

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03967

研究課題名（和文）ステライルニュートリノ探索実験のためのニュートリノ検出器の開発

研究課題名（英文）Development of neutrino detector for sterile neutrino search

研究代表者

末包 文彦（Suekane, Fumihiko）

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授

研究者番号：10196678

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究でステライルニュートリノ（標準理論には含まれていない第4のニュートリノ）の検出器のR&Dを行なった。具体的には、液体シンチレーターの開発、検出器構造の概念設計及び各種テスト、信号検出用エレクトロニクスの準備などである。このR&Dの結果を利用してJSNS2実験のステライルニュートリノ検出器が制作され、2020年6月にJ-PARC研究所のMLF実験施設で実際のビームにより最初のデータ収集を行うことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究のニュートリノ検出器R&Dの結果を元にしてステライルニュートリノ検出器の制作が行われ、最初のデータ収集を行うことに成功した。今後高い信頼性でステライルニュートリノ探索を行うことが可能となった。ステライルニュートリノは素粒子の標準理論には含まれていない、弱い相互作用を行わない第4のニュートリノである。もしステライルニュートリノが発見されれば、これまでの常識を覆す非常に大きな学術的インパクトを素粒子物理に与え、我々の自然に対する理解を深めることになる。

研究成果の概要（英文）：We performed R&D of sterile-neutrino (4th neutrino that is not included in the standard model of elementary particles) detector. The R&D subjects were, development of liquid scintillator, conceptual design of the detector structure and various tests, preparation of electronics for signal read out, etc. Based of the R&D results, the JSNS2 neutrino detector was constructed and we successfully took initial data using the real beam at J-PARC MLF in June 2020.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ実験 ステライルニュートリノ ニュートリノ振動 液体シンチレーター

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

注: [1]などは、本成果報告書の「5.主な発表論文等」の著者名の前に書き入れた論文参照番号。

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型では、ニュートリノの種類は3種類とされている。しかし、これまでのニュートリノ振動実験のいくつかの結果が、弱い相互作用を行わないステライルニュートリノ(ν_s)と呼ばれる第4のニュートリノの存在を示唆していた。しかしながらそれまでの実験による示唆は、バックグラウンドの解釈などに不定性が含まれるなどでどれも決定打とはなっていなかった。ステライルニュートリノは、標準理論では想定されていない全く新しい素粒子であり、暗黒物質の候補にもなっているため、もしその存在が確認できれば素粒子・宇宙物理に与える衝撃は計り知れない。そのため世界の研究者の間では、ステライルニュートリノの存否の確認が焦眉の課題となっていた。そのような背景の中で、本研究グループは、茨城県 J-PARC の物質生命科学施設(MLF)ビームラインから発生する、強力でクリーンな静止崩壊ニュートリノを用いて、ステライルニュートリノの確定的な検証を行うことを計画していた(JSNS² 実験)。本研究は、この JSNS² 実験のニュートリノ検出器の開発として出発した。

2. 研究の目的

JSNS² 実験では、液体シンチレーターを用い 30MeV 程度の反電子ニュートリノ($\bar{\nu}_e$)を検出する。このエネルギーは原子炉ニュートリノのエネルギー(~4MeV)と比較して大きく、このエネルギー領域での液体シンチレーターの特性やバックグラウンド除去能力などはこれまでほとんど研究されていなかった。一方 JSNS² 検出器は地下ではなく地上にあるためバックグラウンドが多いという特徴を持つ。そのため、このエネルギーでの液体シンチレーターの特性を測定し、シミュレーションに入れバックグラウンド除去能力の検討など行なった。また、高いエネルギーに対応してダイナミックレンジの大きな信号読み出しエレクトロニクスなどの検討と準備を行なった。さらに JSNS² 実験の検討が進むにつれ明らかになって来た様々な課題に対処するため、検出器構造体や液体シンチレーター取り扱いシステムの基礎設計やテストを行なった。

3. 研究の方法

(A) 液体シンチレーターの開発では、バックグラウンド除去のための信号波形の違いによる n/γ の粒子識別能力や、陽子信号の消光効果(バークス定数)などの測定を行なった。ステライルニュートリノのエネルギー領域(30MeV)の中性子を放出する放射線ソースはないため、東北大サイクロトロンラジオアイソトープセンター(CYRIC)の 70MeV の準単色中性子ビームを用いて、中子と陽子の弾性散乱を利用し測定を行なった。また、このエネルギーの中子と炭素の反応で新たなバックグラウンドが生じるかの測定を行なった。

(B) 広いダイナミックレンジの読み出し系の開発では、光電子増倍管のブリーダー回路を調整して、ダイナミックレンジを広げる方法や、電子回路を高ゲイン低ゲインに分けて読み出す方法を検討した。

(C) 検出器構造体の開発では、KamLAND, Double Chooz などの原子炉ニュートリノ測定実験の検出器の開発と建設の経験と知識を元に、アクリルタンク、ステンレスタンク、液体シンチレーター操作システムなどの基礎設計及びテストを行なった。JSNS² 検出器は毎年液体シンチレーターの出し入れを行わなければならない、液を満たした状態でクレーンで移動しなければならない、温度変化がある環境で運転しなければならない、など他の実験にはない難しい要素があるため、業者との議論も行いながら注意深く基礎設計を行なった。

4. 研究成果[7]

まとめ: 本研究により、JSNS² ステライルニュートリノ検出装置の開発を行なった。その結果を元に他の研究費で JSNS² 実験装置が建設され、本研究期間終了後データの収集を始めることに成功した。

(A) 液体シンチレーターの開発[4,5,8]

(1) バックグラウンドの除去に必要な、液体シンチレーターのステライルニュートリノエネルギーでの n/γ 粒子識別能力とバークス定数の測定を東北大学CYRICの70MeVの準単色中性子を用いて行った。中子と液体シンチレーター中の陽子との弾性散乱により陽子に与えられたエネルギーと検出器で測定されたエネルギーの比からバークス定数を測定した。またその信号の波形の解析から粒子識別能力の測定を行なった(図1)。これらのデータを検出器開発のシミュレーションに応用し、様々な検討の基礎データとして利用した。ナフタレンやDINなどの導入で高速中子除去能力が改善することが明らかになったが、安定性や調達などの面で問題が予想される一方、この実験の結果既存の液体シンチレーターで必要十分な能力があることが確認できた。

(2) 東北大CYRICで高速中子と液体シンチレーター中の炭素との反応によるバックグラウンド

の測定を行なった。この結果この種のバックグラウンドは予想の範囲内であることが分かった。

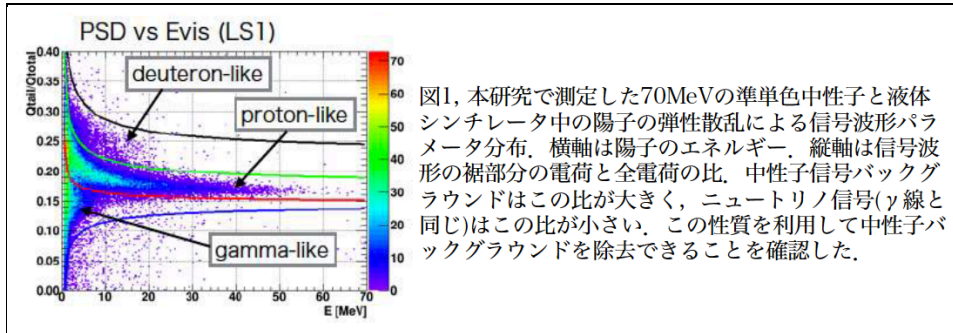


図1, 本研究で測定した70MeVの準単色中性子と液体シンチレータ中の陽子の弾性散乱による信号波形パラメータ分布。横軸は陽子のエネルギー。縦軸は信号波形の裾部分の電荷と全電荷の比。中性子信号バックグラウンドはこの比が大きく、ニュートリノ信号(γ 線と同じ)はこの比が小さい。この性質を利用して中性子バックグラウンドを除去できることを確認した。

(B) ダイナミックレンジの広い信号読み出し系の開発[1,2]

光電子増倍管のブリーター回路の抵抗分割にテーパーをつけることによりゲインの線形領域を広げることができるが、読み出しエレクトロニクスを高ゲイン/低ゲインの2段にすることでダイナミックレンジを広げること、新たな光電子増倍管を開発する必要はないことが分かった。必要な読み出しチャンネル数が2倍になるが、フランスのダブルショー実験で使用していたフラッシュADC、フロントエンドエレクトロニクスなどを、現地に赴き解体・回収し、日本に輸送し利用することで対処することにした。

(C) 検出器構造体の開発[3, 6]

(1) 検出器タンクのプロトタイプ設計(図 2)： この実験では年に1度液体シンチレータを満たした検出器全体をクレーンで移動しなければならない。そのため内部液体のスロッシングを抑えるため、蓋の本体部分が液体のレベルより低い特徴的なステンレスタンクの検討を行い、その基礎設計を行なった。またステンレスタンクに入るアクリルタンクの基礎設計を行なった。アクリルの強度を勘案しアクリル部材の厚みの検討、補強構造の検討などを行なった。さらに光電子増倍管支持装置を設計し、モックアップを製作し、テストを行なった。

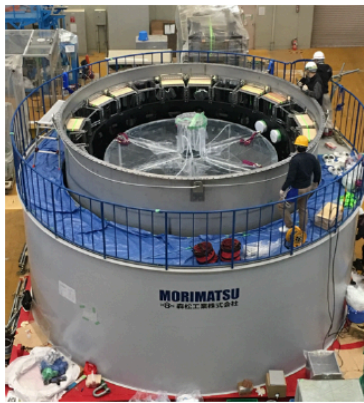


図2, 実験準備室で組み立て中のJSNS²検出器。本研究で基礎設計を行なったステンレスタンク、アクリルタンク、PMT支持装置が見える。

(2) 液体シンチレータ取り扱いシステムの概念設計を行い、必要な装置を購入し、テストを行った。また、液体シンチレータの長期保存による性能の変化の測定を行い問題ないことを確認した。温度変化による液体シンチレータの液面の変化を緩和する液面安定化装置の基礎設計を行なった。

(D) データ収集

本研究期間の終了後約1年で検出器システムの建設が完成し、ニュートリノ検出器をMLF実験場に移動し(図 3)、2020年6月5日から15日にかけて実際にデータを取得することに成功した。

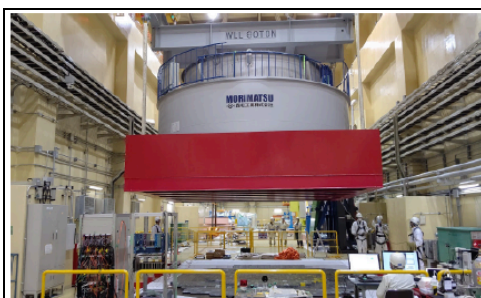


図3, JSNS²検出器のJ-PARC MLF研究施設内の実験場への設置作業。この後、データ収集を行った。本研究では、データ収集のための信号読み出し回路の準備を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 [1] F.Suekane, T.Maruyama 他JSNS2 collaboration	4. 巻 2006.0067
2. 論文標題 The JSNS2 data acquisition system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 [2] F.Suekane, T.Maruyama 他JSNS2 collaboration	4. 巻 2005.01599
2. 論文標題 Performance of PMTs for the JSNS2 experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 [3] F.Suekane, T.Maruyama 他JSNS2 collaboration	4. 巻 2005.01286
2. 論文標題 Slow monitoring system for the JSNS 2 2 experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 [4] J.S.Park, S.Y.Kim, C.Rott, D.H. Lee, D.Jung, F.Suekane, H.Furuta, H.I.Jangm H.K.Jeon, I.Yu, J.H.Choi, J.S.Jang, K.K.Joo, K.W.Ju, M.Pac, P.J.Gwak, S.B.Kim, S.Hasegawa, S.H.Jeon, T.Maruyama, R.Ujiie, Y.Hino and Y.s.Park	4. 巻 14
2. 論文標題 Production and optical properties of liquid scinatillator for the JSNS2 experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 T09010
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/T09010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 [5] Y. Hino, H. Furuta, F. Suekane	4. 巻 14
2. 論文標題 Aging study of Gd concentration in LAB-based Gd loaded liquid scintillator exposed to passivated stainless steel	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 P09007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/P09007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 [6] Y. Hino, H. Furuta, S. Hasegawa, T. Maruyama, K. Nishikawa, J.S. Park, F. Suekane, Y. Sugaya	4. 巻 14
2. 論文標題 Stainless steel tank production and tests for the JSNS2 neutrino detector	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 T09001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/09/T09001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 [7] 末包文彦, 丸山和純, 他JSNS2 collaboration 51名	4. 巻 1705.08629
2. 論文標題 Technical Design Report (TDR): Searching for a Sterile Neutrino at J-PARC MLF (E56, JSNS2)	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-91
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 [8] 日野陽太	4. 巻 -
2. 論文標題 ステライルニュートリノ探索実験 JSNS2 における中性粒子由来の背景事象についての研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 東北大学修士論文	6. 最初と最後の頁 1-81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 [9] 末包文彦, 丸山和純, 他JSNS2 collaboration 35名	4. 巻 1610.08186v1
2. 論文標題 Status Report (22th J-PARC PAC): Searching for a Sterile Neutrino at J-PARC MLF (E56 JSNS2)	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 arXiv	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 [10] Takasumi Maruyama	4. 巻 -
2. 論文標題 Searching for a Sterile Neutrino at J-PARC MLF: JSNS2 experiment	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 PoS(ICHEP2016)	6. 最初と最後の頁 482
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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29件 (うち招待講演 17件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Takasumi Maruyama
2. 発表標題 JSNS2 experiment
3. 学会等名 Neutrino2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T.Maruyama
2. 発表標題 Review of Accelerator-Based Sterile Neutrino Searches
3. 学会等名 J-PARC symposium, @Tokai, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Maruyama
2. 発表標題 Sterile Neutrino Search at J-PARC MLF
3. 学会等名 Erice School/Workshop, @Erice/Sicily, (Italy) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F.Suekane
2. 発表標題 Status of JSNS2 Experiment
3. 学会等名 NuFACT 2019, @Daegu, Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末包文彦
2. 発表標題 標準理論を超えるステライルニュートリノの探索
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019.3) シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末包文彦
2. 発表標題 ニュートリノ振動：東北大の研究を中心として
3. 学会等名 東北大学 物理学専攻コロキウム (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 末包文彦
2. 発表標題 J-PARC MLFの静止崩壊ニュートリノによる $\bar{\nu}$ -原子核反応測定の可能性
3. 学会等名 「ニュートリノ原子核反応とニュートリノ相互作用」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日野陽太
2. 発表標題 J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56) 2
3. 学会等名 日本物理学会年次大会 九州大学 2019年3月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑田和樹
2. 発表標題 Sterile neutrino search experiment at J-PARC MLF (JSNS2, J-PARC E56)-3
3. 学会等名 日本物理学会年次大会 九州大学 2019年3月
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日野陽太
2. 発表標題 J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56) 2
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 日野陽太
2. 発表標題 J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ探索実験JSNS2 (J-PARC E56)
3. 学会等名 Flavor Physics Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.Maruyama
2. 発表標題 Review of the sterile neutrino searches
3. 学会等名 DBD2018, Hawaii (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日野陽太
2. 発表標題 J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ探索実験(JSNS2; J-PARC E56) 2
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 日野陽太
2. 発表標題 J-PARC MLFにおける ステライルニュートリノ探索実験 JSNS2 (J-PARC; E56)
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日野陽太
2. 発表標題 Gd入り液体シンチレーターのステンレス耐性
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 桑田和輝
2. 発表標題 8bit Flash ADCによる波形弁別能力の測定
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Suekane
2. 発表標題 Neutrino Oscillation & Sterile Neutrino Experiment JSNS2
3. 学会等名 Seminar @ LPSC (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Suekane
2. 発表標題 Neutrino Oscillation & Sterile Neutrino Experiment JSNS2
3. 学会等名 Seminar @ CPPM (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Suekane
2. 発表標題 Sterile Neutrino Experiment JSNS2: The direct test of the LSND anomaly
3. 学会等名 Seminar @ LPNHE (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Suekane
2. 発表標題 Neutrino Oscillation & Sterile Neutrino Experiments
3. 学会等名 Seminar @ CIEMAT (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumihiko Suekane
2. 発表標題 Sterile Neutrino Search at JSNS2 experiment
3. 学会等名 GDR Neutrino meeting @ LPNHE (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takasumi Maruyama
2. 発表標題 Sterile Neutrino Searches at J-PARC MLF
3. 学会等名 39th course of INTERNATIONAL SCHOOL OF NUCLEAR PHYSICS IN ERICE, SICILY, 2017/Sep/17, Erice, Sicily, Italy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takasumi Maruyama
2. 発表標題 JSNS2 overview
3. 学会等名 Korean Physics Society (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 日野陽太
2. 発表標題 ステライルニュートリノ探索実験JSNS2本体検出器設置候補地におけるビーム由来背景事象粒子識別測定
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 日野陽太
2. 発表標題 J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ探索実験JSNS2(J-PARC;E56) 2
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 未包文彦
2. 発表標題 Review of Short Baseline Programs in the World
3. 学会等名 The international workshop on future potential of high intensity accelerators for particle and nuclear physics (HINT2016) (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 末包文彦
2. 発表標題 ステライルニュートリノ検出のための 液体シンチレーターの 中性子バックグラウンド除去能力評価-2」 中間報告
3. 学会等名 東北大CYRIC報告会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takasumi Maruyama
2. 発表標題 Searching for a Sterile Neutrino at J-PARC MLF: JSNS2 experiment
3. 学会等名 38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2016) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 古田久敬
2. 発表標題 波形弁別能力を実装したGd入り液体シンチレーターのCYRIC 70MeV中性子ビームを用いた性能評価測定
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 末包文彦	4. 発行年 2017年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 2
3. 書名 パリティ(2018年1月号)「ステライル ニュートリノの現在」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

*新聞記事など:
 2018年2月25日 日経新聞朝刊「未知のニュートリノを探せ」
 2019年1月7日 日経新聞朝刊「素粒子探し国際競争号砲」
 2019年12月29日 日経新聞朝刊「暗黒物質の正体は？」
 2018年5月号 日経サイエンス「もうひとつの见えない粒子『ステライルニュートリノ』」
 * 受賞など
 2018年12月 「波紋President choice賞」 丸山和純・長谷川 「J-PARC MLFにおけるステライルニュートリノ探索実験」
 2016年 Blaise Pascal Chair (フランス) 末包文彦 "Promotion of Neutrino Science"
 *ホームページ:
 J-PARC MLF中性子源を用いたステライルニュートリノ探索
<http://research.kek.jp/group/mlfn/>

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 分 担 者	丸山 和純 (Maruyama Takasumi) (80375401)	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 (82118)	
連 携 研 究 者	古田 久敬 (Furuta Hisataka) (50467023)	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究員 (82118)	