

JAERI-M

6990

JFT-2用中性粒子入射ビームの組成

1977年2月

柴田猛順・伊藤孝雄・白形弘文・菅原 亨\*

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.

JFT-2 用中性粒子入射ビームの組成

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

柴田猛順・伊藤孝雄・白形弘文・菅原 亨\*

(1977年2月1日受理)

JFT-2 中性粒子入射加熱実験に使用される中性粒子ビームの組成を調べた。イオンの加速電圧30kV, 引きだし電流5.5 A のとき中性粒子ビーム全エネルギーのうち, H (30 keV), H (15 keV), H (10 keV), H<sub>2</sub> (30 keV), H<sub>2</sub> (20 keV) の各粒子が, 57%, 28%, 9%, 3%, 3% 受けもっていることがわかった。イオン源のガス効率は57%であった。さらに中性子化セルをつけずに, 不純物イオンの量を測定した。主要な不純物は, O<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> で全イオン電流の, 0.4%, 0.4%, 1.3%, 0.1% であった。

---

\* 外来研究員 東芝総研

Composition of Neutral Beam for Heating JFT-2 Plasma

Takemasa SHIBATA, Takao ITOH

Hirofumi SHIRAKATA and Tohru SUGAWARA\*

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

(Received February ], 1977)

The composition of neutral beam for heating the JFT-2 plasma has been measured. At 30kV acceleration and 5.5A current, power partition of the charge-exchanged and dissociated neutral hydrogen beam is 57%, 28%, 9%, 3% and 3% for H(30keV), H(15keV), H(10keV), H<sub>2</sub>(30keV) and H<sub>2</sub>(20keV), respectively. The gas efficiency is 57%. Impurity ion contents has also been measured without the neutralizer. The dominant impurities are oxygen and its hydrides. The amount of O<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> and H<sub>3</sub>O<sup>+</sup> are about 0.4%, 0.4%, 1.3% and 0.1% of the total ion current, respectively.

---

\* On leave from Research and Development Center, Tokyo Shibaura Electric Co., Ltd.

目 次 な し

## 1 はじめに

51年度半ばからJFT-2 トーラスへの中性粒子入射加熱実験が行なわれている。このためにビーム入射加熱用イオン源テストスタンド (ITS-1) でイオン源の開発が行なわれ、最初に試作した7cm $\phi$ イオン源 (デュオピガトロン) で25KV, 5.5Aの水素イオンビームを得た。<sup>(1)</sup> さらにJFT-2の限られた入射口に高いエネルギー密度で入射できるようにするため7cm $\phi$ イオン源でマルチビームの収束実験が行なわれ、収束により、入射パワーを約3倍にふやせることがわかった。<sup>2</sup>

ここでは、収束用の電極を用いたイオン源に、中性化セルを取り付け、ここを通過してくる中性粒子ビームの組成を酸素などの不純物も含めて質量分析により測定し、さらに中性化セルをつけたときのイオン源のガス効率も推定したので報告する。

## 2 実験装置

イオン源には、収束用の電極のついた7cm $\phi$ デュオピガトロンを用いた。<sup>(2)</sup> イオン源の下に、図1のような中性化セルをつけた。中性化ガスにはイオン源からもれてくる水素ガスをそのまま使った。中性化セルの途中についている2つの電離真空計は水素ガスの流量測定用である。イオン源から1.5m離れたところにある2mm $\phi$ のスリットを通して、分析部にビームを通した。スリットを通ったビームのうち荷電粒子は偏向板により除かれ、中性粒子ビームだけがイオン化セルに入る。セル中でイオン化された粒子は磁場により60°または30°偏向されてファラデーカップに入る。ファラデーカップは二次電子放出を押えるためにグリッドに約-40Vの電圧を加えた。ファラデーカップに入った電流はシンクロスコープで測定した。イオン化セルにはモニター用の電離真空計がおかれ、イオン化セルに水素ガスを入れたとき、分析部の真空度は(1~4)  $\times 10^{-5}$  Torrであった。分析用の磁石はポールピースの大きさが15cm $\phi$ 、最大磁場が9K Gaussで定常磁場を作りだすだけでなく、ビーム持続時間の100msec以内での掃引もできる。この実験は定常磁場でおこなった。イオンの加速電圧が25KVのとき測定できる質量数は60°偏向のとき40以下、30°偏向のときは220以下であった。このときの分解能は60°のとき約20、30°のとき約5であった。

## 3 実験結果

### 3.1 水素に関係した組成

イオン源で作られる3種のイオン $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$ は中性化セル中で表1にあげたような反応を起こす。ここにあげた断面積はOsher<sup>(3)</sup>により編集されたものである。中性化セル(正確には2 $\phi$ のスリットまで)を出たビームはこれらの反応生成物を含んでいる。偏向板に電圧をかけず、ガスセル中にガスを導入しないときのHに関するマススペクトルの1例を図2に示す。これは中性化セルをでたあとのイオンの組成を示しているものである。

### 3-1-1 加速電圧の変化

イオン源の放電条件を一定にしておき、加速電圧だけを変えたとき各イオン種がどのように変わるかを調べた。このとき偏向板に電圧をかけず、イオン化セルに気体を導入せずに、中性化セルからでてくるイオンだけを見た。フィラメント部の圧力がピラニーゲージの読みで  $0.046 \text{ Torr}$ 、加速電圧  $25 \text{ KV}$ 、引きだし電流  $3.3 \text{ A}$  のときの実験結果を図3に示す。加速電圧だけのエネルギー  $E$  として、それだけのエネルギーをもっている  $\text{H}^+(E)$  の電流値を1にとっている。加速電圧が  $20 \text{ KV}$  以上では中性化セルをでたあとのイオンの組成がおおよそ一定であることがわかる。ガスセル中での反応断面積は、加速電圧が  $25 \text{ KV}$  のときと  $30 \text{ KV}$  のときで表1をみてもわかるように大きい違いはない（最も違うもので  $\text{H}^+(E) \rightarrow \text{H}^0(E)$  で約  $20\%$  の差）。これからイオン源の放電条件が一定なら、引きだされるイオンの組成は加速電圧によらないと考えるとよい。

### 3-1-2 中性粒子ビームの引きだし電流に対する依存性

加速電圧を一定にし、放電条件をかえて引きだし電流をかえたとき中性粒子ビームの組成がどのように変化するかを調べた。偏向板に電圧をかけ中性ビームだけをとりだし、これを約  $2 \times 10^{-3} \text{ Torr}$ 、長さ  $25 \text{ cm}$  水素のガスセル中を通してイオン化し、質量分析した。得られたイオン電流を、表1にある対応するイオン化断面積で割ってもとの中性粒子ビームの割合をだした。フィラメント部の圧力がピラニー真空計で  $0.06 \text{ Torr}$ 、加速電圧  $30 \text{ KV}$  のとき図4に示すようになった。この図では、中性粒子の全エネルギーのうち、各粒子がどれだけを受けもっているかを示している。引きだし電流が  $4 \text{ A}$  以上になると、組成はあまり変化せず、 $4 \text{ A}$  以下に引きだし電流が少なくなると分子イオン  $\text{H}_3^+$  から生成する  $\text{H}(E/3)$  がふえることがわかる。

図5は、フィラメント部がそれぞれの圧力の場合について  $2 \phi$  のスリットを通してでてくる中性粒子の全エネルギーを引きだし電流にたいして示したものである。図5の丸印は、小原等<sup>(2)</sup>により測定されたビーム発散  $\omega_i/e$  を用いて  $I/\omega_i^2/e$  を引きだし電流が  $3 \text{ A}$  のときの各圧力での平均値に規格化して示したものである。引きだし電流が  $4 \text{ A}$ 、 $5 \text{ A}$  で、丸印と全エネルギーの値とよく一致している。これから、全エネルギーが引きだし電流と比例しない理由は、各電流で、ビームの発散が変化するためであることがわかる。

### 3-1-3 イオン源から引きだされた直後のビーム組成

中性化セルがついているので直接求めることはできない。このため、イオン源から質量分析用スリットまでの水素ガスの厚みを推定し、これより中性化効率を求めた。これと前節の結果とを合わせてイオン源から引きだされた直後のビーム組成を推定した。

図1で示されているようにイオン源から  $20 \text{ cm}$ 、 $50 \text{ cm}$  離れた場所での中性化セルの圧力を測定した。また真空容器の圧力も測定した。これらの測定は、イオン源を動作させずに行ない、圧力は電離真空計のよみに水素ガスの補正係数  $1/0.45$  をかけて求めた<sup>(4)</sup>。中性化セル部分は分子流領域にあると考えて水素ガスの厚みを求めた。イオン源のフィラメント部の圧力が  $0.06 \text{ Torr}$  のときガスの厚みは  $5.7 \times 10^{15} \text{ 個/cm}^2$  であった。  $30 \text{ KV}$  で引きだされたときの中性化効率は、 $\text{H}^+ \rightarrow \text{H}(30 \text{ KeV})$ 、 $\text{H}_2^+ \rightarrow 2\text{H}(15 \text{ KeV})$ 、 $\text{H}_3^+ \rightarrow 3\text{H}(10 \text{ KeV})$  についてそれぞれ  $70\%$ 、

72%, 68% である。これより前節の結果と合わせて加速電圧 30KV, 引き出し電流 5.5A のとき, イオン源から引きだされた直後の組成は  $H^+$ , 61%,  $H_2^+$ , 29%,  $H_3^+$ , 10% であることがわかった。

### 3-1-4 イオン源のガス効率

イオン源からのガス流量は, 前節で述べたように中性化セル中の二点で圧力を測定し, これと計算した円形導管コンダクタンスより求めた。フィラメント部の各圧力についての流量 ( $H_2$  から  $2H^+$  ができるとしたときの電流量であらわす) を図 6 に示す。前節で述べたフィラメント部の圧力 0.06 Torr, 加速電圧 30 KV, 引き出し電流 5.5 A のとき, ガス効率は 57% になる。ここでガス効率は, イオンの流量と, イオン源からもれる水素分子の流量の比である。

## 3.2 ビーム中の不純物

ビーム中の主な不純物は酸素とその水素化合物が最も多く, その他に炭素とその水素化合物, 銅などの重金属などがある。酸素とその水素化合物については, 中性ビームに含まれる量を調べた。その他の不純物については中性ビームの中に含まれる量を測定するのにイオン化セルでもう一度イオン化するとノイズレベル以下の信号しか得られないため中性化セルを取り除き, イオン源へのガス導入をパルス化して  $2\phi$  のスリットに達するまでに中性化などの反応ができるだけ進まないようにして, 不純物イオンの量についてだけ調べた。さらに不純物イオンのパルス繰り返し時間に対する依存性も調べた。

### 3-2-1 イオン源からひきだされるとき, 不純物も含めたビームの組成

中性化セルをとり, イオン源へのガス導入をパルス化し, 偏向板に電圧をかけず, イオン化セルにガスを導入しないで, イオンの分析をした。ノイズレベル以上の信号を与える各イオン種がどのような割合でまじっているかを表 2 に示す。これは, 加速電圧 25KV, 引きだし電流 3A のときのものである。イオン源から  $2\phi$  のスリットまでの水素ガスの厚みは,  $H_2^+(E)$  と  $H^+(E/2)$  の比と, 表 1 にある反応断面積から大体  $0.8 \times 10^{15}$  molecules /  $cm^2$  と推定される。酸素以外の不純物イオンの起源はつぎのように考えた。

- 1)  $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ; フィラメントを作るときの有機溶媒。
- 2)  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ ; 空気のリーク
- 3)  $Cu^+$ ; 電極材料
- 4)  $Ag^+$ ,  $Cd^+$ ; 銀ろう (冷却パイプと電極の接続)
- 5)  $Ba^+$ ; フィラメントのバリウムオキシド

### 3-2-2 酸素とその水素化合物

中性粒子中の酸素とその水素化合物の量をみるために, 偏向板に電圧を加え, 中性ビームだけにし, これをイオン化セルで再びイオン化してこのときでてくるイオンを測定した。中性ビームの量を知るために, 水素ガス中で酸素とその水素化合物のイオン化断面積の値が必要である。しかし, 酸素のイオン化断面積<sup>(5)</sup>しか測定値がないので水素化合物についてもイオン化断面積は等



しいとして、酸素とその水素化合物の量を求め、中性粒子ビーム中に含まれる水素原子に対する酸素原子の割合をだした。結果を図7に示す。加速電圧は、25KVで、フィラメント部の圧力は0.06 Torrである。引きだし電流が多いほど酸素原子の割合は小さくなる傾向にある。

この装置では酸素とその水素化合物のイオンの量は全体の2%以上であり、その主なものは $\text{H}_2\text{O}^+$ である。この原因として第1にフィラメントや電極の壁からの水の脱着、第2に放電中の水素ガスによるオキサイドカソードか表面の酸化物の還元による水の生成が考えられる。次期の装置であるJT-60入射では酸素などの軽い元素の不純物を1%以下にすることが要請されているので、今後の実験で、イオン源内での $\text{H}_2\text{O}$ の生成の原因を明らかにするつもりである。

### 3-2-3 不純物イオンのパルス繰り返し時間に対する依存性

パルス繰り返し時間に対する不純物イオンの量を調べるために、 $\text{H}_2\text{O}^+$ から中性化セル中で生成する $\text{O}^+$  ( $M=14$ に相当するところにてでくる)と $\text{Cu}^+$ についてイオン電流の測定を行なった。加速電圧25KV、引きだし電流3A、パルス巾100msecのときの結果を図8に示す。

## 4 おわりに

JFT-2加熱用中性粒子入射装置のビーム組成の測定は、不純物イオンの場合を除いてイオン源へのガス導入が定常的な場合について行なった。しかし、加熱実験のとき、圧力が平衡に達してアーク放電を開始することになるので、ガス導入がパルスの行的に行なわれてもそのままこの実験結果を適用できる。

最後にこの実験を行なっていく上で終始協力と議論をしていただいた松田慎三郎氏をはじめとする加熱工学研究室の諸氏に感謝いたします。

## 文 献

- (1) 松田慎三郎 他; JAERI-M 6431 (1976)
- (2) 小原祥裕, 松田慎三郎, 白形弘文, 田中茂; JAERI-M 6438 (1976)
- (3) L. D. Stewart からの私信
- (4) 日本真空技術K. K.; 電離真空計GI-TL<sub>2</sub>取扱説明書
- (5) C. F. Barnett et al.; ORNL-3113

表1  $H^+$ ,  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  の中性化セル (水素ガス) 中での反応断面積 (単位  $cm^2$ )

反 応	加速電圧 25 kV	加速電圧 30 kV
$H_3^+(E) \rightarrow H^+(E/3)$	$1.6 \times 10^{-16}$	$1.7 \times 10^{-16}$
$H_3^+(E) \rightarrow H^0(E/3)$	$8.9 \times 10^{-16}$	$9.2 \times 10^{-16}$
$H_3^+(E) \rightarrow H_2^+(2E/3)$	$1.2 \times 10^{-16}$	$1.25 \times 10^{-16}$
$H_3^+(E) \rightarrow H_2^0(2E/3)$	$4.0 \times 10^{-16}$	$4.0 \times 10^{-16}$
$H_2^+(2E/3) \rightarrow H^+(E/3)$	$2.1 \times 10^{-16}$	$2.0 \times 10^{-16}$
$H_2^+(2E/3) \rightarrow H^0(E/3)$	$8.1 \times 10^{-16}$	$8.2 \times 10^{-16}$
$H_2^+(2E/3) \rightarrow H_2^0(2E/3)$	$4.0 \times 10^{-16}$	$3.7 \times 10^{-16}$
$H_2^0(2E/3) \rightarrow H^+(E/3)$	$4.1 \times 10^{-17}$	$4.7 \times 10^{-17}$
$H_2^0(2E/3) \rightarrow H^0(E/3)$	$2.9 \times 10^{-16}$	$3.1 \times 10^{-16}$
$H_2^0(2E/3) \rightarrow H_2^+(2E/3)$	$1.1 \times 10^{-16}$	$1.25 \times 10^{-16}$
$H^+(E/3) \rightarrow H^0(E/3)$	$8.9 \times 10^{-16}$	$8.6 \times 10^{-16}$
$H^0(E/3) \rightarrow H^+(E/3)$	$1.40 \times 10^{-16}$	$1.45 \times 10^{-16}$
$H_2^+(E) \rightarrow H^+(E/2)$	$1.9 \times 10^{-16}$	$1.8 \times 10^{-16}$
$H_2^+(E) \rightarrow H^0(E/2)$	$8.2 \times 10^{-16}$	$8.0 \times 10^{-16}$
$H_2^+(E) \rightarrow H_2^0(E)$	$3.2 \times 10^{-16}$	$2.8 \times 10^{-16}$
$H_2^0(E) \rightarrow H^+(E/2)$	$5.5 \times 10^{-17}$	$6.1 \times 10^{-17}$
$H_2^0(E) \rightarrow H^0(E/2)$	$3.6 \times 10^{-16}$	$3.6 \times 10^{-16}$
$H_2^0(E) \rightarrow H_2^+(E)$	$1.4 \times 10^{-16}$	$1.5 \times 10^{-16}$
$H^+(E/2) \rightarrow H^0(E/2)$	$8.0 \times 10^{-16}$	$7.3 \times 10^{-16}$
$H^0(E/2) \rightarrow H^+(E/2)$	$1.45 \times 10^{-16}$	$1.45 \times 10^{-16}$
$H^+(E) \rightarrow H^0(E)$	$4.8 \times 10^{-16}$	$3.9 \times 10^{-16}$
$H^0(E) \rightarrow H^+(E)$	$1.35 \times 10^{-16}$	$1.3 \times 10^{-16}$

表2 イオンビームに含まれる不純物イオンの割合 (25 kV, 3A)

M	%		M	%	
1/3	0.95	$H^+(\frac{1}{3}E)$	16	0.40	$O^+$
1/2	7.54	$H^+(\frac{1}{2}E)$	17	0.40	$OH^+$
1	47.7	$H^+$	18	1.27	$H_2O^+$
4/3	0.80	$H_2^+(\frac{2}{3}E)$	19	0.12	$H_3O^+$
2	35.8	$H_2^+$	28	0.01	$N_2^+$
3	4.77	$H_3^+$	32	0.006	$O_2^+$
12	0.07	$C^+$	65	0.019	$Cu^+$
13.5	0.02	$O^+(\frac{16}{19}E)$	110	0.001	$Ag^+, Cd^+$
14	0.08	$CH_2^+, O^+(\frac{16}{18}E)$	134	0.001	$Ba^+$
15	0.12	$CH_3^+, O^+(\frac{16}{17}E)$			

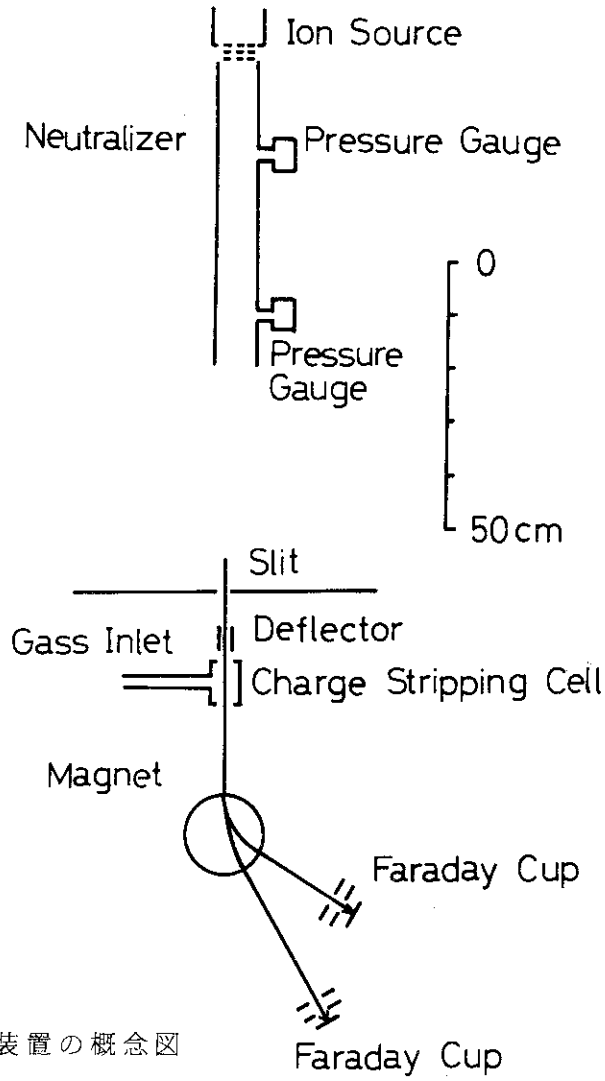


図1 実験装置の概念図

Mass Spectra after Passage of Neutralizer

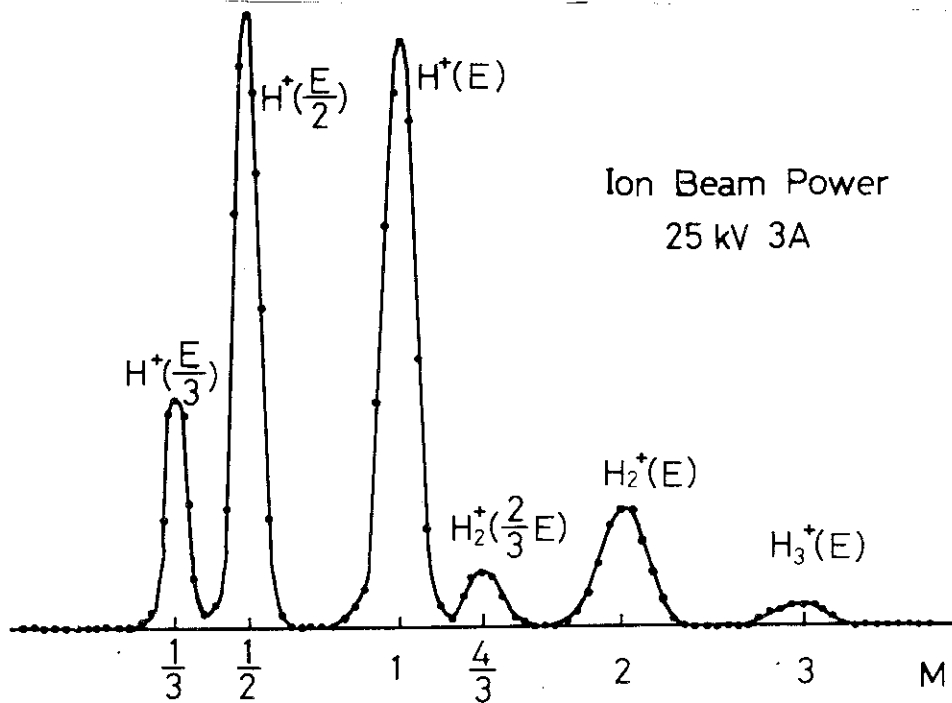


図2 マススペクトルの1例

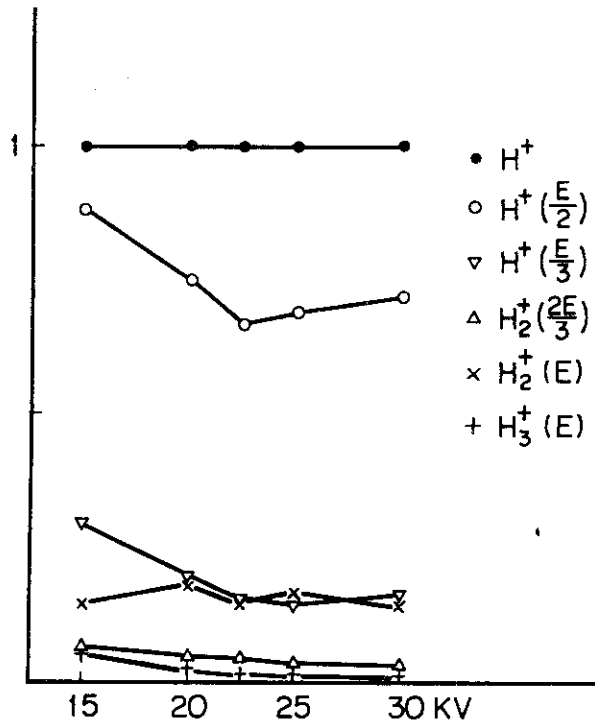


図3 各イオン種の加速電圧による変化。ソースプラズマの放電条件を一定にし、 $H^+(E)$ の電流値を1にとってある。

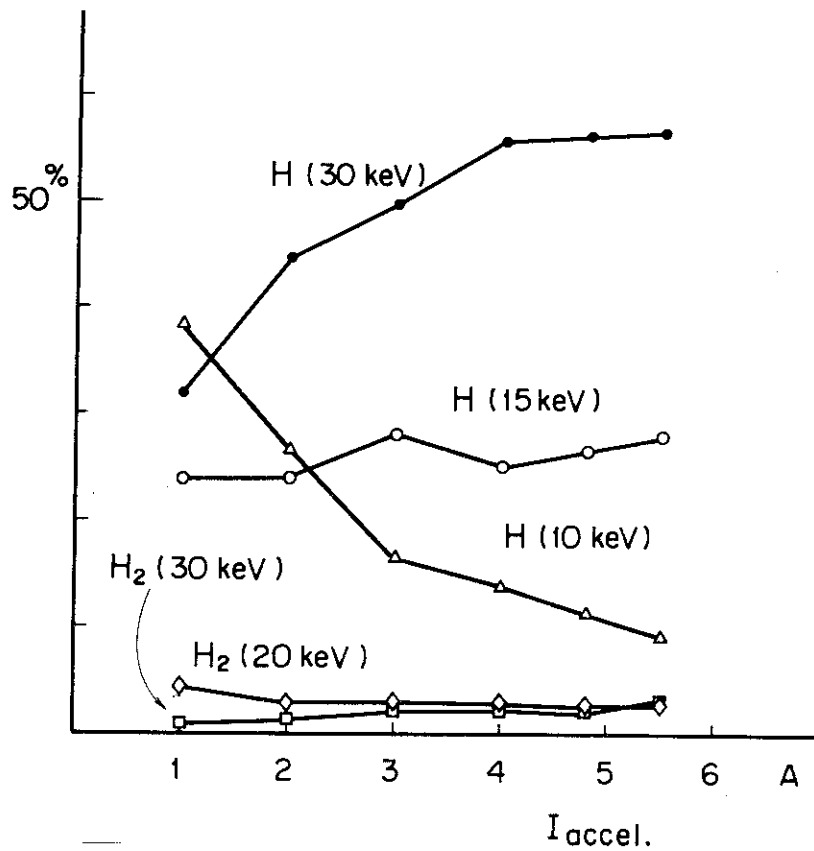


図4 全中性粒子エネルギーのうちの各粒子の割合。加速電圧は30 kVである。

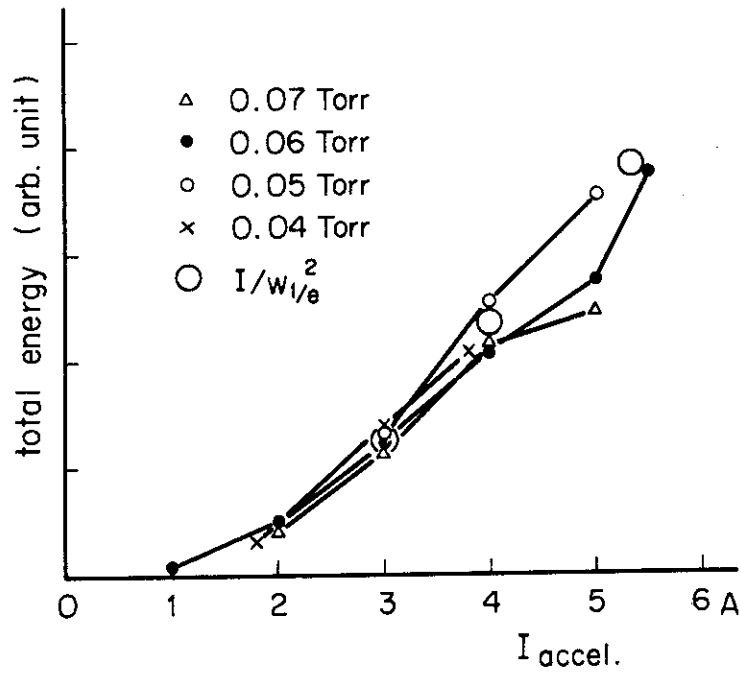


図5 スリットを通過する全中性粒子エネルギーの引きだし電流に対する依存性

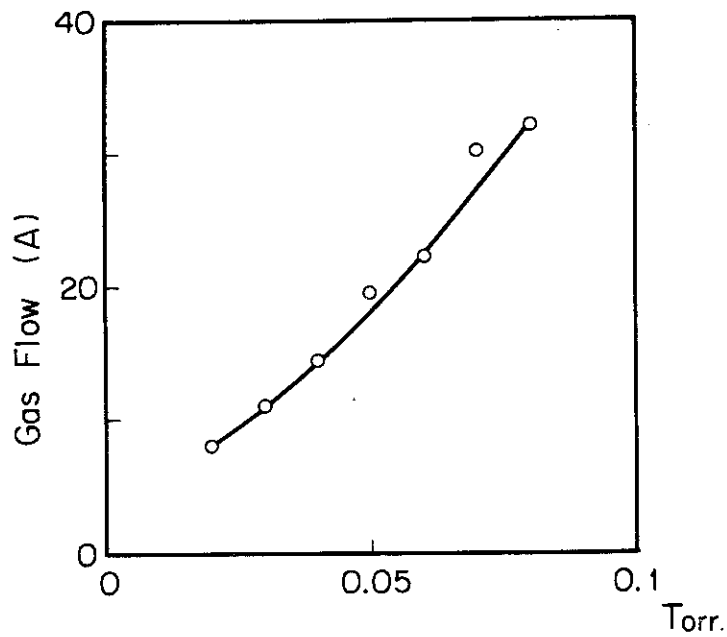


図6 フィラメント部の圧力(ピラニー真空計の指示値)と中性化セルを流れるガス量( $H_2$ より $2H^+$ ができるとしたときの電流値)の関係

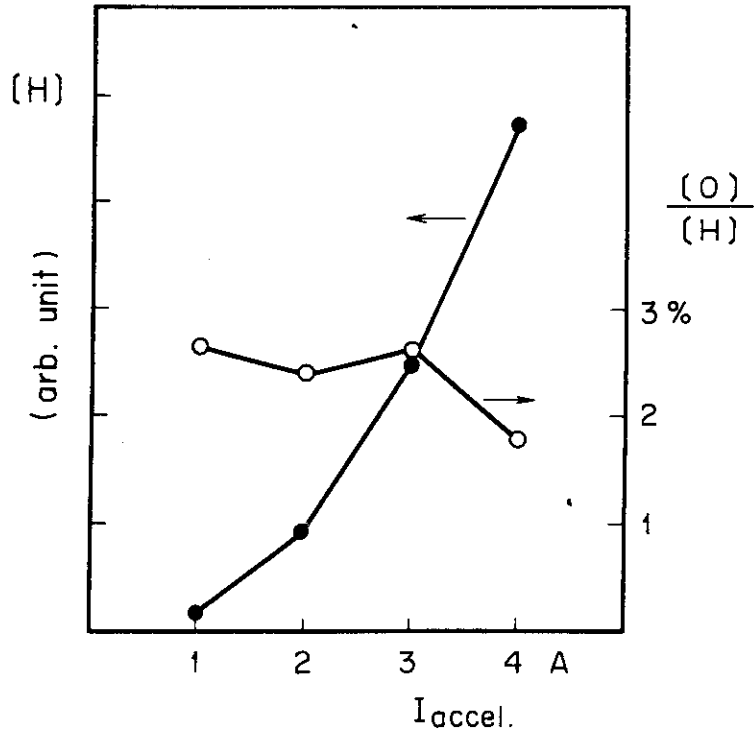


図7 中性粒子ビーム中に含まれる酸素原子の高速水素原子に対する割合。各引きだし電流に対するスリットを通過する水素原子の量も示してある。

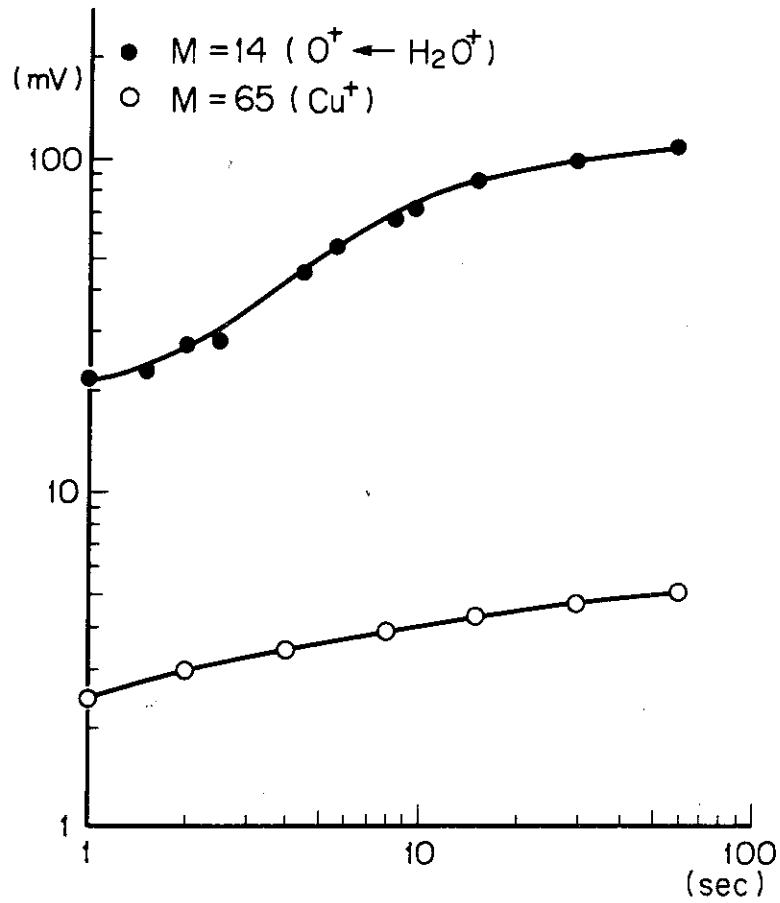


図8 不純物イオンのパルス繰り返し時間に対する依存性