

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340063

研究課題名(和文) 固体ニュートリノ検出器を用いた原子炉プルトニウムモニターの開発

研究課題名(英文) The development of reactor plutonium monitor using solid neutrino detector

研究代表者

宮田 等 (Miyata, Hitoshi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：80192368

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,300,000円

研究成果の概要(和文)：原子炉ではウラン燃料が消費されると共にプルトニウムが生成される。危険なプルトニウムの量をモニターできる原子炉ニュートリノ検出器の開発をGd含有新型プラスチックシンチレータを用いて行った。Am241/Be線源からのガンマ線，中性子をニュートリノ疑似信号として用い，82kgのプロトタイプ検出器の性能を評価した。得られた実験データを基に，Geant4シミュレーションによって1トンの原子炉モニターの性能について評価した。熱出力3GWの原子炉の燃料交換前後でのプルトニウム量に関して，11日間の測定で6%の燃料(プルトニウム90kg相当)の取り出しを2 $\sigma$ の有意度で確認できるという結果を得た。

研究成果の概要(英文)：In the reactor, the uranium fuel is consumed, and plutonium is generated. The development study of the reactor neutrino detector that was able to monitor a dangerous plutonium content was done with Gd containing new plastic scintillator. The performance of the prototype detector of 82kg was evaluated by using the gamma ray and the neutron from Am241/Be source as a pseudo neutrino signal. The performance of the reactor monitor of one ton was evaluated by the Geant4 simulation based on the obtained experimental data. The result that taking out the fuel of 6% (equivalent plutonium 90kg) was able to be confirmed by the significance of 2 $\sigma$  in the measurement of 11 days was obtained for the reactor of thermal power 3GW for the change in the plutonium content at the before and after of the refueling.

研究分野：高エネルギー物理学

キーワード：ニュートリノ 原子炉 プルトニウム シンチレータ

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学の分野において、標準模型を超えてニュートリノに質量が有ることを示すニュートリノ振動の測定は、最も重要な研究テーマの一つであり、スーパーカミオカンデ、K2K、カムランドなどのグループにより  $m_{23}^2$ 、 $m_{12}^2$  による振動が確認された。その後、最後の振動である  $m_{13}^2$  による振動の実験的確認とそれを引き起こすニュートリノ混合角  $\theta_{13}$  の測定が重要な課題となり、現在までに世界中で様々な実験が進められた。日本でも、新潟大学、東北大学、首都大学東京、東京工業大学などの実験グループが、フランスの原子炉を用いて行われている Double Chooz 実験に参画している。

原子炉ニュートリノ実験は、通常、原子炉より 1.5 km 程度離れた位置（振動の最大値）に設置した Far 検出器と振動が始まらない数 100 m 以内に設置した Near 検出器でのニュートリノフラックスの比較をする。 $\theta_{13}$  角でのニュートリノ振動は小さいので、測定の系統誤差（1%程度）をより減らすために、小型で安全で原子炉建屋内で使うことができる固体原子炉ニュートリノ検出器の開発を行ってきた（基盤研究B・固体ターゲットを用いた原子炉ニュートリノ検出器の開発・H19～20）。原子炉1基ごとに、その至近距離に小型ニュートリノ検出器を設置することで、より正確にニュートリノフラックスを測定できる。

## 2. 研究の目的

ニュートリノ振動角  $\theta_{13}$  は小さいので、測定の系統誤差をより小さくするために、今までに通常のニュートリノ検出器よりも小型で原子炉建屋内で安全に使うことができる固体原子炉ニュートリノ検出器の開発を行ってきた。本研究ではこれをさらに進めて、ウランとプルトニウムの核分裂によるニュートリノフラックスの違いなどから、原子炉燃料中のプルトニウム量を10%の精度でモニターできるシ

ステムを開発することを目的とした。ニュートリノによる原子炉モニターは、IAEAの報告書でも注目されているように、保障措置のための切り札的新技術となり得る。

## 3. 研究の方法

本研究は安価で安全な固体プラスチックシンチレータを新たに開発し、これを用いて原子炉燃料中のプルトニウム量をモニターしようとする挑戦的な研究であり、次のような年度計画を立てて着実に開発研究を推進した。しかし、新型シンチレータの性能が向上し100kgレベルのプロトタイプ検出器を作れるようになった平成26年度（最終年度）には、国内の原発は全て停止していた。そこで計画の一部を変更して実施した。

### (1) 平成23年度

Gd をドーブした安価なシンチレータの開発をミンダナオ大学(MSU-IIT)の研究者と共に行う計画を立てた。ミンダナオ大学が試作したシンチレータサンプルを用いて小型のプロトタイプ検出器を製作し、線源を用いてこの固体シンチレータ検出器の性能（発光量、光の透過率など）を明らかにするベンチテストを行うと共に、ニュートリノ検出器の小型プロトタイプについて Geant4 シミュレーションを行う計画であった。

### (2) 平成24年度

開発している安価な新型プラスチックシンチレータについて、日本企業の協力のもと、ミンダナオ大学または国内において、Gd 入りプラスチックシンチレータ板（基本サイズ：60cm×60cm×6cm を想定）を製作する。このシンチレータ板を16枚用いると総重量約400kgのニュートリノ検出器になる。製作された試作品のGd入りプラスチックシンチレータ板について、その発光量や光の減衰長の測定を線源を用いて行う。

開発したより大型のGd入りプラスチックシンチレータについて、中性子線源を用いて

擬似ニュートリノ反応検出のテスト実験を行い、その性能を明らかにすると共に、Geant4 シミュレーションと比較する。

### (3) 平成 25 年度

当初は製作した大型の固体ニュートリノ検出器を原子炉建屋内の原子炉至近距離(20-30m)に設置し、テスト実験を行う予定であったが、現実的には稼働している商用原子炉はほとんどなく、またこれについても建屋内への設置は許可されていない。商用原子炉ではない JAEA の原子炉「もんじゅ」も稼働していない。そこで、研究が当初計画どおりに進まない時の対応として、中性子線源を用いた擬似ニュートリノ反応事象を新潟大学理学部の実験室において十分に測定することにした。

固体検出器本体の周囲に宇宙線 VETO カウンターを配置し、その外側を鉛板などで覆い、自然放射線を遮蔽する。ニュートリノ反応事象相当のデータの取得には、擬似ニュートリノ反応線源として、中性子と  $\gamma$  線を同時に放出する中性子線源(Am/Be 線源)[4.4MeV (  $\gamma$  ) + 4~8 MeV (中性子)]を用いる。

中性子線源を用いたテスト実験によって得られた擬似ニュートリノデータを解析し、固体ニュートリノ検出器の性能評価を行う。

### (4) 平成 26 年度

製作した新型固体ニュートリノ検出器について、原子炉建屋内ではなく、新潟大学の実験室において、Am/Be 線源を用いた擬似ニュートリノ反応事象の実験データを十分に取得・解析し、性能評価を行う。

検出器本体の周囲に配置した宇宙線 VETO カウンターの調整、環境  $\gamma$  線や中性子バックグラウンドを遮蔽するための鉛板、ポリエチレン・ブロックの増強を行う。

ニュートリノ反応事象相当のデータの取得には、Am/Be 線源を用いる。ターゲット質量 1 トンのニュートリノ検出器の場合、通常

の商用原子炉 1 基(熱出力 3GW)当たり 1 日約 8000 個のニュートリノが検出器と反応する。

擬似ニュートリノ反応のデータを解析し、固体ニュートリノ検出器の性能評価を行うと共に Geant4 シミュレーションの結果と比較する。環境  $\gamma$  線や中性子バックグラウンドを理解して、プルトニウム量のモニター精度について考察し、プルトニウム量モニターシステムとしての固体ニュートリノ検出器の性能を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 平成 23 年度

Gd をドーブした安価なシンチレータの開発をミンダナオ大学の研究者と共に計画であったが、その前に、材料系の日本企業が試作したシンチレータサンプルを用いて、小型のプロトタイプ検出器を製作し、その性能評価テストを行った。また、ニュートリノ検出器の小型プロトタイプについてのシミュレーションも行った。

企業の協力のもと、厚さ 3 mm 程度の Gd 入りプラスチックシンチレータ板を試作した。この Gd 入りプラスチックシンチレータ板について、その発光量や光の減衰長の測定などを  $\gamma$  線源を用いて行った。この結果は、後に発表論文(5. 主な発表論文等〔雑誌論文〕)としてまとめられた。

Gd 入りプラスチックシンチレータを用いて、ベンチテスト用の小型プロトタイプ検出器を製作した。これに対して中性子線源(Am/Be 線源)を用いて、擬似ニュートリノ反応検出のベンチテストを行った。検出器に対する空気中や床からの中性子、 $\gamma$  線バックグラウンドを遮蔽するために、全体を鉛ブロックやボロン入りポリエチレンブロックで覆い実験を行った。その結果、擬似ニュートリノ反応イベントで生じる中性子を検出できた。また、この検出器について、Geant4 シミュレーションを行い、実験で測定された中

中性子捕獲時間（約  $20\ \mu\text{s}$ ）をほぼ再現した。

## （2）平成 24 年度

開発している安価な新型プラスチックシンチレータについて、日本企業の協力ののもとに、Gd 入りシンチレータ板やシンチレータブロックを国内（材料の入手や知財を考慮）で製作し、その性能評価を行った。製作されたシンチレータ板について、線源を用いて、その発光量や光の減衰長の測定を行った。また、Gd 入りシンチレータブロックに光電子増倍管を取り付けて、ニュートリノ検出器とした。これに対して中性子線源（Am241/Be）を用いて、擬似的なニュートリノ事象の測定を行った。実際のニュートリノを測定する場合と同様に、先発信号と後発信号の同期をとる遅延同時計数法を用いて測定した。

実験データと Geant4 シミュレーションによる平均中性子捕獲時間を比較した。Gd 入りシンチレータブロック検出器（重量約 2kg）について、実験データの平均中性子捕獲時間は  $21 \pm 2\ \mu\text{s}$ 、シミュレーションの値は  $17 \pm 1\ \mu\text{s}$  と求められ、実験データとほぼ一致し、中性子を検出できていることがわかった。

しかし、Gd 入り新型プラスチックシンチレータの光量は、Gd を含まないものの半分程度であり、検出器のエネルギー分解能を良くするためにも、より発光量が多いシンチレータの開発が重要であることが分かった。

## （3）平成 25 年度

小型で安全で原子炉建屋内で使うことができる固体原子炉ニュートリノ検出器の開発を行っているが、国内で稼働している商用原子炉がほとんどなく、また原子炉建屋内への検出器の設置が許可されないことから、中性子線源を用いた擬似ニュートリノ反応事象や宇宙線、自然放射線によるバックグラウンド事象を新潟大学理学部の実験室において観測することにした。

固体検出器本体のニュートリノターゲットの周囲に宇宙線ミュオン粒子の VETO カウンターであるプラスチック・シンチレーションカウンターを配置し、その外側を鉛板やポリエチレン・ブロックで覆い、環境線や中性子バックグラウンドを低減した。ニュートリノ検出器の較正は、Co60 などの放射線源を用いて行った。ニュートリノ反応事象相当のデータの取得には、擬似ニュートリノ反応線源（Am/Be 線源）を用いた。

Am/Be 線源を用いたテスト実験によって得られた擬似ニュートリノデータを解析し、固体ニュートリノ検出器の性能評価を行った。その結果、Gd 含有新型プラスチックシンチレータを用いたプロトタイプ・ニュートリノ検出器（重量約 20kg）について、平均中性子捕獲時間が  $21.9 \pm 0.8\ \mu\text{s}$  と求まった（図 1）。

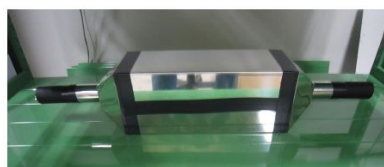


図 1：20Kg 検出器モジュール

市販のプラスチックシンチレータと Gd シートをサンドイッチ状に束ねて作ったプロトタイプ検出器の場合には、平均中性子捕獲時間は  $35.5 \pm 2.7\ \mu\text{s}$  であった。Gd 含有新型プラスチックシンチレータを用いた検出器の方が平均中性子捕獲時間が短いのは、シンチレータ中に Gd が一様に混ざっているためと考えられる。

## （4）平成 26 年度

原子炉建屋内で使うことができる安全で小型の固体原子炉ニュートリノ検出器の開発を行ってきたが、本研究に適した国内の商用原子炉がすべて停止中であることから、中性子線源を用いた擬似ニュートリノ反応や宇宙線、自然放射線などのバックグラウンドの

データを新潟大学の実験室において十分に取得し、これを解析してニュートリノ検出器（原子炉プルトニウムモニター）の性能評価を行った。

本年度までに開発できた最も性能が良い Gd 含有新型プラスチックシンチレータ・モジュール（重量約 20kg）を 4 個並べたプロトタイプニュートリノ検出器（合計重量 82kg）を製作した（図 2）。この周囲に配置した宇宙線 VETO カウンターの調整、環境線や中性子バックグラウンドの遮蔽増強を行った。



図 2：プロトタイプ検出器（82kg）の全体セットアップ

擬似ニュートリノ反応線源を使用したテスト実験によって得られたデータを解析し、プロトタイプ検出器の性能評価を行った。その結果、このプロトタイプ検出器の平均中性子捕獲時間は、 $22.3 \pm 1.4 \mu\text{s}$  と求まり、これは Geant4 シミュレーションの結果 ( $23.0 \pm 0.9 \mu\text{s}$ ) と誤差の範囲で一致した。また、検出器のエネルギー分解能 (30%) などの量を求めた。

プロトタイプ検出器（重量約 20kg）から得られた性能の情報を用いてシミュレーターを調整し、この検出器モジュールを 50 個並べて約 1 トンの検出器とした場合の原子炉モニターの性能を評価した。その結果、現在の検出器デザインでは、一般的な商用原子炉の核燃料交換の前後におけるニュートリ

ノ量の差を有意 (3 $\sigma$ ) に確認するためには、15 日間の測定が必要であることがわかった。また、使用済核燃料 (150 トン) の 6% (Pu-239：約 90kg 相当) が不正に取り出された場合、これに伴うニュートリノ数の減少を 11 日間の測定で 2 $\sigma$ 、25 日間の測定で 3 $\sigma$  の有意度で検知可能であることがわかった（図 3、図 4）。

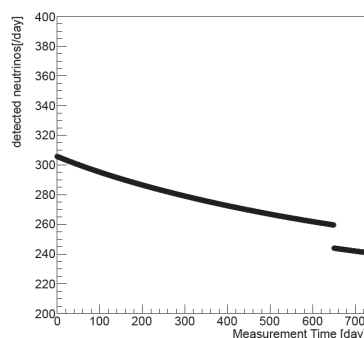


図 3：検出ニュートリノ数の変化の例

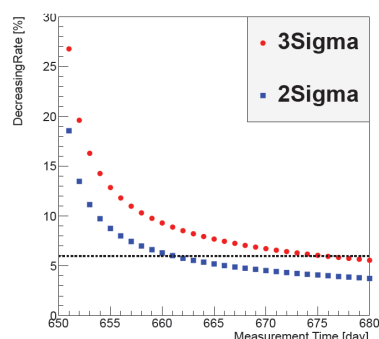


図 4：核燃料の取り出しに対する感度

#### (5) 研究成果についてのまとめ

##### 研究の主な成果

- ・原子炉プルトニウムモニターに使うことができる新型のプラスチックシンチレータを開発した。
- ・使用済み原子炉燃料を 9 トン不正に取り出した場合、1 トンの新型プラスチックシンチレータを用いた原子炉モニターによって、1 ヶ月以内で検知できるという結果が得られた。  
得られた成果の国内外における位置づけとインパクト
- ・従来のプラスチックシンチレータに比べて

安価に作る事ができる新型プラスチックシンチレータを開発したことは、原子炉プルトリウムモニターを実際に原子炉建屋内に設置しようとしたときに、安全性、費用の面で非常に重要であり、このような開発は国内外でほとんど行われていない。今後の展望

- ・新型プラスチックシンチレータの性能を向上させ、原子炉モニターの感度を上げる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

M. Watanabe, M. Katsumata, H. Ono, T. Suzuki, H. Miyata, Y. Itoh, K. Ishida, M. Tamura, Y. Yamaguchi  
First performance test of newly developed plastic scintillator for radiation detection  
Nucl. Instrum. Meth. A 770 (2015) 197-202  
(査読有り)  
DOI: 10.1016/j.nima.2014.10.005

H. Ono, K. Takahashi, H. Miyata, K. Ishida, M. Katsumata, M. Watanabe  
Study of Plastic Scintillator based Reactor Neutrino Detector  
Bulletin of The Nippon Dental University  
Vol. 41, 6pp (2012).

〔学会発表〕(計6件)

小野裕明, 伊藤祐介, 斎藤栄輔, 宮田等, 渡辺みのり, 鈴木崇民, 田村正明, 山口容史  
原子炉ニュートリノ検出器のためのガドリウム含有プラスチックシンチレータの開発,  
日本物理学会・第70回年次大会  
2015年03月21日~24日,早稲田大学(東京)

渡辺みのり, 宮田等, 伊藤祐介, 小野裕明, 勝亦正明, 斎藤栄輔, 鈴木崇民, 田村正明, 山口容史  
プラスチックシンチレータを用いた原子炉ニュートリノ検出器の開発2  
日本物理学会・第70回年次大会  
2015年03月21日~24日,早稲田大学(東京)

斎藤栄輔, 伊藤祐介, 小野裕明, 勝亦正明, 渡辺みのり, 宮田等, 鈴木崇民, 田村正明, 山口容史  
原子炉ニュートリノ検出器のためのプラスチックシンチレータ開発  
日本物理学会新潟支部・第43回例会  
2014年12月13日,新潟大学(新潟)

Hitoshi Miyata

Development and performance of new reactor neutrino detector using Gd-doped plastic scintillator  
2014 International Conference on Applied Physics and Materials Science (ICAMS 2014)  
2014年10月23日~25日  
Xavier University- Ateneo de Cagayan, Cagayan de Oro, Philippines

伊藤祐介, 宮田等, 小野裕明, 勝亦正明, 鈴木崇民, 田村正明, 山口容史, 渡辺みのり  
プラスチックシンチレータを用いた原子炉ニュートリノ検出器の開発  
日本物理学会・2014年秋季大会  
2014年09月18日~21日,佐賀大学(佐賀)

伊藤祐介, 勝亦正明, 宮田等, 鈴木崇民, 渡辺みのり, 石田恭平, 小野裕明  
原子炉由来の反電子ニュートリノ検出に用いる新型プラスチックシンチレータの開発  
日本物理学会新潟支部・第41回例会  
2012年12月08日,日本歯科大学新潟生命歯学部(新潟)

〔その他〕

ホームページ等  
新潟大学 高エネルギー物理学研究室  
VNDグループページ  
<http://www.hep.sc.niigata-u.ac.jp/~vnd/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

宮田等 (MIYATA, Hitoshi)  
新潟大学・自然科学系・教授  
研究者番号: 80192368

### (2)研究分担者

無し

### (3)連携研究者

川崎 健夫 (KAWASAKI, Takeo)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 00323999

小野 裕明 (ONO, Hiroaki)  
日本歯科大学・新潟生命歯学部・准教授  
研究者番号: 70453925

### (4)研究協力者

田村 正明 (TAMURA, Masaaki)  
鈴木 崇民 (SUZUKI, Takahito)  
山口 容史 (YAMAGUCHI, Yoji)  
渡辺 みのり (WATANABE, Minori)  
勝亦 正明 (KATSUMATA, Masaaki)  
Vequizo Reynaldo M.  
Jacosalem Editha P.