

## DEVELOPMENT OF HIGH INTENSITY HEAVY ION SOURCES

Yukimitsu Ohshiro<sup>1,A)</sup>, Shin-ichi Watanabe<sup>A)</sup>, Shoichi Yamaka<sup>A)</sup>, Shigeru Kubono<sup>A)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>B)</sup>,  
Yoshihide Higurashi<sup>B)</sup>, Toshiyuki Hattori<sup>C)</sup>, Ichiro Arai<sup>D)</sup>, Michihiro Oyaizu<sup>E)</sup>, Hiroari Miyatake<sup>E)</sup>

<sup>A)</sup> Center for Nuclear Study, Graduate School of Science, the University of Tokyo  
2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

<sup>B)</sup> RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science  
2-1, Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

<sup>C)</sup> Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, JAPAN

<sup>D)</sup> Graduate School of Pure and Applied Sciences, University of Tsukuba  
Tenodai 1-1-1 Tsukuba, Ibaraki 305-8571, Japan

<sup>E)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

### Abstract

The high intensity and multi-charged heavy ion beams from gaseous and metal ion sources are required for RI beam experiments at CRIB separator of CNS in RARF. Three kinds of ECR ion sources are in progress for CRIB experiments: (1) Ions of  $\text{Li}^{2+}$ ,  $\text{Li}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{8+}$ ,  $\text{Si}^{9+}$ , and  $\text{Ca}^{11+}$  were extracted from Hyper ECR ion source by high intensity of 200, 75, 30, 32 and 50  $\mu\text{A}$  respectively. (2) In superconducting ECR ion source, the coil was cooled to 5.5K and the magnetic field was obtained up to 1.7T. (3) In Charge breeding ECR ion source, setting up all equipments was finished and the performance test is carried out.

## 大強度重イオン源の開発

### 1. はじめに

CNSは理研AVFサイクロトロン施設内で天体核物理の実験プロジェクトを展開しているが、この実験においてはRIビーム生成のための一次ビームとして気体や金属の重イオンビームをCRIB<sup>[1]</sup>セパレーターに大強度で供給する必要がある。この一次ビーム供給のために、Hyper ECR、超電導ECR、電荷増殖型ECRのイオン源を理研内に設置した。

Hyper ECRイオン源からは金属イオンビームが大強度で取出され、サイクロトロンへ入射している。これまでに、 $\text{Li}^{2+}$ 、 $\text{Li}^{3+}$ 、 $\text{Mg}^{8+}$ 、 $\text{Ca}^{11+}$ 等のイオンを200、75、30、50 $\mu\text{A}$ でそれぞれ取出している。金属蒸気生成ではルツボを用いることが特徴である。

超電導ECRイオン源は筑波大学で開発されたものを同大学との共同研究により理研内に移設した。これは $\text{Xe}^{30+}$ イオンビームを10 $\mu\text{A}$ で取出した実績があり、CNSでの多価イオンビーム増強が見込まれる。現在、性能の再現試験を行っている。

電荷増殖型ECRイオン源(CBECR)はCNSで独自に設計製作したものである。金属イオン生成時に起こるプラズマ室内の汚れや真空劣化等を改善するために開発している<sup>[2]</sup>。装置はほぼ完成し、現在構成機器の性能試験を行っている。

これらの結果を含め現状を以下に述べる。

### 2. Hyper ECRイオン源

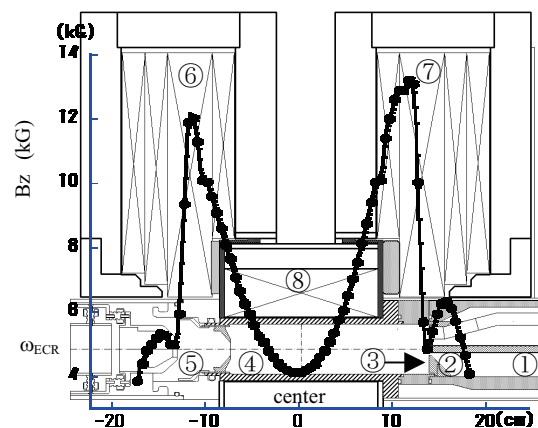


図1 : Hyper ECRイオン源の概略図と $^{40}\text{Ca}^{11+}$ イオン生成時のミラー磁場分布 ①可動式ロッド、②固体試料、③RF壁、④プラズマ室、⑤引出し電極、⑥MC1、⑦MC2、⑧六極磁石

Hyper ECR イオン源の概略図と磁場分布を図1に示した。MC1、MC2のコイル電流は450A、580Aに調整し、ミラー磁場のピークは1.20T、1.32Tとなる。ECRゾーンの長さは約6.3cmである。MC2のピーク磁場付近に鉄製のRF遮蔽壁（穴径1.4cm）を取付け

<sup>1</sup> E-mail: yohshiro@cns.s.u-tokyo.ac.jp

ている。この構成でイオン源内にルツボやロッドを挿入して、金属イオンを生成する。

融点が600度より低い金属試料はルツボ法<sup>[3]</sup>を、これ以上の融点ではロッド法<sup>[4]</sup>を用いる。低融点物質でロッド法を用いるとRFパワーの増加で試料の急激な蒸発が起り、安定な金属イオンビームの取出しは困難である。例えば、LiやMgでは純金属を充填したルツボを、CaではCaF<sub>2</sub>のロッドを挿入する。

イオン源内で蒸発した金属物質はプラズマ室内壁に付着し、イオン生成の妨げとなる。このために、ホットライナーを取付けた。これはTa製の円筒をプラズマ室内壁から0.05cm離して取付けられるので、高温となり、金属蒸気の固着が改善される。ライナーの使用で、比較的安定な金属イオン生成が可能となり、試料の消費率も2/5に減少した。

表1：イオン源から取出した金属イオンビームの強度と使用した金属物質

Ion	Beam Intensity (eμA)	Charged Material (method)
<sup>7</sup> Li <sup>2+</sup>	200	Li pure metal (crucible)
<sup>7</sup> Li <sup>3+</sup>	75	Li pure metal (crucible)
<sup>24</sup> Mg <sup>8+</sup>	30	Mg pure metal (crucible)
<sup>28</sup> Si <sup>9+</sup>	32	SiO <sub>2</sub> (rod)
<sup>40</sup> Ca <sup>11+</sup>	50	CaF <sub>2</sub> (rod)
<sup>31</sup> P <sup>9+</sup>	29	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Crucible)

これまでに得られた金属イオンビーム強度を表1に示した。このように、イオン源から大強度で取出している。イオン源の運転条件は金属物質の融点やイオンビーム強度によって調整されるが、定常的に、RFパワーは300~500W、真空度は10<sup>-5</sup>Paの領域で運転される。

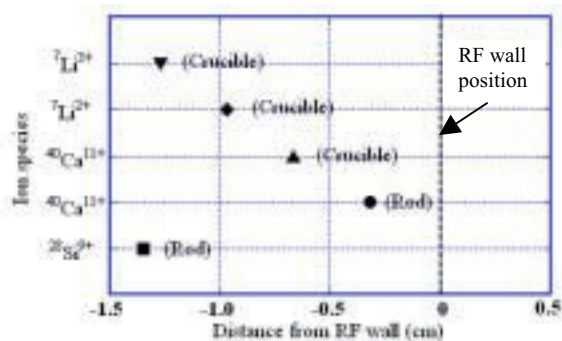


図2：プラズマ室内でのルツボやロッドの先端位置

ルツボやロッドの先端は金属イオンビーム強度が最大に得られる最適な位置に置かれる。これはRF遮蔽壁から約1.5 cmの距離にあり(図2参照)、イオン源中心からは約10cm離れた所にある。この距離内で、高いビーム強度の金属イオン生成が再現できるので、金属試料を挿入する目安となっている。

### 3. 超伝導ECRイオン源



図3：磁場測定中の超伝導ECRイオン源

磁場測定中のイオン源の写真を図3に示した。超伝導コイル(NbTi)は小型冷凍機を用いたクライオスタットにより冷却され、液体Heフリーである。コイルに吸着したガスは冷却能力を劣化させるので、冷却前に排除しなければならない。

常温放置によるガス出し(1週間)、コイル室の排気(1週間、到達真空度: 10<sup>-3</sup> Pa)を行い、冷却を開始した。約1週間の冷却で、温度は5.5K(カーボン抵抗温度計で727Ω)になり、安定した。冷却停止後は急速に温度が上昇し、1分以内でクエンチ臨界温度(7K)を超えた。

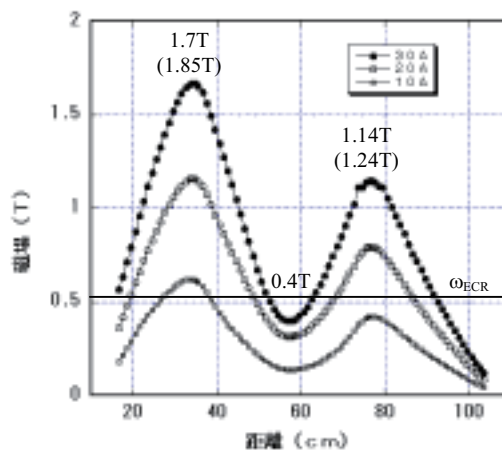


図4：再現した超伝導ECRイオン源のミラー磁場

クエンチ対策を具備した電源を製作した。温度上昇による通電停止(524Ω以下)、電圧出力制限(3.4V以下)、電流上昇時間の設定(30分~120分段階的)等が主な対策である。保護回路は十分に機能している。これを用いて、ミラー磁場の再現試験を行った。

測定した磁場分布を図4に示した。括弧内は筑波大での値である。磁場のピークは1.7Tと1.14Tで、筑波大での1.85 Tと1.24Tをほぼ再現している。これはXe<sup>30+</sup>イオンビームを10eμAで取出した時の強度であり、CNSでの多価イオン生成も可能である。現在、Ar<sup>11+</sup>イオンの100eμA取出しを目処に、真空排気系、高周波系（14.5 GHz）等の整備を進めている。

#### 4. 電荷増殖型イオン源

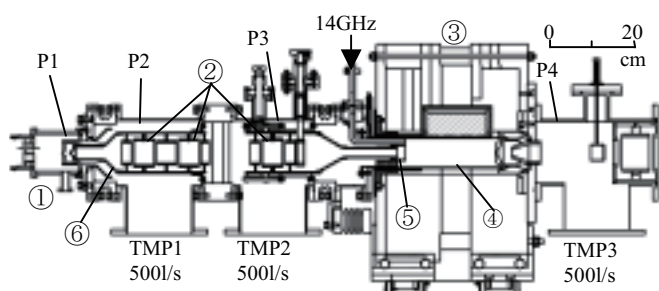


図5：CNS電荷増殖型イオン源の断面図 ①1価イオン源、②静電レンズ、③CBECRイオン源、④プラズマ室、⑤減速電極、⑥円錐壁

これは1価のイオンを外部から入射し、多価のイオンに増殖するイオン源<sup>[5]</sup>である。1価イオン源①はCBECR③と分離している（図5参照）。これにより、CBECRと無関係に気体や金属の1価のイオンを大量に生成することができる。1価イオン源はボリューム型<sup>[6]</sup>（気体イオン用）とスパッター型（金属イオン用）を用いる。前者は既にAr<sup>+</sup>イオンで100eμAのビーム強度を得ている。

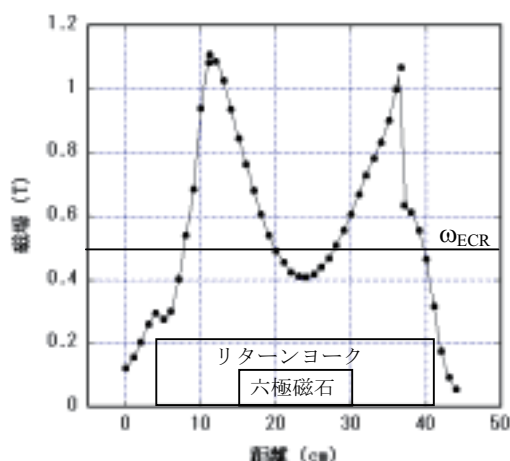


図6：改良後のCBECRイオン源のミラー磁場分布

CBECRイオン源は在来のHiECR<sup>[7]</sup>を14GHz運転用に改良したイオン源である。コイル電流の増加（600A）のために冷却水圧力を高め（1MPa）、ビーム入射側に鉄製のシム（長さ5cm）を取付けた。改良後のミラー磁場分布を図6に示した。Hyper ECRの磁場分布（図1参照）とほぼ一致しているの

で、このCBECRでの14GHz運転は可能である。

CBECRでは1価のイオンをプラズマ室に入る直前で減速する。入射したイオンはプラズマ室内をゆっくり進むので、多価イオンのイオン化効率が高まる。減速電極⑤は一对の円筒電極（内径2cm、3.4cm）からなり（図5参照）、この先端をミラー磁場のピーク付近（リターンヨークから7cm）に置いた。この位置で、減速効率が高まるからである。

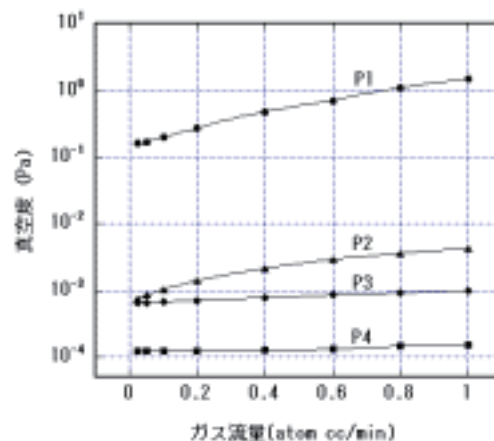


図7：電荷増殖型イオン源の差動排気効果

このイオン源の特徴は差動排気技術を導入したことである。1価イオン源の引出電極室と静電レンズ室は円錐壁⑥で分離され、それぞれを500l/sのTMPで排気している（図5参照）。1価イオン源へのガス流量と各測定点P1～P4での真空度を図7に示した。ガス流量が1cc/minでも、P3、P4の真空度に大きな勾配はなく、CBECRへのガスの流れが阻止されている。ECRプラズマ室の真空度を10<sup>-4</sup>Paの領域に保つことができ、多価イオンの増強が期待できる。

#### 5. まとめ

我々は高強度の多価重イオンビーム開発のために、3台のECRイオン源を扱っている。Hyper ECRイオン源では主に低融点の金属イオンビームを高強度で生成している。今後、Fe、Ni等のイオンビームの増強テストを予定している。超電導ECRイオン源ではミラー磁場の再現性を確認し、電荷増殖ECRイオン源では各機器の改良と真空排気を終了した。現在、速い時点でのイオン生成のために調整を進めている。

#### 参考文献

- [1] T. Teranishi *et al.*, CNS Ann. Rep. 2001 (2002) 7
- [2] Y. Ohshiro *et al.*, CNS. Annual Report 2005 (2006)57
- [3] Y. Ohshiro *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. 39 (2006) 231
- [4] Y. Ohshiro *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. 38 (2005) 253
- [5] M.Oyaizu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. 73 (2002) 806.
- [6] S. Watanabe *et al.*, CNS. Annual Report 2004 (2005) 61.
- [7] D. Nagae *et al.*, CNS. Annual Report 2002 (2003) 69.