

# 粒子加速器における非破壊での遅いビーム取り出し手法の研究

## STUDY OF NON-DESTRUCTIVE SLOW BEAM EXTRACTION METHOD IN PARTICLE ACCELERATOR

永山晶大<sup>#, A, B)</sup>, 原田寛之<sup>B)</sup>, 下川哲司<sup>C)</sup>, 山田逸平<sup>B)</sup>, 地村幹<sup>A, B)</sup>, 山本風海<sup>B)</sup>, 金正倫計<sup>A, B)</sup>  
Shota Nagayama<sup>#, A, B)</sup>, Hiroyuki Harada<sup>B)</sup>, Tetsushi Shimogawa<sup>C)</sup>, Ippei Yamada<sup>B)</sup>, Motoki Chimura<sup>A, B)</sup>  
Kazami Yamamoto<sup>B)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>A, B)</sup>  
<sup>A)</sup>Tohoku University  
<sup>B)</sup>Japan Atomic Energy Agency (JAEA)  
<sup>C)</sup>High Energy Accelerator Organization (KEK)

### Abstract

We have been developing a new device of "Non-destructive electrostatic septum" that is matter free on the beam orbit to achieve non-destructive beam extraction. The spatial distribution of an electric field like a step function is ideal for separating the extraction beam from the circulating beam with minimal negative effect on the circulating beam. This device is composed of an anode, a cathode and guide electrodes that form a step-function-like electric field. We determined the voltages applied to the electrodes by an optimization method using the least squares method. Additionally, we newly propose the "electric and magnetic field coupling type" that improves the beam separation between these beams by applying the additional magnetic field. The optimization of the guide electrode voltages reduced the root-mean-square error between the electric field of the new device and a step function from 1.93 kV/m to 0.68 kV/m. Furthermore, for the electric and magnetic field coupling type, the error decreased from 0.68 kV/m to 0.32 kV/m. In this paper, we report these methods and results together with introducing the principle. We describe the concept and status about the proof-of-principle device under developing.

## 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 に静電セプタム装置を用いた遅い取り出し手法の概要を示す。本手法では周回するビームを広げつつ静電セプタムで発生させた電場境界（セプタム境界）を超えた粒子を「かんなの刃で木材を削り出す」様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ぬように電場が無く、加えてビームを明確に分断する為に取り出し境界にて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為、挿入物(リボン電極)を用いる手法が広く採用されている。しかし、本手法で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）への異常停止に対する強い制限

などの問題が生じている。従ってリボン電極でのビームロスが引き起こすこれらの課題を解決する為に、セプタム電極（リボン電極などの挿入物）がない「非破壊型の静電セプタム」の開発が必要である。

<sup>#</sup>nagayama.shota.t2@dc.tohoku.ac.jp

本研究では、このような革新的な装置開発を達成すべく原理検証・実証を進めている。

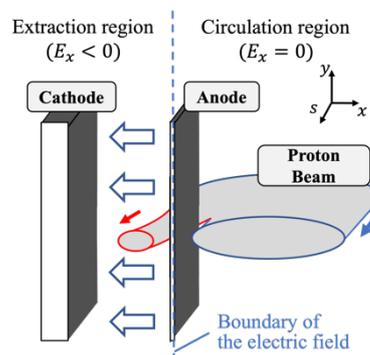


Figure 1: A conceptual diagram of electric septum for slow-extraction of proton beam.

## 2. 非破壊型静電セプタムの概要

### 2.1 非破壊型静電セプタムの着想

本研究では、「ビーム軌道の周りに多数のガイド電極を配置し、各電極の印加電圧を最適化することでビームを切り分ける事が可能な電場分布を形成する」という着想に基づき、Fig. 2 に示す遅い取り出しの新技术を考案した[2, 3]。新たに考案した手法は、挿入物を必要としない点で従来手法とは根本から異なる。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取り出し側に切り分ける為には、

1. 装置の周回側における平坦な電場分布
2. 装置の取り出し境界での急な電場の勾配

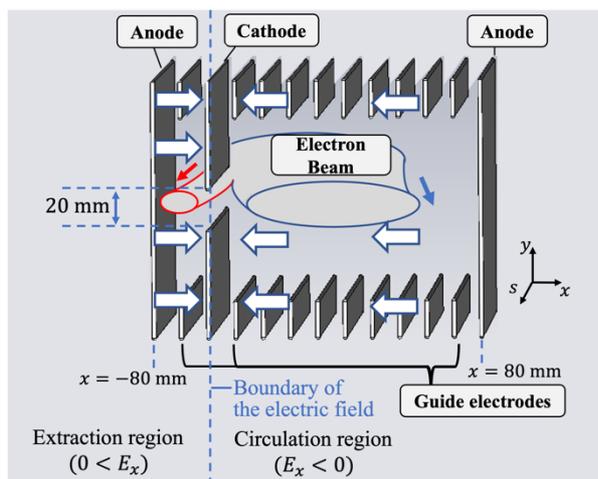


Figure 2: A conceptual diagram of proposed non-destructive electric septum.

の二つの要求を満たす電場分布が理想である。一つ目の要求は周回ビームが装置から受けた力を容易に補正す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。この二つの要求を満たす理想的な装置内の電場分布として階段関数が挙げられる。また、本手法ではビームの取り出し側と周回側で互いに逆方向の電場を形成しており、ビームの分離能力が向上している。

## 2.2 電極への印加電圧の最適化

前節で述べた要求を満たすべく、非破壊型静電セプタムの各ガイド電極の印加電圧を調整・最適化する必要がある。本節では、ガイド電極への印加電圧の最適化方法について述べる。以降の計算では、非破壊型静電セプタムの電極に対して、水平、鉛直、ビーム進行方向を  $x, y, s$  と定義し、それぞれの方向において電極の中心となる点を原点とおき、 $y = s = 0$  の場合の、 $x$  方向の電場  $E_x$  を計算する。印加電圧の最適化は以下の手順で行った。

まず、各電極が形成する電場を計算すべく、簡易モデルによる定式化として Fig. 2 のガイド電極を  $x$  方向に厚みを持たない電極として近似した。次に、位置  $x_i$  の電極に電圧  $V_i$  を印加した場合に位置  $x_k$  に形成される電場の大きさ  $E(x_k)$  は、Coulomb の法則より以下の式で記述できる。

$$E(x_k) \equiv c_{ki} V_i \quad (1)$$

$$c_{ki} = \frac{la}{\pi\epsilon_0} \int_{y_1}^{y_2} \frac{(x_k - x_i)dy}{\{(x_k - x_i)^2 + y^2\}\sqrt{(x_k - x_i)^2 + y^2} + l^2}$$

ここで、 $l$  は  $s$  方向の電極の長さ、 $y_1, y_2$  は  $y$  方向の電極の下端と上端の座標、 $V_i$  は電極の印加電圧、 $\epsilon_0$  は電気定数、 $a$  は各電極表面の電荷密度  $\sigma$  とした場合に  $\sigma = aV$  と定義した定数である。

位置  $x_i$  の電極の印加電圧を  $\Delta V_i$  変化させた際の位置  $x_k$  における電場の変化  $\Delta E_i$  は、Eq. (1) で  $V_i \rightarrow \Delta V_i$  と置き換えたものである。各電極の印加電圧を各々変化させた場合の位置  $x_k$  での電場の総変化量  $\Delta E(x_k)$

は各電極の寄与の和をとって  $\Delta E(x_k) = \sum c_{ki} \Delta V_i$  となる。各座標での  $\Delta E(x_k)$  をベクトルで表記すると以下ようになる。

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

ここで  $n, m$  はそれぞれ電極の総数、電場の観測点の総数である。各  $x_k$  において、現状の電場と階段関数との差を  $\Delta E(x_k)$  とする。行列  $C$  の逆行列を求めて Eq. (2) の両辺に作用させることで  $V$  が求まり、目標の関数に現状の電場を近づける為に必要な各電極の電圧の変化量が得られる。

上記の近似計算は、各電極が他の電極へ及ぼす影響は独立のものとして定義しており、実際の電場の変化は電極同士の相互作用等の要因によって単純な Eq. (1) の和で厳密には表すことはできない。従って Eq. (2) から求めた  $\Delta V_i$  だけ各電極の電圧を変化させた場合の全体の電場の計算は電場計算ソフトで行い、得られた電場の計算結果をさらに目標の電場に近づける為に、補正電圧導出、適用、電場計算、目標値との差分評価を繰り返す必要がある。この過程を繰り返し、電極の電場と目標の電場の差が収束した時の各電極のポテンシャルの値を採用する。補正回数に対する目標の電場と本装置による電場の差を二乗して平方根を取ったもの (RMSE: root-mean-square error) を Table 1 に示す。今回は Table 1 より、三回目の計算での印加電圧の値を採用した。今回は初期条件として線形に配置したポテンシャルの区間  $-0.04 \text{ m} \leq x \leq 0.08 \text{ m}$  における電場を目標とする階段関数に近づけることを目標に計算を行った。印加電圧の最適化後の電場分布を Fig. 3 に示す。電場の周回部 ( $-0.04 \text{ m} \leq x \leq 0.08 \text{ m}$ ) の領域がより平坦な分布に改善された。  $xy$  平面のポテンシャル分布は Fig. 4 に示す通りである。

Table 1: The RMSE against the Optimizations in  $[-0.04 \text{ m} \leq x \leq 0.08 \text{ m}]$

補正回数	0	1	2	3
RMSE [V/m]	36.3	13.2	7.13	6.77

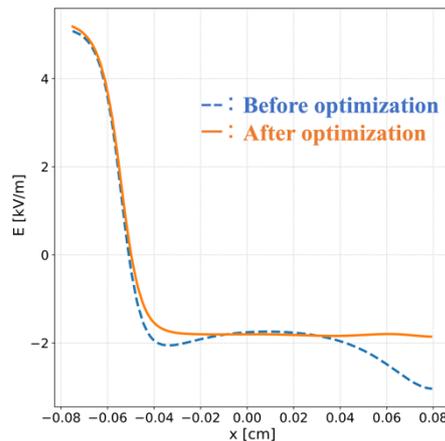


Figure 3: The calculated electric field distribution for the horizontal direction before (dashed) and after (solid) the optimization using our method.

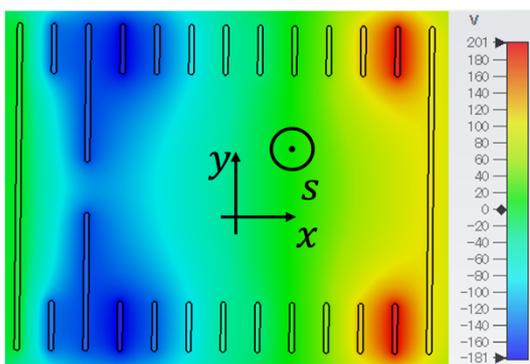


Figure 4: The calculated electric field in the transverse plane (x, y) at  $s = 0$  after the optimization.

### 2.3 電子ビームでの粒子軌道計算結果

上述のように非破壊型静電セプタムの目標として

1. 非破壊で周回ビームから取り出しビームを切り分ける
2. 取り出しビームを切り分けた後の周回ビームを装置に入射する前のリング周回軌道に戻すの二つが挙げられる。現在、非破壊型静電セプタムの原理実証を目的とする、5 keV のエネルギーを持つ電子ビームを用いた小型の原理実証機を開発しており、CST studio suite [4] (以後 CST) を用いたシミュレーションモデルを作成した。Figure 5 に CST でのビーム軌道計算の結果を示す。s 方向に並べられている三つの電極のうち、ビームの入射側から二番目の電極はビームを切り分ける役割を持ち、残りの二つは周回ビームを元の周回軌道に戻す役割を持つ。電極に対して垂直に入射したビームは、三つの電極全てを通過後のビームは取り出し側と周回側に切り分けられ、周回側のビーム軌道は閉じたバンパ軌道になる計算結果が得られたことから、原理実証器のモデルで目標である 2 つの機能を十分に達成した。

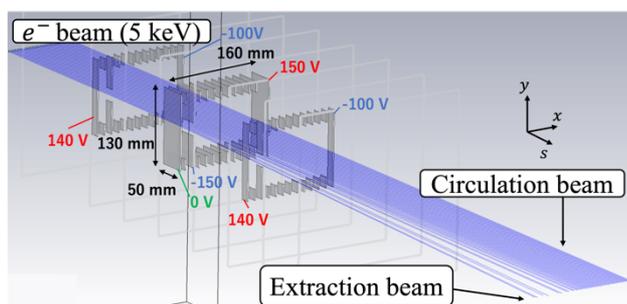


Figure 5: The particle tracking result on the model of proof-of-principle test device with CST studio suite. A 5 keV electron beam is incident on the device. The gray plates are the electrodes and the blue lines are the particle trajectories.

## 3. 電磁場結合型の構想

前章では電極の印加電圧の最適化を行った結果、ビームの分離機能を備えつつ周回側電場をビームへ

の影響の少ない平坦な分布に形成することに成功した。しかし、前章での最適化計算は、放電の危険性を考慮して電極の間隔や数、電圧の上限などに制約を課している状況であった。電極に対する前述の制限は、ビームの分離に対して理想的な階段関数のようなギャップを持つ電場実現の障害となっている。この問題への対処法として s 方向に平行な電線を多数配置し、電場と直交する磁場で補正力を新たに加えることで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を考案した。この機構は非破壊型静電セプタ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。

### 3.1 磁場での補正力形成方法の着想

Figure 6 に上述の磁場での補正方法を示す。まず、x 軸対称に 2 本配置した電線の対を考える。Figure 6 に示したように配置した対の電線に同じ大きさの電流を流す事で、ビームが通過する x 軸上においてはビームのセパレートに必要な磁場の y 方向成分のみが形成される。この 2 本の電線の対を、装置の幅を設置する電線対の数で分割した間隔で敷き詰めるようにして装置の右端から左端に渡って等間隔で x 方向全域に多数配置する。配置した各電線対の電流値を最適化することで、静電セプタムの電場によるクーロン力に対して、直交する磁場による補正力を発生させ、補正力を加えたローレンツ力を階段関数に近づける。

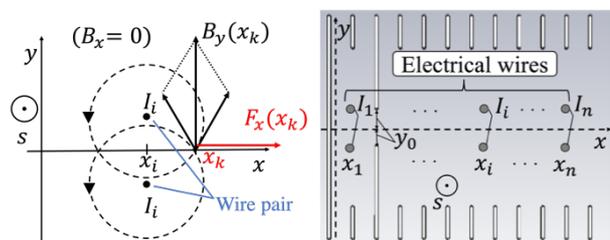


Figure 6: The concept of a correction method with an additional magnetic field generated by the electric wires. The left figure shows Lorentz force of the magnetic field generated by a pair of two wires. The right figure shows the configuration of the electric wires.

### 3.2 電線の電流値の決定

本論文では長さが無限大かつ太さの無い電線を考える。位置  $x_i$  に配置された電線対の電流値を  $I_i$  とおくと、電線対が x 軸上の任意の位置  $x_k$  に作る y 方向磁場  $B_y(x_k)$  は、Biot-Savart の法則により以下のように表される。

$$B_y(x_k) = \frac{(x_i - x_k)\mu_0 I_i}{2\pi\{(x_i - x_k)^2 + y_0^2\}} \quad (3)$$

各電線対が任意の位置  $x_k$  に作る磁場の合計  $B_y(x_k)$  は Eq. (3) を各電線についての和をとり

$$B_y(x_k) = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_k)\mu_0 I_i}{2\pi\{(x_i - x_k)^2 + y_0^2\}} \quad (4)$$

と表される。 $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  の関係から、電流  $I_i$  の電線対が位置  $x_k$  に発生させる補正力は Eq. (4) を用いて

$$F(x_k) = qv_s B_y(x_k) \equiv \sum_{i=1}^n a_{ki} I_i \quad (5)$$

$$a_{ki} = \frac{qv_s \mu_0 (x_i - x_k)}{2\pi \{(x_i - x_k)^2 + y_0^2\}}$$

と書くことができる。Figure 3 に示した電場による力为目标である階段関数に近づける為に必要な補正力は、階段関数と現状の電場の差である。x軸上の各点(x<sub>k</sub>)における、必要な補正力F<sub>c</sub>は

$$\mathbf{F}_c = \{F(x_1), \dots, F(x_k), \dots, F(x_m)\}$$

と表されるので、Eq. (5)を用いて

$$\mathbf{F}_c = \begin{pmatrix} F(x_1) \\ \vdots \\ F(x_m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} = \mathbf{A} \mathbf{I} \quad (6)$$

と表せる。ここでn, mはそれぞれ電線対の総数、観測しているx軸上の点の総数である。Equation (6)での補正力F<sub>c</sub>と行列Aは既知である。Aの一般化逆行列A<sup>+</sup>を、行列Aの特異値分解により数値的に導出し、Eq. (6)の両辺に左から作用させて、必要な補正力を発生させる電流分布Iの最小二乗解を導出できる。

### 3.3 電流値最適化計算の結果

50組(n = 50)の電線対を Fig. 6 のように配置し、Fig. 3 に示した最適化されたガイド電極の電場に補正力を加える場合の電流値最適化計算を行った。計算では電流値の最小二乗解を求める際に、原理実証機の電場・磁場結合型への改装を想定して電流値へ上下限として±10 A の制約を与えた。各電線対の電流値の計算結果を Fig. 7 に示す。補正前の力と階段関数との差が大きいセプトム境界近傍で電流の分布は有意な値を持ち、対照的に周回側の領域では有意な値を持たない事が確認できる。ガイド電極最適化前(初期)、ガイド電極最適化後(電極最適化)、最適化後に磁場で補正を加えた場合(補正)の装置内全区間におけるRMSEをTable 2に、電極によるクーロン力、磁場による補正力、及びそれらの合力のローレンツ力を電子の電荷で規格化した分布をFig. 8に示す。補正力を加えたローレンツ力は、セプトム境界付近の勾配が補正前と比べて大きくなり、より階段関数に近い力の分布になっていることが確認できる。

本節での結果から、磁場による補正力を加えることで、ビームのセパレートに重要であるセプトム境界近傍での力の勾配を大きく改善できるという結果が得られた。また、補正が必要な領域の周辺で電流値が有意な値を持つという結果から、今後は補正が必要な箇所の近傍のみに電線を配置するなど、電線の配置方法を再検討する。また、今回の計算では無限に長く太さが無い電線を想定したが、今後は有限の長ささと太さを持つ電線の場合について検討を行う。

Table 2: The RMSE Corresponding to Each Force in  $-0.08 \text{ m} \leq x \leq 0.08 \text{ m}$

力(x方向)	初期	電極最適化	磁場で補正
RMSE [kV/m]	1.93	0.68	0.32

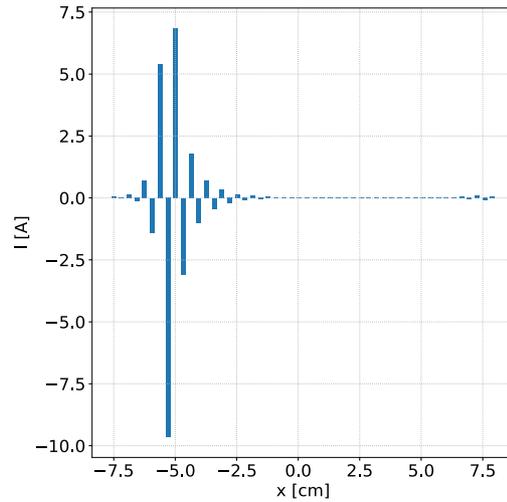


Figure 7: Current values of each electric wire pairs.

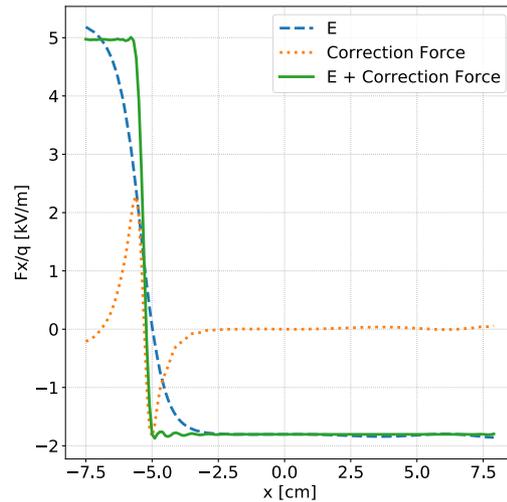


Figure 8: The calculated distributions of the Lorentz force per electron charge for the horizontal direction. Dashed (blue), dot (orange) and solid (green) lines mean the force due to the electric field, the force due to magnetic field for correction and the combined force due to both fields, respectively.

## 4. 非破壊型静電セプトム原理実証機

第2章では数値計算を利用して、考案した非破壊型静電セプトムにより、階段関数に対して二乗平均誤差 0.68 kV/m の電場分布が形成できることを示した。この結果を実験的に実証することを目的として、電場測定装置を考案した。電場を直接測定することは出来ないが、非破壊型静電セプトムに電子ビームを入射することで、電場により曲げられた電子ビームの軌道から間接的に電場を測定することができる。実際に開発した原理実証機の外観を Fig. 9 に示す。

Figure 9 の鉛直上方向をビーム取り出し方向として設定した。なお、現在本実証機の静電セプトムは電極のみであり、磁場による補正力を形成する機能は、現段階では備わっていない。本実証機の概略図を Fig. 10 に示す。Figure 10 に示すように電子銃の位

置をx方向に走査しながら、電子ビームの位置を3台のワイヤーモニタで測定する。測定したこれら3点のビーム重心位置の関係から電子ビームの軌道が得られ、その軌道変動を粒子軌道計算と比較する。現在は製作完了した実験装置を搬入し、実験に向けた装置の立ち上げを行っている。今後は本実証機を使用して電場分布の検証、電極印加電圧最適化手法の確認、計算モデルの検証を行う。加えて、本実証機を電場・磁場結合型へと改装し、磁場を加えることでビームの分離性能についての検証を行う。

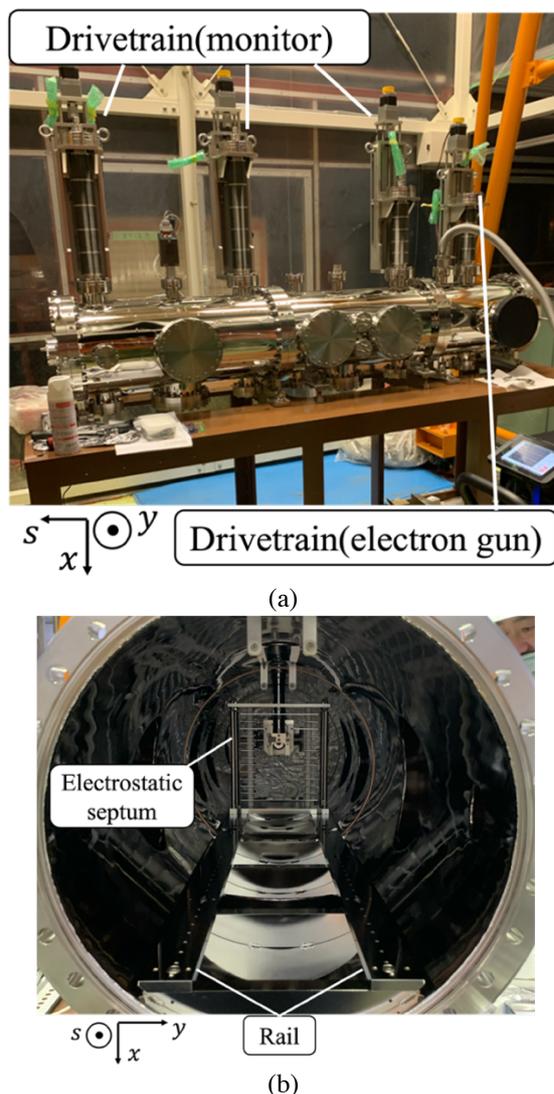


Figure 9: A view of (a) the outside and (b) the inside of our proof-of-principle demonstration device from the beam-travel direction.

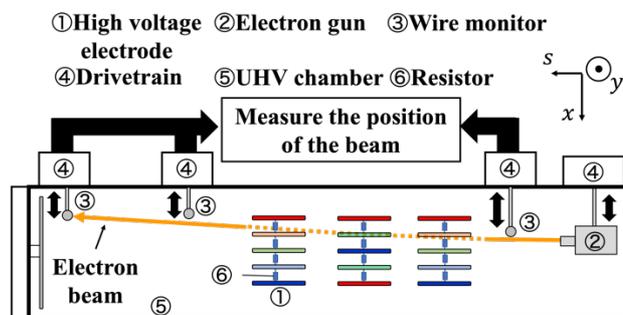


Figure 10: A schematic diagram of our proof-of-principle demonstration device with an electron beam.

## 5. まとめ

本研究では、非破壊でビームのセパレートを実現するために、「非破壊型静電セプタム」を考案した。目標の電場を形成するために重要な、非破壊型静電セプタムのガイド電極印加電圧の最適化方法を考案し、目標とする電場分布を形成できることを示した。

非破壊型静電セプタムは、放電の問題で電極の間隔や印加電圧への制限が生じている。この制限により、電場のみではセプタム境界付近での大きな電場勾配を達成できないため、十分なビームの分離能力を発揮出来ないという技術的な問題が生じていた。電極の上下に電線対を配置することで、電場に直交する磁場を補正力として加えてビーム分離性能を向上させる「電場・磁場結合型」を考案した。この機構は非破壊型静電セプタムの電極とは独立であるため、電極の印加電圧などの制限に干渉しない。磁場による補正の効果を計算した結果、電極のみの場合と比較して、ビームへ与えるローレンツ力分布を理想形である階段関数へより近づけることに成功し、ビームのセパレート性能が大幅に向上した。

今後、製作が完了した原理実証機を立ち上げ、磁場を加えた本手法を実証し、実用化に向けて開発を進める。

## 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、佐藤篤氏、泰中俊介氏のご助力に感謝いたします。本研究は ISPS 科研費 JP20K0399 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](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発機構, 特開2020-119644, 2020年8月6日.
- [4] CST Studio Suite; [https://www.aetjapan.com/software/CST\\_Overview.php](https://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php)