

非破壊型静電セプトム実現に向けたビーム分離試験装置の開発

DEVELOPMENT OF THE BEAM SEPARATION EXAM DEVICE FOR THE NON-DESTRUCTIVE ELECTROSTATIC SEPTUM

永山晶大^{#, A, B)}, 原田寛之^{B)}, 下川哲司^{C)}, 佐藤篤^{D)}, 山田逸平^{B)}, 地村幹^{B)},
小島邦洸^{B)}, 山本風海^{B)}, 金正倫計^{A, B)}

Shota Nagayama^{#, A, B)}, Hiroyuki Harada^{B)}, Tetsushi Shimogawa^{C)}, Atsushi Sato^{D)}, Ippei Yamada^{B)}, Motoki Chimura^{B)}
Kunihiro Kojima^{B)}, Kazami Yamamoto^{B)}, Michikazu Kinsho^{A, B)}

^{A)} Tohoku University

^{B)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{C)} High Energy Accelerator Organization (KEK)

^{D)} NAT

Abstract

We have been developing a new device the non-destructive electrostatic septum. To evaluate its two-dimensional electric field, we are developing the new beam separation exam device consists of an electron gun and three sets of wire scanner monitors. This device can measure the electric field indirectly by measuring a trajectory of a narrow electron beam and scanning its incident position. Narrow and parallel beam is necessary for the experiments but the beam of the existing electron gun does not satisfy this requirement. We designed an additional optics for electron gun consisting of two collimators two Einzelens, and three steering electrodes. Theory of linear focusing of iris was used to calculate the optics. By transporting the beam through this optics, the beam is modified to the narrow, parallel beam. In this paper, we present the new beam separation exam device and a design of the additional optics.

1. はじめに

リング型粒子加速器であるシンクロトロン加速器では、リング内に溜め込んだビームを加速し、周回させながら徐々に供給する「遅い取り出し」技術で最先端の物理実験や放射線がん治療を実現している。Figure 1 に静電セプトム装置を用いたビームの遅い取り出しの概要を示す。本手法では周回するビームを広げつつ電場境界に近づけ、境界を超えた粒子に対して静電セプトムで発生させた電場によるキックを与えて、「かんなの刃で木材を削り出す」ように周回ビームから徐々に取り出す [1]。周回側にはビームを乱さないように電場が無く、加えてビームを明確に分離する為に取り出し境界で粒子が受ける

力に大きな差をつける必要があるため、階段関数状の電場分布が理想的である。階段関数状の電場を形成するために挿入物(リボン電極)が用いられている。しかし、本手法はビームと挿入物との直接衝突が原理的に生じる「破壊型」であるため、大強度陽子加速器では

- 静電セプトム及び周辺機器の高放射化
- ビーム強度の制限
- リボンの高熱化による機器の破損・故障

等の問題が生じている。セプトム電極におけるビームロスが引き起こす諸課題を解決するために、Fig. 2 に示すようにセプトム電極が無い非破壊型の静電セプトムの開発および原理検証・実証を進めている [2]。

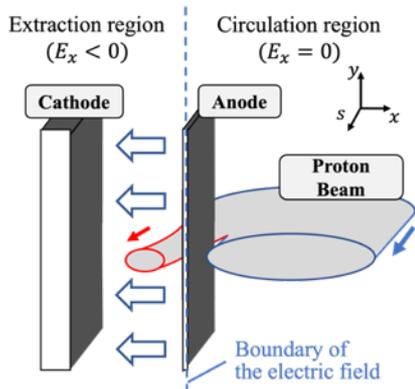


Figure 1: A conceptual diagram of an electric septum for slow extraction of a proton beam.

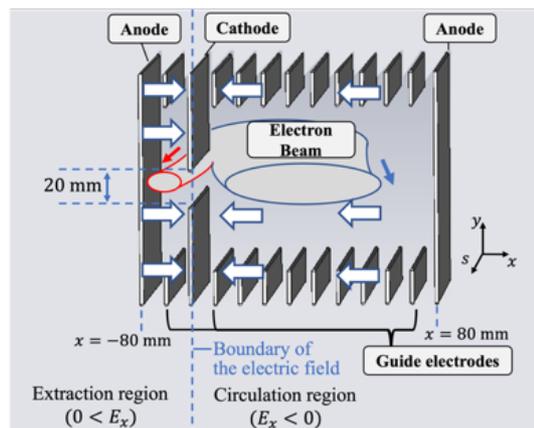


Figure 2: A conceptual diagram of the non-destructive electric septum.

2. ビーム分離試験機

Figure 3 に非破壊型静電セプタム試作機 [3]の外観を示す。本試作機はJ-PARC 実機を想定したアパーチャの設計になっており、実機を想定した計算モデルからビーム進行方向を 50 mm に縮小している。本研究では、非破壊型静電セプタム試作機の電場測定と技術的課題の明確化を目的として、ビーム分離試験機 [4]を開発した。Figure 4 にビーム分離試験装置の概略図、Fig. 5 に装置の外観を示す。真空チャンバには、電子銃用とモニタ用の駆動機が合計 4 台設置されている。最上流の一台は電子銃用、下流の3台はワイヤースキャナモニタ(WSM)用であり、それぞれ Fig. 5 の x 方向へ走査することが可能

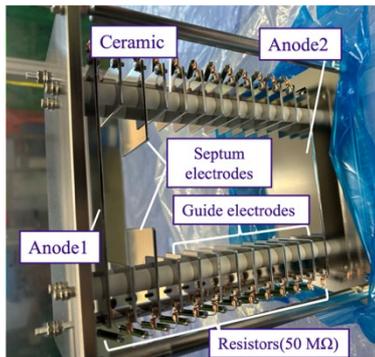


Figure 3: An appearance of the prototype non-destructive electrostatic septum.

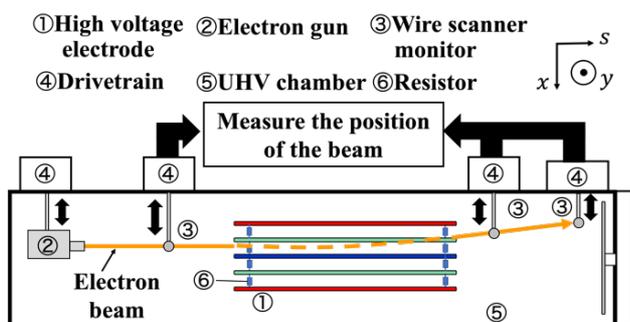


Figure 4: A schematic diagram of the beam separation exam device.

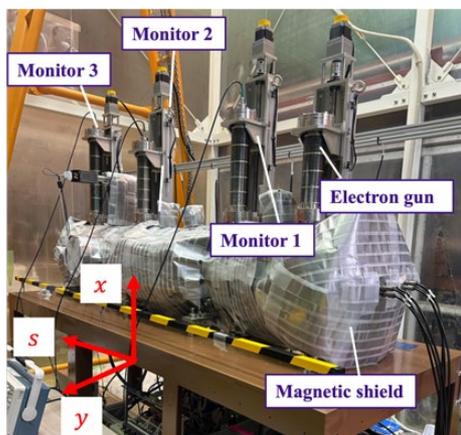


Figure 5: An appearance of the beam separation exam device.

である。

本試験装置では測定対象の電場分布に対して電子ビームを入射し、ビーム軌道の曲げ角を測定し電場の評価を行う。具体的な測定手順を以下に示す。

1. 電子ビームを測定対象の電場に入射する
 2. 測定対象の手前に設置された WSM1 で電子ビームの電場分布への入射位置を測定する
 3. 電場分布からのキックを受けた軌道を WSM2,3 で測定し、軌道の曲げ角を計算する
 4. 駆動機を用いて電子銃の位置を変更する
- ビームの入射位置を変更しながら測定を行う事で、入射位置に対する、電場による軌道偏向角度の分布を作成し、計算モデルとの比較を行う。本装置を用いて非破壊型静電セプタム試作機の電場評価を行い、計算と良く一致する結果が得られた [5]。

3. 電子銃の改良

3.1 新ビーム分離試験装置

現状のビーム分離試験機では電子銃及び WSM を x 方向にしか動作させることができないため、本装置で測定可能な電場は、非破壊型静電セプタム中心軸上における一次元電場分布に限られる。非破壊型静電セプタムの電場による、実機ビームへの影響を評価するためには、中心軸以外のアパーチャ全域の電場評価が必須である。我々は、非破壊型静電セプタムの電場をより詳細に評価するために新たなビーム分離試験機を開発中である。Figure 6 に開発中である新ビーム分離試験装置の全体図を示す。本装置では、電場によるビームへの蹴り角の二次元分布の作成を目的としている。基本的な装置構造は現行の試験機を踏襲しているが電子銃用の駆動機に稼働ステージを設置したことで、電子銃の位置を二次元的に動作させることが可能になった。加えて、各 WSM の位置に y 方向分布測定用 WSM を追加した。以上の改良により、ビームが通過する二次元平面の電場評価が可能となった。

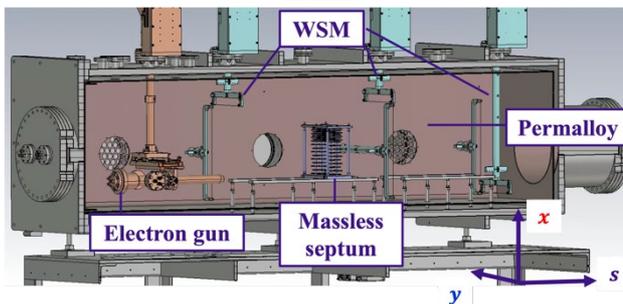


Figure 6: The design model of the new beam separation exam device.

3.2 電子銃の改良

電場測定においては、ビーム幅が重ならないように電子銃の位置を走査しながら、電場に入射したビームの曲げ角の測定を行う。したがって、ビームの幅は電場のスキャン点数を決定する。以前の実験から、要求されるビーム条件は、ビームの裾幅 1mm 程度(標準偏差 σ)

は 0.5 mm 程度)の平行ビーム(各 WSM の位置ではほぼ等しいビーム幅)である。Figure 7 に現在使用している電子銃の各 WSM におけるビーム幅の測定結果を示す。ビーム幅の測定は現行の試験機で行い、y方向ビーム幅は、電子銃本体を 90 度回転させて測定を実行した。レンズ電圧が 2.6 kV の場合、x方向の標準偏差のビーム幅は各 WSM の位置で目標値である 0.5 mm 程度と狭く、幅の変化が少ないことからビームが比較的平行である。一方、y方向はビーム幅が大きいx,y両方向において要求のビーム条件を満たすために、既存の電子銃に対して新たなレンズの追加を検討した。本節では、上述の追加レンズの設計について説明する。

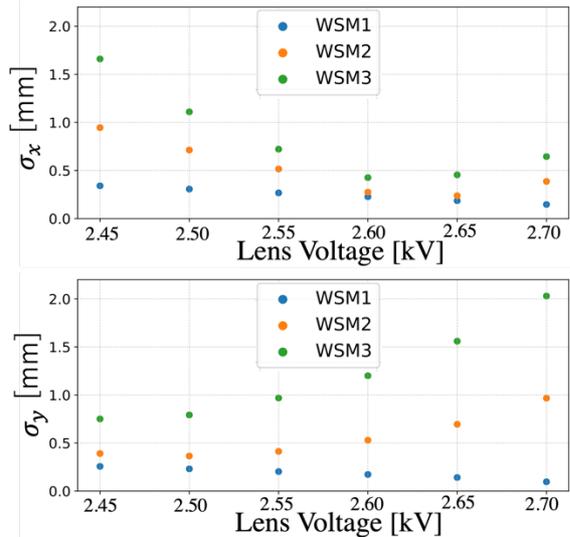


Figure 7: A dependence of beam width on lens voltage.

3.2.1 追加レンズの設計

Figure 7 に示す通り、現状ではy方向のビーム幅はx方向と同程度まで絞る事ができない。つまりビームのy方向エミッタンスがx方向より大きいことが予想される。平行かつ細いビームを形成するためには、エミッタンスをより小さくし、各モニタ位置におけるビーム幅の変化が少なくなるような位相空間分布を形成しなければならない。今回は安価かつ検討が比較的容易であるという点から、コリメータで位相空間分布を削り、エミッタンスを小さくする方法を採用した。本研究では、2 枚のコリメータと静電レンズ二つを組み合わせた追加レンズ系を考案した。追加レンズ系は、電子銃の先端に追加される。

3.2.2 計算に使用する初期分布の決定

軌道計算に用いた初期分布は、運動量方向にボルツマン分布とした。また、電子銃の電流値は 8 μA 程度であり粒子同士の衝突と空間電荷効果が現在の系では非常に小さい事と、フィラメント表面から粒子が一樣に放出されるという考察から実空間方向には一樣にランダムな分布を持つと仮定した。この初期分布を用いて、既存電子銃を模擬した軌道計算を行った。計算結果と実際の軌道測定結果の比較を Fig. 8 に示す。レンズ電圧に対するビーム幅の応答がよく一致しており、仮定した初期分布は現実の結果をよく反映しているといえる。

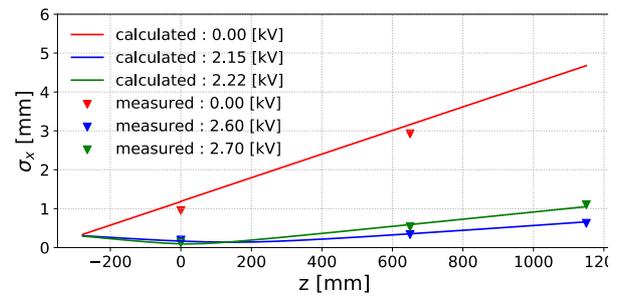


Figure 8: A measured (solid lines) and calculated (inverted triangle) beam width converged by Einzel lens.

3.2.3 光学系の設計

電子ビームの収束にはアインツェルレンズを用いる。今回の計算は、計算領域の全てのポテンシャルをレンズ中心軸における値で近似可能な、近軸近似の適用範囲を考える。この場合、アインツェルレンズによる効果は線形力で近似でき、収束力は以下の Eq. (1)に示す転送行列 M_{el} で表され [6]、具体的には

$$M_{el} = \begin{pmatrix} 4 - \frac{3R}{2} - \frac{2R}{3} & \frac{2d(3R-1)}{R(1+R)} \\ \frac{3(R^2-1)(1-R)(3-R)}{8dR} & 4 - \frac{3R}{2} - \frac{2R}{3} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{qV}{E_{kin}}}$$

となる。 q, V, E_{kin}, d はそれぞれ電荷、レンズ電圧、粒子の運動エネルギー、アインツェルレンズの電極間の距離である。以上の計算モデルを使用し、追加レンズの光

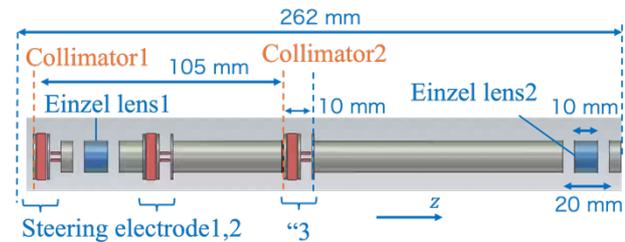


Figure 9: The calculational model of the additional optics.

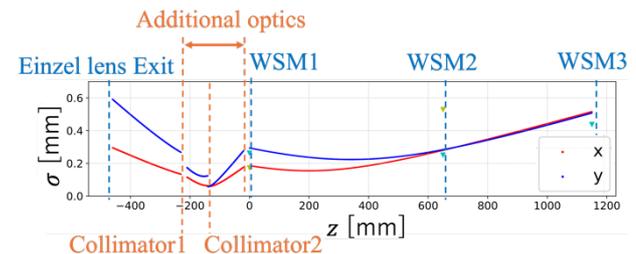


Figure 10: A width of the beam transported by the additional optics. Blue triangle is x-directional measured data and yellow triangle is y-directional one.

光学系を設計した。Figure 9 に追加レンズ系の各構成要素の配置を示す。上流から順番に、コリメータ 1、レンズ 1、コリメータ 2、レンズ 2 の順に配置されている。Figure 10 に追加のレンズ系でビームを輸送した場合のビーム幅の計算結果を示す。以上の結果から、この光学系は目標とするビーム条件(各 WSM で $\sigma = 0.5$ mm 前後のビーム幅)を達成できることがわかる。このレンズ系に入射したビームは、以下の手順を経て目標のビーム品質に形成される。また、この時の位相空間分布を Fig. 11 に示す。

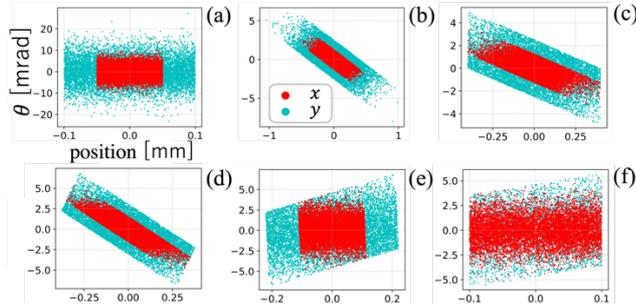


Figure 11: Two-dimensional phase space distribution transported by the optics. (a) is the initial distribution. (b) is the entrance, (c) is the exit of the collimator1. (d) is the exit of the lens1. (e) is the entrance, (f) is the exit of the collimator2.

1. 初期分布(a)を電子銃のレンズで収束させ、コリメータ 1 まで輸送する(b)
2. コリメータ 1 でビームを削る(c)
3. レンズ 1 で位相空間を回転させ(d)、コリメータ 2 までビームを輸送する(e)
4. コリメータ 2 で実空間分布を削る(f)

光学系の設計においては、コリメータにおけるビーム電流値の低下を最小化するために、現状でも目標のビーム品質を満たしている x 方向のビーム幅はコリメータで削られずに透過するように、コリメータ径やレンズ電圧等を決定した。レンズ 1 とコリメータ 2 の位置関係は、コリメータ 2 のアパーチャ径で決定される。Equation (2) の位相進み $\varphi(z)$ とベータ関数 $\beta(z)$ の関係は

$$\varphi(z) = \int_0^z \frac{dz}{\beta(z)} \quad (2)$$

と表される。エミッタンスを ε とすると、ビーム幅は $\sigma = \sqrt{\beta\varepsilon}$ の関係となる。つまり、レンズ 1 の収束力が高ければ $\beta(z)$ が小さくなり、移送進みが早くなるのでレンズ 1 とコリメータ 2 の距離を短くすることができる。しかし、 $\beta(z)$ が小さくなるのでコリメータ 2 におけるビーム幅も狭くなる。今回の計算では、レンズ 1 とコリメータ 2 間の距離を 25 mm とした場合、コリメータ 2 におけるビーム幅は数百 μm 程度まで狭くなる。この状況でビームを削るためには、数十 μm 程度の非常に高い精度でコリメータの製作やレンズ系のアライメントを行う必要がある。以上により、位相進みの速さとビーム幅の関係から、レンズ 1 とコリメータ 2 間の距離はある程度の長さを確保する必要がある。今回は製作精度と追加レンズ系に対する余剰スペースの制約から、コリメータの内径と各コンポーネントの配置、静電レンズへの印加電圧を決定した。

3.2.4 ステアリング電極の設計

追加レンズ系は、既存の電子銃を改造し、銃口の先に設置される。電子銃本体から出射される電子ビームを入射位置と角度を合わせて追加レンズ系に入射することは、装置の製作精度やアライメント精度の観点から非常に困難である。線形な収束レンズを考えると、ビームがレンズ中心からずれて入射した場合には、中心に入射した場合に受ける収束力に加えて一様なキックを受ける。Figure 12 にアライメントのずれに対する静電レンズの二極キックの値を示す。静電レンズの中心軸に対して電子ビームの重心がずれて入射した場合、ビームは大きな二極キックを受け、下流のコリメータを透過する事が困難となる。この課題を解決するために、追加レンズ系の入口やレンズの前後にステアリングを合計三組追加した。Figure 13 にステアリングの印加電圧に対する蹴り角を示す。ステアリングの追加により、レンズに対してビーム重心が数 mm 程度ずれた場合でも、中心軸に対して位置と入射角度を合わせて電子ビームを入射することが可能である。Figure 14 (a) にステアリングの外観と電場分布を示す。電極の長さは、レンズ系全体の長さへの制限により、進行方向に短い設計になっている。また、静電レンズとステアリングを近距離に配置する必要があるため、レンズへの漏れ電場を低減するための設置された電極をステアリング電極の前後に設置している。また、漏れ電場自体の大きさを低減させるために、ステアリングの開口部は可能な限り狭い設計とした。Figure 14 (b) にポテンシャル分布を示す。電圧を印加する際には、二つの電極間に発生させたい電位差の半分を正負で印加する。一方のみに電圧を印加し他方を接地した場合、電位差は同じであるが、ビーム通過領域のポテンシャルが 0 ではなく、進行方向に対するビームの加減速が発生してしまう。これにより静電レンズ効果が発生し、ビームに予期しない収束力が働いてしまう。以上の理由から、ステアリン

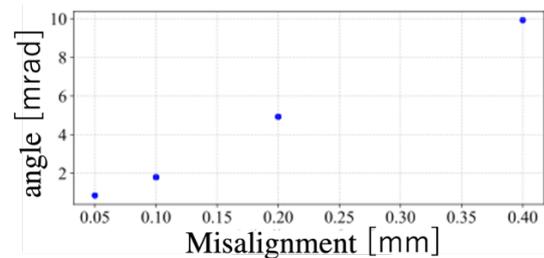


Figure 12: A misalignment dependence of dipole kick to the beam from Einzel lens (1.9 kV).

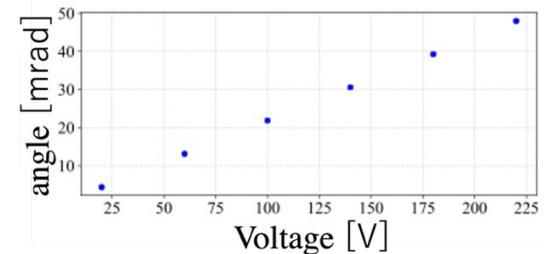


Figure 13: The lens voltage dependence of the kick angle of steering electrodes.

グ電極には正負でそれぞれ電圧を印加する事が一般的である。

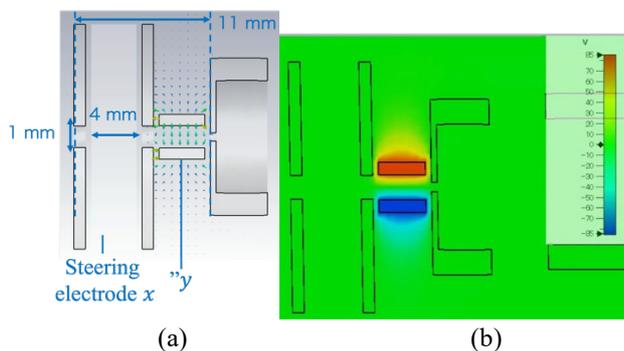


Figure 14: The electric field vector (a) and potential distributions (b) of the steering electrodes.

3.3 既存電子銃のステアリングの改良

前述した通り、追加レンズ系へのビーム入射の調整には、既存の電子銃のステアリングも用いて行う。Figure 15 (a)に既存電子銃のステアリング電圧が0 Vの場合、Fig. 15 (b)に電圧が360 Vの場合の蛍光板における電子ビームの様子を示す。今回はステアリングを用いてビームを Fig. 15 のx方向に動かし、蛍光板の位置もx方向に動作させた。ステアリングの電圧値に応じて収束力が変化してしまうと、ビーム軌道の調整が非常に困難である他、コリメータでビームを削りすぎてしまい、電流値の極端な低下が予想される。電子銃の分解を行ったところ、ステアリング電極の一方が接地されている構造である事を確認し、静電レンズ効果を発生させていた事が判明した。

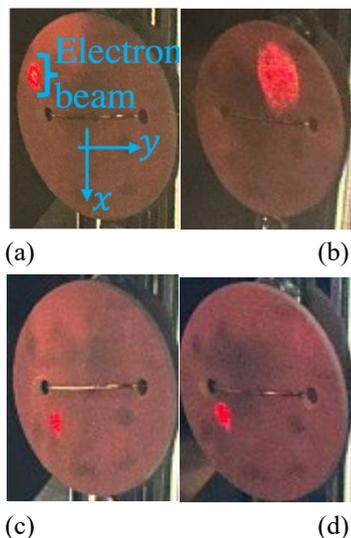


Figure 15: The beam shape appearing on the fluorescent board. The beam and fluorescent board move in the x direction. (a) and (b) are the before improvement, (c) and (d) are the after. (a) and (c) are the steering voltage is 0 V, (b) and (d) are the steering voltage is 360 V.

静電レンズ効果を低減するために、電極に同じ絶対値の電圧を正負で印加できるように改造を行った。Figure 15 (c)にステアリング電圧が0 Vの場合、Fig. 15 (d)に電圧が360 Vの場合の蛍光板における電子銃改造後の電子ビームの様子を示す。この結果から、ステアリングで発生する静電レンズ効果の大幅な低減に成功した。

4. まとめ

本研究では非破壊型静電セパタムの詳細な電場評価を行うために、新たなビーム分離試験機を開発中である。本装置は、電場に対して入射した電子ビームを計6台のWSMで測定する事で、ビーム進行方向に積分された電場の2次元分布を測定可能である。また、電子ビーム幅の広さにより測定点数が限られる課題に対し、既存の電子銃に追加する新たなレンズ系を設計した。追加レンズ系はコリメータ2つと静電レンズ2つ、水平・鉛直方向のステアリング電極3組からなる。二つのコリメータとその間の静電レンズの電圧調整により、任意の長形状位相空間分布を形成可能である。光学系の設計は、線形化した静電レンズの計算モデルを用いて行った。また、レンズやコリメータの間にステアリングを計3組設置したことにより、アライメントや製作精度に依存せず、電子ビームをレンズ系の中心軸と平行な角度で中心に入射することが可能である。今後は、追加レンズ系全体の具体的な設計を行い、製作を開始する予定である。

謝辞

J-PARC センター加速器ディビジョンの高橋博樹氏、鈴木康夫氏、加藤威氏、泰中俊介氏のご助力に感謝いたします。

本研究はJSPS 科研費 JP20K03993, JP23KJ0173 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Tomizawa, "Slow extraction from the J-PARC main ring using a dynamic bump", Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 902 (2018) 51–61.
- [2] T. Shimogawa and H. Harada, "非破壊型遅いビーム取り出し装置の提案", Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, July 3-1, 2019, pp. 1156-118. https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/FRPI/FRPI048.pdf
- [3] 原田寛之, 日本原子力研究開発機構, 特許第 7207712 号, 2023 年 1 月 10 日.
- [4] S. Nagayama *et al.*, "Study of non-destructive slow beam extraction method in particle accelerator", Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, WEP002, this meeting.
- [5] S. Nagayama *et al.*, "Beam separation experiment with prototype non-destructive electrostatic septum for device improvement", Proc. PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 2023, WEP19, this meeting.
- [6] H. Wiedeman., "Particle Accelerator Physics Forth Edition".