

J-PARCにおけるミュオン $g-2$ /EDM 精密測定実験用 ミュオンリニアックの高ベータセクション HIGH-BETA SECTION OF A MUON LINAC FOR THE MEASUREMENT OF THE MUON $G-2$ /EDM AT J-PARC

近藤恭弘 ^{*A)}、長谷川和男 ^{A)}、大谷将士 ^{B)}、三部勉 ^{B)}、吉田光宏 ^{B)}、北村遼 ^{C)}

Yasuhiro Kondo ^{*A)}, Kazuo Hasegawa ^{A)}, Masashi Otani ^{B)}, Tsutomu Mibe ^{B)}, Mitsuhiro Yoshida ^{B)}, Ryo Kitamura ^{C)}

^{A)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA), ^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK), ^{C)}Univ. of Tokyo

Abstract

A muon linac development for a new muon $g-2$ experiment is now going on at J-PARC. Muons from the muon beam line (H line) at the J-PARC muon science facility are once stopped in a silica-aerogel target, and room temperature muoniums are evaporated from the aerogel. They are dissociated with lasers, then accelerated up to 212 MeV using a linear accelerator. For the accelerating structure from 40 MeV, disk-loaded traveling-wave structure is applicable because the particle beta is more than 0.7. The structure itself is similar to that for electron linacs, however, the cell length should be harmonic to the increase of the particle velocity. In this paper, the beam dynamics design of this muon linac using the disk-loaded structure (DLS) is described.

1. はじめに

ミュオン異常磁気モーメント $(g-2)_\mu$ は素粒子標準模型を超える物理を探索するうえで非常に有用なプローブである。現在までのところ、 $(g-2)_\mu$ の最高測定精度は、米国ブルックヘブン国立研究所の E821 [1] での 0.54 ppm であり、この実験では標準偏差のおよそ 3 倍の標準模型からの偏差が測定された。より精度の高い実験が望まれており、J-PARC E34 では、 $(g-2)_\mu$ を 0.1 ppm の精度で測定することを狙っている。それに加えて、E34 ではミュオンの電気双極子モーメントも $1 \times 10^{-21} e \cdot \text{cm}$ の精度で測定出来る [2]。E34 の実験方法は、これまでの実験とはまったく異なる。これまでの実験では、生成標的で生じたパイオンの崩壊からのミュオンを直接用いていたため、ミュオンビームのエミッタンスは典型的には $1000\pi \text{ mm mrad}$ と非常に大きく、これが系統誤差の主な要因となっていた。それに対して、E34 では系統誤差を改善するために低エミッタンスミュオンビームを用いる。要求されるビーム広がり $\Delta p_t/p$ は、 10^{-5} 以下であり、想定エミッタンスは、 $1.5\pi \text{ mm mrad}$ である。これを満たすために、我々はシリカエアロジェル標的から生成される室温のミュオニウム ($\text{Mu: } \mu^+e^-$) をレーザー乖離して生成する超低速ミュオン [3] を用いる。室温 (25 meV) の超低速ミュオンは、要求される $\Delta p_t/p$ を満たすため 212 MeV まで加速する必要がある。リニアックを用いることで、 $2.2 \mu\text{s}$ と寿命の短いミュオンを素早く加速出来る。Figure 1 にミュオンリニアック [4] の構成を示す。

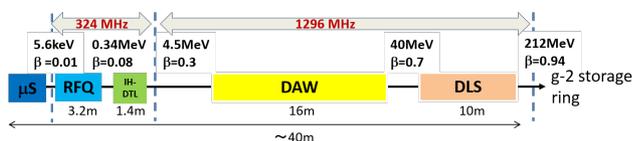


Figure 1: Configuration of the muon linac.

* yasuihiro.kondo@j-parc.jp

ミュオンリニアックは、J-PARC ミュオン施設の H ライン [5] に建設予定である。超低速ミュオンは、高周波四重極リニアック (RFQ) によってバンチングされ、0.34 MeV まで加速される。RFQ に続いて、交差楕形 H モードドリフトチューブリニアック [6] によって、4.5 MeV まで加速される。引き続き、ディスクアンドワッシャー (DAW) 結合空洞型リニアック (CCL) セクションで 40 MeV まで加速される。CCL の加速勾配は、典型的には 10 MV/m 以下であり、CCL を用いて 212 MeV まで加速すると、ミュオンリニアックの全長は利用可能な敷地を超えてしまう。40 MeV 以上では、ミュオンの β は 0.7 以上であり、電子リニアックで広く用いられている円盤装荷構造 (DLS) の進行波 (TW) 管が使用出来る。Table 1 にこの DLS セクションの主要パラメータを示す。

Table 1: Main Parameters of the DLS Section

Input energy	40 MeV
Output energy	212 MeV
Beam intensity	$1 \times 10^6 / \text{s}$
Beam pulse width	10 ns
Number of bunches	3 /pulse
Repetition rate	25 Hz
Normalized transverse emittance	$1.5\pi \text{ mm mrad}$
Momentum spread	0.1%

本論文では、ミュオンリニアックの高ベータセクションのビーム力学設計の現状を示す。

2. セル設計

Table 2 に加速管の想定パラメータを示す。

ミュオンは電子に比べるとゆっくり加速されるので、セル長 D を同期粒子の速度 β_s が増すにしたがってセルごとに変化させる。我々は $2\pi/3$ モードを採用するので、 D は、

Table 2: Assumed Design Parameters of the Accelerating Structure

Structure	Disk loaded traveling wave
Frequency	1296 MHz
Accelerating mode	$2\pi/3$
Accelerating tube length	~ 2 m
Accelerating gradient	20 MV/m

$$D = \frac{\beta_s \lambda}{3} \quad (1)$$

のように表される。1セルでのエネルギー増分 ΔW は、

$$\Delta W = E_0 D \cos \phi \quad (2)$$

となる。ここで、 E_0 は加速勾配、 ϕ は波頭からの位相である。現設計では、縦方向のアクセプタンスを確保するために、 ϕ を -10° に設定してる。

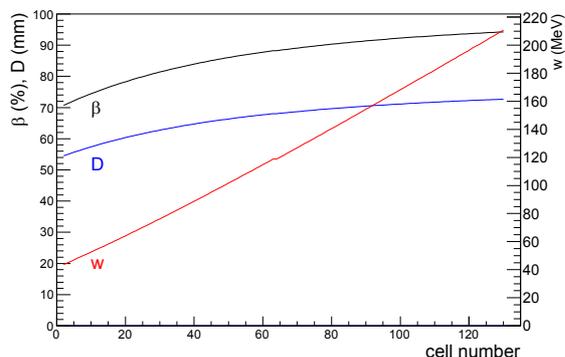


Figure 2: Calculated cell parameters of the DLS section.

Figure 2 は、DLS セクション全体の、セル番号に対する導出された β 、 D 、及び粒子のエネルギー W である。加速管設計には、ここで得られた D を用いる。

3. 加速管設計

加速管の設計は、[7] を用いて行った。このツールでは、加速管の寸法は SUPERFISH [8] を用いて決める。SUPERFISH で、それぞれのセルでの解放-解放および短絡-短絡の境界条件での定在波モードの電磁場分布を計算する。この定在波の電磁場分布を位相を $\pi/2$ ずらして重ね合わせることで進行波の電磁場分布を得、General Particle Tracer (GPT) [9] を用いた粒子シミュレーションに用いる。設計の単純化のために現段階では定インピーダンス設計、すなわち口径を $2a = 40$ mm の一定としている。前節で述べた通り、 β_s から計算した D を入力値として用いる。各セルの内径 $2b$ は、SUPERFISH の計算値が両方の境界条件とも要求される共振周波数になるように 179.4 から 180.3 mm と調整される。

例として、最初の加速管 (DLS1) のパラメータを Figure 3 に示す。 D は入力パラメータであり、 E_0 、単位長さ当たりのシャントインピーダンス Z 、群速度 v_g 、及び Q 値は SUPERFISH による計算値である。

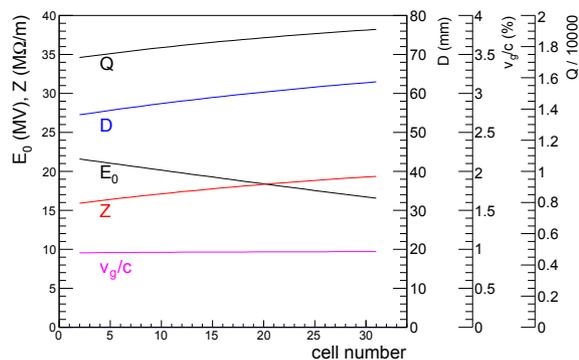


Figure 3: Structure parameters of the DLS1.

4. 粒子シミュレーション

DAW のシミュレーションによって得られた粒子分布 [4] を DLS の粒子シミュレーションの入力として用いる。文献 [4] の時点では、DAW と DLS 間のマッチングは考慮されていなかったため、ここではマッチングを取る。まず、Figure 4 に示すように、最初の単位周期での整合条件を TRACE3D [10] を用いて求める。単位周期は、加速管一つと四重極電磁石のダブルレットから成る。

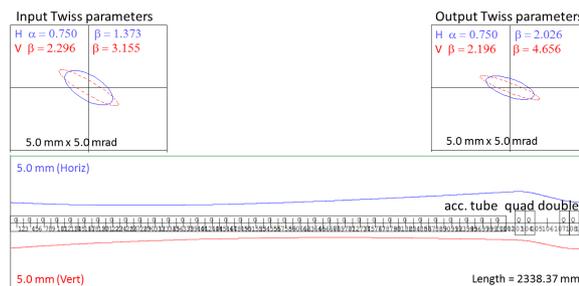


Figure 4: Injection matching of the DLS section using TRACE3D.

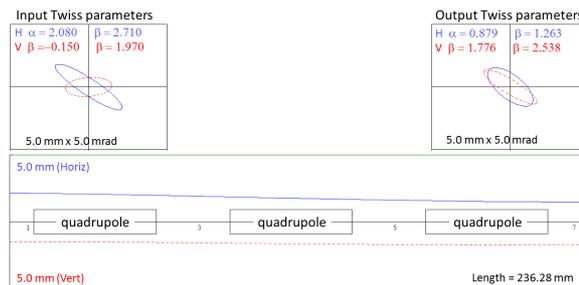


Figure 5: Matching section between the DAW and the DLS sections.

このパラメータを実現するために、Figure 5 に示すように、四重極電磁石 3 個からなるマッチングセクションを TRACE3D を用いて設計した。入射粒子は PARMILA [11] を用いて輸送し、得られた粒子分布を GPT シミュレーションの入力とした。

Figure 6 は、DLS 出口での粒子の位相空間分布を、ま

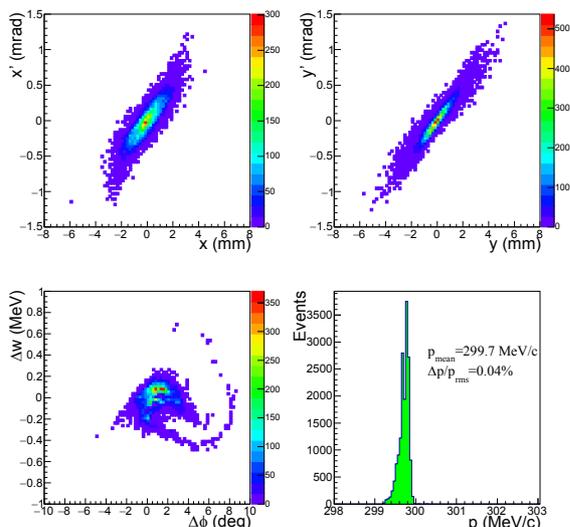


Figure 6: Simulated particle distribution at the DLS exit. Lower right figure shows the momentum histogram.

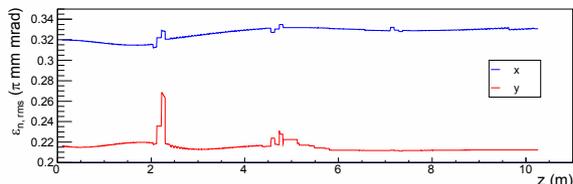


Figure 7: Emittance evolution through the DLS section.

た、Figure 7は、DLS セクションを通した横エミッタンスを示す。顕著なエミッタンス成長は見られない。DLS セクションの透過率は100%であり、ミュオンの崩壊によるロスが1%と計算される。水平方向と垂直方向の規格化 rms 横エミッタンスはそれぞれ、 $\varepsilon_{x,n,rms} = 0.33\pi$ mm mrad と $\varepsilon_{y,n,rms} = 0.21\pi$ mm mrad であり、rms 運動量広がり は 0.04% である。Table 3 に、DLS シミュレーションの結果をまとめる。

Table 3: Result of the DLS Simulation

Transmission	100%
Decay loss	1%
$\varepsilon_{x,n,rms}$	0.33π mm mrad
$\varepsilon_{y,n,rms}$	0.21π mm mrad
Momentum spread	0.04%

ビームの質自体は要求を満たしているが、現状の加速管では、短いセル長と大きなアパーチャーのため、シャントインピーダンスが低いことが問題である。このため、加速管1本あたりの要求電力が80 MW と、やや過大な値となっている。Figure 8は、DLS セクションを通したビームエンベロープであり、縦軸は rms ビーム幅の6倍を示している。すべての粒子はこのエンベロープ内に収まっており、現状のアパーチャー ($a = 20$ mm) では十分な余裕があることがわかる。したがって、ア

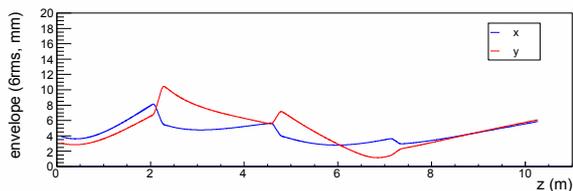


Figure 8: Beam envelope of the DLS section.

パーチャーをさらに小さくすることでシャントインピーダンスを改善出来ると見込まれる。加えて、加速管を低勾配設計に改良する予定である。さらに、S バンド加速管の使用も検討するなど、DLS システムを最適化する努力を続ける。

5. まとめ

ミュオンリニアックの高ベータセクションのビーム力学設計を行った。最初のリファレンスデザインを得ることが出来、シミュレーションで得られた水平方向と垂直方向の横エミッタンスはそれぞれ、 0.33π mm mrad と 0.21π mm mrad であり、運動量広がり は 0.04% である。これらのパラメータは要求を満たしているが、現状の設計の要求 RF 電力はやや過大であるなど問題点もあるためさらに設計を改良していく予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費 JP15H0366 及び JP16H03987 の助成を受けております。

参考文献

- [1] G. W. Bennett *et al.*, “Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL”, Phys. Rev. D 73 (2006) 072003.
- [2] T. Mibe, edit., “J-PARC E34 conceptual design report”, Tech. rep., KEK (2011).
- [3] P. Bakule *et al.*, “Measurement of muonium emission from silica aerogel”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2013 (103C01).
- [4] M. Otani *et al.*, “Development of muon linac for the g-2/EDM experiment at J-PARC”, Proceedings of LINAC2016, East Lansing, MI, USA, 2016, pp. 990–994.
- [5] N. Kawamura *et al.*, “H line; A beamline for fundamental physics in J-PARC”, Proceedings of USM2013, 2014, p. 010112.
- [6] M. Otani *et al.*, “Interdigital H-mode drift-tube linac design with alternative phase focusing for muon linac”, Phys. Rev. Accel. Beams 19 (2016) 040101.
- [7] M. Yamamoto; URL http://www.yamamo10.jp/yamamoto/study/accelerator/GPT/TW_structure/
- [8] J. H. Billen, L. M. Young, “Poisson Superfish”, LA-UR-96-1834 (1996).
- [9] Pulsar Physics, “General Particle Tracer”; URL <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [10] K. R. Crandall, D. P. Rusthoi, “Trace 3-D Documentation”, LA-UR-97-886 (1997).
- [11] H. Takeda, “Parmila”, LA-UR-98-4478 (1998).