

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：32607

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610064

研究課題名(和文) 方向感度をもつ中性子TOF型ニュートリノ検出器による原子炉内部モニタリング

研究課題名(英文) Reactor monitoring with compact neutrino detector through neutron TOF and direction measurement.

研究代表者

川崎 健夫 (Kawasaki, Takeo)

北里大学・理学部・教授

研究者番号：00323999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：原子炉で発生する数MeVの反電子ニュートリノに対して、逆ベータ崩壊により発生する中性子の速度と方向を測定する小型検出器の開発を目的として、小型かつ高効率の中性子検出器の開発を行った。3He検出器を比較の対象として、6Liガラスシンチレータと、Gdとプラスチックシンチレータを組み合わせた検出器の性能を評価した。結果として、6Liガラスシンチレータは透明度の問題から必要なサイズにすることが難しく、Gdはガンマ線による反応位置再構成の性能が低く、必要な雑音事象除去能力が期待できないことが判った。

原子炉近傍での測定は、予定していた研究炉が研究期間中に稼働せず行えなかった。

研究成果の概要(英文)：We developed small detector, which can measure anti-electron neutrino from reactor. It measure a direction and velocity of neutron generated by inverse beta decay. Therefore high efficiency at neutron detection is necessary. We have evaluated the capability of 6Li glass scintillator and Plastic scintillator with Gadolinium, and compare those with 3He gas chamber. As a result, we found 6Li glass has low transparency. Gd+Plastic scintillator has poor position resolution. Both candidates are not useful since those capability not enough to reduce noise events. We couldn't perform the measurement close to reactor since the reactor has not been activated due to the maintenance to suit the revised security condition.

研究分野：素粒子物理学(実験)

キーワード：原子炉 ニュートリノ 中性子検出器

### 1. 研究開始当初の背景

ニュートリノに関する研究は、カミオカンデにより超新星ニュートリノを観測した、小柴のノーベル物理学賞受賞(2003)からも判るように、日本が世界をリードしているといえる。ところで、熱出力 100 万 kW の原子炉内部では、 $2 \times 10^{20}$  個/秒の反電子ニュートリノが発生しており、素粒子物理学の研究に用いられているが、“ニュートリノによる原子炉内部のモニター”というアイデアも活発に検討されている。例えば、国際原子力機関(IAEA)では 2008-09 年の研究開発報告書において、「核不拡散を目的とした不申告核活動に対する監視の方法として重要な技術の 1 つ」と位置づけている。

### 2. 研究の目的

現在、原子炉ニュートリノを測定する方法は、大量の液体シンチレータを用いる方法が主流である。原子炉からの反電子ニュートリノ(以後、原子炉ニュートリノと略す)は、平均 4MeV 程度のエネルギーを持ち、シンチレータ中の陽子と比較的大きな断面積により逆ベータ反応(図 1)を起こす。このとき、陽電子消滅信号と中性子捕獲信号をコインシデンスすることにより、雑音事象を大幅に減らした測定が可能である。しかし、可燃性の液体シンチレータを原子炉心付近に設置することは保安上の制限から困難であり、測定距離は最短でも数十メートル程度にとどまっている。そのため、短時間で十分な統計量の事象を観測することは難しかった。本申請研究では、新しい測定原理によって小

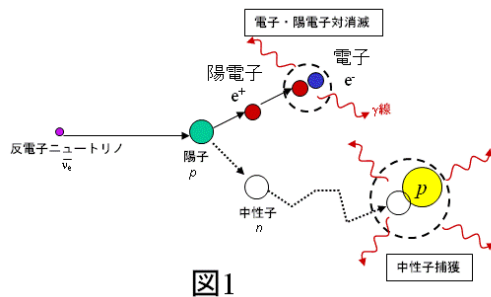


図1

型(0.3m<sup>3</sup>程度)の原子炉ニュートリノ検出器を開発する。この測定器はニュートリノの方向に感度を持ち、中性子の飛行時間を用いてニュートリノのエネルギーを測定する。小型の検出器を製作し、原子炉の超近傍でニュートリノの検出を行うことにより測定原理の実証を行うことを目的とする。

### 3. 研究の方法

可燃性の液体シンチレータを用いずに、小型原子炉ニュートリノの検出器を開発するためには、高い検出効率を持つ「中性子検出器」の開発が不可欠である。また、構想するニュートリノ検出器は、飛行時間によって中性子の速度を測定する。そのため、熱化されていない速度の速い中性子に対しても高い

効率を持つことが望ましい。一般によく用いられる<sup>3</sup>He検出器は、熱中性子に対して高い吸収断面積(約5,300バーン)を持ち、ガンマ線に感度を持たない、理想的な検出器である。しかし、近年<sup>3</sup>Heは高額化しており、また構造的にも大型化することは難しい。また、中性子の速度による断面積の変化も大きく、運動エネルギー1keVで10バーン程度になってしまう。

本研究では、以下の2種類の中性子検出器を試作し、性能評価を行った。

#### (1) <sup>6</sup>Li ガラスシンチレータ検出器

<sup>6</sup>Liの熱中性子に対する吸収断面積940バーン程度であるが、運動エネルギー1keV程度では、<sup>3</sup>Heとほとんど同じ程度(約5バーン)の大きさである。また、固体のため小型で高い密度実現することも可能である。LiO<sub>2</sub>をシンチレータ(ZnS)と、ガラス固化させた検出器(100x100x10mm<sup>3</sup>)を試作し、性能を評価した。

#### (2) プラスチックシンチレータ + Gd(ガドリニウム)

プラスチックシンチレータに、極めて大きな中性子吸収断面積を持つガドリニウム(Gd<sup>155-158</sup>)を組み合わせた検出器について性能評価した。これは酸化ガドリニウムを含むペイントをシートに塗布して、プラスチックシンチレータを包んだものである。ガドリニウムは、複数の同位体を含むが、それらを平均しても、<sup>3</sup>Heの20倍以上の中性子吸収断面積を持っている。

これらを比較して、必要な性能を満たせるかどうか確認する。また、原子炉近傍、つまり地表で原子炉ニュートリノを測定するためには、地下実験に比べて桁違いに多い宇宙線の影響と環境ガンマ線の影響を取り除ける必要がある。そのため、これら雑音事象の信号事象(原子炉ニュートリノ)に対する量も測定する必要がある。

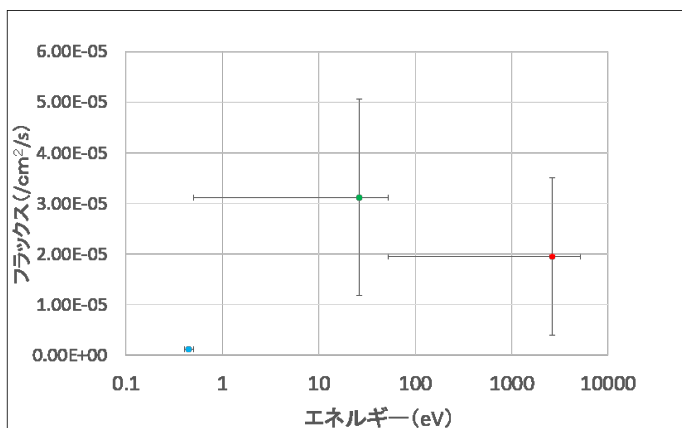
### 4. 研究成果

(1) 京大原子炉実験所における、原子炉ニュートリノ測定に関して、実験所スタッフと打ち合わせを行った。実験所には最大出力5MWの教育用原子炉があり、原子炉ニュートリノの発生量は、商業用炉の1/500程度である。原子炉ニュートリノは等方的に発生するため、炉の周囲に平面的に配置されている中性子を取り出すためのビームラインに影響されない場所に置くことができる。炉心から3m以上離れた場所には構造物が少なく、発生点に近づくことにより原子炉ニュートリノの高いフラックスを得ることができる。実験所スタッフと議論し、小型の検出器であれば、炉から5m以内の場所に設置して、1週間程度の観測が行えることを確認した。

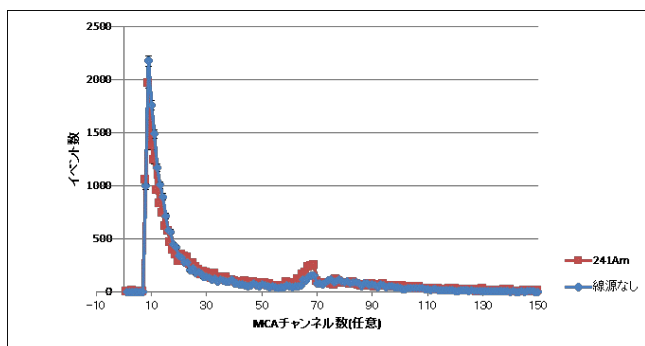
一方、当該原子炉は原子力規制庁による新しい安全基準への適合審査のため、本研究の

遂行期間中に稼働することができなかったため、残念ながら原子炉ニュートリノ信号の観測のための測定を行うことはできなかった。

(2)中性子検出器の性能評価のために、大学で所有する $^{241}\text{Am}$ を用いた。これは、ガンマ線源として用いられていたものであるが、崩壊によって発生したアルファ線が、線源ケースの金属と衝突することにより、一定量の中性子が発生することを $^3\text{He}$ 検出器によって確認して使用した。また、別の中性子線源( $^{252}\text{Cf}$ :10kBq)を購入した。比較するために、 $^3\text{He}$ 検出器によって発生する中性子のフラックスを測定した。発生する中性子は運動エネルギーで2MeV程度と高速であるため、厚さの異なるポリエチレンで減速して、様々な速度の中性子を生成したうえで、 $^3\text{He}$ 検出器により実効的な熱中性子のフラックスを得た。ここで、厚さ5cmのポリエチレンで減速した場合に、検出される中性子数が最も多くなり、効率よく減速することができたと考えられる。下図は、中性子と同時に発生するガンマ線の検出タイミングを用いて、 $^{252}\text{Cf}$ で発生する中性子のフラックスを、速度別に求めたものである。

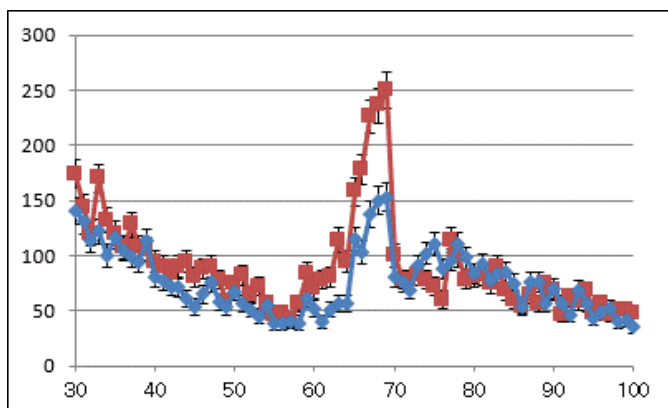


(3)  $^6\text{Li}$  検出器の性能評価。 $^6\text{Li}$  検出器によって、 $^{241}\text{Am}$  で発生する中性子を観測した結果を下図に示す。



横軸は、測定したマルチチャンネルアナライザ(MCA)のチャンネル数であり任意の大きさである。シンチレータであるため、ガンマ線を多く検出していることが判る。このガンマ

線は線源からではなく、環境放射線によるものであることが、線源の無い状態との比較から判る。次に70チャンネル付近の中性子信号と思われるピークを拡大したものを下図に示す。



線源からの中性子フラックスが小さいため、線源からの中性子数は、環境に存在する中性子とあまり変わらない。70チャンネル付近のピークが線源からの中性子と考えられる。また、60-100チャンネルのブロードな山も中性子によるものである。 $^6\text{Li}$  ガラスは、中性子に対して大きな断面積を持っているため、熱中性子はガラス表面で吸収され、反応後の粒子( $^6\text{Li}+n \rightarrow \text{T}+$ )の一部がシンチレータ外へ逃げてしまい、全エネルギー(4.8MeV)が測定されないためである。対して、線源からの中性子はシンチレータ内部まで入ってから反応するため、測定されるエネルギーの幅が狭くなっている。また、この線源からと思われる中性子信号のピーク値が、線源からの中性子がシンチレータに入射する位置に対して敏感に変動しており、ガラスシンチレータの透明度が低く、中性子の反応位置によって観測される光量が大きく変化している可能性がある。また、上記の中性子検出量を、予想される中性子フラックスと $^6\text{Li}$ の中性子吸収断面積から計算すると、検出効率が50%程度しか無かった。これは、シンチレータの透明度のため、吸収反応位置による検出光量の低下ためと考えられる。

シンチレータの透明度は、必要なサイズの検出器を製作するために重要な要素である。さらに強度の高い中性子源を用いて、位置依存性精密に測定する必要があるといえる。

原子炉ニュートリノの観測には、一定以上の体積が必要であり、大型化のためには、中性子検出能力を持ち、かつ透明度の高いシンチレータが必要であるため、今後は $^6\text{Li}$ やGdなどを含有し、透明度の高いプラスチックシンチレータの開発に取り組むこととした。

(4) Gd(ガドリニウム) + プラスチックシンチレータの性能評価。

以前より、東京大学理学部のグループと協力して、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に取り組

んできた。平成 28 年度には、1 トンサイズの検出器を、北里大学において完成させた。この検出器は、Gd を塗布したシートでプラスチックシンチレータの周囲を包んだものである。この際、シンチレータの透明度は影響を受けず、大型化に際して問題はない。中性子を吸収した Gd は複数本のガンマ線を放出するため、検出が可能である。しかし、比較的高エネルギーのガンマ線であるため、プラスチックシンチレータ中を比較的長距離移動する (~40cm)。そのため、中性子の吸収された点の再構成精度が悪化し、中性子の速度を求めるための飛行距離の測定が困難となる。この問題は、 ${}^6\text{Li}$  のように中性子吸収反応時にガンマ線を発生しない核反応を用いることにより避けられる。

本研究でテストした 2 種類の中性子検出器の、長所を組み合わせた検出器が提案できる。 ${}^6\text{Li}$  含有する薄いシンチレータシートを用いて、通常のプラスチックシンチレータ等の周囲に巻き付けることにより、位置精度とシンチレータの透明度の両方の問題点を解決できる。このようなシートは商用で入手可能であるが非常に高価である (150 万円/m<sup>2</sup>) が、設計を検討することにより、必要なサイズの検出器を実現できる可能性も考えられるため、今後の発展研究として取り組みたいと考えている。

#### 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 0 件 )

[ 学会発表 ] ( 計 2 件 )

“Status of PANDA and Japanese reactors”: S.Iwata; Applied Antineutrino Physics 2016, Liverpool, U.K., 1-2/Dec/2016”

"可搬型ニュートリノ検出器を用いた雷雲ガンマ線バーストの観測 [1] 検出器アップグレードとバックグラウンド評価": 岩田修一、川崎健夫、加藤陽、蓑輪眞、井上慶純、瀧田正人：日本物理学科分科会、2016 年 9 月、宮崎大学

[ 図書 ] ( 計 0 件 )

[ 産業財産権 ]

無し

[ その他 ]

北里大学理学部・平成 27 年度卒業研究論文「原子炉ニュートリノ測定用中性子検出器の性能評価」、山崎あかね

北里大学理学部・平成 28 年度卒業研究論文、

「 ${}^{252}\text{Cf}$  の中性子フラックス測定」鳥澤武大、

「 ${}^6\text{Li}$  ガラスシンチレータの中性子検出効率の測定」柴田惇史

#### 6 . 研究組織

(1) 研究代表者

川崎健夫 (KAWASAKI, Takeo)

北里大学・理学部・教授

研究者番号：00323999

(2) 研究協力者

岩田修一 (Iwata, Shuichi),

松井達滉 (MATSUI, Tatsuaki)

山崎あかね (YAMASAKI, Akane),

鳥澤武大 (TORIZAWA, Takehiro),

柴田惇史 (SHIBATA, Atsushi)