

電子サイクロトロン共鳴イオン源における低 Z イオンの選択的加熱による 多価イオン生成高効率時のプラズマパラメータ測定

PLASMA PARAMETER MEASUREMENT DURING EFFICIENTLY PRODUCING MULTICHARGED IONS BY SELECTIVELY HEATING LOW-Z IONS ON ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE ION SOURCE IN MIXING LOW-Z GASES

得能慎司^{#A)}, 藤村優志^{A)}, 井手章敦^{A)}, 浅地豊久^{B)}, 村松正幸^{C)}, 北川敦志^{C)}, 加藤裕史^{A)}
Shinji Tokuno^{A)}, Yushi Fujimura^{A)}, Akinobu Ide^{A)}, Toyohisa Asaji^{B)}, Masayuki Muramatsu^{C)}, Atsushi Kitagawa^{C)},
Yushi Kato^{A)}

^{A)} The University of Osaka

^{B)} The University of Shiga Prefecture

^{C)} National Institutes for Quantum Science and Technology

Abstract

Electron Cyclotron Resonance Ion Sources (ECRIS) have been widely applied in various fields, including particle accelerators, superheavy element research, cancer therapy, and ion implantation. We are conducting research on the efficient production of multicharged ion beams on 2.45 GHz ECRIS. Gas mixing with low-Z gases is known as an effective method for enhancing the production of multicharged ions, and one of its possible mechanisms is the ion cooling effect. Focusing on this effect, we attempt to amplify its effect by selectively heating low-Z gases using ion cyclotron resonance (ICR). In this experiment, we used Xe as the operating gas and introduced low-Z gases that is He or Ar. Low-frequency RF power is applied through an ICR antenna which six turn antenna made of Cu covered by Al₂O₃. The frequencies of ion cyclotron resonance are 400 kHz for He⁺ and 40 kHz for Ar⁺. The charge state distribution (CSD) based on ion beam current showed an increase in the yield of multicharged ions, with a more significant enhancement when He⁺ ions were heated than that of Ar⁺. We measured the plasma parameters of mixing gas by using Langmuir probes, both with and without low-frequency RF. Electron temperatures and ion saturation current increase in both Xe/He and Xe/Ar plasmas. Electrical temperature in the case of Xe/He exhibits a more significant increase. In this paper, we will present details of these experimental results.

1. 背景と目的

電子サイクロトロン共鳴イオン源 (Electron Cyclotron Resonance Ion Sources: ECRIS) は重粒子線がん治療[1]や超重元素生成[2]など幅広い領域に応用されている。多価イオンの生成を効率化する手法は多々あるが[3]私たちが注目している方法の一つにガスミキシング法がある[4]。ガスミキシング法の原理はまだ完全に解明されていないと思われる。この原理として有力と考えているものの一つがガスミキシングによるイオンクーリング効果である。質量の異なるイオン同士が衝突した時、重いイオンが冷やされて磁場中に閉じ込められる時間が長くなることから、多価イオンの生成効率が上がるというものである。我々はミキシングしたプラズマに更に低周波数 RF 電磁波を導入し、イオンサイクロトロン共鳴 (ICR) 加熱を行うことでこのクーリング効果を更に助長できるのではないかと考え実験を行った[5, 6]。

本研究では、2.45 GHz の ECRIS において Xe ガスに He をミキシングしたプラズマに低周波数 RF 電磁波 (400 kHz) を導入し、引き出したイオンビームに対して質量価数分布測定 (CSD) を行ったところ Xe のビーム電流の増大が見られた。Ar をミキシングしたプラズマに対し、低周波数 RF (40 kHz) を導入したところ同様にビ

ーム電流の増大が見られたが、Xe/He ミキシングプラズマの方がより顕著に増大がみられた。

本研究の目的は RF 導入後、ビーム電流の増加がみられたミキシングプラズマについてラングミュアプローブによるプラズマパラメータ測定を行い、電子温度並びに電子密度に比例するイオン飽和電流値を測定することでイオン源内にどのような変化が起きているかを明らかにすることである。

2. 実験装置と手順

本研究において使用した装置全体の上面図を Fig. 1 に示す。本装置はプラズマ生成部 (ECRIS)、ビームライン、イオンビーム照射部 (IBIS) に分けられる。ECRIS は、ミラーコイル A、B、補正用コイル C、8 極永久磁石によって真空容器内に磁場を構成している。代表的な磁場強度の z 軸上の分布は Fig. 1 (a) の中に示される。通常、コイル A、B の電流量は 150 A に固定しており、コイル C の電流量は 15 A 前後で調整する。磁場強度を示す図中の破線は、ECR 用の 2.45 GHz のマイクロ波に対応する共鳴磁場強度 0.875 T を表している。真空排気は、ECRIS では 3000 l/s の油拡散ポンプ、ビームラインでは 260 l/s、400 l/s のターボ分子ポンプによって行っている。ECRIS、ビームライン、IBIS にそれぞれ B-A ゲージを設置しており、各部での圧力を常時監視できる。2.45 GHz マイクロ波は 2 か所から導入する。プラズマ生成部の拡

[#] tokuno@nf.eie.eng.osaka-u.ac.jp

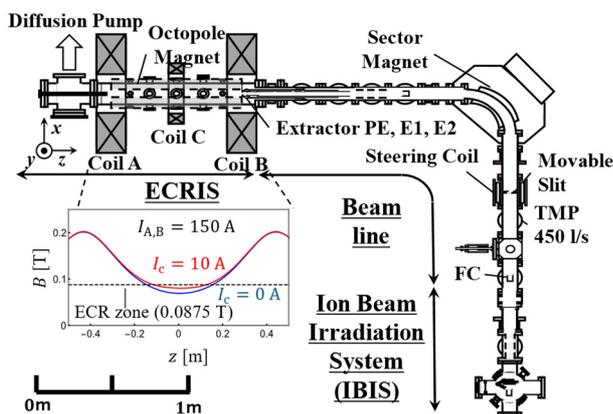


Figure 1: The top view of ECRIS, beam line, IBIS, and Magnetic field strength distribution of ECRIS (a).

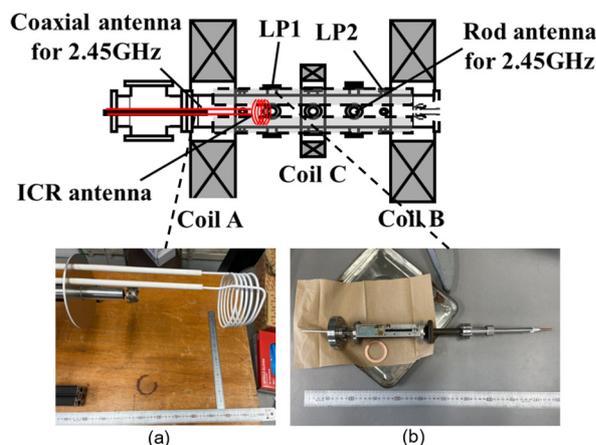


Figure 2: Plasma purification section within ECRIS (a) ICR antenna and (b) Langmuir probe.

大図を Fig. 2 に示す。一方は上流側から同軸上に導入し、もう一方は下流側の真空容器側面から 4 本のヘリカルアンテナより導入する。上流側を upperstream helical antenna (UHA)、下流側を downstream helical antenna (DHA) と呼称する。上流側には ICR 用のコイル状アンテナも設置しており、400 kHz または 40 kHz の電流導入が可能である。Ar や He のガス導入にはマスフローコントローラが用い、ガス流量を調整できる。Xe のガス導入には低流量での調整のためバリアブルリークバルブを用いた。

真空容器側面からラングミュアプローブを挿入することでプラズマパラメータが測定できる。プローブは真空容器の中心を $z = 0$ として $z = -175, 300$ mm の 2 か所に設置しており(それぞれのプローブを LP1, LP2 と呼称する)、真空容器の軸中心を $x = 0$ mm として、どちらも $x = 0 \sim 50$ mm の範囲で測定できる。プラズマ中のイオンは真空容器下流に設置した電極 PE, E1, E2 (グラウンド) によってビームラインに引き出される。通常、 $V_{PE} = +10$ kV によってビームが形成され、 $V_{E1} = -1 \sim 0$ kV によって最適化する。また、ビームライン上のアインツェルレンズによっても最適化を行う。引き出されたイオンビームは分析磁石によって特定の質量価数比のイオン種のみ分離され、ファラデーカップ (FC) で捕集

される。ビームライン上には可動スリットを設置しており、捕集されるビーム電流量を調整できる。分析磁石の作る磁場を変化させ、FC で捕集したイオンの電流量と磁場強度を同時に計測することでビーム電流の CSD 測定を行なう。

今回の実験では、まず ECRIS から引き出されたイオンビームに対して CSD 測定を行い、コイル電流 C、引き出し電極 E1、アインツェルレンズによって Xe^{6+} の電流量を最適化した。次に He ガスを導入して再度最適化を行ない、ビーム電流量の CSD 測定を行うことで、 Xe^{6+} などの多価イオン電流量が増加することを確認した。Xe/He 混合プラズマに対し、400 kHz の RF 20 W を導入し CSD を測定した。そして同プラズマに対しラングミュアプローブによるプローブ測定を行ない、RF 導入前後での電子温度 T_e とプローブ電圧 $V_p = -90$ V でのイオン飽和電流値 I_{is} の変化を測定した。また Xe/Ar 混合プラズマについても同様の実験を行なった。このとき RF はビーム電流量の増大が最も大きい 40 kHz の RF 100 W で導入した。加えて、Xe/He 混合プラズマに対して導入するマイクロ波パワーと Xe ガスの流量を一定として、He ガスの流量のみを変化させ、400 kHz の RF 20 W を導入し、CSD 測定を行なってその変化を比較した。

3. 実験結果

3.1 Xe/He 混合プラズマに対する RF 導入前後での CSD およびプラズマパラメータ測定

ECRIS で生成された Xe/He 混合プラズマに対して低周波数電磁波 400 kHz の RF を導入した前後での CSD 測定の結果を Fig. 3 に示す。ECRIS 内での動作圧力は 6.4×10^{-5} Pa である。マイクロ波入射パワーはそれぞれ DHA: 170 W 及び UHA: 95 W である。RF 導入前に、引き出し電圧 $V_{PE} = 10$ kV によって引き出された Xe^{6+} のビーム電流量が最大となるようにコイル C の電流 I_c 、引き出し調整電圧 V_{E1} 、アインツェルレンズ電圧 V_{el} をそれぞれ最適化した。グラフの横軸は分析磁石の磁場強度で $\sqrt{m/q}$ に比例している (m はビーム質量数、 q は価数)、縦軸はファラデーカップで捕集したビームの電流量を対数でプロットしている。黒線は RF 導入前、赤線は RF 20 W 導入後の CSD を表す。RF の導入により Xe^{6+} のビーム電流量が増加することが分かる。具体的な値では Xe^{6+} で 8.35×10^{-8} A から 1.55×10^{-7} A まで増加している。反対に He^{+} に関しては RF を導入したことで 1.65×10^{-6} A から 1.27×10^{-6} A までビーム電流量が減少している。

次に、CSD 測定と同じ条件のプラズマに対してプラズマパラメータを測定した。測定の結果を Fig. 4, 5 に示す。LP1, LP2 に印加した電圧とプローブに流れる電流の特性から電子温度とイオン飽和電流値を得ることができる。電子温度 T_e とイオン飽和電流値 I_{is} の x 方向分布をとった。黒丸は RF 導入前、赤丸は RF 導入後を表している。 T_e 、 I_{is} 共に中央付近で高く、RF 導入後、 T_e が平均して 2 eV 上昇している。 I_{is} についても LP2 で平均して 0.03 μ A 上昇していることが分かった。

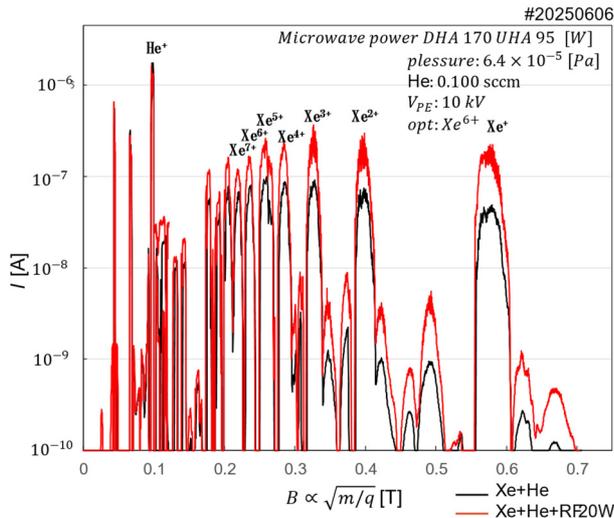


Figure 3: CSDs for Xe/He mixing plasma and Xe/He mixing plasma with 400 kHz RF for ICR heating.

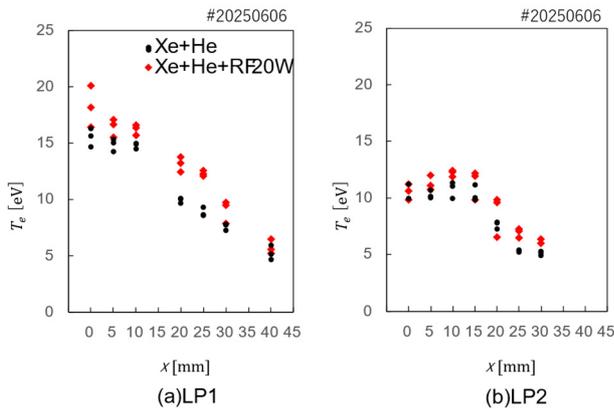


Figure 4: T_e distribution diagrams for Xe/He mixing and Xe/He mixing plasmas with 400 kHz RF for ICR heating with (a)LP1 and (b)LP2.

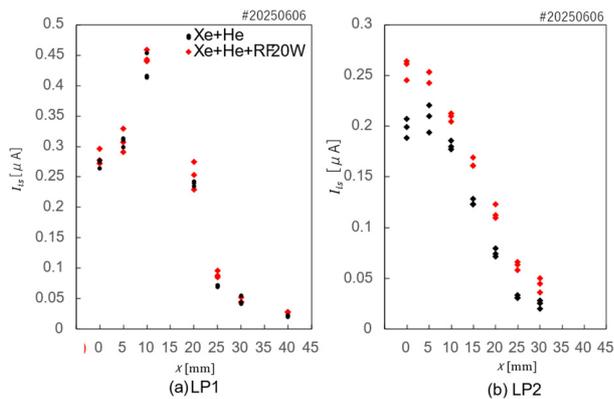


Figure 5: I_{is} distribution diagrams for Xe/He mixing and Xe/He mixing plasmas with 400 kHz RF for ICR heating with (a)LP1 and (b)LP2.

3.2 Xe/Ar 混合プラズマに対する RF 導入前後での CSD およびプラズマパラメータ測定

Xe に対して Ar ガスをミキシングし同様に Ar 加熱用に 40 kHz の電流をコイル状アンテナから導入した。CSD を Fig. 6 に示す。ECRIS 内の圧力は 3.6×10^{-5} Pa である。黒線は RF 導入前の Xe/Ar 混合プラズマであり、赤線は Xe/Ar 混合プラズマに RF を 100 W 導入したときの CSD である。RF の導入によって Ar^{4+} の収量はほとんど増加せず、 Xe^{9+} の電流が増加している。具体的な量としては Xe^{6+} 電流量は RF 導入前では 3.44×10^{-8} A であり、RF 導入後では 4.27×10^{-8} A であった。

Xe 7 価以上は不純物 O、N、C 等に重なって読み取れない状態であった。

次に、CSD 測定と同じ条件のプラズマにおいてプローブ測定を行なった。電子温度とイオン飽和電流値の x 分布測定の結果を Fig. 7, 8 に示す。黒丸は RF 導入前、赤丸は RF 導入後の Xe/Ar 混合プラズマを表わしている。電子温度に関しては優位な差は見られない。イオン飽和電流値に関しては引き出し電極に近い LP2 の中央付近で平均して $0.01 \mu A$ 高くなっている。

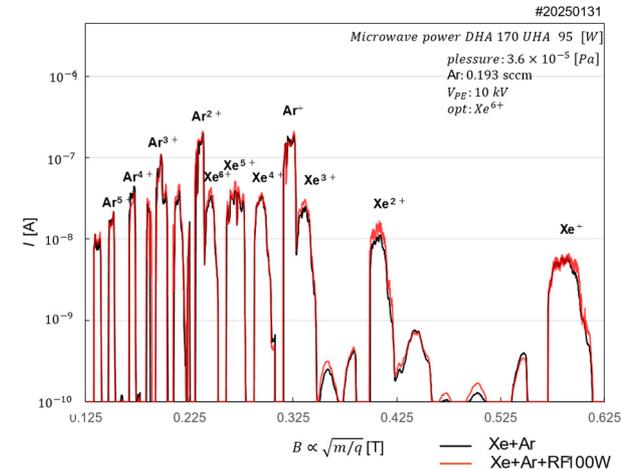


Figure 6: CSDs for Xe/Ar mixing plasma and Xe/Ar mixing plasma with 40 kHz RF for ICR heating.

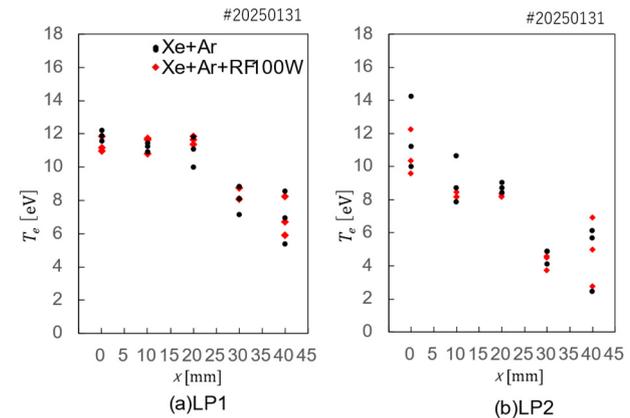


Figure 7: T_e distribution diagrams for Xe/Ar mixing and Xe/Ar mixing plasmas with 40 kHz RF for ICR heating with (a)LP1 and (b)LP2.

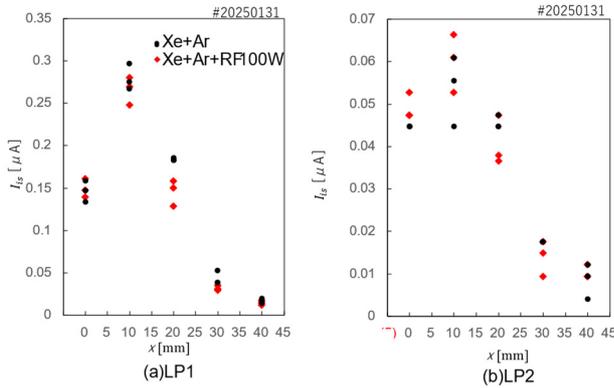


Figure 8: I_{is} distribution diagrams for Xe/Ar mixing and Xe/Ar mixing plasmas with 40 kHz RF for ICR heating with (a)LP1 and (b)LP2.

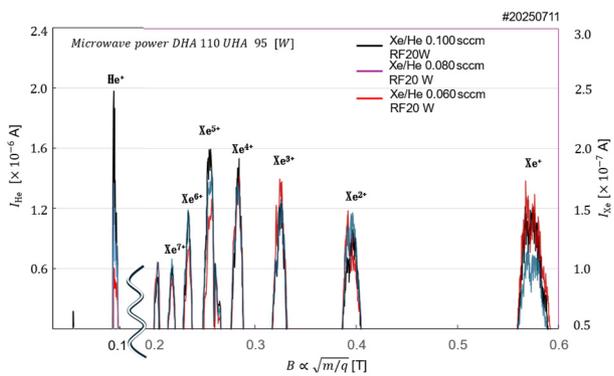


Figure 9: CSDs for Xe/He mixing plasma with 400 kHz RF for ICR heating.

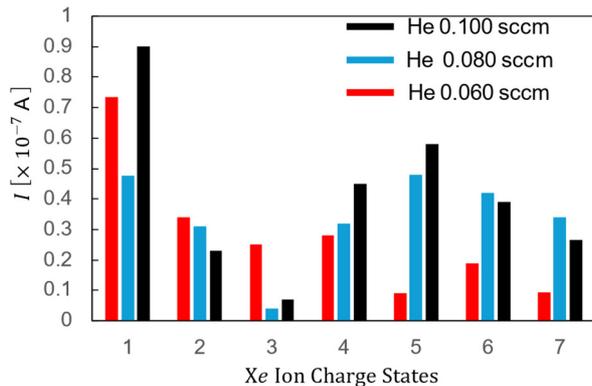


Figure 10: Changes in Xe beam current due to 400 kHz RF injection when He flow rate is changed.

3.3 Xe/He 混合プラズマに対する He ガス流量の影響

Xe ガスと導入するマイクロ波が一定であるのに対して He ガスの流量を段階的に 0.060, 0.080, 0.100 sccm、として RF (400 kHz) を 20 W 導入し、CSD 測定を行なった。その変化を比較した CSD を Fig. 9 に示す。ECRIS 内の動作圧力は 5.7×10^{-5} Pa であった。左側の軸が He のビーム電流量を表わしており右側の軸は Xe のビーム電流量を表わしている。RF は 20 W 導入し、入射マイクロ波パワーは DHA: 110 W 及び UHA: 95 W で固定

しており黒線、青線、赤線の順で He ガス流量が 0.100、0.080、0.060 sccm である。He ガスを多く導入している方が RF を導入したとき高価数の Xe ビーム電流量が増えていることが分かる。反対に低価数の Xe ビーム電流量は低下している。次に各流量において RF 導入後の電流値から、導入前の電流値を引いた値を縦軸、横軸を Xe の価数としたグラフを Fig. 10 に示す。He の導入量に応じて RF の効果に差があることが分かった。

4. まとめと今後の予定

本研究では、動作ガスとして Xe を用いたプラズマに混合ガスとして He ガス並びに Ar ガスをミキシングしたプラズマに対し、RF を導入したときの多価イオンビーム電流量の増加効果について確認し、同時にプラズマパラメータを測定し、電子温度の上昇とイオン飽和電流の増加効果について確認することができた。Xe/He の場合すべての点での平均をとったところ、RF 導入前後で T_e は 17%、 I_{is} は 18% ほど上昇した。Xe/Ar の場合には全体では大きな差は出なかった。また Xe/He 混合プラズマへ He ガス流量を段階的に変化させ、RF 導入したところ、多価イオンビームの収量が増加した。これはミキシング効果を向上させることができたと考えられる。これまでの我々の実験は Xe プラズマに対して He を追加していく方法で行っていたが、今後は全圧を一定にして He の追加と同時に Xe を減少させる方法でも実験を行い、再現性を確認していく予定である。

またイオンセンシティブプローブを製作し、イオン源内のイオン温度を計測することで先のビームエミッタンスの実験によって得られた He の加熱傾向[7]との対応も明らかにする予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K18275、挑戦的研究(開拓)の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] A. Kitagawa, T. Fujita, M. Muramatsu, S. Biri and A. G. Drentje, Rev. Sci. Instrum. 81, 02B909 (2010) 81, 2010, 02B909.
- [2] K. Morita, Nuclear Physics A 944, pp 30-61 (2015).
- [3] A. G. Drentje, Rev. Sci. Instrum. 74, 2631 (2003).
- [4] A. G. Drentje, Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B9, pp.526-528 (1985).
- [5] Y. Kato *et al.*, "Accessibility condition of wave propagation and multicharged ion production in electron cyclotron resonance ion source plasma", Rev. Sci. Instrum. 87, 2016, 02A710.
- [6] Y. Fujimura, K. Iwahara, Y. Kato "Enhanced production of multicharged ions by mixing low Z gas and emittance measurement on electron cyclotron resonance ion source" Proceedings of the 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2023, PASJ2023 FRP36.
- [7] I. G. Brown, *The Physics and Technology of Ion Sources*, 1989, pp.92-94.