

# 原子炉ニュートリノモニター開発に向けた PSD能力を有したLi含有液体シンチレータの有効性の検討

川端 孝弥\* 中島 恭平\*\* 玉川 洋一\*\* 鈴木 耕拓\*\*\*

## The study on the effectiveness of Li loaded liquid scintillator with PSD for the development of reactor neutrino monitor

Atsuya KAWABATA\*, Kyohei NAKAJIMA\*\*, Yoichi TAMAGAWA\*\* and Kohtaku SUZUKI\*\*\*

(Received January 13, 2022)

Reactor neutrino monitor is a technology that monitors the fuel composition inside the reactor by observing electron anti-neutrinos generated from the reactor. We developed a Li loaded liquid scintillator (LiLS) with Pulse Shape Discrimination (PSD). In this paper, the effectiveness of LiLS is verified by estimating the S/N in electron anti-neutrinos observations.

**Key Words** : reactor neutrino monitor, Li-loaded liquid scintillator, neutrino, S/N

### 1. 緒言

我々の研究グループは、原子炉ニュートリノモニター開発に向けた基礎研究に取り組んでいる。原子炉ニュートリノモニターとは、原子炉運転時に発生する反電子型ニュートリノを観測することで、原子炉内のリアルタイムモニタリングを行う技術である。原子炉運転時に発生する核分裂生成物は $\beta$ 崩壊時に反電子型ニュートリノを放出する。この反電子型ニュートリノの数やエネルギー分布を詳細に得ることができれば、原子炉内の稼働状況や燃料組成をリアルタイムで遠隔から知ることが可能になるため、核不拡散、核の平和利用の観点において、IAEAから開発要請もあり、研究が進められている。

この反電子型ニュートリノ検出には逆 $\beta$ 崩壊反応(図1)を利用する。我々は原子炉ニュートリノモニターにおけるニュートリノ検出器として水素を多く含む有機シンチレータの中でも特に液体シンチレー

タの開発に取り組んでいる。逆 $\beta$ 崩壊反応によって放出される中性子を効率よく検出することで検出効率向上に貢献できる。我々は、中性子捕獲反応として $\alpha$ 線・トリチウムを放出する ${}^6\text{Li}$ を添加し、さらに波形弁別能を有したLi含有液体シンチレータ(LiLS)の開発に成功した。これまで、LiLSの発光量、波形弁別能、透過率、中性子捕獲反応、消光係数といった基礎特性を評価してきた。

本論文では、これまで評価してきた基礎特性の結果より最も原子炉ニュートリノモニターに最適だと結論付けたLiLSに対して、中性子線源である ${}^{252}\text{Cf}$ 、環境放射線(バックグラウンド)を測定することで、検出器としてどの程度のバックグラウンド排除能力を有しているのか検討した結果について報告する。

### 2. 背景

#### 2.1 原子炉ニュートリノモニター

原子炉ニュートリノモニターは、ニュートリノの特性を活かした技術の一つである。ニュートリノには透過率が高いという特徴がある。原子炉運転時に発生する核分裂生成物の $\beta$ 崩壊の際に発生する反電子型ニュートリノの数やエネルギー分布を明らかにすることで原子炉の稼働状況や燃料組成をリアルタイムでモニタリングできる装置である。現在、燃料組成を確認する方法は、原子炉を停止し、一定時間経過後に、燃料を取り出し、内部を調査する方法が

\* 大学院工学研究科安全社会基盤工学専攻

\*\* 原子力安全工学講座

\*\*\* 若狭湾エネルギー研究センター

\* System and Infrastructure Engineering for Safe and Sustainable Society, Graduate School of Engineering

\*\* Department of Nuclear Safety Engineering, Faculty of Engineering

\*\*\* The Wakasa Wan Energy Research Center

とられている。これは組成が判明するまでに時間がかかり、放射線による被ばくの観点からも危険が伴う。この方法に対し、原子炉ニュートリノモニターは透過率の高い反電子型ニュートリノを観測することで燃料組成を確認することができる。この方法は、原子炉建屋外から原子炉内に直接アクセスすることなく、リアルタイムで情報を得ることができるため、安全である。そのため、IAEAからも開発要請がある<sup>[1]</sup>。

また、このようにニュートリノ観測の技術が向上すると物理学分野におけるステライルニュートリノといった未解決問題解決に貢献できると考えられている。このように原子炉ニュートリノモニターという技術は工業的利用、物理学的観点といった幅広い分野に応用できることから、研究が進んでいる。

原子炉ニュートリノモニター実用化のため、地上で測定可能、原子炉の運転に干渉しない、移動が容易、どこにでも設置可能、トラックの荷台に積めるコンパクトな検出器といった条件が求められる。我々は、このような条件を満たすことのできる1tサイズ程度の反電子型ニュートリノ検出器の開発を行っている。

## 2.2 先行研究

原子炉ニュートリノモニターの研究開発は世界的に進められている。代表的な実験として SONGS 実験、PANDA 実験、PROSPECT 実験が挙げられる。

### 2.2.1 SONGS 実験<sup>[2]</sup>

SONGS (San Onofre Nuclear Generating Station) 実験である。アメリカで2003年から2007年にかけて行われていた実験である。原子炉から発生した反電子型ニュートリノを測定し、原子炉ニュートリノモニターの実現性を示した実験である。

この実験では、地下10m、原子炉から距離24.5mの位置に検出器を設置し、原子炉由来の反電子型ニュートリノ測定を行った。反電子型ニュートリノ検出器としてGd含有液体シンチレータを0.64t、宇宙線排除用にプラスチックシンチレータ、中性子に対する遮蔽材として厚さ50cmのポリエチレンが使用されている。

測定結果は、原子炉稼働時にニュートリノの検出効率が、 $544 \pm 13$  /day、停止時に $105 \pm 9$  /dayと原子炉稼働時と停止時でニュートリノ検出効率に明確な差があることが確認できた。

### 2.2.2 PANDA 実験<sup>[3]</sup>

PANDA (Plastic Anti-Neutrino Detection Array) 実験である。日本の北里大学が開発を行っている原子炉ニュートリノモニターの実験である。特徴は、反電

子型ニュートリノ検出器としてGd含有シートを巻いたプラスチックシンチレータを検出器として用いている。プラスチックシンチレータは不燃性であるため、原子炉施設内で測定する際に安全であるという点で優れている。また特徴として、プラスチックシンチレータ1本10cm×10cm×100cmを100本組み合わせた検出器を使用している。

2019年に関西電力の大飯原子力発電所4号機にて、原子炉から45m離れた地上でテスト測定を行った。反電子型ニュートリノ事象に対するバックグラウンド事象の比(S/N)が1/100となり、原子炉由来の反電子型ニュートリノの有意性を確認するには、約20日の測定を要することが確認された。

### 2.2.3 PROSPECT 実験<sup>[4]</sup>

アメリカで行われているPROSPECT実験である。天然存在比7.5%の<sup>6</sup>Liを95%まで濃縮したLiClを用いて<sup>6</sup>LiLS開発を進めている。

プロトタイプとして、117.6cm×14.5cm×14.5cmの検出器を2つ用意し、検出器の両側に光電子増倍管(PMT)を設置することで検出器の両側から信号を読み出している。検出器は、1MeVにおいてエネルギー分解能は $4.0 \pm 0.2\%$ であった。また、波形弁別能によって、 $\gamma$ 線による事象と中性子による反跳陽子事象を明確に分離することができており、<sup>6</sup>Liによる中性子捕獲反応を十分に確認できている。この試作機では、減衰長、位置分解能、中性子捕獲反応、長期安定性を測定した。PROSPECT実験における反電子型ニュートリノ観測とバックグラウンド事象排除に対する条件を満たしており、ニュートリノ検出のほかにも中性子検出といった他の用途でも価値のある検出器の開発に成功している。

## 2.3 反電子型ニュートリノの検出

逆 $\beta$ 崩壊反応を利用して、反電子型ニュートリノを検出する。反応式(1)に逆 $\beta$ 崩壊反応を示す。反電子型ニュートリノと液体シンチレータ内の陽子が逆 $\beta$ 崩壊反応を起こすことによって、陽電子と中性子が発生する。

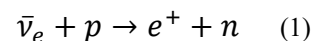


図1にLiLS内における反電子型ニュートリノの検出原理を示す。逆 $\beta$ 崩壊反応後、放出された陽電子はLiLS内でエネルギーを落としていきながら、最終的に電子と対消滅し、511keVのエネルギーを持つ $\gamma$ 線を2本放出する。これを先発事象とする。中性子は検出器内で熱化し、最終的にLiLSに添加した<sup>6</sup>Liに捕獲され、中性子捕獲反応である $\alpha$ 線・トリチウム(合計4.78MeV)を放出する。これを後発事象とする。これまでLiではなくGdを添加した液体シ

ンチレータの開発を行ってきた<sup>[5,6]</sup>。Gd の場合、中性子捕獲反応として複数の  $\gamma$  線 (合計 8 MeV) を放出するのに対し、 ${}^6\text{Li}$  では、中性子捕獲反応として  $\alpha$  線・トリチウムを放出するため、先発事象、後発事象の弁別、またバックグラウンドとの弁別が容易であることが優れている。

先発事象と後発事象の時間差は約数十  $\mu\text{s}$  であり、この時間相関を利用することで反電子型ニュートリノ事象の観測を行う。先発事象と後発事象の時間差を利用し、時間相関のないバックグラウンド事象を削減する方法を遅延同時計測法という。この先発事象と後発事象の時間差は Li 濃度によって変化する。

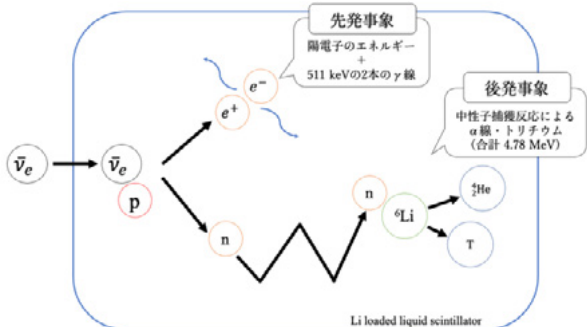


図 1. 反電子型ニュートリノ検出原理

## 2.4 遅延同時計測法では排除できない背景事象

図 2 に宇宙線による核破砕反応で発生する環境中の高速中性子が LiLS 内で検出される際の模式図を示す。高速中性子が LiLS 内の陽子と弾性散乱し、反跳陽子が生成される。これが先発事象となる。弾性散乱後の中性子は LiLS 内で熱化し、 ${}^6\text{Li}$  による中性子捕獲反応によって  $\alpha$  線・トリチウムを放出する。これが後発事象となる。

遅延同時計測法は図 1 に示すような 2 つの事象の時間差を利用して反電子型ニュートリノ事象を同定する手法であるが、環境中の高速中性子事象による先発事象、後発事象の時間差も反電子型ニュートリノ事象における先発事象、後発事象とよく似た時間差で検出されるため、遅延同時計測法を用いて弁別するのが困難である。そのため、後述する波形弁別能を利用することで弁別をする。

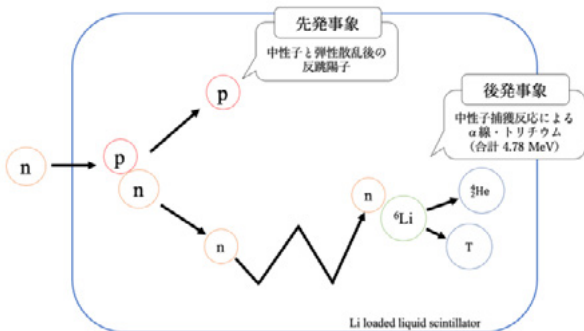


図 2. 環境中の高速中性子事象

## 2.5 波形弁別能

近年、エレクトロニクス的发展により、放射線検出器の出力波形を高速にデジタル化して 1 つ 1 つの波形を保存することが可能となり、1 波形ずつを用いた解析を行うことができるようになった。

波形弁別は、得られた放射線の波形の減衰時間の違いから  $\gamma$  線と中性子を弁別する方法である。図 3 に  $\gamma$  線と高速中性子によって発生する反跳陽子の本測定において得られた平均波形を示す。 $\gamma$  線と反跳陽子において波形の減衰時間に明らかな差が出ていることが確認できる。

反電子型ニュートリノ測定では先発事象が  $\gamma$  線であるのに対し、環境中の高速中性子事象の先発事象が高速中性子由来反跳陽子であることから、 $\gamma$  線と反跳陽子の波形の減衰時間を利用した波形弁別によって 2.4 節で示した環境中の高速中性子事象を排除することが可能になる。

具体的な方法は、波形の全体積分  $Q_{\text{total}}$ 、減衰部分の積分  $Q_{\text{tail}}$  を求める。これらの比  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  を求め、分布を見ることで弁別を行う。

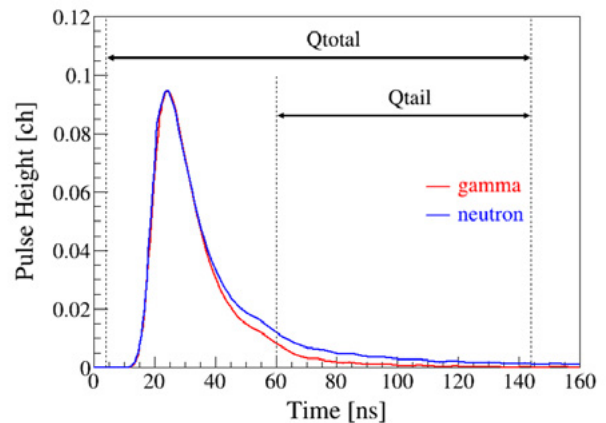


図 3.  $\gamma$  線と高速中性子由来反跳陽子の本測定において得られた平均波形

## 3. 本研究の目的

先行研究である PANDA 実験が 2019 年に関西電力の大飯原子力発電所 4 号機より 45 m 離れた位置でテスト測定を行った際に、 $S/N = 1/100$  という結果が得られた。この実験において、原子炉由来の反電子型ニュートリノの有意性を確認するには、約 20 日の測定が必要であることが確認された。しかし、原子炉ニュートリノモニターの実用化には、より少ない日数で反電子型ニュートリノの検出を行う必要がある。そのためには、バックグラウンドをもっと効果的に排除する必要がある。

そのため、我々は波形弁別能を有した Li 含有液体シンチレータ (LiLS) の開発に取り組んでいる。LiLS

は波形弁別能を有しているため、遅延同時計測法を用いた後に、波形弁別によってさらに関心事象を選別することが可能になり、2.4節で示した環境中の高速中性子事象も排除することが可能になる。

本研究では、我々が原子炉ニュートリノモニターにおいて最適だと結論付けた LiLS に対して、中性子線源である  $^{252}\text{Cf}$ 、バックグラウンド測定を行うことにより、PANDA 実験で得られた  $S/N = 1/100$  がどれだけ改善できるか検討を行う。

#### 4. Li 含有液体シンチレータ

表 1 に、本実験において使用した LiLS の材料組成を示した。Li 濃度が 0.1wt%、波形弁別能を付与する Ultima Gold F が発光母体である LAB, Ultima Gold F に対して、10wt%となるようにした。

表 1. 本実験に使用した LiLS の材料組成

材量	重量
LAB	68.4 g
界面活性剤	20.0 g
LiCl 水溶液	3.7 g (Li 0.1wt%)
PPO	0.27 g
Bis-MSB	27 mg
Ultima Gold F	7.6 g

#### 5. 測定と評価

今回は、100 g サイズの LiLS を用意し、測定を行った。このサイズは原子炉ニュートリノモニターとして想定している 1 t 級サイズの LiLS に対して、1/10000 である。

我々の研究グループは過去に環境放射線の測定を行っている。その際に 2.4 節で示した高速中性子事象は 3L (およそ 3kg) サイズの液体シンチレータにおいて、およそ 20 events/hour という結果を得た。今回の測定では 100 g の LiLS での測定であることから、さらに高速中性子事象は検出レートが下がることが考えられる。そのため、今回の測定においては、中性子線源である  $^{252}\text{Cf}$  の高速中性子を測定することで、LiLS 内で発生する高速中性子事象を予測し、その結果をもとにバックグラウンド測定より S/N 改善の検討を行うこととした。

##### 5.1 中性子線源測定

###### 5.1.1 遅延同時計測法による中性子捕獲反応の確認

中性子線源である  $^{252}\text{Cf}$  を用いて測定を行い、遅延同時計測法を用いることで時間相関のある事象領域

(On-timing) と時間相関のない事象領域 (Off-timing) の選定を行った。

図 4 に中性子線源測定における測定系の模式図を示す。 $^{252}\text{Cf}$  測定の際は、バックグラウンドの  $\gamma$  線や  $^{252}\text{Cf}$  から発生する  $\gamma$  線を排除するため、厚さ 5 cm の鉛ブロックで覆い、線源側には厚さ 10 cm の鉛ブロックを設置した。これにより、大幅に  $\gamma$  線による事象を排除することが可能になる。

図 5 に遅延同時計測法によって得られる先発事象と後発事象の時間差  $\Delta T$  分布を示す。この結果から On-timing を 5~100  $\mu\text{s}$ 、Off-timing を 205~300  $\mu\text{s}$  とした。また、先発事象のエネルギー範囲は、測定機器の性能上、5000 keV 以上はサチュレーションを起こしていたため、200~4500 keV とした。後発事象のエネルギー範囲は  $^6\text{Li}$  による中性子捕獲反応である  $\alpha$  線・トリチウムの観測エネルギーがおおよそ 500 keV 付近に見られることから 300~700 keV とした。

図 6 に後発事象のエネルギースペクトルを示す。点線で囲っている範囲が今回の後発事象のエネルギー範囲である 300~700 keV である。500 keV 付近に中性子捕獲反応による  $\alpha$  線・トリチウムによって形成されたピークが確認できる。これにガウス関数でフィッティングをし、ピーク値より  $\pm 2\sigma$  の位置である 461~634 keV の事象を中性子捕獲反応による事象として計算すると  $709 \pm 41$  events であった。

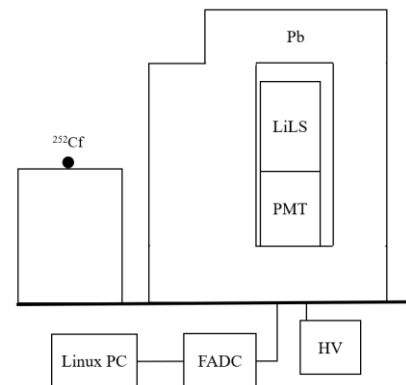


図 4. 中性子線源測定における測定系の模式図

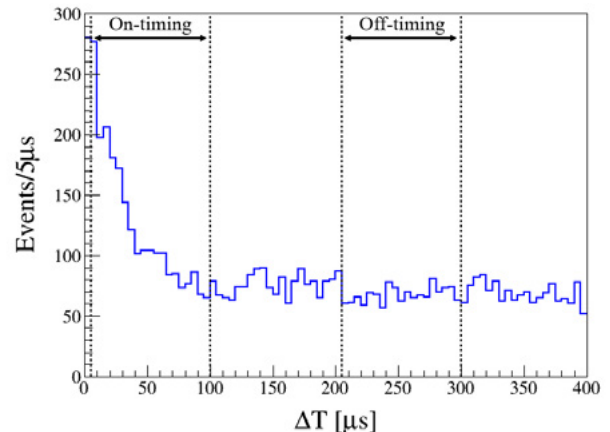


図 5. 遅延同時計測法より得られた時間差  $\Delta T$  分布

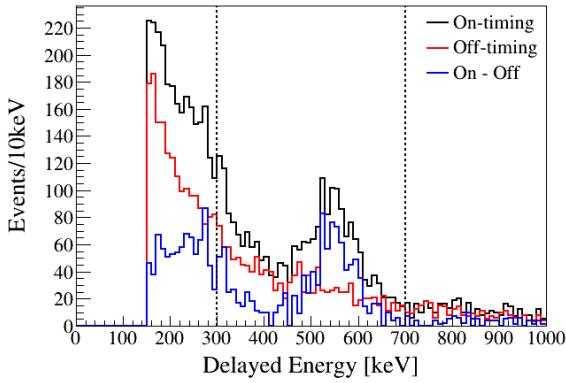


図 6. 後発事象のエネルギースペクトル

5.1.2 波形弁別を用いた n/γ の選別

遅延同時計測法を用いた <sup>252</sup>Cf の測定データに対して γ 線による事象と高速中性子事象の弁別を行うためのカットラインを選定した．波形弁別能を行う際に 2.5 節で示した Q<sub>total</sub> を波形のピークから、-20 ns ~ +120 ns の範囲、Q<sub>tail</sub> を波形のピークから、+36 ns ~ +120 ns とした．

図 7 に縦軸 Q<sub>tail</sub>/Q<sub>total</sub>、横軸 エネルギーとして、On-timing から Off-timing を差し引いた後発事象における Q<sub>tail</sub>/Q<sub>total</sub> のエネルギー依存性の二次元ヒストグラムを示す．図 8 に図 7 で示した 300 keV~700 keV に対する縦軸 Q<sub>tail</sub>/Q<sub>total</sub> を射影した際のヒストグラムを示す．図 8 の Q<sub>tail</sub>/Q<sub>total</sub> ヒストグラムに対して、ガウス関数でフィッティングを行った．反電子型ニュートリノ事象を検出するには、先発事象が陽電子の電子対消滅による γ 線の事象、後発事象は <sup>6</sup>Li の中性子捕獲反応による α 線・トリチウムとなる．そのため、図 8 において、<sup>6</sup>Li の中性子捕獲反応による α 線・トリチウム事象を 95% 以上残せるようガウス関数でフィッティングした際に得られる μ - 2σ の位置を後発事象における n/γ のカットラインとした．こうして後発事象のカットラインを選定すると後発事象では Q<sub>tail</sub>/Q<sub>total</sub> = 0.094 となった．

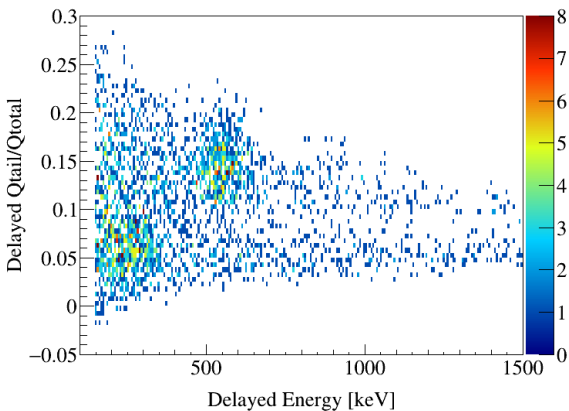


図 7. <sup>252</sup>Cf 測定における後発事象の Q<sub>tail</sub>/Q<sub>total</sub> のエネルギー依存性

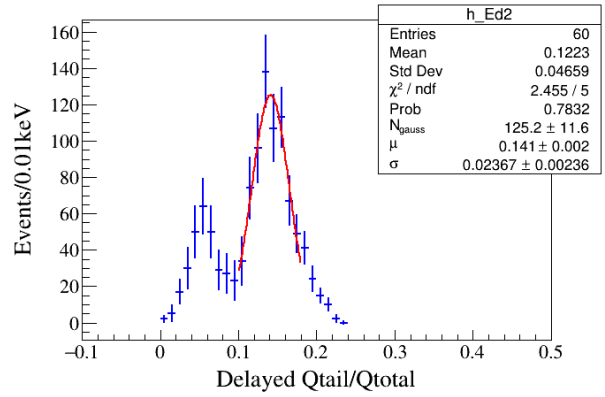


図 8. 図 7 において Q<sub>tail</sub>/Q<sub>total</sub> を 300~700keV の範囲で射影した際のヒストグラム (青：ヒストグラム，赤：中性子事象にフィッティングしたガウス関数)

5.2 バックグラウンド測定

5.2.1 遅延同時計測法

図 9 にバックグラウンド測定における測定系の模式図を示す．図 4 に示す中性子線源測定とは違い、周囲の鉛ブロックを排除した．

5.1 節において、On-timing を 5~100 μs、Off-timing を 205~300 μs としたところ、中性子捕獲反応を十分に確認することができた．バックグラウンド測定では、反電子型ニュートリノ事象がなく、環境中の高速中性子事象も非常に少ないことが想定されるため、遅延同時計測法を用いた際に On-timing 領域と Off-timing 領域の選定が困難である．そのため、5.1 節で示した On-timing 5~100 μs、Off-timing 205~300 μs を採用することとした．

バックグラウンドの測定データに対して遅延同時計測法を用いた．遅延同時計測法における選別条件は、次の通りとした．先発事象のエネルギー範囲は 200~4500 keV、後発事象のエネルギー範囲は 300~700 keV、On-timing 領域は 5~100 μs、Off-timing 領域は 205~300 μs である．この条件で遅延同時計測法を行い、得られた先発事象、後発事象のエネルギースペクトルをそれぞれ図 10、図 11 に示す．

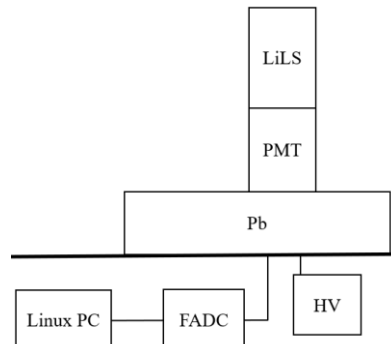


図 9. バックグラウンド測定における測定系の模式図

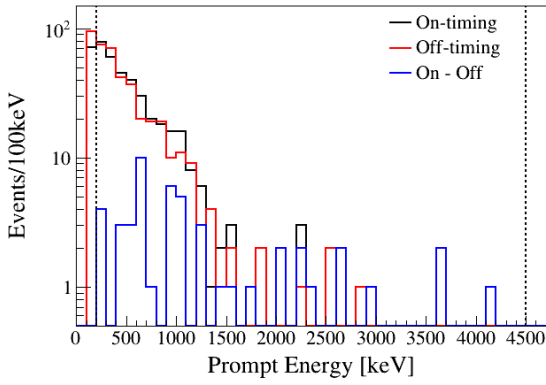


図 10. 先発事象のエネルギースペクトル

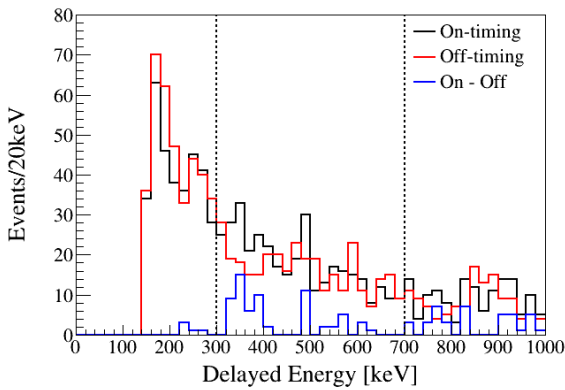


図 11. 後発事象のエネルギースペクトル

### 5.2.2 波形弁別による S/N 改善に関する検討

図 12 に縦軸  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ , 横軸 エネルギーとして, On-timing から Off-timing を差し引いた遅延同時計測法後の先発事象における  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  のエネルギー依存性の二次元ヒストグラムを示す. 図 13 に図 12 で示した先発事象の 200~4500 keV に対する縦軸  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  を射影した際のヒストグラムを示す. 5.1.2 節に示したように反電子型ニュートリノ事象の検出には, 先発事象は陽電子の電子対消滅による  $\gamma$  線の事象である. そこで図 13 の  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  ヒストグラムに対してガウス関数でフィッティングを行い,  $\gamma$  線の事象を 95%以上残せるようガウス関数でフィッティングをした際に得られる  $\mu + 2\sigma$  の位置を先発事象における  $n/\gamma$  のカットラインとした. こうして先発事象のカットラインを選定すると, 先発事象では  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}} = 0.077$  となった.

図 14, 図 15 に, On-timing, Off-timing における縦軸 後発事象における  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ , 横軸 先発事象における  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  とした二次元ヒストグラムを示す. 図 14, 図 15 には, 先発事象, 後発事象のカットラインを引いており, 反電子型ニュートリノ事象が観測される領域および遅延同時計測法を用いても排除できない領域を示した.

表 2 に遅延同時計測法を用いても排除できない事

象, 図 14, 図 15 のどの領域がこの事象にあたるか, および今回観測された On-timing から Off-timing を差し引いた各領域における事象数を示す.

表 2 の結果より, 全体の事象数 (1+2+3+4) を 100% とした場合に対して反電子型ニュートリノを観測される事象領域 1 以外の事象数 (2+3+4) は 68% である. この結果より, PANDA 実験の示した  $S/N = 1/100$  に対して, 今回の測定では  $S/N = 1/32$  まで改善できることが確認できた.

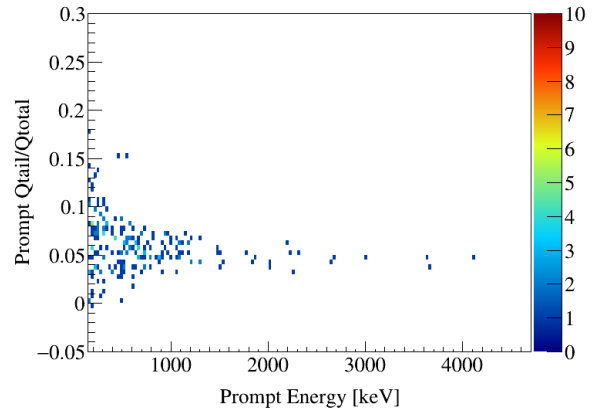


図 12. バックグラウンド測定における先発事象の  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  のエネルギー依存性

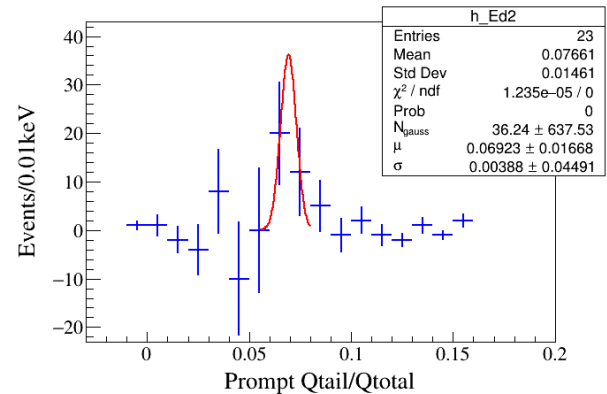


図 13. 図 12 において  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  を 200~4500 keV の範囲で射影した際のヒストグラム

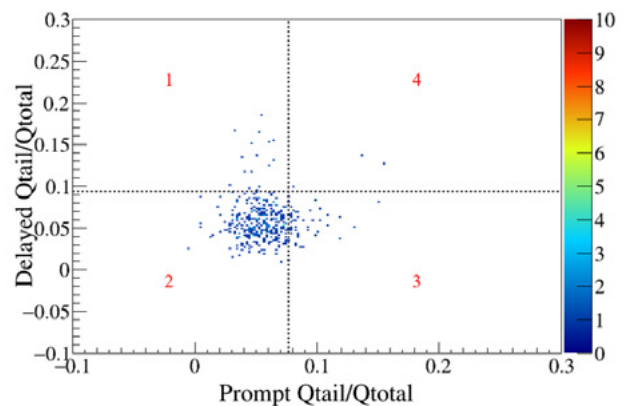


図 14. On-timing における縦軸 後発事象の  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ , 横軸 先発事象の  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  とした二次元ヒストグラム

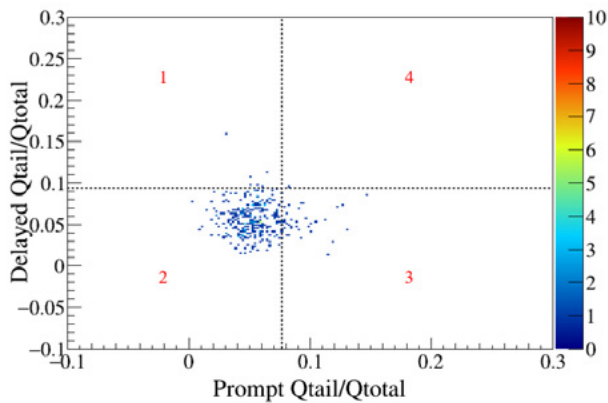


図 15. Off-timing における縦軸 後発事象の  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$ , 横軸 先発事象の  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  とした二次元ヒストグラム

表 2. 遅延同時計測法後に観測される事象と今回の測定において観測された各領域における事象数

領域	事象	On [events]	Off [events]	On-Off [events]
1	$\gamma - n$	$16 \pm 4$	$6 \pm 2$	$10 \pm 5$
2	$\gamma - \gamma$	$297 \pm 17$	$286 \pm 17$	$11 \pm 24$
3	$n - \gamma$	$43 \pm 7$	$35 \pm 6$	$8 \pm 9$
4	$n - n$	$3 \pm 2$	$1 \pm 1$	$2 \pm 2$

## 6. 結果と考察

福井大学敦賀キャンパス 3 階の実験室でバックグラウンド測定を行った。敦賀キャンパスの近くには稼働中の原子力発電所がないため測定において得られるデータはすべて環境中のバックグラウンドに起因するものとした。

5.1 中性子線源測定では  $^{252}\text{Cf}$  を用いて遅延同時計測法を用いることによって、中性子捕獲反応数は  $461 \sim 634 \text{ keV}$  の範囲に観測でき、中性子フラックス  $4 / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  に対しておよそ  $35 \text{ events/hour}$  であった。また、この測定において反電子型ニュートリノを観測する際の後発事象カットラインを  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}} = 0.094$  とした。

5.2 バックグラウンド測定においては先発事象カットラインを  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}} = 0.077$  とした。中性子線源測定で得られた後発事象カットラインを用いることで、現状  $S/N = 1/100$  をどこまで改善できるのかを確認した。結果はバックグラウンドをさらに 68% 排除可能であることが確認され、 $S/N = 1/32$  となった。

今回の測定は  $100 \text{ g}$  サイズの LiLS を使用し、測定を行い、 $S/N$  を見積もった。しかし、実際に想定している原子炉ニュートリノモニターの検出器サイズは  $1 \text{ t}$  級である。波形弁別能は検出器サイズが大きくなると悪くなることが分かっている。今後は  $1 \text{ kg}$  とい

った LiLS の容量を大きくした検出器で検討を行う必要があると考えられる。

## 7. まとめ

我々の研究グループでは原子炉ニュートリノモニターの開発に取り組んでいる。原子炉ニュートリノモニターとは、原子炉運転時に発生する核分裂生成物の  $\beta$  崩壊の際に放出される反電子型ニュートリノを観測することで原子炉内部をリアルタイムモニタリングする技術である。その中でも、我々は特に重要な反電子型ニュートリノ検出器の開発に取り組んでいる。反電子型ニュートリノ検出の際に逆  $\beta$  崩壊反応を利用する。逆  $\beta$  崩壊反応の際に放出される中性子を効率よく検出できると反電子型ニュートリノの検出効率向上に貢献する。そこで我々は中性子捕獲反応として  $\alpha$  線・トリチウムを放出する  $^6\text{Li}$  を添加し、波形弁別能を有した Li 含有液体シンチレータ (LiLS) の開発に成功した。これまでは LiLS の発光量、波形弁別能、中性子捕獲反応といった発光特性を中心に基礎特性の評価を行ってきた。そこで原子炉ニュートリノモニターに使用するために最適な LiLS を結論づけた。

先行研究である PANDA 実験では反電子型ニュートリノ事象とバックグラウンド事象の比 ( $S/N$ ) が  $1/100$  であることが示されている。PANDA 実験では波形弁別能を有していないプラスチックシンチレータを使用しており、本実験では波形弁別能を有した LiLS を使用するため、遅延同時計測法では排除できない環境中の高速中性子事象等の排除が可能になり、 $S/N$  の改善が期待できる。

本研究では、最適と結論づけた LiLS  $100 \text{ g}$  を用いて中性子線源である  $^{252}\text{Cf}$  測定、バックグラウンド測定を行った。これらの測定データを用いることで、 $S/N$  がどれだけ改善できるか見積もった。今回の測定では、近くに稼働中の原子力発電所といった反電子型ニュートリノの発生源となる施設がなかったため、バックグラウンド測定の結果を用いて  $S/N$  の  $N$  にあたるバックグラウンド事象がどれだけ排除できるか検討を行った。バックグラウンド測定において、 $100 \text{ g}$  の LiLS では環境中の高速中性子事象は非常に少ないことが想定されるため、中性子線源として  $^{252}\text{Cf}$  を用いて中性子捕獲反応の確認ができるエネルギー条件の選定や後発事象における  $Q_{\text{tail}}/Q_{\text{total}}$  のカット条件の選定を行った。遅延同時計測法後に波形弁別能を用いることで  $S/N = 1/32$  になることが確認できた。

今後は、原子炉ニュートリノモニターの開発に向

けて検出器の大型化を行う必要がある。将来的には、1 t 級の LiLS を用意する必要がある。また波形弁別能は LiLS が大きくなれば、悪くなることが分かっているため、まずは 1 kg とした 1/1000 サイズの試作機を作製し、大型化に向けて検討を行っていく必要がある。

### 参考文献

1. Final Reports: Focused Workshop on Antineutrino Detection for Safeguards Applications, 28-30 October 2008 IAEA Headquarters, Vienna.
2. N. S. Bowden et al., "Observation of the isotopic evolution of pressurized water reactor fuel using an antineutrino detector", Journal of Applied Physics 105, 064902 (2009).
3. Tomoyuki Konno, "Measurement of reactor neutrinos using plastic scintillator array on the ground", Applied Antineutrino Physics 2019, Guangzhou city, China, Dec.7 2019(presentation).
4. J. Ashenfelter et al. (The PROSPECT collaboration), "Performance of a segmented  ${}^6\text{Li}$ -loaded liquid scintillator detector for the PROSPECT experiment", JINST 13(2018) P06023.
5. 池山佑太, 中島恭平, 玉川洋一  
「原子炉ニュートリノモニター開発 -PSD 能力を有する Gd 入り液体シンチレータの発光量と透過率測定-」  
福井大学学術研究院工学系部門研究報告, 2020.03, vol.68, 3.
6. 増井友哉, 川端孝弥, 玉川洋一, 中島恭平  
「原子炉ニュートリノモニター開発 -試作機のバックグラウンド排除能力の評価-」  
福井大学学術研究院工学系部門研究報告, 2021.10, vol.70, 2.