

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：特別推進研究

研究期間：2009～2013

課題番号：21000001

研究課題名（和文） ニュートリノ観測装置カムランドを用いた
ニュートリノレス二重 β 崩壊の研究研究課題名（英文） Study of neutrinoless double-beta decay
using the neutrino detector, KamLAND

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）605,900,000 円、（間接経費）181,770,000 円

研究成果の概要（和文）：

ニュートリノのマヨラナ性を検証するニュートリノレス二重 β 崩壊研究において、巨大・極低放射能環境のカムランドに ^{136}Xe を大量導入することで、迅速かつ効率的に世界最高感度での探索を実現した。同各種を使う実験との統合解析により、 ^{76}Ge での信号発見の主張を排除し、マヨラナ有効質量の上限値 $120\sim 250\text{meV}$ を与えた。並行して、原子炉停止時のデータから地球ニュートリノ観測を高精度化し、地球モデルの選別を開始するに至った。

研究成果の概要（英文）：

The world highest sensitivity of the search for neutrino-less double beta decay has been quickly and cost-effectively achieved by deploying large amount of ^{136}Xe in the huge and ultra-low radioactivity environment, KamLAND. The previous positive claim with ^{76}Ge has been refuted by a combined analysis with an experiment using the same nuclei. Also an upper limit on the effective Majorana mass of $120\sim 250\text{meV}$ has been obtained. Simultaneously, more precise geo-neutrino observation with the reactor-off data started to examine Earth models.

研究分野：数物系科学、物理学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）

1. 研究開始当初の背景

(1) 「物質素粒子の中でニュートリノだけが極端に軽い謎」や「無から生じた宇宙に反物質が存在しない謎」など宇宙・素粒子の基本的な問題に対して、ニュートリノと反ニュートリノが同一でありうるというニュートリノのマヨラナ性の検証が大きな課題となっていた。また、ニュートリノ振動研究によって三世代間のニュートリノ質量二乗差が研究されていたが、絶対値や順序などニュートリノ質量構造を特定することも課題であった。これらを研究する唯一現実的な手法としてニュートリノを伴わない二重 β 崩壊 ($0\nu 2\beta$) の探索が世界中で精力的に行われていた。

(2) ニュートリノ振動研究の高精度化によって、ニュートリノ質量構造究明に対する具

体的かつ現実的な目標設定が可能となり、二重 β 崩壊核を 100 から 1000kg 導入することが必要な状況であった。一方で、地下 1000m に 1000 トンの液体シンチレータを有するカムランド実験は、反ニュートリノ観測を通して検出器の特性が良く理解できており、大規模かつ極低放射能の環境を実現していた。これを活用することで二重 β 崩壊のようなごく希な現象を迅速かつ高いコストパフォーマンスで大規模に研究できる状況であった。

2. 研究の目的

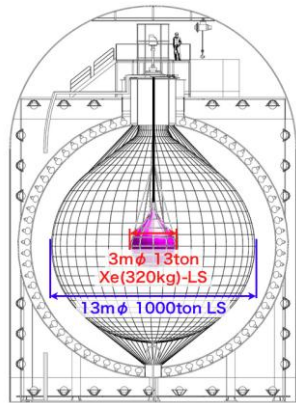
(1) 大量の二重 β 崩壊核 (^{136}Xe) を極低放射能環境であるカムランドで観測することで、ニュートリノを伴う二重 β 崩壊 ($2\nu 2\beta$) を高精度で測定するとともに、 $0\nu 2\beta$ を高感度で探索する。特に、 ^{76}Ge を用いた過去の実験でバックグラウンドが多い中測定されその信頼

性が議論されている観測結果 (KK クレーム) を検証し、さらに高感度を目指す。これにより、ニュートリノのマヨラナ性を検証し、ニュートリノ質量構造を究明する。

(2) 反ニュートリノ観測を並行して行い、特に国内の原子炉全停止状態での地球反ニュートリノ観測から地球内部の熱生成や地球モデルの理解を深める。

3. 研究の方法

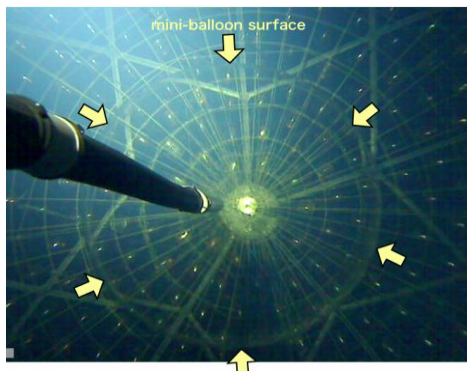
(1) カムランド中央に低放射性不純物のミニバルーンを吊し、 ^{136}Xe を大量に溶かしたキセノン含有液体シンチレータで満たす。二重 β 崩壊で生じた電子が液体シンチレータを発光させ、内壁に取り付けた光センサーで観測する光量からそのエネルギーを算出する。 $2\nu 2\beta$ 信号は連続分布し、 $0\nu 2\beta$ 信号は 2.46MeV に位置する。液体シンチレータは超高純度であり、巨大なため周囲からの放射線も完全に遮蔽する。



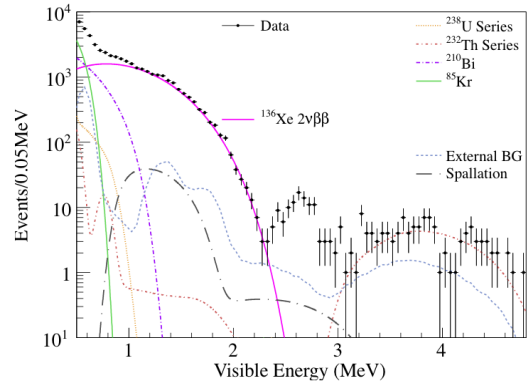
(2) ミニバルーンは全体の 1.5% 弱の体積にすぎず、特徴的な遅延同時計測を行うことで反ニュートリノ観測も継続する。

4. 研究成果

(1) 強度・光透過度・ガスバリア性・化学耐性・接着性に優れ、放射性不純物の少ないナイロンフィルムを開発し、クラス 1 スーパークリーンルームでミニバルーンに加工した。また、発光量・密度・透過率ともにカムランド液体シンチレータと整合性を持つキセノン含有液体シンチレータを開発し、カムランド中央に設置したミニバルーンを、320kg のキセノンを含む 13 トンの液体シンチレータで満たし、観測を開始した。

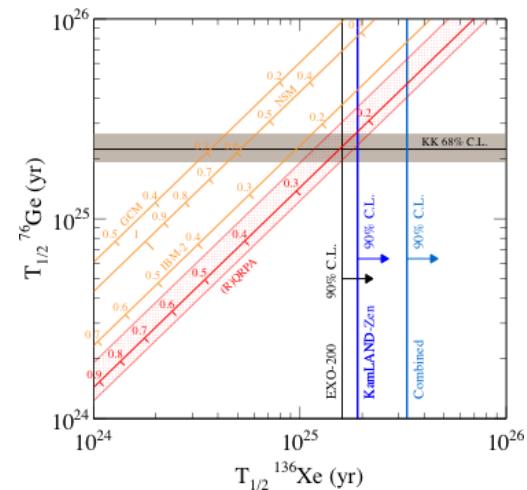


(2) 78 日の観測から、世界最高精度で $2\nu 2\beta$ を測定し、半減期 $2.38 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst}) \times 10^{21}$ 年を得た。その結果、過去の実験間の 5 倍の矛盾を決着した (論文 4)。

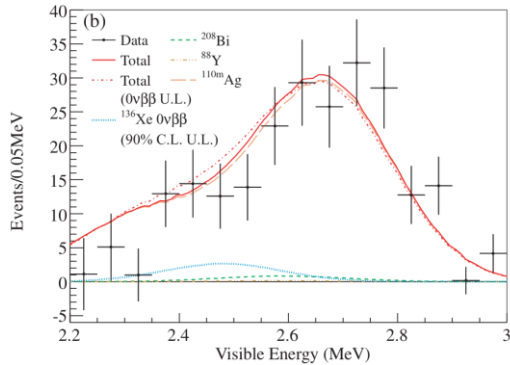


(3) 112.3 日の観測 (論文 3) では、マヨロンといわれる質量 0 の南部・ゴールドストーンボソンの探索を行い、そのニュートリノとの結合定数が 90% の信頼度で $0.8 \sim 1.6 \times 10^{-5}$ 以下であることを示した。超新星ニュートリノ観測による間接的な制限と組み合わせると、 0.02eV 以上の軽いマヨラナニュートリノ交換による二重 β 崩壊においてマヨロン放出の寄与は無視できることを示した。

(4) さらに世界最大統計となる $89.5\text{kg}\cdot\text{yr}$ での $0\nu 2\beta$ 探索を行い、90% の信頼度で半減期の下限值 1.9×10^{25} 年を得た。これは、世界最高感度を記録する。さらに、同じ ^{136}Xe を使う他実験との統合解析を行うことで、制限は 3.4×10^{25} 年以上に高められる。軽いマヨラナニュートリノ交換による $0\nu 2\beta$ を仮定し、 ^{136}Xe の制限を ^{76}Ge の制限に換算すると、最近の入手可能などの原子核モデルを用いても KK クレームを 97.5% 以上の信頼度で排除でき、当初目標の KK クレームの検証に成功した。また、この制限をマヨラナ有効質量に換算すると、 $120 \sim 250\text{meV}$ (範囲は原子核モデルの不定性による) 以下に相当し、未踏領域の探索を進めている。



(5) 既知のバックグラウンドを差し引いた後の $0\nu 2\beta$ 領域には、期待される信号と 3% エネルギーのずれた隆起があるが、エネルギースペクトルと時間変化から、放射性不純物である ^{110m}Ag が原因であると同定できた。さらに、キセノン含有液体シンチレータからキセノンを脱気してもそのバックグラウンドが残留することを確認し、オン・オフ測定による信号の検証が可能であることを実証した。



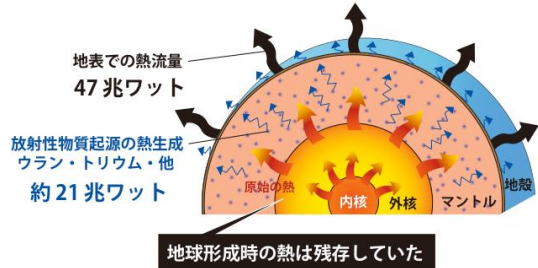
(6) 同定したバックグラウンドを低減するため、脱気回収したキセノンに対し精溜やゲッターによる純化、液体シンチレータに対して交換・循環蒸留を適用し、 ^{110m}Ag を 10 分の 1 以下に低減することに成功した。キセノンの再導入時には、濃度を高めることで、キセノン導入量を 383kg にまで高めることにも成功した。これらの改善により、3 分の 1 の観測時間でこれまでと同等の感度を達成しており、のべ 2 年程度の観測で単独でも 100meV を切る感度を見込む。

(7) 性能向上のための開発を実施し、①実物大の試作集光ミラーにおいて 2~2.5 倍の光量増を達成、②広視野・高被写界深度・大開口光学系を設計し、 γ 線を伴うバックグラウンドの低減方法を提案、③高発光・高引火点液体シンチレータおよび同密度のバッファーオイルを開発し、その純化方法も確立、④ α 線を伴うバックグラウンドを低減でき、液体シンチレータに耐性があるシンチレーションフィルムの超音波接合に成功した。

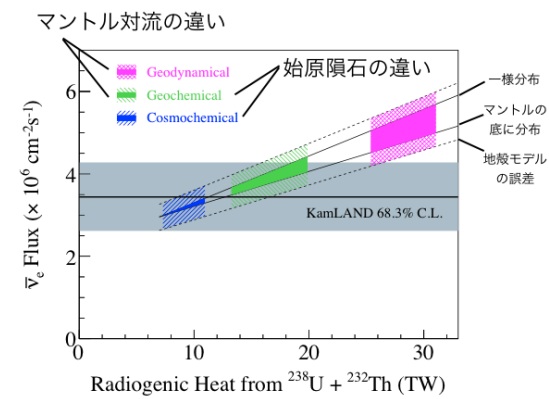


(8) 本研究は、反ニュートリノを並行観測で

きることを特徴とする。地球反ニュートリノ観測から、地熱生成に占める放射性熱の割合が約半分程度であることを初めて実験的に検証し、地球形成時の原始の熱が今でも残存している地球が徐々に冷えているという地球物理の重要な知見に実験的裏付けを与えた。(論文 6)



さらに、原子炉停止時の地球ニュートリノデータの蓄積により、観測精度を向上し、マントルの一層対流を支持する Geodynamical モデルを 89% の信頼度で排除するなど、地球モデルの選別を開始した。(論文 1)



また、原子炉反ニュートリノデータの蓄積とともに、原子炉停止時のデータからバックグラウンド評価の誤差を縮小することで、ニュートリノの第 1・第 2 世代間の質量 2 乗差測定において、2.4% という高精度を達成した。これは、世界で最も高精度なニュートリノ質量に関する測定である。(論文 1)

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)
(1) A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago, H. Ikeda, K. Inoue, K. Ishidoshiro, H. Ishikawa, M. Koga, R. Matsuda, S. Matsuda, T. Mitsui, D. Motoki, K. Nakamura, A. Obata, A. Oki, Y. Oki, M. Otani, I. Shimizu, J. Shirai et al. (46 名) (KamLAND collaboration), "Reactor on-off antineutrino measurement with

- KamLAND”, *Physical Review D* **88** (2013) 033001 10pp. 査読有り
- (2) A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago, H. Ikeda, K. Inoue, K. Ishidoshiro, R. Kato, M. Koga, S. Matsuda, T. Mitsui, D. Motoki, T. Nakada, K. Nakamura, A. Obata, A. Oki, Y. Ono, M. Otani, I. Shimizu, J. Shirai et al. (42 名) (KamLAND-Zen collaboration), “Limit on Neutrinoless $\beta\beta$ Decay of ^{136}Xe from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in ^{76}Ge ”, *Physical Review Letters* **110** (2013) 062502 5pp. 査読有り
- (3) A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago, H. Ikeda, K. Inoue, R. Kato, M. Koga, S. Matsuda, T. Mitsui, T. Nakada, K. Nakamura, A. Obata, A. Oki, Y. Ono, I. Shimizu, J. Shirai et al. (39 名) (KamLAND-Zen collaboration), “Limits on Majoron-emitting double- β decays of ^{136}Xe in the KamLAND-Zen experiment”, *Physical Review C* **86** (2012) 021601(R) 4pp. 査読有り
- (4) A. Gando, Y. Gando, H. Hanakago, H. Ikeda, K. Inoue, R. Kato, M. Koga, S. Matsuda, T. Mitsui, T. Nakada, K. Nakamura, A. Obata, A. Oki, Y. Ono, I. Shimizu, J. Shirai et al. (39 名) (KamLAND-Zen collaboration), “Measurement of the double- β decay half-life of ^{136}Xe with the KamLAND-Zen experiment”, *Physical Review C* **85** (2012) 045504 6pp. 査読有り
- (5) A. Gando, Y. Gando, K. Ichimura, H. Ikeda, K. Inoue, Y. Kibe, Y. Kishimoto, M. Koga, Y. Minekawa, T. Mitsui, T. Morikawa, N. Nagai, K. Nakajima, K. Nakamura, K. Narita, I. Shimizu, Y. Shimizu, J. Shiai et al. (66 名) (KamLAND collaboration), “Search for extraterrestrial antineutrino sources with the KamLAND detector”, *The Astrophysical Journal* **745** (2012) 193 8pp. 査読有り
- (6) A. Gando, Y. Gando, K. Ichimura, H. Ikeda, K. Inoue, Y. Kibe, Y. Kishimoto, M. Koga, Y. Minekawa, T. Mitsui, T. Morikawa, N. Nagai, K. Nakajima, K. Narita, I. Shimizu, Y. Shimizu, J. Shirai et al. (66 名) (KamLAND collaboration), “Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements”, *nature geoscience* **4** (2011) 647-651. 査読有り
- (7) S. Abe, K. Furuno, A. Gando, Y. Gando, K. Ichimura, H. Ikeda, K. Inoue, Y. Kibe, W. Kimura, Y. Kishimoto, M. Koga, Y. Minekawa, T. Mitsui, T. Morikawa, N. Nagai, K. Nakajima, K. Nakamura, M. Nakamura, K. Narita, I. Shimizu, Y. Shimizu, J. Shirai et al. (79 名) (KamLAND collaboration), “Measurement of the ^8B solar neutrino flux with the KamLAND liquid scintillator detector”, *Physical Review C* **84** (2011) 035804 6pp. 査読有り
- (8) A. Gando, Y. Gando, K. Ichimura, H. Ikeda, K. Inoue, Y. Kibe, Y. Kishimoto, M. Koga, Y. Minekawa, T. Mitsui, T. Morikawa, N. Nagai, K. Nakajima, K. Nakamura, K. Narita, I. Shimizu, Y. Shimizu, J. Shirai et al. (65 名) (KamLAND collaboration), “Constraints on θ_{13} from a three-flavor oscillation analysis of reactor antineutrinos at KamLAND”, *Physical Review D* **83** (2011) 052002 11pp. 査読有り
- (9) S. Abe, S. Enomoto, K. Furuno, Y. Gando, H. Ikeda, K. Inoue, Y. Kibe, Y. Kishimoto, M. Koga, Y. Minekawa, T. Mitsui, K. Nakajima, K. Nakajima, K. Nakamura, M. Nakamura, I. Shimizu, Y. Shimizu, J. Shirai et al. (82 名) (KamLAND collaboration), “Production of radioactive isotopes through cosmic muon spallation in KamLAND”, *Physical Review C* **81** (2010) 025807 14pp. 査読有り
- [学会発表] (計 220 件)
- (1) 丸藤祐仁, “KamLAND-Zen 実験の現状と将来”, 日本物理学会第 69 回年次大会「二重ベータ崩壊研究の最前線」シンポジウム, 2014 年 3 月 28 日, 東海大学.
- (2) 石徹白晃治, “KamLAND”, International Workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN13), 2013 年 11 月 11 日, 東京大学.
- (3) P. Decowski, “Status of the KamLAND-Zen Experiment”, 13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2013), 2013 年 9 月 10 日, Asilomar, USA.
- (4) 清水格, “Past and Present Experiments of Geo Neutrinos”, 13th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2013), 2013 年 9 月 9 日, Asilomar, USA.
- (5) 白井淳平, “The Status of KamLAND-Zen for neutrino-less Double Beta Decay of ^{136}Xe ”, 2013 年 8 月 23 日, Moscow,

- Russia.
- (6) 清水格, “KamLAND2-Zen”, 天文学・宇宙物理学中規模計画の展望, 2013年5月28日, 日本学術会議講堂.
 - (7) 井上邦雄, “Status of KamLAND-Zen”, Opportunities in Underground Physics for Snowmass, 2013年5月26日, Asilomar, USA.
 - (8) 井上邦雄, “KamLAND2-Zen”, 極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会, 2013年4月23日, 富山市.
 - (9) 中村健悟, “KamLAND-Zen”, Neutrino Telescopes 2013, 2013年3月14日, Venice, Italy.
 - (10) 渡辺寛子, “KamLAND”, Neutrino Telescopes 2013, 2013年3月12日, Venice, Italy.
 - (11) 白井淳平, “KamLAND-Zen Status and Future”, Neutrino Oscillation Workshop (NOW2012), 2012年9月10日, Otranto, Italy.
 - (12) 井上邦雄, “非加速器素粒子原子核実験”, 素粒子物理・原子核物理分野の「大型施設計画・大規模研究計画マスタープラン」に関するシンポジウム, 2013年2月8日, 港区.
 - (13) 井上邦雄, “Status of KamLAND-Zen”, Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics, 2012年6月11日, 奈良市.
 - (14) 井上邦雄, “Results from KamLAND-Zen”, The XXV International Conference on Neutrino and Astrophysics (Neutrino 2012), 2012年6月6日, 京都市.
 - (15) 丸藤祐仁, “Present Status of KamLAND-Zen”, International Workshop on Double Beta Decay and Neutrinos (DBD11), 2011年11月15日, 大阪.
 - (16) 井上邦雄, “ $0\nu 2\beta$ in KamLAND-Zen and SNO+”, Workshop on Lepton and Baryon Number Violation (BLV2011), 2011年9月23日, Gatlinburg, USA.
 - (17) 井上邦雄, “地下における素粒子実験の展望”, 日本物理学会秋季大会「10年先を俯瞰した高エネルギー物理学の将来展望」シンポジウム, 2011年9月17日, 弘前大学.
 - (18) 渡辺寛子, “Low energy neutrino physics at KamLAND”, 12th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP11), 2011年9月6日, Munich, Germany.
 - (19) 井上邦雄, “KamLAND-Zenの将来計画”, 二重ベータ崩壊研究懇談会, 2010年12月17日, 岩沼市.

- (20) 井上邦雄, “KamLANDの将来計画”, 宇宙線研究者会議将来計画シンポジウム, 2010年9月16日, 東京大学.
- (21) 三井唯夫, “Low-energy neutrino physics with KamLAND”, Neutrino Oscillation Workshop (NOW2010), 2010年9月6日, Otranto, Italy.
- (22) 井上邦雄, “KamLAND-Zen: Search for neutrino-less double-beta decay with the neutrino detector”, Fundamental Physics Using Atoms, 2010年8月9日, 大阪大学.
- (23) 古賀真之, “KamLAND double beta experiment using ^{136}Xe ”, 35th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2010), 2010年7月24日, Paris, France.
- (24) 井上邦雄, “New Geo-neutrino Measurement with KamLAND”, The XXIV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2010), 2010年6月19日, Athens, Greece.
- (25) 中村健悟, “Liquid Scintillator based experiments in 0ν Double Beta Decay”, The XXIV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2010), 2010年6月16日, Athens, Greece.

[その他]
ホームページ等
<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

白井 淳平 (SHIRAI, JUNPEI)
東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授
研究者番号: 90171032

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