

JAERI - M
89-075

JT-60NBI における
ドリフト管内の再電離損失の概算法

1989年6月

松岡 守・秋場 真人・薄井 勝富・大原比呂志
小原 祥裕・栗山 正明・堀池 寛

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。
入手の間合わせは、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, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 磯高野高速印刷

J T - 6 0 N B I におけるドリフト管内の再電離損失の概算法

日本原子力研究所那珂研究所 J T - 6 0 試験部

松岡 守・秋場 真人⁺・薄井 勝富・大原比呂志

小原 祥裕⁺・栗山 正明・堀池 寛

(1 9 8 9 年 5 月 2 3 日 受 理)

J T - 6 0 では、中性粒子入射装置の真空容器と本体真空容器とを結ぶドリフト管内の再電離損失を近傍の真空度等を基に算出している。本メモはその算出法をまとめたものである。この方法により求めた再電離損失は入射開始当初入射パワーの 5 0 % にも及ぶと見積られた。これはドリフト管内壁からのアウトガスによる。その後約 3 0 ショットのビーム入射により内壁はほぼ完全に枯化し、プラズマの周辺圧力にもよるが再電離損失は約 5 % に落ち着くことがわかった。

Estimation Method of Reionization Loss in the Drift Ducts
for JT-60 NBI

Mamoru MATSUOKA, Masato AKIBA⁺, Katsutomi USUI
Hiroshi OOHARA, Yoshihiro OHARA⁺, Masaaki KURIYAMA
and Hiroshi HORIIKE

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

(Received May 23, 1989)

In JT-60 the reionization loss of neutral beams in the drift ducts is estimated using the information of ambient pressure and gas flow rate into the beam-lines. The reionization loss was more than 50% of the injection power at the start of the injection experiments, due to the outgas from the surface of the drift ducts. However, it was found that the drift ducts were well conditioned after about 30 beam shots and the reionization loss was reduced to about 5%.

Keywords: Reionization Loss, JT-60, NBI, Outgas, Conditioning

+ Department of Thermonuclear Fusion Research

目 次

1. はじめに	1
2. JT-60 NBIの真空系	2
3. 再電離イオンビームの軌道と許容熱負荷	2
4. 再電離損失の算出法	3
5. 測定例	7
6. まとめ	8
謝 辞	8
文 献	9
付録1 排気速度とコンダクタンスだけから求めた ΔP_3 と P_{main} の関係	19
付録2 水素雰囲気中における水素原子ビームの電子損失断面積	19

Contents

1. Introduction	1
2. Evacuation System of JT-60 NBI	2
3. Beam Orbits of Reionized Ions and Permissible Heat Flux	2
4. Evaluation Method of Reionization Loss	3
5. Examples of the Measurement	7
6. Summary	8
Acknowledgements	8
References	9
Appendix 1 Relation between ΔP_3 and P_{main} numerically deduced from pumping speeds and conductances.	19
Appendix 2 Cross sections for electron Loss or stripping of H atoms in H and H ₂	19

1. はじめに

中性粒子入射装置 (NBI) とトカマク本体の真空容器とを結ぶドリフト管にはトカマクからの漏洩磁場が存在する。ドリフト管内で室温のガスと衝突し電離したビームは偏向されてトカマクプラズマに到達することなくドリフト管内壁に衝突し熱化する。この現象がドリフト管におけるビームの再電離損失で、単に入射パワーが減ずるのみならず、ドリフト管、もしくはドリフト管近傍の機器に過大な熱負荷を与える可能性があるため注意を要する。トカマクからの漏洩磁場は主にプラズマ電流と変流器コイル電流によるポロイダル方向のものと、トロイダルコイルによるトロイダル方向のものとの合成の磁場である。前者はドリフト管の領域にとどまらず、もっと遠い範囲に及ぶもので、ドリフト管の所での磁場の強さは JT-60 の場合数百～数 kG である。後者の磁場はトロイダルコイルの外径より中に入った領域に限られるが、その磁場は強く数テスラに及ぶ。これらの合成磁場は 3 次元的で再電離イオンビームの軌道も 3 次元的な複雑な軌道を描く。一方再電離損失の原因となるドリフト管内の中性ガスの源としては、NBI 側からの作動水素ガスの流れ、トカマクプラズマからのガスの流れ、及びドリフト管壁からのビーム衝突によるアウトガスの 3 種が考えられる。NBI 側からの作動ガスの流れはプラズマに及ぼす影響の観点からも低減する必要があるが、JT-60 NBI¹⁾ では作動ガスの流れに伴う再電離損失が 5% 以下、トカマク本体真空容器に流れ込むガス流入量が全 14 ユニットの NBI の合計で $1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 程度以下になるように NBI の真空系が設計されている。トカマク本体真空容器側からのガスの流れは、プラズマ周辺の圧力が高い場合に問題となる。アウトガスに伴う再電離損失は、ドリフト管内壁の脱ガスができていないビーム入射初期の場合、ドリフト管で入射パワーの 50% といった大きなパワー損失が生じる²⁾。このような大きなパワー損失は単にプラズマ加熱パワーの損失にとどまらず、ドリフト管及び近傍の機器の健全性の観点からも問題である。JT-60 NBI の例を挙げると、NBI 用のゲート弁及び高速シャッタ³⁾ に再電離イオンビームが当り得るので注意が必要である。

再電離損失の量を評価するにはドリフト管に当る再電離イオンビームをカロリメトリックに測定するのが最も直接的である。しかしながら JT-60 のドリフト管は時定数の長い慣性冷却を用いており、受熱量を精度良く求めることが困難である。また再電離損失の時間変化を見ることができない。そこで JT-60 NBI では、ドリフト管の両端の真空度の情報及び NBI の作動水素ガス流量を基にビームの再電離の断面積を用いて再電離損失を評価している。

再電離イオンビームの軌道及びこれによるドリフト管部の熱負荷分布は、一様でないガスの圧力分布と 3 次元的な磁場分布を考慮した計算コード⁴⁾ により評価している。またドリフト管内に間隔をおいて取り付けられているビームリミタの熱電対出力から評価した各ビームリミタの受熱量は先の計算コードによる評価と概略一致した。そこで、ビームリミタ近傍にあるゲート弁や高速シャッタへの受熱量は、ビームリミタ熱電対出力から計算コードで得られている熱負荷分布を考慮して評価し、安全な運転の目安としている。

本報告においては、以上のような JT-60 の再電離損失に関する事項のうち、真空度等の情

報を基に再電離損失を評価する計算法を示す。なお本報告では触れないが、中性化セルで中性化されずに残ったイオンビームを分離する偏向磁石の中での再電離損失は、JT-60NBI原型ユニットにおいて測定されており、標準的な条件の下では入射パワーの約4%となることが知られている。第2章ではまずJT-60NBIの真空系について説明する。次いで第3章では再電離イオンビームの軌道と同熱負荷分布の計算例と、ドリフト管及び近傍の機器の許容熱負荷を示す。第4章では真空度等の情報を基にした再電離損失の算出法を示す。5章では再電離損失の測定例を示し、6章ではまとめと今後の課題について記した。

2. JT-60NBIの真空系

第1図にJT-60NBIの真空系の構成を示す。NBIの真空容器は、 $P_1 \sim P_3$ の3室に仕切られており、差動排気を行っている。 $C_1 \sim C_3$ はビーム通過領域からクライオパネルまでのコンダクタンスである。図中の数値は、JT-60NBI原型ユニットにおける測定と、幾何形状から求めた計算値とを合わせて示したものである。 P_3 室のクライオポンプは排気速度が $60 \text{ m}^3/\text{s}$ と小さいが、ドリフト管内の圧力低減に有効である。ドリフト管内壁の脱ガスが十分行われ、かつJT-60本体真空容器内の圧力が低い場合には、 P_3 室のビーム通過領域の圧力は $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 程度に抑えられる。したがって本体真空容器へのガス流入量は、

$$2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \times 33 \text{ m}^3/\text{s} \times 14 \text{ ユニット} \sim 1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$$

と見積られる。図中○を付した P_1 、 P_3 は電離真空計を示す。

3. 再電離イオンビームの軌道と許容熱負荷

第2図に再電離イオン軌道の計算例を示す。計算条件はビームエネルギー 50 keV 、 $B_T = -4 \text{ T}$ 、 $I_p = 1 \text{ MA}$ 、 $I_F = -37 \text{ kA}$ (ショットE1539相当)である。本図はビーム中心軸上で電離したものをサンプル的にプロットしてあるが、熱負荷計算では電離する場所がビーム全体の空間にわたるとして実際の状況に合うようにして計算している。図からわかるように再電離イオンは、No.1からNo.7までの7箇所に取り付けられた第3ビームリミタのうち最もNBI寄りのNo.1リミタ近辺に集中する傾向がある。この位置は主にトロイダル磁場の分布で決まっているため、運転パラメータを変更してもあまり変わらない。たとえば、ビームエネルギーを 50 keV から 100 keV に変更しても 10 cm 程度移動するだけである。熱負荷の集中する部分には接線ベローズの保護板やゲート弁の内部構造物、特に開放時に弁板シール面にスパッタ粒子が当たらないようにするスパッタシールドなど許容熱負荷の低いものがあるため、過大な再電離損失下での運転はすることができない。許容熱負荷は、ベローズの保護板が $100 \text{ J}/\text{cm}^2/\text{ショット}$ 、ゲート弁部が $50 \text{ J}/\text{cm}^2/\text{ショット}$ である。そこで、ドリフト管の枯化を行う際の目安として、第3ビームリミタNo.1の熱電対の温度上昇をモニタし、これらの部位への入熱が許容熱負荷内であることに対応する値

報を基に再電離損失を評価する計算法を示す。なお本報告では触れないが、中性化セルで中性化されずに残ったイオンビームを分離する偏向磁石の中での再電離損失は、JT-60NBI原型ユニットにおいて測定されており、標準的な条件の下では入射パワーの約4%となることが知られている。第2章ではまずJT-60NBIの真空系について説明する。次いで第3章では再電離イオンビームの軌道と同熱負荷分布の計算例と、ドリフト管及び近傍の機器の許容熱負荷を示す。第4章では真空度等の情報を基にした再電離損失の算出法を示す。5章では再電離損失の測定例を示し、6章ではまとめと今後の課題について記した。

2. JT-60NBIの真空系

第1図にJT-60NBIの真空系の構成を示す。NBIの真空容器は、 $P_1 \sim P_3$ の3室に仕切られており、差動排気を行っている。 $C_1 \sim C_3$ はビーム通過領域からクライオパネルまでのコンダクタンスである。図中の数値は、JT-60NBI原型ユニットにおける測定と、幾何形状から求めた計算値とを合わせて示したものである。 P_3 室のクライオポンプは排気速度が $60 \text{ m}^3/\text{s}$ と小さいが、ドリフト管内の圧力低減に有効である。ドリフト管内壁の脱ガスが十分行われ、かつJT-60本体真空容器内の圧力が低い場合には、 P_3 室のビーム通過領域の圧力は $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 程度に抑えられる。したがって本体真空容器へのガス流入量は、

$$2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \times 33 \text{ m}^3/\text{s} \times 14 \text{ ユニット} \sim 1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$$

と見積られる。図中○を付した P_1 、 P_3 は電離真空計を示す。

3. 再電離イオンビームの軌道と許容熱負荷

第2図に再電離イオン軌道の計算例を示す。計算条件はビームエネルギー 50 keV 、 $B_T = -4 \text{ T}$ 、 $I_p = 1 \text{ MA}$ 、 $I_F = -37 \text{ kA}$ (ショットE1539相当)である。本図はビーム中心軸上で電離したものをサンプル的にプロットしてあるが、熱負荷計算では電離する場所がビーム全体の空間にわたるとして実際の状況に合うようにして計算している。図からわかるように再電離イオンは、No.1からNo.7までの7箇所に取り付けられた第3ビームリミタのうち最もNBI寄りのNo.1リミタ近辺に集中する傾向がある。この位置は主にトロイダル磁場の分布で決まっているため、運転パラメータを変更してもあまり変わらない。たとえば、ビームエネルギーを 50 keV から 100 keV に変更しても 10 cm 程度移動するだけである。熱負荷の集中する部分には接線ベローズの保護板やゲート弁の内部構造物、特に開放時に弁板シール面にスパッタ粒子が当たらないようにするスパッタシールドなど許容熱負荷の低いものがあるため、過大な再電離損失下での運転はすることができない。許容熱負荷は、ベローズの保護板が $100 \text{ J}/\text{cm}^2/\text{ショット}$ 、ゲート弁部が $50 \text{ J}/\text{cm}^2/\text{ショット}$ である。そこで、ドリフト管の枯化を行う際の目安として、第3ビームリミタNo.1の熱電対の温度上昇をモニタし、これらの部位への入熱が許容熱負荷内であることに対応する値

報を基に再電離損失を評価する計算法を示す。なお本報告では触れないが、中性化セルで中性化されずに残ったイオンビームを分離する偏向磁石の中での再電離損失は、JT-60NBI原型ユニットにおいて測定されており、標準的な条件の下では入射パワーの約4%となることが知られている。第2章ではまずJT-60NBIの真空系について説明する。次いで第3章では再電離イオンビームの軌道と同熱負荷分布の計算例と、ドリフト管及び近傍の機器の許容熱負荷を示す。第4章では真空度等の情報を基にした再電離損失の算出法を示す。5章では再電離損失の測定例を示し、6章ではまとめと今後の課題について記した。

2. JT-60NBIの真空系

第1図にJT-60NBIの真空系の構成を示す。NBIの真空容器は、 $P_1 \sim P_3$ の3室に仕切られており、差動排気を行っている。 $C_1 \sim C_3$ はビーム通過領域からクライオパネルまでのコンダクタンスである。図中の数値は、JT-60NBI原型ユニットにおける測定と、幾何形状から求めた計算値とを合わせて示したものである。 P_3 室のクライオポンプは排気速度が $60 \text{ m}^3/\text{s}$ と小さいが、ドリフト管内の圧力低減に有効である。ドリフト管内壁の脱ガスが十分行われ、かつJT-60本体真空容器内の圧力が低い場合には、 P_3 室のビーム通過領域の圧力は $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 程度に抑えられる。したがって本体真空容器へのガス流入量は、

$$2 \times 10^{-3} \text{ Pa} \times 33 \text{ m}^3/\text{s} \times 14 \text{ ユニット} \sim 1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$$

と見積られる。図中○を付した P_1 、 P_3 は電離真空計を示す。

3. 再電離イオンビームの軌道と許容熱負荷

第2図に再電離イオン軌道の計算例を示す。計算条件はビームエネルギー 50 keV 、 $B_T = -4 \text{ T}$ 、 $I_p = 1 \text{ MA}$ 、 $I_F = -37 \text{ kA}$ (ショットE1539相当)である。本図はビーム中心軸上で電離したものをサンプル的にプロットしてあるが、熱負荷計算では電離する場所がビーム全体の空間にわたるとして実際の状況に合うようにして計算している。図からわかるように再電離イオンは、No.1からNo.7までの7箇所に取り付けられた第3ビームリミタのうち最もNBI寄りのNo.1リミタ近辺に集中する傾向がある。この位置は主にトロイダル磁場の分布で決まっているため、運転パラメータを変更してもあまり変わらない。たとえば、ビームエネルギーを 50 keV から 100 keV に変更しても 10 cm 程度移動するだけである。熱負荷の集中する部分には接線ベローズの保護板やゲート弁の内部構造物、特に開放時に弁板シール面にスパッタ粒子が当たらないようにするスパッタシールドなど許容熱負荷の低いものがあるため、過大な再電離損失下での運転はすることができない。許容熱負荷は、ベローズの保護板が $100 \text{ J}/\text{cm}^2/\text{ショット}$ 、ゲート弁部が $50 \text{ J}/\text{cm}^2/\text{ショット}$ である。そこで、ドリフト管の枯化を行う際の目安として、第3ビームリミタNo.1の熱電対の温度上昇をモニタし、これらの部位への入熱が許容熱負荷内であることに対応する値

であるように徐々にパルス幅を伸ばしてゆくこととした。なお、第3ビームリミタの熱負荷の評価はその熱的な時定数が長いことからショット後2分後の温度上昇から求めている⁵⁾。また、一連の計算から第3ビームリミタNo.1, ゲート弁及びベロー保護板の熱負荷は概略次の関係式で表わされることがわかっている。

ビームエネルギー：40 keV

$$W_{3-1} = 6.6 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 9 (\text{W/cm}^2)$$

$$W_{GV} = 5.2 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 8 (\text{W/cm}^2)$$

$$W_{BLW} = 2.0 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 3 (\text{W/cm}^2)$$

($I_p = 1 \sim 2 \text{ MA}$, $B_T = 4, 4.5 \text{ T}$, リミタ/ダイバータ放電について計算)

ビームエネルギー：60 keV

$$W_{3-1} = 9.6 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 10 (\text{W/cm}^2)$$

$$W_{GV} = 3.9 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 3.9 (\text{W/cm}^2)$$

($I_p = 1.5 \text{ MA}$, $B_T = -4.5 \text{ T}$, ダイバータ放電について計算)

ここで、 W_{3-1} , W_{GV} , W_{BLW} はそれぞれ、第3ビームリミタNo.1, ゲート弁及びベロー保護板に対する最大熱負荷、 ΔP_3 は P_3 室の電離真空計の上昇幅、 P_{inj} は入射パワーを表わす。ドリフト管内の真空度の分布は、第3図に示したように斜線部のNB I側からの標準的なガスの流れで決まる真空度の分布にドリフト管中央もしくはよりトラス側からのガスの流れによる真空度の分布が重畳するとした。この重畳分に対する P_3 室の真空計の上昇幅が ΔP_3 である。なお、 P_3 室の電離真空計はビーム通過領域から離れており、4章で示されるように P_3 室のビーム通過領域の圧力は電離真空計の指示値より約1.4倍高いと見積られる。

第2図において構造上のいわゆるドリフト管は、ベローズ以降トラス真空容器までの間であるが、第1図に示されるようにビームを通すというドリフト管の名称本来の意味からも、また真空的にも P_3 室以降がドリフト管として機能する。よって以下では P_3 室とトラス真空容器との間全体をまとめて「ドリフト管」と称した。

4. 再電離損失の算出法

1章でも説明したように、ドリフト管での再電離損失の原因となる室温のガス源としては

- a) NB I側からの作動水素ガスの流れ
- b) トカマクプラズマ側からのガスの流れ
- c) ドリフト管壁からのアウトガス

の3種が考えられる。第4図はこれらの個々のガス源に対するドリフト管内の圧力分布を模式的に描いたものである。実際の圧力分布はこれらを合成したものとなる。圧力分布の成分をこの図のように単純な3種の形に限れば、3個の独立な測定量があればガス圧分布が求められ、再電離損失が評価できることになる。独立な測定量としては、1) NB Iの作動ガス流量、2) P_3 室真空

であるように徐々にパルス幅を伸ばしてゆくこととした。なお、第3ビームリミタの熱負荷の評価はその熱的な時定数が長いことからショット後2分後の温度上昇から求めている⁵⁾。また、一連の計算から第3ビームリミタNo.1, ゲート弁及びベロー保護板の熱負荷は概略次の関係式で表わされることがわかっている。

ビームエネルギー：40 keV

$$W_{3-1} = 6.6 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 9 (\text{W/cm}^2)$$

$$W_{GV} = 5.2 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 8 (\text{W/cm}^2)$$

$$W_{BLW} = 2.0 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 3 (\text{W/cm}^2)$$

($I_p = 1 \sim 2 \text{ MA}$, $B_T = 4, 4.5 \text{ T}$, リミタ/ダイバータ放電について計算)

ビームエネルギー：60 keV

$$W_{3-1} = 9.6 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 10 (\text{W/cm}^2)$$

$$W_{GV} = 3.9 \times \Delta P_3 (10^{-3} \text{ Pa}) \times P_{inj} (\text{MW}) + 3.9 (\text{W/cm}^2)$$

($I_p = 1.5 \text{ MA}$, $B_T = -4.5 \text{ T}$, ダイバータ放電について計算)

ここで、 W_{3-1} , W_{GV} , W_{BLW} はそれぞれ、第3ビームリミタNo.1, ゲート弁及びベロー保護板に対する最大熱負荷、 ΔP_3 は P_3 室の電離真空計の上昇幅、 P_{inj} は入射パワーを表わす。ドリフト管内の真空度の分布は、第3図に示したように斜線部のNB I側からの標準的なガスの流れで決まる真空度の分布にドリフト管中央もしくはよりトラス側からのガスの流れによる真空度の分布が重畳するとした。この重畳分に対する P_3 室の真空計の上昇幅が ΔP_3 である。なお、 P_3 室の電離真空計はビーム通過領域から離れており、4章で示されるように P_3 室のビーム通過領域の圧力は電離真空計の指示値より約1.4倍高いと見積られる。

第2図において構造上のいわゆるドリフト管は、ベローズ以降トラス真空容器までの間であるが、第1図に示されるようにビームを通すというドリフト管の名称本来の意味からも、また真空的にも P_3 室以降がドリフト管として機能する。よって以下では P_3 室とトラス真空容器との間全体をまとめて「ドリフト管」と称した。

4. 再電離損失の算出法

1章でも説明したように、ドリフト管での再電離損失の原因となる室温のガス源としては

- a) NB I側からの作動水素ガスの流れ
- b) トカマクプラズマ側からのガスの流れ
- c) ドリフト管壁からのアウトガス

の3種が考えられる。第4図はこれらの個々のガス源に対するドリフト管内の圧力分布を模式的に描いたものである。実際の圧力分布はこれらを合成したものとなる。圧力分布の成分をこの図のように単純な3種の形に限れば、3個の独立な測定量があればガス圧分布が求められ、再電離損失が評価できることになる。独立な測定量としては、1) NB Iの作動ガス流量、2) P_3 室真空

度、3) プラズマ周辺圧力、の3種が可能であるので、これらを用いることとした。以下ガス源ごとに測定量とガス線密度との関係を求める。

a) NBI側からの作動水素ガスの流れ

NBI内に外部から導入する作動ガスとしてはイオン源に注入するもの (Q_{is}) 及び中性化セルに注入するもの (Q_n) の2つがあるが、両者の再電離損失に対する寄与は同等である。第5図はJT-60NBI原型ユニットにてガス導入量を変化させて P_3 室の圧力変化を調べた結果である。 $Q_{is} = 1.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 固定とし、 Q_n を変化させたもので、実際に70kV, 60A, 4秒のビームを引き出した上でのものである。図中に示したように、ビームオン直後圧力は20%程度減少し、0.5秒程度の時定数ではぼ元の値に戻る。これは、イオン源からのビームによるポンピング作用と、残留イオンビームを熱化させるビームダンプ表面でイオンビームが再びガス化する現象の組み合わせの結果により生ずる。再電離損失を厳密に評価するにはこの時間変化を考慮する必要があるが、ここでは $Q_{is} + Q_n = 1.5 + 2 = 3.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ で $P_3 = 2.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ (一定) になるとした。ただし P_3 は P_3 室の電離真空計の指示値(校正済みの値)である。第1図に示したように P_3 室のビーム軸上から P_3 室のクライオパネルまでのコンダクタンスが $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 P_3 室のクライオパネルの排気速度が $60 \text{ m}^3/\text{s}$ であるから、ビーム軸上の圧力は P_3 室の真空計の指示より $(150^{-1} + 60^{-1}) / 60^{-1} = 1.4$ 倍だけ高い。したがって $Q_{is} + Q_n = 3.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ のとき P_3 室のビーム軸上の圧力は $3.8 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ となると見積られる。第6図にこのときの偏向磁石よりトカマク側の圧力分布を示す。この図よりNBI側からの作動水素ガスの流れによる、偏向磁石より下流のガス線密度 $n\ell_Q$ は

$$\begin{aligned} n\ell_Q &= \{ 6.4 \times 10^{-3} \text{ Pa} \times 1.1 \text{ m} + (6.4 \times 10^{-3} \text{ Pa} + 3.8 \times 10^{-3} \text{ Pa}) / 2 \times 0.3 \text{ m} \\ &\quad + 1/2 \times 3.8 \times 10^{-3} \text{ Pa} \times 4.6 \text{ m} \} \times (Q_{is} + Q_n) / 3.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \\ &= 4.95 \times 10^{-3} \times (Q_{is} + Q_n) [\text{Pa} \cdot \text{m}] \\ &\quad Q_{is}, Q_n [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}] \end{aligned}$$

により求められる。

b) トカマクプラズマ側からのガスの流れ

ドリフト管のコンダクタンスに比して P_2 、 P_3 室は、クライオパネルまでのコンダクタンスを考慮しても排気速度が大きいことから、トカマクプラズマ側からのガスの流入による圧力分布は第7図のように描ける。これからガス線密度 $n\ell_M$ は

$$\begin{aligned} n\ell_M &= 1/2 \times P_{\text{main}} (\text{Pa}) \times 4.9 \text{ m} \\ &= 2.45 P_{\text{main}} [\text{Pa} \cdot \text{m}] \end{aligned}$$

で概算される。

c) ドリフト管からのアウトガス

ドリフト管はイオン源の引き出し電極からの距離で5mから9mの間にあり、再電離イオンビームの衝突に伴うアウトガスがこの中央、即ちイオン源から7mのところから集中的に出ると考える。ドリフト管の両側は排気が十分大きいと考えると、アウトガスに伴う圧力分布は第8図のようになる。第2図の再電離イオン軌道の計算例でわかるように、再電離イオンはD

ドリフト管の中央付近に集中して衝突する傾向があるので、以上の仮定は第0近似として正しい。このように簡略化してもまだ真空の計算は容易ではないことから、以下の計算では次のように等価な電気回路に置き換えて考えた。

圧 力 → 電 圧
 ガ ス 源 → 電流源
 コンダクタンスの逆数 → 抵 抗

するとアウトガスに関連する真空系の等価回路は第9図のように描くことができる。ここで、 ΔP_D 、 $\Delta P_3'$ 、 ΔP_3 はそれぞれアウトガスによるドリフト管中央、 P_3 のビーム通過位置、及び P_3 室の電離真空計取り付け位置での圧力変化である。等価回路よりこれらの量には次の関係のあることがわかる。

$$\begin{aligned}\Delta P_3' / \Delta P_3 &= (150^{-1} + 60^{-1}) / 60^{-1} = 1.4 \\ \Delta P_D / \Delta P_3' &= [66^{-1} + \{60^{-1} // (150^{-1} + 60^{-1})\}] / \{60^{-1} // (150^{-1} + 60^{-1})\} \\ &= 2.56 \\ \therefore \Delta P_D / \Delta P_3' &= 3.58\end{aligned}$$

但し、ここで記号“//”は

$$(A // B) \equiv (A^{-1} + B^{-1})^{-1}$$

なる演算を表わす。以上よりアウトガス分のガス線密度 $n\ell_D$ は

$$\begin{aligned}n\ell_D &= 1/2 \times 3.58 \times \Delta P_3 \times 4.9 \text{ m} \\ &= 8.77 \Delta P_3 \text{ [Pa} \cdot \text{m]}\end{aligned}$$

となる。

ΔP_3 は P_3 室電離真空計の指示値より、次のようにして求める。

- 1) 電離真空計の指示値から a) $Q_{is} + Q_n$ 寄与分, b) P_{main} 上昇寄与分, を引く。
- 2) 得られた P_3 の値が正又は0ならばその値を, 負の場合は0を ΔP_3 とする。

ここで、寄与分を引いた値が負の場合に ΔP_3 に0を代入するのは、誤差を含む測定量の差分をとった結果、アウトガスによる圧力上昇が負となる不都合をなくするためである。このようにすることにより、アウトガスが少ない場合はNB Iの作動ガスとトカマク側からのガスの流れでほぼ決まるガス線密度が、またアウトガスが多い場合にはアウトガスでほぼ決まるガス線密度が求められる。

ここで $Q_{is} + Q_n$ 寄与分, P_{main} 上昇寄与分はそれぞれ次のようにして求める。

$Q_{is} + Q_n$ 寄与分: a) で示したように

$$\begin{aligned}Q_{is} + Q_n &= 3.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \text{ のとき} \\ \Delta P_{3Q} &= 2.7 \times 10^{-3} \text{ Pa} \\ \therefore \Delta P_{3Q} &= 2.7 \times 10^{-3} \text{ Pa} \times (Q_{is} + Q_n) / 3.5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s} \\ &= 7.7 \times 10^{-4} (Q_{is} + Q_n) \text{ [Pa]}\end{aligned}$$

P_{main} 上昇寄与分：第10図に P_{main} 上昇を模擬した，JT-60NBI 原型ユニットにおける実験結果を示した。この図より P_{main} 相当の P_4 と P_3 室電離真空計指示値 P_3 との比は概略 8.4 である。よって

$$\Delta P_{3M} = P_{\text{main}} / 8.4 = 0.119 P_{\text{main}}$$

と求められる（付録1参照）。

以上から

$$\Delta P_3 = P_3 - 7.7 \times 10^{-4} \times (Q_{\text{is}} + Q_{\text{n}}) - 0.119 P_{\text{main}}$$

にて ΔP_3 が求められる。但し，値が負になる場合は0とする。

以上 a), b), c) をまとめると全体のガス線密度は次式で求められる。

$$\begin{aligned} n_{\text{T}}(t)l &= n l_{\text{Q}} + n(t) l_{\text{M}} + n(t) l_{\text{D}} \\ &= 4.95 \times 10^{-3} \times (Q_{\text{is}} + Q_{\text{n}}) + 2.45 \times P_{\text{main}}(t) + 8.77 \times \Delta P_3(t) \\ &\quad \{ [\text{Pa} \cdot \text{m}] ; [\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}] ; [\text{Pa}] \} \end{aligned}$$

ここで

$$\Delta P_3(t) = P_3(t) - 7.7 \times 10^4 \Delta P_3(t) - 0.119 \times P_{\text{main}}(t)$$

（但し， $\Delta P_3(t)$ が負となる場合は0を代入する。）

式中 (t) を付したものは時間の関数として扱われる量を示す。 Q_{is} ， Q_{n} は，流量系の時間応答が遅いため現状1ショットの積分量の形でしか測定できないため，時間について一定とした。以上から再電離損失は次式で求められる。

$$\begin{aligned} L_{\text{ri}}(t) &= [1 - \exp\{-K n_{\text{T}}(t) l \sigma(v_{\text{acc}}(t))\}] \times 100 \text{ (\%)} \\ K &= 2.41 \times 10^{20} \text{ [molecules/m}^3/\text{Pa]} \end{aligned}$$

σ ：水素雰囲気中における水素原子ビームの電子損失断面積（付録2参照）

ここで定数Kは室温（300K）と仮定して単位をPaからmolecules/m³に変換する変数である。 σ としてはヘリウムプラズマの場合にはヘリウムガスを，アウトガスが多い場合には不純物ガスを考慮するべきであるが，Hビームを入射する限り P_3 ， P_{main} の測定値はH₂を必ず含んだ値となる。これを成分に分けるのは現状ではできないので当面HビームがH₂ガス中を通過する場合の断面積を用いることとした。このためヘリウムプラズマに入射する場合や，アウトガスが非常に多い場合は再電離損失の計算値の絶対値は精度の悪いものとなり，単に再電離損失の目安を示しているものと解釈する必要がある。

以上の計算法はNBI計算機に組み込まれ， P_3 真空度のサンプル周期である10msの時間分解能で再電離損失の評価ができるようになっている。

5. 測定例

第11図にビーム入射時の P_3 圧力変化及びこれから計算した再電離損失の時間変化の例を示す。同図a)は入射開始から17ショット目、b)は87ショット目のものである。図中BDはイオン源の放電破壊によりビームが短時間とぎれたことを示す。a)図の場合はドリフト管の枯化が不十分のためアウトガスが多く、圧力上昇が大きい。ショットを重ねてゆくと徐々にアウトガスは減り、最終的にはb)図のようにビーム入射中の圧力上昇はほとんど無くなる。4章で述べた方法により、a)図の再電離損失を求めると、ビーム入射開始直後が約4%となるのに対し、ビーム入射終了直前では28%にもなると見積られる。この例について第3ビームリミタNo.1下部への入熱量を評価すると、 ΔP_3 の平均 $\sim 8 \times 10^{-3}$ Pa, $W_0 = 0.9$ MW, パルス幅0.37秒より、

$$W_{iL} \times 0.37 \text{ s} \times 0.9 = 2.6 \text{ J/cm}^2$$

となる。但し係数0.9はリミタへの熱負荷が一様でない分布を持つことを考慮したものである。一方同部への入熱量はそこに埋め込まれた熱電対出力からも評価することができる。詳細な熱伝導の数値計算によれば、ビーム入射後2分経過した時刻の温度上昇から $\pm 30\%$ の精度で入熱量を求めることができる⁵⁾ことがわかっている。第11図a)の例ではこの温度上昇は7.5 Kであり、これから入熱量は 3.3 J/cm^2 と見積られる。このように2種類の異なる評価法から求めた入熱量は矛盾のない値となる。

第12図は真空容器を大気開放した後の再電離損失の推移をプロットしたものである。再電離損失の値はビームパルス終了直前の値で、図中の番号はNBIのユニット番号である。再電離損失の計算値が約50%となる電離真空計 P_3 の真空度出力はオートレンジの切り替わる⁶⁾ところ($\sim 1 \times 10^{-3}$ Pa(読み))に相当し、切り替えに時間遅れがあることから、50%程度以上の再電離損失の計算値はこれ以上であるということしかわからない。パルス幅は、第3ビームリミタの熱負荷が3章に示した許容値を超えないように徐々に延ばして行った。途中テラー放電洗浄を挟んでいるのは、ポートのアウトガスによるプラズマへの不純物混入により、プラズマ放電がディスラプティブになったことによる。またユニット毎に運転開始がずれているのは単に各ユニットの準備の都合による。実験に供するには再電離損失が10%程度以下とすべきであるが、これには約30ショットのビームを入射する必要のあることがわかる。

ドリフト管の枯化については以上の他に次のことが経験的にわかった。

- 1) 枯化作業はいったん実施すれば再び真空容器を大気開放するまで必要としない。大気開放した場合は、大気開放の状態が1カ月以上にも及ぶ場合、初期状態と同じショット数を要する。一方窒素封入の場合は長期運転休止に伴う多少の再枯化作業だけで良いようである。
- 2) 水素を用いたテラー放電洗浄を行った場合は、ドリフト管壁にガスが付着するため、5ショット程度の枯化作業が改めて必要となる。
- 3) グロー放電はドリフト管などの内部に及ぶ。従って、ヘリウムグロー放電洗浄はドリフト管の枯化に有効であるようである。但し第一壁のグラファイト化後、ヘリウムグロー放電は炭素

粉末が計測ガラス窓等に付着する問題等のためこれまで1回しか実施されていない。

6. ま と め

以上JT-60NBIのドリフト管における再電離損失の計算法とその測定例を示した。この計算法によりドリフト管内壁の枯化の進展の状況を定量的に捉えることができた。また、本計算法は枯化終了後も対向面に埋め込まれた熱電対信号による突き抜け量の計算とともにプラズマへの入射パワーの評価のために利用されている。

JT-60は真空容器の下部にコイルを追加することにより、プラズマの下方にX点を有するダイバータ放電も可能になった。この場合X点近傍の中性粒子ガス圧が高くなることから、上下NBIユニットに対応するドリフト管も上下で圧力差が出ることが予期される。最近の測定によればジュール加熱時で約3倍、NBI追加加熱時は6倍もの圧力差がドリフト管のプラズマに面する部分の圧力差としてあるらしいことがわかっている。但し、アウトガスが多い場合にはアウトガスにより再電離損失がほぼ決まる。またアウトガスが少なくなって以降も中～低プラズマ密度域での実験ではNBI側からの作動ガスによりほぼ再電離損失がほぼ決まる。従って、このような場合には現状の計算法で再電離損失を求めても大きな誤差とはならない。一方高プラズマ密度域の実験時は注意を要する。このような場合にも正しく評価するには上下個別にプラズマ周辺圧力を測定する手段及び新たな評価法を要するが、これは今後の課題である。

謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、有益な議論を第4試験室及び加熱工学第1研究室の皆様にして頂きましたことに感謝致します。また、ご協力と激励を頂きました国枝俊介第4試験室長、蛭田和治同室長代理に感謝致します。本研究遂行に際し、ご指導と激励を頂いた、吉川允二理事、田中正俊那珂研究所所長、飯島勉JT-60試験部部長、及び田中裕二同次長に感謝致します。

粉末が計測ガラス窓等に付着する問題等のためこれまで1回しか実施されていない。

6. ま と め

以上JT-60NBIのドリフト管における再電離損失の計算法とその測定例を示した。この計算法によりドリフト管内壁の枯化の進展の状況を定量的に捉えることができた。また、本計算法は枯化終了後も対向面に埋め込まれた熱電対信号による突き抜け量の計算とともにプラズマへの入射パワーの評価のために利用されている。

JT-60は真空容器の下部にコイルを追加することにより、プラズマの下方にX点を有するダイバータ放電も可能になった。この場合X点近傍の中性粒子ガス圧が高くなることから、上下NBIユニットに対応するドリフト管も上下で圧力差が出ることが予期される。最近の測定によればジュール加熱時で約3倍、NBI追加加熱時は6倍もの圧力差がドリフト管のプラズマに面する部分の圧力差としてあるらしいことがわかっている。但し、アウトガスが多い場合にはアウトガスにより再電離損失がほぼ決まる。またアウトガスが少なくなって以降も中～低プラズマ密度域での実験ではNBI側からの作動ガスによりほぼ再電離損失がほぼ決まる。従って、このような場合には現状の計算法で再電離損失を求めても大きな誤差とはならない。一方高プラズマ密度域の実験時は注意を要する。このような場合にも正しく評価するには上下個別にプラズマ周辺圧力を測定する手段及び新たな評価法を要するが、これは今後の課題である。

謝 辞

本報告書をまとめるに当り、有益な議論を第4試験室及び加熱工学第1研究室の皆様にして頂きましたことに感謝致します。また、ご協力と激励を頂きました国枝俊介第4試験室長、蛭田和治同室長代理に感謝致します。本研究遂行に際し、ご指導と激励を頂いた、吉川允二理事、田中正俊那珂研究所所長、飯島勉JT-60試験部部長、及び田中裕二同次長に感謝致します。

粉末が計測ガラス窓等に付着する問題等のためこれまで1回しか実施されていない。

6. ま と め

以上JT-60NBIのドリフト管における再電離損失の計算法とその測定例を示した。この計算法によりドリフト管内壁の枯化の進展の状況を定量的に捉えることができた。また、本計算法は枯化終了後も対向面に埋め込まれた熱電対信号による突き抜け量の計算とともにプラズマへの入射パワーの評価のために利用されている。

JT-60は真空容器の下部にコイルを追加することにより、プラズマの下方にX点を有するダイバータ放電も可能になった。この場合X点近傍の中性粒子ガス圧が高くなることから、上下NBIユニットに対応するドリフト管も上下で圧力差が出るのが予期される。最近の測定によればジュール加熱時で約3倍、NBI追加加熱時は6倍もの圧力差がドリフト管のプラズマに面する部分の圧力差としてあるらしいことがわかっている。但し、アウトガスが多い場合にはアウトガスにより再電離損失がほぼ決まる。またアウトガスが少なくなって以降も中～低プラズマ密度域での実験ではNBI側からの作動ガスによりほぼ再電離損失がほぼ決まる。従って、このような場合には現状の計算法で再電離損失を求めても大きな誤差とはならない。一方高プラズマ密度域の実験時は注意を要する。このような場合にも正しく評価するには上下個別にプラズマ周辺圧力を測定する手段及び新たな評価法を要するが、これは今後の課題である。

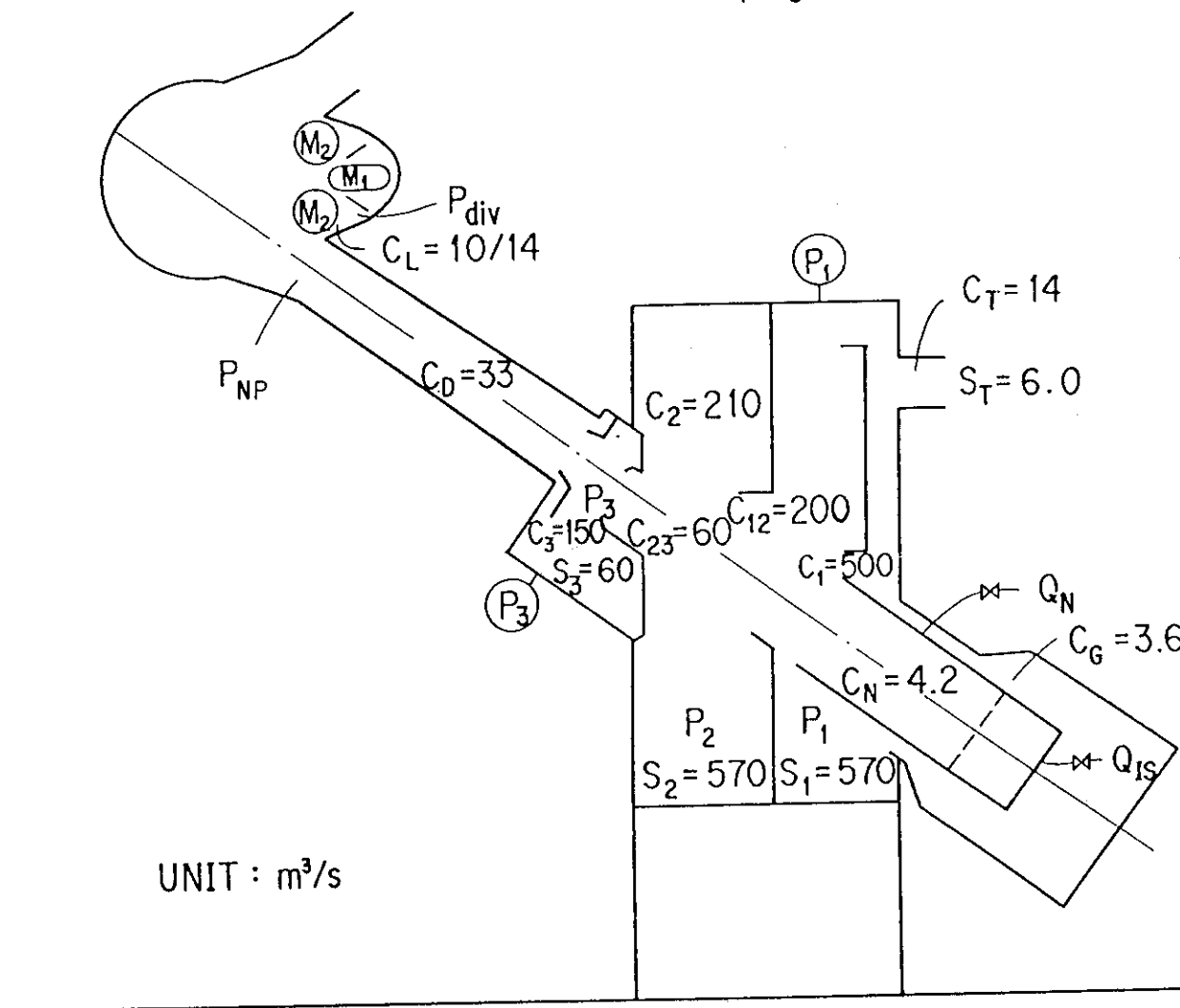
謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、有益な議論を第4試験室及び加熱工学第1研究室の皆様にして頂きましたことに感謝致します。また、ご協力と激励を頂きました国枝俊介第4試験室長、蛭田和治同室長代理に感謝致します。本研究遂行に際し、ご指導と激励を頂いた、吉川允二理事、田中正俊那珂研究所所長、飯島勉JT-60試験部部長、及び田中裕二同次長に感謝致します。

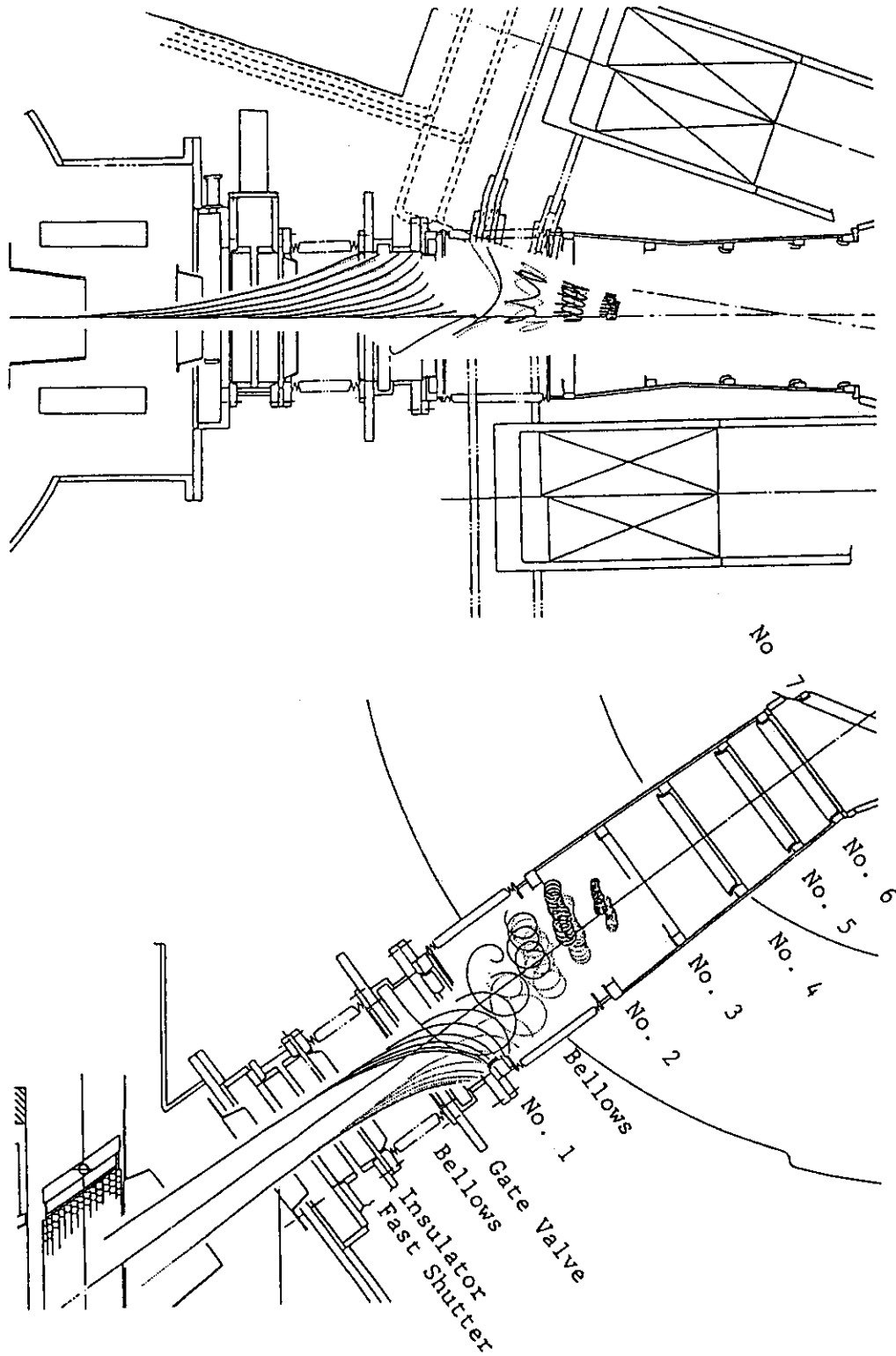
文 献

- 1) S. Matsuda et al., Fusion Engineering and Design 5 (1987) 85.
- 2) JT-60 チーム, 「JT-60 初期加熱実験結果のレビュー」, 日本原子力研究所レポート JAERI-M 87-009, P.264~ (1987年)。
- 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年)。
- 4) 小原祥裕, 「3D再電離イオン軌道計算コード」 (not published)。
- 5) 荒木政則, 栗山正明, 「JT-60 NBI ポート内ビームリミタの熱電対出力応答 (I)」, 日本原子力研究所レポート JAERI-M 86-085 (1986年)。
- 6) M. Kuriyama et al., Proc. 9th Symp. Engineering Problems of Fusion Research, Chicago (1981) 1347.

- Q : GAS FEED RATE
- C : CONDUCTANCE
- S_T : TMP PUMP SPEED
- $S_{1\sim3}$: CRYOPUMP SPEED



第1図 JT-60NBIの真空系の構成



第2図 再電離イオン軌道の計算例

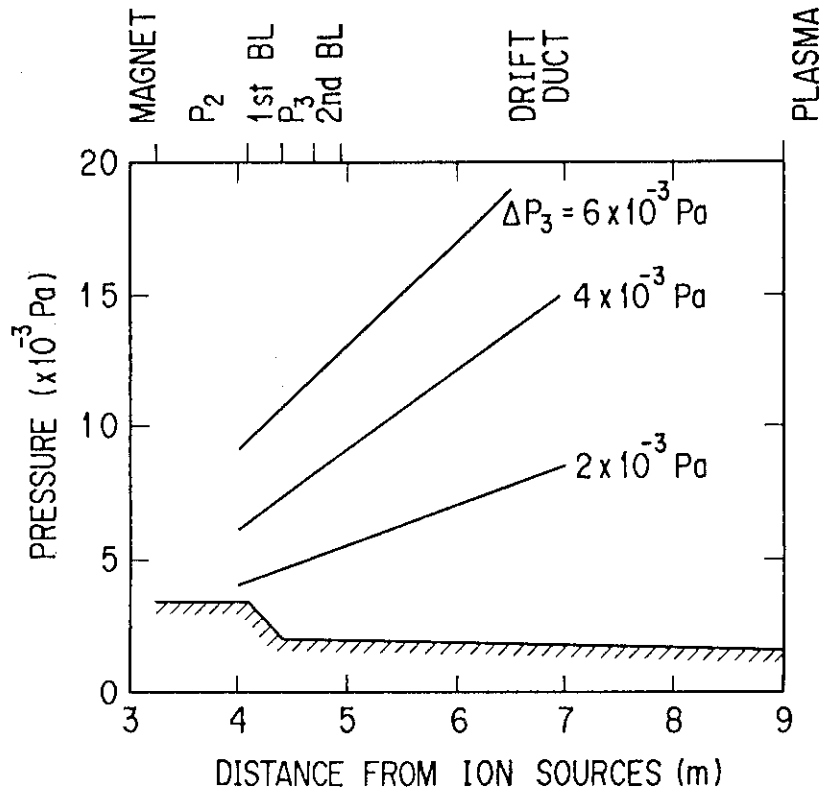
計算条件：ビームエネルギー 50 keV

トロイダル磁場 -4T

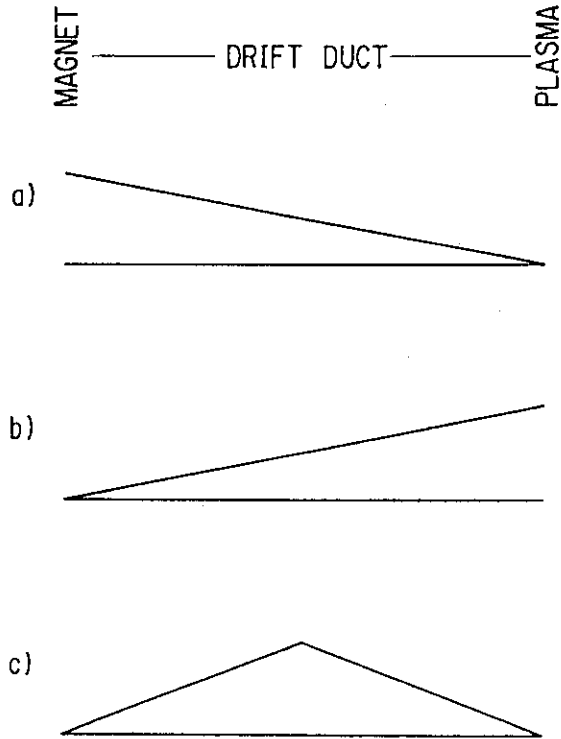
プラズマ電流 1MA

オーミックコイル電流 -37kA

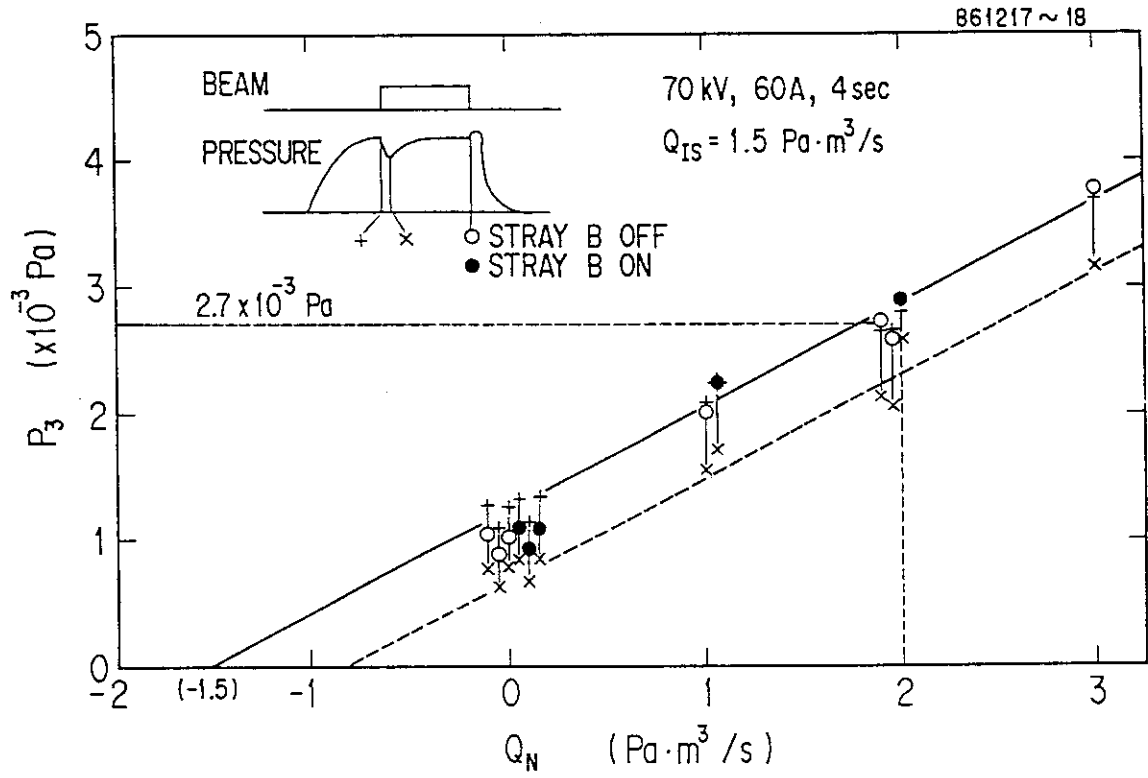
(ショットE1539相当)



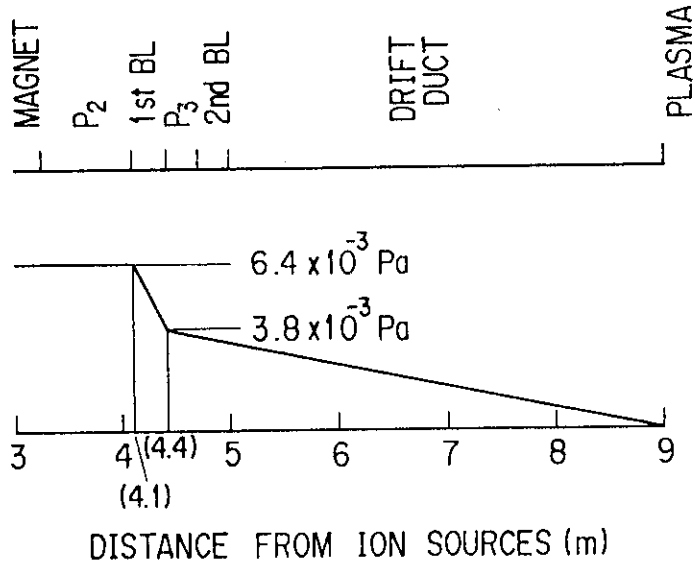
第3図 再電離イオンによる熱負荷分布を求めるのに用いられた、ドリフト管内の真空度の分布。斜線部はNB I側からのガスの流れできまる真空度の分布で、これにドリフト管中央もしくはよりトーラス側からのガスの流れが重畳するとした。



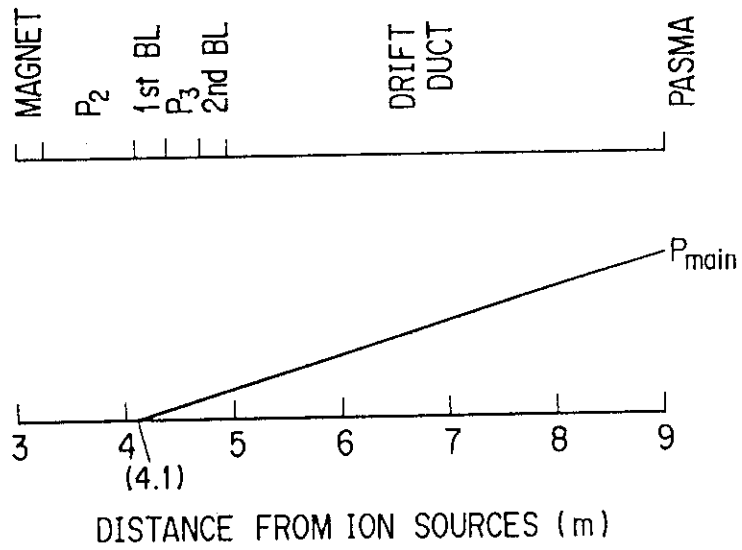
第4図 各ガス源に対するドリフト管内の圧力分布
 a) NB I側からの作動水素ガスの流れ
 b) トカマクプラズマ側からのガスの流れ
 c) ドリフト管壁からのアウトガス



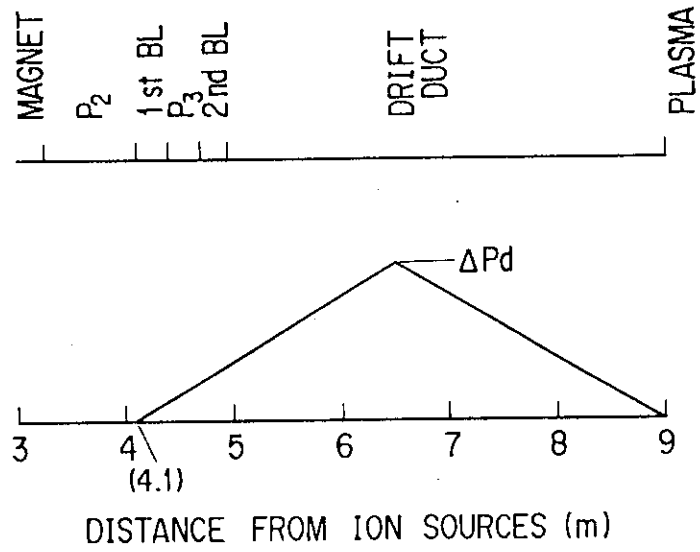
第5図 JT-60 NBI原型ユニットにおける, ガス導入量を変化させたときの P_3 室圧力変化の測定結果



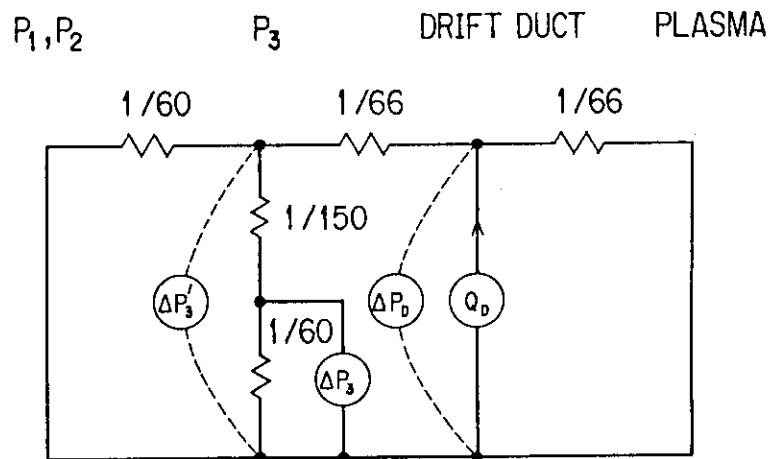
第6図 NB I側からの作動水素ガスの流れによる圧力分布



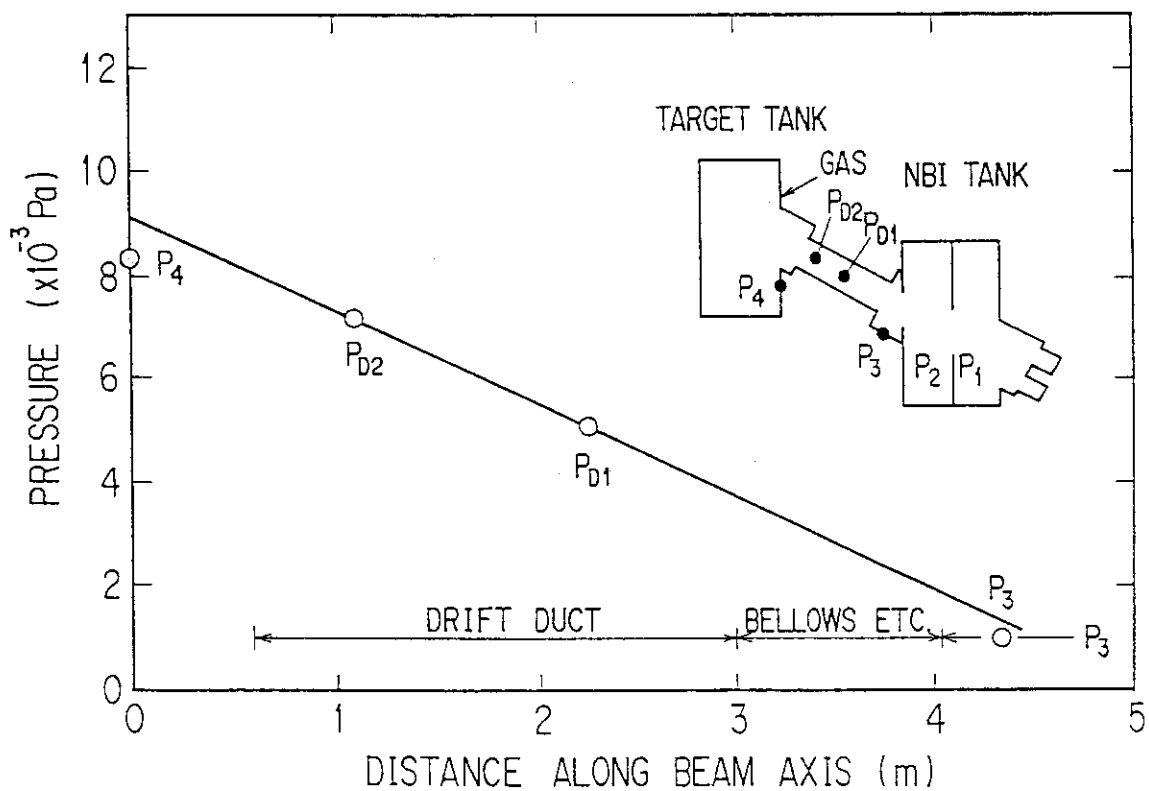
第7図 トカマクプラズマ側からのガスの流入に依る圧力分布



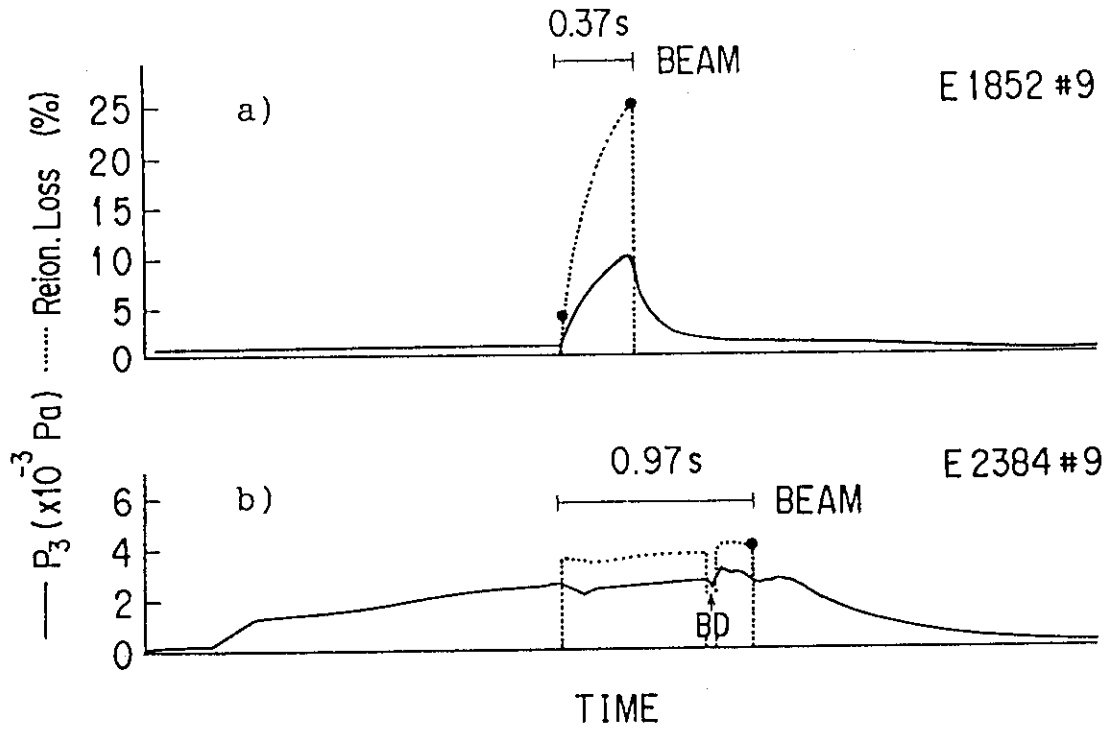
第8図 再電離イオンの衝突に伴うアウトガスに依る圧力分布



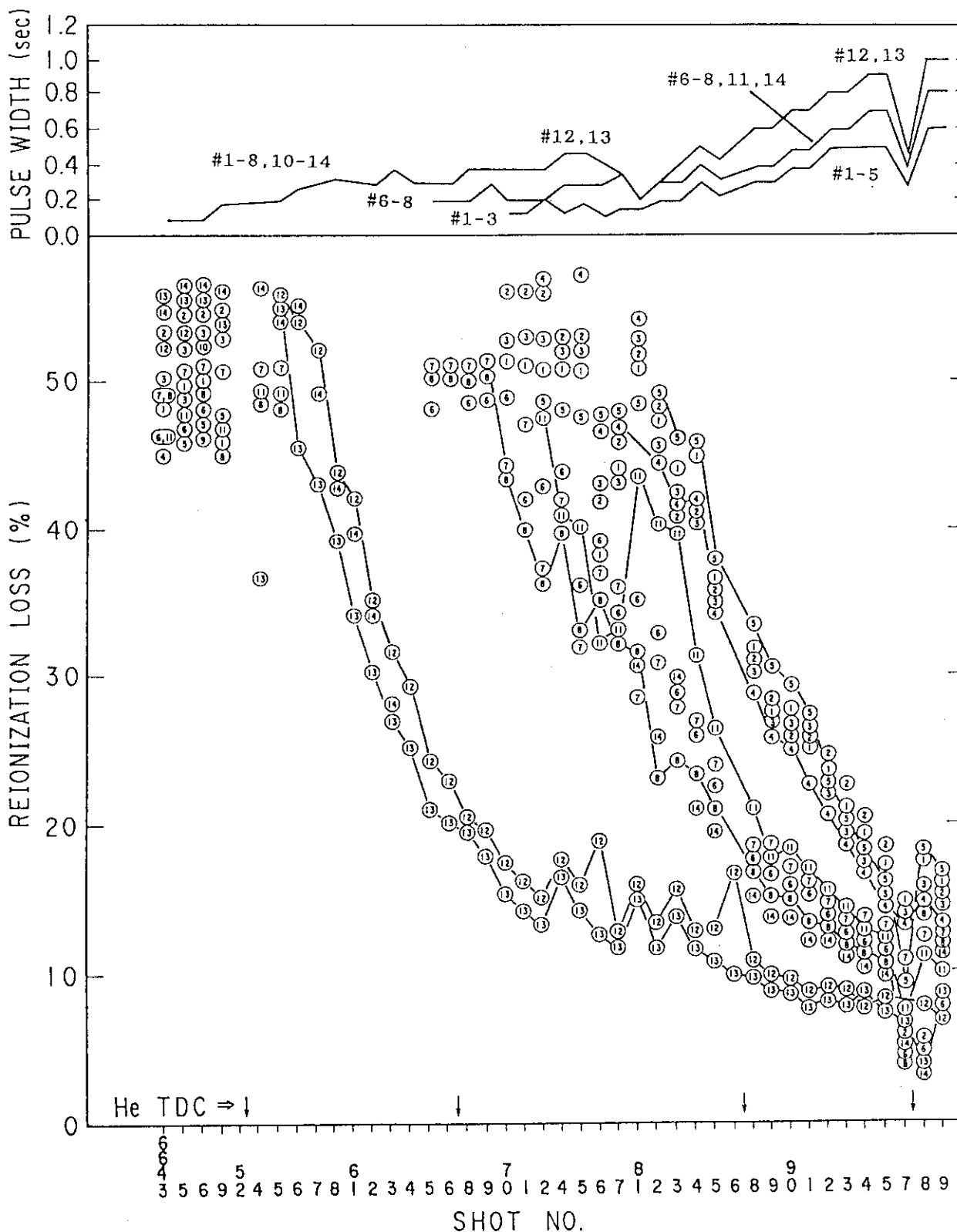
第9図 再電離イオンの衝突に伴うアウトガスに関連する真空系の等価回路



第10図 JT-60NBI原型ユニットにてクライオポンプ排気時にターゲットタンクからガスを導入したときの圧力分布。



第 1 1 図 P_3 圧力変化及びこれから計算された再電離損失の時間変化の例
 a) 入射開始から通算で 17 ショット目
 b) 87 ショット目。BD はイオン源の放電破壊でビームが短時間とぎれた事を示す。



第12図 真空容器を大気開放した後の再電離損失の推移

付録 1 排気速度とコンダクタンスだけから求めた ΔP_3 と P_{main} の関係

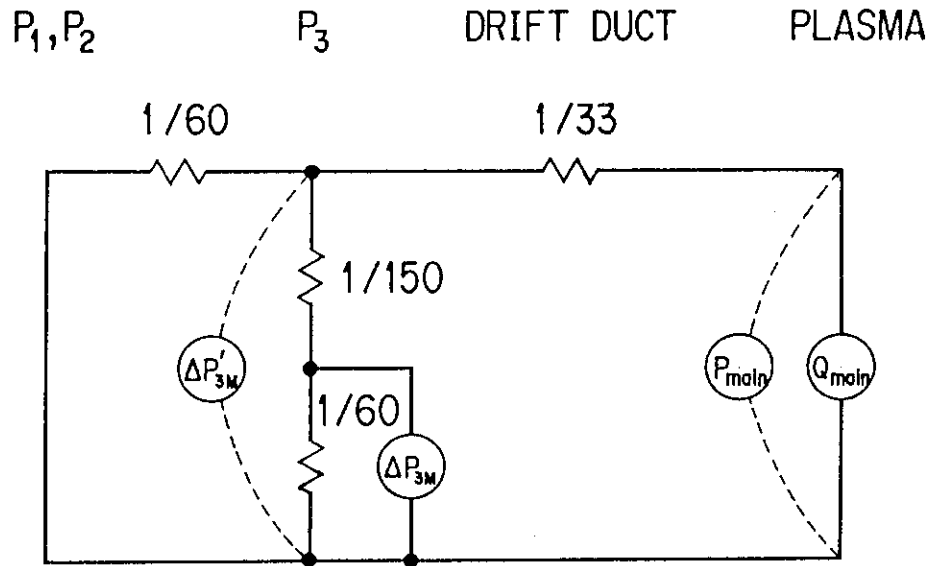
同様の関係式は付図1のような等価回路を考えると排気速度とコンダクタンスだけからも求めることができ、次の値が得られる。

$$P_{main} / \Delta P_{3M}' = [33^{-1} + \{60^{-1} \parallel (150^{-1} + 60^{-1})\}] \parallel \{60^{-1} \parallel (150^{-1} + 60^{-1})\}$$

$$= 4.12$$

$$\therefore \Delta P_{3M} = \Delta P_{3M}' / 1.4 = 0.173 P_{main}$$

先の値と開きがあるが、原型ユニットにおける測定値の方が直接的な測定をしており、精度があると考えられることから、原型ユニットの測定値を採用した。



付図1 ΔP_3 と P_{main} の関係を排気速度コンダクタンスだけから求める場合の等価回路。

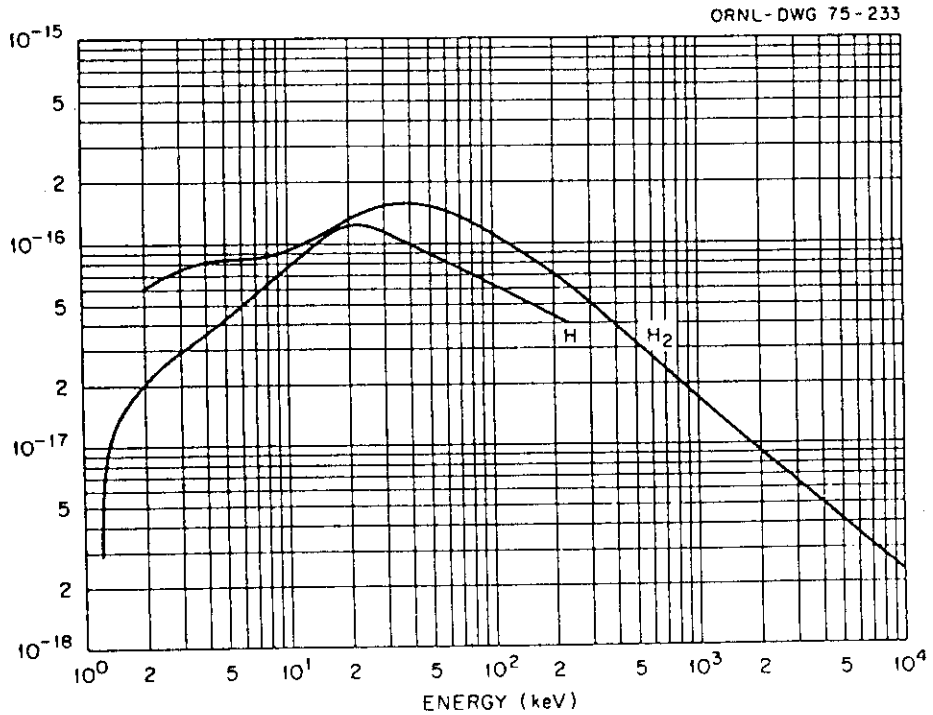
付録2 水素雰囲気中における水素原子ビームの 電子損失断面積

水素雰囲気中における水素原子ビームの電子損失断面積を付図2に示す(C. F. Barnett et al., Oak Ridge National Laboratory Report ORNL 5206 (1977)より転載)。

Cross Sections for Electron Loss or Stripping
of H Atoms in H and H₂

Energy (keV)	Cross Sections (cm ² /molecule)	
	H	H ₂
1.2 E 00	3.0 E-18	
2.0 E 00	2.0 E-17	6.0 E-17
5.0 E 00	4.2 E-17	7.3 E-17
7.0 E 00	5.6 E-17	7.4 E-17
1.0 E 01	7.7 E-17	9.5 E-17
2.0 E 01	1.2 E-16	1.3 E-16
5.0 E 01	8.8 E-17	1.5 E-16
7.0 E 01	7.5 E-17	1.3 E-16
1.0 E 02	6.2 E-17	1.1 E-16
2.0 E 02	4.3 E-17	7.0 E-17
5.0 E 02		3.2 E-17
7.0 E 02		2.3 E-17
1.0 E 03		1.7 E-17
2.0 E 03		9.2 E-18
5.0 E 03		4.1 E-18
7.0 E 03		3.1 E-18
1.0 E 04		2.3 E-18

Accuracy:
± 25%



付図2 水素雰囲気中における水素原子ビームの
電子損失断面積 (Barnettらによる)。