

DEVELOPMENT OF VERY SMALL ECR H⁺ ION SOURCE WITH SMALL PERMANENT MAGNETS

Yuji Nasu^{#A)}, Ryunosuke Kitahara^{A)}, Yasuhiro Fuwa^{A)}, Hiromu Tongu^{A)},
Yoshihisa Iwashita^{A)}, Masahiro Ichikawa^{B)}

^{A)}Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji City, Kyoto 611-0011

^{B)}Japan Atomic Energy Agency, 2-166, ObuchiOmotedate,
Rokkasho-mura, Kamikita-gun, Aomori 039-3212

Abstract

The neutron attracts attention as a probe of material structure. While the small neutron ion source is widely required, there are few neutron facilities is limited and we cannot feel free to use the facility. To develop the small neutron source using a proton linac, we started to develop a very small ECR H⁺ ion source with small permanent magnets.

Overmuch gas flow to an ion source caused by continuous gas supply increases the load to the vacuum pumping system, while following accelerator such as an RFQ requires high vacuum. We are now developing a new ion source. In this ion source, pulse driven piezoelectric gas valve can supply proper volume of hydrogen gas. Because of this idea, the ion source can generate plasma particles efficiently with the adequate amount of gas. We are trying to extract the high current beam from the small H⁺ ion source.

Among several key components of the ion source, we revised the pulse gas valve for a good reproducibility.

小型永久磁石を用いた ECR 水素イオン源の開発

1. はじめに

近年、中性子の利用に注目が集まっており、中性子は様々な分野での応用が期待されている[1]。一方、中性子実験施設の数日本国内では数えるほどであり、それゆえマシンの利用時間に大きな制約がかかる。今後の中性子科学分野の発展を考慮すると、広く普及可能な小型中性子源の開発が急務となっている。

そこで当研究室では陽子線形加速器ベースの小型中性子源の開発をめざし、その第一歩として、一次陽子ビーム生成のための H⁺イオン源の開発を行っている。開発にあたり、引き出されるビームはパルスの、J-PARC の中性子源に合わせ 25Hz での繰り返し運転ができ、小型かつ長寿命であることを目的とした。加えて大強度の中性子ビームを得るために大電流を得ることが不可欠である。これらの条件を満たすイオン源として、我々は小型永久磁石を用いた ECR(Electron Cyclotron Resonance)イオン源に着目した。ECR を利用するため効率よく電子にエネルギーを与えることができ、低 RF パワーでも大電流を得ることが出来る。また、電磁石でなく永久磁石を用いることで電力供給が必要なく低コストを実現している。今回、本イオン源のガス弁の新規製作を行い、新ガス弁の性能評価を行った。

2. 本 ECR イオン源の概要

我々が得ようとしているのは H⁺イオンであるため、水素原子の軌道電子を引きはがす必要がある。ECR イオン源は電子との衝突による電離を用いている。

ECR イオン源ではプラズマチャンバー中に軸方向の磁場をかける。これにより、チャンバー内で電子がその磁場に巻き付く方向にサイクロトロン運動を行うようになる。そのサイクロトロン周波数に等しい周波数の RF を加えることによりサイクロトロン運動をしている電子が共鳴的にエネルギーを吸収し、電子の運動エネルギーが大きくなる (図 1)。

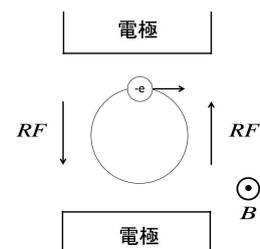


図 1 : ECR の原理図

よって大きなエネルギーを持った電子がチャンバー内の中性ガスに衝突し、中性原子の電子を剥離し、イオン化させる。電子のサイクロトロン運動の周波数はこの磁場のチャンバー内で ECR を起こさせる部分にかかる大きさで決まり、以下の関係を持つ。

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

ここで B_{ecr} は ECR 領域における磁場強度、 f は RF 周波数、 m_e は電子の質量、 e は電気素量である。

[#] nasu@kyticer.kuicr.kyoto-u.ac.jp

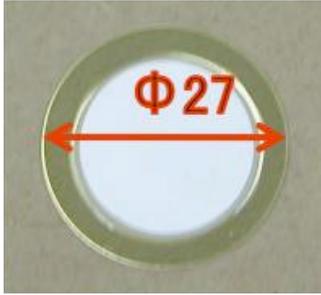


図 2 : KBS-27DA-5A

表 1 : KBS-27DA-5A の仕様

Diameter of metal base	27.0±0.1mm
Diameter of piezoelectric element	20.2±0.1mm
Total thickness	0.53±0.1mm
Thickness of metal base	0.25±0.03mm
Resonance frequency	4.6±0.5kHz
Capacitance	20±0.3nF
Electric strength(catalogue spec.)	30V _{p-p}

大電流ビームを引き出すには中性ガスを多く流す必要がある。しかし本イオン源では、RFQ 等に入射することを考慮し、できるだけ加速管内の真空度を悪化させないことを目的としている。そこでガス流量を調整して真空排気系への負担を減らすべく円盤状の圧電素子（京セラ、KBS-27DA-5A、図 2）を用いてパルスガス弁を構成している[2]。図 3 に示すように、電圧をかけると変形する圧電素子の性質を利用し、電圧をかけないときにはガスの流路を塞いでいるが（以下 OFF 時）、電圧をかけると（以下 ON 時）流路が開くという原理で動作している。

本イオン源の断面図を図 4 に示す。左側から流入する水素ガスはガス弁を通してチャンバー内に到達する。小型永久磁石により生み出される ECR 領域での磁場はおよそ 0.22T ほどであり、式 (1) から求められる共振周波数の RF がチャンバーに加えられている。チャンバーの設計には Poisson/Superfish シミュレーションを、円筒形のチャンバー内部の構造に関しては HFSS シミュレーションを使用している。引き出し電極部の形状はシミュレーションソフト PBGUNS を用いて設計されており、25keV での引き出しを目標としている。

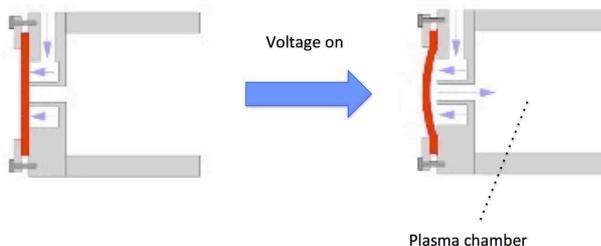


図 3 : パルスガス弁動作原理

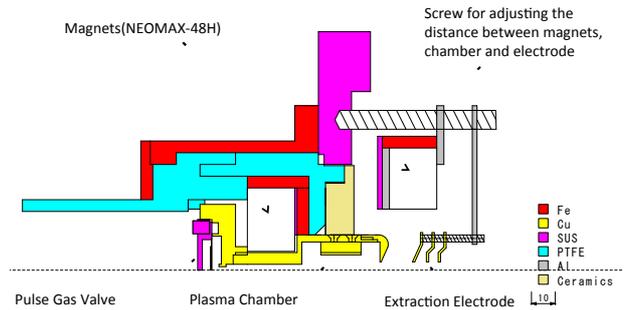


図 4 : イオン源断面図

イオン源から引き出されたビームの解析を行うためには図 5 のようなテストベンチを用い、イオン源から出たビームをまずアインツェルレンズで集束させ、アナライザーマグネットで H^+ 、 H_2^+ 、 H_3^+ などを分離し、ファラデーカップでそれぞれの電流値を測定することができる。また、下流側のフランジから分光器を用い、プラズマの発光スペクトルから H^+ イオンの生成効率を見積もる研究も進行中である[3]。テストベンチの写真を図 6 に示す。

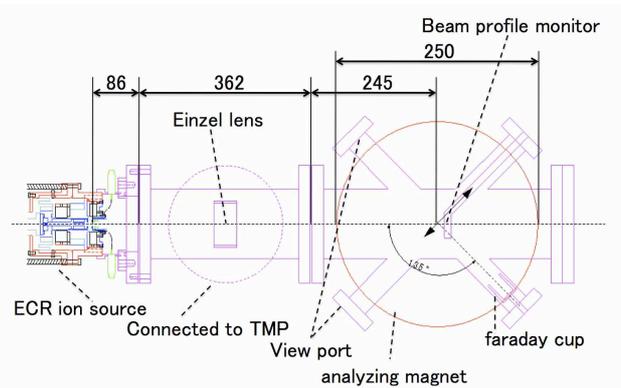


図 5 : ビームライン水平方向断面図



図 6 : テストベンチ

3. ガス弁の評価

ビームライン内真空度の善し悪しは、イオン源の性能評価を行う上でとても重要である。また、イオン源上流からガスを流入させるため、ガスバルブ系が構成する真空系には特に気を配らなければならない。したがって、ガス弁が正常に機能するかを確かめることが必要である。

図7は圧電素子にかかるパルス電圧の繰り返し周波数 250Hz、パルス幅 2ms でガス弁をパルス駆動（以下 PULSE とする）させたときの上流側ガス圧変化に対する水素ガスの流量をプロットした。また、圧電素子に一樣電圧をかけつづけ以下 CW とする）弁が開いている状態を ON、閉じている状態を OFF とし、それらの比（ON/OFF 比）もプロットした。ガス圧が 500hPa 以上では流量は増加するが、400hPa 以下では流量に変化は見え、ガス弁が開いていないことが分かる。しかし、経験的にチャンバー内のガス密度が低い、すなわち上流ガス圧が低いときにはイオンの再結合が起こりにくく、H⁺イオンの比率は向上する傾向があり、低いガス圧での実験が重要となってくる。そのためガス弁を交換し、新しく取り付けられたガス弁の性能評価を行った。

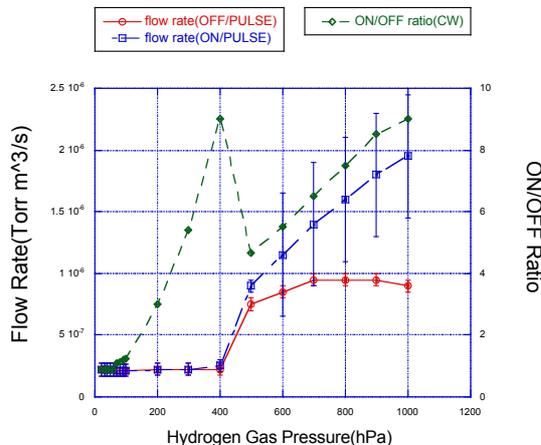


図7：繰り返し周波数 250Hz、パルス幅 2ms のときの流量と CW の ON/OFF 比

測定条件としてパルス電圧は繰り返し周波数 250Hz、パルス幅 1ms、デューティ 2.5%としている。図8も図7と同様、PULSE 駆動において流入させる水素ガス圧に対する水素の流量と CW での ON/OFF 比がプロットされている。以前のガス弁と比較して、低いガス圧でもガス圧の増加に伴って流量も増加している。その一方で PULSE 駆動させたときの流量は OFF 時の流量と大差がなく、OFF 時にガス弁が閉まりきっていない。それゆえ、ON/OFF 比も以前に比べ減少している。原因として、ガス弁の組み立ての際、圧電素子がへこみ、そのためにガス弁が閉まりにくくなったと考えられる。従って圧電素子を交換するか、圧電素子と接触する弁座にスペーサー

を設け、ガス弁と弁座の間のスペースを埋めることで ON/OFF 比の向上を図る予定である。

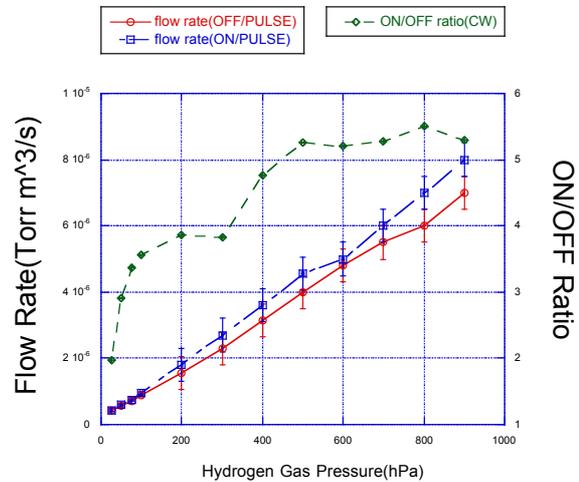


図8：繰り返し周波数 25Hz、パルス幅 1ms のときの流量と CW の ON/OFF 比

4. まとめ

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。今回、ガス弁の真空度の変化を通してガス弁の性能を調査した。以前のガス弁では上流側ガス圧が低いときに、ガスはほとんど流入しなかった。しかし、H⁺イオンの比率を増やそうとすると上流ガス圧は低い方が望ましい。そこでガス弁の改造を行った。新ガス弁では低いガス圧でもガス圧に対応する量のガスが流入できるようになり、流量も増加した。しかし OFF 時のときの流量が大きく、ガス弁が閉まりきっていないことが考えられる。今後ガス弁座にスペーサーを挟み込むなどして、ON/OFF 比の向上を目的としたさらなる改良を試みたい。

参考文献

- [1] http://www.jrias.or.jp/report/pdf/tyusei_kiso_05.pdf
- [2] M.Ichikawa, et al., "DEVELOPMENT OF VERY SMALL ECR H⁺ ION SOURCE WITH PULSE GAS VALVE", Proceedings of the 23th Particle Accelerator Conference in Canada, Vancouver, May. 4-8, 2009
<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2009/papers/mo6rfp032.pdf>
- [3] M.Ichikawa, et al., "IMPROVEMENT OF ECR H⁺ ION SOURCE WITH PERMANENT MAGNETS" 第7回日本加速器学会年会プロシーディングス、姫路, Aug. 4-6, 2010