

JAERI-M
87-075

JT-60ダイバータ室粒子排気装置および
ダイバータ放電における粒子排気特性

1987年6月

安東 俊郎・中村 博雄・砂押 秀則
新井 貴・秋野 昇・広木 成治
山本 正弘

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, 1987

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山 田 軽 印 刷 所

JT-60 ダイバータ室粒子排気装置および
ダイバータ放電における粒子排気特性

日本原子力研究所那珂研究所 JT-60 試験部

安東 俊郎・中村 博雄・砂押 秀則・新井 貴
秋野 昇・広木 成治・山本 正弘

(1987年5月6日受理)

JT-60のダイバータ放電において、ダイバータ室より中性粒子を排気する真空排気装置およびダイバータ実験におけるその排気特性について示した。本排気装置は、長パルス、大熱入力の中性粒子入射加熱時における過度のプラズマ密度上昇を防止し、安定に放電を終止させることを目的としたものである。真空ポンプにはZr-Al非蒸発ゲッターポンプを使用し、小型で大排気速度を有する排気装置を設計した。ダイバータ室における本真空ポンプの総排気速度は、水素に対して $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$ である。ジュール加熱および中性粒子入射加熱ダイバータ放電において排気実験を行った結果、ダイバータ室の圧力が主プラズマ密度のほぼ2乗に比例して増加すること、したがって比較的小排気速度で、ダイバータ室から中性粒子を大量に排気でき、主プラズマの密度が約 $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ で、熱入力20MWの中性粒子入射加熱時の粒子注入量と同程度の排気量が得られ、長パルス中性粒子入射加熱実験が可能であることを明らかにした。また、ゲッターポンプの使用/不使用時における主プラズマ密度の減衰特性の比較より、ゲッターポンプによる密度制御効果を確認した。

JT-60 Divertor Pumping System and its Pumping Characteristics
in Divertor Discharges

Toshio ANDO, Hiroo NAKAMURA, Hidenori SUNAOSHI
Takashi ARAI, Noboru AKINO, Seiji HIROKI
and Masahiro YAMAMOTO

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

(Received May 6, 1987)

The JT-60 divertor pumping system and its pumping characteristics in divertor discharges are described. The objective of this system is an active particle control in long pulse and high power neutral beam heated divertor discharges. The pumps are composed of compact non-evaporable Zr-Al getter pumps with a total pumping speed of 5.6 m³/s for hydrogen in the divertor chamber. It is found from the pumping experiment in joule heated and neutral beam heated divertor discharges that the pressure in the divertor chamber increases approximately in proportion to the square of the line averaged electron density \bar{n}_e of the main plasma. A total particle exhaust rate of 3 Pam³/s is possible for $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ which is as large as the fueling rate by the neutral beam injection with a heating power of 20 MW. The density decay characteristics of the main plasma in the discharges with getter pumps-on and no pumping show an evident particle control effect by this pumping system.

KEYWORDS : Divertor, JT-60, Experiment, Particle Control,
Getter Pump, Pressure, Pumping Speed, Hydrogen,
Baffle Plate, Particle Exhaust Rate

目 次

1. 序	1
2. 粒子排気に関する従来の研究	1
3. ダイバータ室粒子排気装置	2
3.1 Zr-Al ゲッターポンプシステム	3
3.2 粒子の排気制御板	5
3.3 圧力の測定方法	5
3.4 Zr-Al ゲッターポンプの排気速度	6
4. ダイバータ放電における排気特性	7
4.1 圧力特性	7
4.2 粒子排気量	9
4.3 ゲッターポンプの使用 / 不使用における比較	10
5. 結 論	11
謝 辞	12
参考文献	13

Contents

1. Introduction	1
2. Survey of researches on particle exhaust	1
3. Divertor pumping system	2
3.1 Zr-Al getter pumps	3
3.2 Baffle and augmentation plates for particle control	5
3.3 Method of pressure measurement	5
3.4 Pumping speed of Zr-Al getter pumps	6
4. Pumping characteristics in divertor discharges	7
4.1 Pressure characteristics	7
4.2 Particle exhaust rate	9
4.3 Comparison of particle exhaust in discharges with pumping-on and no pumping	10
5. Conclusion	11
Acknowledgement	12
References	13

1. 序

大型トカマクにおいては、中性粒子入射加熱時の密度上昇を防止し、プラズマの温度を高めることおよびディスラプションを生ずることなく安定に放電を終了させるために、プラズマの密度を制御することが必要である⁽¹⁾。高密度、長パルスのプラズマ放電では、プラズマから壁面に入射する粒子束と壁面からプラズマへ流入する粒子束は殆ど等しくなると予想される。即ち、粒子リサイクリング率は殆ど1となるために、壁面での粒子の吸着などに依存することなく、排気が可能な能動的粒子制御がより適切と考えられる。ダイバータ運転の場合には、セパトリティクス磁気面の外側のスクレイプオフ層粒子は、ダイバータ室へ導かれるので、ダイバータ室での中性粒子圧力が高まる。したがって、ダイバータ室の粒子を排気する真空排気系によって、最も効率良い粒子排気がなされることが考えられる。

このような目的で、Zr-Al 非蒸発ゲッターポンプを用いたダイバータ室粒子排気装置を JT-60 に取り付け、ダイバータ室粒子の排気に関する実験を行った。

本報告では、本ダイバータ室粒子排気装置の JT-60 ダイバータ放電における排気特性について実験的に検討するものである。

2. 粒子排気に関する従来の研究

従来の特カマク装置では、真空容器の内側をチタン (Ti) の蒸着膜で覆う方法や非蒸発ゲッターポンプにより、プラズマへのガス不純物の軽減を図り、プラズマの密度制御、リサイクリング制御を行う試みがなされている。

最初に Ti 蒸着が試みられたのは ATC⁽²⁾ (Adiabatic Toroidal Compressor) で、Ti 蒸着の結果、酸素不純物量が 1/6 に減少するなどの効果が確認された。また PLT⁽³⁾ においても、Ti 蒸着によって、中性粒子入射加熱時の密度上昇を抑制する試みがなされ、その結果、イオン温度 6.5 keV を達成した。PDX⁽⁴⁾ や ASDEX⁽⁵⁾ のダイバータ付きトカマク装置では、ダイバータ室内面を Ti 蒸着し、ダイバータプラズマのリサイクリング制御の試みもなされた。日本においても、JFT-2a⁽⁶⁾、JFT-2⁽⁷⁾ で真空容器内面の Ti 蒸着がなされた。

この Ti 蒸着は、壁のほぼ全面を Ti 膜で覆うことが可能なので、大排気速度の粒子排気が行えるという利点がある反面、放電の繰り返しによる熱サイクルで膜の剥離が生じたり、吸収粒子の飽和による排気性能の低下を回復させるため、頻りに再蒸着する必要がある。これは、装置の大型化、大熱入力化および長パルス化に伴い、より深刻な問題となる。これに対して、非蒸発ゲッターの場合は、Ti 蒸着のように再蒸着の必要がなく、飽和するまでの排気容量が大きいという利点を有し、また水素に対しては再生可能という特徴がある。非蒸発ゲッターには、Zr-Al 合金 (St101)⁽⁸⁾、ZrVFe 合金 (St707)⁽⁹⁾ があるが、広く一般に使用されているのは Zr-Al 合金

1. 序

大型トカマクにおいては、中性粒子入射加熱時の密度上昇を防止し、プラズマの温度を高めることおよびディスラプションを生ずることなく安定に放電を終了させるために、プラズマの密度を制御することが必要である⁽¹⁾。高密度、長パルスのプラズマ放電では、プラズマから壁面に入射する粒子束と壁面からプラズマへ流入する粒子束は殆ど等しくなると予想される。即ち、粒子リサイクリング率は殆ど1となるために、壁面での粒子の吸着などに依存することなく、排気が可能な能動的粒子制御がより適切と考えられる。ダイバータ運転の場合には、セパトリティクス磁気面の外側のスクレイプオフ層粒子は、ダイバータ室へ導かれるので、ダイバータ室での中性粒子圧力が高まる。したがって、ダイバータ室の粒子を排気する真空排気系によって、最も効率良い粒子排気がなされることが考えられる。

このような目的で、Zr-Al 非蒸発ゲッターポンプを用いたダイバータ室粒子排気装置を JT-60 に取り付け、ダイバータ室粒子の排気に関する実験を行った。

本報告では、本ダイバータ室粒子排気装置の JT-60 ダイバータ放電における排気特性について実験的に検討するものである。

2. 粒子排気に関する従来の研究

従来の特カマク装置では、真空容器の内側をチタン (Ti) の蒸着膜で覆う方法や非蒸発ゲッターポンプにより、プラズマへのガス不純物の軽減を図り、プラズマの密度制御、リサイクリング制御を行う試みがなされている。

最初に Ti 蒸着が試みられたのは ATC⁽²⁾ (Adiabatic Toroidal Compressor) で、Ti 蒸着の結果、酸素不純物量が 1/6 に減少するなどの効果が確認された。また PLT⁽³⁾ においても、Ti 蒸着によって、中性粒子入射加熱時の密度上昇を抑制する試みがなされ、その結果、イオン温度 6.5 keV を達成した。PDX⁽⁴⁾ や ASDEX⁽⁵⁾ のダイバータ付きトカマク装置では、ダイバータ室内面を Ti 蒸着し、ダイバータプラズマのリサイクリング制御の試みもなされた。日本においても、JFT-2a⁽⁶⁾、JFT-2⁽⁷⁾ で真空容器内面の Ti 蒸着がなされた。

この Ti 蒸着は、壁のほぼ全面を Ti 膜で覆うことが可能なので、大排気速度の粒子排気が行えるという利点がある反面、放電の繰り返しによる熱サイクルで膜の剥離が生じたり、吸収粒子の飽和による排気性能の低下を回復させるため、頻りに再蒸着する必要がある。これは、装置の大型化、大熱入力化および長パルス化に伴い、より深刻な問題となる。これに対して、非蒸発ゲッターの場合は、Ti 蒸着のように再蒸着の必要がなく、飽和するまでの排気容量が大きいという利点を有し、また水素に対しては再生可能という特徴がある。非蒸発ゲッターには、Zr-Al 合金 (St101)⁽⁸⁾、ZrVFe 合金 (St707)⁽⁹⁾ があるが、広く一般に使用されているのは Zr-Al 合金

であり、排気特性に関する研究例も多い⁽¹⁰⁾。

Zr-Al 合金を用いた粒子排気に関する実験としては、PDX⁽¹¹⁾ および ISX-B⁽¹²⁾、TEXTOR⁽¹³⁾ における ALT-1⁽¹³⁾ および TFTR⁽¹⁴⁾ がある。PDX の場合は、リミタの近傍にゲッターアレイを取り付けることにより、リサイクリング率を 10% 軽減させることができた。また ISX-B、ALT-1 では、ポンプリミタの排気装置として Zr-Al ゲッターポンプが用いられた。その実験では、リミタヘッドのスロート部よりスクレイプオフ層粒子をリミタ内部へ導き、ゲッターポンプにより排気した結果、プラズマ密度の制御に効果的であることが確認された。TFTR では、真空容器内部にパネル型の Zr-Al ゲッターポンプが設置されている。その総排気速度は、水素に対して約 500 m³/s である。TFTR におけるゲッター排気の目的は、不純物の除去や中性粒子入射加熱中の密度制御だけでなく、D-T 燃焼実験における、軽元素不純物による燃料粒子の希釈化を防止すること、排気したトリチウムを再生、回収するという目的もあった。

これに対して、JT-60 の場合には、ダイバータを有するので不純物の軽減の観点からは、とくに粒子排気を行う必要性はないが、大熱入力、長パルスの中性粒子入射加熱時の過度のプラズマ密度上昇を抑制し、プラズマの温度を増加させるという観点から、粒子排気が必要であった。したがって、その排気性能としては、中性粒子入射加熱による粒子入射量約 3 Pa m³/s の排気が可能な粒子排気系が必要とされた。また、放電終了段階において、プラズマ電流の減少とともに、プラズマの密度も減少させないと、いわゆる、密度限界によるディスラプションが発生するので、安定な放電終了を得るためにも、粒子排気が必要であった。

このようなプラズマの密度制御を目的とした真空排気系の設置位置に関しては、ダイバータ放電中に、中性粒子密度が高くなるダイバータ室内に真空ポンプを設置するのが、大排気量を確保するうえで最も効率的である。しかし、パルス弱電流プラズマ放電 (TDC) やグロー放電により、真空容器壁の洗浄を行う場合には、真空容器の圧力が $10^{-3} \sim 10^{-2}$ Pa となるため、過度の水素の吸収による Zr-Al ゲッターの脆化が問題となる。これに関して、PDX では、TDC 中に壁面から放出される酸素によって、ゲッター面が不活性化され、Zr-Al ゲッターの脆化は避けられるとしているが⁽¹⁵⁾、壁の材料が異なる JT-60 においても可能かどうかは不明であり、ゲッターを損傷させる危険性が高い。よって、Zr-Al ゲッターポンプ容器をダイバータ室の近傍に設置し、その間をゲートバルブを介して、ダクトで連結する取り付け構造とした。前述のように、従来から、ダイバータ室内面の Ti 蒸着により、ダイバータ室の粒子排気を行う試みはなされているが、非蒸発ゲッターポンプにより、しかもダイバータ室の外に排気系を設置し、粒子排気を行うのは、本装置が初めてと思われる。

3. ダイバータ室粒子排気装置

JT-60 ダイバータ室粒子排気装置の設計では、上記のように、ダイバータ室の近傍に Zr-Al ゲッターポンプを設置することとしたが、それとともに、ダイバータ室から主プラズマ容器への粒子の逆流を低減するためのバッフル板を取り付け、また、ダイバータ室からトーラス主排気系

であり、排気特性に関する研究例も多い⁽¹⁰⁾。

Zr-Al 合金を用いた粒子排気に関する実験としては、PDX⁽¹¹⁾ および ISX-B⁽¹²⁾、TEXTOR における ALT-1⁽¹³⁾ および TFTR⁽¹⁴⁾ がある。PDX の場合は、リミタの近傍にゲッターアレイを取り付けることにより、リサイクリング率を 10% 軽減させることができた。また ISX-B、ALT-1 では、ポンプリミタの排気装置として Zr-Al ゲッターポンプが用いられた。その実験では、リミタヘッドのスロート部よりスクレイプオフ層粒子をリミタ内部へ導き、ゲッターポンプにより排気した結果、プラズマ密度の制御に効果的であることが確認された。TFTR では、真空容器内部にパネル型の Zr-Al ゲッターポンプが設置されている。その総排気速度は、水素に対して約 500 m³/s である。TFTR におけるゲッター排気の目的は、不純物の除去や中性粒子入射加熱中の密度制御だけでなく、D-T 燃焼実験における、軽元素不純物による燃料粒子の希釈化を防止すること、排気したトリチウムを再生、回収するという目的もあった。

これに対して、JT-60 の場合には、ダイバータを有するので不純物の軽減の観点からは、とくに粒子排気を行う必要性はないが、大熱入力、長パルスの中性粒子入射加熱時の過度のプラズマ密度上昇を抑制し、プラズマの温度を増加させるという観点から、粒子排気が必要であった。したがって、その排気性能としては、中性粒子入射加熱による粒子入射量約 3 Pa m³/s の排気が可能な粒子排気系が必要とされた。また、放電終了段階において、プラズマ電流の減少とともに、プラズマの密度も減少させないと、いわゆる、密度限界によるディスラプションが発生するので、安定な放電終了を得るためにも、粒子排気が必要であった。

このようなプラズマの密度制御を目的とした真空排気系の設置位置に関しては、ダイバータ放電中に、中性粒子密度が高くなるダイバータ室内に真空ポンプを設置するのが、大排気量を確保するうえで最も効率的である。しかし、パルス弱電流プラズマ放電 (TDC) やグロー放電により、真空容器壁の洗浄を行う場合には、真空容器の圧力が 10⁻³ ~ 10⁻² Pa となるため、過度の水素の吸収による Zr-Al ゲッターの脆化が問題となる。これに関して、PDX では、TDC 中に壁面から放出される酸素によって、ゲッター面が不活性化され、Zr-Al ゲッターの脆化は避けられるとしているが⁽¹⁵⁾、壁の材料が異なる JT-60 においても可能かどうかは不明であり、ゲッターを損傷させる危険性が高い。よって、Zr-Al ゲッターポンプ容器をダイバータ室の近傍に設置し、その間をゲートバルブを介して、ダクトで連結する取り付け構造とした。前述のように、従来から、ダイバータ室内面の Ti 蒸着により、ダイバータ室の粒子排気を行う試みはなされているが、非蒸発ゲッターポンプにより、しかもダイバータ室の外に排気系を設置し、粒子排気を行うのは、本装置が初めてと思われる。

3. ダイバータ室粒子排気装置

JT-60 ダイバータ室粒子排気装置の設計では、上記のように、ダイバータ室の近傍に Zr-Al ゲッターポンプを設置することとしたが、それとともに、ダイバータ室から主プラズマ容器への粒子の逆流を低減するためのバッフル板を取り付け、また、ダイバータ室からトーラス主排気系

へ粒子が流入しやすくするため、排気促進板を設けることにより、粒子排気量の増加を図った。ダイバータ室粒子排気装置の排気特性を調べるために、ダイバータ室圧力、ゲッターポンプ容器の圧力などの測定を行った。Zr-Al ゲッターポンプについては、JT-60 本体に取り付けた後、排気速度の測定を行った。以下に、これらについて述べる。

3.1 Zr-Al ゲッターポンプシステム

Zr-Al ゲッターポンプは、厚さ 80 μm の Zr-Al 合金をコンスタンタンの基板の上に圧着により接合させたもので、TFTRなどで使用しているパネル型のもものと JT-60 で採用したカートリッジ型の 2 種類がある。JT-60 で用いた C-500 型のカートリッジ⁽¹⁶⁾ は、図 1 に示すように、多数の Zr-Al 合金板で環状円筒型の吸収体を構成し、内側には活性化/再生化用のヒーターが取り付けられている。1 個のカートリッジの Zr-Al 合金の重量は、約 400 g であり、水素に対する排気速度は、カートリッジ温度が 25°C では、1.5 m^3/s 、400°C では 2 m^3/s となっている。カートリッジを室温よりも高温状態で使用するほうが排気速度は大きいので、一般には 200°C ~ 400°C の温度で運転される。

Zr-Al 合金の活性化は、ヒータでゲッターカートリッジを、700°C に 30 分間程度保持することにより、容易に行うことができる。また、水素吸収量がゲッターの単位重さあたり 1300 Pam^3/kg となると、排気速度は初期の半分になり、2600 Pam^3/kg では脆化が生じる。C-500 型カートリッジの場合の吸収量にすると、各々、530 Pam^3 、1060 Pam^3 となる。さらに、水素中に、酸素などの活性ガスが含まれる場合にも、排気速度が低下することが知られている。不活性ガス、例えば He などに対しては排気しない。吸収した水素は、活性化と同様の高温処理により放出させ、排気能力を回復することが可能である。酸素などに対しては、再生不能であるが、1% 程度の混入率であれば水素の総吸収量が約 10^4 Pam^3 まで使用可能である。

図 2 に、Zr-Al ゲッターポンプ、トーラス主排気系、ガス注入系などの設置位置を模式的に示す。Zr-Al ゲッターポンプは、比較的直径の大きいダイバータ室ポートが設けられた、トーラス方向 2 ヶ所のポートセクションに設置した。各々のポートセクションでは、上下のポートに取り付けたので、Zr-Al ゲッターポンプは、合計 4 系統から構成される。トーラス主排気系も、同様に、トーラス方向 2 ヶ所、上下 2 ヶ所の 4 系統からなる。図 3 には、ポートセクション P-1 の上下に設置した、ゲッターポンプの取り付け構造を示す。各ゲッターポンプ容器には、取り付け空間の制限内で、可能な限り多くのポンプを設置することとし、3 個の Zr-Al ゲッターカートリッジを取り付けた。したがって、ゲッターポンプ 1 系統あたりの排気速度は、4.5 m^3/s (25°C) ~ 6 m^3/s (400°C) となる。表 1 に、Zr-Al ゲッターポンプの主要諸元を示す。

ゲッターポンプ容器とダイバータ室の間には、前に述べたように、真空封じ切り用のゲートバルブを設け、放電洗浄時に過剰の水素ガスを吸収しないようにした。また、ゲートバルブのシールには、高真空装置で広く使用されているフッ素ゴム (バイトン) を使用し、バイトンがベーキング時の熱で損傷しないよう、シール面の近傍を水冷した。ゲートバルブとゲッターポンプ容器の間には、セラミックブレイクで真空容器との絶縁をとるとともに、熱膨張差を吸収し、セラミックに衝撃を与えないよう溶接ベローズを設置した。ダイバータ室とゲッターポンプ容器との間

のコンダクタンスは、実効的な排気速度を決定する重要な因子なので、水素に対して $2 \text{ m}^3/\text{s}$ を目標として、設置スペース上可能な限り大きくなるように設計した。

上記のゲッターポンプ容器における Zr-Al ゲッターポンプの排気速度およびダイバータ室とゲッターポンプ容器との間のコンダクタンスの値より求められる、ダイバータ室における排気速度は、4系統の合計で、 $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (25°C) \sim $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (400°C) となる。

一方、プラズマの体積平均密度 $\langle n_e \rangle$ 、プラズマの体積 V_p 、粒子とじ込め時間 τ_p より、主プラズマからダイバータ室への粒子束 Γ が得られ、ダイバータ室から主プラズマへの逆流コンダクタンスを C_b 、ダイバータ室圧力を P_{div} 、主プラズマ周辺の圧力を P_{main} 、 Q_w をダイバータ板での粒子吸収、 $Q_{\text{Zr-Al}}$ をゲッターポンプによる粒子排気量とすると、定常状態におけるダイバータ室での粒子バランスは、

$$= C_b (P_{\text{div}} - P_{\text{main}}) + Q_w + Q_{\text{Zr-Al}} \quad (1)$$

となる。

式(1)において、 Q_w および $Q_{\text{Zr-Al}}$ は他の2項と比較すると数%程度であり、またダイバータ室圧力は主プラズマ周辺圧力より非常に大きいと考えられる。即ち、

$$\begin{aligned} \langle n_e \rangle \cdot V_p / \tau_p, C_b (P_{\text{div}} - P_{\text{main}}) \gg Q_w, Q_{\text{Zr-Al}} \\ P_{\text{div}} \gg P_{\text{main}} \end{aligned}$$

である。よって、ダイバータ室圧力を決定する支配的關係は、

$$\langle n_e \rangle \cdot V_p / \tau_p \cong C_b \cdot P_{\text{div}} \quad (2)$$

となる。ここで $\langle n_e \rangle = 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 、 $V_p = 45 \text{ m}^3$ として、 $\tau_p = 0.05 \sim 0.1 \text{ s}$ と予想すると、 Γ は約 $100 \sim 200 \text{ Pam}^3/\text{s}$ となり、逆流コンダクタンス C_b が、 $400 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であれば、 $P_{\text{div}} = 0.25 \sim 0.5 \text{ Pa}$ となる。よって、このとき、ゲッターポンプによる粒子排気量として、 $1.5 \sim 3 \text{ Pam}^3/\text{s}$ が得られることになり、中性粒子入射加熱による粒子入射量程度の排気が期待できると考えられる。

ゲッターポンプ容器や配管内部の初期排気およびゲッターカートリッジの活性化や再生化時の排気のために、ターボ分子ポンプとロータリーポンプからなる補助排気系を設けた。図4に Zr-Al ゲッターポンプシステムの真空系統図を示す。ターボ分子ポンプの吸入側圧力は、再生化時には 0.1 Pa 以上になることが予想されたので、高圧力領域でも排気速度の低下の小さい複合分子ポンプを選択した。本ポンプは、窒素に対して吸入側圧力 2 Pa まで $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上、水素に対して吸入側圧力 0.3 Pa まで $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上の排気速度を有する。補助排気系は P-1 および P-9 セクションに1系統ずつ設置した。ダイバータ実験時には、複合分子ポンプと Zr-Al ゲッターポンプの間のバルブを閉状態として運転した。また再生化時に排気管内部の水素を強制排気するため、ブロアーを設置するとともに、水素濃度検出器を取り付けた。本排気装置の運転操作は、実験棟制御室より遠隔操作により行うとともに、中央制御室に監視盤を設置した。

ゲッターポンプ容器およびゲートバルブは 250°C のベーキングができるよう、電気ヒータ、保温層および温度調整用の熱電対を取り付けた。また、ゲッターポンプ容器から補助排気系までの配管も 100°C のベーキングができるようにした。ゲッターポンプの活性化や再生化処理では 700°C までカートリッジを昇温するため、ポンプ容器の温度が上り過ぎないように、また真空計が損傷しないように、熱放射遮蔽板をゲッターポンプ容器内に設けた。

ゲッターカートリッジ用ヒータおよびベーキング用ヒータは、磁場による損傷の恐れがあるため、コイル通電中にはヒータ通電を停止するよう、保護動作回路を制御系に組み入れた。また、ゲッターポンプ容器に取り付けた電離真空計も、ヒータと同様にコイル通電中にはフィラメントへの通電を停止するようにした。

図5に、ゲッターポンプの再生化時の圧力、カートリッジ温度およびゲッターポンプ容器温度を示す。カートリッジ温度が700°Cに達すると、圧力が1 Pa程度になり、吸収されていた水素がカートリッジから放出されることがわかる。また、容器の温度は、200°C以下に保たれ、熱的にも問題ない。

3.2 粒子の排気制御板

図6にダイバータ室粒子の排気促進板およびバッフル板を示す。排気促進板は、ダイバータ室からトラス主排気系への粒子の流れを促進させるのが目的で、各主排気系ポートの入口に取り付けた。また、バッフル板は、ダイバータ室から副ダイバータコイルの裏側を回り、主プラズマへ逆流する粒子のコンダクタンスを減少させることによって、ダイバータ室圧力を増加させ、排気量の増大を図る目的で取り付けられたものである。バッフル板は、トラス主排気ポートを除くすべてのポートセクションに取り付けた。これらの排気板の材料は、すべて真空容器と同一のインコネル625合金とし、厚さ2 mmの板を、真空容器側に溶接して取り付けられた。副コイル容器にはベローズがあるため溶接ができず、5～10 mmのギャップをもたせた。このバッフル板を取り付けたことにより、ダイバータ室から副コイル容器裏側を回り主プラズマ容器へ逆流する粒子のコンダクタンスは、水素に対して、概略、400 m³/sから100 m³/sに低減することができた。

3.3 圧力の測定方法

図3および図6にはダイバータ放電中の各部圧力測定点も示している。測定した圧力は、ダイバータ室圧力 (P_{div})、主プラズマ周辺の圧力 (P_{main})、ゲッターポンプ容器圧力 (P_g) およびトラス主排気系マニホルドの圧力 (P_v) である。これらはすべて、B-A型電離真空計であり、放電中磁場の影響を受けないように、磁場の強さが数10 mTの位置に設置するとともに、9 mm厚さの軟鉄の磁気シールドを取り付けた。また、コイル通電試験などにおいて、磁場ノイズの影響を調べ、圧力測定上問題のないことを確認した。ダイバータ放電中の主プラズマ密度のピークと上記真空計指示値のピークの時間的なずれから応答遅れを求めた結果、 P_{div} が0.1秒、 P_g が0.2秒、 P_v および P_{main} が0.3秒であった。トラス主排気系マニホルドの真空計は絶対較正が行われたものを使用した。各真空計の較正は、Zr-Alゲッターカートリッジを不活性状態にして、真空容器へ水素ガスを導入し、一定圧力となったときの各真空計の指示値とマニホルドの真空計の指示値を比較して、較正定数を相対的に決定した。ダイバータ放電時の圧力測定は、放電前2秒から放電後40秒まで行った。圧力データはCAMACシステムを使用して、10 msのサンプリング周期で取得した後、パーソナルコンピュータにより、データの転送および処理を行った。

3.4 Zr-Al ゲッターポンプの排気速度

3.1で述べたように、Zr-Al ゲッターカートリッジの排気特性に関しては、これまでいくつかの報告がある。しかし、ゲッターポンプの排気速度は取り付け構造や運転条件によって左右されるので、本ゲッターポンプの排気速度測定を行い、これまで公表されているデータと比較した。

ゲッターポンプの排気速度の測定は、トーラス主排気系の第1弁および真空容器に取り付けられたすべてのゲートバルブを閉め、封じ切り状態として、ガス注入系より水素ガスを導入した後、ゲッターポンプ1系統のゲートバルブを開き、真空容器の圧力減衰およびゲッターポンプ容器の圧力減衰から、次式により排気速度を求めた。ゲッター温度は常温とした。

$$S_{\text{eff}} = 2.3 V \left| \frac{d}{dt} (\log_{10} P_v) \right| \quad (3)$$

$$Q_{\text{ex}} = S_{\text{eff}} \cdot P_v = S_g \cdot P_g = C (P_v - P_g) \quad (4)$$

ここで、 S_{eff} および S_g は、各々、ゲッターポンプ1系統あたりのダイバータ室における排気速度、ゲッターポンプ容器における排気速度である。また、 Q_{ex} は排気量、 C はダイバータ室からゲッターポンプ容器までのコンダクタンスである。 V は真空容器の容積で、約200 m³である。排気速度測定時の P_v および P_g の圧力範囲は、

$$\begin{aligned} 0.02 \text{ Pa} < P_v < 0.07 \text{ Pa}, \\ 0.007 \text{ Pa} < P_g < 0.027 \text{ Pa} \end{aligned}$$

であった。

図7には、測定の結果得られた各ゲッターポンプ1系統あたりの、ダイバータ室における排気速度および排気量を示す。なお、トーラス主排気系マニホールドとダイバータ室の間のコンダクタンスは十分大きく、無視できるので、 $P_v = P_{\text{div}}$ としている。これより、ダイバータ室における排気速度は、各ポンプとも約1.4 m³/sとなっており、測定した圧力範囲では一定となっている。また、図8には、各ゲッターポンプ1系統あたり（Zr-Al カートリッジ3個）の、ゲッターポンプ容器における排気速度を示す。ゲッターポンプ容器での排気速度は3～4.6 m³/sの範囲となっており、P-1セクションのゲッターポンプがP-9セクションに設置したものより、排気速度が小さい。この理由は明らかではないが、P-1側の真空排気系の一部から、ゲッターの排気性能を低下させる不純物が混入した可能性が考えられる。Zr-Al カートリッジ1個あたりの排気量にすると、1.1 m³/sから1.53 m³/sの範囲にあり、常温における排気速度の公表値1.5 m³/sの67%～102%であった。また、ダイバータ室からゲッターポンプ容器までのコンダクタンスは、2.4～3.2 m³/sであり、目標とした値を上回る結果が得られた。Zr-Al ゲッターポンプのダイバータ室における排気速度は、4系統の合計で5.6 m³/sとなった。

JT-60 運転サイクルは2週間/サイクルで構成され、1サイクルの放電数は概略200ショットである。図9は、ゲッターポンプ排気速度測定時に得られた排気速度で規格化した、相対的排気速度のショットごとの変化を表している。これは、各ダイバータ放電後のトーラス主排気系マニホールドの圧力とゲッターポンプ容器の圧力の比率から評価したものである。これより、Zr-Al ゲッターの再生化により、排気速度が増加していること、実験運転における吸収により排気速度が徐々に低下すること、また、カートリッジの温度を室温よりも200°Cとしたほうが、排気速度

がやや大きいことがわかる。各サイクルでZr-Alゲッターカートリッジが吸収した水素の量は、約 $100 \text{ Pam}^3/\text{s}$ であり、この排気速度の低下の原因は、水素の吸収によるものとは考え難い。ディスラプションを起こした放電後の排気速度が、とくに低下していることから、実験時の水素ガス中に含まれる一酸化炭素(CO)などの不純物の影響と推測される。このため、ゲッターポンプの再生処理は、原則として1週間毎に行った。

また、図10は、ダイバータ実験において、プラズマ電流が立上らず、ガス注入のみ行われた場合に対し、ダイバータ室圧力とゲッターポンプ容器圧力の比率から求めた相対的排気速度を、カートリッジ温度が室温および 380°C に対して、比較したものである。これより、カートリッジ温度を 380°C とすることによって、排気速度の2倍近い改善が認められる。この系統のカートリッジ1個の室温における排気速度は、 $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、高温時では $2 \text{ m}^3/\text{s}$ となることを示している。

4. ダイバータ放電における排気特性

4.1 圧力特性

図11は、代表的なジュール加熱ダイバータ放電における、プラズマ電流 (I_p)、主プラズマの平均電子密度 (\bar{n}_e)、ガス注入量 (Q_{gas}) およびダイバータ室の圧力 (P_{div}) を示すものである。Zr-Alゲッターポンプは4系統とも使用し、トーラス主排気系も全系統運転した場合である。プラズマ電流は3.5秒から7.5秒までの4秒間、2 MA (一定) に保たれている。これより、主プラズマの密度は、ガス注入量にほぼ比例して増加することがわかる。これに対して、ダイバータ室の圧力は、主プラズマ密度の増加よりも、さらに急激に増加している。

図12には、ダイバータ室圧力、主プラズマ周辺の圧力およびトーラス主排気系マニホルドの圧力の主プラズマ密度に対する依存性を示す。本図は、プラズマ電流 $1.5 \sim 2 \text{ MA}$ 、放電時間10秒の多数の放電における、密度の最大値とこれに対応する各圧力の最大値をプロットしたものである。これによりダイバータ室圧力は、主プラズマ密度が $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ から $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の範囲でおよそその2乗に比例して増加することがわかる。主プラズマ周辺の圧力およびトーラス主排気系マニホルドの圧力もまた、主プラズマ密度の2乗に比例している。ダイバータ室圧力と主プラズマ周辺の圧力を比較すると、約45倍ダイバータ室圧力が高く、これは、ダイバータ室において顕著な粒子の圧縮が生じていることを示している。例えば、 $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ では、主プラズマ周辺の圧力が 0.0035 Pa であるのに対して、ダイバータ室圧力は 0.13 Pa である。

また、主プラズマ周辺の圧力が 10^{-2} Pa 以下の小さい値になっているということは、中性粒子入射ポート内部の圧力もこの程度に十分小さく、入射ポート内部での入射ビームの再電離損失は問題ないと考えられる。

一方、マニホルドの圧力は主プラズマ周辺の圧力に比べて、約1.7倍大きくなっている。トーラス主排気系マニホルドにおける主排気系の排気速度を S_v 、主排気ポートのコンダクタンスを C_v

がやや大きいことがわかる。各サイクルでZr-Alゲッターカートリッジが吸収した水素の量は、約 $100 \text{ Pam}^3/\text{s}$ であり、この排気速度の低下の原因は、水素の吸収によるものとは考え難い。ディスラプションを起こした放電後の排気速度が、とくに低下していることから、実験時の水素ガス中に含まれる一酸化炭素(CO)などの不純物の影響と推測される。このため、ゲッターポンプの再生処理は、原則として1週間毎に行った。

また、図10は、ダイバータ実験において、プラズマ電流が立上らず、ガス注入のみ行われた場合に対し、ダイバータ室圧力とゲッターポンプ容器圧力の比率から求めた相対的排気速度を、カートリッジ温度が室温および 380°C に対して、比較したものである。これより、カートリッジ温度を 380°C とすることによって、排気速度の2倍近い改善が認められる。この系統のカートリッジ1個の室温における排気速度は、 $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、高温時では $2 \text{ m}^3/\text{s}$ となることを示している。

4. ダイバータ放電における排気特性

4.1 圧力特性

図11は、代表的なジュール加熱ダイバータ放電における、プラズマ電流 (I_p)、主プラズマの平均電子密度 (\bar{n}_e)、ガス注入量 (Q_{gas}) およびダイバータ室の圧力 (P_{div}) を示すものである。Zr-Alゲッターポンプは4系統とも使用し、トラス主排気系も全系統運転した場合である。プラズマ電流は3.5秒から7.5秒までの4秒間、2MA(一定)に保たれている。これより、主プラズマの密度は、ガス注入量にほぼ比例して増加することがわかる。これに対して、ダイバータ室の圧力は、主プラズマ密度の増加よりも、さらに急激に増加している。

図12には、ダイバータ室圧力、主プラズマ周辺の圧力およびトラス主排気系マニホルドの圧力の主プラズマ密度に対する依存性を示す。本図は、プラズマ電流 $1.5 \sim 2 \text{ MA}$ 、放電時間10秒の多数の放電における、密度の最大値とこれに対応する各圧力の最大値をプロットしたものである。これによりダイバータ室圧力は、主プラズマ密度が $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ から $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の範囲でおおよそその2乗に比例して増加することがわかる。主プラズマ周辺の圧力およびトラス主排気系マニホルドの圧力もまた、主プラズマ密度の2乗に比例している。ダイバータ室圧力と主プラズマ周辺の圧力を比較すると、約45倍ダイバータ室圧力が高く、これは、ダイバータ室において顕著な粒子の圧縮が生じていることを示している。例えば、 $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ では、主プラズマ周辺の圧力が 0.0035 Pa であるのに対して、ダイバータ室圧力は 0.13 Pa である。

また、主プラズマ周辺の圧力が 10^{-2} Pa 以下の小さい値になっているということは、中性粒子入射ポート内部の圧力もこの程度に十分小さく、入射ポート内部での入射ビームの再電離損失は問題ないと考えられる。

一方、マニホルドの圧力は主プラズマ周辺の圧力に比べて、約1.7倍大きくなっている。トラス主排気系マニホルドにおける主排気系の排気速度を S_v 、主排気ポートのコンダクタンスを C_v

とすれば、主排気系ポート入口における圧力は $(C_v + S_v) / C_v$ だけ、マニホールド圧力より大きくなる。これを考慮すると、排気促進板による粒子排気の増加率は、2.3 倍 $(= 1.7 (C_v + S_v) / C_v; C_v = 28 \text{ m}^3/\text{s}, S_v = 10 \text{ m}^3/\text{s})$ となる。

図 13 は、プラズマ電流 1～2 MA、10 秒放電における、ゲッターポンプ容器の圧力の主プラズマ密度依存性を示す。カートリッジの温度は室温である。ゲッターポンプ容器圧力は、 $\bar{n}_e = 2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ から $4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の範囲では、やはり主プラズマ密度の 2 乗に比例して増加している。本図には、図 12 に示したダイバータ室圧力も示す。ダイバータ室の圧力とゲッターポンプ容器圧力の比率を、前項で示した排気速度測定時の圧力比と比較すると、約 10 % 放電中の方が小さい。この差はデータのばらつきの範囲内であるが、考えられる原因の一つとして、純粋な水素ガスに対する Zr-Al ゲッターポンプの排気速度と CO などの不純物を含む水素ガスに対する排気速度の差がある。したがって、この圧力差の減少を考慮して、排気速度を補正すると、放電時の Zr-Al ゲッターポンプの総排気速度は $5.3 \text{ m}^3/\text{s}$ となる。これは、 $\bar{n}_e = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のとき、 $0.3 \text{ Pa m}^3/\text{s}$ の排気量が得られることになる。しかし、 $\bar{n}_e = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ より密度が高くなると、ダイバータ室圧力とゲッターポンプ容器の圧力差は、密度の増加とともに小さくなる傾向が認められる。この原因は、式 (4) からわかるように、ゲッターポンプの排気速度の低下、あるいはゲッターポンプ容器とダイバータ室の間のコンダクタンスの増加が考えられる。しかし、この圧力領域での水素分子の平均自由行程は 0.1～0.2 m 程度であり、ゲッターポンプの配管径が 0.2 m であることから、分子流領域と考えられる。即ち、粘性流領域になったことにより、コンダクタンスが増加したとは考え難く、やはり排気速度の低下に起因するものと考えられる。

このような Zr-Al ゲッターポンプの排気速度の低下は、ゲッターカートリッジの温度を室温で使用したため、ゲッター内部への水素の拡散が遅く、表面に入射する粒子束が増大するに伴って表面層に水素が蓄積し、飽和することによるものと推定される。したがって、カートリッジの温度を 400°C 程度まであげ、ゲッター材内部への拡散を大きくすることによって排気速度は改善されるものと考えられる。一方、ダイバータ室における放射損失の測定結果およびプラズマのシュミレーション解析との比較から、ダイバータ室の不純物含有量は酸素にして 1～2 % 程度と推定される⁽¹⁷⁾。この程度の不純物に対しては、 400°C の場合には、ゲッターポンプの排気速度に及ぼす影響は小さく⁽¹⁸⁾、また、 0.3 Pa 程度までの圧力に対しては、排気速度の圧力依存性もわずかである⁽¹⁶⁾。さらに、カートリッジ温度を 400°C で運転すれば、図 10 に示したように、室温より 2 倍程度排気速度が改善される。これらのことにより、 400°C 運転により Zr-Al ゲッターポンプの排気速度は、 $\bar{n}_e = 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \sim 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の高密度領域においても、前述のような、低密度領域と同程度の排気速度が維持される可能性は十分あると考えられる。

図 14 は、中性粒子入射加熱時とジュール加熱時のダイバータ室圧力のプラズマ密度依存性を比較したものである。プラズマ電流は 1.5～2 MA、加熱入力は 10～20 MW、加熱時間は 1 秒である。これにより中性粒子入射加熱プラズマでも、ダイバータ室圧力は主プラズマ密度の 2 乗に比例して増加する傾向が認められるが、ジュール加熱の場合よりも、同じ主プラズマ密度に対して、約 3 倍大きい値を示している。この中性粒子入射加熱時の P_{div} の増加の原因としては、式 (1) で表わされるダイバータ室の圧力バランスを考えると、 τ_p の低下あるいは C_b の低下が考

えられる。しかし、ダイバータプラズマの解析によれば、 C_b が中性粒子入射により大きく減少することはなく、したがって、 P_{div} の増加の主要な理由は τ_p の減少と推定される⁽¹⁷⁾。この P_{div} の増加により、中性粒子入射加熱時ではダイバータ室粒子の排気がより効率良く行われることになる。

4.2 粒子排気量

次に、ダイバータ室粒子の排気量について述べる。ダイバータ室粒子の排気量とダイバータ室圧力の関係は、Zr-Al ゲッターポンプおよびトラス主排気系による排気量について各々、次のように表わされる。

$$Q_{Zr-Al} = S_{eff} \cdot P_{div} \quad (5)$$

$$Q_{main} = N \cdot S_v \cdot P_v \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Q_{total} &= Q_{Zr-Al} + Q_{main} \\ &= (S_{eff} + N \cdot S_v \cdot (P_v/P_{div})) P_{div} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 Q_{Zr-Al} 、 Q_{main} および Q_{total} は、各々、Zr-Al ゲッターポンプによる総排気量、トラス主排気系による総排気量およびそれらの合計排気量である。また、 S_{eff} 、 S_v は各々Zr-Al ゲッターポンプのダイバータ室における排気速度およびトラス主排気系のターボ分子ポンプ (TMP) 1台のマニホールドにおける排気速度である。NはTMPの台数である。上記の実験結果より得られた S_{eff} 、 P_v/P_{div} は、各々、 $S_{eff} = 5.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $P_v/P_{div} \sim 1/24$ であり、また $S_v = 2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $N = 15$ である。よって式(5)～(7)は次のように表わされる。

$$Q_{Zr-Al} = 5.3 P_{div} \quad (8)$$

$$Q_{main} = 1.5 P_{div} \quad (9)$$

$$Q_{total} = 6.8 P_{div} \quad (10)$$

一方、中性粒子入射によりプラズマへ供給される粒子量は、概略次のようになる。

$$Q_{NBI} = K \cdot P_{NBI} / (E \cdot e) \quad (11)$$

ここで、 Q_{NBI} は単位時間あたりの中性粒子の入射量、 P_{NBI} はトラス熱入力、Eはビームのエネルギー、eは電子の電荷である。またKは換算係数である。JT-60中性粒子入射加熱装置のビームエネルギーは定格75 keV、最大100 keVである。よって各々のビームエネルギーに対して、熱入力20 MWの場合の中性粒子入射量は、概略、 $Q_{NBI} = 3 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (E = 75 keV)、 $2.3 \text{ Pam}^3/\text{s}$ (E = 100 keV)となる。

図15は、ダイバータ室粒子の排気量とプラズマ密度との関係をジュール加熱時(OH)および中性粒子入射加熱時(NBI)に対して示したものである。中性粒子入射加熱時の排気特性は、ジュール加熱時の3倍としている。JT-60の中性粒子入射実験において、熱入力20 MW、プラズマのエネルギー閉じ込め時間0.4秒では、臨界条件の達成に最も有利なプラズマ密度は約 $6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ である⁽¹⁹⁾。 $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ での総排気量は、ビームエネルギー100 keVで、20 MWの中性粒子入射加熱を行ったときの粒子入射量とほぼ等しくなっている。また、ビームエネルギーが75 keVの場合には、 $\bar{n}_e = 7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度で排気可能である。よって、プラズマ密度が $(6 \sim 7) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上であれば、ダイバータ室粒子排気装置によって、熱入力20 MW

の中性粒子入射加熱時の入射粒子を排気することは可能と考えられる。

4.3 ゲッターポンプの使用 / 不使用における比較

図 16 に、Zr-Al ゲッターポンプを使用した場合と不使用の場合の、中性粒子入射加熱ダイバータ放電における、主プラズマの線積分電子密度の比較を示す。この場合、ゲッターの温度は室温で、4 系統とも活性状態である。最初にゲートバルブを開状態 (pumps on) でダイバータ放電を行い、続いてゲートバルブを閉状態 (no pumping) として、同一条件で放電を行い比較したものである。中性粒子入射加熱は、放電開始後 6 秒から始まり、0.7 秒あるいは 1 秒間入射されている。これより、ゲッターを使用した場合と、使用しない場合では、ジュール加熱状態ではプラズマ密度の増加とともに差が現われ、ゲッターを使用しない場合の方が密度上昇率が大きくなっている。また中性粒子入射加熱中においても、わずかにその傾向が認められる。しかし、この 2 つの放電では、ゲッターを使用した場合が、使用しない場合より前に行われた放電であり、壁の状態としては後の方がリサイクリング率が大きくなる傾向があるので、上記の結果がゲッターの排気効果によるものか、それともダイバータ板のリサイクリング率の変化によるものか明らかでない。

そこで、ゲッターを使用する場合と使用しない場合の放電順序を逆にして実験を行った。その結果を図 17 に示す。ゲッター温度は 380°C である。この場合、2 つの放電は密度の立ち上がりところで、挙動の差違が認められるが、ジュール加熱状態では密度の上昇に伴って、ゲッター使用の場合の方がその上昇率が小さくなっているのが認められる。中性粒子入射加熱の開始直前において、密度の上昇率の違いを比較すると、ゲッター使用の場合が $2.38 \times 10^{19} \text{m}^{-2}/\text{s}$ であるのに対して、ゲッター不使用の場合には $2.83 \times 10^{19} \text{m}^{-2}/\text{s}$ となり、約 20% だけゲッター使用の方が密度上昇率が小さい。また、中性粒子入射加熱時においても、ゲッター使用の場合は、加熱前の密度が高いにもかかわらず、加熱中の密度は、ゲッター不使用の場合とほぼ同程度となり、かつ密度の上昇率も小さいことがわかる。また、この実験では、中性粒子入射加熱中に、ガス注入を停止しているが ($t = 6.7 \text{ s}$)、ガス注入停止後の密度減衰率はゲッター使用のほうが大きくなっている。ゲッター使用の放電は後から行っており、ダイバータ板のリサイクリング率の増加、即ち、壁の吸収量の減少分を相殺することになっていることから、この違いは、Zr-Al ゲッター排気の効果であると考えられる。

中性粒子入射加熱の開始直前の密度上昇率の差より、プラズマ半径を 0.84 m、プラズマ体積を 43 m^3 として粒子排気量を求めると $0.22 \text{ Pam}^3/\text{s}$ ($\bar{n}_e = 5.7 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$) となる。また、中性粒子入射加熱中の密度上昇率およびガス注入停止後の密度減衰率の差より粒子排気量を求めると、いずれも、 $\bar{n}_e = 4.2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ において、約 $0.5 \text{ Pam}^3/\text{s}$ が得られた。ゲッターポンプを不使用の場合、ガス注入停止後の密度減衰率から求めた壁の粒子排気量は、約 $0.6 \text{ Pam}^3/\text{s}$ であり、ゲッターポンプによる排気量と同程度となっている。

また、図 18 は、これら 4 つの放電について、中性粒子入射加熱の開始直前と加熱中 (加熱終了直前) のダイバータ室圧力とプラズマ密度の関係を比較したものである。これより、380°C のゲッター排気の場合には、他の場合と傾向が異なり、加熱中のプラズマ密度が小さくなってお

り、ダイバータ室圧力の上昇も抑制されていることが明らかである。

ところが、本図に示す 380°C のゲッター排気において、中性粒子入射加熱の開始直前と加熱中（加熱終了直前）のダイバータ室圧力の増加は、0.18 Pa から 0.21 Pa となっており、18% の増加率である。これに対して、密度変化率の差より求めた粒子排気量は、 $0.22 \text{ Pam}^3/\text{s}$ から $0.5 \text{ Pam}^3/\text{s}$ と 2 倍以上増加している。これは、単純に Zr-Al ゲッターポンプによる排気効果だけでは説明できない。

ゲッターポンプを使用した場合と不使用の場合の密度の変化率より求めた粒子排気量の差分を ΔQ_{ex} 、壁の排気量の差分を ΔQ_w 、ゲッターポンプによる排気量を Q_{Zr-Al} とすると、

$$\Delta Q_{ex} = Q_{Zr-Al} - \Delta Q_w \quad (12)$$

と表される。 Q_{Zr-Al} はダイバータ室の圧力に比例するので、加熱開始前と加熱中で、 ΔQ_{ex} が 2 倍以上異なるのは、主として、 ΔQ_w の差と考えられる。つまり、連続した二つの放電における壁の排気効果を比較すると、中性粒子入射加熱開始前のジュール加熱状態では、後の放電のほうが壁に粒子が吸収されにくくなる傾向が強（リサイクリング率の増加が大きい）、 ΔQ_w が比較的大きい。これに対して、中性粒子入射加熱中では、前後の放電でリサイクリング率の変化が比較的小さい、即ち、 ΔQ_w が比較的小さいためと推測される。

5. 結 論

JT-60 ダイバータ放電において、ダイバータ室より粒子を排気する真空排気装置を設計し、ダイバータ実験においてその排気特性を調べた。ダイバータ放電の主要なパラメータは、プラズマ電流 1~2 MA、主プラズマの平均密度 $2 \times 10^{19} \sim 8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、放電時間 10 秒、中性粒子入射加熱入力 10~20 MW、加熱時間 1 秒であった。その結果、次のような結論が得られた。

Zr-Al ゲッターポンプの排気速度測定を行い、水素に対する排気速度は、カートリッジ温度が室温の場合で $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$ となること、またカートリッジを約 400°C にすることにより排気速度が 2 倍程度改善されることを確認した。ダイバータ放電中の排気速度は、カートリッジが室温の場合では、 $5.3 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、CO などの不純物を含む場合には、排気速度が低下する現象が認められた。

トラス主排気系への排気促進効果は、案内板を取り付けることにより 2.3 倍排気量を増加させることができた。その結果、トラス主排気系のダイバータ室における排気速度は $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、ダイバータ室粒子の排気量を約 30% 増加させることができた。

ダイバータ放電中のダイバータ室圧力は主プラズマ密度のほぼ 2 乗に比例して増加することがわかった。ジュール加熱放電の場合、 $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ では、ダイバータ室圧力は 0.13 Pa となり、中性粒子入射加熱時には、同じ密度で約 3 倍高いダイバータ室圧力が得られた。また、主プラズマ周辺の圧力、トラス主排気系マニホールド圧力および Zr-Al ゲッターポンプ容器圧力もまた \bar{n}_e の 2 乗に比例して増加することがわかった。主プラズマ周辺の圧力はダイバータ室圧力に比較すると、約 1/45 であり、ダイバータ室での粒子の圧縮効果が顕著に認められた。

り、ダイバータ室圧力の上昇も抑制されていることが明らかである。

ところが、本図に示す 380°C のゲッター排気において、中性粒子入射加熱の開始直前と加熱中（加熱終了直前）のダイバータ室圧力の増加は、0.18 Pa から 0.21 Pa となっており、18% の増加率である。これに対して、密度変化率の差より求めた粒子排気量は、 $0.22 \text{ Pam}^3/\text{s}$ から $0.5 \text{ Pam}^3/\text{s}$ と 2 倍以上増加している。これは、単純に Zr-Al ゲッターポンプによる排気効果だけでは説明できない。

ゲッターポンプを使用した場合と不使用の場合の密度の変化率より求めた粒子排気量の差分を ΔQ_{ex} 、壁の排気量の差分を ΔQ_w 、ゲッターポンプによる排気量を Q_{Zr-Al} とすると、

$$\Delta Q_{ex} = Q_{Zr-Al} - \Delta Q_w \quad (12)$$

と表される。 Q_{Zr-Al} はダイバータ室の圧力に比例するので、加熱開始前と加熱中で、 ΔQ_{ex} が 2 倍以上異なるのは、主として、 ΔQ_w の差と考えられる。つまり、連続した二つの放電における壁の排気効果を比較すると、中性粒子入射加熱開始前のジュール加熱状態では、後の放電のほうが壁に粒子が吸収されにくくなる傾向が強（リサイクリング率の増加が大きい）、 ΔQ_w が比較的大きい。これに対して、中性粒子入射加熱中では、前後の放電でリサイクリング率の変化が比較的小さい、即ち、 ΔQ_w が比較的小さいためと推測される。

5. 結 論

JT-60 ダイバータ放電において、ダイバータ室より粒子を排気する真空排気装置を設計し、ダイバータ実験においてその排気特性を調べた。ダイバータ放電の主要なパラメータは、プラズマ電流 1~2 MA、主プラズマの平均密度 $2 \times 10^{19} \sim 8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 、放電時間 10 秒、中性粒子入射加熱入力 10~20 MW、加熱時間 1 秒であった。その結果、次のような結論が得られた。

Zr-Al ゲッターポンプの排気速度測定を行い、水素に対する排気速度は、カートリッジ温度が室温の場合で $5.6 \text{ m}^3/\text{s}$ となること、またカートリッジを約 400°C にすることにより排気速度が 2 倍程度改善されることを確認した。ダイバータ放電中の排気速度は、カートリッジが室温の場合では、 $5.3 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、CO などの不純物を含む場合には、排気速度が低下する現象が認められた。

トラス主排気系への排気促進効果は、案内板を取り付けることにより 2.3 倍排気量を増加させることができた。その結果、トラス主排気系のダイバータ室における排気速度は $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ となり、ダイバータ室粒子の排気量を約 30% 増加させることができた。

ダイバータ放電中のダイバータ室圧力は主プラズマ密度のほぼ 2 乗に比例して増加することがわかった。ジュール加熱放電の場合、 $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ では、ダイバータ室圧力は 0.13 Pa となり、中性粒子入射加熱時には、同じ密度で約 3 倍高いダイバータ室圧力が得られた。また、主プラズマ周辺の圧力、トラス主排気系マニホールド圧力および Zr-Al ゲッターポンプ容器圧力もまた \bar{n}_e の 2 乗に比例して増加することがわかった。主プラズマ周辺の圧力はダイバータ室圧力に比較すると、約 1/45 であり、ダイバータ室での粒子の圧縮効果が顕著に認められた。

本ダイバータ室粒子排気装置の排気量については、 $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上の密度領域で、ビームエネルギー 75 ~ 100 keV, 熱入力 20 MW の中性粒子入射加熱時の粒子入射量に相当する排気量 2.3 ~ 3 Pa m³/s が可能であることを示し、長パルスの中性粒子入射加熱実験が可能であることを示した。

中性粒子入射加熱ダイバータ放電において、Zr-Al ゲッターポンプを使用した場合と、使用しない場合の放電において、プラズマ密度およびダイバータ室圧力を比較した結果、カートリッジ温度を 380°C としてゲッターポンプを使用した場合には、プラズマ密度の上昇率が小さくなるとともに、ガス注入停止後の密度減衰率が大きくなる結果が得られ、ゲッターポンプによる密度制御効果を確認した。中性粒子入射加熱時の密度減衰率の変化より求めた粒子排気量は、 $\bar{n}_e = 4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ において約 0.5 Pa m³/s であり、壁の吸収による粒子排気量と同程度であった。

謝 辞

本研究を遂行するに際し、終始激励いただいた苫米地顕那珂研究所所長、吉川允二臨界プラズマ研究部部長、飯島勉 JT-60 試験部部長に深く感謝致します。また、終始指導され有益な助言をいただいた太田充 JT-60 第 2 試験室室長、下村安夫臨界プラズマ実験室室長に深く感謝の意を表します。さらに、清水正重 JT-60 第 2 試験室試験グループリーダーおよび大久保実同開発グループリーダーには、本装置の設計、製作、運転などの面から貴重な助言をいただき感謝致します。永見正幸副主任研究員、吉田英俊研究員、新倉節夫研究員（現在、三菱原子力工業株式会社）ならびに JT-60 実験チームの方々には、実験に関して有益な議論をいただき感謝致します。JT-60 運転チーム、とくに本体班および運転委託の方々には、ダイバータ室粒子排気装置の運転およびデータ収集にご尽力いただき、心より感謝致します。

本ダイバータ室粒子排気装置の排気量については、 $\bar{n}_e = 6 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 以上の密度領域で、ビームエネルギー 75 ~ 100 keV, 熱入力 20 MW の中性粒子入射加熱時の粒子入射量に相当する排気量 2.3 ~ 3 Pa m³/s が可能であることを示し、長パルスの中性粒子入射加熱実験が可能であることを示した。

中性粒子入射加熱ダイバータ放電において、Zr-Al ゲッターポンプを使用した場合と、使用しない場合の放電において、プラズマ密度およびダイバータ室圧力を比較した結果、カートリッジ温度を 380°C としてゲッターポンプを使用した場合には、プラズマ密度の上昇率が小さくなるとともに、ガス注入停止後の密度減衰率が大きくなる結果が得られ、ゲッターポンプによる密度制御効果を確認した。中性粒子入射加熱時の密度減衰率の変化より求めた粒子排気量は、 $\bar{n}_e = 4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ において約 0.5 Pa m³/s であり、壁の吸収による粒子排気量と同程度であった。

謝 辞

本研究を遂行するに際し、終始激励いただいた苫米地顕那珂研究所所長、吉川允二臨界プラズマ研究部部長、飯島勉 JT-60 試験部部長に深く感謝致します。また、終始指導され有益な助言をいただいた太田充 JT-60 第 2 試験室室長、下村安夫臨界プラズマ実験室室長に深く感謝の意を表します。さらに、清水正亜 JT-60 第 2 試験室試験グループリーダーおよび大久保実同開発グループリーダーには、本装置の設計、製作、運転などの面から貴重な助言をいただき感謝致します。永見正幸副主任研究員、吉田英俊研究員、新倉節夫研究員（現在、三菱原子力工業株式会社）ならびに JT-60 実験チームの方々には、実験に関して有益な議論をいただき感謝致します。JT-60 運転チーム、とくに本体班および運転委託の方々には、ダイバータ室粒子排気装置の運転およびデータ収集にご尽力いただき、心より感謝致します。

References

- (1) Simomura, Y., et al. : J. Nucl. Mater., 128/129, 19 (1984).
- (2) Stott, P.E., et al. : Nucl. Fusion, 15, 431 (1975).
- (3) Eubank, H., et al. : in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1978 (Proc. 7th Int. Conf., Innsbruck, 1978), IAEA, Vienna, Vol.1, 167. (1977).
- (4) Meade, D.M., et al. : in Controlled Fusion and Plasma Physics (Proc. 9th Europ. Conf., Oxford, 1979), Vol.1, 91 (1979).
- (5) Mueller, E.R., et al. : Nucl. Fusion 22/12, 1651 (1982).
- (6) Nagami, M. et al. : Nuclear Fusion, 18, 4, 529 (1978).
- (7) Suzuki, N., et al. : J. Nucl. Mater. 93/94, 282 (1980).
- (8) Ferrario, B. and Rosai, L. : Proc. 7th Int. Vac. Congress and 3rd Int. Conf. Solid Surfaces, Berger and Söhne, Vienna, 359 (1977).
- (9) Boffito, C. : J. Vac. Sci. Technol., 15, 1117 (1981).
- (10) Cecchi, J.L. and Knize, R.J. : J. Vac. Sci. Technol., A2 (2), April-June, 1214 (1984).
- (11) Cecchi, J.L., et al. : J. Nucl. Mater., 111/112, 305 (1982).
- (12) Mioduszewski, P., et al. : in Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1984 (Proc. 10th Int. Conf., London, 1984), IAEA, Vienna, 257 (1985).
- (13) Dippel, K.H., et al. : *ibid.*, 249 (1985).
- (14) Cecchi, J.L., et al. : J. Nucl. Mater., 128/129, 1 (1984).
- (15) Knize, R.J., et al. : J. Nucl. Mater., 103/104, 539 (1981).
- (16) Barosi, A., et al. : Proc. Int. Conf. Radiation Effects and Tritium Technol. for Fusion Reactors, Gatlingburg, October, 213 (1975).
- (17) Yoshida, H., et al. : Submitted to Nucl. Fusion.
- (18) Ferrario, B., et al. : Proc. 9th Symp. Fusion Technol., Carmisch-Partenkirchen, June 14-18, 51 (1976).
- (19) Niikura, S., et al. : JAERI-M 86-089, (1986).

表1 Zr-Al ゲッターポンプの諸元

Parameters	Units	Constants
Number of getter pumps	-	4 (P-1 U&L, P-9 U&L)
Number of cartridges for each pump	-	3
Type of getters	-	Zr-Al alloy SORB-AC C-500 (St 101)
Pumping speed of cartridge	m ³ / s	1.5 (25 °C) 2.0 (400 °C)

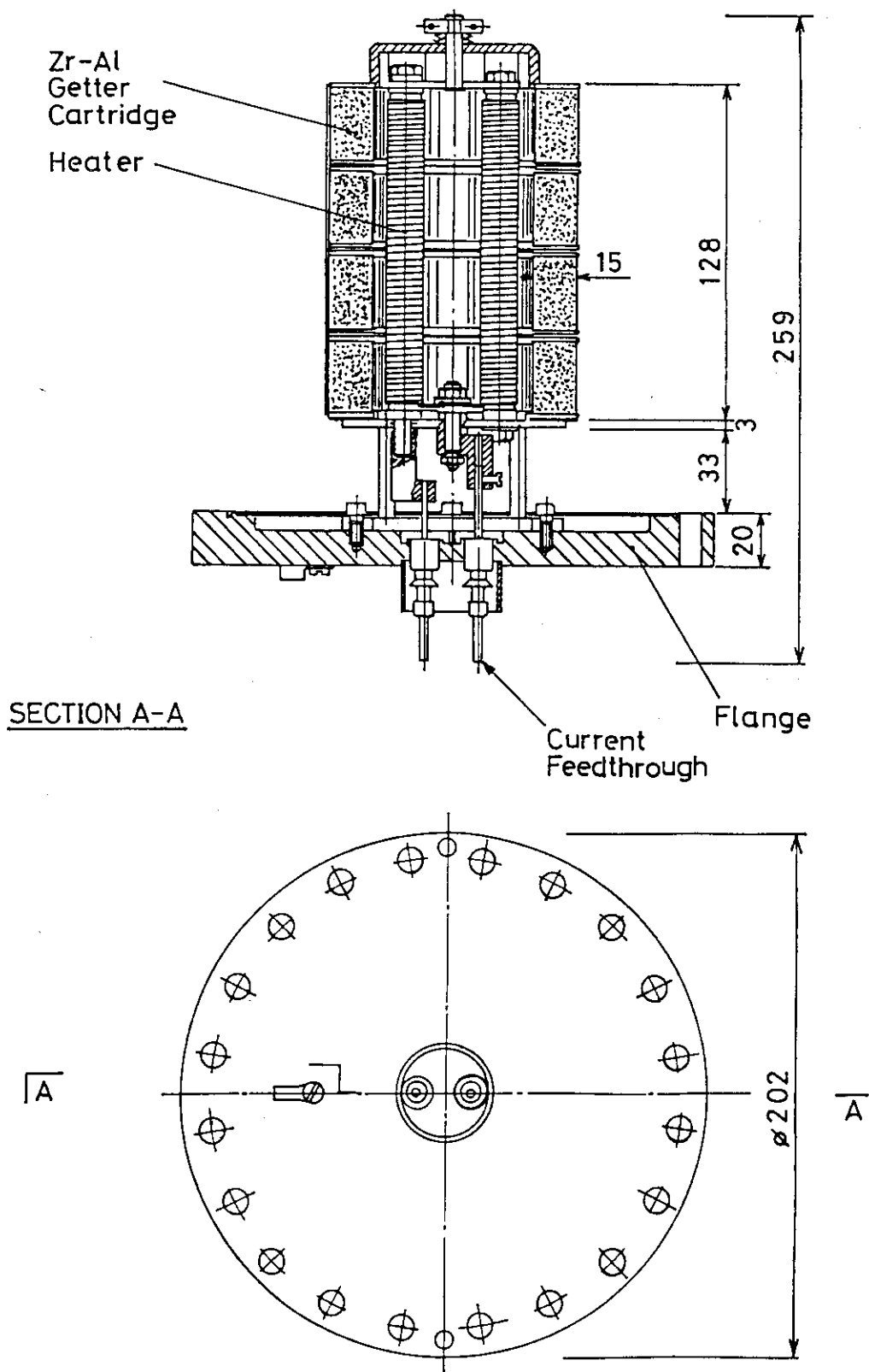


図1 Zr-Al ゲッターポンプカートリッジ (SORB-AC C-500)⁽¹³⁾

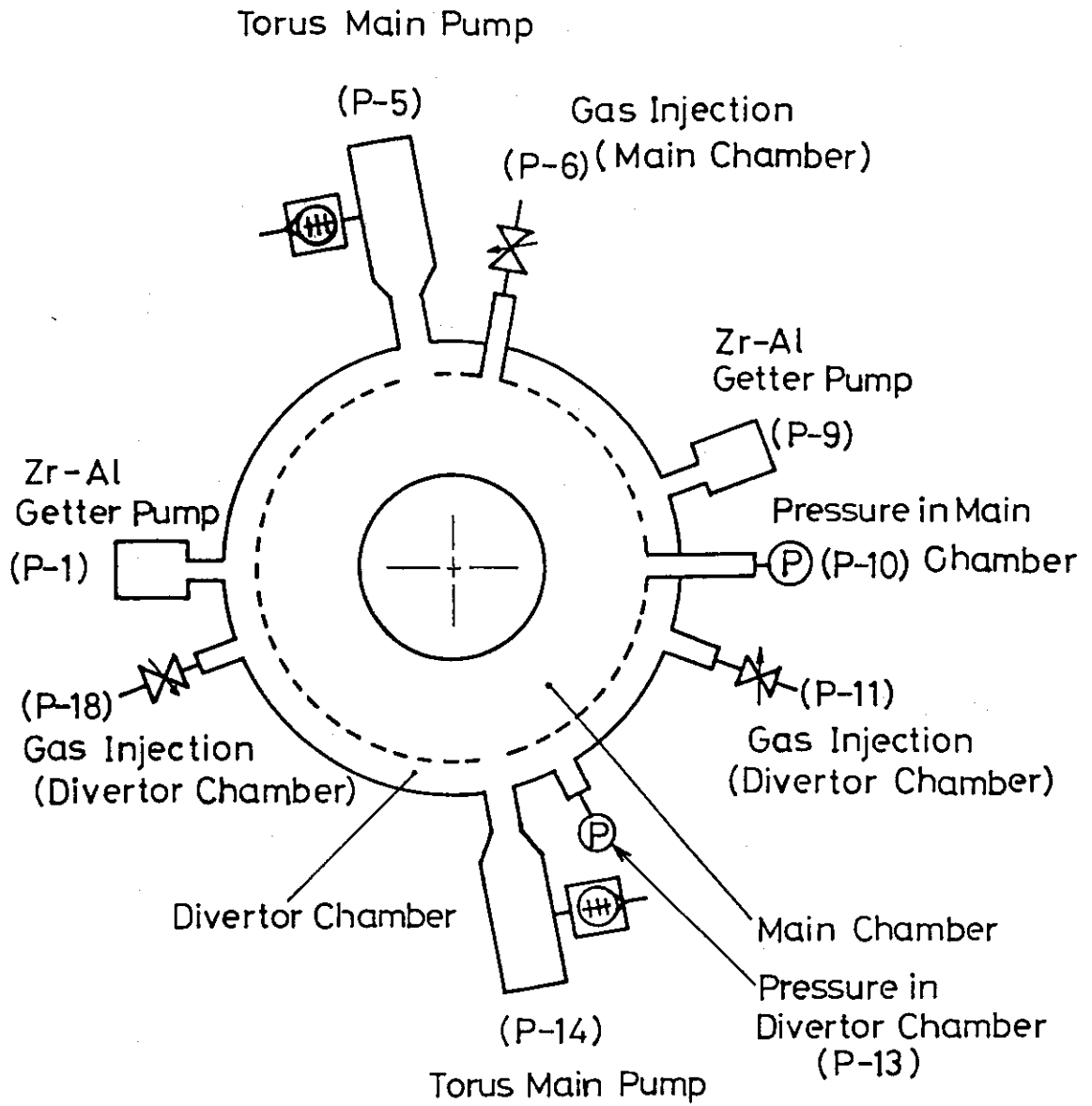


図2 Zr-Al ゲッターポンプ, トーラス主排気系, ガス注入系
などのトーラス方向配置

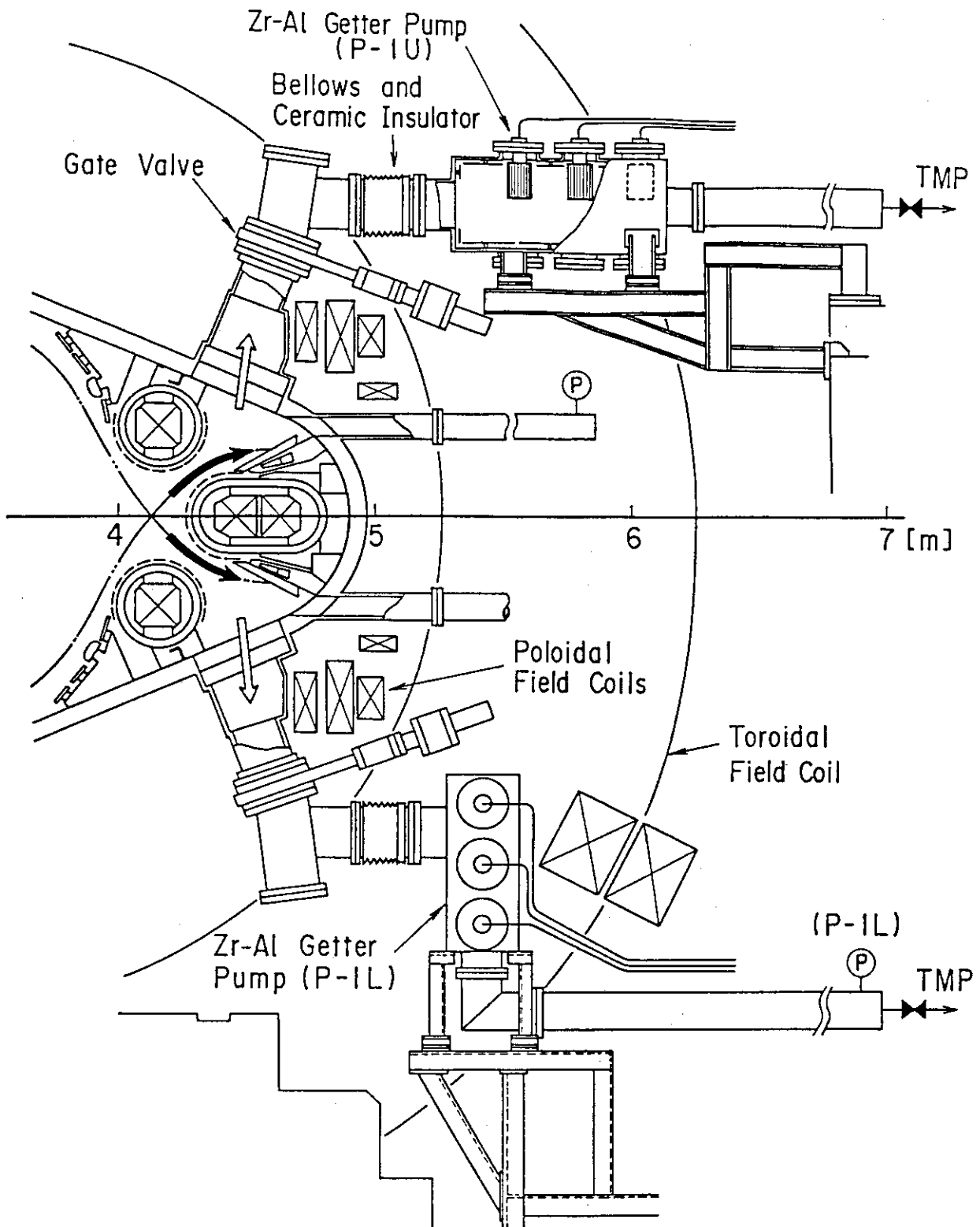
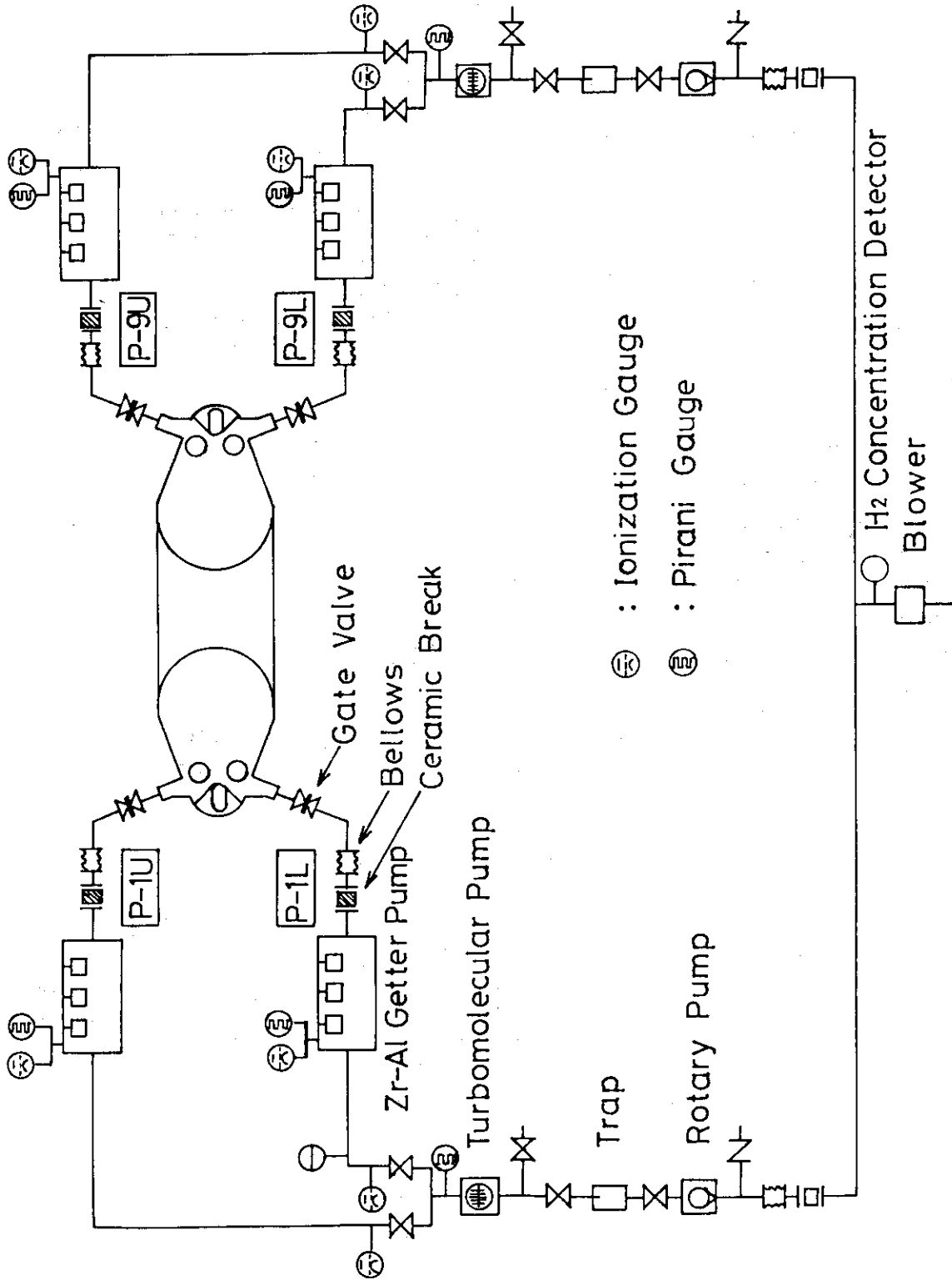


図3 Zr-Al ゲッターポンプの取付構造 (P-1 セクション)



⊕ : Ionization Gauge

⊗ : Pirani Gauge

図4 Zr-Alゲッターポンプの真空排気系統図

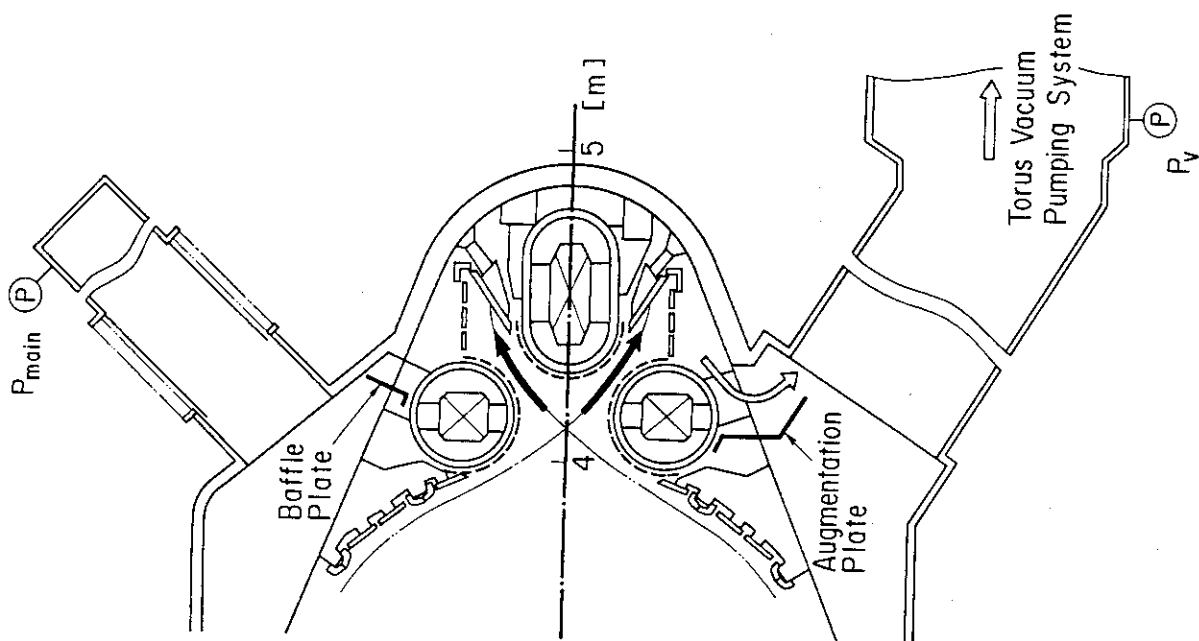


図6 ダイバーター室粒子の排気促進板およびバツフル板

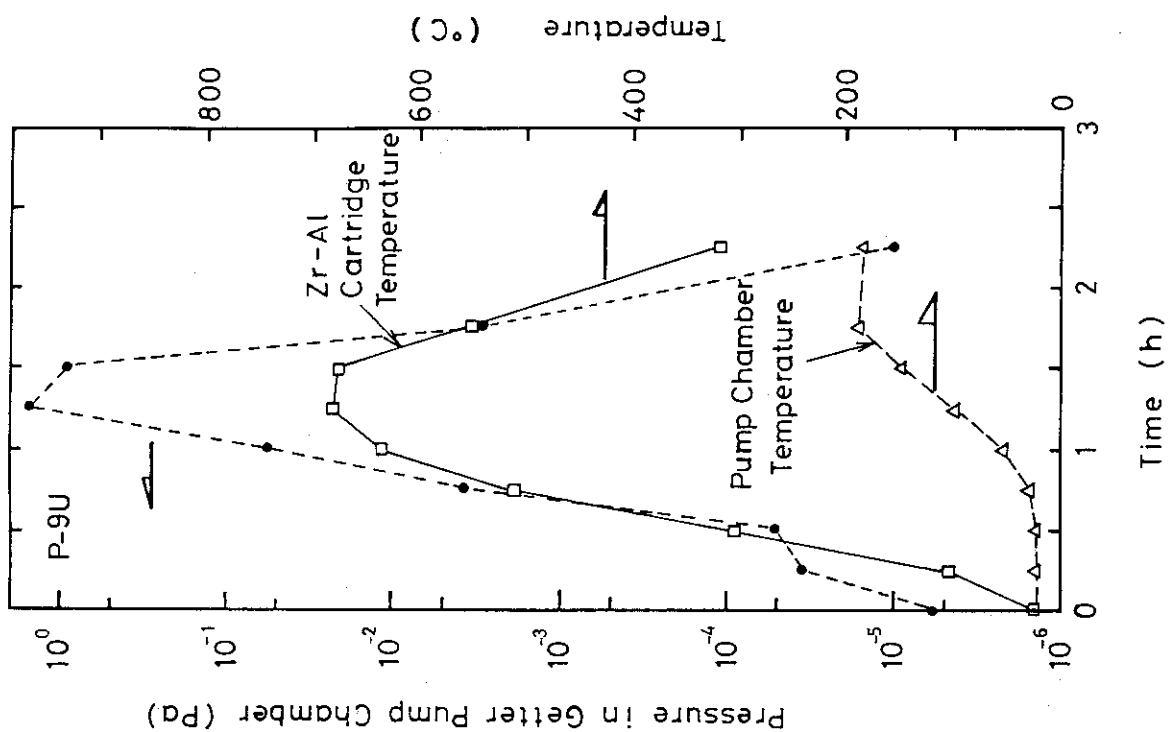


図5 Zr-Al ゲッターポンプの再生化時の圧力および温度変化

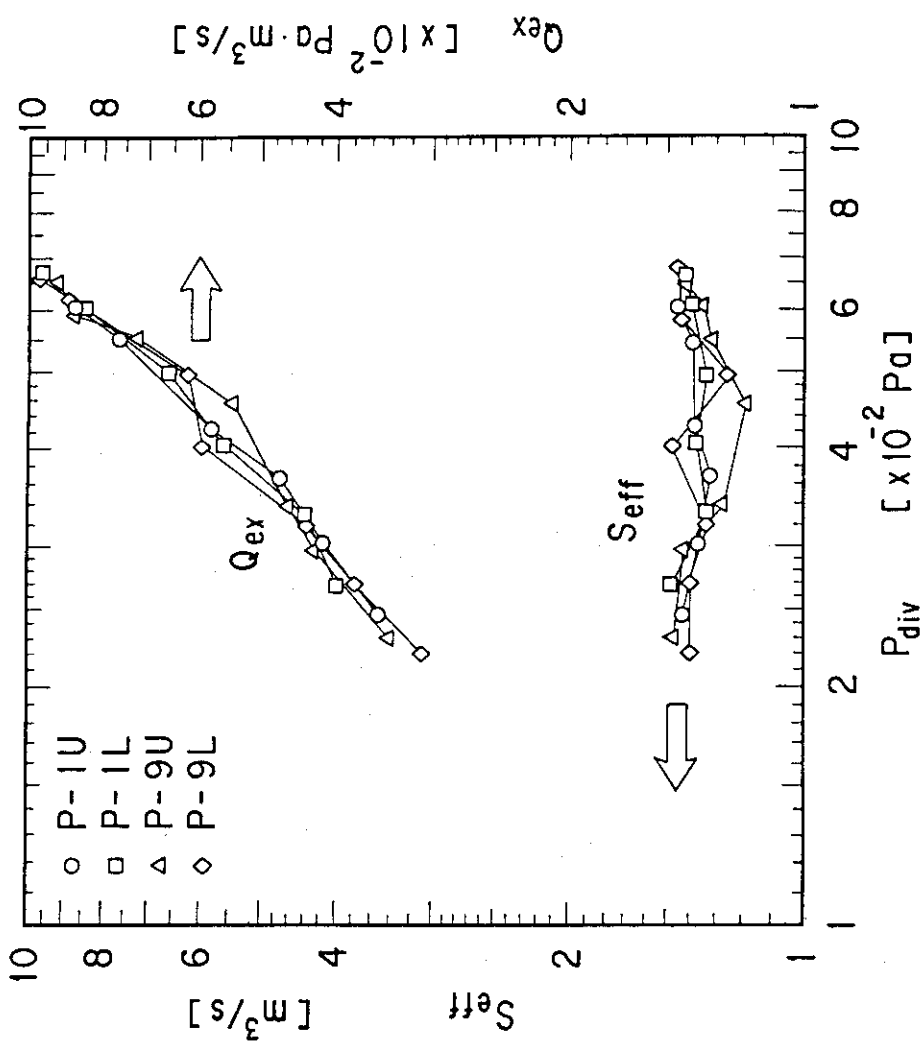
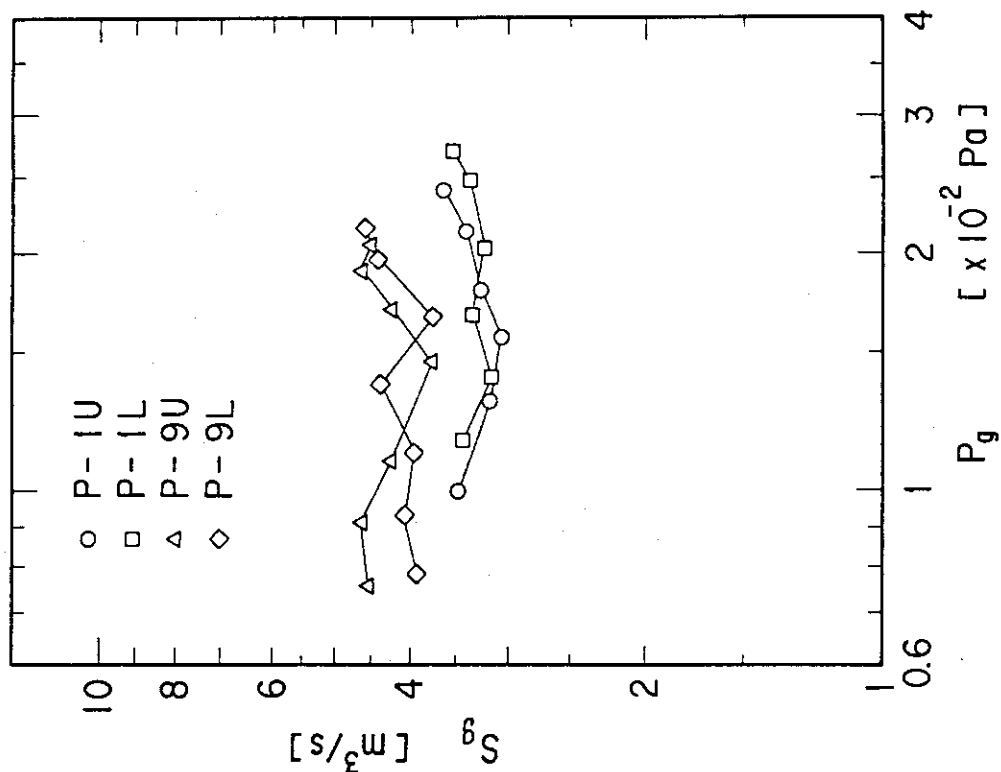


図8 Zr-AIゲッターポンプのゲッターポンプ容器における排気速度

図7 Zr-AIゲッターポンプのダイバータ室における排気速度および排気量

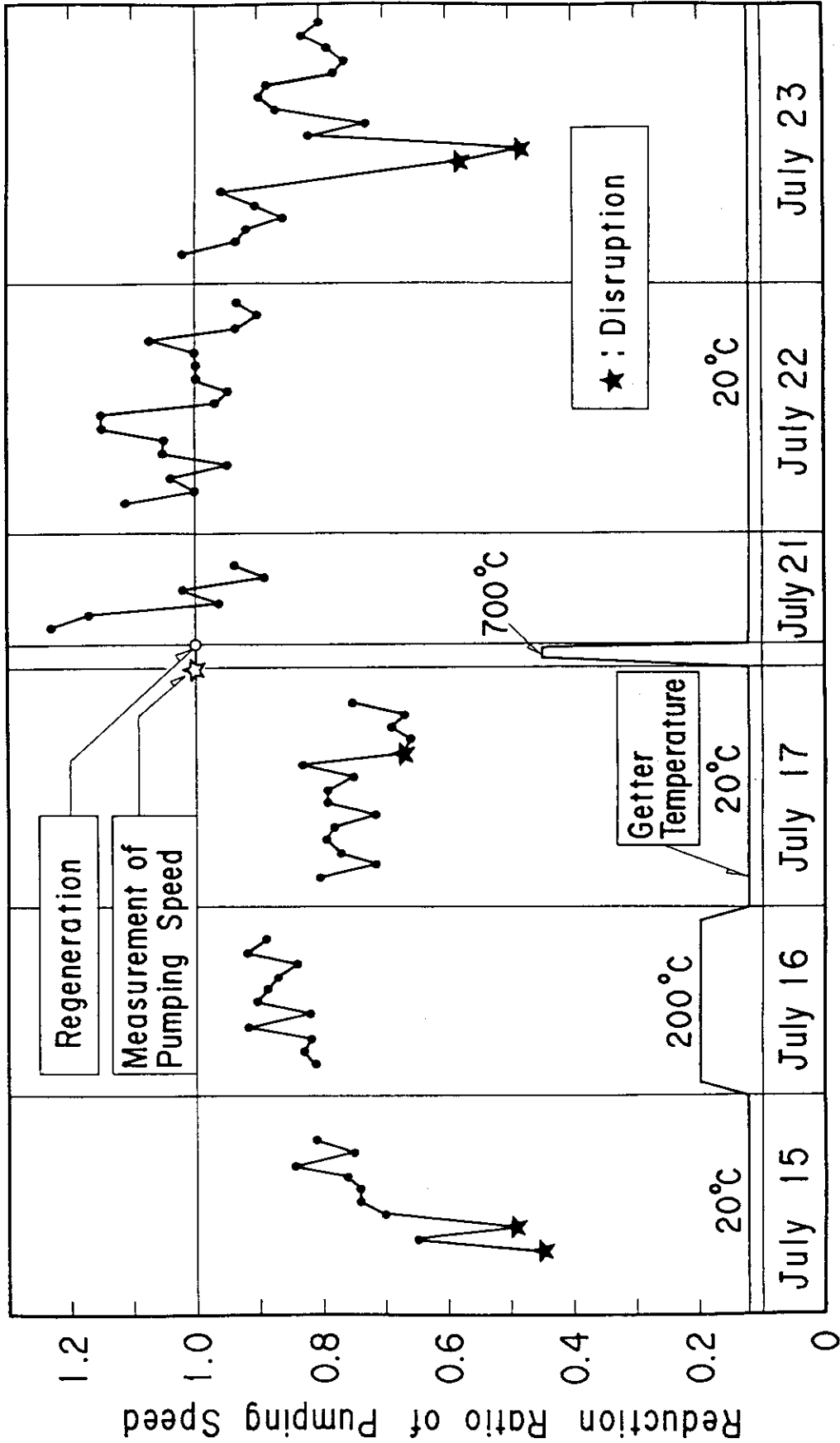


図9 JT-60 運転サイクルにおけるZr-AIゲッターポンプ
排気速度の相対的变化

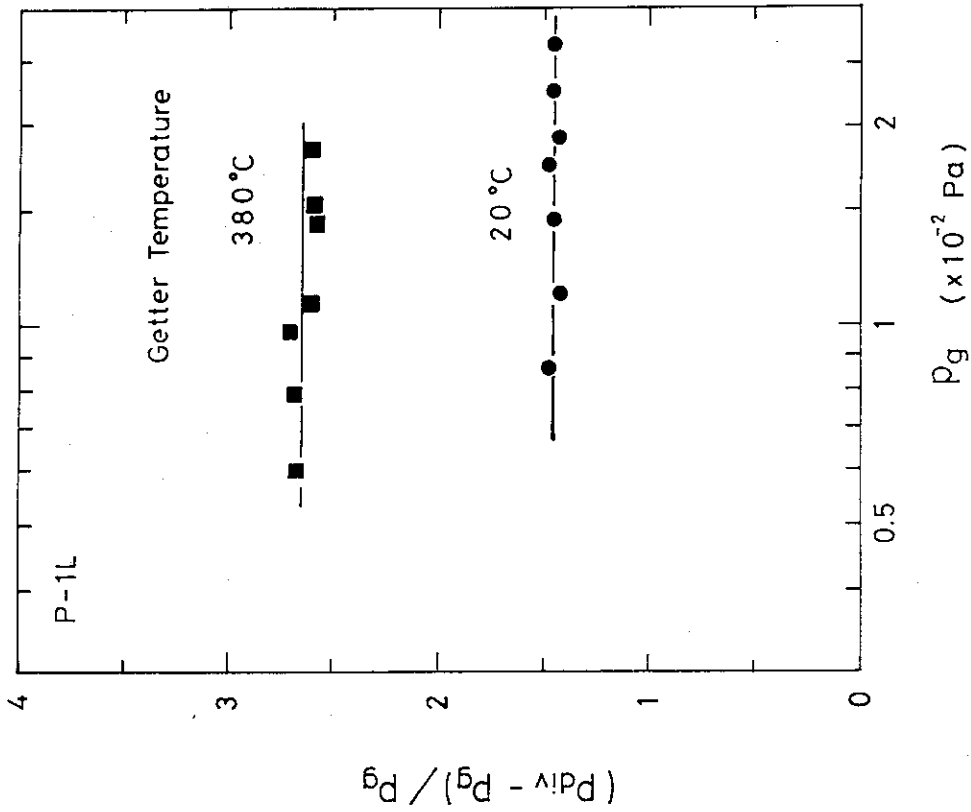


図10 Zr-Alゲッターカートリッジの温度(20°Cと380°C)の排気速度に及ぼす影響

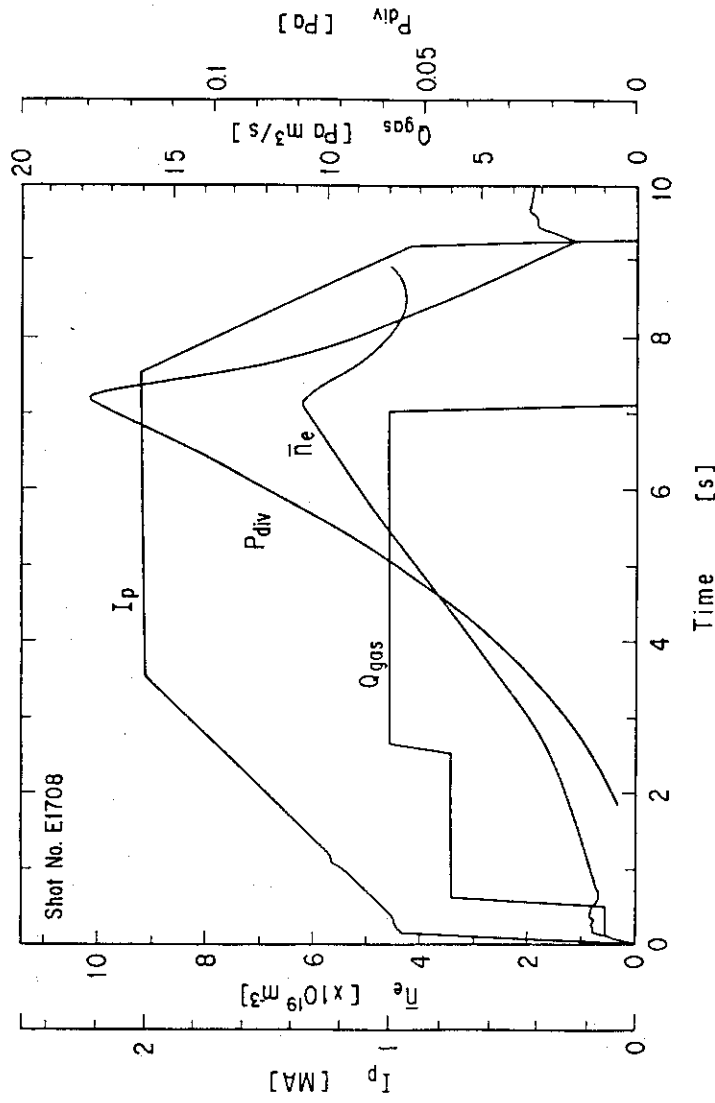


図11 代表的なジュール加熱ダイバータ放電におけるプラズマ電流 (I_p), 主プラズマの平均電子密度 (\bar{n}_e), ガス注入量 (Q_{gas}) およびダイバータ室圧力 (P_{div}) の時間的变化

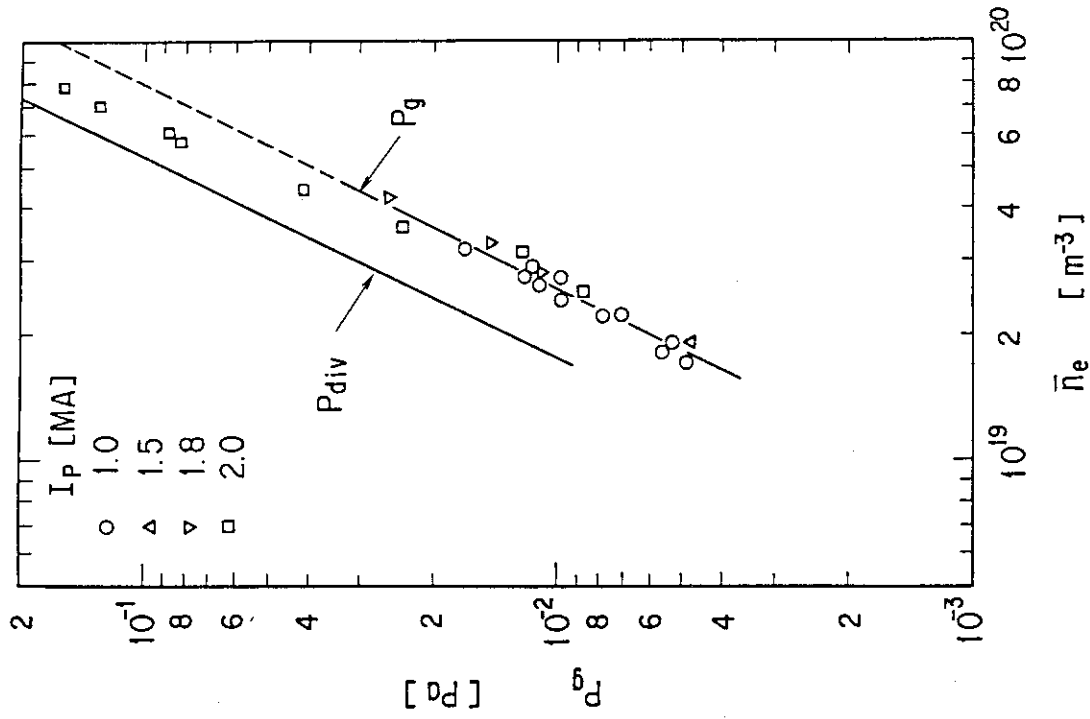


図12 ジュール加熱ダイバータ放電におけるダイバータ室圧力 (P_{div}), 主プラズマ周辺圧力 (P_{main}) およびトラーラス主排気系マニホールド圧力 (P_v) の主プラズマ平均電子密度 (\bar{n}_e) に対する依存性

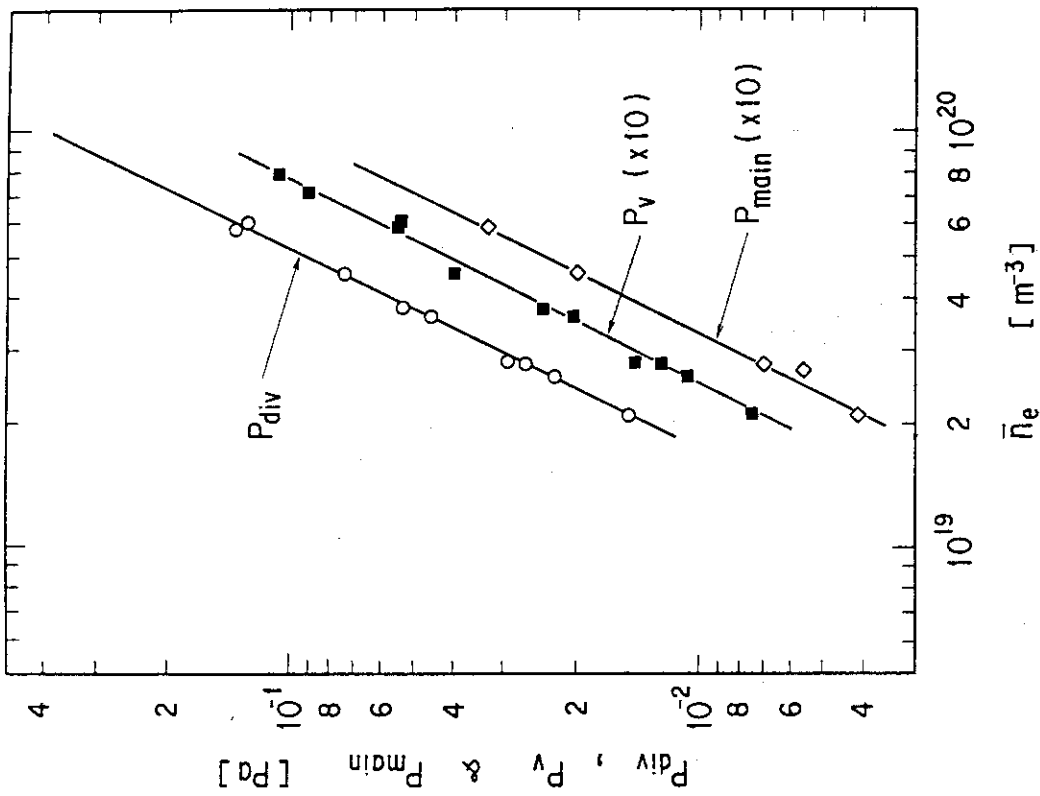


図13 ジュール加熱ダイバータ放電におけるZr-AIゲッターポンプ容器圧力 (P_g) の主プラズマ平均電子密度 (\bar{n}_e) に対する依存性

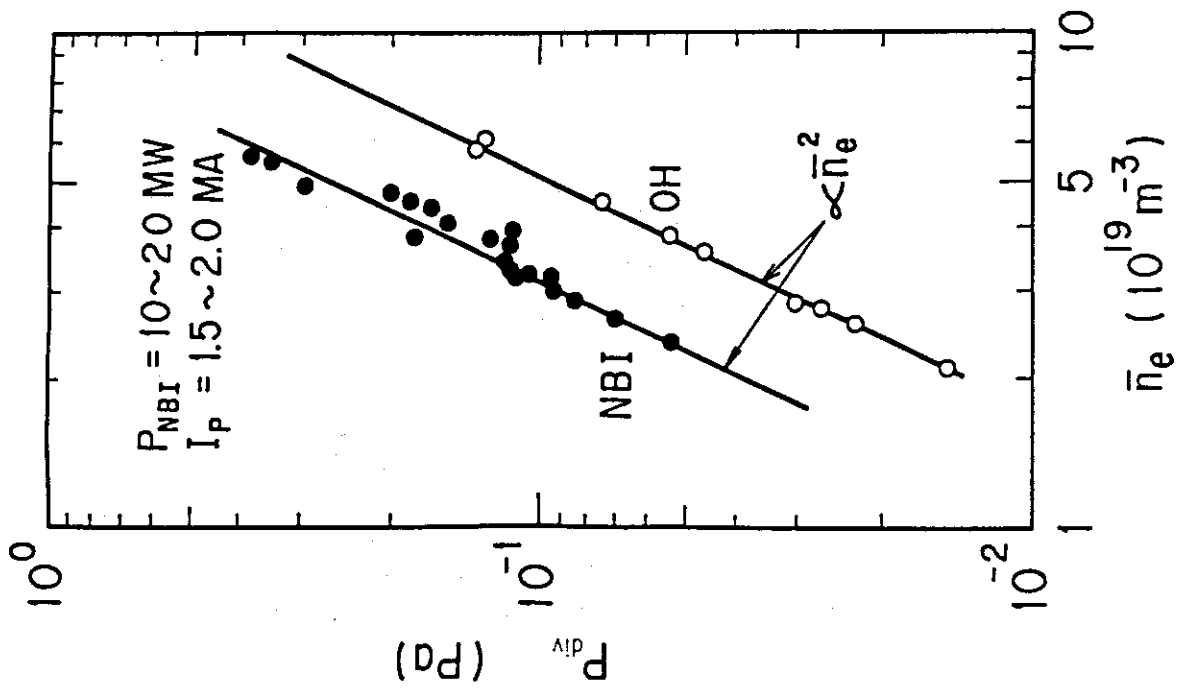


図14 ジュール加熱ダイバータ放電 (OH) および中性粒子入射加熱時 (NBI) におけるダイバータ室圧力 (P_{div}) の主プラズマ平均電子密度 (\bar{n}_e) に対する依存性

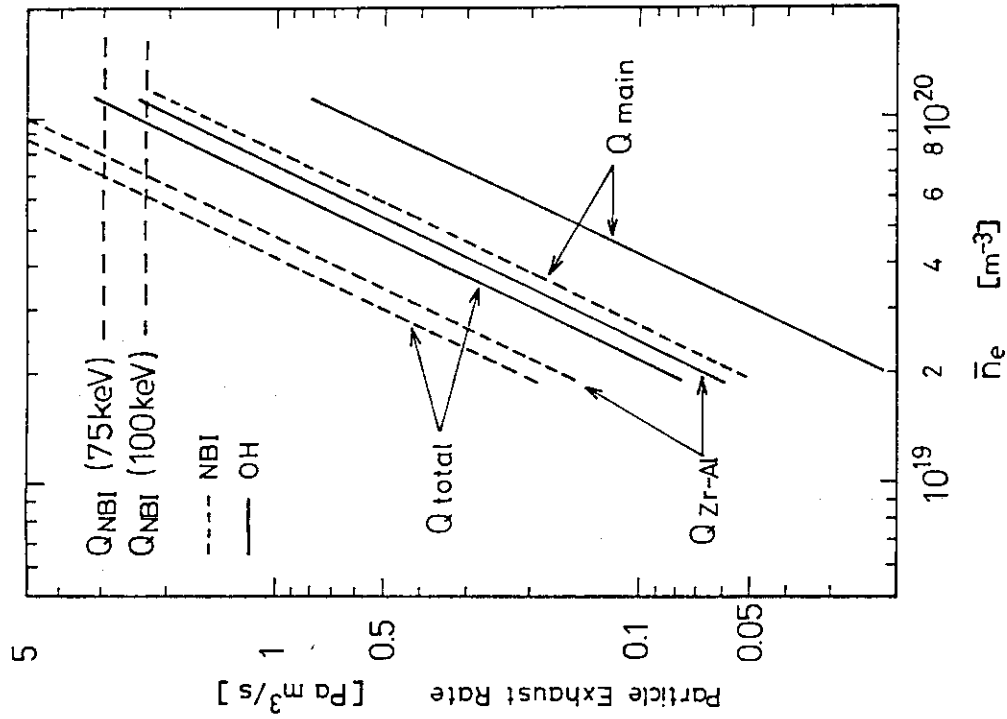


図15 Zr-Alゲッターポンプの排気量 (Q_{Zr-Al}), トーラス主排気系の排気量 (Q_{main}) および総排気量 ($Q_{total} = Q_{Zr-Al} + Q_{main}$) の主プラズマ平均電子密度 (\bar{n}_e) に対する依存性 (熱入力 20 MW の中性粒子入射による粒子流入量 (Q_{NBI}) との比較)

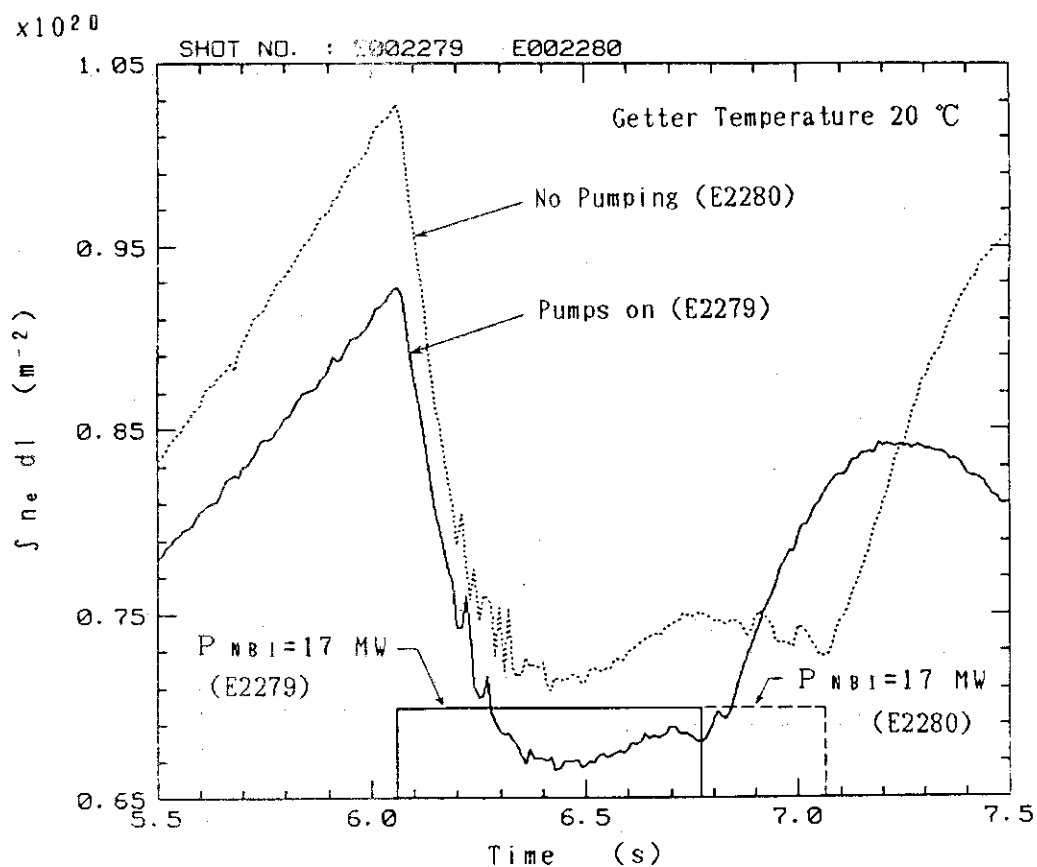
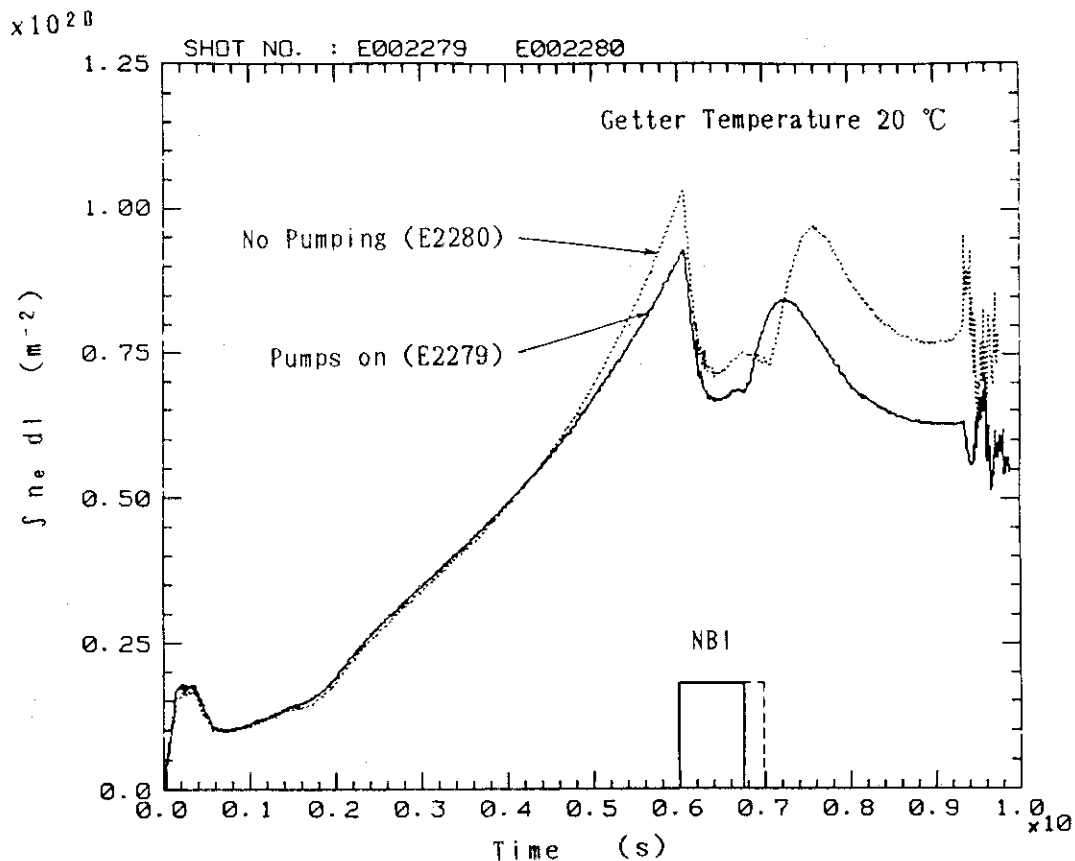


図16 Zr-Al ゲッターポンプの使用および不使用の場合における主プラズマ平均電子密度 (\bar{n}_e) の時間変化 (カートリッジ温度 20°C の場合)

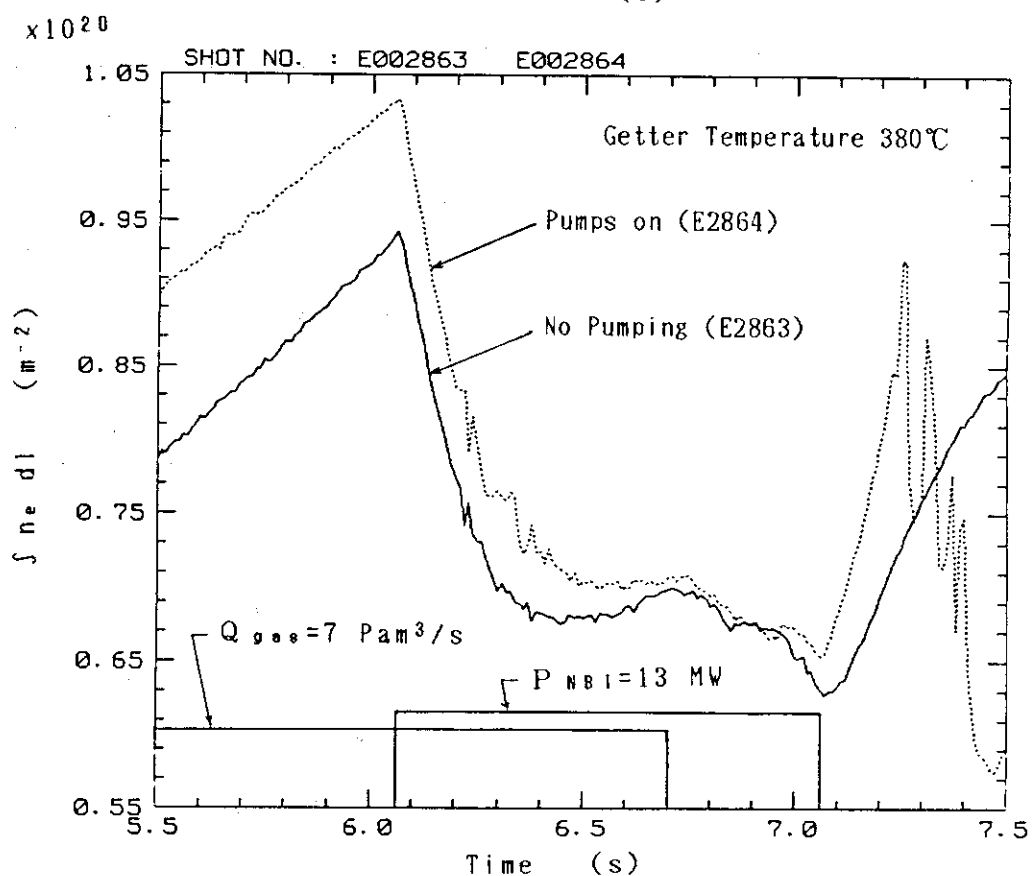
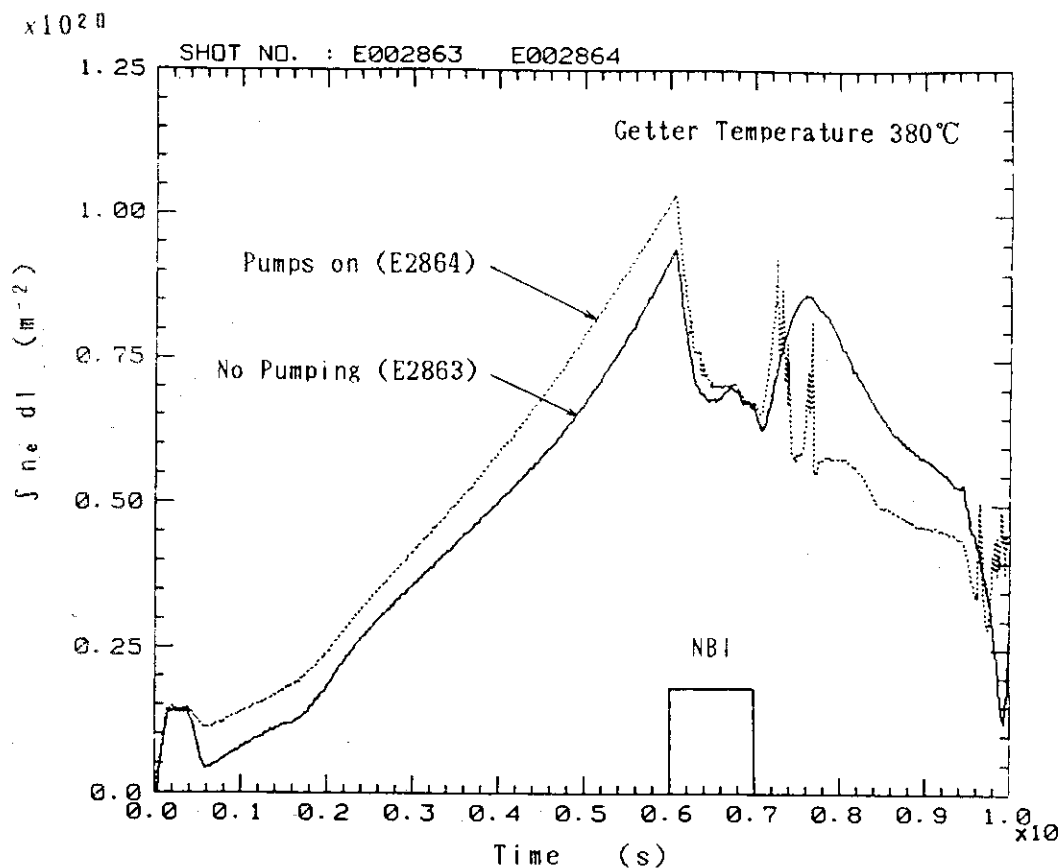


図17 Zr-Alゲッターポンプの使用および不使用の場合における主プラズマ平均電子密度 (\bar{n}_e) の時間変化 (カートリッジ温度 380°C の場合)

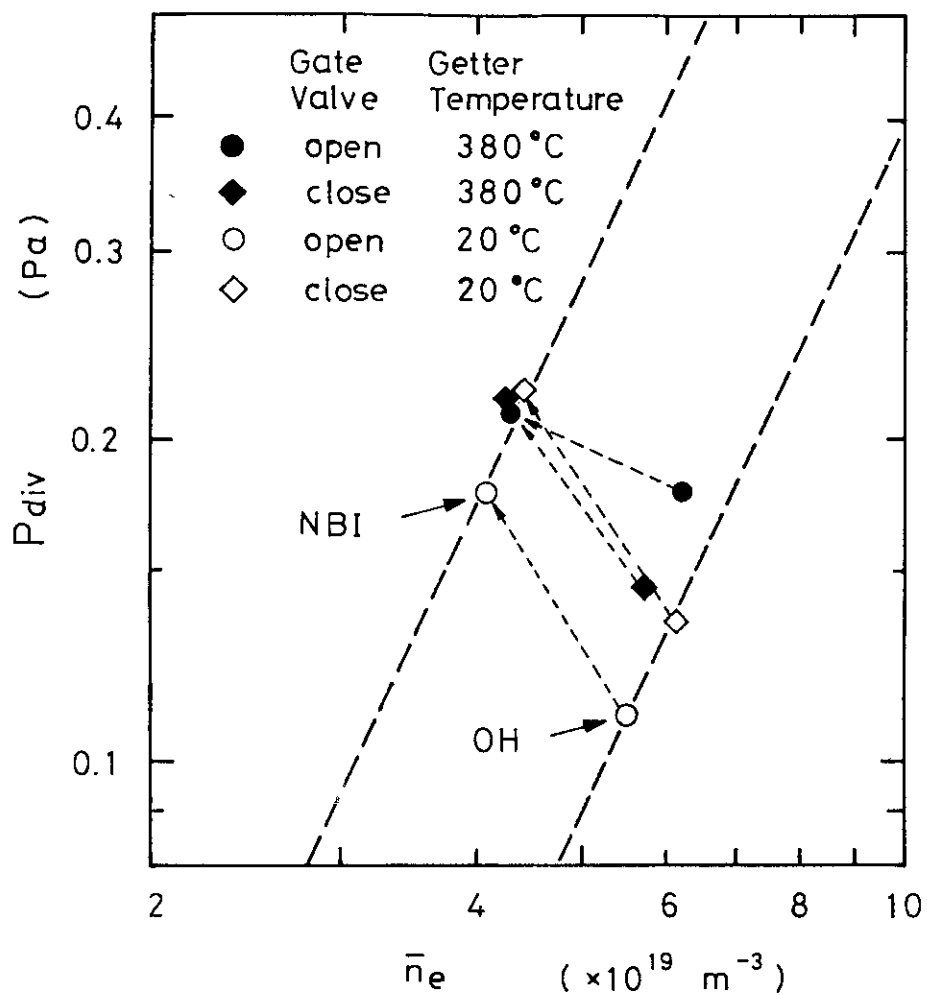


図 18 Zr-Al ゲッターポンプの使用および不使用の場合におけるダイバータ室圧力 (P_{div}) の中性粒子入射加熱前 (OH) と加熱時 (NBI) の比較