

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 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22340047

研究課題名（和文）

地球ニュートリノ方向検出のためのイメージンテンスファイアユニットの開発

研究課題名（英文）

Development of Image Intensifier Unit for Directional Measurement of Geoneutrino

研究代表者

三井 唯夫 (TADAO MITSUI)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：20283864

研究成果の概要（和文）：

大容積・低バックグラウンドの液体シンチレータ検出器に、到来方向検出と粒子識別の能力を付加するための基礎研究を行った。液体シンチレータの発光点をイメージンテンスファイアユニットによって撮影することによって、1 MeV ガンマ線の位置分解能が、現在の 15 cm から 5 cm へと改善することを実測した。また、以前開発した「リチウム 6 液体シンチレータ」の中性子捕獲時間・捕獲後アルファ線エネルギーの測定を行った。これらの基礎データを用いて、地球ニュートリノ到来方向測定のシミュレーションを行った。

研究成果の概要（英文）：

For large-volume, ultrapure liquid scintillator detector, like KamLAND, basic R&D has been performed for a new method to measure arrival direction of electron antineutrinos, and particle ID. By taking photographs of light emission vertex, the position resolution was measured at 5 cm for 1-MeV gamma ray, being improved from the current resolution of 15 cm. For “Li-6 liquid scintillator”, that we have developed before, the neutron capture time and the energy of the alpha ray emitted after capturing neutrons were measured. With those data, we performed a simulation for directional measurement of geoneutrinos.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 22 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
平成 23 年度	400,000	120,000	520,000
平成 24 年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	5,800,000	1,740,000	7,540,000

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）

1. 研究開始当初の背景

地球科学における最重要問題のひとつであるプレート運動の熱源について、2005 年に地球ニュートリノが初めて観測されたことで新たな研究手段が加わった。1000 トン液

体シンチレータ検出器「カムランド」では、地球内部のウラン、トリウム崩壊によるニュートリノ、「地球ニュートリノ」の検出に成功し、地殻およびマントル内のウラン、トリウム濃度について、これまでの地球化学的モデルと無矛盾であることを示した。このよう

な新しい観測手段が得られたことを受けて、さらなる研究、特により詳しい熱源分布の測定が期待された。ひとつの方法は、地球ニュートリノの到来方向を検出して、マントルからの成分と地殻からの成分を分離することである。もうひとつは、地球上で多地点の観測を行い、さまざまな地球モデルによる予測と比較することである。多地点観測については、その後、イタリアの「ボレキシノー」検出器も地球ニュートリノの観測に成功し、2つのデータの統合解析が行われた。しかし、有意に精度が上がるには、10個程度の同等な検出器が必要で、すぐには実現しない。そこで、地球ニュートリノの到来方向を測定する研究が、各グループによって精力的に始められた。地球ニュートリノは反電子ニュートリノであり、自由陽子（水素原子核）との「逆ベータ崩壊反応」によって陽電子と中性子を放出する。このうち、入射ニュートリノの運動量を担って放出されるのは反跳質量の大きい中性子の方である。したがって、このモードで到来方向を検出するためには、中性子の放出方向を測定しなくてはならない。我々はこの目的のために、中性子捕獲断面積の大きいリチウム6を溶かした液体シンチレータを以前に開発した。これによって、逆ベータ崩壊反応で放出された中性子の拡散を抑え、捕獲位置と放出方向の相関を最大限に保存することができる。さらに、中性子を捕獲したリチウム6は、アルファ線と三重水素核を放出するが、これらの粒子も大きく拡散することなくエネルギーを失ってシンチレータを発光させる。現在のカムランドのように自由陽子（水素原子核）で中性子を捕獲する場合、捕獲後に放出されるガンマ線が、10 cm以上飛行してしまい、さらに中性子放出方向の情報を失わせてしまうのとは対照的である。このようにリチウム6シンチレータは地球ニュートリノおよび一般に反電子ニュートリノ検出における方向検出に大きな可能性をもたらした。しかし、リチウム6が放出したアルファ線と三重水素核による発光位置を光検出器で検出する際、現在のカムランドでは、10 cm以上の不定性を生じてしまう。カムランドでは、光電子増倍管でシンチレータの発光を検出し、あらゆる方向で検出した光の時間差から発光位置（バーテックス）を決定する。したがって、光電子増倍管の時間分解能がバーテックス分解能に直結するが、その際、光速という大きな因子が掛け算されてしまうため、高い位置分解能を得るのは容易ではない。そこで我々は、時間情報ではなく、シンチレータの発光を直接撮影するために、1光子単位で、位置情報とともに光を検出し、画像として出力できるイメージンシファイア(I.I.)を用いることを計画した。I.I.の出力を高分解能・高速 CCD カメラで読

み取る。このようなアイディアはハワイ大学などでも検討されていたが、我々は、実際にカムランドにテストモジュールを設置することを目指して、現実的なモジュール設計を目的とした本研究を計画した。

2. 研究の目的

I.I.は光電子増倍管に匹敵する高い量子効率で光子をとらえることができ、マルチチャンネルプレート(MCP)を備えたものはゲイン、位置分解能とも我々の用途にとって十分な性能を持っている。しかし、I.I.の受光面に像を結ぶための光学系は、通常の写真用のもでは使えない。シンチレータの発光を検出するためには、受光面積すなわち、1つ目の(一番、被写体側の)レンズの径を最大限に大きくとる必要がある。そして、そのような大きなレンズでとらえた光を最小限の収差で収束させ、像を I.I.の受光面に結ぶためには、倍率を 0.1 倍以下にしないといけない。このような光学系には、焦点距離の短い、F 値の小さいレンズを使うか、反射鏡をうまく用いなくてはならない。本研究では、このような光学系の開発を目指した。また、I.I.は、通常蛍光板による光出力であるから、これをさらに高速・高分解能 CCD カメラで読み込んで電気信号に変換する。このように、光学系、I.I.、CCD カメラからなる「イメージンシファイアユニット(I.I.ユニット)」の開発を目指した。

このように、バーテックスの高分解能検出を行う I.I.ユニットは、反電子ニュートリノの到来方向測定だけでなく、液体シンチレータ検出器におけるベータ線とガンマ線の識別(粒子識別)にも使える。ベータ線は、シンチレータ内原子のイオン化過程でエネルギーを失って通常 1 cm 以内で停止するため、発光は 1 cm 以内の狭い領域に限られる(一地点発光)。それに対して、ガンマ線は、コンプトン散乱で電子にエネルギーを与え、その電子がイオン化を起こして発光するため、コンプトン散乱の液体シンチレータ内散乱長である 10 cm 以上の距離を飛行してから発光する。さらに、コンプトン散乱では、終状態にもガンマ線が存在するため、ふたたびコンプトン散乱を起こし、最後は光電効果で原子に吸収され、このときにも電子(光電子)が放出され、シンチレータを発光させる。このようにガンマ線は発光点が複数あり、その分布は 10 cm から数 10 cm 以上に広がっている(多地点発光)。このような、ベータ線の一地点発光とガンマ線の多地点発光の違いは、光電子増倍管をもちいたバーテックス分解能では区別できないが、I.I.ユニットなら

ば区別できる。I.I.ユニットは高いバーテックス分解能だけでなく、多地点発光をすべて像としてとらえる事ができるためである。

粒子識別用の I.I.ユニットは、反電子ニュートリノ方向測定用に比べて、位置分解能の要求は緩いが、多地点発光を余さずとらえることと、一地点発光に対して余計なノイズ光が混入し、多地点に見えてしまうことを避けなければならない。このように方向測定用と粒子識別用では、設計が異なる。本研究では、当初は方向測定用のみを想定していたが、「カムランド II」への改造が当初の予定より遅くなったため、方向測定用テストユニットを挿入できる時期が遅れる見込みとなった。その一方で、ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索「カムランド禅」が 2012 年に成功を納めた。しかし、こちらも当初の予定より到達感度が悪く、これを改善したい。原因は、予想外のガンマ線バックグラウンドが混入したため、ベータ線/ガンマ線の粒子識別が待ち望まれた。二重ベータ崩壊探索は、直径 3.2 m の「ミニバルーン」で行っているため、粒子識別用の I.I.ユニットは、地球ニュートリノ（直径 13 m の「外層バルーン」で観測）方向検出用よりずっと視野は狭くて良く、カムランド検出器上部から挿入する事もできるため、カムランド II への改造を待たずにテストを行える。以上のような状況変化を受けて、本研究では、粒子識別用の I.I.ユニット開発を目的に加えた。

3. 研究の方法

I. I. メーカーとしては、世界的にトップレベルにあるフォトニス社製の直径 1.5 cm の I. I.、これの読み出し用を想定した同社の高速 CCD カメラをセットで購入した。この I. I. に像を結ぶための光学系の試作を繰り返すことで、I. I. ユニットの設計を絞り込んで行った。まず、液体シンチレータによるコバルト 60 線源からのガンマ線検出の発光を、このテストユニットで撮影し、位置分解能を測定した。次に、このユニットを用いて、以前開発したりチウム 6 液体シンチレータによる中性子捕獲時の、捕獲時間、シグナル（アルファ線+三重水素核）エネルギーの測定を行った。さらに、粒子識別用 I. I. ユニットの想定して、位置分解能の距離依存性（光軸方向、光軸と垂直方向）、すなわち「被写界深度」、「画角」に相当するパラメタを測定し、これに基づいて光線追跡シミュレーションを行った。さらに、カムランド禅での粒子識別を実際に行うことを想定し、このようなユニット 90 個で銀 110m のバックグラウンドを二重ベータ崩壊事象から区別するシミュレーション

を行い、オフラインでの適切なデータセレクトーションによって、銀 110m 事象を約半分に減らせることを示した。

4. 研究成果

I. I. ユニットと試作光学系によるセットアップを図 1 に示す。中央にある一辺 10 cm の立方体アクリル容器に「リチウム 6 液体シンチレータ」を満たし、その左側、コリメータ越しに線源を置く。図は中性子測定のためにカリフォルニウム 252 線源を置いたところである。図の右側に光学系、I. I. ユニットが設置されている。

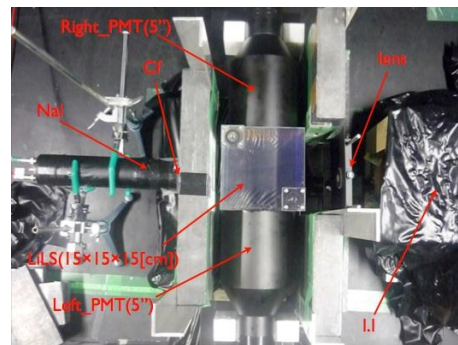


図 1. I. I. ユニット、試作光学系テストのセットアップ

このセットアップで測定した、コリメートしたコバルト 60 からのガンマ線による発光を図 2 に示す。線源をコリメータごとずらして、発光点が 2 cm 離れた 2 点からのデータを重ね合わせてある。図より、位置分解能は 1 cm 以下であることが分かる。

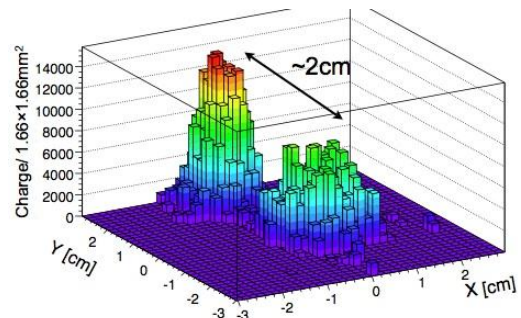


図 2. I. I. ユニットで撮影された、コバルト 60 線源の像。

これを、実際のカムランドの条件に変換すると、バーテックス分解能は約 5 cm である。地球ニュートリノ方向検出に必要な分解能ぎりぎりであるため、さらに位置分解能を向

上させる光学系の開発を続けている。

次に、リチウム6液体シンチレータによる中性子捕獲実験を行った。このシンチレータは、地球ニュートリノ方向検出に関する、以前の科研費研究で開発されたものである。現在カムランドで用いているものと同じ、パラフィンオイルベースの液体シンチレータに、臭化リチウム水溶液と界面活性剤を溶解し、重量比0.078%のリチウム6核を溶かし込むことに成功した。このリチウム含有量におけるモンテカルロシミュレーションを行った結果、80%以上の中性子はリチウム6核に捕獲され、シンチレータ中での中性子寿命は約30 μs となった。これは、現在のカムランドシンチレータにおける200 μs から大きく改善される。中性子の拡散が抑えられることと、遅延同時計測の時間幅を短くできることからバックグラウンド削減が期待できるだけでなく、中性子捕獲後のシグナルがアルファ線と三重水素核であるため、シンチレータの発光点が捕獲位置から拡散しないメリットがある。捕獲位置と発光位置の関係もモンテカルロシミュレーションでの確認が行われていた。また、捕獲後シグナルの「可視エネルギー」はアルファ線と三重水素核の合計で約0.5 MeV (シミュレーション) と予想され、十分検出可能なエネルギーである。これらのパラメタは、地球ニュートリノ方向検出の成否を左右するものであるから、今回のセットアップを用いて実測することにした。

中性子線源としてカリフォルニウム252を用いた(図2)。カリフォルニウム崩壊のシグナル(図2、左側のNaIシンチレータで検出)と、リチウム6核による中性子捕獲シグナルの遅延同時計測を行った。中性子捕獲シグナルは、液体シンチレータ容器に設置した2本の5インチ光電子増倍管およびI. I. ユニットで検出した。図3、図4はそれぞれ、5インチ光電子増倍管のエネルギースペクトル、タイムスペクトルである。図3より、中性子捕獲シグナルのエネルギーは、0.47 MeVと測定された。モンテカルロシミュレーションの結果とよく一致し、クリアなシグナルとして検出できることが初めて実証された。図4より、中性子捕獲時間は、寿命で44.36 μs と測定された。モンテカルロシミュレーションと多少ずれるのは、周りの物質の効果と考えられる。実際、周りの物質も入れたモンテカルロシミュレーションを行った結果、測定値と良く一致した。したがって、十分大容量の液体シンチレータ中では、以前のモンテカルロシミュレーションで得られた30 μs 程度の寿命となるものと期待される。図5には、I. I. ユニットで撮影された中性子捕獲事象の像を示す。コリメートしていないので、位置分解能に関する知見は得られなかったが、クリアな点状事象として撮影されており、

リチウム6液体シンチレータを用いた中性子捕獲位置の測定が、I. I. ユニットによって可能になることが、原理的に実証された。

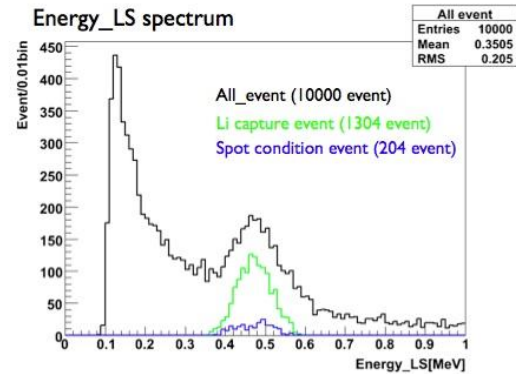


図3. リチウム6液体シンチレータによる中性子捕獲シグナルのエネルギースペクトル

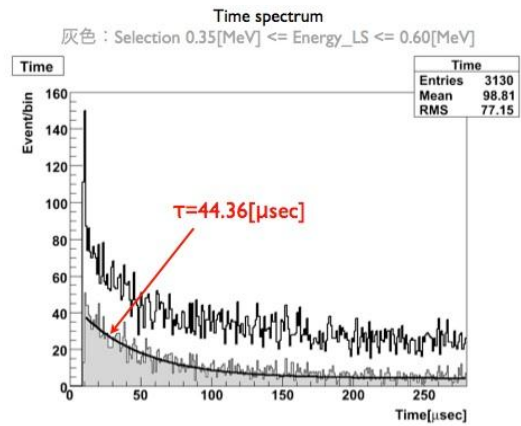


図4. リチウム6液体シンチレータによる中性子捕獲時間のタイムスペクトル

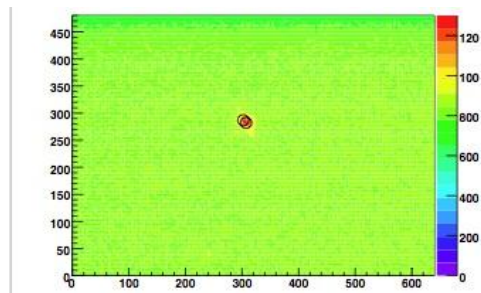


図5. I. I. ユニットで撮影されたリチウム6液体シンチレータによる中性子捕獲事象の像。視野はおおよそ5 cm × 5 cm

以上、コバルト60による位置分解能の測定と、リチウム6液体シンチレータの実測されたパラメタを用いて、カムランドによる地球ニュートリノ到来方向測定のモンテカルロシミュレーションを行った。その結果、点源からニュートリノがやって来た場合、約70%の事象が、その点源の方向から90度以内

の到来方向と観測されるものと見積もられた。90度以内ということは、点源方向の半球に相当するので、その割合が50%であれば、まったく方向検出能力は無いということである。したがって70%という結果は、かろうじて方向の情報を得られる、というレベルであるが、太平洋側とユーラシア大陸側の違いが見えれば、新しい知見を得られる可能性がある。今後は、地球モデルも含めたシミュレーションを行う予定である。また、光学系をより最適化し、今回作成したテストユニットを駆使して、2 cm以下の分解能が得られるよう研究・開発を続ける計画である。

研究期間後半は、I. I. ユニットによる粒子識別を目指した開発を行った。これは、ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験「カムランド禅」用の測定器であり、二重ベータ崩壊核キセノン¹³⁶を溶かし込んだ、直径3.2 mの「ミニバルーン」内だけを観測すれば良い。地球ニュートリノの場合の直径13 mバルーンよりもずっと条件が緩い。また、検出すべきは、ガンマ線事象のときの発光点の広がり（発光点が複数あること）であり、実際、現在深刻なバックグラウンドである銀110 mの事象や、将来主なバックグラウンドになると考えられている炭素10の事象では、発光点が10 cm以上に広がる。二重ベータ崩壊事象は1 cm以内である。この違いの検出には、5 cmの分解能で十分であり、この点も地球ニュートリノの場合より条件が緩い。したがって、粒子識別では、100モジュール程度のI. I. ユニートを挿入できれば、実際の解析で稼働する検出器となる。地球ニュートリノ方向測定では、今回の研究でテストモジュールの仕様を決定し、そのテストモジュール100台を挿入して原理検証を行う。本格的稼働には500モジュール程度が必要、という見積もりであったのに対して、粒子識別は一段階早い実現を目指すものである。そこで、上記のような、分解能、視野に関する緩い条件をうまく活用し、1ユニットで撮影できる範囲を大幅に広くし、実際に100モジュールで本格稼働することを目指す研究に力を入れた。具体的には、撮影可能な角度範囲「画角」と、距離範囲「被写界深度」を広くする研究である。

まず、テストユニットの液体シンチレータ容器をLEDに置き換えることで、視野内の位置分解能分布を調べた。図6に示すように、基板に9つのLEDを取り付け、被写体とした。視野の端のLEDのスポットを解析することで、画角を、LEDを光軸方向に動かしながら測定することで被写界深度の測定を行った。図7は、このセットアップで撮影された9つのLEDスポットである。「着目」と記された視野の端のスポットの広がり解析することで、位

置分解能が要求を満たす視野（角度範囲）、すなわち画角を測定した。LED基板を光軸方向に動かして同じ測定を繰り返すことで、位置分解能が要求を満たす光軸方向の距離範囲、すなわち被写界深度の測定も行った。

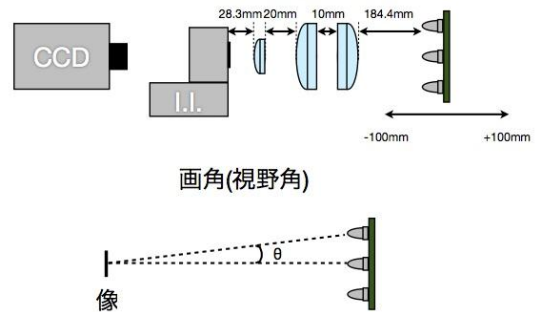


図6. I. I. ユニットと、9つのLEDを取り付けた基板による画角、被写界深度の測定

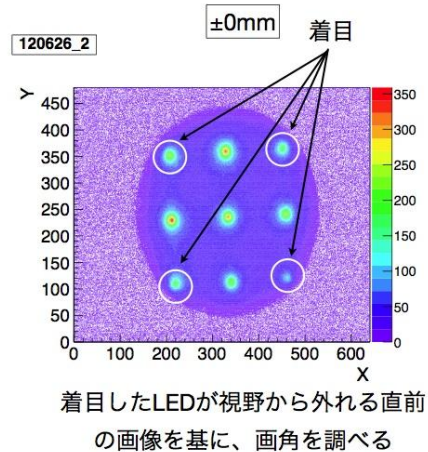


図7. I. I. ユニットで撮影されたLEDのスポット。端ほど位置分解能が悪くなる

これらの測定結果は、光線追跡シミュレータ「ZEMAX」を用いた、実際の光学系設計のためのインプットデータとした。実測データによって、信頼できる光学系シミュレーションを行うことができ、最終的に図8に示すような反射鏡を用いた光学系を備えたI. I. ユニートを、カムランド上部のチムニーから90モジュール挿入する案を完成させた。

さらに、粒子反応と光線追跡のシミュレーションを組み合わせ、最終的な粒子識別能力を見積もった。I. I. ユニット90モジュールと、現在稼働中の1800本の光電子増倍管すべての情報を統合して粒子識別を行うものと仮定する。図9はすべてのI. I. ユニートの画像を統合した画像中で、もっとも明るいピクセルへの光の集中度から、ガンマ線とベータ線の区別を試みたものである。90ユニットの画像を統合する際、発光点の重心位置の3次元情報が必要になる。これを光電子増倍

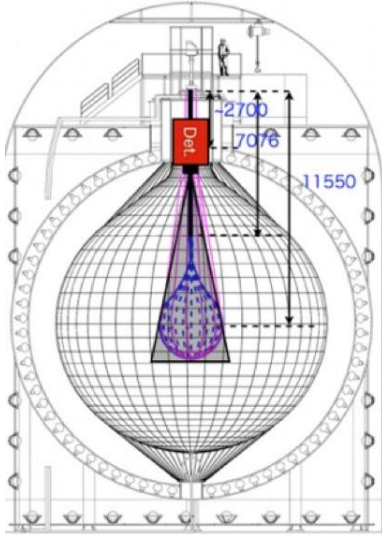


図8. 上：光線追跡シミュレータ「ZEMAX」を用いて設計された反射鏡による光学系。下：カムラント禅に粒子識別用 I. I. ユニット 90 モジュールを挿入するモンテカルロシミュレーション。上部チムニーからの観測を仮定しているが、ステンレスタンク内壁に取り付けられれば、より良いパフォーマンスが得られる。

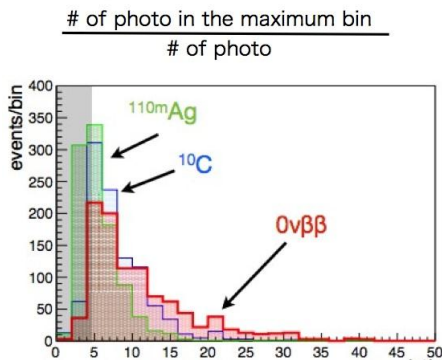


図9. 粒子識別用 I. I. ユニットのモンテカルロシミュレーション結果。横軸は、画像中もっとも明るいピクセルの光量を全光量で割った値。二重ベータ崩壊は、一地点発光であるためこの値が大きくなるが、多地点発光のバックグラウンドでは、この値は小さくなる。

管の時間情報から得るものとする。図中、陰をつけた部分の事象を排除すると、シグナル（二重ベータ崩壊事象）を 90%残したまま、銀 110m を 48%、炭素 10 を 16%排除できるという結果を得た。まだ実用化には性能が足りないものの、90 モジュールという現実的な数で、これだけのパフォーマンスが出る可能性を示したことは、早期の実用化へ向けた期待につながる。引き続き、テスト I. I. ユニットとシミュレーションを駆使して、光学系、光検出器の最適化、設計、試作を続け、カムラント禅への早期適用を目指す。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① 花籠紘 (KamLAND-Zen コラボレーション)、KamLAND-Zen におけるバックグラウンド除去に向けたイメージング検出器の開発、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 29 日、東広島市、広島大学
- ② 花籠紘 (KamLAND-Zen コラボレーション)、Development of mirror type imaging detector for reducing ^{10}C & ^{110}mAg backgrounds for KamLAND-Zen (ポスター)、The fifth international conference on Neutrino Geoscience、2013 年 3 月 12 日、高山市、ひだホテルプラザ
- ③ 井上邦雄 (KamLAND-Zen コラボレーション)、カムラント禅の現状と将来、第 2 回日大理工・益川塾連携素粒子物理学シンポジウム、2012 年 11 月 3 日、京都市、京都産業大学
- ④ 松田さゆり (KamLAND-Zen コラボレーション)、Energy and Vertex Calibration and Background estimation in KamLAND-Zen (ポスター)、The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics、2012 年 6 月 4 日、京都市、京都テルサ
- ⑤ 池田晴雄 (KamLAND-Zen コラボレーション)、Backgrounds for KamLAND-Zen experiment (ポスター)、The XXV International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics、2012 年 6 月 5 日、京都市、京都テルサ

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三井 唯夫 (TADAO MITSUI)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：20283864