

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—

増井 友哉* 川端孝弥* 玉川 洋一** 中島 恭平**

Development of Reactor Neutrino Monitor — Evaluation of the background reduction of the prototype detector —

Tomoya MASUI*, Atsuya Kawabata*, Yoichi TAMAGAWA** and Kyohei NAKAJIMA**

(Received September 30, 2021)

Reactor neutrino monitor is a technology for remotely monitoring a reactor using anti-electron neutrinos generated from the reactor. Reduction of the background is important for detecting neutrinos, and previous studies have shown that the background for neutrinos is 100 times ($S/N = 1/100$). Currently, we have created a prototype for the development of a 1t size Gd-containing liquid scintillator for neutrino monitors with the goal of $S/N = 1/10$. In this paper, we evaluated the ability of the prototype to eliminate the background by pulse shape discrimination.

Key Words : Reactor Neutrino Monitor, Background, Liquid Scintillator

1. 緒言

原子炉から発生する反電子ニュートリノを用いて原子炉を遠隔から監視する技術である原子炉ニュートリノモニターの開発を進めている。反電子ニュートリノは相互作用がほとんど起こらず、検出頻度が低いため、地上での測定は、バックグラウンドの排除が重要な課題となっている。

先行研究では原子炉由来のニュートリノ事象に対してバックグラウンド事象が 100 倍($S/N = 1/100$)という結果が得られており、この結果を踏まえて、現在 $S/N = 1/10$ を目標とした 1t サイズの波形弁別能力を有する Gd 含有液体シンチレータ検出器の作成を行っている。

本論では、目標とする検出器の約 1/100 の大きさの試作機を作成し、作成した試作機の波形弁別を用いたバックグラウンドの排除能力を評価し、結果について検討する。

2. 研究背景

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とは、原子炉内での核分裂により発生する反電子ニュートリノを用いて、原子炉の運転状況や核燃料内部の ^{235}U と ^{239}Pu の組成比を遠隔でリアルタイムに監視する技術である。

またニュートリノは、弱い相互作用でしか反応しないため、遮蔽による隠ぺいが困難であり、この技術により IAEA(国際原子力機関)の核不拡散に貢献できると考える。IAEA では、 ^{239}Pu の兵器転用防止のため IAEA の保障措置の元、核査察を行っている。従来の方法では核燃料に対して、非破壊検査などによる確認を行っているがこの方法では査察側、被査察側の両方に負担がかかってしまう。そのため遠隔からリアルタイムで監視でき、プラントシステムから独立した原子炉ニュートリノモニターの開発が注目されている^[1]。

原子炉ニュートリノモニター実用化のため、性能として地上で測定可能、炉の運転に干渉しない、どこにでも設置可能、安価でコンパクトなどが求められる。そのため、これらの条件を満たすことのできる 1t サイズ程度のニュートリノ検出器の開発を現在行なっている。

* 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

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

** Department of Nuclear Safety Engineering

2.2 先行研究

2.2.1 SONGS 実験

SONGS(San Onofre Nuclear Generating Station)^[2]実験とはアメリカで2003年から2007年にかけて行われていた実験であり、原子炉から発生した反電子ニュートリノを用いた測定により、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、原子炉由来のニュートリノ測定を行なった。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50cm厚のポリエチレンが使用されている。

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

2.2.2 PANDA 実験

PANDA(Plastic Anti-Neutrino Detection Array)実験^[3]とは、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り、特徴として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1本 $10 \times 10 \times 100\text{cm}^3$ のプラスチックシンチレータを100本組み合わせて検出器として使用している。

2019年に関西電力の大飯原子力発電所の4号機の原子炉から45m離れた地上でテスト測定を行ない、結果として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。

2.3 反電子ニュートリノ

ニュートリノとは、素粒子である中性レプトンの一種で電子ニュートリノ、タウニュートリノ、ミューニュートリノの3種類に分類できる。ニュートリノは電氣的に中性であり、質量が非常に小さいため弱い相互作用でしか反応せず、高い貫通力を有している。

また3種類のニュートリノには、それぞれ反粒子が存在する。電子ニュートリノの反粒子である反電子ニュートリノは、原子炉内で核燃料である ^{235}U と

^{239}Pu が核分裂し、 β 崩壊した際に発生する。1核分裂あたりに平均6個発生し、3GWの熱出力で1秒間に約 6×10^{20} 個発生する。

2.4 液体シンチレータ

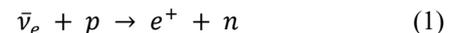
液体シンチレータとは、有機シンチレータの一種で特徴として波形の減衰時間が短く、約10ns以下である。本研究では、逆 β 崩壊反応を用いて反電子ニュートリノを検出するため、ニュートリノ検出器として陽子を多く含む液体シンチレータを使用した。液体シンチレータを用いる利点として安価で大量に作る点、容器の形状に拡張性がある点、溶質に添加材を加えることで容易に改良できる点などが挙げられる。

液体シンチレータは、主に溶媒、溶質2つで構成されており、溶媒には移動性に富み、励起されやすい π 電子構造を持つ有機物を使用することで溶媒間でのエネルギー移行が起こりやすくなることが出来る。主な溶媒の例としてリニアアルキルベンゼン(LAB)やプソイドクメン、トルエンなどが挙げられる。また原子力発電所で測定をする点から事故防止のため毒性が低く、引火点が高いものを用いる必要がある。溶質については、発光剤としての役割を持つ第一溶質と波長変化剤としての役割を持つ第二溶質の二つに分類できる。第一溶質は、溶媒から移行されたエネルギーにより励起され、蛍光を発するため蛍光効率や溶解度が重要である。第二溶質は、第一溶質で放出された光を吸収し、使用している光電子増倍管の感度に合わせた波長の光を放出するものを使用する必要がある。

これらの溶媒と溶質に加え、本実験では、添加物としてGdとUltima Gold-Fを加えた液体シンチレータを試作機として使用した。

2.5 原子炉由来の反電子ニュートリノの検出

原子炉由来の反電子ニュートリノは、検出器内で起こる逆 β 崩壊反応を利用して、遅延同時計測法を用いて検出する。逆 β 崩壊反応の式は、



と表される。式(1)より有機シンチレータ内の陽子と1.8MeV以上のエネルギーを持つ反電子ニュートリノが反応し、陽電子と中性子を発生させる。

遅延同時計測法とは、図1のように逆 β 崩壊反応により発生した陽電子が検出器内に落とすエネルギーと陽電子がエネルギーを落とし切った後、電子と反応し、対消滅した際に発生する2本の511keVの対消滅ガンマ線を先発信号、逆 β 崩壊反応により発生した中性子が熱化してGdに中性子捕獲された際

に発生する合計のエネルギーが約 8MeV となる複数のガンマ線を後発信号として、先発信号と後発信号の時間差によりニュートリノ事象を検出する方法である。このときの先発信号と後発信号の時間差は約数十 μs である。Gd を使う理由として中性子捕獲断面積が大きいという特徴があり、検出器内の Gd の濃度が高いほど先発信号と後発信号の時間差が短くなる。また遅延同時計測法を用いることで時間相関のないバックグラウンド事象を排除することができる。

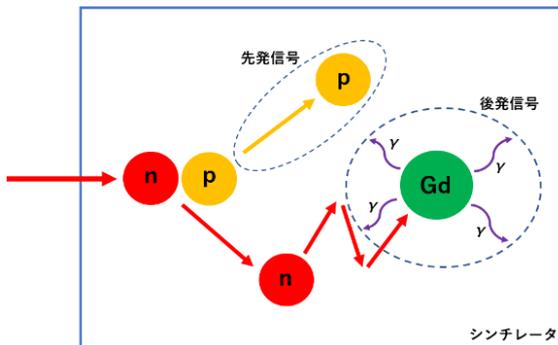


図 1 遅延同時計測法を用いた反電子ニュートリノの検出原理

2.6 バックグラウンド

遅延同時計測で排除できないバックグラウンド事象として、偶発背景事象と高速中性子事象がある。偶発背景事象は、先発信号として環境ガンマ線、後発信号として環境ガンマ線などが遅延同時計測の時間差内で偶然反応した事象である。高速中性子事象は図 2 のように先発信号として高速中性子と弾性散乱した反跳陽子が検出器内に落とすエネルギー、後発信号として高速中性子が熱化して Gd に中性子捕獲された際に発生する合計のエネルギーが約 8MeV となる複数のガンマ線が後発信号となり、ニュートリノ事象とよく似た時間差で発生するため遅延同時計測で排除することが非常に困難である。これらの事象を排除することが課題となっている。

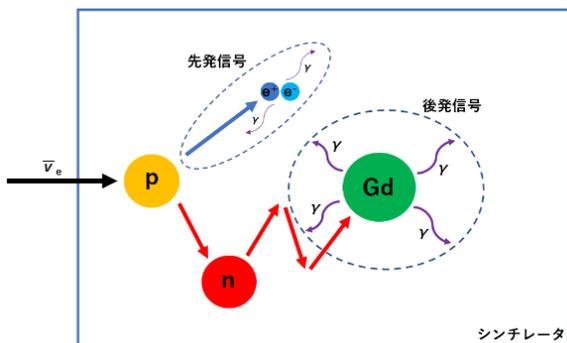


図 2 高速中性子事象の例

2.7 波形弁別

波形弁別とは、信号波形の違いからガンマ線と中性子を弁別する方法である。ニュートリノ事象の先発信号がガンマ線、高速中性子事象の先発信号が中性子による反跳陽子であることからガンマ線と反跳陽子の波形を弁別することでバックグラウンドである高速中性子事象を排除することができる。ガンマ線と中性子では図 3 のように波形の減衰部分に差があるため波形全体の積分値 Q と波形の減衰部分の積分値 Q_{tail} の比である Q_{tail}/Q により弁別できる。 Q については波形の波高値の最大になる位置から 20ns 前と 120ns 後の合計 140ns の範囲、 Q_{tail} については波形の波高値の最大になる位置から 36ns 後の波形が減衰し始める位置から 84ns 後までの範囲を積分範囲とした。

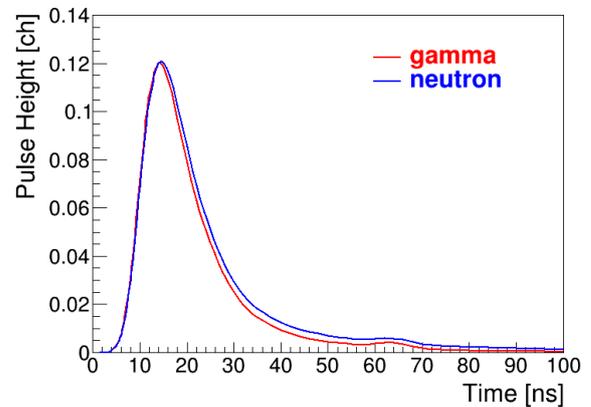


図 3 ガンマ線と中性子の平均波形

3. 本研究の目的

先行研究である PANDA 実験が原子炉近傍の地上でテスト測定をした際に、ニュートリノ事象に対してバックグラウンド事象が 100 倍 ($S/N = 1/100$) という結果が得られた。ニュートリノモニターの実用化のためには、より少ない日数で原子炉由来の反電子ニュートリノの有意性を確認する必要があるため、バックグラウンド事象のさらなる排除による S/N の改善が重要な課題となっている。バックグラウンド事象の内訳として偶発背景事象と高速中性子事象の 2 つが大部分を占めている。このうち高速中性子事象は先発信号が中性子のため波形弁別により排除することができる。

そのため本研究では、高速中性子事象を排除できる 1t サイズの波形弁別能を有する Gd 含有液体シンチレータの作成を行っている。PANDA 実験で使用した検出器は波形弁別能力を有していないため本研究で作成している検出器は、 S/N の更なる改善が望

めるため性能として $S/N = 1/10$ を目標としている。現在は、最終目標である 1t サイズの検出器の作成の前に約 1/100 サイズの試作機を作成し、性能評価を行っている。

本稿では、作成した試作機の波形弁別によるバックグラウンドの排除した際の S/N の改善についての実験結果を述べる。

4. バックグラウンド排除能力の評価

4.1 評価方法

先行研究の PANDA 実験のより $S/N = 1/100$ という結果が得られている。この結果をもとに試作機で測定したバックグラウンドについて波形弁別により高速中性子事象を排除した際の S/N の値で評価を行った。

4.2 実験に使用した試作機

実験には 8L の Gd 含有液体シンチレータを試作機として使用した。使用した液体シンチレータの構成は、溶媒として LAB, 第一溶質として PPO, 第二溶質として Bis-MSB, 添加物として、遅延同時計測を行えるようにするために中性子捕獲断面積の大きい Gd と液体シンチレータに波形弁別能力を与える Ultima Gold-F を使用した。液体シンチレータを入れる容器として図 4 のアクリル製の $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 20\text{cm}$ の立方体容器を使用した。また反射材としてデュポン社製のタイベックシートを容器全体に張り付け使用した。測定時には、アクリル容器の両側に浜松ホトニクス社製の光電子増倍管をつけ、アルミのケースに入れて遮光し、測定を行なった。

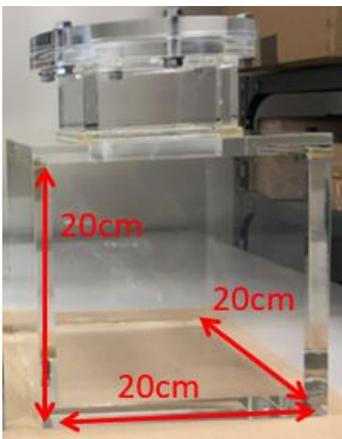


図 4 試作機に使用したアクリル容器

4.3 遅延同時計測による 2 事象間の時間差の確認

初めに試作機を用いて遅延同時計測ができるかの

確認を行った。測定には、中性子線源である ^{252}Cf を用いてニュートリノ事象と同様の時間相関をもつ事象である高速中性子事象で遅延同時計測を行った。2 事象間の時間分布は、図 5 のようになった。時間相関のある事象と時間相関のない事象が混ざった区間を ΔT_{on} 、時間相関のない事象のみの区間を ΔT_{off} として $\Delta T_{\text{on}} - \Delta T_{\text{off}}$ をすることで時間相関のある事象だけを取り出すことができる。今回は ΔT_{on} の区間を $2\mu\text{s}$ から $100\mu\text{s}$ 、 ΔT_{off} の区間を $202\mu\text{s}$ から $300\mu\text{s}$ とした。また先発信号と後発信号のエネルギースペクトルはそれぞれ図 6 と図 7 のようになった。先発信号と後発信号のエネルギースペクトルについて ΔT_{on} と ΔT_{off} の両方で 3000keV 以下に環境ガンマ線である ^{40}K と ^{208}Tl の事象が見られる。環境ガンマ線による事象は、2 つの事象が偶然遅延同時計測の時間差内で反応した偶発背景事象でない限り、時間相関がないため、 $\Delta T_{\text{on}} - \Delta T_{\text{off}}$ をした際のエネルギースペクトルでは排除されていることが確認できた。偶発背景事象を排除するため先発信号のエネルギーを 2000keV から 10000keV 、後発信号のエネルギーを 3000keV から 9000keV の領域の事象について遅延同時計測を行った。

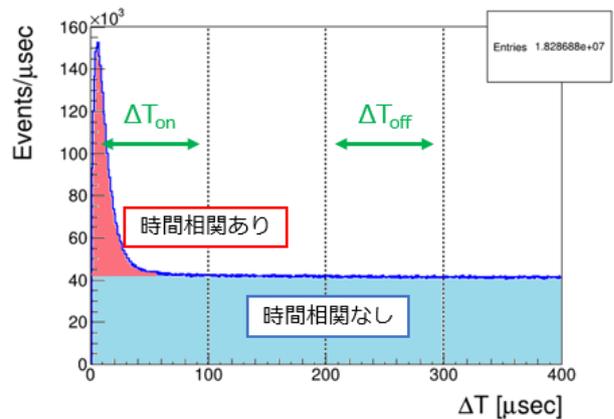


図 5 2 事象間の時間分布

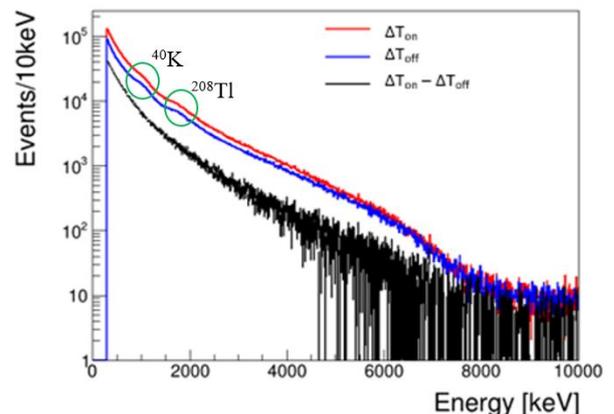


図 6 先発信号のエネルギースペクトル

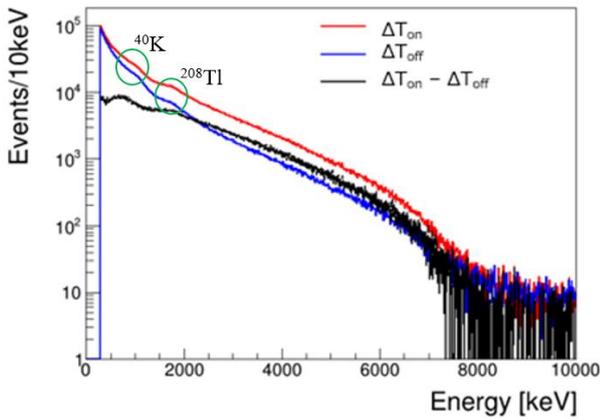


図7 後発信号のエネルギースペクトル

4.4 波形弁別能力の確認

次に波形弁別能の確認を行った。遅延同時計測により $\Delta T_{on} - \Delta T_{off}$ を行い、時間相関のある事象かつ対応する後発信号が 3000keV から 9000keV の領域にある先発信号の事象について縦軸を Q_{tail}/Q 、横軸をエネルギーとした 2次元ヒストグラムで表すと図8のようになった。 Q_{tail}/Q が 0.15 付近の事象が中性子による事象で 0.1 付近の事象がガンマ線による事象である。この先発信号の 2次元ヒストグラムについて 2000keV から 10000keV の領域で縦軸の Q_{tail}/Q を射影した際のヒストグラムが図9のようになった。ガンマ線による事象が実際にニュートリノを測定する際の先発信号の事象となるので、ガンマ線による事象をガウス分布で Fit を行った。この際に得られたガウス分布のパラメータである μ と σ を用いて、ガンマ線の事象が 95%以上残る $\mu + 2\sigma$ である $Q_{tail}/Q = 0.11$ を中性子による事象をカットする際のカット位置とした。

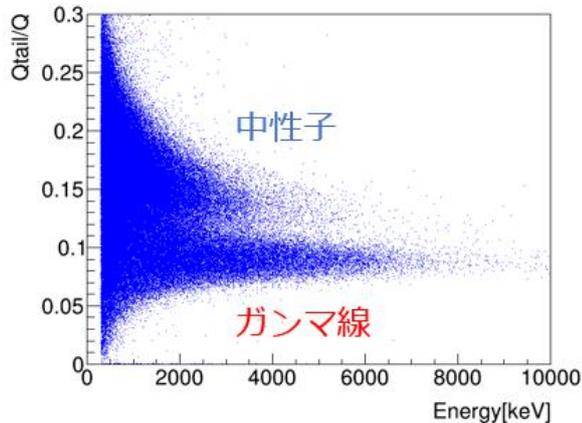


図8 ^{252}Cf 測定における先発信号の 2次元ヒストグラム

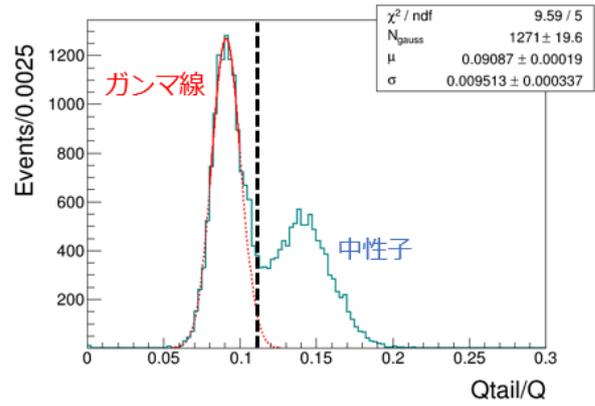


図9 図8の2次元ヒストグラムの縦軸 Q_{tail}/Q を 2000keV から 10000keV の領域で射影したヒストグラム

5. 結果

福井大学の敦賀キャンパスの実験室でバックグラウンド測定を行なった。近くに原子力発電所などがなかったため取得した事象は原子炉由来のニュートリノ事象でなく、全てバックグラウンドによる事象とした。測定したバックグラウンド事象について遅延同時計測を行い、先発信号の時間相関のある事象について縦軸 Q_{tail}/Q 、横軸をエネルギーとした 2次元ヒストグラムで表すと図10のようになった。縦軸の Q_{tail}/Q を射影した際のヒストグラムが図11のようになり、5.4で決めたカット位置である $Q_{tail}/Q = 0.11$ より右の事象を高速中性子による事象として排除することで高速中性子事象を含むバックグラウンドによる事象を 62%排除することができた。先行研究である PANDA 実験が遅延同時計測を行った後の S/N が $S/N = 1/100$ になるのに対して、今回作成した試作機は、 $S/N = 1/38$ という結果が得られた。

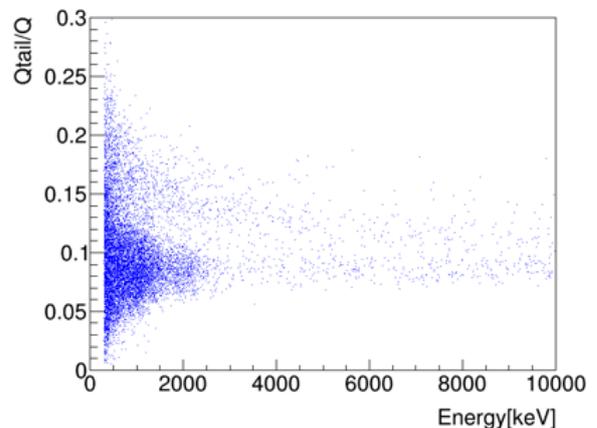


図10 バックグラウンド測定における先発信号の 2次元ヒストグラム

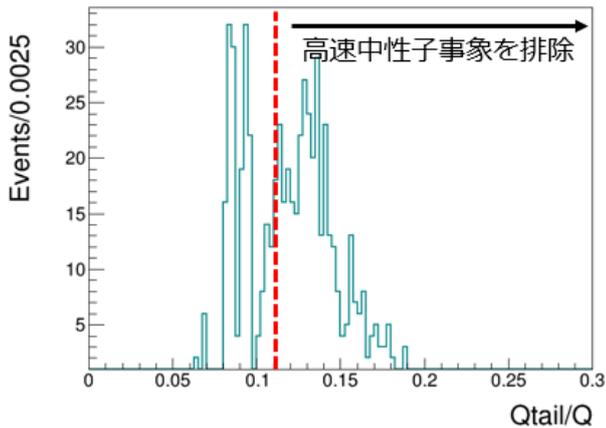


図 11 図 10 の 2 次元ヒストグラムの縦軸 Q_{tail}/Q を 2000keV から 10000keV の領域で射影したヒストグラム

6. 結論

現在福井大学では、原子炉から発生する反電子ニュートリノを利用して遠隔から原子炉の運転状態や核燃料の組成比を監視するニュートリノモニターの研究を進めている。実用化のためには、地上で測定可能、炉の運転に干渉しない、コンパクトで安価であるといった性能が求められる。

ニュートリノ事象の測定には、逆 β 崩壊反応を利用し、遅延同時計測を用いることでニュートリノ事象を検出しつつ、時間相関のない事象を排除することができる。先行研究より地上で測定する際は、遅延同時計測を用いてもニュートリノ事象に対してバックグラウンド事象が 100 倍 ($S/N = 1/100$) であることが分かっており、さらなるバックグラウンド事象の排除が重要な課題となっている。この遅延同時計測で排除できないバックグラウンド事象の内訳として偶発背景事象と高速中性子事象の 2 つ大きな割合を占める。高速中性子事象に対しては、先発信号が中性子による反跳陽子であるため波形弁別により排除することができる。

本研究では、 $SN = 1/10$ を目標とした 1t サイズの Gd 含有液体シンチレータの開発を行っており、前段階として 1/100 サイズの試作機を作成し、バックグラウンド排除能力の評価を行った。試作機には、20cm \times 20cm \times 20cm のアクリル容器と波形弁別能力を有する Gd 含有液体シンチレータを使用した。

試作機の遅延同時計測と波形弁別能力の確認のため中性子線源である ^{252}Cf を用いて測定を行った。今遅延同時計測のカット条件について、 ΔT_{on} を 2 μs から 100 μs 、 ΔT_{off} を 202 μs から 300 μs 、先発信号のエネルギーを 2000keV から 10000keV、後発信号

のエネルギーを 3000keV から 9000keV とし、高速中性子事象のカット条件として $Q_{tail} = 0.11$ 右の事象を中性子による事象とした。

試作機のバックグラウンド排除能力を評価するため実際にバックグラウンドを測定した。結果として波形弁別によりバックグラウンド事象が 62% 排除することができ、 $S/N = 1/38$ に改善された。

今後は、さらなる S/N 改善のため容器の形状を変えてバックグラウンド排除能力を評価することと今回行った波形弁別法より弁別能力の高い Shape Indicator 法^[4]による高速中性子事象の排除を行っていく予定である。

参考文献

- [1] Final Report: 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] Yoichi Tamagawa et al., “Alpha–gamma pulse-shape discrimination in $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (GAGG): Ce^{3+} crystal scintillator using shape indicator”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 795 (2015) 192–195.