

令和3年度  
原子力規制庁 放射線対策委託費  
(放射線安全規制研究戦略的推進事業費)

環境放射線モニタリングに適した  
半導体受光素子ベースの検出器の開発

研究代表者：京都大学 谷垣 実

2022年3月23日

## 目次

1	概要	1
2	背景	2
3	研究目標	4
3.1	研究の内容	4
3.2	期待される成果	4
4	研究体制と遂行状況	5
4.1	実施体制	5
4.2	研究実施状況	6
4.3	研究成果の公表など	7
5	検出器の設計と試作	8
5.1	検出器の構成	8
5.2	目標とする測定範囲	10
5.3	八角柱型 CsI(Tl) 検出器の設計 - 2 inch NaI(Tl) の置き換え想定	13
5.3.1	形状の決定	13
5.3.2	シンチレータの大きさの決定	14
5.3.3	検出器としての計数率	16
5.3.4	測定上限の見積	16
5.3.5	試作した八角柱検出器の概要	17
5.3.6	エネルギー校正とエネルギー帯域およびエネルギー分解能	18
5.3.7	八角柱型検出器の計数直線性試験	18
5.3.8	八角柱型検出器の方向特性試験	21
5.3.9	八角柱型検出器のエネルギー特性試験	22
5.4	高線量率対応 CsI(Tl) 検出器の設計	25
5.4.1	設計方針	25
5.4.2	計数率の直線性の確認	25
5.4.3	シンチレータの大きさについての検討	28
5.4.4	立方体のシンチレータとしての形状の妥当性の確認	29
5.4.5	6 mm 角 CsI(Tl) 用 G(E) 関数	30
6	環境中での測定試験	34
6.1	6 mm 角 CsI(Tl) 検出器	34
6.1.1	日本品質保証機構による試験	34
6.1.2	既設モニタリングポストに併設しての試験	34
6.2	八角柱型 CsI(Tl) 検出器	38

6.2.1	福島県大熊町での試験運用 . . . . .	38
6.2.2	石川県野々市市での試験運用 . . . . .	40
7	GAGG 検出器の可能性の検討	44
8	まとめ	46
9	謝辞	47

## 1 概要

原子力施設の周辺に展開される固定・可搬型モニタリングポストについては、従来光電子増倍管を使用した NaI(Tl) シンチレーション検出器や電離箱、半導体検出器のいずれか、あるいは組み合わせたものが利用されている。これらの検出器は特性がよく研究されており運用実績も豊富であるが検出器ごとに課題や制約があり、現場では多大な労力や費用をかけて運用が維持されている。しかし、厳しい昨今の財政事情から設置や管理コストの削減要求は強まる一方である。一方、近年の半導体技術と光計測市場の進展と拡大により、光電子増倍管のような増幅効果を持つ半導体受光素子である APD (Avalanche Photo Diode) や MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が安価に広く普及しており、これを放射線計測に応用することで、高圧電源が不要で小型軽量、振動や衝撃にも強く使い勝手の良い検出器が実用化されている。たとえば走行サーベイシステム KURAMA-II で使われている CsI(Tl) + MPPC のシンチレーション検出器ではバックグラウンドレベル $\sim$  mSv/h オーダーを 1 台でカバーする能力を持っている。ただ、この半導体受光素子ベースの検出器は、福島事故対応で展開されたものを除き、固定・可搬型モニタリングポストでの採用が進んでいない。これは半導体受光素子ベースのシンチレーション検出器が固定・可搬型モニタリングポスト用として必ずしも最適化されておらず、運用実績や能力の評価も行われていないことによる。そこで、この研究では、半導体受光素子ベースのシンチレーション検出器について、固定・可搬型モニタリングポストへの対応能力を検証し、検出器のリファレンスモデルを提案する。具体的には、固定・可搬型モニタリングポストとしての利用に適したシンチレータの種類や形状をシミュレーションにより決定して検出器を製作し、校正場や実際の環境での能力評価および従来の固定・可搬型モニタリングポストとの比較検証を行う。この研究により、半導体受光素子ベースの使い勝手のよい検出器が固定・可搬型モニタリングポストに導入できるようになり、ユーザの負担軽減と厳しい財政事情下でもモニタリング能力の維持・強化が可能となる。

## 2 背景

原子力施設やその周辺地域で展開されている環境放射線モニタリングでは、平常時の環境放射線レベルから緊急時に想定されるような mSv/h オーダーやそれ以上の線量率のモニタリングが必要になることから、異なるタイプの検出器を組み合わせでのモニタリング活動が実施されている。ここで、環境放射線モニタリングに使われる検出器について表 1 にまとめる。

表 1 環境放射線モニタリングに使われる主な検出器とその特徴

		
<p>NaI(Tl) 検出器 (画像は [1] より)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● エネルギー情報が得られる</li> <li>● 低線量率でも安定した計測が可能</li> <li>● 高線量率での数え落とし</li> <li>● 潮解性が大きい</li> <li>● 外気温や湿度に影響される</li> <li>● 高電圧の制御が必要(±1% 未満)</li> </ul>	<p>電離箱検出器 (画像は [1] より)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● エネルギー特性・方向特性が良い</li> <li>● 線量率直線性がよい</li> <li>● エネルギー情報が得られない</li> <li>● 平常時の環境放射線レベルの測定が困難</li> <li>● 外気温や気圧、湿度に影響される</li> </ul>	<p>半導体検出器 (画像は [2] より)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 高線量率計測が可能</li> <li>● 安価</li> <li>● エネルギー情報が得られない</li> <li>● 外気温の変化に大きく影響される</li> <li>● 平常時の環境放射線レベルの測定が困難</li> </ul>

これらの検出器はいずれも適切な条件での運用でモニタリングに必要な能力を発揮することができるものがあるが、そのためにはそれぞれの持つ短所 (たとえば湿度や温度変化に弱い、あるいは低線量率での感度不足など) について適切な対応が必要であり、現場では測定能力の維持に多大な労力が払われている。たとえば、NaI(Tl) 検出器や半導体の線量率に対する温度依存性として、温度管理機能を搭載しない可搬型モニタリングポストに採用された NaI(Tl) 検出器と半導体検出器の例を図 1 に示す。屋外で想定される範囲の外気温の変化でも外気温に連動して線量率が変化していく様子がよくわかる。また、NaI(Tl) 検出器や電離箱は数百 V 以上の高いバイアス電圧を必要とするため、湿気によるリーク電流や放電をおこしやすい。さらには NaI(Tl)

は潮解性が高いことから多湿の環境でのシンチレータ自身の劣化も発生する。このような問題を解決するため、固定型のモニタリングポストでは電源や信号処理装置、記録装置などを収めた局舎と検出器の容器を一体化し、局舎内と一体の空調管理を行うといった工夫も行われている。しかし、このような大規模な環境制御の構造をとることで設置や維持の費用が著しく上昇することとなり、運用者の大きな負担となっている。

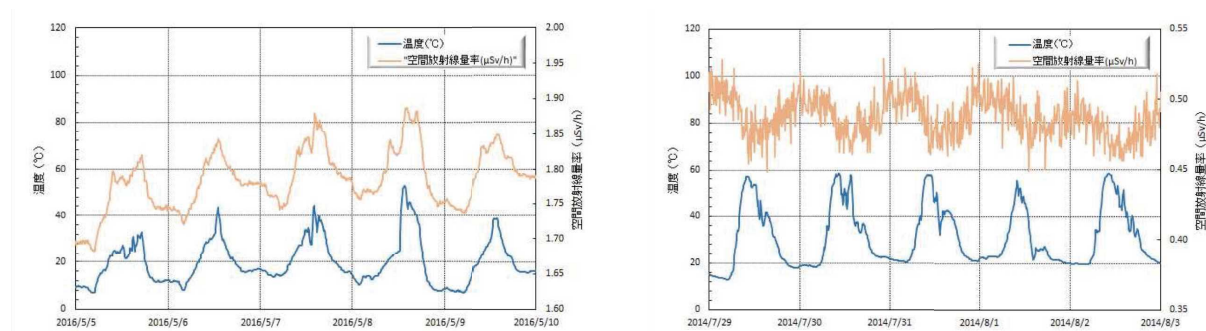


図1 可搬型モニタリングポストに搭載された NaI(Tl) 検出器の線量率の温度依存性（左）と半導体検出器の線量率の温度依存性（右）[2]。

このような事情もあって、老朽化等の更新に際してより運用コストの低い検出器への要望が多いものの、要望に応えられる適切な選択肢が提供されていない現状がある。加えて近年の財政事情に伴う設置や維持管理の費用の節減の一方で東電福島原発事故をはじめとする様々な経験を踏まえた緊急時対応への能力の向上がもためられており [3]、運用コストだけでなく十分な測定能力の維持は不可欠である。

さて、近年の半導体技術の進展により APD (Avalanche Photo Diode) [4] や MPPC (Multi Pixel Photon Counter) [5] のような優れた素子が登場しており、これらを採用した検出器は高い耐環境性と安定した測定能力、小型軽量、低コスト化を達成し、PC に USB 接続するだけで直ちに測定できるような手軽さをも実現している [6]。特に、KURAMA-II[7] の開発の際にこのような検出器の信号処理の高速化アルゴリズムも開発され [8]、バックグラウンドレベル $\sim$ mSv/h オーダーを一つの検出器で測定できるようになってきている。これらの技術をモニタリングポストへの適用することでユーザのニーズに的確に応えられると考えられる。

## 3 研究目標

### 3.1 研究の内容

環境放射線モニタリングに適した半導体受光素子ベースのシンチレーション放射線検出器の開発や実装の研究を行う。まず、受光素子に MPPC を使用した CsI(Tl) である浜松ホトニクス社 C12137 の高計数率対応モデルをベースとして、平常時や緊急時を想定した環境放射線モニタリングに適した線量率範囲をカバーする検出器を設計する。この結果を基に環境放射線モニタリング用検出器の試作を行い、従来の環境放射線モニタリング活動で使われてきた NaI(Tl) 検出器や電離箱、半導体検出器との性能比較や置き換え可能性を検証する。成果は本事業および大学の知財の取り扱いの規定に沿って技術供与し、商品化を目指す。

研究で取り組む各項目のより詳細な内容は以下のとおりである。

#### 環境放射線モニタリングに適したシンチレータの材質及び形状の決定

環境放射線モニタリングでは方向依存性がない方が望ましいが、結晶の製作・加工費用や歩留まり、パッケージングを考慮する必要がある。また、MPPC は 500 nm 付近の光に対して良好な感度を示すことから、この付近のシンチレーション光を発生する CsI(Tl) が望ましいが、CsI(Tl) はシンチレーション光の寿命が長く高線量率の場合での数え落としが予想されるため、測定対象とする線量率範囲で十分な統計量が得られる最小の体積であることが望ましい。以上を踏まえて PHITS[10] などのシミュレーションコードにより実用的な環境放射線モニタリングのためのシンチレータ形状を決定する。なお、CsI(Tl) のシンチレーション光の寿命が問題となる場合は GAGG ( $Gd_3(Ga,Al)_5O_{12}(Ce)$ ) [9] などの他のシンチレータも考慮する。

#### 製作した検出器の性能評価

1) で試作した検出器について、標準場における特性評価（線量率直線性、方向依存性、エネルギー特性）を行うとともに、自然放射線の環境や福島第一原発周辺の高度に汚染された環境などで試験を行う。標準場の利用にあたっては JAEA 核燃料サイクル工学研究所の施設などを利用する。

#### 既設モニタリングポストに準じた運用試験

令和 2 年度までの規制庁委託研究で開発した可搬型モニタリングポストを改造して 1) で試作した検出器を内蔵したモニタリングポストを製作し、実際に設置されている固定・可搬モニタリングポストの設置箇所に併設して実環境における長期の運用試験を行う。

#### 研究成果の社会還元

今回の研究成果については本事業および大学の知財の取り扱いルールに則って技術供与を行い、早期の商品化を目指す。

### 3.2 期待される成果

原発立地及び周辺自治体が展開する NaI(Tl) 検出器、電離箱、半導体検出器を用いた固定・可搬モニタリングポストの測定能力の維持や向上と運用の負担軽減を実現し、測定結果の信頼性や評価の一貫性を高める。

## 4 研究体制と遂行状況

### 4.1 実施体制

谷垣実（京都大学・助教）のもと、以下の研究協力者と研究参加者によって実施された（表 2, 3, 図 2）。研究協力者と研究参加者はこれまで KURAMA-II 関連の研究開発に従事してきた実績のある者から構成されている。採択後に KURAMA-II での G(E) 関数検討の実績のある JAEA 津田氏と KURAMA-II の校正場での照射試験実績のある JAEA 星氏の参加の了解が得られたことで、試作検出器の性能評価の体制を強化して取り組んだ。

表 2 研究協力者

氏名	参加内容	所属機関	所属機関での職名
松浦隆弘	試作検出器の屋外耐久性試験	株式会社松浦電弘社	代表取締役社長
津田修一	G(E) 関数の検討・照射試験	日本原子力研究開発機構	上級研究員
星勝也	試作検出器の照射試験	日本原子力研究開発機構	技術員

表 3 研究参加者

氏名	参加内容	所属機関	所属機関での職名
奥村良	検出器の開発・調整および試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員
吉永尚生	検出器の開発・調整および試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員
吉野泰史	検出器の開発・調整および試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員



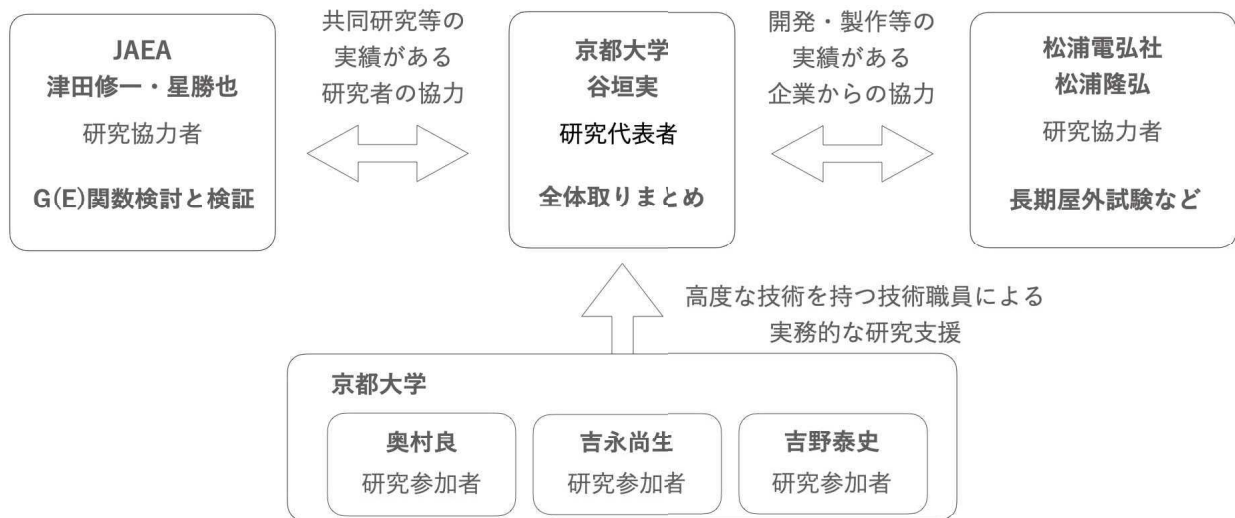


図2 研究体制図

## 4.2 研究実施状況

本研究は1年計画で取り組む研究である。研究実施のあらましを図3に示す。新型コロナ流行とそれに伴うそれに伴う各種自粛要請が支障となり、試作や動作試験、現地試験などが当初計画通り進められず、内容を精査して実質的な目標達成を目指すこととなった。KURAMA-IIで実績のある受光素子にMPPCを使用したCsI(Tl)検出器をベースに、平時や緊急時に想定される環境放射線モニタリングに適した測定範囲と特性を持った全固体シンチレーション検出器の設計、試作、評価を行った。新型コロナによる出張等の自粛や物流混乱等の影響で試作や試験評価に大きな影響が出たが、主要部分は実施・あるいは期間内の終了の見込みが立っている。利用者のニーズを踏まえ、NaI(Tl) 2 inch 相当の低線量率用検出器と10 mSv/h程度までをカバーする高線量率用検出器を過去の試験評価やシミュレーションで設計し、試作品をJAEA核燃料サイクル工学研究所の計量機器校正施設で試験評価した。また、試作品は既設モニタリングポストに隣接する場所に設置し、長期耐久試験及び測定値の比較検証に着手している。また、今回の研究成果である10 mSv/h程度まで計測可能な高線量率用検出器については商品化を実現した(浜松ホトニクス社 C12137-06HA)。また2 inch NaI(Tl) 検出器相当の検出器も商品化される予定である(浜松ホトニクス社 C1237-88H)。

実施項目	担当者 (所属機関)	第一四半期	第二四半期	第三四半期	第四四半期
検出器の試作	谷垣実 (京都大学) 津田修一 (JAEA)	← 基本設計 シミュレーション →	← 詳細設計・追加シミュレーション 低線量率用試作器製作 →		
性能評価	谷垣実・奥村良 (京都大学) 津田修一・星勝彦 (JAEA)	高線量率用試作機 照射試験		低線量率用試作機 照射試験	
運用試験	谷垣実 (京都大学) 松浦隆弘 (松浦電弘社)			既設モニタリングポストとの 比較試験	
成果発表など	谷垣実 (京都大学)		▲ 原子力学会	▲ EPR2021	

図3 研究計画。新型コロナウイルス感染拡大に伴う緊急事態宣言や各種移動規制により、概ね第一四半期～第二四半期は実証試験等を中心に事業進捗が見込めない状況であった。

### 4.3 研究成果の公表など

#### 研究成果の実用化

浜松ホトニクス C12137-06HA (高線量率用：6 mm 角立方体 CsI(Tl) 搭載)

浜松ホトニクス C12137-88HA (低線量率用：48 mmφ 八角柱型 CsI(Tl) 搭載)

#### 国際会議での発表

International Conference on the Development of Preparedness for National and International Emergency Response (EPR2021) (2021年10月11-15日)

M. Tanigaki: A Carborne Gamma-ray Survey System, KURAMA-II

#### 国内学会での発表

日本原子力学会 2021年秋の大会 (2021年9月8-10日)

谷垣 実：福島における放射性物質分布調査 (2) KURAMA-II の手法に基づく分布測定技術開発の現状

#### 一般向け広報

youtube 番組「鈴木光司のパワートーク」出演 (2021年9月19日より公開)

Maker Faire Tokyo 出展 (2021年10月2-3日)

## 5 検出器の設計と試作

### 5.1 検出器の構成

本研究で開発する半導体受光素子ベースのシンチレーション放射線検出器では浜松ホトニクス社 C12137[6] をベースに開発を行った。C12137 シリーズの外形を図 4 に、構成を図 5 に、また市販されている C12137 シリーズの電氣的・光学的特性を表 4 に示す。



図 4 C12137 シリーズ。用途に応じて様々な形状および大きさのシンチレータのものが用意されている。

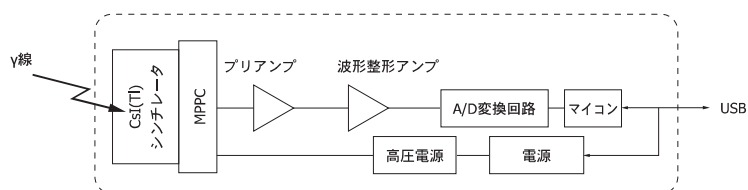


図 5 C12137 の構成図 [6]。MPPC とそのバイアス用高圧電源、波形整形回路、AD 変換回路、信号処理や PC との通信をおこなうマイコンがコンパクトにまとめられ、すべて USB パスパワーで作動する。

表 4 C12137 の電氣的・光学的特性 ([6] より抜粋)

項目	条件	C12137-00	C12137-01	C12137-08	C12137-10	単位
計数効率 min.	$^{137}\text{Cs}$ , 0.01 $\mu\text{Sv/h}$	40	400	2000		cpm
エネルギー範囲		0.03 ~ 2		0.06 ~ 2		MeV
エネルギー分解能	$^{137}\text{Cs}$ , 662 keV	8	8.5	9	10	%
測定範囲 (線量率)	$^{137}\text{Cs}$ , 662 keV 環境放射線による	0.01 ~ 100	0.001 ~ 10	線量率換算なし		$\mu\text{Sv/h}$
測定誤差	遮蔽物による減衰 計数揺らぎを除く	±20		線量率換算なし		%

C12137 をベースとした開発の理由であるが、

- 光電子増倍管と同様に増倍効果を持つ MPPC を採用していること
- 信号処理のアナログ系や A/D 変換回路、PC とのインターフェースが実装されていること
- KURAMA-II をはじめとする放射線計測装置などで幅広く採用されており、その性能と安定動作の実績があること
- 前年度の規制庁安全規制研究で開発した可搬型モニタリングポストで開発したソフトウェア資産が活用できること
- 既存の C12137 シリーズとの電氣的互換性を確保することで、すでに使用されている KURAMA-II などの放射線計測システムでの採用が極めて容易になること

が挙げられる。これらの特徴は高い信頼性とトラブル発生時も USB ケーブルを差し替えるだけで復旧可能となるためである。

また、シンチレータには CsI(Tl) を採用することとした。これは、蛍光時間が  $\sim 1\mu\text{s}$  と長いという欠点はあるものの、NaI(Tl) に比べて潮解性が小さいこと、C12137 シリーズで採用する MPPC の変換効率の高い波長領域に蛍光波長があること、また KURAMA-II 他で長期間の実環境での安定した運用実績があり、耐環境性についても十分あると考えられるためである。なお、近年登場した新しいシンチレータである GAGG は、吸湿性や潮解性がなく自己放射性もないという有望な素材であるが、実際にモニタリングポストとして大量に使用することとなった場合の結晶の供給能力の問題が残っている。そこで、今回の研究では将来の供給体制の安定化の向け基礎的な評価をおこなうこととする。

なお C12137 シリーズでは、一般的な検出器で想定される不感時間に伴う数え落としではなく、AD 変換後のデジタル信号処理遅延による数え落としの影響から、ソフトウェア的に計数率の上限を 10000 cps に制限して市販されている。従来、放射線検出器の線量率校正では  $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV 単色線が使われているが、無機シンチレータは原子番号の大きな元素で構成されていることから、実環境で散乱等により発生するカウント数あたりの線量率への寄与の小さい低エネルギー成分の計数が高くなる。この結果、従来市販されている C12137 シリーズでは「低エネルギー放射線が支配的な環境放射線を検出する場合、最大測定値が 1/3~1/2 程度になります」との注意喚起が行われている [6]。この欠点については、京大と浜松ホトニクスで共同開発したデジタル信号処理の高速化アルゴリズムを信号処理系に採用して克服して高計数率対応を達成しており [8]、一般向け C12137 でみられた実環境での数え落としがなくなっただけでなく、ダイナミックレンジの大幅な拡大を実現している (図 6)。今回の研究でもデジタル信号処理系にこの高計数率対応アルゴリズムを採用した。

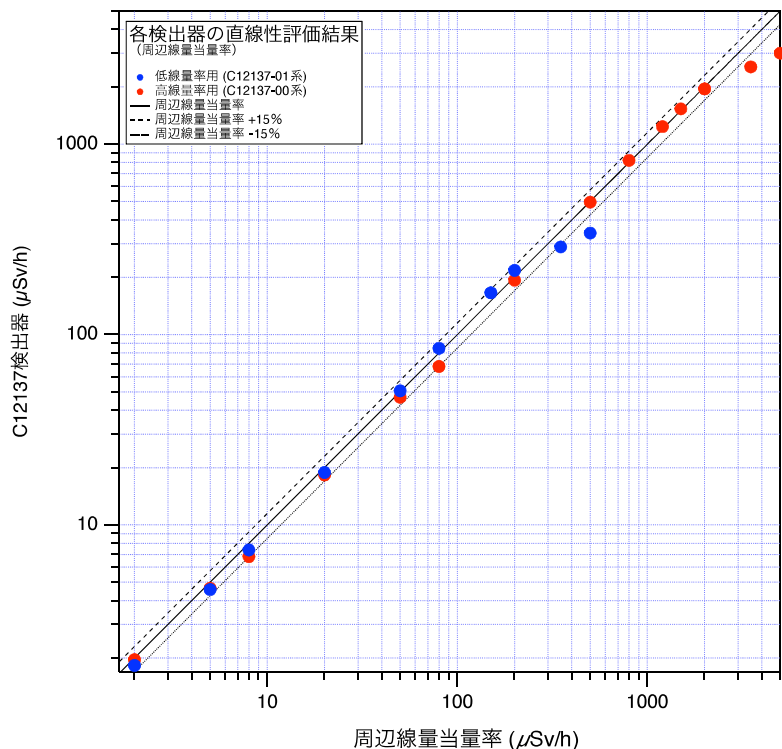


図6 改良型 C12137 シリーズのダイナミックレンジ。JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設の所有する  $^{137}\text{Cs}$  線源による校正場で照射した。市販される C12137-00 は公称  $100 \mu\text{Sv/h}$  まで、C12137-01 は公称  $10 \mu\text{Sv/h}$  まで計測可能となっているが、アルゴリズム改良で大幅に測定可能範囲が広がっており、C12137-00 タイプでは  $2 \text{ mSv/h}$  まで到達する。

## 5.2 目標とする測定範囲

今回の検出器の開発にあたり、実際に環境放射線モニタリング業務を実施している原発立地県およびその隣県の実務担当者を中心に聞き取りを行った。その結果、平時の観測で使用している 2 inch NaI(Tl) 検出器の置き換えと半導体検出器あるいは電離箱の置き換えの希望が多いことがわかった。いずれも測定能力の維持は達成しているものの、そのための人的・金銭的コストの負担が大きいことが理由となっていた。また、可搬型モニタリングポストの整備を検討されている方からは、C12137-00 で達成した  $2 \text{ mSv/h}$  を超える高線量率への対応の要望が根強かった。この際、従来の KURAMA-II による走行サーベイ時のように  $1 \sim 3$  秒間隔といった短いものは必要なく、2 分ないし 10 分の平均値で精度を達成すれば良いということであった。

また、既存のモニタリングポスト用検出器の仕様の典型的な例を表 5, 6, 7 に示す。いずれの場合も測定範囲をバックグラウンドレベル  $\sim 100 \text{ mGy/h}$  とし、 $10 \mu\text{Gy/h}$  程度までを NaI(Tl) 検出器で、それ以上を半導体検出器ないし電離箱でモニタする構成となっている。また、原子力規制庁の可搬型モニタリングポスト調達における仕様 [11] では「測定線量率範囲: $10 \text{ nGy/h} \sim 10 \text{ mGy/h}$  または  $10 \text{ nSv/h} \sim 10 \text{ mSv/h}$  ( $^{137}\text{Cs}$  にて)」とされている。

そのほかモニタリングポストに関する規格としては JIS Z4325 「環境  $\gamma$  線連続モニタ」 [12] があり、以下のよう定められている。

- 直線性  $-15\% \sim +22\%$  (有効測定範囲内において)
- エネルギー特性  $0.7 \sim 1.3$  (80 keV $\sim$ 1.5 MeV)
- 方向特性  $\pm 20\%$  (80 keV $\sim$ 1.5 MeV,  $0^\circ \sim \pm 120^\circ$ ,  $15^\circ$  間隔 (AI 型の場合))
- 指示値変動係数 0.2

以上を踏まえ、

- 既存の 2 inch NaI(Tl) を置き換える  $0.01 \sim 10 \mu\text{Sv/h}$  をカバーした低線量率用検出器
- 電離箱や半導体検出器の置き換えを想定した測定上限が 10 mGy/h 以上の高線量率用検出器

の 2 つのタイプを開発することとした。

上限については、本研究の実施までにシンチレーション検出器で電離箱や半導体検出器の達成する 100 mGy/h の達成は容易でないものの 10 mGy/h 程度までの達成は見込めたこと、電離箱や半導体検出器では得られない  $\gamma$  線のエネルギー情報が得られる利点がある点を考慮して設定した。ただし、本研究内においても可能な限り高線量率への対応を試みる。

さらに、2 つの検出器の測定範囲がスムーズなオーバーラップを持たせるために、高線量率用検出器では  $1 \mu\text{Sv/h}$  程度を下限値の目標とすることにした。2 分程度の測定で  $1 \mu\text{Sv/h}$  の測定が可能な検出器であれば、その 50 倍の 1 時間の積算でバックグラウンドレベルでも十分な統計量を確保できると期待できるためである。今回の目標や既存の検出器の測定範囲、また緊急時の判断基準となる数値の関係を図 7 に示す。

表 5 可搬型モニタリングポストの例 1 ([13] より再掲)

項目	性能等	
	NaI(Tl)シンチレーション式検出器 (低線量域)	半導体検出器 (高線量域)
測定線種	$\gamma$ (X) 線	
測定範囲	BG $\sim$ 100 mGy/h	
表示範囲	0.000 $\sim$ 999.9 $\mu$ Gy/h 1.000 $\sim$ 99.99 mGy/h	
方向特性	方向特性 $\pm 20\%$ , ( $-90^\circ \sim +90^\circ$ の範囲において、 $^{137}\text{Cs}$ )	
エネルギー特性	許容範囲 ( $^{137}\text{Cs}$ に対して)	
	60 $\sim$ 100 keV 未満: 0.5 $\sim$ 1.25	60 $\sim$ 100 keV 未満: 0.5 $\sim$ 1.3
	100 $\sim$ 400 keV 未満: 0.9 $\sim$ 1.2	100 $\sim$ 400 keV 未満: 0.7 $\sim$ 1.3
	400 $\sim$ 1500 keV 以下: 0.9 $\sim$ 1.1	400 $\sim$ 1500 keV 以下: 0.7 $\sim$ 1.3
使用温度・湿度範囲	$-10 \sim +40^\circ\text{C}$ 100%RH (相対湿度) 以下 (結露なきこと)	
点検校正時の線源照射方向	検出器の軸方向に対して上 (垂直) 方向	
電源	AC85 $\sim$ 110V 及び太陽電池(最大 70W $\times$ 2 個)、 二次電池(105Ah $\times$ 2 個)、バックアップ用一次電池(22Ah $\times$ 2 個)	
本体外径	約 400(W) $\times$ 300(D) $\times$ 700(H)mm	

【富士電機取扱説明書】

表6 可搬型モニタリングポストの例2 ([13]より再掲)

項目	性能等	
	Nal(Tl)シンチレーション式検出器 (低線量域)	半導体検出器 (高線量域)
検出器	Nal(Tl)シンチレーション式検出器 (低線量域)	半導体検出器 (高線量域)
計数方式	測定部：デジタルレートメータ方式、記録部：積算平均方式	
測定範囲	バックグラウンド～11 $\mu$ Gy/h	9 $\mu$ Gy/h～100mGy/h
エネルギー測定範囲	50 keV ～ 3 MeV	50 keV ～ $\infty$
時定数	100秒または10秒	
積算平均値	10分、2分または1分	
$\gamma$ 線スペクトル測定	あり	
指示精度	$\pm 20\%$ 以内	
点検時の線源照射方向	検出器の軸方向に対して上（垂直）方向	
使用温度・湿度範囲	-10°C～+40°C、90%以下（但し、結露しないこと）	

【提供：福島県】

表7 固定モニタリングポストの例 ([13]より再掲)

項目	性能等	
	低線量率ポスト	高線量率ポスト
測定線種	$\gamma$ 線及びX線	
検出器	温度補償型 Nal(Tl)シンチレーション式検出器 (2インチ $\phi$ × 2インチ)	加圧型電離箱式検出器 (約14L)
測定範囲	バックグラウンド～10 $\mu$ Gy/h	バックグラウンド～100mGy/h
測定エネルギー範囲	50 keV ～ 3 MeV	50 keV ～ $\infty$
$\gamma$ 線スペクトル測定	あり（5 MeV以上の計数を 5 MeV相当のchに記録）	なし
検出部温度制御	加温・送風	
表示器	タッチパネル式6.5インチカラーTFT液晶	
表示項目	線量率、計数率、SCA線量率、 SCA計数率、スペクトル	線量率
指示精度	$\pm 1\% \pm 1$ digit	$\pm 2\% \pm 1$ digit
使用温度・湿度範囲	+5°C～+35°C、80%以下	
点検校正時の線源照射方向	検出器の軸方向に対して上（垂直）方向	
検出器設置高さ	地面より1mまたは局舎上約1m	
メーカー名	株式会社日立製作所	

【提供：福島県】

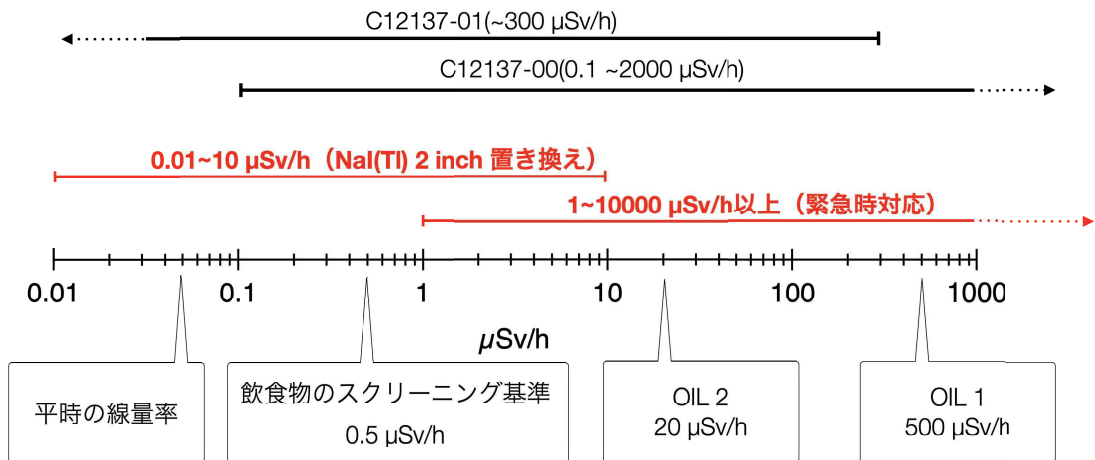


図7 今回の開発で目標とする検出器の測定可能範囲。平常時の環境放射線レベルで十分な能力を持つ NaI(Tl) 2 inch と置き換え可能なものと、緊急時の高線量率への対応を想定したものの2つのタイプを開発する。C12137-00, -01 の測定範囲は京大・浜ホトで開発したアルゴリズムを搭載した場合の数値。

### 5.3 八角柱型 CsI(Tl) 検出器の設計 - 2 inch NaI(Tl) の置き換え想定

#### 5.3.1 形状の決定

平常時の環境放射線レベルのための検出器として 2 inch NaI(Tl) 検出器が広く設置されている。この検出器のシンチレータの形状は方向依存性を改善する観点から直径と高さを等しくした円柱形となっている。しかし、製造にあたっては単結晶のインゴットから切り出して円柱状に整形、研磨などの表面加工を施すこととなるため、インゴットあたりの製造可能なシンチレータの個数や加工が複雑になって検出器の製造コストの上昇をもたらすという問題がある。

切り出しや加工といった観点から言えばシンチレータ形状を立方体とすることが効率的であるが、その場合面方向と角方向からの入射でシンチレータの実効厚が変わることとなり、方向依存性が発生する恐れがある(図8)。

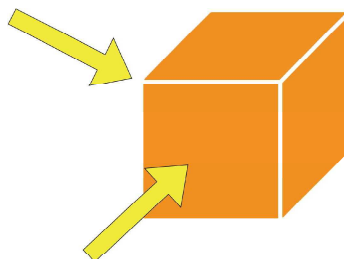


図8 立方体シンチレータの場合、面方向からの入射と角方向からの入射では最大  $\sqrt{3}$  倍結晶厚が異なることになる。

そこで、今回はシンチレータを立方体から四隅を切り落とした八角柱とすることで、切り出しや整形研磨の効率を改善することとした(図9)。立方体で問題であった角の問題はほぼ解消される。また、側面に残る角についても結晶を横断する最短経路と最長経路の比率は八角柱で 1 : 1.47、円柱の場合で 1 : 1.41 となるため、



円柱と遜色ない方向依存性であることが想定される。

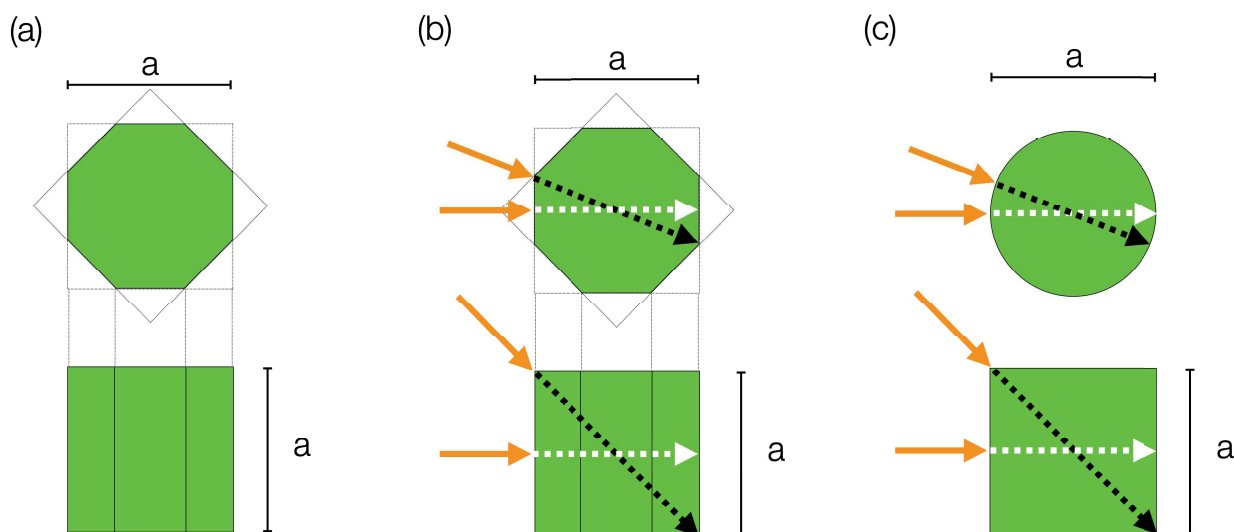


図9 八角柱形のシンチレータ ((a))。幅と高さと同じになるようにすることにより、結晶を横断する最短経路 (白矢印) と最長経路 (黒矢印) の長さの比率は従来の円柱形とほぼ一致する ((b), (c))。

### 5.3.2 シンチレータの大きさの決定

検出器の設計にあたっては、統計精度に直接影響する計数率の考慮が重要である。この計数率はシンチレータの体積に比例する蛍光の発光頻度だけでなく、蛍光の継続時間、蛍光を電気信号に変える受光素子の受光効率、さらに信号処理系の処理能力で決まる。今回開発する検出器では、KURAMA-II 等で運用実績の多数ある C12137 のものを採用する。そのため、既存の C12137 シリーズでの計数率を評価することで、シンチレータの蛍光の受光効率を含めた実効的な計数率を見積もることができる。

このことを踏まえ、以下のような手順でシンチレータの大きさを決定することとした。

1. 直径と高さがそれぞれ 2 inch の NaI 結晶について計数率をシミュレーションにより求める。
2. 同じ条件で八角柱 CsI 結晶の計数率のシミュレーションを行い、NaI シンチレータと同等の計数率を与える大きさを決定。
3. 既製品の C12137 との比較のため、既製品と同じ形状・大きさの CsI 結晶での計数率のシミュレーションを行う。
4. 既製品 C12137 シリーズについて過去に行った校正場による線量率直線性のデータから、MPPC 以降の計数効率を含んだ線量率直線性の上限を推定。
5. これらを総合して八角柱 CsI 結晶で想定される測定値の加減と上限を推定し、想定する測定範囲をカバーしていることを確認する。

シミュレーションには PHITS[10] を使用することとした。結晶と同じ大きさの 662 keV 単色  $\gamma$  線源と、線源から 5 cm 離れた場所に側面を面線源と平行にした状態で評価対象の結晶を置き、結晶の側面に向けて 662 keV 単色・平行  $\gamma$  線を照射した。そして、10 nGy/h1 時間相当分の照射を行った時の計数を比較することとした (図 10)。

まず、基準となる 2 inch NaI(Tl) 結晶の計数率をシミュレーションで評価した。2 inch の円柱の NaI 結晶の側面から真空中の 662 keV の単色平行  $\gamma$  線で照射した時のカウント数を求めた。その後、同じ条件で縦横が同じ長さ a の八角柱 CsI 結晶について照射を行い、NaI 結晶の場合と同じカウント数が得られるように a を調整した。その結果 a=48 mm とすることで NaI と同等の計数率が得られることがわかった。

また、受光素子以降の信号処理系の能力を考慮した計数率を考えるため、既製品の C12137 シリーズの実測結果とシミュレーション結果を関係付ける必要があることから、市販されている C12137 シリーズの中で 48 mm 角八角柱に一番近い体積のシンチレータ (38 × 38 × 25 mm) を持つ C12137-01 の計数率シミュレーションをおこなっている。カタログ上の代表値として 662 keV  $\gamma$  線照射の時 0.01  $\mu$ Sv/h で 400 cpm とされているが、これは 10 nGy/h で 5.6 cps 程度であり PHITS シミュレーションの結果はこれと矛盾しない。以上のシミュレーション結果を表 8 にまとめる。

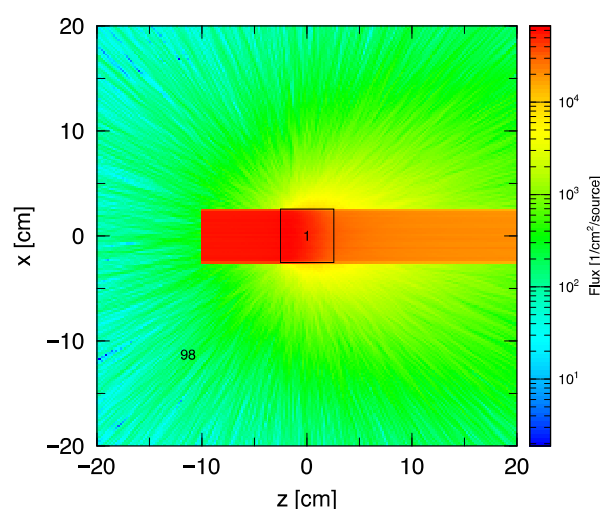


図 10 PHITS によるシンチレータの発光頻度を求めるためのシミュレーションの例。シンチレータの側面から真空中の 662 keV の単色平行  $\gamma$  線で入射した時のカウント数を評価する。

表 8 PHITS によるシミュレーションで得られたシンチレータの計数率。基準となる 2 inch 径円柱形 NaI 結晶、48 mm 角八角柱形 CsI 結晶、既製品 C12137-01 検出器 (CsI : 38 × 38 × 25 mm) のほか、参考として 1 inch 径円柱形 NaI 結晶と 24 mm 角 CsI 結晶の結果も併せて記載している。

	10 nGy/h での 1 時間計数	10 nGy/h での計数率 (cps)	0.1 $\mu$ Sv/h での計数率 (cps)
NaI 2 inch	$5.207 \times 10^4$	$1.446 \times 10^1$	$1.205 \times 10^3$
CsI 48 mm	$5.244 \times 10^4$	$1.457 \times 10^1$	$1.214 \times 10^3$
C12137-01	$2.235 \times 10^4$	6.209	$5.174 \times 10^1$
NaI 1 inch	$8.309 \times 10^3$	2.308	$1.923 \times 10^2$
CsI 24 mm	$8.657 \times 10^3$	2.405	$2.004 \times 10^2$

### 5.3.3 検出器としての計数率

受光素子以降の信号処理系の能力を考慮した計数率を考えるため、既製品の C12137 シリーズの実測結果とシミュレーション結果を関係付ける必要がある。そこで市販されている C12137 シリーズの中で 48 mm 角八角柱に一番近い体積のシンチレータ (38 × 38 × 25 mm) を持つ C12137-01 (高計数率タイプ) について 662 keV 単色  $\gamma$  線で行った線量率直線性試験の結果を使用した。この試験は 2017 年に JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設で実施したもので、662 keV 単色  $\gamma$  線を  $H^*(10)$  で 2 ~ 500  $\mu\text{Sv/h}$  の範囲で照射した時の計数率を評価したものである。この際検出器としての不感時間は 16  $\mu\text{sec}$  とされており、その補正後の計数率の直線性を図 11 に示す。この中で特に直線性の良い 100  $\mu\text{Sv/h}$  までの区間をフィッティングし、シンチレータから信号処理系まで全て含めた実効的な計数率を  $5.14 \pm 0.04 \times 10^4 \text{ cpm}\mu\text{Sv/h}$  を得た。また、検出器の線量率指示値は 300  $\mu\text{Sv/h}$  まで JIS Z4333 の許容範囲 (+15%, -22%) に入っているが、その中でも直線性が良いのは 200  $\mu\text{Sv/h}$  までと見られる。そこで、C12137-01 (高計数率タイプ) の測定上限を 200  $\mu\text{Sv/h}$  と設定した。この時の不感時間補正後の計数率は  $1.03 \times 10^7 \text{ cpm} = 1.72 \times 10^5 \text{ cps}$  となる。つまり、シンチレータ側で  $1.72 \times 10^5 \text{ cps}$  の計数率が得られた時が、C12137 シリーズの受光素子以降を利用したときの測定の上限ということになる。

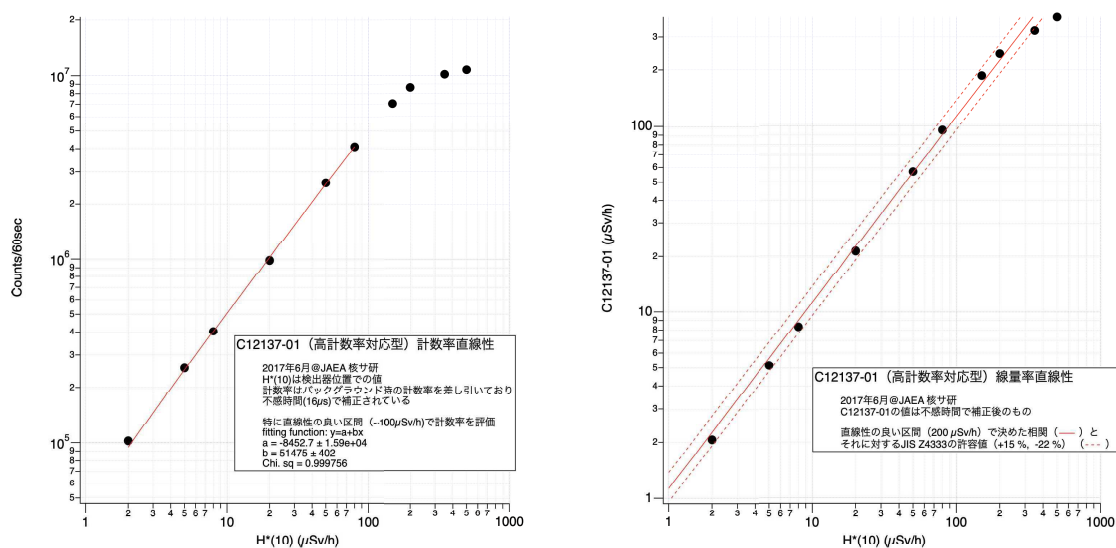


図 11 C12137-01 の線量率直線性評価の結果。(左) 不感時間 (16  $\mu\text{sec}$ ) で補正した後の計数率の直線性。(右) G(E) 関数法により  $H^*(10)$  に換算した際の直線性と JIS Z4333 の許容範囲の関係。線量率の上昇により 1 カウントあたりの線量付与が大きい高エネルギー側の係数が上昇するため、計数率の直線性と必ずしも一致しない。

### 5.3.4 測定上限の見積

ここまでのシミュレーション等の結果より、48 mm 角の八角柱型 CsI 検出器の測定上限の評価を行う。PHITS のシミュレーションから八角柱 CsI と C12137-01 の線量率あたりの計数率の比が決定できる。この比率を実測で決めた C12137-01 の線量率直線性が維持できる最大の線量率での計数率に当てはめることで、シンチレータを八角柱 CsI に置き換えた時の測定可能な線量率の上限を見積もる事ができる。これをまとめた

ものが表 9 であり、八角柱 CsI ではおよそ  $85\mu\text{Sv/h}$  ( $= 71\mu\text{Gy/h}$ ) まで計測可能と見積もられた。これは従来の 2 inch NaI 検出器の上限として設定されている  $10\mu\text{Gy/h}$  を十分上回っており、統計精度を維持したまま測定範囲を大幅に広げることが可能になると見込まれる。

表 9 線量率の測定範囲の上限の見積。\*は NaI で C12137 と同じ MPPC および後段処理ができると仮定した参考値。

	NaI 2 inch	CsI 48 mm	C12137-01
PHITS からの $10\text{ nGy/h}$ での計数率 (cps)	14.46	14.57	6.209
① C12137-01 に対する比率	2.329	2.347	1
② JAEA 校正施設での実測の計数率 (cpm/ $\mu\text{Sv/h}$ ) (cps/ $\mu\text{Gy/h}$ )			$(5.14 \pm 0.04) \times 10^4$ $(1.03 \pm 0.01) \times 10^3$
③ 推定される計数率 (②を①の比率で換算) (cps/ $\mu\text{Sv/h}$ ) (cps/ $\mu\text{Gy/h}$ )	$2.00 \times 10^3$ $2.39 \times 10^3$	$2.01 \times 10^3$ $2.41 \times 10^3$	
④直線性を維持できた最大の計数率 ( $200\mu\text{Sv/h} = 167\mu\text{Gy/h}$ の時, cps)			$(1.19 \pm 0.01) \times 10^5$
線量率の上限 (④/③) ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ( $\mu\text{Gy/h}$ )	85.9* 71.7*	85.4 71.2	.

### 5.3.5 試作した八角柱検出器の概要

ここまでの検討をもとに八角柱型検出器の試作を行った (図 12)。シンチレータは 48 mm 幅で、3 mm 厚のアルミケースに収められている。JIS Z4325 で定める方向依存性への影響を防ぐため、MPPC のバイアス電源や波形整形回路、ADC などの回路系は八角柱の底面下の基板に集約されている。基板と MPPC を結ぶフラットケーブルの曲げの最小半径の問題から、MPPC は結晶側面に設置されている。

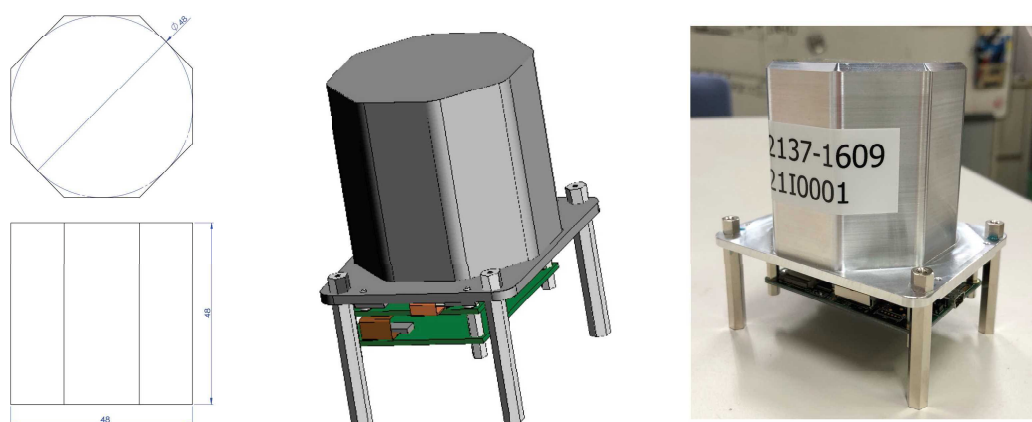


図 12 試作した八角柱型検出器のシンチレータ形状 (左) と検出器の 3D CAD (中央) および実際の試作品。

線量率算出には G(E) 関数法 [14] を用いた。使用する G(E) 関数は検出器の設計データに基づき側面からの平行線入射の条件で PHITS でシミュレーションを行なって決定した。使用した G(E) 関数を図 13 に示す。

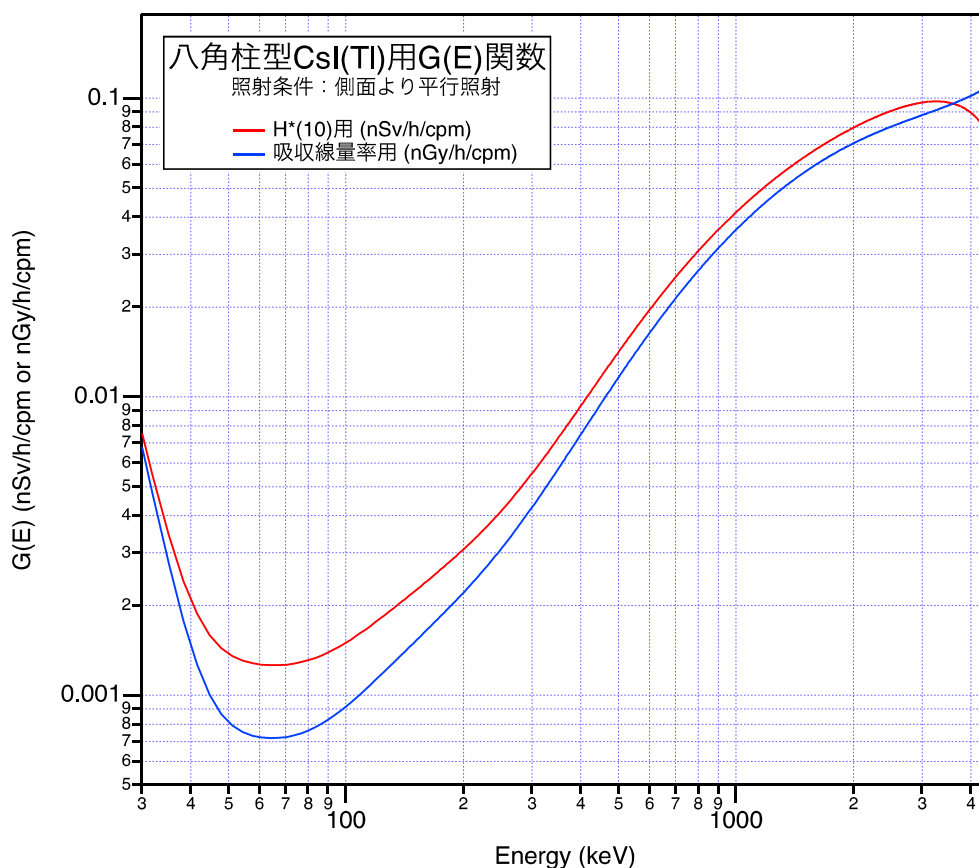


図 13 八角柱型検出器の H\*(10) 用 G(E) 関数。PHITS により側面から平行線を照射する条件でシミュレーションを実施した。

### 5.3.6 エネルギー校正とエネルギー帯域およびエネルギー分解能

G(E) 関数の適用にあたり検出器のエネルギー校正を行った。密封線源 ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) に加え、 $^{238}\text{U}$  系列や  $^{232}\text{Th}$  系列の  $^{208}\text{Tl}$  の 2615 keV やそのほかの各種ピークを利用するため市販されているマンデル鉱石を使用した。エネルギー校正に使用した標準線源のスペクトルを図 14 に、鉱石のスペクトルを図 15 に示す。エネルギー校正の結果、エネルギー帯域は 4 MeV 以上まで到達しており、環境放射線モニタリング用検出器のエネルギー帯域として一般的な 3 MeV 以上を十分確保している。標準線源のスペクトルの  $^{137}\text{Cs}$  ピークで評価した 662 keV でのエネルギー分解能は約 6.6% となっており、市販されている C12137 シリーズと同等のエネルギー分解能を達成している。

### 5.3.7 八角柱型検出器の計数直線性試験

製作した八角柱型検出器について、JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設のコリメート型  $^{137}\text{Cs}$  線源で計数率直線性の試験を行った。試験の際の検出器の設置状況を図 16 に、測定結果を図 17 に示

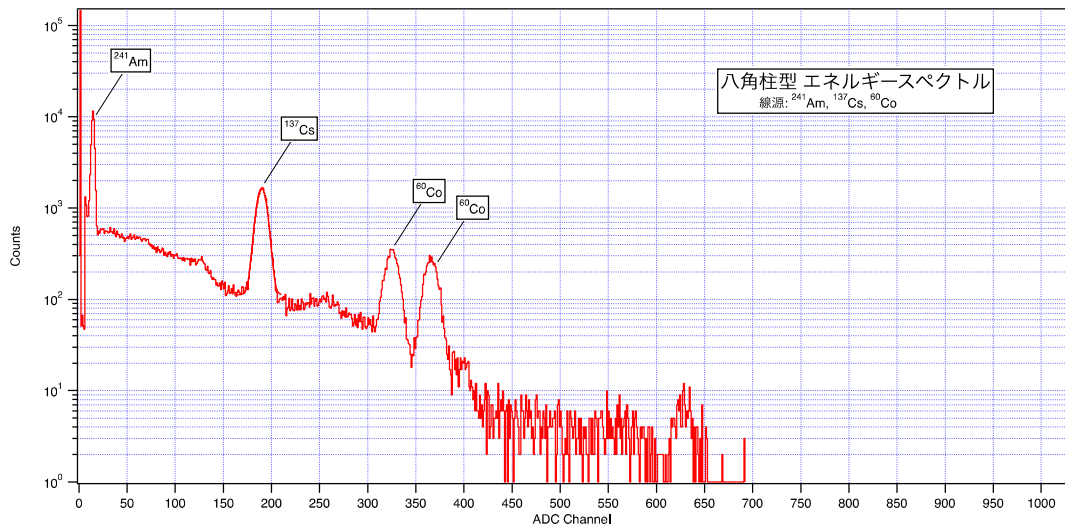


図 14 八角柱型検出器による  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  のスペクトル。 $^{137}\text{Cs}$  の 662 keV ピークを評価した結果、662 keV でのエネルギー分解能は約 6.6% となった。

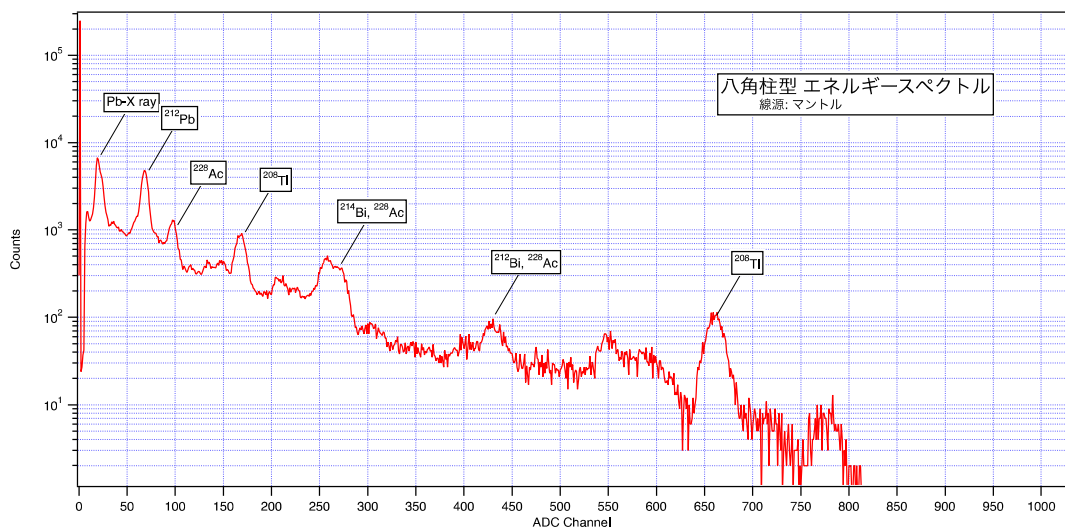


図 15 八角柱型検出器によるマントル鉍石のスペクトル。 $^{208}\text{Tl}$  の 2615 keV ピークが明瞭に捉えられており、環境放射線測定に十分なエネルギー帯域を持っていることがわかる。

す。不感時間補正を行うと  $100 \mu\text{Sv/h}$  まで直線性が確保できることが確認され、当初の見積りの  $85 \mu\text{Sv/h}$  以上が確保された。

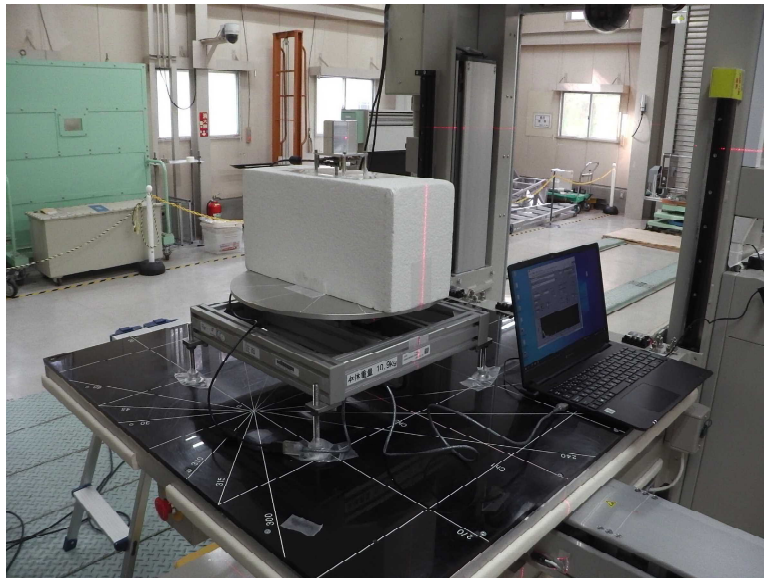


図 16 八角柱型検出器直線性試験の設置の様子。線源は画面向かって左側にある。検出器は回転台の上に設置され、直線性試験の配置そのまま水平方向の方向依存性の測定に移れるように準備してある。

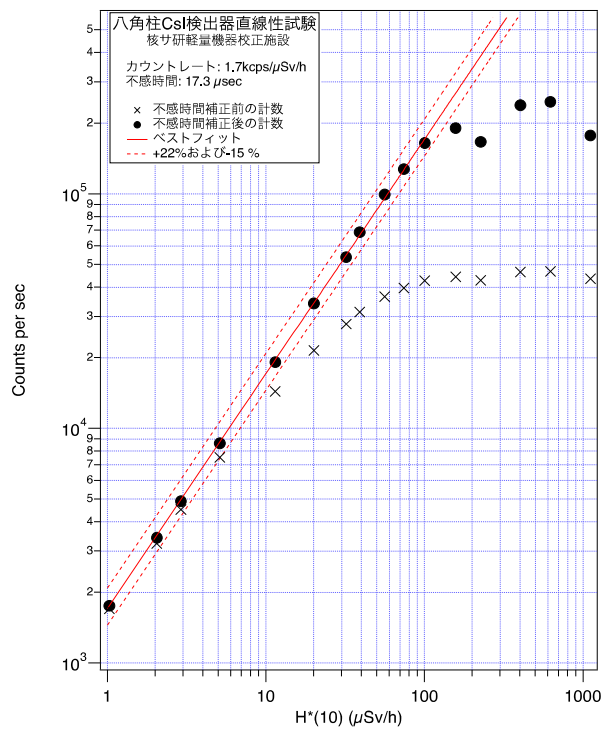


図 17 八角柱型検出器計数率直線性試験の結果。不感時間補正をしないと  $10\mu\text{Sv/h}$  程度から計数率が頭打ちになるが、不感時間補正を行うことで約  $100\mu\text{Sv/h}$  まで原点を通る直線でよく表せる。

### 5.3.8 八角柱型検出器の方向特性試験

JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設において、 $^{137}\text{Cs}$  線源の 662 keV による検出器の水平方法および鉛直方向の方向特性試験を行った。検出器位置での周辺線量当量率は約  $5 \mu\text{Sv/h}$  であった。水平方向の試験では、検出器を図 16 の直線性試験の設置条件のまま回転台を回転させることで実施した。また鉛直方向の方向依存性の測定は図 18 のように検出器の鉛直方向の軸を地面に並行に置いて回転台を回転させて行った。

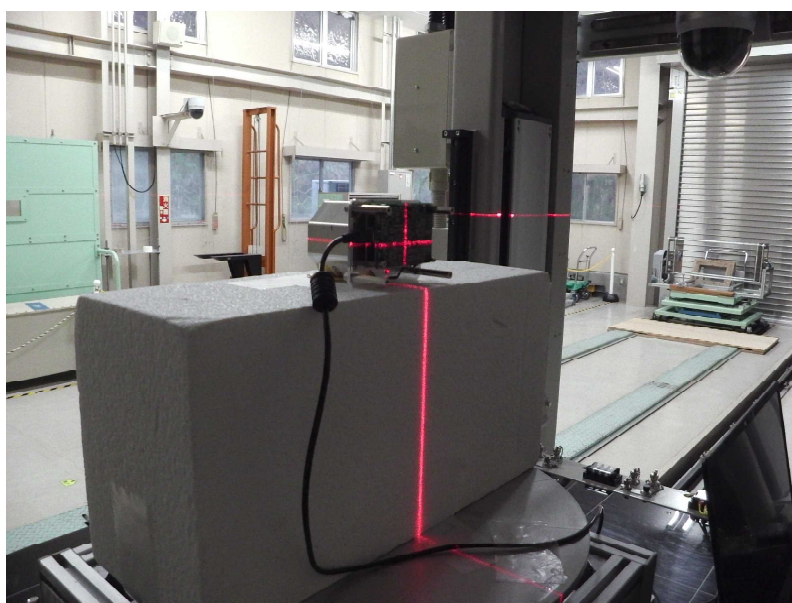


図 18 八角柱型検出器鉛直方向依存性測定時の設置の様子。検出器は倒して回転台の上の発泡スチロールの台の上に設置され、回転台を回転させることで鉛直方向の方向依存性の測定とした。

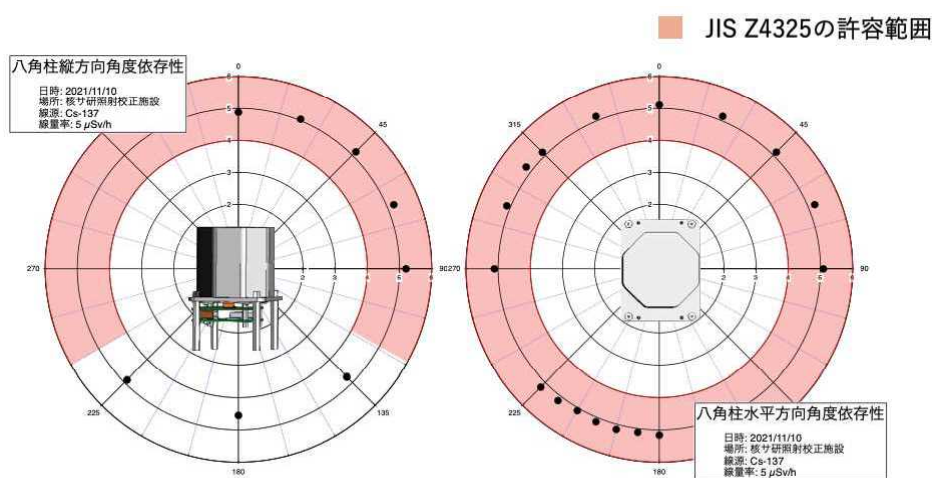


図 19 八角柱型検出器鉛直方向依存性測定の結果。左が鉛直方向、右が水平方向。



得られた結果を図 19 に示す。JIS Z4325 の許容範囲内に十分収まる良好な方向依存性が得られた。また JIS が光電子増倍管や各種機器の設置を想定して方向依存性の規定から外している鉛直下方向についても、他の方向で規定されている許容範囲に収まっていることがわかる。これにより方向依存性については従来の 2 inch NaI(Tl) 検出器を上回る性能を達成したといえる。

### 5.3.9 八角柱型検出器のエネルギー特性試験

JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設の密封線源（表 10）を用い、各エネルギーごとの実際の線量率と 5.3.5 の G(E) 関数を用いて決定された線量率の比率を評価した。なおこの際、散乱線およびバックグラウンドの影響を差し引くため、(1) の線源と検出器だけの状態と (2) 線源と検出器の間に鉛遮蔽体を置いた状態のそれぞれのスペクトルを 1 分ずつ測定し、差し引いた上で評価している。得られたエネルギー特性を図 22 に示す。 $^{60}\text{Co}$  や  $^{137}\text{Cs}$  では良い一致を示している一方、低エネルギー側では線源によって規定される量よりも低くなる傾向にある。特に  $^{241}\text{Am}$  は低い値となっている。しかし、エネルギー依存性の相対的幅は JIS Z4325 の 0.7 ~ 1.3 の幅より十分小さくなっているため、平均値を 1 とするような校正定数をとることで、現状でも JIS Z4325 をクリアできる。また、唯一外れている  $^{241}\text{Am}$  は受け渡し当事者間の協定によって規定となっているため、これらを踏まえれば直ちに JIS 規格に抵触しているというわけではない。さらに、この不一致については検出器のエネルギー分解能のエネルギー依存性を考慮することで改善されることが分かってきており、引き続き改善作業を進めている。

表 10 エネルギー特性試験で使用した線源とそのスペック。H\*(10) は寿命による減衰と設置距離を含めて計算した試験当日に八角柱検出器位置での値。

線源	公称放射能 (MBq)	H*(10) ( $\mu\text{Sv/h}$ )
$^{241}\text{Am}$	3.7	$1.77 \times 10^{-2}$
$^{133}\text{Ba}$	3.7	$2.31 \times 10^{-2}$
$^{137}\text{Cs}$	10	$7.93 \times 10^{-1}$
$^{60}\text{Co}$	10	$1.23 \times 10^0$

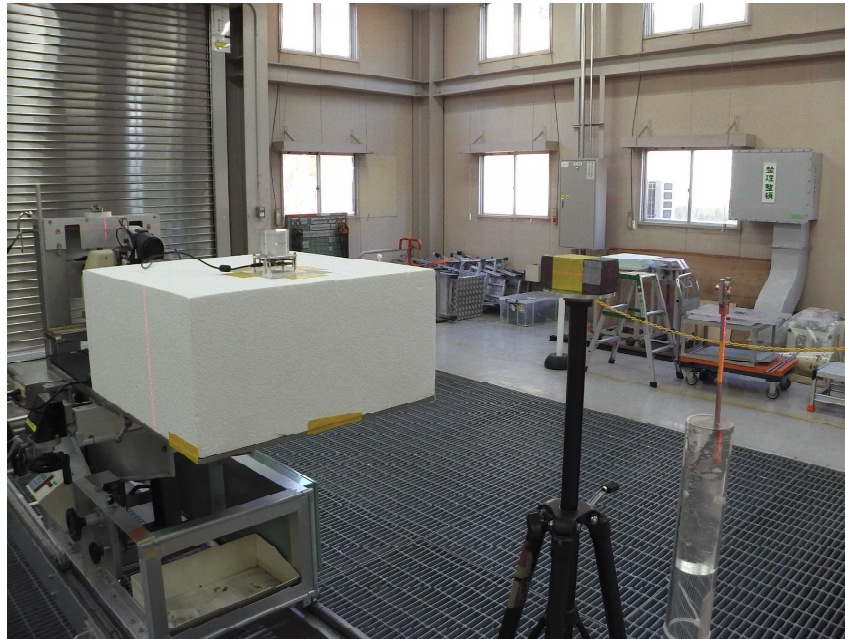


図 20 エネルギー特性試験の様子。線源と検出器の間に鉛遮蔽体を置いた状態でも測定し、直接線以外の影響を差し引いた。

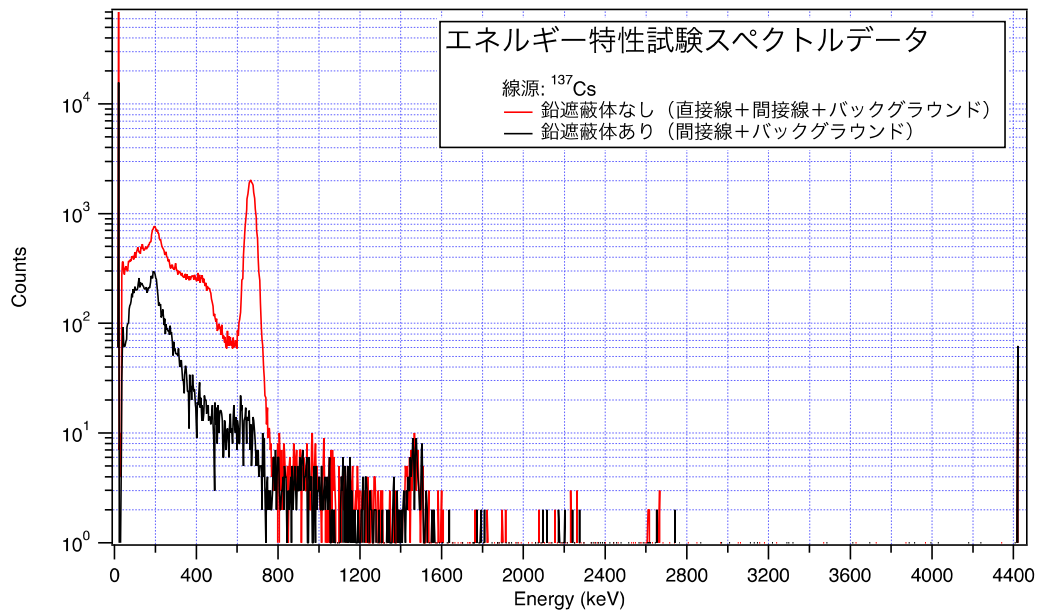


図 21 試験で実際に測定したスペクトルデータ。測定時間は 60 秒。鉛遮蔽体をいれることで全吸収ピークがほぼ消失していることがわかる。

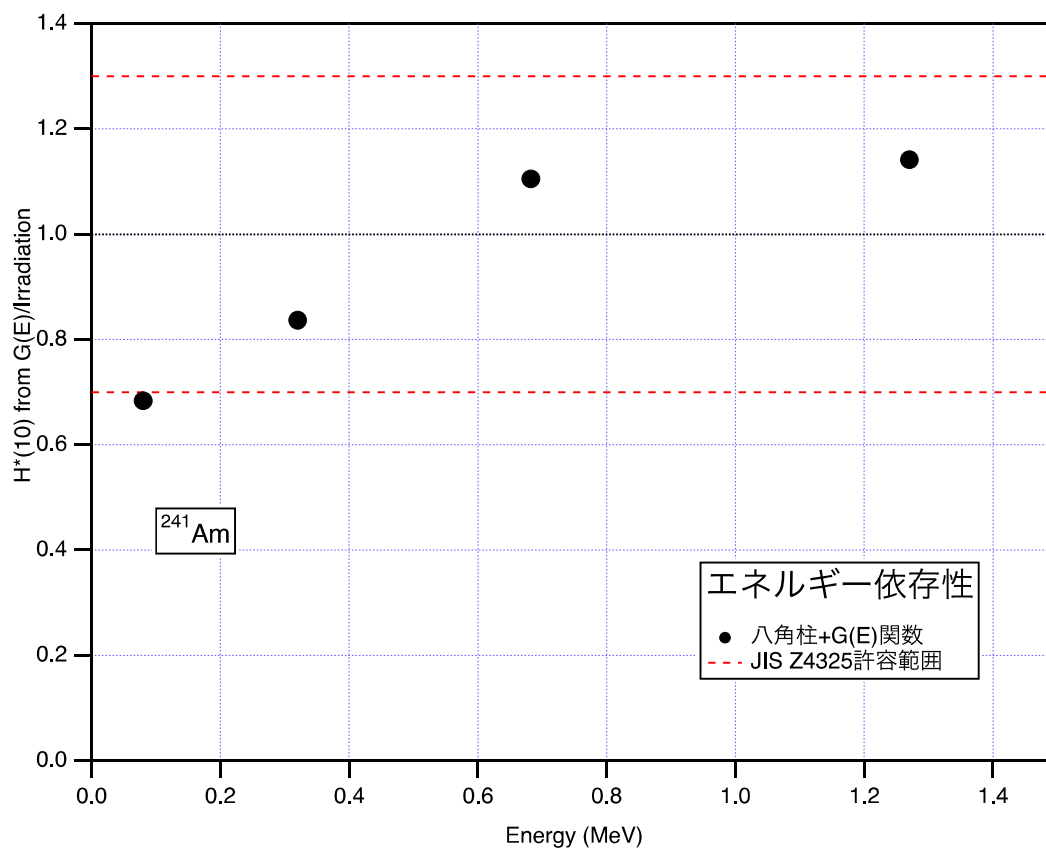


図 22 得られたエネルギー特性。JIS Z4325 で規定された範囲に収まっている。なお、 $^{241}\text{Am}$  が規定範囲から外れているが、JIS Z4325 では 80 keV 未満は受け渡し当事者間の協定となっている。

## 5.4 高線量率対応 CsI(Tl) 検出器の設計

### 5.4.1 設計方針

高線量率対応の CsI(Tl) 検出器では  $1\mu\text{Sv/h}$  から  $10\text{ mSv/h}$  以上を設定している。従来の C12137-00 型で実現していた最大値  $2\text{ mSv/h}$  を超えるには、C12137-00 の結晶のサイズである  $13 \times 13 \times 20\text{ mm}$  よりも小さいものが必要になる。この程度の大きさになると  $\gamma$  線のシンチレータ中の平均自由行程（例えば  $^{137}\text{Cs}$  の  $662\text{ keV}$  では  $2.6\text{ cm}$ ）と同程度あるいは小さくなって結晶内での蛍光発生箇所は均一に近づくため、八角柱型で検討したような方向依存性の問題が発生しづらくなる。

また、蛍光の発生箇所が均一になると計数率がシンチレータの体積によりよく比例するようになるはずである。この考えに基づけば、例えば  $5\text{ mSv/h}$  程度まで測定を行いたい場合、従来品の C12137-00 のシンチレータ ( $13 \times 13 \times 20\text{ mm} = 3.4\text{ cm}^3$ ) を  $1\text{ cm}^3$  程度の大きさに変えれば良いはずである。一方、今回の研究に先立ち別の目的で浜松ホトニクスを試作品を入手しており（図 23, 表 11）、これらの検出器のシンチレータの大きさは上記の考えに基づけば今回想定している  $10\text{ mSv/h}$  以上の測定範囲に適しているとみられる。

そこで開発の方針を少し変え、まず検出器の計数直線性を校正場を使って実測して立方体結晶の大きさを決め、その大きさの立方体で異方性がないことを確認することとした。

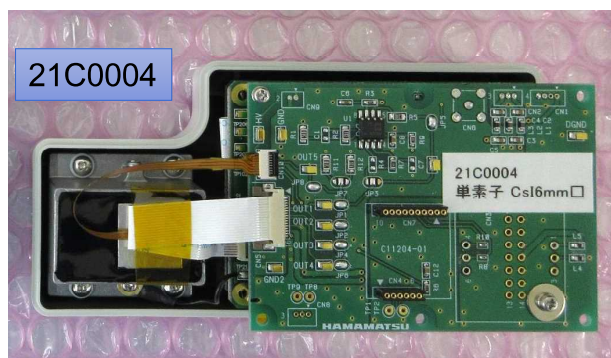


図 23 試作検出器の外形。C12137-00 のケースを使用し、既製品で使用しているものと同じ Al 製の金属容器にシンチレータおよび MPPC が樹脂で封入されている。単素子 MPPC 用信号処理回路が試作品のため、ケースを片側半分取り去って基板を乗せた形になっている。

### 5.4.2 計数率の直線性の確認

5.4.1 に示した検出器について、マシンタイム確保の都合から JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設および放射線標準施設の二か所で計数率の直線性試験を行った。

核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設では、表 11 の 21C0001~4 の 4 つの CsI(Tl) 検出器について評価を行った。同施設のコリメート型  $555\text{ MBq}$ ,  $11.1\text{ GBq}$ ,  $111\text{ GBq}$   $^{137}\text{Cs}$  照射線源により  $\text{BG} \sim 100\text{ mSv/h}$  程度の範囲の照射を行い、その時の計数率の線量率依存性をとった。照射方向は検出器の前面からで、線源の強度と距離で検出器位置の線量率を決定している。データは KURAMA-II の高計数率対応計測ルーチンを実装した LabVIEW ベースのアプリケーションで行い、常時計測状態でスペクトルデータを記録しつづけた状態にして、各線量率ごとに 1 分間の照射を行った。測定中はリアルタイムの計数率表示を見ながらおおよその直線性の評価を行い、計数率が飽和したとみられる線量率の少し上まで測定した。解析時は記録されたスペク

表 11 浜松ホトニクスから提供のあった試作品。MPPC 種別のアレー型は現行製品のもので、単素子型は今後採用が計画されているもの。なお、MPPC の違いに起因する性能差は確認されていない。

試作品番号	シンチレータ	一辺の長さ (mm)	MPPC の種類	照射箇所
21C0001	CsI(Tl)	13	アレー型	核燃料サイクル工学研究所
21C0002	CsI(Tl)	10	アレー型	
21C0003	CsI(Tl)	10	単素子	
21C0004	CsI(Tl)	6	単素子	
21E0001	CsI(Tl)	3	単素子	放射線標準施設
21E0002	GAGG	6	単素子	
21E0003	GAGG	3	単素子	

トルデータから各線量率の照射時間の積算スペクトルを生成し、検出器の Lower Level Discrimination Level (おおむね 30 keV) より高エネルギー側を積分して計数率とした。試験中の様子を図 24 に、得られたそれぞれの計数率直線性試験の結果を図 25 に示す。MPPC の違いにもかかわらずいずれの場合も不感時間補正前は  $2 \times 10^4$  cps 程度、補正後で概ね  $5 \times 10^5$  cps 程度で計数率が飽和しており、計数率の飽和から見積もった検出器の実効的な不感時間はいずれも  $8.5 \mu\text{sec}$  程度であった。このことから、検出器の実効的な不感時間はシンチレータの蛍光の寿命と共通の信号処理系の時定数や速度によって決まっており、結晶の大きさや線量率、MPPC の違いには依存しないことがわかる。



図 24 核燃料サイクル工学研究所での照射の様子。検出器は中央発泡スチロールの上に設置されており、計測制御用の PC は検出器後方に置かれている。

また JAEA 放射線標準施設では、表 11 の 21E0001 3 mm 角 CsI(Tl) 検出器と、21E0002~3 の GAGG 検

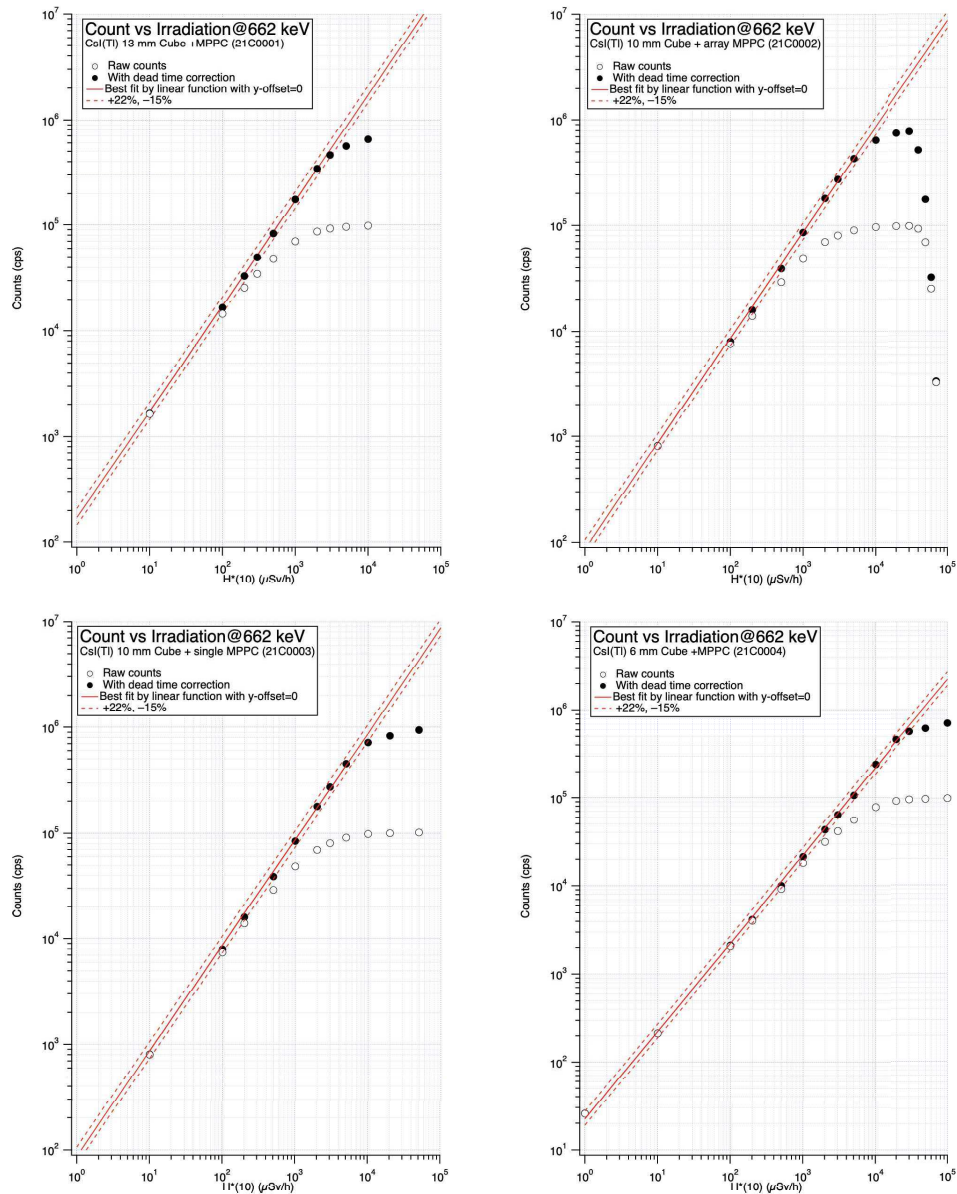


図 25 核燃料サイクル工学研究所で照射した 21C0001~4 の計数率直線性。結晶の大きさや検出器位置の線量率に関わらず、不感時間補正前は  $2 \times 10^4$  cps 程度、補正後で概ね  $5 \times 10^5$  cps 程度で計数率が頭打ちになっている。

出器について、同施設のコリメート型  $^{137}\text{Cs}$  照射線源で実現可能な最大 40 mSv/h までの計数率評価を行った (図 26)。線量率の範囲を除いて測定の方法は核燃料サイクル工学研究所と同じである。6 mm 角 GAGG は不感時間補正前は  $6 \times 10^4$  cps 程度で頭打ちとなっているように見えるが、不感時間の補正により今回の試験範囲の上限 40 mSv/h まで良い直線性が得られた。一方 3 mm 角の結晶の検出器ではごくわずかに計数率の飽和が見える程度であった。

以上の計数率直線性試験の結果をまとめると表 12 の通りになる。

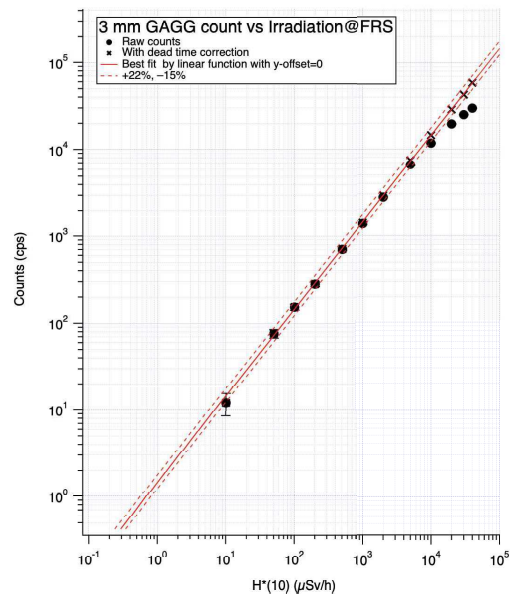
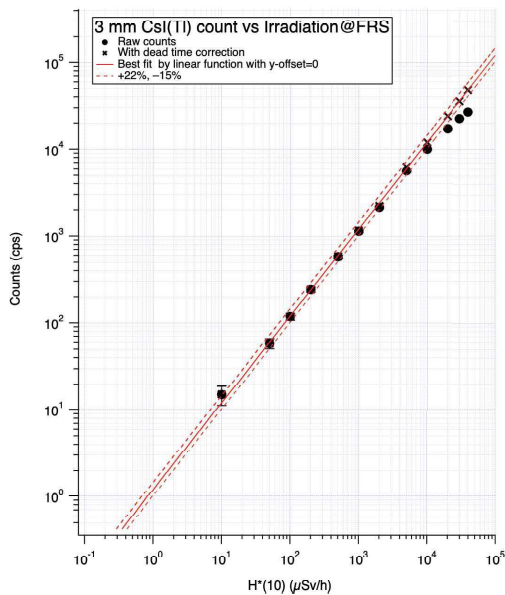
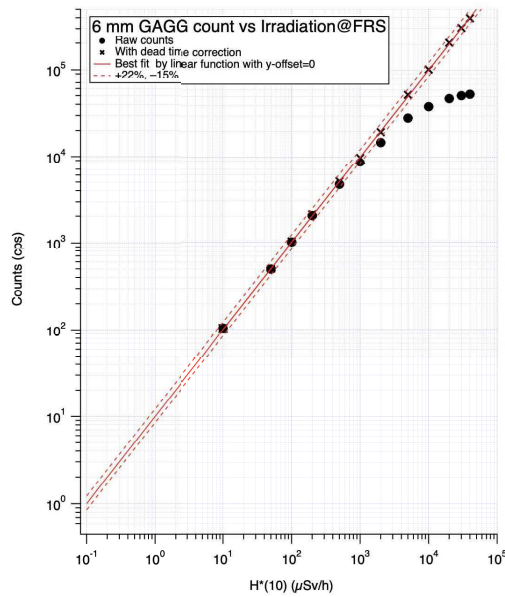


図 26 放射線標準施設で照射した 21E0002 の 6 mm 角 GAGG 検出器計数率直線性（上）と 3 mm 角の CsI(Tl) (21E0001) (下左) と GAGG (21E0002) の計数率直線性（下右）。

### 5.4.3 シンチレータの大きさについての検討

ここまでの直線性試験で明らかになった通り、当初の目標である 10 mSv/h 以上を満たすのは 6 mm 角あるいはそれより小さいシンチレータの時である。そこで、低線量率側での計数について検討する。25 及び 26 から、結晶の大きさに対する計数率は 6 mm 角 CsI(Tl) が 1 番大きく、次いで 6 mm 角の GAGG、3 mm 角

表 12 計数率直線性のまとめ。上限値は不感時間補正後に JIS Z4325 の許容範囲を超える直前の測定値。FRS 照射分では照射可能な範囲内で上限を決めることができなかったため、上限値は示していない。

検出器	シンチレータの材質	シンチレータの大きさ (mm 角)	許容範囲内となる上限値 (mSv/h)	計数率 (cps/ $\mu$ Sv/h)
21C0001	CsI(Tl)	13	3	172.12 $\pm$ 0.12
21C0002	CsI(Tl)	10	5	86.47 $\pm$ 0.15
21C0003	CsI(Tl)	10	5	87.10 $\pm$ 0.15
21C0004	CsI(Tl)	6	20	23.34 $\pm$ 0.04
21E0001	CsI(Tl)	3	N.A.	1.202 $\pm$ 0.01
21E0002	GAGG	6	N.A.	10.04 $\pm$ 0.06
21E0003	GAGG	3	N.A.	1.453 $\pm$ 0.006

の GAGG、3 mm 角の CsI(Tl) となっている。また 3 mm 角では CsI(Tl) と GAGG の計数率に大きな差がないことから、6 mm 角と 3 mm 角の CsI(Tl) で評価する。表 5.4.3 にそれぞれのシンチレータにおける計数率をまとめたものである。それぞれの計数率から 2 inch NaI の検出下限とされている 10 nGy/h の計数率と同等の計数の得られる線量率を見積もったところ、6 mm 角であれば 5.2 で設定した当初目標の 1  $\mu$ Sv/h を満たせることがわかる。また、2 inch NaI で 0.05  $\mu$ Sv/h 程度の環境放射線を測定した場合と同等の統計量を得る場合を考えると、6 mm 角の CsI(Tl) の計数率であれば 1 ~ 2 時間の積算時間で達成可能と見込まれる。あくまで今回の設計方針では想定外ではあるものの、環境放射線レベルのモニタリングでの補助的なデータ取得にも使える可能性がある。

以上から高線量率用の検出器用のシンチレータとして 6 mm 角 CsI(Tl) を選定する。

表 13 シンチレータの大きさと測定能力の検討。2 inch NaI の値は 5.3.2 での PHITS によるシミュレーションの結果を使用。全てが 662 keV 単色線における値のため、1 Sv = 1.2 Gy の関係が成立する。

シンチレータ	計数率 (cps/ $\mu$ Sv/h)	① 2 inch NaI の計数 @10 nGy/h 2 分間	2 分間の測定で ①と同じ計数を 得られる線量率 ( $\mu$ Sv/h)	0.05 $\mu$ Sv/h 程度で NaI 2 分間と同程度の 統計量を得るのに 必要な時間 (時間)
2 inch NaI	1205	1735	-	-
6 mm 角 CsI(Tl)	23.34 $\pm$ 0.04	-	0.62	1.4
6 mm 角 GAGG	10.04 $\pm$ 0.06	-	1.44	3.4
3 mm 角 CsI(Tl)	1.202 $\pm$ 0.01	-	12.0	28

#### 5.4.4 立方体のシンチレータとしての形状の妥当性の確認

高線量率用のシンチレータとして 6 mm 角 CsI(Tl) を選ぶこととしたので、結晶が立方体であることによる異方性について PHITS により検証した。基本的な照射方法は 5.3.2 と同じで、線源は xy 面側に置き、結晶を回転させながら平行線の  $\gamma$  線を照射することで計数率の変化を見た。設定した結晶方位を図 27 に示す。



なお、照射する  $\gamma$  線のエネルギーは 662 keV ( $^{137}\text{Cs}$  相当) と 122 keV ( $^{57}\text{Co}$  相当) とした。

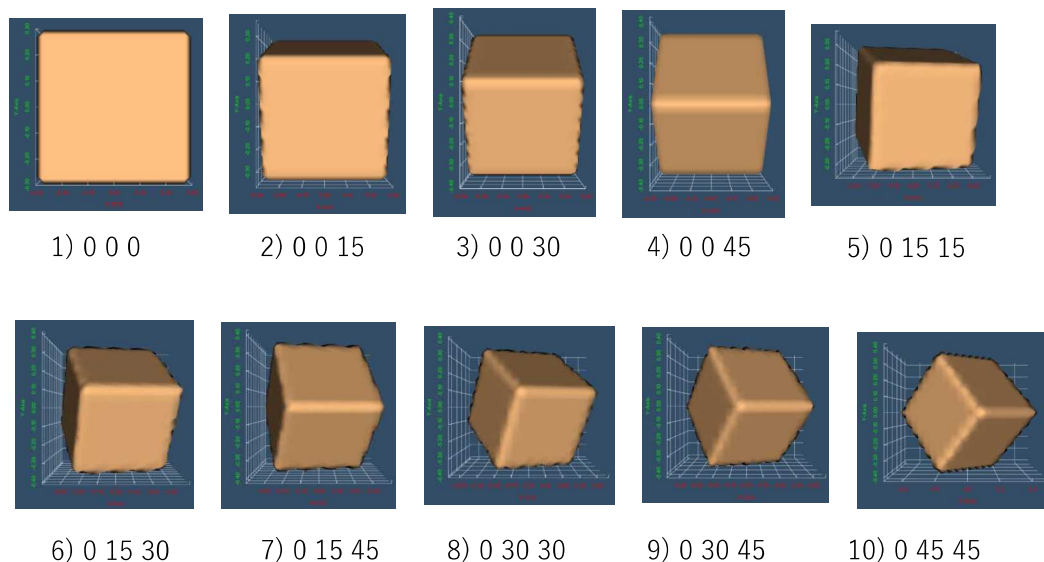


図 27 PHITS で立方体の異方性を調べた時の結晶の配位を xy 面から見た図。それぞれの図の下に結晶の向き（たとえば 0, 15, 45 は x 軸周りに 0 度、y 軸周りに 15 度、z 軸周りに 45 回転の意味）を示している。配位は立方体の対称性を考慮して選んである。

得られた異方性について、最も異方性が大きくなる回転（結晶の  $\langle 111 \rangle$  軸を回転軸とする場合）と最も異方性が小さい回転（立方体の面の法線 ( $\langle 100 \rangle$  軸) を軸とする回転) に並び替えたものを図 28 に示す。結晶内の平均自由行程と結晶の大きさからも予想されていたが、得られた結果は 5.2 にある JIS Z4325 の定める異方性を十分クリアしていることがわかる。

今回、新型コロナウイルスの影響から実際に 6 mm 角の検出器での方向依存性試験を行うことができなかった。しかし、令和 2 年度までの安全規制研究で製作した可搬型モニタリングポストの実測では  $13 \times 13 \times 20$  mm の直方体シンチレータで良好な方向依存性が確認できており [15] (図 29)、間接的にはあるが今回のシミュレーションの結果を支持している。

#### 5.4.5 6 mm 角 CsI(Tl) 用 G(E) 関数

八角柱型検出器同様に線量率算出には G(E) 関数法 [14] を用いた。使用する G(E) 関数は検出器の設計データに基づき側面からの平行線入射の条件で PHITS でシミュレーションを行なって決定した。使用した G(E) 関数を図 30 に示す。

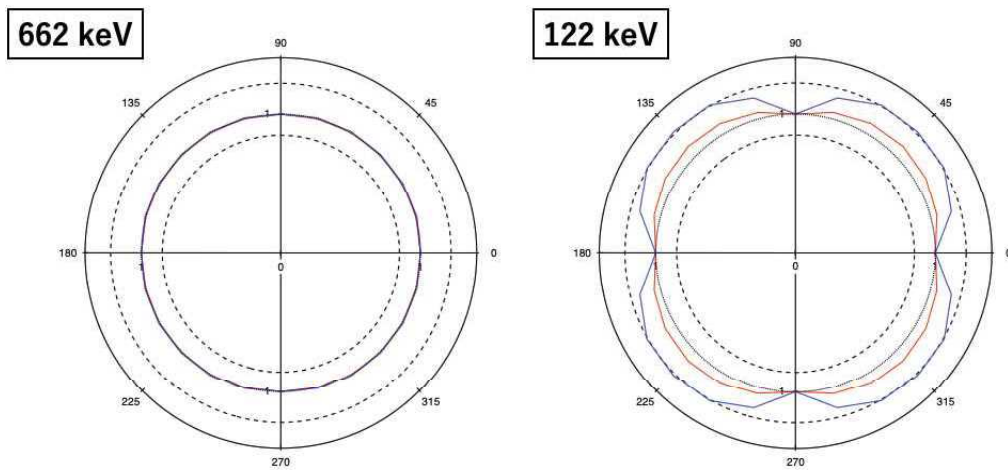


図 28 PHITS のシミュレーションで得られた異方性。赤線が  $\langle 100 \rangle$  軸での回転、青線が  $\langle 111 \rangle$  軸での回転。点線が JIS Z4325 の定める方向依存性の許容値。 $^{137}\text{Cs}$  相当の 662 keV ではほとんど方向依存性が見られない。方向依存性が大きくなる  $^{57}\text{Co}$  相当の 122 keV 照射時の  $\langle 111 \rangle$  軸での回転でも、JIS Z4325 の許容範囲内に十分収まることがわかる。

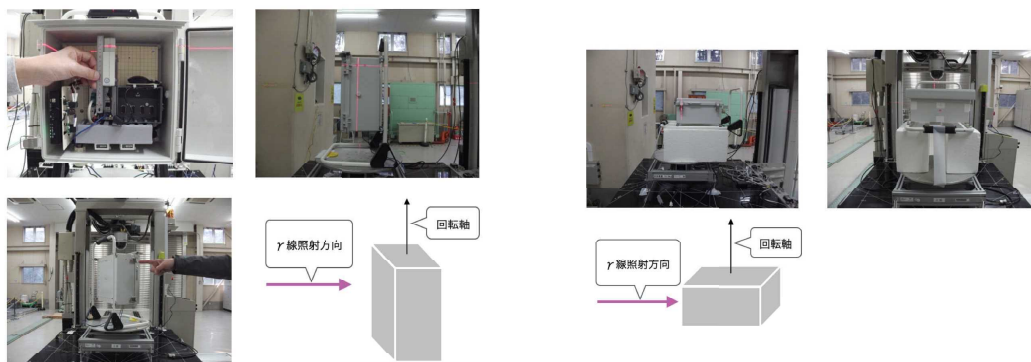
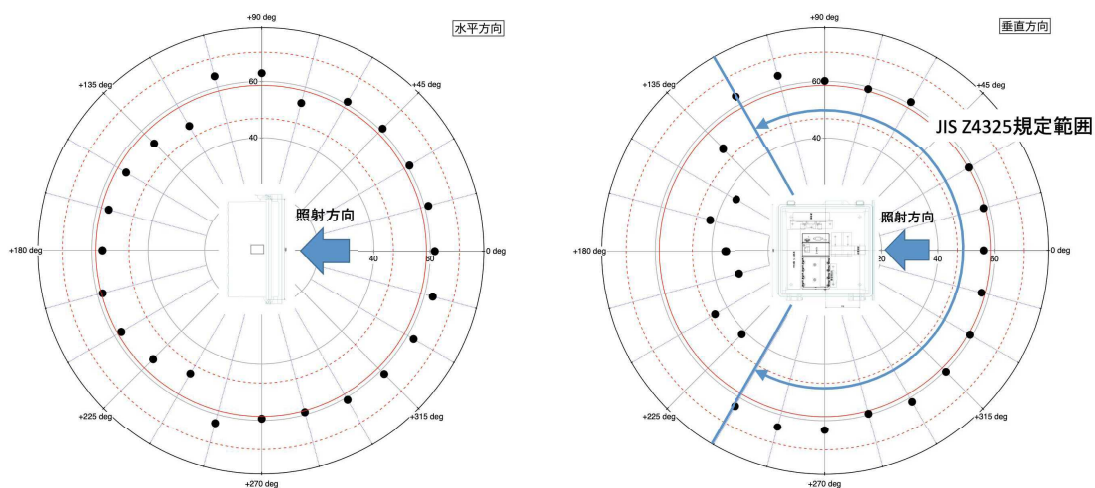


図 29 令和 2 年度までの安全規制研究で実施した可搬型モニタリングポストの方向依存性測定 ([15] より再掲)。測定は JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設で  $^{137}\text{Cs}$  線源で行った。モニタリングポストの内蔵する浜松ホトニクス C12137-00 (高計数率対応) の内蔵する CsI(Tl) シンチレータは  $13 \times 13 \times 20 \text{ mm}$  の直方体であるが JIS Z4325 を満たす良好な方向依存性を示している。

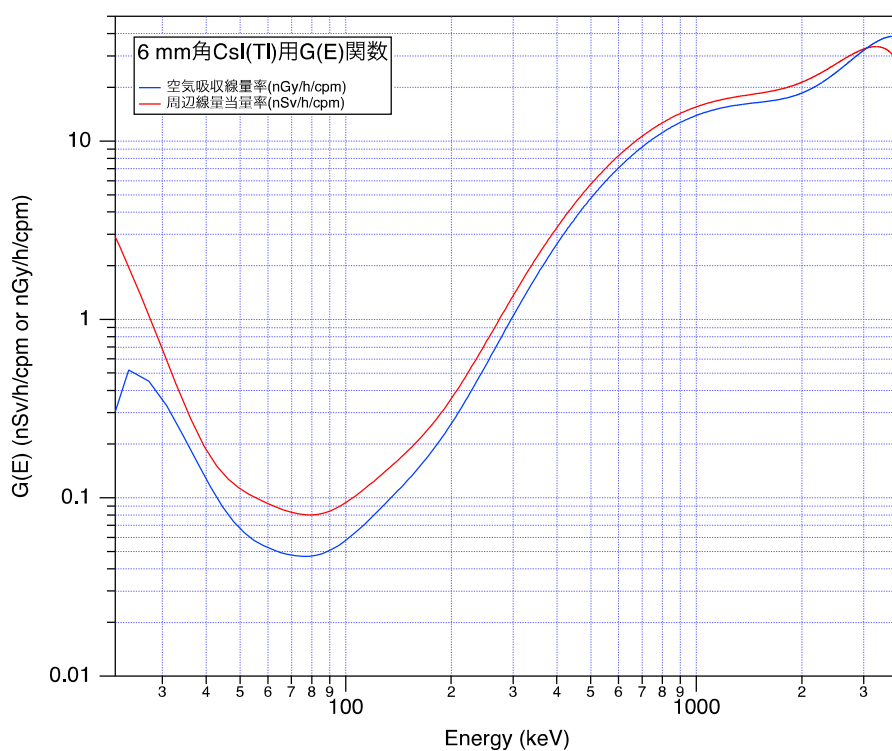


図 30 6 mm 角検出器の H\*(10) 用 G(E) 関数。PHITS により側面から平行線を照射する条件でシミュレーションを実施した。