

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 6 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H02192

研究課題名(和文) 導電性薄膜ストローで実現する真空中で動作可能な超低物質質量飛跡検出器の開発

研究課題名(英文) Development of extremely low-material particle tracker enabled by a conductive polymer straw

研究代表者

西口 創 (Nishiguchi, Hajime)

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・准教授

研究者番号：10534810

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、素粒子標準理論を超える新しい物理により予言される、テラ電子ボルトより高いエネルギーでの現象を検知する検出器の開発を目指した。メガ電子ボルト領域での既知の素粒子反応における異常現象を検知することで、量子効果を介して間接的に調べる実験を計画しており、そのための軽量化飛跡検出器を開発した。低いエネルギーでの反応は、検出器の構成物質によりクーロン多重散乱されてしまい、入射粒子の位置検出精度が制限されてしまう。本研究では導電性薄膜を超音波溶着技術で成形した軽量化比例計数管を作成し、これを真空中で動作させることで実現した。これにより、ミューオンによる新物理探索実験の検出器開発が完了した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した素粒子飛跡検出器は、真空中で動作可能な導電性薄膜比例計数管で、現在世界で最も軽い飛跡検出器である。低いエネルギーでの素粒子反応を精密に検知するには、粒子の飛跡が検出器の構成物質で散乱してしまう影響を抑制することが肝要であり、本研究の成果はその低物質質量化の世界記録を達成したことに相当する。この飛跡検出器は、今後ミュー粒子崩壊の精密測定実験で用い、素粒子物理の新展開を目指す計画である。

研究成果の概要(英文)：In this research program, we aimed to develop the detector which can explore the phenomenon in the new elementary particle standard model caused by higher energy than tera-electron-volt. This can be realized investigating the known particle's phenomenon precisely. However, known phenomenon at mega-electron-volt must be investigated carefully with a low material detector because the particle trajectory can be disrupted easily due to the multiple coulomb scattering. In this research program, extremely thin-wall straw, which is operational in vacuum, was enabled by ultra-sonic welding technique. This thin-wall straw was equipped as a tracking detector, and the detection performances were confirmed with 105 MeV electron beam in the vacuum environment. By this result, the detector R&D for COMET Phase-I was completed. And a new straw, 12 micron-thick and 5mm rad., was also enabled by new technique. Four more straw stations would be constructed to perform the COMET Phase-II experiment.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ミューオン 素粒子実験 放射線検出器 ガス増幅型検出器

1. 研究開始当初の背景

欧州合同原子核研究機構(CERN)のLHC加速器にてヒッグス粒子が発見されたが、ヒッグス粒子以外に新しい物理の手がかりは得られておらず、このような状況下で素粒子標準理論を越える物理のヒントを得る観点から、精密実験の重要性が再認識されてきている。数多ある新しい物理モデルを実験データに基づいて検討するには、LHCの結果と、それとは別の切り口から得られるより高いエネルギー(テラ電子ボルト = TeV)での物理の知見を組合わせて、複合的見地から議論することが必須である。そこで注目されているのが、TeVスケール物理に優れた感度を持つ「**荷電レプトンフレーバ非保存事象探索実験**」[参考文献1]である。特に μ 粒子(ミュオン)での探索は、膨大なミュオンを生成可能である事から優れた感度での実験が可能で、物理上相補的な2つの探索モード“ $\mu \rightarrow e\gamma$ ”と“ $\mu N \rightarrow eN$ ”(原子内でのミュオン=電子転換過程)がある。長らく実現が待たれていた $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索・MEG実験[参考文献2]がスイスPSI研究所にて進行中であり、LHC・MEG 両実験が結果を出している今、この最高の時期を逸する事なく、残されたもう一つのモード「 **μ -e転換探索**」を優れた感度で実現することが素粒子物理学理論・実験双方から強く期待されている。

そこで、我が国が誇る大強度陽子加速器施設(J-PARC・茨城県東海村)で生成可能な膨大な量のミュオンを用いた、新しい μ -e転換過程探索実験(COMET)が計画されている。この実験では、 μ -e転換現象の信号である電子のエネルギーが低いため、検出器の物質量をいかに低減出来るか、が実験成功の鍵を握る。入射粒子のエネルギーが低いと、検出器の構成物質でクーロン多重散乱されてしまい、入射粒子の位置検出精度が制限されてしまうからである。

[参考文献1] 三原智,「荷電レプトンで探る新物理」日本物理学会誌 70 (2015) p740

[参考文献2] 森俊則,「ミュオン粒子の崩壊から素粒子の大統一理論に挑む MEG 実験」日本物理学会誌 64 (2009) p674

2. 研究の目的

本研究は、 μ -e転換現象をかつてない高感度で探索しその発見を目指すCOMET実験のための検出器開発を目指す。膨大な通常事象(ミュオン通常崩壊)の中から、非常に稀な頻度(素粒子標準理論を超える新物理候補の多くは、およそ1京分の1~10兆分の1程度と予想している)で発生する信号事象を精度良く検出するため、**検出器自体を薄膜で製作しこれを真空中で運用する**、というかつてない軽量化を目指すことにした。そのための準備研究として、本研究代表者の西口は若手研究(A)(2013-2015)「ミュオン粒子電子転換過程探索実験のための真空中で動作可能な飛跡検出器の開発研究」にて、独自開発した超音波溶着技術を用いて20ミクロンという極薄の導電性薄膜(PETフィルムにアルミを蒸着)を真空中で動作可能な比例計数管として開発することに成功した。本研究では、これを大型検出器用に多数実装することで、素粒子飛跡検出器として実現することを目指す。特に、

- ・研究項目A) 準備研究で実現した20ミクロンストローによる大型飛跡検出器開発
- ・研究項目B) 将来実験に向け、更に薄く細いストロー(12ミクロン厚・5mm径)の開発

の2つを研究目的とする。

研究項目Aにより、COMET実験・第1期(Phase-I)用の飛跡検出器の開発研究が完了する。また研究項目Bは、第2期実験(Phase-II)のための要素開発の端緒となることを目指す。

3. 研究の方法

研究項目Aのために、まず検出器実装手法を最適化する。20ミクロン薄膜は非常に薄いため、検出器として実装した際にストロー自身の自重により撓んでしまう。また、ストロー外部を真空排気することで生じる1気圧の圧力差によりストローは膨張する。これらによるストローの変形は、印加電場の形状を歪めガス増幅型検出器としての動作精度を制限してしまう。これを抑制するため、ストローには適切な張力(1mのストローに対して1.2kg重)を印加する必要がある。そのため、まずストロー端部を封止するためのプラグを開発し、このプラグを引張りつつ圧力容器に固着させ張力を保持することにする。また、このプラグは電流導入端子としての役割も果たすよう設計し、ストロー内部に設置するワイヤにガス増幅させるための高電圧(2,000V)を印加する機能を持たせる。以上のプラグ開発と並行して、導電性薄膜ストローを多数(480本)実装し、張力を保持し、高電圧を印加し、信号読出用電子回路を接続し、真空中で動作させるべく制御可能な検出器筐体(圧力容器)を開発する。この圧力容器に、上記で開発するプラグを固着したストローを多数実装し、大型飛跡検出器として実現することまでを研究項目Aとする。大型飛跡検出器の性能評価については、実機を用いた最終評価に先駆けて、実機寸試作機(実機と同じ大きさだが、実装ストロー数を制限した、最終性能実証用試作機)を用いた性能評価を実施する。これは、東北大学電子光物理学研究センターにて検出器試作機への電子ビーム照射試験を実施し、 μ -e転換現象で期待される105MeVと同じエネルギーの電子ビームに対する検出性能~特に位

置分解能と検出効率～を評価する。

一方、研究項目Bのため、新しい超音波溶着機を導入し、より物質量を抑制した新たな導電性薄膜ストローの製作を試みる。検出器としての物質量をさらに低減するため、ストローの膜厚を薄くし直径を小さくすることを目指す。これに伴い、ストロー断面の真円度が悪化する。特に、超音波溶着するためには貼り合わせる部分（シーム）がある程度必要で、「シームを如何に細く出来るか」が実現成否の鍵を握る。しかし、シームを細くすればそれだけ気密性が犠牲になるため、真空中で動作可能な程度に気密を保ち、かつ比例計数管としての動作に支障を来さない程度に真円度を保つような、シームと超音波溶着設定の最適化が必要になる。本研究の研究項目Bでは、新型ストローの製作実現までを目指す。

4. 研究成果

【研究項目A】

まず、導電性薄膜ストローの両端を封止して活性ガスを導入し、ストローに適性な張力を印加してそれを保持し、同時に電流導入端子としての役割を果たすプラグを開発した。これは1つの構造体では実現出来ないため、図1に示すような3つの部品でこれを実現した。部品1(図1・左)はストローに固着し端部を固定、部品2(図1・中央)は部品1の内部の雌ネジに嵌合する雄ネジ形状の部品で、ネジを巻き上げることでストロー端部を引張してストローへ印加する張力を制御、部品3(図1右)は部品2中央に開けた孔にワイヤを通した上で封止する電流導入端子である。この機構により、各々のストローに適切な張力を印加した上で、内部に活性ガスを導入し、ストロー内部のワイヤに高電圧を印加してガス増幅型検出器として動作可能な検出器として実現した。張力印加によるストロー歪みの抑制は、表面の変異を静電容量計測型近接センサにより1ミクロンの精度で測定し、検知不能な程度以下の歪みに抑制されていることを確認した。また、この検出器を真空中で動作させるため、検出器の外部を真空排気し、リーク速度・脱ガス量及び到達真空度の測定を実施し、 μ -e転換現象で期待される105MeV電子に対する運動量分解能要求を達成可能な真空度(1Pa以下)が実現可能であることを確認した。



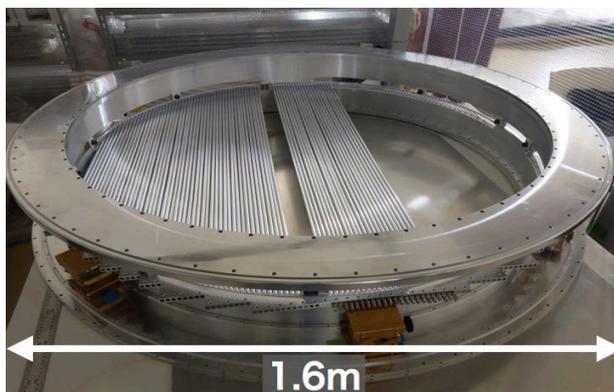
【図1】導電性薄膜ストローを飛跡検出器として実装するために開発したプラグ部品

本研究で開発する飛跡検出器は真空中で動作させる必要があるが、ワイヤから読出すアナログ信号を真空電流導入端子を介して大気中へ取り出してから信号増幅しては、信号/雑音比が悪く、精度の良い位置検出は出来ない。そこで、真空槽内に電子回路を設置してワイヤから読出した直後に信号増幅→デジタル化し、デジタル信号を光ファイバーを介して減衰なしで転送することを目指した。その結果、高エネルギー加速器研究機構において検出器読出し回路として開発された前段増幅回路(ASD)と、スイス・ポールシェラー研究所にて開発されたアナログ波形デジタル変換回路(DRS4)とを組合せた独自開発回路「ROESTI」を実現した。当該回路は真空中での動作が可能であるが、真空中での回路の放熱を別途促進する必要がある。そこで、ガス増幅型検出器として導入される活性ガスを各ストローへ等圧分配するための多岐管(マニフォールド)内にROESTIを設置し、ストローへ供給する活性ガスによって放熱することを企図した。しかし、ガスの小さな熱容量のため、十分な放熱を達成することは出来なかった。そのため追加措置として、供給する活性ガスを圧縮して風量上げ、同時にガスを冷却して供給することで要求を満たす冷却能を実現することを目指した。その結果、1.2気圧に加圧し、かつマイナス20度まで冷却したAr/CH混合ガス(混合比1:1)を導入することで、ROESTIを安定動作させられる温度に保持し、同時に検出器の動作温度をほぼ室温に保持することに成功した。

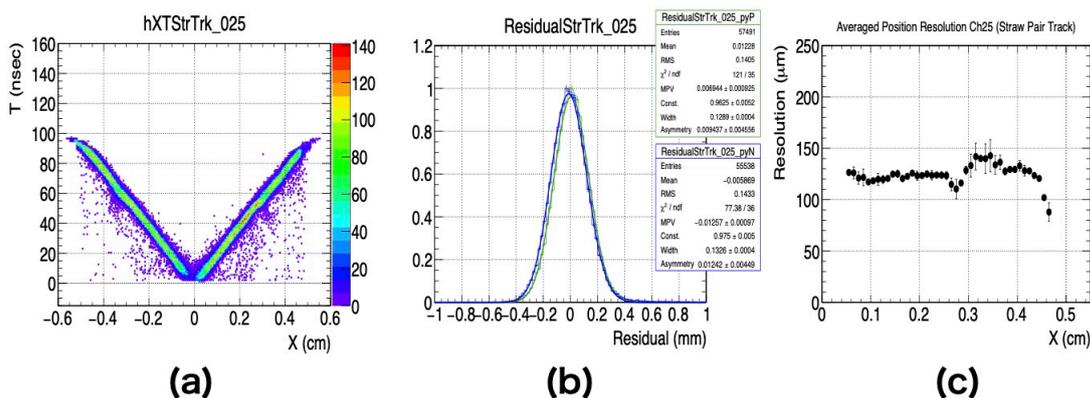
以上の予備開発を実現した上で、検出器実機の開発に取り掛かった。図2は、実現した実機(ストロー480本)の製作途上の写真である。ストローの張力を保持しつつ、真空内での圧力差に対して保持可能な圧力容器として、また磁場中で動作させるためにアルミでこれを製作した。この飛跡検出器を5台製作してソレノイド磁場中に設置することで、COMET実験・Phase-IIにおける飛跡検出器が完成する。本研究で製作した大型飛跡検出器は、その5台のうちの初号機となる。

以上で検出器実機の開発研究は結実したが、その性能が実験の要求を満たす必要がある。特に、信号電子のエネルギーを同定するための運動量分解能は、105MeV/c電子に対して200keV/cを切る必要があり、想定している1Tのソレノイド磁場中での飛跡検出性能を実現するためには、

200ミクロンより優れた固有位置分解能を達成する必要がある（ここで位置分解能は、入射位置測定値の誤差分布を正規分布と仮定したときの標準偏差）。完成したばかりの実機はガス冷却系の実装が済んでいないため、まずは検出器試作機を用いて性能評価を実施した。この検出器試作機は、外寸や実装する導電性薄膜ストロー等は完全に実機と同じであり、実装するストローの本数のみを少なくした（16本×16本の合計32本）、実機寸試作機（フルスケールプロトタイプ）である。この実機寸試作機に、東北大学電子光物理学研究センターにある蓄積リング型電子加速器が生成する105MeV電子ビームを照射して、性能評価を行った。図3は、その結果の一例である。図3(a)は、ストロー内のワイヤで検出した入射電子信号のドリフト時間とドリフト距離の相関（位置＝時間相関 → X-T相関）である。活性ガスで満たされ高電圧を印加されたストロー内に入射した電子はストロー内のガス分子を電離し、そこで発生する電子は高電圧を印加されているワイヤへ向けて掃引（ドリフト）される。ワイヤまでの到達時間（ドリフト時間）は活性ガスと印加電圧により正確に把握することが可能なため、ドリフト時間を計測することで入射位置を正確に知ることが出来、その結果、この検出器により入射粒子の入射位置を精度良く計測することが出来る。図3(a)に示される通り、ドリフト時間とドリフト距離の優れた線形性が示された。ここで得られた入射位置と、実際の入射位置（シンチレーションファイバーを用いた飛跡検出器で同時に入射粒子の位置を計測しておく）との乖離の分布が図3(b)であり、この分布によりこの検出器の固有位置分解能を知ることが出来る。得られた位置分解能は平均して100-150ミクロン程度であり、十分に要求を満たすことが示された。また、この位置分解能を、ドリフト距離に対して調べた相関が図3(c)である。その相関はあまり強くないことが示され、従来のドリフトチェンバー検出器のようなワイヤ近傍での電離数の不定性や、ガス拡散による到達電子のドリフト時間測定不定性は比較的小さいということがわかった。これは、ワイヤのみで電場整形するドリフトチェンバー等のガス増幅型検出器と異なり、ストローという真円度の高い電場構成のため、入射位置による電離数の不定性が小さいことや、ドリフト距離が短いことでガス拡散の影響が抑制されていることに起因していると考えている。以上により、COMET実験・Phase-Iに向け、実験の要請を十分に満たす飛跡検出器開発を実現することに成功した。



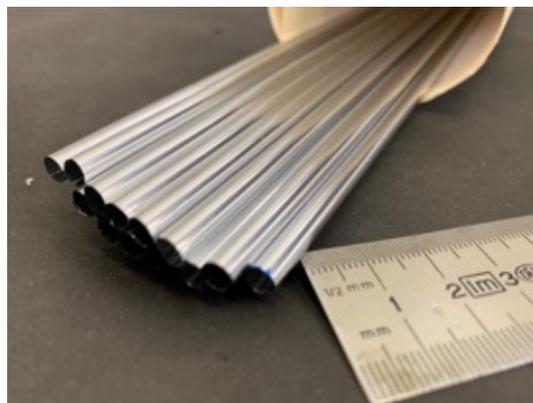
【図 2】開発した導電性薄膜ストローを多数実装する大型飛跡検出器製作の様子



【図 3】飛跡検出器実機寸試作機への105MeV電子ビーム照射試験による性能評価:(a)ドリフト時間とドリフト距離の相関(X-T相関)、(b)固有位置分解能、(c)位置分解能のドリフト距離依存性

一方、探索感度をさらに100倍向上させるCOMET実験・Phase-IIに向けては、さらに薄く、さらに細い、究極の薄膜ストロー飛跡検出器を実現する必要がある。そこで、新しい超音波溶着機を導入しさらに溶着の最適化を図ることで、これを実現することを目指した。ストローのシーム部の幅を可能な限り狭くし、これをストローの気密を犠牲にすることなく実現するため、高出力の超音波ヘッドを用いて短時間で溶着実現するような最適化を行った。その結果、「12ミクロン厚・5mm径」という現在世界で最も薄くて細い比例計数管用導電性薄膜ストローを実現することに成功した(図4)。現在、世界中の素粒子物理実験で、同様の真空中で動作可能な薄膜ストロー飛跡検出器は数多く運用され、また新型ストローが開発途上にあるが(例:CERNで実施中のK中間子稀崩壊分岐比精密測定実験 NA62(36ミクロン厚・10mm径)、米Fermi研究所で実施中のミ

ユーオンg-2/EDM実験(15ミクロン厚・5mm径)、同じく米Fermi研究所で実施が計画されている μ -e転換現象探索実験Mu2e(15ミクロン厚・5mm径)等)、それらの中でも抜きん出て軽量化されたストローを実現することに成功した。ただしこのストローは試作段階であり、その力学的な基礎特性、飛跡検出器として実装するための部品や実装手法の開発という課題がある。これらの課題解決のため、本研究を基課題とした国際共同研究をCERNと共同で開始した(科研費・国際共同研究加速・2017-2019・「真空中で動作可能な軽量化比例計数管の素粒子飛跡検出器への実装研究」)。現在、この新しい究極の軽量化ストローを真空中で動作可能な飛跡検出器として実現すべく、上記の基礎特性試験及び実装手法の開発を進めている。



【図 4】試作に成功した、より薄くより細い導電性薄膜ストロー(12 ミクロン厚・5mm 径)

以上、本研究で目指した

- ・研究項目A) 準備研究で実現した20ミクロンストローによる大型飛跡検出器開発
- ・研究項目B) 将来実験に向け、更に薄く細いストロー (12ミクロン厚・5mm径) の開発

の2つの研究項目を当初計画通りに達成した。

上記の2つの研究項目は其々、

- ・COMET実験 Phase-I における飛跡検出器の開発研究を完了
- ・COEMT実験 Phase-II における飛跡検出器のための軽量化ストローを実現

したことに相当する。

今後は、本研究で開発したPhase-I用飛跡検出器をさらに4機製作して、飛跡検出器とソレノイド磁場と組み合わせて、真空中で動作可能な分光器(スペクトロメーター)としてCOMET実験・Phase-Iの検出器準備を整えることを目指す。また同時に、本研究で実現した12ミクロンストローを飛跡検出器として実装し、真空中で動作させた際に実験要求を満たす性能を実現することを目指す。

本研究で実現した軽量化飛跡検出器は、極めて低物質質量であり、且つ真空中で動作可能である。これは、比較的低いエネルギーでの素粒子・原子核反応を調べるような、 μ -e転換探索に限らない多くの実験に対して共通に応用可能な検出器であり、更に真空中で動作可能であるため、加速器内や宇宙空間での精密測定にも応用可能である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hajime Nishiguchi, et.al.	4. 巻 958
2. 論文標題 Construction on vacuum-compatible straw tracker for COMET Phase-I	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A	6. 最初と最後の頁 162800
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2019.16280	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 K. Uenoa, E. Hamada, S. Hashimoto, M. Ikenoa, S. Mihara, H. Nishiguchi, T. Uchida, H. Yamaguchi	4. 巻 936
2. 論文標題 Design and performance evaluation of front-end electronics for COMET straw tracker	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A	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 Hajime Nishiguchi, et.al.	4. 巻 845
2. 論文標題 Development of an extremely thin-wall straw tracker operational in vacuum - The COMET straw tracker system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A	6. 最初と最後の頁 269-279
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2016.06.082	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 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hajime Nishiguchi
2. 発表標題 Construction of Vacuum-compatible Straw Tracker for COMET Phase-I
3. 学会等名 The 15th Vienna Conference on Instrumentation (国際学会)
4. 発表年 2019年

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

1. 発表者名 大石航
2. 発表標題 COMET実験のための飛跡検出器・電磁カロリメータ試作機の電子ビームを用いた性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石航
2. 発表標題 COMET実験のためのストロー飛跡検出器および電磁カロリメータの開発
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Tzverava, G. Adamovi, A. Moiseenko, H. Nishiguchi, B. Sabirov, Z. Tsamalaidze
2. 発表標題 Development of ultrathin 12 um-thick straw tubes for the tracking detector of COMET experiment
3. 学会等名 2019 IEEE Nuclear Science Symposium & Medical Imaging Conference (国際学会)
4. 発表年 2019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
連携研究者	三原 智 (MIHARA Satoshi) (80292837)	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・教授 (82118)	
連携研究者	東城 順治 (TOJO Junji) (70360592)	九州大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授 (17102)	
連携研究者	笠見 勝祐 (KASAMI Katsuyu) (50391727)	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・主任技師 (82118)	