

J-PARCにおけるミュオン g-2/EDM 精密測定実験のための ミュオンリニアック

THE MUON LINAC FOR THE PRECISE MEASUREMENT OF MUON G-2/EDM AT J-PARC

近藤恭弘^{*A)}、長谷川和男^{A)}、伊藤崇^{A)}、Artikova Sayyora^{A)}、大谷将士^{B)}、三部勉^{B)}、内藤富士雄^{B)}、
吉田光宏^{B)}、北村遼^{C)}、岩下芳久^{D)}、岩田佳之^{E)}、林崎規託^{F)}、齊藤直人^{G)}

Yasuhiro Kondo^{*A)}, Kazuo Hasegawa^{A)}, Takashi Itou^{A)}, Sayyora Artikova^{A)}, Masashi Otani^{B)}, Tsutomu Mibe^{B)},
Fujio Naito^{B)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Ryo Kitamura^{C)}, Yoshihisa Iwashita^{D)}, Yoshiyuki Iwata^{E)}, Noriyosu Hayashizaki^{F)},
Naohito Saito^{G)}

^{A)}Japan Atomic Energy Agency (JAEA), ^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

^{C)}Univ. of Tokyo, ^{D)}Kyoto Univ., ^{E)}National Institute of Radiological Sciences (NIRS), ^{F)}Tokyo Institute of Technology,

^{G)}J-PARC Center

Abstract

We are developing a muon linac for the measurement of the muon anomalous magnetic moment and search for the muon electric dipole moment to explore beyond the Standard Model of elementary particle physics. This muon linac accelerate μ^+ from room temperature to 212 MeV with normalized transverse emittances of about 1.5π mm mrad. The muon linac consists of an ultra-slow muon source, a radio frequency quadrupole (RFQ) linac, an inter-digital H-mode drift tube linac (IH-DTL), a disk and washer coupled cavity linac (DAW CCL), and disk loaded structure (DLS) traveling-wave linac. In this paper, the status of the muon linac development, especially, the beam dynamics simulation is described.

1. はじめに

近年、素粒子標準理論を超える物理を探索するためのプローブとして、ミュオンが注目されている。我々は、J-PARCにおいて、新たなミュオン異常磁気モーメント (g-2) 及び電気二重極モーメント (EDM) 精密測定実験計画 (J-PARC E34) を推進している [1]。この実験では、束電場なしでビーム蓄積する要請から、 10^{-5} rad 程度以下にミュオンビームの広がりを抑える必要があり、J-PARC MLFにおいて、ほぼ室温のエネルギー (30 meV) を持つ超低速ミュオンを生成し、それを 212 MeV まで加速することでこの要求を満たす。想定している規格化横エミッタンスは 1.5π mm mrad であり、従来のミュオンビームと比べておよそ 1/1000 の低エミッタンスとなる。まず、J-PARC MLF H ラインからの表面ミュオンビームを、シリカエアロゲル中に静止させる。ここで生成される室温のミュオンウム [2] をレーザーでイオン化することで、超低速ミュオン (μ^+) [3] が得られる。これを静電レンズ (SOA レンズ) によって 5.6 keV まで加速した後、ミュオンリニアックに入射する。レーザーのパルス幅は 1 ns であるが、レーザースポットの空間分布に起因して、入射点でのビームパルス幅は、10 ns 程度に広がる。この時点での μ^+ の数は、MLF に 1 MW のビームが入射されたときに、 $1 \times 10^6 \mu^+ / s$ を見込んでいる。Table 1 に、ミュオンリニアックの主要パラメータを、Figure 1 に構成を示す。

ミュオンは、電子と同じくレプトンであるが、その質量は 106 MeV であり、電子よりは陽子に近い。そのため、ミュオンリニアックの入射時のエネルギー

Table 1: Basic Parameters of the Muon Linac

Particle	μ^+
Energy	212 MeV
Number of particles (injection)	$1 \times 10^6 / s$
Repetition rate	25 Hz
Pulse width (ns)	10 ns
Transverse emittance (normalized, total)	1.5π mm mrad
Momentum spread	0.1%

5.6 keV での β はわずか 0.01 であり、ここから加速していても、電子のようにすぐに $\beta=1$ になることはない。従って、ミュオンリニアックでは、陽子リニアックと同様に、 β によって最適な加速構造を用いる必要がある。まず、高周波四重極リニアック (RFQ) で $\beta = 0.08$ (340 keV) まで加速及び縦方向のバンチングを行った後、交差楕円型 H モードドリフトチューブリニアック (IH DTL) で $\beta = 0.28$ (4 MeV) まで加速する。その後、ディスクアンドワッシャ (DAW) 型結合セルリニアック (CCL) で $\beta = 0.7$ (40 MeV) まで加速する。最後は、電子リニアックで標準的に用いられる円盤装荷型 (DLS) 進行波加速管で $\beta = 0.94$ (212 MeV) まで加速する。ミュオンの質量が軽いおかげで、同程度まで加速する陽子リニアックに比べると、全長が短く、コンパクトなりニアックとなる。このうち、RFQ については、J-PARC リニアック用に開発された RFQ[4] を用いる予定である [5] が、それ以降の加速器については専用に開発している。加速空洞の共振周波数は、RFQ、IH については 324 MHz、それ以降は 1296 MHz である。

* yasuihiro.kondo@j-parc.jp

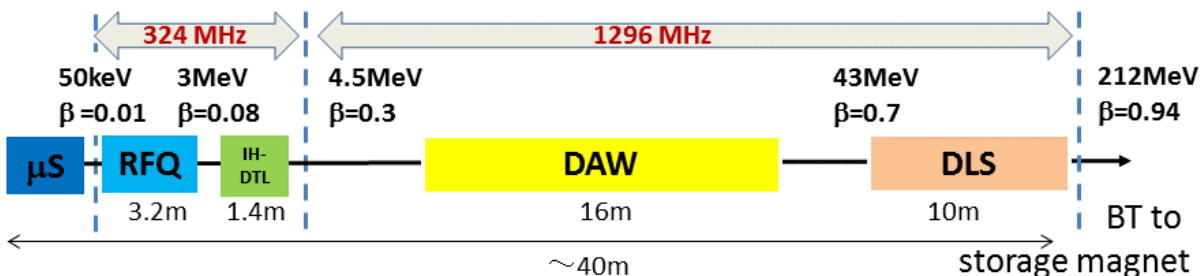


Figure 1: Schematic view of the muon linac.

本論文では、この世界初となるミュオンリニアックの全体設計、ビームシミュレーションについて報告する。各加速要素開発の概要についても触れるが、RFQでのミュオン加速の実証実験 [6]、IH-DTL 設計の詳細 [7] については、本学会の別の発表 [8] も参照されたい。

2. RFQ

ミュオンリニアックの最初期においては、J-PARC リニアック用に開発した RFQ を用いてビームコミッションを開始する予定である。Figure 2 に、この RFQ を示す。

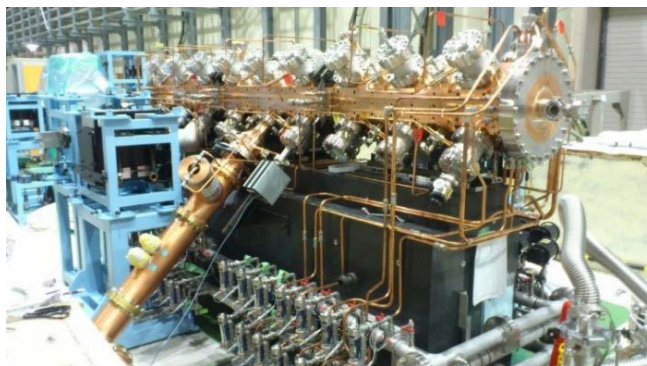


Figure 2: Photograph of the J-PARC RFQ.

前述のように、RFQ 入り口でのビームパルス幅は、10 ns 程度に広がる。Figure 3 に、RFQ 入り口でのビームの時間分布を示す。RFQ の周波数は、324 MHz なので、3 バンチにバンチングされることになる。この時点での規格化 rms 横エミッタンスは、x が 0.38π mm mrad、y が 0.13π mm mrad である。文献 [5] においては、位相方向の分布を平坦と仮定したが、今回はこの時間分布を用いてシミュレーションを行った。結果は、透過率 95%、x と y の規格化 rms エミッタンスがそれぞれ 0.30π mm mrad、 0.17π mm mrad であり、位相分布平坦な場合と大きな違いはない。

この RFQ は製作後長期間保管されていたが、真空引きを行い、ミュオン加速に必要な高周波を投入し、動作確認を行った [9]。このように、RFQ はミュオン加速に向けた準備は完了しており、適当なミュオン源が準備できればいつでも加速試験を行える状態にある。

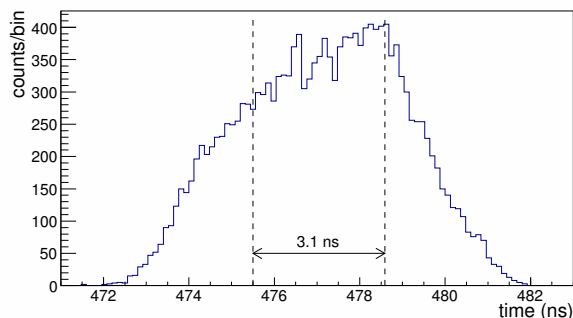


Figure 3: Time structure of μ^+ beam at the RFQ entrance.

3. IH

RFQ の後段加速器として良く用いられるのは Alvarez DTL であるが、より短い距離での加速を実現して、崩壊損失を最小化するために IH DTL を採用した。Figure 4 に、IH DTL の概要を示す。

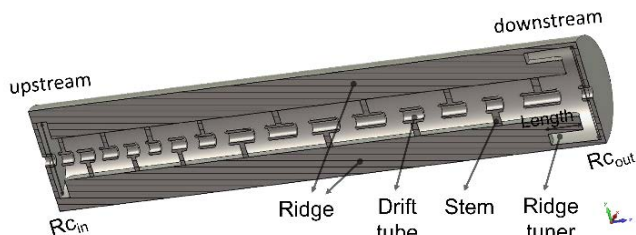


Figure 4: Schematic view of the IH DTL.

IH DTL は Alvarez DTL と異なり、H モード共振を利用するため、収束周期が Alvarez DTL の半分である $\beta\lambda/2$ となり、高い加速効率を有している [10]。そのため、高周波源も含めトータルでコスト削減が可能となる。さらに短距離加速・低コスト化を目指し、近年重イオンリニアックで実現 [11] した Alternating Phase Focusing (APF) 法に着目した。APF 法とは同期位相をセル毎に変調することで縦・横両方向の収束を高周波電場のみで実装する手法であり、ドリフトチューブに内蔵される横方向収束のための四重極磁石が不要となり低コスト化を可能とし、さらにドリフトチューブのギャップ面

を小さく出来るため加速効率も向上する。APFのビーム力学設計は、LINACsapf[12]を用いて行い、粒子シミュレーションにはGPT[13]を用いた[7]。Figure 5に、IH-DTL 出口での粒子分布を示す。

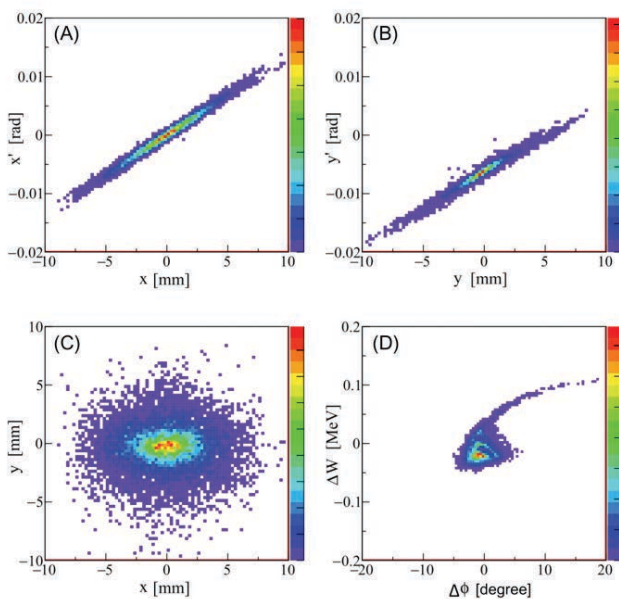


Figure 5: Simulated particle distributions at the exit of the IH-DTL.

この IH-DTL の詳細については、本学会の別の報告に詳しい[8]が、すでにビーム力学設計は完了し、現在は実機製作に向けて、チューナや、熱設計など、詳細な空洞設計を行っている。

4. DAW

IHで $\beta = 0.28$ まで加速した後は、加速効率を上げるため周波数を324 MHzから1296 MHzに上げる。加速構造は、DAW型CCL[14]を採用した。DAWは、高いシャントインピーダンスを持ち高効率加速に適した加速構造である。また、他の結合型加速空洞と比較して構造が単純なことから、結合定数が大きいため加工誤差の許容度が高いと考えられることからコスト的に有利であると見込まれる。

DAWセクションのビーム力学設計では、周波数のトランジションに対して十分な縦アクセプタンスを確保するため、同期位相を -30° とした。平均軸電場はキルバトリック限界電圧(E_k) [15]を考慮して5.6 MV/mと設定した。このときの最大表面電界は、 $0.9 E_k$ 以下となる。ビーム力学設計に必要なトランジットタイムファクタは、すでに終了している空洞設計[9]で得られた値を用いた。横方向の収束は四重極電磁石のダブレットを用い、Figure 6に示すように、収束周期ごとにTRACE3D[16]を用いてエミッタンスのマッチングを取り、周期構造になるように設計した。このとき、この種のリニアックの設計におけるセオリーであるが、構造共鳴を避けるために1収束周期あたりのゼロ電流位相進みを 90° 以下にするという条件を課した。現状、最も β の小さい始めのモジュールでの位相進みが約 83°

である。さらに、PARMILAを用いて全モジュールを通した粒子シミュレーションを行った。

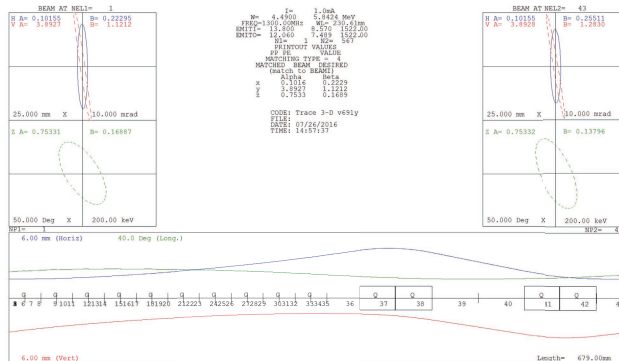


Figure 6: TRACE3D calculation for single focusing period of the first DAW section.

粒子シミュレーションの結果は、透過率ほぼ100%であり、DAW出口での規格化rms横エミッタンスはx,y方向それぞれ0.32と0.21 π mm mradであった。現在はアルミ製コールドモデルを製作し、低電力測定を行っている。

5. DLS

β が0.7以上の領域においては、さらなる加速効率の向上をねらって、電子加速器で広く用いられている円盤装荷構造(DLS)の進行波加速管を用いる。ただし、 $\beta=1$ 一定のためセル長が常に一定で済む電子リニアックの加速管と異なり、ミューオンリニアックでは、粒子が加速されていくにしたがい β が増加していくため、それに伴ってセル長を長くしていく必要がある。また、電子リニアックで最もよく用いられているSバンド(2586 MHz)に比べて、縦方向も横方向も大きなアクセプタンスが確保できるLバンド(1296 MHz)でまずはビーム力学設計を行っている。粒子シミュレーションにはGPTを用い、電場分布はSUPERFISHによる境界条件の異なる2つのモードを重畳して進行波とすることで計算した[17]。加速管の加速勾配は20 MV/mを想定し、約2 mの加速管と、その間にダブレットの収束電磁石を置く構成としている。Figure 7に、シミュレーションで得られたDLS出口での位相空間分布を示す。

横エミッタンスは $\epsilon_x = 0.32 \pi$ mm mrad、 $\epsilon_y = 0.25 \pi$ mm mradであり、運動量分散(RMS)は約0.04%である。Y方向でDLS入り口での不十分な横エミッタンスマッチングに起因するエミッタンス増大が見られるが、今後マッチングを改善するなどしてエミッタンス増大を減らしていく。

6. まとめ

これまで述べたように、RFQについては準備が完了しており、IH、DAWについては、ビーム力学設計はすでに完了し、実機空洞の製作に向けたスタディーを行っている。DLSについても初期のビーム力学設計を行った。ミューオンリニアックを通したビームシミュレーション結果をTable 2に、また横エミッタンスの成長を

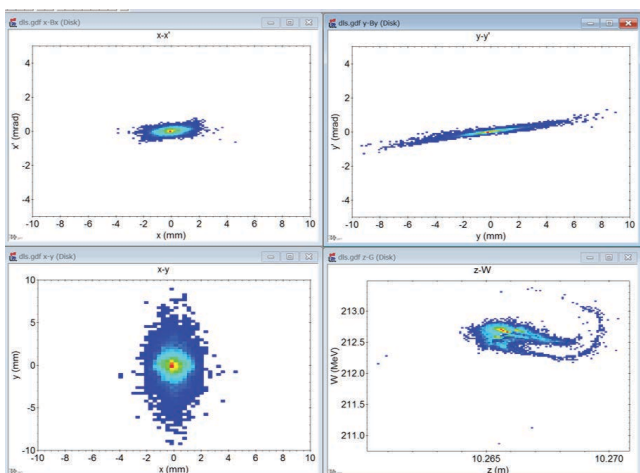


Figure 7: Simulated particle distributions at the DLS exit.

Figure 8にまとめる。おおむね想定エミッタンスからの致命的な超過は見られない。

Table 2: Summary of the Particle Simulation Through the Muon Linac

	RFQ	IH	DAW	DLS
Transmission (%)	95	100	100	100
Decay loss (%)	19	2	4	1
$\epsilon_{n,rms,x}$ (π mm mrad)	0.30	0.32	0.32	0.32
$\epsilon_{n,rms,y}$ (π mm mrad)	0.17	0.20	0.21	0.25

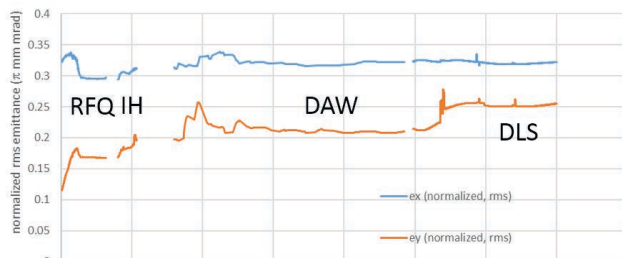


Figure 8: Simulated transverse emittance evolution through the muon linac.

現在は、この現実的なシミュレーション結果を用いた、g-2測定システムへの入射系[18]のシミュレーションを行っているところである。また、本稿では触れなかったが、非常に粒子数の少ないミュオンビームを検出するためのプロファイルモニタ、g-2測定の系統誤差を消すためにミュオンビームのスピンを反転するスピンローテータ、ミュオンビームのスピン偏極度を測定するためのスピンポラリメータなどの開発も並行して進めており、ミュオンg-2の測定精度向上に向けた実験準備を鋭意進行中である。

謝辞

本研究は日本学術振興会科学研究費 15H03666 及び 16H03987 の助成を受けております。また、J-PARC リ

ニアックグループにはあらゆる機会にご協力をいただいております、感謝いたします。

参考文献

- [1] J-PARC E34 conceptual design rport (2011).
- [2] G. A. Beer *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 (91C01).
- [3] P. Bakule *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. B 266 (2008) 335–346.
- [4] Y. Kondo *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 16 (040102) (2013) 040102.
- [5] Y. Kondo *et al.*, Proceedings of IPAC2015, Richmond, VA, USA, 2015, pp. 3801–3803.
- [6] R. Kitamura *et al.*, in these proceedings, MOP050.
- [7] O. Masashi *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams 19 (2016) 040101.
- [8] M. Otani *et al.*, in these proceedings, TUP017.
- [9] M. Otani *et al.*, Proceedings of 12th Annual Meeting of PASJ, Tsuruga, Japan, 2015, pp. 56–61.
- [10] U. Ratzinger, CERN Yellow Report No. 2005-003 No.2005-003 (2005) 351.
- [11] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. A 569 (2006) 685–696.
- [12] R. A. Jameson, arXiv 1404.5176 (2014).
- [13] Pulsar Physics, General Particle Tracer; URL <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [14] V. G. Andreev *et al.*, Proceedings of the 1972 Proton Linear Accelerator Conference, Los Alamos, New Mexico, USA, 1972, pp. 114–118.
- [15] W. D. Kilpatrick, Rev. Sci. Instrum. 28 (1957) 824–826.
- [16] K. R. Crandall, D. P. Rusthoi, "Trace 3-D Documentation", LA-UR-97-886 (1997).
- [17] M. Yamamoto; URL http://www.yamamo10.jp/yamamoto/study/accelerator/GPT/TW_structure/
- [18] H. Iinuma *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A 832 (2016) 51–62.