

JAERI-Tech

95-043



Ar 凝縮層を用いたクライオソーブションポンプによる
混合ガス (He/D₂) 排気実験

1995年9月

秋野 昇・磯崎信光・栗山正明・大賀徳道・清水和彦

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター(〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内)で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1995

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)高野高速印刷

Ar凝縮層を用いたクライオソープションポンプによる
混合ガス (He/D₂) 排気実験

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

秋野 昇・磯崎 信光・栗山 正明

大賀 徳道・清水 和彦

(1995年8月14日受理)

クローズドダイバータ実験時のダイバータ室排気ポンプとして、JT-60NB Iクライオポンプを用いることが計画されている。本実験時に排気するガスは混合ガス (He/D₂) が主となる。Heガスのみの排気は、長パルスヘリウムビーム入射実験の際に、Ar凝縮層を用いたクライオソープションポンプにて実証済みであるが、混合ガスの排気は経験がない。そのため、Ar凝縮層を用いたクライオソープションポンプにて混合ガスの排気実験を行った。達成した排気速度は、1ビームラインあたり混合ガス (He/D₂; 5/95) に対して約700m³/sであった。この結果、JT60-NB Iクライオポンプをダイバータ室排気ポンプとして使用できることが明らかとなった。

Mixed Gas Evacuation with a Cryo-sorption Pump Using an Argon
Condensed Layer

Noboru AKINO, Nobumitsu ISOZAKI, Masaaki KURIYAMA
Tokumichi OHGA and Kazuhiko SHIMIZU

Department of Fusion Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 14, 1995)

The cryopump in the JT-60 neutral beam injector(NBI) will be used as an evacuation pump of the JT-60 closed divertor region. A pumping gas from the divertor area is mainly a mixed gas of helium and deuterium. The evacuation of the mixed gas has never been confirmed, though pure helium gas pumping has been demonstrated with cryosorption pump using an Ar condensed layer. The evacuation test has been done with the cryosorption pump to obtain the pumping characteristic of the mixed gas. The pumping speed of mixed gas of 5% helium and 95% deuterium has been demonstrated to be about 700m³/s, and hence it has been determined possible to employ the cryosorption pump using the present JT-60 NBI cryopump for the evacuation in the JT-60 closed divertor region.

Keywords : Cryosorption Pump, Ar Condensed Layer, Helium Gas, Mixed Gas, NBI

目 次

1. はじめに	1
2. JT-60NBIクライオポンプの実効排気速度の検討	1
3. 小型クライオポンプを用いた混合ガス排気実験	3
3.1 実験装置	3
3.2 実験手順	3
3.3 混合ガス導入量	4
3.4 実験結果	5
4. JT-60NBIクライオポンプを用いた混合ガス排気実験	7
4.1 装置の概要	7
4.2 実験手順	8
4.3 実験結果	8
5. まとめ	9
謝 辞	10
参考文献	11

Contents

1. Introduction	1
2. Discussion of Effective Pumping Speed	1
3. Mixed Gas Evacuation Experiment with a Small Size Cryopump	3
3.1 Experimental Apparatus	3
3.2 Experimental Procedure	3
3.3 Mixed Gas Flow Rate	4
3.4 Experimental Results	5
4. Mixed Gas Evacuation Experiment with JT-60 NBI Cryopump	7
4.1 Outline of the Apparatus	7
4.2 Experimental Procedure	8
4.3 Experimental Results	8
5. Summary	9
Acknowledgements	10
Reference	11

1. はじめに

JT-60では、ITER物理実験計画の第2段階として、平成7年度から始まるJT-60ITER物理実験(2)において炉心プラズマの定常化の研究を行う。本研究においては、主プラズマの閉じ込め及び電流駆動性能向上に加えて、高温プラズマからの熱流を制御し、同時に核融合反応の生成物であるヘリウム灰を排気し燃料密度を最適に制御する役割をもつダイバータ性能の向上を図ることに重点をおいている。そして、ダイバータ研究では、その成果をITER工学設計の最終2年間に反映する計画である。

しかし、現在のJT-60Uダイバータは、ダイバータの物理研究に重点をおいた単純な設計となっているためダイバータ性能としては不十分であり、また、ダイバータ部排気装置を備えていないために、今後、プラズマ周辺制御装置としての工学的な観点からのダイバータ研究を行うには限界がある。特に、ダイバータの性能向上を図るにはダイバータ形状や排気方法を最適化し、さらに、主プラズマ性能と両立させるためにはリサイクリング粒子の逆流を防止することが重要である。

そこで原研では平成7～8年度の2年計画でJT-60Uのダイバータ改造を実施し、平成9～10年度にかけてダイバータ及び主プラズマ性能の両立に重点をおいた定常化研究を推進する予定である。

本ダイバータ改造計画では、ダイバータ部排気をNBIクライオポンプで行うと共にヘリウム灰の排気も本ポンプを用いて行うことで進められている。NBIクライオポンプによるヘリウムガスの排気は、アルゴンガスを吸着媒としたクライオソープションポンプを用いることで可能であるが、*1混合ガス(H_e/D₂)の排気はこれまで実績が無い。そのため、NBIクライオポンプを模擬した小型クライオポンプを用いて、予備実験を行い、その結果をもとにNBIクライオポンプによる混合ガスの排気実験を行い、ダイバータ部排気のパフォーマンスを確認を行った。

2. JT-60NBI クライオポンプの実効排気速度の検討

NBIクライオポンプをダイバータ実験時に排気ポンプとして使用する際のダイバータ部での実効排気速度の検討を行った。

「前提条件」

- ① 準垂直 NBI 用クライオポンプの排気速度； $1000\text{m}^3/\text{s}(\text{D}_2)$
- ② 実験運転時(ベーキング)の JT-60U 真空容器平均温度； 200°C

1. はじめに

JT-60では、ITER物理実験計画の第2段階として、平成7年度から始まるJT-60ITER物理実験(2)において炉心プラズマの定常化の研究を行う。本研究においては、主プラズマの閉じ込め及び電流駆動性能向上に加えて、高温プラズマからの熱流を制御し、同時に核融合反応の生成物であるヘリウム灰を排気し燃料密度を最適に制御する役割をもつダイバータ性能の向上を図ることに重点をおいている。そして、ダイバータ研究では、その成果をITER工学設計の最終2年間に反映する計画である。

しかし、現在のJT-60Uダイバータは、ダイバータの物理研究に重点をおいた単純な設計となっているためダイバータ性能としては不十分であり、また、ダイバータ部排気装置を備えていないために、今後、プラズマ周辺制御装置としての工学的な観点からのダイバータ研究を行うには限界がある。特に、ダイバータの性能向上を図るにはダイバータ形状や排気方法を最適化し、さらに、主プラズマ性能と両立させるためにはリサイクリング粒子の逆流を防止することが重要である。

そこで原研では平成7～8年度の2年計画でJT-60Uのダイバータ改造を実施し、平成9～10年度にかけてダイバータ及び主プラズマ性能の両立に重点をおいた定常化研究を推進する予定である。

本ダイバータ改造計画では、ダイバータ部排気をNBIクライオポンプで行うと共にヘリウム灰の排気も本ポンプを用いて行うことで進められている。NBIクライオポンプによるヘリウムガスの排気は、アルゴンガスを吸着媒としたクライオソープションポンプを用いることで可能であるが、*1混合ガス(H_e/D₂)の排気はこれまで実績が無い。そのため、NBIクライオポンプを模擬した小型クライオポンプを用いて、予備実験を行い、その結果をもとにNBIクライオポンプによる混合ガスの排気実験を行い、ダイバータ部排気のパフォーマンスを確認を行った。

2. JT-60NBI クライオポンプの実効排気速度の検討

NBIクライオポンプをダイバータ実験時に排気ポンプとして使用する際のダイバータ部での実効排気速度の検討を行った。

「前提条件」

- ① 準垂直 NBI 用クライオポンプの排気速度； $1000\text{m}^3/\text{s}(\text{D}_2)$
- ② 実験運転時(ベーキング)の JT-60U 真空容器平均温度； 200°C

- ・真空容器 ; 300°C
- ・NBI ポート ; 150°C

③ダイバータ部バッフル板のコンダクタンス ; 144m³/s

以上の条件を基に、ダイバータ部での実効排気速度を計算した。

実効排気速度の計算式としては下記の式を使用した。

$$Se = \frac{SoC}{So + C}$$

また、NBI ポート各部のコンダクタンスは、 $C = 121 \frac{d^3}{l}$ (長い円筒の式) から計算し、その結果を第 2-1 表に示す。

第 2-1 表

	l (m)	d (m)	C (m ³ /s)
・第 3 ビームリミタ	0.05	0.50	302.5
・ポート胴部 3	0.51	0.66	68.2
・第 2 ビームリミタ	0.05	0.50	302.5
・ベローズ+胴部 2	0.86	0.65	38.6
・第 1 ビームリミタ	0.05	0.51	321.0
・ポート胴部 1	0.51	0.54	37.4
・F/S、GV 部	0.84	0.60	31.1

第 2-1 表より NBI ポート部全体のコンダクタンス Ct は

$$\frac{1}{Ct} = \frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} \dots \frac{1}{Cn} \quad \text{より} \quad Ct = 9.16 \text{ m}^3/\text{s} \text{ となる。}$$

これより実効排気速度を見積もると以下の通りとなる。

$$Se = \frac{1000 \times 9.16}{1000 + 9.16} = 9.08 \text{ m}^3/\text{s} \quad (20^\circ\text{C}; \text{空気換算})$$

さらに、重水素換算及び温度換算を入れると実効排気速度は

$$Se = 9.08 \times \sqrt{\frac{28.8}{4}} \times \sqrt{\frac{473}{293}} = 30.96 \text{ m}^3/\text{s}/\text{unit} \quad \text{となる。}$$

また、ダイバータ部から NBI ポート部へ導くバッフル板と本体真空容器間のコンダクタンスを円筒で近似して求めると

$$C = 116 \times \sqrt{\frac{28.8}{4}} \times \sqrt{\frac{593}{293}} \times S \times k \text{ から } 443 \times \pi (3.8^2 - 3.6^2) \times 0.07 = 144 \text{ m}^3/\text{s}$$

となる。

従って、使用する NBI ユニット数を n とすると実効排気速度は

$$Sp = \frac{1}{\frac{1}{144} + \frac{1}{30.96n}} \quad \text{から第2-2表の通りとなる。}$$

第2-2表

n ユニット	1	2	3	4	5
Sp	25.48	43.3	56.46	66.58	74.6

3. 小型クライオポンプを用いた混合ガス排気実験

3.1 実験装置

小型クライオポンプを用いた混合ガス排気のための実験装置を第 3.1-1 図に示す。真空容器（φ 800×2060）内には液体ヘリウム冷却のクライオパネル、液体窒素冷却のシェブロンバッフル等が設置されている。なお、この真空容器内には今回の実験では使用しない4K シェブロンバッフルが設置されているが、これは特に冷却せず常温の状態にして、本実験には影響のないようにした。また、本シェブロンバッフルの通過確率を 0.24 としてガス導入量を調整した。混合ガスを排気するためのクライオパネルの表面積は 0.2 m² である。排気実験時のクライオポンプの温度は 4.2K とした。真空容器内の粗引きポンプとして、500l/s (N₂ガス) のターボ分子ポンプ (TMP) 及び油回転ポンプが設置されている。混合ガス及びアルゴンガスを導入するためのガス導入部は、真空容器下部に設置されており、サーマルマスフローメータによりガス導入量を制御した。真空容器内の圧力は、He ガス及び混合ガス (He + D₂) により校正した電離真空計及び、D₂ ガスと He ガスを分離することができる高性能四重極型質量分析計により測定した。

3.2 実験手順

混合ガス排気実験手順を以下に示す。

- 1) 真空容器内を 10⁻³ Pa 以下まで真空引きする。
- 2) シェブロンバッフルを液体窒素にて冷却する。
- 3) クライオパネルを液体ヘリウムにて冷却する。
- 4) アルゴンガスを一定流量で規定量導入する。(今後 Pre-Ar とする)
- 5) この状態で 30 分間放置する。
- 6) さらに、アルゴンガスを一定量導入し 2 分間放置する。(今後 FLA-Ar とする)
- 7) 混合ガスを導入し排気データを取得する。

$$Sp = \frac{1}{\frac{1}{144} + \frac{1}{30.96n}} \quad \text{から第2-2表の通りとなる。}$$

第2-2表

n ユニット	1	2	3	4	5
Sp	25.48	43.3	56.46	66.58	74.6

3. 小型クライオポンプを用いた混合ガス排気実験

3.1 実験装置

小型クライオポンプを用いた混合ガス排気のための実験装置を第 3.1-1 図に示す。真空容器（ $\phi 800 \times 2060$ ）内には液体ヘリウム冷却のクライオパネル、液体窒素冷却のシェブロンバッフル等が設置されている。なお、この真空容器内には今回の実験では使用しない4Kシェブロンバッフルが設置されているが、これは特に冷却せず常温の状態にして、本実験には影響のないようにした。また、本シェブロンバッフルの通過確率を 0.24 としてガス導入量を調整した。混合ガスを排気するためのクライオパネルの表面積は 0.2 m^2 である。排気実験時のクライオポンプの温度は 4.2K とした。真空容器内の粗引きポンプとして、500l/s (N_2 ガス) のターボ分子ポンプ (TMP) 及び油回転ポンプが設置されている。混合ガス及びアルゴンガスを導入するためのガス導入部は、真空容器下部に設置されており、サーマルマスフローメータによりガス導入量を制御した。真空容器内の圧力は、He ガス及び混合ガス ($\text{He} + \text{D}_2$) により校正した電離真空計及び、 D_2 ガスと He ガスを分離することができる高性能四重極型質量分析計により測定した。

3.2 実験手順

混合ガス排気実験手順を以下に示す。

- 1) 真空容器内を 10^{-3} Pa 以下まで真空引きする。
- 2) シェブロンバッフルを液体窒素にて冷却する。
- 3) クライオパネルを液体ヘリウムにて冷却する。
- 4) アルゴンガスを一定流量で規定量導入する。(今後 Pre-Ar とする)
- 5) この状態で 30 分間放置する。
- 6) さらに、アルゴンガスを一定量導入し 2 分間放置する。(今後 FLA-Ar とする)
- 7) 混合ガスを導入し排気データを取得する。

- 8) 上記 6), 7)の操作を繰り返しながら排気データを取得し、クライオポンプが不安定状態または自然再生するまで実験を行う。

アルゴンガス及び混合ガスの導入量及び導入速度は、He ガス単体の排気速度と比較するため、従来、試験している Ar ガスを用いたクライオソープションポンプによる He ガス排気と同様にした。つまり、Pre-Ar ガス導入量は単位面積当たり 110Pam^3 とした。小型クライオパネルの表面積は 0.2m^2 であるので、ガス導入量としては 22Pam^3 となる。このガスを導入速度； $1.2 \times 10^{-2} \text{Pam}^3/\text{s}$ で 30 分間導入した。また、FLA-Ar ガスの導入量は、混合ガス導入量の 20 倍とした。混合ガスの導入量は以下に示すように $4.8 \times 10^{-2} \text{Pam}^3$ なので FLA-Ar ガスの導入量は 0.96Pam^3 となる。このガス量を導入速度； $4 \times 10^{-2} \text{Pam}^3/\text{s}$ で 4 分間で導入した。混合ガスの導入量は、JT-60NBI クライオポンプの排気速度をもとに小型クライオポンプの予想排気速度を求め、さらに JT-60NBI の He ビーム入射実験時のガス導入速度が $1.5\text{Pam}^3/\text{s}$ で、最長パルス幅は 10sec であるので、今回の試験に用いた 1 ショット当たりのガス導入量は 15Pam^3 となる。この量を小型クライオポンプに置換えると、ガス導入速度は $4.8 \times 10^{-3} \text{Pam}^3/\text{s}$ となる。

さらに、今回の実験では (1) 清浄なクライオパネルの表面にアルゴンガスを形成させて、混合ガスを連続で導入したときの排気特性及びパルスで導入したときの排気特性、(2) クライオパネル表面に D_2 ガスを形成させて、その上にアルゴンガス凝縮層を形成させたときの混合ガス排気、(3) アルゴン凝縮層を形成させないときの混合ガス排気について実験を行った。

3.3 混合ガス導入量

上記のように、混合ガスの導入量は $4.8 \times 10^{-3} \text{Pam}^3/\text{s}$ であるが、今回、ガス導入量制御に使用しているサーマルマスフローメータは He ガスにて校正されたものを使用しているため、以下のようなガス導入量の適正化を図った。

①混合ガス(He: D_2 =1:1)

He ガス単体及び D_2 ガス単体のコンバージョンファクタ(CF)は、それぞれ 1.39、1.0 であるので実際流そうとするガス流量は以下のようなになる。

$$CF = \frac{100}{\frac{50}{1.39} + \frac{50}{1.0}} = 1.163$$

さらに、今回使用したマスフローメータは He ガスにて校正されたものであるためコンバージョンファクタは $CF = \frac{1.163}{1.39} = 0.8367$ となり、混合ガスの導入速

度は $Q = \frac{4.8 \times 10^{-3}}{0.8367} = 5.73 \times 10^{-3} \text{Pam}^3/\text{s}$ となる。

②混合ガス(D₂:He=95:5)

$$CF = \frac{100}{\frac{5}{1.39} + \frac{95}{1.0}} = 1.014$$

さらに、マスフローメータの校正計数を加味すると $CF = \frac{1.014}{1.39} = 0.73$ となり、

混合ガスの導入速度は $Q = \frac{4.8 \times 10^{-3}}{0.73} = 6.58 \times 10^{-3} \text{ Pam}^3/\text{s}$ となる。

3.4 実験結果

3.4.1 混合ガスを連続で導入したときの排気特性

Arガスを凝縮層に用いたクライオソーブションポンプにて混合ガスが排気可能か否かを見極めるための実験を行った。He/D₂ガスの混合比が1:1のガスを使用して、連続でガスを導入したときのHe及びD₂それぞれの分圧のピーク値を第3.4-1図に示す。混合ガスの導入速度は $4.8 \times 10^{-3} \text{ Pam}^3/\text{s}$ と $9.6 \times 10^{-3} \text{ Pam}^3/\text{s}$ の2通りについて実施した。連続ガス導入時間は約60秒とした。

2通りのガス導入速度に対して、概ね30秒までは分圧の変化はなく、30秒を過ぎたあたりから徐々に分圧が上昇している。また、He/D₂の分圧比は約1:2となっているが、これは質量分析計の感度計数「He(1):D₂(2)」の違い*²によるものである。このことからHeガス、D₂ガス共に充分排気されていることが確認された。

3.4.2 混合ガスの排気速度

混合比が1:1のガスを用いて排気速度の測定を実施した。混合ガスの導入速度は $4.8 \times 10^{-3} \text{ Pam}^3/\text{s}$ で一定とし、ガス導入時間は1パルスあたり10秒とした。He、D₂ガスそれぞれの排気速度の計算は、TMP排気時とクライオソーブションポンプ排気時のP-Q特性の比から求めた。(TMP排気速度を既知とした。)

He、D₂それぞれのTMP実効排気速度は次のようにして求めた。

① Heガスに対して

TMP-真空容器間の配管のコンダクタンス(C)は下記のようになる。

$$C = K \times 116 \times A \times \sqrt{\frac{28}{4}} \text{ から } C = 2.2 \text{ m}^3/\text{s}$$

実効排気速度 Se は下記の通りとなる。

$$Se = \frac{S_0 \times C}{S_0 + C} \Rightarrow \frac{0.57 \times 2.2}{0.57 + 2.2} = 0.453 \text{ m}^3/\text{s} \text{ となる。}$$

②同様に D₂ガスに対する実効排気速度は 0.407m³/s である。

He ガス及び D₂ガスの排気速度比較曲線を第 3.4.2-1, 2 図に示す。上記の TMP 排気速度を基にしてクライオソーブションポンプの排気速度を導くと、He ガスの場合は TMP の約 7.5 倍となるため約 3.4 m³/s の排気速度であることが確認された。また単位面積当たりの排気速度は 17 m³/s/m²となる。

同様に D₂ガスの排気速度を計算すると、TMP の排気速度に対してクライオソーブションでは約 11.5 倍となるため、4.54 m³/s となり、単位面積では 22.7 m³/s となる。

以前行った He-Pure ガスを用いた時のクライオソーブションポンプの排気速度と比較すると、He-Pure 時は 30 m³/s/m²前後の排気速度が得られており、今回行った混合ガス(He)に対する排気速度は He-Pure 時の約 55%であった。

なお、この試験でクライオポンプ再生までに導入した混合ガスの積算ガス導入量は 1.296 Pam³であり、この量は JT-60NBI クライオポンプに換算すると 405 Pam³であった。

3.4.3 D₂ガス吸着後の排気特性

ダイバータ実験にて予想される排気形態として、D₂ガスと混合ガスを交互に排気することを予測して、クライオポンプの排気特性を取得した。まず、清浄なクライオパネルの表面に 27Pam³(JT-60NBI; 2,000Pam³相当)の D₂ガスを吸着させ、2.2 項の排気実験手順に示す要領で Ar ガス、混合ガスを導入した。使用した混合ガスは混合比が He(5%) : D₂(95%)のガスとした。混合ガスの導入速度は 4.8×10^{-3} Pam³/s で導入した。またこの時の圧力測定は電離真空計(B-A ゲージ)にて測定した。この際、He、D₂個々の排気速度は明確にできなかった。

第 3.4.3-1 表

	Q(Pam ³ /s)	S(m ³ /s)	S(m ³ /s/m ²)
1 ショット目	4.8×10^{-3}	8.55	42.7
10 ショット目	"	9.9	49.7

第 3.4.3-1 表に示したように、クライオソーブションポンプの排気速度は 1 ショット~10 ショット(混合ガス吸着量; 4.8×10^{-1} Pam³)まではショットを重ねる毎に排気速度が増加し、また安定に排気されている。しかし、11 ショット以降からクライオポンプが不安定となり、最終的には 17 ショット終了時点でクライオポンプが自然再生に至った。クライオポンプが自然再生するまでに吸着したガス量は約 0.816Pam³であった。この値は JT-60NBI ; 255Pam³に相当する。

このことから、クライオポンプ表面に D₂ガスを吸着させた後に、混合ガス層

を形成させるとクライオポンプの寿命は約40%近く短縮されることがわかった。

3.4.4 アルゴン凝縮層を形成させないときの混合ガス排気特性

He(5%) ; D₂(95%)の混合ガスを用いて、アルゴン凝縮層を形成させないときのクライオポンプの排気実験を行った。混合ガスの導入速度は $4.8 \times 10^{-3} \text{ Pam}^3/\text{s}$ で10秒間導入した。TMP排気を行わないときと、TMP排気中にガスを導入したときのそれぞれの主タンク内圧力曲線を第3.4.4-1図に示す。TMP排気を行わないときに混合ガスを導入したときの主タンク内の圧力上昇は、導入開始から終了までの約10秒間で、ほぼ直線的に圧力が上昇している。また、混合ガス導入を停止したときに主タンクの圧力がベース圧力まで戻らずに、Heガス分圧だけが残留したかたちで主タンク内が平衡状態となっている。その後、TMPにて排気することでHeガスも排気されている。ガス導入停止後の排気カーブがTMP排気中に混合ガスを導入/停止したときの排気曲線とよく一致していることから、アルゴン凝縮層無しの際にはHeガスは排気できず、D₂ガスだけクライオポンプで排気されていることが分かる。

4. JT-60NBI クライオポンプを用いた混合ガス排気実験

小型クライオポンプの実験結果から、アルゴンガスを凝縮層に使用したクライオソープションポンプでの混合ガスの排気が明確になったので、JT-60NBIクライオポンプを用いて混合ガスの排気実験を行った。また、これまで取得できていなかった、アルゴン凝縮層によるクライオソープションポンプでのH₂ガスに対する排気特性データも併せて取得した。

4.1 装置の概要

JT-60NBIは14ユニットのビームラインから構成され、NBI主排気タンク内には水素ガスに対し約 $1370 \text{ m}^3/\text{s}$ の排気速度を有する液体ヘリウム冷却の凝縮型クライオパネルが設置されている。^{*3}このクライオポンプは主排気タンク内壁に沿って設置され6枚のクライオポンプモジュールと気液分離器及びこれらを連結する配管で構成されている。主排気タンク内は、イオン源側からP1、P2、P3の3つの部屋に仕切られ、それぞれの部屋に2枚のクライオポンプモジュールが設置され、中性化セルより流れ出る室温のガスを効率よく排気して、ドリフト部へのガス流入を少なくするための差動排気方式をとっている。

クライオパネルの有効排気面積は、P1、P2室がそれぞれ約 7 m^2 、P3室が約 1 m^2 でトータル約 15 m^2 の排気面積を有している。クライオパネルを冷却するための液体ヘリウムは、系統内の圧力を -45 cmHg に減圧することでクライオパ

を形成させるとクライオポンプの寿命は約40%近く短縮されることがわかった。

3.4.4 アルゴン凝縮層を形成させないときの混合ガス排気特性

He(5%) ; D₂(95%)の混合ガスを用いて、アルゴン凝縮層を形成させないときのクライオポンプの排気実験を行った。混合ガスの導入速度は $4.8 \times 10^{-3} \text{ Pam}^3/\text{s}$ で10秒間導入した。TMP排気を行わないときと、TMP排気中にガスを導入したときのそれぞれの主タンク内圧力曲線を第3.4.4-1図に示す。TMP排気を行わないときに混合ガスを導入したときの主タンク内の圧力上昇は、導入開始から終了までの約10秒間で、ほぼ直線的に圧力が上昇している。また、混合ガス導入を停止したときに主タンクの圧力がベース圧力まで戻らずに、Heガス分圧だけが残留したかたちで主タンク内が平衡状態となっている。その後、TMPにて排気することでHeガスも排気されている。ガス導入停止後の排気カーブがTMP排気中に混合ガスを導入/停止したときの排気曲線とよく一致していることから、アルゴン凝縮層無しの際にはHeガスは排気できず、D₂ガスだけクライオポンプで排気されていることが分かる。

4. JT-60NBI クライオポンプを用いた混合ガス排気実験

小型クライオポンプの実験結果から、アルゴンガスを凝縮層に使用したクライオソープションポンプでの混合ガスの排気が明確になったので、JT-60NBIクライオポンプを用いて混合ガスの排気実験を行った。また、これまで取得できていなかった、アルゴン凝縮層によるクライオソープションポンプでのH₂ガスに対する排気特性データも併せて取得した。

4.1 装置の概要

JT-60NBIは14ユニットのビームラインから構成され、NBI主排気タンク内には水素ガスに対し約 $1370 \text{ m}^3/\text{s}$ の排気速度を有する液体ヘリウム冷却の凝縮型クライオパネルが設置されている。^{*}このクライオポンプは主排気タンク内壁に沿って設置され6枚のクライオポンプモジュールと気液分離器及びこれらを連結する配管で構成されている。主排気タンク内は、イオン源側からP1、P2、P3の3つの部屋に仕切られ、それぞれの部屋に2枚のクライオポンプモジュールが設置され、中性化セルより流れ出る室温のガスを効率よく排気して、ドリフト部へのガス流入を少なくするための差動排気方式をとっている。

クライオパネルの有効排気面積は、P1、P2室がそれぞれ約 7 m^2 、P3室が約 1 m^2 でトータル約 15 m^2 の排気面積を有している。クライオパネルを冷却するための液体ヘリウムは、系統内の圧力を -45 cmHg に減圧することでクライオパ

ネルの温度を 3.7K 以下にしている。

JT-60NBI クライオポンプの鳥瞰図及び断面図を第 4.1-1 図、4.1-2 図に示す。

4.2 実験手順

使用ユニットは#1 ビームラインとし、使用ガスは混合ガス「He(5%) : D₂(95%)」及び H₂ ガスの 2 種とした。

実験手順は以下の通りである。

- 1) ヘリウム冷凍機及びクライオポンプを定常状態とする。
- 2) アルゴンガスを 1.0Pam³/s で 1650Pam³ まで導入する。
- 3) アルゴンガスを規定量導入後、30 分間放置する。
- 4) さらにアルゴンガスを 1.25Pam³/s で 300Pam³ まで導入する。
- 5) 2 分間放置する。
- 6) 混合ガス又は H₂ ガスを 0.5~2.0Pam³/s で約 10 秒間導入する。
- 7) 4)~6) の操作を繰り返す。

ここで、タンク内各部の圧力測定は B-A 型の電離真空計を用いた。このため混合ガスを用いた排気実験時の測定結果は、He ガス、D₂ ガス単体では計測できなかった。

4.3 実験結果

4.3.1 混合ガス及び H₂ ガス排気特性

第 4.3.1-1 図にアルゴン凝縮層を用いたクライオソープションポンプによる混合ガスの排気実験を行ったときの主排気タンク内圧力曲線を示す。測定点は、ガス導入を開始して約 10 秒経過したときの圧力である。このグラフからガス導入量が最大 2.0Pam³/s × 10 秒の時でも各タンク内の圧力上昇は、ガス導入量と共にほぼ直線的に上昇しており、安定に排気されることが確認できた。また、以前から行ってきた He ガス単体でのクライオソープションポンプの排気特性の比較を第 4.3.1-2 図に示す。He ガス単体排気時に対して、混合ガス排気時の主排気タンク内圧力上昇は概略 1/2 程度となっている。

第 4.3.1-3 図に通常のクライオポンプとして使用したときと、アルゴン凝縮層を形成させたときに H₂ ガスを導入したときの、主排気タンク内圧力上昇曲線を示す。アルゴン凝縮層を形成させることによって、僅かではあるがクライオポンプの排気速度が低下している。これは、アルゴン凝縮層を形成させたことによってクライオパネルの表面温度が上昇し排気速度が低下していると思われる。

4.3.2 混合ガスの排気速度

JT-60NBI 主排気タンク内の圧力変化から排気速度を概算する方法として、等価回路を用いて算出する手法を用いた。^{*4}ここで、ガス流量を Q 、タンク内の各部圧力を P 、コンダクタンスを C 、排気速度を S として下記の式より排気速度を求めた。

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

$$P_1C=Q_1/C_1+P_1 \quad (2)$$

$$P_1C=(Q_2+Q_3)/C_{12}+Q_2/C_2+P_2 \quad (3)$$

$$P_1C=(Q_2+Q_3)/C_{12}+Q_3/C_3+P_3 \quad (4)$$

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

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

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

測定値である混合ガス導入量、圧力及び計算から求めたコンダクタンスを式に代入し、得られた排気速度は NBI クライオポンプ 1 ユニットあたり

① 混合ガスに対して $700\text{m}^3/\text{s}$ ($47\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$)

② H_2 ガスに対して $1370\text{m}^3/\text{s}$ ($90\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$)

③ H_2 ガス (Ar 有り) に対して $950\text{m}^3/\text{s}$ ($63\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$) であった。

この値を基に、混合ガスを排気するときの JT-60NBI クライオポンプ 1 ユニットあたり NBI ポート部の実効排気速度は以下となる。

$$S_e = \frac{700 \times 9.16}{700 + 9.16} \times \sqrt{\frac{28.8}{4}} \times \sqrt{\frac{473}{293}} = 30.83\text{m}^3/\text{s} \text{ となり、これにダイバータ部から}$$

NBI ポート部までのバッフル板と真空容器間のコンダクタンス含めて計算する

$$\text{と } S_p = \frac{1}{\frac{1}{144} + \frac{1}{30.83n}} = 25.4\text{m}^3/\text{s} \text{ となる。}$$

5. まとめ

平成 9 年度から計画されているクローズドダイバータ実験に於いて、ダイバータ部の排気ポンプとして NBI クライオポンプが使用される。ダイバータ部の排気は、ヘリウム灰を伴った混合ガス ($\text{He} + \text{D}_2$) の排気が主となる。そこで以前から行われている Ar 凝縮層を用いたクライオソープションポンプにて混合ガスの排気が可能であるか否かを小型クライオポンプ及び JT-60NBI クライオポンプを用いて排気実験を行い、以下のことを明らかにした。

4.3.2 混合ガスの排気速度

JT-60NBI 主排気タンク内の圧力変化から排気速度を概算する方法として、等価回路を用いて算出する手法を用いた。^{*4}ここで、ガス流量を Q 、タンク内の各部圧力を P 、コンダクタンスを C 、排気速度を S として下記の式より排気速度を求めた。

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

$$P_1C=Q_1/C_1+P_1 \quad (2)$$

$$P_1C=(Q_2+Q_3)/C_{12}+Q_2/C_2+P_2 \quad (3)$$

$$P_1C=(Q_2+Q_3)/C_{12}+Q_3/C_3+P_3 \quad (4)$$

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

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

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

測定値である混合ガス導入量、圧力及び計算から求めたコンダクタンスを式に代入し、得られた排気速度は NBI クライオポンプ 1 ユニットあたり

① 混合ガスに対して $700\text{m}^3/\text{s}$ ($47\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$)

② H_2 ガスに対して $1370\text{m}^3/\text{s}$ ($90\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$)

③ H_2 ガス (Ar 有り) に対して $950\text{m}^3/\text{s}$ ($63\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$) であった。

この値を基に、混合ガスを排気するときの JT-60NBI クライオポンプ 1 ユニットあたり NBI ポート部の実効排気速度は以下となる。

$$S_e = \frac{700 \times 9.16}{700 + 9.16} \times \sqrt{\frac{28.8}{4}} \times \sqrt{\frac{473}{293}} = 30.83\text{m}^3/\text{s} \text{ となり、これにダイバータ部から}$$

NBI ポート部までのバッフル板と真空容器間のコンダクタンス含めて計算する

$$\text{と } S_p = \frac{1}{\frac{1}{144} + \frac{1}{30.83n}} = 25.4\text{m}^3/\text{s} \text{ となる。}$$

5. まとめ

平成 9 年度から計画されているクローズドダイバータ実験に於いて、ダイバータ部の排気ポンプとして NBI クライオポンプが使用される。ダイバータ部の排気は、ヘリウム灰を伴った混合ガス ($\text{He} + \text{D}_2$) の排気が主となる。そこで以前から行われている Ar 凝縮層を用いたクライオソープションポンプにて混合ガスの排気が可能であるか否かを小型クライオポンプ及び JT-60NBI クライオポンプを用いて排気実験を行い、以下のことを明らかにした。

- 1) He/D₂の混合比が1:1のガスを使用したときの、クライオソークションポンプの排気速度は、Heガスに対して17m³/s/m²、D₂ガスに対して22.7m³/s/m²であった。He-Pure使用時は30m³/s/m²の排気速度が得られている。よって混合ガスを排気したときでは、Heガス単体に対し約55%の排気速度であった。
- 2) D₂ガス凝縮層が形成されているクライオパネル面にAr凝縮層を形成して、混合ガス(He/D₂;5/95)を導入したときの排気速度は40m³/s/m²~50m³/s/m²であった。但し、D₂ガスが形成されていないときに対して、形成されているときのクライオポンプの寿命は約40%程度短縮されてしまう。
- 3) Ar凝縮層を形成させないで、混合ガス(He/D₂;5/95)を導入したときのHeガスに対する排気速度は全くない。
- 4) Ar凝縮層を形成させて、H₂ガスを導入したときの排気速度は63m³/s/m²であり、Ar無しの時の90m³/s/m²に対して約70%の排気速度であった。

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始激励をいただいた田中祐二那珂研究所長、船橋昭昌核融合装置試験部長、國枝俊介管理部次長、清水正亜核融合装置試験次長に感謝致します。また、終始有益な議論をいただいた阿部哲也炉心工学研究室主任研究員、柴沼清ITER開発室副主任研究員、廣木成治炉心工学研究室副主任研究員、NBI装置試験室の関係諸氏及び、小原祥裕NBI加熱研究室長をはじめとするNBI加熱研究室の関係諸氏に感謝いたします。また、菊池勝美氏他原子力エンジニアリング運転委託関係諸氏に深く感謝致します。

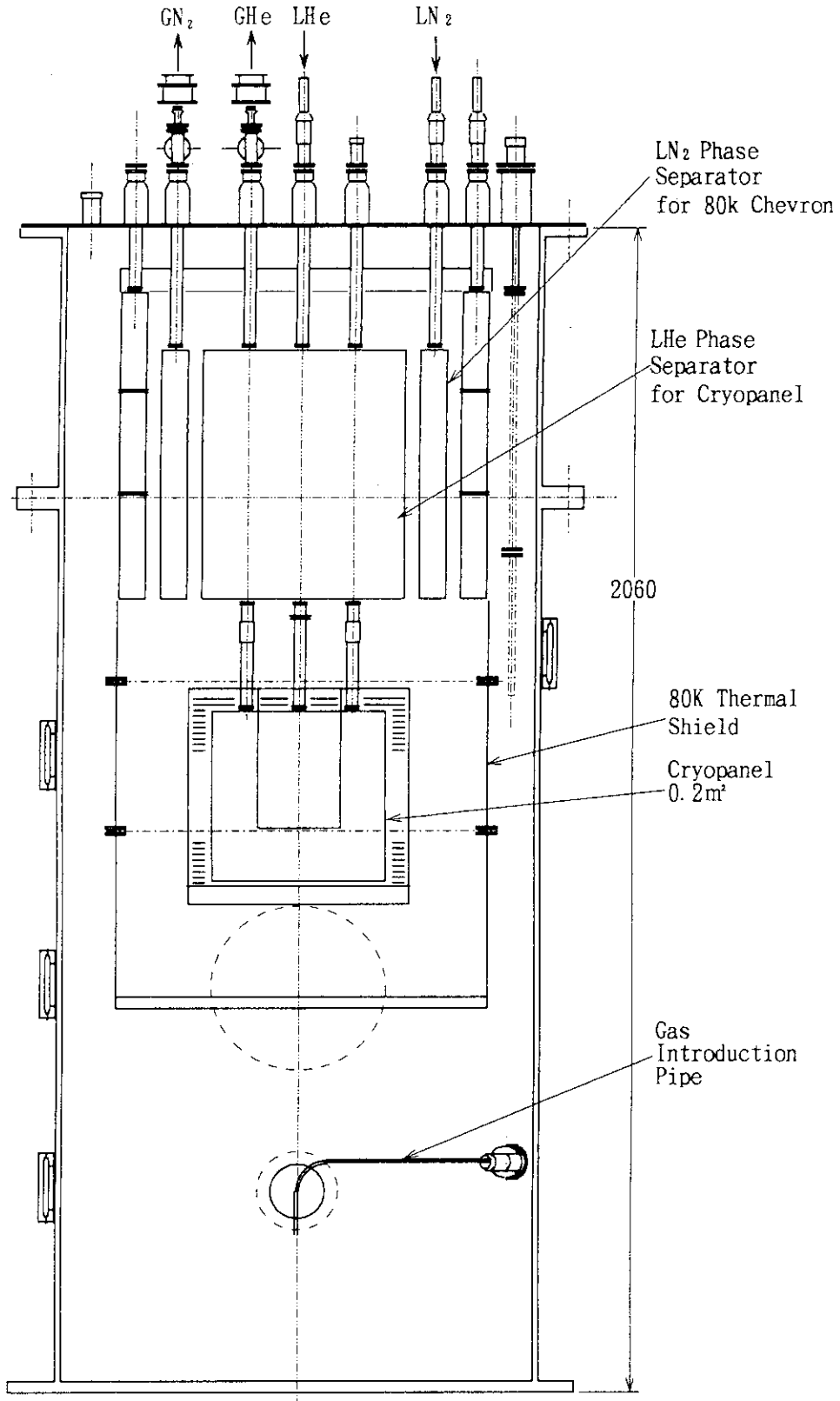
- 1) He/D₂の混合比が1:1のガスを使用したときの、クライオソーブションポンプの排気速度は、Heガスに対して17m³/s/m²、D₂ガスに対して22.7m³/s/m²であった。He-Pure使用時は30m³/s/m²の排気速度が得られている。よって混合ガスを排気したときでは、Heガス単体に対し約55%の排気速度であった。
- 2) D₂ガス凝縮層が形成されているクライオパネル面にAr凝縮層を形成して、混合ガス(He/D₂;5/95)を導入したときの排気速度は40m³/s/m²~50m³/s/m²であった。但し、D₂ガスが形成されていないときに対して、形成されているときのクライオポンプの寿命は約40%程度短縮されてしまう。
- 3) Ar凝縮層を形成させないで、混合ガス(He/D₂;5/95)を導入したときのHeガスに対する排気速度は全くない。
- 4) Ar凝縮層を形成させて、H₂ガスを導入したときの排気速度は63m³/s/m²であり、Ar無しの時の90m³/s/m²に対して約70%の排気速度であった。

謝 辞

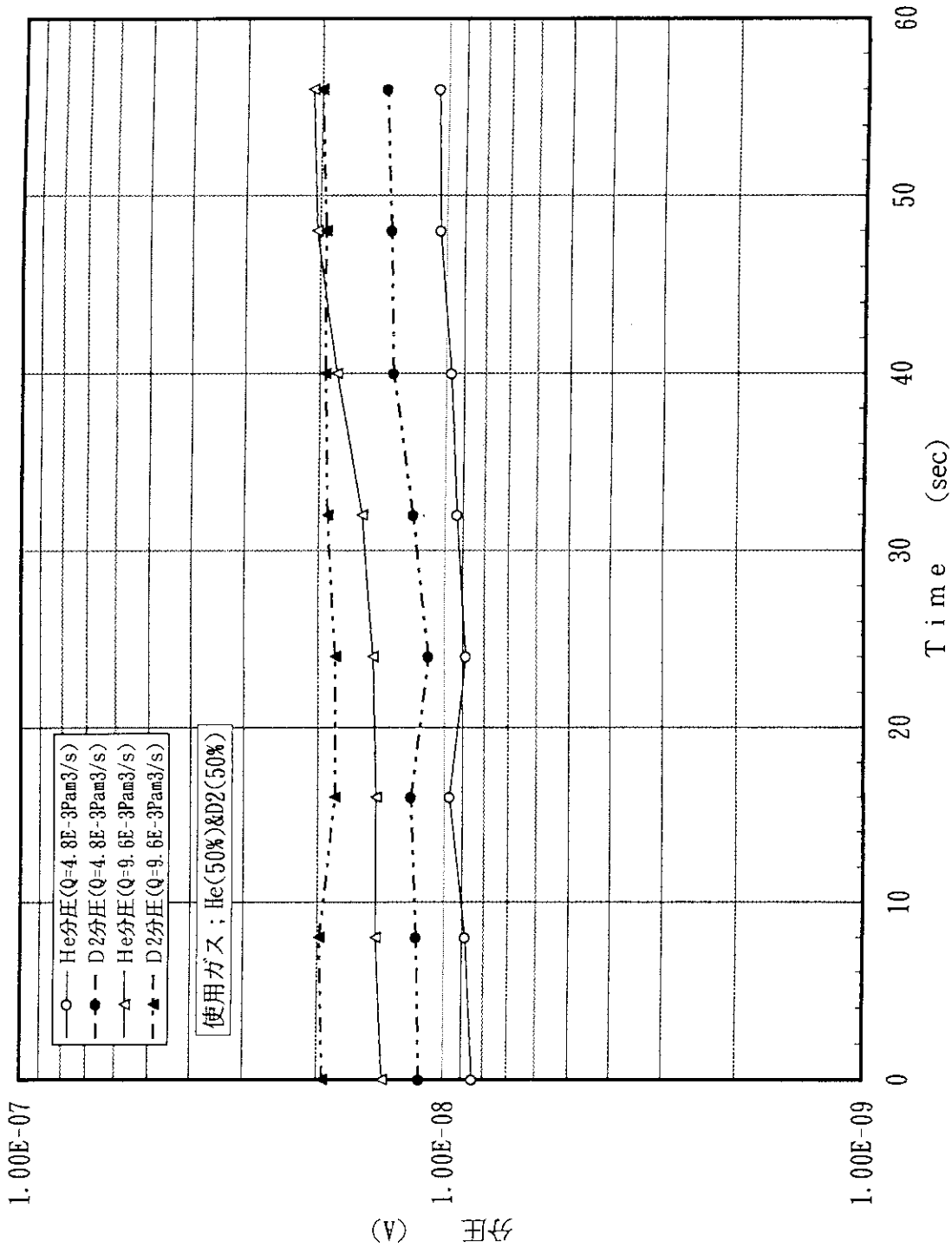
本研究を行うにあたり、終始激励をいただいた田中祐二那珂研究所長、船橋昭昌核融合装置試験部長、國枝俊介管理部次長、清水正亜核融合装置試験次長に感謝致します。また、終始有益な議論をいただいた阿部哲也炉心工学研究室主任研究員、柴沼清ITER開発室副主任研究員、廣木成治炉心工学研究室副主任研究員、NBI装置試験室の関係諸氏及び、小原祥裕NBI加熱研究室長をはじめとするNBI加熱研究室の関係諸氏に感謝いたします。また、菊池勝美氏他原子力エンジニアリング運転委託関係諸氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

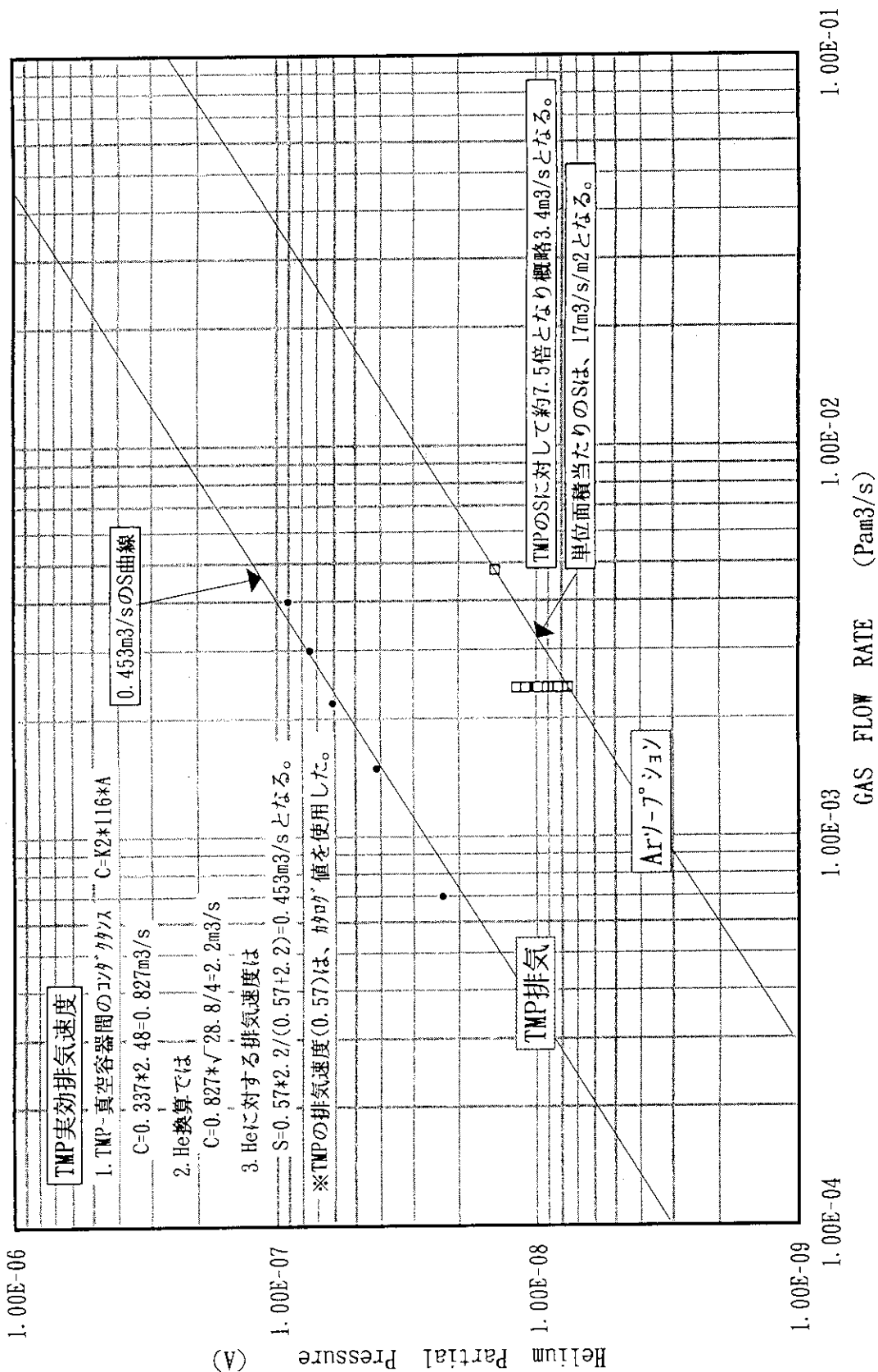
- 1) 秋野昇他：「Ar凝縮層を用いたクライオソープションポンプによるHeガス排気」日本原子力研究所レポート JAERI-M 94-031(1994)
- 2) 日本真空技術 K.K. : 真空ハンドブック (1985) 第2改訂版
- 3) 栗山正明他：「JT-60 粒子入射加熱装置の設計及び技術開発」, 日本原子力研究所レポート JAERI-M 87-169 (1987)
- 4) 菊池勝美他：「SF₆凝縮層を用いたJT-60NBIクライオポンプでのヘリウム排気試験」日本原子力研究所レポート JAERI-M 90-056 (1990)



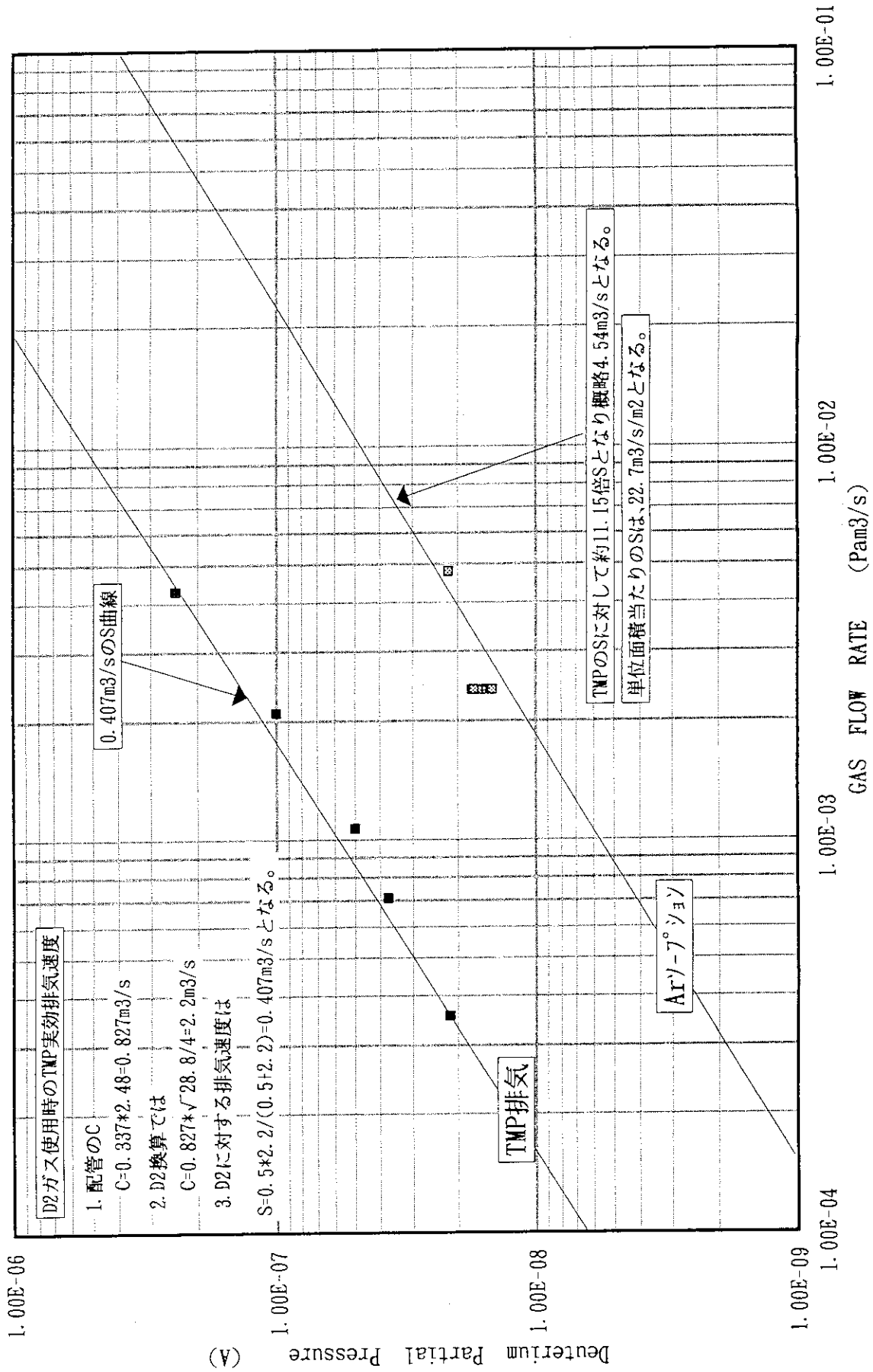
第3.1-1図 小型クライオポンプ構造図



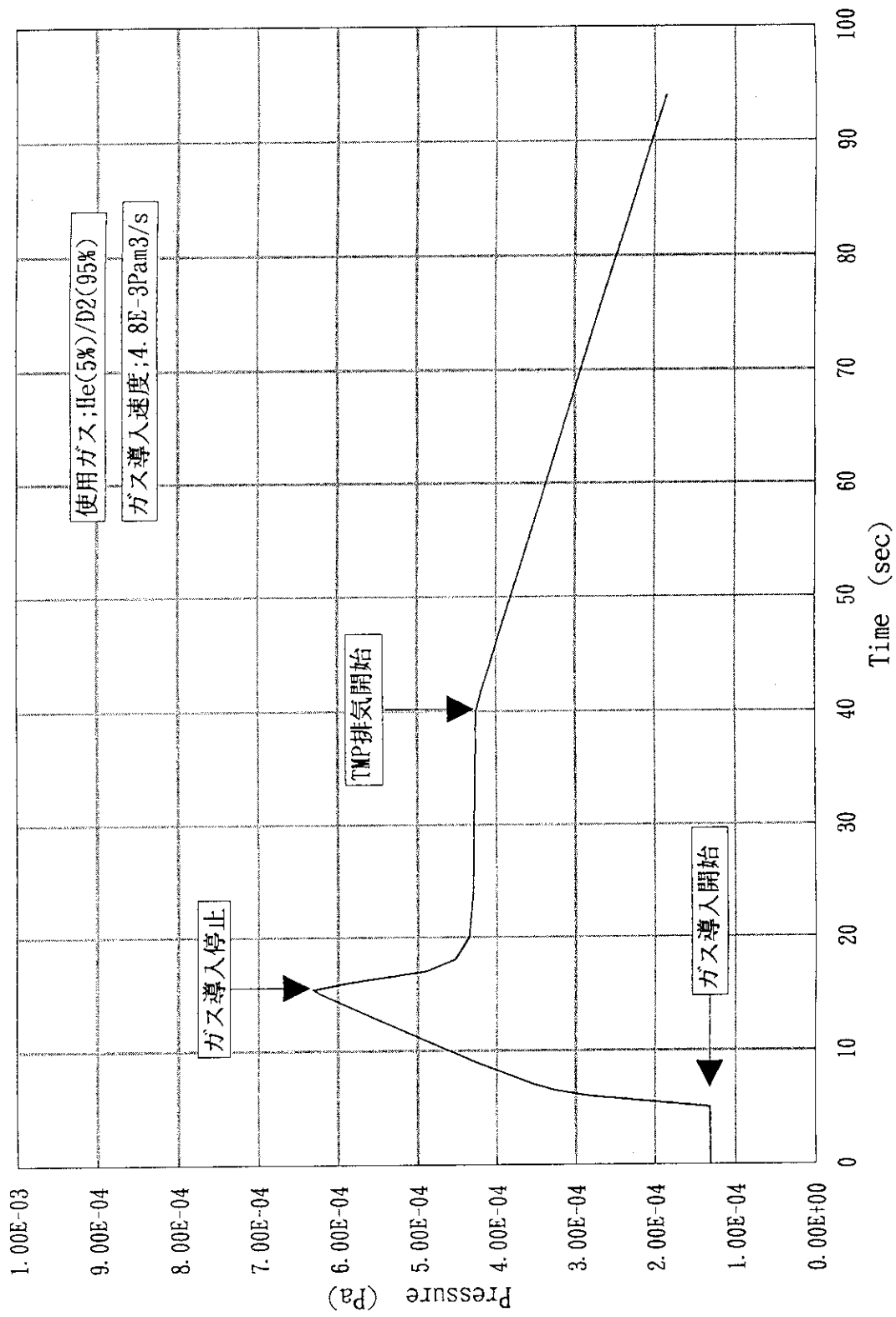
第3.4-1図 Arソープションポンプでの混合ガス排気実験時の質量分析計による He/D2分圧値測定



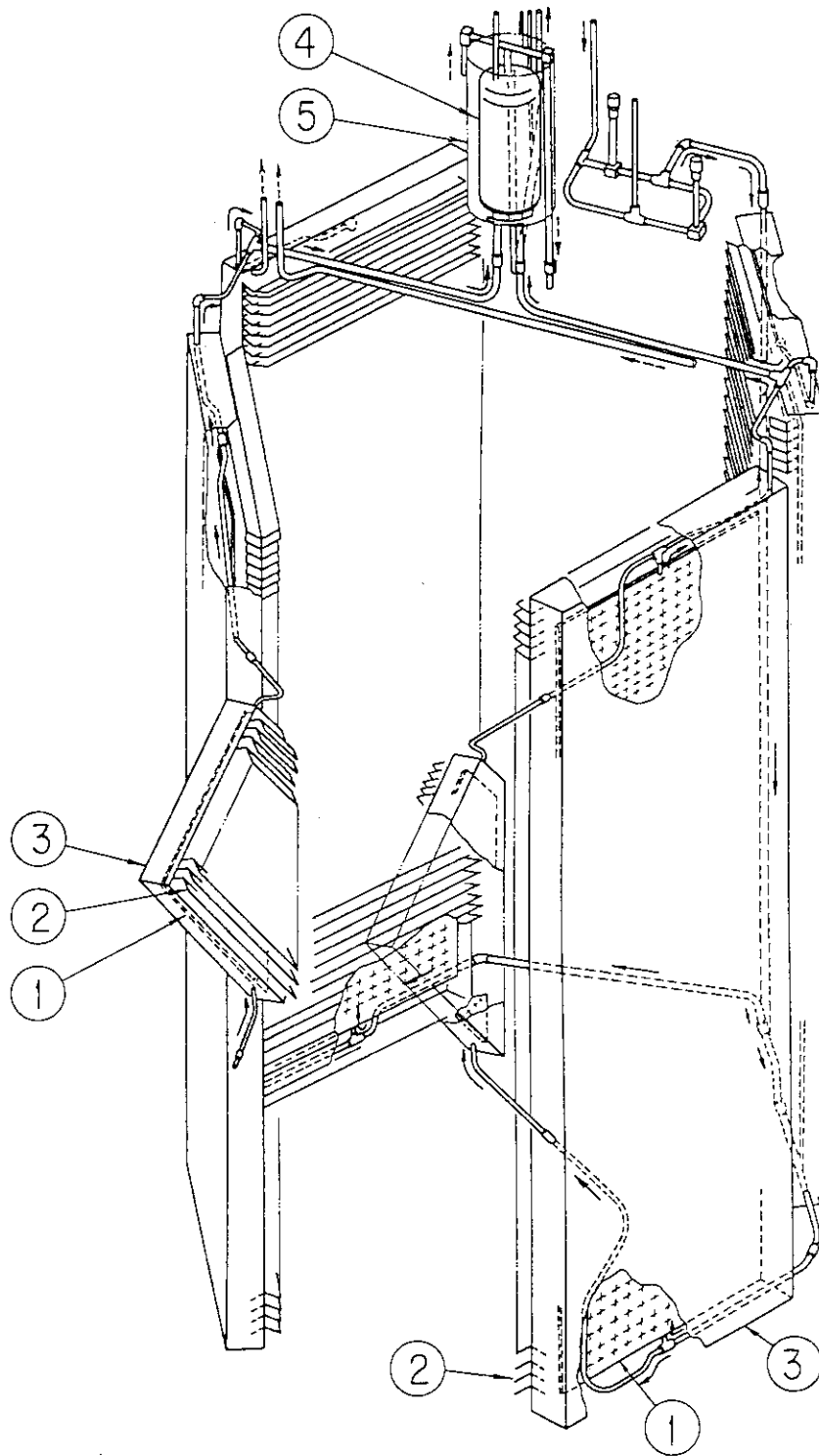
第3.4.2-1図 He分圧による排気速度グラフ (He; 50&D2; 50)



第3.4.2-2図 D2分圧による排気速度グラフ (He; 50 & D2; 50)

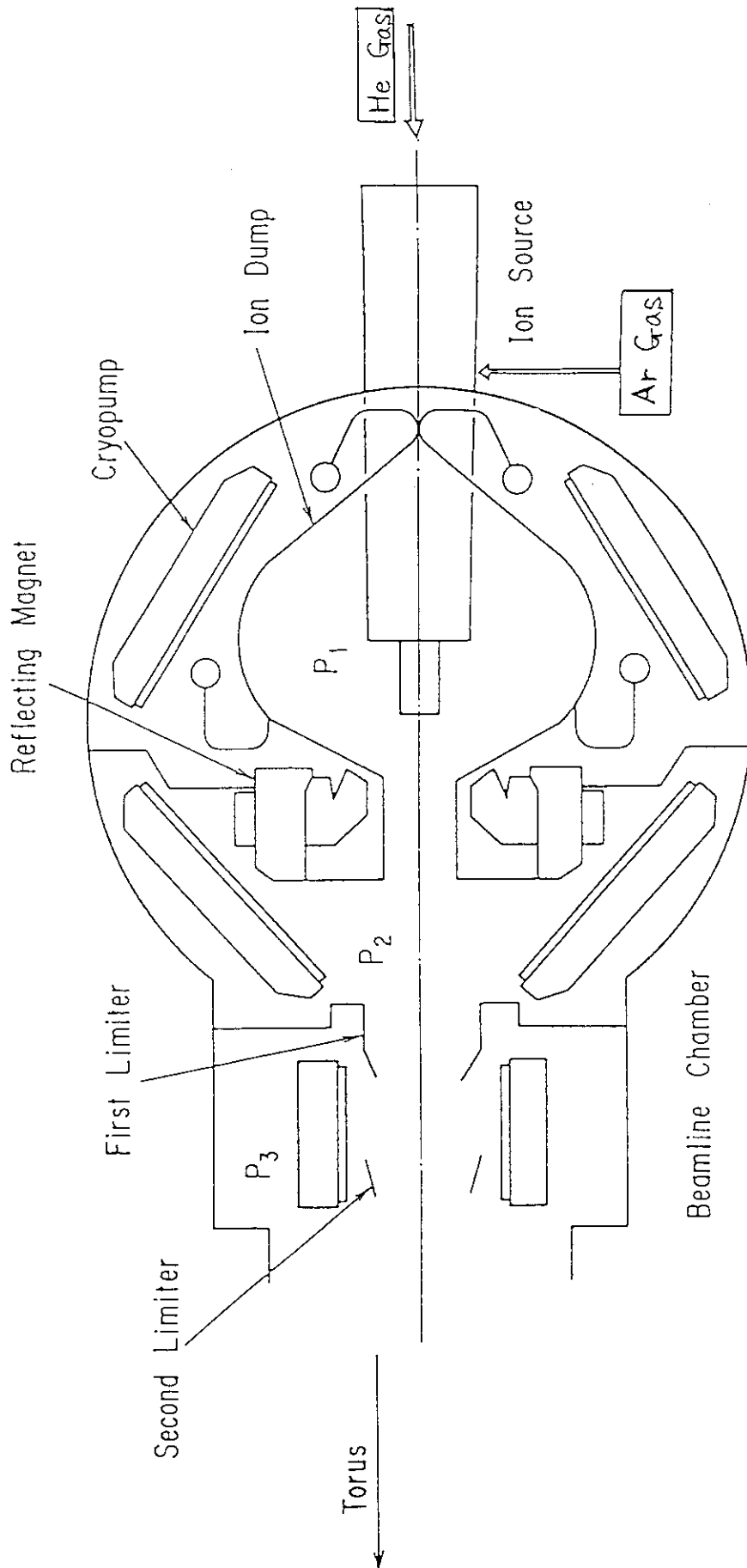


第3.4.4-1図 Ar凝縮層を形成しないときの混合ガス排気特性

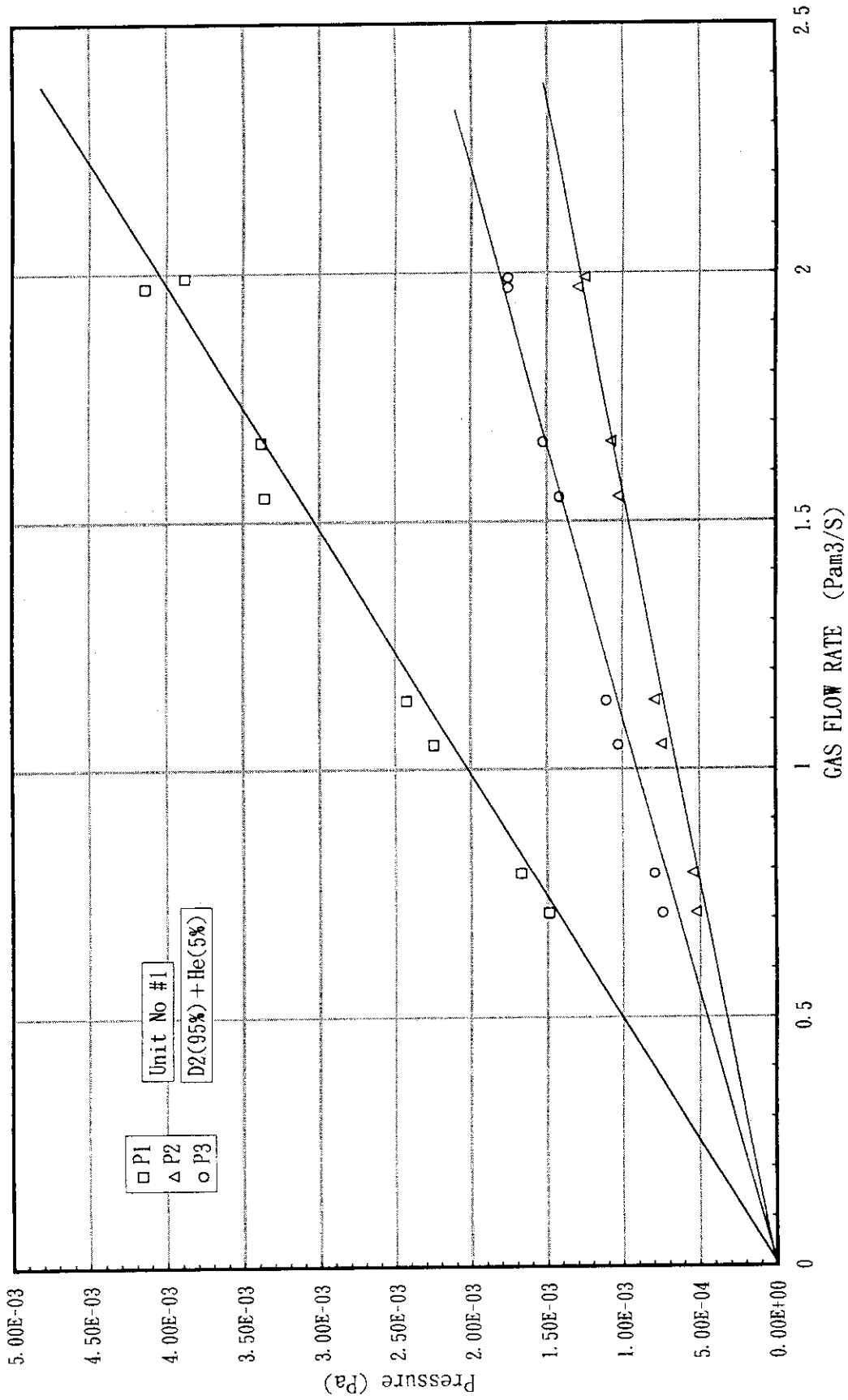


- | | |
|------------------|-------------------|
| ① CRYOPANEL | ④ PHASE SEPARATOR |
| ② CHEVRON BAFFLE | ⑤ THERMAL SHIELD |
| ③ THERMAL SHIELD | |

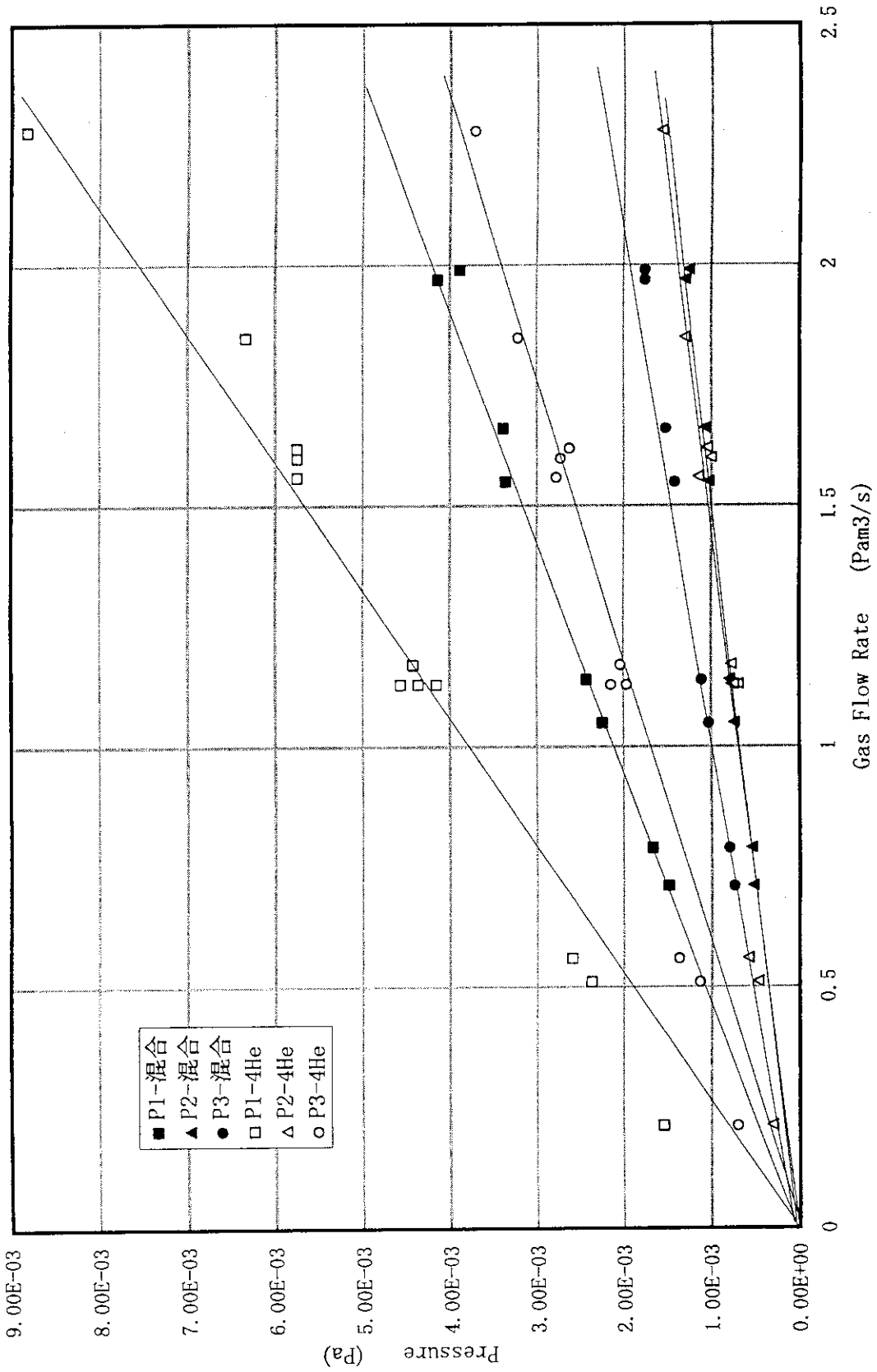
第4.1-1図 JT-60NBIクライオポンプ鳥瞰図



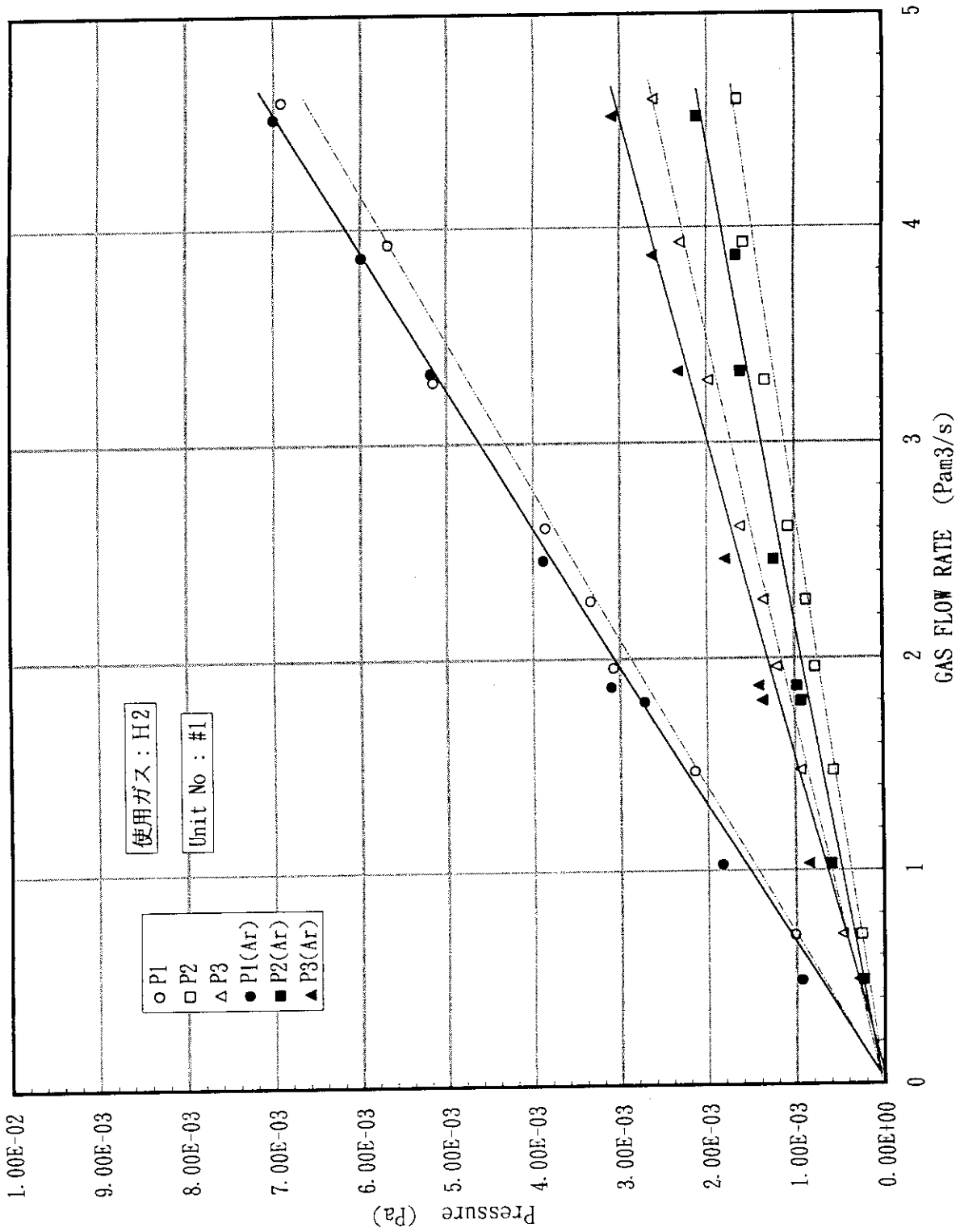
第4.1-2図 クライオポンプ断面図



第4.3.1-1図 Ar凝縮層を形成させた時の混合ガス排気特性



第 4.3.1-2 図 Ar 凝縮層使用時の混合ガス (D2 : 95 + He : 5) 及び 4He ガス 単独排気特性



第4.3.1-3図 Ar凝縮層形成の有無によるH2ガス排気特性