

ミューオン高周波加速の実現までの道のり

KEK 加速器研究施設

大谷 将士

masashio@post.kek.jp

東京大学大学院理学系研究科

北村 遼

rkita@post.kek.jp

日本原子力研究開発機構

近藤 恭弘

yasuhiro.kondo@j-parc.jp

2018 年 (平成 30 年) 5 月 6 日

1 はじめに

我々は J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) におけるミューオンの異常磁気能率 ($g-2$)・電気双極子能率の精密測定実験 (E34) のためのミューオン線型加速器を開発している。ミューオンの $g-2$ はブルックヘブン国立研究所で行われた測定の結果、標準模型の計算値と 3 標準偏差以上の乖離がある [1]。この乖離は標準模型を超える新理論を構築する指針の一つ (悩みの種?) となっているが、10 年以上もの間これを検証する測定結果がない。標準理論の計算は様々なデータによって精度が向上しており、更なる精度向上を目指して活発に議論がなされている [2]。現在、米国フェルミ研究所で先行実験を超える精度 0.14 ppm を目指す実験の準備が進んでいるが、先行実験と同じ原理で主要な実験装置も同じであるため、自ずと系統誤差は相関を持っていると考えられる。

そこで我々はミューオン冷却・加速による低エミッタンスミューオンビームを用いた新しい原理の実験を準備している (J-PARC E34 実験) [3, 4]。ビームの指向性を表すエミッタンスが従来のミューオンビームに比べ 3 桁以上向上したミューオンビームを用いることで、コンパクトな高精度蓄積リング中でミューオンの $g-2$ の測定が可能になる。実験では、従来型のミューオンビームを室温ミューオニウム生成及びレーザー乖離によって室温エネルギー (25 meV) まで冷却し、線型加速器によって 212 MeV まで加速して実験を行う。ミューオニウムのレーザー乖離による超低速ミューオンの生成は約 30 年以上もの間 KEK 物構研グループらが開発してきた歴史があり [5, 6, 7]、現在も J-PARC MLF で超低速ミュー

オンが生成されている [8]。一方で、ミューオンを高周波加速した前例はなく、我々の大きなマイルストーンの一つであった。

このマイルストーンを達成するために、2014 年から準備を始めた。高周波加速試験のセットアップを図 1 上に示す。本実験では迅速にミューオン加速を実証するために、負ミューオニウムイオン ($\text{Mu}^-, \mu^+e^-e^-$) 生成による冷却手法を採用した。 Mu^- は 1980 年代後半に真空中で初めて観測されて以降 [9, 10]、我々の知る限り真空中での再測定の例が無く、J-PARC MLF の実験環境でどの程度の Mu^- が加速に使えるか未知であった。そこで 2015 年から 2017 年にかけて図 1 下のようなセットアップで Mu^- の測定実験を行った後、2017 年 10 月に高周波四重極線型加速器 (RFQ) による高周波加速試験を行った [11]。一連の実験はすべて J-PARC MLF のテストミューオンビームライン (D ライン, D2 実験エリア) で行った。

本稿では、2014 年の Mu^- 実験準備開始から 2017 年 10 月の加速試験成功に至るまでの経緯を時系列で振り返る。本章の構成は表 1 の通りである。

表 1: ミューオン高周波加速までの時系列と本記事の構成。

2 章	減速 μ^+ の測定	2016 年 2 月
3 章	Mu^- の測定	2016 年 12 月
4 章	ミューオン加速試験の準備	~2017 年 11 月
5 章	ミューオン高周波加速の実現	2017 年 11 月

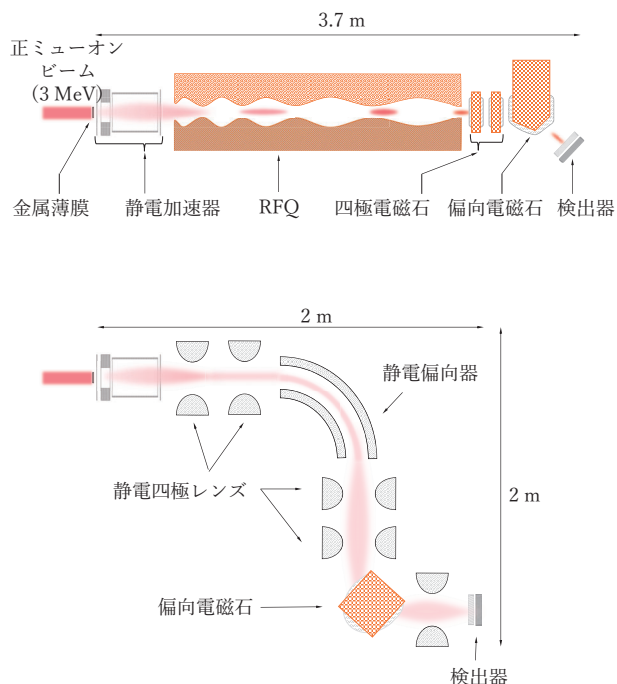


図 1: (上)RFQ を用いたミュオン加速試験の概要図。
(下) 負ミュオニウム測定実験の概要図。

2 減速ミュオンの測定

まず我々は、迅速にミュオンの高周波加速を実現するために、簡易な手法でミュオンを冷却して加速試験を行う検討を始めた。 $g-2$ 実験のためのミュオンビーム源の開発を進めていた深尾祥紀氏 (KEK) と共に、 Mu^- 生成による冷却手法に着目した。この手法ではミュオンビームをアルミニウムなどの金属薄膜に照射するだけで 1 keV 以下まで減速することが可能である。一方で、1980 年代の初観測以降、測定例が無く加速試験にとって有意な強度が得られる確証がなかった。そこで、ミュオン加速試験に先駆けて Mu^- の測定実験を行うことにした。

さて、 Mu^- 実験の検討を始めた 2014 年 5 月頃、理化学研究所 (理研) の英国ラザフォードアップルトン研究所 (RAL) 支所において低速ミュオンビームラインの刷新の話があり、古い装置を再利用する話が挙がった。機器の中には Mu^- 生成後に加速して RFQ に入射するための静電加速器も含まれていたため、本機器を用いることで Mu^- 測定実験の後、シームレスに加速試験に移行することが可能となった。これは渡りに船と早速シミュレーションでセットアップや測定効率の評価を行った結果、十分に実験が可能である見通しがついた。KEK ミュオン科学研究系主幹の三宅康博氏のご厚意もあり、現地に赴いて旧装置の解体・梱包・輸送手続きを行うことに

なった。幸いなことに実験提案も J-PARC/MUSE 共同利用実験として採択され (課題番号 2014B0311), 2015 年 4 月に 2 日間、実験を行えることになった。

2014 年 8 月、日本ではお盆真っ只中、我々は英国で機器の解体作業を行っていた (図 2, 図 3)。図 1 の静電加速器 (Soa レンズ [12]), 静電四極レンズ, 静電偏向器が RAL で解体して再利用したものである。これらの機器に加えて、電源, 真空ポンプ, 制御系に至るまで可能な限り再利用できるよう、通常解体作業にはない緊張感のもと作業を進めた。三部勉氏 (KEK), 石田勝彦氏 (理研) が現地スタッフと綿密に調整を進めてくれたおかげでスムーズに作業が進み、10 日間の現地滞在中に 1 日お休みを取ることができた。

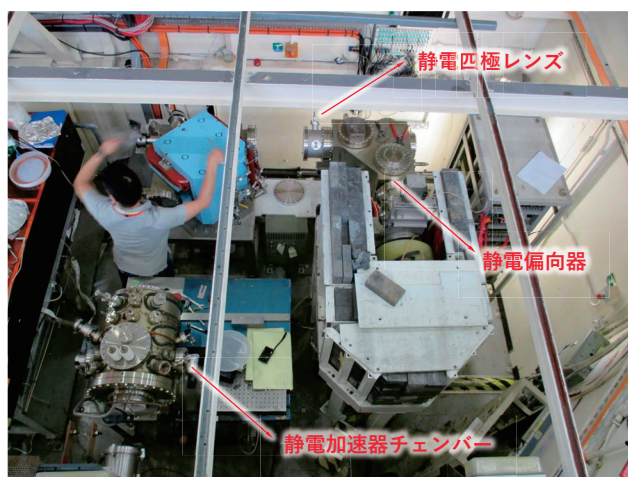


図 2: 理研 RAL ミュオンビームラインでの解体作業風景。写真に写っているのは頑張って解体作業を進める三部勉氏 (KEK)。

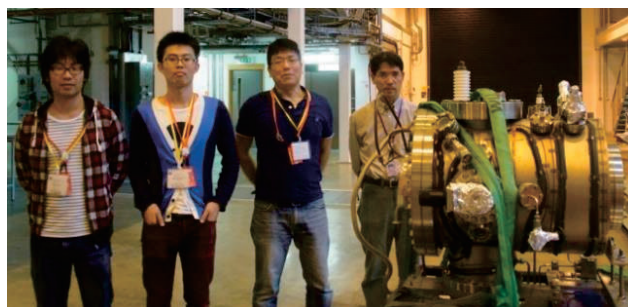


図 3: 2014 年 8 月ラザフォードアップルトン研究所にて。左から北村遼 (東大), 大谷将士 (KEK), 三部勉 (KEK), 石田勝彦 (理研)。一番右に写っているのは理研から KEK まで輸送した機器の一つである静電加速チェンバー。

2014 年 10 月 31 日に RAL から J-PARC MLF に機器が到着し組立作業を開始した。河村成肇氏 (KEK) を中心に MLF ミュオン施設と調整し、実験場所に近い MLF

第一実験エリアで作業を行うことができた。この実験では全機器をビームタイムの直前に設置し、2日間の実験の後、即座に撤去する必要があった。そこで、大きな架台の上にビームライン機器を全て設置してアライメントや機器の調整を行っておき、架台ごと移動して実験、撤去まで行うことにした。図4は機器を組み立てた後に実際に架台ごと吊り上げた際の写真である。静電加速器と静電四極レンズの試運転も終わり、作業も残すところ後わずかというところで2015年1月16日、J-PARC MLFで火災が発生した。もちろん我々の機器は火災とは無関係で原理的には作業を再開できたのだが、機器組立・試運転に関して改めて安全審査を受ける必要が生じた。2015年4月の実験に間に合わせるべく即座に計40ページに及ぶ作業実施計画書を用意し、3月3日に安全審査を受けて翌々週18日には作業を再開したのだが、残念なことに利用運転の再開が我々の実験に間に合わなかった。悪い事は重なるもので、2015年4月に起きた中性子標的の不具合もあり、結局、利用運転が再開したのは2016年2月の事である。



図4: 架台上のセットアップを吊り上げた際の様子。

時は少し遡るが、2014年12月、ミュオン測定に用いるマイクロチャンネルプレート(MCP)検出器にミュオン崩壊由来の陽電子を照射する試験を行った。MCPは低速イオンの検出などに用いられるが、エネルギーが高いMinimum Ionization Particle(MIP)領域の粒子に対する応答はあまり知られていなかった。図5は本測定に加えて、テストベンチで行った低速電子の測定データとMCP応答モデルによる波高分布である。そのほとんどがMIPである崩壊陽電子はMCPを透過する。そのため、MCP表面から増幅が始まる場合よりも低い様々な増幅率を重ね合わせた信号が観測される。一方、実験で測定するミュオンは低速電子と同様の速度領域であるため、ほぼ同程度の波高の信号が得られると期待される。信号強度が低く崩壊陽電子バックグラウンドとの戦

いであった Mu^- 測定実験および加速試験において、本測定結果は非常に重要な測定データとなった。

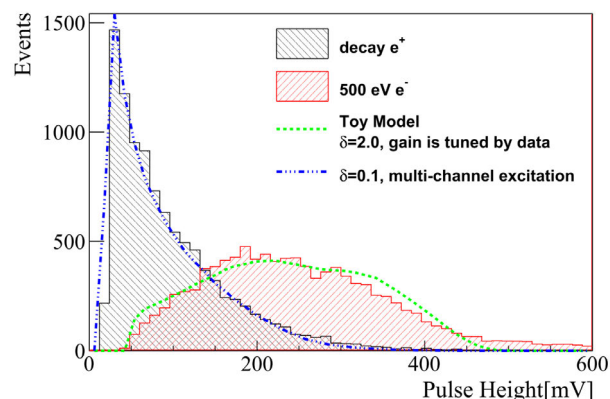


図5: 崩壊陽電子(黒色ヒストグラム)と低速電子(赤色ヒストグラム)に対するMCP波高分布。緑点線と青一点鎖線はそれぞれ対応するMCPモデルによる波高分布。図中の δ は2次電子の平均放出個数。

さて、本題の Mu^- 測定実験であるが、当初の予定から半年以上遅れた2016年2月25日に減速 μ^+ の測定まで行うことが出来た(実験課題番号2015A0324)。当初の予定では、2日間の実験期間中にまず減速 μ^+ を測定して低速ミュオンビームラインの調整を行い、続いて Mu^- の測定を行うつもりだった。しかし、今回採択された実験課題に与えられたビームタイムが1日だけであったため、まずは減速 μ^+ の測定のみ焦点をあてて実験を行うことにした。本試験のセットアップは図1の下図において偏向電磁石が無く、その位置に検出器が置かれている。実験開始後、低速ミュオンビームラインを少し調整した後、すぐに図6に示したように飛行時間(TOF)約 $2.8\ \mu\text{s}$ のピークの測定に成功した。しかし、事前に計算及びシミュレーションで予想していたTOFと3倍程度の乖離があり、さすがの筆者(大谷)もそんなに間違ふハズはないだろうと思いながら測定を続けた。下村浩一郎氏(KEK)をはじめとした共同研究者の助言もあり、測定開始後数時間で標的の不純物由来の H^+ であることは検討がついたが、いけどもいけどもミュオンは見つからない。照射するミュオンビームの運動量を振りながら H^+ の強度を測定していくうち、減速標的の物質質量から最適だと思っていた運動量 $27\ \text{MeV}/c$ より低い方がミュオンにとって最適なのではないかという天啓が降りてきた。そこで、少し低い運動量でスキャンしていった結果、 $25\ \text{MeV}/c$ で遂に減速ミュオン(図6の約 $0.8\ \mu\text{s}$ のピーク)の測定に成功した。おそらく、標的物質質量の見積もり方法に原因があったと考えられる。輸送効率に関しても、より詳細な減速ミュオンのエネルギー分布を考慮してシミュレーションすることで、測

定値と同程度の結果が得られた。

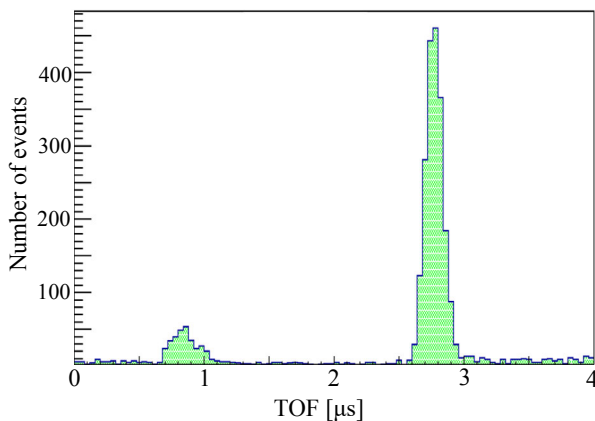


図 6: 減速ミューオン測定実験の結果。横軸は金属薄膜からの飛行時間。約 $0.8 \mu\text{s}$ のピークが低速ミューオンに対応。約 $2.8 \mu\text{s}$ のピークは陽子で、金属薄膜表面の不純物由来だと考えられる。

3 Mu^- 観測とプロファイル測定

前章までに減速 μ^+ の初観測に成功し、いよいよ Mu^- の生成実験へと進むのだが、装置の動作試験を進める中で課題も見えてきた。 Mu^- の測定を行うには、減速 μ^+ 測定における Soa レンズと輸送ビームラインの電圧設定で、極性を正極性取り出しから負極性取り出しへと反転させれば良い。しかしビームラインへの電圧印可試験の際に Soa レンズから最大で 1 MHz にも達する多量の電子が電極から放出され、輸送ビームラインに乗って MCP まで飛来していることがわかった。これは標的ホルダーなどの尖部から電子が電界放出されていると考えられる。この放電問題はこれまで超低速ミューオンを含めて正極性での取り出しにしか用いてこられなかった輸送ビームラインを、負極性で使用した際に初めて顕在化した。 Mu^- は減速 μ^+ と同様に TOF 測定で同定するはずであったが、輸送ビームラインへ連続的に大量の電子が放出されている場合、わずか数 mHz に過ぎない Mu^- 信号は容易にバックグラウンドに埋もれてしまう。そこで新規に偏向電磁石を設計・製作して輸送ビームラインへ追加し、電子バックグラウンドの除去を試みた。偏向電磁石の導入により、輸送ビームラインは延長されて検出器部分は当初のビームライン架台に収まらなくなってしまったため、新たに延長架台を設けて検出器チャンバーを最下流端に設置することにした。さらに減速 μ^+ のシミュレーション結果から、加速電圧を減速 μ^+ 測定実験時の 7 keV から上げることで輸送効率の向上が見込まれたため、新たに 20 keV まで加速可能な高圧電源を導入した。

Mu^- 生成実験のビーム試験に向けて 2016 年 10 月下旬から本格的にビームライン改修作業を開始した。図 7 にビームライン延長作業風景を示す。電磁石用の真空チャンバーの製作精度が粗かったために設置作業は難航したが、作業を手伝っていただいた J-PARC MUSE グループの方々の多大なご支援もあって、無事すべての真空機器接続を完了した。



図 7: ビームライン延長作業。

輸送ビームラインの試験は紫外光由来の H^- ビームを使って行った。当初は紫外光を標的に当てることで光電子を生成してビームラインの調整を行うつもりだったのだが、試験の最中に TOF の測定から光電子だけでなく H^- も生成されていることがわかった。高々数 keV の電子を数メートルのビームラインに通した場合、地磁気の影響が無視できない。地磁気の影響をほぼ受けない H^- の発見によって、ビームラインの調整が格段に容易となった。この H^- による調整方法の確立が、後の加速試験成功に決定的な役割を果たすこととなる。図 8 に Soa レンズ内の標的部分で生成した光子と H^- を MCP で観測した際のオシロスコープ画像を示す。この信号が見えたのはビームラインを実験エリアに搬入するわずか 5 日前のことであった。

2 回目のビーム試験は 2016 年 12 月 8 日から 3 日間に渡って実施した (実験課題番号 2016A0067)。前回の実験で確認済みであった減速 μ^+ と H^+ を使って再現性の確認と輸送ビームラインの調整を行った上で、最後にビームライン極性を全て正負反転させて Mu^- の生成確認を行った。図 9 に正極性取り出し及び負極性取り出しの場合の MCP で測定した TOF 分布を示す。図からわかるように、シミュレーションと合致する TOF でアルミ薄膜標的に生成した減速 μ^+ 及び Mu^- の信号ピークを観測できた。TOF はそれぞれ $622 \pm 6 \text{ ns}$, $637 \pm 8 \text{ ns}$ であり、統計誤差の範囲内で一致している。シミュレーションの予想値とも数%の範囲内で合致しており、詳細



図 8: Soa レンズ内の標的部分で生成した光子と H^- を MCP で観測した際のオシロスコープ画像。緑が偏向電磁石の直進方向に設置したシングルアノード MCP による信号である。1 番目のピークが標的で生成した光子の信号であり、2 番目のピークが H^- 信号を示す。

な比較を進めている。真空中での Mu^- 観測は筆者の知る限りで 1989 年に LAMPF のグループから報告された実験以来約 30 年ぶりである [9, 10]。

測定した μ^+ と Mu^- の信号レートはそれぞれ $(5.9 \pm 0.6) \times 10^{-3} \mu^+/\text{s}$, $(1.9 \pm 0.4) \times 10^{-3} Mu^-/\text{s}$ と予想通り低いものであった。しかしこの貴重な実験データを使ってシミュレーションにより加速試験の予想ビーム強度を評価した結果、加速試験でも Mu^- 生成実験と同じ $O(1) \text{ mHz}$ 程度での測定が可能であることがわかった。この実験結果をもって Mu^- 源を確立できたことで加速試験は俄然現実味を帯びることとなった。図 10 に Mu^- 生成実験終了時の記念写真を示す。

加速器の調整を行う上で、ビームプロファイルの測定は必要不可欠である。低エネルギーミュオンのプロファイル測定ではディレイライン型の MCP が良い候補である。しかしミュオンリニアックの設計ビーム強度 (パンチあたり 4×10^4 個) ではパイルアップが問題となってしまう。そこで我々は MCP と CCD カメラを組み合わせた低エネルギーミュオン用のビームプロファイルモニ

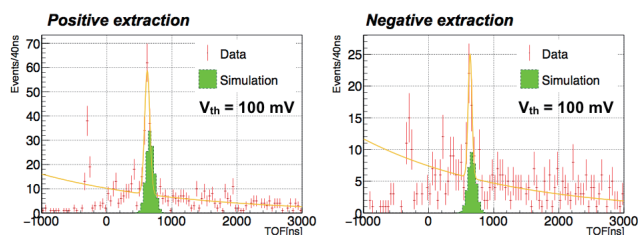


図 9: MCP で測定した減速 μ^+ (左) と Mu^- (右) の TOF 分布。シミュレーションと合致する位置に信号ピークが観測できる。

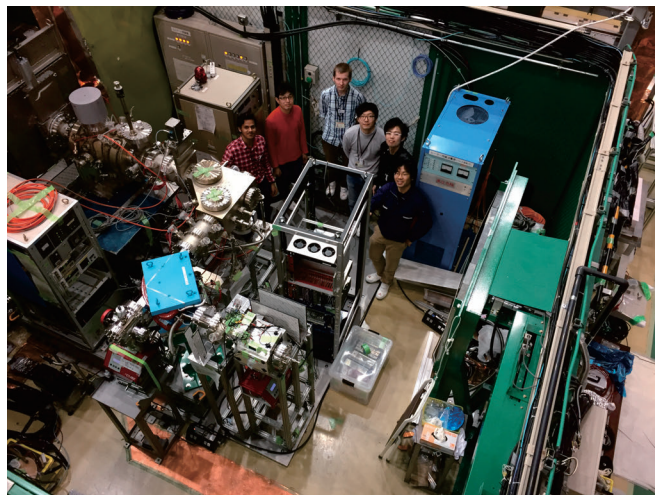


図 10: Mu^- 生成実験終了後の記念撮影。実験成功に喜ぶ筆者 (北村) と、実験終了までお付き合い頂いた (筆者にこき使われてしまった) 他の方々の喜びと疲れの混じる表情が印象的である。お疲れ様でした。

タ (BPM) を開発してきた [13]。図 11 に BPM 概略図を示す。時は少し遡るが、既に BPM は表面ミュオンビームを用いて性能評価を行っていた (実験課題 2015A0321, 代表 B. Kim)。加速後のミュオンプロファイル測定にさきがけて、 Mu^- 実験と同じセットアップで低速ミュオンプロファイルの測定実験を行った。

プロファイル測定実験実施の前に、前述の H^- と BPM によってビームラインの調整を行った。プロファイル測定実験では統計量を優先するために、 μ^+ の測定に専念した。また、減速 μ^+ を用いる利点として、偏向電磁石を除くビームラインを構成する機器はすべて静電場を用いるために、加速エネルギーが同じであればビームラインの設定パラメータは減速 μ^+ と H^- ビームで共有できる点がある。減速 μ^+ は Mu^- より信号強度が大きいとはいえ、依然統計量が非常に小さいために、ビーム試験開始前にビームパラメータを調整できたことは実験成功の大きな原動力となった。図 12 に調整前後の H^- ビームのプロファイル測定結果を示す。ビーム中心に偏りが

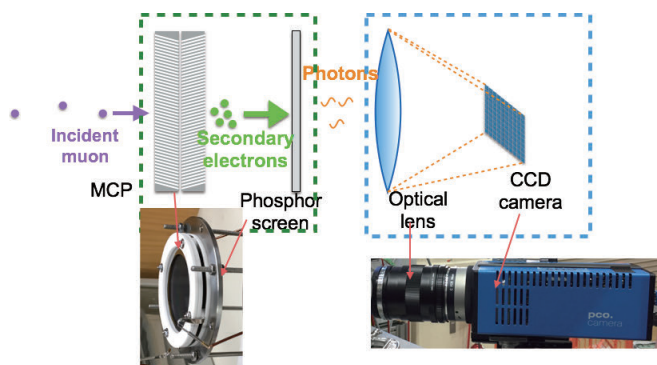


図 11: BPM の概念図。

あるのは輸送ビームラインに対して、BPM の光学系がずれて設置されてしまっているためと考えられる。Mu⁻ 生成実験ではやっとの思いでビームラインを立ち上げて忙しかったが、プロファイル測定試験では事前の調整がある程度できたので、それなりに余裕を持って実験に臨むことができた。

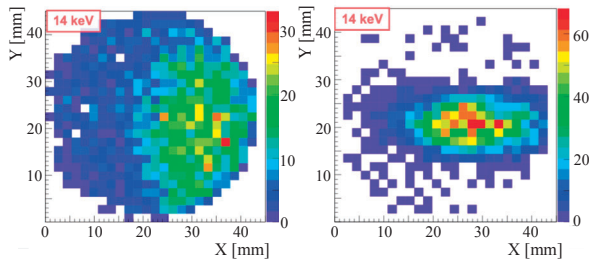


図 12: 調整前 (左) と調整後 (右) の H⁻ ビームプロファイル。

プロファイル測定試験は 2017 年 3 月に 4 日間に渡って実施した (実験課題番号 2016B0214)。本測定では崩壊陽電子バックグラウンドが無視できないため、CCD カメラの露光時間をできるだけ短くして減速 μ^+ に合わせる必要がある。そこでまず、CCD カメラの露光タイミングを調整した。図 13 に CCD カメラの露光タイミングをスキャンした場合に、CCD カメラの画像データを解析して算出したイベント数と、MCP 信号で測定したイベント数の時間分布との比較が示してある。CCD カメラ画像から算出したイベント数の増減は MCP 信号のイベント数の時間分布と合致していることがわかる。露光タイミング調整のあと、 μ^+ プロファイル測定をおこなった。図 14 に測定した減速 μ^+ のプロファイル分布を示す。測定結果はシミュレーションとよく合致しており、ビーム横方向分布を診断するためのデバイスとしては十分なデータが得られることを確認できた。ビーム試験期間と減速 μ^+ の測定強度による制約から設定条件を変えた多くのプロファイルデータは取れなかったものの、ビームラインに設置した静電四重極レンズ (加速試験では四極電磁石) の収束力を変化させつつビームプロファイルを測定することで、ビーム横方向エミッタンス測定が可能と結論付けられた。

4 加速試験準備

Mu⁻ 源が準備完了となり、いよいよ RFQ による加速実験が可能となったのだが、ここで問題となったのは実験場所である。この時点で E34 本実験を行う J-PARC MLF ミューオンビームライン (H ライン) の完成はもう少し先の話であるが、他の実験エリアでもビーム強度が低い点を除けば原理的には加速試験可能である。た

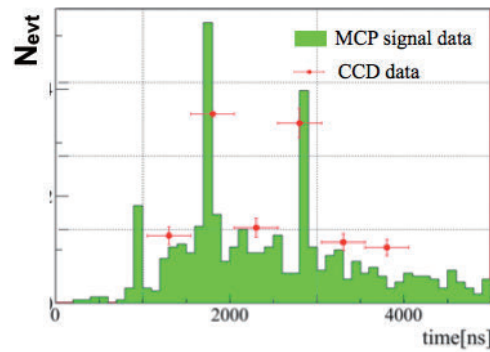


図 13: 各トリガータイミングでの CCD カメラ画像データから算出したイベント数と、MCP 信号からの時間分布の比較。MCP 信号の 3 つのピークは左から順にプロンプト陽電子、減速 μ^+ 、H⁺ を示している。

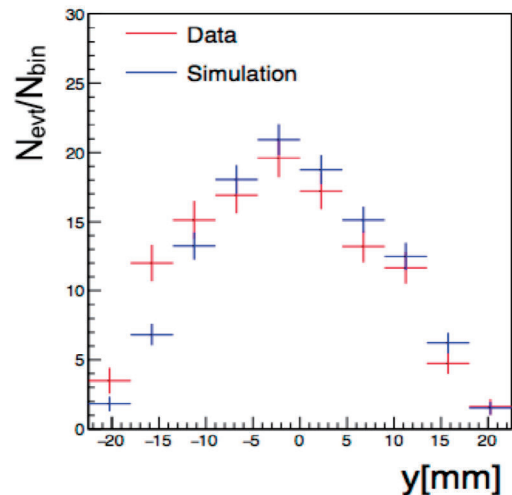


図 14: 減速 μ^+ のプロファイル測定結果。

だし他の実験エリアはミューオンリニアック実機用の RFQ II を入れられるほど広くはない。ここで白羽の矢が立ったのは、J-PARC リニアック用に製作された大電流 RFQ の試作機である [14]。この RFQ は J-PARC リニアックで加速している H⁻ ビームの電流を 30 mA から 50 mA に増強するための開発プロジェクトの一環として製作されたものであり、本来の長さの半分までの部分に相当する。残りの部分を製作して接続することで実機として使用することを前提として開発された。空洞の接合方法にレーザービーム溶接を用いるなどなかなかの意欲作であったが、J-PARC 運転開始当初の RFQ 放電問題 [15] もあり、実機大電流 RFQ (RFQ III [16]) は多くの RFQ で実績のある真空ろう付けにより製作された。そのため、この試作 RFQ が J-PARC H⁻ RFQ として実際に使用されることは遂になく、地下の保管場所で 10 年間眠っていた。この RFQ ならば RFQ II の 2/3 程度

の長さであり、 Mu^- 源と検出器系を付けても D ラインに設置可能と思われた。早速図面上での検討を行い、隙間 8 cm で設置可能という結論が得られた。これが 2016 年の 10 月のことであり、年も押し迫った 12 月 27 日に氷雨そぼ降る中、地下の保管場所から検出器系の追加作業などをより行いやすい J-PARC リニアック棟まで引っ張り出してきた (図 15)。2016 年度中にはミュオン加速に必要な冷却水配管等の解体を行った。



図 15: 10 年ぶりに日の目を見た J-PARC 試作 RFQ。

RFQ II の 2/3 の長さとは言え 4 トンの重量物であり、通常の加速器のように常設されるわけではなく、限られたビームタイムの直前に設置し、実験終了後は速やかに撤退しなければならないため、悠長に設置・撤去作業を行うわけにはいかない。そのため、RFQ の架台を延長してその上に検出器系を載せアライメント等の調整はあらかじめ行っておき、現場では Mu^- 源に合わせて置けばよいような構造を考えた。 Mu^- 源は RFQ のアクセプタンスに対して非常に広がったビームが出てくるので、RFQ の角度が若干ずれても問題ない。この診断ビームラインの設計は 2017 年 4 月から行い、7 月からは RFQ への組み込み作業を行った (図 16)。

限られた予算で診断ビームラインを構築するために、偏向電磁石は J-PARC リニアックで使わなくなったものを借用した。また、四極電磁石に関しては、飯沼裕美氏 (当時は KEK 加速器、現在は茨城大学) の協力のもと、KEK 入射器で未使用だったものをお借りした。検出器を含め診断ビームラインの全ての機器を設置後、森下卓俊氏 (原研) によってレーザートラッカーを用いて精度約 0.2 mm でアライメントを行った。

ビーム診断系の調整は前述の H^- の運動量を加速ミュオンと同じになるように加速して四極電磁石と偏向



図 16: ビーム診断系用延長架台。

電磁石の設定や TOF の整合性を事前に確認することが出来た。図 17 にこのコミッショニングの一例を示す。偏向電磁石の電流値を変えていくことで、MCP によるビームプロファイルモニタ上での H^- ビームが計算通りに移動していくことが確認された。シミュレーションにより予想される加速ミュオンは 1 秒間に 10^{-3} 個であり、通常の加速器のようなビームを用いたコミッショニングはほぼ出来ないと行ってよいなかでこの方法で事前にビームラインの調整が出来たことはミュオン加速成功に決定的な貢献となった。この H^- によるビームラインのコミッショニングは、茨城大学の学部学生である中沢雄河氏が KEK の加速器科学インターンシップでの実習の一環として行った。得られた結果は 2018 年の International Particle Accelerator Conference (IPAC18) で報告した [17]。これらのビーム調整は 2017 年 9 月から 10 月にかけて行われた。

この RFQ は長期間窒素ページのまま保管されており、真空リークの有無等健全性の確認が必要であったので、診断ビームラインの組立て・調整と並行して RFQ の確認作業も行った。取り外されていた RF カップラの組み立て後真空リーク試験を行い特に問題はなかった。二ツ川健太氏 (KEK) を中心にベクトルネットワークアナライザを用いた高周波特性の確認も行い、共振周波数 324.02 MHz、無負荷 Q 値 9900 と製作時と同等であることが確認された。 H^- 用に設計された RFQ でミュオンを加速する場合は、入射の粒子の速度 (β) を合わせて、投入電力を粒子の質量の 2 乗でスケールするだけでよい。したがってこの RFQ でミュオンを加速するために必要な投入電力はわずか 2.3 kW であり、最大出力 5 kW の半導体アンプからの電力を同軸ケーブルを通して供給した。

以上のように J-PARC リニアック棟にて入念に組み立て調整を行った後、いよいよ 2017 年 10 月 16 日に MLF

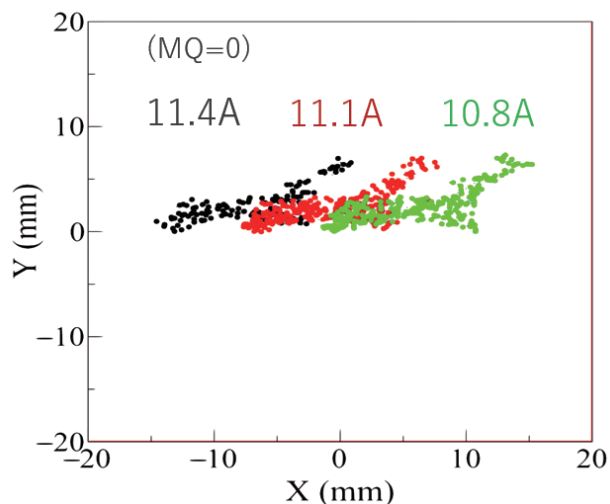


図 17: H^- を用いたビームライン調整の例。偏向電磁石の設定値を変化させると H^- プロファイルが x 方向に移動していくのが確認出来る。

へと持ち込んだ。図 18 は D2 エリアへ搬入する直前の様子である。図面上は何度も確認したもの、あまりにぎりぎりの寸法であったので実際に D2 エリアに設置するまでは本当に入るのか安心出来なかったが、無事収まった。アライメント作業に若干手こずったものの山崎高幸氏 (KEK) による MLF 施設との作業調整の甲斐もあり、当初の予定通り 2 日間で設置作業を完了し、その後配線、真空引き、 H^- での診断系コミッショニングを行い 10 月 24 日からのビームタイムに万全の準備で臨んだ。



図 18: D2 エリアへのインストール。

5 結果

RFQ を用いたミューオン加速試験は 2017 年 10 月 24 日から 6 日間に渡って実施した (実験課題番号

2017A0263)。RFQ の上流に設置された Soa レンズまでは、 Mu^- 生成実験のセットアップと共通である。生成した Mu^- は Soa レンズで RFQ の入射エネルギー 5.6 keV まで再加速された上で、RFQ へと入射する。RFQ によって Mu^- は 89 keV まで RF 加速されて、RFQ 下流に設置されたビーム診断系によって検出器まで輸送される。

図 19 にシミュレーションによる加速 Mu^- ビームの位相空間分布を示す。RFQ を含めたビームライン全体の輸送効率はシミュレーションを用いて見積もった。また Mu^- の生成効率は先に実施した Mu^- 実験での生成効率から見積もっている。この Mu^- 生成効率とアルミ標的の入射から検出器までの輸送効率の積は 3×10^{-10} である。加速試験実施時の陽子ビームパワーは 300 kW で、この時の入射ミューオンビーム強度は $2.5 \times 10^6 \mu^+/\text{sec}$ である。そのため加速 Mu^- ビーム強度は $8 \times 10^{-4} Mu^-/s$ と予想された。

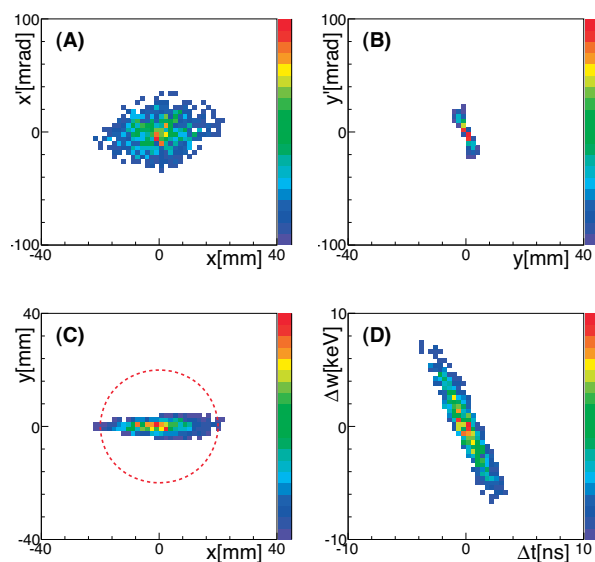


図 19: シミュレーションによる加速 Mu^- ビームの位相空間分布。赤点線は MCP の有効検出領域を示している。

加速 Mu^- は Mu^- 生成実験の時と同様に、偏向電磁石による極性と運動量選別、及び TOF 測定により同定を行った。図 20 に RFQ へ RF を投入した場合 (RF-on) と、投入しない場合 (RF-off) に MCP で測定した TOF 分布を示す。RF-on ではシミュレーションの予想信号と合致する TOF で加速 Mu^- の信号ピークがあることがわかる。一方 RF-off では有意な信号ピークは見られない。この解析によるピーク位置での TOF は 828 ± 9 ns で、シミュレーションの予想値と合致する。この TOF 分布が RFQ によって加速されたミューオンを捉えた決定的な証拠であり、世界で初めて高周波加速器によってミューオンが加速された瞬間であった。

加速 Mu^- ビームの強度は $(5 \pm 1) \times 10^{-4} Mu^-/\text{sec}$ で予想値とファクター 2 の範囲で合致した。予想通り加速

Mu^- のビーム強度は非常に小さいものであったが、実測した加速 Mu^- のビーム強度と予想強度が合致していることから、今回の加速試験におけるビーム輸送系に対する理解は概ね正しいと言える。図 21 に主に実験準備を担った方々の集合写真を示す。 Mu^- 生成実験の計画から 4 年目にして、漸く目標であった加速試験の成功にまで辿り着くことができた。

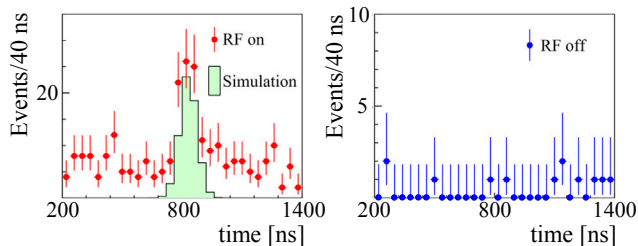


図 20: RFQ の RF-on (左) 及び RF-off (右) の場合に MCP で測定した TOF 分布。

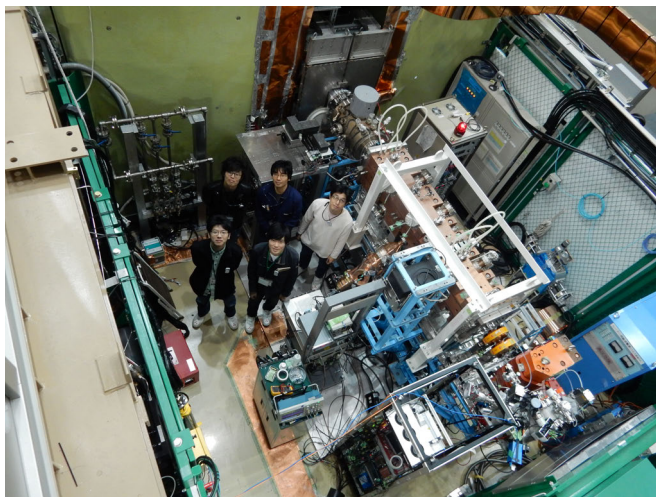


図 21: 加速試験での集合写真。須江氏 (前列左, 名大), 中沢氏 (前列右, 茨城大) と筆者ら (後列)。

6 まとめ

さて、やっとの思いで実現したミュオンの高周波加速だが、全長 40 m のミュオン専用線型加速器で 212 MeV まで加速するという全体計画からすれば、初めの一步を踏み出したに過ぎない。今後は、現在整備中のミュオンビームライン (H ライン) において、下流の加速を実証して行く予定である。既に RFQ 下流の interdigital H-type drift tube linac はプロトタイプを製作しておりオフライン試験を進めている。

本記事で詳しく説明できなかった J-PARC ミュオン $g-2$ 実験の全体像やミュオン線型加速器の設計に

関しては、物理学会誌 [18] と加速器学会誌 [19] を参照していただきたい。

本実験は J-PARC MLF 課題番号 2015A0324, 2016A0067, 2016B0214, 2017A0263 として実施された。実験準備に関して MLF ミュオン科学系グループの協力無くしては不可能であった。また、理研 RAL 支所のスタッフには再利用機器の解体、輸送に関して多大なご尽力をいただいた。さらに、四極電磁石をお借りした KEKB リニアックグループにも、この場をお借りして改めて感謝したい。本研究は JSPS 科研費 JP25800164, JP15H03666, JP15H05742, JP16H03987, JP16J07784, JP16K13810, 18H03707 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] G.W. Bennett *et al.*, *Phys. Phys. Rev. D* **73**, 072003, 2006.
- [2] 野村大輔, 高エネルギーニュース **37-1**, (2018).
- [3] 三部勉, 石田勝彦, 佐々木憲一, 高エネルギーニュース **31-3**, 209, 2012.
- [4] 三部勉, 石田勝彦, 高エネルギーニュース **35-2**, 110, 2016.
- [5] A. P. Mills *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 1463, 1986.
- [6] S. Chu *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 101, 1988.
- [7] K. Nagamine *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4811, 1995.
- [8] Y. Miyake *et al.*, *JPS Conf. Proc.* **21**, 011054, 2018.
- [9] D.R. Harshman, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 2850, 1986.
- [10] Y. Kuang, *et al.*, *Phys. Rev.* **A35**, 3172, 1987.
- [11] S. Bae *et al.*, *Phys. Rev. AB* **21**, 050101, 2018.
- [12] E.A. Soa, *Janaer Jahrbuch* **1**, 115, 1959.
- [13] B.Kim *et al.*, *Nucl. Instru. Meth.* **A899**, 22, 2018.
- [14] Y. Kondo *et al.*, *Proc. of LINAC2006*, Knoxville, Tennessee USA, 2006, pp. 749–751.
- [15] K. Hasegawa *et al.*, *Proc. IPAC2010*, Kyoto, Japan, 2010, pp. 621–623.
- [16] Y. Kondo *et al.*, *Phys. Rev. AB* **17**, 120101, 2014.

- [17] Y. Nakazawa, *et al.*, *Proc. IPAC2018*, Vancouver, Canada, TUPAK009, 2018.
- [18] 日本物理学会, 2017 年 6 月号掲載予定
- [19] 日本加速器学会誌, Vol. 15, No.2 掲載予定