

ミューオン線形加速器のための Disk-and-Washer 空洞の詳細設計 DETAILED DESIGN OF THE DISK-AND-WASHER CAVITY FOR MUON LINEAR ACCELERATOR

竹内 佑甫 ^{*A)}、東城 順治 ^{A)}、中沢 雄河 ^{B)}、北村 遼 ^{C)}、近藤 恭弘 ^{C)}、森下 卓俊 ^{C)}、岩下 芳久 ^{D)}、
Cicek Ersin ^{E)}、大谷 将士 ^{E)}、河村 成肇 ^{E)}、齊藤 直人 ^{E)}、二ツ川 健太 ^{E)}、三部 勉 ^{E)}、山崎 高幸 ^{E)}、
吉田 光宏 ^{E)}、須江 祐貴 ^{F)}、四塚 麻衣 ^{F)}、鷲見 一路 ^{F)}、安田 浩昌 ^{G)}

Yusuke Takeuchi ^{*A)}, Junji Tojo ^{A)}, Yuga Nakazawa ^{B)}, Ryo Kitamura ^{C)}, Yasuhiro Kondo ^{C)}, Takatoshi Morishita ^{C)},
Yoshihisa Iwashita ^{D)}, Cicek Ersin ^{E)}, Masashi Otani ^{E)}, Naritoshi Kawamura ^{E)}, Naohito Saito ^{E)}, Kenta Futatsukawa ^{E)},
Tsutomu Mibe ^{E)}, Takayuki Yamazaki ^{E)}, Mitsuhiro Yoshida ^{E)}, Yuki Sue ^{F)}, Mai Yotsuzuka ^{F)},
Kazumichi Sumi ^{F)}, Hiromasa Yasuda ^{G)}

^{A)}Kyushu University, ^{B)}Ibaraki University, ^{C)}JAEA/J-PARC, ^{D)}Kyoto University

^{E)}KEK, ^{F)}Nagoya University, ^{G)}University of Tokyo

Abstract

The muon anomalous magnetic moment ($g_\mu - 2$) and the muon electric dipole moment (EDM) are one of the most promising probes to search for new physics beyond the particle standard model. The muon $g-2$ /EDM precision measurement experiment is now under preparation at J-PARC, and the muon linear accelerator for the experiment is under development. A Disk-and-Washer (DAW) cavity is used for the medium-speed part of the accelerator, and muons are accelerated from $v/c = \beta = 0.3$ to 0.7 at an operating frequency of 1.296 GHz. The first tank of the actual DAW cavity is scheduled to be fabricated this year, and the detailed design for the fabrication has been carried out. In this paper, the details of the design of the first tank of the actual DAW cavity and the progress of the project will be reported.

1. はじめに

ミューオンの異常磁気モーメント ($g_\mu - 2$) では、素粒子標準模型によって予測される理論値とブルックヘブン国立研究所 (BNL) E821 実験によって 0.54 ppm の精度で測定された実験値との間に 3σ 以上の不一致があり [1]、そしてこれは標準模型を超える新しい物理学の兆候ではないかと長い間議論されてきた。2021 年 4 月、フェルミ国立加速器研究所 (FNAL) の実験グループは BNL の実験装置を改良し、同様の方法で実験を行った結果を発表した。この結果は BNL の実験と一致しており、2 つの実験の平均と標準模型の予測 [2] の間の不一致は 4.2σ [3] に更新された。その結果、標準模型を超える新物理発見への期待はますます高まっている。しかし、2 つの先行実験はいずれも同じミューオン蓄積リングを使った全く同じ手法による測定であるため、異なる新しい手

法で測定を行い、この不一致が標準模型を超えた未知の現象によるものなのか、それとも実験手法に起因するものなのかということを検証することが非常に重要である。そこで、2 つの先行実験から完全に独立したアプローチによる実験 (E34 実験) が大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で計画されている。E34 実験は、 $g_\mu - 2$ を 0.1 ppm の精度で測定することができる [4]。この実験では、先行実験で主要な系統誤差の一つであったミューオンビームに関連する誤差を排除するために、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。また、崩壊損失を抑えるために、 $2.2 \mu\text{s}$ のミューオンの寿命に比べて、ミューオンを十分に短い時間で加速する必要がある。ミューオン線形加速器は、Fig. 1 に示すように、ビーム速度に応じて最適な 4 つの加速空洞を適用することによって高効率の加速を実現し、ミューオンは室温 (25 meV) からほぼ光速 (212 MeV) まで加速される [5]。

* takeuchi@epp.phys.kyushu-u.ac.jp

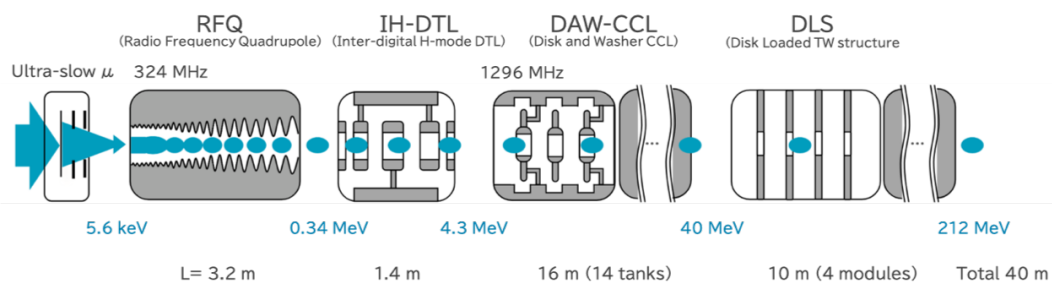


Figure 1: Configuration of the muon linac.

2. DISK-AND-WASHER 空洞

ミューオン線形加速器中速部には Disk-and-Washer (DAW) 空洞を採用しており、ミューオンは 1.296 GHz の運転周波数で $v/c=\beta=0.3$ から 0.7 まで加速される。DAW 空洞はディスクとワッシャーの組み合わせによって構成される CCL の一種で、1970 年代初頭に初めて提案された加速構造であり [6]、Moscow Meson Factory の陽子加速器において実用化された例がある [7]。DAW 空洞は高いシャントインピーダンスを有し、高効率な加速に適している。また、他の CCL と比較して、構造が単純であり結合定数が大きいいため、許容できる製作誤差が大きく、コスト面・電磁場の安定性の面で有利であると考えられる。一方で、加速モード以外の隣接モードが多数存在するために設計・解析が複雑となるため、実際の運用例は多くない。しかし、近年の計算機パワーと加工技術の向上に伴い、詳細設計が可能な環境が整ってきている。とはいえ、陽子に比べると急速に速度が上昇するミューオン専用の設計が必要であることに加えて、 $\beta=0.3$ という速度領域はこれまでの実績に比べて低いため、入念な設計を進めてきた [8]。ビームダイナミクス設計には TRACE3D [9] 及び PARMILA [10] を用いた。まず、TRACE3D のマッチング機能を用いて固有ビームパラメータを算出し、PARMILA を用いて全加速空洞のパラメータの決定を行なった。空洞の設計には、SUPERFISH [11] を用いた 2 次元電磁場計算及び CST MICROWAVE STUDIO [12] を用いた 3 次元電磁場計算を利用した。ミューオン加速用 DAW は、それぞれ 11 の加速セルと 10 の結合セルからなるタンク 14 個で構成される。タンク間はブリッジカプラーで接続され、ビーム集束用の四重極電磁石ダブレットが各ブリッジカプラー内に設置される。Figure 2 にミューオン加速用 DAW の構成を示す。

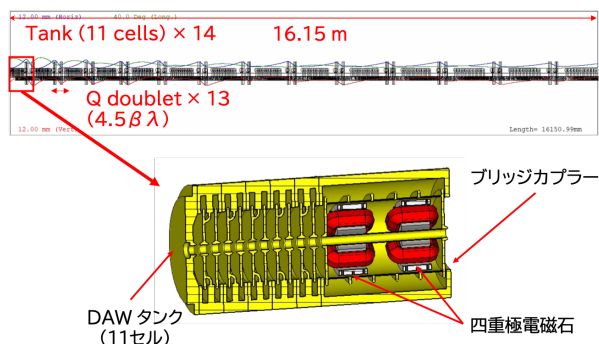


Figure 2: Top: Overall view of the DAW CCL. Bottom: Enlarged view of the first tank, the bridge coupler connected to it, and the quadrupole magnet installed inside it.

実機製作に向け、これまでに、アルミ製のコールドモデルによる低電力試験 [13] ならびに空洞電力・位相などに由来するエラースタディ [14]、冷却システムの検討 [15] を完了している。本年度には、全 14 タンク中の 1 タンク目の基本パーツを製作し、低電力試験まで行う予定である。

3. 実機制作に向けた詳細設計

3.1 製作手順の検討

本年度製作予定の DAW 空洞 1 タンク目は、空洞外周部を構成するディスク、加速ギャップを構成するワッシャーからなる。ワッシャーはサポートによってディスクと結合される。タンク両側には、端板及びブリッジカプラーとボルト結合可能なフランジによるエンドセルを構成する。ディスク 1、ワッシャーおよびそれを固定するサポートを Step1 ロウ付けにより組み立てた部品を Unit と呼び、5 Unit の間に 4 枚のディスク 2 を挟んで積層、Step2 ロウ付けにより結合することで加速空洞を構成する。Figure 3 に現在検討されている実機製作手順の概略図を示す。

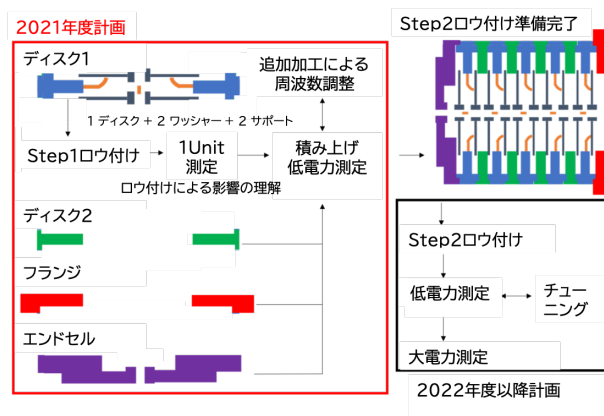


Figure 3: Schematic diagram of the fabrication procedure.

本年度は、Step1 ロウ付けの後、1 Unit 及び積層した状態での低電力試験を行い、ロウ付け後の空洞形状への影響の測定、空洞の基本性能の測定等を行い、製作手法の確立を図るとともに、来年度以降に予定されている Step2 ロウ付け、大電力試験への準備を完了させる予定である。

3.2 ディスク部分詳細設計

実機の製作に際して、電場強度が高くなると予想されるディスクのワッシャーに近接した箇所の R 面取りを施すこととし (Fig. 4 参照)、このために CST シミュレーションを用いて周波数の微調整のための空洞形状の最適化を行なった。最終的に決定した形状パラメータは Table 1 の通りである。

3.3 エンドセル設計

今回製作する 1 タンク目にはエンドセル (端板) が含まれるが、端板の設計は未完成であったため設計を行なった。基本的な設計は通常のディスク・ワッシャー部分の寸法と同じとし、Fig. 5 左に示すように CST シミュレーションを用いて 1 Unit と端板を組み合わせたモデルにおいて加速モードの周波数が 1.296 GHz に一致するように図中に示した REnd という寸法の最適化を行なった。加速モードの周波数の REnd への依存性を Fig. 5 右に示す。

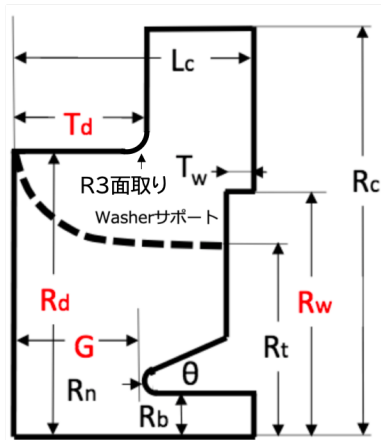


Figure 4: Parameters considered in optimizing the cavity shape. R chamfer (radius 3 mm) at the disk corner where the disk and washer are in close proximity.

Table 1: Optimized Parameters of Tank 1 (fa: Accelerating Mode Frequency, fc: Coupling Mode Frequency)

β	0.296
L [mm]	17.118
Rb [mm]	12
Rn [mm]	2.6
Tw [mm]	3.5
Rc [mm]	146.422
Rd [mm]	97.314
Td [mm]	9.640
Rw [mm]	109.236
G [mm]	5.313
fa [GHz]	1.29607
fc [GHz]	1.29623

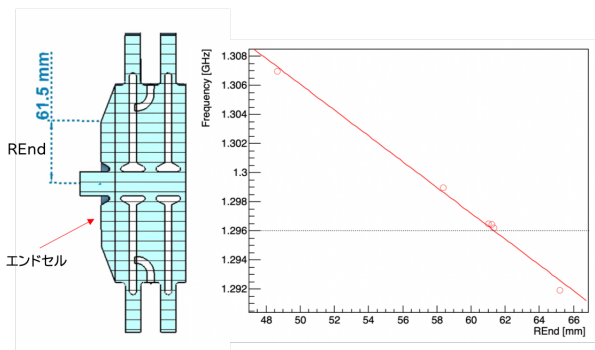


Figure 5: Left: A 3D simulation model used for end-cell shape optimization. The optimum value for REnd is 61.5 mm. Right: Dependence of acceleration mode frequency on REnd. The black dotted line represents the acceleration frequency.

3.4 ディスク寸法誤差の検討

実機製作時には、Step1 ロウ付け後に 1 Unit での周波数測定を検討している。これをもとに、製作時の寸法誤差及び Step1 ロウ付けによる変形によって生

じる周波数変化を把握し、追加加工を行い周波数の微調整を行う。今回、加速モード・結合モードそれぞれの周波数に対して各寸法の変化がどのような影響をもたらすかを事前に把握し、周波数微調整の際の加工手順の検討を行うため、最適化された空洞形状が、Td、Rc、Rd について $\pm 50 \mu\text{m}$ の範囲で $10 \mu\text{m}$ 刻みで変化したときの共振周波数の変化を調べた。各寸法への依存性の CST シミュレーションの結果を Fig. 6 に示す。加速モードと結合モードで各寸法に対する依存性が異なることがわかる。各寸法変化に対する各モードの周波数変化量を Table 2 に示す。特に、加速モードは Td にだけ影響を受けるため、まず Td を変化させて加速モードを調整、その後、Rc、Rd を変化させ結合モードを調整するといった手法が可能であると考えられる。

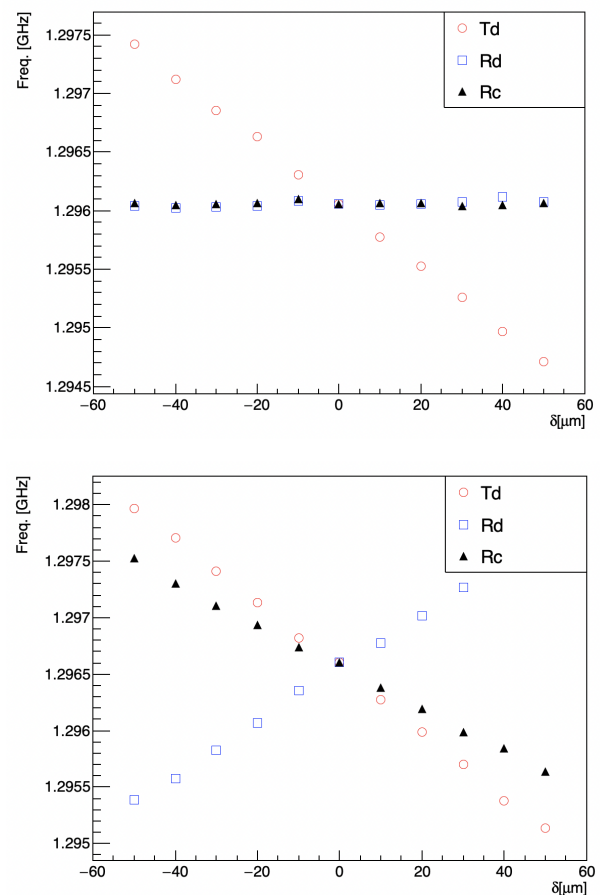


Figure 6: Sensitivity of frequency to Td, Rd, and Rc. Top: Accelerating mode frequency. Bottom: Coupling mode frequency.

Table 2: Sensitivity of Frequency to Td, Rd, and Rc

Parameters	df/dTd	df/dRd	df/dRc
fa [kHz/ μm]	-27.01	0	0
fc [kHz/ μm]	-28.63	23.87	-18.63

3.5 ワッシャー設置誤差の検討

Step1 ロウ付けではディスク1と2枚のワッシャーをサポートによって固定するが、この際ワッシャーの設置誤差が生じる可能性がある。ワッシャーによって加速ギャップを構成する DAW 空洞ではこの設置誤差が軸上電場に影響を与えることが予想される。今回、CST シミュレーションを用いて、ワッシャーにビーム軸方向の設置誤差を与えた際に各ギャップの軸上電場強度へどのような影響が出るか調べた。Figure 7 に使用したシミュレーションモデルを示す。実際に製作する実機では片側はブリッジカプラーが接続されるが、ブリッジカプラーの詳細設計が未完了のため今回は両側に端板を取り付けたモデルでシミュレーションを行なった。各ワッシャー(1-5)に軸方向の設置誤差を $\pm 200 \mu\text{m}$ の範囲で $50 \mu\text{m}$ 刻みで与えた際の各ギャップ(1-11)中心の軸方向電場誤差をプロットしたものを Fig. 8 に示す。等価回路モデルを用いた計算においてワッシャーのずれを加速セルと結合セル間の結合度の変化として考慮すると、傾向を再現することができた (Fig. 9 参照)。これにより、ワッシャーが寄った側の結合度が小さくなり、反対側の結合度が大きくなること、 $200 \mu\text{m}$ の設置誤差で約 2% の結合度の変化が生じることがわかった。これらの結果から製作時の要求は電場誤差 1% に相当する $50 \mu\text{m}$ を目安に検討を進めている。

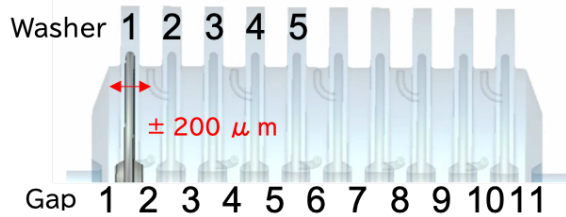


Figure 7: The model used in the simulation for the study of washer installation error. Due to the symmetry of the model, only washers 1 to 5 were considered.

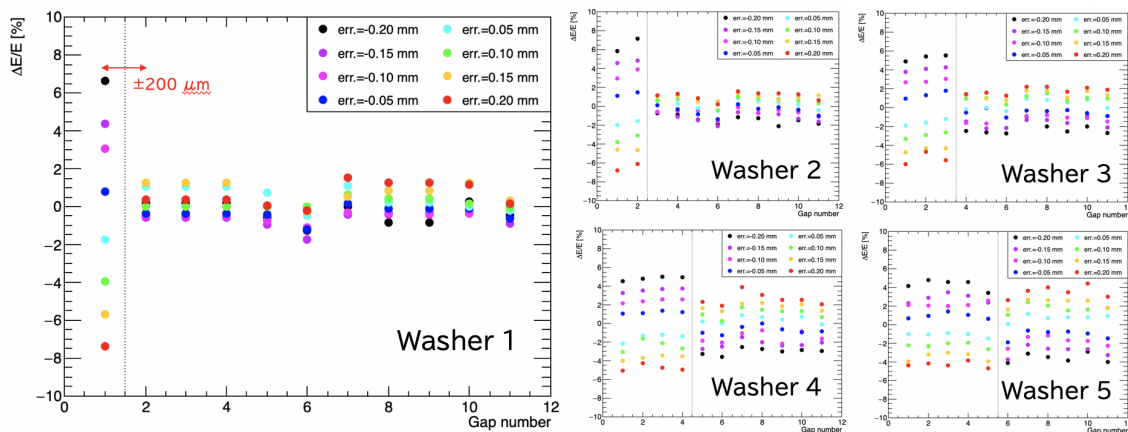


Figure 8: The variation of on-axis electric field in each gap when a washer is displaced in the beam-axis direction. Black dotted lines represents the position of displaced washer. The number of gaps affected increases as the position of the displaced washer moves towards the center of the tank. For example, a displacement of washer 5 of $\pm 200 \mu\text{m}$ will result in a field error of about 4% for almost all gaps.

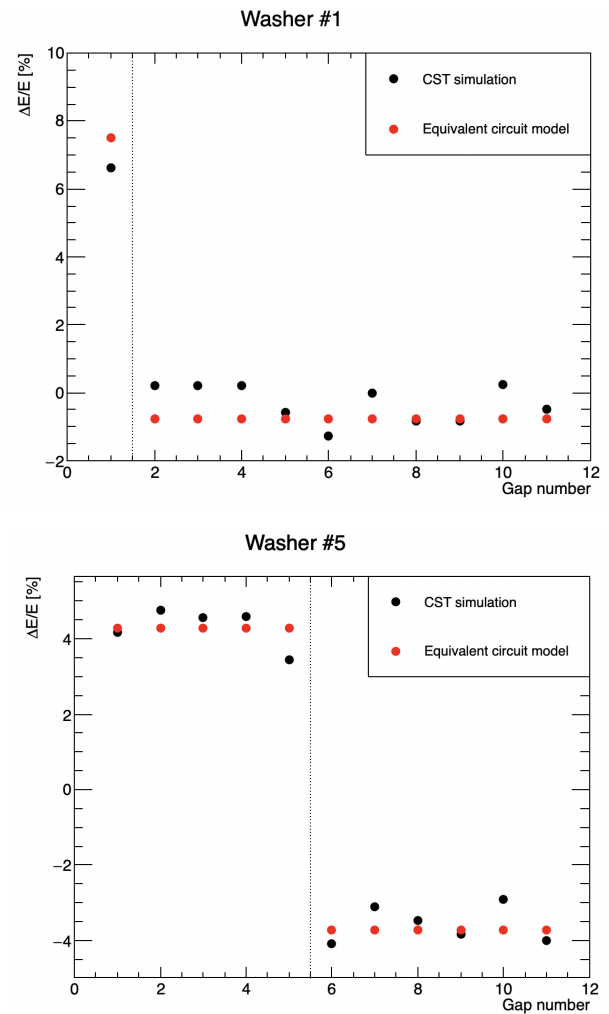


Figure 9: Comparison of CST simulation results (Black) with calculations using the equivalent circuit model (Red). Black dotted lines represents the position of displaced washer. Top: $200 \mu\text{m}$ displacement is applied to washer 1. Bottom: $200 \mu\text{m}$ displacement is applied to washer 5.

4. まとめと展望

2021 年度中に DAW 全 14 タンク中の 1 タンク目の基本パーツを製作し、低電力試験まで行う予定である。今回、製作に向けた詳細設計の現状について報告を行なった。既に設計が完了していたディスク・ワッシャーに加えて、エンドセルの設計を行なった。また、製作手順の検討を行い、ロウ付け前後で必要となる周波数調整のために各ディスク寸法誤差の周波数への影響をシミュレーションによって調べ、周波数調整加工の手順を検討した。さらに、ワッシャーの設置誤差の軸上電場強度への影響についてもシミュレーションと等価回路を用いた計算によって理解を試み、要求設置誤差の検討を行なった。今後は、今回検討できていないディスク・ワッシャーに関する他の誤差の影響の見積もりや、Step2 ロウ付け後の周波数・軸上電場調整方法などの検討を進め、これらの検討を元に実機製作に向けた工学モデルの設計を行い、実際に製作に着手する。

謝辞

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

参考文献

- [1] G. W. Bennett *et al.*, “Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL” , *Phy. Rev.D*, vol. 73, no. 7, p. 072003, Apr. 2006; doi:10.1103/PhysRevD.73.072003
- [2] T. Aoyama *et al.*, “The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model” , *Physics Reports*, vol. 887, pp.1–166, 2020; doi:10.1016/j.physrep.2020.07.006
- [3] B. Abi *et al.*, “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.46 ppm” , *Phy. Rev. Lett.*, vol. 126, no. 14, p.141801, Apr. 2021; doi:10.1103/PhysRevLett.126.141801
- [4] M. Abe *et al.*, “A New Approach for Measuring the Muon Anomalous Magnetic Moment and Electric Dipole Moment” , *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2019, no. 5, May. 2019; doi:10.1093/ptep/ptz030
- [5] Y. Kondo *et al.*, “Re-Acceleration of Ultra Cold Muon in JPARC Muon Facility” , in *Proc. IPAC’ 18*, Vancouver, BC, Canada, Apr.–May 2018, pp. 5041–5046 ; doi:10.18429/JACoW-IPAC2018-FRXGBF1
- [6] V. G. Andreiev *et al.*, *Proc. 1972 Linear Acel. Conf.*, Los-Alamos, USA, (1972).
- [7] S. K. Esin *et al.*, *Proc. 1988 Linear Accel. Conf.*, Virginia, USA, (1988).
- [8] M. Otani *et al.*, “ Disk and washer coupled cavity linac design and cold-model for muon linac” in *Proc. IPAC’19*, Melbourne, Australia, May 2019, 1924–1927 ; doi:10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPRB117
- [9] K. R. Crandall and D. P. Rustoi, Los Alamos Report No.LA-UR-97-886. (1997).
- [10] H. Takeda, Los Alamos Report No. LA-UR-97-886.
- [11] J. H. Billen and L. M. Young, “Poisson Superfish” , LA-UR-96-1834, (1996).
- [12] CST Studio Suite, Computer Simulation Technology (CST); <https://www.cst.com/products/CSTMWS>
- [13] Y. Takeuchi *et al.*, “Development of Disk-and-Washer Cavity for Muon Linear Accelerator” , *Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Japan (virtual)*, Sep. 2-4, 2020, pp. 158-162.
- [14] Y. Takeuchi *et al.*, *JPS Conf. Proc.* , 33, 011129 (2021).
- [15] Y. Takeuchi *et al.*, “ Development of a Disk-and-Washer Cavity for the J-PARC Muon g-2/EDM Experiment” in *Proc. IPAC’21*, Campinas, SP, Brazil (virtual), 24-28 May 2021.