

高速中性子検出器

S670e

高速中性子と熱中性子線の分離した検出カウント

S670

高速中性子線のための検出カウント



高速中性子検出器

高線量ガンマ線と磁場環境での高速中性子線の検出

高速中性子検出器 S670, S670e は、高速中性子がヘリウム 4 に入射して弾性散乱する時に発生するシンチレーション光を SiPM(シリコン光子測量デバイス) によって検出するまったく新しい中性子線検出器です。

減速材を使わない構造であるため中性子がヘリウムガスに入射した正確なタイミングとエネルギー情報を得ることができます。光パルス信号の時間、強さを分析することでガンマ線、熱中性子線、高速中性子線を分離した検出カウントを実現します。

ヘリウム 4 は1原子あたり 2 つの電子しかないためガス中の電荷密度が非常に低く、電離放射線であるガンマ線に対する感度を大幅に抑えることが可能です。これにより高線量なガンマ線を排除して、高速中性子線だけを検出できます。

研究者や技術者向けには、中性子線の検出ごとに出力される TTLパルス出力にも対応しており、オシロスコープ・デジタルライザーなどを使って測定・解析システムを構築できます。

特徴

- 高速中性子線に対して高感度 (S670)
- 高速中性子線と熱中性子線に対して高感度(S670e)
- 中性子線の入射時間、エネルギー情報の把握
- 無害な ヘリウム 4 を使用
- ステンレス管を使用した高耐久設計
- 複数の検出器の接続に対応
- 電磁場、振動に対する高い耐性
- 200 $\mu\text{Sv/h}$ 以上のガンマ線に対する耐性
- $(0.9 < \text{GARRn}^{**} < 1.1)$
- TTLパルス出力

2つの製品



S670

高速中性子だけを検出



S670e

高速中性子と
熱中性子を分離して検出
(内部にLi6コーティングあり)



高速中性子検出器

高線量ガンマ線と磁場環境での高速中性子線の検出

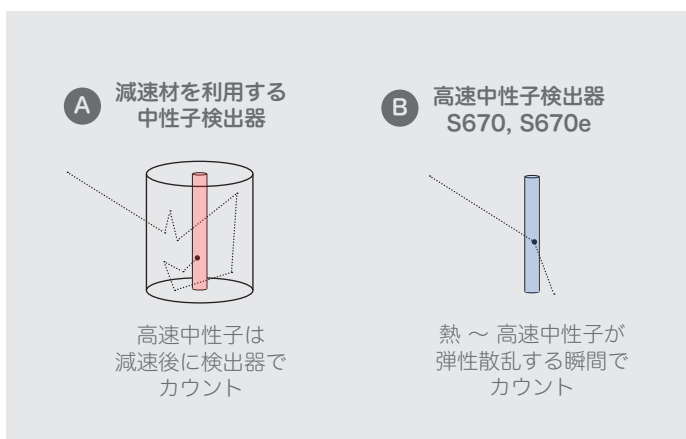


従来の中性子検出器

一般な中性子検出器は、He3 (ヘリウム3)、Li6 (リチウム6)、B10 (ホウ素10)などの物質が使われています。これらの物質は低速な熱中性子に対して感度を示します^[2] (図2)。高速中性子を測定する場合には、減速材で高速中性子を減速させて熱中性子に変えてから検出します。中性子の比例計数管がその一例です。

図1-Aは減速材をもつ中性子検出器です。高速中性子が入射すると減速材の水素原子と衝突を繰り返し、やがて速度エネルギーを失い最終的に低速な熱中性子となります。これが検出器に入りカウントされる仕組みです。熱中性子線は原子炉や核物質から放射される高速中性子線に対して 10^8 倍も小さいエネルギーです。

図1：中性子検出器の比較



減速材の課題

従来型の中性子検出器は、すべてを中性子線を熱中性子線に変えることで低速～高速までの中性子をカウントできる利点があります。一方で減速材の中で衝突を繰り返してから検出されるため中性子の正確な入射タイミングと元のエネルギー情報が失われます。背景放射線など対象以外からの熱中性子とも混ざり合うため、線源からの高速中性子線を区別することができないことが課題となる場合があります。

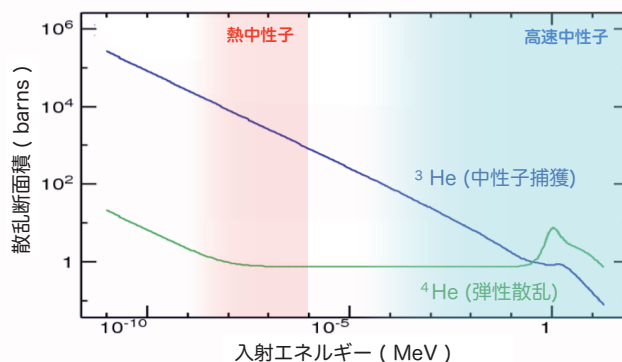
高速中性子検出器の特徴

S670, S670e 高速中性子検出器は、減速材を使わずに散乱時に発生する光を検出することで中性子を検出します。

- ① S670, S670e は従来のヘリウム3 に代わり高圧充填されたヘリウム4を利用します。ヘリウム4はNaI 結晶と同程度の光収量を備えた優れたシンチレーター材です。^[1] 電子密度が非常に低く高線量のガンマ線に対して低感度な特性を持ち中性子線検出器に理想的な材料です。これにより大型X線スキャナーなどの高線量ガンマ線下でも中性子を測定できます。

- ② 高圧ヘリウム4に入射した中性子は弾性散乱時にシンチレーション光を発生します。この光をSiPM(シリコン光子測定デバイス)で検出することで中性子線の正確な入射タイミングとエネルギー情報を測定できます。(図1-B)
- ③ 熱中性子は移動が少ないため減速材が検出器の近くない場合には検出量は小さく、核融合・核分裂からの高速中性子がより多くなります。検出器で生成される光は弾性散乱で交換されるエネルギーに比例するため熱中性子のカウントは実際の測定器では検出されません。そしてヘリウム4は熱中性子に対して低感度です。^[2]
- ④ 減速材を使わないことで中性子の正確な入射タイミングとエネルギー情報を得ることが可能です。光の強さは中性子線のエネルギーに比例しており入射した中性子線のスペクトル分布を見ることができます。光の継続時間を解析することでガンマ線、高速中性子線を分離した検出とカウントを実現しています。
- ⑤ 核分裂からの高速中性子(0.5~5 MeV)の領域でより低い背景放射特性を持っています。
- ⑥ S670e 検出器は、パイプ内にLi6 (リチウム6)のコーティングを追加して熱中性子線が入射した時の光パルスを増幅します。これによりS670eは熱中性子と高速中性子を分離して検出カウントすることができます。

図2：ヘリウムの中性子に対する散乱断面積



測定原理

ヘリウム4のガス中で相互作用する中性子とガンマ線は、光検出デバイスで持続時間が異なるパルス信号を発生させます。この継続時間の違いによってガンマ線と中性子が同時に検出される状況でガンマ線を区別し排除できます。ガンマ線は短時間の信号となり、中性子は長時間の信号となります。(図3)

最初のピーク信号を「早い成分」、長時間続く信号を「遅い成分」としてガンマ線と中性子線の信号を分けた結果が(図4)です。赤はCo60線源(ガンマ線)、黒はAm-Be線源(ガンマ線+中性子線)からの信号です。ここで太線のしきい値ライン設定することでガンマ線と中性子を効率よく分けられます。



図3：ガンマ線と中性子線のパルス応答の違い

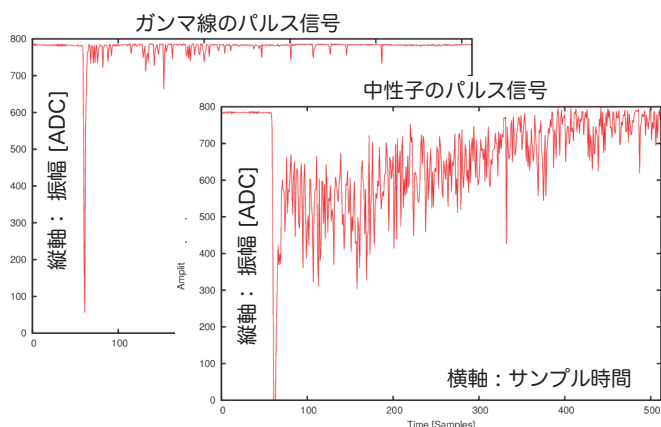
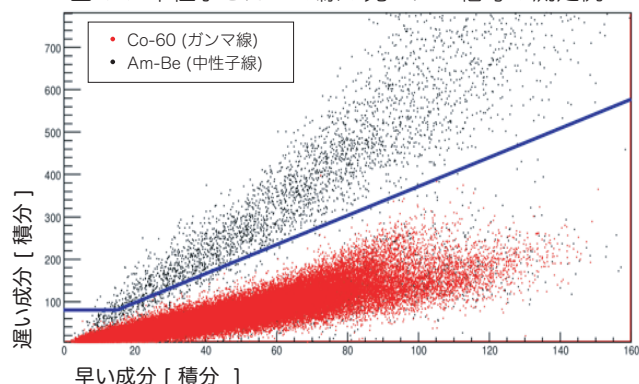


図4：中性子とガンマ線の光パルス信号の測定例



実際の測定器 S670, S670e

実際の高速中性子検出器 S670, S670e ではパルス信号の処理を簡略化しており単純にパルス信号の継続時間だけでガンマ線と中性子を分類分けしています。この方法でもガンマ線排除率 10^{-7} を実現しています。

図7：実際の測定ソフトウェアの表示結果

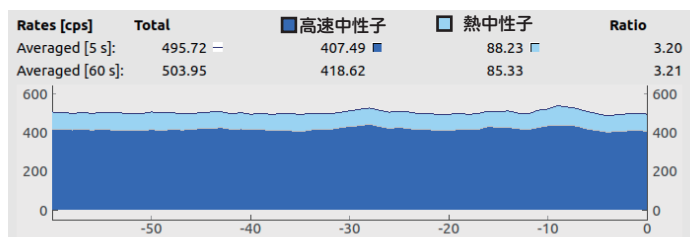
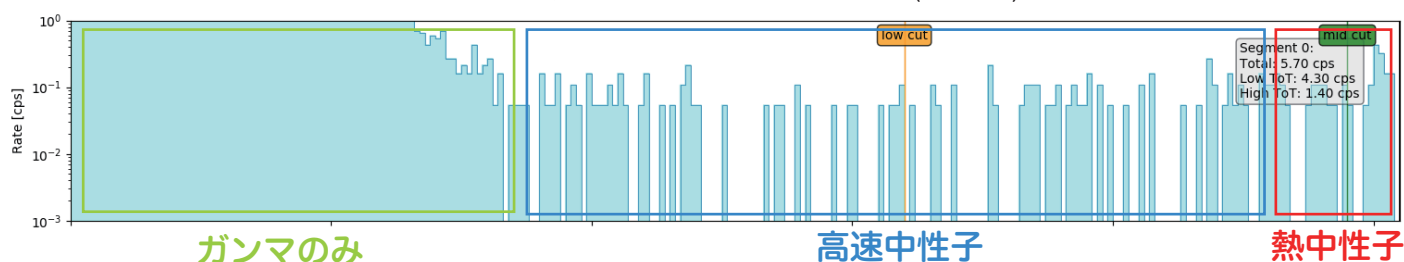


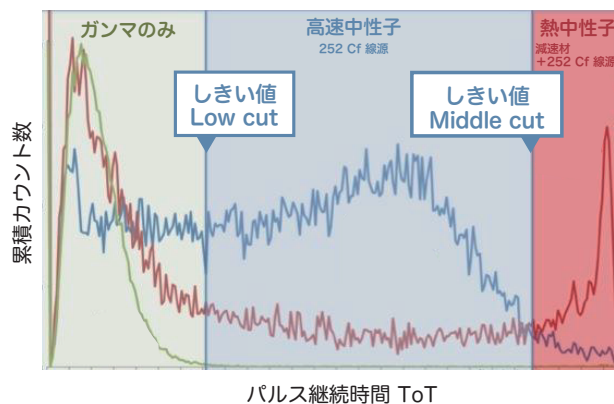
図6：実際の測定ソフトウェアの表示結果(S670e)



※ S670の場合には熱中性子は表示されません。
S670e は熱中性子線まで表示されます。

図5では横軸をパルスの持続時間 ToT、縦軸を累積カウント数としてガンマ線、熱中性子線、高速中性子線の3つの線源を測定した結果です。

図5：ガンマ線、熱、高速中性子線のパルス持続時間



- ガンマ線は短い光信号になるため継続時間が短い左側に集中します。
- 熱中性子線はコーティングされたリチウム6によって長い光信号となるため右側に集中します。
- 熱中性子線はその間になります。

S670, S670e の測定ソフトウェアで表示される実際の結果はこちら図6です。この測定結果は、横軸：パルス応答時間(ToT)、縦軸は累積カウント数です。こちらでも左側からガンマ線、高速中性子、熱中性子の順に並びます。しきい値(Low cut), (Middle cut)の2つで緑・青・赤ゾーンを分けています。これにより中央の高速中性子だけの検出カウントを測定できます。

一番右側に熱中性子線がある理由は、S670e 検出器ではパイプ内にリチウム6のコーティングが施してあり熱中性子線はコーティング上で長時間で発光するため図6では一番右側に表示されます。

しきい値(Low cut), (Middle cut)を適切に設定することでS670eの場合には熱中性子、高速中性子のカウント数をリアルタイムで測定できます。S670の場合には高速中性子だけが表示されます。(図7)

しきい値の決め方

図5は、ガンマ線、熱中性子線、高速中性子線の3つの線源を使って測定したデータです。

ガンマ線と中性子線は完全に分離できるライン(Low cut)を容易に見つけることができます。

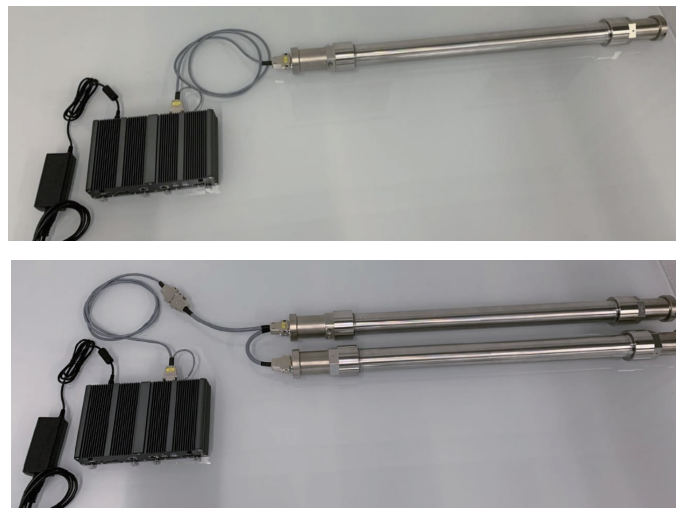
熱中性子と高速中性子を区別するしきい値は完全には分離できませんが、測定対象の線源に対して減速材あり、なしの2通りを測定することでデータを取得してしきい値ライン(Middle cut)を決めることができます。

- [1] E. Aprile, A.E. Bolotnikov, A.I. Bolozdynya and T. Doke, *Scintillation detectors, in Noble gas detectors*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim Germany (2006);
J.B. Birks, *The theory and practice of scintillation counting*, Pergamon Press, New York U.S.A. (1964);
G.F. Knoll, *Radiation detection and measurement*, Wiley, New York U.S.A. (1989);
B.A. Dolgosheim and B.U. Rodionov, *The mechanism of noble gas scintillation, in Elementary particles and cosmic rays. Volume 2*, Atomizdat, Moscow Russia (1969).
- [2] H. Friederich et al., *A scalable DAQ system based on the DRS4 waveform digitizing chip*, IEEE Trans. Nucl. Sci. 58 (2011) 1652.
- [3] R.Kouzes et al., "Neutron detection gamma ray sensitivity criteria", <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900211014628>

測定システム

S670, S670e 測定システムは、制御ソフトウェアを備えた Linux OSシステムと接続して測定します。測定器は複数接続できます。(図8)

図8：実際の測定ソフトウェアの表示結果



仕様

型番	S670 : 中性子線のみ検出カウント S670e : 高速と熱中性子線を分離して検出カウント
製品パッケージ	TTL出力、検出器
物理的な仕様	全長915mm, 検出器部分 600mm, 直径70mm, 重さ 6.6 kg
中性子線感度	S670 : 0.04 cps/ng ²⁵² Cf at 2 m S670e : 0.12 cps/ng ²⁵² Cf at 2 m (高速と熱中性子線を分離してカウント可能)
ガンマ線排除率	ガンマ線排除率: 10 ⁻⁷ ガンマ線耐性 200 uSv/h, 0.9 < GARRn < 1.1 **
出力	MCX 同軸出力 (メス, MCX-BNCアダプターも利用可能) TTL出力。TTLレベル 3.3V, Rise time< 5 nS, ドライブ電流 24mA パルス幅: 標準 80nS, 10-2560 nS でプログラム可能 出力パルスの長さで高速、熱中性子線の分離出力も可能 (S670e のみオプション)
制御ケーブル接続	D-Sub 15ピンコネクタ接続: 制御ユニットとの接続 最大8検出器まで接続可能
電源	12V, 2.5W(1 検出器あたり)、高電圧は不要 検出器は数珠つなぎ可能
動作温度	-30~+30度 (高温での仕様にも改造可能)
湿度	0~100% (検出器は霧状態でも使用可能)
防水防塵	IP62 (改造可能)
圧力容器仕様	CE, 2014/68/EU, 労働安全衛生法 (適応外の圧力容器 内径44mm, 長さ600mm, 圧力 18MPa)