

## リアルタイムストロンチウム 90 カウンター開発 性能評価測定

### 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)。平均屈折率 10411 のシリカエアロゲルを有効面積に厚さ 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。

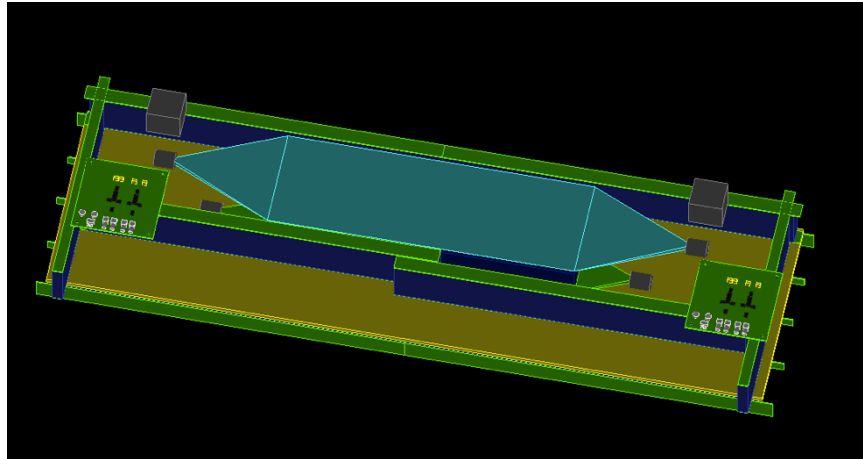


図 1. RTSC-A ver.0.3 の 3D CG

### 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ベータ線を止める。線源はシートと木の板の間に設置する。

使用する線源は  $^{90}\text{Sr}$  を 3 種類、 $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{40}\text{K}$  で表 1 に放射能を一覧にした。アイソトープ協会から購入した線源は 20%未満の誤差が存在し、長寿命核種の  $^{40}\text{K}$  は安定質量の塩化カリウムに 16.6 Bq/g 存在することから誤差は計りの精度で決定される。

表 1. 線源放射能リスト

Source	Radioactivity
$^{90}\text{Sr}$ : No. 99039	$22.9 \pm 0.1 \pm 4.6$ kBq
$^{90}\text{Sr}$ : No. 99027	$23.1 \pm 0.1 \pm 4.6$ kBq
$^{90}\text{Sr}$ : No. 99035	$24.1 \pm 0.1 \pm 4.8$ kBq
$^{137}\text{Cs}$	$26.0 \pm 0.1 \pm 5.2$ kBq
$^{40}\text{K}$ in KCl	$498.0 \pm 1.7$ Bq

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商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)  $\text{Trigger} \otimes \text{AC}(M \geq 1) \otimes \overline{\text{VET0}}$ , (2)  $\text{Trigger} \otimes \text{AC}(M \geq 2) \otimes \overline{\text{VET0}}$ , (3)  $\text{Trigger} \otimes \overline{\text{VET0}}$ , (4)  $\text{Trigger} \otimes \text{AC}(M \geq 2)$  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2 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2. 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	$PMT1(Tr1) \cap PMT2(Tr2)$
$AC(M \geq n)$	${}_4C_n$ in $PMT3(AC1), PMT4(AC2), PMT5(AC3), PMT6(AC4)$
VETO	$PMT7(VETO1) \cup PMT8(VETO2)$

### 3. 結果

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。ここで理解を容易にするために(2)の演算方法を基準に記述していく。ここで、演算方法(2)と(4)は宇宙線除去したかどうか比較できる。この結果、バックグラウンド事象の中に 4.37%宇宙線由来以外の影響が存在することを発見した。前回入射窓に遮蔽物を置かなかった場合のバックグラウンド頻度が 242 cph だったことから、明らかに空気の中に放射性核種が存在していると断定できる。特に気体の  $^{222}\text{Rn}$  がウラン崩壊系列で自然放射能として 10~100 Bq/m<sup>3</sup> 含まれていることが知られている。この崩壊過程にある  $^{214}\text{Bi}$  が最大 3.27 MeV のベータ線が原因であると考えられる。個体である  $^{214}\text{Bi}$  が入射窓に堆積していることを考慮してエアダスターで埃ごと吹き飛ばして実験を試みたが放射平衡の立ち上がりは観測されず、一定の計数値が得られた。これは空気中に  $^{214}\text{Bi}$  が放射平衡状態にあり堆積物のなかと空気中にさほど差がない、そして新鮮な空気が外から供給され永続平衡状態にあることを裏付けている。

この結果は重要な意味を持ち、我々の常識を覆すかもしれない。もし空気中に  $^{222}\text{Rn}$  とその娘核が放射平衡状態で存在していれば、我々はそれらを吸入し続けていたことになる。ICRP の自然放射能被曝の推定では気体の  $^{222}\text{Rn}$  を吸入し放射平衡になると考えているが、娘核種の  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Po}$  も同時に摂取し、被曝している。もしこれが本当なら、吸入摂取による自然被曝は 3 mSv で、全体で年間 5 mSv 被曝していたのかもしれない。この結果は自然の肺がん発生が異様に高いことと、密封状態にした素粒子原子核実験装置の指数関数的に減衰する高いエネルギーのバックグラウンドを説明することができる。

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

表3. 演算方式における絶対感度と検出限界

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

#### 4. 考察

遮蔽物を入射窓に置いた場合で、バックグラウンド頻度は 132 cph だった。遮蔽物を入射窓に置いて計数が半分になったが、まだ遮蔽の隙間や内部の空気が残っている。純粋窒素を流して  $^{222}\text{Rn}$  と娘核種を含んだ空気を追い出してバックグラウンド頻度を落とす計画を立てている。もしバックグラウンド頻度が 0 cph になった場合検出限界は  $A_{\text{min}}^{\text{Sr}}(\text{fish}) = 4.13 \text{ Bq/kg}$ ,  $A_{\text{min}}^{\text{Sr}}(\text{water}) = 0.28 \text{ Bq/kg}$ が見込まれる。 $^{214}\text{Bi}$ からの放射能を落とす必要がある。

#### 5. まとめ

RTSC-A をアップグレードした結果、宇宙線ミュオンを精度良く識別することができた。その貢献として空気中の放射能が見えるようになった。特に  $^{214}\text{Bi}$ からの最大 3.27 MeV のベータ線はバックグラウンドたりうる存在で無視できない。この結果より、吸入摂取による自然放射能被曝線量の見積りの重要な補正項を発見した。遮蔽物を置いて半分は対処した。性能は AC のマルチプリシティ 2 では十分な感度比を示したが検出限界は不十分である。検出限界としてバックグラウンド頻度がまだ大きな要因として存在することから落とす必要がある。窒素ガスを入れてバックグラウンド頻度がどのように減衰するか検証する必要が出てきた。