

LバンドRFQの低電力測定 LOW POWER TEST OF AN L-BAND RFQ

近藤恭弘^{*A)}、森下卓俊^{A)}、田村潤^{A)}、大谷将士^{B)}

Yasuhiro Kondo^{*A)}, Takatoshi Morishita^{A)}, Jun Tamura^{A)}, Masashi Otani^{B)}

^{A)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)}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 instead of the 324 MHz RFQ and IH-DTL as an alternative to simplify the configuration of the muon linac. In this paper, the present status of the design and the measurement of a cold model of this world first L-band RFQ 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オニウム (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。

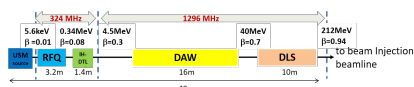


Figure 1: Configuration of the muon linac.

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、交差楕円 H モードドリフトチューブリニアック (IH-DTL) [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、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 リニアックの技術を利用する予定であり、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。陽子の場合、1.3 GHz では典型的な RFQ 入射エネルギーである 50 keV でのセル長は $\beta\lambda/2 = 1.2 \text{ mm}$ となってしまう現実的ではない。それに対してミューオンならば 3.5 mm となり十分に可能な大きさである。そこで、IH-DTL までを置き換えることを前提に、ミューオンリニアックベースライン設計の代替案として、Table 1 に示す Lバンド RFQ を提唱する。

本論文ではミューオンリニアック用 Lバンド RFQ の設計と、コールドモデルによる RF 測定の結果を示す。

Table 1: Requirements for the L-band RFQ

Beam species	μ^+
Resonant frequency	1296 MHz
Injection energy	30 keV
Extraction energy	5.2 MeV
Peak beam intensity	1×10^6
Transverse emittance (normalized rms)	$< 0.25\pi \text{ mm mrad}$
Repetition rate	25 Hz
RF pulse length	20 μs
RF duty factor	0.05%

* yasuhiko.kondo@j-parc.jp

2. Lバンド RFQ の設計

Lバンド RFQ のビーム力学設計は RFQGEN [8] 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。この設計では 324 MHz の RFQ と同等の平均ボア半径を確保し、現状の入射ミューオンを受け入れ可能な設計とした。このため消費電力が大きくなっているが、入射収束系と RFQ との設計の整合と最適化は今後の課題である。

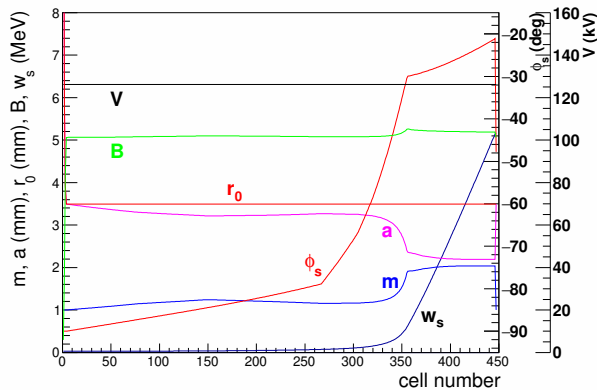


Figure 2: Cell parameters of the L-band RFQ.

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

Vane length	3.7 m
Number of cells	448
Inter-vane voltage	126 kV
Maximum surface field	53.0 MV/m (1.65 Kilpatrick)
Average bore radius (r_0)	3.50 mm
ρ_t/r_0 ratio	0.75 ($\rho_t = 2.62$ mm)
a_{min}	2.23 mm
m_{max}	2.19
$\phi_{s,max}$	-21.1 deg

Figure 3 に粒子シミュレーション結果を示す。規格化 rms エミッタンス 0.2π mm mrad 入射に対して、透過率 100% であり、RFQ 出口での規格化 rms エミッタンスは、横方向 0.26π mm mrad、縦方向 0.095π MeV deg であった。この長さの RFQ でのミューオンの崩壊損失は 8% である。

このビーム設計結果に基づき、空洞断面形状の設計を RFQFISH [9] を用いて行った。Figure 4 に、RFQFISH によって得られた空洞断面形状を示す。SUPERFISH による計算値では、Q 値は 6554、電力損失は 3 MW であった。ヴェーンエンドカットの寸法は CST Micro Wave Studio [10] を用いた三次元計算によって決定した。有限長さのモデルに対してヴェーンエンド対面に磁氣的境界条件を設定したうえで固有モードを計算し、共振周波数が無限長モデルと同じになるように調整した。

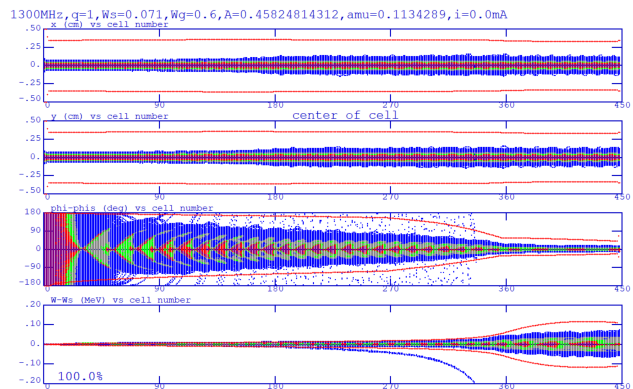


Figure 3: Phase-space evolution of the L-band RFQ.

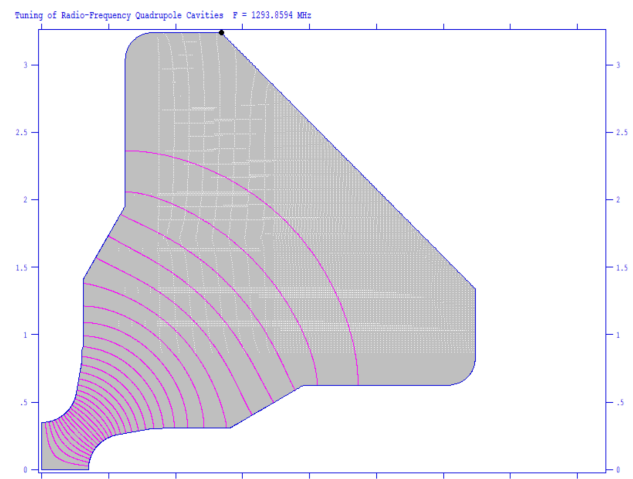


Figure 4: Cross sectional view of the L-band RFQ.

3. Lバンド RFQ コールドモデル

前項の設計に基づき長さ 450 mm のコールドモデルを製作した。コールドモデルとしてはアルミ製で十分であるが、今回は加工精度を確認するため無酸素銅で製作した。Figure 5 にヴェーン先端の寸法測定結果を示す。メジャーヴェーン 1 の下流側で設計値との差が大きいが、その他は概ね $\pm 15\mu\text{m}$ の範囲内に収まっている。メジャーヴェーン 1 についても加工誤差自体は小さく、全体の反りが大きいのが問題である。この点は今後の課題である。

全体を組み上げた写真を Fig. 6 に示す。空洞外径は 135 mm であり非常にコンパクトなのが分かる。一象限につき 4 つのチューナ、5 つのピックアップポートを備えている。チューナは無酸素銅製のプラグをねじ込む方式とした。

完成したコールドモデルの固有状態の周波数を Fig. 7 に示す。1284 MHz のピークが四重極の基本モードと推定される。この RFQ の電磁場分布を測定するためのビーズ駆動装置は現在整備中であるが、このモードが四重極モードであることを確認するために予備的なビーズ測定を行った。このときのセットアップを Fig. 8 に示す。現状では一象限ずつ糸を張り替える必要がある。今

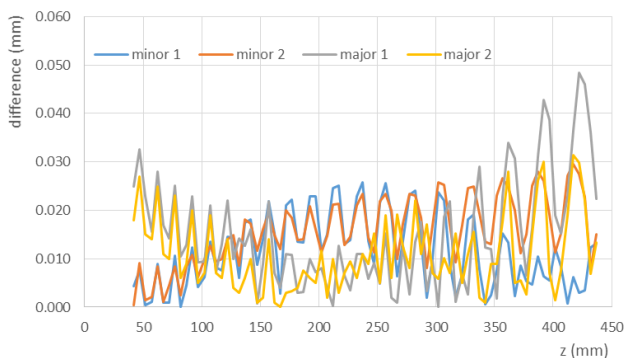


Figure 5: Coordinate measurement of the vane tips.

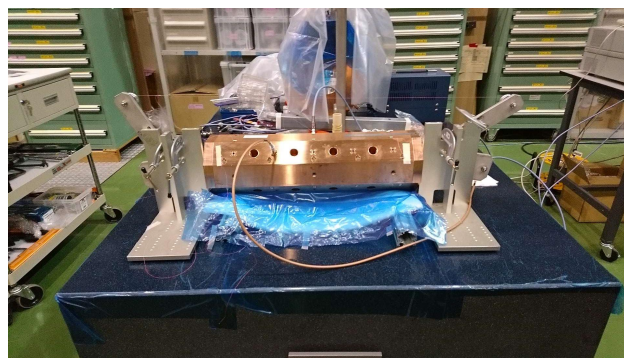


Figure 8: Setup of the bead-pull measurement.

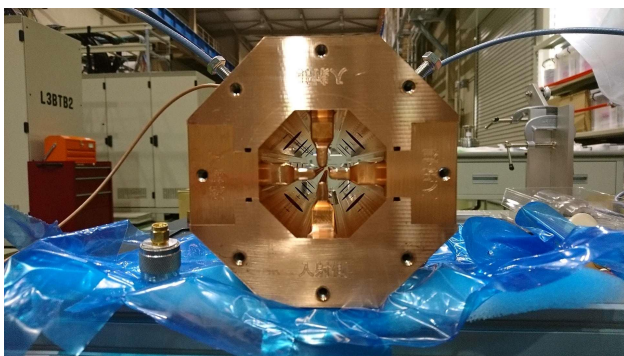


Figure 6: Photo of the L-band RFQ coldmodel.

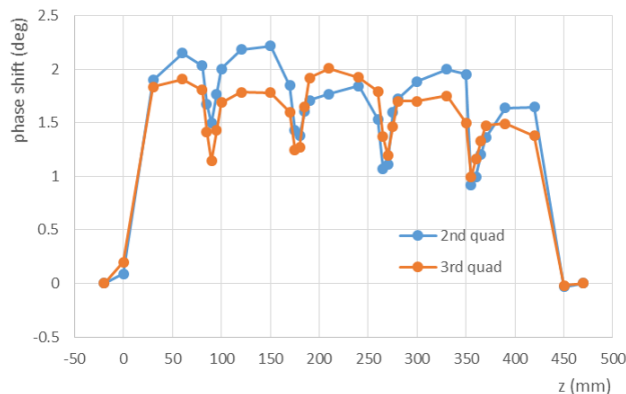


Figure 9: Preliminary bead-pull measurement.

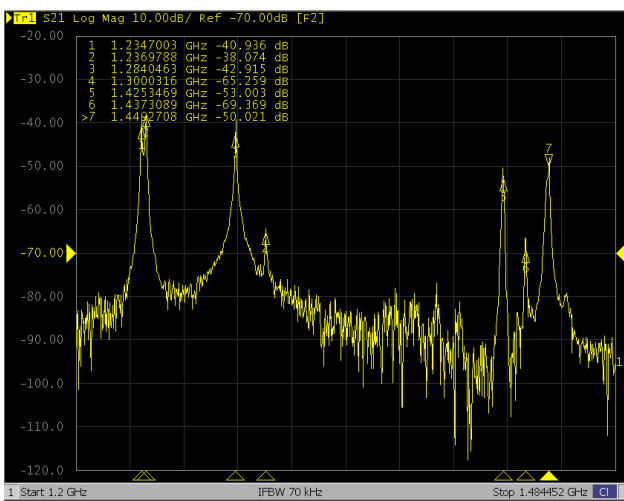


Figure 7: Eigenmode frequencies of the L-band RFQ cold model.

回の測定ではチューナを装着しないで行った。

Figure 9 に結果を示す。プロット中 4 か所のへこみはチューナポートによる磁場の引き込みを示す。ネットワークアナライザの port 1 を第一象限に、port 2 を第四象限のピックアップに接続し、第二象限と第三象限にビーズを挿入した時の S21 パラメータの位相変化を測定した。第二、第三象限ともに同等に長手方向に平坦に励起されており、このモードが TE210 モードであることが同定出来た。

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 を提案した。このような高周波数の RFQ は陽子に用いるには入射部のセル長が小さくなりすぎるためこれまで実現されていなかったが、ミュオンでは製作可能なセル長となり実現可能と考えた。L バンド RFQ を実証するためのコールドモデルを製作し、周波数測定と予備的なビーズ測定まで行った。今後はビーズ測定装置を整備し、共振周波数、電磁場分布の調整を行う予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費 JP17K18784 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; <http://stacks.iop.org/1742-6596/874/i=1/a=012054>
- [8] Linear Accelerators, RFQGEN.
- [9] J. H. Billen, L. M. Young, Poisson Superfish, Tech. rep., LA-UR-96-1834 (1996).
- [10] CST MICROWAVE STUDIO, CST; <http://www.cst.com/>