

非破壊型静電セプタム試験機によるビーム分離実験と装置改良の検討 BEAM SEPARATION EXPERIMENT WITH PROTOTYPE NON-DESTRUCTIVE ELECTROSTATIC SEPTUM AND STUDY FOR DEVICE IMPROVEMENT

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)}, Atushi 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 for a slow extraction. The septum has multiple electrodes with controlled voltage placed around the region without the outside of the beam and separates the beam with its electric field. To evaluate its electric field, we have built a prototype septum and a test machine for beam separation consists of an electron gun and three wire scanners. This test machine can measure the electric field indirectly by using the thin electron beam and scanning its position in the septum. The experimental results of the prototype septum showed good agreement with the calculation ones. However, the electric field distribution was not enough to separate the beam because a step function-like electric field distribution is ideal for the beam separation with a minimal negative effect on the beam. We have studied two methods to realizing an ideal field. One is adding a magnetic field as a correction to the electric field, and the other is improving the electrode configuration to match the beam shape. In this paper, we present the result of the electric field measurements and the septum improvement. Additionally, we describe the future plan of this development.

1. はじめに

Figure 1 に静電セプタ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セプタム境界に近づけ、境界を超えた粒子に対して静電セプタ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である。上記の要求を満たすために挿入物（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

- 自機器及び周辺機器の高放射化
- ビーム強度の制限
- 機器の破損・故障
- 他機器（電磁石, RF 電源）の異常停止に対する強い制限

等の問題が生じている。セプタ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、セプタム電極が無い非破壊型の静電セプタムの開発および原理検証・実証を進めている。

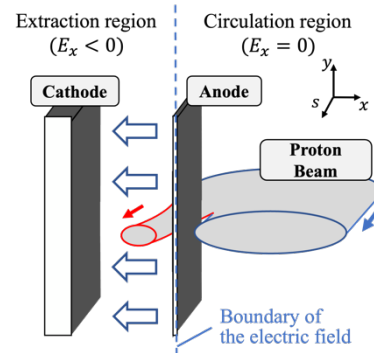


Figure 1: A conceptual diagram of an electric septum for slow extraction of a proton beam.

2. 非破壊型静電セプタムの概要

Figure 2 に本研究において開発を進めている非破壊型静電セプタム[2, 3]の概略図を示す。本装置は、ビーム軌道周辺に配置した多数の電極に対して適切な電圧を印加し、装置内の電場分布を制御することで、ビームを分離する事が可能な電場分布の形成を目指す。周回ビームへの影響を最小限にしつつ、ビームを周回側から分離する為には、以下要求から階段関数状の電場分布が理想である。

1. 取り出し・周回側における一様な電場分布
2. セプタム境界における大きい電場勾配

一つ目の要求は、ビームの品質低下を最小限に抑

[#]nagayama.shota.t2@dc.tohoku.ac.jp

えるために重要である。二つ目の要求はビームの高い分離性能を実現するために重要である。

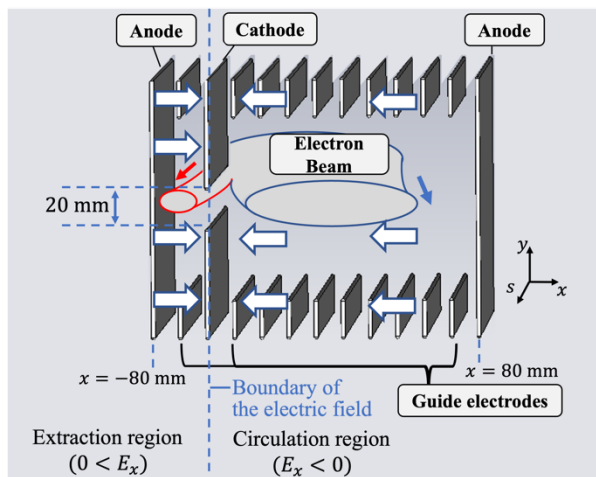


Figure 2: A conceptual diagram of the proposed non-destructive electric septum.

3. ビーム分離試験

3.1 ビーム分離試験装置の概要

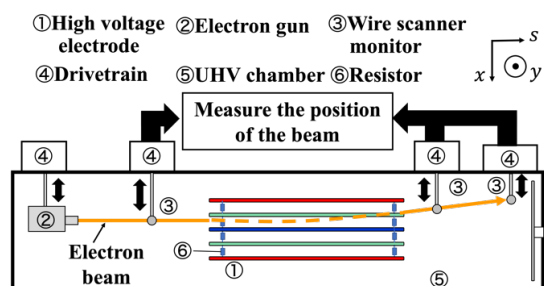


Figure 3: A schematic diagram of the beam separate testing machine with an electron beam.

Figure 3 に本研究で開発した非破壊ビーム分離試験装置の概略図を示す。本実証機の目的は
a.ビーム分離が可能な電場形成の実証
b.技術的課題の明確化

である。しかし、電場は直接測定が出来ないため、本試験装置では非破壊型静電セプタムの電場の影響を受けた電子ビームの軌道を測定することで、電場分布の間接的な評価を行う。Figure 4(a)にビーム分離試験装置の外観図を示す。真空チャンバには、Fig. 2のx方向(静電セプタムでビームにキックを与える方向)に対して動作する、電子銃用とモニター用の駆動機が合計4台設置されている。チャンバ最上流部の駆動機には電子銃を設置し、電子銃本体の位置を駆動機によってx方向に走査することができる。残り3機の駆動機には Fig. 4(b)に示すワイヤスキャナモニターが設置されており、それぞれの設置位置におけるビームのx方向分布を測定することができる。モニター1で小型試験機へのビームの入射位置、モニター2・3で電子ビームの曲げ角の測定を行う。非破壊型静電セプタムの電場がON/OFFのビーム軌道を

ビーム分離試験装置を用いて測定し、両者の比較を行うことで電場のビームへの影響を評価する。

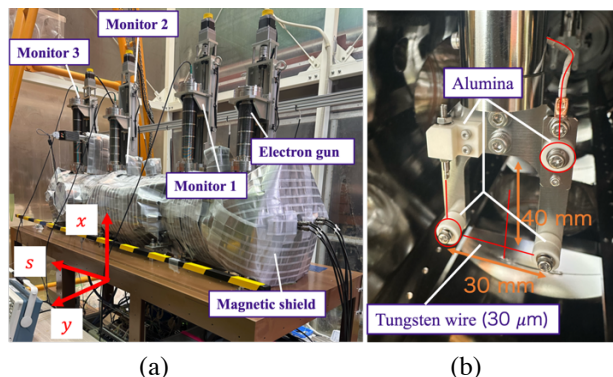


Figure 4: An appearance of the beam separate testing machine (a) and the wire scanner (b).

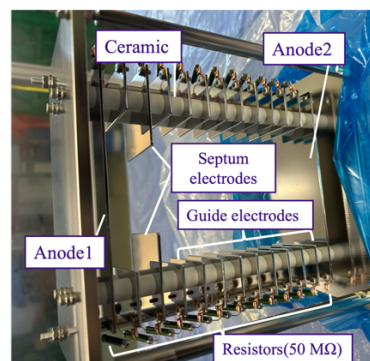


Figure 5: An appearance of the prototype non-destructive electrostatic septum.

3.2 非破壊型静電セプタム小型試験機

Figure 5 に非破壊型静電セプタム試作機の外観を示す。今回使用する抵抗器は一律 50 MΩの値を使用した。抵抗を挟んで直列に繋がれた各ガイド電極には、電圧降下が一定のため定電圧電源で印加した電圧が等分配される。

3.3 ビーム分離試験と外部磁場の遮蔽

ビーム分離試験における、電子ビームの具体的な測定手順は以下の通りである。

1. 電子ビームを入射
2. 試験機で曲げられた電子ビーム軌道を測定
3. 電子銃の位置を移動

以上の 1~3 の行程を繰り返し実行し電子ビームの入射位置に対する電子ビーム軌道変化の応答をシミュレーションと比較することで電場の評価を行う。

しかし、実験開始当初において、直進しているはずの電子ビームの軌道を上流 2 台のモニタでしか測定することができないという問題が発生した。この問題の原因を外部磁場の影響であると推測し、試験エリア内の簡易的な磁場測定を行ったところ、約 50μT 程度の外部磁場が測定された。50 μT 程度の磁場が存在した場合、実験で利用している 5 keV の電子ビームは回転半径約 4 m の円運動をすることにより、試験機最下流のモニタ 3 に到達する以前にビー

ムがチャンバーに衝突する事が計算から判明した。従って、外部磁場の遮蔽を目的として磁気遮蔽膜を製作した。遮蔽膜をチャンバに巻き付けて効果を測定した結果、1枚目追加の段階で、初めて3台全てのモニターでビーム軌道の測定が可能になり、更なる遮蔽膜の追加では遮蔽膜の枚数に対する電子ビーム軌道の応答が見られた。Figure 6 に遮蔽膜の巻き数が1と5の場合の電子ビーム軌道を示す。初めて軌道の測定が可能になった1枚目と比較して、5枚目の場合はほぼ直進するビーム軌道を実現している。

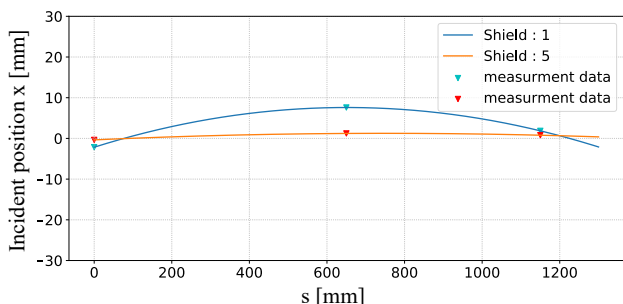


Figure 6: The trajectory of the electron beam under the influence of an external magnetic field. Triangle points show the measurement data on monitors and the solid line show the calculation result of the circular trajectory passing through the measurement points.

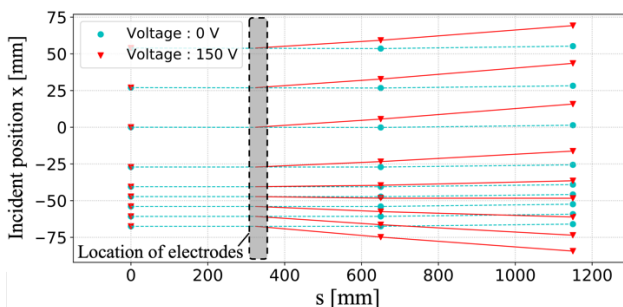


Figure 7: The measurement result of electron beam trajectories. The red triangle points show the case when a maximum voltage of 150V is applied to the electrodes and the light blue points show the case when 0V is applied.

3.4 非破壊ビーム分離実験結果

Figure 7 に非破壊型静電セプトム試作機によってキックを与えた電子ビームの軌道測定結果を示す。 $x = -55$ mm のセプトム境界に対して、周回側($x \geq -55$)に入射した粒子は周回側へ、取り出し側 ($x \leq -55$)に入射した粒子は取り出し側にキックを受けていることが確認できる。Figure 8 に非破壊型静電セプトムによる電子ビームへの蹴り角の測定結果を示す。小型試験機の計算モデルによる粒子トラッキングシミュレーションの結果と実験結果が非常に一致した事から、今回の実験を通して計算上のモデルを実験系に反映する手法を確立した。

本実験により、非破壊型静電セプトム試作機が想定した電場を形成できることを実証した。今後は、取り出し・周回領域における一様な分布や、セプト

ム境界における大きな勾配等の要素を持つ電場分布の形成を目指して、装置の改良を進める。

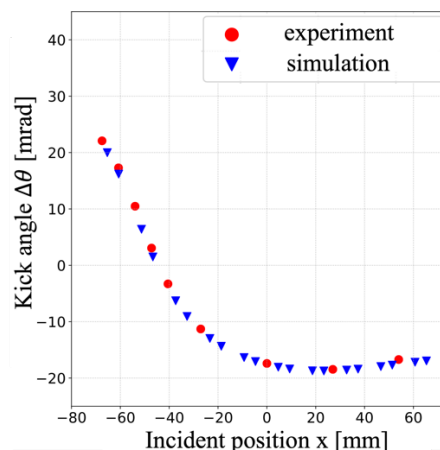


Figure 8: Measured and experimental kick angle of the electron beam.

4. 装置の改良・実機に向けた検討

非破壊型静電セプトムの実機への導入を検討した場合、本装置が形成する現状の電場分布では不十分である。本節では、階段関数状分布の形成を目指して行った2通りの装置の改良及び実機に向けた検討について説明する。

4.1 電場・磁場結合型

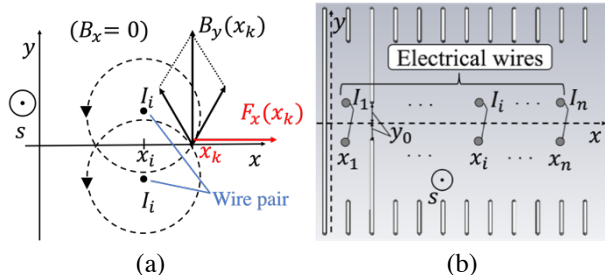


Figure 9: The concept of a correction method with an additional magnetic field generated by the currents (a). The left figure shows Lorentz force of the magnetic field generated by a pair of two wires. The right figure shows the configuration of the electric wires (b).

改良案の一つである電場・磁場結合型[4]は、放電の危険性から電極の間隔や数、印加電圧の上限などに制約を課している状況において、ビーム進行方向 (s 方向)に多数の平行な電線を配置し、電場と直交する磁場による補正力を新たに加え、電場と磁場のローレンツ力の合力を階段関数に近づける手法である。この電線は非破壊型静電セプトムとは独立しており、電極に対しての制限に関係なく補正力を発生させる。前回の加速器学会では、階段関数との誤差が大きいセプトム境界近傍にのみ数本の電線を配置すれば良いという計算結果を報告した[4]。今回は、電線の配置方法に関してより詳細に検討を行った。

4.1.1 印加電圧・電流の最適化

本節では、以後のガイド電極・電線への印加電圧・電流の最適化方法について述べる。以後は水平、鉛直、ビーム進行方向を x, y, s と定義し、各方向の装置の中心となる点を原点とおく。 $y = 0$ の平面における x 方向成分について議論する。今回の計算では、電子ビームは非破壊型静電セプタム装置内を直進する近似の下で行う。電場の場合、電場の x 成分を s （進行方向）に対して積分したものを $E_i(x_k)$ 、位置 x_i に設置した電極の印加電圧 V_i とすると、電子ビーム受ける電場の積分（以後、簡略のため電場） $E(x_k)$ は各電極の寄与の和をとり以下 Eq. (1)で表される。

$$E(x_k) = \sum_{j=1}^n c_{k,j} V_j \quad (1)$$

各座標における $E(x_k)$ をベクトルで表記すると以下の Eq. (2)のようになる。

$$\begin{pmatrix} E(x_1) \\ \vdots \\ E(x_m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \dots & c_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} = CV \quad (2)$$

ここで n, m はそれぞれ電極の総数、電場の観測点の数である。以上の Eq. (2)の逆問題を解き、印加電圧 V を導出する。

4.1.2 電場・磁場結合型の電線配置の検討

A) 一つの電線対を配置し大電流を印加した場合

Figure 10(a)にセプタム境界に電線を一対配置し、電極印加電圧の最適化を行った場合のローレンツ力を示す。グラフから、電場のみの場合と磁場を加えたローレンツ力の分布は変わらない事がわかる。理由としては、電極と電線による電場・磁場の形に違いが無い事が挙げられる。簡単のために、 s 方向に無限に長い、電荷密度 λ の電荷分布と電流 I の線電流が作る、電場の x 成分と磁場の y 成分を Eq. 3 に示す。

$$E_x(x_k) = \frac{(x_i - x_k)\lambda_i}{2\pi\epsilon_0\{(x_i - x_k)^2 + y_0^2\}} \quad (3)$$

$$B_y(x_k) = \frac{(x_i - x_k)\mu_0 I_i}{2\pi\{(x_i - x_k)^2 + y_0^2\}}$$

上式から、電線・電極を同様に配置した場合にはビームに与えるキックもまた同様である。また、Eq. 3 に示す分布のピーク間距離は電極・電線の y 方向間隔と 1:1 に対応することから、急峻なローレンツ力分布を達成するためには、電極・電線の y 方向間隔を可能な限り狭くする事が重要である。

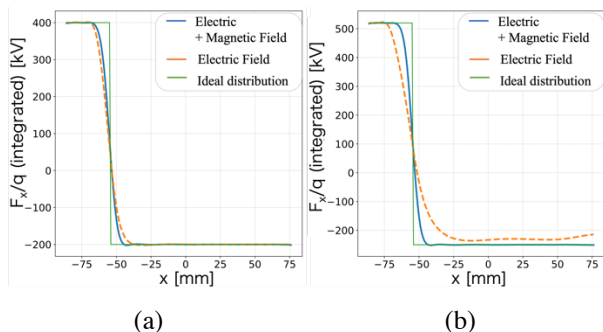


Figure 10: The integrated electric and magnetic field distribution for a single wire (a) and multiple wire (b) .

B) 電極周辺に電線を同数配置した場合

Figure 10(b)に電極と同数の電線を電極周辺に配置し、電流値を最適化した場合のローレンツ力分布の計算結果を示す。グラフより、印加電圧に制限がある場合には、目標とする電場強度（緑実線）を実現できず、特に周回領域の電場の分布が歪んでいるが、磁場による補正を加えることによって、ローレンツ力の合力で目標の強度を達成している。この結果は、電場に対して磁場による補正を加えることは、電極への印加電圧の上限を超えて電圧の印加する事と同等であることを意味する。

4.2 電極構造の改良

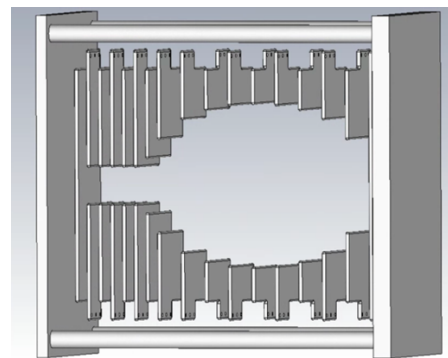


Figure 11: The calculational model of the improved non-destructive electrostatic septum.

4.2.1 電極形状の最適化

第 4.1 章の結果から、より階段関数に近い電場分布を形成するためには電極の y 方向間隔をできるだけ狭くする必要がある。Figure 11 に電極形状を改良した非破壊型静電セプタム試作機の外観を示す。装置の周回側の電極配置は J-PARC Main Ring (MR) 入射時のビーム形状、取り出し側の電極配置は取り出し時の断熱減衰したビーム形状に合わせて決定した。参考にしたパラメーターは、物理アパーチャ: 81π mm·mrad、 β_x : 40 m、 β_y : 10 m、100%エミッタンス（取り出し時）: 10π mm·mrad である。Table 1 に前述のパラメータの場合のビーム幅を示す。

Table 1: RMS of the Gaussian Fitted Beam Distribution at Injection and Slow Extraction in MR

	σ_x [mm]	σ_y [mm]
injection	57	28.5
extraction	20	10

また、装置の取り出し領域における電場をより細かく制御するために、ガイド電極の枚数を 1 枚から 4 枚へと変更した。加えて、Eq. (3)より電場分布は距離に対して 2 乗分の 1 に比例するが、電圧に対しては 1 乗に比例するため、同じ大きさの電場変化でも、 y 方向間隔が広い電極はより大きい印加電圧変化が必要になる。特に、隣接した電極の y 方向間隔の差が大きいと、印加電圧分布の導出に悪影響を及ぼすため、隣接した電極の y 方向間隔を緩やかに変化させることで対処している。

4.2.2 最適化計算結果

Figure 12(a)に最適化後の印加電圧、Fig. 12(b)に装置内のポテンシャル分布の計算結果を示す。印加電圧の最適化計算において、解（印加電圧）が振動すると、隣接した電極の電位差が極端に増大する。30 GeV 陽子ビームを想定して印加電圧を決定する際に、放電の危険を回避するために、電圧分布が単調増加する様な制限を加えた。Figure 13(a)にビーム進行方向に積分した電場の x 成分、Fig. 13(b)に装置の入射位置に対する電子ビームの蹴り角を示す。電場形成の自由度が増加したことで、以前の構造では不可能だった、取り出し領域における一様な電場分布の形成が可能になった。よって一様な分布の形成には、電極の数（自由度）が重要であると言える。

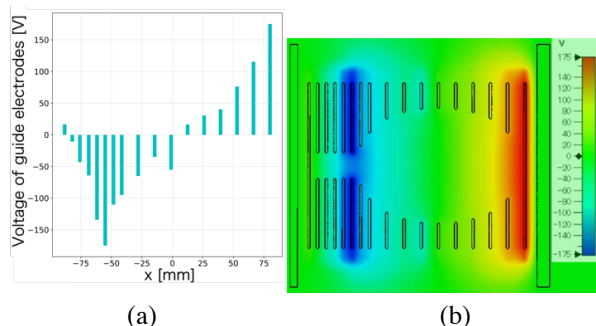


Figure 12: The calculation result of the applied voltage to the guide electrodes (a) and the potential distribution in the device (b).

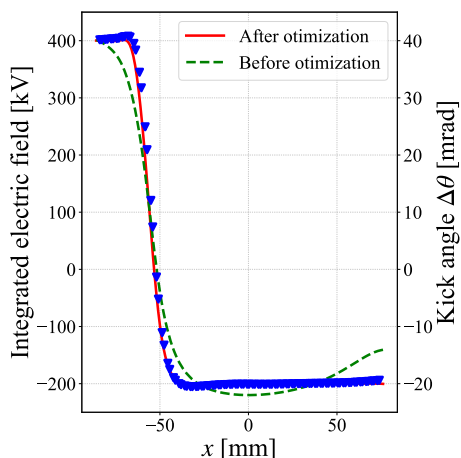


Figure 13: A calculation results of an integrated electric field distribution (solid and dashed line) and a kick angle of the 5 keV electron beam (triangle points).

4.3 30 GeV 陽子を想定したスケールリング

Figure 14(a)に、MR を想定してスケールリングした非破壊型静電セプトム改良型の電場分布を、Fig. 14(b)にガイド電極への印加電圧の計算結果を示す。スケールリングしたパラメータは、 s 方向長さ: 50 mm→1.5 m、最大印加電圧: 180 V→50 kV である。分布が一様である周回・取り出し領域の電場ギャップにより、現行の静電セプトムと同等の 0.2 mrad の蹴り角を達成できる。

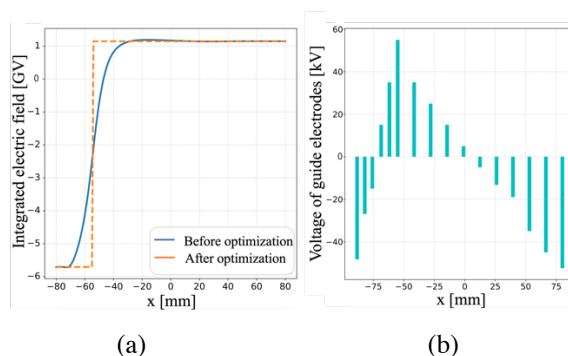


Figure 14: The calculation results of an integrated electric field distribution (a) and an applied voltage to the guide electrodes (b) for the case of 30 GeV proton.

5. まとめ

本研究では、ビーム分離試験機の開発を行い、非破壊型静電セプトム試作機が設計通りの電場形成が可能であり、非破壊でビーム軌道が分離されることを確認した。また、ビーム分離に対して理想である階段関数状の力を電場・磁場で実現することを目指し、追加で磁場を加える手法と、電極配置の最適化の検討を行った。印加電圧の制限により目標の電場強度が達成できない場合は、不足分を磁場により保証する方法が有効である。電極配置・枚数を変更した新構造のセプトムは、以前の構造では実現できなかった、取り出し領域における電場の一様分布を実現し、加えて縦方向長さとしてスケールリングすることで 30 GeV の陽子ビームに対して現行の静電セプトムと同等の蹴り角を達成できることが計算上可能である。今後は課題であるセプトム境界近傍における急峻な電場勾配形成を実現するための検討や、MR を想定した本装置による遅い取り出しのシミュレーションを実行し MR 用試作機の開発を進める。

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] R. Muto, “J-PARC メインリングにおける遅い取り出し”, 高エネルギー加速器セミナー OHO’10.
- [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. 1156-1158. 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.