

リアルタイムストロンチウム 90 カウンターのアップグレード

2016年03月31日

概要

リアルタイムストロンチウム 90 カウンターは福島県沖漁業復興、そして水道水や除染された汚染水のために開発された ^{90}Sr だけに感度が高い分析装置である。宇宙線ベトーカーを追加して入射角度が大きい宇宙線のバックグラウンド頻度を抑える計画だ。

1. はじめに

2011年の福島原発事故から5年経った今、注目すべきはストロンチウム 90(以降 ^{90}Sr)である。アルカリ土類金属でカルシウムと似た化学的性質を持つことから体内に摂取されると骨に溜まり、内部被曝が放射性セシウム(^{134}Cs または ^{137}Cs)と比べて数百倍危険だ。福島県沖漁業が再開されない一つの理由は試料内の ^{90}Sr の放射能が測定困難であることである。従来の測定では化学的に Sr を抽出し、その後 ^{90}Sr と ^{90}Y の放射平衡状態にして ^{90}Y の放射能を測定することで逆算して推定する。この方法では1検体あたりの測定時間が数週間から1ヶ月程度、さらに測定量を数十万円要する。法律上管理区域での測定となるので輸送費がかかる。これでは漁業再開できないことは明らかだ。そのためにサーベイメータのように管理区域外でも使用でき、試料質量と計測値から簡単に放射能測定する方法を確立する必要がある。

2. 水道事業の ^{90}Sr 検査の必要性

図1に曲線はある期間に摂取する Cs の放射能濃度と50年間生涯被曝推定量を示す。政府が規定した食品内に含まれる放射性セシウムの含有量の基準値 100 Bq/kg は1日あたりの食品摂取量約 2 kg とすると1日あたり 200 Bq 摂取する計算になる。毎日摂取したとしても、この基準は自然放射能である ^{40}K の内部被曝(体内に約 400 Bq の ^{40}K があるとして評価)による生涯被曝約 10 mSv より十分に低い。

しかし ^{90}Sr は基準が設けられておらず、もし Cs と同様に摂取すると数百倍危険である。100 Bq/kg を毎日 2 kg 摂取(200 Bq/day)し続けると約3年で生涯被曝は推定 1 Sv に達し、ICRP(国際放射線防護委員)は累積 100 mSv 以上の場合の発がん死亡率は約 0.5%と報告している。つまり2人に1人ががんで死亡する計算になる。この図では早めに Sr が含まれていたかを判断し切り替えるかで命運を分けることを示唆し、1~2日で 10 Bq/day (20 Bq/kg 相当)を判断できれば ^{90}Sr による生涯被曝量は 0.1 mSv に抑えることができる。

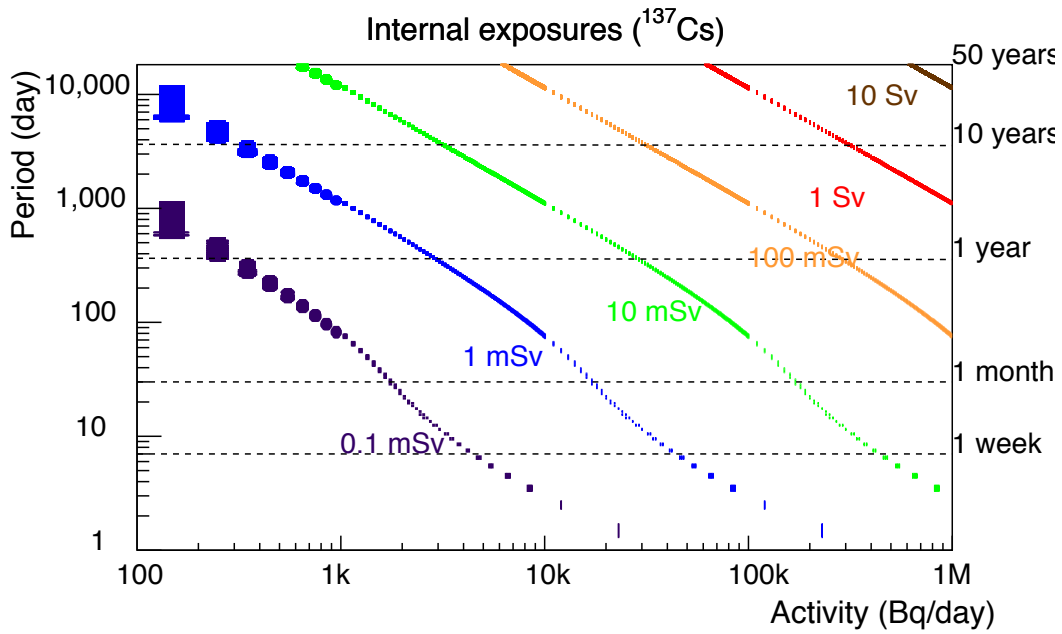


図 1. ある期間に摂取する ^{137}Cs の放射能濃度と 50 年間生涯被曝推定量

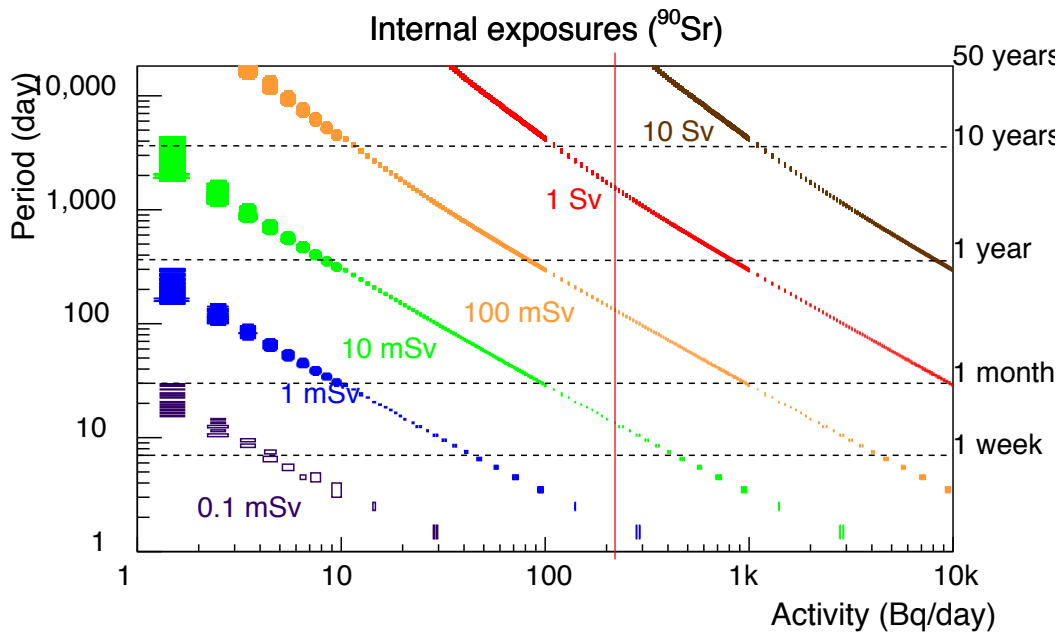
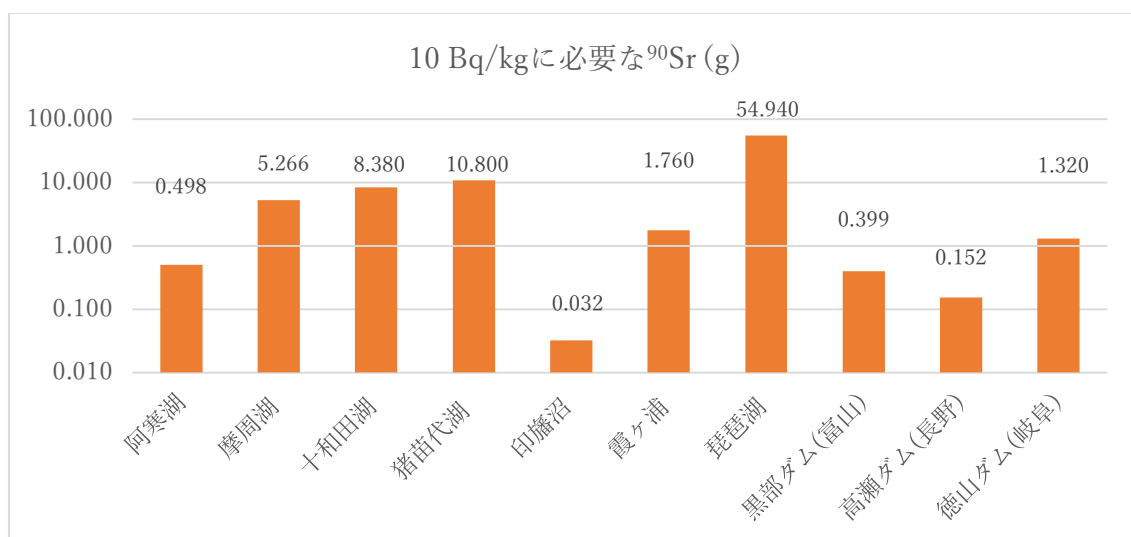


図 2. ある期間に摂取する ^{90}Sr の放射能濃度と 50 年間生涯被曝推定量

^{90}Sr の比放射能は 5×10^{12} Bq/g であり、1 g の ^{90}Sr は 5 億 t の水を放射能濃度 10 Bq/kg にする能力を持つ。1 L が 1 kg なので、千葉の印旛沼を同じ放射能にするために必要な ^{90}Sr は約 0.32 g、同様に茨城の霞ヶ浦では約 1.76 g で汚染できる。もし原発事故もしくは原子力テロで ^{90}Sr が水道等に混ざったことを想定すると、できれば毎日、最低でも 1 週間に 1 度は特定放射能汚染検査を行うべきである。



3. リアルタイムストロンチウム 90 カウンター

従来のシンチレーション・サー

ベイメータと異なり、チェレンコフ放射を動作原理としたリアルタイムストロンチウム 90 カウンターを千葉大で開発した。チェレンコフ放射は一種の衝撃はで荷電粒子が屈折率 n の物質内で光より速く走る時に放射する。 ^{90}Sr の娘核である ^{90}Y から放射される最大 2.28 MeV のベータ線(電子)だけ

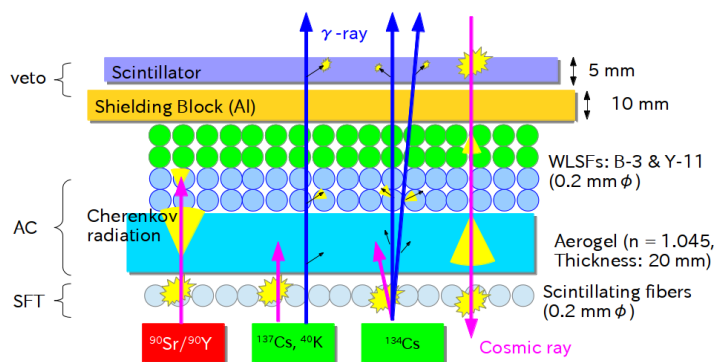


図3. リアルタイムストロンチウム 90 カウンターの原理

に反応し、他のバックグラウンドとなる ^{40}K からの 1.33 MeV のベータ線や ^{137}Cs からの最大 1.17 MeV のベータ線に反応しないために屈折率 1.042 未満の透明な物質が要求される。

3.1. 初号機: RTSrC ver. 1.0.1

2015年に製造開発した初号機 (RTSrC ver. 1.0.1) は有効面積 $300 \times 100 \text{ mm}^2$ でシリカエアロゲルは屈折率 1.035, 透過長 46 mm, 厚さ 30 mm を使用している(ただしテスト用なので面積 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)。チェレン

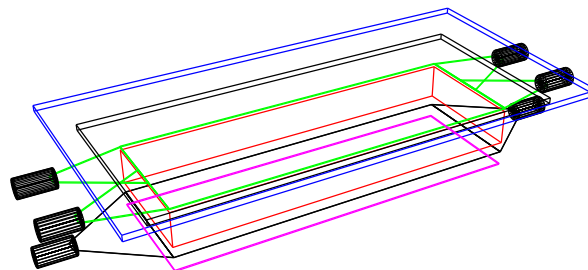


図4. 初号機 ver. 1.0.1 の設計

コフ光は波長変換ファイバーシートをゲルの下流に設置し両末端に PMT を接続させている。ベトーカーンターはサイズ $400 \times 200 \times 5 \text{ mm}^3$ のプラスチックシンチレータを用い、4 側面に波長変換ファイバー (Y-11) シートを4層巻き、両端をまとめて一つの PMT で読み出す設計で AC の上部に据え付けられた。回路は林栄精器株式会社に設計してもらった。2 系統 7 チャンネルの PMT 電源供給と 7 個の信号入力、それぞれディスクリミネータで論理信号に変換し SFT \otimes AC \otimes $\overline{\text{VETO}}$ の条件で計測するシステムである。信号処理において致命的なバグを発見し、以降 NIM モジュールで回路設計して性能評価を行った。議論の結果、初号機の ^{90}Sr の検出限界は以下の式で定義される。

$$A_{Sr}^{min} = \frac{2.58 \sqrt{R_{BG} + (\eta(Cs)A'_{Cs} + \eta(K)A'_K)m\epsilon^{-1}}}{\eta(Sr)m\epsilon^{-1} \sqrt{t}}$$

ここで、 R_{BG} はバックグラウンド頻度、 m は試料の質量、 ϵ は圧縮率、 η は核種の感度、 A' は試料内の核種放射能、 t は測定時間をそれぞれ示す。汚染水検査の場合、加熱処理で体積が 1% になると仮定すると 2.2 Bq/kg, 解散食品の場合、加熱処理で体積が 30% になると仮定すると 62 Bq/kg と評価された。

4. 初号機アップグレード

初号機 ver. 1.0.1 の設計は宇宙線ベトーカーンターが AC 上部に据え付けているだけなので、宇宙線ミューオンが角度を持って入射した場合、SFT と AC を通過する事象を除去しきれない。したがって低放射能な KCl 線

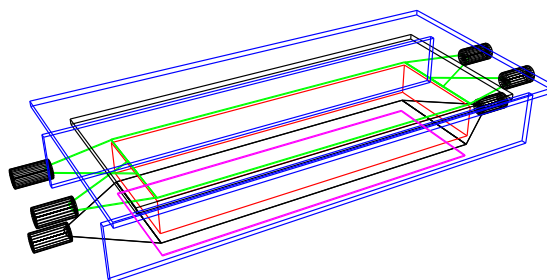


図5. アップグレード後 ver. 1.0.2 の設計

源を使用した場合、バックグラウンドに埋もれ、KCl の感度は測定できなかった。それ以上にバックグラウンド頻度が高いため ^{90}Sr の検出限界が必要な値まで達成することができなかった。そこで AC の側面にもプラスチックシンチレータ板を据え付け「コ」の字にすることでバックグラウンド頻度を落とす計画を 2016 年 3 月に立てた。

4.1. ベトーカーの改良

ベトーカーを3枚のプラスチックシンチレータから製作する設計として波長変換ファイバーシートを両側面に取り付け、それぞれ末端で束ねて読み出す方針とする。これらを遮光しこの字に組み立てる。



図 4. ベトーカー用のプラスチックシンチレータ

^{90}Sr 線源を用いて入射位置における光電子数をシンチレータ板ごとに調べた。図 5

に示す。黒が右、赤が左の PMT の光電子数を示し、緑はその和である。右上、左下、右

下の図がそれぞれシンチレータ 1, 2, 3 の線源位置における光電子数の関係を示す。図 4 で言う真ん中のシンチレータ 2 は合算で平均 15 p.e.、奥と手前のシンチレータ 1 と 3 は合算して平均 8~9 p.e.の光電子数が観測され、入射位置の一様性も良さそうな結果が得られた。

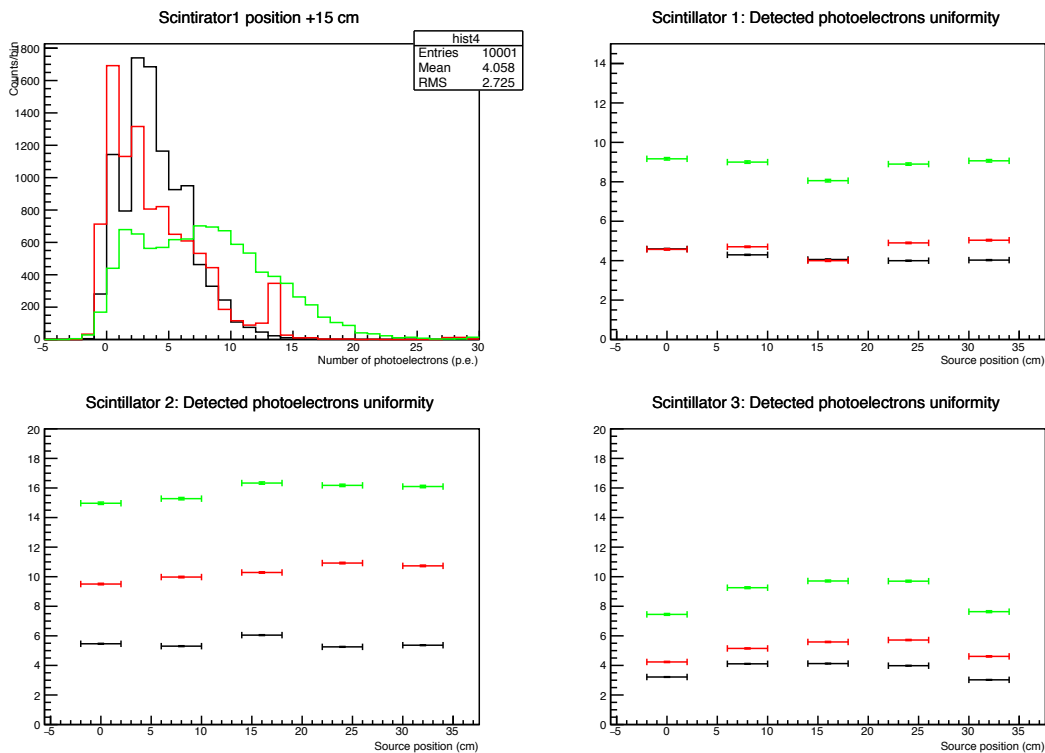


図 5. ベトーカーの光電子数の線源位置の依存性

4.2. セットアップ

SFT と VETO に接続している PMT からの信号を図 6 のように配線し宇宙線ミュオンによる SFT の信号が VETO 信号をオーバーラップするように時間調整する。宇宙線ミュオンは $(2.083 \pm 0.016(\text{stat}) \pm 0.062(\text{sys}))$ のカウント頻度が得られた。

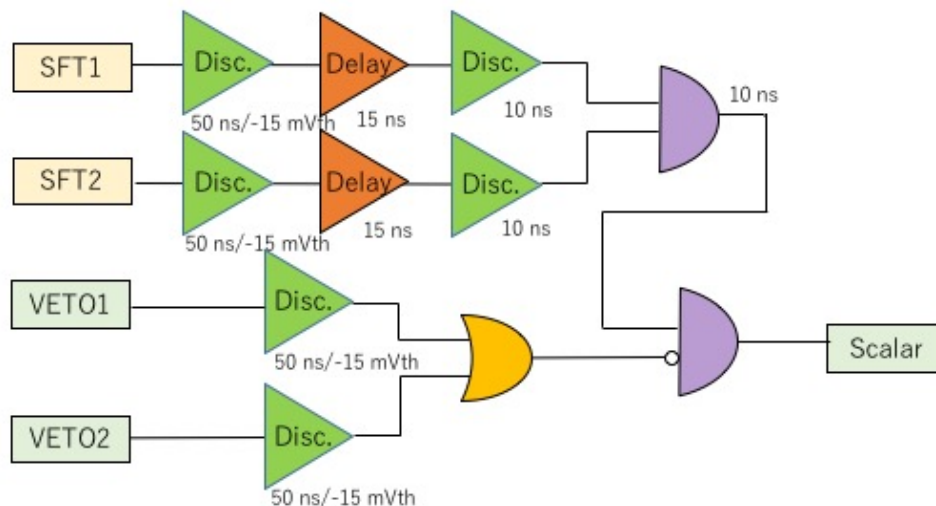


図 6. トリガー回路設計

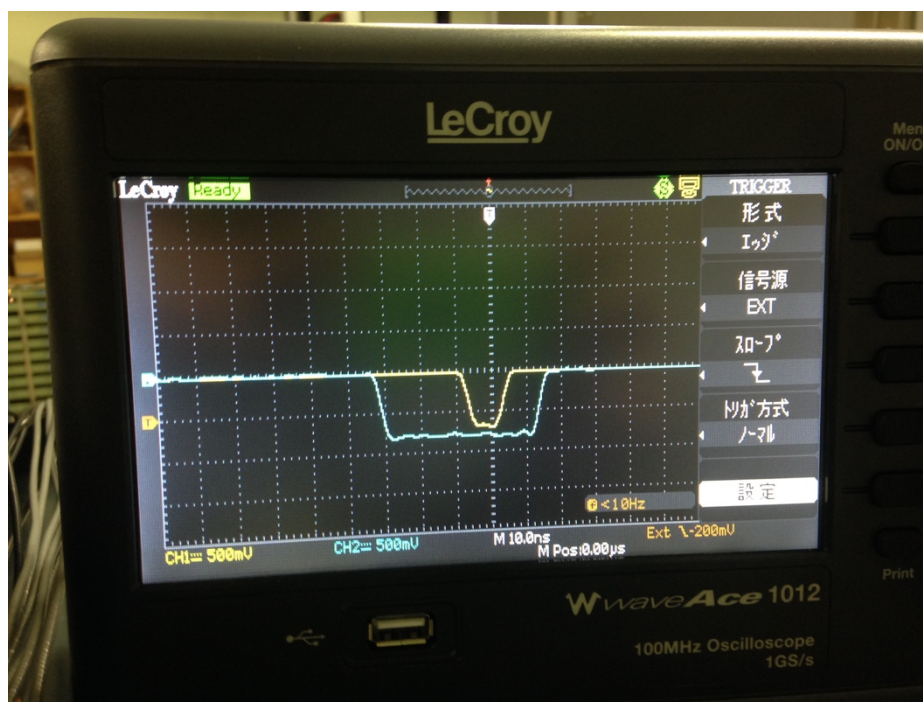


図.7 トリガー信号タイミング調整：SFT の信号(黄色)が VETO 信号(シアン)幅内に入っていることを確認した。

4.3. 宇宙線ミュオンの抑制効果

AC マルチプリシティ 2 における係数測定で、バックグラウンド頻度は 0.07 cps, Sr の感度 2.14×10^{-3} cps/Bq, Cs の感度 1.79×10^{-6} cps/Bq, KCl の感度はバックグラウンド頻度の誤差の範囲内で 2.6×10^{-4} cps/Bq 未満という結果が得られたが、これは改良前と同じ値を示す。

トリガー信号をゲートにして CAMAC ADC で AC1~4 の PMT の信号を確認した。トリガーを SFT のみにしてバックグラウンドを測定をした場合、0.5 p.e. しきい値で検出効率は 13%、トリガー-SFT ⊗ $\overline{\text{VETO}}$ の場合検出効率は 4% だった。49 分 3 秒間で 21,157 事象のトリガー頻度なので、カウント頻度は 0.28 cps であることが言える。ただしカウント頻度で比較するなら PMT が何個反応したか、つまり Multiplicity(M) が 2 であるときの efficiency を確認すれば良い。結果として 0.12 cps が M=2 の BG 頻度に相当する。

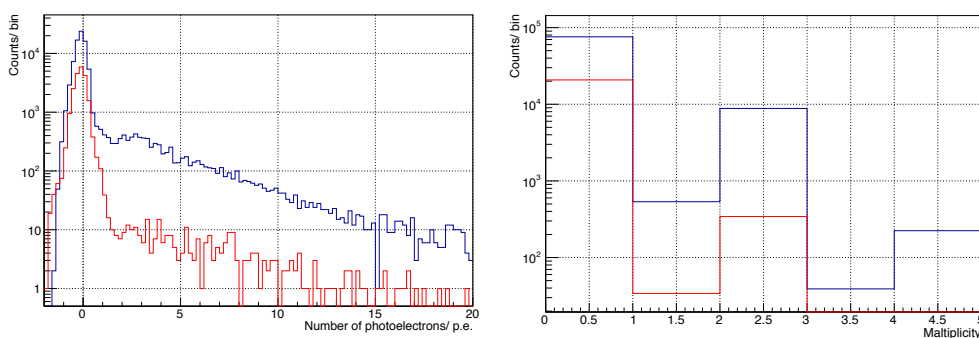


図 8. バックグラウンド測定による宇宙線除去効果

4.4. 考察

VETO で宇宙線ミュオン事象は落としきれていないのだろうか。ベトーカーンターの覆っている立体角を増やしたのにバックグラウンド頻度が減っていないのは他の要因が支配的であることを暗示している。マルチプリシティをみると、PMT1 個よりも 2 個の方が反応している。

仮定 1 : エアロゲルがある領域では宇宙線除去は十分であり、PMT が静かだと言っても、1 kHz で熱ノイズを出力しているのので、宇宙線が PMT に入射したときに、反対側の PMT が熱ノイズで信号を出力している事象が無視できなくなってきたのではないか。

仮定 2 : PMT 側の立体角が覆いきれていないのではないか。つまり宇宙線除去が不十分である。しかし BG 頻度が変わっていないことをどう説明するのだろうか。宇宙線の強度は鉛直方向からなす角度が大きくなるにつれて減少傾向にあり、角度を持って入射する低い頻度の宇宙線の強度よりも PMT のコネクタ付近のファイバー(図 5 参照)に入射する鉛直方向の宇宙線の強度が誤差の範囲内で高いことで説明できるのではないか。

5. 追試実験：宇宙線ミュオン・スキヤニング

前章で述べた仮定が正しいか検証する必要がある。バックグラウンドがどこで多く支配しているのか。方法はストロンチウムカウンターの上部にシンチレーションカウンターをスキヤニングして、もし宇宙線が原因ならどこが脆弱なのか判断することができる。

5.1. セットアップ

初号機の上部にプラスチックシンチレーションカウンターを設置し、 $SFT \otimes \overline{VETO}$ 時においてスキヤニングする。PMT(scan 1)は H1161 RA7972 と scan2 は同型 RA6601 が使用された。

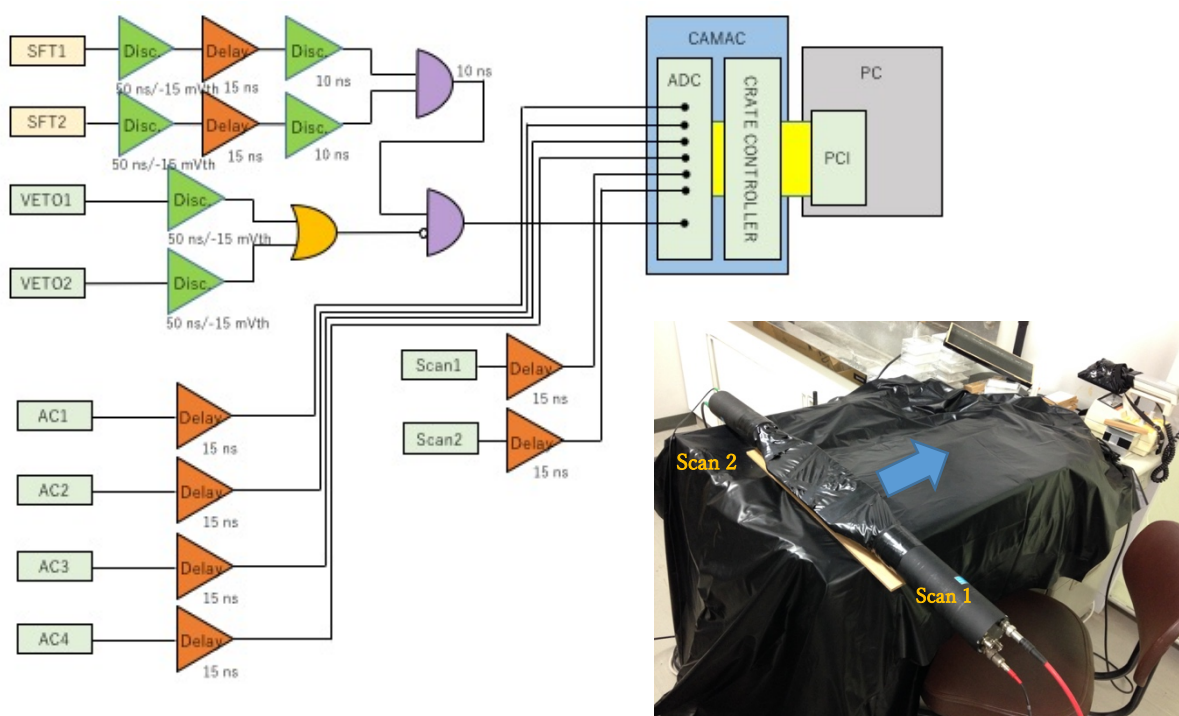


図9. 追試実験セットアップ

5.2. 測定結果：装置端の脆弱性

$SFT \otimes \overline{VETO}$ かつ AC のマルチプリシティが2以上の条件における Scan カウンターの ADC を図 10 に示す。スキヤン位置 45 cm と 65 cm は明らかに抑制されていることが確認できる。図 11 の青領域がベトーカーの覆われている範囲でそこを外れている箇所に宇宙線による信号が現れている。初号機のバックグラウンドは左側で 16%、右側で 7%が、装置端で宇宙線を除去しきれていないことが原因であることがわかった。対策としては PMT 領域までベトーシンチを拡張することで必要な 70 cm×40cm の面積が必要であるだろう。

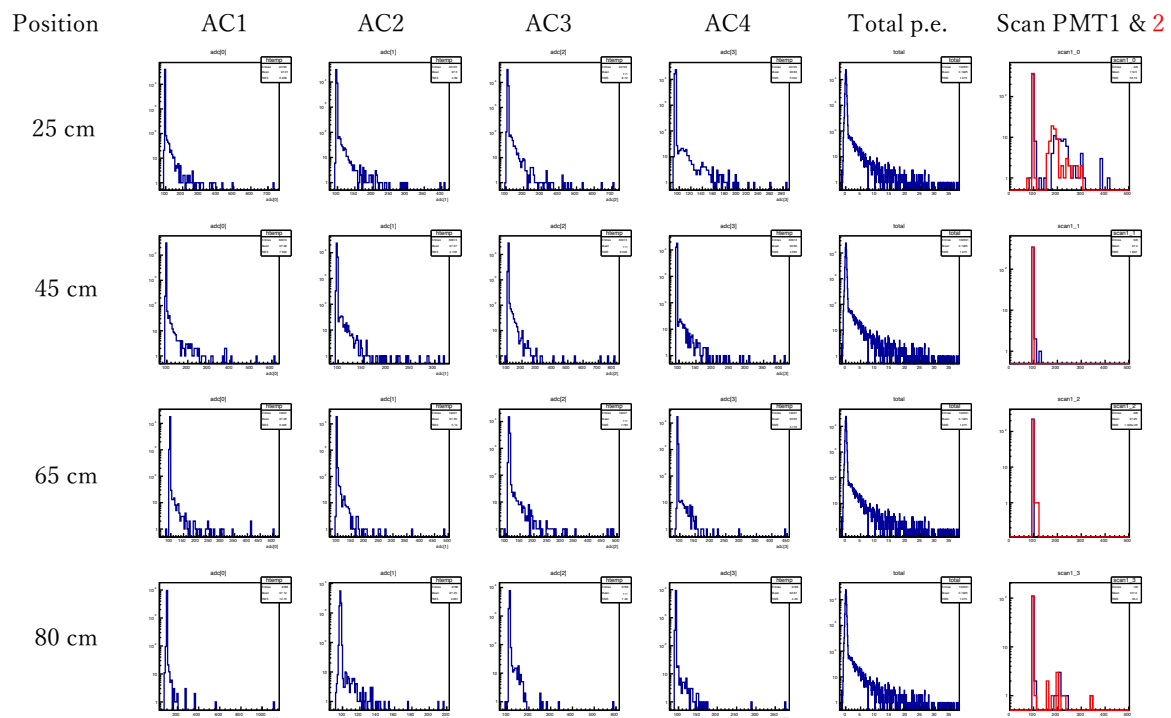


図 10. スキャン結果。行はスキャン位置を、列はそれぞれ AC1~4 の ADC, AC の全光電子数、Multiplicity=2 におけるスキャン PMT の ADC をそれぞれ示している。

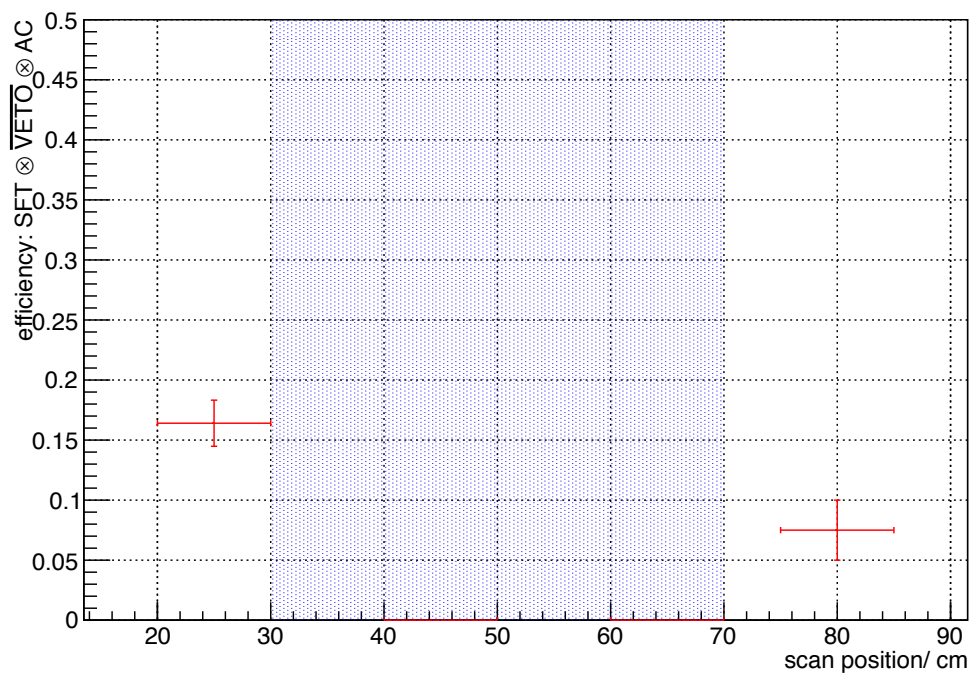


図 11. スキャン結果 2。AC M=2 における scan PMT1 と 2 の OR 検出効率。青領域はベトーシンチの覆っている範囲。

5.3. ベトーカーンター改善策と改善後性能の推定評価

PMT とファイバーの接続部がベトーカーンターで覆われていないことが BG 頻度を減らせない原因の約 22%であった。AC の M=2 において BG 頻度が 0.07 cps から 22%減で 0.05 cps が見込まれる。面積 10 cm×10 cm のプラシン検出器を左右に設置して、今後アップグレードした装置の性能を評価した。セットアップは図 12 に示す。結果バックグラウンド頻度は 0.048 cps で矛盾しない結果が得られ、Sr の感度 2.15×10^{-3} cps/Bq、Cs の感度 1.46×10^{-6} cps/Bq、K の感度 4.97×10^{-4} cps/Bq が得られた。



図 12.ベト-2 追加測定のセットアップ

6. まとめと今後の計画

今回ストロンチウム 90 カウンター初号機のアップグレードとしてベトーカーンターの性能向上を図った。3つのプラスチックシンチレータを用いて角度をもつ入射宇宙線ミュオンを除去する目的だ。検証実験でベト-シンチを追加したのに関わらず BG 頻度が変わらなかった。その原因が装置端で宇宙線を除去しきれていなかったことがわかった。追試実験でその BG 頻度の約 22%が両端での宇宙線の影響であることがわかり、ベト-シンチを追加して性能評価した結果 BG 頻度は予想と等しく 22%減した。残りの約 0.05 cps は追加したベト-シンチでも捉えきれていない領域の宇宙線事象が残っているのだろう。

今後 1.0.3 にアップグレードする計画としては、4月にサイズ 40 cm×100cm×0.5 cm のプラシンを入荷する予定なので、加工研磨した後、5月にベト-シンチ製作に取り掛かる予定だ。ベト-シンチは PMT コネクタの領域まで覆う必要があると判断し、シンチ内の光の減衰を考慮して、現在 100 cm×20 cm×0.5 cm のサイズを 2枚重ねて装置上部に、40 cm×6 cm×0.5 cm を装置の前後側面、15 cm×8 cm×0.5 mm を装置左右側面に貼り付ける予定だ。⁴⁰K の感度が思いの外高いのは、エアロゲルの有効面積が 10 cm×10 cm なので隙間からファイバーに到達して、応答しているのではないかと考えている。30 cm×10 cm×3 cm のエアロゲルを準備して次回の測定に挑む予定だ。