

世界初、 ミュオンを加速するライナック

SATテクノロジー・ショーケース2017

■ はじめに

近年、パルスミュオンビームと VUV 光による超低速ミュオンビームの生成手法が確立し[1]、既存のミュオンビームでは不可能であった数 mm 程度にまでビーム径を絞ることが可能になった。一方で、太陽電池などの開発に必要な結晶粒界の精査には数 10 μ m 程度の分解能が必要となるため、更なる尖鋭化が不可欠となる。これを可能にするのがミュオン加速であり、従来のミュオンビーム($\sim 1000 \pi$ mm mrad)に比べて数ケタ小さいエミッタンス($< 1 \pi$ mm mrad)を持つミュオンビームが実現する。さらに高いエネルギーまでの加速が実現すれば、火山やピラミッドの大規模構造の透視が可能になる。宇宙線ミュオンによる手法では、ミュオンが様々なエネルギー・天頂角を持って飛来するため、高感度探索は困難である。高エネルギー加速器ミュオンが実現すれば、高度に依らない高感度透視が可能になる。

この新たな量子ビームが開拓する科学分野はこれだけではない。我々はミュオン異常磁気能率($g-2$)の精密測定を目指してミュオン線型加速器(ライナック)の研究開発を進めている(J-PARC E34 実験[2])。極小エミッタンス(1.5π mm mrad)のミュオンビームを用いることで先行実験[3]で主要な系統誤差であったビーム由来の不定性を抑制し、高精度測定(目標精度 0.1ppm)によって素粒子標準模型の検証が可能になる。

図 1 にミュオンライナックの概略図を示す。シリカエアロゲルとレーザーイオン化による超低速ミュ

オン生成の後、SOA 静電レンズで $\beta=0.01$ (運動エネルギー $T=5.6$ keV)まで加速しライナックに入射する。高周波加速空洞は粒子の速度に応じて加速効率が変化するため、各速度領域で効率の高い空洞を用いる。まず、Radio Frequency Quadrupole (RFQ)で $\beta=0.08$ ($T=340$ keV)まで加速し、Inter-digital H-mode Drift Tube LINAC (IH DTL)で $\beta=0.28$ (4 MeV)まで加速する。その後、Disk And Washer (DAW) Coupled Cell LINAC (CCL)で $\beta=0.7$ ($T=40$ MeV)まで加速し、最終的に Disk loaded structure (DLS)で $\beta=0.95$ ($T=212$ MeV)まで加速する。

ミュオンライナックは世界初の試みであり、我々には入念な設計を進めてきた。現在までに基本設計を終え、実際にJ-PARCで加速を実現する準備が整いつつある。ここでは、設計と実験準備状況について説明する。

■ 活動内容

1. 加速空洞の設計

ここでは、各加速空洞の設計について述べる。

初段加速器であるRFQは β が0.1より小さい領域で広く使われるリニアックであり、粒子の速度がほぼゼロの状態から加速を開始する我々の計画においても有効な加速構造である。ミュオンリニアック用のRFQとして、J-PARCリニアック用に開発されたRFQ[4]を用いる予定である。このRFQは負水素イオンを加速するように設計されているが、RFQのヴェーン間に印加する電圧を質量でスケールすることで、ミュオンを加速することが出来る。実際にシミュレーションで高輸送効率が示されており、透過率は95%で

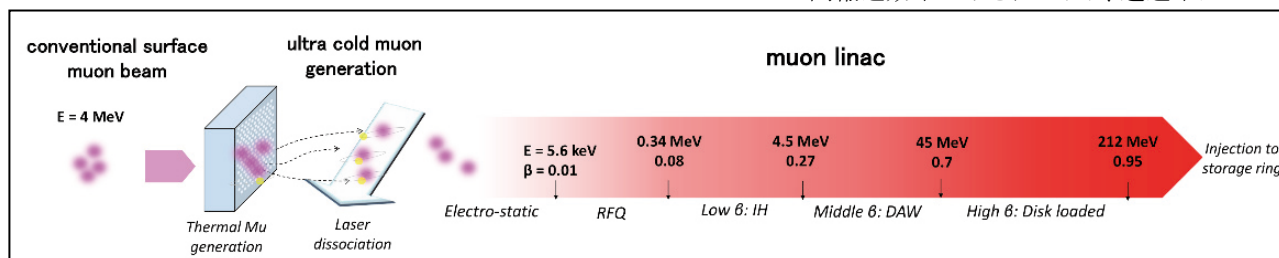


図 1. J-PARC ミュオン $g-2$ /EDM 実験におけるミュオン線型加速器の構成

代表発表者 大谷 将士 (おたに まさし)
所 属 高エネルギー加速器研究機構
素粒子原子核研究所
問合せ先 〒305-0801 つくば市大穂1-1
TEL: 029-864-5200 (内線 2414)
FAX: 029-864-7831
masashio@post.kek.jp

■キーワード: (1) 線型加速器
(2) ミュオン
(3) 異常磁気能率

■共同研究者: 岩下芳久(京都大学)、岩田佳久(NIRS)、河村成肇(高エネルギー加速器研究機構)、北村遼(東京大学)、近藤恭弘(JAEA)、齊藤直人(J-PARC センター)、長谷川和夫(JAEA)、林崎規祐(東京工業大学)、三部勉、吉田光宏(高エネルギー加速器研究機構)

ある。このRFQは製作後長期間保管されていたが、真空引きを行い、ミューオン加速に必要な高周波を投入し、動作確認を行った[5]。このように、RFQはミューオン加速に向けた準備は完了しており、適当なミューオン源が準備できればいつでも加速試験を行える状態にある

RFQ は β が大きくなるにつれて加速効率が減少するため、 $\beta \sim 0.08$ 程度で別の空洞に切り替えるのが一般的である。良く用いられるのはアルバレ DTL であるが、より短い距離で加速を実現して崩壊損失を最小化するために IH DTL を採用した。IH DTL は加速セル周期がアルバレ型の半分の長さ $\beta \lambda / 2$ であることから短距離加速が可能であり、高い加速効率を有しているため電源のコスト削減が可能である。さらに我々は APF と呼ばれる収束方式を採用することによりさらなる高効率化を目指した。既に電磁界計算ソフトウェア CST MW などを用いて設計を完了しており[6]、実機製作の準備を進めている段階である。

$\beta = 0.28$ まで加速した後は加速距離短縮のために運転周波数を 324MHz から 1296MHz に変調する。それに応じて加速構造についても結合型加速空洞の 1 種である DAW に変更する。DAW はロシア陽子加速器などに用いられており、高い加速効率を持つ構造である。また、他の結合方加速空洞と比較して高周波結合が大きいため、加工精度の緩和による低コスト化が期待できる。しかし、前例のないミューオン専用の設計が必要であることに加えて、広い速度領域 ($\beta = 0.28 \sim 0.7$) をカバーするために、セル (β に応じて形状が変化) の設計が困難になる。我々はセル設計を半自動で行うアルゴリズムを開発し、全速度領域でのセル設計を完了した[5,7]。現在はプロトタイプ製作まで完了しており、試験を進めている状況である。

β が 0.7 以上の領域においては、電子加速器で広く用いられている DLS 進行波加速管を用いる。ただし、 $\beta = 1$ 一定のため単純な構造にできる電子リニアックと異なり、ミューオンリニアックでは粒子が加速されていくにしたがい β が増加していくため、それに伴ってセル長を長くしてい

く必要がある。DLS を含め全ての加速空洞でダイナミクスの評価が完了しており、当初の目標(規格化全エミッタンス $= 1.5 \pi \text{ mm mrad}$)と同程度の高品質ビーム(規格化 rms エミッタンス $\sim 0.3 \pi \text{ mm mrad}$)が実現できる見通りである[8]。

2. 加速試験の準備状況

最初に述べた通り、ミューオン加速は世界初の試みであり実験的な実証が必要不可欠である。また、近年ミューオン実験は国際競争が非常に激しく、ミューオン加速に関しても早期に実現することが望ましい。そこで我々は、ミューオン加速実証の第一段階として J-PARC MLF 新設ミューオンビームライン(Hライン)にて初段加速器 RFQ によるミューオンの加速試験を計画している。加速試験では表面ミューオンビームを金属薄膜によりサブ keV 程度のエネルギーにまで減速した後、SOA 静電レンズと RFQ で運動エネルギー 340 keV まで加速する。既に J-PARC テストミューオンビームラインにおいて減速及び静電加速したミューオンの観測に成功しており[8]、新設ビームライン整備後ただちに世界初のミューオン加速に挑戦することが可能となる。

ミューオン加速の実現は様々な科学領域で起爆剤となりうる基盤技術である。ミューオン加速を軸に領域を横断した研究協力体制が整いつつある[9]。ミューオン加速の今後の展開に期待していただきたい。

■ 参考文献

- [1] Nucl. Instru. Meth. B266, 335, 2008.
- [2] [<http://g-2.kek.jp/portal/index.html>]
- [3] Phys. Rev. D73, 072003, 2006.
- [4] PRAB, 16, 040102, 2013.
- [5] PASJ2015 Proc., WEOM02, 2015.
- [6] PRAB 19, 040101, 2016.
- [7] PASJ2014 Proc., SAP039, 2014.
- [8] linac2016 Proc., FR1A05, 2016.
- [9] Muon acceleration workshop,
[<https://kds.kek.jp/indico/event/22383/>]