

Development of Small ECR Ion Source with Permanent Magnets

Masahiro Ichikawa^{1,A)}, Yoshihisa Iwashita^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Hiroshi Fujisawa^{A)}, Masako Yamada^{A)}
 ICR, Kyoto University
 Gokasho, Uji, Kyoto, 611-0011

Abstract

Neutrons are very interested as new probe for inspection inner structure, because of those characteristics that they can interact with light materials more strongly than electrons or photons. But there are few neutron facilities in Japan. Therefore we aim to develop a linear accelerator base small neutron source using ${}^7\text{Li}(p,n)$ reaction.

At present, we are working on a small H^+ ion source as the first step of development of a small neutron source. We have selected a type of ECR ion source with permanent magnets as a small and high intensity ion source, because ECR ion source can provide high H^+ ratio due to their high plasma temperature. Using permanent magnets makes the ion source small and running cost low. Because there is no hot cathode, a longer MTBF is also expected.

In designing our ECR ion source, we performed extensive computer simulation studies to optimize the extraction electrode system, magnet arrangement and the plasma chamber geometry.

A pulse gas valve made of a piezoelectric element was built-in in the ion source plasma chamber to reduce the loading of evacuation systems.

We have obtained in our test stand a beam current of 1.53mA at RF frequency of 6.40GHz and 25W RF power.

永久磁石を用いた小型ECRイオン源の開発

1. はじめに

今日、物質構造を探る新たなプローブとして中性子は大いに注目されている。また、BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)のような医療分野への応用も進められている。しかし、中性子実験可能な施設の数に限られており、新しい発見や中性子科学の裾野の拡張のためには多くの実験をこなさなければならないことを考えると、大規模施設のみならず身近に使いやすい小型中性子源もあることが望ましい。そこで、我々は ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応を用いた陽子線形加速器ベースの小型中性子源の開発を目指し、その第一歩として1次 H^+ ビームを得るためのイオン源の開発から着手している。

イオン源の種類として、長寿命であることや小型であることを目指すため、また運用コストが安いということなどから永久磁石を用いたECRイオン源を採用した。また、常にガスを流し続けることによる真空系への負担を軽減するために、圧電素子を用いたパルスガス弁を組み込んでいる^[1]。

2. プラズマチャンバーの再設計

これまでにイオン源の試作一号機を製作し、全カレント測定やイオン種ごとのカレント比の測定を行い、全カレントとしては引出し電圧10kV、ピークRFパワー25Wで1.13mAという値が得られている^[2]。これまでの結果を踏まえ、カレントと H^+ 比の向上を目指し、プラズマによりよくRFパワーが吸収される

ようプラズマチャンバーを再設計した。

プラズマによりエネルギーを吸収させるにはチャンバーで反射されるエネルギーが小さくなるようチャンバーの共振周波数を使用するRFの周波数に合わせれば良い。そこで、その共振周波数が約6GHz程度になるようにシミュレーションソフトHFSS^[3]を用いて設計を行った。このチャンバーはおおよそ $\phi 40\text{mm} \times 27\text{mm}$ という非常に小型のものである。

プラズマ中の電子にエネルギーを効率よく加えるために電場がチャンバーの中心軸に垂直に変動する TE_{111} モードを使用する。その TE_{111} モードの共振周波数を約6GHzにするためにチャンバー内にリッジ付きのリングを挿入するようにした(図1、2)。なお、このリングを挿入した時の磁場の変動は図3のようになる。

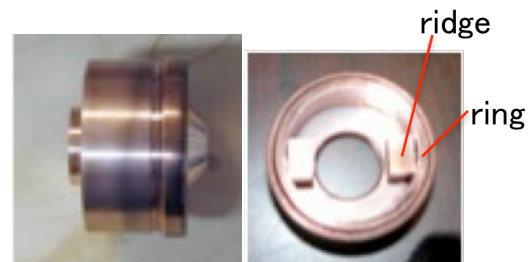


図1: 改良後プラズマチャンバー写真

¹ E-mail: ichikawa@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

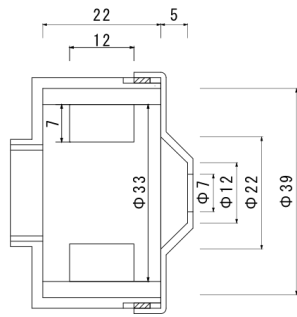


図 2: チェンバー断面図

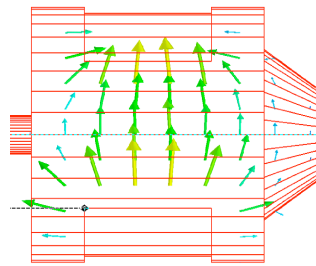


図 3: チェンバー内電場シミュレーション結果

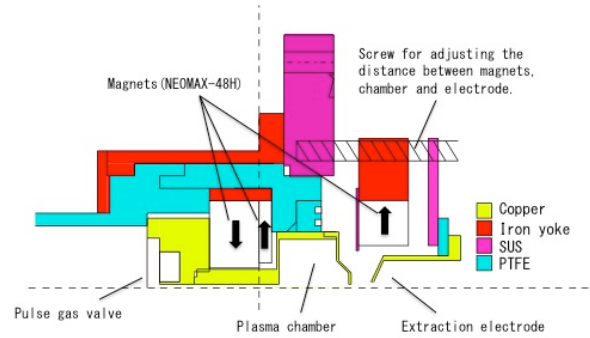


図 4: イオン源二号機断面

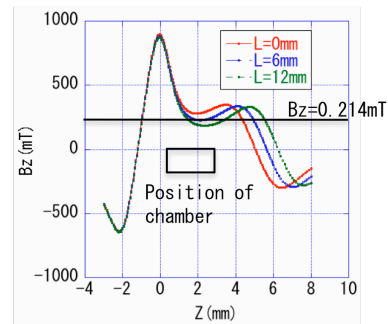


図 5: 軸方向磁場分布(Lは磁石間距離を表す).

3. イオン源二号機

図 4 にイオン源二号機の断面を示す。プラズマチェンバー部は高圧がかかっており、接地されている鉄ヨークとの間に絶縁体を挟むことで絶縁している。サイズは約 $\phi 200 \times 250 \text{mm}$ である。

4.1 一号機からの改良点

イオン源内の真空度を向上させるために下流側磁石のまわりに空間を広く取り、コンダクタンスを向上させている。また、引き出し電極周りの放電を防ぐために電極周りの空間を広く取っている。一号機では下流側磁石と引き出し電極が一緒に動いてしまい、磁石間距離を変えるとそれに伴って電極間距離も変わってしまった。そこで、下流側磁石と引き出し電極を独立して動かせるようにし、磁石間距離と電極間距離を個別に調整できるようにした。

4.2 磁石配置

ECRイオン源においてRF周波数が f のときに最適なECR領域での磁場強度は式(1)で求められる。

$$B_{ecr} [\text{T}] = \frac{m_e \omega}{e} = \frac{2\pi m_e}{e} f \approx \frac{f [\text{GHz}]}{28} \quad (1)$$

ここで、RF周波数が6GHzのときは約214mTであるがチェンバーの出入り口付近で電子を閉じ込めるためのミラー磁場を形成しなければならない。そのような磁場をつくる磁石配置をPANDIRA^[4]を用いて求めた(図5)。なお、磁場強度の値は磁石間距離を変えることで調整できる。

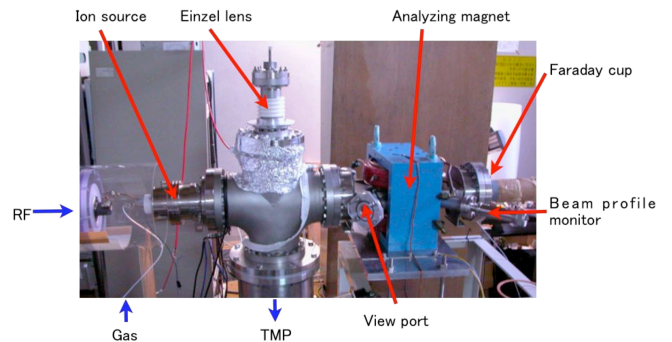
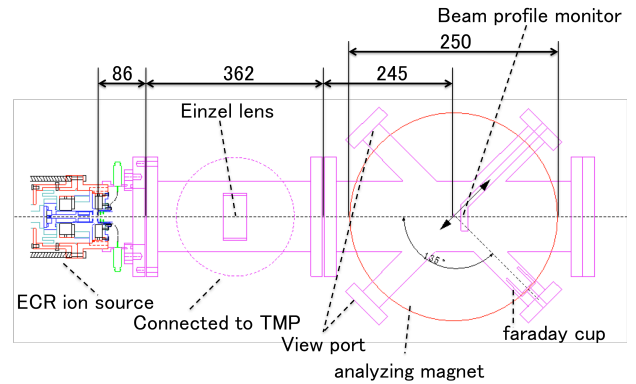


図 6: 上図;テストベンチの水平方向断面 (アナライジングマグネットの口径は 60mm). 下図; テストベンチの写真

4.3 カレント測定

イオン源二号機を用いたカレント測定を行うにあたり、イオン源一号機で使用したのと同様のテストベンチを使用した。そのテストベンチを図6に示す。一号機での全カレント測定の際はアインツェルレンズの位置にファラデーカップを挿入して全カレントを測定したが、質量分析をする際にはファラデーカップとアインツェルレンズを交換しなければならず手間がかかった。そこで、二号機では図6のテストベンチに大きく手を加えることなくイオン種ごとの測定と全カレントの測定が切り替えられるようにアナライザーマグネット部に挿入されているビームプロファイルモニターをファラデーカップとして用いることにした。すなわち、モニターとフィードスルーの接続部を絶縁体にし、モニターに導線を接続することでモニターに当たった電流値を読むことができるようにした。そこで、アインツェルレンズを用いてモニター上にビームを集束させ、その時の測定された電流値を全カレントとする。

固定パラメータを表1のように設定し、引出し電圧とアインツェルレンズ電圧を調整したところ、引出し電圧10kV、レンズ電圧4.74kVのときと引出し電圧12.5kV、レンズ電圧3.95kVのときに関して図8のような結果が得られた。それぞれについての平均全カレントは引き出し電圧10kVで1.23mA、12.5kVで1.53mAである。

5. まとめと今後の展望

これまでに小型ECRイオン源の試作一号機、二号機の製作を終えており、二号機において引き出し電圧12.5kV、RF周波数6.40GHz、RFパワー約40Wで1.53mAのカレントが得られている。また、引出し電圧が上がるに従いカレントが増えており、より高い電圧で引き出せば最大電流値の増加が見込める。しかし、これまでの測定において電圧が約13kVを越えるとイオン源中で放電が起きてしまい、高圧がかかれていない。その放電の原因としては高圧部と鉄ヨークの間の絶縁体の表面を流れる延面放電が疑われるが絶縁体の延面傾斜によって延面放電が軽減できるという報告^[5]があるのでそれを試してみるつもりである。

また、二号機についてアナライザーマグネットを用いた測定も行いイオン種ごとの比率がどうかを確かめる。

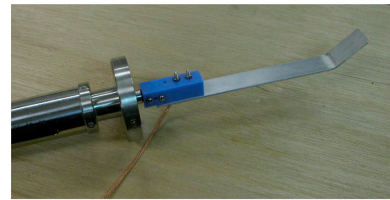


図7: ビームプロファイルモニターに導線を繋ぎ、当たった粒子ビームカレントを読み出せるようにした

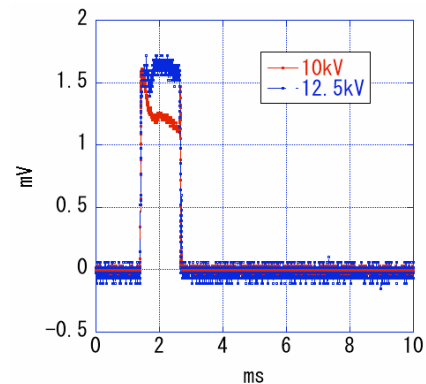


図8: 1パルスあたりのカレント

表1: 全カレント測定時の固定パラメータ

RF frequency	6.40GHz
Peak RF power	40W
Repetition rate	25Hz
Duty factor of the driving signal	50%
Pressure of gas	400kPa

参考文献

- [1] M. Ichikawa, et al., "DEVELOPMENT OF PIEZO-ELECTRIC PULSE GAS VALVE" 第4回日本加速器学会年会・第32回リニアック技術研究会プロシーディングス, 和光, Aug. 1-3, 2007
- [2] M. Ichikawa, "Development of very small ECR Ion Source with pulse Gas Valve", Proceedings of LINAC'08, August 2008, <http://www.pasj.jp/>
- [3] Ansoft, <http://www.ansoft.com/products/hf/hfss/>.
- [4] Reference Manual for the POISSON/SUPERFISH Group of codes, No. LA-UR-8712.
- [5] 川田則幸・鶴崎一也・原田朋広・小林信一, "真空中における延面放電耐力向上に関する研究", 三菱重工技報 Vol. 33 No. 2, March 1996