## 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 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

 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・ビー・エム(株)
 エネルギー変換工学専攻修士課程 (現在 三菱重工業(株)) 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.

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,ビームプロフィ 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.



タンクへ入射される.真空排気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1mm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<sup>-4</sup>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板に充電電圧 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 µF 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を 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 Pam<sup>3</sup>/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. 6 は電磁弁の開口時間 tv とアーク放電電流 L 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,L はフィラ メント加熱電流,V<sub>chg</sub>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,tv=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 tv >60 ms ではLa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劾率

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4、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 Vace をほぼ一定とした時,引出し電流 Iace 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. 5 Time variation of arc impedance.



Fig. 6 Arc discharge current in an ion source.

明らかなように、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、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	Ia (A)	Iacc (A)	Vacc (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Iamax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



Fig. 7 Maximum arc current.

対して Lamax 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 Vace, 縦軸は引出し可能な最大ビーム電流値 Iaccmax, および, それに対応するアーク放電電流 Ia, である. チャイルド・ラングミュアーの法則によれば, Iacc  $\infty V_{acc}^{1.5}$  となるが,図に示されるように本イオン源 では Vacc に対する Iaccmax 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20kV,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<sub>lim</sub> 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<sub>c</sub> (A/m<sup>2</sup>) 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 のプロフィルを比較する 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、Iacc>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. 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<sup>1</sup><sub>2</sub>, H<sup>1</sup><sub>3</sub>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>9</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.





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 Iacc>0.5A の領域で良好な収束性を示すが、これ は Ia>400A に対応しており、この状態では H<sup>+</sup>(E): H<sup>+</sup>(E/2): H<sup>+</sup>(E/3): H<sup>+</sup><sub>2</sub>(2E/3)=45: 25: 18: 12 とな っている事が分かった.

### 昭和60年

#### 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、20kV,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.
- 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.