

JAERI - M
90-056

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

1990年3月

菊池 勝美・秋野 昇・飯田 一広・大内 章寿
大内 豊・小原 祥裕・国枝 俊介・栗山 正明
柴沼 清・関 昌弘・大楽 正幸・田中 茂
寺門 拓也・野本 弘樹・蛭田 和治・松岡 守

JAERI-M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、お申しこしてください。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。

JAERI-M reports are 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, 1990

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 山出軽印刷所

SF₆凝縮層を用いたJT-60 NBIクライオポンプでのヘリウム排気試験

日本原子力研究所那珂研究所 JT-60 試験部

菊池 勝美 ・秋野 昇 ・飯田 一広⁺ ・大内 章寿
大内 豊 ・小原 祥裕⁺ ・国枝 俊介 ・栗山 正明
柴沼 清⁺⁺ ・関 昌弘⁺ ・大楽 正幸⁺ ・田中 茂⁺
寺門 拓也⁺⁺ ・野本 弘樹 ・蛭田 和治 ・松岡 守

(1990年2月19日受理)

JT-60 NBI 加熱装置において長パルスヘリウムビーム実験を行う際、大容量のヘリウムガス排気ポンプが必要となった。この大容量ヘリウム排気ポンプとして、原研で独自に開発を行っているSF₆凝縮層を吸着媒とするクライオソープションポンプを採用し、既存の水素排気用JT-60 NBIクライオポンプを小改造することにより、JT-60への長パルスヘリウムビーム入射を可能とした。ヘリウムガスに対する排気速度は約800 m³/secに達した。また、本クライオソープションポンプは、ビーム入射中でも正常に作動することが確認された。

Helium Gas Evacuation Experiment by Cryopump of JT-60 NBI
with Condensed SF₆ Layers

Katsumi KIKUCHI, Noboru AKINO, Kazuhiro IIDA⁺, Syoujyu OOUTI
Yutaka OOUTI, Yoshihiro OHARA⁺, Shunsuke KUNIEDA, Masaaki KURIYAMA
Kiyoshi SHIBANUMA⁺⁺, Masahiro SEKI⁺, Masayuki DAIRAKU⁺
Shigeru TANAKA, Takuya TERAOKA⁺⁺, Hiroki NOMOTO
Kazuharu HIRUTA and Mamoru MATSUOKA

Department of JT-60 Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 19, 1990)

In the long pulse helium beam injection into Tokamak by JT-60 NBI, a pumping system which can evacuate a large amount of the helium gas was required. A cryo-sorption pump by using SF₆ condensed layers which we developed originally was adopted as a helium gas pumping. The present cryopump in JT-60 NBI which evacuates the hydrogen gas was modified to the cryo-sorption pump. The cryo-sorption pump enabled the long pulse helium beam operation in JT-60 NBI. The total pumping speed by one unit NBI system reached 800 m³/s for helium gas. The cryo-sorption pump was operated well during helium beam injection and any problem was not found.

Keywords: Helium Gas Evacuation, Condensed SF₆ Layers, JT-60, NBI,
Cryopump

+ Department of Thermonuclear Fusion Research

++ Fusion Experimental Reactor Team

目 次

1. はじめに	1
2. クライオポンプ及びSF ₆ 放出管の構成	2
2.1 NBIクライオポンプ	2
2.2 SF ₆ 放出管	2
2.3 電離真空計の校正	3
3. 実験手順	3
4. ヘリウム排気特性	3
4.1 排気特性のヘリウム導入量依存性	4
4.2 ヘリウム排気速度の概算	4
4.3 ヘリウムガス排気速度のガス吸着量による変化	5
5. ヘリウムビーム入射	5
6. クライオソーブションポンプの再生	6
7. ま と め	6
謝 辞	7
文 献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Cryopump and SF ₆ gas spout out tube system in JT-60 NBI	2
2.1 NBI cryopump	2
2.2 Spout out tube of SF ₆ gas	2
2.3 Calibration of ionization pressure gauge	3
3. Experimental procedures	3
4. Evacuation characteristics of helium gas with cryo-sorption pump	3
4.1 Dependence of helium feeding rate for evacuation characteristics	4
4.2 Rough estimation for helium pumping speed	4
4.3 Change of helium pumping speed with the amount of adsorbed helium	5
5. Injection of helium beam by JT-60 NBI	5
6. Regeneration of cryo-sorption pump	6
7. Summary	6
Acknowledgements	7
References	7

1. はじめに

将来の核融合炉では、D-T反応により生じる灰ヘリウムの制御が課題となる。したがって灰ヘリウムの輸送、排気は重要な研究項目の1つである。JT-60での灰ヘリウムの挙動を研究するためヘリウムガスパフ及び中性粒子加熱装置(NBI)でのヘリウムビームを用いての灰ヘリウムの輸送、排気実験¹⁾を実施した。

NBIでヘリウムビームを入射するには、ビーム入射時の多量の中性ヘリウムガスの排気を行うための大容量真空排気ポンプが必要となる。ヘリウムガスを排気するためには、機械式ポンプ、表面現象を利用したポンプ等があるが、大容量のヘリウムガスを排気するには表面現象を利用するクライオソープションポンプが適している。

大容量のヘリウムガスの排気に安定した排気特性を有するクライオソープションポンプとしては固体多孔質あるいは気体凝縮層をヘリウム吸着媒として用いる方式がある。固体多孔質吸着媒を用いたクライオソープションポンプとして活性炭やモリキュラシーブ等が最も良く知られ、多くの研究報告^{2, 3, 4)}がある。特に活性炭は優れた排気特性を有することが確認されているが、この場合クライオパネル排気面への吸着媒の接着が必要となる。この方式を既存設備のJT-60 NBIクライオポンプに採用するには大きな改造が必要となり、また接着剤の熱疲労による劣化も問題となってくる。これに対して気体凝縮層を用いたクライオソープションポンプの場合、凝縮層とパネル面の熱接触が非常に良く、凝縮層自体が運転サイクル毎に新しく形成されることから、吸着媒の劣化等の問題は避けられる。また、既存設備であるクライオポンプの改造を最小限に抑えることができるという利点もある。気体凝縮層を用いた方式としては、同伴凝縮によるアルゴントラッピングが良く知られている。同伴凝縮によるアルゴントラッピングは、クライオパネル吸着面近傍にアルゴンガスを導入して、このアルゴンガスがヘリウムガスを捕獲して、共にクライオ面に吸着するものであるが、同伴凝縮作用では排気しようとするヘリウムに対して、50～100倍程度のArガスを導入しなければ安定な排気特性が得られないことから、真空のベース圧が高くなってしまふ欠点⁴⁾がある。原研では数年前より独自にSF₆気体凝縮層を用いて小型クライオソープションポンプでの基礎的研究開発⁵⁾を行ってきた。SF₆ガスを用いたクライオソープションポンプは、ヘリウムガスの排気を行う前に、クライオパネル排気面にSF₆ガスを導入して、SF₆凝縮層を形成させ、SF₆凝縮層にヘリウムガスを捕獲する能力を持たせるものである。このため、ヘリウムガス排気時に同伴凝縮の様な吸着媒の同時導入を行う必要がなく、ベース圧を低く抑えることができる。吸着容量は4.2 Kのクライオパネル温度における最適なSF₆凝縮量の条件で、SF₆凝縮量の約50%のヘリウムガスを捕獲できることが基礎実験により確認されており、排気特性もArガス等に比べ非常に優れた特性を示すことが解っている。以上からJT-60 NBIではヘリウムビーム入射実験を実施するための大容量ヘリウム排気ポンプとして、既存設備である水素排気用クライオポンプの大幅な改造が不要で水素ビーム、ヘリウムビームとビーム種を変更しても排気ポンプの共用ができる利点を有するSF₆ガスを吸着媒に使用したクライオソープションポンプを採用することとした。

本報告は、JT-60 NBIにSF₆ガス凝縮層を利用したクライオソープションポンプを適用した場合のヘリウムガス排気試験結果、ヘリウムビーム入射時の排気特性等について述べたものである。

2. クライオポンプ及びSF₆放出管の構成

2.1 NBIクライオポンプ

JT-60 NBIは14ユニットのビームラインで構成されており、1ユニットのクライオポンプは計6枚のクライオポンプモジュールより構成されている。クライオポンプの全体図を図1に示す。これらのクライオポンプはNBIタンク内で差動排気系を構成するため、図2に示すように仕切板により仕切られた、P1、P2、P3の3つの部屋に2枚ずつ設置されている。各クライオポンプはステンレス鋼をキルティング構造にした3.5 Kまで冷却されるクライオパネルと液体窒素温度に冷却されるアルミニウム製のシェブロンバッフル、シールド板から構成されている。

NBIクライオポンプ面積は、P1、P2室ともに約7 m²、P3室は約1 m²となりNBI1ユニット当りの総面積は約15 m²となっている。これらクライオポンプは水素ガスに対して、合計1,370 m³ / secの排気速度⁶⁾を有する。

2.2 SF₆放出管

NBIクライオポンプはシェブロンバッフルが77 Kまで冷却されているために、凝縮温度222 KであるSF₆ガスをクライオポンプ外部から導入すると、SF₆ガスはすべてシェブロンに凝縮してしまう。このためSF₆ガスをパネル面へ凝縮させることを目的に外径6 mmのSF₆放出管をシェブロンバッフルとクライオパネルの間に新たに設置した。SF₆放出管の設置状態を図3に示す。放出管円周方向にはクライオパネル側に指向性を持たせるため、パネル中心及び中心から左右60°と3方向に直径0.3 mmの放出孔を設けた。長手方向には、圧力損失によるガス放出量不均衡を抑制するため放出孔ピッチ20～25 mmとする構造とした。また、低温下でのSF₆ガスの放出管内部での凝縮を防止するため、放出管を直接通電により昇温できる構造としている。尚、放出管はクライオポンプ内部のわずかな隙間に挿入してあるため、内部での接触があるとパネル、シェブロン等の昇温につながり、クライオポンプの運転に大きな障害を及ぼすため、放出管にスペーサーを設置し、シェブロンバッフルとクライオパネルとの熱及び電氣的絶縁を施した。

SF₆ガス導入系ラインを図4に示す。P1、P2室の大型クライオには左右対称に2本ずつ(放出管長3,500 mm)、P3室小型クライオは、中心付近に1本の放出管(放出管長850 mm)を設置している。

本報告は、JT-60 NBIにSF₆ガス凝縮層を利用したクライオソーブションポンプを適用した場合のヘリウムガス排気試験結果、ヘリウムビーム入射時の排気特性等について述べたものである。

2. クライオポンプ及びSF₆放出管の構成

2.1 NBI クライオポンプ

JT-60 NBIは14ユニットのビームラインで構成されており、1ユニットのクライオポンプは計6枚のクライオポンプモジュールより構成されている。クライオポンプの全体図を図1に示す。これらのクライオポンプはNBIタンク内で差動排気系を構成するため、図2に示すように仕切板により仕切られた、P1, P2, P3の3つの部屋に2枚ずつ設置されている。各クライオポンプはステンレス鋼をキルティング構造にした3.5 Kまで冷却されるクライオパネルと液体窒素温度に冷却されるアルミニウム製のシェブロンバッフル、シールド板から構成されている。NBIクライオポンプ面積は、P1, P2室ともに約7 m²、P3室は約1 m²となりNBI1ユニット当りの総面積は約15 m²となっている。これらクライオポンプは水素ガスに対して、合計1,370 m³/secの排気速度⁶⁾を有する。

2.2 SF₆放出管

NBIクライオポンプはシェブロンバッフルが77 Kまで冷却されているために、凝縮温度222 KであるSF₆ガスをクライオポンプ外部から導入すると、SF₆ガスはすべてシェブロンに凝縮してしまう。このためSF₆ガスをパネル面へ凝縮させることを目的に外径6 mmのSF₆放出管をシェブロンバッフルとクライオパネルの間に新たに設置した。SF₆放出管の設置状態を図3に示す。放出管円周方向にはクライオパネル側に指向性を持たせるため、パネル中心及び中心から左右60°と3方向に直径0.3 mmの放出孔を設けた。長手方向には、圧力損失によるガス放出量不均衡を抑制するため放出孔ピッチ20～25 mmとする構造とした。また、低温下でのSF₆ガスの放出管内部での凝縮を防止するため、放出管を直接通電により昇温できる構造としている。尚、放出管はクライオポンプ内部のわずかな隙間に挿入してあるため、内部での接触があるとパネル、シェブロン等の昇温につながり、クライオポンプの運転に大きな障害を及ぼすため、放出管にスペーサーを設置し、シェブロンバッフルとクライオパネルとの熱及び電気的絶縁を施した。SF₆ガス導入系ラインを図4に示す。P1, P2室の大型クライオには左右対称に2本ずつ(放出管長3,500 mm)、P3室小型クライオは、中心付近に1本の放出管(放出管長850 mm)を設置している。

2.3 電離真空計の校正

NBI主排気タンクの各部圧力の測定は、クライオソープションポンプの排気特性を調べる上で重要なものとなる。NBI主排気タンクには、図9に示す様にP1、P2、P3各室に電離真空計が設置されている。これらの電離真空計はBild-up法により校正を行った。基準真空計はタンクに取り付けているバロトロン真空計を用い、ガス導入系よりHeを一定流量導入し比較校正により各電離真空計のヘリウムに対する感度校正係数を求めた。

3. 実験手順

NBIクライオソープションポンプでのヘリウム排気試験及びヘリウムビーム入射実験を実施するまでの実験手順を図5に示す。NBI主排気タンクは補助真空排気系ターボ分子ポンプによりクライオポンプ作動圧まで排気が行われる。この状態にて冷媒循環系⁶⁾よりクライオポンプに液体ヘリウム、液体窒素を供給し、クライオパネルは3.5 K、その周囲に設置されているシェブロンバッフル、シールド板は77 Kに冷却される。この状態においては、SF₆ガス放出管は冷輻射により液体窒素温度付近まで冷却を受ける。SF₆ガスの凝縮点は222 Kと高いため、放出管内部でのガスの凝縮を避けるため、放出管自体に直接通電を行うことにより、昇温を行った。昇温操作は、クライオポンプへの熱負荷等、つまり液体ヘリウム気液分離器の液面及びクライオポンプのヘリウム蒸発量をモニターしながら、クライオパネル内の液体ヘリウム流動の不安定現象が起こらないように通電電流の調整をし、各放出管下流部に設置した熱電対温度で常温付近になるようにした。この状態においてSF₆ガスを一定流量で連続導入し、SF₆凝縮層の形成を行った。上記一連の実験手順におけるSF₆ガス放出管温度の傾向を図6に示す。SF₆ガス導入はP1、P2室の大型パネルで2～3 Pa m³ / sec、P3室小型パネルで1 Pa m³ / secであり、総導入量はP1、P2室でそれぞれ40,000 Pa m³、P3室で6,000 Pa m³、1ユニット計86,000 Pa m³であった。このSF₆導入量は、原型ユニットで予め行ったヘリウム排気試験及び小型クライオソープションポンプの基礎的実験データにより決めたものである。この状態でヘリウムビーム入射実験を含めたヘリウム排気試験を実施した。

4. ヘリウム排気特性

ヘリウムビーム入射実験に先立って、ヘリウム排気特性等の確認試験を実施した。ヘリウムガスの導入はイオン源より行い、SF₆ガス及びヘリウムガスの導入量は、サーマルマスフローメータにより測定した。ヘリウムガスの導入は以下の各条件を考慮して行った。

2.3 電離真空計の校正

NBI主排気タンクの各部圧力の測定は、クライオソープションポンプの排気特性を調べる上で重要なものとなる。NBI主排気タンクには、図9に示す様にP1, P2, P3各室に電離真空計が設置されている。これらの電離真空計はBild-up法により校正を行った。基準真空計はタンクに取り付けているバラトロン真空計を用い、ガス導入系よりHeを一定流量導入し比較校正により各電離真空計のヘリウムに対する感度校正係数を求めた。

3. 実験手順

NBIクライオソープションポンプでのヘリウム排気試験及びヘリウムビーム入射実験を実施するまでの実験手順を図5に示す。NBI主排気タンクは補助真空排気系ターボ分子ポンプによりクライオポンプ作動圧まで排気が行われる。この状態にて冷媒循環系⁶⁾よりクライオポンプに液体ヘリウム、液体窒素を供給し、クライオパネルは3.5 K、その周囲に設置されているシェブロンバッフル、シールド板は77 Kに冷却される。この状態においては、SF₆ガス放出管は冷輻射により液体窒素温度付近まで冷却を受ける。SF₆ガスの凝縮点は222 Kと高いため、放出管内部でのガスの凝縮を避けるため、放出管自体に直接通電を行うことにより、昇温を行った。昇温操作は、クライオポンプへの熱負荷等、つまり液体ヘリウム気液分離器の液面及びクライオポンプのヘリウム蒸発量をモニターしながら、クライオパネル内の液体ヘリウム流動の不安定現象が起こらないように通電電流の調整をし、各放出管下流部に設置した熱電対温度で常温付近になるようにした。この状態においてSF₆ガスを一定流量で連続導入し、SF₆凝縮層の形成を行った。上記一連の実験手順におけるSF₆ガス放出管温度の傾向を図6に示す。SF₆ガス導入はP1, P2室の大型パネルで2~3 Pa m³ / sec, P3室小型パネルで1 Pa m³ / secであり、総導入量はP1, P2室でそれぞれ40,000 Pa m³, P3室で6,000 Pa m³, 1ユニット計86,000 Pa m³であった。このSF₆導入量は、原型ユニットで予め行ったヘリウム排気試験及び小型クライオソープションポンプの基礎的実験データにより決めたものである。この状態でヘリウムビーム入射実験を含めたヘリウム排気試験を実施した。

4. ヘリウム排気特性

ヘリウムビーム入射実験に先立って、ヘリウム排気特性等の確認試験を実施した。ヘリウムガスの導入はイオン源より行い、SF₆ガス及びヘリウムガスの導入量は、サーマルマスフローメータにより測定した。ヘリウムガスの導入は以下の各条件を考慮して行った。

2.3 電離真空計の校正

NBI主排気タンクの各部圧力の測定は、クライオソープションポンプの排気特性を調べる上で重要なものとなる。NBI主排気タンクには、図9に示す様にP1, P2, P3各室に電離真空計が設置されている。これらの電離真空計はBild-up法により校正を行った。基準真空計はタンクに取り付けているバラトロン真空計を用い、ガス導入系よりHeを一定流量導入し比較校正により各電離真空計のヘリウムに対する感度校正係数を求めた。

3. 実験手順

NBIクライオソープションポンプでのヘリウム排気試験及びヘリウムビーム入射実験を実施するまでの実験手順を図5に示す。NBI主排気タンクは補助真空排気系ターボ分子ポンプによりクライオポンプ作動圧まで排気が行われる。この状態にて冷媒循環系⁶⁾よりクライオポンプに液体ヘリウム、液体窒素を供給し、クライオパネルは3.5 K、その周囲に設置されているシェブロンバッフル、シールド板は77 Kに冷却される。この状態においては、SF₆ガス放出管は冷輻射により液体窒素温度付近まで冷却を受ける。SF₆ガスの凝縮点は222 Kと高いため、放出管内部でのガスの凝縮を避けるため、放出管自体に直接通電を行うことにより、昇温を行った。昇温操作は、クライオポンプへの熱負荷等、つまり液体ヘリウム気液分離器の液面及びクライオポンプのヘリウム蒸発量をモニターしながら、クライオパネル内の液体ヘリウム流動の不安定現象が起こらないように通電電流の調整をし、各放出管下流部に設置した熱電対温度で常温付近になるようにした。この状態においてSF₆ガスを一定流量で連続導入し、SF₆凝縮層の形成を行った。上記一連の実験手順におけるSF₆ガス放出管温度の傾向を図6に示す。SF₆ガス導入はP1, P2室の大型パネルで2~3 Pa m³ / sec, P3室小型パネルで1 Pa m³ / secであり、総導入量はP1, P2室でそれぞれ40,000 Pa m³, P3室で6,000 Pa m³, 1ユニット計86,000 Pa m³であった。このSF₆導入量は、原型ユニットで予め行ったヘリウム排気試験及び小型クライオソープションポンプの基礎的実験データにより決めたものである。この状態でヘリウムビーム入射実験を含めたヘリウム排気試験を実施した。

4. ヘリウム排気特性

ヘリウムビーム入射実験に先立って、ヘリウム排気特性等の確認試験を実施した。ヘリウムガスの導入はイオン源より行い、SF₆ガス及びヘリウムガスの導入量は、サーマルマスフローメータにより測定した。ヘリウムガスの導入は以下の各条件を考慮して行った。

P : 圧力	2 : P 2 室
S : 排気速度	3 : P 3 室

その結果、NBIクライオソーブションポンプでの排気速度の概算値としてP 1, P 2室でそれぞれ約 $380 \text{ m}^3 / \text{sec}$, P 3室で $48 \text{ m}^3 / \text{sec}$, 合計約 $808 \text{ m}^3 / \text{sec}$ 程度を得た。尚、参考までに水素ガスにおけるクライオポンプの排気速度は、P 1, P 2室でそれぞれ $650 \text{ m}^3 / \text{sec}$, P 3室で $70 \text{ m}^3 / \text{sec}$, となり総排気量は $1,370 \text{ m}^3 / \text{sec}$ となっている。

4.3 ヘリウムガス排気速度のガス吸着量による変化

クライオソーブションポンプの性能を明確にする上で、ヘリウム吸着容量も重要なもの1つとなる。JT-60 NBIクライオソーブションポンプでのヘリウム飽和吸着量の確認は、14ユニットのNBIクライオポンプが並列運転されていることから、14ユニット全体の運転を優先することとしたために、再生状態となるヘリウム飽和吸着量までガスの導入はせず、ヘリウムビーム入射実験に必要なヘリウムガス量約 $2,000 \text{ Pa m}^3$ まで導入を行い終了した。これは、NBI約150ショットに相当する量である。

本実験におけるNBIクライオソーブションポンプでのヘリウム排気速度のガス吸着量による変化を図11に示す。P 1, P 2, P 3室とも試験終了まで安定した排気特性を示している。P 2室でのヘリウム吸着量約 $1,000 \text{ Pa m}^3$ までの排気速度が僅かに増加しているが、これは以下の理由による。つまり、小型クライオポンプを用いた実験結果⁵⁾よりSF₆ 気体凝縮層へのヘリウムガスの排気速度はあるヘリウム吸着量まで排気速度が上昇する傾向があることがわかっており、前述の等価回路の計算によりP 1, P 2, P 3の各部屋に流れ込むヘリウムガスの流量はイオン源から $2 \text{ Pa m}^3 / \text{sec}$ 導入した時で、それぞれP 1で $2.32 \times 10^{-1} \text{ Pa m}^3 / \text{sec} \cdot \text{m}^2$, P 2で $4.02 \times 10^{-2} \text{ Pa m}^3 / \text{sec} \cdot \text{m}^2$, P 3で $9.75 \times 10^{-2} \text{ Pa m}^3 / \text{sec} \cdot \text{m}^2$ となり、P 2室への流入量が他の部屋に比べ少ないものとなっている。P 1, P 3室の排気速度の上昇はヘリウム排気のごく初期の段階で終了しており、P 2室のみある時間まで排気速度が上昇したものである。

本実験の範囲では、排気速度の低下はほとんどなく、まだ十分な能力を残していると思われる。従来の基礎的実験データから判断して上記SF₆ ガス導入量においては、約 $25,000 \text{ Pa m}^3$ までのヘリウムガスを排気できると推測される。

5. ヘリウムビーム入射

ヘリウム排気試験を行った結果、ヘリウムビーム引出し時のヘリウムガス導入のパラメータにおいて、十分な排気能力を有することが確認できた。また、原型ユニットにおいて最大5秒間のヘリウムビーム引出しを実施、ビーム引出し時の排気安定性を確認した。

図12は実際にプラズマへのヘリウムビーム入射時のビームライン各室の圧力特性を示したものであり、ビームエネルギー 31.5 keV , 41.8 A のヘリウムビームを約2秒間の入射した際のもの

である。P 1, P 2 室の入射中の圧力の低下はビームポンピング作用によるものであり、P 3 室の圧力の上昇はドリフト部の再電離ビームが僅かに当たったことによるものである⁸⁾。このショットはヘリウムビーム入射が開始されて、数ショット後のデータのため再電離損失による影響がまだ大きく出ている。

また、図 12 よりクライオソーブションポンプの排気性能はヘリウムビームが運転中でも影響のないことが確認された。SF₆ ガスをクライオポンプに導入した状態でヘリウム排気を行っている際、NBI タンク内の SF₆ ガスの分圧は 0.5 % 以下であり、これはビーム中も変化することがなかった。

これら一連のヘリウムビーム入射実験では、約 20 ショットのヘリウムビーム入射が行われ、いずれも正常にプラズマへ入射され、かつビーム入射中の排気安定性が確認された。

6. クライオソーブションポンプの再生

クライオソーブションポンプを再生する際、他の 13 ユニット NBI クライオポンプは定常状態で運転しているために、クライオソーブションポンプへの液体ヘリウム、液体窒素供給バルブを閉とし、液体ヘリウムの自然蒸発によりパネル温度を 15 ~ 20 K 程度に上げ、吸着したヘリウムを脱離させた。

次に、再生時の圧力について述べる。これら一連のヘリウム排気試験で再生操作を、ヘリウム吸着量を変えて 3 サイクルほど行っており、その時のクライオソーブションポンプの再生時の圧力を図・13 に示す。ヘリウム吸着量 1,850 Pa m³ の時 39 分、1,500 Pa m³ の時 49 分、470 Pa m³ で 68 分経過後急激な圧力上昇により再生状態となった。ヘリウム吸着量が多いと再生までの時間が短くなっている。これは、クライオソーブションポンプ再生時にはクライオパネルが局所的に昇温して、ここに吸着していたヘリウムガスが放出され、他のまだ昇温していない凝縮層に再吸着される。この現象は、図 13 に見られる再生前に生ずる急激な圧力上昇のスパイクとして現れている。この際に、ヘリウム吸着量が多いと放出されるガス量が多くなり、これが再吸着される際に、クライオパネルの熱負荷となりパネルを昇温することで再生までの時間が短くなっている。

ヘリウムガス再生時における冷媒循環系の全体システムへの影響はほとんどなく、正常な状態で再生操作が行われた。

7. ま と め

JT-60 NBI において長パルスヘリウムビーム入射時のビームライン内のヘリウムガス排気のため、JT-60 NBI クライオポンプの一部を改造することにより大容量ヘリウムガスの排気が可能とした。

である。P 1, P 2 室の入射中の圧力の低下はビームポンピング作用によるものであり、P 3 室の圧力の上昇はドリフト部の再電離ビームが僅かに当たったことによるものである⁸⁾。このショットはヘリウムビーム入射が開始されて、数ショット後のデータのため再電離損失による影響がまだ大きく出ている。

また、図 12 よりクライオソーブションポンプの排気性能はヘリウムビームが運転中でも影響のないことが確認された。SF₆ ガスをクライオポンプに導入した状態でヘリウム排気を行っている際、NBI タンク内の SF₆ ガスの分圧は 0.5 % 以下であり、これはビーム中も変化することがなかった。

これら一連のヘリウムビーム入射実験では、約 20 ショットのヘリウムビーム入射が行われ、いずれも正常にプラズマへ入射され、かつビーム入射中の排気安定性が確認された。

6. クライオソーブションポンプの再生

クライオソーブションポンプを再生する際、他の 13 ユニット NBI クライオポンプは定常状態で運転しているために、クライオソーブションポンプへの液体ヘリウム、液体窒素供給バルブを閉とし、液体ヘリウムの自然蒸発によりパネル温度を 15 ~ 20 K 程度に上げ、吸着したヘリウムを脱離させた。

次に、再生時の圧力について述べる。これら一連のヘリウム排気試験で再生操作を、ヘリウム吸着量を変えて 3 サイクルほど行っており、その時のクライオソーブションポンプの再生時の圧力を図・13 に示す。ヘリウム吸着量 1,850 Pa m³ の時 39 分、1,500 Pa m³ の時 49 分、470 Pa m³ で 68 分経過後急激な圧力上昇により再生状態となった。ヘリウム吸着量が多いと再生までの時間が短くなっている。これは、クライオソーブションポンプ再生時にはクライオパネルが局所的に昇温して、ここに吸着していたヘリウムガスが放出され、他のまだ昇温していない凝縮層に再吸着される。この現象は、図 13 に見られる再生前に生ずる急激な圧力上昇のスパイクとして現れている。この際に、ヘリウム吸着量が多いと放出されるガス量が多くなり、これが再吸着される際に、クライオパネルの熱負荷となりパネルを昇温することで再生までの時間が短くなっている。

ヘリウムガス再生時における冷媒循環系の全体システムへの影響はほとんどなく、正常な状態で再生操作が行われた。

7. ま と め

JT-60 NBI において長パルスヘリウムビーム入射時のビームライン内のヘリウムガス排気のため、JT-60 NBI クライオポンプの一部を改造することにより大容量ヘリウムガスの排気が可能とした。

である。P 1, P 2 室の入射中の圧力の低下はビームポンピング作用によるものであり、P 3 室の圧力の上昇はドリフト部の再電離ビームが僅かに当たったことによるものである⁸⁾。このショットはヘリウムビーム入射が開始されて、数ショット後のデータのため再電離損失による影響がまだ大きく出ている。

また、図 12 よりクライオソーブションポンプの排気性能はヘリウムビームが運転中でも影響のないことが確認された。SF₆ ガスをクライオポンプに導入した状態でヘリウム排気を行っている際、NBI タンク内の SF₆ ガスの分圧は 0.5 % 以下であり、これはビーム中も変化することがなかった。

これら一連のヘリウムビーム入射実験では、約 20 ショットのヘリウムビーム入射が行われ、いずれも正常にプラズマへ入射され、かつビーム入射中の排気安定性が確認された。

6. クライオソーブションポンプの再生

クライオソーブションポンプを再生する際、他の 13 ユニット NBI クライオポンプは定常状態で運転しているために、クライオソーブションポンプへの液体ヘリウム、液体窒素供給バルブを閉とし、液体ヘリウムの自然蒸発によりパネル温度を 15 ~ 20 K 程度に上げ、吸着したヘリウムを脱離させた。

次に、再生時の圧力について述べる。これら一連のヘリウム排気試験で再生操作を、ヘリウム吸着量を変えて 3 サイクルほど行っており、その時のクライオソーブションポンプの再生時の圧力を図・13 に示す。ヘリウム吸着量 1,850 Pa m³ の時 39 分、1,500 Pa m³ の時 49 分、470 Pa m³ で 68 分経過後急激な圧力上昇により再生状態となった。ヘリウム吸着量が多いと再生までの時間が短くなっている。これは、クライオソーブションポンプ再生時にはクライオパネルが局所的に昇温して、ここに吸着していたヘリウムガスが放出され、他のまだ昇温していない凝縮層に再吸着される。この現象は、図 13 に見られる再生前に生ずる急激な圧力上昇のスパイクとして現れている。この際に、ヘリウム吸着量が多いと放出されるガス量が多くなり、これが再吸着される際に、クライオパネルの熱負荷となりパネルを昇温することで再生までの時間が短くなっている。

ヘリウムガス再生時における冷媒循環系の全体システムへの影響はほとんどなく、正常な状態で再生操作が行われた。

7. ま と め

JT-60 NBI において長パルスヘリウムビーム入射時のビームライン内のヘリウムガス排気のため、JT-60 NBI クライオポンプの一部を改造することにより大容量ヘリウムガスの排気が可能とした。

JT-60 NBIクライオソーブションによるヘリウム排気試験及びヘリウムビーム入射で以下のことを明らかにした。

- (1) クライオパネル面にSF₆凝縮層を設けるためSF₆放出管を製作した。ヘリウム排気特性からみて一様なSF₆凝縮層によるクライオソーブションポンプの形成を可能としたといえる。
- (2) クライオソーブションポンプのヘリウムに対する排気速度は、NBI1基で約800 m³/secとヘリウムガスに対して世界最大を記録した。これは本クライオポンプでの水素ガス排気速度の60%に相当するものである。
- (3) ヘリウムビーム入射実験中も安定な排気特性を示し、ヘリウムビーム入射が正常に行われた。

謝 辞

本実験を行うに当たって、第4試験室及び加熱工学第1研究室の皆様終始協力と有益な議論をして頂きましたこと感謝いたします。本研究遂行に際し、ご指導と激励を頂いた、田中正俊那珂研究所所長、飯島勉JT-60試験部部長、及び田中祐二同次長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) H. Nakamura et al. : IAEA TECHNICAL COMMITTEE MEETING ON ALPHA PARTICLE CONFINEMENT AND HEATING, KIEV, USSR, OCT. 23-26. 1989.
- 2) H. C Hseuh et al. : 8th symp. on Engineering Fusion Research (1979) 1568.
- 3) 五明由夫他：日本原子力研究所レポート JAERI-M 82-037 (1982).
- 4) S. Kuribayashi et al. : 11th symp. Fusion Engineering (1985) 856.
- 5) 柴沼清他：真空. 31(5) p 311 1988.
- 6) 柴田猛順, 柴沼清：低温. 21(2) 1986.
- 7) 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).
- 8) 松岡守他：「JT-60 NBIにおけるドリフト管内の再電離損出の概算法」日本原子力研究所レポート JAERI-M 89-075 (1989).

JT-60 NBIクライオソープションによるヘリウム排気試験及びヘリウムビーム入射で以下のことを明らかにした。

- (1) クライオパネル面にSF₆凝縮層を設けるためSF₆放出管を製作した。ヘリウム排気特性からみて一様なSF₆凝縮層によるクライオソープションポンプの形成を可能としたといえる。
- (2) クライオソープションポンプのヘリウムに対する排気速度は、NBI1基で約800 m³/secとヘリウムガスに対して世界最大を記録した。これは本クライオポンプでの水素ガス排気速度の60%に相当するものである。
- (3) ヘリウムビーム入射実験中も安定な排気特性を示し、ヘリウムビーム入射が正常に行われた。

謝 辞

本実験を行うに当たって、第4試験室及び加熱工学第1研究室の皆様終始協力と有益な議論をして頂きましたこと感謝いたします。本研究遂行に際し、ご指導と激励を頂いた、田中正俊那珂研究所所長、飯島勉JT-60試験部部長、及び田中祐二同次長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) H. Nakamura et al. : IAEA TECHNICAL COMMITTEE MEETING ON ALPHA PARTICLE CONFINEMENT AND HEATING, KIEV, USSR, OCT. 23-26. 1989.
- 2) H. C Hseuh et al. : 8 th symp. on Engineering Fusion Research (1979) 1568.
- 3) 五明由夫他：日本原子力研究所レポート JAERI-M 82-037 (1982).
- 4) S. Kuribayashi et al. : 11 th symp. Fusion Engineering (1985) 856.
- 5) 柴沼清他：真空. 31(5) p 311 1988.
- 6) 柴田猛順, 柴沼清：低温. 21(2) 1986.
- 7) 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).
- 8) 松岡守他：「JT-60 NBIにおけるドリフト管内の再電離損出の概算法」日本原子力研究所レポート JAERI-M 89-075 (1989).

JT-60 NBIクライオソープションによるヘリウム排気試験及びヘリウムビーム入射で以下のことを明らかにした。

- (1) クライオパネル面にSF₆凝縮層を設けるためSF₆放出管を製作した。ヘリウム排気特性からみて一様なSF₆凝縮層によるクライオソープションポンプの形成を可能としたといえる。
- (2) クライオソープションポンプのヘリウムに対する排気速度は、NBI1基で約800 m³/secとヘリウムガスに対して世界最大を記録した。これは本クライオポンプでの水素ガス排気速度の60%に相当するものである。
- (3) ヘリウムビーム入射実験中も安定な排気特性を示し、ヘリウムビーム入射が正常に行われた。

謝 辞

本実験を行うに当たって、第4試験室及び加熱工学第1研究室の皆様終始協力と有益な議論をして頂きましたこと感謝いたします。本研究遂行に際し、ご指導と激励を頂いた、田中正俊那珂研究所所長、飯島勉JT-60試験部部長、及び田中祐二同次長に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) H. Nakamura et al. : IAEA TECHNICAL COMMITTEE MEETING ON ALPHA PARTICLE CONFINEMENT AND HEATING, KIEV, USSR, OCT. 23-26. 1989.
- 2) H. C Hseuh et al. : 8 th symp. on Engineering Fusion Research (1979) 1568.
- 3) 五明由夫他：日本原子力研究所レポート JAERI-M 82-037 (1982).
- 4) S. Kuribayashi et al. : 11 th symp. Fusion Engineering (1985) 856.
- 5) 柴沼清他：真空. 31 (5) p 311 1988.
- 6) 柴田猛順, 柴沼清：低温. 21 (2) 1986.
- 7) 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).
- 8) 松岡守他：「JT-60 NBIにおけるドリフト管内の再電離損出の概算法」日本原子力研究所レポート JAERI-M 89-075 (1989).

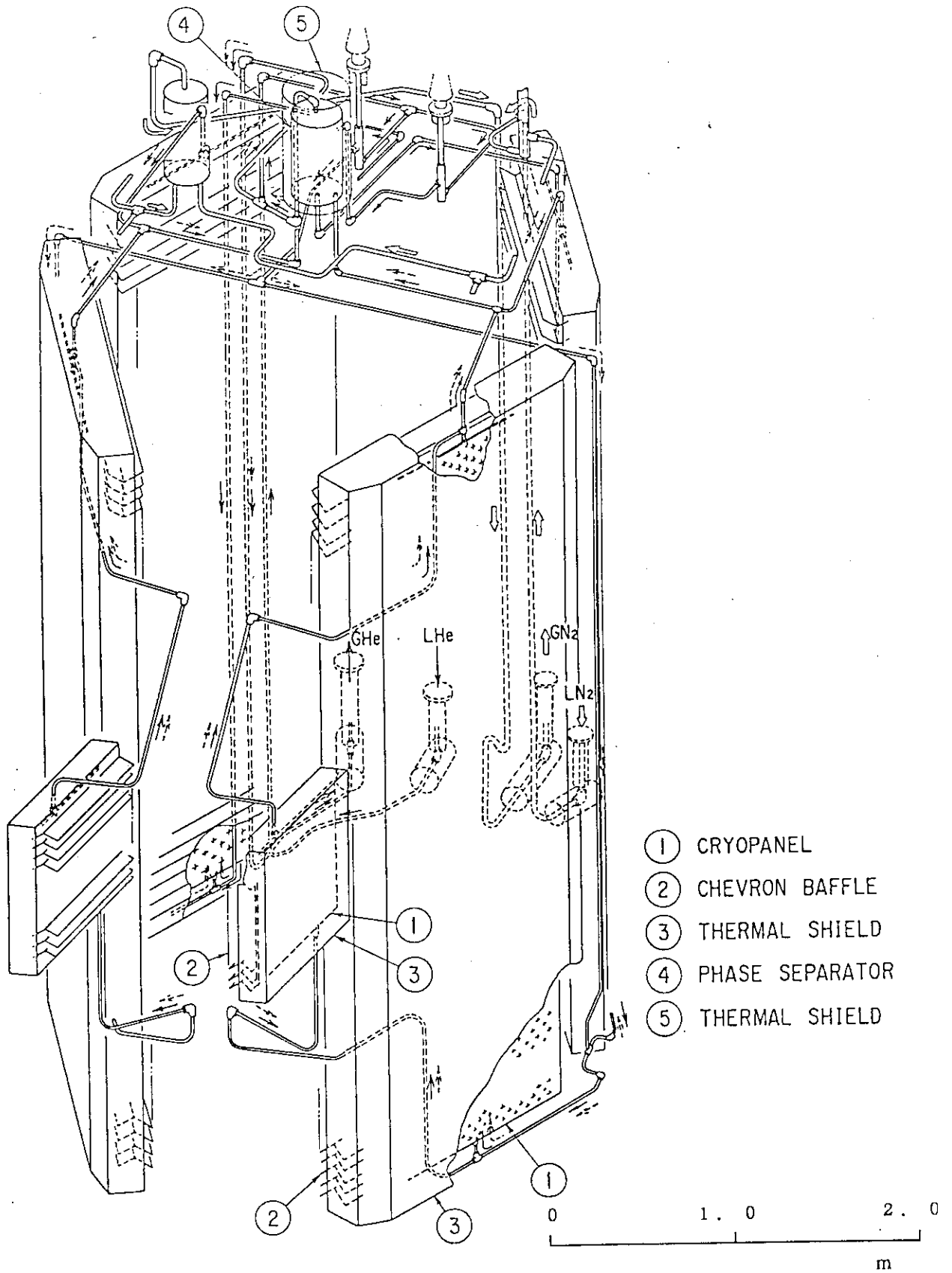


図1 クライオポンプ鳥瞰図

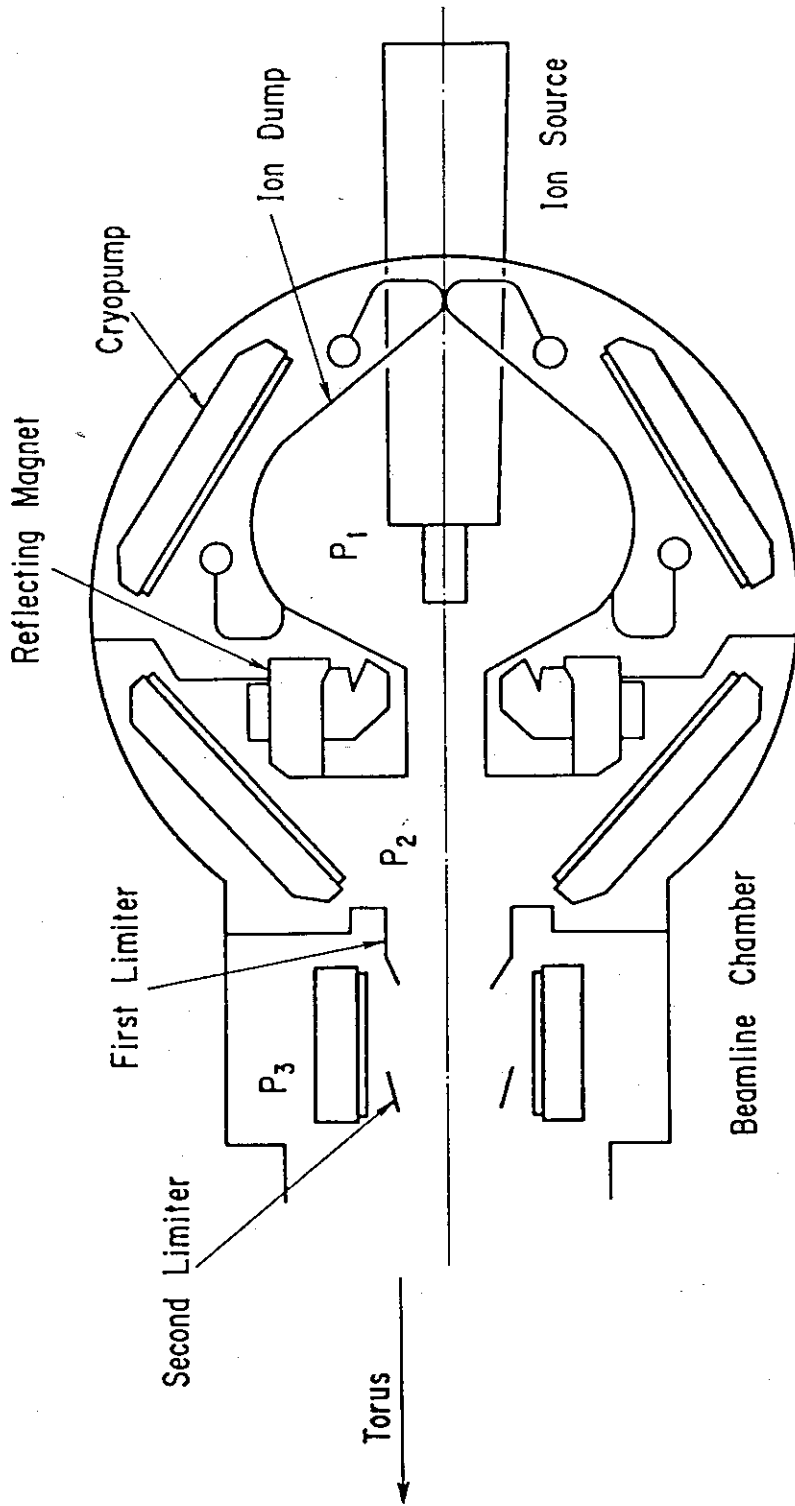


図2 NBI主排気タンク断面図

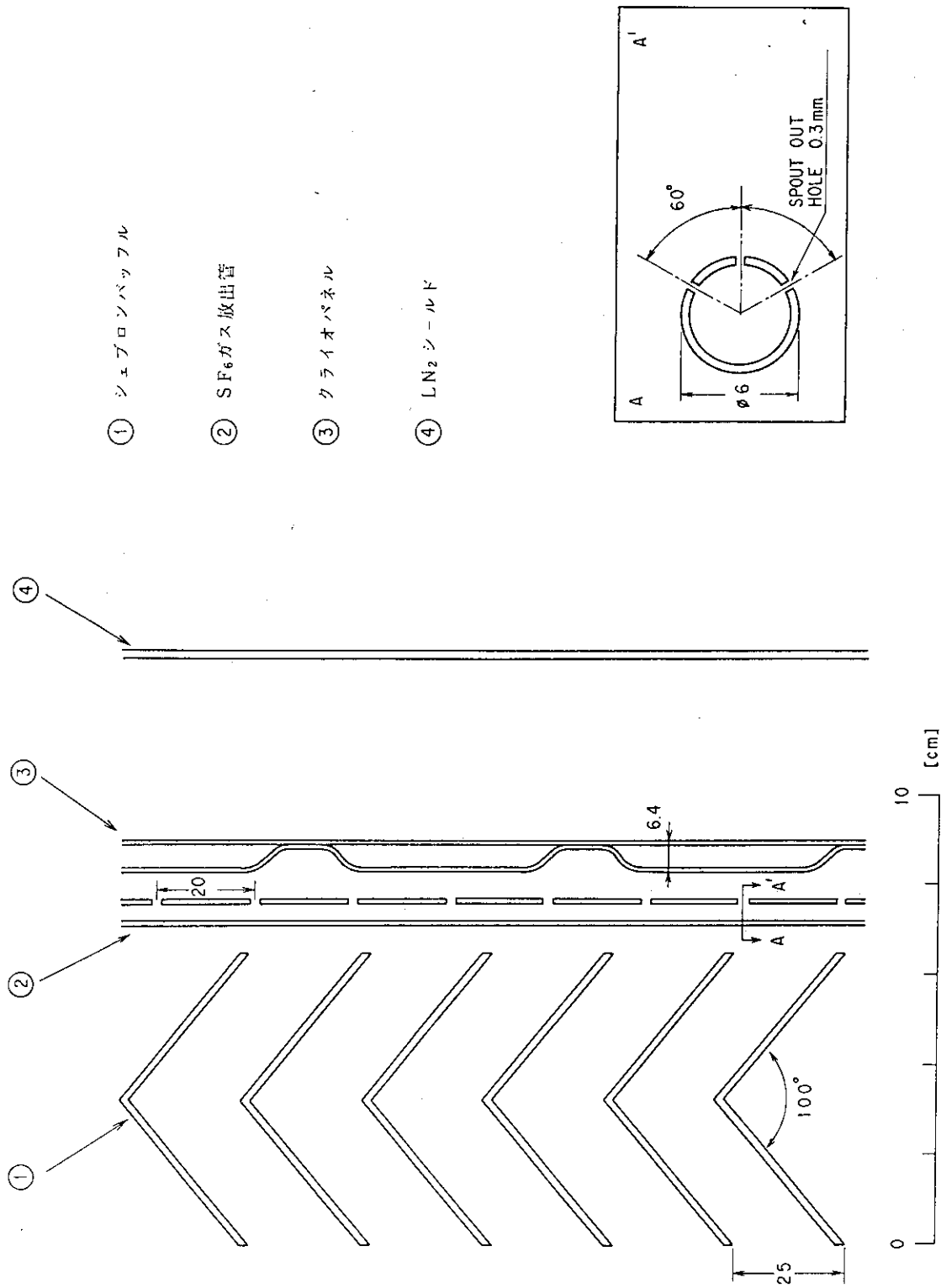


図3 SF₆放出管設置状態図

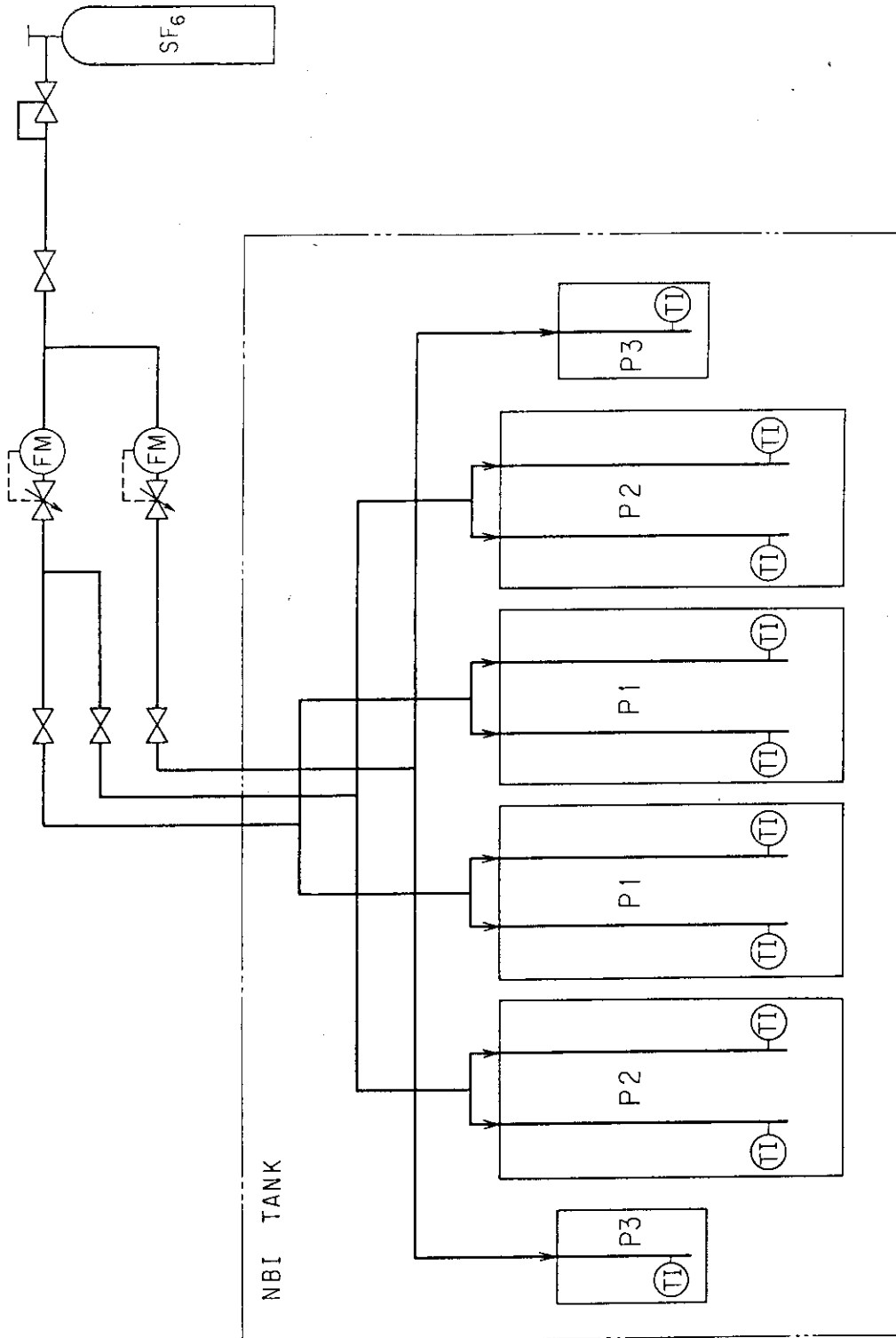


図4 SF₆ ガス導入系ライン

ターボ分子ポンプによるクライオポンプ
作動域まで N B I 主排気タンクの排気



冷媒循環系によりクライオポンプの冷却
シェブロンバッフル 77 K
クライオパネル 3.5 K



SF₆ ガス放出管の昇温
放出管温度 20 °C



SF₆ ガスを一定流量で導入
SF₆ 凝縮層の形成



He ガスの排気試験
He ビーム入射実験

図5 実験手順

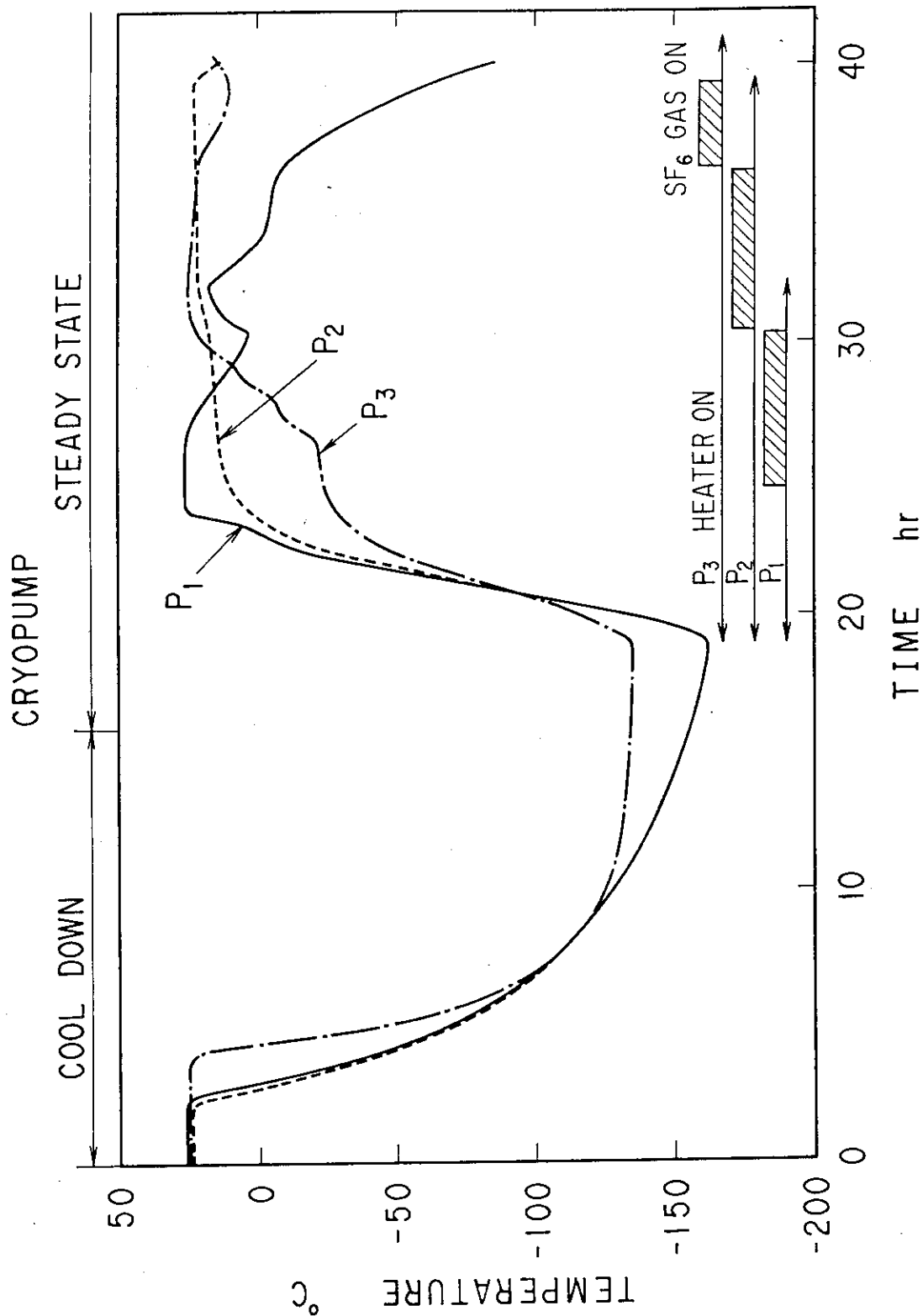


図6 SF₆ ガス放出管の温度傾向

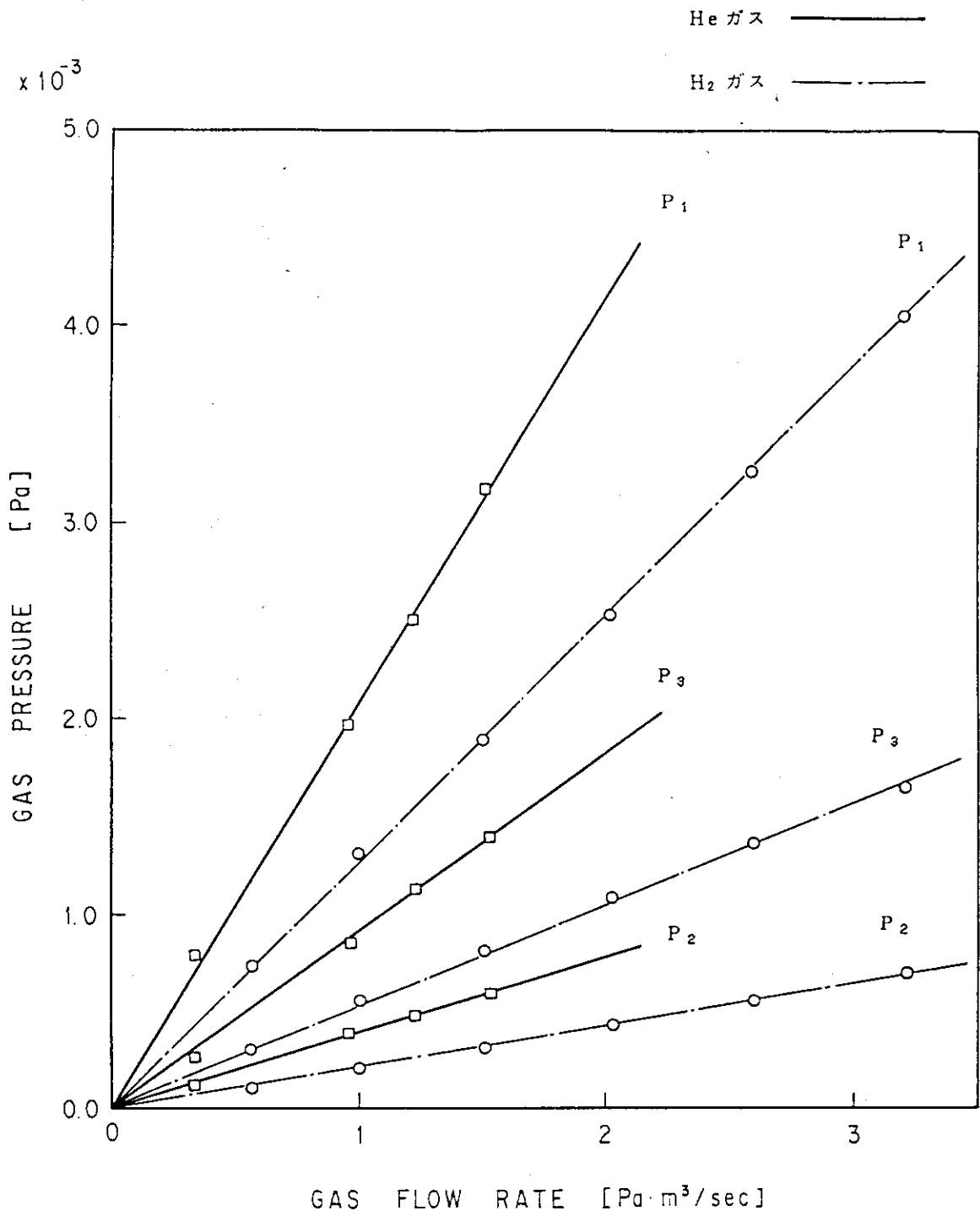


図7 水素、ヘリウムガス導入量による排気特性依存性

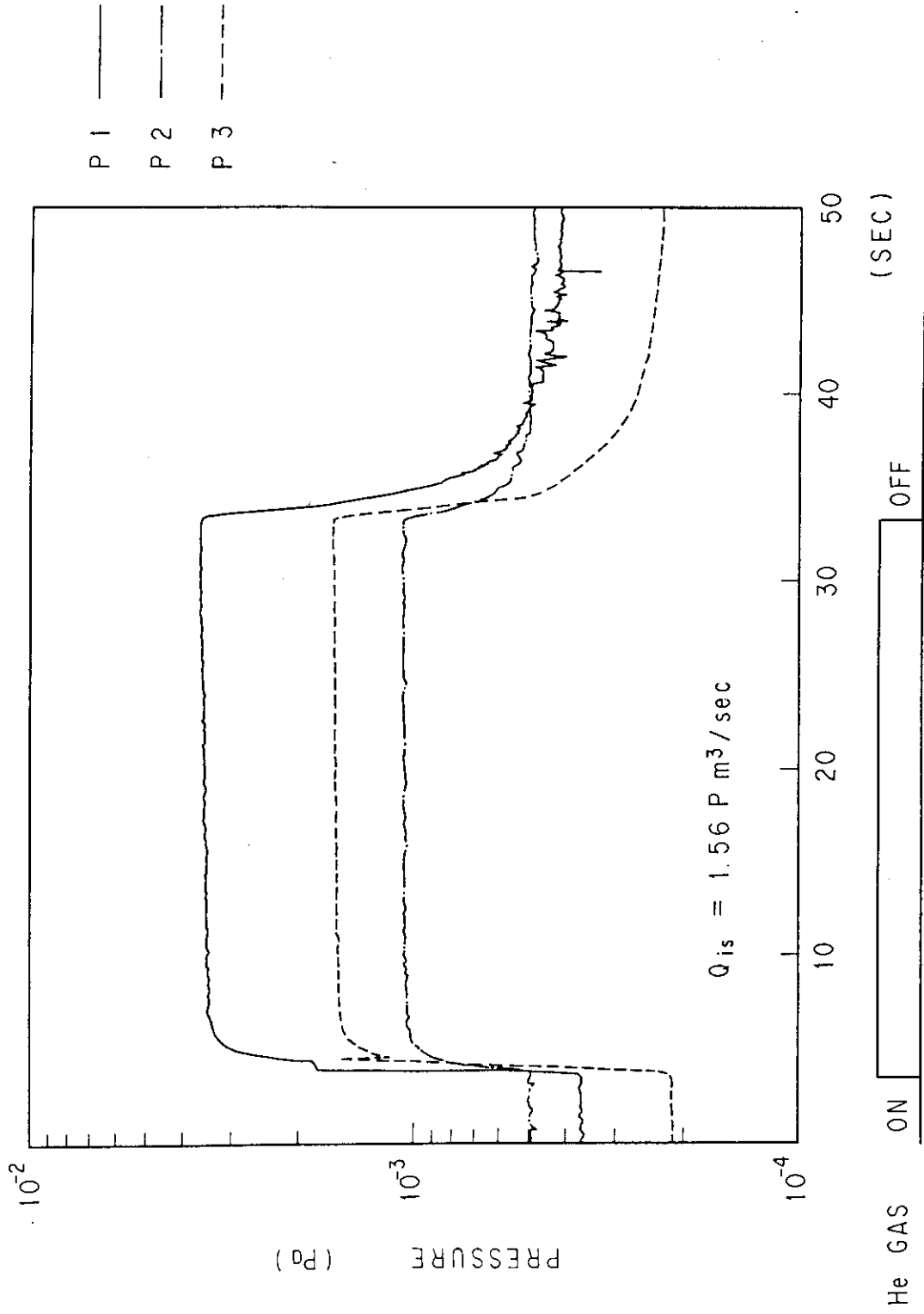


図8 ヘリウムガス導入時のビームライン各室の圧力特性

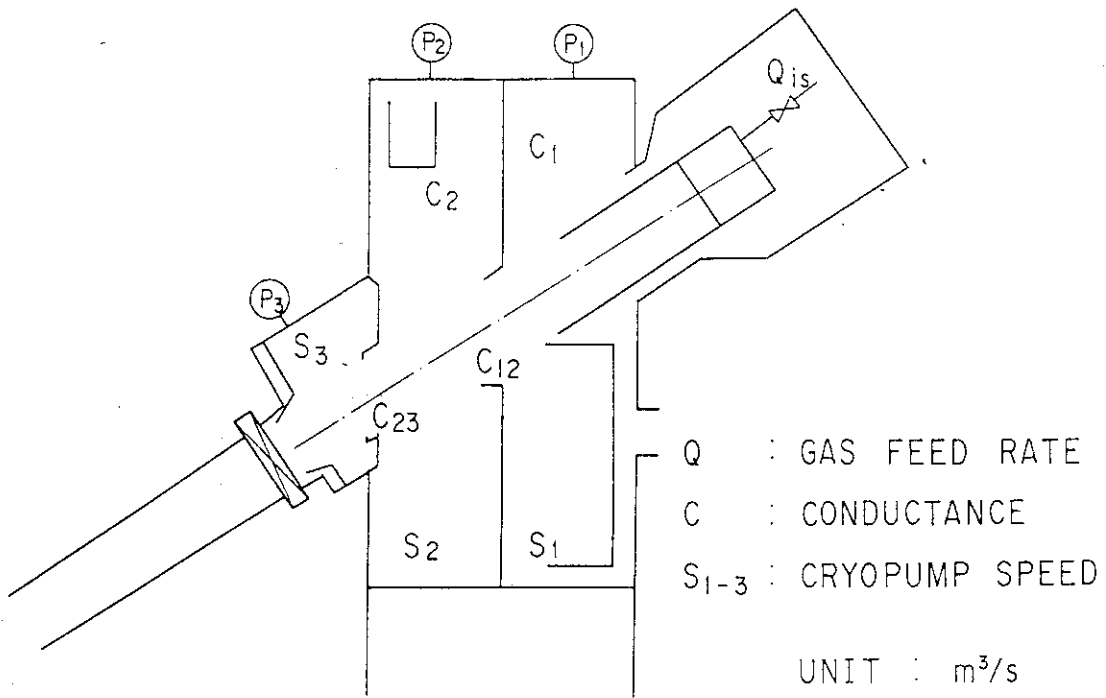


図9 NBI排気系の構成

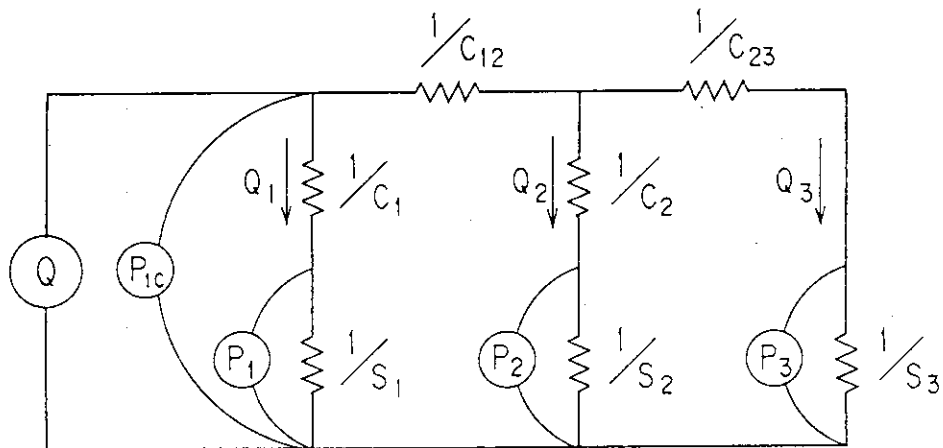
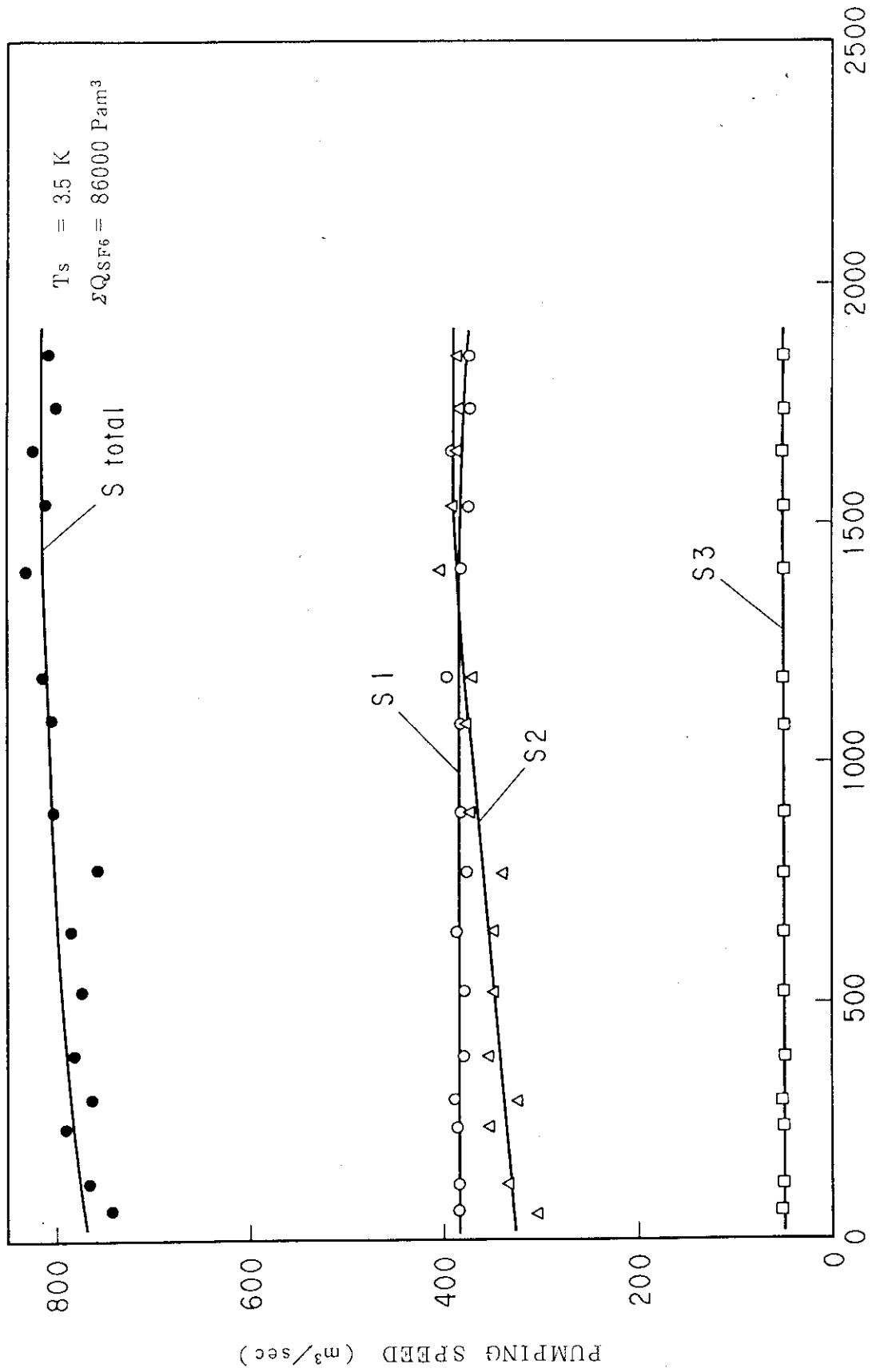


図10 NBI排気系の概略等価回路



HELIUM ADSORBED ΔQ_{He} (Pam³)
 図11 ヘリウム排気速度のヘリウム吸着量による変化

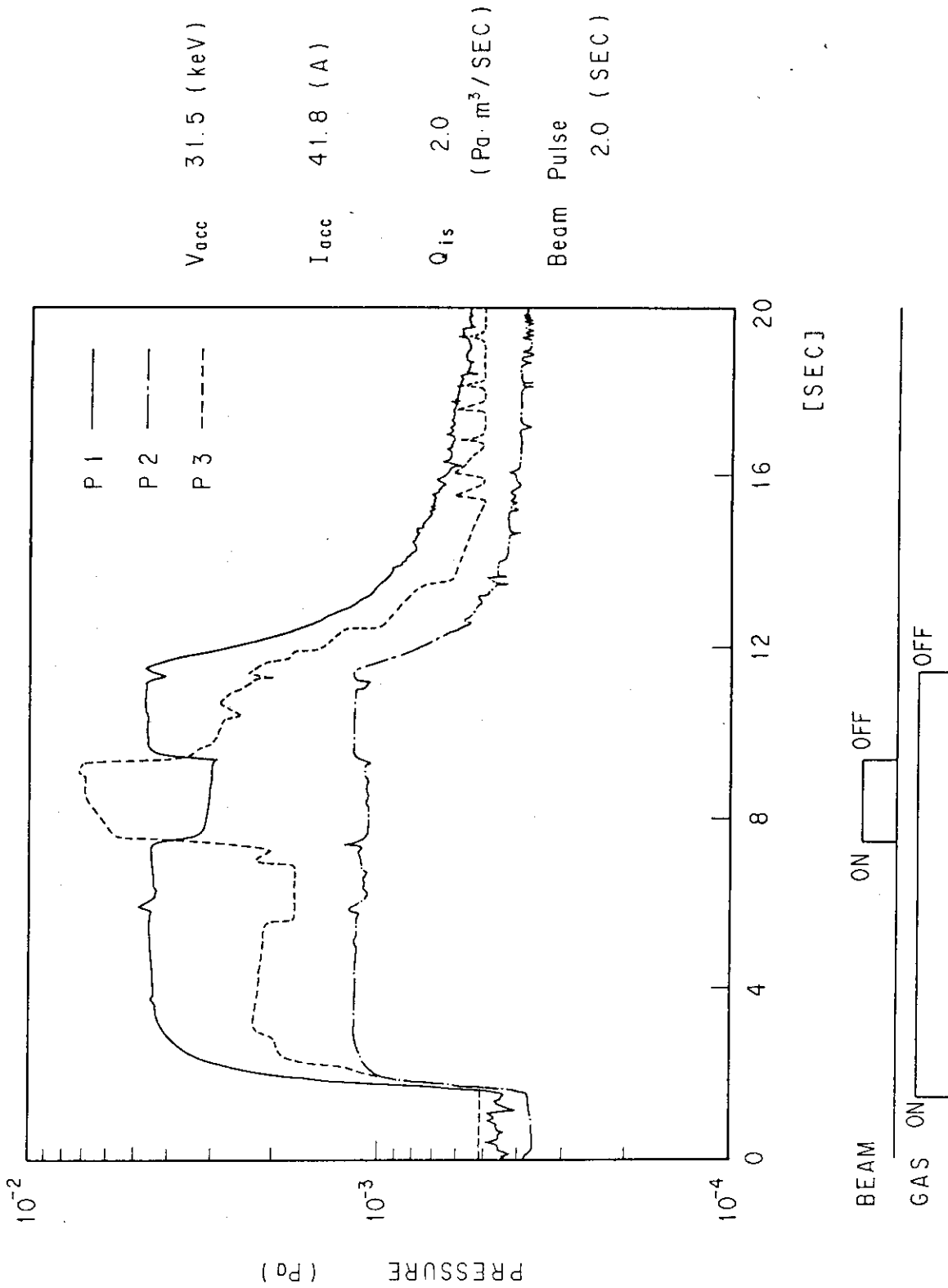


図12 ヘリウムビーム入射時のビームライン圧力

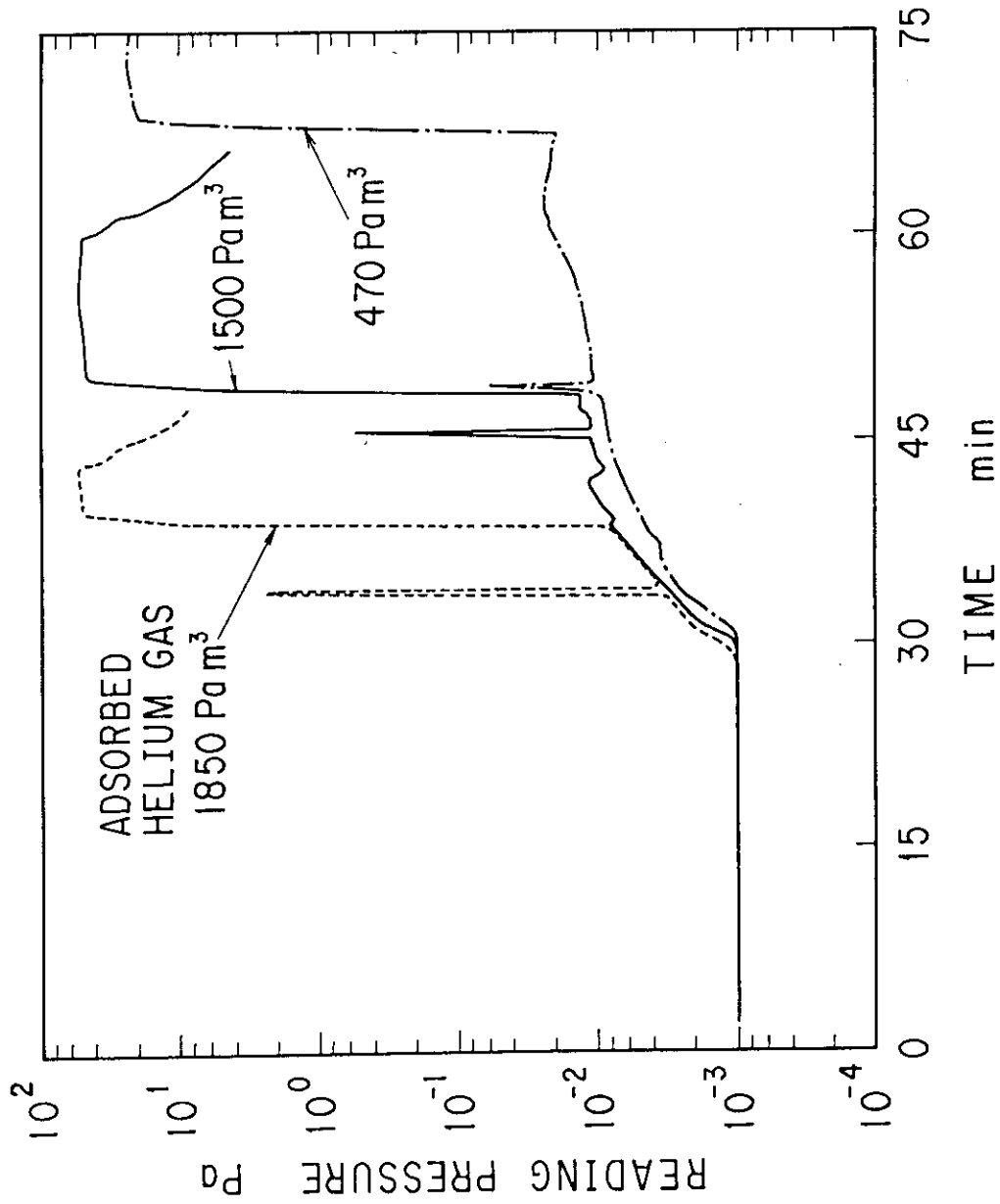


図13 クライオソープションポンプ再生時圧力のヘリウム吸着量による違い