

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 13 日現在

機関番号：11302
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2018～2020
 課題番号：18K03664
 研究課題名(和文) ジルコニウム96を用いた二重ベータ崩壊実験のためのタリウム208背景事象の除去

 研究課題名(英文) Reduction of Tl-208 decay backgrounds for neutrinoless double beta decay experiment using Zr-96

 研究代表者
 福田 善之 (Fukuda, Yoshiyuki)

 宮城教育大学・教育学部・教授

 研究者番号：40272520
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はZr-96を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象探索実験ZICOSで使用する液体シンチレータのエネルギー分解能の測定と、1MeV程度の電子から放射するチェレンコフ光とシンチレーション光を波形分別する手法の開発を行った。エネルギー分解能は光電子増倍管の集光率を考慮すると2.2%@3.35MeV相当であることがわかった。また、高性能の光電子増倍管とデジタイザを用いてパルス波形を計測しカイ2乗検定を行ったところ、チェレンコフ光を含む事象が判別でき、1MeV程度の電子から放射されるチェレンコフ光の位相幾何学的情報がTl-208事象の除去に有効であることを世界で初めて立証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊は、宇宙誕生時に何故物質だけが残ったのか、ニュートリノの質量はいくらか、等の疑問を解く鍵を握っています。世界中でこの崩壊を探していますが、まだ誰も観測していません。日本のカムランド-禅はキセノン136を使って研究をしていますが、仮にこの崩壊を見つける事ができたとしても、原子核の計算に不定性があるため、他の原子核でも崩壊を見つけなければいけません。そこでジルコニウム96を使ったZICOSを計画しています。現在、観測の邪魔になるタリウム208を、チェレンコフ光を用いて除去する方法を開発しており、本研究によりチェレンコフ光が除去に利用できる事がわかりました。

研究成果の概要(英文)：A liquid scintillator containing Zr complex has been developed for ZICOS experiment which will search for neutrinoless double beta decay using Zr-96 isotope. The liquid scintillator has 10wt.% concentration of the complex, and an energy resolution was obtained by 2.2% at 3.35MeV assuming 60% photo coverage of the photomultiplier (PMT). In order to realize ZICOS experiment, we have to reduce 95% of backgrounds from Tl-208 decay. We have developed new reduction technique using the topology of location for PMT which receives Cherenkov lights. For this purpose, we have to discriminate PMT signal whether includes Cherenkov light or not among the scintillation. Using fast PMT and digitizer, we have succeeded to develop the pulse shape discrimination, and have proved that the topology of Cherenkov light emitted from even 1 MeV electron is really useful to reduce backgrounds from Tl-208 beta decay.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ 二重ベータ崩壊 チェレンコフ光 パルス波形分別 位相幾何学情報 バックグラウンド除去

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1998年、スーパーカミオカンデ(SK)は大気ニュートリノ振動を発見し、それまで質量が無いと考えられてきたニュートリノに有限の質量が存在する決定的な証拠を得た。しかし、ニュートリノ振動はニュートリノ質量の値を予言していない。そこで、0.1eV以下の質量を測定できる、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊の観測に世界の注目が集まっている。

ニュートリノがマヨラナ型の場合、原子核内の核子のベータ崩壊により放出したニュートリノが同じ核内の別の核子に吸収されて再度ベータ崩壊すると、ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)となる。この原子核は、娘核の質量やスピンにより、通常のベータ崩壊が強く抑制される。一方、通常のベータ崩壊が同じ核内で同時に2回起きる二重ベータ崩壊($2\nu\beta\beta$)の場合、放出するニュートリノがエネルギーを持ち去るため、2個の電子のエネルギー和は連続分布となるのに対し、 $0\nu\beta\beta$ 事象では崩壊前後の原子核の質量エネルギー差(Q値)と一致する。すなわち、Q値のエネルギーの事象が観測されると $0\nu\beta\beta$ 事象の可能性がある。しかし、現実には観測装置に有限のエネルギー分解能が存在するため、 $2\nu\beta\beta$ や放射性核種の崩壊が背景事象となる。実際、2015年に発表された ^{136}Xe を320kg使用したKamLAND-Zenの結果でも、 $0\nu\beta\beta$ の半減期の下限値として 2.1×10^{26} 年、ニュートリノ質量の上限値として0.061-0.165eVを得るに留まっている[1](図1参照)。

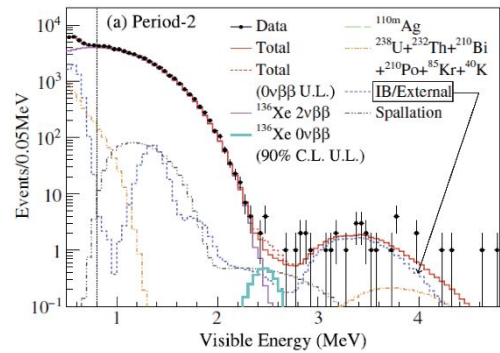


図1 KamLAND-Zenで観測されたエネルギースペクトルと背景事象の内訳[1]

2. 研究の目的

ニュートリノ質量の逆階層解が予想する0.1eV以下の領域を探索する第2世代の $0\nu\beta\beta$ 実験として、KamLAND-Zen以外に ^{76}Ge を濃縮したゲルマニウム検出器を用いたGERDAや自然の ^{130}Te を含む TeO_2 結晶の温度変化を捉えるCUOREなどが観測を開始しているが、いずれも標的原子核の質量は数10~数100kg程度である。一方、トンスケールの実験は、KamLAND-Zenが ^{136}Xe を800kg使用する計画であり、1000tonの液体シンチレータに ^{130}Te を0.1wt.%溶解させるSNO+も始まろうとしている。本研究では、逆階層解が予想するニュートリノ質量の最下点である0.01eVまで探索するため、

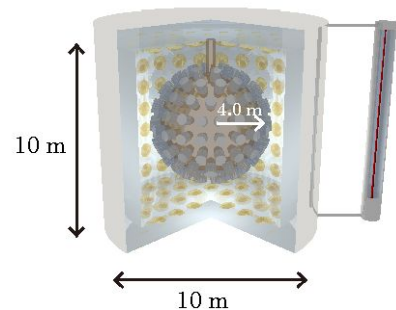


図2 ZICOS実験の概要図

$0\nu\beta\beta$ のQ値が標的原子核の中では3番目に高い ^{96}Zr 900kgを液体シンチレータに溶解させるZICOS実験を計画している(図2参照)。ニュートリノ質量を決定するためには核行列要素の不定性を打ち消す必要があり、複数の原子核による観測が必須となるが、 ^{96}Zr を使った $0\nu\beta\beta$ 崩壊実験は世界中でもZICOS実験だけが推進する研究計画であり、大容量液体シンチレータ実験では最もQ値が高い実験である。

これまでにPPO 5wt.%、POPOP 0.2wt.%、テトラキス(アセト酢酸イソプロピル)ジルコニウム($\text{Zr}(\text{iPrac})_4$) 10wt.%をアニソールに溶解させた液体シンチレータ(LS)の開発に成功し、標準のLS BC505に対して48.7%の発光量と9%の集光率で12.5%@1.02MeVのエネルギー分解能を得ている[2]。 ^{96}Zr のQ値3.35MeVと光電子増倍管(PMT)の集光率64%をEに従って換算するとエネルギー分解能は2.6%となり、高性能なLSであることが期待される。

【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

一方、LS を使用する実験はエネルギー以外に $0\nu\beta\beta$ 事象と放射性核種の崩壊による背景事象を区別する手段がないため、放射性物質を極限まで除去する必要があるが、図 1 からわかるように、KamLAND-Zen でも ^{96}Zr の Q 値 3.35MeV 付近に ^{208}Tl の崩壊による背景事象が存在している。しかし、モンテカルロシミュレーションによると $0\nu\beta\beta$ 事象と ^{208}Tl 背景事象から放出されるチェレンコフ光を受光する PMT の位置分布が異なり、78%の $0\nu\beta\beta$ 事象の検出効率で 93%の ^{208}Tl 背景事象を除去できることがわかった[3](図 3 参照)。つまり、低エネルギー電子が放射するチェレンコフ光に方向性を有することを意味する。本研究では PMT の集光率を 60%にした場合、3.35MeV において 2.6%相当のエネルギー分解能を有することを確認し、更にチェレンコフ光とシンチレーション光を識別するための手法を開発し、一定方向に発生した 1MeV の電子から放射されるチェレンコフ光に方向性が確認されること、すなわちチェレンコフ光の位相幾何学情報が有効であることを実証することを目的としている。

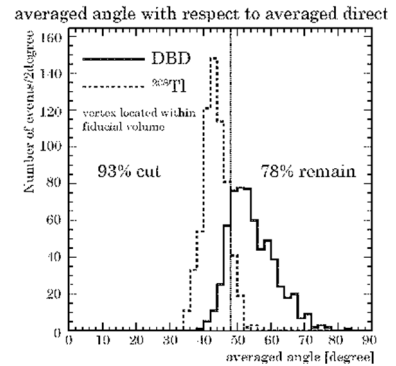


図 3 チェレンコフ光の幾何学的情報を示す平均角分布[3]

3. 研究の方法

(1) エネルギー分解能の測定

120mLの大型バイアルの中にZICOS実験用のLSを充填し、そのバイアルを格納し周囲に光電子増倍管を設置するためのアクリル製治具を作製した。ゲインが 3×10^6 の PMT H6410 を側面に 3 台と底面に 1 台設置し、集光率をこれまでの倍の 20% とした。 ^{22}Na から放射される 1.275MeV のガンマ線を LS 内に入射させ、LS 内でコンプトン散乱したガンマ線の内、100度後方へ散乱したガンマ線を検出する La-GPS 検出器との同時計測でデータを取得する。La-GPS 検出器の周囲は鉛ブロックで覆い、特にガンマ線の入射面は 2mm のスリット開けて、後方散乱ガンマ線を選択する。同時計測されたとき、LS 内には約 982keV の単色の電子が発生しているため、その光量と光量分布の幅からエネルギー分解能を測定することができる。その結果、図 4 のようにエネルギー分解能として 7.0% が得られた。光電子増倍管の集光率が 20% であることから、60% に換算すると 2.2% @ 3.35MeV 相当であることがわかった。これは、当初考えていた 2.6% から改善している結果である。

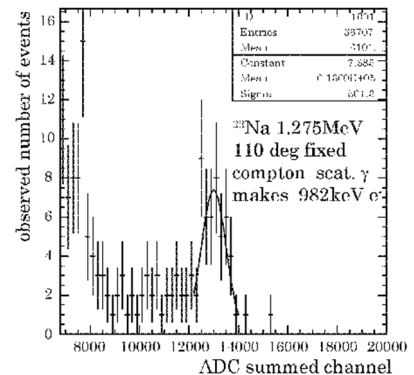


図 4 エネルギー分解能の結果

(2) チェレンコフ光の識別と方向性の観測

1 MeV の電子から放射されるチェレンコフ光は、進行方向に対して 46 度の方向に放射する。一般的に低エネルギーの電子は多重散乱するため、チェレンコフ光の方向性は失われると考えられてきたが、シミュレーションによると進行途中の電子の方向は初期の発生方向を中心に分布しており、チェレンコフ光に一定の方向性が存在する結果を得ている[3]。一方、ZICOS 実験ではシンチレーション光とチェレンコフ光を同時に観測するため、チェレンコフ光の受光の有無を知る必要がある。有機 LS は 軌道電子が放射線のエネルギーを吸収励起し蛍光を放射するため、 10^{-9}sec 程度の発

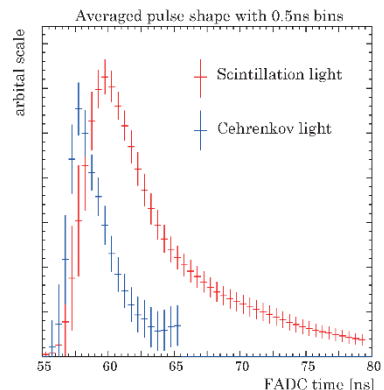


図 5 パルス波形観測の結果

【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

光時間である。一方、チェレンコフ光は水中の光速よりも早く移動する電子による分子偏極から放射するため、放射時間は電子の通過時間程度となり、数 MeV であれば $10^{-11} \sim 10^{-10}$ sec である。従って、観測される時間波形に違いが存在するはずである。

そこで、LSの溶媒であるアニソールだけが入った20mLのバイアルに、立ち上がり時間0.7ns、TTSが0.37nsのH2431-50を接続する。アニソールの300nm付近のシンチレーション光を除去するため、バイアルの周囲をSC-37 UVカットフィルタで巻き、アニソールから放射されるチェレンコフ光のみをPMTで計測する。バイアルには、 $^{90}\text{Sr} / ^{90}\text{Y}$ からの最大エネルギー2.28MeVの線を鉛ブロックで方向を絞って入射させる。光電子増倍管の信号は、時間分解能が0.5nsecのデジタイザ V1751へ入力し、チェレンコフ光の時間波形を計測する。次に、アニソールからZICOS用LSに変更して、シンチレーション光の時間波形を計測した。その結果、パルス波形は図5のように立ち上がり部が大きな違いが観測された[4]。観測結果から、シンチレーション光の立ち上がり時間は1.45n、チェレンコフ光では0.75nsであることがわかった。

次に、観測した時間波形の立ち上がり部分を区別して、チェレンコフ光の有無を判別するための波形分別法を開発した。前述のH2431-50を接続した20mLバイアルに外部からガンマ線を入射させた。使用したガンマ線源は ^{60}Co (1.17MeV/1.33MeV)、 ^{137}Cs (662keV)、 ^{133}Ba (356keV/ 81keV)、 ^{57}Co (122keV)である。図6のように観測されるガンマ線事象は122keV 以外はコンプトン散乱によるものであると考えられるため、観測される事象のコンプトン端付近の事象を選ぶと、散乱された電子は入射ガンマ線の方向になるため、約42方向にH2431-50を向けるとチェレンコフ光が観測されると期待される。また、チェレンコフ光を放出するエネルギー閾値が169keVであるため、122keVのガンマ線による事象はチェレンコフ光を発しないと考えられる。そこで、122keVのガンマ線による事象のパルス波形時と、その他のガンマ線のパルス波形を比較することにより、波形分別法を開発することができる。

チェレンコフ光を放射するエネルギー閾値以下である ^{57}Co の波形はシンチレーション光のみと考えられるため、他のガンマ線による波形と比較したところ、立ち上がり波形に明確な相違が観測された。波形のピークを60nsとした時、57.0nsから58.0nsの3つの時間の波形をテンプレートとしてカイ2乗検定を行ったところ、カイ2乗値が0.1以下の事象は背景事象と重なっており、このことから0.1以

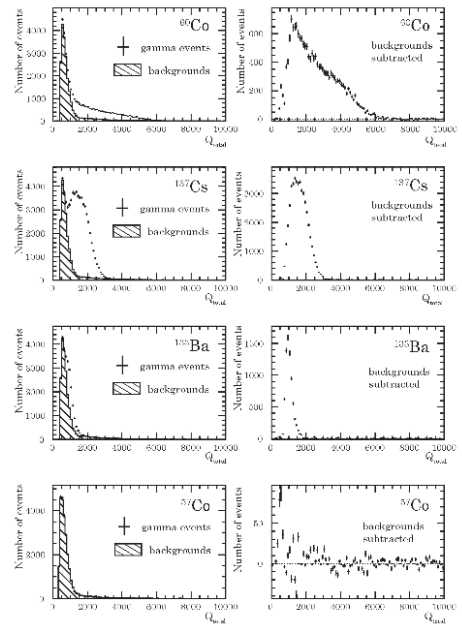


図6 観測されたガンマ線による散乱電子のエネルギー分布

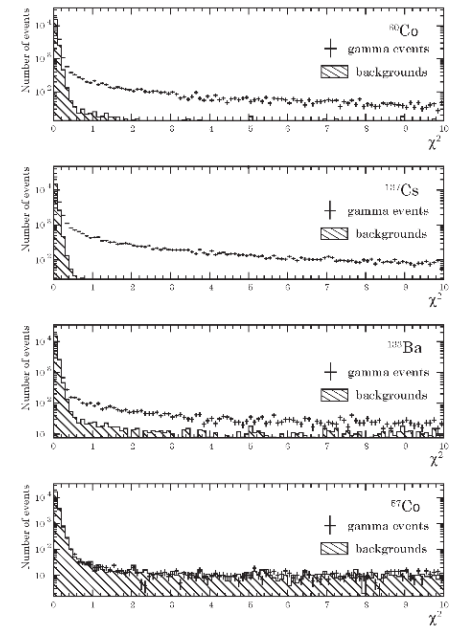


図7 観測されたガンマ線により散乱電子のカイ2乗値分布

【1 研究目的、研究方法など(つづき)】

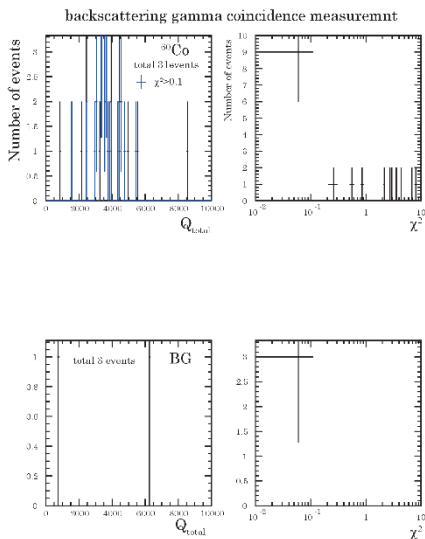


図 8 一定方向一定エネルギーの電子事象によるカイ 2 乗測定

一定方向一定エネルギーの電子事象によるチェレンコフ光の検出効率を観測した。その結果、図9の上図のように、コンプトン端付近の事象では、チェレンコフ光の検出効率は $89.8 \pm 0.5\%$ であり、一方、図9の下図のようにチェレンコフ閾値以上のエネルギーを持つ背景事象では、チェレンコフ光の検出効率は $50.1 \pm 1.4\%$ となることがわかった。背景事象の発生点が不明であることから方向性を持たないと考えられるため、光電子増倍管にチェレンコフ光が入射する割合が50%であることは自然に理解できる。一方、コンプトン端の事象が入射ガンマ線の方向を向いていることを考えると、この両者の差は2.9シグマの差であることから、コンプトン散乱電子が放射するチェレンコフ光が方向性を有しているという結論が得られる。更に、図8の測定結果との差は、誤差の範囲内で一致していることがわかった。

上の事象はチェレンコフ光を含むシンチレーション光の事象であると判断できることがわかった(図7参照)。

更に、この手法を用いて散乱電子の方向性を計測した。まず、 ^{60}Co からのガンマ線を20mLのバイアルに入射させ、後方100度にコンプトン散乱した事象をLa-GPS検出器で同時計測し、H2431-50のパルス波形を観測した。発生する電子は、一定方向に約835keVの単色エネルギーを持つ。この電子を用いて波形分別をしたところ、図8のように、観測された31事象中、3事象は偶発による背景事象であるため(この3事象のカイ2乗値はすべて0.1以下であった)、残る28事象中、カイ2乗の値が0.1以上の事象数は21事象であることがわかり、これからチェレンコフ光の検出効率は $78.6 \pm 9.6\%$ となった。

この結果を確認するため、前述のH2431-50を接続した20mLバイアルを用いて、コンプトン

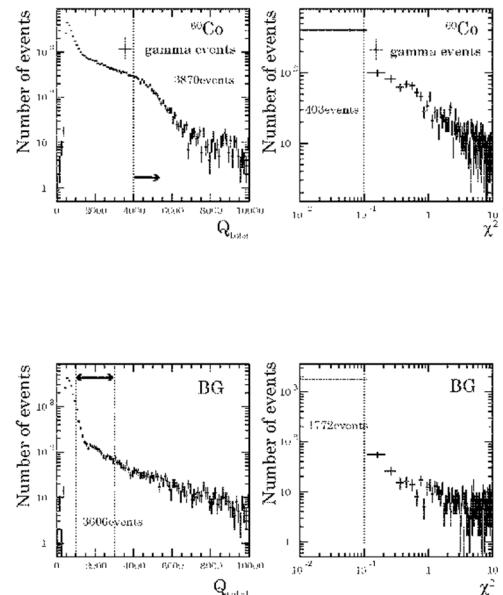


図 9 コンプトン端事象と背景事象によるカイ 2 乗分布

4. 研究成果

以上の結果から、1MeV 程度の電子から放射されるチェレンコフ光の位相幾何学的情報が方向性を有しており、 ^{208}Tl 背景事象の除去に有効であることを世界で初めて立証することができた[5]。

5. 引用文献

[1] A.Gando et al., Phys. Rev. Lett. **117** (2016) 082503
 [2] Y.Fukuda et al., J. Phys.: Conf. Ser. **718** (2016) 062019
 [3] 福田善之 他、宮城教育大学情報処理センター研究紀要 **第24号** (2017) 19-30
 [4] Y.Fukuda et al., J. Phys.: Conf. Ser. **1468** (2020) 01213
 [5] Y.Fukuda et al., Bulletin of Miyagi University of Education **55** (2021) 141-150

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Yoshiyuki FUKUDA, Shigetaka MORIYAMA, Katsuki HIRAIDE, Izumi OGAWA, Takahiro GUNJI, Ryohei HAYAMI, Satoru TSUKADA and Shunsuke KUROSAWA	4. 巻 1468
2. 論文標題 ZICOS - Neutrinoless Double Beta Decay experiment using Zr-96 with an organic liquid scintillator -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1468/1/012139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 FUKUDA Yoshiyuki, ANZAI Daisuke, KAMEI Yuto, Narengerile, OBATA Akira, MORIYAMA SHigetaka, OGAWA Izumim, GUNJI Takahiro, HAYAMI Ryohei, TSUKADA Satoru, KUROSAWA Shunsuke	4. 巻 54
2. 論文標題 Precise pulse shape measurement of Cherenkov light using sub-MeV electrons from Sr-90/Y-90 beta source	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of Miyagi University of Education	6. 最初と最後の頁 169-176
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Y.Fukuda , D.Anzai, Y.Kamei, K.Hiraide, S.Moriyama, Narengerile, A.Obata, I.Ogawa, T.Gunji, S.Tsukada , R.Hayami	4. 巻 1
2. 論文標題 ZICOS - Neutrinoless Double Beta Decay experiment using Zr-96 with an organic liquid scintillator -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Zenodo	6. 最初と最後の頁 1300437
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5281/zenodo.1300437	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Y.Fukuda , D.Anzai, Y.Kamei, K.Hiraide, S.Moriyama, Narengerile, A.Obata, I.Ogawa, T.Gunji, S.Tsukada , R.Hayami, S.Kurosawa	4. 巻 53
2. 論文標題 Direct measurement of spectral shape of Cherenkov light using cosmic muons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bulletin of Miyagi University of Education	6. 最初と最後の頁 183-191
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Y. Fukuda, Y.Kamei, Narengerile, A.Obata, S. Moriyama, I.Ogawa, T. Gunji, R. Hayami and S.Tsukada	4. 巻 52
2. 論文標題 Discrimination of Cherenkov light in Liquid Scintillator for Neutrinoless Double Beta Decay Experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of Miyagi University of Education	6. 最初と最後の頁 139 - 147
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 1件/うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Y.Fukuda, D.Anzai, Y.Kamei, K.Hiraide, S.Moriyama, Narengerile, A.Obata, I.Ogawa, T.Gunji, S.Tsukada, R.Hayami, S.Kurosawa
2. 発表標題 ZICOS - Neutrinoless Double Beta Decay experiment using Zr-96 with an organic liquid scintillator -
3. 学会等名 The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田善之、安齊太亮、亀井雄斗、那仁格日樂、小畑旭、森山茂栄、平出克樹、小川泉、郡司天博、塚田学、速水良平、黒澤俊介
2. 発表標題 ZICOS -ジルコニウム96を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象探索実験-
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」領域研究会(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.Fukuda, D.Anzai, Y.Kamei, K.Hiraide, S.Moriyama, Narengerile, A.Obata, I.Ogawa, T.Gunji, S.Tsukada, R.Hayami, S.Kurosawa
2. 発表標題 ZICOS EXPERIMENT FOR NEUTRINOLESS DOUBLE BETA DECAY SEARCH USING ZIRCONIUM-96
3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田善之、安齊太亮、亀井雄斗、那仁格日榮、小畑旭、森山茂栄、平出克樹、小川泉、郡司天博、塚田学、速水良平、黒澤俊介
2. 発表標題 ジルコニウム 96 を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象の探索XIV~ZICOS用液体シンチレータのエネルギー分解能測定~
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福田善之、安齊太亮、亀井雄斗、那仁格日榮、小畑旭、森山茂栄、平出克樹、小川泉、郡司天博、塚田学、速水良平、黒澤俊介
2. 発表標題 ジルコニウム 96 を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象の探索XIV高速PMTとFADCを用いた低エネルギー電子によるチェレンコフ光の波形観測~
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.Fukuda , D.Anzai , Y.Kamei , K.Hiraide , S.Moriyama , Narengerile , A.Obata , I.Ogawa , T.Gunji , S.Tsukada , R.Hayami , S.Kurosawa
2. 発表標題 ZICOS - Neutrinoless Double Beta Decay experiment using Zr-96 with an organic liquid scintillator -
3. 学会等名 International Symposium on Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.Fukuda , D.Anzai , Y.Kamei , K.Hiraide , S.Moriyama , Narengerile , A.Obata , I.Ogawa , T.Gunji , S.Tsukada , R.Hayami
2. 発表標題 ZICOS - Neutrinoless Double Beta Decay experiment using Zr-96 with an organic liquid scintillator -
3. 学会等名 XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 福田善之、安齊太亮、亀井雄斗、那仁格日榮、小畑旭、森山茂栄、平出克樹、小川泉、郡司天博、塚田学、速水良平、黒澤俊介
2. 発表標題 ジルコニウム96を用いたニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊事象の探索XIII～低エネルギー電子によるチェレンコフ光の波形観測について～
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>EPS-HEP2019で発表したポスター http://masamune.miyakyo-u.ac.jp/gakkai/poster-epshep2019-fukuda.pdf 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」領域研究会で口頭発表したスライド http://masamune.miyakyo-u.ac.jp/gakkai/ungd2019-fukuda.pdf TAUP2019で口頭発表したスライド http://masamune.miyakyo-u.ac.jp/gakkai/TAUP2019-fukuda.pdf 日本物理学会 2019年秋季大会 で口頭発表したスライド http://masamune.miyakyo-u.ac.jp/gakkai/jps2019-fall.pdf 日本物理学会 第74回年次大会で講演したスライド http://masamune.miyakyo-u.ac.jp/gakkai/jps2019-spring.pdf 地下素核国際研究会で発表したポスター http://masamune.miyakyo-u.ac.jp/gakkai/poster-zicos-UNGD2019.pdf Neutrino2018で発表したポスター https://zenodo.org/record/1300437#.XMZ_MkkVDZQ 日本物理学会 2018年秋季大会で講演したスライド http://masamune.miyakyo-u.ac.jp/gakkai/jps2018-fall.pdf</p>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	森山 茂栄 (Moriyama Shigetaka)	東京大学・宇宙線研究所・教授 (12601)	
研究協力者	平出 克樹 (Hiraide Katsuki)	東京大学・宇宙線研究所・准教授 (12601)	
研究協力者	小川 泉 (Ogawa Izumi)	福井大学・工学部・准教授 (13401)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	郡司 天博 (Gunji Takahiro)	東京理科大学・理工学部・教授 (32660)	
研究協力者	黒澤 俊介 (Kurosawa Shunsuke)	東北大学・金属材料研究所・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関