

東京大学大学院新領域創成科学研究科  
環境システム学専攻

2021 年度  
修士論文

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 2 月 28 日提出  
指導教員 飯本 武志 教授

庄 沁優

## 目次

1. 序論.....	3
1.1 教育目的放射線量計の現状と課題.....	3
1.1.1 放射線教育の現状.....	3
1.1.2 教育用放射線量計の課題.....	4
1.2 本研究の目的.....	5
1.3 本論文の構成.....	6
2. 本研究に関連した重要となる基盤的情報と知見.....	7
2.1 放射線の単位.....	7
2.1.1 放射能.....	7
2.1.2 実用量.....	8
2.1.3 計数率 (CPM/CPS) .....	8
2.2 放射性核種.....	9
2.2.1 自然放射性核種.....	9
2.2.2 原子力事故由来核種.....	9
2.3 放射線量計の種類.....	10
2.3.1 電離箱式線量計.....	10
2.3.2 シンチレーション式線量計.....	11
2.4 KINDpro の基本情報.....	13
2.4.1 概要.....	13
2.4.2 エネルギー補償方法.....	14
2.5 ガンマ線の相互作用 (シンチレータを用いた放射線スペクトル測定) .....	15
2.5.1 光電吸収.....	15
2.5.2 コンプトン散乱.....	15
2.5.3 電子対生成.....	15
2.5.4 検出器の応答関数.....	16
2.6 G(E)関数.....	17
2.6 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」 .....	18
2.6.1 概要.....	18
2.6.2 共通試験条件.....	18
2.7 試験方法の基本情報.....	20
2.7.1 本研究で使用了試験場.....	20
2.7.2 シャドーシールド法.....	22
2.7.3 照射線量 (率) から 1 cm線量当量 (率) の換算方法.....	23
2.8 モンテカルロ計算コード PHITS.....	24
2.9 クリアランス.....	25
2.9.1 IAEA 安全指針 RS-G-1.7 の概要.....	26
2.9.2 IAEA 安全指針 RS-G-1.7 改訂の背景.....	26

3. 教育用放射線量計に存在する不確かさ .....	27
3.1 IAEA 安全指針 RS-G-1.7 改訂の論点 .....	28
3.2 教育用放射線量計における不確かさの考え方 .....	29
4. 現存の教育用放射線量計の特性整理 .....	31
4.1 特性試験実施の背景 .....	31
4.2 温度特性 .....	33
4.2.1 試験方法 .....	33
4.2.2 試験結果と考察 .....	36
4.3 方向特性 .....	38
4.3.1 試験方法 .....	38
4.3.2 試験結果と考察 .....	41
4.4 エネルギー特性 .....	43
4.4.1 試験方法 .....	43
4.4.2 結果と考察 .....	45
5. 新係数によるエネルギー補償の検討 .....	47
5.1 背景 .....	47
5.2 モンテカルロシミュレーション(PHITS)のモデル .....	47
5.3 実測とシミュレーションの比較（モデルの妥当性の確認） .....	49
6. 教育目的放射線線量計の使用場面に関する整理 .....	52
6.1 新係数算出の下準備 .....	52
6.2 様々な使用場面の分類 .....	54
6.2.1 一般環境 .....	55
6.2.2 原子力事故に関連する環境 .....	55
6.3 使用場面別の新係数整理 .....	56
6.4 考察 .....	65
7. 結語 .....	66
7.1 結論 .....	66
7.2 今後の展開 .....	67

## 1. 序論

### 1.1 教育目的放射線量計の現状と課題

#### 1.1.1 放射線教育の現状

放射線は身の回りの自然環境に日常的に存在しており、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。そのような中、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 [1]。事故とそれを取りまく状況を踏まえ、文部科学省は児童生徒が放射線の基本的な知識を身につけることの重要性を強調し [2]、学校現場での放射線教育の実施を支援するために小学生用と中学生・高校生用の2種類の放射線副読本を作成した [2]。実際、授業中で放射線に関する内容を扱ったことや扱う予定がある学校の割合は、小学校は約70%、中学校は約90%以上、高等学校は約80%となっており、前述の放射線副読本を活用した割合は小学校は約50%、中学校は約60%、高等学校は約30%となっている [3]。

これらのデータを見ると、放射線教育の普及率は高く見えるが、文部科学省が令和元年12月10日～令和2年1月24日に実施した「放射線教育の実施状況調査」の結果によると、放射線副読本を活用した活動は「教師の説明」、「調べ学習」および「話し合い・発表」が主であり、「観察・実験」は全ての学年において5%を下回っている [4]。教育全般において座学は主要な教育方法ではあるが、現状、学生たちにとって「放射線」は未だに遠い存在だと考えられる。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。

Q2-4 放射線副読本を活用した活動（複数回答有）

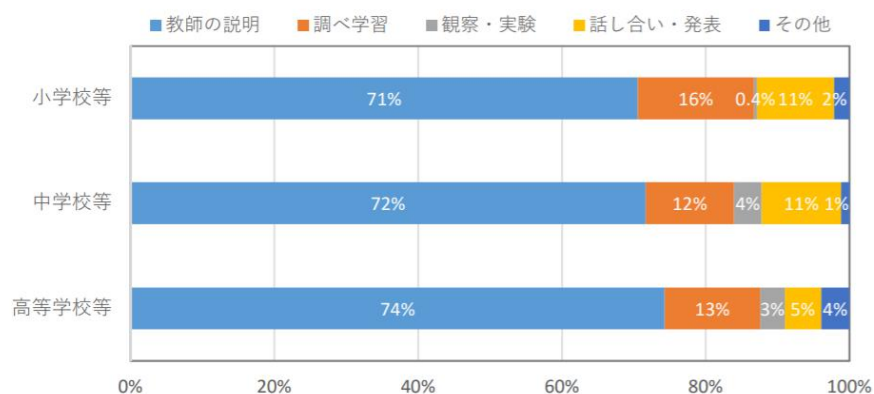


図 1.1 放射線教育の実施状況調査（抜粋） [4]

例えば、間接的に放射線の飛跡を観察する装置として「霧箱」がある [5]。環境省と福島県が設置している環境再生プラザの活動にも霧箱実験が組み込まれており、ウェブサイトで実写動画映像が公開されている [6]。以前、文部科学省では教育用放射線量計「はかるくん」の貸出事業を行っており、小学校教師用解説書にも「はかるくん」を用いた実験手順として「簡易放射線測定器の活用」という内容を記載していた [7]。しかし、この貸出事業は 2014 年に終了し [8]、現在、それを代替する事業は残念ながら存在していない。

実際、一般財団法人日本原子力文化財団によるアンケートの結果、測定実習を取り入れた授業は教育現場からのニーズが高まっており、90%以上の参加者が高評価を挙げた [8]。授業等で放射線に関する内容を扱った時や授業等を準備する際に外部人材等を活用した割合は約 5%である [4]。教職員自身が専門的な放射線教育を受けてない状況下で、実験、実習を取り入れた授業は放射線教育をバックアップする重要な取り組みであり、今後もこのような授業を継続的に実施していくことは必要であると考えられる。

### 1.1.2 教育用放射線量計の課題

本研究で想定する教育用放射線量計のターゲットは、小中高校生である。このような使用者の特徴は、放射線の基礎知識を持たず、専門的な放射線業務に従事する予定がないことである。このような小中高校で実施する放射線教育は、基礎教育の一環であり、大きなコストを確保することはできない。また、一般的な小中高校で教育を実施する側の教師も、必ずしも十分な放射線に関する専門知識を持っているわけではなく、教材のみ使用して実施できる教育には限りがある。前節で述べた教育における実験・実習内容を通じて、学習者の放射線に対する興味を引き寄せ、一層豊富な教育内容を提供することが可能である。教育用放射線量計を用いた測定は、現在も実施されている放射線教育実験の一つである。しかし、線量計の教育目的に特化した統一された基準は現状存在しておらず、このような線量計を学校などの教育現場で独自に管理するには様々な問題点と課題が存在する。

例えば、文部科学省「はかるくん」事業の終了後、貸出用に製造された線量計は全国の教育委員会などに配布された [8]。それから 4 年後に実施した調査によると、ある自治体の教育委員会に配布された「はかるくん」100 台のうち、99 台は測定誤差 20%以内に収まっている [9]。しかし、本来は管理側で校正済の線量計を配布している形式を考えると、専門的な放射線知識と校正の手段を持たない教育委員会で管理された線量計は、測定誤差が比較的低い状態から段々と離れていることは明らかである。管理状況が不明である線量計も存在しており、もし現状のままで進めていくと、誤っている測定値が教育現場に混乱を与え、「数値の一人歩き」が発生することが懸念される。

また、教育用放射線量計は一般的に普段の生活環境での使用を想定しており、線量限度レベルを超える可能性のある、強い放射線環境での使用を本来の目的としたものではない [9]。本研究では、教育における「環境の空間線量（率）測定」の用途に着目し、一部の内容には民間で開発が進んでいる教育用放射線量計 KINDpro を一例として取り扱

う。日本原子力文化財団が実施した「2020 年度原子力に関する世論調査」の結果によると、放射線分野について聞いたことがある項目のうち、「自然放射線の存在」56.9%、「放射線利用」53.0%が高く、次いで、「放射線影響の単位」48.8%、「放射能の単位」43.8%と続く。一方、説明できる項目は、全体として選択率はそれほど大きくない [1]。身の回りの環境に放射線が存在していること自体の認知度は高いが、それに対する具体的な理解は不足していると考えられる。小中高校における放射線教育は様々な分野の知識に関係があり、そのうち線量計を利用して行える教育内容は、線量率、計数率、エネルギースペクトル、線源と組み合わせた遮蔽効果など多岐にわたるが、元々馴染みのある知識から理解を深めていく方が、学習者の興味を引き寄せ、基礎を築くのには有利であると考えた。

一方、放射線の管理現場で使用されるような放射線量計と同様な、校正を含めた管理方法を教育用放射線量計に適用するのは、小中高校における専門的人材とコストの不足により、適切とはいえない。そのため、設計上の目的に合致する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 [9]。

## 1.2 本研究の目的

現存の放射線量計に対する管理と使用に関する議論は、ほとんど専門的な放射線管理現場に使われることを想定している。しかし、放射線教育と教育に取り込む実験・実習の需要が高まっている中で、教育目的に特化した放射線量計の管理を統一化し、そのような目的の使用における性能の向上を検討するのは必要だと思われる。本研究で想定する「環境の空間線量（率）測定」の用途の場合、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し、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、放射線の専門家が常駐するわけでは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。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機関に普及するため、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。

よって、本研究では、「環境の空間線量（率）測定」の使用目的に合致し、教育目的に特化した統一された管理と使用の基準と、線量計の性能を向上する方法の提案を行うことを目的とする。そして、提案した方法の教育現場での「環境の空間線量（率）測定」における有効性を検証し、教育用放射線量計の教育現場での普及につなげていく。

### 1.3 本論文の構成

本論文の第2章では本研究における必要な情報や知識をまとめる。第3章ではクリアランスレベルに関する議論を通じて、教育用放射線量計で環境測定を行う際の不確かさの許容範囲を示す。第4章では既存の JIS 4333 を参考にして、教育用放射線量計の一例として扱う KINDpro の現状の性能を調査しながら、教育目的に特化した性能の基準と調査方法を提案する。第5章と第6章では、シミュレーションを通じて様々な測定場面に最適なエネルギーの補償方法を提案する。その内、第5章では使用したモデル体系の妥当性を確認し、第6章では教育用放射線量計に想定される様々な測定環境を整理することで、それぞれに適している係数を算出し、各環境にて一番有効な補償設定を整理した。

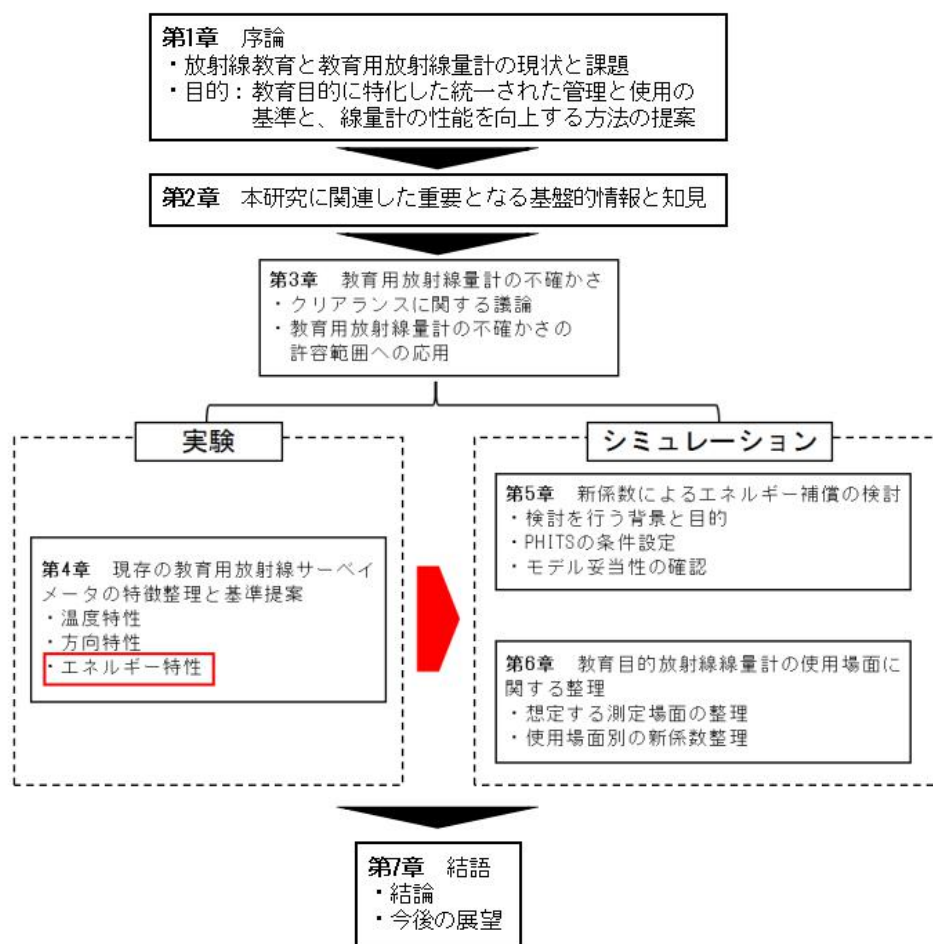


図 1.2 本論文の構成

## 2. 本研究に関連した重要となる基盤的情報と知見

本章では、本研究に関連した重要となる基盤的情報と知見を記載する。本章の各項目と本論文の各章の間の関係は、表 2.1 にて示す。また、「2.1 放射線の単位」「2.4 KINDpro の基本情報」については全ての章に関連する。

表 2.1 本章の各項目と本論文の各章間の関係

本論文の各章のタイトル	対応する 2 章の項目
3. 教育用放射線量計の不確かさ	2.2 放射性核種 2.10 クリアランス
4. 現存の教育用放射線量計の特徴整理	2.3 放射線量計の種類 2.7 JIS Z 4333:2014 2.8 試験方法の基本情報
5. 新係数によるエネルギー補償の検討	2.5 ガンマ線の相互作用 2.6 G(E)関数 2.9 モンテカルロ計算コード PHITS
6. 教育目的放射線線量計の使用場面に関する整理	2.2 放射性核種 2.6 G(E)関数 2.9 モンテカルロ計算コード PHITS

### 2.1 放射線の単位

#### 2.1.1 放射能 [10]

本研究でいう放射能は、「原子核の単位時間当たりの壊変数（壊変率）」という意味を示す。放射能の単位は Bq（ベクレル）であり、1 秒あたりの壊変数（壊変率）と定義されている。本研究では 6 章の環境整理の際に、公表されている土壌などの比放射能を用いて線量率への寄与を算出した。比放射能とは、放射性核種の属する元素の単位質量あたりの放射能をいう。



### 2.1.2 実用量

実際には測定できない防護量\*である実効線量の代わりに、一定の条件のもと、実効線量とほぼ同じ値が測定で得られる「実用量」として個人線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量などが定義されている。線量当量とは、実効線量を導く、測定可能な実用量である [11]。実用量はICRUで定義されたものであり、外部放射線による被ばくに対する適切な防護量を十分な近似で容易に計測可能とし、また、一方ではその量を極端な過小評価又は過大評価を避けるように考案されている [12]。その内、本研究で取り扱う線量計に関係がある2つの実用量を説明する。

#### ■ 周辺線量当量 [12]

ある放射線場の1点における周辺線量当量とは、対応する整列拡張場\*\*において、ICRU球\*\*\*内の整列場に対向する半径上の深さdにおける線量当量。

#### ■ 方向性線量当量 [12]

ある放射線場の1点における方向性線量当量とは、ICRU球内の指定されたある方向の拡張場に対向する半径上の深さdにおける線量当量。

本研究で取り扱うKINDproは、放射線が入射する方向により応答が異なるため、測定するのは1cm方向性線量当量（率）である。

\*防護量 [10]：放射線防護のために用いられる量である。体内の組織の放射線感受性等に基づく重みづけがされており、直接測定可能な量ではない。

\*\*整列拡張場 [13]：着目している点に入射する様々な種類とエネルギーの放射線を、同じ強度と同じエネルギー分布で無限に広い一様平行な放射線場に置き換えたもの。

\*\*\*ICRU球 [13]：密度1g/cm<sup>3</sup>の軟組織等価物質でできた直径30cmの球体ファントム。

### 2.1.3 計数率 (CPM/CPS) [10]

CPM (Count per Minute)/CPS (Count per Second)とは、1分/1秒に線量計が検出した放射線の数を表す単位である。本研究で取り扱うCsI(Tl)シンチレーション線量計は空間の線量率を測定する際、計数率から線量率（ $\mu$  Sv/h）へ換算している。

## 2.2 放射性核種

本項目では、本研究で想定する「環境の空間線量（率）測定」を目的とする教育用放射線量計の測定対象である放射性核種を記載する。自然放射性核種と、原子力事故由来の人工核種の2種類に分類される。

### 2.2.1 自然放射性核種 [10]

#### ■ ウラン系列

ウラン系列はウランの同位体U-238（半減期 $4.47 \times 10^9$ 年）から始まり、最後は安定核種のPb-206で終わる。主な壊変は、8回の $\alpha$ 壊変と6回の $\beta^-$ 壊変である。ウラン系列でU-238に次いで半減期が長いのはU-234の $2.45 \times 10^5$ 年であるため、生成後 $10^6$ 年ほどで計算上全核種は永続平衡にある。

#### ■ トリウム系列

トリウム系列は半減期 $1.41 \times 10^{10}$ 年のTh-232から始まり、6回の $\alpha$ 壊変と4回の $\beta^-$ 壊変を行い、安定核種のPb-208となり終わる。Th-232の次に半減期が長いのはRa-228（5.75年）であるため、岩石と鉱物に含まれるトリウム系列の全核種は生成後70年ほどで放射平衡となる。

#### ■ カリウム-40

半減期は $1.28 \times 10^9$ 年、天然のカリウムに0.0117%の割合で含まれる。カリウムは自然中や人体に多く存在する。K-40は $\beta^-$ 壊変（89.3%）によってCa-40、電子捕獲（10.7%）によってAr-40になる。

### 2.2.2 原子力事故由来核種 [14]

本研究の6章で主に検討した原子力事故由来核種は、表2.2にまとめた。

表 2.2 主に検討する原子力事故由来核種

核種	半減期	主な光子エネルギーと放出割合
Xe-133	5 日	81keV (38.0%)
I-131	8 日	364keV (81.7%)
I-132	2 時間	668keV (98.7%), 773keV (75.6%)
Cs-134	2 年	605keV (97.6%), 796keV (85.5%)
Cs-137	30 年	662keV (85.1%)

## 2.3 放射線量計の種類

### 2.3.1 電離箱式線量計 [10]

電離箱では、2枚の平行に向かい合った電極に電圧が引加されている（図 2.1）。荷電粒子が気体中を走ると、気体分子を電離し、電子とイオンの対を多数生成する。負の電荷をもつ電子は正の電極に引き寄せられ、正の電荷をもつイオンは負の電極に引き寄せられる。その結果回路に電流が流れ、放射線が検出される。個々の放射線による電流は極めて小さいため、ふつう電離箱では多数の放射線によって平均的に流れる電流を測定する。電離箱式線量計は、30 keV から 1.25 MeV のエネルギーまで、ほぼ平坦な特性を示しており、比較的良好なエネルギー特性を持つ（図 2.3） [15]。

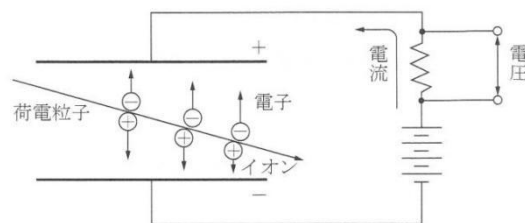


図 2.1 電離箱の基本的原理 [10]

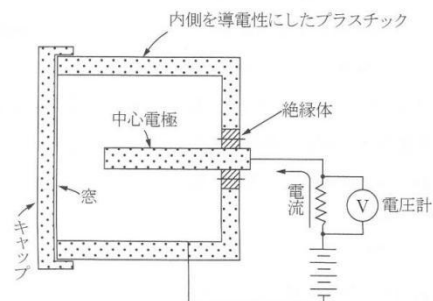


図 2.2 電離箱式線量計の構造 [10]

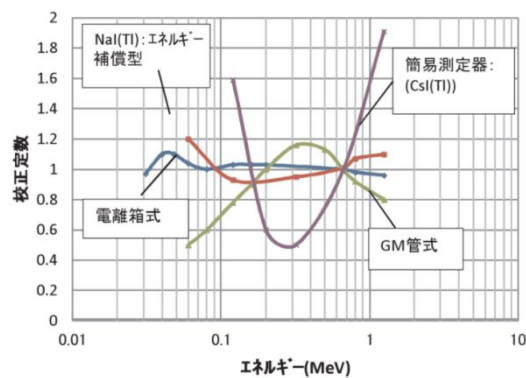


図 2.3 各種線量計のエネルギー特性 [15]

### 2.3.2 シンチレーション式線量計 [10] [16]

シンチレーションとは、シンチレータに入射する $\gamma$  (X) 線によってたたき出された電子が結晶中で電離や励起を起こし、これらがもとに戻る過程で、シンチレータが発する、吸収したエネルギーに比例した強度の光のことである。ある種の物質中で発生するシンチレーションの光によって電離性放射線を検出することは非常に古くから行われてきた放射線測定法の一つである。シンチレーション過程は各種放射線の検出とスペクトル測定を行うためのもっとも有用な方法の一つとして今日でも使用されている。

もっとも広く用いられているシンチレータは、ヨウ化ナトリウムなどの無機のアルカリハライド結晶、有機の液体およびプラスチックである。無機材料は光出力と直線性の点で優れているが、ほとんどのものは応答時間がかなり長い。有機シンチレータの応答は一般的に速いが発光量が少ない。使用目的もまたシンチレータを選択する場合の主な原因となる。無機結晶は成分中のZの値が大きく、密度も高いことからガンマ線スペクトル測定用として優れているが、有機物はベータ線スペクトル測定に用いられ、また水素を含むので中性子測定用としても有用である。

本研究で主に取り扱うのは無機のアルカリハライド結晶を用いたシンチレーション式線量計であり、その材料として使われるNaI(Tl)とCsIについて次から具体的に述べる。

### ・ NaI(Tl)シンチレーション式線量計

タリウム (Tl) を少量添加したヨウ化ナトリウム (NaI) 結晶を、ガラス窓がついた金属ケースに封入したものである。添加されたタリウムは活性化物質 (アクチベータ) と呼ばれ、吸収したエネルギーが光として放出されやすいように、また光電子増倍管が受けやすい波長の可視光が放出されるようにする働きがある。本研究で使用した NaI(Tl) シンチレーション式線量計は、日立アロカメディカル製 TCS-161 と TCS-172 である。

### ・ CsI シンチレーション式線量計

ヨウ化セシウム (CsI) は、シンチレーション材料として有用なもう一つのアルカリハライドである。これには活性化材料として、タリウムを用いたものとナトリウムを用いたものが市販されていて入手可能であり、次項で説明する KINDpro が採用したのはタリウムを用いたものである。CsI は NaI に比べ単位長さ当たりの  $\gamma$  線吸収がかなり大きい。また、CsI は NaI よりも強度があり、衝撃や振動のある厳しい条件下でも使用できる。吸湿性は NaI(Tl) より少ないが、水や高湿度にさらすと劣化する。

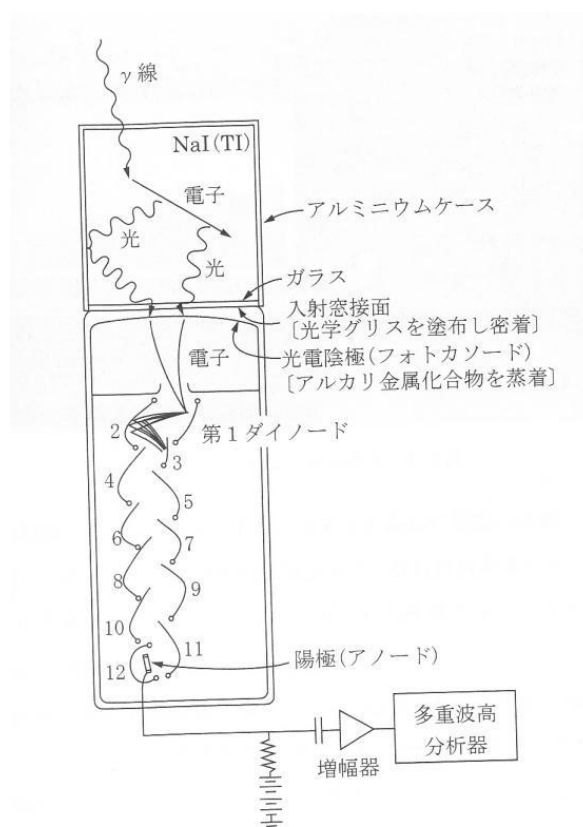


図 2.4 NaI(Tl) シンチレーション式線量計の構造 [10]

## 2.4 KINDpro の基本情報

### 2.4.1 概要

本研究の4章の実験対象と、5章6章の参考として、教育用放射線量計の一例としてKINDproを取り扱う。KINDproとは、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のプロトタイプの基本情報を表2.3に示す。

表 2.3 KINDpro (プロトタイプ) の基本情報

シンチレータ	CsI (Tl)
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~3MeV を7つに分割



図 2.5 KINDpro と NaI シンチレーション線量計の外観比較

左：放射線教育用線量計 KINDpro

中：NaI シンチレーション線量計 TCS-172

右：NaI シンチレーション線量計 TCS-161

## 2.4.2 エネルギー補償方法

プロトタイプでは、CPM から 1 cm線量当量（率）への換算は、64keV～3MeV を 7 つのエネルギーチャンネルに分割して、それぞれ係数を掛けて足し合わせる方法で行われている（表 2.4）。具体的な式は以下に示す。この初期設定は、実測を重ねて計数率から 1 cm線量当量に換算する最適な係数を算出した。また、エネルギー分割に関しては製造側の都合により 7 チャンネル（2MeV～3MeV）は固定し、1 チャンネル～6 チャンネルは低エネルギー側が細くなるように分割されている。

### ・ 1 cm線量当量への換算方法

$$\text{DOSE} : \Sigma (W1 \times \text{CPM1}, \dots, W7 \times \text{CPM7}) \times (\text{CAL1}/100) \times (\text{CAL2}/100)$$

\*W1～W7：各チャンネルの係数

\*CPM1～CPM7：各チャンネルで測定された CPM 値

\*CAL1、CAL2：線量計の個体ごとに設定されている校正定数

表 2.4 KINDpro のエネルギーチャンネル初期設定

エネルギーチャンネル[keV]		係数	
LVL1	64	W1	0.00300209
LVL2	144		
LVL2	144	W2	0.0126503
LVL3	248		
LVL3	248	W3	0.0984717
LVL4	448		
LVL4	448	W4	1.00003
LVL5	832		
LVL5	832	W5	2.58825
LVL6	1600		
LVL6	1600	W6	5.29085
LVL7	2000		
LVL7	2000	W7	6.34902
LVL8	3000		

\*LVL1～8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=64、LVL2=144 の場合、1 チャンネルの範囲は 64keV～144keV という意味である。

\*\*W1～W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

## 2.5 $\gamma$ 線の相互作用（シンチレータを用いた放射線スペクトル測定） [16]

ガンマ線は種々の方法で物質と相互作用をするが、 $\gamma$ 線スペクトル測定では光電吸収、コンプトン散乱および電子対生成の3種類の相互作用が實際上重要な意味を持っている。本項目では、これらの相互作用の詳細を述べ、KINDproのような小型線量計の応答関数について考察する。

### 2.5.1 光電吸収

光電吸収とは、入射 $\gamma$ 線光子が消失する相互作用である。この相互作用は、数百 keV までのエネルギーの $\gamma$ 線に対して重要である。

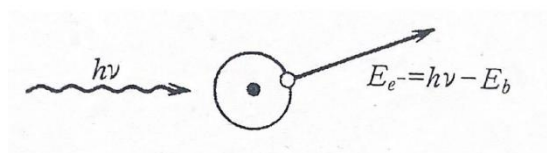


図 2.6 光電吸収の過程 [16]

\* $h\nu$  : 入射 $\gamma$ 線光子エネルギー  $E_b$  : もとの殻の電子の結合エネルギー  
 $E_e$  : 吸収原子の電子殻の一つから作られる光電子の運動エネルギー

### 2.5.2 コンプトン散乱

コンプトン散乱（コンプトン効果）とは、光子と電子の衝突で電子と散乱光子が作られ、これら二つにエネルギーが分配される現象である。この相互作用は、両極端間のエネルギー領域でもっともよく起こる過程である。

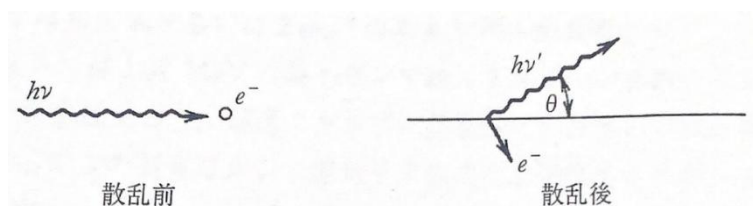


図 2.7 コンプトン散乱の過程 [16]

\* $h\nu$  : 入射 $\gamma$ 線光子エネルギー  $h\nu'$  : 散乱 $\gamma$ 線光子エネルギー  $\theta$  : 散乱角

### 2.5.3 電子対生成

電子対生成とは、光子が原子核の強い電場に吸収され、電子と陽電子を生み出す反応である。この相互作用は、5～10MeV 以上の高エネルギー $\gamma$ 線に対して重要なものである。



## 2.5.4 検出器の応答関数

入射  $\gamma$  線との相互作用で生まれる 2 次放射線の平均自由行程は数 cm 程度であるため、寸法が 1~2 cm を超えない検出器を、小形の検出器だと定義する。同時に全ての荷電粒子（光電子、コンプトン電子、電子対生成の電子と陽電子）は検出器体積内で完全に吸収されるとした単純化のための仮定は成立しているとする。

この条件下で付与される電子エネルギーの予測値を図 2.8 に示す。入射  $\gamma$  線エネルギーが電子対生成が重要となる値より低い場合には、スペクトルは、コンプトン散乱と光電吸収が混合したものとなる。コンプトン散乱電子に対応する連続エネルギーはコンプトン連続部と名付け、光電子に対応する狭いピークを光電ピークと名付ける。小形の検出器ではただ 1 回の相互作用だけが起これ、光電ピークの面積とコンプトン連続部の面積の比は検出器材料の光電効果断面積とコンプトン断面積の比に等しい。

入射ガンマ線エネルギーが十分高い場合には、電子対生成の結果も電子エネルギースペクトルにはっきり現れる。小形の検出器には電子と陽電子の運動エネルギーだけが付与されて、消滅放射線は検出器外へ逃げる。その結果、光電ピークから  $2m_0c^2$  ( $\sim 1.02\text{MeV}$ ) のエネルギーだけ下の場所にダブルエスケープピークが加わる。ダブルエスケープとは、消滅光子が両方とも相互作用せずに検出器の外へ逃げてしまうことを意味する。光電吸収と 1 回のコンプトン散乱の仮定は図 2.8 の左下に示したような低エネルギースペクトルを形成する。高エネルギーでも電子対生成過程によりスペクトルの右下の図に示されているダブルエスケープピークが加わる。

6.1 で PHITS により算出した出力の図を見ると、KINDpro の応答関数は本章で述べた小形検出器のガンマ線スペクトル測定における応答と一致していることが分かる。

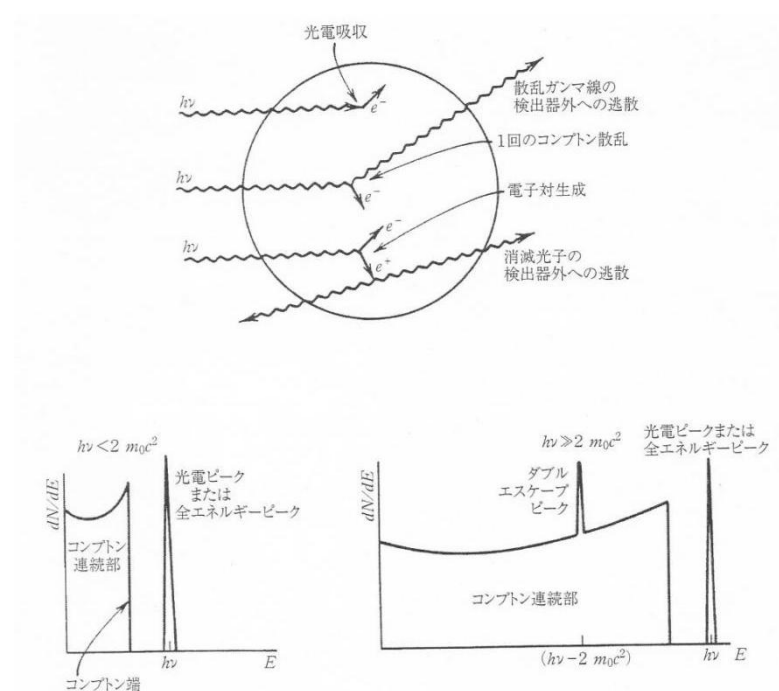


図 2.8 小形検出器の  $\gamma$  線スペクトル測定における応答 [16]

## 2.6 G(E)関数 [17] [18]

一般に、ある場の線量は、エネルギースペクトルの情報と国際放射線防護委員会 ICRP 等が勧告しているフルエンス当たりの線量換算係数を掛け合わせて算出するが、エネルギースペクトルの測定は容易ではない。一方、G(E)関数による線量導出手法では、使用する測定器のレスポンスと線量換算係数から導出される G(E)関数を用いることによって、場のエネルギースペクトルの解析を行うことなく、測定した波高スペクトルから直接的に高い精度で線量を評価できる。以下にて、G(E)関数による線量評価法を考察する。

NaI(Tl)シンチレータ中に発生するコンプトン散乱あるいは光電吸収による二次電子のエネルギーと光電子増倍管を経てもたらされるパルス波高は完全に比例するものと仮定し、エネルギー  $E_0$ (MeV)の単位強度 (photon/cm<sup>2</sup>・min) の入射  $\gamma$  線によって NaI(Tl)シンチレータ中に生ずるエネルギー  $E$ (MeV)のパルスの分布関数 (以下、スペクトル分布) を  $n(E, E_0)$ (counts/min・MeV per photon/cm<sup>2</sup>・min)と表し、また同じ放射線場における照射線量あるいはその場に置かれた物質の受ける線量を  $D(E_0)$ と置くことにする。もし任意のエネルギー範囲のいかなるエネルギーの  $\gamma$  線 ( $E_0$  MeV) に対しても次の積分方程式が常に成立するような荷重関数 G(E)が存在するならば、いかなる放射線場で測定されたスペクトル分布であっても、この G(E)関数を適用することによって直接的に線量を求めることが可能である。

$$D(E_0) = \int_0^\infty n(E, E_0) \cdot G(E) dE \quad (1)$$

NaI(Tl)シンチレータで観測される種々のエネルギーの  $\gamma$  線の混在場のスペクトル分布を  $N(E)$ とおけば、 $N(E)$ は種々のエネルギー  $E_j$  の  $\gamma$  線の分布関数の重なり合ったものとして次のように表される。

$$N(E) = \sum_{j=1} \phi(E_j) \cdot n(E, E_j) \quad (2)$$

個々のエネルギーの  $\gamma$  線によるスペクトル分布に対して (1) 式は成立するため、以下の (3) 式の関係がある。

$$D(E_j) = \int_0^\infty n(E, E_j) \cdot G(E) dE \quad (3)$$

したがって、各核のエネルギーの  $\gamma$  線による線量を総計した全線量を  $D$  とすれば、(2) 式と (3) 式の関係により、次の式が成り立つ。

$$D = \sum_j \phi(E_j) \cdot D(E_j) = \int_0^\infty N(E) \cdot G(E) dE \quad (4)$$

この結果から、全線量は測定された混合  $\gamma$  線によるスペクトル分布をスペクトル分解するまでもなくそのままの形で G(E)関数を求められることになる。

G(E)関数による線量評価法は以上考察した通りであり、この方法によれば、エネルギー解析等の煩雑な手順を経たなくとも非常に簡単に制度の良い線量測定をおこなうことができる。

## 2.6 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」 [19]

4章の試験で参考にする規格として、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」を選定した。選定理由などの詳細に関しては4章にて述べる。

### 2.6.1 概要

この規格は、2009年に第1版として発行されたIEC 60846-1を基とし、日本の使用状況に応じて、技術的内容を変更して作成した日本産業規格である。

この規格は、放射線サーベイを目的として、X線、 $\gamma$ 線及び $\beta$ 線の周辺線量当量（率） $\dot{H}^*(10)$ 、 $H^*(10)$ 及び／又は方向性線量当量（率） $\dot{H}'(0.07)$ 、 $H'(0.07)$ を測定する携帯型の線量（率）計及び警報付き線量（率）計について規定する。

### 2.6.2 共通試験条件

基準条件は、表2.5による。特に指定のある場合を除き、この規格における試験条件は、表2.5による。

表 2.5 共通試験条件 [19]

項目	基準条件 (製造業者が指定しないとき)	標準試験条件 (製造業者が指定しないとき)
基準 X 線、基準 $\gamma$ 線 $\dot{H}^*(10)$ $\dot{H}'(0.07)$	$^{137}\text{Cs}$ (最小定格範囲 80 keV～1.5 MeV の場合) 実効エネルギー 80 keV 付近の X 線 (最小定格範囲 20 keV～150 keV の場合) 実効エネルギー 65 keV 付近の X 線又は $^{241}\text{Am}$	$^{137}\text{Cs}$ (最小定格範囲 80 keV～1.5 MeV の場合) 実効エネルギー 80 keV 付近の X 線 (最小定格範囲 20 keV～150 keV の場合) 実効エネルギー 65 keV 付近の X 線又は $^{241}\text{Am}$
基準 $\beta$ 線	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$
線量率 $\dot{H}^*(10)$ $\dot{H}'(0.07)$	10 $\mu\text{Sv/h}$ 100 $\mu\text{Sv/h}$	3 $\mu\text{Sv/h}$ ～100 $\mu\text{Sv/h}$ <sup>a)</sup> 10 $\mu\text{Sv/h}$ ～1 mSv/h <sup>a)</sup>
線量 $H^*(10)$ $H'(0.07)$	100 $\mu\text{Sv}$ 100 $\mu\text{Sv}$	10 $\mu\text{Sv}$ ～1 mSv <sup>a)</sup> 10 $\mu\text{Sv}$ ～1 mSv <sup>a)</sup>
予熱時間	15 分	15 分以上
環境温度	20 $^{\circ}\text{C}$	18 $^{\circ}\text{C}$ ～22 $^{\circ}\text{C}$ <sup>a)</sup>
相対湿度	65 %	50 %～75 % <sup>a)</sup>
気圧	101.3 kPa	86.0 kPa～106.6 kPa <sup>a)</sup>
電池電圧	公称電圧	公称電圧 $\pm 1\%$
放射線の入射角度	製造業者によって指定された校正方向	入射角度 $\pm 5^{\circ}$
外部電磁波	無視できるレベル	影響の認められるレベル以下
外部磁気誘導	無視できるレベル	地球磁界の2倍以内
サーベイメータを置く方向	製造業者が指定	$\pm 5^{\circ}$
項目	基準条件 (製造業者が指定しないとき)	標準試験条件 (製造業者が指定しないとき)
バックグラウンド線量率	周辺線量当量率 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下	周辺線量当量率 0.25 $\mu\text{Sv/h}$ 以下
放射性物質による汚染	無視できるレベル	無視できるレベル
注 <sup>a)</sup> 試験時の実際の値を明示する。		

試験方法一般は、次による。

- a) 全ての試験は、15 分間の予熱時間が経過した後に実施するものとする。
- b) 試験条件のうちのある項目の条件を変化させて試験する場合には、その項目以外の条件は、表 2.5 に示す標準試験条件の範囲内にあるものとする。
- c) 必要に応じて指示値は、バックグラウンドを考慮する。
- d) 指示値の変動が放射線の統計的変動によるのであれば、十分な測定回数の平均値をとって、特性が性能規定を満たすかどうか確認する。

## 2.7 試験方法の基本情報

本項目では、4章で行われる KINDpro の特性試験に必要な情報を示す。基本的な試験場の情報、使用した校正済線源の照射線量（率）から 1 cm線量当量（率）の換算方法、また、試験場では金属の距離調整装置を使用するため、散乱線の影響が大きいと考えられ、その影響を軽減する方法であるシャドーシールド法に関する知見を含む。

### 2.7.1 本研究で使用した試験場 [20]

本研究の試験は全て公益社団法人日本アイソトープ協会（JRIA）川崎技術開発センターの低線量校正室にて実施した。低線量校正室の寸法と各装置の配置は図 2.9 に示す。校正に使われる施設に対して、JCSS（Japan Calibration Service System：計量法校正事業者登録制度）技術的要求事項適用指針 JCT21703—08 では、 $\gamma$  線源を使用する照射室に関して寸法は 4×4×3 m 以上と規定し、環境条件の参考として表 2.6 を記載した。また、校正結果に影響を与える振動、塵あい等は適切な方法により除去する処置を講じてあること、校正作業を行う区域の温度及び湿度は、適切に制御及び記録されていること、校正作業を行う区域の気圧は、適切に記録されていることが要求されている。JRIA の低線量校正室では、加湿・除湿ユニットとエアコン 2 台により室内の温度及び湿度を制御し、センサーで室内の温度・湿度・気圧を常時観測している。本研究で校正試験は行っていないが、このような試験場を使用することで、特性試験を行う際に生じる不確かさを軽減できると考えられる。

表 2.6 JCT21703—08 に記載されている環境条件の一例 [20]

項 目	標準状態 *1)	範囲又は許容差(変動幅)*2)	特記事項
温度	20 °C、22 °C 又は 23 °C	15 °C以上 35 °C以下 ±2 °C(温度2級)	JIS Z 8703
相対湿度	65 %	85 %以下 (湿度 20 級)下限は設けない。	JIS Z 8703
気圧	1013 hPa	860 hPa 以上 1060 hPa 以下	
$\gamma$ 線バックグラウンド及びその他	≤0.1 $\mu$ Sv/h	≤0.25 $\mu$ Sv/h	1 cm 線量当量率 *3) *4)
*1) 標準状態は、比較のための基準。測定を行う温度範囲を決めるものではない。 *2) 測定(校正)を行う範囲は、温度2級と言えども測定を行う範囲の上限、下限を越えないこと。標準状態に換算する場合は、換算に関するマニュアルを定めること。 *3) サーベイメータ等による測定で可。 *4) 電磁気の影響がないこと。			

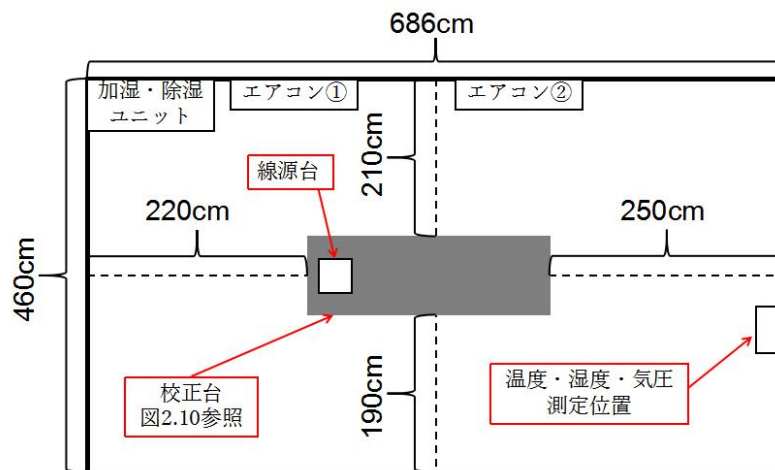


図 2.9 JRIA 川崎の低線量校正室（天井の高さ 320 cm）



図 2.10 低線量校正室内で使用している校正台



図 2.11 線源と線量計の距離を表示する座標パネル

### 2.7.2 シャドーシールド法 [21]

シャドーシールド法に用いるシャドーコーンは、校正する線量計が隠れる大きさの断面をもつコーン形状の鉛製の遮蔽体であって、直接線の減弱率を千分の一以下にする厚さ（Cs-137で約6.5 cm、Co-60で約12.5cm）があるものとされている。ビーム中心軸上の $\gamma$ 線源から被校正線量計間の距離のほぼ中央に支持具を用いて設置する。

シャドーシールド法は、全空気カーマ率から散乱線を分離して、直接線に対する測定器の指示値を求める方法であり、照射距離は、シャドーコーンがなす立体角内に線量計を隠すことを考慮すると、通常は100cm以上が望ましい。また、エネルギー特性が悪い線量計のエネルギー特性試験を行う場合に、散乱線を分離して直接線に対するレスポンスを求めるための方法として有効である。

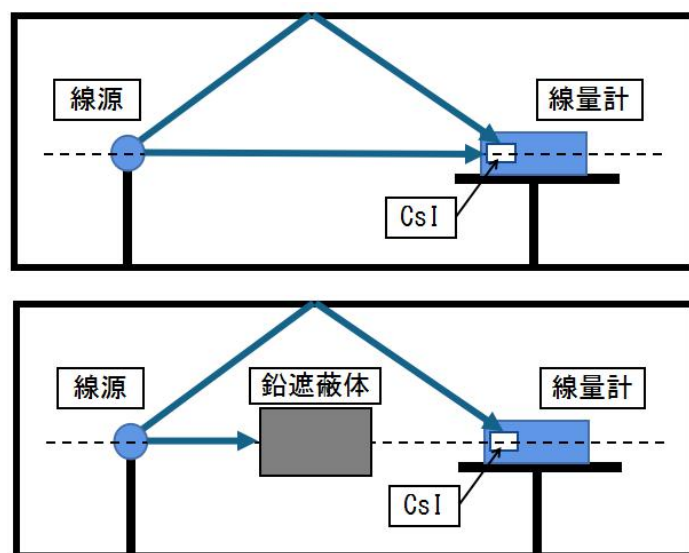


図 2.12 シャドーシールド法の原理



### 2.7.3 照射線量（率）から1 cm線量当量（率）の換算方法 [22]

1 cm線量当量（率）の理論値は、照射線量（率）を空気カーマ（率）に換算し、この値に1 cm線量当量換算係数を乗ずる方法を使用して算出した。以下の式は、照射線量から空気カーマへの変換式である。ICRU Report 47(1992)によれば、1MeV未満の光子では、制動放射によるエネルギー損失は無視することができる。また、Co-60の $\gamma$ 線は実効エネルギーが1.25MeVであるため、正確を期せば(1-g)値 (=0.997)で補正する必要があるが、照射線量率に対する校正の不確かさを考慮すれば、その影響は実用的には十分無視できるものと考えられる。また、式のW/e値は33.97[J/C]である。

$$K = X \times \frac{1}{(1-g)} \times \frac{W}{e}$$

K：空気カーマ[J/kg = Gy]

X：照射線量[C/kg]

g：制動放射によるエネルギー損失割合

W/e：空气中でイオン対を作るために必要なエネルギー[J/C]

1 cm線量当量は、空気カーマに1 cm線量当量換算係数を掛けることによって算出される。本章の試験で使用したすべての核種（Am-241を除く）に対する1 cm線量当量換算係数は、公益社団法人日本アイソトープ協会（JRIA）で算出された値を使用した（表 2.7）。

表 2.7 本研究の試験で使用した核種に対する1 cm線量当量換算係数

核種	光子の実効エネルギー [keV]	1 cm線量当量換算係数 [Sv/Gy]
Co-60	1250	1.16
Cs-137	660	1.20
Ba-133	340	1.31
Co-57	124	1.56



## 2.8 モンテカルロ計算コード PHITS [23] [24]

本研究は実測で使用できない核種の線源に対する線量計の応答を模擬するため、PHITS (Particle and heavy ion transport code system) を利用した。

PHITS とは、あらゆる物質中での様々な放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ計算コードである。原子力分野で培った数多くの基盤技術を集結し、その技術を原子力のみならず放射線に関連する多様な研究分野に応用することを目的に、日本原子力研究開発機構が中心となって開発が進められている。放射線施設の設計、医学物理計算、放射線防護研究、宇宙線・地球惑星科学など、工学、医学、理学の様々な分野の研究者・技術者に利用されている。

## 2.9 クリアランス

国際原子力機関（IAEA）では、放射線防護に関し 1985 年以降「Exemption（免除）」という用語を使用し始めた。この段階では、「免除」は、放射線防護上の規制体系に組み込むことを免除すること（規制の入口で対象外とすること）と、放射線防護上の規制下にあったものの規制を解除すること（規制の外に出すこと）の両方の意味をもつ概念であった。その後、1995 年頃から両者の概念を分離して検討する必要上から、前者を「規制免除」、後者を「クリアランス」という用語で区別するようになった [25]。

IAEA の文書によると、規制除外（Exclusion）は、本質的に規制になじまず規制システムの外に置かれる被ばくに関するもの、規制免除（Exemption）は行為や行為の中の些細な放射線量やリスクしか生じないため規制要求しないことの決定に関するもの、クリアランス（Clearance）は被ばくやリスクが些細であることに基づいて規制管理から放出される物質に関するもの、と整理されている。規制除外、規制免除及びクリアランスの概念を図 2.13 に示す [25]。本研究の 3 章では、クリアランスレベルに関して挙げられた論点を参考に、教育用放射線量計の不確かさの許容範囲に関して議論する。

クリアランスレベルとは、放射性物質の放射能濃度が極めて低く人の健康への影響が無視できるため、放射性物質として扱う必要のない物を区分する放射能レベルを指す。放射性物質をクリアランスできるかの判断は、多くの場合、測定が容易な  $\gamma$  線の測定結果に基づいて行われる [26]。クリアランス判断を測定により行う場合には、外部からの測定が容易で核種組成の主要部分を占める核種を測定し、あらかじめ設定した対象物中の放射性核種の存在割合（以下、核種組成比）により、その他の核種濃度を評価する方法を適用できる。核種組成比を用いた評価方法を適用できない場合には、平均濃度の核種が常に存在すると想定して核種濃度を評価する方法がある [27]。しかし、測定対象物が少量の場合には、測定すべき放射能レベルが低く、測定主要核種の測定には比較的大きな誤差が懸念され、用いられる平均放射能濃度や核種組成比には、桁を超えるばらつきが認められる可能性が高い。これらの誤差と不確かさをどう取り扱うか、現在国際的に議論が行われている。

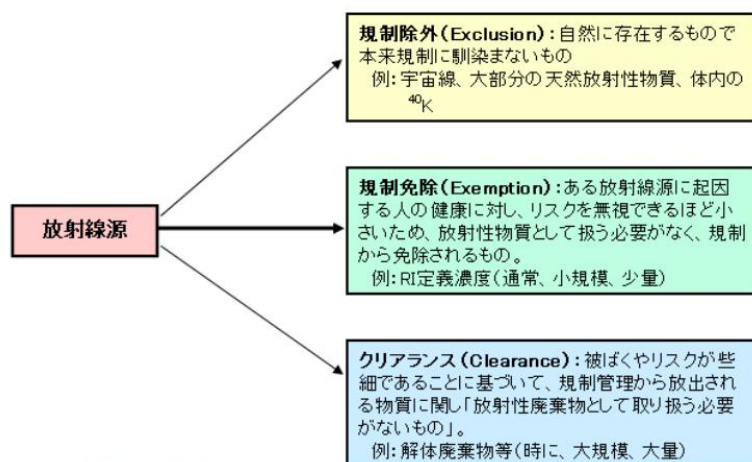


図 2.13 規制除外、規制免除及びクリアランスの概念 [25]

### 2.9.1 IAEA 安全指針 RS-G-1.7 の概要 [28]

「電離放射線に対する防護及び放射線源の安全のための国際基本安全基準」（S.S. No.115、以下「BSS」）には、規制除外、規制免除及びクリアランスの概念と中程度の量（1 トンオーダーの量）に関する規制免除レベルが示されている。しかし、規制除外とクリアランスに関する定量的な濃度基準と大量の物質に対する規制免除レベルは示されていない。そのため、BSS を補完する目的で、国の規制当局等に対して、規制除外、規制免除及びクリアランスの概念の適用に関する指針を示すことを目的として、IAEA 安全指針 RS-G-1.7「除外、規制免除及びクリアランスの概念の適用」が作成された。また、本指針は天然起源の放射性核種及び人工起源の放射性核種の両方に対して、大量物質を規制除外、規制免除又はクリアランスをする際の「放射能濃度値」を示すことを目的としている。

本指針では人工起源及び天然起源の放射性核種それぞれに放射能濃度が設定され、その放射能濃度を下回る際は規制が不必要だと考え、上回る際には段階的（graded）アプローチが適用可能であることが、基本的な適用の考え方である。段階的アプローチの内容は、以下に示す。

- 放射能濃度値を数倍（例えば、10 倍まで）超える場合、国内の規制の枠組みによっては、規制機関は規制要件を適用しないことを決定できる。その際、多くの場合は、ケースバイケースで判断が行われるが、この程度であれば、規制が不要であると予め規定することも可能である。
- 規制を行うことを決定した場合、規制の程度（届出、許可等）は、リスクの程度に比例したものであること。

### 2.9.2 IAEA 安全指針 RS-G-1.7 改訂の背景

ICRP2007 年勧告では、放射線の被ばくを低減するための防護方策を必要とする被ばく状況を「計画被ばく状況」、「緊急時被ばく状況」、「現存被ばく状況」に区分化した。この改訂を受け、改訂版 BSS（2014）でも被ばく状況別の構成となった。その中で、現存被ばく状況は、管理についての決定がなされる時点で既に線源が存在している状況であり、2011 年東京電力福島第一原子力発電所事故の経験と深く関連する [29]。この改訂版 BSS（2014）に対応するために、RS-G-1.7 も改訂する必要が生まれた。その他、クリアランスプロセスに関するより詳細なガイダンス、建物のクリアランス、表面密度測定に基づくクリアランス、条件付クリアランス（将来の用途に制限を持たせたクリアランス）に関するガイダンス、液体と気体のクリアランスの概念など、元指針では提供されていない内容の需要が、RS-G-1.7 を改訂する必要性を高めた。

### 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。計量・計測に関連する7つの国際機関の名前で出版された「計測における不確かさの表現のガイド」(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement ; GUM) の考え方によると、一般に、測定の結果は測定対象量の値の近似値あるいは推定値に過ぎず、このためその推定値の不確かさの記述を伴って初めて完全なものになる[30]。測定における不確かさの評価を行う際には、図3.1に示されている項目が不確かさの根本的な要因として考えられ[31]、いずれも異なる教育現場によって大きく差が出てしまう要素である。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。

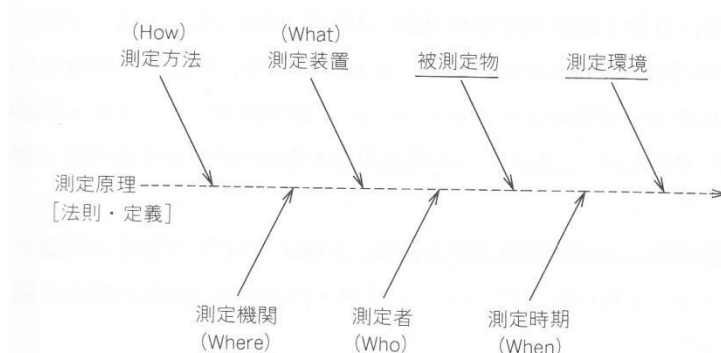


図 3.1 一般の計測における不確かさの要因 [31]

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。その内、低濃度な放射線に対する規制の概念のひとつである「クリアランス」における不確かさで現在行われている議論を基に、同様に主な測定対象が低濃度放射線である教育目的の放射線量計に存在する不確かさについて議論し、このような不確かさの振れ幅が測定値に与える影響を整理するのが本章の目的である。

### 3.1 IAEA 安全指針 RS-G-1.7 改訂の論点 [32]

2.1 では、クリアランスに関する基礎知識と IAEA 安全指針 RS-G-1.7 の内容および改訂の背景を説明した。

クリアランスに関する改訂の中で色々な論点が挙げられているが、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。教育用放射線量計の不確かさに関する議論にも参考にできることは、「過剰に保守的な評価を避ける」ことである。ICRP Pub. 75 [33] と IAEA GSG-7 [34]、および IAEA Safety Report No. 67 [35] (2012) 1 に採用された確率論的アプローチの考え方をまとめると、以下の通りになる。

- ・ 20 mSv/y の線量限度付近では、1.5 倍まで許容できる。
- ・ 1 (or 2) mSv/y の記録レベルでは、2 倍まで許容できる。
- ・  $10\ \mu\text{Sv/y}$  のクリアランスに対する低レベルの線量規準では、10 倍まで許容できる。

ここで懸念されるのは、もし  $10\ \mu\text{Sv/y}$  のレベルでも厳しい規制を行う場合、それよりも大きい他の放射線防護基準には更に厳格な要件を適用せざるをえない状況になってしまうことである。そのため、放射能のリスクレベルに釣り合う規制方法を適用するのは重要である。このような考え方を踏まえ、RS-G-1.7 の改訂を計画し、新しいクリアランス安全指針案である DS500 のドラフトを作成する専門家会合に参加した服部隆利氏（電力中央研究所）は、不確かさが判断基準を超えるほど大きい場合には、適切に安全裕度を設定する扱い方を採用するべきだと主張した [26]。

### 3.2 教育用放射線量計における不確かさの考え方

教育用放射線量計に実用目的の放射線量計のような精度は求められておらず、教育現場で不確かさの性能管理を行うことは困難であり、厳しい規制を行うことによるメリットはコストの上昇によるデメリットを上回らないと考えられる。教育用放射線量計を用いて教育現場で測定実習を行う際に、線量計の表示値は必ずしも一定に維持できるわけではない。その表示値が上がった際に、その変動は不確かさによるものか、それとも測定した場所の線量率が一般的な数値から外れているかを判断できるようにする必要がある。このような教育用放射線量計の特徴を考えると、測定目的に合う不確かさの許容範囲を検討する方法を採用するべきである。

教育用放射線量計の測定対象は主に低線量放射線である。環境省「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（平成 26 年度版）」では、日本地質学会が元素の濃度分布図である地球化学図のデータに基づいて計算した、日本全国 of 自然放射線量の理論値を引用し、自然状態で環境放射線が最も高いのは岐阜県、最も低いのは神奈川県と説明した [36]。この 2 県に加えて、東京電力福島第一原子力発電所事故による放射性物質の放出の影響を大きく受けた福島県のデータも考慮する。しかし、事故現場など日常的に教育測定実習を実施すると考えられない高線量な区域も存在するため、福島県において人口が比較的多いと考えられる福島県県中地方の現在の空間線量率を参考にする。県中地方とは、県の中央に位置し、郡山市、須賀川市、田村市及び岩瀬郡、石川郡、田村郡などの 3 市 6 町 3 村から構成される [37]。原子力規制委員会が公開しているモニタリングポストによる岐阜県、神奈川県および福島県県中地方の空間線量率測定結果の平均値を表 3.1 にまとめた [38]。

一般的に、モニタリングポストが測定するのは空気吸収線量率 [ $\mu\text{Gy/h}$ ] であるが、線量計が示すのは 1 cm 線量当量率 [ $\mu\text{Sv/h}$ ] である。放射能測定法シリーズ No.17「連続モニタによる環境  $\gamma$  線測定法」の参考資料では、東京電力福島第一原子力発電所事故後に福島県周辺の多数の地点において空気吸収線量率と周辺線量当量率の両線量を測定し比較した報告結果によると、放射性セシウムが沈着した地域では、周辺線量当量率と空気吸収線量率の比率 (Sv/Gy) は 1.25 程度であると記載されている [39]。この数値を参考に、周辺線量当量率への換算を行った。結果によると、日本で教育用放射線量計を用いて環境放射線の測定実習を行う場合、測定場所による環境空間線量率はおおよそ  $0.040\mu\text{Sv/h}\sim 0.104\mu\text{Sv/h}$  で変動すると考えられる。

実際に東京大学本郷キャンパスの敷地内にて、1 時間程連続で KINDpro を用いて BG 測定を行った結果、1 分間の平均計数は約 246 カウント、対応する 1 cm 線量当量率は約  $0.067\mu\text{Sv/h}$  と表示された。よって、KINDpro を全国で使用する場合、1 分間の計数は 147 カウント $\sim$ 382 カウントの範囲内で変動すると考えられる。

計測値のばらつきの分布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。そのため、線量計が示す測定値のカウント数が平常時のカウント数より  $3\sigma$  以上高い場合、有意に放射線が増えていると判断できる。「アイソトープ手帳」 [14] に掲載されている方法に従い平常時の計数誤差を計算すると、147 カウント

の標準偏差は $\sqrt{147} \approx 12.12$  カウント、382 カウントの標準偏差は $\sqrt{382} \approx 19.54$  カウントとなり、相対標準偏差（変動係数）は約 5.1%～8.2%となる。3 $\sigma$ の考え方を参考にすると、毎分の計数の変動が約36カウント～60カウントを超えた場合、有意な放射線はあると判断する。

以上の計算をまとめると、教育用放射線量計の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  $\mu$  Sv/h である。この数値を超えた場合、測定している環境に有意な放射線が存在すると判断することができ、測定している環境の放射能は平常時より高いといえる。

前述の服部氏の考え方を参考にすると、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。参考として、環境省が放射性物質汚染対処特措法に基づく汚染状況重点調査地域の指定や、除染実施計画を策定する地域の目安として策定した要件は 0.23  $\mu$  Sv/h である [40]。この数値は本項目の議論により得られた 0.120  $\mu$  Sv/h という有意な放射線が存在しないといえる上限値を超えるため、このような除染が必要だとされる地域の判断を目的としても、教育用放射線量計は使用できそうである。

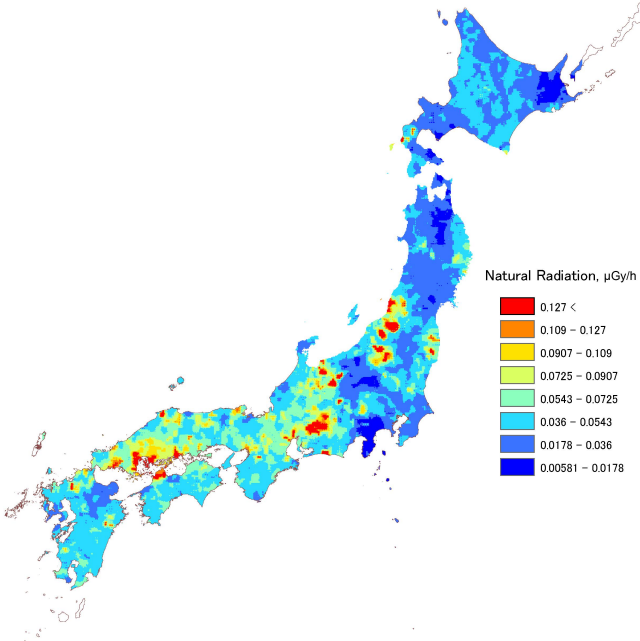


図 3.2 日本の自然放射線量率 [41]

表 3.1 モニタリングポストによる空間線量率測定結果（平均値）

測定地	データ数	空気吸収線量率 [ $\mu$ Gy/h]	周辺線量当量率 [ $\mu$ Sv/h]
岐阜県	12	0.055	0.069
神奈川県	29	0.032	0.040
福島県県中地方	753	0.083	0.104

\*データは 2022/1/15 13:00:00 の結果から算出

## 4. 現存の教育用放射線量計の特性整理

### 4.1 特性試験実施の背景

教育用の線量計に要求される性能については現状では特段の定めはない。本章では、教育用放射線量計の一例として現在開発中の KINDpro のプロトタイプを取り扱い、現状備えている性能の調査と、このような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ことを目的とする。

本研究では、 $\gamma$  線の周辺線量当量及び／又は方向性線量当量を測定する教育用放射線量計を想定する。取り扱う線量計の種類が比較的近い既存の規格基準として国際規格 IEC 60846-1:2009 Radiation protection instrumentation - Ambient and/or directional dose equivalent (rate) meters and/or monitors for beta, X and gamma radiation - Part 1: Portable workplace and environmental meters and monitors (以下、IEC 60846-1) と日本産業規格 JIS (JIS=Japanese Industrial Standards) Z 4333:2014「X線、 $\gamma$  線及び $\beta$  線用線量当量(率)サーベイメータ」(以下、JIS 4333)が存在する。JIS 4333 は、2009 年に第1版として発行された IEC 60846-1 を基とし、日本の使用状況に応じて、一部の内容を変更して作成した規格である。その技術的差異がある変更内容は主に旧規格で製作された製品が現在も販売されていること、 $\gamma$  線及び $\beta$  線での高線量率の照射ができないものがあること、10 Sv/h での校正された照射が実施できないことなど、日本国内の事情が原因である [19]。また、JIS 4333 のエネルギー・方向特性試験項目では試験点数を減らす方法を記載しており、これは IEC 60846-1 より改善されている箇所である。これらの変更点を総合的に考慮した結果、本研究で参考するのは JIS 4333 の方が妥当であると考えた。

日本産業規格は、日本の産業製品に関する規格や測定法などが定められた日本の国家規格のことである。工業標準化法の目的は、適正且つ合理的な工業標準の制定・普及により、工業標準化を促進することで、鉱工業品の品質の改善、生産能率の増進・生産の合理化、取引の単純公正化、使用又は消費の合理化を図り、あわせて公共の福祉の増進に寄与することである [42]。特に生産においてコストを下げることは、教育用放射線量計の一大目標であり、教育用放射線量計は現在基本的に民間で開発し、取引されていることを踏まえると、既に成熟した実用目的放射線量計の JIS 規格を参考するのは合理的だと考えられる。JIS 4333 は放射線サーベイを目的とする、X 線、 $\gamma$  線及び $\beta$  線の周辺線量当量(率)  $H^*(10)$ 、 $H^*(10)$  及び／又は方向性線量当量(率)  $H'(0.07)$ 、 $H'(0.07)$  を測定する携帯形の線量(率)計及び警報付き線量(率)計の性能について規定する [19]。

図 4.1 に示されている通り、JIS 4333 では線量計の様々な特性の許容範囲やその特性を調査する試験方法について詳しく記載されているが、「教育目的」に絞ると必要ではない項目や、コストの関係上実現が難しい項目、逆に放射線サーベイ(実用目的)より厳しく規定された方が望ましい項目が存在すると考えられる。



本研究では「教育現場での使用」を前提として、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った。これらの特性以外にも「携帯電話及び無線 LAN に対する電磁界特性」「梱包落下特性」など、線量計を教育現場で普及するのに重要だと思われる項目があるが、本研究ではまず線量計を使用するにあたって避けられない項目であり、物理的強度より表示値に影響を与える項目を優先的に調査を行う。また、実際に採用した試験方法は教育現場での要求と実際の操作可能性を考慮して、JIS 4333 を参考しながら一部改変を行った。それぞれを選定した理由と試験方法の詳細は、次項から具体的に述べる。

	ページ
序文	1
1 適用範囲	1
2 引用規格	1
3 用語及び定義	2
4 性能	4
4.1 直線性	4
4.2 変動係数	4
4.3 エネルギー・方向特性	5
4.4 線量測定における線量率特性	6
4.5 応答時間	6
4.6 オーバロード特性	6
4.7 ドリフト	7
4.8 ウォームアップ時間	7
4.9 $\beta$ 線による影響	7
4.10 警報設定精度	7
4.11 温度特性	7
4.12 湿度特性	7
4.13 電源電圧の変動に対する安定性	7
4.14 外部電磁界特性	7
4.15 携帯電話及び無線 LAN に対する電磁界特性	7
4.16 電源周波数磁界イミュニティ特性	8
4.17 静電気放電特性	8
4.18 無線周波電磁界によって誘導された伝導妨害に対するイミュニティ特性	8
4.19 こん（梱）包落下特性	8
4.20 耐微小振動特性	8

図 4.1 JIS 4333 目次の抜粋 [19]

## 4.2 温度特性

### 4.2.1 試験方法

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。教育目的においては、温度が標準試験条件（18℃～22℃）に近い室内だけでなく、季節などによる温度の変化の幅が広い室外での線量計の使用も少なくないため、温度特性の調査と関連する基準の検討は重要である。

温度特性試験の線量率測定方法について、JIS 4333 では以下の通り規定されている。

「サーベイメータを恒温槽内に設置し、線源を用いて  $10H_0$  程度で照射する。標準試験条件並びに表 4 に規定する温度範囲の最低温度及び最高温度でそれぞれ少なくとも 4 時間放置し、最後の 30 分間の指示値を記録する。標準試験条件における指示値を基準とし、それぞれの温度における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る。」（ $H_0$ ：有効測定範囲の下限值） [19]

しかし、学校現場では恒温槽の確保が難しいため、手軽に作成が可能である恒温箱（以下、自作恒温箱）を自作した（図 4.2）。このような恒温箱は、簡単に大量生産して教育現場に確保できるだけでなく、授業を通じて学生に「温度特性」による線量計の指示値の変化を観察させることも可能であり、放射線に関する教育実験の内容を豊富にする。

自作恒温箱は専門的な恒温槽と比べ、長時間な保温は難しいが、少なくとも指示値を読み取る間の 5 分間（間隔 1 分×連続 5 回）は温度を一定に保つことを目指した。また、材料に関しては放射線の遮蔽効果をほぼ持たないものを選定すべきであり、総合的に考慮した結果、発泡スチロール箱を採用した。もし実際の実験で保温効果が望ましくない場合、一定の保温効果を持つ毛布を被せる方法を候補として考えた。また、線量計のデータ輸送用ケーブルと外付け温度計用に開けた穴は、できるだけ隙間を小さくするように注意した。

KINDpro の場合は温度計が内蔵されているが、温度の指示機能を持たない線量計も温度の観察手段を確保する必要があるため、外付け温度計を線量計と同じ高さに設置した。

線量計に内蔵されている温度計の指示値が安定したら、線量率の測定値を連続で 5 回（間隔 1 分）読み取った。Cs-137 線源と Co-60 線源を使用して（表 4.1）、2 台の KINDpro の指示値を記録した。

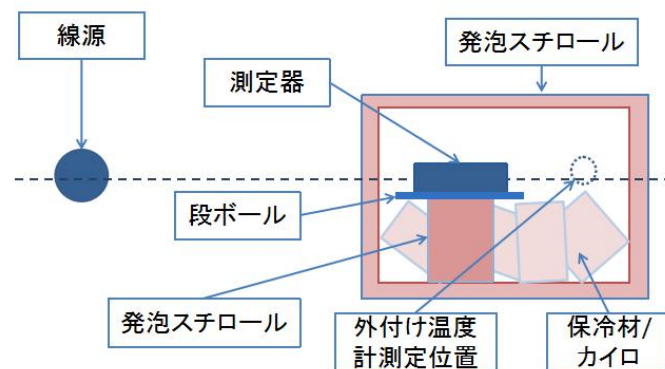


図 4.2 自作恒温箱の構造

表 4.1 温度特性試験で使用した線源

核種	番号	基準日	基準時刻	照射線量率 [C/kg · h]	換算	
					[ $\mu$ Sv/h]	[cm]
Cs-137	2018GV	2019/3/5	12:00	5.103E-08	8.541	50
Co-60	0112	2020/5/15	12:00	6.388E-08	2.634	100

具体的には、以下の手順に従って試験を行った。

- ①線量計を自作恒温箱に入れる
- ②標準温度条件（室温約 20℃）において、BG 線量率を 60s 間隔で連続 5 回読み取る
- ③線源を線量計と一直線上で 1.0m 離れた位置に設置する
- ④標準温度条件（室温約 20℃）において、線量率測定値を 60s 間隔で連続 5 回読み取る
- ⑤保冷材／カイロを自作恒温箱に入れる
- ⑥外付け温度計と線量計の内蔵温度計の指示値を観察する
- ⑦温度の指示値が一定の間（約 10 分）安定していることを確認したら、線量率測定値および線量計の内蔵温度計の指示値を 60s 間隔で連続 5 回読み取り、記録する

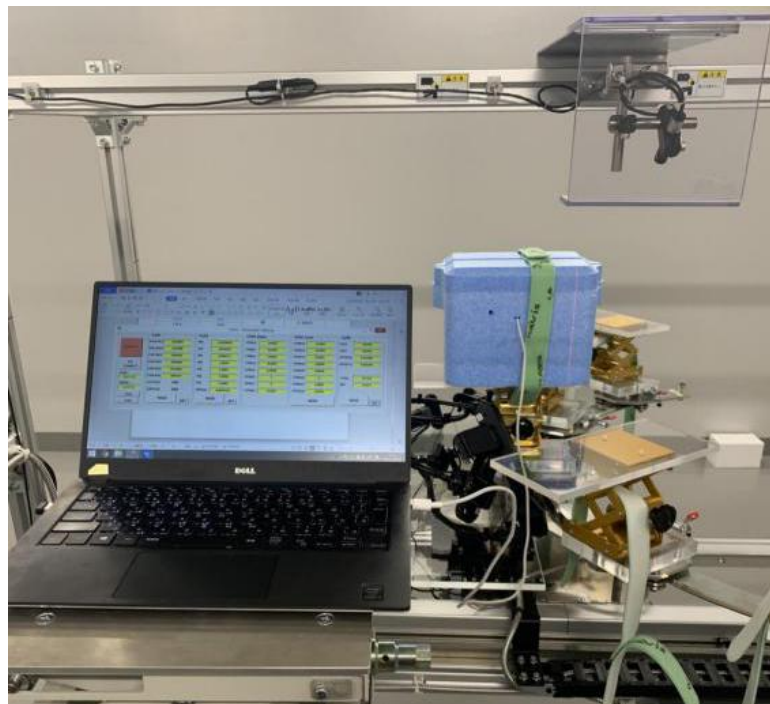


図 4.3 温度特性試験の様子

#### 4.2.2 試験結果と考察

表 4.2 線量計を冷却した場合の温度特性試験結果

使用機器	線源	温度変化 平均値[°C]	基準値 [ $\mu$ Sv/h]	温度変化後指示値 [ $\mu$ Sv/h]	差 (指示値-基準値) [ $\mu$ Sv/h]	比率 (差/基準値)
KINDpro01	Cs-137	-12.02	1.701	1.877	0.177	10.40%
	Co-60	-12.70	2.218	2.283	0.065	2.95%
KINDpro02	Cs-137	-11.13	1.713	1.880	0.167	9.76%
	Co-60	-13.20	2.465	2.557	0.091	3.71%

表 4.3 線量計を加熱した場合の温度特性試験結果

使用機器	線源	温度変化 平均値[°C]	基準値 [ $\mu$ Sv/h]	温度変化後指示値 [ $\mu$ Sv/h]	差 (指示値-基準値) [ $\mu$ Sv/h]	比率 (差/基準値)
KINDpro01	Cs-137	15.91	1.701	1.547	-0.154	-9.03%
	Co-60	15.18	2.218	2.168	-0.050	-2.24%
KINDpro02	Cs-137	15.64	1.713	1.519	-0.194	-11.34%
	Co-60	13.22	2.465	2.256	-0.209	-8.49%

保冷材とカイロを使用する温度調整方法には限界があり、約+10°C～+38°Cの温度範囲での測定になったが、KINDpro による試験結果は、JIS 4333 における温度特性の許容範囲（表 4.4）を満たしていることが確認された。

室外で教育用放射線量計を使用する場合、使用時間は一般的に昼～夕方が想定される。そのため、温度特性を調査する際の温度範囲は、一日の最高気温条件を参考するべきである。過去の記録をみると、日本各地の一日の最高気温は-32°C～41.1°Cの範囲で変動している [43]。しかし、室外での教育実習は一般的に過酷な温度条件を避ける。例えば、熱中症の危険警報は、目安として 35°C以上で発信される [44]。北海道など気温が低い地区でも、0°Cに近い気温条件では室外での教育実習をほぼ行わないと考えられる。よって、本研究では日本で人口が一番多く、極端な気温が比較的少ない東京都の気温を参考にする。気象庁による東京都の月ごとの気温集計（図 4.4）を見ると、2021 年の平均気温が一番高い 8 月の平均最高気温は 31.6°C、最高気温は 36.8°Cである。また、平均気温が一番低い 1 月の平均最高気温は 10.3°C、最高気温は 18.7°Cである [45]。今回の試験で実施した+10°C～+38°Cの温度変化範囲は、東京での使用を考えれば十分に対応できる。使用頻度は少ないと考えられるが、この範囲外での使用も考慮して、線量計の説明書には温度特性試験により得られた温度と表示値の変動範囲を明記することが望ましい。

標準線源で線量計を照射して、温度特性を調べる際の指示値の許容範囲は、事前に想定した「自然環境の測定」という教育用放射線量特有の使用目的に当てはまらないため、

JIS 4333 で規定されている -13%～+18% を教育用放射線量計にも適用する。しかし、実際に室外で低線量の放射能を対象に測定を行う場合、3 章で議論した通り、通常より不確かさの影響が大きめに存在するため、-13%～+18% の範囲内に必ずしも収まるわけではないことを使用者に伝えるべきである。

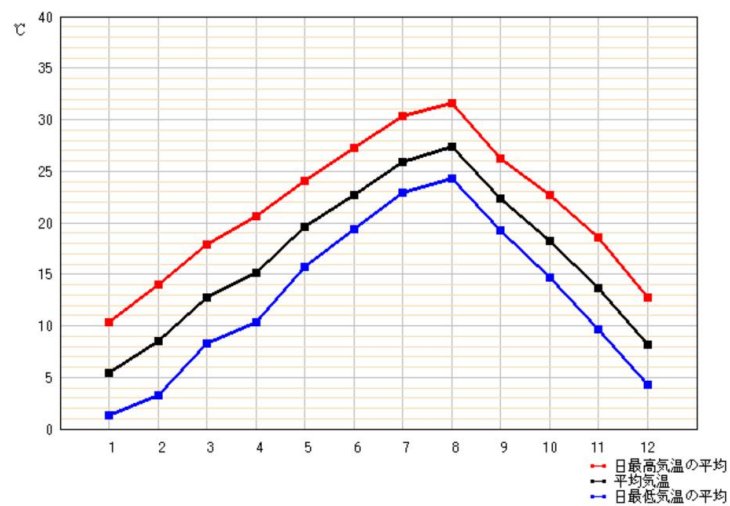


図 4.4 2021 年東京気温（月ごとの値） [45]

表 4.4 温度特性の許容範囲 [19]

種類	温度範囲 °C	許容範囲 %
屋内仕様	+5～+40	−13～+18
屋外仕様	−10～+40	−13～+18

## 4.3 方向特性

### 4.3.1 試験方法

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。教育目的においては、標準である測定方向を定めても、主には放射線の専門家ではない学生が環境中で線量計の向きを特に気にせず使用するため、様々な入射方向で測定を行ってしまうことが発生しうる。そのため、指示値が大きく変化する入射方向と対応する指示値の変化の幅を把握し、教育の中で明示するのは重要であると考えられる。

方向特性試験の X 線及び  $\gamma$  線の  $H^*(10)$  及び  $H^*(10)$  測定方法について、JIS 4333 では以下の通り規定した（1 形及び 2 形の場合）。

「基準の向きを  $0^\circ$  とし、サーベイメータの基準点を通る垂直方向及び水平方向の両方向について実施する。（中略）

表 JC.1 に規定する実効エネルギー付近の X 線及び表 JC.2 に規定する  $\gamma$  線のうち定格範囲のエネルギーについて、入射角度（ $\alpha$ ）を  $0^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$  及び  $\pm 90^\circ$  で照射する。定格角度範囲の最大値がこれらの角度と異なる場合は、その角度についても照射する。表 5 に示す基準 X 線又は基準  $\gamma$  線の入射角度  $\alpha = 0^\circ$  のときのレスポンスを基準値として、各エネルギー及び各角度に対する相対レスポンスを求める。

なお、入射角度による相対レスポンスの変化が小さいか単調であると考えられる場合については、試験点数を減らしてもよい。」 [19]

KINDpro のシンチレータは、薄い立方体の形状をしている（図 4.5）。そのため、JIS 4333 によると水平方向のみの照射を行うが、本研究では指示値の変動が大きいと考えられる縦方向での照射も行った（図 4.6）。また、水平方向に関しては、入射角度による相対レスポンスの変化が小さく、単調であると考えられるため、 $0^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$  の 5 回のみ照射した（図 4.7）。Cs-137 線源（表 4.5）を使用して、2 台の KINDpro の指示値を記録した。

具体的には、以下の手順に従って試験を行った。

- ① BG 線量率を 60s 間隔で連続 5 回読み取る
- ② 線源を線量計と一直線上で 1.0m 離れた位置に設置し、水平方向  $0^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$  の指示値を 60s 間隔で連続 5 回読み取る
- ③ 線量計を立て、シンチレータの中心が線源と一直線上になるよう高さを調整し、指示値を 60s 間隔で連続 5 回読み取る



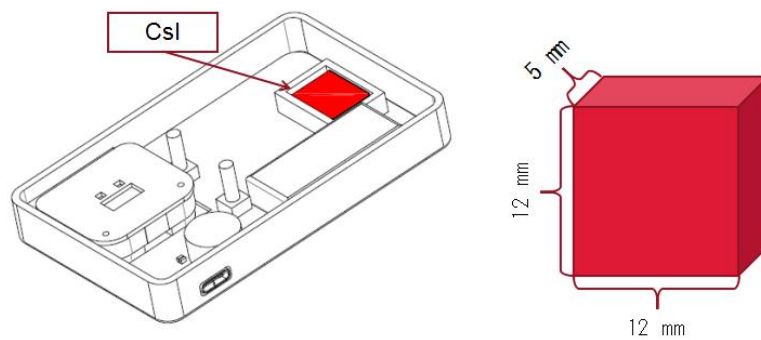


図 4.5 KINDpro と CsI シンチレータの形状

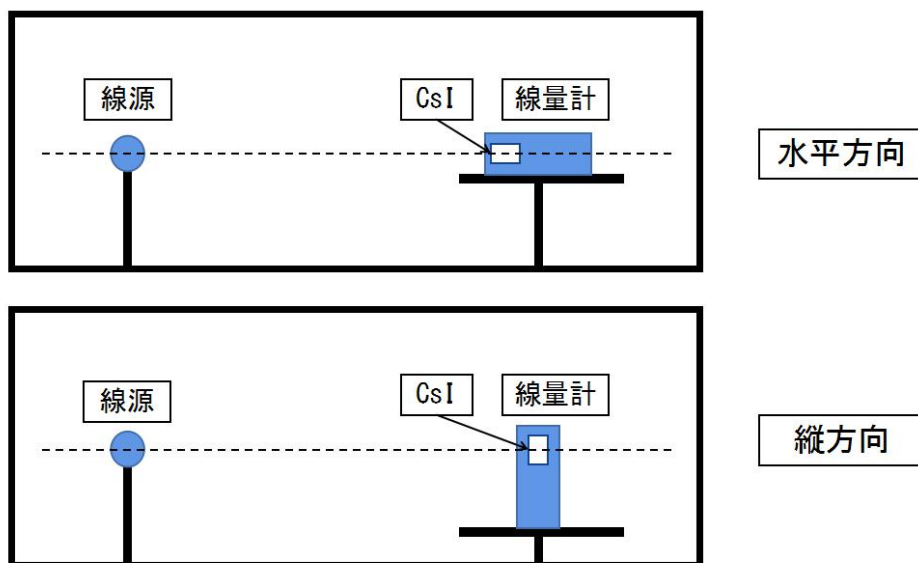


図 4.6 水平方向／縦方向の照射方法

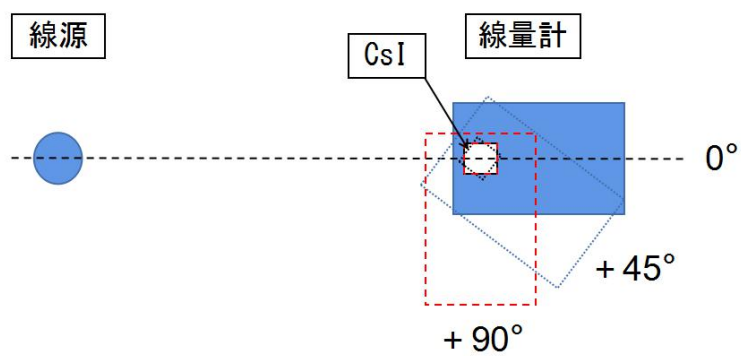


図 4.7 水平方向の照射角度





図 4.8 縦方向の方向特性試験の様子

表 4.5 方向特性試験で使用した線源

核種	番号	基準日	基準時刻	照射線量率 [C/kg · h]	換算	
					[ $\mu$ Sv/h]	[cm]
Cs-137	2018GV	2019/3/5	12:00	5.103E-08	8.541	50

### 4.3.2 試験結果と考察

表 4.6 方向特性試験結果

使用機器	角度	線源	測定値[ $\mu$ Sv/h]	比率 (測定値/理論値)	0° の値を 1 とした 相対レスポンス
KINDpro01	+90°	Cs-137	1.607	0.79	0.91
	+45°		1.717	0.84	0.97
	0°		1.771	0.87	1.00
	-45°		1.717	0.84	0.97
	-90°		1.691	0.83	0.95
	縦		1.911	0.94	1.08
KINDpro02	+90°		1.708	0.84	0.96
	+45°		1.776	0.87	1.00
	0°		1.777	0.87	1.00
	-45°		1.821	0.89	1.02
	-90°		1.684	0.83	0.95
	縦		1.988	0.98	1.12

$\gamma$  線の入射角度  $\alpha = 0^\circ$  のときのレスポンスを基準値として計算した、各角度に対する相対レスポンスの中で、1.0 から一番離れているのは KINDpro02 の縦方向の 1.12 であり、次点は KINDpro01 の +90° 方向の 0.91 と KINDpro01 の縦方向の 1.08 である。

この結果は、JIS 4333 における方向特性の許容範囲（表 4.7）を満たしている。KINDpro は方向特性の影響が小さかったが、異なる原理の線量計（電離箱式など）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特定の測定方向が存在することが考えられる。本章で実施した方向特性試験を参考にして、方向特性の影響が大きいと思われる方向から照射を行い、JIS 4333 で記載されている「1 形及び 2 形については、入射角度範囲の  $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 75^\circ$  及び  $\pm 90^\circ$  が定格範囲に含まれない場合も、入射角度及びエネルギーに対する相対レスポンスを試験結果として明示することとし、許容範囲は規定しない」[19]の内容を参考にして、これらの方向に関しては教材などで相対レスポンスを明示することを提案する。定格範囲と対応する相対レスポンスの許容範囲に関しては、JIS 4333 の規定は教育用放射線量計に適用できると考えられる。

表 4.7 X 線及び  $\gamma$  線の  $H^*(10)$  及び  $H^*(10)$  エネルギー・方向特性 [19]

種類	最小定格範囲		相対レスポンスの許容範囲
	エネルギー範囲	入射角度範囲 (括弧内は試験点)	
1 形	80 keV $\sim$ 1.5 MeV	0° $\sim$ $\pm$ 45° (0°, $\pm$ 30°, $\pm$ 45°)	$0.71 - u_{rel} \sim 1.67 + u_{rel}$
2 形	20 keV $\sim$ 150 keV	0° $\sim$ $\pm$ 45° (0°, $\pm$ 30°, $\pm$ 45°)	$0.71 - u_{rel} \sim 1.67 + u_{rel}$
3 形	(10 keV $\sim$ 30 keV) <sup>a)</sup>	0°	製造業者の指定による
	30 keV $\sim$ 0.2 MeV	0°	$0.65 - u_{rel} \sim 1.35 + u_{rel}$
	0.2 MeV $\sim$ 1.5 MeV	0°	$0.85 - u_{rel} \sim 1.15 + u_{rel}$
	(1.5 MeV $\sim$ 10 MeV) <sup>b)</sup>	0°	$(0.65 - u_{rel} \sim 1.35 + u_{rel})$ <sup>c)</sup>
	<sup>137</sup> Cs	0° $\sim$ $\pm$ 90° (30° ステップ)	$0.75 - u_{rel} \sim 1.25 + u_{rel}$
4 形	60 keV $\sim$ 1.5 MeV	0°	$0.7 - u_{rel} \sim 1.3 + u_{rel}$
	(1.5 MeV $\sim$ 6.5 MeV) <sup>b)</sup>	0°	$(0.5 - u_{rel} \sim 1.3 + u_{rel})$ <sup>c)</sup>
	<sup>137</sup> Cs	0° $\sim$ $\pm$ 90° (30° ステップ)	$0.75 - u_{rel} \sim 1.25 + u_{rel}$
<p>注記 1 1 形及び 2 形は、国際規格 (IEC 60846-1) を満足しているサーベイメータである。</p> <p>注記 2 6 MeV 付近のエネルギーを定格範囲に含まない場合でも、高エネルギー <math>\gamma</math> 線の測定が可能なサーベイメータに関しては、6 MeV 付近のエネルギーの相対レスポンスを参考値として試験結果に示すことが望ましい。</p> <p>注 <sup>a)</sup> 定格範囲が 30 keV 未満を含む場合</p> <p><sup>b)</sup> 定格範囲が 1.5 MeV 以上を含む場合</p> <p><sup>c)</sup> 許容範囲として望ましい値であるが、これは参考値であって、規定の一部ではない。</p>			

## 4.4 エネルギー特性

### 4.4.1 試験方法

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。教育目的においては、環境中に存在する様々なエネルギーの核種を測定するため、これらの核種に対する指示値と正確な理論値間の差を把握することは重要であると考えられる。

エネルギー特性試験の X 線及び  $\gamma$  線の周辺線量当量（率）測定方法について、JIS 4333 では表 4.8 の線源を指定した（1 形及び 2 形の場合）。本研究では、より連続で完全なエネルギー特性曲線を得るため、Ba-133 線源と Co-57 線源を追加し、最終的には表 4.9 の線源を採用した。しかし、本試験で使用した Am-133 線源に関しては、線源校正データが不明であるため、基準場における 1cm 線量当量率の理論値の計算ができない。そのため、Am-133 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。

また、本試験の測定では散乱線の寄与が高いと考えられるため、「シャドーシールド法」を使用した。具体的には、以下の手順に従って試験を行った。

- ①BG 線量率を 60s 間隔で連続 5 回読み取る
- ②線源を線量計と一直線上で 1.0m 離れた位置に設置し、指示値を 60s 間隔で連続 5 回読み取る
- ③鉛の遮蔽体（ $20 \times 5 \times 10$ cm）を線源と線量計の間に設置し、指示値を 60s 間隔で連続 5 回読み取る

②で得た値から③で得た指示値を引けば、散乱線の寄与を取り除いた、線源から直接線量計に入射する放射線のみの値を得られる。

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、日立アロカメディカル製 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、指示値を記録した。

表 4.8 JIS 4333 にて指定されたエネルギー特性試験の  $\gamma$  線源 [19]

線源	エネルギー keV	換算係数 $H^*(10)$ (Sv/Gy)
S-Am	59.5	1.74
S-Cs	662	1.2
S-Co	1 250	1.16

表 4.9 エネルギー特性試験で使した線源

核種	番号	基準日	基準時刻	照射線量率 [C/kg · h]	換算 [ $\mu$ Sv/h][cm]		光子の実効エネルギー [keV]
Co-60	0112	2020/5/15	12:00	6.388E-08	2.634	100	1250
Cs-137	2018GV	2019/3/5	12:00	5.103E-08	8.541	50	660
Ba-133	0033	2020/5/15	12:00	1.08E-08	1.986	50	340
Co-57	0121	2020/5/11	12:00	4.34E-09	0.934	50	124
Am-241	情報なし						60

#### 4.4.2 結果と考察

表 4.10 エネルギー特性試験結果（各核種に対する相対レスポンス）

使用線源核種 /装置	$\gamma$ 線の実効 エネルギー [keV]	TCS-172	TCS-161	KINDpro	A2700
Co-60	1250	1.06	1.02	1.22	0.82
Cs-137	660	1.00	1.00	1.00	1.00
Ba-133	340	1.11	1.13	1.27	1.01
Co-57	124	1.16	1.13	0.40	0.42
Am-241	60	0.69	0.87	0.11	0.06

\*相対レスポンスとは、測定値/理論値の比率を指す。また、各相対レスポンスは Cs-137 に対する相対レスポンスを 1.0 に合わせて全て規格化した

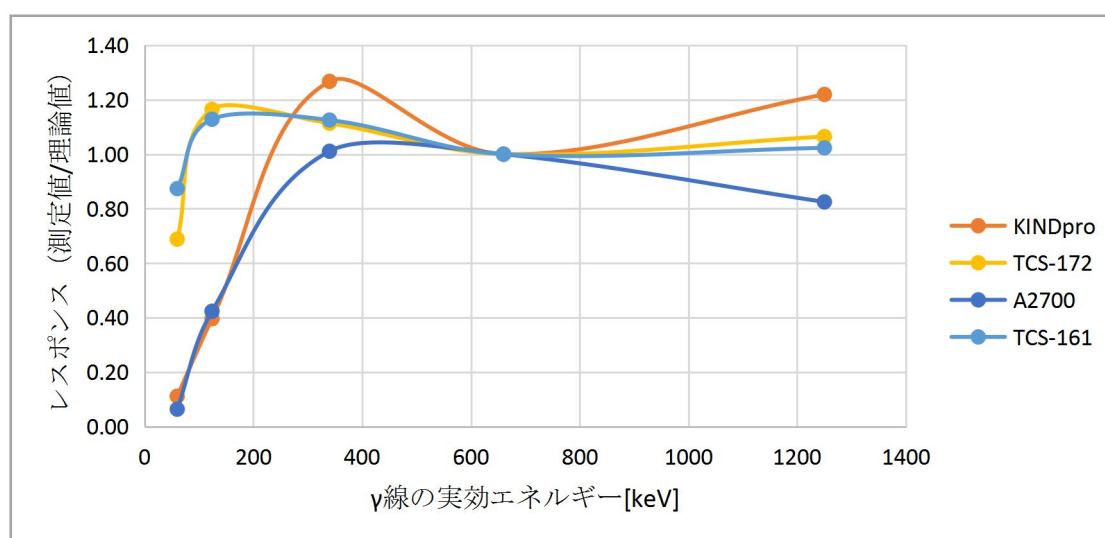


図 4.9 エネルギー特性のグラフ(Cs-137 を 1.0 とする)

結果、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（表 4.7）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り、低濃度の自然放射性核種において、もっとも重要な成分はカリウム、トリウム、ウランおよびウランとトリウムの長寿命壊変系列核種である [16]。図 4.10 に示す地上ガンマ線スペクトルで顕著である核種のエネルギーと福島事故由来の Cs-137 環境を考えると、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。

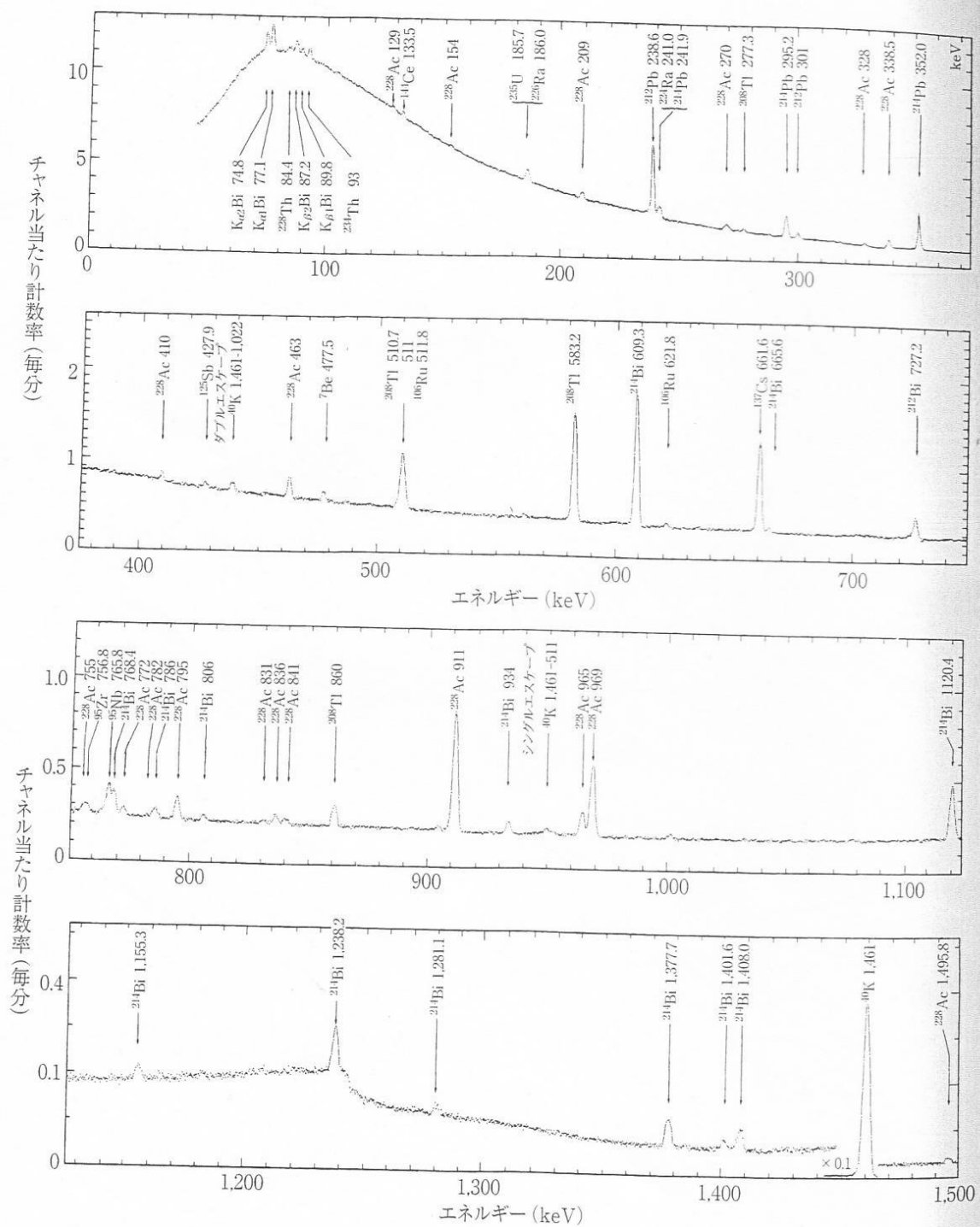


図 4.10 地上 1m に設置した 60cm<sup>3</sup> の Ge 検出器により  
170 時間記録した地上ガンマ線スペクトルの例 [16]

## 5. 新係数によるエネルギー補償の検討

### 5.1 背景

一部の放射線量計において、 $G(E)$ 関数による補償方法を採用している。しかし、教育用放射線量計はコストの制限上、連続した波高スペクトルを導出することが難しいことが多い。KINDpro の場合、初期設定は実測を重ねて計数率から 1 cm線量当量に換算する最適な係数を算出した。また、エネルギー分割に関しては製造側の都合により 7 チャンネル (2MeV~3MeV) は固定し、1 チャンネル~6 チャンネルは低エネルギー側が細くなるよう、基本的には均等に分割した。しかし、プロトタイプのこの分割方法では、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。本章と 6 章では、プロトタイプの補償設定の弱点をカバーし、様々な環境の寄与核種のエネルギーに基づく適切な補償設定を算出するための方法を提案し、新たに算出した係数を様々な環境における測定に適用した際の効果を検証することを目的とする。

実測で利用できる線源の種類、すなわち得られるエネルギー点の情報の数に限りがある。そのため、本研究では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。細かくエネルギー点を取ることによって、より細かいチャンネルの出力を得ることが出来る。出力のデータが多ければ多いほど、算出する係数はより正確な値に近づく。

本章では、使用したシミュレーションのモデルとその妥当性の検証結果について述べる。

### 5.2 モンテカルロシミュレーション(PHITS)のモデル

PHITS シミュレーションで線源の照射を受ける線量計は、KINDpro の形状を参考とした。

シミュレーションに必要な入力情報は以下の通りである。

- ・線量計の外部ケースとシンチレータ周辺のジオメトリ

AIR：空気

ABS：ABS 樹脂（外部ケース）

SUS：SUS パネル（ケース正面のパネル）

Acryl：アクリルケース（シンチレータ周辺ケース）

CsI：シンチレータ

- ・線源中の核種の種類とその放射エネルギー
- ・線源と線量計の位置関係

ここでは、まず線量計のジオメトリに関して記載する。様々なエネルギーの放射線を照射した際の線量計 (KINDpro) のレスポンスをシミュレーションにより再現することを目的とするため、KINDpro の電子回路部分は今回のモデルでは省略し、主に結晶の周



辺部分と散乱と遮蔽に影響を与える外部ケースの部分再現した。以下にそのジオメトリを示す。図 5.1 と図 5.2 の 1 と表記されている黄緑の部分、KINDpro の検出部分である CsI 結晶である。また、本試験では周囲の壁などによる散乱線の影響を考慮しないため、障害物がない空气中（ジオメトリでは、CsI 結晶の下部中央を中心とする、半径 5m の球体空間と設定）での照射を想定した。

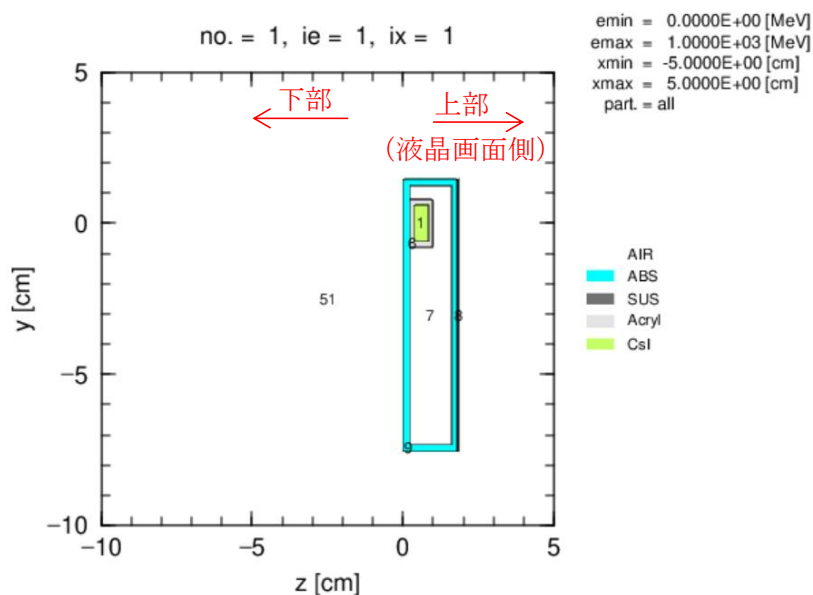


図 5.1 作成した KINDpro モデルの側面

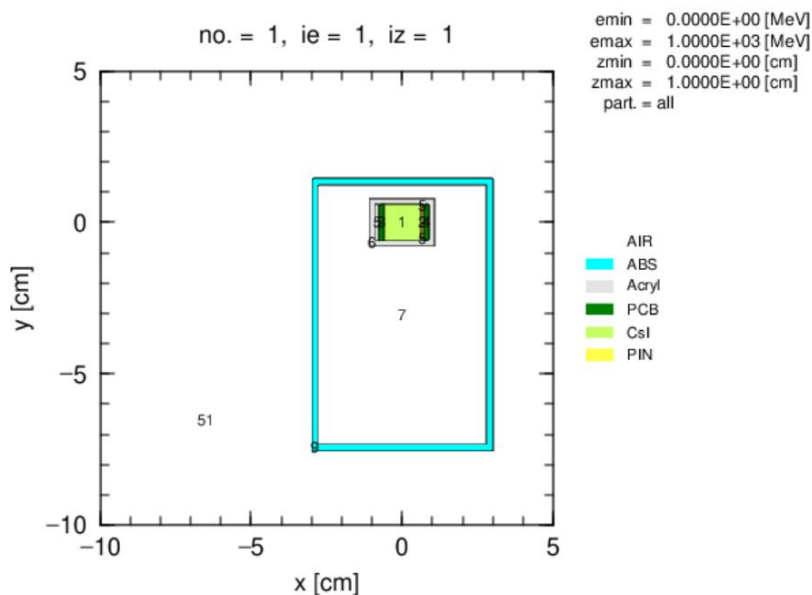


図 5.2 作成した KINDpro モデルの正面

### 5.3 実測とシミュレーションの比較（モデルの妥当性の確認）

モデルの妥当性を検証するステップでは PHITS の RI source 設定機能を利用して Cs-137 等方点線源／Co-60 等方点線源を KINDpro の CsI 結晶の中心部から 1.0m 離れた位置に設置した。線源と線量計の体系内における位置関係は、以下に示す。放射能の強さは、実際に試験で使用した Cs-137 線源（37MBq）／Co-60 線源（10MBq）と一致させた。

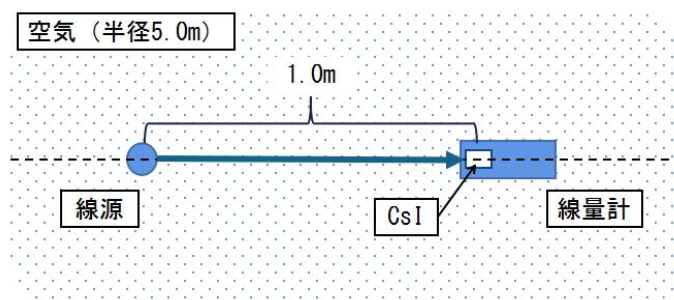


図 5.3 モデルの妥当性を確認する際のシミュレーション体系

シミュレーションにより得る線量計の各チャンネルの出力と比較するために、KINDpro 1 台に両線源をそれぞれ照射し、シャドーシールド法を使用して得た各チャンネルの CPM（毎分あたりの計数）を以下の通り記録した（表 5.1）。CPM 1 はチャンネル 1 での計数率を表し、CPM 1 から 2, 3 …7 へ向けて、観測するエネルギーが大きくなるように設定している。（各チャンネルの対応エネルギー領域は、2.5.2 の表 2.2 を参照）また、シミュレーション値との比較を容易にするため、誤差が一番小さいと一般的に考えられる全吸収ピークが所在するチャンネル（Cs-137 の場合はチャンネル 4、Co-60 の場合はチャンネル 5）の値を 1.0 に合わせて全体を規格化した（表 5.2）。

表 5.1 実測による各チャンネルの CPM 値

	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
CPM1	317.8	109.8
CPM2	518.4	145
CPM3	717.4	257.4
CPM4	759	305.6
CPM5	39.8	333
CPM6	0	3
CPM7	0.8	-0.8

表 5.2 実測による各チャンネルの CPM 値（規格化）

	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
CPM1	0.42	0.33
CPM2	0.68	0.44
CPM3	0.95	0.77
CPM4	1.00	0.92
CPM5	0.05	1.00
CPM6	0.00	0.01
CPM7	0.00	0.00

シミュレーションの結果も同様に、全吸収ピークが所在するチャンネルの値を 1.0 に合わせて全体を規格化した。

表 5.3 シミュレーションによる各チャンネルの出力

	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
CPM1	7.39	2.00
CPM2	12.32	3.18
CPM3	14.79	4.55
CPM4	16.70	6.36
CPM5	0.00	7.27
CPM6	0.00	0.00
CPM7	0.00	0.00

表 5.4 シミュレーションによる各チャンネルの出力（規格化）

	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$
CPM1	0.44	0.27
CPM2	0.74	0.44
CPM3	0.89	0.63
CPM4	1.00	0.88
CPM5	0.00	1.00
CPM6	0.00	0.00
CPM7	0.00	0.00

表 5.2 と表 5.4 を比較した結果は以下に示す。

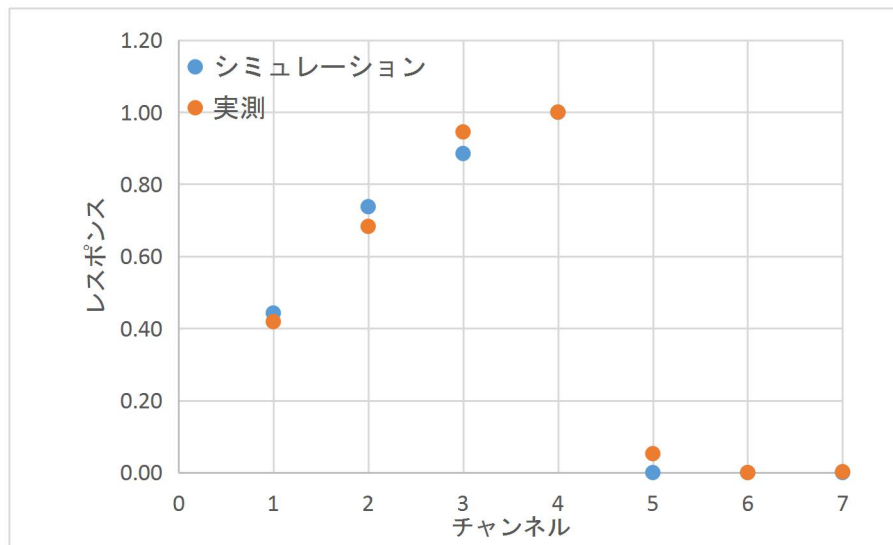


図 5.4 Cs-137 線源のシミュレーションと実測の比較

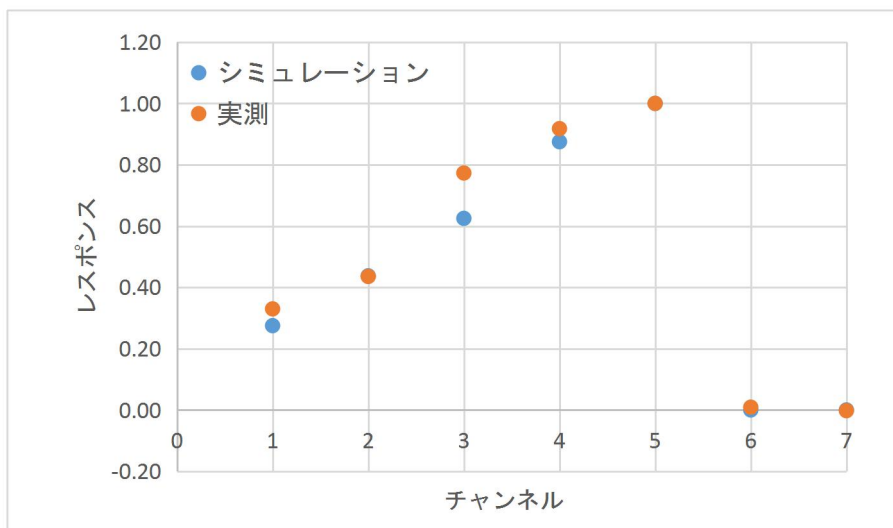


図 5.5 Co-60 線源のシミュレーションと実測の比較

比較の結果、例えば図 5.5 の 3 チャンネル（248keV～448keV）における実測とシミュレーションの差が目立つが（約 20%）、PHITS 側の統計誤差 10%～20%を考慮すると、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. 教育目的放射線線量計の使用場面に関する整理

### 6.1 新係数算出の下準備

本研究で重点的に取り扱う教育用放射線線量計の用途は、環境放射線の計測である。そのため、KINDpro の場合は図 6.1 のような測定場面を標準的な使用方法とする。この場合は空間の線量を測定しているため、シミュレーションを行う際には、整列拡張場を再現した並行ビームの線源を設定するのが妥当である。

しかし、放射線の専門知識を持たない使用者は、表面線量と空間線量の違いに関する理解がなく、放射能が高い特定の箇所の測定を行う可能性がある。この使い方は前述の本研究で想定するものとは異なり、係数の算出方法も別途検討する必要がある。これについては、線量計の使用説明書などに注意書きとして記載し、誤解なく使用者に伝える必要がある。

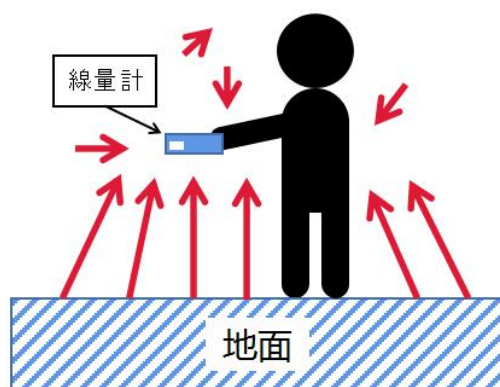


図 6.1 本研究で想定する教育用放射線線量計の測定場面の一例

教育用放射線線量計はコストの関係上、チャンネルの設定数に上限がある。本研究では、KINDpro の 7 チャンネルの設定を参考してシミュレーションと新係数の算出を進める。係数を未知とし、線量計の各チャンネルの出力と 1 cm 線量当量の理論値に関する連立方程式を解けば、理論上、各チャンネルの係数を算出することが可能である。具体的には、以下に手順を示す。

- ①異なるエネルギーで照射（シミュレーション）を繰り返す
- ②シミュレーションで得た各数値で、以下の方程式を作成

$$\Sigma (W_1 \times R_1, \dots, W_n \times R_n) = H^*(10)$$

$W_n$ ：各チャンネルの係数（未知）

$R_n$ ：各チャンネルの出力（レスポンス）

$H^*(10)$ ：周辺線量当量（1 cm 線量当量）

- ③異なるエネルギーを照射して得た方程式による連立方程式を解く

また、最終的に算出する係数は7チャンネルの設定に従うが、シミュレーションを行う際はエネルギー範囲の分割点の設定の見直しを容易にするため、まずは0.0MeV～3.0MeVを均等な30チャンネルに分割し、出力した。

よって、本シミュレーションで出力すべき値は、以下の2つである。

- ①0.0MeV～3.0MeV 均等な30チャンネルの出力（1チャンネル0.1MeV）
- ②周辺線量当量  $H^*(10)$

例えば、1.0MeVと2.0MeVの並行ビームを当てた場合、それぞれ図6.2と図6.3のような出力が得られる。

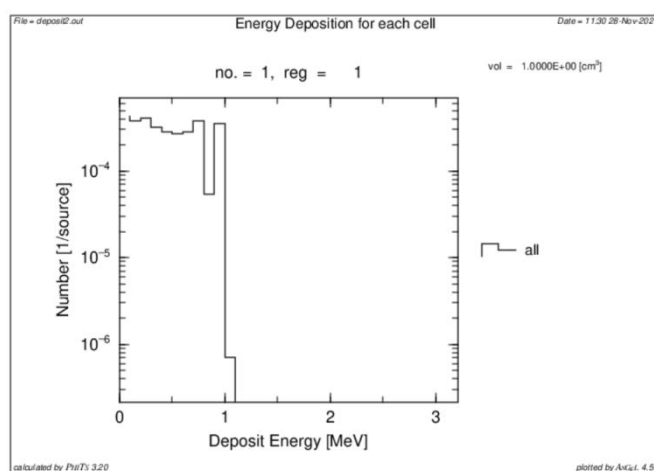


図 6.2 1.0MeV の並行ビームを当てた場合の均等な30チャンネルの出力

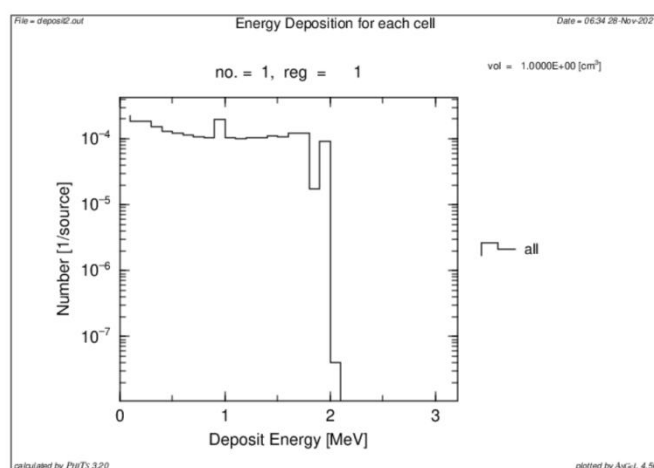


図 6.3 2.0MeV の並行ビームを当てた場合の均等な30チャンネルの出力

線源の設定において選定するエネルギー点は、ICRP Publication 74の光子フルエンスから周辺線量当量  $H^*(10)$ の換算係数表におけるエネルギー点の一部を参考とし、1MeVから3MeVの間は0.2MeV間隔にエネルギー点を追加した。

## 6.2 様々な使用場面の分類

測定を行う環境に対する線量計の挙動を考えるには、その環境における様々なエネルギーの核種の構成比が必要である。本項目では、教育用放射線量計が使用される様々な使用場面とその核種構成比を整理する。

放射線の管理現場は教育用放射線量計が想定する測定に含まれないため、教育用放射線量計が測定する人工核種は非常に限られている。しかし、日本での展開を考える場合、場所によっては東京電力福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウム核種などが存在することもある。また、このような事故が発生した際に、一般的な学校などが保有している線量計として一時的に使用することも想定される。そのため、本研究では自然放射線を主体とする一般的な身の回りの環境のほか、原子力発電所事故に関連する様々な環境も整理に含める。

表 6.1 と表 6.2 では、核種構成比に特徴があるいくつかの放射線測定環境をまとめた。核種構成比の数値は、その環境中に存在する代表的な核種を選出して、公表されている資料をもとに、空間における大まかな寄与を計算した。異なる環境を測定する際に、その環境に応じた最適な補償方法を適用できれば、有限なコストでエネルギー特性を向上させることが可能となる。次項から、それぞれの環境の詳細を述べる。

表 6.1 一般的な身の回りの環境とその核種構成比（ベクレル濃度から算出）

	Cs-137	ウラン系列	トリウム系列	K-40
東京都 [46]	24%	1%	2%	72%
人形峠* [47]				
日本産花崗岩 [48]		2%	7%	91%

\*人形峠の核種構成比に関する具体的な数値はないが、  
一般環境よりウラン系列の寄与が高いと考えられる

表 6.2 原発事故環境とその核種構成比

	Cs-137	Cs-134	Xe-133	I-132	I-131	天然核種
事故発生直後の現場 [49]	57%	43%				
現在の事故現場 [49]	96%	4%				
事故発生直後の千葉県 [50]			95%	2%	1%	2%
雨による沈着後の千葉県 [50]	8%	23%		21%	10%	3%
沈着から 60 日後の千葉県 [50]	18%	46%				4%

### 6.2.1 一般環境

教育現場で想定されるもっとも一般的な測定環境として、東京都を選択した。本来、このような一般的な環境の中では（過去の大気核実験による低濃度の人工核種を除けば）主に天然核種のみ存在するが、東日本では2011年の東京電力福島第一原子力発電所の事故の影響をいまだに観測できる地域がある。たとえば東京都では放射性セシウム核種が土壌中に存在することが今でも確認できる。本章では、東京都健康安全研究センターが2021年9月14日に実施した都心部（新宿百人町）の土壌サンプリング結果のCs-134とCs-137濃度を参考にした[46]。

より特殊な一般環境としては、人形峠を選定した。人形峠にはウラン鉱床があり、ラドン濃度が高い地域だと知られている。岡山県が実施している「人形峠周辺の環境放射線等の監視測定」では、U-238、Ra-226、Rn-222をサンプリングの放射能測定項目に指定し、ウラン系列の寄与が比較的大きな自然特性地域であることを定量的に示し、公表している[47]。

また、建材などに使われる一般的な鉱石として花崗岩を選定した。学校の放射線教育では霧箱を用いた実験も検討されている。霧箱は、無水エタノールとドライアイスによって、霧箱内に湿度が高く低温な環境を作り出し、身近な放射線源から出る放射線の電離作用により、霧箱内に現れる「飛行機雲」を通じて、間接的に放射線の飛跡を観察するものである[51]。実験の際に入れる放射線源に、花崗岩を利用する例がある[52]。今後は本研究で開発、検討された教育用放射線量計を組み合わせた教育実験を展開するといふ。

### 6.2.2 原子力事故に関連する環境

原子力発電所事故が発生した緊急事態での教育用放射線量計の利用を想定するため、2011年東京電力福島第一原子力発電所事故の実際の関連データを参考にした。事故発生直後の事故現場では、Cs-134とCs-137の濃度が非常に高くなり、天然核種の寄与はほぼ無視できるレベルであった。Cs-134の半減期は約2年と短いため、令和3年度第1四半期の原子力発電所周辺環境放射能測定結果では、事故由来核種の寄与はほぼCs-137によるもののみとなった[49]。

事故現場から一定の距離を置いた遠隔地における、事故由来核種の影響についてもまとめる。東京電力福島第一原子力事故の例では、東日本の広い地域が放射性プルームの影響を受けた。その一例として、千葉県千葉市で行われた事故由来核種の寄与線量率測定を参考にする。放射能測定法シリーズ「連続モニタによる環境 $\gamma$ 線測定法」では、平成23年3月15日から3月31日までの千葉県千葉市における環境 $\gamma$ 線量率のトレンドグラフ（図6.4）を基に、事故時における線量率に対する核種別の寄与割合が解説されている[50]。



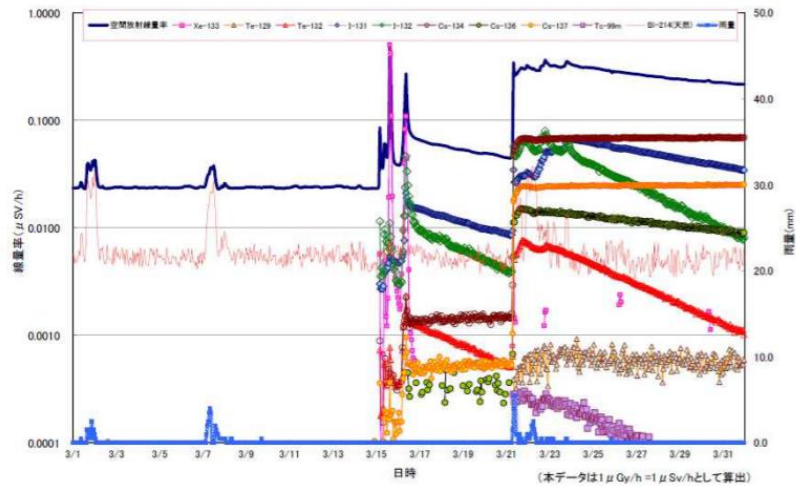


図 6.4 環境  $\gamma$  線量率と各核種の寄与線量率（平成 23 年 3 月） [50]

事故発生初期、事故由来の人工核種は放射性プルームにより一気に遠隔地に到着する。この段階は、Xe-133、I-132、I-131 のような短半減期の核種の寄与が目立つ。この中でも Xe-133 の寄与は約 95% と高く、低エネルギー領域のエネルギー特性が重要である。この後、3/21 に降雨の影響で放射性核種は地表面に沈着した。放射性プルーム到着時に寄与が高かった短半減期の核種は減衰が進み、この段階は放射性ヨウ素と放射性セシウムの寄与が大半を占めている。更に 60 日経過後、事故由来核種はほぼ放射性セシウムのみが残り、相対的に天然核種の寄与が徐々に上がってきた。これは発電所からの放出が無くなり、沈着した放射性核種の物理的半減期及びウェザリング効果によって減衰したため、半減期の比較的長い核種の寄与割合が多くなっているためである [50]。同じく原発事故に関連する環境でも、場所や時期により核種の構成比は大きく変化することが分かる。

### 6.3 使用場面別の新係数整理

様々な環境中の主な寄与核種における  $\gamma$  線エネルギーに最適なエネルギー補償を行える係数を算出するという目的を達成するため、連立方程式を解く際は「重み付き最小二乗法」を採用するのが最適だと考えた。本章では MATLAB の lscov 関数を通じて重み付き最小二乗法の計算を行った。具体的な重み付け方法は、前節で整理した各放射線環境の核種構成比を参考にした。

lscov 関数は、線形方程式系  $A^*x = B$  の最小二乗解を返す。つまり、 $x$  は二乗誤差  $(B - A^*x)^*(B - A^*x)$  の和を最小にした  $n$  行 1 列のベクトルである。ここで、 $A$  は  $m$  行  $n$  列であり、 $B$  は  $m$  行 1 列である。 $w$  が正の実数重みのベクトルの長さ  $m$  である  $x = \text{lscov}(A, B, w)$  は、線形方程式  $A^*x = B$  に対する重み付き最小二乗解を返す。つまり、 $x$  は  $(B - A^*x)^*\text{diag}(w)^*(B - A^*x)$  を最小にする。 $w$  は一般的に回数または逆行列分散を含む [53]。

本研究では、2種類の分割の考え方を検討する。

一つ目は、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である。放射能測定法シリーズ「空間 $\gamma$ 線スペクトル測定法」によると、天然放射性物質が主な成分である通常的环境放射線の測定において、種別の線量寄与の分離にマトリックス解析を行う。カリウム、ウランおよびトリウム系列を分離する際、あらかじめそれぞれに対応するエネルギー領域を定めた（表 6.3） [54]。この設定を参考し、一番上の2チャンネルの分割点は1.6MeVと2.3MeVにした。（以下、方法1）

二つ目は、環境中の寄与割合が高い核種の全吸収ピークが所在するチャンネルを細かく分割する方法である。（以下、方法2）

本章では、各測定環境に2種類の分割方法を適用して係数をそれぞれ算出し、最後にこれらの分割方法とプロトタイプの分割方法による補償結果を比較する。

表 6.3 主な自然起源放射線源に対応するエネルギー領域 [54]

核種	エネルギー[MeV]
カリウム系列	1.34~1.60
ウラン系列	1.61~2.30
トリウム系列	2.31~3.00

シミュレーションで線量計に照射したのは、実測で使用した点線源に近い線源ではなく、並行ビームである。本章で提案する新たな補償設定と比較するために、プロトタイプの分割方法に対応する各チャンネルの係数を再度算出する必要がある。また、プロトタイプの係数を算出する際に方程式の重み付けは行わない。新たに算出した各チャンネルの係数を、表 6.4 に示す。

表 6.4 新たに算出したプロトタイプ分割方法に対応する係数

エネルギーチャンネル[keV]		係数	
LVL1	64	W1	0.0003
LVL2	144		
LVL2	144	W2	0.0022
LVL3	248		
LVL3	248	W3	0.0198
LVL4	448		
LVL4	448	W4	0.0932
LVL5	832		
LVL5	832	W5	0.2198
LVL6	1600		
LVL6	1600	W6	0.2956
LVL7	2000		
LVL7	2000	W7	0.3434
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=64、LVL2=144 の場合、1 チャンネルの範囲は 64keV~144keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

まずは、一般的な身の回りの環境で測定を行う場合を考える。核種構成比における主要な核種を考慮して、主に以下の 2 種類の設定を提案する。

#### ①K-40 と Cs-137 に対応するエネルギーを細かく分割した場合

特定の核種が多く存在すると想定されない環境で利用する設定だと位置づける。K-40 と Cs-137 が放出する  $\gamma$  線エネルギーはそれぞれ 1461 keV と 662 keV であるため、方法 2 では 600keV~700keV や 1300keV~1500keV など、そのエネルギーに対応するチャンネルを細かく分割した。また、方程式の最小二乗解を求める際には、0.6 MeV と 1.5 MeV の並行ビームを照射したデータの重みを増やす。計算結果と対応するエネルギー領域は、表 6.5 と表 6.6 に示す。

表 6.5 教育用放射線量計の設定①-方法 1 の提案

エネルギーチャンネル [keV]		係数	
LVL1	0	W1	-0.0002
LVL2	200		
LVL2	200	W2	0.0246
LVL3	500		
LVL3	500	W3	0.1147
LVL4	800		
LVL4	800	W4	0.1576
LVL5	1100		
LVL5	1100	W5	0.2491
LVL6	1600		
LVL6	1600	W6	0.2946
LVL7	2300		
LVL7	2300	W7	0.3704
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=0、LVL2=200 の場合、1 チャンネルの範囲は 0keV~200keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

表 6.6 教育用放射線量計の設定①-方法 2 の提案

エネルギーチャンネル [keV]		係数	
LVL1	0	W1	0.0006
LVL2	200		
LVL2	200	W2	0.0276
LVL3	600		
LVL3	600	W3	0.0297
LVL4	700		
LVL4	700	W4	0.2029
LVL5	1300		
LVL5	1300	W5	0.2631
LVL6	1500		
LVL6	1500	W6	0.2723
LVL7	2300		
LVL7	2300	W7	0.4212
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=0、LVL2=200 の場合、1 チャンネルの範囲は 0keV~200keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

## ②ウラン系列の Ra-226 に対する重みを増やした設定

ウラン鉱山やラドン温泉など、ウラン系列の寄与が高くなる環境の測定に推奨する設定として提案する。K-40 と Cs-137 の対応チャンネルを引き続き細かく分割しつつ、方法 2 では Ra-226 (186 keV) を考慮し、低エネルギー領域をより細かく分割した。また、方程式の最小二乗解を求める際には、0.2 MeV の並行ビームを照射したデータの重みを増やす。計算結果と対応するエネルギー領域は、表 6.7 と表 6.8 に示す。

表 6.7 教育用放射線量計の設定②-方法 1 の提案

エネルギーチャンネル [keV]		係数	
LVL1	0	W1	0.0006
LVL2	200		
LVL2	200	W2	0.0236
LVL3	500		
LVL3	500	W3	0.1145
LVL4	800		
LVL4	800	W4	0.1578
LVL5	1100		
LVL5	1100	W5	0.249
LVL6	1600		
LVL6	1600	W6	0.2946
LVL7	2300		
LVL7	2300	W7	0.3704
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=0、LVL2=200 の場合、1 チャンネルの範囲は 0keV~200keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

表 6.8 教育用放射線量計の設定②-方法 2 の提案

エネルギーチャンネル [keV]		係数	
LVL1	0	W1	-0.0008
LVL2	100		
LVL2	100	W2	0.0016
LVL3	200		
LVL3	200	W3	0.0279
LVL4	600		
LVL4	600	W4	0.1615
LVL5	800		
LVL5	800	W5	0.1876
LVL6	1400		
LVL6	1400	W6	0.2809
LVL7	1700		
LVL7	1700	W7	0.3109
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=0、LVL2=100 の場合、1 チャンネルの範囲は 0keV~100keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

次に、原発事故に関連する環境を考える。主に以下の 2 種類の設定を提案する。

### ③Xe-133 に対する重みを増やした設定

事故発生初期に到来する放射性プルームにおける核種構成比を重視する。利用できる場面は非常に限られているが、避難時に教育用放射線量計を持ち歩いている場合、参考として利用できる設定として提案する。Xe-133 のエネルギー 81 keV に対応するために、方法 2 では低エネルギー領域をより細かく分割した。また、方程式の最小二乗解を求める際には、0.1 MeV の並行ビームを照射したデータの重みを増やす。計算結果と対応するエネルギー領域は、表 6.9 と表 6.10 に示す。

表 6.9 教育用放射線量計の設定③-方法 1 の提案

エネルギーチャンネル [keV]		係数	
LVL1	0	W1	0.0005
LVL2	200		
LVL2	200	W2	0.0191
LVL3	500		
LVL3	500	W3	0.1206
LVL4	800		
LVL4	800	W4	0.1582
LVL5	1100		
LVL5	1100	W5	0.2487
LVL6	1600		
LVL6	1600	W6	0.2854
LVL7	2300		
LVL7	2300	W7	0.393
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=0、LVL2=200 の場合、1 チャンネルの範囲は 0keV~200keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

表 6.10 教育用放射線量計の設定③-方法 2 の提案

エネルギーチャンネル [keV]		係数	
LVL1	0	W1	0.0001
LVL2	100		
LVL2	100	W2	0.0012
LVL3	200		
LVL3	200	W3	0.02
LVL4	600		
LVL4	600	W4	0.1765
LVL5	800		
LVL5	800	W5	0.1959
LVL6	1500		
LVL6	1500	W6	0.2987
LVL7	2300		
LVL7	2300	W7	0.3687
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=0、LVL2=100 の場合、1 チャンネルの範囲は 0keV~100keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

④放射性セシウムと放射性ヨウ素に対する重みを増やした設定

原発事故が発生してから一定の期間が過ぎた際に、自分の周りの環境の放射能濃度を確認する設定として提案する。放射性セシウム（Cs-134、Cs-137）と放射性ヨウ素（I-131、I-132）のエネルギーを総合的に考慮し、方法 2 では 0.6 MeV 付近のエネルギーを細かく分割する。また、方程式の最小二乗解を求める際には、0.6 MeV の並行ビームを照射したデータとその周辺のデータの重みを増やす。計算結果と対応するエネルギー領域は、表 6.11 と表 6.12 に示す。

表 6.11 教育用放射線量計の設定④-方法 1 の提案

エネルギーチャンネル [keV]		係数	
LVL1	0	W1	0.0006
LVL2	200		
LVL2	200	W2	0.0238
LVL3	500		
LVL3	500	W3	0.1027
LVL4	800		
LVL4	800	W4	0.177
LVL5	1100		
LVL5	1100	W5	0.2437
LVL6	1600		
LVL6	1600	W6	0.2874
LVL7	2300		
LVL7	2300	W7	0.3908
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=0、LVL2=200 の場合、1 チャンネルの範囲は 0keV~200keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。



表 6.12 教育用放射線量計の設定④-方法 2 の提案

エネルギーチャンネル [keV]		係数	
LVL1	0	W1	0.0007
LVL2	200		
LVL2	200	W2	0.023
LVL3	500		
LVL3	500	W3	0.1005
LVL4	600		
LVL4	600	W4	-0.049
LVL5	700		
LVL5	700	W5	0.1815
LVL6	800		
LVL6	800	W6	0.2232
LVL7	1700		
LVL7	1700	W7	0.3298
LVL8	3000		

\*LVL1~8 とは、各チャンネルの分割点である。本表における単位は keV。例えば、LVL1=0、LVL2=200 の場合、1 チャンネルの範囲は 0keV~200keV という意味である。

\*\*W1~W7 とは、各チャンネルに対応する係数である。

## 6.4 考察

表 6.1 と表 6.2 で示した一般環境、ウラン濃度がより高い一般環境、事故発生初期の遠隔地、事故発生後期の遠隔地の 4 種類の環境における核種構成比を PHITS の並行ビームで再現した。これらの並行ビームを線量計に当てた場合、6.3 で求められた各分割方法による補償設定と、プロトタイプの補償設定により線量計が示す 1 cm 線量当量率を、1 cm 線量当量率の理論値と比較した結果を表 6.13 に示す。また、CsI シンチレータの検出限界により、本検証で 0keV~50keV の放射線は検出しないものとする。

表 6.13 新しい補償設定 2 種とプロトタイプの補償設定の比較

	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
ウラン濃度高めの一般環境	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

結果、ウラン濃度が高い場合を含む一般環境の測定と、放射性セシウムと放射性ヨウ素の寄与が高い事故発生後期（放射性核種沈着後）の環境測定においては、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 1 の補償設定が理論値により近く、精度が向上した。

一方、Xe-133 (81 keV) の寄与が高い事故発生初期の遠隔地の環境測定においては、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 1、環境中の寄与割合が高い核種の全吸収ピークが所在するチャンネルを細かく分割する方法 2 の補償設定、プロトタイプの補償設定の精度はほぼ同じレベルである。

本章で新たに提案した補償設定は、対応する環境の測定の精度を向上させる役割を果たした。多くの場合は方法 1 の設定に切り替えた方が精度が向上する。しかし、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と想像する。

ここで挙げたいくつかの例にとどまらず、本研究で示した知見を運用すれば、各教育機関は所在する地域の状況に応じて、教育を実施する環境に特化した係数を算出するのも可能である。

## 7. 結語

本研究では教育用放射線量計の基準と性能向上に関する整理と提案を行った。以下に結論をまとめる。

### 7.1 結論

放射線教育現場での実験・実習内容は不足しているが、現場からの需要の声は高まっており、このような内容を放射線教育に取り組むことは重要であると考えられる。様々な実験内容があるなか、本研究では教育用放射線量計を用いた環境測定に着目し、現状存在していない教育目的に特化した基準と、性能向上に関する整理と提案を行った。

3章では低濃度放射能を対象とするクリアランスレベルに関する議論を参考にして、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。

4章では 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、以下の項目における教育用放射線量計に特化した基準の提案を行った。

#### ■ 温度特性

温度の変化範囲は、東京での測定を想定して $+10^{\circ}\text{C}\sim+38^{\circ}\text{C}$ が合理的だと考えられる。指示値の許容範囲に関しては、JIS 4333 の規定を教育用放射線量計に適用することを提案する。しかし、想定する温度範囲外での使用も想定し、温度特性試験にて得た温度と指示値の変動範囲を線量計の説明書に明記すべきである。また、標準線源を線量計にあてて試験形式で得た指示値の変動範囲より、室外での測定は低線量を対象にするため、不確かさにより変動範囲が広がると考えられる。これらについて、使用者に適切に伝えるべきである。

#### ■ 方向特性

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特定の測定方向が存在することが考えられる。方向特性の影響が大きいと思われる方向から照射を行い、JIS 4333 の内容を参考にして、これらの方向に関しては教材などで相対レスポンスを明示することを提案する。定格範囲と対応する相対レスポンスの許容範囲に関しては、JIS 4333 の規定は教育用放射線量計に適用できると考えられる。

#### ■ エネルギー特性

KINDpro の特性調査の結果、低エネルギー領域では JIS 4333 の規定を満たしていない。しかし、教育用放射線量計の測定対象は、主に自然起源の放射線と福島事故由来の Cs-137 環境ということを考えると、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。

5章と6章では、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、モンテカルロシミュレーション PHITS を用いた。5 章では、実測値との比較を通じて、シミュレーションで使用したモデルの妥当性が確認された。6 章では、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、5 章で妥当性が検証されたモデルを活用し、それぞれに具体的なエネルギーの分割方法を提案し、対応する係数を算出した。これらの設定の有効性の検証結果によると、一般環境の測定と原子力事故後期（放射性物質の沈着後）には、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の補償設定が理論値により近く、精度が向上した。一方、低エネルギー核種の寄与が高い環境の測定を行う場合、本研究では 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、今後は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すれば、精度の更なる向上が考えられる。

## 7.2 今後の展開

教育用放射線量計の基準については、本研究で取り扱った 3 つの特性以外でも、例えば「携帯電話及び無線 LAN に対する電磁界特性」などが教育現場にとって重要であると考えられる。引き続き、JIS 4333 の項目に沿って特性試験を行い、教育用放射線量計と共にこれらの特性の基準と試験の手順、および注意書きを説明書の形式でまとめたものを教育現場に提供すれば、これまでに統一された管理がなされてない教育用放射線量計の現状を改善することが期待される。

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、実際に教育用放射線量計に手軽に設定を変えられるプログラムを取り込み、教育現場でこれらの設定を学習者に体験してもらい、測定器に関する知識を身につけさせる。感想をアンケート形式で収集する展開を考えている。フィードバックされた使用感想をもとに、採用する補償設定の見直しを繰り返し行えば、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一步近づける。

このような作業を経て、最終的には専門家がいなくても現場でも管理ができる、コストを抑えた上で精度もある程度保障した教育用放射線量計を各教育機関に普及するのが目的である。教育用放射線量計の普及により、放射線教育における実習・実験内容を豊富にして、学生のみならず教員の放射線リテラシーを向上していく。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] 一般財団法人 原子力文化財団, “2020 年度 原子力に関する世論調査,” [オンライン]. Available: <https://www.jaero.or.jp/data/01jigyoku/tyousakenkyu2020.html>. [アクセス日: 18 1 2022].
- [2] 文部科学省, “放射線等に関する副読本,” [オンライン]. Available: [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shuppan/sonota/detail/1311072.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/detail/1311072.htm). [アクセス日: 18 1 2022].
- [3] 文部科学省, “放射線教育の実施状況調査の結果について,” [オンライン]. Available: [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/mext\\_00175.html](https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/mext_00175.html). [アクセス日: 18 1 2022].
- [4] 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].
- [5] 公益財団法人日本科学技術振興財団, “見てみよう! やってみよう! 放射線実験,” 放射線教育支援サイト “らでい”, [オンライン]. Available: <https://www.radi-edu.jp/2012/06/30/1045>. [アクセス日: 18 1 2022].
- [6] 環境省, “霧箱で放射線を観察しよう (実写動画映像),” 環境再生プラザ, [オンライン]. Available: [http://josen.env.go.jp/plaza/materials\\_links/movie/movie16071201.html?](http://josen.env.go.jp/plaza/materials_links/movie/movie16071201.html?). [アクセス日: 18 1 2022].
- [7] 文部科学省, “小学校教師用解説書,” [オンライン]. Available: [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shuppan/sonota/attach/1314125.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/attach/1314125.htm). [アクセス日: 18 1 2022].
- [8] 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.
- [9] 掛布智久, 飯本武志, 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②-新しい教育測定器の開発経緯とその特徴,” 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.
- [10] 柴田徳思, 放射線概論 第 12 版, 通商産業研究社, 2019.
- [11] 環境省, “放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料,” [オンライン]. Available: <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/h28kisoshiryo/h28kiso-02-03-08.html>. [アクセス日: 18 1 2022].
- [12] 壽藤紀道, “様々な線量,” *Isotope News*, 第 708, pp. 90-93, 2013.
- [13] 多田順一郎, “線量ー第 4 回ー,” *Isotope News*, 第 705, pp. 26-36, 2013.
- [14] 公益社団法人 日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳 10 版, 丸善株式会社, 2002.
- [15] 根元久, “空間線量測定に用いる代表的なサーベイメータの特性,” 放計協ニュー

- ス, 第 48, p. 5, 2011.10.
- [16] G. F. Knoll, 放射線計測ハンドブック 第 4 版, 株式会社オーム社, 2013.
  - [17] 森内茂, “スペクトル-線量変換演算子による線量評価法とその演算子の決定,” 1971.
  - [18] 津田修一, “線量測定の原理; G(E)関数による線量測定手法,” *Isotope News*, 第 706, pp. 59-62, 2013.
  - [19] 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、 $\gamma$  線及び  $\beta$  線用線量当量 (率) サーベイメータ, 2014.
  - [20] 独立行政法人製品評価技術基盤機構認定センター, JCSS 技術的要求事項適用指針 (JCT21703-08), 2021.
  - [21] 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 4511:2018 X 線及び  $\gamma$  線用線量 (率) 測定器の校正方法, 2018.
  - [22] 公益社団法人 日本アイソトープ協会, “照射線量(率)から 1cm 線量当量(率)への換算,” [オンライン]. Available: [https://www.jrias.or.jp/products/pdf/reference\\_exposure\\_gamma\\_std20190110.pdf](https://www.jrias.or.jp/products/pdf/reference_exposure_gamma_std20190110.pdf). [アクセス日: 18 1 2022].
  - [23] 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構, “PHITS,” [オンライン]. Available: <https://phits.jaea.go.jp/indexj.html>. [アクセス日: 18 1 2022].
  - [24] 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,” *Journal of Nuclear Science and Technology*, 第 巻 55, p. 684-690, 2018.
  - [25] ATOMICA, “放射性廃棄物としての規制免除についての考え方,” [オンライン]. Available: [https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat\\_detail\\_11-03-04-04.html](https://atomica.jaea.go.jp/data/detail/dat_detail_11-03-04-04.html). [アクセス日: 18 1 2022].
  - [26] 服部隆利, “低線量・低線量率の放射線リスクはどこまでわかっているか?,” *電気新聞*, 31 3 2021.
  - [27] 服部隆利, “測定誤差と核種組成の不確定性に対するクリアランスレベル検認の安全裕度の考え方,” 2004.
  - [28] 文部科学省原子力安全課, “RS-G-1.7 の概要について,” 2 2 2005. [オンライン]. Available: [https://www.mext.go.jp/component/b\\_menu/shingi/giji/\\_icsFiles/afieldfile/2009/05/11/20050314\\_01e.pdf](https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/giji/_icsFiles/afieldfile/2009/05/11/20050314_01e.pdf). [アクセス日: 18 1 2022].
  - [29] 文部科学省, “国際放射線防護委員会 ICRP2007 年勧告 (Pub.103) の国内制度等への採り入れ (現存被ばく状況関連) について (案),” [オンライン]. Available: <https://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001w5ek-att/2r9852000001w5ss.pdf>. [アクセス日: 18 1 2022].
  - [30] 今井秀孝, 測定における不確かさの表現のガイド[GUM]ハンドブック, 日本規格協会, 2018.
  - [31] 今井秀孝, 計測の信頼性評価 トレーサビリティと不確かさ解析, 日本規格協会,

1996.

- [32] 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.
- [33] ICRP, ICRP Publication 75, ICRP, 1997.
- [34] IAEA, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7, IAEA, 2018.
- [35] IAEA, IAEA Safety Report Series No. 67, IAEA, 2012.
- [36] 環境省, “放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（平成 26 年度版）,” [オンライン]. Available: <https://www.env.go.jp/chemi/rhm/kisoshiryo/attach/201510mat1s-01-6.pdf>. [アクセス日: 18 1 2022].
- [37] 福島県, “県中地域の概要,” [オンライン]. Available: <https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/01220a/kenchu-gaiyo.html>. [アクセス日: 18 1 2022].
- [38] 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-webg/>. [アクセス日: 15 1 2022].
- [39] 原子力規制庁監視情報課, “参考資料（連続モニタによる環境  $\gamma$  線測定法）,” 12 2017. [オンライン]. Available: <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No17-2.pdf>. [アクセス日: 15 1 2022].
- [40] 東京都環境局, “国（環境省）が示す毎時 0. 23 マイクロシーベルトの算出根拠,” 9 2 2018. [オンライン]. Available: [https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/policy\\_others/radiation/view/men.html](https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/policy_others/radiation/view/men.html). [アクセス日: 15 1 2022].
- [41] 今井登, “日本の自然放射線量,” 日本地質学会, [オンライン]. Available: <http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html#map>. [アクセス日: 15 1 2022].
- [42] 松本隆, “JIS の歴史,” 19 2 2009. [オンライン]. Available: [https://www.jsa.or.jp/datas/media/10000/md\\_2418.pdf](https://www.jsa.or.jp/datas/media/10000/md_2418.pdf). [アクセス日: 18 1 2022].
- [43] 気象庁, 歴代全国ランキング, [オンライン]. Available: [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankall.php?prec\\_no=&block\\_no=&year=2021&month=&day=&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankall.php?prec_no=&block_no=&year=2021&month=&day=&view=). [アクセス日: 15 1 2022].
- [44] 環境省, “熱中症予防情報サイト,” [オンライン]. Available: <https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt.php>. [アクセス日: 15 1 2022].
- [45] 気象庁, “過去の気象データ検索,” [オンライン]. Available: [https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly\\_s1.php?prec\\_no=44&block\\_no=47662&year=2021&month=&day=&view=](https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/monthly_s1.php?prec_no=44&block_no=47662&year=2021&month=&day=&view=). [アクセス日: 15 1 2022].
- [46] 東京都健康安全研究センター, “土壌中の放射性物質検査結果（新宿区 健康安全研究センター）,” [オンライン]. Available: [https://monitoring.tmiph.metro.tokyo.lg.jp/radiation\\_geo.html](https://monitoring.tmiph.metro.tokyo.lg.jp/radiation_geo.html). [アクセス日: 15 1 2022].
- [47] 岡山県, “令和 2 年度 人形峠周辺環境放射線等測定結果＜概要版＞,” [オンライン]. Available: [https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/703551\\_6301008\\_misc.pdf](https://www.pref.okayama.jp/uploaded/life/703551_6301008_misc.pdf). [アクセス日: 15 1 2022].

- [48] 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構, “自然起源放射性物質 (NORM) データベース,” [オンライン]. Available: [https://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/NORMDB/1\\_bussitunokensaku.php](https://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/NORMDB/1_bussitunokensaku.php). [アクセス日: 15 1 2022].
- [49] 福島県, “原子力発電所周辺環境放射能測定結果 (令和 3 年度 第 1 四半期),” [オンライン]. Available: <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/476388.pdf>. [アクセス日: 15 1 2022].
- [50] 原子力規制庁監視情報課, “放射能測定法シリーズ No.17 連続モニタによる環境  $\gamma$  線測定法,” 12 2017. [オンライン]. Available: <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No17.pdf>. [アクセス日: 15 1 2022].
- [51] 放射線教育支援サイト“らでい”, “見てみよう! やってみよう! 放射線実験 1. 放射線の存在: 霧箱 ～放射線の飛跡を見てみよう～,” 公益財団法人日本科学技術振興財団, [オンライン]. Available: <https://www.radi-edu.jp/2012/06/30/1045>. [アクセス日: 18 1 2022].
- [52] サヒメル理科ネット, “「放射線をみてみよう」簡易霧箱キット,” 独立行政法人 科学技術振興機構, [オンライン]. Available: <http://rikanet.nature-sanbe.jp/material/2012/06/29/41/>. [アクセス日: 18 1 2022].
- [53] MathWorks, “lsconv 既知の共分散を使用した最小二乗解法,” [オンライン]. Available: <https://jp.mathworks.com/help/matlab/ref/lsconv.html>. [アクセス日: 18 1 2022].
- [54] 文部科学省, “放射能測定法シリーズ No.20 空間  $\gamma$  線スペクトル測定法,” [オンライン]. Available: <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No20.pdf>. [アクセス日: 18 1 2022].



## 謝辞

本研究は ERAN F-21-42 の助成を受け、東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻在学中に得られた研究結果をまとめたものです。本論文の執筆にあたり、多くの方のご協力をいただきました。

飯本武志教授には、多くの時間を費やして下さい、研究の着想から論文執筆まで丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。深く感謝し、お礼を申し上げます。また、副査の松島潤教授には面談を通じて様々なご助言をいただきました。感謝いたします。

公益社団法人日本アイソトープ協会の萩原聡昭氏、赤堀省吾氏、椎名卓也氏、山下貴大氏には線量計の特性試験でサポートを頂きました。深く御礼申し上げます。

公益財団法人日本科学技術振興財団の掛布智久氏、加藤太一氏、日本原子力発電株式会社の渡辺進一氏には KINDpro を含む教育用放射線量計に関する情報をご提供いただきました。深く御礼申し上げます。

日本原子力研究開発機構の小川達彦氏には PHITS のコードに関して様々なご指導とご助言を頂きました。深く御礼申し上げます。

そして、飯本研究室の秘書の中村仁美氏、吉山文氏には研究生活を送る上で様々なサポートをしていただきました。ありがとうございます。また、共に切磋琢磨し、様々なご指導を頂いた研究室の先輩方、同期、後輩の皆様には大変お世話になりました。深く感謝し、お礼を申し上げます。

最後に、これまでの人生を支えてくださった家族に深く感謝いたします。

ありがとうございました。