PASJ2018 FROL13

ミューオン電子転換過程探索実験のための 8 GeV 遅い取り出しビーム試験

8GeV-SLOW EXTRACTION TEST FOR MUON ELECTRON CONVERSION SEARCH EXPERIMENT

富澤 正人^{*, A)}, 武藤 亮太郎^{A)}, 木村 琢郎^{A)}, 柳岡 栄一^{A)}, 新垣 良次^{A)}, 村杉 茂^{A)}, 岡村 勝也^{A)},
白壁 義久^{A)}, 五十嵐 進^{A)}, 佐藤 洋一^{A)}, 白形 政司^{A)}, 高野 淳平^{A)}, 森田 裕一^{A)}, 上窪田 紀彦^{A)},
外山 毅^{A)}, 橋本 義徳^{A)}, 發知 英明^{B)}, 田村 文彦^{B)}, 五十嵐 洋一^O, 上野 一樹^{C)}, 西口 創^{C)},
深尾 祥紀^{C)}, 藤井 祐樹^{C)}, 三原 智^{C)}, 森津 学^{D)}

Masahito Tomizawa,^{#, A)}, Ryotaro Muto^{A)}, Takuro Kimura^{A)}, Eiichi Yanaoka^{A)}, Yoshitsugu Arakaki^{A)}, Shigeru Murasugi^{A)}, Katsuya Okamura^{A)}, Yoshihisa Shirakabe^{A)}, Susumu Igarashi^{A)}, Yoichi Sato^{A)}, Masashi Shirakata^{A)}, Junpei Takano^{A)}, Yuichi Morita^{A)}, Norihiko Kamikubota^{A)}, Takeshi Toyama^{A)}, Yoshinori Hashimoto^{A)}, Hideaki Hotchi^{B)}, Fumihiko Tamura^{B)}, Youichi Igarashi^{C)}, Kazuki Ueno^{C)}, Hajime Nishiguchi^{C)}, Yoshinori Fukao^{C)}, Yuki Fujii^{C)}, Satoshi Mihara^{C)}, Manabu Moritsu^{D)},

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization, ACCL

^{B)} J-PARC Center/Japan Atomic Energy Agency

^{C)} High Energy Accelerator Research Organization, IPNS

^{D)} Japan Society for the Promotion of Science

Abstract

Planned muon to electron conversion search experiment (COMET) needs 8 GeV bunched proton beam with a 1 MHz pulse structure. In this experiment, ratio of residual beam intensity inter-bunch to the main bunch intensity, which is expressed as extinction, should be 10^{-10} . In RUN78 (Jan. to Feb., 2018), we have succeeded in slow extraction of 8 GeV protons with 7.3×10^{12} ppp, satisfies the COMET phase-I requirement, and the extinction derived from time structure of secondary particles generated from the target shows a promising result.

1. はじめに

J-PARC では、メインリング(MR)からの遅い取り 出し (SX) ビームを用いたミューオン電子転換過程 を探索する実験(COMET)が計画されている[1]。 COMET 実験では反陽子によるバックグラウンドの 観点から、通常の SX 運転での加速エネルギー30 GeV に対して、8 GeV に加速された陽子ビームを用 いる。さらに連続的に供給される陽子ビームは約1 μs 間隔のパルス状の時間構造を持つ必要があり、 隣り合うパルス状メインビーム間に存在する残留 ビームの強度比(extinction)は 10⁻¹⁰ のレベルが要求さ れる。この時間構造を作るために、3 GeV シンクロ トロン(RCS)では1バンチ加速を行い、MRに4回入 射し8 GeV まで加速する。加速されたビームはバン チ構造を保ったまま遅い取り出しを行うことにより COMET 実験施設に供給される。3 GeV から 8 GeV までという低い加速率のため、ビームサイズ縮小効 果が少ない状態で遅い取り出しを行うため、取り出 し装置のアパーチャーとのクリアランスには注意が 必要である。COMET は phase-I と phase-II で構成さ れ、phase-Iのビーム強度は 3.2 kW と適度である。 このビーム強度では、RCS からのビームサイズを小 さくするパラメーター選ぶことにより、現状の遅い 取り出し装置をそのまま使える見通しが 2014 年の8 GeV 加速試験(SX はなし)で得られている[2]。ま たこのビーム試験においては、extinction の改善のた めに MR の入射キッカーのタイミングをずらして、 空バケツに存在する残留ビームを入射後に全ロスさ せる手法が試され、十分な有効性が確認されている。 しかしながら遅い取り出し過程の extinction への影 響がどの程度あるかに関しては長年の懸案事項と なっていた。2018 年初頭に実施されたビーム試験に おいて、Phase-I で必要な 3.2 kW 相当の陽子ビーム の 8 GeV 遅い取り出しに初めて成功した。取り出さ れたビームの extinction が測定された。



Figure 1: Injection scheme from RCS to MR for COMET.

[#]masahito.tomizawa@kek.jp

PASJ2018 FROL13

2. パルスドビーム発生シナリオ

約1 µsの連続ビームを生成する方法は以下の通 りである。RCSとMRのハーモニックスはそれぞれ 2 と 9 である。通常の運転では、RCS で加速された 2 バンチからなるビームが、MR に 40 ms ごとに 4 回入射される。つまり MR では合計 8 バンチが入 射・加速される。残りの1個の RF バケツは空バケ ツである。一方、Fig. 1 で示されているように、 COMET 実験では1 バンチのみが RCS で加速され、 残り1つは空きバケツとなる。RCS への1バンチ入 射は、RFOとDTLの間に置かれた横方向RFチョッ パーにより、空きバケツのタイミングのビームを蹴 り出すことにより行っている。RCS からの1バンチ からなるビームは、40 ms ごとに MR に 4 回入射さ れる。MRでは、もともとの空きバケツを除いて、1 つおきのバケツに 4 つのバンチが入射され、8 GeV に加速される。通常の 30 GeV 遅い取り出しを用い た実験では、ビームの RF 周波数による時間構造を なくすために加速終了直後に RF を非断熱的にオフ するが、COMET 運転においては RF を OFF せず RF の時間構造を保ったまま遅い取りだしを行う。この シナリオにより、1 つおきのバンチ間隔に対応する 1.17 μs のパルス時間構造を持つ 8 GeV 陽子を連続 的に供給することができる[3]。

MR の1つおきの空きバケツには、前述の RF チョッパーの蹴り残しに起因する残留ビームが存在 する。この量は extinction で言うと 10⁶のオーダー でありこのままでは要求を満たさない。これを解決 するために、MR の入射キッカーのタイミングをず らし、空きバケツに対応する残留ビームをキッカー で蹴らないようにする案が著者の田村により提案さ れた(Fig. 2)。キッカーで蹴られなかった残留ビーム は MR への入射直後にダクト等にあたりロスとなる。 2014 年に実施されたビーム試験においてこの手法の 有効性がすでに確かめられている。



Figure 2: Timing shift of injection kickers.

3.8 GeV 加速と遅い取り出し

2014 年に実施された 8 GeV ビーム試験では遅い 取り出しは行われなかった。今回の 8 GeV ビーム試 験の大きな目的は、COMET phase-I で想定している ビーム粒子数で 8 GeV の遅い取り出しを行うこと、



Figure 3: 8 GeV acceleration pattern in Feb., 2018.

遅い取り出しビームの extinction を直接測定するこ とである。2018 年 1 月, 2 月に割り当てられたそれ ぞれ 3~4 日間の試験は、RUN78 の 30 GeV SX 利用 運転の途中に実施された。1月、2月に実施された8 GeV 試験の直前までそれぞれ 5.52 秒、5.20 秒サイ クルで 30 GeV の SX 利用運転を行っていたため[4]、 8 GeV 試験のサイクルは直前のサイクルと同じ値で 行った。ただしこのサイクルの中で、加速パターン は実際に想定している 2.48 秒に近い値とした。 Figure 3 は 2 月に実施された 8 GeV 試験の励磁パ ターンである。フラットトップは 0.8 秒でビームス ピルの長さは 0.65 秒程度に調整された。MR の粒子 数は 2.48 秒サイクルで目標の 3.2 kW となる 6.2×10¹² ppp を少し超える 7.3×10¹² ppp であった。 RCS で取り出された 3 GeV ビームのエミッタンスは、 中性子施設へのビームライン(3NBT)の上流に設置さ れたプロファイルモニターにより測定された。横方 向、縦方向の 1σエミッタンスは測定回数の平均で 0.66、0.85 π mm•mrad で、期待していた値以内と なっていた。リニアックのパラメーターは、ピーク 電流 40 mA に対して、パルス幅 50 µs, チョップ 幅 280 ns, 間引き率 26/32 が選ばれた。主電磁石の パターンを 30 GeV の設定値から Bpでスケールした ものにセットした時、RF の周波数パターンとのず れが許容できず、偏向電磁石(BM)のパターンとそれ に合わせて Q 磁石のパターンを調整する必要があっ た。ベータトロンチューンを 30 GeV と同じ値に セットした場合、入射・加速初期のロスが大きく、 特に水平方向のチューンをずらす必要があった。 coupling resonance の影響によるものと推測される。 またビームロスを減らすために、入射・加速初期の chromaticity と skew-O 磁石の調整を新たに行った。

取り出し直前のチューンと chromaticity は 30 GeV SX 時の値付近で微調整を行った。遅い取り出し中 は取り出し効率を上げるため、チューン変動で決ま るバンプ軌道を DSP によりリアルタイムで制御して いる(ダイナミックバンプ)[5]。チューン変動に対 応するバンプ閉軌道のセットをあらかじめ求めてお く必要があるが、30 GeV のセットを Boでスケール したものでは閉軌道を作ることができず、今回 SAD に組み込まれた MICAD を使い新たにパラメーター セットを求める必要があった。以上述べた様々な事 前調整により、最初のトライで8 GeV の遅い取り出 しに成功することができた。2月の試験においては、 ダイナミックバンプ調整、静電セプタム(ESS1,2)・ 低磁場セプタム(SMS1)の位置調整、さらに ESS2 の 電圧調整により取り出し効率は 97%まで改善した。 30 GeV SX で達成している取り出し効率 99.5%と比 較するとまだ満足できる段階ではないが、これらの 調整をさらに進めることで、効率をアップさせるこ とができる感触はつかむことができた。また、ビー ムスピルの時間構造の指標となる spill duty factor は 16%程度であった。Figure 4 は 8 GeV SX での DCCT, ビームスピル、SX エリアのビームロス分布の例を 示す。

遅い取り出しビームのエミッタンスは取り出され た後のビームライン(HD ビームライン)のプロファイ ルの測定で求められた[6]。得られたエミッタンスは 遅い取り出し装置のアクセプタンスをクリアするこ



Figure 4: DCCT, beam spill and beam loss distribution around SX area for 8 GeV slow extraction.

とを示唆するものとなっている。

4. Extinction の測定結果

遅い取り出しビームによる extinction の測定に先 立って、キッカーでアボートラインに蹴りだされた ビームをシンチレーターと PMT の組み合わせによ り測定する方法により extinction を求めた (2014 年 と同じ方法)。MR への 4 回の入射を順番に K1、 K2、K3、K4 と呼び、そのそれぞれに 2 つの MR の RF バケツが順番に割り当てられ、先に入射するバ ケツを front, 後を rear で表す。この測定では、 K1~K3 の入射は行わず、K4 のみビーム入射し、メ インビームは rear に入れ、front の残留粒子の event 比から extinction が求めた。メインビームを rear に 入れた理由は、メインビームの飽和した信号のあと に非常に数の少ない残留粒子を測定することが難し いためである。入射キッカーのタイミングシフトな しの場合の extinction は 8×10⁻⁶ であった。入射キッ カーのタイミングシフトは時間が遅れる方向に 600 ns にした。取り出し時の RF 電圧が加速電圧と同じ 180 kV での extinction は 10⁻¹¹ 台であった。2014 年 の測定と同様に、キッカーシフトによる extinction 改善の有効性が確かめられた。

遅い取り出しビームの extinction は、金ターゲッ トから発生した 2 次粒子のイベントタイミングを K1.8 ビームラインに置かれたホドスコープにより 測定して求められた[6]。Figure 5 は 9 個のバケツタ イミングにやってきた 2 次粒子の強度を表す。この 測定ではビームは K1~K4 rear に入れた。Front では なく rear に入れた理由は以下の通りである。入射 キッカーの磁場波形は回路のミスマッチにより磁場 波形がたち下がったあとに反射波形が発生する。こ の反射波形は先に MR に入射されたビームを蹴りエ ミッタンスを大きくする。この対策として補正キッ カーが導入された[7]が SX のチューンではこの補正 は十分ではなく、K1~K4 front にビームを入れた場 合は K1~K4 rear より影響が大きくなる。入射キッ カーは時間が早くなる方向に 720 ns だけをシフトさ せた。Figure 5 の K1~K3 rear のタイミングには全 く粒子が存在しないことがわかる。しかしながら



Figure 5: Pulsed beam structure measured at the secondary beam line.

PASJ2018 FROL13

K4_rear には 202 個の粒子があった。遅い取り出し のプロセスで K4_rear のみに粒子を発生させるメカ ニズムは考えられないため、この粒子は MR の入射 もしくは加速時にすでに K4_rear に存在していたと 考えられる。K4 を除く K1~K3 の範囲に対する extinction は 6×10^{-11} 以下となる。遅い取り出し過程 の extinction への影響も 6×10^{-11} 以下であるというこ とを意味し、今回得られた非常に大きな成果と言う ことができる。

K4_rear に分布している粒子は、遅い取り出しの 開始が最も多く、スピルの後半以降にゼロになるこ とがわかっている。つまり、水平方向のベータトロ ン振幅が大きいものが残りやすいということを意味 する。また前述のように、K4_rear にビームを入れ たアボートラインの extinction モニターによる測定 では、K4_front の残留粒子は小さかった。これらの 情報が遅い取り出しを行った際の K4_rear の残留粒 子発生メカニズムを解く鍵であると思われる。

5. まとめ

2018年1月、2月に行われたビーム試験において、 8 GeV まで加速された陽子ビームの遅い取り出しに 成功した。取り出しされたビーム強度は COMET phase-I で想定されているビーム粒子数に相当する。 取り出し効率、spill duty factor は限られた調整時間 の中でそれぞれ 97%, 16%に到達した。次回の試験 では十分な時間を確保しさらに取り出し効率、spill duty factor の向上を目ざす。入射キッカーのタイミ ングをずらす方法により extinction が 10⁻¹¹のオー ダーに改善されることが 2014 年に引き続き確認さ れた。懸案であった遅い取り出し過程の extinction への寄与は 6×10-11 以下であり要求される 10-10 を満 たすことが確かめられた。今回のビーム試験結果で 得られた成果は COMET 実験実現に向けて大きな一 歩となる。K4 rear の残留粒子の発生原因と対策に ついては今後の課題である。

謝辞

J-PARC メインリングの電源、モニター、制御、 入出射、RF グループの著者以外のメンバーの方々 にも多くの貢献をしていただきました。また取り出 し分岐部から下流のビームラインのビーム調整は、 一次陽子ビームライングループのメンバーによって なされたものです。以上の方々に感謝の意を表しま す。

参考文献

[1] The COMET Collaboration, CDR for COMET, Jun 23, 2009;

http://comet.kek.jp/Documents_files/comet-cdr-v1.0.pdf

- [2] M. Tomizawa *et al.*, "Extraction aperture and 8 GeV-beam size for μ-e conversion experiment in J-PARC", JPS Conf. Proc. 8, 012019 (2015).
- [3] M. Tomizawa *et al.*, "J-PARC accelerator scheme for muon to electron conversion search", Proc. of 11th EPAC, 2008, p.367-369.

- [4] R. Muto *et al.*, "Beam commissioning of slow extraction at J-PARC Main Ring", in these proceedings, WEP011.
- [5] M. Tomizawa *et al.*, "Slow extraction from J-PARC main ring using a dynamic bump", Nucl. Insr. and Methods, A902(2018) 51-61.
- [6] Y. Fukao *et al.*, "Measurement of proton beam profile at 8GeV acceleration commissioning for the J-PARC COMET experiment", in these proceedings, FROL12.
- [7] T. Sugimoto *et al.*, "Upgrade of the compensation kicker magnet for J-PARC main ring", Proceedings of the 2016 Particle Acc. Sci. of Japan, 2016, p.1209-1213.