

# 永久磁石を用いた高速スキャン可能なイオン種分析システムの開発

## DEVELOPMENT OF HIGH SPEED ION SPECIES ANALYSIS SYSTEM WITH PERMANENT MAGNET

竹内佑甫<sup>#, A)</sup>, 岩下芳久<sup>A)</sup>, 頓宮拓<sup>A)</sup>, 片山領<sup>A)</sup>, 宮脇瑛介<sup>A)</sup>, 山崎祐希<sup>A)</sup>, 不破康裕<sup>B)</sup>  
Yusuke Takeuchi<sup>#, A)</sup>, Yoshihisa Iwashita<sup>A)</sup>, Hiromu Tongu<sup>A)</sup>, Ryo Katayama<sup>A)</sup>, Eisuke Miyawaki<sup>A)</sup>,  
Yuki Yamazaki<sup>A)</sup>, Yasuhiro Fuwa<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Chemical Research, Kyoto University

<sup>B)</sup> Kyoto University Research Reactor Institute

### Abstract

As the first step in developing a small neutron source based on proton linear accelerator, a compact ECR H<sup>+</sup> ion source for extracting proton beam has been under development. Molecular ions H<sub>2</sub><sup>+</sup> and H<sub>3</sub><sup>+</sup> are also generated at the same time. Therefore, it is necessary to analyze the ratios of the ion species in the extracted beam. So far a momentum analyzer using magnetic field or Wien filter has been used, but measurements for each ion specie take time. In order to solve this problem, a high speed scan type ion species analysis system using permanent magnets is under development. This paper reports the progress of development the system.

### 1. はじめに

近年、中性子利用についてのニーズが高まっているが、中性子実験可能な施設は限られており、そのためマシンの利用時間に大きな制約がかかる[1]。そこで、より中性子実験に触れやすくし、実験の効率を上げるために <sup>7</sup>Li(p,n)等の低エネルギー核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、小型かつ大強度の H<sup>+</sup>イオン源の開発を行っている。イオン源の種類としては小型、大強度、メンテナンスフリー、分子状イオンに対して H<sup>+</sup>の生成比率が大きいこと等を達成するために永久磁石を用いた ECR (Electron Cyclotron Resonance) イオン源を採用した[2]。イオン源のテストベンチ全体の写真を Figure 1 に示す。

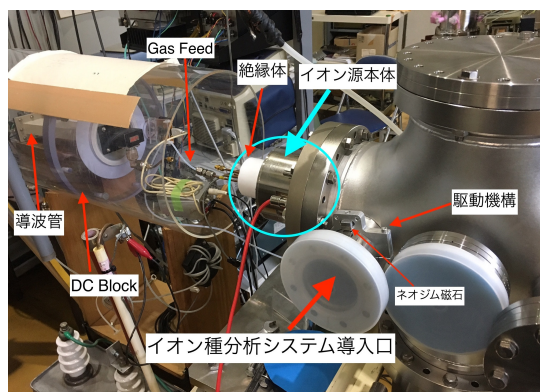


Figure 1: Overview of the test bench.

これまで我々はイオン源から引き出されたビームの解析を行うために、磁場を使った運動量分析、または Wien Filter を用いていたが掃引による各イオン種毎の計測が

<sup>#</sup> takeuchi.yusuke.64z@st.kyoto-u.ac.jp

必要であった。今回、この問題を改善する永久磁石を用いたイオン種分析システムを設計した。

### 2. イオン種分析システムの設計

#### 2.1 本イオン種分析システムの概要

一般に水素プラズマからイオンを取り出す H<sup>+</sup>イオン源の場合プラズマ中には、分子状のイオン H<sub>2</sub><sup>+</sup>や H<sub>3</sub><sup>+</sup>も同時に生成される。そのため引き出されるビームの構成イオン種の比率を分析する必要がある。

本イオン種分析システムでは、イオン源から引き出されたビームを分析磁石で発生させた磁場中を通過させる。ビームに含まれるイオンそれぞれの質量電荷比の違いから、磁場を通過する際、各イオンが描く軌道が異なる。そのため複数の電極を並べて設置しこれらを同時に検出すると、それぞれの電極に荷電粒子が入射し、荷電粒子の数に応じた電流が流れる。電極に流れる電流は電極下方に設置された 16ch 高速 スキャナーで集約され、一つの信号としてオシロスコープに表示される。Figure 2,3 に本イオン種分析システムの全体図と概略図を示す。

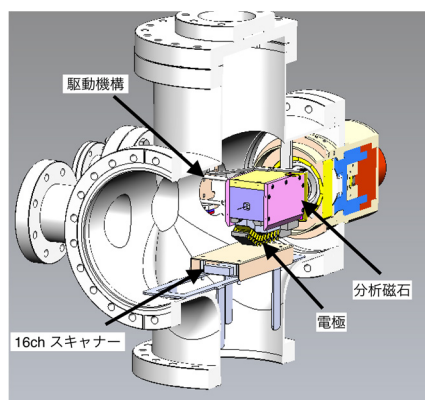


Figure 2: Entire structure of this system.

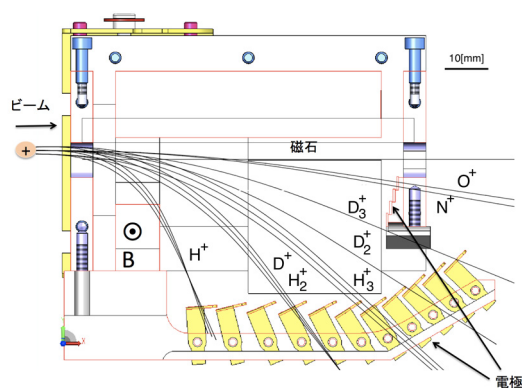


Figure 3: Schematic drawing of this system.

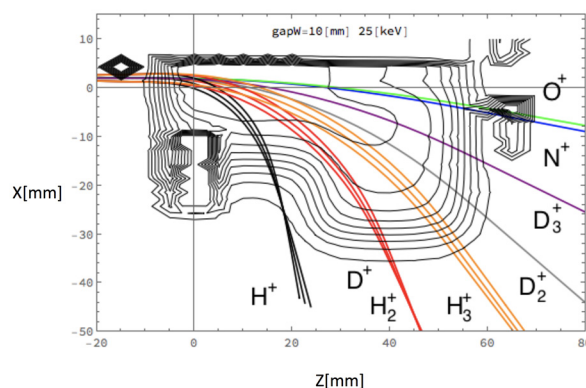


Figure 5: Simulation results of particle trajectories.

## 2.2 磁石部分の設計

イオン源のテストベンチにはあまり大きなスペースがないので、極力小型化を図る必要があった。このため、磁石部分には、永久磁石の中でも磁束密度が高いネオジム磁石を採用した。ネオジム磁石を採用することで、磁石を設置できるスペースの空間的制限を満たすことができる。リターンヨーク部分の鉄が飽和してしまわないように発生する磁力線を 2 次元の計算コード PANDIRA[3]を用いて計算し鉄の幅を設計した。実際には入手と取り扱いの問題から、ヨーク材は耐食性に優れた汎用の磁性ステンレス鋼材 SUS430 を採用した。Figure 4 に製作した磁石部分の写真を示す。また各電極から得られる電流値がどのイオン種に相当するかを知るため、3 次元の磁場計算コード RADIA[4]で磁場分布の計算をし、その計算結果を用いて Mathematica[5]で各種イオンの軌道のシミュレーションを行った。引き出し電圧 25[kV]におけるシミュレーション結果を Figure 5 に示す。

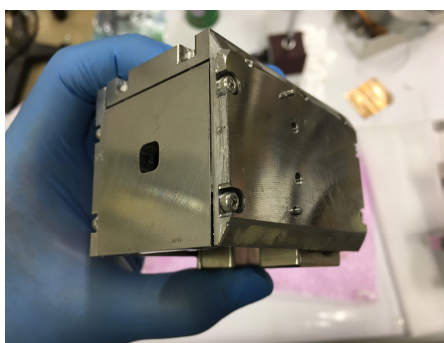


Figure 4: Analyzer magnet.

## 2.3 イオン収集電極

Mathematica による粒子軌道のシミュレーションを参考に磁石部分下方にメインの電極を 11 枚、後方にサブの電極を 4 枚、合計 15 枚の電極を取り付けた(Figure 2 参照)。メインの電極では  $H^+$  から  $D_3^+$  までのイオンを検出、サブの電極ではそれ以外の  $N^+$  や  $O^+$  のような比較的重いイオンを検出することを目的としている。電極の形状及び 16ch 高速スキャナーの写真 Figure 6,7,8 に示す。この 16ch 高速スキャナーはクロック 10MHz で 16ch のアナログ信号を切り替えてスキャンし、出力する。入出力の信号線は、5V 電源、スキャン信号出力、クロックジェネレーターの 1/16 分周出力信号のエッジでスキャン開始 ch が判るようになっており、取り扱いが容易である。

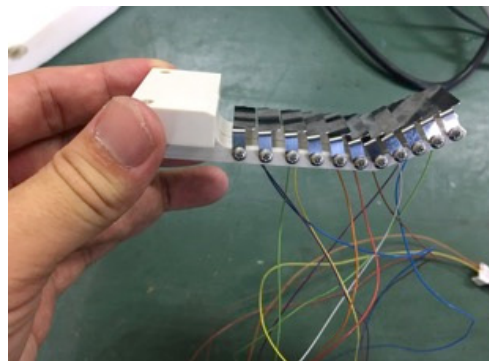


Figure 6: The main part of electrode.

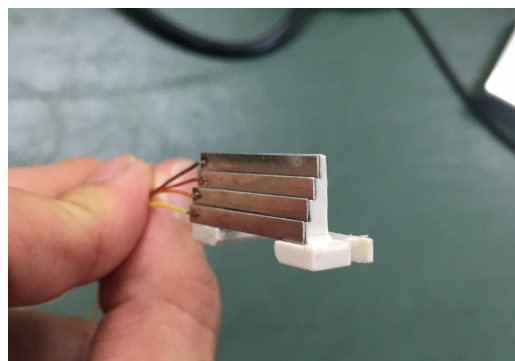


Figure 7: The sub part of electrode.

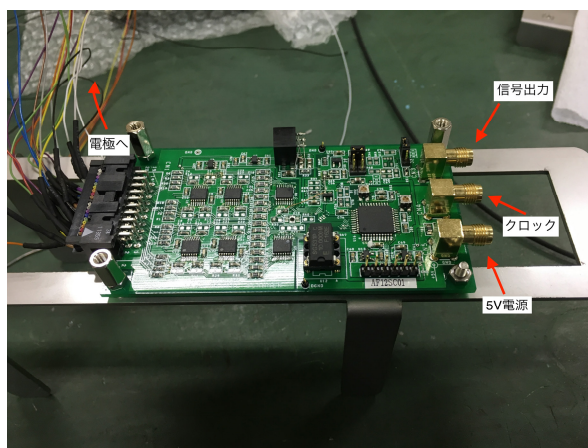


Figure 8: 16ch signal scanner.

## 2.4 駆動機構

磁石部分と電極はイオン種の比を測定する時以外は横側に退避する仕組みとなっている。駆動機構には、ネオジウム磁石を用いた非接触型の伝達機構を採用した。また、磁石部分の側面に ZnS を塗布したプレートが開閉する機構が備えてあり、磁石部分ではなく、プレート部分がビームの軌道上に来るように位置を調整することもできるようになっている。ZnS にイオンビームが照射すると黄緑色の蛍光が発せられる。これによりビームのおおよその位置が確認できる。駆動機構と ZnS プレートを含む全体図を Figure 9 に示す。

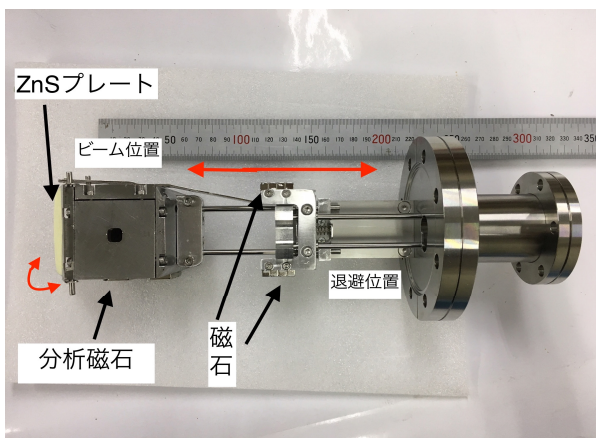


Figure 9: Drive mechanism and ZnS plate.

## 3. 磁場測定

実際に製作した分析磁石の磁場分布を測定し、粒子軌道をシミュレーションすることで電極から得られる電流がどのイオン種に相当するかをより正確に判断するために磁場測定を行なった。磁場測定はホールプローブを用いて行なった。磁石の構造上プローブを入れることができない箇所があったため、実際に測定した範囲は Figure 10 に示す範囲である。赤線で囲った範囲は磁石の下方からプローブを入れ XZ 平面に垂直な磁場を測定した。水色線で囲った範囲はビーム入射口からプローブ

ブを入れ測定した。ビーム入射口の中心を通る直線上の磁場分布の Radia によるシミュレーション結果と測定値との比較を Figure 11 に示す。計算値より 20%程度低い値が得られた。これについては、ヨーク部分の設計の際の PANDIRA を用いた計算では、標準的な鉄の B-H カーブを用いて鉄が飽和しないように設計したが、実際に使用した SUS430 では飽和してしまい、全体の磁場が弱くなってしまった可能性があると考えている。測定することができなかった範囲は、測定した範囲のデータからおおよその値を見積もった。得られた磁場分布を用いた引き出し電圧 25[kV]における粒子軌道のシミュレーション結果を Figure 12 に示す。H<sup>+</sup>の軌道については、軌道の大部分が実際に測定していない領域内にあり、参考にならない可能性が高いため破線で表している。シミュレーションの結果より、今回製作した分析磁石では H<sub>3</sub><sup>+</sup>より重いイオンが後方に集中してしまい判別できない可能性があることが予想される。

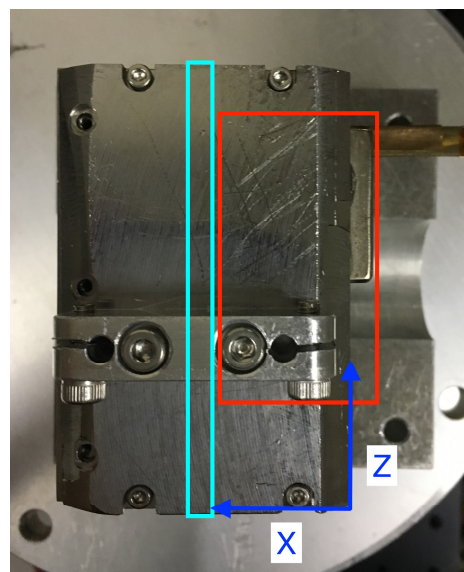


Figure 10: Magnetic field measurement.

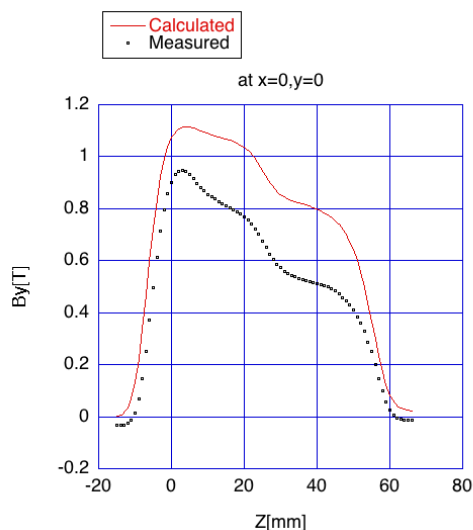


Figure 11: Magnetic field distribution.

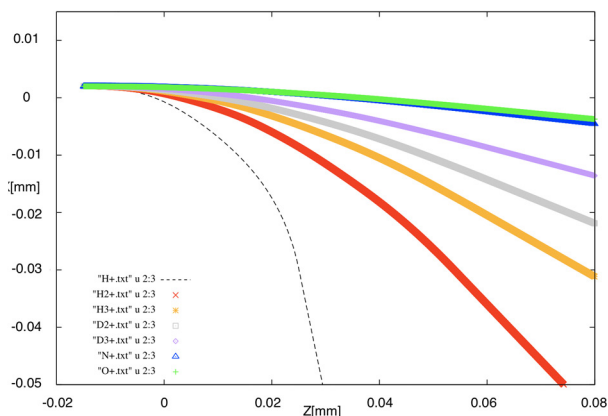


Figure 12: Simulation results of particle trajectories.

#### 4. まとめと今後の展望

京都大学化学研究所では小型永久磁石を用いた ECR イオン源の研究開発に取り組んでいる。現在、イオン源から引き出されたビームの解析を行うための分析磁

石の開発を行っている。本稿では、分析磁石の試作一号機の開発状況を報告した。今後は、実際に製作した分析磁石を用いて ECR イオン源で生成されるイオン種の比率を調べることを計画している。また、今回の結果より、ヨーク材に用いる鉄の種類や形状に改善の余地があると考えている。

#### 参考文献

- [1] J-PARC の利用方策の在り方に関する懇談会報告書について J-PARC の利用方策の在り方に関する懇談会報告書 (J-PARC 中性子利用施設の幅広い活用に向けて) 2. 我が国における中性子利用の現状—文部科学省; [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/20/07/08072508/002/002.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/07/08072508/002/002.htm)
- [2] Iwashita, Y.; Tongu, H.; Fuwa, Y.; Ichikawa, M., Compact permanent magnet H+ ECR ion source with pulse gas valve Rev. Sci. Instrum. 87-2, 02A718-1-02A718-3 (2016).
- [3] Poisson/Superfish Los Alamos National Laboratory Report No. LA-UR-96-1834.
- [4] P.Elleume *et al.*, “ COMPUTING 3D MAGNETIC FIELDS FROM INSERTION DEVICES”, Proceedings of PAC97, Vancouver, May, (1997) 3509-3511.
- [5] Wolfram Research, Inc., Mathematica, Version 11.1, Champaign, IL (2017).