

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 γ 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° 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 γ 線のエネルギー情報が得られる利点を得られ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	γ (X) 線	
測定範囲	BG \sim 100 mGy/h	
表示範囲	0.000 \sim 999.9 μ 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}Cs)	
エネルギー特性	許容範囲 (^{137}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 μ Gy/h	9 μ Gy/h～100mGy/h
エネルギー測定範囲	50 keV ～ 3 MeV	50 keV ～ ∞
時定数	100秒または10秒	
積算平均値	10分、2分または1分	
γ 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	γ 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 ϕ × 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 μ 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 ～ ∞
γ 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】

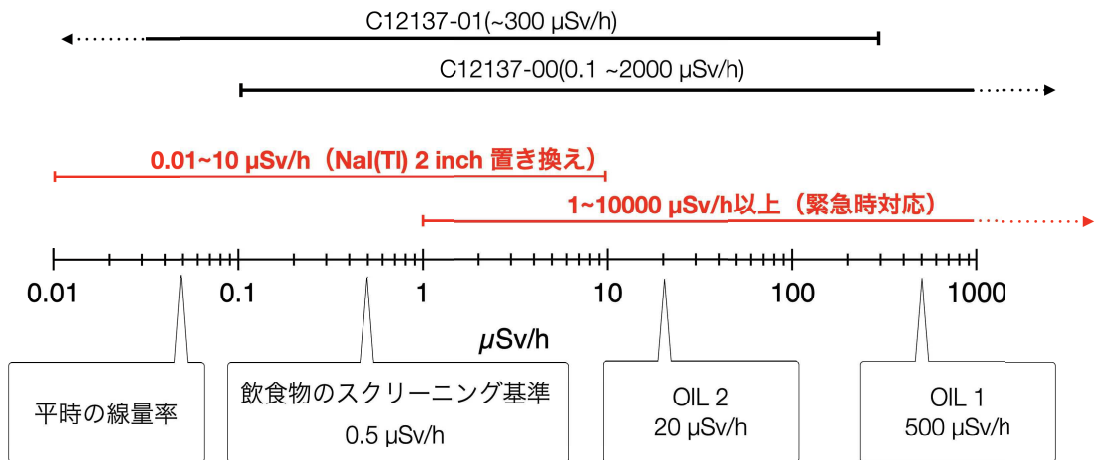


図7 今回の開発で目標とする検出器の測定可能範囲。平常時の環境放射線レベルで十分な能力を持つ NaI(Tl) 2 inch と置き換え可能なものと、緊急時の高線量率への対応を想定したものの2つのタイプを開発する。C12137-00, -01 の測定範囲は京大・浜ホトで開発したアルゴリズムを搭載した場合の数値。

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)。

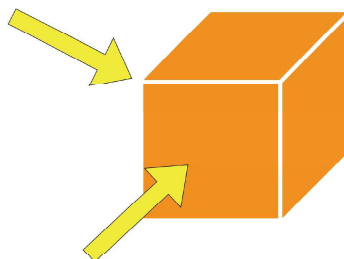


図8 立方体シンチレータの場合、面方向からの入射と角方向からの入射では最大 $\sqrt{3}$ 倍結晶厚が異なることになる。

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。

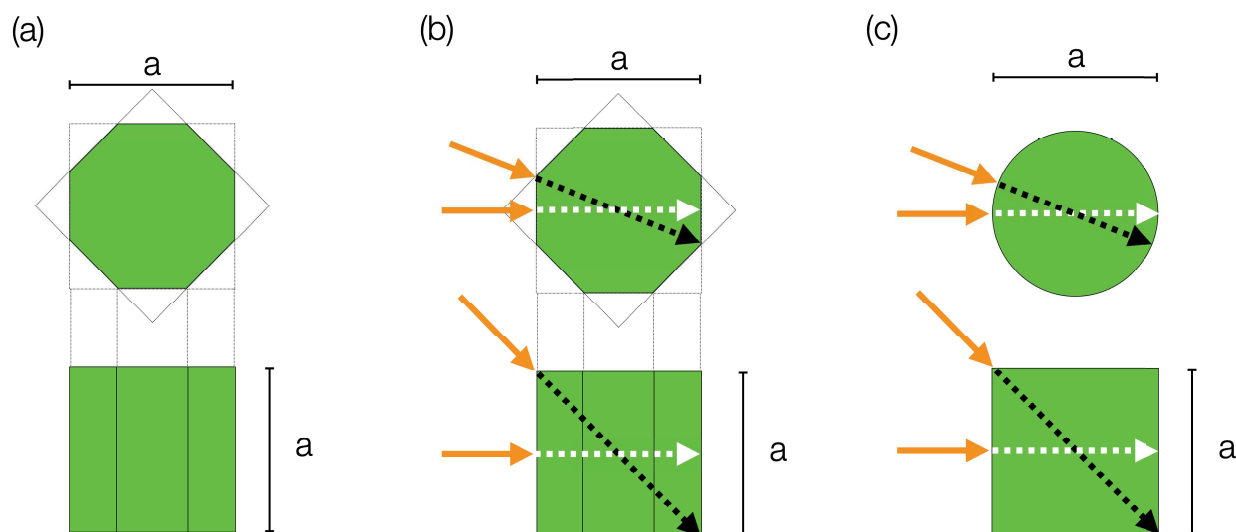


図9 八角柱形のシンチレータ ((a))。幅と高さと同じになるようにすることにより、結晶を横断する最短経路 (白矢印) と最長経路 (黒矢印) の長さの比率は従来の円柱形とほぼ一致する ((b), (c))。

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 γ 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 γ 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 γ 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 γ 線照射の時 0.01 μ 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。

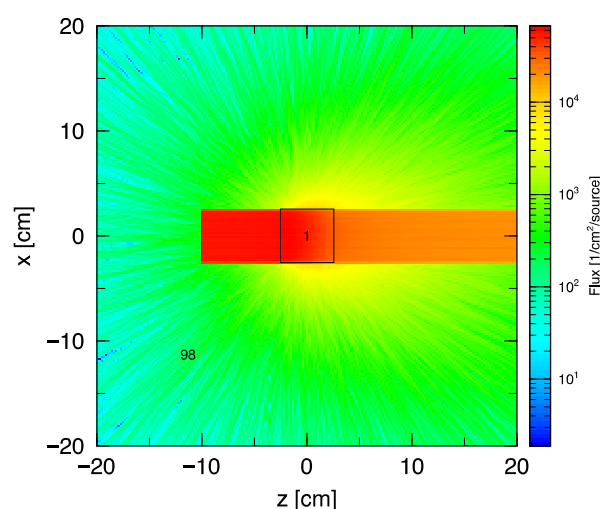


図 10 PHITS によるシンチレータの発光頻度を求めるためのシミュレーションの例。シンチレータの側面から真空中の 662 keV の単色平行 γ 線で入射した時のカウント数を評価する。

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

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 γ 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 γ 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 μsec 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。

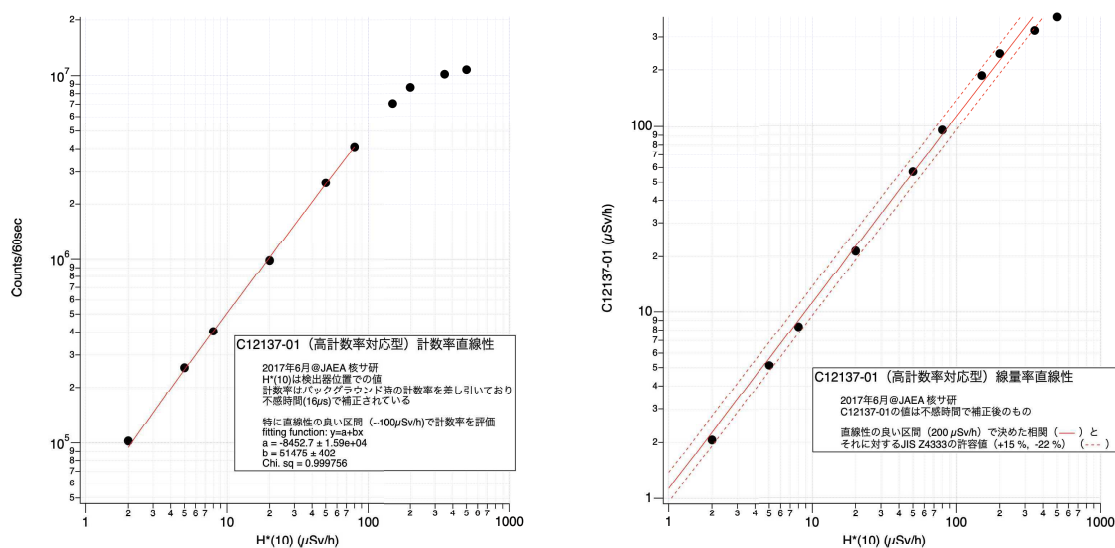


図 11 C12137-01 の線量率直線性評価の結果。(左) 不感時間 (16 μsec) で補正した後の計数率の直線性。(右) G(E) 関数法により H*(10) に換算した際の直線性と JIS Z4333 の許容範囲の関係。線量率の上昇により 1 カウントあたりの線量付与が大きい高エネルギー側の係数が上昇するため、計数率の直線性と必ずしも一致しない。

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ことができる。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 $10\mu\text{Gy/h}$ を十分に上回っており、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 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/ $\mu\text{Gy/h}$)	2.00×10^3 2.39×10^3	2.01×10^3 2.41×10^3	
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。

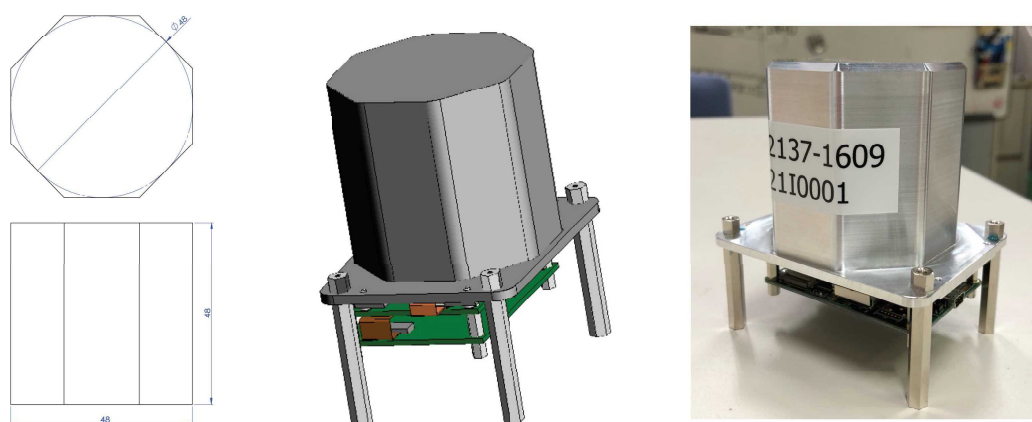


図 12 試作した八角柱型検出器のシンチレータ形状 (左) と検出器の 3D CAD (中央) および実際の試作品。

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。

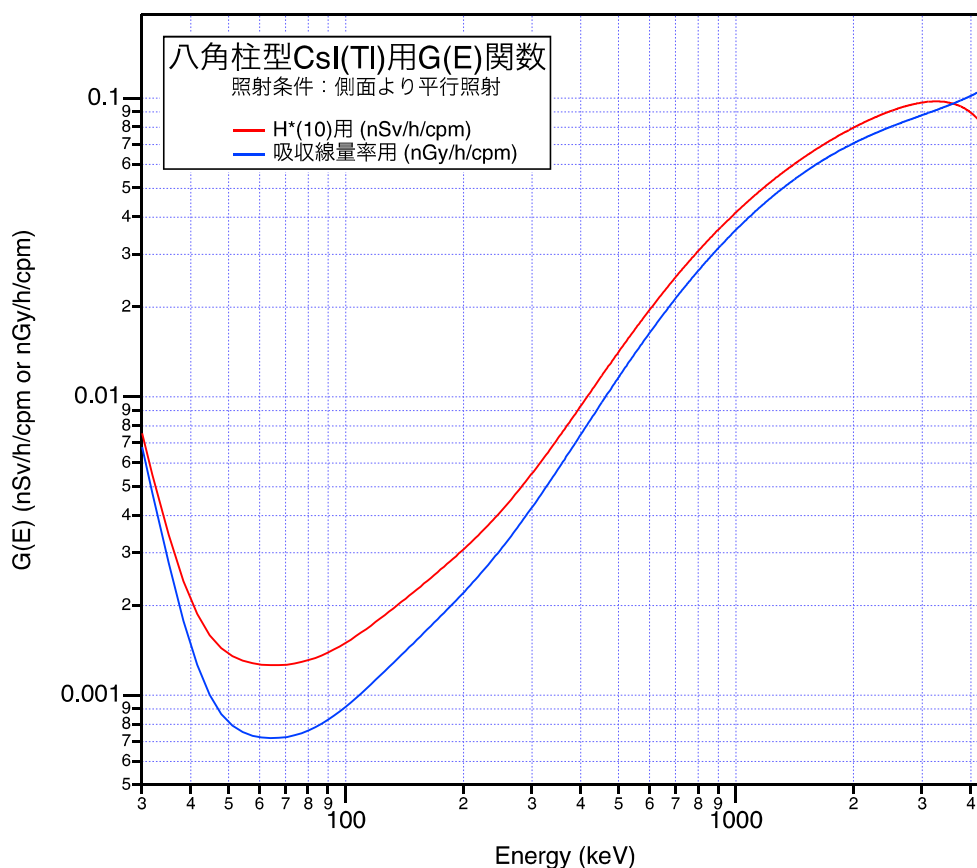


図 13 八角柱型検出器の H*(10) 用 G(E) 関数。PHITS により側面から平行線を照射する条件でシミュレーションを実施した。

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}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co) に加え、 ^{238}U 系列や ^{232}Th 系列の ^{208}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}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}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

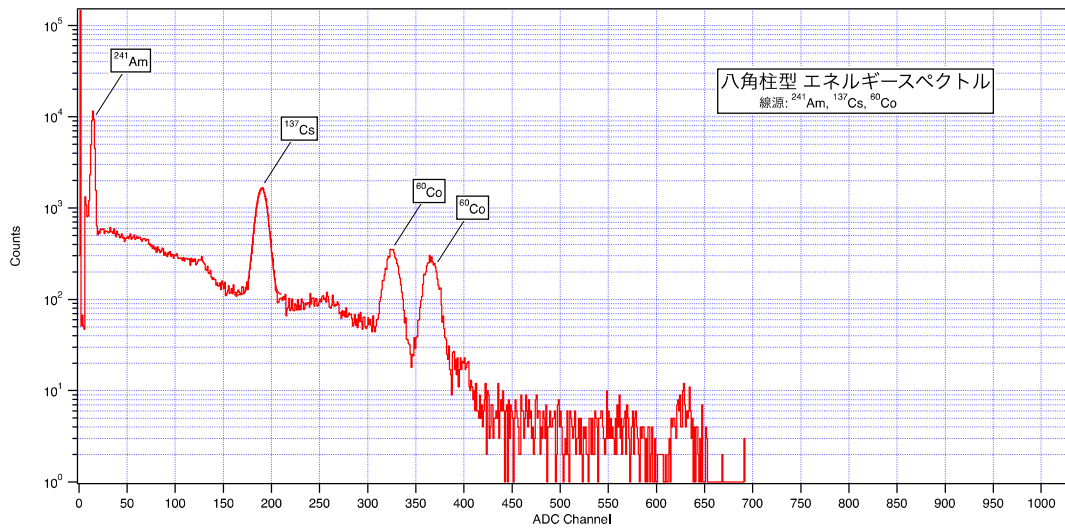


図 14 八角柱型検出器による ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{60}Co のスペクトル。 ^{137}Cs の 662 keV ピークを評価した結果、662 keV でのエネルギー分解能は約 6.6% となった。

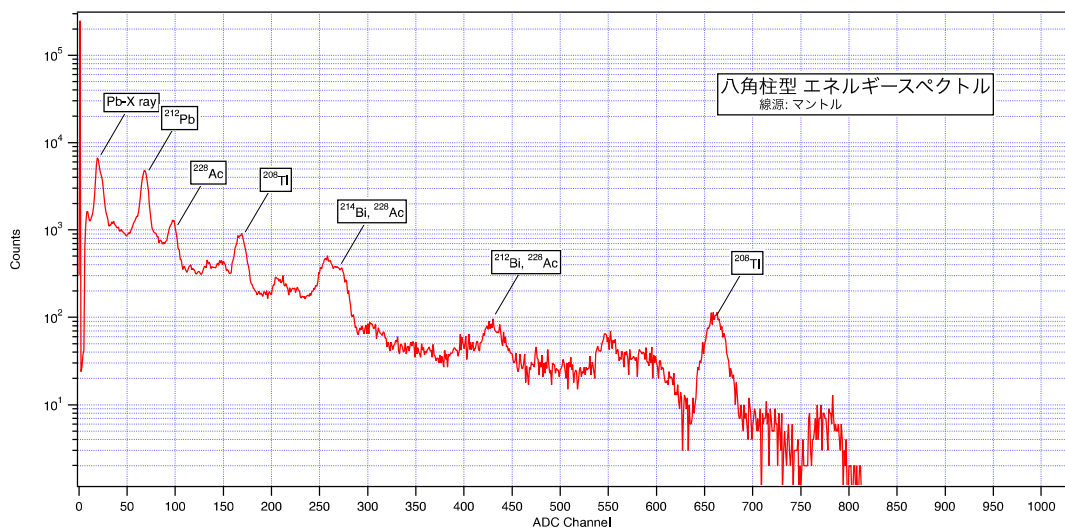


図 15 八角柱型検出器によるマントル鉱石のスペクトル。 ^{208}Tl の 2615 keV ピークが明瞭に捉えられており、環境放射線測定に十分なエネルギー帯域を持っていることがわかる。

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。

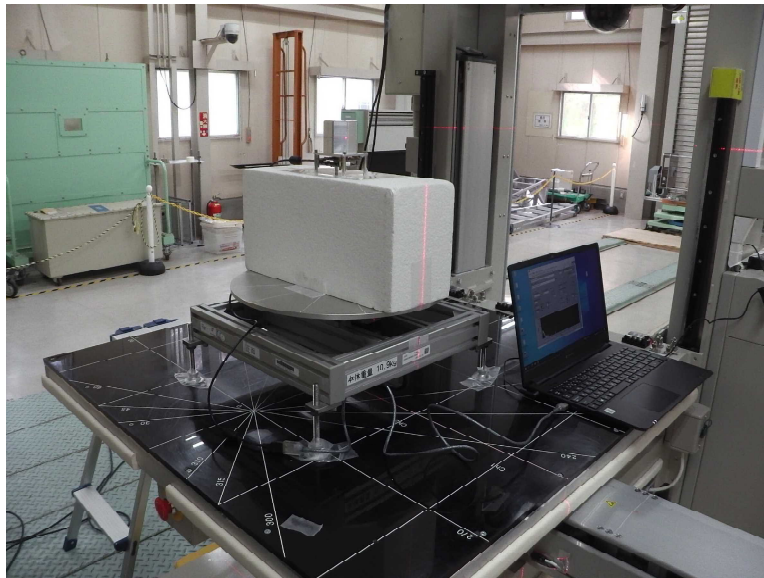


図 16 八角柱型検出器直線性試験の設置の様子。線源は画面向かって左側にある。検出器は回転台の上に設置され、直線性試験の配置そのまま水平方向の方向依存性の測定に移れるように準備してある。

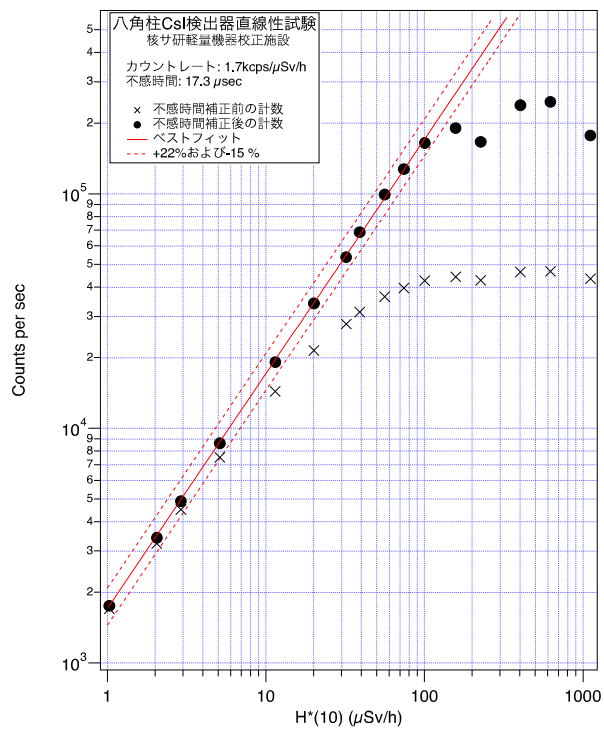


図 17 八角柱型検出器計数率直線性試験の結果。不感時間補正をしないと $10\mu\text{Sv/h}$ 程度から計数率が頭打ちになるが、不感時間補正を行うことで約 $100\mu\text{Sv/h}$ まで原点を通る直線でよく表せる。

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}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。

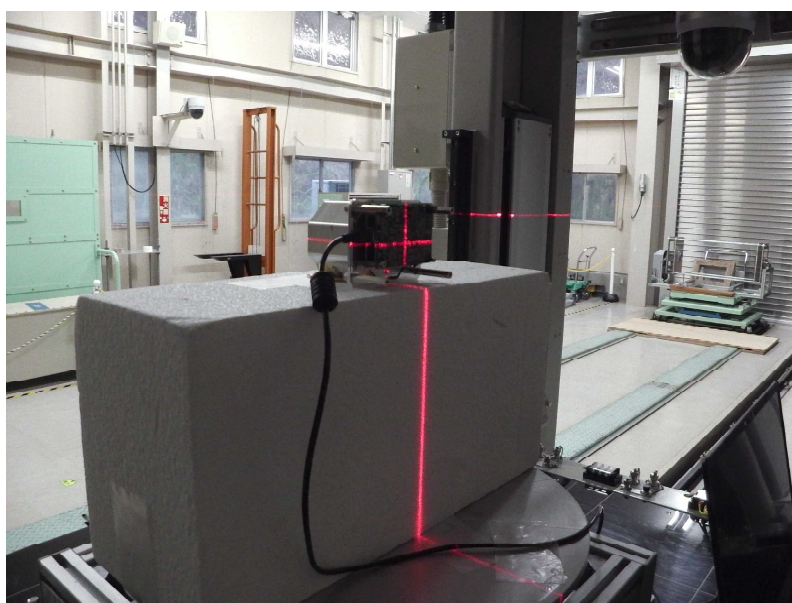


図 18 八角柱型検出器鉛直方向依存性測定時の設置の様子。検出器は倒して回転台の上の発泡スチロールの台の上に設置され、回転台を回転させることで鉛直方向の方向依存性の測定とした。

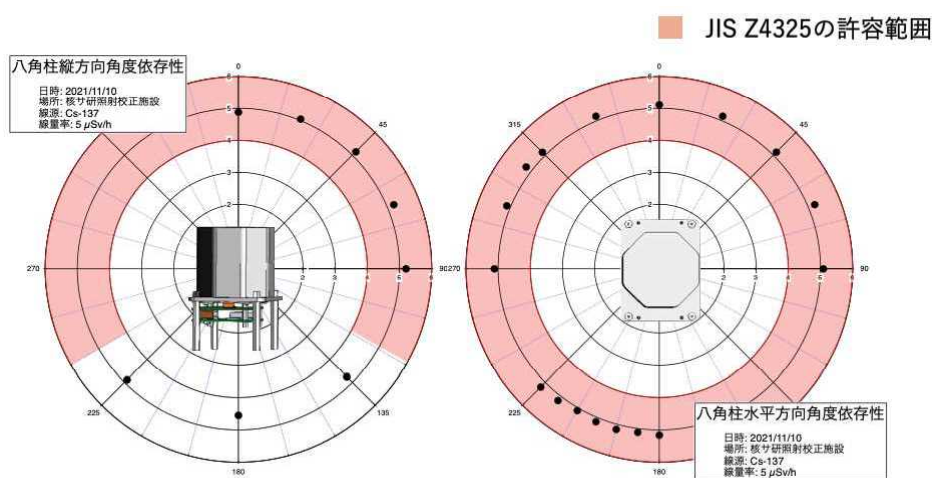


図 19 八角柱型検出器鉛直方向依存性測定の結果。左が鉛直方向、右が水平方向。

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}Co や ^{137}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}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}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}Am	3.7	1.77×10^{-2}
^{133}Ba	3.7	2.31×10^{-2}
^{137}Cs	10	7.93×10^{-1}
^{60}Co	10	1.23×10^0



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。

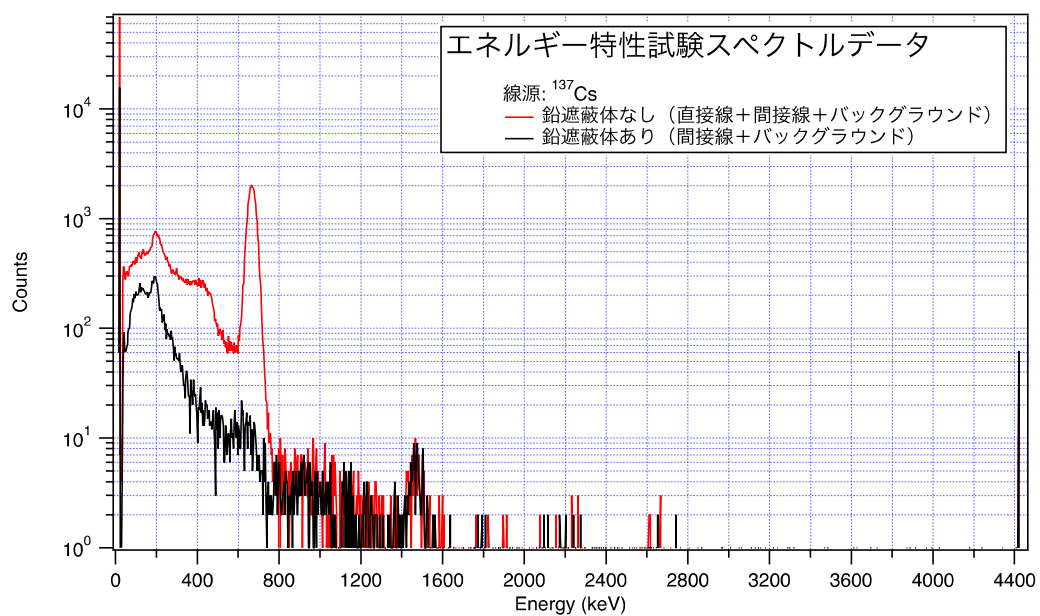


図 21 試験で実際に測定したスペクトルデータ。測定時間は 60 秒。鉛遮蔽体をいれることで全吸収ピークがほぼ消失していることがわかる。

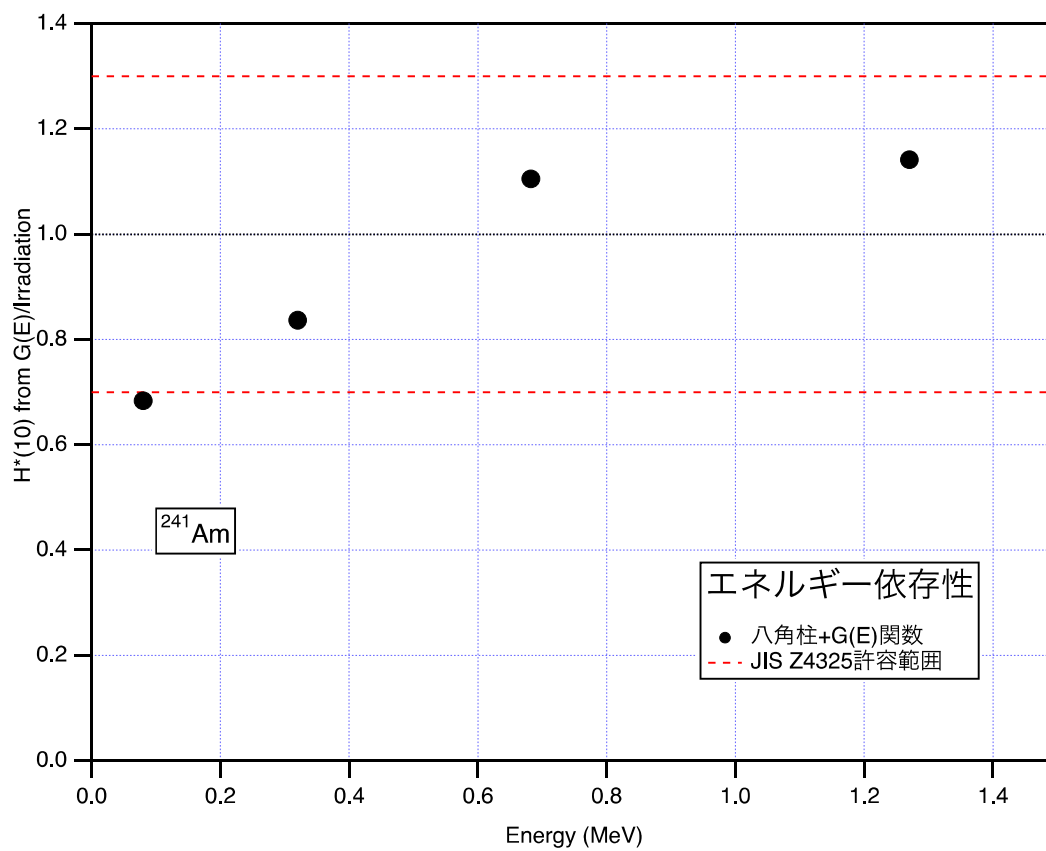


図 22 得られたエネルギー特性。JIS Z4325 で規定された範囲に収まっている。なお、 ^{241}Am が規定範囲から外れているが、JIS Z4325 では 80 keV 未満は受け渡し当事者間の協定となっている。

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 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 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 γ 線のシンチレータ中の平均自由行程（例えば ^{137}Cs の 662 keV では 2.6 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 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 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 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 MBq , 11.1 GBq , 111 GBq ^{137}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 2×10^4 cps 程度、補正後で概ね 5×10^5 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

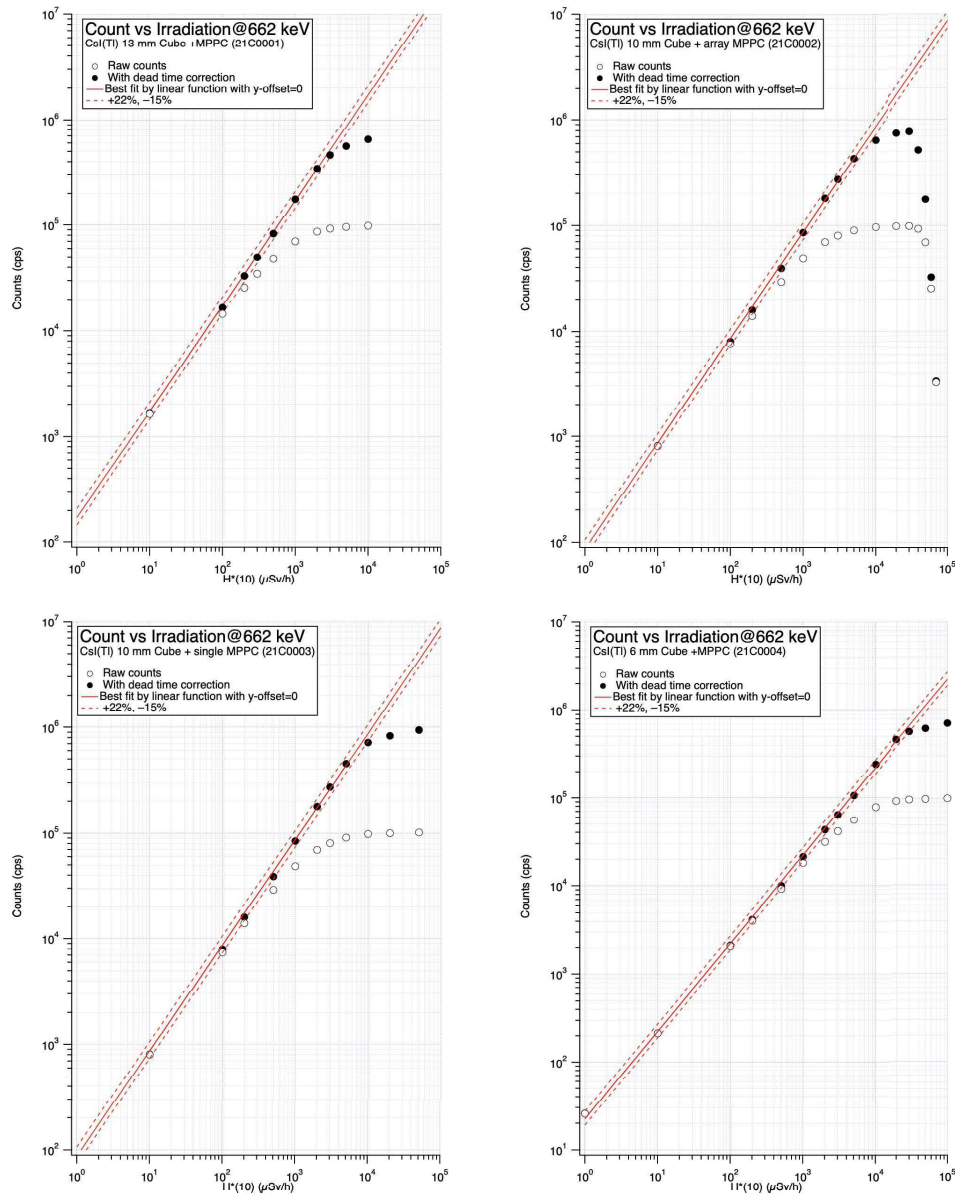


図 25 核燃料サイクル工学研究所で照射した 21C0001~4 の計数率直線性。結晶の大きさや検出器位置の線量率に関わらず、不感時間補正前は 2×10^4 cps 程度、補正後で概ね 5×10^5 cps 程度で計数率が頭打ちになっている。

出器について、同施設のコリメート型 ^{137}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 6×10^4 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。

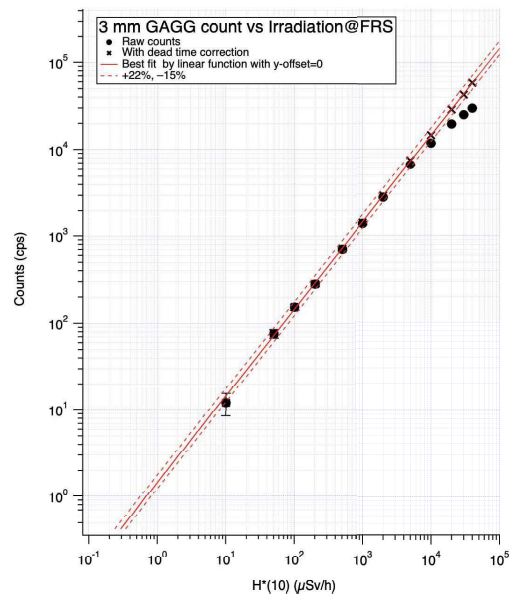
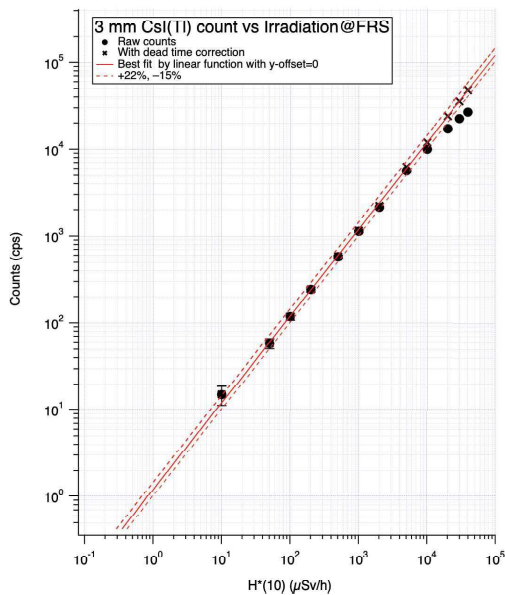
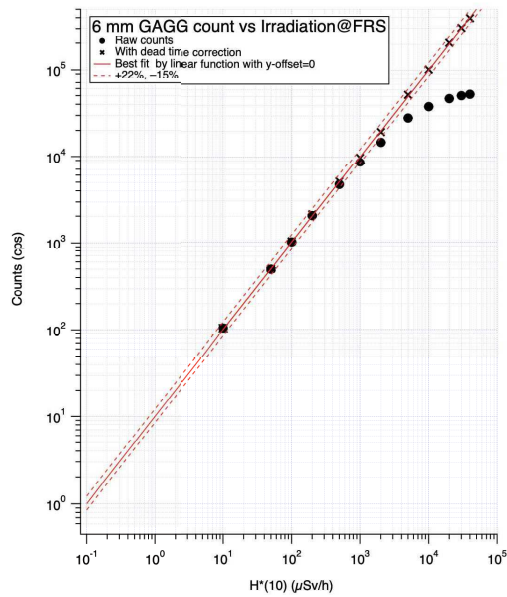


図 26 放射線標準施設で照射した 21E0002 の 6 mm 角 GAGG 検出器計数率直線性（上）と 3 mm 角の CsI(Tl) (21E0001) (下左) と GAGG (21E0002) の計数率直線性（下右）。

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/ μ 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 μ Sv/h を満たせることがわかる。また、2 inch NaI で 0.05 μ 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/ μ 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 (μ Sv/h)	0.05 μ 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 γ 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 γ 線のエネルギーは 662 keV (^{137}Cs 相当) と 122 keV (^{57}Co 相当) とした。

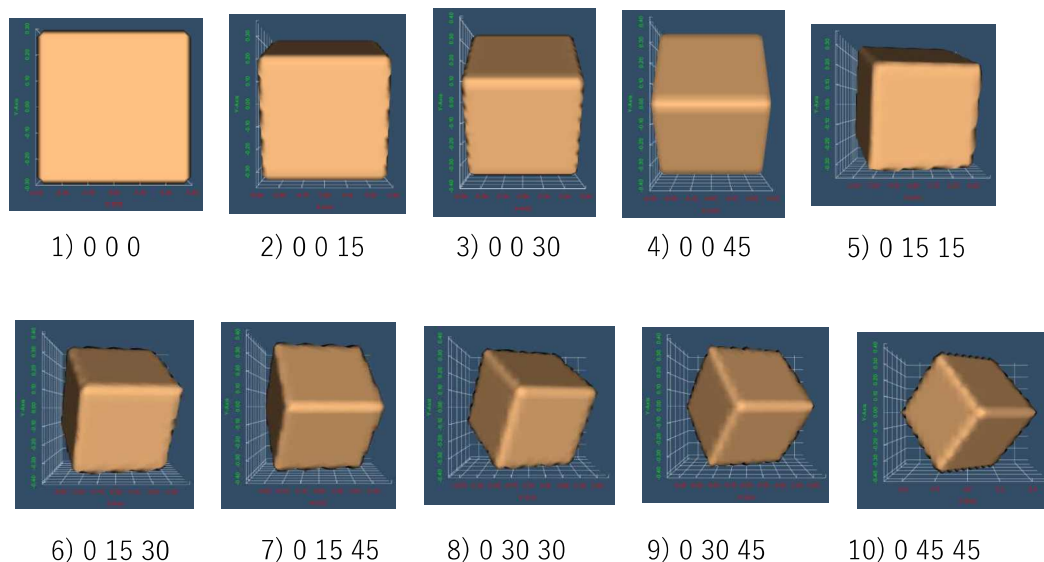


図 27 PHITS で立方体の異方性を調べた時の結晶の配位を xy 面から見た図。それぞれの図の下に結晶の向き（たとえば 0, 15, 45 は x 軸周りに 0 度、 y 軸周りに 15 度、 z 軸周りに 45 回転の意味）を示している。配位は立方体の対称性を考慮して選んである。

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。

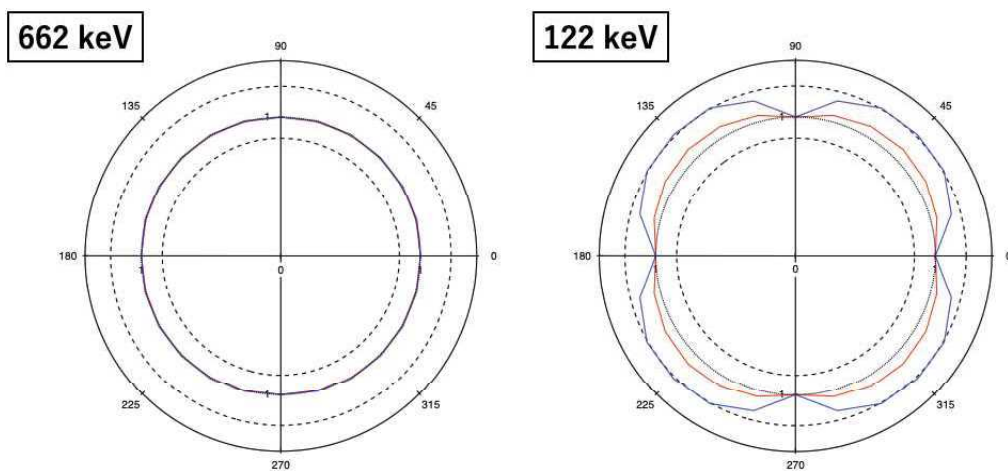


図 28 PHITS のシミュレーションで得られた異方性。赤線が $\langle 100 \rangle$ 軸での回転、青線が $\langle 111 \rangle$ 軸での回転。点線が JIS Z4325 の定める方向依存性の許容値。 ^{137}Cs 相当の 662 keV ではほとんど方向依存性が見られない。方向依存性が大きくなる ^{57}Co 相当の 122 keV 照射時の $\langle 111 \rangle$ 軸での回転でも、JIS Z4325 の許容範囲内に十分収まることがわかる。

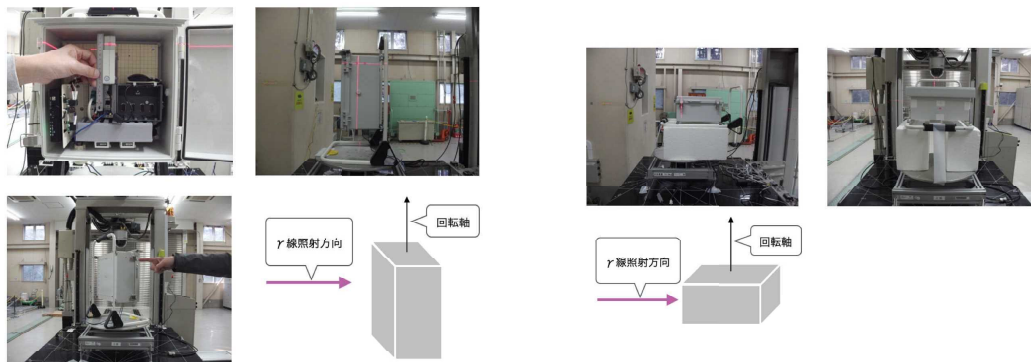
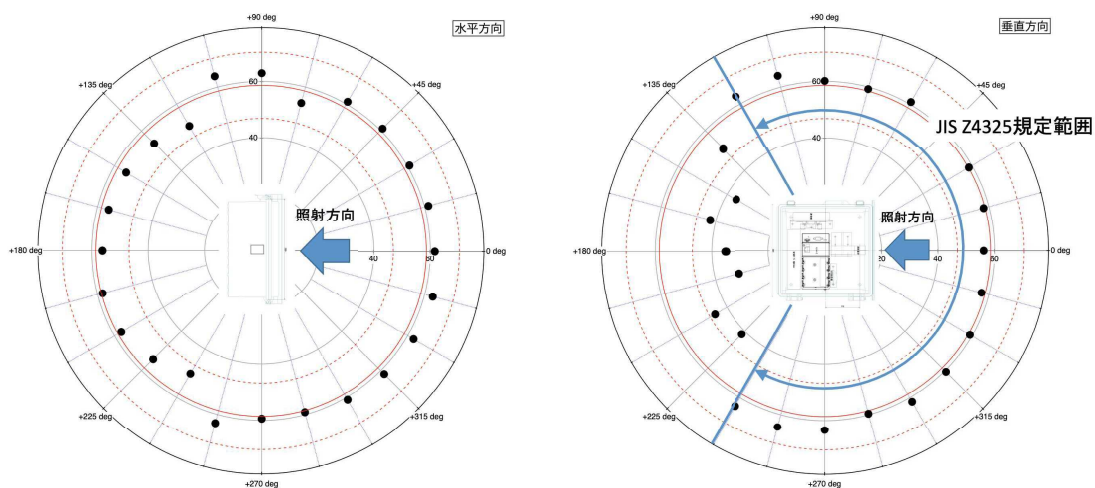


図 29 令和 2 年度までの安全規制研究で実施した可搬型モニタリングポストの方向依存性測定 ([15] より再掲)。測定は JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設で ^{137}Cs 線源で行った。モニタリングポストの内蔵する浜松ホトニクス C12137-00 (高計数率対応) の内蔵する CsI(Tl) シンチレータは $13 \times 13 \times 20 \text{ mm}$ の直方体であるが JIS Z4325 を満たす良好な方向依存性を示している。

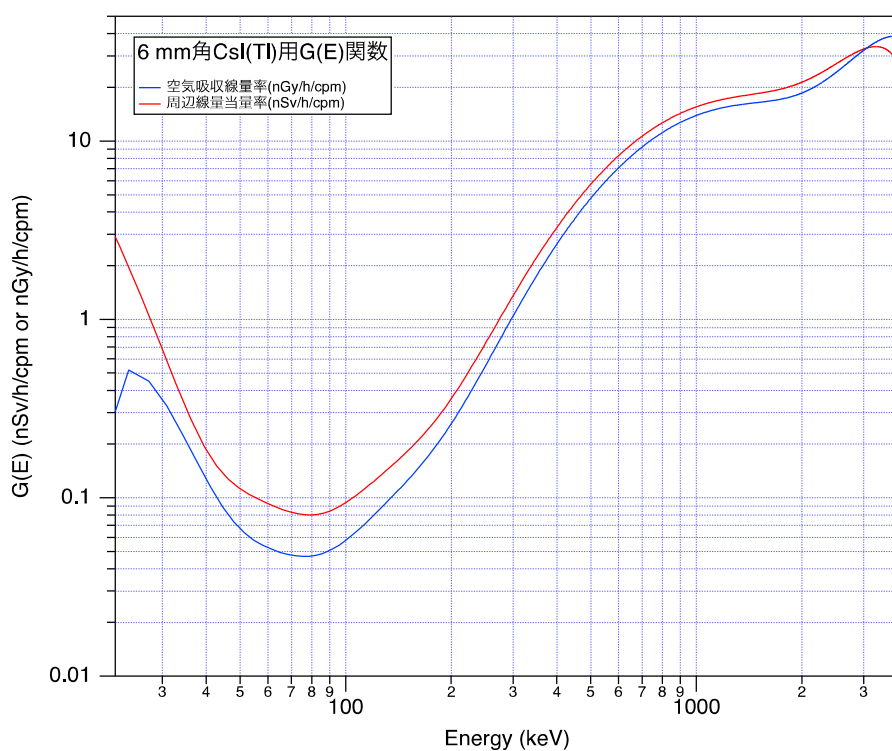


図 30 6 mm 角検出器の H*(10) 用 G(E) 関数。PHITS により側面から平行線を照射する条件でシミュレーションを実施した。

6 環境中での測定試験

6.1 6 mm 角 CsI(Tl) 検出器

6.1.1 日本品質保証機構による試験

6 mm 角 CsI(Tl) 検出器は事業期間内に商品化が決まった。試作品では仮組みでケース内に収まらなかった基板も再設計され、従来の C12137-00 と同じケースの中に収められ、型番 C12137-06HA として販売が始まっている。実際の環境中での試験に先立ち、製品化されたものについて一般財団法人 日本品質保証機構による空気カーマ率の校正試験を実施している。校正条件は以下の通りである。

- 校正の基準面: 検出器先端面より 24 mm 後方（シンチレータの中心位置）
- 照射方向: 検出器先端面に対して垂直
- 線源: ^{137}Cs
- G(E) 関数: 試験中に使用したものと同一

校正試験の結果を証明書より抜粋したものを表 14 にまとめる。10 mGy/h まで JIS Z4325 の $-15 \sim +22\%$ を十分満たす結果が得られた。

表 14 日本品質保証機構での空気カーマ率校正結果。

実効エネルギー (keV)	空気カーマ率 ($\mu\text{Gy/h}$)	表示値 ($\mu\text{Gy/h}$)	校正定数	校正の不確かさ (%)
662 keV	1.00×10^4	10490	0.95	15
662 keV	1.00×10^3	947	1.06	15
662 keV	5.0	5.1	0.99	15

6.1.2 既設モニタリングポストに併設しての試験

商品化された C12137-06HA については、石川県で採用されたものが既設モニタリングポストに隣接して設置され試験調整中である（図 31）。

本来、この検出器は通常時のバックグラウンドレベルの線量率測定を想定していないが、寒冷かつ積雪のある冬の石川県での稼働に支障がないかやバックグラウンドレベルの放射線の測定能力を参考情報として得る観点から、その際の稼働状況と公開されている既設モニタリングポストのデータとの比較検証を行なった。ここに設置されている C12137-06HA のデータ取得システムは前年度までの原子力規制庁事業 [15] で開発した KURAMA-II をベースとした可搬型モニタリングポストに準じた構成となっており、G(E) 関数法による線量率測定だけでなくその時のスペクトルデータもデータとして取得・記録している。

モニタリングポストは 2022 年 1 月下旬より稼働している。そのうち、2022 年 1 月 21 日から 3 月 2 日までの C12137-06HA で測定した周辺線量当量率 $H^*(10)$ と、放射線モニタリング情報共有・公開システム [16] より公開されている赤住局のモニタリングポストの吸収線量率を表示したものが図 32 である。寒冷で降雪もある冬季の石川県での長期連続測定であるにもかかわらず期間中には特に不具合が発生しなかった。測定結果については、全体としては赤住局の測定結果と矛盾しないものの、シンチレータの大きさから予想される通り 1 分ごとの値では統計量の不足に由来する精度不足が顕著である。そこで調整を行った 1 月 31 日以降の

C12137-06HA のスペクトルデータから周辺線量率および吸収線量率の 1 時間値を再算出して比較した。依然として統計量の問題から精度は十分とは言えないが、赤住局の測定結果によく追従していることがわかる。

また、スペクトルデータから算出した C12137-06HA による吸収線量率 1 時間値は赤住局のものに比べて $0.01 \sim 0.02 \mu\text{Gy}/\text{h}$ 程度高めに外出していることがわかる。また、2022 年 1 月 21 日から 3 月 2 日までの周辺線量当量率の分布も明らかに正規分布ではなくなっている（図 33）だけでなく、波高スペクトルからも計数が極めて少ないことがわかる（図 34）。これらから、シンチレータが小さくなったために検出器の計数率が非常に低くなっており、通常行われる正規分布を仮定した統計処理ができなくなっていると考えられる。

この結果に基づき、計数が極めて少ない場合の線量率の算出や統計処理の手法の検討を進めている。本事業終了後も、製作した試作検出器を用いて環境中での連続使用試験などを継続する計画である。その中で線量率の算出や統計処理の手法のアルゴリズム検証もすすめていく予定である。



図 31 石川県に設置された C12137-06HA。既設モニタリングポスト（志賀町赤住局）に隣接する形で、従来のモニタリングポストと類似の形状の樹脂製容器に入れて設置されている（左）。検出器は高計数率対応版の C12137-01 と共に設置されている。C12137-06HA の高さは 1.8 m である。

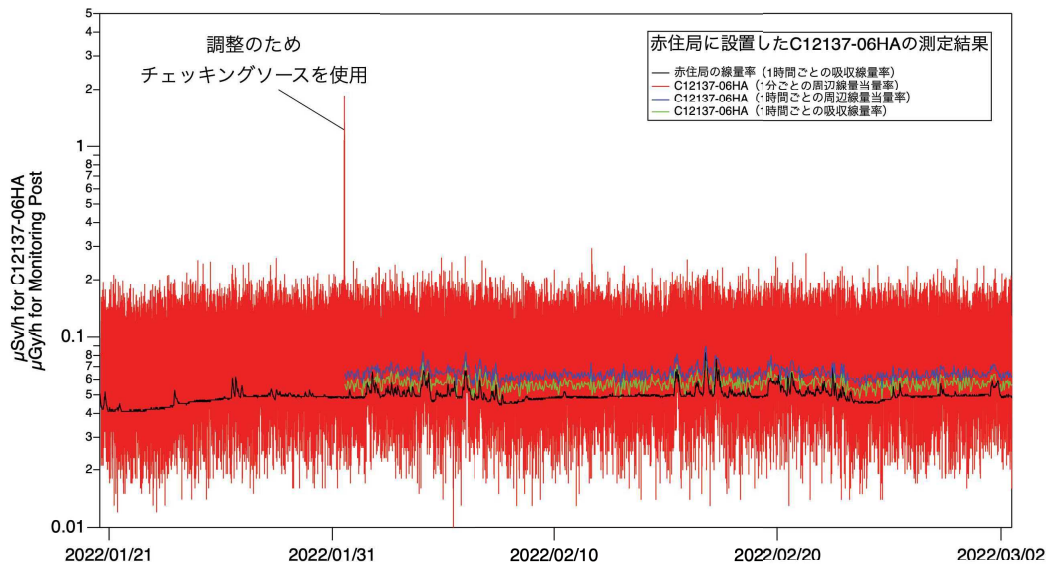


図 32 既設モニタリングポストである赤住局に隣接して設置された C12137-06HA と赤住局のモニタリングポストの測定結果。1 月 31 日の線量率の急激な上昇はチェックソースを用いた調整に伴うものである。また C12137-06HA 側で取得しているスペクトルデータを利用して、1 月 31 以降の 1 時間ごとの周辺線量率および吸収線量率も評価した結果も記載している。

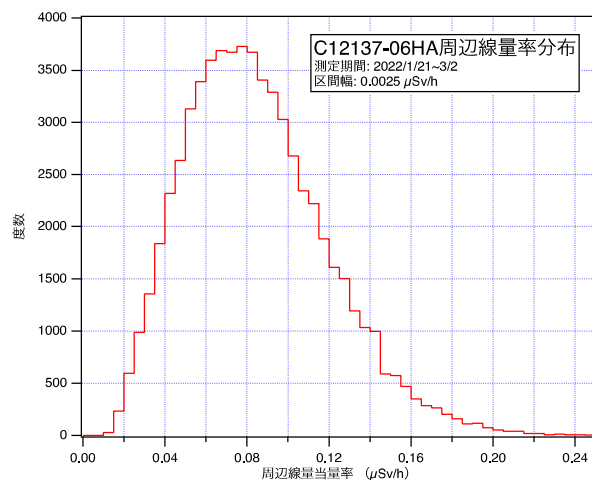


図 33 C12137-06HA の周辺線量当量率の 1 分値の分布の状況。明らかに正規分布からずれており、少数統計についての考慮が必要であることを示唆している。

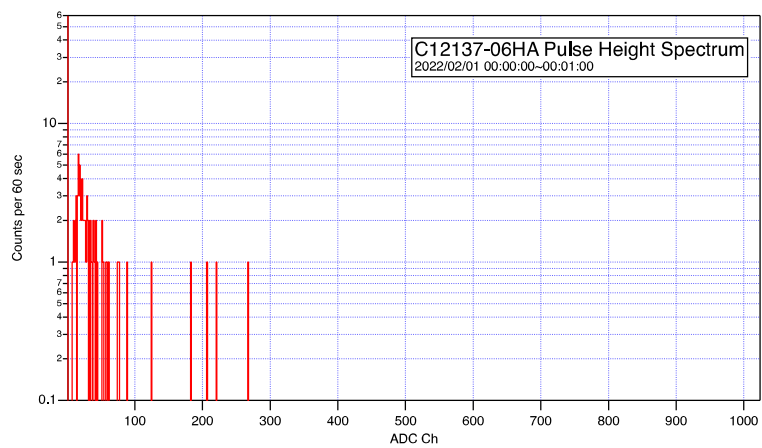


図 34 C12137-06HA の環境放射線レベルでの典型的な波高スペクトル。このスペクトルは 60 秒分の測定であるが、ADC1 チャンネルあたりの計数がたかだか数カウントであり、全体でも 100 カウントに満たない。

6.2 八角柱型 CsI(Tl) 検出器

6.2.1 福島県大熊町での試験運用

性能評価の終わった八角柱型検出器を福島県大熊町の農地に持ち込み、 $^{134,137}\text{Cs}$ の残留する実際の環境での線量率測定を行った。比較対象として日立アロカの TCS-172B を用い、この TCS-172B の $\text{H}^*(10)$ 指示値と八角柱型検出器で測定した $\text{H}^*(10)$ を比較した。測定を実施した農地は $40\text{ m} \times 160\text{ m}$ 程度の広さで、事故後に果樹園だった場所を果樹を伐採、表土剥ぎと客土の除染した後、作付けを行わずに定期的な圃場の保安全管理として雑草を生やさないための表土の耕起を年数回実施してきている場所である。圃場内は $0.5 \sim 1\mu\text{Sv/h}$ 程度である。圃場のあらましと検出器の設置状況を図 35 に示す。

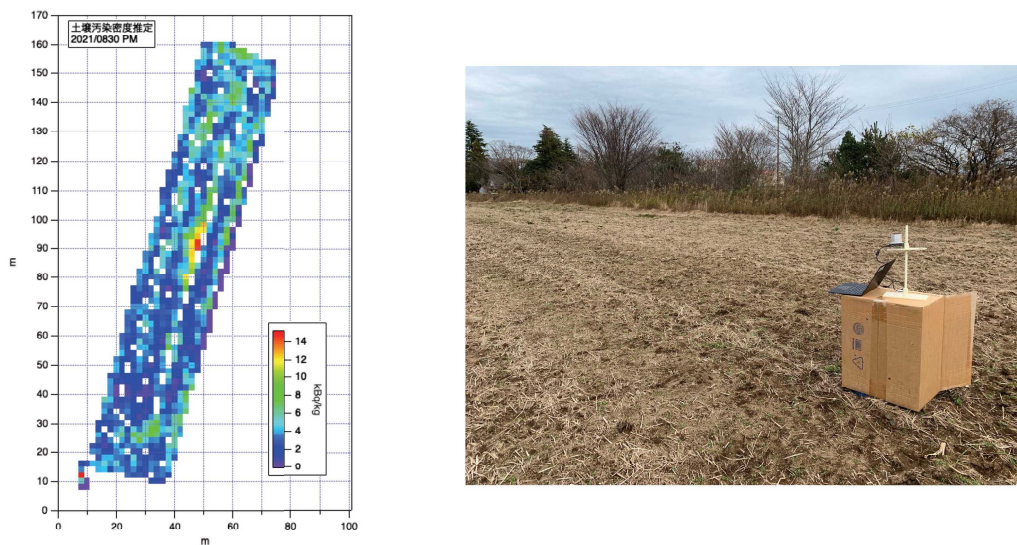


図 35 測定を行った圃場の様子。歩行型 KURAMA-II で測定した土壌の汚染密度分布（左）と、測定当日の圃場の様子（右）。検出器は空の段ボール箱などを使って高さ 1 m の位置に設置して測定している。

測定はこの圃場から TCS-172B の指示値で 3 ヶ所程度場所を選んで測定を行った。各地点の八角柱型検出器で求めた線量率は TCS-172B の指示値と良い一致を示した（図 36）。また、JAEA での八角柱形検出器の試験中に取得したスペクトルデータと圃場ないのスペクトルデータを比較すると、双方の場所の天然核種の比率の差（例えば ^{40}K や ^{208}Tl ）や環境中の $^{134,137}\text{Cs}$ のピークが明瞭に捉えられていることがわかる（図 37）。

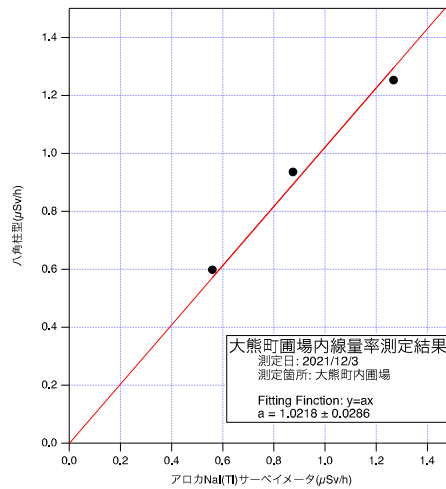


図 36 八角柱型検出器と TCS-172B の指示値の相関。

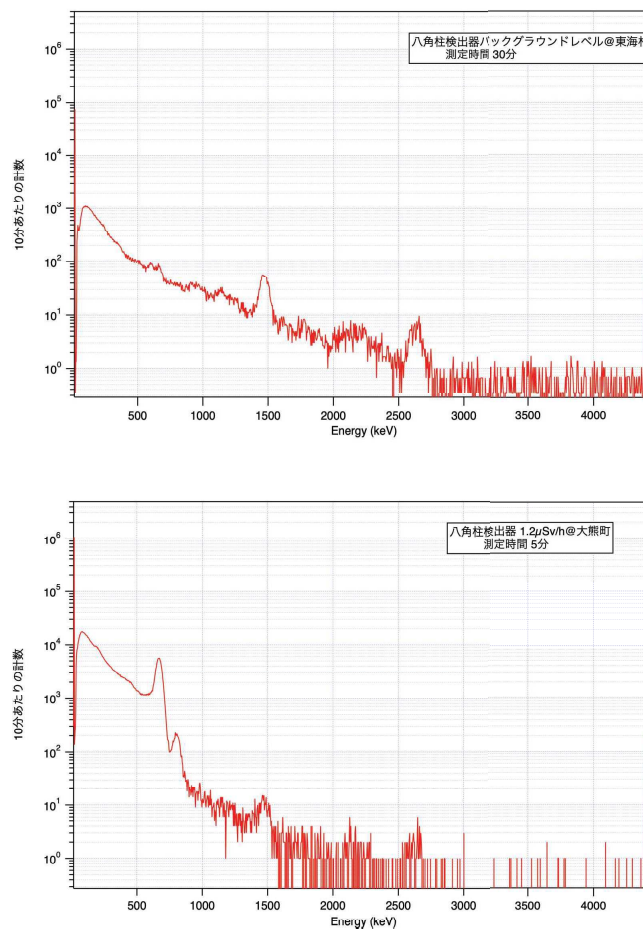


図 37 八角柱型検出器で取得した東海村の環境放射線のスペクトルデータ（上）と大熊町の圃場でのデータ（下）。縦軸はいずれも 10 分間の計数に換算している。その地点の環境放射線場を構成する核種のちがいが明瞭にみてとれる。

6.2.2 石川県野々市市での試験運用

八角柱型検出器の実環境での長期的な試験の第一段階として、石川県野々市市の松浦電弘社敷地内に設置して連続運用を実施している。設置の様子を図 38 に示す。石川県では降雪を考慮して検出器の高さを 1.8 m としているが、今回の敷地内試験では検出器のシンチレータ中心の高さが 1 m になるように調整した。事前のサーベイメータによる調査により、八角柱検出器設置箇所の高さ 1 m の周辺線量当量率は $0.08\mu\text{Sv/h}$ 程度あることがわかっている。



図 38 連続運用中の八角柱型検出器。検出器は昨年までの安全規制研究で開発した可搬型モニタリングポストと同型のもの（左）に内蔵している。検出器は同じ場所に設置されている（右）。松浦電弘社の自社敷地内に設置されている。この箱は防水仕様ではあるが内部の温度管理等は行っていない。この試験が終わった後は石川県が設置するモニタリングポストに隣接しての試験を予定しているため、仮置きでの試験となっている。

試験中の測定結果の例として、2021 年 3 月 3～9 日の測定結果を、検出器内蔵の温度センサの値と近隣のモニタリングポスト（能美市辰口および金沢市太陽が丘）の測定データとともに図 39 に示す。全体として期間を通じてほぼ $0.08\mu\text{Sv/h}$ で一定である。特に温度管理等を行わず成り行きで測定を行なっているが、3 月 8 日には検出器温度が日時変動で $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ほど変わっているにもかかわらず、可搬型モニタリングポストで使用される NaI(Tl) 検出機や半導体検出器で見られるような気温の日時変動に伴う線量率の変化が見られない。

一方、所々にスパイク状の上昇と $0.01\sim 0.02\mu\text{Sv/h}$ 程度の上昇が見られる。スパイク状の上昇は八角柱型検出器や隣接場所で密封小線源を使用したことに伴う上昇であり、使用中の線源に対応するピークが波高スペクトルにあらわれていることでも確認できる（図 40）。一方 3 月 6 日に見られる線量率の上昇は気象要因による線量率上昇で、なだらかな上昇であり人工核種に対応づけられるピークではなく降雨時にみられる ^{214}Bi のピークが大きくなっていることが挙げられる（図 41）。3 月 5、6 日は石川県地方は断続的な降雨が起きていることがわかっており、3 月 5 日の昼ごろの線源使用中にも同様の気象要因による線量率上昇が観測されている（図 42）。

このように、屋外の降雨や温度変化の下でも安定した測定ができており、スペクトルデータから線量率の変動要因の特定も可能なことが確認できた。今後は既設モニタリングポスト隣接場所に移設して長期的な試験を続け、より詳細な評価を行う計画である。

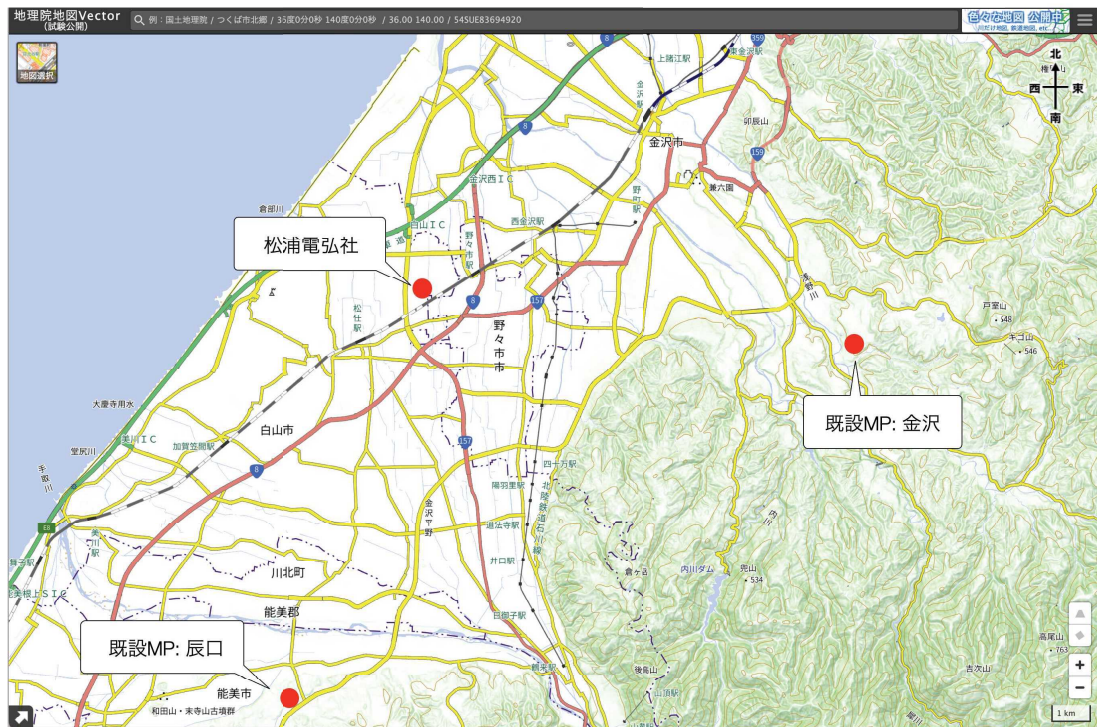
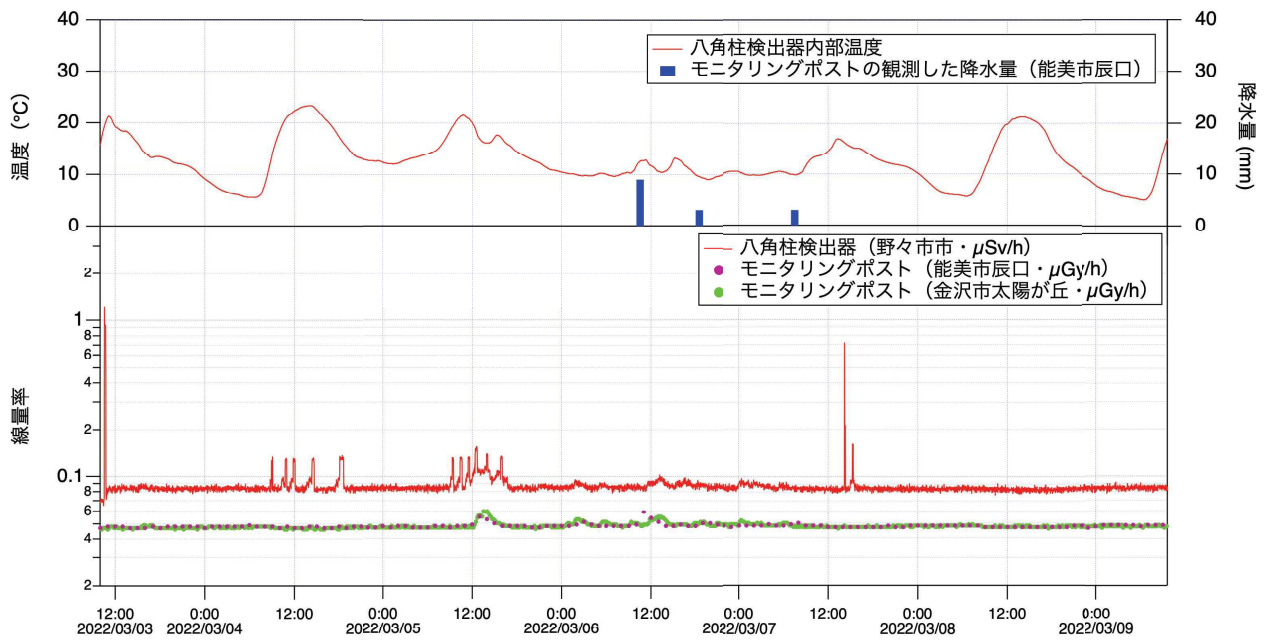


図 39 八角柱型検出器および近隣のモニタリングポストの測定結果 (上) と、比較対象とした既設モニタリングポストの設置箇所との位置関係 (下)。設置箇所の周辺線量当量率は $0.08\mu\text{Sv/h}$ で安定しており、密封線源が近接している場合を除き全体として近隣のモニタリングポストとよく似た挙動を示している。また、3月8日には検出器温度が日時変動で $15\text{ }^\circ\text{C}$ ほど変わっているにもかかわらず八角柱型の線量率に変化はないことも確認できる。

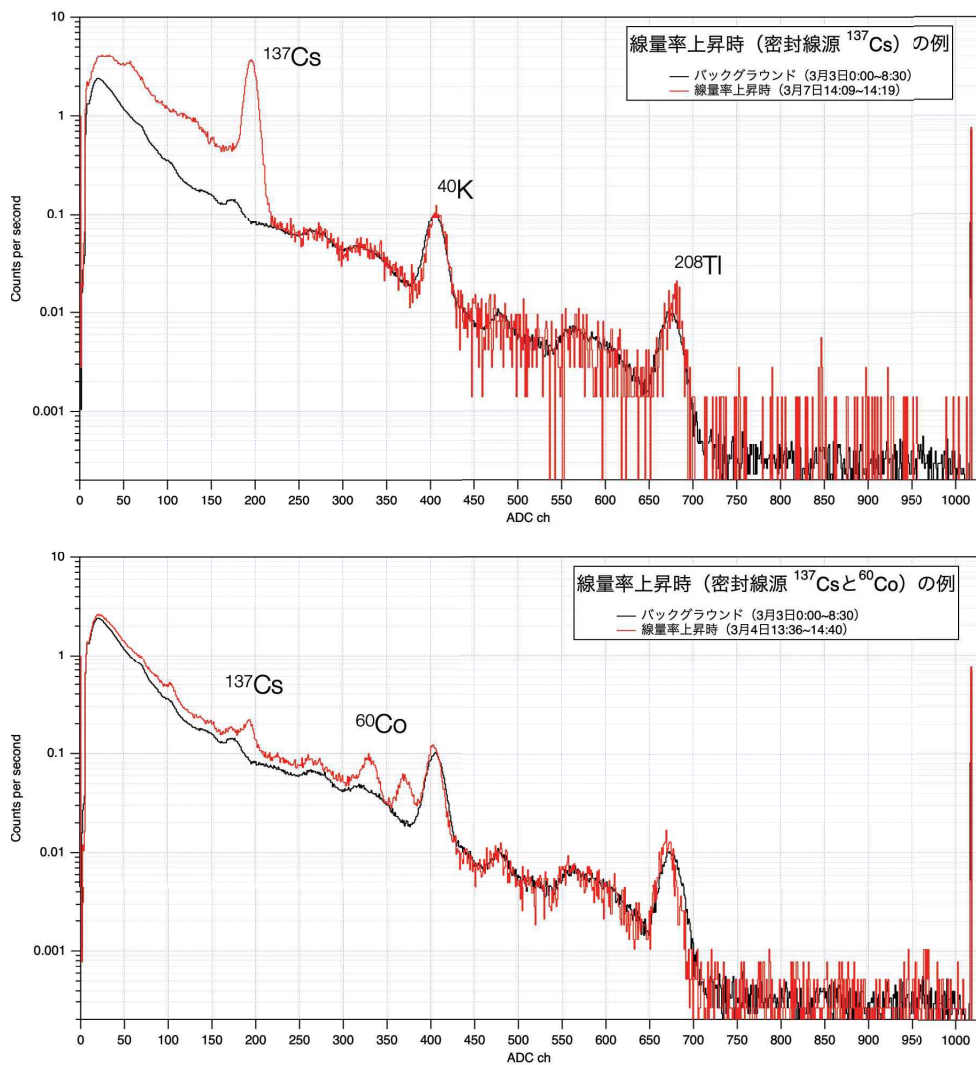


図 40 線源による線量率上昇時のスペクトル。上側のグラフは八角柱検出器調整目的で ^{137}Cs 使用時、下は隣接する社内試験用モニタリングポストで ^{137}Cs と ^{60}Co を同時に使用したとき。天然核種の ^{40}K や ^{208}Tl はバックグラウンド時と同一なまま ^{137}Cs と ^{60}Co に対応するピークだけが現れている。

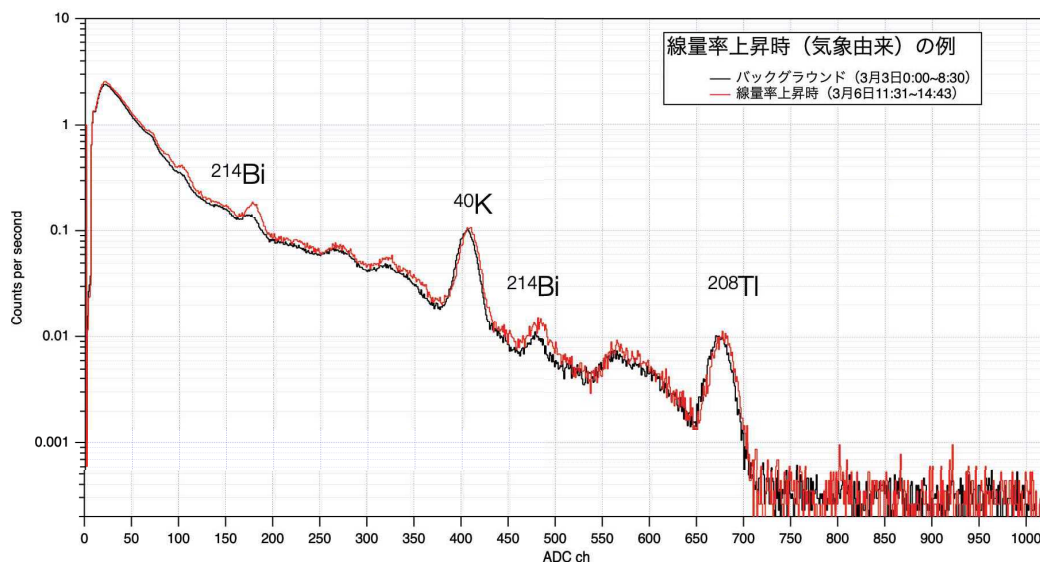


図 41 気象由来による線量率上昇時のスペクトル。 ^{137}Cs と ^{60}Co のような人工核種のピークが見られない一方、天然核種のなかでも降雨時に見られる ^{214}Bi のピークが明瞭になっているのがわかる。

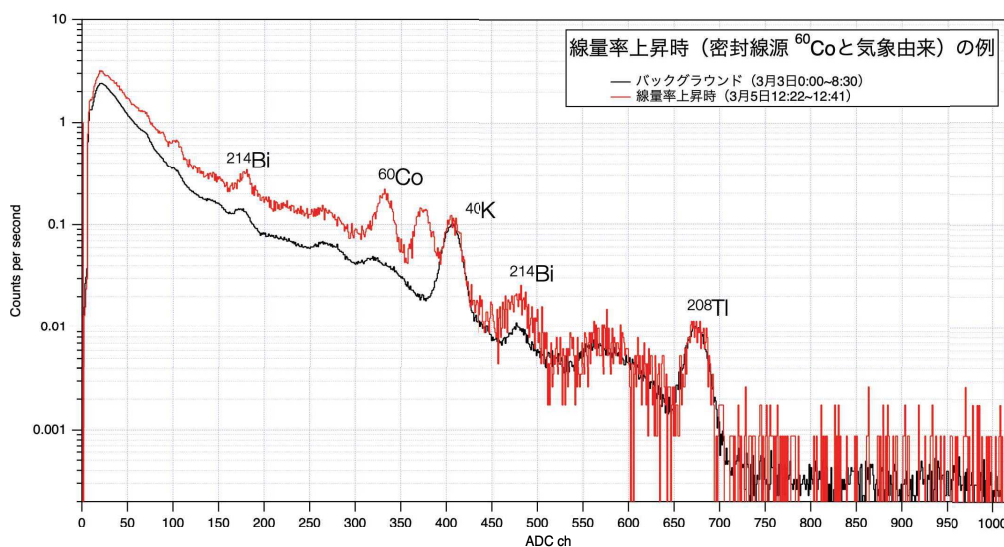


図 42 線源と気象由来両方による線量率上昇時のスペクトル。使用している ^{60}Co が明瞭に現れる一方、天然核種のなかでも降雨時に見られる ^{214}Bi のピークが明瞭になっているのがわかる。

7 GAGG 検出器の可能性の検討

先に 3.1 で述べたとおり、GAGG は優れた特性を持つシンチレータである。特に GAGG の蛍光時間は約 90 ns とされており、約 1 μ s の CsI(Tl) に比べて高計数率を達成することが期待される。本研究でも 3 mm 角と 6 mm 角の GAGG について評価しており、図 26 にある通り高い計数率でも良い直線性を示すことが期待される結果となっている。このように本格的な展開に必要な環境が整った場合には高線量率対応の検出器のためのシンチレータとして有力な選択肢になり得る。

2021 年末に GAGG による新たな検出器の試作の目処が立ったことから、より現実的な検出器の検討と試作を試みた。GAGG の蛍光時間が CsI(Tl) の約 1/10 であることを踏まえ、GAGG 結晶は 6 mm 角の約 10 倍の体積となる 13 mm 角の立方体とした。表 12 から GAGG と CsI(Tl) の計数率のオーダーは同じと想定されるので、13 mm 角の CsI(Tl) より計数率の上限の伸びが期待できる一方で低線量率の計測においても 6 mm 角よりも改善される可能性が高く、CsI(Tl) よりもダイナミックレンジの広い高線量率対応検出器となる可能性がある。

試作品は従来の C12137-00 型と同じ筐体に入れられており、13 mm 角の結晶は厚み 2 mm のアルミケースに封入され検出器前方の突起部分に装備される (図 43)。

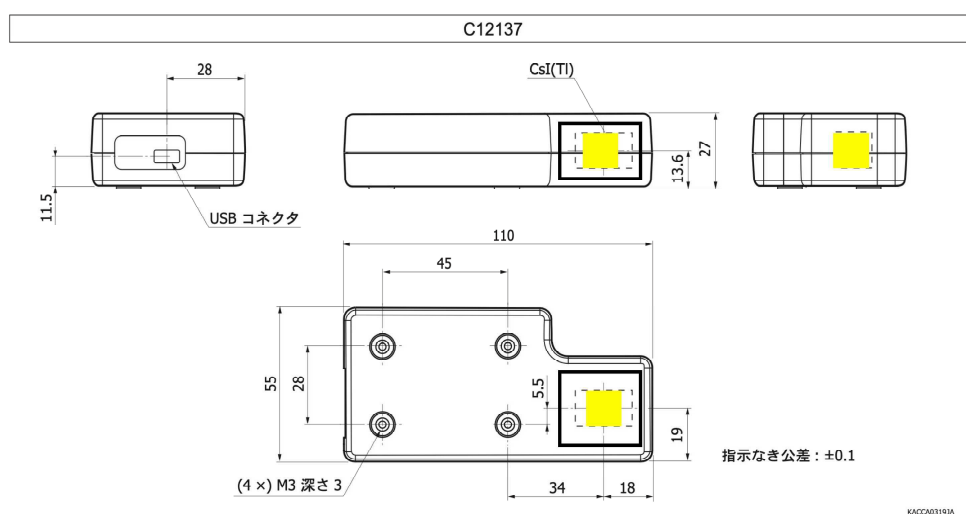


図 43 試作した 13 mm 角立方体 GAGG 検出器の概要を C12137 のカタログで公開されている図面に配置したもの。結晶 (黄色) が 2 mm 厚のアルミケース (黒枠) に収められ、従来の C12137-00 と同じ筐体で仕上げられている。

製造完了見込み時の校正施設での照射が実現できなかったため、工場試験として試作品の 662 keV における計数やエネルギー分解能の温度依存性を評価することとした。GAGG はこれは実環境におけるモニタリングの耐環境性の観点から重要な特性である。温度は C12137 シリーズのカタログ上の下限である 0°C、室温の 25°C、カタログ状の上限である 50°C とし、それぞれの温度で ^{137}Cs 線源の波高スペクトルを取得し、ピーク位置とピーク幅を比較することにした。

得られた結果を図 44 に示す通り、この温度範囲での変化は見られなかった。またピーク幅も FWHM で

5.3% で温度依存性はなかった。これらから、従来の CsI(Tl) 検出器同様に気温変動に関わらず安定した測定ができることが強く示唆される。引き続き校正場での試験などを行い、GAGG による環境モニタリング用検出器検討のための評価を続ける予定である。

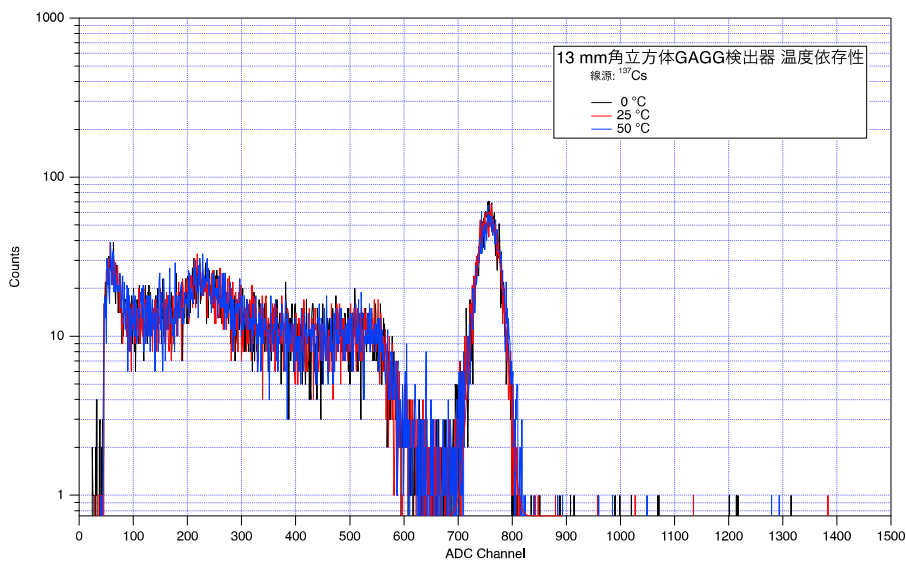


図 44 試作した GAGG 検出器の温度依存性測定データ。0°C (黒)、25°C (赤)、50°C (青) の 3 つの場合が示されているが、明確な違いは観測できなかった。ピーク幅から評価したエネルギー分解能についても、いずれの温度でも 5.3 % であった。

8 まとめ

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おいて現在使用されている各種検出器では、耐環境性や設置や運用コストといった課題を解決するために、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を行った。

KURAMA-II で実績のある MPPC を受光素子とした C12137 シリーズをベースとして、製造時の歩留まりと方向特性を両立させた 2 inch NaI(Tl) 置き換え八角柱型 CsI(Tl) 検出器と、緊急時モニタリングに対応可能な 10 mGy/h 以上測定可能な 6 mm 角の CsI(Tl) 検出器を試作した。

また、石川県のモニタリングポストの隣接箇所や松浦電弘社敷地内での実環境における評価もすすめ、長期間の運用でも支障なく測定ができることを確認した。

本研究の成果に基づき、6 mm 角の CsI(Tl) 結晶を搭載した C12137-06HA が商品化された。また八角柱型の CsI(Tl) シンチレータを搭載した検出器についても、まもなく C12137-88H として商品化される予定である。

これらの商品化された検出器が導入されることで、従来のモニタリングポストやその計測系で必要であった高度な温調や湿度管理、高電圧電源や耐圧処理が不要になることで導入や維持管理の大幅なコスト低減を実現できることになる。

この試験において取得した 3 mm 角および 6 mm 角の立方体の GAGG 検出器のデータをもとに、13 mm 角の立方体 GAGG 検出器を製作し、環境放射線モニタリングで重要な温度依存性について良い特性が得られていることを確認した。

本事業終了後も引き続き試験評価を継続し、C12137-06HA で見られた極めて低い計数率における適切な統計処理に基づいた線量率評価や、13 mm GAGG 検出器の性能評価を進めると共に、これらの成果の学会や論文での発表および社会実装を進める。

9 謝辞

本研究の高線量率対応検出器の開発にあたり、浜松ホトニクス株式会社には CsI(Tl) 検出器及び GAGG 検出器の試作品の使用を快諾いただきました。また、石川県保健環境センターには、本研究で試作した検出器の試験環境としてモニタリングポスト設置箇所の提供や、石川県が購入した C12137-06HA による試験データ取得と利用の許諾をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 茨城県放射線テレメータ・インターネット表示局 http://www.houshasen-pref-ibaraki.jp/system/sokutei_sochi.html
- [2] 放射能測定法シリーズ No. 17 「連続モニタによる環境 γ 線測定法」
- [3] 令和元年版 防災白書 <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/hakusho/h31/index.html>
- [4] 浜松ホトニクス Si APD https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si-apd_kapd9007j.pdf
- [5] 浜松ホトニクス MPPC https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf
- [6] 浜松ホトニクス C12137 <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/type/C12137/index.html>
- [7] M. Tanigaki, R. Okumura, K. Takamiya et al., “Development of KURAMA-II and its operation in Fukushima”, Nucl. Instr. Meth. **A781** (2015) 57–64.
- [8] 谷垣 実 「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立 (4) KURAMA-II の検出器系の改良」日本原子力学会 2015 年秋の大会 静岡市 2015 年 9 月 9 日
- [9] K. Kamada, T. Endo, K. Tsutumi, T. Yanagida, Y. Fujimoto, A. Fukabori, et al., “Crystal Growth and Scintillation Properties of Ce Doped $Gd_3(Ga,Al)_5O_{12}$ Single Crystals”, Cryst. Growth Des. **11** (2011) 4484-4490.
- [10] Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02”, J. Nucl. Sci. Technol. **55** (2018) 684–690.
- [11] 原子力規制庁 「令和 3 年度 可搬型モニタリングポストの更新に係る一般競争入札説明書」 <https://www.nsr.go.jp/data/000355614.pdf>
- [12] 日本規格協会 「環境 γ 線連続モニタ JIS Z 4325:2019」
- [13] 産業技術総合研究所 平成 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進 事業費 (環境モニタリング線量計の現地校正に関する研究) 事業 成果報告書
- [14] S. Moriuchi, I. Miyanaga, “A spectrometric method for measurement of low-level gamma exposure dose”, Health Physics **12** (1966) 541–551.
- [15] 谷垣 実 令和 2 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) 「発災直後の面的な放射線モニタリング体制のための技術的研究」 成果報告書
- [16] 原子力規制委員会 「放射線モニタリング情報共有・公表システム」 <https://www.erms.nsr.go.jp/nra-ramis-webg/general/mapdisplaydoserate/initialize>