

J-PARC MR におけるビーム散乱体を用いた遅い取り出しビームロス低減手法の検討

SIMULATION STUDY OF BEAM SCATTERER FOR BEAM LOSS MITIGATION IN SLOW EXTRACTION AT J-PARC MR

武藤亮太郎^{#, A)}, 新垣良次^{A)}, 木村琢郎^{A)}, 村杉茂^{A)}, 岡村勝也^{A)}, 白壁義久^{A)}, 富澤正人^{A)}, 柳岡栄一^{A)}
Ryotaro Muto^{#, A)}, Yoshitsugu Arakaki^{A)}, Takuro Kimura^{A)}, Shigeru Murasugi^{A)}, Katsuya Okamura^{A)},
Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Masahito Tomizawa^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK), 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 301-0801 Japan

Abstract

We performed simulation studies of the beam scatterer for the beam loss mitigation in the slow extraction from the J-PARC Main Ring. In the J-PARC MR slow extraction, the largest beam loss occurs at the electrostatic septum (ESS), which is located at the most upstream of the slow extraction straight section. Suppressing this largest beam loss is crucial to realize the slow extraction with larger beam power. A beam scatterer, which is placed at the upstream of the ESS and deflects the protons travelling toward the septum ribbons of the ESS, is one possibility to reduce such beam loss. Thus we performed simulation studies and found that in the best case the total amount of the beam loss can be reduced by 36 % compared to the beam loss without the scatterer.

1. はじめに

J-PARC(茨城県東海村)[1] の 30 GeV 陽子シンクロトロン(以後 J-PARC 主リングと呼ぶ)では、ハドロン実験施設における素粒子・原子核物理実験に向けて遅い取り出しビームを供給しており、この遅い取り出しビームのさらなる大強度化を目指して性能向上の努力が続けられている。陽子シンクロトロンからの遅いビーム取り出しにおいてはビームロスが原理的に不可避である。それはビームを削り出す役割を担う静電セプタム(ESS)のセプタム電極に必ずある割合でビームが当たってしまうからである。このビームロスは加速器の機器の放射化を引き起こすため、大強度ビームの遅い取り出しを目指す際には如何に ESS でのビームロスを低減するかが最も重要な課題の 1 つとなる。

本研究では、ESS のセプタム電極の上流にビーム散乱体を設置することにより、セプタム電極にヒットするビーム量を減らし、ビーム散乱体によるものとセプタム電極によるものを合わせた総ビームロス量を、ESS 単体で運転した場合に比べて低減することが出来ないか、計算コード MARS[2]を用いたシミュレーションによって検討した。散乱体のビーム軸方向の長さを増やせばセプタム電極に当たる陽子の数は減らすことが出来るが、散乱体そのものによるビームロスは増えていってしまうため、総ビームロス量を低減出来るかどうかは自明ではない。そこで、散乱体の素材、ビーム軸方向の長さ、設置位置について、総ビームロス量を指標として最適値の探索を行った。

2. 静電セプタムの概要

静電セプタム(ESS)のセプタム電極は、ビーム軸方向に 1500 mm の長さを持つコの字型のコアに、厚さ 30 μm 、幅 1 mm のタングステン-レニウム合金製リボン

のすき間をあけて 500 本張ることで構成されている。そのセプタムリボンと向かい合う位置にチタン製の電極が保持されている。電極間の距離は 25 mm であり、104.4 kV(30 GeV 運転時)の電圧が印加される。Figure 1 はビームの下流側から撮影した ESS のセプタムリボンと電極である。

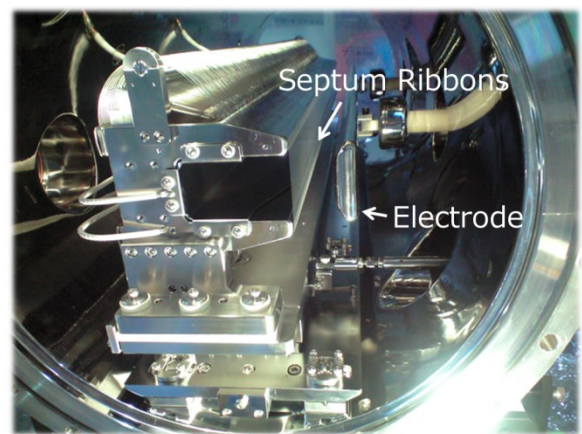


Figure 1: Photo of the electrostatic septum in vacuum chamber at J-PARC Main Ring.

周回ビームはコの字の内側を周回し、3 次共鳴によって振幅の増大したビームの一部がリボンを超えて電極間の高電圧によりキックされる。電極およびセプタムリボンは長さ 2090 mm の真空チェンバー内に設置されている。500 本のリボンのビームと直角方向の位置変位は 50 μm 以内におさまっており、これよりセプタム電極の実行厚は約 80 μm となっている。このセプタムリボンに衝突する陽子数を減らすことが、散乱体設置の目的である。

[#] ryotaro.muto@kek.jp

3. 散乱体に適した素材

散乱体の中に入射された陽子ビームは、散乱体原子のクーロン電場との multiple scattering によりおおよそ式 (1) のような角度広がりをもつ。[3]

$$\Theta_{\text{ms}} \approx \frac{13.6\text{MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \quad (1)$$

ここで X_0 は radiation length であり、 x/X_0 は radiation length を単位とした散乱体のビーム軸方向の長さである。 x/X_0 を一定にしておけば素材によらず multiple scattering による小角度の散乱の大きさはほぼ同じになる。この角度広がりを利用して、セプタム電極にヒットする確率を低減させることが、散乱体設置の目的である。一方、入射した陽子が散乱体の原子核との強い相互作用によって散乱される確率は nuclear interaction length λ_T を単位とした散乱体の長さ x/λ_T におおよそ比例する。Table 1 に典型的な物質の radiation length と nuclear interaction length を、密度でわって長さの次元にした値で示した。

Table 1: Radiation Lengths X_0 and Nuclear Interaction Lengths λ_T for Typical Materials

Material	Z	A	X_0/ρ [cm]	λ_T/ρ [cm]
Be	4	9	35.3	29.9
C	6	12	19.3	26.8
Ti	22	48	3.6	17.4
W	74	184	0.35	5.7

おおざっぱに言って、radiation length は Z の 2 乗に反比例し、nuclear interaction length は質量数 A の 2/3 乗に反比例するような量であるため、 x/X_0 は一定という条件で各物質を比較すると、質量数の大きな原子を用いて散乱体を製作したほうが原子核散乱によるビームロスを低く抑える観点から有利である。散乱体の素材としてベリリウム(原子番号 4)とタングステン(原子番号 74)を用いた時の入射陽子の散乱角分布の比較を Figure 2 にしめす。

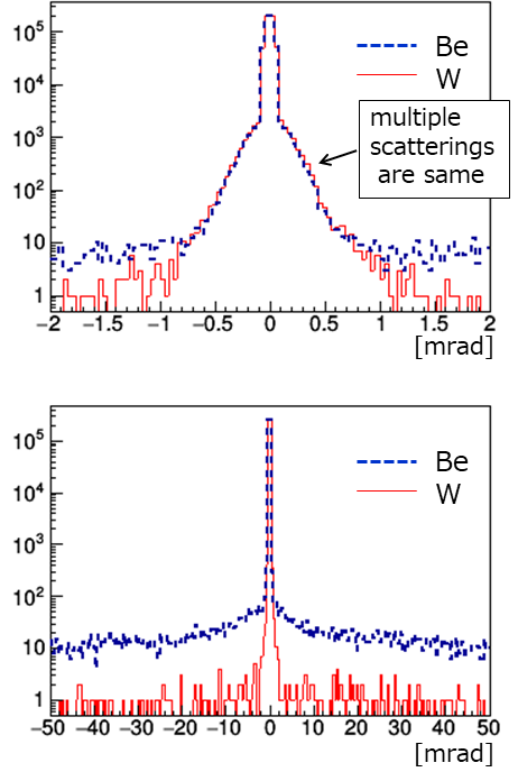


Figure 2: MARS calculation results for the angle distributions of scattered protons with two different scatterer materials. The data in upper and lower panels are same but the lower has wider range in the horizontal axis.

この比較では、 x/X_0 がほぼ同一になるように、ビーム軸方向の長さはベリリウムの場合 50 mm、タングステンの場合は 0.5 mm としている。multiple scattering による小角度散乱の分布はどちらの素材でもほぼ同じになるが、大きな角度を持って散乱される陽子の数はタングステンの方が少ないことがわかる。本研究では、原子番号の大きさと融点の高さから、散乱体の素材として ESS のセプタムリボンと同様にタングステンを用いることとして検討を行った。

4. 散乱体のサイズと位置の MARS による最適化

4.1 静電セプタムの真空チェンバーの上流に散乱体を設置する場合

まず、現在 J-PARC 主リングに設置されている静電セプタムおよびその真空チェンバーをそのままの形で使用し、その上流に散乱体を付加する場合について検討を行った。この場合、静電セプタムの真空チェンバーは長さ 2090 mm であり、その上流に散乱体を保持するチェンバーをフランジで接続する形をとるため、散乱体をセプタム電極にもっとも近づけて設置した場合でも、設置位置はセプタムリボンの上流端から 500 mm 程度上流になる。そこで、セプタムリボンより 500 mm 上流に散乱体を設置した場合について、散乱体のビーム軸方向の長さの最

適値の検討を行った。この検討ではセプタムリボンの厚さを $50\ \mu\text{m}$ とし、素材は純タングステンとした。またセプタムリボンは $1\ \text{mm}$ 幅のリボンが $2\ \text{mm}$ の間隔をあけて設置されている構造のため、密度をタングステンの $1/3$ の $6.43\ \text{g/cm}^3$ として計算を行っている。その $500\ \text{mm}$ 上流に同じく厚さ $50\ \mu\text{m}$ のタングステン製散乱体を設置し、総ビームロス量を MARS を用いて算出した。計算におけるセプタムリボンおよび散乱体の配置図を Figure 3 に示す。

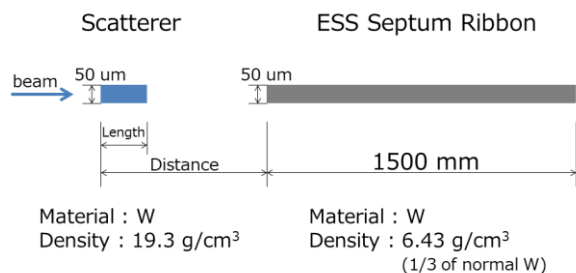


Figure 3: Schematic top view of the configuration of the beam scatterer and the ESS septum ribbon.

ビームの初期条件は、SAD[4]による取り出しのシミュレーションに基づき決定した。たとえば水平方向の dx/ds は全幅 $0.1\ \text{mrad}$ の一様分布としている。ビームロス量は、ESS のセプタムリボンの下流端において、J-PARC 主リングのアーチャー $81\ \pi\ \text{mm}\cdot\text{mrad}$ の中に入り、かつ $\Delta p/p < 0.3\%$ のものを生き残り陽子数とし、初期条件における発生陽子数からの減少分をビームロスとして評価した。Figure 4 に計算結果を示す。横軸は散乱体のビーム軸方向の長さであり、縦軸はビームロスと、ESS のセプタムリボンに衝突する陽子数の、散乱体を設置しないときに対する比である。

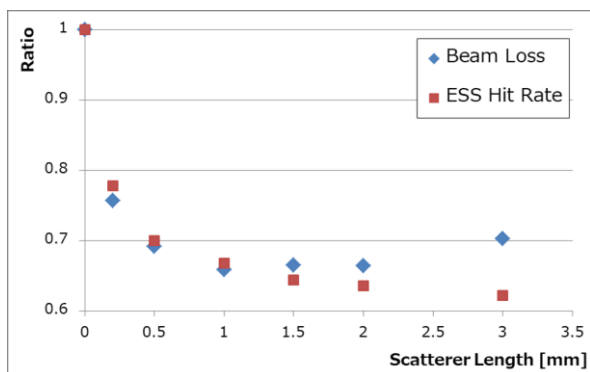


Figure 4: The simulation results of the total beam losses and the hit rates on ESS septum ribbon with various scatterer lengths. The total beam loss has minimum value around the scatterer length of $1\ \text{mm}$.

散乱体の長さを $0\ \text{mm}$ から増やしていくと、ESS のセプタムリボンに衝突する陽子数は減っていき (Figure 4 内の ESS Hit Rate)、これが効いてビームロス量も減っていくが、散乱体自体によるビームロスは増えていくため、散乱体の長さが $1\ \text{mm}$ 程度を超えると総ビームロス量は逆に増えてしまうことがわ

かる。総ビームロス量の最小値は散乱体を置かない場合の約 66% であり、散乱体を設置することによってビームロスを有意に低減出来ることがわかった。また式(1)によれば、長さ $1\ \text{mm}$ の散乱体における multiple scattering による角度の広がり約 $0.24\ \text{mrad}$ である。

4.2 散乱体の設置位置を自由に動かした場合

次に、散乱体の設置位置を自由に動かして、よりビームロスを低減することが出来ないか検討を行った。計算の諸条件は 4.1 節の検討と同様であるが、散乱体の設置位置 (Figure 3 の "Distance") を $500\ \text{mm}$ から変化させ、それぞれの設置位置について散乱体のビーム軸方向の長さをスキャンし、ビームロスが最小になる組み合わせを探した。Figure 5 に結果を示す。

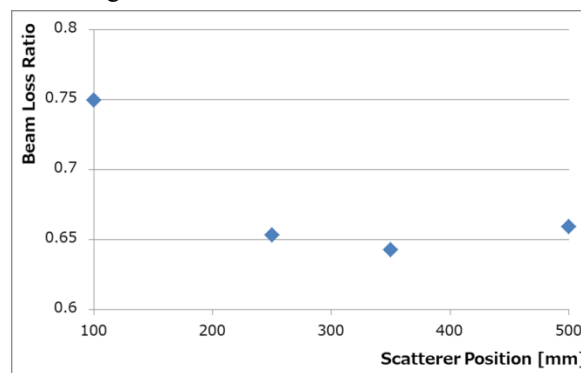


Figure 5: The simulation results of the total beam losses with various scatterer positions. The length of the scatterer is optimized individually for each scatterer position.

結果として、散乱体をセプタムリボンの上流端から $350\ \text{mm}$ の位置に設置したときにビームロスが最小になることがわかった。この位置では、総ビームロス量を最小にする散乱体のビーム軸方向の長さは $1.5\ \text{mm}$ であり、そのとき総ビームロス量を散乱体を置かない場合とくらべて約 64% に低減できることがわかった。

5. まとめ

MARS を用いたシミュレーションにより、J-PARC 主リングからの遅い取り出しに用いる静電セプタムでのビームロスをビーム散乱体を用いて低減することができないか検討を行い、以下の結果を得た。

- 散乱体の素材は原子番号の大きいもののほうが有利である。
- 散乱体としてタングステンを用いた場合の検討を行い、静電セプタムの上流 $500\ \text{mm}$ の位置に散乱体をおいた場合は、ビーム軸方向の長さ $1\ \text{mm}$ の散乱体で総ビームロス量を約 34% 低減できる。散乱体の位置を自由に選べる場合は、散乱体の位置を静電セプタムの上流 $350\ \text{mm}$ 、ビーム軸方向の長さ $1.5\ \text{mm}$ とした場合にもっともビームロス量を小さくでき、そのとき総ビームロス量は約 36% 低減することができた。

今後の課題としては

- ビームロス量だけでなく、周辺の電磁石、ビームダクト、真空チェンバーなどの物質の残留線量による散乱体の効果の評価
- より現実に近いビームロス量を得るための、散乱された粒子を入力とした加速器全体のシミュレーション

がある。

参考文献

- [1] Joint Project Team of JAERI and KEK, KEK Report 99-4 (1999) and JAERI-Tech 99-056 (1999).
- [2] N. V. Mokhov *et al.*, “Recent Enhancements to the MARS15 Code,” Technical Report Fermilab-Conf, 04/053, 2004.
- [3] Claus Grupen and Boris Shwartz, “Particle Detectors Second Edition”, Cambridge University Press, 2008.
- [4] SAD home page; <http://acc-physics.kek.jp/SAD/>