

高速・高効率中性子位置検出器の開発試験

Development of high frequency neutron detector

高橋 浩之¹⁾

藤原 健¹⁾

Hiroyuki TAKAHASHI

Takeshi FUJIWARA

¹⁾ 東京大学

(概要)

MSGC(Micro Strip Gas Counter)は高速動作・高位置分解能を実現する二次元中性子検出器であり、今後J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)など大強度中性子源での実用化が期待されている。しかし、MSGCで高い検出効率を得るためには大量のHe-3を必要とするため、近年のHe-3の枯渇に対応するため、He-3を代替する検出器が強く求められている。LiやGd系シンチレータやBを用いた固体コンバータなどさまざまな検出器が検討されてきているが、いずれも γ 線に対する感度やガス検出器に比べて大面積化が困難などといった問題を抱えている。LiCAF:Ceシンチレータ(Ce:6LiCaAlF₆ (LiCAF))は株式会社トクヤマによって開発された高速な単結晶シンチレータである。LiCAFは熱中性子に対して、Li(n, α)反応により、高い検出感度を有するとともに、波高値のみで従来のガスカウンタ並の中性子・ガンマ線の弁別能に優れたシンチレータとして期待されている。本研究では、LiCAFとAPDアレイを組み合わせた二次元検出器をMSGCと比較をすることで評価した。

キーワード :

中性子用シンチレータ、MSGC、He-3 代替

1. 目的

LiCAF:Ce シンチレータ(Ce:6LiCaAlF₆ (LiCAF))は株式会社トクヤマによって開発された高速な単結晶シンチレータである。LiCAF は熱中性子に対して、Li(n, α)反応により、高い検出感度を有するとともに、波高値のみで従来のガスカウンタ並の中性子・ガンマ線の弁別能に優れたシンチレータとして期待されている。従来、熱中性子に対して波高ピークを生じるようなシンチレータとしては、Li ガラスシンチレータがあったが、Li ガラスの場合は、 α/β 比が小さく、 γ 線の信号と中性子のピークが重なり、波高値から中性子と γ 線の弁別は不可能であった。一方、LiCAFの発光量は、Li ガラスの半分の中性子あたり 3000 光子しかないが、蛍光寿命は 40ns と短く高速である。また、潮解性もなく、取扱は容易で安定である。しかしながら昨年12月のJ-PARC(BL16)での測定では、短波長用APD(Avalanche Photo Diode)との組み合わせの中性子に対しての感度が低く、波高スペクトル測定においては中性子のピークが観察できなかった。これは LiCAF シンチレータの発光ピークが 280nm であり、APD の有感領域から外れていたことが原因として考えられる。そこで今回の実験では2種類の波長シフト(POPOP, MSB)を用いることで、LiCAF:Ce 中性子との反応による発光に対するAPDの感度を向上させる。

本実験では、この LiCAF シンチレータと波長シフトを組み合わせた際の中性子に対する特性を測定することを目的とする。具体的には、JRR-3 NOP にて中性子照射時の波高スペクトル測定とバックグラウンドの波高スペクトルを求めることとする。

2. 方法

2.1 実験手順

実験は下記の通り行った。

- LiCAF の中性子検出効率を求めるために、同じビームラインで He-3 比例計数管による測定。
- LiCAF シンチレータと APD を用いた際の発生する電荷量を調べるためにパルサーによる較正を行った。
- LiCAF 単体（波長シフト無し）での波高スペクトル測定。
- LiCAF*POPOP での波高スペクトル測定を。シェーピングタイムを $0.5\mu\text{s}$, $1\mu\text{s}$, $2\mu\text{s}$ と変えて測定。
- LiCAF*MSB での波高スペクトル測定を。シェーピングタイムを $0.5\mu\text{s}$, $1\mu\text{s}$, $2\mu\text{s}$ と変えて測定。

2.2 He-3 比例計数管による測定

LiCAF シンチレータの中性子検出効率の較正用に、He-3 比例計数管による測定を行った。今回使用したモデルは Reuter Stokes の RS-P4-0810-224 である。セットアップを以下に示す。

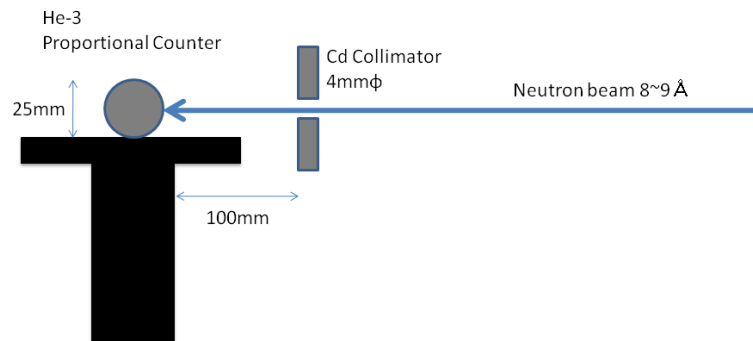


図 1. ビームラインセットアップ。ステージコントローラの上に比例計数管を設置。レーザーポインターを用いてちょうど検出器の中心にビームが当たるよう調整した。ビームは Cd のコリメータを用いて 4mmφ に絞った。

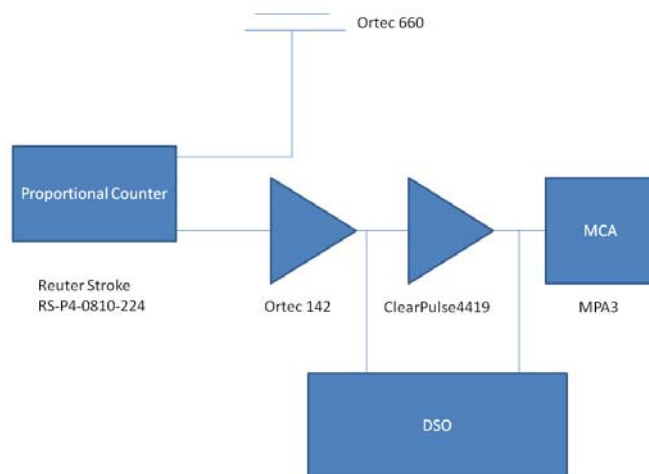


図 2. 検出器の構成。

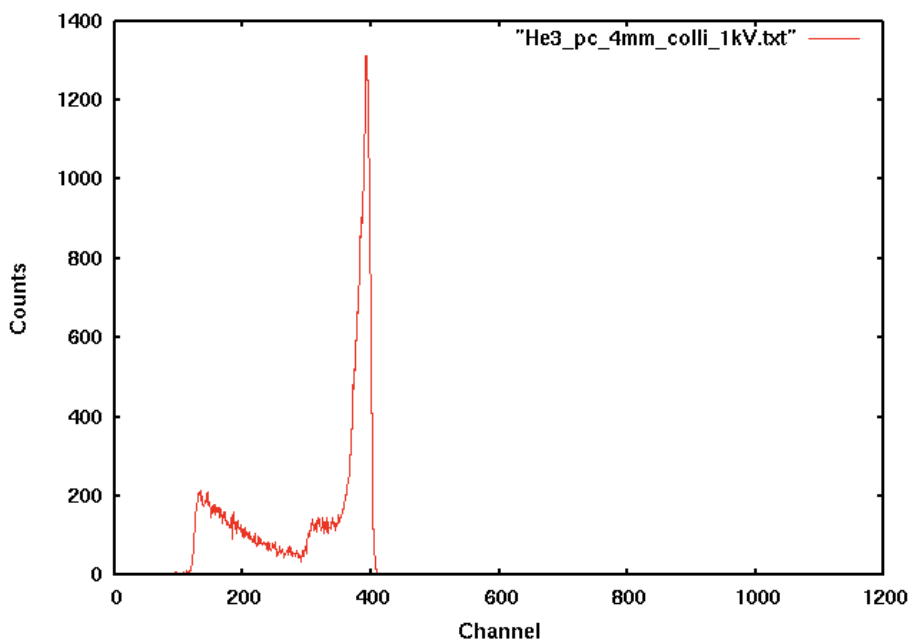


図 3. He-3 比例計数管を用いた波高スペクトル。シェーピングタイム 2 μ s である。計測時間は 300sec。

300 秒測定した結果、56000 カウント、つまり 180cps を比例計数管で数えたことになる。その後 JRR-3 の出力に変化はなかったので、以後の実験はこのデータを元に検出効率を算出する。

2.3 APD と LiCAF 単体での測定

次に APD と LiCAF を組み合わせた実験を行った。セットアップを以下に示す。



図 4. 検出器内部。APD とシンチレータを光学コンパウンドを用いて密着させ、テフロンテープを巻いてある。それらを機密性の高いアルミケースに入れ、光が入らないようにした。

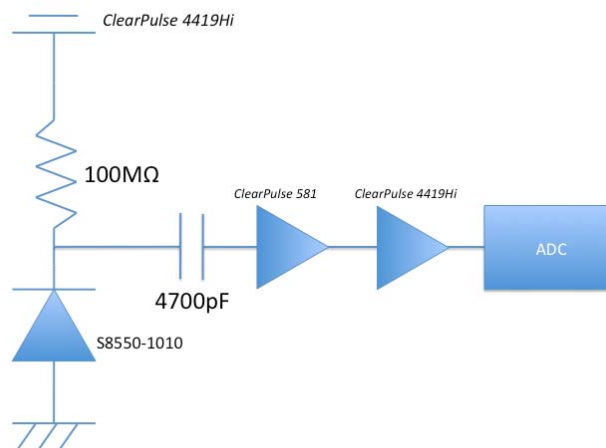


図 5. 回路図。バイアス回路は 100MΩ を通して与え、信号は 4700pF のコンデンサを介して読みだしている。

バイアス電圧は 400V, シェーピングタイムは 0.5us, 1us, 2us でそれぞれ 300 秒測定した。また、ビームを off にした時の Cold run 測定も行った。結果を以下に示す。

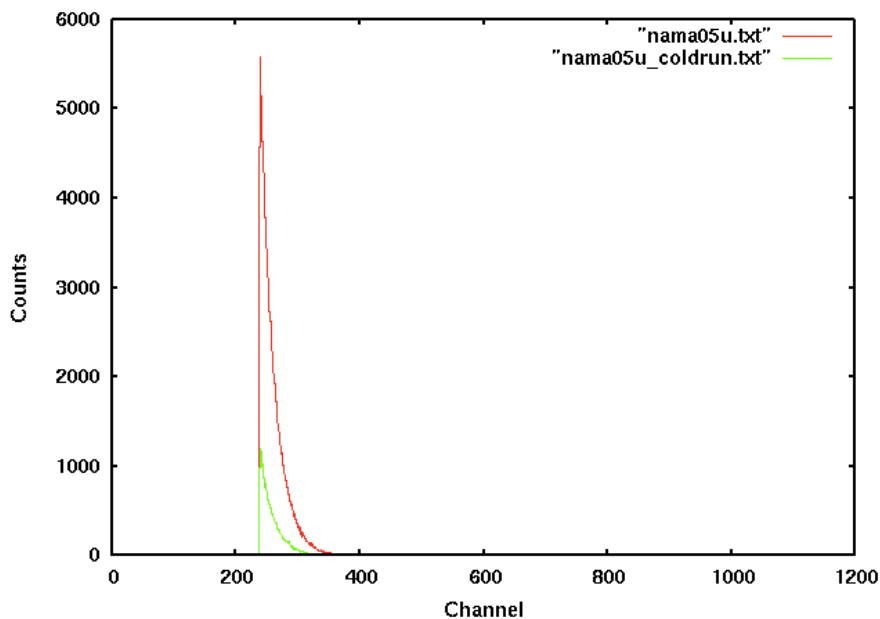


図 6-a. シンチレータ単体と APD を組み合わせた波高スペクトル。シェーピングタイムは $0.5\mu\text{s}$ 。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

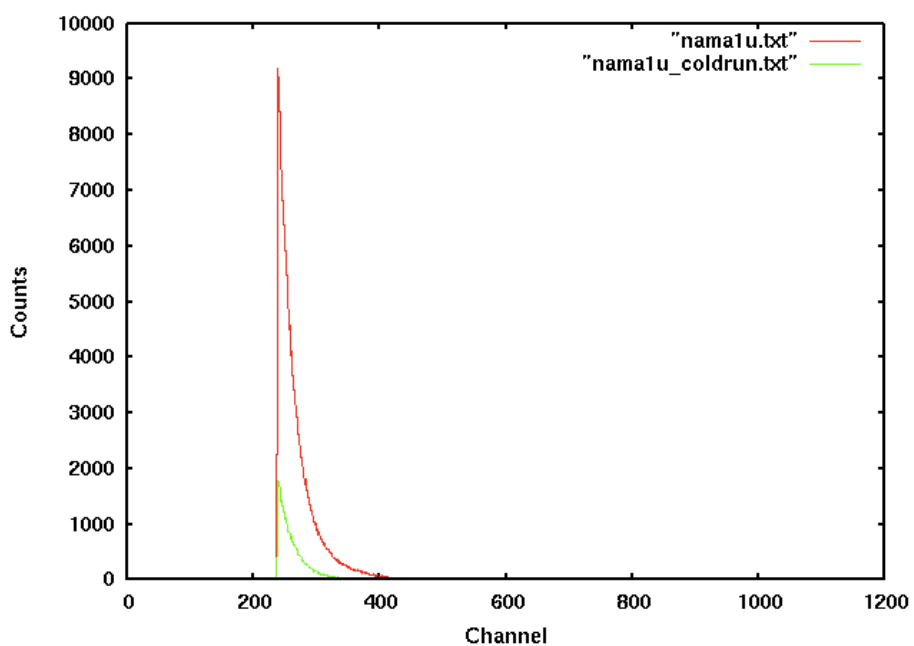


図 6-b. シンチレータ単体と APD を組み合わせた波高スペクトル。シェーピングタイムは $1\mu\text{s}$ 。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

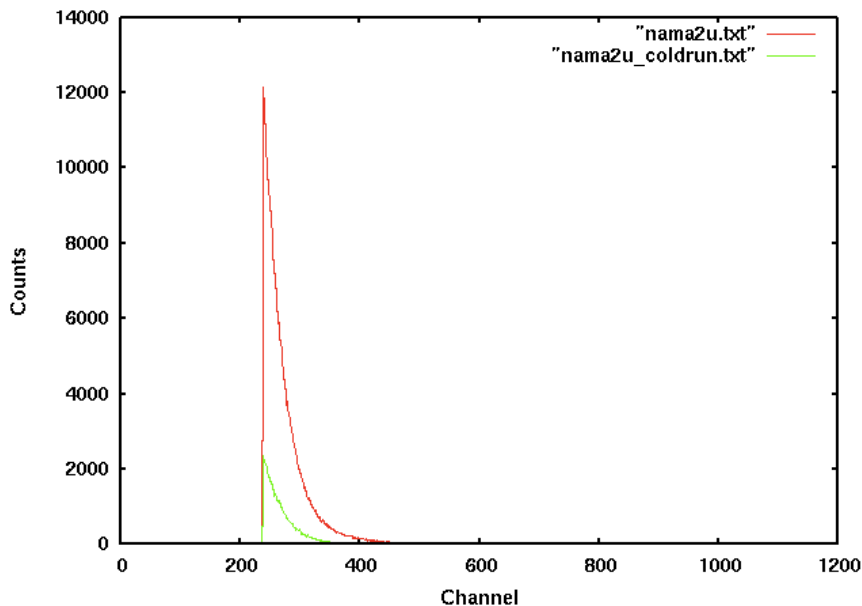


図 6-c. シンチレータ単体と APD を組み合わせた波高スペクトル。シェーピングタイムは 2 μ s。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

以上の通り、LiCAF を単体で用いた場合、シェーピングタイムを 0.5 μ s, 1 μ s, 2 μ s, と変えて測定したが、いずれの場合も中性子のピークは観測出来なかった。

2.4 APD と波長シフタを用いた測定

2.4.1 POPOP を用いた測定

波長シフタに POPOP を用いた測定を行った。ビーム・回路などのセットアップは変更していない。バイアス電圧は 400V, シェーピングタイムは 0.5 μ s, 1 μ s, 2 μ s でそれぞれ 300 秒測定した。結果を以下に示す。

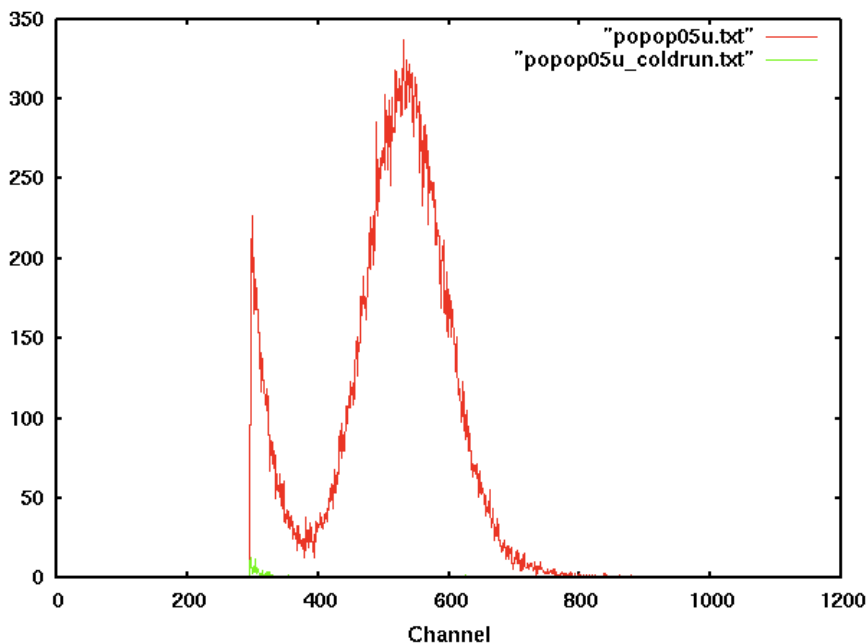


図 7-a. シンチレータに波長シフタ(POPOP)を塗り、短波長 APD と組み合わせた際の波高スペクトル。シェーピ

ングタイムは $0.5\mu\text{s}$ 。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

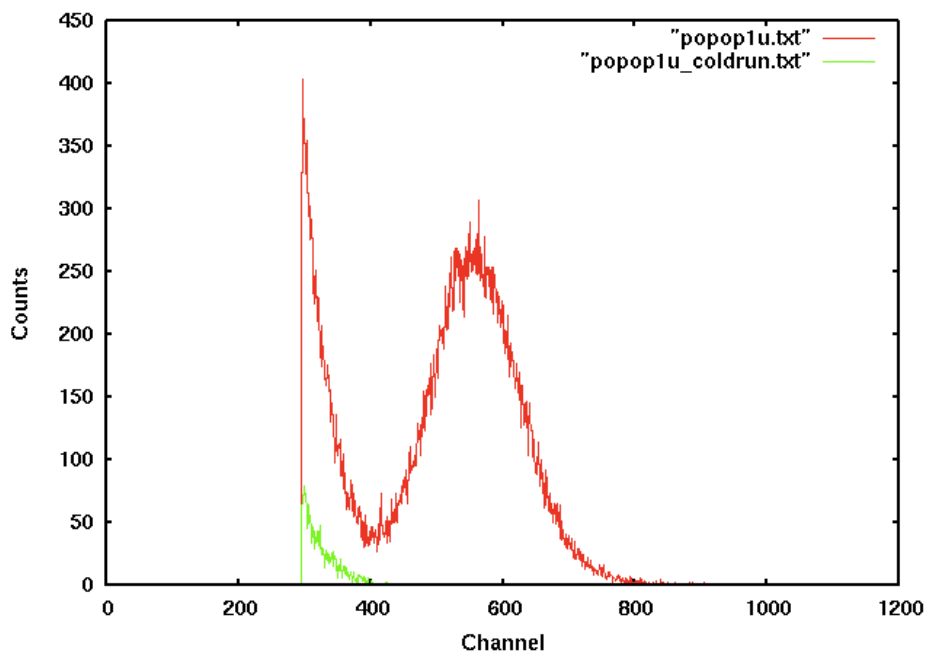


図 7-b. シンチレータに波長シフタ(POPOP)を塗り、短波長 APD と組み合わせた際の波高スペクトル。シェーピングタイムは $1\mu\text{s}$ 。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

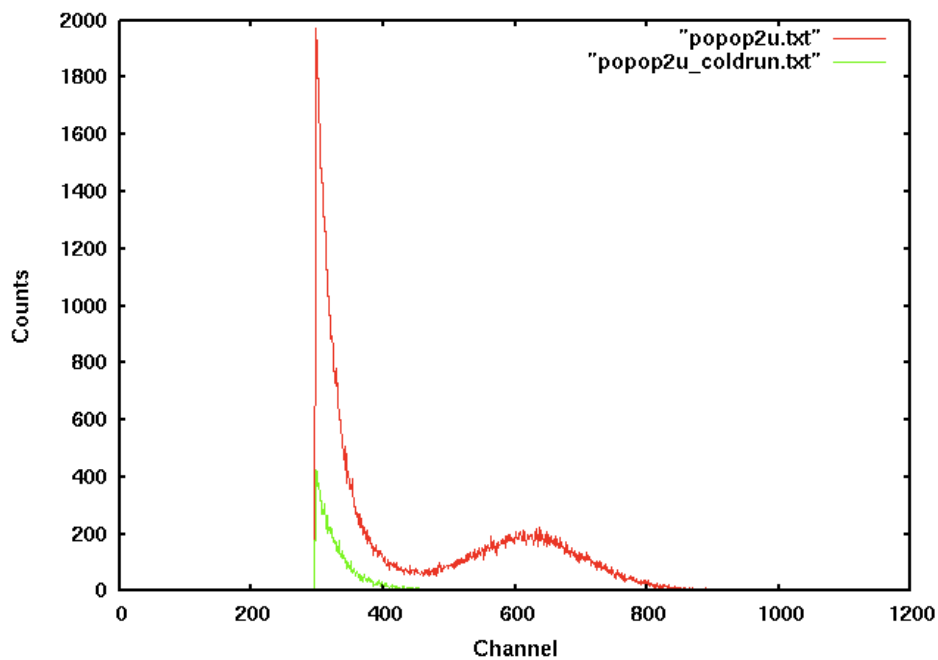


図 6-c. シンチレータに波長シフタ(POPOP)を塗り、短波長 APD と組み合わせた際の波高スペクトル。シェーピングタイムは $2\mu\text{s}$ 。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

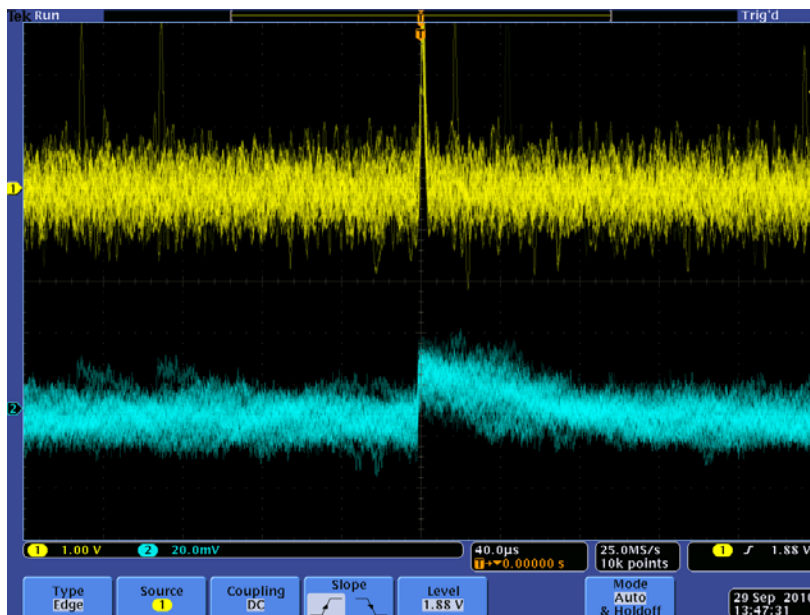


図.7-a POPOP+LiCAF の時のプリアンプ出力(青)とシェーピングアンプ(黄)のオシロスコープ波形。40 μ s スケール。

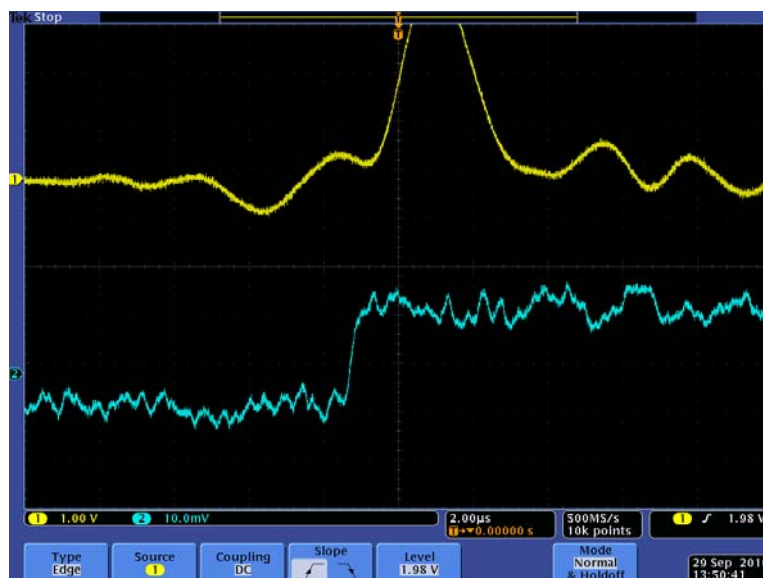


図 7-b. POPOP+LiCAF の時のプリアンプ出力(青)とシェーピングアンプ(黄)のオシロスコープ波形。

今回の POPOP を LiCAF に塗布した際の波光スペクトル測定では、はっきりとピークが観測できた。エネルギー分解能はシェーピングタイムが 0.5 μ s の時が一番高く、ピークチャンネルは 534、FWHM は 143 であった。また、カウント数は 46800 であり、これは今回の実験で較正用に使用した He-3 比例計数管 (RS-P4-0810-224) の 83%である。

2.4.2MSB を用いた測定

次に、波長シフタに MSB を用いた測定を行った。セットアップは前述した実験と同様である。バイアス電圧は 400V, シェーピングタイムは 0.5us, 1us, 2us でそれぞれ 300 秒測定した。結果を以下に示す。

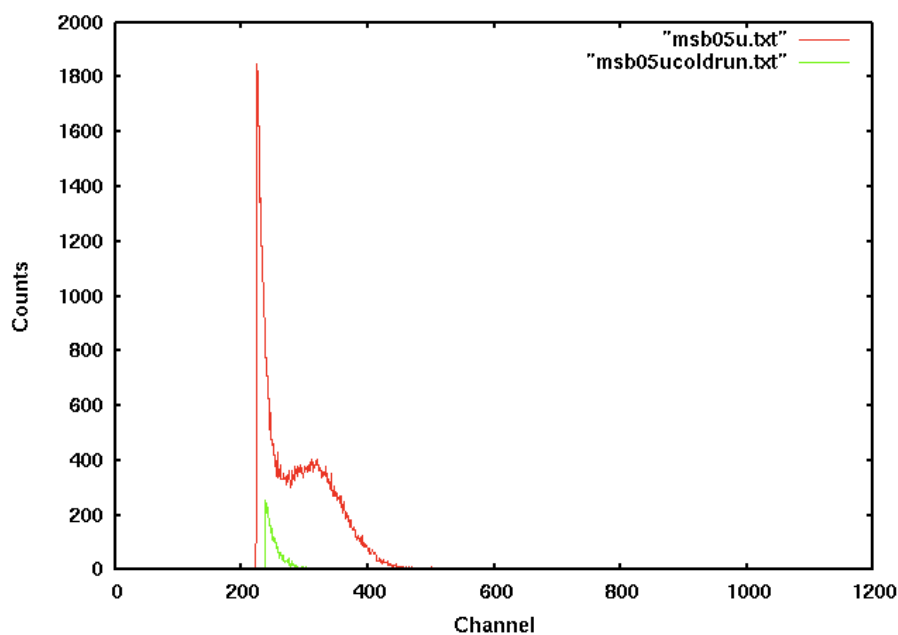


図 8-a. シンチレータに波長シフタ(MSB)を塗り、短波長 APD と組み合わせた際の波高スペクトル。シェーピングタイムは 0.5 μ s。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

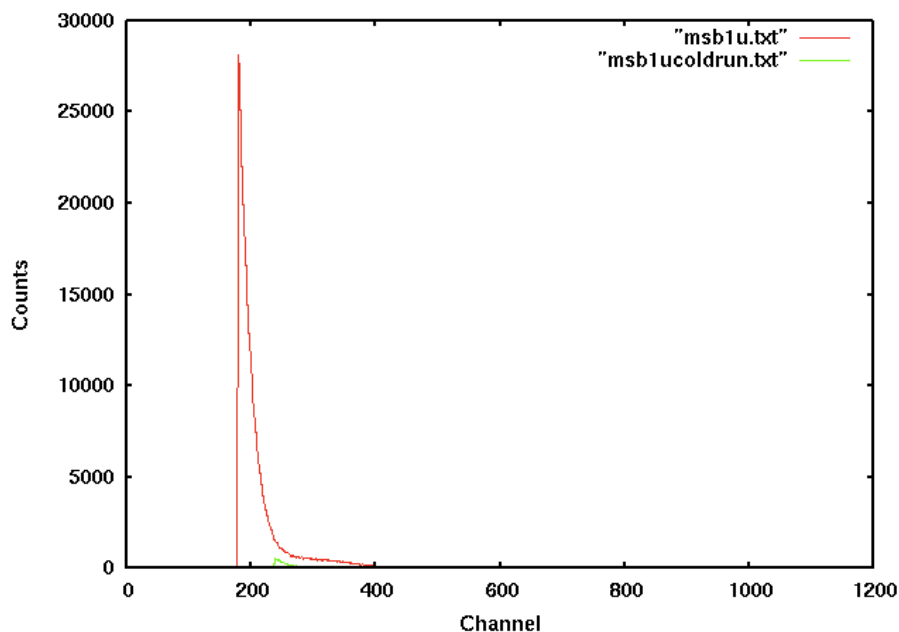


図 8-b. シンチレータに波長シフタ(MSB)を塗り、短波長 APD と組み合わせた際の波高スペクトル。シェーピングタイムは 1 μ s。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

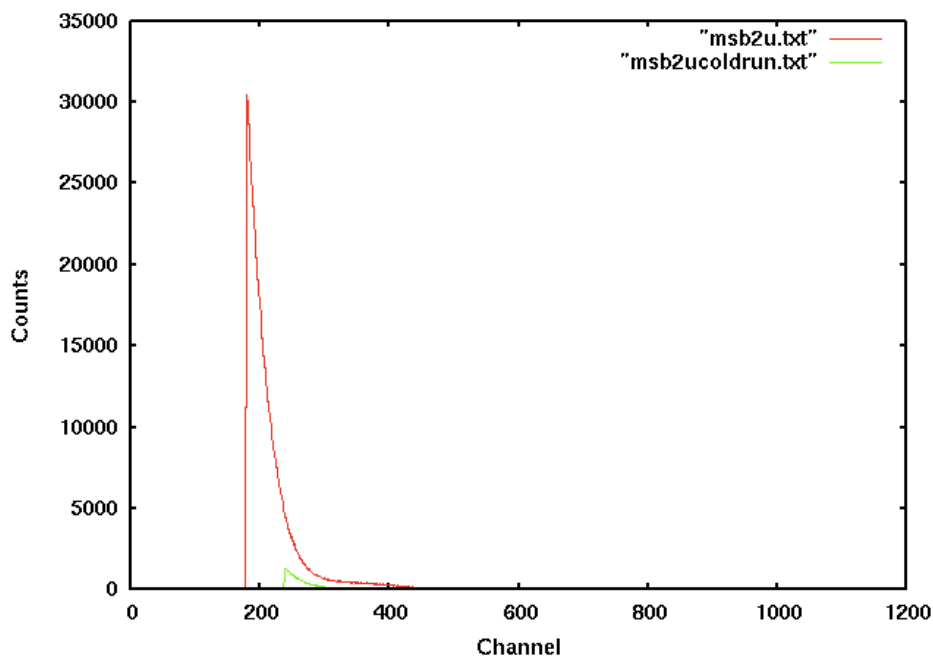


図 8-c. シンチレータに波長シフタ(MSB)を塗り、短波長 APD と組み合わせた際の波高スペクトル。シェーピングタイムは $0.5\mu\text{s}$ 。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線が Cold run 測定。

2.5 パルサーによる較正

パルサーに 1pF のキャパシタンスを直列につなぎ、電子回路の較正のための測定を行った。プリアンプ以下は前述の実験と同様である。

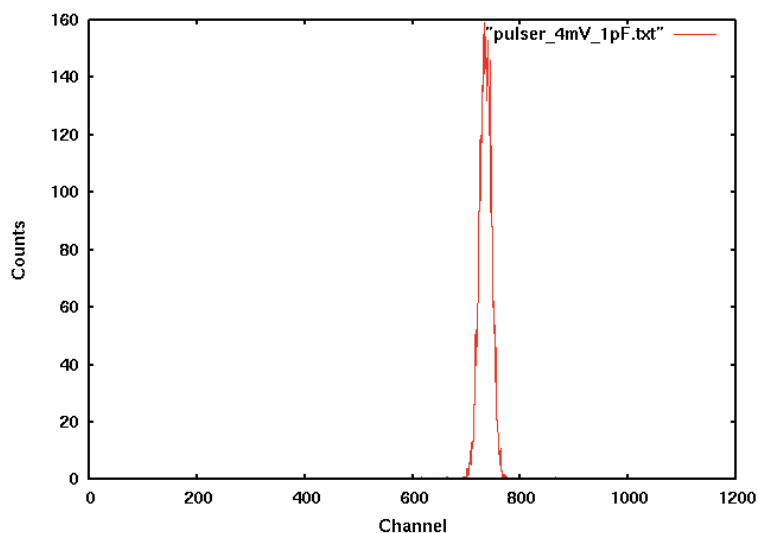


図 9. パルサーを用いた較正。パルサーの出力は 4mV 、キャパシタは 1pF を用いた。

$4\text{fC}(4\text{mV}+1\text{pC})$ のチャージ入力の時、ピークチャンネルは 731ch で、 $\text{LiCAF}^*\text{POPOP}$ を用いた際のピークが 530ch なので、 2.9fC のチャージが発生していると考えられる。

2.6 波長シフタの発光ピーク

波長シフタの特性を調べるために、MSB を Cs137 を用いて発光させ、発光スペクトル測定を行った。

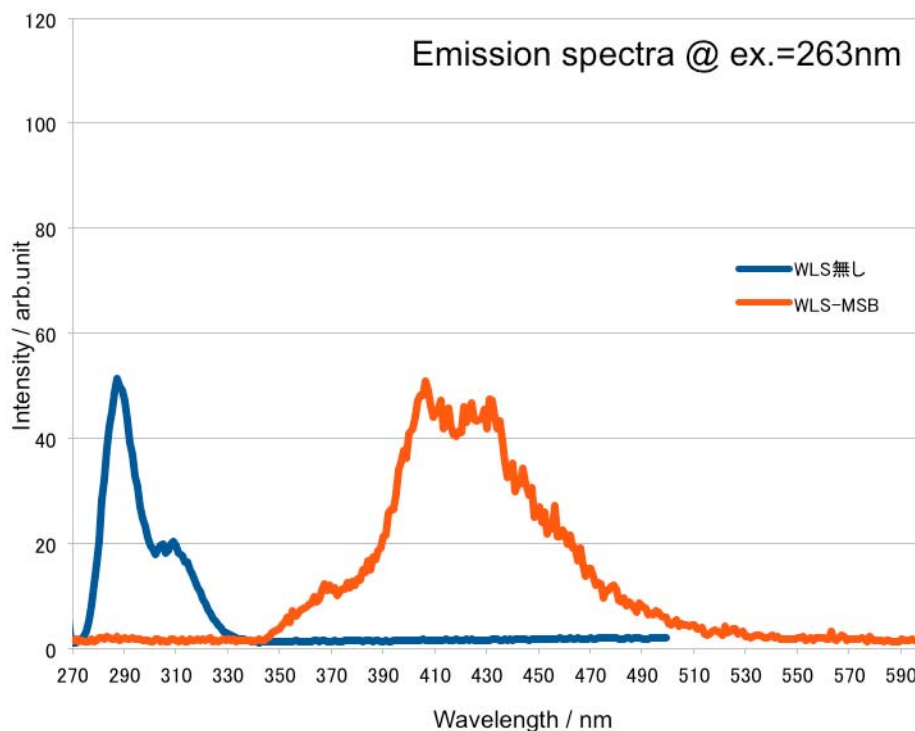


図 10. 発光スペクトルは 290nm 付近から 410nm 付近にシフトしている。

3. 結論・考察

JRR-3 NOP にて、LiCAF に波長シフタ (POPOP, MSB) を組み合わせ、受光体に APD を用いた中性子波長スペクトル測定を行った。いずれの波長シフタを用いた場合でも、中性子のピークを観察することができたが、POPOP を用いた場合、特に良好な結果が得られた。検出効率も He-3 比例計数管に対して、83% になっており、今後 He-3 検出器の代替に十分なる可能性がある。

今回使用した APD は長時間使っていると信号が突然大きく乱れる現象が見受けられ、バイアス電圧を定格の 430V よりも低い 400V で測定した。原因はまだ究明されていないが、この問題が解決され定格電圧での測定ができればエネルギー分解能や MSB を用いた際の波高スペクトルがバックグラウンドと中性子のピークをより明確に見分けられるようになると思われる。

今後は RI を用いて、 γ 線弁別能の確認を行う。また、シンチレータの厚み、波長シフタの厚みを変えた検出器開発に取り組み、さらに APD アレイを用いた二次元検出器の開発に取り組む。