

ペッパーポットエミッタンスモニタを用いたイオンの価数毎のエミッタンスの測定 MEASUREMENT OF EMITTANCE FOR EACH ION CHARGE STATE USING A PEPPER-POT EMITTANCE MONITOR

中尾政夫^{#, A)}

Masao Nakao^{#, A)}

^{A)} Gunma University Heavy Ion Medical Center

Abstract

At the Gunma University Heavy Ion Medical Center (GHMC), the 10 GHz ECR ion source “KeiGM” is used as the ion source for carbon ion therapy. An ion source test stand of the same type has been installed both as a spare and for research and development purposes. In 2022, a pepper-pot emittance monitor was installed on the test stand to shorten the emittance measurement time. The pepper-pot emittance monitor measures emittance by observing ions that have passed through a pepper-pot mask. These ions strike a microchannel plate (MCP), producing secondary electrons that are amplified and then converted into light on a fluorescent screen, which is recorded by a camera. In this study, emittance was measured for each charge state of ions such as C, Ne, and Ar.

1. はじめに

イオン源から加速器のアクセプタンスに入射できるビーム量を測定し、またイオン源を調整してマッチングを良くして入射効率を上げるために、エミッタンスの測定はイオン源の開発・調整において重要である。群馬大学重粒子線医学センター(GHMC)の加速器に使用されているイオン源と同型機の、RF 周波数 10 GHz の永久磁石型 ECR イオン源である KeiGM2 がテストスタンドとして設置されている。このイオン源は研究開発用として C 以外にも多種のイオンを生成している(Table 1)。

2022 年から新たにペッパーポット型エミッタンスモニタ (PPEM) [1, 2] を製作してビームラインに設置した。既存のスリットワイヤ型のエミッタンスモニタ(SWEM)より短時間でエミッタンスが測定できるメリットがある。一方で大強度のビームを観測し続けると MCP が劣化したりマスクが熱により変形したりするなど注意が必要なデバイスである。理研[3]、RCNP[4]、QST 高崎[5]などで製作されてきたものを参考にして設計製作を行った。製作した PPEM の諸元を Table 2 に示した。

2. ペッパーポットエミッタンスモニタ取得画像の解析

ペッパーポットエミッタンスモニタの製作については既に報告した[6, 7]。ペッパーポットマスクの孔からのビームが MCP で増幅され蛍光板で可視光になり CMOS カメラで観測される。この画像を USB3.0 で PC に取り込み Python を用いて解析を行い位相空間分布やエミッタンスの値を求めた。

エミッタンスモニタの各 부품の設置精度が求めるエミッタンスの精度に影響するが、ペッパーポットマスク、MCP、鏡は一つの台に乗っていて、製作精度はビームラインの設置精度よりも十分高いと考えられる(Fig. 1)。CMOS カメラはエミッタンスモニタの上部の金属板とネジを用いて固定した。カメラがビームラインに対して水平方向に回転

することにより画像が斜めになることを防ぐため、カメラ設置時に MCP 取り付けマウントの上下左右にあるケガキ線が水平・垂直になっているか画像上で確認した。更に静電レンズを OFF にして「広いビーム」を作り、蛍光列が画像上で水平、垂直に並び MCP の幅に対して 1 ピクセル未満の傾きであることを確認した。

CMOS カメラで得られた画像からエミッタンスを求める Python プログラムを作成した。予め夫々のペッパーポットの孔から直進した場合のビームが MCP に衝突したときに光っている蛍光板を見た CMOS の座標の位置を求めておく。この周りに広がった光がビームの角度の情報を持っている。X 方向、Y 方向夫々で合計値をもとめ、その分布の一山をその位置での角度分布としてプロットすることで位相空間分布が得られる。バックグラウンドはビー

Table 1: Parameters of the Ion Source

RF frequency	10 GHz
Max RF power	550 W
Gas	CH ₄ , He, N ₂ , O ₂ , Ne, Ar, Kr, Xe etc.
Extraction voltage	Max. 30 kV

Table 2: Parameters of the Pepper-pot Emittance Monitor

MCP	Hamamatsu Photonics F2226-24P-Y003 (77 mm)
Typical Applied Voltage	MCP -0.90 kV, Fluorescence screen 0.71 kV
Pepper-pot mask	A 50 μm nickel plate with 100 μm holes spaced at 3-mm intervals
Camera	DMK33UX252 1/1.8” CMOS 2048×1536 120 fps
Lens	Focal length 25 mm, F1.8

[#] nakaom@gunma-u.ac.jp

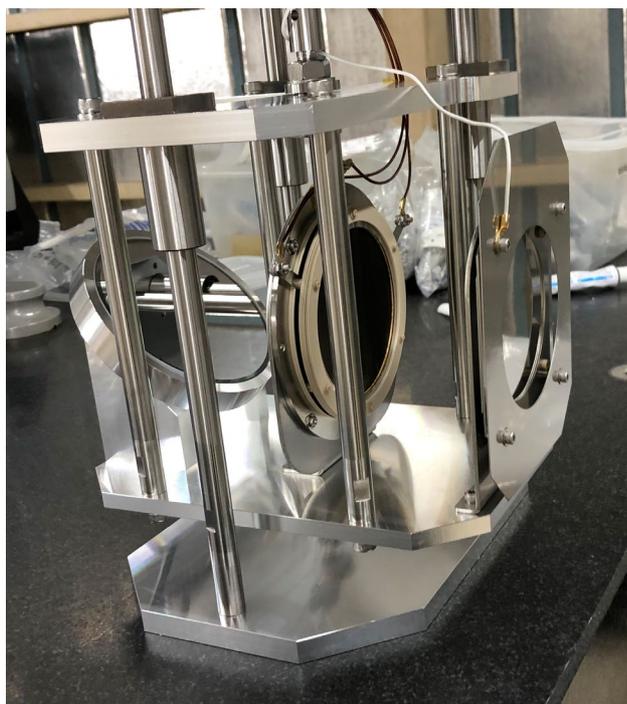


Figure 1: A stage with an MCP, a pepper-pot, and a mirror.

ムの存在しないときにも存在する迷光あるいはカメラのノイズ由来と、ビームを当てた時のみ発生する MCP 由来のものがある。迷光はガラス窓とカメラの隙間をアルミホイルで覆ったりすることでほぼ消すことができた。MCP と蛍光板の電圧の設定も留意点である。蛍光板電圧を上げれば蛍光が増えて明るくなるが、上げすぎるとビームが無い部分の蛍光板も光り始めてしまうため適当な値に設定し、Table 2 に示した一定の値を使用することとした。

3. 測定結果

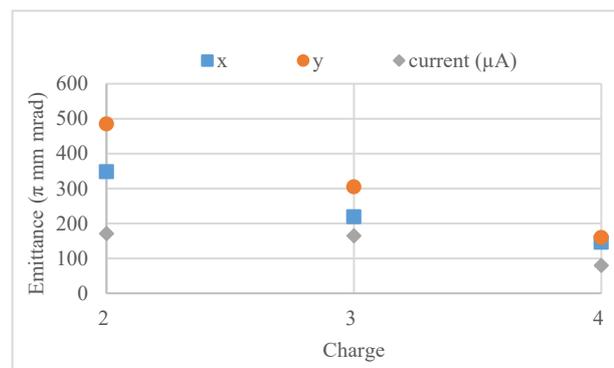
PPEM で測定された価数ごとの 95% エミッタンスの値を Fig. 2 に示した。各ガス (Ne, CH₄, Ar) を用いてイオン源を運転した一連の測定においては、価数の異なるイオンを測定するために変化した偏向電磁石以外のパラメータは変化させずに測定を行った。

Ne では価数が増えるに従いエミッタンスが小さくなったが、C や Ar ではそのような傾向は見られなかった。Ar については価数が増えるに従ってビーム電流が減少したが、エミッタンスはほとんど変化がなかった。これにより空間電荷効果の影響でエミッタンスが変化している訳ではないと思われる。

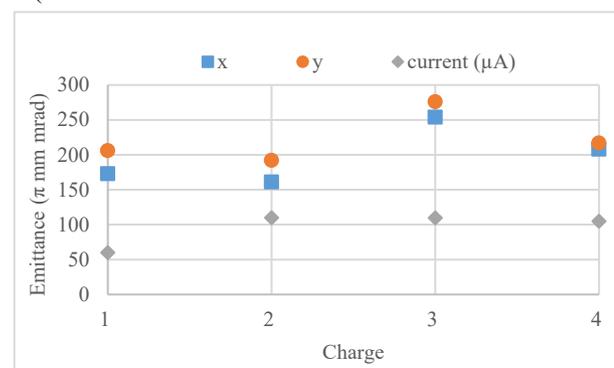
この結果を質量電荷比 (M/q) と規格化エミッタンスのグラフにしたものが Fig. 3 である。M/q と規格化エミッタンスの傾向が元素によって異なり、Ne では M/q が大きいほどエミッタンスが大きくなっているが C では逆に M/q が大きいほどエミッタンスが小さくなっている。過去の研究においても基本的には M/q が大きくなるほどエミッタンスは小さくなるが、逆の傾向を示す研究結果もある [8, 9]。イオン源内部の状態や、何がエミッタンスを制限しているかによって傾向が変化すると思われる。

4. 結論

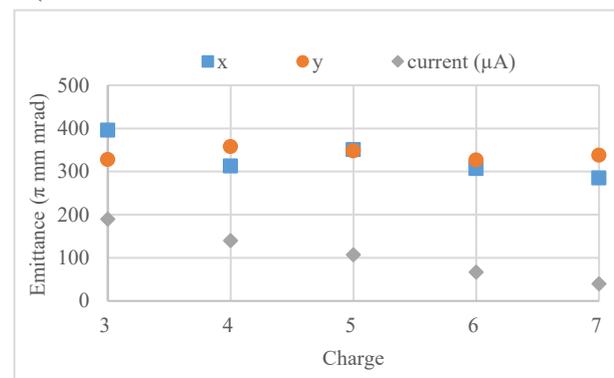
GHMC のイオン源テストスタンドにおいて PPEM を用いて C, Ne, Ar の各イオンに対して価数ごとのエミッタンスを系統的に測定した。C では高価数ほど規格化エミッタンスが大きい、つまり M/q が大きいほど規格化エミッタンスが小さいという典型的な傾向を示したが、Ne では逆であった。今後なぜ Ne では異なる傾向を示したのかを調査するため、RF パワーを変更したりガスマキシングにより複数の元素のイオンを同時に発生させたりして様々な条件で測定する必要がある。



(a) Neon

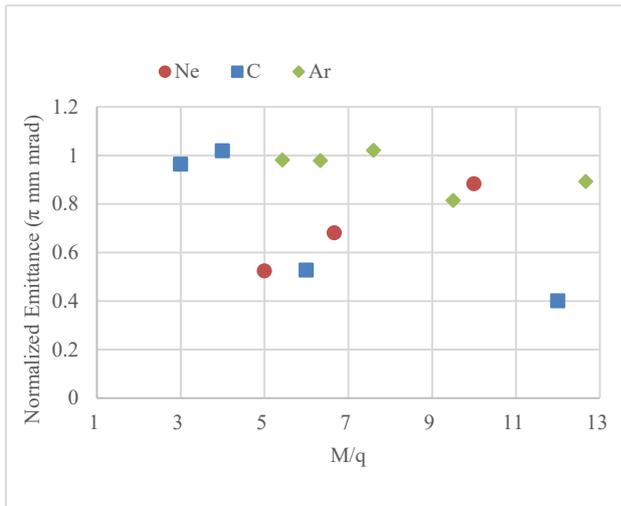


(b) Carbon

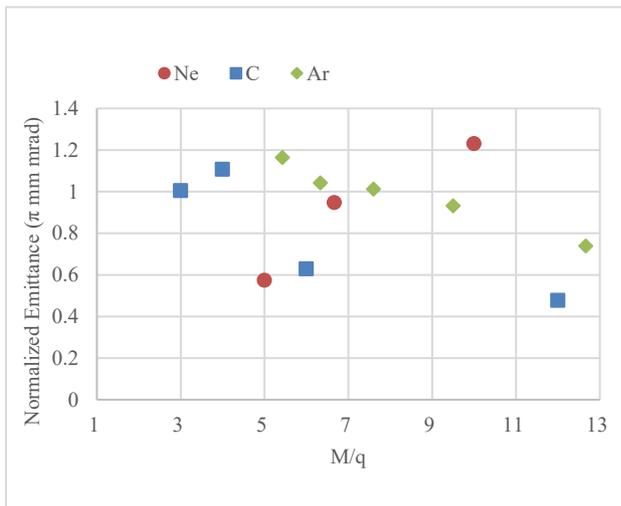


(c) Argon

Figure 2: Emittance for each charge state of the elements (a) Neon, (b) Carbon and (c) Argon. Beam current was shown in electric μA.



(a)



(b)

Figure 3: (a) Horizontal and (b) vertical normalized emittance of Ne, C and Ar.

謝辞

本研究において、放医研の村松正幸氏、東大 CNS の小高康熙氏、QST の宮脇信正氏、大阪大学 RCNP の依田哲彦氏、山形大学の想田光氏、WERC の野田耕司氏には助言を頂きました。また、理研の長友傑氏の制作したペッパーポット原板を使用させていただきました。また、本研究は JSPS 科研費 20H04454 の支援を受けて実施しました。また、住友重機械工業株式会社および住友重機械イオンテクノロジー株式会社との共同研究により本エミッタンスモニタなどを製作しました。また、日常のイオン源のメンテナンスについて加速器エンジニアリング株式会社の支援を頂きました。

参考文献

- [1] T. Hoffmann *et al.*, Proc. 9th BIW, Cambridge, USA, p.432-439 (2000).
- [2] H. R. Kremers *et al.*, “A pepper-pot emittance meter for low-energy heavy-ion beams”, Rev. Sci. Instrum., vol. 84, 025117 (2013).
- [3] Y. Kotaka *et al.*, “Development of pepper-pot emittance monitor for AVF cyclotron” RIKEN Accel. Prog. Rep. 49 (2016).
- [4] T. Yorita *et al.*, “Developments of fast emittance monitors for ion sources at RCNP”, Rev. Sci. Instrum., vol. 87, pp. 02B928, 2016.
- [5] N. Miyawaki *et al.*, “TIARA AVF サイクロトロン のペッパーポット型エミッタンス測定装置の開発” Proc. 16th PASJ (2019).
- [6] M. Nakao *et al.*, “GHMC のイオン源テストスタンドにおけるペッパーポットエミッタンスモニタの導入” Proc. 20th PASJ (2023).
- [7] M. Nakao *et al.*, “The Development of Pepper-Pot Emittance Monitor in Gunma University” J. Phys.: Conf. Ser. 2743 012078 (2024).
- [8] K. Ozeki *et al.*, “Emittance Measurements For RIKEN 28 GHz SC-ECRIS” Proc. 9th PASJ (2012).
- [9] O. Tarvainen *et al.*, “Effect of the gas mixing technique on the plasma potential and emittance of the JYFL 14 GHz electron cyclotron resonance ion source” Rev. Sci. Instrum. 76, 093304 (2005).