

JAERI-Tech  
98-034



JT-60NB | クライオポンプを用いた  
ダイバータ排気システム

1998年8月

秋野 昇・栗山正明・大賀徳道・関 宏・棚井 豊

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。  
入手の間合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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 Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所

JT-60NBI クライオポンプを用いたダイバータ排気システム

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

秋野 昇・栗山 正明・大賀 徳道

関 宏・棚井 豊

(1998年7月9日受理)

NBI クライオポンプにより JT-60 の W 型ダイバータ部の排気を行うため、NBI 加熱装置の排気システムの改造を行った。3 基の NBI クライオポンプによりダイバータ部での重水素ガス排気速度が 13 ~ 15 頃 / s であることを確認した。また、ダイバータでのヘリウム灰排気の模擬実験において、アルゴンフロスト化したクライオポンプによりヘリウムと重水素の混合ガスが排気できることを実証した。更に、NBI ポート設置してある高速シャッタの開口率を調節できるように改造したことで、ダイバータ部の中性粒子圧力制御を可能にした。

Divertor Pumping System with NBI Cryopump for JT-60

Noboru AKINO, Masaaki KURIYAMA, Tokumichi OHGA,  
Hiroshi SEKI and Yutaka TANAI

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

(Received July 9, 1998)

The pumping system for JT-60 W-shape divertor with the NBI cryopump have been developed. The pumping speed achieved in the divertor region was  $13\sim 15\text{m}^3/\text{s}$  for deuterium gas with three units of the NBI cryopumps. In a simulation experiment of helium ash exhaust through the divertor, pumping of a mixed gas of helium and deuterium has been demonstrated using the NBI cryosorption pumps covered with an argon condensed layer. Control of neutral particle pressure in the divertor region became possible by having remodeled an aperture of the existing fast shutter, which is installed between the JT-60 vacuum vessel and NBI beam-line, to be regulated.

Keywords : Divertor Pumping, Cryopump, Fast Shutter, Deuterium Gas, NBI, Pressure Control

## 目 次

1. はじめに	1
2. NBIクライオポンプ	2
3. ダイバータ部排気系	3
4. 高速シャッタ	3
4.1 改造内容	4
4.2 改造のための予備試験	4
4.3 改造後の動作試験	5
5. ダイバータ部での排気速度測定	6
5.1 真空計の校正	6
5.2 排気速度測定	6
6. ダイバータでのヘリウム灰排気実験時のクライオポンプ性能	7
7. まとめ	7
謝辞	8
参考文献	8

## Contents

1. Introduction.....	1
2. NBI Cryopump.....	2
3. Divertor Pumping System.....	3
4. Fast Shutter.....	3
4.1 Remodeling of Fast Shutter.....	4
4.2 Preliminary Test for Remodeling.....	4
4.3 Motion Test after Remodeling.....	5
5. Measurement of Pumping Speed at Divertor Region.....	6
5.1 Calibration of Vacuum Gauge.....	6
5.2 Measurement of Pumping Speed.....	6
6. Cryopump Performance in Helium-ash Exhaust Experiment.....	7
7. Summary.....	7
Acknowledgements.....	8
References.....	8

## 1. はじめに

臨界プラズマ試験装置（以後「JT-60」という。）では平成9年2月～5月にかけて、オープンダイバータからW型ダイバータへの改造を行った。W型ダイバータ化に伴い、粒子バランスの観点からプラズマ定常状態を維持するには、最低限 NBI で補給される粒子を JT-60 真空容器に付随する真空ポンプで排気する必要があり、このための大容量真空排気ポンプが必要となった。大容量真空排気ポンプとしては、JT-60 の真空容器内部に設置するタイプと、真空容器外部に設置するタイプの2通りがある。真空容器内部に設置するタイプとしては DIII-D で採用しているようなダイバータ室内に設置するクライオポンプがあげられるが、液体ヘリウム、液体窒素の供給・循環系統及びクライオポンプ再生頻度、再生方法の問題、さらには、He 灰排気模擬実験時に本クライオポンプでどの程度ヘリウム排気が可能であるか、また、ヘリウム排気をどのような方式で行うか等不明な点が多い。一方、真空容器の外部に新たに大容量真空ポンプを設置する場合でも、必要排気速度に見合った排気ポンプの設置スペースを確保するのが困難である。そのため、大容量真空排気ポンプとして実績が有り、さらに He 灰排気模擬実験におけるヘリウム排気も可能にできる NBI クライオポンプを排気ポンプとして使用することとなった。排気に使用する NBI ビームラインの配置を第1図に示す。ダイバータ部排気に使用するクライオポンプは、ビーム入射加熱実験とダイバータ部排気特性との兼合いから、準垂直入射ビームラインの下ユニット（#1, #5, #11）の3ポートとし、トロイダル方向に分散させることによってトロイダル方向一様に排気できるようにした。さらに、各ビームラインには、JT-60 と NBI クライオポンプを真真空的に仕切り、JT-60 から NBI へのガス流入を抑制するための高速シャッタが設置されている。この高速シャッタの開口率をダイバータ排気実験時に 0、25、50、75、100%の5段階に自由に調整できるように改造した。また、この高速シャッタの開閉タイミング及び開口率の設定等は各ユニット独立に制御できるようにした。

あわせて、He 灰排気模擬実験でのヘリウムガス排気を可能とするため排気ユニットクライオポンプをアルゴン凝縮型ソープションポンプにするためのアルゴンフロスト化改造を実施した。この改造を実施することで、JT-60 ダイバータ実験時のヘリウムガスと重水素ガスの混合ガスの排気を可能とし、また、高速シャッタ開度調節により NBI 排気ポートのコンダクタンスを調節することでダイバータ部の中性粒子圧力制御が可能となった。これは、ダイバータでの粒子排気特性やダイバータでの粒子制御の研究を行う上で不可欠なものである。

本報告は、ダイバータ部の粒子を JT-60NBI クライオポンプで排気するために行った改造内容、改造後の単体試験結果及び、JT-60 ダイバータ放電時に於ける粒子排気特性について述べるものである。

## 2. NBI クライオポンプ

JT-60NBI 用クライオポンプは、イオン源及び中性化セルより流出する大量の水素及び重水素ガスを効率よく排気し、ビームライン内を  $10^{-3}\text{Pa}$  以下に保つことにより、高速水素（重水素）原子ビームが偏向磁石通過後に残留ガスと衝突して再びイオン化するのを最小限に抑えるためのものである。ビームライン内クライオポンプの配置は、効率よくガスを排気するために差動排気系を構成しており、第2図のクライオポンプ断面図に示すように  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  室の間に仕切板を入れた構造となっている。クライオポンプは主排気タンク内壁に沿って設置され、4枚の主クライオポンプモジュール ( $P_1$ 、 $P_2$  室；縦 3,900mm×横 900mm) と2枚のドリフト部クライオポンプモジュール ( $P_3$  室；縦 890mm×横 900mm)、1基の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。本クライオポンプは、水素ガスに対して約  $1,370\text{m}^3/\text{s}$  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ポンプである[1]。

クライオポンプ構成を大きな変更なしにダイバータ部を排気しようとするときのような問題があった。従来のガス導入経路はイオン源及び中性化セルからであったが、ダイバータ部排気として使用するときには、これとは逆に JT-60 側からガスが流入するため、①  $P_3$  室クライオポンプへの負荷が増大し、液体ヘリウムループにアンバランスが生じる。② He 排気模擬実験時は、Ar フロスト法によりヘリウムガスを排気することとなるが、Ar ガス導入部が中性化セルガス導入系であるため、JT-60 に近い  $P_3$  室に吸着する Ar ガス量が僅かとなり、①と同様に  $P_3$  室クライオポンプの負荷が増大し、液体ヘリウムループにアンバランスが生じる。そのため、 $P_3$  室クライオポンプにガスが吸着しないよう、表面にステンレス製の遮蔽板を取付けた。このことで、クライオポンプ全体の排気速度は5%程度低下することになるが、NBI 排気ポートのコンダクタンスを考慮すると、この低下は全く問題ないと思われる。また、従来はイオン源側からのガス導入に対して排気効率をよくして、JT-60 への流入ガスを少なくするようにするために、 $P_1$ ～ $P_2$  間に差動排気用仕切板を取付けていたが、JT-60 側からの排気効率を上げるために、この仕切板を取外した。

以下にダイバータ部排気に使用するクライオポンプの排気特性を示す。

### (1) クライオポンプの1ユニットあたりの排気速度

- ・  $\text{H}_2$  ガスに対して ;  $1,370\text{m}^3/\text{s}$ [2]
- ・  $\text{D}_2$  ガスに対して ;  $1,000\text{m}^3/\text{s}$
- ・ He ガスに対して (Ar フロスト) ;  $480\text{m}^3/\text{s}$ [3]
- ・ 混合ガス「He (5%) +  $\text{D}_2$  (95%)」に対して (Ar フロスト) ;  $700\text{m}^3/\text{s}$ [4]

### (2) 最大飽和吸着量 (クライオポンプ不安定領域になるときのクライオパネルガス吸着量)



- ・ H<sub>2</sub>ガス ; >30,000Pam<sup>3</sup>
- ・ D<sub>2</sub>ガス ; >30,000Pam<sup>3</sup>
- ・ Heガス ; 780Pam<sup>3</sup> (Ar フロスト)

H<sub>2</sub>、D<sub>2</sub>ガスはこれまで 30,000Pam<sup>3</sup>以上のガスを導入した実績がないので、実際の飽和吸着量は更に大きいと推定される。また、Ar フロスト法での He ガス排気では 780Pam<sup>3</sup>以上で排気が不安定になり、クライオパネルに吸着されたヘリウムガスが瞬間的に放出される現象が出てくる。

### 3. ダイバータ部排気系

ダイバータ部の粒子排気系は、第3図に示すように、内側ダイバータ部に排気口を設けて①ドーム下、②ダイバータ板とドーム接合部下、③ダイバータ板固定座の間及び、④パツフル板下を通して、NBI 排気ポートを経由しビームライン内のクライオポンプに至る排気流路となる。NBI 排気ポート部は、レーストラック構造をしており円筒に近似した概略寸法はφ600×3,200mmである。NBI ポート部のコンダクタンスは金属シールゲート弁及び高速シャッタを全開したとき、常温の重水素ガスに対して 17m<sup>3</sup>/sである。NBI ポート部を通過したガスは第2ビームリミタ、第1ビームリミタ及びガスリミタ等の狭隘部を通りクライオポンプに導かれる。第2ビームリミタ及び第1ビームリミタのコンダクタンスは、重水素ガスに対してそれぞれ 106m<sup>3</sup>/s、42m<sup>3</sup>/sである[5]。

### 4. 高速シャッタ

高速シャッタの本来の目的は、NBI から JT-60 へ中性ビームを入射するときに、真空容器内に充満している燃料ガスを NBI へ引き込まないために中性ビーム入射前後に開閉する高速遮断弁である。NBI へのガス流入を極力少なくするためには、ビーム入射の直前に瞬時に全開となり、ビーム入射終了直後に瞬時に全閉となる必要がある。また、高速シャッタは高速で開閉させるためにシール機能は有していないが、全閉状態の時にはガスの流入を極力低く押さえるようにガスのコンダクタンスを十分小さくしてある。さらに、高速シャッタはビーム入射前後に開閉するため、シャッタが完全に全開状態となる前にビーム入射が行われると、シャッタ弁板に中性ビームがあたり、装置の機能を損なう恐れがある。そのため高速動作に加えて確実に動作する構造となっている。

#### (1) 高速シャッタの構造及び基本仕様

高速シャッタの構造を第4図に示す。基本仕様は、

- ・ 開口部寸法 ; 600mm φ

- ・フランジ面間距離 ; 224mm
- ・揺動ベローズ寿命 ;  $3 \times 10^4$  サイクル
- ・閉時コンダクタンス ;  $0.2 \text{m}^3 / \text{s}$
- ・エアチャンバ容量 ; 8%

## (2) 動作シーケンス

高速シャッタの動作シーケンスの一例を第5図に示す。これまでは高速シャッタの停止位置は全開もしくは全閉のいずれかであり、中間開度位置で停止させる機能は有していなかった。全開から全開または全開から全閉の高速シャッタ動作時間は約700msecである。

### 4. 1 改造内容

ダイバータプラズマでのNBI加熱実験、あるいはHe灰排気の模擬実験においては、実験運転中に高速シャッタの開口率を変化させることによってNBI排気ポートのコンダクタンスを調整し、ダイバータ部の中性粒子圧力を制御する必要がある。そのため、上記の既設高速シャッタをシャッタ動作時間等の性能を出来るだけ低下させないようにして中間位置で停止できるように改造した。中間開度位置は、0%、25%、50%、75%、100%の5段階とし、停止位置の保持は、ディスクブレーキにより行う方式とした。

現状の高速シャッタ駆動系はそのままとして、開度のみを調整・設定するための開度設定装置をJT-60本体室内に設置した。中央制御室からの遠隔操作のため本体室現場盤と中央制御室の制御盤間の信号授受は、光ケーブルを使用した。また、装置の配置等を考慮してシャッタ板揺動軸にブレーキ機構と角度センサーを一体化して設置する構造とした。開度設定装置は、通常ディスクブレーキがかかった状態を維持している。高速シャッタ開閉指令により電磁ブレーキが解除され、その揺動軸の角度が設定値直前になったことをポテンショメータで検出し、素早くブレーキをかけることにより目標開度で停止する。高速シャッタの停止位置は中央制御室の制御盤から設定する。目標開度と停止位置の関係は、圧縮吸気供給用電磁弁の応答速度に多少の時間遅れがあるため、あらかじめ停止位置を目標開度より数%手前に設定することにより、規定の開度で停止するようにした。

### 4. 2 改造のための予備試験

現場での調整試験を容易にするため、予備品として保有している高速シャッタを改造し、予備的な動作試験を行った。高速シャッタ駆動構成図を第6図に示す。

高速シャッタの動作原理は、圧空シリンダの直線運動をリンク機構で回転運動に変え、シャッタ弁板の開閉動作を行うのが基本的な機構である。シャッタを中間位置で停止させるときの機器の動作は次の通りである。既設電磁弁; MV1 (以後「MV1」という。) を励磁することにより、空気供給ポートP~ポートBを経由し駆動シリンダ①側に圧縮空気が

供給される。駆動シリンダの空気圧上昇によってピストンが押し上げられ、シャッタが動作する。シャッタ動作と共に駆動シリンダ②の空気圧が圧縮される。排気調整電磁弁；MV3（以後「MV3」という。）を「開／閉」させ、空気圧を排気することにより駆動シリンダ①と②の空気圧がバランスし、シャッタは中間位置で停止する。

中間位置停止動作の試験中に、MV1の動作不安定現象が発生しシャッタが正常に動作しなくなった。シャッタ不安定現象はMV1の動作に起因して発生した。それは上記に示したように、MV1に供給する圧縮空気が空気供給ポートPからポートBに送られ、駆動シリンダ内を昇圧させているが、このときポートAにも大量（ポートA > B）の圧縮空気が流れてしまうことがある。MV1の異常発生原因は、MV3閉止時に排気ポート側背圧が急激に上昇し、MV1のパイロット弁棒及びピストン弁棒が何らかの外乱で中立状態となり、供給及び排気流路が混在する状態になったためと推測される。

そのため、第7図に示すようにMV1を3位置4ポート型電磁弁と交換した。、シャッタを中間位置で維持させるときは、シリンダ各室の空気が負荷に対応した圧力で密封され停止するようにした。さらに長時間停止状態を確保することが可能なように、セーフティロックバルブをスピードコントローラと電磁弁の間に挿入した。この改良により、シリンダ及び電磁弁の不安定動作はなくなった。

#### 4. 3 改造後の動作試験

高速シャッタの運転パターンの一例を第8図に示す。この運転パターンは、JT-60 全系制御の下で高速シャッタを運転する際の動作を示す。全系制御設備では、各ユニットの使用／不使用及び開放時期（ $T_0$ ）を設定し、また、NBI 高速シャッタ制御盤にて高速シャッタの開閉プレプロ（ $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ ・・・）を設定する。ここで、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ はシャッタ目標開度の保持時間を、 $R_1$ 、 $R_2$ は各ステップの目標開度を示す。また、 $\tau_{open}$ は目標開度位置に到達するまでの時間を示し、中間位置に停止させるときの時定数は約500msec、全閉の位置から全開とするとき又は、全開の位置から全閉とさせるときの時定数は約800msecである。

この開閉プレプロが全系制御及び、NBI 高速シャッタ制御盤からの指令により正常に動作することの確認試験を行った。試験の結果を第9図に示す。動作試験時の指令として、プラズマ着火； $T=0$ のタイミングから2秒後に#1が25%まで開動作を開始し、その後3秒間保持した後全閉となる。同じように#5、#11についてもそれぞれ2秒ずつ遅れて開閉動作を行うシーケンスである。第9図に示すようには全系で発信した高速シャッタ動作指令により、それぞれの高速シャッタが指令値通り動作している。#1、#5、#11の各シャッタの開放時期は、2秒ずつの時間差で正常に動作していることがわかる。

次に、全系制御設備と切り離し、手動にて高速シャッタを操作した結果を第10図に示す。設定開度は0→25%→50%→75%→100%及び、0%→100%→75%→50%→25%→0%とした。目

標開度に到達するまでの時定数は0%→100%及び100%→0%の時は約800msecである。また、中間位置に停止させるときは概ね500msecで目標開度に到達することが確認できた。

この高速シャッタの動作時間；全閉→全開又は全開→全閉時が約800msecは、改造前の動作時間(700msec)と比較してほぼ同程度であり、改造による性能劣化はほとんどないことがわかった。

## 5. ダイバータ部での排気速度測定

### 5. 1 真空計の較正

NBI クライオポンプを使用してダイバータ部排気実験を行うときの、ダイバータ室粒子排気効率を確認するために、排気パス経路における高速シャッタの前後の圧力測定を行うこととした。電離真空計取付位置の詳細を第11図に示す。一つはNBI主排気タンクに設置されているP3室電離真空計、もう一つはJT-60真空容器側のNBIポート部に取り付けられているドリフト部電離真空計とした。これらの真空計は、JT-60実験時の主要ガスである重水素ガスにて感度較正を行った。ドリフト部電離真空計の較正方法は、JT-60本体真空排気ポートに設置されている電離真空計との比較により行い、各真空排気設備の第一仕切弁を「閉」としビルドアップ法にて実施した。得られた比感度計数は#1；0.44、#5；0.56、#11；0.59である。また、P3室電離真空計については、従来から使用している比感度計数(#1；0.37、#5；0.48、#11；0.49)を採用した。

### 5. 2 排気速度測定

ダイバータ排気用クライオポンプの排気効率を確認するために、クライオポンプが定常運転状態にある時に、本体真空容器より重水素ガスを導入してクライオポンプによる排気速度を測定した。

#### (1) 測定手順

- a) 真空容器に付随する各真空排気設備の第1仕切り弁を「閉」として、真空容器内の排気を停止する。
- b) 本体真空容器にある一定圧力となるまで重水素ガスを導入する。
- c) ダイバータ排気ポンプ(#1, #5, #11)の金属シールゲート弁(以後「GV1と言う」)を「開」とする。
- d) GV1が全て「開」となったのを確認した後、高速シャッタの開度を目標開度に設定する。
- e) 高速シャッタの目標開度は、「100%、75%、50%、25%」の4点について排気デ

ータを取得する。

## (2) 試験結果

高速シャッタ開口率をパラメータとして、#1, #5, #11の3ユニットの高速シャッタを「開」としたときの圧力変化を第12～14図に示す。高速シャッタの開放タイミングは各ユニットとも同一時期に行った。何れのユニットも、高速シャッタを開操作した直後は、NBIポート部の圧力は急激に低下している。その後のガスの流れが準定常になった状態ではNBIポート部及びバッフル板排気溝等のコンダクタンスで一律にガスの排気が行われている。高速シャッタ開口率の違いによる各ユニットの排気特性は、シャッタ開口率が25%の時は、他の開口率に比べて排気効率が明らかに低下しているが、25%以上の開口率では顕著な差は認められない。これは、NBIビームライン、NBIポート及びバッフル板排気溝等のコンダクタンスがシャッタのコンダクタンスより明らかに小さいために、高速シャッタのコンダクタンスを変更しても有意な排気特性の差が見受けられないと思われる。また、高速シャッタの開口率を100%としたときの本体真空容器の排気時定数から、ダイバータ部に於けるNBIクライオポンプ3ユニット合計の排気速度は、重水素ガスに対して概略 $13\sim 15\text{m}^3/\text{s}$ であった。[6]

## 6. ダイバータでのヘリウム灰排気実験時のクライオポンプ性能

ダイバータ部でのヘリウム灰排気実験時におけるクライオポンプの排気結果データを第15図に示す。この図はJT-60プラズマ中にNBI#2及び#4ユニットから3秒間のヘリウムビームを入射し、その他の8ユニットは重水素ビームを入射したときの#5ユニットの圧力波形を示している。本実験では、#1及び#11ユニットについても同時にダイバータ部排気ポンプとして作動している。ヘリウムガス排気のために#1, #5, #11の3ユニット共、ヘリウムビーム入射前にアルゴンフロスト化を行ってヘリウムガス排気を可能としている。高速シャッタは、ヘリウムビーム入射の約2秒前に全開とし、ヘリウムビーム入射後約3秒経過してから全閉とした。高速シャッタ全開の状態ではヘリウムビームを3秒間入射している過程でも各圧力が平衡状態を維持しており、ヘリウムガス及び重水素ガスの混合ガスを効率よく排気していることが確認できた。

## 7. ま と め

水素及び重水素ガス排気用のNBIクライオポンプをJT-60W型ダイバータ部の排気用に改造し、以下の結果を得た。

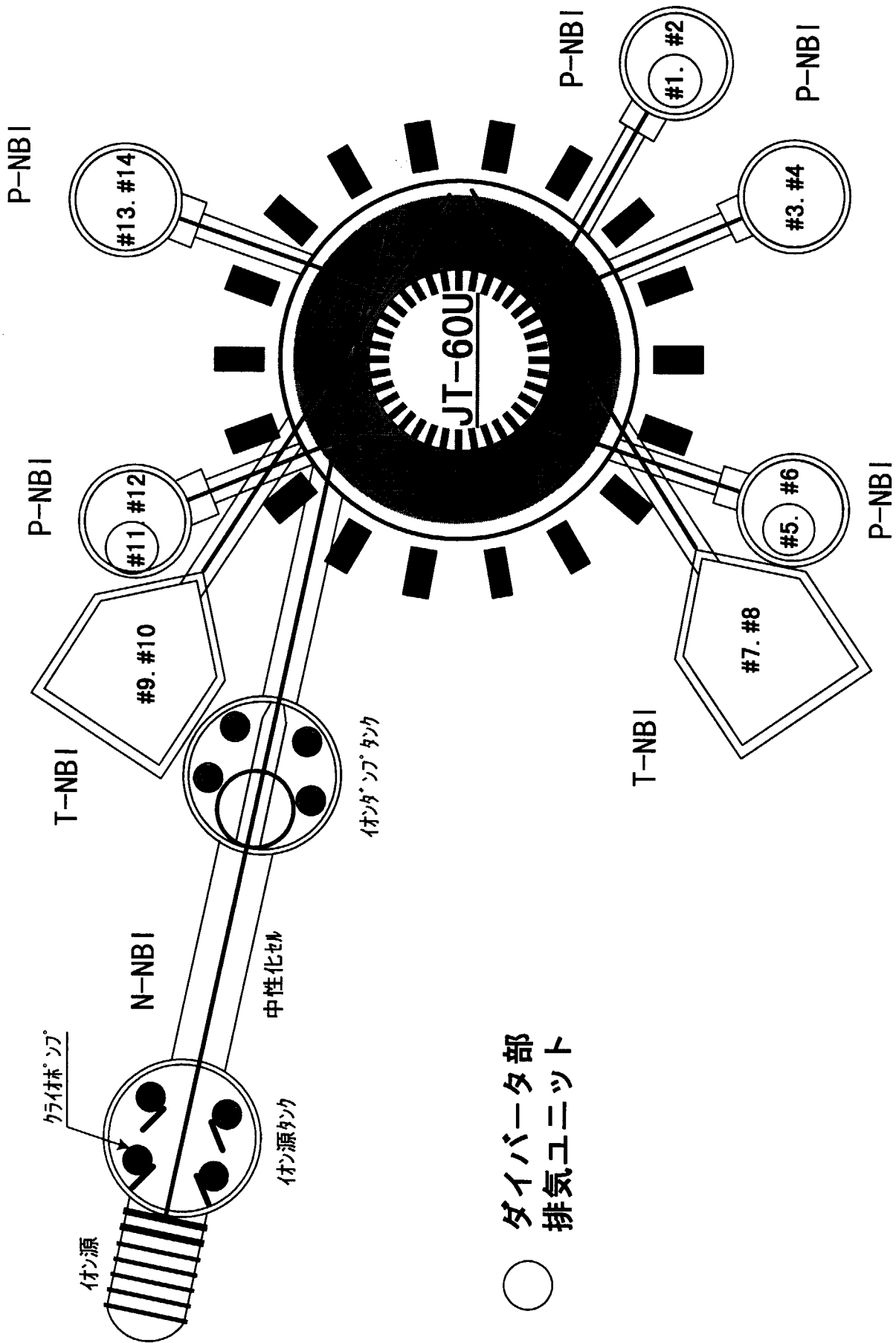
- (1) ダイバータ部に於ける NBI クライオポンプ 3 ユニットでの合計排気速度は重水素ガスに対して  $13\sim 15\text{m}^3/\text{s}$  であった。
- (2) プラズマ中からのヘリウム灰排気模擬実験において、アルゴンフロスト化した NBI クライオポンプによりヘリウムと重水素の混合ガスを効率よく排気できることを実証した。
- (3) NBI ポート部に設置してある高速シャッタの開度を可変とすることにより、ダイバータ部の中性粒子圧力制御を可能とした。

## 謝 辞

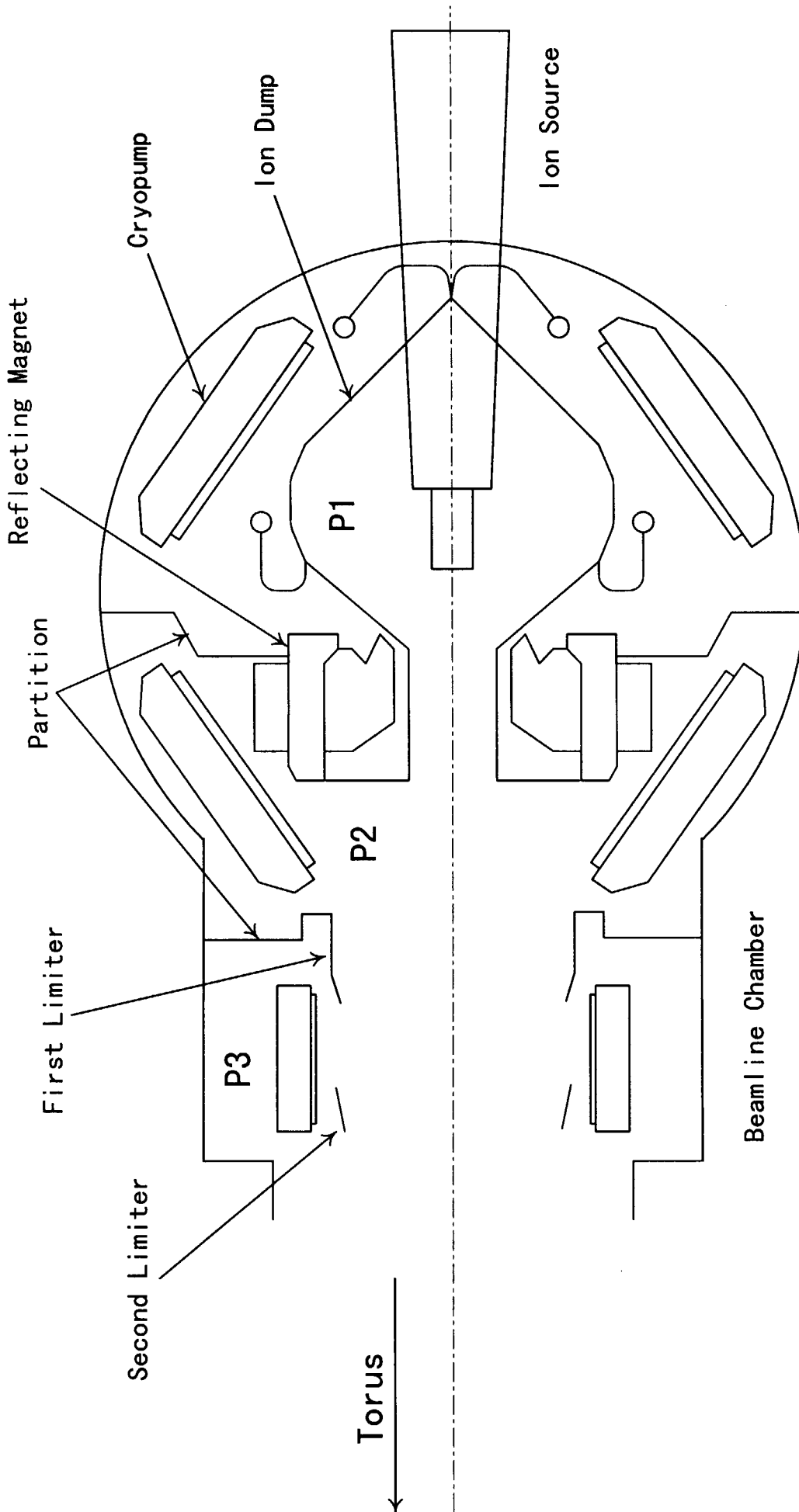
本報告書をまとめるにあたり、有益な議論とご協力を頂きました NBI 装置試験室の皆様と細金延幸 JT-60 第 2 試験室長に感謝いたします。また、本研究遂行に際し、ご指導と激励を頂いた太田充那珂研究所長、船橋昭昌核融合装置試験部長、及び清水正亜同次長に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- [1] 栗山他；JAERI-M 87-169 (1987)
- [2] 柴沼他；日本原子力学会誌 Vol33. No.10 225 (1990)
- [3] 秋野他；JAERI-Tech 94-031 (1994)
- [4] 秋野他；JAERI-Tech 95-043 (1995)
- [5] 松岡他；JAERI-M 89-075 (1989)
- [6] 逆井他；「第 2 回核融合エネルギー連合講演会」 (1998)

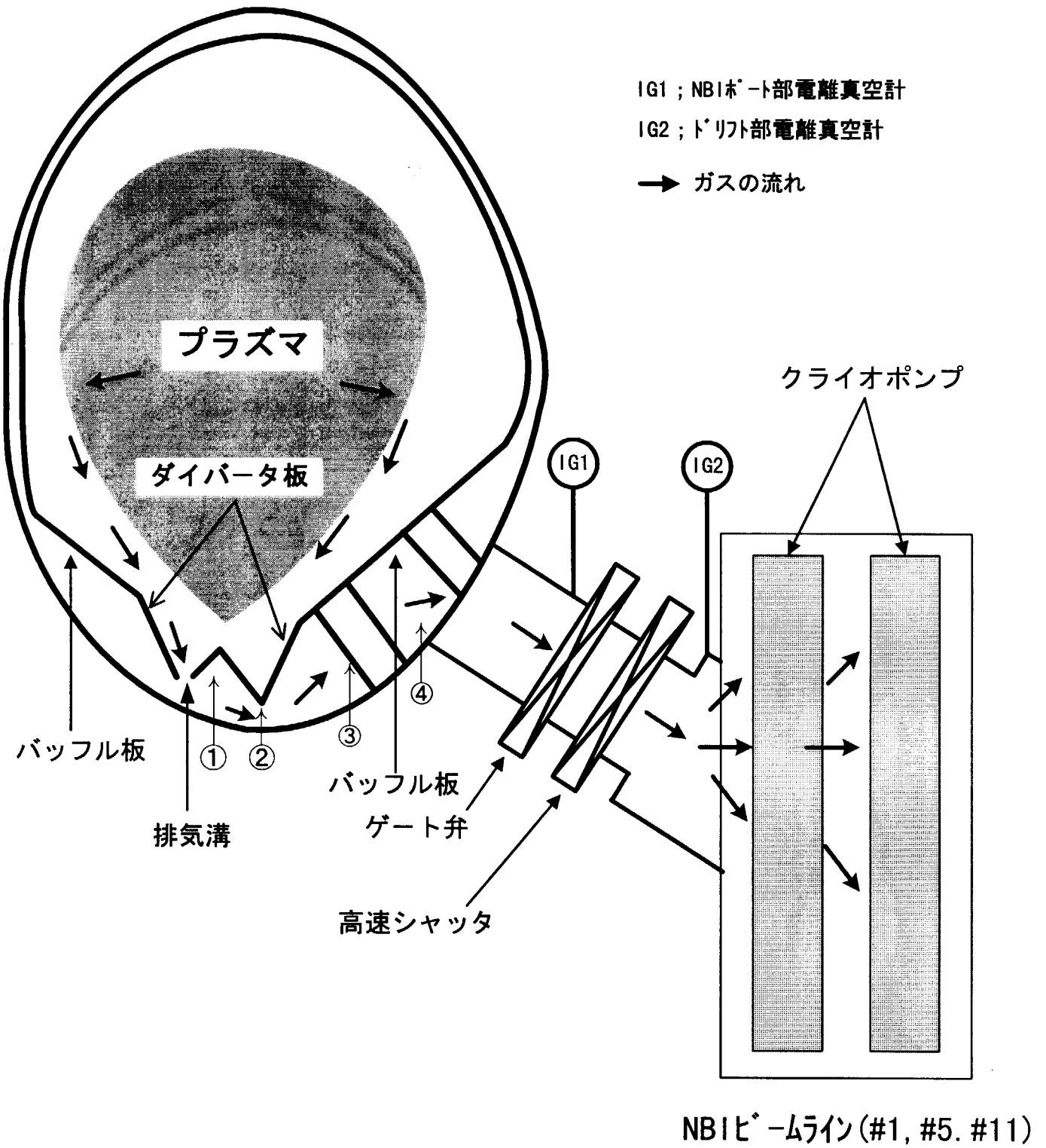


第1図 NBIビームライン配置 (ダイバータ部排気ユニット)

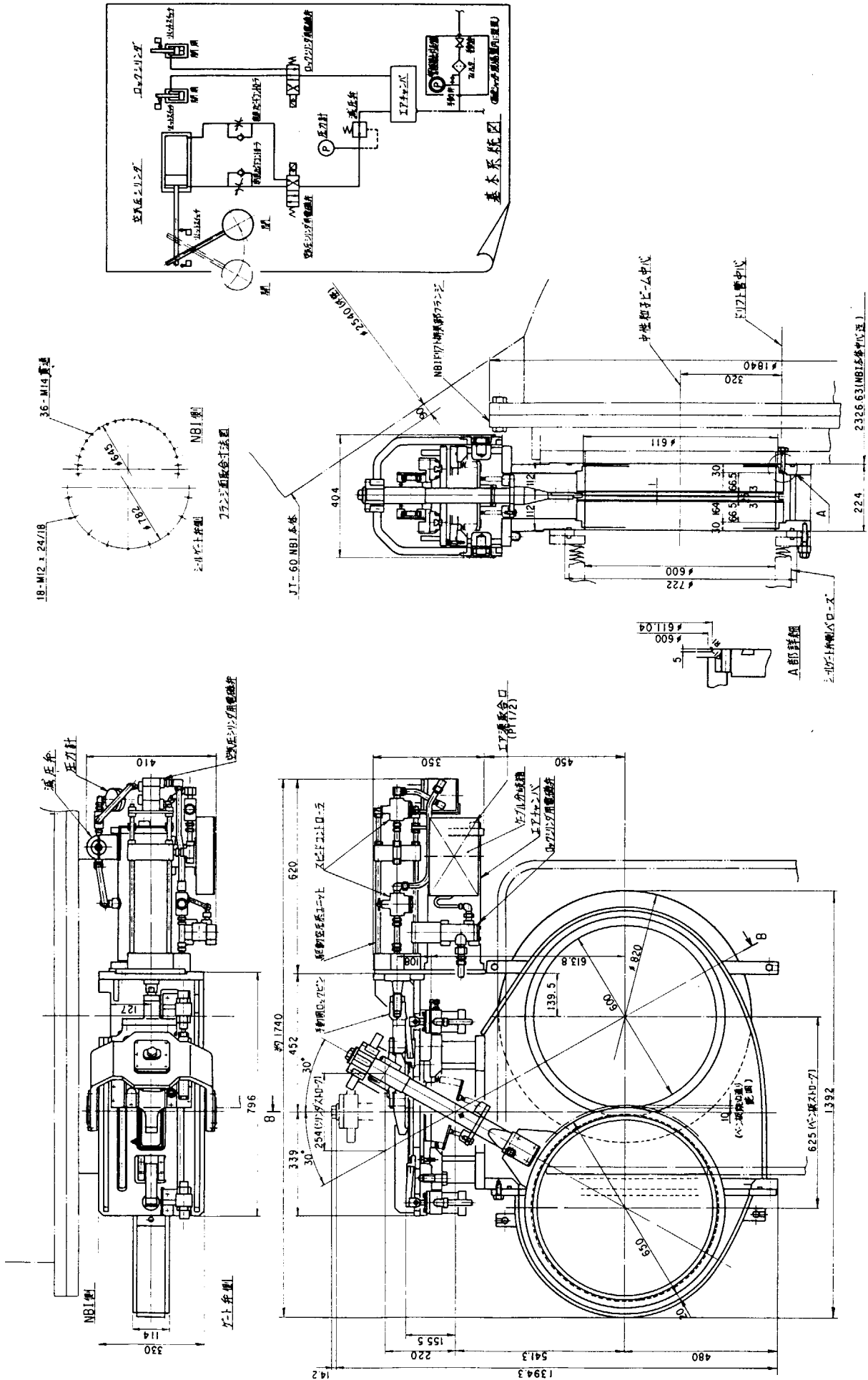


第2図 差動排気系構成のためのクライオポンプ配置



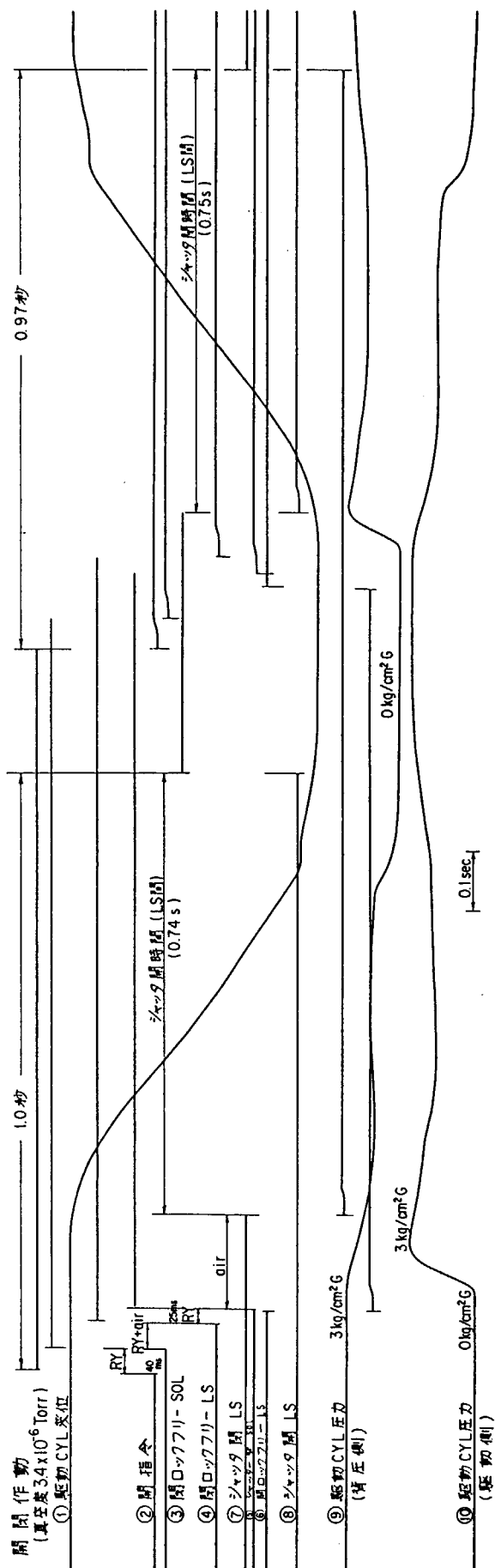


第3図 ダイバータ部排気の際のガス排気流路

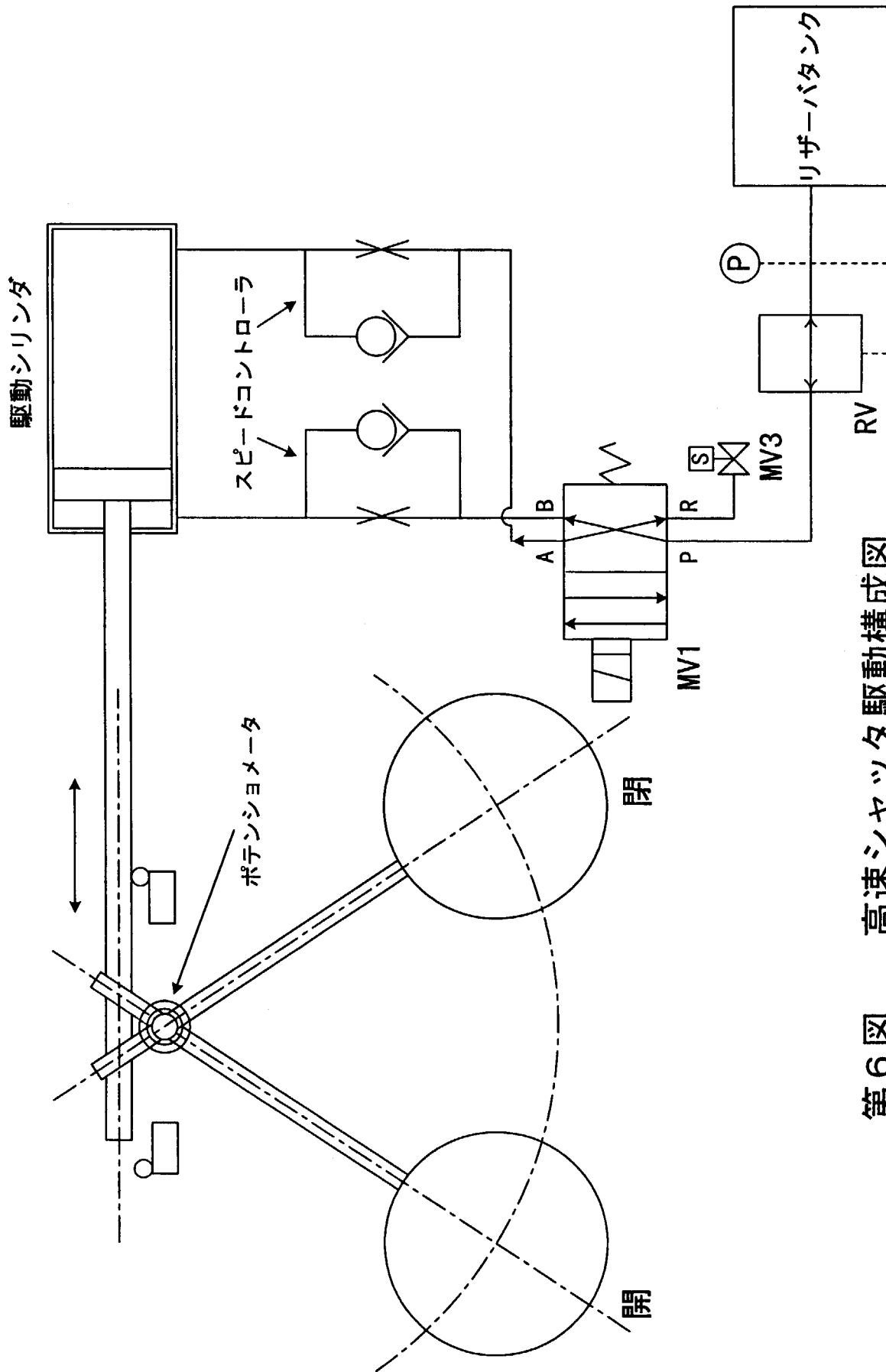


断面 B-B

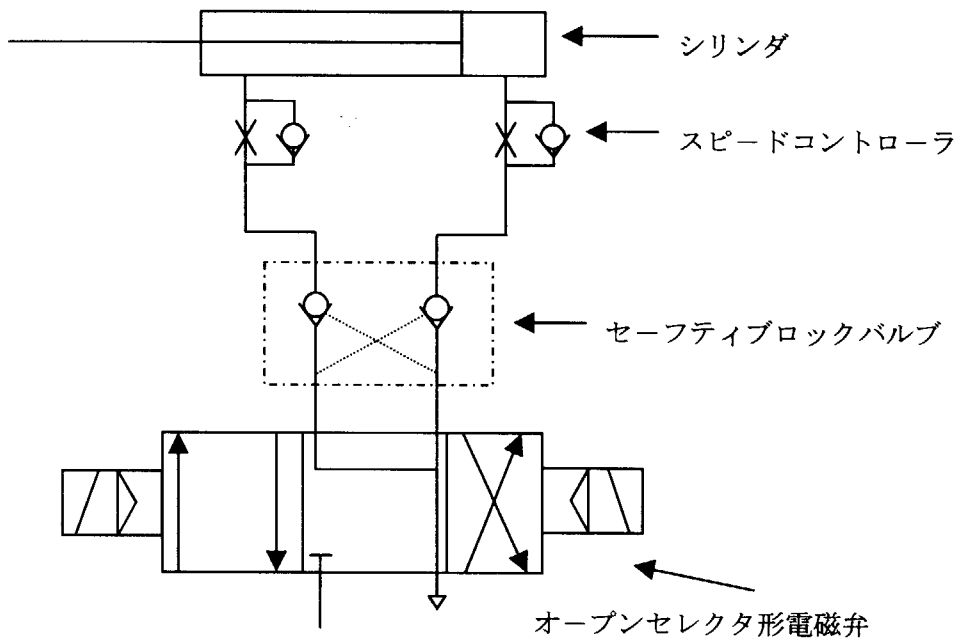
第 4 図 高速シャッタ構造図



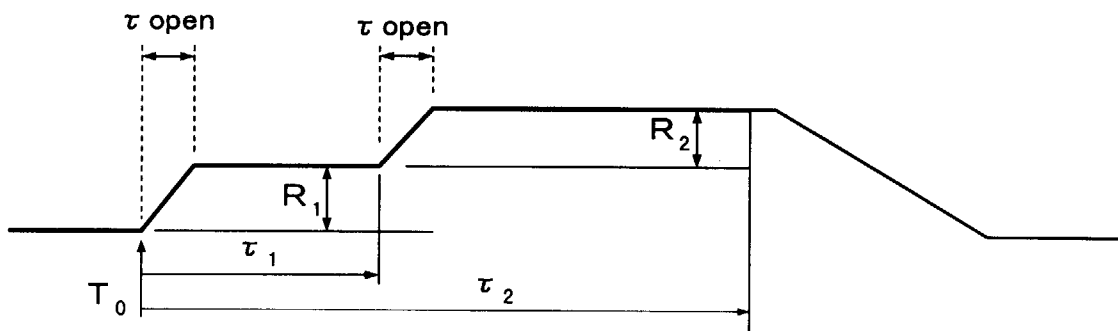
第5図 高速シャッター動作シーケンス



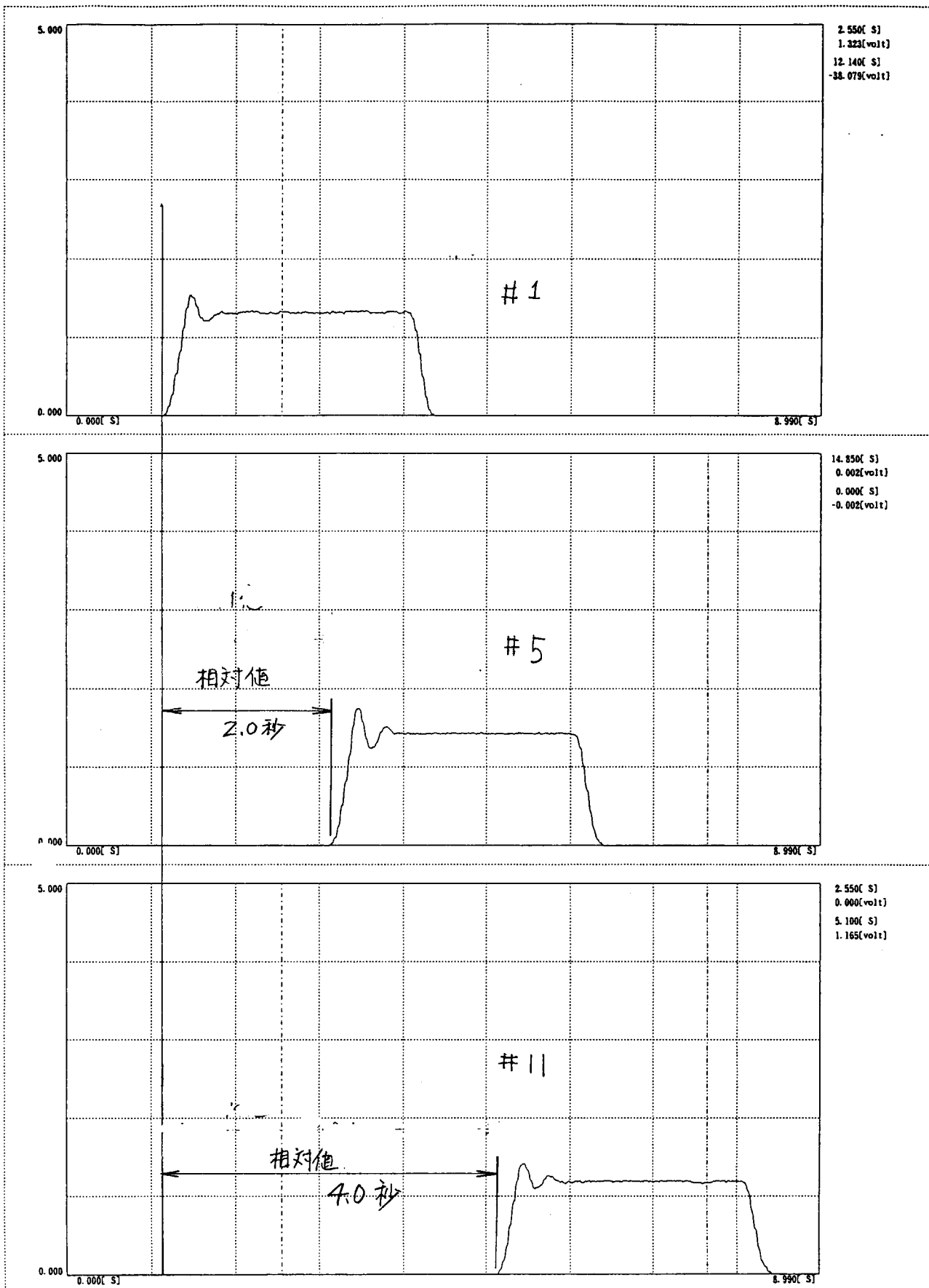
第6図 高速シャッタ駆動構成図



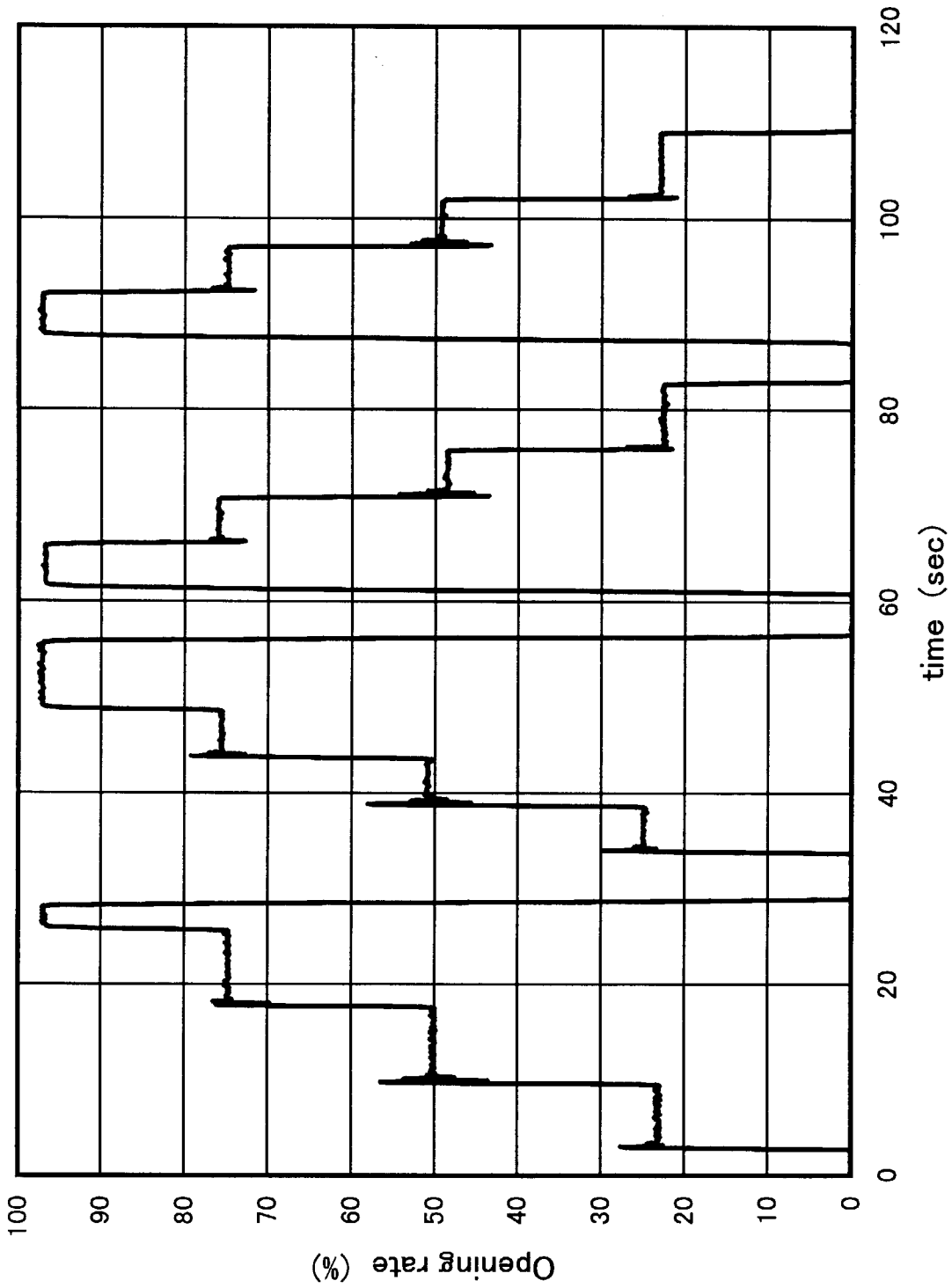
第7図 中間位置停止用電磁弁構成図



第8図 高速シャッタの運転パターン

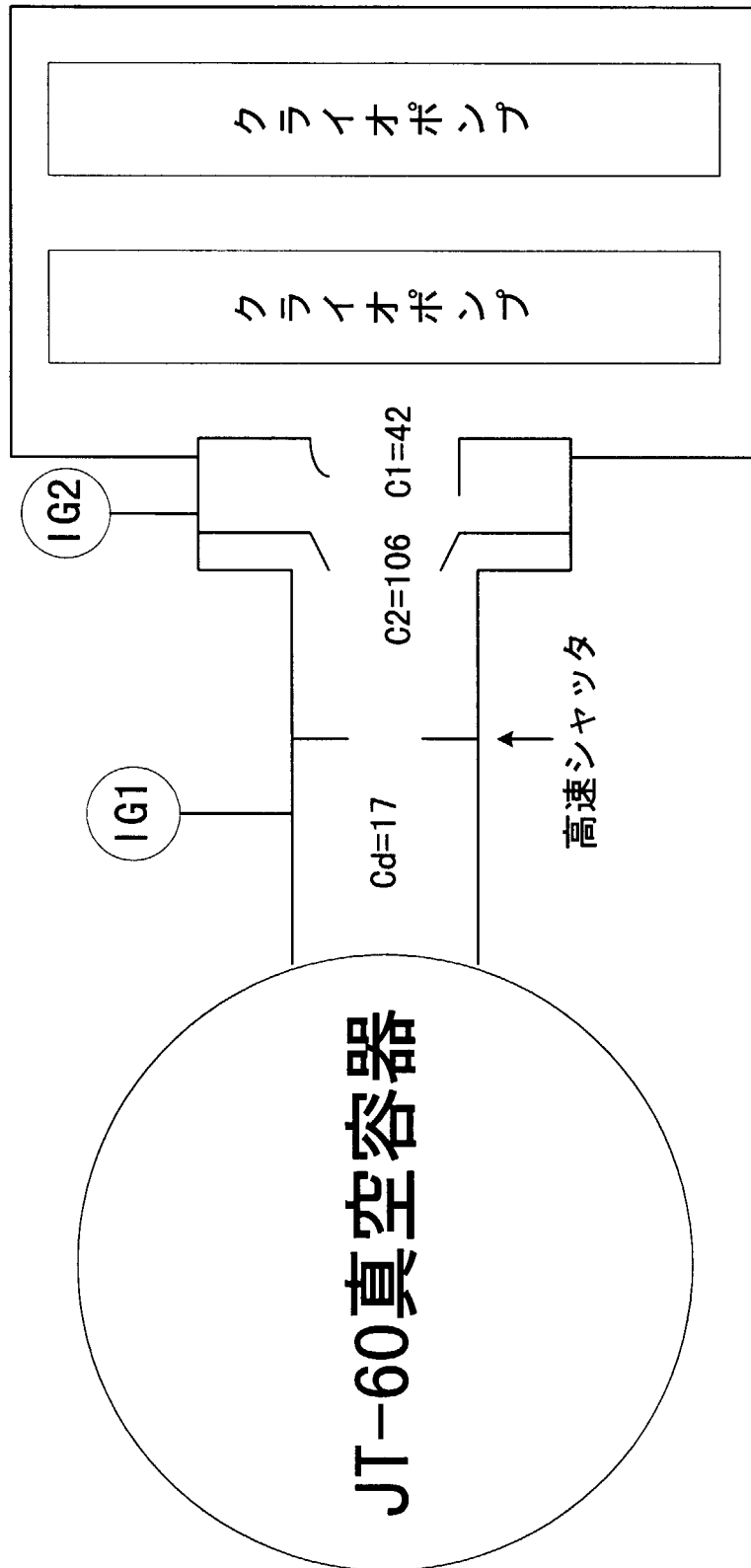


第 9 図 #1、#5、#11 それぞれの高速シャッタ実動作波形



第10図 高速シャッタを中間位置に停止できるように改造した後の  
手動による動作試験結果

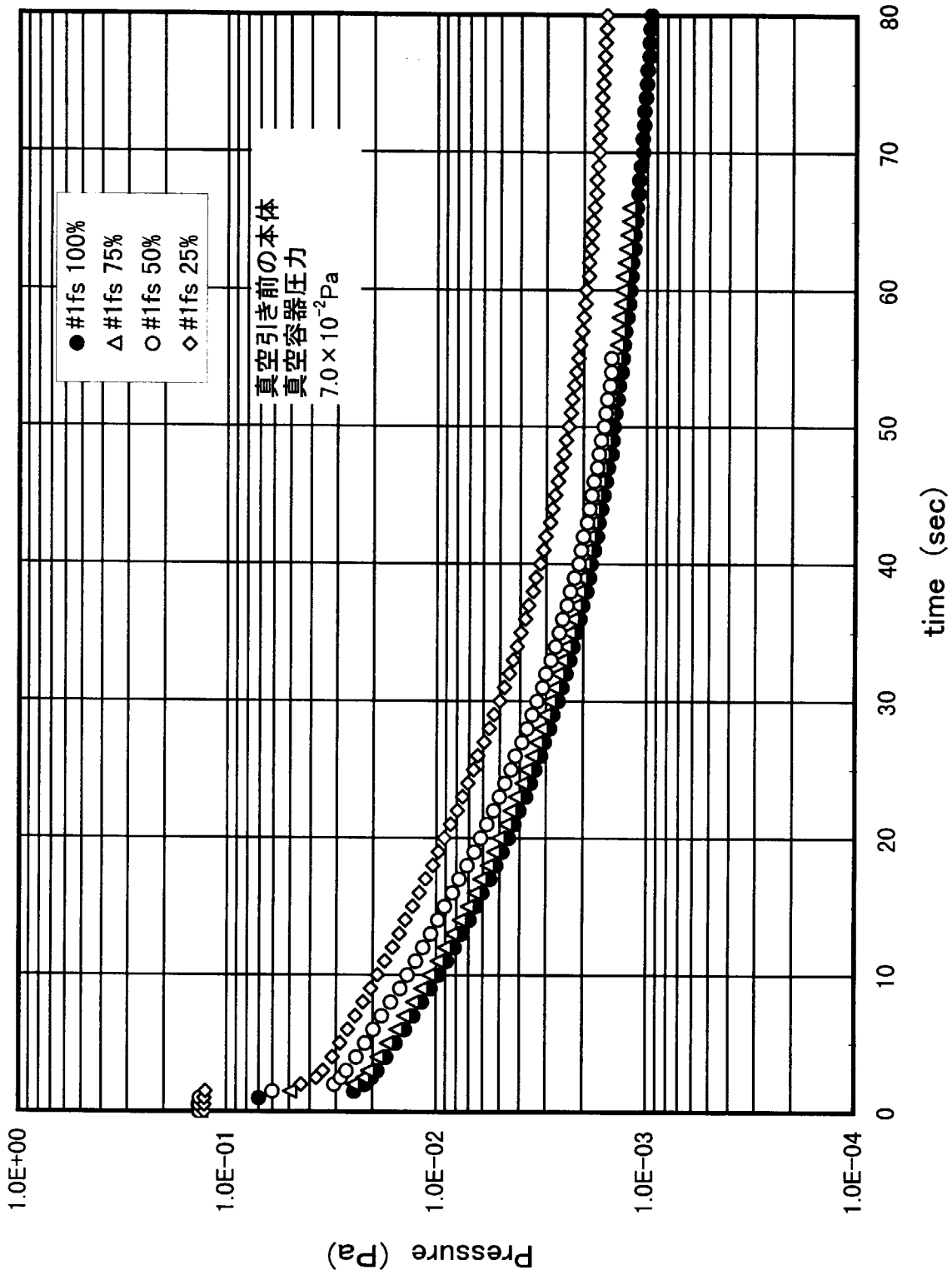
C=コンダクタンス  
IG=電離真空計



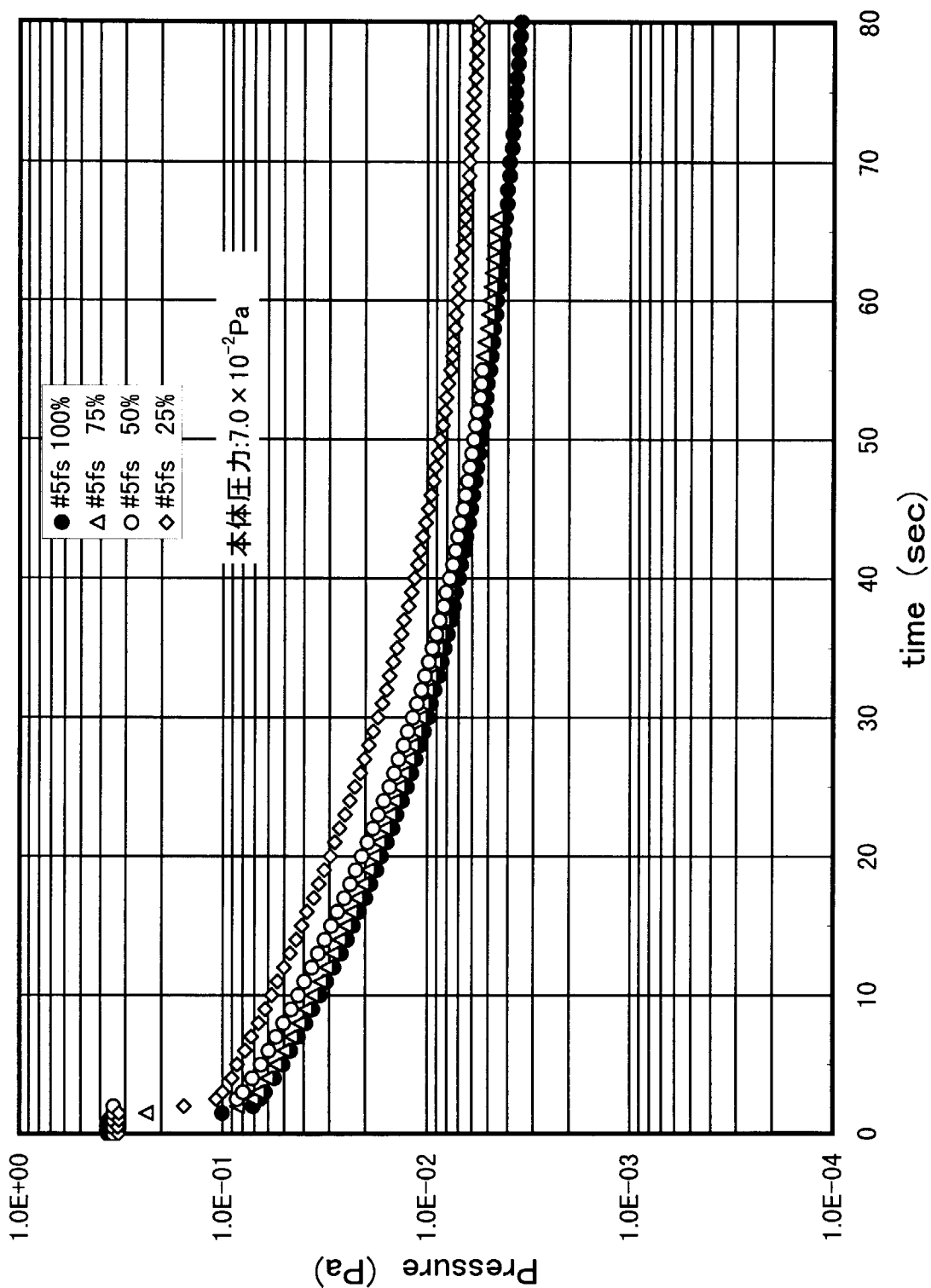
JT-60NBI ビームライン(#1, 5, 11)

第11図 真空計取り付け位置及びJT-60真空容器～NBI  
ビームライン間のコンダクタンス

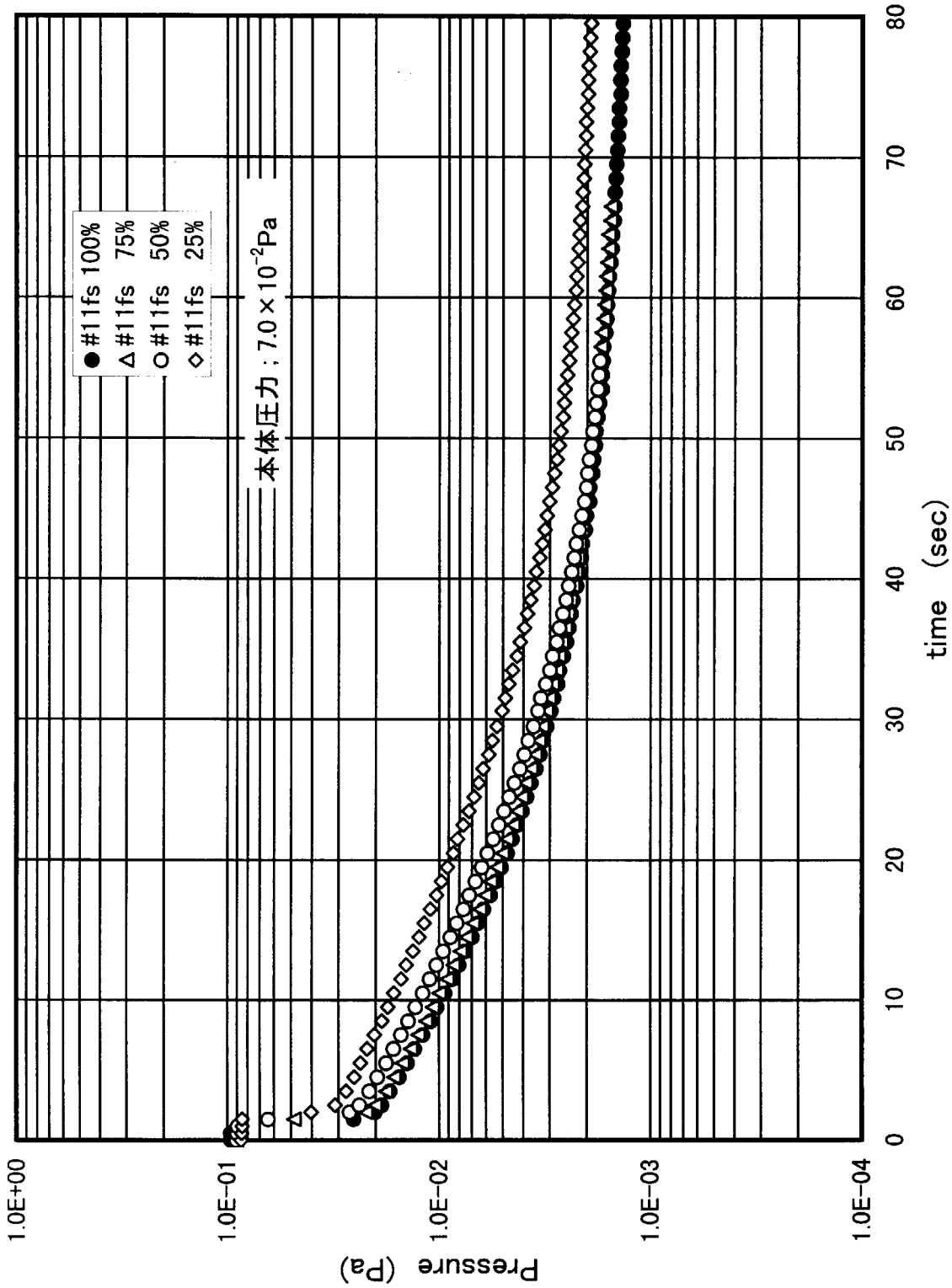




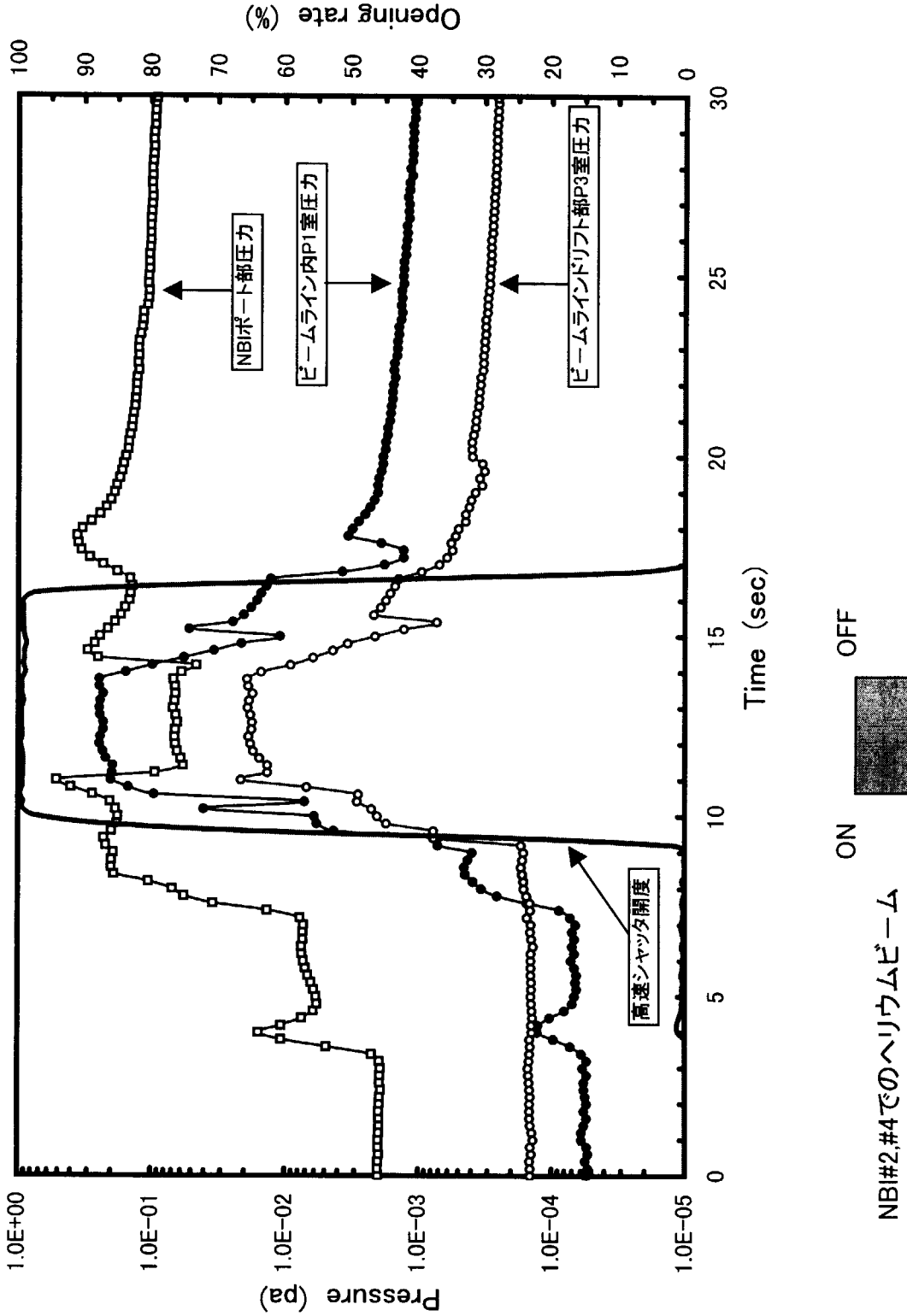
第12図 高速シャッタの開口率を変化させたときのドリフト部における  
 クライオポンプ排気特性 (#1ユニット)



第13図 高速シャッタの開口率を変化させたときのドリフト部における  
 クライオポンプ排気特性 (#5ユニット)



第14図 高速シャッタの開口率を変化させたときのドリフト部における  
クライオポンプ排気特性 (#11ユニット)



第15図 JT-60ダイバータ放電時において、#2,#4ビームラインからヘリウムビームを入射したときの#5ユニットクライオポンプ排気特性

# 国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質質量	モール	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分, 時, 日	min, h, d
度, 分, 秒	°, ', "
リットル	l, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J

1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m

1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>

1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa

1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>

1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq

1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg

1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy

1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版, 国際度量衡局 1985年刊行による。ただし, 1 eV および 1 uの値は CODATA の1986年推奨値によった。
- 表4には海里, ノット, アール, ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは, JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令では bar, barn および「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れていない。

## 換算表

力	N (=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1

- 1 cal = 4.18605 J(計量法)  
 = 4.184 J(熱化学)  
 = 4.1855 J(15 °C)  
 = 4.1868 J(国際蒸気表)  
 仕事率 1 PS(仏馬力)  
 = 75 kgf·m/s  
 = 735.499 W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

JT-60NB クライオポンプを用いたダイバータ排気システム