

理研 AVF サイクロトロンで加速される大強度イオンビーム用ペッパーポット型エミッタンス測定器開発の現状

CURRENT STATUS OF DEVELOPING PEPPER-POT EMITTANCE MONITOR FOR HIGH-INTENSITY ION BEAMS ACCELERATED BY RIKEN AVF CYCLOTRON

小高康熙^{*A)}、鎌倉恵太^{A)}、山口英斉^{A)}、今井伸明^{A)}、酒見泰寛^{A)}、大西純一^{B)}、畑中吉治^{†C)}
Yasuteru Kotaka^{*A)}, Keita Kamakura^{A)}, Hidetoshi Yamaguchi^{A)}, Nobuaki Imai^{A)}, Yasuhiro Sakemi^{A)},
Jyun-ichi Ohnishi^{B)}, Kichiji Hatanaka^{†C)}

^{A)} CNS, University of Tokyo

^{B)} RIKEN Nishina center

^{C)} RCNP, Osaka University

Abstract

At the Center for Nuclear Study, a high-intensity Francium (Fr) generation experiment aiming at the highest measurement accuracy of the electric dipole moment is underway. Fr is generated by a nuclear fusion reaction by irradiating a gold target with $^{18}\text{O}^{6+}$ beam accelerated to 7 MeV/u by the RIKEN AVF Cyclotron. To achieve the accuracy, a beam intensity of 3 pμA or higher is required. However, the beam transport efficiency is as low as 66 % on average when the beam intensity exceeds 10 eμA. To solve the problem, we planned to improve the beam transport efficiency for high intensity ion beams and are developing a pepper-pot emittance monitor (PEM). With reference to the PEM used for injection beam of AVF cyclotron, we have developed three additional items. The first is to place the camera away from the beamline to reduce radiation damage. The distance between the camera and the PEM is 2.2 m, and the image position accuracy is 0.15 mm. The second is to achieve the angular accuracy suitable for the ion beam accelerated by the RIKEN AVF cyclotron. The necessary angular accuracy is estimated to be at least 0.3 mrad. A beam test is planned to evaluate the first and second items. The third is a beam shutter system to suppress heating of the PEM by the ion beam. In the test of the control system, the PEM measurement time comes to be 0.27 second.

1. はじめに

原子核科学研究センター (CNS) において、世界最高精度の電気双極子能率 (EDM) の測定を目指した大強度 Fr 生成実験が進行中である [1]。Fr は理研 AVF サイクロトロンで 7 MeV/u に加速した酸素イオン ($^{18}\text{O}^{6+}$) ビームを金標的に照射し、核融合反応で生成する。この精度達成のために 3 pμA (400 W) 以上のビーム強度が必要と見積もられている。この EDM 実験装置は理研 AVF サイクロトロンの階下の E7 実験室にある (Fig. 1)。

E7 実験室の C12, CRIB, E7B への平均ビーム輸送率はビーム強度が 10 eμA 程度を越えると平均 66 % となるので、大強度ビーム輸送方法の改善が課題である。この原因はビーム強度増加に伴うエミッタンス増大と考えている [2]。既存の 2D エミッタンス測定器 (EM_C01) の冷却能力は 130 W 程度のビームにしか対応できない。そこで大強度イオンビームのエミッタンスが測定できるペッパーポット型エミッタンス測定器 (PEM) [3,4] を開発し、エミッタンス測定結果を用いてビーム輸送方法を最適化する計画である。

このために AVF サイクロトロン入射ビームに使用している PEM [5,6] を参考にして、さらに必要な 3 項目を追加開発、改良を進めている。1 つ目はカメラへの放射線損傷低減のため、ビームラインからカメラを離すカメラ光学系開発。2 つ目は理研 AVF サイクロトロン取出

ビームに適した PEM の性能の改良である。1, 2 番目の項目の評価のためビームテストを東京大学タンデム加速器施設で行う。3 つ目は 400 W 以上のイオンビーム照射による PEM の加熱を回避する短時間ビーム測定を目指したビームシャッター機構開発である。

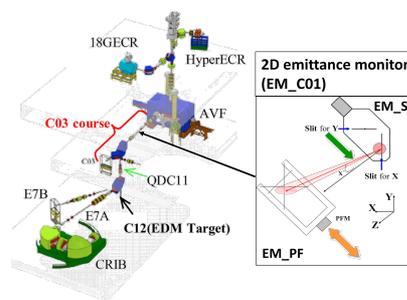


Figure 1: AVF Cyclotron and beamlines to the experiment devices. EM_C01 is shown in the right.

2. カメラの放射線損傷低減

PEM は等間隔に穴が開いた薄板 (マスク) を通過したビームをその後方にあるビーム検出器でビーム強度と位置の関係を測定し、4次元エミッタンスを得る。我々が開発した PEM を Fig. 2 に示す。ビーム検出器として蛍光板を使用し、ビーム像をデジタルカメラで撮影する。

ビーム起因の放射線によるカメラセンサの損傷は避けられないので、対策としてカメラをビームラインから引

* kotaka@cns.s.u-tokyo.ac.jp

† Deceased.

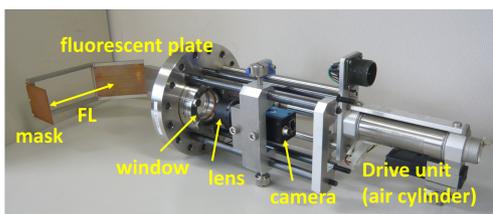


Figure 2: The image of the developed PEM.

き離し、遮蔽材で囲んで低減する方針である。さらに損傷したカメラの更新頻度も考えて比較的安価な NTSC 出力 (720×480 pixel の画層数) のカメラを用いた望遠レンズによるカメラ光学系について述べる。我々の場合、PEM を ICF152 のフランジに設置するので、蛍光板を覗くガラス窓の径は 48 mm が現状である。この窓から有効面積 50×50 mm² 程度の蛍光板全域をカメラで撮影する。これを遠く (2 m 程度) から写真撮影するために望遠レンズで蛍光板を見ると Fig. 3 左のように蛍光板全域は撮影できない。望遠レンズと蛍光板の間に中間レンズを入れると蛍光板全域を撮影できるようになる [2]。今回は画像の歪みを抑えるために焦点距離 200 mm の色消しレンズを中間レンズとして採用したところ、ガラス窓からカメラまでの距離を 2.2 m まで拡張できた。

この条件で撮影した蛍光板は Fig. 3 右のように全域が確保できた。蛍光板には座標系となる格子状の線が引いてあり、その上に蛍光剤を塗布する。格子線から解像度を見積ると平均的に 0.15 mm/pixel である。この画像の位置精度を見積もる。けがき線の格子点のビットマップ座標と各格子点の基準座標間の射影変換係数を求め、射影変換された位置の基準座標に対する変位と基準座標の関係を図 4 に示す。左が水平方向、右が鉛直方向である。これらの変位の標準偏差 (SD) は水平方向が 0.16 mm、鉛直方向が 0.14 mm となった。この SD の要因はカメラ光学系に起因する画像の歪みとけがき線の描画精度とカメラ画素と考えている。

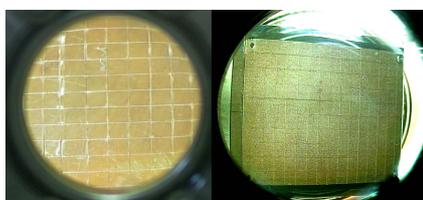


Figure 3: The image taken by camera with tele lens from 2m away. The left view is without intermeditate lens and the right view is with intermeditate lens.

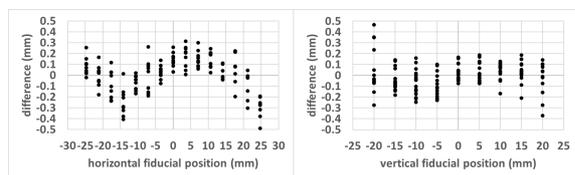


Figure 4: The relationship between the displacement of transformed positions with respect to designed positions.

3. PEMに必要な性能の考察

ビーム軌道計算に適した PEM の性能を見積もる。必要な位置や角度精度はビームエミッタンスの大きさやビーム輸送距離に依存する。マスク穴間隔やマスクと蛍光板面積もビームに依存する。この見積もりのために必要な AVF サイクロトロン取出ビームエミッタンスは EM_C01 で測定してきた。EM_C01 は Fig. 5 の C03 コースの模式図で説明すると、AVF 出口の三連四極電磁石から 1880 mm のところにある。EM_C01 の下流に二連四極電磁石、1 台目の三線式ビームプロファイルモニタ BPM (PF_C02)、2 台目の BPM (PF_C03) がある。BPM は径 0.1 mm のワイヤをビーム方向に垂直に走査してビーム強度の 1 次元位置分布 (以後、単に「ビーム分布」とする) を測定する。

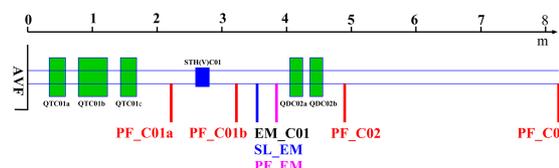


Figure 5: The schematic view of beam line to C03.

EM_C01 測定には問題がある。EM_C01 測定値を用いて PF_C03 の設置位置までビーム軌道計算してビーム分布を再構成し、PF_C03 の測定結果と比較すると EM_C01 測定値から再構成された PF_C03 のビーム分布の幅の方が大きい傾向がある。例えば ¹⁹F⁷⁺ イオンビーム (エネルギー 6.68 MeV/u 強度 5 eμA) の EM_C01 のエミッタンス測定値 (Fig. 6) を用いて PF_C03 の設置位置へビーム軌道計算して再構成したビーム分布 (以後、「再構成ビーム分布」と呼ぶ) を Fig. 7 に破線で示す。また実際に PF_C03 で測定したビーム分布 (以後、「測定ビーム分布」と呼ぶ) を Fig. 7 に実線で示す。比較すると再構成ビーム分布の幅が 2 倍以上大きい。ここにビーム横向き水平方向を x、鉛直方向を y (単位 mm) とし、それぞれの軸の角度成分を x'、y' (単位 mrad) とする。

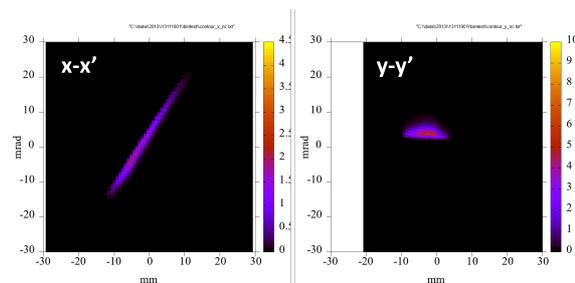


Figure 6: The measured phase space of ¹⁹F⁷⁺ ion beam (energy 6.68 MeV/u, intensity 5 eμA).

EM_C01 は幅 0.1 mm の単スリット (SL_EM) を 1/√2 mm 間隔でビーム方向に垂直方向に移動させ、そこを通過したビーム分布を 320 mm 後方の BPM (PF_EM) で測定してビームの位置・角度分布を得る (Fig. 1)。スリット幅とワイヤ径から見積もられる角度誤差は 0.1 mrad

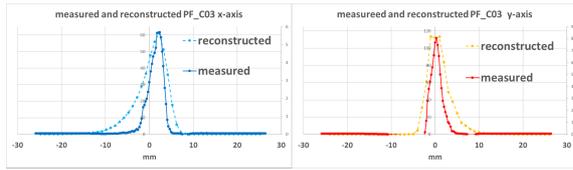


Figure 7: The dashed line represents reconstructed beam distribution at the same place as PF_C03 by transporting the beam components measured by EM_C01. The solid line represents the measured beam distribution of PF_C03.

なので説明がつかない。原因の1つに PF_EM のワイヤー位置を示す回転式ポテンショメータ (栄通信工業 CP45) の誤差の1つの単独直線性 ($\pm 0.5\%$) がある。BPM のワイヤーの走査距離が 72 mm なので、 $\pm 0.5\%$ を換算すると ± 0.36 mm に相当し、角度誤差に換算すると 1.1 mrad となるので、誤差要因の候補と考えられる。

Figure 7 の再構成ビーム分布と測定ビーム分布の違いの原因を探るため、測定エミッタンスから真のエミッタンス (σ マトリックス) と測定誤差を分離する。そこで真のエミッタンスを推定する。3つのビーム分布測定値を用いて σ マトリックスを計算する方法がある。ただし AVF サイクロトロン取出ビームのビーム分布は正規分布せず、左右非対象なので単純に解けず工夫がいる。つまり PF_C03 でビーム幅を 1 mm 程度に絞っているの、これを使用して σ マトリックスの方程式の解の範囲が限定できる事に注目する。そこで Fig. 5 に示す PF_C03, PF_C02, PF_EM の3つの測定ビーム分布を用いて σ マトリックスを計算する。x 方向のビーム分布の標準偏差 SDx の2乗を σ_{11} 、x' 分布の標準偏差 SDx' の2乗を σ_{22} 、x と x' 分布の共分散を σ_{21} とする。PF_EM から PF_C02 までの σ マトリックスの転送行列を m_{ij} とし、PF_C02 から PF_C03 までの距離を L としたドリフト転送行列で示すと Eq. (1), (2) のように表せる。3つの BPM の測定ビーム分布の σ_{11} が既知である。未知変数は PF_EM, PF_C02, PF_C03 それぞれの σ_{21} , σ_{22} の6つとなるので、Eq. (1), (2) で全 σ マトリックス成分を解くことができる。一方、y 方向の σ マトリックスは、x の σ マトリックスの添え字の1を3とし、y' については x' の2を4として同様に解く。Figure 7, 8 に示した PF_C03, PF_C02, PF_EM の測定ビーム分布の (SDx, SDy) はそれぞれ (1.6, 1.3), (5.6, 4.8), (7.1, 2.8) である。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}(C02) \\ \sigma_{21}(C02) \\ \sigma_{22}(C02) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11}(EM) \\ \sigma_{21}(EM) \\ \sigma_{22}(EM) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}(C03) \\ \sigma_{21}(C03) \\ \sigma_{22}(C03) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2L & L^2 \\ 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11}(C02) \\ \sigma_{21}(C02) \\ \sigma_{22}(C02) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Equation (1), (2) を解いて得られた σ マトリックスのうち、PF_C02 と PF_C03 の σ_{22} が負であった。 σ_{22} は SDx' の2乗なので解がない。ここで PF_EM の SDx を 8.0 mm と仮定すると Table 1 の解が得られる。PF_EM のビーム分布の全幅は 40 mm 程度であり、左右非対象なので SDx を 7.1 から 8.0 mm と仮定しても影響は小さいと考える。

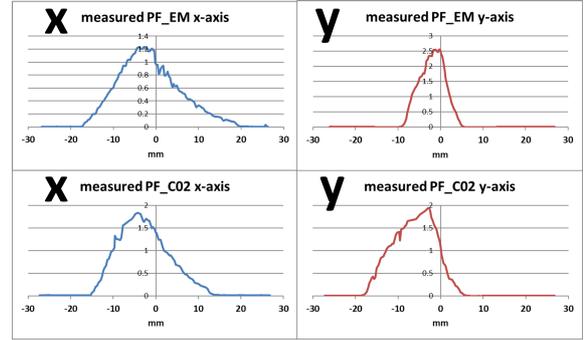


Figure 8: The measured beam distribution. Top view is PF_EM. Bottom view is PF_C02.

Table 1: σ Matrix Calculated from the Measured PF_EM, PF_C02, and PF_C03 Supposing SDx of PF_EM Is 8.0 mm

	σ_{11}	σ_{21}	σ_{22}	σ_{33}	σ_{43}	σ_{44}
PF_EM	64.0	67.46	71.20	7.84	1.47	0.56
PF_C02	31.36	-8.45	2.48	23.04	-5.87	1.59
PF_C03	2.56	-0.33	2.48	1.69	-0.65	1.59

Table 1 より PF_C03 の x, y 方向の相関係数 r21, r43 はそれぞれ -0.13, -0.39 となる。負の相関係数はビーム幅が絞られる方向性を示す。PF_C03 は実験装置の標的の上流にあるので、実際のビームも絞られる方向と考えられ、矛盾はない。そこで Table 1 の σ マトリックスは真と仮定する。これから EM_C01 (SL_EM と同位置とする) における σ マトリックスを算出すると Eq. (3) となる。ただし x と y の相関は無いと仮定する。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \sigma_{14} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \sigma_{24} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \sigma_{34} \\ \sigma_{41} & \sigma_{42} & \sigma_{43} & \sigma_{44} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 28.1 & 44.6 & 0 & 0 \\ 44.6 & 72.0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 7.9 & 1.3 \\ 0 & 0 & 1.3 & 0.6 \end{pmatrix} \quad (3)$$

真と仮定した Eq. (3) の成分を用いて 4 変数正規乱数を生成する。4 変数は (x, x', y, y') を成分にもつイオン (粒子) に相当し、500000 粒子を生成した。計算によって、これらの粒子群を $1/\sqrt{2}$ mm 間隔に置いた幅 0.1 mm のスリットを通して 320 mm (PF_EM 設置場所) 後方に輸送する。この PF_EM の設置位置で各粒子の (x, y) 座標に PF_EM の位置誤差を SD とする正規分布に従って生成した乱数を誤差として加える。PF_EM の設置位置において誤差を加えられた各粒子の位置 (x, y) とスリットの中心位置を使って角度 (x', y') を再計算する。これにより誤差を加えられた粒子の (x, x', y, y') が生成される。この方法を「誤差シミュレーション」と名付ける。その後粒子群を PF_C03 設置位置までビーム軌道計算により輸送し、再構成ビーム分布を作り、Fig. 7 の測定ビーム分布と一致するような誤差を探す。

まず誤差無し粒子群で計算した PF_C03 の設置位置の再構成ビーム分布は Fig. 7 の測定ビーム分布にほぼ一致することは確認した。次に PF_EM の位置誤差を 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm と変えて誤差シミュレーションを行い、

C03において Fig. 7 の再構成ビームと一致する解を探した。Figure 7の再構成ビーム分布は左右対称ではないので明確に判断できないが、PF.EM の位置誤差を 0.3 mm とした時の PF_C03 の設置位置における再構成ビーム分布 (Fig. 9) が、ある程度一致する。これはポテンシオメータ位置誤差 ± 0.36 mm に近いので誤差候補となるが、偶然一致している可能性もある。単独直線性が $\pm 0.1\%$ のポテンシオメータに交換して違いを見るなど、断定するには別な判断材料が必要である。ここで主張したいのは、真と見なせるエミッタンスを推定することにより、測定器の構造から想定した誤差要因の成否を考察できることである。測定器の構造を変えるなど、想定する誤差要因を変えてビームテストと誤差シミュレーションをしていけば誤差要因が絞られていくと考える。

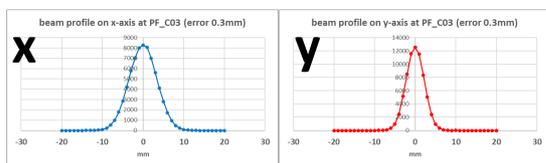


Figure 9: The beam distribution reconstructed at the position of PF_C03 by the transported particles containing 0.3 mm PF_EM error.

次にこの EM.C01 の測定誤差が EDM の標的におけるビーム分布に含まれる誤差を、先に述べた誤差シミュレーションを使って見積もる。目標は EDM 実験の標的においてビーム分布の SD が 1 mm となるビーム輸送系なので、まず標的で SDx と SDy が 1 mm となるビーム軌道を Eq. (3) の σ マトリックスを初期値としてビーム軌道計算コード TRANSPORT [7] で計算する。

結果を Fig. 10 に示す。横軸と縦軸の 1 目盛りはそれぞれ 1 m と 8 mm、下半分が x 方向、上半分が y 方向のビームエンベロープである。赤線が四極電磁石、青線が偏向電磁石を示す。ビーム輸送系は EM.C01 下流に二連四極電磁石があり、次に垂直偏向電磁石によって鉛直下方 (y 方向) に軌道を曲げる。最後に三連四極電磁石を通す。現状の EDM 標的へのビーム輸送系は、最後の四極電磁石が二連四極電磁石だが、標的で収束させるために仮想的に三連四極電磁石に変更した。またビームの運動量分散 (dp/p) は AVF サイクロトロンにとって平均的な値として 0.006 を用いた。この値はビームの状

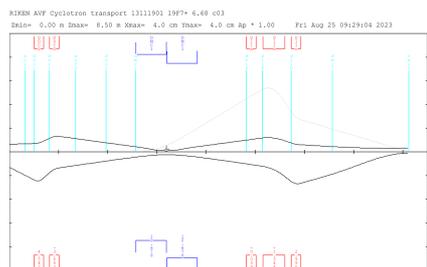


Figure 10: The beam envelopes applying Eq. (3) as initial values by TRANSPORT for σ_{11} and σ_{33} to be around 1 mm at the EDM Target.

態によって変わるので一定ではない。この Fig. 10 が誤差を含まないビーム軌道となる。次に誤差シミュレーションで得られた粒子群から計算した σ マトリックスを初期値として Fig. 10 と同じ四極電磁石の磁場勾配を用いて TRANSPORT で計算する。その結果として出力される EDM 標的におけるビーム分布の SDx と SDy と EM.C01 の測定誤差から算出した角度誤差の関係を Fig. 11 に示す。角度誤差に相関して標的のビーム幅は拡大する。これより角度誤差 0.3 mrad 以下が必要である。

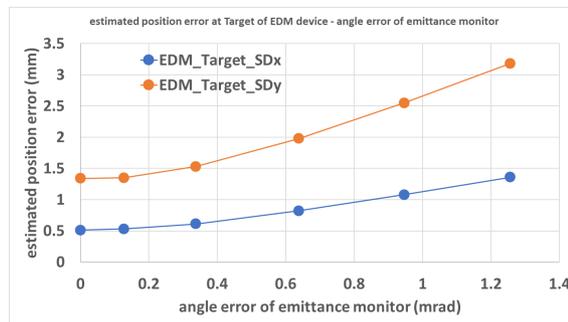


Figure 11: The relationship between angular errors (mrad) of an emittance monitor and the calculated SD of beam position distribution at the EDM Target.

PEM はマスク穴径 0.3 mm、蛍光板の位置精度 0.1 mm が技術的に下限値なので、マスクと蛍光板間距離を 441 mm とすれば角度誤差 0.3 mrad が見込まれる。ただし既存の真空チェンバーを使用すると、マスク-蛍光板間距離を 300 mm 程度とし、角度誤差 0.4 mrad 程度とする可能性はある。それでも EDM 標的でのビーム分布の誤差は大きくないので使用に耐えると考えている。

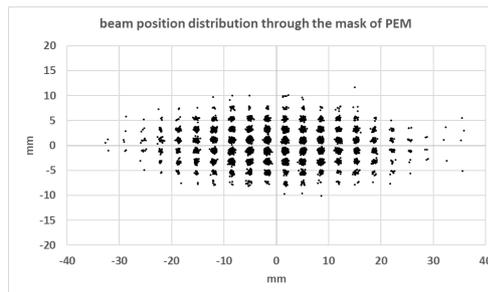


Figure 12: The position distribution of the particles going through holes on the fluorescent plate located 441 mm behind the mask of PEM. The diameter of every hole is 0.3 mm. The distance between each hole is 2 mm.

Equation (3) を使って生成した (x, x', y, y') の粒子群をマスク穴を通して蛍光板で得られる像をシミュレーション計算すると、マスク穴の間隔や蛍光板の必要面積を見積もることができる。異なるマスク穴を通ったビームが蛍光板で重なったり、蛍光板面積が足りなければ測定不可となる。穴径 0.3 mm、穴間隔 2 mm、マスク-蛍光板間距離 441 mm の場合、マスク穴を通過した粒子群の蛍光板上での分布をシミュレーション計算した結果を Fig. 12 に示す。異なる穴を通過した粒子群は蛍光板で分離され、蛍光板有効面積は $60 \times 30 \text{ mm}^2$ と分かる。

4. 性能評価のビーム照射テスト計画

これまで EM_C01 測定結果を真とみなした σ エミッタンスと誤差成分に分離して、PEM に必要な性能を見積もってきた。今後は PEM の測定誤差要因を直接特定することを目的としたビーム照射テストを計画している。真のエミッタンスを推定できることを前提とした場合、PEM 測定結果を真のエミッタンスと誤差成分に分離し、想定した誤差要因を用いて誤差シミュレーションを行い、誤差を含んだ測定結果の説明を目指す。PEM の誤差要因が明確になれば、任意のビーム輸送系においても Fig. 11 と同様の許容できる測定誤差の見積もりができる。また PEM の誤差要因が確定したならば、エミッタンス測定値から誤差を取り除くことにより真のエミッタンスを推定することも考えたい。

ビーム照射テストには xy の相関が無く、角度誤差の影響が顕著となる低エミッタンスビームと 3 台の BPM の存在が望ましい。東京大学タンデム加速器施設 [8] がこれらを満たすと考えており、既に望遠レンズのカメラ光学系を持つ PEM 設置は完了した。このビームラインには PEM のマスクから上流 735 mm と下流 2070 mm に BPM がある。また PEM は位置精度 0.15 m 程度の BPM となるので、合計 3 台の BPM がある。マスク-蛍光板距離、マスク穴径、カメラ光学系など想定される誤差要因を変えたテストを考えている。

5. PEM 発熱回避ビームシャッター機構

400 W 以上ビーム照射による PEM の発熱を回避するための測定時間短縮を目指した PC によるビームシャッター機構を制作した。ビーム停止はイオン源のビームラインにある電極にビームに対して横向きに高電圧をかけてビームを横向きに偏向させる。高電圧電源は -2 kV、立ち上がり時間 0.15 秒の浜松ホトニクス製 C9619 を使用した。回路の模式図を Fig. 13 に示す。

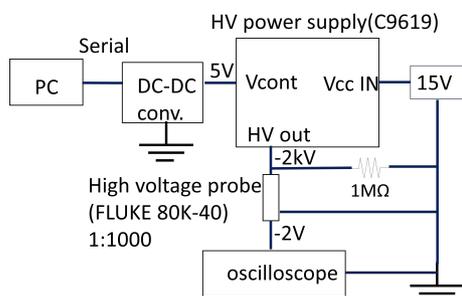


Figure 13: The diagram of the beam shutter system.

測定の流れは (1) ビーム停止 (HV ON)(2)PEM 挿入 (3) ビーム照射 (HV OFF)(4) ビーム像撮影 (5) ビーム停止 (HV ON)(6)PEM 退避となる。時間短縮が必要なのは (3)~(5) の間である。この時間を高電圧電源出力の時間変化で見る。-2 kV を高電圧プローブ (FLUKE 80K-40) で 1/1000 に落としてオシロスコープを使用し、ビーム無しで測定した。その結果を Fig. 14 に示す。(3)~(5) は電圧が -2 V から 0 V になり再び -2 V に戻るまでの時間であり、0.27 秒を実現した。次はビームを使用して動作

テストをする。

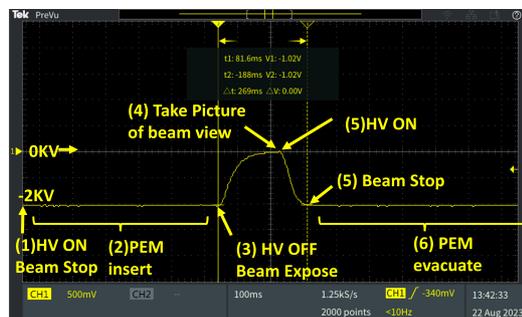


Figure 14: The operating time the beam shutter system measured by oscilloscope.

6. まとめ

蛍光板全域を確保するカメラ光学系改良により蛍光板の位置精度を水平 0.16 mm、鉛直 0.14 mm に保ちつつ、カメラと PEM ガラス窓間距離を 2.2 m に更新した。AVF サイクロトロン取出ビームの真のエミッタンスを推定し、EM_C01 の測定誤差要因を推定した。真と見なせるエミッタンスから測定誤差を含んだ粒子群を生成する方法で EDM 標的へのビーム軌道計算に必要な PEM の角度精度は 0.3 mrad と分かった。PEM の測定誤差要因を直接調べるため東大タンデム加速器施設のビーム照射テストを計画し、測定器設置を完了した。ビーム照射による PEM 加熱回避シャッター機構を構築し、動作テストでビーム測定時間を 0.27 秒に抑えた。

謝辞

この研究を進めるにあたり、下浦亨氏、加瀬昌之氏、後藤彰氏におかれましては、多大なご指導ご支援をいただきました。ここに感謝の意を申し上げます。

本研究は、JSPS 科学研究費助成事業 (科研費) 20K12481 の助成を受けています。

参考文献

- [1] Y. Sakemi *et al.*, AIP Conference Proceedings 2319, 080020 (2021).
- [2] Y. Kotaka *et al.*, Proc. 18th Annual Meeting of PASJ, (2021), p. 873-877.
- [3] T. Hoffmann *et al.*, AIP Conf. Proc. 546, 432 (2000).
- [4] L. E. Collins and P. T. Stroud, Nucl. Instr. and Meth. 26 (1964), p. 157-166.
- [5] Y. Kotaka *et al.*, Proc. 8th IBIC2019, Malmö, Sweden, (2020) p. 351-354. <http://accelconf.web.cern.ch/ibic2019/papers/tupp022.pdf>
- [6] Y. Kotaka *et al.*, Proc. 16th Annual Meeting of PASJ, (2019), p. 1109-1113.
- [7] D.C. Carey, K.L. Brown and F. Rothacker, FERMI LAB-Pub-98/310.
- [8] 東京大学タンデム加速器研究施設 (MALT) <https://malt.um.u-tokyo.ac.jp/>