

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 1 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01120

研究課題名（和文）ニュートリノのマヨラナ性の発見を目指すカムランド禅の新たな挑戦

研究課題名（英文）A new challenge of the KamLAND-Zen experiment aiming at discovery of the Majorana nature of neutrinos.

研究代表者

白井 淳平（Shirai, Junpei）

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・学術研究員

研究者番号：90171032

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 24,400,000円

研究成果の概要（和文）：ニュートリノがマヨラナ粒子（粒子と反粒子が同一）かどうかを検証する唯一の手段である「ニュートリノが出ない2重ベータ崩壊（ $0\nu\beta\beta$ 崩壊）」の発見を目指すカムランド禅実験において、本研究では、探索に用いる $^{136}\text{Xe}$ 濃縮キセノン（750kg）を溶かした液体シンチレータを保持する新型ミニバルーンの製作を行ない、高品質データの採取による $0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索を開始した。新型バルーンは十分なクリーン度が確認され、安定したデータ採取が継続中である。さらに背景事象の除去のため新たな解析手法を導入し、検出器の性能向上のための工夫を行った結果、探索感度の大幅な向上に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノは電荷がなくそれ自体が反粒子の可能性（マヨラナ性）があり、事実ならニュートリノの質量が他の素粒子に比べ何桁も小さいことや、現在の宇宙が物質ばかりであることの謎が説明できる可能性がある。実験的には原子核の $0\nu\beta\beta$ 崩壊を見つけることが鍵のため世界的に実験が進行中である。カムランド禅はキセノンを使った世界最高感度の実験で、本研究はその中核であるバルーンを新たに導入し、高品位のデータ採取による感度の向上に成功した。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊が見つかれば世紀の大発見であり、我々を含め現在の宇宙がなぜ存在するのかの深淵な問いに科学の道筋をつけることができる。本研究はこれに迫る研究である。

研究成果の概要（英文）：The purpose of KamLAND-Zen experiment is to search for undiscovered neutrinoless double beta decay ( $0\nu\beta\beta$  decay) using  $^{136}\text{Xe}$  nuclei, which is the unique test of Majorana nature of neutrinos: neutrinos and antineutrinos are identical particles. In this study construction of a new mini-balloon for the KamLAND-Zen which holds liquid scintillator dissolved with 750 kg xenon gas enriched with  $^{136}\text{Xe}$  nuclei was made, and the  $0\nu\beta\beta$  decay search by taking high-quality data was started for the experiment. The new balloon was confirmed to be clean enough and the data taking has been stably continued. In addition, new analysis methods have been introduced to remove background events and various efforts have been made to improve the detector performance, which significantly made better the sensitivity.

研究分野：素粒子物理学、ニュートリノ物理学

キーワード：ニュートリノ 2重ベータ崩壊 カムランド禅 液体シンチレータ キセノン

## 1. 研究開始当初の背景

物質を構成する究極の素粒子の一つであるニュートリノは、唯一電荷がなく自分自身が反粒子(マヨラナ粒子)である可能性がある。もしニュートリノがマヨラナ粒子であれば非常に高いエネルギーの物理が示唆され、ニュートリノの質量が他の素粒子と比べてなぜ桁も小さいかの謎や、今日の宇宙がなぜ物質優勢なのかの謎の解明につながる鍵を与える可能性がある。ニュートリノのマヨラナ性を検証する唯一可能な現象としてニュートリノの放出を伴わない2重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ 崩壊)がある。発見されればニュートリノがマヨラナ粒子であることが明らかとなり、それは素粒子および宇宙物理学における大発見となる。しかし現在まで数多くの探索実験が行われてきたが未発見であり、発見一番乗りを目指して世界各地で探索が行われている。

カムランド禅実験は大量のキセノン $^{136}\text{Xe}$ 核を用い、世界最大の1000トン液体シンチレータ検出器であるカムランドの極低放射能環境を利用し、その中心に小型のバルーン(ミニバルーン)を設置し、内部を $^{136}\text{Xe}$ 濃縮したキセノンを大量に(約380kg)溶かした液体シンチレータで満たすユニークな手法で $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索を2011年より行ってきた。申請者による基盤研究S(課題番号25220704)では、それまでに得られたデータの解析により世界最高感度を達成するとともに、検出器外水槽の再建を行いキセノンを増量した新たな探索フェーズ(Zen800)を目指して研究を進めた。本研究は、これを受け検出器の要であるキセノン含有液体シンチレータを保持するクリーンかつ2倍の大きさの新型ミニバルーンを製作導入し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊発見に世界に先駆けて迫ることを目指す研究計画である。

## 2. 研究の目的

本研究はカムランド禅実験(Zen400フェーズ)で行った約380kgの $^{136}\text{Xe}$ 濃縮キセノンを用いた $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の感度を大幅に向上するため、申請者による基盤研究Sで進めた開発研究の成果を受け、探索の要であるクリーンかつ体積を増量した新型ミニバルーンを製作、検出器に設置し、内部を約750kgの濃縮キセノンガスを溶解させた液体シンチレータで満たし、高品位かつ高統計データの採取(Zen800)を実現することを目的とする。これにより世界最高感度の探索をさらに遂行し $0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見に迫ることを目指す。本研究の中心である新型ミニバルーンの製作はクリーン環境と徹底した清浄度管理のもと、これまで培った製作技術をさらに改良、新たな工夫を重ねて初めて可能となるものである。本研究は要求を満たす新型ミニバルーンの製作を完了し、検出器へ導入することにより、前人未到の高感度 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の遂行を目的とする。

## 3. 研究の方法

新型ミニバルーンの製作は本学スーパークリーンルームでの徹底したクリーン度管理のもとで行った。Zen400で行ったこれまでの製作手法を洗い出し、部材洗浄、クリーンウェア強化、除電装置強化、フィルムの乾燥を防ぐための加湿システム導入など数多くの改良を行った。またナイロンフィルムの溶着方法を見直し、自動および手動溶着機の新規導入、十分な強度を満たす溶着条件の最適化、徹底したリークチェックと新たな補修方法の導入を行った。

製作した新型ミニバルーンは、実験施設のある神岡鉱山地下に搬送しカムランド検出器に設置した後、キセノンを導入する前にデカンベースの液体シンチレータで膨らませ、バルーンの変形変化のほか、モニターカメラによる監視と採取したデータの解析によるバルーン形状および半径の変化の有無を入念にチェックした。またバルーン外側の液体シンチレータの分析を行い、ミニバルーン内にのみ存在する成分(デカン)の漏れ出しの有無をチェックした。一連のチェックの結果、バルーンに異常がないことを確認した。これを受け新たにキセノンと液体シンチレータを純化し、バルーンに導入し、定常データ採取を開始した。ミニバルーンからの漏れの有無についてはさらに、バルーン外側の液体シンチレータのサンプル分析を行いキセノンの漏れがないことを確認した。これら一連のプロセスでミニバルーン内部の液体シンチレータおよびミニバルーンフィルムによる微量放射性元素の崩壊(ウラン、トリウム系列)がともに必要な条件を満足することを確認し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索を開始した。その後順調にデータ採取を続け現在に至っている。

得られたデータから背景事象がZen400フェーズに比べて大きく減少し、それまで支配的であった放射性銀( $^{110m}\text{Ag}$ )が消滅したことが確認されたが、新たな背景事象として宇宙線ミュー粒子による核破砕反応として、既知の $^{10}\text{C}$ の他に $^{136}\text{Xe}$ の破砕による不安定核の崩壊事象が浮上した。そこで核崩壊データ(ENSDF)による生成核の精密調査を行い、シミュレーションコード

(FLUKA, GEANT)を用いた核反応および検出器応答の評価を行っている。これらの背景事象は破砕反応にともなって放出される中性子を、高性能データ採取システム(Mogura)を使って、ミュー粒子検出、崩壊核検出と合わせた3重の遅延同時検出により効率的に除去する。また検出器内でミュー粒子により発生するローカルなシャワー事象の検出、光センサーの波形情報を用いた粒子識別(トリウム系列の短寿命 $^{212}\text{Bi}$ - $^{212}\text{Po}$ 崩壊事象検出)、ニューラルネットによる粒子識別の向上による背景事象の除去を行っている。

#### 4. 研究成果

本研究では新型ミニバルーンの製作、検出器導入、高品質データ採取を予定通りに完了することができ2019年1月から新たな実験フェーズ(Zen800)を開始することに成功した。

製作した新型ミニバルーンは十分な強度を有し、内部からの液の漏れは一連のチェックにより見つからず安定したデータ採取が進行中である。また得られたデータからミニバルーン由来の背景事象についてウラン、トリウム系列の事象を調べたところ、ウラン、トリウムの濃度にしてそれぞれ $3 \times 10^{-12}$  g/g,  $4 \times 10^{-11}$  g/gであった。これはZen400フェーズでのバルーンに比べて10分の1であり、ナイロンフィルム素材とほぼ同程度であった。それはバルーン製作全体にわたり改良を重ねたクリーン度管理が十分に要求要件を満たすことを示す成果といえる。ミニバルーンの体積を倍増したこと、ミニバルーン内部のキセノン含有液体シンチレータを純化したことにより0崩壊探索に用いる有効体積が従来の3倍に増やせることがわかった。

現在順調に採取されたデータを用いて0崩壊の信号領域を含む観測スペクトルの詳細な解析を進めている。結果はZen400フェーズと合わせて近日中に論文にまとめる予定である。これまでの解析で、従来存在した $^{110m}\text{Ag}$ の背景事象が消滅し、宇宙線ミュー粒子による原子核破砕反応の除去が次なる課題となっている。そのため反応に付随して生成する中性子を高効率で検出する工夫や解析の精密化などハード、ソフト両面での工夫を行っている。

暫定的な結果であるが現在のデータ量での0崩壊の探索感度は崩壊半減期で $10^{26}$ 年を超えることがわかっている。それはニュートリノの有効質量にして50 meVを切る感度で、世界で初めて逆階層領域での探索が可能となったことを示す結果である。今後のデータ採取により、0崩壊率に対するいくつかの理論予測も検証可能である。本研究は宇宙観測とニュートリノ質量の直接探索と合わせてニュートリノ質量の謎の解明に貢献する新たな結果を与えることが期待される。

なお今後さらなる感度向上を目指す上で最後に残る背景事象と言える、ニュートリノを放出する2重ベータ崩壊(2崩壊)の除去が重要である。標準理論で許されるこの2崩壊を除去するには、エネルギー分解能の向上が大きな課題である。そのため本研究による蓄積データの解析を含め、関連する開発研究が進行中である。すなわち高量子効率光電子増倍管用の集光コーンの設計開発、大発光量かつ高光透過率の液体シンチレータと純化法の開発、新型高速フロントエンドエレクトロニクスシステムの開発、シンチレーション光を発するフィルムを用いた新たなバルーンの導入による有効体積100%を実現するための開発研究などを含む、ハード、ソフト両面での開発である。これらの開発研究に基づく検出器改造が実現すれば、現在の数十倍の感度(ニュートリノの有効質量にして数 meV)の探索感度が得られ、有効質量の逆階層領域を完全に覆う探索が可能となる。同時に0崩壊探索に止まらず汎用検出器であるカムランドの特徴を生かした地球ニュートリノ観測、太陽ニュートリノ観測、超新星ニュートリノ観測、JPARC加速器ニュートリノの検出、国外原子炉による長基線原子炉ニュートリノ観測など豊富な物理の成果が期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Junpei Shirai	4. 巻 332
2. 論文標題 KamLAND-Zen experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Science-PoS(HQL2018)050	6. 最初と最後の頁 050-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.332.0050	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 Junpei Shirai	4. 巻 46
2. 論文標題 Double Beta Decay	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 1860002-1~8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/S2010194518600029	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 Junpei Shirai	4. 巻 888
2. 論文標題 Results and future plans for the KamLAND-Zen	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series (Proceedings of Neutrino2016)	6. 最初と最後の頁 12031
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/888/1/012031	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 Junpei Shirai	4. 巻 307
2. 論文標題 KamLAND-Zen	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science(NEUTEL2017)027	6. 最初と最後の頁 027-(11-7)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.307.0027	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 Junpei Shirai	4. 巻 307
2. 論文標題 KamLAND	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of Science(NEUTEL2017)003	6. 最初と最後の頁 003-(1-10)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22323/1.307.0003	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 Junpei Shirai	4. 巻 46
2. 論文標題 Double Beta Decay	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Modern Physics: Conference Series (Proceedings of PANIC 2017)	6. 最初と最後の頁 1860002-(1-8)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S2010194518600029	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 S.Abe 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 Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 116-121
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 -

1. 著者名 A.Gando et al., KamLAND-Zen Collaboration	4. 巻 122
2. 論文標題 Precision measurement of the $^{136}\text{Xe}$ 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 192501-1-7
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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 白井淳平
2. 発表標題 Neutrinoless Double Beta Decay Experiment : Recent Status and KamLAND-Zen
3. 学会等名 15th Rencontres du Vietnam, Behind and Beyond the Standard Model at the LHC, Future Colliders and Elsewhere. (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Junpei Shirai
2. 発表標題 KamLAND-Zen Experiment
3. 学会等名 XIV International Conference on Heavy Quarks and Leptons (HQL2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Junpei Shirai
2. 発表標題 Double Beta Decay
3. 学会等名 The 21st Particles and Nuclei International Conference (PANIC2017) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 白井淳平、末包文彦	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 196
3. 書名 現代物理学 展開シリーズ1「ニュートリノ物理学」	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東北大学ニュートリノ科学研究センターKAMLANDホームページ  
<https://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>

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	三井 唯夫  (Mitsui Tadao)  (20283864)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授    (11301)	
連携研究者	丸藤 祐仁  (Gando Yoshihito)  (60396421)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教    (11301)	
連携研究者	古賀 真之  (Koga Masayuki)  (90343029)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授    (11301)	
連携研究者	石徹白 晃治  (Ishidoshiro Koji)  (20634504)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授    (11301)	

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0件

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
---------	---------