

## 非破壊型遅いビーム取り出し装置の開発状況

### STATUS OF NONDESTRUCTIVE DEVICE DEVELOPMENT FOR SLOW EXTRACTION

下川哲司<sup>\*A)</sup>、原田寛之<sup>B)</sup>、山本風海<sup>B)</sup>、佐藤篤<sup>C)</sup>

Tetsushi Shimogawa<sup>\*A)</sup>, Hiroyuki Harada<sup>B)</sup>, Kazami Yamamoto<sup>B)</sup>, Atsushi Sato<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>High Energy Accelerator Organization (KEK)

<sup>B)</sup>Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

<sup>C)</sup>Nippon Advanced Technology Co., Ltd. (NAT)

#### Abstract

Particle beams from accelerators such as synchrotrons have been used in physics experiments and in medical applications. In a slow extraction scheme that extracts beams from a synchrotron over many turns, the accelerated beam is slowly blown up, deflected, and separated by an electrostatic septum. The electrostatic septum creates an electric field and separates an extraction beam using electrodes and a septum. Generally, a wire or plate is used for the septum and beam loss caused when passing through it is inevitable. Consequently, the extraction efficiency and beam power are limited because of the beam loss and the device's radio-activation. We newly propose a non-destructive electrostatic septum, where multiple electrodes are arranged surrounding the beam and produce an electric field that deflects and separates the beam. This device does not involve any materials in the beam orbit area. We introduce the design of test model of our proposed non-destructive electrostatic septum.

#### 1. はじめに

シンクロトロン加速器では、加速したビームをリング内で周回させながら数秒の時間をかけて徐々に取り出す「遅い取り出し」があり、素粒子・原子核実験だけでなく放射線がん治療にも利用されている。遅い取り出しでは、周回するビームを徐々にひろげ、静電セプタム (ESS) により周回ビームと取り出しビームを分離し、取り出しビームを蹴り出す。静電セプタムの概念図を Fig. 1 に示す。静電セプタ

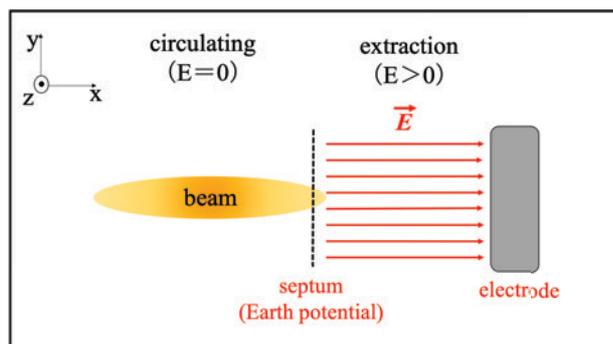


Figure 1: Schematic view of a current type ESS. (The beam has a positive charge.)

ムは、ビーム取り出し側と周回側の境界面に配置されたセプタム面 (アース電極) と高圧印加電極を超高真空内に配置されており、境界面を越えてひろげられたビームを、セプタム面と高圧印加電極間に生成された高圧電場によって取り出し側に蹴り出す機器である。しかしながら、現行の方式では、構造上、

周回ビームと取り出しビームの間にセプタム面があるため、セプタム面でのビームが衝突してしまうため、ビームロスは避けられない。特に、陽子や重粒子線ビームでは、ビームロスは機器の放射化に直結し、メンテナンスの妨げとなり出力ビーム強度を制限する。そのため、取り出し時のビームロスを抑えるために、主に2種類の手法がとられてきた。1つ目は、周回毎のビームのひろがる速度を上げ境界面を越える確率をあげる共鳴法 [1-3] や RF ノックアウト法 [4] 等の手法である。この方法は、1周回当たりに取り出されるビームの量も同時に変化してしまう。もう一つは、境界面でのビームの衝突確率、散乱確率を下げる方法である。セプタム面にリボンや細いワイヤーを採用 [5] したり、セプタム面の物質を原子番号の低い物質を採用 [6] した ESS の開発が行われている。こちらの手法の場合、ビーム衝突の際の熱負荷によるセプタム面の損傷の可能性が高くなってしまいます。実際に、セプタム面がビームの熱負荷により故障した事象もある [7]。そのため、熱負荷への耐久度が高くかつ軽い材質の採用やセプタム面の故障を想定した装置開発が主流である。

我々は、さらなる遅い取り出し時のビームロス低減を目指して、静電セプタムの弱点である境界面でのビームロスが発生しないビーム非破壊型の静電セプタムを提案した [8,9]。本稿では、原理実証試験を行うための小型試験機について報告する。

#### 2. ビーム非破壊型静電セプタム

これまで国内外で磁場を用いた非破壊型の分離が検討されていたが、非線形な漏れ磁場による周回ビームへの影響が大きいことがわかっており断念している [10]。そこで、我々は非破壊型残留ガスプロファイルモニタ (Ionization profile monitor (IPM) [11])

\* tetsus@post.j-parc.jp

を参考にした非破壊型静電セプタムを提案した。提案した非破壊型 ESS は、Fig. 2 に示すように、境界面には物質を配置せず境界面とビーム領域の外側両端に電極を配置し、境界面に対して矢印の向きに電場を形成する。さらに電極間に並べたガイド電極により電場の平行度、電場勾配を制御する。こうすることで、境界面に対して逆方向かつ取り出し方向に対して平行な電場を形成し、周回側、取り出し側にビームを非破壊的に分離、蹴り出すことを可能としたものである。提案した非破壊型 ESS のデザインを CST

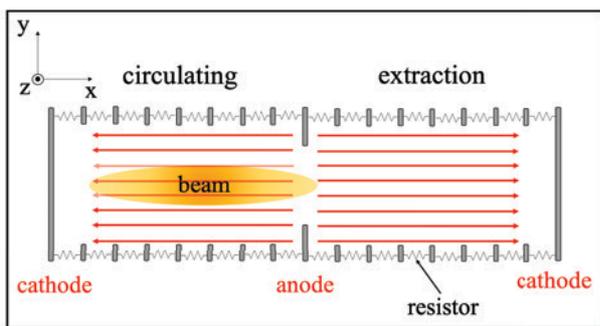


Figure 2: Schematic view of the nondestructive type ESS. Red arrows mean electric fields. The charge of beam is positive.)

Studio Suite[8] を用いた 3 次元電場解析による電場ポテンシャル分布および電場分布を Fig. 3 に示す。このとき、陽極に 30 kV、陰極に -25 kV、ガイド電極に陽極から陰極に向かってそれぞれ、15、5、-5、-15 kV をそれぞれ印加した。境界面の電極 (セプタム電極) を中心に対称でかつ平行な電場が形成できている。この平行電場は、周回ビームへ影響をおよぼすが、変更成分であれば補正は用意である。さらに、境界面の電極が張り出していることも重要で、セプタム電極周辺の四極成分を緩和する役目を担っている。

### 3. 原理実証用小型試験機のデザイン

提案した非破壊型 ESS の小型試験機 の概念図を Fig. 4 に示す。超高真空チャンバー内に、5 keV の電子銃、位置検出用のワイヤースキャナー、3 台の非破壊型 ESS (main device、sub device) を配置した。電子の入射位置、角度を調整できるように、x、y 方向への平行移動、回転が可能な架台に配置した。位置、角度を変更しながら、電子銃から出射した電子を非破壊型 ESS の上流下流に配置した検出器で検出することで積分電場を算出し、電場マップを測定する。3 台準備した非破壊型 ESS は、main device を中心として sub device を上下流に配置した。組み合わせによるビーム分離能力の検証、平行電場への周回ビームへの影響の補正の検証のために、電極への電圧印加用の電源をそれぞれ別にして、電場の強さやセプタム電極位置の変更を main device と独立に変更できるようにした。

例として、Fig. 5 に示すように、main device には、セプタム電極を中心に周回側、取り出し側にむかう電

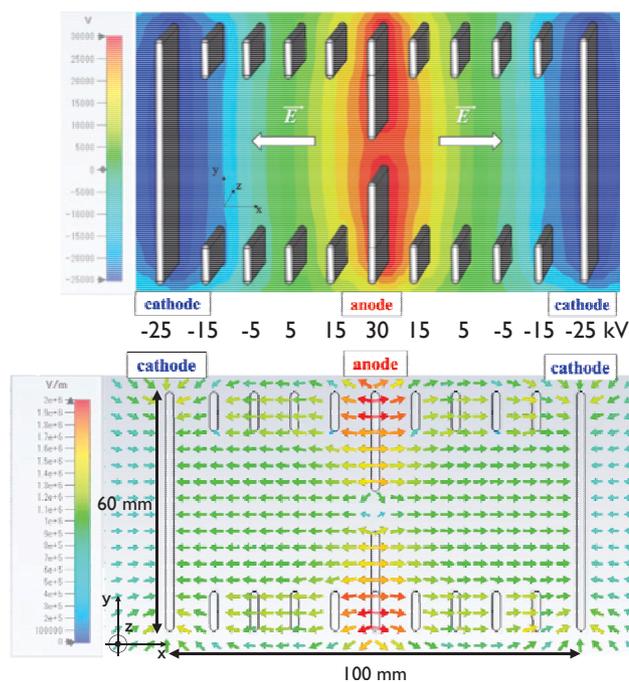


Figure 3: The result of 3D simulation for electric potential distribution (upper) and electric field distribution (middle) on transverse plane. Gray plates mean cathode, anode and guide electrodes. The bottom is horizontal electric field  $E_x$  on x-axis.

場を形成し、2 台の sub device は共に周回側から取り出し側の向きに電場を形成し、平行電場の周回ビームへ影響の補正を行ったシミュレーションを行った。このシミュレーションでは、電子銃から出射された電子は、 $-60 \text{ mm} \leq x \leq 60 \text{ mm}$ 、 $-1 \text{ mm} \leq y \leq 1 \text{ mm}$  の範囲で発生し、z 軸方向に直進するように設定している。また、セプタム電極は、 $x = -54 \text{ mm}$  に配置してある。Figure 6 に示すように、3 台の非破壊型 ESS でパンプ軌道を生じ、周回側では、再下流でパンプ軌道が閉じ、取り出し側ではビームを蹴出し軌道間隔がひろがっていることがわかる。また、最下流でのプロファイルをみるとわかるように、main device のみに電場を生成した場合、周回側に蹴出された周回側ビームが補正できていることがわかる。

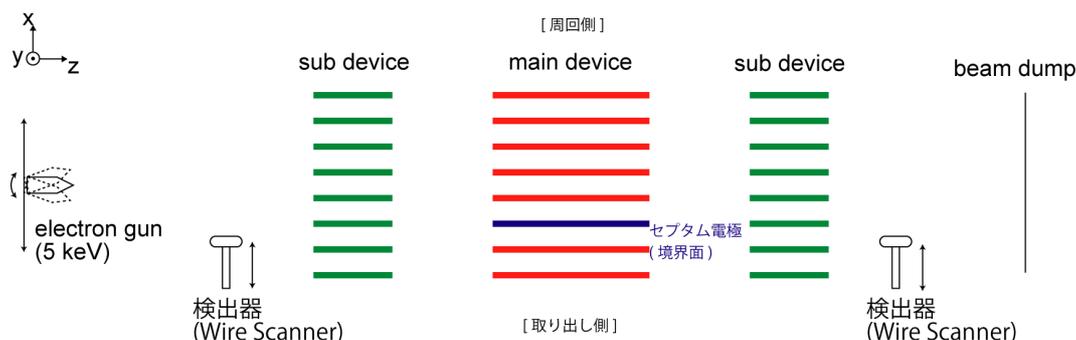


Figure 4: Schematic view of small test model of the nondestructive type ESS.

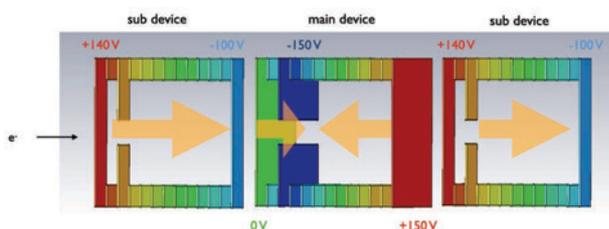


Figure 5: Schematic view of potential and direction of electric field in each device.

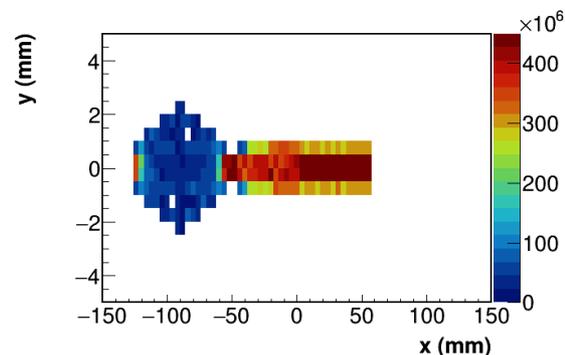
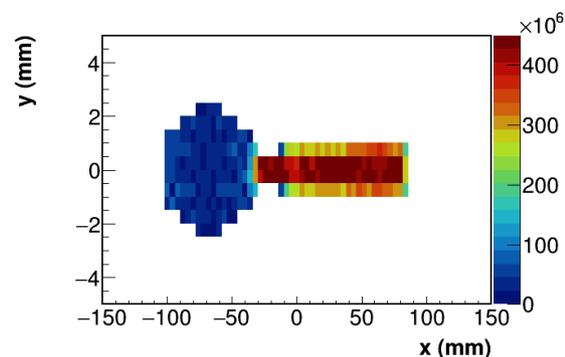
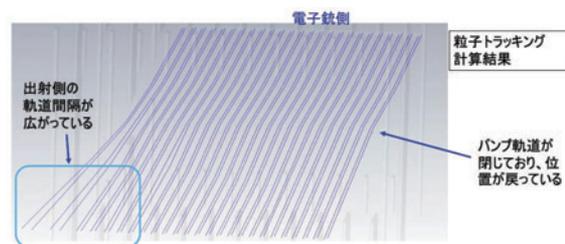


Figure 6: The result of tracking simulation of small test model (upper). The x-y profile on the downstream devices with/without correction bump orbit.

#### 4. まとめと今後

素粒子・原子核等の学術研究だけでなく放射線がん治療などの医療応用と世界中で、幅広く利用されている遅い取り出しビームの取り出し時のビームロス、機器の放射化によるメンテナンス性の悪化を引き起こし、ビーム強度を制限している。そこで、現装置に代わる新しいビーム非破壊型静電セプタムを提案し、電場計算および粒子飛跡計算を行い原理的に可能であることを見出した。現在、実用化に向けて計算した電場分布の正当性の確認するために原理実証用の小型機を製作中であり、今年度末から試験を開始する予定である。さらに小型機では、3台の独立な非破壊型 ESS を配置することで組み合わせによるビーム分離能力の向上や、周回ビームへの影響の補正等の検証も行うことを考えている。

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 20K03993 の助成を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] K. Hiramoto *et al.*, “Resonant beam extraction scheme with constant separatrix”, Nucl. Instr. and Meth. A322(1992) 154-160.
- [2] M. Tomizawa *et al.*, “Slow beam extraction at TARN II”, Nucl. Instr. Meth. Res. A326 (1993), p.399-406.
- [3] V. Nagaslaev, K.A. Brown, and M. Tomizawa, “Third integer resonance extraction with presence of higher multipoles”, Phys. Rev. Accel. Beams 22, 043501.
- [4] N. Carmignani *et al.*, “RF-KNOCKOUT EXTRACTION

- SYSTEM FOR THE CNAO SYNCHROTRON”, Proc. of IPAC’10, P.3891-3893 (2010).
- [5] Y. Arakaki *et al.*, “Electrostatic Septum for 50GeV Proton Synchrotron in J-PARC”, Proc. of IPAC’10, p.3900-3902.
- [6] D. Horikawa *et al.*, “STUDY OF ELECTROSTATIC SEP-

- TUM BY LOW-Z MATERIAL FOR HIGH INTENSITY PROTON BEAM”, Proceedings of the IPAC’12, p.484-486 (2012).
- [7] R. Muto *et al.*, “Current status of slow extraction from J-PARC Main Ring”, J. Phys. Conf. Ser. 1350 (2019) 1, 012105.
- [8] Hiroyuki Harada, patent pending, Japanese published examined application (2019-007318).
- [9] T.Shimogawa *et al.*, “Proposal of non-destructive device for slow extraction”, Proceedings of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug.3, 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)
- [10] Y. Yonemura *et al.*, “Beam extraction of the PoP FFAG with a massless septum”, Proc. of the PAC’03, p.1679-1681 (2003).
- [11] Hiroyuki Harada and Shinichi Kato, “The residual Gas Ionization Profile Monitor in the J-PARC 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron”, JPS Conf. Proc. 8 (2015) 012011.