

# プラズマ利用陽子加速器用イオン源の製作

桑原 正道<sup>1,A)</sup>、伊藤 弘昭<sup>A)</sup>、今井 将史<sup>B)</sup>、湯上 登<sup>A)</sup>、西田 靖<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> 宇都宮大学

〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2

<sup>B)</sup> 株式会社 東芝 (TOSHIBA CORPORATION)

〒212-0013 神奈川県川崎市幸区堀川町 72 番地

## 概要

本研究では小型陽子加速器の研究を行っており、現在加速実験に必要な陽子源の製作と前段加速器の設計を行っている。陽子源からはエネルギー30 keV、電流密度  $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  のビームを得ることが出来た。

## 1. はじめに

プラズマとレーザーを用いた新方式の荷電粒子加速器の研究が盛んに行われている。プラズマを利用すると加速勾配を数千倍大きくできるため、高エネルギー加速器を小型化できる。

本研究では、電子加速のみではなく陽子やイオン等の加速にも適用できる  $V_p \times B$  型加速方式とレーザー励起航跡場の横電場を利用した小型陽子加速器の研究を行う<sup>[1][2]</sup>。今後の研究を行うにあたり 1 MeV 程度の陽子ビームが必要となるので、前段加速器を含めた陽子源の開発を行っている。陽子加速器の構想図を図1に示す。

本研究ではイオン源としては PIG 放電によって生成された水素プラズマを利用した陽子源の製作を行い<sup>[3]</sup>その性能について、また前段加速器としては電力効率に優れている IH 型線形陽子加速器を採用し、その設計について報告する。

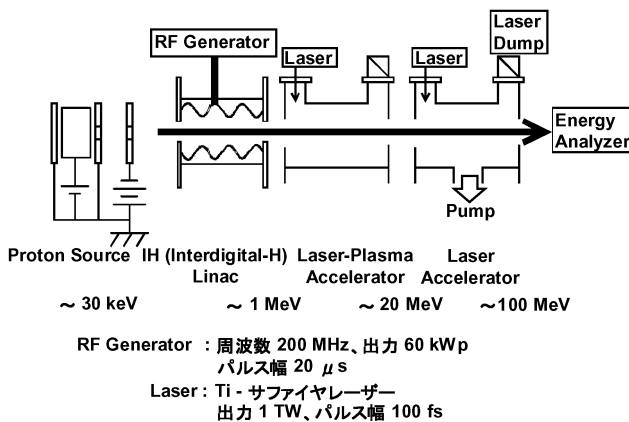


図1 : 陽子加速器構想図

## 2. イオン源

### 2.1 PIG 型イオン源

今回製作したイオン源は、冷陰極軸方向引き出し型 PIG(Penning 又は Phillips Ionization Gauge)イオン源である。図2に PIG 型イオン源の原理図を示す。PIG 放電は、円筒状の陽極の両端に陰極を配置し、軸方向に十分強い磁場を加えた構造を持つ。この構造において、陰極から出た電子は磁場により半径方向を、両端の陰極により軸方向を閉じこめられ、高密度のプラズマを生成できる。この方式を用いる利点としては、プラズマ生成が高効率であり、構造が単純であることが挙げられる。

イオン源の製作に当たり、前段加速器に入射するためのイオン( $\text{H}^+$ )のエネルギー及び電流の目標値を、それぞれ 30 keV、1 mA とした。この値は、後に述べる前段加速において、十分な加速勾配及びビーム量を得るためのものである。

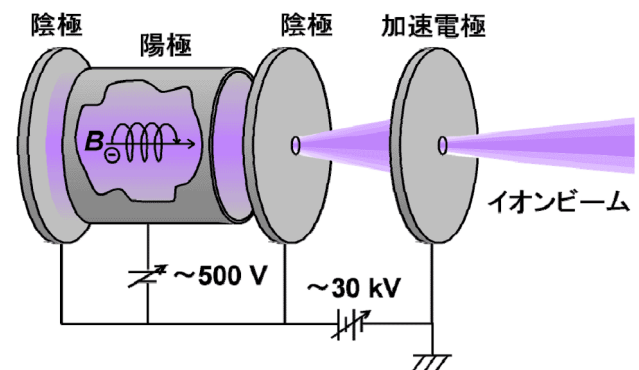


図2 : PIG 型イオン源原理図

### 2.2 実験装置

本研究で使用した実験装置の概略を図3に示す。円筒状陽極と陰極を置き、軸方向に磁場が加えられるようにコイルを配置した。イオンを引き出す側の

<sup>1</sup> E-mail: kuwa@plasma.ees.utsunomiya-u.ac.jp

陰極を境に、放電側(陰極より左側)と測定側(陰極より右側)で真空度の差(差動排気)をつけている。陰極の後に、イオンを引き出し加速するための加速電極を配置し、更に、ビームを集束させるための集束電極を配置した。陽極内に水素ガスを封入し、円筒型陽極とその両端の平板陰極間の直流放電により、水素プラズマを生成する。

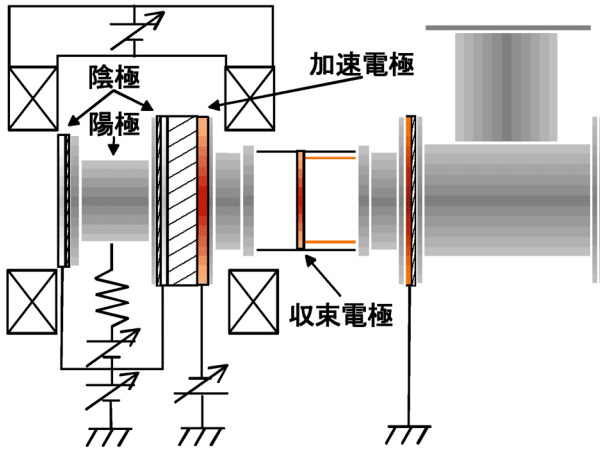


図 3 : 実験装置概略図

## 2.3 実験結果

図 4 にイオン電流の加速電圧依存性を示す。横軸は加速電圧  $V_a$ 、縦軸は測定された電流を集束電極の孔の面積で割ったイオン電流密度  $J_i$  を示す。実験は、放電電圧 500 V、磁場 200 Gauss、ガス圧 0.2 Pa で行った。加速電圧の増加に伴い、電流密度は増加した。図中の実線は Child-Langmuir の  $V^{3/2}$  則の依存性を示している。加速電圧  $V_a$  の低い部分では、値は大きくずれているが、これはプラズマ生成のため印可した放電電圧  $V_b$  によって初期加速されて放出されたビーム成分である。加速電圧の高い部分では、電流は、飽和する傾向を示す。これはイオンを供給する側のイオン飽和電流密度  $J_{pi}$  に制限があるためと考えられる。製作したイオン源は、加速電圧 10 kV 付近で  $d_s \approx d$  であるため  $V^{3/2}$  則に従うが、それ以外では  $d_s \neq d$  であるため依存性からはずれてしまうと考えられる。

図 5 に磁場偏向型エネルギーアナライザにより測定した陽子ビームの加速電圧依存性を示す。実験は、引き出し電圧 -5 kV、放電電圧 500 V、磁場 200 Gauss、ガス圧 0.4 Pa で行った。図のエラーバーは、エネルギースペクトルの半値幅をとったものである。図中の実線は、傾き 1 の直線であり、加速電圧に比例してイオンエネルギーが増加していることが示されている。

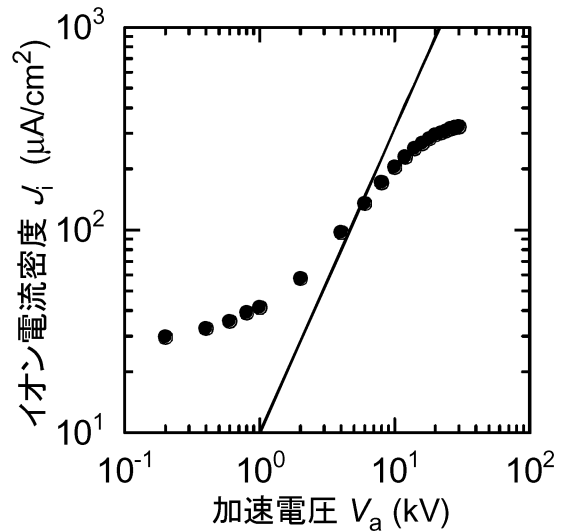


図 4 : イオン電流密度の加速電圧依存性

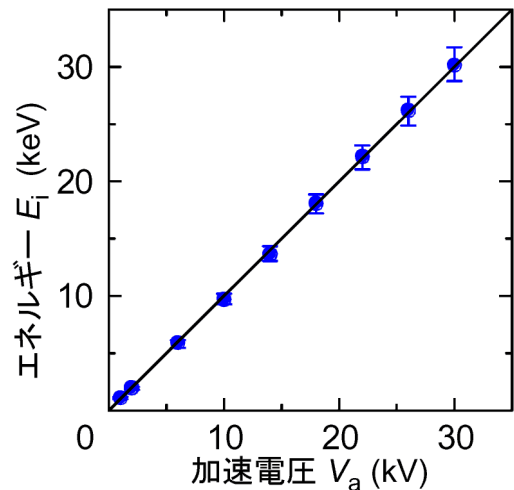


図 5 : イオンエネルギーの加速電圧依存性

## 3. 前段加速

### 3.1 IH 型線形加速器

イオン源で生成したエネルギー 30 keV のイオンビームをレーザー・プラズマ加速器に入射するため、前段加速器により 1 MeV まで加速を行う。前段加速器として IH(Interdigital-H)型線形加速器を採用した。IH 型構造を用いる利点として次のことが挙げられる

- ・ 低・中エネルギー領域の加速に適している
- ・ ショットインピーダンスが高い(アルバレ型、RFQ 型に比べ 5~20 倍)

### 3.2 加速原理

IH 型線形加速器の共振構造は基本的に  $TE_{111}$  モードで共振させた円筒空洞共振器である。加速原理図を図 6 に示す。 $TE_{111}$  モードによる加速軸方向の電場成分はないが、ドリフトチューブと呼ばれる電極を空洞共振器内に設置することにより励起させる。ドリフトチューブは金属支柱(ステム)に支えられ、上下向かい合う形で交互に配置されている。空洞共振器内にドリフトチューブを配置することで、 $TE_{111}$  モードで励起された加速軸方向磁場によりステム-容器側壁に沿って誘導電流が流れるため、ドリフトチューブ間に電位差が生じ電場が発生する。ドリフトチューブは加速ギャップを含めて単位セル( $=\beta \lambda$ )となるよう設置してあるため、RF(Radio Frequency)で共振させることにより  $\pi$ モード電場が発生する。これにより、減速位相のときにはドリフトチューブで電場から遮蔽し、加速位相のときにギャップ間電場により加速する。

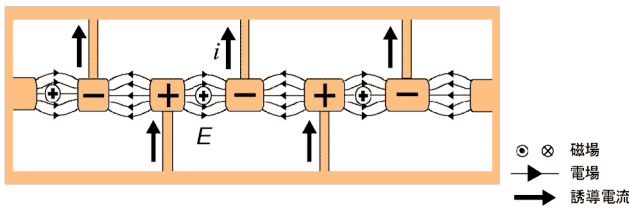


図 6 : IH 型加速機構原理図

### 3.3 加速機構の設計

今回使用する設計パラメータを表 1 に示す。加速器内部をビームが通過するとき、高周波電場により Transverse 方向に次式のような力が働くことが知られている。

$$F_r = \frac{\pi e V T \sin \phi}{2 E \beta \gamma^3 \lambda}$$

一般にビームは Longitudinal 方向の安定性が重視されるので、上式の  $\phi$  は負の位相になるため Transverse 方向には発散力がはたらく。このためドリフトチューブに 4 重極磁石を組み込んだり、最近では APF(Alternating Phase Focus)による収束法が試みられている<sup>[4][5]</sup>。本研究では設計段階においてコスト的、スキルの問題があるため、加速位相に Transverse 方向の収束・発散が起こらない位相  $0^\circ$  を選択した。

ドリフトチューブテーブルを作成し、加速シミュレーションを行ったところ、60 cm 程度の加速距離で約 1.5 MeV まで加速可能という結果が得られた。Longitudinal 方向のアクセプタンスは  $-45^\circ \sim 5^\circ$  の  $50^\circ$  となり、そのときの Transverse アクセプタンスは約  $18\pi$  mm mrad であった。規格化エミッタンスに換算すると  $0.15\pi$  mm mrad となる。イオン源のエミッタンス測定はまだ行っていないが、イオン温度

から計算した規格化エミッタンスは  $0.3\pi$  mm mrad であったため、この点に関しては今後調整が必要である。調整法としてはセル数やドリフトチューブの内径の調節が挙げられ、IH 入射前にバンチャーやレンズを用いて十分に収束をかけてから入射する方法を検討している。

表 1 : 設計パラメータ

Charge-to-mass ratio (q/A)	$H^+$ , 1
Input Energy (keV/u)	30
Output Energy (MeV/u)	1
RF Frequency (MHz)	200
RF Power (kW <sub>p</sub> )	60
Synchronous Phase	$0^\circ$
Number of Cell	27

## 4. まとめ

### 4.1 イオン源

PIG 放電を用いたイオン源の製作を行い、イオン電流とエネルギーを測定した。その結果、加速電圧の増加分がエネルギーの増加になることが確認でき、最大エネルギー 30 keV、イオン電流密度  $300 \mu A/cm^2$  の陽子ビームを得ることができた。イオンエネルギーに関しては目標値を達成できたが、イオン電流がまだ十分ではないため、今後磁場によりプラズマの閉じこめを強化する予定である。

### 4.2 前段加速器

レーザー・プラズマ陽子加速器の前段加速器である IH 型線形加速器の設計を行った。アクセプタンスに関して今後調整の必要はあるものの、70 cm 程度の加速距離があればエネルギー 30 keV の陽子を十分 1 MeV まで加速可能であることがわかった。現在は加速空洞と加速機構間の静電容量調整を行いつつ、加速器全体の設計を行っている。

## 参考文献

- [1] H. Ito, M. Bakhtiari, M. Imai, N. Yugami and Y. Nishida, Proc. of SPIE, **3886**, 533 (1999).
- [2] M. Bakhtiari, H. Ito, M. Imai, N. Yugami and Y. Nishida, Jpn. J. Appl. Phys. **39** pp1097-L1100(2000).
- [3] 今井将史 他 : 日本物理学会, 28aSM-4 (2001).
- [4] T. Hattori, S. Matsui, N. Hayashizaki, T. Yoshida, T. Hata, Y. Takahashi, K. Kashiwagi, S. Okada, K. Yamamoto, T. Sugita, M. Okamura, H. Tomizawa, S. Yamada, D. Dudu, E. Osvath, Proc.25<sup>nd</sup> Linear Accelerator Meeting, **25** 294-296 (2000).
- [5] T. Hata, T. Hattori, K. Yamamoto, S. Matsui and E. Osvath, Proc.25<sup>nd</sup> Linear Accelerator Meeting, **25** 297-299 (2000).