

Developments of RIKEN New superconducting ECR ion source.

Yoshihide HIGURASHI ^{#A)}, Takahide NAKAGAWA^{A)}, Junichi OHNISHI^{A)}, Hiromitsu HABA^{A)}, Eiji IKEZAWA^{A)}, Masaki FUJIMAKI^{A)}, Yutaka WATANABE^{A)}, Misaki KOMIYAMA^{A)}, Masayuki KASE^{A)}, Akira GOTO^{A)}, Osamu KAMIGAITO^{A)}, Toshimitsu AIHARA^{B)}, Masashi TAMURA^{B)}, Akito UCHIYAMA^{B)},

^{A)} RIKEN Nishina Center 2-1 hirosawa Wako, Saitama JAPAN, 351-0198

^{B)} SHI Accelerator Service, Ltd. 1-17-6 ohsaki, Shinagawa-ku Tokyo JAPAN, 141-0032

Abstract

To increase the beam intensity of highly charged heavy ions for RIKEN RIBF project, we constructed and tested RIKEN new SC-ECRIS. Using it, we intensively studied the effect of the magnetic field gradient and ECR zone size on the beam intensity systematically. In this experiment, it was clearly seen that the gentler field gradient and larger ECR zone size give higher beam intensity of highly charged heavy ions. Based on these studies, we produced 500 μA of Ar^{11+} and 350 μA of Ar^{12+} at the RF power of 1.8kW. For producing highly charged U ion beam, we used the sputtering method and obtained 0.7~2 μA of $\text{U}^{35+-27+}$ ion beams. In this summer, we will try use the 28 GHz microwaves to increase the beam intensity.

理研新超電導 ECR イオン源の開発研究

1. はじめに

理研 RIBF 計画では 2007 年にウランビームの加速に成功以来、2008 年には 10 倍のビーム強度 (最大 0.4 pA) 増強を行い、わずか 4 日間のビームタイムで 40 種以上の新同位元素の生成に成功している^[1]。しかしながら既存のイオン源からのウランビーム強度は要求量の数 100 分の 1 にしか達しておらず、さらなるビーム強度増強が望まれていた。この増強のため 2007 年から新しい 28 GHz 超電導 ECR イオン源の製作を開始し 2009 年に 18 GHz マイクロ波源を用いてファーストビームの生成に成功した。その後種々の改良を施すことで現在、多価ウランイオンビーム強度が 2008 年時の約 10 倍に達している。本稿では多価イオンビーム増強のためのテスト実験結果の詳細およびウランビーム生成実験の結果について報告する。

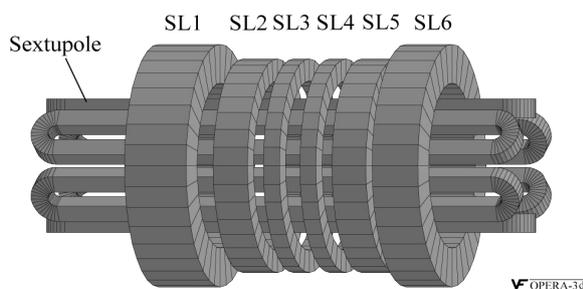


図 1. 超伝導コイルの概略図

2. 超電導 ECR イオン源の構造

図 1 は超電導コイルの概略図である。このイオン源の特徴は 6 つのソレノイドコイルによって ECR ゾーンでの磁場勾配、大きさを独立に変化させられることにある。構造の詳細に関しては文献[2, 3]を参照されたい。高周波数のマイクロ波 (18 GHz 以上) を用いる超電導 ECR イオン源の場合、プラズマから放射される X-線のクライオスタットへの侵入によってクライオスタット内の温度が上昇し、超電導状態を維持できない危険性が報告されている。この X-線侵入によるクライオスタット温度上昇を防ぐために、2009 年秋に GM-JT 型冷凍機 (冷凍能力 5 W@4 K) 追加設置した。

3. 試験結果

3.1 ECR ゾーンの大きさ、ECR 点における磁場勾配の効果

従来のイオン源は 3 つのソレノイドコイルを用いてミラー磁場を生成していたため^[4] B_{\min} を変化させると磁場勾配、ECR ゾーンの大きさが同時に変化し、これらがビーム強度、ECR プラズマにどのような影響を与えるかはあきらかではなかったが、文献[2]でも述べたように、本イオン源は 6 個のソレノイドコイルによってミラー閉じ込め磁場を形成するため、ECR ゾーンの大きさ、ECR 点における磁場勾配を独立に設定できる特徴を有している。

図 2 は Ar^{11+} イオンビーム強度の磁場勾配、共鳴領域の大きさ依存性を測定した結果である。2 つの要

[#] higurasi@riken.jp

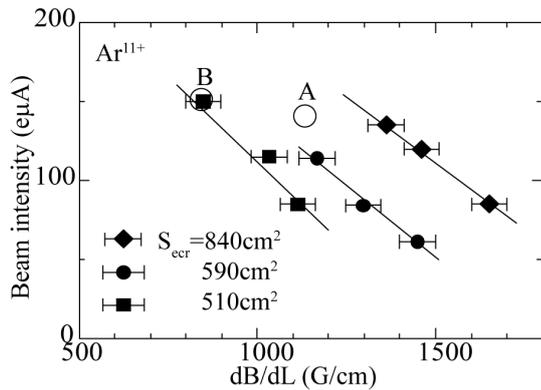


図 2. Ar¹¹⁺イオンビームの平均磁場勾配依存性

素の影響のみを調べるためにマイクロ波パワーは 500W, RF 入射側最大ミラー磁場強度 (B_{inj})、プラズマチャンバー内壁表面での 6 極磁場強度 (B_r)、及びビーム引出側最大ミラー磁場強度 (B_{ext}) はそれぞれ 2.2 T, 1.15 T, 1.3 に、ビーム引出し電圧は 17 kV に固定された。図から明らかなように同じゾーンサイズであれば共鳴点における磁場勾配が緩やかなほどビーム強度が増加する傾向に、また同じ磁場勾配であれば ECR 領域が広いほど多価イオンビーム強度が強い傾向にあることがはっきりとわかる。

図 3 は Ar¹¹⁺イオンビームの RF パワー依存性である。ビーム強度は RF パワーの増加とともに直線的に増加していることが分かる。図中 A と B は図 2 中に示された A と B と同一の磁場勾配、ECR 共鳴領域を採用した場合の結果である。

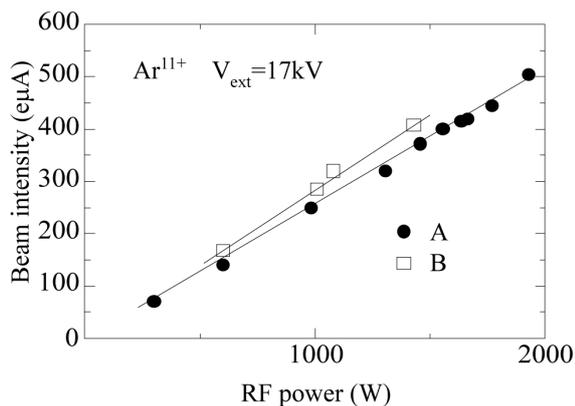


図 3. Ar¹¹⁺ビーム強度の RF パワー依存性。

3.2 クライオスタットへの X-線流入

高周波数のマイクロ波を用いた ECR イオン源の場合、プラズマ中で発生する高エネルギーの X-線はプラズマチャンバー、クライオスタット外壁を透過し、クライオスタットの温度上昇を引き起こすこと

が分かっている。^[5] 過大な X-線侵入はクライオスタットの温度上昇を引き起こし最終的にはコイルの超電導状態を保てなくなる危険性があるためできるだけ低く抑えることが肝要である。

図 4 は図 2 中 A, B の条件下での熱侵入を測定したものである。図から明らかなように磁場勾配が緩やかなほど、熱侵入が大きくなる。これは緩やかな磁場勾配によって高エネルギー X-線が大量に発生しクライオスタット内に侵入、圧力上昇を促しているものと考えられる。ビーム強度に関しては A, B ともそれほど大きな違いはないが熱侵入の観点からは B のほうが低くイオン源運転においてはより条件が良いことが分かる。

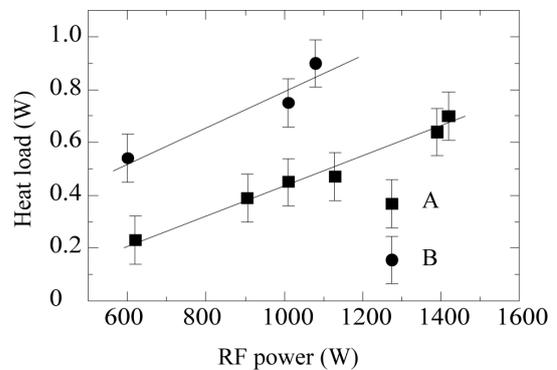


図 4. クライオスタットへの熱侵入の RF パワー依存性。

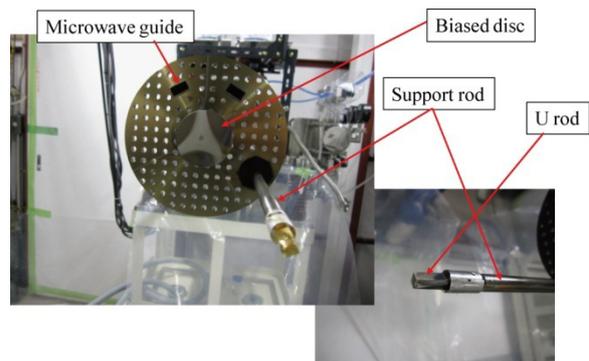


図 5. RF 導入側フランジの写真

3.3 多価ウランビーム生成

大強度多価ウランビーム生成にはいくつかの手法があるが、今回はスパッタリング法を採用しビーム生成試験を行った。図 5 は RF 導入側フランジの写真である。図中 support rod, U rod と示された箇所がスパッター法を用いる際に使用される。ロッドにはプラズマ中のイオンを用いてスパッターさせるため、

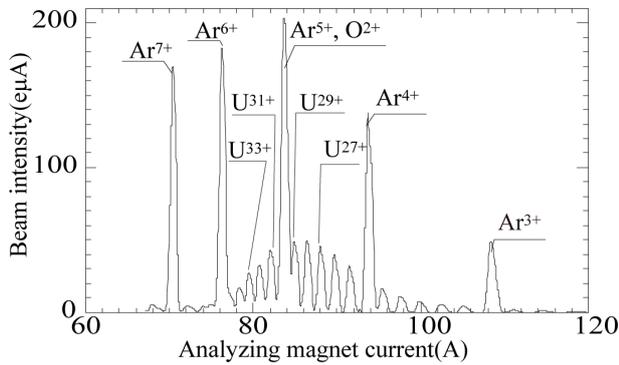


図6. ウランイオンビーム生成時の価数分布

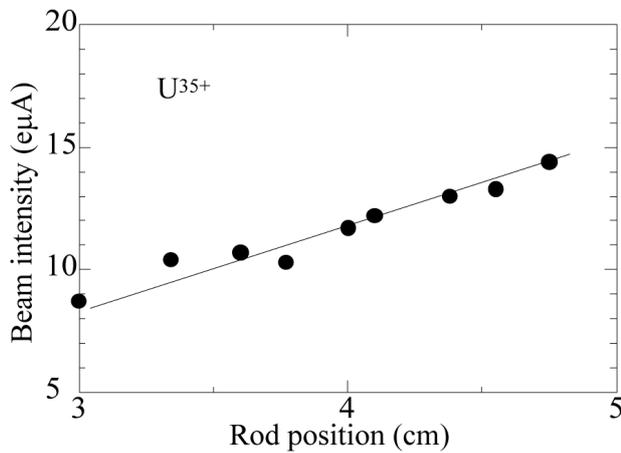


図7. U^{35+} ビーム強度のロッド位置依存性

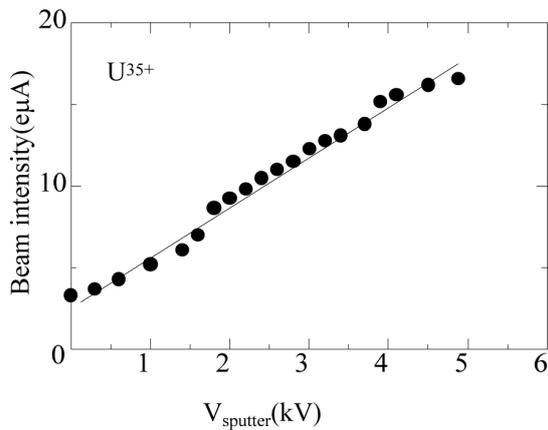


図8. U^{35+} ビーム強度のスパッター電圧依存性

チャンバーに対して負の高電圧が印加される。ウランは高温で他の金属と激しく反応し合金を生成してしまい金属ウランとしての使用が不可能となる。こ

の問題を回避するため金属ウランを支える support rod は2重管構造で冷却水を流せ、プラズマ中での金属ウランの温度上昇を極力抑えられる構造になっている。ロッドの位置は遠隔操作で 0.5 mm 程度の精度で決定できる。ビーム強度はロッド位置、スパッター用高電圧、ガス圧、RF パワーによって最適化される。図6はUイオンビーム生成時の価数分布である。プラズマ生成用電離ガスとして $Ar+O_2$ を用いた。RF パワーは ~ 900 W。引き出し電圧は 15 kV である。図7は U^{35+} ビーム強度のロッド位置依存性である。図8は U^{35+} ビーム強度のスパッター電圧依存性である。ビーム強度はロッド位置が ECR ゾーンに近ければ近いほど、電圧が高いほどビーム強度が増加していることがわかる。通常 ECR ゾーンに近づくにつれてプラズマ密度は増加するためロッド位置

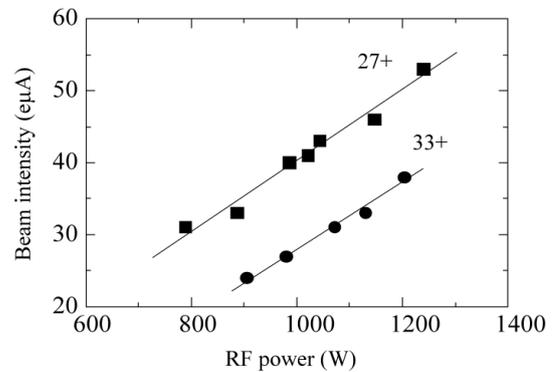


図9. U^{27+} , U^{33+} イオンビームのRFパワー依存性

が ECR ゾーンに近づくにつれてスパッタリングに使用されるイオン数が増加する。結果として図7に示す様な傾向が観測されたと推察される。同様にして、スパッタリング電圧の上昇はロッドに入射するイオン数の増加およびスパッタリング率の増加をうながし中性U原子の生成率が増加、ビーム強度が増加するものと考えられる。図9は多

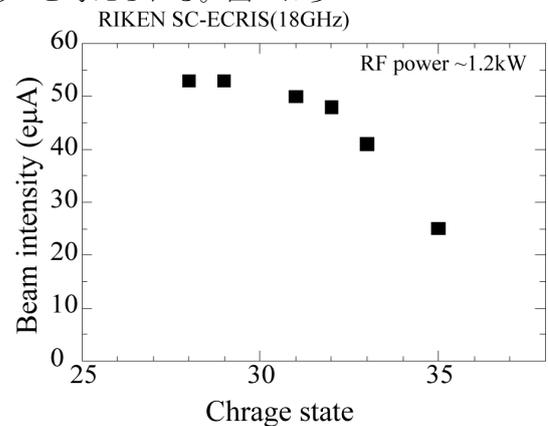


図10. 各価数に対するビーム強度

価ウランイオンビームの RF パワー依存性である。本実験の範囲内ではビーム強度は直線的に増加していることがわかる。図 10 に各価数に対するビーム強度を表す。RF パワーは最大 1.2 kW であった。27+から 32+に関しては 50 eμA 以上のビーム強度生成に成功している。

理研 RFBF 計画で要求されるウランの価数は 35+ であり、今回の実験で最大 25 eμA の生成に成功した。このビーム強度は理研で開発された従来の 18 GHz ECR イオン源のビーム強度の約 10 倍である。

図 11 に電離ガスとして Ar を用いた場合の rms エミッタンスの価数依存性を示す。ここで示す rms エミッタンスは

$$\epsilon_{rms} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

で計算されたものである。図から明らかなように引き出し電圧が一定の場合価数が大きくなるとエミッタンスは小さくなる傾向にある。35+に関しては 100 πmm・mrad と加速器のアクセプタンス (~150 πmm・mrad) よりも小さく 90 %以上の通過効率で加速できる可能性があることが明らかになった。

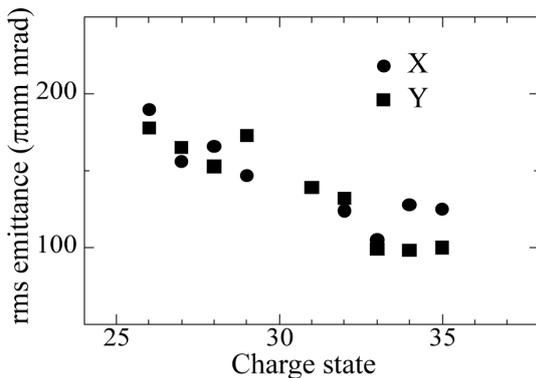


図 11. rms エミッタンスの価数依存性

4. 今後の計画

2009 年春にファーストビームの生成に成功して以来種々のテストを 18 GHz のマイクロ波源を用いて行ってきた。2010 年 6 月より新入射器 (RIRAC 2) [6] の外部イオン源として第二イオン源室への移設を開始し、7 月に設置完了、改めて励磁試験を行っている。励磁試験完了後はジャイロトロンを用いた 28 GHz マイクロ波源を稼働、超電導 ECR イオン源のマイクロ波源として使用する予定である。

5. まとめ

理研RIBF計画のために製作された超伝導ECRイオン源を用いて、従来測定不可能であったECRゾーンの大きさ、磁場勾配の多価イオンビーム強度に与える影響を独立に測定することができた。その結果、磁場勾配が緩やかなほど、ゾーンサイズが大きいほど

ビーム強度が強くなることが初めて明らかになった。多価ウランイオンビームは本イオン源の使用によって現状でも従来の10倍以上のビーム強度増強の可能性が開けた。

参考文献

- [1] T. Ohnishi, "Identification of 45 new neutron-rich isotopes produced by in-flight fission of a 238U beam at 345MeV/nucleon" JPSJ in press
- [2] J. Ohnishi et al, 第6回加速器学会年会 p637(2009)
- [3] Y. Higurashi et al, 第6回加速器学会年会 p377(2009)
- [4] C. Lyneis et al, Rev. Sci. Instrum. 75 1389(2004)
- [5] D. Leitner et al, Rev. Sci. Instrum. 79 02A325(2008)