

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04841

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手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of diagnostic method for high-intensity pulsed muon beam under a harsh environment

研究代表者

上野 一樹 (Ueno, Kazuki)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：20587464

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 6,900,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARCで実施する計画のミュオン電子転換過程探索実験(COMET)には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不可欠であり、その準備を進めているが、これまでにない大強度ビームであるが故、取得ビームレート最適化のためのジオメトリ構築、検出器の放射線耐性の確保、粒子識別手法の確立が課題となっていた。本研究により、放射線耐性については概ね解決し、他についてもシミュレーションスタディによる最適化方針はほぼ固まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の究極目的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欠かせず、本研究によるビームの最適化のための問題解決は非常に重要であり、本研究の成果を基に本実験の探索が可能となる。また、本研究における放射線耐性の研究は、他の加速器実験にも役立つものであり、さらには宇宙や原子炉等高放射線環境への応用も考えられる。

研究成果の概要(英文)：In the search of muon to electron conversion at J-PARC (COMET experiment), it is indispensable to realize and optimize high-intensity pulsed muon beam. The dedicated detector is essential for the optimization, which has been developed. However, we have surfaced some problems due to the most intense beam as never before. In this study, we tried to solve these problems. Then, radiation tolerance of the detector was almost acquired. Geometry construction of the detector to optimize the beam rate and establishment of the way of the particle identification were studied with simulation and those policies were almost fixed.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

2015年、素粒子の中性レプトンであるニュートリノにおけるフレーバー混合(ニュートリノ振動)の発見に対しノーベル物理学賞が受賞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過程探索には、重いレプトンであるミュオンがタウ粒子を使ってその崩壊モードを精査する方法があるが、寿命の長さや粒子生成の容易さからミュオンを使用した方が感度が高く、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いる。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いるが、これを実現するためには、検出器に加えてミュオンビーム自体の最適化も不可欠である。稀崩壊過程であるため、ビームの大強度化は必須であり、J-PARCにて新たなビームラインの設計・建設が進められている。ビームの最適化には大強度パルスミュオンビーム診断装置が必要不可欠であり、開発を進めてきた。一方、実際にビーム診断を行うための最適化として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はしていたが高すぎることで、装置を設置する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十分でないことの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を目指すことである。ヒットレートは装置の安定動作のために2桁下げ、放射線量に対しては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、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%以上にすることをそれぞれの目標とする。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目指す。

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. 粒子識別手法確立およびファイバー検出器製作

A. ヒットレート低減のためのブロッカーデザイン

準備研究における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。そこで、(1)ビームそのもののレートを下げる、(2)より高ヒットレートに耐えうる検出器を新たに考える、(3)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てシミュレーションと合わせてビーム診断を行う、の3通りを考えた。現在開発を進めている診断装置は、COMET Phase-II 実験の物理測定用検出器として設計されているため、(2)は現実的ではない。(1)に関してはPhase-II 実験におけるビーム環境と異なってしまいが、シミュレーションおよび(3)と合わせることで精密な診断を行うことができると考えられる。以上から、特に(3)を推進することが必須であり、本項目では、ビームブロッカーデザインの完遂までを目指す。シミュレーションによる材質や形状の選定を行い、それを基にプロトタイプを製作する。テストビームを利用し、ブロッカーによるレート低減効果を調べ、シミュレーションにフィードバックをかける。その後最適化を行い、ブロッカーを完成させる。

B. 信号処理システムの耐放射線化研究および製作

準備研究におけるPHITS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、1 kGy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。その結果を踏まえ、信号処理システムのプロトタイプ機を用いた中性子・ガンマ線照射試験を行っている。この試験から、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が必要であることがわかった。本項目ではこれらを完遂させ、実機用信号処理システムを完成させる。

C. 粒子識別手法確立およびファイバー検出器製作

準備段階において粒子識別手法として、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を開発した。そして実際にスイスPSI研究所にてミュオン、電子、パイオンの混ざったビームを用いた診断装置プロトタイプによる試験を行ったが、識別効率が十分でなかった。そこで、飛行時間法も更に組み合わせられれば効率が向上するのではと考え、

ファイバー検出器を新たに導入すること検討した。本項目では、シミュレーションスタディを進め、ファイバー検出器の最適化を行った後に、実際にファイバー検出器を製作し性能評価を行う。

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、いくつかの形状を試した結果、ヒットレートを約 1/7 まで低減することは成功した(図1、図2)。現在は材質にタングステンをを用いているが、さらに他の材質選定が必要である。また、形状や配置の最適化によりレートの低減をさらに進められることが予想される。

プロトタイプ製作までは進められなかったが、今後はこのシミュレーションスタディをさらに進め、その結果を基に製作を進める。プロトタイプを用いたテストビーム試験を行い、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更なる最適化を行う。実際のビーム診断時のことを考えると、シミュレーション結果も含め不定性が問題になり得るため、複数種類のブロッカーを用意し、それぞれを用いた際の測定結果を比較することでその不定性を最小限に抑えられるようにする。また、移動ステージのようなブロッカーを交換できるシステム等についても考慮し、実機の製作を進める。

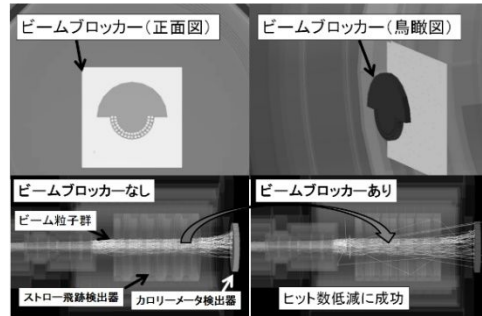


図1 ビームブロッカー簡易デザインとシミュレーションモデル

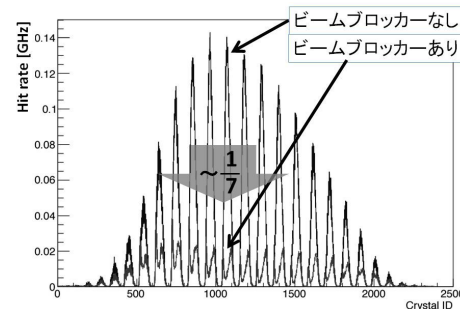


図2 ビームブロッカーによるヒットレートの低減

B. 信号処理システムの耐放射線化研究および製作

FPGA における SEU 検知・修正ファームウェアの開発および実装を進め、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追加も行った。実際に中性子を照射させた際にそれらの機能が問題なく動作することを確認した。また、照射試験の際、同時に複数種 FPGA における SEU レートの測定も行い、実験で用いる各信号処理システムにおける本実験における SEU レート、自動再ダウンロードの必要頻度等も見積もった。この結果については論文にまとめ、発表した。また、複数回のガンマ線照射試験を行い、TID に耐えうるパーツ選定も概ね完了した。この結果についても別途論文にまとめ、発表してある。残りのパーツについては更なる試験が必要である。これらの結果を基に、信号処理システムのプロトタイプ機を一部製作し、その性能評価も行い、要求を満たすことを確認している。この結果についても論文として発表し、一部は現在論文の準備中である。以上を踏まえ、実機のデザイン等をはじめたところである。

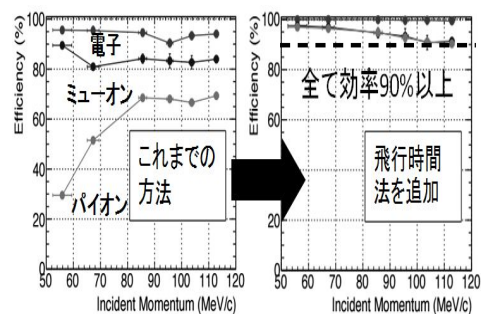


図3 粒子識別効率。これまでの方法(左)と新たな方法(右)

C. 粒子識別手法確立およびファイバー検出器製作

シミュレーションスタディにより、ファイバー検出器が時間分解能 1 ns を有し、ストロー飛跡検出器の前段に配置すれば識別効率が 90% 以上に達することがわかった(図3)。しかし、パイオンとミュオンとの分離度は悪く、さらに調べたところ、検出器領域より上流の磁石部に配置し、時間分解能が向上できれば分離できる可能性が出てきた(図4)。今後は、シミュレーションスタディをさらに進め、ファイバー検出器の最適化を行い、製作まで進める予定である。

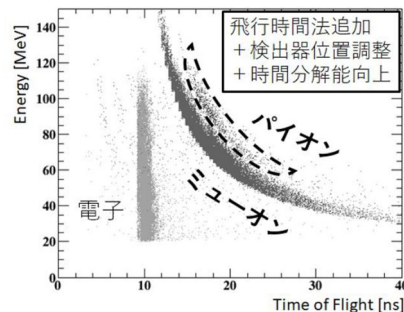


図4 粒子識別法の最適化例

以上より、3つの課題に対し全て完遂までは至らなかったが、解決した、または解決への方針は概ね明確になったため、今後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4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Gillies Ewen, Hamada Eitaro, Igarashi Youichi, Lee MyeongJae, Moritsu Manabu, Matsuda Yugo, Miyazaki Yuta, Nakai Yuki, Natori Hiroaki, Oishi Kou, Sato Akira, Uchida Yoshi, Ueno Kazuki, Yamaguchi Hiroshi, Yeo BeomKi, Yoshida Hisataka, Zhang Jie	4. 巻 955
2. 論文標題 Radiation hardness study for the COMET Phase-I electronics	5. 発行年 2020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 163247-163247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.163247	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 Ueno Kazuki, Hamada Eitaro, Hashimoto Shohei, Ikeno Masahiro, Mihara Satoshi, Nishiguchi Hajime, Uchida Tomohisa, Yamaguchi Hiroshi	4. 巻 936
2. 論文標題 Design and performance evaluation of front-end electronics for COMET straw tracker	5. 発行年 2019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 297-299
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.08.027	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 Nakazawa Yu, Fujii Yuki, Hamada Eitaro, Lee MyeongJae, Miyazaki Yuta, Sato Akira, Ueno Kazuki, Yoshida Hisataka, Zhang Jie	4. 巻 936
2. 論文標題 Radiation study of FPGAs with neutron beam for COMET Phase-I	5. 発行年 2019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 351-352
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2018.10.130	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 Ueno Kazuki, Evtoukhovitch Peter, Fujii Yuki, Hamada Eitaro, Mihara Satoshi, Moiseenko Anatoly, Nishiguchi Hajime, Oishi Kou, Saito Takashi, Samartsev Alexander, Tojo Junji, Tsamalaidze Zviadi, Tserava Nikolozi	4. 巻 314
2. 論文標題 Development of a thin-wall straw-tube tracker for COMET experiment	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 524(online)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.314.0524	査読の有無 有
オープンアクセス 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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kazuki Ueno
2. 発表標題 Development of the StrECaI System for COMET Phase-I
3. 学会等名 The 3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Ueno
2. 発表標題 Design of Radiation Tolerant Electronics for StrECaI System in COMET Experiment
3. 学会等名 European Physical Society Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazuki Ueno
2. 発表標題 Status on the StrECaI System
3. 学会等名 J-PARC Symposium 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上野一樹
2. 発表標題 COMET実験における検出器開発
3. 学会等名 第34回放射線検出器とその応用
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kazuki Ueno
2. 発表標題 Design and performance evaluation of front-end electronics for COMET straw tracker
3. 学会等名 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kazuki Ueno
2. 発表標題 Development of a thin-wall straw-tube tracker for COMET experiment
3. 学会等名 The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上野一樹
2. 発表標題 高放射線環境対応技術の共有化の提案
3. 学会等名 計測システム研究会
4. 発表年 2017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
---------	---------------------------	-----------------------	----