

論文の内容の要旨

Reactor neutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method

(保障措置のための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モニタリング)

小栗 秀悟

IAEA は保障措置のために各国の原子炉をモニタリングしているが、その新たな手法として、原子炉ニュートリノを用いたモニタリング装置の開発を推奨している。透過性が高く代替物も用意しにくいニュートリノの利用は、原子炉のモニタリングにおいて革新的技術である。IAEA は 5～8 年程度の中期的な目標として、地上かつ少ない遮蔽物で運用可能な可搬性の高い検出器の開発を掲げている。しかし、地上での運用は、宇宙線起源の高速中性子バックグラウンドが非常に多くなってしまったため、現状では IAEA の条件に合致するニュートリノ検出器は開発されていない。

我々のグループの最終目標は、1t クラスの検出器で IAEA の条件に合致する物を開発することである。具体的には、原子炉建屋外での測定で、原子炉の ON/OFF の状態変化を一週間以内に 3σ 以上の精度で検出することを目標にしている。高速中性子バックグラウンドへの対策として、検出器を 10cm×10cm×100cm の柱状のモジュール 100 本に細分化し、各イベントのより詳細な様子を把握できるようにしたことが大きな特徴である。また、他の実験の多くが液体シンチレータを使用しているのに対し、本検出器にはプラスチックシンチレータを採用することで可搬性の向上を図っているのも、特色の一つである。

IAEA の条件に合致するニュートリノ検出器が開発できた暁には、この技術を学術的な課題に応用したいと考えている。その候補の一つとして、近年話題となっている Reactor Anomaly を視野にいれている。Reactor Anomaly は原子炉

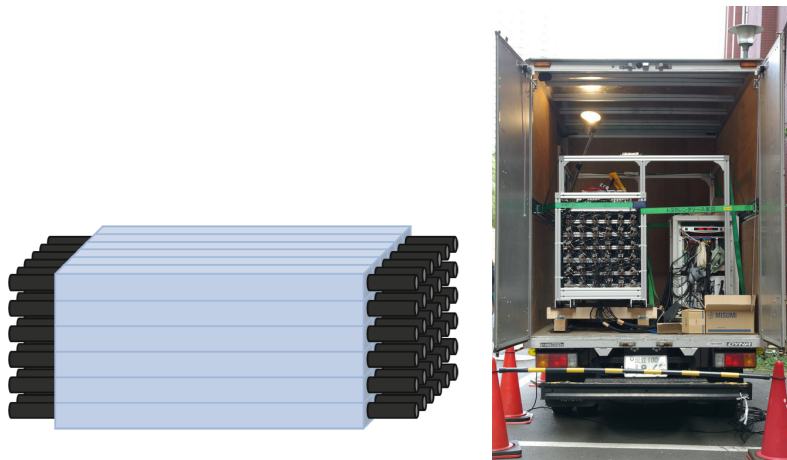


Figure 1: PANDA36 検出器

ニュートリノフラックスの理論と実験の不一致が sterile ニュートリノによるものではないかとされている問題であるが、これを正確に検証するためには、正確なエネルギースペクトルを距離を変えて測定する必要がある。これは我々の検出器の得意とするところであり、将来この分野に大きな役割をはたせると考えている。

1tクラスの検出器の開発の前段階として、我々のグループでは、360kgのプラスチックシンチレータを用いて、原子炉建家の外での原子炉ニュートリノ測定を行った。ニュートリノの検出は逆ベータ崩壊を用いて行う。反応で生じた陽電子と中性子は別々に検出され、測定時にイベントごとに付与された時刻データをもとに、解析の段階でディレイドコインシデンスがとられる。中性子は電荷を持たないため、直接検出することは難しい。そこで検出器にガドリニウムを追加することで中性子をガドリニウムに捕獲させ、その際に生じる複数のガンマ線を通じて中性子を検出する。我々の検出器の特徴は柱上に分割されたプラスチックシンチレータを用いている点である (Fig. 1)。その他の実験ではほとんどの場合液体シンチレータが用いられているが、液体シンチレータを検出器に封入した状態で持ち運ぶことは難しいため、可燃性の液体を原子炉の近くで導入する必要がある。これは、保障措置としては大きなデメリットである。固体検出器の場合、ガドリニウムを混ぜるのが一番の問題になるが、我々は柱上に分割することで解決した。棒状のモジュールに分けて一本一本をガドリニウムの塗布したシートで巻くことで、ガドリニウムを混入させた場合と同じ効果を得ることができた。また、小さく分割したことにより、検出器全体でのイベントの様子がより細かくわかるようになり、バックグラウンドのカットが容易になった。特に陽電子イベントで生じる対消滅 γ 線によるエネルギー損失に着目したセレクションでは、効率よくバックグラウンドが除去できることが確認された。

この検出器を用いて、関西電力の大飯発電所にて原子炉ニュートリノの測定実験を行った。この測定実験の目標は、二つある。一つ目は、原子炉屋外に駐車したトラック内で、原子炉の ON と OFF の期間、それぞれ一ヶ月ずつ測定を行い、そのニュートリノの変化を検出することである。結果として、ニュートリノ由来の変動は 2σ 程度であり原子炉の ON/OFF を検出したとは言えないが、屋外

測定でかろうじて差が見えたのは世界初であり、この功績は大きい。一方で、今回の測定では環境の変化に由来する高速中性子の変動も観測された。地上の測定では周りの環境の変化がつきものだが、ニュートリノ検出器がそのような変化に弱いことは、今回新たに得られた知見である。さらに、セグメント化された検出器の特徴を生かして、ニュートリノの変動と高速中性子の変動を独立に測定する手法も開発した。

もう一つの目標は、屋外測定バックグラウンドを詳細に解析し、将来の 1t クラスの検出器への展望を示すことである。PANDA36 の原子炉 OFF 時のデータを解析した結果、バックグラウンドの大半は、宇宙線起源の高速中性子による“陽子反跳-中性子捕獲”イベント、複数の中性子が同時に検出器内入ることによって引き起こされる“中性子捕獲-中性子捕獲”イベント、アクシデンタルイベントの三種類から構成されることがわかった。これらのバックグラウンドを PANDA100 に適用した結果、PANDA100 は 1 週間の測定で 5.5σ の精度で原子炉の ON/OFF を判断する能力を持っていることがわかった。これに加え、ニュートリノセレクション条件を PANDA100 用に最適化することで、さらなる S/N 比向上が期待される。PANDA100 は IAEA が中期的に定める目標を達成できると考えられる。