

# 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

## INTRODUCTION OF A PEPPER-POT EMITTANCE MONITOR AT GHMC

中尾 政夫<sup>#, A)</sup>, 野田 耕司<sup>A)</sup>, 依田 哲彦<sup>B)</sup>, 福田 光宏<sup>B)</sup>, 宮脇 信正<sup>C)</sup>, 想田 光<sup>D)</sup>  
Masao Nakao<sup>#, A)</sup>, Koji Noda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>B)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>B)</sup>, Nobumasa Miyawaki<sup>C)</sup>, Hikaru Souda<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> Gunma University Heavy Ion Medical Center

<sup>B)</sup> Research Center for Nuclear Physics of Osaka University

<sup>C)</sup> National Institutes for Quantum Science and Technology

<sup>D)</sup> Yamagata University

### Abstract

Gunma University Heavy Ion Medical Center (GHMC) uses a 10 GHz ECR ion source, KeiGM, which extracts about 200  $\mu\text{A}$  of  $\text{C}^{4+}$  at extraction voltage of 30 kV. An ion source test stand, which is the same design as KeiGM, is also installed as a spare unit and for research and development. The test stand is already equipped with a wire-slit type emittance monitor as a beam diagnostic device, but it has problems of time-consuming measurement and small phase space that can be measured. To solve these problems, a pepper pot emittance monitor (PEEM) was installed. PEEM utilizes the fluorescent from MCP which detect the beam from the pepper-pot mask. The measurement method was established by optimizing the background removal method through comparison with conventional emittance monitor.

### 1. はじめに

イオン源から線形加速器やサイクロトロンに入射する場合、ビームがアクセプタンスに入らなければならないのでエミッタンス測定は重要である。

エミッタンスモニタにはスリットを通過したビーム電流を下流のワイヤで測定する、スリットとワイヤを組み合わせた方式がある。しかしながら、スリット・ワイヤ方式のエミッタンスモニタ(SWEM)はスリットを物理的に動かしながら測定するため、測定に時間が掛かってしまう。ペッパーポットエミッタンスモニタ(PEEM) [1, 2]はペッパーポットマスクを通過したビームを下流で MCP モニタと蛍光板、その蛍光板を観測するカメラによって構成され、SWEMより短時間で測定できる。測定時間を短縮するだけでなくビームの時間変化の測定も可能とすることを目標とした。

2021年頃既存のSWEMの調子が悪かった(現在は解決)こともあり、PEEMを開発することにした。日本国内だけでも理研[3]、RCNP[4]、QST 高崎[5]などで製作されており、参考にしたり開発者に意見を聞いたりして製作した。

### 2. 群馬大学イオン源テストスタンド

群馬大学重粒子線医学センター(GHMC)では、イオン源として、RF周波数が10 GHzの永久磁石型 ECR イオン源である KeiGM を使用し、30 kV の引出電圧で  $\text{C}^{4+}$  を 200  $\mu\text{A}$  程度取り出して治療のための運転を行っている。専ら  $\text{CH}_4$  ガスから  $\text{C}^{4+}$  イオンを生成し、200  $\mu\text{A}$  のビームを 1 年間メンテナンスせずに安定的に取り出すことを目的にしている。一方で群馬大学には、群馬重粒子線産学官共同研究センターとして治療に用いられているのと同様である KeiGM2 イオン源のテストスタンドが整備されている。重粒子線医学センターの予備機としての役割を果たすと同時に企業との共同研究にも用いられている

(Fig. 1)。こちらは  $\text{C}^{4+}$  イオンの他に、He,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ne, Ar, Kr, Xe 等のガスを使用して様々なイオンを生成している。90 度偏向電磁石とスリットによってイオン種を分離し、またアインツェルレンズと 3 連静電四重極レンズによってイオンを収束することができる。

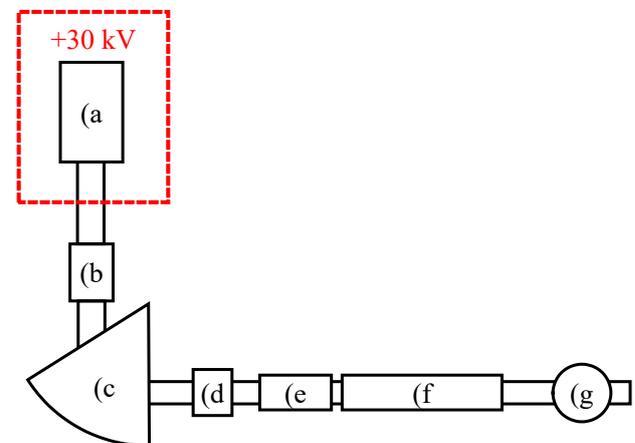


Figure 1: Schematic picture of ion source test-stand. (a) KeiGM2 ion source, (b) einzel lens, (c) 90° bending magnet, (d) slit and Faraday cup, (e) 3 electrostatic Q lenses, (f) wire slit emittance monitor, (g) pepper-pot emittance monitor.

SWEM がビームラインに設置してあるが、これは GHMC で使用されている装置と同型であり、主に線形加速器で 4 MeV/u に加速されシンクロトロンに入射する前のビームの分布を測定するために製作された装置であるため、イオン源からの 100  $\pi$  mm mrad 程度のビームに対しては測定できる範囲がやや小さいものであった。これよりも大きな範囲を観測することも PEEM 開発の目標とした。

### 3. ペッパーポットエミッタンスモニタの原理

PPEM の原理[1, 2]を Fig. 2 に示した。左方向からイオンビームが到達すると、ペッパーポットマスクの孔を通過したもののみが右の MCP モニタに到達し、MCP によって増幅された電子が蛍光板を光らせる。粒子が通過したマスクの孔の位置が位置情報を与える。また、それぞれの孔を通過したビームの粒子は、その粒子の進行方向に向かって進み、広がりを持って MCP モニタに到達するため MCP モニタ上での一つの孔からのビームの広がりがビームの傾きの情報を与える。これらを位相空間上にプロットすれば位相空間上でのビームの形状が構成される。ここで MCP モニタ上での一つの孔からのビーム分布が隣の分布と重なると、どちらの孔を通過したか不明になるため、孔の間隔より MCP 上でのビームの広がりが小さい範囲が測定の上限となる。

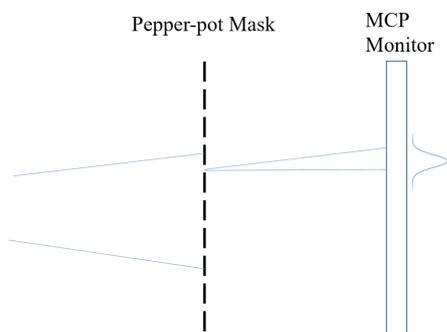


Figure 2: Schematic drawing of pepper-pot emittance monitor. The ion beam comes from left side. Whether the beam pass or not at each hole of the pepper-pot mask shows the beam position the spread of the beam from each hole shows the beam spread. Observing the fluorescent light from MCP monitor, the phase space distribution of the beam is reconstructed.

### 4. エミッタンスモニタの製作

既に挙げたように、PPEM 製作の目標として

- 1 秒以下の時間幅でのイオン源の過渡現象を測定
  - 既存のエミッタンスモニタより広いビームを測定
- の 2 点を設定した。

MCP モニタの蛍光は、鏡で反射されビームライン上部に設置したレンズとカメラによって観測される。時間幅の小さい現象を測定するために高速撮影可能な The Imaging Source 社の産業用 USB3.0 カメラ (DMK33UX252, SONY 1/1.8" CMOS 解像度 2048 × 1536, 120 fps) を、レンズは焦点距離 25 mm F1.8 の製品を使用した。ビーム強度が低い場合や露光時間が短い場合には蛍光強度の S/N 比が悪化するため実用上は 1fps 程度となった。一方でビームの強度が強い場合 (30kV で数百  $\mu\text{A}$  以上)、ペッパーポットマスクまたは MCP が熱負荷に耐えられなくなる懸念がある。

ペッパーポットマスクは 50  $\mu\text{m}$  と薄いため位置精度が高く、比較的熱負荷に耐えられる素材として Ni エッチン

グ板を使用した。角度方向に広がったビームに対応するためピンホール間隔を比較的広めの 3 mm として  $\pm 25 \text{ mrad}$  まで測定できるようにした。また、ペッパーポットマスクの製作にあたって既に理研が製作[3]した原板を使用してもらい費用を抑えることができた。ペッパーポットマスクと MCP の間隔が可変[3, 4]で位相空間内での形状に対応できるようにすることも検討したが、サイズと費用の問題を考えて間隔を 58 mm に固定した。

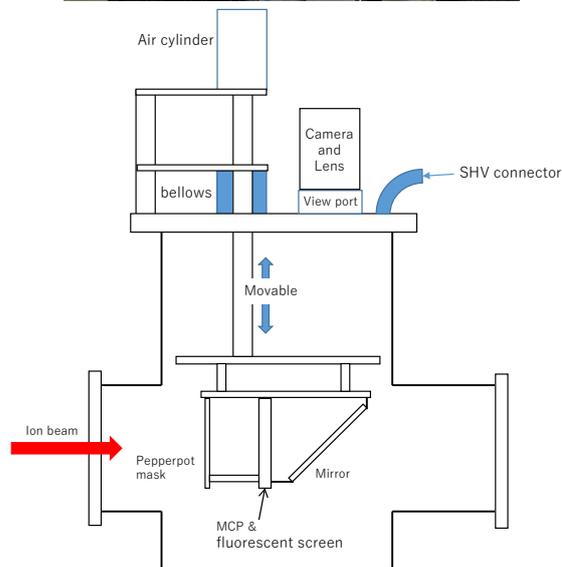


Figure 3: The picture of pepper-pot emittance monitor and schematic view of total system.

Figure 3 のように、ペッパーポットマスク、MCP、ミラーを載せた台は、PPEM 使用しないときにはエアシリンダーによりビームラインから待避できる。手でエア配管のスイッチを切り替えて動作するがテストスタンドでは現場まで近いため問題ない。MCP に掛ける負の高電圧、蛍光板に掛ける正の高電圧は夫々チェンバー上部の高圧用フィードスルーを通して供給される。電圧は 3 kV 程度まで掛けられる(実際にはもっと低い電圧で使用) が電流はほとんど流れない。また、ペッパーポットマスクに当たったビームの電流も計測できるようにしている。

## 5. 解析

### 5.1 取得画像の解析

ビームの情報は CMOS カメラで撮影されて画像が USB 3.0 ケーブルで PC に送信され解析される。画像の解析は python を用いて行った。画像は Fig. 4 のように、蛍光板上にペッパーポットマスクの孔からのビームによる蛍光が見えている。MCP の電源を切った状態で外光をあてて MCP の外縁が見える状態で画像を取得し、その中心をビームダクト位置の中心とした。また、静電四重極レンズを調整して広く平行に近いビームを作成し、その蛍光の間隔とペッパーポットマスクの孔の間隔(3 mm)が一致することを確認して X(水平), Y(鉛直)両方向で 3 mm が相当するピクセル数を算出した。

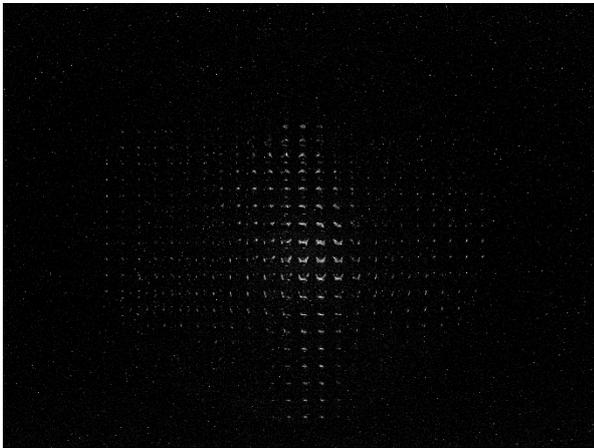


Figure 4: Fluorescence of MCP monitor by  $\text{Ar}^{3+}$  beam captured by the CMOS camera.

画像の解析としては、まず画像から一定のバックグラウンドを引いた後に X, Y 各方向にピクセルの明るさを足し合わせて求めた分布から、一列分の孔からのビーム分布を算出した。この分布がペッパーポットマスクの孔の位置での角度方向の分布であるから、相当する位置の位相空間にプロットする(Fig. 5 (b)). 全ての列に対してこれを行うことで位相空間分布が再現できる。

### 5.2 SWEM と PPEM の比較

$\text{Ar}^{3+}$  の 30kV 引出し 190  $\mu\text{A}$  のビームを SWEM と PPEM の両方で測定した(Fig. 5).

PPEM で得られた画像からエミッタンスの値を出す過程で、バックグラウンドの引き方によって得られるエミッタンスの値が変化する。Figure 5 の解析時には、双方のエミッタンスモニターで 95%エミッタンスの絶対値が等しくなるように PPEM のバックグラウンド値を決めた。システムティックにバックグラウンドの水準を決めた場合に二つのエミッタンスモニタの結果が等しくなるようにできる手法を確立することを今後の課題としたい。

SWEM の水平、垂直のエミッタンススリットから PPEM までは夫々、83 cm、92 cm の距離があるため、位相空間では、その距離だけドリフトしているはずである。Figure 5 の X 方向の分布の周辺の点を 6 点取り、ドリフトさせた結果を Fig. 6 に示した。似た傾向になっていることが見て取れる。

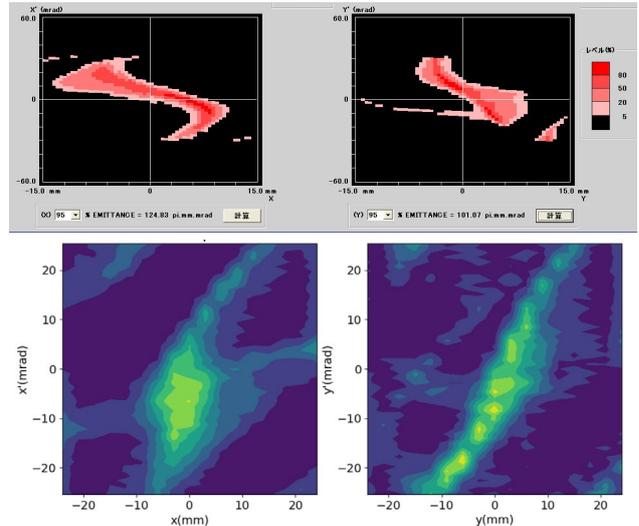


Figure 5: (a) The phase space plot took by wire-slit emittance monitor and (b) pepper-pot emittance monitor of 190  $\mu\text{A}$   $\text{Ar}^{3+}$  ion beam.

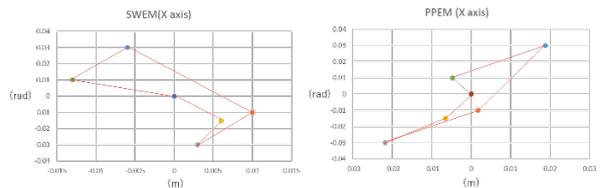


Figure 6: The phase space plot of 6 particles detected by wire-slit emittance monitor. The right picture shows the phase space progressed by drift space between two emittance monitors.

## 6. 結論

PPEM を製作し、測定結果を SWEM と比較することで校正し、ある程度信頼できるエミッタンスの値を出すことができた。

エミッタンスを観測するためにカメラで蛍光を 1 秒積算しているが、これは目標としていた時間よりも長い。より短時間で測定するためには穴の径を広げたペッパーポットマスクに交換することなどが必要となる。

測定しているビームの範囲については、MCP の直径が 77 mm なのでそれに内接する正方形の 1 辺が 54 mm、つまりビーム断面が正方形であれば  $\pm 27$  mm の範囲を測定できる。断面が丸ければ直径 77 mm のビームまで観測することができる。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 20H04454 の支援を受けて実施しました。また、イオン源を利用した共同研究では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にお世話になりました。放医研の村松正幸氏、東大 CNS の小高康熙氏には様々な助言を頂きました。また、理研の長友傑氏の制作したペッパーポットマ

スク原板を使用させていただきました。深くお礼申し上げます。

## 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 サイクロトロンへ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).