

ミュオン選別可能な高感度ビーム位置モニター開発

DEVELOPMENT OF A HIGH-SENSITIVITY BEAM POSITION MONITOR CAPABLE OF MUON IDENTIFICATION

宮原房史[#], 大谷将士, 三部勉

Fusashi Miyahara[#], Masashi Otani, Tsutomu Mibe

High energy Accelerator Research Organization (KEK)

Abstract

In the J-PARC muon g-2/EDM experiment, the development and construction of a muon linear accelerator is underway, and acceleration tests of the low-energy section are currently being conducted. For acceleration beyond 40 MeV, disk-loaded S-band traveling wave accelerating structures will be used. In the early stages of commissioning, the number of muons per pulse will be very low, at the level of a few muons, and dark current emitted from the accelerating structures will also mix in as background. Therefore, a monitor is being developed to separate the muon beam from the dark current and measure the position of the muon beam.

1. はじめに

近年、次世代の衝突型加速器やミュオンの異常磁気能率測定を用いた標準模型の検証のため、ミュオン加速が注目され、新しい物理学を切り開く道具として注目されている。J-PARC muon g-2/EDM 実験ではエネルギー 212 MeV のミュオン線形加速器の開発、建設が進んでおり、現在低速部の加速試験を行っている。エネルギー 40 MeV 以降の加速はディスクロード型の S-band 進行波加速管を用いる。コミッション初期段階ではパルス当たりのミュオンが数個レベルと非常に少ないことが予想され、さらに加速管から放出される暗電流がバックグラウンドとして混入してくる。このためビームと並走する壁電流を測定するストリップライン型ビーム位置モニターや空洞に誘起される電磁場を測定して位置を求めるキャビティビーム位置モニターなど、従来の方法ではミュオンビームの位置を評価することが出来ない。そこで暗電流に紛れた極低電荷量のミュオンビームを選別して位置測定を行うためにチェレンコフ放射を用いたビーム位置モニターを開発している。本論文では主に最下流に設置するモニターを報告する。

2. ミュオン線形加速器のビーム条件

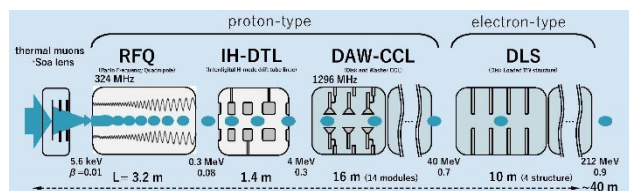


Figure 1: Layout of Muon Linac.

ミュオン線形加速器の概略を Fig. 1 に示す。現在、ディスクロード型の S-band 進行波加速管 (Disk Loaded Traveling Wave Structure: DLS) 部の入口と出口のミュオンビーム位置モニター (BPM) の開発を行っている。DLS 部は4台の S-band (2592 MHz) 加速管で構成され、加速勾配は約 20 MV/m である[1]。DLS 出口のビームパ

[#] fusashi.miyahara@kek.jp

ラメータを Table 1 にまとめる。ビームのエネルギーは 212 MeV、速度 $\beta = 0.94$ で、光速には達していない。設計ビーム強度はパルスあたり 10^6 [1/s] であるが、コミッションの初期段階では数個程度と非常に小さい可能性がある。ストリップライン型 BPM や Cavity BPM は1バンチあたりの電子数が $10^8 \sim 10^{11}$ 個 (10 pC – 10 nC) のビームで使われるが、DLS 出口のミュオンの数はこれより 8 桁以上少なく、通常モニターを使った場合はミュオンビームの信号がノイズに埋もれてしまう。また、DLS 部の加速管は、通常電子用の S-band 加速管と同程度の電界放出による電子が発生すると考えられる。シミュレーションによる評価では 25 Hz で 0.9 nA 程度の暗電流が予想されている[2]。ビームと並走する壁電流やビームが空洞に誘起する電磁場を測定してビーム位置を評価する電気的な測定では、ミュオンと電子の信号を分離することは現実的に非常に困難である。ミュオン線形加速器でミュオンビームを測定するためには電子とミュオンの分離が可能な高感度のモニターが必要となる。

Table 1: Muon Beam at the Exit of DLS

Kinetic Energy [MeV]	212
Intensity [1/s]	$1 - 10^6$
Repetition [Hz]	25
Pulse length [ns]	10
Normalized emittance [π mm mrad]	1.5
$\Delta p/p$	0.1

3. ミュオン選別

ミュオンの速度が $\beta \approx 1$ に達していないため粒子識別にチェレンコフ光を利用する。暗電流で加速管下流まで到達する電子の多くは $\beta \approx 1$ であるため、チェレンコフ光の放出角度の違いで粒子選別が可能となる。またミュオンと速度が同じ低エネルギーの電子も存在するが、同一のチェレンコフ角を持つ電子のエネルギー幅は非常に狭く、電磁石等で大きく軌道を曲げられるため、混入の

可能性は低いと考えられる。加速管出口でエネルギー 40, 212 MeV のミュオン測定に適したラジエーター(誘電体)の候補とチェレンコフ光の光子数、チェレンコフ角を Table 2 にまとめる。ラジエーターの厚みは光子数が 40-50 個程度になる厚みとした。電子とミュオンはチェレンコフ角が大きく異なるためミュオン起源のチェレンコフ光を容易に選択可能である。

Table 2: The material and thickness of the radiator suitable for muons with energies of 40 and 212 MeV, the number of photons, and the Cherenkov angle.

Energy [MeV]	Radiator, Refractive index n	N_{photon}	$\theta_{\text{Cherenkov}}$ for μ	$\theta_{\text{Cherenkov}}$ for e^-
40	Rad. Resistant Glass $n=1.516$	~ 50 ($t=10$ mm)	16.6	48.7
212	Silica Aerogel [3] $n=1.08$	~ 40 (*) ($t=20$ mm)	10.9	22.2

4. ビーム位置モニター

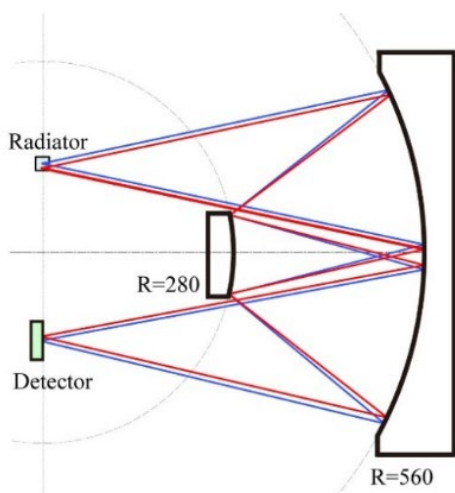


Figure 2: Layout of Offner Relay optical system.

チェレンコフ光は放出角が大きく光学系の設計に工夫が必要である。通常のスクリンモニターの蛍光や高エネルギー電子の遷移放射測定のようにレンズを用いてラジエーター部を直接観測する場合、焦点距離が短く、口径の大きなレンズが必要になる。一般的にそのような光学系では収差が大きくなり、特殊な非球面レンズを用いる必要がある。レンズを用いて収差の小さい光学系を構築するためには多数の非球面レンズを組み合わせた複雑な光学系が必要となる。さらに1段目のレンズはラジエーター近傍に設置する必要があるが、加速管の出口付近は線量が高いため、一般的なレンズ材質は放射線損傷による光の透過率の低下が発生する。透過率の悪化が一般ではない場合、像にゆがみを生じさせ、透過率の低下はバンチ電荷量の評価に影響してしまう。そこで、J-PARC の高ダイナミックレンジ2次元ビームプロファイルモニター[4]で用いられているオフナーリレー光学系[5]

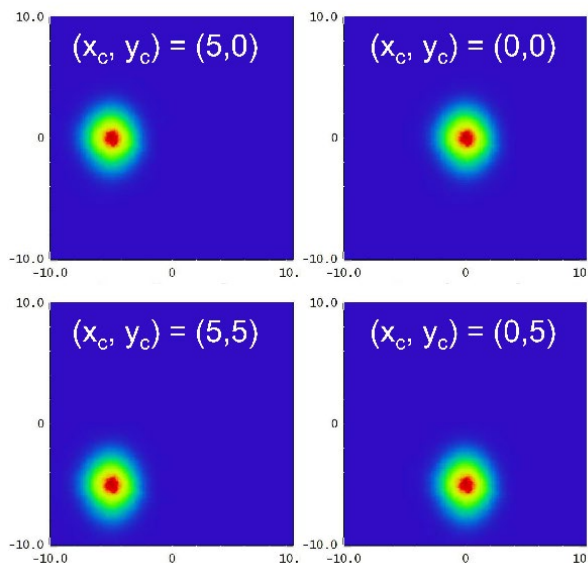


Figure 3: Beam incident position and observed image.

の利用を検討した。

オフナーリレー光学系は凹面の球面鏡と、径が凹面鏡の 1/2 の凸面の球面鏡で構成される (Fig. 2)。発光点から出た光は、球面鏡中心を挟んで反対側に結像する 1:1 の光学系となる。鏡を使うため、色収差が無く、非点収差 (水平、垂直方向など、光の放出される向きによって焦点が異なる) 以外の収差は補正される。ミュオンビームがラジエーターを通過した際に得られる像とビーム位置モニターとして利用可能であるか確認するため、Zemax OpticStudio[6]による 3 次元レイトレーシングを用いて評価を行った。ミュオン 1 個がラジエーターを通過した際のチェレンコフ光を厚み方向が 0.1 mm、偏角 ϕ 方向が 1 度ステップの発光点からの光線で模擬した。ビームサイズ $\sigma_x = \sigma_y = 0.9$ mm、粒子数 1000 個のミュオンビームが異なる位置に入射した場合の像を Fig. 3 に示す。ビーム形状はどの位置に入射しても同様で分布の幅は $\sigma_{x,\text{image}} = 1.2$, $\sigma_{y,\text{image}} = 1.36$ mm であった。発光点の深さ方向による焦点距離の違いによってビームサイズよりも像が大きくなり、非点収差によって x, y 方向の広がりには違いが生じる。ビームの入射位置と像の重心位置を Fig. 4 に示す。水平、垂直方向いずれも傾き -1 の直線に乗っており、像の重心を計算するだけでビーム位置を評価できることが分かる。

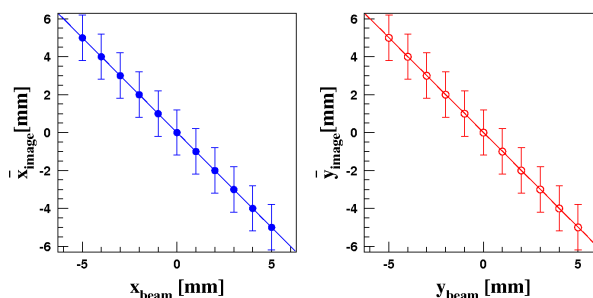


Figure 4: Beam position and center of gravity of image. The error bars correspond to the width of the distribution.

5. ビームエネルギーモニター

粒子の速度が $\beta \approx 1$ に達していない場合、チェレンコフ角の違いからエネルギーが推定出来る。ビームエネルギーモニターの光学系を Fig. 5 に示す。光学系の光軸(ラジエーター中心)で発生したチェレンコフ光は1台目の円錐ミラー(凹面)で反射され、2台目の円錐ミラー(凸面)で反射された光が平行光となる。45°ミラーは光の取り出しのために設置してあり、ミュオンは中心部の穴を通過する。2台の円錐ミラーの角度は設計ビームエネルギーのチェレンコフ角と取り出したい平行光のサイズから決定出来る。凹面の円錐ミラー1台でも平行光を作ることは可能であるが、その場合は平行光のサイズが大きくなる。平行光となったチェレンコフ光はレンズで CCD カメラ等の光の検出器に集光される。ミュオンのエネルギーが設計値のとき、検出器上で点となる様にレンズの焦点距離を選択する。色収差を抑えるためにアクロマティックレンズを用いる。

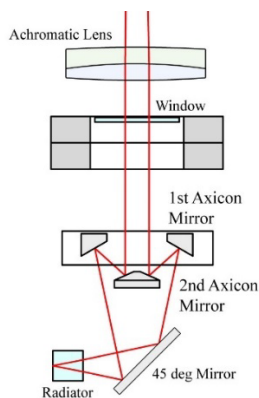


Figure 5: Optical system setup for energy measurement.

設計値より低いエネルギーのミュオンがラジエーター中心に入射した場合、焦点は検出器よりも奥、高いエネルギーが入射した場合は手前になるため、像は円環となる。異なるエネルギーのミュオンが入射したときの像、エネルギーと円環の大きさの関係を Fig. 6 に示す。円環の大きさはエネルギーに対してほぼ線形な応答であるため、直線部でもエネルギーの推定が可能であることが分かる。同じ円環サイズに対してエネルギーの高い側と低い側の2つの可能性があるが、RF 位相を変えて円環サイズの変化を調べることで設計エネルギーに対してどちら側か判断出来る。この光学系は大きなコマ収差をもつため、ミュオンが光軸から外れた位置に入射した場合、像が大きく広がる。コマ収差の様子を Fig. 7 左図に示す。光軸 $(x, y) = (0, 0)$ に入射した場合は像が点になるのに対し、光軸からずれた位置では大きく広がった円形の形状となっている。オフナーリレー光学系の場合と同様に像全体を測定すれば重心からビーム位置の推定が可能であるが、そのためには測定範囲よりも非常に大きく、高感度でダイナミックレンジの広い検出器が必要となる。しかし、ビームのエネルギーモニターとして使用する場合は、それほど大きな検出器は必要ない。Figure 7 右図はエネルギー208 MeV、ビームサイズ $\sigma_x = \sigma_y = 0.9$ mm のミュオンビームがラジエーター中心に入射したときに観測される像である。コマ収差のため、中心方向から外側に向けて広

がる線が見えるが、像の中心に光が届かない円形の形状が現れている。したがって、コマ収差が大きくても信号のない円形領域の大きさからエネルギーの推定が可能である。光学系の設計誤差や設置誤差などが原因でエネルギーモニターの較正は難しいことも予想されるが、ミュオン蓄積電磁石へのビーム蓄積に最適なエネルギーの維持、再現に利用する目的でも利用が可能である。

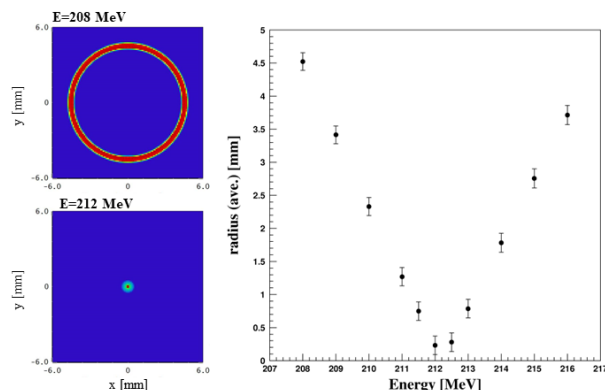


Figure 6: Left figures show the image observed at beam energy of 208 (upper) and 212 MeV, respectively. Right figure shows energy and the radius of the observed ring.

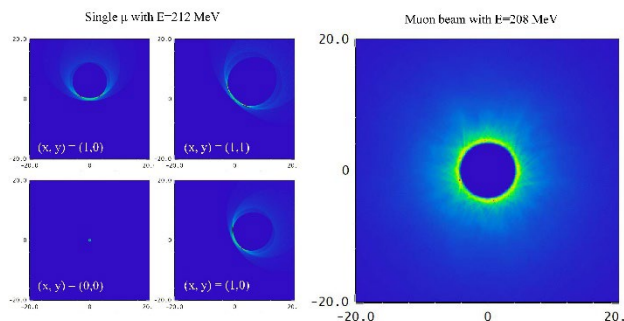


Figure 7: Images when a single muon with an energy of 212 MeV enters different positions of the radiator (left figure) and when a muon beam with an energy of 208 MeV enters (right figure).

6. まとめと今後の課題

ミュオン線形加速器の速度 $\beta \sim 0.7$ となる DLS 部で、ミュオンを加速管の暗電流から分離して測定可能なビーム位置モニター、エネルギーモニターの開発を行っている。ミュオン選別に関しては屈折率 1.08 のシリカエアロゲル (E=212 MeV) や屈折率 1.516 の耐放射線ガラス (E=40 MeV) を用いることでほぼ光速の電子とミュオンの分離が可能である。ビーム位置はオフナーリレー光学系で像の重心を測定することで簡単に評価出来る。また、2台の円錐ミラーとレンズを用いることでエネルギー推定が可能であることが分かった。

これまで測定方法とモニターとしての利用の可能性を確認するための基礎的な設計を行った。今後は要求される分解能と測定位置範囲から球面鏡のサイズや誘電体の厚み、検出器などの最適な設計を行う必要がある。その後、実際に検出器を製作し、ミラーや光学素子のア

ライメント方法の検討、分解能測定や誤差の評価などを行う。検出器は加速管の近くに設置するため放射線シールドの設計を行う。またシリカエアロゲルに関しては屈折率の不均一性の影響評価と放射線損傷、ビーム通過時のアウトガスの調査、対策が必要である。

謝辞

光学系の設計に関して KEK 三橋利行氏に多くの情報、助言を頂いた。KEK 橋本義徳から J-PARC のオフナーリレーを用いたプロファイルモニターに関して多くの情報を頂いた。深く感謝します。

参考文献

[1] K. Sumi *et al.*, “Design and beam dynamics study of disk-loaded structure for muon LINAC”, Journal of Physics: Conference Series 2420(2023) 012038, 13th International

Particle Accelerator Conference (PAIC'22).
DOI:10.1088/1742-6596/2420/1/012038

- [2] S. Shitara *et al.*, “ミュオン加速管の放射線線量推定”, Proc. 21st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2024), Yamagata, Japan, Aug. 2024, THP065, this meeting.
- [3] M. Tabata *et al.*, “Fabrication of silica aerogel with $n=1.08$ for e^+/m^+ separation in a threshold Cherenkov counter of the J-PARC TREK/E36 Experiment”, Nuclear Instruments and Methods A 795, 2015, pp.206-212.
- [4] Y. Hashimoto, “大強度陽子ビームのためのマルチスクリーンモニター”, Proc. 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, 2014, pp.282-286.
- [5] A. Offner, “New concepts in projection mask alignment”, Optical Engineering, vol. 14, no. 2, p.130-132, 1975.
- [6] <https://www.ansys.com/products/optics/ansys-zemax-opticstudio>