液体ヘリウム消費量を定める主な要素は放射熱と固体による熱伝導である。

張法により行なった。図4に真空計感度校正に用いた装置の系統図を示す。図のように13.27cm³のガラス球に水素を入れ、この圧力を水銀マンローメーターで測定した。ガラス球内の水素をあらかじめ排気された2.95m³の真空容器内に拡散させ、このときの真空容器内絶対圧力をボイルの法則により計算し、これと電離真空計の指示値の比すなわち校正係数を求めた。なお真空容器はあらかじめ排気した後ゲートバルブを閉じてポンプと切り離すと容器内圧力は一定速度で上昇する。電離真空計の校正は、一定速度の圧力上昇に相当する部分を真空計の指示値よりさし引いて行なった。図5に一例としてG₂の電離真空計の校正の結果を示す。図より校正係数は3.4であることがわかった。G₁, G₃, G₄についても校正係数を求めた。

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

シェブロンパ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, 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_g, 凝縮気体の蒸発の確率をC_sとすると

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

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。クライオポンプの排気面積として、シェブロンの開口面積すなわちシェブロンの面積(67cm×60cm)からシェブロンのフィンの重なり(1枚で2mm)と2本の液体窒素パイプ(直径2.2cm)の断面積をさしひいたものをとる。両方のポンプで

$$A = 2 \times (67 - 2 \times 2.2) \times (60 - 0.2 \times 30) = 6,760 \text{ cm}^2$$

となる。開き角120°のシェブロンの通過確率fを0.25と見積もり、^{12,13}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

$$S = 60,000 \left\{ 1 - \frac{C_s P_s}{C_g P_g} \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^{1/2} \right\} \quad (\ell/\text{sec})$$

となる。P_g ≫ $\frac{C_s}{C_g} P_s \left(\frac{T_g}{T_s} \right)^{1/2}$ 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60,000 ℓ/secである。

3.2 液体ヘリウム消費量の推定

3.2.1 水素を排気しない時の定常的消費量

水素無負荷時の液体ヘリウム消費量を決める主要要素は放射熱と固体による熱伝導である。

この推定は、12,000 ℓ/sec のクライオポンプでの推定と同じ方法で行なった。

放射熱は、液体ヘリウム槽、およびパネルの温度を 4.2 K、液体窒素槽、シェブロン、放射シールドの温度を 80 K、シェブロンの放射率を 0.9、それ以外の面の放射率を 0.1 または 0.2 として計算した。固体による熱伝導は真空容器の上ぶたと液体ヘリウム槽を結ぶパイプによるもので、パイプ両端の温度差を 295 K として計算した。結果は表 1 に示す。消費量は放射率が 0.1 のとき 1.44 ℓ/h 、0.2 のとき 1.78 ℓ/h となる。

3.2.2 容器の予冷に必要な液体ヘリウム量の推定値

クライオパネルおよび液体ヘリウム槽は液体窒素で予冷するので液体ヘリウムを導入するときの容器の温度は 80 K と推定される。一般に鉄 1 kg を液体窒素温度から液体ヘリウム温度まで予冷するのに必要な液体ヘリウムは 0.5 ~ 1 ℓ と言われている。液体ヘリウム容器の重量は片側で 21 kg、両方で 42 kg であるので予冷に必要な液体ヘリウム量は片側で 10 ~ 21 ℓ 、両方では 21 ~ 42 ℓ と推定される。

3.2.3 水素ガス凝縮による液体ヘリウム消費量

クライオパネルへの水素ガス凝縮による熱負荷の推定値は 6 節で詳しく述べるように 1 Torr $\cdot \ell/\text{sec}$ あたり 0.15 ℓ/h と推定される。

4. 排気実験の結果

4.1 排気速度の測定

排気速度の測定は 12,000 ℓ/sec クライオポンプの時と同様の方法⁸で行なった (図 3 参照)。水素ガスはポンペから可変リークバルブ、水素ガス流量計、テストドームを通してクライオポンプ内に導入した。この流量計は内径 10 cm、長さ 22 cm の二つの部屋とその間の直径 1 cm の孔でできており、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 は流量計の二つの部屋の圧力で電離真空計 G_1 、 G_2 で測定した。 C は直径 1 cm、厚さ 1 mm の孔の室温水素ガス (20°C) に対するコンダクタンスで 32 ℓ/sec である。クライオポンプ内の圧力として電離真空計 G_4 で測定した P_4 をとり、排気速度 S は

$$S = Q/P_4$$

から求めた。ここで流量 $Q = C (P_1 - P_2)$ は $P_1 > 3 \times 10^3$ Torr で G_1 の指示が圧力と比例しなくなるなどの理由で測定不可能となるため $P_1 > 10^3$ Torr になる時の流量は、

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

により求めた。ここで P_3 はテストドームの圧力で電離真空計 G_3 により求めた。 C' は流量計の右側の部屋 (図 3 で) とテストドーム間の実効的コンダクタンスで $P_1 < 3 \times 10^3$ Torr のと

この推定は、12,000 ℓ/sec のクライオポンプでの推定と同じ方法で行なった。

放射熱は、液体ヘリウム槽、およびパネルの温度を 4.2 K、液体窒素槽、シェブロン、放射シールドの温度を 80 K、シェブロンの放射率を 0.9、それ以外の面の放射率を 0.1 または 0.2 として計算した。固体による熱伝導は真空容器の上ぶたと液体ヘリウム槽を結ぶパイプによるもので、パイプ両端の温度差を 295 K として計算した。結果は表 1 に示す。消費量は放射率が 0.1 のとき 1.44 ℓ/h 、0.2 のとき 1.78 ℓ/h となる。

3.2.2 容器の予冷に必要な液体ヘリウム量の推定値

クライオパネルおよび液体ヘリウム槽は液体窒素で予冷するので液体ヘリウムを導入するときの容器の温度は 80 K と推定される。一般に鉄 1 kg を液体窒素温度から液体ヘリウム温度まで予冷するのに必要な液体ヘリウムは 0.5 ~ 1 ℓ と言われている。液体ヘリウム容器の重量は片側で 21 kg、両方で 42 kg であるので予冷に必要な液体ヘリウム量は片側で 10 ~ 21 ℓ 、両方では 21 ~ 42 ℓ と推定される。

3.2.3 水素ガス凝縮による液体ヘリウム消費量

クライオパネルへの水素ガス凝縮による熱負荷の推定値は 6 節で詳しく述べるように 1 Torr $\cdot \ell/\text{sec}$ あたり 0.15 ℓ/h と推定される。

4. 排気実験の結果

4.1 排気速度の測定

排気速度の測定は 12,000 ℓ/sec クライオポンプの時と同様の方法⁸で行なった (図 3 参照)。水素ガスはポンペから可変リークバルブ、水素ガス流量計、テストドームを通してクライオポンプ内に導入した。この流量計は内径 10 cm、長さ 22 cm の二つの部屋とその間の直径 1 cm の孔でできており、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 は流量計の二つの部屋の圧力で電離真空計 G_1 、 G_2 で測定した。C は直径 1 cm、厚さ 1 mm の孔の室温水素ガス (20°C) に対するコンダクタンスで 32 ℓ/sec である。クライオポンプ内の圧力として電離真空計 G_4 で測定した P_4 をとり、排気速度 S は

$$S = Q/P_4$$

から求めた。ここで流量 $Q = C (P_1 - P_2)$ は $P_1 > 3 \times 10^{-3}$ Torr で G_1 の指示が圧力と比例しなくなるなどの理由で測定不可能となるため $P_1 > 10^{-3}$ Torr になる時の流量は、

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

により求めた。ここで P_3 はテストドームの圧力で電離真空計 G_3 により求めた。C' は流量計の右側の部屋 (図 3 で) とテストドーム間の実効的コンダクタンスで $P_1 < 3 \times 10^{-3}$ 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 $P_1 < 3 \times 10^{-3} \text{Torr}$ (電離真空計 G_1 の校正係数は3.6である) 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 $C' = 140 C$ を得た。なお $12,000 \ell/\text{sec}$ のクライオポンプの排気速度測定の時も $(P_1 - P_2)/(P_2 - P_3) = 140$ の値を得ている。⁸

排気速度の測定結果を図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になっている圧力(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をとることが確かめられ、この時の排気速度は $63,000 \ell/\text{sec}$ で計算値 $60,000 \ell/\text{sec}$ とよい一致を示した。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と平衡になっている到達圧力 $\left(\frac{C_s}{C_g} P_s (T_g/T_s)^{1/2}\right)$ は図8のように報告されている値¹⁴と一致した。

4.2 大容量水素を排気したあとの排気速度

JT-60用中性粒子入射装置ではクライオパネル単位面積当りの水素凝縮量が $1.6 \text{Torr} \cdot \ell/\text{cm}^2$ でパネルを再生を行なう予定であるが、²この値より約1桁大きい $13 \text{Torr} \cdot \ell/\text{cm}^2$ の凝縮後の排気速度が、ほとんど水素を凝縮していない時の排気速度からどれくらい変化するかを調べた。結果を図9に示す。この実験は、液体ヘリウムの温度が4.2 Kのとき、片側のクライオポンプのみで行なったものである。図のようにクライオパネルへの水素の凝縮量が $13 \text{Torr} \cdot \ell/\text{cm}^2$ になると、ほとんど水素を排気していない時に比べて排気速度がわずかであるが大きくなっている。⁴Halama等は約 $10 \text{Torr} \cdot \ell/\text{cm}^2$ の凝縮量で排気速度が10~15%小さくなるという報告をしているが、ここでの実験とは一致していない。 $12,000 \ell/\text{sec}$ クライオポンプの実験でも $30 \text{Torr} \cdot \ell/\text{cm}^2$ の水素凝縮後も排気速度の減少はみられていないので今回の実験で $10 \text{Torr} \cdot \ell/\text{cm}^2$ 以上水素をクライオパネルに凝縮させても排気速度の減少はないことがよりはっきりとわかった。

4.3 クライオポンプ再生時の圧力上昇

排気実験を終わりクライオポンプを放置すると液体ヘリウムがなくなり真空容器内の圧力が上昇する。図10にポンプ内の圧力変化を示す。約4時間後に液体ヘリウムがなくなり凝縮していた水素が急激に蒸発し著しい圧力上昇をもたらす。これは液体ヘリウムが少しずつなくなっていく時に気化した水素ガス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再び液体ヘリウムの残っているクライオ面に凝縮し、液体ヘリウムが完全になくなると、凝縮したすべて水素が一時に気化するためである。また、液体ヘリウムがなくなっていく途中で数度圧力が上昇して再び下降する現象がある。これは $12,000 \ell/\text{sec}$ のクライオポンプの時も見られたが、この理由はまだわかっていない。

5. 液体ヘリウム消費量の測定

5.1 予冷量

液体窒素で予冷された液体ヘリウム槽とクライオパネル液体ヘリウムを導入したが、片側で約 30 ℓ の液体ヘリウムを導入して、15 ℓ の液体ヘリウムをためることができた。予冷量は $30 - 15 = 15$ ℓ であるがこの値は予想予冷量 10.5 ~ 21 ℓ の範囲内にある。

5.2 水素を排気しない時の液体ヘリウム消費量

液体ヘリウム槽より蒸発してくるヘリウムガスをフロート式流量計につないで液体ヘリウムの消費量を測定した。片側のクライオポンプのみで測定したが、1.3 ℓ/h であった。12,000 ℓ/sec クライオポンプの実験で使用した連続液面計による測定では 1.4 ℓ/h で二つの方法で矛盾はない。これから述べる実験はすべてフロート式流量計で行なった。

クライオパネルへの熱負荷の原因のうち液体窒素温度のシェブロン、放射シールドからの放射熱を調べるため液体窒素槽の蒸気をロータリーポンプで 210 Torr にまで排気して液体窒素の温度を 77 K から 68 K まで下げた。この時の液体ヘリウム消費量の減少分は 0.13 W 相当分であった。液体窒素温度が 77 K, 68 K のときのシェブロンとシールドからの放射熱をそれぞれ R_{77} , R_{68} とすれば

$$R_{77} - R_{68} = 0.13 \text{ W}$$

であり

$$R_{68}/R_{77} \simeq (68/77)^4 = 0.61$$

が成りたっていれば $R_{77} = 0.33 \text{ W}$ となる。

連続液面計は超電導線に電流を流し液体ヘリウムに接触していない部分の抵抗による電圧で液面を知るようになっている。この抵抗による発熱は当然液体ヘリウムの消費量を増加させるがこの増加分をみるため連続液面計を液体ヘリウム槽から抜いた。この時液体ヘリウム消費量の減少分は 0.2 W 相当であった。この実験を行なっている時の液面計の指示から超電導線の抵抗を求め超電導線のジュール熱を計算すると 0.2 W であった。

クライオパネルへの熱負荷全体では 0.95 W であるが上記の二つの熱負荷をさし引いたものがパイプを通しての熱伝導による熱負荷とするとこれは 0.42 W になる。

表 2 に液体ヘリウム消費量の実験値と推定値のまとめを示す。熱伝導による熱負荷は蒸発してくるヘリウムガスでパイプが冷却されるのでこの推定値より小さくなると考えられる。放射熱についても推定値は放射率が不確定であるので、表 2 の結果は実験値、推定値がだいたい一致していると言える。

5.3 水素排気後の液体ヘリウム消費量の増加

5.3.1 水素排気をやめたあとの液体ヘリウム消費量の増加

この実験もクライオポンプの片側のみを使用し、パネル温度は4.2 Kの場合について行なった。

水素排気を始めてしばらくしてから水素排気をやめても液体ヘリウムの消費量は水素排気前の状態すなわち1.3ℓ/hにはもどらず、2.1ℓ/hであった。このあと排気を何度繰り返しても水素をやめたあとの液体ヘリウム消費量は2.1ℓ/hと変わらなかった。これはクライオパネルに水素が少しも凝縮していないときよりある程度以上水素が凝縮しているとクライオパネルへの熱負荷が0.6W増加したことになる。この理由はまだ明らかでないが、一つの可能性として凝縮水素とつり合っている水素分子によるシェブロンやシールド板からクライオパネルへの熱伝導が考えられる。この他の原因として液面付近の液体ヘリウム槽の壁の温度が4.2 Kより高くここでの水素の圧力が、4.2 Kでの平衡蒸気圧より高くなって気体分子による熱伝導が増大することや、水素凝縮によりパネル面の放射率が増加すること等も考えられる。第一の可能性のあるものとして上にあげた凝縮水素とつりあっている水素分子による熱伝導を以下のように見積もると0.34Wであり熱負荷の増加量0.6Wの約半分になった。

凝縮水素の平衡蒸気圧とつりあって、シェブロンやシールド板とクライオパネルや液体ヘリウム槽の間には水素分子が多く存在し、これによりシェブロン、シールドからパネルへ熱が運ばれる。この時クライオパネル上に凝縮する分子数と脱離する分子数は等しいから、熱負荷の計算は圧力が低い場合の真空壁間の熱伝導と同じようにして行なってみる。単位面積当りの熱伝導量を Q とすると

$$Q = \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1} \right) \sqrt{\frac{R}{2\pi M}} \frac{2}{\sqrt{T_1} + \sqrt{T_2}} P (T_1 - T_2)$$

である¹⁵。ここで γ は比熱比、 R は気体定数、 M は分子量、 T_1 、 T_2 は壁の温度、 P は圧力で温度 T_1 、 T_2 の気体のそれぞれの分圧の和である。なおこの式では壁での熱適応係数を1としている。クライオパネルとシェブロンやシールド板間の熱伝導の計算ではつぎのように値をとる。 $\gamma = 5/3$ 、水素は二原子分子であるが液体窒素温度で比熱への回転運動の寄与は小さいので無視する。 $M = 2$ 、 $T_1 = 80\text{ K}$ 、 $T_2 = 4.2\text{ K}$ 、4.2 Kでの水素の平衡蒸気圧は図8のように $9 \times 10^{-7}\text{ Torr}$ である。これとつり合っている80 Kの面上での圧力は $9 \times 10^{-7} \times \sqrt{\frac{80}{4.2}} = 3.9 \times 10^{-6}\text{ Torr}$ であり P はこれらの平均であるから $P = 2.4 \times 10^{-6}\text{ Torr}$ とする。 $Q = 2.28 \times 10^{-5}\text{ W/cm}^2$ となる。クライオ面の面積は 4.060 cm^2 、クライオ面以外の液体ヘリウム温度面の面積は 10.700 cm^2 なので、熱交換する面積は合計で 14.760 cm^2 になる。これより水素分子による熱負荷は0.34 Wとなる。

なお、水素排気による液体ヘリウム消費量の増加については、6節でクライオパネルでの水素凝縮の熱負荷の推定とともに詳しく述べる。

6. クライオパネルへの水素凝縮による熱負荷

クライオパネルへの気体凝縮による熱負荷は多くの文献^{16,17}によれば排気される気体とパネル上に凝縮した固体の間のエンタルピー差とされている。しかしながら、この考えは排気される気体の圧力がある程度高く粘性流領域にあるのなら正しいが、気体の圧力が低く分子流領域にある場合にはクライオパネルへの熱負荷はエンタルピー差でなくなってくる。また我々の以前の報告¹⁰でクライオパネルへの熱負荷は内部エネルギー差と書いたがこれも誤りである。以下の節で熱負荷がエンタルピー差でも内部エネルギー差でもない理由を説明し水素凝縮による熱負荷を計算する。さらに、本クライオポンプでの実験結果を述べ計算値と比較する。

6.1 分子流領域での気体のクライオ面への凝縮による熱負荷

壁温が T_1 の大きい真空容器内に温度 T_0 の小さい表面積 S_0 のクライオパネルがあるとす。クライオパネルへの凝縮係数を1、真空容器内の気体は分子流領域にあつて壁としか衝突せず壁温と熱平衡状態にあるとして、クライオパネルに入る分子の運動エネルギーの平均を求める。気体分子のクライオパネルに衝突する確率は分子の速度 v に比例するので、分子全体の速度分布関数を $f(v) dv$ とするとクライオパネルに衝突する分子の速度分布関数は $vf(v) dv$ に比例する。 $f(v)$ はマクスウェル-ボルツマン分布としてパネルに衝突する分子の並進エネルギーの平均値を求めると、

$$\left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle = \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{2} m v^2 v f(v) dv}{\int_0^{\infty} v f(v) dv} = 2 k T_1$$

となる。ここで m は気体分子の質量である。この方法は分子流領域での壁間の気体分子による熱伝導を求める時の計算¹⁵と同じである。

クライオ面への気体凝縮による熱負荷を二段階すなわち(1)温度 T_1 の気体が温度 T_0 の気体になる、(2)温度 T_0 の気体が温度 T_0 の固体になる場合にわけて考える。

(1) T_1 の気体が T_0 の気体になるとき

T_0 の気体になるのに放出されるエネルギーは1モル当り並進エネルギーによるものは上記の結果から $2R(T_1 - T_0)$ である。分子の他の自由度によるエネルギーについては

$\sum_n \{ E_n(T_1) - E_n(T_0) \}$ である。ここで n は分子の振動や回転の自由度をあらわし、 $E_n(T)$ は、自由度 n の温度 T での1モル当りのエネルギーである。以上の二つを合わせると、
 $2R(T_1 - T_0) + \sum_n \{ E_n(T_1) - E_n(T_0) \}$ となる。

(2) 温度 T_0 の気体が温度 T_0 の固体になるとき

温度 T_0 の気体が、分子間で衝突を繰り返しながら凝縮するときの熱負荷は気相および凝縮相間のエンタルピー差 ΔH である。これは気体分子が凝縮するとき気体圧力による仕事をされているからであり、このうち気体分子の並進運動によるものは $\frac{5}{2}RT_0$ である。一方ここで考えているように分子間の衝突がない時の並進運動による熱負荷は $2RT_0$ であり、エンタルピー差より $\frac{1}{2}RT_0$ だけ小さくなる。すなわち T_0 の気体が T_0 の固体になるときの熱負荷は $\Delta H - \frac{1}{2}RT_0$ である。

(1), (2) を合計して温度 T_1 の気体が温度 T_0 のクライオ面に凝縮係数 1 で凝縮するときの熱負荷は、

$$2R(T_1 - T_0) + \sum_n \left\{ E_n(T_1) - E_n(T_0) \right\} + \left(\Delta H - \frac{1}{2}RT_0 \right)$$

となる。

6.2 水素凝縮による熱負荷の計算

水素排気用のクライオポンプは本クライオポンプと同様に液体窒素冷却のシェブロンと液体ヘリウム冷却のクライオパネルで構成されているものがほとんどである。ここでは、水素分子が壁としか衝突せず、シェブロンで 80 K まで冷却され、4 K のクライオパネルには凝縮係数 1 で凝縮すると仮定して水素の凝縮熱を計算する。6.1 の結果に従がい、(1) 並進運動によるもの、(2) 回転運動によるもの、(3) $\Delta H - \frac{1}{2}RT_0$ によるもの、にわけて考える。

(1) 並進運動による熱負荷

$$2R(T_1 - T_0) = 302 \text{ cal/mol}$$

(2) 回転運動による熱負荷

水素分子の場合このような低温では分子振動は無視できる。回転エネルギー E は、回転定数を B 、回転量子数を K として $E = BK(K+1)$ であり $B = 7.6 \times 10^{-3} \text{ eV}$ である。¹⁸ シェブロンや凝縮によるオルソ-パラの変化はないと考え、オルソとパラ水素の比は常温のままとして計算した。結果は、

$$1.7 \text{ cal/mol}$$

である。

(3) $\Delta H - \frac{1}{2}RT_0$

文献によると固体水素の蒸気圧は、

$$\log_{10} P_{\text{sat}} = 3.85 - \frac{41.6}{T}$$

である。¹³ ここで P_{sat} は平衡蒸気圧 (Torr)、 T はクライオ面の温度 (K) である。この T と P_{sat} の関係から Clapayron-Clausius の式を用いて凝縮の潜熱を求めると $\Delta H = 192 \text{ cal/mol}$ となる。一方

$$\frac{1}{2}RT_0 = 4 \text{ cal/mol}$$

これより

$$\Delta H - \frac{1}{2}RT_0 = 188 \text{ cal/mol}$$

となる。

以上の(1), (2), (3)を加えて水素の凝縮熱を求めると 492 cal/mol となる。1モルの気体を $\text{Torr}\cdot\ell$ の単位であらわすと 20°C では、 $1.83 \times 10^4 \text{ Torr}\cdot\ell$ なので $1 \text{ Torr}\cdot\ell$ 当りの熱負荷は $1.13 \text{ J/Torr}\cdot\ell$ となる。

6.3 水素凝縮による熱負荷の測定

本クライオポンプの片側のみを使用し、蒸発してくるヘリウムガスを流量を測定しクライオパネルへの水素凝縮による熱負荷を知った。

この実験は、まず始めに水素ガスをおる程度流し、5.3.1節で述べたように水素排気をやめても液体ヘリウムの消費量が増加したままの状態の時に行なった。まず水素ガスを流さない時に液体ヘリウム槽内にヒーターを入れ、このときのヘリウム蒸発量の増加量を測定した。この測定を行なったのはつぎの理由による。ヘリウム蒸発量がふえると液体ヘリウム槽を支えているパイプ内を冷たいヘリウムガスが通り伝導熱は減少すると考えられ、蒸発ヘリウムガスの増加分だけでパネルへの熱負荷を推定すると過少評価になる可能性があるためである。この結果を図11に示す。この測定のと水素ガスをサーマルフローメーターを通してクライオポンプ内に導入した。なおサーマルフローメーターと、図3にある流量計による水素流量の指示は一致した。水素凝縮によるヘリウム蒸発量の増加を図12に示す。図12のたて軸の右側目盛は図11をもとにして書いたものである。この図より水素ガス凝縮による熱負荷は $0.12 \text{ W}/(\text{Torr}\cdot\ell/\text{s})$ すなわち $0.12 \text{ J}/\text{Torr}\cdot\ell$ であることがわかる。図を見てもわかるようにヘリウム蒸発量をフロート型流量計で測定しているため、ヘリウムガス流量の測定値は $\pm 1 \ell/\text{min}$ は同じ状態でも変動している。また、測定日が違う時の結果のばらつきなども考慮に入れると $1 \text{ Torr}\cdot\ell$ 当りの水素の凝縮熱は $(0.12 \pm 0.12) \text{ J}/\text{Torr}\cdot\ell$ となる。これを6.2節で述べた推定値 $0.113 \text{ J}/\text{Torr}\cdot\ell$ と比較するとよく一致していることがわかる。Chouらは $(0.20 \pm 0.03) \text{ J}/\text{Torr}\cdot\ell$ と報告しており¹⁷ ここでの結果と大きく異なるが、大きい差がでた理由はよくわからない。

6.4 水素排気による液体ヘリウム消費量の増加

図12のヘリウムの蒸発量の増加分より、液体ヘリウム消費量の増加を求めると $1 \text{ Torr}\cdot\ell/\text{sec}$ の水素排気で、 $0.09 \ell/\text{h}$ の液体ヘリウムが消費される。 $1 \text{ Torr}\cdot\ell/\text{sec}$ につき 0.12 W の熱がすべて液体ヘリウムの蒸発に使われるなら、 $0.17 \ell/\text{h}$ の液体ヘリウム消費量になるはずのところ $0.09 \ell/\text{h}$ しか消費されないのは、6.3節でも述べたように、ヘリウム蒸発量の増加で液体ヘリウム槽をささえているパイプの冷却が起って伝導熱が減少するためと考えられる。

5節では液体ヘリウム消費量の変化から、クライオパネルへの熱負荷はすべてヘリウムの蒸発に使われるとして熱負荷を計算してきたが、ヘリウム蒸発による伝導熱の減少が無視できず表2の放射による熱負荷は過小評価になっている可能性がある。

7. 結 論

JT-60 用中性粒子入射装置用クライオポンプの開発のため 12,000 ℓ/sec のポンプに続き 60,000 ℓ/sec のポンプを製作し、排気実験を行なった。排気速度は設計排気速度と一致し、クライオパネルに 10 Torr $\cdot\ell/\text{cm}^2$ 以上水素を凝縮し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消費量を測定し、クライオパネルへの熱負荷の原因についても測定や考察を行なった。特にクライオパネルへの水素凝縮による熱負荷については排気される気体と凝縮水素のエンタルピー差でないことをのべて熱負荷を計算し、測定値もこれと一致することを確かめた。

以上の実験より JT-60 用中性粒子入射装置排気系の設計の基礎資料を得るとともにクライオポンプの操作にも習熟することができた。

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白形弘文室長、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の方々に感謝します。またこのポンプを製作された日本真空技術(株)の関係者の方々、真空計較正用ガラス真空系を製作していただいたガラス工場の小原和弘氏に感謝します。

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) 松田他, JAERI-M 7655 (1978).
- 3) T. J. Duffy and L. D. Odden, Proc. 6th Symp. Engineering Problems of Fusion Research. (IEEE, New York, 1975) P. 805.
- 4) H. J. Halama and J. A. Bamberger, 同上 P. 202.
- 5) H. J. Halama, C. K. Lam and J. A. Bamberger, J. Vac. Sci. Technol., 14, 1201 (1977).
- 6) B. S. Denhoy, T. H. Batzer and W. R. Call, Proc. 7th Symp. Engineering Problems of Fusion Research (IEEE, New York, 1977) P. 1045

7. 結 論

JT-60用中性粒子入射装置用クライオポンプの開発のため12,000ℓ/secのポンプに続き60,000ℓ/secのポンプを製作し、排気実験を行なった。排気速度は設計排気速度と一致し、クライオパネルに10 Torr・ℓ/cm²以上水素を凝縮し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消費量を測定し、クライオパネルへの熱負荷の原因についても測定や考察を行なった。特にクライオパネルへの水素凝縮による熱負荷については排気される気体と凝縮水素のエンタルピー差でないことをのべて熱負荷を計算し、測定値もこれと一致することを確認した。

以上の実験よりJT-60用中性粒子入射装置排気系の設計の基礎資料を得るとともにクライオポンプの操作にも習熟することができた。

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白形弘文室長、松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の方々に感謝します。またこのポンプを製作された日本真空技術(株)の関係者の方々、真空計較正用ガラス真空系を製作していただいたガラス工場の小原和弘氏に感謝します。

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) 松田他, JAERI-M 7655 (1978).
- 3) T. J. Duffy and L. D. Odden, Proc. 6th Symp. Engineering Problems of Fusion Research. (IEEE, New York, 1975) P. 805.
- 4) H. J. Halama and J. A. Bamberger, 同上 P. 202.
- 5) H. J. Halama, C. K. Lam and J. A. Bamberger, J. Vac. Sci. Technol., 14, 1201 (1977).
- 6) B. S. Denhoy, T. H. Batzer and W. R. Call, Proc. 7th Symp. Engineering Problems of Fusion Research (IEEE, New York, 1977) P. 1045

- 7) 吉川庄一 私信
- 8) 柴田他 JAERI-M 7792
- 9) 大賀他 JAERI-M 7604
- 10) T. Shibata et al, Proc. 7th Symp. Engineering Problems of Fusion Research (IEEE, New York, 1977) P. 544
- 11) 桜庭, 大賀, 柴田 JAERI-M 投稿予定
- 12) L. L. Levenson, N. Milleron and D. H. Danis, 1960 7th Natl. Symp. Vac. Technol. Trans. (Pergamon 1961) P. 372.
- 13) 桜庭, 柴田, JAERI-M 7611 (1978).
- 14) C. Benventi, R. S. Calder, and G. Passardi, J. Vac. Sci. Technol., 13, 1172 (1976)
- 15) 熊谷, 富永, 「真空の物理と応用」P. 73 (裳華房)
- 16) J. Hengevoss, Balzers High Vacuum Report, 21, 1, (1970)
- 17) T. S. Chou and H. J. Halama, Proc. 7th Symp. Engineering Problems of Fusion Research, (IEEE, New York, 1977) P. 1790
- 18) L. D. Landau and E. M. Lifshits, Quantum Mechanics, P. 296

表1 水素を排気しない時の液体ヘリウム消費量の推定値*

	シェブロン以外の面の放射率が0.1のとき	シェブロン以外の面の放射率が0.2のとき
シェブロンからの放射熱	0.09 w	0.18 w
シェブロン以外からの放射熱	0.13 w	0.28 w
放射熱	0.22 w	0.46 w
伝導熱	0.80 w	0.80 w
熱負荷の合計	1.02 w	1.26 w
液体ヘリウム消費量	1.44 l/h	1.78 l/h

* この推定値は片側だけに対するものである。

表2 クライオパネルへの熱負荷，測定値と推定値の比較

	測定値	推定値*	推定値**
放射	0.33 w	0.22 w	0.46 w
液面計	0.2 w	0.2 w	0.2 w
熱伝導	0.42 w	0.8 w	0.8 w
合計	0.95 w	1.12 w	1.46 w

* シェブロン以外の面の放射率が0.1のときの推定値

** シェブロン以外の面の放射率が0.2のときの推定値

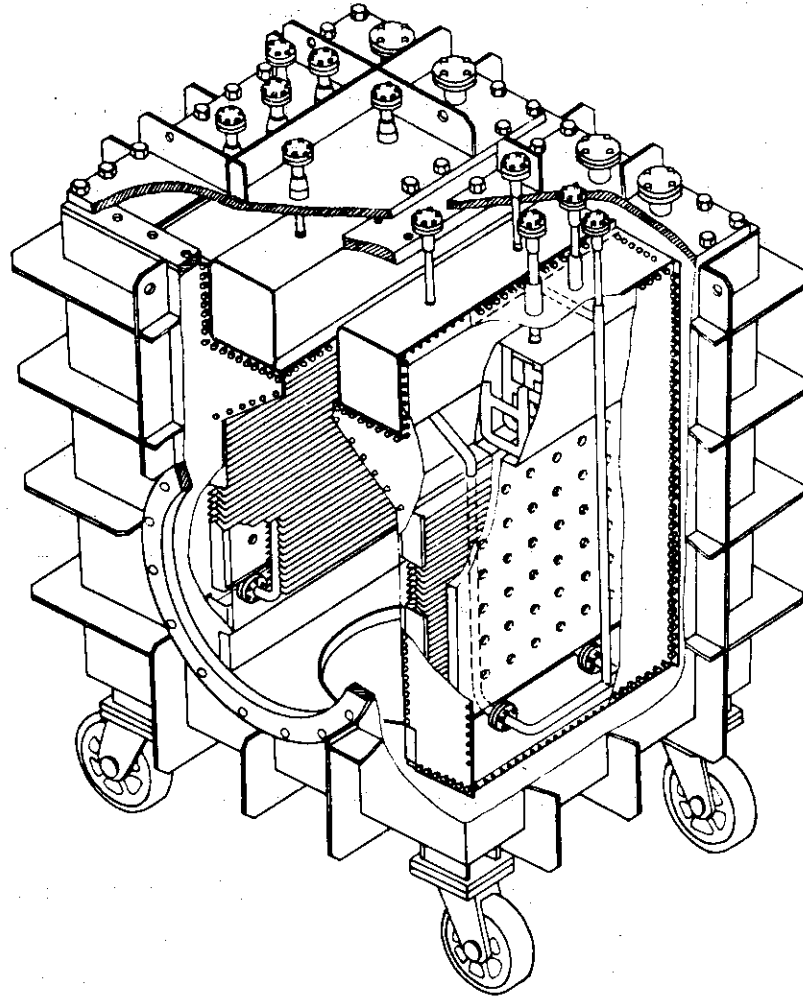


図1 60,000 l/sec クライオポンプの鳥かん図

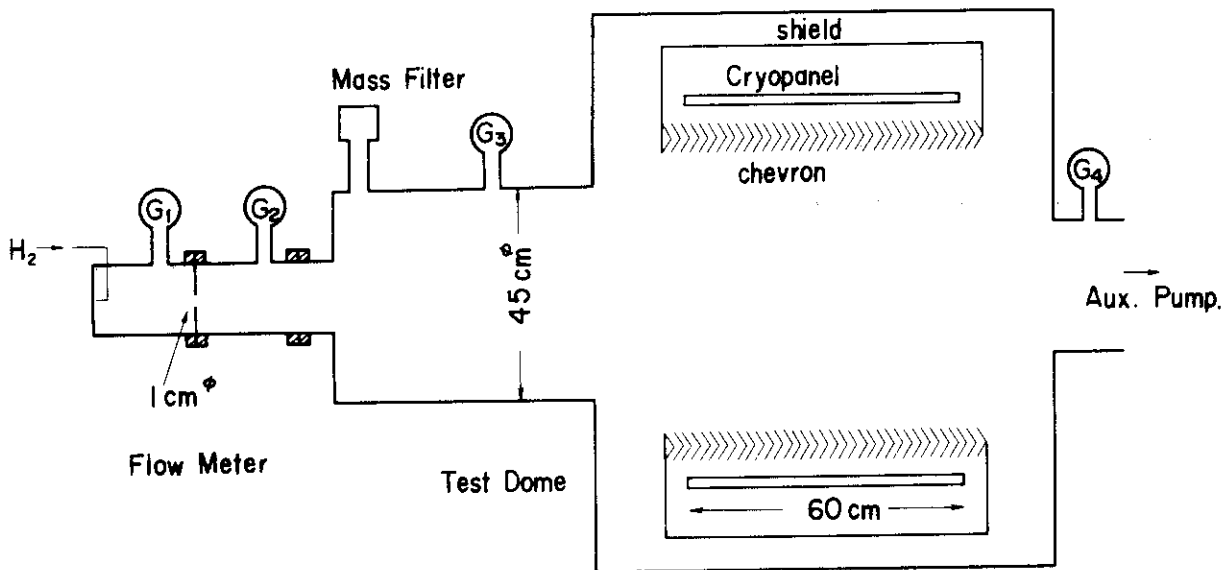


図3 排気速度定系の概略図

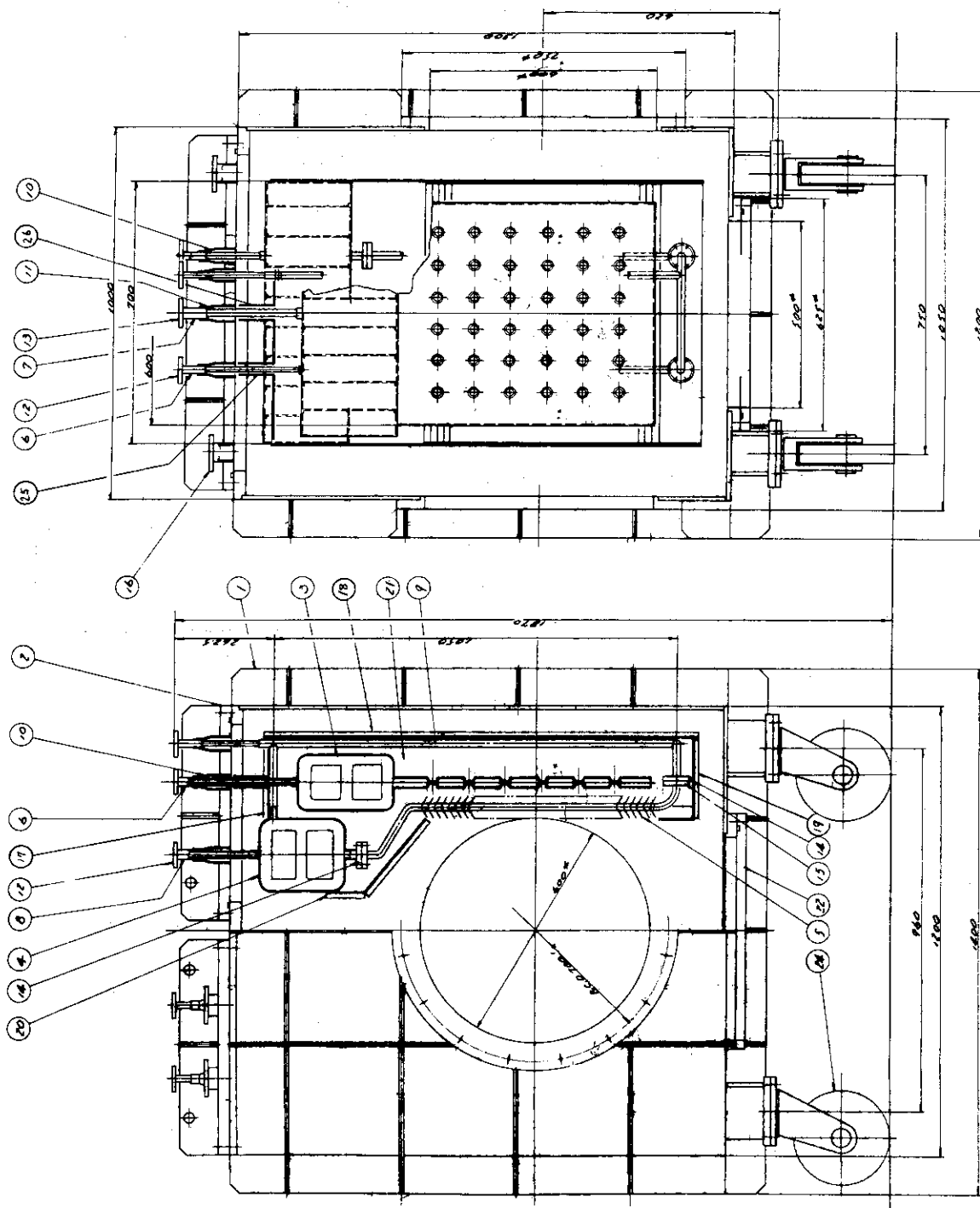


図2 60,000 l/secクライオポンプの側面図と正面図

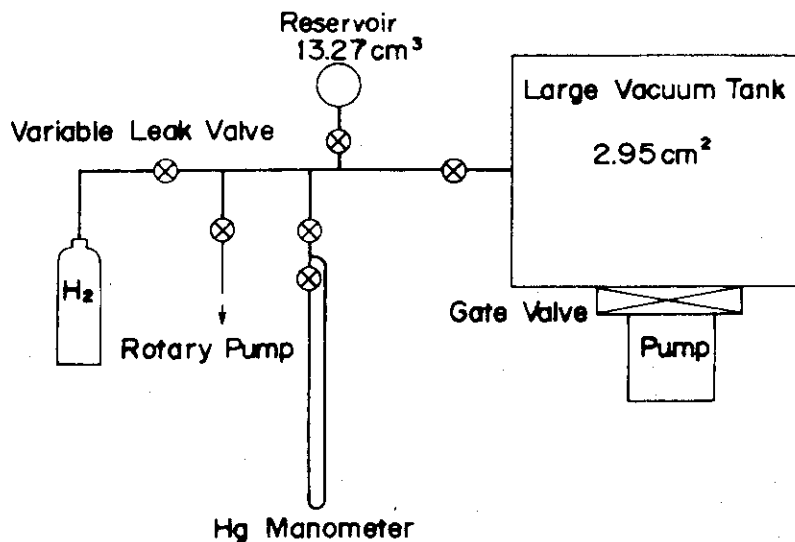


図4 真空計感度校正装置の概略図

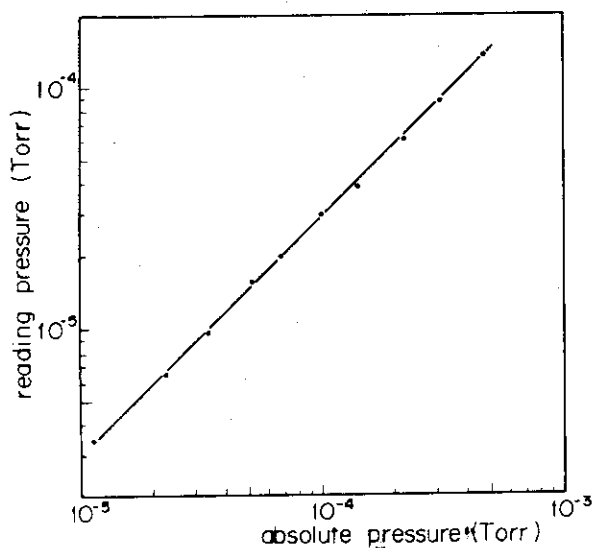


図5 電離真空計G₂の感度校正結果

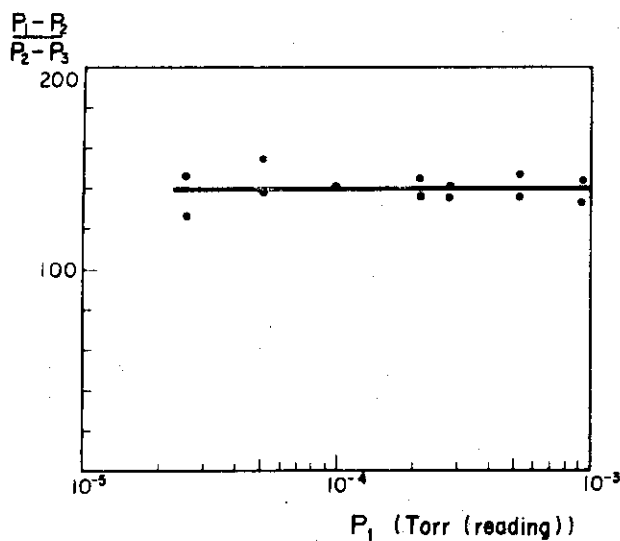


図6 電離真空計G₁ (校正係数3.6)が測定可能

領域での $\frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3}$ のこのグラフより

$$\frac{C'}{C} = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_3} = 140 \text{ が得られる。}$$

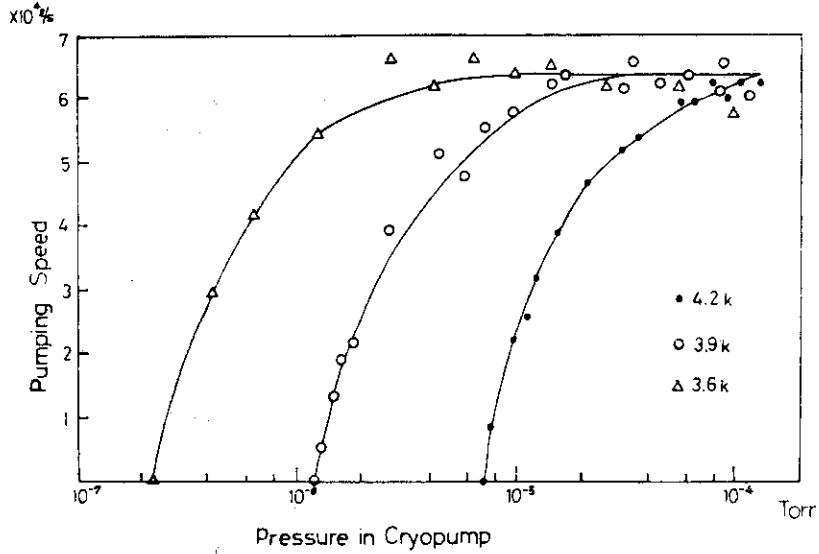


図7 60,000 l/sec クライオポンプの排気速度測定結果

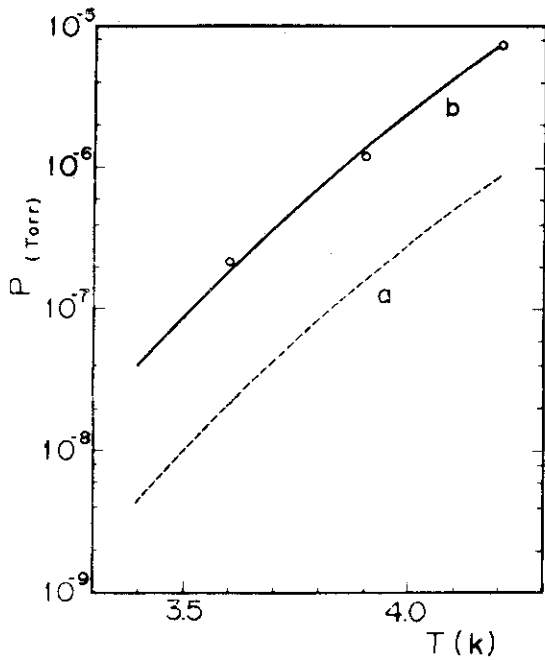


図8 水素の平衡蒸気圧, a; 平衡蒸気圧 P_s (文献13) b; — 熱遷移後の蒸気圧で $\frac{C_s}{C_g} P_s \left(\frac{295}{T} \right)^{1/2}$ ここで $\frac{C_s}{C_g} = 1$ P_s は文献14の値を用いて計算した。○; 実験値で図7の到達圧力を示す。

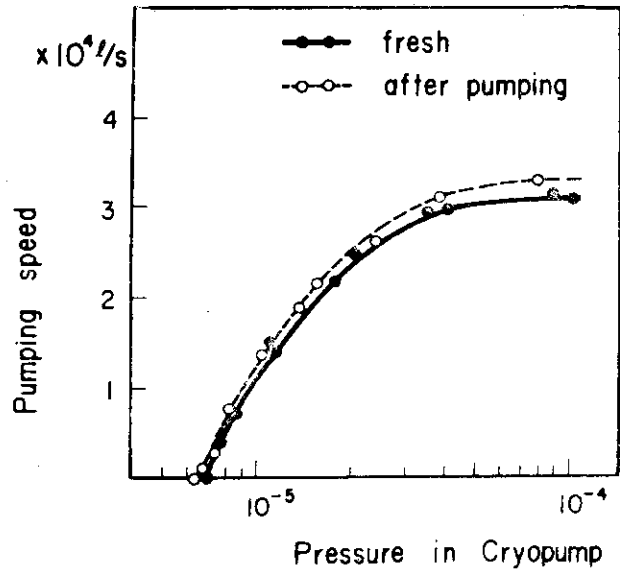


図9 ○-○- ほとんど水素を凝縮していない時の排気速度; ○-○- $13 \text{ Torr} \cdot \text{l}/\text{cm}^2$ の水素がクライオパネルに凝縮している時の排気速度, ここでの実験は, ポンプの片側のみ使い, パネル温度は42Kである。

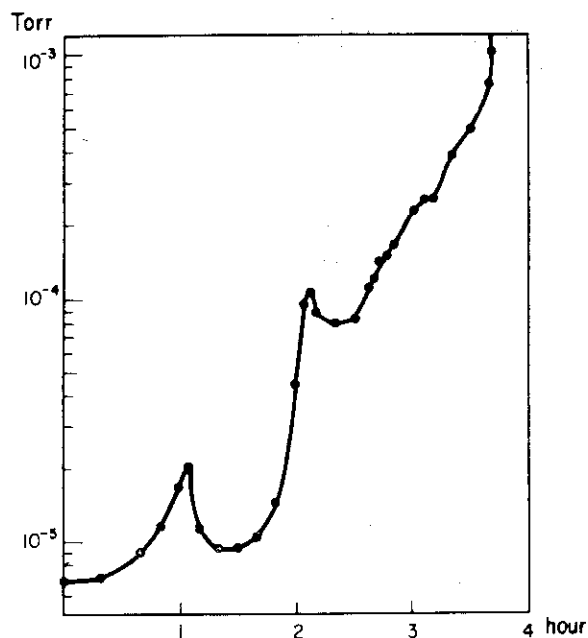


図10 排気実験後クライオポンプを放置した時のポンプ内圧力の上昇

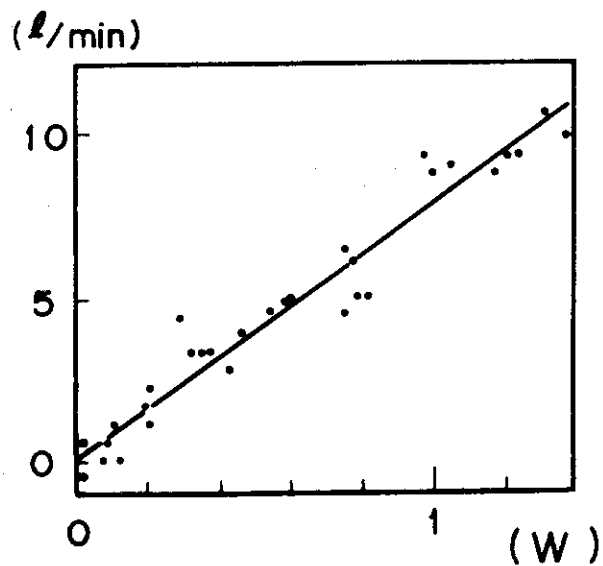


図11 液体ヘリウム槽内に入れたヒータへの入力とそのときの液体ヘリウム蒸発量の増加

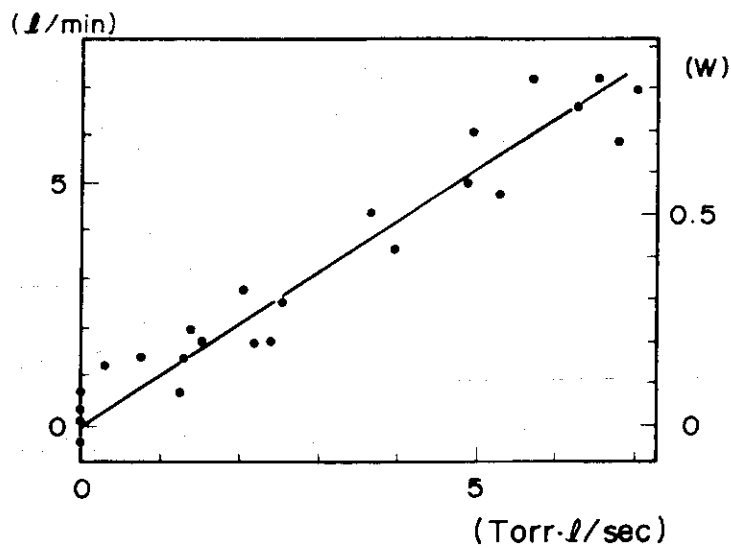


図12 クライオパネルへの水素凝縮による液体ヘリウム蒸発量の増加、たて軸の右側の目盛は図11をもとにして入れた。