

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 DEVELOPMENT OF A PEPPER-POT EMITTANCE MONITOR SYSTEM FOR THE TIARA AVF CYCLOTRON

宮脇信正[#], 柏木啓次, 石岡典子

Nobumasa Miyawaki[#], Hirotsugu Kashiwagi, Noriko S Ishioka

Takasaki Advanced Radiation Research Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology

Abstract

A pepper-pot emittance monitor (PPEM) system has been developed to obtain four-dimensional emittance data which is necessary to the beam transport calculation for controlling the emittance shape in the low energy beam transport line including solenoid magnets. The PPEM consists of a pepper-pot (PP) mask, a multichannel plate (MCP), a mirror, and a CMOS camera. Each of the MCP and the camera is placed on the movable stage to change the distance between the PP mask and the MCP. The central-hole position of the PP mask was obtained from beam images by changing the distance between the position of the PP mask and the MCP. As a result of preliminary experiments using a 17.04 keV $^4\text{He}^{2+}$ beam, beam emittance was obtained from image data at about 1 Hz.

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所(量研高崎)のイオン照射研究施設(TIARA)の AVF サイクロトロン(K=110) [1]では、材料・バイオ研究等のために 10 MeV H^+ から 490 MeV Os^{30+} の多様なイオンビームを頻りに切り替えて提供している。このビーム切り替えに伴うサイクロトロンへのビーム入射調整を効率的に行うため、入射ビームのエミッタンスとサイクロトロンのアクセプタンスの計測に基づいた入射調整方法を開発している [2]。サイクロトロンのアクセプタンスに入射ビームのエミッタンス形状を合わせるために、これまでは既存のエミッタンスモニター (EM) より上流の電磁石パラメータから、測定したエミッタンスを逆方向に輸送計算して求めた上流のエミッタンスを基に集束要素を再調整する方法を行っていた。しかし、ビームロスがある場合や空間電荷効果が無視できない大強度軽イオンビームの場合は、上流のエミッタンスを正確に算出することが困難であった。そのため、正確なエミッタンス形状制御を行うためには、EM よりイオン源近傍の分析電磁石の下流でのエミッタンス測定が必要であった。また、イオン源からサイクロトロンまでの低エネルギービーム輸送ラインの集束要素は主にソレノイド電磁石で構成されているため、EM の位置で軌道計算によってエミッタンス形状を制御するためには、より上流の位置で 4 次元エミッタンスのデータが必要であった。そこで、設置スペースが比較的小さく、4 次元エミッタンス測定データが容易に取得可能なペッパーポット型エミッタンスモニター (PPEM) の開発を行った。本稿では開発した PPEM の仕様や校正方法、ビーム試験結果を報告する。

2. PPEM の概要

PPEM の基本原理は、測定対象のイオンビームを小さな開孔のパターンを持つペッパーポット (PP) マスクで遮

り、それぞれの開孔から透過したビームの像を画像等で取得して、開孔位置に対するビームの位置分布からエミッタンスを求めるものである [3,4]。本装置は、Fig. 1 の通り、TIARA AVF サイクロトロンにビームを供給する 4 つの ECR イオン源の 1 つである、多価の重イオンや高強度で安定なビームを生成する HECR イオン源のビームライン上の分析電磁石直後のビーム診断チェンバー後の限られた範囲に設置した。ここから EM まで 4 つのソレノイド電磁石と偏向電磁石でビームを集束・偏向して輸送するが、比較的長いドリフトスペースでビームロスが確認されており、その原因究明にも本設置場所における計測が有効である。

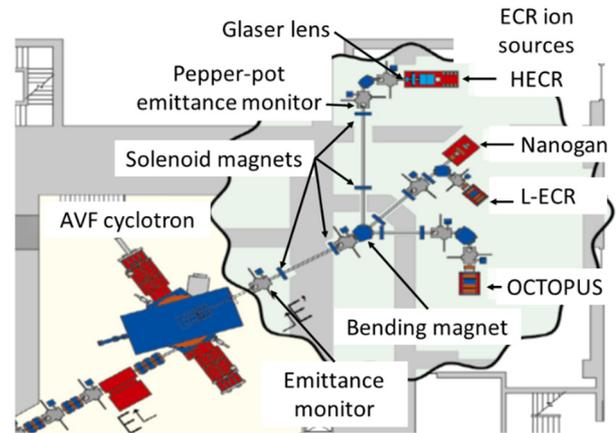


Figure 1: Schematic layout of ion sources and these low energy beam transport line.

TIARA の PPEM を Fig. 2 に示す。PP マスクとして Ni 製の厚さ 0.05mm の板に 2mm 間隔で 0.1mm ϕ の開孔を規則的に六角形状に配置したものを使用した。透過したビームの像を画像として明確に得るために、蛍光板付きマルチチャンネルプレート (MCP) を用いた。MCP は浜松ホトニクス F2226-24P46 (蛍光板: $\text{Y}_3\text{Al}_4\text{O}_{12}:\text{cerium}$) を

[#] miyawaki.nobumasa@qst.go.jp

使用し、その有効径は 77mm である。MCP の蛍光板に投影されたビームの像は、ミラーによってチェンバー上部の窓を通して、CMOS カメラで取得する。使用したカメラは、Basler acA1920-40gm で、1920×1200 の画素数の画像データを、最高 42fps のフレームレートで得られるが、カメラ出力のインターフェースである GigE の LAN ケーブルから PC への取り込み時に USB に変換することや露光時間との関係で実際のフレームレートはより低い値となる。

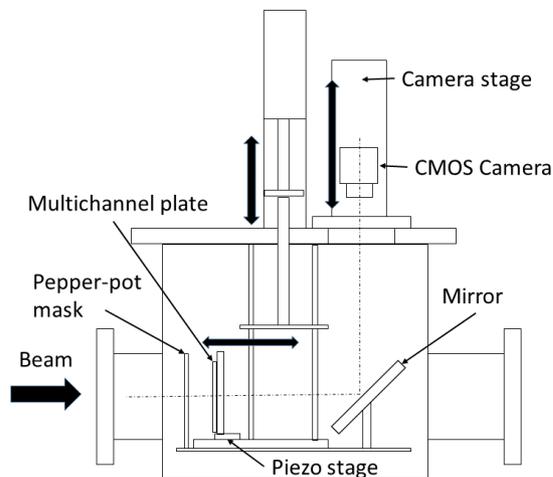


Figure 2: Schematic view of PPEM.

ビーム像の解析においては、PP マスクの各開孔とそこを通過したビームの像の分布全体を一对一で対応させるため、隣の開孔像との重なりがあると解析が困難になる。この像が重なる条件は、PP マスクの開孔の間隔に対し、ビームの各位置での発散角分布と、PP マスクの開孔の間隔と PP マスク-MCP 間の距離によって決まる。そこで、様々な発散角分布のビームに対応させるため、真空中で PP マスクとの距離を 100mm の範囲に対して位置設定が可能なピエゾステージ (SmarAct: SLL-V42-160-S-HV/1-S) 上に MCP を設置し、PP マスクと MCP の距離を変更できるようにした。一方、MCP を移動した場合、カメラとの距離が変わるため焦点が合わなくなることから、大気中のカメラも一軸ステージ (駿河精機 SXM2602C) 上に設置し、位置の変更を可能とした。



Figure 3: Picture image of fluorescence screen of MCP.

3. ビーム計測テスト

3.1 計測画像データの補正

カメラの取り付け誤差による画像データの回転方向のずれがある場合、正確な解析が行えなくなることから、予め画像の補正を行った。Figure 3 は、PP マスクから MCP までの距離を原点位置である 41mm に設定して、MCP の蛍光面を外部からの照明によりカメラのピントを合わせた時の画像である。画像解析により、MCP の取付け板の端面等から、画像データと MCP の水平位置の間の回転角や pixel あたりの長さを求めることができる。そこで、PP マスクと MCP の距離を 21mm、41mm、61mm の 3 点で画像データと MCP の水平位置の間の回転角を求めた結果、それぞれ 0.79 度、0.73 度、0.62 度であった。この回転のずれを実際のビームによる MCP の蛍光面上での発光から画像データで確かめるため、イオン源から引き出されたビームをグレーザーレンズによって発散させ、PP マスク全体に照射し、PP マスクと MCP の距離を 21mm、41mm、61mm の 3 点で、MCP に -600V、蛍光板に 800V の電圧を加えた時の発光を計測した。Figure 4 は 41mm の距離で取得した画像である。また、それぞれの距離で取得した画像の発光の分布を Fig. 5 に示す。

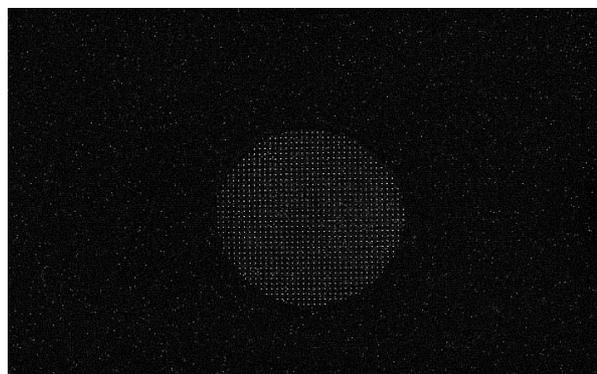


Figure 4: Image data for 41mm of distance between PP mask and MCP with broad beam.

これらの結果は画像の角度補正をしていないため、水平軸に対してのずれが確認できる。また、X 方向の位置が小さいほどマスクの同じ開孔を通ったビーム重心位置

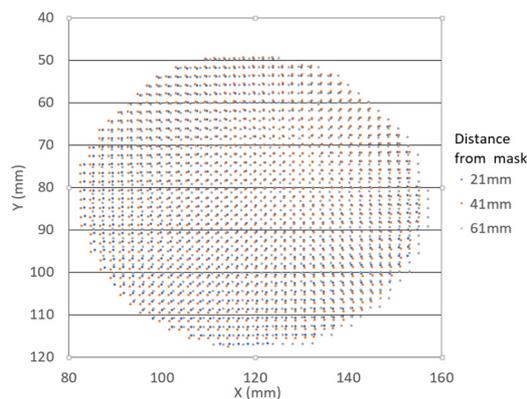


Figure 5: Distribution of fluorescence position in image data.

のずれが大きく、逆に大きな位置ではこのずれが小さくなることから、小さな位置ほどビーム発散が大きいことが確認できる。

3.2 PP マスクの開孔位置

PPEM の MCP 画像から 4 次元エミッタンスのデータを正確に得るためには、各ビーム画像がどの開孔から出射したかのを正しく設定する必要がある。本装置は MCP と PP マスクの距離を変えられることから、2 か所以上の MCP 位置でのビーム画像から各ビーム画像の PP マスク上でのビーム重心座標を求めることで、各ビーム画像の出射元の開孔を決定する。これを行うためには PP マスクの各開孔の画像上の座標が既知であることが必要である。この座標を求めるため、各ビーム画像の PP マスクの開孔パターン上の位置特定を可能とするために PP マスク全体に照射したビームを異なる MCP 位置で測定した。各 MCP 位置について、前節の回転角の補正後の各ビーム画像の発光位置を求め、PP マスクと MCP 間との距離の関係から、画像上の PP マスク位置での各開孔位置を求めた。Table 1 に、例として PP マスクと MCP の距離ごとの中心の開孔位置を示す。また、その際に用いた各 MCP 上の位置での画像データと実際の距離の変換係数も示す。

解析の結果、PP マスクからの距離の増加に伴って、X 方向の位置は減少し、Y 方向は増加する傾向が得られた。一方、61mm の結果は他の結果に比べて差が大きくなった。これは、ステージ移動時に行った遮光の調整でレンズに触れた事が原因であると考えられ、変換係数も他の 2 つに比べて差が大きい。そのため 21mm と 41mm の結果から外挿して画像データ上の PP マスクの中心の開孔位置を求めた。また、各 MCP 位置で開孔位置は、間隔 2mm に対して最大で X が 0.09mm、Y が 0.07mm の差で孔径 0.1mm ϕ 内に収まっていること確認できた。

Table 1: Position of Central Hole in PP Mask and Parameter to Convert Length Unit

Distance (mm)	X (mm)	Y (mm)	Parameter (pixel/mm)
61	121.3048	85.39312	8.0564
41	122.0627	84.57395	8.1897
21	122.1902	84.38468	8.2051
0	122.3242	83.22833	-

3.3 エミッタンス計測テスト

サイクロトロンで 50MeV $^4\text{He}^{2+}$ を加速するビーム条件において、PPEM のエミッタンス計測テストを行った。HECR イオン源から 8.52kV で引き出された $^4\text{He}^{2+}$ ビームをレーザーレンズと分析電磁石を通過後、ビーム診断チェーンのファラデーカップ (FC) でビーム電流を測定し、直後 PPEM でエミッタンス測定を行った。計測した画像をリアルタイムで解析するため、理化学研究所及び大阪大学 RCNP で使用されている LabVIEW による制御・解析プログラム[5,6]を TIARA の PPEM の仕様に合わせてカスタマイズした。計測結果を Fig. 6 に示す。この解析プ

ログラムでは、カメラで捉えられる発光を十分得るためにカメラの露光時間の設定を長くした場合、フレームレートが低下して処理速度が低下するが、MCP に印加する電圧を増加して発光強度を上げて露光時間を少なくすることで、ほぼ 1Hz 程度の頻度で解析結果を得ることができた。得られた 80% エミッタンスは、X 方向で 70 $\pi\text{mm mrad}$ 、Y 方向で 79 $\pi\text{mm mrad}$ であった。一方、下流にある EM で測定した 80% エミッタンスは、X 方向で 51 $\pi\text{mm mrad}$ 、Y 方向で 19 $\pi\text{mm mrad}$ であった。Y 方向のエミッタンス値の差が大きい、これは、それぞれのモニターに近い FC の電流値が PPEM で 178 μA 、EM で 102 μA であることから、途中の偏向電磁石の Y 方向のアパーチャーが小さいため、ビームの損失が生じ、これらの値に現れたと推測できる。PPEM の計測値の妥当性を確かめるためには、PPEM で得られた 4 次元エミッタンスデータを基に軌道計算によって EM での値と比較する必要がある。現在のプログラムでは、4 次元エミッタンスデータが得られないため、今後プログラムの改造を行う予定である。

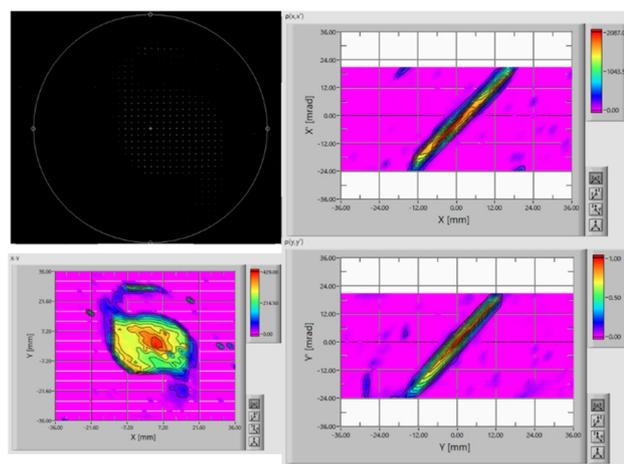


Figure 6: Image and particle distribution in the transversal plane of (X, Y), and the phase space of (X, X') and (Y, Y').

4. まとめと今後の予定

今回開発した PPEM は、MCP と PP マスク間の距離の変更を可能にしたことによって、PP マスクの開孔位置を複数の画像データで特定でき、計測画像データの補正が行えることを明らかにした。エミッタンス計測テストでは、ほぼリアルタイムエミッタンス測定が可能であることが確認できたが、カメラの画像範囲が MCP の蛍光面に比べて大きい、計測した画像の分解能が小さくなっている。今後、計測する視野に合ったレンズを用いるとともに、カメラ位置変更時に調整を必要としない遮光方法を検討する必要がある。データ解析プログラムに関しては、現状 2 次元データの解析のみが可能であるため、4 次元エミッタンスデータを解析できるよう開発を進める予定である。今後、得られた 4 次元エミッタンスデータを用いた軌道計算と下流の EM の測定結果と比較してエミッタンスの測定精度の向上や、軌道計算によるサイクロトロンへの入射のエミッタンス形状制御を行い、通常のビームとともに空間電荷効果が生じる大強度軽イオンビームに対して

のサイクロトロンへの高効率入射について検討を進める
予定である。

謝辞

本装置の製作にあたり、PPEM 装置とその解析プログラムに関する資料を提供して頂いた理化学研究所の長友傑氏、大阪大学 RCNP の福田光宏氏、依田哲彦氏、森田泰之氏に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] S. Kurashima *et al.*, *Quantum Beam Sci.* 1, 2 (2017).
- [2] H. Kashiwagi *et al.*, “スリット-ハーブ装置による 4 次元エミッタンス評価の試験”, *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp. 566-568.
- [3] H. R. Kremers *et al.*, “A pepper-pot emittance meter for low-energy heavy-ion beams”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 84, pp. 025117, 2013.
- [4] Tetsuhiko Yorita *et al.*, “Developments of fast emittance monitors for ion sources at RCNP”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 87, pp. 02B928, 2016.
- [5] Y. Morita *et al.*, “RCNP におけるペッパーポット型エミッタンス測定装置のリアルタイム化”, *Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aomori, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 548-551.
- [6] V. Tzoganis *et al.*, “EMITTANCE MEASUREMENTS AND OPERATION OPTIMIZATION FOR ECR”, *Proceedings of IPAC2016*, Busan, Korea, pp. 361-363.