

令和元年5月31日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05368

研究課題名(和文) 新素材シンチレーターを用いたK0稀崩壊実験用VETO検出器の基礎開発

研究課題名(英文) A Basic R&D of the veto counter using a scintillator made from new material for the 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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARC E14 STEP 2の実現に向けて、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樹脂ベースの新素材シンチレーター「シンチレックス」については、試作したサンドイッチ型検出器のビーム実験データから直線性やエネルギー分解能について一定水準の応答性能を示せた。またその温度消光、熱発光について初の系統的な測定データを得ることができた。新世代MPPCは高計数率下においても信号特性に優れて安定に動作させることが可能であることが示せた。またUVSOR放射光を用いてシンチレーター材料の時間特性の性能評価の手法を確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2011年に産学連携事業により登場した新素材について、実際の検出器に応用してその性能を実証できた一方で、得てして応用先行になりがちなど、その基礎物性の研究にも取り組み、その素材がもっている欠点(温度消光や熱発光等)についても系統的な測定データを得るなどして、基礎的な裏付けを与えることができた。また、新世代MPPC等新しいデバイスを、素粒子実験の将来計画に効果的に採用できることを実証できた。

研究成果の概要(英文)：We made basic R&Ds on scintillators and optical devices which compose veto counters of E14 STEP 2 planned as the next project of the K0 rare decay experiment at J-PARC. Especially, we evaluated the capability of a new plastic scintillator "Scintirex" made of polyethylene naphthalate (PEN) as a component of a sandwich calorimeter. We obtained systematic data which showed the existence of temperature quenching and thermoluminescence of the Scintirex. A prototype sampling calorimeter which consisted of lead plates and Scintirex plates was tested by using the positron beam at ELPH. The obtained data showed good linear response and energy resolution. A new generation MPPC could be operated stably under high counting rates with a suitably designed electrical circuit. We have measured fluorescence spectra and decay curves for some polystyrene-based plastic scintillators with the use of a short pulse light source in the wide range from visible to vacuum ultraviolet at UVSOR.

研究分野：数物系科学

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

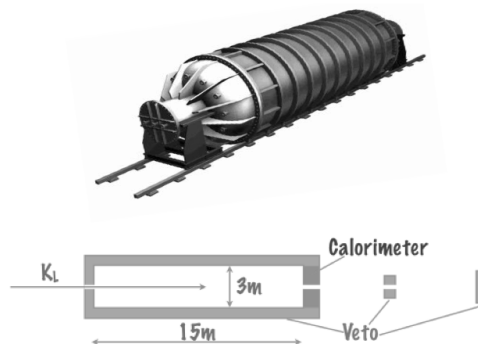
1. 研究開始当初の背景

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、一方で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。本研究申請時で得られているこの反応の上限値は、山形大学を含めた我々 KEK E391a による 2.6×10^{-8} であり、上記の予想に対してまだ 3 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 は、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、2 段階の実験計画で臨んでいる。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、現在ビーム実験が進行中である。そして STEP 2 では K_L^0 の崩壊領域を大きく拡大し、15m 超の検出器でもって 10^2 events 程度の反応を観測し、その分岐比の精密測定を目指している。

右下に J-PARC E14 STEP 2 検出器の概念図を示す。これまでの実験に比べて特徴的なのは、 K_L^0 粒子の崩壊領域を十分に確保するために、検出器のビーム方向の長さが 15m あまりに及ぶことである。(KEK E391a 及び J-PARC E14 STEP 1 での Main Barrel Counter の長さは 5.5m である。) この計画は、検出器サイズを一気に 3 倍近くスケールアップする一方で、 γ 線を VETO する性能は維持し、さらにエネルギー測定性能を向上させようという野心的なものである。

この計画を実現するためには、それを構成する検出器について、性能だけではなく経済性にも優れたものが求められており、そのために数々の R&D に取り組まなければならない。本研究もそのひとつである。



2. 研究の目的

本研究の目的は、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」) など、これまで利用されてこなかった PET 樹脂、PEN 樹脂等を発光体として採用したサンドイッチカロリメーターの基礎開発をおこない、J-PARC E14 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 15m 超の γ 線 VETO 検出器をはじめとする各種 γ 線 VETO 検出器への応用の可能性を探ることである。

PEN 樹脂や PET 樹脂等のリサイクル材料は、従来のプラスチックシンチレーターに比べて発光特性や透過率等の光学特性には劣っているが、一方で強度と柔軟性を兼ね備えており、加工性などにも優れているので、無機結晶では実現困難な形状のカロリメーターを作ることでもでき、自らの重量を自らの構造で支えなければならない VETO 検出器をサンドイッチカロリメーターで構成するときの発光体として有望である。加えて、材料を比較的安価に入手できることは、巨大な検出器を建設する上で何よりも魅力的である。

また本研究では、PET 樹脂等のリサイクル材料を用いた蛍光材料に加えて、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になった 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する可能性を探り、性能のみならず経済性も追求する。STEP 2 では γ 線のエネルギー分解能だけでなく、その位置分解能の性能向上も求められており、これらのデバイスの開発と、その性能の評価方法の確立が求められている。

本研究は検出器量産の前段階の R&D を担い、プロジェクトの推進に寄与し、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 反応の精密測定をおこない、標準理論の検証とその先の物理学を探索していくことが最終的なゴールである。

3. 研究の方法

STEP 2 においても、 γ 線 VETO 検出器は STEP 1 と同様に WLS Fiber 集光系を有するサンドイッチカロリメーターとしてデザイン、建設される可能性があることを考慮に入れて、以下に挙げる項目について研究を進めた。

- (1) 新素材シンチレックスを発光体として採用した試作サンドイッチカロリメーター (鉛板 2mm+シンチレックス 5mm x 20 層) のビームテストについてのデータ解析。(ビームテストは 2015 年度に東北大学電子光理学研究センター ELPH において、100—800MeV の陽電子ビームを使用して実施。) その応答特性について、プラスチックシンチレーターの従来品 (EJ-200) を発光体として採用した同一構成のテスト検出器と詳細な比較をおこなう。
- (2) 山形大学の物性実験グループの協力を得て、シンチレックスの吸光特性、発光特性などの

物理特性について詳細な測定をおこなう。主な測定事項は以下の通り。吸収波長／発光スペクトル／発光量の温度依存性／減衰時間の温度依存性／熱発光／宇宙線を使用した波形の測定。

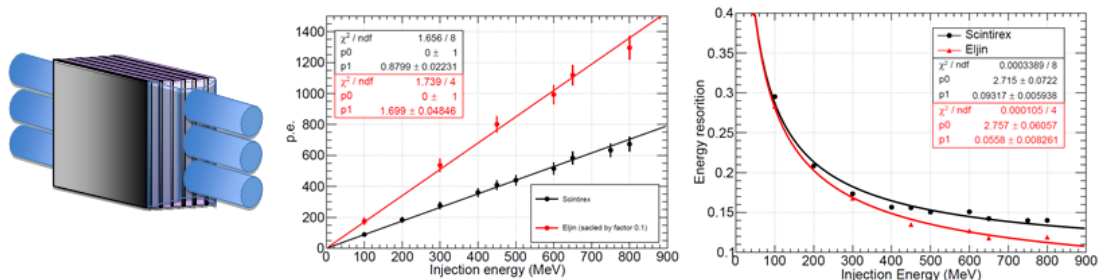
- (3) フォトン・カウンティング・デバイスとして第3世代 MPPC を採用する可能性を迫る。この新世代 MPPC は、これまでより低い電圧で動作し、クロストークも抑えられノイズも低減されているので、より高精度な位置測定性能をバレル部の VETO 検出器に持たせたい次期計画に、省スペース、多CH化、経済性という点で、光電子増倍管より好ましいと考えられる。
- (4) WLS ファイバーやシンチレーションファイバー類の蛍光寿命（時間性能）の評価方法を確立することを試みる。高エネルギー物理学の実験では、検出器に時間応答の早さが常に要求されるが、実験室で数 ns 以下の特性をきちんと評価することは難しい。本研究では自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設の UVSOR 放射光を利用して、時間相関単一光子計数法によりこれらのデバイスの性能の評価方法の確立を目指す。

4. 研究成果

以下に主な実験結果および研究成果について述べる。

(1) ELPH におけるビーム実験の解析

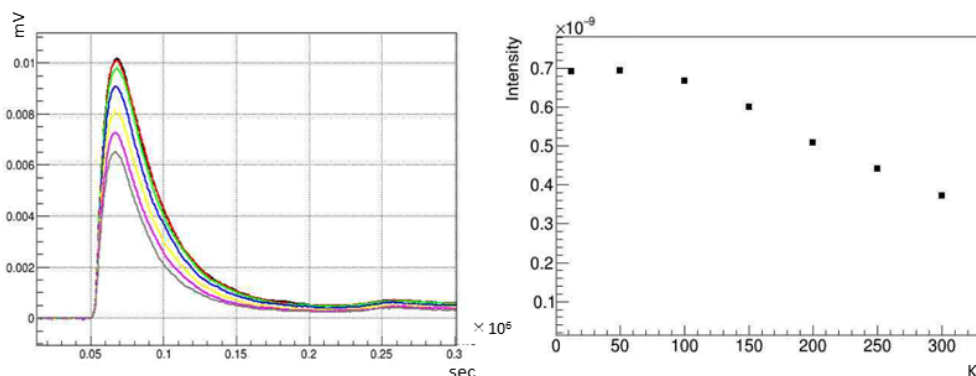
前年度のビーム実験についてデータ解析を注意深くおこない GEANT4 シミュレーションとの比較もおこなった。「鉛 2mm+シンチレーター5mm」20層のサンドイッチカロリメーターを2台製作した。比較のためそれぞれのシンチレーターをシンチレックス（1mm厚の5枚重ね）と EJ-200 とした。それぞれの放射長は 7.5X₀ および 7.4X₀ である。サイズは 200mm×200mm×120mm とし、両サイドに口径2インチの光電子増倍管を3本ずつ装着した。（下左図）



上中図が獲得光電子数換算したエネルギー応答，上右図がエネルギー分解能の測定結果である。（黒がシンチレックス，赤が EJ200）入射エネルギーに対する応答の直線性やエネルギー分解能については，良好な性能を有することが確認できた。獲得光電子数はシンチレックスが 0.88 pe/MeV，EJ200 が 17 pe/MeV であった。またエネルギー分解能については，シンチレックスが統計項 8.6%，定数項 9.3%，EJ200 が統計項 8.7%，定数項 5.6% であった。

(2) シンチレックスの物性測定

シンチレーターの発光特性は，吸光・発光波長スペクトル，発光量，蛍光寿命（減衰時間），温度消光，熱発光等で表すことができる。本研究ではこれらを測定しシンチレックスの特性を評価した。特に下記の温度依存性，熱発光について系統的な測定がおこなわれたのは初めてと思われる。

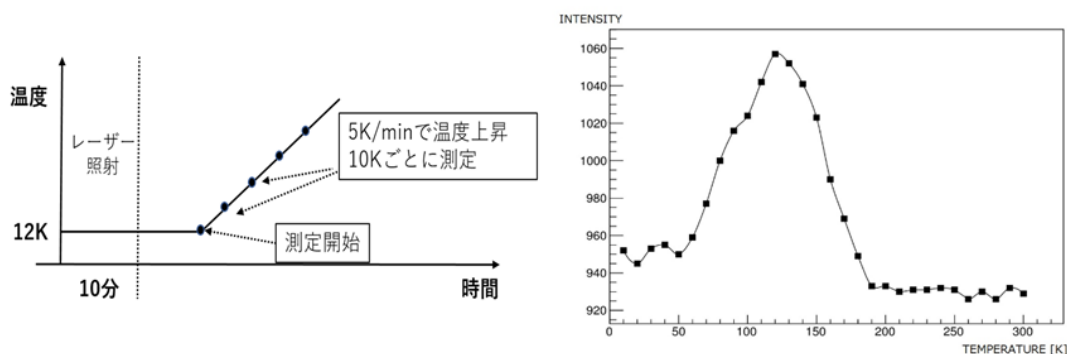


上図はシンチレックスの発光の温度依存性を示したものである。（12K, 50K, 100K, 150K,

200K, 250K, 300K) 300K での発光量は、ピーク温度 (50K) での発光量から 46.4%減少している。これはシンチレックスの温度消光 (温度が上がると熱振動が増大し励起状態から基底状態への無輻射遷移が増え、その結果として光量は減り減衰ははやくなる。) によるものであることが強く示唆される。なお比較のため Eljen 社製プラスチックシンチレータ EJ-212 についても同じ測定をしたが、このような温度消光を示唆するデータは得られなかった。

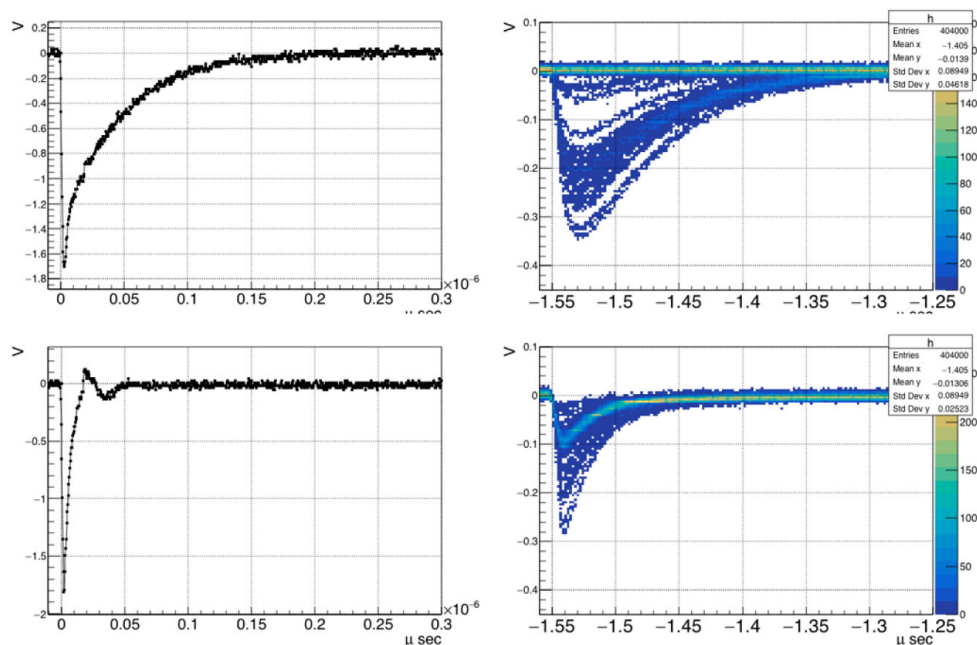
次にシンチレックスの熱発光の有無を実験した。トラップを有する蛍光体では、放射線などによって励起された電子がトラップに捕獲される。捕獲された電子は熱によるエネルギーで伝導体に押し上げられて発光をトリガーし、これを熱発光と呼ぶが、このようなトラップ経由の発光は残光として現れ減衰を遅くする場合があります、一般的にシンチレータとしては好ましくない性質とされる。

試料を 12K まで冷却し、その後レーザーを 10 分間照射することによって試料を刺激し、じゅうぶん励起されることによってトラップが電子 (あるいは正孔で) 満たされるようにする。その後シンチレックスからの発光が消えるのを待ってから、一定の温度上昇率 (5K/min) で試料を加熱し 12K~300K での熱発光を測定した。下図に実験結果を示す。横軸は温度、縦軸は最大発光波長におけるピーク強度である。測定範囲全体にわたって熱発光が観測され、シンチレックスにトラップが存在することが強く推測される結果となった。



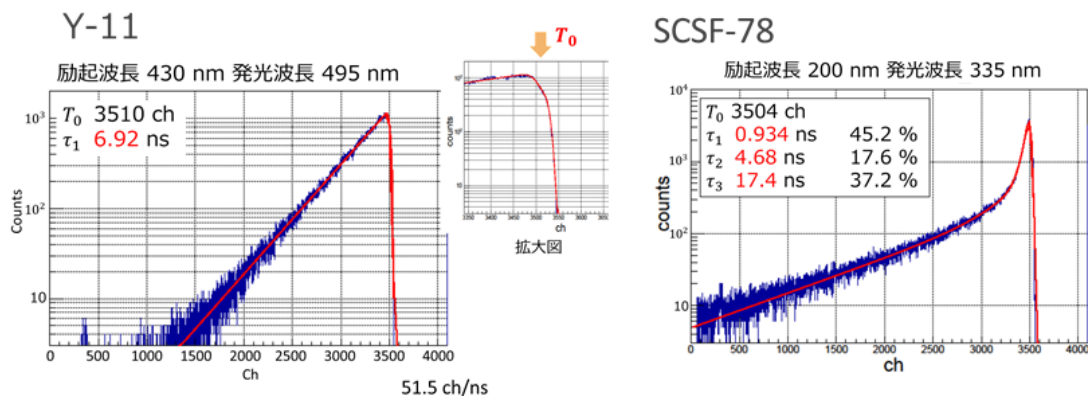
(3) 新世代 MPPC の可能性の追求

K 中間子稀崩壊実験においては、測定器のすべては真空容器の中に収納しなければならないので、検出器からの一次情報を処理するデバイスは省スペースでなければならない。また STEP 2 ではバレル部の検出器にも現行より詳細な γ 線位置検出性能を持たせたいので、多 CH 化は必至である。今回、優れた時間分解能特性のみならず、読み出し回路系の設計を工夫することにより、高計数率下においても信号特性に優れて安定に動作させることが可能であることが示された。これにより γ 線検出部や集光系の種類に依らず、省スペース、多 CH 化、経済性という点で、新世代 MPPC は光電子増倍管以上の汎用性を有することを示すことができた。(下図は MPPC の時間応答波形。左列がピコ秒レーザー、右列が陽電子ビームに対するもの。読み出し回路を工夫することによって「上→下」と、より高計数率に対応させることができる。)



(4) UVSOR 放射光を利用したシンチレーター類の性能評価方法の確立

自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設の UVSOR 放射光を利用して、プラスチックシンチレーションファイバー及び波長変換ファイバーの性能評価をおこなった。シングルバンチ運転下の UVSOR BL3B ビームライン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クラレ社から提供された試料の蛍光寿命を決定した。測定試料は既発品 Y-11(300), Y-8(100), B-3(300), O-2(100), R-3(100), SCSF-78J 及びポリスチレン母材。加えて分光蛍光光度計 (ランプ光源照射) により、それぞれの試料の吸光・発光スペクトルも測定し、発光特性についての補足データを収集した。



上図は WLS ファイバー Y11 及びシンチレーションファイバー SCSF-78 の測定結果である。これらをはじめとしてすべての試料について、 $< 1\text{ ns}$ の速い発光も含めて蛍光寿命とその成分比を決定することができた。将来計画の R&D においては、真空紫外光による測定、低温や高温下での測定、放射線照射による劣化材料の測定なども求められるが、本研究でシンチレーター材料の時間特性の性能評価の手法を確立することができたといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 5 件)

- ① T. Ishikawa, Q. He, H. Shimizu, Y. Tajima, H.Y. Yoshida 他 (計 37 名, 37 番目), Non-strange dibaryons studied in the $\gamma d \rightarrow \pi^0 \pi^0 d$ reaction, Physics Letters B, 査読有, vol. 789, 2019, pp. 413-418.
DOI: 10.1016/j.physletb.2018.12.050
- ② J.K. Ahn, T. Komatsubara, G.Y. Lim, Y. Tajima, T. Yamanaka, H.Y. Yoshida 他 (計 69 名, 69 番目), Search for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ and $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$ Decays at the J-PARC KOTO Experiment, Physical Review Letters, 査読有, vol. 122, 2019, pp. 021802-1-6.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.021802
- ③ M. Sasaki, T. Ishikawa, Y. Tajima, H.Y. Yoshida 他 (計 10 名, 10 番目), Development of a new photon tagging system for GeV- γ beam line, 2017 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 査読無, 2018, pp. 018264479-1-4.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8532685>
- ④ T. Ishikawa, H. Shimizu, Y. Tajima, H.Y. Yoshida 他 (計 36 名, 36 番目), First measurement of coherent double neutral-pion photoproduction on the deuteron at incident energies below 0.9 GeV, Physics Letters B, 査読有, vol. 772, 2017, pp. 398-402.
DOI: 10.1016/j.physletb.2017.04.010
- ⑤ J.K. Ahn, H. Nanjo, Y. Tajima, T. Yamanaka, H.Y. Yoshida (計 91 名, 90 番目), A new search for the $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ and $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$ decays, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有, vol. 021C01, 2017, pp. 1-11.
DOI: 10.1093/ptep/ptx001

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① 及川 裕暉, UVSOR 紫外光を用いたシンチレーションファイバー及び波長変換ファイバーの蛍光寿命測定, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年.
- ② 岩佐 美和, GeV- γ ビームラインにおける新光子標識化装置の開発 IX, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年.
- ③ 佐々木 未来, GeV- γ ビームラインにおける新光子標識化装置の開発 VIII, 日本物理学会第 72 回年次大会, 2017 年.
- ④ 佐々木 未来, GeV- γ ビームラインにおける新光子標識化装置の開発 VII, 日本物理学会

2016 年秋季大会, 2016 年.

[その他]

修士論文・卒業論文等

- ① 岩佐 美和, 新世代 MPPC を用いた標識光子トリガー検出器の開発, 山形大学大学院理工学研究科修士論文, 2018 年 3 月.
- ② 関 悠登, 新素材シンチレータを用いたサンドイッチカロリメーターの開発, 山形大学大学院理工学研究科修士論文, 2017 年 3 月.
- ③ 杉原 悠太, シンチレータの蛍光測定, 山形大学理学部卒業論文, 2017 年 3 月.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

- ① 研究協力者氏名: 田島 靖久
ローマ字氏名: (TAJIMA, Yasuhisa)
所属研究機関名: 山形大学
部局名: 学士課程基盤教育機構教育企画部
職名: 准教授
研究者番号: 51311577
- ② 研究協力者氏名: 佐々木 未来
ローマ字氏名: (SASAKI, Miki)
- ③ 研究協力者氏名: 関 悠登
ローマ字氏名: (SEKI, Yuuto)
- ④ 研究協力者氏名: 岩佐 美和
ローマ字氏名: (IWASA, Miwa)
- ⑤ 研究協力者氏名: 及川 裕暉
ローマ字氏名: (OIKAWA, Hiroki)
- ⑥ 研究協力者氏名: 杉原 悠太
ローマ字氏名: (SUGIHARA, Yuuta)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。