

ミューオン加速用Lバンド低エネルギーリニアックの概念設計 CONCEPTUAL DESIGN OF A L-BAND LINAC FOR MUON ACCELERATION

近藤恭弘^{*A, B)}、大谷士将^{C)}

Yasuhiro Kondo^{* A, B)}, Masashi Otani^{C)}

^{A)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA), ^{B)}Ibaraki University,

^{C)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

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. In the current reference design, a 324-MHz radio frequency quadrupole (RFQ) and an interdigital H-mode drift tube linac (IH-DTL) are used for the low beta acceleration. We propose a 1300 MHz (L band) RFQ and coupled cavity drift tube linac (CCDTL) instead of the 324 MHz RFQ and IH-DTL as an alternative to simplify the configuration of the muon linac. In this paper, the conceptual design of this low energy section of the muon linac is described.

1. はじめに

ミュー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 ではミュー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ーオンを直接用いていたため、ミュー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ー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ーオンウム (Mu: μ^+e^-) をレーザー乖離して生成する超低速ミューオン [3] を用いる。室温 (25 meV) の超低速ミューオンは、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、 $2.2 \mu\text{s}$ と寿命の短いミューオンを素早く加速出来る。Figure 1 にミューオンリニアックの現状のベースライン構成 [4] を示す。

ミューオンリニアックは、J-PARC ミューオン施設の H ライン [5] に建設予定である。超低速ミューオンは、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 (IH-DTL) [6] に

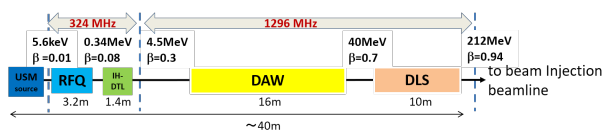


Figure 1: Configuration of the muon linac.

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、最後に円盤装荷型進行波加速管 (DLS) [7] によって 212 MeV まで加速される。RFQ は開発コストを下げるため、J-PARC リニアック用の予備機を使用する予定であり [8]、したがって加速周波数は 324 MHz である。J-PARC RFQ を使用するという制限を外し、後段の周波数である 1.3 GHz (L バンド) に揃えられれば RF 源の種類を一種類にすることができ合理的である。我々は、文献 [9] において、この部分を L バンド RFQ で置き換える提案をしたが、RFQ のヴェーン長が 3.7 m と波長の 16 倍になってしまう (単空洞の RFQ を安定動作させるには波長の 4 倍程度が限度とされる) のと、消費電力が 3 MW とかなり大きくなってしまったことから、今回はより良い効率を目指して RFQ と結合空洞型 DTL (CCDTL) の組み合わせから成る初段部を提案する。Table 1 に主要パラメータを示す。

本論文ではこのミューオンリニアック L バンド低エネルギー部の RFQ と CCDTL それぞれの概念設計を示す。

2. RFQ

L バンド RFQ のビーム力学設計は RFQGEN [10] を用いて行った。Figure 2 にセルパラメータ、Table 2 に得られた設計パラメータをまとめる。RFQ は一般に加速効率は良くないので、バンチング終了後最低限の加速で次段の CCDTL に繋ぐ設計とした。

Figure 3 に、RFQ を通しての粒子分布の発展を、Fig. 4

* yasuhiko.kondo@j-parc.jp

Table 1: Requirements for the L-band RFQ

Beam species	μ^+
Resonant frequency	1296 MHz
Injection energy	30 keV
Extraction energy	4.5 MeV
Peak beam intensity	1×10^6
Trans. norm. rms emittance	$< 0.25\pi$ mm mrad
Repetition rate	25 Hz
RF pulse length	20 μ s
RF duty factor	0.05%

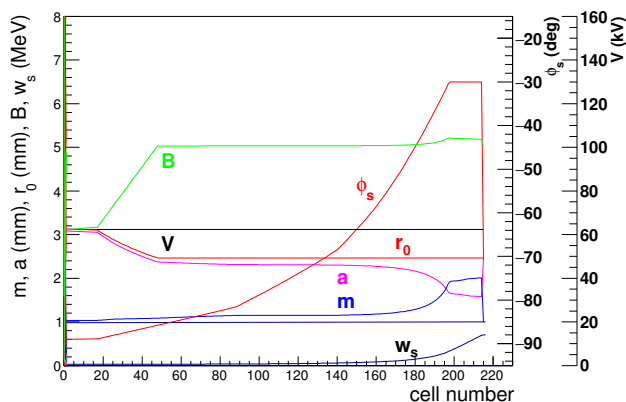


Figure 2: Cell Parameters of the L-band RFQ.

Table 2: Design Parameters of the L-band RFQ Obtained with RFQGEN

Initial energy	30 keV
Final energy	0.7 MeV
Vane length	0.94 m
Number of cells	217
Inter-vane voltage	63 kV
Maximum surface field	34 MV/m (1.06 Kilpatrick)
Average bore radius (r_0)	2.50 mm
ρ_t/r_0 ratio	0.75 ($\rho_t = 1.9$ mm)
a_{min}	1.58 mm
m_{max}	2.00
$\phi_{s,max}$	-30 deg
Power dissipation	0.2 MW

に RFQ 出口での粒子分布を示す。規格化 rms エミッタンス 0.17π mm mrad のウォーターバッグ入射ビームに対して、透過率 99% であり、RFQ 出口での規格化 rms エミッタンスは、横方向 0.19π mm mrad、縦方向 0.13π MeV deg であった。この長さの RFQ でのミュオンの崩壊損失は 4% である。

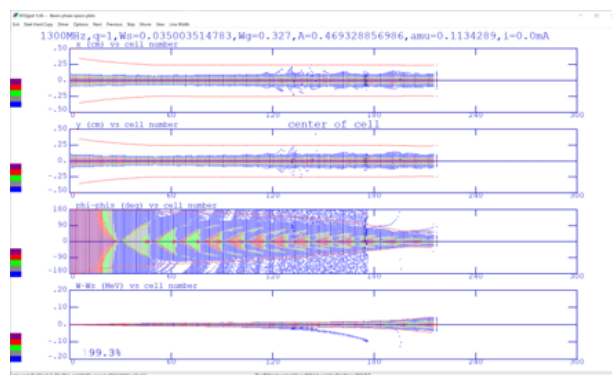


Figure 3: Phase space evolution of the L-band RFQ obtained with RFQGEN.

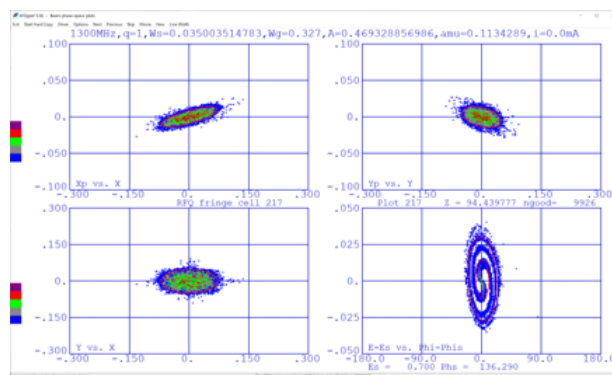


Figure 4: Phase space distribution at the RFQ exit.

3. CCDTL

DTL は 1946 年に Alvarez によって提唱された古典的な加速構造であるが、今日でもなお β が 0.1 から 0.3 程度の陽子や重陽子の加速に最善の加速器である。ミュオンにおいてもビーム力学上はそうであるが、L バンドの構造を考える場合、ドリフトチューブ内に収束構造を埋め込むのはほぼ不可能であろう。そこで代替として、収束磁石を空洞外に配置できる CCDTL を検討した。我々のミュオンリニアックでは、空間電荷力はまったく考慮する必要が無いが、ミュオンの質量は陽子の $1/9$ しかないため、RF 発散力の影響を強く受ける。このため 1 空洞内に 1 本のドリフトチューブとし、1 空洞毎に収束磁石を挟む構成とした。収束磁石としてはコンパクトに製作出来る永久磁石を想定している。

CCDTL の空洞設計は CDTFISH [11] を用いて行った。Figure 5 に、 $\beta = 0.11$ と $\beta = 0.18$ までの SUPERFISH のプロットを示す。CDTFISH で $\beta = 0.11$ から $\beta = 0.18$ まで 0.1 きざみでトランジットタイムファクタを計算し、ビーム力学の計算に用いた。

CCDTL のビーム力学設計は、PARMILA [12] を用いて行った。Table 3 に主なパラメータとビームシミュレーションの結果を示す。空洞と空洞の間隔は $2\beta\lambda$ とし、FODO ラティスを採用した。Figure 6 は PARMILA が出力した TRACE3D 入力ファイルの表示結果で、Fig. 7 に CCDTL 出口での粒子分布を示す。ミュオン崩壊に

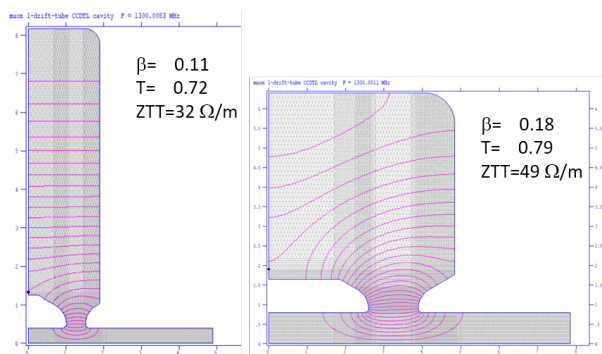


Figure 5: CCDTL cavities designed with SUPER-FISH. Left: $\beta = 0.11$. Right: $\beta = 0.18$.

よるロス率は2%と見積もられる。

Table 3: Design Parameters of the L-band CCDTL Obtained with PARMILA

Initial energy	0.7 MeV
Final energy	4.5 MeV
E_0	5.5 MV/m
$\phi_{s,max}$	-30 deg
Number of cells	30 (15 cavities)
Length	2.4 m
Transmission	100%
Trans. emittance growth	10%
Power dissipation	0.4 MW

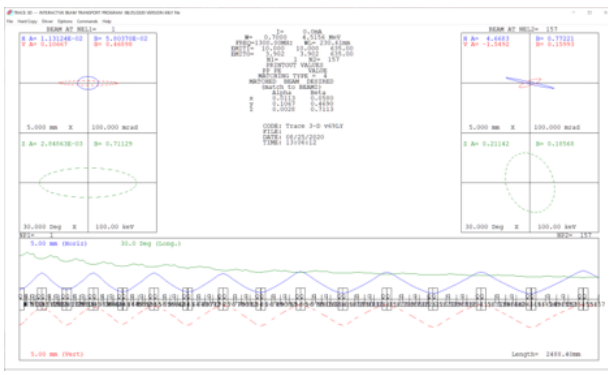


Figure 6: Beam envelopes of the CCDTL obtained with TRACE3D designed using PARMILA.

4. まとめ

ミュオンリニアック低エネルギー部の代替案としてLバンドRFQとCCDTLの組み合わせによるリニアックを提案した。324 MHzのベースライン設計が、3.2 mのRFQと1.4 mのIH-DTLで全長4.6 m（マッチングセクション除く）であったところ、前回のLバンドRFQのみの設計では全長3.7 m（ただし出射エネルギーは5.2 MeV）、今回の設計ではRFQ 0.9 m、CCDTL 2.4 m

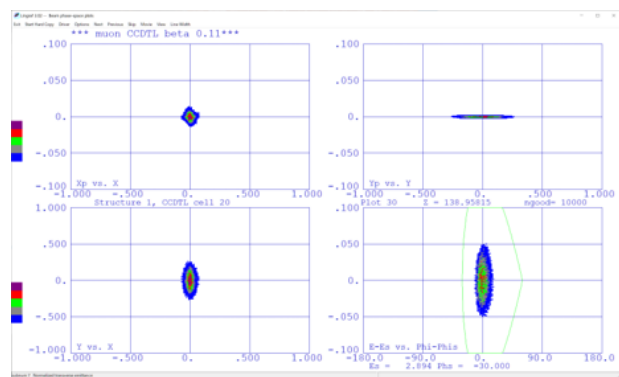


Figure 7: Phase distributions at the CCDTL exit with PARMILA.

の全長3.3 mとなった。空洞損失も、LバンドRFQのみの場合の3 MWから合計で0.6 MWと、かなりの省電力設計となった。ただし、324 MHzの場合の空洞損失は0.4 MWであり、今回の設計より少ないが、これはRFQが周波数が高くなると電力消費が増えるためである。このように、LバンドRFQとCCDTLの組み合わせの低エネルギー部の可能性が示されたが、一方で、デメリットとしては、横方向のアクセプタンスが小さくなる点があり、より慎重なRFQ入射設計が求められる。今後、入射部の再設計と、RFQ-CCDTL間のマッチングセクションを設計し、総合的に性能を評価していく。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費JP18H03707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] G. A. Beer, Y. Fujiwara, S. Hirota, K. Ishida, M. Iwasaki, S. Kanda, H. Kawai, N. Kawamura, R. Kitamura, S. Lee, W. Lee, G. M. Marshall, T. Mibe, Y. Miyake, S. Okada, K. Olchanski, A. Olin, H. Ohnishi, Y. Oishi, M. Otani, N. Saito, K. Shimomura, P. Strasser, M. Tabata, D. Tomono, K. Ueno, E. Won, K. Yokoyama, Enhancement of muonium emission rate from silica aerogel with a laser-ablated surface, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2014 (91C01).
- [4] Y. Kondo, *et al.*, Re-acceleration of ultra cold muon in J-PARC muon facility, in: *Proceedings of IPAC2018*, Vancouver, BC, Canada, 2018, p. FRXGBF1.
- [5] N. Kawamura, A. Toyoda, T. Mibe, N. Saito, M. Aoki, K. Shimomura, Y. Miyake, H line; A beamline for fundamental physics in J-PARC, *JPS Conf. Proc.* 2 (2014) 010112.
- [6] M. Otani, T. Mibe, M. Yoshida, K. Hasegawa, Y. Kondo, N. Hayashizaki, Y. Iwashita, Y. Iwata, R. Kitamura, N. Saito, Interdigital H-mode drift-tube linac design with alternative phase focusing for muon

- linac, *Phys. Rev. Accel. Beams* 19 (2016) 040101.
- [7] Y. Kondo, K. Hasegawa, M. Otani, T. Mibe, M. Yoshida, R. Kitamura, Beam dynamics design of the muon linac high-beta section, *Journal of Physics: Conference Series* 874 (1) (2017) 012054;
URL <http://stacks.iop.org/1742-6596/874/i=1/a=012054>
 - [8] Y. Kondo, K. Hasegawa, M. Otani, T. Mibe, N. Saito, R. Kitamura, Simulation study of muon acceleration using RFQ for a new muon g-2 experiment at J-PARC, in: *Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015*, pp. 3801–3803.
 - [9] Y. Kondo, T. Morishita, M. Otani, Low power measurement of a 1300-MHz RFQ cold model, in: *Proceedings of LINAC2018, Beijing, China, 2018*, pp. 794–797.
 - [10] Linear Accelerators, LLC, RFQGEN.
 - [11] J. H. Billen, L. M. Young, Poisson Superfish, Tech. Rep. LA-UR-96-1834, Los Alamos National Laboratory (1996).
 - [12] H. Takeda, Parmila, Tech. Rep. LA-UR-98-4478, Los Alamos National Laboratory.