

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

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

<sup>A)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, ACCL

<sup>B)</sup> J-PARC Center/Japan Atomic Energy Agency

<sup>C)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, IPNS

<sup>D)</sup> 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  $7.3 \times 10^{12}$  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  $\mu$ s 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unch 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unch 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。

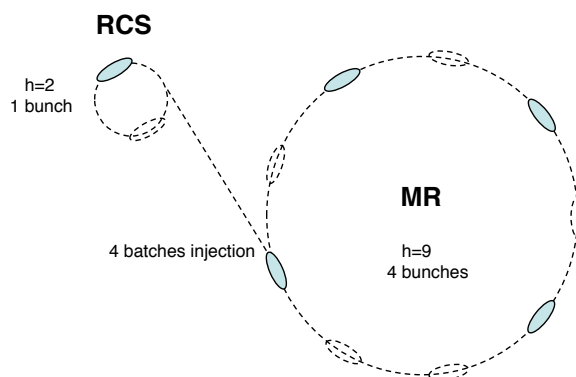


Figure 1: Injection scheme from RCS to MR for COMET.

<sup>#</sup>masahito.tomizawa@kek.jp

## 2. パルスドビーム発生シナリオ

約  $1 \mu\text{s}$  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、RFQ 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 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出しを行う。このシナリオにより、1 つおきのバンチ間隔に対応する  $1.17 \mu\text{s}$  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  $10^{-6}$  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。

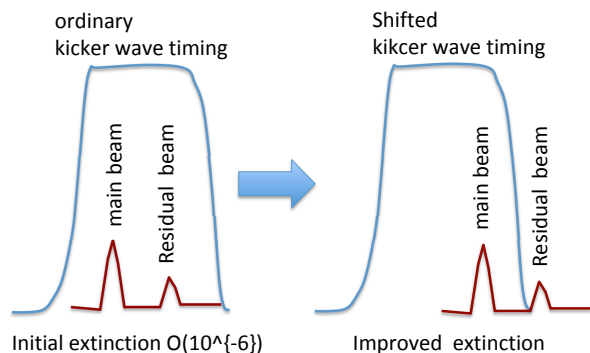


Figure 2: Timing shift of injection kickers.

## 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、

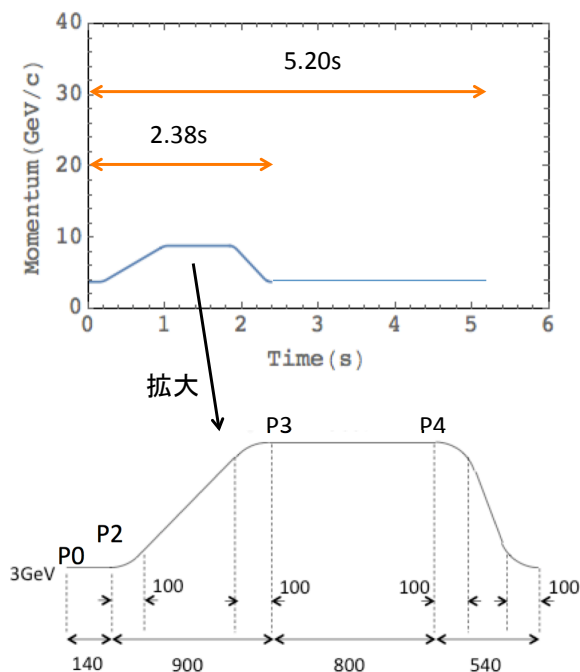


Figure 3: 8 GeV acceleration pattern in Feb., 2018.

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  $3.2 \text{ kW}$  となる  $6.2 \times 10^{12}$  ppp を少し超える  $7.3 \times 10^{12}$  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  $1\sigma$  エミッタンスは測定回数の平均で 0.66、0.85  $\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  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  $\mu\text{s}$ 、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-Q 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 Bp 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, ビームスパイル, 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

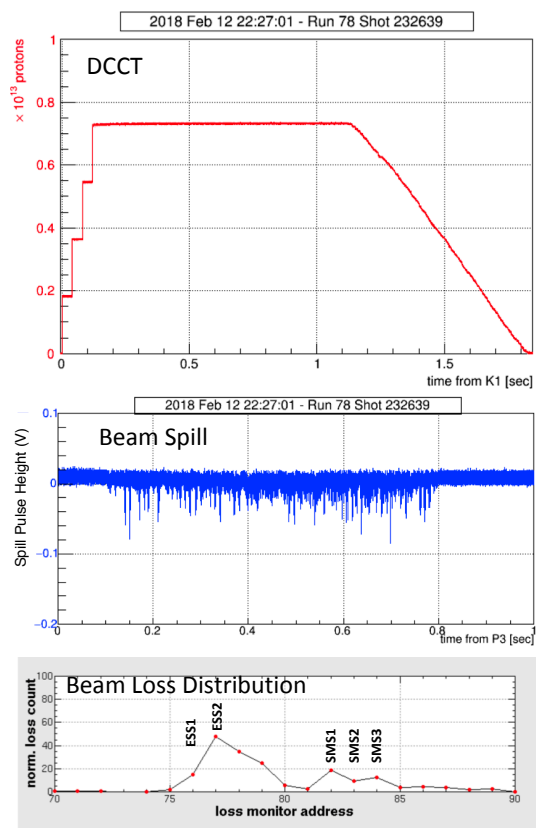


Figure 4: DCCT, beam spill and beam loss distribution around SX area for 8 GeV slow extraction.

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、キッカーでアポ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  $8 \times 10^{-6}$  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

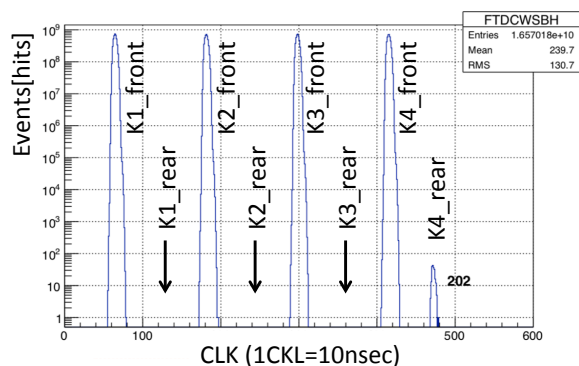


Figure 5: Pulsed beam structure measured at the secondary beam line.

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  $6 \times 10^{-11}$  以下となる。遅い取り出し過程の extinction への影響も  $6 \times 10^{-11}$  以下であるということを含め、今回得られた非常に大きな成果とすることができると言える。

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atron 振幅が大きいものに残りやすいということを含め、また前述のように、K4\_rear にビームを入れたアポートラインの 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 の向上を目指す。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  $6 \times 10^{-11}$  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](http://comet.kek.jp/Documents_files/comet-cdr-v1.0.pdf)
- [2] M. Tomizawa *et al.*, “Extraction aperture and 8 GeV-beam size for  $\mu$ -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. Instr. 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.