

ミューオン加速用 Disk-and-Washer 試作機の低電力試験 LOW-POWER TEST OF A PROTOTYPE DISK-AND-WASHER STRUCTURE FOR MUON ACCELERATION

近藤彩夏^{*,A)}, 飯嶋徹^{A,B)}, 鷲見一路^{A)}, 竹内佑甫^{C)},
Cicek Ersin^{D)}, 恵郷博文^{D)}, 大谷将士^{D)}, 中沢雄河^{D)}, ニツ川健太^{D)}, 三部勉^{D)}, 吉田光宏^{D)},
近藤恭弘^{E)}, 森下卓俊^{E)}, 岩下芳久^{F)}

Ayaka Kondo^{*,A)}, Toru Iijima^{A,B)}, Kazumichi Sumi^{A)}, Yusuke Takeuchi^{C)},
Ersin Cicek^{D)}, Hiroyasu Ego^{D)}, Masashi Otani^{D)}, Yuga Nakazawa^{D)}, Kenta Futatsukawa^{D)},
Tsutomu Mibe^{D)}, Mitsuhiro Yoshida^{D)},

Yasuhiro Kondo^{E)}, Takatoshi Morishita^{E)}, Yoshihisa Iwashita^{F)}

^{A)} Graduate School of Science, Nagoya University

^{B)} Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe, Nagoya University

^{C)} Tsung-Dao Lee Institute and School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University

^{D)} High Energy Accelerator Research Organization

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

^{F)} Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University

Abstract

The precision measurement of the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment at J-PARC aims to independently verify a sign of physics beyond the Standard Model of particle physics using low-emittance beams produced by cooling and accelerating muons. The muon linear accelerator used in this experiment consists of four types of accelerating cavities, each suitable for a specific speed range. The design and fabrication methods for the medium speed range have not yet been established, which are responsible for accelerating from 30% to 70% of the speed of light. Currently, a Disk-and-Washer (DAW)-type accelerator with high acceleration efficiency is being focused on as a medium velocity range accelerator. The DAW for muon consists of tanks, which are acceleration cavities, and bridge couplers (BCs), which couple tanks electromagnetically and provide space for quadrupole magnets used for focusing the beam. We designed and built a BC prototype, evaluating its fabrication accuracy and conducting low-power tests. These low-power tests checked high-frequency characteristics (resonant frequency, Q_0 -value) and measured the electromagnetic field via bead pull. This paper reports on the BC's design using electromagnetic field analysis code, its fabrication accuracy, and the prototype's low-power test results.

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 (Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC) では、新物理の寄与が期待されている物理量である、ミューオンの異常磁気能率 ($g - 2$) を 0.45 ppm の精度で測定し、電気双極子能率を 1.5×10^{-21} e·cm の感度で探索する実験を計画している [1]。この実験ではミューオンを冷却・加速して得られる低エミッタンスミューオンビームを用いるという新手法での測定が計画されており、米国で行われてきた $g - 2$ 測定とは独立な検証を行う [2, 3]。実験概要を Fig. 1 に示す。

ミューオンの加速にはミューオンの速度範囲に応じた 4 種類の加速器を用いる。中速度領域 (光速の 30%~70%) の加速を担う 3 段目の加速器では、ミューオン特有の急激な速度変化に対応する必要があり、広い速度領域を効率的にカバーする加速器の設計・製作が求められる。我々は中速度領域の加速器として、他の加速器に比べ高い加速効率を持つ Disk-and-Washer (DAW) 型加速器に着目した [4]。DAW は、1970 年代に提案され

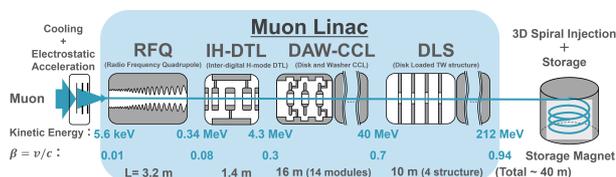


Figure 1: Schematic of the J-PARC muon $g - 2$ /EDM experiment.

た構造であり [5]、後に陽子加速器に用いられた [6]。高いシャントインピーダンスと、高い結合による電界安定性がメリットであるが、複雑な構造から設計が困難とされてきた。しかし、近年の計算技術の進展により信頼性の高い設計が可能になってきた。

ミューオン加速用 DAW は、加速空洞である Tank と、Tank 同士を電磁的に結合しつつビーム収束用の四重極磁石を配置するためのスペースを確保する Bridge coupler (BC) から構成される。2030 年の J-PARC でのミューオン加速実験を目指し、Tank、BC の開発を並行して進めている。先行研究 [7] では Tank の試作機が製作され、その性能評価が行われた。BC は試作機の製作・性能評価

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

が進行中である。

本論文では、まず DAW の概要を説明し、その後、BC の設計、BC 試作機の概要、低電力試験について述べる。低電力試験では、共振周波数、 Q_0 値といった高周波特性の評価や、ビーズを用いた電場測定を行った。

2. ミューオン加速用 DISK-AND-WASHER

ミューオン加速用 DAW は Fig. 2 のように、14 個の Tank と 11 個の BC から構成される。また、Tank と BC の構造を Fig. 3 に示す。DAW 構造の Tank は Disk と Washer を交互に配置した構造を持つ加速空洞である。他の Coupled cavity linac (CCL) と同様に、主に加速セル領域で電磁場が励起される加速モードと、主に結合セル領域で電磁場が励起される結合モードの共振周波数を合わせることで(合流条件)、安定な加速電場を実現する。本ミューオン加速用 DAW では、DAW の強い結合に合わせて、同軸タイプの BC を採用した。同軸型 BC は、外導体、内導体からなり、内導体の中にビーム収束のための磁石を内蔵する。同軸型 BC は開発実績が乏しく、中でもミューオン用においては初めての試みである。また、両端に接続される Tank を均等に励起する必要があるため、BC に隣接する 2 つの加速ギャップでの電場分布を均一にすることが求められる。BC 試作機では、電場の平坦度について、ビームダイナミクスの要請から要求を $\pm 1\%$ 未満に設定した。値は J-PARC で運用している CCL を参考に決めた [8]。

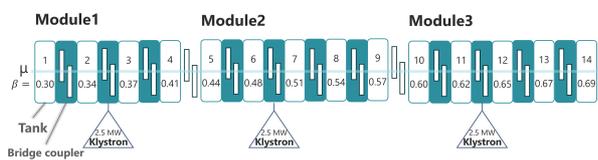


Figure 2: Schematic of the DAW accelerator for muon.

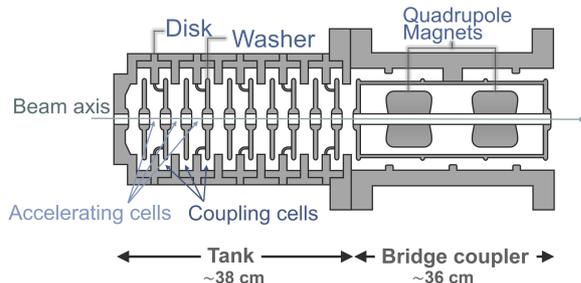


Figure 3: Tank and BC structure. This figure shows the cross section of the first tank and BC.

3. BRIDGE COUPLER の設計

設計は、2D モデルによる基礎設計 [9] を基に Stem などを含む 3D モデルについて CST Studio Suite [10] で計算して実施した。加速モード・結合モードの電場分布を Fig. 4 に示す。加速モードは主に Tank の加速セルと BC の内導体の突起付近の領域で大きな電場が励起され、結

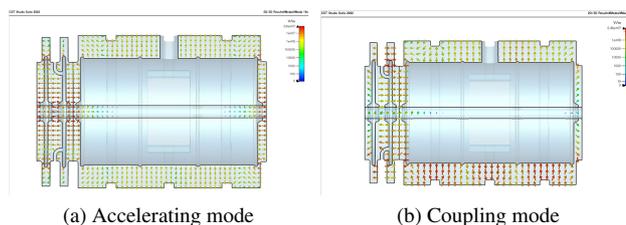


Figure 4: Electric field distribution of the accelerating mode (left) and coupling mode (right) in the tank (2 cells) and BC.

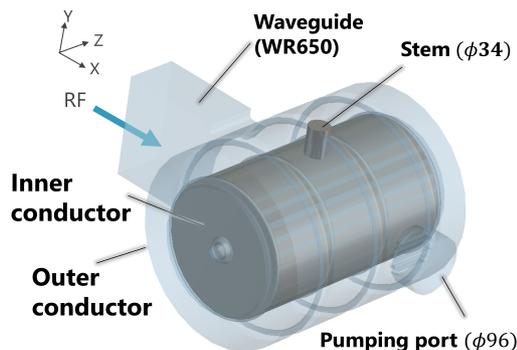


Figure 5: 3D model of the BC prototype. All dimensions are in millimeters (mm). Light blue region is vacuum, and gray region is copper. Not shown, but a tuner can also be fitted for frequency adjustment.

合モードは主に Tank の結合セルと BC の外導体の突起付近の領域で大きな電場が励起される。

設計において、まずは内導体端面と Tank との距離を調整することで電場の平坦度を調整した。その後、内導体の突起長を調整することで加速モードの共振周波数を、外導体の突起長を調整することで結合モードの共振周波数を微調整した。設計したモデルを Fig. 5, 6 に示す。

シミュレーションの結果、加速モードの共振周波数は 1296.04 MHz、 Q_0 値は 7996、結合モードの共振周波数は 1295.96 MHz、 Q_0 値は 16986 と算出した。軸上軸方向電場の平坦度は -0.5% (Fig. 7) となり、要求される $\pm 1\%$ 未満の条件を満たす設計を達成した。

4. BRIDGE COUPLER 試作機の製作

本研究では、製作例の少ない BC の製作精度および高周波特性を確認するため、2025 年 3 月に試作機を製作した。試作機の概要を Fig. 8 に示す。実機は外導体に無酸素銅、内導体に銅メッキされたアルミニウムを用いて、取り合いの SUS フランジ等も銅メッキ処理を施す仕様としている。一方試作機の内導体および SUS フランジは銅メッキ処理を省力した。また、構造同士の結合方法も、実機ではろう付けによる結合が用いられる部分にも試作機ではボルト締めを採用している。Figure 9 に製作した試作機の写真を示す。試作機は、外導体、内導体、

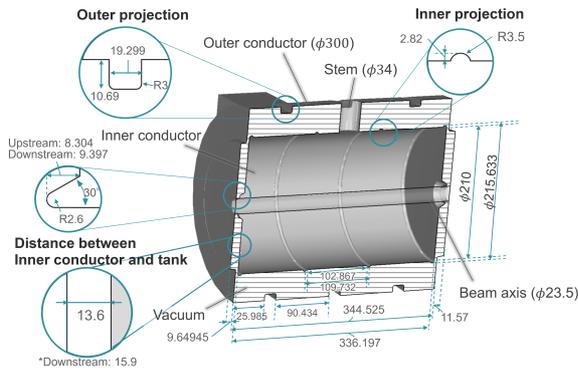


Figure 6: Cross-sectional view of the BC, cut vertically along the beam axis. All dimensions are in millimeters (mm). Inner projection length is sensitive to the resonant frequency of accelerating mode. Outer projection length is sensitive to the resonant frequency of coupling mode. The distance between inner conductor and tank is sensitive to the field flatness.

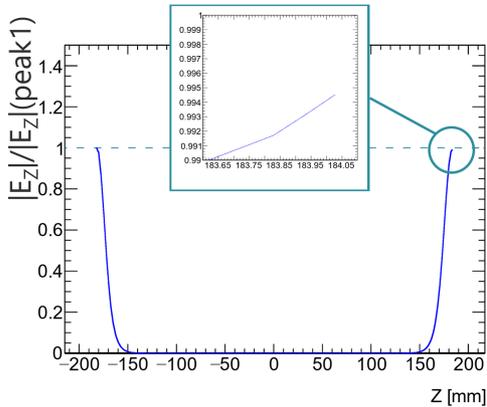


Figure 7: Magnitude of the axial electric field on the beam axis of the BC.

端板、チューナー、真空ポートから構成され、四重極磁石は製作していない。試作機の寸法を測定したところ、試作機全体の製作誤差は 0.08 mm 未満に抑えられていることがわかった。

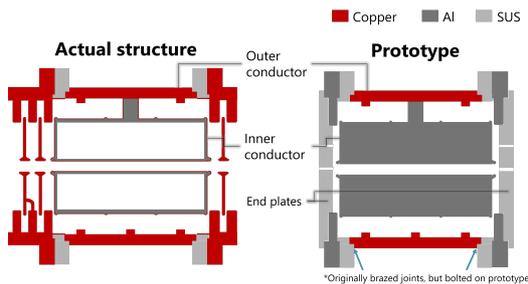


Figure 8: Structure of actual and prototype BC.

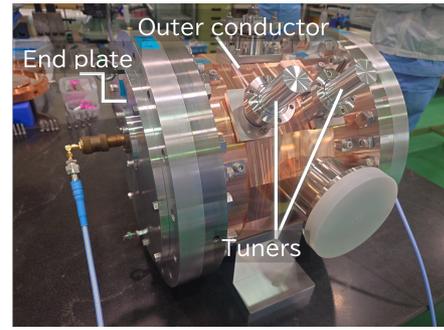


Figure 9: Photo of the BC prototype.

5. 低電力試験

低電力試験では、Vector Network Analyzer (VNA) を用いて試作機の共振周波数と Q_0 値の測定を行った。また、ビーズを用いた電場測定を行った。セットアップを Fig. 10 に示す。

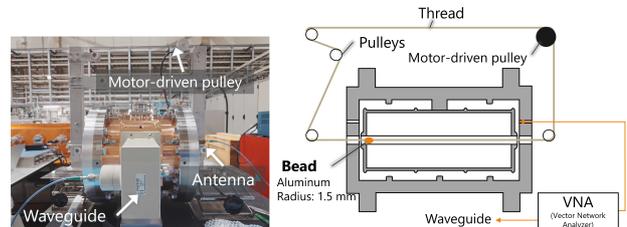


Figure 10: Low-power test setup. The BC prototype is connected to a vector network analyzer (VNA) for resonance frequency and Q -value measurement. Bead pull system is for electric field measurement. An aluminum bead with a radius of 1.5 mm was pulled at a constant speed along the beam axis by a stepping motor, and the frequency shift was measured by VNA.

5.1 共振周波数・ Q_0 値

測定した共振周波数は 1295.4 ± 0.01 MHz、 Q_0 値は 3493 であった。試作機の材質を考慮したモデルでのシミュレーション結果は共振周波数 1296.3 ± 0.01 MHz、 Q_0 値 7002 であり、測定した Q_0 値はシミュレーション値の約 49.9% となった。 Q_0 値悪化の原因としては、構造同士が RF コンタクトなしでボルト締めで接続されており、接触が不完全となっていることが予測される。特に端板付近は Fig. 4a からわかるように電場の強度が高いため、接触が不完全であると測定結果に大きな影響を与える可能性がある。

5.2 電場分布

ビーム軸上の電場の大きさを、ビーズを空洞内に挿入したときの共振周波数シフトの測定 [11] から評価した。Eq. (1) は磁場のない領域で導体ビーズを挿入したときのスレーターの定理を表しており、これにより共振周波数シフトから電場を計算することができる。 ω_0 は共振周波数、 $\Delta\omega_0$ はビーズ挿入後の共振周波数シフト、 ΔV

はビーズの体積、 U は蓄積エネルギー、 ϵ_0 は真空の誘電率、 E はビーズ挿入位置の電場の大きさである。

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{3\Delta V}{4U}\epsilon_0 E^2 \quad (1)$$

この現象を利用し、ビーム軸上の軸向電場分布を調べた。Figure 11 に測定した電場分布と試作機をモデルとしたシミュレーション結果を示す。横軸はステムを原点とした BC の z 方向長さを示し、縦軸は上流側の 1st peak の値で規格化した電場強度を示す。下流側のピーク比は測定で約 +10.5% (Fig. 11 の赤点) であったのに対し、シミュレーションでは +1.63% であった (Fig. 11 の青線)。これにより、加速モードの励起は確認できたものの、電場の平坦度は要求値から外れていることが判明した。

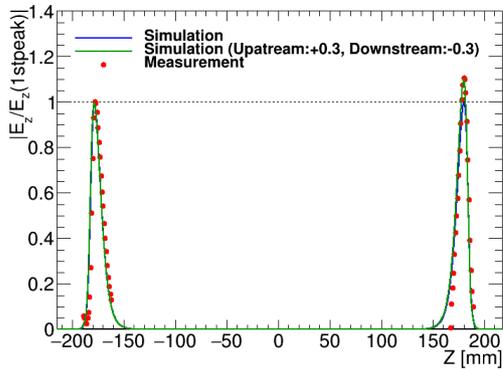


Figure 11: Magnitude of the axial electric field on the beam axis of the BC. The blue line represents the simulation results, the red dots represent the measured data and the green line represents the simulation results when the distance between the tank and the end plate is varied by +0.3 mm for the flow side and -0.3 mm for the downstream side.

平坦度が悪化する要因の一つに、内導体と端版の距離が挙げられる。そこで、シミュレーション上で内導体と端版の距離を意図的に変化させたモデルを作成した。その結果、上流側が +0.3 mm、下流側が -0.3 mm の場合に下流側の電場が約 +10% となり、測定結果に近くなることが確認できた (Fig. 11 の緑線)。一方で、製作誤差は上流側 +0.06 mm、下流側 -0.02 mm であり、このときのシミュレーション結果は +2.45% となる。製作誤差だけでは +10.5% の電場の誤差を説明しきれないため、他の要因を考慮する必要があることがわかった。

6. まとめと展望

本研究では、J-PARC ミューオン加速器中速部における DAW 用 BC の低電力試験を実施した。同軸型 BC は製作実績が乏しく、平坦な電場強度が要求されるという課題に対し、試作機を製作してその特性を評価した。加速モードの周波数、 Q_0 値、電場を測定した結果、 Q_0 値はシミュレーションと大きく乖離があり、電場の平坦度は約 +10% で製作誤差だけでは説明できない差が生じていることが明らかになった。

今後の展望として、 Q_0 値や電場分布の応答をさらに詳細に調査する。また、端版の境界条件を Tank に近づけたエンドセル (Fig. 12) を製作し、より実際の条件に近い測定を行う予定である。最終的には、Tank と BC を接続した状態での共振周波数・ Q_0 値や電場分布への影響を確認する測定を実施し、実機製作に向けた知見を深めていく。

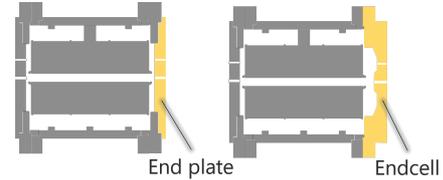


Figure 12: Differences in end plate and end cell construction. The use of end cells allows the boundary conditions of the bridge coupler to be closer to those of a tank mounted, thus reproducing a situation closer to the actual system.

謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費 22H00141, 21H05088, 25H00401, 25H01295, the JST FOREST Program (Grant Number JPMJFR2120), the Toray Science and Technology Award and Research Grant, and the natural science grant of the Mitsubishi Foundation, Support for academic and research activities from Sumitomo Electric Group CSR Foundation, and Support for academic and research activities from CASIO SCIENCE PROMOTION FOUNDATION. の助成を受けたものです。また、BC 試作機は三菱重工機械システム株式会社に製作していただきました。

参考文献

- [1] M. Abe *et al.*, “A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment”, *PTEP*, vol. 2019, no. 5, p. 053C02, May 2019. DOI: 10.1093/ptep/ptz030
- [2] G. W. Bennett *et al.*, “Final report of the E821 muon anomalous magnetic moment measurement at BNL”, *Phys. Rev. D*, vol. 73, no. 7, p. 072003, Apr. 2006. DOI: 10.1103/PhysRevD.73.072003
- [3] D. P. Aguillard *et al.*, “Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 127 ppb”, *arXiv:2506.03069 [hep-ex]*, 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2506.03069
- [4] M. Otani *et al.*, “Measurement of the muon anomalous magnetic moment at J-PARC”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1350, 012097 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1350/1/012097
- [5] Andreu V. G. *et al.*, “Study of High-Energy Proton Linac Structures”, *Proc. 1972 Linear Accelerator Conf.* (Los Alamos, 1972).
- [6] Esin S. K. *et al.*, “The Disk and Washer Structure for Moscow Meson Factory Linac”, *Proc. 1988 Linear Accelerator Conf.* (Virginia, USA, 1988).

- [7] Y. Takeuchi *et al.*, “Fabrication and Low-Power Test of Disk-and-Washer Cavity for Muon Acceleration”, Proc. IPAC’22. pp. 1534–1537, 2022.
DOI:10.18429/JACoW-IPAC2022-TUPOMS046
- [8] H. Ao *et al.*, “ACS CAVITY FOR J-PARC LINAC”, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, p. 1310, 2011.
- [9] Y. Takeuchi, “Development of an RF cavity for muon linac middle- β section for muon $g - 2$ /EDM experiment at J-PARC”, Ph.D. dissertation, Kyushu University, 2023.
- [10] <https://www.3ds.com/ja/products/simulia/cst-studio-suite>
- [11] T. P. Wangler, *RF Linear Accelerators*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2008.