

JAERI-Research

JP0550072

2004-020



64x64チャンネル高位置分解能
中性子イメージ検出器の検出特性

2004年12月

坂佐井 馨・片桐 政樹・松林 政仁
Nigel RHODES*・Erik SCHOONVELD*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、
お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡
東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division,
Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-
gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

64 x 64 チャンネル高位置分解能中性子イメージ検出器の検出特性

日本原子力研究所東海研究所中性子利用研究センター

坂佐井 馨・片桐 政樹・松林 政仁・

Nigel RHODES*・Erik SCHOONVELD*

(2004年10月18日受理)

ZnS:Ag/ ^{6}LiF シンチレータと波長シフトファイバを用いた背面読み取り法により位置検出を行う 64 x 64 チャンネル高位置分解能中性子イメージ検出器の検出特性を英国ラザフォードアップルトン研究所の ISISにおいて測定した。その結果、ISISが実際に用いている Applied Scintillator Technology (AST) 社製シンチレータを用いた場合、熱中性子に対して検出効率が 24.5%であることがわかった。また、同時にガンマ線感度を ^{60}Co 線源を用いて測定した結果、 $7 \times 10^{-5} \text{counts}/\text{photons}$ であることがわかった。

原研で開発した ZnS:Ag と ^{6}LiF の比が 1.5:1 としたシンチレータでは熱中性子に対して検出効率が 14.5%と ISIS のものに対して約 60%であることがわかった。検出効率については、1-1, 1-2, 2-1、及び 2-2 コインシデンス法についてそれぞれ評価した。

本検出器による中性子イメージ特性は、原研 CNRF 施設を用いて評価した。2mm ϕ の Cd コリメータを用いて測定した結果、明瞭なビームイメージが得られることがわかった。2-2 コインシデンス法を用いた場合には、検出効率は下がるもの的位置分解能が改善されることを確認した。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

*ラザフォードアップルトン研究所(英国)

Characteristics of 64 x 64 Channel High-position Resolution Neutron Imaging Detector

Kaoru SAKASAI, Masaki KATAGIRI, Masahito MATSUBAYASHI,
Nigel RHODES* and Erik SCHOONVELD*

Neutron Science Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 18, 2004)

The Characteristics of 64 x 64 channel high-position resolution neutron imaging detector have been investigated using ZnS:Ag/ ^{6}LiF as a neutron sensitive scintillator at ISIS of Rutherford Appleton Laboratory in the United Kingdom. The imaging device is based on the backside readout method using wavelength shifting fibers. The detection efficiency of the scintillator fabricated by Applied Scintillation Technology (AST) Inc. that is actually used at ISIS was 24.5 % for thermal neutron. The n/ γ characteristic was also measured and was 7×10^{-5} using a ^{60}Co γ -ray source.

Another ZnS:Ag/ ^{6}LiF scintillator (the weight ratio of ZnS/Ag to ^{6}LiF is 1.5:1) which was developed by JAERI had a neutron detection efficiency of 14.5 % and this efficiency was about 60 % of that by AST. The detection efficiencies by 1-1, 1-2, 2-1, and 2-2 coincidence methods were also estimated.

The neutron image was measured at JAERI CNRF facility. The neutron beam image was obtained with a high resolution using a Cd collimator with a hole of 2mm-diameter. Although the detection efficiency was decreased, it was confirmed that the position resolution was improved by using 2-2 coincidence method.

Keywords: High-position Resolution, Neutron Imaging, Detection Efficiency, Gamma-ray Sensitivity, Coincidence, Wavelength Shifting Fiber

*Rutherford Appleton Laboratory, United Kingdom

目 次

1.	はじめに -----	1
2.	高位置分解能イメージ検出器の概要-----	2
3.	開発した測定系 -----	5
4.	英国ラザフォード研究所における実験 -----	11
5.	中性子イメージ測定結果 -----	12
6.	まとめ -----	19
	謝辞 -----	19
	参考文献 -----	19

Contents

1.	Introduction -----	1
2.	High-position Resolution Imaging Detector -----	2
3.	Developed Measuring System -----	5
4.	Experiments at ISIS, Rutherford Appleton Laboratory -----	11
5.	Results of Neutron Imaging Measurement -----	12
6.	Conclusions -----	19
	Acknowledgements -----	19
	References -----	19

This is a blank page.

1. はじめに

日本原子力研究所と高エネルギー加速器研究機構が共同で計画・建設を開始した大強度陽子加速器計画 J-PARC、米国 SNS 計画、欧洲連合 ESS 計画などにおいて、核破碎を用いた大強度パルス中性子源の開発が進められている。これらのパルス中性子源の特長は、原子炉・定常中性子源と比較して時間平均中性子束は変わらないものの、ピーク中性子束が数 100 倍強く、かつ飛行時間 (TOF) 法を用いた中性子のエネルギー弁別が実験に当たつては不可欠である。

これらパルス中性子源の特長を最大限に生かした中性子散乱実験や中性子ラジオグラフィなどを行うには、定常中性子源をベースに開発された従来の中性子イメージ検出器では困難であり、高計数率、高時間分解能、高位置分解能、高ダイナミックレンジ、および広いイメージ面積などの性能にブレークスルーが要求される。また、開発した検出器を実際に散乱実験装置などに実装する際には、上記性能以外に、コスト、製作方法、メインテナンスの容易さなどの要因が大きな課題となる。

このため、シンチレータを用いた中性子イメージング検出法の研究を進めた。シンチレータを用いた検出法は、パルス中性子を用いた中性子散乱実験に必要なイメージ検出特性、特に高計数率や高位置分解能性能を達成する可能性が大きい。このため、シンチレータを用いた高位置分解能イメージ検出器を開発すると共に、中性子検出用シンチレータの試作を行った。開発した検出器の検出特性を英国ラザフォードアップルトン研究所において測定した。実験の際、英国 ISIS で実際に用いられているシンチレータについてもその特性を評価した。また、中性子イメージ特性については、原研 JRR-3 の冷中性子ラジオグラフィ装置において測定した。本報告では、これまで開発したイメージング検出器の内容及び、英国ラザフォードアップルトン研究所及び原研 JRR-3 での評価結果について報告する。

2. 高位置分解能イメージ検出器の概要

蛍光体／中性子コンバータ・検出シートを用いた高位置分解能中性子イメージング法としては、従来、図1に示すクロスファイバ法が用いられてきた¹⁾。

本方法は、波長シフトファイバを直交して検出シートの上下に配置し、中性子の入射により発光した蛍光を検出することにより、入射位置を決定するものである。図では、中性子は上方から入射される。用いられる蛍光体は蛍光量が最も多い中性子検出体としてZnS:Ag/ ^{60}LiF が使用される。しかし、このクロスファイバ法を用いた高位置分解能中性子イメージ検出器では、波長シフトファイバの素材がプラスチックであることから、中性子エネルギーが高くなるとファイバ内の水素により散乱が生じ一部の中性子を検出できなくなるなどの欠点がある。また、本方式のイメージ検出器を製作する場合、薄い蛍光体／中性子コンバータ検出シートを波長シフトファイバで挟み込む必要があり製作工程が複雑でコストもかかるという欠点もある。

このため、蛍光体／中性子コンバータ検出シートあるいは中性子用シンチレータの背面から蛍光を検出し中性子の入射位置を決定する背面読み取り法を考案した^{2),3)}。図2にイメ

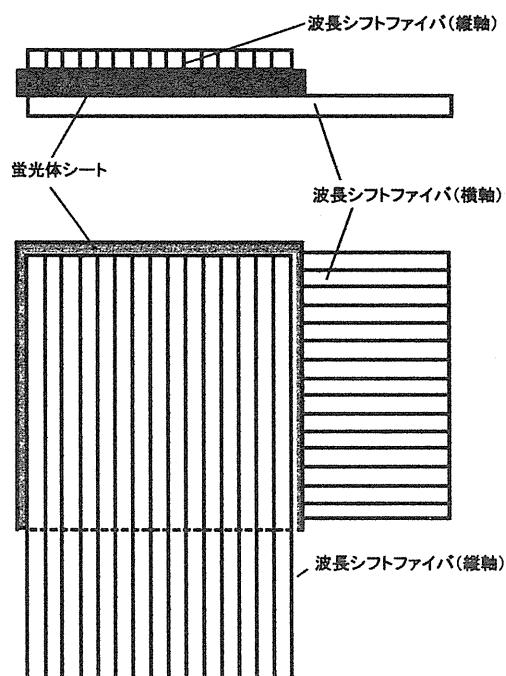


図1 クロスファイバの測定法の原理。蛍光体シートに挟み込んだ波長シフトファイバによって蛍光体からの蛍光を測定する。

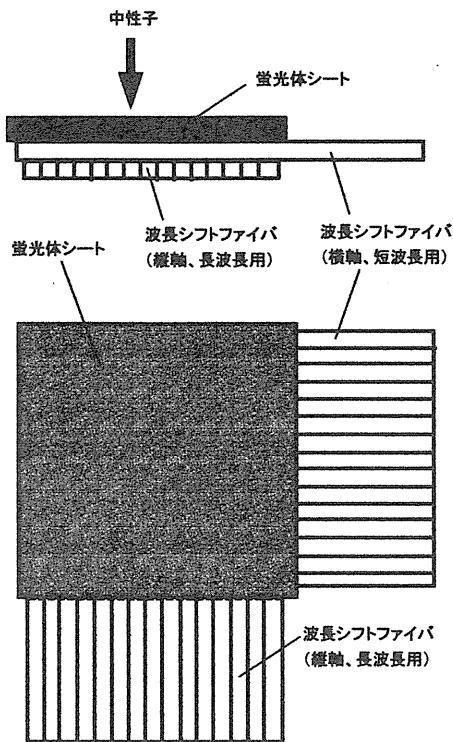


図2 背面読み取り方式の原理

ージ検出原理を示す。蛍光体／中性子コンバータ検出シートあるいは中性子用シンチレータの背面に吸収波長帯の異なる二種類の波長シフトファイバを直交して配置することにより中性子の入射位置を求めることができる。
ZnS:Ag の蛍光波長帯のうち短い波長帯については最初の短波長用波長シフトファイバで検出し、長い波長帯については最初の波長シフトファイバが約30%の割合で透過して出てくる蛍光を背後においていた長波長用波長シフトファイバで検出する。直交した波長シフトファイバからのフォトン信号のコインシデンスをとることにより中性子の入射位置を決定する。

前述したように、クロスファイバ方式では、中性子検出体として蛍光量の最も多いZnS:Ag/6LiFが使用されるため、中性子が入射すると入射位置の周辺の何本もの波長シフトファイバが蛍光を検出してしまいます。入射位置を正確に求めるためには、どのファイバが最も多く蛍光を検出したかを求める必要があり、回路系が複雑になると共に位置決定までに

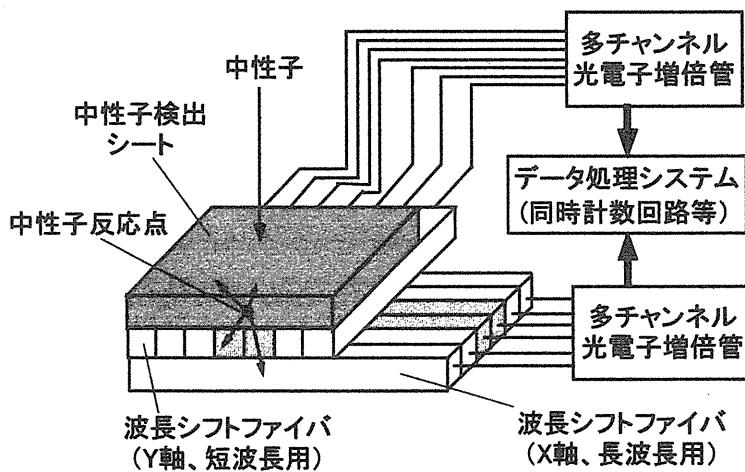


図3 コインシデンス法による検出法

時間を要した。

このため、高位置分解能を維持したまま高計数率に対応し、かつ簡便に2次元中性子イメージ検出しその入射位置を決定するコインシデンス法として、横に並んだ隣接する波長シフトファイバについてコインシデンス法を適用する方法を考案した^{4),5)}。これを図3に示す。蛍光体／中性子・検出シートの下面に、それぞれ縦軸と横軸として直角に一片の長さが0.5mmの波長シフトファイバを並列に配置する。考案した位置決定法では、各検出場所に対応したデジタルパルス信号とその信号の隣あるいは両隣の2つあるいは3つのデジタルパルス信号について、2信号コインシデンス回路あるいは3信号コインシデンス回路を用いてコインシデンス測定し、コインシデンスした時その真ん中に対応した場所に中性子が入射した位置パルス信号とする。コインシデンス時間は蛍光体の蛍光寿命に近い値を設定する。

3. 開発した測定系

実際に開発した測定系を図 4 に示す。使用した中性子検出媒体は ZnS:Ag/ ^{6}LiF であり、使用したファイバは短波長用波長シフトファイバとしてバイクロン製 BCF-99-33、長波長用としてクラレ Y8 を使用した。外形寸法は、共に 0.5mm 角の角型ファイバである。製作チャンネル数は長波長用及び短波長用共に 64 チャンネルである。使用した 2 つのファイバの吸収特性及び ZnS:Ag/ ^{6}LiF 蛍光体の蛍光スペクトルを図 5 に示す。ZnS:Ag/ ^{6}LiF の発光帶の短波長部が BCF-99-33 に、長波長部が Y8 に吸収されることがわかる。なお、Y8 ファイバは短波長側にも比較的大きな吸収帯があるので、短波長を吸収する BCF-99-33 を上側に配置する。また、これらの波長シフトファイバの発光波長は BCF-99-33 が 437nm、Y8

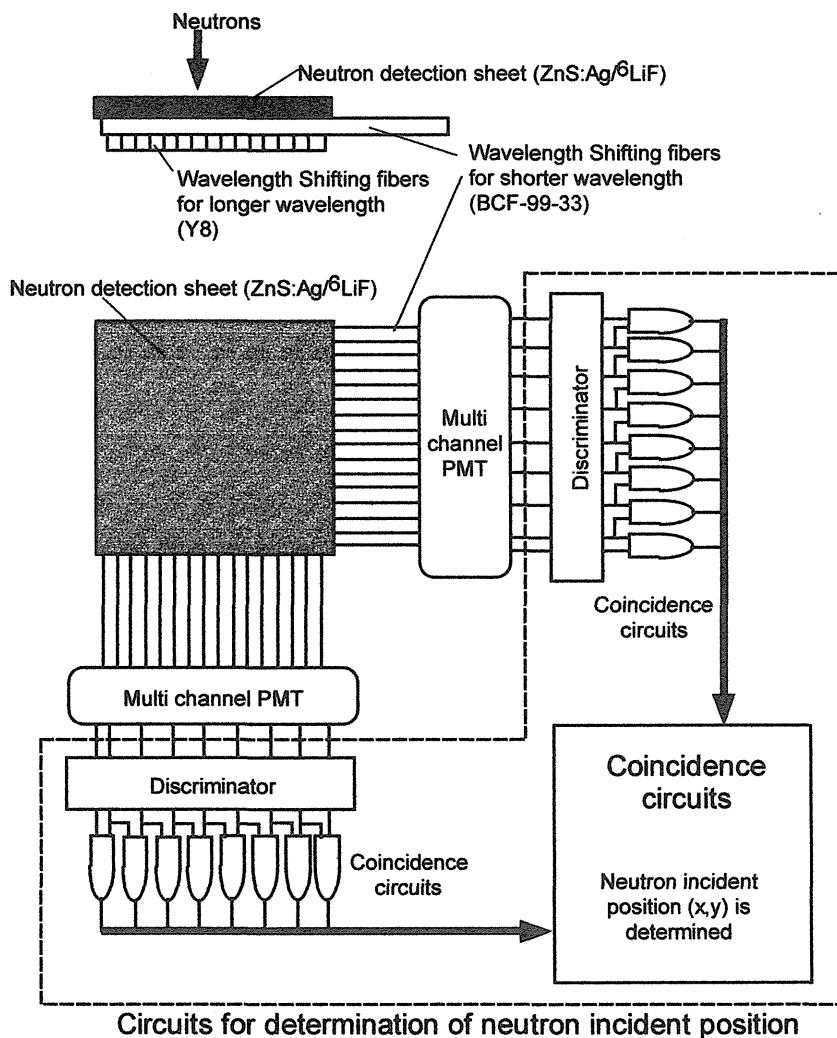


図 4 開発した測定系

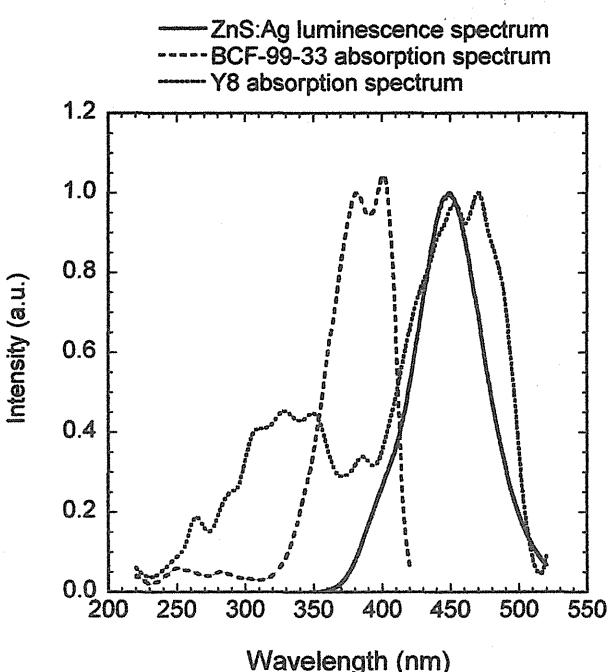


図 5 使用した 2 つの波長シフトファイバの吸収特性と ZnS:Ag の蛍光スペクトル

ル光電子増倍管へと導かれる。これら 2 つの光電子増倍管に入射した光は電気信号に置き換えられ、ディスクリミネータによってノイズと分離され、デジタル信号に変換される。デジタル信号に変換された各ファイバからの出力は、隣り合う 2 つあるいは 3 つの信号をコインシデンスすることによってファイバの位置を決定する。すなわち、X 軸信号として、長波長を吸収した波長シフトファイバ Y8 の信号をとった場合、Y8 の 2 つ又は 3 つの隣り合うファイバからの出力がある設定したコインシデンス時間内に同時に output されたとき、その中心位置をもって中性子入射の X 軸とする。中性子入射の Y 軸位置は短波長用の波長シフトファイバからの出力を同様にコインシデンスしたものとする。さらに、これらの決定された X 軸位置、及び Y 軸位置に対応する信号についてコインシデンス処理を行うことによって、中性子入射位置を得る。これらの信号処理系を図 6 に示す。64x64 チャンネル=4096 ピクセル内の中性子位置を決定する必要な膨大な信号処理を行うため、専用の増幅器・ディスクリミネータ(豊伸電子製 HE2764)及び FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた信号処理装置(JAERI4240)を製作した。開発したディスクリミネータ及び信号処理装置の外観図を図 7 及び図 8 に示す。この信号処理装置から出力され信号は 2 次元マルチチャンネルアナライザに入力され、パーソナルコンピュータに出力され、ディスプレイ上に表示される。

が 510nm である。

さて、中性子が中性子有感物質である ${}^6\text{LiF}$ のリチウムと核反応 ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$ 反応を起こし、生成された高速の荷電粒子が ZnS:Ag 蛍光体に入射して中心波長約 450nm の蛍光を発し、その短波長部分は ZnS:Ag/ ${}^6\text{LiF}$ 蛍光体の中性子入射側と反対側に置かれた BCF-99-33 に吸収され、波長シフトファイバを通じて多チャンネル光電子増倍管(浜松ホトニクス、H7546)に導かれる。一方、ZnS:Ag/ ${}^6\text{LiF}$ から発せられた蛍光のうち、BCF-99-33 に吸収されない長波長部分はその下に配置された Y8 に吸収され、別の多チャンネ

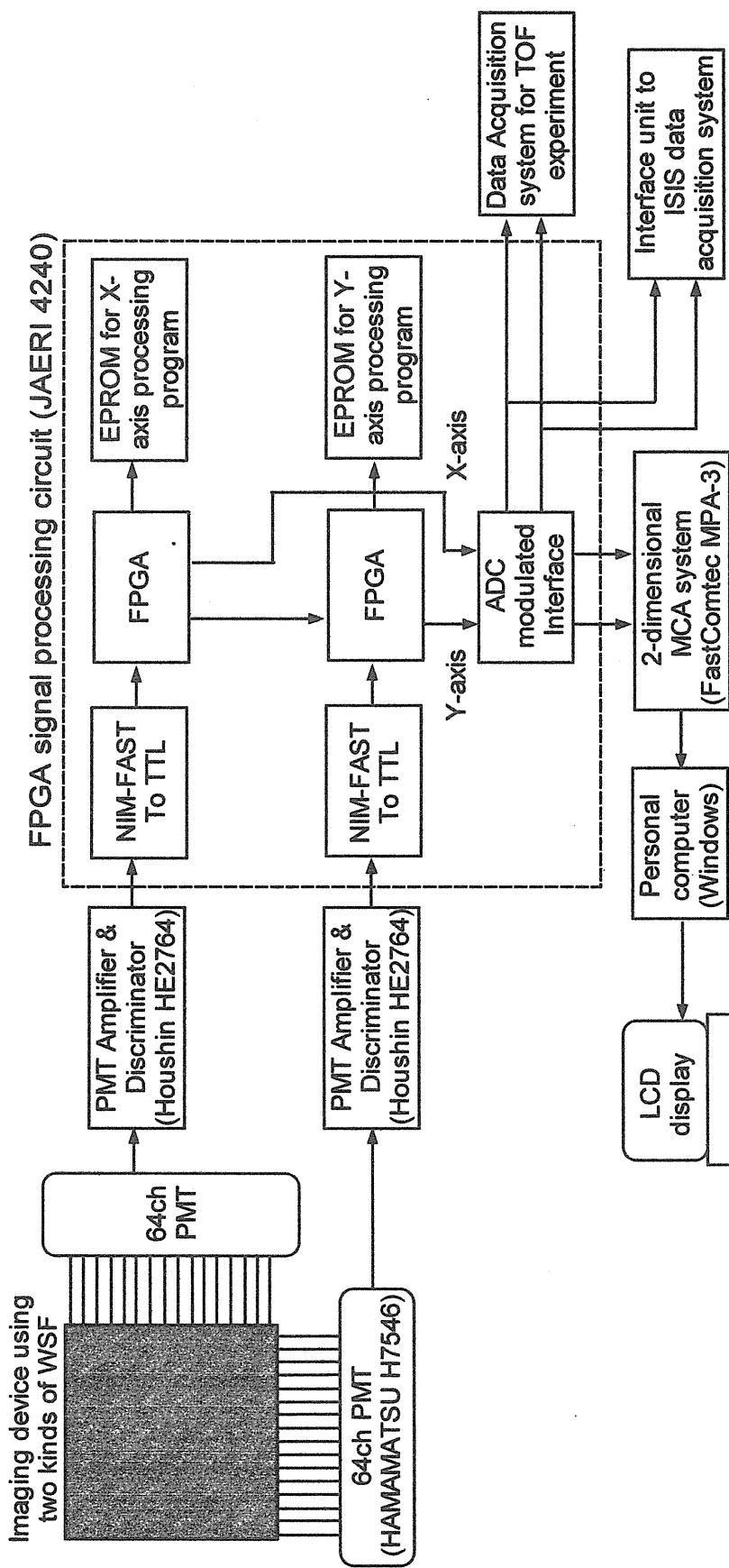


図6 開発した信号処理系

This is a blank page.

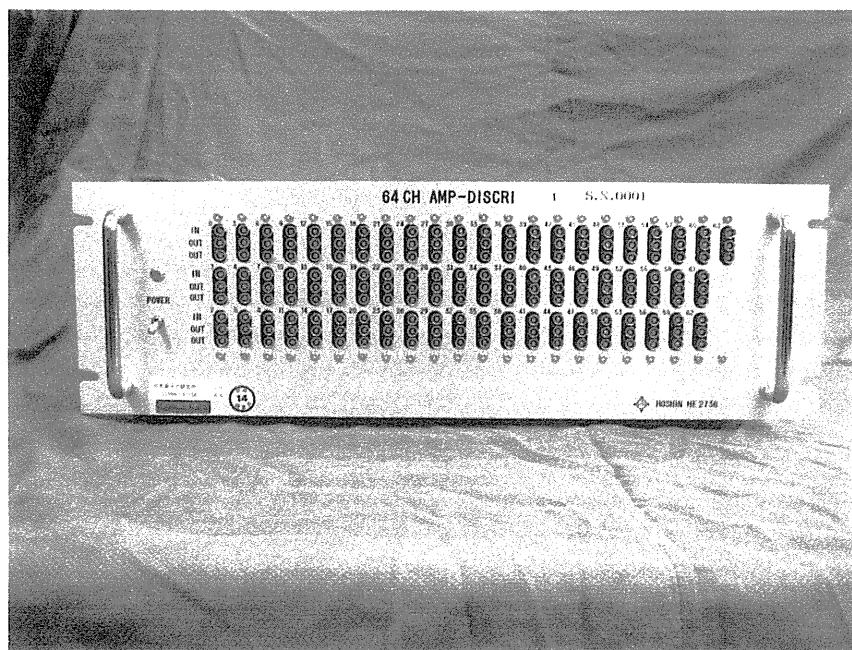


図 7 PMT Amplifier & discriminator の外観写真

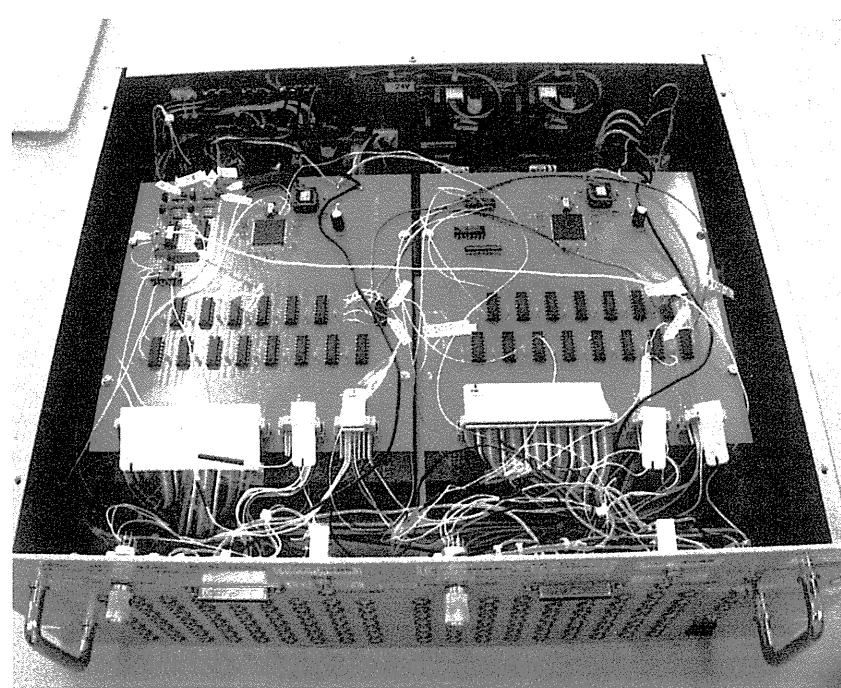


図 8 信号処理装置の外観写真

This is a blank page.

4. 英国ラザフォード研究所における実験

開発した検出器素子及び測定システムを英国ラザフォード研究所に持ち込み、その検出特性を測定した。測定項目は中性子検出効率、及びガンマ線感度である。検出体系を図9に示す。中性子源にはAm-Beの370GBqを用いた。ラザフォード研究所の中性子源は、図に示すように、台座が下降することによって、中性子が照射できるようになっている。検出素子位置における中性子束は89 n/cm²/sである。

本実験に用いた中性子検出媒体は原研で製作したもので、蛍光体の種類はZnS:Ag/⁶LiFである。その塗布量はZnS:Agが22.5mg/cm²、⁶LiFが15mg/cm²であり、ZnS:Agと⁶LiFの重量比が1.5:1のものである。また、比較のため、ラザフォード研究所のシンチレータ型中性子検出器に使用されているZnS:Ag/⁶LiFについても同じ実験を行った。同研究所の中性子検出用媒体に使用されているZnS:Ag/⁶LiFはApplied Scintillation Technology (AST)社製で、その塗布量はZnS:Agが60mg/cm²で、⁶LiFが15mg/cm²である。測定結果を表1に示す。表中で、コインシデンス法の項で、1-1、1-2、2-1及び2-2とあるのは、コインシデンスに用いたファイバの数を示す。すなわち、1-1はx軸及びy軸それぞれについてはコインシデンスを行わず、x軸とy軸の出力のコインシデンスを行う方法であり、1-2はx軸についてはコインシデンスを行わず、y軸については隣り合う2本のファイバについてコインシデンスを行った後、その出力をコインシデンスする方法である。

測定結果を見てみると、原研で製作した蛍光体はISIS型の約60%となっていることがわ

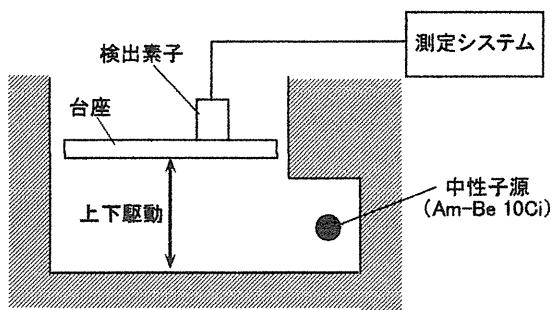


図9 英国 ISIS での測定体系

表1 中性子検出効率の測定結果

コインシデンス法	原研型	ISIS型	比
1-1	14.5%	24.5%	0.59
2-1	8.75%	14.4%	0.61
1-2	9.9%	15.3%	0.65
2-2	6.35%	9.5%	0.67

表2 ガンマ線感度の測定結果

コインシデンス法	1-1	2-1	1-2	2-2
ガンマ感度	7.1×10^{-5}	3.2×10^{-5}	2.9×10^{-5}	1.7×10^{-5}

かる。これは、蛍光体中の ZnS:Ag と ^{6}LiF の量が異なるためであると考えられる。 ^{6}LiF は中性子断面積が大きいため、蛍光体中ではその量は ZnS:Ag に比較して少なくても良いことを示している。また、ZnS:Ag/ ^{6}LiF を塗布するのに使用する接着剤も重要な要素で、発する蛍光を良く通過させるなどの性質をもつものが必要である。なお、コインシデンスを行うと検出されるフォトンの数が減少するのは良く知られている結果である⁶⁾。

次にガンマ線感度を測定した。ガンマ線感度の測定は、 ^{60}Co 線源の入った鉛の容器に検出素子を入れて出力される信号を測定した。測定位置のガンマ線の量は、530 photons/cm²/s である。測定の結果、原研製の蛍光体の感度は 1-1 コインシデンス法においては、 5.0×10^{-5} counts/photons であった。一方、ラザフォード研究所において使用されている AST 社の蛍光体では、 7.1×10^{-5} counts/photons となり、ほぼ同程度であった。AST 社の蛍光体においてはコインシデンス法によった結果も測定した。その結果を表2に示す。中性子検出効率の場合と同様、コインシデンスの数が増加することによってガンマ感度が少なくなっていることがわかる。

5. 中性子イメージ測定結果

本検出素子の位置分解能性能については、原研 JRR-3 の冷中性子ラジオグラフィ施設 (CNRF) において測定した。測定体系を図 10 に、実際に製作した検出素子の外観図を図 11 に示す。用いたシンチレータは、AST 社の ZnS:Ag/ ^{6}LiF シンチレータである。なお、CNRF の中性子束密度及び中性子波長はそれぞれ $10^8 \text{n}/\text{cm}^2/\text{s}$ 及び 0.5nm である。図 10 に示すように、ガイド管からの中性子を直径 2mm の穴のあいたカドミウムのコリメータを通してその像を製作した検出素子で測定した。また、コインシデンス法として、1-1、2-1、1-2、及び 2-2 コインシデンス法を用いた。その結果を図 12 から図 15 に示す。1-1 コインシデンス法では、x 軸及び y 軸決定にコインシデンスを用いないため、ファイバ間のクロストークがやや確認できる。しかし、2-1 コインシデンス法及び 1-2 コインシデンス法では、それぞれ x 軸と y 軸のクロストークが除去されているのがわかる。さらに、2-2 個コインシデンス法

では両軸のクロストークが除去され、分解能が向上しているのがわかる。なお、この場合の位置分解能性能として、ピーク値の 10%から 90%になるのに要する距離を定義すると、 x 軸及び y 軸の位置決定にコインシデンスを用いない場合は、クロストークのため、2mm とやや大きいが、コインシデンスを行った後は 0.6mm と極めて高分解能性能が得られた。

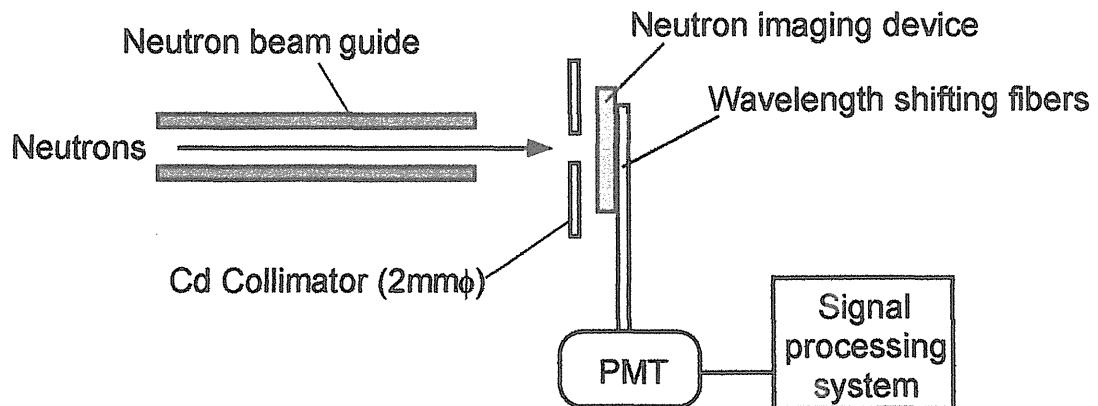


図 10 原研 JRR-3 冷中性子ラジオグラフィ施設でのイメージング実験

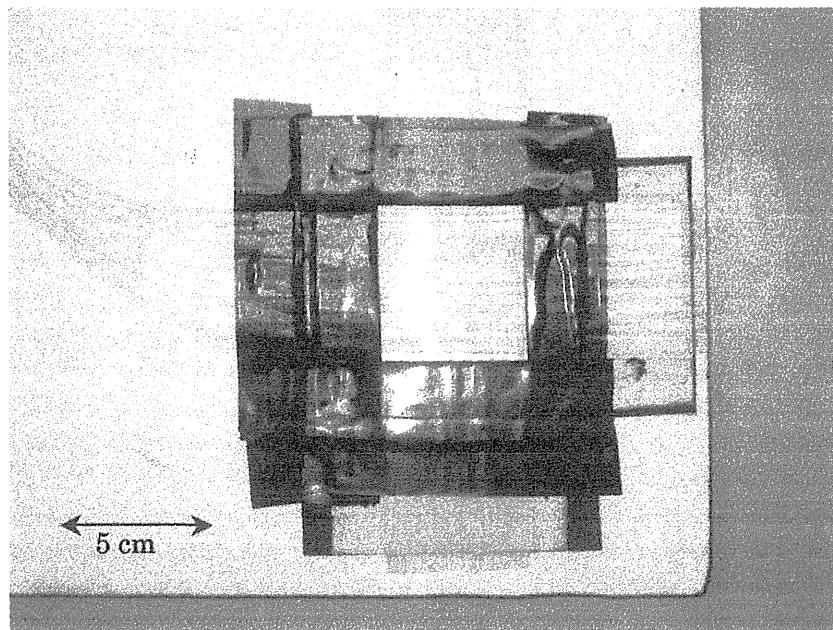


図 11 製作した検出素子。白く見えるのが BCF-99-33 ファイバで、
黄色みがかかっているのが Y8 ファイバである。

This is a blank page.

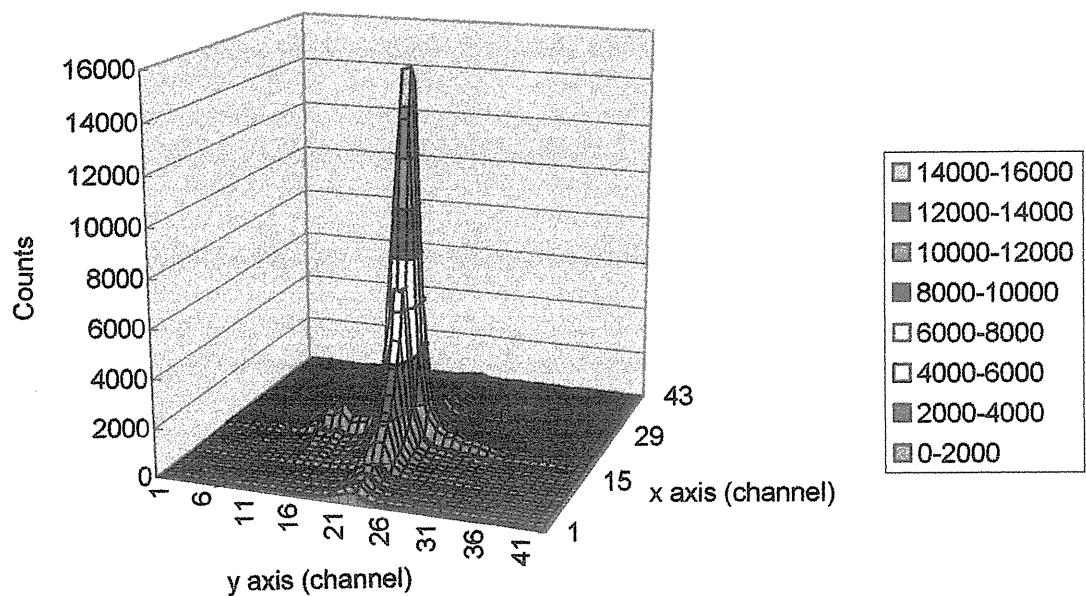


図 12 1-1 コインシデンス法を用いた場合の中性子ビームイメージ

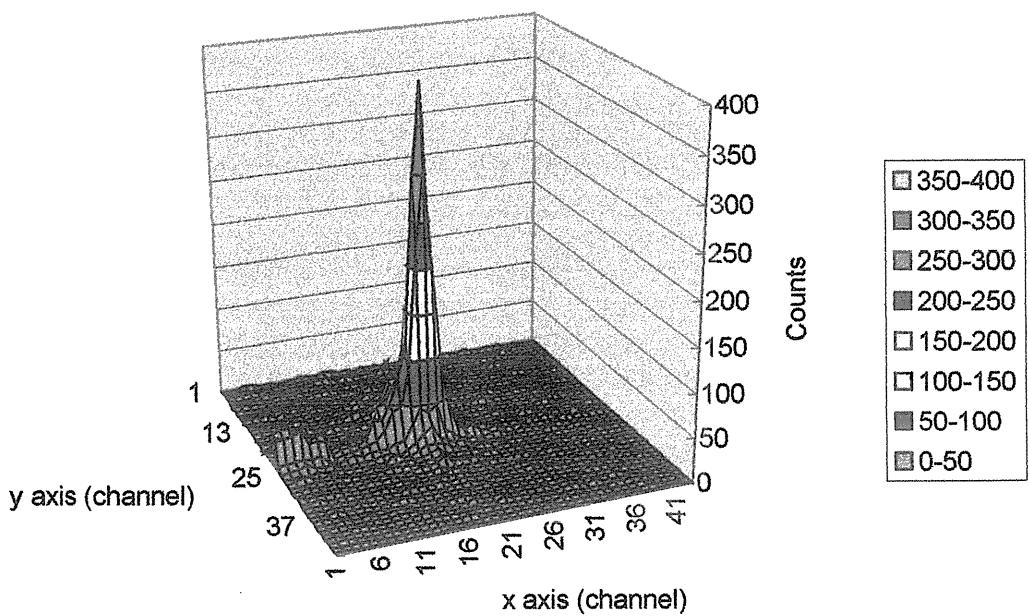


図 13 2-1 コインシデンス法を用いた場合の中性子ビームイメージ

This is a blank page.

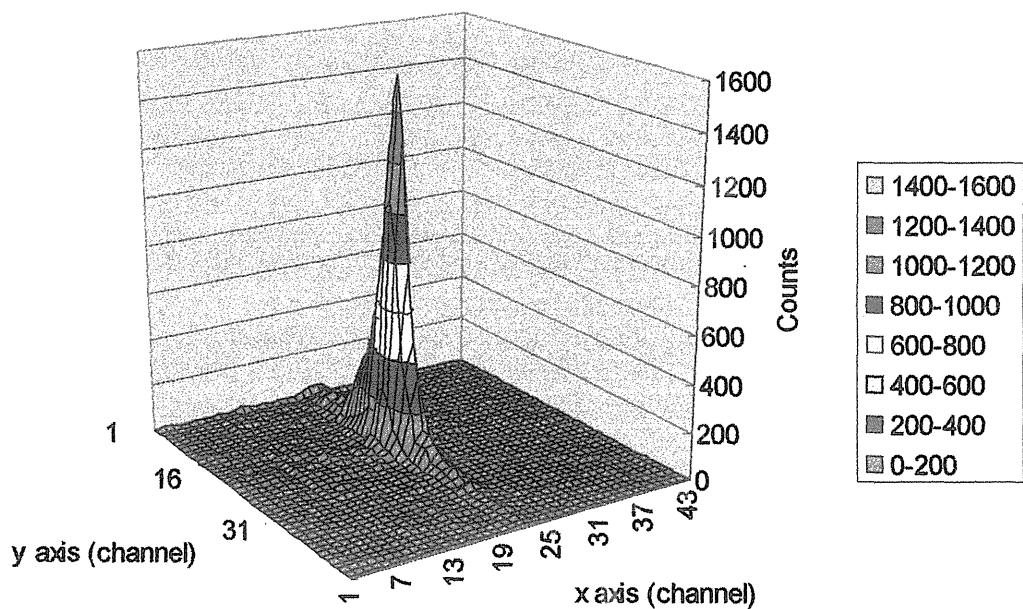


図 14 1-2 コインシデンス法を用いた場合の中性子ビームイメージ

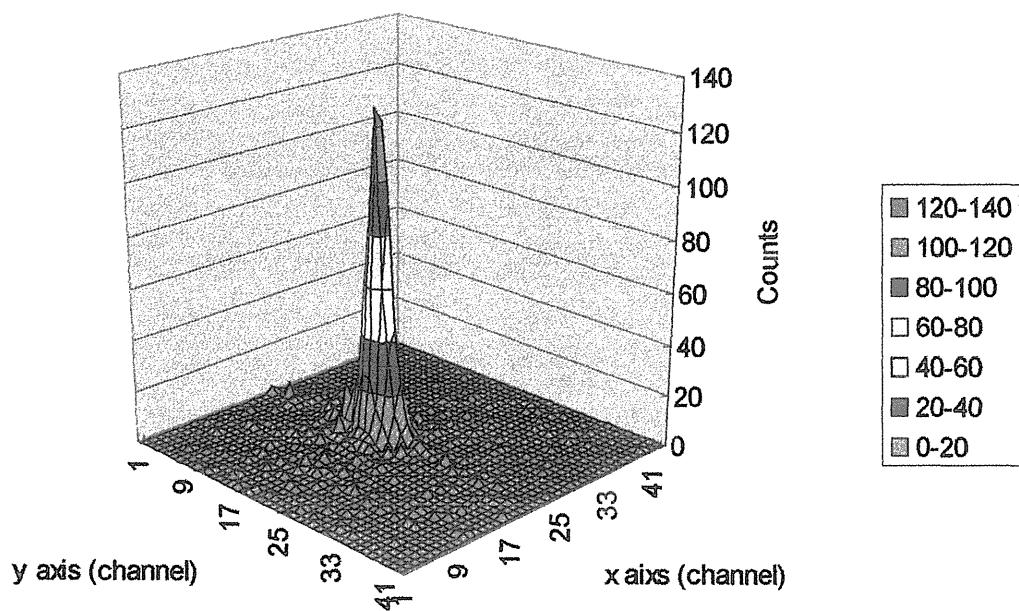


図 15 2-2 コインシデンス法を用いた場合の中性子ビームイメージ

This is a blank page.

6. まとめ

シンチレータとして、ZnS:Ag/ ^{6}LiF を用い、その背面に設置した2種類の波長シフトから光を検出する背面読み取り法による64x64チャンネルの高位置分解能イメージ検出器を作成し、その検出特性を英国ラザフォードアップルトン研究所において測定した。その結果、同研究所で実際に使用されているAST社製のZnS:Ag/ ^{6}LiF シンチレータを用いた場合、中性子検出効率は24.5%であることがわかった。また、原研が開発したシンチレータを用いた場合、AST社製の約60%の検出効率が得られることがわかった。この原因是、ZnS:Ag/ ^{6}LiF の混合比において、蛍光体であるZnS:Agの量が少ないためと、使用する接着剤に起因するものであることがわかった。今後は、ZnS:Agと ^{6}LiF の量の最適化を行い、接着剤についても最適なものを選択する予定である。また、ガンマ線感度は 5×10^{-5} counts/photonsで、ほぼAST社製のものと同程度であった。

本検出器による中性子イメージ特性については原研のCNRF施設を用いて評価を行い、高位置分解能で中性子ビームイメージが取得できることがわかった。また、検出効率は下がるもの、中性子位置のx軸及びy軸決定に使用するファイバに2・2コインシデンス法を適用すると、分解能が向上されることがわかった。

謝辞

本研究に対して適切な助言とご支援を頂いた中性子利用研究センター 中性子制御・検出系開発研究グループリーダー曾山和彦氏に感謝致します。

参考文献

- 1) K. Koroda, Nucl. Instr. Meth. A, 529 (2004) 280.
- 2) M. Katagiri, K. Sakasai et al., ESS 03-136-N1 (2003) 435.
- 3) M. Katagiri, K. Sakasai et al., Nucl. Instr. Meth. A, 529 (2004) 313.
- 4) M. Katagiri, K. Toh, K. Sakasai et al., Appli. Phys. A, 74 [Suppl.] (2002) S1604.
- 5) M. Katagiri, K. Sakasai, et al., Nucl. Instr. Meth. A, 513 (2003) 374.
- 6) K. Kuroda and I. Manuilov, Nucl. Instr. Meth. A, 430 (1999) 311.

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}C$	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	\AA
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

1. 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N($=10^5$ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa($=10$ bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J($=10^7$ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法) = 4.184 J(熱化学) = 4.1855 J(15 °C) = 4.1868 J(国際蒸気表) 仕事率 1 PS(仏馬力) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}	
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}	
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	$= 735.499 \text{ W}$
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1	

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
				1	100
	1	2.70270×10^{-11}		0.01	1
	3.7×10^{10}	1			

照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	1	3876		1	100
				2.58×10^{-4}	1

(86年12月26日現在)

64×64チャンネル高位位置分解能中性子イメージ検出器の検出特性



古紙配合率100%
白色度70%の再生紙を使用しています