

COMET 実験に向けた J-PARC メインリングの 陽子ビームのエクステンション改善と 補正キッカーの最適化

2020年9月2日
第17回日本加速器学会年会

野口恭平, 東城順治, 西口創^A, 富澤正人^B
九大理, KEK 素核研^A, KEK 加速器^B

講演番号 : WEOT02

ミュオン電子転換過程

ミュオンがニュートリノを放出せずに
電子へ転換する**荷電レプトンフレーバー非保存過程**

❖ 信号事象

- ◆ $\mu^- + N(A, Z) \rightarrow e^- + N(A, Z)$
- ◆ 2体崩壊であり、電子は単色エネルギー
- ◆ アルミニウムの場合、 $E_e = 105 \text{ MeV}$

❖ 背景事象

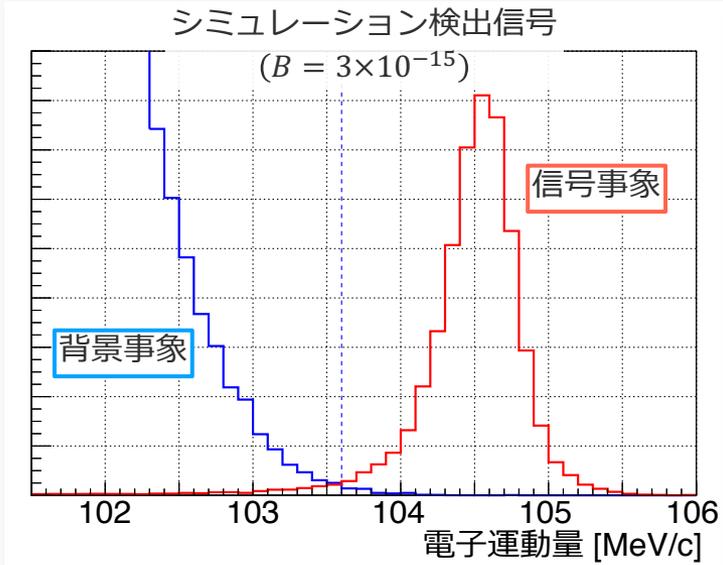
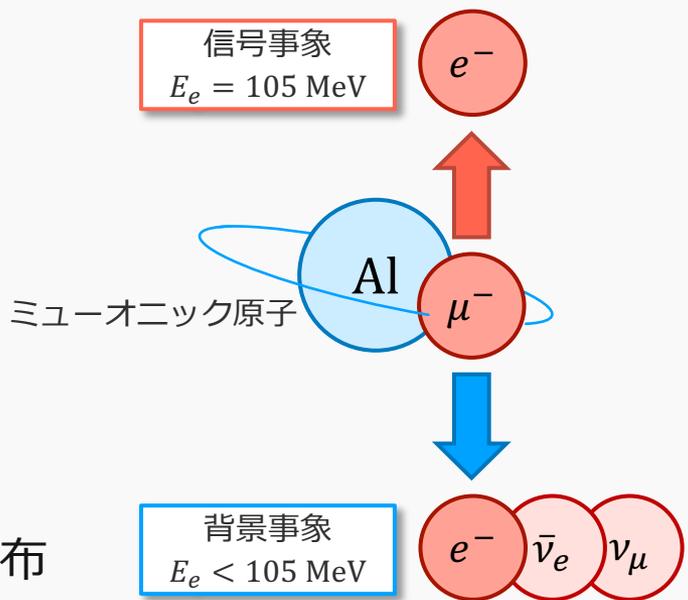
- ◆ $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
- ◆ 3体崩壊であり、電子のエネルギーは連続的に分布
- ◆ アルミニウムの場合、 $E_e < 105 \text{ MeV}$

❖ 信号事象の分岐比

- ◆ 標準理論 $< 10^{-54}$
- ◆ 標準理論を超えた物理 $\sim 10^{-15}$ \Rightarrow 40桁
- 標準理論を超えた物理の探索の良いプローブ

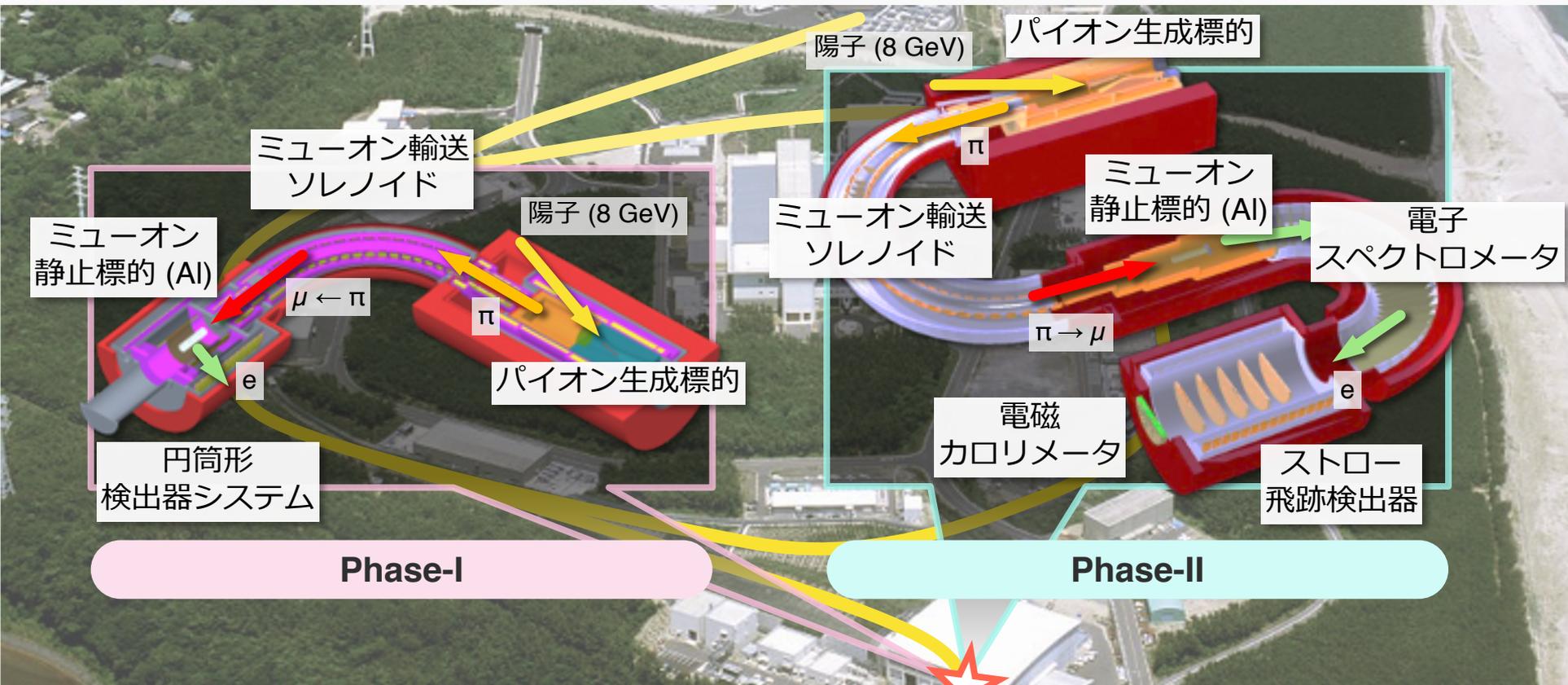
COMET 実験は**ミュオン電子転換過程を探索する**

- ◆ 稀現象探索であり、**背景事象により感度が制限**



COMET 実験

- ◆ J-PARC (茨城県東海村) の大強度陽子パルスビームを使用



❖ 目標到達感度

- ◆ Phase-I 10^{-15} → 理論予言領域の上限まで探索
- ◆ Phase-II 10^{-17} → 理論予言領域内を広く探索
 - 先行実験 (SINDRUM-II) の **1万倍**の到達感度

COMET 実験のビーム

ビーム起因背景事象を排除

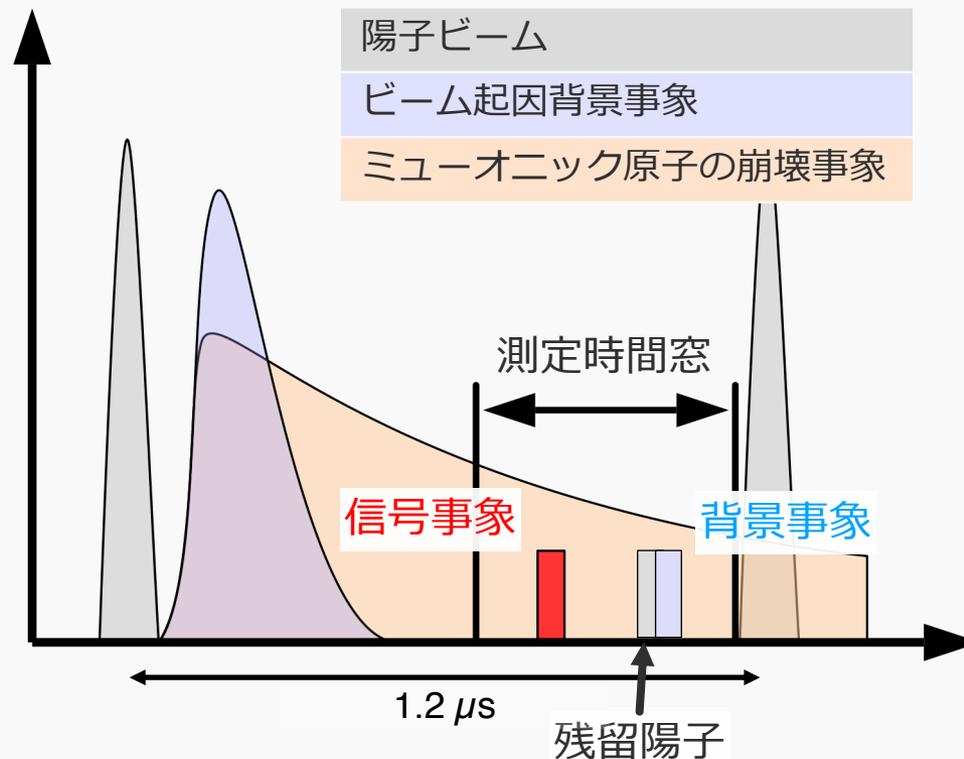
- ◆ **パルス陽子ビーム** (Bunched Proton Beam) & 測定時間窓 (Delayed Time Window)

検出器のパイルアップの抑制

- ◆ **遅い取り出し** (Slow Extraction)

バンチ間の残留陽子が背景事象の主要因となる

- ◆ **残留陽子の割合** (Extinction) の要求値 < 10^{-10}

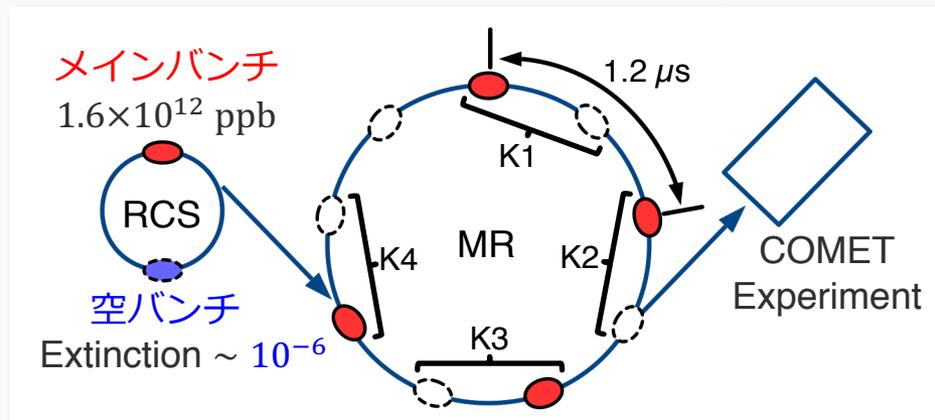


COMET 実験のビーム

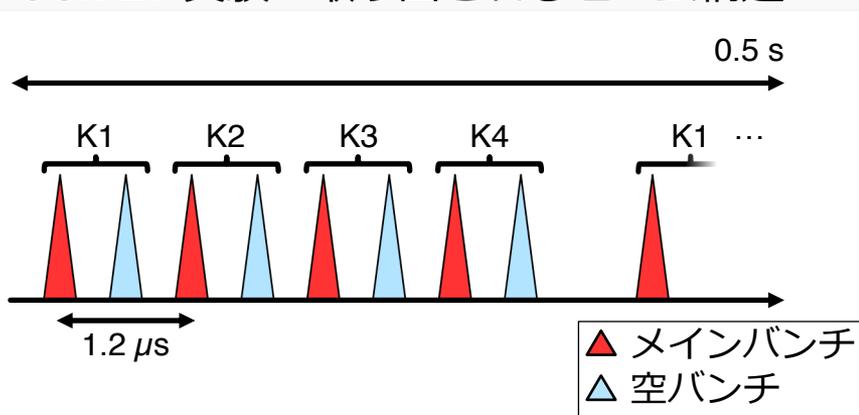
バンチ間隔 $1.2 \mu\text{s}$ を確保するため、9 バケツ中 4 つに陽子を詰める

- ◆ メインバンチと空バンチが交互に並ぶ

メインリングにおけるビーム状況



COMET 実験へ取り出されるビーム構造



COMET Phase-I におけるビーム

| | |
|-----------|----------------------|
| エネルギー | 8 GeV |
| パワー | 3.2 kW |
| 陽子 / バンチ | 1.6×10^7 |
| 陽子 / ショット | 6.2×10^{12} |
| サイクル | 2.5 秒 |
| 取出し時間 | 0.5 秒 |

空バンチ中には残留陽子が存在

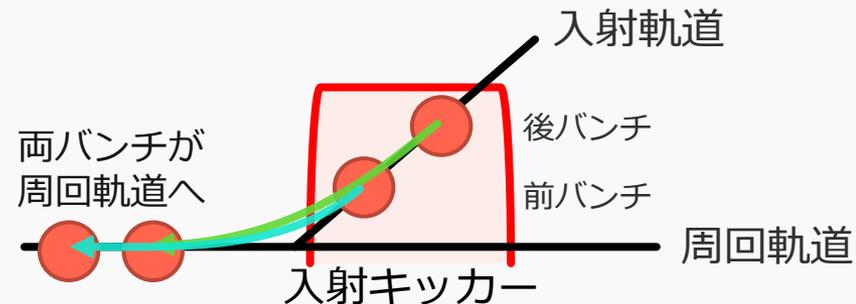
- ◆ 空バンチについて Extinction を 5 桁改善する必要がある

エクステンションの改善手法

❖ 通常の入射

RCS から入射される 2 バunchを
1 回の入射キッカーのキックで MR へ入射

- ◆ 空バunch中の残留陽子も周回軌道に入ってしまう



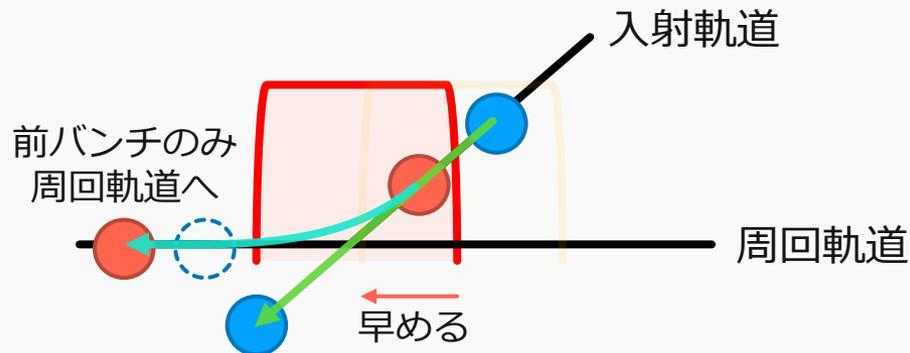
❖ Single Bunch Kicking

入射キッカーのタイミングをシフトし、メインバunchのみキック

- ◆ 空バunch中の残留陽子はコリメータ ($54 \pi \text{ mm mrad}$) によって完全に排除される
- ◆ 前後バunchのどちらをメインバunchとするかによって 2 パターン存在

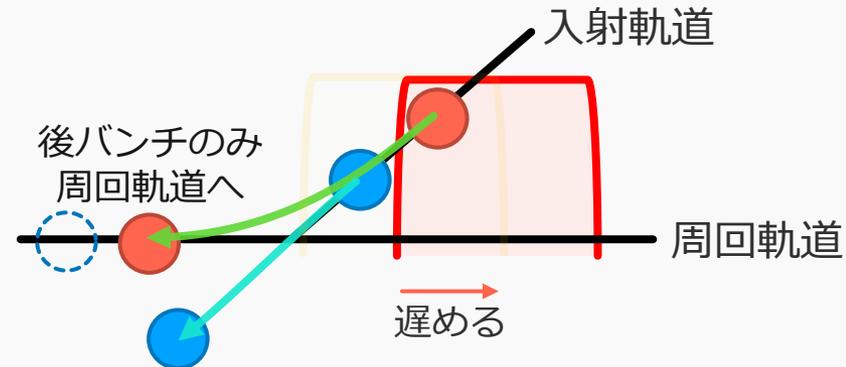
① 前入れ

前バunchをメインバunchとする
入射キッカーのタイミングを早め、
前バunchのみキック



② 後入れ

後バunchをメインバunchとする
入射キッカーのタイミングを遅め、
後バunchのみキック



入射キッカーシミュレーション

❖ 入射キッカー

- ◆ 立ち下がりが立ち上がりと比較して遅く、前入れと後入れで異なる影響を及ぼす
- ◆ 反射波が存在しており、先に MR 内を周回しているビームを蹴ってしまう

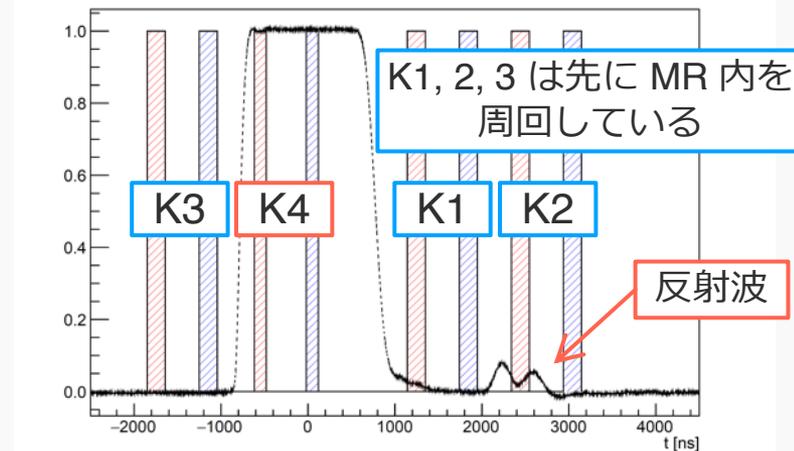
❖ 目的

- ✓ 前入れと後入れの比較
- ✓ 最適なキッカーのシフト量の見積もり

❖ 手法

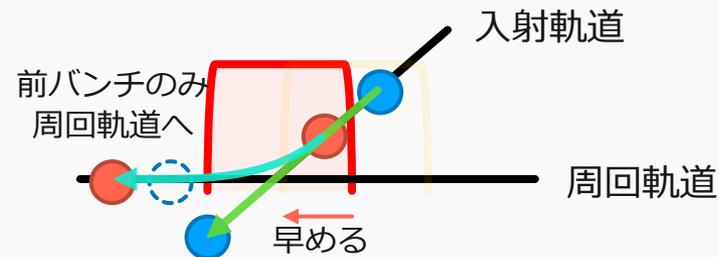
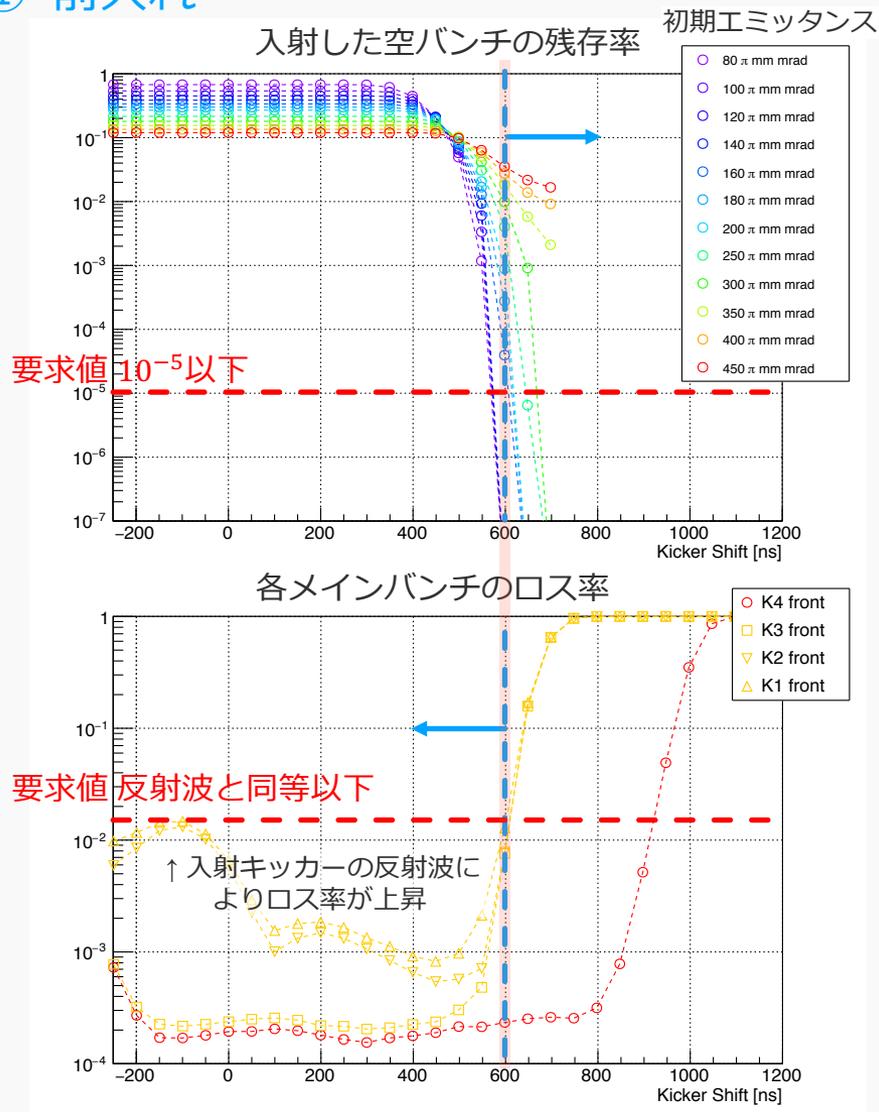
- ◆ 入射キッカー波形に対するバンチのタイミング毎に計算
 - 各粒子の位相空間上の運動を計算
 - キッカーの開口や内部での散乱、空間電荷効果は考慮しない
- ◆ 加速器の各パラメータは、設計値や SAD (Structured Accelerator Design) の計算値を使用
- ◆ 入射キッカーを通過した後の**空バンチの残存率**と**メインバンチのロス率**で評価
 - 残存率 := MR のアクセプタンス ($54 \pi \text{ mm mrad}$) **内**に存在する粒子の割合
 - 空バンチの残存率は低いことが求められる
 - ロス率 := MR のアクセプタンス ($54 \pi \text{ mm mrad}$) **外**に存在する粒子の割合
 - メインバンチのロス率は低いことが求められる

K4入射時の入射キッカーとバンチの位置関係の例



入射キッカーシミュレーションの結果

① 前入れ



❖ 空バンチの残存率

- ◆ 入射キッカーの立ち下がりから外に出ることで残存率が減少
- ◆ 要求を満たす条件
 - シフト 600 ns 以上
 - 初期エミッタンス 140π 以下

❖ メインバンチのロス率

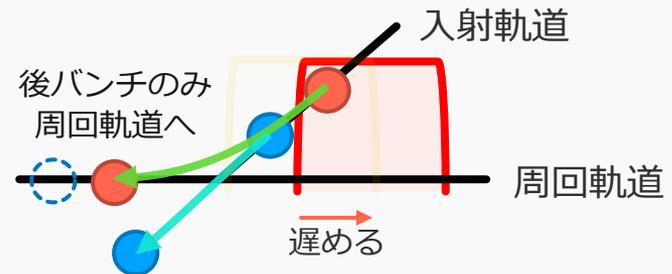
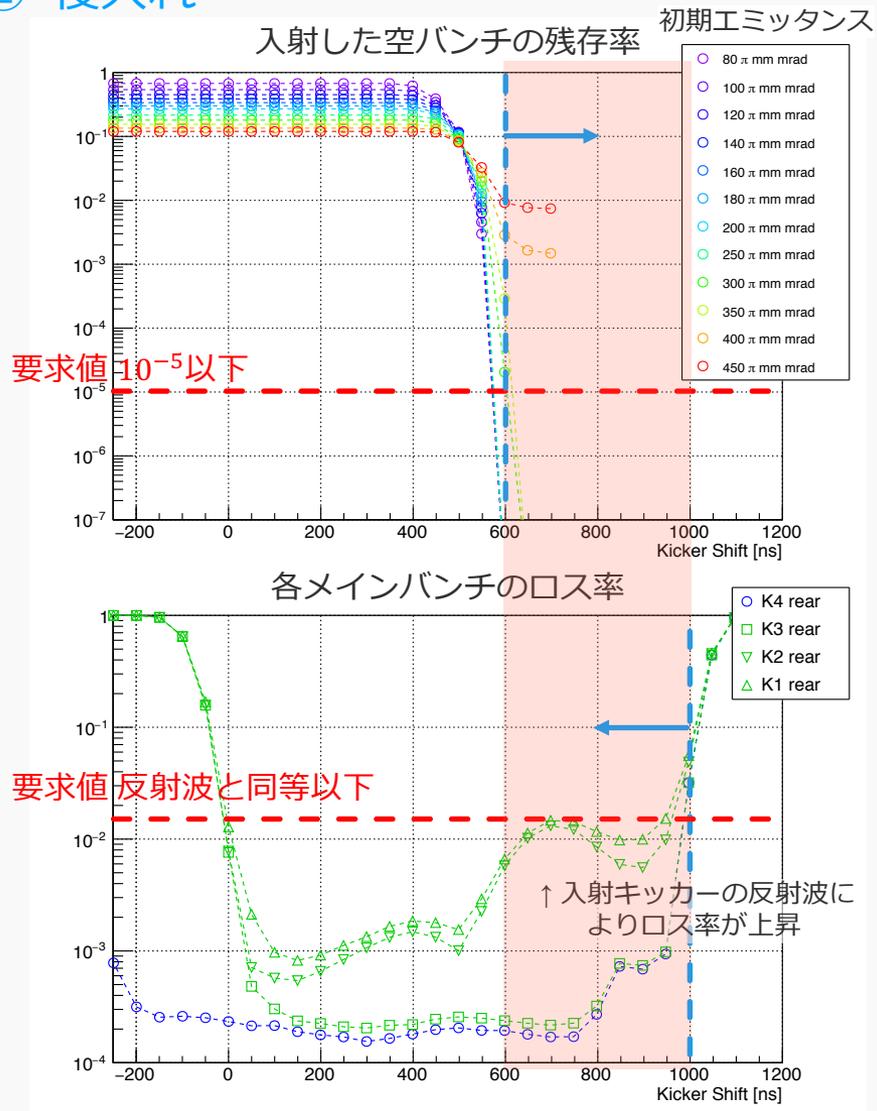
- ◆ 入射キッカーの立ち上がりによりロス率が増加
- ◆ 要求を満たす条件
 - シフト 600 ns 以下

❖ 最適なシフト量

- ◆ 600 ns 前後のみ

入射キッカーシミュレーションの結果

② 後入れ



❖ 空バンチの残存率

- ◆ 入射キッカーの立ち上がりから外に出ることで残存率が減少
- ◆ 要求を満たす条件
 - シフト 600 ns 以上
 - 初期エミッタンス 250 π 以下

❖ メインバンチのロス率

- ◆ 入射キッカーの立ち下がりによりロス率が増加
- ◆ 要求を満たす条件
 - シフト 1000 ns 以下

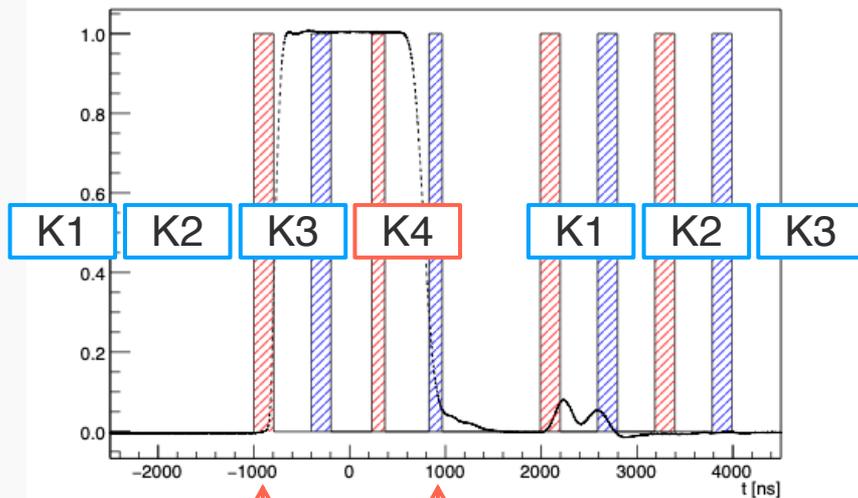
❖ 最適なシフト量

- ◆ 600 ns から 1000 ns の間
- ◆ 反射波の影響によるビームロスが予想される

K4 入射時の入射キッカーとバンチの位置関係

① 前入れ

入射キッカーを 600 ns 早めた場合

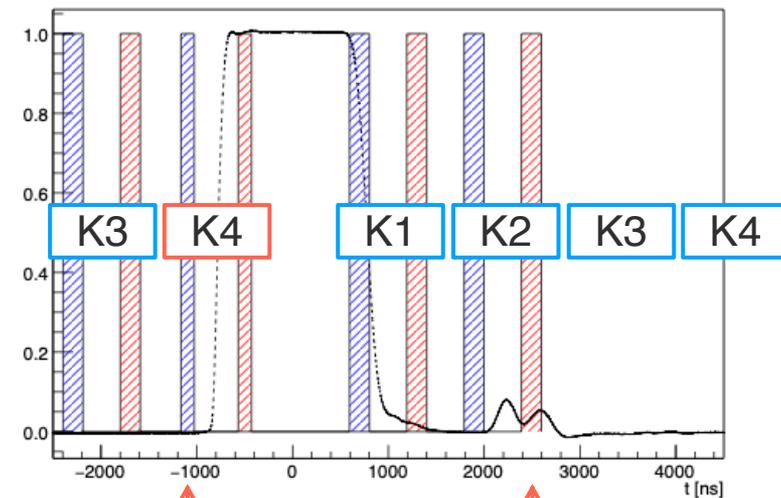


空バンチが入射キッカー波形の
タイミング外に存在する

これ以上早めた場合、
入射キッカーの立ち上がりにより
周回ビームが強く蹴られる

② 後入れ

入射キッカーを 800 ns 遅めた場合



空バンチが入射キッカー波形の
タイミング外に存在する

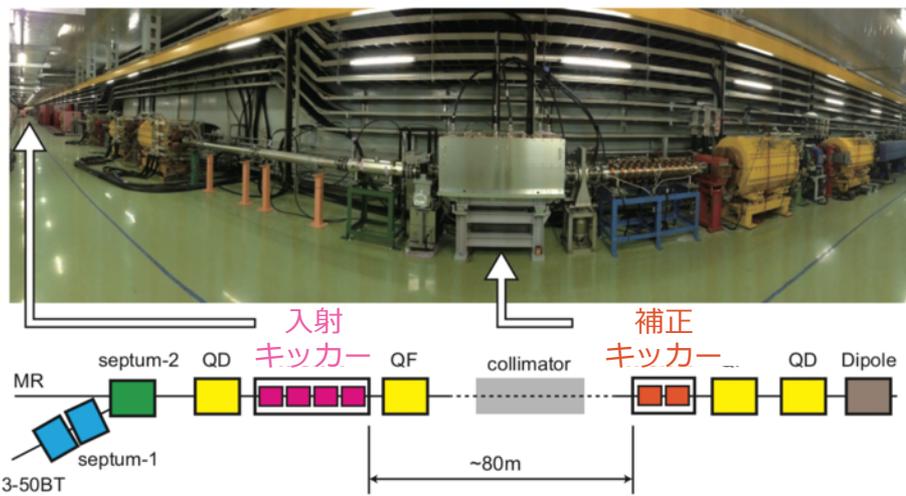
入射キッカーの反射波により、
周回ビームが蹴られている

- ◆ 後入れに優位な点は多いものの、**反射波の影響が懸念される**
 - (特に大強度化した場合に) ビームロスやエミッタンス増加が問題となりうる
- ◆ 入射時の各ビームの余剰なキックの影響は入射エラーとして測定される
 - 入射エラー := 入射時の基準粒子軌道 (ビーム軸) からの変位 ~ エミッタンス

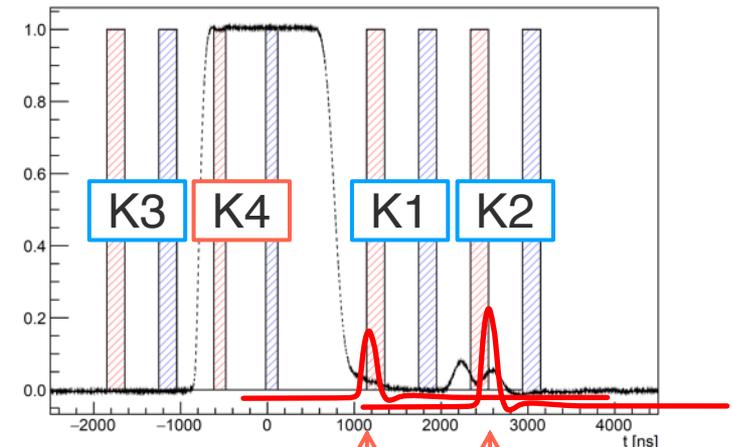
入射エラーの補正

❖ 補正キッカー

- ◆ 余剰なキックの影響を打ち消す方向にビームをキックし、**入射エラーを補正**
- ◆ 補正キッカー 2 台 (A と B) で、入射キッカーの反射波とテール部分をそれぞれ補正
- ◆ ビーム強度が強い**早い取り出し**において運用されている
 - 早い取り出し ($Q_x = 21.41$) と遅い取り出し (通常は $Q_x = 22.308$, COMET は $Q_x = 22.32$) では**最適な動作タイミングが異なる**
 - 遅い取り出しでも運用されているが、最適化はされていない
- ✓ 遅い取り出しにおいても補正キッカーを最適化して運用し、**後入れにおける反射波の問題を解消**する



通常の補正キッカーの動作タイミング例



テールに対する補正
反射波に対する補正

補正キッカーの動作タイミングの候補

❖ 入射キッカーと補正キッカーの位相差

| | | 遅い取り出し | | | |
|----------|----------|----------------|-------|--------|-----|
| | | 30 GeV (通常の運転) | | | |
| 運転種別 | | チューン Qx | | | |
| | | 22.308 | | | |
| 入射後補正 | | [2π rad] | [deg] | Δphase | 極性 |
| 既存の設定 | + 0 turn | 0.8856 | 318.8 | -41.2 | IN |
| | + 1 turn | 23.1936 | 69.7 | 69.7 | IN |
| | + 2 turn | 45.5016 | 180.6 | 0.6 | OUT |
| | + 3 turn | 67.8096 | 291.5 | -68.5 | IN |
| | + 4 turn | 90.1176 | 42.3 | 42.3 | IN |
| + 5 turn | 112.4256 | 153.2 | -26.8 | OUT | |
| 入射前補正 | | [2π rad] | [deg] | Δphase | 極性 |
| | - 0 turn | 21.4224 | 152.1 | -27.9 | OUT |
| | - 1 turn | 43.7304 | 262.9 | 82.9 | OUT |
| | - 2 turn | 66.0384 | 13.8 | 13.8 | IN |
| | - 3 turn | 88.3464 | 124.7 | -55.3 | OUT |
| | - 4 turn | 110.6544 | 235.6 | 55.6 | OUT |
| | - 5 turn | 132.9624 | 346.5 | -13.5 | IN |

| | | 遅い取り出し | | | |
|-------|----------|------------------|-------|--------|-----|
| | | 8 GeV (COMET実験用) | | | |
| 運転種別 | | チューン Qx | | | |
| | | 22.32 | | | |
| 入射後補正 | | [2π rad] | [deg] | Δphase | 極性 |
| | + 0 turn | 0.8892 | 320.1 | -39.9 | IN |
| | + 1 turn | 23.2092 | 75.3 | 75.3 | IN |
| | + 2 turn | 45.5292 | 190.5 | 10.5 | OUT |
| | + 3 turn | 67.8492 | 305.7 | -54.3 | IN |
| | + 4 turn | 90.1692 | 60.9 | 60.9 | IN |
| | + 5 turn | 112.4892 | 176.1 | -3.9 | OUT |
| 入射前補正 | | [2π rad] | [deg] | Δphase | 極性 |
| | - 0 turn | 21.4308 | 155.1 | -24.9 | OUT |
| | - 1 turn | 43.7508 | 270.3 | -89.7 | IN |
| | - 2 turn | 66.0708 | 25.5 | 25.5 | IN |
| | - 3 turn | 88.3908 | 140.7 | -39.3 | OUT |
| | - 4 turn | 110.7108 | 255.9 | 75.9 | OUT |
| | - 5 turn | 133.0308 | 11.1 | 11.1 | IN |

既存の設定

1番目に良い

1番目に良い

- Δphase は、位相差が 0 deg (= 360 deg) または 180 deg のどちらか近い方からの差
- 補正は、位相差が 0 deg または 180 deg に近い方が望ましい
- 極性は、位相差が 0 deg に近い場合はリング内蹴り (IN)、180 deg に近い場合はリング外蹴り (OUT) に設定する必要がある
- ◆ 通常の 30 GeV の遅い取り出しでは、+ 0 turn で動作させていた
 - さらに 2 turn 補正タイミングを遅らせる + 2 turn が最もよく補正できる計算

補正キッカーの最適化

- ◆ 通常の遅い取り出しの加速器スタディや立ち上げにおいて最適化を実施
- ◆ 極性の変更は他のスタディへの影響もあったため、リング内蹴りで試験を実施
 - リング内蹴りで位相差と周回数が少ない - 2 turn について試験

❖ 手法

- ◆ 補正キッカーの動作タイミングと励磁電圧をスキャンし、入射エラーを最小化

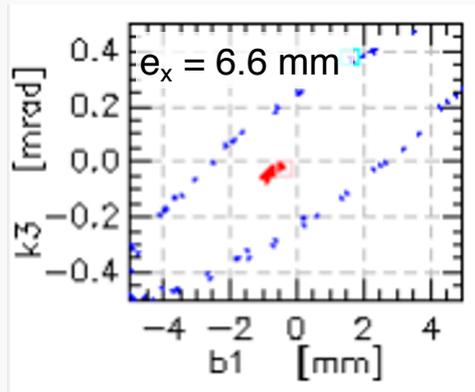
| # | 実施 | 対象 | パラメータ | グローバルオフセット |
|---|--------|-------|------------------|------------|
| 1 | 2020/2 | A & B | Timing and Power | 0 deg |
| 2 | 2020/5 | A & B | Timing | 0 deg |
| 3 | 2020/6 | B | Timing | 60 deg |

- ◆ グローバルオフセットとは ...
 - J-PARC MR 遅い取り出しにおいて、取り出し時のビーム不安定性を解消するための手法
 - 全 RF 加速空洞の位相にオフセットをつけて入射し、バンチの振動を起こし、縦方向エミッタンスを増大させる手法

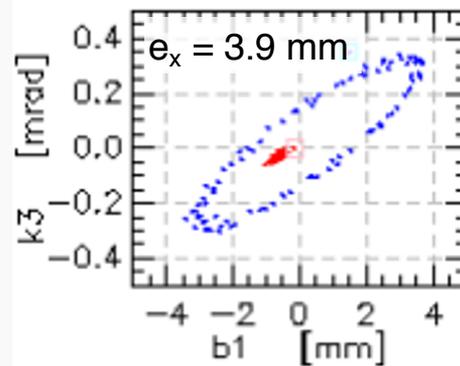
補正キッカーの最適化結果

❖ #1 (2020/2)

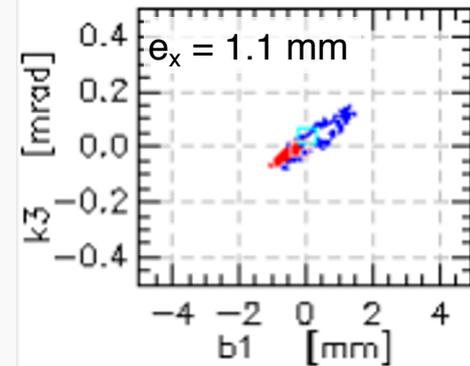
- ◆ 入射エラーの最小化を達成、ビームロスも調整前と比較して減少
- ◆ しかし、タイミングがローカルミニマムにある可能性があった



補正なし



調整前
(+ 0 turn)



調整後
(- 2 turn)

❖ #2 (2020/5)

- グローバルオフセット無し (0 deg) の状態で調整し、入射エラーを最小化
 - しかし、調整後にグローバルオフセットを付けて (55 deg) 入射した際に、#1より入射エラーとビームロスが増加 (悪化)
- 調整はグローバルオフセットを付けた状態で実施すべし

❖ #3 (2020/6)

- グローバルオフセットの影響を理解した上でパラメータを最適化
 - パラメータは #1 と近く、入射エラーとしても #1 と同程度
- 遅い取り出しの利用運転で、本調整で得られたパラメータが使用されている

まとめ

❖ COMET 実験

- ◆ J-PARC においてミュオン電子転換過程を探索する
- ◆ バンチ間の残留陽子の割合であるエクステンクションについて 10^{-10} 以下であることを要求する

❖ エクステンクション

- ◆ 要求値を達成する上で問題となる空バンチ中の残留陽子は、J-PARC MR の入射キッカーのタイミングをシフトすることで排除する
- ◆ 前入れと後入れの2パターンの方法があるが、計算の結果どちらも要求を満たしうることがわかった
- ◆ 後入れは、より高精度のエクステンクションを達成可能とみられているが、入射キッカーの反射波の影響が懸念される

❖ 補正キッカー調整

- ◆ 通常の遅い取り出しにおいて最適化し、後入れにおける問題を解消した
- ◆ 利用運転においても補正キッカーのパラメータを使用されている

❖ 今後

- ◆ ハドロン実験施設において、エクステンクション試験を予定
- ◆ 現在、エクステンクション測定器を開発中