

GeV 領域エネルギー電子を使った測定器開発用テストビームラインの ワイヤーターゲットが PF-AR の蓄積ビームおよび 入射ビームに与える影響 (2)

EFFECT OF THE GeV-RANGE TEST BEAMLINE WIRE TARGET ON THE STORED AND INJECTED BEAMS AT KEK PF-AR (2)

高木宏之^{*A)}, 満田史織^{A)}, 本田融^{A)}, 内山隆司^{A)}, 坂中章悟^{A)}, 佐々木洋征^{A)}, 谷本育律^{A)},
内藤大地^{A)}, 中村典雄^{A)}, 長橋進也^{A)}, 野上隆史^{A)}, 山本尚人^{A)}, 池上陽一^{A)}, 宇野彰二^{A)},
佐藤康太郎^{A)}, 外川学^{A)}, 中村勇^{A)}, 花垣和則^{A)}, 幅淳二^{A)}, 森隆志^{A)}, 安部草太^{B)},
寺村七都^{B)}, 前田順平^{B)}, 小田川高大^{C)}, 鷺見一路^{D)}, 前田朱音^{D)}

Hiroyuki Takaki^{*, A)}, Chikaori Mitsuda^{A)}, Tohru Honda^{A)}, Takashi Uchiyama^{A)}, Shogo Sakanaka^{A)}, Hiroyuki Sasaki^{A)},
Yasunori Tanimoto^{A)}, Daichi Naito^{A)}, Norio Nakamura^{A)}, Shinya Nagahashi^{A)}, Takashi Nogami^{A)}, Naoto Yamamoto^{A)},
Yoichi Ikegami^{A)}, Shoji Uno^{A)}, Kotaro Satoh^{A)}, Manabu Togawa^{A)}, Isamu Nakamura^{A)}, Kazunori Hanagaki^{A)},
Junji Haba^{A)}, Takashi Mori^{A)}, Sota Abe^{B)}, Natsu Teramura^{B)}, Jumpei Maeda^{B)}, Takahiro Odagawa^{C)},
Kazumichi Sumi^{D)}, Akane Maeda^{D)}

^{A)} High Energy Research Organization (KEK), ^{B)} Kobe University,

^{C)} Kyoto University, ^{D)} Nagoya University

Abstract

A test beamline for particle physics detector development has been constructed at KEK PF-AR, where a wire target is installed in the storage ring to generate GeV-energy electrons using bremsstrahlung from the stored beam. This test beamline will be operated in parallel with synchrotron radiation experiments. Therefore, it is necessary to avoid the influence of the target on the stored beam and the injection beam. If part of the stored beam is lost due to interaction with the target, the beam lifetime will be shortened. In addition, top-up injection has been implemented in the PF-AR since the construction of the direct injection path from the KEK LINAC in 2017. Then, it is also important that the radiation of the injection beam is damped and merged with the stored beam without beam loss. In this presentation, the effect of the target on the stored beam and the injection beam is evaluated using the particle tracking method.

1. はじめに

素粒子原子核実験用測定器開発において、測定機器に粒子線を照射し評価することは大変重要である。Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) では、蓄積リング内に設置したワイヤーターゲット (ターゲット) に蓄積ビームを当て、そこから発生する制動放射を利用して GeV 領域の電子を生成し取り出す事を目的とした素粒子原子核実験用測定器開発のテストビームライン (AR-TBL) を建設した [1, 2]。

設置したターゲットは Fig. 1 に示すようなコの字型をしたフォークの先にワイヤーを張った形状をしている。ステッピングモーターを使った駆動機構により、このフォーク構造全体を蓄積ビームに対して近づけたり、影響がない位置まで遠ざけることが 1 μm のステップで可能となっている。

PF-AR は放射光施設であるため限られた運転期間を AR-TBL だけに使う事ができず、放射光実験と並行して運用する必要がある。そこで、ターゲットが蓄積ビームへ影響を与えて放射光の品質を悪化させない事が重要となる。また、2017 年には KEK LINAC から PF-AR への直接入射路が建設され [3]、PF-AR でもトッ プアッ

プ入射が実施されている。ターゲットには水平方向の駆動機構があるものの、トッ プアップ運転中の入射時のみターゲットを抜く事は速度的に難しいため、入射ビームに対する影響がない事も重要となる。

今回、蓄積ビームおよび入射ビームに対するターゲットの影響を粒子トラッキングを使って評価したので報告する。



Figure 1: ワイヤーターゲットの形状。

2. 蓄積ビームへの影響

GeV 領域エネルギー電子の生成量を多くするにはターゲットと蓄積ビームの相互作用で発生する制動放

* hiroyuki.takaki@kek.jp

射を増やせばよく、ターゲットをビーム軌道中心に近づけた方が有利となる。一方、ターゲットとの相互作用により発生する制動放射によって蓄積ビームはエネルギーを失い、その損失量がバケットハイトを超えた電子は失われビーム寿命は短くなる。ターゲットをどこまで近づける事ができるかはビーム寿命との兼ね合いとなる。

許容できるビーム寿命を 20 時間とすると、相当する電子損失レートは 6.5×10^6 electron/s となる [1]。ただし、ターゲットに衝突した電子がバケットハイトを超えてしまう確率は 0.26% であるので、この電子損失レートを発生させるために必要な衝突レートは 2.5×10^9 electrons/s となる。ターゲットの形状を水平方向に幅 0.1 mm で垂直方向に無限に伸びた平面とし、蓄積ビームが $1\sigma = 2.0$ mm のガウス分布をすると仮定すると、蓄積ビームの軌道中心からの距離と衝突レートおよびビーム寿命の関係は Fig. 2 のようになる。 2.5×10^9 electrons/s の衝突レートを満たすターゲットの挿入位置は蓄積エネルギー 5 GeV においては 10.8 mm (5.4σ) となる。ターゲットの挿入位置が蓄積ビーム中心から 5.4σ 離れているため蓄積ビームへの影響も小さいと考えられる。ただ、入射時に入射バンプが閉じずに蓄積ビームが振動することになれば、ターゲットがより蓄積ビーム中心に接近することになるため、最終的には実機によるビーム試験を通して影響を調べる必要がある。

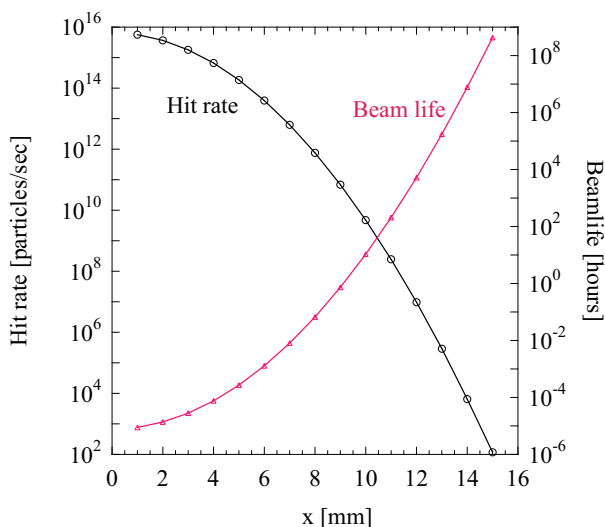


Figure 2: 蓄積ビーム軌道中心からの水平距離とターゲットとの衝突レートおよびビーム寿命の関係。ビーム寿命は衝突レートから算出される電子損失レートのみを使用。蓄積電流はシングルバンチモードで 60 mA を仮定。

3. 入射ビームへの影響

短時間でターゲットを抜き差しできないため、トップアップ運転中のターゲットは入射中も蓄積ビームの中心から 10.8 mm の位置に留まることになる。したがって、ターゲットとの散乱によって入射ビームが失わ

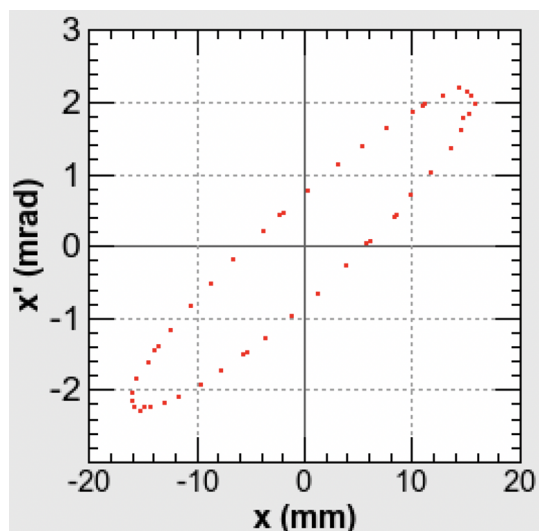


Figure 3: ターゲット設置点において入射直後の入射ビームの重心振動を 50 ターン分プロットしたもの。水平方向の最大値は 16.1 mm で、ターゲット位置である 10.8 mm の外側まで振動している。

れないことが重要である。

入射点における水平方向のベータ関数は 18.8 m、ターゲット設置点では 20.7 m であるため、ターゲット設置点での入射ビームは入射点における振幅とほぼ同じ振幅でベータatron振動する。入射直後の入射ビームの重心の軌道は、Fig. 3 に示すようにターゲット位置において最大で 16.1 mm の振幅を持ち、ターゲット ($x = 10.8$ mm) を跨ぐように振動することになる。したがって、入射ビームは放射減衰して蓄積ビームにマージされる間に、何度もターゲットと衝突することになる。

入射ビームが失われることなくターゲットの内側に放射減衰できるのかを確認するために、粒子トラッキングコードである SAD [4] 使用してシミュレーション

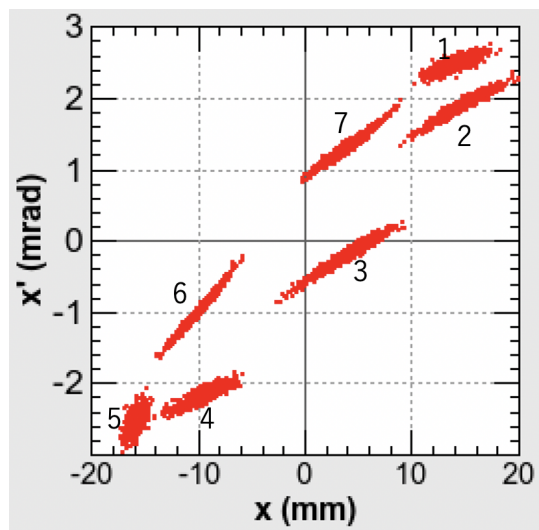


Figure 4: ターゲット設置点における入射ビームのターン毎の振る舞い。プロット横の数字はターン数。

をした。初期入射ビームはガウス分布するものとし、入射点での初期広がりには 3σ までとした。入射ビームが、最初の数ターン間にターゲット設置点でどのように振る舞うかを示したのが Fig. 4 である。

ターゲット形状は、水平方向に 0.1 mm の幅を持ち、ビーム進行方向に厚さ 0.1 mm、垂直方向に物理口径と同じ長さを持つとした。ターゲットの材質としてはカーボンとタングステンの 2 種類で計算をおこなった。タングステンはカーボンに比べて重く約 50 倍の制動放射を発生するため、ターゲットの発熱に対する問題を考えない場合は有力な候補となる。SAD には制動放射によるエネルギー損失をシミュレートする機能がないため、入射ビームがターゲットに衝突したと判定されると一旦トラッキングを中断し、予め用意したエネルギー損失の累積分布関数を使って乱数で失うエネルギーを決め、衝突した粒子にエネルギー損失を与えた上でトラッキングを再開する方法を使った。エネルギー損失テーブルは、GEANT4 [5] を使って作成した。5 GeV の電子が厚さ 0.1 mm のカーボンターゲットに垂直に衝突した際に発生する制動放射のエネルギーの累積分布関数は Fig. 5 のようになる。発生する制動放射の 99.5% は 2.5 MeV ($dE/E = 5 \times 10^{-4}$) 以下であることが判る。同様のものをタングステンに対しても用意した。線形加速器からの入射ビームの全てがちょうど 5 GeV のエネルギーを持つわけではなく、0.1% 程度のエネルギー広がりをもっている。その全てのエネルギーに対して累積分布関数を用意することはできないので、カーボンとタングステンに対してそれぞれ 5 GeV における累積分布関数を標準分布とし、衝突粒子が持つエネルギーに対してスケールすることで損失エネルギーを決めた。

水平方向の放射減衰時間は 5.4 msec であり、これは

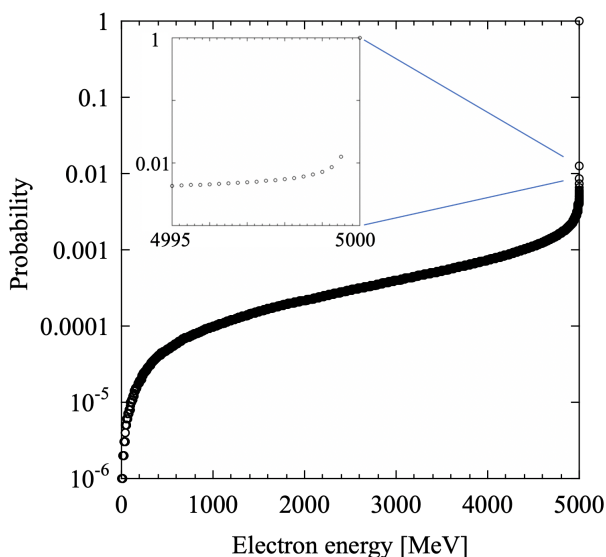


Figure 5: 厚さ 0.1 mm のカーボンターゲットに衝突後の電子のエネルギーの累積分布関数。横軸は 0.25 MeV 刻み。図中左上の拡大図は電子エネルギーが 4995 から 5000 MeV 間の拡大図。約 99% が 4999.75 MeV 以上のエネルギーを持ってターゲットを通過する。

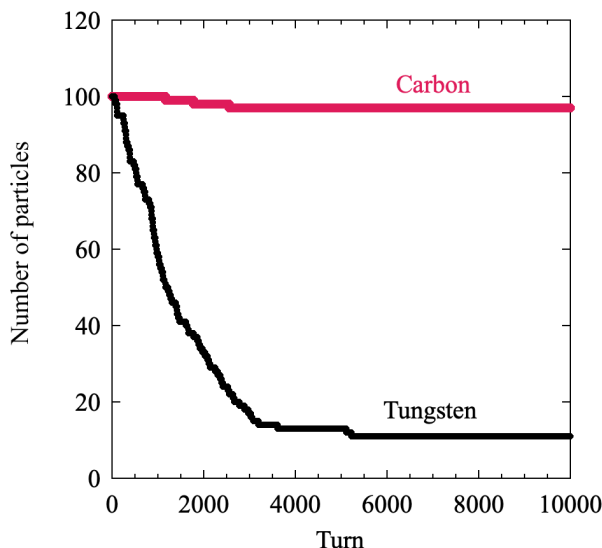


Figure 6: ターゲットを挿入した状態での入射ビームの生存粒子数。カーボン製およびタングステン製のターゲットを比較した。は初期粒子数は 100。水平方向の放射減衰時間は 4300 周に相当する。

4300 ターンに相当する。ターゲットに衝突する度に累積確率分布テーブルを参照する必要があることと、放射減衰の様子をみるため 1 万ターンに渡ってトラッキングを行うには時間がかかるので、入射粒子として 100 粒子の振る舞いを調べる事にした。計算結果は Fig. 6 のようになり、カーボンの場合はほぼ入射ビームを失うことなく放射減衰するが、タングステンでは放射減衰する前に大きく入射ビームを削ることがわかる。この結果から、カーボン製のターゲットであれば入射可能と考えられる。また、入射ビームの 10% しかタングステン製のターゲットを通過できないことを考えると、タングステンを使用する場合は入射ビーム軌道の外側 (Fig. 4 から蓄積ビーム中心から 20 mm 以上外側) に設置する必要があり、実用的なフラックスを得ることができなくなる。

4. まとめ

AR-TBL のターゲットが PF-AR の蓄積ビームおよび入射ビームに対してどのような影響を与えるのかについて、粒子トラッキングを用いて評価した。蓄積ビームに対しては、ターゲットの挿入位置がビーム中心から 5.4σ 離れているので影響は小さいと考えられる。また、入射ビームに対しても、カーボン製のターゲットを使用する場合はビームをほぼ失う事なく放射減衰するという結果になった。ただし、今回の検討は蓄積ビームの軌道や入射ビームのエネルギーが変動しないという条件下でのものであるため、今後はビーム試験を行いどのようなか検証する予定である。

参考文献

- [1] T. Honda *et al.*, “PF-AR の測定器開発テストビームライン建設計画”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of

- Particle Accelerator Society of Japan, QST-Takasaki Online, Japan, Aug. 9-12, 2021, pp.379-383.
- [2] C. Mitsuda *et al.*, “PF-AR における GeV 領域エネルギー電子を使った測定器開発用テストビームラインの建設”, Proceedings of the 19th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Kitakyushu, Japan, Oct. 18-21, 2022, pp.320-324.
- [3] N. Higashi *et al.*, J. Particle Accelerator Society of Japan, 14 (2017), pp. 134-141.
- [4] <https://acc-physics.kek.jp/SAD/>
- [5] <https://geant4.web.cern.ch/>