

# リアルタイムストロンチウム 90 カウンターによる 環境放射能測定技術

千葉大学 伊藤博士

2015/ 11 月

福島原発事故によって太平洋沖に排出されたとされるストロンチウム 90 は、海産食品として我々の下へ巡ってくる。放射性セシウムとは異なりストロンチウム 90 は骨に蓄積されるため摂取は危険である。さらにガンマ線を放出しないので放射能測定が困難で、福島県沖漁業は未だ自粛している。千葉大はストロンチウム 90 からのベータ線だけに感度を持つ装置(リアルタイムストロンチウム 90 カウンター)を開発した。その原理と実用化までの動向を報告する。

## 1. はじめに

福島原発事故から 4 年経った現在(2015 年)、土木、農業、交通はだいぶ復興されてきている。しかし、原発中心地の廃炉作業と漁業については復興は十分に行えていない。福島県沖の漁業が未だ再開されない主な原因は放射性ストロンチウムの存在である。このストロンチウム 90 は体内に入ると骨に蓄積されるので、放射性セシウムなどと比較すると危険である。食品に含まれている放射能基準は 100 Bq/kg と定められているが、ストロンチウム 90 は別に基準を設けるべきである。しかし自然放射能などのバックグラウンドによって、ストロンチウム 90 の放射能を即時測定することは困難なのだ。JIS 規格のストロンチウム 90 の放射能測定は数 Bq/kg の精度で検査することが出来るが、結果がでるまでに約数週間から 1 ヶ月の時間を要し、さらに 1 検体あたりの費用がかかる。さらにこの作業は特別の業者に検査依頼する必要があることが漁業再開が困難な要因でもある。特別な資格を持たない人でも検査が容易で、ストロンチウム 90 の放射能を即時検査できるようになれば漁業復興も早まるだろう。

## 2. ストロンチウム 90 って

ストロンチウム 90 とはストロンチウムの放射性同位体の一つで原子炉の核燃料から主に生成される物質である。これはアルカリ土類金属で体内に吸収されると骨に蓄積される。セシウムはアルカリ金属で体内に吸収されると、ナトリウムやカリウムなどの様に全身をめぐる、新陳代謝によって排出されるので基準がゆるく設定されている。吸収された放射性セシウムは全身の発がん率を上げる。一方、放射性ストロンチウムは骨に集中的に発がん率を上げるのでセシウムよりも摂取は規制すべきである。ストロンチウム 90 の半減期は約 29 年なので、4 年経った今でも海水に漏れた放射性ストロンチウムは食物連鎖で魚介類の骨に蓄積している可能性がある。

## 3. 現在の放射能基準値

自然被曝には天然放射性同位体の内・外被曝と宇宙線由来による被曝に分類できる。前者は主にトリチウムやカリウム 40、ラドン 222 が代表的で、外部被曝もしくは経口摂取し内部被曝する。後者は主にミュオン粒子による外部被曝が主で、これら自然被曝は年間約 2.4 mSv と評価されている。厚労省はこの年間自然被曝量を有意に超えないような食品内放射能基準値を設定した。化

学的性質が良く似ているカリウム 40 の自然被曝量と比較して十分に小さい量として設定した。天然の放射性カリウムの存在比はカリウム自体の約 0.012%なので、カリウム 1 g 当たりの放射能は 31.7 Bq である。成人 (体重 60kg) 体内には約 130 g のカリウムが含まれているので、放射性カリウムは約 4,000 Bq 存在している。これに対して十分小さい放射能、そして幼児や妊娠女性なども考慮して、放射性セシウムに関する食品内放射能基準値は 2014 年 4 月から 100 Bq/kg と設定した (飲料水は 10 Bq/kg)。

## 4. $^{90}\text{Sr}$ 放射能測定は困難

ストロンチウム90 ( $^{90}\text{Sr}$ )は半減期 29 年で最大 0.55 MeV のベータ線を放出して、イットリウム 90 ( $^{90}\text{Y}$ )に崩壊、その後半減期 64 時間で最大 2.28 MeV のベータ線を放出してジルコニウム 90 ( $^{90}\text{Zr}$ )に崩壊する。ここで、 $^{90}\text{Sr}$  の放射能測定が困難な理由は大きく3つある。

1. ガンマ線を放出しない
2. ベータ線のエネルギーは連続的
3. 試料内の放射能バックグラウンドが多い

従来の主な放射能測定はガンマ線スペクトロメータによる分析で、ガンマ線の光電吸収ピークの高さから、原子核の放射能を評価する。放射性セシウム ( $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) はどちらもベータ線とガンマ線を放出するが、ガンマ線のエネルギーが異なるので区別が可能だ(図1)。

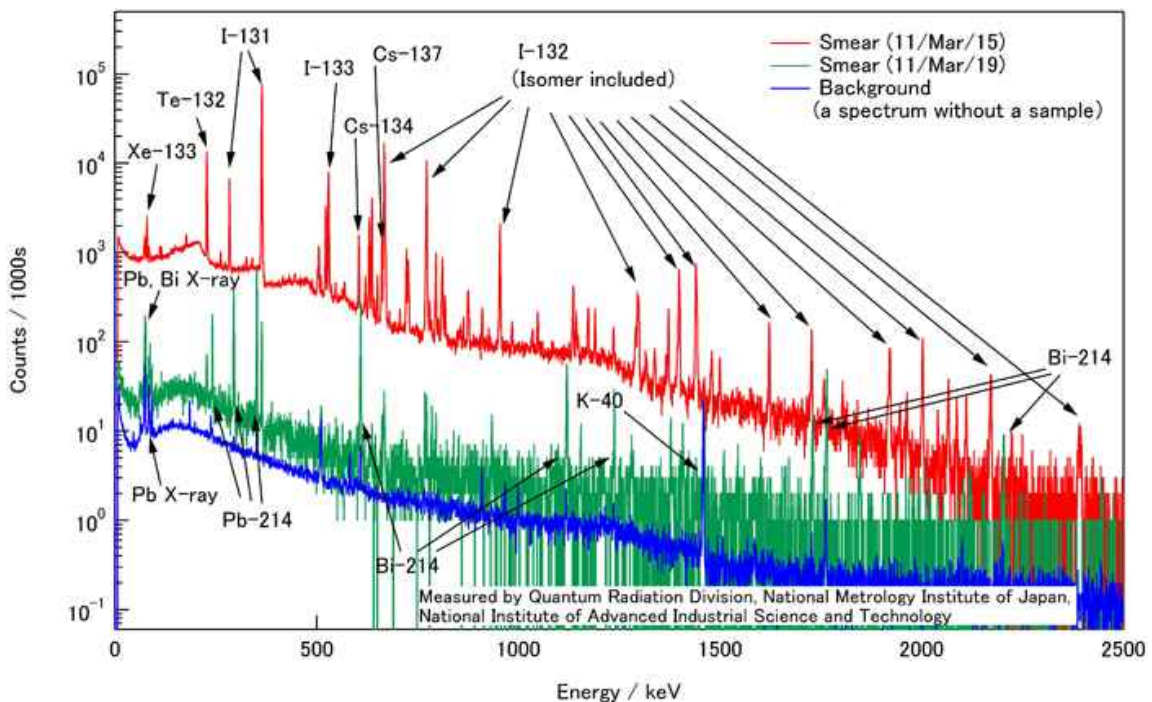


図 1. ゲルマニウム検出器によるガンマ線スペクトラム

しかしベータ線は連続的なエネルギー分布を持つのでスペクトロメータによる区別ができない。最大エネルギーが核種によって異なるため、シンチレーション検出器では波高分布の最大 (end

of edge)の違いから同定する方法があるが、検出効率が非常に低く、実用には至らない。

環境中の試料(ここでは海産物、海水)には、天然の放射性カリウムが存在している(海水 1 L 当たり約 12 Bq) 場合、そして厚労省が定めた放射性セシウムの基準値 100 Bq が未満存在している場合、これらのベータ線がストロンチウム 90 のベータ線と区別できずバックグラウンドとなり、放射能測定が困難になる。

## 5. リアルタイムストロンチウム 90 カウンター

千葉大学の河合秀幸准教授らが 2013 年に  $^{90}\text{Sr}$  からの  $\beta$  線に高感度で  $\gamma$  線に低感度な装置を開発した。その名もリアルタイムストロンチウム 90 カウンターである。 $^{90}\text{Sr}$  とその娘核の  $^{90}\text{Y}$  は放射平衡状態では放射能が等しくなり、この装置は  $^{90}\text{Y}$  からの高エネルギー  $\beta$  線(最大 2.28 MeV)を観測することで間接的に  $^{90}\text{Sr}$  の放射能を測定する。

この装置の動作原理はチェレンコフ放射を基にしている。試料中に含まれている  $^{40}\text{K}$  および  $^{134}\text{Cs}$  や  $^{137}\text{Cs}$  からの低エネルギーの  $\beta$  線にはチェレンコフ放射しないために輻射体 (radiator) の屈折率(1.04)を決定する必要がある。KEK Belle 実験のために千葉大で開発していた「シリカエアロゲル」がこの条件を満たす屈折率を持ち、この装置に使用されている。



図 2. リアルタイムストロンチウム 90 カウンター初号機の配線作業途中写真: 中央奥の回路で PMT 電圧供給と信号処理、計数記録を行う。中央手前にカウンター本体(有効面積  $300 \times 100 \text{ mm}^2$ )が設置される。外側手前に引き出しが設置され、試料を設置される。

## 5.1. 開発の歴史

開発の歴史をたどってみると、2013 年は第 106 回日本医学物理学会学術大会でアイデアと実証実験結果を報告し、日本物理学会秋季大会で実証実験の追試実験結果を報告、IEEE NSS&MIC で改善案と性能推定の報告、中部電力から助成金獲得、丸橋健太が修士論文として提出した。2014 年は林栄生器株式会社に依頼して試作機を製作、中部電力成果報告会で試作機を展示、TIPP2014 で試作機の性能評価結果を報告、千葉エリア産学官連携オープンフォーラムで試作機の展示、IEEE NSS&MIC で報告、NIRS テクノフェア 2014 で試作機の展示、河合秀幸准教授がこの成果を認められ学長章を受賞した。飯島周太郎が修士論文として提出した。2015 年は試作機をパッケージング、性能評価した。この結果を ANIMMA2015 で報告した。

2013.09	第106回日本医学物理学会学術大会	口頭発表	伊藤博士
2013.09	日本物理学会秋季大会	口頭発表	飯島周太郎
2013.11	IEEE NSS&MIC 2013	ポスター発表	飯島周太郎
2014.03	修士論文:@千葉大	論文	丸橋健太
2014.06	TIPP2014	口頭発表	伊藤博士
2014.06	中部電力研究成果発表会	展示発表	河合秀幸
2014.09	千葉エリア産学官連携オープンフォーラム	展示発表	河合秀幸
2014.11	IEEE NSS&MIC 2014	ポスター発表	飯島周太郎
2014.12	NIRSテクノフェア2014	展示発表	河合秀幸
2015.03	修士論文:@千葉大	論文	飯島周太郎
2015.04	ANIMMA2015	ポスター発表	伊藤博士

表 1. スترونチウム 90 カウンターに関する業績一覧

## 5.2. チェレンコフ放射による識別原理

屈折率  $n$  の物質中において荷電粒子が光よりも速く (速度  $v > c/n$ ) 通過するとき、一種の衝撃波が生じる。これをチェレンコフ放射とよび、この現象によって生じた光子をチェレンコフ光と呼ぶ。

ベータ線の速度比  $\beta$  は相対論から以下の式で表される:

$$\beta \equiv \frac{v}{c} = \frac{\sqrt{(m_e + K)^2 - m_e^2}}{m_e + K}$$

ここで、 $m_e$  は電子質量、 $c$  は光速、 $K$  はベータ線のエネルギーおよび電子の運動エネルギーを示す。つまり、 $^{40}\text{K}$  からのベータ線ではチェレンコフ放射しないしきい値を設定することで、試料中に含まれる  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$  以外のバックグラウンド源となるベータ線およびガンマ線の影響を抑制することができる。最大 2.28 MeV のベータ線の速度比は約 0.983 に対して最大 1.31 MeV のベータ線の速度比は約 0.959 なので、 $^{90}\text{Sr}$  で反応して  $^{40}\text{K}$  で不感のための条件は  $1.0172 < n < 1.041$  と導ける。

### 5.3. 装置の構造

リアルタイムストロンチウム 90 カウンターはシンチレーション・ファイバー・トリガー (SFT)、エアロゲルチェレンコフカウンター (AC)、そしてベータカウンター (veto) で構成されている。このセクションでは本装置を構成している部品、マテリアル等について説明する。

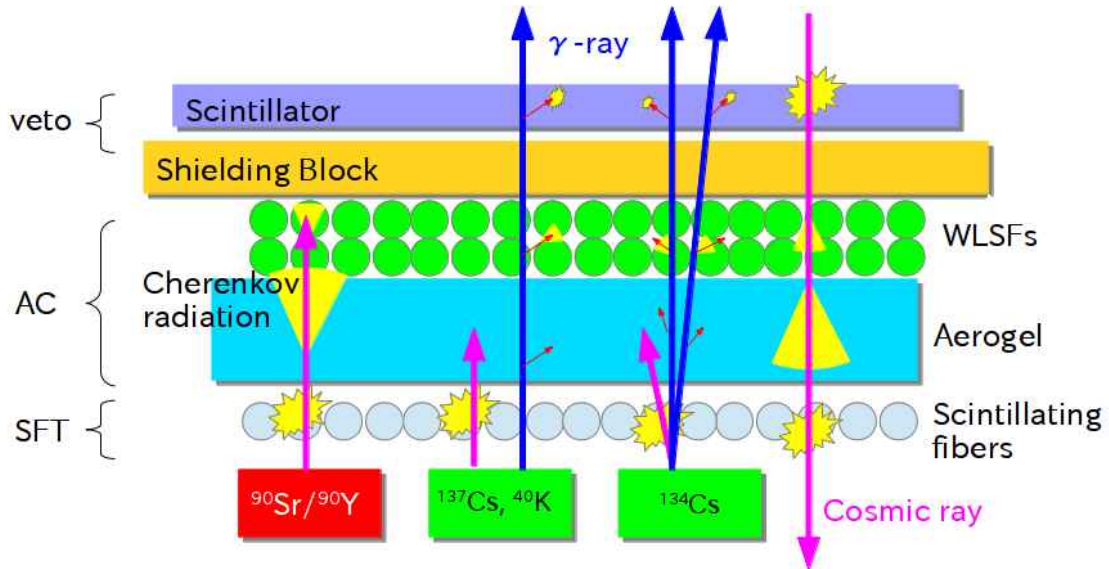


図 3. リアルタイムストロンチウム 90 カウンターの構造

#### (1) シンチレーション・ファイバー・トリガー

SFT は荷電粒子が通過したことを保証し、上部の AC でチェレンコフ放射条件を妨げないために薄型 (低密度) 設計を持つ。SFT はシンチレーション・ファイバーのシートと両側に接続されている PMT で構成されている。シンチファイバーは Kuraray 社の直径 0.2 mm の型番: SCSF-78MJ を用いている。これはダブルクラッド構造でトラッピング効率  $\epsilon_{\text{trap}} = 5.4\%$  をもち、シングルクラッド構造と比較して約 1.41 倍高い。この装置に使用している PMT はすべて浜松ホトニクス社の型番: R9880U-210 を使用している。外直径 16 mm、有効面積が直径 6 mm、ウルトラバイアルカリ光電面を使用され、350 nm で最大 40% と高い量子効率、そしてメタルパッケージ・ダイノードによる早い時間特性が特徴づけられている。

性能評価のために、外部シンチレーション検出器とベータ線源の間に SFT の挟んだセットアップを構築し、検出効率を評価した。SFT はファイバー層を増やすと検出効率が増加するに従ってエネルギー損失も増加する。これはつまり、効率良くチェレンコフ放射の条件を満たせなくなる。これを考慮し、ファイバー層は 1 層の SFT は検出効率 54% が測定された。これは、ファイバーのコアにベータ線が入射する確率 88% が大きく起因し、次に製作による隙間が要因を考慮すると説明ができる。また、ファイバーのトラッピング効率や PMT 量子効率も要因になりうるがシンチレーション光のような十分な光子数の検出では影響が少ない。SFT は低検出効率であっても、厚さ 0.2 mm で低物質量の設計が重要である。

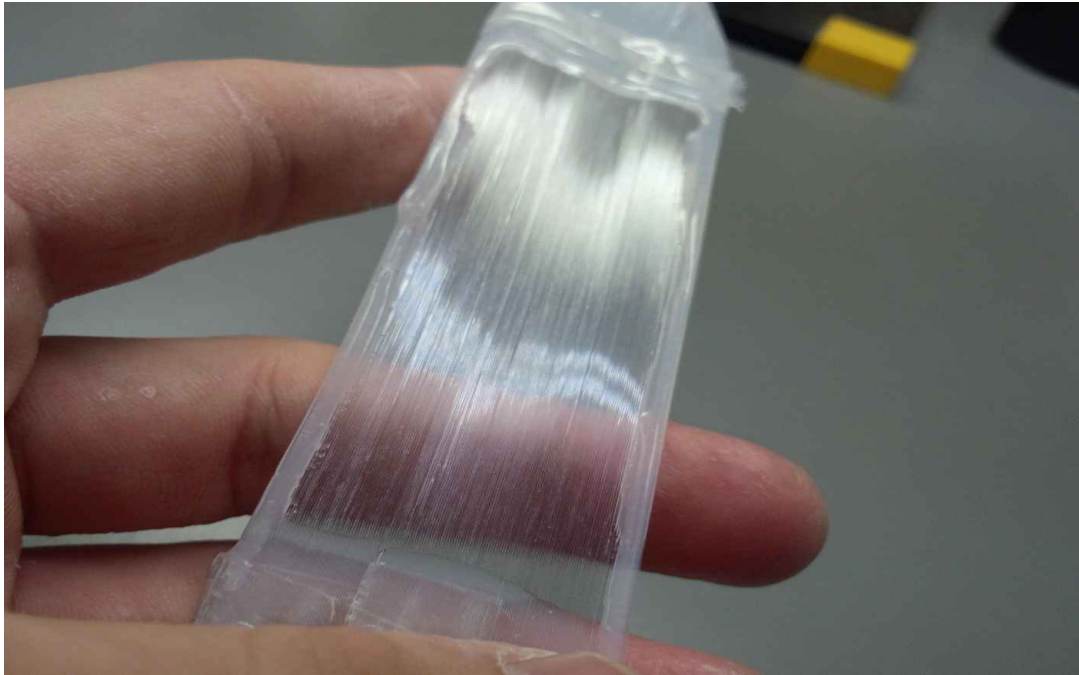


図 4. シンチレーション・ファイバーのシート製作

trigger scintillating fiber ADC distribution

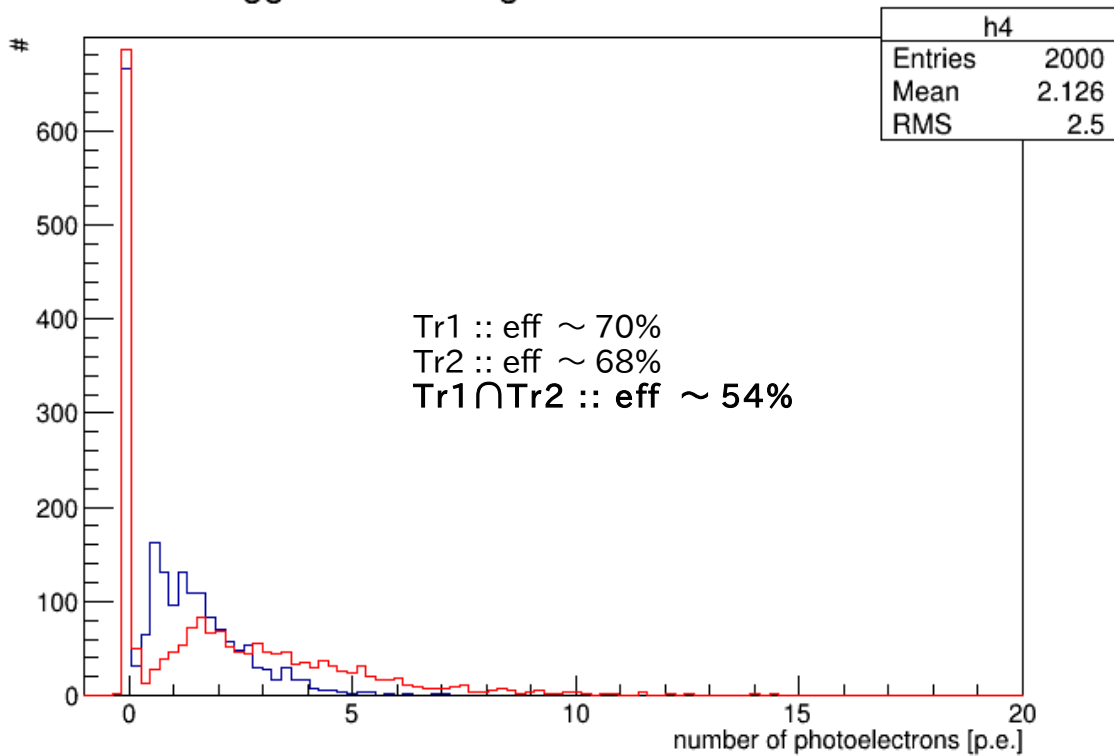


図 5. SFT 性能評価測定結果: 平均光電子数は 2~3 p.e. が得られ、両側面の PMT が同時に計測する効率は 54% が得られた。

## (2) エアロゲル・チェレンコフ・カウンター

エアロゲル・チェレンコフカウンター(AC)はシリカエアロゲルを輻射体にした粒子識別装置のひとつ。シリカエアロゲルは $\text{SiO}_2$ と空気の物質量を調合することで任意の屈折率(1.003~1.26)を決定することが出来る(図6)。初号機に据え付けたエアロゲルの屈折率は  $1.045 \pm 0.001$  である。

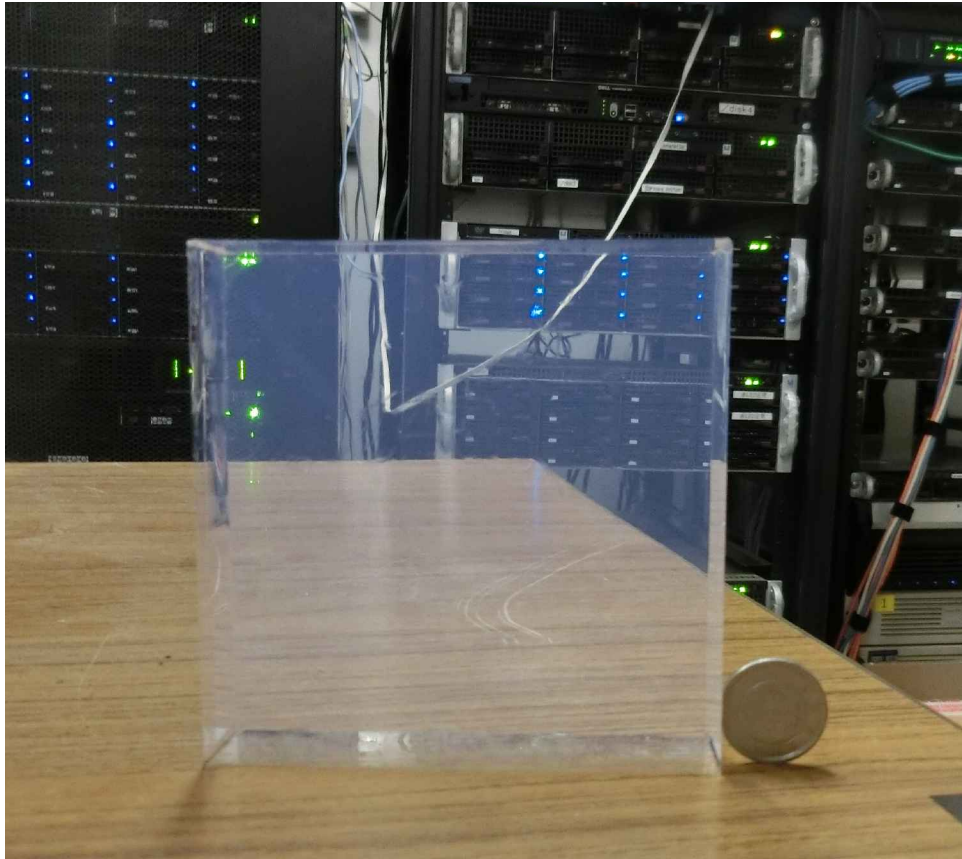


図6. シリカエアロゲル(屈折率 1.05)。隣の1円硬貨は比較のため。うっすら青みがかっているのはレイリー散乱によるものである。

チェレンコフ光読出しに通常光電子増倍管を用い、光子をひとつずつ測定する。波長変換ファイバーのライトガイドを経由することで有効面積に対して光電子増倍管の使用数を削減でき、安価な設計に貢献する。

波長変換ファイバーは光ファイバーに波長変換物質を含んだ材質で、ファイバー側面から特定の波長の光を吸収し、波長を伸ばして再発光、その後全反射条件を満たした光を両末端へ伝搬する性質をもつ。Kuraray社の波長変換ファイバー(型番:B-3(300)MJ)は紫外線を吸収し、青い光を発光する。同じく型番:Y-11(300)MJは青い光を吸収し、緑の光を発光する。チェレンコフ光読出しには2種類の波長変換ファイバーをB-3, Y-11の層構造をもつライトガイドを用いた。チェレンコフ光は波長の2乗に反比例した連続的な波長スペクトラムをもち、B-3で全反射条件を満たさず漏れた光は下層のY-11で最吸収される。したがって、1種類の波長変換ファイバーを用いるより

B-3、Y-11 を用いたライトガイドのほうが収集効率が高い。

波長変換ファイバーのライトガイドは有効面積  $300 \times 100 \text{ mm}^2$  で直径  $0.2 \text{ mm}$  の B-3 を 500 本を隙間なく敷き詰めた層を 2 層と、同じく Y-11 の層が 2 層、そして最下層をアルミ蒸着したマイラー反射材で構成されている(図 7)。PMT 接続面は左右 2 つずつ(計 4 個) 設け、平均直径  $6.5 \text{ mm}$  で R9880U-210 の光電面で読み出すことが可能である。

屈折率 1.05 のシリカエアロゲルに  $\beta=1$  の電子が通過した時、約  $50 \text{ photons/cm}$  が放出されるといわれる。東北大学電子光理学研究センターにおける実験で波長変換ファイバー・ライトガイドのチェレンコフ光における収集効率約 8% が得られた。

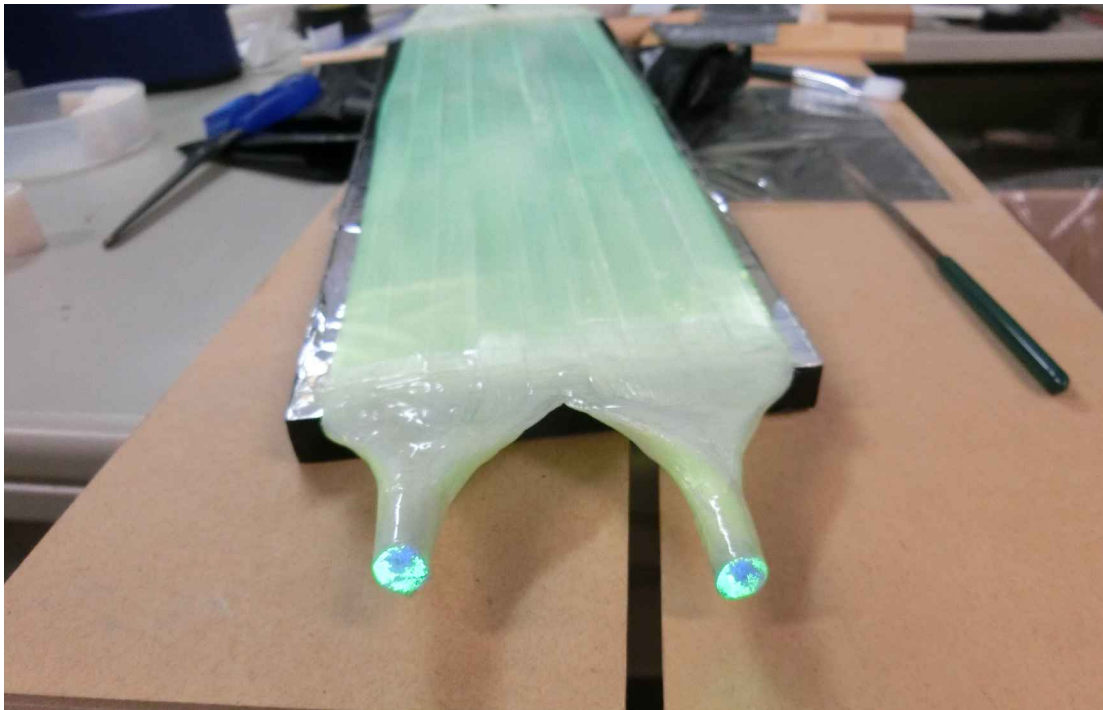


図 7. 波長変換ファイバー・シート: 上層から B-3 が 2 層、Y-11 が 2 層、そして反射板から構成されている。

### (3) 宇宙線ベトロー・カウンター

宇宙線ベトロー・カウンター(veto)は主に宇宙線ミューオンからのバックグラウンドを抑制するために遮蔽体(Shield Block)の上部に設置する。プラスチック・シンチレータの側面に波長変換ファイバー(Y-11)によるシートを貼りつけられ、そのファイバーの両末端を一つに束ね PMT に接続されて構成されている。ベトローカウンターに使用されているプラスチックシンチレータは ELJEN TECHNOLOGY 社製(型番: EJ-230)で、Seint-Gobain 社の BC420 相当の光学特性をもち、 $400 \times 200 \times 5 \text{ mm}^3$  のサイズをもつ。

シンチレータ中心に宇宙線ミューオンが通過した時の PMT の光電子数を調べた。シンチレータを挟むように 2 つのトリガーシンチレーションカウンターを中心に設置し、これらが同時に反応した事象におけるベトローカウンターの応答データを収集した結果、約 7 p.e. の光電子数が得られた。



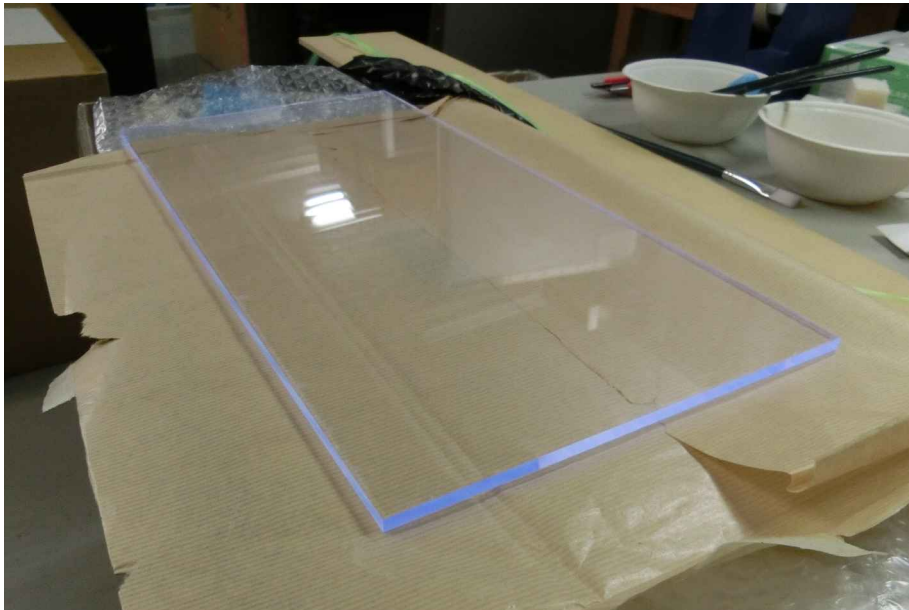


図 8. プラスチックシンチレータ

#### (4) 読出し回路

SFTとACが応答し、かつ veto が応答しない事象を計測する回路を設計する(図 9)。動作確認のため NIM モジュールで、試作のため設計した回路を林栄精器株式会社に受注した。

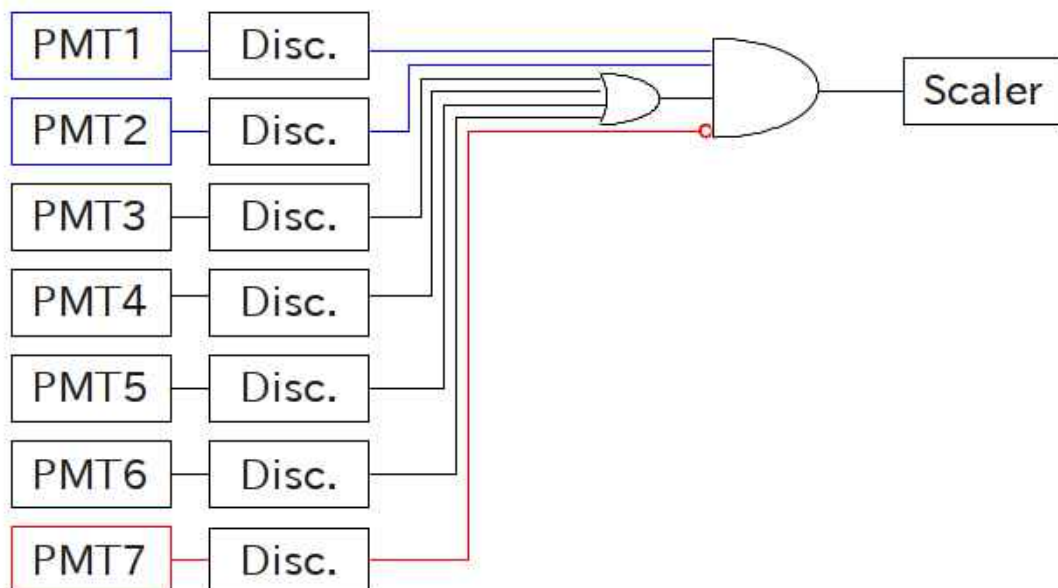


図 9. 読出し回路設計図

## (5) 核種ごとの応答

図3に示すようにシンチファイバー、エアロゲル、波長変換ファイバー、ベトーシンチを設置する。読み出し回路の設計図(図9)より、SFT, AC, veto に接続されている PMT からの信号をすべて Discriminator で論理信号に変え、OR と AND 回路で演算し最後スケーラでカウントする。図 10 に各核種における信号の応答を模式的に表した。 $^{90}\text{Sr}$  からのベータ線は最大 2.28 MeV をもち、シンチファイバーを反応させ、エアロゲル内でチェレンコフ放射し、その光は波長変換ファイバーで読み出さる。また、そのベータ線は波長変換ファイバーに直撃しチェレンコフ放射し同様に反応させる。その後、遮蔽ブロックで静止する。 $^{40}\text{K}$  や  $^{137}\text{Cs}$  のようにガンマ線とベータ線を放出する核種はベータ線でシンチファイバーを反応させるが、運動エネルギーがしきい値を下回っていればチェレンコフ放射しない。しかし、 $^{40}\text{K}$  からの最大 1.33 MeV、 $^{137}\text{Cs}$  からの最大 1.17 MeV のベータ線は波長変換ファイバーに直撃すれば反応させるので、エアロゲルの厚さはそれを考慮して 20 mm に設定すると良い(ただし初号機は仕様が 10mm である)。しかし、ガンマ線がエアロゲル内でコンプトン散乱しその反跳電子がファイバーに直撃しても反応しそれがノイズになる。宇宙線はシンチファイバーもエアロゲルでチェレンコフ放射もするのでベトーカウンタで負論理信号を同期させる。したがって  $^{90}\text{Sr}$  だけに感度良く反応する。

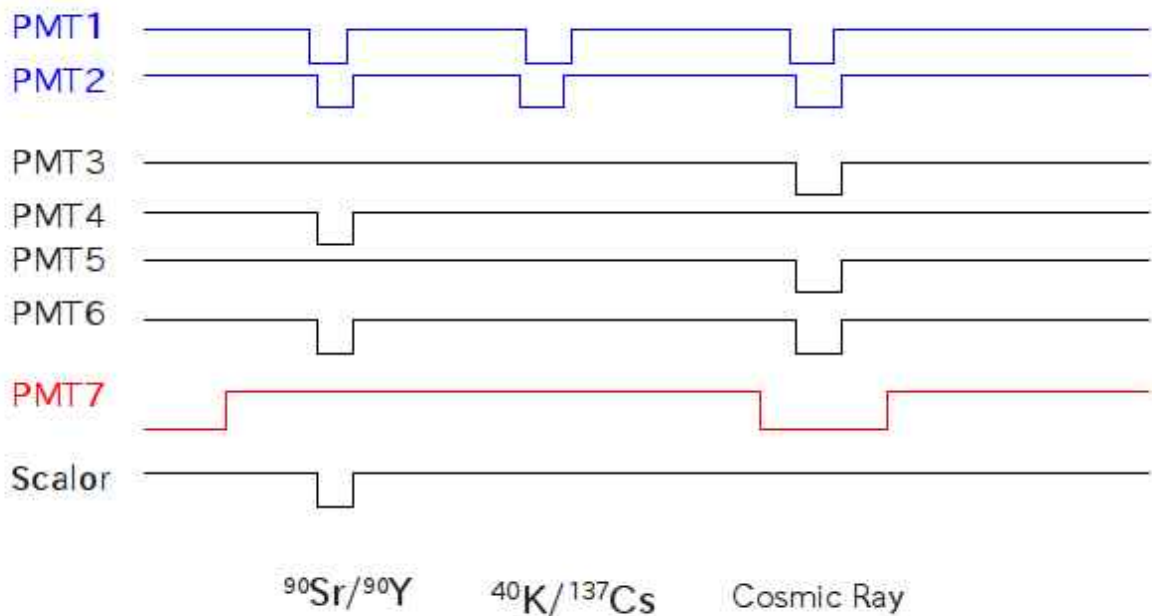


図 10. ストロンチウム 90 カウンターの各核種における応答

## 5.4. 性能評価測定

ストロンチウム 90 カウンターの性能は密封線源による絶対感度を基に評価される。使用した線源は放射能 25 kBq の  $^{90}\text{Sr}$  と  $^{137}\text{Cs}$ 、そして 100 kBq の  $^{60}\text{Co}$  と  $^{22}\text{Na}$  である。基本的に  $^{60}\text{Co}$  と  $^{22}\text{Na}$  はベータ線源ではない(詳しく言うと  $^{22}\text{Na}$  は  $\beta^+$ 崩壊)がガンマ線に不感であることを実証したい。本研究での目的は政府が定義した基準値:放射性セシウム 100 Bq/kg が試料に含まれていたとしても十分  $^{90}\text{Sr}$  の放射能が測定できることを証明する。基本的な測定方法はこうだ。バックグラウンドとして装置の上に何も置かずに計測し記録する。それぞれの線源を装置の有効面積の中心に設置し、1 分間の測定を 30 回施行し計測する(図 11)。その計数値の平均と誤差を測定時間で割ってカウント頻度を計算し、バックグラウンド頻度との差から正味のカウント頻度を見積る。密封線源の放射能に対する装置のカウント頻度つまりその核種における絶対感度を意味する。

カウント頻度の測定結果を図 12 に示す。これらのヒストグラムは上記で説明したが 1 分間の測定を 30 回施行したカウント頻度を意味する。マゼンタのヒストグラムはバックグラウンド頻度、シアンは  $^{137}\text{Cs}$ 、緑は  $^{22}\text{Na}$ 、赤は  $^{60}\text{Co}$ 、青は  $^{90}\text{Sr}$  を示す。 $^{90}\text{Sr}$  と  $^{137}\text{Cs}$  は同じ放射能であってもカウント頻度に差が生じたことを確認できる。

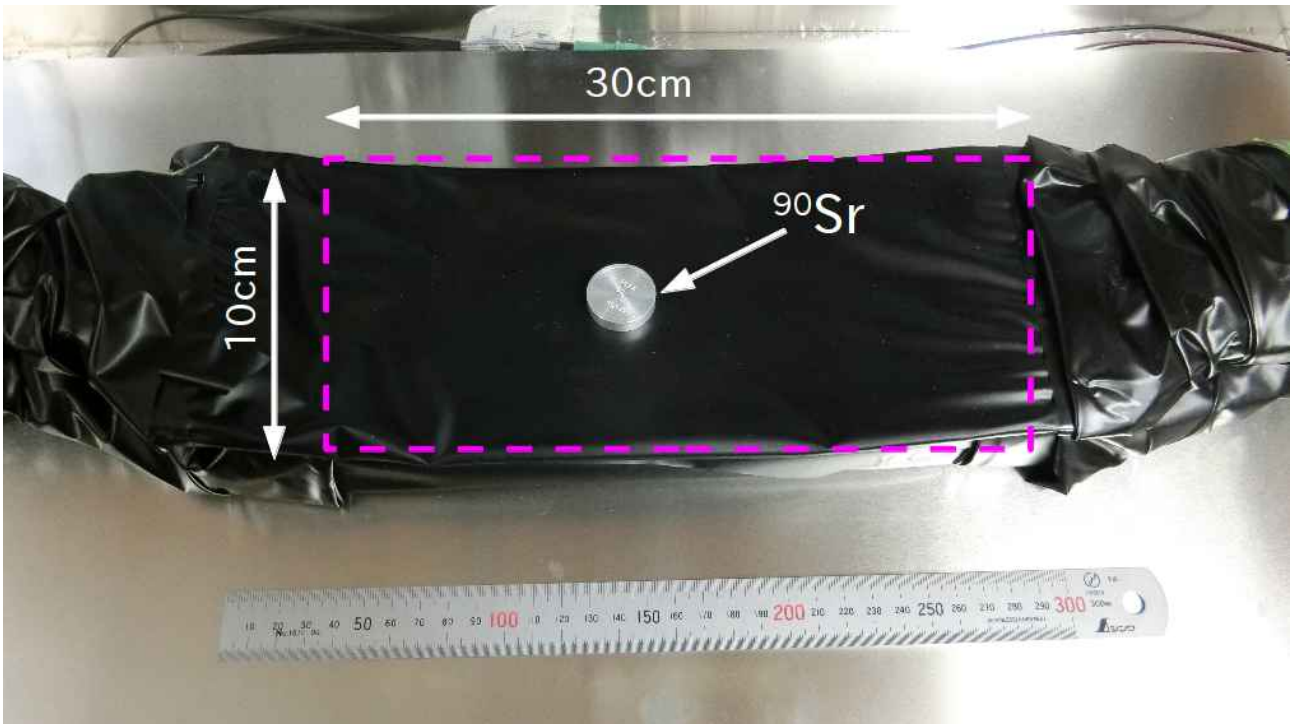


図 11. 密封線源を用いた性能評価測定の様子

それぞれの核種における装置の絶対感度  $\eta$  は以下の式で表せる。

$$\eta = \frac{R \pm \sigma_R}{A}$$

$$R = \frac{N - N_{BG}}{t}$$

$$\sigma_R = \frac{\sqrt{N + N_{BG}}}{t}$$

ここで、R は正味のカウント頻度でバックグラウンドを差し引いている。t は測定時間である。各核種における絶対感度の測定結果を表 2 に示す。評価測定の結果から  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{90}\text{Sr}$  の感度比  $(2.0 \pm 1.2) \times 10^{-3}$  が得られた。これは  $^{137}\text{Cs}$  が 100 Bq 存在していても  $^{90}\text{Sr}$  を同定することが可能であることを示している。

performance	parameter
$\eta(\text{Sr-90/Y-90})$	$(5.49 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ Hz/Bq}$
$\eta(\text{Cs-137})$	$(1.12 \pm 0.66) \times 10^{-5} \text{ Hz/Bq}$
$\eta(\text{Co-60})$	$(8.77 \pm 0.39) \times 10^{-5} \text{ Hz/Bq}$
$\eta(\text{Na-22})$	$(5.65 \pm 0.33) \times 10^{-5} \text{ Hz/Bq}$
Background	$(1.48 \pm 0.46) \times 10^{-1} \text{ Hz}$
$\Gamma(\text{Cs/Sr})$	$(2.0 \pm 1.2) \times 10^{-3}$

表 2. 核種における絶対感度

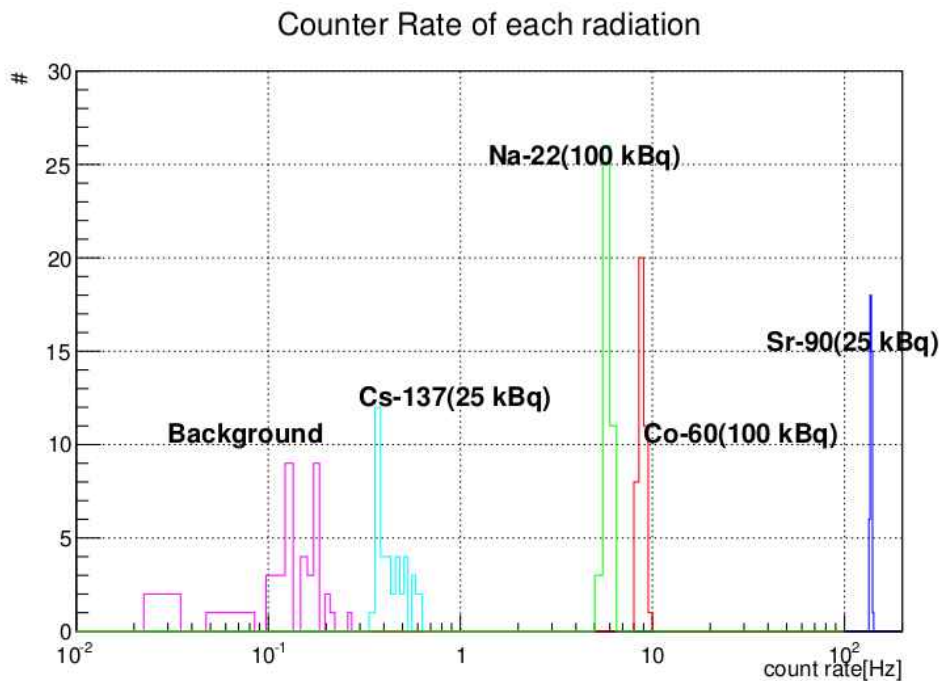


図 12. 核種におけるカウント頻度のヒストグラム

次に線源の置く位置を変えた時の応答(感度の一様性)をしらべる。<sup>90</sup>Sr線源を4cm毎移動させ、計11点の感度を調べた(図13)。絶対感度測定と同様に1分間の測定を30回施行しヒストグラムにした。有効面積の端はシグモイド関数(階段関数が訛っているような関数)にしたがって立ち上がっている。ベータ線の感度として入射窓の材質の差、距離に依存して揺らぐ傾向を持ち、遮光のため黒シートを何重にも巻いたりするとこの傾向が強まる。この結果から標準偏差で10%未満の感度一様性を示せた。

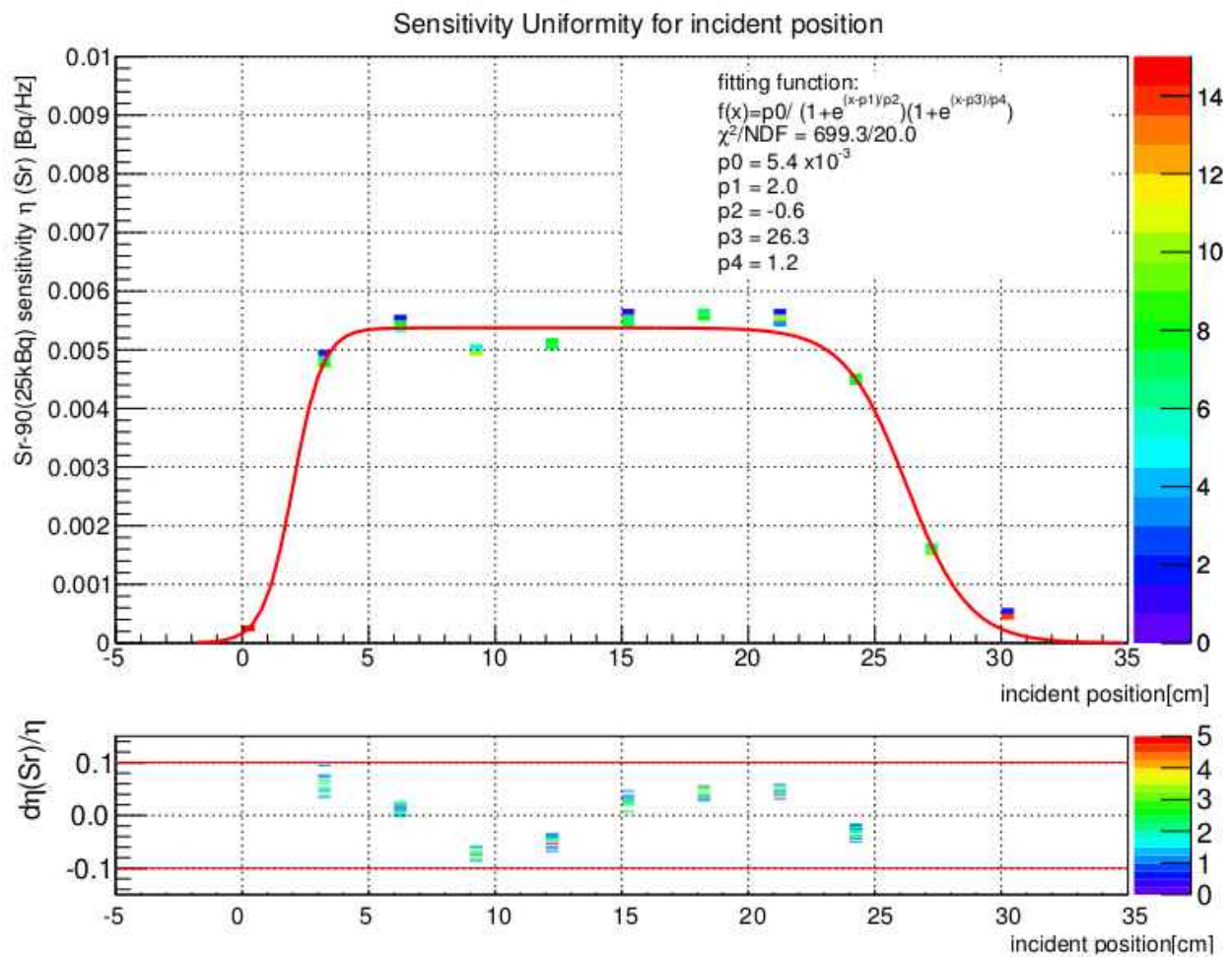


図13. <sup>90</sup>Srの感度一様性の測定結果

## 6. 放射能測定

初号機を図 2 のように厚さ 5 mm の黒いアルミ板でパッケージングした。側面に試料をセットする引き出しがついている。前項の性能評価測定は線源を下向きに置き行ったが、本測定器は上向きに置き評価される。カリウム 40 は純粋の塩化カリウムに 16.6 Bq/g 含まれており、これを用いて評価する。1時間ほどの測定結果を以下の表 3 に示す。

	time	Count	Rate[Hz]
BG	4042	593	0.147
KCl(166 Bq)	3700	722	0.195
<sup>137</sup> Cs(25 kBq)	3783	703	0.186
<sup>90</sup> Sr(25 kBq)	680	28688	42.188

表 3. 各線源における測定時間、カウント数、カウント頻度の測定結果

この測定結果より初号機の絶対感度は <sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs, <sup>40</sup>K においてそれぞれ  $(1.68 \pm 0.01) \times 10^{-3}$ ,  $(1.56 \pm 0.52) \times 10^{-6}$ ,  $(2.92 \pm 0.80) \times 10^{-4}$  が得られ、感度比は

$$\Gamma(^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}) = (9.3 \pm 3.1) \times 10^{-4}$$

$$\Gamma(^{40}\text{K}/^{90}\text{Sr}) = (1.73 \pm 0.48) \times 10^{-1}$$

と評価された。

初号機のカリウム 40 における識別能力は低い結果が得られた。これは使用しているエアロゲルの屈折率 1.045 がカリウム 40 からのベータ線でチェレンコフ放射し、そしてエアロゲルの厚さ 10 mm ではベータ線が止まらずファイバーに直撃していることが大きな要因であると考えている。本目的のためには屈折率 1.04 未満のシリカエアロゲルを入れ替え再評価する必要がある。

### 6.2. 測定限界

表 3 の結果より、1 時間測定したときのカウント数はバックグラウンド計数值  $N_{BG}=528 \pm 23$  である。正味の計数值  $N - N_{BG}$  が誤差  $(\sigma_N + \sigma_{BG})$  を考慮して優位にあるための条件を満たす放射能  $A$  は計算を簡単にするために測定時間 1 時間に固定して計算すると、以下の条件を満たすはずである。

$$\begin{aligned} \text{significant} &= \frac{(N - N_{BG}) - (\sqrt{N} + \sqrt{N_{BG}})}{\sqrt{N} + \sqrt{N_{BG}}} \\ &= \frac{A\eta t - (\sqrt{A\eta t + N_{BG}} + \sqrt{N_{BG}})}{\sqrt{A\eta t + N_{BG}} + \sqrt{N_{BG}}} \\ &> 2.58 \end{aligned}$$

この条件は 99%信頼を保証するために有意差(Significant)が 2.58  $\sigma$  離れている必要があることを示し、この条件を満たす  $A$  は  $A > 9.0$  Bq である。したがって放射能測定限界は 9.0 Bq と見積もれる。また <sup>137</sup>Cs が 100 Bq 存在している場合、同様にバックグラウンド計数值は  $N_{BG} = 532 \pm 23$  に

たいして  $^{90}\text{Sr}$  が 99%信頼区間による測定限界は 9.1 Bq と見積もれる。

測定時間に従って測定限界は下がる傾向をもつことは定性的に知られており、2 時間では 99% 信頼区間における限界は 4.6 Bq、4 時間では 2.3 Bq、10 時間では 0.9 Bq と見積ることができる。

## 6.2. 表面汚染検査

ベータ線放出核種の放射能測定は短い飛程の性質から表面汚染検査が有効である。初号機は有効面積 300  $\text{cm}^2$  で、1 時間における測定限界は前項より  $3.0 \times 10^{-2}$  Bq/ $\text{cm}^2$  と推定できる。有効面積が広くなるに従って、表面汚染検査における測定限界が下がる傾向があり、弐号機では 1000  $\text{cm}^2$  の有効面積に拡張する予定だ。

## 6.3. 質量あたりの放射能測定限界

ベータ線は分厚い試料を通過できないので、通常汚染検査では試料は薄く広げられる。本測定器では厚さ 1.0 mm に試料を薄く伸ばすことを考えている。試料の密度が 1.0  $\text{g}/\text{cm}^3$  と仮定すると単位面積当たりの質量(面密度)は 0.1  $\text{g}/\text{cm}^2$  である。前項の単位面積当たりの測定限界に面密度で割った値が単位質量あたりの限界値に等しい。したがって、初号機の測定限界は 0.3 Bq/g と推定できた。

## 7. まとめ

本研究は福島県沖漁業復興のためのストロンチウム 90( $^{90}\text{Sr}$ )の即時測定技術を確立した。 $^{90}\text{Sr}$  は体内に吸収されると骨に蓄積されることから危険とみなされているが、海産物の試料からは原子炉から生成され問題となっているセシウム 137, 134 や自然放射性物質であるカリウム 40 などと識別が困難であった。チェレンコフ光測定ベースの放射能測定ではセシウム 137 とストロンチウム 90 は 1000 倍以上の識別が可能でたとえ 100 Bq の放射性セシウムが試料中に存在していてもストロンチウム 90 の放射能を測定できることを示した。初号機として試作した装置は1時間の測定時間で試料内のストロンチウム 90 を 99%信頼区間において測定限界値 0.3 Bq/g を達成した。

我々が目標とする値は測定限界が 1 Bq/kg である。初号機の結果は目標に対して不十分で改善する必要がある。測定時間はいじらないとすると、まずは有効面積を拡張する。面積に比例して限界が下がる傾向を持つので 300  $\text{cm}^2$  から 1000  $\text{cm}^2$  に拡張すると限界は 3 分の 1 へ下がるだろう。そしてバックグラウンド頻度を抑え  $^{90}\text{Sr}$  の感度を上げるため、波長変換ファイバー・ライトガイドのチェレンコフ光読み出し方法を改善する。チェレンコフ光は粒子入射方向に依存して円錐状に放射する性質をもつ。ライトガイドを縞状にし1束ごと読み出すと、チェレンコフ放射した場合は数束が反応し、放射しない場合ガンマ線のコンプトン散乱やエアロゲルを通過してほぼ1束しか反応しない。何束反応したかの Multiplicity を論理演算し段階を設けることでバックグラウンド頻度によって粗い測定から精密測定を可能にできる。

これらを考慮して初号機のアップグレードではエアロゲルの屈折率の変更、そして波長変換ファ

イバー・ライトガイドの読出し方法の変更と回路論理演算の仕様変更を実施する。式号機は有効面積を 1000 cm<sup>2</sup>に拡張し、波長変換ファイバー・ライトガイドと論理演算法に段階を設ける。

## 参考文献

- [1] P. Beltrame et al., Nucl. Instr. and Meth. A 654 (2011) 546-559.
- [2] D. Brajnik, et al., Nucl. Instr. and Meth. A, 353 (1994), p. 217.
- [3] TEPCO, TEPCO Press Release (May 24, 2012);  
[http://www.tepco.co.jp/en/press/corpcom/release/2012/1204659\\_1870.html](http://www.tepco.co.jp/en/press/corpcom/release/2012/1204659_1870.html).
- [4] S. Ijima et al., in 2013 IEEE NSS MIC Conference Record NPO1-169, DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829625.
- [5] K. Nakamura et al. (Particle Data Group), 2010 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 37 075021, 28.
- [6] M. Tabata et al., Nucl. Instrum. Methods A 668 (2012) 64.
- [7] Kuraray Co. Ltd., Kuraray's Scintillation Materials. Product Catalog. Available: <http://kuraraypsf.jp/>.
- [8] HAMAMTSU PHOTONICS K.K., Catalog: metal package photomultiplier tube R9880U series, Available: <http://www.hamamatsu.com/>.
- [9] H. ITO et. al., PoS(TIPP2014)242.
- [10] PDG, Chinese Phys. C, vol. 38, No. 9 (2014) 090001, 28.