

リアルタイムストロンチウム 90 カウンター開発 veto 装置性能向上のための宇宙線測定

1. はじめに

リアルタイムストロンチウム 90 カウンター(以降 RTSC-A)を試作した。性能評価の結果、海水の場合 1.3 Bq/kg、海産物の場合 38 Bq/kg の検出限界を確保できることが推定された。しかし、福島漁業再開のためには性能が不十分で、宇宙線除去装置の検出効率が 72.7%と低いことも分かった。検出限界の公式によると、30 cm×10 cm の有効面積でベト装置の検出効率 99.9%以上 (バックグラウンド頻度が 0.0005 cps 未満相当) にした場合、海産物において 2 Bq/kg の検出限界が推定できる。装置全体を覆うベトはシンチレータと波長変換ファイバーを用いて 99.9%の検出効率を維持するための設計を構築する必要がある。本稿はそのための基礎実験の結果を報告する。

2. セットアップ

2つのトリガー用シンチレーション検出器が同時に反応した事象は荷電粒子が2つ間の軌跡にそって通過しているものとしてデータ取得する。これらのトリガーはシンチレーションファイバーをシート状にして 50×50 mm² の有効面積を持つ。片側読み出しで PMT: R9880U-210 で読み出される。これら2つのトリガーの間に試験対象となるシンチレータを置く。図1のセットアップ図では簡略するために PMT の位置を示したが、実際はライトガイド部が重ならないように配置しているので注意されたい。

トリガーに使用されている PMT1, 2 はディスクリミネータによって論理信号に変換されコインシデンス回路で AND 演算処理され CAMAC ADC のゲート信号として入力される。対象となる PMT3 は型番 BAF2866 で供給電圧 1200 V において増幅率は 1.9×10^7 である。PMT3 からの信号は ADC ゲート領域に合わせて 30 ns 遅延回路を経由し ADC に入力される。

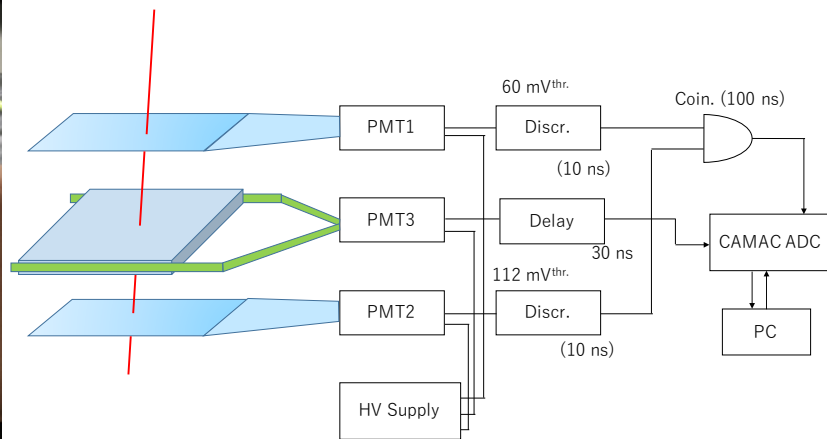
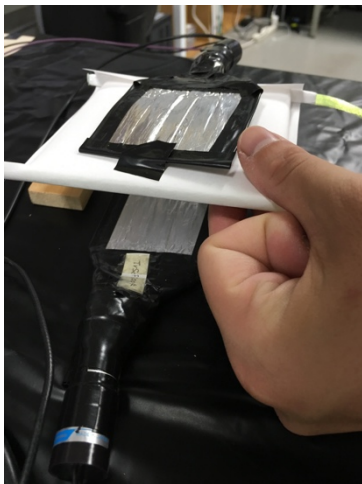


図1. セットアップ

3. 事象頻度

トリガーは対象のシンチレータ(厚さ 5 mm)の上流と下流に設置される。宇宙由来のミュオンは1次宇宙線の崩壊に左右されるため地上における頻度にふらつきが生じる。トリガー自身の検出効率は低いが $0.116 \pm 0.016 \text{ sec}^{-1}$ の事象頻度を観測された。これは約 1 時間で 500~600 事象得られることに等しく、有意義な実験が行える環境であることを示す。

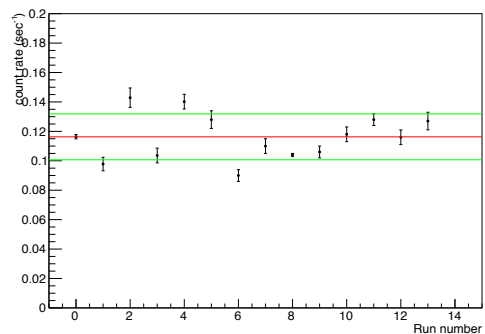


図2. RUN ごとの事象頻度推移

4. 検出効率と平均光電子数

中央に宇宙線ミューオンが通過した時、シンチレーション光はファイバーまで伝搬して読み出される。図3に宇宙線がサイズ $100 \times 100 \times 5$ mm のシンチレータを通過した時の、ファイバーY-11を4層重ねたライトガイドを経由し観測された光電子数分布を示す。シンチレータは4側面が研磨されており、反射材としてアルミホイルで包まれている。2平面は研磨されていない。波長変換ファイバーはY-11シングルクラッドを使用され、PMTまで190mmの距離配線されている。2側面にファイバーシートを貼り片側末端をPMTに接続されている。反対側は研磨せず、光は戻ってこないと考えている。

PMTの増幅率から光電子数に変換されて表示されている。0.5 p.e.をしきい値にした時の全事象あたりの割合を検出効率と呼び、この場合、 $95.8 \pm 1.3\%$ が得られた。この時の平均光電子数は 4.95 ± 0.05 p.e.である。この値は veto 装置の検出効率としては不十分で、対策としては(1)波長変換ファイバーの種類をダブルクラッド構造に替えること、(2)反対側に反射材を据え付けること、(3)シンチの厚さを増やすことがあげられる。

本測定のための目的はシンチレータと波長変換ファイバーを用いたシステムの基礎的な特性を調べることである。(1)シンチレータ内伝搬による減衰項、(2)ファイバーの減衰長、(3)反射材による差異、(4)シンチレータ研磨による有効性を調べた。他の項目は来週に持ち越すことにする。

Number of photoelectrons detected in Cosmic ray veto counter

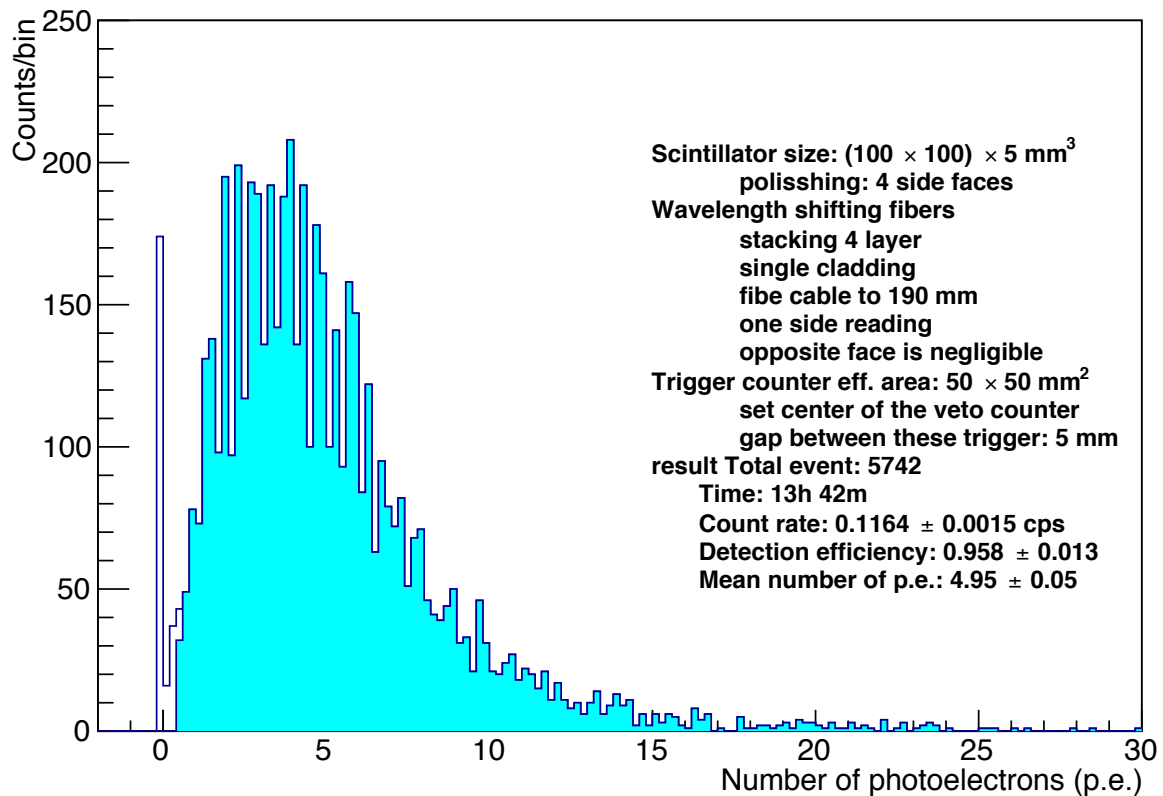


図3. シンチレータとWLSFによる観測された光電子数分布

5. シンチレータ内伝搬による減衰

シンチレータは厚さ 5 mm、奥行き 100 mm、幅が 100, 200, 300, 400 mm のサイズを検証した。波長変換ファイバーの長さは伝搬距離 340 mm で固定し、同じライトガイドを使用することで断面研磨や PMT 固有の揺らぎの項を考えなくてもよくした。図 4 にシンチレータの幅の違いによる検出効率と平均光電子数の関係をグラフに示す。指数関数的に減少している関係が得られ、フィッティングの結果減衰長 312 mm が得られた。ここで注意されたいのは、この減衰長はシンチレータ内を光が伝搬した距離に応じて減衰するものとはニュアンスが異なる点だ。2 側面でファイバー読み出ししているため、伝搬距離は近い方と遠い方で平均化される。中心においてはどちらも同じ伝搬距離をもつため、検出効率の位置依存性は下に凸な傾向を持つ。したがって本測定結果では最低限保証できる検出効率、平均光電子数のシンチレータの幅依存性と解釈できる。つまりシンチレータの幅を 2 倍にすると光電子数は 60~65% に減衰する。

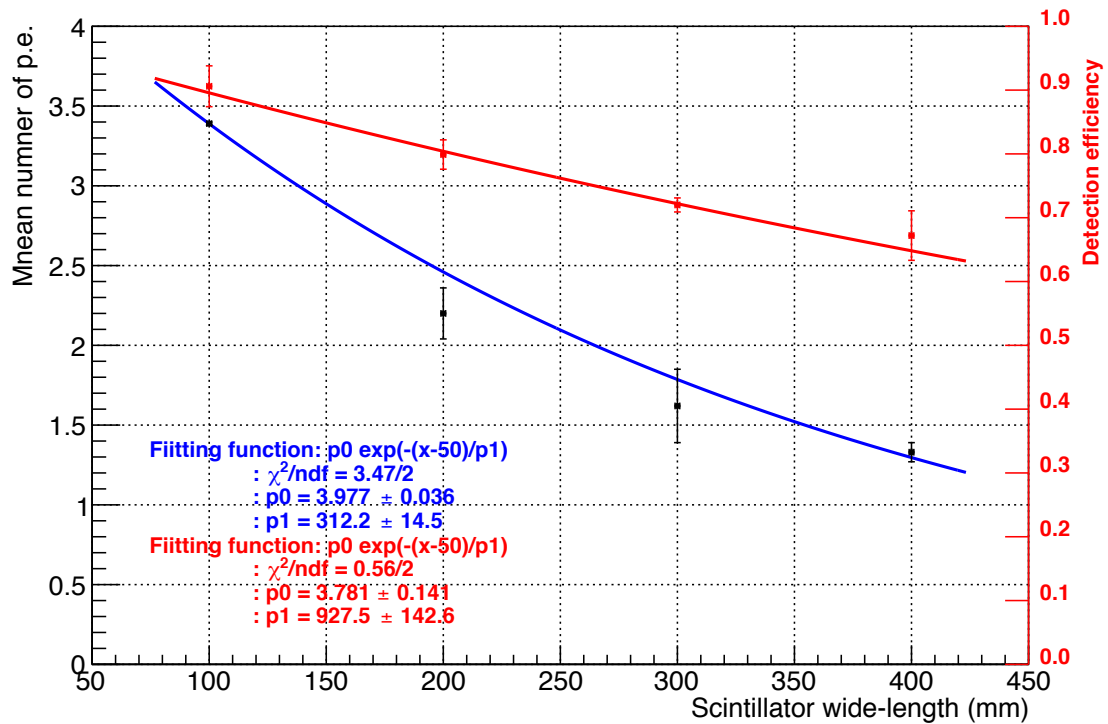


図 4. シンチレータ内伝播距離と光電子数及び検出効率の関係

6. 波長変換ファイバー伝搬による減衰

波長変換ファイバーの伝搬距離を変えて同様に宇宙線ミュオンを検出した。図5に波長変換ファイバーの伝播距離と平均光電子数、検出効率の関係を示す。シンチレータの4側面を機械研磨した場合(○)と研磨しない場合(△)を比較した。平均光電子数に関しては、ファイバー190 mmの場合研磨しない方が高く、340 mmの場合研磨しなかった場合研磨した方が高い、520 mmの場合どちらも同じという結果が得られた。つまり、シンチレータ研磨による収集光量の向上は有効的ではなく、コスト削減につながるだろう。

研磨した場合、してない場合、それぞれのファイバー伝播距離と平均光電子数の関係を指数関数でフィットした結果、それぞれ 525.8 ± 29.0 mm, 519.2 ± 50.0 mm の減衰長が得られた。というのも研磨しようがしまいが同じファイバーを使用しているため誤差の範囲内で一致している。この二つの平均としてファイバーの減衰長は 522.5 ± 4.0 mm であると結論できる。

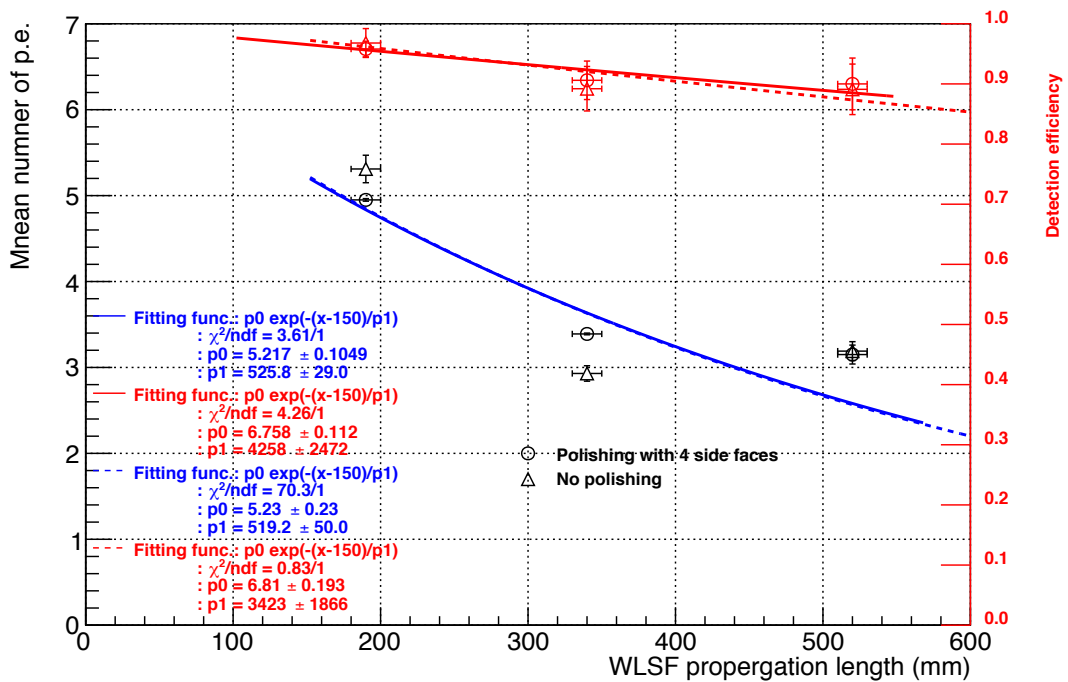


図5. 波長変換ファイバーの伝搬距離と平均光電子数及び検出効率の関係

7. 反射材の差異

これまでの結果は波長変換ファイバーの反対側は無視して片側読み出しした。波長変換ファイバーの読み出し反対面を研磨して反射材(住友スリーエム株式会社: ESR140X160S)を貼った。図6(左)にシンチレータの4側面研磨と研磨しない時を比べた結果を示す。シンチレータサイズは $(100 \times 100) \times 5 \text{ mm}^3$ 、波長変換ファイバーの伝播距離は190 mm、アルミホイルで包まれている。

結果はファイバー反対側に反射材を貼り付けて理論的には2倍ほど向上するはずだったが、実際は1.1~1.3倍しか向上しなかった。反射材を貼り付けた場合の結論は平均6.55 p.e.が得られた。この原因はアルミホイルで包んだ時にファイバーの反対側も一緒に包んだことで元々反対側からの光も読まれていたのかもしれない。もしくはこの反射材のシンチレーション光に対する反射率が低いことが考えられる。

次にシンチレータを包んでいる反射材に注目してみよう。シンチレーション光は全反射をして側面まで伝わりファイバーに入射する。(1) アルミホイル、(2) 白いコピー用紙、(3) ファイバー貼り付けの面に白いシールテープと全体をアルミホイル、(4) 白いシールテープ、(5) 黒い塩化ビニール製シートを用いて同様な測定を行った。図6(右)に各反射材における光電子数の結果比較を示す。シンチレータサイズは $(100 \times 100) \times 5 \text{ mm}^3$ 、波長変換ファイバーの伝播距離は190 mm、ファイバーの反対側は同様に3M社 ESR フィルムを貼り付けた。結果としてアルミニウム箔で覆った場合が今回試したものの中で最も良かった。

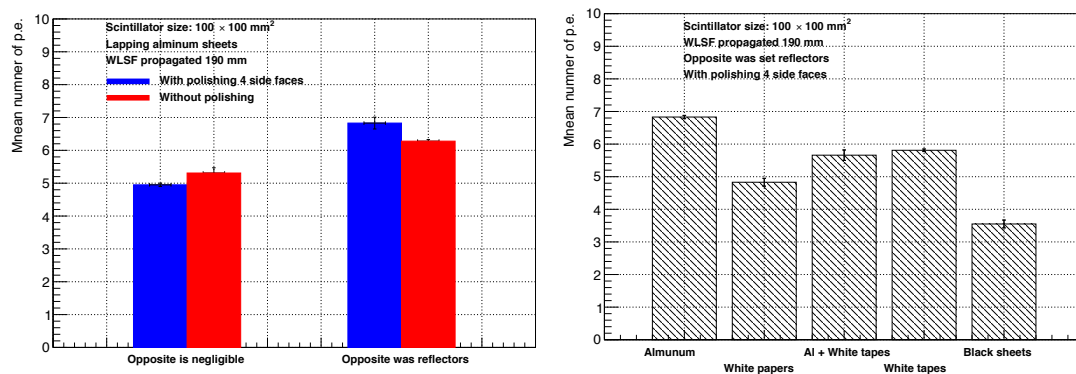


図6. ファイバー反対面に反射材あり/なしの平均光電子数比較グラフ(左)とシンチレータを覆う反射材の種類による平均光電子数の比較グラフ(右)

8. 結論・考察

これまでの結果を踏まえて以下にまとめる。

- (1) 波長変換ファイバーシートで挟むシンチレータの幅を2倍にすると光量は55~65%に減少する。
- (2) 伝搬させるファイバーの距離による減衰長は平均52 cm。
- (3) シンチレータの研磨は有効性が薄く、むしろ若干研磨しない方が光量は高い。
- (4) 波長変換ファイバーの反対面に反射材を貼り付けても1.1~1.3倍にしか光量は増加しなかった。
- (5) シンチレータを包む材質は5種類試した結果、アルミホイルが最適であった。
- (6) シンチレータのサイズ(100×100)×5 mm³に波長変換ファイバー片側読み出し、シングルクラッド構造のファイバー、ファイバー伝搬距離190 mm、アルミホイルで包んだ場合にPMTで観測された平均光電子数は6.83±0.18 p.e., 検出効率は0.987±0.040が得られた。

ここでveto装置は有効面積700×200 mm²なので、シンチ幅は200 mm、ファイバーの伝搬距離は最低でも350 mmが要求される。まだ未知な成分としてシンチの厚さによる光量増加、波長変換ファイバーのダブルクラッド構造による光量増加がわかればveto装置設計の最終盤が決定するだろう。

ここでダブルクラッドにすることにより光量が1.4倍、シンチレータ厚さに比例して光量が増加すると仮定する。厚さ5 mmのシンチレータでシングルクラッド構造のファイバーを使用し上記の要請で設計した場合、3.0 p.e.が推定される。そこからダブルクラッド構造にすると4.2 p.e.が推定される。99.9%以上の検出効率を達成するためには10 p.e.が要求され、そのためには必要なシンチレータの厚さは15 mmである。

また幅50 mmの場合では厚さ5 mmでシングルクラッド構造の場合8.3 p.e.が推定され、ダブルクラッド構造ファイバーを使用すると11.7 p.e.が推定される以上から検討している設計を以下に示す。

- (1) 面積200×700 mm²の上面部には(200×350)×20 mm³のシンチレータを2枚
- (2) 面積50×700 mm²の長側面には(350×50)×10 mm³のシンチレータを4枚
- (3) 面積200×50 mm²の長側面には(200×50)×5 mm³のシンチレータを2枚
- (4) 以上のシンチレータには波長変換ファイバー(ダブルクラッド構造)を貼り付ける。(1)と(2)は片側読み出しで反対側に反射材を接続し、ファイバー伝搬距離は35 cmにした場合1.68 p.e.と23.4 p.e.が、(3)は両側側読み出しでファイバー伝搬距離は19 cmにした場合15.9 p.e.が推定される。

9. まとめ

リアルタイムストロンチウム90カウンターを試作し、性能試験の結果、宇宙線除去装置が72.7%の検出効率と低いことが分かった。宇宙線ミュオンを用いてシンチレータと波長変換ファイバーを用いた検出器の性質を調べた。検査項目はシンチレータ内伝搬による減衰、ファイバー伝搬による減衰、ファイバー反対側の反射材の有無、シンチレータを包む素材の種類である。ダブルクラッド構造にした場合、シンチレータの厚さによる増加については来週測定する予定だ。これらの結果からveto装置の設計を検討した。現在のRTSC-Aのveto装置の検出効率を入射位置、方向ごとに調べる必要があり、vetoの設計を早急に最終決定したい。