

ENGIN-X型1次元シンチレータ中性子検出器の 検出器性能向上に関する技術開発

— ZnSシンチレータ、光リフレクタ、及びデジタル信号処理装置の開発 —

Development for Upgrading Japanese ENGIN-X Type Linear Scintillation
Neutron Detectors

- Development of New ZnS Scintillator, Light Reflector and Digital Signal
Processing Module -

中村 龍也 片桐 政樹 美留町 厚 海老根 守澄

筒井 紀彰* 曾山 和彦 Erik Schooneveld* Nigel Rhodes*

Tatsuya NAKAMURA, Masaki KATAGIRI, Atsushi BIRUMACHI, Masumi EBINE

Noriaki TSUTSUI*, Kazuhiko SOYAMA, Erik Schooneveld* and Nigel Rhodes*

J-PARC センター

J-PARC Center

March 2009

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 (<http://www.jaea.go.jp>)
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

ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器の検出器性能向上に関する技術開発
— ZnS シンチレータ、光リフレクタ、及びデジタル信号処理装置の開発 —

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, 美留町 厚⁺, 海老根 守澄⁺, 筒井 紀彰^{*1}
曾山 和彦, Erik Schooneveld^{*2}, Nigel Rhodes^{*2}

(2008 年 12 月 19 日受理)

ENGIN-X 型 1 次元中性子シンチレータ検出器の性能向上を目的として新規な ZnS シンチレータ、光リフレクタ、およびデジタル信号処理装置の開発を行った。ZnS シンチレータに関してはさらなる高速・高検出効率化を図るため ZnS を基本とした各種シンチレータを試作しその性能を評価した。その結果、開発した ZnS/¹⁰B₂O₃ シンチレータでは ISIS 標準シンチレータよりも検出効率が 2 割改善することを確認した(中性子波長 1 Å)。また、シンチレータを装填する光リフレクタに関しては白色塗料を使用せず Al 基板表面にエッチング処理を施すことにより製作する方法を開発した。これにより従来と同等以上の光散乱能を有しかつ経年変化にも強い光リフレクタを実現した。さらにフィールドプログラマブルゲートアレイによる全デジタル化フォトンカウンティング信号処理装置を開発しこれまでのアナログ回路による信号処理系と比較して中性子計数の温度安定性が改善することを実証した。

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} (株)秩父富士

^{*2} Rutherford Appleton Laboratory

Development for Upgrading Japanese ENGIN-X Type Linear Scintillation Neutron Detectors
- Development of New ZnS Scintillator, Light Reflector and Digital Signal Processing Module -

Tatsuya NAKAMURA, Masaki KATAGIRI, Atsushi BIRUMACHI⁺,
Masumi EBINE⁺, Noriaki TSUTSUI^{*1}, 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)

New ZnS scintillator, light reflector and digital signal processing modules were developed to upgrade the Japanese ENGIN-X type linear scintillation neutron detector. The developed ZnS:Ag/¹⁰B₂O₃ scintillator improved a detector efficiency by a factor 1.2 for neutrons with a wavelength of 1 Å compared with the ISIS standard scintillator. The detector maintained a similar gamma sensitivity and multi-count ratio to the present scintillator. The new light reflector made of an etched-surface aluminum plate was developed in replace of a light reflector with an acrylic paint coating. The detector implemented with this reflector exhibited similar detector performances to that with an acrylic paint coated reflector, securing long-term stability. The digital signal-processing module incorporating a photon-counting method was successfully developed. The fully digitalized photon counting system improved temperature stability of neutron counts significantly compared with the present analogue system.

Keywords: Neutron Detector, Scintillator, Boron Converter, Light Reflector, Digital Signal Processing, Temperature Stability

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

^{*1} Chichibufuji Co. Ltd.

^{*2} Rutherford Appleton Laboratory

目 次

1. 緒言	1
2. ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器 (27 ch 検出器)	1
3. ZnS/ ⁶ LiF 及び ZnS/ ¹⁰ B ₂ O ₃ シンチレータの開発	2
3.1 シンチレータ試料の製作	2
3.2 シンチレーション光減衰時間および発光量の比較	3
3.3 試作シンチレーション検出器の性能評価	4
3.3.1 検出器性能評価法	5
3.3.2 Am-Be 中性子源における性能評価	6
3.3.3 ガンマ線感度プロットによる検出器性能の評価	6
3.3.4 中性子波長依存性の評価	7
4. 表面エッチング処理による塗料レス光リフレクタの開発	8
5. 全デジタル化したフォトンカウンティング信号処理装置の開発	10
6. 結論および今後の課題	12
謝辞	12
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. ENGIN-X type linear scintillation neutron detector (27-ch detector)	1
3. Development of ZnS/ ⁶ LiF and ZnS/ ¹⁰ B ₂ O ₃ scintillator	2
3.1 Specification of developed scintillator	2
3.2 Scintillation light properties: Light yield and decay time	3
3.3 Evaluation of detector performances	4
3.3.1 Experimental methods	5
3.3.2 Evaluation by using an Am-Be neutron source	6
3.3.3 Detector performances plotted with a gamma sensitivity	6
3.3.4 Dependence on neutron wavelength	7
4. Surface etched aluminum reflector	8
5. Digital signal processing with a photon counting method	10
6. Conclusion	12
Acknowledgements	12
References	12

This is a blank page

1. 緒言

現在、J-PARC、物質・生命科学施設内に工学材料回折装置 (匠)¹⁾の建設/コミッショニングが進められている (図 1)。匠は高性能中性子回折装置であり工学製品の残留応力健全性、材料製造過程あるいは新材料の開発における構造評価等を可能とし、学術研究のみならず産業利用を含む広範な分野における利用が期待されている。2008 年度にはガイド管、検出器等の据え付け調整が始まり年度後半にはユーザへのビーム供与が予定されている。

匠には英国パルス中性子源施設 ISIS²⁾の技術協力を受けて国産化した 1 次元シンチレータ中性子検出器が設置される。匠ではサンプルー検出器間距離が ISIS、ENGIN-X 装置³⁾ (写真 1) よりも大きいこと、1 検出器モジュールのサイズ、ピクセル数はオリジナルに比較して大きなものへと改造がなされている。

さて、ENGIN-X 型検出器⁴⁾は ISIS 検出器グループが開発し検出器システムとして確立したものである。当然ながら彼らの中性子源 160 kW、装置設計に対して最適化がなされている。一方、J-PARC では将来的には 1 MW の出力が予定され ISIS のそれと比較して数倍の中性子強度となる。したがって、中性子検出器の性能も段階的に高度化し装置性能を向上していくことが必要不可欠である。

本報告では、1 次元シンチレータ中性子検出器の性能向上に関する技術開発として ZnS シンチレータ、光リフレクタおよびデジタル信号処理装置の研究開発を行った成果を報告する。

2. ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器 (27 ch 検出器)

本中性子検出器の研究開発においては ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器よりもエレメント数を減らした 27 ch 検出器を使用した。ここでは本検出器の動作原理を簡単に説明する。

27 ch 検出器は ENGIN-X 装置にインストールされている検出器と同一の検出器構造を有する。コンパクトな試験用検出器とするためシンチレータエレメント数を約 1/5 の 27 エレメントとし PMT 8 本で全てを読み出すことができる。写真 2 に 27 ch 検出器を示す。写真では内部が見えるよう検出器前面カバーと光リフレクタグリッド上のアルミホイルを取り外してある。本検出器(ENGIN-X 型検出器)の大きな特徴は、シンチレーション光を読み出すファイバ群をコーディングして読み出していること、シンチレータを中性子入射方向に対して斜め配置 (ベネチアン配置) していること、である。これにより少ない読み出しエレクトロニクスチャンネル数と高い中性子検出効率を実現している。

図 2 には当検出器のシンチレータ・光リフレクタグリッドの構造を示す。中性子は ZnS シンチレータとともに混合された中性子コンバータにより捕獲される。その核反応の結果として 2 次荷電粒子が発生する。2 次荷電粒子は ZnS にエネルギーを付与し青色シンチレ

ーション光が生じる。発生したシンチレーション光は光リフレクタにより反射・散乱をうけ下流側に設置された光ファイバにより集光される。1 エlement中には 98 本の光ファイバがあるがそれらは 2 群に分けられそれぞれ異なる光電子増倍管 (PMT) に光学接続される (2Cn コーディング)。図 3 に本検出器の検出システムの構成を示す。PMT からの信号はフォトンカウンティング/ディスクリ信号処理モジュールに送られ、ここで中性子/バックグラウンドの信号弁別がなされる。デコーダでは発光した PMT の組み合わせから中性子入射位置が割り出される⁵⁾。

シンチレータ・光リフレクタグリッドは 27 の光絶縁されたピクセルからなりそれぞれに 197 mm (長さ) X 8.9 mm (幅) X 0.4 mm (厚さ) のシンチレータストリップが装填される。各ピクセル間は 3 mm ピッチで配置されこれが検出器の位置分解能となる。検出器面に垂直に入射した中性子はシンチレータに対して約 20 度の浅い角度で入射するため実効シンチレータ厚さはシンチレータ厚さの約 3 倍となる。一方、シンチレーション光の光透過特性は入射中性子角度には依存しないため収集光量を犠牲にすることなく中性子検出効率を高める工夫がなされている。

3. ZnS/⁶LiF 及び ZnS/¹⁰B₂O₃ シンチレータの開発

高検出効率、低ガンマ感度、低マルチカウント率、高計数率動作である検出器の実現を目指して新規 ZnS シンチレータの開発を行った。とくに検出効率の向上を第一目標とし、ZnS/⁶LiF と ZnS/¹⁰B₂O₃ シンチレータを試作した。製作方針として、中性子コンバータ(⁶Li、¹⁰B)の量を増大すること、中性子吸収断面積の大きい¹⁰Bを用いたシンチレータの製作を行うこと、とした。¹⁰Bの中性子吸収断面積は⁶Liよりも約4倍大きく中性子吸収確率においては有利である。一方、¹⁰Bコンバータでは⁶Liと比較すると反応Q値が約半分となるため初期シンチレーション発光量の点では劣る。

3.1 シンチレータ試料の製作

シンチレータの母材には一般によく使用される青色発光の ZnS:Ag を用いた。ZnS/⁶LiF を製作する場合には ZnS 粉末、⁶LiF 粉末、および有機系接着剤を混合し溶媒を加えてシート状に伸ばし乾燥させて整形した。また、ZnS/¹⁰B₂O₃ の製作においては ZnS に H₃¹⁰BO₃ 粉末を混合し 600 度の温度で 1 時間ほど焼成しセラミック化した。表 1 に試作したシンチレータ試料の特性をまとめる。

試料(1)、(2)は英国 Applied Scintillation Technologies 社 (AST)が製作したものである。試料(1)は AST (4:1)と呼称されるシンチレータで ENGIN-X 装置に装填されており参照用標準試料とした。ちなみに AST(4:1)では ZnS と ⁶LiF が重量比で 4 : 1 の意である。また、試料(2)は AST(2:1)と呼称され、ZnS に対する ⁶LiF 量を 2 倍に増量したものである。

試料(3)~(6)は JAEA にて製作した。検出効率はシンチレータにおける中性子吸収確率と

シンチレータの光透過率の兼ね合いで決まる。したがって、JAEA 製試料では ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^{10}\text{B}$ コンバータの使用やその密度、ZnS 粒径、厚さ等の異なるものを各種製作した。各試料の概要は以下のとおりである。

試料(3) : ${}^6\text{Li}$ コンバータ使用。ZnS への共付活剤として Cl の代わりに Al とし光量の増大を図っている。

試料(4) : ${}^6\text{Li}$ コンバータ使用。厚さを 0.7 mm とすることで中性子吸収効率の増大を図った。

試料(5) : ${}^6\text{Li}$ コンバータ使用。一般によく使用される ZnS:Ag,Cl を使用したもので厚さも標準の 0.4 mm。ZnS の平均粒径は 8 μm 。

試料(6) : ${}^{10}\text{B}$ コンバータ($\text{H}_3{}^{10}\text{BO}_3$ 、焼結後は ${}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ となる) を使用。中性子吸収率の増大を図った。ガラス基板上(0.4 mm 厚さ)に製作した。

3.2 シンチレーション光減衰時間および発光量の比較

各試料からの中性子誘起シンチレーション光を観測しそのシンチレーション光減衰時間および発光量を比較した。実験では長さ 30 mm の小型光リフレクタグリッド(図 2 に示したものの長さを短くしたもの)に各種シンチレータを取り付け PMT 上に直接固定し、PMT からのアナログ信号波形およびその波高値を解析した。

図 4 に規格化した信号波形を示す。本信号波形は 1000 波形分の平均を示している。どの試料も荷電粒子による ZnS シンチレーション光に観測されるように 100 ns 程度の速い減衰成分と 1~10 μs に及ぶ遅い減衰成分(アフターグロー)が認められた。速い減衰成分がより速くかつ大きく、また遅い成分ができるだけ小さいことが検出器の高計数率化のためには重要である。これらの試料の中で試料(6) (ZnS:Ag,Cl/ ${}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$)の時間応答性が一番速いものであった。これを信号波高が 20%、10%に減衰するまでの経過時間として解析した結果を表 2 内に示す。まず 100-20%時間をみると、標準シンチレータ試料(試料(1))では 0.46 μs であったのに対して試料(6)では 0.29 μs であり約 4 割も速くなった。いずれの試料も同一の ZnS:Ag,Cl であるので ZnS 発光そのものの違いとは考えられない。 ${}^6\text{LiF}$ コンバータを用いた他の試料(2)(4)(5)は 0.5~0.95 μs であったのに対し ${}^{10}\text{B}$ コンバータを用いた試料が最も高速な時間応答であった。現在のところ試料(6)の速い減衰を示す理由は明らかではない。ZnS/ ${}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ シンチレータのうち ${}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ はガラス性であるため粉末を接着剤で固めて整形する ZnS/ ${}^6\text{LiF}$ シンチレータと比較して発光吸収および光透過率の波長依存性が異なることが関係するのではないかと考えている。試料(6)ののアフターグロー成分も標準試料の約 4 割(表 2 の 100-10%時間を参照)であり高計数率動作において極めて良好と考えられる。ちなみに、試料(3)の ZnS:Ag, Al の光減衰時間が他より極端に遅いのは共付活剤として加えた Al の影響である。

図 5 に各試料の波高分布を示す。本測定はスペクトロスコープアンプ(時定数 1 μs)を通し整形したものを Multi Channel Analyzer にて測定したものである。波高分布形状は次の 3

つの特徴を示すものに分類できた。1つ目は、標準シンチレータと同様の光量をもちピークを形成するものである(試料(1)、(2)、(5)、(6))。このうち試料(1)、(2)、(5)はいずれも ${}^6\text{Li}$ コンバータを使用したもので(1)、(2)はAST社製、(5)はJAEA製である。これらは同程度の厚さであることからJAEA製の ZnS^6LiF シンチレータはAST製のものとほぼ同程度の光透過性を有していると考えられる。2つ目は、標準シンチレータよりも発光量が大きくピークを形成するものである(試料(3))。この試料(3)の光出力は標準シンチレータよりも約1.7倍も高いものであり共付活剤として添加したAlの影響であると考えられる。本試料では図4に示した様に発光減衰時間は遅くなる一方、発光量は大きくなることが分かった。3つ目は、ピークをもたず低波高側ほど高い計数を有する波高分布である(試料(4))。これは試料が0.7 mmと厚すぎシンチレータ中における光損失が大きかったためと考えられる。 ZnS シンチレータ中における光の平均自由行程は測定値で約180 μm であった。したがって、不透明な ZnS シンチレータでは厚さを平均自由行程よりも必要以上に増大することはピークの消失を招き計数安定性が劣化することを示している。

ここで ${}^{10}\text{B}$ コンバータを使用した試料(6)が ${}^6\text{Li}$ を使用している標準シンチレータとほぼ同程度の発光量を有していることは興味深い。試料(6)では ${}^{10}\text{B}$ コンバータを使用しているのでシンチレータ内での初期発光量は ${}^6\text{Li}$ のそれと比較して約半分と考えられる。それにもかかわらず両者が同程度の発光収量を示したことは、試料(6)の厚さが ${}^6\text{Li}$ のそれよりも0.1 mmと薄いこと、シンチレータそのものの光透過率が高いこと、により光収量の補償が働いたためと考えられる。試料(6)のシンチレータ厚さ(0.3 mm)を考慮してもマクロ中性子吸収断面積は ${}^6\text{LiF}$ を使用する0.4 mm厚さの標準シンチレータのそれよりも3倍以上大きい。したがって中性子検出効率の改善が期待できる。

また、これらの波高分布にピークが形成されているのは非常に意義深い。シンチレーション光をシンチレータ片面のみから読み出す方法ではこのようなピークは形成されない。通常は ZnS シンチレータの不透明性のため低波高側ほど大きな計数をもつ波高分布となる。一方、本検出器のようにシンチレータを光リフレクタと共に斜めに配置するとシンチレーション光はその両面から集光される。このため、収集光量はシンチレータ中での中性子吸収深さにそれほど関係しなくなる。結果として波高分布にはピークが現れバックグラウンドとの分離が明確となったと考えられる。図5の波高分布における低波高側にある多くのイベントは電気回路雑音によるものではない。これらは ZnS シンチレータからのアフターグローによるフォトン信号による。フォトンカウンティング信号処理回路ではこれらは排除されるため中性子信号によるピークとアフターグローによるバックグラウンドとの分離は一層明確なものとなる。これらの結果からシンチレータのベネチアン配置が光収集量の増大のみならず中性子計数の安定性に対しても重要な役割を果たしていることが分かった。

3.3 試作シンチレーション検出器の性能評価

試作したシンチレータを実際のファイバーコード型1次元中性子検出器に装填した場合

の検出器性能の評価を以下に行った。

3.3.1 検出器性能評価法

本シンチレーション検出器の性能評価として、中性子計数、マルチカウント率、ガンマ線感度、及び Quiet カウント率の 4 つを評価項目とした。以下にそれぞれの定義と測定法を簡単に記す。

中性子計数試験ではポリエチレン減速体系中に設置された Am-Be 中性子線源(10 Ci)を使用した。Am-Be 線源からの中性子はポリエチレン体系(1200 x 1200 x 1200 mm³)に設置している。検出器設置位置(線源から 750 mm)における中性子フラックスは約 77 1/s/cm²であった。

マルチカウント率とは 1 中性子により複数回計数された事象数の真の中性子事象数に対する割合で定義する。ZnS の発光では大きなアフターグローのためディスクリミネータの閾値によっては容易に複数回計数されてしまい問題となる。マルチカウント率の測定は、閾値以上であったパルス(パルス幅 1 μs)の計数($n_{\text{raw counts}}$)と当該パルスを 20 μs ほどストレッチしたパルスによる計数($n_{20-\mu\text{s counts}}$)を同時に測定することで行った。そして $n_{20-\mu\text{s counts}}$ をマルチカウントのない中性子計数率であるとみなして以下の式から算出した。

$$R_{\text{multi-count}} = \frac{n_{\text{raw counts}} - n_{\text{true counts}}}{n_{\text{true counts}}},$$

$$n_{\text{true counts}} = \frac{n_{20-\mu\text{s counts}}}{1 - n_{20-\mu\text{s counts}} \tau_{20-\mu\text{s}}},$$

ここで $\tau_{20-\mu\text{s}}$ はパルスストレッチ時間 (20 μs) であり、 n はそれぞれ 1 秒あたりの計数で表されている。実際のビームラインにおいてはこのマルチカウント率が 1%以下になるようディスクリミネータの閾値が設定される。

Quiet カウント率試験では、¹⁰B 含有ワックスブロックからなる Quiet ボックス(壁厚は 300 mm)内に検出器を設置し計数を測定した。27 ch 検出器では 2 つの PMT のコインシデンスをとる測定系であるため PMT 雑音パルスによる計数は小さい。したがって、Quiet カウント率は宇宙線による寄与が支配的となる。

ガンマ線感度試験では、⁶⁰Co (3.3 μCi) をシンチレータから 50 mm の距離に配置し計数を記録した。その計数から Quiet カウントを差し引き入射ガンマ線数との比をとることでガンマ線感度を計算した。なお、⁶⁰Co は 1 崩壊あたり 1.17 および 1.33 MeV のガンマ線を放出する。

ZnS シンチレーション検出器では検出効率、マルチカウント率、ガンマ線感度および Quiet カウント率がディスクリミネータの閾値を関数としてお互いに相関をもつ。通常、検出器性能はある閾値におけるそれらの各性能を見て総合的に評価する。一方、本実験のようにシンチレータの光量が試料毎に異なる場合には同一閾値における比較だけでは正しく検出

器性能を評価したことにならない。そこで、マルチカウント率、あるいはガンマ線感度を横軸にとり中性子計数や Quiet カウント率をプロットすることでディスクリミネータの閾値、すなわち試料による光量の大小とは関係なく検出器性能を比較した。

シンチレータ検出器は、高い検出効率、低いマルチカウント率、低いガンマ線感度、および低い Quiet カウント率であるのが理想的である。参考のため ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ検出器におけるこれらの値を示すと、検出効率 $\sim 50\% @ 1 \text{ \AA}$ 、ガンマ線感度 $\sim 1 \times 10^{-7}$ 、マルチカウント率 1% 以下、Quiet カウント率 $6 \times 10^{-4} \text{ 1/s/cm}^2$ である。

3.3.2 Am-Be 中性子源による性能評価

試料(1)~(6)のシンチレータストリップを 27 ch 検出器に装填しシンチレータ検出器としての性能を評価した。なお、ディスクリミネータは ISIS オリジナル信号処理ディスクリミネータエレクトロニクス⁵⁾を使用した。

図 6 は各シンチレータによる中性子計数をマルチカウント率の関数としてプロットしたものである。同図より 6 つのシンチレータは中性子計数のマルチカウント率による傾向から 3 群に分かれることが分かった。

1 つ目は ISIS 標準シンチレータである試料(1)と同様の傾向を示すものである。他には試料(3)、試料(5)が同様の傾向でありこれらはいずれも JAEA 製 ZnS:Ag/⁶LiF であった。2 つ目は同じマルチカウント率においてもより高い検出効率を示す試料(4)、(6)である。これらの試料は ZnS:Ag,Cl/⁶LiF と ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃ である。検出効率の高い理由として、試料(4)では厚さが 0.7 mm と厚いこと、試料(6)では ¹⁰B の中性子吸収断面積が大きいことが挙げられる。3 つ目は上記 1 と 2 の中間の特性を示した試料(2) (AST(2:1))である。

これより試料(2)、(4)、(6)が良好な中性子計数-マルチカウント率特性を示すことが分かり、さらに詳細に測定することとした。

3.3.3 ガンマ線感度プロットによる検出器性能の評価

図 7 は参照試料(1)と試料(2)、(4)、(6)について中性子計数、マルチカウント率、Quiet カウント率をガンマ線感度を横軸としてプロットしたものである。このうち高い検出効率を示した試料(2)と試料(6)に特に着目する。また、同図においては実際の検出器の動作点であるガンマ線感度が 1×10^{-7} 付近において各シンチレータにおける検出器特性について議論する。

まず中性子計数(図 7 (a))であるが、計数の高い順に試料(6) (ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃)、試料(2) (AST(2:1))、試料(4) (ZnS:Ag,Cl/⁶LiF 1109)であった。試料(6)の中性子計数が高いのは良好な光収量が得られたため ¹⁰B の大きい中性子吸収断面積が有効に働いたためと考えられる(図 5 参照)。試料(2)も試料(6)とほぼ同程度の中性子計数を示した。これらの値は、標準の試料(1)と比較していずれも 20~30%大きいものであった。

また、マルチカウント率(図 7(b))に関してはどの試料もほぼ同様に 1%以下であり実際

使用における基準を十分満足するものであった。特に試料(6)は $0.2 \pm 0.2\%$ と極めて良好であった。これは $\text{ZnS}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ の発光アフターグローが少なかった結果とよく一致している。ここで、試料(4)は他の 2 つとは全く異なる傾向を示した。同一ガンマ線感度に対して他の試料よりも数倍低いマルチカウント率であった。これは本シンチレータの発光量が低いと考えている。本シンチレータは 0.7 mm と厚くいため大多数の中性子イベントの光収量は小さい(図 5 参照)。すなわち、シンチレーション発光の主発光が小さい場合には当然アフターグローも小さく、結果としてマルチカウント率も低くなったと考えられる。

Quiet カウント率に関しては、試料(2)、(4)がほぼ標準シンチレータと同様であったのに対し、試料(6)では 3~5 倍高いものであった。Quiet 事象をオシロスコープによる直接信号波形観測するとその多くは遅い減衰を伴うシンチレーション発光であった。これより Quiet 計数は宇宙線に含まれる高速中性子が支配的であると考えられた。試料(6)のマクロ中性子吸収断面積は標準シンチレータのその約 3 倍である。宇宙線のエネルギーは非常に高いためこれらに対する検出感度はおよそマクロ断面積に比例すると考えると実験結果を説明できる。

3.3.4 中性子波長依存性の評価

良好な検出性能を示した $\text{AST}(2:1)$ 、 $\text{ZnS:Ag,Cl}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ (試料(2)、試料(6))について中性子計数の中性子波長依存性を評価した。実験は英国 ISIS パルス中性子源の ROTAX ポートにて行った。ROTAX のサンプル位置にプラスチックロッドを設置し水素核からの非干渉性散乱中性子を 27 ch 検出器で計測した。なお各シンチレータにおけるディスクリミネータの閾値はガンマ感度 1×10^{-7} 、マルチカウント率 0.5% 以下となるよう設定した ($\text{AST}(4:1)$ では -220 mV 、 $\text{AST}(2:1)$ および $\text{ZnS:Ag,Cl}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ では -180 mV とした)。

図 8 に両試料の中性子計数の中性子波長依存性を示す。同図では $\text{AST}(4:1)$ の中性子計数を基準とし相対計数比をプロットしている。両シンチレータともに測定計数比は $0.3 \sim 5 \text{ \AA}$ にわたって 1 以上であり標準シンチレータに優る検出効率であることが分かった。両シンチレータともに標準シンチレータと比較して約 2 割検出効率が改善した(中性子波長 1 \AA に対する値)。本結果から開発したシンチレータを装填することでガンマ線感度やマルチカウント率を犠牲にすることなく検出効率が改善することを確認した。表 3 に各シンチレータ検出器の設定閾値における検出器性能をまとめる。

一方、 $\text{AST}(2:1)$ と $\text{ZnS:Ag,Cl}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ では中性子波長依存性に違いが見られた。図 9 は $\text{ZnS:Ag,Cl}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ と $\text{AST}(2:1)$ との計数の比をプロットしたものである。 $\text{ZnS:Ag,Cl}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ は 1 \AA よりも短波長側においては $\text{AST}(2:1)$ よりも中性子計数が高かった(比が 1 以上であった)。一方、それよりも長波長側になると $\text{AST}(2:1)$ の方が計数が高く計数比は 1 以下となった。中性子吸収率のみを考慮した理論計算によると $\text{ZnS:Ag,Cl}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ による計数がどの中性子波長においても $\text{AST}(2:1)$ よりも高い計数となることが予想されたが結果と矛盾していた。この理由として $\text{ZnS:Ag,Cl}/^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ では長波長中性子の吸収イベントにおけるシンチレ

ーシオン発光収量の低減が考えられる。中性子波長が長くなるとシンチレータ表面付近での中性子吸収確率が高くなる。シンチレータ表面にて吸収されたイベントの発光量は二次粒子のシンチレータ外への飛び出しによる影響を受けて発光量が低減することは十分考えられる。ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃ シンチレータでは¹⁰Bの高い中性子吸収断面積のためこの効果は⁶Liの場合より相対的に大きい。結果としてZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃とAST(2:1)の中性子計数の中性子波長依存性に違いが表れたと考えられる。

以上、開発したZnSシンチレータ試料に関しその検出器性能を評価した。AST(2:1)は標準のAST(4:1)と同等のガンマ感度、マルチカウント率、Quietカウント率であり1Å波長の中性子に対して2割ほど検出効率が改善することが分かった。また、ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃については、Quietカウント率が若干高かったものの標準シンチレータと同等のガンマ線感度と優れたマルチカウント率特性を示し検出効率も約2割改善することを確認した。ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃シンチレータはアフターグロー成分も少なくより高い計数率下での良好な動作が期待できる。また、¹⁰Bは⁶Liに比較すると安価かつ容易に入手できる。したがって、中性子コンバータ資源の有効活用の点からもZnS/¹⁰B₂O₃シンチレータは非常に有望である。

4. 表面エッチング処理による塗料レス光リフレクタの開発

シンチレータヘッド部(図2参照)における光リフレクタの役目はシンチレータ発光を反射・散乱し下流側に設置された光ファイバへ効率的に導くことである。そのため光リフレクタ表面にはアクリル系白色塗料が塗布される。しかしながら検出器を数年以上の長期間使用した場合には白色塗料がリフレクタから剥がれ落ちる懸念がある。また、光リフレクタにおける光散乱特性を開発シンチレータ発光に最適化することで検出器性能の向上が期待できる。これらの理由から新たな光リフレクタを開発することとした。

まず、長期使用に耐えうる標準シンチレータAST(4:1)に適応した光リフレクタの開発を行った。具体的にはアルミ薄板の表面にエッチング処理によって凹凸をつけ光散乱能を増大させる手法の開発を行った。

図10には製作した光リフレクタの光反射特性を示す。ZnSの発光は、400~500nmに渡りその発光ピークは450nmである。ISIS標準アクリル系白色塗料(white paintと呼称)リフレクタではその領域をほぼカバーしていることがわかる。一方、塗料レス光リフレクタに関しては、表面処理を施していないアルミ板(No.4)では光反射・散乱能が劣りその約半分であった。そこでAl表面にエッチングを施したところNo.1、No.2、No.3とエッチング量を増大するにしたがって光反射・散乱率が増大した。参考のためAl粉末を無機接着剤により塗布したものの測定値も示すがZnSの発光波長においてはエッチング処理した方が有効であることが分かる。

これらの結果を基に **white paint** リフレクタと表面エッチング処理した光リフレクタからなる試験用グリッドを試作し(写真 3)27 ch 検出器に装填して中性子計数を比較した。標準の **white paint** グリッドのうちの **ch 17** と **ch 18** に開発した光リフレクタ(**No.3** と **No.7**)を装填した。ここで **No.7** は **No.3** の表面にさらに強くエッチング処理を施したものである。

図 11 に本グリッドを使用した検出器の中性子計数の測定結果を示す。光リフレクタ **No.3** では光反射・散乱が不十分であることが分かり、さらにエッチング処理を施した **No.7** では標準 **white paint** グリッドとほぼ同等の中性子計数特性が得られることが分かった。

次に光リフレクタのアセンブリ接合部分における光漏れについて評価を行った。ISIS 標準グリッドは SUS 構造材と光リフレクタ板にてグリッドを組み立てたのちアクリル系白色塗料をスプレー塗布して製作する。このため組み立て時に生じる小さな間隙は白色塗料により塞がれエレメント間における光漏れを防止できる。一方、塗料レス光リフレクタでは SUS 構造材と光リフレクタは接着のみで製作されるためピクセル間における光漏れの懸念が残っていた。実験では 1 エレメントのみにシンチレータを装填し隣接するエレメント(シンチレータ未装填)の中性子計数を測定することで光漏れの度合いを評価した。図 12 に測定結果を示す。同図では隣接ピクセルでの計数(光漏れによる計数)の中心ピクセルへの中性子計数による比を示している。**White paint** 光リフレクタグリッドと表面エッチング処理した光リフレクタグリッドではエレメント間の光漏れによる計数はほぼ同程度であった。このことから光リフレクタグリッドのアセンブリ接合部からの光漏れは無視できる程度であり、開発した光リフレクタは実装上問題のないことを確認した。ちなみに、計測された光漏れによる計数は通常の閾値である -220 mV において 0.01% 以下であった。実際の計測系においては光漏れを伴う事象はデコーダによりリジェクトされるためさらに小さな値となる。

図 13 に標準シンチレータ AST(4:1)において **white paint** リフレクタグリッドおよび表面エッチング処理光リフレクタを使用した場合の、中性子検出特性、マルチカウント率特性をガンマ線感度の関数としてプロットしたものを示す。同図より中性子計数特性、マルチカウント率特性ともに ISIS 標準 **white paint** 光リフレクタとほぼ同様の性能となることを確認した。

続いて本光リフレクタが新たに開発した AST(2:1)および $\text{ZnS:Ag,Cl}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ に対して適用可能であるかの評価を行った。図 14 には AST(2:1)、 $\text{ZnS:Ag,Cl}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ と **white paint** リフレクタおよび表面エッチング処理した光リフレクタによる中性子計数特性を示す。AST(2:1)に関しては表面エッチング処理光リフレクタの場合でも標準光リフレクタの場合と同様の計数を示し良好であった。一方、 $\text{ZnS:Ag,Cl}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ に対しては表面エッチング処理光リフレクタでは中性子計数が 20% ほど減少することが分かった。 $\text{ZnS:Ag,Cl}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ では図 4 に示したように発光減衰時間が異なるためと考えられた。

図 15、図 16 に AST(2:1)、 $\text{ZnS:Ag,Cl}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ シンチレータにおいて **white paint** リフレクタグリッドおよび表面エッチング処理光リフレクタを使用した場合の中性子検出特性、マ

ルチカウント率特性をガンマ感度の関数としてプロットしたものを示す。AST(2:1)、ZnS:Ag,Cl/B₂O₃ に関しては同一ガンマ感度において中性子計数が 10~20%程度計数が減少した。これらのシンチレータ用としてはさらなる最適化が必要なことが分かった。

以上、光リフレクタ開発の第一段階として表面エッチング処理した光リフレクタの開発を行い、ISIS 標準シンチレータである AST(4:1)については既存の white paint リフレクタと同等以上の性能を有することを確認した。今後は AST(2:1)、ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃ に関して表面処理の最適化を進めていく予定である。

5. 全デジタル化したフォトンカウンティング信号処理装置の開発

ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器の信号読み出しにはフォトンカウンティング法が用いられる。本手法では、PMT が計測したフォトン 1 つ 1 つをカウントし一定時間範囲内における計測フォトン数から中性子とバックグラウンド(ガンマ線、PMT ノイズなど)とを弁別する。本手法では PMT 以後は信号処理装置まですべてデジタル信号で伝送される。したがって信号処理にはデジタル信号処理で行われるのが自然である。しかしながら ISIS にて信号処理システムが開発された当時においては Field Programmable Gate Array (FPGA) のような多論理素子の入手は容易ではなかったことや、ZnS 用の信号処理アルゴリズムがアナログ信号処理手法でも実現できた等の理由からアナログ信号処理回路技術を用いて開発された。

我々は、近年安価かつ容易に入手できるようになった FPGA を使用してデジタル信号のみでフォトンカウンティングを行う信号処理装置の開発を行った。FPGA を用いることにより検出器性能の大幅な改善が期待できると同時に非常にフレキシブル、かつ汎用的なものとなる。デジタル信号のみで処理することができるため信号処理部における中性子計数の温度依存性をほぼなくすことができる。また、FPGA ではソフトウェアによりハードウェア(ロジック回路)を容易に変更できるため新たな信号処理法の開発やパラメータサーベイ試験を効率的に進めることが可能となる。さらに、検出器に実装した後においてもユーザの要望に応じて信号処理法を最適化できる。これらは従来のアナログ回路では大幅なコスト負担が強いられるためほぼ不可能であったことである。近年の FPGA 技術の進歩によりコンパクト、多ロジック、多機能化でありこれまでは困難と考えられていた複雑な信号処理ロジックの多チャンネル実装も可能となってきた。加えて、チャンネル密度が高い、消費電力が小さい、差動入力可能、といった点もあり、今後さらなる多チャンネル化が予想される中性子検出器システムの信号処理装置の構築において極めて有効と考えられる。

写真 4 は JAEA が原理確認のために開発したフォトンカウンティング信号処理装置である。PMT での光信号は PMT 後段に設置された回路においてデジタル信号化され本信号処理

装置に Low Voltage Differential Signaling (LVDS)信号として入力される。

デジタル信号処理における大きなメリットのひとつに計数の温度安定性の改善が挙げられる。図 17 は従来のアナログ信号処理系とデジタル信号処理系による中性子計数の温度依存性を測定したものである。信号処理エレクトロニクス部分のみを恒温ボックスに設置し外気温度を 20 度から 50 度に変化させ中性子計数の変化を比較した。信号処理の機能はどちらも同等である。ISIS アナログ信号処理系では+0.017 %/deg の温度係数であったのに対しデジタル処理系では約 1/6 の+0.003 %/deg であった。検出器ヘッド自身（シンチレータと PMT 部分）の温度係数がおおよそ+0.02 %/deg であるから、デジタル信号処理系の部分の温度依存性はほぼ無視できる程度にまで改善することができた。

FPGA を用いたデジタル信号処理装置のもう 1 つの利点として検出器性能の最適パラメータサーベイが容易に実行できることが挙げられる。図 18 には 27 ch 検出器のガンマ線感度測定例を示す。たとえば 1~20 フォトン信号に相当する広い閾値範囲を試験したい場合、アナログ信号処理回路ではハードウェアの変更が必要となり容易ではない。一方、FPGA デジタル信号処理システムではハードウェアはそのままソフトウェア(プログラム)の変更のみで容易に評価できる。もうひとつの例として 27 ch 検出器において 1 エLEMENT から出力された 2 つのファイバ群におけるコインシデンス時間の最適化例を示す。このコインシデンス時間の最適化は検出器の検出効率と計数率特性のトレードオフに関わる極めて重要なパラメータである。図 19 には FPGA プログラム変更のみで測定した結果である。これより最適コインシデンス時間は約 1 μ s であることが容易に求められた。さらに、これらの最適化実験は FPGA のロジックセルに余裕があれば一回の測定でも可能である。すなわち同一中性子イベントに対して複数の信号処理を平行に実行させればよい。

このような全デジタル化信号処理の特徴はビームラインに装填される検出器にも活用することができる。実験者は異なる信号処理手法を施された実験データを一度の測定で、実時間で得ることができる。このため実験結果を異なった角度からより深く考察すること実験中にできるようになる。こうした技術は中性子ビームの有効利用にも資する。

このようにシンチレータ検出器のフォトンカウンティングシステムに全デジタル化したフォトンカウンティング信号処理装置を導入することで多くのメリットが得られる。今後は信号処理装置のさらなる検証を進めるとともに新たに開発したシンチレータの発光特性に適応したデジタル信号処理法やより高計数率に対応する信号処理法の開発、そして高クロック化等のハードウェアの改良も進めていく。

6. 結論および今後の課題

ENGIN-X 型一次元中性子シンチレータ検出器の性能向上のため新規シンチレータ、光リフレクタ、および全デジタル化した信号処理装置の技術開発を行った。新たに開発した $\text{ZnS:Ag,Cl}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ や AST(2:1)シンチレータを搭載することによりこれまでと同等のガンマ線感度、マルチカウント率でありながら検出効率を約 2 割 (中性子波長 1 Å) 改善できることを実証した。また、アルミ薄板の表面エッチング加工による光リフレクタを開発した。これにより従来の光リフレクタで懸念となっていた長期使用における塗料剥離の問題を解決した。さらに、全デジタル化した光子カウンティング信号処理装置を開発し従来のアナログ信号処理回路と比較して中性子計数の温度安定性の改善を実証した。今後は開発した技術の最適化をさらに進め 1 MW パルス中性子源にも対応できる検出器へと開発を進める。

謝辞

本試験は英国ラザフォードアップルトン研究所の検出器グループの多大な協力を受け行われた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) J-PARC: available from <<http://j-parc.jp/MatLife/ja/index.html>>
- 2) ISIS: available from <<http://www.isis.rl.ac.uk/>>
- 3) ISIS ENGIN-X: available from <<http://www.isis.rl.ac.uk/Engineering/>>
- 4) E. M. Schooneveld, et al: "A new neutron sensitive scintillation detector for ENGIN-X", ICANS-XVI, 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, p.455 (2003)
- 5) T. Nakamura, et al: "Performance test of the Japanese ENGIN-X type linear scintillation neutron detector", JAEA-Research 2007-014 (2007).



Fig. 1: An image view of Japanese engineering diffractometer, "Takumi", in the J-PARC/MLF.

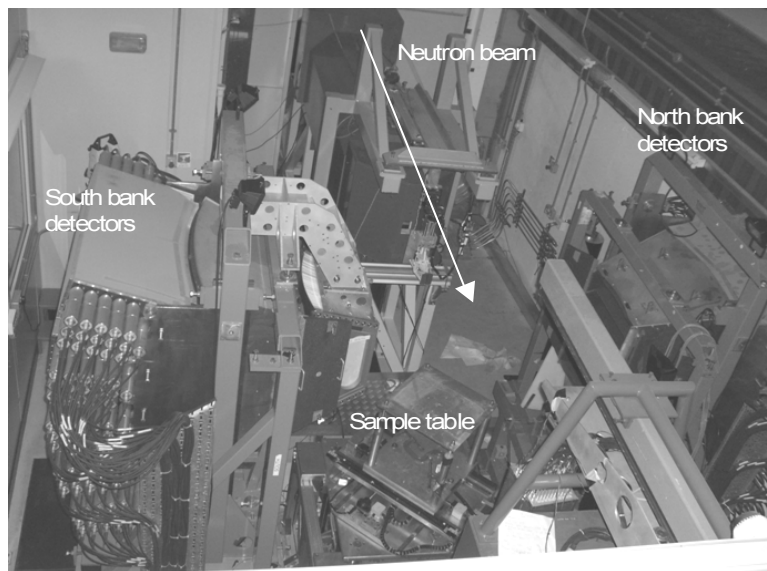


Photo. 1: The ENGIN-X diffractometer at ISIS

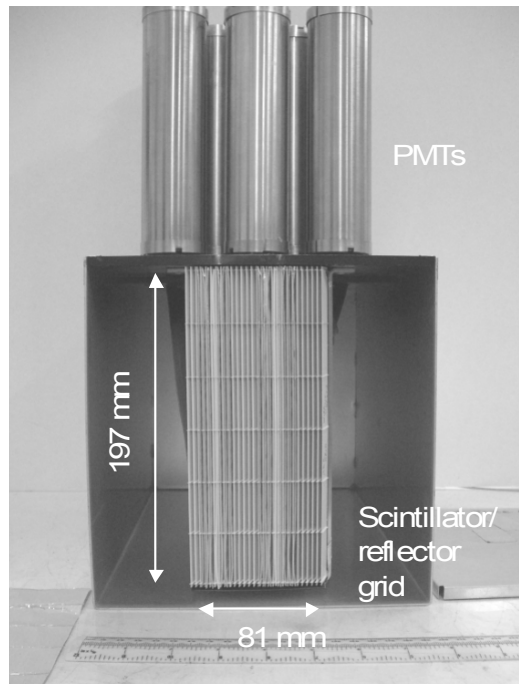


Photo. 2: A 27-ch fibre-coded detector. An top aluminum foil and detector face cover were removed for visibility.

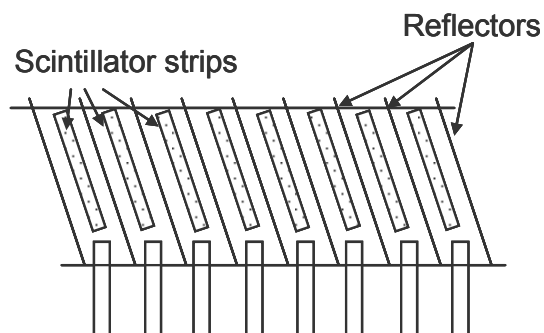
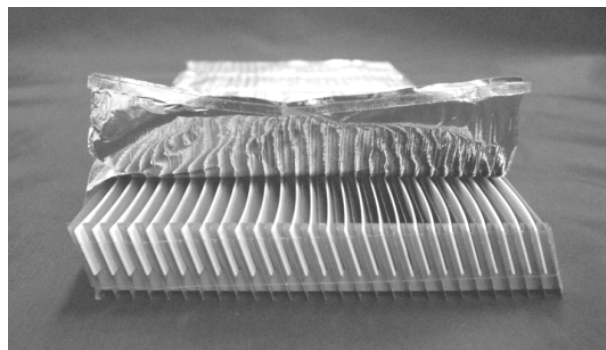


Fig. 2: A schematic view of a scintillator / light reflector grid.

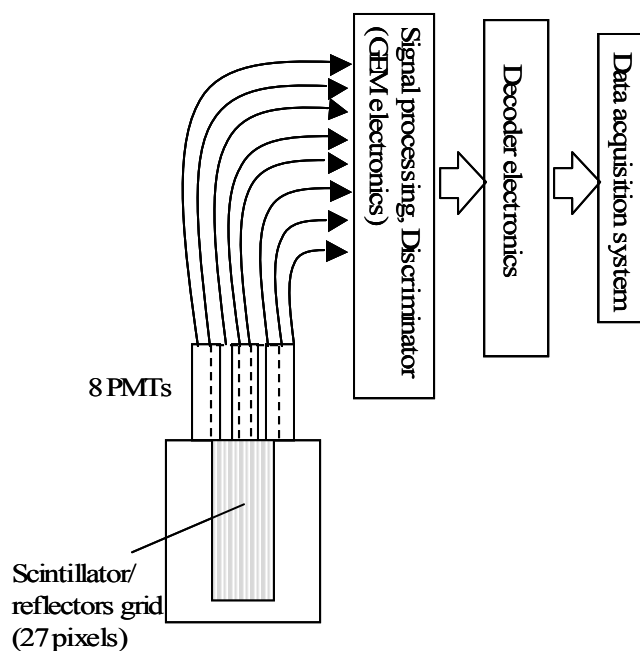


Fig. 3: A schematic view of a 27-ch linear scintillation detector system.

Table. 1: Specifications of scintillator samples

No.	Manu- facturer	Sample name	Scintillation material	Converter material	ZnS: ⁶ LiF (by weight)	Thickness (mm)	ZnS particle size (um)	Notes
(1)	AST ^{*1}	AST(4:1)	ZnS:Ag,Cl	⁶ LiF	4 :1	0.4	4~5 (-)	flexible, thermoplastic
(2)	AST	AST(2:1)	ZnS:Ag,Cl	⁶ LiF	2 :1	0.4	4~5 (-)	flexible, thermoplastic
(3)	JAEA	Ag,Al 1055	ZnS:Ag,Al	⁶ LiF	2.7 :1	0.45	8~9 (1055) ^{*4}	non-annealed after sinter
(4)	JAEA	Ag,Cl 1109	ZnS:Ag,Cl	⁶ LiF	2.7 :1	0.7	4~5 (1109)	non-annealed after sinter
(5)	JAEA	Ag,Cl 2112	ZnS:Ag,Cl	⁶ LiF	2.7 :1	0.4	8~9 (2112)	non-annealed after sinter
(6)	JAEA	ZnS/B ₂ O ₃	ZnS:Ag,Cl	¹⁰ B ₂ O ₃	1.5 :1 ^{*2}	0.3/0.4 ^{*3}	4~5 (1109)	scintillator layer formed on a glass substrate.

*1 : Applied Scintillation Technologies LTD.

*2 : ZnS : H₃¹⁰BO₃

*3 : 0.3-mm thick scintillator formed on a 0.4-mm glass substrate.

*4 : Numbers in parenthesis denote powder number from Nichia Co LTD.

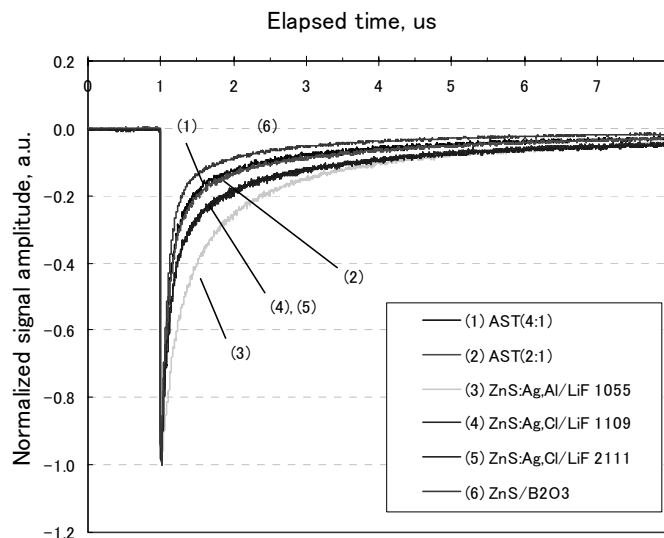


Fig. 4: Normalized signal shapes measured with various scintillators with a bialkali PMT. The scintillator strips were installed in a light reflector grid. The averaged signals were displayed.

Table. 2: Scintillation light properties

No.	Manu- facturer	Scintillation material	Converter material	ZnS: ⁶ LiF (by weight)	Time 100-20% (us)	Time 100-10%(us)	Relative signal height (relative peak position)
(1)	AST ^{*1}	ZnS:Ag,Cl	⁶ LiF	4 : 1	0.46	1.44	1.0
(2)	AST	ZnS:Ag,Cl	⁶ LiF	2 : 1	0.50	1.64	0.88
(3)	JAEA	ZnS:Ag,Al	⁶ LiF	2.7 : 1	1.4	3.0	1.69
(4)	JAEA	ZnS:Ag,Cl	⁶ LiF	2.7 : 1	0.95	2.64	(no clear peak)
(5)	JAEA	ZnS:Ag,Cl	⁶ LiF	2.7 : 1	0.86	2.54	0.85
(6)	JAEA	ZnS:Ag,Cl	¹⁰ B ₂ O ₃	1.5 : 1 ^{*2}	0.29	0.82	1.0

*1 : Applied Scintillation Technologies LTD.

*2 : ZnS : H₃¹⁰BO₃

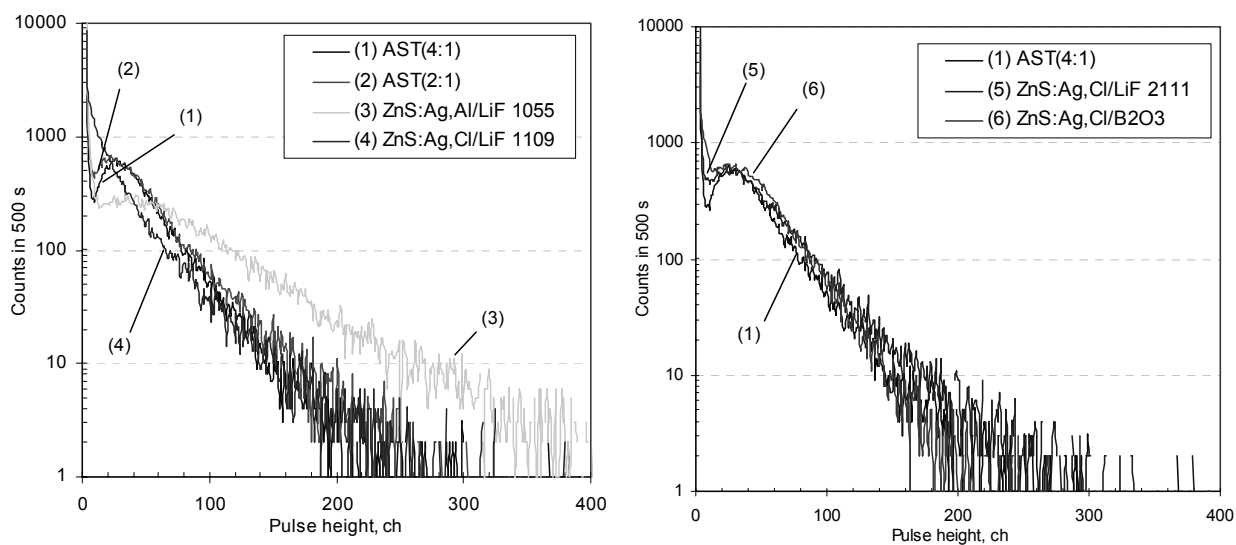


Fig. 5: Pulse height distributions measured with various scintillators with a bialkali PMT.

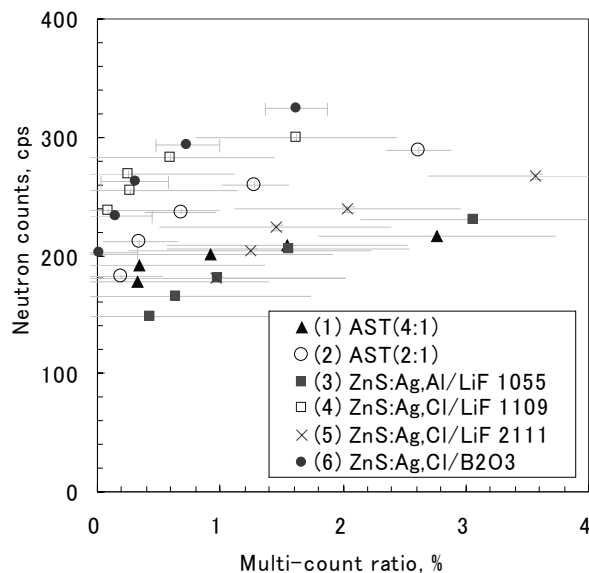


Fig. 6: Neutron counts plotted as a function of a multi-count ratio.

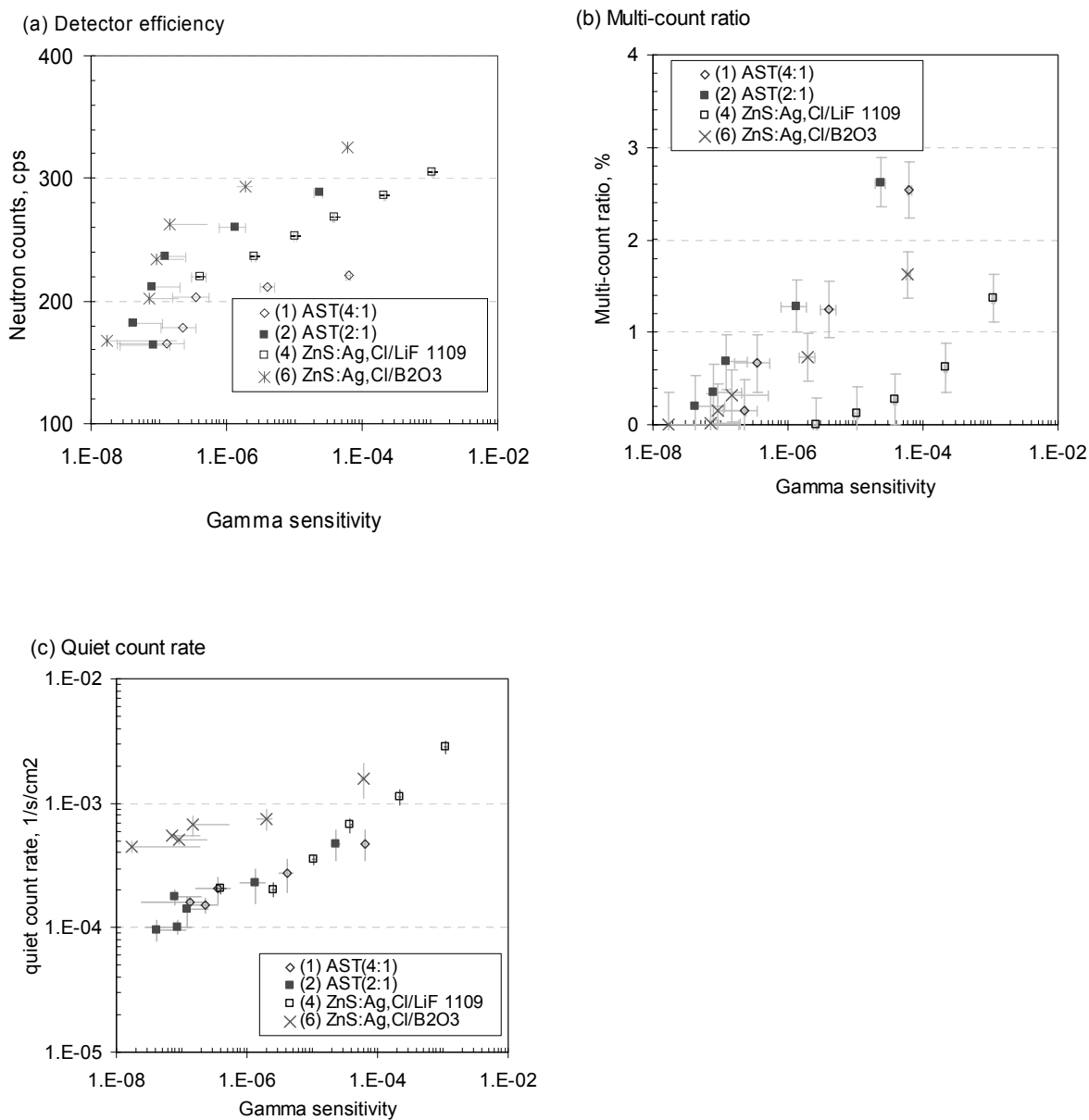


Fig. 7: Detector performances plotted as a function of a gamma sensitivity. (a) detector efficiency (neutron counts), (b) multi-count ratio and (c) quiet count rate.

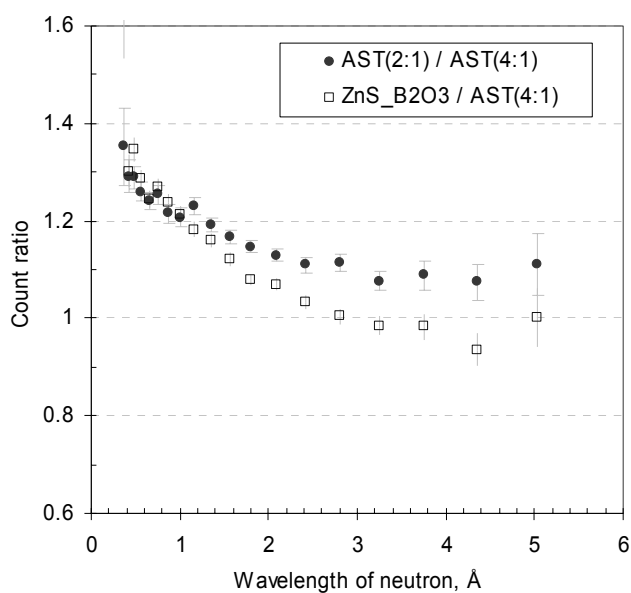


Fig. 8: Count ratios between AST(2:1) and AST(4:1) and between ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃ and AST(4:1) plotted as a function of a neutron wavelength.

Table. 3: Scintillator detector performances. The threshold voltages for GEM electronics were set at -220 mV for AST(4:1) and -180 mV both for AST(2:1) and ZnS/¹⁰B₂O₃ scintillator.

Scintillator	Detector efficiency % for 1Å	Gamma sensitivity x 10 ⁻⁷	Multi-count ratio %	Quiet count rate x 10 ⁻⁴ 1/s/cm ²
(1) AST(4:1)	46±2	2±1	0.6±0.3	2.1±0.3
(2) AST(2:1)	56±1	0.9±2	0.5±0.3	2.1±0.5
(3) ZnS/B ₂ O ₃	57±1	1.5±4	0.3±0.3	6.9±1.1

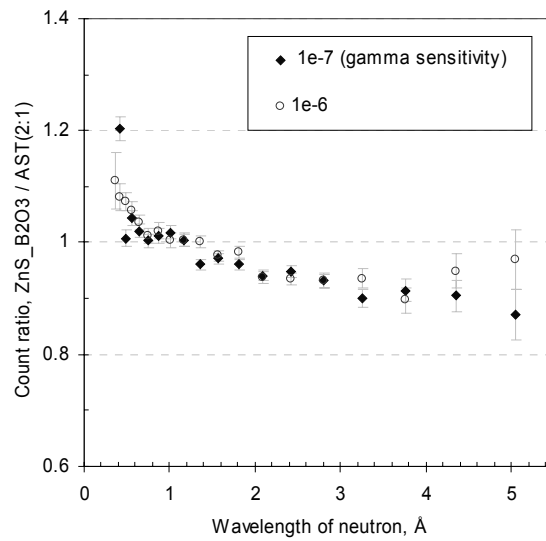


Fig. 9: Count ratios between ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃ and AST(2:1) plotted as a function of a neutron wavelength.

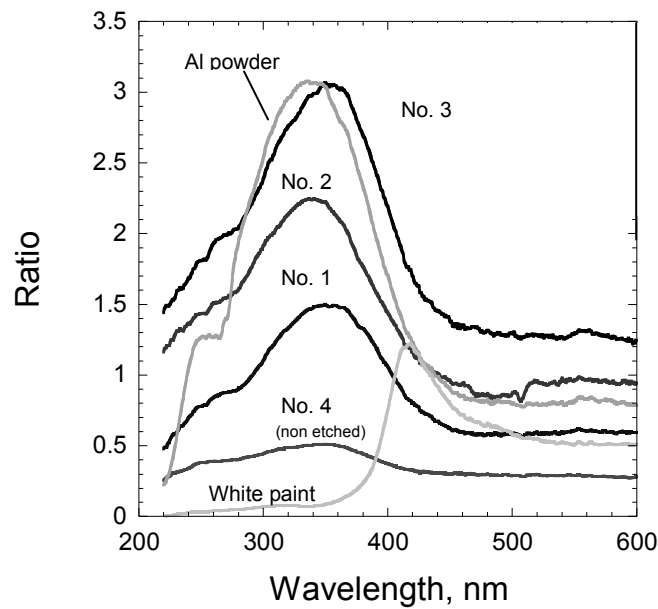


Fig. 10: Reflectivity of light reflectors. An ISIS standard reflector is denoted as white paint. An etching rate is increased from reflector No. 1 to 3 in an order.

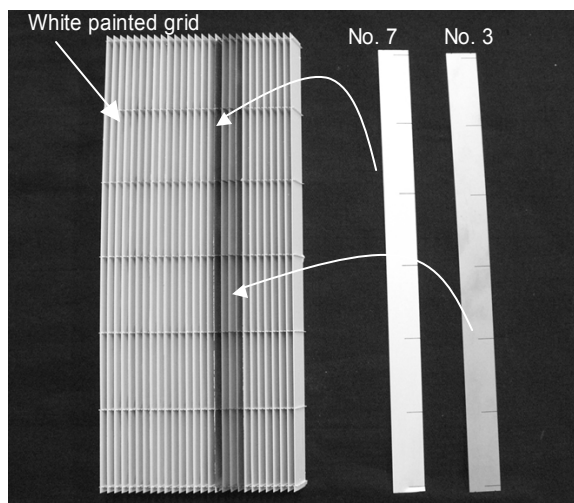


Photo 3: A white painted reflector grid (ISIS standard, left) and etched aluminum grid reflectors (No.3 and No.7, right). The reflectors for channel 17 and 18 were replaced with No.3 and No.7 reflectors for the test.

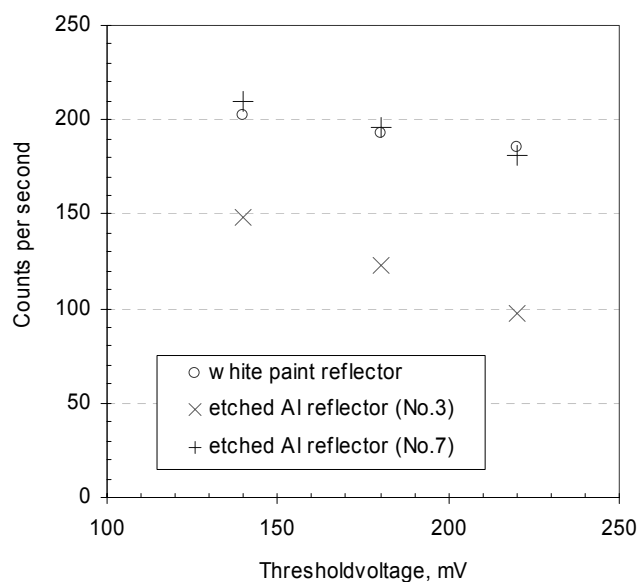


Fig. 11: Neutron counts measured with surface etched aluminum reflectors. An AST(4:1) scintillator was installed in the grid.

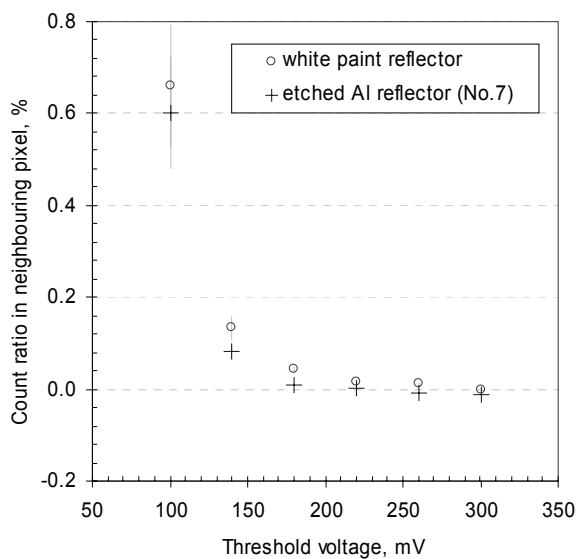


Fig. 12: A count ratio in a neighboring pixel through light leakage.

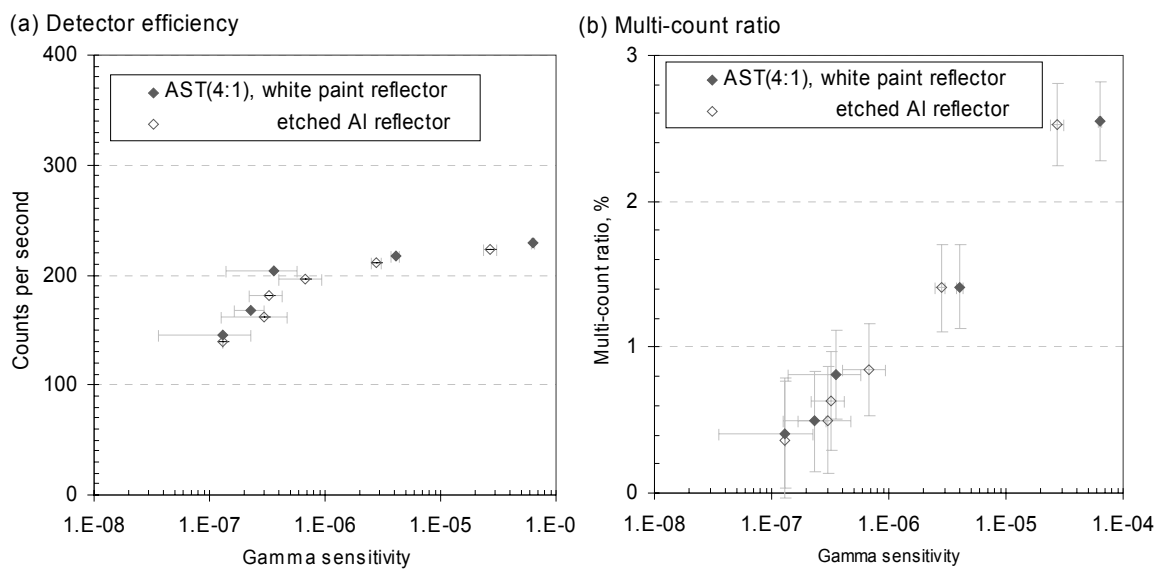


Fig. 13: Detector efficiency (neutron counts) and a multi-count ratio of AST(4:1) scintillator as a function of a gamma sensitivity.

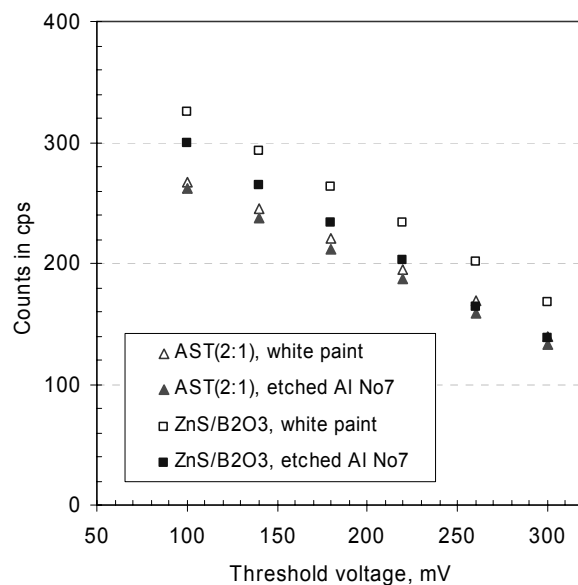


Fig. 14: Neutron counts measured with white paint and etched surface reflectors.

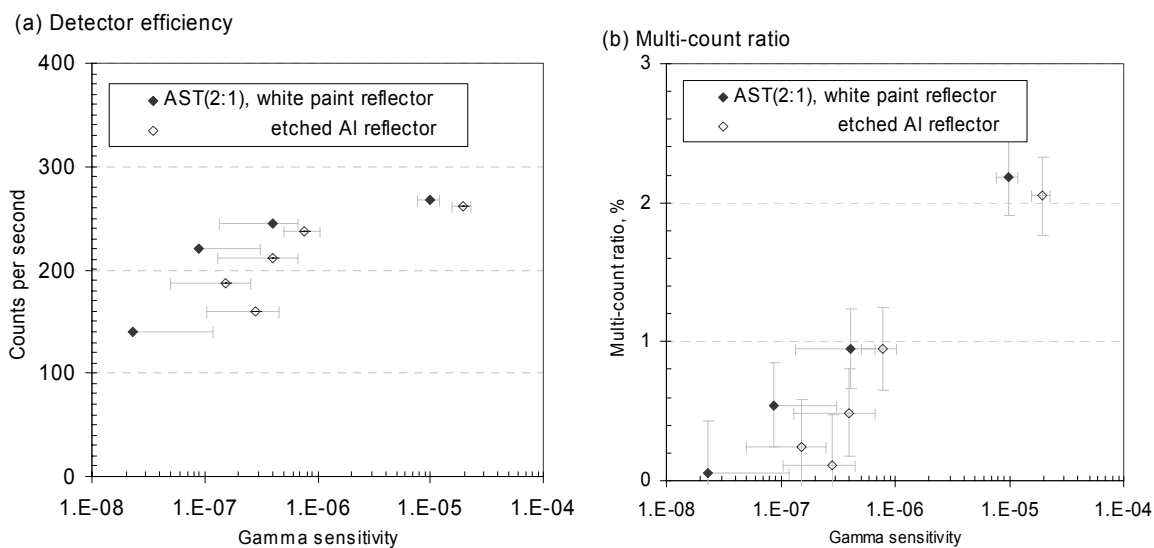


Fig. 15: Neutron counts and a multi-count ratio of AST(2:1) scintillator as a function of a gamma sensitivity.

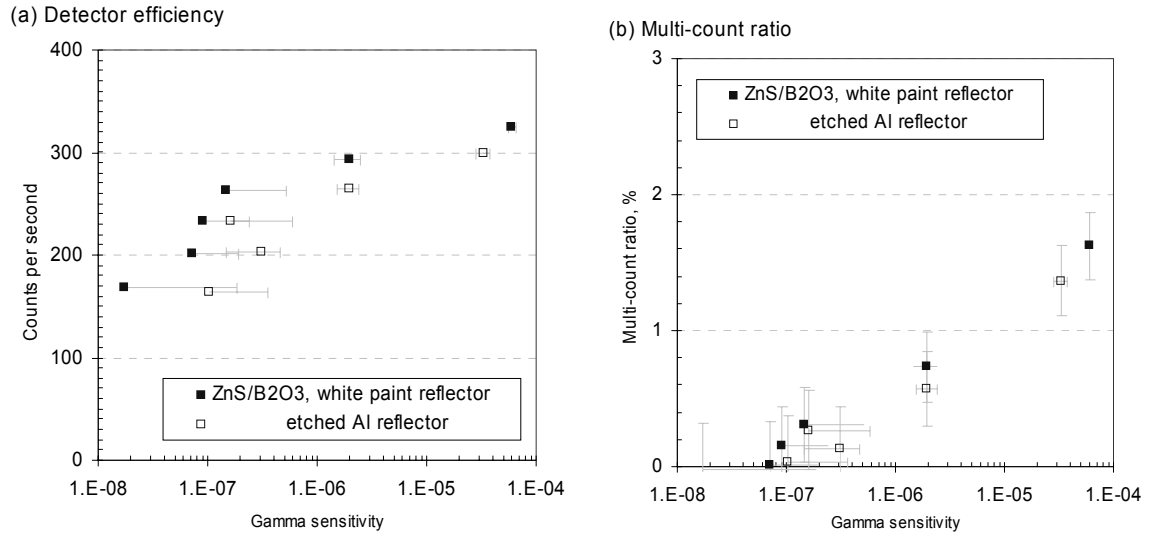
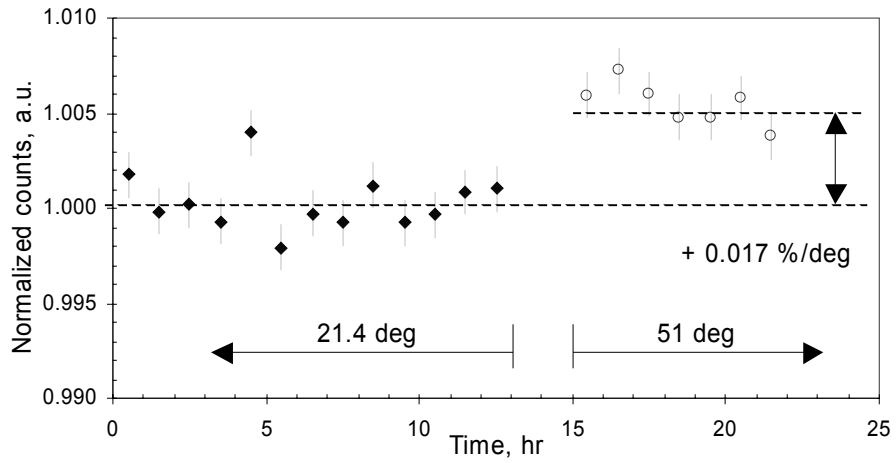


Fig. 16: Neutron counts and a multi-count ratio of ZnS:Ag,Cl/¹⁰B₂O₃ scintillator as a function of a gamma sensitivity.



Photo 4: A digital signal processing module developed by JAEA.

(a) Analog signal processing (Analogue electronics)



(b) Digital signal processing (FPGA electronics)

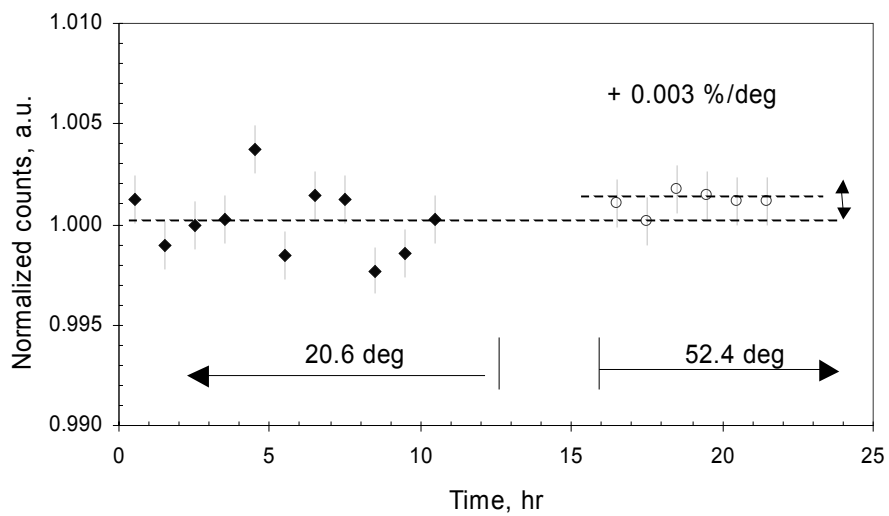


Fig. 17: Temperature stability of neutron counts measured with an analogue (a) and a digital (b) photon counting system.

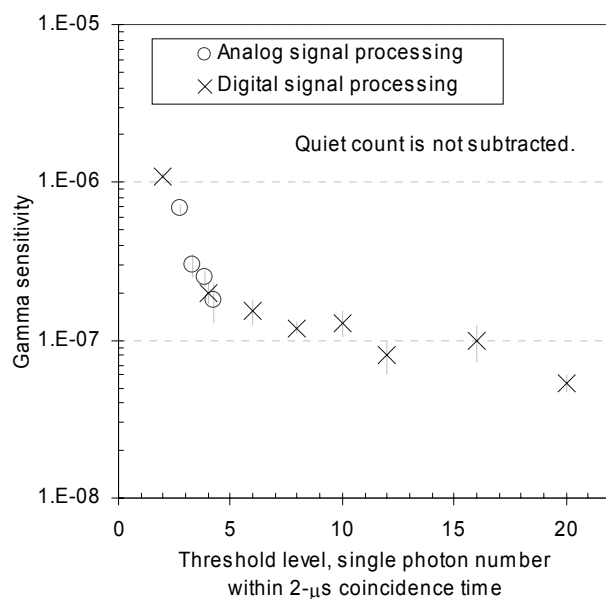


Fig. 18: A gamma sensitivity measured with an analogue and a digital photon counting system.

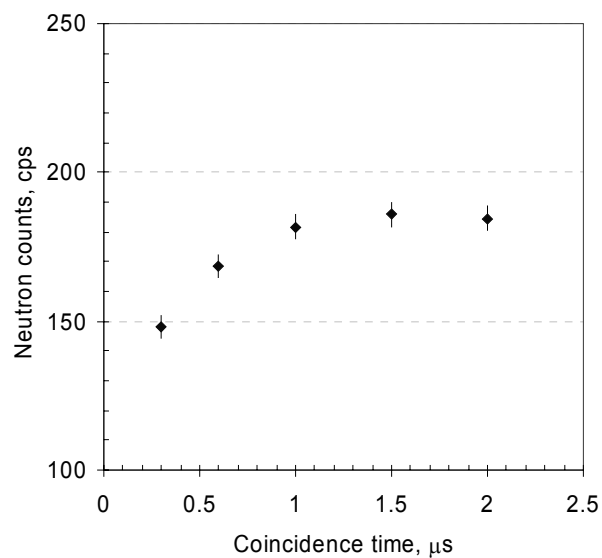


Fig. 19: Neutron counts measured with a digital photon counting system as a function of a coincidence time.

