

# 東京大学 CNS 14 GHz Hyper ECR イオン源の現状

## CURRENT STATUS OF 14 GHz ECR ION SOURCE AT CNS, THE UNIVERSITY OF TOKYO

鎌倉恵太<sup>\*A)</sup>、小高康熙<sup>A)</sup>、中川孝秀<sup>B)</sup>、大西純一<sup>B)</sup>、後藤彰<sup>B)</sup>、加瀬昌之<sup>B)</sup>、  
畑中吉治<sup>C)</sup>、山口英齊<sup>A)</sup>、今井伸明<sup>A)</sup>、下浦享<sup>A)</sup>、酒見泰寛<sup>A)</sup>

Keita Kamakura<sup>\*A)</sup>, Yasuteru Kotaka<sup>A)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>B)</sup>, Jun-ichi Ohnishi<sup>B)</sup>,  
Akira Goto<sup>B)</sup>, Masayuki Kase<sup>B)</sup>, Kichiji Hatanaka<sup>C)</sup>, Hidetoshi Yamaguchi<sup>A)</sup>,  
Nobuaki Imai<sup>A)</sup>, Susumu Shimoura<sup>A)</sup>, Yasuhiro Sakemi<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>CNS, the University of Tokyo

<sup>B)</sup>Nishina Center, RIKEN

<sup>C)</sup>RCNP, Osaka University

### Abstract

14 GHz Hyper ECR ion source (ECRIS) was first introduced in 1989 at Institute for Nuclear Study, the University of Tokyo. It was relocated to RIKEN Nishina Center in 2004, and has been providing various ion beams to RIKEN AVF cyclotron ever since. Over the course of past thirty years, the performance has been vastly improved. At the moment, it can be operated at high beam intensity to match the requirement of recent experiments, yet further improvement is expected to meet the requirement of higher intensity and more stable operation. In general, the beam intensity is determined by two factors; the amount of ions produced in the ECR plasma and the efficiency of beam extraction from the plasma chamber. In this report, recent research and improvements on both factors will be discussed.

### 1. 概要

14 GHz Hyper ECR イオン源は 1989 年に旧・東京大学原子核研究所で製作され、2004 年に理化学研究所仁科加速器研究センターへ移設された。それ以来、理研 AVF サイクロトロンに様々なイオンを供給してきた。近年 30 年に渡る開発が実を結び、イオン源のビーム量は大幅に増強された。特に去年導入された強収斂引出系による引出効率の改善は、イオン源の大強度化に大きく寄与し、各イオンで約 2 倍のビーム強度が得られるようになった。現在もさらなる多価重イオンビーム大強度化の要求に応じるべく、理研加速器グループと協力しつつ本イオン源の高度化が進められている。

### 2. 強収斂引出系

引出電極は Figure 1 に示されたように幾つかの電極で構成されている。プラズマチェンバからイオンを引き出すための電場の分布は、プラズマ電極とグラウンド電極の二つの電極形状によって決まっている。この電場は引き出されるビーム強度だけでなく、ビームの位相空間分布にも影響し、ビーム輸送及び加速に重要なエミッタンスも決定する。近年、空間電荷効果を考慮したイオン源引き出し部の粒子軌道計算が行われた。この計算をもとに、引出効率の向上のため新たな強収斂引出系が設計・製作された。その結果、従来型の引出系と比較して、広い範囲の M/Q を持った核種でビーム量の倍増が確認された [1]。強収斂引出系の成功により 2020 年 4 月以降はすべての営業運転でこの引出系を用いて運転を

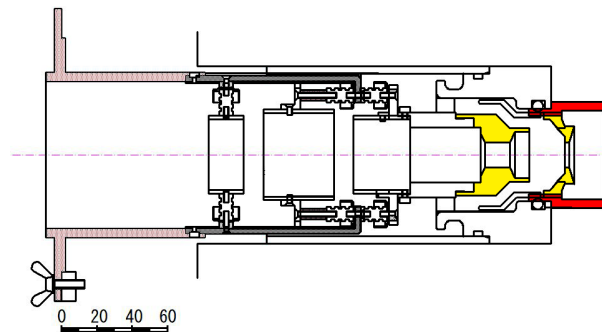


Figure 1: Cross-sectional view of the strong-convergence extraction system. Plasma Electrode forms the end of the plasma chamber on the right. Ground Electrode is located next to Plasma Electrode. A voltage of 7.5~15 kV is applied between them.

行っており、これは理研 AVF サイクロトロンの高度化に大きく寄与している [2]。

### 3. ECR プラズマの研究

原理的に、プラズマ状態は電子密度・電子温度・イオン閉じ込め時間などの物理量で決まる。これらはメインガス・サポートガスの流量、ミラーコイルの電流、マイクロ波出力、RF チューナーの位置など様々な運転パラメータで制御される。最近の研究でプラズマチェンバの外にあるアインツェル電極の電圧によっても、プラズマバウンダリ、さらにはプラズマ状態が影響を受けていることがわかってきた。観測量はビーム電流・ビームプロファイル・エミッタンスとプラズマの可視光である。イオン源を最高性能で運転するには 6~7 パラメータの最大値問題を解かなければならない。ECR イオン源を運転する上

\* kamakura@cns.s.u-tokyo.ac.jp

で最も難しいのは、プラズマ状態を決めている物理量、観測量、制御パラメータが複雑に絡み合っているという点にある。例えば、ガスの流量を増やすと、電子密度は上昇する一方で、電子の平均温度は下降する。このようなシステムの運転は常にローカルマキシмумに落ち込んでしまう危険が伴うため注意が必要である。

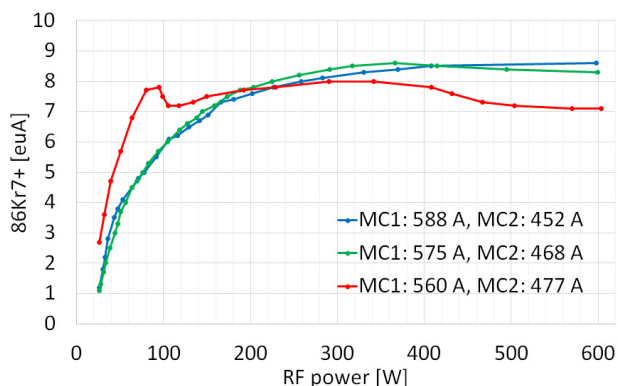


Figure 2: Beam current of  $^{86}\text{Kr}^{7+}$  vs. RF power. Trends are measured with three set of mirror coil currents. MC1 and MC2 are the current applied to upstream and downstream mirror coil, respectively. The rest of the parameters stayed the same.

Figure 2 は  $^{86}\text{Kr}^{7+}$  のビーム電流に対するマイクロ波出力の依存性を測定した結果である。ある条件下(上流ミラーコイル: 560 A, 下流ミラーコイル: 477 A)ではローカルマキシмумが 90 W と 300 W 付近に二つ存在している。

クリプトンをイオン化ガス(メインガス)として、各価数に適した各運転パラメータの性質を現在研究している。さらに、様々なサポートガスを用いてミキシング効果の評価を進めている。

## 4. 金属ビーム

AVF サイクロトロンへの金属ビームの供給は Hyper ECR イオン源の重要な役割の一つである。

### 4.1 鉄 56

Hyper ECR イオン源で供給している鉄ビームは生物照射グループによって行われている重イオンビーム品種改良技術の研究において大きな役割を担っている。昨年のイオン源及び AVF サイクロトロンの改良により、ビーム量が大幅に向上した。

$^{56}\text{Fe}^{15+}$  ビームは Hyper ECR イオン源から引き出された後、AVF サイクロトロンで 5.01 MeV/u まで加速される。チャージストリッパを通して 24 価までストリッパされ、理研リングサイクロトロン(RRC)へ入射する。Table 1 は過去一年のビーム量とトランスミッション改善の推移を表している。ターゲットでのビーム量は 10 倍以上になっている。

### 4.2 リチウム 7

リチウム 7 は CNS の低エネルギー不安定核生成分離装置(CRIB)で天体核実験に用いられている。要求

Table 1: Particle current of iron beam at Faraday cups from hyper ECRIS to the target. IH10: hyper ECRIS. I36: before injection to AVF. C01: after extraction from AVF. D50: before target.

Date	$^{56}\text{Fe}^{15+}$ [pnA]			$^{56}\text{Fe}^{24+}$ [pnA]
	IH10	I36	C01	D50
Dec. 11, 2019	140.0	106.7	14.0	0.7
Jul. 3, 2020	300.0	266.7	53.3	2.8
Sep. 16, 2020	506.7	266.7	45.3	4.0
Feb. 16, 2021	386.7	346.7	106.7	8.0

エネルギーに応じて  $^7\text{Li}^{2+}$  と  $^7\text{Li}^{3+}$  を供給している。

真空中ではリチウムの融点と沸点が近いため適切な蒸気生成を維持するには試料温度を 200~300°C 付近でコントロールする必要がある。また蒸気生成とイオン化を同時に制御することは非常に困難であった。しかし最近の研究により、プラズマ光の色分布を観察することで再現性良く最適パラメータを見つけられるようになってきた。

価数はサポートガスの種類を変えることで変更できることがわかった。これまでヘリウムをサポートガスに使い、イオン源で  $^7\text{Li}^{2+}$ : 142.5  $\mu\text{A}$ ,  $^7\text{Li}^{3+}$ : 41.3  $\mu\text{A}$  を得たが、3 価を増やそうと制御パラメータを動かしてもほとんどビーム量は変わらなかった。そこでサポートガスを  $\text{H}_2$  に切り替えたところ、リチウムの価数はほぼ完全に 2 価から 3 価に移動した。Figure 3 にほとんど  $^7\text{Li}^{3+}$  になったリチウムビームのスペクトルを示す。AVF サイクロトロンからの出射ビームの最大電流値は  $^7\text{Li}^{2+}$  と  $^7\text{Li}^{3+}$  でそれぞれ 3.6  $\mu\text{A}$  と 5.2  $\mu\text{A}$  である。これは 2018 年に比べ倍増している [3]。

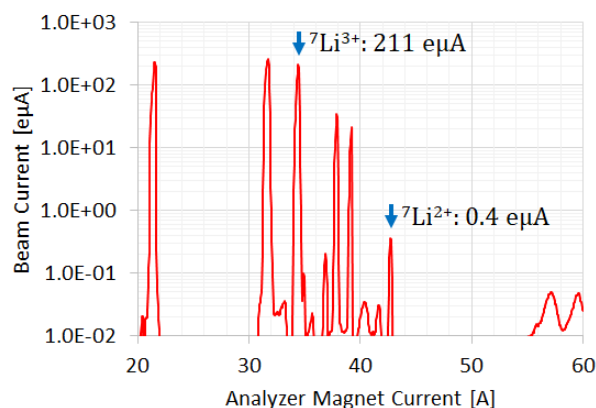


Figure 3: Ion spectrum of  $^7\text{Li}^{3+}$  beam with  $\text{H}_2$  gas mixing.

## 参考文献

- [1] Y. Ohshiro *et al.*, CNS Annual Report 2019, 53 (2021).
- [2] K. Suda *et al.*, Proceedings of the 18th PASJ Meeting, THSP01, 2021.
- [3] Y. Ohshiro *et al.*, CNS Annual Report 2018, 51 (2020).