

電子サイクロトロン共鳴イオン源での低 Z イオン選択的加熱による多価イオン生成 高効率化時のエミッタンス測定

EMITTANCE MEASUREMENT OF ION BEAM CURRENT IN SELECTIVELY HEATING LOW Z IONS ON ELECTRON CYCLOTRON RESONANCE ION SOURCE

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

^{A)} Division of Electrical, Electronic and Infocommunications Engineering, Graduate School of Engineering,
The University of Osaka

^{B)} The University of Shiga Prefecture

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

Abstract

We have been studying efficient production of multicharged ions in electron cyclotron resonance ion source (ECRIS). We are conducting experiments in mixing low Z gases, which is widely known empirically as a method for efficient production of multicharged ions. Furthermore, low-frequency electromagnetic waves have been introduced to the experiment to enhance effect of the low Z gas mixing. Specifically, we conduct experiments in which Ar and He gases are introduced into Xe operation gases and then selectively heat low Z ions (Ar^+ and He^+) by ion cyclotron resonance (ICR) to actively enhance the cooling effect of multicharged Xe ions. We confirmed the effect of ICR selectively heating He^+ from rms emittance values derived from multislit method and corresponding primary profiles of beam current. Rms emittances of ion species heated by ICR is tending to be higher than those without ICR. Therefore, low Z ions are heated by introducing low-frequency electromagnetic waves.

1. 背景と目的

電子サイクロトロン(ECR)イオン源(ECRIS)は、多価イオンビームの生成が可能であり、重粒子線がん治療[1]や超重元素生成分野などで利用されている。ECRIS から引き出されるイオンビームの質を向上させるためには、多価イオンのビーム量を増大させることが求められる。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る[2]。それらの手法の 1 つに軽質量元素ガスミキシング法がある[3]。ガスミキシング法とは、目的のイオンに対して軽い元素のガスを混入させると多価イオン収量が増加する効果を利用した手法である。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が、質量の異なるイオン同士の衝突によって重い方のイオンが冷やされることによって磁場閉じ込めの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考えられる[4]。また、ガスミキシング時のプラズマに対して、従来の ECR よりも低周波数の電磁波を導入すること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)による加熱を行うことで衝突による冷却効果を助長し、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。

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、さらにそこに軽い方のイオンを加熱するための低周波数 RF 電磁波を導入しさらに多価イオン収量が増加していることを確認する。その時のイオン温度に関するパラメータを取得し、

軽いイオンの加熱を確認し、さらに重いイオンの変化を調べることが本研究の目的である。本研究では、Xe プラズマを対象として Ar もしくは He を混合させた場合について実験を行った。多価イオン収量増加効果は、典型的な純 Xe プラズマ(pure Xe)に対する質量価数分布(CSD)測定の結果と Ar ガスミキシング時の Xe プラズマ(Xe/Ar)もしくは He ガスミキシング時の Xe プラズマ(Xe/He)に対する CSD 測定の結果を比較することで確認した。さらに、そのプラズマにそれぞれのイオン(Ar^+ , He^+)に対応する低周波数 RF 電磁波を導入し、その時の CSD 測定の結果を比較し、多価イオン収量増加効果を確認した。また、低周波数 RF (Radio Frequency) 電磁波導入前後でのイオン温度に関するパラメータは、各ビームのエミッタンス測定から導出される 2 乗平均平方根(rms)エミッタンス値をそれぞれに対して取得することで比較した[6, 7]。

2. 実験装置と実験手順

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 の中に示した。通常、コイル A、B の電流量は 150 A であり、コイル C の電流量は 10 A 前後で調整される。図中の破線は、我々が ECR で用いる電磁波の周波数が 2.45 GHz であるため、磁場強度が 0.0875 T となる点で共鳴が起きることを表している。真空排気は、ECRIS では 3000 //s の油拡散ポンプ、ビームラインと計測部ではそれぞれ 260 //s、

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

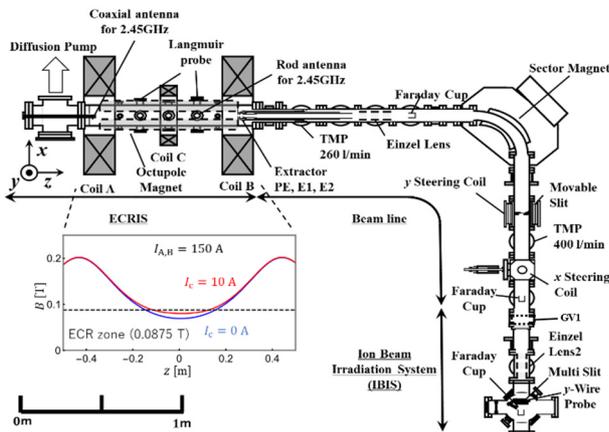


Figure 1: The top view of ECRIS.

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 か所から導入できる。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垂直に導入される。ガス導入の際は Xe に関してはバリアブルリークバルブ、Ar と He に関してはマスフローコントローラーが用いてガス流量の調整を行う。

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。また、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 ヘ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、ステップモーターによって y 方向に可動な W 製ワイヤプローブ(直径 0.05 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。ワイヤプローブの位置は可変抵抗を用いて校正を行う。また、ワイヤプローブの 10 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

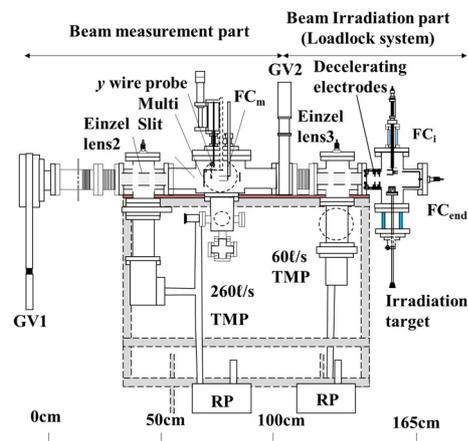


Figure 2: The side view of measurement part of IBIS.

ぞれに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 Xe^{7+} の電流量を最適化した。次に Ar もしくは He ガスを導入してビーム電流量の CSD 測定を行うことで、 Xe^{7+} などの多価イオン電流量が増加することを確認した。その後、低周波数 RF 電磁波として Ar ガス導入時は 40 kHz、He ガス導入時には 400 kHz の電磁波を導入し、同様に多価イオンビーム電流量が増加していることを確認した。このとき低周波数用 RF 電磁波の有無それぞれに対してエミッタンス測定を行った。また、低周波数用 RF 電磁波の導入を止めると多価イオン電流量が元に戻ることも確認した。

3. 実験結果

3.1 ECR から引き出されたイオンビーム電流量の質量価数分布(CSD)測定

我々の ECRIS で生成された pure Xe プラズマ、Xe/Ar プラズマおよび 40 kHz RF 電磁波を導入したときのプラズマに対する CSD 測定結果を Fig. 3 に示す。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、合計の入射パワーは 225 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よって形成されたビームにおいて Xe^{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であり、縦軸はファラデーカップで採集したビームの電流量を対数で表している。ここで、分析磁石の作る磁場は質量価数比の平方根と比例している。黒線は pure Xe プラズマに対する CSD、青線は Xe/Ar プラズマに対する CSD、赤線は Xe/Ar プラズマに 40 kHz RF 電磁波を 100 W 導入したときの CSD をそれぞれ示している。今回の実験では Xe イオンビームのピークは 1~7 価までのものが確認された。ただし、 Xe^{7+} のイオンビームに関しては Ar^{2+} と重なってしまうため、1~6 価で比較した。Xe/Ar プラズマにおける低価数イオン電流量は pure Xe プラズマでの電流量に比べて減少しており、高価数イオン電流量は増加していることを確認した。さらに、40 kHz RF 電磁波の導入により、高価数イオンが増加していることがわかる。

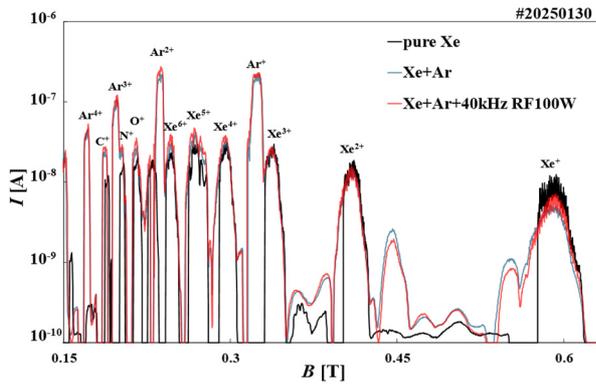


Figure 3: CSDs of ion beam currents for pure Xe, Xe/Ar mixing without RF and with 100 W of 40 kHz RF.

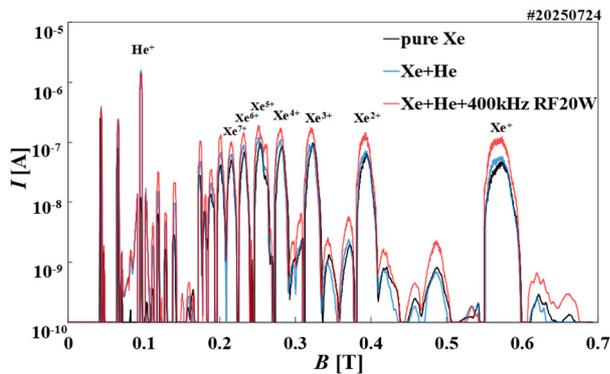


Figure 4: CSDs of ion beam currents for pure Xe, Xe/He mixing without RF and with 20 W of 400 kHz RF.

Xe/Ar プラズマと同様に Xe/He プラズマにて行った実験結果について示す。pure Xe プラズマ、Xe/He プラズマおよび 400 kHz RF 電磁波を導入したときのプラズマに対する CSD 測定結果を Fig. 4 に示す。マイクロ波の導入パワーは 225 W であった。黒線は pure Xe に対する CSD、青線は Xe/He プラズマに対する CSD、赤線は Xe/He プラズマに 400 kHz RF 電磁波を 20 W 導入したときの CSD をそれぞれ示している。He を入れた場合は Xe イオンビームは 1~7 価まで確認できる。Xe/He プラズマにおける低価数 Xe イオン電流量は pure Xe プラズマでの電流量に比べて減少しており、高価数 Xe イオンはわずかに増加していることが分かる。さらに、400 kHz RF 電磁波を 20 W 導入することにより、Xe ビーム電流量がすべての価数で増加していることが分かった。ただし、Xe ビーム増加量は高価数よりも低価数の方が大きく伸びている。CSD では Xe、He 以外のピークもみられ、これは、C、N、O などの不純物である。

3.2 ECR から引き出されたイオンビームに対するエミッタンス測定

Xe/He プラズマにて行った実験結果について示す。ECRIS で生成した 400 kHz RF 電磁波なしの Xe/He プラズマおよび 400 kHz RF 導入時の Xe/He プラズマにおいて計測部まで引き出した He⁺ビーム電流量の y 分布をワイヤープローブによって測定し、Fig. 5(a)に示す。次に、マルチスリットを挿入した時のビーム電流量の y 分布をそ

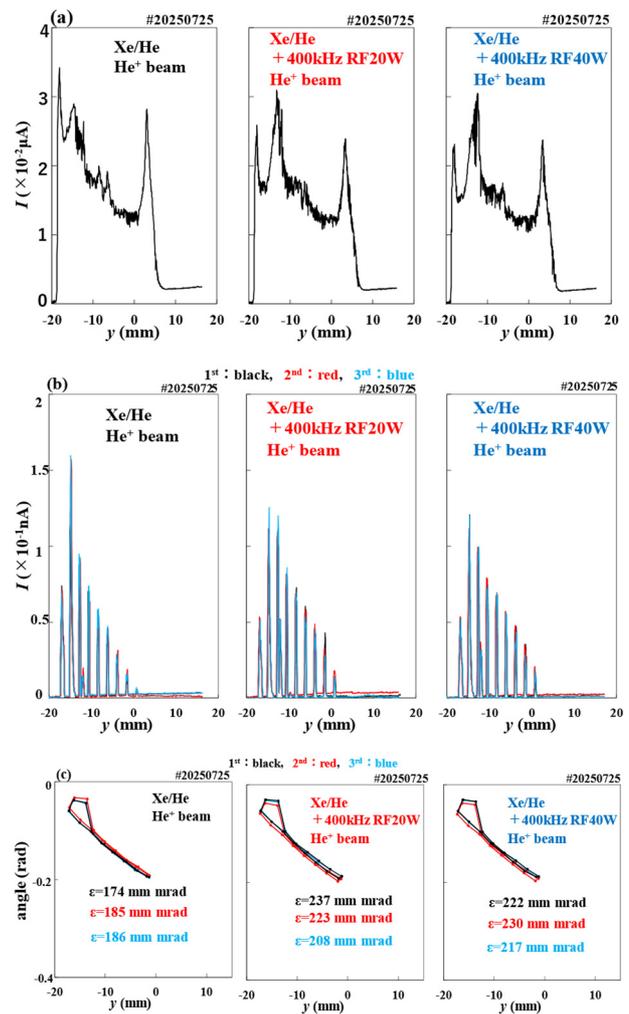


Figure 5: (a) The primary He⁺ beam profiles for Xe/He mixing with RF (0 W-40 W). (b) He⁺ profiles passed through the multi-slit for Xe/He mixing with RF (0 W-40 W). (c) Emittance diagram of He⁺ beams for Xe/He mixing with RF (0-40 W).

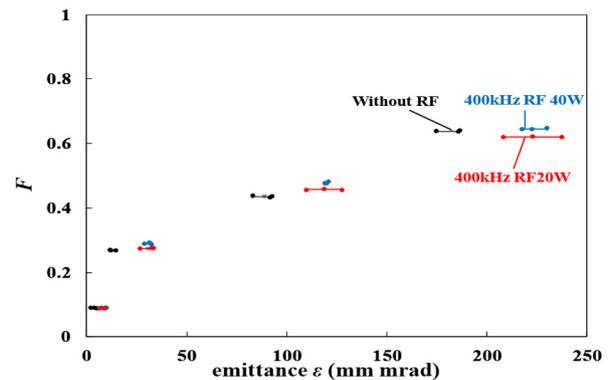


Figure 6: Cumulative emittance distribution function F vs. emittance ϵ for He⁺ beam.

れぞれ測定した(Fig. 5(b)). 今回は、400 kHz RF 電磁波 0 W、20 W、40 W の場合でそれぞれ 3 回ずつデータを採取した。Figure 5(b)、(c)では、1 回目の測定結果を黒

色、2回目を赤色、3回目を水色でそれぞれ示している。マルチスリット通過ビーム電流のピークはそれぞれ 9 本ずつ確認された。この各ピークの幅を読み取り、マルチスリットのスリット間隔及びマルチスリットとワイヤープローブの距離を考慮してマルチスリットを通過したビームの広がり角をそれぞれのピーク位置において評価し、Fig. 5(c)のエミッタンス図が得られた。図中の各領域での面積がエミッタンス値を表しており、得られた全領域でのエミッタンス値は図の中に示している。エミッタンス図を Fig. 5(a)で示した He^+ ビームプロファイルと照らし合わせることで各位置のエミッタンスとビーム電流の累積分布関数の対応関係を得た (Fig. 6)。それぞれ 3 回測定した時のそれぞれの測定結果を丸点で示しており、それに加えて、3 データ平均からの誤差範囲について示している。今回の結果は、400 kHz RF 電磁波を 20 W 導入により He^+ の ϵ_{rms} が上昇したことが分かる。また、さらに RF を入れ 40 W 入れた場合は 20 W 導入した場合に比べ ϵ_{rms} がほとんど変わらないことが分かる。

また、 Xe^{6+} ビーム電流量の y 分布をワイヤープローブによって測定し、Fig. 7(a)に示す。次に、マルチスリットを挿入した時のビーム電流量の y 分布をそれぞれ測定した (Fig. 7(b))。 He^+ と同様に 400 kHz RF 電磁波 0 W、20 W、40 W の場合でそれぞれ 3 回ずつデータを採取した。Figure 7(b), (c)では、1 回目の測定結果を黒色、2 回目を赤色、3 回目を水色でそれぞれ示している。マルチスリット通過ビーム電流のピークはそれぞれ 9 本ずつ確認された。この各ピークの幅を読み取り、マルチスリットのスリット間隔及びマルチスリットとワイヤープローブの距離を考慮してマルチスリットを通過したビームの広がり角をそれぞれのピーク位置において評価し、Fig. 7(c)のエミッタンス図が得られた。図中の各領域での面積がエミッタンス値を表しており、得られた全領域でのエミッタンス値は図の中に示している。エミッタンス図を Fig. 7(a)で示した Xe^{6+} ビームプロファイルと照らし合わせることで各位置のエミッタンスとビーム電流の累積分布関数の対応関係を得た (Fig. 8)。それぞれ 3 回測定した時のそれぞれの測定結果を丸点で示しており、それに加えて、3 データ平均からの誤差範囲について示している。今回の結果は、400 kHz RF 電磁波を導入しても Xe^{6+} の ϵ_{rms} は変化していないことが分かる。

4. 考察とまとめ

本研究では、Xe プラズマに対して Ar ガス及び He ガスをミキシングしたときの結果について示した。Xe プラズマに対して低 Z ガスミキシング時、低周波数 RF 電磁波の多価イオンビーム電流量への効果を確認し、そのときのエミッタンスを測定した。CSD の結果、純 Xe プラズマにおける Ar または He の混合効果が確認された。さらに、低周波数 RF 電磁波を導入すると、高価数 Xe イオンのビーム電流が増加した。これは、低周波数 RF 電磁波がガス混合効果をもたらし、高価数 Xe イオンのビーム電流を増加させることを示唆していると考えられる。さらに、エミッタンス測定により、低周波 RF 電磁波を導入する対象のイオンである He の rms エミッタンス ϵ_{rms} が増加することが確認された。これは、イオンサイクロトロン共鳴により対象のイオンが加熱された結果と考えられる。エミッタンスは引き出し口の磁場による影響を受けるが、

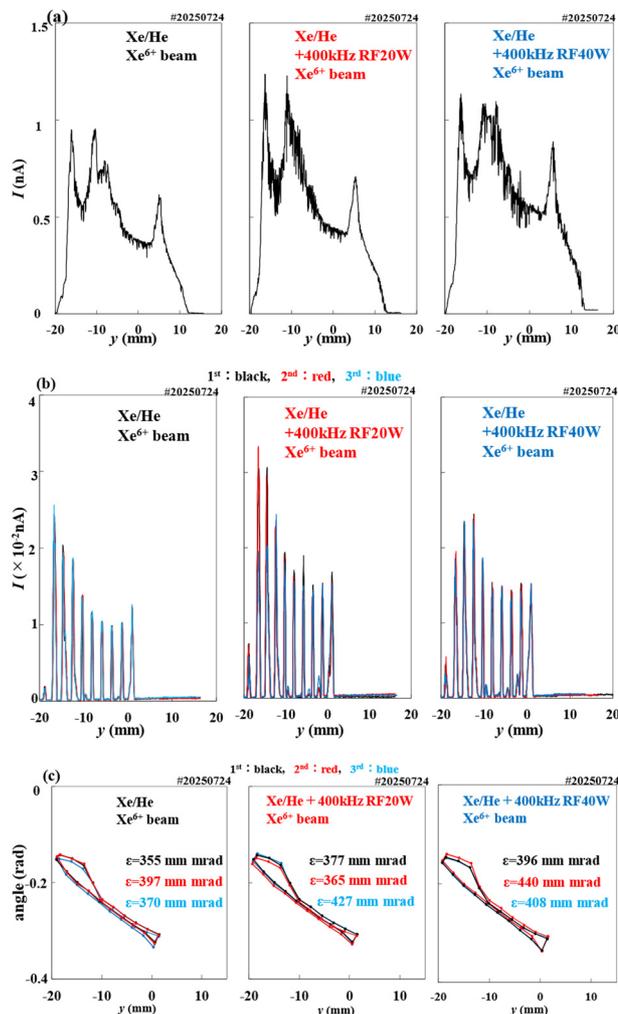


Figure 7: (a) The primary Xe^{6+} beam profiles for Xe/He mixing with RF (0 W-40 W). (b) Xe^{6+} profiles passed through the multi-slit for Xe/He mixing with RF (0 W-40 W). (c) Emittance diagram of Xe^{6+} beams for Xe/He mixing with RF (0-40 W).

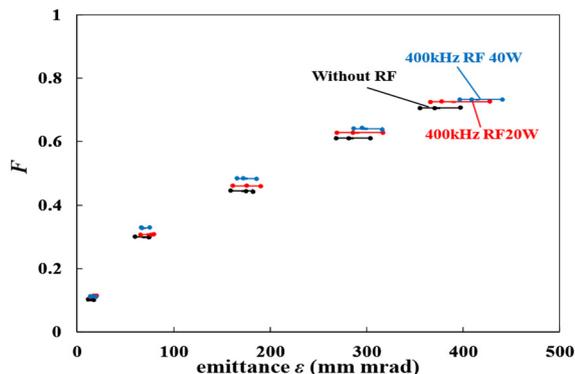


Figure 8: Cumulative emittance distribution function F vs. emittance ϵ for Xe^{6+} beam.

我々の装置ではエミッタンスに対する磁場の寄与はイオン温度の効果と同程度であり、磁場強度を大きく変えずに測定しているため、エミッタンスの変化は温度効果によ

るものだと考えられる[8]。

現在はXeを一定にして、そこにHeを導入する手法を用いている。そのため、pure XeとXe/He mixingの比較が困難であり、再現性をその場で確認することも難しい。そのため、今後は全圧を一定にしてHe、Xeの圧力を調整し測定を行っていききたいと考えている。また、現在行っているエミッタンス測定との結果に加えて、チャンバー内のイオン温度を直接測定するプローブの製作や光学測定により、ICRの影響をクロスチェックしようと考えている。現在、400 HzのRFを導入すると不純物が増えるため、ICRコイルを焼きだしてから実験を行い、低価数のイオンの上昇を抑え、さらに、高価数イオンのビーム上昇を狙った結果を出していきたいと考えている。

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, *Rev. Sci. Instrum.* 74, “Techniques and mechanisms applied in electron cyclotron resonance sources for highly charged ions”, 2003, pp. 2631-2645.
- [3] A. G. Drentje, “THE ECR ION SOURCE AND ASSOCIATED EQUIPMENT AT THE KVI”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, 9(4), 526-528. doi:10.1016/0168-583X(85)90360-X
- [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 1989 *The Physics and Technology of Ion Sources*. pp. 92-94.
- [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, 2011, “Ion beam properties for ECR ion source injector systems” *Jinst.* 6 P07010.