

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号 : 14401
研究種目 : 特別推進研究
研究期間 : 2013~2017
課題番号 : 25000004
研究課題名 (和文) 最高強度ミュオンビームによるミュオン・レプトンフレーバー非保存探索の新展開
研究課題名 (英文) Search for Muon Lepton Flavour Violation with High Intensity Muon Beam
研究代表者
久野 良孝 (KUNO, Yoshitaka)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号 : 30170020
交付決定額 (研究期間全体) (直接経費) : 449,900,000 円

研究成果の概要 (和文) :

本研究の目的は、大強度陽子加速器施設 J-PARC において、ニュートリノを伴わずにミュオンが電子に転換する $\mu \rightarrow e$ 転換過程を従来の上限値の 100 倍以上の実験精度 (3×10^{-15}) で探索することである。 $\mu \rightarrow e$ 転換過程は、素粒子物理学の標準理論における荷電レプトンフレーバー保存則を破る過程であり、新しい物理現象を発見する最善の過程のひとつであると考えられている。この研究は、J-PARC E21 として採択されている COMET 実験の一環として、特にその第 1 段階に相当する COMET Phase-I 実験として、5 年間で推進される。

研究成果の概要 (英文) :

The proposed research project is to search for a process of charged lepton flavor violation (CLFV) of muon to electron ($\mu \rightarrow e$) conversion by the first phase of the J-PARC E21 COMET experiment (COMET Phase-I), with an improved experimental sensitivity by more than hundreds over the previous experimental limit. It has been experimentally confirmed that quarks and neutrino are transformed one another. However, only CLFV has been yet to be observed, and a discovery of CLFV is considered to be one of the most important subjects, which potentially leads a search to discover new physics beyond the Standard Model in particle physics.

研究分野 : 高エネルギー物理学、素粒子物理学実験

キーワード : ミュオン、稀過程、 $\mu \rightarrow e$ 転換過程、荷電レプトンフレーバー

1. 研究開始当初の背景

(1)素粒子物理学の標準理論は、それ自身で決定できないパラメータを数多く内包しており、完全な理論ではないと考えられている。究極理論の手がかりを得る事が素粒子物理学の最重要課題である。

2012年、欧州CERN研究所でのLHC加速器により(標準理論で予測された)ヒッグス粒子が発見された。それにより、素粒子物理学が再び活況を呈している。しかし、LHCにおいて、標準理論の枠組み以外の新粒子は未だ発見されていない。この現状を踏まえ、新粒子のヒントを得るために稀崩壊探索がより注目を浴びるようになった。このような新物理探索においては、標準理論では起こらないような稀崩壊を探るのが最善であると考えられている。ミュオン・レプトンフレーバー非保存過程はそのような稀過程のひとつである。

(2)ミュオン・レプトンフレーバー非保存の探索は何故重要でその意義は何であろうか？ミュオン・レプトンフレーバー非保存過程の研究は、素粒子物理学において以下のように位置づけられている。ある種のクォークが別種のクォークに変換すること(クォーク転換)の研究は小林・益川両教授によってなされ、2008年にノーベル物理学賞を受賞された。これは、クォークフレーバー非保存過程である。また、2015年には、梶田隆章教授とArt MacDonal教授が、それぞれスーパーカミオカンデとSNO実験でニュートリノ振動現象を発見した。これから、ニュートリノには質量があり、ニュートリノが異種のニュートリノに変わる過程(ニュートリノ転換過程)を実験的に確立した。しかし、最後に残っている荷電レプトン間の転換はまだ未発見である。たとえば、ニュートリノを伴わずにミュオンが電子に転換する過程($\mu \rightarrow e$ 転換過程)を検出すれば、ノーベル物理学賞級クラスの発見となる可能性がある

2. 研究の目的

(1)本研究の目的は、ミュオン・レプトンフレーバー非保存則を破る $\mu \rightarrow e$ 転換過程($\mu^- N \rightarrow e^- N$)を、東海村にある大強度陽子加速器施設J-PARCにおいて、従来の実験上限値を大きく上回る実験精度で探索することである。これにより、標準理論を超える新しい物理現象を発見することである。特に、後述するCOMET Phase-I実験を推進する。

(2)ミュオン・レプトンフレーバー非保存過程は非常に稀な過程であることが知られている。稀崩壊探索の研究では、量子補正による効果を用いて未発見の新粒子の存在を研究する。この効果は非常に小さいことが予想されているので、(前述のように)標準理論では起こらない過程を研究対象にするのが最善である。その過程の一つが、荷電レプトンのレプトン・フレーバー非保存過程であり、特にミ

ューオンの場合をミュオン・レプトンフレーバー非保存過程という。たとえば、ミュオンが電子に変わるような $\mu \rightarrow e$ 転換過程がある。

(3)この研究は、J-PARCのE21実験として、J-PARCの陽子ビームを用いて行われる。この実験は、COMET (Coherent Muon to Electron Transformation)とも呼ばれる。COMET実験は、平成21年度に、J-PARC実験審査委員会(J-PARC PAC)において、Stage-1の採択を受けた。

現在の $\mu \rightarrow e$ 転換過程の分岐比の実験上限値は、 $B(\mu^+ Au \rightarrow e^+ Au) \leq 7 \times 10^{-13}$ (90% C.L.) であり、COMET 実験では、その上限値を約10,000倍向上し、分岐比 3×10^{-17} の1事象発見実験精度での探索を目標とする。

(4)COMET実験は、詳細を後述するように、二段階で推進することになった。その第1段階に相当するCOMET Phase-I実験では、100倍の実験精度の向上を目標とする。

平成24年に高エネルギー加速器研究機構

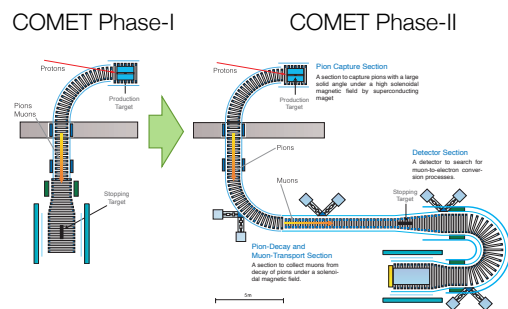


図1: COMET Phase-I と Phase-II 実験のレイアウト

(KEK)の素粒子原子核研究所(素核研)は、J-PARCのハドロンホールに新しいビームラインを建設する中期計画を決定した。この中期計画では、高運動量陽子ビーム実験およびCOMET実験に使用する新しい一次陽子ビームライン(Bライン)と、COMET用高強度ミュオンビームラインの最初の90度湾曲部までを平成25年度から建設することを決定した。この中期計画に対応して、我々COMET実験グループは平成25年度から5年間でCOMET実験の第1段階(COMET Phase-I)を進める計画を立案した。図1に、COMET Phase-I とCOMET Phase-II のレイアウトを示す。COMET Phase-Iの重要な目標は、従来の100倍以上の実験精度で、 $\mu \rightarrow e$ 転換過程探索を早期に開始することと、最終段階であるCOMET Phase-IIで重要となるミュオンビーム中の背景事象の源について調べることである。この提案は、文部科学省の大強度陽子加速器施設評価作業部会においても高い評価で承認されている。また平成25年度のKEK将来ロードマップにも、最優先課題の一つとして明記された。KEKはCOMET Phase-IIに必要な施設設備を建設するが、COMET Phase-I用の実験測定器については実験グループで準備することになった。

3. 研究の方法

(1) $\mu \rightarrow e$ 転換過程の測定原理と背景事象について述べる。まず、低エネルギーの負電荷ミュオンを標的物質に静止させると、ミュオン原子が生成される。ミュオン原子の基底状態にあるミュオンが $\mu^- N \rightarrow e^- N$ 反応を起こすと、 $E_{\mu e} = m_{\mu} - B_{\mu}$ の運動エネルギーを持つ電子が放出される。ここで、 m_{μ} および B_{μ} はミュオンの質量およびミュオン原子の束縛エネルギーである。COMET Phase-I 実験で使うアルミニウム標的では、 $E_{\mu e} = 104.9 \text{ MeV}$ である。この電子の運動エネルギーを測定することによって、 $\mu \rightarrow e$ 転換過程事象を同定する。

背景事象としては、ミュオン起源とビーム起源のものがある。前者の例は、束縛状態のミュオン崩壊からの電子で、稀に原子核の反跳で 100 MeV 領域に加速され、背景事象となる。後者の例は、ビーム中のパイオンが標的に静止して、輻射パイオン原子核捕獲からの光子が対生成反応をして電子を放出する場合である。または、飛行中のミュオンが崩壊して高いエネルギーの電子を放出する場合などもある。前者の背景事象を抑制するためには、高い運動量分解能をもつ電子飛跡検出器が必要である。後者を抑制するために、パルス状時間構造をもつ陽子ビームを用いて、陽子ビームパルス間で測定する。この際、パルス間の陽子の漏れを 10^{-10} 程度に非常に少なくすることが要求される。

(2) COMET Phase-I 実験の要となる主要測定器は、円筒ドリフトチャンバー (cylindrical drift chamber, 以下 CDC) である。CDC は、ミュオン静止標的を取り囲み、発生した $\mu \rightarrow e$ 転換過程からの電子を大立体角で検出する。ミュオン静止標的の材質としては、ミュオン原子の寿命が長いアルミニウム (Al) を使う。CDC の長さは 1.5 m で、内半径が 540 mm で、外半径が 840 mm である。電子の横方向運動量は約 $80 \text{ MeV}/c$ 以上でないと CDC に到達しないので、普通のミュオン崩壊からの電子 (約 $53 \text{ MeV}/c$ 以下) は CDC に到達せず、背景事象を大きく削減することができる。CDC の設計は、イタリアの KLOE 実験の CDC や KEK の BELLE-II 実験の CDC などを参考しながら、その仕様を決定した。CDC は、約 1.0 T の磁場を発生する超伝導検出器ソレノイド磁石の中心に置かれる。検出器ソレノイド磁石は鉄ヨークを備えており、宇宙線背景事象の減少にも貢献する。また、静止したミュオン総量をモニターするために、ゲルマニウム検出器を CDC の横に置き、Al のミュオン原子からの原子 X 線を測定する。

4. 研究成果

(1) 初年度は、円筒型ドリフトチャンバー (CDC) の設計を行った。まず、 $\mu \rightarrow e$ 転換過程のシグナル電子の測定感度 (アクセプタンス) の向上と背景事象の除去という二つの観点から、CDC の基本設計をおこなった。特に、CDC でのシグナル電子の実験感度を精密なシミュ

レーション計算を用いて評価した。その結果、たとえば、CDC のワイヤーをすべてステレオワイヤー層にすることにより感度を大幅に向上できることがわかった。これは、シグナル電子が CDC 内に閉じ込められたらせん軌道を描くため、すべてステレオワイヤー層にすることにより、CDC 軸方向成分の座標情報を多く得ることができ、電子軌道の再構成効率が上がったためである。

このようにして、COMET Phase-I 実験の CDC の設計理念を確立し、その詳細設計を完了した。最終設計として、(a) (上述のように) CDC のワイヤー層構造はすべてステレオ層とした。(b) CDC のセル構造として約 16 mm 幅の大きさとした。(c) CDC の構造体として、 10 mm 厚さのアルミニウムのエンドプレート、 5 mm 厚さの強化プラスチック CFRP の外筒、 0.5 mm の CFRP の内筒を採用した。さらに、異なるエンドプレート形状について、CDC のワイヤーの張力に対しての機械的強度と歪みについて CAD 計算を行い、最適化を図った。(d) エンドプレートに取り付けるフィードスルーを設計した。(e) ミュオン原子核捕獲から発生する陽子を止めるために CDC の内側に置く陽子吸収材の設計をし、CFRP の 0.5 mm 厚の内筒で十分であるとした。(f) 検出器ソレノイドの設計も進め、具体的な磁場計算を行い、その非一様性を含めた磁場マップを使って運動量分解能や、 $\mu \rightarrow e$ 転換過程シグナルのアクセプタンスを調べた。

また、数台の CDC 試作器を作成し、それらの実際の性能評価を行い、設計にフィードバックをかけた。

(2) 上記の設計に基づいて CDC 検出器実機を製作した。まずエンドプレート及び CFRP 外筒を製造した。両端のエンドプレートにそれぞれ約 2 万個のフィードスルー固定用の穴を高精度で開けるため、小型の試作エンドプレートを事前に製作し、三次元測定結果をフィードバックすることで製作精度を向上させた。製造したエンドプレートと CFRP 外筒は、アウトガスが少ない特別なエポキシ接着剤とボルトで連結した。KEK のクリーンルームに運搬し、ワイヤーを張る準備を行なった。また、試作機を用いて長期間の性能について評価し、フィードワイヤーの直径を $\phi 126 \mu\text{m}$ に設計仕様を変更した。

その後、高エネルギー加速器研究機構のクリーンルームにおいて、ワイヤー張り作業を行なった。ワイヤー張り技師の手により、約 160 本/日のペースで作業を進行させた。張ったワイヤーは、我々でその日のうちに張力を測定し、基準を満たさないものは翌日に張り直した。最終的に、121 日間 (実質約 6 ヶ月) の作業で、計 19,548 本のワイヤーを無事に張り終えた。ワイヤー張り完了後は、全ワイヤーの張力を再度測定し、基準を満たさない約 80 本程度のワイヤーについて張り直しを行った。ワイヤー張りの後、CFRP の $500 \mu\text{m}$ 厚の CDC 内

筒を、外筒と端板(エンドプレート) からなる CDC 構造体に組み入れた。また、CDC のガスリーク試験をし、見つかったリーク箇所をシリコンゴムで補修した。フィールドワイヤーに高電圧をかけ、CDC の放電などが無いことを確認した。図 2 にあるように、これで CDC の製作が完了した。

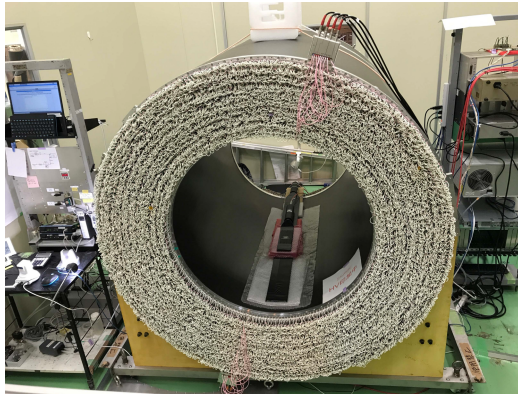


図 2 : 完成した円筒型ドリフトチェンバー (CDC)

(3)平成 28 年 8 月から CDC の運転を開始した。まず、CDC 読み出し回路を設置した。試験中に信号増幅率(ゲイン)が低くなることが時々あった。これは CDC 内の混合ガス (He:イソブタン=85:15) の混合比が変わったためであることが判明した。これを防ぐために、ガス混合比を正確に制御するガス流量のコントロールシステムを構築した。さらに、内筒の厚さは 0.5mm と大変に薄いので、CDC の内圧と大気圧の差圧を正確に制御する必要がある。それで、ガス圧制御システムを導入した。途中 CDC のワイヤー 3 本が断線するなどの問題も起きたが、再度ワイヤーを張り替えることによって解決した。2 万本内の 3 本なので断線率は非常に低い。また、HV 側のケーブル取り付けを終了した。信号読み出し側の電子回路のインストールも完了した。HV のコミッションングも順調に終了した。モニターシステムも構築した。

(4)平成 29 年度から、CDC の性能を、宇宙線ミュオンを使って、評価した。この宇宙線を用いた試験は、KEK の富士実験室にて行った。宇宙線ミュオンの飛跡を解析し、CDC の位置分解能を測定した。CDC の位置分解能は約 200 ミクロン以下であり、要求性能を十分に達成することができた。また、図 3 にあるように、位置分解能のドリフト距離依存性も調べた。高統計のデータを使い、位置分解能に寄与する成分をそれぞれ同定でき、初期イオン数からの寄与や拡散からの寄与などを個別に評価した。また、ワイヤー位置精度と整列度を宇宙ミュオンの直線の飛跡を用いて校正した。これらの結果は設計予想値と一致した。これより、製作した CDC の基本性能は要求条件を満足するものであることが分かった。

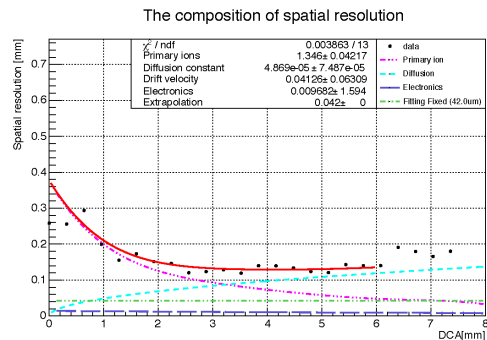


図 3 : CDC の位置分解能の位置依存性

(5)CDC トラッキングソフトウェアを開発した。シミュレーション計算から、実際の実験では、CDC に大量の背景事象事象ヒットがあり、さらにトリガー率が高いことが分かった。これを減少させるために、新たに、深層学習に基づくレベル 1 トリガーシステムを導入した。これはヒットのパターンを見て良い事象と悪い事象を区別するものである。また、最小二乗法に基づくトラッキング・プログラムの開発も行った。多重散乱を補正し電子軌道の運動量を正確に測定する解析プログラム (genfit2) を開発した。さらに、COMET 実験の大量シミュレーションデータをフランスの大型計算機システムを使って生成した。これをベースに CDC の背景事象などを評価した。

また、 μ -e 転換過程のシグナル電子の飛跡再構成 (tracking) のプログラムをより進展させた。特に、シグナル電子は CDC の中に内包されて多数のスパイラルの軌道を残すマルチターン事象がある。この事象については、1 周目の飛跡と 2 周目以降の飛跡がオーバーラップする。これを区別するためのアルゴリズムを深層学習などを用いて、日本と韓国と中国のグループで独立に作成して性能を競っている。

また、トリガーシステムには、FPGA を使ったレベル 1 決定システムを導入した。CDC のヒット情報を Boosted Decision Tree などの機械学習を用いて最適化した。信号ヒットの取得率を 98% で、バックグラウンドヒットを 95% 削除する性能を得た。FPGA でのコーディ

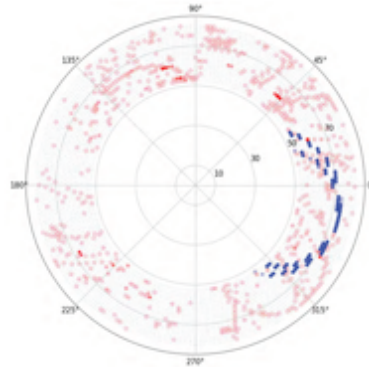


図 4 : 検出器ソレノイドの超伝導コイル

ングも並行して進めている。

(6) 検出器ソレノイドを製作した。まず検出器ソレノイドに必要な詳細設計を行い、また必要となる磁場の一様性などを検討した。この詳細設計に基づき、超伝導線の仕様を決定し、仕様を満たす超伝導線を購入した。購入した超伝導線を使って、製造会社において検出器ソレノイド磁石のコイルを製造した。超伝導線をコイルに巻きつけ、ソレノイド磁石の製造を行なった。各ユニット毎に製造され、最終的には1つの巨大な超伝導ソレノイド磁石に結合され、図5にあるように、コイルは完成している。

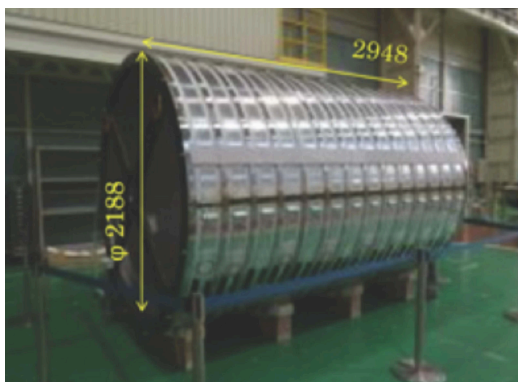


図5：検出器ソレノイドの超伝導コイル

(7) COMET 実験で $\mu \rightarrow e$ 転換過程が発見されたときに、その現象を引き起こす物理モデルを精査する実験方法を理論的に検討した。特に、原子核のスピンがある場合とない場合を比較することにより、新しい知見を得ることができることを示し、これを学術論文としてまとめた。また、COMET 実験の装置を用いて、 $\mu \rightarrow e$ 転換過程を探索する実験提案を検討して論文にまとめた。

(8) COMET Phase-I 実験の技術設計書を作成した。我々実験グループは350ページのCOMET実験技術審査書(technical design report)を製作し、平成28年4月と6月に度、KEK/J-PARCにおいて開催されたCOMET

技術審査委員会に提出した。これが審査され、7月のJ-PARC実験審査委員会において、COMET実験は第2段階実験採択を獲得した。これは実験を始めて良いという許可である。これに基づき、8GeVの陽子ビーム運転、特に



図6：COMET技術設計書

加速の最適化や引き出しの最適化、そしてパルス運転などを開始した。これらの結果は十分に要求性能を満たしていた。

(9) COMET Phase-I 実験は、KEKのミュオンビームラインの建設が遅れて、平成29年度においてまだ完了していない。このように、ミュオンビームが供給されるようになれば、COMET Phase-I 実験をすぐに始められる状況にあるといえる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11件)

① S. Davidson, Y. Kuno, and A. Saporta, “Spin-dependent $\mu \rightarrow e$ conversion on light nuclei” *Euroean Physics Journal*, C78, 109 (2018) 査読有
DOI:10.1140/epjc/s10052-018-5584-8

② Y. Uesaka, Y. Kuno, J. Sato, T. Sato, and M. Yamanaka, “Improved analyses for $\mu \bar{e} \rightarrow e \bar{e}$ in muonic atoms by photonic interactions”, *Phys. Rev. D* 97, 015017 (2018) 査読有
DOI:10.1103/PhysRevD.97.015017

③ B. Yeo, Y. Kuno, M. Lee, K. Zuber, “Future experimental improvement for the search of lepton-number-violating processes in the $e\mu$ sector” *Phys. Rev. D* 96, 75027 (2017) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.96.075027

④ V. Cirigliano, S. Davidson, Y. Kuno, *Phys. Lett. B* 771 242–246 (2017) 査読有
DOI:10.1016/j.phyletb.2017.05.053

⑤ Y. Uesaka, Y. Kuno, J. Sato, T. Sato, and M. Yamanaka, “Improved analyses for $\mu \bar{e} \rightarrow e \bar{e}$ in muonic atoms by contact interactions”, *Phys. Rev. D* 93, 076006 (2016) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevD.93.076006

⑥ S. Cook, Y. Kuno et al., “Delivering the world’s most intense muon beam”, *Phys. Rev. Accelerators and Beams* 20, 030101 (2017) 査読有
DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams20.030101

⑦ Y. Kuno (for the COMET collaboration), “A search for muon-to-electron conversion at J-PARC: The COMET experiment”, *PTEP* 2013 (2013) 022C01 査読有
DOI:10.1093/ptep/pts089

[学会発表] (計 95 件)

① Y. Kuno, “Search for Muon to Electron Conversion at J-PARC - COMET”, Tamura Symposium on Lepton and Baryon Symmetry, Austin TX USA, 2017

② Y. Nakazawa, “COMET Experiment searching for muon to electron conversion”, International Workshop on “Flavor Physics and CP”, May 2016, Nagoya.

③ Y. Kuno, “Search for Muon to Electron Conversion at J-PARC - COMET, International Workshop on Baryon and Lepton Number Violation, April 2015, University of Massachusetts Amherst.

④ COMET-CDC の宇宙線を用いた性能評価試験 (3), 吉田学立, 久野良孝, 佐藤朗, Wu Chen, Ming Liang Wong, 中沢遊, Ting Sam Wong, 沖中香里, 中村有希, 森津学, Jie Zhang, 他 COMET-CDC グループ, 日本物理学会 2017 年秋季大会(於 宇都宮大学、2017 年 9 月)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
取得年：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://mlfv.hep.sci.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久野 良孝 (KUNO, Yoshitaka)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：30170020

(2) 研究分担者

東城 順治 (TOJO, Junji)
九州大学・理学研究院・准教授
研究者番号：70360592

佐藤 朗 (SATO, Akira)
大阪大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号：40362610

(3) 連携研究者

川越 清以 (KAWAGOE Kiyomoto)
九州大学・理学研究院・教授
研究者番号：40183785

宇野 彰二 (UNO Shoji)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：70183019

荻津 透 (OGITSU Toru)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：30185524

三原 智 (MIHARA Satoshi)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：80292837

吉岡 珠樹 (YOSHIOKA Tamaki)
九州大学・理学研究院・准教授
研究者番号：20401317

佐々木 憲一 (SASAKI Kenichi)
高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授
研究者番号：70322831

吉田 誠 (YOSHIDA Makoto)
高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・講師
研究者番号：70379303

(4) 研究協力者

()