

波長シフトファイバを用いた高検出効率、 高位置分解能型2次元シンチレータ中性子検出器の 開発研究

J-PARC/MLF 生命物質構造解析装置「iBIX」のための
 コンパクト型検出器の開発 –

Development of Two-dimensional Scintillator Neutron Detector using Wavelength-shifting Fibres

- Development of a Compact Detector for iBIX Instrument in J-PARC/MLF -

中村 龍也 片桐 政樹 細谷 孝明* 美留町 厚 海老根 守澄 曽山 和彦 Erik Schooneveld* Nigel Rhodes*

Tatsuya NAKAMURA, Masaki KATAGIRI, Takaaki HOSOYA*, Atsushi BIRUMACHI* Masumi EBINE, Kazuhiko SOYAMA, Erik Schooneveld* and Nigel Rhodes*

J-PARC センター

J-PARC Center

March 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

波長シフトファイバを用いた高検出効率、高位置分解能型 2次元シンチレータ中性子検出器の開発研究

- J-PARC/MLF 生命物質構造解析装置「iBIX」のためのコンパクト型検出器の開発-

日本原子力研究開発機構

J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン

中村 龍也, 片桐 政樹, 細谷 孝明^{*1}, 美留町 厚^{*}, 海老根 守澄^{*}, 曾山 和彦, Erik Schooneveld^{*2}, Nigel Rhodes^{*2}

(2008年12月19日受理)

J-PARC/MLF の生命物質構造解析装置に実機として供与することのできる波長シフトフ ァイバを用いた高検出効率、高位置分解能型2次元シンチレータ中性子検出器を開発した。 検出器を構成する各要素について当該装置仕様に基づいて最適化し高性能化を図った。有 感面積13.3 x 13.3 cm²、有感面積率69%以上であるコンパクトなプロトタイプ検出器を試 作しISIS パルス中性子源にてその動作性能を確認した。開発した2次元検出器は当該装置 に要求された仕様をほぼ満足するものであった。

J-PARC センター:〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

- * 東海研究開発センター 原子力科学研究所 工務技術部
- *1 茨城大学工学部生体分子機能工学科
- ^{*2} Rutherford Appleton Laboratory, ISIS facility

Development of Two-dimensional Scintillator Neutron Detector using Wavelength-shifting Fibres - Development of a Compact Detector for iBIX Instrument in J-PARC/MLF -

Tatsuya NAKAMURA, Masaki KATAGIRI, Takaaki HOSOYA^{*1}, Atsushi BIRUMACHI⁺, Masumi EBINE⁺, Kazuhiko SOYAMA, Erik Schooneveld^{*2}, and Nigel Rhodes^{*2}

> Materials and Life Science Division, J-PARC Center, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

> > (Received December 19, 2008)

A compact two-dimensional neutron detector was developed for iBIX instrument in the J-PARC/MLF. The specifications required for the detector were a spatial resolution of less than 1 mm, a detector efficiency of more than 50% for thermal neutrons, a gamma sensitivity of less than 10^{-6} , detector coverage of around 16 x 16 cm² with least dead area, compactness, modularity, and a pulse pair resolution of less than 2 μ s. The detector components including new scintillator material, wavelength-shifting fibres, photomultipliers, amplifier/discriminator electronics, signal processing electronics, time of flight data acquisition module, were studied in detail and optimized for the purpose. The compact prototype detector that has a neutron sensitive area of 13.3 x 13.3 cm² was made and feasibility of the detector was demonstrated successfully in the experiments at the ISIS pulsed neutron source.

Keywords: Neutron Detector, Scintillator, Two-dimensional Detector, Wavelength-shifting Fibre

⁺ Engineering Services Department, Nuclear Science Research Centre, Tokai Research and Development Center

^{*1} Ibaraki University, Department of Biomolecular Functional Engineering

^{*2} Rutherford Appleton Laboratory, ISIS facility

目 次

1.	はじめに	<u>-</u> • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
2.	WLSF	2次元中性子シンチレータ検出器の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・
	2.1	中性子検出原理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	2.2	検出器に要求される性能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2
	2.3	検出器の基本設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・3
3.	検出器構	毒成要素に関する基礎的研究および実用化技術開発・・・・・・・・・・・ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.1	ZnS/ ¹⁰ B ₂ O ₃ 中性子有感シンチレータの開発・・・・・・・・・・・・・4
	3.2	波長シフトファイバの最適化研究・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
	3.3	マルチアノード光電子増倍管の改良・・・・・・・・・・・・・・・8
	3.4	フォトンカウンティング用アンプ/ディスクリ回路モジュールの開発 ・・・10
	3.5	デジタル信号処理・エンコーダ回路・・・・・・・・・・・・・・・・・・11
	3.6	ToF データ収集回路モジュールの開発・・・・・・・・・・・・・・・・12
4.	プロトタ	マイプ検出器システムの試作・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
5.	ISIS パル	レス中性子源における検出器システムの動作確認試験・・・・・・・・・ 12
	5.1	位置分解能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13
	5.2	ToF 測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13
	5.3	中性子回折測定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・13
6.	結論およ	こび今後の課題・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
謝話	辛•••	
参考	うくしょう うちょう うちょう うちょう しんちょう しんしょう うちょう うちょう うちょう うちょう しんしょう うくしんしょう しんしょう しんしょ しんしょ	

Contents

1. Introduction ••••••••••••••••••••••••••••••••••••
2. Two-dimensional WLSF-type scintillator neutron detector • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
2.1 Principle of neutron detection •••••••••••••••••••
2.2 Detector specifications required for iBIX instrument • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
2.3 Detector design • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
3. Development of detector components for a iBIX detector • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
3.1 ZnS/ ¹⁰ B ₂ O ₃ scintillator $\cdot \cdot \cdot$
3.2 Evaluation of a wavelength-shifting fibre •••••••••••••••
3.3 Multianode photomultiplier • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
3.4 Amplifier/discriminator circuit module for photon counting method • • • • 10
3.5 Digital signal processing and encoding electronics • • • • • • • • • • • • • 11
3.6 Time of flight data acquisition circuit module • • • • • • • • • • • • • • • 12
4. A prototype 2-d detector system • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
5. Detector performance test at ISIS pulsed neutron source • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
5.1 Spatial resolution •••••••••••••••••••••••••••••
5.2 Time of flight measurements • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
5.3 Neutron diffraction measurements • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
6. Conclusion • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
Acknowledgements · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
References • • • • • • • • • • • • • • • • • • •

1. はじめに

2008 年 5 月、原子力機構が J-PARC/物質生命科学施設(Materials and Life science Facility, MLF)内に建設を進めてきた大強度パルス中性子源がファースト中性子ビームを生成しその稼動を開始した。本パルス中性子源は原子力機構 JRR3 の 2 桁以上、またこれまで世界最大のパルス中性子源であった英国ラザフォード研究所 ISIS パルス中性子源の数倍の瞬間中性子強度を実現する。

MLF内には23の中性子実験ビームラインが設けられる。各実験スイートにはバラエティ に富んだ中性子回折・分光装置群が設置される。中でも茨城県が設置する生命物質構造解 析装置¹⁾は有機低分子や生体高分子単結晶の水素・水和構造解析を専門とする非常にユニー クな装置である。本装置では試料からの回折中性子をできる限り多く、大立体角で、高精 細に、かつ広い波長領域を一気に測定する斬新な装置である。本装置の実現により当該研 究分野、ひいては生命物質科学研究全体に大きなインパクトを与えることは間違いない。

本装置成立の最大の鍵は高性能 2 次元中性子検出器の実現にある。当該 2 次元中性子検 出器には、検出効率(> 50%@1A)、空間分解能(< 1 mm)、有効検出面積(> 16 x 16 cm²)、有 効検出面積率(> 70%)、時間分解能(< 2 µs) 、ToF 性能、モジュラー性等の性能が要求され る。また、1 検出器モジュールの信号チャンネル数が数 100 以上となり、かつ最終的には 50 台近くの検出器が設置されるため検出器のコンパクト性もきわめて重要である。このよ うな性能を有する既存検出器はなく本装置の要求性能を満足する 2 次元中性子検出器の実 現が待たれていた。

一方、原子力機構では平成 10 年度から平成 15 年度にかけて先端基礎研究センターにおいて波長シフトファイバ(Wavelength-shifting fibre, WLSF)を用いたパルス中性子イメージング検出器の基礎的研究が行われていた。原子力機構はその研究成果を発展させ WLSF 型2 次元シンチレータ中性子検出器を当該装置用検出器候補として位置付けた。それに伴い平成 16 年度から 19 年度にかけて実機供与のための最適化、高性能化に関する研究開発や外部への技術移転も見据えた実用化技術開発を進め、20 年度からは実機検出器のコミッショニングが始まっている。本報はこの中でもプロトタイプ試作機に至るまでの検出器要素技術開発研究を中心に報告するものである。

2. WLSF 型 2 次元中性子シンチレータ検出器の概要

2.1 中性子検出原理

中性子有感シンチレータと WLSF を用いた中性子検出器は 1996 年に米国オークリッジ 国立研究所の D.P. Hutchingson²⁾らにより提案されそれ以後多くの研究機関において研究開 発が行われた^{3,4,5)}。

WLSF は通称クリアファイバと呼ばれる透明なプラスチックファイバのコア部分に蛍光

ダイを添加したものである⁶⁾。WLSF では外部から入射した光を吸収しダイによる再発光 をファイバ両端に伝播する。クリアファイバではファイバ端面に入射した光のみ他端へ伝 播されるが WLSF ではファイバ側面から入射した光も再発光を介して他端へ伝播可能であ る。このため大体積を有するシンチレータからの発光収集等を目的として高エネルギー物 理分野では古くから用いられてきた⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

図1はZnS/6LiFシンチレータとWLSFからなる典型的な中性子検出器の原理図である。 ZnS/6LiFシンチレータに入射した熱中性子は 6Li(n,α)T 核反応により吸収され結果として 二次粒子が生成される。ZnS シンチレータは二次粒子のもつエネルギー(4.78 MeV)の付与 を受けシンチレーション発光を生じる。その青色シンチレーション光(中心波長 450 nm)は その直下に置かれたWLSF にて吸収される。WLSF 中の蛍光ダイは光エネルギーを受け緑 色に再発光する。この緑色光のうち一部がファイバ両端部へ向けて伝播する。ファイバ端 部には光電子増倍管(Photomultiplier, PMT)が接続され電気信号としてフォトン検出する。

図 2 はこのような検出器原理に基づいた 2 次元中性子検出器のシステム構成を示したも のである。同図では X、Y 各軸方向に 256 本の WLSF を配置した検出器の例を示している。 各軸方向の WLSF ファイバリボンは互いに 90 度の角度を持ってスタックされる。検出器 はその上下両面を板状シンチレータで挟み込んだサンドイッチ構造を有する。ファイバか らの光信号は個別に PMT に接続され光子信号(フォトンカウンティング)として読み出され る。その後、アンプ/ディスクリ回路により信号増幅、中性子/バックグランド弁別が行われ る。それらは後段にあるイメージ信号処理回路に送られる。ここで各軸における光子入射 パターン解析が行われそのコインシデンスにより中性子入射位置が特定される。

2.2 検出器に要求される性能

生命物質構造解析装置の中性子検出器に要求される性能の概要は以下の通りである。

- 1) 高検出効率 (> 50% for thermal neutrons)
- 2) 高位置分解能 (< 1 mm)
- 3) 低ガンマ線感度 (< 10⁻⁷)
- 4) 大有感面積 (> 160 mm x 160 mm)
- 5) 小不感領域 (< 30%)
- 6) モジュラー性
- 7) 高パルスペア分解能 (<2 µs)
- 8) Time of Flight (ToF) 計測能力

一般に当該装置にて使用される試料サイズは1x1x1mm³以下と小さく、かつ、ユニットセルの一辺は数10-100Åと大きいため中性子回折強度は非常に弱い。したがって、検出器の検出効率が高いことは極めて重要である。また、試料の多くは水素を含むため水素核からの即発ガンマ線や装置構造物、遮蔽構造体からの即発ガンマ線(いずれも MeV オーダーのエネルギー)に対して感度が低いことも要求される。また、試料サイズ、ピーク分離、ピ

ーク対バックグランド比、解析精度向上の観点から 1 mm 以下の位置分解能も必要不可欠 である。さらに大きな立体角を複数台の検出器でカバーするため 1 検出器がモジュラー性 を有し、かつ不感領域はできるだけ小さいことが必要である。もちろん、ToF 測定が必要な のは言うまでも無くピークの時間分離の観点から 2 μs 程度以下のパルスペア分解能が要求 されている。

WLSF型2次元中性子検出器の主な利点は1mm以下の高位置分解能が比較的容易に達成できること、不感領域が少なくできること、軽量かつコンパクトであること、堅牢であること、形状設計に自由度があること、である。一方、ガス検出器と比較して改善すべき 課題は中性子検出効率とガンマ線感度の向上、計数一様性の改善等が挙げられる。

本装置の最大の目的はできるだけ多くのブラッグ反射ピークを精度よく観測し生命物質 試料の構造解析に資することである。このためにはできるだけ多くの立体角を覆うことが 重要である。この観点から検出器が軽量、コンパクト、モジュラー性であることは極めて 重要で、したがってシンチレータ検出器のメリットを最大限に生かすことができる。検出 効率に関しては ISIS に設置された SXD 装置は約 35%(1.8 Å 中性子波長換算)¹⁰⁾で稼動して おり、また新しいシンチレータ材料の基礎研究結果からも 40.7%¹¹⁾という結果が得られて いる。したがって、今後のシンチレータの改良によっては目標の 50%も可能と考えられる。

一方、検出器のガンマ線感度に関しては ISIS においては 10⁻⁶程度あれば回折実験に使用で きることが知られている¹²⁾。さらに当該装置に限っていえば試料水素(不完全重水素置換分) による非干渉性散乱中性子がバックグランドを支配することも十分考えられる。したがっ て検出器の高いガンマ線除去能は必ずしも低バックグランドにつながらないことにも留意 しておくべきで当該装置では 10⁻⁶ がひとつの目安と考えられる。計数一様性に関しては試 料測定の前後において必ず較正測定を行うため 20~30%程度のばらつきであれば実際上問 題とならない。

共用装置という観点からはシンチレータ検出器の堅牢性、耐ノイズ性能は極めて有効で ある。一般にシンチレータ検出器の信号対雑音比はガス検出器のそれよりも1桁以上大き い。したがってシンチレータ検出器は測定環境における外来雑音に対して強い。また、故 障に関しては、単結晶装置では回折ピークが集中することによる局所計数率の増大による ことが多い。その場合シンチレータ検出器では PMT 交換等による修理で短時間のうちにビ ーム実験に復帰できる。一方、マルチワイア 2 次元ガス中性子検出器ではガス、ワイアあ るいは最悪の場合検出器交換等の大掛かりな作業が必要で復帰までに時間とコストを要す る。

以上のことから WLSF 型 2 次元シンチレータ中性子検出器が当該装置用検出器として妥当と考えられる。

2.3 検出器の基本設計

当該装置に要求された検出器性能を可能な限り満足するため以下を特徴とする WLSF 型

2次元シンチレータ中性子検出器を開発することとした。

1) 高い検出効率を有する中性子有感シンチレータ

従来の⁶Li ではなく¹⁰B を中性子コンバータとする ZnS シンチレータを開発する。これ により従来より薄いながらも高い検出効率を有するシンチレータの実現を目指す。

- 2) WLSF の上流及び下流側に各 1 枚の ZnS/¹⁰B₂O₃ シンチレータを配置した検出器構造 ファイバ群を中性子入射の上下流側からシンチレータで挟んだサンドイッチ構造と する。これにより低エネルギー側中性子を前面シンチレータで、高エネルギー側中性子 を背面シンチレータで検出し効率よく実効シンチレータ厚さを増大し検出効率を向上 する。WLSF 内のダイ濃度を最適化しいずれのシンチレータからの発光に対しても効率 的光収集を可能とする。
- 3) 検出器端部でWLSFを90度屈曲し検出器の下流側にて信号読み出しを行う検出器構造 WLSFを90度背面方向に屈曲し信号を読み出す技術を開発する。これにより中性子 不感領域を最小限に抑えかつ検出器のコンパクト化を図る。また屈曲後クリアファイバ に接続して PMT へ導くことで WLSF の長さを最小限とする。これによりダイの自己吸 収効果による光量減衰を抑えるとともに WLSF 寄与のガンマ線感度の低減を図る。
- 4) 個別読み出し、フォトンカウンティング法による微弱シンチレーション光計測

ファイバ毎に光信号読み出しを行うことで中性子入射位置決定において重心演算法 の適用を可能とし高位置分解能化を図る。また、フォトンカウンティング法の適用によ りシンチレータの微弱発光までとらえ検出効率を向上する。さらに検出フォトン数によ る中性子/ガンマ線弁別を行いガンマ線感度の低減を図る。加えて PMT の温度依存性を 信号処理により改善し中性子計数の安定性を確保する。

5) 位置演算方式の工夫による高位置分解能化

光検出パターンに応じた信号処理法を適用し高位置分解能化を図る。これらの演算論 理回路はソフトウェアにより変更可能なField Programmable Gate Array (FPGA)で行い 演算手法の高度化に伴い柔軟に対応できる構成とする。

3. 検出器構成要素に関する基礎的研究および実用化技術開発

3.1 ZnS/¹⁰B₂O₃中性子有感シンチレータの開発

シンチレータ検出器開発の大きな課題である検出効率の向上には、中性子を検出し蛍光 に変換する中性子用シンチレータの高検出効率化が必要不可欠である。一般には中性子有 感シンチレータとして⁶LiF が中性子コンバータとして使用されているが、さらに高い検出 効率を確保するため、中性子捕獲断面積が⁶Li に比較して約4倍大きな¹⁰Bを中性子コンバ ータとして用いる。以下に⁶Li、¹⁰Bによる核反応を示す。

⁶Li + n → ³H + α + 4.78 MeV, 940 barn for thermal neutrons, ¹⁰B + n → ⁷Li*+ α + 2.792 MeV, (6%) \rightarrow ⁷Li*+ α + 2.31 MeV, (94%) 3840 barn for thermal neutrons,

¹⁰Bをコンバータとして用いる際の問題点は、中性子反応Q値の低減にともなう二次粒子 飛程の低減と初期発光量の低減である。

(1) シンチレータの試作研究

¹⁰B から中性子捕獲反応により放出されるエネルギーは ⁶Li から放出されるエネルギーの 約半分である。このため核反応の結果生じるアルファ、⁷Li の飛程はそれぞれ 4.2 µm、2.3 µm と小さい ¹³)。 ⁶LiF では二次粒子であるアルファ、トリトンの飛程が 6.1 µm、33.0 µm と長 いため ¹³バインダ (接着材) を用いて ZnS 蛍光体と混合しシート化する簡便な製作法が適 用できた。また反応 Q 値も 4.78 MeV と大きくバインダによる非発光エネルギー損失もそ れほど影響しない。一方、¹⁰B コンバータの場合ではバインダにおける非発光エネルギー損 失が無視できず本製作手法は有効ではなかった。

我々は ¹⁰B₂O₃ 自身が適度な温度にて溶融する性質に着目しそれ自身を焼結処理すること でバインダとして使用し製作することとした ¹⁴⁾。ZnS には一般に使用される青色発光の ZnS:Ag 粉末を用いそれと H₃¹⁰BO₃を混合し約 1 時間焼結して製作した。製作条件の最適化 実験から約 600 度が適切な焼結温度であることが分かった。最終的には ZnS と H₃¹⁰BO₃ が 重量比で 1.5: 1 のものを JAEA 標準 ZnS/¹⁰B₂O₃ シンチレータとして製作した。写真 1 に JAEA にて製作したシンチレータ(50 x 50 mm²)の写真を示す。

次にZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータの発光量の確認を行った。ZnSシンチレータは不透明で あるためPMT 直付けによる波高分布測定では発光量の比較は困難である。そのため、シン チレータ両面から光収集を可能とする光反射グリッド¹⁵⁾に装填した後PMTへ取り付けるこ とで波高分布測定を行った。図3はAm-Be中性子源において測定したISIS標準ZnS/⁶LiF シンチレータ¹⁶⁾ (AST 社製、厚さ 0.4 mm)とZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータの波高分布である。 ここでZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータは両面からシンチレーション光を収集できるようにガラス 基板上に製作している。本ZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータの厚は 0.3 mm であり ISIS標準ZnS/⁶LiF シンチレータより 0.1 mm 薄い。本測定によると波高分布にピークが観測できその最頻ピー クチャンネルから光量比較できる。ZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータにおいても ISIS標準ZnS/⁶LiF シンチレータとほぼ同じチャンネルに発光ピークを観測した。この結果から試作した ZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータは初期エネルギー付与が⁶Li の場合の半分であるにもかかわらず ISIS標準ZnS/⁶LiF シンチレータと同等の光収量が得られることを確認した。また、 ZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータの方が ISIS標準ZnS/⁶LiF シンチレータよりも中性子計数値が多 く検出効率の増大も期待できる。

これらの結果を基に $ZnS/^{10}B_2O_3$ シンチレータ製作技術をメーカーに移転した。さらにメ ーカーとの共同研究により大型シンチレータスクリーンの実用化技術開発を行い、現在で はアルミ基板上に約 0.17 ~ 0.5 mm 厚さの $ZnS/^{10}B_2O_3$ スクリーンの製作が可能となった。 写真 2 にメーカーで製作された 140 mm x 140 mm の $ZnS/^{10}B_2O_3$ シンチレータを示す¹⁷⁾。

(2) 前面シンチレータの最適厚さ

J-PARC の生命物質解析装置ポート(BL03)では結合型減速体をカーブドスーパーミラー ガイドで見込む。したがって、測定に供する中性子波長は 0.5~8 Å で遅い中性子にまで及 ぶ。シンチレータ厚さ方向における中性子吸収割合は波長が長いほど表面側(上流側)が大き くなる。したがって、ファイバ前面側に配置したシンチレータの厚さがシンチレーション 光の平均自由行程に対して厚すぎると冷中性子領域における検出効率が低下するため注意 が必要である。

試作した ZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータの厚さは 0.2 mm、0.3 mm の 2 種類である。前面スク リーン厚さの違いによる検出効率への影響を試験用 WLSF ファイバ検出器(64 X 64 チャン ネル)により検証した。図 4 は減速体系中に設置した Am-Be 線源における中性子計数特性を プロットしたものである。JAEA 標準仕様 ZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータにおいては 0.3 mm よ りも 0.2 mm 厚さのものの方が 20~30%ほど中性子計数が高いことが分かった。同様の実験 を ISIS パルス中性子源において行ったが中性子波長 1~5 Å まで同様の結果であった。これ より厚さ 0.2 mm のシンチレータを前面に配置することとした。中性子計数はシンチレータ の光透過率や中性子コンバータ濃度等にも強く依存する。それらも踏まえた最適前面シン チレータ厚さの検証が今後必要である。

なお、ファイバ後面に配置されたシンチレータの厚さにはそれほど制約がない。これは 中性子吸収割合の厚さ方向分布がどの中性子波長においても WLSF 側が高いためである。 したがって、後面シンチレータの厚さとしては中性子吸収率が適度にとれ収集光量が十分 とれる程度に薄く、シンチレーション光の拡散が位置分解能を劣化させない程度に厚くす ることが選定条件となる。現在では厚さ 0.4 mm のものを装填することとしている。

3.2 波長シフトファイバの最適化研究

(1) 波長シフトファイバの選択

WLSF はシンチレータからの青色発光を吸収し長波長シフトした緑色発光を PMT へと伝 播する役目を負う。WLSF のコア材料はポリスチレンあるいはポリメチルメタクリレート からなりその表面部には数 10 ミクロン厚さのクラッドが 1 重、あるいは 2 重にコーティン グされている。ファイバに入射したフォトンはコアで吸収されそのエネルギーは最終的に コア中に含有された数 100 ppm の有機蛍光ダイに伝播する。このダイは再発光しストーク スシフトのため発光中心波長は長波長側にシフトする。発光はダイから 4π方向に放射され るがそのうち 3.4~7%程度がコア/クラッドの屈折率の違いによる全反射角度内に入りファ イバ両端に伝播する。

WLSF の選択においては、光スペクトルの整合が ZnS 発光/WLSF 吸収、WLSF 発光/PMT 光電陰極において良好であることが基本である。

図 5 には入手可能ないくつかのファイバの発光、吸収スペクトルを示す。絶対発光量は

ファイバに添加するダイ濃度で調整することができる。吸収波長に関しては BCF-91A (a) と Y11 (c)は同様で ZnS 発光のピーク波長以下(450 nm)を大きく吸収する。一方、BCF-92 (b) はそれよりも短波長側を緩やかに吸収する。したがって、同一ダイ濃度で比較すると BCF-92 の発光量は Y11 より低い。しかしながら BCF-92 では ZnS 発光の遅発成分をフィ ルタリングする効果¹⁸⁾が期待できる。このため、Y11 (BCF91A)と BCF-92 の両者を候補と して選択し開発を進めることとした。

また、ファイバ形状は光伝播特性(光トラップ確率)が良好である角型とし、ファイバ開口 数が大きいマルチクラッドファイバを用いることとした。ファイバの大きさに関しては検 出器に要請される位置分解能との整合から 0.5 mm とした。

(2) ダイ濃度の最適化

WLSF 束の前後面に中性子用シンチレータを各 1 枚配置する検出器構造ではその両者からのシンチレーション発光を効率的に収集する必要がある。このため WLSF 内に添加する ダイ濃度の最適化が必要である。理論的には入射光に対して後面の WLSF 束が最大の光収 集であるときに最適な検出効率が達成される。Y11 ファイバ(角型 0.5 mm)においてダイ濃 度を 50 から 160 ppm まで可変したものを特注し最適ダイ濃度の検証を行った。図 6 は横 軸にダイ濃度、縦軸を相対収集光量としてプロットしたものである。これよりダイ濃度が 100~160 ppm 程度であれば後面に配置されたファイバからの光量が最良となることが分か った。また、後面ファイバの発光量はその範囲のダイ濃度であればそれほど変化しないこ とも分かった。したがって、100~160 ppm の範囲内にあればダイ濃度の微調整はそれほど 必要ないと考えられる。この結果から WLSF のダイ濃度を 160 ppm と決定した。

(3) ファイバベンディングによる蛍光透過損失率の測定評価

本検出器では図7に示すようにWLSファイバをおよそ90度に折り曲げ検出器後面にて 信号読み出す。本方法は簡便かつ安価であるがファイバ屈曲による蛍光透過特性が劣化す る。

この影響を調べるためファイバベンディングにおける蛍光透過損失率を評価した。実験 では丸形直径 0.5 mm の Y11 ファイバを半径 5~1000 mm の円筒に巻きつけ青色 LED でフ ァイバ端部を側面から照射し伝播光の蛍光透過量を測定した。図 8 は円筒半径に対して蛍 光透過率をプロットしたものである。これより半径約 20 mm 付近から曲げによる若干の光 損失が生じはじめ半径 10 mm 以下では急激に光損失が増大することが分かった。半径 5 mm ベンディングにおける蛍光透過量はストレートの場合の約 80%に低減した。

次に角型 Y11 ファイバについて実際の WLSF 検出器と同様の状態である 90 度 1 回折り 曲げにおける蛍光透過損失評価を行った。図 9 は 11 本のファイバに対して行った蛍光透過 率の頻度分布である。これより 90 度折り曲げ後の蛍光透過率は最頻値で 73% であることが 分かった。また、透過率の折り曲げ方によるばらつきは現在の方法では±10%程度である ことも分かった。ファイバ屈曲による約 30%の光損失率は許容範囲内であり本検出器の信 号読み出し構造として利用できる。また、折り曲げ法を最適化することで透過光量とばら つきはさらに改善すると考えられる。

3.3 マルチアノード光電子増倍管の改良

本検出器には 512 の PMT チャンネルが必要となる。各 PMT には直径 1 mm のファイバ 1 本が接続されるのみである。このため 30 mm x 30 mm x 45 mm(奥行き)とコンパクトな がら 64 チャンネルの個別 PMT ピクセルを有するマルチアノード PMT(H7546)を 8 台用い ることとした。PMT ゲインの観点からは所望の 10⁷ 程度を有する 16 チャンネル型マルチア ノード PMT(H8711)¹⁹⁾が適するが空間的制限のため 32 台装填するのは現実的ではなく選択 しなかった。写真 3 に浜松フォトニクス社製 H8711 と H7546 の写真を示す。H7546 では 1 ピクセルのウィンドウサイズは 2 x 2 mm² でありファイバ装填率は約 20%となる。本 PMT ではウィンドウ厚さ 1 mm 以下でありピクセル間光クロストークが 1.5%以下に抑えられて いる²⁰⁾。本 PMT に求められる主要性能はシングルフォトン計測に供することができるよう 10⁷ に近い PMT ゲインを有することである。また、検出効率の向上のためには光電陰極の 量子効率が高いことが重要である。

(1) PMT ゲイン

H7546のPMT ゲインは最大印加電圧に近い-950 V においても 2 x 10⁶ 程度と低い²⁰。こ のため、PMT の各ダイノードに印加する電圧配分を変更し高ゲインとする改造を行った。 本改造では 12 ステージあるダイノードに前 3 段と最終段に高い電圧配分とした。具体的に は 12 ステージの電圧配分を 2.4:2.4:2.4:1:1: ・・・:1:1.2 へと改造した。これによ り PMT 出力が大きくなった場合の応答線形性は劣化するが PMT ゲインは増加する。この 非線形応答はダイナミックレンジの大きな ZnS 発光計測にはむしろ好都合である。図 10 は試験用 1 次元 WLSF 検出器(64 チャンネル)の信号読み出しに改造 H7546 と高ゲイン型 H8711(参照用)を用いた場合の中性子計数の高電圧特性を比較したものである。改造 H7546 は高ゲインの H8711 とほぼ同様の高電圧計数特性を示した。これより改造 H7546 は H8711 と同等の PMT ゲインに改良されたことが分かる。ちなみに本特性において明確な計数プラ トーが見られないのは各 PMT ピクセルのゲインのばらつきのためである。これらの結果か ら H7546 の高電圧分圧法を改良することによりほぼ所望の PMT ゲインが得られることを 確認した。

(2) ウルトラバイアルカリ(UBA)光電陰極型 PMT

検出効率の向上には光電陰極の量子効率の改善が効果的である。2007 年 10 月に浜松フ オトニクスから光電陰極の量子効率を大幅に改善したウルトラバイアルカリ PMT(Ultra Bialkali photomultiplier, UBA-PMT)の入手が可能となった。図 11 にその量子効率特性²¹⁾を 示す。WLSF の発光中心波長である 500 nm において 16%から 20%へ 1.3 倍程度量子効率 が改善しており有望である。本 UBA-PMT の 2 次元中性子検出器への適用のためその特性 を検証した。

(3) ピクセル間光クロストーク

先行して入手することのできた UBA 光電陰極型 H8711MOD(16 チャンネルマルチアノ ード PMT)を用いてピクセル間光クロストークを調べた。本実験では光電陰極が UBA とな るとピクセル間光クロストークが増大するか否かの検証を目的とした。H8711MOD のピク セルサイズは4 x 4 mm² であり H7546 の 4 倍である。このため本ピクセルの中央部直径 2 mm 部分に WLSF 束 11 本を接続し H7546 の場合と同様のファイバ充填率(20%)とした。11 本の WLSF 束のうち隣接するピクセルに最も近い最外部に位置した WLSF に LED 光を入 射し、自ピクセルと隣接ピクセルにおける信号波高の比としてクロストーク量を定義した。 図 12 には PMT 中央付近のピクセル 6 における光クロストーク測定結果を示す。これより 隣接ピクセルにおいては UBA、BA-PMT 共に 1.3~3.1%のクロストークがあることが分かっ た。ちなみに電子回路によるクロストークは 0.1%であるため観測された数%のクロストー クは PMT ウィンドウにおけるピクセル間光クロストークによるものである。測定結果から は UBA-PMT の方が BA-PMT よりも 1.2~1.8 倍クロストーク量が大きかった。これらの値 は PMT の固体差にも関係するがいずれも 3%程度の値であった。本結果から BA-PMT を UBA-PMT にしても光クロストークによる検出器バックグランド計数への大きな影響はな く現状程度であろうことが予想された。

(4) バックグランド計数

UBA-PMT では BA-PMT と比較して原理的にダーク電流が大きくなる。例えば BA、 UBA-PMT 各 2 台にそれぞれ-800 V を印加しダーク電流を観測したところ前者は 0.03、0.07 nA、後者は 1.4、4.8 nA であった。ここで試験に用いた UBA-PMT のゲインは BA-PMT の それの約半分であったので UBA-PMT のダーク電流は高いと言える。

一方、実際の中性子検出器システムにおいてはダーク電流に比例する PMT 雑音パルスは 信号ディスクリミネータ、あるいは X,Y 軸データの時間コインシデンスによりその大部分 が排除される。本 UBA-PMT を実際の検出器システムに適用し PMT 雑音パルスの影響を試 験した。図 13 は試験用 1 次元 WLSF 検出器(64 チャンネル)において PMT を BA-PMT から UBA-PMT とした場合のバックグランド計数の測定結果である。この図が示すように UBA-PMT では BA-PMT の場合とほぼ同程度のバックグランド計数であることが分かり、 その比は高々2 の程度であった。ここで観測している PMT 雑音パルス(宇宙線による寄与も 含む)によるバックグランド計数値は 10⁴ cps/cm² 程度である。実際の検出器の有感面積を 13 x 13 cm² としても検出器全体でたかだか 10⁻² cps のバックグランド計数と低い。したが って実際の 2 次元検出器においては UBA-PMT 使用によるバックグランド計数の増加は他 の要因に比べてほぼ無視できる程度であると考えられる。

(5) 検出効率の改善

本試験器において UBA と BA-PMT を使用した場合の中性子計数を比較したものを図 14 に示す。UBA-PMT を使用することで BA-PMT と比較して約 1.3 倍中性子計数が増大した。 光電陰極の高量子効率化は PMT ゲインの増大と本質的に異なり光信号そのものの検出感度 を高めるものである。これは検出器の信号対雑音比の増大に加え検出効率の向上において 極めて有効であることを確認した。

3.4 フォトンカウンティング用アンプ/ディスクリ回路モジュールの開発

本検出器ではフォトンカウンティング法によるため PMT からの1フォトン信号をデジタ ル信号として計数する。PMT ゲインには限りがあるため後段にアンプを設置し信号増幅を 補う。本アンプは、数 mV 波高、数 ns 時間幅の1フォトン信号の増幅まで行うため広周波 数帯域幅かつ低雑音であることが必要不可欠である。また、合計 512 チャンネルの信号線 それぞれにアンプ/ディスクリ回路が必要となるため多チャンネル、低消費電力、かつコン パクトな高性能アンプ/ディスクリ回路モジュールの開発が必要不可欠であった。

(1) 必要なアンプゲインの実験的検証

まず本検出器に必要なアンプゲインを実験的に検証した。以前 16 チャンネルマルチアノ ード PMT 用に開発してあった広周波数帯域アンプ(帯域幅 >100MHz)を基礎としゲインを 10~40 倍まで可変としたアンプを試作し実験した。試験 WLSF 検出器の 1 チャンネルに 64 チャンネルマルチアノード PMT(H7546)と本アンプを接続し²⁵²Cf 中性子線源を用いて計数 ディスクリ特性を測定した。図 15 に示す測定結果より約 40 倍以上のアンプゲインが必要 であることが分かった。

この結果をもとに、アンプゲイン 60 を有し、かつ、広周波数帯域 (約 600 MHz)である 32 チャンネルアンプ/ディスクリボードを試作した (写真 4、左)。本アンプは広周波数帯域 を有する IC(THS3201、LMH6703)を使用した 2 段増幅回路からなり高ゲイン、低雑音性を 確保している。試作したアンプ/ディスクリボードを用いて同様に試験検出器の中性子計数 特性を行った結果を図 16 に示す。同図より本ボードでは電子回路雑音が約 40 mV である ことが分かる。また、PMT 標準動作電圧である-950V において中性子信号と雑音が明確に 弁別でき計数プラトーが観測できることを確認した。

(2) 実用 32 チャンネルアンプ/ディスクリ回路ボードの試作評価

前記の実証ボードでは消費電力、ボードサイズともに要求仕様よりも大きいという課題 があった。実機で必要となる多チャンネル(512 チャンネル)においても現実的に対応可能と なる低消費電力型ボードの開発を行った。具体的にはフォトンカウンティング性能を損な わないようにアンプの周波数帯域幅を低減する改良を行った。多くのIC 試験・回路最適化 調整試験の結果、低い消費電力にて高速動作する AD8001 を選択し回路の周波数帯域幅を 220 MHz とした。写真4右に改良試作した 32 チャンネルアンプ/ディスクリボードを示す。 本回路においても実証ボードとほぼ同様のフォトンカウンティング性能が得られ、かつ消 費電力も約7割 (5 W/1 ボード、80 W/16 ボード)に改善した。また、基板サイズも必要と される 100 mm X 160 mm へと低減した。図 17 は本アンプ/ディスクリボードを使用し検出 フォトンの波高分布を測定した結果である。同図より約 30 mV の閾値でフォトンと回路雑 音が弁別できることを確認した。また実機では 16 枚のアンプ/ディスクリ回路ボードを検出 器の背面の限られた空間に収める。このためボードへの電源供給とともに入出力配線をボ ード前後から取り出すことを可能とするミニチュアクレート筐体を試作した。本クレート 筐体に 16 枚のアンプ/ディスクリ基板を挿入した状態のモジュールを写真5 に示す。

3.5 デジタル信号処理・エンコーダ回路

デジタル信号処理・エンコーダ回路においては中性子入射位置を演算しその位置および 時間情報を ToF データ収集回路に出力する役目を負う。本回路はアンプ・ディスクリボー ドから出力された X、Y 軸各 256 チャンネルの Low Voltage Differential Signaling (LVDS)デ ジタル信号を受け取り演算する。ここでのデジタル信号処理はすべて FPGA により行う。 FPGA のサンプリングクロックは 100 MHz であり、最小幅約 5 ns の PMT 信号入力に対し てもサンプリングし計数できる。

中性子入射位置演算は第1段目の FPGA が受け持つ。位置演算の基本はある数以上のフ オトンを検出したファイバを監視しそれらのファイバ群の重心位置演算におく。現状の検 出器においてはシングルフォトンを計数するファイバ群は 1~4 本のファイバに渡る。しか しながら、収集光量が少ないことや ZnS の不規則遅発発光のため必ずしも連続したファイ バすべてがフォトンを検出するとは限らない。そのためフォトンを検出したファイバ群の パターンから中性子入射位置を推定する方法(パターンマッチング法)を適用し高位置分解 能化を図っている (図 18)。また、X 及びY 軸における信号の時間コインシデンスをとりガ ンマ線や PMT ノイズの影響を除去する。

このようにして求めた中性子入射位置情報は第2のFPGAに送られる。ここでデータを 一時的にバッファし ToF データ収集回路モジュールへ送出する。これらの出力にも高速か つ低消費電力であるLVDS で行っている。本モジュールのデータビット構成を図19に示す。 1 中性子イベントデータはX、Y 位置各8ビット、ToF 時間12ビットで記録される。本デ ータの DAQ への受け渡しは小型コネクタ(約100ピン)による信号ケーブル1本で行う。こ れにより検出器を多数配置した場合にもDAQへの接続が見通しよく行われるよう配慮して いる。試作したデジタル信号処理・エンコーダ回路を写真6に示す。概略サイズは30 cm x 15 cm x 25 cm (奥行)である。

3.6 ToF データ収集回路モジュールの開発

エンコーダ回路からの中性子入射位置及び ToF 情報は本 ToF データ収集回路モジュール により収集される。ToF 情報は J-PARC 加速器から出力される TO 信号を起点として計算さ れる。試作した ToF データ収集回路モジュールを写真 7 に示す。本モジュールは VME 規格 1 幅サイズで 1 つの FPGA、2GB (1GB X2)の DRAM 及び 16 MB の SDRAM から構成され ている。必要な機能は FPGA によりプログラムされる。

本モジュール収集はヒストグラム及びイベントの両方の機能を有する。ヒストグラムモードにおいては 256 ch X 256 ch 中性子イメージを時間幅 4096 チャンネルに収集可能である。また一定時間ごとのバックアップ機能も付属している。イベントモードでは 26 bit でTO カウント数も付加しリストデータとして収集する。収集回路モジュールの出力は VME 規格に基づいて行われる。

4. プロトタイプ検出器システムの試作

以上に述べた WLSF 型 2 次元中性子検出器本体、アンプディスクリミネータ回路及び信号処理・エンコーダ回路を各専用ケーブルで接続し検出器システム化した。写真 8 に検出器本体、図 20 にプロトタイプ 2 次元中性子検出器システムの全景を示す。全長は約 1 m となり J-PARC/MLF の生命物質構造解析装置の検出器架台に設置可能なサイズとなっている。

プロトタイプ 2 次元中性子イメージ検出器の設計・試作に当たっての主な仕様は以下の 通りである。

- ・検出効率:約30%(熱中性子)
- ・検出面積:177 cm²(13.3 cm X 13.3 cm)
- ·位置分解能:約1mm
- ·有効検出面積:69%以上
- ・漏洩中性子による散乱を防止した構造
- ・ガンマ線感度: 10⁻⁶ (⁶⁰Co 線源)
- ・検出器本体サイズ: 16 cm X 16 cm X 30 cm (奥行)
- ・重量:5 kg

5. ISIS パルス中性子源における検出器システムの動作確認試験

試作したプロトタイプ WLSF 型 2 次元中性子検出器システムの動作試験を英国ラザフォ ード研究所にある ISIS パルス中性子源にて行った。ビーム時間が限られていたため本検出 器のパルス中性子における 2 次元計測システムとしての動作確認を主目的とした。実験を 行った ROTAX ポート²²⁾では中性子線源から試料位置までの飛行距離はおよそ 15.74 m で あり使用できる中性子波長領域は 0.6~5.2 Å である。また最大ピーク中性子強度は約 10⁶ n/s/cm²である。

5.1 位置分解能

まず検出器の位置分解能を確認するため直径 1 mm の穴を空けた Cd 板を検出器前面に貼 り付け検出器をダイレクトビーム位置に設置して測定を行った。検出器の動作条件は、PMT バイアス電圧を-850V、アンプ/ディスクリ回路の閾値を 40 mV とした。中性子入射位置の 決定にはパターンマッチング法を用い各ファイバの閾値は 1 フォトンとしている。図 21 (a) に測定した全 ToF 時間での計数和イメージ、(b)にピーク部における 1 次元プロファイルを 示す(コインシデンス時間は 1 µs としている)。同図(a)より本検出器がコリメートされた中 性子ビームを良好に測定していることが分かる。図 21 (b)のプロファイルをガウシアンフィ ットしたところ半値幅として 2 mm を得た。これより検出器の位置分解能は約 1 mm であ ることを確認した。

5.2 ToF 測定

また、データ収集系の ToF 測定特性を含めた検出動作を確認するため中性子ビーム部分 における ToF 特性を評価した。図 21(a)のビーム部分における ToF スペクトルを図 22 に示 す。同図にはコインシデンス時間を 1、1.5、2、4 µs で測定した結果を示している。検出器 の光量収集が十分でないためコインシデンス時間が長いほど中性子計数が増大しているが ToF 特性についてはどれも同様な傾向が得られた(現在では検出器の改良が進められ約 2 µs 以上のコインシデンス時間において計数プラトーが得られている²³⁾)。また、中性子計数 ピークは ISIS 標準モニターと同様に 1.5~1.8 Å において観測され正しく ToF 測定されてい ることを確認した。

5.3 中性子回折測定

本2次元中性子検出器を実際の中性子散乱実験における評価のためNiロッド試料(直径 6 mm)の中性子回折パターンの測定を試みた。写真9にROTAX内での検出器配置を示す。2 台の検出器を20で90度(detector 1)、45度(detector 2)の位置に配置した。試料と検出器間の距離はそれぞれ65,140 mmである。図23にはあるToFにおいて測定された中性子散乱イメージの1例を示す。両検出器とも安定に動作し良好な粉末中性子回折パターンを計測した。図24は各ToFにおいて測定された回折イメージを散乱角度20とToF(中性子波長)のスキャッタープロットを示したものである。これよりNiのデバイシュラーリングがToFとともにその位置を変えているのが明瞭に分かる。また、図25は時間フォーカシング処理によりひとつのToFスペクトルとしたものである。空気による散乱のためバックグランドは高いがNiの回折ピークを明瞭に観測し本検出器がToF測定用2次元検出器として正常動作していることを確認した。

6. 結論および今後の課題

J-PARC/MLF に茨城県が設置する生命物質構造解析装置のための高性能 2 次元シンチレ ータ中性子検出器の開発を行った。当該装置の検出器には高位置分解能、高検出効率、少 ない不感領域等のチャレンジングな性能が要求された。その実現のため波長シフトファイ バ技術を用いた 2 次元中性子検出器を設計しその検出器構成要素に関する詳細な研究開発 の結果、プロトタイプ検出器システムを試作した。ISIS における試験から試作検出器の正 常動作を確認し実機検出器の実現の見通しを得た。これらの成果は、生命物質構造解析装 置に実機として供される 2 次元中性子検出器システムの設計及び仕様書の作成の基礎とな った。今後は本検出器のさらなる高性能化、信頼性の確保、コストの低減等を進めていく 予定である。

謝辞

本検出器開発は装置設置機関である茨城大学の協力はもとより英国ラザフォードアップ ルトン研究所検出器グループとの密接な研究協力体制の下で行われた。また本検出器の試 験評価実験においては原子力機構 JRR-3 CHOP ポートを使用させて頂き装置担当の J-PARC 中性子利用セクション、相澤一也氏には多大なる協力と助言を頂いた。ここに深 く感謝申し上げる。

参考文献

- 1) J-PARC/MLF BL03: < http://j-parc.jp/MatLife/ja/instrumentation/bl03/bl03.html>
- 2) D.P. Hutchinson, et al., Proc. SPIE 3769 (1999) p.88.
- 3) A. Gorin, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 479 (2002) p.456.
- 4) K. Sakai, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 529 (2004) p.301.
- 5) M. Katagiri et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 529 (2004) p.325.
- 6) for example, SAINT-GOBAIN, Optical Scintillating Fibers catalogue.

7) A. Menzione, Proc. 2nd Int. Conf. on Calorimetry in High Energy Physics, Capri, 1991 (World Scientific, Singapore, 1992) p.131.

- 8) ATLAS TileCal, E. Mazzoni, Nucl. Instrum. and Meth. A 409 (1998) p.601.
- 9) K. Kuroda, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 430 (1999) p.311.
- 10) N.J.Rhodes, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 392 (1997) p.315.
- 11) M. Katagiri, et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 529 (2004) p.274.
- 12) N.J.Rhodes, Private communication
- 13) Calculation with SRIM code, < http://www.srim.org/ >
- 14) T. Kojima et al., Nucl. Instrum. and Meth. A 529 (2004) p.325.

15) T. Nakamura et al., IEEE NSS 2008, to be published in Conference Record.

16) Applied Scintillation Technologies : < http://www.appscintech.com/>

17) N. Tsutsui, presented at 1st International Symposium on Pulsed Neutron and Muon Sciences (IPS08), Mito, Ibaraki, Japan, 5 – 7 March 2008

18) M. Katagiri , Japanese Patent pending

19) Hamamatsu photonics, Multianode photomultiplier tube assembly H8711 catalogue, P2.

20) Hamamatsu photonics, Multianode photomultiplier tube assembly H7546 catalogue, P2.

21) Hamamatsu photonics, Ultra Bialkali photomultiplier catalogue, P11.

22) ISIS ROTAX < http://www.isis.rl.ac.uk/excitations/rotax/ >

23) T. Hosoya, et al., presented at 1st International Symposium on Pulsed Neutron and Muon Sciences (IPS08), Mito, Ibaraki, Japan, 5 – 7 March 2008, to be published in NIMA.



Fig. 1: A schematic view of a typical neutron detector using a ZnS/⁶LiF scintillator and wavelength-shifting fibres.



Fig. 2: A schematic view of a two-dimensional neutron detector system using a neutron-sensitive scintillator and wavelength-shifting fibres. This system comprised of 256 fibres in both axis.



Photo 1: A ZnS:Ag/ $^{10}B_2O_3$ scintillator made in house (50 mm x 50 mm).



Fig. 3: Pulse height spectra of a developed $ZnS:Ag/^{10}B_2O_3$ and a standard $ZnS/^6LiF$ scintillator manufactured by AST Co. The scintillators were installed in an ENGIN-X type light reflector grid to collect scintillation light efficiently from the both sides of the scintillator¹⁵⁾.



Photo 2: Large size $ZnS:Ag/^{10}B_2O_3$ scintillators manufactured by Chichibufuji Co. The size of the scintillators measured 14 cm x 14 cm. The thickness of the scintillator was 0.175 mm (left) and 0.375 mm (right).



Fig. 4: Neutron counts measured with a 2-d test detector equipped with a 0.2 or 0.3 mm-thick $ZnS/^{10}B_2O_3$ scintillator.



Fig. 5: Light absorption/reemission spectra of a ZnS/⁶LiF scintillator, WLSF and a photocathode sensitivities of a bialkali PMT.



Fig.6: Light output of a Y11 WLSF of front and back fibres in a 2-d detector as a function of dye content. The Y11 fibres had square-shape with a side length of 0.5 mm.



Fig. 7: A schematic view of a scintillator/fibre head in a 2-d detector.



Fig. 8: Light transmission of round-shaped Y11 fibres as a function of bending radius. A diameter of a fibre was 0.5 mm. Four of Y11 fibres with multiclad were tested.



Fig. 9: Light transmission of square-shaped Y11 fibres with 90-degree bending.



Photo 3: Multianode photomultipliers, H8711 (16 ch.) and H7546 (64 ch.), manufactured by Hamamatsu Co.



Fig. 10: Neutron counts measured with a 1-d WLSF test detector equipped with a H8711 or H7546 PMTs.



Fig. 11: A quantum efficiency of an ultra bialkali PMT manufactured by Hamamatsu $\mathrm{Co}^{21)}$.

(а) ВА-РМТ

(b) UBA-PMT

0.3	2.2	0.4	
1.3	100	1.4	
0.2	2.0	0.1	

0.4	3.1	0.3
1.4	100	2.6
0.4	2.4	0.1

Fig. 12: Light cross talk between pixels on a PMT window in a bialkali (BA) PMT (a) and ultra bialkali (UBA) PMT (b). The light cross talk was defined as a ratio of a signal height relative to a signal in a center pixel (light incident pixel).



Fig. 13: Background counts measured with a 1-d WLSF test detector with a BA or UBA PMT.



Fig. 14: Neutron counts measured with a 2-d WLSF test detector with a BA or UBA PMT.



Fig. 15: Neutron counts measured with a 2-d WLSF test detector with a preliminary amplifier board. The gain of the amplifier was variable from 10 to 40.



Photo 4: 32 channel amplifier/discriminator boards. A test board (left) and a prototype board (right).



Fig. 16: Neutron counts measured with a 2-d WLSF test detector equipped with a 32-channel test amplifier/discriminator board.



Fig. 17: Pulse height spectrum of photons measured a prototype 32-channel amplifier/discriminator board.



Photo 5: A prototype mini power crate for amplifier/discriminator boards.

Finding position



Fig. 18: A pattern matching method employed in a signal processing and encoder module to determine a position of an incident neutron.



Fig. 19: A data flow and data bit structure of the signal processing and encoder module.

(a) Front view





Photo 6: A signal processing and encoder circuit module.



Photo 7: A time of flight data acquisition circuit module

(a) Front view



(b) Rear view



Photo 8: A prototype detector. A front view (a) and a rear view (b).





Fig. 20: A prototype 2-d WLSF detector system. A block diagram (a) and detector system (b).







Fig. 22: Time of flight spectra in the area of neutron count peak.



Photo. 9: Experimental setup in the ROTAX port at ISIS pulsed neutron source. Two prototype 2-d WLSF detectors were set up at the angle positions of 45 and 90 degree.



Fig. 23: Diffraction images of Ni rod measured with a detector 1 and detector 2 at fixed time of flight.



Fig. 24: Scatter plot of neutron diffraction from a Ni rod sample.



Fig. 25: Time of flight spectra after time focusing correction.

This is a blank page

表1.	SI 基本单位	2
甘木島	SI 基本ì	単位
	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	Α
熱力学温度	ケルビン	Κ
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位	zを用いて表されるSI組立単	立の例
和立量	SI 基本単位	
和立里	名称	記号
面	積 平方メートル	m^2
体	積 立法メートル	m ³
速さ,速し	度 メートル毎秒	m/s
加速!	度 メートル毎秒毎秒	m/s^2
波	数毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密/	度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密!	度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比 体 ネ	積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	度 アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強	さ アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) ,濃」	度 モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃!	度 キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝	度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈 折 率	^(b) (数字の) 1	1
比诱磁率	^(b) (数字の) 1	1

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

		SI 組立単位			
組立量	反敌	和早	他のSI単位による	SI基本単位による	
	-口 1小	口 ク	表し方	表し方	
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
立 体 角	ステラジアン ^(b)	$\mathrm{sr}^{(\mathrm{c})}$	1 ^(b)	$m^{2/}m^{2}$	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹	
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²	
压力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1}kg s^{-2}$	
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$	
電荷,電気量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$\mathrm{m}^2\mathrm{kg}\mathrm{s}^{-3}\mathrm{A}^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^3 A^2$	
コンダクタンス	ジーメンス	\mathbf{S}	A/V	${ m m}^{-2}{ m kg}^{-1}{ m s}^{3}{ m A}^{2}$	
磁床	ウエーバ	Wb	Vs	$\mathrm{m}^2\mathrm{kg}\mathrm{s}^2\mathrm{A}^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^2 A^1$	
インダクタンス	ヘンリー	Η	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光 東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能(「)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与, グレイ			J/kg	m ² e ⁻²	
カーマ	,	ω,	0/115		
線量当量,周辺線量当量,方向	シーベルト ^(g)	$S_{\rm V}$	JArg	$m^2 e^{-2}$	
性線量当量,個人線量当量			5,115		
<u>酸素活</u> 性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SE接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)潤光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)加光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)加光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (e)如火ウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (e)セルビンの特別な名称で、セルシウス温度であずまな値に見ためっ単位で大きうにも同じである。
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM制告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位		
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{1} s^{1} = s^{1}$
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m \text{ kg s}^{-3} \text{ K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	$m^{-1} kg s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \text{ kg s}^2 \text{ A}^2$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^{-2} mol^{-1}$
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^2 kg s^3 = m^2 kg s^3$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	$m^2 m^2 kg s^3$ =kg s ³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語					
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	а
10^2	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60s		
時	h	1h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	٥	1°=(п/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad		
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^{2}=10^{4}m^{2}$		
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1t=10^{3}$ kg		

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	-++ \= 1 +	18 (HARA 44) - (H > 1, 7, 1, m)	

_	衣され	しる剱値:	か実験的に侍られるもの
	名称	記号	SI 単位で表される数値
7	電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
	ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
j	統一原子質量単位	u	1u=1 Da
	天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位								
	名称		記号	SI 単位で表される数値				
バ	-	ン	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa				
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa				
オン	オングストローム			1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m				
海		里	М	1 M=1852m				
バ	-	\sim	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})2=10^{-28} \text{m}^2$				
1	ッ	F	kn	1 kn=(1852/3600)m/s				
ネ	-	パ	Np	ロ単伝しの粉は切り用ない				
ベ		ル	В	↓ 51単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存.				
デ	ジベ	ル	dB -					

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位							
名称	記号	SI 単位で表される数値					
エルグ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$					
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N					
ポーアーズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s					
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} = 10^{-4} \text{m}^2 \text{ s}^{-1}$					
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd} \text{ m}^{-2}$					
フォト	$_{\rm ph}$	$1 \text{ ph}=1 \text{cd sr cm}^2 10^4 \text{lx}$					
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ² =10 ⁻² ms ²					
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$					
ガ ウ ス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$					
エルステッド ^(c)	Oe	$1 \text{ Oe} \triangleq (10^{3}/4\pi) \text{A m}^{-1}$					

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例							
名称				記号	SI 単位で表される数値		
キ	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq		
$\scriptstyle u$	ンヨ	、ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$		
ラ			ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy		
\mathcal{V}			Д	rem	$1 \text{ rem}=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{Sv}$		
ガ	2	/	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T		
フ	X	N	11		1フェルミ=1 fm=10-15m		
メー	ートル系	ミカラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg		
\mathbb{P}			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa		
標	準 ナ	戻 フ	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa		
力		IJ	_	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)		
3	ク		\sim	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$		

この印刷物は再生紙を使用しています