

# ストロンチウム 90 カウンター性能評価

2016 年 05 月 13 日

## 概要

福島県沖漁業復興、そして水道水や除染された汚染水のために開発されたリアルタイムストロンチウム 90 カウンターの低雑音化の研究をしている。現在の仕様では宇宙線除去しきれていないことがわかった。応急処置で面積 20 cm×10 cm のシンチレーションカウンターを 2 つ設置し宇宙線除去の補強をした。AC の PMT において光電子数と電圧の関係からディスクリミネータのしきい値電圧を設定し、1 時間測定において 10 回試行して性能評価した。AC のマルチプリシティにおける性能の違いを確認した。

## 1. はじめに

$^{90}\text{Sr}$  だけに感度をもつ装置「リアルタイムストロンチウム 90 カウンター」を開発している。現在の仕様（デモ機）では宇宙線除去しきれていないことがわかった。応急処置で面積 20 cm×10 cm のシンチレーションカウンターを 2 つ設置し宇宙線除去の補強をした。AC の PMT において光電子数と電圧の関係からディスクリミネータのしきい値電圧を設定し、1 時間測定において 10 回試行して性能評価した。AC のマルチプリシティにおける性能の違いについて確認する。

## 2. セットアップ

デモ機の演算回路は SFT ⊗ AC (M > 2) ⊗  $\overline{\text{VETO}}$  だが、PMT とファイバーの接続部が覆われていないことが BG 頻度を減らせない原因であることがわかった。面積 10 cm×10 cm のシンチレーション検出器を左右に設置した。追加した検出器をそれぞれ VETO1, VETO2 とし、演算処理

$$\text{SFT} \otimes \text{AC} (M > 2) \otimes \overline{\text{VETO}} \otimes \overline{\text{VETO1}} \otimes \overline{\text{VETO2}}$$

に組み込んで計測する。1 時間測定を 10 回試行するルーチンプログラムを形成した。NIM によって演算した信号を CAMAC ADC GATE に入力しトリガー数をカウントする。

## 3. 線源放射能の見積もり

### 3.1. 密封線源

線源入荷日から時間  $t$  年経た密封線源の放射能  $A(t)$  は

$$A(t) = A_0 \exp \{-t / \ln 2 \tau\}$$

$$\delta A = A \left| \frac{\partial A}{\partial t} \delta t \right|$$

$$= A / \ln 2 \tau$$

で定義される。ここで  $A_0$  は日本アイソトープ協会が定めた 37 kBq (±20% の信頼誤差)、 $\tau$  は物理学的半減期を示す。 $^{90}\text{Sr}$  線源について、物理学的半減期は約 29 年、購入日は 1997 年 10 月で現在 2016 年 4 月であるため、約 18 年 6 ヶ月たっている。誤差を ±1 ヶ月とすると、式(1)から  $(23.8 \pm 1.0(\text{stat}) \pm 4.7(\text{sys}))$  kBq と評価できる。一方  $^{137}\text{Cs}$  は物理学的半減期 30 年、2001 年 1 月に購入しているので、約 15 年 3 ヶ月経過している。同様に計算すると、 $(26.0 \pm 1.0(\text{stat}) \pm 5.2(\text{sys}))$  kBq と評価できる。

### 3.2 低比放射能線源

$^{40}\text{K}$  は自然のカリウムに約 0.012% 存在していると言われている。つまり 1 g あたりに 30.4 Bq である。半減期が  $1.29 \times 10^9$  年で、線源として時間の減衰を無視できる。比較的質量が安定な塩化カリウム (KCl) は質量数 74.55 g/mol で、比放射能は 16.6 Bq/g である。サーベイメータで KCl の質量と正味のカウンtr頻度の線形性を観測し、 $^{90}\text{Sr}$  線源の放射能と比較して正味の計数頻度から放射能に校正した結果、 $15.5 \pm 2.3$  Bq/g の比放射能が得られた。この量は  $^{40}\text{K}$  の崩壊分岐比を含んで導いている。今回線源として 4 g を使用したので KCl 線源の放射能は  $62 \pm 9$  Bq である。

### 3.3. 測定計数

この装置では 1 時間あたりの計数値から  $^{90}\text{Sr}$  の放射能を推定する仕様だ。そのため、性能評価に関しても 1 時間における計数を試行回数繰り返し平均と統計誤差を導く。試行回数  $n$  回、試行番号  $j$  における計数を  $N_j$  とすると、平均値  $\bar{N}$  は

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n N_j,$$

標準偏差は

$$\sigma = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (\bar{N} - N_j)^2,$$

と定義する。

### 3.4. 絶対感度 (absolute efficiency)

バックグラウンド計数を差し引いた正味の計数から線源の放射能  $A_x$  と測定時間  $T$  を割った値をこの装置の核種における絶対感度 (absolute efficiency) と定義し、以下に示す。

$$\eta_x = \frac{N_x - N_{BG}}{A_x T}$$

ここで  $x$  は核種 ( $x = ^{90}\text{Sr}, ^{137}\text{Cs}, ^{40}\text{K}$ ) を示す。測定時間  $T$  は 3600 sec を代入する。誤差は誤差の伝播により計算して以下で定義される。統計誤差と系統誤差をごっちゃにしないことに注意する。

$$\begin{aligned} \delta \eta_x &= \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_x}{\partial N_x}\right)^2 \delta N_x^2 + \left(\frac{\partial \eta_x}{\partial N_{BG}}\right)^2 \delta N_{BG}^2 + \left(\frac{\partial \eta_x}{\partial A_x}\right)^2 \delta A_x^2} \\ &= \frac{1}{A_x T} \sqrt{\delta N_x^2 + \delta N_{BG}^2 + \left(\frac{\delta A_x}{A_x}\right)^2} \end{aligned}$$

### 3.5. $^{90}\text{Sr}$ 検出限界

試料は熱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  $\text{cm}^2$  なので密度 1  $\text{g}/\text{cm}^3$  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% は水分なので熱処理して圧縮率は 0.3、汚染水のほぼ 99% 以上は水なので、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  $^{137}\text{Cs}$  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  $^{40}\text{K}$  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

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

で表せる。ここで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)、 $\varepsilon$  は圧縮率 (海産物: 0.3, 汚染水: 0.01)、 $T$  は測定時間 (3600 sec) を示す。バックグランド計数は

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

で表される。 $^{90}\text{Sr}$  が優位に測定できるための条件:  $N > N'_{\text{BG}} + 3\sqrt{N'_{\text{BG}}}$  を満たせる  $A'_{\text{Sr}}$  の最小値を  $^{90}\text{Sr}$  の検出限界  $A_{\text{Sr}}^{\text{min}}$  と定義し以下で表せる。

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

#### 4. 結果

AC のマルチプリシティ (Mult.) を 1 以上もしくは 2 以上に設定した時のそれぞれの結果を表 1 に示す。Mult. をあげると  $^{90}\text{Sr}$  の測定限界が 1.3~1.4 倍悪化するが、 $^{90}\text{Sr}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の感度比は約 5 倍改善することが確認された。これは試料に  $^{137}\text{Cs}$  や  $^{40}\text{K}$  が多く含まれている場合、Mult. を調節して  $^{137}\text{Cs}$  の感度を抑えて  $^{90}\text{Sr}$  の放射能を測定する仕様が検討される。

	<i>Multi.</i> > 1	<i>Multi.</i> > 2
$N_{\text{BG}}$	373 ± 14	138 ± 12
$N_{\text{Sr}}$	384828 ± 519	169756 ± 631
$N_{\text{Cs}}$	1650 ± 27	281 ± 12
$N_{\text{KCl}}$	388 ± 19	157 ± 16
$\eta_{\text{Sr}}$	$(4.49 \pm 0.01(\text{stat})_{-0.38}^{+0.56}(\text{sys})) \times 10^{-3}$	$(2.0 \pm 0.01(\text{stat})_{-0.38}^{+0.56}(\text{sys})) \times 10^{-3}$
$\eta_{\text{Cs}}$	$(1.36 \pm 0.03(\text{stat})_{-0.22}^{+0.32}(\text{sys})) \times 10^{-5}$	$(1.53 \pm 0.18(\text{stat})_{-0.22}^{+0.32}(\text{sys})) \times 10^{-6}$
$\eta_{\text{K}}$	$< 1.7 \times 10^{-4}$	$< 1.7 \times 10^{-4}$
$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}$ (seafood)	36 Bq/kg	51 Bq/kg
$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}$ (water)	1.3 Bq/kg	1.7 Bq/kg

#### 5. まとめ、今後の予定

AC の Mult. はチェレンコフ光の光電子数しきい値に相当し、Mult. を増やせば Sr/Cs 感度比は上がるが、 $^{90}\text{Sr}$  の検出限界も上がることがわかった。一貫して  $^{40}\text{K}$  の感度は宇宙線によって、もしくは低放射能のため有意に測定できなかった。今後の仕事は(1) BRoAD による計測と比較測定、(2) TDC 時間差測定による精密測定、(3) 実機ソフトウェア仕様決定、(4) 実機測定のベトー設計のための線源テストである。スケジュールとしては来週に 1 と 2、来週月曜には 3 を詰める、来週末に 4 のセットアップという流れで進めていこう。