

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H05803

研究課題名（和文）逆階層領域でのニュートリノのマヨラナ性の研究

研究課題名（英文）Study on Majorana nature of neutrinos in the inverted hierarchy region

研究代表者

井上 邦雄（Inoue, Kunio）

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：10242166

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 182,300,000円

研究成果の概要（和文）： ^{136}Xe でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索を世界最高感度で実施した。緻密な較正や解析手法の改善によってエネルギー分解能を向上させ、課題であった宇宙線による長寿命放射性原子核の生成を同時生成中性子数に着目することで低減した。その結果、排除領域が世界で初めて逆階層領域に到達し、理論予測にもかかり始めた。また多用途として並行実施していた地球ニュートリノ観測において、地熱量が多いHigh-Qモデルを排除することに成功し、マンツルの対流様式や組成に対して新たな知見を与えることに成功した。ニュートリノ観測によって地球科学の大問題を解明する新たな到達点に達した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

排除領域が逆階層領域や理論予想に切り込み始めたことで、「宇宙物質優勢の謎」といった根源的な疑問を解明できる可能性が一気に高まった。これを受け世界の探索計画は逆階層領域のカバーという方針に転換され、国際協働による統合や淘汰が進み、分野全体の底上げにつながった。また、地球ニュートリノ研究が地球科学に新たな知見をもたらしたことで、さらに挑戦的な観測プロジェクトが素粒子・地球科学の協働で提案されるなど、学際分野の活性化が進んだ。これら、知的好奇心を喚起するテーマにおいて世界をリードする研究を国内で進行させることで、優秀な若手の興味を引きつけ、科学立国日本の将来を担う人材発掘や育成に貢献した。

研究成果の概要（英文）：We conducted a search for neutrinoless double beta decay in ^{136}Xe with the world's highest sensitivity. The energy resolution was improved through detailed calibration and improved analysis methods, and the problem of the generation of long-lived radioactive nuclei due to cosmic rays was reduced by focusing on the number of associating neutrons. As a result, the excluded region on effective Majorana neutrino mass reached the inverted ordering region for the first time in the world, and started to cover theoretical predictions. Furthermore, in the geoneutrino observations that were being carried out in parallel as a multipurpose project, we succeeded in eliminating the High-Q model, which has a large amount of geothermal heat, and succeeded in providing new knowledge about the convection style and composition of the mantle. Neutrino observation has reached a new milestone in solving major problems in earth science.

研究分野：ニュートリノ実験

キーワード：二重ベータ崩壊 マヨラナニュートリノ 宇宙物質優勢 極低放射能 地球ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

「ニュートリノと反ニュートリノは同一粒子なのか？」というマヨラナ性問題は、1937年に提起された。近年の注目度の高まりは、理論の進展により、「物質はどこから来たのか？」という宇宙の歴史と物質の進化の謎を解明する鍵と考えるからである。マヨラナ性検証の唯一現実的な方法は、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu 2\beta$) 研究であり、これまで多くの $0\nu 2\beta$ 探索実験が行われてきた。一方、Super-Kamiokande や KamLAND をはじめとするニュートリノ振動研究の大きな進展から、ニュートリノ質量構造と $0\nu 2\beta$ 探索実験の規模との関係が明らかになった。これを受け、宇宙・素粒子・原子核研究の最重要課題の一つに位置付けられ、世界的競争と多くの関心が集まっている。新学術領域「地下素核」での活動で、KamLAND-Zen が世界を大きくリードし縮退構造をほぼ排除したことで、世界の競合は逆階層構造へ切り込む次世代実験実現に軸足を移している。KamLAND-Zen は拡張性を特徴とし、二重ベータ崩壊核 (^{136}Xe) の倍増化・新学術での連携で大幅な低放射能化を実現したことで、次世代の目標感度に先行到達できる。40meV をきる感度で、複数の理論モデルの検証を実現し、すなわち大発見も期待できる。

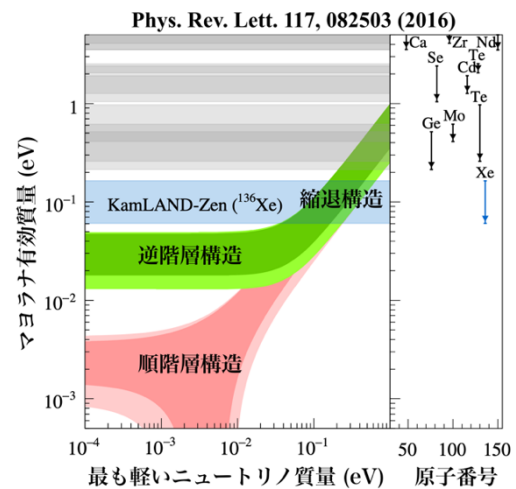
巨大かつ極低放射能の KamLAND-Zen は自然放射能を大幅に低減する一方で、液体シンチレータ中の ^{136}Xe 濃度が 3%程度と低く、そのため宇宙線起源の ^{10}C バックグラウンドが課題となる。またエネルギー分解能向上による $2\nu 2\beta$ バックグラウンド低減は、競合の次々世代に相当する将来の高感度化での重要課題である。KamLAND-Zen の優位性は、流体の使用で、その場での純化、 ^{136}Xe の脱気によるオン・オフ測定が可能となる点にある。順階層構造に達する究極の感度実現には、流体の利点と半導体や熱量計などの高分解能技術を組み合わせた国際連携が必要と考える。KamLAND-Zen の性能を極めることは世界の潮流で舵を取り中核となる上でも重要である。

また、中性子星連星合体からの重力波観測で、元素合成の歴史が見直される中、地下観測は物質の起源から星形成の歴史や超新星爆発での元素合成などを幅広くカバーする。KamLAND が開拓した地球ニュートリノ観測では地球始源隕石の特定が進み、物質の進化で「どのように地球に行き着いたのか？」の解明に貢献する。これらの連結で物質進化の系統的な理解が期待される。また、超新星爆発では、光・ニュートリノ・重力波によるマルチメッセンジャー観測が待望される。光学観測はニュートリノをきっかけに開始できるが、重力波はニュートリノと同時に到達する上に稼働率は低い。ベテルギウスなどの近傍超新星爆発では、KamLAND が爆発の数日前から前兆ニュートリノを観測でき、重要な機会を逃さない体制を構築している。地球ニュートリノや超新星ニュートリノは継続的な観測が重要であり、分野間のさらなる連携と継続的発展が必要である。

地下素核研究が活性化し極低放射能技術や設備の共有は非常に有効であり、 $0\nu 2\beta$ 探索・暗黒物質探索・超新星ニュートリノ観測などで、相乗的かつ大きな進展が得られた。これをさらに発展させ、低温技術を含む革新技術でも連携することで、飛躍的な性能向上や長期的な競争力維持が実現する。地下素核研究領域は、長期的視野で戦略的に計画立案や技術開発を実現してきており、これを継続することでさらに発展していく。

2. 研究の目的

「物質はどこから来たのか？」という宇宙の歴史と物質の進化の大問題を究明する鍵となる「ニュートリノと反ニュートリノは同一粒子なのか？」を検証するため、唯一現実的と考えられている「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu 2\beta$)」の探索を行う。地下の極低放射能研究実験と技術を共有することで、導入時に混入した放射性不純物の低減に成功し、新学術領域「地下素核研究」の研究期間内に縮退構造をほぼ排除する飛躍的な高感度化を実現した。さらにキセノン含有液体シンチレータを内包するミニバルーンフィルムの低放射能化も達成し、KamLAND-Zen の拡張性を生かして二重ベータ崩壊核を 745kg への倍増を実現し逆階層構造に切り込む感度での探索を開始した。これらにより主要な 3 つのバックグラウンドのうち自然放射能由来のものは無視できるほどに低減できている。本研究では次のバックグラウンドとして宇宙線起源の放射性核を識別するための開発を実施し、複数の理論モデルに到達する感度で $0\nu 2\beta$ 発見一番乗りを目指す。さらに、残る主要バックグラウンドであるニュートリノを放出する二重ベータ崩壊



($2\nu 2\beta$) 低減のための高エネルギー分解能化を含む汎用的かつ革新的な技術開発によって逆階層構造をカバーする探索を準備する。これにより、例え $0\nu 2\beta$ が未発見であっても多くの重要な知見を得ることができる。さらには、反ニュートリノ観測と共存できることも活かして、地球ニュートリノ観測による地球始源隕石や地球内部ダイナミクスの解明などの研究多様化を図り、「どのように地球に行き着いたのか？」を解明していき、着実に成果を生み出す。観測の成果は随時 E01・E02 班にフィードバックし、宇宙の歴史と物資の進化の解明につなげる。また D01・D02 班をハブに本研究の極低放射能技術を領域全体に還元し、他の計画研究も相乗的に発展させる。

3. 研究の方法

濃縮キセノン量を倍増した KamLAND-Zen800 での主要なバックグラウンドは宇宙線起源の放射性核である。原因となる宇宙線 μ 、原子核破碎で生じる中性子、さらに放射性核の崩壊を使った三重遅延同時計測で ^{10}C および長寿命核を効果的に除去する。一方で、宇宙線 μ は大信号を生じるため、オーバーシュートによるベースラインのずれ、アフターパルスによる高周波ノイズにより、中性子の検出を困難にする。これまでの電子回路では効率 64% で ^{10}C を除去できていたが、2ch のテスト回路試作を通して、ベースライン補正による波形デジタルの実現、ベースライン変動を避ける微分でのヒット判定、2段階トリガーによる信号同期時間幅の縮小により、中性子の検出効率を大幅に高められることがわかり、新型電子回路の導入により効率 99% 程度で ^{10}C を除去できる見込みを得た。中性子の検出効率の向上は長寿命核の除去にも有効である。本計画で 16ch フルスケールボードを試作し、実環境を含む性能評価を行い実機製作に進む。KamLAND-Zen800 では既に良質の低バックグラウンドデータを蓄積し始めているため、観測停止期間を最小限にしながら導入できるように、観測性能への影響が少なくなるように開発を行う。高い稼働率を維持することで、期間内に逆階層構造に切り込み複数の理論モデルを検証できる 40meV をきる探索感度を実現する。地球ニュートリノ観測も並行して実施し、原子炉ニュートリノの影響が少ないデータを高統計で蓄積し、地球内部のダイナミクスや始源隕石の特定につながる地球内部組成に関する知見を得られる精度向上を実現する。また、地下クリーン環境を整備し、将来の高感度化のための汎用的かつ革新的な技術開発を行い、他の計画研究やコミュニティとの極低放射能技術・開発環境の共有化や高度化を実施する。これらの開発は、逆階層構造をカバーする 20meV の感度での探索につながり、領域が相乗的に高感度化することで、宇宙の歴史と物質の進化の解明を目指す新学術領域を継続的に発展させる。

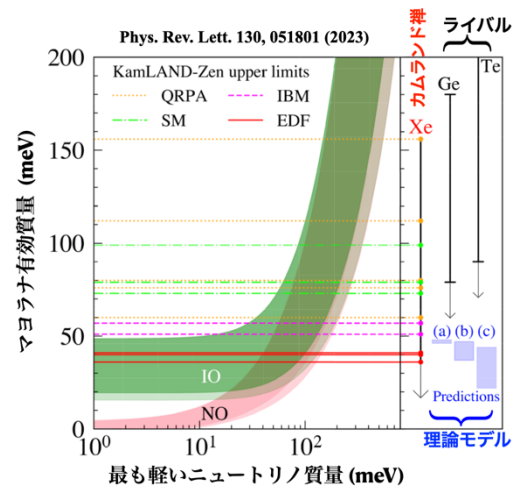
4. 研究成果

(1) ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

大発見はなかったものの、ライバルを大きく引き離して世界で初めて逆階層領域 (IO) に切り込む制限 (36-156meV 以下) を与えることに成功し、目標を達成した。複数の理論モデルにもかかり始めており、今後の感度向上に大いに期待が持てる。この成果を受け、世界の次期計画は逆階層領域のカバーを目指すよう方針が定められ、分野全体の底上げにも貢献した。

この成果の実現には、老朽化による検出器特性の変化に対応しつつ位置・エネルギー再構成の分解能向上や、主要なバックグラウンドである宇宙線による原子核破碎の識別が重要であった。検出器特性は物理観測データを使って連続的に時間特性・信号増幅率・光子検出感度を較正する手法を確立し、光を検出しなかったチャンネルをも統計的に再構成に活用して性能を向上することで、安定した性能を引き出すことに成功した。研究開始当初は主として ^{12}C を破碎して生じる ^{10}C を問題視していたが、対策が進み感度が上昇するにつれて、新たに ^{136}Xe を破碎して生じる数日に及ぶ長寿命核への対策が課題となった。これに対しても、同時に生成される中性子多重度に着目することで、数日に及ぶ三重遅延同時計測を実現し低減に成功した。さらに低減性能を高める新型電子回路 MoGURA2 の開発、トリガー手法の開発も実現した。MoGURA2 は高性能化のための技術開発の達成度を確認するプロトタイプ検出器での統合試験にも活用された。新たな解析手法も開発が進み、ミューオン束の再構成、長寿命核識別への機械学習の導入、機械学習による γ 線を伴うバックグラウンドの識別など、さらなる感度向上につながる技術が蓄積された。

KamLAND の高性能化は逆階層領域をカバーする感度を素早く実現できる。これまでの観測でコンセプトの正しさは実証されており、着実にバックグラウンドの理解が進み、技術開発も準備万端である。高性能化計画は日本学術会議の未来の学術構想 2023 に掲載され、文科省のロードマ

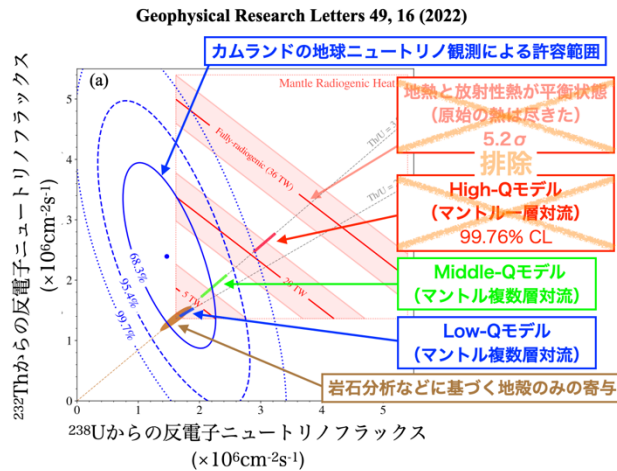


ップ 2023 にも採択された。高性能化のための準備開始に合わせて二重ベータ崩壊実験は 2024 年 1 月に一旦終了した。そこまでの全データを解析すると、目標を大きく上回り半減期にしてさらに 50%程度の感度向上が見込まれる。

(2) 地球ニュートリノ観測

^{238}U 起源・ ^{232}Th 起源の地球ニュートリノの分離測定を実施し、地球モデルの精度約 20%を凌駕する観測精度 15%を実現した。また、High-Q モデルと言われるマンツルの一層対流を予言するモデルを排除することに成功した。地球内部のダイナミクスに対する知見（マンツルの多層対流）に加えて、モデルの仮定に問題があることを示唆することから、地球内部組成に対しても知見を与えており、KamLAND 発祥のニュートリノ地球科学の質的転換を果たした。

二重ベータ崩壊研究と並行して国内の原子炉の大部分が停止している期間において、精緻な較正によって安定的な地球ニュートリノ観測を続けたことで、統計精度の向上が実現した。これまで不可能と言われた地球ニュートリノ観測の実現（今回の成果では 8.3σ での観測を実現）や地球が冷えていることの検証（今回の成果では、地熱と放射性熱が平衡状態とするモデルを 5.2σ で排除）につづき、地球科学分野で長らく議論が続いてきたマンツル対流様式や地球始原隕石の解明に関連する地球モデルに対して、High-Q モデルを排除できたことで、単なる検証にとどまらず地球科学の大問題に関係する新たな知見を与えることができた。地球内部を大局的に観測する新たなツールとしての質的な変革である。また、エネルギースペクトルの違いを利用してウラン・トリウム分離測定も実現したことで、新しいモデル検証の手法も提示できた。地球ニュートリノ観測は新しい学際分野として地球科学研究者の興味もひいており、素粒子・地球科学の協働で提案する海洋底での地球ニュートリノ観測計画は日本学術会議の未来の学術構想 2023 に掲載された。



(3) 天体ニュートリノ観測体制

ニュートリノ天文学の低エネルギー領域を担当し、近傍超新星爆発の予兆を捉える KamLAND 発の研究において、Super-Kamiokande との協働を開始し、近傍超新星爆発のマルチメッセンジャー観測の体制をより盤石なものとした。

ニュートリノ天文学は光学的観測・重力波観測と合わせてマルチメッセンジャー天文学の一角をなす。天体ニュートリノのエネルギー範囲は広く、光学観測での多波長観測と同様に数 GeV 以上の高エネルギー、数十 MeV 以上の中間エネルギー、数 MeV 程度の低エネルギーでそれぞれ観測手法が異なる。高エネルギーは南極の氷を立法キロメートルオーダーで使う IceCube、中間エネルギーは 5 万トンの水を使う Super-Kamiokande、低エネルギーでは最も光収量の多い液体シンチレータを 1000 トン使った KamLAND が担っている。

KamLAND は低エネルギーの観測に優れるため、ベテルギウスなどの近傍天体が超新星爆発する際には、爆発の数日前からその前兆となるニュートリノを捉えることができ、特に起動に時間の係る重力波望遠鏡に対して重要なアラームを提供してきた。一方、Super-Kamiokande がガドリニウムを添加したことで、爆発の数時間前からの感度を高めており、これを受けて、より信頼性の高いアラームを生成できるように、前兆アラームに必要な知見を提供しつつ Super-Kamiokande との合同観測体制を構築した。一方が停止していても最低限のアラームを发出できるため、KamLAND の高性能化作業期間や、Hyper-Kamiokande 開始に伴う Super-Kamiokande の停止後も継続して監視が可能となり、重大事象である近傍超新星爆発をマルチメッセンジャーで観測する体制をより盤石なものとした。また、その他の天体ニュートリノに対しても、大気ニュートリノや高速中性子などの天体ニュートリノ観測のバックグラウンドの精緻化を行い、広範な天体ニュートリノ研究によって 9 件の国際共著論文を発表した。

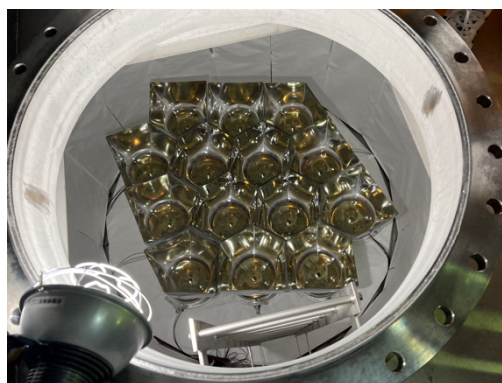
(4) 高性能化のための開発

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索において、逆階層領域をカバーする感度を実現することは大発見の確率を大幅に高める。現在最も感度が高い KamLAND では、エネルギー分解能の向上が不可欠であり、急務である老化対策に合わせて高性能化を実現することが効率的である。エネルギー分解能を向上するための開発として、集光ミラー・高量子効率 PMT・新型液体シンチレータの開発を行い、約 5 倍の集光量の増加を見込める開発に成功した。また、宇宙線による原子核破碎バックグラウンドを低減する新型電子回路の開発や組み合わせるトリガーシス

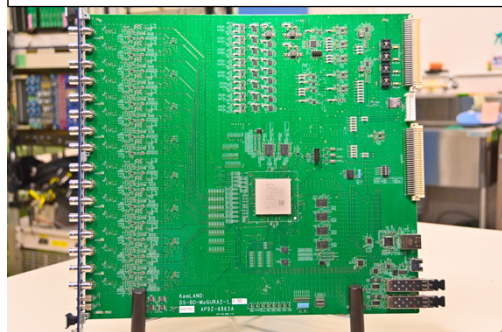
テム、ミニバルーン表面のバックグラウンド低減に有効な蛍光フィルムを使ったミニバルーン開発なども実施し、準備万端の体制が整った。高性能化計画は既述の通り、未来の学術構想 2023 に掲載され、ロードマップ 2023 に採択された。

集光ミラーは、円形から多角形に変更することで、隙間なく敷き詰めることが可能となり、目標を上回る 2.2~2.3 倍の集光量の増加を実現した。PMT は Hyper-Kamiokande 用と同様の高量子効率化とともに大光量でのオーバーシュート低減や耐油性確保のための追加対策を施すことで、目標を達成した。液体シンチレータに対しても新たに波長変換剤を添加し調合を最適化することで目標性能（発光量・透過率）を実現した。これらの性能の統合試験を行うため 50m³ タンクのテスト環境を構築し、14 本の PMT+集光ミラーを設置して検証を行った。検証には新型電子回路 MoGURA2 も活用した。

さらに革新的な技術開発にも取り組み、バックグラウンドの大幅低減につながるシンチレーション光を撮像する装置の開発を行った。2 枚鏡では実現できなかった広視野・高焦点深度の両立を 3 枚レンズと鏡を組み合わせた Baker-Nunn 型の光学系で実現し、さらに、光ファイバーと組み合わせて球面センサーを実現することで、1 枚レンズ 1 枚鏡の設計にも成功し、実用化に大きく近づいた。PMT の 10% 程度を撮像装置に置き換えることで、 γ 線を伴うバックグラウンドを 10 分の 1 に低減できる。この装置はこれまで明るさ以外の情報に乏しかったシンチレーション検出器の機能を大幅に高めるものとして、広い応用範囲が期待される。



統合試験装置



新型電子回路 MoGURA2

(5) 国際的中核となる研究拠点の形成

KamLAND は世界をリードする二重ベータ崩壊研究や地球ニュートリノ観測で国際的な高い求心力を維持している。一方、本領域が発展させてきた分野は、極稀な現象の研究によって物質の起源や力の統一を目指す極稀現象フロンティアを開拓した。この分野は今後数十年にわたって宇宙・素粒子・原子核研究の重要な分野であり続けると期待され、求心力の高い KamLAND の高性能化に続き、長期的な視野を持った技術開発・技術継承・人材育成をコミュニティと連携して実施していく必要がある。A01 班のプロジェクトである KamLAND を運営する東北大学ニュートリノ科学研究センターと、全国・国際共同利用共同研究機関であり A02・D02 班のプロジェクトに参加する大阪大学核物理センターは、極稀現象フロンティアでの研究を展開し、技術開発・技術継承・人材育成をコミュニティと連携して実施することを目的として、「大学間連携による神岡極稀現象研究拠点の形成」(KERNEL)を組織整備として開始した。これは、本領域の大きな成果である。さらに、KERNEL の活動を支える純空気製造装置や純水製造装置を備えるクラス 1 のスーパークリーン施設が 2025 年 3 月に竣工する。地上にあるだけで宇宙線による放射化が問題となる本分野で、地下にスーパークリーン施設を有することは大きなアドバンテージとなり、技術継承を確実なものとし、技術革新を生み出す原動力となる。これも本領域での活動の成果である。KamLAND は、高性能化計画の実現を想定して解体を開始しており、高性能化のタイムリーな実現によって、国際的中核としての研究拠点の形成に大きく貢献する。その入り口として、KamLAND はスペインのカンプラン地下実験施設が進めている NEXT 実験と、キセノンを使った将来計画の実現のための連携をはじめているほか、本領域も注力してきた極低温での量子センサーを使った極稀現象研究を有望な技術と考え、KEK-QUP と連携して実現する CryoLab のための整備を KamLAND 施設内で実施している。統合試験で構築した 50m³ タンクも KamLAND の高性能化後は簡易極低放射能実験装置として共同利用に供する予定であり、KamLAND およびその周辺施設も含めて、国際的中核となる研究拠点の形成を主導することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計42件（うち査読付論文 38件 / うち国際共著 30件 / うちオープンアクセス 33件）

1. 著者名 川田 七海	4. 巻 79
2. 論文標題 カムランドによる地球ニュートリノ観測でひもとく地球熱史	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 117 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.79.3_117	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 -
1. 著者名 Axani S.N., Futagi S., Garcia M., Grant C., Hosokawa K., Ieki S., Inoue K., Ishidoshiro K., Kawada N., Matsumoto Y., Nakahata T., Nakamura K., Shouji R., Song H., Winslow L.A.	4. 巻 19
2. 論文標題 RFSoC-based front-end electronics for pulse detection	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P03013 ~ P03013
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/19/03/P03013	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 Kamei Y., Shimizu I., Teraoka Y., Yamamura T., Shirasaki K.	4. 巻 18
2. 論文標題 Reduction of radioactive impurities in liquid scintillator by using metal scavengers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P08002 ~ P08002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/18/08/P08002	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 Abe S. et al. (KamLAND-Zen collaboration)	4. 巻 107
2. 論文標題 Measurement of cosmic-ray muon spallation products in a xenon-loaded liquid scintillator with KamLAND	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 54612
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.054612	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 Watanabe Hiroko, Abe Natsue, Araki Eiichiro, Araki Takuto, Inoue Kunio, Kasaya Takafumi, Kyo Masanori, McDonough William F., Sakai Taichi, Sakurai Noriaki, Ueki Kenta, Yoshida Hiroshi	4. 巻 1
2. 論文標題 Ocean Bottom Detector: frontier of technology for understanding the mantle by geoneutrinos	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 2023 IEEE Underwater Technology (UT)	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/UT49729.2023.10103417	査読の有無 無
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 Abe S. et al. (KamLAND collaboration)	4. 巻 107
2. 論文標題 First measurement of the strange axial coupling constant using neutral-current quasielastic interactions of atmospheric neutrinos at KamLAND	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 72006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.107.072006	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 Li A., Fu Z., Grant C., Ozaki H., Shimizu I., Song H., Takeuchi A., Winslow L. A.	4. 巻 107
2. 論文標題 KamNet: An integrated spatiotemporal deep neural network for rare event searches in KamLAND-Zen	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 14323
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.107.014323	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 S.Abe et al. (KamLAND-Zen Collaboration)	4. 巻 130
2. 論文標題 Search for the Majorana Nature of Neutrinos in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 51801
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.130.051801	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 S.Abe et al. (KamLAND Collaboration)	4. 巻 143
2. 論文標題 KamLAND 's search for correlated low-energy electron antineutrinos with astrophysical neutrinos from IceCube	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102758 ~ 102758
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2022.102758	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 S.Abe et al. (KamLAND Collaboration)	4. 巻 49
2. 論文標題 Abundances of Uranium and Thorium Elements in Earth Estimated by Geoneutrino Spectroscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2022GL099566	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 S.Abe et al. (KamLAND Collaboration)	4. 巻 934
2. 論文標題 Search for Supernova Neutrinos and Constraint on the Galactic Star Formation Rate with the KamLAND Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 85 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7a3f	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 S.Abe et al. (KamLAND Collaboration)	4. 巻 927
2. 論文標題 A Search for Correlated Low-energy Electron Antineutrinos in KamLAND with Gamma-Ray Bursts	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 69 ~ 69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac4e7e	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 Ieki S., Asami S., Axani S., Futagi S., Hosokawa K., Ishidoshiro K., Nakahata T., Nakamura K.	4. 巻 2374
2. 論文標題 Concept of KamLAND2 DAQ system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012104 ~ 012104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2374/1/012104	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 S.Abe et al. (KamLAND Collaboration)	4. 巻 925
2. 論文標題 Limits on Astrophysical Antineutrinos with the KamLAND Experiment	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac32c1	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 S.Abe et al. (KamLAND Collaboration)	4. 巻 924
2. 論文標題 Search for Solar Flare Neutrinos with the KamLAND Detector	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac35d1	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 Y.Gando et al. (KamLAND-Zen Collaboration)	4. 巻 16
2. 論文標題 The nylon balloon for xenon loaded liquid scintillator in KamLAND-Zen 800 neutrinoless double-beta decay search experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JINST	6. 最初と最後の頁 P08023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/08/p08023	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 G.Bellini, K.Inoue, F.Mantovani, A.Serafini, V.Strati, H.Watanabe	4. 巻 45
2. 論文標題 Geoneutrinos and geoscience: an intriguing joint-venture	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 La Rivista del Nuovo Cimento	6. 最初と最後の頁 1-105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40766-021-00026-7	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 Y.Kamei for the KamLAND-Zen collaboration	4. 巻 2156
2. 論文標題 Prospects for searching new Double Beta Decay physics with KamLAND-Zen 800	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J.Phys: Conf.Ser.	6. 最初と最後の頁 12230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2156/1/012230	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 A.Takeuchi	4. 巻 2156
2. 論文標題 Status of 0 2 search in KamLAND-Zen 800	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J.Phys: Conf.Ser.	6. 最初と最後の頁 12221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2156/1/012221	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 M.Eizuka and KamLAND collaboration	4. 巻 2156
2. 論文標題 Supernova Burst Search at KamLAND	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J.Phys: Conf.Ser.	6. 最初と最後の頁 12195
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2156/1/012195	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 S.Abe et al. (KamLAND collaboration)	4. 巻 2156
2. 論文標題 Nuclear de-excitation associated with neutrino-carbon interactions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J.Phys: Conf.Ser.	6. 最初と最後の頁 12189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2156/1/012189	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 T.Sakai, K.Inoue, H.Watanabe, W.F.McDonough, N.Abe, E.Araki, T.Kasaya, M.Kyo, N.Sakurai, K.Ueki, and H.Yoshida	4. 巻 2156
2. 論文標題 Study of Ocean Bottom Detector for observation of geo-neutrino from the mantle	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J.Phys: Conf.Ser.	6. 最初と最後の頁 12144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2156/1/012144	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 S.Obara et al. (KamLAND collaboration)	4. 巻 2156
2. 論文標題 Search for Supernova Relic Neutrinos at KamLAND	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J.Phys: Conf.Ser.	6. 最初と最後の頁 12138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2156/1/012138	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 Aobo Li	4. 巻 2156
2. 論文標題 KamLAND-Zen 800 Status and Prospect with the Artificial Intelligence Powered Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 J.Phys: Conf.Ser.	6. 最初と最後の頁 12114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/2156/1/012114	査読の有無 無
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 井上邦雄	4. 巻 60
2. 論文標題 マヨラナ粒子の探索	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 数理科学2022年4月号特集「マヨラナ粒子をめぐって」	6. 最初と最後の頁 36-42
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 Abe S., Asami S. et al., KamLAND Collaboration	4. 巻 909
2. 論文標題 Search for Low-energy Electron Antineutrinos in KamLAND Associated with Gravitational Wave Events	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 116 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd5bc	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 S Al Kharusi et al.	4. 巻 23
2. 論文標題 SNEWS 2.0: a next-generation supernova early warning system for multi-messenger astronomy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 31-201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/abde3323	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 Gando A., Gando Y. et al., KamLAND-Zen Collaboration	4. 巻 122
2. 論文標題 Precision Analysis of the Xe136 Two-Neutrino Spectrum in KamLAND-Zen and Its Impact on the Quenching of Nuclear Matrix Elements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 192501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.192501	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 Obara S, Gando Y, Ishidoshiro K	4. 巻 2019
2. 論文標題 Scintillation balloon for neutrinoless double-beta decay search with liquid scintillator detectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 073H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptz064	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 Ozaki H., Takeuchi A.	4. 巻 958
2. 論文標題 Upgrade of the KamLAND-Zen mini-balloon and future prospects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 162353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.162353	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 K.Hosokawa (KamLAND-Zen collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 Search for charged excitations of dark matter by KamLAND-Zen experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12065
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012065	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 S.Ieki (KamLAND-Zen collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 Simulation study of cosmic-ray muon backgrounds for KamLAND-Zen experiment	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012134	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 S.Obara, Y.Gando and K.Ishidoshiro	4. 巻 1468
2. 論文標題 Scintillation balloon for liquid scintillator base Neutrinoless double beta decay search experiments	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012136	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 Y.Gando (KamLAND-Zen collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 First results of KamLAND-Zen 800	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12142
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012142	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 A.Gando, Y.Gando, T.Hachiya, K.Hosokawa, H.Ikeda, S.Obara, H.Ozaki, K.Ueshima, H.Watanabe (KamLAND-Zen Collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 Inner balloon production for KamLAND-Zen 800	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12145
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012145	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 Aobo Li (KamLAND-Zen Collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 A Bayesian Approach to Neutrinoless Double Beta Decay Analysis in KamLAND-Zen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012201	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 Y.Kamei (KamLAND collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 Reduction of radioactive impurities from the liquid scintillator by using a Metal scavenger	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012241	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 H.Miyake (KamLAND collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 Improvement of Energy Estimator for KamLAND-Zen 800	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012250	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 Takeuchi Atsuto, Kawada Nanami	4. 巻 1468
2. 論文標題 Development of new trigger system for KamLAND2-Zen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012155	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 Nakamura R., Sambonsugi H., Shiraishi K., Wada Y.	4. 巻 1468
2. 論文標題 Research and development toward KamLAND2-Zen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012256	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 T.Hachiya (KamLAND collaboration)	4. 巻 1468
2. 論文標題 Delayed coincidence with a day-scale window for tagging 232Th series isotopes in KamLAND	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012257	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 Ozaki H., Takeuchi A.	4. 巻 958
2. 論文標題 Upgrade of the KamLAND-Zen mini-balloon and future prospects	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 162353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2019.162353	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 -

〔学会発表〕 計264件 (うち招待講演 79件 / うち国際学会 96件)

1. 発表者名 Kunio Inoue
2. 発表標題 Status and prospects of KamLAND-Zen
3. 学会等名 UGAP2024 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiroko Watanabe
2. 発表標題 KamLAND-Zen/Geoneutrinos
3. 学会等名 International Symposium on Neutrino Physics and Beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Itaru Shimizu
2. 発表標題 Results and Prospects of KamLAND-Zen
3. 学会等名 International Workshop on Double Beta Decay and Underground Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nanami Kawada
2. 発表標題 Latest result of geoneutrino measurement with KamLAND-Zen
3. 学会等名 TAUP2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Minoru Eizuka
2. 発表標題 Supernova neutrino detection in KamLAND
3. 学会等名 International Conference on Supernova Neutrino Detection (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideyoshi Ozaki
2. 発表標題 Current status and prospects of KamLand-Zen
3. 学会等名 NNN22 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroko Watanabe
2. 発表標題 Ocean Bottom Detector: frontier of technology for understanding the Mantle by geoneutrinos
3. 学会等名 Frontier of Understanding Earth's Interior and Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内敦人
2. 発表標題 Latest Result from KamLAND-Zen 800
3. 学会等名 La Thuile 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺寛子
2. 発表標題 Geoneutrinos
3. 学会等名 Neutrino 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎秀義
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800
3. 学会等名 XIX International Workshop on Neutrino Telescopes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸藤祐仁
2. 発表標題 First results of KamLAND-Zen 800
3. 学会等名 TAUP2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

領域ホームページ https://www.lowbg.org/ugap/index.html 東北大学ニュートリノ科学研究センターホームページ http://www.awa.tohoku.ac.jp 領域ホームページ
--

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

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2件

国際研究集会 UGAP2024	開催年 2024年～2024年
国際研究集会 UGAP2022	開催年 2022年～2022年

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			
	カリフォルニア大学バークレー校	ワシントン大学	マサチューセッツ工科大学	他8機関
米国	カリフォルニア大学バークレー校	ワシントン大学	マサチューセッツ工科大学	他8機関
オランダ	アムステルダム大学			