

# 教育用放射線量計に求められる特徴とその効果的な利用に関する検討

2022 年 3 月修了 環境システム学専攻 47-206650 庄沁優

指導教員：飯本武志 教授

キーワード：放射線量計、放射線教育、環境放射能測定

## 1. 背景

私たちの身の回りには常に自然放射線が存在している。また、医療、工業、農業など、様々な分野で人工放射線が利用されている。2011 年に東京電力福島第一原子力発電所事故が発生し、事故により放出された放射性物質は注目を集めることとなった。このような背景の中で、文部科学省は学校での放射線教育を重視し始めた。しかし、現在実施している放射線教育はほとんど座学がメインとなっている [1]。参加型の教育形式である「実験」は座学で得られない体験であり、教育に取り入れることによって、一部の独特な学習内容を設計することが可能となる。放射線に関する実験機材は様々な種類があるが、その一つである教育用放射線量計にはいくつかの課題が存在する。例えば 2014 年に終了した文部科学省による CsI シンチレーション式教育用放射線量計「はかるくん」貸し出し事業の場合、事業終了後に「はかるくん」は全国の教育委員会などに配布された。しかし、これらの線量計は教育現場で機能確認や校正ができないため、測定誤差が段々と大きくなっており、管理状況が不明であるものも存在する [2]。また、実務の現場で使用される放射線量計と同様な管理方法を教育用放射線量計に適用するのは、コストや専門人材の不足などの理由から適切とはいえない。そのため、教育目的に特化した管理と使用の基準を検討することが要求されている。



図 1 放射線線量計の例

左：放射線教育用線量計 KINDpro

中：NaI シンチレーション式線量計 TCS-172

右：NaI シンチレーション式線量計 TCS-161

## 2. 研究目的と方針

本研究では、教育目的に特化した放射線量計の統一された管理、使用の基準と、性能を向上する方法の提案を行い、教育用放射線量計の普及に貢献することを目的とする。

教育用放射線量計の用途は色々あるが、本研究では「環境の空間線量（率）測定」という用途に特化した教育用放射線量計を想定した。表示値の変動を正しく解釈し、環境で測定を行う際に考えられる線量計の表示値に影響を与える要因を整理する。教育用放射線量計の配布と同時に説明書と注意書きを提供すると、専門家が常駐できない一般的な教育現場でも、線量計の表示値に誤解が生じる可能性を低減できると考えられる。また、教育用放射線量計は予算を多く割り出せない一般的な教育現場での使用が主であるため、有限なコストで測定の精度を向上する方法を探す必要もある。

本研究では、教育用放射線量計の一例として、公益財団法人日本科学技術振興財団が東京大学飯本研究室と協働して開発を進めている教育用放射線量計である KINDpro のプロトタイプを使用した。

表 1 KINDpro（プロトタイプ）の基本情報

シンチレータ	CsI (TI)
測定線種	$\gamma$ 線 (100-3000KeV)
測定範囲	0.001 $\mu$ Sv/h $\sim$ 30.00 $\mu$ Sv/h 0 $\sim$ 99,999 カウント
測定誤差	$\pm 15\%$ (Cs-137 基準)
感度	1000 CPM/ ( $\mu$ Sv/h) 以上
測定モード	1 cm 線量当量（率）、cpm
エネルギーチャンネル	64keV $\sim$ 3MeV を 7 つに分割

## 3. 教育用放射線量計に存在する不確かさ

線量計で環境放射線の測定を行う際に、同じ空間で繰り返し測定を行っても、測定値のばらつきが出る可能性がある。このような測定の結果に付随した、合理的に測定対象量に結び付けられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータとして、「不確かさ」が使われている。教育現場だけでなく、東京電力福島第一原子力発電所事故後に個人で線量計を使用し測定を行うケース

が多くなっているが、不必要な混乱を避けるため、不確かさの理解と表現に関する議論は必要である。現在、放射線に関する様々な分野で不確かさに関する議論が行われている。本研究では、低濃度な放射線に対する規制の概念である「クリアランス」において、低濃度の放射性物質を合理的に管理するために、過剰に保守的にしないことが提案されている [3]。この提案を参考にすると、教育用放射線量計に許容される不確かさに厳しい規制は不要であるが、東京電力福島第一原子力発電所事故が発生した過去の事例を考えると、所在する空間が危険であるという最低限の判断ができることが望ましい。

日本全国で教育用放射線量計を使用する場合、その測定値が一番高い場所は事故由来の人工核種の影響を多く受けた福島県（県中）の  $0.104 \mu\text{Sv/h}$ 、一番低い場所は天然に存在する自然放射性核種が一番低いとされる神奈川県  $0.040 \mu\text{Sv/h}$  だと考えられる [4]。KINDpro の場合、この空間線量率に対応する CPM（毎分のカウント数）はおおよそ 147～382 である。CPM のばらつきをガウス分布とする場合、測定の不確かさにより  $3\sigma$  を超える確率は約 0.1% である。したがって、CPM が約 36～60 を超えた場合、有意に放射線が増加していると判断できる。KINDpro の場合、不確かさを考慮すると、有意な放射線が存在しないと考えられる表示値の上限は約  $0.120 \mu\text{Sv/h}$  である。

#### 4. 現存の教育用放射線量計の特性整理 [5]

本研究で取り扱う、 $\gamma$  線の周辺線量当量や方向性線量当量を測定する教育用放射線量計に比較的近い既存の規格基準として、放射線サーベイを目的とする線量計の性能について規定する JIS Z 4333:2014「X 線、 $\gamma$  線及び  $\beta$  線用線量当量（率）サーベイメータ」の項目を参考にした。教育用放射線量計を使用する際に重要だと思われる「温度特性」「方向特性」「エネルギー特性」を選定し、KINDpro を教育用放射線量計の代表として試験を行い、KINDpro のプロトタイプが備えている性能を調査した。結果を通じて、教育用放射線量計が備えるべき管理と使用の基準を提案するのが本章の目的である。

##### 4.1 温度特性

温度特性とは、線量計を使用する環境の温度により、指示値が変化する特性を指す。試験で

は恒温箱を自作し、保冷材とカイロを用いて温度を調整した。標準試験条件で Cs-137 と Co-57 線源を照射した際の指示値を基準とし、温度変化後の指示値から基準値を差し引いた値の基準値に対する百分率を求めた。

その結果、約  $+10^{\circ}\text{C}$ ～ $+38^{\circ}\text{C}$  の温度範囲で KINDpro の指示値は約 -11%～10% の範囲で変動し、KINDpro のプロトタイプは JIS 4333 が規定する温度特性の許容範囲を満たしていることが確認された。

本来、JIS 4333 では屋外仕様の線量計に対する項目で、温度の変動範囲を  $-10^{\circ}\text{C}$ ～ $+40^{\circ}\text{C}$  と規定している。屋外で行う教育実験は基本的に過酷な気候を避けることを考慮し、極端な気候が少なく、人口が全国で一番多い東京都の温度を考えると、実験で得られた  $+10^{\circ}\text{C}$ ～ $+38^{\circ}\text{C}$  の温度変化範囲は教育現場での温度変化に対応することができる。しかし、この範囲外で使用される可能性と、室外での低濃度放射線測定で生じる不確かさを考慮して、指示値の変動について使用者に誤解なく伝える必要がある。

##### 4.2 方向特性

方向特性とは、線量計の正面から放射線が入射する場合を正位置とし、入射方向の変化により、指示値が変化する特性を指す。正対位置を  $0^{\circ}$  とし、入射角度を  $0^{\circ}$ 、 $\pm 45^{\circ}$ 、 $\pm 90^{\circ}$  及び KINDpro を縦にした状態で  $^{137}\text{Cs}$  線源の  $\gamma$  線を照射した。入射角度  $0^{\circ}$  で照射した際のレスポンス（表示値と実際に照射した線量の比）を基準値として、各角度に対する相対レスポンスを求めた。

結果、この相対レスポンスは 0.91～1.12 の範囲で変動し、変動が一番大きい測定方向は縦方向である。これは、KINDpro の CsI 結晶のサイズ ( $12 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ) の影響だと考えられる。KINDpro の場合は JIS 4333 が規定した方向特性の許容範囲を満たしているが、異なる原理の線量計やその線量計の構造によっては、方向特性の影響が大きく現れる測定方向が存在するだろう。本章で実施した方向特性試験を参考にして、影響が大きいと思われる方向から照射を行い、これらの方向に関しては説明書などで相対レスポンスを明示することを提案する。

##### 4.3 エネルギー特性

エネルギー特性とは、エネルギーの異なる放射線が入射する際に、指示値が変化する特性を

指す。本試験ではKINDproを4台、比較用にA2700（「はかるくん」同等機）を3台、NaI(Tl)シンチレーション式線量計TCS-161を3台、TCS-161の上位機種であるTCS-172を1台使用し、それぞれにCo-60, Cs-137, Ba-133, Co-57, Am-241線源を照射した。Cs-137線源で照射した際のレスポンスを基準値として、各エネルギーに対する相対レスポンスを求めた。その内、Am-241線源に関しては線源校正データが不明であるため、Am-241線源の正確な測定が可能である校正済電離箱式線量計AE-133Vの表示値を参考にした。試験結果のグラフは図2に示す。

KINDproの低エネルギー部分に対する相対レスポンスはJIS 4333で規定された基準性能を満たしていない。しかし、本研究で想定する教育用放射線量計の測定対象は、主に自然起源の放射線である。低濃度の自然放射性核種において、もっとも重要なU系列、Th系列、K-40と、福島事故由来のCs-137が放出する $\gamma$ 線のエネルギー範囲におけるレスポンスは規定を満たしているため、本研究で調査した機器については現時点での大きな問題はないと考えられる。エネルギー特性に関しては、測定する環境に応じて柔軟に基準を設けていくことを提案する。

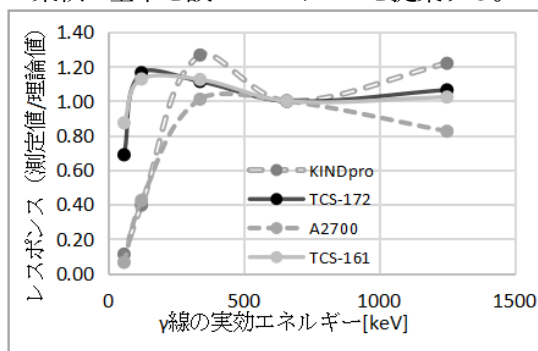


図2 エネルギー特性のグラフ  
(Cs-137を1.0とする)

## 5. 新係数によるエネルギー補償の検討

KINDproは、事前に分割方法が決められた各エネルギー区分の応答に係数を掛け、足し合わせることによって、CPMを1cm線量当量(率)に換算するエネルギー補償方法を採用している。KINDproのプロトタイプでは実測によるデータを基に、基本的には均等にエネルギーを分割しているため、全てのエネルギー領域における応答を同等に重視しており、測定する環境に特

化していない。しかし、様々な環境を構成する放射性核種のエネルギー領域はそれぞれ異なる。測定する環境に応じてその環境に特化した補償設定を適用できれば、教育用放射線量計の有限なコストでも測定の精度を向上することが出来ると考えた。実測では使用困難な核種の線源からのエネルギーに対する応答についても調べるため、モンテカルロシミュレーションPHITSによる計算を実施した。

本章では、KINDproのCsI結晶周辺と外部のケースを中心にモデリングし、実際に線源を当てた場合の各チャンネルの応答と、シミュレーションで同じ線源を当てた場合の各チャンネルの応答を比較した。

その結果、PHITSのモデルは線量計の実際の出力傾向を概ね再現できていると結論付けた。よって、Cs-137線源とCo-60線源を照射した場合の出力の正確性は証明され、実測で利用できない核種を用いたシミュレーションが可能となる。

## 6. 教育用放射線線量計の使用場面の整理

本章では、まず教育用放射線量計の補償設定に使われる各エネルギーチャンネルに対応する係数の算出方法を述べた。具体的には、PHITSで異なるエネルギーの並行ビームを線量計に繰り返し照射することによって、以下のような方程式からなる連立方程式を得る。MATLABのlscof関数を通じて重み付き最小二乗解を求めれば、未知である各チャンネルの係数を算出できる。

$$\Sigma (W1 \times R1, \dots, Wn \times Rn) = H^*(10)$$

Wn: 各チャンネルの係数 (未知)

Rn: 各チャンネルの出力 (レスポンス)

H\*(10): 周辺線量当量 (1cm線量当量)

次に、教育用放射線量計が使用される可能性がある測定環境を整理した。これらの環境は一般的な身の回りの環境と原発事故環境の2種類に分類される。更にこれらの環境の核種構成比に対応する以下の設定を考案した。

- ①K-40とCs-137を重視する設定
- ②ウラン系列のRa-226を重視する設定
- ③Xe-133を重視する設定
- ④事故由来の放射性セシウムと放射性ヨウ素を

重視する設定

それぞれの設定におけるエネルギーチャンネル分割方法は、以下の2種類を提案した。

**方法1:** 高エネルギー領域のチャンネル分割をプロトタイプより細かくし、それ以下のチャンネルはプロトタイプのコンセプトと同様に、低エネルギー側が細くなるように分割する。

**方法2:** 寄与割合が高い核種の全吸収ピークが存在するチャンネルを細かく分割する。

PHITS でこれらの環境を測定した際の線量計の各チャンネルの応答を計算し、前述の重み付け設定と分割方法により算出された係数を使い導き出した1 cm線量当量率と、理論値の1 cm線量当量率の比較は以下に示す。

表2 新しい補償設定とプロトタイプの比較

	方法1	方法2	プロトタイプ	理論値
一般環境	6.41E+06	4.95E+06	5.93E+06	6.38E+06
ウラン濃度が高い一般環境	7.16E+06	8.05E+06	6.61E+06	7.07E+06
事故発生初期の遠隔地	1.58E+06	1.29E+06	1.29E+06	1.44E+06
事故発生後期の遠隔地	1.87E+07	1.29E+07	1.75E+07	1.99E+07

その結果、多くの場合は方法1の精度が一番高く、事故発生初期の遠隔地（低エネルギー領域がメイン）においては新たに提案した2種類の設定とプロトタイプの設定の精度はほぼ同じレベルである。低エネルギー核種の寄与が高い環境の測定を行う場合、本章では7チャンネルに分割することを前提に補償設定を検討しているが、今後、低エネルギー領域の分割を更に細分化した補償設定を検討していけば、低エネルギー核種の寄与が高い環境測定により貢献できるだろう。

## 7. 結言

本研究では、まず教育用放射線量計の不確かさのあり方に関する議論を行った。次に、JIS 4333の項目と照らし合わせて、KINDproを教育用放射線量計の一例として既存の特性を調査・整理した。KINDproのプロトタイプは既にJIS規格で規定されている温度特性と方向特性の基準を満たしていると確認され、温度特性・方向特性・エネルギー特性における教育用放射線量計に特化した基準の提案ができた。実測では得ることが難しいエネルギーに対する線量計の応答を調査するために、PHITSを用いた。

教育用放射線量計に想定される様々な測定環境を整理した上で、作成したモデルの妥当性を検証し、各測定環境について具体的なエネルギー分割方法の提案とそれらの係数の算出を行った。更に、これらの係数とプロトタイプ設定を用いて、様々な環境を測定した際のエネルギー補償効果を比較した。その結果、本研究で提案したエネルギー補償設定の有用性が検証された。本研究の成果は、教育用放射線量計を普及させ放射線教育における実習・実験内容を豊富にし、学生のみならず教員の放射線リテラシーを向上できる。

今後は引き続きJIS 4333の項目に沿って特性試験を行い、一方、性能向上のために提案したエネルギー補償係数に関しては採用する補償設定の見直しを繰り返し行うことで、教育現場で手軽に使用でき、同時に測定精度もある程度保障できる放射線量計の完成に近づくだらう。同時にデータログの記録機能などを持つ教育用放射線量計専用のPCソフトの開発も進めることで、教育内容の幅が更に広がり、STEAM（科学・技術・工学・芸術・数学）教育の需要にも対応できると考えられる。

## 参考文献

- [1] 文部科学省, “放射線教育の実施状況調査の結果について,” 3月2020年. [オンライン]. Available: [https://www.mext.go.jp/content/20200318-mxt\\_kyoiku01-000005926\\_2.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20200318-mxt_kyoiku01-000005926_2.pdf). [アクセス日: 18 1 2022].
- [2] 真壁佳代, 掛布智久, 飯本武志, 河野孝央, 中村尚司, “教育用放射線測定器の利用と値づけに関する考察①-学校教育における放射線測定器の役割と期待,” 著: 第2回 日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会, 2019.
- [3] 服部隆利, “クリアランスレベルの考え方と測定の不確かさの論点について,” 著: 第71回放射線防護研究会, 2021.
- [4] 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,” [オンライン]. Available: <https://www.erms.nsr.go.jp/nra-ramis-web/g/>. [アクセス日: 15 1 2022].
- [5] 一般財団法人 日本規格協会, 一般社団法人 日本電気計測器工業会, JIS Z 4333:2014 X線, γ線及びβ線用線量当量(率)サーバイメータ, 2014.