

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：11501  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2019～2021  
課題番号：19K03881  
研究課題名(和文)新蛍光素材を用いた高B/CなK0稀崩壊実験次期計画用VETO検出器の基礎開発

研究課題名(英文)Basic R&D of the veto counter with high B/C using new fluorescent materials for the future K0 rare decay experiment

研究代表者  
吉田 浩司(Yoshida, Hiroshi)  
山形大学・学士課程基盤教育機構・教授

研究者番号：80241727  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：K0稀崩壊実験次期計画実現に向けて、線VETO検出器の構成要素に関する基礎研究をおこなった。PEN樹脂、PET樹脂等の市販リサイクル材料も含め、サンドイッチカロリメーターに適した蛍光材料を探索した。材料特性のうち応答速度は重要であり、UVSOR放射光を用いて単一光子計数法により詳細な蛍光寿命測定をおこなった。また新たに開発された複数のWave Length Shifter材料の蛍光寿命については、いずれも1.5ns未満という高速な性能を有していることが判明した。より高計数率な環境下で動作し得る、高速応答で大型の(長尺な)サンドイッチカロリメーターの実現に好ましい成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
環境性や経済性や持続性に著しく劣る学問は社会的に許容されないという時代を迎えつつある中で、リサイクル材料を積極的に活用することを目指し、製造に伴う環境負荷の低減を図るとともに、経済性の向上も図ることも本研究の目的にしている。  
まだ未解明の点が多いが、電子ビームに対して得られたPET樹脂の時間応答が格段に速く、発光量がプラスチックシンチレーターの1/5程度であるとはいえ、リサイクル材料である(ホームセンター等で市販されている程度)PET樹脂を検出器として利用する可能性を見出した意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：A basic R&D on scintillators and optical devices of the gamma-ray veto detectors was made for the realization of the next project of the K0 rare decay experiment. We searched for fluorescent materials suitable for sandwich calorimeters, including commercially available recycled materials such as PEN resin and PET resin. Especially, since the response speed of the material was important, the detailed fluorescence lifetime was measured by the time-correlated single-photon counting method using the synchrotron radiation at UVSOR. Several newly developed wave length shifter materials for the optical fiber readout were found to have short fluorescence lifetime of less than 1.5 ns. Favorable results were obtained for the realization of large and long sandwich calorimeters with fast responses that can operate under higher counting rate.

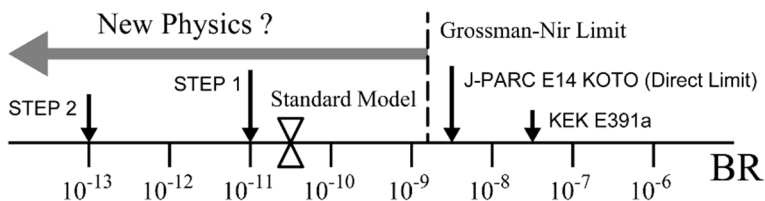
研究分野：素粒子原子核物理学

キーワード：粒子線検出器 カロリメーター シンチレーター

## 1. 研究開始当初の背景

直接 CP 対称性を破る  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  反応は、標準理論により予想されている分岐比は  $10^{-11}$  程度と大変小さいものであるが、理論計算による不定性も 1~2%程度と大変小さいと考えられていて、CKM 行列要素を決める上できわめて重要な反応である。これまでに実験で得られているこの反応の上限値は、山形大学も参加している J-PARC E14 KOTO による  $3.0 \times 10^{-9}$  であり、上記の予想に対してまだ 2 桁も大きく、この反応は K 崩壊で残された最大の実験対象といわれている。

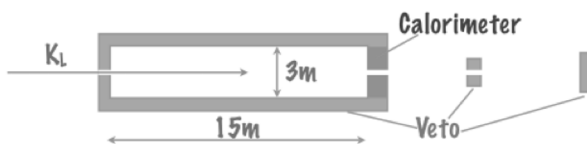
J-PARC E14 KOTO は、KEK E391a の後継実験であり、この反応を捕らえ標準理論を超えた物理を探索するために、STEP 1 → STEP 2 と 2 期の実験計画で臨んでいる。まず STEP 1 では KEK E391a の検出器を改造し、この反応の初観測を目指し、目下ビーム実験が進められており、現在その最初の重要な成果が得られつつある。そして STEP 2 では  $K_L^0$  の崩壊領域を大きく拡大し、20m 超の検出器でもって 100 events 程度の反応を観測し、標準理論の予想値のはるか先の領域において、その分岐比の精密測定を目指している。



## 2. 研究の目的

本研究はこの STEP 2 実現に向けて、 $K_L^0$  崩壊領域側面部をカバーする Barrel Counter と呼ばれる長さ 15~20m 超 (直径 3m 超) の  $\gamma$  線 VETO 検出器やその他の  $\gamma$  線 VETO 検出器の基礎開発を行うものである。タイトルに「高 B/C (benefit-cost ratio)」と謳っているのは、検出器の性能向上もさることながら、その経済性の向上を本開発研究の目的にすえているという意味である。

「LHC や ILC 計画の予算規模を見ると、高エネルギー加速器物理学は持続性の限界に達しつつあるとの印象を拭えない。(中略) そのような研究戦略が有限のリソースしかないこの世界で早晚行き詰まることは必至である。」(国際リニアコライダー計画の見直し案に関する論点メモ@日本学術会議) という文書にも見られるとおり、いかに優れた研究テーマであろうとも、経済性に著しく劣る研究計画は社会的に許容されないという時代を迎えつつある。そのような中で次期計画 STEP 2 実現に向けた経済性に優れた VETO 検出器の基礎開発をおこなうのが本研究の目的である。



本研究は検出器量産前の R&D を担うものである。発光特性、機械的強度、加工性などに優れた PEN 樹脂製の新素材シンチレーター (商標名「シンチレックス」)、PET 樹脂等のリサイクル材料を用いた蛍光材料、それらの発光波長域に対応した WLS Fiber (Wavelength shifter Fiber)、口径も大きくなり、低ノイズで安定した単一光子観測が可能な MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) 等、新たに開発された素材やデバイスを積極的に活用し、性能のみならず経済性を追求する。

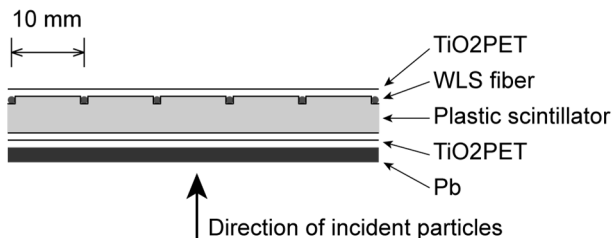
## 3. 研究の方法

### (1) 研究対象の基本構成単位

STEP 2 の検出器の容積を考慮し、経済性を追求するという観点からも、研究の対象は鉛とプラスチックシンチレーターのサンドイッチ型電磁シャワーカロリメーターに絞ることとした。

- (i) 応答時間が速い
- (ii) 特殊形状への加工の容易性 (デザインの自由度)
- (iii) 短期間での量産

が可能といった利点があるからである。さらに右図のような基本構成を想定し、(i) シンチレーター等の発光体 (ii) 波長変換材や集光系材料 (iii) PMT や MPPC 等の光電気信号変換デバイスと大別して探求をおこなっていくこととした。



## (2) 新素材の探索と物性評価

物質の発光波長域が PMT の受光感度域にあることにこだわらなければ、リサイクル材料として社会に広く浸透している PET 樹脂等、蛍光発光し、経済性、加工性、力学的強度に優れている候補材料は少なくない。その波長域や発光量の不利を新開発の WLS Fiber でカバーできる可能性もある。本研究では、これらの蛍光材料の探索をおこなう。特に大強度・高計数率が要求される高エネルギー実験では、検出器の高速応答が要求されるので、UVSOR 施設の放射光も利用してナノ・ピコ秒オーダーでの物性評価をおこなう。

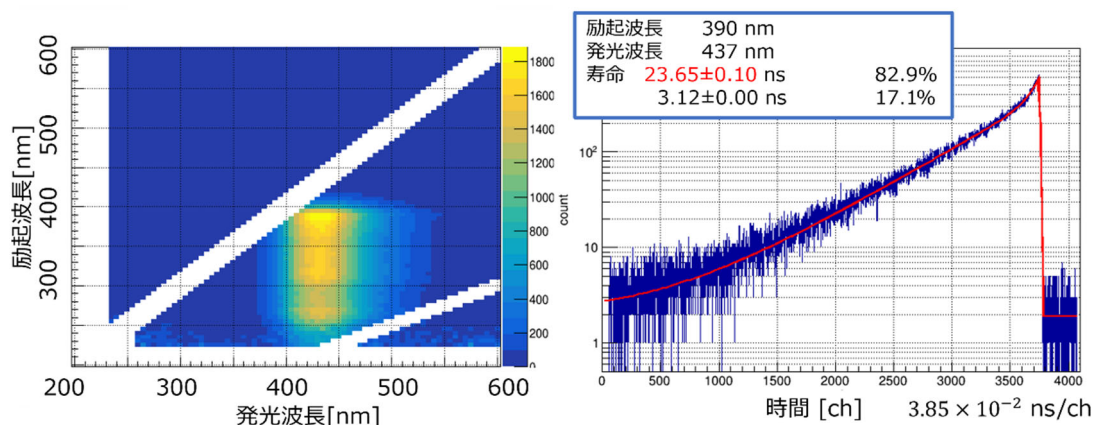
## (3) テストモジュールの製作／ベンチテスト／ビームテスト

以上の研究を検証するためのテストモジュールを製作する。加速器からの粒子線を利用したビーム実験を日常的に行うのは非現実的なので、放射線源や宇宙線等によるベンチテストは重要である。モジュールを支えるフレームは、汎用性の高い構造を持たせ、金属輻射体、シンチレーター、集光系デバイス、PMT や MPPC 等の光電気信号変換デバイス等をテストに応じて入れ替えられる構造にする。上記 (2) を遂行するのに必要な暗箱や実験治具や光学機器も整備し、様々な評価ベンチを整備する。

# 4. 研究成果

## (1) 蛍光材料の探索と光物性測定

既発売品のプラスチックシンチレーターからホームセンターで市販されている樹脂板に至るまで広い範囲で、吸光発光特性や蛍光寿命について測定することができた。蛍光寿命測定は、UVSOR 放射光 (シングルバンチ運転) を試料に照射し、時間相関単一光子計数法を用いることで精度良く (0.1ns 以下) おこなわれた。また現在 J-PARC E14 KOTO 実験の Barrel veto counter として使用されている独自開発のシンチレーターについてもテストをおこない、性能の検証をおこなうことができた。



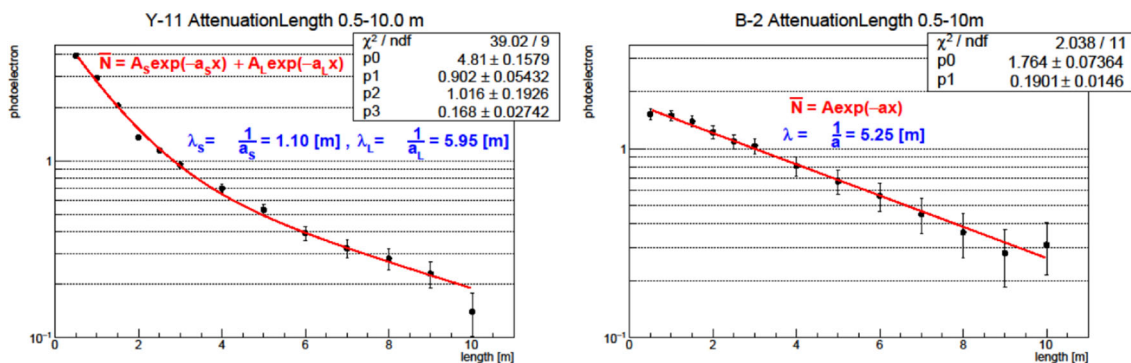
新素材と喧伝されていたシンチレックスについては、そのベースとなっている PEN 樹脂単体の測定もおこない、両者の蛍光寿命データを比較することができた。発光量はそれなりにあるものの、蛍光寿命は他のプラスチックシンチレーターに比べて長く、その成分も複数観測されるなど、その物性は STEP 2 には不向きであることも明らかになった。(上図)

## (2) 蛍光素材の性能評価方法として $^{106}\text{Ru}$ 線源からの $\beta$ 線を用いる手法の確立

素粒子原子核実験の実地における性能を検証するには  $e, \pi, \mu$  等の荷電粒子ビームによる最小電離への応答を測定するのが最も確実な方法ではあるが、テスト用の小サンプルを測定するだけのためにしばしば加速器実験を申請するのは実際的ではない。また本研究期間ではコロナ禍の下で、大学の一般的な実験室でも実施可能な実験方法を確立することが強く望まれた。この

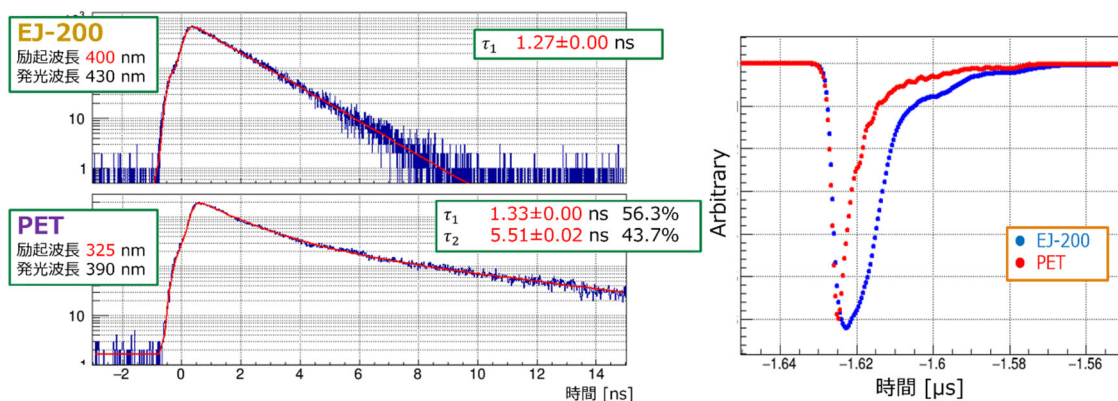
ような場合、しばしば加速器ビームの代替になるのは宇宙線 ( $\mu$ ) であるが、テストサンプルの大きさやセットアップの立体角に不足することがそのまま測定結果の統計精度に直結しており極めて実験効率が悪い。また、荷電粒子源としてしばしば利用される  $^{90}\text{Sr}$  は、放出される  $\beta$  線のエネルギーが低く、「荷電粒子がシンチレーターを突き抜ける」という実験条件を実現できない。 $^{106}\text{Ru}$  は半減期が 373.6 日と短く経済性には劣るものの、 $\beta$  崩壊した子孫核種  $^{106}\text{Rh}$  が放出する  $\beta$  線の  $E_{\text{max}}$  は 3.55MeV であり、そのような実験条件を実現してベンチテストをおこなうことができる。

本研究では  $^{106}\text{Ru}$  線源を用いて 2 種類の WLSF Kuraray Y-11 と B-2 について、その減衰長を精密に測定してみた。溝を掘ったプラスチックシンチレーターに WLSF を埋め込み、それに  $^{106}\text{Ru}$  からの  $\beta$  線を透過させることによって実験をおこない、前者については 5.95m、後者については 5.25m という結果を得た。(下図)



### (3) 市販 PET 樹脂の時間応答性能

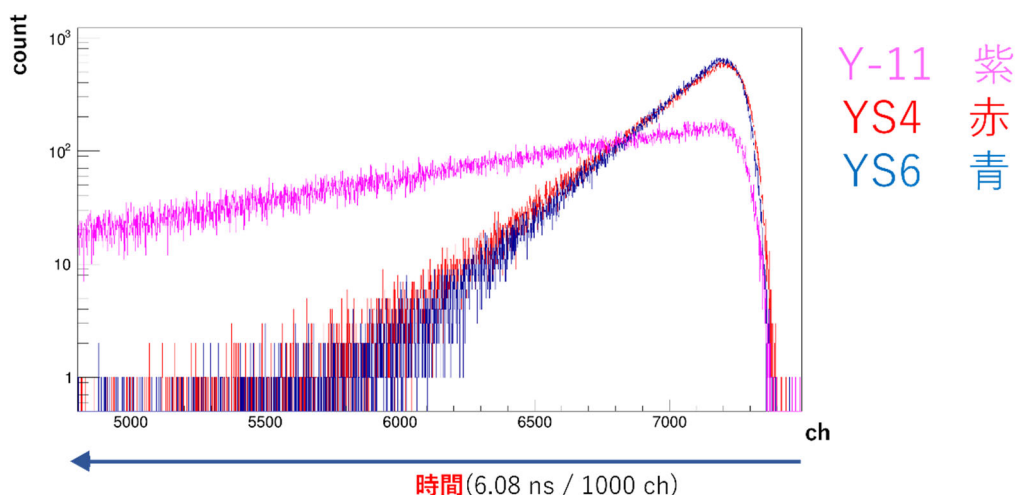
東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) において電子ビームでテストする機会を得た際、汎用のプラスチックシンチレーター EJ-200 に比べて、市販の PET 樹脂単体の時間応答の方が高速であるという注目すべき知見が得られた。運動量 770MeV/c の電子ビームを入射し、貫通したイベントについての光電子増倍管の出力波形を観測したところ、PET 樹脂の方がより高速でシャープな出力波形を示した。(右下図参照。オシロスコープ出力波形を平均化して比較したもの。) これはこれまで UVSOR の紫外光照射で得られていた両者の蛍光寿命測定の実験結果からは予想できないものであった。(左下図) 発光メカニズムの探求等、今後の課題はさまざま残されてはいるが、高エネルギー物理学に使用される検出器には何よりも高速であることが求められることもあり、発光量がプラスチックシンチレーターの 1/5 程度であるとはいえ、PET 樹脂の可能性を見出した意義は大きい。



### (4) 高速応答が期待される Wave Length Shifter 材料の蛍光寿命測定

内外の従来品よりも応答が速いと思われる複数の Wave Length Shifter 材料について UVSOR 放射光を用いて蛍光寿命測定等の物性実験をおこなった。シングルバンチ運転下の UVSOR BL3B 及び BL7B からの紫外光を励起光源とし、時間相関単一光子計数法により試料の蛍光寿命を決定した。測定した時間スペクトルから解析して得られた蛍光寿命は、いずれのサンプルについても 1.5ns 未満であり、汎用のプラスチックシンチレーターと同程度の高速なものであった。この結果は、より高計数率な環境下で動作し得る高速応答で大型 (長尺) なサンドイッチ

カロリメーターの実現に向けて、大いに好ましいものであるといえる。(測定結果を下図に示す。「YS4」及び「YS6」は仮のサンプル名である。比較のために Kuraray Y-11 の蛍光寿命スペクトルを重ねて表示してある。)



サンドイッチカロリメーターの集光系・読み出し系として、これらの高速応答の WLS Fiber が適しているか否かをテストしていくために、プラスチックシンチレーターと組み合わせたファイバーの減衰長や発光量を測定・評価するための暗箱やテストベンチを新たに製作し、放射線源を用いた精密な測定実験の開始に向けての整備もおこなった。将来的には、その測定結果をもとにカロリメーターの実証機を製作し、加速器ビームを用いて、発光量、エネルギー分解能、時間応答などを評価していきたいと考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 新館航平
2. 発表標題 サンドイッチ型カロリメーターへの応用をめざした放射光を使った短寿命波長変換シンチレーターの蛍光寿命測定
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池田晴紀
2. 発表標題 UVSOR紫外光を用いたサンドイッチカロリメータ用シンチレーターの蛍光寿命測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

修士論文・卒業論文等 及川裕暉, KO稀崩壊実験次期計画に向けた VETO検出器の経済性の探求と素材評価, 山形大学大学院理工学研究科修士論文, 2020年3月. 池田晴紀, WLSF読み出しサンドイッチカロリメーターへのリサイクル材料の活用可能性の研究, 山形大学大学院理工学研究科修士論文, 2021年3月. 大橋淳也, 106Ru線源を用いたWLSFの減衰長測定システムの構築, 山形大学理学部卒業論文, 2021年3月. 比留間芳樹, 波長変換ファイバーの時間情報測定による性能評価方法の確立, 山形大学理学部卒業論文, 2021年3月. 石山諒, PET樹脂を利用したサンドイッチカロリメーターの開発, 山形大学理学部卒業論文, 2022年3月. 坂野空, シンチレーターの発光量比較測定, 山形大学理学部卒業論文, 2022年3月. 新館航平, 波長変換ファイバーの蛍光寿命測定, 山形大学理学部卒業論文, 2022年3月. 中村匠吾, サンドイッチカロリメータを用いたミュオン寿命測定, 山形大学理学部卒業論文, 2022年3月.
--

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
研究協力者	田島 靖久  (Tajima Yasuhisa)		

## 6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	及川 裕暉  (Oikawa Hiroki)		
研究協力者	池田 晴紀  (Ikeda Haruki)		
研究協力者	大橋 淳也  (Ohashi Junya)		
研究協力者	比留間 芳樹  (Hiruma Yoshiki)		
研究協力者	石山 諒  (Ishiyama Ryo)		
研究協力者	坂野 空  (Sakano Sora)		
研究協力者	新館 航平  (Shintate Kohei)		
研究協力者	中村 匠吾  (Nakamura Shogo)		

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
---------	---------