

令和元年5月28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：2014～2018

課題番号：26104002

研究課題名（和文）大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究

研究課題名（英文）Study on Majorana Nature and Number of Generations of Neutrinos with a Large Liquid Scintillator Detector

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） 259,000,000円

研究成果の概要（和文）： $^{136}\text{Xe}$ を液体シンチレータに導入し、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索を通してニュートリノのマヨラナ性を検証するKamLAND-Zen実験において、世界最大量の二重ベータ崩壊核の導入と放射性不純物の低減に成功し、世界最高感度を達成しニュートリノ質量階層の縮退構造をほぼ排除する制限を得た。さらに、放射性不純物を10分の1に低減したミニバルーンを作成し倍量のキセノンを導入することに成功した。低放射能化の成功によって有効体積を4倍に拡大することに成功し、逆階層構造に切り込み5年以内に複数の理論モデルを検証できる感度での探索を開始した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索においてニュートリノ質量の縮退構造を排除し、世界を大幅にリードする感度を達成したことで、研究手法の正しさを実証することができたとともに、将来の見通しが立つようになり、「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高まった。本研究による研究の進展は世界の競合に大きな影響を与え、世界の将来計画をさらに高感度に改良していくことを促し、分野全体の底上げにつながった。また、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ていることで、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する。

研究成果の概要（英文）：KamLAND-Zen studies Majorana nature of neutrinos through the search for Neutrinoless Double Beta Decay with  $^{136}\text{Xe}$  loaded liquid scintillator. It has succeeded to install the world largest amount of double beta decay nuclei and to reduce radioactive impurities by purification. The world-leading limit obtained from the search almost fully rejects the quasi-degenerated region of neutrino mass hierarchy. Then, it successfully introduced double amount of xenon with newly developed 10 times lower radio-impurity mini-balloon. The fiducial volume for the search has been expanded by factor 4 thanks to the achieved low-radioactivity. The 5 years sensitivity of the launched experiment reaches inverted hierarchy region and allows to examine multiple theoretical models.

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

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 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？」というニュートリノのマヨラナ性の問題は、およそ 80 年も前に提起されている。近年の注目度の高まりは、理論研究の進展により、「宇宙初期の物質粒子生成」や「軽いニュートリノの謎」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実験の大きな進展から、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、欧米の宇宙・素粒子研究ロードマップで重要課題として取り上げられる一方、国内でも素粒子原子核・宇宙線研究での重要計画として取り上げられ、激しい競争が繰り広げられている。特に、新世代となる 100kg 超の二重ベータ崩壊核を使用する EXO-200(米)と KamLAND-Zen 実験が最先端を競っており、現在は KamLAND-Zen 実験が世界最高感度を実現している。他にも新たに参入する実験や最先端技術を駆使した将来計画が目白押しである。

これらの実験の共通課題は、極低放射能環境と二重ベータ崩壊核の大量導入であり、KamLAND-Zen は原子炉・地球反ニュートリノ研究で実現した巨大かつ極低放射能の環境を最大限に活かし、迅速かつ優れたコストパフォーマンスで実績をあげた。その特徴は、KamLAND 中心に二重ベータ崩壊核である  $^{136}\text{Xe}$  を溶かした液体シンチレータを内包するミニバルーンを設置するという単純な構造にあり、非常に拡張性に優れ、さらに循環純化による観測開始後のバックグラウンド低減も可能である。現在約 380kg のキセノンで再純化後のデータを蓄積しているが、一層の感度向上には、キセノン増量とミニバルーン再作成による大型化・低放射能化が有効である。長期的には、検出器の性能を向上する革新的な技術開発も必要である。

### 2. 研究の目的

「宇宙初期の物質粒子生成」や「軽いニュートリノの謎」といった宇宙・素粒子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？」という 80 年も前から未解決の問題を解決するため、唯一現実的と考えられている  $0\nu 2\beta$  の探索を行う。特別推進研究によって立ち上げ、現在世界最高感度である KamLAND-Zen の拡張性を活かし、二重ベータ崩壊核を倍増させ極低放射能を追求することで、期間内に縮退構造をカバーする感度を世界に先駆けて達成し、期間終了時には逆階層構造に切り込む感度での観測を開始する。実績ある既存装置の活用で、優れたコストパフォーマンスで継続的に世界をリードし続け、 $0\nu 2\beta$  発見の一番乗りを目指す。並行して、逆階層構造をカバーする感度実現を目指した、汎用的かつ革新的な技術開発を実施する。逆階層構造をカバーすることで、例え  $0\nu 2\beta$  が未発見とな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することも活かして、研究の多様化を図り、着実に成果を生み出す。その際、他計画の極低放射能化にも寄与する極低放射能材料スクリーニングのための環境も同時に構築する。

### 3. 研究の方法

現在の濃縮キセノン量 380kg から、ミニバルーンを大きくすることでキセノン量を増量できるというスケーラビリティのメリットを生かし、キセノン量を増量することで感度向上を実現し、 $0\nu 2\beta$  探索での世界的な競争で堅実にリードを続ける。380kg を使った観測では、競合を引き離して縮退構想の大部分をカバーするマヨラナ有効質量 80meV の感度を達成する。

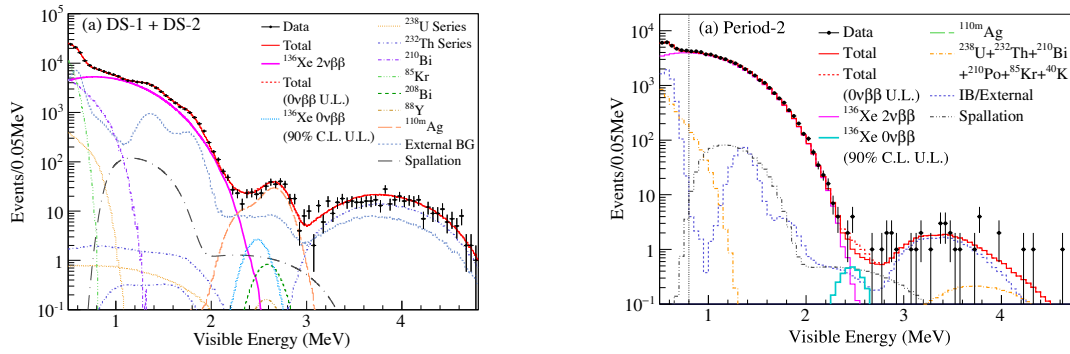
観測期間中は、クリーン環境を整備して極低放射能ミニバルーンの製作を行うとともに、将来の高感度化に有効な、エネルギー分解能改善のための集光ミラー・高発光液体シンチレータ・高量子効率光電子増倍管の開発、ミニバルーンフィルム内や表面の  $\alpha$  線検出によってバックグラウンド低減を行う発光フィルムの開発、複数の反応点を持つ  $\gamma$  線を伴うバックグラウンドを除去するための高感度撮像装置の開発・試作を行う。

H27 年度末には、外槽の水を抜くタンクの目視点検と同期させ、故障割合が半数を超えた外槽の光センサーを交換し宇宙線に対する感度低下を防ぐ。期間内に縮退構造をカバーする感度 60meV を達成(H30)するとともに、最終的に濃縮キセノンを 800kg 超ま

で内包できるサイズの極低放射能ミニバルーンを導入し、5年で逆階層構造に切り込む40meVの感度に到達する観測を開始する。

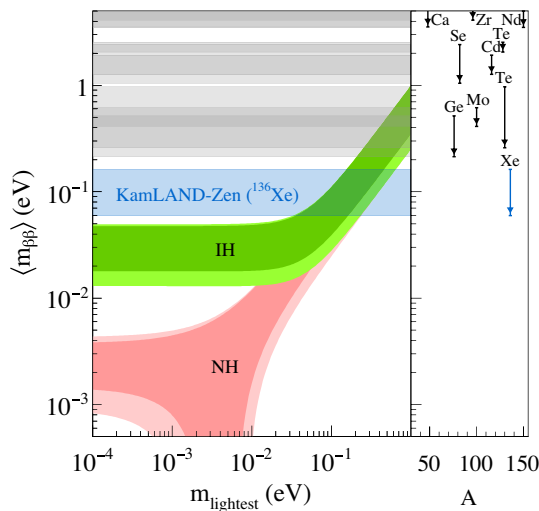
#### 4. 研究成果

KamLAND-Zen が使用するキセノン含有液体シンチレータは、ガスを溶かした液体であることから、循環しながらキセノンを脱気回収し、B01 班が開発したキセノン蒸留装置、および A01 班で開発済みの液体シンチレータ蒸留装置を使い純化することが可能である。この特徴を生かし、実験開始当初に見つかった福島原発由来のバックグラウンド源である  $^{110m}\text{Ag}$  を低減することに成功し、液体シンチレータ中のバックグラウンドを大幅に低減することに成功した。



左図：上流純化前のエネルギー分布、右図：純化後の半径 1m 以内のエネルギー分布

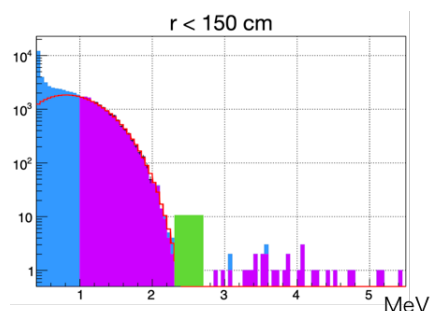
依然ミニバルーン近辺はミニバルーンフィルムに付着した放射性不純物起源のバックグラウンドが多いが、バックグラウンドの詳細な理解を通して、統計的に有利なように、体積を分割しつつもバックグラウンドが多いミニバルーン近辺も含めた全体積の同時解析をすることで高感度化を図った。純化前後のデータを統合解析することで、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu 2\beta\beta$  に対して、90%信頼度での半減期の下限値  $1.07 \times 10^{26}$  年を得た。この結果は世界を大幅にリードするものであり、当時 25 乗年台はじめしか到達できていなかった競合と比べて桁違いの厳しい制限を与えることに成功した。半減期への制限は原子核計算を通してマヨラナ有効質量に換算することができ、マヨラナ有効質量の上限値 **61-165 meV** を得た。上限値の範囲は原子核計算の不定性によるものである。この上限値は、最終年度までの達成目標を前倒して実現した結果であるとともに、ニュートリノ質量階層構造として考えられる標準階層(NH)・逆階層(IH)・縮退構造のうちの縮退構造をほぼ全て排除することに成功したものであり、 $0\nu 2\beta\beta$  探索は新たなステージに突入り、世界中が逆階層構造に届く感度を実現するための装置設計に大きく舵を切り始めた。



KamLAND-Zen によるマヨラナ有効質量への上限値、競合の当時の達成感度は灰色のバンドで示されている。

並行して、キセノン量を増大させるための2倍サイズのミニバルーン作成をクラス1のスパーククリーン環境で実施した。B01 班や海外のプロジェクトと表面汚染防止のノウ

ハウを交換して低放射能化を進めた。作業者が主要な不純物源であることから、フィルムの溶着を機械化したほか、クリーン下着導入や2段階の更衣室、二重の手袋にゴーグル、1日2回のクリーニングなど徹底した埃対策を行った結果、バックグラウンド付着量を10分の1に低減することに成功した。しかし、1回目の導入では意図しない加圧と不十分な溶着強度のために、ミニバルーンに亀裂が生じてしまった。その後、原因究明と溶着パラメータの最適化によって溶着強度を2倍にすることに成功し、2倍サイズのミニバルーン導入が実現した。表面バックグラウンド量は10分の1を維持できており、純化後もリークが観測されなかったことからキセノン導入を開始し、最終的に745kgの $^{136}\text{Xe}$ (91%濃縮)を循環導入することに成功した。ミニバルーンの低放射能化が進んだことで、有効体積は4倍を達成して大幅な感度向上を実現した。



745kgを導入した探索の初期データ、半径150cmまで拡大しても十分バックグラウンドが低減できている。

逆階層構造に到達し、5年以内に40meVを切り込み複数の理論モデルを検証できる観測が開始できており、当初の目標を達成することができた。

さらに将来に向けた開発として、新型電子回路・高量子効率PMT・集光ミラー・新型液体シンチレータ・蛍光フィルムバルーンなどの開発が順調に進んでおり、これらを導入することで、将来逆階層構造をカバーする20meVの感度を達成する技術を整えた。新型電子回路を前倒して導入できれば、現在の主要なバックグラウンドの一つである宇宙線起源の $^{10}\text{C}$ を99%除去することが可能であるとともに、ニューラルネットワークを利用した解析手法では、ガンマ線を伴うバックグラウンド全般を半分に低減することにも成功している。

研究対象の多様化においては、原子炉停止中の良質の地球ニュートリノデータを並行して蓄積しており、地球モデルの誤差を凌ぐ観測精度を達成しつつある。この研究が進展することで、マンツルの対流様式や地球始原隕石の特定などが進むと期待される。そのほか、陽子崩壊の探索や、太陽ニュートリノの観測、近傍超新星前兆ニュートリノ観測の研究、天体現象に伴うニュートリノの探索など多様な研究を進めることができた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計21件)

1. “Precision Analysis of the  $^{136}\text{Xe}$  Two-Neutrino  $\beta\beta$  Spectrum in KamLAND-Zen and Its Impact on the Quenching of Nuclear Matrix Elements”, A.Gando et al. (KamLAND-Zen Collaboration), 56名中9番目, Physical Review Letters 122, 192501 (2019), DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.192501, 査読有
2. “A Search for Electron Antineutrinos Associated with Gravitational-wave Events GW150914 and GW151226 using KamLAND”, A.Gando et al. (KamLAND Collaboration), 47名中7番目, The Astrophysical Journal 829:L34, 2016, 査読有
3. “Search for Majorana the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen”, A.Gando et al. (KamLAND-Zen Collaboration), 41名中7番目, Physical Review Letters 117, 082503 (2016), DOI: 10.1103/PhysRevLett.117.082503, 査読有
4. “KamLAND Sensitivities to Neutrinos from Pre-Supernova Stars”, K.Asakura et al. (KamLAND Collaboration), 47名中7番目, The Astrophysical Journal 818 (2016) 91, DOI:10.3847/0004-637X/818/1/91, 査読有
5. “Search for double-beta decay of  $^{136}\text{Xe}$  to excited states of  $^{136}\text{Ba}$  with the KamLAND-Zen”, K.Asakura et al. (KamLAND-Zen Collaboration), 44名中7番目, Nuclear Physics A 946 (2016) 171-181, DOI:10.1016/j.nuclphysa.2015.11.011, 査読有

6. “B7 solar neutrino measurement with KamLAND”, K.Asakura et al. (KamLAND Collaboration), 71 名中 7 番目, Physical Review C 92, 055808 (2015), DOI:10.1103/PhysRevC.92.055808, 査読有
7. “Search for the Proton Decay Mode  $p \rightarrow \bar{\nu}K^+$  with KamLAND”, K.Asakura et al. (KamLAND Collaboration), 54 名中 7 番目, Physical Review D 92, 052006 (2015), DOI:10.1103/PhysRevD.92.052006, 査読有
8. “Study on electron anti-neutrinos associated with gamma-ray bursts using KamLAND”, K.Asakura et al. (KamLAND Collaboration), 48 名中 7 番目, The Astrophysical Journal 806 (2015) 87, DOI:10.1088/0004-637X/806/1/87, 査読有
9. “A compact ultra-clean system for deploying radioactive sources inside the KamLAND detector”, T.I.Banks et al. (KamLAND Collaboration), 57 名中 8 番目, Nuclear Instruments and Methods A 769 (2015) 88-96, DOI:10.1016/j.nima.2014.09.068, 査読有
10. “Laboratory studies on the removal of radon-born lead from KamLAND’s organic liquid scintillator”, G.Keefer et al. (KamLAND Collaboration), 68 名中 33 番目, Nuclear Instruments and Methods A 769 (2015) 79-87, DOI: 10.1016/j.nima.2014.09.050, 査読有

[学会発表] (計 280 件)

1. K. Inoue, “KamLAND-Zen”, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, 2019
2. 井上邦雄、「非加速器素粒子原子核実験のレビュー」、学術会議・素粒子原子核分野大型計画シンポジウム、2019
3. 井上邦雄、「極低放射能環境でのニュートリノ研究」、日本学術会議天文学・宇宙物理学分科会第 2 回シンポジウム、2019
4. Y.Gando, “Neutrinoless double beta decay search with liquid scintillator experiments”, NuPhys 2018, 2018
5. A.Gando, “Review of Double Beta Decay Experiments”, NNN18, 2018
6. K. Inoue, “Current status and future prospects of KamLAND-Zen”, DBD2018, 2018
7. Y.Gando, “Neutrinoless double beta decay search with KamLAND-Zen”, NOW2018, 2018
8. I. Shimizu, “Status of the KamLAND-Zen Experiment”, NDM2018, 2018
9. A.Gando, “KamLAND-Zen”, Neutrino 2018, 2018
10. I. Shimizu, “New Liquid Scintillator Detector to Search for Neutrinoless Double Beta Decay of  $^{136}\text{Xe}$ ”, Workshop for Unification and Development of the Neutrino Science Frontier, 2017
11. K. Inoue, “Neutrinoless Double Beta Decay and Mass Scale”, ICFA seminar, 2017
12. J. Shirai, “Neutrino Physics: Double Beta Decay”, PANIC2017, 2017
13. 井上邦雄、「KamLAND2-Zen」、2017 年度 CRC 将来計画タウンミーティング、2017
14. 井上邦雄、「KamLAND-Zen の現状と展望」、宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究、2017
15. K.Ueshimma, “KamLAND-Zen results and purification methods”, XeSAT2017, 2017
16. J. Shirai, “KamLAND-Zen”, Neutrino Telescopes, 2017
17. K. Inoue, “Experimental review of DBD and KamLAND-Zen experiment”, DBD16, 2016
18. H. Ikeda, “LS-based 0νDBD”, NNN16, 2016
19. A.Gando, “Searches for Double Beta Decay”, Physics in Collision, 2016
20. H. Ozaki, “Refurbishment of KamLAND Outer Detector”, ICHEP, 2016
21. J. Shirai, “Status and future plans for the KamLAND-Zen experiment”, Neutrino 2016, 2016
22. K. Inoue, “Neutrino mass measurements (double beta) Asia”, Large Neutrino Infrastructures, 2016
23. 井上邦雄、「太陽ニュートリノ振動発見の歴史」、日本物理学会年次大会「2015 年ノーベル物理学賞ニュートリノ振動の発見と招待への展望」、2016
24. K. Inoue, “New Result of KamLAND-Zen”, Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, 2016
25. I. Shimizu, “KamLAND and KamLAND-Zen”, Frontiers in Liquid Scintillator Technologies, 2016
26. J. Shirai, “KamLAND-Zen”, Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, 2015
27. A.Gando, “Search for neutrinoless double beta decay with KamLAND-Zen”, NDM2015, 2015
28. 井上邦雄、「KamLAND-Zen の現状と将来計画」、宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究、2015
29. A.Gando, “Recent results from KamLAND”, Rencontres de Moriond, 2015

30. I. Shimizu, "KamLAND", Neutrino Telescopes, 2015
31. K. Ishidoshiro, "KamLAND-Zen", DBD2014, 2014
32. Y. Gando, "Latest results from KamLAND-Zen second phase", ICHEP, 2014
33. 井上邦雄、「KamLAND-Zen」、宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究、2014

〔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：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

領域ホームページ：<http://www.lowbg.org/ugnd/>

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/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8 桁）：

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。