

千葉大学大学院理学研究科
修士論文

^{90}Sr β 線即時検出器の開発

平成 26 年 3 月提出

基盤理学専攻
物理学コース

丸橋 健太

概要

2011年3月の福島第一原子力発電所の事故で各種の放射線同位元素が自然界に放出された。

その中で ^{137}Cs は比較的良好に測定され、調べられているが、 ^{90}Sr のそれは少ない。その原因の一つに ^{90}Sr の検出時間の長さにある。 ^{90}Sr は γ 線を放出しないため、 β 線を直接測定するのであるが、その際化学的な処理等に2~4週間ほどかかる。

^{90}Sr の物理学的半減期は29年、生物学的半減期は49年、有効半減期は18年となる。

^{137}Cs の物理学的半減期は30年、生物学的半減期は ^{90}Sr と比べて短く70日、有効半減期は70日となる。このように放射線防護の観点から ^{137}Cs のみでなく ^{90}Sr を迅速に測定する方法が必要と考える。

対象となる試料より（試料としては放射能汚染水や汚染食品を考えている。） ^{90}Sr を測定するとき、バックグラウンドとして、 ^{137}Cs からの β 線、宇宙からの μ 粒子があげられる。この二つと ^{90}Sr の区別が重要なポイントとなる。

^{90}Sr 、 ^{137}Cs の崩壊過程より、1.2MeV以上のエネルギーをもつ β 線のみを測定できれば良い、そこでシリカエアロゲルを用いてチェレンコフ光を測定した。

本論文では ^{90}Sr β 線即時検出器の開発、性能評価の結果を報告する。

目次

第1章 東京電力福島原子力発電所事故	1
1.1 事故の概要	
1.2 汚染水問題	
1.3 ^{90}Sr β 線即時検出器の必要性	
第2章 ^{90}Sr β 線即時検出器の開発	5
2.1 通常の ^{90}Sr の測定方法	
2.2 ^{90}Sr β 線即時検出器の原理	
2.3 チェレンコフ光	
2.4 シリカエアロゲル	
2.4.1 シリカエアロゲル構造	
2.4.2 シリカエアロゲル製法	
2.5 ^{90}Sr β 線即時検出器の構造	
第3章 各種線源による性能評価	22
3.1 セッティング	
3.2 結果、考察	
第4章 結論	27
4.1 まとめ	
4.2 今後の展望	

参考資料

謝辞

第1章 東京電力福島原子力発電所事故

1.1 事故の概要

平成 23 (2011) 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震及び津波を端緒として、東京電力株式会社の福島第一原子力発電所は、国際原子力事象評価尺度 (INES) で「レベル 7」という極めて深刻な事故を引き起こした。

地震発生時、福島第一原発は、1 号機が定格電気出力一定で運転中、2 号機、3 号機は定格熱出力一定で運転中、4～6 号機は定期検査中であった。運転中であった 1～3 号機は地震発生直後に自動的にスクラム (原子炉緊急停止) した。この地震動で、東電新福島変電所から福島第一原発にかけての送配電設備が損傷し、全ての送電が停止した。また、東北電力の送電網から受電する 66kV 東電原子力線が予備送電線として用意されていたが、1 号機金属閉鎖配電盤 (M/C) に接続するケーブルの不具合のため、同送電線から受電することができず、外部電源を喪失してしまった。

その後、地震動を起因として発生した津波により、非常用ディーゼル発電機 (D/G) や冷却用海水ポンプ、配電系統設備、1 号機、2 号機、4 号機の直流電源などが水没して機能不全となり、6 号機の空冷式非常用ディーゼル発電機 1 台を除く全ての電力供給機能が失われた。すなわち 1 号機、2 号機、4 号機の全電源喪失及び 3 号機、5 号機の全交流電源喪失 (SBO) が生じた。そして、3 号機は、直流電源のみ辛うじて残ったものの、3 月 13 日未明には放電し全電源喪失となった。

一方、地震や津波の被害による影響は、電源に対してのみにとどまらなかった。すなわち、津波は、がれきや車両、重機、重油タンク、土砂等を伴って原子力発電所の建屋や機器・設備を破壊した。また、3、4 号機超高圧開閉所や運用補助共用施設 (共用プール建屋) にまで津波が及び、主要建屋エリア全体にわたって大量の海水が流れ込んだ。津波が去った後も、津波漂流物が原子力発電所構内に散乱し、車両の通行や資機材搬入作業を妨げるとともに、マンホールやグレーチング等のふたを吹き上げて開口部を作り、地震による発電所構内道路の隆起、沈降、陥没と相まって、アクセス性が著しく悪化した。また、継続的に発生する大規模な余震や津波は、それへの警戒と断続的な作業中止を余儀なくさせ、円滑な事故対応を阻害する一因であった。さらに、電源喪失によって、中央制御室 9 での計装や監視、制御といった中央制御機能、発電所内の照明、通信手段を一挙に失った。

そのため、有効なツールや手順書もない中、現場運転員たちによる臨機の判断、対応に依拠せざるを得ず、まさに手探りの状態での事故対応となった。

電源喪失によって、適時かつ実効的な原子炉冷却も著しく困難になっていた。原子炉冷却、すなわち、高圧注水や原子炉減圧、低圧注水、格納容器冷却と減圧、最終ヒートシンクへの崩壊熱除去といった、事故回避へ向けた各ステップの実行とその成否は、電源の存在に強く依存しているためである。また、前述した発電所構内のアクセス性の悪化は、消防車による代替注水や電源復旧、格納容器ベントのライン構成及びそれらの継続的な運用において、大きな障害になった。結果的に、放射性物質を大量に外部環境に放出する大事故に至った。

ヨウ素換算でチェルノブイリ原発事故の約 6 分の 1 に相当するおよそ 900PBq (ペタベクレル) の放射性物質が放出された。

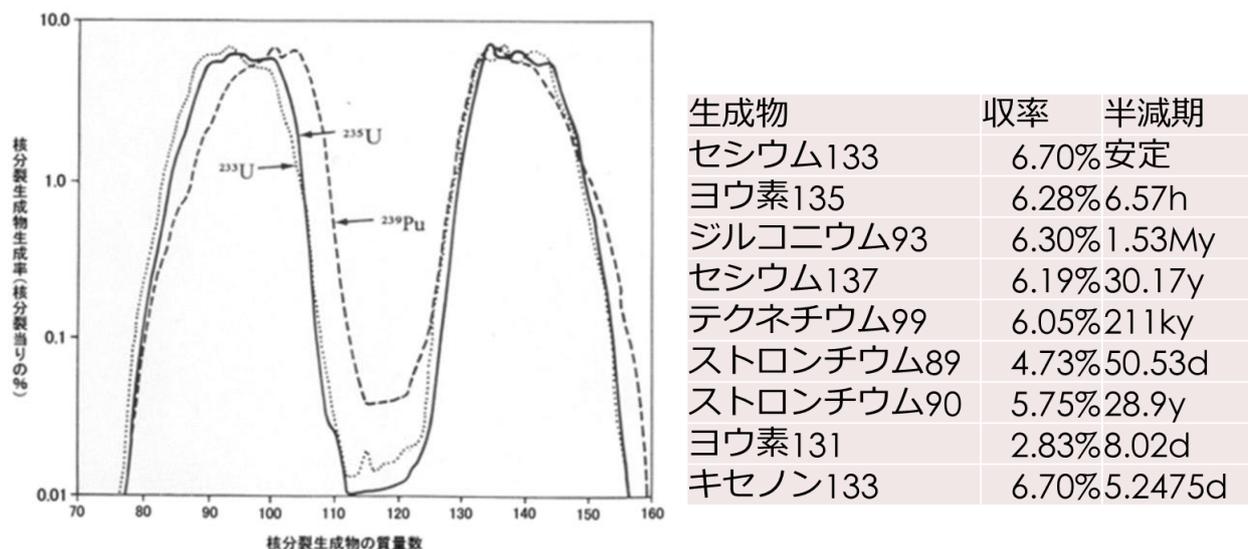


図 1.1 ウラン 235 の熱中性子による核分裂で生じる主な核分裂生成物

1.2 汚染水問題

事故当時運転していた 1～3 号機では、核分裂の連鎖反応が止まった後も熔融燃料が崩壊熱を出し続けるため、冷却を続けなければならない。

発熱量は事故翌日と比べて 100 分の 1 程度に低下したが、今も 1 基当たり 1 日約 100 トンの冷却水を原子炉内に注入している。

冷却水は燃料に触れて高濃度の放射性物質を含んだ後、格納容器の損傷部分から漏れて地下などにたまる。そこへ原子炉建屋の外から地下水が流れ込んで混ざるため、毎日約 400 トンの汚染水が発生し続けている。

また、2014 年 2 月 22 日、福島第 1 原発の 2 号機の東側敷地にある観測用井戸

の水から、 ^{90}Sr などのベータ線を出す放射性物質が、過去最高値の1リットル当たり 500 万 Bq 検出されている。

1.3 ^{90}Sr β 線即時検出器の必要性

汚染水問題により、大気中に放出された放射性同位元素のみでなく、海洋中に放出されたものについても考えなければならない。

^{131}I や ^{137}Cs などは、原子炉のベントおよび水素爆発によって空気中に放出され、関東地方でも観測されている。また、原子炉への注水によりこれらの放射性同位元素は、海水に流れ出た。 ^{131}I については、半減期が短いため事故から3年経とうとしている今日では、 ^{137}Cs と ^{90}Sr の影響が強いとされている。

その中で ^{137}Cs は比較的良く測定され、調べられているが、 ^{90}Sr のそれは少ない。その原因の一つに ^{90}Sr の検出時間の長さにある。 ^{90}Sr は γ 線をほとんど放出しないため、その固有 γ 線による測定が出来ない。その為 β 線の直接測定をするのであるが、その際化学的な処理に2週間~4週間ほどかかる。(2.1で詳述) Sr はアルカリ土類金属で体内では Ca と似た挙動を示し骨へと集積する。(骨親和性核種、ボーンシーカーなどという) ^{90}Sr の物理学的半減期は29年、骨に沈着するので生物学的半減期は長く49年、有効半減期は18年となる。

Cs はアルカリ金属で体内では Na と似た挙動を示し全身を巡る、 ^{137}Cs の物理学的半減期は30年、代謝により排泄されるので生物学的半減期は ^{90}Sr と比べて短く70日、有効半減期は70日となる。

放射性核種	物理学的半減期	生物学的半減期	有効半減期
^{137}Cs	30年	70日	70日
^{90}Sr	29年	49年	18年

物理学的半減期：放射性核種の寿命によるもので、崩壊して1/2になるまでの時間。

生物学的半減期：生体内で代謝などに減少し1/2になるまでの時間。

有効半減期：両方の効果を鑑みたもの。

有効半減期の逆数は、物理学的半減期の逆数と、生物学的半減期の逆数の和になる。(式1.1)

$$T_{\text{eff}}^{-1} = T_{\text{phy}}^{-1} + T_{\text{bio}}^{-1} \quad (1.1)$$

核種	集積部位	影響(発生しうる主なもの)
$^3\text{H}(\text{HTO})$	全身	突然変異など
^{14}C	全身	突然変異など
^{32}P	骨	白血球減少、(白血病は可能性のみ)
^{40}K	全身	突然変異など
^{45}Ca	骨	白血病
^{59}Fe	骨髄	白血病
^{60}Co	肝、脾、下部消化器	肝がん
^{65}Zn	肝、骨	肝がん、骨腫瘍
^{90}Sr	骨	骨腫瘍、白血病
^{131}I	甲状腺	甲状腺がん、甲状腺機能低下
^{137}Cs	筋肉、全身	白血病、不妊
^{222}Rn および娘核種	肺	肺がん
^{226}Ra	骨	骨腫瘍、白血病
^{232}Th	肝、骨、肺	肝がん、骨腫瘍、肺がん、白血病
^{238}U	腎、骨、肺	骨腫瘍、肺がん、白血病
^{239}Pu	肝、骨、肺	肝がん、骨腫瘍、肺がん、白血病
^{241}Am	骨	骨腫瘍、白血病

表 1.1 各核種の集積部位

^{90}Sr は骨に集積し、骨や造血臓器である骨髄に障害を起こし得る。また生物学的半減期も長い。 ^{90}Y の β 線の最大飛程は水中で1.1cmなので、すべてのエネルギーを体内で落とし得るので例えば ^{137}Cs と同じ放射能であっても線量が多くなる。

このように放射線防護の観点から ^{137}Cs のみでなく ^{90}Sr を迅速に測定する方法が必要と考える。

第2章 ^{90}Sr β 線即時検出器の開発

2.1 通常の ^{90}Sr の測定方法

^{90}Sr を分析する場合、 ^{90}Sr 及びその娘核種の ^{90}Y は崩壊時に γ 線を殆ど放出せず、固有ガンマ線の直接測定による分析が不可能である。そのため、試料からストロンチウムを化学的に分離してから β 線を測定するという手法を取る。

一般的な手法は、試料溶液から炭酸ストロンチウムの形で沈殿を生成させ塩酸で溶解後、イオン交換樹脂を詰めたカラムで妨害元素を分離し、鉄(III)塩 (Fe^{3+}) とアンモニア水を加えて沈殿する水酸化鉄(III)と共に、共存している娘核種の ^{90}Y を一度共沈させて除く。(スカベンジングする) この濾液を 2 週間から 4 週間放置して ^{90}Y を十分に生成させ、再び鉄(III)塩とアンモニア水を加えて水酸化鉄(III)と共に ^{90}Y を沈殿させて分離し、この ^{90}Y の β 線を測定して ^{90}Sr の量を算出する。(この 2~4 週間放置は ^{90}Y の半減期 64.1 時間によっている。)

2.2 ^{90}Sr β 線即時検出器の原理

^{90}Sr を測定するとき、 ^{90}Sr でない信号として、 ^{137}Cs 、宇宙線の μ 粒子などがあげられる。この 2 つのバックグラウンドと ^{90}Sr の区別が本検出器の重要なポイントとなる。

^{90}Sr の崩壊過程

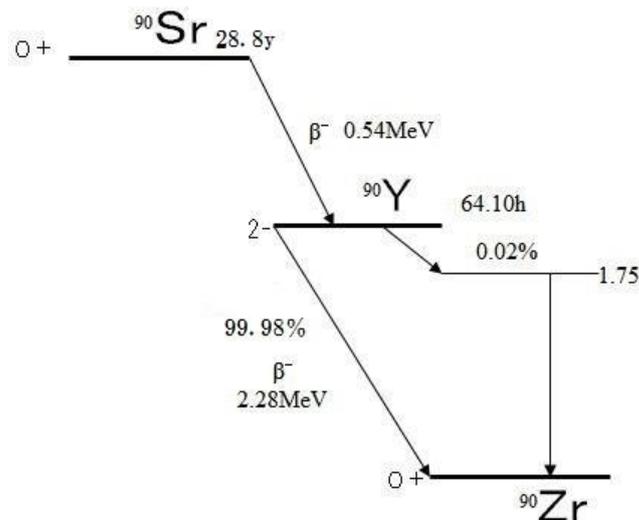


図 2.1 ^{90}Sr 崩壊図

^{90}Sr の崩壊はほぼ β 線のみを放出する。 ^{90}Y は半減期が 64 時間と短い、常に ^{90}Sr の崩壊により ^{90}Y が供給されるため、全体として 28.8 年で ^{90}Sr から ^{90}Zr に崩壊する。

^{90}Sr から放出される β 線は、一定のエネルギーを持つのではなく連続したエネルギー分布を持つ。放出される ^{90}Sr の β 線最大のエネルギーは、2.28MeV である。

^{137}Cs の崩壊過程

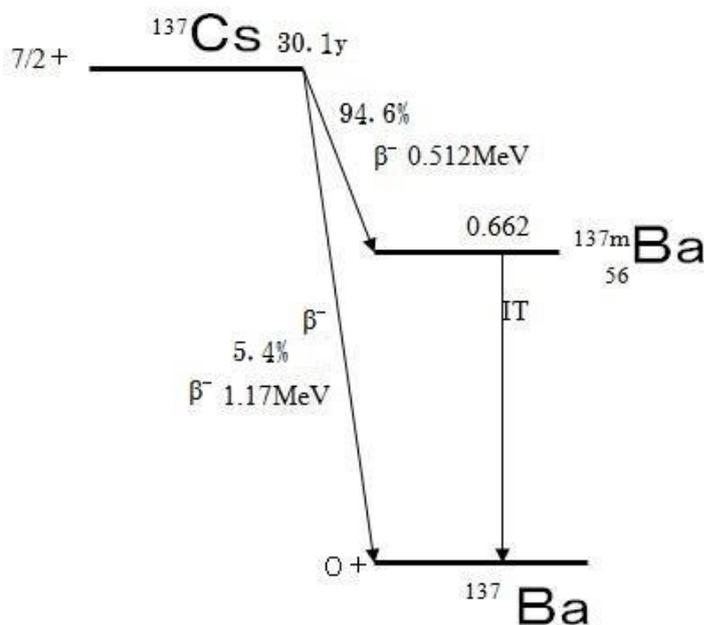


図 2.2 ^{137}Cs 崩壊図

^{137}Cs は β 線と γ 線を放出するが、 β 線のみを放出することがある。放出される β 線の最大エネルギーは、1.17MeV である。

^{90}Sr と ^{137}Cs の崩壊過程より、1.2MeV 以上のエネルギーを持つ β 線を計測できれば、 ^{90}Sr と判別できることになる。

1.2MeV 以上の β 線のみを測定するために、チェレンコフ光 (2.3 で詳述) を利用する。そのチェレンコフ光の発光体として、シリカエアロゲル (2.4 で詳述) を用いる。

1.2MeV 以上の β 線でチェレンコフ光を発生させる屈折率を求めると、特殊相対論より

$$E = mc^2 = \gamma m_0c^2 = (1.2 + 0.511) = 1.711 \quad \text{【MeV/c}^2\text{】}$$

$$\gamma = (1.2 + 0.511) / 0.511 = 3.348 = (1 - \beta^2)^{-0.5}$$

$$\beta = 0.954$$

$$n = 1 / \beta = 1.048$$

よって、 $n=1.048$ のエアロゲルをチェレンコフ発光体とすれば、 ^{137}Cs と ^{90}Sr を識別できる。

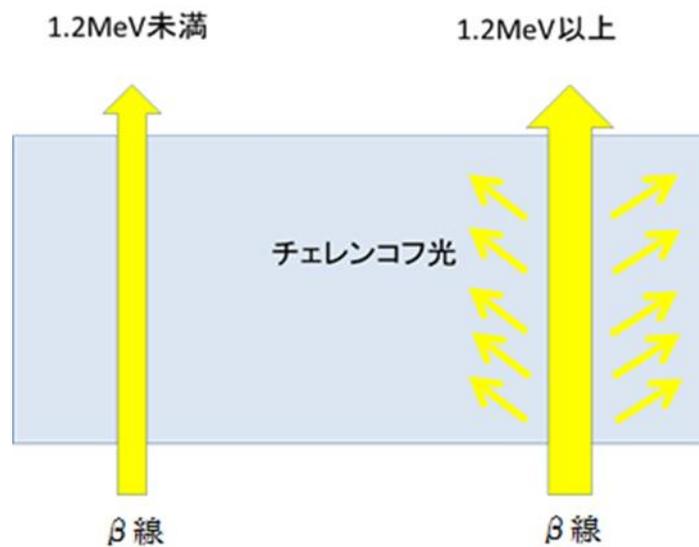


図2.3 核種の識別イメージ

目標としては ^{137}Cs が ^{90}Sr の十倍以上存在するような環境中で表面汚染密度の測定下限が最低 10Bq/cm^2 できれば 1Bq/cm^2 の、のhandy-type検出器を開発する。

測定時間は数分程度

$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ の感度比は少なくとも100倍出来れば1000倍以上を目指す。

現在福島第一で使用中の全ベータ検出器の性能は $10^1 \sim 10^6 \text{ Bq/cm}^2$ である。

2.3 チェレンコフ光

一般に速度 v (v/c) を持つ荷電粒子が屈折率: n の媒質中を通過する際、その速度が媒質中での光の速度: c/n (c は真空中での光の速度) を超える条件を満たした時、荷電粒子の路上より円錐上に発生する電磁波をチェレンコフ光と呼ぶ(式2.1)、これは荷電粒子が媒質中を移動する際、荷電粒子の通過行路周囲の媒質に電場を生じさせ、その電場によって媒質が分極する、このとき発生する電磁場が後に「置いてきぼり」となり、ホイヘンスの原理により波面が重なって衝撃波が生じ、この衝撃波がチェレンコフ光となり観測される為である。

(図2.4) 更に、チェレンコフ光の放出される角度は衝撃波の波面が荷電粒子の進

行方向となす角を θ とすれば、その発生原理より(式2.2) で表され通過荷電粒子の速度と輻射媒質の屈折率に依存した、非常に指向性が強い光として観測される。この時チェレンコフ発生する角度をチェレンコフ角: θ_{ch} という。

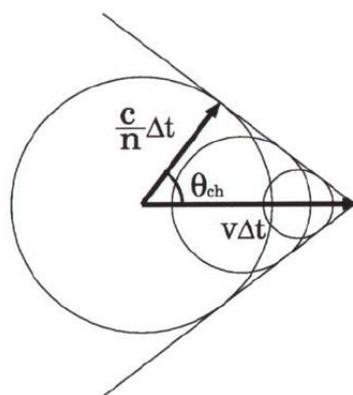


図2.4 チェレンコフ光の発生模式図

$$\beta c > c/n \quad (2.1)$$

$$\cos \theta_{ch} = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n} \quad (2.2)$$

$$N = 2\pi\alpha L \int \frac{\sin^2 \theta_{ch}}{\lambda^2} d\lambda \quad (2.3)$$

輻射体通過時に発生するチェレンコフ光の光子数はフランク・タムによって証明され、輻射体中を粒子が通過した距離： L ，観測チェレンコフ光子の波長： λ 、チェレンコフ放射角： θ_{ch} をもって(式2.3) によって表現される。このときの α は微細構造定数である。

2.4 シリカエアロゲル

2.4.1 シリカエアロゲル構造

エアロゲルはゲル状の物質を乾燥することで作られる多孔性の固体であり、その体積の大部分が空気で占められている。そのうちシリカ (SiO_2) を主成分とするものはシリカエアロゲルと呼ばれ、固体としては極めて低屈折率、低密度である。輻射体の屈折率を通常の固体や気体で用意することが困難である。そこでシリカエアロゲルはその特異構造によりガスなどの気体物質より安定な個体であり、チェレンコフ光を観測する際に光に対して良い透明度を示す物質であることなどが上げられる。

シリカエアロゲル中では主成分となる二酸化珪素(SiO_2) が直系1~2nm の無孔性粒子を形成し、この1次粒子がさらに集合し最大で直径が50nm の大きさの2次粒子が形成されている。この二酸化珪素(SiO_2) を基本構造とした1 及び2次粒子の径の大きさがエアロゲルの光学的性能を特徴付ける重要な要因として考えられている。1,2次粒子の中の SiO_2 の密度は、ガラスと同定密度2.4~2.6g/cm³ 程度である。2次粒子は互いに鎖上に結合し合い3次元ネットワークを形成し固体構造中の90% 以上が空孔から成る高多孔質構造を持つことにより、固体であるにもかかわらず低密度・低屈折率を可能にしている(表2.1)。それにより単純固体では難しい領域において、低屈折率、低密度を実現している。図(2.5)にシリカエアロゲルの特異構造をモデル化した図を示す。

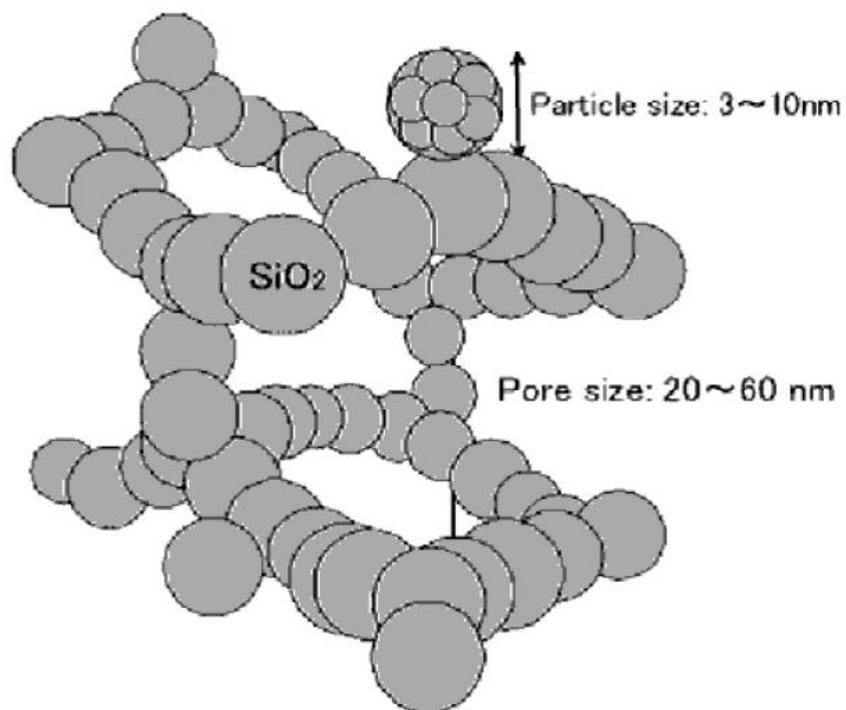


図2.5 シリカエアロゲル構造

	物質	屈折率
固体	シリカエアロゲル	1.003~1.26
	ガラス	1.48
	ポリエチレン	1.58
液体	水	1.33
	水素	1.11
	液体ヘリウム	1.024
気体	二酸化炭素	1.00045
	水素	1.000138
	ヘリウム	1.000035
	空気	1.000292

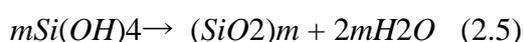
表2.1 いろいろな物質の屈折率

2.4.2 エアロゲル製法

シリカエアロゲルの主原料はテトラメトキシシラン ($\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$) と蒸留水であり、アンモニアを触媒としてアルコール溶媒中で混合すると、加水分解して水酸化ケイ素 ($\text{Si}(\text{OH})_4$) を得る (式2.4)。



同時に(式2.5) の縮重合反応が進行 (ゾル生成) し、次第に粘度が大きくなってゲル化する。



我々がエアロゲルの標準製法としているKEK法 (KEK・松下電工 (株) 共同開発) の第

一の特徴は、テトラメトキシシランが平均して3 個縮合したメチルシリケート5 (MS51) と呼ばれる薬品を用いることである。MS51 はシリカ分(SiO_2) として51 重量% 相当分を含有する無色透明の液体である。このMS51 を用いることにより、KEK 法以前の製法に比べて調合工程が簡素化されている。KEK 法の第2 の特徴は疎水化処理である。疎水化をしていないエアロゲルはOH 基をもち親水性で吸湿性に富むため、空気中の水分を容易に吸収する。その結果エアロゲルは変色し、透明度が低下してしまう。そこで疎水化剤としてヘキサメチルジシラザンを使用し、アルコゲルのOH 基中のH を疎水性の $\text{Si}(\text{CH}_3)_3$ 基 (トリメチルシリル基: TMS) に置換している (図3.3) 。更に本来は反応で容易に混ざることのないメチルシリケート51 と H_2O 両者を溶す溶媒に対して、閾値型で要求される屈折率領域:1.01~1.03 ではメタノール(CH_3OH) を使用することで高い透過長が得られている。しかし、RICH で要される屈折率~1.05 においてメタノールでは不十分である。そこで、2003 年にメタノール溶媒に変わる溶媒の候補として (N-ジメチルホルムアミド) ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$) 溶液を使用しシリカエアロゲルの開発を行なった。(図2.6) DMF を導入したことにより、大幅に透明度が向上した。

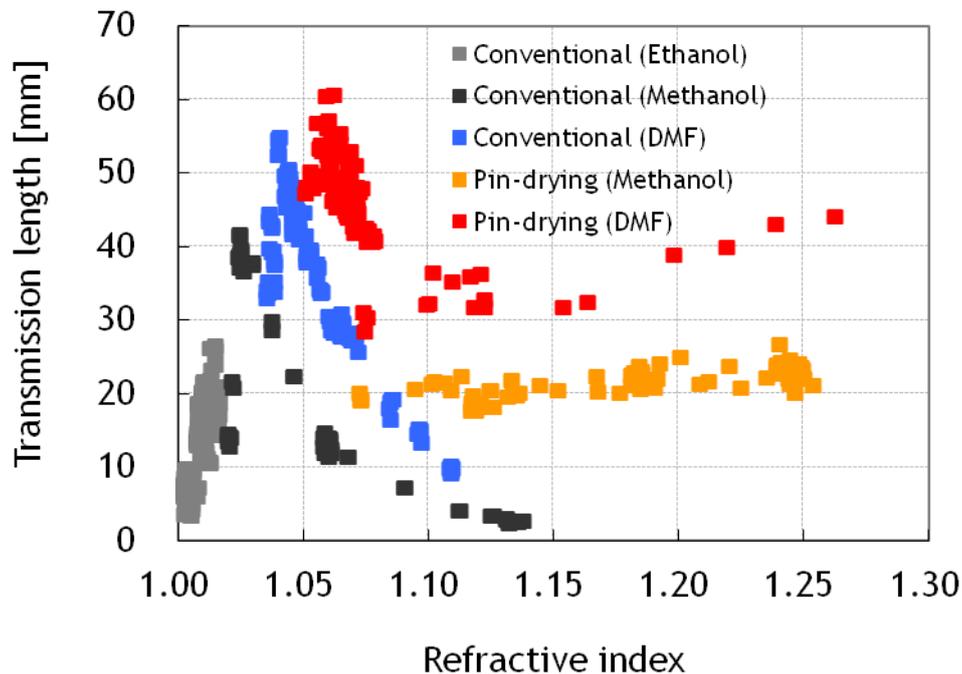


図2.6 DMF ピンホール乾燥 導入による透過長の向上

また、KEK 法の具体的な製作工程は以下のようなになる。

調合 予め決定した調合比に従って薬品を2つの容器に取り分ける。片方の容器にはMS51、溶媒を量り取ってA液とし、もう片方の容器には蒸留水、アンモニア水を量り取ってB液とする。B液をA液に注ぎ込み、30秒～1分間攪拌する。混合液を製作したい形状の型（ポリスチレン製）に流し込み、気泡をすばやく取り除く。型に蓋をしてゲル化が進行するのを待ち、表面が固まったら乾燥を防ぐために溶媒として使用した薬品を表面に静かに張る。各薬品の調合比はエアロゲルの屈折率を決定するばかりでなく、温度などとともにゲル化速度に寄与し、エアロゲルの透明度を左右する。ゲル化が速いほどゲル構造が細かく透明なエアロゲルになることが知られているが、型での成型操作を考慮して混合から数分で固化するように触媒であるアンモニア水の量を調節する。

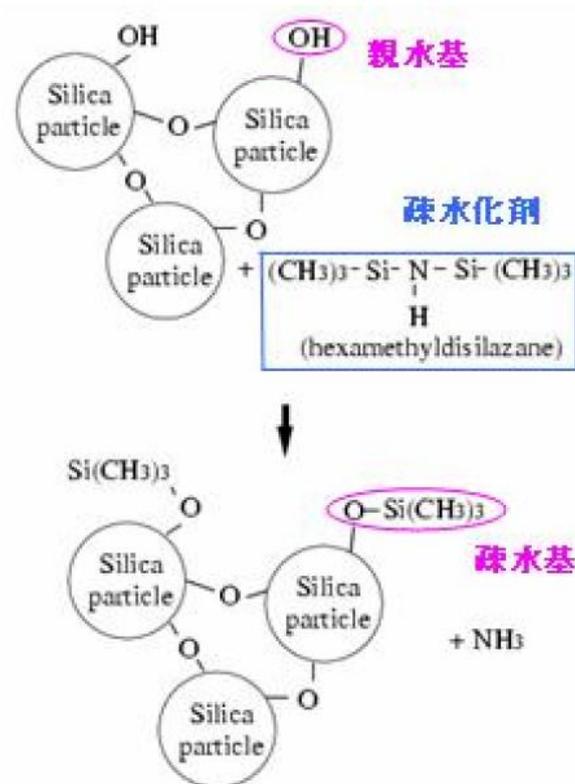


図2.7 疎水化課程

疎水化剤（ヘキサメチルジシラザン）を用いて、エアロゲルの親水基を疎水基に置換する。これで吸湿による透明度の悪化を予防できる。

熟成（1 週間） ゲル構造を強固にするため、蓋をした型のまま熟成させる。この工程は乾燥を防ぐため、底にエタノールを張って蒸気で満たした保存缶（密閉缶）で行う。

ピンホール乾燥（2週間～2ヶ月） アルコゲルをエタノール中で網台に載せ、微小な間隙（ピンホール）を設けた半密閉容（ピンホール容器）にエタノールから出して網台ごと封入する。アルコゲルが必要な大きさまで収縮したら（2週間～2ヶ月）、ピンホール容器ごとエタノール蒸気にさらす。ピンホール容器がエタノール蒸気で十分に満たされたら、ピンホール容器ごとエタノールに沈める。

洗浄 1（3 日間） 型の蓋を取り、保存缶をエタノールで満たしてアルコゲルを型のままエタノールに沈める。これはゲル化反応後の不要なアンモニアや水を取り除くためである。

疎水化 (3 日間) 保存缶のエタノール中でアルコゲルを型から外し、パンチングメタル皿 (多数の穴を開けたステンレス容器) に載せる。エタノール9 の体積に比して1 の疎水化剤を保存缶に注いで混ぜる。

洗浄2 (3 日間× 3 回) 疎水化反応で生成されたアンモニアを除去するため、アルコゲルを新しいエタノールに沈める。疎水化後3 日ごとに3 回エタノールを交換する (洗浄2-1, 2, 3)。

超臨界乾燥 (2~3 日間) アルコゲルを自然乾燥すると、溶媒が蒸発するときにアルコゲルの毛細管状の細孔中にメニスカスが生じ、その収縮方向に表面張力が働く (図2.8)。さらに乾燥が進むとメニスカスがアルコゲル内部に入り込み、大きくなった表面張力でひび割れ (クラック) を起こしてしまう。(図2.9) に示すように、物質の温度と圧力が臨界点を超え、アルコゲルの形状と構造を保ったまま溶媒を抽出するには、超臨界乾燥を行う。(図2.9)に示すように、物質の温度と圧力が臨界点を超え、液相と気相の境界がなくなった状態が超臨界流体である。表2.2 にいくつかの物質の臨界点データを示す。超臨界流体は、液体のような密度でありながら気体のような粘度をもち、拡散係数は液体と気体の中間である。

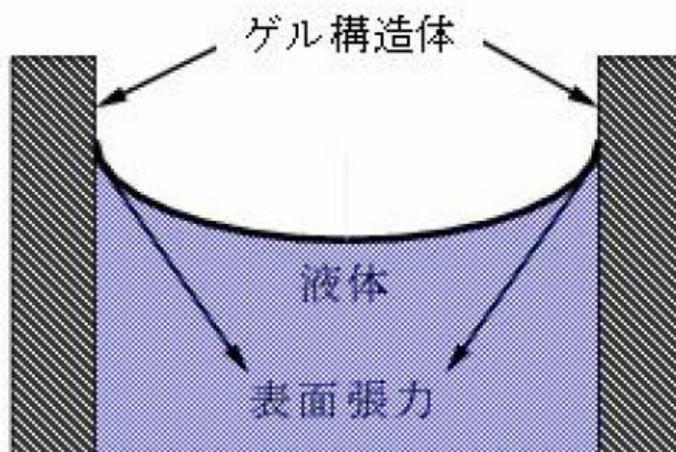


図2.8 メニスカス

液面が描く曲線をメニスカスという。自然乾燥が進むとゲル構造が失われてしまう。

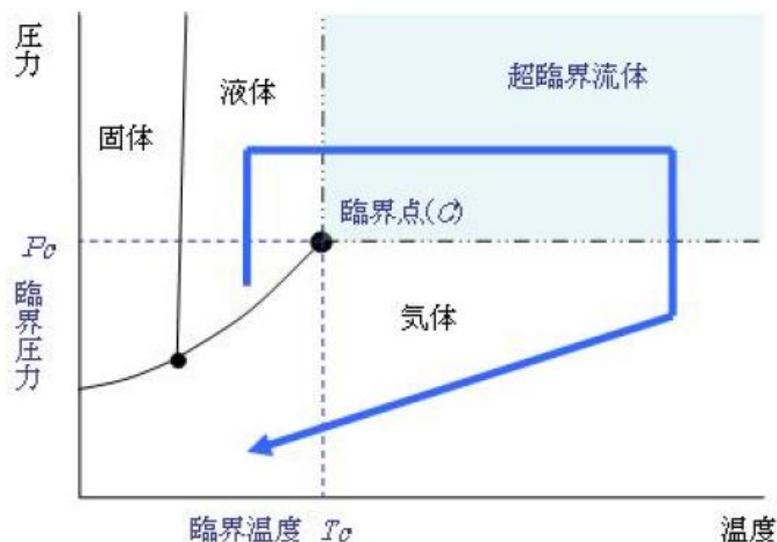


図2.9 超臨界過程

圧力を上げて液体にならず、メニスカスも生じない。この状態でアルコゲルから溶媒を抽出すれば不必要な表面張力が働かないため、形状と構造を保ってエアロゲルを得ることができる。

(表2.2) から分かるように可燃性のエタノールに高温・高圧を印加する必要がある。通常は、まず溶媒を臨界温度が比較的低い二酸化炭素に置換し、その後で二酸化炭素を超臨界状態にする二酸化炭素オートクレーブ (図2.10) を使用する。こうしてアルコゲル中の溶媒を抽出後、常温・常圧に戻せば空気中で安定なエアロゲルが完成する。

	臨界温度 °C	臨界圧力 atm	臨界密度 g/cm ³
エタノール	243.1	63.1	0.275
メタノール	239.43	79.9	0.272
二酸化炭素	31.1	73.0	0.46
水	374.1	218.5	0.324
アンモニア	132.4	112.0	0.234
窒素	-147.1	33.5	0.311

表 2.2 いろいろな物質の臨界点



図2.10 CO₂ オートクレーブ

オートクレーブ内でアルコゲル中のエタノールを液化炭酸に置換後、二酸化炭素を超臨界流体（臨界温度31.1 °C、臨界圧力7.30MPa）にし、アルコゲルから抽出する。内容積7.6 l

2.5 ^{90}Sr β 線即時検出器の構造

シンチレーションファイバー SCSF-78MJ 0.2mm (クラレ)

光電子増倍管 PMT1、2 R9880U-210 (浜松ホトニクス)

PMT3 R329-02 (浜松ホトニクス)

シリカエアロゲル 30mm×40mm×10mm n 1.0486 TL 35.7mm

発生したチェレンコフ光をアルミマイラーで反射させPMT3にて受ける。
シンチレーションファイバーに繋いだPMT1とPMT2でトリガーし、PMT3が
鳴ったイベントを計数する。

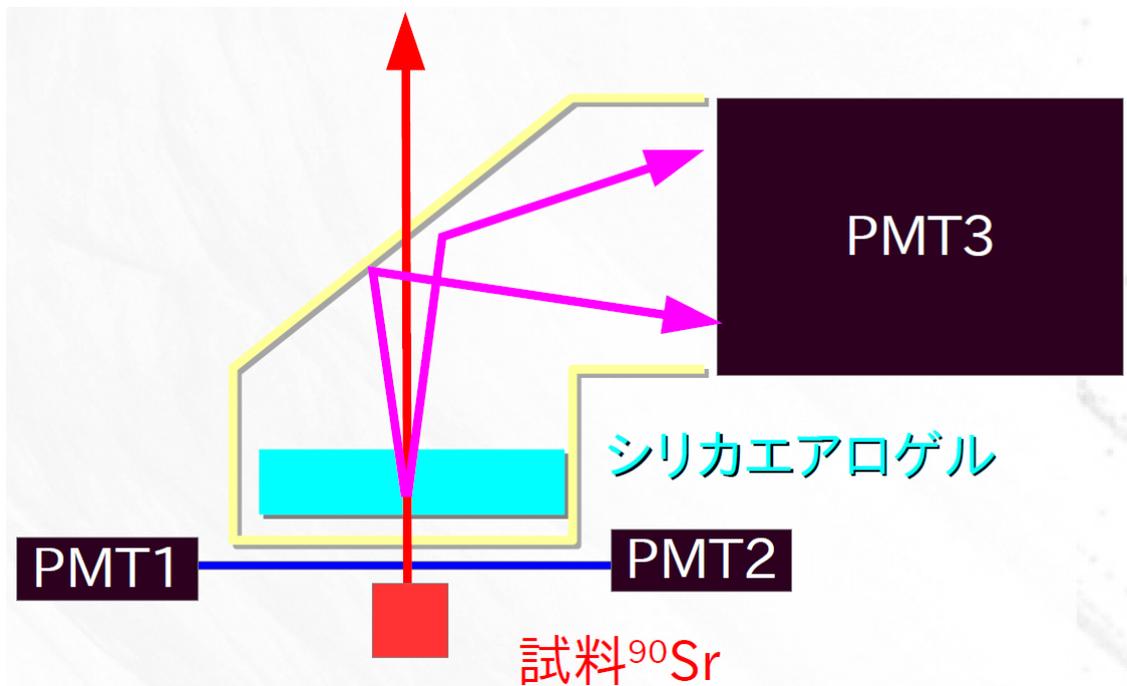


図2.11 検出器の模式図

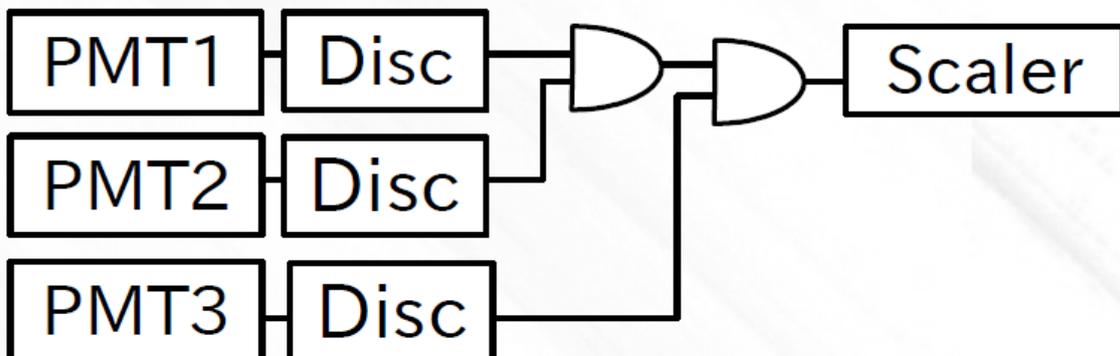


図2.12 検出器の回路図



図2.13 R329-02

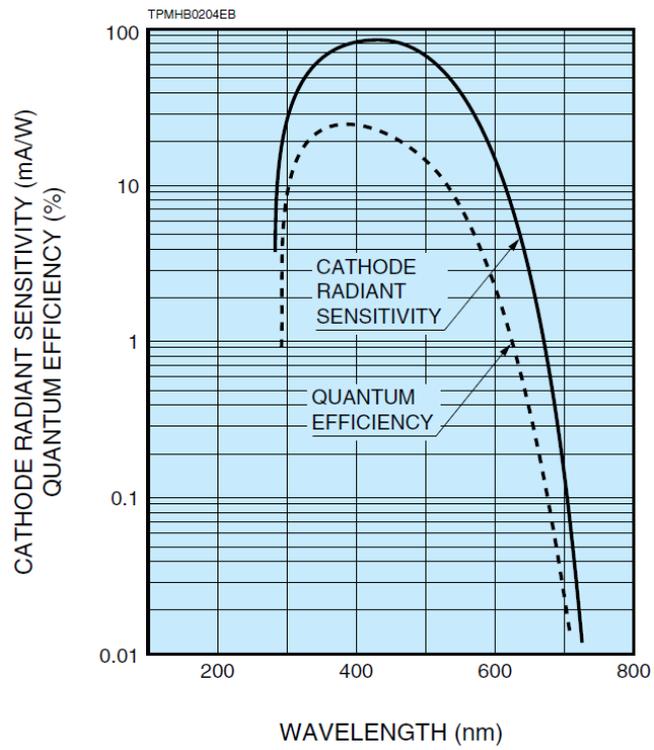


図2.14 R329-02の量子効率



図2.15 R9880U-210

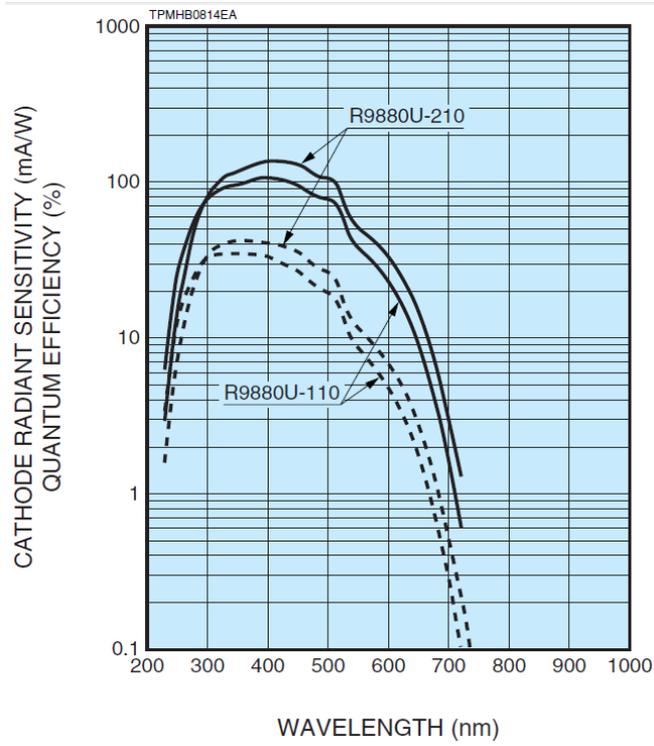


図2.16 R9880U-210の量子効率

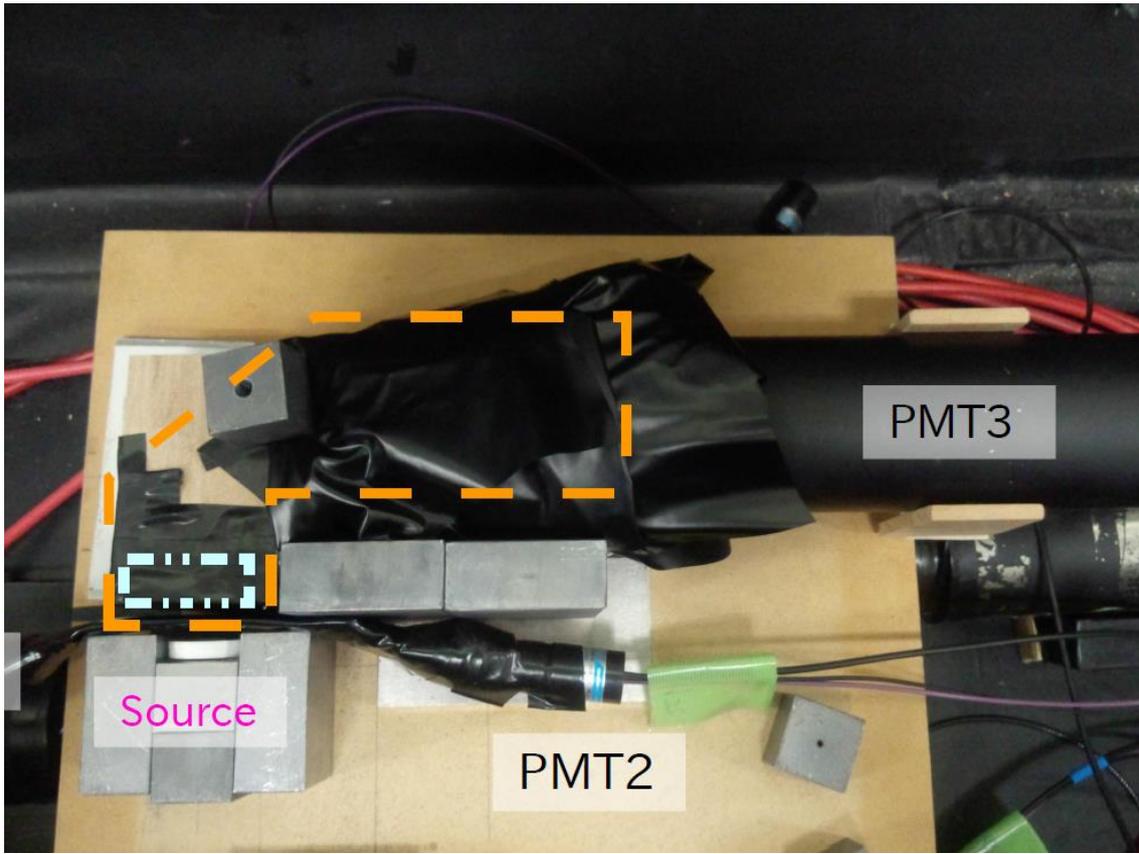


図2.17 セッティング

第3章 各種線源による性能評価

3.1 セッティング

PMT1、2 HV 1000V

PMT3 HV 2300V

シリカエアロゲル 30mm×40mm×10mm n 1.0486 TL 35.7mm

有効窓面積 12cm²

¹³⁷Cs 線源 27kBq

⁹⁰Sr—⁹⁰Y 線源 25kBq

3.3 結果、考察

線源	時間[sec]	2coin	3coin	rate[Hz]
Sr	60	110385	516	8.6
Cs	875	373105	65	0.074
BG	629	521	2	0.0032

Sr/Cs 115

⁹⁰Sr のカウント数から ¹³⁷Cs のカウント数とバックグラウンドを引き、その値が ¹³⁷Cs のカウント数とバックグラウンドの平方根の 3 倍以上であれば検出できていると考える。

$${}^{90}\text{Sr} : 8.6\sigma/25000 \times S \times t = 4.13 \times 10^{-3} \sigma t$$

$${}^{137}\text{Cs} : 0.07k\sigma/27000 \times S \times t = 3.11 \times 10^{-5} k \sigma t \quad \text{【Bq/cm}^2\text{】}$$

$$\text{BG} : 0.0032t$$

S : 有効窓面積 12cm² σ : ⁹⁰Sr の放射能面密度 k : ⁹⁰Sr の放射能に対する割合
t : 測定時間

$$4.13 \times 10^{-3} \sigma t - 3.11 \times 10^{-5} k \sigma t - 0.0032t > 3 \sqrt{3.11 \times 10^{-5} k \sigma t + 0.0032t}$$

(⁹⁰Sr)
(¹³⁷Cs)
(BG)

σ について解くと

$$A \equiv (1.7 \times 10^{-5} - 2.7 \times 10^{-7} k + 1.1 \times 10^{-9} k^2) t$$

$$B \equiv -\{(2.6 \times 10^{-5} - 2.1 \times 10^{-7} k) t + 3.0 \times 10^{-4} k\}$$

$C \equiv (1.0 \times 10^{-5} - 2.9 \times 10^{-2})$ として

$$\sigma > \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

と表せ、特に $k=0$ のとき

$$\sigma > \frac{41}{\sqrt{t}} + 0.78$$

となる。

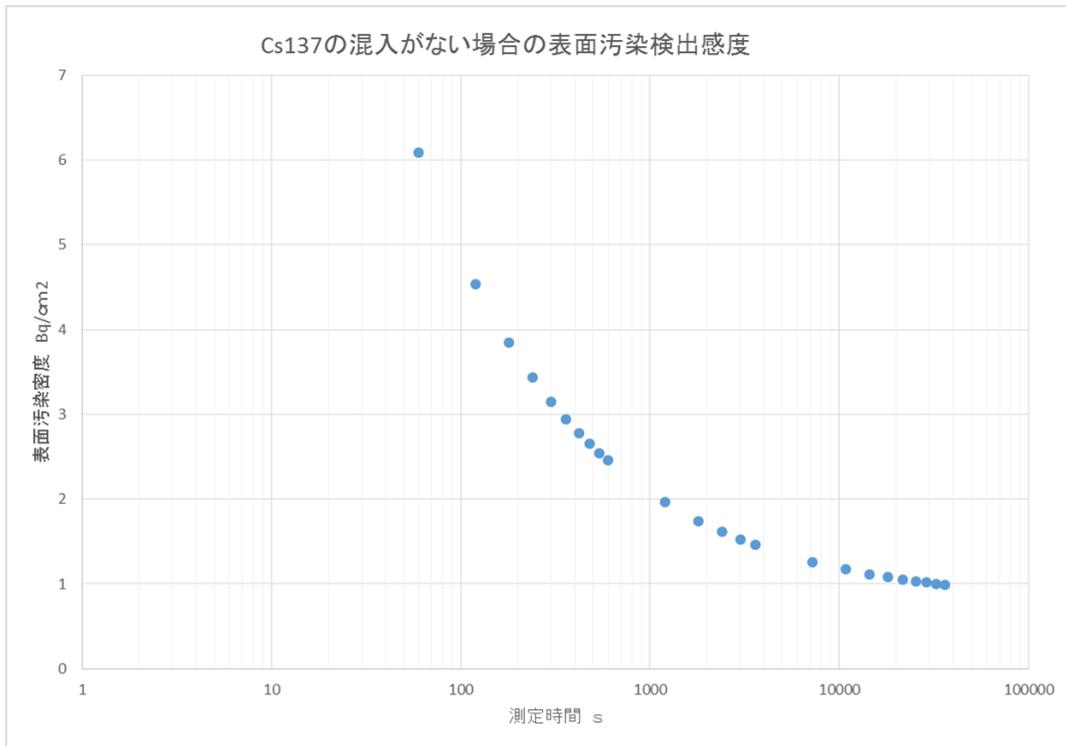


図 3.1 ^{137}Cs の混入がないときの表面汚染検出感度

$$\sigma > \frac{41}{\sqrt{t}} + 0.78$$

1 分 : 6.1Bq/cm²

5 分 : 3.2Bq/cm²

1 時間 : 1.5Bq/cm²

10 時間 : 1.0Bq/cm²

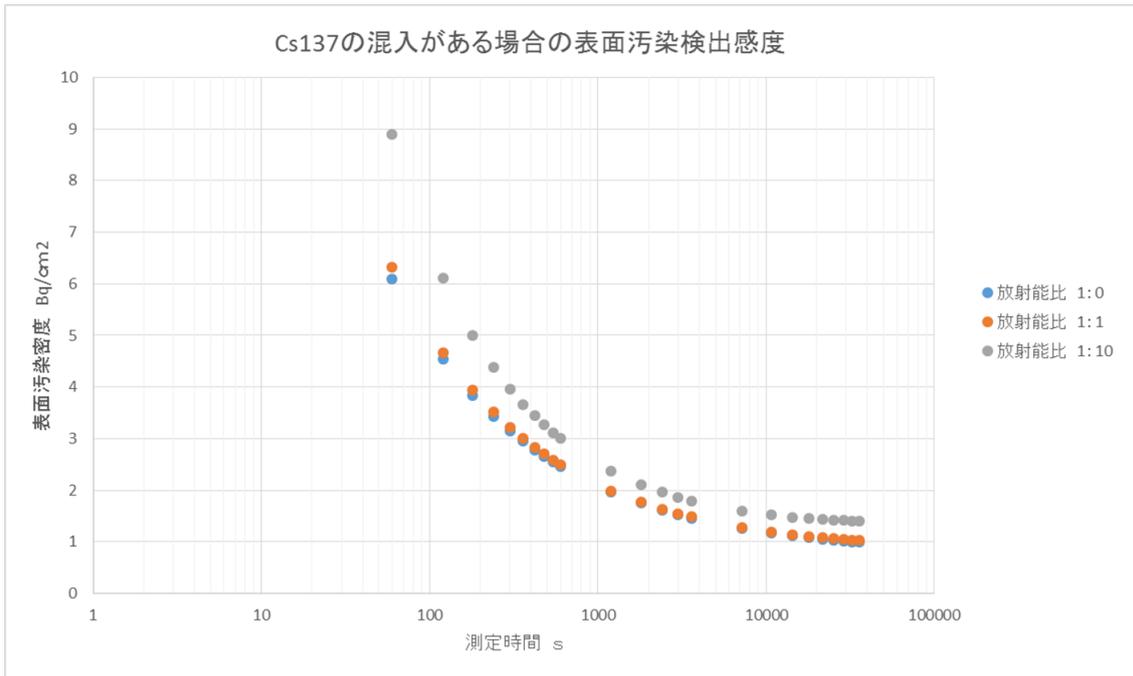


図 3.2 ^{137}Cs の混入がある場合の表面汚染検出感度

$$\sigma > \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

Cs/Sr 放射能比

		0	1	10
測定時間	1分	6.1	6.3	8.9
	5分	3.2	3.2	4.0
	1時間	1.5	1.5	1.8
	10時間	1.0	1.0	1.4

Bq/cm²

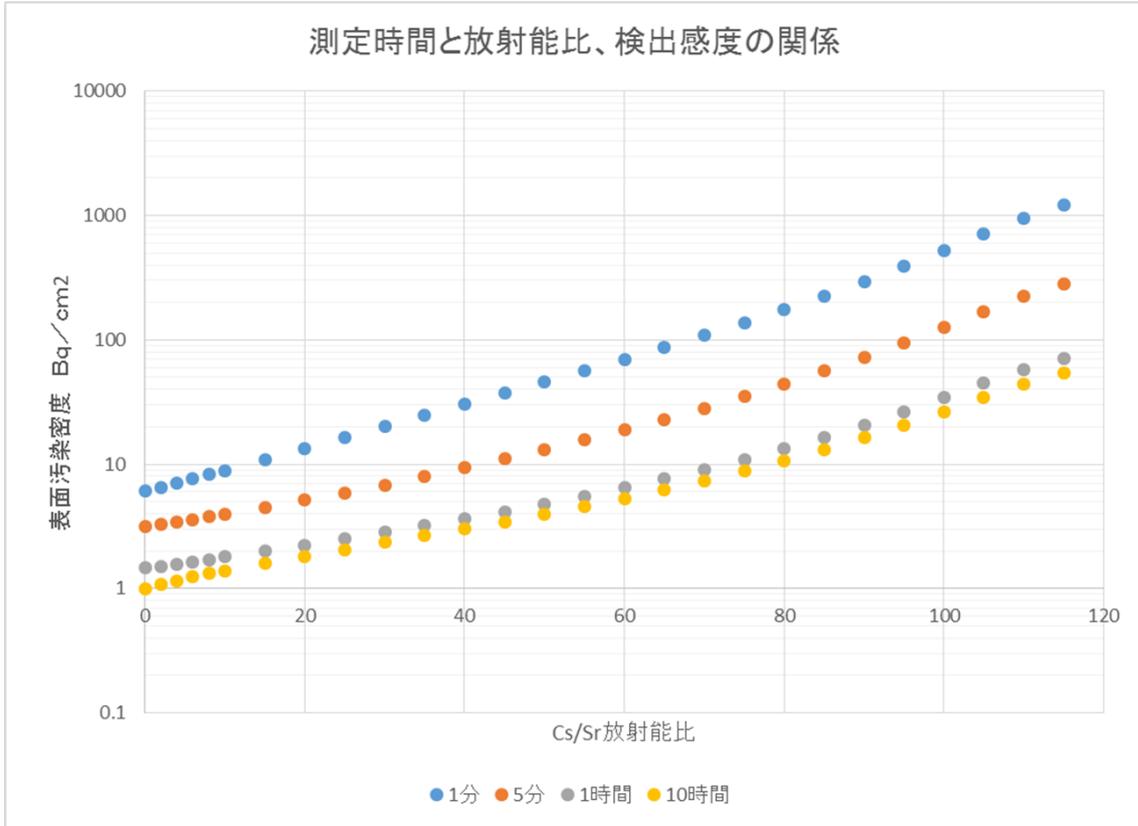


図 3.3 測定時間と放射能比、検出感度の関係

4 章 結論

4.1 まとめ

γ 線に鈍感で 1.2MeV 以上の β 線に有感な検出器を作ることが出来た。

構造もごくシンプルでかつリアルタイムで検出できる。

感度も 1 分測定で 6.1Bq/cm^2 となり十分ではないかと思う。特筆すべきは全 β 線の感度ではないところである。

^{137}Cs が混在する場合であっても ^{90}Sr と同程度の放射能であれば 1 分測定で 6.3Bq/cm^2 と精度の落ちも小さい。10 倍の放射能比であっても 8.9Bq/cm^2 となる。

4.2 展望

宇宙放射線によるバックグラウンドを減らすために検出器の外側にベト一用シンチレーターを置く。(図 4.1)

チェレンコフ光を PMT で直接読むのではなく WRSF (波長変換ファイバー) にて受け放射線場から離す事でノイズを減らせる。また、ファイバーを使うことで大きい面積を確保でき感度の向上を狙える。面積を大きくしても PMT の数を多くはしないので安価でシンプルなものが出る。(図 4.2)

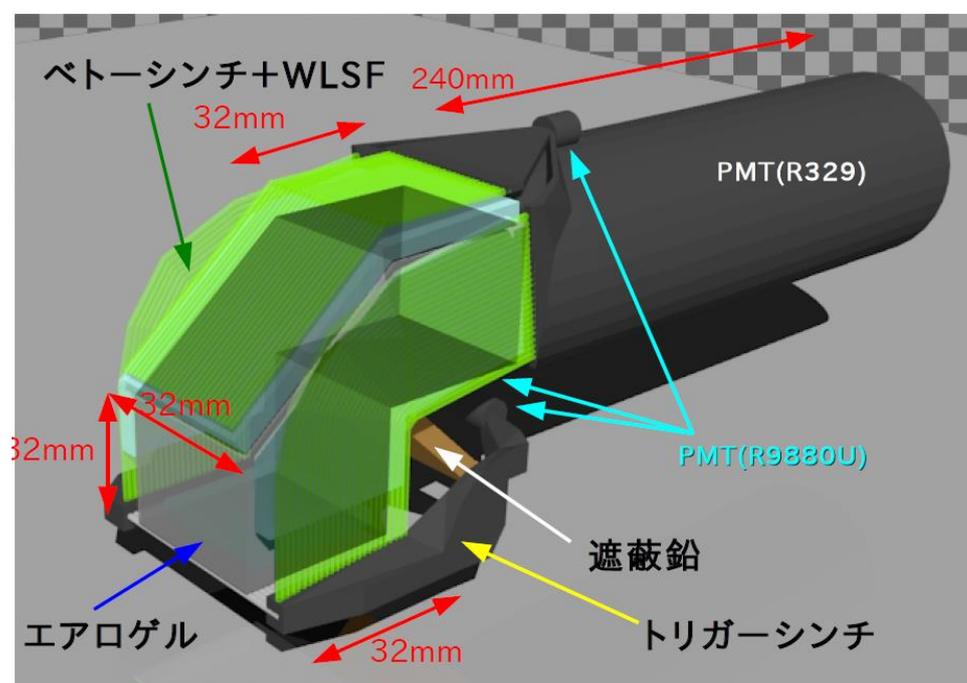


図 4.1 宇宙線ベト一を備えた検出器

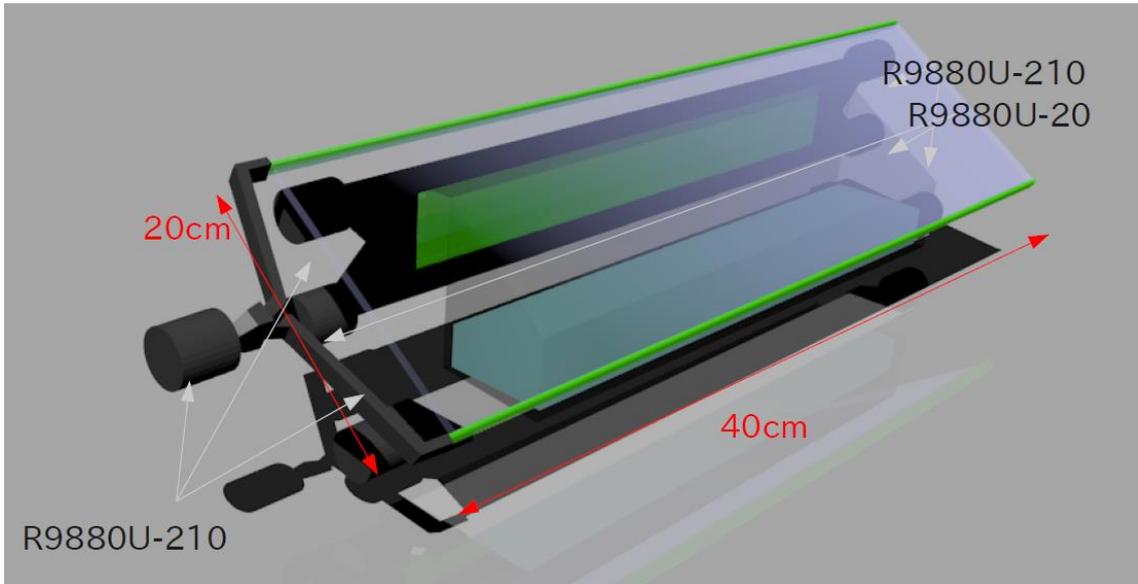


図 4.2 据付型の大型検出器

参考資料

東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（国会事故調）報告書
アイソトープ手帳 社団法人日本アイソトープ協会 丸善株式会社
理科年表 文部科学省 国立天文台 編 丸善株式会社
放射線取扱の基礎 社団法人日本アイソトープ協会 丸善株式会社
放射線概論 柴田徳思 通商産業研究社
放射化学 ショパン・リルゼンツィン・リュードベリ丸善株式会社
放射化学の基礎 コルネリウス・ケラー 現代工学社
倉谷厚志、千葉大学、修士論文(2007)

謝辞

本研究を行なうにあたり多くの方々に御協力、御指導頂きました。河合秀幸準教授には本研究に参加する機会を与えてくださったこと感謝致します。

吉田滋教授、間瀬圭一助教には助言を頂き深く感謝いたします。

本研究は科学研究費補助金（25610049）の助成、中部電力株式会社 技術開発本部 原子力安全技術研究所の援助を受けました。ここに謝意を表します。

千葉大学での学生生活にてお世話になりました、玉津早駿さん、新田宗孝さん、児玉諭士さん、伊藤博士さん、大和久耕平さん、飯島周多郎さん、雲越大輔さん、韓樹林さん、鈴木清太郎さん、上山駿佑さん、には有意義な研究生生活を送ることが出来感謝致します。

他、物理学を共に学んだ友人を含め多くの方々の支えがあって、本研究を行なうことができました。皆様、本当にありがとうございます。

最後に大学院生としての研究生生活を支えてくれた家族に心より感謝します。