

# 非破壊型遅いビーム取り出し装置の提案 PROPOSAL OF NON-DESTRUCTIVE DEVICE FOR SLOW EXTRACTION

下川哲司 \*<sup>A)</sup>、原田寛之 <sup>B)</sup>、

Tetsushi Shimogawa\*<sup>A)</sup>, Hiroyuki Harada<sup>B)</sup>

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

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

## Abstract

A particle beam from accelerator such as synchrotron has been applied not only to physics experiments but also medical applications. In the slow extraction which extract beam from a synchrotron during a large number of turns, the accelerated beam is blown up and slowly deflect and separate the beam with the electrostatic septum. The electrostatic septum consists of electrode and septum for separating the electric field between extraction and circulating beam. Generally, the wire or plate is used for septum. In this case, the beam loss hit by septum is inevitable. Consequently, the limitation of the extraction efficiency and the beam power caused by suppressing the radioactivation of devices. We propose the non-destructive electrostatic septum. The multiple electrodes arrange surround the beam and produce the electric field for separation and deflect the beam. There are no materials in the beam orbit area. This method is referred to ionization profile monitor. This will be reported introduction of our proposed non-destructive electrostatic septum.

## 1. はじめに

シンクロトロン加速器では、加速されたビームを周回させながら時間をかけて徐々に取り出す「遅い取り出し」[1]による素粒子・原子核物理実験さらには放射線がん治療が行われている。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) を使用して取出しビームと周回ビームを分離し蹴り出す。静電セプタムの概念図を Fig. 1 に示す。静電セプタムは、ビーム周回側とビーム取り出し側の境界に配置されたセプタム面 (アース電極) とビーム取り出し側に配置された高圧印加電極で構成された機器であり、その境界面を超えひろがったビームを電極間に生成した高圧電場により取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

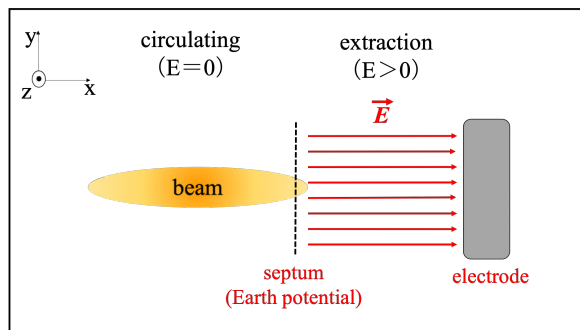


Figure 1: Schematic view of the present type ESS. (When the charge of the beam is positive.)

造上セプタム面へのビームが衝突しビームロスが避けられない。ビームロスは、機器の放射化を引きおこしメンテナンスの妨げとなり出力ビーム強度の制

限を制限する。そのため、取り出し時のビームロスを抑える手法として従来、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超える確立を上げる共鳴法やRFノックアウト法 [2] 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、セプタム面にリボンや細いワイヤーを採用する [3] ことでセプタム面への衝突確率を減らしたり、セプタム面に使用する物質に原子番号の低い物質を使用する [4] などの境界面での散乱確率を下げるといった手法である。こちらの場合、ビームの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ふ。実際に、J-PARC主リングではビーム調整中の大強度ビームがセプタムリボンに衝突し、リボンが切断してしまい電極とセプタムリボンが接触した事象も発生している。そのため、カーボンナノチューブ等の熱負荷に耐えられかつ軽い材質の採用や切断事象が発生することを想定した装置開発が主流である [5]。

そこで、さらなる遅い取り出し時のビームロス低減を目指して、現行の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静電セプタムを提案し、シミュレーションによる原理検証を行った。

## 2. ビーム非破壊型静電セプタム

これまで国内外で電磁石の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。そこで、非破壊型残留ガスプロファイルモニタ (Ionization profile monitor (IPM) [6]) を参考にした非破壊型静電セプタムを提案した。提案する装置は、Fig. 2 [7] に示すように、境界面には何も物質を配置せず、境界面とビームの両端に電極を配置し境界面に対して Fig. 2 中の矢印のように外側 (も

\* tetsus@post.j-parc.jp

しくは内側)に電場を形成する。さらに、電極間にガイド電極を並べ抵抗器によって接続することで、電場の平行度、電場勾配を制御することを可能にする。そうすることにより、境界面に対して逆方向かつ取り出し方向に平行な電場を形成し、周回側と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するものである。

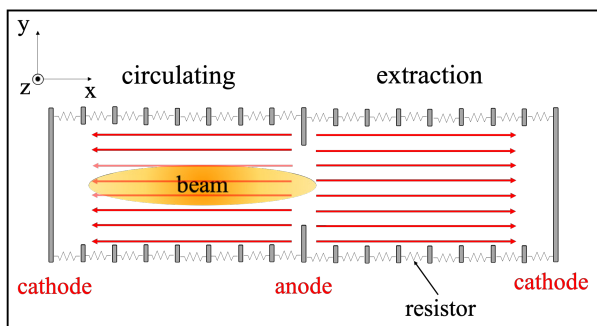


Figure 2: Schematic view of the nondestructive type ESS. (When the charge of the beam is positive.)

### 2.1 シミュレーションによる原理検証

提案するビーム非破壊型静電セパタムのデザインを CST Studio Suite [8] を用いた 3 次元電場解析および 3 次元粒子軌跡計算による検証を行った。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、15kV、5kV、-5 kV、-15 kV 印加したときの電場ポテンシャル分布および電場分布を Fig. 3 に示す。境界面を境に逆方向の平行電場を形成できていることを確認できた。この平行電場は周回ビームにも影響をあたえるが、偏向成分であれば下流の他の磁石での補正も容易であると考えている。さらに、境界面近傍付近では四極成分が発生しているが、境界面の電極を中央方向にはりだすことで四極成分を緩和することができる。そのため、平行電場を生成するために電極の大きさ、ガイド電極の数量、間隔、分圧比の最適化が実機を製作する上で重要になってくる。

さらに、ビームを周回側、取り出し側へ分離できるだけの蹴角を評価するために、30 GeV の陽子をビーム非破壊型静電セパタムに入射したときの粒子の飛跡計算結果を Fig. 4 に示す。入射した陽子は、水平方向に  $\pm 1$  cm の間に一様に分布し、Z 方向に直進するという初期条件で飛跡計算を行った。提案する機器で発生させた平行電場によって境界面を中心にビーム周回側と取り出し側へビームを蹴り出し、分離できていることが確認できた。この結果は、遅い取り出しで原理的に発生するセパタム面との衝突によって生じるビームロスや低減できる可能性を示唆している。

### 3. まとめと今後

遅い取り出しビームは、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にも

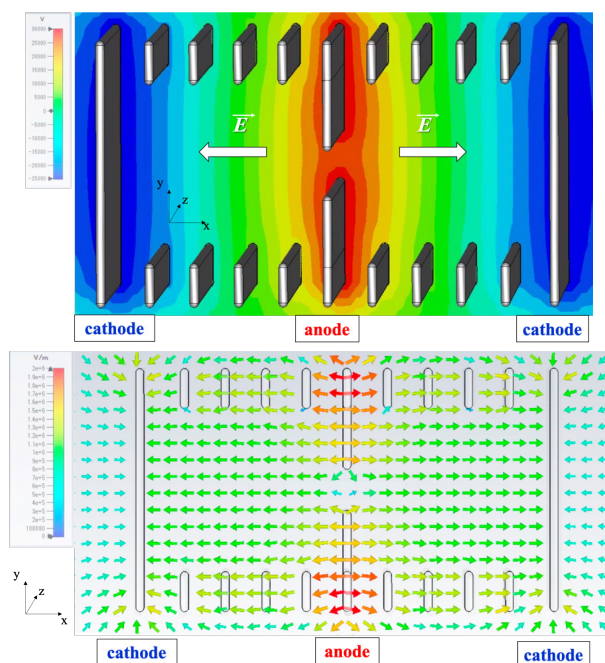


Figure 3: Potential distribution (upper) and Electric field distribution (bottom).

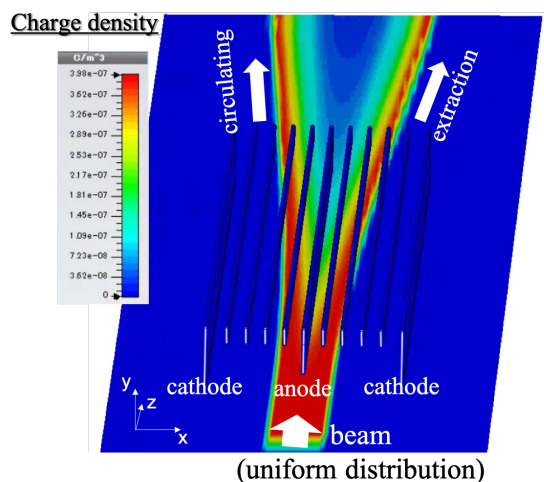


Figure 4: Result of the tracking simulation with 30 GeV proton.

利用されており、世界中で幅広く利用されている。現状、ビーム取り出し時に原理的に発生するビームロスや避けられず機器の放射化によるメンテナンス性の悪化、ビーム強度に制限がかかっている。そこで、現装置に代わる新しいビーム非破壊型静電セパタムを提案し、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。今後、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シミュレーションによる検証を進めるとともに、ベンチテスト用の小型実証機的设计をシミュレーションにより進めていく。

## 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] Y. Arakaki *et al.*, “Electrostatic Septum for 50GeV Proton Synchrotron in J-PARC”, Proc. of IPAC’10, p.3900-3902.
- [4] D. Horikawa *et al.*, “STUDY OF ELECTROSTATIC SEPTUM BY LOW-Z MATERIAL FOR HIGH INTENSITY PROTON BEAM”, Proceedings of the IPAC’12, p.484-486 (2012).
- [5] Y. Arakaki *et al.*, “An improvement and high voltage test of Titanium-ESS in J-PARC MR”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 7-10, 2018, pp.329-332;  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEPO/WEPO18.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEPO/WEPO18.pdf)
- [6] K.Satou, *et al.*, “IPM Systems for J-PARC RCS and MR”, HB2010, p.506 (2010).
- [7] H. Harada *et al.*, Patent pending.
- [8] [https://www.aetjapan.com/software/CST\\_Overview.php](https://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php)