

## 20kV, 1.5A 中性ビーム入射装置の特性 : 20kV, 1.5A 中性ビーム入射装置の特性に関する研究

益田, 光治  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

矢野, 栄宣  
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

熊谷, 雅之  
日本アイ・ビー・エム株式会社 | 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

永江, 弘  
三菱重工業株式会社 | 九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/17623>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 7 (1), pp.33-39, 1985-08-01. 九州大学大学院総合理工学  
研究科  
バージョン :  
権利関係 :

[20 kV, 1.5 A 中性ビーム入射装置の特性]  
 20 kV, 1.5 A 中性ビーム入射装置の  
 特性に関する研究

益田 光治\* · 矢野 栄宣\* · 熊谷 雅之\*\*

永江 弘\*\*\* · 赤崎 正則\*

(昭和60年3月29日 受理)

**Characteristics of the 20 kV, 1.5 A Neutral  
 Beam Injection System**

Mitsuharu MASUDA, Hidenobu YANO,  
 Masayuki KUMAGAI, Hiroshi NAGAE  
 and Masanori AKAZAKI

For a fusion reaction to be feasible, it is necessary to heat plasmas to a very high temperature. One of the most promising ways for heating plasmas is to inject high energy neutral particles to the magnetically confined plasmas and to convert their kinetic energy to the thermal energy through collisions. In order to investigate various problems associated with this neutral beam injection method, a 20kV, 1.5A neutral beam injector has been designed and constructed. By using this injection system, the effect of a gas injection to the ion source was investigated, and it was shown that the accurate control of the gas injection pressure was necessary to attain the stable ion beam extractions. The effect of the anode size on the arc discharge characteristics in an ion source was also obtained experimentally. The beam profiles were measured by a calorimeter and the good beam convergence was shown to be obtained by the present system. Since the plasma produced in the ion source contained molecular ions, the low energy particles existed in the ion beam. The energy of the extracted ion beam was analysed by using the deflection magnet, and the variations of low energy ion fractions with arc discharge currents were also clarified.

1. 序 論

近年急激に増大しつつあるエネルギー需要に応ずるため、各国とも核融合炉の開発研究を重要課題としている。この実現のためには、トーラスあるいは磁気ミラー装置などに閉じ込めたプラズマを十分高温に加熱する必要がある。プラズマ加熱の方法としては、プラズマ中に大電流を流すジュール加熱法が有力であるが、温度の上昇とともにプラズマの電気抵抗が減少するため、この方法で得られる温度には上限があり、ジュール加熱のみで核融合プラズマを得る事はできな

い。そこで追加熱を行う必要があるが、高速の中性ビームをプラズマ中に入射し、プラズマ粒子との衝突を介して中性粒子の運動エネルギーを熱エネルギーに変換してプラズマの温度を上げる方法が、現在、最も有力視されている<sup>1)~2)</sup>。高速中性ビーム入射装置 (Neutral Beam Injector) の概略を Fig. 1 に示す。イオン源ではアーク放電によりプラズマが生成される。ついで、引出し加速電極に高電圧を印加してプラズマからイオン

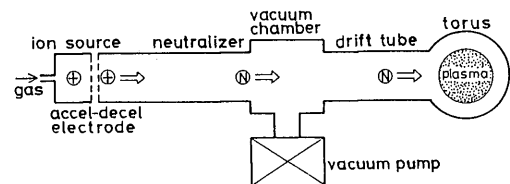


Fig. 1 Neutral beam injector.

\* エネルギー変換工学専攻

\*\* エネルギー変換工学専攻修士課程  
 (現在 日本アイ・ピー・エム(株))

\*\*\* エネルギー変換工学専攻修士課程  
 (現在 三菱重工(株))

のみを取り出し、高速に加速する。得られた高速イオンビームは、中性化セルを通過する間にセル内部の中性粒子との荷電交換により中性化され、高速中性ビームとなり、核融合炉に入射されプラズマを加熱する。

この中性ビーム入射装置に関しては、現在、積極的な研究開発が行われているが、今後、この装置を実用化する際には、イオン源における安定で効率の高いプラズマの生成法、イオンビームの引出し特性、イオンビームに含まれるエネルギーの低い粒子の存在比の分析、等に関する詳細な検討を必要とすると考えられる。著者らは、これらの中性ビーム入射装置に関する基礎的問題を明らかにするため、20kV, 1.5A の中性ビーム入射装置を設計、製作した。この入射装置を用い、イオン源へのガス注入法と、プラズマ生成法の検討を行うとともに、ビームの引出し特性、ビームプロファイルの測定、ビームのエネルギー分析、などを行い、効率の良い中性ビーム入射装置の設計法に関する知見を得る事ができたので報告する。

2. 実験装置の構成

本研究で製作した中性ビーム入射装置の構成を Fig. 2 に示す。本装置はイオン源と中性化セル、ビームリミター、測定部タンクより構成される。ビームエネルギーの分析に際しては、測定部タンクの圧力を低く保ち、タンク内でのイオンビームの中性化を防ぐ必要があるため、中性化セルの下部に膨張室を設け、イオン源から流入してくる室温の中性ガスのタンクへの流入を防止した。イオンビームはビームリミターにより中央の強度の大きい部分のみが取り出されて測定部

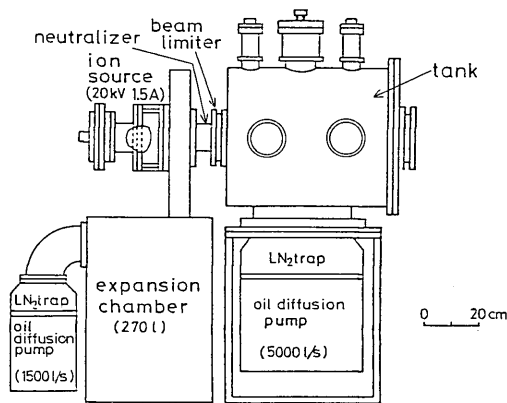


Fig. 2 20 kV, 1.5A NBI system.

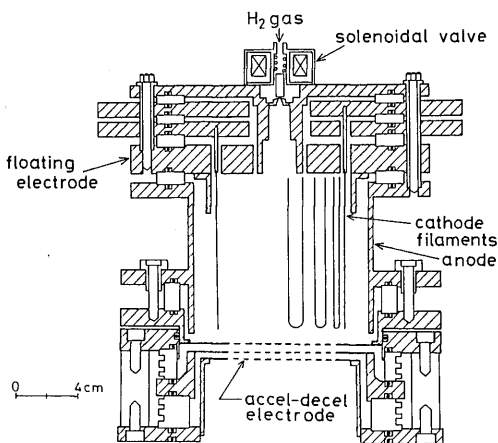


Fig. 3 Ion source.

タンクへ入射される。真空排气系は液体窒素トラップを付加した二台の油拡散ポンプで構成される。

イオン源を Fig. 3 に示す。イオン源は円筒形ステンレス製で、陽極部の長さは 100 mm、内径は 92 mm、および 113 mm の二種類を用いた。フィラメントは直径 0.5 mm、長さ 75 mm のヘアピン状タングステン線で、総数を 13 本から 20 本まで変化させた。イオン引出し加速電極は厚さ 1 mm の 3 枚組銅製多孔板で、直径 55 mm の範囲内に直径 3 mm の孔が 199 個あけてある。作動気体には水素を用いた。まず、イオン源内部を高真空 ( $10^{-4}$ Pa) に排気した後、フィラメントに 400A 程度の電流を 2 秒間通電して熱電子を発生させ、ついで 50~100 ms 間電磁弁を開いて水素ガスを導入する。同時にアーク放電電極に充電電圧 150V のコンデンサにより 100~400A の電流を 40 ms 流し、プラズマを生成した。引出し加速電極には、常時、容量  $20 \mu\text{F}$  のコンデンサにより 3~25 kV の高電圧が印加されており、アーク放電によりプラズマが生成されると、プラズマ中のイオンがこの高電圧により加速されて高速イオンビームが得られる。

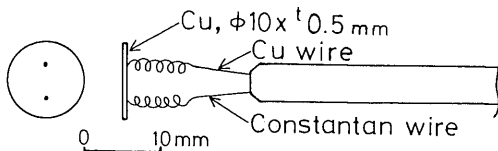


Fig. 4 Calorimeter.

イオンビームと中性ビームの強度分布の測定に用いたカロリメータを Fig. 4 に示す。カロリメータの感部は直径 10 mm, 厚さ 0.5 mm の銅製円盤で, これに銅-コンスタンタン熱電対が取り付けられている。ビームが円盤に入射すると, ビームのエネルギーにより円盤の温度が上昇するが, この温度上昇を測定する事によりビームの強度が測定できる。

### 3. イオン源への水素ガス注入

イオン源では, 電磁弁により注入された水素ガスがアーク放電により電離し, プラズマが生成されるが, イオン源内部のガス圧力が生成されるイオンの量に直接影響する。従って, 安定なビーム引出しを行うためには注入ガス流量を精度良く制御しなければならないが, 取り扱うガス流量が通常  $0.1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$  程度と小さいため, Fig. 3 に示したイオン源上部の電磁弁のオリフィス直径を小さくする必要がある。一方, このオリフィスはフィラメントからの放射を直接受けるため温度が上昇し, 熱により変形して注入ガス流量が時間とともに変化することが分かった。Fig. 5 は電磁弁上流側のガス圧力とアーク放電電源コンデンサの充電電圧を一定 (150V) に保ち, 1 分間に 1 ショットの割合でビーム引出しを行った場合のアーク放電のインピーダンスの時間変化を示す。図に示されるように, インピーダンスはショット数とともに徐々に増大したが, これは時間の経過とともにガス注入オリフィスが変形し, オリフィスの有効断面積が減少したためと思われる。本実験の結果より, イオン源の安定動作のためには, 常にガス圧力をモニターし電磁弁背圧を調整してイオン源内部のガス圧力を一定に保つ必要がある事が分かる。

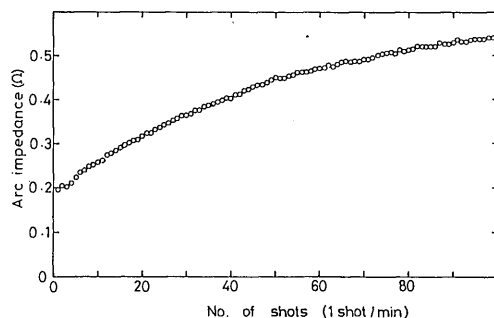


Fig. 5 Time variation of arc impedance.

Fig. 6 は電磁弁の開口時間  $t_v$  とアーク放電電流  $I_a$  の関係で, 縦軸は放電電流, 横軸は電磁弁の開口時間を示す。Q はイオン源への注入ガス流量,  $I_f$  はフィラメント加熱電流,  $V_{chg}$  はアーク放電電源コンデンサの充電電圧である。本実験で用いたビームの持続時間は 40 ms であるが, 同図は,  $t_v = 0$  で電磁弁を開口し, 一定時間経過後にアーク放電を開始し, その後 40 ms の間のアーク放電電流の波形を重ね合わせたものである。放電電源コンデンサの充電電圧を一定とした場合, アーク放電電流はイオン源内部のガス圧力にほぼ比例する<sup>3)</sup>。同図より  $t_v > 60 \text{ ms}$  では  $I_a$  はほぼ一定となっており, この領域を用いて実験を行えば, 時間に対して一定で安定なビーム引出しが行える事が分かった。

### 4. イオン源内部におけるプラズマ生成効率

イオン源では, 引出し加速電極単位面積当りのビーム電流値ができるだけ大きい事が望ましいが, このためにはイオン源内部で密度の高いプラズマを作る必要がある。そこで磁場を用いてイオン源内のプラズマを閉じ込め, 密度を上昇させる試みが報告されているが<sup>4)</sup>, 本実験においても Fig. 3 に示すイオン源の円筒状陽極周辺部にコイル, あるいは永久磁石を付加し, プラズマの閉じ込めを行った。Table 1 はその結果で, 加速電圧  $V_{acc}$  をほぼ一定とした時, 引出し電流  $I_{acc}$  を 1A に保つために必要なアーク放電電流を, (i) 陽極に条件を付加しない, (ii) 円筒状陽極のまわりに 1 ターンのコイルを巻き, 約 300A の電流を流して磁場を発生させる, (iii) 陽極周囲に 48 個のフェライト永久磁石 (0.08T) を付加し, イオン源内部にカスプ状磁場を作る, (iv) 同様に 128 個の磁石を用いる, の三つの条件のもとで比較した結果である。この表から

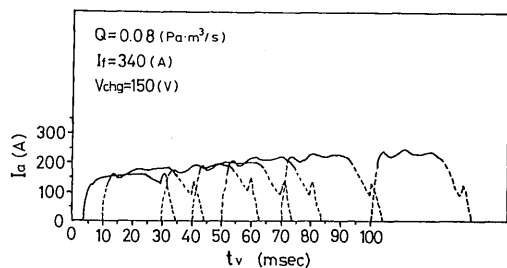


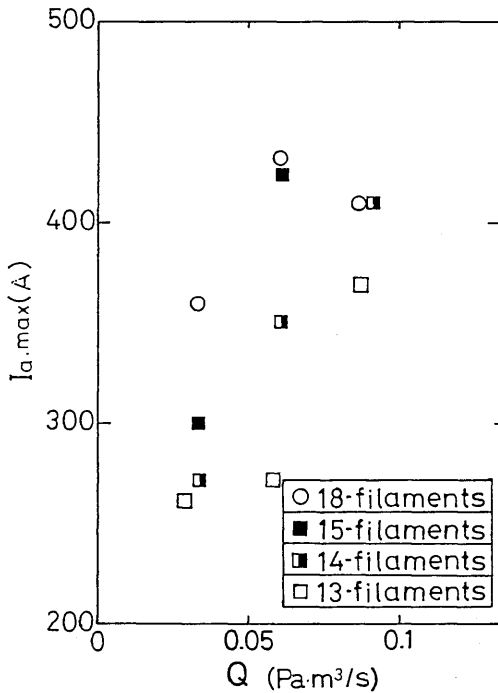
Fig. 6 Arc discharge current in an ion source.

明らかのように、磁場を付加すると、同じイオンビーム電流を引出すために必要なアーク放電電流が著しく少なくてよい事が分かる。なお、より磁束密度の高いコバルト・サマリウム磁石 (0.2T) も試みたが、この場合、磁場が強くと、磁力線がイオン引出し面に達するため、イオンビームの軌道が変化し、正常な引出しが行えなかった。また、1ターンコイルでは、磁場を強くした場合にソースプラズマ内に不安定性が発生し、有効なイオンビーム引出しが行えない事が分かった。

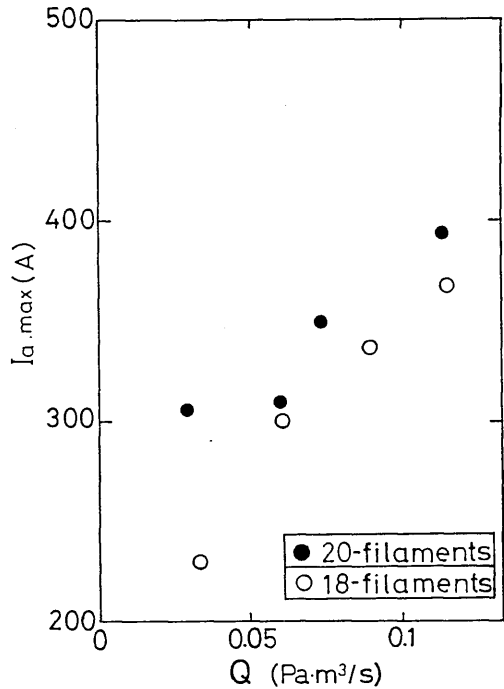
**Table 1.** Arc currents for different anode conditions.

Anode condition	$I_a$ (A)	$I_{arc}$ (A)	$V_{acc}$ (kV)
—	449	0.97	19.4
1 turn coil	348	1.04	19.9
48-Ferrite Magnets	408	1.00	19.6
128-Ferrite Magnets	293	0.99	20.0

本研究で用いたイオン源では、イオン源の形状と導入ガス流量を決定した場合、放電電流が大きくなりすぎると、放電が不安定となりカソードフィラメントの損傷が発生する。これはイオン源内部の放電が、拡散モードから集中アークモードへ移行し、フィラメントの一部に電流が集中するためと考えられている<sup>5)</sup>。このため、アーク放電では放電可能な電流に最大値が存在するが、一方、放電電流が大きいくほど生成されるプラズマの密度が高く、大電流のビーム引出しには有利である。従って、イオン源の形状決定の際には放電可能な最大電流値に対する考慮が必要であるが、現在、イオン源の形状を系統的に変化させ、この点を明らかにした研究は行われていない。そこで本研究では、イオン源陽極の内径とフィラメント本数を変化させて実験を行い、アーク放電電流の最大値の変化の状態を調べた。Fig. 7はその結果で、横軸はイオン源への供給ガス流量  $Q$ 、縦軸はアーク放電電流の最大値  $I_{a,max}$  である。(a) 図は陽極内径が 92 mm、(b) 図は 113 mm の場合で、陰極フィラメントの本数も変化させた。図に示されるように、陽極内径が大きいと同一ガス流量に



(a) anode diameter = 92 mm.



(b) anode diameter = 113 mm.

**Fig. 7** Maximum arc current.

対して  $I_{a,max}$  は低くなったが、これはイオン源内部のガス圧力が低くなるためと思われる。また、(a), (b) のいずれにおいてもフィラメントの本数が多いほど最大放電電流値は高くなった。安定なアーク放電を維持するためには、熱陰極と陽極に対し空間電荷制限領域で放電を起こさせる事が望ましいが<sup>3)</sup>、フィラメントの本数を増加させると陰極面積が増大する結果、空間電荷制限領域から熱電子制限領域へ移行するアーク電流値が上昇するためと考えられる。同図より、本イオン源においては、直径92 mm、フィラメント本数18本の場合が最も効率の良いビーム引出しが行える事が分かる。

5. イオンビームの引出し特性

Fig. 8 はイオンビームの引出し特性である。横軸は加速電圧  $V_{acc}$ 、縦軸は引出し可能な最大ビーム電流値  $I_{acc,max}$ 、および、それに対応するアーク放電電流  $I_a$ 、である。チャイルド・ラングミュアの法則によれば、 $I_{acc} \propto V_{acc}^{1.5}$  となるが、図に示されるように本イオン源では  $V_{acc}$  に対する  $I_{acc,max}$  の増加量は1.5乗則からの予想よりも小さかった。これはイオン引出し電極孔の部分において、プラズマと引出し加速部の境界に形成さ

れるメニスカスの形状が加速電圧によりかなり変化するためと考えられる。本イオン源からは20 kV, 2Aのイオンビーム引出しが可能である事が分かった。

Fig. 9 はビームリミター直径  $D_{lim}$  が30 mmの場合に、Fig. 4 に示したカロリメータを用いて測定したビーム半径  $(r)$  方向の等価電流密度  $J_c$  ( $A/m^2$ ) の分布で、 $z$  は引出し加速電極よりの軸方向距離を示す。図に示されるように、イオン源から引出されたビームは、ほぼガウス状の強度分布を有する。本イオン源では、引出し加速部においてプラズマ側電極に対し第2、第3の電極孔位置を変位させてビームを収束させているが、 $z=670$  mm と  $750$  mm のプロファイルを比較すると、中心軸上の強度に大きな差が認められない事から、ビームはこの領域に収束していると考えられる。

Fig. 10 は、加速電圧を一定 (20 kV) として引出し電流値を変化させた場合にカロリメータで測定した中心軸上のビームの等価電流密度の変化である。同図より本イオン源では、 $I_{acc} > 0.9A$  の領域でビームが急速に収束する事が分かる。なお、ファラデーカップを用いた測定によれば、この場合のビーム中の全イオン電流は約100 mAであった。

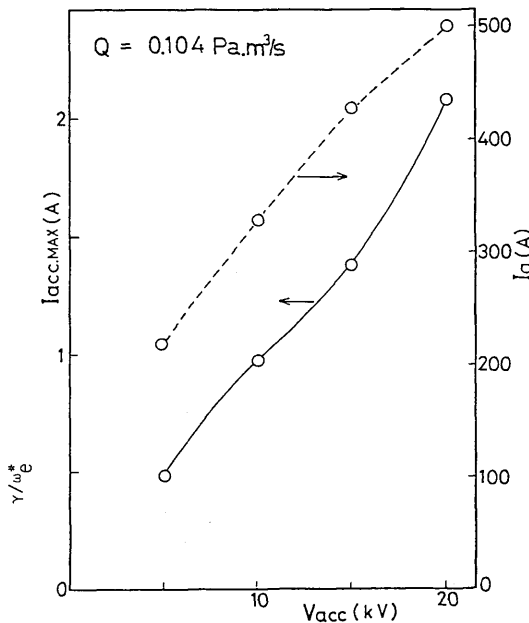


Fig. 8 Ion beam extraction characteristics.

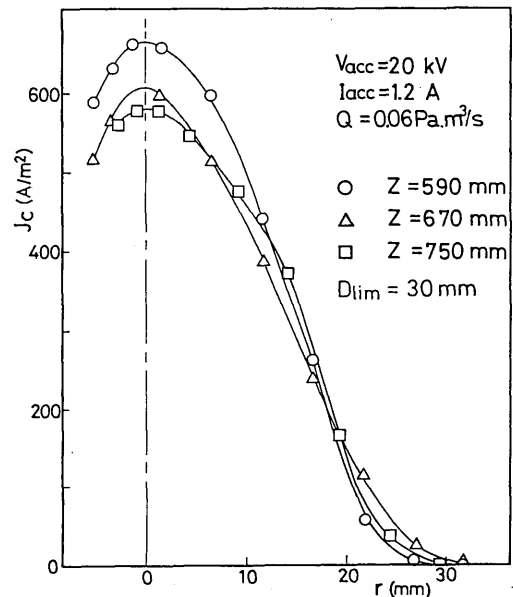


Fig. 9 Beam profiles.

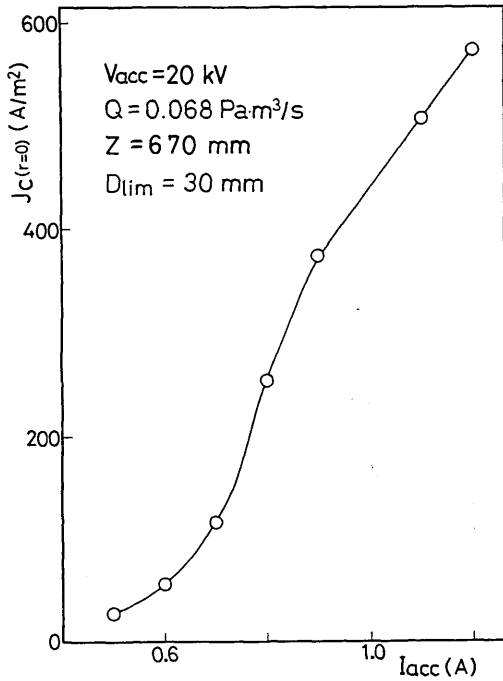


Fig. 10 Centerline beam intensity.

6. ビームエネルギーの分析

イオン源内部で生成されたプラズマ中には、原子状イオンの他に  $H_2^+$ ,  $H_3^+$  の分子状イオンが存在する。これ等の分子状イオンを引出し加速電極で加速すると、中性化セル内で一部が解離して原子状イオンとなるため、セル出口ではビーム中に加速電圧に等しいエネルギー  $E$  を有する粒子の他に、 $E/2$ ,  $E/3$ ,  $2E/3$  のエネルギーの粒子が存在する<sup>6)</sup>。イオン源を製作する際には引出されたビーム中に含まれるこれらの部分エネルギー粒子の存在比率を測定しておく必要がある。本研究では、Fig. 11 に示すように測定部タンク内に電磁石 (0.2T) を設置してイオンビームの軌道をエネルギーに応じて偏向させ、二つのファラデーカップを上下させてイオンビーム電流値を測定し、部分エネルギーイオンの存在比率を得た。

Fig. 12 はその結果で、ビーム中の部分エネルギーイオンの存在比率をアーク放電電流に対してプロットしたものである。同図には、アーク放電電流の増加とともにビーム中のエネルギー  $E$  のイオンの存在比率

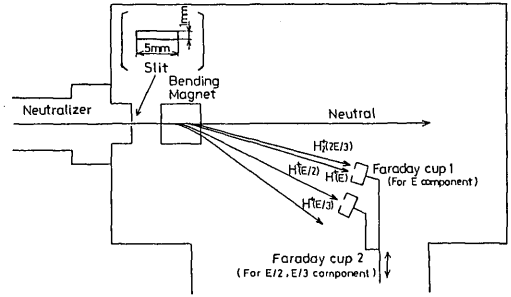


Fig. 11 Schematic diagram of beam composition measuring system.

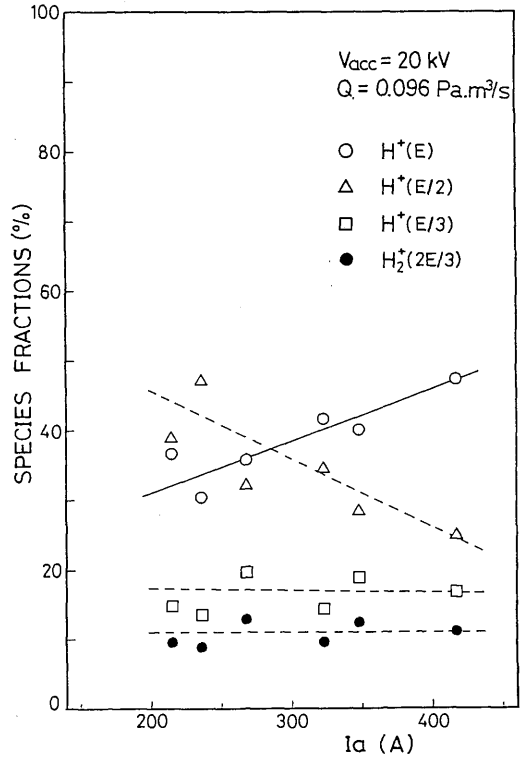


Fig. 12 Beam species fractions.

が増加し、エネルギー  $E/2$  のイオンが減少する様子がよく示されている。5節で述べたように、本イオン源は  $I_{acc} > 0.5 \text{ A}$  の領域で良好な収束性を示すが、これは  $I_a > 400 \text{ A}$  に対応しており、この状態では  $H^+(E) : H^+(E/2) : H^+(E/3) : H_2^+(2E/3) = 45 : 25 : 18 : 12$  となっている事が分かった。

## 7. 結 論

核融合プラズマ加熱用中性ビーム入射装置について、イオン源の効率向上、ビーム引出し特性、などに関する基礎的情報の収集を目的とし、20 kV, 1.5A の中性ビーム入射装置を設計、製作した。この装置を用いて実験的研究を行い、イオン源のガス注入オリフィスの熱変形によるアーク放電インピーダンスの変化、および、イオン源内ガス圧力とアーク放電電流の関係、を調査するとともに、陽極直径とフィラメント本数がアーク放電特性に及ぼす影響を明らかにする事ができた。また、引出されたイオンビームの強度分布の測定を行い、ビームの収束性を確かめるとともに、電磁石を用いてイオンビーム軌道を偏向させ、イオンビーム中の部分エネルギーイオン種の存在比率を測定し、存

在比率とアーク放電電流の関係を明らかにした。本研究の結果は、今後、効率の高い中性ビーム入射装置を設計する際に指針を与えるものと思われる。

## 参 考 文 献

- 1) Eubank, H. P., J. Vac. Sci. Technol., A2-2 (1984) p.655.
- 2) Menon, M. M., Nuclear Technol./Fusion, 4 (1983) p.625.
- 3) 赤崎正則・ほか6名, 九州大学総合理工学研究科報告, 3-2 (1981) p.131.
- 4) MacKenzie, K. R. and Limpaecher, R., Rev. Sci. Instrum., 44-6 (1973) p.726.
- 5) Ehlers, K. W.・ほか6名, Lawrence Berkeley Laboratory Rept., LBL-3336 (1974).
- 6) Chun, F. C., Burrell, C. F. and Cooper, W. S., J. Appl. Phys., 54-11 (1983) p.6119.