

## リアルタイムストロンチウム 90 カウンター開発 RTSC-A ver. 0.3 性能評価測定 2

### 1. 背景

リアルタイムストロンチウム 90 カウンター(RTSC-A)に New veto 装置を導入しアップグレードした(ver. 0.3)。さらに屈折率が平均 10411 のシリカエアロゲルを有効面積300 mm × 100 mmに厚さ 30 mm になるように敷き詰めた。バックグラウンド測定に置いて veto に反応しない事象が 10%程度観測されたが、これは空気中の放射能が原因であることを発見し、遮蔽することで対処した。この状態で線源を用いて性能評価を行った。線源位置依存性、放射能における応答線形性を調べた。

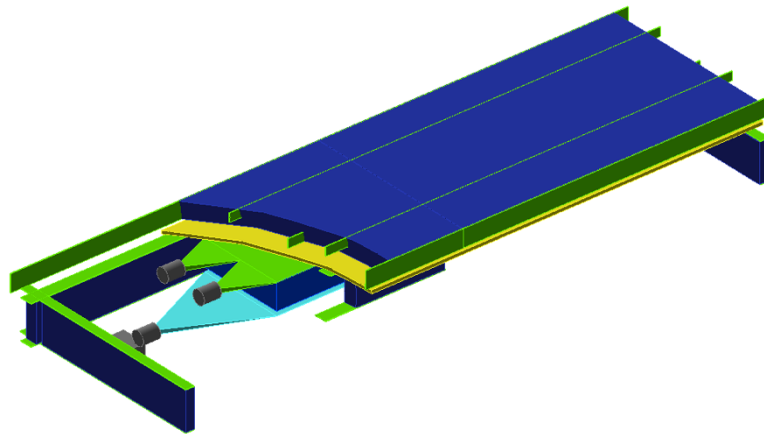


図 1. RTSC-A ver.0.3 の 3D CG

### 2. セットアップ

装置を仰向けに設置し線源の出し入れを容易にした。BG はトリガーファイバーシートの上流に木の板を置き、その上にアルミ製、真鍮製のブロックを積み上げて遮蔽した。こうすることで空気を取り除き、さらに上空の空気からの放射線を止める。線源はシートと木の板の間に設置する。

バックグラウンドは 1 時間測定を 14 時間とってその平均を取った。線源を置き 1 時間における計数頻度とバックグラウンド頻度の差から得られた正味の計数頻度から使用した核種の放射能の比が装置の感度として評価される。

論理信号演算は 4 種類試した。BRoaD 回路では AND, OR, NOT の演算を組み合わせる自由度の高い回路設計が可能で、(1)  $Trigger \otimes AC(M \geq 1) \otimes \overline{VETO}$ , (2)  $Trigger \otimes AC(M \geq 2) \otimes \overline{VETO}$ , (3)  $Trigger \otimes \overline{VETO}$ , (4)  $Trigger \otimes AC(M \geq 2)$ を設定した。ここで  $Trigger$  はシンチレーティング・ファイバーの両端に接続された PMT1, 2 の AND 信号、 $AC$  はシリカエアロゲルからのチェレンコフ光読み出し用の波長変換ファイバーに接続された PMT3-6 の Multiplicity 信号で  $M \geq 1$  は 4 つの PMT のうち 1 つ以上、 $M \geq 2$  は 4 つのうち 2 つ以上の同時性で出力する信号、そして  $VETO$  は宇宙線除去装置の波長変換ファイバーに接続された PMT7, 8 の OR 信号を示す。表 1 にリストにした。 $Trigger$  と  $AC$  は 40 ns ほど遅延され、 $VETO$  信号は幅 100 ns に拡張されて不論理演算の同時性を確保している。

表 1. 演算回路のための論理信号

論理信号	PMT 番号と演算出力
$Trigger$	$PMT1(Tr1) \cap PMT2(Tr2)$
$AC(M \geq n)$	$\text{AND}_{i=1}^n PMT3(AC1), PMT4(AC2), PMT5(AC3), PMT6(AC4)$
$VETO$	$PMT7(VETO1) \cup PMT8(VETO2)$

### 3. 結果

#### 3.1. 核種の絶対感度と検出限界

バックグラウンド頻度は1時間の計数頻度を14回施工し、それぞれの演算方法において(1) 454.14 cph, (2) 132.57 cph, (3) 24278.2 cph, (4) 3030.79 cph が得られた。核種ごとの絶対感度の測定結果を表3に示す。絶対感度はバックグラウンド頻度を差し引いた正味の計数頻度から核種放射能を割った値で以下に定義される。

$$\eta_x = (N_x - N_{BG})/A_x T$$

ここで  $x = {}^{90}\text{Sr}, {}^{137}\text{Cs}, {}^{40}\text{K}$ 、 $T = 3600 \text{ s}$ 、 $N$ は計数を示す。

試料は乾燥処理で体積が圧縮され厚さ1 mmのペースト状に整形される。有効面積が300 cm<sup>2</sup>なので密度1 g/cm<sup>3</sup>の試料なら最大30 gまで測定できる。ここでは試料が海産物と汚染水の2つの場合を想定して議論する。海産物の約70%は水分なので乾燥処理して圧縮率は0.3、海水はほぼ99%以上が水なので、圧縮率は0.01とする。この装置は厚労省が定めた基準100 Bq/kg の<sup>137</sup>Cs がたとえあったとしても動作してほしい。魚介類に含まれる<sup>40</sup>Kは約150 Bq/kg、海水には約12.1 Bq/kg 含まれているとする。この時装置に試料を入れた時のカウント数は

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

で表せる。ここで  $A'_{\text{Sr}}$ ,  $A'_{\text{Cs}}$ ,  $A'_{\text{K}}$ はそれぞれ試料に含まれている核種の放射能、 $m$ は試料の質量(30 g)、 $\epsilon$ は圧縮率(wetted-fish: 1, dried-fish: 0.3, dried-seawater: 0.01)、 $T$ は測定時間(3600 sec)を示す。この時のバックグラウンド計数は

$$N'_{BG} = (\eta_{\text{Cs}}A'_{\text{Cs}} + \eta_{\text{K}}A'_{\text{K}}) m\epsilon^{-1}T + N_{BG}$$

で表される。<sup>90</sup>Srが統計的優位に測定できるための条件は  $N > N'_{BG} + 3\sqrt{N'_{BG}}$  である。この条件を満たせる  $A'_{\text{Sr}}$  の最小値を<sup>90</sup>Srの検出限界 $A_{\text{Sr}}^{\text{min}}$ と定義し以下に示す。

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

表2に結果を示す。演算回路1と2はACのMultiplicityなので多核種との感度比は $M \geq 2$ の方が良いが検出限界は悪い。演算回路3は全ベータ測定を意味し多核種との分離は不可能だが<sup>90</sup>Srのみ存在した試料については当然だが最も検出限界が良い。演算回路2と3を比較することで、宇宙線事象を除去した場合の検出限界は0.21倍と精度が改善されたことがわかる。

表2. 演算方式における絶対感度と検出限界

	Trigger⊗ AC(M ≥ 1)⊗VETO	Trigger⊗ AC(M ≥ 2)⊗VETO	Trigger⊗ VETO	Trigger⊗ AC(M ≥ 2)
$N_{BG}/\text{cph}$	454.14	132.57	24278.2	3030.79
$\eta_{\text{Sr}}/\text{Bq}^{-1}\text{s}^{-1}$	$5.06 \times 10^{-3}$	$2.03 \times 10^{-3}$	$2.58 \times 10^{-1}$	$2.04 \times 10^{-3}$
$\eta_{\text{Cs}}/\text{Bq}^{-1}\text{s}^{-1}$	$2.81 \times 10^{-5}$	$1.87 \times 10^{-6}$	$6.86 \times 10^{-2}$	$2.74 \times 10^{-6}$
$\eta_{\text{K}}/\text{Bq}^{-1}\text{s}^{-1}$	$8.36 \times 10^{-5}$	$1.75 \times 10^{-5}$	$1.36 \times 10^{-1}$	$4.42 \times 10^{-5}$
$\eta_{\text{Sr}}/\eta_{\text{Cs}}$	180	1083	3.75	743.3
$\eta_{\text{Sr}}/\eta_{\text{K}}$	60.5	115.9	1.90	46.2
$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{fish})_{\text{wet}}/\text{Bq kg}^{-1}$	117.3	157.6	17.8	748.5
$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{fish})_{\text{dry}}/\text{Bq kg}^{-1}$	35.3	47.4	5.97	224.7
$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{water})_{\text{dry}}/\text{Bq kg}^{-1}$	1.2	1.6	0.37	7.50

### 3.2. $^{90}\text{Sr}$ 絶対感度の線源位置依存性

RTSC-Aの有効面積は $300\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ である。密封線源の設置場所を変えて絶対感度測定を行った。結果を図2に示す。使用した線源は $^{90}\text{Sr}$ のシリアル番号99039、放射能強度推定 $22.9\text{ kBq}$ である。位置はx軸方向に7点:3-4 cm ずつ、y軸方向に5点:2 cm ずつ移動させて観測した。 $\text{Trigger} \otimes \text{AC}(M \geq 2) \otimes \overline{\text{VETO}}$ の演算回路に注目するとy座標の中心は感度が良く前後端に進むに従って悪化する傾向が観測された。この傾向はベータ線が線源から等方的に放射されているため装置中心が最も感度が高いことから予想通りの結果となった。中心で絶対感度は約 $2\text{ Bq}^{-1}\text{ s}^{-1}$ で端が半分程度に悪化し、平均 $1.68 \pm 0.24\text{ Bq}^{-1}\text{ s}^{-1}$ が計算された。

線源位置依存性を考慮して検出限界を計算した結果を表3に示す。中心測定の結果と比較して若干悪化する結果となった。多核種の感度比は相対的に同等であろうと考えられる。右奥と左手前の感度が端であるにもかかわらず比較的高い結果はACが若干斜めに挿入されていることが考えられる。この設計はVETOを挿入するとき内部の設置場所が限界であるためACが斜めに挿入されたが、今回の結果ではその影響が観測された。

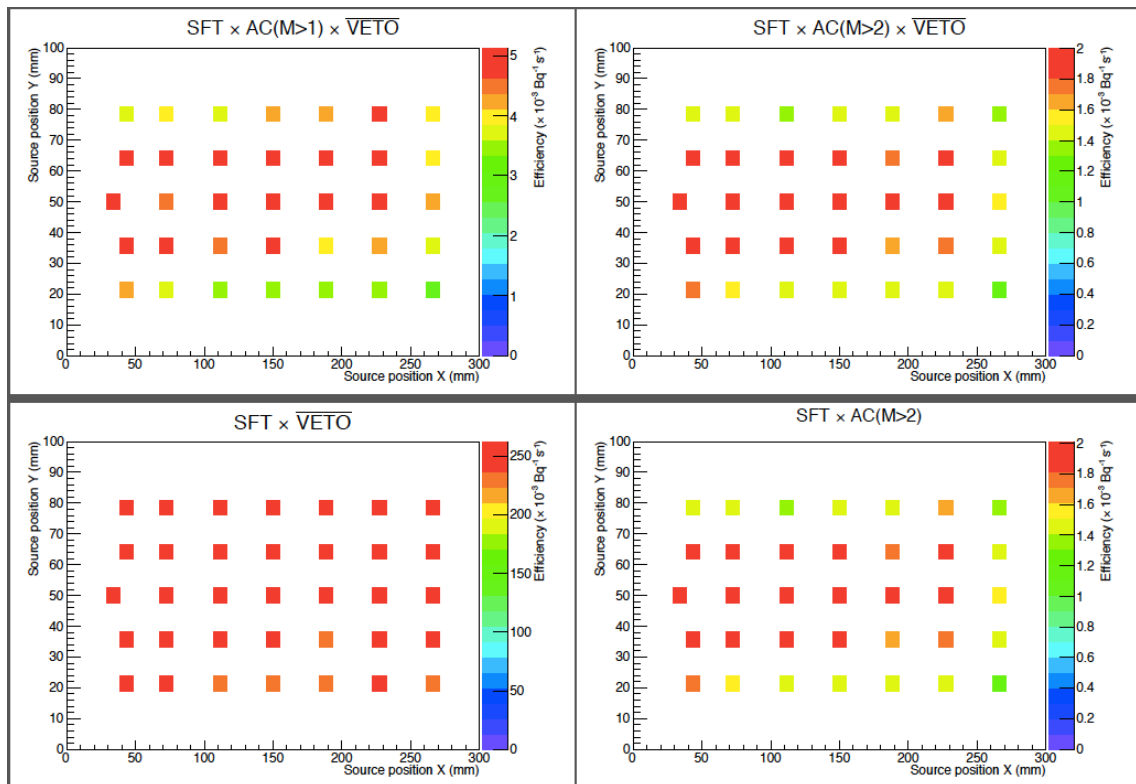


図2. 線源位置依存性測定結果

表3. 演算方式における検出限界

	$\text{Trigger} \otimes$ $\text{AC}(M \geq 1) \otimes \overline{\text{VETO}}$	$\text{Trigger} \otimes$ $\text{AC}(M \geq 2) \otimes \overline{\text{VETO}}$	$\text{Trigger} \otimes$ $\overline{\text{VETO}}$	$\text{Trigger} \otimes$ $\text{AC}(M \geq 2)$
$\eta_{\text{Sr}} / \text{Bq}^{-1}\text{ s}^{-1}$	$4.28 \times 10^{-3}$	$1.68 \times 10^{-3}$	0.25	$1.69 \times 10^{-3}$
$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{fish wet}) / \text{Bq kg}^{-1}$	138.6	190.6	18.3	905.0
$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{fish dry}) / \text{Bq kg}^{-1}$	41.7	57.3	6.15	271.6
$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{water dry}) / \text{Bq kg}^{-1}$	1.4	1.9	0.38	9.1

### 3.3. $^{90}\text{Sr}$ 放射能における応答線形性

RTSC-A の線源の放射能強度依存の応答線形性を調べた。7月に線源の相対的な放射能強度を調べ校正した。装置中心では感度が悪化しないため位置依存の影響を抑え、線源を増やしながら測定した。結果を図3に示す。横軸は放射能、縦軸はバックグラウンド頻度を差し引いた正味の計数頻度を示す。原点を1次関数でフィットした結果良い線形性を示した。傾きと $\chi^2/NDF$ を演算回路ごとに表4に示す。

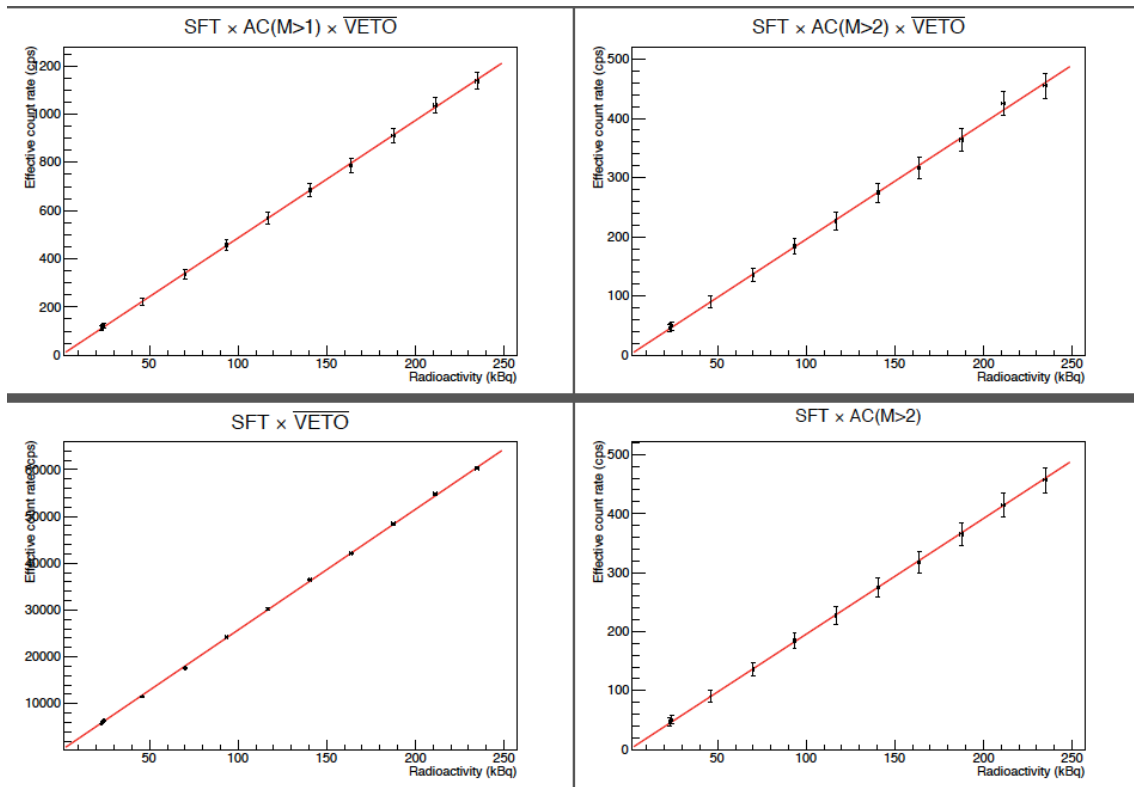


図2. 線源位置依存性測定結果

表4. 演算方式における検出限界

	$Trigger \otimes AC(M \geq 1) \otimes VETO$	$Trigger \otimes AC(M \geq 2) \otimes VETO$	$Trigger \otimes VETO$	$Trigger \otimes AC(M \geq 2)$
$\eta_{Sr}/Bq^{-1}s^{-1}$	$(4.87 \pm 0.06) \times 10^{-3}$	$(1.96 \pm 0.04) \times 10^{-3}$	$0.257 \pm 0.001$	$(1.96 \pm) \times 10^{-3}$
$\chi^2/NDF$	0.924/11	0.672/11	29.0/11	0.378/11

## 5. まとめ

アップグレードしたRTSC-Aの性能評価測定を行った。前回に引き続き感度の位置依存性、応答線形性を調べた。位置依存性は中心に感度が高く端に行くに従って感度が悪化する傾向が観測された。応答性は良い線形性を確認でき、放射能と計数頻度が一对一の関係であることが示せた。

次回は装置内窒化することで $^{222}\text{Rn}$ の孫娘核である $^{214}\text{Bi}$ を追い出すことでさらなる低バックグラウンドを目指す。ガスボンベ設置工事のために株式会社巴商會に $\text{N}_2$ ガス、ボンベ、設置台、配管コネクタ等をの発注を依頼した。来週はボンベ設置工事と装置にガス注入口と排出口を設けることだ。