



JP0750172

ENGIN-X型1次元シンチレータ中性子検出器の 製作と性能試験

Performance Test of the Japanese ENGIN-X Type Linear Scintillation
Neutron Detector

中村 龍也 坂佐井 馨 片桐 政樹 美留町 厚
細谷 孝明 曽山 和彦 佐藤 節夫* Erik Shooneveld*
Nigel Rhodes*

Tatsuya NAKAMURA, Kaoru SAKASAI, Masaki KATAGIRI, Atsushi BIRUMACHI
Takaaki HOSOYA, Kazuhiko SOYAMA, Setsuo SATO*, Erik Shooneveld*
and Nigel Rhodes*

量子ビーム応用研究部門
中性子制御・検出系開発研究グループ
Neutron Detectors and Optical Devices R&D Group
Quantum Beam Science Directorate

March 2007

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器の製作と性能試験

日本原子力研究開発機構
量子ビーム応用研究部門 中性子産業利用技術研究ユニット

中村 龍也, 坂佐井 馨, 片桐 政樹, 美留町 厚⁺, 細谷 孝明^{*}
曾山 和彦, 佐藤 節夫^{*1}, Erik Shooneveld^{*2} and Nigel Rhodes^{*2}

(2007年1月24日受理)

我々は ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器を試作しその検出性能試験・評価を行った。試作した検出器は英国ラザフォードアップルトン研究所にて開発されたもので ISIS パルス中性子源 ENGIN-X 装置にて稼動しているものと同型である。試作した検出器は ENGIN-X 装置の 1 検出器モジュールであり、幅 3 mm 高さ 196 mm の中性子有感ピクセルが 240 チャンネル配置された構造を有する。検出器性能試験を行った結果、試作検出器が位置分解能 3 mm、中性子検出効率 64% (中性子波長 1.8 Å)、計数ユニフォーミティー 6 ~7%、⁶⁰Co ガンマ線感度 $\sim 5 \times 10^{-7}$ を有することを確認し、大強度陽子加速器計画における残留応力解析や粉末回折実験装置に必要な 1 次元シンチレータ中性子検出器の国産化の見通しを得た。

原子力科学研究所（駐在）：〒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

※ 特定課題推進員

*1 高エネルギー加速器研究機構

*2 Rutherford Appleton Laboratory

Performance Test of the Japanese ENGIN-X Type Linear Scintillation Neutron Detector

Tatsuya NAKAMURA, Kaoru SAKASAI, Masaki KATAGIRI, Atsushi BIRUMACHI[†],
Takaaki. HOSOYA[※], Kazuhiko SOYAMA, Setsuo SATO^{*1}, Erik Shooneveld^{*2} and Nigel Rhodes^{*2}

Neutron Technology R&D Center
Quantum Beam Science Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 24, 2007)

The ENGIN-X type linear scintillation neutron detector was manufactured in Japan and its detector performances were evaluated. The ENGIN-X type linear scintillation neutron detector was originally developed by the detector group in Rutherford Appleton Laboratory and the Japanese prototype detector was identical to one of the detector modules installed in the ENGIN-X diffractometer operated at ISIS pulsed neutron source. The prototype detector can install 240 elements of neutron-sensitive scintillator, where each element has 3 mm in width and 196 mm in height. The prototype detector exhibited a spatial resolution of 3 mm, detection efficiency of 64% for neutrons with a wave-length of 1.8 Å, count uniformity of 6~7%, ⁶⁰Co gamma sensitivity of $\sim 5 \times 10^{-7}$. Technological transfer to Japanese manufacturer was done successfully and mass production of these detectors for J-PARC project is feasible.

Keywords: Neutron Detector, Scintillation Detector, Linear Detector, ENGIN-X, Spatial Resolution, Detection Efficiency, Gamma Sensitivity

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

※ Special Topic Engineer

*1 High Energy Accelerator Research Organization

*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	1
2.1 ISIS オリジナル検出器システム	1
2.2 原子力機構製検出器システム	2
3. 検出器構成各部の性能試験	3
3.1 PMT、PMT 基板回路及び GEM エレクトロニクス	3
3.2 デコーダおよび DAE システム	3
4. 検出器システム性能試験	4
4.1 位置分解能	4
4.2 ガンマ線感度	4
4.3 中性子検出効率	5
5. 結論および今後の課題	5
謝辞	5
参考文献	5

Contents

1.	Introduction	1
2.	ENGIN-X type linear scintillation neutron detector	1
2.1	ISIS original detector system	1
2.2	JAEA detector system	2
3.	Test of the detector components	3
3.1	PMT, PMT base circuit and GEM electronics	3
3.2	Decoder and DAE system	3
4.	Test of the detector performances	4
4.1	Spatial resolution	4
4.2	Gamma-ray sensitivity	4
4.3	Detector efficiency	5
5.	Conclusion	5
	Acknowledgements	5
	References	5

1. 緒言

現在、大強度陽子加速器(J-PARC, Japan Proton Accelerator Research Complex)が日本原子力研究開発機構(原子力機構)東海研究サイト内に建設されている。J-PARC のうち物質・生命科学実験施設は世界トップクラスのピーク中性子強度と 23 本のビームラインを有する実験施設となり、各種材料の物性物理研究や産業応用利用が期待されている。現時点での建設スケジュールによると 2007 年度には中性子散乱実験装置の建設が開始し 2008 年初頭にはファースト中性子ビーム、続いて一般ユーザへのビーム供給が予定されている。

Day-1 実験装置のうちのひとつ、新材料解析装置(Figure 1)は原子力機構が主体となって建設する中性子回折実験装置である。本実験装置は試料中の残留応力を 3 次元的に測定することが可能で学術研究のみならず産業応用利用も念頭に置かれている。

本装置の主要を構成する中性子検出器には、高い検出効率、低いガンマ線感度、数 mm 程度の 1 次元位置分解能といった基本性能が要求される。また、自動車のエンジン、航空機の羽部といった大型試料の測定も可能とするため検出器が大きな有感面積を有することも重要な条件のひとつである。これらを考慮した結果、新材料解析装置に据え付けられる中性子検出器として英国ラザフォードアップルトン研究所(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)にて開発され実機使用実績のある 1 次元シンチレータ中性子検出器(ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器と呼称)が選定された。それに伴い、原子力機構中性子制御・検出系開発研究グループは RAL との国際研究協力協定に基づき技術協力を受け ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器の国産化を進めている。

本報は、国産第一次試作器の性能試験結果を報告するものである。

2. ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器

本検出器は RAL の ISIS パルス中性子源に設置されている残留応力測定装置である ENGIN-X¹⁾の検出 1 モジュールである。Photo 1²⁾に ENGIN-X 残留応力測定装置に設置された検出器の写真を、Table 1 にその性能を示す³⁾。中性子有感厚さが十分小さく Time of flight (ToF) の誤差となる時間パララックスが十分小さいこと、位置分解能 3 mm で長手方向に隙間なく大面積を覆えること、コンパクトなモジュール設計がなされ多数の検出器配置を可能とすること等、パルス中性子を用いた残留応力測定装置用検出器として最適化設計がなされている。

2.1 ISIS オリジナル検出器システム

ISIS オリジナル検出器を例に本検出器システムの動作と特徴を概説する。

本検出器システムは大きく分けて検出器ヘッド部、光電子増倍管(Photomultiplier, PMT)、GEM エレクトロニクス(波形整形および波高ディスクリミネータ)、デコーダ、データ収集エレクトロニクス(Data acquisition electronics, DAE)から構成される(Figure 2)。検出器ヘッド部には 240 チャンネルの光絶縁されたピクセルグリッドがあり、それぞれに中性子有感シンチレータが収められている。検出器に入射した中性子はシンチレータに含有された⁶Li 中性子コンバータにて捕獲吸収されシンチレーション光を生じる。発生したシンチレーション光は光ファイバにより二分され各ピクセル毎に 2 つの PMT と接続するようコーディングがなされる(2Cn コーディング)。PMT に到達したシンチレーション光は PMT にて電気信号に変換後、GEM エレクトロニクスに送出される。GEM エレクトロニクスではフォトンカウンティングが行われ発光フォトン数の違いによるバックグラウンド(ガンマ線など)と

中性子に起因する発光との弁別が行われる。GEM エレクトロニクスにて中性子による発光信号と判別された場合にはトリガ信号パルスがデコーダへ送出される。デコーダでは発光を検出した 2 つの PMT の組み合わせから中性子入射ピクセル位置が割り出される。そのピクセル位置信号は DAE に送出されその時間タイミングと中性子検出位置から ToF スペクトルが構成される。

本検出器システムの大きな特徴として、1) ベネチアン配置されたシンチレータによる高い検出効率の実現、2) 2Cn コーディングによる計測チャンネル数の低減、3) フォトンカウンティング計測による中性子計数安定性の向上、が挙げられる。1) の高い検出効率はシンチレータ配置が鍵で厚さ約 0.4 mm の ZnS⁶LiF シンチレータを中性子入射方向に対して斜めに配置する(ベネチアン配置)ことで光収集効率を犠牲にすることなく実効シンチレータ厚さを増大し 50 % (中性子波長 1 Å) の検出効率を実現している²⁾。また、2) の光ファイバを用いた 2Cn コーディングは 16 本の計測チャンネルで 120 ch の位置ピクセル読み出しを可能とし計測システムのメンテナンス性を高め、さらに低コスト性にも貢献している(ENGIN-X モジュールでは検出エリアを 2 分し各 120 ch である)。各ピクセルの中性子計数率はそれほど高くないが多数のピクセルを読み出す必要のあるこの種の中性子回折(残留応力)測定装置に適した信号読み出し方法である。3) のフォトンカウンティング計測では、シンチレータおよび PMT の温度ドリフトに対する中性子計数変化を低減する。本検出システムでは PMT ゲインをシングルフォトンに感度を有するよう設定しバックグランド(ガンマ線など)と中性子の弁別は計測したフォトン数の違いにより行う。外部温度変化などの影響によりシンチレータあるいは PMT ゲインが変動すると検出したシングルフォトン信号の波高及び時間幅が大きく変化するため単純な信号積分による弁別法では中性子計数も温度変動してしまう。一方、フォトンカウンティング法ではフォトン数が同一であれば信号形状とは無関係に中性子計数は同一となり検出器の計数は安定なものとなる。さらに PMT ゲインを詳細に設定する必要がないため(シングルフォトンを検出する以上の PMT ゲインがあればよい) 多チャンネルに及ぶ検出器の調整、メンテナンス性を容易なものとしている。

2.2 原子力機構製検出器システム

Photo 1 に原子力機構が試作した ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器の写真を示す。本試作検出器は Photo 1 に示した ENGIN-X 残留応力測定装置に設置されている検出器と同型 1 モジュールである。検出器ヘッド部、GEM エレクトロニクス、デコーダ及び DAE は国産し、中性子有感シンチレータ及び PMT は ISIS にて使用しているものと同じものを購入して組み上げた。

本検出器のサイズは幅約 1000 mm (PMT 部を含めると 1600 mm)、高さ 200 mm、奥行き 500 mm である(中性子有感面積は幅 744 mm、高さ 196 mm)。本検出器ヘッド部には 240 ch のシンチレータピクセルが配置可能である。本試験においては半分の 120 ch にシンチレータをインストールし 16 本の PMT を使用して信号を読み出した。シンチレータは英国 Applied Scintillation Technology 社製 ZnS⁶LiF (厚さ 0.4 mm)を、また、PMT には英国 Electron Tube LTD 社製の直径 38 mm の 9102SB を使用した。GEM エレクトロニクスは NIM ビン 2 幅のモジュールで 16 ch を処理する。デコーダおよび DAE 部分には各 VME1 幅の信号処理ボードと VME-USB 変換ボードを使用した⁴⁾。デコーダは既存ハードウェアの FPGA プログラムを 2Cn デコードテーブルに書き換えることで対応した。データ収集およびコントロールは VME-USB 変換ボードを介し laptop PC 上の LabVIEW プログラムにより行った。

3. 検出器構成各部の性能試験

試作検出器を構成する各部分要素（検出ヘッド部を除く）の性能を ISIS オリジナルのものと比較することで評価した。本評価試験においては ISIS 製小型 1 次元シンチレーション検出器（27 ch 検出器と呼称）を検出ヘッドとし、PMT、PMT 基板回路、GEM エレクトロニクス、およびデコーダ/DAE システムのそれぞれを原子力機構製のものに置き換えて比較評価した。本 27ch 検出器は ENGIN-X 用検出器モジュールのサイズを一回り小さくしたもので、ISIS で製作されたものであり、8 本の PMT で 27 ピクセルを読み出す。本試験は RAL において行い、Am-Be 中性子線源（10 Ci、試験位置における中性子束～60 neutrons/s/cm²）、ISIS パルス中性子源（ROTAX ポート、モデレータ-試料間距離 15 m、試料-検出器間距離 50 cm、ピーク中性子束～ 1×10^6 neutrons/s/cm²）を使用した。

3.1 PMT、PMT 基板回路及び GEM エレクトロニクス

ISIS 型 1 次元シンチレータ中性子検出器はフォトンカウンティング計測を行うため PMT からのアナログ信号出力を PMT 基板回路にて 0 ~ -250 mV の電圧出力をもつ矩形信号に変換する。正確なフォトンカウンティングを行うためには本 PMT 基板回路が十分高速に波形整形動作することが重要である。PMT からのシングルフォトン信号は ns オーダーの立ち上がり時間をもつ幅の狭い高速信号パルスであるため整形回路には広周波数帯域かつ安定動作が求められる。ISIS オリジナルの PMT 基板回路では RAL において独自開発された高速コンパレータ ASIC (RAL-10) が使用されているが原子力機構製のものでは市販で入手可能な Analogue Device 社の高速コンパレータ AD96687 を使用し回路を構成した。Figure 3 に原子力機構製および ISIS オリジナルの PMT 基板による典型的なシングルフォトン出力信号波形を示す。原子力機構製 PMT 基板回路は高速、かつ安定に動作し、数 ns の立ち上がり時間で ISIS オリジナルのものとほぼ同等の性能を有していることを確認した。

続いて PMT、PMT 基板と GEM エレクトロニクスを組み合わせた計測系において原子力機構製と ISIS オリジナルとの比較を行った。本測定においては 27 ch 検出器を Am-Be 中性子源体系内に固定し PMT、PMT 基板と GEM エレクトロニクスをさしかえ両者での中性子計数を比較した。Figure 4 は GEM エレクトロニクスでの閾値を -220 mV に固定し PMT に印加する高電圧を変化して中性子カウント数を測定したものである。ISIS 分 PMT は～800 V、原子力機構のものは～1000 V 以上を印加することで計数プラトーを有することを確認した。このプラトー開始電圧の違いは PMT ゲインの個体差と PMT 基板回路のコンパレータ作動特性に依存していると考えられるが、いずれの場合においてもシングルフォトン計測が可能となる電圧以上を PMT に与えることで安定な中性子計数が確保されることが分かる。Figure 5 には中性子計数の GEM エレクトロニクス閾値特性を示す（典型的な 1ch のものを表示）。横軸は閾値電圧で示しているがこれはフォトン数に対応する。測定した中性子計数の閾値特性は両者ともほぼ同等で原子力機構製の PMT、PMT 基板及び GEM エレクトロニクスが正常動作していることを確認した。

3.2 デコーダおよび DAE システム

本試験にて使用した原子力機構のデコーダ/DAE と ISIS オリジナルとの比較を ISIS パルス中性子源の ROTAX ポートにて行った。この場合、検出器ヘッド及び PMT (PMT 基板回路を含む) は ISIS オリジナルを使用し、GEM エレクトロニクス及びデコーダ/DAE は原子力機構製のものを使用した。実験では、27 ch 検出器はサンプル位置から 50 cm、90 度散乱位置に設置した。試料は直径 10 mm のプラスチック棒とし含有水素による非干渉性散乱中

性子を測定した。Figure 6 は全 ToF における計数和を各ピクセル毎に示したものである。原研開発機構の GEM エレクトロニクス、デコーダ/DAE と ISIS オリジナルの GEM エレクトロニクス、デコーダ/DAE は同様の計数値、散乱中性子分布を示し原子力機構製の正常動作を確認した。

また、当デコーダ/DAE の ToF 測定性能を評価するため試料を Ni ロッドとし回折パターンの測定も行った。この場合は、検出器ヘッドのみを ISIS オリジナルとし、PMT 以降のシステムを原子力機構のものと ISIS オリジナルシステムを比較・実験した。Figure 7 に一例として 1 ピクセル（幅 3mm、散乱角 20° は約 89.9~90.2 deg）の ToF スペクトルを示す。スペクトルには Ni による複数の回折ピークが観測されたが、いずれのピークも両システムで同じ ToF チャンネルに計数され、原子力機構の PMT 以降のシステムの ToF 性能の正常動作を確認できた。

以上より検出器ヘッドを除く原子力機構製 1 次元シンチレータ中性子検出器の計測系（PMT、PMT 基板、GEM エレクトロニクス、デコーダ及び DAE）は ISIS オリジナルのものとほぼ同等であることを確認した。

4. 検出器システム性能試験

原子力機構製 ENGIN-X 型 1 次元シンチレータ中性子検出器システムを国産検出ヘッド部と計測系から組み上げその検出器性能評価試験を行った。実験は原研開発機構中性子標準施設棟内に設置された ^{252}Cf と原研 3 号炉(JRR-3) MUSASI ポートにて行った。 ^{252}Cf 線源は黒鉛減速体系中心部に設置され黒鉛体系表面から 125 cm 位置における熱中性子束は約 39 neutrons/s/cm² である。また、Figure 8 に MUSASI ポートにおける中性子ビームのエネルギースペクトルを示す。MUSASI ポートでは、Pyrolytic Graphite 結晶をモノクロメータとして用いているため、幾つかのエネルギーピークを有するビームとなっている。また、ガンマ線感度測定実験においては ^{60}Co 線源(100 μCi)を使用した。PMT 印加電圧～1200 V、GEM エレクトロニクス閾値は-220 mV として実験を行った。

4.1 位置分解能⁵⁾

本検出器では各シンチレータピクセルは光学絶縁されており原理的にはピクセル幅が位置分解能となる。Figure 9 は検出器の有感 1 ピクセルに 2 × 1 mm にコリメートした中性子ビームを照射したもので(JRR-3 MUSASI ポートにて測定) 1 ピクセルが強く計数していることが分かる。これより、本検出器のコーディングが正しく行われていることを確認するとともに、ピクセル間の顕著な光クロストークがなく本検出器が 3 mm の位置分解能を有することを確認した。

4.2 ガンマ線感度

本検出器のガンマ線感度測定を ^{60}Co 線源を使用して行った。 ^{60}Co は 1 崩壊あたり 1.17 MeV と 1.33 MeV のガンマ線を発生する。検出器表面から 60 cm 位置に ^{60}Co 線源を設置しガンマ線による計数を計測した(なお、計測結果には宇宙線などによるバックグラウンドカウントも含む)。測定計数を入射ガンマ線数で割ることによりガンマ線感度を算出したところ 1 ピクセルあたり平均 5×10^{-7} (counts/photons)であり ISIS オリジナル検出器とほぼ同等であることを確認した。

4.3 中性子検出効率

黒鉛減速体系中に設置された ^{252}Cf 中性子源を用いて検出効率を評価した。Figure 10 に測定結果を示す。検出器全体に渡る計数のばらつきは 6~7% (標準偏差)で ISIS オリジナルのものとほぼ同程度であった。また、中性子検出効率を計算により算出したところ平均 64%@1.8Å であった。この値は 1 Å 換算で 43% であり、ISIS オリジナルの中性子検出効率が 50% であることを考慮すると、原子力機構製検出器の中性子検出効率は十分実用に耐えうるものであることが分かる。これらの結果は中性子入射により発生したシンチレーション光の収集がおおむね良好に行われていることを示しており、シンチレータ検出部の製作技術の向上に伴いさらに改善するものと考えている。

Figure 11 に計数応答線形性の試験結果を示す。実験は JRR-3、MUSASI ポートにおいて行い、ビーム強度はコリメータ前面に Disperser を置くことによって調整した。また、入射中性子数の較正は ^3He 検出器で行った。本試験で実験することができた約 3×10^3 cps までの範囲において計数直線性を有していることを確認した。

以上、原子力機構製 1 次元シンチレーション中性子検出器の性能試験結果を Table 2 にまとめて示す。

5. 結論および今後の課題

我々は大強度陽子加速器計画における中性子散乱実験施設、特に残留応力解析や粉末回折実験施設に必要な中性子検出器として、英国ラザフォードアップルトン研究所の ISIS パルス中性子源に設置されている ENGIN-X 装置用検出器と同型の 1 次元シンチレーション中性子検出器を試作しその性能評価試験を行った。その結果、試作した中性子検出器システムが安定かつ良好に動作することを確認し、残留応力ならびに中性子回折装置用の 1 次元シンチレーション中性子検出器の国産化の見通しを得た。今後、検出効率ならびに一様性のさらなる改善を行うとともに新材料解析装置へのインストールを念頭においていた実機設計や計測システムの最適化を行う。また、現行検出器に対して高速シンチレータやデジタル信号処理などを適用し検出器総合性能のさらなる向上とダイナミックレンジの確保を図り J-PARC の 1MW フルパワー稼動にも十分対応できるよう検出器の改良を進めていく。

謝辞

本試験は日本原子力研究開発機構放射線管理部の古渡意彦氏、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したい。

参考文献

- 1) ISIS ENGIN-X: available from <<http://www.isis.rl.ac.uk/Engineering/>>
- 2) N. J. Rhodes, et al. : "Current Status and future directions of position sensitive neutron detectors at ISIS", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 529, 243 (2004)
- 3) E. M. Shooneveld, et al ; "A new neutron sensitive scintillation detector for ENGIN-X", ICANS-XVI, 16th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources, 455 (2003)

- 4) S. Sato, et al: "Development of readout system for neutron scintillation detector", KEK Report 2003-8
- 5) 坂佐井馨他 ; 日本原子力学会 2006 年春 K02、及び 2006 年秋の大会 E38

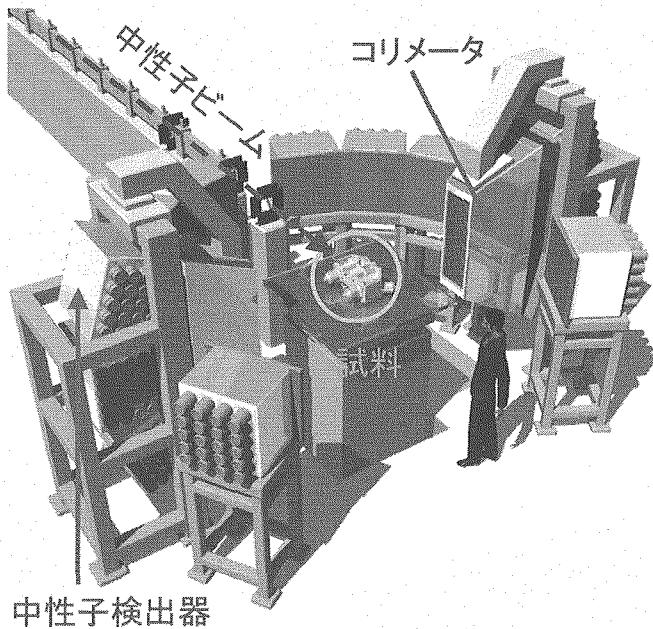


Fig. 1: Image view of Engineering Diffractometer at J-PARC

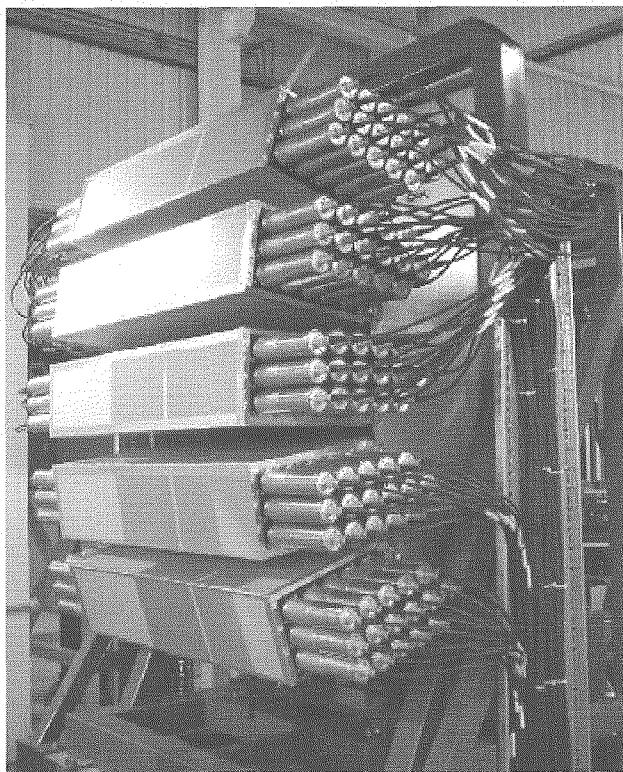


Photo. 1: The south bank of the ENGIN-X detector array²⁾

Table 1: Specifications of neutron detectors for ENGIN-X³⁾

Number of detector modules	10
Geometry of single detector module	196 mm * 744 mm
Linear position resolution	3 mm
Number of elements / detector module	240
Neutron detection efficiency	> 50% at 1Å
Gamma sensitivity (1.3 MeV)	< 10 ⁻⁶
Intrinsic detector background	< 12 c/hr/element
Pulse pair resolution	10 µs
Neutron detection stability	< 1%

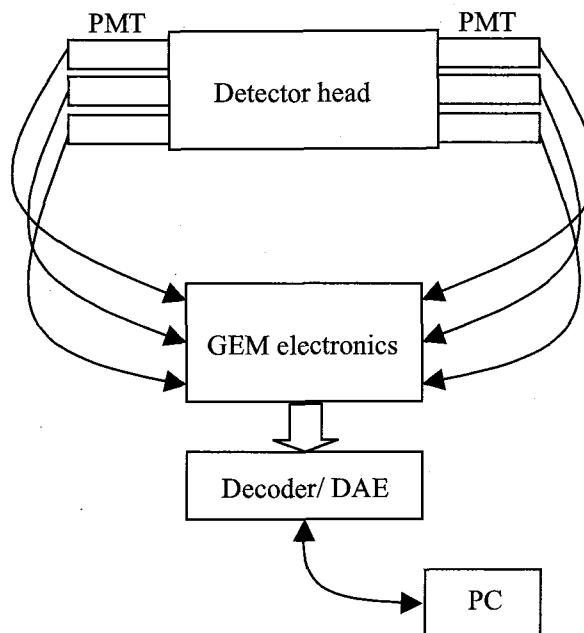


Fig. 2: Schematics of the ENGIN-X type scintillation detector

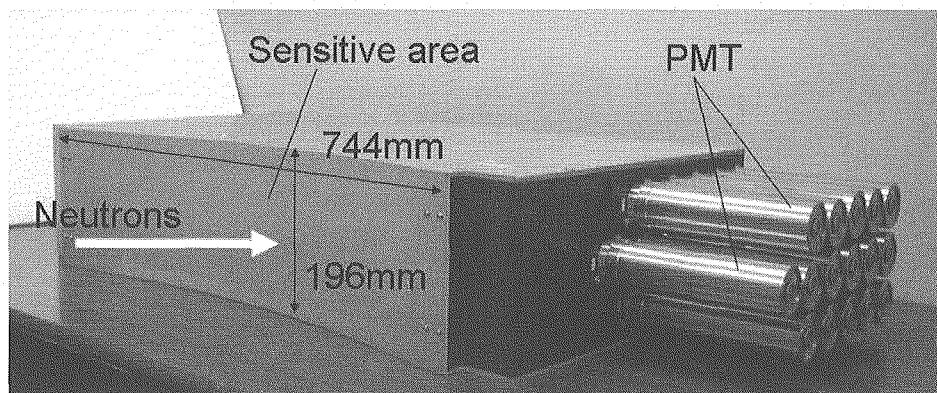


Photo 2: Japanese ENGIN-X type scintillation detector. Main Parts of the detector system, detector head and PMTs, are shown only.

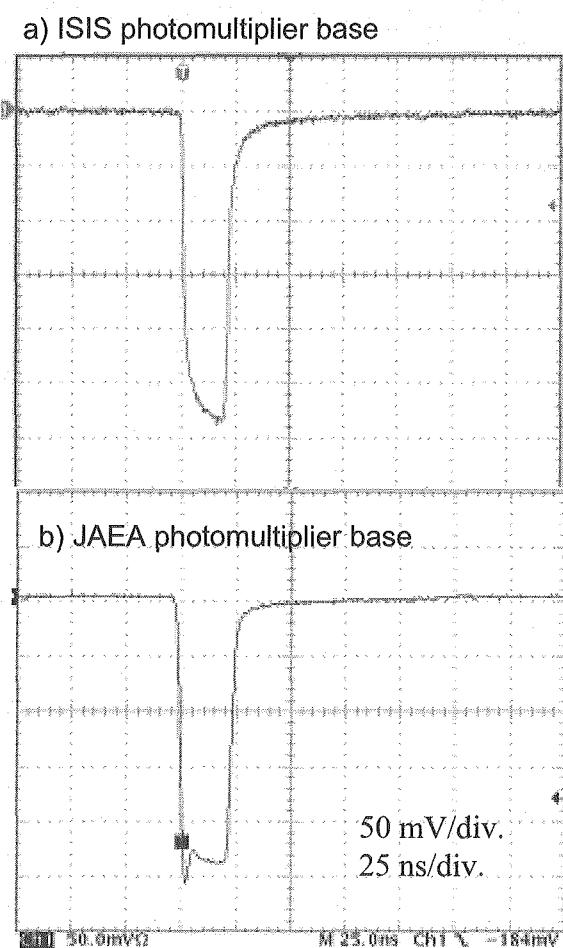


Fig. 3: Single photon signal measured through photomultiplier base circuit made by a) ISIS and b) JAEA.

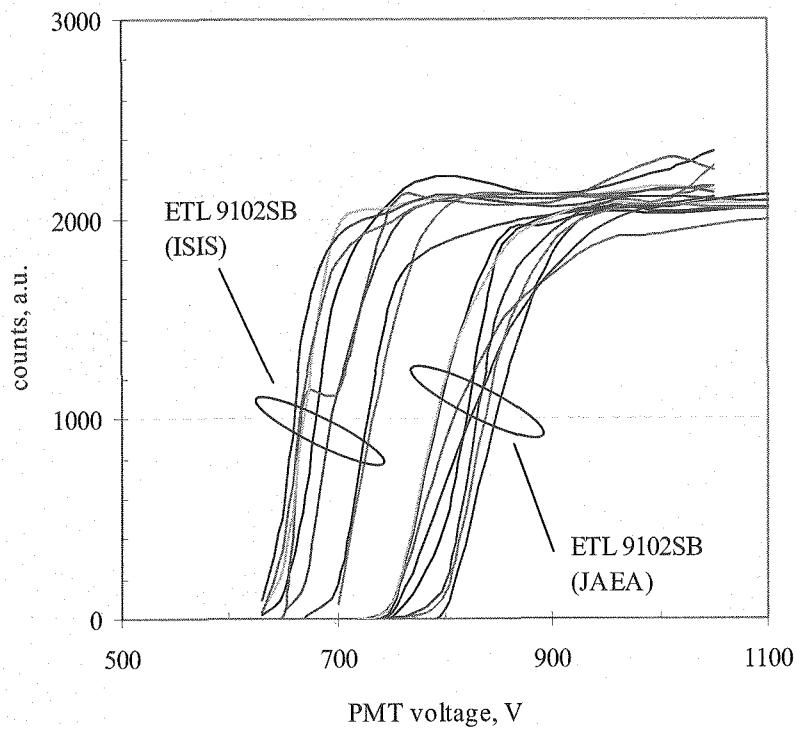


Fig. 4: Neutron counts as a function of high tension on photomultiplier tube.

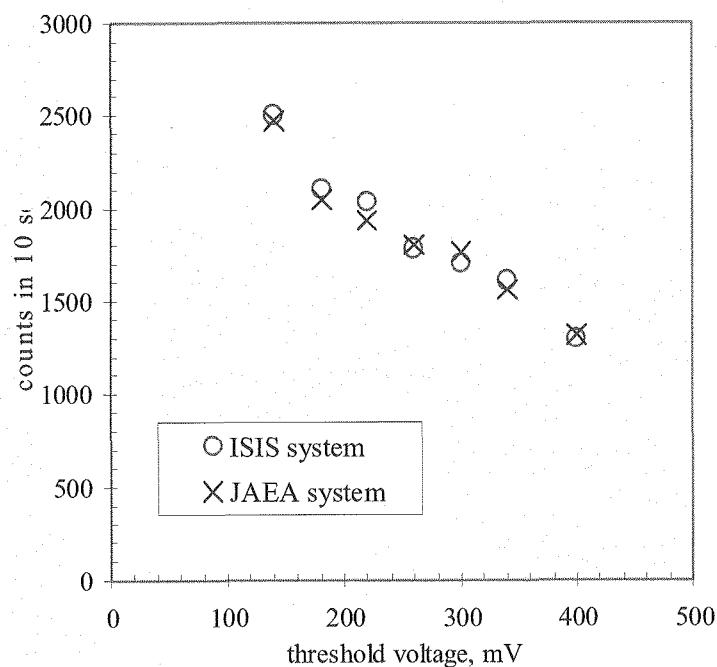


Fig. 5: Neutron counts measured by ISIS and by JAEA system as a function of threshold voltage of GEM electronics.

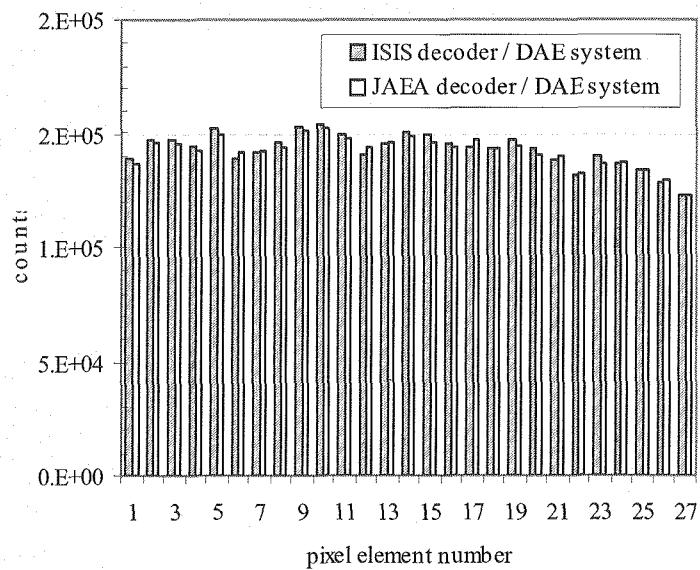


Fig. 6: Neutron counts measured by 27 ch linear scintillation detector.
Scattered neutrons by a plastic sample was measured by detectors placed at the 90 degree position.

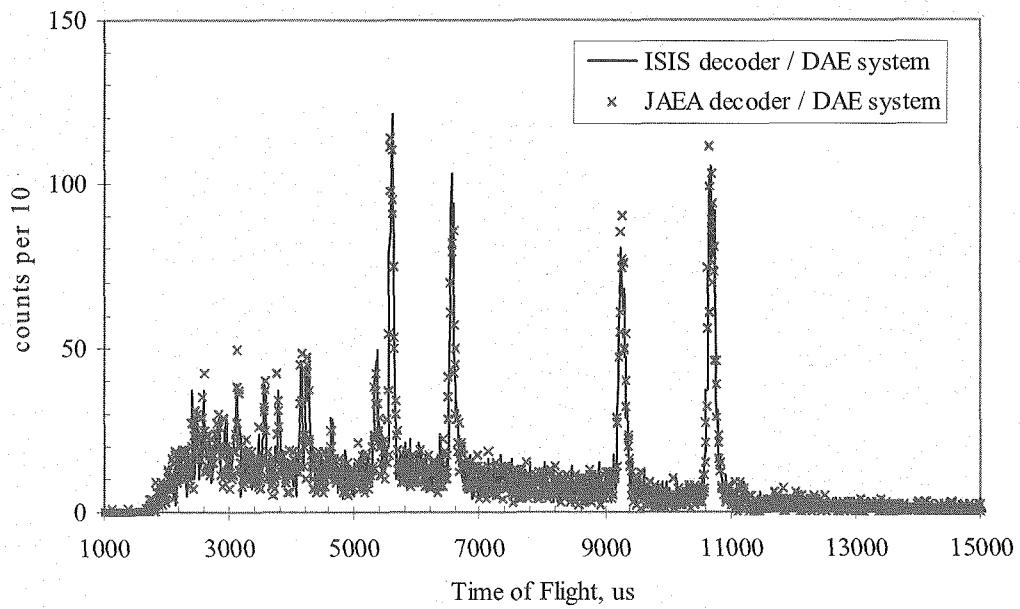


Fig. 7: Time of flight spectra of Ni sample measured at ROTAX port at ISIS. The distance from the sample to detector was 50 cm and scattering angle covered by was 89.9-90.2 degree.

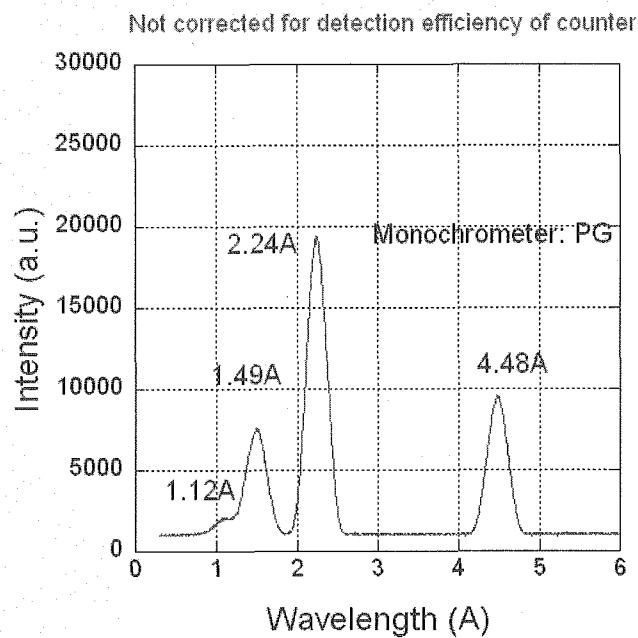


Fig. 8: Neutron wave-lengths measured after a pyrolytic graphite monochromator at MUSASI port at JRR-3. Neutron counts are not corrected by the detection efficiency of the counter.

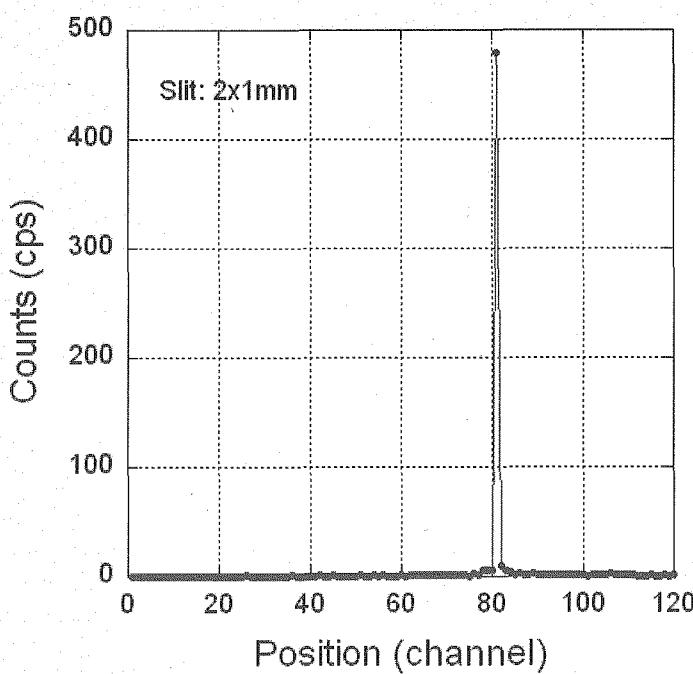


Fig. 9: Spatial response of the Japanese ENGIN-X type linear detector measured at MUSASI port at JRR-3 reactor. Incident neutrons (for spectra see figure 7) has a size of $2 \times 1 \text{ mm}^2$.

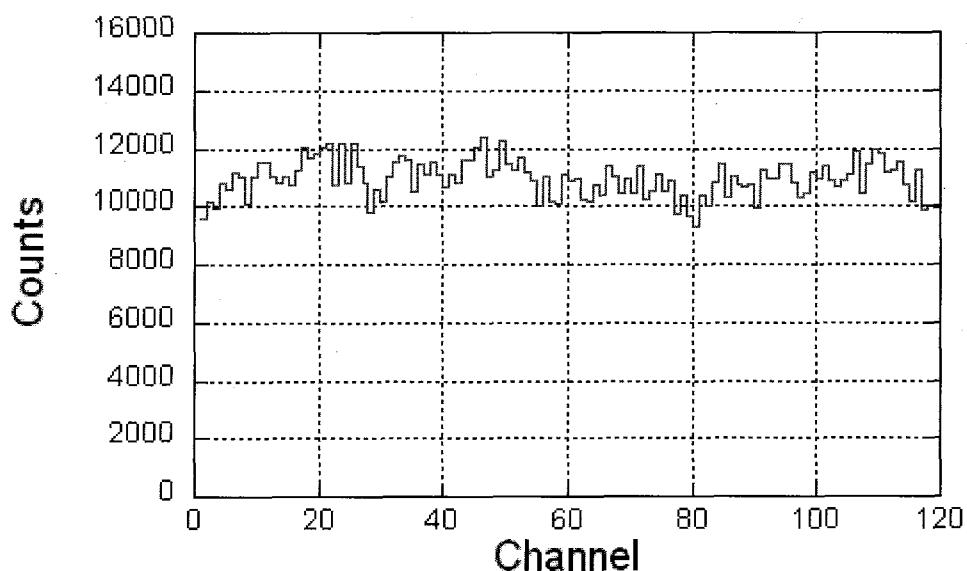


Fig. 10: Count uniformity of Japanese ENGIN-X type scintillation detector. Thermalized neutrons from ^{252}Cf were measured by the detector at the distance of 125 cm from the source.

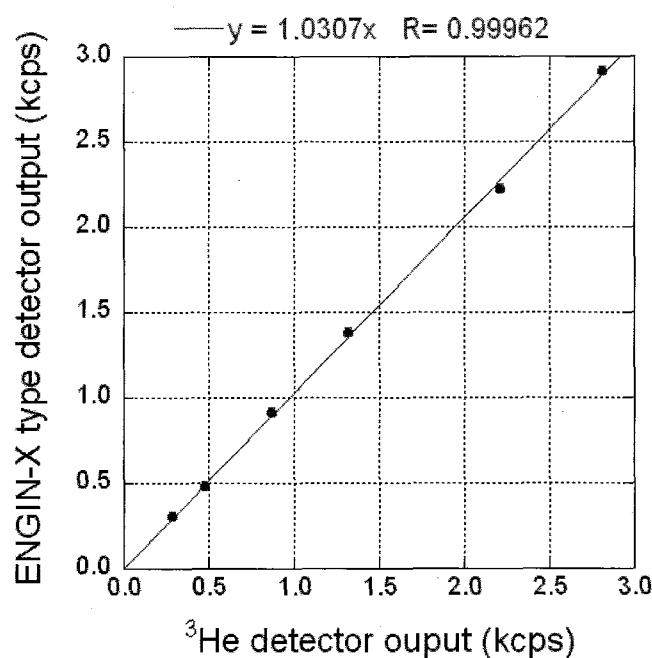


Fig. 11: Neutron count linearity of Japanese ENGIN-X type scintillation detector. Measured counts by the scintillation detector were plotted to those by ^3He tube for calibration.

Table 2: Detector specifications of Japanese ENGIN-X type linear detector
 (*) : not yet evaluated)

Number of detector modules	1
Geometry of single detector module	196 mm * 744 mm
Linear position resolution	3 mm
Number of elements / detector module	240 (120 installed)
Neutron detection efficiency	64% at 1.8Å
Gamma sensitivity (1.3 MeV)	5×10^{-7}
Intrinsic detector background	- *)
Pulse pair resolution	<10 μs
Neutron detection stability	- *)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
立体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル毎メートル	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム每立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル每キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア每平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア每メートル	A/m
(物質量の)濃度	モル每立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ每平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI 基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1}$ ^{=1(b)}	
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1(b)$	
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}	
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$	
応力	パスカル	Pa	N/m^2	
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$	
功率、放射束	ワット	W	J/s	
電荷、電気量	クーロン	C	$kg \cdot A \cdot s$	
電位差(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	$m^2 \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$	
コンダクタンス	シemens	S	V/A	
磁束密度	テスラ	T	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	
インダクタンス	ヘルツ	H	Wb/m^2	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	Wb/A	
光度	ルーメン	lm	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	
(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー分与、カーマン線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量	ベクレル	Bq	$cd \cdot sr^{(c)}$	
			$lm \cdot m^2$	
			$m^2 \cdot m^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$	
			s^{-1}	
			J/kg	$m^2 \cdot s^{-2}$
				$m^2 \cdot s^{-2}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	1° = ($\pi/180$) rad
分	'	1' = (1/60)° = ($\pi/10800$) rad
秒	"	1" = (1/60)' = ($\pi/648000$) rad
リットル	l, L	1l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1Np=1
ベル	B	1B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない单位でSI単位で表される数値が実験的を得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} J$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} kg$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} m$

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ⁻² m ²
ヘルツ	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バー	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	$1 erg=10^{-7} J$
ダイナ	dyn	$1 dyn=10^{-5} N$
ボーア	bohr	$1 P=1 dyn \cdot s / cm^2 = 0.1 Pa \cdot s$
ストークス	St	$1 St = 1 cm^2/s = 10^{-4} m^2/s$
ガウス	G	$1 G = 10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe = (1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx = 10^{-8} Wb$
スチル	sb	$1 sb = 1 cd/cm^2 = 10^4 cd/m^2$
ホル	ph	$1 ph = 10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal = 1 cm/s^2 = 10^{-2} m/s^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg$
ラド	rad	$1 rad = cGy = 10^{-2} Gy$
レム	rem	$1 rem = 1 cSv = 10^{-2} Sv$
X線単位	IX unit	$1 IX unit = 1.002 \times 10^{-4} nm$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 nT = 10^{-9} T$
ジャンスキ	Jy	$1 Jy = 10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m$
メートル系カラット	Torr	$1 metric carat = 200 mg = 2 \times 10^{-4} kg$
標準大気圧	atm	$1 Torr = (101.325/760) Pa$
カリ	cal	$1 atm = 101.325 Pa$
ミクロ	μ	$1 μ = 1 \mu m = 10^{-6} m$