

電子サイクロトロン共鳴多価イオン源における軽元素ガスミキシングの イオンビーム電流の価数分布、プラズマパラメータおよびエミッタンスに対する効果

EFFECT OF LOW Z GAS MIXING ON THE CHARGE STATE DISTRIBUTION OF ION BEAM CURRENTS, THE PLASMA PARAMETERS AND THE EMITTANCE IN AN ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE ION SOURCE

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)}

Yushi Fujimura^{#, A)}, Akinobu Ide^{A)}, Toyohisa Asaji^{B)}, Masayuki Muramatsu^{C)}, Atsushi Kitagawa^{C)}, Yushi Kato^{A)}

^{A)} Osaka University

^{B)} The University of Shiga Prefecture

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

Abstract

Electron cyclotron resonance ion source (ECRIS) is used in various fields e.g., cancer therapy, accelerator physics. ECRIS is required to increase the yield of multicharged ion beams. An empirically method of efficiently producing multicharged ions is to mix low Z gas into the plasma. One of explanations for gas mixing effect is ion cooling due to collisions between main ions and low Z ions. In this work, we measured charge state distributions of ion beam currents and plasma parameters for each of pure argon plasmas and argon plasmas mixed with helium (Ar/He mixing). Furthermore, the CSD and the emittance were measured for the ion beam of Ar/He mixing with ion cyclotron resonance heating to excite He⁺ ions.

1. 背景と目的

電子サイクロトロン共鳴 (ECR) イオン源 (ECRIS) は重粒子線がん治療[1]などの加速器分野で利用されるイオン源であり、特に多価イオンビームの効率的な生成が求められている。これまでに考えられてきた多価イオン生成高効率化の手法は多岐にわたり[2]、それらの手法の1つにガスミキシング法がある[3]。ガスミキシング法とは、目的のプラズマに対して軽い元素のガスを混入させると多価イオンビームの収量が増加するという物理効果を利用した手法であり、比較的簡単な多価イオンビーム生成を高効率化する手法であるためしばしば利用される。ガスミキシング法の原理はまだ完全には解明されていないと思われるが、この効果の説明の1つに、質量の異なるイオン同士の衝突が重い方のイオンを冷やし、イオンが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生成効率が上がるというものがある[4]。また、ガスミキシング時のプラズマに対して、低周波の導入によって軽い方のイオンへ選択的にイオンサイクロトロン共鳴 (ICR) 加熱を行うことで冷却効果を助長し、目的の多価イオン収量がさらに増加されることが期待されている。

本研究の目的は、我々グループの ECRIS[5]においてガスミキシング法による多価イオン収量増加効果を確認し、そのときのプラズマパラメータを取得することである。また、ガスミキシングプラズマに対して ICR 用の低周波を導入し、イオンビームの収量やエミッタンスも測定した。多価イオン収量増加効果は、典型的な純 Ar プラズマ (Pure Ar) に対するイオンビーム電流の質量価数分布 (CSD) 測定の結果と Ar に He をミキシングしたプラズマ (Ar/He mixing) に対する CSD 測定の結果を比較するこ

とで確認した。また、Pure Ar と Ar/He mixing のそれぞれに対して、ラングミュアプローブによるプラズマパラメータの測定も行い、それぞれの電子密度 (n_e) および電子温度 (T_e) も比較した。さらに、Ar/He mixing プラズマにおいて He⁺ に対する ICR 加熱用の RF (400 kHz) を導入し、CSD に対する影響を確認した。また、ビームエミッタンスはイオン温度に依存することが知られており[6, 7]、He⁺ 加熱が行われていることを確認するため、He⁺ ビームエミッタンスを測定した。

2. 実験装置と手順

本研究において我々が使用した装置全体の上面図を Fig. 1 に示す。我々の装置はプラズマ生成部 (ECRIS)、ビームライン、計測及び照射部 (IBIS) に分けられる。ECRIS は、ミラーコイル A, B、調整用コイル C、八極永久磁石によって磁場が構成された真空容器である。代表的な磁場強度の z 軸上の分布は Fig. 1 の中に示される。通常、コイル A, B の電流量は 150 A に固定されており、コイル C の電流量は 10 A 前後で調整される。磁場強度を示す図中の破線は、我々が ECR で用いる電磁波の周波数 2.45 GHz に対応する磁場強度 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われる。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。ECR 用の 2.45 GHz マイクロ波は2か所から導入される。一方は上流側から同軸に導入され、もう一方は下流側の真空容器側面から導入される。上流側には ICR 用のコイル状アンテナも設置されており、400 kHz での電流導入が可能である。ガス導入にはマスフローコントローラが用

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

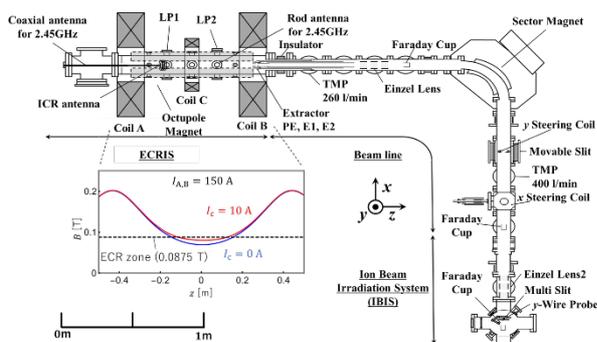


Figure 1: The top view of ECRIS and beam line.

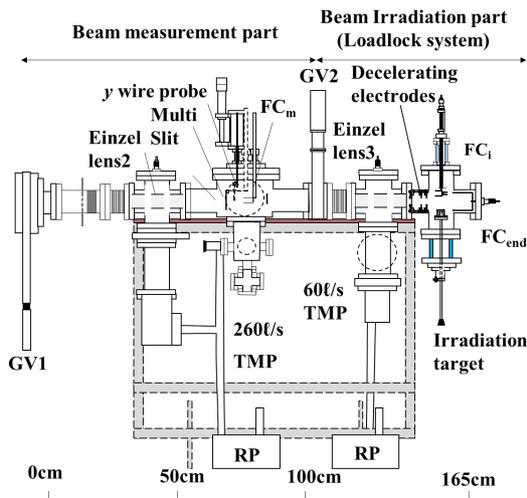


Figure 2: The side view of measurement part of IBIS.

いられ、Ar や He のガス流量が調整できる。
 我々の ECRIS では、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上流側と下流側の2か所に設置されており(それぞれのプローブは LP1, LP2 と呼ばれる)、どちらも $x = 0 \sim 50$ mm で調整できる(真空容器の軸中心が $x = 0$ mm)ため、プラズマパラメータの x 方向に対する分布測定が可能である。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 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 によって最適化される。また、ビームライン上の Einzel Lens によっても最適化は行われる。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、ファラデーカップで捕集される。ビームライン上には可動スリットが設置されており、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動させ、ファラデーカップで捕集したイオンの電流量と変動磁場を同時に計測することでビーム電流の CSD 測定が可能である。

ビームライン上のファラデーカップを退避させ、ゲートバルブ GV1 を開くことによって IBIS ハイオンビームを導入できる。計測部の側面図を Fig. 2 に示す。計測部にもファラデーカップが設置されており、ビーム電流量を測定できる。引き出されたイオンビームは Einzel Lens 2 に

よって再び最適化される。計測部では、ステップングモーターによって y 方向に可動なワイヤプローブ(直径 0.02 mm)を用いることでビーム電流の y 方向分布測定が可能である。また、ワイヤプローブの 20 mm 上流にマルチスリット(縦幅 0.5 mm のスリットが 2.1 mm 間隔で 11 個並んでいる)が挿入可能であり、マルチスリット通過ビーム電流の y 方向分布測定も可能である。ビーム電流の y 方向分布測定をマルチスリット挿入有無のそれぞれにおいて行うことでエミッタンス計測が可能である。

今回の実験では、まず ECRIS から引き出されたイオンビーム電流量の CSD を測定し、コイル電流 C、引き出し電極 E1、Einzel Lens によって Ar^{6+} の電流量を最適化した。次に He ガスを導入してビーム電流量の CSD 測定を行うことで、 Ar^{6+} などの多価イオン電流量が増加することを確認した。従来は Ar プラズマに対して少量の He を追加する手順で実験を行っていたが、今回は全圧が一定となるように、He の追加と同時に Ar 流量を減少させる手順での実験も行った。さらに、Pure Ar と Ar/He mixing のそれぞれのプラズマに対する CSD を測定した後、 He^+ に対する ICR 用の 40 kHz RF をアンテナから導入し CSD を比較した。また、それぞれの状態のプラズマに対して CSD を測定した後、プラズマパラメータの測定やビームエミッタンスの測定も行った。

3. 実験結果

3.1 Pure Ar と Ar/He mixing に対する CSD およびプラズマパラメータ測定

ECRIS で生成された Pure Ar プラズマおよび Ar/He mixing プラズマに対する CSD 測定結果を Fig. 3 に示す。ECRIS 内での動作圧力はミキシング前では 3.2×10^{-4} Pa であり、He ガスミキシング時は 4.2×10^{-4} Pa であった。マイクロ波導入は同軸上および真空容器側面の2か所から行っており、入射パワーはそれぞれ約 100 W であった。引き出し電圧 $V_{PE} = 10$ kV によって形成されたビームにおいて、 Ar^{6+} のビーム電流量が最大となるようにコイル電流 I_c 、引き出し調整電圧 V_{E1} 、Einzel Lens 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作る磁場を示

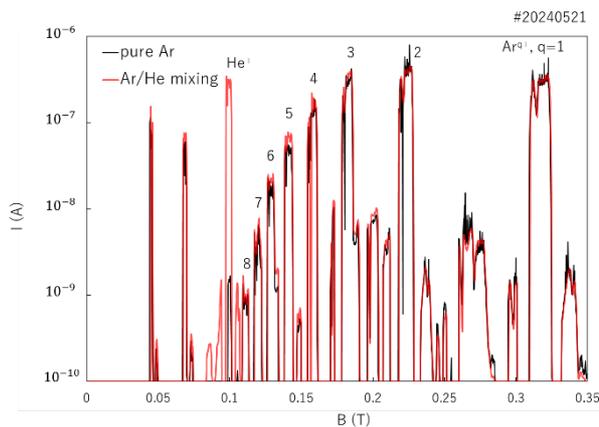


Figure 3: CSDs for pure Ar plasma and Ar/He mixing plasma.

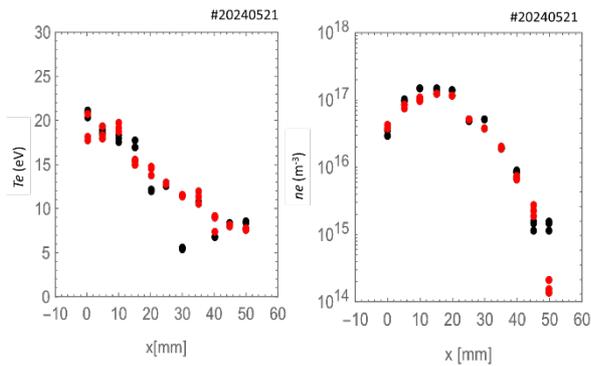


Figure 4: T_e and n_e distribution diagrams for pure Ar and Ar/He mixing plasmas.

し、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表示している。黒線は Pure Ar プラズマに対する CSD を示しており、赤線は Ar/He mixing プラズマに対する CSD を示している。Ar/He mixing プラズマにおける低価数イオン電流量は Pure Ar プラズマでの電流量と比べて低下しているのに対して、 Ar^{6+} などの高価数のイオン電流量は増加していることが読み取れる。代表的なイオンのビーム電流量として、 Ar^{2+} 電流量は Pure Ar では 5.6×10^{-7} A であり Ar/He mixing では 3.6×10^{-7} A であった。 Ar^{8+} 電流量は Pure Ar では 1.4×10^{-9} A であるのに対して Ar/He mixing では 1.7×10^{-9} A であった。今回の CSD 測定結果では Ar と He 以外のピークも見られ、これらは主に H, C, N, O などの不純物によるものであると考えられる。

次に、CSD 測定と同じ条件で生成した Pure Ar と Ar/He mixing のそれぞれのプラズマに対してプラズマパラメータ測定を行った。プラズマ中に挿入したラングミュアプローブ (LP1) に電圧を印加し、プローブに流れる電流と同時に記録し結び付けることによって電子温度と電子密度を得られる。電子温度と電子密度の x 分布測定結果を Fig. 4 に示す。黒点は Pure Ar、赤点は Ar/He mixing のものを表し、電子温度も電子密度も中央付近で高くなるのがわかる。電子温度は Pure Ar と Ar/He mixing での変化は誤差の範囲内であると思われるが、電子密度は Ar/He mixing の方がピーク付近でやや低くなっていることが読み取れる。

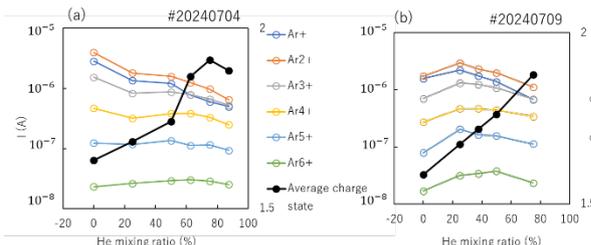


Figure 5: CSDs of Ar beam currents for pure Ar plasma and Ar/He plasma under the constraint that the total pressure is constant.

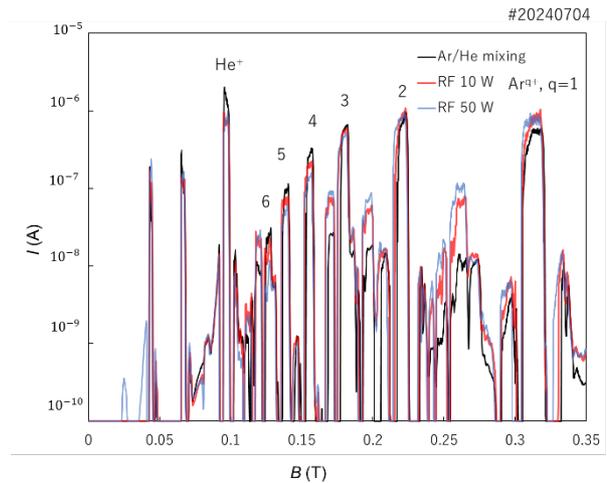


Figure 6: CSDs for pure Ar plasma and Ar/He mixing plasma with 400 kHz RF for ICR heating.

3.2 全圧一定下での Pure Ar と Ar/He mixing に対する CSD 測定

前節の実験では Pure Ar に対して少量の He ガスを追加する方法でガスミキシングを行っていたが、次に、全圧一定下でガスミキシングを行ったときの CSD を測定し、いくつかのミキシング割合に対する各価数 Ar ビームの電流量と平均価数を Fig. 5 に示す。全圧は B-A ゲージで測定しており、Fig. 5(a) では 3.2×10^{-4} Pa、Fig. 5(b) では 3.4×10^{-4} Pa に固定した。2 か所からのマイクロ波の入射パワーはそれぞれ約 100 W である。 Ar^+ などの低価数の Ar ビーム電流量は低価していき、 Ar^{6+} などの高価数の Ar ビーム電流量は He ミキシングの割合が約 50% のときに最大となった。低価数 Ar ビーム電流量の減少量が大きいと、平均価数を計算すると He の割合が高くなるほど平均価数は増加し、He 割合 75% 以上で最大となることがわかる。

3.3 He^+ に対する ICR 用 RF 導入時の CSD およびエミッタンス測定

全圧一定の条件下で Ar/He mixing を行い、 Ar^{6+} が最大となる割合に調整したプラズマに対して、400 kHz の電流をコイル状アンテナに導入した。このときの CSD の結果を Fig. 6 に示す。黒線は He の圧力割合が 75% の Ar/He mixing プラズマに対する CSD であり、赤線と青線はそれぞれ ICR 用 RF をそれぞれ 10 W、50 W 導入したときの CSD である。RF の導入によって Ar と He 以外の H, C, N, O などの不純物のビーム電流量が極端に増加してしまうことがわかる。これは RF 導入時のアンテナの加熱によるものであると考えられ、目的の Ar ビーム電流量に悪影響を及ぼしていると思われる。

次に、CSD 測定と同じ条件下において He^+ と Ar^{2+} に対するビームエミッタンス測定を行った。 He^+ ビームに対する典型的な y プロファイルを Fig. 7(a) に示す。RF パワーは 0 W、10 W、50 W であり、電流量は RF パワーの増加によって減少していくことがわかる。マルチスリットを通過した He^+ ビームの y プロファイルを Fig. 7(b) に示す。それぞれの RF パワーで 9 本ずつピークが確認でき、ビーム全体の 80% 程度の領域でマルチスリット通過プロファイ

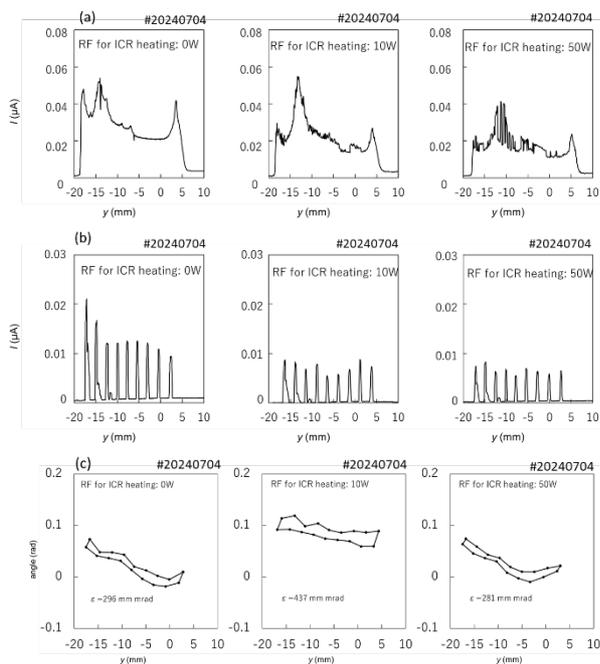


Figure 7: (a) Typical He⁺ beam profiles for Ar/He mixing with RF (0 W–50 W). (b) He⁺ beam profiles when the multi slit was inserted for Ar/He mixing with RF (0 W–50 W). (c) Emittance diagrams of He⁺ beams for Ar/He mixing with RF (0 W–50 W).

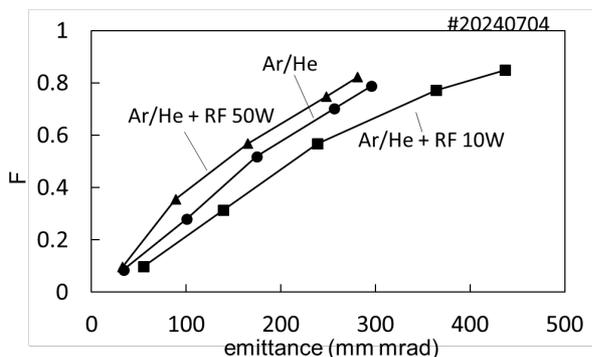


Figure 8: Cumulative emittance distribution function F vs. emittance ϵ for He⁺ beam.

ルが取得できたことがわかる。Fig. 7(b)から、9本ずつのピークそれぞれに対してビームの広がる角度を計算し、ビームの位置と発散角を結び付けることによって作成したエミッタンス図をFig. 7(c)に示す。エミッタンス図が右肩下がりであることはビームが収束性であることを示している。また、取得できたエミッタンス図の領域全体の面積はエミッタンス ϵ を表し、図中に値を表記している。ある領域のエミッタンスを、典型的なビームプロファイルから計算した、その領域が占めるビームの割合と結び付けた図をFig. 8に示す。これはエミッタンスをビーム割合で規格化したものであり、同じビーム割合に対してエミッタンスが高ければ、エミッタンスに依存するイオン温度も高いと考えられる。今回の結果では、RF 0 W の Ar/He mixing プラズマの He⁺温度に対して、RF 10 W のものはイオン温度が高くなっており、RF 50 W のものはイオン温度が低く

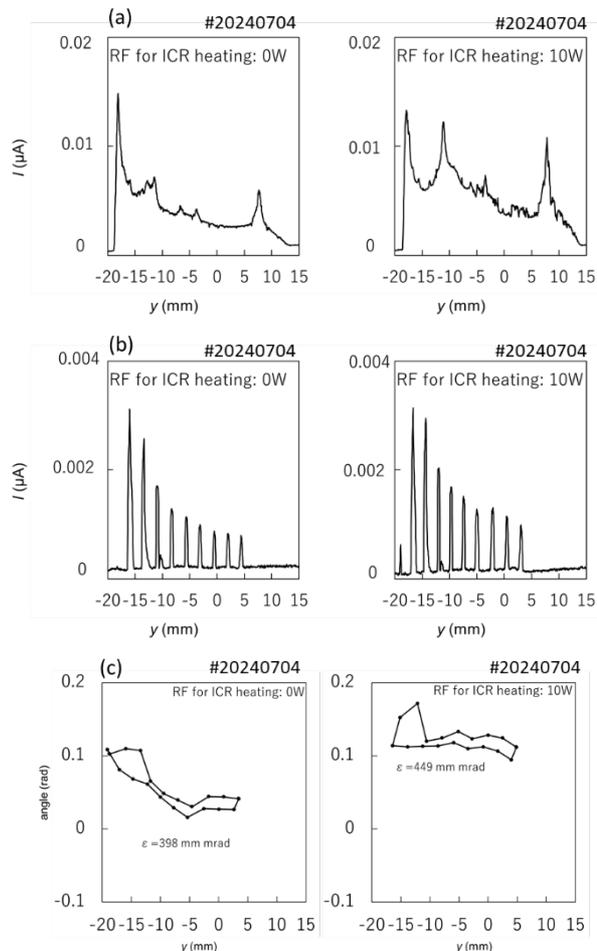


Figure 9: (a) Typical Ar²⁺ beam profiles for Ar/He mixing with RF (0 W, 10 W). (b) Ar²⁺ beam profiles when the multi slit was inserted for Ar/He mixing with RF (0 W, 10 W). (c) Emittance diagrams of Ar²⁺ beams for Ar/He mixing with RF (0 W, 10 W).

なることを示している。

Ar²⁺ビームに対する典型的なビームプロファイルをFig. 9(a)に示す。Ar/He mixing プラズマに導入した RF パワーは 0 W, 10 W である。マルチスリット挿入時のビームプロファイルを Fig. 9(b)に示す。He⁺ビームと同様に 9本ずつのピークが得られ、ビーム全体に対して 70%程度の領域にわたってマルチスリット通過プロファイルが得られた。

このとき作成されたエミッタンス図は Fig. 9(c)に示す。得られたエミッタンス値と領域の占めるビーム割合を結び付けた図を Fig. 10 で示す。今回の結果は RF 10 W の導入によって Ar²⁺イオン温度が低下したことを示す。

4. 考察とまとめ

本研究では、Ar プラズマに対して He ガスをミキシングしたときの多価イオンビーム電流量への効果を確認し、そのときのプラズマパラメータやエミッタンスを測定した。これまでの私の実験は Ar プラズマに対して少量の He を追加する方法で行っていたが、今回は全圧を一定にして He の追加と同時に Ar を減少させる方法でも実験を

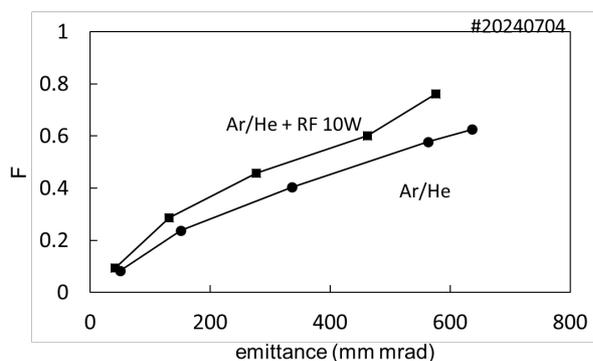


Figure 10: Cumulative emittance distribution function F vs. emittance ϵ for Ar^{2+} beam.

行い、多価イオンビーム電流量の増加や平均価数の増加が確認された。今後は全圧一定下での Ar/He mixing プラズマに対してプラズマパラメータの測定を行い、電子温度や電子密度を確認する予定である。

He^+ に対する ICR 加熱用 RF 10 W の導入によって、 He^+ ビームエミッタンスの増加が確認され、 He^+ 加熱が示唆される結果を得た。しかし、RF 50 W 導入時には加熱効果は確認されなかったため、今後さらにエミッタンスの測定を行い、誤差も含めて考察する予定である。エミッタンスはイオン温度以外に引き出し口付近の磁場にも影響することが知られており[8]、今後磁場の計算も考慮に入れることによってイオン温度を推定することが可能になると考えられる。また、より精密なエミッタンスの測定を可能とするため、計測部の改善も計画している。今回用いた RF 導入系は Ar^+ に対する ICR 加熱(40 kHz)も可能であり、Xe/Ar mixing プラズマを対象としたミキシング効果を確認する実験や Pure Ar プラズマに RF 導入することによるポテンシャルウェルの緩和を狙った実験も今後実

施する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP12K34567、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 *et al.*, “Review on heavy ion radiotherapy facilities and related ion sources (invited)”, *Rev. Sci. Instrum.* 81, 2010, 02B909.
- [2] A. G. Drentje, “Techniques and mechanisms applied in electron cyclotron resonance sources for highly charged ions”, *Rev. Sci. Instrum.* 74, 2003, pp.2631-2645.
- [3] A. G. Drentje, “THE ECR ION SOURCE AND ASSOCIATED EQUIPMENT AT THE KVI”, *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B* 9, 1985, pp.526-528.
- [4] A. G. Drentje, A. Girard, D. Hitz and G. Melin, “Role of low charge state ions in electron cyclotron resonance ion source plasmas” *Rev. Sci. Instrum.* 71, 2000, pp.623-626.
- [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] Brown I G, *The Physics and Technology of Ion Sources*, pp. 92-94, 1989.
- [7] 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.*
- [8] D. Leitner, D. Winklehner and M. Stohmeier, “Ion beam properties for ECR ion source injector systems”, *Jinst*, 6 P07010, 2011.