

ミューオン加速用 L バンド円盤装荷型加速管の基礎設計 BASIC DESIGN OF L-BAND DISK-LOADED STRUCTURE FOR MUON LINAC

鷲見一路^{*A)}、飯嶋徹^{A)}、居波賢二^{A)}、恵郷博文^{B)}、大谷将士^{B)}、近藤恭弘^{C, D)}、齊藤直人^{B)}、
須江祐貴^{A)}、竹内佑甫^{E)}、中沢雄河^{D)}、三部勉^{B)}、安田浩昌^{F)}、吉田光宏^{B)}、四塚麻衣^{A)}

Kazumichi Sumi^{*A)}, Toru Iijima^{A)}, Kenji Inami^{A)}, Hiroyasu Ego^{B)}, Masashi Otani^{B)},
Yasuhiro Kondo^{C, D)}, Naohito Saito^{B)}, Yuki Sue^{A)}, Yusuke Takeuchi^{E)}, Yuga Nakazawa^{D)},
Tsutomu Mibe^{B)}, Hiromasa Yasuda^{F)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Mai Yotsuzuka^{A)}

^{A)}Nagoya University, ^{B)}KEK, ^{C)}JAEA/J-PARC, ^{D)}Ibaraki University, ^{E)}Kyushu University, ^{F)}University of Tokyo

Abstract

The muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment precision measurement experiment planned at J-PARC will use a low-emittance muon beam obtained by accelerating a thermalized 25 meV muons up to 212 MeV in the linear accelerator. The high-velocity section of the LINAC is going to use four disk-loaded structures (DLS) of the traveling-wave type. The operating frequency is set to L-band (1296 MHz) to ensure longitudinal acceptance. In this study, to realize the acceleration gradient as high as possible in the L-band DLS with the power of 40 MW, parameters such as the cell length and the iris aperture were adjusted by evaluating the uniformity of the acceleration gradient, and the group velocity at first and last cell. In this paper, we will show the design of the L-band DLS that accelerates muons from about 70% to 80% of the speed of light. The designing method in this study yielded the structural parameters of the DLS optimized to generate accelerating gradients as much as high and constant at a rated power of 40 MW. Particle simulations confirmed the beam acceleration with transverse emittances and momentum spread required for the designed DLS.

1. はじめに

素粒子物理学における標準理論は、ヒッグス粒子をはじめ、多くの観測結果を説明する優れたモデルであるが、物質優勢宇宙や暗黒物質の謎を説明することはできない。そのため、標準理論を超える新物理の存在が期待されており、現在観測できている物理量により精密な測定で標準理論を検証することは、素粒子実験分野の重要な役割の1つである。その中でもミューオン異常磁気能率 ($g_\mu - 2$) の精密測定は特に注目されている実験である。

$g_\mu - 2$ は、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) による 20 年ほど前の測定 [1] により、標準理論とのずれの兆候が発見されていた。2021 年 4 月に新たに発表されたフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) による測定結果 [2] は BNL の測定値と非常に近い値を示し、標準理論が予想する値 [3] と実験値の世界平均との乖離は 4.2 標準偏差となった。この乖離に新物理の寄与が期待されており、また、その新物理が観測可能な大きさの電気双極子能率 (EDM) をもたらす可能性も挙げられている。一方、これら 2 つの実験は同じ運動量のミューオンビーム、同じ蓄積リングを用いており、同様の手法による系統的なずれの可能性も否定できない。よって、この長年の議論に終止符を打つには FNAL の更なる測定と合わせて、J-PARC にて計画されている全く異なる手法を用いた精密測定 [4] による独立な検証が必要である。

J-PARC の実験の概略図を Fig. 1 に示す。この実験では、陽子ビームから生成したミューオンを冷却し、線形加速器で加速することで得られる低エミッタンスミューオンビームを用いる。このビームのエミッタンスは先行研究のおよそ 1000 分の 1 と見込まれ、ミューオンがそ

の寿命程度飛行する間のビーム広がりを十分に抑えることができる。これにより静電四極レンズの除去、小型ミューオン蓄積リングの使用など、先行研究とは異なる系統での精密測定が可能となる。

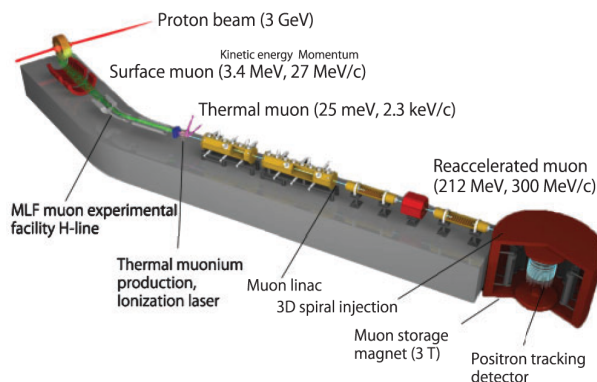


Figure 1: Schematic view of the muon $g - 2$ /EDM experiment at J-PARC [4].

ミューオン線形加速器は、Fig. 2 に示すように、加速中に変化するミューオンの速度 $\beta = v/c$ に合わせて Radio Frequency Quadrupole (RFQ)、Inter-digital H-mode Drift-Tube Linac (IH-DTL)、Disk And Washer Coupled Cavity Linac (DAW-CCL)、Disk-Loaded Structure (DLS) の 4 種類の加速空洞を用い、高効率かつエミッタンス成長を抑えた加速を行う。ミューオン用の加速空洞は前例がないため各要素について新たに開発が必要であり、それぞれの要素について、RFQ による負ミューオニウムの加速実証 [5]、IH-DTL 試作機の大電力試験に向けた開発 [6]、DAW-CCL の cold model による性能評価 [7]、DLS のビーム力学設計 [8] などが行われてきた。

* ksumi@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

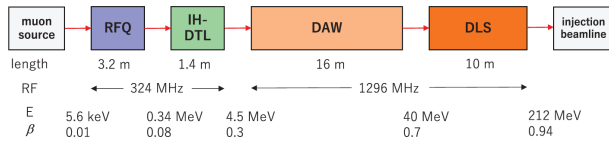


Figure 2: Configuration of the muon LINAC [4].

ミュオンリニアック高速部に用いる予定の DLS は電子加速でよく用いられる構造であり、加速対象のミュオンの β が 0.7 以上と概ね光速に近いことから使用できると判断した。高速部は 10 m 程度の長さで運動エネルギー約 40 MeV から 212 MeV までの加速を担う。ビーム力学設計ではこれらの要求を満たすリニアック高速部を約 2 m の DLS4 本で構成した。各 DLS の間にはそれぞれ 2 つの四極電磁石が設置され、ビームの集束を担っている。DLS の加速モードには加速効率が高い TM01- $2\pi/3$ を採用し、速度変化により位相から外れる粒子を減らすために加速位相 ϕ_s を -10 deg に設定した。運転周波数 f は、加速効率、RF 発散力、縦方向のアクセプタンスを考慮し、初段 DLS については前段の DAW-CCL と同じ周波数 1296 MHz を用いることにしている。限られた加速区間と実験から要求されるビーム品質を鑑みると、高速部への要求は以下の 3 項目である。

- 20 MV/m の加速勾配
- 1.5π mrad 以下の横方向規格化 100% エミッタンス
- 0.1% 以下の運動量分散

本研究は、ミュオンを $\beta = 0.7$ から 0.8 程度まで加速する初段 DLS について、入力電力、群速度、位相ずれ、加速勾配をビーム力学設計時より詳細に考慮した設計を行なったものである。本論文では、2 章で空洞設計について、3 章で粒子シミュレーションによる空洞の評価について説明し、最後にまとめと展望を述べる。

2. DLS 設計

DLS は円筒導波管にアイリス付きディスクを周期的に装荷した構造で、ディスクの間隔をビーム速度と位相速度が合うように調整することで、加速管として使用可能となる。ここで DLS のセル構造を決めるパラメータを Fig. 3 のように定義する。

本研究の設計では、L バンド DLS のセル数を暫定で 40 とし、入力電力を放射光入射器増強計画 [9] のために開発された L バンドクライストロン [10] を参考に 40 MW と仮定した。また、群速度 v_g については、カプラーセルの電圧定在波比 (VSWR) 1.05 以下を目標とし、共振周波数調整可能精度 $|\Delta f|$ が 1296 MHz に対して 150 kHz 程度であるという仮定のもと、

$$|\Delta f| = \frac{VSWR - 1}{4\sqrt{VSWR}} f \frac{2}{2\pi/3} \frac{v_g}{c} \quad (1)$$

の関係式 [11] に基づき $v_g/c > 1\%$ と定めた。ディスク厚 t は 5 mm で固定した。

ミュオン用 DLS では電子加速の場合と異なりビーム速度が緩やかに変化するため、セル長 D をセルごとに換え、各セルで位相速度の調整を行う必要がある。ビー

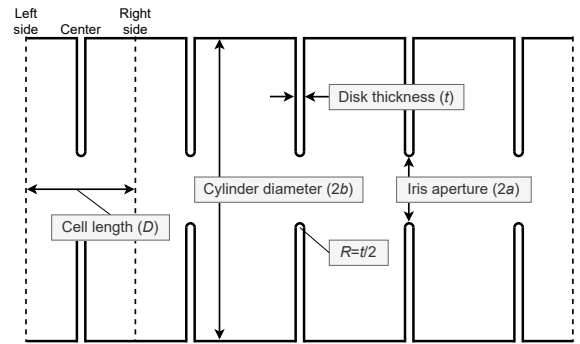


Figure 3: Cavity parameters of the disk-loaded structure. Each parameter, except disk thickness, takes a different value in each cell.

ム速度と位相速度を合わせるためのディスクの間隔調整は、セル番号 n 、各セルの中央でのビーム速度 β_{center} 、左端・中央での運動エネルギー $W_{\text{left}} \cdot W_{\text{center}}$ 、そのセルでの運動エネルギー増分 ΔW 、ミュオン質量 m_μ 、高周波波長 λ 、想定される平均加速勾配 E_0 を用いた以下の 4 式で行った。

$$\beta_{\text{center}}(n) = \frac{\sqrt{W_{\text{center}}^2(n) + 2W_{\text{center}}(n)m_\mu}}{W_{\text{center}}(n) + m_\mu} \quad (2)$$

$$D(n) = \beta_{\text{center}}(n)\lambda/3 \quad (3)$$

$$\Delta W(n) = E_0 D(n) \cos(-10 \text{ deg}) \quad (4)$$

$$W_{\text{center}}(n) = W_{\text{left}}(n) + 0.5\Delta W(n) \quad (5)$$

ここで、Eq. (4) では各セルの平均電場 E_{cell} が E_0 と一致していること、同期位相が -10 deg からずれないことを仮定した。Equation (2) の W_{center} は最初の計算ではわからないため、初期値として $W_{\text{center}} = W_{\text{left}}$ とし、Eqs. (2)-(5) の計算を数回繰り返すことで β_{center} , D , W_{center} を収束させた。

D の調整にて E_{cell} が均一であると仮定したため、ディスクアイリス径 $2a$ を調整することで準定勾配型 DLS を設計することとした。 E_{cell} は、各セルでの損失電力 ΔP 、単位長さあたりのシャントインピーダンス Z を用いて

$$E_{\text{cell}}(n) = \frac{1}{D(n)} \sqrt{\Delta P(n) \times Z(n)D(n)} \quad (6)$$

と表せる。 ΔP は、そのセルの左端での電力 P_{left} 、Q 値 Q 、減衰定数 $\alpha(n) = \pi f / (v_g(n)Q(n))$ を用いて

$$\Delta P(n) = P_{\text{left}}(n) \{1 - \exp(-2\alpha(n)D(n))\} \quad (7)$$

と表せる。 v_g は主に $2a$ に依存し、 Z と Q は主に D に依存するため、準定勾配型 DLS を設計するには D と $2a$ の調整を複数回交互に行う必要がある。そこで、あらかじめ取り得る (D, a) を持つセルの電磁場計算を数百通り行い、得られたパラメータを D , a の 2 変数関数でフィットすることで、 v_g , Z , Q の関数を得た。ここで、本論文中の電磁場計算は 2 次元軸対称電磁場解析コード SUPERFISH [12] による計算を指すものとする

る。SUPERFISH を用いた進行波の計算手法については [13, 14] を参照されたい。関数は

$$F_{m\text{th order polynomial}}(D, a) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^i p_{ij} D^{i-j} a^j \quad (8)$$

のような多項式とし、各 (D, a) の電磁場計算による値との差が 10^{-3} 以下になるように、 Z と Q については 2 次、 v_g については 3 次まで用いた。例として v_g を表す多項式とフィットに用いた点を Fig. 4 に示す。

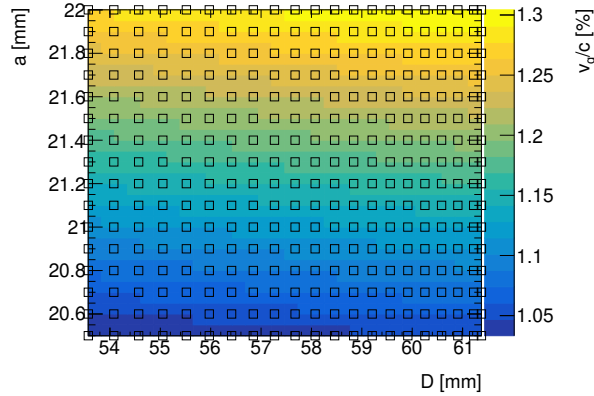


Figure 4: Third order polynomial function (gradation plot) of group velocity, and fitting points (open squares) calculated by SUPERFISH.

多項式を用いた DLS 設計の最適化の過程を Fig. 5 に示す。まず、 $2a$ は最初と最後のセルの値を定め、間のセルでは n の一次関数になるように

$$2a(n) = 2a(1) + \frac{2a(40) - 2a(1)}{40 - 1} \times (n - 1) \quad (9)$$

と定義した。ここで、最後のセルの方が $2a$ が小さくなるため、このセルで v_g/c が 1% 以下とならないように $2a(40) = 41$ mm で固定した。最初の計算では E_0 の値を適当な初期値として $E_{\text{cell}}(1)$ 程度に定めて D を計算し、 $2a$ の調整を行なった (Fig. 5 の iteration 0 から 1)。次に、得られた DLS 全体での平均電場を E_0 に定めてセル長を調整した (iteration 2)。セル長の僅かな変化で E_{cell} も変化するため、それに合わせて再度 $2a(1)$ の調整を行い (iteration 3)、次の E_0 の微調整 (iteration 4) 後でも $E_{\text{cell}}(1) \simeq E_{\text{cell}}(40)$ となったことを以て収束とした。

最適化により各セルの D 、 a が決まったため、最後に電磁場計算により、シリンダ内直径 $2b$ の変更による空洞共振周波数の調整と Z や E_{cell} などのパラメータの確認を行なった。最適化した空洞パラメータとその空洞で電磁場計算を行なった場合の各パラメータを Table 1 にまとめる。設定した入力電力と群速度の条件のもとでは加速勾配は 12.3 MV/m 程度までしか上がらないことが確かめられた。また、得られた各セルの電場は Fig. 6 に示すように多項式計算とのずれが比較的大きい DLS 両端でも 10^{-3} 程度であると確認され、勾配差が 1% 以内の準定勾配型の設計が完了した。

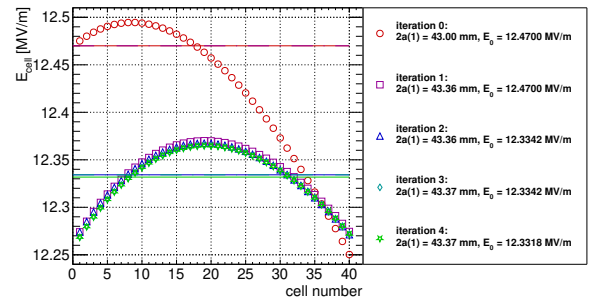


Figure 5: Optimization process and the accelerating gradient at each cell (E_{cell}) in each process. The horizontal lines show the assumed accelerating gradient (E_0) set in each process.

Table 1: Summary of Design Parameters of the Quasi-Constant Gradient DLS

Parameters	Upstream	Downstream
Structure	Disk-loaded traveling-wave quasi-CG type	
Operating frequency (f) [MHz]	1296.0	
Accelerating mode	TM01- $2\pi/3$	
Synchronous phase (ϕ_s) [deg]	-10	
Length [m]	2.315	
Number of regular cells	40	
Input RF power [MW]	40	
Accelerating gradient (E_0) [MV/m]	12.3318	
Beam energy [MeV]	41.2446	69.3544
Beam velocity	0.695	0.797
Speed of light (β)		
Cell length (D) [mm]	53.698	61.394
Iris aperture ($2a$) [mm]	43.37	41.00
Cylinder diameter ($2b$) [mm]	181.147	180.126
Disk thickness (t) [mm]	5	
Quality factor (Q)	17116	18788
Shunt impedance (Z) [$M\Omega/m$]	29.15	36.93
Group velocity	1.22	1.05
Speed of light (v_g/c) [%]		
Filling time [ns]	663	
Field attenuation factor (α)	0.0648	0.0690

3. 粒子シミュレーション

設計した DLS と電磁場計算で得た電磁場分布を用いて、General Particle Tracer (GPT) [15] による粒子シミュレーションを行なった。ミュオン用 DLS は電子用とは異なり、想定した加速勾配と実際の加速勾配にずれがある場合に位相のずれも生じ得る。そのため、まずは粒子シミュレーションを用いて設計した DLS でミュオンを加速した場合の加速勾配と位相ずれを評価した。評価のために輸送する粒子は進行方向のみに運動量を持ち、初期位置が DLS の軸上にある運動エネルギー 41.2446 MeV のミュオン 1 つである。そのミュオンが各セルの右端に到達する時間 $t_{\text{beam}}(n)$ と高周波の周期との時間差を位相差に変換した

$$\Delta\phi \equiv \phi - \phi_s = 360ft_{\text{beam}}(n) - 120n \quad (10)$$

を位相ずれ $\Delta\phi$ と定義した。また、 ϕ_s 付近で各セルを通過するミュオンが受ける平均の加速勾配を

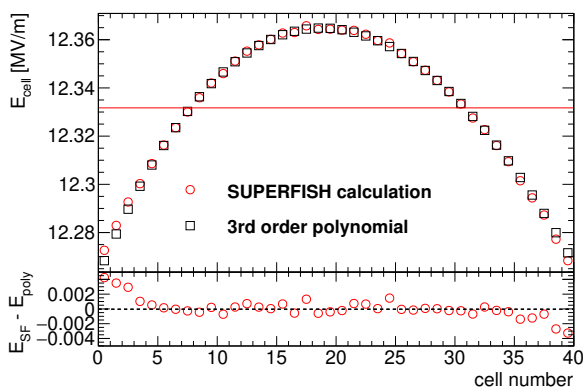


Figure 6: Average electric field and its residual in each cell calculated by the two methods. The red horizontal line in upper figure shows the average accelerating gradient.

$E_{\text{cell}} \cos(\phi)$ と表記する。この 2つのパラメータは Fig. 7 に示すように、DLS 出口で -0.2 deg の位相ずれであり、その影響で下流の $E_{\text{cell}} \cos(\phi)$ が僅かに低下しているが、概ね想定通りの加速勾配をミュオンに与えられていることが確かめられた。

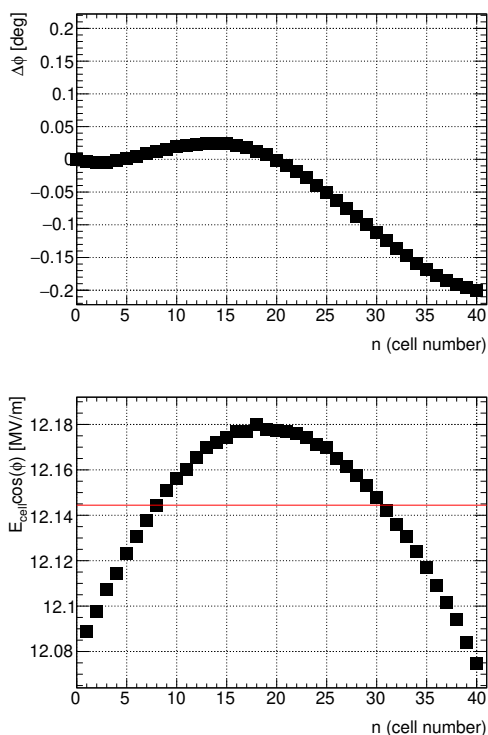


Figure 7: Simulated phase slip ($\Delta\phi$) from the synchronous phase (ϕ_s) and the energy gain per unit length of each cell ($E_{\text{cell}} \cos(\phi)$). The red horizontal line in the lower figure shows the expected energy gain ($E_0 \cos(\phi_s)$).

次に、この DLS で上流の加速器シミュレーションで得られた分布の輸送シミュレーションを行い、得られるエミッタンスを評価した。使用した粒子分布は、DAW-

CCL までのシミュレーション [16] と四極電磁石 3 つからなる DAW-CCL と DLS の間のマッチングセクションのシミュレーション [8] を経たものである。初段 DLS 出口で得られた位相空間分布は Fig. 8 に示すようになり、横方向規格化 RMS エミッタンスと運動量分散は高速部出口での要求に近い値である。運動エネルギーは設計と 0.1 MeV 以下のずれであり、想定通りに合わせることが可能となった。

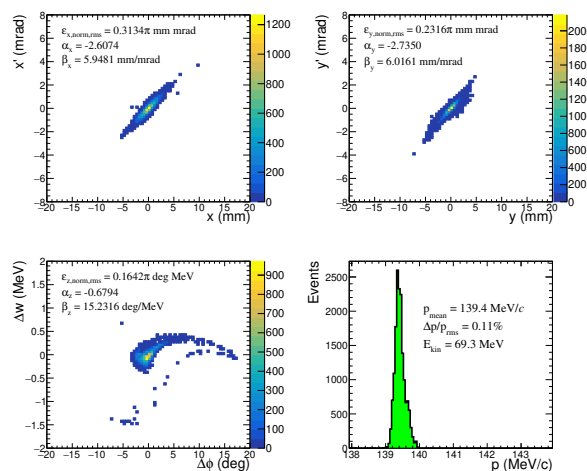


Figure 8: Simulated particle distributions at the DLS exit.

最後に DLS の各位置での横方向規格化エミッタンスとビームエンベロープをそれぞれ Fig. 9 と Fig. 10 に示す。エミッタンスは RMS 表記であり、ビームエンベロープはビーム分布の RMS 幅の 6 倍を示している。横方向エミッタンス及びエンベロープには加速による顕著な増加は見られず、エンベロープについては $2a$ より十分小さいことが確かめられた。

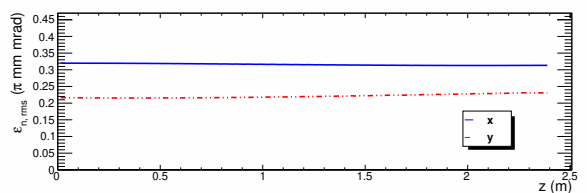


Figure 9: Transverse normalized rms emittance evolution through the DLS section.

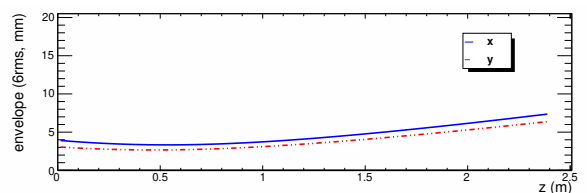


Figure 10: Beam envelope of 6rms in the DLS section.

4. まとめと展望

本論文では、40 MW の入力電力、群速度 1% 以上の条件でミュオン用 DLS の設計を行なった。ミュオンの速度に合わせるためのセル長調整手法を確立し、ディスクアイリス径の調整を経て勾配差が 1% 以内の準定勾配型 DLS を得た。また、粒子シミュレーションを行い、位相のずれが DLS 出口で -0.2 deg 程度であること、ビームが感じる電場と下流でのビームエネルギーも想定通りであること、加速によるエミッタンス及びビームサイズに顕著な増加が見られないことを示した。

しかし、今回の設計により 40 MW の L バンド DLS では要求される 20 MV/m の加速勾配を達成できないことも示された。したがって、今後は周波数を倍増した S バンド DLS の基礎設計を、本論文の示したミュオン用 DLS の設計手法を適用し進めていく。また、本論文ではカプラーセルの電磁場を考慮していないため、3 次元電磁場解析コードを用いたカプラーセルの詳細な設計を行う。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18H03707、JP18H05226、JP20H05625 の助成を受けたものです。

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*, vol. 73, p. 072003, 2006. doi:10.1103/PhysRevD.73.072003
- [2] B. Abi *et al.*, “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm”, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 126, p. 141801, 2021. doi:10.1103/PhysRevLett.126.141801
- [3] T. Aoyama *et al.*, “The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model”, *Phys. Rep.*, vol. 887, pp. 1-166, 2020. doi:10.1016/j.physrep.2020.07.006
- [4] M. Abe *et al.*, “A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment”, *PTEP*, vol. 5, p. 053C02, 2019. doi:10.1093/ptep/ptz030
- [5] M. Otani *et al.*, “負ミュオンを用いたミュオン RF 加速実証試験”, *Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aug. 7-10, 2018, pp. 239-243.
- [6] Y. Nakazawa *et al.*, “APF 方式 IH-DTL によるミュオン加速実証試験のための診断ビームラインの開発”, *Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sep. 2-4, 2020, pp. 254-257.
- [7] Y. Takeuchi *et al.*, “ミュオン線形加速器のための Disk-and-Washer 空洞の開発”, *Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Sep. 2-4, 2020, pp. 158-162.
- [8] Y. Kondo *et al.*, “Beam dynamics design of the muon linac high-beta section”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 874, p. 012054, 2017. doi:10.1088/1742-6596/874/1/012054
- [9] I. Sato *et al.*, “放射光入射器増強計画 —KEKB に向けて—”, *KEK Report 95-18*, 1996.
- [10] M. Kubosaki *et al.*, “L バンド 40MW クライストロンの開発”, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Aug. 1-3, 2011, pp. 1366-1368.
- [11] S. Miura, “進行波加速管の精密インピーダンス調整方法”, Thesis, 総合研究大学院大学, 2006; <https://ci.nii.ac.jp/naid/500000412586>
- [12] J. H. Billen and L. M. Young, “Poisson Superfish”, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA, Rep. LA-UR-96-1834, 1996.
- [13] M. Yamamoto; http://www.yamamo10.jp/yamamoto/study/accelerator/GPT/TW_structure/
- [14] K. Sumi *et al.*, “Basic Design Study for Disk-Loaded Structure in Muon LINAC”, *Proceedings of the 12th International Particle Accelerator Conference*, p. TUPAB174, 2021.
- [15] Pulsar Physics, “General Particle Tracer”; <http://www.pulsar.nl/gpt/>
- [16] M. Otani *et al.*, “Development of a Muon Linac for the g-2/EDM Experiment at J-PARC”, *Proceedings of LINAC 2016*, East Lansing, MI, USA, pp. 1037-1041.