

話 題

COMET 実験のための 8 GeV 遅い取り出しビーム試験

富澤 正人 *

8 GeV Slow Extraction Beam Test for COMET Experiment

Masahito TOMIZAWA *

Abstract

Planned muon to electron conversion search experiment (COMET) needs 8 GeV bunched proton beam with a 1 MHz pulse structure. In this experiment, an intensity ratio of in-between residual beam to main pulsed beam, which is expressed as extinction, should be less than the level of 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 timing measurement of secondary particles generated from the target shows a promising result. A scenario to explain the measured extinction has been proposed.

1. はじめに

COMET (Coherent Muon to Electron Transition) 実験は、荷電レプトンフレーバー保存を破る過程であるミュオンが電子にニュートリノの発生を伴わずに転換する過程 (μe 転換過程) を探索するのが目的である¹⁾。

μe 転換過程は素粒子の標準理論ではほぼ禁止されており、この過程が見つければ、素粒子物理の大発見となる。 μe 転換過程は負電荷ミュオン原子と原子核 N との反応 $\mu^- + N \rightarrow e^- + N$ による 105 MeV 付近のエネルギーの電子を検出する。具体的には J-PARC 主リング (MR) からの陽子ビームをパイオン生成標的に照射し、発生したパイオンをソレノイド磁場で捕獲し、ミュオン輸送部内で崩壊したミュオンを効率良く静止標的に輸送し静止させる。このミュオンから変換した 105 MeV 領域の電子を検出する。ハドロン実験区域内に建設された COMET 実験棟はすでに完成し、一次陽子ビームラインの建設も進められている。COMET 実験は Phase-I と Phase-II に分かれている。Phase-I は 3×10^{-15} の事象発見精度を目指しており、そのための実験装置の製作が進められている。Phase-I の実験後に計画されている

Phase-II では、 3×10^{-17} の事象発見精度を目指している。アメリカのフェルミ加速器研究所でも同じ目的の計画が進行中で熾烈な国際競争が繰り広げられることになる。

COMET 実験において陽子ビームにどのようなスペックが要求されるのであろうか。通常の遅い取り出し (SX) 運転での加速エネルギーは 30 GeV であるが、COMET 実験では、反陽子によるバックグラウンドを抑えるために、8 GeV の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 μ sec 間隔のパルス状の時間構造を持つ必要がある。図 1 に示すように、ビームに起因するバックグラウンド発生後にデータ取得を行う。 μe 転換による電子は約 1 μ sec の寿命を持つミュオン原子の崩壊反応によって生成される。パルスビーム間の残留陽子はデータ取得中のバックグラウンド源となるため、厳しい条件が求められる。ビームパルス間に存在する残留陽子数とビームパルス内の陽子数の比を extinction という。この extinction は 10^{-10} 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

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

(Masahito Tomizawa E-mail: masahito.tomizawa@kek.jp)

験施設に供給される。加速比が3 GeV から8 GeV までと低いためビームサイズ縮小効果が少ない。したがって取り出し装置のアーチャーと取り出しビームのクリアランスが問題となる。幸い Phase-I のビーム強度は3.2 kW と適度である。RCS の入射ペイント領域を小さく選び、さらにその後の加速中のエミッタンス増加を抑えることにより、現状の遅い取り出し装置をそのまま使うことにした。2014 年の8 GeV 加速試験 (SX はなし) でこの方針がうまくいくことを確認できた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た。

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懸案事項となっていた。遅い取り出しにおいて最初にビームを削り出す静電セプタム (後述) のセプタム面には、必然的にビームの一部がぶつかる。その結果セプタム面で散乱されたビームは、角度の広がりを生じると共に基準運動量に対して低い方向に分布を持つ。周回側に散乱された低い運動量を持つビームが周回し、slippage factor により RF に対する位相のずれが生じ、その後取り出されてしまう可能性は十分に小さいのだろうか。一方では、共鳴を利用した遅い取り出しではそのような粒子は位相がスリップする前に取り出されてしまうかリング内でロスすることを期待していた。しか

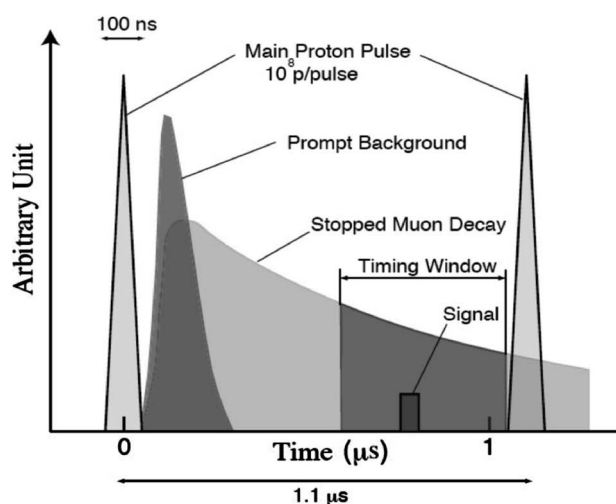


図1 COMET 実験のビームパルス構造.

し 10^{-10} の精度で評価するのは極めて困難である。したがって実際の遅い取り出しのビーム試験で extinction を測定することが待望されていた。

2018 年初め (RUN78) 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。さらに取り出されたビームの extinction が測定された。

2. ビームパルス生成シナリオ

1 μ sec の連続するパルス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 msec 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バケツにはビームを入射しない。一方、図2で示されているように、COMET 実験では RCS で1バンチ入射を行う。この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、空きバケツに入るタイミングのビームを蹴り出すことにより行われる (図3)。RCS からの1バンチからなるビームは、40 msec 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。一方、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

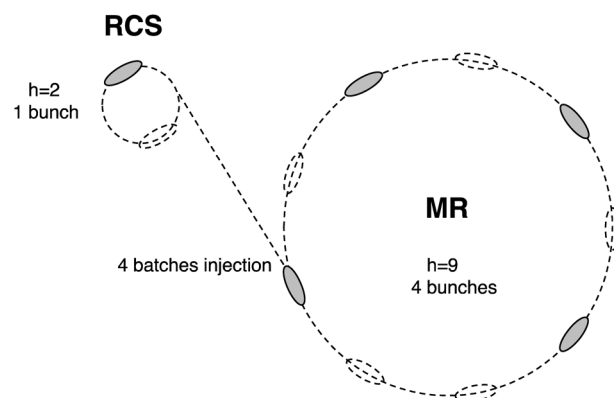


図2 COMET 実験のための RCS から MR へのビーム入射スキーム.

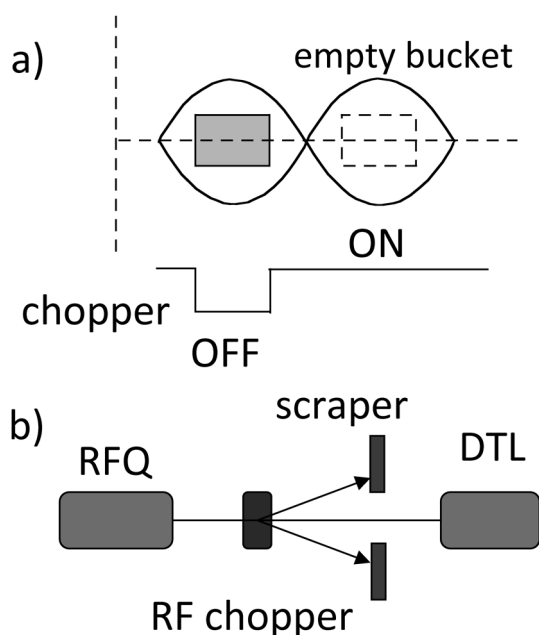


図3 RF チョッパーにより RCS で空バケツを作る方法.

ナリオにより、1つおきのバンチ間隔に対応する $1.17 \mu\text{sec}$ 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⁾.

3. Extinction 改善シナリオ

MR の1つおきの空バケツには、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。この問題を解決するために、MR の入射キッカーのタイミングをずらし、1つおきの空バケツに入るタイミングの残留ビームをキッカーで蹴らないようにする案が提案された(図4)。キッカーで蹴られなかった残留ビームはMR への入射直後にコリメーター等でロスするため空バケツ内の残留粒子を大幅に減らすことができる。2014年に実施された8 GeV ビーム試験において、速い取り出し方法でアポートビームラインに取り出されたビームの extinction が測定され、この手法の有効性が確かめられた。

4. MR 遅い取り出しの概要

ここで J-PARC MR の遅い取り出しについて簡単に説明をしておく。平成20年1月に初めて 30 GeV 遅い取り出しビームを素粒子・原子核実験施設へ導くことに成功した。

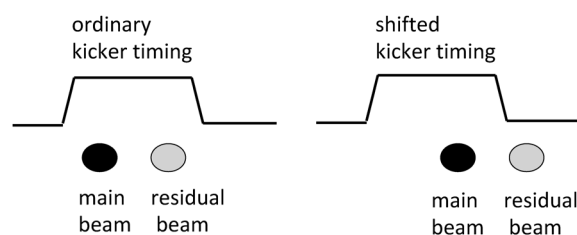


図4 ビームバンチと入射キッカーの関係。通常は左、右はキッカーをシフトした場合。

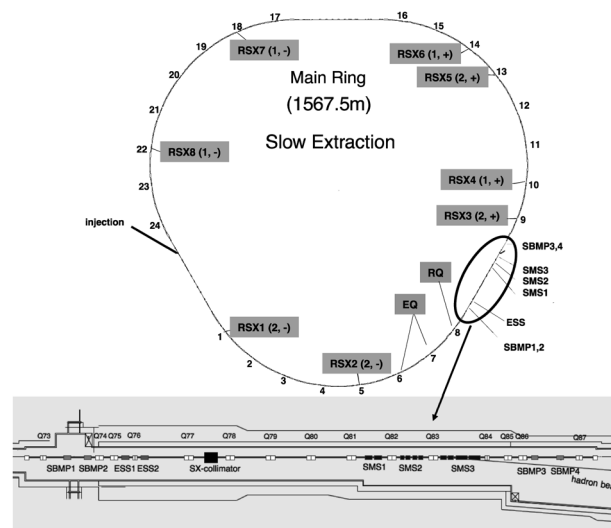


図5 遅い取り出し装置の配置図.

MR の遅い取り出しは3次共鳴 ($Q_x = 67/3$) を利用している。図5に示すように、2台の静電セプタム (ESS1, 2)、3種類のセプタム磁石 (SMS1-3)、4台のバンプ磁石 (SBMP1-4) が遅い取り出し直線部に置かれている。ESS2の下流にはESSのセプタム面にビームの一部が当たることによって生成されたビームハローの一部を削るコリメーター (SX コリメーター) が設置されている。3次共鳴を励起するための8台の6極磁石 (RSX1-8) はアーク部に設置され2台の電源で励磁される。

アーク部の48台のQ磁石 QFNにより、水平方向のチューンを3次共鳴線に近づけビームをゆっくりと取り出す。また取り出しビームの時間構造を改善するために、取り出されたビーム強度信号をもとに DSP によりリアルタイムでフィードバックを行う Q 電磁石 EQ (2台)、RQ (1台) がアーク部に設置されている。EQ は周回ビームの位相空間分布に起因するビームの時間構造をできるだけ一様に整形する。RQ はリング内の偏向磁石 (BM)、Q 磁石電源の電流リップルに起因する

スパイク状の時間構造を補正する。しかしながら、実際の主電源の電流リップルは設計時の想定より非常に大きく、これらのフィードバックでは十分なスピルの一様性が達成できない。そこで、2種類のベータトロン振動数の harmonics に近い周波数とその周りのノイズ幅を持つ横方向の高周波電場 (transverse RF) を周回ビームに与えることにより、スピルの時間構造の改善を行っている。

MR の遅い取り出しは、大強度ビームの取り出しのために、高い取り出し効率が得られる設計がなされている。最もビームロスが多く発生する1台目の ESS1 は2台の水平方向収束 Q 磁石の間に置かれている。この区間ではビームサイズを大きくすることができ、ESS1 のセプタム面に当たるビームの密度を下げビームロスを減らすことができる。また、ESS が設置されている直線部は dispersion がない。この時取り出し時の水平方向の chromaticity をフル補正することにより、取り出しのセパトリックスの運動量依存性をなくすることができる。セパトリックスはチューンを共鳴に近づけると縮む。これにより取り出しビームのセプタム面に対する角度にずれが生じる。セプタム側面への取り出しビームの衝突を減らすために、このずれをバンプ軌道を変化させ補正する。この角度のずれは、取り出し中のチューンに依存する。QFN によるチューン変化はあらかじめ既知であるが、一方 EQ によるチューン変化はリアルタイムで変動する。バンプ用 DSP は EQ の電流値をリアルタイムで読み込み、QFN による分と合わせてチューン変動による角度のずれを補正するバンプ軌道の解を求め、4台のバンプ電源に指令する。このダイナミックバンプと呼ぶスキーム⁴⁾により、30 GeV, 51 kW 運転において取り出し効率99.5% を定常的に達成している。遅い取り出し国際ワークショップで作成したテーブルにより、他の施設の取り出し効率の最高値より4倍性能が良い値となっていることが確認された。

5. 8 GeV 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、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

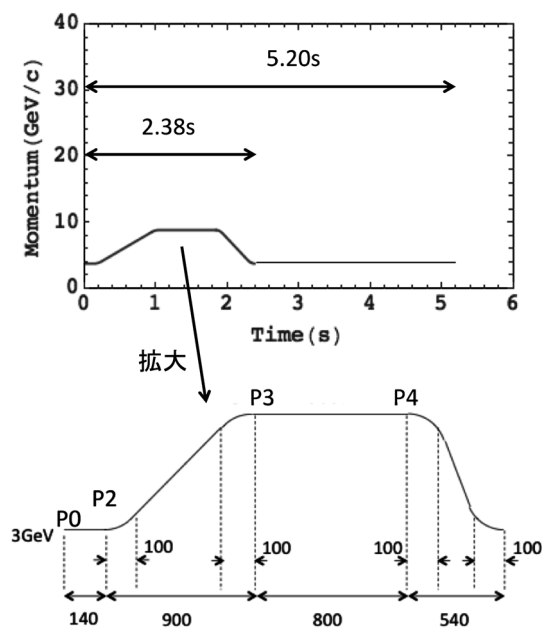


図6 8 GeV 励磁パターン。

と、遅い取り出しビームの extinction を直接測定することの2つである。2018年1,2月に割り当てられたそれぞれ4日間のビーム試験は、RUN78の30 GeV SX 利用運転の期間の合間に実施された。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⁵⁾, 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。図6は2月に実施された8 GeV 試験の励磁パターンである。主電源の安定性を確保するため、加速中の運動量の勾配は、30 GeV の 20.9 GeV/c/t よりかなりゆるい $dp/dt = 6.33 \text{ GeV/c/t}$ が選ばれた。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 6.2×10^{12} ppp を少し超える 7.3×10^{12} ppp であった。リニアックのパラメータは、ピーク電流40 mA に対して、パルス幅 $50 \mu\text{sec}$, チョップ幅280 nsec, 間引き率26/32 が選ばれた。表1に今回の8 GeV SX 試験に加えて、2014年の8 GeV 試験と30 GeV SX 運転のビーム設定パラメータを比較のため掲載した。RCS では、中性子実験施設 (MLF) へのビーム供給との共存の条件下において、できるだけエミッタンス増加を小さく抑えるため、加速中のチューンを補正 Q 磁石でパターン調整した。さらに chromaticity 補正6極磁石は、

電流の向きを途中で変える両極性の電流パターンで運転を行った。

BMのパターンを30 GeVの設定値から $B\rho$ 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、BMのパターンとそれに合わせてQMのパターンを調整する必要があった。QMの調整で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。これは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遅い取り出し時の値をベースに微調整を行った。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)。このために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運転のセットを $B\rho$ でスケールしたものではありません。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。

以上述べた様々な調整により、最初の試みで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

表1 ビームパラメータとエミッタンス。エミッタンスの単位は π mm·mrad。

	8 GeV (2014)	8 GeV (2018)	30 GeV (2018)
LI current (mA)	15	40	40
LI macro width (μ sec)	300	50	100
LI chop width (nsec)	435	280	265
LI thinning factor	20/32	26/32	18/32
Proton number (ppb)	1.6×10^{12}	1.7×10^{12}	6.9×10^{12}
Bunch number (RCS/MR)	1/4	1/4	2/8
Beam power (kW)	3.2	1.7	51
MR cycle (sec)	2.48	5.20	5.20
V n-emittance at 3 GeV	5.63	3.45	5.5
V n-emittance at 8 GeV	6.35	11.3	(10.4)
V n-emittance at 30 GeV	—	—	10.4

より取り出し効率は97%まで改善した。取り出し効率を算出するにあたって、ビームロス信号はビームエネルギーに比例すると仮定し、30 GeVで較正されたものをそのまま使った。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、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んだ。今回、ビームスピルの時間構造の指標となるspill duty factorは16%程度にとどまったが、transverse RFをONすることによって改善されることが期待される。図7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。ビームロス分布において、30 GeV運転の場合はESS1下流のビームロス値が一番高いが⁵⁾、8 GeV試験ではESS2の下流が高かった。調整不足でESS2のビームロスが実際多かったからなのか、30 GeVと8 GeVではそもそもビームロス分布が違うのかは不明である。

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

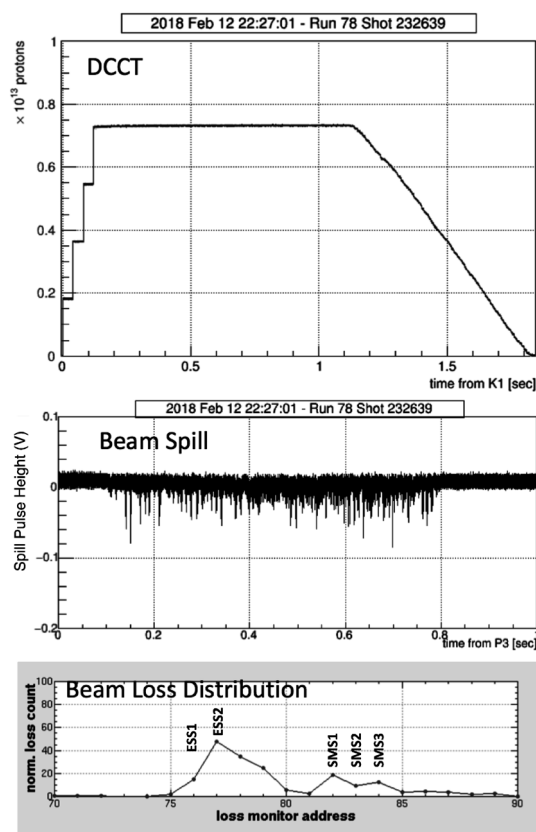


図7 DCCT信号、ビームスパイル、ビームロス分布。

された。測定回数で平均した横方向、縦方向の1 σ 非規格化エミッタンスは0.66, 0.85 π mm \cdot mrad と小さかった。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 (約24 π mm \cdot mrad) をクリアすることを示唆するものとなっている。2014年の8 GeV 試験, 今回の8 GeV 試験, 30 GeV 運転で測定された垂直方向の規格化エミッタンスが表1に示されている。2014年の8 GeV 試験のエミッタンスはMRのライニングワイヤーによるビームサイズから求めたものである。測定方法の違いはあるものの, 8 GeV エネルギーで比較すると, 今回の値は2014年のときより2倍程度大きくなっている。取り出し時とRCS出口のエミッタンス比も3倍を超えている。8 GeV 取り出し時の値は, 51 kW, 30 GeV 運転で測定された値から8 GeV にスケールした値とほぼ一致している。入射時の縦方向の位相空間の分布がまだらになっていたことがビーム試験後の壁電流モニターのトモグラフ解析でわかった⁷⁾。このpeakyな分布は横方向のspace charge効果を強めエミッタンス増大が起きた可能性があるのではないかと推測している。

6. 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出されたビームをシンチレーターと光電子増倍管によって直接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の残留粒子とのイベント比から extinction を求めた。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 nsecに設定された。取り出し時のRF電圧が加速電圧と

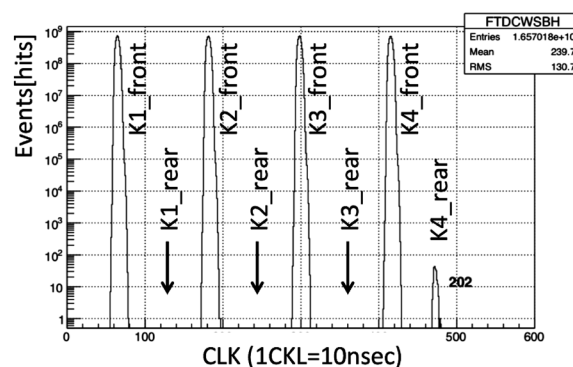


図8 遅い取り出しで測定されたビームの時間スペクトラム。

同じ180 kVでの extinction は 10^{-11} 台であり, 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⁾。図8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立ち下がったあとに反射波形が発生する (後述)。この反射波形は先にMRに入射され周回している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⁸⁾。しかしSXのチューンではこの補正は十分ではなく, K1~K4_rearにビームを入れ, キッカーのタイミングを遅らせる方向にずらした場合は, 逆の場合より影響が大きくなる。そのため, K1~K4_frontにビームを入れ, 入射キッカーは早める方向に720 nsecシフトさせた。図8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K4_rearには202個の粒子があった。K4を除くK1~K3の範囲に対する extinction は 6×10^{-11} 以下となる。遅い取り出し過程でK4_rearのみ残留粒子を発生させることはできないことから, 次のセクションで述べるように別の原因で発生している。したがってK1~K3の範囲の測定結果から, 遅い取り出しによる extinction への影響は 6×10^{-11} 以下であったと判断できる。この結果は今回得られた最大の成果と言うことができる。

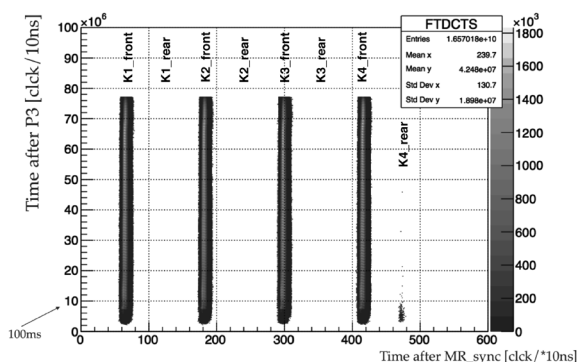


図9 各バンチ分布の取り出し中の時間経過。

図9は各バンチ分布の取り出し中の時間経過を表す。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る。

7. 残留粒子の原因推測

前述のように、遅い取り出しビームの extinction の測定によって、K1~K3のrearバケツの残留粒子数はゼロだったのに対し、K4_rearのみ202個の残留粒子が存在していた。なぜK4_rearのみに残留粒子が存在したのかを、測定された結果をもとに推測してみる。遅い取り出しビームによる extinction の測定では、K1~K4のfrontバケツにメインビームが入射された。それに対応してMR入射キッカーは、720 nsecだけタイミングを早める方向にずらし、rearに入るRCSからの残留粒子をMRで周回させないようにした。遅い取り出しのメカニズムではK4_rearのみ残留粒子を発生させることはできない。入射時にすでに残留粒子が存在していたと考えるのが自然である。

まず、図9からわかるように、K4_rearに分布している残留粒子は、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。3次共鳴の水平方向位相空間上のセパトリックスは、スピルの開始が最も大きく、取り出しの進行につれて小さくなり、最後はゼロになる。つまり水平方向のベータatron振幅が大きいものほど残りやすいということを意味する。この事実は原因の推測をする上で大きなヒントとなる。

図10は、遅い取り出しによる extinction 測定時のMRへのビームバンチの入射、入射キッカーとRFバケツの関係を模式的に示したものである。黒で示したバンチはメインビーム、灰色で示した

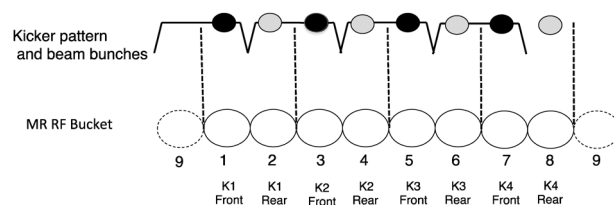


図10 ビームバンチ、キッカー、RFバケツの関係。

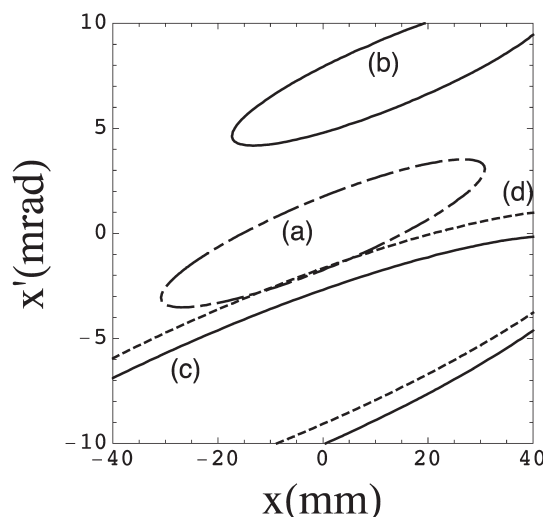


図11 入射キッカー出口でのビームの水平方向空間内プロット。

ものはRFチョッパーの蹴り残しビームである。RCSからの1回目の入射K1で、これらのビームバンチはそれぞれK1_frontとK1_rearに入る。このとき、K1_rearに対応したビームをリングで周回させないために、入射キッカーは約1 RFバケツ分前にずらす。K1入射から40 msec後にK2の入射が行われる。K2のキッカーも前にずらしているため、仮にK1_rearに残留粒子が存在し周回していてもK2のキッカーで再度蹴られてしまう。K2_rear, K3_rearも同様である。しかし、K4_rearの粒子だけはキッカーで蹴られないことがわかる。図11は入射キッカー出口の水平方向位相空間を示す。(a)の楕円はコリメーターで決まるリングのアクセプタンスである。ここでは 54π mm·mradとした。一旦入射され周回したビームが再度入射キッカーで蹴られた場合の楕円を(b)で示す。ここでエミッタンスは 54π mm·mradとした。これらの2つの楕円には十分なクリアランスがあるため、入射キッカーで再度蹴られたK1~K3_rearの粒子はすべてビームロスとなる。

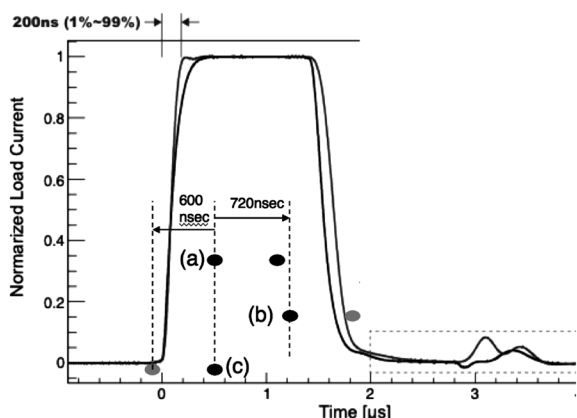


図12 入射キッカー波形とビームバンチ.

これで K4_rear のみ残留粒子が存在する理由が説明できる。

それでは、キッカーのタイミングシフトにより RF チョッパーの蹴り残しビームを MR 入射直後に全部消滅させたはずなのに、何で K1~K4_rear に粒子が残ってしまうことが起きるのであろうか。1つの可能性を以下で述べる。RCS からのビームはビーム輸送系 (3-50BT) を輸送され MR へ入射される。3-50BT には RCS からのビームハローを削るコリメーターが設置されている。また入射キッカーの直上流にはセプタム磁石が置かれている⁹⁾。仮に入射キッカーにやってくるビームに非常に大きな振幅を持つハローが存在するならば、MR のアクセプタンスに入り周回してしまう可能性がある (運動量はメインビームと同じ程度とする)。図11(c)は入射キッカーのタイミングをずらして磁場がゼロだった場合に振幅 $250 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ を持っているハローの分布線である。この例ではぎりぎり (a) のアクセプタンスとの重なりはないため入射直後にロスとなる。図12は入射キッカーの実際の波形とビームバンチとの関係を示す。2つのキッカーの波形が示されているが、現在は立ち上がりが鋭い方の波形で運転されている⁸⁾。キッカーの波形の立ち上がりと比較して立ち下がりには緩くテールを引いているのがわかる。また、キッカーの主波形が立ち下がった後に反射波によるこぶ状の波形が見えているが、キッカーのタイミングを遅れる方向にシフトするとこの影響が大きくなる。front にメインビームを入れ、キッカーシフトを早める方向にしたのはこの理由による。図12(a)はキッカーをシフトさせず

2バンチとも入射させる通常の場合を示す。これに対して、図12(b)は front にメインビーム(黒), rear は蹴り残しビーム(灰色)の場合で、キッカーの波形は720 nsec だけ前にずらしている。この例では、蹴り残しビームは立ち下がり途中の磁場(フルの15%程度)を感じる。この15%のキッカーの磁場を感じた場合、図11のハロー(c)は(a)のアクセプタンスに近づき(d)の点線になる。この場合、アクセプタンス(a)との重なりが生じることができ生き残る。ハローのベータトロン振幅が大きいものほどアクセプタンスの中心に入るが数は少なくなる。これは遅い取り出しの開始がもつとも残留粒子が多いことを説明する。

それではなぜ、速い取り出しでアボートビームラインに蹴り出したビームの K4_front の extinction は悪くなかったのであろうか。この時、メインビームは K4_rear に入れ、キッカーはタイミングが遅れる方向に600 nsec ずらした(図12(c))。RF チョッパーの蹴り残しビーム(灰色)は、キッカーの波形が鋭く立ち上がるために、図12(b)の時とは違いキッカーの磁場を感じない。これは図11(c)に対応する。図11(c)は(a)との重なりがないため、RF チョッパーの蹴り残しビームは完全になくなる。

以上の推測が正しい場合、rear にメインビームを入れ、キッカーをタイミングが遅れる方向にずらして4回入射する場合は、K1~K4_front の残留粒子は満足できる結果になるはずである。ただし前述のようにキッカー波形を後ろにずらすのは、キッカー波形の反射波の周回ビームへの影響が大きいため好ましくないとされる。しかしながら、ほんとうに許容できないかどうかは今後定量的に精査することも必要と思われる。K1~K4_front にメインビームを入れ、キッカー波形を前にずらす場合、空振りの K5 になるもので K4_rear の粒子を K1~K3_rear と同様に蹴り飛ばすことができれば、K4_rear の問題も解決するはずである。

以上述べた内容は、測定されたすべての結果を定性的に説明するが、あくまで推測の域を出ない。今後追加ビーム試験を行い推測の成否や対策の有効性を確かめる予定である。

8. 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に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%に達した. 次回の試験では, 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年に引き続き遅い取り出しビームによる測定で確認された. 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を推測した. 推測が正しいかを以降のビーム試験で確認し対策をとることが今後の課題である.

謝 辞

本執筆にあたって, 8 GeV SX 試験と extinction

の測定については参考文献¹⁰⁾を参考にしており, これらの仕事はこの論文の著者の方々により進められたものです. また, これらの方々以外にも, J-PARC MRの電源, モニター, 制御, 入出射, RFグループの多くの方々に協力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. 以上すべて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.: JPS Conf. Proc. **8**, 012019 (2015).
- 3) M. Tomizawa et al.: Proc. of the 11th EPAC, 367 (2008).
- 4) M. Tomizawa, Y. Arakaki, T. Kimura, R. Muto, S. Murasugi, K. Okamura, H. Sato, Y. Shirakabe and E. Yanaoka: Nucl. Instrum. Methods **A902**, 51 (2018).
- 5) R. Muto et al.: Proc. of the 15th PASJ, WEP011 (2018).
- 6) Y. Fukao et al.: Proc. of the 15th PASJ, FROL12 (2018).
- 7) 杉山康之, 私信.
- 8) T. Sugimoto et al.: Proc. of the 14th PASJ, 1209 (2016).
- 9) M. Tomizawa et al.: Proc. of the 22nd PAC, 1505 (2007).
- 10) M. Tomizawa et al.: Proc. of the 15th PASJ, FROL13 (2018).