

RTSC-A ver. 1.1 性能評価測定結果

2017年1月8日

伊藤博士

2016年10月に空气中ガンマ線雑音が発見されてから試料皿の下に粘土を敷き雑音頻度を論理信号 $SFT \otimes AC(M \geq 2) \otimes \overline{VETO}$ で平均 125 cph まで抑制した(ver. 1.1)。11月に装置の上部と側部1面を鉛と真鍮で遮蔽することで平均 90 cph まで抑制できた(ver. 1.2)。鉛遮蔽は有効と判断し翌年1月に KEK から鉛を 200-300 kg 借りて程雑音実験を開始する予定だ。RTSC-A ver. 1.1 において 2016年12月から翌年1月にかけて線源を使用した性能評価測定を行った。

絶対感度

装置の電源を入れた直後 ^{90}Sr 線源を入れて測定すると、160K から 15-20 時間かけて次第に 150-148K と減衰する振る舞いが観測された。試料挿入口を開けて空気を入れ替えただけではこの現象は再現されず、電源を入れた直後にのみ再現された。これはトリガーにベータ線が当たった時に同時にチェレンコフカウンターがアクシデンタルに鳴る事象が次第に現象することを示し、電源を入れた直後にそれが多いうことだ。対処療法だが使用上電源を入れてから 15-20 時間は放置する必要がある。

バックグラウンド頻度はそれぞれの論理信号において 392.1 ± 25.3 , 125.1 ± 12.3 , $(28.8 \pm 0.01) \times 10^4$, $(2.30 \pm 0.05) \times 10^3$ cph が得られた。この誤差は 20 回施工した時の不確定を示す。絶対感度は式

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

で表せ、放射能 22.9 kBq の ^{90}Sr 線源を試料皿中心に置いた時、論理信号 2 における絶対感度は $(1.79 \pm 0.01 \text{ (stat)} \pm 0.36 \text{ (sys)}) \times 10^{-3} \text{ Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$ と計算された。同様に ^{137}Cs と ^{40}K の感度はそれぞれ、 $(1.33 \pm 0.19 \text{ (stat)} \pm 0.26 \text{ (sys)}) \times 10^{-6}$, $(5.77 \pm 7.83 \text{ (stat)} \pm 0.23 \text{ (sys)}) \times 10^{-5} \text{ Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$ が得られた。感度比 $\eta(\text{Sr}/\text{Cs})$ と $\eta(\text{Sr}/\text{K})$ はそれぞれ 1352 と 310 である。他の論理信号における結果は付録の表にまとめている。したがって、この装置は試料中に ^{137}Cs や ^{40}K が存在しても ^{90}Y からのベータ線は十分識別することができる。

放射能線形性

^{90}Sr 線源の放射能とカウント頻度の関係を図に示す。線源は平均 23.6 kBq の放射能を持ち、最大 10 個試料皿の中央に設置した。測定時間はそれぞれ 10 分間である。この関係は良い線形性で、直線で傾き $(1.74 \pm 0.04) \times 10^{-3} \text{ Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$, $\chi^2/\text{NDF}=2.6/9$ でよくフィットされた。この装置は 300 kBq の放射能まで計測頻度が飽和せず、計測頻度から試料の放射能濃度が測定できることが示せた。

検出限界

この装置の検出限界 $A_{\text{Sr}}^{\text{min}}$ は

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

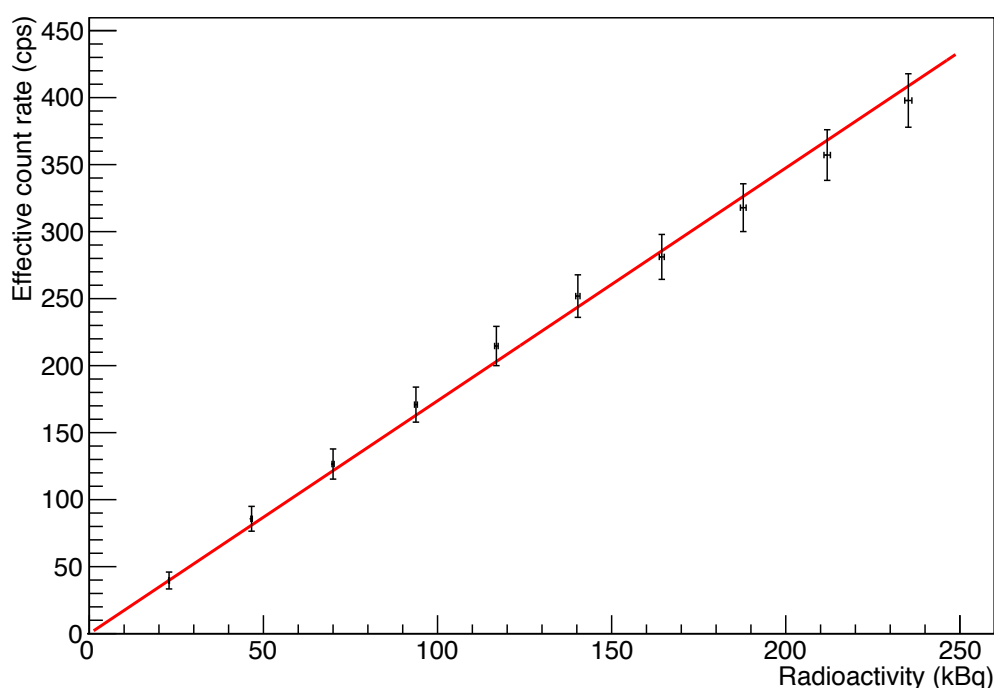
で与えられる。ここで、試料の質量 m は入射窓のサイズから 30 g と仮定される。 ε は試料

の圧縮率、 T は測定時間 3600 s を示す。この式は試料に食品汚染基準の濃度の ^{137}Cs と自然の ^{40}K が含まれた試料において ^{90}Sr の放射能濃度を測定できる限界を示している。海水と魚の場合の検出限界はそれぞれ、

$$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{water}) = 1.75 \pm 0.09 \text{ Bq/kg}$$

$$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{fish}) = 52.2 \pm 2.6 \text{ Bq/kg}$$

と計算された。1 時間の測定で海水(海産物)試料に 1.75 (52.2) Bq/kg の ^{90}Sr が含まれているかどうか判断することができることを示す。



位置一様性測定

この装置の有効面積(effective area)は、シンチファイバーを用いたトリガー入射窓とエアロゲルのサイズから有効面積が決定されて果たして正しいのだろうか。なぜなら線源から放射されるベータ線は等方的に放射されるため装置中心に比べて端では有限のサイズを持つ入射窓に入る粒子の数が少なる、つまり必然的に端では感度が悪化するからである。検出限界は有効面積に大きく依存しているため、この議論は慎重に取り扱う必要がある。

有効面積を決定するための方針は2つ考えられる。一つは全ての領域の感度を測り、これらを平均して有効面積は300 mm × 100 mmにおける感度とする考え方、もう一つは高い感度が保たれている領域を有効面積とする考え方だ。前者は装置の感度は悪化することになるがサンプルの質量は十分確保できる。サンプルには均等に ^{90}Sr が含まれていると仮定するならば、感度が悪い領域に対しても平均化されて放射能濃度測定として正しく評価できる。後者はサンプルの量は減るが高い感度を持つ。どちらのアプローチが検出限界を減らして向上するのか議論していく。

測定方法： ^{90}Sr 線源の設置位置を変えて 10 分間計測した。線源は直径 25 mm のプラスチックケースの中に直径 10 mm の幅で格納されている。入射窓を 20 mm 四方のセグメントに分割して、それぞれの中心に線源を設置した。合計 75 点計測した。図 1 に絶対感度における位置一様性の結果を示す。論理信号は $SFT \otimes AC(M \geq 2) \otimes \overline{VETO}$ で、縦軸は装置に線源を置いた時の試料皿奥行き方向、横軸が同じく試料皿横方向を示す。全領域の感度の平均は $(1.11 \pm 0.53) \times 10^{-3} \text{ Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$ であった。したがって有効面積 $300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ とするならば、検出限界の式から海水と魚の場合それぞれ、

$$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{water}) = 2.74 \pm 1.27 \text{ Bq/kg}$$

$$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{fish}) = 81.8 \pm 38.0 \text{ Bq/kg}$$

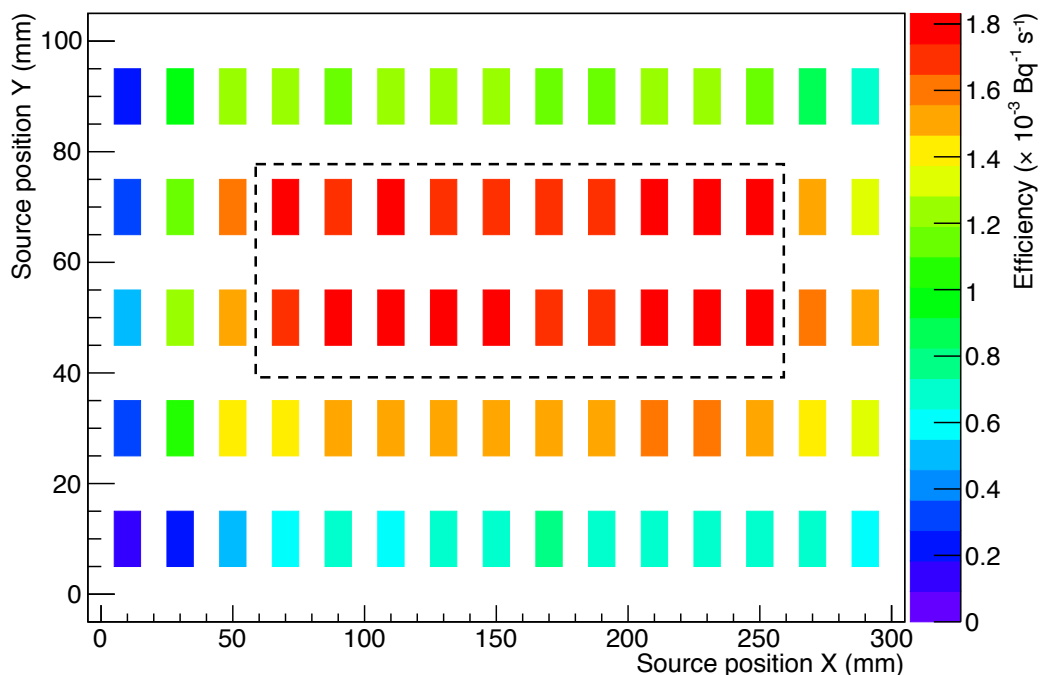
と計算された。

それに対して図 2 の破線枠内は感度が高い領域を示し、平均値は $(1.75 \pm 0.38) \times 10^{-3} \text{ Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$ である。この領域は奥行き 40 mm、幅 200 mm なので、有効面積は入射窓の 26% である。したがって、検出限界は

$$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{water}) = 6.83 \pm 0.15 \text{ Bq/kg}$$

$$A_{\text{Sr}}^{\text{min}}(\text{fish}) = 204 \pm 4 \text{ Bq/kg}$$

と計算された。これらを比較すると、高い感度で局所的に測定するよりも感度は低いが入射窓全域を使用して測定する方が検出限界は低くて性能が良い。したがって、この装置は $300 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の有効面積と、 $(1.11 \pm 0.53) \times 10^{-3} \text{ Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$ の ^{90}Sr の絶対感度を持ち、検出限界は海水の場合 2.74 Bq/kg、魚の場合 81.8 Bq/kg であると推定された。



考察・まとめ

装置の最終的な ^{90}Sr の感度は感度面積の平均で $(1.11 \pm 0.53) \times 10^{-3} \text{ Bq}^{-1} \text{ s}^{-1}$ が得られた。この時の検出限界は、海水の場合 2.74 Bq/kg、魚の場合 81.8 Bq/kg であると推定された。検出限界は未だにバックグラウンド頻度の影響が大きい。装置外部に鉛遮蔽をしてバックグラウンド頻度が 1 cph になった場合、検出限界は 5.4 Bq/kg (魚) と 0.28 Bq/kg (海水) が期待される。また検出限界は面積の 1/2 乗に反比例するため、300 cm² から 1000 cm² に拡張すると 3.0 Bq/kg(魚) と 0.15 Bq/kg(海水) に性能向上できる。

今後の仕事

有効面積拡張は必要だが、その前に鉛遮蔽によって BG がどこまで抑制されるか検証する必要がある。この結果が出てからでないと 5 Bq/kg が 3 Bq/kg になるだけである。1月18日に KEK から鉛を約 500 kg 借りる約束を結ぶことができた。J-PARC E36 実験で使用された Gap Veto カウンター(鉛とプラスチックシンチレータのサイドウィッチカロリメータ)の鉛1000 mm × 200 mm × 4.8 mm が 48 枚である。ハイエースの積載容量が 700 kg とかだったので多分運べるだろう。1月13日に責任者である今里さんに挨拶と鉛置き場の下見に行ってくる。

付録

=====

BG rate

=====

0 392.062 25.2846

1 125.062 12.3109

2 28795.6 131.007

3 2297 49.5669

=====

absolute efficiency

=====

mode0-----

Sr 0.00458288 8.73751e-06 0.000940591 Bq⁻¹ s⁻¹Cs 1.60528e-05 6.44386e-07 3.21055e-06 Bq⁻¹ s⁻¹K 4.06836e-05 1.37735e-05 1.63388e-07 Bq⁻¹ s⁻¹

mode1-----

Sr 0.00178821 4.47987e-06 0.000367012 Bq⁻¹ s⁻¹Cs 1.32241e-06 1.94894e-07 2.64482e-07 Bq⁻¹ s⁻¹K 5.76961e-06 7.82501e-06 2.31711e-08 Bq⁻¹ s⁻¹

mode2-----

Sr 0.247345 0.00011168 0.0507651 Bq⁻¹ s⁻¹Cs 0.0675487 3.12124e-05 0.0135097 Bq⁻¹ s⁻¹K 0.123874 0.000392704 0.000497488 Bq⁻¹ s⁻¹

mode3-----

Sr 0.00179524 4.66812e-06 0.000368455 Bq⁻¹ s⁻¹Cs 2.30299e-06 4.91184e-07 4.60598e-07 Bq⁻¹ s⁻¹K 1.57052e-05 2.57894e-05 6.3073e-08 Bq⁻¹ s⁻¹

=====

efficiency ratio

=====

mode0-----

Sr/Cs 285.489 58.5414 181.738

Sr/K 112.647 65.7282 51.5298

mode1-----

Sr/Cs 1352.23 523.514 860.811

Sr/K 309.936 361.278 141.779

mode2-----

Sr/Cs 3.66173 0.110678 2.331

Sr/K 1.99674 0.120165 0.913398

mode3-----

Sr/Cs 779.524 362.19 496.233

Sr/K 114.309 146.596 52.2899

Limit of detection(検出限界)

=====

mode0-----

(fish) 36.1318 1.15945 7.41569 Bq/kg

(water) 1.23434 0.0377964 0.253336 Bq/kg

mode1-----

(fish) 52.19 2.56623 10.7115 Bq/kg

(water) 1.75226 0.0851709 0.359635 Bq/kg

mode2-----

(fish) 6.56041 0.011857 1.34646 Bq/kg

(water) 0.385672 0.00028853 0.0791554 Bq/kg

mode3-----

(fish) 222.518 2.46957 45.6697 Bq/kg

(water) 7.42309 0.0824102 1.52352 Bq/kg