

永久磁石を用いた小型 ECR H⁺ イオン源 COMPACT ECR H⁺ ION SOURCE WITH PERMANENT MAGNET

竹内 佑甫、岩下 芳久、頓宮 拓
Yusuke Takeuchi,*Yoshihisa Iwashita,Hiromu Tongu
Institute of Chemical Research, Kyoto University

Abstract

A compact ECR H⁺ ion source using a permanent magnet is under development. The ion source has gas injection system achieved by a fast piezoelectric gas valve that can reduce the gas load on the vacuum pumping system. This function is suitable when the ion source is close to RFQ. In the ECR H⁺ ion source, not only H⁺ but also molecular ions (H₂⁺ and H₃⁺) are generated at the same time. Since it will be used for a proton linear accelerator, it is desirable that the H⁺ ratio of the beam extracted from the ion source should be as high as possible. Therefore, it is necessary to optimize many parameters (magnetic field distribution, gas pressure, microwave frequency, etc.) so that the ratio of H⁺ increases in the beam extracted from the ion source. Momentum analyzers using a magnetic field or a Wien filter had been used so far, but a slow scanning measurement for the ion species was time-consuming and inefficient. In order to improve this problem, a quick scan type mass analysis system using permanent magnets was developed. Analysis of the beam extracted from the ion source was carried out using this system. In this paper, the details of the analysis results are described.

1. はじめに

ガス放電を利用するイオン源では、イオンビームだけでなく中性ガスも排出される。中性ガスの大部分は、低エネルギービーム輸送 (LEBT) 領域の真空排気システムによって排気され、ガスの一部は加速管内部に拡散する。パルスイオン源の場合でも一般にガス供給は定常で行われるので、イオンビームはパルス持続時間だけイオン源から抽出されるが、一方で、中性ガスはプラズマチャンバーから絶えず出て行く。大強度のイオン加速器では、空間電荷効果の悪影響を低減するために、LEBT の長さは可能な限り短いことが望ましい。しかしながら、LEBT が短いと、真空コンダクタンスが増え加速管内部への中性ガスの流入量が大きくなる。このため、加速管内の放電が起きやすくなり、安定した動作を妨げる可能性がある。このガス流入の低減には、体積の小さいプラズマチャンバーを用い、ガス供給をパルス化することが効果的である。そこで我々は、ガス供給をパルス化した真空排気系への負荷が少ない ECR イオン源の開発を進めている。本稿では、開発中の永久磁石を用いた小型 ECR H⁺ イオン源 [1] について報告する。

2. 小型 ECR H⁺ イオン源

陽子線形加速器ベースの小型中性子源への利用を想定しているため、イオン種としては H⁺ を選択、引き出しビーム中の高い H⁺ 比率を達成することを意図して、ECR 方式を採用している。また、プラズマチャンバーへのガス供給をパルス化するために、圧電素子を用いたガスバルブを開発し使用している。プラズマチャンバーは 6 GHz で共振するように設計されており、6 GHz での ECR 条件を満たす磁場強度

は約 2.2 kG である。磁場の発生には、永久磁石を用いることで小型化を図っている。また、ビーム軸上の磁場強度分布をフラットにし ECR 領域を広く取ることによってマイクロ波の吸収効率を上げることを意図して、後述するマルチミラー磁場を採用している。引き出し電極には 25 kV 印加することができ、サプレッサー電極と接地電極は、イオン源に対しての距離が調節可能となっている。開発中のイオン源の主なパラメータを Table 1 に、イオン源の構造を Fig. 1 に示す。ここでは、本イオン源の特徴である、圧電素子を用いたパルスガスバルブとマルチミラー磁場について述べる。

Table 1: Parameters of the Ion Source

Magnetic field	2.2 kG
RF frequency	6 GHz
RF power	200 W
Plasma chamber	Diameter : 31mm Length : 28 mm
Extraction voltage	25 kV

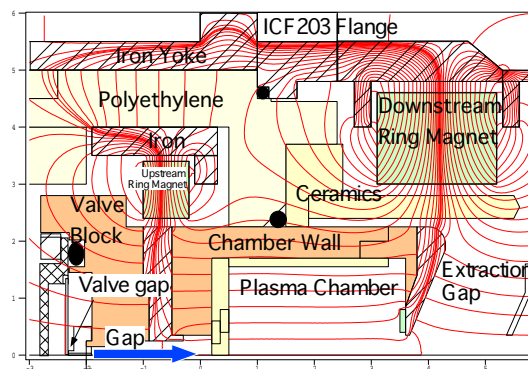


Figure 1: Schematic drawing of the ion source. Red lines indicate magnetic flux.

* takeuchi.yusuke.64z@st.kyoto-u.ac.jp

2.1 圧電素子を用いたパルスガスバルブ

我々は、市販の圧電素子（京セラ社製 KBS-27DA-5A）を用いたパルスガスバルブ [2] を開発し、イオン源のガス供給のパルス化に用いている。圧電素子に電圧が加えられていなければチャンパー内へのガスの入り口が圧電素子によって塞がれるためガスはチャンパー内に流れ込まない。しかし、圧電素子に電圧を加えると圧電素子に変形することで流路が開き、チャンパー内にガスが流入する。圧電素子にパルスの電圧を印加することで、ガス供給をパルス的に行うことができる。Fig. 2 に圧電素子を用いたパルスガスバルブの動作原理の模式図を示す。

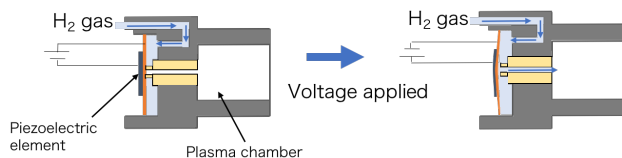


Figure 2: Operating principle of the pulse gas valve. A pulsed gas injection system with a piezoelectric gas valve that is installed very close to the chamber can reduce the gas load to a vacuum evacuation system. Hydrogen gas flows into the plasma chamber due to deformation of the piezoelectric element.

2.2 マルチミラー磁場

ビーム軸上の磁場強度分布をフラットにし ECR 領域を広く取ることによってマイクロ波の吸収効率を上げるために、本イオン源ではマルチミラー磁場を採用している [3]。直径 34 mm のディスク状のセラミックにそれぞれ直径 3 mm の磁石が埋め込まれたものを、チャンパーの上流と下流に装荷することでマルチミラー磁場を発生させている。Fig. 3 に磁石が埋め込まれたディスク状のセラミックの写真とそれをチャンパーに装荷した際の磁場分布を、Fig. 4 にビーム軸上の軸方向磁場強度の測定結果を示す。磁石の形状を調整することで磁場分布を改善する余地はあるが、磁場は軸上でフラットである。

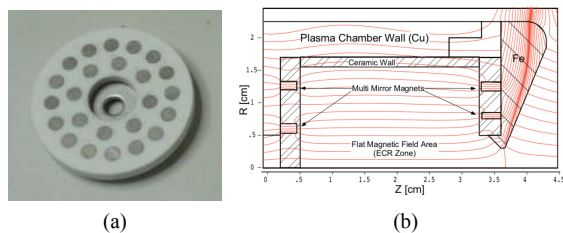


Figure 3: (a) downstream cylindrical magnet columns embedded in a ceramic disc with the diameter of 34 mm. The diameter of each magnet column is 3 mm. (b) schematic flux plot with multi-mirror field.

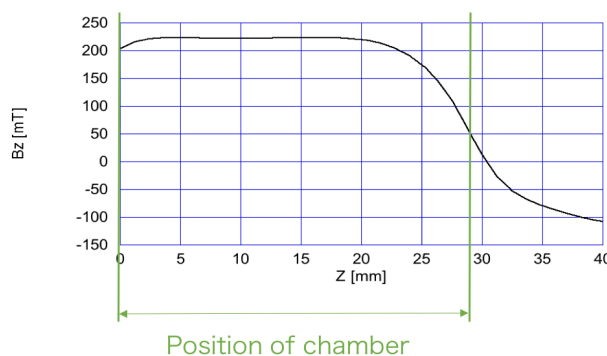


Figure 4: Axial magnetic field distribution.

3. イオン源テストベンチ

現在、ECR イオン源のビーム生成性能の評価のためにテストベンチを構築し、試験を行っている。6 GHz の RF 電力は、シグナルジェネレーターによって発生させたものを半導体高周波アンプで増幅することで最大 200 W まで供給することができる。増幅された RF 電力は、導波管の端部に取り付けられた同軸-導波管変換アダプタで導波管に入力され、導波管の間の DC blocker を介してイオン源のプラズマチャンパーへ供給される。水素ガスはガスクロマトグラフィー用の水素発生器で発生させている。発生したガスはガスバッファタンクに貯蔵され、パルスガスバルブへのガス供給圧力を調整することによってプラズマチャンパーへのガス流量を調整することができる。ガス流量は、マスフローメーターによって測定される。Figure 5 にイオン源テストベンチの写真を示す。

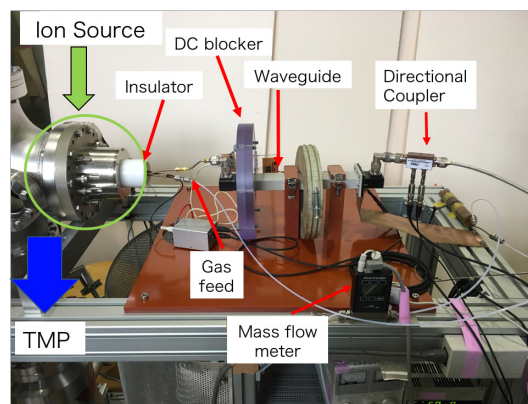


Figure 5: Photograph of the ion source testbench.

4. 価数分析試験

ECR H^+ イオン源では、 H^+ だけでなく、分子状イオンも同時に生成される。陽子線形加速器への利用を想定しているため、イオン源から引き出されるビームの H^+ 比率は可能な限り高いことが望まれる。このため、イオン源から引き出されるビームのイオン種の割合を分析しながら、 H^+ の割合が増加するように多くのパラメータ（磁場分布、ガス圧、マイク

口波入力など)を最適化する必要がある。今回、引き出しビーム中のイオン種の割合を知るために、イオン源直後に分析磁石と多数のコレクター電極が一体となった質量分析器 [4] を設置し、引き出しビームの質量分析を行った。この質量分析器の特徴は、引き出しビーム中の複数種のイオンを同時かつほぼリアルタイムに分析可能という点である。これにより磁場分布、ガス圧、マイクロ波入力など多数のパラメータが複雑に関わって決まる、ECR イオン源で生成されるビームの性質を調べる効率が格段に向上している。また、全て測定は繰り返し周波数 3 Hz、RF 周波数 6 GHz、引き出し電圧 25 kV で行った。

4.1 RF 周波数依存性

まずはじめに、引き出しビームの中のイオン種の割合の RF 周波数依存性について調べた。測定はガスバルブを 0–2000 μs の間オープンにし、RF は 2000–4000 μs の間入力、繰り返し周波数は 3 Hz、RF 周波数は 6 GHz、引き出し電圧 25 kV で行った。この時チャンバーに入力した RF 電力は 30 W、ガス流量は 0.03 sccm であった。この条件で、周波数を変えて複数回測定を行った。各イオン種の電流値の周波数依存性を Fig. 6 に示す。縦軸が RF を入力している間の平均電流、横軸は RF 周波数、線の色はイオン種を表している。今回の測定の範囲では、顕著な周波数依存性は見られなかったため、以降の試験では全て周波数 6 GHz を用いている。

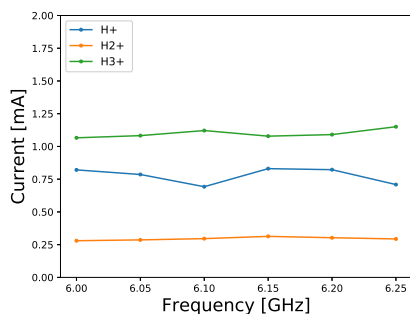


Figure 6: Frequency dependence of the components of the beam.

4.2 ガスバルブ、RF のタイミングによる影響

次に、ガスバルブをオープンにするタイミングと、RF を入力するタイミングを変えることで、引き出しビーム中のイオン種の割合にどのような影響が出るかを調べた。ガスバルブをオープンにするタイミングが 0–1000, 0–2000 μs の 2 通りに対して RF の入力タイミングを 0–2000, 1000–3000, 2000–4000, 3000–5000, 4000–6000, 5000–7000 μs と変化させて測定を行った。この時チャンバーに入力した RF 電力は 57 W であった。まず、特徴的であったのが、RF の入力タイミングが 0–2000 μs の時である。ガスバルブをオープンにするタイミングを 0–2000 μs 、RF の入力タイミングを 0–2000 μs にした時のイオン種の分析結果を Fig. 7 に示す。縦軸が電流、横軸が時間、線の色がガス流量を表しており、 H^+ および H_2^+ 、 H_3^+ について別々のグラフで示している。ガスバルブをオープンにしてから 600–1200 μs 程度たってから信号が見え始める。どのイオン種もガス流量が多いほど早いタイミングで信号の立ち上がりが見えているが、ガス流量が 0.03 sccm ではほとんど信号が見えなかった。ガスバルブが開きはじめてからプラズマの生成に必要なガス密度に達するまでにしばらく時間を要しており、ガス流量が多いほど早く達していると考えられる。また、 H^+ 、 H_2^+ については、信号の立ち上がりに鋭いピークが見えており、 H^+ で 3.5 mA、 H_2^+ で 6 mA 程度のピークとなっている。このピークについては、ガスバルブをオープンにするタイミングを 0–1000 μs にした場合でも同様の結果が得られている。ガスバルブをオープンにするタイミングを 0–1000 μs の間、RF の入力タイミングを 1000–3000 μs の間にした時の H^+ の結果を Fig. 8 に示す。ガス流量が 0.15 sccm の時に 4 mA 程度の電流値が得られ、今回の測定の範囲内では最大となった。また、 H_2^+ に関しては、Fig. 7 のピーク以外に目立った結果が得られる RF のタイミングはなかったが、 H_3^+ に関しては、Fig. 9 に示すように、ガスバルブをオープンにするタイミングを 0–2000 μs 、RF の入力タイミングを 4000–6000 μs 、ガス流量 0.15 sccm の時最大で、2.5 mA 程度の電流値が得られた。

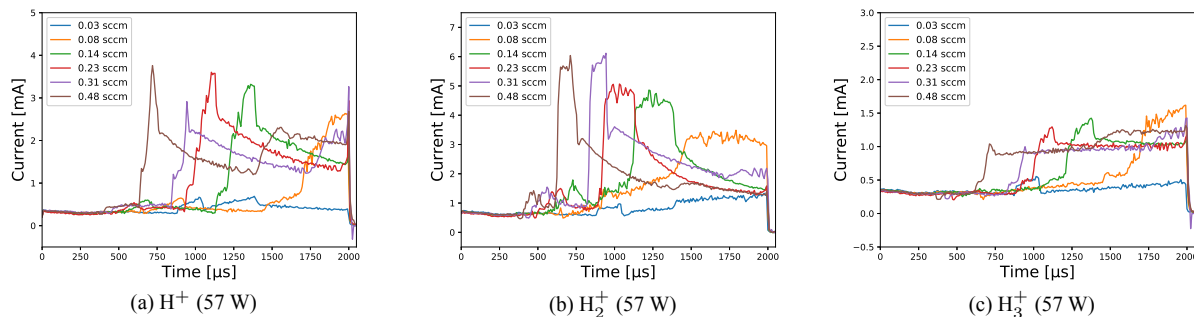


Figure 7: Time variation of the ion species in a pulse. RF power is fed from 0 to 2000 μs and the gas valve is open from 0 to 2000 μs .

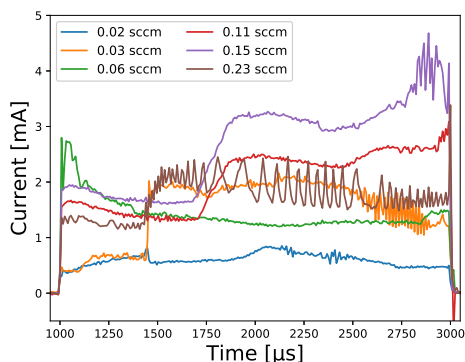


Figure 8: H^+ current is about 4 mA at 0.15 sccm. RF power is fed from 1000 to 3000 μs and the gas valve is open from 0 to 1000 μs .

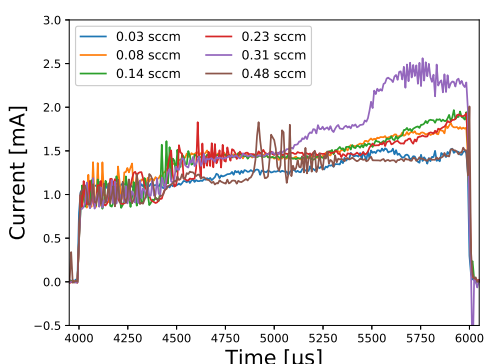


Figure 9: H_3^+ current is about 2.5 mA at 0.14 sccm. RF power is fed from 4000 to 6000 μs and the gas valve is open from 0 to 2000 μs .

4.3 RF 電力依存性

RF 電力依存性についても調べた。ガスバルブをオープンにするタイミング、RF を入力するタイミング共に 0–2000 μs に設定し、ガス流量を 0.26 sccm にして測定を行った。RF 電力を 12, 18, 26, 37, 47, 54, 68 W と変化させて入力した時に測定した H^+ についての結果を Fig. 10 に示す。

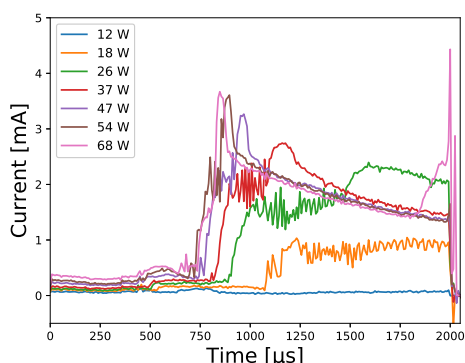


Figure 10: Input RF power dependence (H^+).

RF 電力が大きければ大きいほど早くプラズマが

立ち上がっている。また、37 W 以上では立ち上がりの時にピークも見られる。12 W 以下ではプラズマが立たないこともわかった。 H_2^+ についても同様の結果が得られた。

4.4 他のイオン種の混入

また、今回の測定において、 H_2 ガス由来ではないと考えられるイオン種の混入も確認された。詳しい発生源は突き止めることができていないが、四重極質量分析計での分析結果からチャンバー表面からの吸着ガスや残留ガスに含まれる水や窒素が発生源でないかと考えている。

5. まとめ

我々は、永久磁石を用いた小型 ECR H^+ イオン源のビーム生成性能評価を始めた。今回、引き出しビームの質量分析を行い、引き出しビームの RF 周波数依存性、ガス流量、RF 電力依存性の時間変化を調べた。試験の結果、ガスバルブや RF のタイミングを調節することで H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ のピーク電流がそれぞれ最大 4 mA、6 mA、2.5 mA 程度出ることがわかった。今後は、

- 入力 RF 電力の向上
- 引き出しビーム軌道のシミュレーションを行い、その結果を参考に引き出し電極の位置・形状の再検討
- マルチミラー磁場を生成するセラミックディスクに埋め込む磁石の個数・配置によるビーム生成性能への影響の評価
- 引き出しビームのエミッタンスの測定

を行い更なるビーム電流の増強および、ビーム生成性能の評価を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Y. Iwashita, H. Tongu, Y. Fuwa, and M. Ichikawa, Rev. Sci. Instrum. 87,02A718 (2016).
- [2] M. Ichikawa *et al.*, “Development of Piezoelectric Pulse Gas Valve”, Proceedings of 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan, August 2007, pp. 103-105; http://www-linac.kek.jp/mirror/www.pasj.jp/web_publish/pasj4_lam32/PASJ4-LAM32/contents/T0.html
- [3] Y. Iwashita *et al.*, “Compact H^+ ECR Ion Source with Pulse Gas Valve”, Proceedings of the 17th International Conference on Ion Sources, Genova, October, 2017.
- [4] Y. Takeuchi *et al.*, “Development of High Speed Ion Species Analysis System with Permanent Magnet”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp.670-673; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/index.html