

成果報告書

「中性子ビーム利用高度化技術の開発」
(中性子検出における信号処理技術の高度化に関する研究)

平成23年5月

国立大学法人東京大学

様式第20

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立大学法人東京大学が実施した平成22年度「中性子ビーム利用高度化技術の開発」(中性子検出における信号処理技術の高度化に関する研究)の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

「中性子ビーム利用高度化技術の開発」

(中性子検出における信号処理技術の高度化に関する研究)

中性子偏極・集光・検出及びイメージングなどの中性子ビーム基盤技術研究を発展させ、その基盤技術を J-PARC 及び JRR-3 の中性子科学研究施設の高角散乱、小角散乱、イメージングの実験装置に導入し、中性子ビームの高品質化、高輝度化、高精度化を実現することで、これまで出来なかったナノ領域からマイクロ領域の階層的な磁性、軽元素、構造歪み、ダイナミクスなどの高精度の中性子計測を可能にすることを目的とする。

このため、独立行政法人日本原子力研究開発機構、国立大学法人北海道大学、国立大学法人東北大学、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、国立大学法人京都大学と共同で業務を行う。

国立大学法人東京大学では、中性子検出における信号処理技術の高度化に関する研究を実施する。

2. 平成 22 年度の実施内容

2.1 実施計画

中性子検出における信号処理技術の高度化に関する研究

多出力検出器の信号処理を、より安価にかつ効率的に行う方法論についての研究を行う。本年度は、中性子入射によるシンチレーション光を用いた検出器から得られる多信号出力を対象とした高速信号処理法の研究を行う。具体的にはデジタル信号処理技術を活用して、多数のチャンネルを高速に扱うことの可能な集積回路を効果的に用いた信号処理系を構築し、その有効性を示すために、検出器と組み合わせた性能評価を行う。

2.2 実施内容(成果)

MSGC(Micro Strip Gas Counter)^{[1][2]}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)での実用化が期待されている。しかし MSGC は近年の He-3 の枯渇により、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。本研究では現在の中性子散乱実験で要求される $10 \times 10 \text{cm}^2$ 以上の有感面積をもち、かつ 1mm 以下の位置分解能、 He-3 ガス検出器なみの低ガンマ感度を持つ2次元検出器を開発し、多出力信号処理に用いる検出器の対象とした。

LiCAF:Ce シンチレータ ($\text{Ce:}^6\text{LiCaAlF}_6$) 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、 $\text{Li}(n,\alpha)$ 反応により、高い検出感度を有するとともに、その小さい元素番号から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。 LiCAF はガンマ感度が非常に低く、 He-3 の代替として有望なシンチレータであるが、発光波長が紫外領域にあるため受光体としての光検出器の制約が大きく、これまでの研究では光電子増倍管と組み合わせることが必須であった。特に光量に関する制約から、光電子増倍管と直接接続することが必須と考えられてきた。一方、光電子増倍管の有感領域はその大きさに限界があるため、中性子散乱実験で期待される大面積化は困難である上、抵抗分割等による読み出しは散乱分布情報の歪みを引き起こす可能性があり好ましくない。これに対し、APD (Avalanche Photo Diode) は小ピクセルのアレイが開発されており、高位置分解能かつ、大面積のピクセルアレイ型検出器が期待できる。 LiCAF の発光波長は短いため、短波長用 APD (Hamamatsu S8664 等) においても、 LiCAF の発光波長に対する感度は低く、 LiCAF と APD の組み合わせが利用されることはなかった。そこで、 LiCAF 結晶と波長シフトを組み合わせハイブリッド型シンチレーション検出器とすることで APD を用いたピクセル型検出器の開発に取り組んだ。

一方、ピクセルアレイ型検出器では、その信号処理が大きな課題となる。多信号出力検出器から高密度の信号を読み出すためには、読み出し電子回路の簡素化も重要である。ただし、回路は簡素化しつつ、中性子とガンマ線の分離において有効な波高分析などの機能を実現し、中性子信号とガンマ線信号を弁別する必要がある。本研究では、その目的で、各信号読み出し回路の各々に、コンパレータを設置して、波高値を時間幅に変換して読み出す信号読み出し方式の開発を行った。以下、得られた結果の詳細について説明する。

2.2.1 LiCAF シンチレータと波長シフトを組み合わせの検討

トクヤマ製のシンチレータ、 $\text{Ce:}^6\text{LiCaAlF}_6$ (LiCAF) はガンマ感度が非常に低く、 He-3 の代替として有望なシンチレータであるが、発光波長のピークは 270nm と短いため、これまでの研究では受光体として APD が LiCAF との組み合わせとして利用されることはなかった。そこでわれわれは2種類の波長シフト

【POPOP(5-Phenyl-2-[4-(5-phenyl-1,3-oxazol-2-yl)phenyl]-1,3-oxazole), MSB(4-BIS(2-METHYLSTYRYL)BENZENE)】と組み合わせることで、 LiCAF:Ce と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ことを試みた。 LiCAF の $10 \times 10 \times 2 \text{mm}^3$ の結晶に、

波長シフタ (POPOP, MSB) を100-200 μm 厚塗布し、受光体には短波長APD浜松ホトニクス S8664-1010を用いて (図1)、日本原子力研究開発機構のJRR-3 NOPにて中性子の波高スペクトル測定を行った。

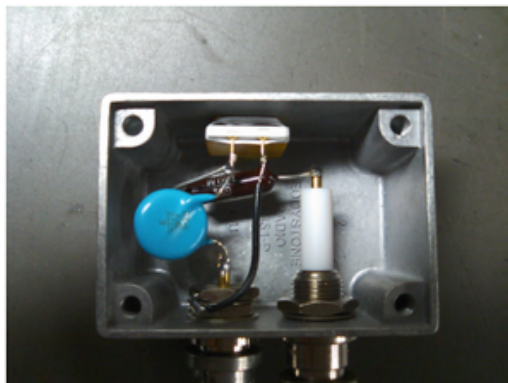


図1. 検出器内部。APDとLiCAF結晶をオプティカルコンパウンドを用いて密着させ、テフロンテープを巻いてある。

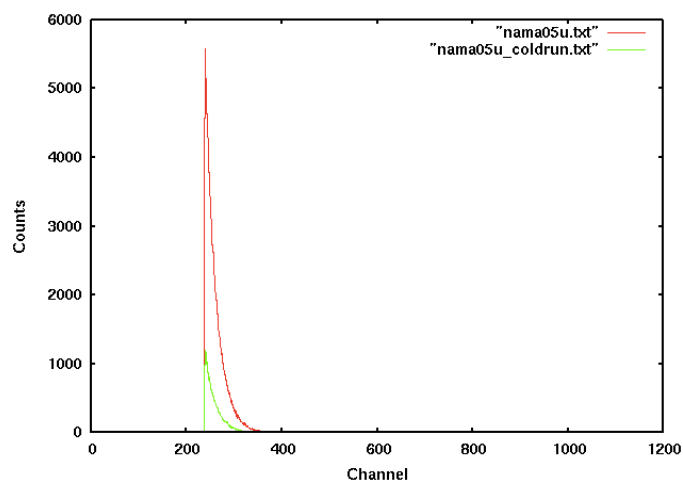


図2. シンチレータ単体とAPDを組み合わせた波高スペクトル。シェーピングタイムは0.5 μs 。赤線が中性子ビームを当てた時であり、緑線がCold run測定である。

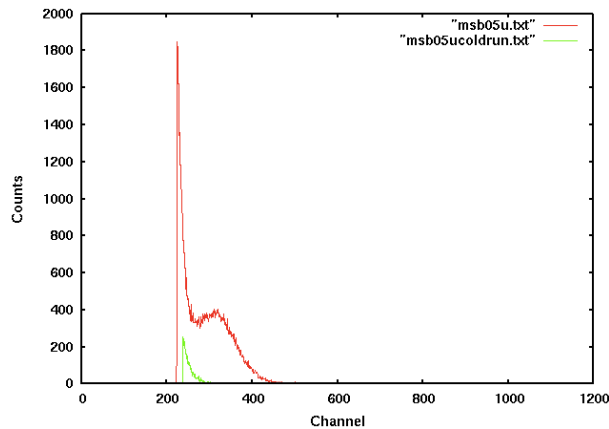


図3. シンチレータに波長シフタ(MSB)を塗り、短波長APDと組み合わせた際の波高スペクトル。シェーピングタイムは $0.5\mu\text{s}$ 。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線がCold run測定。

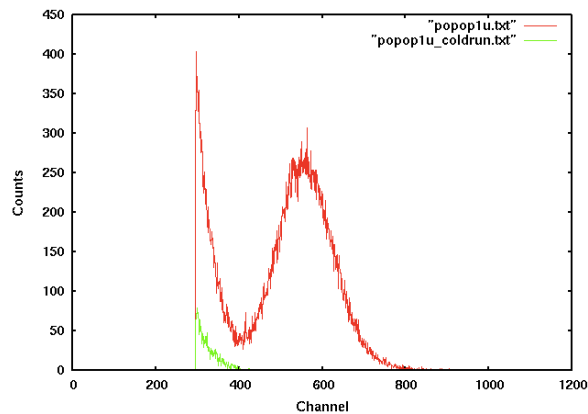


図4. シンチレータに波長シフタ(POPOP)を塗り、短波長APDと組み合わせた際の波高スペクトル。シェーピングタイムは $1\mu\text{s}$ 。赤線が中性子ビームを当てた時で、緑線がCold run測定。

LiCAFに波長シフタを組み合わせることによって、MSBを用いた場合でもPOPOPを用いた場合でも中性子の波高ピークを得ることに成功した(図3、図4)。特にPOPOPをLiCAFに塗布した際の波光スペクトル測定では、明確なピークが観測された。その際のエネルギー分解能はシェーピングタイムが $0.5\mu\text{s}$ の時が一番高く、He-3比例計数管(RS-P4-0810-224)で校正した結果、検出効率83%という結果が得られた。

2.2.2 Time over Threshold 信号処理法の開発

前述したように多信号出力検出器から高密度の信号を読み出すためには、読み出し電子回路の簡素化も重要である。ただし、回路は簡素化しながらも、その回路機能は波高分析などの用途に耐え、中性子信号とガンマ線信号を弁別することが可能であるなどの要求を

満たす必要がある。本研究では、この目的で、各信号読み出し回路の各々に、コンパレータを設置して、波高値を時間幅に変換して読み出す方式の開発を行った。これにより、信号処理回路のコストを抑えながらも、高い読み出し性能を実現することができるものと期待される。Time over Threshold (ToT)法³⁾により、信号を処理することで、波高値情報を時間情報に変換するものである。本研究では、マルチレベルスレシヨルドを用いた ToT により、従来手法の欠点であったリニアリティの改善、ダイナミックレンジの高度化に取り組んだ。研究では、まず閾値を3つ用いた場合を検討した。図5にマルチレベル ToT の概念図を示す。

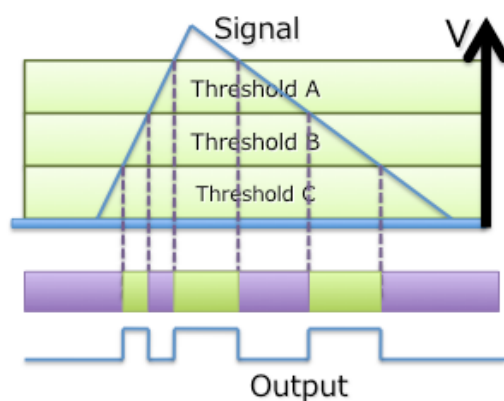


図5. マルチレベル ToT の基本概念

本手法では、信号のエネルギーレンジを低、中、高の3つにわけ、それぞれのエネルギーレンジに最適な閾値を用いることで、リニアリティを改善し、高エネルギーレンジにおける飽和を防ぐものである。また、信号が閾値を越えるたびにパルスを折り返すパルスエンコーディングを用いることで多数の閾値を用いた場合でも信号線を増やさずに3つの ToT パルスの伝送を可能にした。図6、図7に波高値と ToT パルスの関係を、従来手法とマルチレベル ToT で比較したものを示す。入力にはセミガウシアンでシェーピングした波形を用いた。リニアリティは INL(Integral Non-Linearity)で、従来手法の21%から、マルチレベル ToT を用いた場合だと4.6%まで改善した。また、本手法を三角波や CR-RC でシェーピングした波形においても検討したが、いずれの波形においてもリニアリティが劇的に改善される結果が得られた。マルチレベル ToT とパルスエンコーディングを組み合わせた、信号線を増やすことなく、リニアリティを改善できるので、低コスト化と高エネルギー分解能が求められる多チャンネル検出器において非常に有効であると言える。

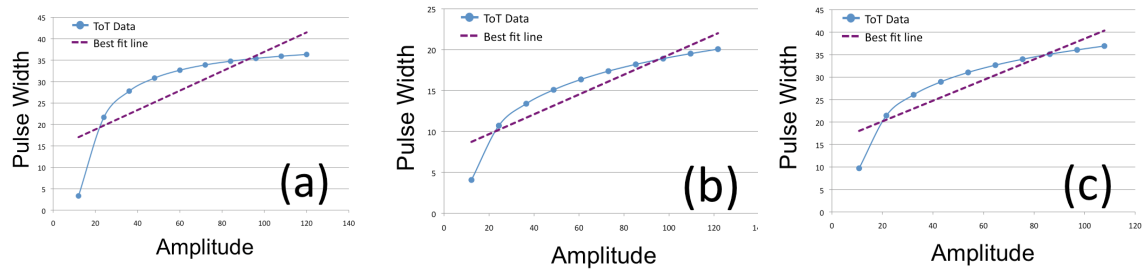


図 6-(a)従来 ToT を三角波に、(b)従来 ToT を CR-RC シェーピングに、(c)従来 ToT をセミガウシアンシェーピングにそれぞれ適用した際の波高値とパルス幅の関係

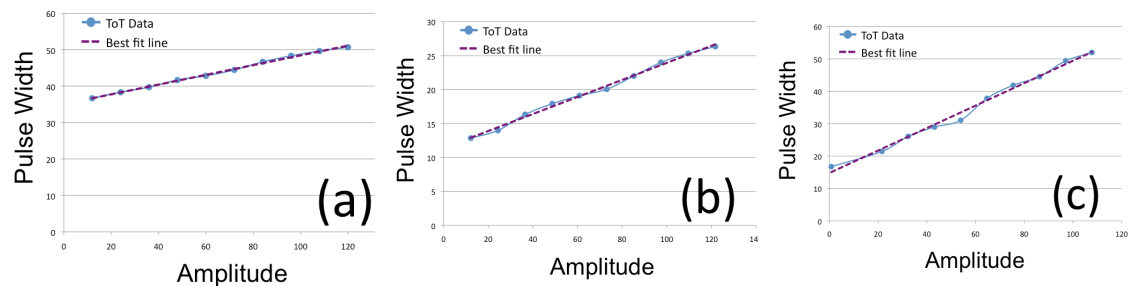


図 7-(a)マルチレベル ToT を三角波に、(b)マルチレベル ToT を CR-RC シェーピングに、(c)マルチレベル ToT をセミガウシアンシェーピングにそれぞれ適用した際の波高値とパルス幅の関係

一方、マルチレベル ToT 法では、複数のコンパレータを用いる必要があり、回路の複雑化・ならびに消費電力の上昇を招く。そこで、よりシンプルな回路構成で、ToT 法のリアリティを改善するために、新たに、ダイナミック ToT 法の開発を行った。時間幅信号処理である ToT 法においては波高値を時間幅に変換する際に、特に低エネルギー側で非線形性があらわれる。ToT 法の利点を生かしつつ、欠点であるこの非線形性を改善するための方法として閾値を一定の遅延時間ののちに入力信号にあわせて変化させるような動的閾値を持った ToT 法が dynamic Time over Threshold 法(dToT)である。閾値を変化させることによって、波形整形に自由度を残したまま非線形性が改善されるというメリットがあり、閾値側の配線は信号線とは別なので閾値信号が信号線に及ぼす影響はほとんどない。しかし、閾値電圧の波形は何でもよいわけではなく入力の整形波形に合う波形にしなければならない。具体例として入力の整形波形が CR-RC によって行われるような場合、閾値電圧をコンパレータの立ち上がりから一定遅延時間後に、パルス RC(Low pass Filter)に入力し指数関数状に増えていくような電圧にする。(図 7) 遅延時間と RC Filter に入力されるパルスはモノステーブルマルチバイブレータを通して与える。これにより立ち上がりに反応してワンショットのパルスを出す回路と論理回路によって図 8 のような動作が得られる。

本研究では、このダイナミック ToT 法の動作原理の確認のために、回路基板の製作を行い動作を実証した。

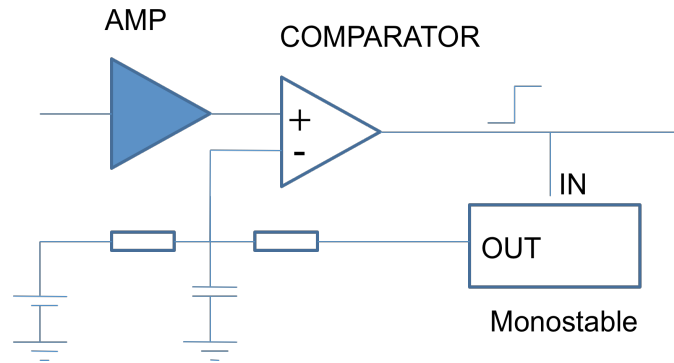


図 7. ダイナミック ToT 法のブロック図

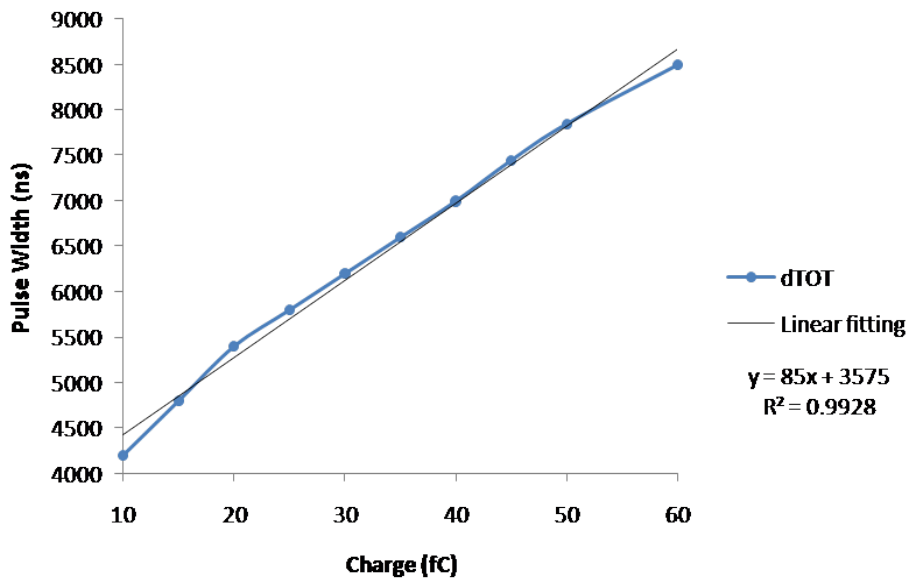


図 8. ダイナミック ToT 法のリニアリティ

参考文献

- [1]. P. Siritiprussamee, K. Fujita, H. Takahashi et al., Nucl. Instr. and Meth. A 580, p1119-1122(2007)
- [2]. A.Oed, Nucl. Instr. and Meth. A 263, pp. 351. (1988)
- [3]. I. Kipnis, T. Collins, J. DeWitt, et al., A Time-over-Threshold Machine: the Readout Integrated Circuit for the BABAR Silicon

Vertex Tracker, IEEE Trans. on Nucl. Sci., vol. 44, No. 3, 289-297.

2.3 成果の外部への発表

H. Takahashi, K. Fujita, T. Fujiwara, B. Guerard, H. Niko, F. Fraga, N. Iyomoto, “Gas proportional scintillation counter with transparent MSGC” , Nucl. Instr. and Meth. A623, No. 1, 123-125.

T. Fujiwara, H. Takahashi, S. Boxuan, K. Shimazoe, “Multi-Level Time-Over-Threshold Method for Energy Resolving Multi-Channel Systems”, IEEE Trans. On Nucl. Sci. 57, 5, 2545-2548.

藤原健, 高橋浩之, 石伯軒, 伊予本直子, 藤田薫, “大強度パルス中性子源用二次元 MSGC の開発”, 日本電気学会研究会, 8月30日 2010, 東京都.

T. Fujiwara, H. Takahashi, B. Shi, N. Torikai, N. Yamada, M. Uesaka “2-Dimensional He-3 M-MSGC with Floating Pads” IEEE Nuclear Science Symposium November 2010, Knoxville, United States.

2.4 活動（運営委員会等の活動等）

特になし。

2.5 実施体制

研究項目	担当機関等	研究担当者
1. 中性子検出における信号処理技術の高度化に関する研究		
(1) 多信号出力中性子検出器の実用化研究	東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻	◎高橋浩之
	同上	大野雅史
	同上	藤田 薫
	同上	渡邊絢子
(2) 多信号出力中性子検出器の信号処理法の研究	東京大学大学院工学系研究科原子力専攻	○藤原健
	同上	伊豫本 直子

注1. ◎:課題代表者、○:サブテーマ代表者

注2. 本業務に携わっている方は、全て記入。