

リアルタイムストロンチウム 90 カウンター開発における基礎研究 BRoaD モジュールを用いた装置性能比較測定

2016 年 5 月 20 日 伊藤博士

概要

BBT 株式会社の論理信号演算処理回路 BRoaD モジュールのリアルタイムストロンチウム 90 カウンター導入を検討している。2016 年 3 月に BRoaD の出力波形を観測した。外部スケーラーによる計数では AND が十分機能するための内部信号幅は 15 ns が妥当であると結論付けた。4 月に仕様を確認したところ、信号出力する段階で性能が落ちるが内部計数では正常に機能することがわかった。2つの信号のタイミングを変えながら内部計数で AND 演算の効率を調べたところ仕様通り内部信号幅は 10 ns で十分機能することを確認した。⁹⁰Sr カウンター装置性能について NIM モジュール演算処理を用いた場合と BRoaD を使用した場合について比較検証した。

1. はじめに

リアルタイムストロンチウム 90 カウンターの読み出し回路として BBT 社の BRoaD が提案された。論理信号を入力し AND, OR, XOR などの演算処理を FPGA によって構成するモジュールだ。3 月に著者が性能試験を試みたところ十分に演算が機能するためには 15 ns の内部信号幅が必要であると判断した。

4 月に同社に問い合わせたところ、内部計測を使用すれば幅 5 ns でも正常に動くはずであると回答を得た。そこで本測定は内部計測が十分に機能する最小の内部信号幅を研究する。NIM 信号を同時に入力したときの AND 演算による内部計測が十分機能する最小幅は 10 ns であると確認できた。

BRoaD モジュールの欠点はリアルタイム計測が実装されていないことで、これは SiTPC のデータ受信の複雑さから FPGA 内のクロック処理を必要とするからである。BRoaD ver. 2.0.19 では内部クロックを使用した場合、7 チャンネルのリアルタイム計測が限界である。5 月の打ち合わせで外部クロックを使用すれば最大 8 チャンネルのリアルタイム計測は可能であると提案された。本測定では、ストロンチウム 90 カウンターの性能について NIM モジュールと BRoaD モジュールの比較検証を目的とする。

2. セットアップ

ハードウェアのセットアップを図 1 に示す。NIM 規格ディスクリミネータ(テクノランド株式会社: 8CH DISCRIMINATOR (Updating), model N-TM305 と、PHLIPS SCIENTIFIC Co. Ltd.: OCTAL DISCRIMINATOR, model 710) を使用してストロンチウム 90 カウンターから出力されたアナログ信号を NIM 規格に変換する。PMT の番号は 0, 1 を SFT1, SFT2、2, 3 を VETO1, VETO2、4~7 を AC1~AC4 として応急措置として追加されている 2 つの PMT は VETO3, 4 と定義する。AC1~4 は電圧 1200 V が供給され、ディスクリミネータの閾値電圧は 0.5 p.e. 相当に設定されている。SFT と VETO はそれぞれ電圧 1000 V 供給され、閾値はディスクリミネータの最小値に設定されている。SFT と AC のそれぞれの信号幅は 10 ns に設定され、VETO はそれぞれ信号幅 100 ns に設定されて出力されている。VETO1~4 は 1, 2 および 3, 4 を FAN IN/FAN OUT((株)海津製作所: 1380)によって OR 演算され、その出力をそれぞれ BRoaD の In-2, In-3 に入力される(それぞれ *veto1*, *veto2* と定義)。SFT1~2 および AC1~4 は再度ディスクリミネータに入力されてチャタリング処理を施された後、合計 50 ns 遅延されて BRoaD の In-0, In-1 および In-4, In-5, In-6, In-7 にそれぞれ入力される。NIM 規格クロックジェネレータ(カイズワークス社: 10 MHz CLOCK GENERATOR, model KN270)で 1 Hz の周波数を外部入力 In-M に入力しリアルタイム計測の出力周波数を生成した。

BRoaD の演算回路は図 2 に示す。8 つの信号は PreLogic を通り、CntFnc で内部信号幅を調節されて PostLogic で演算処理される。リアルタイム計測のために外部から 1 Hz クロック信号を MsrCnt の入力にセットする。測定は最大 4 つまで可能でいくつかの演算回路を試みた。NIM による評価測定は AC の

Multiplicity(以降 M)が 4 つのうち 1 つ以上の正論理($M \geq 1$)、M が 4 つのうち 2 つ以上($M \geq 2$)について結果が報告されたので、基本思想は BRoaD についてもこの 2 つの演算回路で比較する。また、BRoaD の特徴でもある汎用性の演算処理システムを利用して、最大性能をもつ演算回路式を探索する。

線源として 23.8 kBq の ^{90}Sr 、26.0 kBq の ^{137}Cs 、そして 62 Bq の ^{40}K (KCl)を使用した。線源を装置の下にセットし、1 時間のカウント数を計測する。

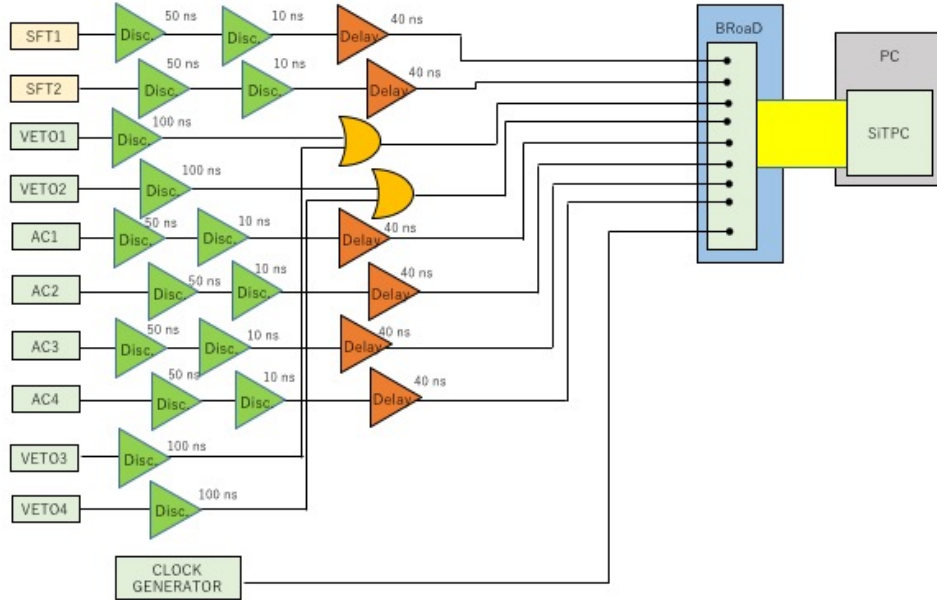


図 1. ハードウェア・セットアップ

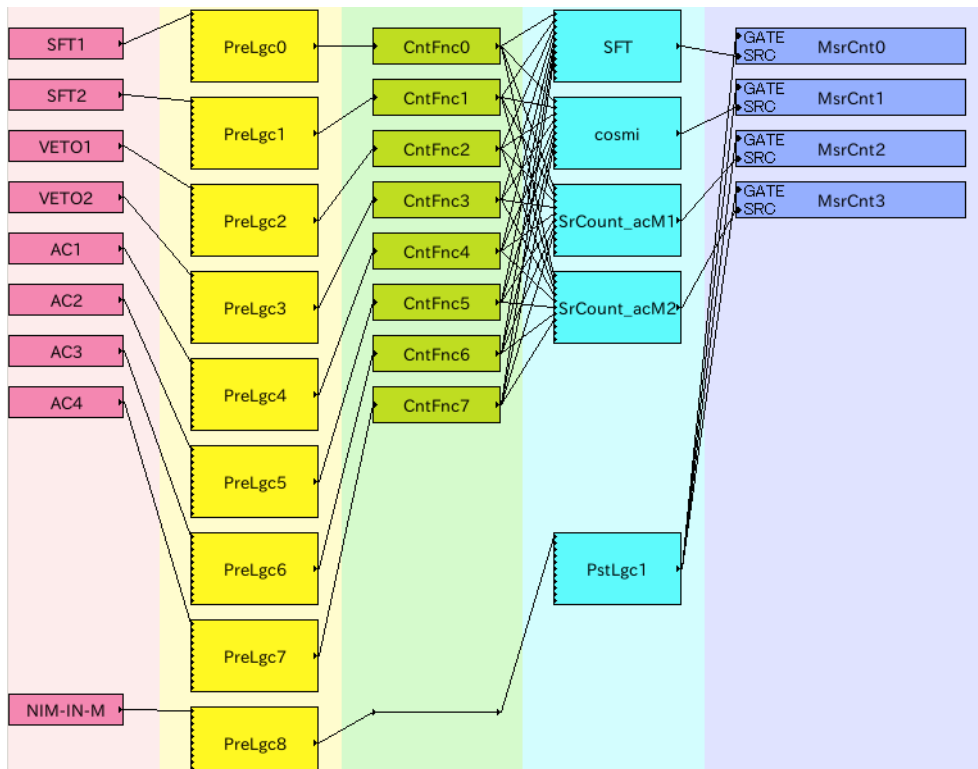


図 2. ソフトウェア・セットアップ

3. 結果と考察

3.1. 演算論理

BRoaDの演算回路設計で試みた数は計6つを以下に示す。

$$\text{OUTPUT}(M \geq 1) = SFT1 \cap SFT2 \cap \overline{veto1 \cup veto2} \cap AC(M \geq 1)$$

$$\text{OUTPUT}(M \geq 2) = SFT1 \cap SFT2 \cap \overline{veto1 \cup veto2} \cap AC(M \geq 2)$$

$$\text{OUTPUT}(M \geq 3) = SFT1 \cap SFT2 \cap \overline{veto1 \cup veto2} \cap AC(M \geq 3)$$

$$\text{OUTPUT}(M = 4) = SFT1 \cap SFT2 \cap \overline{veto1 \cup veto2} \cap AC(M = 4)$$

$$\text{OUTPUT}(\text{logic1}) = \{SFT1 \cap (AC1 \cup AC2)\} \cup \{SFT2 \cap (AC3 \cup AC4)\} \cap \overline{veto1 \cup veto2}$$

$$\text{OUTPUT}(\text{logic2}) = \{SFT1 \cap (AC1 \cap AC2)\} \cup \{SFT2 \cap (AC3 \cap AC4)\} \cap \overline{veto1 \cup veto2}$$

ここで上4つはACのマルチプリシティを順に増加させている。Logicと表記した演算回路は左右でOR演算するように考慮した。つまり、Logic1では左のSFTと左のACが2つのうち1つ以上もしくは右のSFTと右のACが2つのうち2つ以上でかつvetoが応答していない場合に等しい。

3.2. ⁹⁰Srの絶対感度

装置に放射能Aの線源をセットして計測した正味のカウンtr頻度N/Tの比を絶対感度と定義する。

$$\eta = \frac{N}{AT}$$

このとき⁹⁰Sr線源の放射能は 23.8 ± 1.0 kBqであった。図3にNIMとBRoaDを用いた演算回路による感度評価測定の結果を示す。○はNIMモジュールによる演算回路で評価した結果、□と△はBRoaDで生成した演算回路の評価結果である。2つのBRoaD評価の違いはBRoaD1では内部信号幅が10 ns、BRoaD2では信号幅15 nsで生成していることである。BRoaD1ではNIMの結果と比較して感度が再現できなかった。これは単

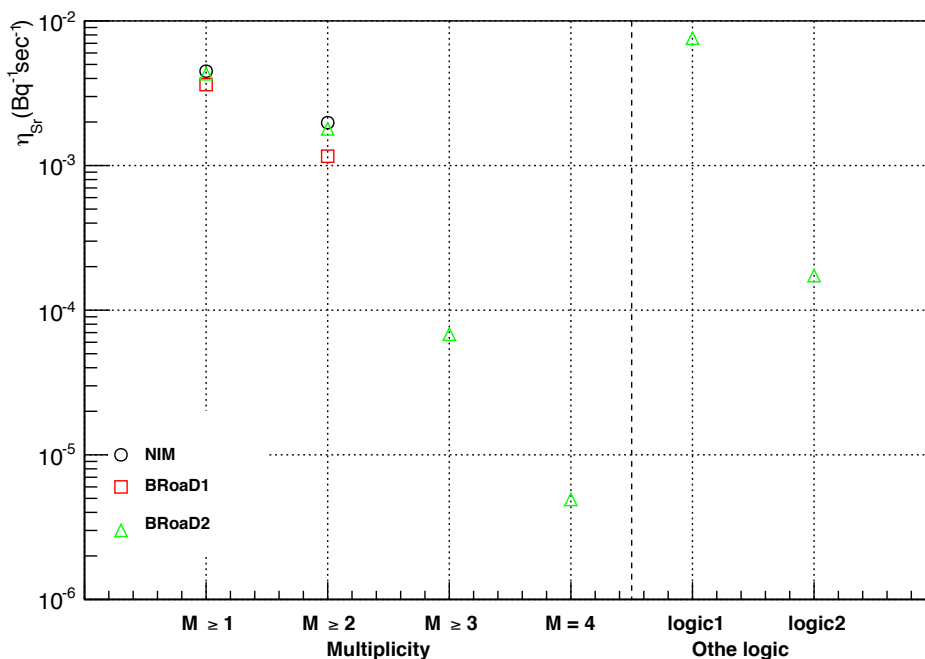


図3. 各演算回路における⁹⁰Srの絶対感度

純にBRoaDのAND演算が十分に機能する最小幅は10 nsで評価したが、ベータ線観測における信号の検出時刻の揺らぎの影響が原因でNIMと比べて感度が低くなったと考えられる。そこで信号幅を15 nsに拡張した結果では、NIMと同等に近い感度が得られ演算回路を再現できた。マルチプリシティの条件を増やすと感度が下がることを確認できた。新たな演算回路をみるとLogic1は感度が良く、Logic2はイマイチな結果が得られた。ここで気になるのは ^{90}Sr に対する他核種の感度比である。

3.3. 他核種の感度比

^{90}Sr の感度 η_{Sr} と他核種の感度 η_{other} の感度比 Γ は以下で表せる。

$$\Gamma = \frac{\eta_{\text{other}}}{\eta_{\text{Sr}}}$$

図4に結果を示す。NIMとBRoaD2の回路演算の結果はほぼ一致している。またマルチプリシティ条件を増やすと、 ^{137}Cs の感度に対して減少する傾向が確認できた。しかし、 ^{40}K との感度比は低放射能が原因で正確な感度を導出できず、誤差の範囲で評価することしかできなかった。マルチプリシティ条件の増加で誤差が増加している要因は ^{90}Sr の感度誤差が反映されているからである。改善策は使用する ^{40}K の放射能を増加することで、具体的には装置の有効面積 300 cm^2 に厚さ 1 mm の塩化カリウム試薬を分布させる。KClの密度は約 1.98 g/cm^3 なので、放射能 0.99 kBq の線源が生成されるはずである。

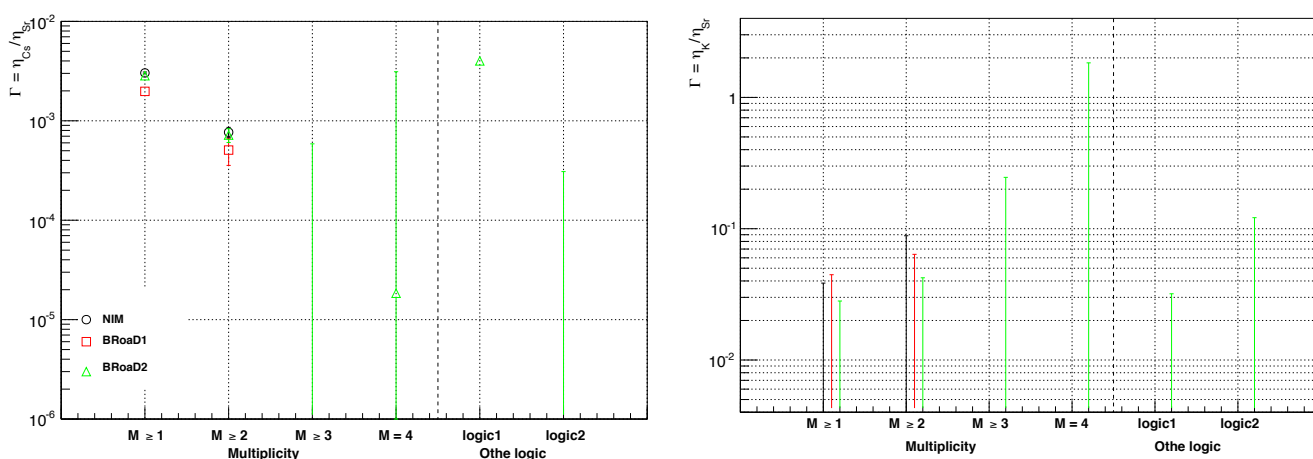


図4. 各演算回路における ^{90}Sr と他核種との感度比

3.4. ^{90}Sr の検出限界

バックグラウンドである ^{137}Cs 、 ^{40}K および宇宙線ミューオンがある中で試料内の ^{90}Sr の検出限界 $A_{\text{min}}^{\text{Sr}}$ は以下で表せる。

$$A_{\text{min}}^{\text{Sr}} = \frac{3\sqrt{N_{\text{BG}} + (\eta_{\text{Cs}}A'_{\text{Cs}} + \eta_{\text{K}}A'_{\text{K}})m\varepsilon^{-1}T}}{\eta_{\text{Sr}}m\varepsilon^{-1}T}$$

ここで、試料は海産物 (fish)と海水(water)について考える。試料は熱せられ体積が圧縮される。圧縮率 ε は海産物が30%、水が1%と仮定する。装置の有効面積は 300 cm^2 で、試料は厚さ 1 mm のペースト状に整形されるので検査される試料(圧縮後)の質量の限界は 30 g である。測定時間 T は 3600 秒。 ^{137}Cs は政府が定めた 100 Bq/kg が最大で含まれて、 ^{40}K は海産物には 150 Bq/kg 、海水には 12.1 Bq/kg 存在していると仮定した。 ^{90}Sr を有意に検出判断するための条件: $N > N_{\text{BG}} + k\sigma$ をこの式は満たしている。ここで、Kaiserの理論に基づいて $k = 3$ 、 σ は標準偏差である。

図5に演算回路による検出限界の推定結果を示す。マルチプリシティ条件の増加で検出限界が増加(悪化)している。これは単純に ^{90}Sr の感度低下に依存している。NIMとBRoaD2で比較しても同等の結果が得られ、この結果からNIMモジュールの代替としてBRoaDモジュール回路は十分妥当であると言える。BRoaDの汎用的な演算回路設計によってLogic1とLogic2を生成した。Logic1はマルチプリシティ条件 $M \geq 1$ よりも良い結果が ^{90}Sr 感度、感度比そして検出限界において得られた。海産物に関して25.0 Bq/kg、海水に関しては0.86 Bq/kgが推定された。この演算回路では目標値1 Bq/kgを達成できることが証明できた。

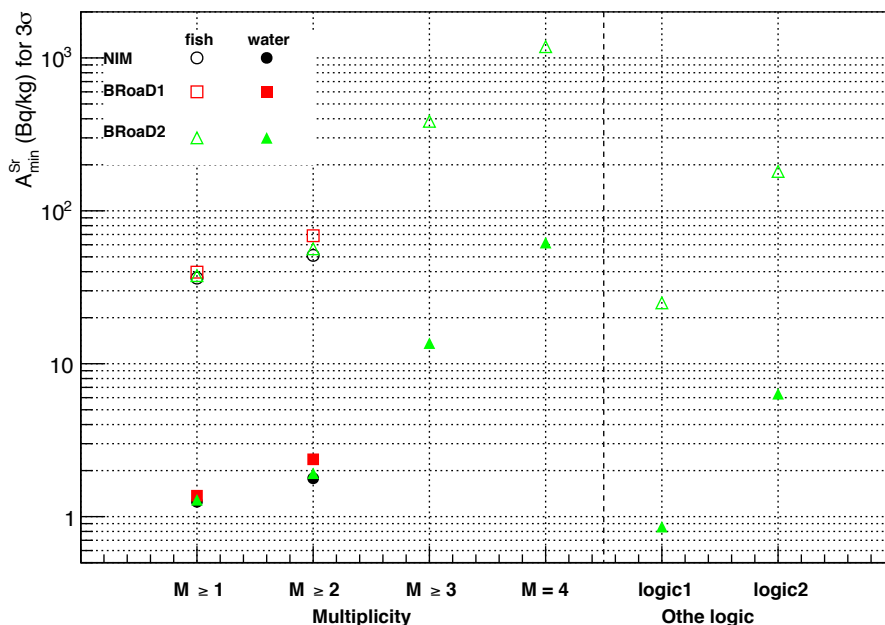


図5. 各演算回路における ^{90}Sr の検出限界

4. まとめ

本測定ではBRoaDモジュールによる性能評価しNIMモジュールによる信号演算処理の代替として十分妥当であることを検証した。このモジュールはその特徴から任意な演算式を設定可能で、いくつか検証した結果、本研究の目標検出限界値1 Bq/kgを達成する演算を発見した。

次の仕事はTDCを用いて信号のタイミングの情報から雑音を抑制して性能向上を図る。また、装置の商品化に向けてソフトウェア、ハードウェアの仕様を業者と打ち合わせして決定したい。技術補佐員の見玉に装置の筐体設計を委託してある。7月の展示発表に向けてパンフレット、マニュアルなどの仕様書作成が今後の予定である。