

理研 RILAC のための新しい 18-GHz ECR イオン源の導入

INSTALLATION OF NEW 18-GHZ ECR ION SOURCE FOR THE RIKEN RILAC

大関和貴^{#, A)}, 日暮祥英^{A)}, 中川孝秀^{A)}

Kazutaka Ozeki^{#, A)}, Yoshihide Higurashi^{A)}, Takahide Nakagawa^{B)}

^{A)} RIKEN Nishina Center

Abstract

In RIKEN Nishina Center, in order to improve the efficiency of the beam supply into the RIKEN linear accelerator (RILAC), the installation of a new 18-GHz electron cyclotron resonance ion source (ECRIS) is being proceeded. By equipping the RILAC with two ion sources, the development of new beams and the supply of a beam for experiments will be conducted in parallel. Based on the existing 18-GHz ECRIS developed at RIKEN, this ion source has the following features: 1) Three solenoid coils is installed to enable B_{ext} to be adjusted while B_{min} is fixed at an optimum value. 2) A variable frequency RF power source is adopted. The main body of ECRIS was installed on March, 2014. In addition to the equipments of the power supply and the cooling water, the installation of the beam diagnostic devices for the beam development will be proceeded hereafter.

1. 序

理研仁科加速器研究センターでは、理研重イオン線型加速器 (RILAC) の外部イオン源として、18-GHz ECR イオン源 (ECRIS) を使用している[1]。このイオン源の用途は、中重核の多価イオンビーム ($^{27}\text{Al}^{7+}$, $^{40}\text{Ar}^{8+}$, $^{48}\text{Ca}^{10+}$, $^{70}\text{Zn}^{15+}$, $^{84}\text{Kr}^{18+}$ 等) を理研 RI ビームファクトリー (RIBF) [2] や超重元素探索実験に、大強度で供給することである。

近年我々は、新しいビームを開発すること、長期間 (1 ヶ月以上) にわたって実験にビームを供給することを要求されている。これらの相反する要求に、1 台のイオン源で応えることは非常に困難である。そこで我々は、RILAC にビームを供給するためのイオン源を新たに導入することとした。

イオン源を併設することにより、実験期間中においても新しいビーム、特に超重元素探索実験を行う上で必要とされるビームの開発を可能にするとともに、実験中にイオン源に何等かのトラブルが発生した場合に、ビームを供給するイオン源を切り替えて、ビームタイムのロスも最小限にとどめることができると期待される。

イオン源の本体は 2014 年 3 月に設置された。ソレノイドコイル、六重極永久磁石に関する概要を簡単に第 2 章で述べる。これらの構造の詳細に関しては文献[3]を参照されたい。3 章から 6 章にかけては、2013 年度に製作されたプラズマチャンバー、ビーム引出系等について詳細に記述する。

2. ミラーコイル、六重極永久磁石[3]

今回設置された新しい 18-GHz ECRIS の概略図を Fig. 1 に示す。

ビーム強度を最大にするために最適なミラー磁場の最小値 (B_{min}) 値はほぼ一定で、電子サイクロロン共鳴が

発生する磁場強度 (B_{ecr}) の 70-80% であることが知られている[4]。一方で、イオンの電荷分布はミラー比に依存する。このため、 B_{min} とビーム引出側の磁場強度 (B_{ext}) は独立に設定できることが望ましい。

軸方向にミラー磁場を形成するためのミラーコイルとして、ソレノイドコイルを 3 つ配することで、 B_{min} を最適値に固定したまま、 B_{ext} を最適値に設定することを可能にした。ソレノイドコイルの諸元を Table 1 に示す。

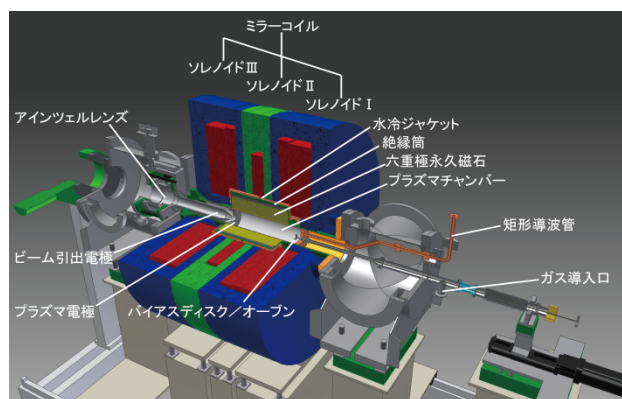


Figure 1: Overview of the new 18-GHz ECRIS.

Table 1: Specifications of the Mirror Coil

	ソレノイド I, III	ソレノイド II
ターン数	296	60
最大電流	660 A	300 A
最大電圧	105 V	10 V
ミラー磁場の最大強度	>1.3 T	
ミラー磁場の最小強度	<0.5 T	

[#]k_ozeki@riken.jp

Figure 2に、入射側の磁場強度 (B_{inj}) を最大 (約 1.4 T) に保った場合の B_{min} と B_{ext} の磁場強度の範囲を示す。黒線で囲まれた領域の中が取りうる磁場強度の範囲である。この図より、 B_{min} を 0.45-0.5 T (B_{ecr} の 70-80%) に保った場合に、 B_{ext} は 0.8-1.3 T の範囲を取れることが分かる。

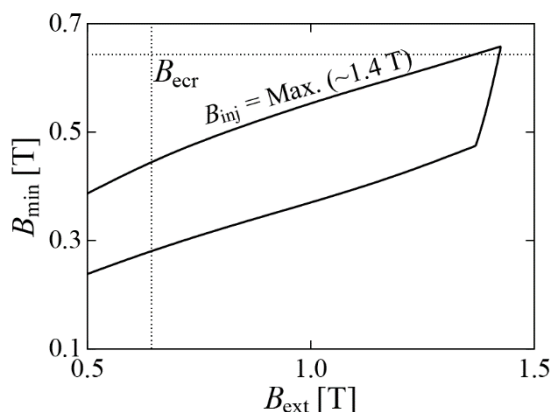


Figure 2: B_{min} vs. B_{ext} . The area surrounded by the line is the possible combination of B_{min} and B_{ext} when B_{inj} is kept to the maximum value.

六重極永久磁石の概略図と諸元を Fig. 3 と Table 2 にそれぞれ示す。36 分割された Nd-Fe-B 永久磁石 (信越化学工業株式会社、N48M) で構成され、内径と外径はそれぞれ 85 mm と 186 mm である。プラズマチャンバーの内壁上 (78.9 mmφ) での動径方向の磁場強度は約 1.3 T で、18 GHz のマイクロ波による運転に対しては、十分な磁場強度である。

ソレノイド磁石から熱が流入し、六重極永久磁石が高温になって減磁するのを防ぐため、六重極永久磁石の外側に水冷ジャケットを設置している (Fig. 1 参照)。

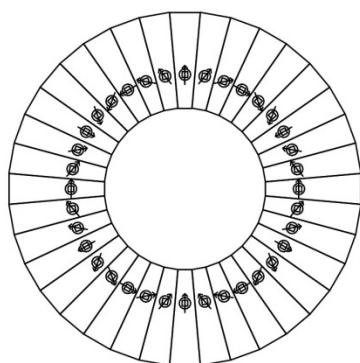


Figure 3: Schematic drawing of the hexapole magnet. Arrows indicate the direction of the magnetization.

Table 2: Specifications of the Hexapole Magnet

材質	Nd-Fe-B 永久磁石
内径	85 mm
外径	186 mm (磁石のみ) 210 mm (保持ジャケットを含む)
軸方向長さ	250 mm
分割数	36
磁場強度	直径 78.9 mmφ, 長さ 150 mm の 円筒表面上で約 1.3 T

3. プラズマチャンバー

プラズマチャンバーの諸元を Table 3 に示す。六重極永久磁石の内部に丁度納まる外径 (85 mmφ) で、内径は 78.9 mmφ である。これは、現在使われている 18-GHz ECRIS のプラズマチャンバーの内径 (75 mmφ) より若干大きい。マイクロ波入射系側とビーム引出系側の両方に排気速度 450 L/min のターボ分子ポンプを設置して、プラズマチャンバー内を高真空 (ガスの流入がない状態で $<10^{-7}$ Torr) に保つ。

ソレノイド磁石の場合と同様に、プラズマチャンバー内に生成したプラズマの熱が六重極永久磁石に流入し、六重極永久磁石が高温になって減磁するのを防ぐ必要がある。このためにプラズマチャンバーの壁を二重構造にし、60° 間隔で水路を軸方向に 6 本配置した (水路の厚さは約 1 mm)。それぞれの水路は、プラズマが壁面に当たる位置に合わせる。冷却水の温度と流量はそれぞれ 20°C、約 6 L/min で、700 W のマイクロ波をプラズマチャンバー内に注入した場合でも、プラズマチャンバーの壁面を室温程度に保つのに十分な流量である。

プラズマチャンバーの RF 入射側には、マイクロ波をチャンバー内に効率良く閉じ込めるために隔壁を設けている (Fig. 4 参照)。隔壁には多数の小孔を開け、効率の良い真空排気ができる構造になっている。

チャンバー内壁の物性的な性質はビーム強度に多大な影響を与えることが報告されている。多くの研究所ではこの点を考慮して、チャンバーをアルミニウムで製作している。アルミニウムは大気中で容易に酸化し、酸化アルミニウムの被膜を形成する。酸化アルミニウムは電子衝撃による 2 次電子放出率が高く、プラズマ中から逃走した電子がチャンバー壁面に衝突した際に多くの 2 次電子を放出し、再びプラズマ中に入射されると推察される。この電子入射はプラズマポテンシャルを下げ、多価イオンのビーム強度を増強する。しかしながら、アルミニウム製のチャンバーは製作が他の物質 (ステンレス、銅等) と比較して難しい。この困難を避け、かつ酸化アルミニウムの効果を利用できるようにするため、従来から使用されている 18-GHz ECRIS と同様に、チャンバーは銅製で、チャンバー内に薄い (厚さ 1 mm) アルミニウム筒を挿入する構造にしてある。

引出電圧の最大値は 20 kV を想定している。例えば、RILAC に $^{48}\text{Ca}^{10+}$ のイオンビームを供給するために必要な引出電圧は 15.9 kV である。放電を防ぐために、プラ

ズマチャンバーと六重極永久磁石の外側を絶縁物のカバー (Fig. 1 の絶縁筒) で覆っている。プラズマチャンバーの両端とビーム引出系用真空槽、ソレノイドコイルとの間にも絶縁物を配置し (Fig. 4 参照)、高電圧 (20 kV) を印加しても放電しない構造になっている。特に、ビーム引出系真空槽とプラズマチャンバー間の絶縁物は、大電流ビームによって温度が上昇する可能性がある。このため、温度上昇によるガス放出が起こりにくいセラミックスを使用している。

Table 3: Specifications of the Plasma Chamber

材質	無酸素銅
内径	78.9 mm
外径	85 mm
軸方向長さ	625 mm
水路	軸方向に 6 本 (直列)
排気装置	排気速度 450 L/min のターボ分子ポンプ×2

4. ビーム引出系

ビーム引出電極 (Fig. 4 参照) は、外から真空を破ることなく、その位置を設定できる構造になっており、プラズマ電極の位置から 100 mm 離れた位置まで連続に設定することができる。また、電極先端部が脱着可能であるため、ビーム引出電極の穴径を必要に応じて変更することができる。プラズマ電極も同様に脱着可能であるため、穴径を変更することができる。ビーム引出電極の下流にアインツェルレンズを配置し、ビームを収束させることで、加速器入射条件に合わせるようにビーム軌道を変化させることができる構造になっている。

5. その他の構造

Figure 4 に示すように、チャンパー内には負電圧を印加可能な金属電極 (バイアスディスク) が設置されている。ECRIS から生成される多価イオンビームの強度はディスクの位置に強く依存するため、ディスク位置の調整はビーム強度増強の手法の一つとして用いられている。この手法を用いて更なるビーム強度増強を図るため、チャンパー内に設置されたバイアスディスクは遠隔操作によってその位置を、チャンパーの真空を破ることなく設定できる構造になっている (Fig. 4 参照)。駆動範囲は 100 mm である。Figure 4 に示すように、マイクロ波導入のための矩形導波管は直接プラズマチャンパーに接合されている。マイクロ波を導入した際、チャンパーの構造上の問題から反射波が発生するが、過大な反射波がマイクロ波発信機に入射しないように E-H チューナーをチャンパーとマイクロ波発信器の間に設置し、反射波のパワーが最小になるように調整できる構造になっている。

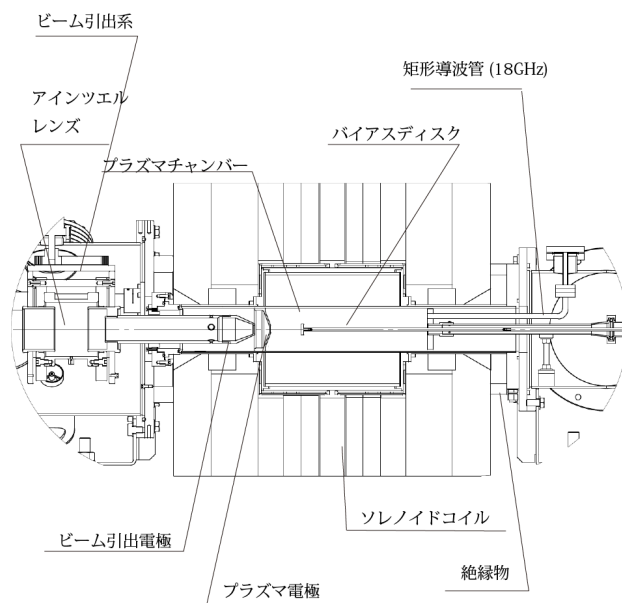


Figure 4: Cross sectional view of the ion source.

イオン源全体は Fig. 5 に示すような架台に設置されている。イオン源の各パーツ (ソレノイドコイル、ビーム引出系用真空槽等) はそれぞれ独立の支持台に乗っている。支持台にはリニアガイドが取り付けられ、架台上に設置されたレールの上に乗っているため、各パーツは独立に架台のレール上を移動させることが可能である。このため各パーツの交換、修理を少人数でも容易に行うことができる。

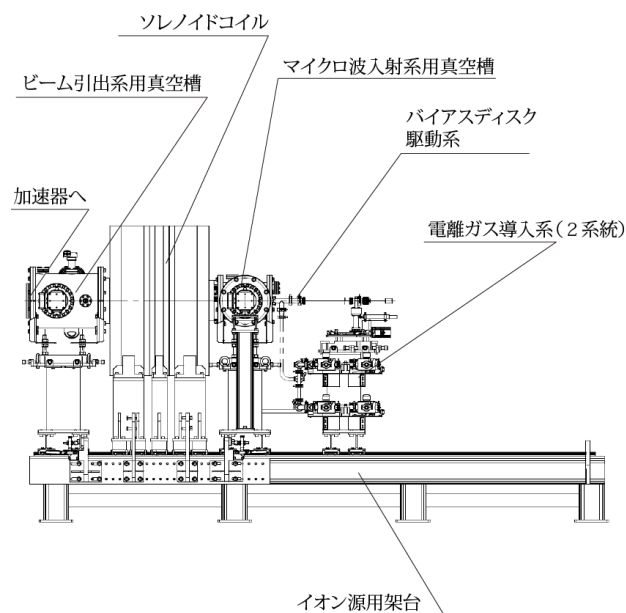


Figure 5: Schematic drawing of the ion source.

6. マイクロ波発生装置

近年、イオン源内に注入するマイクロ波の周波数をわずかに (MHz の範囲) 変化させることで、ECRIS の性能が向上することが報告された [5, 6]。これらの実験的、理論的結果を受け、我々はマイクロ波発生装置として、進

行波管増幅器(TWTA)を採用した。プラズマチャンバーや ECR 領域の大きさに合わせて周波数を微調整することで、ビーム強度の更なる増強が期待できる。

TWTA の周波数帯は 17.2-18.4 GHz で、最大電力は約 700 W である。

7. 今後の整備予定

Figure 6 に理化学研究所リニアック棟イオン源室及び入射器の概略図を示す。新しい ECRIS は 2014 年 3 月に、Fig. 6 に示すように、2 台の分析電磁石を挟む形で従来の ECRIS の反対側に設置された。Figure 7 は設置された新しい ECRIS の写真である。写真の左側がビーム下流、中央にある青色の装置がミラー磁場生成用のソレノイドコイルである。

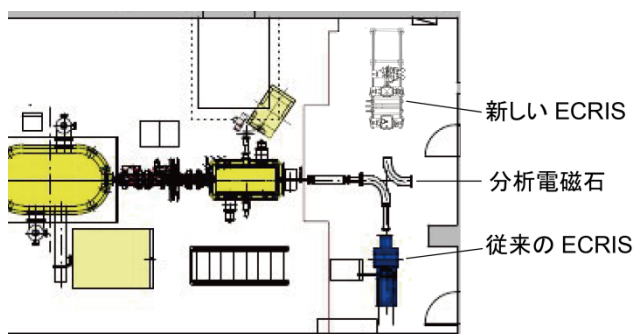


Figure 6: Installation place of the new ECRIS.

Figures 6 に示すように、分析電磁石は既に 2 系統設置されている。分析電磁石を 90°回転させることによってビームの進行方向を適宜変え、片方の ECRIS を実験へのビーム供給に、もう片方の ECRIS を新しいビーム開発に、並行して使用することを意図したものである(Fig. 8 参照)。分析電磁石用真空槽は、2 分割されそれぞれ独自の真空排気装置を持つ、独立した真空槽にする予定である。製作費の観点からは一体型が安価であることは明らかであるが、低速の多価イオンビームはその経路の真空度(残留ガス量)に敏感に反応し、その軌道がわずかながら変化する可能性がある。この変化は加速器中のイオン軌道に影響を与える。真空槽内のガス圧はテスト用 ECRIS の調整のたびに变化するため、その都度、実験に供給しているイオン源の調整、加速器の再調整が必要となる。この問題を回避するため、前述のような独立した真空槽を採用することとした。



Figure 7: Photo of the new ECRIS.

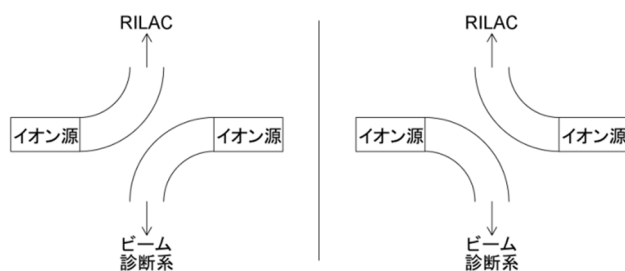


Figure 8: Switchover of two ECRIS's for the supply and development of the beams.

参考文献

- [1] T. Nakagawa, Nucl. Instrum. Methods B226 (2004) 392.
- [2] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B 261 (2007) 1009.
- [3] K. Ozeki et al, Proc. 20th Int. Workshop on ECR ion sources, (ECRIS'12), Sydney, Australia, p.114.
<http://www.jacow.org>
- [4] H. Arai et al., Nucl. Instrum. Methods A491 (2002) 9.
- [5] L. Celona, et al., Rev. Sci. Instrum. 81 (2010) 02A333.
- [6] D. Mascali et al., Proceedings of 19th Int. Workshop on ECR ion sources(ECRIS'10), Grenoble, France p. 165,
<http://www.jacow.org>