

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年3月31日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2012

課題番号：21244025

研究課題名（和文）カムランドでの超高感度2重ベータ崩壊探索を目指す検出器の開発研究

研究課題名（英文）Research and development of a detector for a double-beta decay search with very high sensitivity at KamLAND

## 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・准教授

研究者番号：90171032

研究成果の概要（和文）：本研究はニュートリノがそれ自体反ニュートリノであれば起こり得る「ニュートリノの出ない2重ベータ崩壊」の発見を目指す検出器の開発研究である。世界最大の液体シンチレータ検出器カムランドを活用し、キセノン<sup>136</sup>原子核を溶解した液体シンチレータとこれを収納するミニバルーンを開発製作し、世界最高感度での探索実験を行うことに成功した。その結果、発見を主張してきたゲルマニウム<sup>76</sup>核の実験結果はほぼ排除された。

研究成果の概要（英文）：The study made a research and development of a detector for neutrino-less double-beta decays of nuclei which would occur if the neutrino itself is the anti-neutrino of its own. Using the world's largest liquid scintillator detector KamLAND <sup>136</sup>Xe-resolved liquid scintillator and a mini-balloon filled with the liquid was developed and installed at the center of the detector. The experiment provided the most stringent limit and strongly disfavored the discovery claim of a <sup>76</sup>Ge experiment.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	17,100,000	5,130,000	22,230,000
2010年度	9,500,000	2,850,000	12,350,000
2011年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2012年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
総計	34,000,000	10,200,000	44,200,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・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、カムランド、2重ベータ崩壊、液体シンチレータ、キセノン

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノは電荷をもたないためマヨ

ラナ粒子（それ自身が反粒子に等しい粒子）

の可能性があるがこれは自明ではなく実験

的に検証すべき課題である。もしマヨラナ粒子であれば、ニュートリノの極端に小さな質量が自然に説明されるとともに標準理論をはるかに超える高いエネルギーの物理過程が示唆され、宇宙の開闢と進化を理解する上でも重要な知見を与えるものと考えられる。これを実験的に検証する唯一現実的な方法は、2重ベータ崩壊核を用いて「ニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ )」を検出することである。これまで発見を主張する唯一のグループは  $^{76}\text{Ge}$  核を用いた実験の1部の解析グループであるが、解析の手法をめぐり当初から多くの批判にさらされており、これを解決しさらなる高感度実験を行うことが求められている。このため従来の実験をはるかに上回る大量(数100kgから1トン)の同位体原子核を用い、極低環境放射能空間で探索を行う次世代の実験が世界の数多くの研究所で進行中あるいは計画されている。

## 2. 研究の目的

本研究は大量のキセノン同位体原子核 ( $^{136}\text{Xe}$ ) を用いて2重ベータ崩壊反応、特にニュートリノの出ない崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) の探索に必要な検出器の開発と製作を目的とする。ポイントは、世界最大(1000トン)の液体シンチレータを用いたニュートリノ検出器カムランドの中心に、200~300kgの同位体濃縮( $^{136}\text{Xe}$ )のキセノン溶解液体シンチレータを満たした直径3mのミニバルーンを設置し、半減期  $10^{25}\sim 10^{26}$  年の高感度探索を行うことである。そのため(1)キセノン入り液体シンチレータ、(2)ミニバルーン、(3)キセノンガスシステムの開発と製作を行う。 $0\nu\beta\beta$  現象は全レプトン数保存則を破り、標準理論を超える現象であり、その探索はニュートリノのマヨラナ性と

ニュートリノの質量構造について知見が得られるため極めて重要である。

## 3. 研究の方法

(1) ミニバルーン製作：要求される要件は、液体シンチレータに対する化学的耐性が十分であること、キセノン透過しないこと、十分な機械的強度を有する事、光透過率が高いこと、高いクリーン度、特に放射性不純物を含まないこと、物質量が少ないこと(できる限り薄いこと)である。これらの条件を満たすフィルムの選定とシール技術の開発を行った。

キセノン透過しないかどうかのチェックはフィルムを半割れ型の容器ではさむ装置を考案し、液体シンチレータとキセノンガスを用いて一定期間保持した後ガスクロマトグラフ分析で調べた。また放射性不純物の有無はICP-MS質量分析計で調べた。フィルム同士の接合はインパルス溶着法を用いることにし、機械的強度から溶着条件の最適化を行った。ミニバルーン製作時のフィルムの補修についてもテストを行い、市販の接着剤で十分なクリーン度と透明性、作業に適した粘性を有するものを選定することができた。このノウハウはミニバルーン製造後のヘリウムリーク検出器を用いて行った検査で見つかったリークの補修に用いられた。

クリーンなフィルム部材の選定は自明でなく、候補となる部材はナイロン、EVOH、及びそれらの複合膜である。テストの結果、市販のフィルムはどれもウラン、トリウム、カリウムの含有量が多く採用出来ない事がわかり、これら放射性不純物元素を含まないフィルムの試作を行う会社の協力を得て行った。試行の結果クリーンナイロンペレットによる厚さ25umのフィルム単膜が得られた。

ミニバルーンの構造（吊り紐、接続部材）についても強度のほか耐液体シンチレータ性、クリーン度の観点から部材の選定を行った。これらは全部で4基試作したミニバルーンのテストで製作から検出器投入に至るまでのミニバルーンの取り扱い、密度差を利用したミニバルーン内部への高効率の液注入と液の入れ替えなどの研究を通じて決定した。試作バルーンは4分の1スケール2基（エパールフィルム、ポリエチレン製）、実寸大2基（ポリエチレン製とナイロン製）を製作し、前者は小型水槽を製作し、後者は協力会社の大型水槽を借用してテストを行った。そして液操作による水槽中のミニバルーンの振る舞いを調べるとともに、本番で用いるモニターカメラ等のテストも行った。

(2) 液体シンチレータ：平成19～20年度の科学研究費（基盤研究C、「カムランドでの高感度2重ベータ崩壊探索のための液体シンチレータの特性研究」）の成果をもとに最終的な液体シンチレータの成分決定をおこなった。液の光学的特性の経年変化について分光光度計を使って調べ問題ない事が確認された。

(3) キセノンガスシステムの開発：項目(ii)ではさらに液体シンチレータのキセノン溶解にともなう密度変化、また液中でのキセノンの密度変化、加圧状態での液体シンチレータのキセノン溶解度の測定も行った。その成果はキセノンシステムの設計に必要な基礎データとして活かすことができた。

#### 4. 研究成果

2011年の夏、ミニバルーンが完成し神岡の地下実験室に搬送後、カムランド検出器への設置作業を行った。そして同年9月より「カムランド禅」実験としてデータ採取を開始した。観測事象のエネルギーと位置からミ

ニバルーンが予想以上に放射性不純物に汚染されている事が判明した。特にミニバルーンからの $^{214}\text{Bi}$ の事象が多く、これはミニバルーンが製作から検出器投入に至るまでの間に埃等で汚染されたものと考えられる。さらにミニバルーンからは自然界に存在しない $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ が見つかった。これは同年3月に発生した東日本大震災にともなう福島原発事故の降灰によるものと判断できる。これらは有効体積の設定で解析的に除去した。その結果 $^{136}\text{Xe}$ 核のニュートリノを伴う2重ベータ崩壊( $2\nu\beta\beta$ )が検出された。これは米国のEXO-200実験に続く検出で、半減期はEXO-200実験と誤差内で一致した。 $^{136}\text{Xe}$ 核の $2\nu\beta\beta$ 事象は以前の実験では検出されず、大幅に長い半減期が与えられていた事象である。データの蓄積にともない $0\nu\beta\beta$ 崩壊の信号領域にピーク状をなす事象が観測された。慎重に解析を行った結果、ピーク的位置と形状、時間変化から $0\nu\beta\beta$ 崩壊ではなく $^{110m}\text{Ag}$ ( $^{110}\text{Ag}$ 核の準安定励起状態)の崩壊によるものと判明した。データの蓄積を続け、有効体積を慎重に最適化（増加）した結果、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は発見できなかったが半減期の下限値 $>1.9 \times 10^{25}\text{yr}$  (90%CL) が得られEXO-200を抜いて世界最高感度を達成した。同じ $^{136}\text{Xe}$ 核の探索実験であるEXO-200の結果と合わせると下限値は $>3.4 \times 10^{25}\text{yr}$  (90%CL) となり、これは核行列要素の理論計算の不定性を考慮しても $^{76}\text{Ge}$ 実験で $0\nu\beta\beta$ 崩壊発見を主張してきたグループの結果を初めて排除する結果となった。実験開始から学術雑誌に投稿した論文は3編を数える。

本実験では $0\nu\beta\beta$ 崩壊の信号域に存在する $^{110m}\text{Ag}$ を除去すべくキセノンを回収、純化し、また液体シンチレータを純化した結果、この邪魔物事象は減少したが十分ではなかったためさらに純化を継続したがその最中

に地下実験室内で火災が発生した。幸い人的被害はほとんどなく検出器本体も無事であったが電源系統や通信線、配管などが損傷し、 $^{110m}\text{Ag}$  の十分な除去ができない状態で本研究計画の終了を迎えた。

今後カムランド禅実験は、 $^{110m}\text{Ag}$  を行った後キセノンランを再開する予定である。本研究計画はカムランドの極低放射能空間を最大限に活用し、液体シンチレータを用いたキセノンの高感度 2 重ベータ崩壊の観測で当初の目標をほぼ達成したと言える。さらにミニバルーンの開発製造やキセノン液体シンチレータの開発など技術上のノウハウの蓄積は今後の更なる高感度化にむけて貴重な経験をもたらしたと言える。

## 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 9 件)

- ① A. Gando, J. Shirai (他 40 名、19 番目), “KamLAND-Zen Collaboration, Limit on Neutrinoless  $\beta\beta$  decay of  $^{136}\text{Xe}$  from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in  $^{76}\text{Ge}$ ”, *Physical Review Letters* 110, 062502-1~5 (2013), 査読有り、DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.062502
- ② 白井淳平、山田悟、「カムランド禅実験による  $^{136}\text{Xe}$  核のニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索: 第 1 フェーズの結果と今」、*原子核研究*, 第 50 巻 2 号, p50-66 (2013)、査読有り。
- ③ A. Gando, J. Shirai (他 37 名、16 番目)、KamLAND-Zen Collaboration, “Limits on Majoron-emitting double- $\beta$  decays of  $^{136}\text{Xe}$  in the KamLAND-Zen experiment”, *Physical Review C* 86, 021601(R)-1~4 (2012)、査読有り、DOI: 10.1103/PhysRevC.86.021601
- ④ A. Gando, J. Shirai (他 37 名、16 番目)、KamLAND-Zen Collaboration, “Measurement of the Double-Beta Decay Half-life of  $^{136}\text{Xe}$  in KamLAND-Zen”, *Physical Review C* 85, 045504-1~5 (2012), 査読あり、DOI: 10.1103/PhysRevC.85.045504
- ⑤ A. Gando, J. Shirai, F. Suekane (他 63 名、18 番目), KamLAND Collaboration, “Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements”, *Neutrino Geoscience*, 4, 647-651, 2011, 査読有り、DOI: 10.1038/ngeo1205
- ⑥ S. Abe, J. Shirai, F. Suekane (他 76 名、22 番目), “Measurement of the  $^8\text{B}$  solar neutrino flux with the KamLAND liquid scintillator detector”, *Physical Review C* 84, 035804-1~6 (2011), 査読有り、DOI: 10.1103/PhysRevC.84.035804
- ⑦ A. Gando, J. Shirai, F. Suekane (他 76 名、22 番目), KamLAND Collaboration, “Search for extraterrestrial antineutrino sources with the KamLAND detector”, *Astrophysical Journal*, 745, 193-1~8, 2012, 査読有り、DOI: 10.1088/0004-637X/745/2/193
- ⑧ A. Gando, J. Shirai, F. Suekane, (KamLAND Collaboration、他 62 名、18 番目), “Constraints on  $\theta_{13}$  from a three-flavor oscillation analysis of reactor antineutrinos at KamLAND”, *Physical Review D* 83, 052002-1~11 (2011), 査読有り、DOI:

10.1103/PhysRevD.83.052002

- ⑨ S. Abe, J. Shirai, F. Suekane, (KamLAND Collaboration、他 79 名、18 番目)、  
“Production of Radioactive Isotopes through Cosmic Muon Spallation in KamLAND”, Physical Review C81, 052002-1~11, 2010、査読有り、  
DOI:10.1103/PhysRevC.81.025807

[学会発表] (計 5 件)

- ① 白井淳平、” KamLAND-Zen: Status and Future”, Neutrino Oscillation Workshop 2012, Sep.10, 2012, Otranto, Italy.  
② 白井淳平、” KamLAND-Zen”, KEK 現象論研究会 (KEK-PH2012)、2011年2月28日、高エネルギー加速器研究機構、つくば市。  
③ 白井淳平、KamLAND-Zen、二重ベータ崩壊研究懇談会、2010年12月17日、岩沼市。  
④ 白井淳平、” KamLAND-Zen for the Neutrino-less Double Beta Decay of  $^{136}\text{Xe}$ ”, the 3rd GCOE International Symposium “Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy”, 2010年2月17日、東北大学。  
⑤ 白井淳平、” Reactor, Geo and Solar neutrinos”, XXIst Recontres de Blois, Windows on the Univers, 21-26, June, 2009, Chateau de Blois, sVallee de la Loire, France.

[図書] (計 1 件)

末包文彦、白井淳平、湯田春雄、共立出版、  
「素粒子・原子核物理学の基礎 ～実験から統一理論まで～」、2011、398 ページ。

## 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・  
准教授  
研究者番号：90171032

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

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