

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008～2009年度

課題番号：20684007

研究課題名 (和文)

カムランド検出器による 150Nd 二重ベータ崩壊の研究

研究課題名 (英文)

Study of Double Beta Decay of 150Nd with KamLAND Detector

研究代表者

吉田 斉 (Sei Yoshida)

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：60400230

研究成果の概要 (和文)：

ネオジウム (Nd) 試薬および Xe ガスを溶解した液体シンチレータ (LS) の開発を行い基本性能の評価を行った。両溶解化合物の比較から、デカンを主成分とする LS への Xe 溶解量 (3.0 wt%)、および発光量 (KamLAND に比して 8% 低下)・透過率の点から 2 重ベータ崩壊核  $^{136}\text{Xe}$  が有力な核種であることが判った。具体的な導入方法の検討と実証試験を行った結果、KamLAND 検出器において 400 kg の  $^{136}\text{Xe}$  を使用し約 2 年間の測定で、有効ニュートリノ質量 50 meV の感度を実現する具体的な方法が確立された。

研究成果の概要 (英文)：

The development of the Neodymium loaded liquid scintillator (LS) and Xenon dissolved LS was performed from the view point of neutrino-less double beta decay ( $0\nu\beta\beta$ ) measurement. The properties such as maximum dissolved amount, scintillation light yield and optical transparency, were measured. As a consequence, it was found that  $^{136}\text{Xe}$  was a promising  $0\nu\beta\beta$  nucleus. The installation method of Xe dissolved LS into the KamLAND detector was established by the preliminary experiments. The sensitivity of the  $0\nu\beta\beta$  decay in the KamLAND was estimated to be  $\sim 50$  meV for the effective Majorana neutrino mass by using 400 kg of  $^{136}\text{Xe}$  for 2 years measurement.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2009年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
年度			
年度			
年度			
総計	18,500,000	5,550,000	24,050,000

研究分野：素粒子実験

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：ニュートリノ・マヨラナ質量・二重ベータ崩壊・カムランド検出器・液体シンチレータ・ネオジウム同位体・キセノン同位体

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノが粒子と反粒子が同じであ

るマヨラナ粒子であれば、二重ベータ崩壊と呼ばれる現象を探索することによりニュー

トリノ質量の絶対値、質量生成のメカニズムに迫ることができる。ニュートリノが質量を持つメカニズムはこのマヨラナ粒子という機構が有力であると考えられており、この場合には、特定の条件を満たす核種がニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊を引き起こす。この二重ベータ崩壊の探索は、ニュートリノ質量の生成メカニズムを解明するものであり素粒子物理学の最重要テーマの一つである。

## 2. 研究の目的

本研究課題は、将来計画する大規模二重ベータ崩壊観測システムにおいて、理論的に予測されているニュートリノ質量領域に到達する感度を有することを立証し、ニュートリノ質量の絶対値測定のための具体的な方法を確立することを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) Nd 含有液体シンチレータについてその基本的性質の測定・評価、および KamLAND 検出器への導入の可能性について考察を行う。

### ① LS 中での Nd 溶解度の調査

Nd 含有有機物を利用した調査研究が行われた実績があり、重量比 1% 以上の溶解をすでに達成しているものもある。しかし溶媒はカムランド液体シンチレータとは異なるため、それらの研究成果を本研究計画に導入できるかを調査する必要がある。カムランド実機には太陽ニュートリノ観測に向けて建設された蒸留装置が設置されており、液体シンチレータの配合を変更することは比較的容易に行うことが可能であるため、カムランドの液体シンチレータの溶媒配合（ドデカン：80%、プソイドクメン：20%）をそのまま使用する場合と、一部を別の溶媒に置換する場合を含めて調査した。

### ② Nd 含有 LS の光学特性の評価

作成した Nd 液体シンチレータの透過率を吸光光度計を使用して測定した。特定の波長成分での吸収が認められる場合は、現在のカムランド液体シンチレータの波長変換剤（PPO）を別の吸収・発光特性を持つものに置き換える事によって吸収曲線が回復されるかを検証した。

単色エネルギー $\gamma$ 線を照射して、作成された作成した Nd 液体シンチレータの発光量を測定し、カムランド液体シンチレータとの比較を行った。これらの測定を溶解サンプル毎に行い系統的な調査を行った。

### ③ 安定性、安全性の評価

液体シンチレータは主として有機溶媒を主成分とするため、その取り扱いに関する安全性の評価（引火点や発火点）を要する。二重ベータ崩壊の測定では長期の測定時間

を必要とするため、その安定性について恒温槽を使用した加速試験を行い変質、性能劣化の有無を調査した。

(2) Xe 溶解液体シンチレータについて基本的性質の測定・評価、および KamLAND 検出器への導入の可能性について考察する。

### ① LS 中での Xe 溶解度の調査

Nd 含有有機物を利用した調査研究が行われた実績があり、重量比 1% 以上の溶解をすでに達成しているものもある。しかし溶媒はカムランド液体シンチレータとは異なるため、それらの研究成果を本研究計画に導入できるかを調査する必要がある。カムランド実機には太陽ニュートリノ観測に向けて建設された蒸留装置が設置されており、液体シンチレータの配合を変更することは比較的容易に行うことが可能であるため、カムランドの液体シンチレータの溶媒配合（ドデカン：80%、プソイドクメン：20%）をそのまま使用する場合と、一部を別の溶媒に置換する場合を含めて調査した。

### ② Nd 含有 LS の光学特性の評価

作成した Nd 液体シンチレータの透過率を吸光光度計を使用して測定した。特定の波長成分での吸収が認められる場合は、現在のカムランド液体シンチレータの波長変換剤（PPO）を別の吸収・発光特性を持つものに置き換える事によって吸収曲線が回復されるかを検証した。

単色エネルギー $\gamma$ 線を照射して、作成された作成した Nd 液体シンチレータの発光量を測定し、カムランド液体シンチレータとの比較を行った。これらの測定を溶解サンプル毎に行い系統的な調査を行った。

### ③ 安定性、安全性の評価

液体シンチレータは主として有機溶媒を主成分とするため、その取り扱いに関する安全性の評価（引火点や発火点）を要する。二重ベータ崩壊の測定では長期の測定時間を必要とするため、その安定性について恒温槽を使用した加速試験を行い変質、性能劣化の有無を調査した。

(3) KamLAND 検出器本体において、二重ベータ崩壊実験を実現するため以下の考察を行った。

### ① 二重ベータ崩壊核を溶解した LS を導入する方法の確立

小規模バルーンの素材に関して、機械的強度、化学的耐性、Xe ガス透過度、光透過率の測定結果から最適な素材を選定・試作

### ② バックグラウンドの評価

溶解化合物起源および溶解物を保持するためのバルーン素材からのバックグラウンドに関しては、放射線分析、ICP 質量分析をはじめとする不純物測定の結果からモンテカルロ法により Q 値付近でのバックグラウンドの予測を行った。その中でも、トリウム系

列の不純物 ( $^{208}\text{Tl}$ ,  $Q$  値 4.99MeV) は  $^{150}\text{Nd}$  の  $Q$  値付近においてバックグラウンド源となるため詳細な考察を進めた。しかし、 $^{208}\text{Tl}$  は  $^{212}\text{Bi}$  の  $\alpha$  崩壊に続いて半減期 3 分で崩壊するため先発信号として  $\alpha$  崩壊 (液体シンチレータ中での電子換算エネルギーは 600keV) を識別することで、 $^{208}\text{Tl}$  の崩壊事象を捕らえることができると考えられた。この崩壊系列のタグging法によって、唯一の自然放射能バックグラウンド源を除去するためには、対象エネルギー領域の計数率が低いことが要求されるため、詳細に検証を行った。

宇宙線起源のバックグラウンド ( $^{10}\text{C}$ ,  $^{11}\text{Be}$ ) に関しても間もなく導入される新高速データ収集システムを使用することで事象の同定が詳細に可能となる予定であり、実現した際の除去率に関して詳細な評価を行った。

ニュートリノを放出する二重ベータ崩壊を起源としたバックグラウンドは、光学特性評価から得られたエネルギー分解能の考察をもとに評価し、また  $Q$  値付近でのエネルギー較正の不定性から生まれるスペクトルの歪みが与える影響についても考察した。

### ③ 溶解方法の確立と溶解プラントの設計

二重ベータ崩壊核を溶解した液体シンチレータの性能評価をもとに、カムランドでのエネルギー分解能、溶解量、位置分解能をモンテカルロシミュレーションにより評価し、最適な手法・配合を考察した。また、その手法で製作するための溶解物混合プラントの設計に着手した。将来的なカムランド検出器への導入計画も具体的に立案し、プラントの処理能力、処理中の不純物混入経路の考察・処置、運転制御方法などの詳細を考察した。

## 4. 研究成果

ネオジウム (Nd) 試薬を使用して、液体シンチレータ (LS) の開発を行い基本性能の評価を行った。Nd 化合物は KamLAND の LS 中への溶解度は小さく、1 wt% の溶解度を得るためには、界面活性剤・シンチレータカクテルを併用する必要があることが判った。現在までに作成された、無機 Nd 化合物含有 LS は紫もしくは青色に着色している。このため透過率、発光量は現在の KamLAND-LS と比較して大きく性能が劣化している。Nd 含有液体シンチレータの基本性能を基に、KamLAND 検出器への具体的な導入デザインの検討を行った。Nd 化合物の KamLAND の LS 成分への溶解度を 1 wt% とし、分析によって得られた透過率、発光量を使用して、ニュートリノ有効質量の予想検出感度を評価した。現在までのところ、Nd 化合物の溶解による発光量と透過率の劣化が、到達感度に致命的な影響を及ぼすという結果を得ており、目標感度に到達するためには、着色されない Nd 化合物の探索、および KamLAND 検出器 LS 成分以

外の有機溶剤の導入を検討する必要があることが判った。

Nd 核種の研究開発と平行して、他核種の可能性についても検討を行った。その過程で、キセノン (Xe; 2 重ベータ崩壊核  $^{136}\text{Xe}$ ) が有力な核種であることが判ってきた。そのため Xe を溶解した LS の評価を行った。Xe の KamLAND-LS への溶解量、発光量および透過率の測定を行い、発光量が Xe の溶解によって 8% 低下することが判明した。また Xe 溶解による LS 密度の変化 (おおよそ 2% 増加) を調整するため LS 構成溶媒であるドデカン (NP; 密度小) とブソイドクメン (PC; 密度大) の混合比を変更して、同様の性能評価を行った結果、発光溶媒である PC 比の減少による発光量の低下が激しく、発光溶質の PPO 溶解量の追加では回復できない事が示された。そのため、NP よりも密度の小さいデカンを主溶媒に変更して性能評価を行い、KamLAND-LS と比較して性能劣化がない Xe 含有 LS を作成することに成功した。LS 中への Xe 溶解量から、最も有力な検出器デザインとして、KamLAND 検出器の内部に直径 3.4 m の小規模バルーンを新規に導入する案を採用し、予想検出感度の評価を行った。このデザインを採用することで外部起因のバックグラウンドの抑制、透過率低下による検出光子数 (エネルギー分解能) の低下阻止、溶解核種の必要量抑制を実現でき、有効マヨナラ質量 0.1eV 以下の感度を有することを立証できた。

Xe 溶解 LS による KamLAND 検出器での二重ベータ崩壊観測を実現するために、具体的な導入方法の検討と実証試験を行った。①デカンを主成分とする LS への Xe 溶解量 ②発光量 (KamLAND に比して 8% 低下) ・透過率の精密測定 ③小規模バルーンの素材に関して、機械的強度、化学的耐性、Xe ガス透過度、光透過率の測定結果から最適な素材を選定・試作 ④Xe ガスの溶解・回収方法の確立と実機への導入のための設備設計 を行った。これらの研究を通して、KamLAND 検出器において、400 kg の  $^{136}\text{Xe}$  を使用し約 2 年間の測定で 0.1eV 以下 (到達感度 50 meV) の感度を実現する具体的な方法が確立された。

## 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 12 件)

### ①

著者: S. Abe 他 (82 名中 26 番目)

標 題: Study of the Production of Radioactive Isotopes through Cosmic Muon Spallation in KamLAND

掲載雑誌: Physical Review C

巻・発行年・ページ：81 (2010) 025807

査読の有無：有

②

著者：B. E. Berger 他 (77 名中 46 番目)

標題：The KamLAND Full-Volume Calibration System

掲載雑誌：Journal of Instrumentation

巻・発行年・ページ：4 (2009) 04017

査読の有無：有

③

著者：S. Yoshida 他 (9 名中 1 番目)

標題：Ultra-violet wavelength shift for undoped CaF<sub>2</sub> scintillation detector by two phase of liquid scintillator system in CANDLES system

掲載雑誌：Nuclear Instruments and Methods

巻・発行年・ページ：A601 (2009) 282

査読の有無：有

④

著者：S. Abe 他 (82 名中 30 番目)

標題：Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND

掲載雑誌：Physical Review Letters

巻・発行年・ページ：100 (2008) 221803

査読の有無：有

[学会発表] (計 2 件)

①

発表者：吉田 斉

標題：Double beta decay of 136Xe with KamLAND

学会名：Joint Meeting of APS and JPS

発表年月日：2009 年 10 月 17 日

場所：ハワイ、アメリカ合衆国

②

発表者：吉田 斉

標題：Progress toward 7Be solar neutrino detection with KamLAND

学会名：American Chemical Society Annual Meeting

発表年月日：2009 年 8 月 19 日

場所：ワシントン DC、アメリカ合衆国

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

吉田 斉 (Sei Yoshida)

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：60400230

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：