

ミューオン加速用円盤装荷型加速管におけるカプラーセルの設計 DESIGN OF COUPLER CELLS IN THE DISK-LOADED STRUCTURE FOR THE MUON LINAC

鷲見一路^{*,A)}, 飯嶋徹^{A)}, 居波賢二^{A)}, 茨木優花^{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)}, 守屋克洋^{C)}, 安田浩昌^{F)}, 吉田光宏^{B)}, 四塚麻衣^{A)}

Kazumichi Sumi^{*,A)}, Toru Iijima^{A)}, Kenji Inami^{A)}, Yuka Ibaraki^{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)}, Katsuhiro Moriya^{C)}, Hiromasa Yasuda^{F)}, Mitsuhiro Yoshida^{B)}, Mai Yotsuzuka^{A)}

^{A)} Nagoya University, ^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Japan Atomic Energy Agency (JAEA), ^{D)} Ibaraki University, ^{E)} Kyushu University, ^{F)} University of Tokyo

Abstract

A novel experiment is planned at J-PARC to precisely measure the muon anomalous magnetic moment ($g-2$) and the electric dipole moment (EDM). A low-emittance muon beam produced by muon acceleration is used in the experiment to independently verify a sign of physics beyond the standard model of particle physics shown by previous experiments. The muon linear accelerator (linac) uses four types of acceleration cavities suitable for each velocity range, accelerating from 5.6 keV to 212 MeV in kinetic energy with low decay losses. This method will enable a beam with a normalized transverse emittance of approximately 1π mm mrad and a momentum spread of less than 0.1%. Disk-loaded structures (DLS) with a high accelerating gradient of about 20 MV/m generated by the TM01- $2\pi/3$ mode at 2592 MHz are responsible for acceleration from 40 MeV onward in the last high-velocity section of the muon linac. Since the disk spacing of the DLS for muon varies proportionally to the beam velocity, the dimensions of the coupler cell were optimized using a reference cavity aligned with the regular cell adjacent to the coupler cell and a quasi-constant gradient cavity for the muon acceleration, which is in a simulation using CST Studio Suite. In addition, we evaluated the effect of the electromagnetic field distortion generated in the coupler cell on the beam.

1. はじめに

ミューオンの双極子能率は、素粒子標準模型を超える新物理に対して感度を持つ物理量である。異常磁気能率 ($g-2$) の精密測定については、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) とフェルミ国立加速器研究所 (FNAL) で行われた先行実験 [1, 2] により平均で 0.35 ppm¹ の精度で得られた測定値と理論予想値 [3] との間に 4.2 標準偏差の乖離が存在し、新物理の寄与の兆候と目されている。電気双極子能率 (EDM) の精密測定については、BNL により 95% 信頼区間で 1.8×10^{-19} e cm の上限値 [4] が定められているが、さらに精密に測定することで物質と反物質の非対称性を生み出す新物理を発見できる可能性がある。

そこで、 $g-2$ の乖離を独立に検証し EDM をより精密に測定するために、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) にて新たな実験を計画している [5]。この実験の測定手法は BNL および FNAL で用いられた手法とは全く異なり、ミューオン冷却と再加速で実現する運動量 300 MeV/c (標準偏差 0.1% 以下)、横方向規格化エミッタンス約 1π mm mrad の低エミッタンスビームを用いる。このビームを 3 T のソレノイド電磁石に蓄積しスピン歳差運動を観測することで、 $g-2$ を 0.45 ppm の精度で、EDM を 1.5×10^{-21} e cm の感度で測定する計画である。そのために、我々は前例の

ないミューオン専用の加速器を開発している [6, 7]。

加速によりミューオンの速度は光速の 1% 以下から 94% まで幅広く変化するため、ミューオン用の加速器は Fig. 1 のように 4 種類の加速空洞で構成される。上流の 3 つは主に陽子加速器で用いられるものであるが、光速の 70% 以上にあたる高速部では、160 MeV のエネルギー増幅を担うために電子加速器として高勾配加速の実績が多数ある円盤装荷型進行波加速管 (DLS) を用いる。本論文では、このミューオン用 DLS の開発状況について触れた後、高速部の最上流に位置する DLS1 のカプラーセルの高周波設計とビームダイナミクスについて述べる。

2. ミューオン用円盤装荷型進行波加速管

DLS は、円形導波管を孔の空いたディスクで仕切り、高周波の位相速度をビームの速度に合わせることで加速を実現するものである。ここで、仕切られたひとつひとつの空洞をセルと呼ぶ。ミューオン用 DLS では、加速中にビームの速度が急激に変化するため 1 セルごとにディスクの間隔 (セル長) を調整する必要がある。

これまでの開発では、まず、TM01- $2\pi/3$ モードの DLS 4 本と四極電磁石で構成された高速部のビームダイナミクス設計を行った [8]。その後、速度の同期をより正確に行うためにビーム孔 (アイリス) の内径を調整した準定勾配型 DLS を設計し、昨年 の年会で報告した [9]。現在は、さらに入力電力をより現実的な値である 40 MW 程度と定め、その条件で約 10 m

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

¹ parts per million

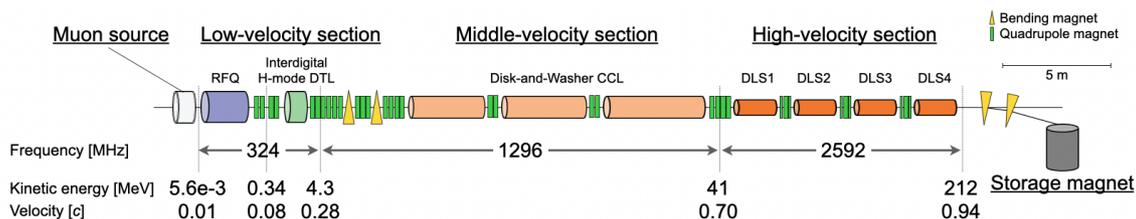


Figure 1: Schematic configuration of the muon linac.

の高速部で十分な加速を行えるよう、運転周波数を2592 MHzに倍増しシャントインピーダンスを上げた設計を採用している [10]。

これまでの DLS の高周波設計では、SUPERFISH [11] による2次元電磁場解析を用いていた。レギュラーセルについては、定在波を重ね合わせて進行波加速管の電磁場分布を得て、カプラーセルについては、軸対称構造で定在波が生じると近似するというものである。今回は、加速管製作に向けたカプラーセルの詳細な高周波設計を行うために、CST Studio Suite [12] による3次元電磁場解析を用いた。高速部の中でも最上流のDLS1は特にセル長が短くRF特性が異なるため、重点的に計算を行いカプラーセルおよび隣接するレギュラーセルを試作することとした。

3. カプラーセルの高周波設計

カプラーセルの設計では、まず開口部の数を決定した。カプラーセルのビーム軸付近の電磁場は開口部に引っ張られて歪むため、開口部の数を増やせば対称性が良くなるが、カプラーセル周りの構造が複雑になり製作費用が増える。ミュオン用DLSでは、後述のように1開口部のカプラーセルを設計し、ビームシミュレーションを踏まえてその形状で要求を満たせると判断した。この1開口部のカプラーセルの形状としては、RF特性が十分に研究され大電力での運転実績もあるKEK入射器用の新型Sバンド加速管 [13] で使用されている形状を踏襲した。その形状はFig. 2に示すように、1つの開口部で加速管と矩形導波管(WR-284)を結合し、ビーム軸を挟んで開口部の反対側に電磁場対称性補正用の凹み(三日月カット)を設けている。ビームポートは、Rを5mm、直径を最下流のレギュラーセルアイリス径と同じ22.6mmとし、外部への電磁場漏洩をセル中央の2桁以上小さい強度に抑えつつ、R付近の最大表面電場強度がレギュラーセル側のアイリスより大きくならないようにしている。矩形導波管には、短辺の長さをカプラーセルと合わせるためにステップを設けており、CSTを用いてステップ間の距離を1/4管内波長付近で反射が最小になるように調整している。

カプラーセルを調整するためには、周波数と移相が正確な基準管が必要となる。ミュオン用準定勾配型DLSでは、セル毎にセル長とアイリス径が異なるため、カプラーセルに隣接するセルの寸法と等しいセルを複数並べて基準管とする。この基準管の

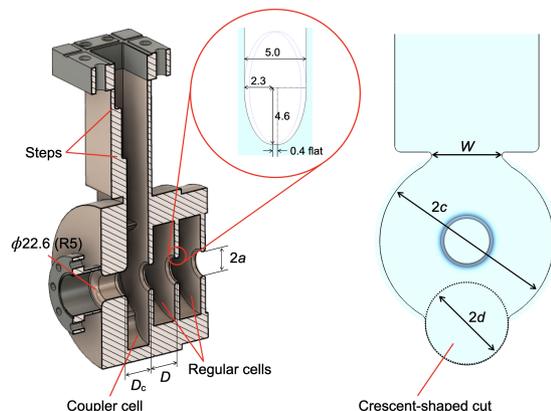


Figure 2: Schematic view of the cutaway and the vacuum portion of the coupler cell.

高周波設計においては、これまでの設計 [10] に製作精度と表面電場強度を考慮したアイリス断面形状の変更を加えている。まず、R面取り加工時にアイリス径が変わらないように0.4mmの直線部を設けることとした。次に、アイリスの断面形状を1:2の楕円にし、R部分に集中する電場を分散させることで最大表面電場強度を抑えることとした。以上の変更を加えた上流下流それぞれの基準管のパラメータはTable 1のようになっており、主にアイリス径の違いで分散曲線が大きく異なっている。

Table 1: Parameters of Reference Cavities

Parameters	Upstream	Downstream
$\pi/2$ -mode frequency ($f_{\pi/2}$) [MHz]	2574.8	2582.5
Coupling coefficient (k)	0.026	0.015
Cell length (D) [mm]	26.935	31.436
Iris aperture ($2a$) [mm]	25.875	22.620
Cylinder diameter [mm]	92.332	90.874
Disk thickness [mm]	5.000	5.000

カプラーセルの調整には三浦氏が開発した手法 [14] を用いた。この手法は従来のKuhl法とは異なり、カプラーセルとレギュラーセルの構造が異なっている、すなわち、分散曲線が異なっている場合にも適用可能である。よって、セル長が異なるという点で構造がわずかに異なるミュオン用DLSでも適切である。この手法に基づき、シミュレーションによる寸法の最適化では、Fig. 2にあるセル内径

2c、アイリス幅 W 、カット径 $2d$ の3つを変数、Fig. 3 に表す Nodal-shift 法で得られるカプラーセルと隣接するレギュラーセルとの位相差、そのセルとさらに隣のレギュラーセルとの位相差を最適化の指標とした。寸法の初期値は、隣接するレギュラーセルの中央を電氣的に短絡した状態で、

- 運転周波数 $f_a = 2592$ MHz で反射係数が最小となること
- 外部 Q 値が基準管のパラメータから概算した値 $Q_{\text{ext}} \approx \left(\frac{1}{2} \frac{f_{\pi/2}}{f_a} k \sin(2\pi/3)\right)^{-1}$ と合うこと
- 磁場中心がビーム軸上にあること

を最適化条件に Frequency Domain Solver の Optimizer で求めた。Nodal-shift 法による微調整は手で繰り返し、位相差が製作精度より少し高精度となるように、240 deg の位相差に対して誤差が 0.5 deg 程度になるまで行った。この時のカプラーセルの寸法と高周波特性は Table 2 に示す値となっており、これを設計値とした。また、2c 径と幅 W の値を設計値付近で動かす、Fig. 4 に示す各高周波特性の寸法依存性を求めた。カプラーセル共振周波数と外部 Q 値は両方の寸法に依存するが変化量が異なるため、調整量を組み合わせて最適値に持っていく。磁場中心のずれは 2c に依存するが、その値が設計と実際に大きく異ならなければ数百 μm のずれに抑えられるため、製作時にはカットの径は設計値で固定する。現在はここで述べた設計でカプラーセルを試作しており、計算した依存関係をもとに切削加工による拡大調整を行う予定である。

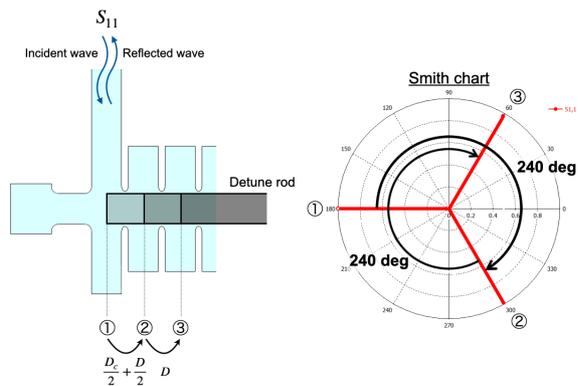


Figure 3: Setup and expected phase shift of Nodal-shift method for the muon DLS.

反射率は、シミュレーション上で同じ寸法のカプラーセルを2つ用意し、基準管の両端に接合して進行波の伝搬を計算することで評価した。反射は、電圧定在波比 (VSWR) で 1.01 程度と実機性能として想定している 1.1 程度より小さく抑えられている。また、移相を調整した数セルの準定勾配管でも同様の計算を行い、カプラーセル寸法の微調整なしで同程度の VSWR であることを確かめた。

Table 2: Parameters of Coupler Cells

Parameters	Upstream	Downstream
Resonant frequency [MHz]	2584.1	2587.4
External Q	84	155
Cell length (D_c) [mm]	26.885	31.462
Iris aperture ($2a$) [mm]	25.875	22.620
Cylinder diameter ($2c$) [mm]	87.197	87.452
Iris width (W) [mm]	35.40	31.62
Cut diameter ($2d$) [mm]	41.40	36.67

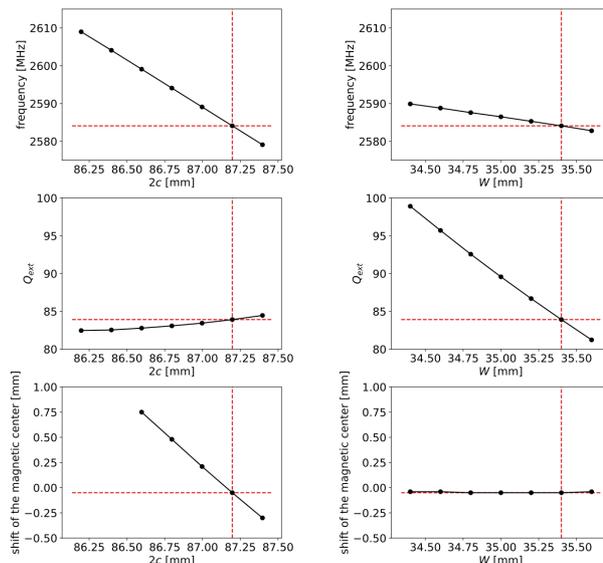


Figure 4: Sensitivity of each RF parameter to $2c$ and W in the upstream coupler cell.

4. ビームダイナミクス

カプラーセルで生じる電磁場は、カットにより対称性がある程度補償されるが、Fig. 5 に示すように水平方向と垂直方向での非対称性が残る。これがどの程度ビームの品質に影響するかを見るために、CST で算出したカプラーセルの電磁場を取り込んだ General Particle Tracer (GPT) [15] によるビームシミュレーションを行った。DLS1 での規格化横方向エミッタンスとビームエンベロープは Fig. 6a のようになり、垂直方向の電場強度増加によって見られる 20% 以上のエミッタンス増加とエンベロープの増加が見られた。一方で、軸対称分布の場合でも 10% 程度のエミッタンス増加が見えており、DLS に入射されるビームの有限のバンチ長に起因する発散力の感じ方の違いが根本の原因であり、それを改善することで実際のカプラーセルのような電磁場分布でもエミッタンス増加を抑制できると期待できる。

改善する手法としては、バンチ長を短くし位相差の影響を減らす、電場またはビームサイズを小さくし発散力を抑制する、などが挙げられるが、今回は

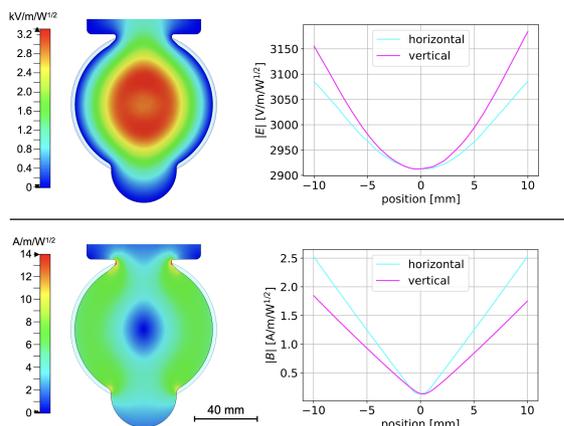
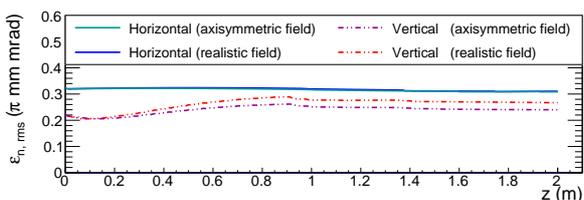
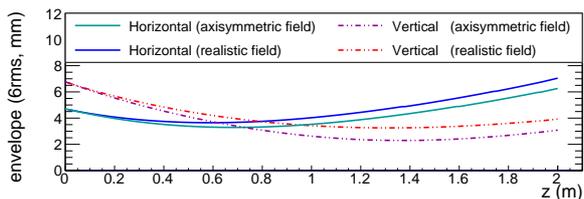


Figure 5: Magnitude profile of the electromagnetic field at the center of the coupler cell.



(a)

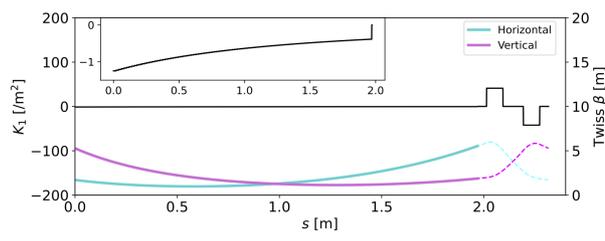


(b)

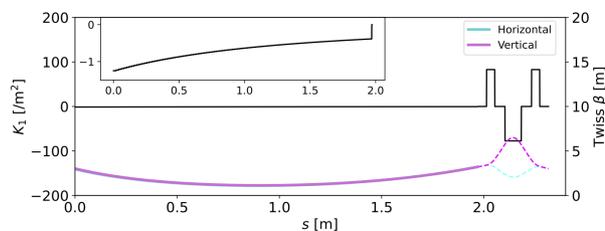
Figure 6: Evolution of the normalized transverse RMS emittance (a) and beam envelope (b) in the DLS1.

高速部でのラティス設計変更のみで完結するビームサイズを小さくする方法を検討した。これまでの高速部の β 関数は、Fig. 7a に示すように DLS1 とダブルレット四極電磁石で構成されるラティスで周期境界条件を満たすように設計していたが、これにより DLS1 入口で垂直方向のビームサイズが大きくなっていた。これを Fig. 7b に示すようにトリプレット四極電磁石に変更することで、 $\beta_y(0)$ が 5.6 m から 3.1 m に減少し、ビームサイズを約 25% 小さくすることが可能である。トリプレットの β 関数の初期条件合うように入射ビーム分布を調整し、同様のビームシミュレーションを行った結果は Fig. 8 のようになった。 $z \approx 1$ m までにかけてはわずかにエミッタンス増加が見えるが、途中で約 0.5% の粒子に縦方向のアクセプタンスによる損失判定が適用され、出口でのエミッタンス増加は数% 以内に抑制できている。ここでのビーム損失は入射ビームのバンチ長で削減可能なため、今回の結果とは別で上流のビーム生成・加速の影響についても検討を行なっていく。また、

今回用いたラティスでは、トリプレットの磁場勾配が従来の倍程度となっている点が課題として残っており、四極電磁石の詳細設計を通してこの勾配を輸送ラインの限られた空間の中で実現できる解を探していく。



(a) DLS1 and doublet quadrupole magnet



(b) DLS1 and triplet quadrupole magnet

Figure 7: Lattice functions from DLS1 entrance to DLS2 entrance.

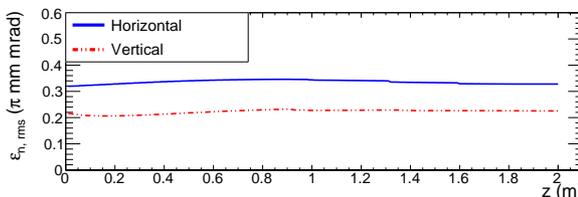


Figure 8: Evolution of the normalized transverse RMS emittance in the DLS1 under the initial conditions for triplet lattice.

5. まとめと展望

J-PARC でのミューオン g-2 と EDM の精密測定に向け、ミューオン用 DLS の開発を進めている。ミューオン用 DLS は 2592 MHz での運転を想定しており、今回はより詳細な設計として 3 次元電磁場解析による基準管とカプラーセルの高周波設計を行った。セル長とアイリス径が各セルで異なることを考慮した手法でのカプラーセル寸法調整をシミュレーションし、上流下流ともに反射を十分に抑制可能な調整が可能であることを示した。また、結合部に起因する電磁場の歪みについて、トリプレット四極電磁石を採用し高速部最上流でのビームサイズを抑制することで規格化エミッタンスの増加を抑えられることを示した。

現在は、設計したカプラー部および基準管を試作しており、製作した空洞の高周波特性を測定し、シ

ミュレーションとの差を検証していく。また、製作誤差や投入する高周波の振幅誤差および位相誤差等の影響を研究するために、等価回路モデルによる評価を行う予定である。

法”, PhD thesis, 総合研究大学院大学, 2006.;
<https://ci.nii.ac.jp/naid/500000412586>
[15] Pulsar Physics, “General Particle Tracer”;
<http://www.pulsar.nsl/gpt/>

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP18H03707、JP18H05226、JP20H05625、21K18630、21H05088、22H00141、22J20870、JST 創発的研究支援事業 JPMJFR2120、三菱財団自然科学研究助成の助成を受けたものです。また、本稿は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託事業で得られた成果を基に作成したものです。

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] G. W. Bennett *et al.*, “Improved limit on the muon electric dipole moment”, *Phys. Rev. D*, vol. 80, p. 052008, 2009.
doi:10.1103/PhysRevD.80.052008
- [5] M. Abe *et al.*, “A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2019, p. 053C02, 2019.
doi:10.1093/ptep/ptz030
- [6] M. Otani, “First muon acceleration and muon linear accelerator for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2022, p. 052C01, 2022. doi:10.1093/ptep/ptac067
- [7] Y. Kondo *et al.*, “The Muon Linac Project at J-PARC”, Proceedings of the 31st Linear Accelerator Conference, 2022.
- [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] K. Sumi *et al.*, “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”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 133-137.
- [10] K. Sumi *et al.*, “Design and Beam Dynamics Study of Disk-Loaded Structure for Muon Linac”, Proceedings of the 13th International Particle Accelerator Conference, 2022, pp. 94-97. doi:10.18429/JACoW-IPAC2022-MOP0ST017
- [11] J. H. Billen and L. M. Young, “Poisson Superfish”, LA-UR-96-1834, 1996.
- [12] <https://www.3ds.com/ja/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [13] H. Ego *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器用 S バンド加速管の開発”, Proceedings of the 18th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 9-12, 2021, pp. 130-132.
- [14] S. Miura, “進行波加速管の精密インピーダンス調整方