

# Improvement of Proton Extinction to Search for a Charged Lepton Flavor Violating Process at J- PARC

野口, 恭平

<https://hdl.handle.net/2324/6787403>

---

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (理学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

氏 名 : 野口 恭平

論 文 名 : Improvement of Proton Extinction to Search for a Charged Lepton Flavor Violating Process at J-PARC  
(J-PARCにおける荷電レプトンフレーバー非保存過程探索のための陽子エクステインクションの改善)

区 分 : 甲

### 論 文 内 容 の 要 旨

素粒子物理の標準理論において、CLFV (荷電レプトンフレーバーの破れ)は禁止されている。ミュオン・電子転換過程は、原子核に束縛されたミュオンがニュートリノの放出を伴わずに電子に転換する CLFV 過程である。2体崩壊であるため、放出される電子のエネルギーは一意である。多くの標準理論を超えた理論によりミュオン・電子転換過程が測定可能な分岐比で発生することが予想されていることから、この課程の探索はより基礎的な物理を明らかにすると期待されている。

COMET 実験は、大強度陽子加速器施設 J-PARC において実験準備中のミュオン・電子転換過程を探索する国際共同実験である。Phase-I と II の2段階で、最終的には先行実験の1万倍となる  $10^{-17}$  の探索感度を目指す。実験では、まず陽子ビームを標的に照射することでパイオンを生成し、そのパイオンの崩壊からミュオンを得る。次に、ミュオンをアルミニウムの標的に静止させ原子核に束縛させる。最後に、ここから放出される電子のエネルギーを測定し、ミュオン・電子転換過程を同定する。陽子ビーム入射に同期した背景事象を排除するため、パルス陽子ビームを用い、入射タイミングから遅れて測定を行う。仮に入射タイミングから遅れて陽子が入射されると、その陽子は測定タイミング内に背景事象を生み、探索感度を悪化させる。目標到達感度を達成するために、「陽子パルスに含まれる陽子数」に対する「パルス以外のタイミングに存在する陽子数」の比として定義される陽子ビームの Extinction が  $10^{-10}$  未満であることを要求している。

COMET 実験では J-PARC の加速器群を COMET 実験専用設定で動作させ、陽子ビームを得る。このビーム設定は全て背景事象の発生を抑制し、高感度の物理測定を実施するために通常運転から変更している。このうち、MR (メインリング加速器)におけるバンチ間隔を  $0.6 \mu\text{s}$  から  $1.2 \mu\text{s}$  に変更することは、Extinction に深刻な影響を及ぼす。倍のバンチ間隔は、陽子を充填したバンチ(メインバンチ)と空のバンチ(空バンチ)を交互に配置することで実現するが、MR の前段加速器である RCS (Rapid Cycling Synchrotron)において、空バンチには  $O(10^{-6})$  の Extinction で陽子が残留している。

空バンチ内の残留陽子が RCS から MR へ入射されないよう、SBK (Single Bunch Kicking)を採用する。SBK では、メインバンチは MR に蹴り入れる一方で、空バンチは蹴らないよう、MR の入射キッカーの励磁タイミングを変更する。入射キッカーに蹴られなかった空バンチ内の残留陽子は、MR 軌道上に設置されているコリメータにより排除される。入射キッカーの励磁タイミングを早める場合を前方 SBK、逆を後方 SBK と呼称する。

先行研究として2018年に COMET 実験専用設定の陽子加速試験が実施された。そこで前方 SBK における Extinction が測定された。空バンチ内の残留陽子を完全に排除できると期待されていた

が、排除しきれていない残留陽子が  $O(10^{-8})$  の Extinction で確認された。2019 年の追加試験により、入射キッカーのタイミング変更量が不足していること残留の原因であると示唆された。

本研究は、先行研究における陽子残留の原因を定量的に理解し、COMET 実験の要求する Extinction を達成することを目的とした。まず、シミュレーションにより前方 SBK における残留を再現する事で原因究明を試みた。前方 SBK ではメインバンチと空バンチの分離に時間応答の遅い入射キッカーの立ち下がり部分を使用しており、これが先行試験における残留の主要因であるという結果を得た。他方、後方 SBK では時間応答の早い立ち上がり部分を使用しており、同種の問題は無いため、Extinction の要求を達成できるという予測を得た。しかし後方 SBK においては、入射キッカーの反射波が予てよりの問題であり、これによるバンチ不安定化が懸念されていた。これに対し、既存の MR の補正キッカーにより反射波の影響を打ち消すことが可能であることをシミュレーションで示したのち、J-PARC の調整運転において試験を実施し、これを実証した。これにより、後方 SBK における Extinction 達成の目処が立った。

2021 年 5 月に COMET 実験専用設定の陽子加速試験を実施した。COMET 実験と共通のビームラインを持つ J-PARC ハドロン実験施設の K1.8BR において、2 次粒子ビームを用いて Extinction を測定した。先行試験の再現などいくつかの条件で測定したのち、後方 SBK での高統計測定を実施した。Extinction 測定では、K1.8BR 併設の BH (Beamline Hodoscope) 2 台の他、プラスチックシンチレータと PMT (光電子増倍管) から成る TC (Trigger Counter) 3 台、本試験のために新たに開発したプラスチックシンチレータと PMT・SiPM (シリコン PM) から成る MD (Main Hodoscope Detector) 1 台を使用し、これら 6 台のコインシデンスにより、バンチ間の粒子を確実に同定した。メインバンチ中の高強度タイミングであっても数え落としなく測定できるよう MD は K1.8BR のビーム分布を踏まえて 132 分割で設計し、Extinction の分母となるメインバンチ内の粒子数を測定した。各検出機の検出効率は本試験のビームを用いて評価し、全検出器の累積として 70% であった。測定の信頼性を担保するために 3 種の TDC (Time to Digital Converter) システムを独立に開発し並列に使用した。いずれも FPGA (Free Programmable Gate Array) ベースであり、TCP/IP 通信によりコンピュータに検出器のヒットタイミングのデータを送信する。各検出器のヒットタイミングをそれぞれ記録し、オフライン解析によるコインシデンスにより、イベントを得た。

本試験は 2 次粒子ビームに起因するバンチ間の背景事象が予想されており、シミュレーションによりこれを検証した。結果として K1.8BR エリア内に設置した TC 3 台と MD 1 台のみでのコインシデンスでは、メインバンチ内の粒子数に対して  $8 \times 10^{-6}$  の背景事象が得られる見積りとなった。

後方 SBK において、バンチ中の粒子数  $3.24 \times 10^{10}$  に対して 7 イベントのバンチ間イベントが検出された。TC 3 台と MD 1 台のみでのコインシデンスでは、想定されていた通りの背景事象イベントが得られており、機械学習を用いた多変量解析によりイベントの信号事象と背景事象の弁別を試みた。結果として、7 イベント全ては背景事象に分類された。Likelihood 関数を用いた統計解析により、各イベントの信号事象らしさを加味して Extinction の上限値を評価した。結果として、Extinction の上限値  $1.02 \times 10^{-10}$  (90% Confidence Level) を得た。また、系統誤差は  $0.04 \times 10^{-10}$  であった。Extinction の上限値は、COMET 実験 Phase-I、II の全測定期間における背景事象数としてそれぞれ 0.047 個、0.69 個に相当する。以上より、COMET 実験の要求を満たすことを示した。