

平成 30 年 9 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287035

研究課題名(和文) 加圧環境を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験

研究課題名(英文) Neutrinoless double beta decay search experiment using pressurized environment

研究代表者

丸藤 祐仁 (Gando, Yoshihito)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教

研究者番号：60396421

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,000,000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ための次世代ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験を実現するため、加圧環境下においてキセノンガス溶解度を高めた液体シンチレータを用いることで測定感度を高める開発研究を行った。特に、上記の条件を実現できる液体シンチレータの開発、現在地下実験で問題になっている容器の表面汚染を防ぐためのスーパークリーンルームの使用方法の改善、容器由来のノイズ事象を大幅に低減することができる発光性容器の開発と技術実証に成功した。

研究成果の概要(英文)：We have developed for the methods based on the high xenon gas concentration liquid scintillator under the pressurized environment to realize the next generation neutrino-less double beta decay search experiment to verify Majorana neutrino property. Especially we have searched suitable components of liquid scintillator, improved how to use super clean room to avoid container surface contamination which has become problems in underground experiments, developed and technically demonstrated about scintillating container which can reduce container origin backgrounds.

研究分野：数物系科学

キーワード：二重ベータ崩壊 ニュートリノ 発光性容器

### 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動研究の進展により、ニュートリノが質量を持つことが明らかになったものの、宇宙論や崩壊の研究から設定されている質量の上限値は、他のクォークや荷電レプトンと比べてニュートリノが桁違いに軽いという問題を提示している。また、ニュートリノが有限質量を持つという事は、ニュートリノが粒子と反粒子で異なるディラック粒子、もしくは同一であるマヨラナ粒子という選択肢を与える。ニュートリノがディラック粒子であれば左巻きと同質量の右巻き粒子が存在するものの、相互作用が弱いために発見されていないという事になり、マヨラナ粒子であればセンサー模型を通して大質量の右巻きニュートリノを導入し、軽いニュートリノを説明可能となる。一方、ニュートリノのマヨラナ性はレプトン数の破れを含んでおり、重いニュートリノの崩壊を通してバリオン数を生成するレプトジェネシス理論が現在の物質優勢宇宙を説明する有力な理論の一つとして議論されている。

ニュートリノのマヨラナ性を検証する唯一現実的な方法は、二重崩壊を起こす特殊な原子核を用いたニュートリノを伴わない二重崩壊事象の検出であり、 $^{136}\text{Xe}$  を用いたカムランド禅および EXO 実験が有効質量領域の探索をリードし、 $^{76}\text{Ge}$  を用いた GERDA や  $^{130}\text{Te}$  を用いた CUORE が実験開始に向け建設を進めていた。

### 2. 研究の目的

現在行われているカムランド禅の技術を元に、逆階層構造領域、そして正常階層構造領域の感度に到達するため、以下の開発研究を行う。

- (1) 液体シンチレータへのキセノンガスの溶解度はヘンリーの法則に従う。そのため、液面下 10m, 30m ではそれぞれ 1.8 気圧下, 3.4 気圧下に達し、これまでより数倍溶かすことが可能になる。これにより体積増加に伴うノイズ事象を抑制したままより多くの崩壊核の導入が可能になる。この加圧環境下におけるキセノン導入を実現できる液体シンチレータの開発を行う。
- (2) これまでの測定では、キセノン含有液体シンチレータを保持するナイロン製容器の放射性元素含有量と表面汚染が感度を制限していた。そのため、放射性不純物の観点からクリーンな容器の作成、および不純物が含まれていたとしても解析的に除去することが可能となる発光性容器の開発を行う。

### 3. 研究の方法

- (1) カムランド禅で使用しているキセノン含有液体シンチレータ、外部液体シンチレータ、バッファオイルの密度差は、約

0.1%未満で調整されている。その一方でキセノンガスを溶解させると密度が増加し、発光量が低下する。そのため、液体シンチレータの成分比の変更や新しい成分を導入することで適切な液体シンチレータの開発を行う。

- (2) これまで使用してきたナイロンフィルムを用いたバルーンの製作を念頭に、クリーンルームにおける作業環境の改良と表面汚染の原因を調査し、クリーンなバルーン製作手順を確立する。
- (3) カムランド禅で問題となっているフィルム中のウラン系列  $^{214}\text{Bi}$  からの  $\gamma$  は、 $^{214}\text{Po}$  からの  $\alpha$  との遅延同時計測によって特定することができる。はフィルム外の液体シンチレータまで到達しないと発光しないため現在この手法は使用できないが、フィルム自体が発光する素材で出来ていれば使用可能になる。この観点から発光するフィルムを用いたバルーンの作成を行う。

### 4. 研究成果

- (1) バルーン製作時の表面汚染を避けることを目的としたクリーンルーム内の埃発生源の特定と微粒子の移動を調査するため、微粒子可視化装置を用いた調査を行った。この測定により、数日間使用した後のクリーンスーツは粒子を多数発することが分かり、一度使用したスーツはクリーニングに出す必要があると判明した。また、クリーンルーム用の手袋や使用する道具なども超純水で洗浄する必要があることが判明した。次に、作業台の下や端は乱流が発生し埃が逆流してくる可能性が高いことが分かり、壁と作業台の間に空間を設けるなどの対策が必要なが判明した。これらの調査から、スーパークリーンルームの使用方法が確立した。

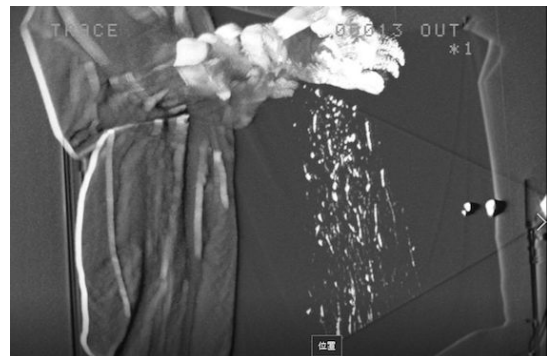


図1 微粒子可視化装置を用いた、手袋からの埃発生状況の確認。

- (2) 洗浄したナイロンフィルムを静電気の帯びやすい湿度 20%以下の環境に1ヶ月放置したところ、ウラン含有量が  $10^{-12}\text{g/g}$  レベルから  $10^{-11}\text{g/g}$  まで増加することが判明した。この対策として除電装置の導入、および本体用のナイロンフ

フィルムと同じ素材のナイロンフィルムでカバーするサンドイッチ状態でバルーン製作を行ったところ、約1年半の作業で $3 \times 10^{-12}$ g/g程度のウラン含有量の増加に抑えることが可能になった。(1)と(2)の結果は、現在遂行しているカムランド禅プロジェクトに反映されている。

- (3) 帝人株式会社の協力により発光性バルーンの素材の候補としてPEN(ポリエチレンナフタレート)フィルムを提供して頂き、このフィルムについてキセノン含有液体シンチレータの保持容器に必要なとされる条件について測定を行なった。その結果、線に対する発光量、発光波形、液体シンチレータ耐性、引っ張り強度、熱溶着パラメータと溶着後の強度について容器として使用するのに十分な条件を有する事を確認した。また、放射性不純物含有量については、解析的に除去することを前提に問題ない数値であることを確認した。さらに透過率については現在使用しているPPOの発光波長である380nmでは吸収があるためbis-MSBなどの波長変換材を使用する必要があるものの、400nmより超波長側では問題が無いことを確認した。
- (4) 前述したPENフィルムを用いて直径80cmの小型バルーンの製作を行った。製作時の溶着温度は237度3.5秒、加熱バーを人の体重で押し付ける方法による手動溶着でバルーン形状の製作が可能であることを確認した。その一方で、手押しの強度にはムラがあり、弱いところで溶着不良によるリーク箇所が見られた。このリーク箇所を補修するために小型溶着機を製作し、熱の受台をバルーンの内側に入れることでバルーン形状になっても追加溶着による補修が可能な方法を確立した。さらに補修に使用可能な接着剤についても調査を進め、一種類使用可能なものを選定した。ウランの含有量が有意であるため限定された箇所のみで使用可能であるものの、解析で使用する有効体積から離れた箇所で使用可能と考えられる。



図2 ブラックライトを照射した 80cmのPEN

フィルム製バルーン。青く発光していることが確認できる。

- (5) 現在のカムランド禅実験では、キセノン含有液体シンチレータを保持するミニバルーンは液面下10mに位置し、バルーン内の圧力は1.8気圧下にある。液体シンチレータに対するキセノン溶解度はヘンリーの法則に従い、この条件下では5.4wt%溶かすことができる。その一方で、キセノンを溶かすにつれ液体密度は上昇し、発光量も低下する。現在のナイロン製ミニバルーンの強度からミニバルーン内外の密度差は0.1%以下にコントロールする必要があるため、発光量を回復した上で、密度差の少ないミニバルーン内部およびミニバルーン外部と外部バルーン間の液体シンチレータ、外部バルーン外部についてのバッファオイルの選定と各種測定を行った。測定の結果、デカン(N10)65%、プソイドクメン(PC)35%、PP02.7g/L、キセノン5.4wt%のキセノン含有液体シンチレータ、パラオール250 80%、プソイドクメン20%、PP01.36g/Lの外部液体シンチレータ、パラオール250 53%、パラオール850 47%のバッファオイルの組み合わせが実現可能であることを確認した。この組み合わせとナイロン製ミニバルーンを使用した場合の感度をシミュレーションしたところ、核行列要素としてQRPAモデルを使用し、5年間の観測を仮定したところ、ニュートリノの有効質量42meVに達するを確認した。
- (6) (5)からさらに発展させ、液面下30mに半径2.25mのミニバルーンを設置することを想定した選定と測定を行った。キセノン含有液体シンチレータはPCベース、外部液体シンチレータはLABベース、外部液体シンチレータの層の厚さは1m、外部液体シンチレータはアクリル層で保持され、アクリル層の外部に高Q.E.光電子増倍管が敷き詰められているという仮定を行った場合、液体シンチレータへのキセノン含有量は、外部液体シンチレータの密度によって制限がかかったものの7.7wt%まで増やす事ができる。さらに発光性ミニバルーンを使用したと仮定して感度をシミュレーションしたところ、5年間の測定による有効質量の到達感度は17.5meVになった。有意なバックグラウンドは宇宙線によるC12原子核破砕によるC10および2 $\mu$ 事象だったが、前者については現在想定している90%の解析的除去率の向上、発光量増加もしくは集光率増加によるエネルギー分解能の向上によって改善可能と考えられる。また後者については、キセノン含有液体シンチレータの発光量が外部

液体シンチレータより小さいため、ミニバルーン付近で発生した の一部分が外部液体シンチレータで発光し、見かけ上高いエネルギーに再構成され 0 の信号領域にシフトしてしまう事象を含んでいる。そのため、2つの液体シンチレータの発光量を揃える事ができれば影響を少なくする事ができると考察される。

#### 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, Y.Gando, et al., "A Search for Electron Antineutrinos Associated with Gravitational-wave Events GW150914 and GW151226 Using KamLAND", The Astrophysical Journal Letters, 829:L34 (5pp), 2016, 査読有
- (2) A.Gando, Y.Gando, et al., "Search for Majorana Neutrinos Near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen", Physical Review Letters 117, 082503 (2016), 査読有
- (3) K.Asakura, A.Gando, Y.Gando, et al., "Search for double-beta decay of  $^{136}\text{Xe}$  to excited states of  $^{136}\text{Ba}$  with the KamLAND-Zen experiment", Nuclear Physics A 946 (2016) 171-181, 査読有
- (4) K.Asakura, A.Gando, Y.Gando, et al., "KamLAND Sensitivity to Neutrinos from Pre-SuperNova Stars", The Astrophysical Journal, 818:91 (8pp), 2016, 査読有
- (5) K.Asakura, A.Gando, Y.Gando, et al., "Search for the proton decay mode  $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$  with KamLAND", Physical Review D 92, 052006 (2015), 査読有
- (6) K.Asakura, A.Gando, Y.Gando, et al., "Study of electron Anti-Neutrinos Associated with Gamma-Ray Bursts Using KamLAND", The Astrophysical Journal, 806:87 (5pp), 2015, 査読有
- (7) A.Gando, Y.Gando, et al., "7Be solar neutrino measurement with KamLAND", Physical Review C 92, 055808 (2015), 査読有
- (8) G.Keefer, ..., Y.Gando, et al., "Laboratory studies on the removal of radon-born lead from KamLAND's organic liquid scintillator", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 769 (2015) 79-87, 査読有
- (9) T.I.Banks, ..., Y.Gando, et al., "A compact ultra-clean system for deploying radioactive sources inside

the KamLAND detector", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 769 (2015) 88-96, 査読有

〔学会発表〕(計 18 件)

- (1) 丸藤祐仁, "KamLAND-Zen and Experimental approach of  $0\nu\beta\beta$  decay in Japan", 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 25 日, 東京理科大
- (2) 蜂谷尊彦, "KamLAND-Zen 800 実験の現状(4)", 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年 3 月 25 日, 東京理科大
- (3) 丸藤祐仁, "ニュートリノ質量と二重ベータ崩壊探索実験", 大阪ワークショップ 2017, 2017 年 11 月 11 日, 大阪大
- (4) 蜂谷尊彦, "KamLAND-Zen 800 実験の現状(3)", 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 13 日, 宇都宮大
- (5) Yoshihito Gando, "KamLAND-Zen", 第 7 回神戸大学ブリュッセルオフィスシンポジウム, 2016 年 11 月 8 日, Vrije Universiteit Brussel U-Residence, Belgium
- (6) 小原脩平, "KamLAND-Zen 800 の現状", 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 23 日, 宮崎大学
- (7) 小原脩平, "Inner balloon uninstalation and new balloon production", Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research, 2016 年 5 月 11 日~13 日, 東京大学
- (8) 小原脩平, "クリーンルームにおける微粒子可視化映像", 新学術「地下素核研究」A 班主催第 1 回若手研究会, 2016 年 2 月 23 日~24 日, 大阪大学
- (9) Shuhei Obara, Yoshihito Gando, "Status of balloon production for KamLAND-Zen 800", 14<sup>th</sup> viena conference of instrumentation, 2016 年 2 月 15 日~19 日, Viena Univ. of Technology, Austria
- (10) 丸藤祐仁, "宇宙の物質・反物質非対称性を探るカムランド禅実験の高感度化", 第 16 回マイクロシステム融合研究会, 2015 年 10 月 16 日, 東北大学
- (11) 林歩美, "KamLAND-Zen 実験次期フェーズに向けたバルーンフィルム洗浄の研究", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 25 日, 大阪市立大学
- (12) 丸藤祐仁, "次期 KamLAND-Zen 用ミニバルーン製作の現状", 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 25 日, 大阪市立大学
- (13) 小原脩平, "KamLAND-Zen 将来計画へ向けた発光性バルーンフィルムの開発研究", 新学術領域「宇宙の歴史を紐解く地下素粒子原子核研究」2015 年領域研究会, 2015 年 5 月 15 日~17 日, 神戸大学
- (14) 小原脩平, "KamLAND-Zen 実験の将来計画へ向けたシンチレーションバルーン

- ンの開発研究”，日本物理学会第 70 回年次大会，2015 年 3 月 21 日，早稲田大学
- (15) 丸藤祐仁，“カムランド禅用ミニバルーンのバックグラウンド対策”，新学術極低放射能技術研究会，2015 年 3 月 9 日，淡路夢舞台国際会議場，兵庫県
- (16) 小原脩平，“バックグラウンド除去のための発光性バルーンフィルムの開発研究”，新学術極低放射能技術研究会，2015 年 3 月 9 日，淡路夢舞台国際会議場，兵庫県
- (17) 小原脩平，“KamLAND-Zen 実験の将来計画に向けたシンチレーションバルーンの研究”，日本物理学会 2014 年秋季大会，2014 年 9 月 20 日，佐賀大学
- (18) 丸藤祐仁，“Latest results from KamLAND-Zen second phase”，37<sup>th</sup> Internal Conference on High Energy Physics (ICHEP)，2014 年 7 月 3 日，Valencia, Spain

(3)連携研究者 ( )

研究者番号：

(4)研究協力者 ( )

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔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

丸藤 祐仁 (GANDO, Yoshihito)  
東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教  
研究者番号：60396421

### (2)研究分担者

( )

研究者番号：