

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 24 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21244034

研究課題名（和文） 48Ca の二重ベータ崩壊の研究

研究課題名（英文） Study for double beta decay of 48Ca

研究代表者 岸本 忠史（Kishimoto Tadafumi）

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90134808

研究成果の概要（和文）：

レプトン数保存則の破れに対応するニュートリノのマヨラナ粒子性を検証するために、二重ベータ崩壊の研究を行う。48Ca の二重ベータ崩壊の研究を行うために、本研究では、CaF₂ シンチレータをメイン検出器とする CANDLES III(UG)システムを構築した。さらに、検出器システムの各種性能評価を行い、有効マヨラナニュートリノ質量 ($\langle m_{\nu} \rangle$) にして 0.5 eV 感度の測定を開始した。

研究成果の概要（英文）：

Measurement of neutrino-less double beta decay provides a test for the Majorana nature of neutrinos and gives an absolute scale of the effective neutrino mass. In order to search for neutrino-less double beta decay of ⁴⁸Ca, we constructed CANDLES system by using CaF₂ scintillators. We checked the performances of the CANDLES system and started a measurement of neutrino-less double beta decay. The sensitivity of the CANDLES III system is 0.5eV for neutrino mass.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	17,700,000	5,310,000	23,010,000
2010 年度	9,900,000	2,970,000	12,870,000
2011 年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
年度			
年度			
総計	36,800,000	11,040,000	47,840,000

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：原子核実験、二重ベータ崩壊、ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

現在の物質優勢の宇宙を説明するには CP 対称性の破れに加えて粒子数の保存則の破れが必要である。現時点で最有力と考えられている説明は、レプトンにおいてこれらの破れが起こるというレプトジェネシスシナリオである。このシナリオの完成にはこれらの

破れを実験的に検証する必要がある。ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊研究は、レプトン数保存則の破れに対応するニュートリノのマヨラナ粒子性を検証するものである。

2. 研究の目的

本研究では CANDLES III(UG)システムを建設し、 ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究を行う。CANDLES III(UG)システムは、メイン検出器として CaF_2 シンチレータを、ベータ検出器として液体シンチレータを、シールド材として水の層を持つ複合型システムである。本システムを用いて、有効マヨラナニュートリノ質量 ($\langle m_{\nu} \rangle$) にして 0.5 eV 程度の感度を持つ実験を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

本研究推進のために、神岡地下実験室に CANDLES III(UG)システムを構築し、測定を開始する必要がある。それぞれの詳細を下記に述べる。



図 1 : 実験室 D に構築した CANDLES 検出器内部。上図 : 検出器の最外部にあたる水タンクの内部。光電子増倍管 55 本が取り付けられている。下図 : 検出器の中心部分に当たる CaF_2 モジュールと液体シンチレータタンク。上部には光電子増倍管 7 本が取り付けられている。

(1) CANDLES III 装置の組み立て

地上実験室での開発のために建設したプロトタイプ検出器から、神岡地下実験室の CANDLES III(UG)システムに、大型 PMT・測定回路類を移設する。また、主検出器である高純度 CaF_2 シンチレータは、全質量 200kg (60 個) から 300kg(96 個)に増設する。システム内部への各部品の取り付け・設置に当たっては放射性不純物を含むほこりの侵入を防ぐ必要があるために、システムの洗浄を行う。測定回路類は別室のエレキハット内に設置し、CANDLES III 装置と配線する。

組み立て・設置が終了した段階で、危険物一般取扱所として消防署の検査を受け、認可

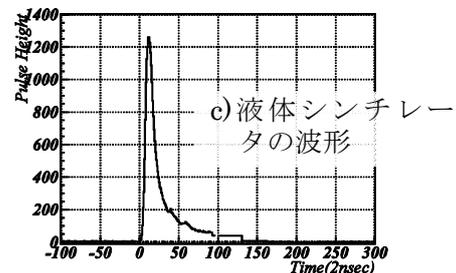
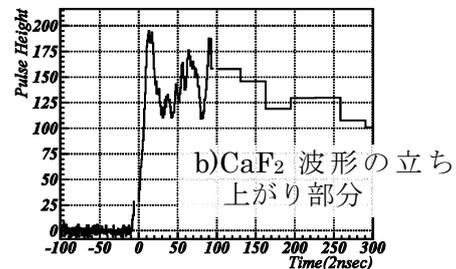
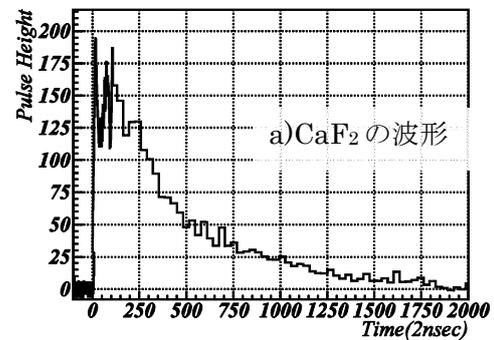


図 2 : FADC で得られた波形。上図 a) : 典型的な CaF_2 の波形。時定数 1 μsec の波形が確認できる。中図 b) : CaF_2 波形の立ち上がり部分の拡大図。立ち上がり部分のみ高速サンプリングでデータ収集される。下図 c) : 液体シンチレータの波形。

を得る。

(2) CANDLES III 装置の試運転・調整

装置の完成を受け試運転を開始する。まず、 CaF_2 シンチレータのみでのテスト測定を行う。この測定で、シンチレータからの信号を読み出すための測定回路 FlashADC (FADC) の動作確認を行う。

その後、液体シンチレータもインストールした状態でのテスト測定を開始する。ここでは、 CaF_2 信号を効率よく収集するためのデータ収集システム（主にトリガーシステム）の開発を行う。また、エネルギー分解能、時間分解能等の各種性能評価を行う。

(3) 改良：ライトパイプシステムの導入 CANDLES III(UG)システムから、さらに二重ベータ崩壊の高感度測定のための基本

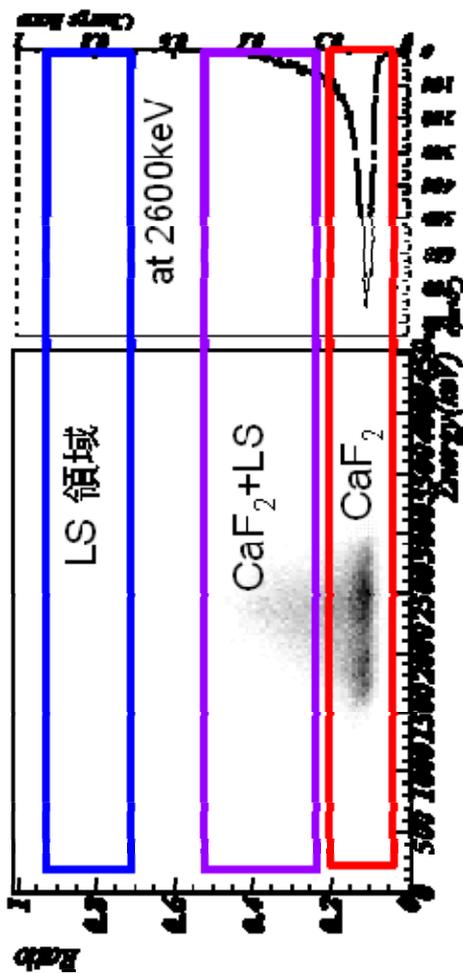


図3： CaF_2 信号のための選択的トリガーを使用した時の事象分布。 CaF_2 事象や、 CaF_2 と液体シンチレータ (LS) の信号が同時に観測された事象は観測されているが、液体シンチレータのみの事象は観測されていない。

性能向上のための研究として、先だって、CANDLES III(UG)システムにライトパイプの導入を進める。ライトパイプは、アクリル製の土台に全反射フィルムを張り付けた形状にする。このライトパイプを液体シンチレータタンクと、光電子増倍管の間に設置し、光の収集効率の向上をめざす。

(4) 本測定の開始

CANDLES III システムでの長期運転を開始し、本測定に入る。長期安定測定のために、放射線源・LED 光源などを用いたエネルギー・時間較正を適宜行う。

4. 研究成果

(1) CANDLES III 装置の組み立て

まず、CANDLES III(UG)システムの地下移設を行った。構築状況の写真を図1に示す。検出器の最外部にあたる水タンク内部には、13(20)インチの光電子増倍管が48(14)本取り付けられている。また、中心部分には、 CaF_2 モジュールと液体シンチレータタンクが入られる。 CaF_2 モジュールは、全 96 個で CaF_2 シンチレータ 305kg に相当する。シールド層となる水、及び、液体シンチレータのための純化装置も設置し、試運転を行った。

(2) CANDLES III 装置の試運転・調整

シンチレータからの信号を読み出すための測定回路 FlashADC(FADC)の開発を進めた。CANDLES で使うシンチレータの時定数は、 CaF_2 が $1\mu\text{sec}$ 、液体シンチレータが数 10nsec と大きな差がある。そのため、液体シンチレータ用の速いサンプリング速度の FADC を用いて、 CaF_2 の波形を収集すると、

膨大なデータ量となる。それを防ぐために、波形の立ち上がりは高速サンプリング、波形の後半は低速サンプリングでデータ収集する FADC を開発した。得られた波形を図2に示す。図 a),b)は、 CaF_2 の波形を、図 c)は、液体シンチレータの波形を示している。b)と c)の波形が十分弁別可能であることから、立ち上がりのみ高速サンプリングでのデータ収集が問題ないことが分かる。このことによって、データ量は $1/10$ まで縮小できた。

また、 CaF_2 信号を効率よく収集するためのデータ収集システム（主にトリガーシステム）の開発を行った。このトリガーシステムによって、液体シンチレータのトリガー効率を 1% 以下に低減させ、 CaF_2 信号のトリガー効率を上げることに成功した（図3参照）。このトリガーシステムを用いて、 CaF_2 事象

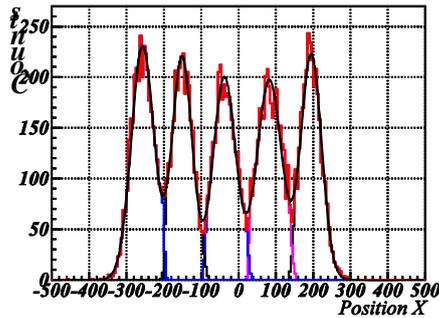


図4：CaF₂信号の事象位置の再構成の結果。CANDLESにおいてCaF₂は、X軸方向に5列配置されており、それが確認できる。

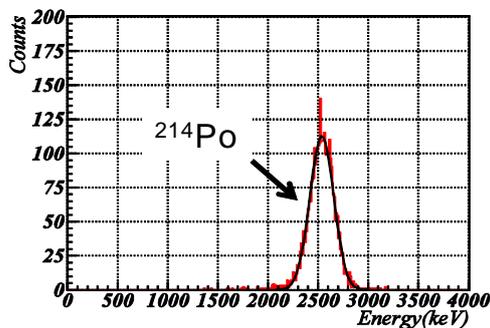


図5：遅延同時計数測定によって得られたエネルギースペクトル。2.5MeV付近のピークが²¹⁴Poによる事象。フィッティングによって得られた²¹⁴Poピークのエネルギー分解能は4.3%。

の観測を行い、事象位置再構成の解析を行った。その結果、CaF₂の位置が正しく再現されていることを確認した(図4参照)。

次の調査として、CaF₂シンチレータのエネルギー分解能評価を行った。CaF₂シンチレータ内部に含まれている放射性不純物によるα線のエネルギースペクトルから、エネルギー分解能σ 4.3%(2.5MeV)を得た(図5参照)。これは、現在のCANDLESシステムで想定されるとおりのエネルギー分解能であった。

(3) 改良および測定開始

CANDLESシステムの今後の感度向上のための改良として、エネルギー分解能を向上させるためのライトパイプシステムの導入をすすめた(図6参照)。これによってシンチレーション光の収集効率が2倍に改善されることが想定される。今後は、バックグラウンドを解析的に除去するとともに、改良



図6：ライトパイプを導入した様子。図1の上写真とほぼ同じ場所から撮影した写真。光電子増倍管がライトパイプに反射している様子がわかる。

を加えたCANDLESシステムで二重ベータ崩壊測定を続けることで、有効マヨラナニュートリノ質量($\langle m_{\nu} \rangle$)にして0.5 eV程度の検証ができる。

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 10件)

1. T. Kishimoto, et al., Neutrino-less double beta decay of ⁴⁸Ca --CANDLES--, AIP Conf. Proc., 査読有、1388 巻、2011、142-148
2. I. Ogawa, T. Kishimoto, et al., Study of ⁴⁸Ca double beta decay by CANDLES, CANDLES, Collaboration, Phys. Conf. Ser., 査読有、312 巻、2011、072014
3. S. Yoshida, T. Kishimoto, I. Ogawa, et al., Light output response of KamLAND liquid scintillator for protons and C-12 nuclei, Nucl. Instrum. Meth., 査読有、622 巻、2011、574-582
4. S. Umehara, T. Kishimoto, et al., Study of double beta decay of ⁴⁸Ca by CANDLES, AIP Conf. Proc., 査読有、1235 巻、2011、287-293
5. I. Ogawa, T. Kishimoto, et al., Study of ⁴⁸Ca double beta decay with CANDLES, J. Phys. Conf. Ser., 査読有、203 巻、2011、012073
6. Y. Fujii, S. Umehara, T. Kishimoto, et al., Mass dependence of calcium

isotope fractionations in crown-ether resin chromatography、Isotopes in Environmental and Health Studies、査読有、46 巻、2011、233-241

7. Kishimoto, T., et al.、Kaon-Nucleus Interaction Studied through the in-flight (K^- , N) Reactions、Nuclear Physics A、査読有、827 巻、2009、321c-323c
8. Yoshida, S., Kishimoto, T., et al.、Ultra-violet wavelength shift for undoped CaF_2 scintillation detector by two phase of liquid scintillator system in CANDLES、NUCLEAR INSTRUMENTS & METHODS IN PHYSICS RESEARCH SECTION A-ACCELERATORS SPECTROMETERS DETECTORS AND ASSOCIATED EQUIPMENT、査読有、601 巻、2009、282-293
9. A.V. Artamonov, et al.、Study of the decay $K^+ \Rightarrow \pi^+, \nu, \bar{\nu}$ in the momentum region $140 < p < 199$ MeV/c、Physical Review D、査読有、79 巻、2009、092004
10. Ogawa, I., et al.、Candles for the Study of Neutrino less Double-Beta Decay ($2\nu\beta\beta$)、Journal of Physics: Conference Series、査読有、203 巻、2009、012073

[学会発表] (計 46 件)

1. T. Kishimoto、Double Beta Decay and Matter Dominated Universe、International Conference on Physics、Mandalay 2012 (招待講演)、2012 年 2 月 4 日、Mandalay University, Mandalay, Myanmar
2. Kensuke Yasuda、Position Reconstruction for CANDLES III (U.G.)、International Workshop on "Double Beta Decay and Neutrinos"、2011 年 11 月 16 日、クリスタルタワー、大阪
3. Go Ito、Single α Events Analysis by Pulse Shape Discrimination with CANDLES III (U.G.)、International Workshop on "Double Beta Decay and Neutrinos"、2011 年 11 月 16 日、クリスタルタワー、大阪
4. Kazuya Takubo、Improvement of the Energy Resolution by Cooling CaF_2 (pure) and WLS for CANDLES、International Workshop on "Double Beta Decay and Neutrinos"、2011 年 11 月 16 日、クリスタルタワー、大阪
5. Wang Wei、The Lifetime measurement of single beta decay of ^{48}Ca 、International Workshop on "Double Beta Decay and Neutrinos"、2011 年 11 月 16 日、クリスタルタワー、大阪
6. Hidekazu Kakubata、Energy Calibration for CANDLES III、International Workshop on "Double Beta Decay and Neutrinos"、2011 年 11 月 16 日、クリスタルタワー、大阪
7. Saori Umehara、CANDLES for the study of Double Beta Decay of ^{48}Ca 、International Workshop on "Double Beta Decay and Neutrinos"、2011 年 11 月 16 日、クリスタルタワー、大阪
8. T. Kishimoto、Nuclear Science in Japan、International symposium on frontiers in nuclear physics (招待講演)、2011 年 11 月 1 日、Beihang University, Beijing, China
9. Saori Umehara、Data Acquisition System of CANDLES Detector for Double Beta Decay Experiment、2011 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference、2011 年 10 月 27 日、Valencia, Spain
10. Saori Umehara、Search for Neutrino-less Double Beta Decay with CANDLES、The 19th Particles and Nuclei International Conference (PANIC11)、2011 年 07 月 28 日、Cambridge, MIT, USA
11. T. Kishimoto、The next generation projects in Deep Underground Laboratories、ASPERA Workshop 2011 (招待講演)、2011 年 7 月 1 日、Zaragoza & Canfranc, Spain
12. T. Kishimoto、CANDLES for the study of double beta decay of ^{48}Ca and its enrichment、The International Symposium on Nuclear Physics in Asia、(招待講演)、October 13-15, 2010、Beihang Univ., 北京 中国
13. I. Ogawa、Low radioactivity CaF_2 scintillator crystals for CANDLES、

Topical Workshop in Low Radioactivity Techniques, LRT2010、August 28-29, 2010、Sudbury, Canada

14. T. Kishimoto、CANDLES for the study of ^{48}Ca double beta decay、Fundamental Physics Using Atoms 2010 (招待講演)、August 7-9, 2010、大阪大学、大阪
15. I. Ogawa、Study of ^{48}Ca Double Beta Decay by CANDLES、International Nuclear Physics Conference, INPC2010、July 4-9, 2010、Vancouver, Canada
16. Saori Umehara、Neutrino-less double beta decay of ^{48}Ca studied by CaF_2 Scintillator、CTP International Conference On Nuclear Physics in LHC Era、2009/11/19、Luxor, Egypt
17. Saori Umehara、Study of Double Beta Decay of ^{48}Ca with CANDLES、The 7th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium、2009/11/12、Univ. of Tsukuba Ibaraki
18. Kensuke Yasuda、Background reduction by position reconstruction for CANDLES III、Third Joint meeting of the nuclear physics division of the APS and JPS、2009/10/17、Hawaii, USA
19. Go Ito、Study of background origin by data analysis and simulation for CANDLES III、Third Joint meeting of the nuclear physics division of the APS and JPS、2009/10/17、Hawaii, USA
20. T. Kishimoto、Opening Address、Double Beta Decay and Neutrinos 2009 (DBD09) 組織委員長、2009/10/11、Hawaii, USA
21. T. Kishimoto、Kaon-nucleus interaction studied by kaon induced reactions、International Symposium on Exotic Nuclei (EXON-2009)、2009/9/30、Sochi, Russia
22. I. Ogawa、Candles for the Study of Neutrino less Double-Beta Decay ($2\nu + 5'$)、TAUP2009、2009/7/3、Rome, Italy

[その他]

ホームページ等

<http://wwwkm.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岸本 忠史 (Kishimoto Tadafumi)

大阪大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：90134808

(2) 研究分担者

小川 泉 (Ogawa Izumi)

福井大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：20294142

能町 正治 (Nomachi Masaharu)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：90208299

(3) 連携研究者 なし

()

研究者番号：