

SiC 半導体検出器を使ったミュオンビームモニターの開発 DEVELOPMENT OF THE MUON BEAM MONITOR USING SiC SEMICONDUCTOR SENSORS

深尾 祥紀^{*,A)}, 五十嵐 洋一^{A)}, 内之八重 広宣^{A)}, 岡部 剣也^{D)}, 岸下 徹一^{C)}, 児島 一聡^{B)}, 小杉 亮治^{B)},
庄子 正剛^{A)}, 田中 保宣^{B)}, 西口 創^{A)}, 濱田 英太郎^{A)}, 藤田 陽一^{A)}, 三原 智^{A)}, 山口 佳樹^{E)}
Yoshinori Fukao^{*,A)}, Youichi Igarashi^{A)}, Hironori Uchinoyae^{A)}, Kenya Okabe^{D)}, Tetsuichi Kishishita^{C)},
Kazutoshi Kojima^{B)}, Ryouji Kosugi^{B)}, Masayoshi Shoji^{A)}, Yasunori Tanaka^{B)}, Hajime Nishiguchi^{A)},
Eitaro Hamada^{A)}, Yowichi Fujita^{A)}, Satoshi Mihara^{A)}, Yoshiki Yamaguchi^{E)}
A) KEK, B) AIST, C) University of Bonn, D) SOKENDAI, E) University of Tsukuba

Abstract

The COMET experiment aims to search for the muon-to-electron conversion. The process violates the charged lepton flavor conservation, which is accidentally conserved and is prohibited in the Standard Model of the particle physics. Once the conversion process is detected, it is the clear evidence of the new physics. To secure the stability of the secondary muon beam during the measurements, a muon beam monitor is planned to be installed to the COMET experiment. Due to the high radiation, SiC semiconductor sensors are adopted for the particle detector of the monitor. The prototype of the detector was tested using the muon beam at the J-PARC MLF MUSE. The results of the beam irradiation test and the current status of the development are reported.

1. ミュオン電子転換

これまでの物理学実験による成果により、クォーク・中性レプトンのセクターにおいてはフレーバー混合が発見されている。一方、荷電レプトンのセクターにおいてはフレーバー量子数の保存則は維持されているものの、その理論的な根拠は存在しない。ミュオンから電子への転換事象は荷電レプトンフレーバー保存則を破る事象であり、素粒子の標準模型においては禁止されている。ニュートリノ振動による寄与を考慮したとしても、その分岐比は 10^{-54} 乗以下と非常に小さく、現在の実験感度においては検出することは不可能である。したがって、実験によりミュオン電子転換が発見された場合、それは直ちに新物理の証拠となる。

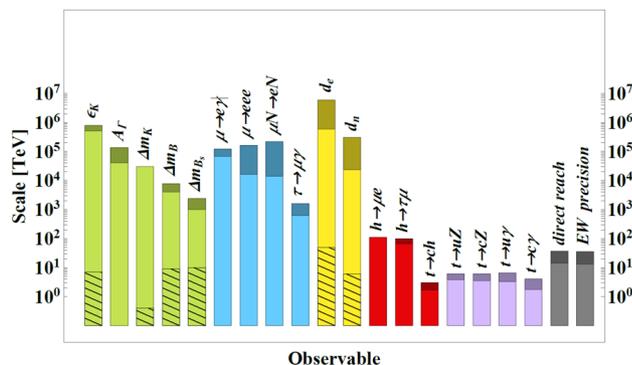


Figure 1: Sensitivity to the new physics reported in European Strategy for Particle Physics Update 2020.

図1は、さまざまなフレーバー物理について European Strategy for Particle Physics Update 2020 において報告された新物理への感度を表している [1]。ミュオン電子

転換については、SINDRUM-II 実験によってその分岐比は 7×10^{-13} 以下であるという結果となっており [2]、これはエネルギースケールにおいて 10^3 TeV 以上の感度があるとされている。さらに現在、計画されている実験により、 10^4 TeV にまで到達すると期待されている。

2. COMET 実験

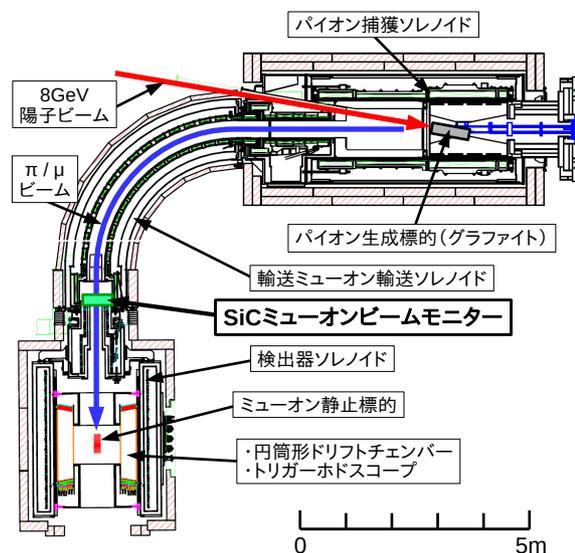


Figure 2: Experiment setup of COMET Phase-I.

COMET 実験は J-PARC ハドロン施設において建設中であり、その第一段階である COMET Phase-I [3] では SINDRUM-II 実験の 100 倍の感度でミュオン電子転換を測定しようとする計画である。図2は、COMET Phase-I の実験セットアップを示している。加速器によって 8 GeV まで加速された陽子ビームをパイオン捕獲ソレノイドの内部に設置したパイオン生成標的（厚さ

* fukao@post.kek.jp

490 mm のグラファイト) に入射し、荷電パイオンを生成する。荷電パイオンはソレノイド磁場によって集められ、ミュオン輸送ソレノイドによって輸送されつつ、ミュオンへと崩壊する。このようにして生成された大強度のミュオンビームを検出器ソレノイドの内部に設置されたミュオン静止標的において静止し、標的の周囲を覆う円筒形ドリフトチェンバーを用いて崩壊電子を検出する。ミュオン電子転換では、ミュオンの質量分のエネルギーを全て崩壊電子が担うため、100 MeV 以上の高いエネルギーをもつ電子がその信号となる。

3. ミュオンビームモニター

COMET 実験は稀崩壊事象の探索実験であり、偽の信号を極限まで抑えることが必須である。偽の信号の要因となり得る二次ビームの不定性を監視するため、ミュオンビームモニターを導入する。また、ミュオンビームモニターは、実験開始時にミュオンビームのプロファイルを測定することで、最適なビームの状態を測定を行うことを可能とする。データ取得中には常時ビームの状態(位置分布、時間分布)を監視し、異常なビーム入射を検知することで、偽の信号の発生を抑制する。COMET 実験で利用するミュオンビームの強度は $\sim 10^9$ Hz であり、通常の二次ビームと比較して高強度である。さらにパイオン生成標的からの距離が近いため、標的で生成された中性子の照射にもさらされる。そのため、モニター検出器の放射線損傷を無視できないことから、放射線耐性に優れた炭化シリコン (SiC) 半導体センサーを利用した検出器を採用している。

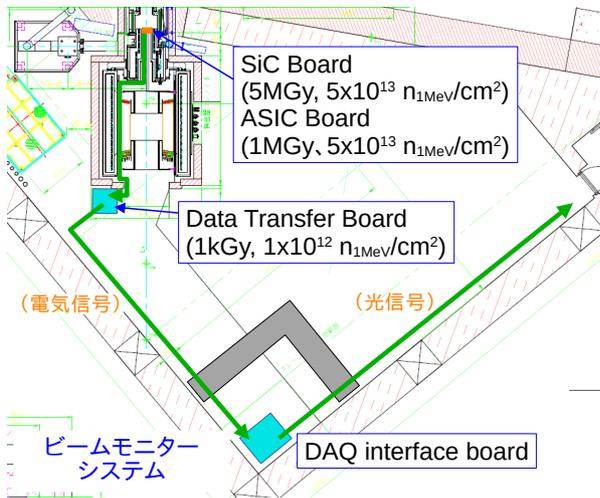


Figure 3: SiC muon beam monitor system.

図 3 は、ミュオンビームモニターのシステム全体を表している。ビームを検出する SiC 半導体センサーは、ミュオン輸送ソレノイドの下流に設置する計画である。シミュレーションにより、モニター検出器の中心部分では 1.2 MGy および 1.6×10^{13} n_{1MeV/cm^2} の放射線損傷が予想されており [4]、安全係数を考慮して 5 MGy および 5×10^{13} n_{1MeV/cm^2} の放射線損傷を想定して検出器の設計を行っている。

ミュオンビームモニターに使用する SiC 半導体セ

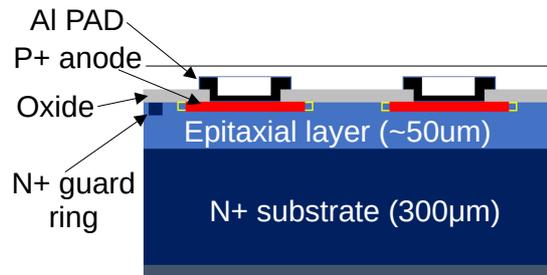


Figure 4: Cross section view of the SiC sensor of the muon beam monitor. The left hand side shows the edge region and the right hand side shows the center region of the SiC sensor board.

センサーは、産総研においてプロセスされた。1 センサーの大きさは $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (電極は $4 \times 4 \text{ mm}^2$) であり、エピタキシャル層の厚さは約 50 μm 、サブストレート層は厚さ 300 μm である (図 4)。このセンサーを 2 次元に配置し、モニター検出器とする。SiC センサーの性能については、 ^{90}Sr および ^{241}Am を用いて評価されている [5]。

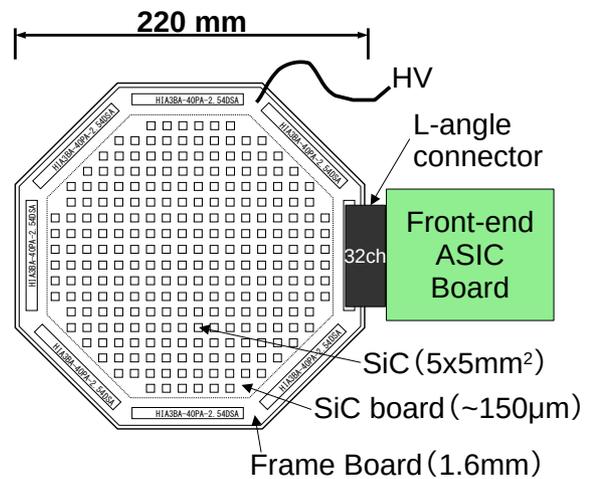


Figure 5: SiC sensor board.

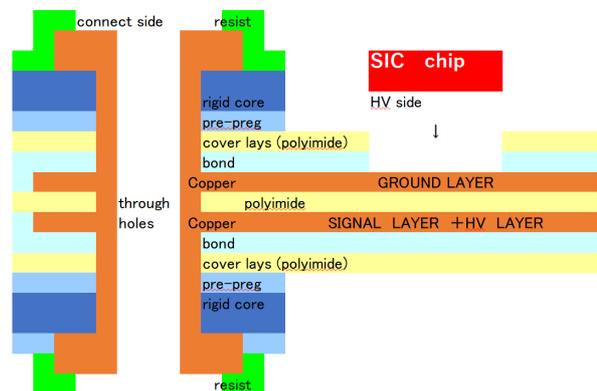


Figure 6: Cross section view of the SiC sensor board.

図 5 は、SiC 半導体センサーを取り付けるモニター

基板を表している。モニター基板は八角形の形状をしており、ビームダクトの内部に設置する。モニター基板によるビームの散乱を低減するため、基板中央部はポリイミド基板としており、ポリイミド基板を支えるため、周縁部をFR-4 基板とした (図 6)。ポリイミド基板上に 10 mm おきに SiC 半導体センサーを取り付け、ビームのプロファイルを測定する。モニター基板には、SiC 半導体センサーからの電気信号を増幅・デジタル化するためのフロントエンド回路が接続される。

4. ミューオンビーム照射試験

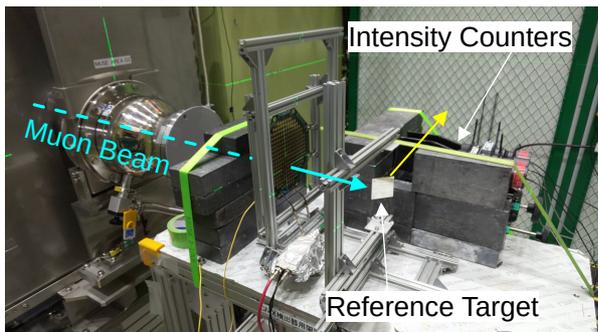


Figure 7: Photo of the experiment at J-PARC MLF MUSE.

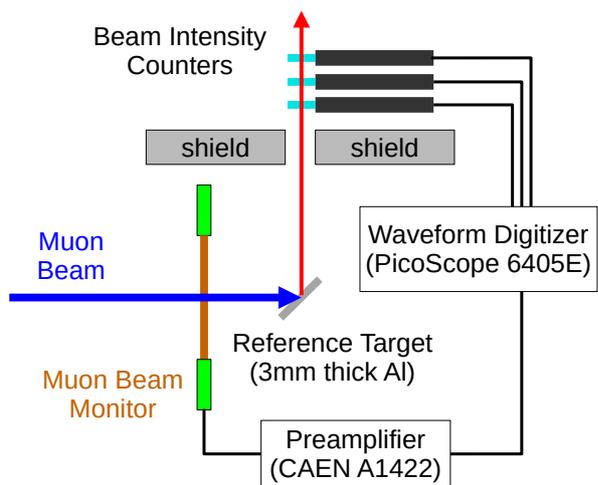


Figure 8: Experiment set up for the muon beam irradiation at the J-PARC MLF MUSE.

ミューオンビーム照射に対する SiC 半導体センサーの応答を調べるため、J-PARC MLF D2 エリア [6] において、ミューオンビームをミューオンビームモニターの試作機に照射した。図 7 は実験の様子を撮影した写真であり、図 8 は実験セットアップの模式図である。SiC 半導体センサーからの信号は信号増幅器 (CAEN A1422) によって増幅され、波形デジタイザ (PicoScope 6405E) によって記録した。ミューオンビームはモニター検出器の下流側に設置された Reference Target においてその大部分が静止する。Reference Target からの崩壊電子を側面に設置された Beam Intensity Counters で検出することで、(相対的な) ビーム強度を測定した。

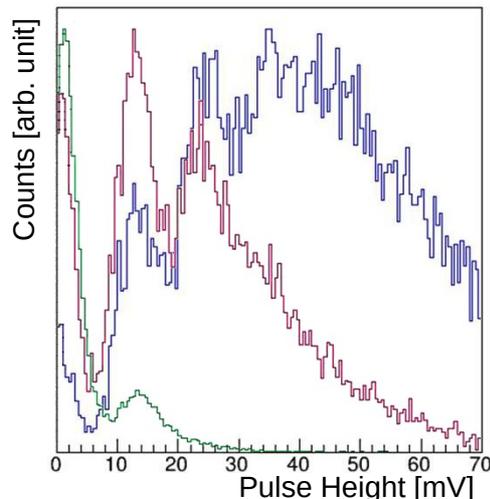


Figure 9: Signal amplitude distribution by the muon beam irradiation. Distributions with different beam intensities are superposed.

MUSE のミューオンビームは、COMET 実験で利用するビームと同様のバンチ状のビームである。データは、二種類の運動量 (40 MeV/c と 70 MeV/c) の設定で取得した。また、ビームライン最上流の Q 磁石の磁場を調整することでビーム強度を変更し、ビーム強度 (すなわち 1 バンチあたりの入射ビーム粒子の個数) による信号波高の変化を記録した。図 9 は SiC 半導体センサーの信号波高の大きさを表す。センサーに 1 ミューオンが入射したときに信号波高に相当するピークが見取れる。ピークの位置をフィッティングで求めることにより、ミューオン入射による信号の大きさ (約 10 mV) が得られた。信号増幅器に対する試験信号入力の測定と比較することによって、ミューオン入射による生成電荷量を算出することができ、 2.3×10^{-15} C という結果となった。また、計算によって得られる SiC におけるミューオンのエネルギー損失を考慮することによって、電子ホール対生成エネルギーに換算することができ、その結果は 7.7 eV となった。上記の測定結果はセンサーに 600 V のバイアス電圧を印加したときのものである。バイアス電圧を 1000 V としたときの電子ホール対生成エネルギーの測定結果は 8.4 eV となった。これらの結果は文献による値 (7.8 eV) [7] とおおむね同等の値となっている。

ビーム強度を変更しながら、SiC 半導体センサーの信号波高を測定することで、センサーの信号波高の線形性を測定することができる。図 10 は、ビーム試験によって得られた、ビーム強度とセンサーの信号波高の比較を示している。これにより、センサーに入射するミューオンが 35 程度程度のビーム強度まで線形性が確認された (上限はビームラインによって供給可能なビーム強度による)。

5. ミューオンサンプルの抽出

実際の COMET 実験の二次ビームには、ミューオンだけでなく、他の荷電粒子 (主に電子) も含まれるが、これらを分離することは困難である。しかしながら、粒子の種類によってミューオンビームモニター検出器に粒

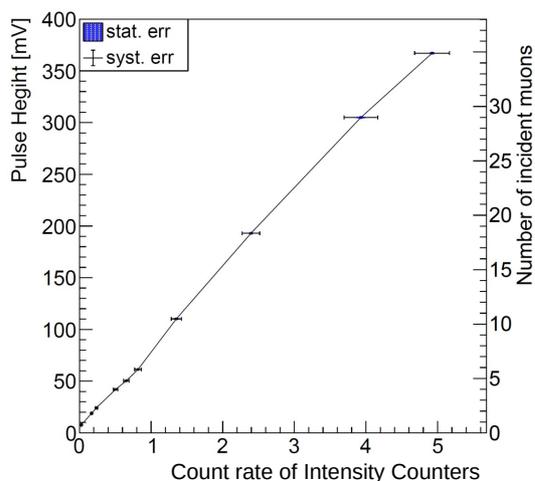


Figure 10: Relation between the beam intensity and the signal amplitude of SiC sensor. This measurements were performed with the beam momentum of 40 MeV/c.

子が到達する時間の違うことや、SiC 半導体センサーでのエネルギー損失の大きさの違いから、大部分がミュオンからの寄与となるタイミングを選択することができる。図 11 は GEANT4 シミュレーションによって見積もられた、実際のビーム運手において予想される信号波形である。ビームに含まれる粒子の種類によって信号への寄与の大きさ、時定数が異なる。300 ns の位置での信号波高を記録することで、80% 程度がミュオンからの寄与となるビームプロファイルを得ることができる。

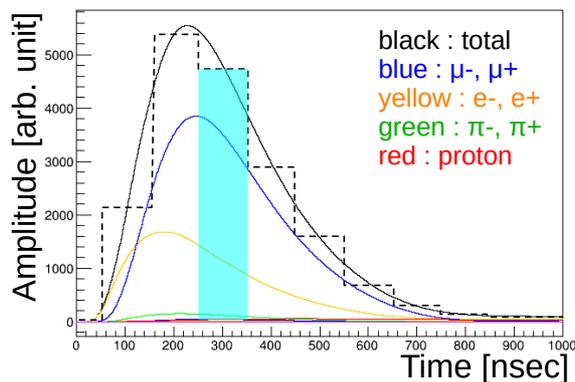


Figure 11: Signal waveform in the actual beam operation estimated by simulation.

上記の機能はフロントエンド電子回路に実装されるが、フロントエンド回路の設置位置における放射線強度は高く、通常の IC を使用することは困難である。そのため、この機能（信号の増幅、整形、波形のデジタル化、信号の転送）は ASIC を用いて実現する計画である。図 12 に ASIC に実装される回路のダイアグラムを示す。

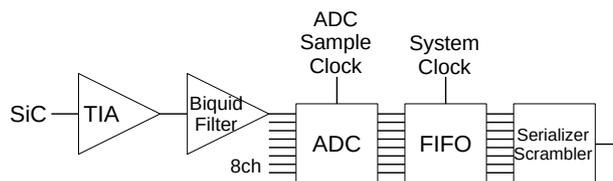


Figure 12: Block diagram of the ASIC implemented in the frontend electronics.

6. まとめと展望

ミュオン電子転換事象の探索を目的とする COMET 実験では、ミュオンビームの監視を目的としたミュオンビームモニターを導入を計画している。ビームモニターには高い放射線耐性が要求されるため、放射線耐性に優れた SiC 半導体センサーを利用した検出器の開発を進めている。J-PARC MLF D2 エリアのミュオンビームを利用して、試作機へのビーム照射試験を行い、SiC 半導体センサーの応答を確認した。現在、実機に必要なフロントエンド電子回路に搭載する ASIC の設計・製作を進めており、実験開始に向けて開発を行っている。

謝辞

実験は大強度陽子加速器施設 物質・生命科学実験施設 D2 エリア (課題番号: 2024A0200) により実施しました。本研究は JSPS 科研費 21H01117、22H01255、22K03657、22H00139、25K07348 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] European Strategy for Particle Physics Preparatory Group, Physics Briefing Book : Input for the European Strategy for Particle Physics Update 2020, CERN-ESU-004 (2020).
- [2] W. H. Bertl et al., A Search for muon to electron conversion in muonic gold, Eur. Phys. J. C 47 (2006) 337–346. doi: 10.1140/epjc/s2006-02582-x
- [3] COMET Collaboration, COMET Phase-I Technical Design Report, PTEP 2020 (3) (2020) 033C01. doi:10.1093/ptep/ptz125
- [4] Y. Fukao et al., Development of the SiC Muon Beam Monitor for the COMET Experiment, proceedings of the 19th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan, 2023.
- [5] T. Kishishita et al., SiC p+n Junction Diodes Toward Beam Monitor Applications, IEEE Trans. Nucl. Sci. VOL. 68 NO. 12 (2021) 2787–2793. doi:10.1109/TNS.2021.3118788, T. Kishishita et al., Hybrid SiC Pixel Detector for Charged-Particle Beam Monitor, IEEE Trans. Nucl. Sci. VOL. 70 NO. 6 (2023) 1210–1214. doi:10.1109/TNS.2023.3265318
- [6] J-PARC MLF D2 beamline, <https://mlfinfo.jp/en/d2/>.
- [7] G. Bertuccio, R. Casiraghi, Study of silicon carbide for x-ray detection and spectroscopy, IEEE Transactions on Nuclear Science 50 (1) (2003) 175–185. doi:10.1109/TNS.2003.807855