

リアルタイムストロンチウム 90 カウンター開発 性能試験

1. はじめに

除染学会の展示では装置は十分な性能試験が得られなかった。宇宙線除去装置の感度が低いことが性能を出なかった原因であった。具体的にはシンチレータの側面に波長変換ファイバーのシートが貼り付けられるが、それ以外は何も処理されていなかったのだ。つまりシンチとファイバーは内箱内で裸の状態だったのだ。さらに使用したファイバーはコスト削減のためシングルクラッドが用いられていた。ダブルクラッドと比較して約 66% に収集効率が落ちるが価格が 1/3 になる。言い訳としては現在ダブルクラッドファイバーをベター装置の練習用にするほど在庫がなかったのだ。そこで、シンチレータの周りを反射材で覆った場合の性能を比較し、今後の方針を検討したい。

2. セットアップ

RTSC-A は図 1 に示す回路で動作しており、PC で制御される。AC100V は AC-DC 変換器で定格 12V に変換され DC-DC 変換器に供給される。そして HV と Discr. の供給電源として 12V, 5V, GND が供給される。HV は 4ch の PMT に 1kV もしくは 1.2kV の電源を供給する。HV mode SW で供給電圧を OFF, 700V, 1.0 or 1.2kV を切り替える。PMT のアナログ信号を Discriminator でデジタル信号に変換し BRoaD に入力する。BRoaD で事前に設定された演算回路で出力され NIM-Scalar で計測される。または PC の ETHERNET ケーブルを経由して制御される。最大 4 ch 分の計測頻度を記録することができる。

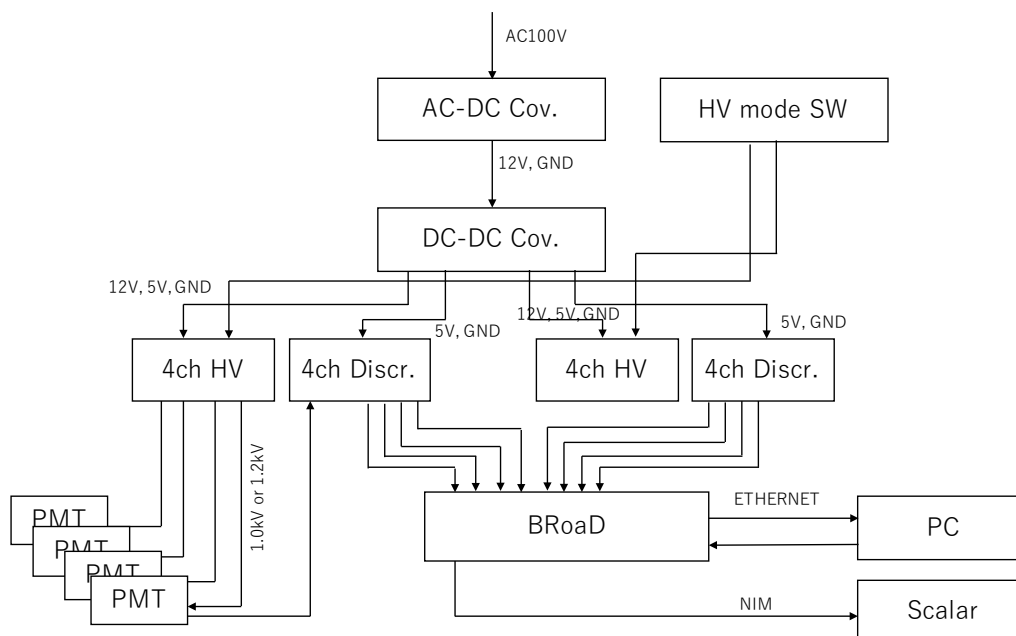


図 1. RTSC-A の読み出し回路の概念図

3. HV 電源立ち上がり

PMT に高圧電源を供給する林栄精器の HV: RP1637-BS は約 3 分間かけてゆっくりと電圧を上げていき 1.0 or 1.2 kV に達する。PMT は Tr1, Tr2, veto1, veto2, AC1, 2, 3, 4 で合計 8 個使用され、ディスクリミネータのしきい値電圧は個別に設定される。

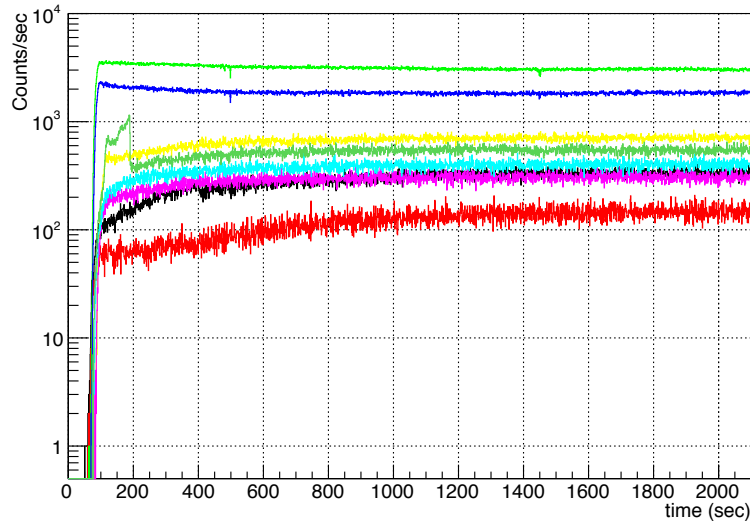


図 2. PMT の電圧供給時の計数率安定性

3分かけて電圧を上昇させるのでカウント頻度が次第に上昇する過程が観測された。定格電圧印加されてから数分は、PMT は高雑音である。そのため安定的に計測できるためには電圧供給開始から 20 分待機する必要がある。PMT チャンネルのしきい値電圧は表 1 に示す。

Channel, function	Threshold [mV]	Channel, function	Threshold [mV]
1ch: Tr1	15.0	5ch: AC1	18.9
2ch: Tr2	15.0	6ch: AC2	32.5
3ch: veto1	15.0	7ch: AC3	33.6
4ch: veto2	15.0	8ch: AC4	22.5

表 1. PMT チャンネル毎の Discr. しきい値電圧

測定用の演算回路での立ち上がりを図 3 に示す。線源を入れないでバックグラウンドの計数率を 1 分ごとに取り得した。黒線は $SFT \otimes \overline{veto}$ 、赤線は $SFT \otimes \overline{veto} \otimes AC(M \geq 1)$ 、緑線は $SFT \otimes \overline{veto} \otimes AC(M \geq 2)$ 、青線は $SFT \otimes AC(M \geq 1)$ を示す。20 分間待機しバックグラウンド頻度が安定してから性能評価する。ここで基準とする回路演算は $SFT \otimes \overline{veto} \otimes AC(M \geq 1)$ とすると、1 時間あたりの平均計数率は 0.56 cps である。

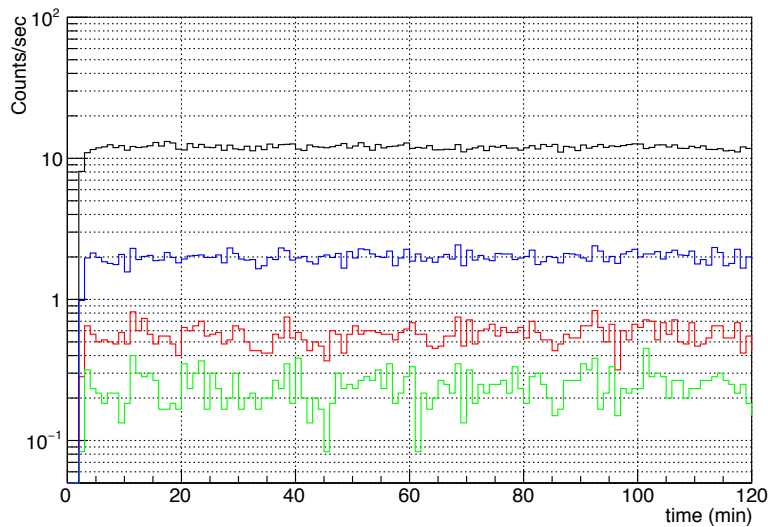


図 3. RTSC-A の電圧供給時のバックグラウンド計数率安定性

4. 宇宙線除去装置性能向上

RTSC-A の性能は密封線源 ^{90}Sr (^{90}Y) ($23.7 \pm 4.7 \text{ kBq}$) と ^{137}Cs ($26.0 \pm 5.2 \text{ kBq}$)、そして ^{40}K ($66 \pm 2 \text{ Bq}$) を用いて評価した。評価の対象は ^{90}Sr 線源による感度とバックグラウンド頻度、そして宇宙線除去装置の検出効率である。1時間の計数とその誤差、そして放射能から核種感度、そして検出限界を推定する。そして $\text{SFT} \otimes \text{AC} (M \geq 1)$ をトリガーにして $\text{SFT} \otimes \overline{\text{veto}} \otimes \text{AC} (M \geq 1)$ の計測比から宇宙線除去装置の検出効率を評価した。また、4種類の演算においてそれぞれ評価した。図3の回路演算をそれぞれ番号1~4で区別することにする。

宇宙線除去装置のシンチレータが裸の場合とアルミホイルを反射材として巻いて改良した場合の結果を表2に示す。改良後では宇宙線による除去が若干向上した効率も61.4%から72.4%に上昇したものの十分な性能とは言えない。検出限界は海水の場合1.3 Bq/kg、海産物の場合38 Bq/kgまで下がった。もしバックグラウンド頻度が0.55 cpsからゼロになった場合、検出限界は海水の場合0.15 Bq/kg、海産物の場合1.2 Bq/kgが予想される。例えばBGが0.01 cps未満になれば検出限界はそれぞれ0.23 Bq/kg, 5.3 Bq/kgが見込まれる。検出限界は以下に示す通り試料の質量（つまり有効面積）の平方根に反比例し、測定時間に反比例する。

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

海産物で1 Bq/kg未満の検出限界を達成するためには有効面積を1.4倍(BG=0)にする必要がある。ここで幅20 cm長さ50 cmの有効面積がファイバーの減衰長から有効的にチェレンコフ光もしくはシンチレーション光を伝搬することができるため約3.3倍の面積拡張は限界である。これを踏まえると、バックグラウンド頻度の目標値は1時間で2カウント未満、つまり $5.5 \times 10^{-4} \text{ cps}$ である。従って除去装置の目標検出効率は99.93%以上である。

	改良前	改良後
BG rate (cps)	0.67	0.55
$\eta_{\text{Sr}} (Bq^{-1}sec^{-1})$	$(7.16 \pm 0.01 (stat) \pm 1.42 (sys)) \times 10^{-3}$	$(9.70 \pm 0.01 (stat) \pm 1.92 (sys)) \times 10^{-3}$
$\eta_{\text{Cs}} (Bq^{-1}sec^{-1})$	$(1.62 \pm 0.09 (stat) \pm 0.32 (sys)) \times 10^{-5}$	$(2.54 \pm 0.09 (stat) \pm 0.51 (sys)) \times 10^{-5}$
$\eta_{\text{K}} (Bq^{-1}sec^{-1})$	$(0 \pm 2.94 (stat) \pm 0.02 (sys)) \times 10^{-4}$	$(2.1 \pm 26.0 (stat) \pm 0.1 (sys)) \times 10^{-5}$
Eff. of veto	61.3%	72.4%
$A_{\text{SR}}^{\text{min}}$ (water) (Bq/kg)	1.9	1.3
$A_{\text{SR}}^{\text{min}}$ (fish) (Bq/kg)	58	38

表2. 結果。改良前、後の比較表

5. まとめ

線源を用いて RTSC-A 性能を評価した。宇宙線除去装置に重大な欠陥が見つかり反射材を巻いて補強した。改良後は宇宙線除去装置の検出効率は61.3%から72.4%へ上昇したが性能としては不十分だ。大幅な設計見直しが必要と分かったこの時の検出限界が水の場合1.3 Bq/kgで海産物の場合38 Bq/kgと推定された。今後の予定は現在の除去装置の感度の位置依存やシンチレータとファイバーの接続方法、ファイバー種類、PMTへのファイバーの長さの限度などを決定するための測定を試行する。