

令和 5 年 5 月 29 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01936

研究課題名（和文）過酷環境下における大強度パルスミュオンビーム診断の実現

研究課題名（英文）Realization of High-Intensity Pulsed-Muon-Beam Diagnosis under Harsh Environments

研究代表者

上野 一樹 (Ueno, Kazuki)

大阪大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：20587464

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,700,000円

研究成果の概要（和文）：ミュオン電子転換過程探索を行うCOMET実験はJ-PARCにて実施予定であり、世界最大級大強度パルスミュオンビームの実現および最適化が必須である。最適化には専用のビーム診断装置が必要不可欠であるが、これまでにない大強度ビームであるが故、ビームレート最適化のためのビームブロッカー構築、検出器信号処理システムの耐放射線性、粒子識別手法の確立が課題となっていた。本研究により、耐放射線性は解決し実機製作に至った。他についても最適化のための方針は概ね固まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の究極的な目標は未だ発見されていない荷電レプトンにおけるフレーバー混合過程の探索である。この過程は稀崩壊過程であるため大強度ビームが非常に重要なポイントとなっており、本研究におけるビームの最適化は必要不可欠なものである。また、本研究による耐放射線性の研究は、他の加速器実験においても有用なものであり、さらには宇宙や原子炉等の高放射線環境への応用も考えられる。他のビームブロッカー開発や粒子識別においても他の加速器実験への利用が考えられる。

研究成果の概要（英文）：COMET experiment aiming to search for muon to electron conversion will be performed at J-PARC. This experiment needs to realize and optimize high intensity pulsed muon beam. The dedicated detector for the beam measurement is indispensable. However, we have faced some issues due to the most intense beam as never before. In this study, we struggled with these issues. The radiation tolerance of detector electronics was achieved and the final version was constructed. Beam blocker design to optimize the beam rate and establishment of the way of the particle identification were proceeded with simulation and those strategies for future were almost fixed.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 ミュオン 耐放射線

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子において、中性レプトンであるニュートリノは2015年にフレーバー混合(ニュートリノ振動)が発見され世間を賑わせたが、一方で荷電レプトンにおけるフレーバー混合過程(cLFV過程)は未だ発見されていない。cLFV過程は、標準模型を超えるTeVスケールの物理が実在するならば実験的に十分観測可能なことが示唆されており、新しい物理のヒントを得る観点からcLFV過程探索は非常に注目されている。既にいくつか国内外でミュオンを用いたcLFV探索実験、実験計画が進められており、いずれも激しい国際競争のさなかにあり、早期実現を目指した実験施設の建設、検出器等の開発が進められている。COMET実験は、先行実験による分岐比上限値を4桁近く向上させることを目標としており、この達成には、検出器に加えてミュオンビーム自体の最適化も必要である。稀崩壊過程であるため、J-PARCにおける新たな大強度パルスミュオンビームを使用予定であり、このビームの診断装置も必要不可欠である。診断装置の開発を進めてきており、一方で診断の最適化のためにシミュレーションスタディを進めたところ、大強度ビームであるが故の問題点がいくつか浮き彫りになってきた。診断装置における粒子のヒットレートがある程度は想定していたが高すぎること、装置の設置場所における中性子やガンマ線といった二次粒子の放射線量が高いこと、そして粒子識別能力が不十分であることの3点である。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は上記3つの課題を解決し、大強度パルスミュオンビーム診断装置実機の完成および診断の実現を目指すことである。装置の安定動作のために2桁ヒットレートを下げることのスタディを進める。放診断装置の信号処理システムに使用される半導体素子等の放射線耐性についての研究および対策を行い、それを踏まえて耐放射線信号処理システムの構築を行う。また、粒子識別については、ミュオン、電子、パイオンの識別効率を90%以上にすることを目標とする。さらに、診断装置が完成した際には実際にビーム診断を行い、ミュオン電子転換探索実験のための最適化を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では上記3つの課題解決に向け、それぞれ以下の方法で研究を行った。

- A. ヒットレート低減のためのブロッカーデザイン
  - B. 信号処理システムの耐放射線化研究および製作
  - C. 粒子識別手法確立
- A. ヒットレート低減のためのブロッカーデザイン  
シミュレーションスタディから、検出器を安定に動作させ、かつ精密なビーム診断を行うためには検出器のヒットレートを2桁以上上げる必要がある。準備研究より、複数のアイデアの中から、ビームブロッカーを用いて検出器におけるレートを下げ、シミュレーションと合わせてビーム診断を行う手法が現実的であると考えられており、ビームブロッカーのデザインを完遂させ、実際に製作することを目標とする。材質選定を進め、さらに形状、配置場所の最適化を行い、それを基にプロトタイプ製作を行う。テストビームの利用により、ブロッカーによるレートの低減効果を調査し、その結果を基にさらなる最適化を進め、ブロッカーの完成を目指す。
- B. 信号処理システムの耐放射線化研究および製作  
PHITSやGeant4を用いた簡易シミュレーションスタディにより、安全ファクター5を考慮して、最悪のケースで信号処理システムはPhase-I実験期間内に $10^{12}/\text{cm}^2$ の中性子量、1kGyのガンマ線吸収線量の影響を受けることが見積もられている。準備研究から中性子によるシングルイベント効果(SEU)対策を処したFPGAファームウェアの開発、およびガンマ線によるトータルドーズ効果(TID)に耐えうるパーツ選定を進めてきた。これを完遂させ、実機用信号処理システムの完成および実機への組み込みを目指す。
- C. 粒子識別手法確立  
準備研究においてカロリメータ検出器の出力信号波形情報およびエネルギー、運動量を用いた手法と、飛行時間法を組み合わせることで粒子識別効率が向上する可能性が考えられた。ファイバー検出器を新たに導入することを検討しており、それを基にシミュレーションスタディおよび最適化を進める。合わせて、他の手法の可能性についても検討し、より最適な解を見つけることを目指す。

## 4. 研究成果

### A. ヒットレート低減のためのブロッカーデザイン

シミュレーションスタディにより、ブロッカー材料の選定や形状の調査を行い、現状約 1/10 程度までは低減できることがわかった。さらに単純に厚みを増やしたり材料を変更したりすることでさらなる低減が期待できる。ただ一方で、ビーム診断という観点から、ビームそのものの強度を少し下げる可能性も議論しており、総合的な議論を今後も進める。一方で、プロトタイプ製作を行いテストビーム試験を実施することで、シミュレーションの妥当性を確かめ、フィードバックをかけることで最適化をさらに進めることを考えていたが、COVID-19 の影響もありビーム施設が利用できないこともあり、実施へは至らなかった。しかし、プロトタイプのパーツは準備し、まずは材料依存性を調べるための検討を進め、協力研究者と共にテスト実験を行うための提案を PSI 研究所に提出し、本事業終了後となってはしまいが採択された。今後もこのスタディを進め、実機製作まで進める予定である。

### B. 信号処理システムの耐放射線化研究および製作

準備研究段階で開発を進めていた FPGA における SEU 検知・修正ファームウェアの各種信号処理システムへの応用および実装を進めた。さらに複数同時 SEU が起こった際にはファームウェアの自動再ダウンロードを行うことができる機能の実装も進めた。この結果については論文にまとめ、発表した。さらにファームウェア開発の流れから、一つの信号処理システムにおいて応用研究としてギガビットイーサネットのディジーチェーン読み出し方式を開発し、これはパーツ点数を減らすことにより耐放射線パーツ等の削減にもつながっていると考えられる。この結果についても論文にまとめ、発表した。準備研究段階で未選定であった光モジュール素子については、複数のモジュールに対してガンマ線耐性試験、中性子照射試験を実施し、要求を満たすパーツを見つけることに成功し、少なくともメイン検出器における信号処理システムの全パーツの選定を完了させた。これを基に実機の製作を行い、確認試験まで進めた。途中、実装することで問題が発生するケースも出たが、これも解決しメイン検出器の信号処理システムを完成させた(図1)。量産を進めると共に、メイン検出器への組み込みも進めた。2022年度終わりには COMET 実験における初ビームの供給が行われ、信号取得にも成功した(図2)。今後は検出器全系の完成まで進める。



図1 メイン検出器(ストロー検出器)の信号処理システム完成版

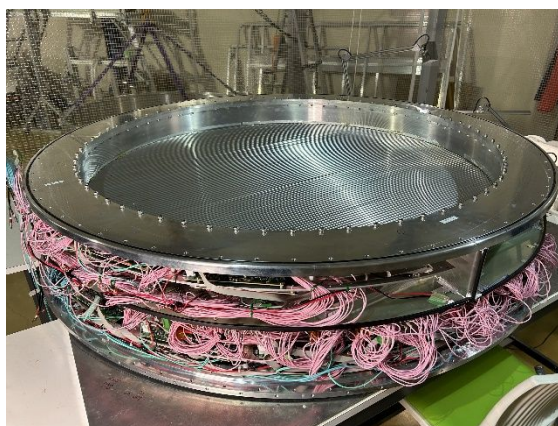


図2 信号処理システムのメイン検出器(ストロー検出器)への組み込みの様子

### C. 粒子識別手法確立

シミュレーションスタディにより、既存の検出器群に加え、新たなファイバー検出器を導入すると識別効率が向上することがわかっていった。実際の設置における検討を進め、概ね設置案については決定できた。一方で、ファイバーを追加せずに既存の検出器群のビームライン最上流部をうまく利用することで効率を十分向上できる可能性が出てきたため、その検討も進めた。シミュレーションによると、十分な効率が得られそうであることがわかった。さらに、別途ビーム供給中に粒子数の変動等を確認するための検出器を設置することを検討しており、それを積極的に利用することで飛行時間法の精度をさらに上げられないかについても検討した。シミュレーションによると、結論としてはあまり大きな向上は見られなかったが、昨今発展の著しい機械学習を適用させると向上させられる可能性もあることがわかったため、さらなるスタディを進める予定である。完全なる結論にまでは至ってはいないが、概ね方針は決まり、さらなる向上も考えられることがわかった。

以上より、3つの課題に対し一部は完遂にまでは至らなかったが、概ね今後の方針は概ね明確になったため、本研究結果を基にこれらを完遂させ、ミュオン電子転換探索実験のための最適化を目指す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ueno Kazuki	4. 巻 33
2. 論文標題 Status on the StrECal System for COMET Phase-I	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JPS Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 11122
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSCP.33.011122	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -
1. 著者名 Dekkers Sam, Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Yoshida Hisataka, Wong Ting Sam, Ueno Kazuki, Nash Jordan	4. 巻 68
2. 論文標題 Radiation Tolerance of Online Trigger System for COMET Phase-I	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 2020 ~ 2027
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2021.3084961	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する
1. 著者名 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Ikeno Masahiro, Kuno Yoshitaka, Lee MyeongJae, Mihara Satoshi, Shoji Masayoshi, Uchida Tomohisa, Ueno Kazuki, Yoshida Hisataka	4. 巻 68
2. 論文標題 An FPGA-Based Trigger System With Online Track Recognition in COMET Phase-I	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 2028 ~ 2034
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2021.3084624	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する
1. 著者名 Hamada Eitaro, Fujii Yuki, Igarashi Youichi, Ikeno Masahiro, Mihara Satoshi, Nishiguchi Hajime, Oishi Kou, Uchida Tomohisa, Ueno Kazuki, Yamaguchi Hiroshi	4. 巻 68
2. 論文標題 Gigabit Ethernet Daisy Chain on FPGA for COMET Readout Electronics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Nuclear Science	6. 最初と最後の頁 1968 ~ 1975
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TNS.2021.3085100	査読の有無 有
オープンアクセス 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 -

1. 著者名 Nishiguchi H., Danielsson H., Hamada E., Hashimoto Y., Kamei N., Mihara S., Osawa O., Suzuki J., Tsamalaidze Z., Tsverava N., Ueno K., Volkov A., Watanabe K.	4. 巻 1042
2. 論文標題 Vacuum-Compatible, Ultra-Thin-Wall Straw Tracker; Detector construction, Thinner straw R&D, and the brand-new graphite-straw development	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 167373 ~ 167373
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2022.167373	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 上野一樹
2. 発表標題 COMET実験における計測システムの現状
3. 学会等名 計測システム研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Ueno
2. 発表標題 Current status of COMET StrEcal
3. 学会等名 2nd J-PARC HEF-ex WS (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上野一樹
2. 発表標題 COMETにおける計測システム開発
3. 学会等名 RCNP研究会「原子核実験の次世代データ収集システム基盤開発にむけて」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上野一樹
2. 発表標題 ナノブリッジFPGAの加速器実験応用検討
3. 学会等名 耐放射線エレキ研究会2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上野一樹
2. 発表標題 ミュー粒子素粒子物理学
3. 学会等名 中間子科学の将来討論会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (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			
オーストラリア	Monash University			
英国	Imperial College London			
ロシア連邦	Budker Institute of Nuclear Physics	Joint Institute for Nuclear Research		
韓国	Sungkyunkwan University			