

DEVELOPMENT OF A HIGH BRIGHTNESS HYDROGEN ION SOURCE FOR THE BTA

H. OGURI, Y. OKUMURA, J. KUSANO, K. HASEGAWA, H. MURATA*,
K. SAKOGAWA**, M. KAWAI***, T. ONO, N. ITO and M. MIZUMOTO

Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

ABSTRACT

The R&D works for construction of a 10MeV/10mA proton linear accelerator (BTA) has been carried out at JAERI. The ion source for BTA requires to produce high brightness and high proton yield beam. The ion source has been designed and fabricated, and the beam test has been performed since 1992. A hydrogen ion beam of 140 mA with a low beam divergence $\omega_{1/e}$ of 8.5 mrad was extracted at an acceleration voltage of 100 kV, and a high proton yield of 85% was obtained at 120 mA.

原研BTA用高輝度水素イオン源の開発

1. はじめに

原研では、ビームエネルギー 10MeV、平均ビーム電流10mAの線形陽子加速器 (Basic Technology Accelerator: BTA) 建設のためのR&Dを実施している。大電流イオンビーム加速の場合、加速途中のビームロス、加速管の放射化や機器の熱的破壊、劣化など深刻な問題を引き起こす。そのためいかに高透過率を保ちながらビームを加速するかがBTA建設の鍵になる。よって、BTAに用いるイオン源には、高輝度 (大電流かつ低エミッタンス)、高プロトン比、安定なビーム引き出しが要求される。イオン源の目標性能を表1に示す。BTAは当面デューティ10%のパルス運転を目標にしているが、イオン源に関しては将来の加速器大電流化にも対応できるように、CW運転を目標に設計している。

イオン源の構造を図1に示す。バケットソースと呼ばれるこのタイプのイオン源は、原研において核融合用のNBI加熱装置として研究開発が進められており、BTA用のイオン源にはこの分野で培われたノウハウが活かされている¹⁾。プラズマ生成室は、内径

表1 BTA用イオン源の目標性能

ビーム種	: 陽子
ビームエネルギー	: 100 kV
ビーム電流	: 120 mA
デューティファクター	: CW
規格化エミッタンス	: 0.5π mm.mrad (100%)
プロトン比	: 90% 以上
不純物量	: 1% 以下

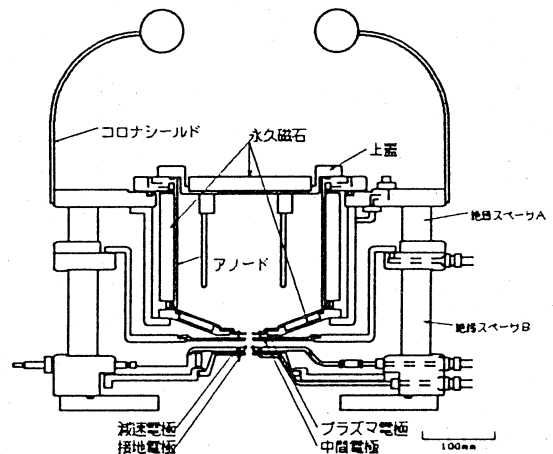


図1 BTA用イオン源の構造図

*Sumitomo Heavy Industries, LTD.

**Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

***Toshiba Corporation

200mmφ、深さ170mmと従来の加速器用のイオン源に比べ大容積である。さらに生成室の外壁全体にサマリウム・コバルト永久磁石を並べて、生成室内にカスプ磁場を発生させている。このカスプ磁場は生成室壁付近で非常に強いので、プラズマは壁ロスが少なく生成室内に長時間に閉じ込められる。その間にプラズマ中の水素分子イオン (H_2^+ 、 H_3^+) は水素原子イオン H_1^+ に解離し、その結果高プロトン比のビームが得られる。ビーム引き出し部は、4枚の電極で構成される。プラズマ電極と逆流電子抑制用の減速電極間に中間電極を置いて2段加速を行い、静電レンズ作用によってビームを収束させる。

BTA用のイオン源は既に製作を終え、1992年よりビーム試験を実施している²⁾。ここでは、イオン源単体のビーム試験結果について報告する。

2. 実験結果

ビーム試験では、プロファイルおよびエミッタンス、プロトン比、不純物量を測定した。なお、空間電荷発散力を中和するために真空容器の真空度を 10^{-4} Torr程度に保った。

ビームプロファイル測定には、マルチチャンネルカロリメータを用いた。この測定器は、熱電対を埋め込んだ多数の銅ブロックを銅板上に十字状に並べた構造をもち、ビーム照射時のブロック温度上昇分布からビームのプロファイルを測定する。図2に、100kV、140mAビームのプロファイルを示す。図中の実線は実験データをガウス分布で関数近似した結果であり、この場合のビーム発散角 $\omega_{1/e}$ は8.5mradと計算される。イオン源のパービアン特性を図3に示す。最適電流値とは各電圧でビーム発散角が最小になる電流値を指す。なお図3において破線で結んだデータは、本イオン源でヘリウムイオンビームを引き出した時の結果である。水素イオンビームの場合、Langmuir-Childの3/2乗則に従わないのは、電流の増加と共にプロトン比が高くなりビームの等価質量が減少するためである。測定の結果、加速電圧100kVの最適加速電流値は140mAとなり、BTA用イオン源の目標性能以上の電流値が得られたことになる。

ビームエミッタンス測定に用いたエミッタンススキャナーは、前方スリットとその下流300mmに置かれたファラデーカップを備えた後方スリット16チャンネルで構成される。前述したように、試験中はビームの空間電荷発散力を中和しているため、ビームのエミッタンスの大きさは保存される。よってイオン源出口のエミッタンスの大きさは、スキャナー

で測定した値に等しい。エミッタンス測定結果の一例を図4に示す。図4は加速電圧60kVにおいて、ビーム発散角が最小になる条件で測定した(加速電流52mA)。このとき求められた規格化エミッタンスは 0.54π mm.mrad(90%)である。また、ビームはイオン源出口から直線で真空中を進むと仮定すると、測定したエミッタンス図をイオン源出口方向に射影すれば出口でのエミッタンス形状を予測することが出来る。実際に図4の図形を射影すると、イオン源出口ではビームは収束方向を向いていることが分った。現在、加速電圧100kV付近でエミッタンス測定を実施中である。

ビーム計測モニタ Ver 1.0

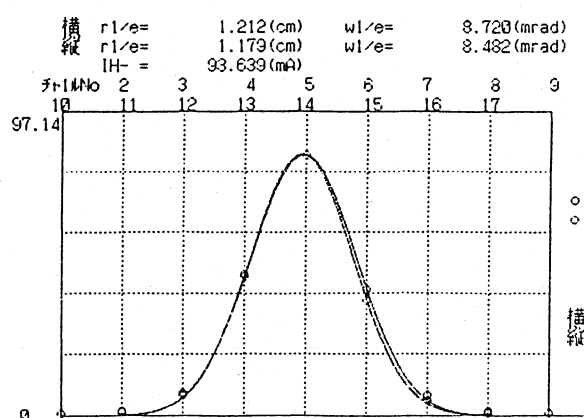


図2 100kV、140mAビームのプロファイル

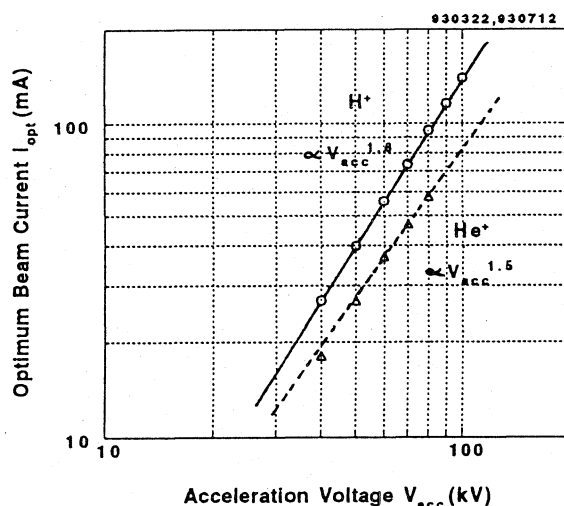


図3 イオン源のパービアン特性

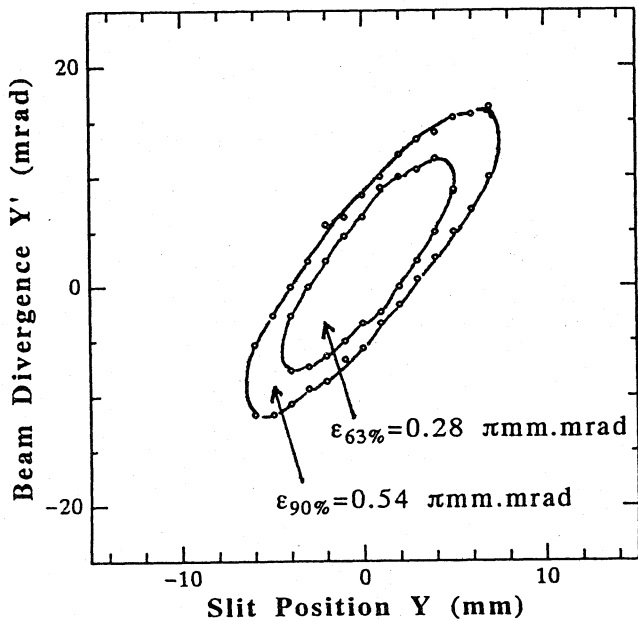


図4 電圧60kV、電流52mAビームのエミッタンス

プロトン比測定には、分光法を用いた。イオン源から引き出された水素ビームは、真空容器内の水素ガスと衝突し励起、発光する。このとき発する光の大部分はバルマー- α 光である。波長 λ_0 の光を、ビーム進行方向に対して角度 θ から眺めるとき、速度 v をもった粒子が放出する光の波長 λ は、以下の式で表される。

$$\lambda = \gamma \cdot (1 - \beta \cos \theta) \lambda_0$$

$$\beta = v/c, \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

ここで、 c は光速を示す。ビーム中のイオンの種類によって v が異なるので、ドップラーシフト光を分光し、得られたスペクトルの面積を水素原子の励起、発光断面積で規格化すれば、イオン組成比が求まる³⁾。この測定方法は、測定器がビームと非接触であるため、大電流ビームに対して、特に有用である。図5に分光法で測定したイオン組成比の加速電流依存性を示す。加速電流の増加とともにプロトン比も増大し、120mAで85%に達する。一方、ビーム中の不純物はイオン源のエイジングを行えばビーム全体の1%程度まで減少することを確認した。

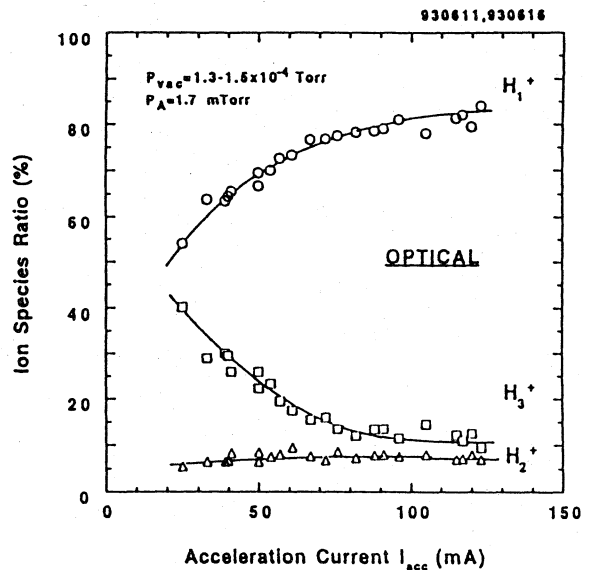


図5 分光法で測定したイオン組成比の電流依存性

3. まとめ

ビーム試験の結果、BTA用のイオン源実用化の目処が得られた。今回のビーム試験では、プラズマ生成はタングステンフィラメントを用いたアーク放電にて行った。使用したフィラメントの寿命は、通電時間で約200時間であり、この結果は、イオン源の試験段階では問題にならない。しかしイオン源を実用化するに当たっては、フィラメントの寿命が加速器全体のシステムの運転時間を制限する恐れがある。そのため原研では、フィラメントを用いずにECRまたはRFによるプラズマ生成実験を実施している⁴⁾。

本イオン源は、1993年末にRFQと接続して2MeVのビーム加速試験を行う予定である。

参考文献

- 1) Y.Okumura and K.Watanabe; Japan Atomic Energy Research Institute Report JAERI-M 92-024 (1992)
- 2) 小栗、他; Japan Atomic Energy Research Institute Report, JAERI-M 92-200 (1992)
- 3) 奥村、他; Japan Atomic Energy Research Institute Report, JAERI-M 9653 (1981)
- 4) H.Tanaka, et al. ; Proc. 14th Symp. on Ion Source and Ion-Assisted Technology, Tokyo, p35-38 (1991)
- 6) 鈴木、他; Japan Atomic Energy Research Institute Report, JAERI-M 92-156 (1992)