

# 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(株式会社 Bee Beans Technologies)の性能限界測定

2016 年 3 月 19 日 伊藤博士

## 概要

リアルタイムストロンチウム 90 カウンターの初号機は 2015 年度に完成した。実用のための性能は不十分であったが、チェレンコフ放射を測定原理にして  $^{90}\text{Sr}$  に強く反応し、 $^{137}\text{Cs}$  に反応しにくい動作を実証した。装置全体の回路は実に単純で 7~8 個の光電子増倍管からの信号をディスクリミネータで論理信号に変換し、AND と NOT 回路で信号処理するだけである。KEK 発ベンチャー株式会社 Bee Beans Technology が開発した BRoad モジュールは 32ch FPGA を実装した信号処理システムで、ソフトウェア上で信号処理回路を設計することができ ROM に保存し再現できる。複数台の NIM モジュールの代用することで、コストダウンと大面積化の時の回路設計が容易になるだろう。本測定で BRoad モジュールの性能限界を調べ装置回路の設計の方針を決定する。

## 目次

1 はじめに	1
2 リアルタイムストロンチウム 90 カウンター	3
3 BRoad モジュール	4
4 セットアップ	5
4.1 入力信号生成	5
4.2 BRoad ソフトウェア	5
5 解析結果	6
5.1 NIM ディスクリミネータ信号	7
5.2 BRoad の出力信号	7
5.3 AND 識別領域	8
6 考察とまとめ	8
7 付録 A	9

## 1. はじめに

2011 年の福島原発事故から 5 年経った今、注目すべきはストロンチウム 90(以降  $^{90}\text{Sr}$ )である。アルカリ土類金属でカルシウムと似た化学的性質を持つことから体内に摂取される

と骨に溜まり、内部被曝が放射性セシウム( $^{134}\text{Cs}$  または  $^{137}\text{Cs}$ )と比べて数百倍危険だ。福島県沖漁業が再開されない一つの理由は試料内の  $^{90}\text{Sr}$  の放射能が測定困難であることである。従来の測定では化学的に Sr を抽出し、その後  $^{90}\text{Sr}$  と  $^{90}\text{Y}$  の放射平衡状態にして  $^{90}\text{Y}$  の放射能を測定することで逆算して推定する。この方法では1検体あたりの測定時間が数週間から1ヶ月程度、さらに測定量を数十万円要する。法律上管理区域での測定となるので輸送費がかかる。これでは漁業再開できないことは明らかだ。そのためにサーベイメータのように管理区域外でも使用でき、試料質量と計測値から簡単に放射能測定する方法を確立する必要がある。

2011年に厚生労働省が食品内に含まれる放射能物質の限界値は100 Bq/kgと設定した。この値はしばしば  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  から放出される  $\gamma$  線の測定から評価した値を指していることが多く、この値は Cs と同じアルカリ金属であり、自然放射能の  $^{40}\text{K}$  の年間内部被曝0.18 mSv/yr を十分下回っていることから設定されている。

図1に1日あたりの  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{90}\text{Sr}$  の摂取量と摂取期間における生涯被曝量(50年間)の推定を示す。100 Bq の  $^{137}\text{Cs}$  を3年間摂取したとしても自然放射能である  $^{40}\text{K}$  による内部被曝量(9 mSv)と同等程度と推定できる。しかし  $^{90}\text{Sr}$  は同様に100 Bq 摂取した場合、1ヶ月摂取するだけで100 mSv 被曝する。ICRP(国際放射線防護委員)は累積100 mSv 以上の場合の発がん死亡率は約0.5%と報告している。したがって1年間毎日  $^{90}\text{Sr}$  を100 Bq 摂取すると発がん死亡率は50%以上と推定できる。

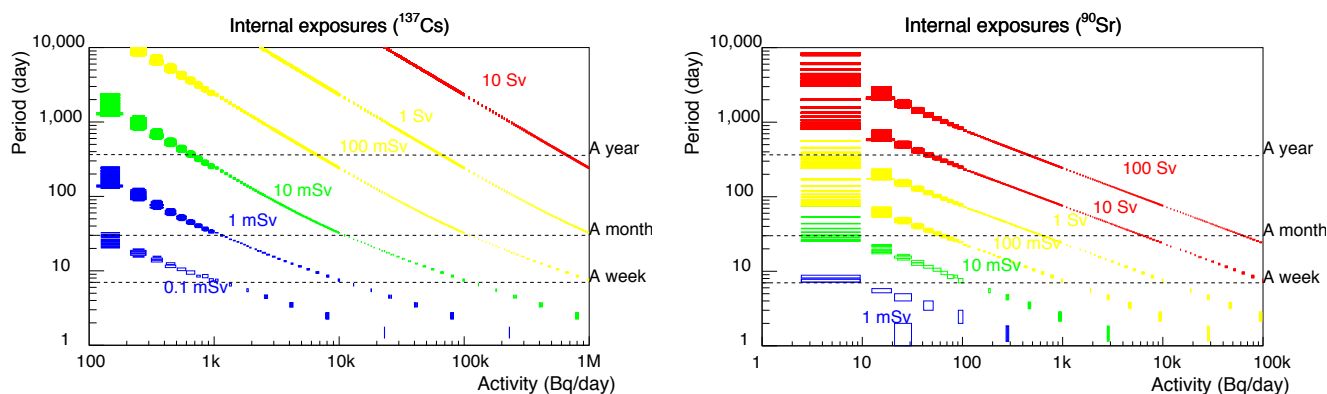


図1. 1日あたりの  $^{137}\text{Cs}$  および  $^{90}\text{Sr}$  の摂取量と摂取期間における生涯被曝量(50年間)の推定

## 2. リアルタイムストロンチウム 90 カウンター

従来のシンチレーション・サーベイメータと異なり、チェレンコフ放射を動作原理としたリアルタイムストロンチウム 90 カウンターを千葉大で開発した。チェレンコフ放射は一種の衝撃はで荷電粒子が屈折率  $n$  の物質内で光より速く走る時に放射する。 $^{90}\text{Sr}$  の娘核である  $^{90}\text{Y}$  から放射される最大 2.28 MeV のベータ線(電子)だけに反応し、他のバックグラウンドとなる  $^{40}\text{K}$  からの 1.33 MeV のベータ線や  $^{137}\text{Cs}$  からの最大 1.17 MeV のベータ線に反応しないために屈折率 1.042 未満の透明な物質が要求される。

千葉大粒子線物理学研究室は高エネルギー物理学実験で用いられる「シリカエアロゲル」を屈折率 1.003~1.25 の領域で製造する技術を持っており、この要求を満たす。図 2 に装置設計を示す。試料は赤色で示すが、ベータ線は透過力が弱いため厚さ 1 mm のペースト状にして最下層に設置する。黒色のシートがシンチレーティングファイバーによるトリガー (SFT)を示し、特にベータ線のエネルギー損失を最小にするために薄型の設計にしてある。シアン色物質がシリカエアロゲルを示し、その上部 (下流) に波長変換ファイバーで集光する。エアロゲルと WLSF を組み合わせて AC と呼ぶことにする。黒円柱は PMT を表しており、それぞれのシンチレーション光もしくはチェレンコフ光を読み出す。黄色物質はアルミ製の遮蔽板で青色物質のベトーカーンター(veto)にベータ線が到達しないように設置している。ベトーカーンターはプラスチックシンチレーターで装置の 5 側面を覆い立体角  $2\pi$  の宇宙線に対して除去できる設計にしている。

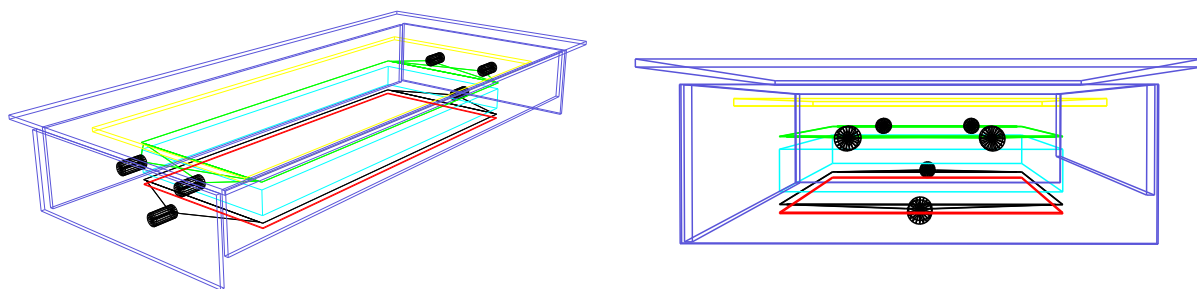


図 2. リアルタイムストロンチウム 90 カウンター設計

この装置は SFT と AC が反応し、かつ veto が反応しない事象が  $^{90}\text{Sr}$  の娘核である  $^{90}\text{Y}$  からのベータ線が入射したとして認識する。PMT からのアナログ信号をデジタル信号に変換し、AND と NOT 演算処理を行って上記の回路設計を行う。

### 3. BRoad モジュール

株式会社 Bee Beans Technologies が開発したプログラマブル NIM 信号処理装置 Bee Beans Technologies Reconfigurable operating architecture designer (BRoad)は以下の特徴を持つ。

1. LEMO コネクタ FastNIM 規格(9-Input, 8-Output), BNC コネクタ TTL 規格(1-Input)
2. 信号は 200 MHz サンプリング処理をしているため、時間分解能 5 ns
3. AND, OR, Delay, Width などの演算可能
4. 作成したロジックは PC 上に保存でき、簡単に切り替え可能
5. SiTCP の技術でネットワークを介して遠隔操作、データのダウンロード等が可能
6. 最大 16 種の ROM にロジックを記憶でき電源起動時に自動で呼び出す設定が可能

ストロンチウム 90 カウンターの回路の候補の一つとして挙げられている。1 台 17 万円相当で NIM モジュール数台分のパフォーマンスを秘めている。<sup>90</sup>Sr カウンターに搭載する場合、Discriminator と PMT HV Supply は別で用意し、信号処理システムとして導入することになる。PC と連結させてカウント数を読み出す方式と、スケーラーを別で用意し、そこにつなげて簡単操作できるようにする方式が検討される。



図 2. BRoad モジュール

## 4. セットアップ

### 4.1. 入力信号生成

波形生成器(Function Generator)の sync から数 kHz の TTL 規格の信号を用いてテスト信号を生成する。TTL 規格の信号を TTL-NIM によって規格変換し、ディスクリミネータで可変幅の論理信号を出力する。ディスクリミネータはテクノランド社の N-TM305 8CH Discriminator (Updating)を使用した。

BRoad モジュールでストロンチウム 90 カウンターが使用する信号は ns の時間スケールである。BRoad の出力信号をオシロスコープで波形解析し、入力信号の時刻から出力信号までの遅延時間、立ち上がり時間、信号幅を観測する。入力信号幅を小さくし認識動作不良となる限界幅を探る。

この装置で特に重要な回路が AND 回路(コインシデンス)である。BRoad 内の AND 処理において内部処理の信号幅を変えると信号が出力されない時が現れた。出力されない幅から限界値を探る。

### 4.1. BRoad ソフトウェア

BRoad 内部回路設計は PC のソフトウェア上で組み上げることができ、図 4 に示すように GUI の仕様で直感的に設計することが可能。この設計は IN-0, 1 の入力信号を AND 処理して OUT-0ch に信号を出力する。

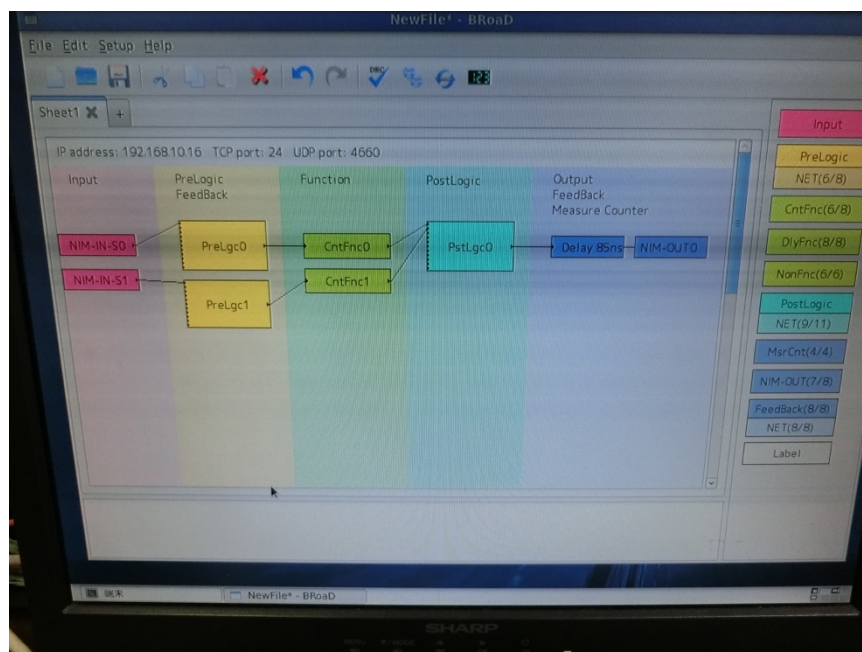


図 4. BRoad ソフトウェア GUI

## 5. 解析結果

### 5.1. NIM ディスクリミネータ信号

NIM 規格は終端 50  $\Omega$  のインピーダンスを採用した場合、0 V が LOW で -0.7 V が HIGH の負論理規格だ。図 5 にオシロスコープで取得した波形データと台形曲線によるフィット結果を載せる。立ち上がり時刻を start、立ち上がり時間を Rise time、信号幅は半値幅を示す。100 事象の波形データのフィット結果から NIM の立ち上がり時刻は平均 2.88 ns、start 時刻の時間分解能は標準偏差で 0.09 ns であることがわかった。入力信号幅は 10 ns, 5 ns, 4 ns と狭めて測定した。

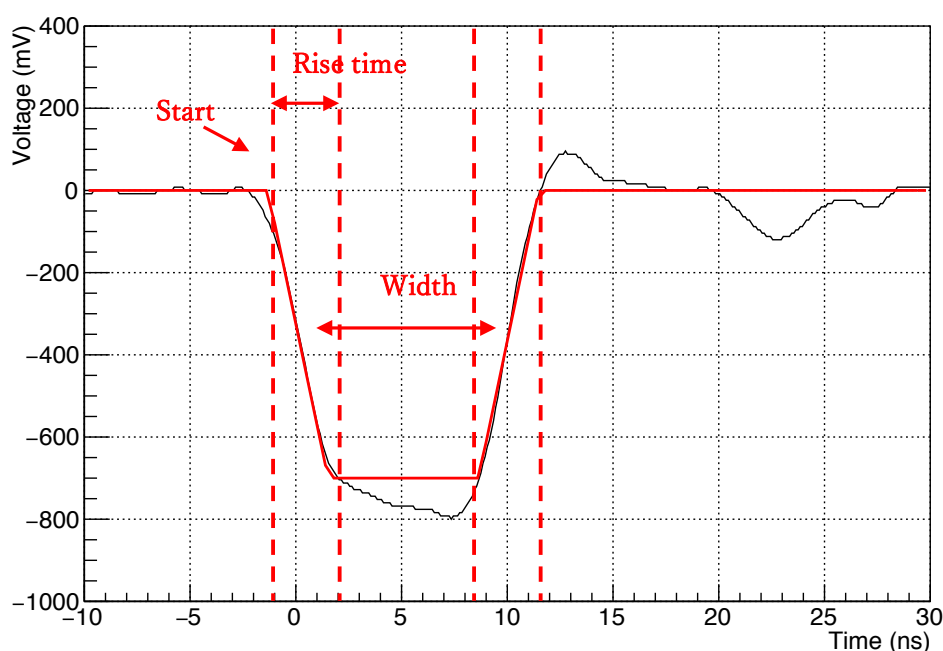


図 5. NIM Discriminator 信号波形

### 5.2. BRoad の出力信号

BRoad の出力信号はソフトウェア上で幅 10 ns の不論理出力領域と 5 ns の俯瞰領域が設定されている。この値が BRoad の最小設定値で、出力領域と俯瞰領域それぞれ 5 ns が最小可変幅である。図 6 にオシロスコープによる取得波形データとフィット結果を載せる。フィット関数の -50 mV を超える時刻を Stop、-50 mV から -700 mV に立ち下がる時間を Rise Time、-700 mV を超えている時間を Width と定義する。立ち上がり時間は平均 3.46 ns であることが確認された。Start と Stop の時間差は平均 90.6 ns、時間分解能 1.5 ns ( $\sigma$ ) と評価でき、入力信号から BRoad 内 FPGA の演算処理時間(約 85 ns)に一致する。

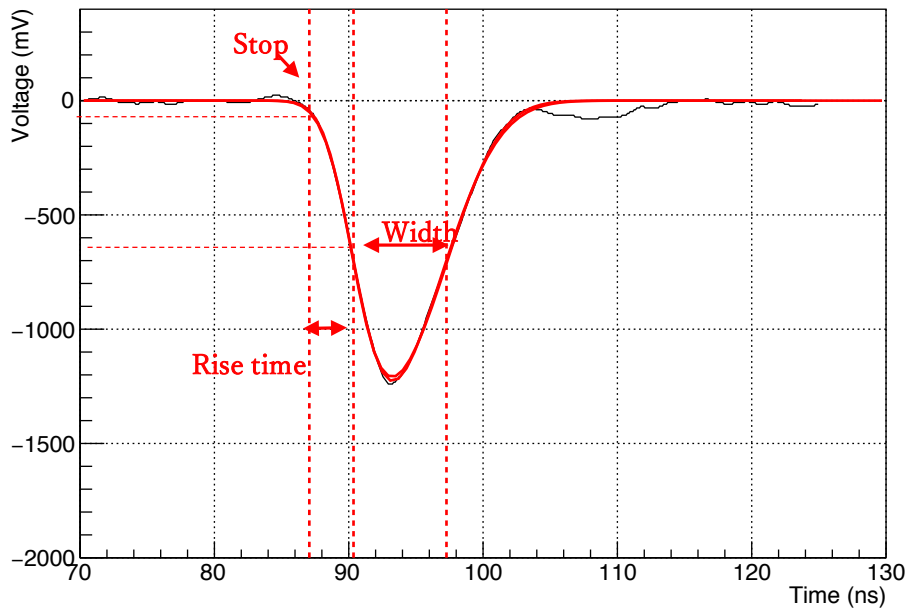


図 6. BRoad 出力信号波形

BRoad の出力信号幅は 10 ns に固定し、NIM ディスクリミネータの入力信号幅を変えた時の信号認識割合の関係を図 7 に示す。4 ns の信号幅では認識 Efficiency が 0.82 と十数%の読み取れない信号が出現する。すなわち 100%認識するための信号幅は 5 ns 以上であり、この幅が BRoad モジュールの性能の限界値であると言える。

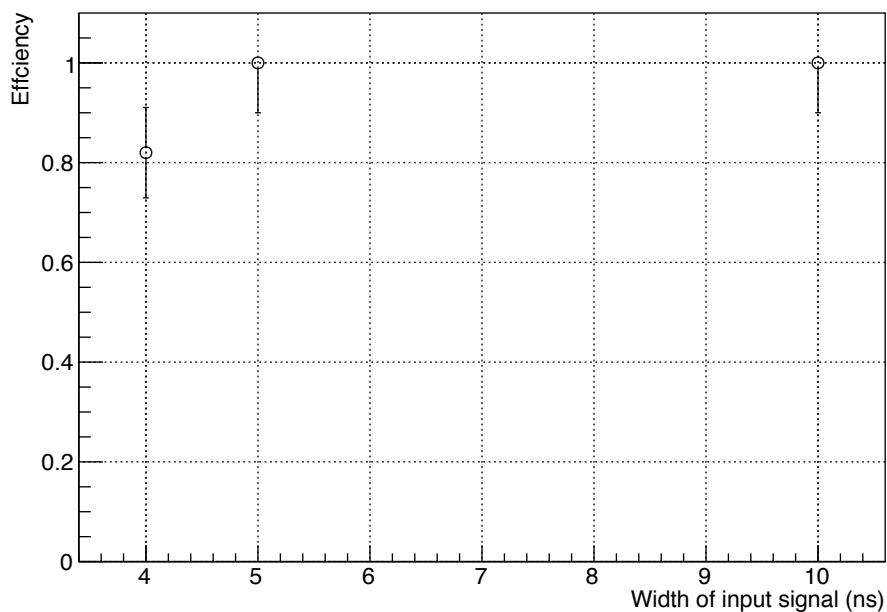


図 7. 入力信号幅に対する BRoad の Efficiency

### 5.3. AND 識別領域

幅 10 ns の NIM の入力信号を同時に In-0, 1 に入力し、内部信号幅を 5 ns ごとに可変すると 5 ns と 10 ns で出力されない事象が存在した。以下に内部信号幅と efficiency の関係を図 8 に示す。コインシデンスレベルが 15 ns ないと演算処理でミスが生じるのかもしれない。

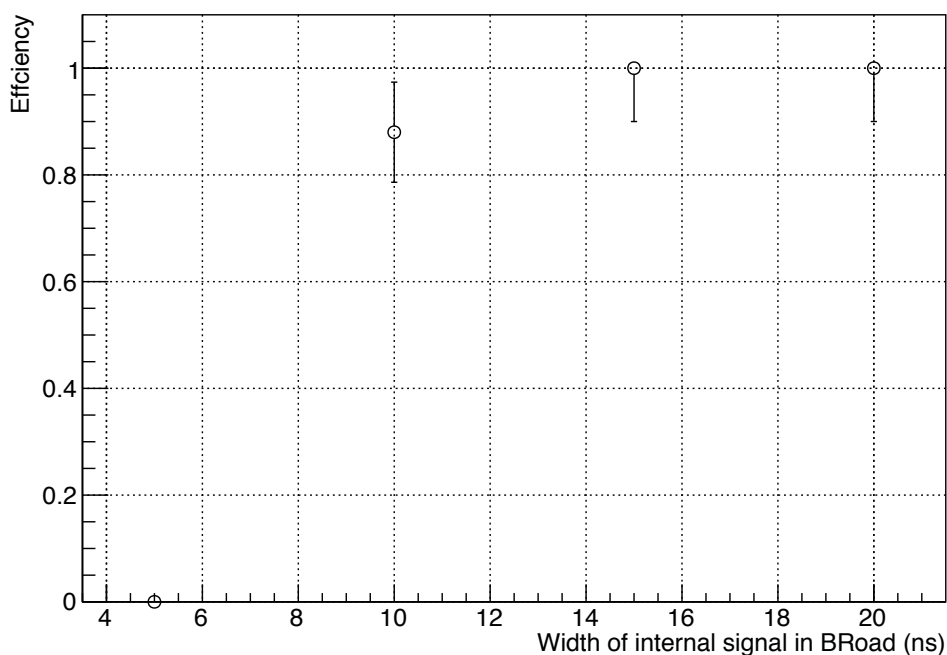


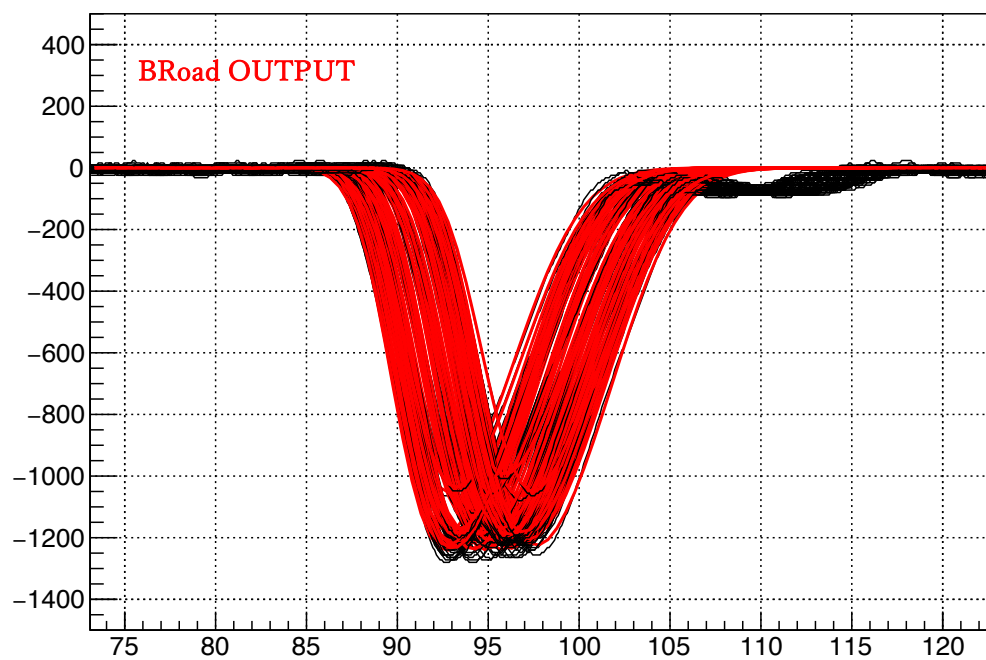
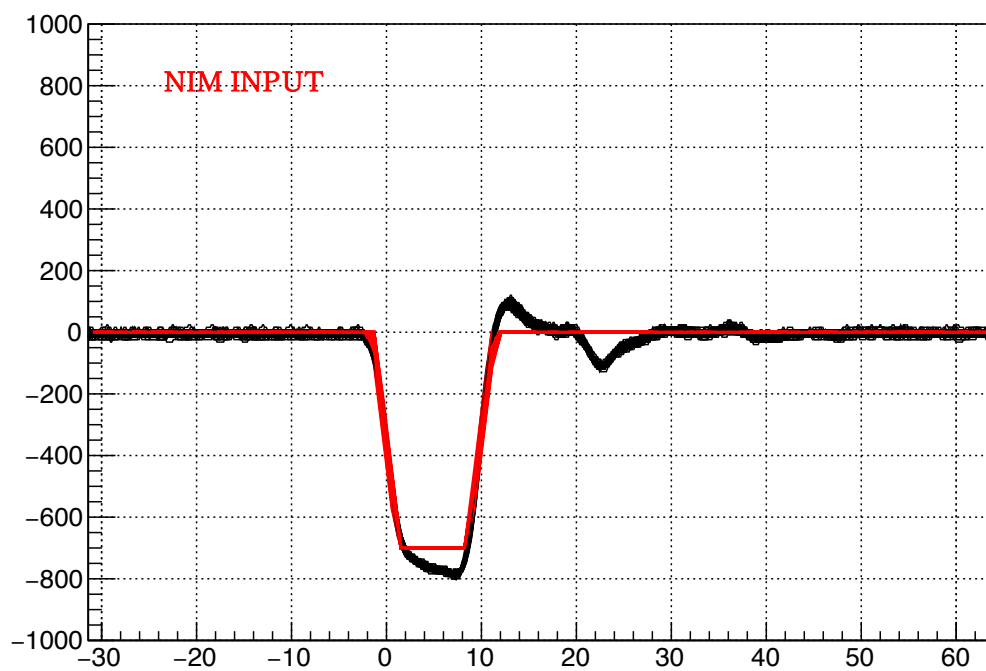
図 8. BRoad 内部信号幅に対する AND 出力の Efficiency

## 6. まとめ

BRoad の性能限界を調べた結果、出力信号は入力時から 90 ns ほど遅延されることは演算処理時間 85 ns に矛盾しなかった。この時間差における分解能は標準偏差で 1.5 ns で NIM ディスクリミネータの信号と比較して約 15 倍ほど大きかった。入力信号の認識限界幅は 5 ns、AND の認識限界幅は 15 ns と確認された。リアルタイムストロンチウム 90 カウンターの信号処理システムとしては十分な性能であることは確認できた。装置の回路設計として Discriminator の信号幅は 10 ns、AND のための内部信号幅は 15 ns の出力領域と 35 ns の不感領域の設定が妥当と判断した。



付録 A : 入力信号と出力信号の 100 event のデータ



付録 B : 入力信号と出力信号のスタート時刻分布とストップ時刻分布

