

JAERI-Tech

97-031



JT-60U用負イオンNB Iにおける
ドリフト管内の再電離損失の評価

1997年7月

大原比呂志・栗山正明

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

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

This report is issued irregularly.

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

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1997

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

JT-60U用負イオンNBIにおけるドリフト管内の再電離損失の評価

日本原子力研究所那珂研究所核融合装置試験部

大原比呂志・栗山 正明

(1997年6月11日受理)

JT-60U用負イオン中性粒子入射(N-NBI)装置のビームラインとJT-60U本体真空容器を結ぶドリフト管内の再電離損失を管内の真空度変化及びイオン源、中性化セルへのガス導入量を基に評価・算出した。

本報告書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、入射開始から約10ショットでD⁰ビームで入射パワーの約3%以下、H⁰ビームではその約半分の1.5%程度に落ち着くことがわかった。これは、N-NBI装置の設計時において、JT-60U真空容器圧力を0.002Pa一定であると仮定し、線密度と衝突断面積から求めた値とほぼ一致した。また、この再電離損失の増減に伴ってドリフト管内の再電離保護板及びビームリミタの温度上昇が変化すること、ポートエージングが終った時は再電離損失の入射パワー依存性がないことなどが確認された。

Estimation of Reionization Loss in the Drift Ducts of the Negative-ion based
NBI for JT-60U

Hiroshi OOHARA and Masaaki KURIYAMA

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

(Received June 11, 1997)

The reionization loss of neutral beams in the beam drift duct for the negative-ion based NBI for JT-60U is estimated from the pressure rise in the duct and gas flow rate into the beam-line.

The reionization loss in the drift duct has been confirmed to be decreased around 3% after the injection of ten shots with D beam, and around 1.5% with H beam. A reionization loss measured agrees with a calculation result assuming that the pressure of the JT-60U vacuum vessel is 0.002Pa. The temperature rise in the drift duct has changed at the same time changing the reionization loss. The reionization loss is independent of the injection power after having completed the drift duct aging.

Keywords: Reionization, Negative-ion, NBI, JT-60U

目 次

1. はじめに	1
2. 再電離損失の算出法	1
3. N-NBI装置の真空排気系	3
4. 再電離損失の測定の結果	3
5. まとめ	4
謝 辞	4
文 献	5
付録 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	17

Contents

1. Introduction	1
2. Estimation Method of Reionization Loss	1
3. Evacuation System of N-NBI	3
4. Results of Reionization Loss	3
5. Summary	4
Acknowledgements	4
References	5
Appendix ; Cross Section for Electron Loss or Stripping of H Atoms in H and H ₂	17

1. はじめに

負イオン中性粒子入射 (N-NBI) 装置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。中性粒子ビームがドリフト管内での室温ガスと衝突し再電離する。この再電離したビームは、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に衝突し熱化する (第1図参照)。この現象がドリフト管におけるビームの再電離損失である。

N-NBI 装置における再電離損失は、ビームエネルギーが高いために衝突断面積が小さく単位長さ当たりの損失は少ない。しかし、正イオン中性粒子入射 (NBI) 装置に比べて中性化セルから JT-60 真空容器までの距離が長いこと、及び高エネルギービームのためにパワー密度が大きいことのために再電離損失を無視できない。これは、再電離損失の増大が単に入射パワーの損失にとどまらず、ドリフト管及びドリフト管近傍の機器に過大な熱負荷を与える恐れがあり、注意を要する。

再電離損失の量を評価するさいにはドリフト管に当たる再電離イオンビームの熱流速を測定するのが最も直接的であるが、JT-60のドリフト管は慣性冷却を用いており時定数が長く、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出来ない。そこで JT-60 N-NBI 装置では、ビームライン側からのガス導入寄与分及び JT-60 プラズマ側からの圧力寄与分を考慮して、ドリフト管内圧力を決定し、これ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することとした。この方法は、現状の正イオン NBI の再電離評価法¹⁾を改良したものである。

本報告においては、真空度等の情報を基に評価する計算法及び平成8年度に行われた N-NBI 入射実験時における再電離損失量を示す。第2章ではまず真空度等の情報を基にした再電離損失の算出法を示す。次いで第3章では N-NBI 装置の真空排気系について説明する。第4章では平成8年度に実施された N-NBI 入射実験時における再電離損失の結果と評価について示し、第5章ではまとめと今後の課題について記した。

2. 再電離損失の算出法

ドリフト管での再電離損失の原因となる室温ガス源としては、

- a) ビームライン側からの作動ガスの流入
- b) トカマクプラズマ側からのガスの流入
- c) ドリフト管壁からのビーム衝突による脱ガス

の3種が考えられており、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求めれば再電離損失が評価できる。

N-NBI では、再電離損失の評価をイオンダンプタンク部及び N-NBI ポート部において行うこととし、N-NBI の作動ガス導入量による寄与分、N-NBI ビーム入射時の JT-60 本体側の圧力上昇及びドリフト管壁からの脱ガスによる圧力上昇分から求めるガス線密度と断面積から再電離損失を算出することとした。

1. はじめに

負イオン中性粒子入射 (N-NBI) 装置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。中性粒子ビームがドリフト管内での室温ガスと衝突し再電離する。この再電離したビームは、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に衝突し熱化する (第1図参照)。この現象がドリフト管におけるビームの再電離損失である。

N-NBI 装置における再電離損失は、ビームエネルギーが高いために衝突断面積が小さく単位長さ当たりの損失は少ない。しかし、正イオン中性粒子入射 (NBI) 装置に比べて中性化セルから JT-60 真空容器までの距離が長いこと、及び高エネルギービームのためにパワー密度が大きいことのために再電離損失を無視できない。これは、再電離損失の増大が単に入射パワーの損失にとどまらず、ドリフト管及びドリフト管近傍の機器に過大な熱負荷を与える恐れがあり、注意を要する。

再電離損失の量を評価するさいにはドリフト管に当たる再電離イオンビームの熱流速を測定するのが最も直接的であるが、JT-60のドリフト管は慣性冷却を用いており時定数が長く、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出来ない。そこで JT-60 N-NBI 装置では、ビームライン側からのガス導入寄与分及び JT-60 プラズマ側からの圧力寄与分を考慮して、ドリフト管内圧力を決定し、これ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することとした。この方法は、現状の正イオン NBI の再電離評価法¹⁾を改良したものである。

本報告においては、真空度等の情報を基に評価する計算法及び平成8年度に行われた N-NBI 入射実験時における再電離損失量を示す。第2章ではまず真空度等の情報を基にした再電離損失の算出法を示す。次いで第3章では N-NBI 装置の真空排気系について説明する。第4章では平成8年度に実施された N-NBI 入射実験時における再電離損失の結果と評価について示し、第5章ではまとめと今後の課題について記した。

2. 再電離損失の算出法

ドリフト管での再電離損失の原因となる室温ガス源としては、

- a) ビームライン側からの作動ガスの流入
- b) トカマクプラズマ側からのガスの流入
- c) ドリフト管壁からのビーム衝突による脱ガス

の3種が考えられており、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求めれば再電離損失が評価できる。

N-NBI では、再電離損失の評価をイオンダンプタンク部及び N-NBI ポート部において行うこととし、N-NBI の作動ガス導入量による寄与分、N-NBI ビーム入射時の JT-60 本体側の圧力上昇及びドリフト管壁からの脱ガスによる圧力上昇分から求めるガス線密度と断面積から再電離損失を算出することとした。

1) 作動ガス寄与分に対する圧力上昇

N-NBIの動作ガスの供給のため、イオン源ガス導入系 (Q_{is}) と中性化セルガス導入系 (Q_n) がある。イオン源及び中性化セルへのガス導入量、 $Q_{is} + Q_n$ に対する圧力上昇を、イオンダンプタンク1室 (P_4 室)、イオンダンプタンク2室 (P_5 室) 及びN-NBIポート部の入口部 (ドリフト部 (P_d) という) に取り付けられている真空計の圧力変化から求める。

真空度とガス流量の関係式を、

$$P = a_0 + a_1 \times Q_{is} + a_2 \times Q_n + a_3 \times I_{acc} \quad \dots (1)$$

とする。

(1) 式から、 P_4 室、 P_5 室、 P_d 真空度を以下の式で求める。

$$\begin{aligned} P_4 &= e_1 + a_1 \times Q_{is} + b_1 \times Q_n \\ P_5 &= e_2 + a_2 \times Q_{is} + b_2 \times Q_n \quad \dots (2) \\ P_d &= e_3 + a_3 \times Q_{is} + b_3 \times Q_n \end{aligned}$$

ここで、 $e_1 \sim e_3$ 、 $a_1 \sim a_3$ 及び $b_1 \sim b_3$ は、イオン源及び中性化セルにガスを導入してビームライン各部の圧力を測定するガスフロー試験²⁾から最小二乗法より求める。

ここで、イオン源へのガス導入量 Q_{is} は、大部分がイオン源タンク部クライオポンプにより排気されるため P_4 室、 P_5 室、 P_d への圧力上昇にはほとんど寄与しない。このため、 $a_1 \sim a_3$ を全て0とした。第1表に(2)式の係数の値を示す。これは、第3章に記すガスフロー試験より求めたものである。

2) ドリフト管内脱ガス等による圧力上昇 (ΔP_P)

ドリフト管内の圧力上昇 (ΔP_P) は、N-NBIポート部に取り付けられたIG-10 (ポート部電離真空計) の指示値により求めることにした。これは、ビーム入射時のポート内圧力上昇は、ドリフト管内の中心部 (第3ビームリミタNo. 3) において最大となり (再電離ビームがこの位置に集中して壁に衝突する)、また、IG-10は管内中心部と第2ビームリミタの中間に取り付けられてあることから、IG-10の指示値がポート内の圧力上昇の平均値に相当すると仮定したためである。

第2図にポート内の圧力分布を模式的に示す。IG10の指示値 (ΔP_P) から求めるポート内の真空度を次の式で求める。

$$\begin{aligned} P_p(t) &= e_p \times P_{p,r}(t + T_p) \\ e_p &: \text{IG-10電離真空計の校正係数 (2.42)} \\ T_p &: \text{IG-10電離真空計時間遅れ量} \\ P_{p,r} &: \text{IG-10電離真空計の読み値} \end{aligned}$$

3) ガス線密度の求め方

1)、2) で求めた真空度からガス線密度 $n_l(t)$ を次式で求める。

$$n_l(t) = P_4 \times L_5 + P_5 \times L_6 + ((P_5 + P_d) / 2) \times L_7 + P_P(t) \times L_8$$

L_5 : イオンダンプタンクP1室距離 (2.68m)

L_6 : イオンダンプタンクP2室距離 (0.97m)

L_7 : 第3BL長さ (0.2m)

L_8 : ポート部距離 (5.46m)

4) 再電離損失

求めたガス線密度 $n_l(t)$ から再電離損失を次式により求める。

$$\eta_{ri}(t) = e_6 \times \{1 - \exp(-e_7 \times n_l(t) \times \sigma(t))\}$$

e_6 : η_{ri} 補正係数 (1.0)

e_7 : 線密度換算係数 (2.41×10^{20} molecules/m³/Pa)

σ : 重水素/水素雰囲気中における重水素/水素原子ビームの電子損失断面積
(付録1参照)

以上の計算手法をN-NBI計算機に組み込み、PP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をできるようにした。

3. N-NBI装置の真空排気系

再電離損失を算出するためには、ビームライン、ドリフト管内の圧力を正確に評価しなければならない。第3図にN-NBI装置の真空排気系及び真空計の構成を示す。N-NBIの真空容器はイオン源タンク部、中性化セル部、イオンダンプタンク部及びNBIポート部から成り、このうち、イオン源タンク及びイオンダンプタンクには1基あたり300m³/sのクライオポンプが4基ずつ設置されている。イオンダンプタンクにはタンク内に仕切板が設けられており、イオンダンプタンク1室及びイオンダンプタンク2室とに分かれており、それぞれに1基当たり300m³/sの排気速度を持つクライオポンプ2基により差動排気を行っている。図中のIG1~IG10は電離真空計を示す。

イオン源及び中性化セルにガスを導入した場合のビームライン及びドリフト管内圧力の分布を第4図に示す。この圧力分布を基にしてイオン源及び中性化セルへのガス導入時のベース圧力の分布を評価した。

4. 再電離損失の測定の結果

平成8年9月(重水素ビーム)及び平成9年2月(水素ビーム)に行った、N-NBI装置による入射実験時の再電離損失を求めた。重水素ビームの場合の結果について第5~7図、水素ビームについては第8~10図に示す。これらの図における横軸の $T_{inj}(s)$ は、入射パルス幅の積算値を示す。

第5図は重水素ビームにおける再電離保護板の熱電対温度上昇率と再電離損失率をプロットしたものである。熱電対温度上昇率は再電離損失の変化に伴って変化しており、両者の傾向はほぼ一致していた。再電離損失の僅かな変化に対して温度上昇が大きく変化していることがわかる。第6図は、重水素ビームにおけるポート真空度と再電離損失率をプロットしたものである。再電離損失の評価は、ドリフト管に設置された真空計の圧力変化から求めているために、この両者の傾向は一致していた。再電離損失が一定になったときのポート真空度は概略 1.5×10^{-3} Paである。第7図は重水素ビームにおける入射パワーと再電離損失率をプロットしたものである。イオン源2台(U/L)とイオン源1台(U)の再電離損失量はポートエージングが完了してポート内壁が枯化されている時には、同じ

4) 再電離損失

求めたガス線密度 $n_l(t)$ から再電離損失を次式により求める。

$$\eta_{ri}(t) = e_6 \times \{1 - \exp(-e_7 \times n_l(t) \times \sigma(t))\}$$

e_6 : η_{ri} 補正係数 (1.0)

e_7 : 線密度換算係数 (2.41×10^{20} molecules/m³/Pa)

σ : 重水素/水素雰囲気における重水素/水素原子ビームの電子損失断面積
(付録1参照)

以上の計算手法をN-NBI計算機に組み込み、PP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をできるようにした。

3. N-NBI装置の真空排気系

再電離損失を算出するためには、ビームライン、ドリフト管内の圧力を正確に評価しなければならない。第3図にN-NBI装置の真空排気系及び真空計の構成を示す。N-NBIの真空容器はイオン源タンク部、中性化セル部、イオンダンプタンク部及びNBIポート部から成り、このうち、イオン源タンク及びイオンダンプタンクには1基あたり300m³/sのクライオポンプが4基ずつ設置されている。イオンダンプタンクにはタンク内に仕切板が設けられており、イオンダンプタンク1室及びイオンダンプタンク2室とに分かれており、それぞれに1基当たり300m³/sの排気速度を持つクライオポンプ2基により差動排気を行っている。図中のIG1~IG10は電離真空計を示す。

イオン源及び中性化セルにガスを導入した場合のビームライン及びドリフト管内圧力の分布を第4図に示す。この圧力分布を基にしてイオン源及び中性化セルへのガス導入時のベース圧力の分布を評価した。

4. 再電離損失の測定の結果

平成8年9月(重水素ビーム)及び平成9年2月(水素ビーム)に行った、N-NBI装置による入射実験時の再電離損失を求めた。重水素ビームの場合の結果について第5~7図、水素ビームについては第8~10図に示す。これらの図における横軸の $T_{inj}(s)$ は、入射パルス幅の積算値を示す。

第5図は重水素ビームにおける再電離保護板の熱電対温度上昇率と再電離損失率をプロットしたものである。熱電対温度上昇率は再電離損失の変化に伴って変化しており、両者の傾向はほぼ一致していた。再電離損失の僅かな変化に対して温度上昇が大きく変化していることがわかる。第6図は、重水素ビームにおけるポート真空度と再電離損失率をプロットしたものである。再電離損失の評価は、ドリフト管に設置された真空計の圧力変化から求めているために、この両者の傾向は一致していた。再電離損失が一定になったときのポート真空度は概略 1.5×10^{-3} Paである。第7図は重水素ビームにおける入射パワーと再電離損失率をプロットしたものである。イオン源2台(U/L)とイオン源1台(U)の再電離損失量はポートエージングが完了してポート内壁が枯化されている時には、同じ

4) 再電離損失

求めたガス線密度 $n_l(t)$ から再電離損失を次式により求める。

$$\eta_{ri}(t) = e_6 \times \{1 - \exp(-e_7 \times n_l(t) \times \sigma(t))\}$$

e_6 : η_{ri} 補正係数 (1.0)

e_7 : 線密度換算係数 (2.41×10^{20} molecules/m³/Pa)

σ : 重水素/水素雰囲気中における重水素/水素原子ビームの電子損失断面積
(付録1参照)

以上の計算手法をN-NBI計算機に組み込み、PP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をできるようにした。

3. N-NBI装置の真空排気系

再電離損失を算出するためには、ビームライン、ドリフト管内の圧力を正確に評価しなければならない。第3図にN-NBI装置の真空排気系及び真空計の構成を示す。N-NBIの真空容器はイオン源タンク部、中性化セル部、イオンダンプタンク部及びNBIポート部から成り、このうち、イオン源タンク及びイオンダンプタンクには1基あたり300m³/sのクライオポンプが4基づつ設置されている。イオンダンプタンクにはタンク内に仕切板が設けられており、イオンダンプタンク1室及びイオンダンプタンク2室とに分かれており、それぞれに1基当たり300m³/sの排気速度を持つクライオポンプ2基により差動排気を行っている。図中のIG1~IG10は電離真空計を示す。

イオン源及び中性化セルにガスを導入した場合のビームライン及びドリフト管内圧力の分布を第4図に示す。この圧力分布を基にしてイオン源及び中性化セルへのガス導入時のベース圧力の分布を評価した。

4. 再電離損失の測定の結果

平成8年9月(重水素ビーム)及び平成9年2月(水素ビーム)に行った、N-NBI装置による入射実験時の再電離損失を求めた。重水素ビームの場合の結果について第5~7図、水素ビームについては第8~10図に示す。これらの図における横軸の $T_{inj}(s)$ は、入射パルス幅の積算値を示す。

第5図は重水素ビームにおける再電離保護板の熱電対温度上昇率と再電離損失率をプロットしたものである。熱電対温度上昇率は再電離損失の変化に伴って変化しており、両者の傾向はほぼ一致していた。再電離損失の僅かな変化に対して温度上昇が大きく変化していることがわかる。第6図は、重水素ビームにおけるポート真空度と再電離損失率をプロットしたものである。再電離損失の評価は、ドリフト管に設置された真空計の圧力変化から求めているために、この両者の傾向は一致していた。再電離損失が一定になったときのポート真空度は概略 1.5×10^{-3} Paである。第7図は重水素ビームにおける入射パワーと再電離損失率をプロットしたものである。イオン源2台(U/L)とイオン源1台(U)の再電離損失量はポートエージングが完了してポート内壁が枯化されている時には、同じ

値になるはずであるが、イオン源2台(U/L)の時の再電離損失量がイオン源1台(U)の時より約40%増加しているのは、まだドリフト管内壁が完全に枯化されていない状態で入射パワーが倍近く増えたことにより、再電離ビーム粒子が増大し、壁への衝突による脱ガスが急激に増えるためである。

第8～10図は水素ビームにおける再電離保護板熱電対温度上昇率、ポート真空度及び入射パワーと再電離損失率をプロットしたものである。第8図及び第9図は、重水素ビームにおける傾向と同じであった。再電離保護板熱電対温度上昇率に関しては、再電離損失の僅かな変化に対して再電離保護板熱電対温度上昇率が大きく変化している。これは、重水素ビームに比べて水素ビームでの入射パワーが約2倍近く大きくなっているためである。第10図では、入射パルス幅の積算時間が約20秒以降、入射パワーが大きく増えても再電離損失量は約1.5%一定である。これは、ポートエージングが進みドリフト管内壁がほぼ枯化したためと思われる。

第5～10図の結果から明らかなように重水素、水素ビームのどちらにおいても入射積算時間約10秒以降からのビーム入射により、ドリフト管内壁はほぼ完全に枯化し、プラズマ周辺圧力にもよるが再電離損失は重水素ビームにおいては約3%、水素ビームにおいてはその約半分に落ち着くことがわかった。これは、水素ガスのコンダクタンスが重水素の場合の $\sqrt{2}$ 倍大きくなるために、水素ビーム運転時のポート内ガス圧が小さくなるためである。

5. まとめ

JT-60U用N-NBIのドリフト管における再電離損失の計算法とその結果を示した。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。今回の再電離損失の測定結果は2～3%であり、設計時に評価した³⁾数値とほぼ一致した。今回の計算に用いたビーム入射データは、ポート内壁がある程度枯化してポート内での脱ガスが少なくなっている状態でのデータであるため、イオン源及び中性化セルに導入したガスによりほぼ決まった再電離損失となっている。

今後は、JT-60本体真空容器開放後における脱ガスが多い時の再電離損失、また、N-NBIポート全体は脱ガスを軽減するために、150℃ベーキングが行える構造となっているが、このベーキング効果による再電離損失の推移を確認する必要がある。これは、平成9年6月から開始されるビーム入射実験時に行う予定である。

謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、有益な議論をNBI装置試験室及びNBI加熱研究室の皆様にして頂きましたことを感謝致します。また、ガスフロー試験の実施及びデータの整理・解析にご協力と激励を頂いた、河合視己人課長代理、秋野昇氏、及び西瀉秀樹氏他NAT運転委託関係諸氏に深く感謝致します。また、本研究に対して終始変わらぬご指導を頂きました、船橋昭昌核融合装置試験部部長、清水正亜同次長に感謝いたします。

値になるはずであるが、イオン源2台(U/L)の時の再電離損失量がイオン源1台(U)の時より約40%増加しているのは、まだドリフト管内壁が完全に枯化されていない状態で入射パワーが倍近く増えたことにより、再電離ビーム粒子が増大し、壁への衝突による脱ガスが急激に増えるためである。

第8～10図は水素ビームにおける再電離保護板熱電対温度上昇率、ポート真空度及び入射パワーと再電離損失率をプロットしたものである。第8図及び第9図は、重水素ビームにおける傾向と同じであった。再電離保護板熱電対温度上昇率に関しては、再電離損失の僅かな変化に対して再電離保護板熱電対温度上昇率が大きく変化している。これは、重水素ビームに比べて水素ビームでの入射パワーが約2倍近く大きくなっているためである。第10図では、入射パルス幅の積算時間が約20秒以降、入射パワーが大きく増えても再電離損失量は約1.5%一定である。これは、ポートエージングが進みドリフト管内壁がほぼ枯化したためと思われる。

第5～10図の結果から明らかなように重水素、水素ビームのどちらにおいても入射積算時間約10秒以降からのビーム入射により、ドリフト管内壁はほぼ完全に枯化し、プラズマ周辺圧力にもよるが再電離損失は重水素ビームにおいては約3%、水素ビームにおいてはその約半分に落ち着くことがわかった。これは、水素ガスのコンダクタンスが重水素の場合の $\sqrt{2}$ 倍大きくなるために、水素ビーム運転時のポート内ガス圧が小さくなるためである。

5. まとめ

JT-60U用N-NBIのドリフト管における再電離損失の計算法とその結果を示した。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。今回の再電離損失の測定結果は2～3%であり、設計時に評価した³⁾数値とほぼ一致した。今回の計算に用いたビーム入射データは、ポート内壁がある程度枯化してポート内での脱ガスが少なくなっている状態でのデータであるため、イオン源及び中性化セルに導入したガスによりほぼ決まった再電離損失となっている。

今後は、JT-60本体真空容器開放後における脱ガスが多い時の再電離損失、また、N-NBIポート全体は脱ガスを軽減するために、150℃ベーキングが行える構造となっているが、このベーキング効果による再電離損失の推移を確認する必要がある。これは、平成9年6月から開始されるビーム入射実験時に行う予定である。

謝 辞

本報告書をまとめるに当たり、有益な議論をNBI装置試験室及びNBI加熱研究室の皆様にして頂きましたことを感謝致します。また、ガスフロー試験の実施及びデータの整理・解析にご協力と激励を頂いた、河合視己人課長代理、秋野昇氏、及び西瀉秀樹氏他NAT運転委託関係諸氏に深く感謝致します。また、本研究に対して終始変わらぬご指導を頂きました、船橋昭昌核融合装置試験部部長、清水正亜同次長に感謝いたします。

値になるはずであるが、イオン源2台(U/L)の時の再電離損失量がイオン源1台(U)の時より約40%増加しているのは、まだドリフト管内壁が完全に枯化されていない状態で入射パワーが倍近く増えたことにより、再電離ビーム粒子が増大し、壁への衝突による脱ガスが急激に増えるためである。

第8～10図は水素ビームにおける再電離保護板熱電対温度上昇率、ポート真空度及び入射パワーと再電離損失率をプロットしたものである。第8図及び第9図は、重水素ビームにおける傾向と同じであった。再電離保護板熱電対温度上昇率に関しては、再電離損失の僅かな変化に対して再電離保護板熱電対温度上昇率が大きく変化している。これは、重水素ビームに比べて水素ビームでの入射パワーが約2倍近く大きくなっているためである。第10図では、入射パルス幅の積算時間が約20秒以降、入射パワーが大きく増えても再電離損失量は約1.5%一定である。これは、ポートエージングが進みドリフト管内壁がほぼ枯化したためと思われる。

第5～10図の結果から明らかなように重水素、水素ビームのどちらにおいても入射積算時間約10秒以降からのビーム入射により、ドリフト管内壁はほぼ完全に枯化し、プラズマ周辺圧力にもよるが再電離損失は重水素ビームにおいては約3%、水素ビームにおいてはその約半分に落ち着くことがわかった。これは、水素ガスのコンダクタンスが重水素の場合の $\sqrt{2}$ 倍大きくなるために、水素ビーム運転時のポート内ガス圧が小さくなるためである。

5. まとめ

JT-60U用N-NBIのドリフト管における再電離損失の計算法とその結果を示した。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。今回の再電離損失の測定結果は2～3%であり、設計時に評価した³⁾数値とほぼ一致した。今回の計算に用いたビーム入射データは、ポート内壁がある程度枯化してポート内での脱ガスが少なくなっている状態でのデータであるため、イオン源及び中性化セルに導入したガスによりほぼ決まった再電離損失となっている。

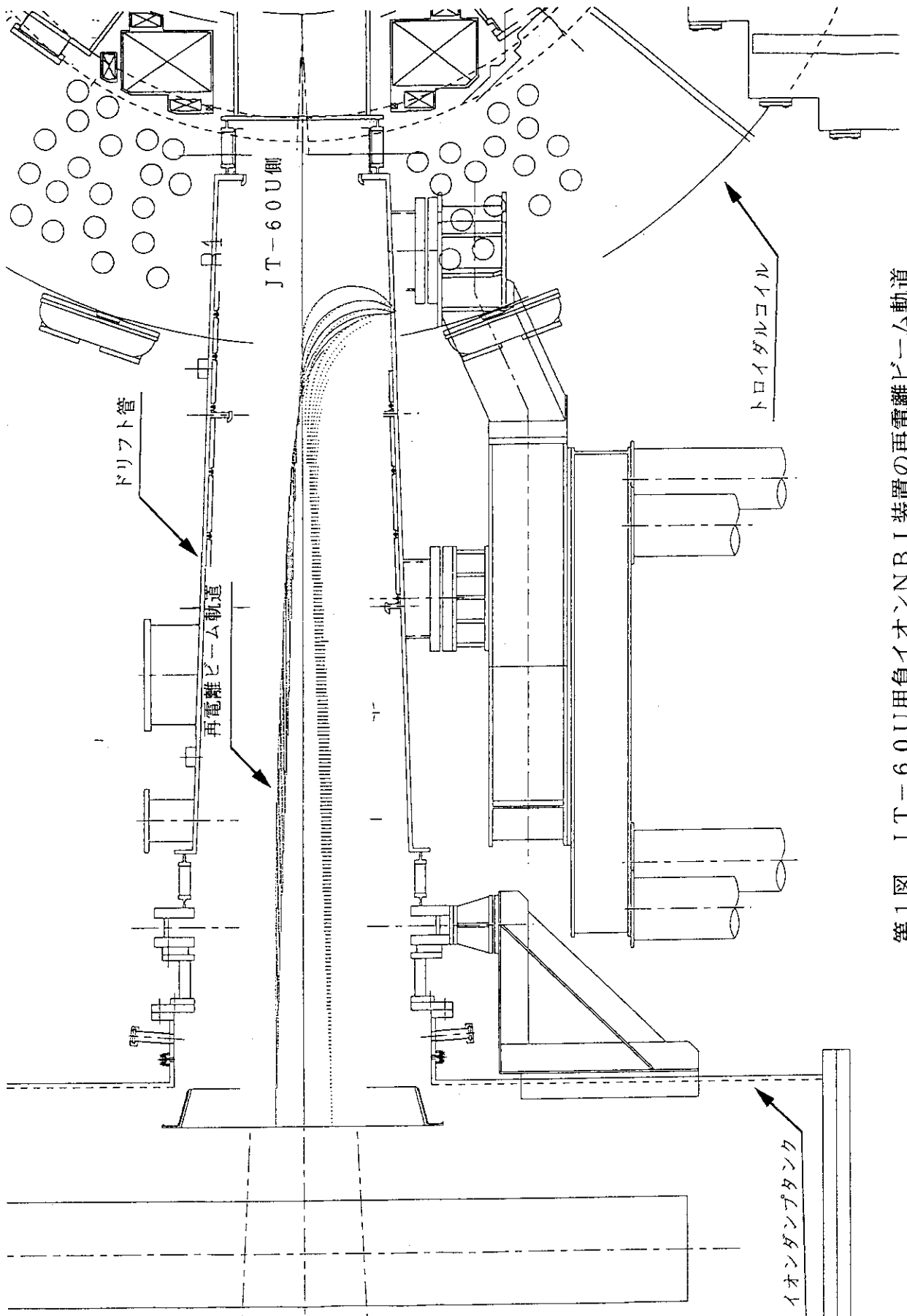
今後は、JT-60本体真空容器開放後における脱ガスが多い時の再電離損失、また、N-NBIポート全体は脱ガスを軽減するために、150℃ベーキングが行える構造となっているが、このベーキング効果による再電離損失の推移を確認する必要がある。これは、平成9年6月から開始されるビーム入射実験時に行う予定である。

謝 辞

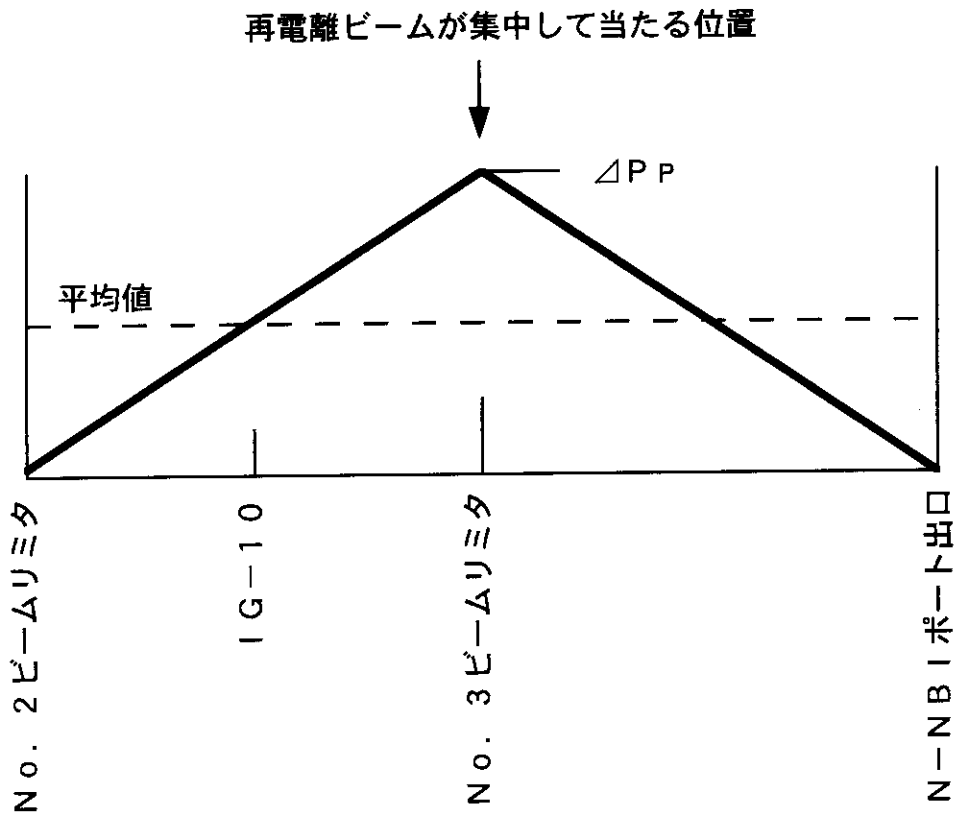
本報告書をまとめるに当たり、有益な議論をNBI装置試験室及びNBI加熱研究室の皆様にして頂きましたことを感謝致します。また、ガスフロー試験の実施及びデータの整理・解析にご協力と激励を頂いた、河合視己人課長代理、秋野昇氏、及び西潟秀樹氏他NAT運転委託関係諸氏に深く感謝致します。また、本研究に対して終始変わらぬご指導を頂きました、船橋昭昌核融合装置試験部部長、清水正亜同次長に感謝いたします。

文 献

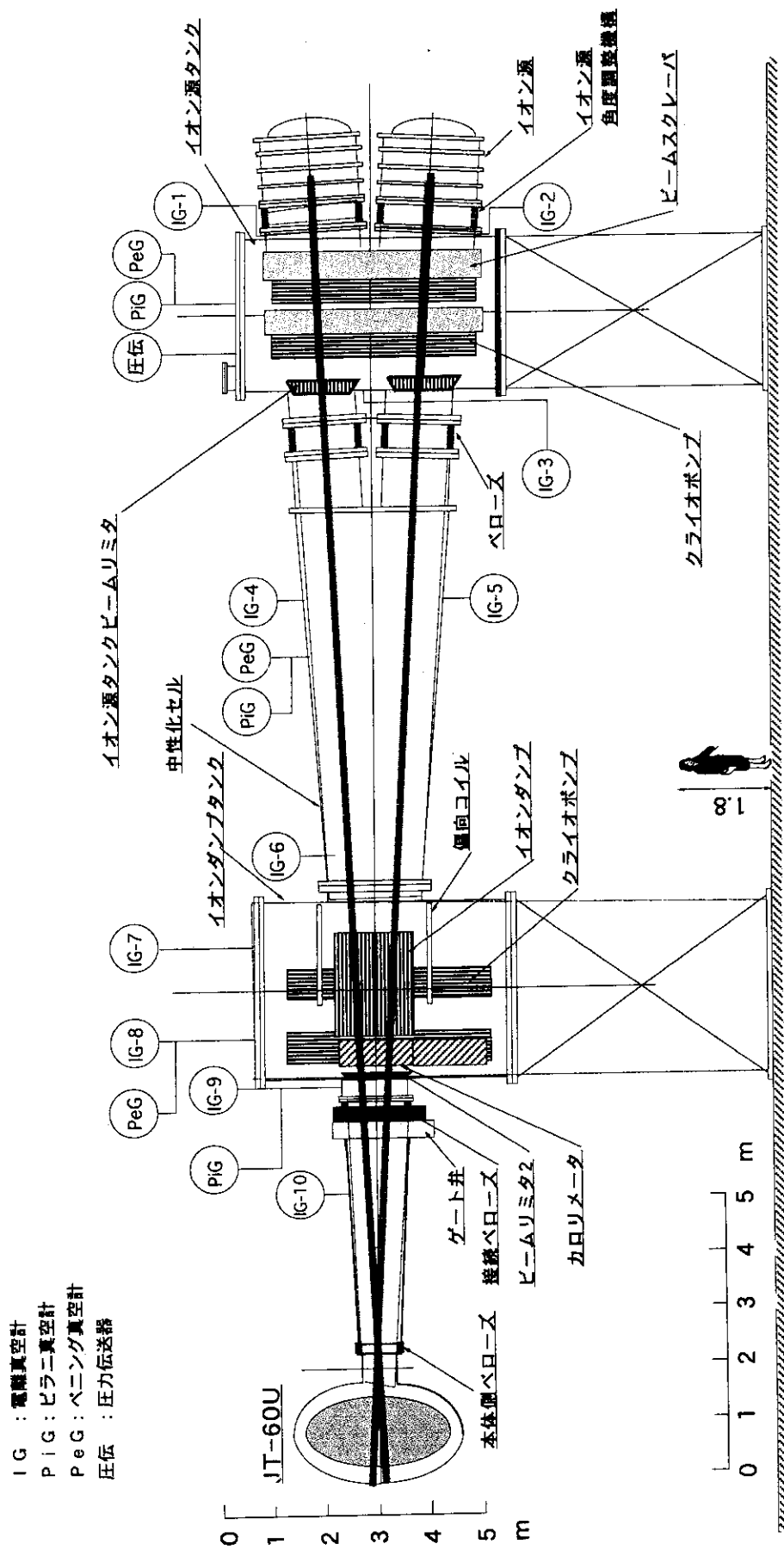
- 1) 松岡 守他、「JT-60NBIにおけるドリフト管内の再電離損失の概算法」、日本原子力研究所レポート JAERI-M 89-075 (1989年)
- 2) 秋野、他「N-NBIガスフロー試験結果データ」、日本原子力研究所レポート JAERI-Tech 投稿中
- 3) NBI装置試験室、NBI加熱研究室、「JT-60U用負イオンNBI装置の設計検討」、日本原子力研究所レポート JAERI-M 94-072 (1994年)



第1図 JT-60U用負イオンNBI装置の再電離ビーム軌道



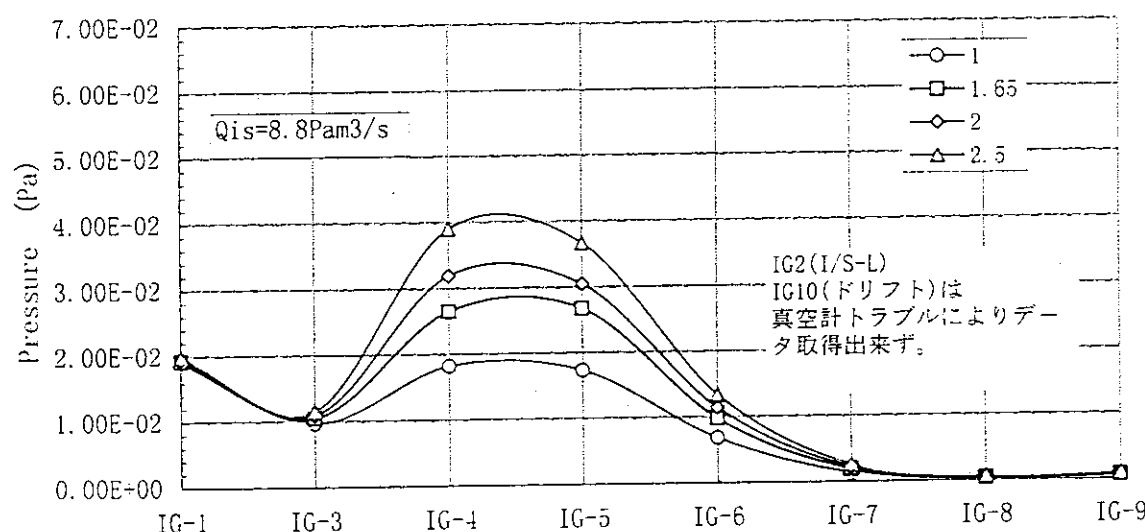
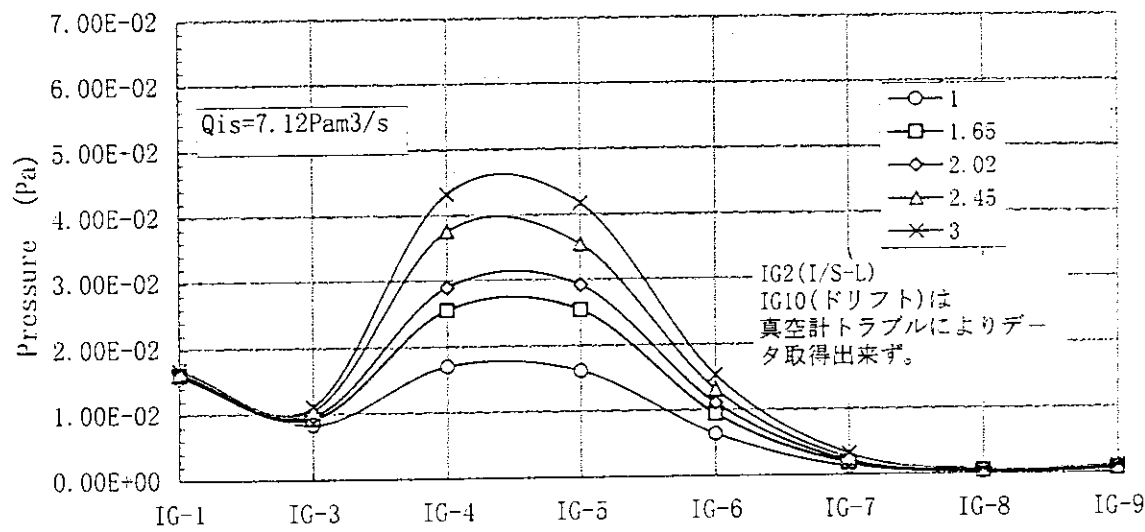
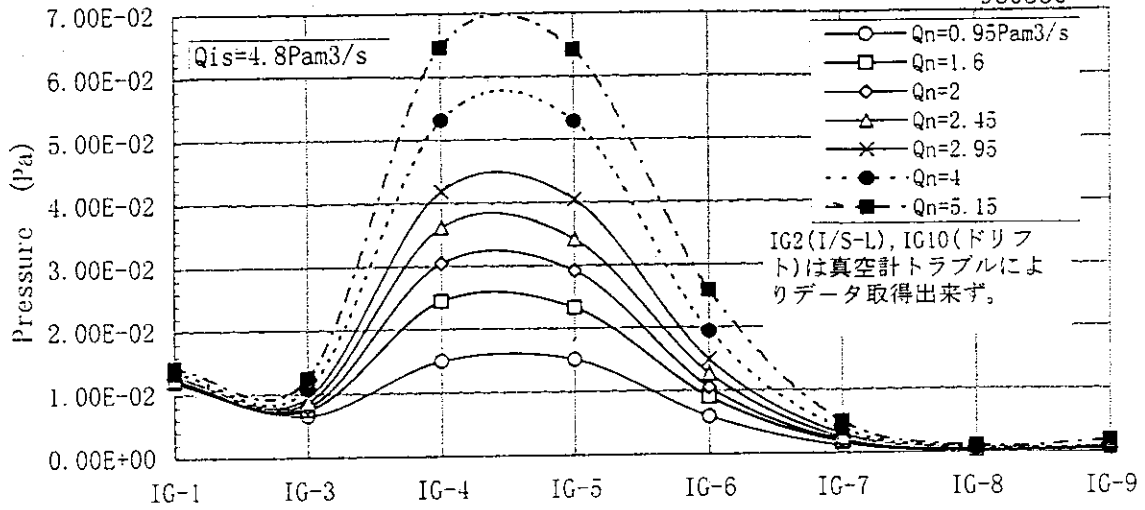
第2図 N-NBI ポート内の圧力分布



第3図 JT-60U用負イオンNBI装置の真空排気系及び真空計の構成

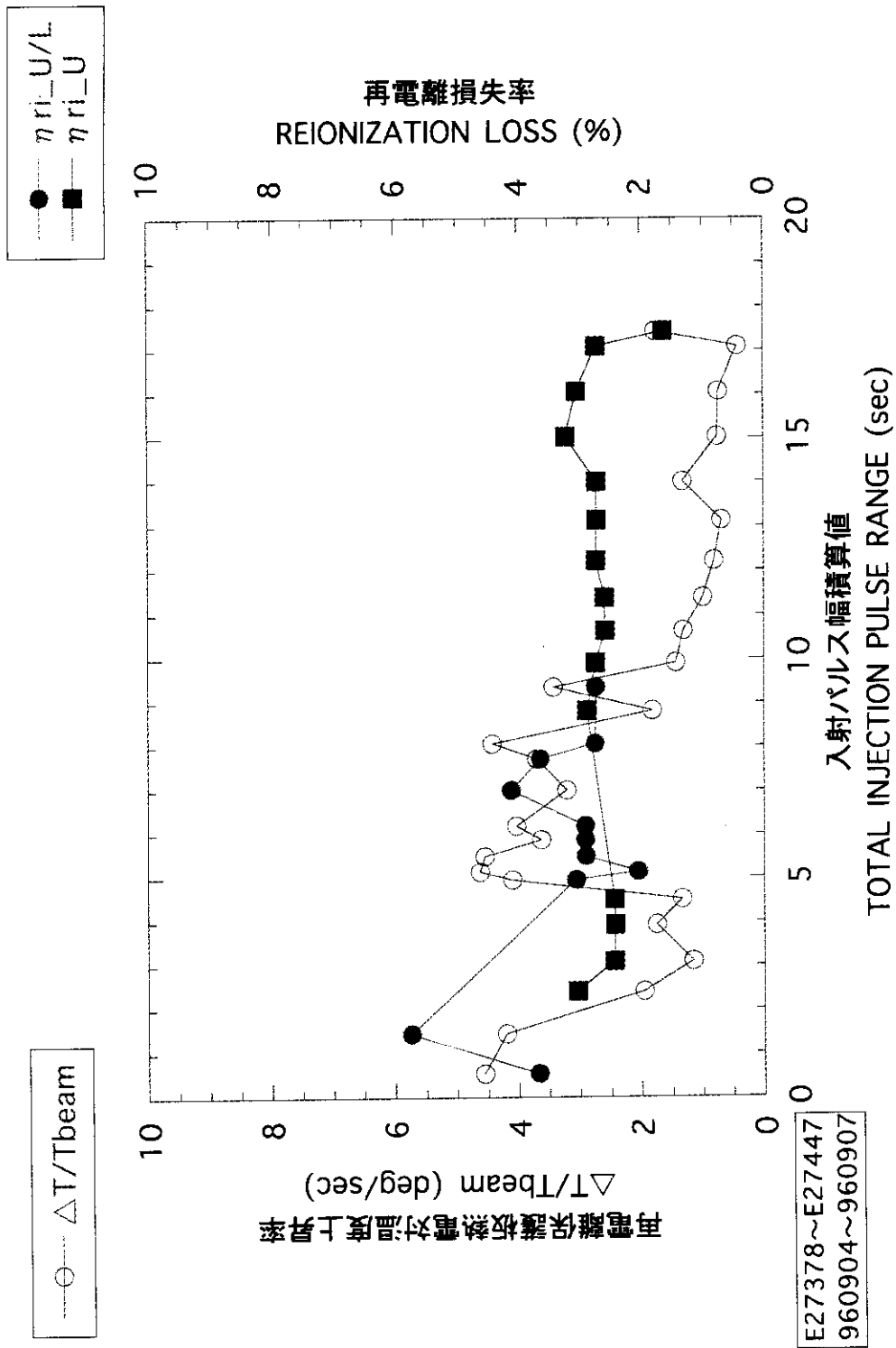
N-NBIガスフロー試験結果(GV1開、カロメ引抜き、CRYO排気)

960530

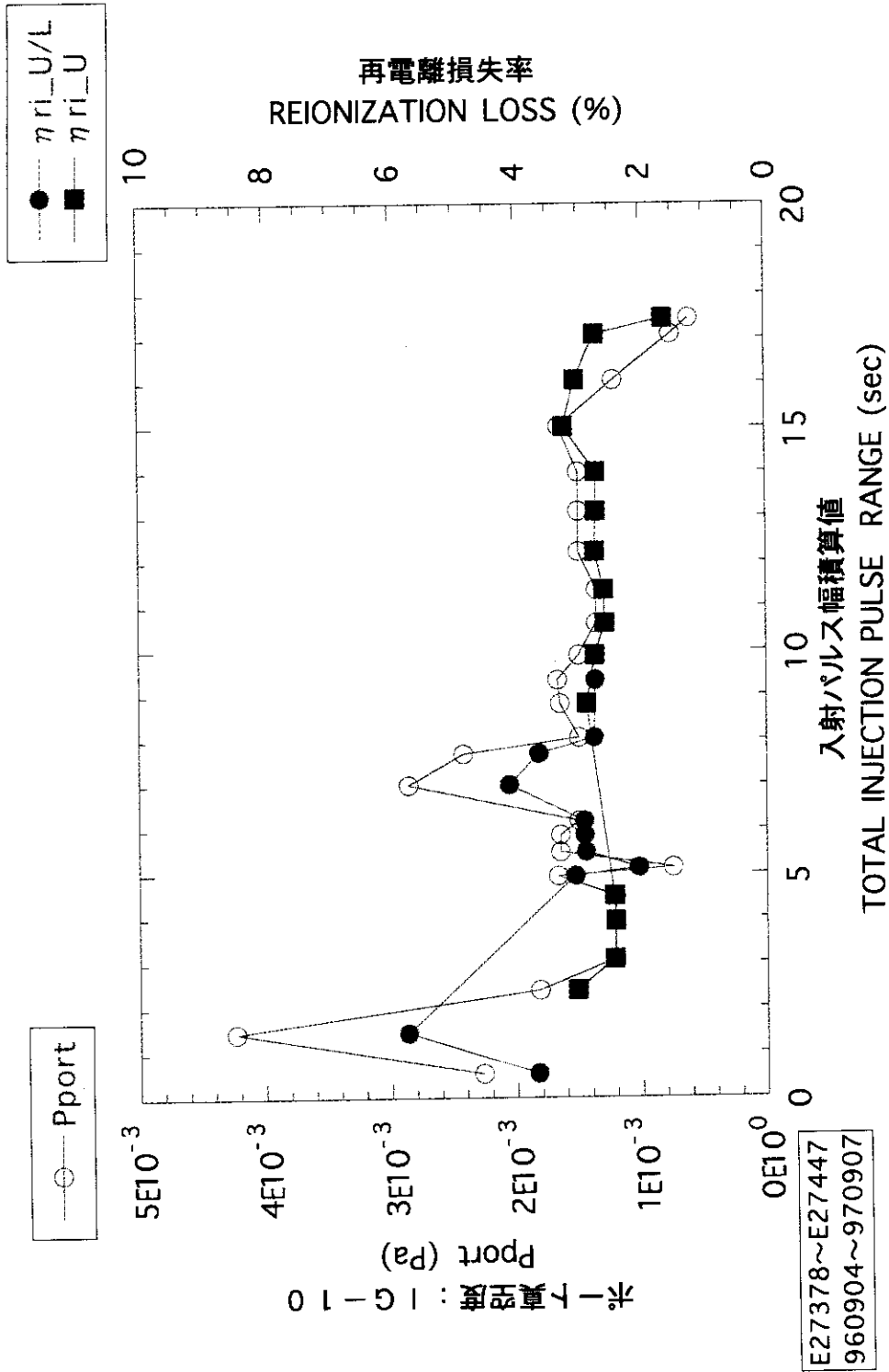


電離真空計取付け位置

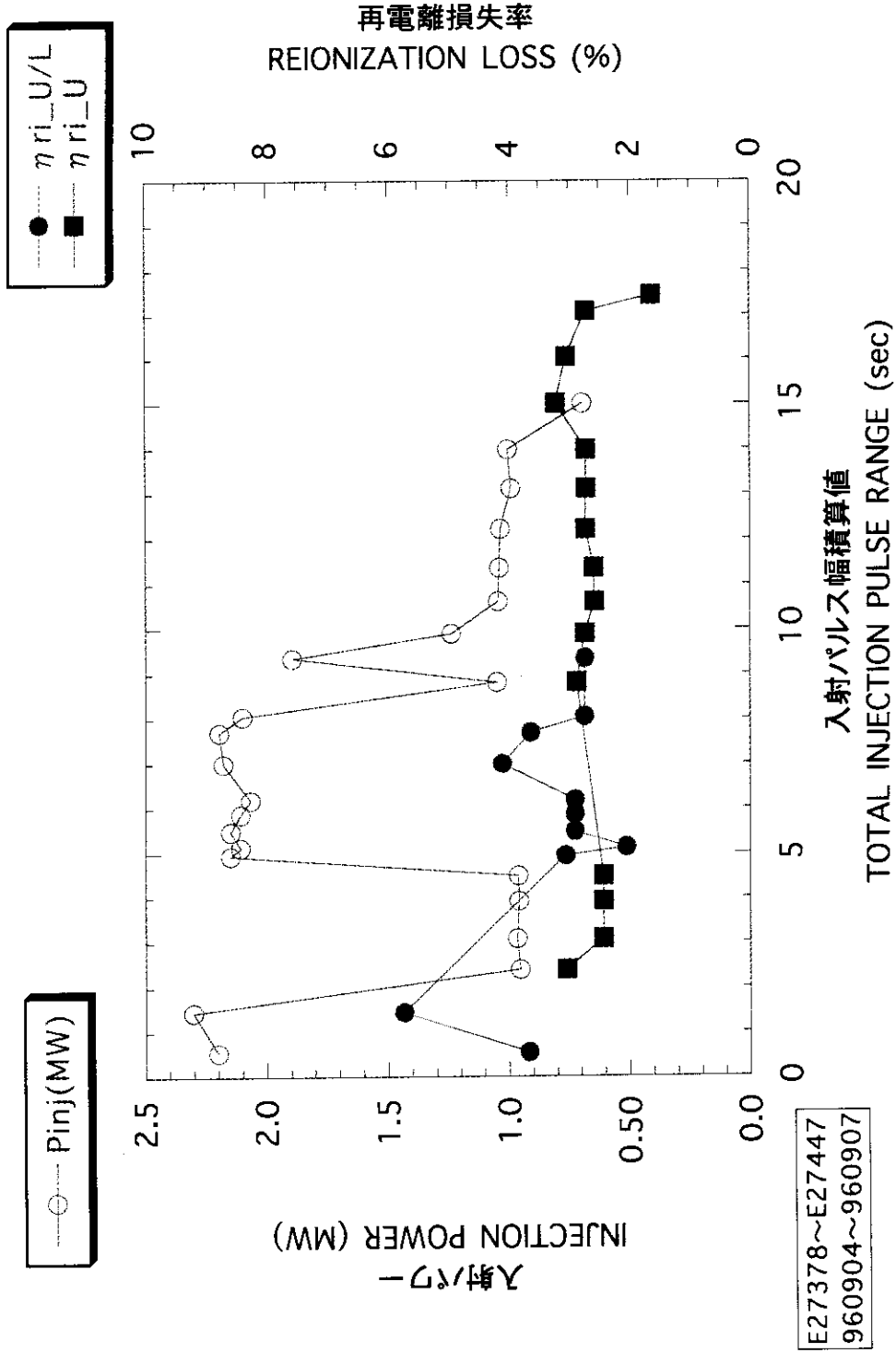
第4図 イオン源及び中性化セルにガスを導入したときの
ビームライン及びドリフト管内圧力の分布



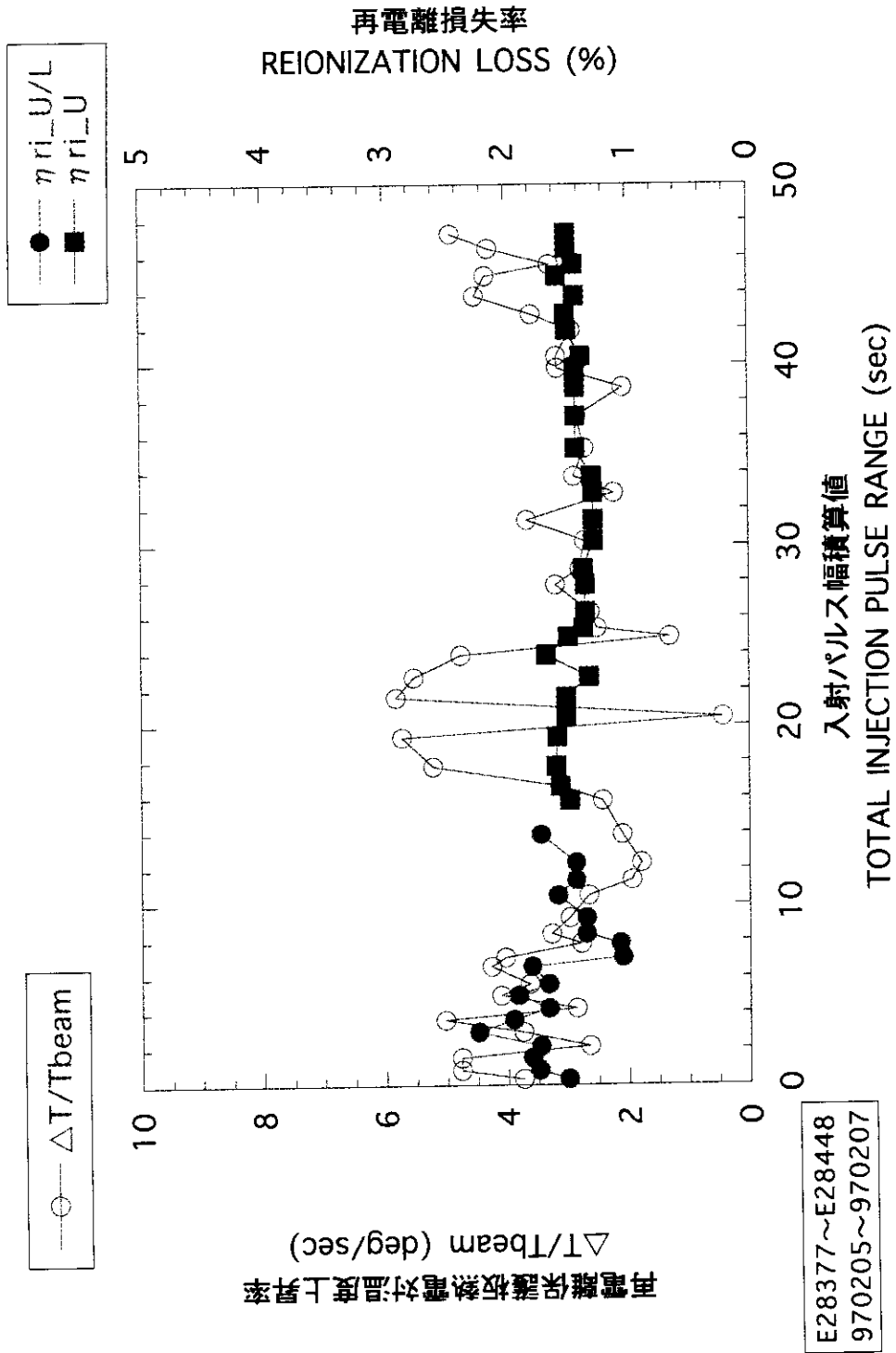
第5図 重水素ビームにおける再電離保護板の熱電対温度上昇率と再電離損失率の推移



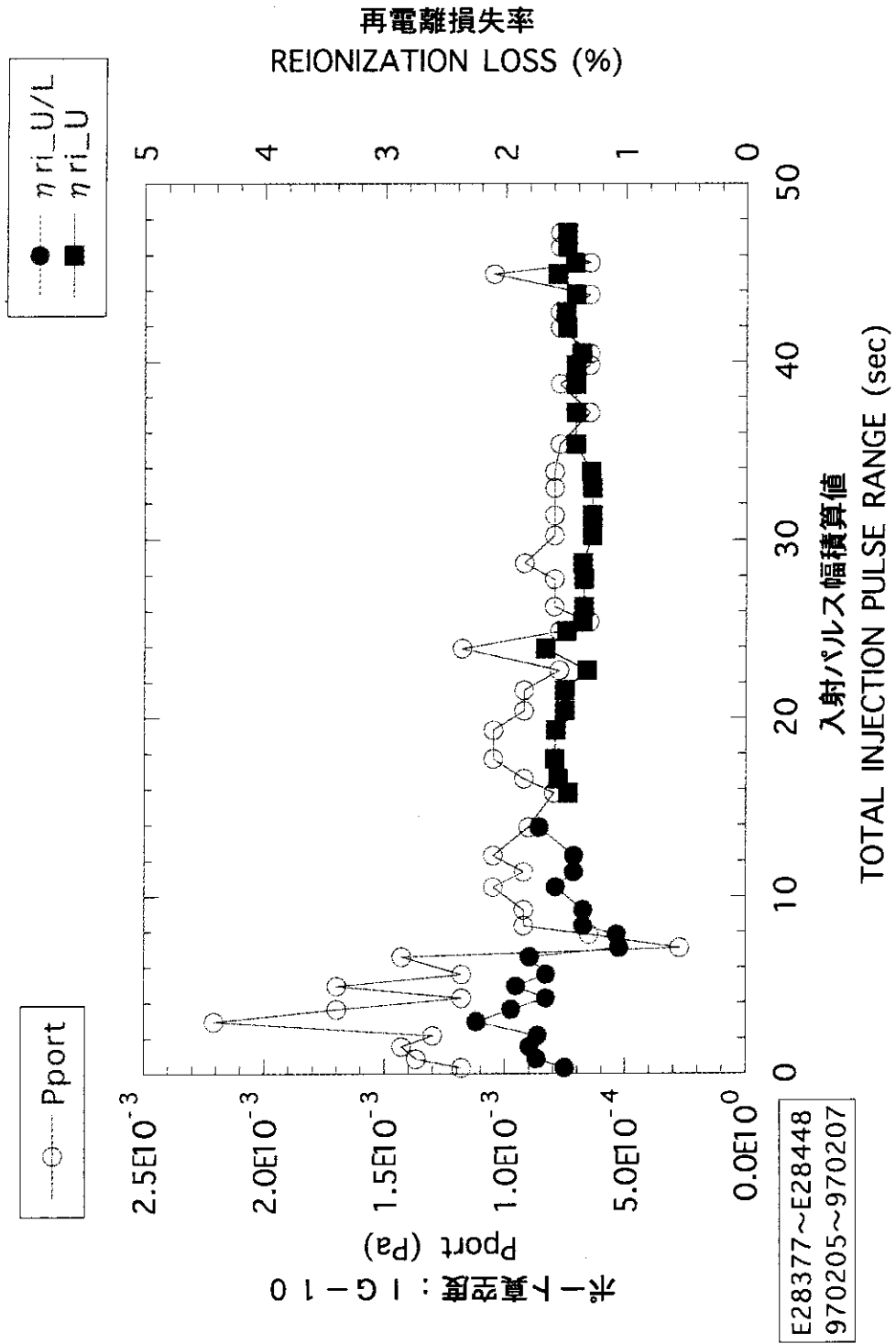
第6図 重水素ビームにおけるポート真空度と再電離損失率の推移



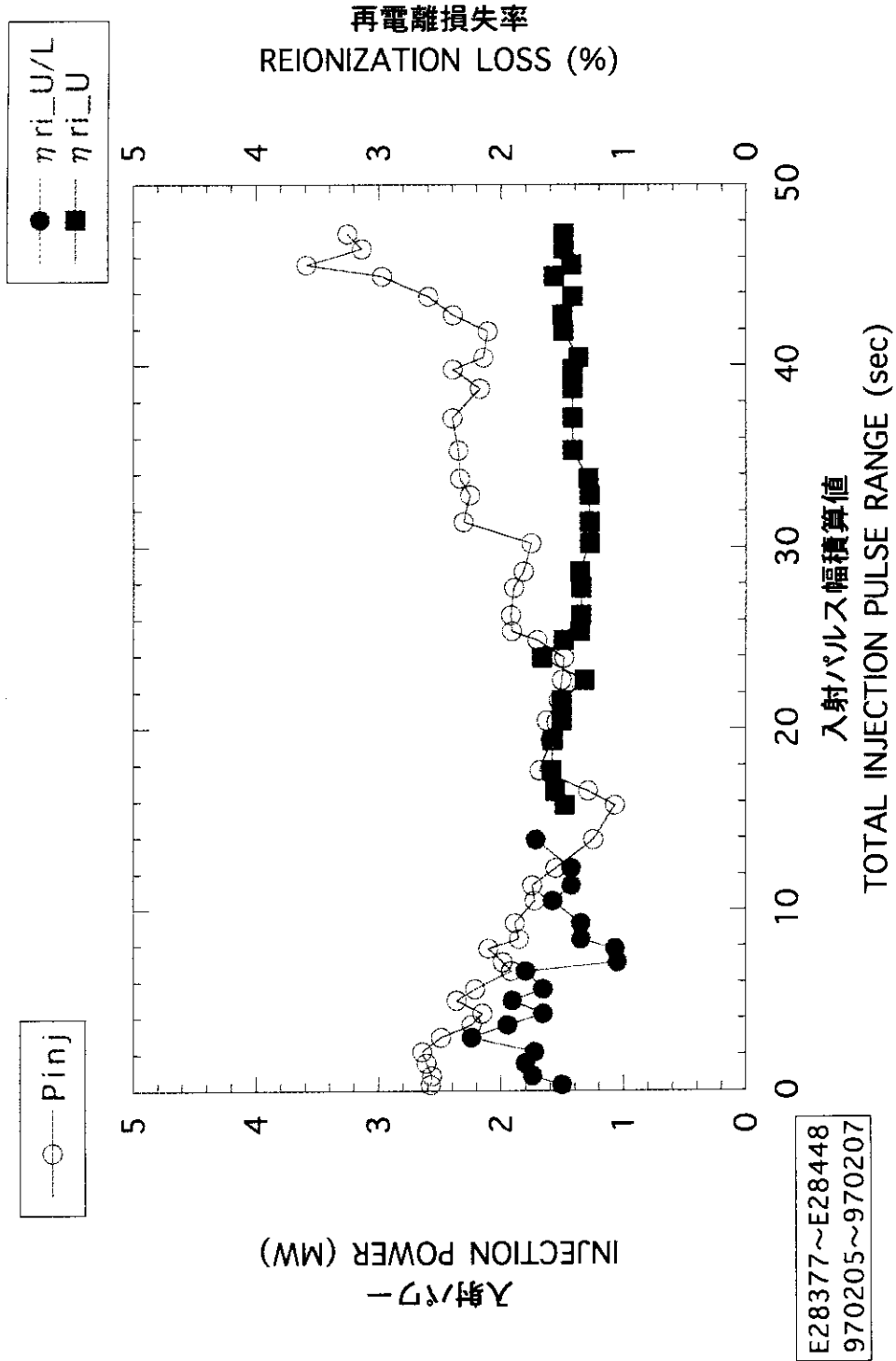
第7図 重水素ビームにおける入射パワーと再電離損失率の推移



第8図 水素ビームにおける再電離保護板の熱電対温度上昇率と再電離損失率の推移



第9図 水素ビームにおけるポート真空度と再電離損失率の推移



E28377~E28448
970205~970207

第10図 水素ビームにおける入射パワーと再電離損失率の推移

	P 4	P 5	P d
e	2. 0 E - 3	5. 1 E - 4	2. 9 E - 4
a	0	0	0
b	4. 7 E - 3	1. 8 3 E - 4	2. 9 E - 4

第 1 表 真空度变换系数

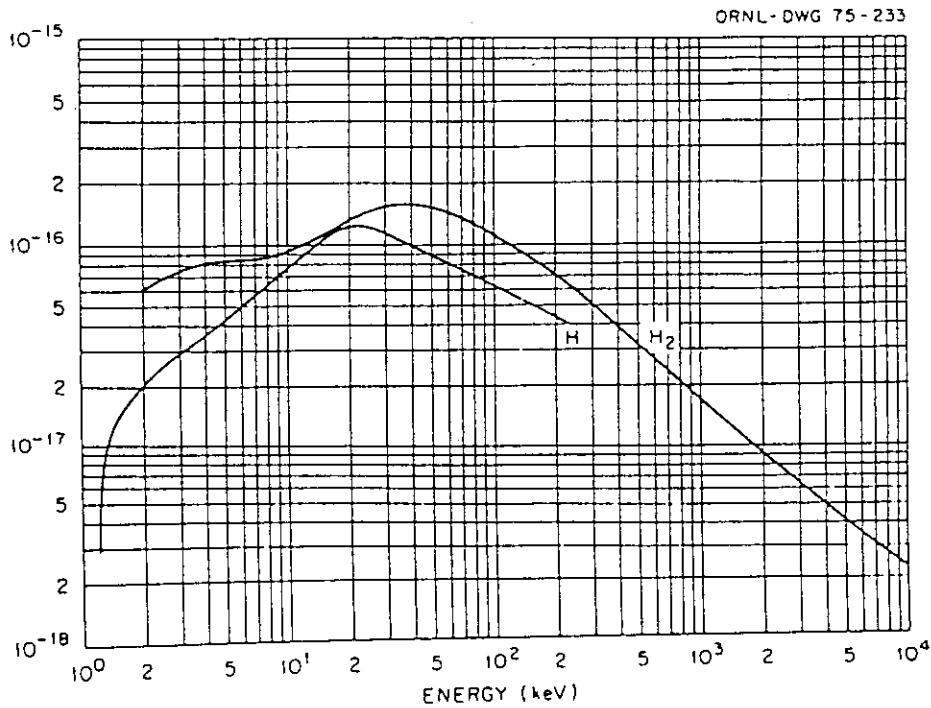
付録 水素雰囲気中における水素原子ビームの 電子損失断面積

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1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	6.0 E-17
2.0 E 00	2.0 E-17	7.3 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	9.0 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
1.0 E 01	1.5 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1 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)。