

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19540256

研究課題名(和文) 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ーの特性研究

研究課題名(英文) Study of characteristics of the liquid scintillator for high sensitivity search for double beta decay in KamLAND

研究代表者

白井 淳平 (SHIRAI JUNPEI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：90171032

研究成果の概要：

極低放射能環境を有し、世界最大(1000トン)の液体シンチレーターを有する高感度ニュートリノ検出器カムランドを利用して、キセノン同位体核( $^{136}\text{Xe}$ )の2重ベータ崩壊探索実験を遂行するため、これに必要な液体シンチレーターの開発を行い種々の基礎的データを獲得した。すなわち、液体シンチレーターに対するキセノンの溶解度、キセノン溶解時での発光量、光透過率、収納容器であるバルーン膜のキセノン透過率、経年特性などを測定した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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、液体シンチレーター、2重ベータ崩壊、カムランド

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノは検出が極めて困難であり、今なお謎に満ちた素粒子である。中でもニュートリノがそれ自身反粒子であるかどうか(その場合ニュートリノはマヨラナ粒子であると言う)は自明でなく、その解明は素粒子標準理論を超えた大統一理論の構築や、宇宙

創成のメカニズムの謎に重要な示唆を与えるものと考えられている。もしニュートリノがマヨラナ粒子であり、かつ質量を持てば、原子核の2重ベータ崩壊のうち、ニュートリノの出ない2重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ 崩壊と言う)が起こり得る。すなわち数種の原子核で観測がされている2個のニュートリノと2個

の電子を放出する高次の弱い相互作用である2重ベータ崩壊とは異なり、電子が2個放出されるのみで、原子核の原子番号が2増える崩壊である。

この現象はニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかを確認できるほとんど唯一の過程であり、その探索はニュートリノの基本的性質の解明と、素粒子標準理論を超える新たな物理現象に迫る極めて重要な知見を与えるものと期待されている。このため長い間世界各地で探索実験が行われてきた。数年前、ゲルマニウムの同位体原子核における $0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見が報告された。しかし解析手法に問題があるとされ、独立した実験による確認が待たれており事実上未発見と言って良い。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索のポイントは2重ベータ崩壊の候補となる原子核を大量に用いることと、邪魔物信号を極力排除した極低放射能環境を構築することである。

ニュートリノ研究は近年多大の進展が見られ、ニュートリノ振動の発見によるニュートリノの有限質量の確認とニュートリノ混合角の精密測定が行われた。これにともない $0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索が素粒子研究の最重要課題のひとつとして大きく脚光を浴びており、世界の主要な研究施設で高感度の探索実験が建設あるいは計画中である。

数ある実験手法の中で、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の候補であるキセノン136同位体核を用いた高感度探索は有力な探索手法として注目されている。特に液体シンチレーター等の有機液体に対するキセノンの高い溶解度を活かした探索は大量の原子核を用いることができ高感度が期待される。しかし実験に必須である大型装置全体を環境放射能から保護し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊以外の邪魔物反応を徹底的に除去する事は容易でなくその困難さゆえに未だ実現されていない。

## 2. 研究の目的

本研究は世界最大（1000トン）の大容量液体シンチレーターを有するカムランド検出器とその極低放射能環境を利用して、キセノン同位体核( $^{136}\text{Xe}$ )のニュートリノを伴わない2重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ 崩壊)の高感度探索実験を行うために必要な基礎的研究である。

カムランドでの $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験では、第1段階として総重量200kgのキセノン136原子核を使用し、ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうか調べるとともにその絶対質量に対して100meV程度の感度での測定を行う予定である。実現すれば現時点での最高感度に匹敵する探索である。実験装置は現在のカムランド検出器の中心部にある液体シンチレーターを収納する直径13メートルのバルーンの内部に、直径約3メートルの薄くて透明なバルーンを設置し、この内部にキセノンを溶解した重量約10トンの液体シンチレーターを注入し探索を行う。

したがってカムランドでの $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験の実現には、大量の $^{136}\text{Xe}$ ガスを溶かした液体シンチレーターの開発や、キセノンの溶解度、キセノンによる液体シンチレーターの発光量、光透過率への影響、物質膜の透過性（キセノン溶解液体シンチレーターを収納する透明な薄いバルーン膜がキセノンをどの程度透過しないかどうか）など数多くの基礎的データを必要とする。特にキセノンは非常に高価な元素であり、フィルムの透過による外部への漏洩がないことを確認することは実験にとって極めて重要である。しかし液体シンチレーターの存在下でキセノンガスのフィルム透過率を測ったデータは見られず、実際に使用する

液体でその適否を確認するしかない。本研究はこれら基礎データの獲得を目指して行うものである。

### 3. 研究の方法

(1) キセノンの液体シンチレータへの溶解度はキセノンをバブリングにより溶解させ、その重量変化(増加率)を10万分の1の高精度で測定可能な電子天秤を用いて測定することにより行った。

(2) 液体シンチレータの発光量測定は、セシウム136のガンマ線で液体シンチレータを照射し、コンプトン後方散乱によるガンマ線をNaI結晶でとらえ、散乱による決まったエネルギーの反跳電子がもたらす液体シンチレータの発光を光電子増倍管で同時計測することにより行った。

(3) 液の透明度はダブルビーム分光光度計を用い、10cm長の石英セルに満たした液体シンチレータサンプルについて光電子増倍管の検出波長領域(350~450nm)を中心に調べた。

(4) キセノンを溶解させた液体シンチレータを収納するバルーン膜のキセノン透過性の測定は、ナイロン、エバールなどのフィルムを保持し、その両側に一定量の液体シンチレータをフィルムに接触させ、長期間保持できる容器を製作して行った。一方の液体シンチレータにキセノンを溶かして静置し、フィルムを透過して他方の液にキセノンが出てくるかどうかをガスクロマトグラフィー(TCD検出器)による分析を行って調べた。

### 4. 研究成果

(1) カムランド液体シンチレータの構成液体である、ドデカンとプソイドクメン及びその混合液体に対してキセノンの溶解度を測定した。重量比で前者は2.0%。後者は2.7%溶けること、混合液では混合比に対応する溶解度が得られた。その結果、キセノンの重量増加を見越した比重の軽い液体シンチレータを開発する必要があることがわかった。

(2) 1)の結果に基づいて液体シンチレータの成分液体を変えて調べた結果、ドデカンとプソイドクメンの混合液体では必要な密度が得られないことがわかり、デカンとプソイドクメンとの混合液体であれば要求を満たすことがわかった。混合比の最適化を行った結果、デカン:プソイドクメン=81.8%:18.2%が得られた。これに発光剤(PP0)を溶かし最終候補となる液体シンチレータが決定された。この液体シンチレータについて発光量などを調べた。

(3) キセノンを溶解したカムランド液体シンチレータの発光量は、キセノン原子の発光から増加することが予測されたが、結果はこれに反し約15%の減少が確認された。2)で決定したデカンを用いた液体シンチレータについて発光剤(PP0)の量の最適化を行った結果、現行のカムランド液体シンチレータを上回る発光量の液体シンチレータが得られた。

(4) キセノンの溶解による液体シンチレータの光透過度の変化(低下)は本研究の期間内では認められなかった。しかしより信頼度を上げるためにはさらに長期間にわたる測定が必要であり、特に微量の酸素による影響をなくすための十分な窒素雰囲気での測定が必要である。

(5) 液体シンチレーターの存在下での種々の膜に対してキセノンの透過率を測定した。カムランドの多層膜 (135  $\mu\text{m}$ 厚)、ナイロンフィルム (25  $\mu\text{m}$ 厚)、エパールフィルム (12  $\mu\text{m}$ 厚) について調べた結果、いずれもキセノンの透過は検出されず、後二者は2重ベータ崩壊探索実験に有力な部材であることが確認された。

(6) 以上から本研究により、液体シンチレーターを用いたキセノン136原子核の2重ベータ崩壊探索実験に向けて、必要となる液体シンチレーターとその光学的性質、液体シンチレーターを保持するバルーンの膜選定についての基礎データが獲得された。

#### 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3件)

① S.Abe, J.Shirai et al, KamLAND Collaboration, Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND, Physical Review Letters, 100, 221803-1~5, 2008, 査読有。

② JunpeiShirai (for the KamLAND Collaboration), New KamLAND Results, proceedings of the fourth NO-VE International Workshop on NEUTRINO OSCILLATIONS IN VENICE, 447~457, 2008, 査読無。

③ J.Shirai (for the KamLAND Collaboration), KamLAND Results, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.), 168, 77~83, 2007, 査読無。

[学会発表] (計3件)

① 白井淳平、KamLANDによるニュートリノ計測、日本原子力学会/応用物理学会、第20回夏の学校、2008年8月1日、浜松市。

② 白井淳平、New KamLAND Results, IV International Workshop on Neutrino Oscillations in Venice, 2008年4月17日、ヴェネチア (イタリア)。

③ 白井淳平、KamLAND: Neutrinos from

Reactors, the Earth and More...、KEK理論研究会「素粒子物理の展望」(KEK PH07)。2007年3月3日、高エネルギー加速器研究機構。(つくば市)。

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

白井 淳平 (SHIRAI JUNPEI)

東北大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：90171032

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし