

JAERI-M

9213

クライオポンプ内への長時間ビームの  
入射実験

1980年11月

柴田 猛順・水谷 泰彦\*・奥村 義和  
桜庭 順二\*\*・柴沼 清

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki ken, Japan.

クライオポンプ内への長時間ビームの入射実験

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

柴田 猛順・水谷 泰彦<sup>\*</sup>・奥村 義和

桜庭 順二<sup>\*\*</sup>・柴沼 清

(1980年10月31日受理)

60,000  $\ell$ /sec クライオポンプ内にビームダンプを置き、そこに 70 keV, 5 A, 10秒の水素イオンビームを入射し、そのときのクライオポンプ内圧力と液体ヘリウム蒸発量の変化をみた。ビーム入射中、クライオポンプ内の水素ガス圧力が  $7.6 \times 10^{-5}$  Torr から  $8.5 \times 10^{-5}$  Torr へ上昇するのが見られた。ビーム入射中のパルス熱負荷によりパネルの溶接部の温度が上昇し、水素蒸気圧が高くなって水素ガスを放出するとして、ポンプ内圧力上昇の説明を試みた。JT-60用中性粒子入射装置のクライオポンプでは、クライオポンプが直接受熱面を見込まないように水冷のスプッターシールドを設けるなどの工夫をして、パネルへの熱負荷を小さくしてビーム入射中の水素ガス放出を抑える予定である。

---

\* 外来研究員, 日新電機(株)

\*\* 外来研究員, 住友重機(株)

Experiment of Long Pulse Beam Injection into Cryopump

Takemasa SHIBATA, Yasuhiko MIZUTANI<sup>\*1</sup>, Yoshikazu OKUMURA,  
Junji SAKURABA<sup>\*2</sup>, and Kiyoshi SHIBANUMA

Division of Thermonuclear Fusion Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

( Received October 31, 1980 )

Hydrogen ion beam of 70 keV, 5 A, 10 sec was introduced into the cryopump of 60,000 l/sec in which a beam dump was installed. The pressure in cryopump and evaporation rate of helium were measured during the beam injection. During the beam injection the pressure of hydrogen gas in the cryopump increased from  $7.6 \times 10^{-5}$  Torr to  $8.5 \times 10^{-5}$  Torr. A following explanation of the pressure rise of hydrogen has been tried. The temperature of welded parts of cryopanel rises due to pulse heat loads during beam injection and vapor pressure of hydrogen increases. Therefore welded parts emit the hydrogen gas. In the case of JT-60 neutral beam injector, we will suppress hydrogen gas emission from cryopanel during beam injection by putting a water-cooled sputter shield so that the cryopump does not see the beam dump directly.

keywords: Cryopump, Ion Beam, Long Pulse, Injection Experiment,  
Neutral Beam Injector, JT-60

---

\*1 On leave from Nissin Electric Co., LTD.

\*2 On leave from Sumitomo Heavy Industries, LTD.

## 目 次

1. 序 .....	1
2. 実 験 .....	1
3. 実験結果 .....	2
3.1 ビーム入射中のクライオポンプ内圧力変化 .....	2
3.2 ビーム入射中の液体ヘリウム蒸発速度の変化 .....	3
4. 考 察 .....	3
4.1 ビーム入射によるクライオパネルへの熱負荷の推定値との比較 .....	3
4.2 クライオパネルからの水素ガス放出についての考察 .....	5
4.3 JT-60用中性粒子入射装置のクライオポンプについて .....	6
5. 結 論 .....	6
謝 辞 .....	7
参考文献 .....	7

## Contents

1.	Introduction .....	1
2.	Experimental Apparatus .....	1
3.	Experimental Results .....	2
3.1	Pressure in the cryopump during beam injection ...	2
3.2	Vaporation rate of liquid helium during beam injection .....	3
4.	Discussions .....	3
4.1	Comparison with estimated value of heat load to cryopanel due to beam injection.....	3
4.2	Discussion on hydrogen gas emission from cryopanel.....	5
4.3	Cryopump of JT-60 neutral beam injector .....	6
5.	Conclusions .....	6
	Acknowledgements .....	7
	References .....	7

## 1. 序

プラズマ加熱用の中性粒子入射加熱装置のクライオポンプが他の装置のクライオポンプと大きく異なるところは、クライオポンプ近傍を高エネルギー、大電流のビームが通過するだけでなく、このビームをうけるビームダンプもあることである。これまでに、クライオポンプ内への大電流のビーム導入は、原研<sup>1)</sup>、ORNL<sup>2)</sup>、LBL<sup>3)</sup>等で行なわれているが、いずれも、ビーム引出持続時間は、500msec以下であり、排気性能の低下は認められていない。

一方、原研で建設中のJT-60用中性粒子入射装置<sup>4)</sup>は、ビーム持続時間が10秒の予定であるが、10秒という長時間ビーム入射時のクライオポンプ排気特性の変化は、まだ調べられていない。

ここでは、原研が1979年に開発した設計値が75kV、6A、引き出し持続時間10秒のイオン源<sup>5)</sup>を用いて原研で試作した60,000<sup>1</sup>/secのクライオポンプ<sup>6)</sup>内への長時間ビーム入射を行ない、この時のポンプ内圧力の変化を調べて、ビーム入射中の排気性能の変化をみた。また入射中の液体ヘリウム蒸発量も測定して、この時のクライオパネルへの熱負荷も推定した。

## 2. 実 験

実験の構成の概略を図1に、用いたポンプの鳥かん図を図2に示す。

イオン源は設計値が75keV、6A、10秒のModified duoPIGatronで、イオン源テスト用の真空容器<sup>7)</sup>に取り付けられている。

この実験に用いたクライオポンプ<sup>6)</sup>は、二組からなり、それぞれ液体ヘリウム槽、液体窒素槽、シェブロン、放射シールド、クライオパネルで構成されている。水素を排気するクライオパネルはステンレス鋼をキルティング状に二枚重ね合わせて溶接してあり、大きさは60cm×60cmである。シェブロンは、開き角120°の銅板で表面は陽極酸化で黒化処理されている。このクライオポンプをイオン源テスト用真空容器とベローをはさんで接続し、ベローの前にはベローとクライオポンプのシェブロンにビームが直接あたるのを防ぐため水冷の銅リミターを置いた。ビームダンパーは、内側は円錐状、外側は円板状の厚さ1cmの銅板に水冷却用の銅パイプを銀ろう付けしたものである。

クライオポンプ内の真空度はポンプ上部に取付けた電離真空計とマスフィルターで測定した。ビームダンパーに入るビームエネルギーを測定するため、ビームダンパーの内側と外側の冷却管の出口側の温度を熱電対で測定した。

イオン源への水素ガスの導入は2.5Torr・<sup>1</sup>/secの流量で定常的に行なった。ターボ分子ポンプによる排気はゲートバルブを閉じることにより行なわず、クライオポンプのみで排気した。60,000<sup>1</sup>/secのクライオポンプは2組のポンプで構成されているが片側のみを用い、液体ヘリウムの圧力は大気圧で実験を行なった。ビーム入射中のヘリウム消費量を測定するため蒸発し

てくるヘリウムガスをフロート型流量計に通した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 ビーム入射中のクライオポンプ内圧力変化

ビーム入射中のクライオポンプ内圧力変化の一例を図3に示す。図3は電離真空計の指示値(校正係数3.5をかけたもの)とともにマスフィルターの質量数2の水素ガス圧力の指示値を示している。マスフィルターの指示値は、ビーム引出前で、電離真空計の指示値と等しくなるように規格化している。このときのビーム出力は70kV, 4.8A(電源電力), 10秒で、ビームダンパーの冷却水温度上昇より求めたビームダンパー入力は上記出力の70%であった。

ビーム入射中、電離真空計の指示値がマスフィルターの指示値より高いのはビーム入射により壁から放出される $H_2O$ や $CH_4$ の圧力も含んでいるためである。ビーム点火時と消滅時の圧力低下と上昇は真空容器やビームダンパーでの水素吸収と放出によると思われるものである。以上のことはクライオポンプを使わずにターボ分子ポンプだけで排気している時も観測される。<sup>5)</sup>ビーム点火時と消滅時の圧力変化について電離真空計の指示がマスフィルターの指示より遅れているのは、電離真空計の時定数によるとみられる。

ビーム引出し開始後2~3秒後にマスフィルターによる圧力指示はほぼ一定になるが、 $8.5 \times 10^{-5}$  Torrでビーム入射前の $7.6 \times 10^{-5}$  Torrより高い。ビーム引出し中もイオン源に流入する水素ガス流量は一定なのでクライオポンプの排気速度が約10%減少したことになる。ビーム入射により排気速度が減少する原因を調べるためつぎのような実験を行なった。以下に述べる実験では電離真空計の指示値で圧力を測定している。水素ガスの圧力だけを見るにはマスフィルターの指示値がよいのに、電離真空計の指示値を用いたのは実験の途中でマスフィルターが故障したためである。参考のために図4に電離真空計とマスフィルターの指示の比較を示す。この図は横軸に、電離真空計のビーム入射中の最高指示値とビーム入射前の指示値の比を縦軸に、マスフィルターのビーム入射中とビーム入射前の指示値の比をとったもので、電離真空計のビーム入射による圧力上昇のほうが大きいのは $CH_4$ や $H_2O$ のガス放出のためである。<sup>5)</sup>

ビームの加速電流をかえたときのビーム入射によるクライオポンプ内圧力上昇を図5に示す。この図より加速電流が大きくなると急激にポンプ内圧力が上昇することがわかる。なお加速電流を変えるとき、ビームの発散が変わらないようにするため、パービアンスがほぼ一定となるように加速電圧も変えた。

イオン源の運転条件(60kV, 3.6A, 10秒)を同一にして、ビームダンパーの冷却水量を変えたときのビーム入射によるクライオポンプ内圧力上昇を図6に示す。冷却水量の増減ではビームダンパーの温度が変わるだけなので、ビームダンパーからクライオパネルへの放射によりポンプ内の圧力上昇が起こることがわかる。

図7に70kV, 5.4A, 10秒のイオンビームを入射したときのクライオポンプ内圧力変化を、イオン源を通してだけ水素ガスを真空容器に導入している通常の場合と、イオン源を通しての



導入に加えて直接真空容器に水素ガスを導入したときについて示している。図よりクライオポンプ内圧力が高いときと低いときのビーム入射による圧力上昇分は、 $1.4 \times 10^{-5}$  Torrと $1.3 \times 10^{-5}$  Torrでほぼ等しいことがわかる。これはポンプの排気速度が低下するのではなく、ビーム入射中には一定量の水素ガスが放出されることを示していると思われる。

### 3.2 ビーム入射中の液体ヘリウム蒸発速度の変化

70kV, 5.6A, 10秒のビームをクライオポンプ内に導入したときのクライオポンプからのヘリウム蒸発量変化を図8に示す。図9は加速電流を変えたときのビーム入射によるヘリウム蒸発量の増加分を示している。ビーム入射によるクライオパネルへの熱負荷をヘリウム蒸発量変化から求めるのは、ヘリウム蒸発量が10秒のビーム入射中に定常直には達していないのでむずかしい。しかしビーム引出し開始後と停止後の発熱量の変化を指数関数で近似すると、その時定数は約5秒であるので、ビーム引出し後10秒では蒸発量の増加が定常値の74%に達していると考えて、その $100/74$ の蒸発量に相当する熱負荷がクライオパネルに加わっているとして図9の右側の縦軸のスケールを目盛った。

## 4. 考 察

### 4.1 ビーム入射によるクライオパネルへの熱負荷の推定値との比較

ビーム入射によるパネルへの熱負荷をビームダンパーからの反射粒子と放射によると考えて推定し、実験値と比較する。推定を容易にするためビームダンパーは直径50cmの円板と仮定した。

ビームダンパーからの反射粒子がシェブロンにあたる確率は、ビームダンパーのシェブロンに対する形態係数に等しいと考える。数値積分により計算すると形態係数は0.15になる。ビームダンパーからの反射粒子が $120^\circ$ の開き角のシェブロンを通過してクライオパネルに与える熱負荷はモンテカルロ法による計算<sup>8)</sup>によれば70kVの $H^+$ は $0.07W/A$ 、35keVの $H^+$ は $0.15W/A$ 、23kVの $H^+$ は $0.3W/A$ である。この実験で用いたイオン源のビーム組成の測定結果は $H^+ : H_2^+ : H_3^+ = 66 : 22 : 12$ である。<sup>9)</sup>ビーム出力が70kV, 5.5Aのとき、ビームダンパーにはビーム出力の70%が入っているので、ビームダンパーに入る各イオン種の電流は、70kVの $H^+$  (70kVのHも含む)

$$5.5 A \times 0.66 \times 0.7 = 2.54 A$$

70kVの $H_2^+$ より解離してできる35kVの $H^+$  (35kVのHも含む)は

$$5.5 A \times 0.22 \times 2 \times 0.7 = 1.69 A$$

70kVの $H_3^+$ より解離してできる23kVの $H^+$  (23kVのHも含む)は

$$5.5 A \times 0.12 \times 3 \times 0.7 = 1.39 A$$

となる。クライオパネルへの熱負荷は形態係数0.15を考慮して

$(0.07 \times 2.54 + 0.15 \times 1.69 + 0.3 \times 1.39) \times 0.15 = 0.13 \text{ W}$  となる。

放射による熱負荷は、ビームダンパーの温度を測定していないこと、シェブロン放射率の推定がむずかしいことのために評価が困難であるが次のように考えられる。70 kV, 5 Aで10秒のビームを入射するとビームダンパーの冷却水が沸騰しているのが音で検知される。冷却水の水圧は約10 atmなので、冷却水が流れている銅パイプの温度は180°Cぐらいになっている。ビームダンパーへの入熱量とビームダンパーの銅板の厚さから計算すると、ビームダンパー表面の温度は冷却管壁の温度より約50°C高くなっていると予想されるのでビームダンパー表面温度は230°Cと推定する。シェブロン表面はビームダンパーからのスパッター粒子により黒化処理した面が、赤っぽくなっているので放射率は当初の0.8~0.9<sup>6)</sup>よりかなり小さくなっていると思われるので、 $\epsilon = 0.6$ と仮定すると、モンテカルルの計算結果<sup>8)</sup>よりシェブロン通過率は0.02である。またパネルの放射率を0.2、ビームダンパーの放射率も0.3と仮定すると、パネルへの熱負荷は、

$$5.67 \times 10^{-12} \times 0.3 \times (5.3 \times 10^2)^4 \times \pi \times 25^2 \times 0.15 \times 2 \times 10^{-2} \times \frac{0.2}{1 - (1 - 0.2)(1 - 0.6)}$$

$$= 0.23 \text{ W}$$

となる。

後方散乱粒子と放射による熱負荷の合計の推定値は0.36 Wとなり実験値約2 Wと約5倍の違いがある。フロート式流量計を用いたパネルへの入熱の測定は、液体ヘリウム槽にニクロム線ヒーターを入れたときのヒーターへの供給電力と蒸発量の関係 $7.2 \text{ l/min/W}$ を用いているが<sup>1)6)</sup>この関係は、ヒーター入力後、蒸発量が一定になったときの値であり、今回の実験のように蒸発量の変化が激しいときには成立しないかもしれないが2倍以上の誤差は考えられない。一方推定値のほうは、シェブロン、パネル、ビームダンパーの放射率の仮定は根拠がなく、とくにシェブロン放射率に対する依存性が強いので、容易に2~3倍の誤差が生じうる。このため実験値と推定値に有意の差があると断言することはできない。しかし、60,000<sup>1/sec</sup>のクライオポンプに、26.4 kV, 2.7 A, 0.1秒のビームをパルス間隔で入射したときも、実験値は推定値の約3倍であった。ここでの推定も、0.1秒のビーム入射時のパネルの熱負荷の推定も後方散乱粒子とビームダンパーからの放射しか考えていないが、他の原因による熱負荷があるのかも知れない。その一例としてビームによって作られたプラズマが、シェブロンを通過してクライオパネルに接することによる熱負荷が考えられる。ビーム周辺部のプラズマの密度は、約 $10^{10}$ 個/cm<sup>3</sup>で温度は約 $10^4$  Kと言われている<sup>10)</sup>このときのデバイ長は $6.9 \times 10^{-3}$  cmであり1.8 cmのシェブロン間隔よりずっと小さいのでプラズマはクライオパネル面上まで来ていると考えられる。シェブロンを通過するとプラズマの密度がどれだけ薄くなり、温度が下がるかわからないがパネル近傍で密度 $10^8$ 個/cm<sup>3</sup>、温度 $10^4$  Kのままとすると、パネル面上にできるシースで加速される $\text{H}_2^+$ の数は単位面積当り

$$0.4 n_e \sqrt{RT_e / M} = 2.57 \times 10^{13} \text{ 個 / s} \cdot \text{cm}^2$$

であり、シースポテンシャルは電子温度の3倍とすると3600 cm<sup>2</sup>のパネル全体で、0.27 Wの熱負荷になる。パネル付近のプラズマ密度、温度を実測したことはないが、この見積りではかな

り大きい熱負荷を与える可能性があるので今後実測することが望まれる。

#### 4.2 クライオパネルからの水素ガス放出についての考察

ビーム入射中のポンプ内の圧力上昇は実験結果よりパネルのパルス熱負荷に関係している水素ガス放出と考えられるのでつぎの機構を考えて、この水素ガス放出を説明することを試みた。

この実験で用いたクライオパネルは厚さ 1.6mm のステンレス板をキルティング状にしたもので、溶接部は直径 20mm である。パネルに大きい熱負荷があると、液体ヘリウムに接しているクライオ面より、溶接部は液体ヘリウムに接するところまで遠いので温度が高くなる。クライオ面の温度が上昇すればそこに凝縮している水素の蒸気圧は高くなり水素ガスを放出する。

一様な熱負荷が円板状の板にあり周囲は一定温度に冷却されているとき定常状態では中心温度と周囲の温度の差  $\Delta T$  は、

$$\Delta T = (q / 4kt) r^2$$

となる。ここで  $q$  は単位面積当りの熱負荷、 $k$  は熱伝導率、 $r$  は円板の半径、 $t$  は円板の厚さである。クライオパネルの溶接部を周辺が液体ヘリウム温度 (4.2K) で冷却されている円板と考え、 $t = 0.32 \text{ cm}$ 、 $r = 1.16 \text{ cm}$  として  $\Delta T$  を求める。 $r = 1.16 \text{ cm}$  としたのは溶接部とステンレス板の厚みを加えたものである。ステンレスの熱伝導率  $k$  は 4K 付近で  $2.2 \text{ mW/cm} \cdot \text{deg}$  であり、<sup>11)</sup> 4K 付近のステンレスの熱容量は小さく 10 sec のビーム入射中に温度分布は定常になっていると考えられる。パネルへの定常熱負荷は図 8 よりヘリウム蒸発量が  $30 \text{ l/min}$  (液体ヘリウム消費量  $2.6 \text{ l/h}$  相当) で  $1.8 \text{ W}$ 、70 kV、5.5 A のビーム入射中の増加分は  $2 \text{ W}$  なのでビーム入射中の熱負荷は  $3.8 \text{ W}$  であり、単位面積当り熱負荷  $q$  は  $q = 3.8 \text{ W} / 3600 \text{ cm}^2 = 1.06 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$  である。このとき溶接部の中心は周辺部より  $\Delta T = 0.51 \text{ K}$  だけ温度が上昇していることがわかる。溶接部周辺部と液体ヘリウムとの間で熱伝達のために  $\Delta T'$  (K) の温度差が生じる。ここで問題にしている熱伝達量では核沸騰熱伝達領域である。<sup>12)</sup>

伝熱面積当りの伝熱量  $q'$  ( $\text{W/cm}^2$ ) は、

$$q' = 1.4 \Delta T'^{2.5}$$

とする。伝熱面積として円板周辺部の面積をとると、 $q' = 1.92 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ 、 $\Delta T' = 0.07 \text{ K}$  となる。以上の計算より溶接部中心は液体ヘリウム温度よりビーム入射中は  $0.51 + 0.07 = 0.58 \text{ K}$  高くその温度は  $4.2 + 0.58 = 4.78 \text{ K}$  と推定される。溶接部中心の平衡蒸気圧は熱遷移後で  $1.2 \times 10^{-4} \text{ Torr}$  となる。<sup>13)</sup> この平衡蒸気圧になる場所は溶接部の中心だけであるが、パルス熱負荷はクライオパネル全体にわたって一様ではなく、平均の熱負荷より大きい場所では溶接部中心の温度は  $4.78 \text{ K}$  よりも高くなり、平衡蒸気圧も高くなる。平衡蒸気圧は温度の指数関数に近いので、平均より熱負荷の大きい溶接部の平衡蒸気圧は非常に高くなる。パネル全体の溶接部から放出される水素ガスを平均熱負荷時の溶接部中心温度に溶接部全体の温度が等しいとして推定する。全体の溶接部は 36 個あるのでその面積は

$$3.14 \times 1.16^2 \times 36 = 152.1 \text{ cm}^2$$

である。ポンプ内にクライオ面から出る速度はシェブロンがあるのでその通過率を 25% とすると、

$$6.25/\sqrt{2} \times 0.25 = 11 \text{ l/sec}\cdot\text{cm}^2$$

なので、パネルからの水素ガス放出量は

$$1.2 \times 10^{-4} \text{ Torr} \times 152.1 \text{ cm}^2 \times 11 \text{ l/sec}\cdot\text{cm}^2 = 0.2 \text{ Torr/sec}$$

となる。

実験では 70 kV, 5.4 A, 10 sec のビーム入射により、電離真空計で——  $8.2 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  から  $9.6 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  への圧力上昇すなわち 1.17 倍の圧力上昇が観測されているが、このとき水素ガス圧の上昇は図 4 より 1.13 倍の圧力上昇すなわち、 $\Delta P = 8.2 \times 10^{-5} \times 0.13 = 1.06 \times 10^{-5}$  だけの圧力上昇がある。これは約  $30,000 \text{ l/sec}$  のポンプで排気しているので、 $0.32 \text{ Torr l/sec}$  の水素ガス放出に相当すると考えられる。上記モデルによる水素ガス放出量  $0.20 \text{ Torr l/sec}$  は計算上の不確定さを考えると実験値とよく一致していると言える。また図 5 のようにビーム電流がふえるとビーム入射による圧力上昇は急激に増加しているが、これは図 9 に示すようにビーム電流がふえてクライオパネルへの熱負荷が増大して放出ガス量が急激に増加していると考えられる。このモデルでも熱負荷が増大して溶接部の温度が上がりそこでの水素の蒸気圧は急激に増加して放出ガス量も増大することになり、実験結果と一致する。

#### 4.3 JT-60 用中性粒子入射装置のクライオポンプについて

本実験でビーム入射中、クライオパネルへの熱負荷が大きくなるとパネルから水素ガスが放出されることが示された。JT-60 用中性粒子入射装置のクライオポンプでもクライオパネルはステンレス鋼を二枚重ね合わせてスポット溶接するが、ビーム入射により水素ガス放出の現象が起きないようにするため次の対策をとる予定である。

第一にクライオパネルのスポット溶接部は本実験で用いたパネルの直径 20mm の円より小さく  $8\text{mm} \times 16.5\text{mm}$  とし、外縁部の溶接部も 7mm とする。またビームダンパーとシェブロンの間には水冷のスプッターシールドを置き、ビームダンパーからのスプッター粒子がシェブロン上に蒸着してシェブロンの放射率が低下しないようにする。このような対策をとったとき、クライオパネルへのパルス熱負荷によるパネルの温度上昇の評価は別の報告<sup>14</sup>でなされているように最大 0.2 K であり、しかもこのときの液体ヘリウム温度は 3.7 K であるので、パネルの温度は最高で 3.9 K となり、パネルからの水素ガス放出は考えられない。

## 5. 結 論

$60,000 \text{ l/sec}$  のクライオポンプ内に、ビームダンパーを置きそこに 70 kV, 5 A, 10 sec のビームを入射し、そのときのクライオポンプ内圧力の変化と、液体ヘリウム蒸発量の変化をみた。ビーム入射前も入射中もイオン源から流れる水素ガス量は一定にもかかわらず、ビーム入射中クライオポンプ内の水素ガス圧力が  $7.6 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  から  $8.5 \times 10^{-5} \text{ Torr}$  へ上昇するのがみら

れた。この圧力上昇は実験結果から、ビーム入射時のパネルへのパルス熱負荷に関係している。これは、パルス熱負荷によるパネル溶接部の温度上昇により、凝縮水素の蒸気圧が高くなるために生ずる水素ガス放出として説明される。ヘリウム蒸発量の変化からビーム入射中のパネルへの熱負荷を求めた。この値は、ビームダンパーからの後方散乱粒子と放射による熱負荷の推定値の5倍であった。これは、ビーム入射中のクライオパネルへの熱負荷は後方散乱粒子や放射だけでなく他の原因、例えば、ビームプラズマがシェブロンを通してクライオパネルにまで浸みこんでいることによる熱負荷があるかも知れないことを示唆する。

JT-60用中性粒子入射装置のクライオポンプでは、水冷スパッターシールドを設けることによりビーム入射時に水素ガス放出の現象が起こらないよう配慮している。

## 謝 辞

この研究を行なっていく上で終始激励をいただいた森茂理事、磯康彦核融合研究開発推進センター長、小幡行雄核融合研究部長、白形弘文加熱工学第一研究室長に感謝いたします。また、多くの有益な議論をしていただいた松田慎三郎副主任研究員、小原祥裕氏をはじめとする加熱工学第一研究室の諸氏に感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) 桜庭順二, 大賀徳道, 柴田猛順, JAERI-M 8013 (1978)
- 2) J. Kim and M. M. Menon, J. Appl. Phys, 51 19 (1980)
- 3) W. G. Graham and L. Ruby, J. Vac. Sci. Technol., 16, 927 (1979)
- 4) 松田慎三郎, 荒川義博, 堀池寛, 伊藤孝雄, 河合視己人, 近藤梅夫, 森田洋昭, 小原祥裕, 大賀徳道, 奥村義和, 桜庭順二, 柴田猛順, 白形弘文, 田中茂, JAERI-M 7655 (1978)
- 5) Y. Okumura, S. Matsuda, Y. Mizutani, Y. Ohara, and T. Ohga, Rev. Sci. Instrum., 51 728 (1980)
- 6) 柴田猛順, 奥村義和, 桜庭順二, JAERI-M 7869 (1978)
- 7) 大賀徳道, 近藤梅夫, 松田慎三郎, 小原祥裕, 柴田猛順, 白形弘文, 菅原亨, 田中茂, JAERI-M 7611 (1978)
- 9) Y. Ohara, M. Akiba, Y. Arakawa, H. Horiike, M. Kawai, S. Matsuda, Y. Mizutani, T. Ohga, Y. Okumura, J. Sakuraba, T. Sibata, H. Shirakata, and S. Tanaka, Proc. 8th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research, San Francisco, Nov.
- 10) 堀池寛, 私信
- 11) Handbook on Materials for Supercconducting Machinery (NBS) (1974,

- 1975, 1977)
- 12) 佐藤新太郎, 尾形久直, 低温工学, 12, 2 (1977)
  - 13) C. Beuventi, R. S. Calder, and G. Passardi, J. Vac. Sci. Technol., 13  
1172 (1976)
  - 14) 柴田猛順, 堀池寛, 栗山正明, 松田慎三郎, 桜庭順二, 白形弘文, JAERI-M 8935  
(1980)

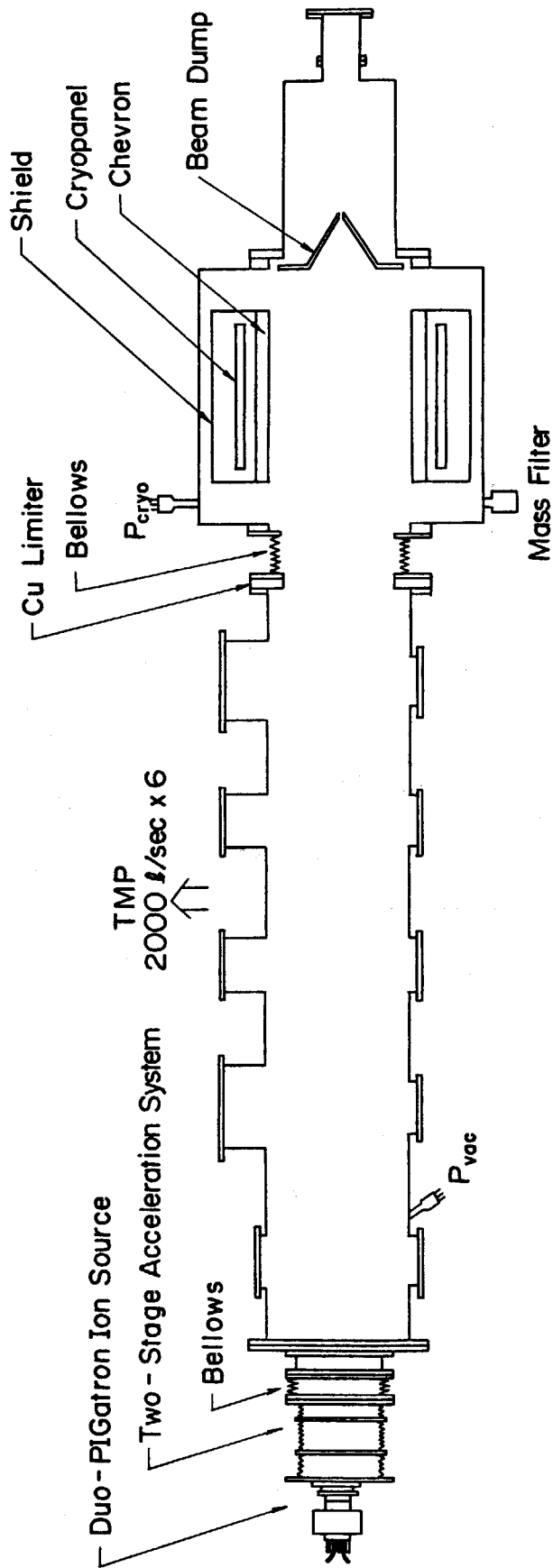


図1 ビーム入射実験の構成の概略図

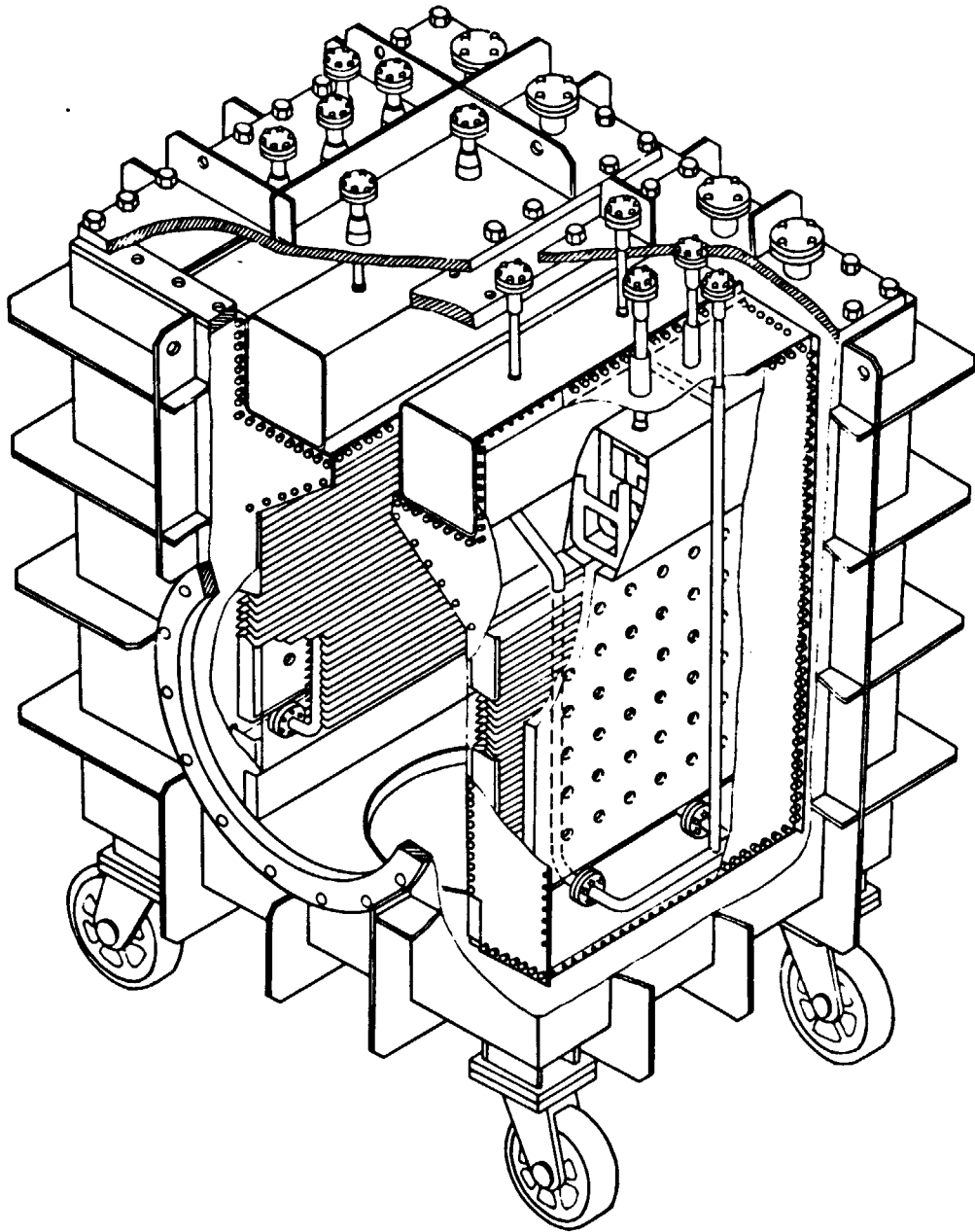


図2 ビーム入射実験に用いた 60,000  $l/sec$   
クライオポンプの鳥かん図



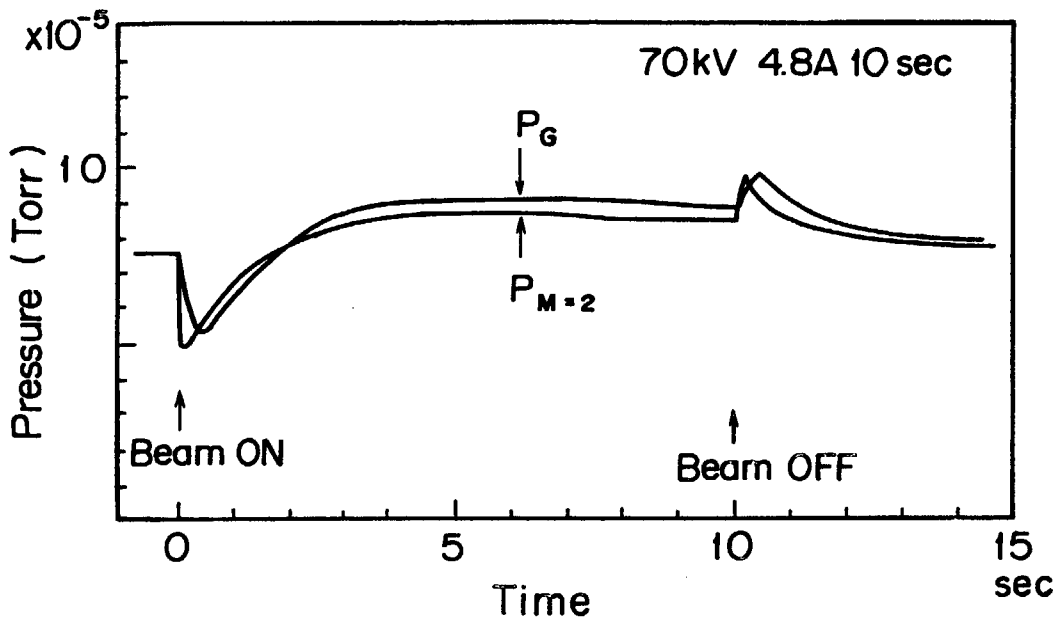


図3 ビーム入射中のクライオポンプ内圧力変化，  
 $P_G$  は電離真空計の指示， $P_{M=2}$  はマスフィル  
 ターによるM=2の指示

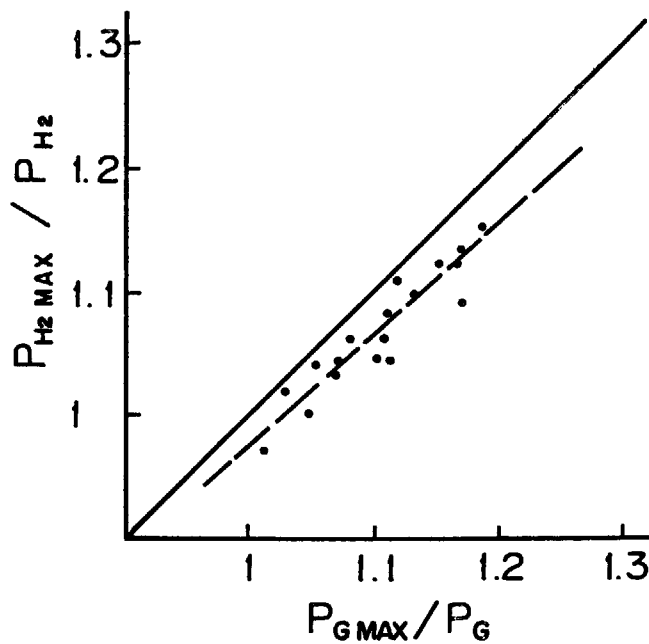


図4 電離真空計とマスフィルターの指示値の比較，横軸，縦軸とも  
 ビーム入射中の最高値をビーム入射前の値で割ったもので，横  
 軸は電離真空計の，縦軸はマスフィルターの比をそれぞれ示し  
 ている。

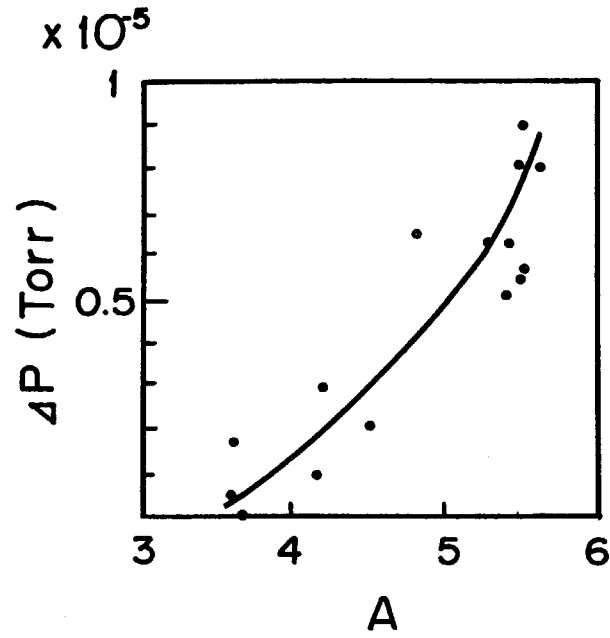


図5 ビーム入射によるクライオポンプ内圧力上昇の加速電流依存性

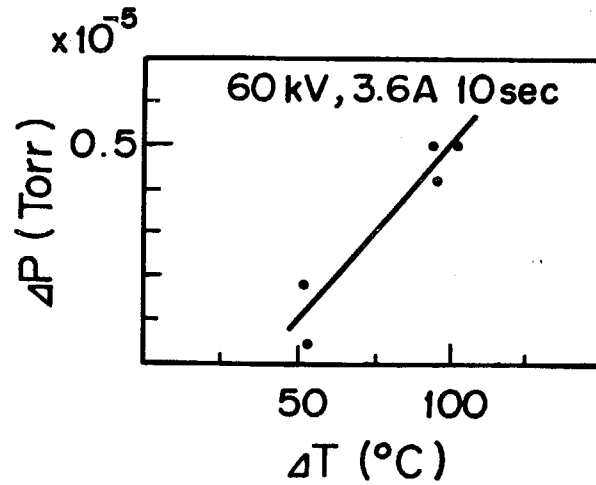


図6 ビームダンパーの冷却水量を変えたときのビーム入射によるクライオポンプ内圧力上昇。横軸はビーム入射中の冷却水量を少くすると最大温度上昇は大きくなる。

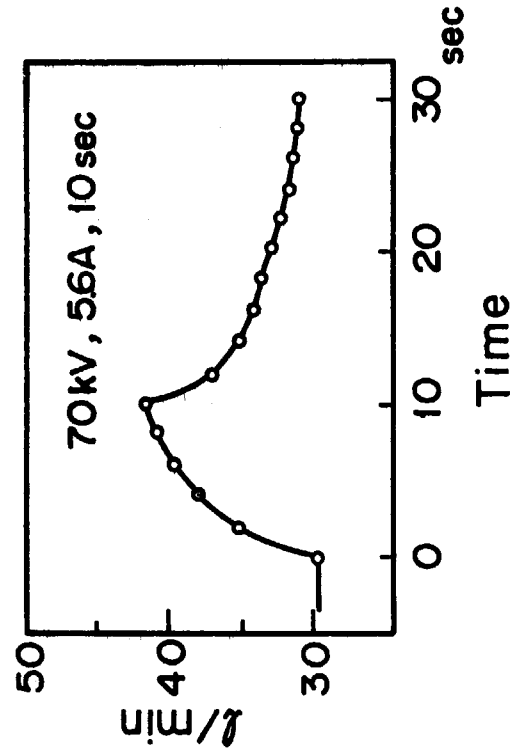


図8 ビーム入射中の液体へリウム蒸発量変化

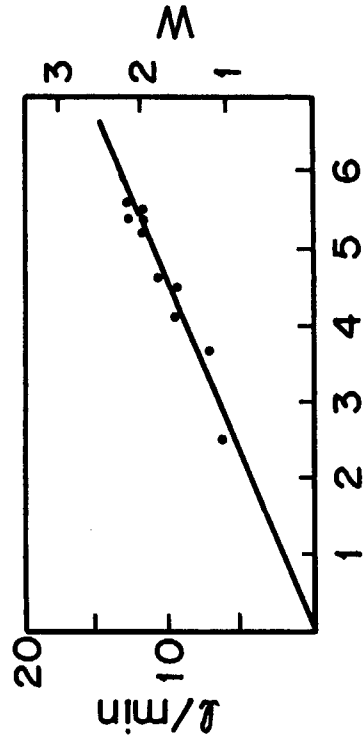


図9 ビーム入射によるへリウム蒸発量増加の加速電流依存性

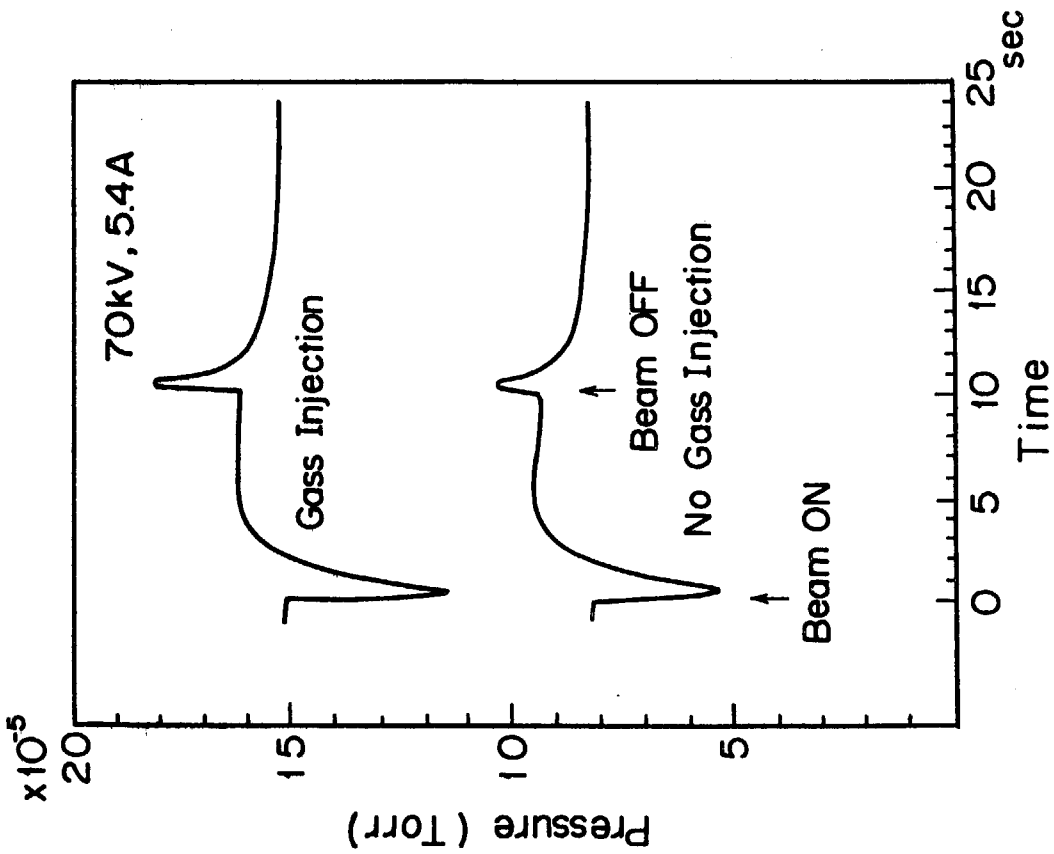


図7 ビームラインに水素を導入したときと、水素ガスを導入しない通常のときのビーム入射中のクライオポンプ内圧力変化