

大強度多価重イオンビーム生成用 ECR イオン源の開発

DEVELOPMENT OF ECR ION SOURCE FOR PRODUCTION OF THE INTENSE BEAM OF THE HIGHLY CHARGED HEVAY IONS

中川孝秀^{#, A)}

Takahide Nakagawa ^{#, A)}

^{A)} Nishina center for Accelerator-Based Science, RIKEN, Hirosawa 2-1, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract

Electron cyclotron resonance (ECR) ion sources for production of intense beam of highly charged heavy ions are widely used as an external in source for heavy ion accelerator. Especially, it is one of the key devices of the heavy ion accelerator facilities for radio isotope beam production. At RIKEN, several ECR ion sources have been constructed and used for production of the intense beam in the past 30 years. Moreover, we studied the effects of the key parameters (magnetic field distribution, RF power, gas pressure etc) of the ion source on the beam intensity of highly charged heavy ions and ECR plasma. In this contribution, we present the effect of the key parameters, especially magnetic field distribution, on the beam intensity of the heavy ions and the performance of the ECR ion sources at RIKEN

1. はじめに

多価イオンビーム生成用 ECR イオン源は現在重イオン加速器の外部イオン源として数多く用いられ、特に Radio-isotope (RI) ビームを生成する加速器施設においては大強度重イオンビームを供給する基幹装置の一つとして使用されている。図 1 は世界の代表的な ECR イオン源から生成された重イオンビーム強度の過去約 30 年にわたる変化を示したものである。例えば、 Ar^{8+} は数 $10\mu\text{A}$ から 2mA 、 Xe^{30+} は 10 から数 $100\mu\text{A}$ へと飛躍的に増加している。ECR イオン源の基本的な構造 (minimum B structure) は第一号機から現在までほとんど変わっていない。図 1 に示されるような進展はイオン源に使用している技術 (永久磁石、超伝導マグネット等) の発展および、プラズマ中での多価イオン生成機構の理解に立脚したイオン源構造の改良等によるものが大きい。ECR イオン源は磁気ミラー型核融合装置を基に開発されたイオン源であり、基本的な性質は磁気ミラー装置に類似しているが、重イオン加速器等に多価重イオンビームを供給するために、イオン温度は極力低く、また閉じ込めは多価イオンの価数、ビーム強度の要求に合わせ最適化するという新たな要求が加わり独自の開発がなされてきた。

理化学研究所ではサイクロトロンを中核加速器として重イオンビームを生成し、特に 1980 年代半ばからは大強度重イオンビーム生成のため ECR イオン源を製作、ビーム強度増強のための改良、研究を行い、現在では RI ビームファクトリー計画^[1]遂行のため、重イオン加速器群の外部イオン源として 4 台の ECR イオン源が設置されている。

本稿ではまず理研で行われた最新の研究を中心に ECR イオン源の各要素 (磁場、マイクロ波強度、周波数、ガス圧など) の内、特に磁場分布が多価イオンビーム強度、プラズマに与える影響に関して述べ、

次に理化学研究所において開発されたイオン源の現状について簡単に紹介する。

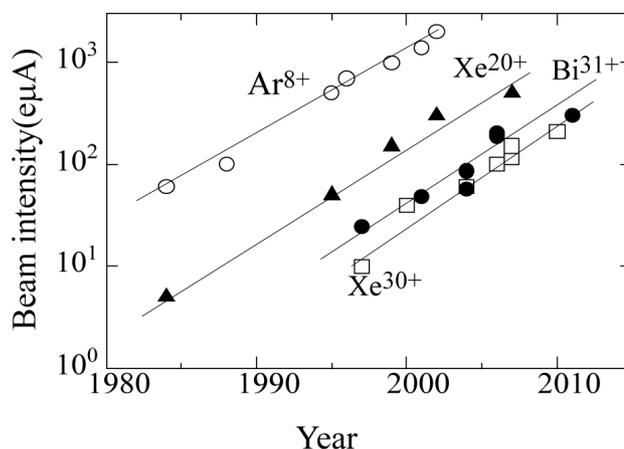


Figure 1: Time evolution of the beam intensity of highly charged heavy ions.

2. 磁場分布がビーム強度に与える影響

通常イオン源から生成されるビーム強度は

$$I_q = \frac{qn_q V}{\tau_q} f \quad (1)$$

であらわされる。ここで、 I_q, n_q, V, τ_q は各々価数 q のイオンのビーム強度、イオン密度、プラズマ体積、イオン閉じ込め時間を表す。 f はプラズマ中で生成されたイオンがビーム引き出し口に到達する割合を表す。要求される価数の重イオンビーム強度を増加させるためにはプラズマ中で価数 q のイオン生成に最適な $n_e \tau_q$ (ここで、 n_e は電子密度) と T_e (電子温度) の状態を保ちつつ τ_q をできるだけ短くすることが重要となる。文献[2]にも記述されるように、

[#] nakagawa@riken.jp

ECR イオン源は電子ビームイオン源と異なり、これらの量(T_e , n_e , τ_q)を独立にコントロールすることはできないため、これらの量に複雑に影響を与える磁場分布、マイクロ波パワー周波数、ガス圧など種々のパラメータを駆逐することによりビーム強度増強に努めてきた。このためこれらのパラメータがプラズマおよびビーム強度に与える影響を研究することはイオン源性能向上にとってきわめて重要となる。ECR イオン源の磁場分布の特徴は、マイクロ波入射側最大磁場 (B_{inj}), ビーム引き出し側最大磁場 (B_{ext}), ミラー最小磁場 (B_{min}), 動径方向最小磁場 (B_r) の4つに集約される (図2)。

入射されたマイクロ波は ECR (電子サイクロトロン共鳴) 領域でプラズマに吸収され、生成されたプラズマはミラー磁場によって閉じ込められる。図2. 中 B_{ecr} は共鳴点における磁場強度を現す。ミラー磁場にはその形状から速度空間上でロスコーンと呼ばれる領域が存在し、その領域に侵入した粒子はミラー磁場から逃走する。ロスコーンの大きさはミラー磁場の最小値と最大値の比 (ミラー比) に強く依存する (ミラー比が大きい場、ロスコーンは小さくなる。) マイクロ波の吸収機構は文献[3]に詳しく述べられているように、共鳴点における磁場勾配、マイクロ波によって生成される電場勾配 (またはプラズマ密度) に強く依存する。プラズマが入射されたマイクロ波パワーの一部のみを吸収するのであれば共鳴領域の大きさも吸収に影響を与えると推察される。前述の磁場分布に関する4つのパラメータはこれらの量 (ロスコーン、マイクロ波吸収) に強い影響を与えることは言うまでもない。

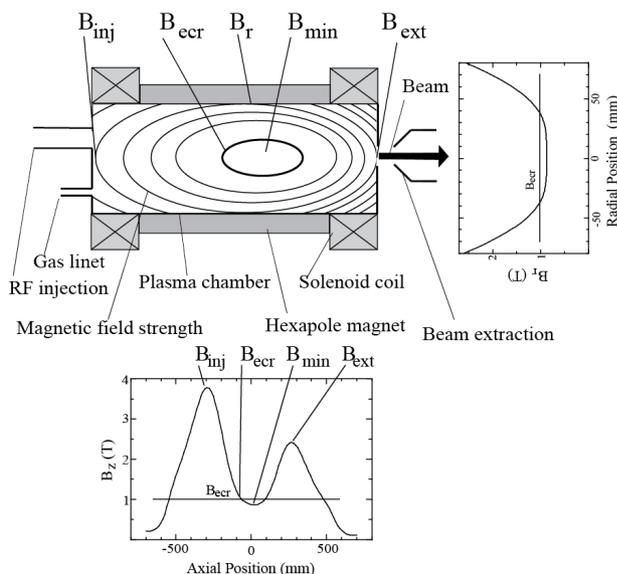


Figure 2: Schematic drawing of the ECR ion source.

2.1 B_{min}

図3は Ar^{11+} ビーム強度の B_{min} 依存性である。用いたマイクロ波周波数は 18GHz. ビーム強度は B_{min} の増加とともに増え、ある値から徐々に減少する。

B_{min} はミラー比、共鳴点での磁場勾配および共鳴領域の大きさに影響を与える。一般に B_{min} を増加させると磁場勾配が緩やかになりマイクロ波の吸収率が増加し、共鳴領域、ミラー比は小さくなる。このビーム強度が最大になる B_{min} の値を $(B_{min})_{opt}$ として、種々のイオンに関してその値を求めた結果、 $(B_{min})_{opt}$ はイオン種、価数にあまり依存せず、一定値を取ることがわかった。(14,18GHz に対して $\sim 0.8B_{ecr}$) [4] 最近の研究で 28GHz のマイクロ波を使用したイオン源に関して同様の傾向が見られた。(図4)

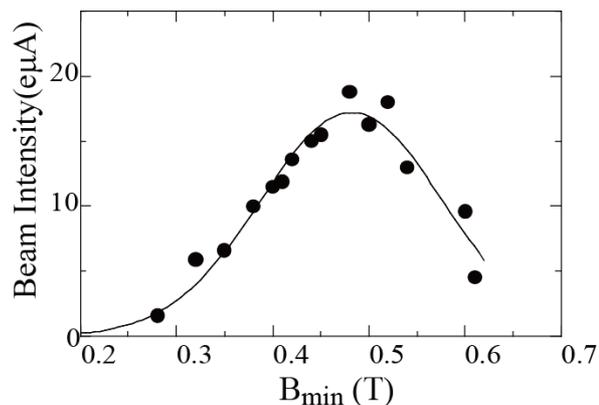


Figure 3: Beam intensity of Ar^{11+} as a function of B_{min} .

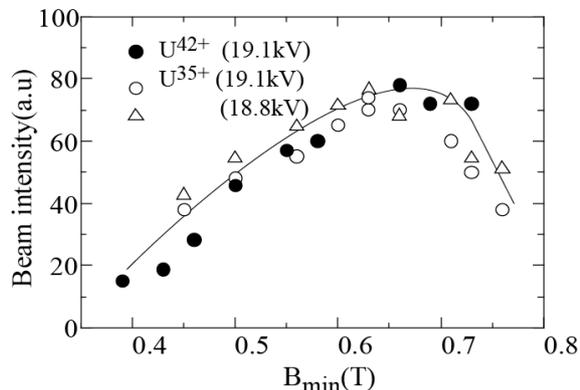


Figure 4: Beam intensity of highly charged U ions as a function of B_{min} .

マイクロ波の吸収は磁場勾配、共鳴領域を考慮しても B_{min} とともに大きくなり実験で示されるように 18GHz のマイクロ波を用いた場合、 $\sim 0.8B_{ecr}$ においてビーム強度が最大になることはない。近年、プラズマ不安定性が $(B_{min})_{opt}$ に強い影響を与えている可能性があることを示唆する結果が報告されている。[5] 前述のように B_{min} はいくつかの重要なパラメータを同時に変化させてしまうためひとつの要素の影響を単独で測定することができない。この問題を解消するため、後述する 28GHz 超伝導 ECR イオン源を用いて、共鳴領域を一定に保ちつつ、磁場勾配を変化させ、多価イオンビーム強度の測定を行った結果を図5に示す。実験は 18GHz マイクロ波を用い

て行われた。図から明らかなようにビーム強度は磁場勾配によって急激に変化すること勾配が緩やかなほどビーム強度が増加することがわかる。

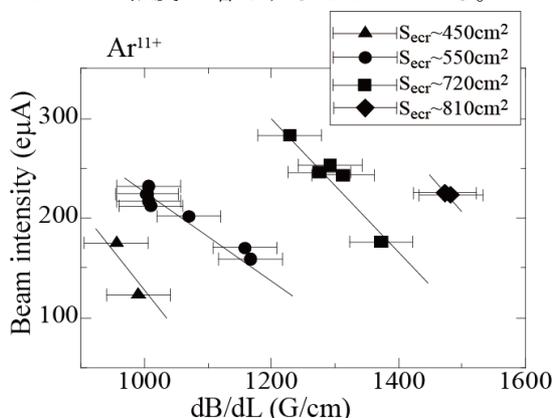


Figure 5: Beam intensity of Ar^{11+} as a function of average magnetic field gradient at ECR zone.

2.2 磁気ミラー

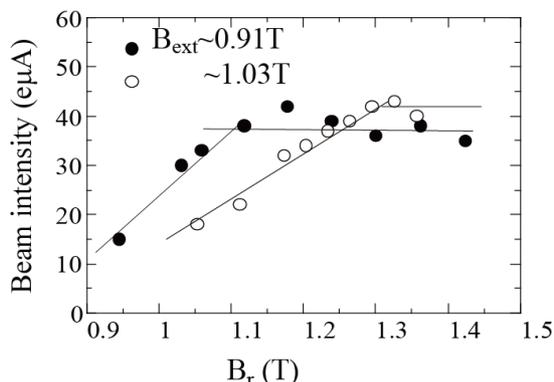


Figure 6: Beam intensity of Xe^{20+} as a function of B_r .

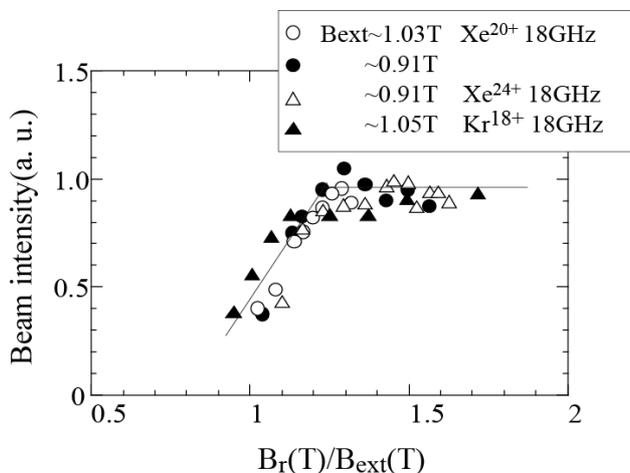


Figure 7: Beam intensity of highly charged heavy ions as a function of B_r/B_{ext} .

ミラー磁場はイオンのプラズマからの流失を抑制する効果を持つためビーム引き出し領域以外へのイオンの流失を最小にするように磁場分布を設定するのが理想的な状態である。前述のパラメータを用いる

と ECR イオン源に関しては3つのパラメータ (B_{inj}/B_{min} , B_r/B_{min} , B_{ext}/B_{min}) が考えられる。つまり、 B_{ext}/B_{min} 以外はミラー比を極力大ききしてイオン損失をゼロに近づければよいことになる。図6は多価イオンビーム強度 (Xe^{20+}) の B_r 依存性である。実験に使用したマイクロ波周波数及びイオン源は18GHz(マイクロ波パワー500W)、28GHz超伝導 ECR イオン源である。ビーム強度は B_r の増加とともに増加しある値以上で一定値を保つ。またビーム強度が一定値になる B_r は B_{ext} の値に依存する。 (B_{ext} が大きければビーム強度が一定値となる B_r も大きくなる。) 図7は多価重イオンビームの B_r/B_{ext} 依存性を示したものである。今回の実験の範囲内ではイオン種、価数によらず、ビーム強度は B_r/B_{ext} とともに増加し、ほぼ $B_r \sim 1.2B_{ext}$ で最大値を向かえその後一定の値をとるように見える。 B_r と B_{min} によって形成されるロスコーンは B_r の増加とともに小さくなる。 B_r/B_{min} が B_{ext}/B_{min} に比較して十分小さい時は荷電粒子の損失が B_r によって支配されていると考えられる。同じ値程度になると各々同量程度の粒子が流失し、 B_r が B_{min} に比較して大きくなると B_r 方向を通しての粒子の損失が小さくなり、粒子損失は B_{ext} 方向が支配的になる。さらに B_r を増加させても B_{ext} 方向の損失が支配的であるため、変化はない。この流失量はイオン及び閉じ込め時間に直接影響を与え、さらには電子温度などにも影響を与えることになると考えられる。 B_{inj} についても同様の結果が得られているがビーム強度が一定となる B_{inj}/B_{ext} は B_r の場合に比較して高くなっている。この差異、メカニズムに関するより詳細な研究が望まれる。

3. 理研において開発された ECR イオン源

前章でイオン源構成要素(磁場分布)が多価イオンビーム強度に与える影響の研究結果の一部を紹介したが、理研ではこれらの研究結果の蓄積とともに研究結果をもとに ECR イオン源の製作、性能の向上に努めてきた。本章では理研で製作された3つのタイプの ECR イオン源について報告する。

3.1 18GHz ECR イオン源^[6]

18GHz マイクロ波を用いた ECR イオン源は1990年代半ばに製作され理研重イオン線形加速器の外部イオン源として用いられている。プラズマチャンバーは直径~72mm、長さ~250mmである。 B_{ext} が比較的 low、プラズマチャンバーの大きさが比較的小さいため、 Xe^{30+} などの多価イオン生成には適さないと考えられるが、比較的 low 価数のイオン (Ar^{8+} , Xe^{20+} など) は大強度ビームの生成に成功している。

3.2 Liquid He free 超伝導 ECR イオン源^[7]

Liquid-He free 超伝導 ECR イオン源はミラー磁場を形成するソレノイドコイルに超伝導コイルを用いて生成できる磁場強度を上げている。通常超伝導コイルには超伝導状態を保つために液体ヘリウムを用いるが、本装置は小型冷凍機によって直接コイルを冷やす手法を用いているため、液体ヘリウムの供給

を必要としない。6極磁石には永久磁石が用いられている。超伝導ソレノイドコイルを使用して $B_{inj} \sim 3T$, $B_{ext} \sim 2T$ の磁場強度を形成できる。

液体ヘリウムを使用する煩雑さがなく、かつ低消費電力で高磁場が発生できるため、多くの研究所で使用されている。[8]

3.3 28GHz 超伝導 ECR イオン源

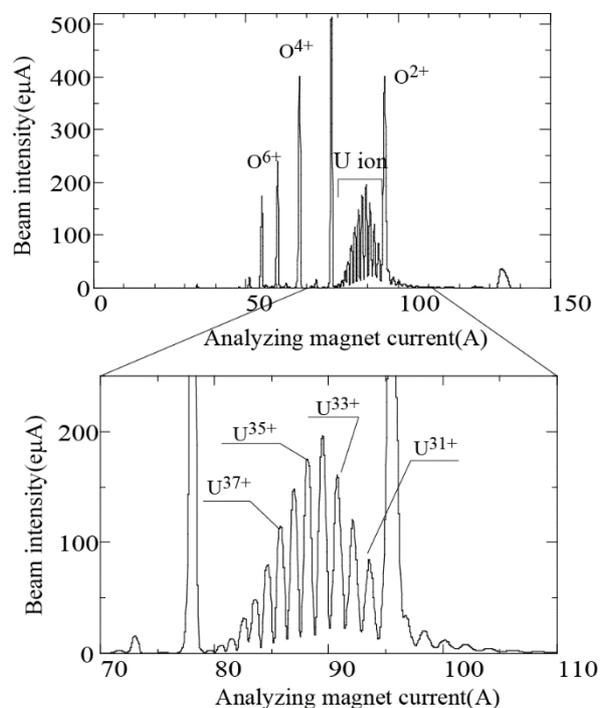


Figure 8: Charge distribution of highly charged U ions. The ion source was tuned to produce U^{35+} ions.

28GHz 超伝導 ECR イオン源は主に重い重イオン (Xe, U など) を生成することを目的として製作された。詳しい構造、現時点での性能に関しては文献 [9] を参照されたい。このイオン源の特徴は6つのソレノイドコイルを配置しているため、ミラー磁場の形状を従来の ECR イオン源と比較してより自由に変化させることができる点にある。つまり前述のように共鳴領域を一定にしつつ磁場勾配のみを変化させたり、逆に磁場勾配を一定にしつつ領域の広さを変化させることができる。また“flat” B_{min} [10] といった特殊な磁場配位を形成することも可能である。さらには共鳴領域の位置を変化させることもできる。このように磁場分布に関してより詳細な研究が可能となっている。図8は生成されたイオンビームの価数分布の一例である。イオン源は U^{35+} イオンビーム強度が最大になるようにガス圧等が調整されている。中性ウラン供給のためにスパッタリング法を用いている。通常スパッタリング法はプラズマを擾乱するため大強度多価イオンビーム供給には適さない手法として敬遠されてきたが、理研では種々の改良、研究を施すことでオープンを用いた手法と遜色ない結果が得られている。

4. まとめ

理化学研究所では過去数十年にわたり、ECR イオン源の製作、開発研究を行ってきた。現在では Ar^{8+} は約 $2mA$, U^{35+} も $200\mu A$ を超えるビーム強度の生成に成功している。加速器の外部イオン源として用いる場合、そのビーム強度の安定性、長時間連続運転は重要な要件であるが、すでに U^{35+} ビーム $\sim 100\mu A$ の長時間安定運転に成功し RI ビーム生成量増強の一躍を担っている。

しかしながら ECR イオン源の多価イオンビーム生成機構に関する理解はいまだ進んでおらず、解明すべき課題は山積みの状態である。これらの問題を一つ一つ解決し、イオン源構成要素の多価イオンビーム強度に与える影響を解明は、イオン源構造の最適化 (例えばシンプルかつより低コストなイオン源) につながる。重イオン加速器の外部イオン源としてはより多価のイオンビームを大強度で供給できるイオン源が要求されることは自然な方向である。イオン価数を上げるには高マイクロ波周波数を使用するのが理論的にはもっとも簡単な方法であるが、その性能を十分に発揮するためには高磁場の使用が必須となる。現在使用されている最も高い周波数は 28GHz であり、必要な磁場は $B_r > 2T$, $B_{inj} > 3T$ である。より高周波数の使用はこれより高い磁場を使用する必要があるが、そのマグネット構造の複雑さから達成にはいくつかの困難が伴っているのが現状である。早急な研究開発が望まれる。

謝辞

本稿で述べられた研究結果は紙面制限の関係上、理研で行われたものの一部であり、理研で行われた同様な研究開発はすべて理研加速器グループの方々との共同によるものである。この場を借りて、研究開発に携わってくださった方々に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B 261(2007)1009.
- [2] R. Geller, “Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas”, IOP Publishing, Bristol, 1996.
- [3] M. Lieberman and A. Lichtenberg, “Principles of plasma discharges and material processing”, John Wiley and Sons, Inc, New York, 1994.
- [4] 中川 孝秀, “ECR イオン源”, 日本物理学会誌, vol 62, no 5, 2007, p329.
- [5] O. Tarvainen et al, Plasma Sources and Technology, 23(2014)025020.
- [6] T. Nakagawa et al, Nucl. Instrum. Methods B 226(2004)392.
- [7] T. Kurita et al, Nucl. Instrum. Methods, B 192(2002)429.
- [8] 例えば A. Efremov, et al, Rev. Sci. Instrum. 83(2012)02A334.
- [9] Y. Higurashi et al, Rev. Sci. Instrum. 85(2014)02A953.
- [10] G. D. Alton and D. N. Smithe, Rev. Sci. Instrum. 65(1994)775.