

Development of an RF cavity for muon linac middle- β section for muon g-2/EDM experiment at J-PARC

竹内, 佑甫

<https://hdl.handle.net/2324/7157288>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 竹内 佑甫

論 文 名 : Development of an RF cavity for muon linac middle- β section for muon $g-2$ /EDM experiment at J-PARC
(J-PARC におけるミュオン $g-2$ /EDM 実験のためのミュオン線形加速器中速度領域用 RF 空洞の開発)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、将来のミュオン異常磁気モーメント ($g-2$) /電気双極子モーメント (EDM) 実験のための高周波 (RF) 加速空洞の開発に関するものである。大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のミュオン施設において、ミュオン異常磁気モーメントの精密測定及び、ミュオン EDM の探索を行うための新しいアプローチに基づく実験が提案されている。これまでの実験で主要な系統誤差であったミュオンビーム由来の系統誤差を低減するため、本実験では、ミュオニウムのレーザーイオン化によって生成された低エミッタンスのミュオンを加速して得られるビームが必要となる。また、崩壊損失を低減するために、ミュオンの寿命である $2.2 \mu\text{s}$ よりも十分に短い時間で加速する必要がある。この点で効率的な線形加速器を我々の実験では選択した。高効率加速を実現するため、ミュオンをビーム速度に応じて4つのRF構造を使って熱エネルギーから相対論的エネルギーまで加速する。RF線形加速器によるミュオンの加速はこれまでに実現されておらず、新たな粒子の加速は、それまでとは全く異なるプローブが使用可能となることを意味し、単に質量の異なる粒子を加速したという以上の極めて重要な学術的意義を持つ。

ミュオン線形加速器の中速度領域では、1296MHzの結合空洞型リニアックの一種である disk and washer (DAW) 空洞が採用されており、ミュオンを1296MHzの運転周波数で $v/c = \beta = 0.3$ から 0.7 まで加速させる。銅製のディスク状の部品と穴の空いた円盤状の部品(ワッシャー)から構成される DAW 空洞は高いシャントインピーダンスを持ち、高効率な加速に適しており、また、他の結合空洞型リニアックと比較して、構造がシンプルで結合定数が大きいこと、製作公差が大きく、コストや電磁界安定性の面でも有利と考えられている。このような利点を持つ DAW 空洞であるが、隣接モードの存在や、構造の機械加工の難しさから実用例はほとんど存在しない。加えて、実績の無い $\beta < 0.4$ 領域及び、ミュオン加速への適用となるため、十分な検討と実機の製作による実証が必要不可欠である。

本研究では、DAW 空洞の設計・製作手順および空洞の性能評価方法の確立し、この一連の流れを通して、ミュオン用 DAW 空洞の実現性の確認を目的とし以下の研究をおこなった。まず初めに、DAW 空洞の、RF設計を2Dおよび3D電磁場シミュレーションを用いて慎重に最適化を行い、それにより得られた空洞パラメータをもとにビームダイナミクス設計を行った。その後、製造上の問題点を洗い出すことを目的とし、設計に基づき試作ユニットの製作を行なった。その結果、ろう付け時にワッシャーの位置がずれる、冷却水流路に圧力がかかると変形するなどの問題が見出された。そこで、ろう付け治具を改良した上で、ろう材も追加して実機スケールモデル(5ユニット)の試

作を行った。これにより、試作ユニットで見られたワッシャーの変形を大幅に抑制することに成功した。次に、製作した実機スケールモデルを用いて、低電力による性能評価を行なった。ユニットごとの周波数のばらつきは 70 kHz 以下と非常に小さく、平均周波数と設計値とのずれは~100kHz 程度まで抑えることに成功した。一方で、積み上げによる軸上電場測定では 10%程度の電場の歪みが見られた。試作セルと実機スケールモデルの製作で得られたさまざまな測定結果と等価回路計算および 3次元電磁場シミュレーションを組み合わせ、電場の歪みの原因が、空洞ろう付け時に治具によって十分に抑えられているものの、わずかに生じたワッシャーの歪みによるセル間の結合度の非対称性によるものであると突き止めた。さらに、等価回路計算により、タンクを構成するユニットの積み上げ方を最適化することで、追加加工をすることなく、エンドセルを除いたセルにおいて電場の field flatness 97%を達成した。また、ミュオン線形加速器の end-to-end シミュレーションを構築し、最新のデザインにおける加速ミュオンビームの品質及び予想強度の見積りを行った。また、磁石の設置誤差、RF の振幅・位相誤差がビームに与える影響についても評価した。加えて今回の製作で得られた空洞の性能による実際のビームへの影響を見積もった。

これらの結果と技術的知見から、実験に必要な性能を満たす DAW 空洞の設計・製作手順が確立されたことが示された。これにより、世界初となるミュオン線形加速器による低エミッタンスミュオンビームを用いた、新しい素粒子実験の実現へ大きく近づいた。