

## 論文の内容の要旨

論文題目 蛍光体と光技術を用いた中性子イメージング検出器の開発研究

氏名 藤 健太郎

### 1. 緒言

近年、構造生物学や物質科学の分野で中性子を利用した研究が盛んになってきたが、現在使用できる中性子源の強度では、知りうる情報量が限られている。そこで、現在計画中的大強度陽子加速器による核破砕パルス中性子源を利用した、中性子科学の研究が注目されている。このような次世代の大強度パルス中性子源の開発計画には The Spallation Neutron Source Project (北米)、The European Spallation Source Project (ヨーロッパ)、大強度陽子加速器計画 (日本) があり、平均中性子束強度は ILL 原子炉 (フランス) と同程度、ピーク中性子は JRR-3M 研究炉 (日本) より3桁、ILL 原子炉より2桁以上強い中性子強度が期待されている。このように、現在の中性子量よりも数桁多い中性子を利用した研究を行うには、現在使用されている測定装置では不十分である。大強度中性子源から発生するパルス中性子源を用い、かつ飛行時間法 (Time of flight) を用いて中性子エネルギー弁別を行う中性子散乱等の中性子2次元イメージングでは、高計数率、高位置分解能、広い検出面積、高時間分解能、高検出効率等の性能を持った検出器が必要とされる。

このような背景から、下記の検出器の開発研究を行った。

#### 【イメージングプレートの高速読み取り法による中性子イメージング検出器】

イメージングプレート (IP) は高位置分解能、広いダイナミックレンジ、大有感面積等の特徴を持つが、唯一の欠点として、TOF法を用いたパルス中性子イメージングに不可欠な時間分解能を持たないということがある。そこで、IPを高速に読み取ることにより、時間分解能を持つ中性子イメージング検出器の研究を行った。

#### 【蛍光体と波長シフトファイバを用いた中性子イメージング検出器】

発光寿命の短い蛍光体 (シンチレータ) と波長シフトファイバを用いた中性子イメージング検出器の開発研究を行った。フォトンカウンティング法とコインシデンス法を用いることで中性子情報決定を行い、高計数率化を可能とする。また、蛍光

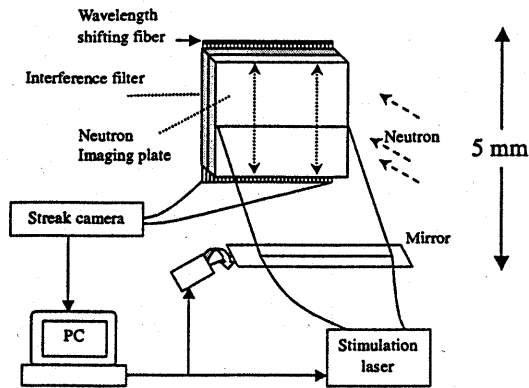


図1 イメージングプレートの高速読み取り法の概略図

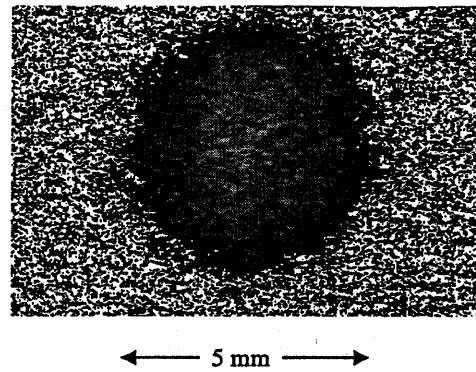


図2 イメージングプレートの高速読み取り実験結果

体と波長シフトファイバの配置法を変化させることで、大面積化が可能なものと高位置分解能化が可能なもの提案し、それぞれの開発研究を行った。

## 2. イメージングプレートの高速読み取り法による中性子イメージング検出器の開発

IPは輝尽性蛍光体を利用した積分型2次元検出器であるため、大強度放射線の測定に適している。しかし、市販の読み取り装置では20 cm × 40 cmのIPを読み取るには数分間かかっていた。そこで、パルス中性子計測に必要な短時間分解能を実現するために、IPの高速読み取り法の研究を行った。開発研究する高速読み取り装置の概略図を図1に示す。励起光を線状光源とし、それによって発生した輝尽発光(PSL)をIP裏面に並列に配置した波長シフトファイバ束で吸収し、波長シフトファイバ束からの光をストリークカメラで平行に読み取ることにより、高速読み取りを実現する。

5 × 4 cmのIP、0.5 mmφの波長シフトファイバを用いて高速読み取り法の予備実験装置を作成した。5 mmφのα線源(<sup>241</sup>Am)を照射したときに得られたイメージを図2に示す。実験より、X軸方向(波長シフトファイバと垂直方向)、Y軸方向(波長シフトファイバと平行方向)の位置分解能はそれぞれ0.8、0.5 mmが得られ、5 × 4 cmのイメージを取るのに必要な時間は5 msであった。

通常IPに蓄積された放射線情報は、放射線を照射した側から励起光を照射し同方向からPSLを読み取ることで得られるが、本高速読み取り法では、放射線を照射した側から励起光を照射し、裏側からPSLを読み取る方法を採用している。この読み取り方法を「透過読み取り法」と呼ぶ。透過読み取り法を行う場合に問題となるのは、蛍光体層内でのPSLの減衰である。PSLは蛍光体層内で減衰するため、蛍光体層の厚さによってその強度が変化する。そこで、IP厚さの最適化を行って、最大のPSL発光量を得るようにした。透過読み取りでの発光量 $Q_0$ 、および従来の読み取りでの発光量 $Q_c$ は次式で得られる。

$$Q_0 = \int_0^t S_x \cdot \exp(-\mu_{PSL} x) dx$$

$$Q_i = \int_0^L S_x \cdot \exp(-\mu_{PSL}(L-x)) dx$$

ここで、L：蛍光体層の厚さ、 $S_x$ ：表面から距離xで蛍光体層内に蓄積された放射線量、 $\mu_{PSL}$ ：中性子反応断面積である。この式を中性子用IP（蛍光体層BaFBr:Eu<sup>2+</sup>、中性子コンバータGd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>）に適応し、熱中性子（25 meV）に対する最適な厚さを求めた結果を図3に示す。透過読み取りで熱中性子を読み取る場合は、45 μmの厚さで最大の発光量を得られることが分かる。

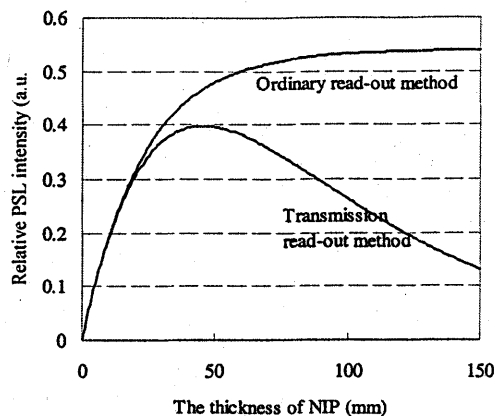


図3 中性子用IPの厚さによる発光量の変化（熱中性子）

### 3. 蛍光体（シンチレータ）と波長シフトファイバを用いた中性子イメージング検出器の開発

ここで開発研究する中性子イメージング検出器の中性子入射から入射中性子位置の計測までの過程は、次のようになっている。

- 1) 中性子入射し、中性子捕獲反応により荷電粒子が生成
- 2) 発生した荷電粒子によりシンチレータ内でルミネッセンスが発生
- 3) ルミネッセンスがシンチレータに接して配置された波長シフトファイバに吸収
- 4) 波長シフトファイバ内で光の波長が変換
- 5) 変換された光が波長シフトファイバ内を伝搬し、光電子増倍管（PMT）で測定
- 6) PMTからの信号を処理し、入射中性子位置の取得

ここで蛍光体と波長シフトファイバの配置の方法によって6)の位置決定法が異なってくる。本論文で開発研究を行ったのは、大面積対応型として4コインシデンス法による位置決定法、3コインシデンス法による位置決定法の2種類である。一方、高位置分解能用としては開発研究を行ったのは、多コインシデンス法を用いたクロスファイバー読み取り法である。信号処理にはフォトンカウンティング法を用いた。これによって高計数率化が可能となる。

#### 3. 1 4コインシデンス法を用いた中性子イメージング検出法

シンチレータを縦横のアレイ状に並べ、波長シフトファイバをそれぞれのシンチレータの4側面に配置する。X軸情報およびY軸情報は、シンチレータ両端の波長シフトファイバの信号をそれぞれコインシデンスすることで得られ、そこで得られたX軸情報とY軸情報をコインシデンスすることにより入射位置情報が得られる。シンチレータと波長シフトファイバの配置図、およびその入射中性子位置決定法を図4に示す。

発光寿命60 nsの<sup>6</sup>Liガラスシンチレータを使用して4×4の検出器を作製し、実験を行った。その結果、32%の検出効率が得られた。また、計数率測定を行った結果、1素子あたりの計数率は3 Mcpsであることを確認した。イメージング実験として、1 mmφの中性子ビームを用いてスキャンした結果を図5に示す。ここで得られた隣の素子へのクロストークは10%以下であった。

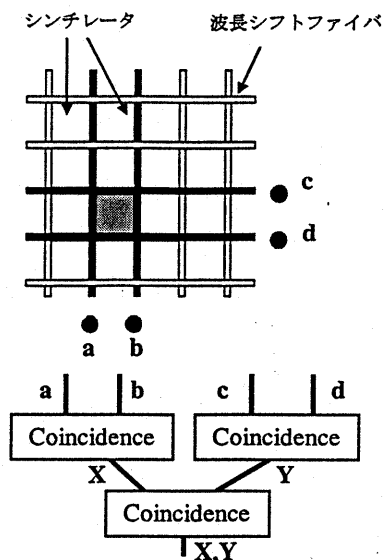


図4 4コインシデンス法の  
検出素子及び位置決定法

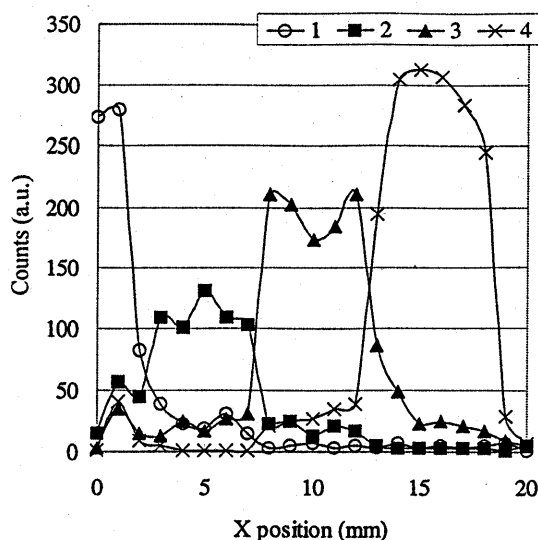


図5 1mmφ中性子ビームによる  
スキャン結果

### 3. 2 3 コインシデンス法を用いた中性子イメージング検出法

実際に実験に使用する検出器には、構造の簡素化、作製・メンテナンスの容易性といったことが必要である。そこで、製作・成型加工が容易な有機プラスチックシンチレータを使用した。プラスチックシンチレータに溝を掘って、そこにファイバを埋めてX軸とし、プラスチックシンチレータ背面に波長シフトファイバを並べてY軸とした。プラスチックシンチレータと波長シフトファイバの配置図、およびその入射中性子位置決定法を図6に示す。

4×4の検出素子を作製し、実験を行った。その結果、54%の検出効率を得られた。1mmφの中性子ビームを用いてスキャンした結果、隣へのクロストークはX軸方向で30%、Y軸方向で40%であった。この結果、3コインシデンス法では、プラスチックシンチレータのγ線感度低下、およびクロストークの改善が重要な課題であることが分かった。

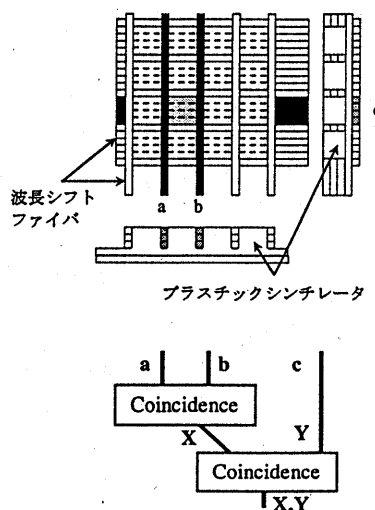


図6 3コインシデンス法の  
検出素子及び位置決定法

### 3. 3 多コインシデンス法を用いたクロスファイバー読み取りによる中性子イメージング検出器

蛍光体を塗布したシートの上下に波長シフトファイバを垂直に並べる。この波長シフトファイバで蛍光体の発光を集めると同時に、上下の信号のコインシデンスを取ることで入射位置を決定する。この方法はクロスファイバー法と呼ばれている。この方法では波長シフトファイバの径によって位置分解能が決定するため、高位置分解能が可能である。また、短発光寿命の蛍光体を使用することで、高計数率での測定が可能である。本研究では、位置決定方法として、上下1本ずつのコイン

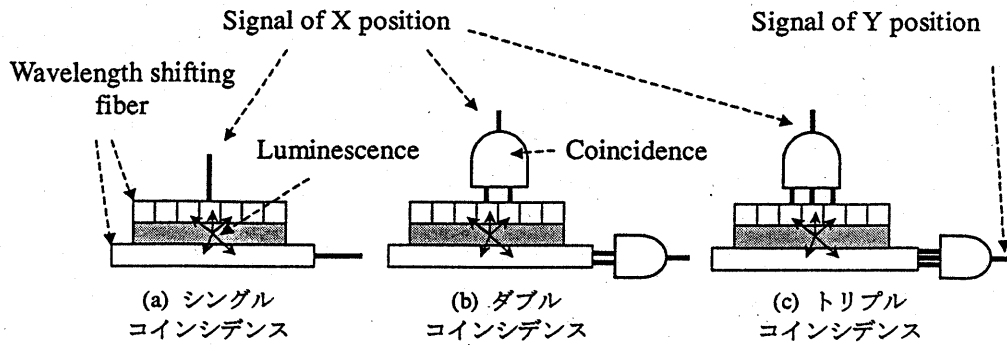


図7 シングル、ダブル、トリプルコインシデンス法による位置決定法

シデンスだけでなく、2本、3本によるコインシデンス（シングル、ダブル、トリプルコインシデンス法）について検証を行った（図7参照）。発光寿命 30 ns の YAP (YAlO<sub>3</sub>) に中性子コンバータとして LBO (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>) を添加した検出シートを作製し実験を行った。

シングル、ダブル、トリプルコインシデンス法それぞれの検出効率は 50、3、0.15 % であった。スキャン結果より、位置分解能はすべての決定法で 1 mm 以下であったが、検出シート上部に配置した波長シフトファイバ方が位置分解能が良いことが分かった。

#### 4. 結言

大強度中性子源に適応した 2 次元中性子イメージング検出器の開発ため、イメージングプレート的高速読み取り法による中性子イメージング検出器、4 コインシデンス法を用いた中性子イメージング検出器、3 コインシデンス法を用いた中性子イメージング検出器、および多コインシデンス法を用いたクロスファイバー読み取り法による中性子イメージング検出器の開発研究を行った。実験により得られた結果を以下にまとめる。

中性子イメージング法	実験結果
イメージングプレート的高速読み取り法	面積：50 x 40 mm <sup>2</sup> 位置分解能：1 mm 時間分解能：5 ms 検出効率：50 %
ガラスシンチレータを用いた4コインシデンス法	面積：20 x 20 mm <sup>2</sup> 位置分解能：5 mm 計数率：3 Mcps 検出効率：32 %
プラスチックシンチレータを用いた3コインシデンス法	面積：10 x 10 mm <sup>2</sup> 位置分解能：2 mm 検出効率：54 %
多コインシデンス法を用いたクロスファイバー読み取り法	面積：3 x 3 mm <sup>2</sup> 位置分解能：<1mm 検出効率：50 %