

話 題

ECR イオン源の開発—理研での結果を中心に—

中川 孝秀*^{1,2}

Development of ECR Ion Sources at RIKEN

Takahide NAKAGAWA *^{1,2}

Abstract

The beam intensity of highly charged heavy ions from the electron cyclotron resonance (ECR) ion source has been rapidly increased in the last three decades. Especially, in the last decade, the performance of the ECR ion source was dramatically improved to meet the requirements for the super-heavy element search experiment and the intense radio isotope beam production. At RIKEN, we constructed several high performance ECR ion sources for those projects. Furthermore, to improve the performance, we studied the effect of the key elements of the ion source on the beam intensity and the plasma. In this article, I describe the brief history of the ion source development and the performance of the ion sources at RIKEN.

1. はじめに

多価重イオン生成用電子サイクロトロン共鳴型 (Electron Cyclotron Resonance: ECR) イオン源は、1970年代に R. Geller とその共同研究者によって多価重イオンビーム生成に成功して以来¹⁾、急速にその性能が向上し、重イオン加速器の外部イオン源として数多く用いられてきた。特に近年、超重元素 (Super Heavy Element: SHE) 探査実験、不安定核ビーム (Radio Isotope Beam: RIB) 生成のための加速器施設建設等、大強度重イオンビームを必要とする計画が進み²⁻⁴⁾ その要求に合わせて種々の ECR イオン源の設計、製作が行われ、その性能をいかに発揮している。

理化学研究所 (理研) では1980年代から多価重イオンビーム強度増強のために重イオン加速器の外部イオン源として ECR イオン源の開発、製作を行ってきた。特に2000年代からは SHE 探査実験⁵⁾ のための大強度多価重イオンビーム生成や、RIB 生成²⁾ のための大強度多価ウランビーム生成に向けて、既存のイオン源の改良、新規イオン源の開発製作に取り組んできた。これらの開発により多価重イオンビーム強度は、過去、約30年

間で例えば、 Ar^{8+} は $\sim 95 \mu\text{A}$ から $\sim 2 \text{mA}$ へ、 Xe^{18+} は $\sim 5.5 \mu\text{A}$ から $\sim 300 \mu\text{A}$ へ、 U^{35+} は $\sim 2 \mu\text{A}$ から $\sim 180 \mu\text{A}$ へと飛躍的に増加した⁶⁻⁹⁾。多価重イオンビーム強度増強のためには、生成のメカニズム、イオン源を構成する要素がプラズマに与える影響の解明、更には、そこから導き出される理想的な状態を実現するための技術の開発が必要不可欠であることは言うまでもない。特に高磁場を発生させるための永久磁石、超伝導マグネットに関する技術の発展はイオン源の性能向上に必要不可欠なものである。

本稿では理研で行われたこれらの開発を中心に、1980年代後半から現在に至る ECR イオン源の進展の概略について報告する。次章ではイオン生成にかかわる物理について短く言及する。第3章では、イオン源を支える技術、各種イオン源について、第4章ではイオン生成にかかわる各種技術について説明する。

2. ビーム強度増強のための基礎研究

プラズマ中の多価重イオンは、高エネルギー電子との衝突による逐次電離によって生成されるため、プラズマ中の電子密度 (n_e)、イオンの閉じ

*¹ 第11回日本加速器学会学会賞 (2014年度) 技術貢献賞受賞者*² 理化学研究所仁科加速器研究センター RIKEN, Nishina Center for Accelerator-Based Science (E-mail: nakagawa@riken.jp)

込め時間 (τ_i), 電子温度 (T_e) が生成に決定的な影響を与える. より多価なイオン生成のためには, $n_e \tau_i$ をより大きくし, 多価イオンの電離に最適な T_e にする必要がある. イオンビーム強度は, $(n_q V / \tau_i) f$ に比例する量であるため (n_q : イオン密度, V : プラズマ体積, f : ビーム引き出し口へイオンが到達する割合), ビーム強度増強には, 前述の条件を保ちつつ n_q , V を増加させ, τ_i を極力短くすることが重要となる. さらにイオン源中プラズマからの荷電粒子の拡散は, 磁場分布, チャンバー形状などに強く依存するため3次元空間において等方的と考えることはできず, ビーム引き出し口への割合を考慮する必要がある. このためビーム強度増強には f の最大化を図ることも重要となる.

図1は ECR イオン源の概略図である. 図に示すように複数のソレノイドコイル, 六極磁石によってミラー磁場が形成され, ECR 現象によって生成されたプラズマは, この磁場によって閉じ込められる. 要求されるビームを生成するために磁場分布, ガス圧, マイクロ波パワー, 周波数などイオン源構成要素を調整し, 前述のパラメータ (n_e , τ_i 等) を最適な値に近づける. 残念ながら

これらのパラメータを独立に制御できる構成要素は存在せず, すべてのパラメータに同時に影響を与える (例えば, ガス圧の増加は電子密度を増加させ, 電子温度, イオン閉じ込め時間を低下させる)¹⁰⁾. この複雑さのため, 各構成要素がパラメータにどのような影響を与えるかを知ることは, イオン源の構造の最適化にとって最も重要な研究となっている. また最適な構造の決定, 製作のためには, 種々の最先端技術が必要となるとともに, イオン源固有の問題を解決するための開発も重要な課題となっていることは言うまでもない.

2.1 進展

イオン源開発当初は, 初歩的なプラズマ物理を基にし, イオン源を構成する要素のパラメータと, 多価イオンビーム強度の相関についての系統的な実験から, 半経験的なスケーリング則が提唱され¹⁾, そのスケーリング則からイオン源のデザイン及び開発が行われた. 1990年代には多価イオンビーム生成のための最適な磁場分布に関する経験則 (High-B mode ; $B_{inj} > 4B_{ecr}$, $B_{ext} < B_r$, $B_r > 2B_{ecr}$: 各パラメータの詳細は図1参照)¹¹⁾ が提唱され, 多くのイオン源がこれらの経験則を基に設計され, 大強度多価イオンビーム生成に成功し

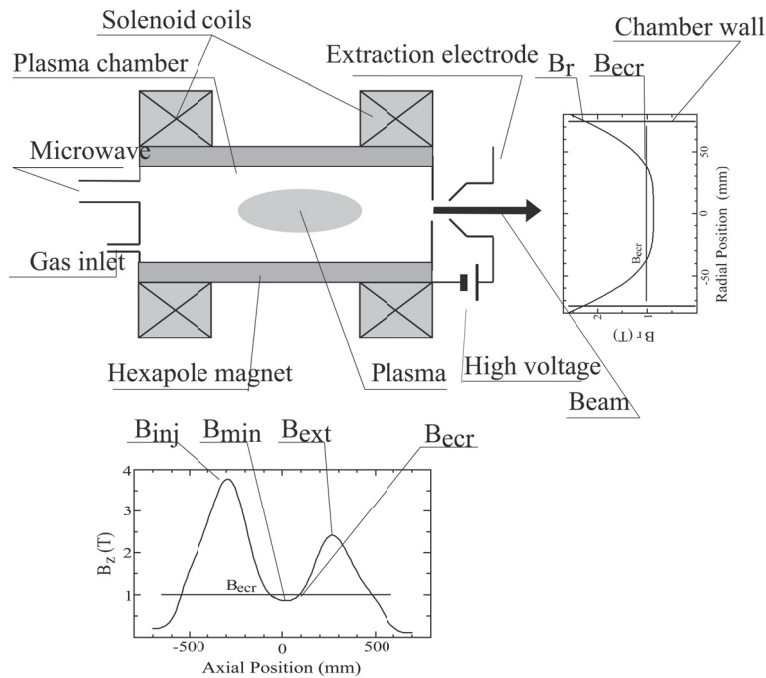


図1 ECR イオン源の構造の概略図. 図中 B_{inj} , B_{min} , B_{ext} 及び B_r はマイクロ波入射側の最大ミラー磁場, ミラー磁場における最小値, ビーム引き出し側の最大ミラー磁場, プラズマチャンバー内壁における動径方向磁場強度を表す. B_{ecr} は ECR 現象が発生する磁場強度. 図中, 動径方向及びビーム軸方向の磁場強度分布を示すグラフは見やすくするために縮尺を変えてある.

ている。本格的なシミュレーション計算は、2000年代に入ってFokker-Planck方程式を用いて行われるようになった¹⁰⁾。計算はいまだ完全ではないが、前述の経験則の傾向と定性的に一致する結果を出している。特に重要なのは、マイクロ波周波数、パワー、磁気ミラー比などの要素がプラズマにどのような影響を与えるのかをはっきりと示している点である。現在ではParticle-in-cell (PIC) コードを用いたシミュレーション計算¹²⁾も行われるようになってきている。

2.2 各構成要素がビーム強度に与える影響

仁科加速器研究センターでは後述するECRイオン源を用いて、構成要素がプラズマ及び多価イオンビームに与える影響を系統的に研究してきた。中でも磁場は生成されたプラズマを閉じ込めるための最も重要な要素であり、発生装置は最も製作コストのかかる部品であるため、最適化は重要な研究課題のひとつである。磁場分布は図1にあるようにいくつかのパラメータ (B_{inj} , B_{min} , B_{ext} , B_r) に集約され表現される。磁場分布の最適化に関する経験則である“High-B mode”は端的には大きなミラー比によるプラズマ閉じ込めを表したものである。興味深いのはビーム強度が、ある一定以上のミラー比で一定値をとることである。図2 a) は理研において、28 GHz 超伝導 ECR イオン源を用いて得られた Xe イオンビーム強度に関する結果である¹³⁾。図に示すようにビーム強度は B_r の上昇とともに大きくなり、ある値以上では一定値を保つ。さらに一定値となる B_r の値が B_{ext} に依存する。ビーム引き出し側と動径方向の磁気ミラーの大きさの比でプロットすると(図2 b)) ほぼ一定の値でビーム強度が一定になることが判明した。つまりこの結果から閉じ込めの良し悪しに加えてロスコーンの大きさの比によってビーム引き出し口方向に流失するイオンの量が大きく変化すると考えられる。

2000年代に入って B_{min} (図1参照) の強さがビーム強度に強い影響を与えることが報告され^{14, 15)} 磁場分布の最適化がさらに促進された。図3 は理研において観測された Ar^{11+} イオンビーム強度の B_{min} 依存性である¹³⁾。 B_{min} の増加とともにビーム強度は増加するが、ある一定磁場強度以上になると徐々に減少し始める。通常磁気ミラーでのプラズマ閉じ込めを考えると、ミラー比

が大きくなるほど(この場合 B_{min} が小さくなるほど)、閉じ込め時間が長くなると考えられるが、マイクロ波の吸収は共鳴点での磁場勾配が緩やかなほど強くなり、プラズマ中の電子温度を高くする¹⁶⁾。磁場勾配は B_{min} の増加とともに緩やかになるため、 B_{min} の上昇とともに電子温度、電子密度ともに上昇し、多価イオン生成に適した状態となると考えられる。この推論を押し進めると、 B_{min} の上昇とともにビーム強度は増加する傾向になるはずであるが、実際には B_{min} が $\sim 0.8B_{ecr}$ で

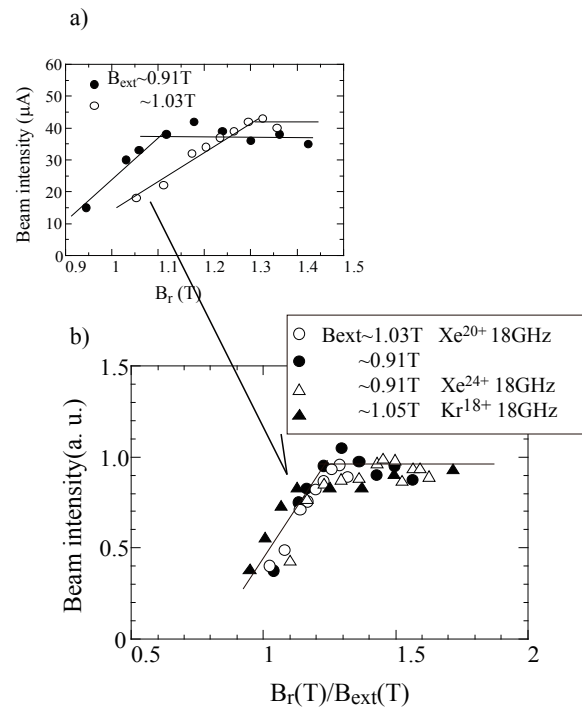


図2 a) Xe^{20+} イオンビームの $B_{ext} \sim 0.91 T, 1.03 T$ 時の B_r 依存性. 実験は後述する 28 GHz 超伝導 ECR イオン源に 18 GHz のマイクロ波を入射して行われた. b) 多価重イオンビーム (Xe, Kr イオン) 強度の B_r/B_{ext} 依存性. 実験は後述する 28 GHz 超伝導 ECR イオン源に 18 GHz のマイクロ波を入射して行われた.

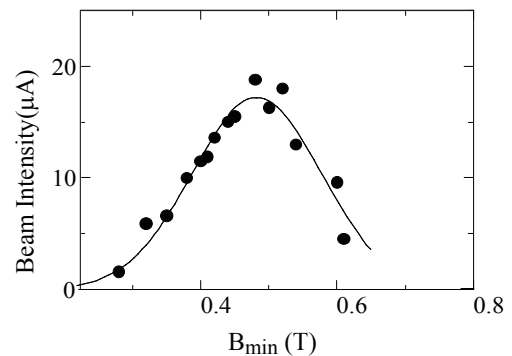


図3 Ar^{11+} イオンビーム強度の B_{min} 依存性. 使用したマイクロ波は 18 GHz, 実験は後述する Liquid-He-Free 超伝導 ECR イオン源を用いて行われた.

ピークを迎え減少することが報告されている¹⁴⁾。近年、 B_{\min} の上昇とともに電子温度があがり、プラズマの不安定性を誘発することが原因であるとの報告がなされ¹⁷⁾、より詳細な研究が進められている。

マイクロ波の多価イオンビーム強度増強への寄与に関しては、Fokker-Planck 方程式を基にしたシミュレーション計算が行われ、マイクロ波周波数が電子閉じ込め時間に大きな影響を与えることがわかってきた¹⁸⁾。この結果としてプラズマ密度、電子温度が上昇し、閉じ込め時間が長くなることと相まって多価イオンの生成効率が上昇することになる。周波数以外のすべての条件を完全にそろえた実験はいまだに行われていないため周波数の効果を定量的に検証するのは難しいが、理研、Catania (イタリア)、LBL (アメリカ)、Lanzhou (中国) のイオン源を用いた多価イオンビーム生成実験の結果から 14 GHz から 28 GHz までの周波数領域においては高い周波数ほど多価イオンビームの強度が強くなることが判明している¹⁹⁻²²⁾。

ECR イオン源内で生成されたプラズマは、その閉じ込めの不完全さからプラズマチャンバ内壁等と相互作用するため、内壁の状態はプラズマに影響を与えることが予想される。この状態を整えることで多価イオンビーム強度を増強するいくつかの手法が考案された。1980 年代半ばに Grenoble (フランス) において、イオン源内で ThO_2 使用後に、多価イオンビームに増強が見られた²³⁾。同時期、LBL においても SiO_2 使用後に²⁴⁾、理研においては、1980 年代後半に Al_2O_3 の使用後同様の結果²⁵⁾が得られた。酸化物でコーティングされた内壁にプラズマからの電子が当たると多くの二次電子を放出し、プラズマに供給されるためと推測されている。LBL における実験の結果、 Al_2O_3 コーティング後のプラズマ電位が、コーティング前に比べ低下していることが判明した²⁶⁾。アルミニウムは、大気中で容易に酸化されるため、 Al_2O_3 と同様の結果が予測され、現在ではアルミニウムを素材としたチャンバが多く、の研究所で用いられている。

コーティングの効果から、外部からの電子の供給は、イオン源の性能向上に良い結果をもたらすことがわかったが、負電圧を印加した金属板をプラズマチャンバ内に設置し、プラズマから流失

する電子を押し戻してやることでもビーム強度が増加することが報告された (バイアスディスク法)²⁷⁾。図 4 a) は後述する 28 GHz 超伝導 ECR イオン源を用いて得られた U^{35+} イオンビーム強度のバイアス電圧依存性である。理研においては後述する 10 GHz ECR イオン源の第一ステージと第二ステージ間に負電圧をかけ、第一ステージで発生したプラズマ中の電子を、第二ステージへ流入させる構造にした結果、多価イオンビーム強度の増加が観測された²⁸⁾。更にバイアスディスクは、その電圧ばかりでなくチャンバ内での位置もビーム強度に影響を与えるという結果が得られた²⁹⁾。図 4 b) に示すようにビーム強度は、ディスク位置に強く依存し不明瞭ではあるが一定のパターンを示しているように見える。このパターンはチャンバ中に存在すると考えられているマイクロ波の定在波と関係があるものと推測されているがその発生機構はいまだ解明されていない。

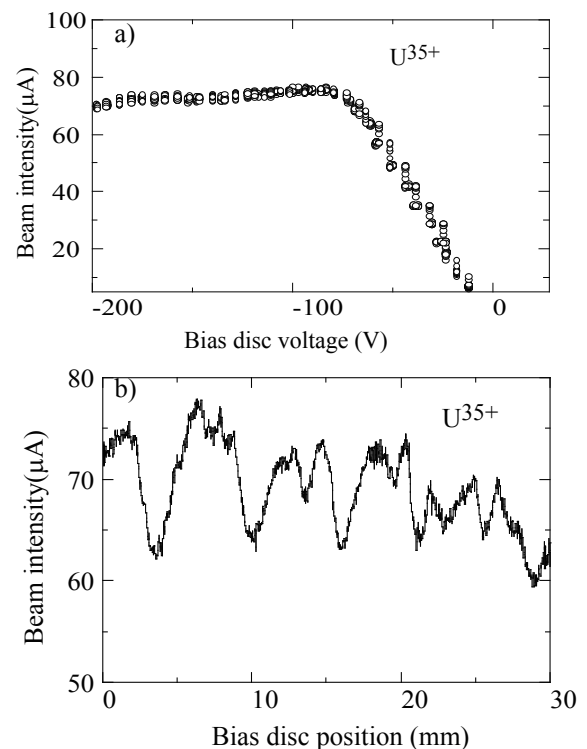


図 4 a) U^{35+} イオンビーム強度のバイアスディスク電圧依存性. 使用したマイクロ波は 28 GHz. 実験は後述する 28 GHz 超伝導 ECR イオン源を用いて行われた. b) U^{35+} イオンビーム強度のバイアスディスク位置依存性. 横軸はマイクロ波入射側チャンバ壁面からの位置を表す. 使用したマイクロ波は 28 GHz. 実験は後述する 28 GHz 超伝導 ECR イオン源を用いて行われた.

3. 理研で開発された ECR イオン源

ECR イオン源はその構造の違いによって Hybrid 型, 超伝導型, 永久磁石型 ECR イオン源の 3 種類に大別される¹⁸⁾. Hybrid 型 ECR イオン源は, 常伝導 (または超伝導) ソレノイドコイルでミラー磁場を, 永久磁石を用い六極磁場を発生させる構造で, 最も長い開発の歴史を持ち, 数多くの研究所で使用されている. 前述の経験則から, 効率よく使用できる最大マイクロ波周波数は, 六極永久磁石の強度の限界から 18 GHz となる. 超伝導 ECR イオン源は, その限界を大幅に向上させるために, 超伝導コイルを用いミラー磁場, 六極磁場を発生させるものである. 1990 年代後半から本格的に開発され, 現在使用されている最高周波数は 28 GHz である. 永久磁石型は永久磁石を用いてミラー磁場, 六極磁場を発生させる ECR イオン源であり, 磁場発生に電力を必要としないため, 供給電力に制限のある環境に多く用いられている. Hybrid 型とは対照的に永久磁石によって発生するミラー磁場強度の限界から, 使用される最高のマイクロ波周波数は, 現在のところ 14 GHz である. ECR イオン源の性能向上は, 各種の最先端技術の進展に負うところが大きい. イオン源で使用されるマイクロ波は, 数 GHz から数 10 GHz にまで及び, 通信技術, 核融合実験等で使用されるマイクロ波発生技術 (ジャイロトロン, クライストロン, 進行波管増幅器 (TWTA)) に, 高磁場発生は, 永久磁石の性能, 超伝導磁石製作技術, 冷凍技術の進展に大きく依存している. 特に永久磁石は, 過去 20 年でその性能が飛躍的に向上し Hybrid 型, 永久磁石型 ECR イオン源の性能向上に寄与している. 理研ではこれらの技術を駆使し 1980 年代後半から 4 台のイオン源の製作開発を行ってきた. 本章ではこれらイオン源の構造, 性能の概略について説明する.

3.1 10 GHz ECR イオン源³⁰⁾

10 GHz ECR イオン源は, AVF サイクロトロンの外部イオン源として 1980 年代後半に製作されたイオン源で, 二つのプラズマ生成域 (第一, 第二ステージ) を持つ. 前述の Al_2O_3 コーティング, プラズマカソード法を使用し, 多価イオンビームの増強に成功した.

3.2 18 GHz ECR イオン源⁸⁾

18 GHz ECR イオン源は, 理研重イオンリニアック³¹⁾ の外部イオン源として 1990 年代半ばに製作された. 最大磁場強度は, 其々 $B_{\text{inj}} \sim 1.4 \text{ T}$, $B_{\text{ext}} \sim 1.4 \text{ T}$ である. 前述のバイアスディスク法を用いている. 更にチャンバー内にアルミ筒を挿入することでアルミニウム製チャンバーと同等の効果を得ている. プラズマチャンバーの大きさ, 磁場強度などから Ar^{8+} 等, 中程度の多価イオンビーム生成に適しており, $\text{Ar}^{8+} \sim 2 \text{ mA}$ のビーム生成に成功している. 2000 年代には SHE 探索実験のための Zn ビーム生成開発を行い, 大強度多価イオンビームの長期安定供給に成功し, 実験の推進に大きく貢献した. 近年では, 後述する oven 法を用いて ^{48}Ca ビームの長期安定供給にも成功し, 理研 RIB Factory 計画²⁾ 遂行に大きく貢献している³²⁾.

3.3 Liquid-He-Free 超伝導 ECR イオン源³³⁾

常伝導コイルを用いる限り, 高磁場発生のための消費電力の増加は不可避である. 例えば前述の 18 GHz ECR イオン源は, 磁場発生に 100 kW 以上の電力を消費している. “High-B mode” に従えば 18 GHz マイクロ波を用いた場合でも $\sim 2.5 \text{ T}$ の磁場が必要でありより大きな電力を必要とする. 消費電力の増加を抑制する方法のひとつとして超伝導コイルの使用があるが, 液体ヘリウムの供給等の煩雑さが伴う. この問題を解消するために, 直接伝導冷却型の超伝導コイルを用いた ECR イオン源の開発を 2000 年代始めに開始した. 発生できる最大磁場は, $B_{\text{inj}} \sim 3 \text{ T}$, $B_{\text{ext}} \sim 2 \text{ T}$ である. 六極磁石には永久磁石が使用されている. 大電力供給の困難な高電圧ターミナルへの設置, ヘリウム液化装置を持たない研究施設などにおいて有用であり, 理研, 筑波大³³⁾, 大阪大学³⁴⁾ で製作された. 理研では AVF サイクロトロンの外部イオン源として M/q (M :イオン質量, q :多価イオン価数) が 4 以下の多価重イオンの生成供給を行っている. 海外では Dubna (ロシア) で同種のイオン源が稼働中である³⁵⁾. 最近では韓国においてプロトタイプが製作され³⁶⁾, Catania において, 癌治療用加速器の外部イオン源³⁷⁾ として製作が検討されている.

3.4 28 GHz 超伝導 ECR イオン源^{9, 38)}

18 GHz より高い周波数のマイクロ波を用いる場合, 経験則に従えば動径方向に 1.4 T ($B_{\text{r}} > 2B_{\text{ecr}}$)

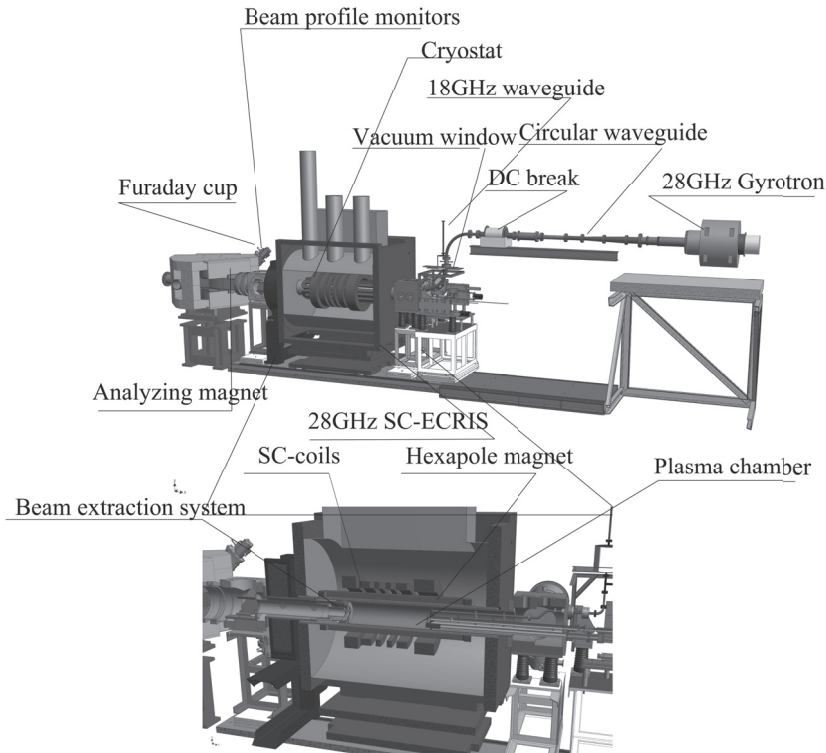


図5 28 GHz 超伝導 ECR イオン源の概略図。図に向かって右側から 28 GHz ジャイロトロン、マイクロ波伝送系、28 GHz 超伝導 ECR イオン源、分析電磁石を表す。図下部に 28 GHz 超伝導 ECR イオン源の断面図を示す。

以上の磁場強度が必要となり、例えば 28 GHz のマイクロ波を使用する場合、 $B_r \sim 2\text{ T}$ となる。現段階でこの高磁場を効率よく発生させるためには、超伝導電磁石を用いる必要がある。2000 年代になり理研 RIBF 計画のための大強度 U^{35+} イオンビーム生成を目的として、28 GHz マイクロ波に最適な超伝導 ECR イオン源が製作された。最大磁場強度は $B_{inj} \sim 3.8\text{ T}$, $B_r \sim 2\text{ T}$, $B_{ext} \sim 2\text{ T}$ である。プラズマチャンバ体積は約 10 L であり、前述の 18 GHz ECR イオン源の 10 倍程度の大きさがある。イオンの閉じ込め時間は、チャンバ体積が大きいほど長くなるため¹⁸⁾、28 GHz 超伝導 ECR イオン源はミラー比の大きさ、高いマイクロ波周波数の使用に加えて、大体積チャンバによって、前述の 18 GHz ECR イオン源に比べて多価イオン生成に適しているといえる。軸上にミラー磁場を形成する超伝導ソレノイドコイルは、6 個あり、ECR ゾーンの大きさ、共鳴点での磁場勾配を独立に変化させることが可能で、マイクロ波吸収機構の研究に最適な構造になっている。“Flat B_{min} ”³⁹⁾ という特殊な磁場分布も作ることも可能である。マイクロ波は 28 GHz ジャイ

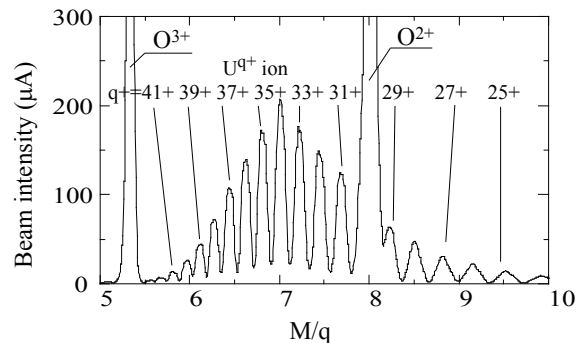


図6 28 GHz 超伝導 ECR イオン源から生成された多価ウランイオンビーム強度の価数依存性。プラズマ生成用電離ガスとして酸素を用いた。図中 O^{2+} , O^{3+} イオンビームは酸素原子が電離、生成されたもの。イオン源は U^{35+} イオンビームを最大にするように調整されている。

ロトロン（最大出力 10 kW）から供給される。図5は 28 GHz 超伝導 ECR イオン源を含む多価イオンビーム供給系の概略図である。図6に得られた典型的な多価 U イオンビーム強度分布を示す。ビームの長期安定供給は加速器の外部イオン源として必須条件であるが、後述する sputtering 法を用いることで $\sim 100\ \mu\text{A}$ (U^{35+}) のビーム強度を長期間連続して供給することに成功し、

RIBF 計画における U ビーム強度増強に貢献している。ビーム生成テスト実験においては、sputtering 法で、すでに $\sim 180 \mu\text{A}$ のビーム供給に成功している。今後より大強度ビームの長期安定供給に向けて開発を行うことを計画している。

4. ビーム生成

常温でガス状の原子、分子は、容易にプラズマチャンパー中に導入できるため、ビーム生成の手法としては最も簡単である。しかしながら、通常ほとんどの物質は常温で固体であるため、生成できるイオン種を増やすためには何らかの方法で物質を気化し、プラズマ中に導入することが必要である。本章では、理研で用いられている固体物質を気化させ、イオンビームを生成する手法について言及する。

4.1 Insertion 法

最も簡単なのは固体試料を直接プラズマに挿入し、プラズマの熱を使う手法である(insertion 法)、高融点物質が容易に融解し、イオンビームが生成できるため、広く用いられている。一方、多くの場合、固体をプラズマ中に挿入するためプラズマを擾乱し、多価イオンビーム強度の増加が見込めない。また消費量が大きいなどの短所も見られる。

4.2 Sputtering 法

Sputtering 法は、試料に負電圧をかけ加速されたプラズマ中のイオンとの衝突によって、試料から中性原子を放出させる方法である。試料に数 kV 程度の電圧を印加するだけでよく、大量の試料を容易にチャンパー中に挿入できるため、長期間途切れることなくビームを供給する必要がある場合に用いられている。理研においては U ビーム生成などに用いられている。

4.3 MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds) 法⁴⁰⁾

多くの金属は常温で固体であるが、ある特殊な化合物になることで大きな蒸気圧を持つことがある。その代表的な物質がフェロセン ($\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$) のような有機金属化合物である。このような有機金属化合物は、ガス状物質と同様に取り扱え、イオン源を停止することなく試料の供給が可能であるため、長時間連続運転が要求される場合、その威力を発揮する。後述する oven 法などのように、試料を気化させるための複雑な装置を必要とせ

ず、気体試料と同様の操作でイオンビームを生成できる利点を有する。理研では 18 GHz ECR イオン源にこの手法を適応し、Fe, Ni 等のイオンに関し大強度ビームの生成に成功している⁴¹⁾。

4.4 Oven 法

Oven 法は試料をイオン生成に十分な蒸気圧が得られるまで、坩堝などを用いて直接加熱する手法である。理研においては、現在、融点が 1000°C 程度までの物質に対するもの(低温用)と、 2000°C を超える物質を蒸発させるもの(高温用)の 2 種類のオープンを用いている。 ^{48}Ca ビーム生成には、低温用を用いているが、試料として酸化カルシウム (CaO , 融点 $\sim 2600^\circ\text{C}$) を使用するため、Al 粉末を混合させ低温で酸化還元反応を促進、Ca 蒸気を得る手法を用いている。 ^{48}Ca の消費量を抑制するためにチャンパー内にホットライナー⁴²⁾ と呼ばれる肉薄な Ta チューブを挿入している。この Ta チューブは、チャンパーとの熱接触が極力小さくなるような構造をしており、プラズマによって熱せられる。オープンから蒸発した Ca がチューブに付着した際に、再び蒸発し、プラズマに取り込まれる。この手法によって、消費量はホットライナーを使用しない場合の数分の一から十分の一程度に抑えられ、長期間連続で大強度ビーム供給が可能となった³²⁾。

U ビーム生成の場合は、試料として UO_2 を用いていることから、十分な蒸気圧を得るには 1900°C 程度まで試料を熱する必要がある。このため、タングステン製の坩堝に数 100 A の電流を流すことで高温状態を作り試料を熱する手法を用いている⁴³⁾。開発研究の結果、坩堝のわずかな構造の変化が、坩堝の性能を左右することが判明した。例えば、わずかな違いで、噴出し口付近の温度が他の場所に比較して低くなり、坩堝内で蒸発した試料が、噴出し口で固化して試料の噴出しを阻害してしまう。このため、注意深い設計が必要となる。高磁場中では大電流を流すと坩堝に大きなローレンツ力がかかり、坩堝の変形を引き起こすため、坩堝の支持構造にも細心の注意を払う必要もある^{44, 45)}。

5. 今後の進展

RIB を用いた不安定核の研究、超重元素探索実験等、重イオンビームを用いた研究の推進のため

には大強度の多価重イオンビームの生成が必須である。より価数の大きな重イオンビームの生成は、新しい加速器建設計画において建設費用の削減に貢献する、よりコンパクトな加速器設計を可能とするため、ECR イオン源の性能向上は、これらの分野において必要不可欠なものである。多価イオンビームの増強のためには、マイクロ波の高周波数化が最も効果的であるが、高周波数化には前述のようにより強い磁場の使用が不可欠である。しかしながら、その構造の複雑さから超伝導コイル間に大きな電磁気力が働き、現状では 28 GHz マイクロ波に対応した磁場強度が限界のようである。より高い周波数のマイクロ波を効果的に使用するためには、この問題点を克服した新しい構造の超伝導コイルの開発が望まれる。既存の装置においても、マイクロ波パワーの増加によってどこまでビーム強度は増えるのか、その限界値はいくらなのか等、その性能の限界はいまだ見極められていない。性能の限界を研究することは、要求される価数、ビーム強度を達成するための最適なイオン源構造を決定する上で重要な課題であることは言うまでもない。今後の進展に注目したい。

本稿で述べられた理研における ECR イオン源の開発研究は、旧サイクロトロン研究室から現在の仁科加速器研究センター加速器基盤研究部まで理研において加速器開発研究にかかわった多くの研究者、技術者と共同で行われたものである。この場を借りて感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) R. Geller: *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasma* (IOP Publishing Ltd, Bristol, UK, 1996).
- 2) Y. Yano: *Nucl. Instrum. Methods* **B261**, 1009 (2007).
- 3) M. Thoennessen: *Nucl. Phys. A* **834**, 688c (2010).
- 4) Y. Oganessian, S. Dmitriev and M. Itkis: *Proc. Int. Sym. on Exotic Nuclei* (World Scientific, Co, Pre. Ltd, Singapore) 483 (2015).
- 5) K. Morita et al: *Journal of the Physical Society of Japan* **81**, 103201 (2012).
- 6) K. Hatanaka et al: *RIKEN Accl. Prog. Report* **22**, 219 (1988).
- 7) Y. Higurashi et al: *RIKEN Accl. Prog. Report* **40**, 117 (2007).
- 8) T. Nakagawa et al: *Nucl. Instrum. Methods* **B226**, 392 (2004).
- 9) Y. Higurashi et al: *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 02A953 (2014).
- 10) A. Girard et al: *Journal of Computational Physics* **191**, 228 (2003).
- 11) S. Gammino and G. Ciavola: *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 631 (2000) and references therein.
- 12) V. Mironov and J. Beijers: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **12**, 073501 (2009).
- 13) T. Nakagawa: *Proc. 12th PASJ, Tsuruga*, 152 (2015).
- 14) H. Arai et al: *Nucl. Instrum. Methods* **B491**, 9 (2002).
- 15) D. Hitz et al: *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 509 (2002).
- 16) M. Liebermann and A. Lichtenberg: *Principles of plasma discharges and material processing*, 412 (John Wiley and Sons, inc, New York, 1994).
- 17) O. Travinen; *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 02A703 (2016).
- 18) A. Girard et al: *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 1381 (2004).
- 19) S. Gammino et al: *Rev. Sci. Instrum.* **70**, 3579 (1999).
- 20) W. Zhao et al: *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02A202 (2010).
- 21) D. Leitner et al: *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 03A302 (2006).
- 22) Y. Higurashi et al: *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 02A308 (2012).
- 23) R. Geller et al: *Proc. 8th Int. Workshop on ECR ion source*, 1 (East Lansing, USA, 1987).
- 24) C. Lyneis et al: *Proc. 8th Int. Workshop on ECR ion source*, 42 (East Lansing, USA, 1987).
- 25) T. Nakagawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **31**, L1129 (1992).
- 26) Z. Q. Xie and C. Lyneis: *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 2947 (1994).
- 27) G. Melin et al: *Proc. 10th Int. Workshop on ECR ion source*, 1 (Knoxville, USA, 1989).
- 28) T. Nakagawa et al: *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 1335L (1993).
- 29) S. Biri et al: *Nucl. Instrum. Methods* **B152**, 386 (1999).
- 30) K. Hatanaka et al: *J. Phys. Colloques* **50**, 827 (1989).
- 31) M. Odera et al: *Nucl. Instrum. Methods* **A227**, 187 (1984).
- 32) K. Ozeki et al: *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 016114 (2015).
- 33) T. Kurita et al: *Nucl. Instrum. Methods* **B192**, 429 (2002).
- 34) T. Yorita et al: *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02A332 (2010).
- 35) A. Efremov et al: *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 03A320 (2006).
- 36) H. You et al: *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 02A326 (2012).
- 37) G. Celona et al: *Proc. ECRIS-2014*, 87 (Nizhny Novgorod, Russia, 2014).
- 38) T. Nakagawa et al: *Rev. Sci. Instrum.* **81**, 02A320 (2010).
- 39) G. D. Alton and D. N. Smithe: *Rev. Sci. Instrum.* **65**, 775 (1994).
- 40) H. Koivisto et al: *Nucl. Instrum. Methods* **B94**, 291 (1994).
- 41) T. Nakagawa et al: *Nucl. Instrum. Methods* **A396**, 9 (1997).
- 42) V. B. Kutner et al: *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 860 (2000).
- 43) D. Leitner et al: *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 02C710 (2008).
- 44) J. Ohnishi et al: *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 02A941 (2014).
- 45) J. Ohnishi et al: *Rev. Sci. Instrum.* **87**, 02A709 (2016).