

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 5月17日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22340060

研究課題名（和文） 次世代二重ベータ崩壊実験用高エネルギー分解能システムの開発研究

研究課題名（英文） Development of high energy resolution detection system for the next generation double beta decay experiment

研究代表者

小川 泉（OGAWA IZUMI）

福井大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：20294142

研究成果の概要（和文）：宇宙は何故物質からできているのか？—この究極の謎に答えを出す鍵となる二重ベータ崩壊実験が地下実験室で行われている。残念ながら未だに観測できていないため、さらに測定感度を向上させた次世代実験が計画されている。この計画の重要な開発要素である検出器の高エネルギー分解能化を実現すべく、本研究を行った。テスト実験装置とシミュレーションを用いた研究の結果、次世代装置において十分な性能が実現可能であることが分かった。

研究成果の概要（英文）：“Why there is no anti-matter in the Universe?” One of the keys to answer this question is to observe the neutrino-less double beta decay. Many experiments to search for the decays are running at the underground laboratories although no events have been found. The next-generation experiments which have better sensitivities are in the R&D stage. We have developed the new methods to increase the energy resolution of our detector to improve the sensitivity. The experiments using the prototype detector and the simulation show that the enough performance will be achieved in our next-generation detector.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2011年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2012年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

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：実験核物理・素粒子実験・放射線、X線、粒子線・二重ベータ崩壊

1. 研究開始当初の背景

我々の住む宇宙は物質だけの（反物質のない）世界になっている。この「宇宙における物質・反物質の非対称性問題」の解明には、(1)物質の世界と反物質の世界が微妙に異なることを意味する CP 対称性の破れと、(2)粒子と反粒子が互いに転換できることを意味

する粒子数保存則の破れの検証が鍵となる。(1)はクォークで見つかっており、レプトンでの探索が次の目標になっているが、(2)については $0\nu\text{DBD}$ の観測で検証することが出来る。粒子数保存則の破れはニュートリノ質量と直接関係することが分かっており、質量の存在を意味する振動現象が確認されたことで

(2)の可能性がかなり高くなった。そのため0 ν DBD研究の重要性は極端に増している。

こういった中で日本を含めた世界中で多くの0 ν DBD実験が計画・建設され、一部は測定が始まっている。我々のグループでもCANDLES計画を進めている。0 ν DBD実験は目的事象の半減期が10²⁶年以上と予想されており、BGの低減が実験の鍵となる。CANDLES計画は、候補原子核の中で最もQ値が高く、それ故原理的に最もBGが少ないと期待される⁴⁸Caを標的核として選択し、それを含むCaF₂シンチレーション結晶を主検出器としている。

現在、世界の0 ν DBD研究はいわゆる「逆階層質量(Inverted mass Hierarchy; IH)領域」、すなわち有効マヨラナニュートリノ質量(m_{ν})にして0.03 eVまでの探索を目標としている。この領域まで感度を上げるには、様々なBGを排除・低減していく必要があり、また実際に行ってきた。最終的には、本質的に避けることが出来ない、2 ν DBD事象がBGとして問題になってくる。これは、連続スペクトルである2 ν DBD事象の高エネルギー側のテールが検出器のエネルギー分解能ゆえに0 ν DBD事象の(エネルギー分解能で決まる)着目エネルギー領域にしみだすことによって起きる。よって、これを低減するには検出器のエネルギー分解能を向上させることが重要である。

また、0 ν DBD観測実験はその半減期を m_{ν} に換算するにあたっての理論的な不定性から、複数の候補原子核で探索を行うことが重要である。よって⁴⁸Ca以外の標的原子核を含むシンチレータの利用可能性についても探っていく必要がある。

2. 研究の目的

次世代のCANDLES装置においてIH領域までの感度を持つことが可能なことを示す。また0 ν DBD研究は地下実験室で長期(数年)にわたって測定を続ける必要があることから、地下実験室という特殊環境下で長期にわたって安定した性能が得られることも確認する。

現在、CANDLES計画では300 kg程度のCaF₂結晶を用いたCANDLES III(U.G.)装置が、神岡地下実験室にて稼働中である。CANDLESのようなシンチレーション検出器の場合、エネルギー分解能の本質的な部分は1)検出器の発光量、2)検出器—光センサー(光電子増倍管)間の光の経路での集光効率、によって決まる。本研究では、これらを組み合わせることで最良のエネルギー分解能を達成することを目標とする。具体的には1)についてCaF₂を冷却し、2)について鏡面型導光管を用いることにより、最終的に光センサーで集める光電子数を数倍程度にまで増やし、それに

よってエネルギー分解能の向上を図ろうというものである。

CaF₂結晶は冷却すると発光量が増大することが知られており、50 K程度の環境では室温に比べて4~4.5倍程度の発光量が期待できる。更に時定数の増大も確認されており、結晶内不純物由来のBG低減に重要な役割を果たすパルス形状に影響を与える。これまでの我々の研究からBG弁別能が良くなることが期待できる。その一方で検出器を冷却するには、寒剤・冷凍機・真空チェンバーなどが必要になり、装置の複雑化・検出器付近での物質量の増大(に伴うBGの増加)等が問題になる。

本研究では、CaF₂結晶の冷却による発光量の増大と集光効率の改善を目的とした鏡面型導光管を組み合わせるにより、1) BG源となりうる検出器近傍の物質量を極力減らし、2) 長期に安定使用可能であり、かつ3) 低コストシステムを開発することを目指とする。また、⁴⁸Ca以外の標的原子核を含むいくつかのシンチレータについて、冷却によるエネルギー分解能・BG弁別能の向上の可能性についても研究を進める。

3. 研究の方法

(1) 冷却装置と温度制御機能を備えたテスト実験装置を設計・製作する。

(2) 既存の簡易冷却装置や(1)で製作したテスト装置を用いてCaF₂結晶・波長変換層・液体シンチレータなどについて、低温環境下での特性を詳細に調べる。

(3) 上記の結果をもとに、検出器付近での物質量を避けるという方針のもとにシミュレーションを利用して現有のCANDLES III(U.G.)への冷却システム組み込みの設計をおこなう。

(4) 光電子増倍管用鏡面型導光管についてCANDLES III(U.G.)への導入を行う。反射材・形状について検討し、それに基づき設計・製作を行って、CANDLES III(U.G.)内へ設置する。

(5) (1)で製作したテスト装置を用いて、標的原子核として¹⁶⁰Gdを含むシンチレータについて、特にエネルギー分解能・BG弁別可能性について性能評価を行う。

4. 研究成果

以下、「3. 研究の方法」での番号に対応させて成果を記す。

(1) 測定対象の結晶や結晶モジュールを液体窒素温度まで冷却可能なテスト装置を製作した。冷却機構として低温寒剤(液体窒素)

とヒーターとの組み合わせを用いることとし、空気中の水分による着霜を避けるため、真空チェンバーと組み合わせた装置として設計・製作を行った。温度センサー・温度制御装置の組み合わせにより、自動で温度制御と測定が可能なものとした。またデータ収集に、高速なハードウェアシステムを導入することにより、前述の温度制御と合わせて測定中の温度変化をほぼ無視できるようなものとした。

(2) CaF_2 シンチレータは低温で発光量・時定数ともに増大することが分かっているが、一方、CANDLES 装置で使用する液体シンチレータ及び波長変換層の発光量・時定数などの温度依存性については未測定であった。これらを様々な温度に冷却して、前記パラメータの温度依存性測定を行った。

まず液体シンチレータの凝固点が -70°C 以下であることを測定・確認し、この結果を基に室温から -50°C までの発光量・時定数などの温度依存性測定を行った。結果は、室温から -30°C 付近までで1割強の発光量の増加が認められたが、それ以下の温度では逆に発光量は低下するというものであった。

続いて CaF_2 結晶の周囲を波長変換層で覆った CaF_2 モジュールで -30°C 程度までの範囲で、発光量・エネルギー分解能・信号の時定数等の測定を行った。波長変換層は現状のCANDLES III の物を用いた。その結果、発光量に関しては、室温 (20°C) での値に対し例えば 0°C では1.39倍という結果が得られた(図1)。これは、 CaF_2 (pure)結晶単体から得られていた発光量の増加率よりも大きい値である。エネルギー分解能は発光量から期待される改善が見られた。また時定数に関しては、過去の CaF_2 (pure)結晶単体で得られた結果とほぼ同じ変化となり、波長変換層による影響はなかった。

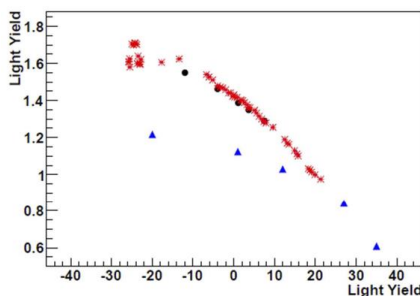


図1 温度変化に伴う発光量の変化(赤・黒)。波長変換層無しの場合(青)との比較。

(3) CANDLES III(U.G.)へ組み込んだ場合の光子伝播シミュレーションにより、エネルギー分解能が改善されることを確認した。この結果をもとにCANDLES III(U.G.)への冷却システムの組み込みについての可能性を検討し、設計を行った。検出器近傍の物質量を

を増やさないために、検出器外部に設置した断熱カバー内に冷媒を流すデザインとした。不凍液を混入させた水を -15°C 程度まで冷却する場合と、純水を 2°C 程度まで冷却する場合の2種類を検討した。予算の裏付けが得られた段階で製作・設置を行う予定である。

(4) 反射材について、LCD用反射フィルムと銀ミラーフィルム、アルミミラーフィルムについて検討した。水中での様々な反射角における反射率の測定結果と水中での長期安定性試験結果・コスト・放射性不純物濃度の面から選定を行い、アルミフィルムを採用した。

続いて反射率測定の結果に基づいたシミュレーションコードを作成した。数種の口径のライトパイプを試作し、これを用いた測定とシミュレーション結果とを比較することによって、シミュレーションの精度を高めた。チューニング済みのシミュレーションコードを用いることにより、CANDLES デザイン(液体シンチレータ中に波長変換層付 CaF_2 結晶を設置)に最適なライトパイプ形状を得た。この結果をもとに設計・製作を行い、CANDLES III(U.G.)内の全てのPMT(62本)に設置した(図2)。1年程度の長期間測定によって性能の安定性の確認も行った。



図2 CANDLES III(U.G.)内に設置された鏡面型導光管

(5) テスト装置を用いて ^{160}Gd を含む2種類のシンチレータ(Gd_2SiO_5 (GSO)・ $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GAGG)結晶)について、発光特性の温度依存性の研究を行った。特にGSOについては、室温から -100°C 付近までの冷却実験を行った結果、 -50°C 付近で発光量が最大(室温の1.4倍程度)となり、さらに冷却すると発光量が低下することが分かった。一方、時定数は温度低下とともに増加することがわかった。この温度変化に対する時定数の変化量が、入射粒子によって異なることから、 β (γ) と α 粒子の弁別可能性について調べたところ、弁別能を表すパラメータ(FOM)が室温に比べて2.5倍程度に上昇することが分かった。GAGGについては、室温付近でも十分な弁別能を示すことが分かった。

以上により、(3)(4)の成果をもとに次

世代の CANDLES 装置 (CANDLES IV) を設計・建設すれば、エネルギー分解能に関して十分な性能が得られることがわかり、 0ν DBD 研究の感度向上に大いに役立つことが期待される。また (5) の成果を今後さらに発展させることにより、仮に 0ν DBD 事象を発見できた場合には、様々な標的原子核で実験を続けて行うことが可能になり、発見の検証と、事象のより一層の理解が深まることが期待される。

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 1 1 件)

- ① I. Ogawa(1 番目), S. Umehara(11 番目), T. Kishimoto(14 番目)他計 14 名, “Background reduction using single-photoelectron counting for WIMP search”, Nucl. Instr. and Meth. **A705**, (2013) 1-6, 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2012.12.083
- ② Masaaki Kobayashi, Yoichi Tamagawa, Shougo Tomita, Akihiro Yamamoto, Izumi Ogawa, Yoshiyuki Usuki, “Significantly different pulse shapes for γ - and α -rays in $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce^{3+}$ scintillating crystals”, Nucl. Instr. and Meth. **A 694** (2012) 91-94, 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2012.07.055
- ③ I. Ogawa(1 番目), T. Kishimoto(2 番目), S. Umehara(3 番目)他計 20 名, “Study of ^{48}Ca double beta decay by CANDLES”, J. of Phys.:Conf. Ser. **375** (2012) 042018, 査読有
DOI: 10.1088/1742-6596/375/1/042018
- ④ S. Umehara(1 番目), T. Kishimoto(2 番目), I. Ogawa(18 番目)他計 28 名, “Search for neutrino-less double beta decay with CANDLES”, AIP Conf. Proc. **1441** (2012) 448-450, 査読有
DOI: 10.1063/1.3700581
- ⑤ I. Ogawa(1 番目), T. Kishimoto(2 番目), S. Umehara(3 番目)他計 15 名, “Low radioactivity CaF_2 scintillator crystals for CANDLES”, AIP Conf. Proc. **1338** (2011) 116. 査読有
DOI: 10.1063/1.3579568
- ⑥ I. Ogawa(1 番目), T. Kishimoto(2 番目), S. Umehara(3 番目)他計 15 名, “Study of ^{48}Ca double beta decay by CANDLES”, J. of Phys.: Conf. Ser. **312** (2011) 072014. 査読無
DOI: 10.1088/1742-6596/312/7/072014
- ⑦ T. Kishimoto(1 番目), S. Umehara(14 番目), I. Ogawa(17 番目) 他計 22 名,

“Neutrino-less Double Beta Decay of ^{48}Ca —CANDLES—”, AIP Conf. Proc. **1388** (2011) 142. 査読有
DOI: 10.1063/1.3647363

- ⑧ T. Kishimoto(5 番目), I. Ogawa(6 番目), S. Umehara(8 番目)他計 14 名, “Light output response of KamLAND liquid scintillator for protons and ^{12}C nuclei”, Nucl. Instr. and Meth. **A622** (2010) 574-582, 査読有
DOI: 10.1016/j.nima.2010.07.087
- ⑨ S. Umehara(6 番目), T. Kishimoto(7 番目)他計 7 名, “Mass dependence of calcium isotope fractionations in crown-ether resin chromatography”, Isotopes in Environmental and Health Studies **46** (2010) 233-241, 査読あり
DOI: 10.1080/10256016.2010.488801
- ⑩ S. Umehara(1 番目), T. Kishimoto(2 番目), I. Ogawa(3 番目)他計 17 名, “Study of Double Beta Decay of ^{48}Ca by CANDLES”, AIP Conf. Proc. **1235** (2010) 287, 査読有
DOI: 10.1063/1.3442610
- ⑪ I. Ogawa(1 番目), T. Kishimoto(2 番目), S. Umehara(3 番目)他計 13 名, “Study of ^{48}Ca double beta decay with CANDLES”, J. of Phys.: Conf. Ser. **203** (2010) 012073, 査読有
DOI: 10.1088/1742-6596/203/1/012073

[学会発表] (計 6 2 件)

- ① 梅原さおり、「CANDLES による二重ベータ崩壊の研究(70)-測定状況-」、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 03 月 26 日～29 日、広島大学
- ② Tadafumi Kishimoto, “Double beta decay and matter dominated universe”, OU-UM workshop on Basic Science, Feb. 14 – 15, 2013, Malaya University, Malaysia
- ③ Tadafumi Kishimoto, “Particle-Nuclear Physics in Osaka University”, OU-RUG joint symposium on Particle-nuclear & condensed matter physics: New challenges and opportunities, Nov. 26 – 28, 2012, Osaka
- ④ Tadafumi Kishimoto, “CANDLES —Study of ^{48}Ca double beta decay—”, 2012 Shanghai Particle Physics and Cosmology Symposium (SPCS2012), Sep. 15 – 16, 2012, Shanghai, China
- ⑤ Tadafumi Kishimoto, “Double beta decay and matter dominated universe”, International Conference on Physics, Mandalay 2012, Feb. 4, 2012,

- Mandalay University, Myanmar
- ⑥ 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, 大阪
- ⑦ T. Kishimoto, “Nuclear Science in Japan”, International symposium on frontiers in nuclear physics, 2011 年 11 月 1 日, Beihang University, Beijing, China
- ⑧ 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
- ⑨ 梅原さおり, 「CANDLES による二重ベータ崩壊の研究(54) -CANDLES 検出器の開発状況-」, 日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学、青森
- ⑩ Izumi Ogawa, “Study of ^{48}Ca double beta decay by CANDLES”, 12th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2011), 2011 年 09 月 06 日, Munich, Germany
- ⑪ 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
- ⑫ T. Kishimoto, “The next generation projects in Deep Underground Laboratories”, ASPERA Workshop 2011, 2011 年 7 月 1 日, Zaragoza & Canfranc, Spain
- ⑬ 梅原さおり, 「CANDLES による二重ベータ崩壊の研究 (48) -検出器の開発状況-」, 日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、新潟
- ⑭ I. Ogawa, “Study of ^{48}Ca double beta decay by CANDLES”, 23rd International Workshop on WEAK INTERACTIONS AND NEUTRINOS (WIN2011), 2011 年 2 月 3 日, Cape Town, South Africa
- ⑮ 小川泉, 「CANDLES 実験」、二重ベータ崩壊研究懇談会、2010 年 12 月 17 日、岩沼
- ⑯ T. Kishimoto, “CANDLES for the study of double beta decay of ^{48}Ca and its enrichment”, The International Symposium on Nuclear Physics in Asia, 2011 年 10 月 13 日, 北京、中華人

- 民共和国
- ⑰ 梅原さおり, 「CANDLES による二重ベータ崩壊の研究 (44) -地下実験室における検出器の開発状況」、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 14 日、福岡
- ⑱ T. Kishimoto, “CANDLES for the study of ^{48}Ca double beta decay”, Fundamental Physics Using Atoms, 2010 年 8 月 7-9 日, Osaka

[その他]
 ホームページ等
 CANDLES 実験
<http://wwwkm.phys.sci.osaka-u.ac.jp/research/r01.html>
 CANDLES
<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~candles/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小川 泉 (OGAWA IZUMI)
 福井大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：20294142

(2) 研究分担者

岸本 忠史 (KISHIMOTO TADAFUMI)
 大阪大学・核物理研究センター・センター長
 研究者番号：90134808

(3) 連携研究者

梅原 さおり (UMEHARA SAORI)
 大阪大学・核物理研究センター・特任助教
 研究者番号：10379282