

速中性子イメージャーの性能評価試験

Performance evaluation of the fast-neutron imager

松村 徹¹⁾

Toru MATSUMURA

野村 正²⁾

Tadashi NOMURA

塩見 公志²⁾

Koji SHIOMI

¹⁾防衛大 応用物理 ²⁾KEK 素核研

(概要)

放射線標準施設の ^{252}Cf 中性子線源を用いて、減速材と複数のリチウムガラスから構成される速中性子イメージャーの位置分解能と感度一様性の性能評価を行った。線源から 2 メートルの位置では中性子統計量に応じて線源スポットサイズが小さくなり、位置分解能の向上が確認された。緯度・経度 10 度間隔で線源方向を変えた測定により、全方位に対して 10%以内で検出感度が一様であることが確認された。

キーワード：中性子検出器，核セキュリティ，リチウムガラスシンチレータ

1. 目的

現在我々が開発している速中性子イメージャーは、中性子の飛来方向をリアルタイムに測定することで中性子源の位置をその場で特定できる装置である。本研究開発の特徴は、0.1~10 MeV 程度のエネルギーを持つ速中性子を減速させ、複数のリチウム含有シンチレータで中性子飛来方向を測定する新しい手法を取ったことにある[1]。これにより、従来からある 2 層の有機シンチレータによる反跳陽子の検出手法に比べて、高感度で全方位に様な視野を持つ利点がある。高感度であることから小型化することが容易で、かつ堅固であることから、可搬型の速中性子イメージャーに最適な手法である。このような特性から、隠匿された核物質の位置を探知することでテロを未然に防ぐセキュリティ分野、加速器施設などにおける漏洩中性子線の位置を特定する放射線防護分野での応用が期待される。

これまでの研究によって、プラスチック製減速材の中に籠状に組み上げた 17 枚のリチウムガラスシンチレータを配置することによって、 ^{252}Cf 中性子線源の線源位置を数分の測定で特定できることを実証した[2]。しかしながら、評価に使用した線源は安全上の理由により厚さ 40 cm のホウ酸入りポリエチレン製の貯蔵箱に覆われた状態であったため、貯蔵箱からの散乱線の寄与を除いた検出器固有の位置分解能を評価するには至らなかった。そこで本課題実験では、グレーチング床構造により照射室内の散乱線の寄与が極力抑えられる放射線標準施設の中性子照射設備を利用し、点状 ^{252}Cf 線源に対する位置分解能の評価、および検出感度の一様性の 2 点について評価を行った。

2. 方法

2.1 検出器とデータ収集

図 1 に、今回評価した速中性子イメージャーの写真を示す。 ^6Li を 95%に同位体濃縮した厚さ 3 mm のリチウムガラス (Scintacor, GS-20, 20 mm 角) に、長さ 15 mm の UV 透過アクリル製ライトガイドを介して高感度半導体光検出器 MPPC (浜松ホトニクス, S13360-6050PE) を光学接合した。これを検出器の 1 モジュールとする。厚さ 10 cm のポリエチレン減速材球殻の中心に、リチウムガラス 17 モジュールと厚さ 1 mm の三角形カドミウム吸収体を籠状に組み上げて配置した。中性子線源からの速中性子はこの減速材内で弾性散乱を繰り返して減速し、やがてリチウムガラス中で $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ 反応により検出される。線源側とその背後のモジュールの中性子計数率の差から飛来方向の強度分布を画像として再構成す



図 1 速中性子イメージャーの構造 (減速材は上半分のみ)

るわけである。

遠隔操作で検出器を水平方向に回転できるように、検出器全体を自動回転ステージに設置した。17 モジュールに接続されたツイストペアケーブルを減速材底部の直径 12 mm の穴から引き出し、汎用 MPPC 読み出しモジュール(GNN-630)でアナログ-デジタル変換することでデータ収集を行った。なお、本実験では 17 モジュールのうち底部に配置した 1 モジュールの読み出しが不安定であったため、以下の議論ではそのモジュールのデータ使用せずに解析を行った。

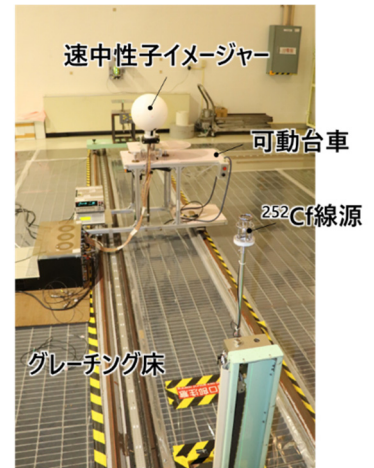


図 2 実験セットアップ

2.2 線源スポットサイズの時間変化

図 2 のように、線源から 2 m の位置に検出器を固定して 5 分間の測定を行い、時間と共に再構成された線源スポットのサイズがどう変化するか調べた。線源から 3 m および 4 m の位置でも同様に 10 分間の測定を行った。2 m, 3 m, 4 m の位置における中性子フルエンス率は、それぞれ 11.7 n/cm²/s, 5.13 n/cm²/s, 2.85 n/cm²/s である。

2.3 線源方向による感度一様性と、再構成位置の応答評価

線源から 2 m の位置で、回転ステージを-170 度から+170 度まで 10 度間隔で回転させることで、水平方向に対する検出感度一様性と再構成された線源スポットの応答変化を評価した。また、検出器を 90 度横倒しにした状態でステージを回転させることで、疑似的に緯度方向-90 度から+90 度の範囲で測定データを取得し、水平方向と同様の応答評価を行った。

3. 結果及び考察

図 3 は、2 m の位置における 1 分後および 5 分後の各モジュールの中性子計数値を元に、中性子の強度分布を再構成した画像である。ここで、再構成には逐次ベイズ推定によるアンフォールドイング (RooUnfold [3]) を用いた。また、検出器の応答行列として、緯度・経度方向 468 点の線源方向について予めシミュレーションで計算した結果を用いている。この図から、経過時間とともに線源スポットのサイズが小さくなっている様子が分かる。

図 4 は経度方向の線源スポットのピーク幅 (σ) を、測定時間で積算した中性子フルエンスの関数としてプロットしたものである。線源に近い 2 m の位置では中性子検出数の増加とともにおおむね単調に線源スポットサイズが小さくなっており、統計量の増加によって位置分解能が改善したものと考えられる。一方、より線源から離れた 3 m および 4 m の位置においては、同じ積算中性子フルエンスと比較しても 2 m の場合ほどスポットサイズは小さくならないことが分かった。線源からの距離が離れるにつれ、検出器背後にある

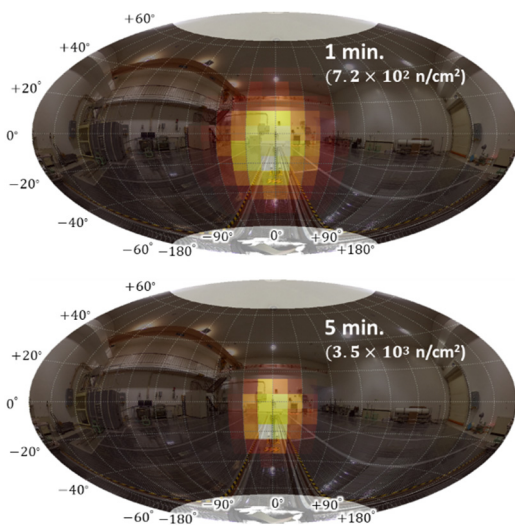


図 3 線源から 2m の位置で、1 分後および 5 分後に得られた中性子強度分布。緯度・経度 0 度に線源がある。

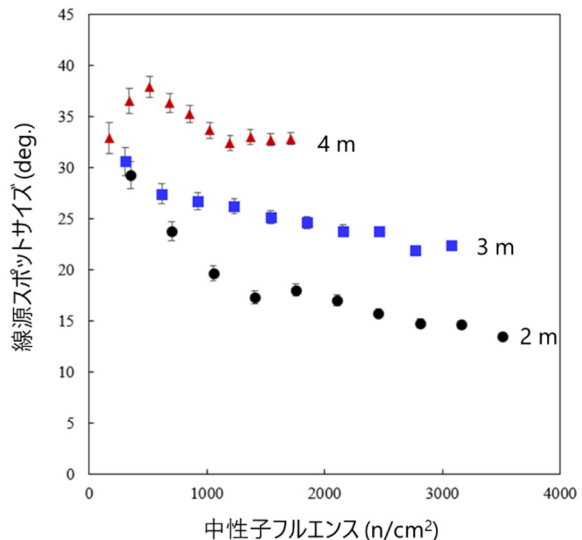


図 4 経度方向の線源スポットのピーク幅と積算した中性子フルエンスの関係

照射室のコンクリート壁からの散乱線の増加の寄与が増えることが要因と考えられる。このような振る舞いを定量的に理解するために、スポットサイズと統計量およびアンフォールディングの逐次計算回数について、今後シミュレーションによる系統的な評価を行う予定である。

図 5(a)は、検出器を水平方向に回転させたときの検出感度（単位フルエンスあたりの全中性子検出数）である。底部 180 度に配置したモジュールを解析に使用していないため、経度 0 度に比べ 180 度では 3%程度の感度の低下が見られたが、水平方向についてほぼ一様な検出感度であることが分かった。

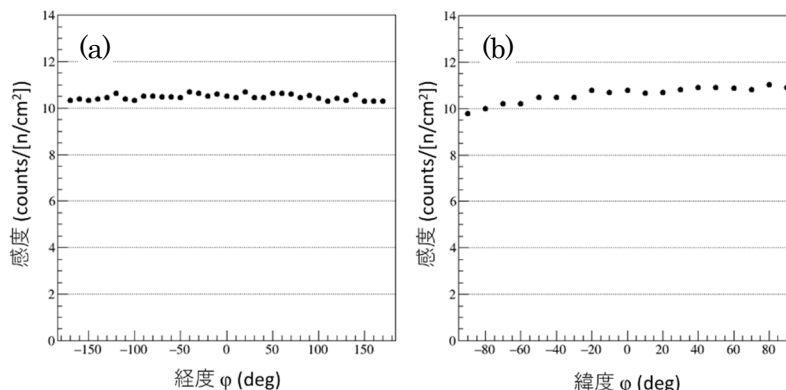


図 5 (a) 水平方向の感度依存性 (b) 経度 0 度における緯度方向の感度依存性

図 5(b)は、検出感度の緯度方向の依存性であるが、こちらは-90 度側、つまり検出器底部側から入射する場合に 10%程度感度が低下していることが分かる。これは減速材底部に開けられたケーブル引き出し用の穴による減速効果低減や、底部 1 モジュールを解析に使用していないことが理由と考えられるが、今後のシミュレーションとの比較によって原因を明らかにしたい。いずれにせよ、全方位に渡って 10%の範囲内で一様な感度を持つ検出器であることが実証されたと言える。

図 6 に、2 m の位置で 2.5 分間測定（中性子フルエンス $1.75 \times 10^3 \text{ n/cm}^2$ ）したときに得られる中性子方向分布とその一様性を示した。経度方向の線源ピークは実際の線源方向とおおむね同じ位置に再構成されている様子が分かる (図 6a)。再構成された線源方向ピークと実際の入射方向の差は最大で 5 度程度であるが、周期的にずれが大きくなるわけではなくモジュールの幾何学的配置との相関はない (図 6b)。ピーク幅は測定によって 15 ~ 20 度程度の範囲で違いが見られた (図 6c)、いずれも中性子検出数はほぼ同じであるため統計変動が原因ではないと考えられ、アンフォールディング手法の最適化などによって、このような測定毎のばらつきが改善するか今後の研究課題とする。

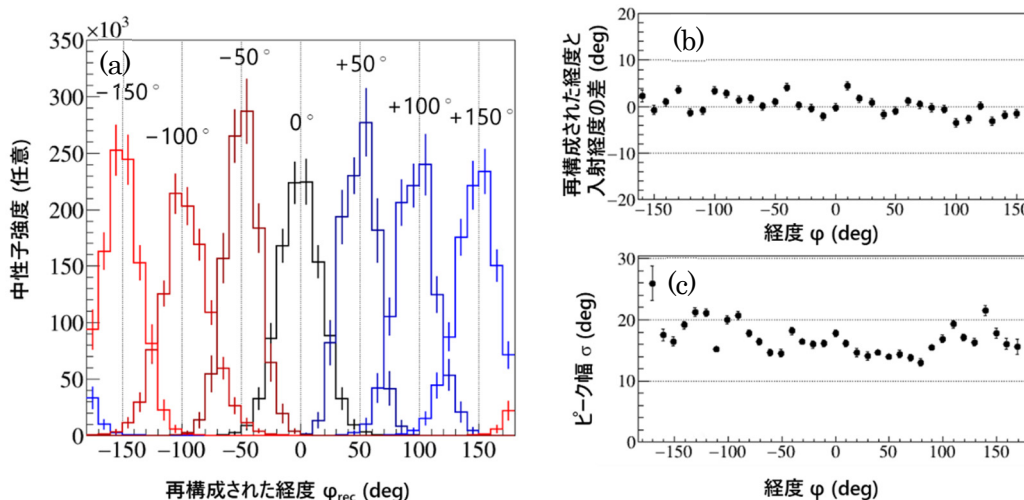


図 6 (a) 実際の線源方向と再構成された中性子強度分布（線源から 2 m, 2.5 分計測）
(b) 実際の線源方向と再構成ピークとの差 (c) 再構成されたピークの幅

4. 引用(参照)文献等

- [1] T. Matsumura and T. Shinkawa, “A portable fast-neutron imager with ${}^6\text{Li}$ -containing scintillators,” in 2016 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC), pp. 1-3 (2016)
- [2] T. Matsumura, T. Shinkawa, K. Tsuchiya and K. Tanabe, “Experimental Verification of High-Sensitivity Portable Fast-Neutron Imager with a ${}^{252}\text{Cf}$ Source,” in 2018 IEEE Nuclear Science Symposium (NSS/MIC), Sydney, Australia, N-23-06, 14 November 2018
- [3] T. Auye, “Unfolding algorithms and tests using RooUnfold,” Proceedings of the PHYSTAT 2011 Workshop, CERN, Geneva, Switzerland, January 2011, CERN-2011-006, pp 313-318