

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13941

研究課題名（和文）高放射線環境下におけるロバストな高効率トリガー機構による $\mu$ 稀崩壊探索感度の向上

研究課題名（英文）Improvement for sensitivity of muon rare decay search with robust and high-efficient trigger system in the high radiation environment

研究代表者

吉田 学立 (Yoshida, Hisataka)

大阪大学・理学研究科・特任助教（常勤）

研究者番号：20733140

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：茨城県東海村J-PARCにおいて、世界最高強度のミュオンビームを用いた $\mu$ 稀崩壊探索を行うCOMET実験のためのトリガー機構の開発を行なった。大強度ミュオンビームに起因する高放射線環境においても、高効率で動作が可能なトリガー機構を構築することで、探索感度の向上が期待できる。フロントエンド電子回路の改良と量産を行い、実際にCDC検出器に導入することができた。一部領域を用いた性能評価試験も行い、トリガーシステムに要求される性能を満たすことを確認した。また、本実験開始に必要とされる電源装置、ケーブル、ネットワーク機器、電子回路制御用のサーバーなど、システム運用のためのインフラの整備を完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

COMET実験で探索するミュオン電子転換過程は、素粒子の標準理論では禁止されており、もし見つければ新しい物理モデルの直接的な証拠となりうる非常に重要なプロセスである。しかしながらこの重要なプロセスの探索は、技術的な困難さから、世界を見回しても30年以上新しいプロジェクトが未だ開始していない。世界に先駆けて、日本の施設(J-PARC)で探索を開始することは、素粒子物理学実験において、大きな意味があると考えられる。本研究は、その探索の感度の向上を狙ったものであり、COMET実験の価値を底上げし、また、技術的にも他のプロジェクトに応用可能な価値のあるプロジェクトであると言える。

研究成果の概要（英文）：I developed the trigger system for the COMET experiment which is aiming to find the muon rare decay process with the world highest intensity muon beam at J-PARC. The robust trigger system will contribute to increase of the sensitivity, even in the high radiation environment caused by the high intensity muon beam. I mass-produced the revised front-end electronics boards for the trigger system, and installed them to the real CDC detector. The performance evaluation test has been done with a partial region of the detector, and the system could be satisfy the requirements. In addition, I almost completed the onsite infrastructure for the trigger system operation such as power supplier, cables, network devices and machine to control the system.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ミュオン トリガー 高放射線環境 高放射能環境

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型は、様々な素粒子反応過程を精度良く説明・予言することが可能である。しかしながら、反物質が物質に比べて極端に少ない物質優勢な現在の宇宙の謎や暗黒物質・暗黒エネルギーの正体、極端に小さなニュートリノ絶対質量など、多くの問題を解決するには至っていない。これらの諸問題を包括的に解決する様々な新しい物理モデルが提唱されているが、近年の素粒子実験の高エネルギー化・高輝度化にも関わらず、新物理の有力な証拠は未だ得られていない。これまでと異なる方向からのアプローチの重要性が高まっている。

$\mu$  稀崩壊の探索実験は、1940年代より続いているが、荷電レプトンフレーバー数非保存(Charged Lepton Flavor Violation, 以下CLFV)過程は、未だに発見されておらず、崩壊分岐比の上限を与えるのみである(図1.)。一方で、中性レプトンであるニュートリノは、ニュートリノ振動現象の発見により、フレーバー数が保存しないことが明らかになっている。ニュートリノ振動と対をなすCLFV過程は存在するのか、早急に解決すべき問題と言えるであろう。また、超対称性模型や重い右巻きニュートリノを導出するSee-Saw模型、リトルヒッグス模型、余剰次元モデルなどのTeVスケールでの様々な新物理モデルにおいて、CLFV過程への大きな寄与が示唆されている。 $\mu - e$  転換過程 $[\mu^- + N \rightarrow e^- + N]$ においては、崩壊分岐比  $10^{-15} \sim 10^{-17}$  程度の大きさで観測可能だとする理論モデルが多数提唱されており、 $\mu$  稀崩壊探索は、新物理の発見・モデル検証の強力なプローブである。

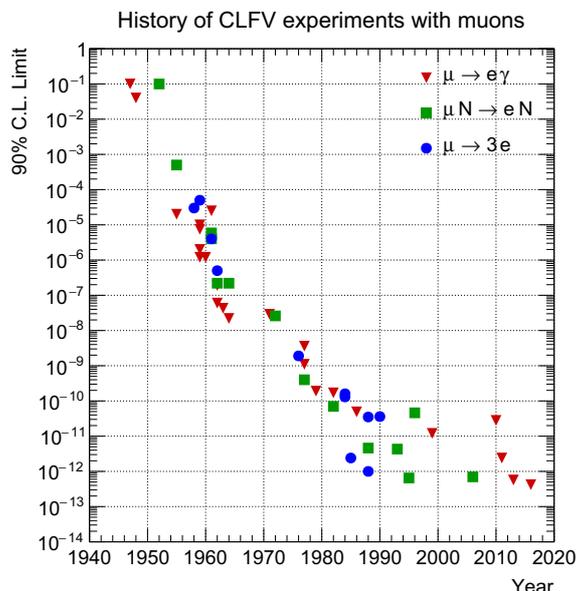


図1.  $\mu$  稀崩壊探索の上限値と将来計画[1]

### 2. 研究の目的

日本国内における $\mu$  稀崩壊探索実験としては、茨城県東海村J-PARCの大強度陽子ビームを利用して、 $\mu$  稀崩壊探索の一つである $\mu - e$  転換 $[\mu^- + N \rightarrow e^- + N]$ 過程探索を行うCOMET実験の計画・建設・準備が鋭意進行中である。COMETは、先行研究であるSINDRUM-II実験により与えられた上限値 $(Br(Au) < 7 \times 10^{-13} (90\% \text{ C.L.}))$  [2]を1万倍更新することを目標とした壮大な実験計画である。Phase-I/Phase-IIの二段階での建設・実験計画となっており、現在はPhase-Iのビームライン・実験装置の建設が進められている。

### 3. 研究の方法

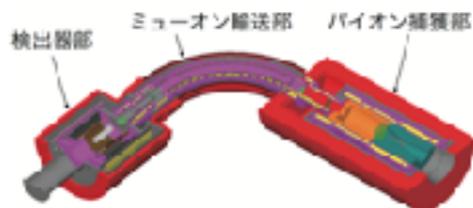


図2. COMET実験 Phase-I 概略図

COMET実験Phase-Iの概略図を図2に示す。パイオン捕獲部では、J-PARCメインリングからの大強度陽子ビームを炭素標的に照射して生成されたパイオンを捕獲する。捕獲されたパイオンはミュオンに崩壊しながら90度に湾曲したソレノイドで検出器部へと輸送され、アルミニウム製の薄いディスク状のミュオン静止標的で静止する。生成されたミュオン原子からは崩壊電子が放出されるが、1Tの磁場中で螺旋運動するため、静止標的を取り囲む円筒型ワイヤードリフトチェンバー(Cylindrical Drift Chamber、以下CDC)検出器で飛跡を再構成することで運動量が測定できる。通常、ミュオン原子中のミュオンは、原子核に捕獲されるか、電子と2つのニュートリノに崩壊する。放出される電子の運動量は、約52 MeV/cのエッジをもつ連続スペクトルとなるが、CLFV過程の一つである $\mu - e$  転換 $[\mu^- + N \rightarrow e^- + N]$ が起こると、ニュートリノがエネルギーを持ち出さず、105 MeV/cの単一ピークスペクトルとなる。したがって、放出電子の運動量を精密に測定することで、分光学的に $\mu - e$  転換過程の探索を行える。

検出器部は、飛跡検出器であるCDC検出器と電子の放出タイミングを測定するためのトリガーカウンター(CDC Trigger Hodoscope, 以下CTH)検出器で構成される(図3)。CDC検出器内で螺旋運動した電子は、上流・下流の両側に設置したCTH検出器にヒットし、デ

一タ取得のためのトリガー発行を行うとともに、ドリフト時間の始点( $T_0$ )を決めるために重要な検出器である。

カウンターは、シンチレータとプラスチックアクリルの二層構造となっており、シンチレーション光とチェレンコフ光のそれぞれを同時検出することで、信号となる荷電粒子(電子)のみトリガーすることが可能となる。円周方向に48セグメント化することで電子の通過位置情報が得られることに加え、斜めに傾けて隣り合ったセグメントと重ね合わせ、4つ(シンチレータ・アクリルx2)の同時検出をトリガー条件に課すことで、偶発事象を大幅に低減する。

CTH検出器によって、放出電子のみを高効率でトリガーすることが可能となるが、実際には、ガンマ線によって対生成される電子・陽電子対などによって、相当数の偶発事象が引き起こされることが判明した。そこで、CDC検出器のヒット情報を用いて、CDC検出器内を通過する電子のみをトリガーするための**新しいトリガー機構を導入し、運動量105 MeV/c付近の電子を高効率で検出し、それ以外の偶発事象を排除する**ことを提案した。実際に、モンテカルロでノイズを含んだCDC検出器のヒットパターンを生成し、深層学習を用いて電子信号らしさを点数化するアルゴリズムの開発を行い、98%の信号取得効率と、約80%の偶発事象の排除効率を見積もった。また、PHITS/Geant4/FULKAなどの複数のシミュレーションツールを利用した結果、検出器部は、高レベルの放射線環境であることが判明しており、積算放射線量は、Phase-Iの物理測定150日間で、最大で約200 Gy(ガンマ線)、約 $10^{11}$  n/cm<sup>2</sup>(中性子)となり、この環境下で稼働できる放射線耐性も要求されている。

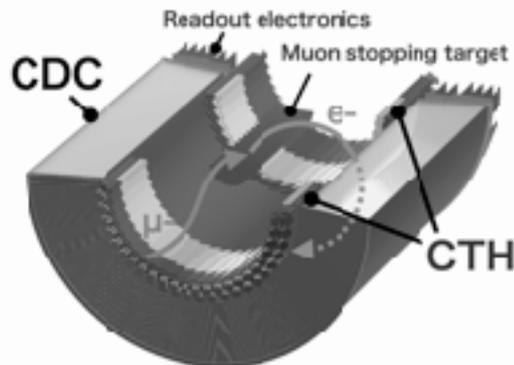


図3. CDC検出器とCTH検出器

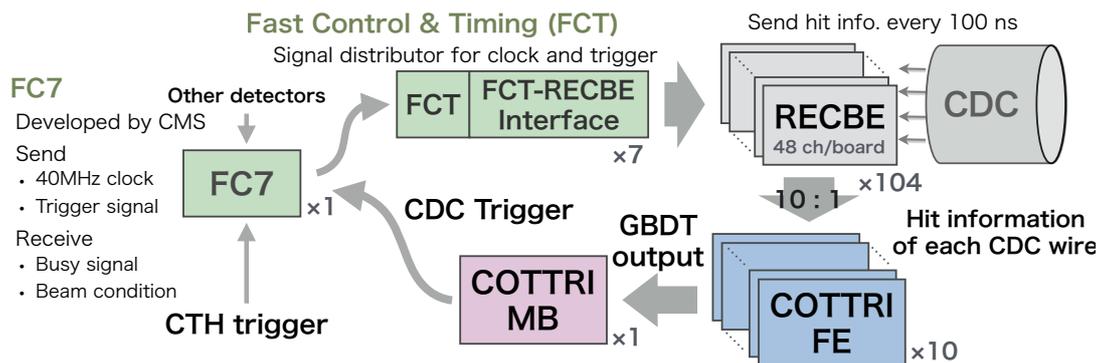


図4. CDC検出器の高レベルトリガー機構(COTTRIシステム)概念図

本研究におけるトリガー機構開発において、重要な点としては、高放射線環境においても信頼性の高い電子回路であること、トリガー発行までの限られた時間内で高い信号検出効率と背景事象排除効率を有したアルゴリズムで処理し、トリガー発行を行えることが挙げられる。これまで、実際に放射線照射の試験(ガンマ線・中性子)を行い、放射線への耐性要求を満たした部品を選定し、使用する電子回路に実装してきたが、実際に使用するシステム全体の統合的な動作試験・評価試験が必要となる。新たなトリガー機構は、COTTRI(COMeT TRIGGER system)システムと呼んでおり、CDC検出器の読出電子回路RECBEとの通信を行う10枚のCOTTRI FE(Front-End)と主トリガー回路FC7およびFEとの通信を行うCOTTRI MB(Merger Board)のツリー構造となっている(図4)。COTTRIシステムの最小構成における試験は既に完了しており、次のステップとしては、COTTRI基板を量産と実機への導入である。更に、FPGAや内装メモリのビット反転を是正できる機構(ECCやTMR)を組み込み、実際の実験に近い通信を行いながら中性子線を照射し、エラー率や安定稼働時間の評価を行う。また、完全に修復することが困難なエラー等が起こった際に、素早くファームウェアの再ダウンロードを実行する仕組みを構築し、実験中のデッドタイムを最小化することも重要である。再ダウンロードは、主トリガー回路FC7と分配基盤FCTを経由して、JTAG信号を送受信することで実現可能である。そういった運用上必要な機構の整備を進め、CDC検出器実機に導入し、宇宙線やコミッションングビームを用いたトリガー試験を行う。同時並行で、CDC検出器のヒットパターンから高効率で信号を検出するアルゴリズムの最適化も重要である。シミュレーションによるヒットパターンとCDC検出器実機からの検出機応答をインプットに、深層学習を用いたアルゴリズム開発を行い、COTTRI MBのFPGAに搭載する。信号電子は、同じ層のワイヤーに連続的にヒットするパターンが見られるため、近隣ワイヤーとの相関をパラメータとして導入し、実際に、高い信号選定効率と背景事象の排除効率が見積もられている。将来的には、新たなアルゴリズム

の導入によって更なる向上も期待できる。

新トリガー機構の導入により、信号の選定効率を維持したまま、トリガーレートを下げることが可能となる。つまり、ビーム強度の増強、また、ミュオン静止標的のディスク数を増やすことで、Phase-Iにおける到達探索感度の向上が実現できる。

#### 4. 研究成果

##### ・新トリガーシステムCOTTRIの導入

試作機段階であったCOTTRIのフロントエンドとなる電子回路の改良と量産を行い、新トリガーシステムの稼働に必要な電子回路の全数を揃えることに成功した。電子回路の改良は、主に電源部分のフィルター回路の多段化による安定化であるが、この改良によって、よりロバストな電子回路として導入することができた。量産した電子回路は、簡単な動作試験の後、実際にCDC検出器と信号読み出し用の電子回路との接続試験を行い、未だ全数ではないものの、一部領域において、宇宙線やテスト信号を用いたトリガー発行の実証および性能評価を実施した。結果として、レイテンシーなどの要求された基本性能を十分に満たしていることが確認できた。

また、新トリガーシステムを本実験において稼働させるため、電子回路用の電源装置や配線、トリガー制御用のサーバー、通信用のネットワーク機器、回路収納用のラックなど、現地でのインフラ整備も行った(図5)。実稼働に向けて不足しているのは、一部、仕様が定まっていないケーブル・アダプタ類などで、トリガーシステムCOTTRIとしてはほぼ準備が完了したと言える。



図5. COTTRI システムの一部

##### ・FPGAに搭載するトリガーアルゴリズムの研究

トリガー決定を行う電子回路のFPGAに実装するアルゴリズムの改良の研究も進んだ。FPGA上での深層学習アルゴリズムによるリアルタイムトリガー決定を実現する手法の評価を開始し、実際にトリガー用フロントエンド電子回路への搭載が実現可能であることを示した。具体的には、hls4mlを用いて、ニューラルネットワークによるヒットパターンのイベント識別をFPGAに搭載し、オンラインで高効率トリガー決定することが可能であるとシミュレーションで確認した。また、簡略化した識別アルゴリズムではあるが、実機の電子回路に搭載されたFPGAにファームウェアをダウンロードし、オンラインでリアルタイムに結果を出力できることを実証した。実際に電子回路に導入できるかは検証段階ではあるが、更なるアルゴリズム最適化に向けた新たな一歩である。

また、トリガー決定のアルゴリズムの最適化に向けて、大規模なシミュレーション用MCデータの生成を開始し、トリガーレートや効率などの性能評価や、性能向上のためのフレームワークを用意することができた。

##### ・高放射線対策の研究

高放射線環境においても動作する電子回路の開発のためのガンマ線照射および中性子照射試験を実施し、実験室で想定される放射線レベルにおいても動作可能な部品の選定や安定性の評価を行なった。中性子などの放射線によって電子回路にビット反転異常等が発生することは以前からよくわかっており、その安定性の評価と異常時の復旧手法の改良を行った。FPGAへのファームウェアダウンロードを新規導入した別な経路から行うことで、ダウンロード速度の向上が50倍以上高速化したことを実際の電子回路で確認した。この速度であれば、データ収集の不感時間が許容できる。ハードウェアの動作実証が完了したため、実機用のダウンロード機構の開発に着手した。

本実験の開始の遅れに伴って、本研究において、当初目標としていた、新トリガーシステムを用いた高効率での物理探索は開始前ではあるが、システムとしては概ね準備が完了し、実験開始前の性能評価や更なる改良を目指す段階に到達することができた。トリガーアルゴリズムの研究も順調に進行中で、実験開始後も深層学習アルゴリズムをFPGA本体に搭載することが可能となれば、更なる感度向上が期待できる。また、高放射線環境における対策も堅実に進めてきたことで、COMET実験室内の過酷な環境においても安定して動作するトリガーシステムを構築することができた。

#### [参考文献]

- [1] A. M. Baldini. et al. (MEG-II Collaboration), Eur. Phys. J. C (2018) 78:380.
- [2] W. H. Bertl et al. (SINDRUM-II Collaboration), Eur. Phys. J. C 47 (2006) 337–346.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Wu C., Wong T.S., Kuno Y., Moritsu M., Nakazawa Y., Sato A., Sakamoto H., Tran N.H., Wong M.L., Yoshida H., Yamane T., Zhang J.                         | 4. 巻<br>1015                  |
| 2. 論文標題<br>Test of a small prototype of the COMET cylindrical drift chamber   | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment                          | 6. 最初と最後の頁<br>165756 ~ 165756 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.nima.2021.165756  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Dekkers Sam, Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Yoshida Hisataka, Wong Ting Sam, Ueno Kazuki, Nash Jordan   | 4. 巻<br>68                    |
| 2. 論文標題<br>Radiation Tolerance of Online Trigger System for COMET Phase-I   | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Transactions on Nuclear Science  | 6. 最初と最後の頁<br>2020 ~ 2027     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/TNS.2021.3084961  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Ikeno Masahiro, Kuno Yoshitaka, Lee MyeongJae, Mihara Satoshi, Shoji Masayoshi, Uchida Tomohisa, Ueno Kazuki, Yoshida Hisataka | 4. 巻<br>68                    |
| 2. 論文標題<br>An FPGA-Based Trigger System With Online Track Recognition in COMET Phase-I  | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Transactions on Nuclear Science  | 6. 最初と最後の頁<br>2028 ~ 2034     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/tns.2021.3084624  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難  | 国際共著<br>該当する                  |
| 1. 著者名<br>Fujii Yuki, Miyataki Masaki, Lee MyeongJae, Nakazawa Yu, Pinchbeck Liam, Ueno Kazuki, Yoshida Hisataka  | 4. 巻<br>8,32                  |
| 2. 論文標題<br>Online Machine-Learning-Based Event Selection for COMET Phase-I  | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Physics Science Forum   | 6. 最初と最後の頁<br>1 ~ 6           |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.3390/psf2023008032   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>該当する                  |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宮滝雅己, 上野一樹, 中沢遊, 藤井祐樹, 吉田学立, MyeongJae Lee |
| 2. 発表標題<br>COMET Phase-Iにおける高速オンライン事象選別トリガーシステムの開発状況  |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2023年春季大会                            |
| 4. 発表年<br>2023年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>宮滝雅己, 藤井祐樹, 中沢遊, 吉田学立, 上野一樹                     |
| 2. 発表標題<br>COMET Phase-I実験に向けた機械学習を実装したFPGAによるオンライン事象選別の研究 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第77回年次大会（2022年）                           |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宮滝雅己, 藤井祐樹, 中沢遊, 吉田学立, 上野一樹, 青木正治, MyeongJae Lee     |
| 2. 発表標題<br>COMET Phase-Iに向けたニューラルネットワークを実装したFPGAによるオンライン事象選別の研究 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会2022年秋季大会                                      |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>宮滝雅己, 上野一樹, 中沢遊, 藤井祐樹, 山田千尋, 吉田学立, MyeongJae Lee |
| 2. 発表標題<br>COMET Phase-I CyDetトリガーシステムの開発状況                 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第78回年次大会（2023年）                            |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山田千尋, 上野一樹, 中沢遊, 藤井祐樹, 宮滝雅己, 吉田学立, MyeongJae Lee |
| 2. 発表標題<br>COMET Phase-I CyDetトリガーシステムの性能評価                 |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第78回年次大会 (2023年)                           |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>吉田学立, 青木正治, 上野一樹, 佐藤朗, 藤井祐樹, Sun Siyuan, 蔭山裕士, 他COMET-CyDetグループ |
| 2. 発表標題<br>COMET Phase-I CyDetシステムの準備状況について                                |
| 3. 学会等名<br>日本物理学会第78回年次大会 (2023年)  |
| 4. 発表年<br>2023年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

|         |                           |                       |    |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号) | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号) | 備考 |
|---------|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

|         |         |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|