

# 永久磁石型 2.45 GHz ECR イオン源の開発

## DEVELOPMENT OF 2.45 GHZ ECR ION SOURCE WITH PERMANENT MAGNET

島田健司\*, 畑中吉治, 福田光宏, 依田哲彦, 植田浩史, 安田裕介,  
鎌倉恵太, 原周平, 久米世大,  
森信俊平, 永山啓一, 齋藤高嶺, 田村仁志

Kenzi Shimada\*, Kichiji Hatanaka, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita, Hiroshi Ueda, Yuusuke Yasuda,  
Keita Kamakura, Shuhei Hara, Toshihiro Kume Shunpei Morinobu,  
Keiichi Nagayama, Takane Saito, Hitoshi Tamura

Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, 10-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

### Abstract

A 2.45-GHz ECR ion source has been developed to supply high currents with a low emittance at the RCNP cyclotron facility. The plasma chamber consists of a cylinder of aluminum, two boron-nitride disks placed at top and bottom of the cylinder, and a water cooled outer cylinder of copper. The magnetic field is formed by two ring permanent magnets and no multipole magnets are employed. A proton-beam intensity of 1 mA at an extracting voltage of 15 kV was obtained using a microwave power of 355 W. A life time of the ion source depends on durability of the disk. After the material of the disks was changed to alumina, it could produce the proton beam of 0.5 mA in a life time test of 1536 hours, and required a relatively low RF power of 200 W. The essential development steps towards the observed performance are described.

## 1. はじめに

大阪大学核物理研究センター (RCNP) の加速器施設は AVF サイクロトロン (K 値 140 MeV) とリングサイクロトロン (K 値 400 MeV) を有しており, これを用いて陽子, 重陽子,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$  などの軽イオンビームの利用を中心とした精密原子核物理研究や, 単色中性子や超冷中性子, ミューオンなどの二次粒子を用いた基礎・応用研究を行ってきた. 近年では粒子線治療や熱中性子を用いたホウ素中性子捕捉療法,  $\alpha$  放出核種を用いた内用療法といった医学への応用も行っている. このような研究においてイオン源にはより高強度なビームを安定して供給することが求められる. 加えて, 高強度ビームを加速するにあたっては機器の放射化がより際立つため, ビーム透過効率を高めるべく高輝度かつ低エミッタンスであることも求められる. このため我々は永久磁石型 2.45 GHz 電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源を開発し, 15 keV の陽子ビームに対して 1 mA 級の出力を目指している [1].

## 2. イオン源の構造

本イオン源の特徴は多極磁場を用いず, リング型永久磁石のみで磁場を構成している点にある. また, ミラー磁場も採用していない. これにより電力を必要としないため電源設備が不要となり, 運転安定性が高くなる. また, 装置の構成が単純となる. つまり, 装置サイズがコンパクトになり, かつ運用とメンテナンスが容易となる. 概略図を Figure 1 に示す. 基本的な設計は CEA/Saclay の SILHI に倣った [2]. 磁場は 2 連の NdFeB 磁石 (NEOMAX-48BH) と鉄 (SS400) の磁気シールドにより形成し, プラズマチェンバーの両端に設置されたセラミック板付近が 87.5 mT となるように調整した. マイ

クロ波源には 2 kW 出力のマグネトロンである Alter 社 SM840E と TMA20 の組み合わせ, もしくは 200 W 出力の進行波管アンプである Varian 社 VZS6953G5 を使用した. マイクロ波経路には 3 段の ridged transformer を挿入し, 導波管とプラズマチェンバー間のインピーダンスを整合した. プラズマチェンバーの内径は 90 mm, 長さ 110 mm である. プラズマチェンバーの上流側と下流側にはセラミック板を設置した. セラミック板の厚さは 2 mm であり, 材質には窒化ホウ素 (BN 99%) もしくはアルミナ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  95%) を用いた. 下流側のセラミック板の中心には引き出しのために直径 5 mm の出口穴を開けた.

本イオン源では電子は 2.45 GHz のマイクロ波による ECR でエネルギーを得て, ビーム軸と平行な磁場に巻き付きながら運動し, セラミック板に衝突する. この時生じる 2 次電子によって電子密度を高め, プラズマを維持してゆく. よって, イオン源の寿命はセラミック板の耐久度に依存している. 詳細については次章にて記す.

引出電場は 4 枚の直径 5 mm の穴をもつ電極で構成した. プラズマチェンバー出口穴のある面をプラズマ電極とし, そこから 16, 54, 68, 82 mm の地点に順に電極 A, B, C, D の 4 枚を設置した. 引き出されたビームはグレーザー磁石を通過し, 診断ステーションにて運動量分析前のビーム量を測定した. さらに 90 度磁石を通過し, 運動量分析後のビーム量を測定した.

## 3. 性能評価

我々はイオン源を RCNP イオン源室に設置し, テスト運転を行った. テスト運転では陽子だけでなく  $\alpha$  放出核種の生成に必要となる  $^4\text{He}^+$  についても行った. イオン源を運転した際のパラメータを Table 1 に示す. 陽子ビームに対する設定は A と B である.  $^4\text{He}^+$  ビームに対する設定は C である. 設定 B と C は加速粒子は異

\* shimada@rcnp.osaka-u.ac.jp

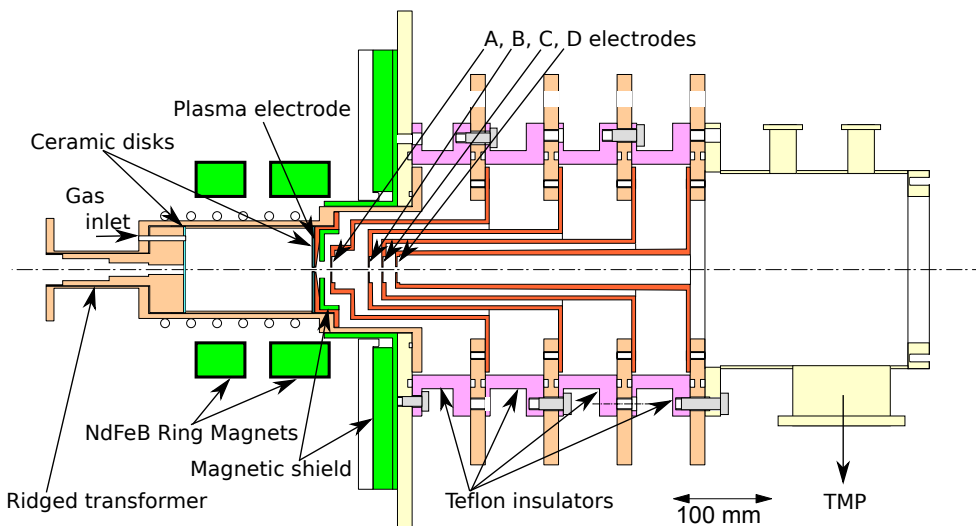


Figure 1: Schematic view of ion source.

Table 1: Parameters of Ion Source for Proton Beam and  $^4\text{He}^+$  Beam

設定		A	B	C
加速粒子		p	p	$^4\text{He}^+$
マイクロ波源		SM840E, TMA20	VZS6953G5	VZS6953G5
セラミック板材質		窒化ホウ素	アルミナ	アルミナ
真空度	引出電極チェンバー	$3.5 \times 10^{-3}$ Pa	$1.7 \times 10^{-4}$ Pa	$8.9 \times 10^{-4}$ Pa
	診断ステーション	$6.2 \times 10^{-3}$ Pa	$3.3 \times 10^{-3}$ Pa	$2.0 \times 10^{-3}$ Pa
H.V.	Plasma 電極	+15.0 kV	+15.0 kV	+15.0 kV
	A 電極	+14.8 kV	+6.1 kV	+5.5 kV
	B 電極	-26.0 kV	-30.0 kV	-30.0 kV
	C 電極	-1.3 kV	-0.5 kV	-1.0 kV
	D 電極	ground	ground	ground
グレイザー磁石電流		170 A	110 A	214 A
ビーム量	運動量分析前	840 $\mu\text{A}$	510 $\mu\text{A}$ ( $\pm 1.3\%$ )	434 $\mu\text{A}^\dagger$ ( $\pm 1.3\%$ )
	運動量分析後	170 $\mu\text{A}$	168 $\mu\text{A}$ ( $\pm 1.1\%$ )	134 $\mu\text{A}$

$^\dagger$  includes  $\alpha$

なるが運転としては同一であり、プラズマチェンバーへ供給するガスを水素ガスからヘリウムガスに変更しただけでイオン源の大気開放やアルミナ板交換はしていない。

ビーム量の時間変化を Figure 2 に示す。ビーム量の安定度について、24 時間の安定度を決定できたものについては括弧の中に示した。設定 A の場合、数時間であれば 1 mA を越えるビームを引き出す事に成功したが、長時間に渡って安定して引き出す事はできなかった。原因はイオン源の安定度と寿命がセラミック板の状態と耐久性にそれぞれ依存しているからである。運転後のセラミック板の様子を Figure 3 に示す。設定 A の場合が Figure 3a であり、窒化ホウ素板が脆いためプラズマ中の電子により削られ、大きく抉れている。運転時間は 300 時間であり、ビーム量が 800  $\mu\text{A}$  を越えたのはその内の 150 時間程度であった。一方、材質をアルミナに変更した場合が Figure 3b であり、セラミック板は 1536 時間の運転の後にも全く劣化していない。ビーム

量は Figure 2 の通り終了時まで安定しており、今回は 1536 時間で打ち切ったがより長時間の運転にも耐える事が分かった。ただし、両運転に関しては機器の故障によりマイクロ波源が異なる事を付記しておく。マイクロ波の強度は前者の場合は 2 kW のマイクロ波源を使用した。これに対し、後者は 200 W 程度であった。今後はアルミナ板においてもより強いマイクロ波を入射し、その性能を見極めたい。

運動量分析前後のビーム透過率は設定 A もしくは B と C でそれぞれ 20% もしくは 30% である。設定 A の場合は強いマイクロ波を入射できるため、プラズマ温度が高くなり、ビーム量も大きい。しかし、プラズマ電極と A 電極の間でペニング放電が起り、A 電極に適切な電圧を印加することができないため、ビームを上手く引き出せていない。このため、透過率が低くなっていると考えられる。一方、設定 B の場合はペニング放電が起らず、A 電極に任意の電位を印加できたため、マイク

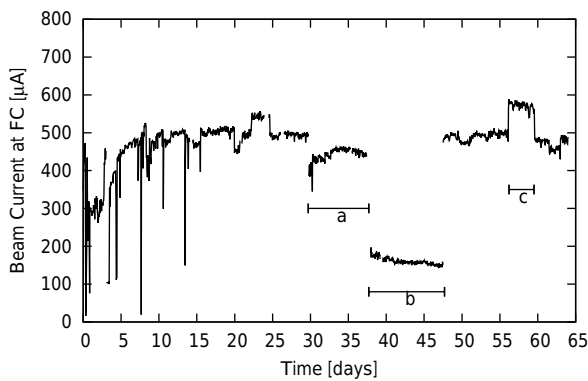


Figure 2: A current of the proton beam is presented as function of time except from 30 to 38 days. a) Then, it is a current of the He beam. b) The current is measured before a momentum analysis except from 38 to 48 days. Then, it is after the momentum analysis. c) The ion source is affected by a magnetic field of the AVF cyclotron, because it has been placed above the AVF cyclotron. Obviously, the current increased from 56 to 60 days by changing the magnetic field.

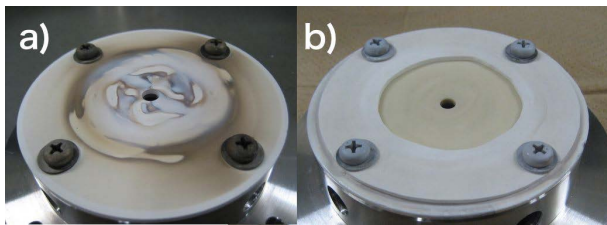


Figure 3: Ceramic plates with exit hole of plasma chamber. a) A boron-nitride disk after 300-hour run with 500-W micro wave. b) An alumina disk after 1536-hour run with 200-W micro wave. A holder of the alumina disk is made of boron nitride.

口波は弱いものの良くビームが引き出せていたものと考えられる。もちろん、良いとは設定 A の場合に比べてであり、引出系の最適化の余地は残されている。ペニング放電の起こる原因はプラズマ電極と A 電極間の残留ガスと出口穴付近の磁場分布に依っていると考えられる。残留ガスに関しては電極を支持する筒に排気穴を開け、排気コンダクタンスを上げることで対応したい。磁場分布に関しては、アルミナ板の使用によりプラズマチェンバー内の状態とビーム量を安定させることが可能となったため、磁石位置を微調する事により最適な磁場分布を見付けたい。

#### 4. まとめ

高強度なビームを安定して AVF サイクロトロンへ供給するため、永久磁石型 2.45 GHz ECR イオン源を開発を行った。本イオン源ではプラズマチェンバーを構成するセラミック板が寿命と安定度を定めるため、窒化ホウ素とアルミナの二つの素材を試した。アルミナを使用した結果、2ヶ月以上安定して運転する事が可能となった。しかし、ビーム量は目標に達していない。これはマ

イクロ波のパワーを上げる事で達成可能であると考えている。また、エミッタンスの良いビームを生成するために引出電場の最適化を進めたい。

#### 参考文献

- [1] 竹村真哉, “陽子ビーム高輝度化のための 2.45 GHz ECR 陽子源の改良”, 大阪大学大学院修士論文, 2014.
- [2] R. Gobin et al., “Development of a permanent magnet light ion source at CEA/Saclay”, Review of Scientific Instruments 77, 2006, 03B502.