

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 $0.01 \sim 0.02 \mu\text{Gy/h}$ 程度高めに外出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。

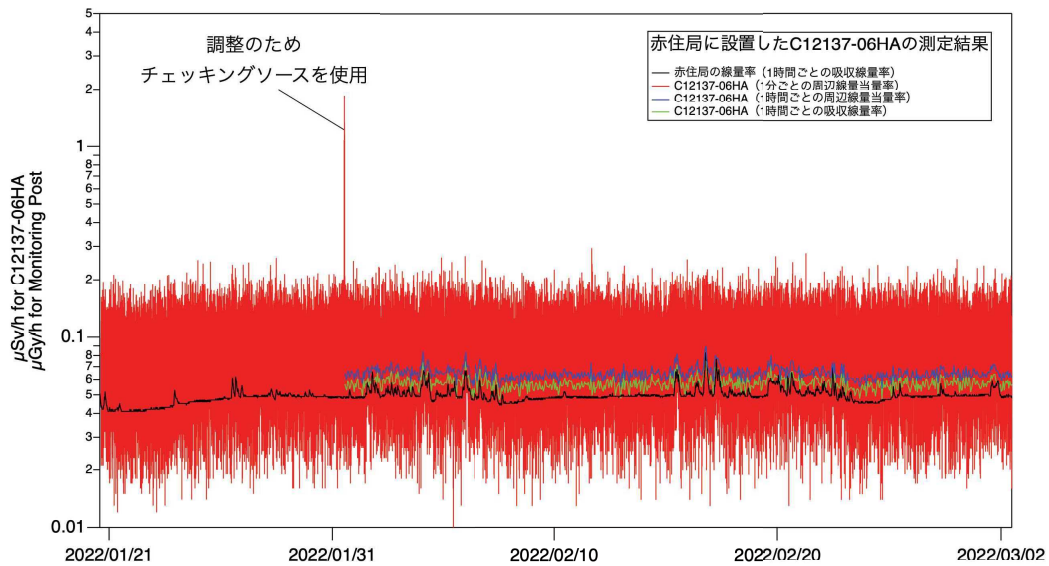


図 32 既設モニタリングポストである赤住局に隣接して設置された C12137-06HA と赤住局のモニタリングポストの測定結果。1 月 31 日の線量率の急激な上昇はチェックソースを用いた調整に伴うものである。また C12137-06HA 側で取得しているスペクトルデータを利用して、1 月 31 以降の 1 時間ごとの周辺線量率および吸収線量率も評価した結果も記載している。

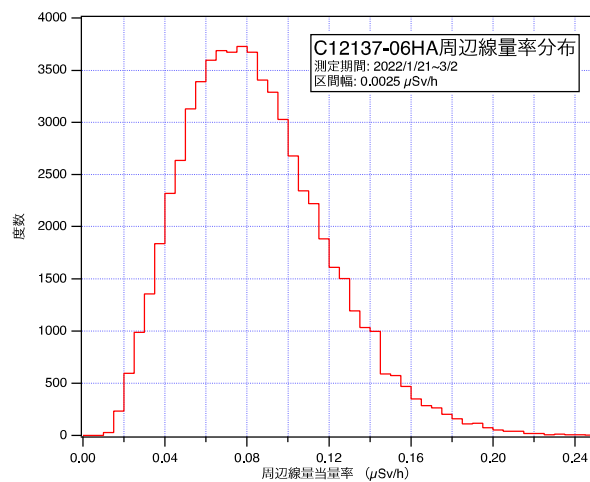


図 33 C12137-06HA の周辺線量当量率の 1 分値の分布の状況。明らかに正規分布からずれており、少数統計についての考慮が必要であることを示唆している。

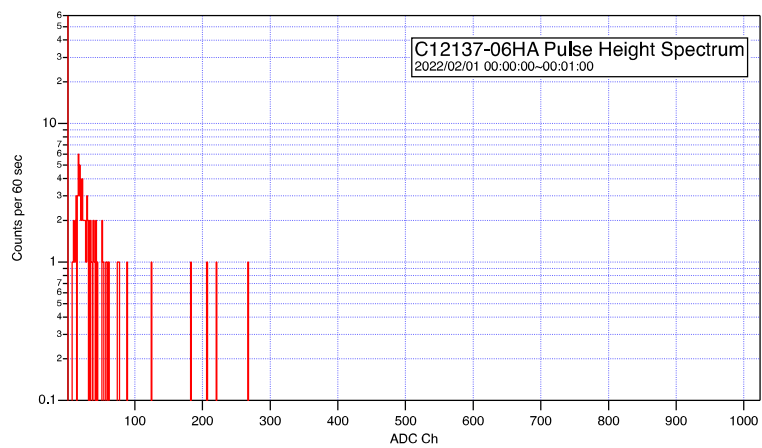


図 34 C12137-06HA の環境放射線レベルでの典型的な波高スペクトル。このスペクトルは 60 秒分の測定であるが、ADC1 チャンネルあたりの計数がたかだか数カウントであり、全体でも 100 カウントに満たない。

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。

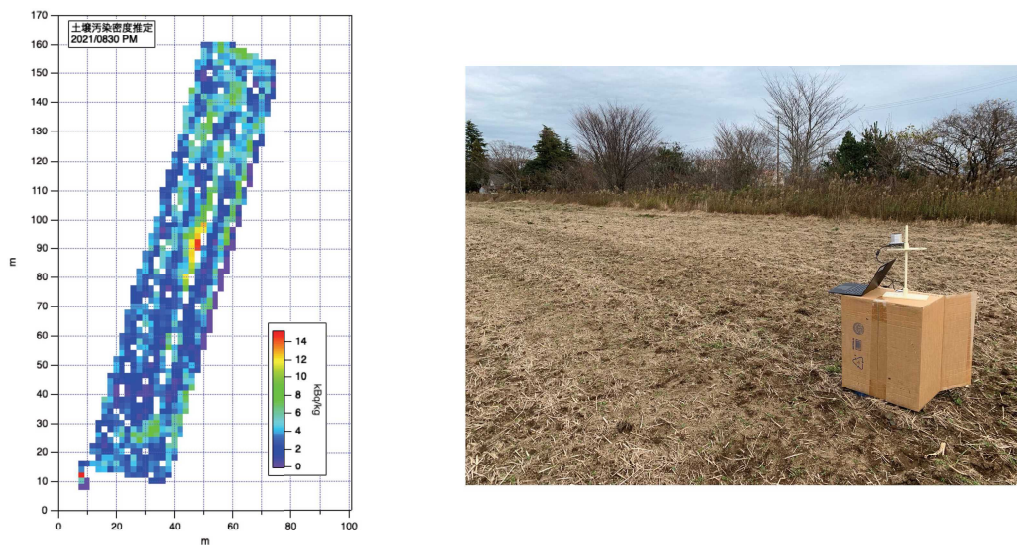


図 35 測定を行った圃場の様子。歩行型 KURAMA-II で測定した土壤の汚染密度分布（左）と、測定当日の圃場の様子（右）。検出器は空の段ボール箱などを使って高さ 1 m の位置に設置して測定している。

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）。

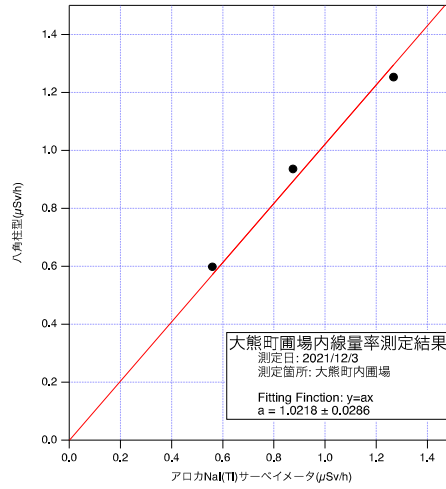


図 36 八角柱型検出器と TCS-172B の指示値の相関。

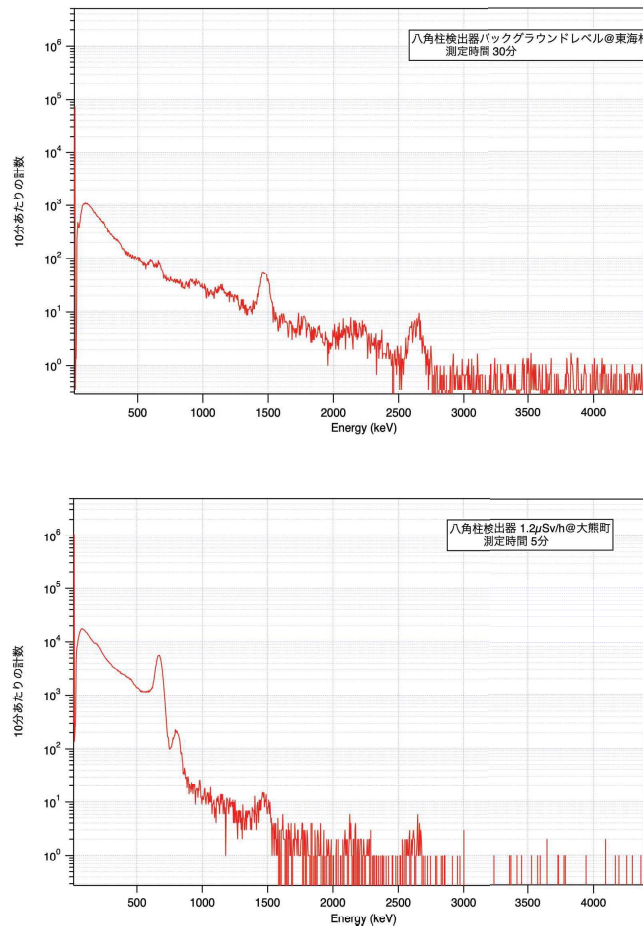


図 37 八角柱型検出器で取得した東海村の環境放射線のスペクトルデータ（上）と大熊町の圃場でのデータ（下）。縦軸はいずれも 10 分間の計数に換算している。その地点の環境放射線場を構成する核種のちがいが明瞭にみてとれる。

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。

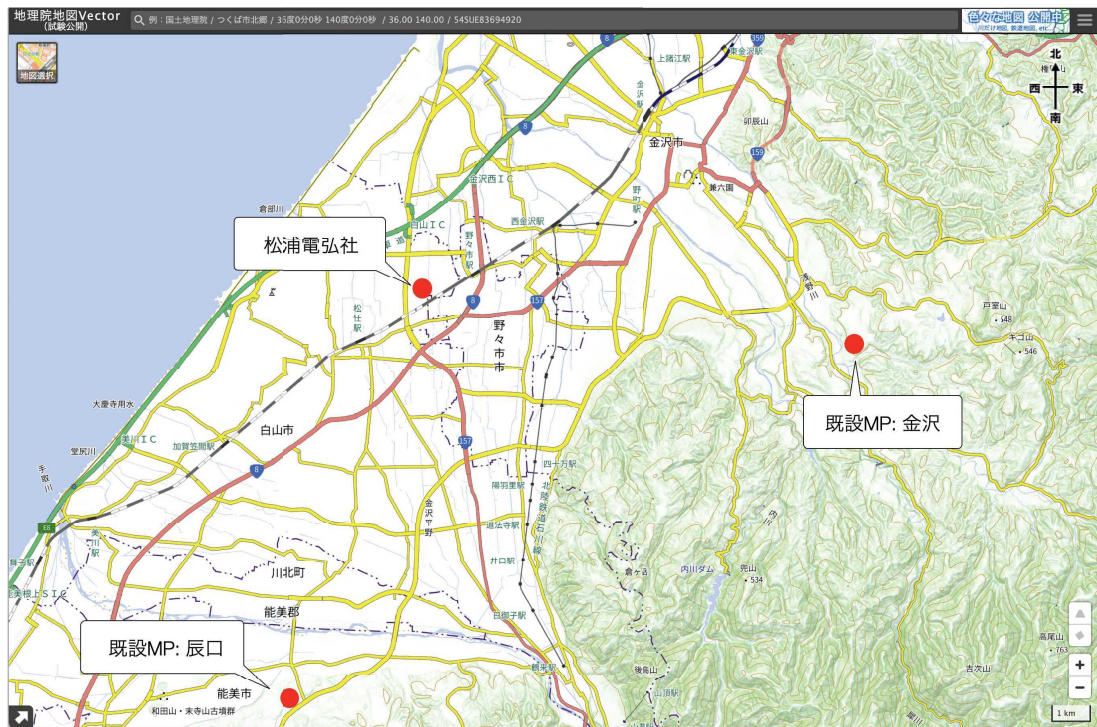
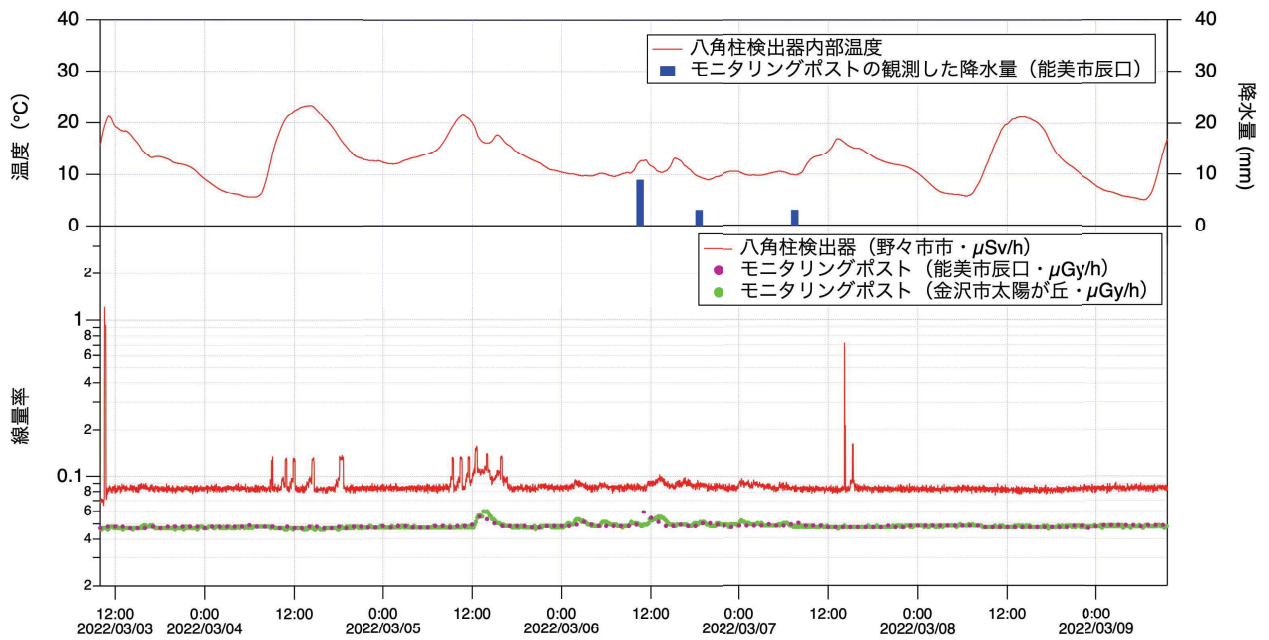


図 39 八角柱型検出器および近隣のモニタリングポストの測定結果 (上) と、比較対象とした既設モニタリングポストの設置箇所との位置関係 (下)。設置箇所の周辺線量当量率は $0.08\mu\text{Sv/h}$ で安定しており、密封線源が近接している場合を除き全体として近隣のモニタリングポストとよく似た挙動を示している。また、3月8日には検出器温度が日時変動で $15\text{ }^\circ\text{C}$ ほど変わっているにもかかわらず八角柱型の線量率に変化はないことも確認できる。

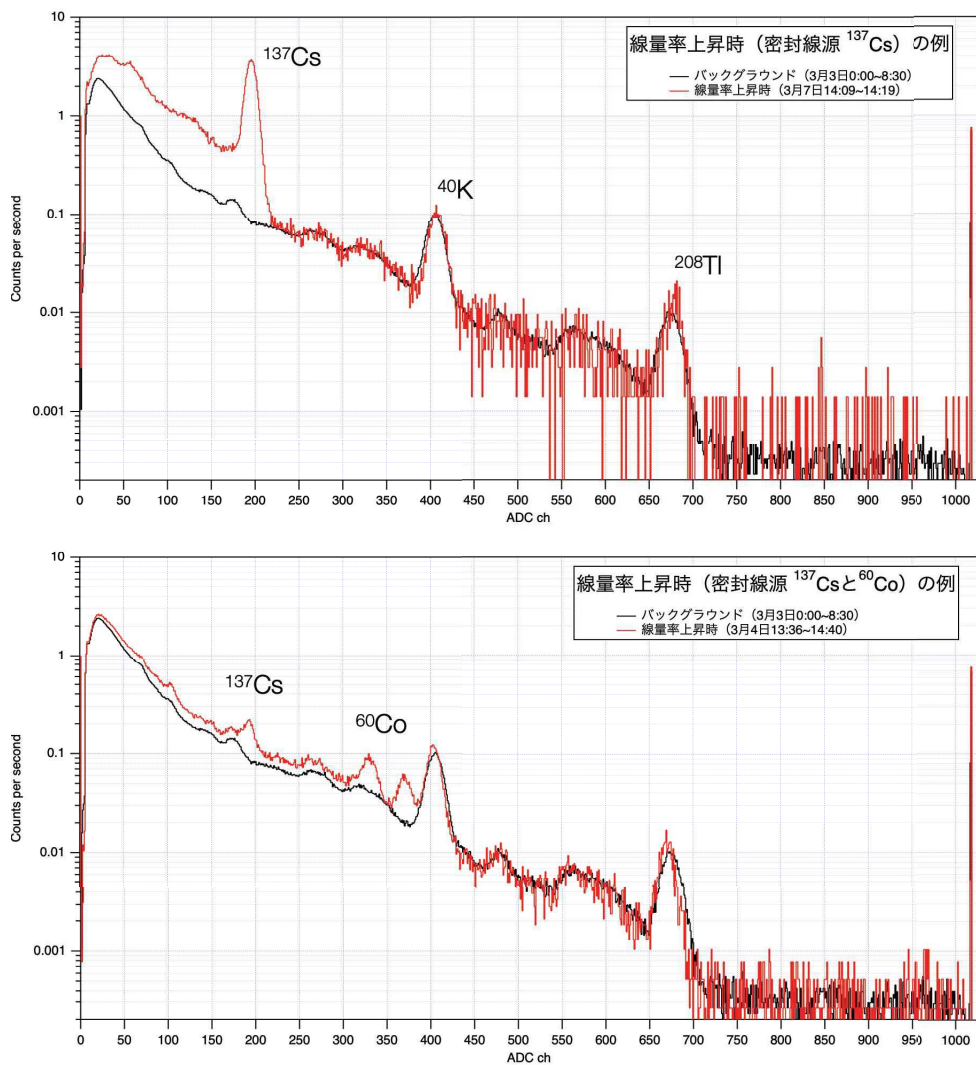


図 40 線源による線量率上昇時のスペクトル。上側のグラフは八角柱検出器調整目的で ^{137}Cs 使用時、下は隣接する社内試験用モニタリングポストで ^{137}Cs と ^{60}Co を同時に使用したとき。天然核種の ^{40}K や ^{208}Tl はバックグラウンド時と同一なまま ^{137}Cs と ^{60}Co に対応するピークだけが現れている。

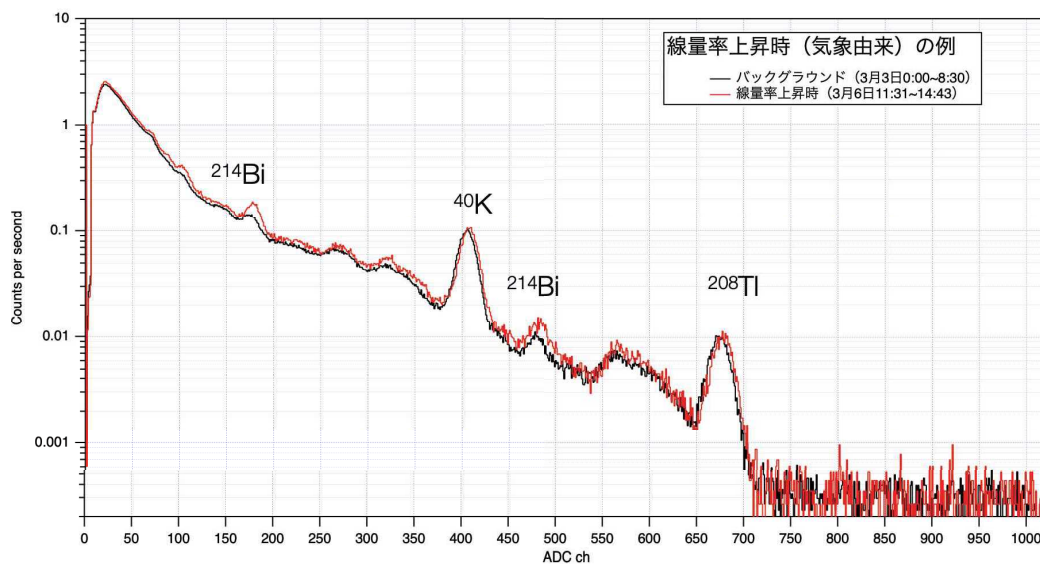


図 41 気象由来による線量率上昇時のスペクトル。 ^{137}Cs と ^{60}Co のような人工核種のピークが見られない一方、天然核種のなかでも降雨時に見られる ^{214}Bi のピークが明瞭になっているのがわかる。

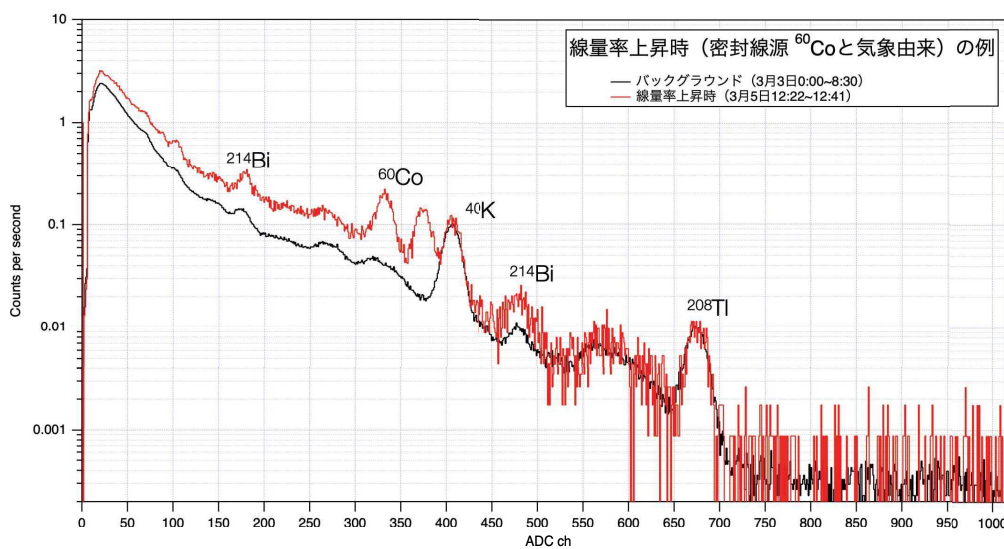


図 42 線源と気象由来両方による線量率上昇時のスペクトル。使用している ^{60}Co が明瞭に現れる一方、天然核種のなかでも降雨時に見られる ^{214}Bi のピークが明瞭になっているのがわかる。

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)。

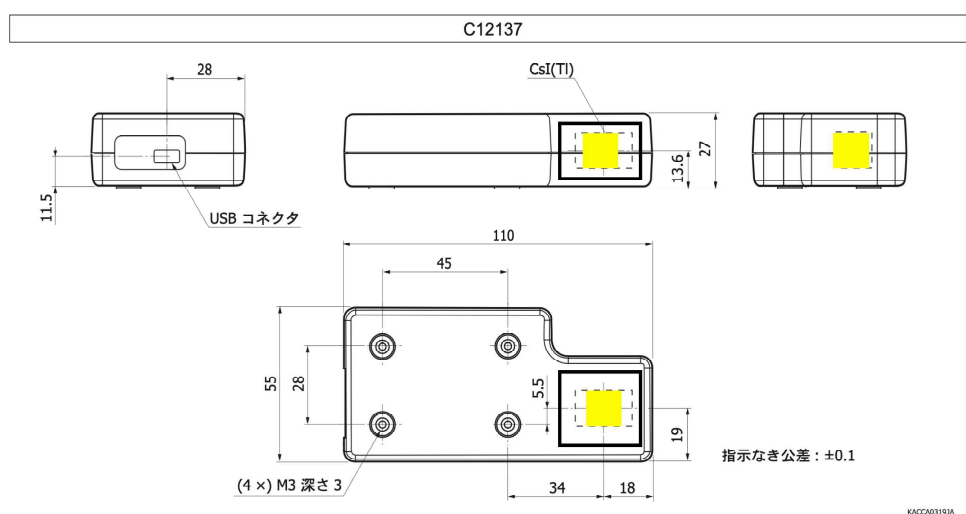


図 43 試作した 13 mm 角立方体 GAGG 検出器の概要を C12137 のカタログで公開されている図面に配置したもの。結晶 (黄色) が 2 mm 厚のアルミケース (黒枠) に収められ、従来の C12137-00 と同じ筐体で仕上げられている。

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。

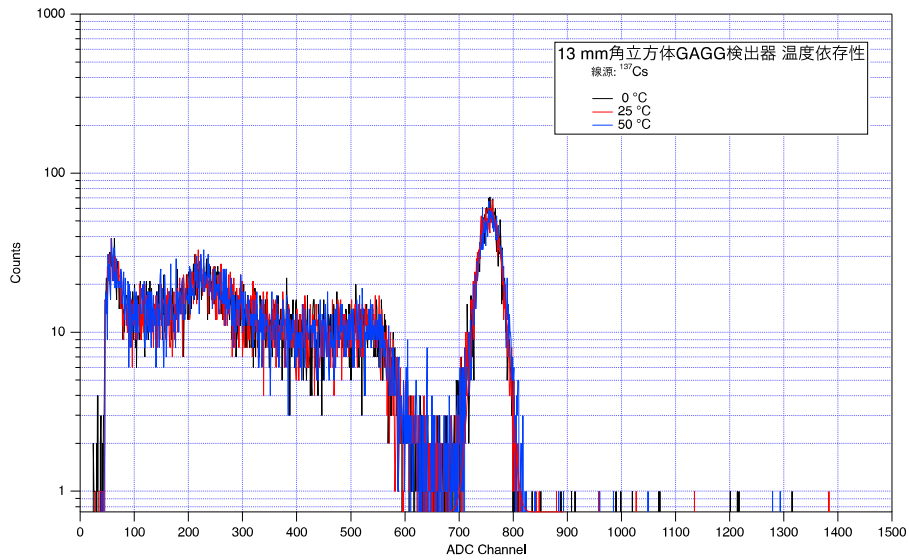


図 44 試作した GAGG 検出器の温度依存性測定データ。0°C (黒)、25°C (赤)、50°C (青) の 3 つの場合が示されているが、明確な違いは観測できなかった。ピーク幅から評価したエネルギー分解能についても、いずれの温度でも 5.3 % であった。

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>