

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

京都大学複合原子力科学研究所
谷垣 実

課題名 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

研究期間：2021年度（1年間）

背景・目的

KURAMA-IIで実績のある受光素子にMPPCを使用したシンチレーション検出器をベースに、環境放射線モニタリングに適したMPPC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。

実施状況

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

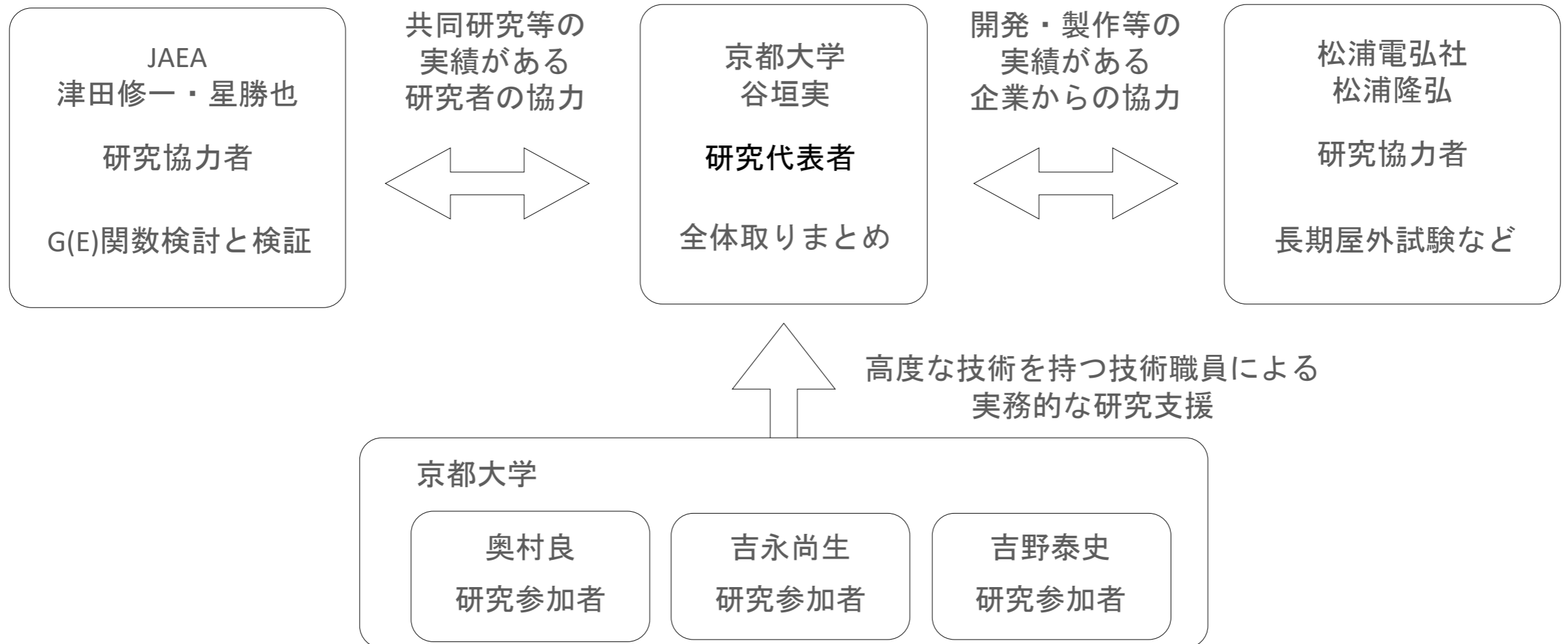
mSv/h程度までをカバーする高線量率用検出器を過去の試験評価やシミュレーションで設計し、試作品をJAEA核サ研の校正施設で試験評価した。また、試作品は既設モニタリングポストに隣接する場所に設置し、長期耐久試験及び測定値の比較検証に着手している。
また、今回の研究成果である10 mSv/h程度まで計測可能な高線量率用検出器については商品化を実現した（浜松ホトニクス社C12137-06HA）。

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	

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。

研究体制



研究の背景

既存のモニタリングポスト用検出器

参考図：茨城県Webページより引用



Nal(Tl)検出器

- エネルギー情報が得られる
- 低線量率でも安定した計測が可能
- 高線量率での数え落とし
- 潮解性が大きい
- 外気温や湿度に影響される
- 高電圧の精密制御が必要（±1%未満）

参考図：茨城県Webページより引用



電離箱検出器

- エネルギー特性・方向特性が良い
- 線量率直線性が良い
- エネルギー情報が得られない
- 平常時レベルの測定が困難
- 外気温や気圧、湿度に影響される

島根県の例：放射能測定法シリーズ No.17より



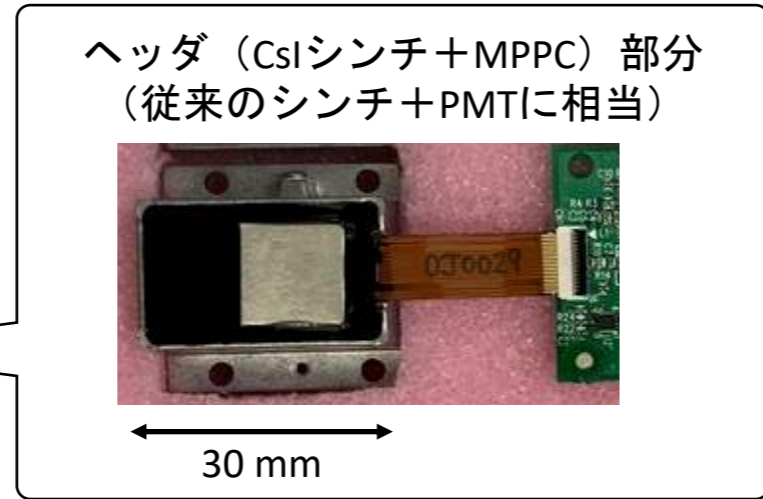
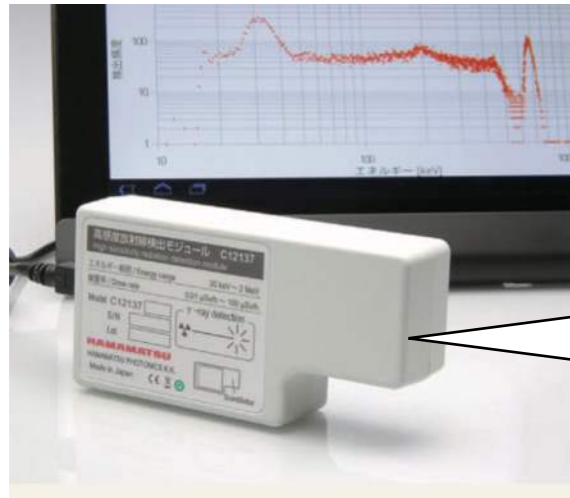
半導体検出器

- 高線量率計測が可能
- 安価
- エネルギー情報が得られない
- 環境の外気温の変化に対する安定性
- 平常時レベルの測定は難しい

研究の背景

MPPCを受光素子とした全固体検出器の実用化

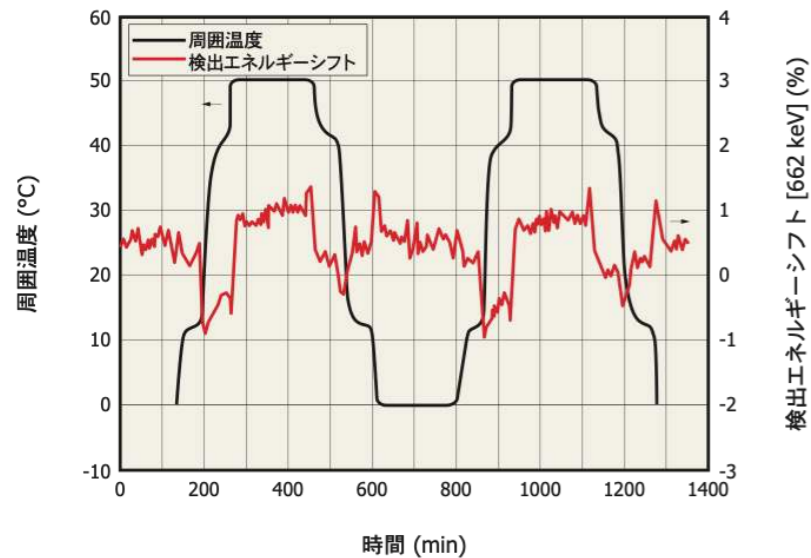
CsI(Tl)+MPPC検出器（浜ホトC12137シリーズ）



- 検出器+受光素子の大幅な小型化
検出器+受光素子のモジュールで
適切な温度補償・湿度管理の実現
- MPPCで低バイアス電圧（～50 V）動作
電圧制御が容易
耐圧処理が不要になり小型化・軽量化に貢献
低消費電力（USBバスパワー動作）
- CsI(Tl)の発光波長とMPPCの受光効率が適合

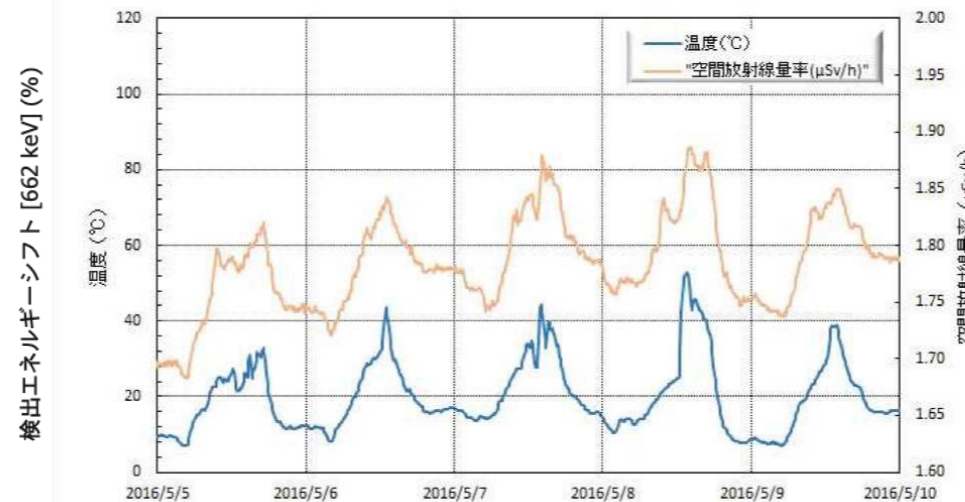
検出器を温度管理なしで使用した場合の温度依存性の例

浜ホトC12137シリーズ(注1)



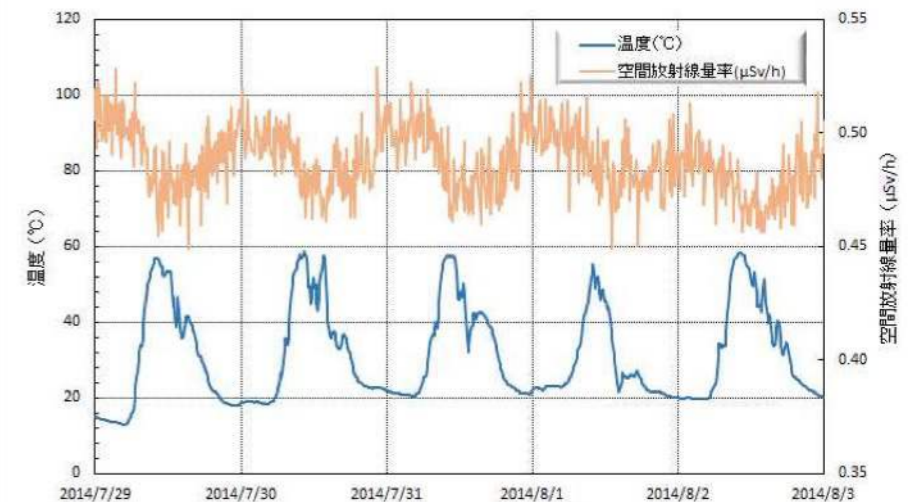
0~50°Cでゲインシフト±1%
（線量率で±2%相当）
温度そのものへの依存は小さい

NaI(Tl)の例(注2)



10~50°Cで線量率±5%
外気温の日時変動に対応した線量率変化

シリコン半導体の例(注2)

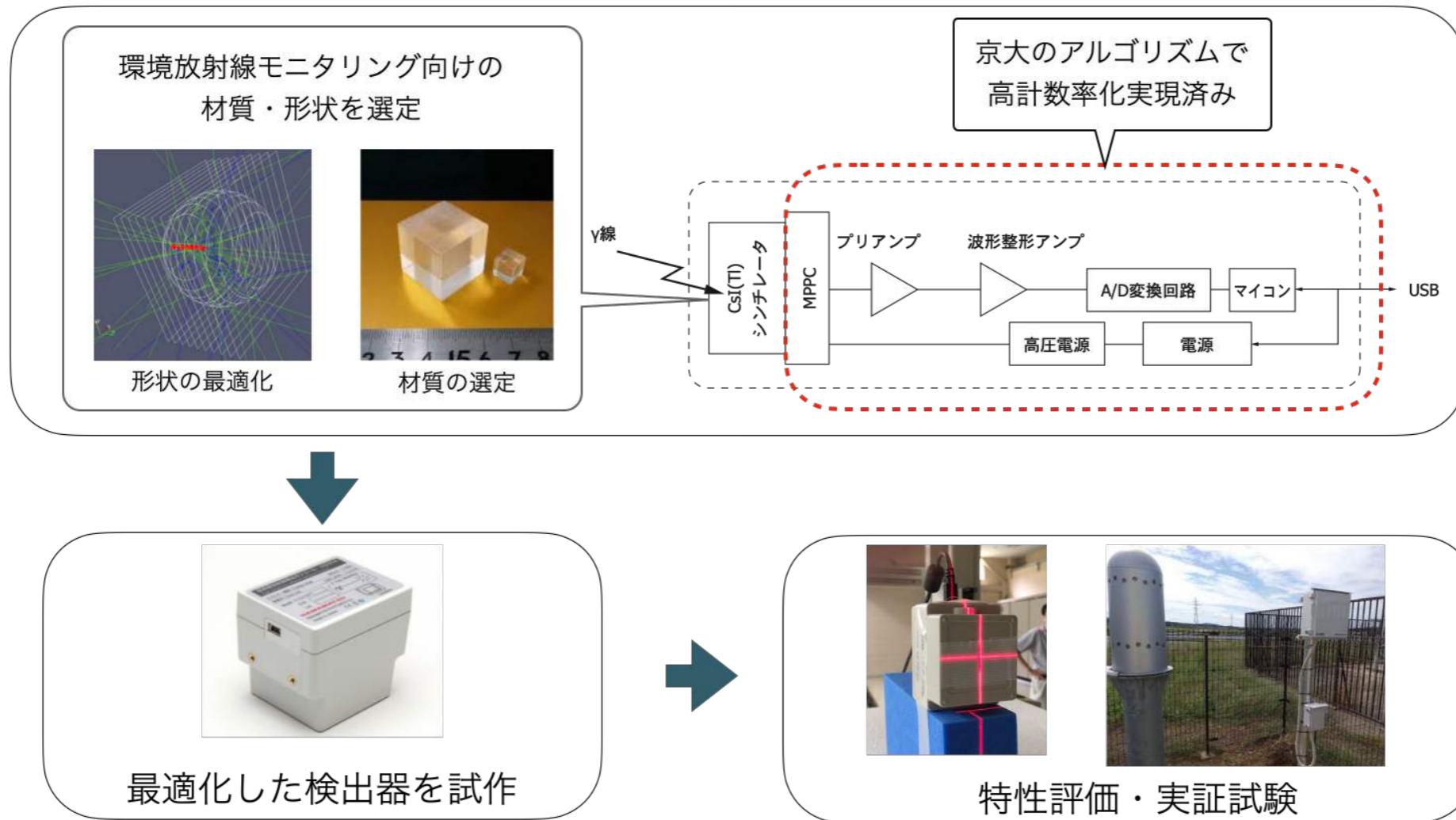


20~50°Cで線量率±5%
外気温の日時変動に対応した線量率変化

(注1) 浜松ホトニクスカタログより (注2) 放射能測定法シリーズ No. 17 可搬型モニタリングポストのデータより

研究の概要

目標：モニタリングポストの測定能力維持＋維持管理コスト削減



具体的には

- モニタリング目的に合致した線量率範囲
- 特性及び価格面で合理的なシンチレータの検討（材質や形状）
- 耐環境性向上による維持管理コスト削減（温度、湿度、機械強度など）
- 既存モニタリングポストとの運用の連続性

目標とする設定範囲

ユーザの声を聴きながら用途に応じた範囲を設定



C12137-01(~300 $\mu\text{Sv/h}$)

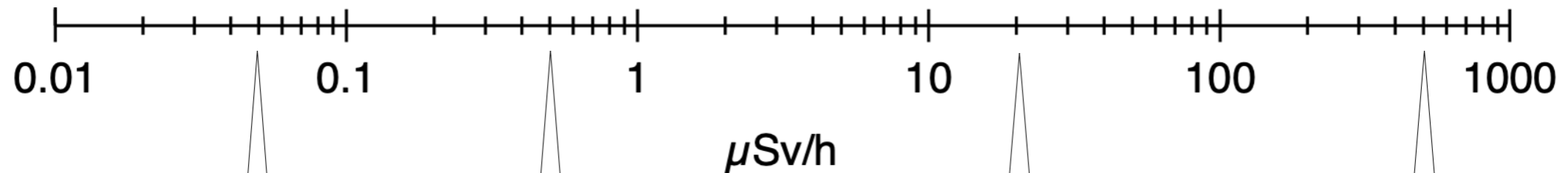


C12137-00(0.1 ~2000 $\mu\text{Sv/h}$)

モニタリングポストを運用する
周辺自治体担当者への聞き取り

0.01~10 $\mu\text{Sv/h}$ (NaI(Tl) 2 inch 置き換え)

1~5000 $\mu\text{Sv/h}$ 以上 (緊急時対応)



平時の線量率

飲食物の
スクリーニング基準
0.5 $\mu\text{Sv/h}$

OIL 2
20 $\mu\text{Sv/h}$

OIL 1
500 $\mu\text{Sv/h}$

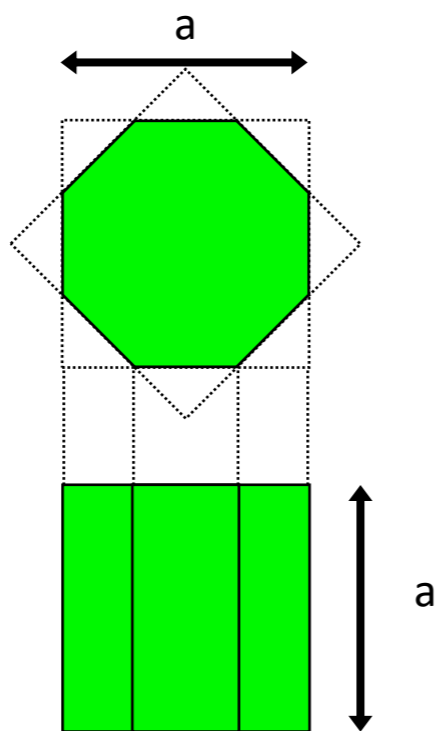
シンチレータの検討

形状：低線量率は八角柱・高線量率は立方体

低線量率

立方体の異方性は角の実効厚で発生。

加工しやすさや歩留まりを考慮して八角柱を採用



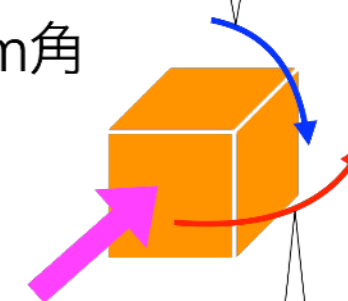
高線量率

γ 線の平均自由行程が結晶寸法以上になる。e.g. CsIで2.6 cm@662 keV

立方体のままでJISを満たす特性が得られる

対角線の張る面の法線を軸に回転

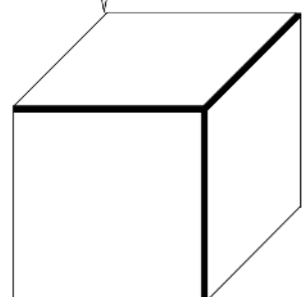
6 mm角



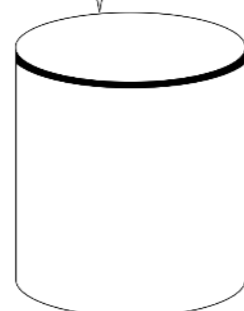
面の法線を軸に回転

角で $\sqrt{3}$ 倍

加工や歩留り

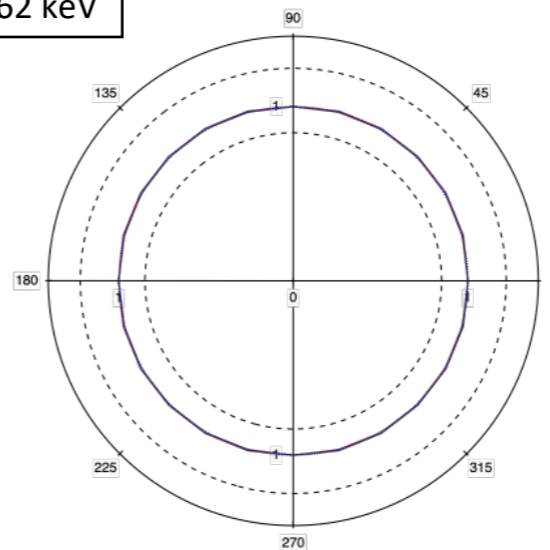


直方体・立方体

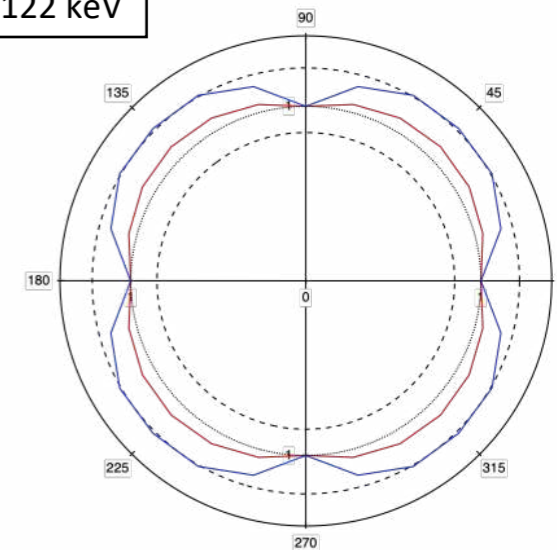


円柱

662 keV



122 keV

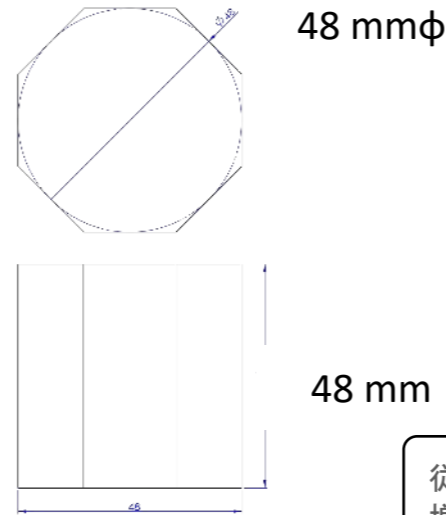
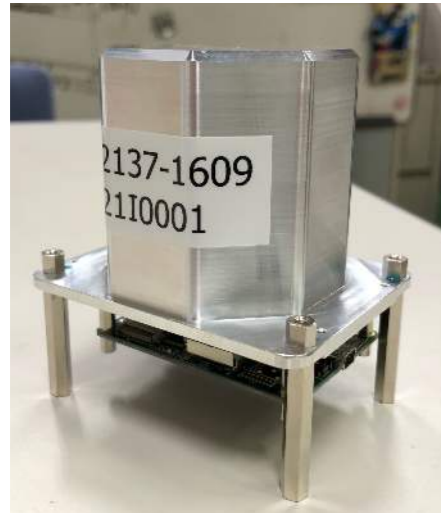


図中の点線はJIS Z4325 (モニタリングポスト) $\pm 20\%$ (^{137}Cs , $0^\circ \sim \pm 120^\circ$)
JIS Z4333 1型 (サーベイメータ) は $-29\% \sim +67\%$ (80 keV \sim 1.5 MeV, 0° , $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$)

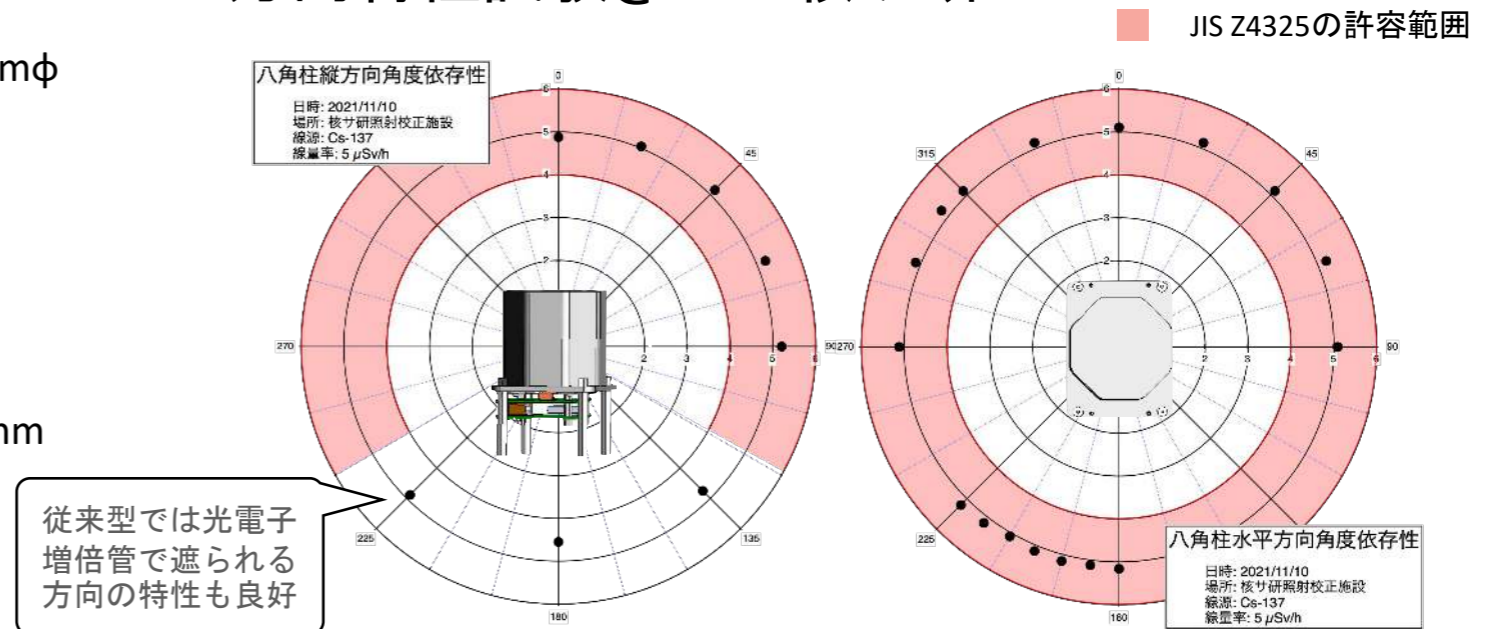
試作品評価: 低線量率用(八角柱)

良好な特性 + 設計通りのダイナミックレンジ

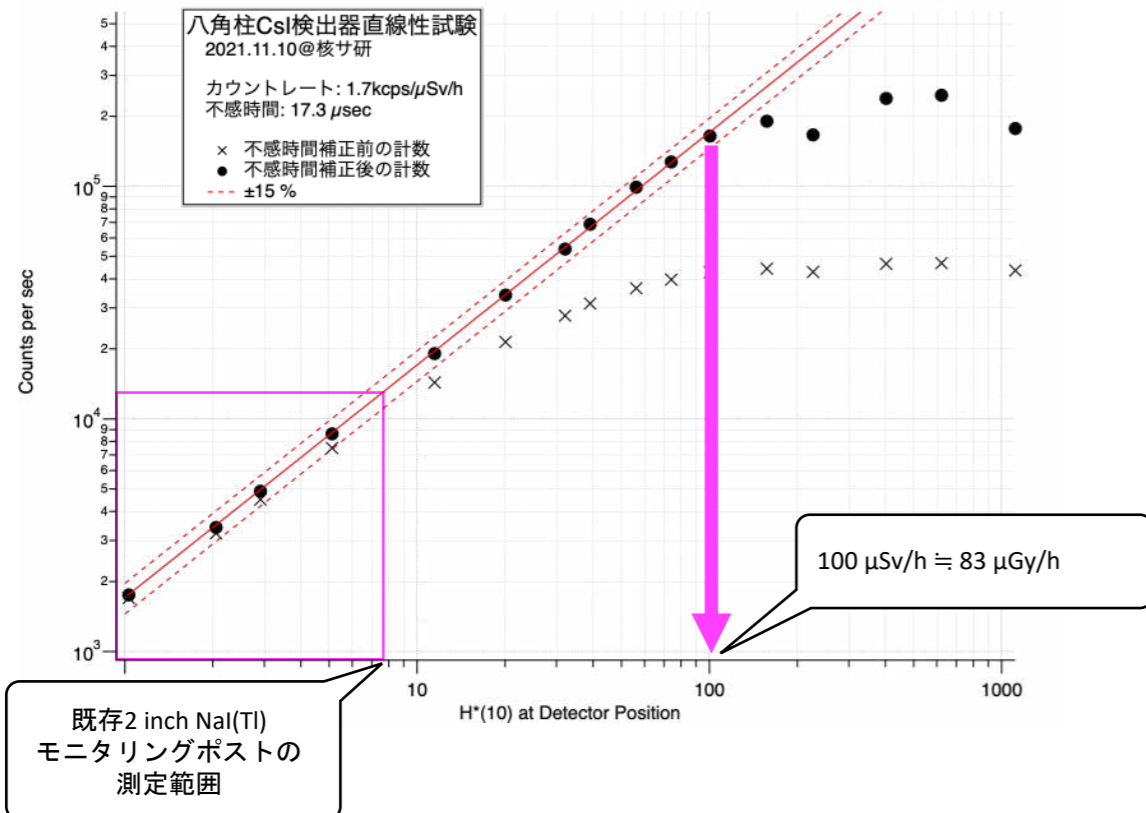
試作品形状



方向特性試験@JAEA核サ研

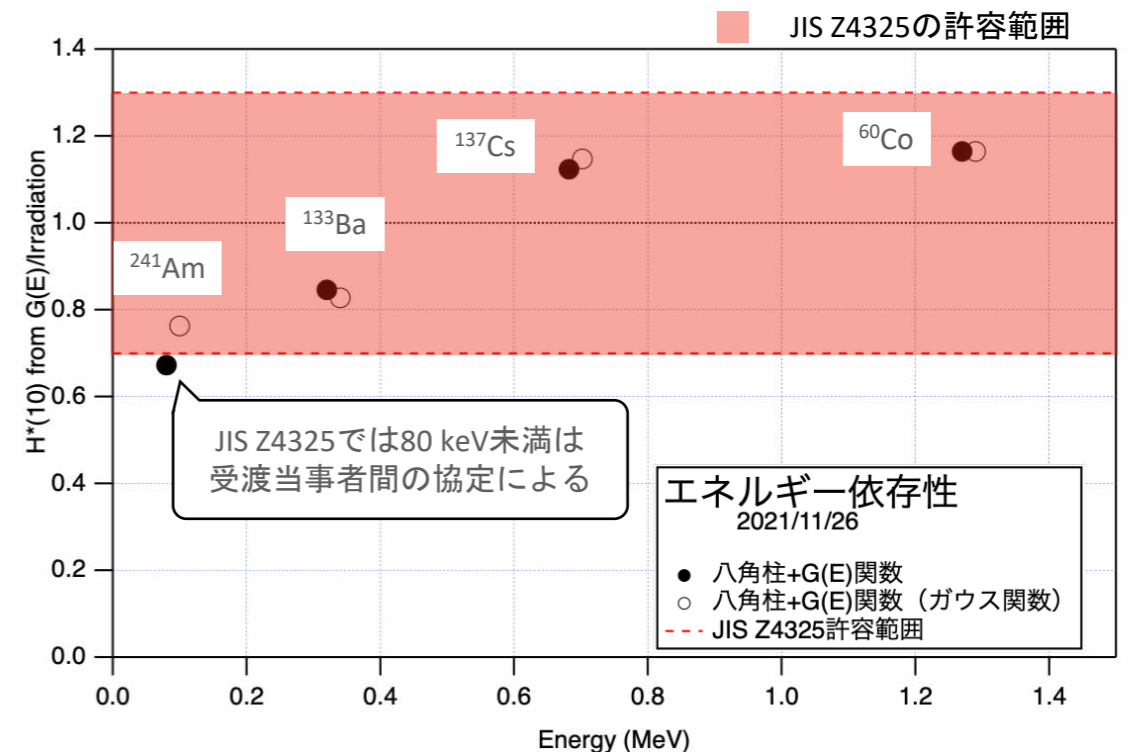


直線性試験@JAEA核サ研



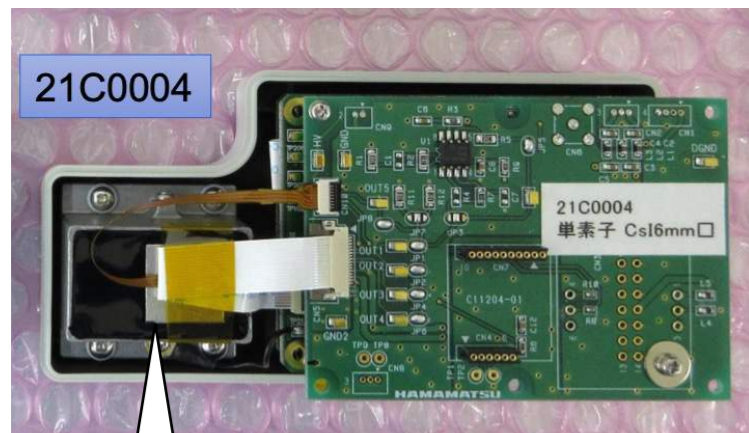
エネルギー特性@JAEA核サ研

※現時点でのG(E)関数による。改善に向けた作業を継続中



試作品評価: 高線量率用(立方体)

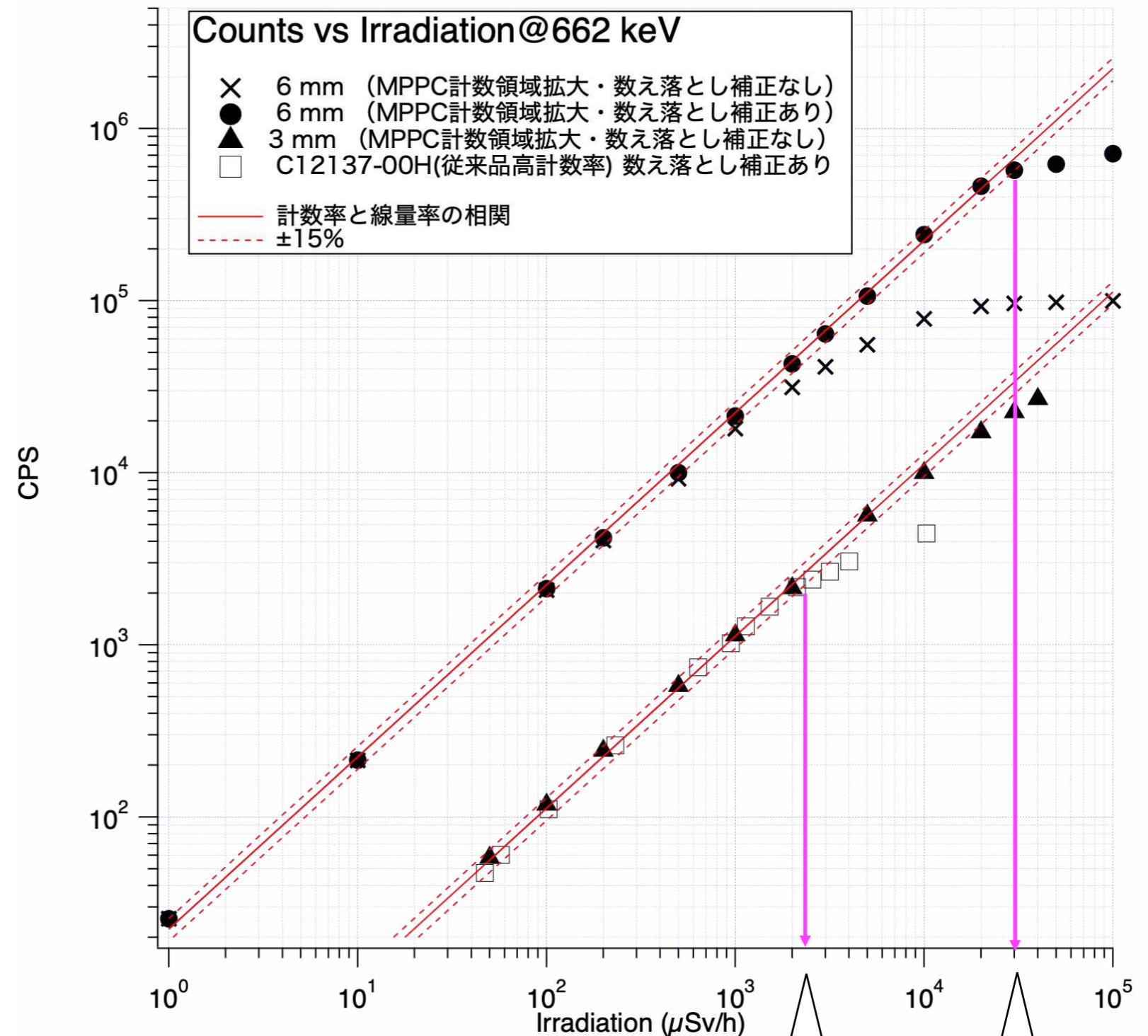
CsI(Tl)の直線性評価



結晶の大きさを変える

- CsI(Tl) 6 mm角立方体
- CsI(Tl) 3 mm角立方体

- 従来品（白抜き四角）
に比べて大幅に改善
- 3 mm角はFRSの照射上
限 40 mSv/hまでしか
取れなかった



従来品の上限 (約2 mSv/h)

30 mSv/h = 25 mGy/h

今年度の成果

高線量率用検出器の商品化

浜松ホトニクスC12137-06HA（6 mm角 CsI(Tl)搭載）

※ 低線量率用八角柱検出器も商品化作業中

学会等での発表

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

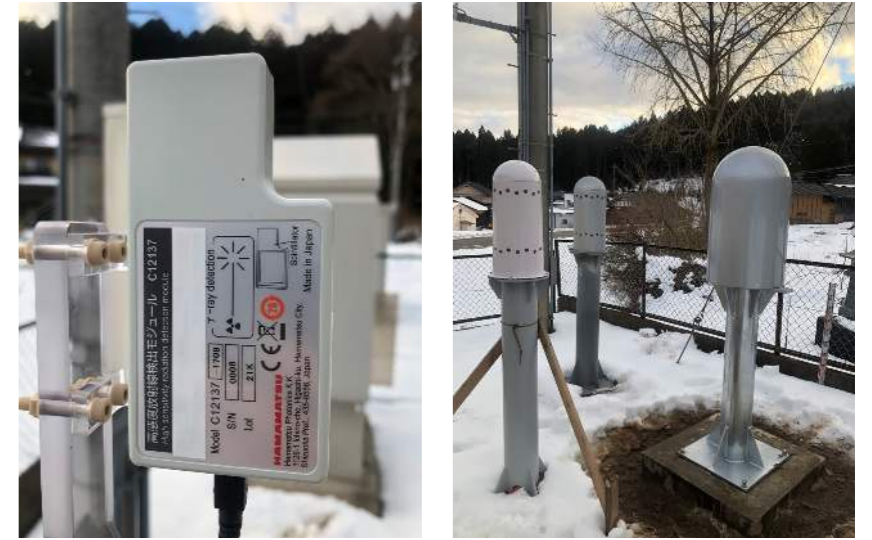
International Conference on the Development of Preparedness for National and International Emergency Response (EPR2021)

(2021年10月11-15日)

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

一般向け広報

- 「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)



左：商品化され石川県に導入されるC12137-06HA（銘板は間に合わず試作品のものを流用）

右：C12137-06HAは樹脂容器に収められて設置される（写真内の一番右側）

高線量率用検出器(C12137-06HA)

石川県赤住局で設置後約半年[※]無故障稼働を達成中

※2022年5月20日現在

設置の様子

新設
モニタリングポスト
内部の様子

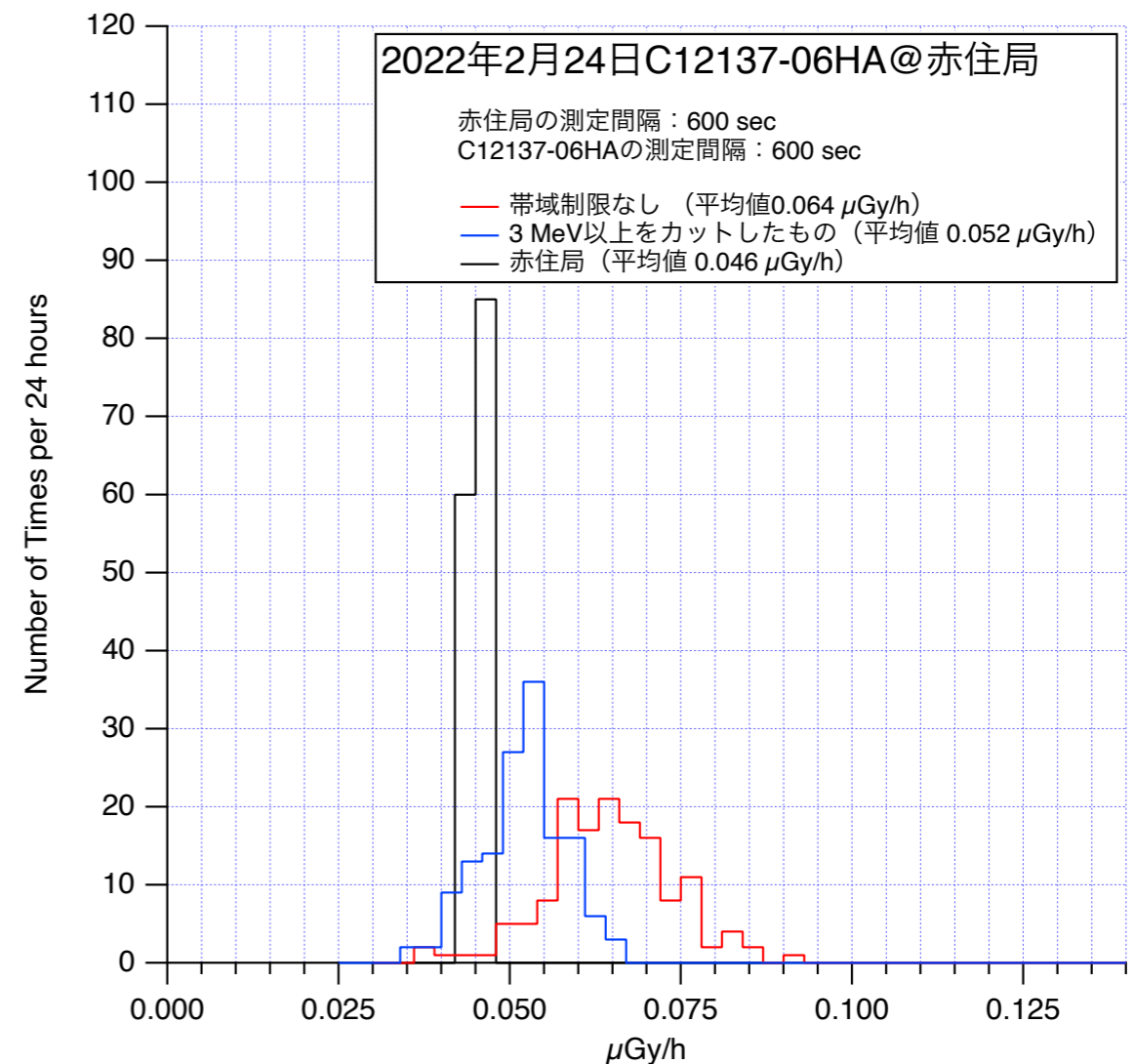


既設モニタリングポスト
(赤住局: 3 inch NaI(Tl)と電離箱)



石川県導入の高線量率用検出器で試験
既設モニタリングポストに隣接して設置

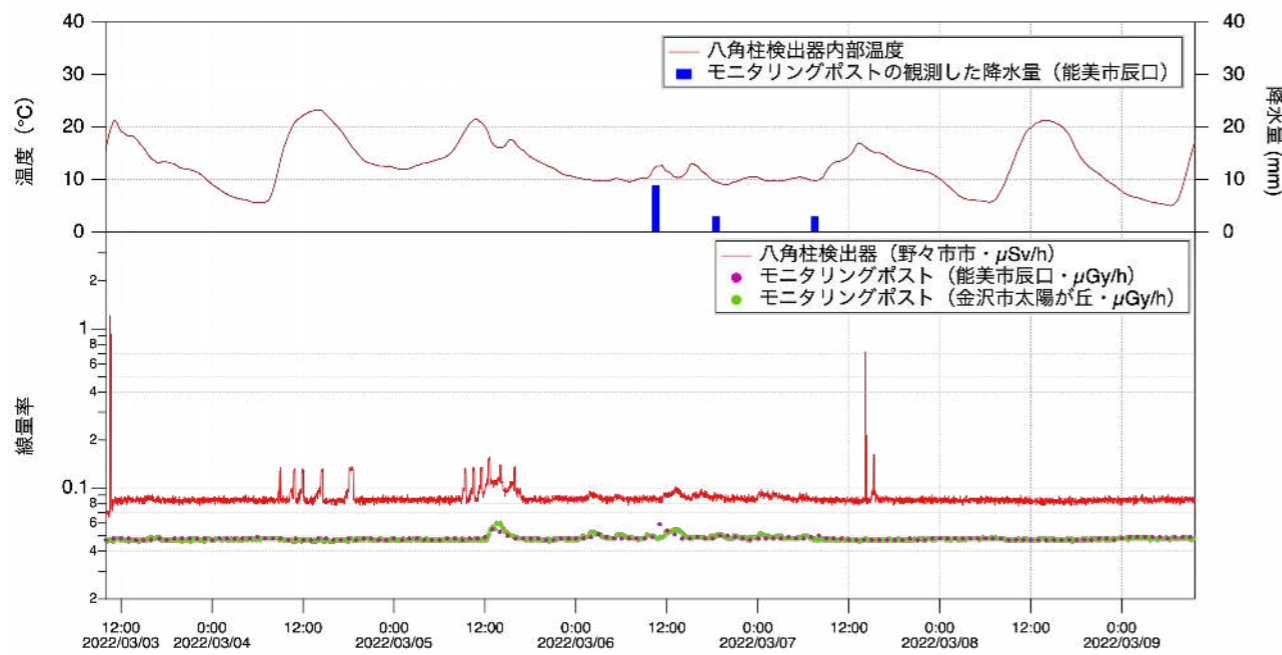
既設モニタリングポストの公表値との比較



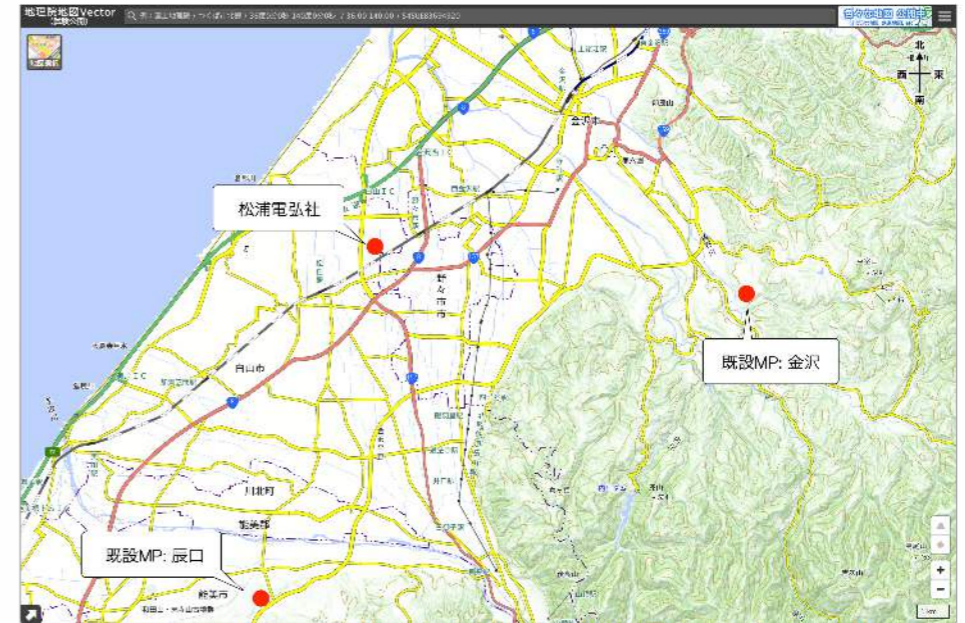
mSv/h以上の計測に対応する高線量率測定用であり
今回見られた差は実用上問題ない。3 MeV以上の計
数の線量率への寄与が大きい。宇宙線とみられるが
今後の運用の中で検証を進める予定。

低線量率用検出器

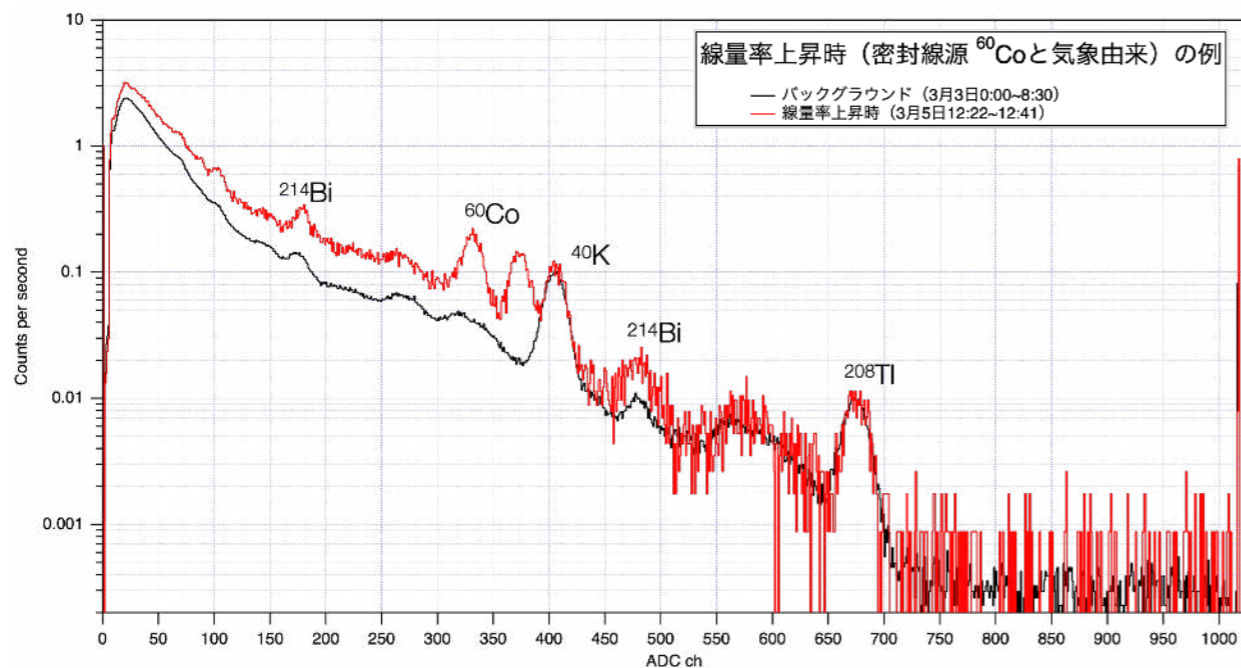
屋外試験中（松浦電弘社敷地内）



経時変化の例



近隣モニタリングポストとの位置関係



気象および密封線源由来の線量率上昇時の波高スペクトル

近隣のNaI(Tl)モニタリングポストと矛盾ない挙動が確認されている。

温度・湿度管理なしでも安定に稼働。

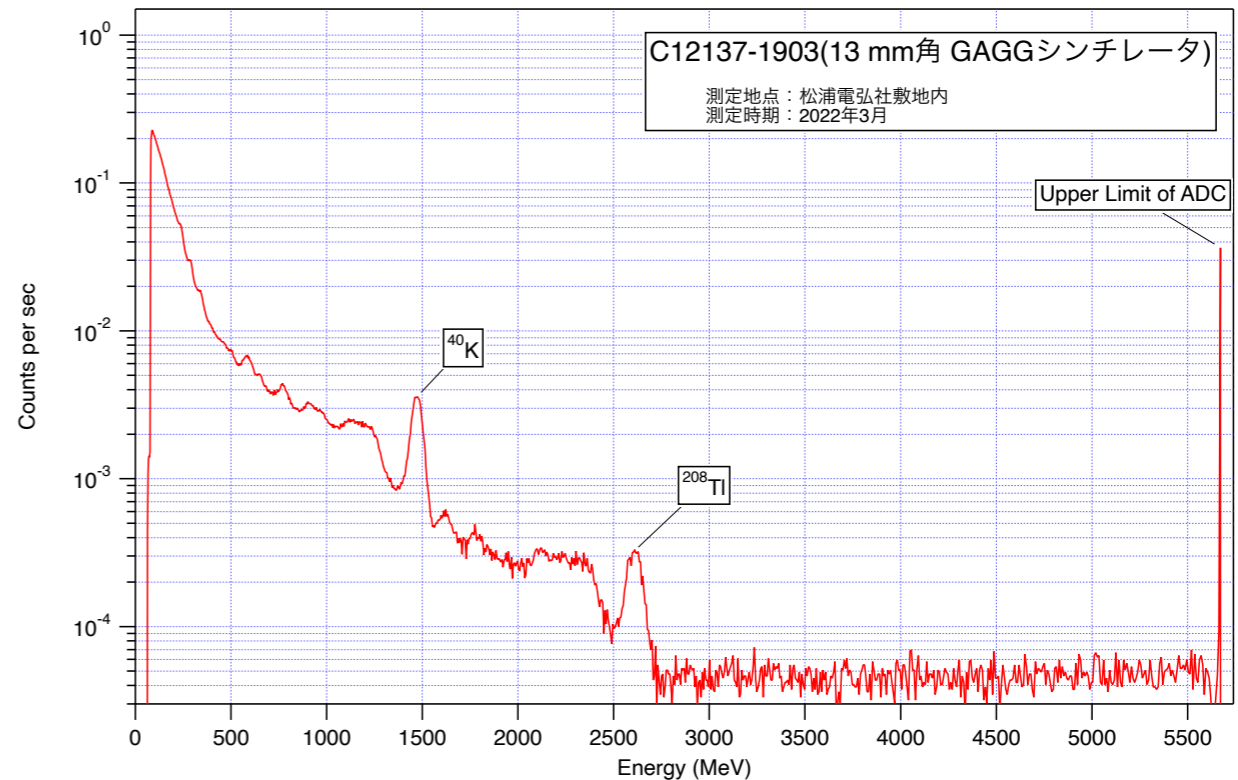
降雨由来の線量率上昇や近隣で使用されたチェックソースも検知している。

GAGG検出器 (C12137-1903)

13 mm角GAGG検出器を屋外試験中



GAGG検出器の屋外設置の様子



GAGG検出器で取得した環境放射線の波高スペクトル

屋外試験用・屋内試験用2個作製した。
うち屋外試験用はエネルギー校正ののち
バックグラウンドレベルでの環境放射線
測定中。

屋外で温度・湿度管理なしでも安定に稼働している。

予約が取れ次第校正施設での各種性能評価を開始する予定。

自己評価

項目	当初計画	現状	評価	
検出器の試作	安定した運用実績のあるCsI(Tl)+MPPCたいふで、各種判断基準をカバーする環境放射線モニタリングに適した特性をもつ検出器の設計・製作	PHITSによるシミュレーション等をもとに、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以上測定可能な検出器を試作し、これらに適用するG(E)関数も決定した。またGAGG結晶の新規調達の目処がついたため、事業期間内に実用的なサイズである13 mm角GAGGの検出器を試作できた。	新型コロナの影響で遅れが発生したものの、事業内で目標通りの試作を行うことができた	○
性能評価	校正場をもちいた検出器の特性評価 G(E)関数の妥当性を確認	試作した検出器について校正場による評価を行い、JIS規格に適合する良好な結果を得た。G(E)関数の改善による一層の特性改善ができた。13mm角GAGG検出器についても特性評価に着手した。	目標通りの結果を得た	○
運用試験	既設のモニタリングポスト横に設置して長期運用を行い、実測値の相互比較や耐久性の評価を行う	新型コロナの影響の試作遅れで着手が遅れる。高線量率対応型は2021年秋頃より屋外耐久性試験を実施。2022年1月より八角柱型と高線量率対応型を石川県内のモニタリングポスト横で3ヶ月程度長期運用を実施した。なお事業後も13mm角GAGG検出器を加えて運用継続中。	試作の遅れによる遅れが発生したが、年度内に当初予定の成果をまとめた。	○
成果公表 社会実装	研究成果の学会等での発表 一般への研究開発状況の紹介	国内外での学会発表（原子力学会・EPR2021） 一般への情報公開（Maker Faire, Twitter等） 高線量率対応検出器の商品化（浜ホトC12137-06HA） 低線量率対応検出器の商品化（浜ホトC12137-88HA）	研究成果を商品化まで結びつけることができた	◎

評価委員会から頂いたコメントについて

評価委員会からのコメント：

Nal 等の既存の検出器との比較データを示すとともに、可能な範囲で長期間に亘る環境耐性についても検討されたい。

高線量率用は隣接して設置した赤住局モニタリングポストとの、低線量率用は近隣二ヶ所のモニタリングポストとの比較を実施した。いずれも問題ない結果を得ている。また、高線量率用検出器は約半年にわたる屋外での連続運用を実施し、故障等の問題が発生していないことを確認した。

研究成果の放射線規制及び放射線防護分野への活用

高線量率用検出器及び低線量率用検出器はそれぞれ浜松ホトニクスより C12137-06HA、C12137-88HAとして商品化された。C12137-06HAは実際に石川県に導入され運用が始まっている。