

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2013～2017

課題番号：25220704

研究課題名(和文)カムランド禅での世界最高感度のニュートリノレス2重ベータ崩壊の探索研究

研究課題名(英文) Search for neutrinoless double beta decays with the highest sensitivities with KamLAND-Zen

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・教授

研究者番号：90171032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 129,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では $^{136}\text{Xe}$ 核を用いてニュートリノのマヨラナ性(粒子=反粒子)を検証するカムランド禅実験において、キセノン含有液体シンチレータを保持するバルーンをよりクリーンかつ容積2倍のものに交換し、外部検出器の再建を行った。また背景事象を解明しマヨラナ性に対し世界で最も厳しい制限を与えることに成功した。しかし導入したバルーンにリークが判明したため本計画を終了し新規採択課題により再挑戦を行うことを決定した。

研究成果の概要(英文)：KamLAND-Zen experiment is testing the Majorana nature of neutrinos, that is the equivalence of the particle and anti-particle, by using  $^{136}\text{Xe}$  nuclei. In this study a balloon holding the Xe-loaded liquid scintillator at the detector center was replaced with a much cleaner and double-volume one, and reconstruction was made on the outer part of the detector. In addition the background events were cleared and the most stringent constraint was given to the Majorana nature of neutrinos. However, leaks were found on the installed balloon and it was decided to terminate the study and restart it in a newly accepted program.

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子(実験) ニュートリノ 2重ベータ崩壊

### 1. 研究開始当初の背景

物質を構成する基本粒子である素粒子の中で、ニュートリノは唯一電荷を持たず、それ自体が反粒子である(マヨラナ粒子)可能性がある。もしマヨラナ粒子ならば非常に大きな質量のニュートリノの存在が示唆され、観測されるニュートリノの質量が他の素粒子に比べ桁違いに小さいことが自然に説明されるだけでなく(シーソー機構)、宇宙誕生期の超高エネルギーの世界から現在の物質優勢の世界に至る、宇宙の進化の謎を解く鍵を与える可能性を秘めている。このためニュートリノのマヨラナ性の検証は素粒子および宇宙物理学において解決すべき極めて重要な課題である。その唯一現実的な手段としてニュートリノを放出しない原子核の $0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索がこれまで世界中で行われてきたが未発見である。本研究計画はカムランド検出器を利用し、大量の $^{136}\text{Xe}$ 核を用いてユニークかつ高感度の探索を推進中のカムランド禅実験の感度を飛躍的に向上し発見を目指すものである。

### 2. 研究の目的

カムランド禅実験は2011年の開始以来、岐阜県飛騨市神岡町の地下1000メートルに位置するカムランド検出器の極低放射能空間を利用し、検出器中心部に小型のバルーン(MIB)を設置し、その内部に $^{136}\text{Xe}$ 核で濃縮したキセノンガスを溶かした液体シンチレータを満ち、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索を行って来た。本実験はこの世界に類を見ない独創的な手法により、長年発見を主張した $^{76}\text{Ge}$ 核の結果を否定し、世界をリードする実験の1つとして探索を推進してきた。この間、液体シンチレータ及びキセノンの純化による高品質データの採取により、探索感度を制限する背景事象の解明が進展する中で、さらに飛躍的な感度向上のために装置の改良を行う必要が生じた。

本研究はその実現を目指し以下の項目を遂行する。すなわちMIBをよりクリーンで大容量のものに入れ替えること、経年劣化した検出器外水槽を再建し宇宙線由来事象の検出効率を向上させること、の2点である。実現すれば探索感度として世界のトップを切ってニュートリノのマヨラナ有効質量の逆階層領域と呼ばれる新たな領域に突入する。これにより $0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見一番乗りを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究の初年度にMIB中のキセノンと液体シンチレータの純化を終了し、高品質のデータ採取を開始した。解析の結果、(i)それまで最大の背景事象であった $^{110}\text{mAg}$ 核の崩壊事象が10分の1以下に消失し、純化の効果を確認できたこと、(ii)MIB表面に付着した埃に含まれるウラン系列の放射性元素( $^{214}\text{Bi}$ 核の崩壊)が最も重要な背景事象と

なったこと、(iii)次いで宇宙線ミュオン粒子の核破砕反応に起因する $^{10}\text{C}$ 核の崩壊事象の除去、(iv) $^{136}\text{Xe}$ 核の既知の $2\nu\beta\beta$ 崩壊事象の高エネルギー側の裾野、が除去すべき事象として明らかになった。その対策を検討し、本研究の目的であるMIB製作に活かすためこれら背景事象のふるまいをさらに詳細に理解することが重要となった。このため本計画の最初の2年間はデータの蓄積を継続した。

その結果、 $^{214}\text{Bi}$ 核崩壊事象の元凶である埃の除去はまさに鍵であり、新型MIB製作環境の徹底した清浄度管理を検討し、具体的な方策を決定した。まずクリーンルーム内の作業員からの埃の発生と移動を可視化装置を用いて調査し、これに基づいて以下の対策を行った。すなわち、(i)2段階のクリーンウェアと更衣室の導入、およびクリーン装備品の増強による埃の発生の抑制、(ii)MIBフィルム本体を埃から保護するためその表裏を覆う保護フィルムの導入、(iii)製作部材の徹底した洗浄、(iv)MIBの防塵保護容器(袋)、各種部材の防塵気密袋の導入、(v)埃の量を監視する高感度パーティクルカウンタの導入、(vi)除電器の増強などである。これにより埃の発生、遮断、除去について以前のMIB製作工程を大幅に改良した。さらにナイロンフィルムの半自動溶着機を導入し溶着工程の効率化も行った。新型MIBは予定通り計画の3年次(平成27年度)に製作を完了した。これによりカムランド禅実験はデータ採取を終了し、既存のMIBを撤去し、次に述べる外水槽の再建作業を行った(平成27年度末)。そして平成28年度、予定通り新型MIBを検出器に設置した。

外水槽検出器の検出効率向上のための再建では225本の光電子増倍管(PMT)を全て撤去し新たに140本の20インチPMTを導入した。そのため、(i)新PMTの性能検査(ゲイン、暗電流、長期安定性、温度依存性など)、(ii)シミュレーションを用いた新PMT配列の決定、(iii)外水槽の内部調査と赤道部の検出効率の改善(PMT設置方向の変更、チェレンコフ光の高反射率シートの導入)、(iv)地磁気と補償コイルによるPMT設置場所ごとの磁場の評価、(v)既存のPMT磁気遮蔽部材の効果のチェックも行った。さらに外水槽の水漏れ対策として止水法の検討を行った。これらの準備の後、再建工事を計画の3年次(平成27年度)に実施した。再建後は最適化したトリガー回路の導入を行い検出器のチューニングを行い実データによる性能チェックを行った。

### 4. 研究成果

本研究計画の期間中に蓄積した、キセノンと液体シンチレータの純化による高品質データを用いて背景事象の詳細な解析を行った。その結果、純化前に支配的であった $^{110}\text{mAg}$ 核からの背景事象がほぼ消失したことが明らかとなり、 $^{214}\text{Bi}$ 核の崩壊事象が最

重要でその原因がMIB表面に付着した埃であることが確認され定量的に評価した。本研究ではこれを除去するため徹底した清浄度管理のもとで体積2倍の新型MIBの製作を行い、予定通り完了した。また外水槽再建によるPMT交換と赤道部の改良を行い、新トリガー回路を導入しチューニングを行い、宇宙線由来事象(高速中性子などの背景事象)の検出効率の向上を確認し、再建作業を終了した。

新型MIBは予定通り検出器に導入したがその後、MIBにリークが判明した。しかし採取したデータの解析によりMIBの清浄度が旧MIBに比べ3倍向上したことがわかり、MIBのクリーン化の成功と製作工程の清浄度対策の成果が確認された。またリークが判明したのはキセノン導入前であったためキセノンの口スはなかった。リークの原因を徹底的に調査し、新たなMIB製作上の改善策を検討しこれを決定した。これにともない本研究は最終年度前年度で終了し、平成29年度採択の研究計画(基盤研究A)で目標実現を目指す。

なお本研究期間中に得られた高品質データの解析により、0 崩壊は観測されなかったが、その崩壊半減期の下限値として $9.2 \times 10^{25}$ 年(信頼度90%)を得ることができ、純化前のデータと合わせて $1.07 \times 10^{26}$ 年(信頼度90%)の下限値を得た(雑誌論文)。この結果はマヨラナ有効質量の上限として世界で最も厳しい制限( $< 61-165$  meV)を与えるもので、今後カムランド禅実験での逆階層領域(10-50meV)の高感度探索がいよいよ現実的になったと言え、関連するニュートリノ研究に与えるインパクトは極めて大きいと言える。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計6件)

A.Gando, Y.Gando, J.Shirai (19番目), T.Mitsui (12番目) (他37名) “Search for Majorana Neutrinos Near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen”, *Physical Review Letters* 117, 082503-1-6 (2016)、査読あり、DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.082503  
K.Asakura, A.Gando, J.Shirai (21番目), T.Mitsui (13番目) (他40名) “Search for double-beta decay of  $^{136}\text{Xe}$  to excited states of  $^{136}\text{Ba}$  with the KamLAND-Zen experiment”, *Nuclear Physics A*, Volume 946, 2016, Page171-181、査読有り、doi:10.1016/j.nuclphysa.2015.11.011  
G.Keefer, C.Grant, A.Piepkke, J.Shirai (10番目), T.Mitsui (47番目), F.Suekane (58番目) (他63名) “Laboratory studies on the removal of radon-born lead from KamLAND’s organic liquid scintillator”, *Nucl.Instr.Meth. A* 769 (2015) 79-87、

査読有り、

doi:10.1016/j.nima.2014.09.050

T.I.Banks, S.J.Freedman, J.Shirai (14番目), T.Mitsui (11番目) (他53名) “A compact ultra-clean system for deploying radioactive sources inside the KamLAND detector”, *Nucl.Instr.Meth. A* 769 (2015) 88-96、査読あり、

doi:10.1016/j.nima.2014.09.068

白井淳平、「原子炉ニュートリノの研究から地球内部の観測へ ～ニュートリノ科学を推進するカムランド実験～」、日本原子力学会誌アトムス(ATOM) vol.56、(2014.9.1発行)、p54-58。

A.Gando, Y.Gando, J.Shirai (19番目), T.Mitsui (11番目) (他42名) “Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND”, *Phys. Rev. D* 88, 033001-1~10 (2013)、査読あり、

DOI:10.1103/PhysRevD.88.033001

### 〔学会発表〕(計6件)

白井淳平、2016年基礎物理学ブレークスルー賞受賞記念「KamLAND:1000ton Liquid Scintillator Detector Challenging Neutrino Physics!」, XVII International Workshop on Neutrino Telescopes, 2017年、ベニス(イタリア)  
白井淳平、「KamLAND-Zen」, XVII International Workshop on Neutrino Telescopes, 2017年、ベニス(イタリア)  
白井淳平、「Results and Future Plans for the KamLAND-Zen Experiment」, XXVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2016)、2016年、ロンドン(英国)

白井淳平、「KamLAND-Zen: Challenging the Mysteries of Neutrinos and the Universe」, NuSTEC School、2015年、岡山大学(岡山市)

白井淳平、「KamLAND-Zen」, 17<sup>th</sup> Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics、2015年、モスクワ大学(ロシア)

白井淳平、「The status of KamLAND-Zen for neutrinoless double beta decay of  $^{136}\text{Xe}$ 」, 16<sup>th</sup> Lomonosov conference on elementary particle physics、2013年、モスクワ大学(ロシア)

### 〔図書〕(計1件)

末包文彦、久世正弘、白井淳平、湯田春雄 共著、森北出版株式会社、「現代素粒子物理：実験の観点から見る標準理論」, 2016年発行、248ページ。

### 〔その他〕

アウトリーチ活動(計5件)

白井淳平、ILC 大学めぐり講演会（宇宙創生の謎に迫る素粒子原子核物理学）講演題目「ニュートリノが開く宇宙の謎」、2016年3月18日、東北大学理学研究科。

白井淳平、TSSP2015 講演（東北大学サイエンスサマープログラム）“ Searching for a clue to a mystery of the Universe in 1000m underground ”、2015年7月9日、東北大学ニュートリノ科学研究センター。

白井淳平、TSSP2014 講演（東北大学サイエンスサマープログラム）“ Neutrinos: So mysterious and Exciting Particles!”、2014年7月10日、東北大学ニュートリノ科学研究センター。

白井淳平、TSSP2013 講演（東北大学サイエンスサマープログラム）“ Neutrinos: Existing everywhere but mysterious particles ! ”、2013年7月10日、東北大学ニュートリノ科学研究センター。

白井淳平、セミナー講演「ニュートリノの謎とカムランド/カムランド禅実験」、2013年4月27日、摂南大学理工学部。

ホームページ

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>

## 6. 研究組織

### (1) 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・教授

研究者番号：90171032

### (2) 連携研究者

三井 唯夫 (MITSUI, Tadao)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：20283864

末包 文彦 (SUEKANE, Fumihiko)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：10196678