

リアルタイムストロンチウム 90 カウンター

目次

1.	背景.....	2
2.	目的.....	4
3.	動作原理.....	4
3.1.	チェレンコフ放射.....	4
3.2.	シリカエアロゲル.....	5
3.3.	検出原理.....	5
4.	構造.....	7
5.	性能仕様.....	8
6.	ユーザビリティ.....	9
7.	価格.....	10
8.	高性能測定器.....	11



CHIBA
UNIVERSITY

1. 背景

体外被爆の主犯は放射性セシウム(^{137}Cs と ^{134}Cs)ですが、体内被爆の主犯はストロンチウム 90(以降 ^{90}Sr)です。

Cs はナトリウム(Na)と同じアルカリ金属です。体内に平均 100g の Na が存在していると言われ、我々は毎日平均 10g の Na を摂取しています。もし ^{137}Cs が体内で Na と同じように振舞うなら、100 Bq/kg の食品を摂取することは毎日 500 Bq の ^{137}Cs を摂取することと同等であると考えられます。2～3 ヶ月後からは体内の ^{137}Cs が約 5,000 Bq で飽和し、年間被曝量は 0.2mSv と推定されます。一方、カルシウム(Ca)は体内に 1kg 存在しますが、毎日平均 0.5 g 摂取しています。もし ^{90}Sr を毎日 100Bq 摂取し続けた場合、平衡状態になるまで 2000 日以上かかり、平衡状態になったときには体内に 20 万 Bq もの ^{90}Sr が蓄積されることとなります。食品に含まれる放射能濃度 (Bq/kg の値) が同じ場合、 ^{90}Sr は ^{137}Cs に比べて内部被曝量 (mSv/年で示される値) が 1000 倍以上も大きく危険であると言えます。

現在の ^{137}Cs 食品汚染基準である 100 Bq/kg はどのような理由で定められているのでしょうか。それは、 ^{137}Cs が都市ガスにおけるチオールのような働きを期待されているからです。都市ガスの主成分である一酸化炭素は毒性が高いが無色無臭なので、ガス漏れの発見が困難です。そこで、毒性は低いが玉ねぎの腐ったような悪臭のするチオールを混ぜることでガス漏れを発見できるようになりました。汚染の主犯である ^{90}Sr は測定が困難なので、簡単に測定できる ^{137}Cs の濃度が 100 Bq/kg 以下なら ^{90}Sr が安全範囲だと判定しているのです。

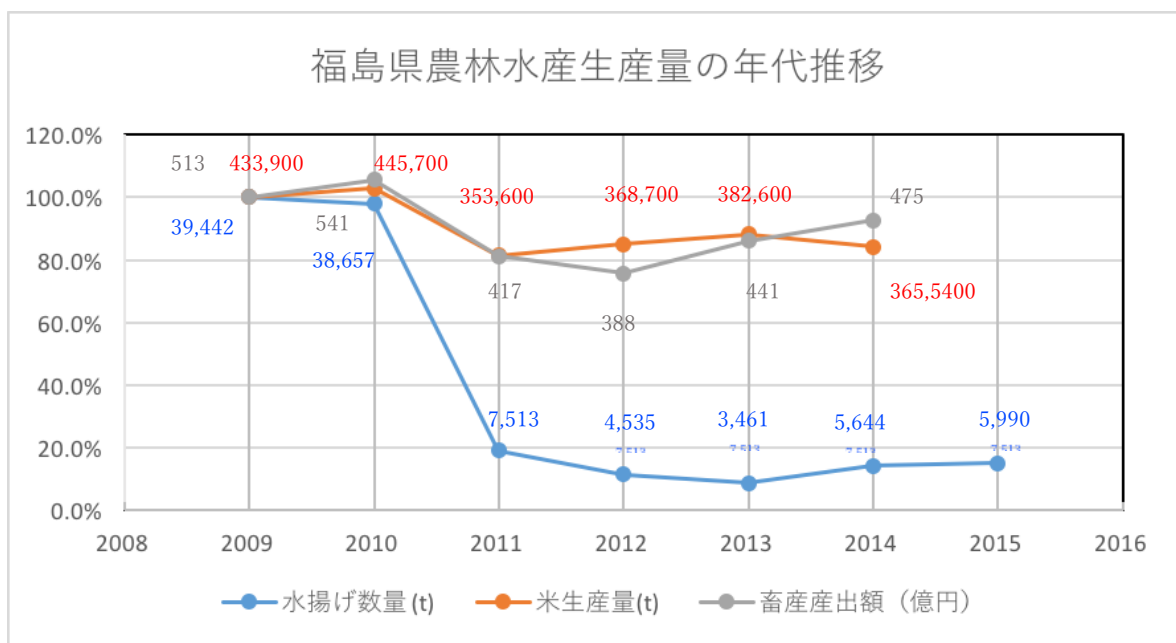
福島第一原発事故で大気中に放出された ^{90}Sr は ^{137}Cs の 1%以下でした。また農作物や畜産物は食物連鎖で ^{90}Sr 濃度が高まることもありません。ところが海水中に放出された ^{90}Sr は ^{137}Cs と同程度以上です。Sr は Ca と同じアルカリ土類金属で、骨組織に集中して何十年も留まることが予想されています。また海中の食物連鎖で濃縮することも考えられます。海産物では ^{137}Cs の測定から ^{90}Sr 濃度を推定する方法は使えません。 ^{90}Sr 濃度を直接測定しなければ安全が保障されません。

福島県の農産業・畜産業が一定の復興を遂げたのは、福島県の皆様が ^{137}Cs の全量検査を徹底されたからです。またちょっと古い話ですが狂牛病問題が起きたときは、牛丼の全国チェーン店が豚丼しか出さなくなり多くの焼肉屋さんが廃業しました。そのとき日本政府は

輸入されてくる全ての牛にプリオン検査を義務付けたので、狂牛病騒動は短期間でおさまりました。日本の消費者は賢明です。食品の汚染検査が十分に実施され安全が科学的に保証されたなら、福島県の実産物も原発事故前と同様に購入するでしょう。

^{90}Sr の測定は困難です。食品試料中に放射性物質が一種類しか含まれていない場合、その核種を判定し放射能を求めることができる測定器は存在します。しかし自然界には半減期 12.5 億年という超長寿命核種カリウム 40 (^{40}K) がどのような所にも数 10 Bq/kg 存在します。また宇宙線 μ 粒子が毎秒 1 平方センチ当たり 1,000 個も飛来します。このような実際の環境中において、1 日以内の測定時間で ^{90}Sr 濃度を 10 Bq/kg 以下の精度で測定することは従来法では非常に困難です。

我々は大型の魚を一匹ごとに、商品価値を損なうことなく、1 時間程度ですぐ結果が判明し、放射線測定の専門知識を持たない普通の人々が簡単に取り扱いでき、放射線管理区域など特別な施設が不要でどんな場所でも測定できる、実質的な測定精度 1 Bq/kg のリアルタイムストロンチウム 90 カウンターを開発しました。希望される方には原価で譲渡します。



2. 目的

放射性セシウム($^{134}\text{Cs}+^{137}\text{Cs}$)は γ 線スペクトロスコープによって精密検査が確立しています。平成 27 年 12 月から平成 28 年 6 月までの検査で、基準値の半分である 50 Bq/kg を上回る検体数 4617 のうち 12 検体、100 Bq/kg を上回る検体数は 1 であったと報告されています。

化学的抽出法(JIS 規格)による ^{90}Sr 放射能検査は検体を灰にするため卸売できず、測定に 1 ヶ月、検体あたり数十万円を要します。シンチレーション検出、サーベイメータによる放射能測定も実施されていますが他の自然放射能による雑音によって実用が困難です。したがって、 ^{90}Sr もしくは娘核の ^{90}Y からの β 線にだけ感度をもつ装置の開発が必要で、 ^{90}Sr についても同様に検体ごとに商品価値の低い箇所を検査し卸売できるシステム導入を目指しています。

3. 動作原理

リアルタイムストロンチウム 90 カウンター (以降 ^{90}Sr Counter と略す) はチェレンコフ検出器を基にしており、 ^{90}Sr (^{90}Y)からの最大エネルギー 2.28 MeV の β 線に高い感度を持ち、他の放射性原子核や自然放射能に極めて低い感度をもつ仕様に設計されています。この章では ^{90}Sr Counter の素材や検出原理などを紹介します。

3.1. チェレンコフ放射

屈折率 n の物質中を荷電粒子の速度 v が光速 c/n を上回った時、光が進行方向に対して円錐方向に放射されます。これをチェレンコフ放射と呼び、その時放射される光をチェレンコフ光といいます。 β 線の正体は電子で、電子の速度比 $\beta = v/c$ と運動エネルギー K の関係は

$$\beta = \frac{\sqrt{(m_e c^2 + K) - m_e^2 c^4}}{m_e c^2 + K}$$

で表せます。そのため、チェレンコフ放射が生じる条件は

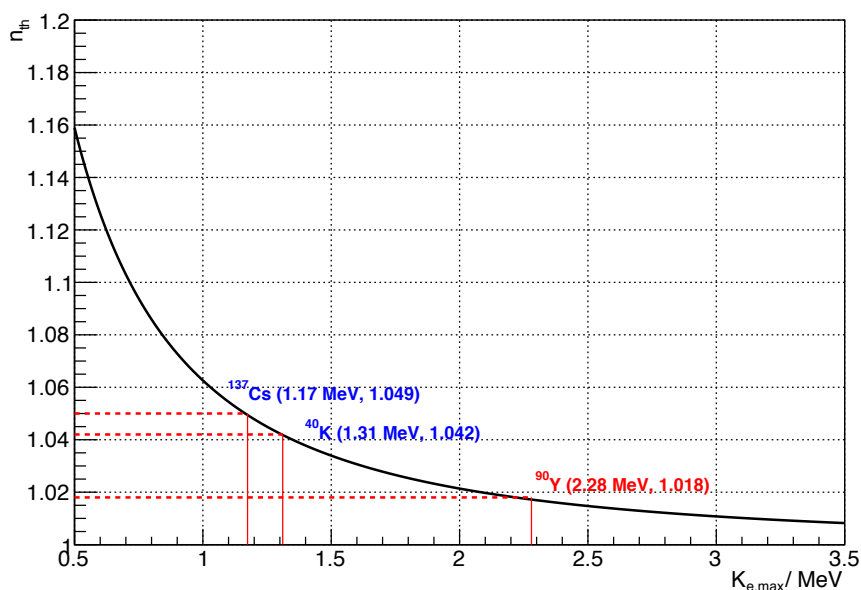
$$n\beta > 1$$

です。

エネルギー K_1 を持つ β 線 1 の速度比を β_1 、エネルギー K_2 を持つ β 線 2 の速度比を β_2 と仮定します。したがって、 β 線 1 に感度を持ち、 β 線 2 に感度を持たないためには屈折率

$$\frac{1}{\beta_1} < n < \frac{1}{\beta_2}$$

を満たす物質が必要とされます。ここで ^{90}Y が放出する β 線の最大エネルギー $K_1 = 2.28 \text{ MeV}$ と ^{40}K が放出する β 線の最大エネルギー $K_2 = 1.31 \text{ MeV}$ を代入すると、必要な屈折率は 1.018~1.042 と計算できます。



3.2. シリカエアロゲル

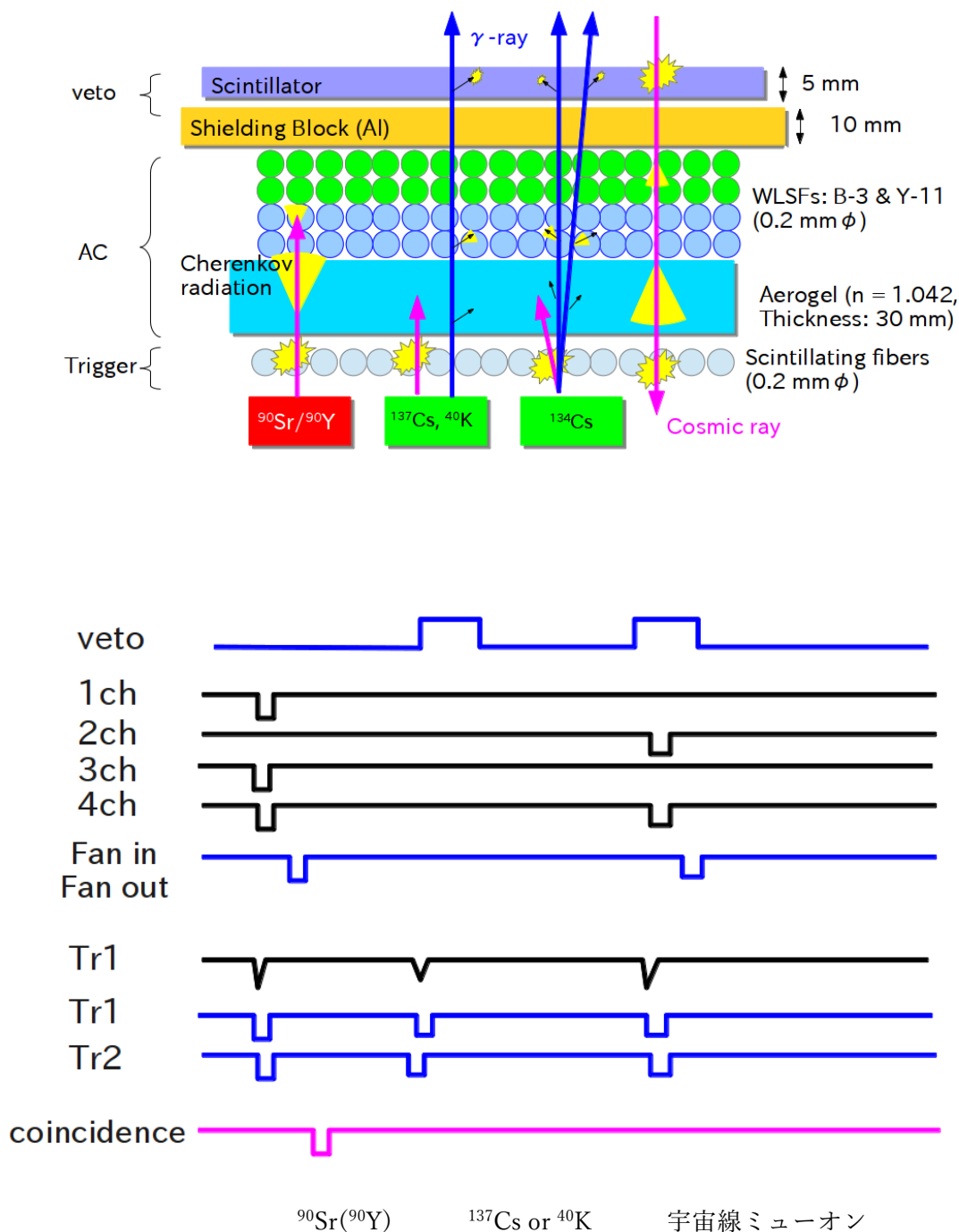
千葉大学で製造・開発しているシリカエアロゲルは低密度、定屈折率で透明な物質で、 SiO_2 と空気の割合を調合することで 1.003~1.25 までの屈折率を誤差 1%未満の精度で製造することが可能になりました。疎水化処理を施しているためシリカゲルの特徴でもある潮解性による劣化を抑えることに成功し、数十年単位での劣化は確認されておりません。

3.3. 検出原理

^{90}Sr Counter は Trigger, AC, veto の 3つのセンサーから構成されています。Trigger は荷電粒子を検出します。AC はチェレンコフ検出器です。屈折率 1.042 のエアロゲルを封入していますので、ちょうど ^{90}Y からの β 線はチェレンコフ放射して ^{40}K からの β 線はチェレンコフ放射しない仕様を設定しました。波長変換ファイバー (WLSF) はチェレンコフ光をファイバー側面で吸収し両端へ伝搬させるため面積拡張と γ 線による雑音を抑制しています。Veto は宇宙線ミューオンが trigger と AC を同時に応答させる雑音を不論理演算で抑制します。

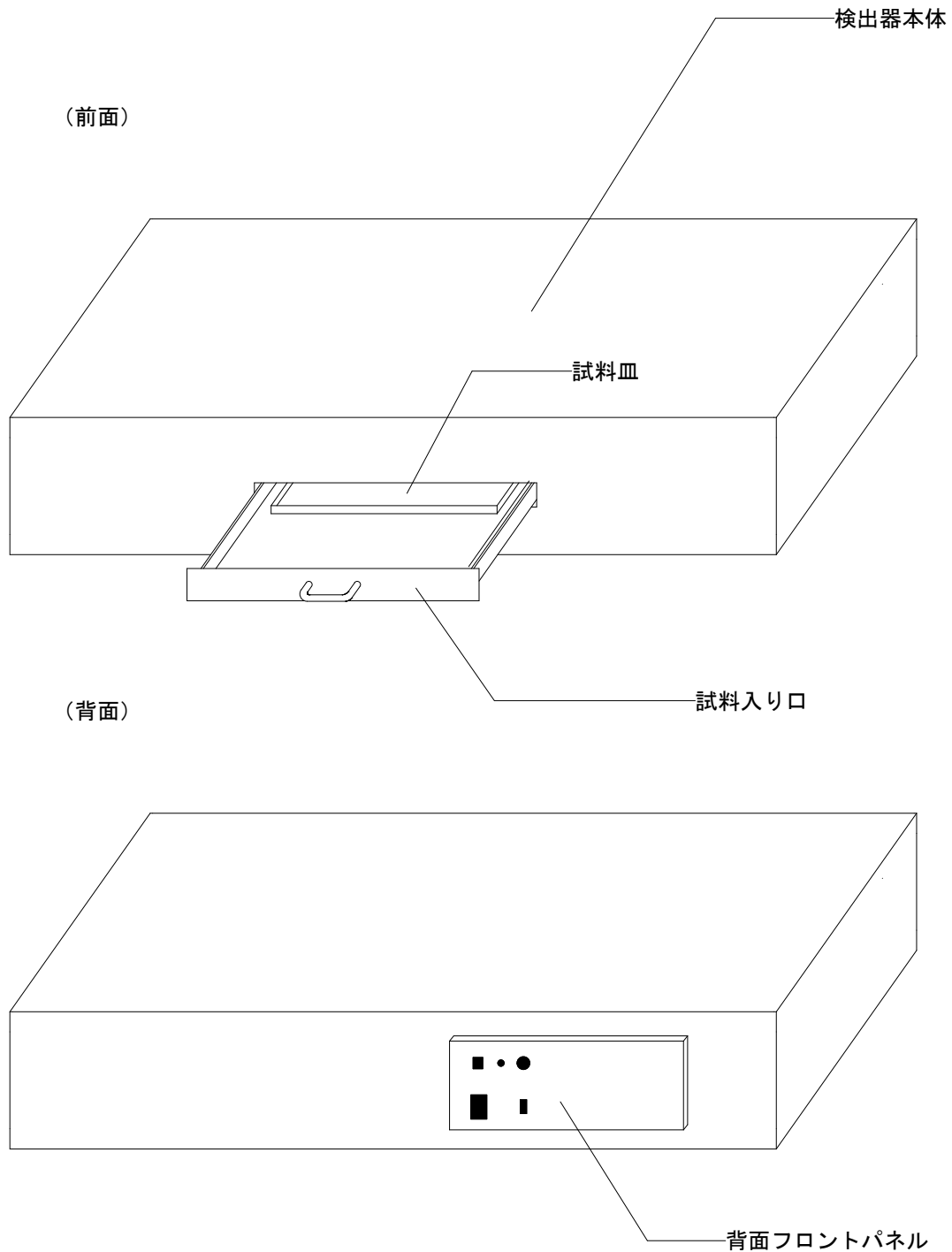
各センサーからの論理信号を処理して Trigger と AC が応答しかつ veto が応答していない

信号を ^{90}Sr (^{90}Y)からの β 線として計測されます。信号の時間スケールで確認すると、AC には 4 個の光電子増倍管(PMT)が接続されており、その OR 信号を出力します。Trigger は 2 個の PMT が接続されており、その AND 信号を出力します。



4. 構造

デモ機: RTCS-typeA(有効面積 $300 \times 100 \text{ mm}^2$)の外装は $950 \times 400 \times 170 \text{ mm}^3$ です。左右側面に取っ手があります。装置前面に試料入り口、背面にスイッチ、電源プラグなどのパネルが装備されています。



5. 性能仕様

実用機 RTSC の性能仕様を以下に示します。

型番	RTSC
有効面積[mm ²]	500 × 200
全体サイズ[mm ³]	1500 × 500 × 170
質量[kg]	30
検査試料限界[cc]	100
⁹⁰ Sr 絶対感度[Bq sec ⁻¹]	2 × 10 ⁻³
感度比 ¹³⁷ Cs/ ⁹⁰ Sr	10 ⁻³
雑音頻度[sec ⁻¹]	0.05
検出限界(海水)[Bq/kg]	0.1
実行検出限界(海産物)[Bq/kg]	1.0**
素材価格	450 万円*

*) 素材価格は時価です。あくまでも参考程度

**) 魚の骨を測定して可食部の放射能濃度を推定

6. ユーザビリティ



背面のフロントパネルに AC 電源プラグ、主電源、Ethernet コネクタ、LEMO コネクタ、モード切り替えダイヤルが実装されています。LEMO コネクタからは NIM 規格の信号が出力されます。スケーラー(計数表示)はユーザーカスタマイズさせていただいております。また ETHERNET による PC 制御もご要望がございましたら実装いたします。

～準備～

1. 主電源を入れてください。
2. ダイヤルは3段階設けられています。左、中央、右がそれぞれ OFF, 遮光チェックモード、測定モードです。
3. 遮光チェックモードにダイヤルを変更してください。
4. モード切り替えには約3分要します。
5. スケーラー(表示盤)はスタート、ストップ、リセットを用意しております。計測値をご確認ください。
6. この時、異常に計測している場合、不具合が生じているため正確に測定できない可能性があります。ご連絡ください。
7. 問題なければ、測定モードにダイヤルを変更してください。

8. バックグラウンド頻度を 1 時間測定してください。この結果をもとに放射能を計算します。
9. ^{90}Sr 密封線源を用いた感度校正は出荷前にいたしておりますので、同封された試験結果の値をお使いください。

～測定～

1. 試料皿の質量を測ります。
2. 試料皿に試料を乗せて測ります。皿との質量差が試料の質量です。
3. 試料を皿ごと熱し水分を飛ばします。
4. 試料を皿ごと装置に挿入し、測定を開始します。
5. 測定モードにダイヤルを変更してください。(3分ほどかかります。)
6. 計数值、BG 値、校正係数、試料の元の質量から ^{90}Sr の放射能密度を計算します。

7. 価格

今回展示したリアルタイムストロンチウム 90 カウンターの製造に必要なおおまかな費用は以下のとおりです。

部品詳細及び内容詳細	取扱メーカー	単価	個数	金額
シリカエアロゲル	千葉大	30 万/L	2L	60 万
シンチレーションファイバー				
波長変換ファイバー	クラレトレーディング	100 円/m	5000	50 万
光電子増倍管	浜松ホトニクス	6 万	8 本	50 万
宇宙線検出用シンチレーター	応用光研	70 万		70 万
但し今回は福島第一原発で建設中のデブリ観測用 μ 測定器のために大量生産したシンチレーターの余りを安価 (20 万円) で購入できた				
電源+デジタル信号変換回路	林栄精器			35 万
デジタル信号処理回路	Bee Beans Technologies			65 万
筐体	スズノ技研			70 万
ファイバースhirt製作	千葉大学の学生アルバイト	950 円/時間		20 万
組み立て・検査作業	千葉大学の大学院生	1200 円/時間		30 万

試験研究機関や公的組織には「研究成果物の有償譲渡契約」で、原価 (450 万円：当分の間 400 万円) で譲渡します。

企業や一般団体には「受託研究」の契約で、原価の 1.3 倍 (間接経費 30% は千葉大学本部が徴収する) の研究費用をお支払い頂いて、研究成果実体物を無償譲渡します。

これらの契約手続きがお望みでないなら、近日中に立ち上げる千葉大学発ベンチャー企業（仮称）千葉エアロゲル株式会社より販売します。価格は

原価×1.3（間接経費）×1.15（ベンチャー企業管理費）+ 税

となります。

8. 高性能測定器

今回展示したリアルタイムストロンチウム 90 カウンターは大型魚用で、鰭・鰓・頭部など切り取っても商品価値を損なわない部位を 500g 確保できることを想定しています。採取できる部位が 50 g なら、受光部が波長変換ファイバーシートから位置弁別型光電子増倍管に変更した、有効面積 10cm×10cm、絶対感度 5%、実質的測定限界は 1Bq/kg のまま、の高性能測定器を原価 1,000 万円で提供できます。また、10 匹を一度に測定するために、受光部を Pixelated Photon Detector のアレイとした、有効面積 30cm×30cm、絶対感度 5%、実質的測定限界は 1Bq/kg のまま、の高性能大面積測定器を原価 3,000 万円で提供できます。

著者： 千葉大学理学研究科 准教授 河合秀幸
千葉大学理学研究科 博士後期課程 伊藤博士
千葉大学理学研究科 技術補佐員 児玉諭士

2016 年 7 月 4 日 初版

〒263-8522

千葉市稲毛区弥生町 1-33 千葉大学理学部 1 号棟 317A 粒子線物理学研究室

TEL & FAX: 043-290-3688