

**平成 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進
事業費(事故等緊急時における内部被ばく線量
迅速評価法の開発に関する研究)事業
成果報告書**

平成 31 年 3 月 29 日

**国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
安全研究センター**

本報告書は、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構が実施した「平成30年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（事故等緊急時における内部被ばく線量迅速評価法の開発に関する研究）事業」の成果を取りまとめたものです。

目 次

1. 事業の背景と目的	1
2. 事業の実施体制	2
3. 事業の概要	4
3. 1 全体計画	4
3. 2 平成 29 年度の研究計画と進捗	5
3. 3 平成 30 年度の研究計画	8
4. 事業の成果	10
4. 1 甲状腺モニタの測定器の開発	10
4. 1. 1 概要	10
4. 1. 2 甲状腺モニタ測定器の試作	10
4. 1. 2. 1 公衆用及び作業員用検出器	10
4. 1. 2. 2 シンチレーション検出器用信号処理装置	11
4. 1. 2. 3 検出器用遮蔽体	11
4. 1. 2. 4 検出器制御用ソフトウェア	12
4. 1. 3 甲状腺モニタ測定器（試作機）の特性試験	13
4. 2 高精度放射性ヨウ素定量法の開発	22
4. 2. 1 概要	22
4. 2. 2 甲状腺モニタ校正方法の開発	22
4. 2. 3 計数効率の不確かさの評価	25
4. 2. 4 バックグラウンド放射線の影響補正法の開発	28
4. 3 甲状腺モニタシステムの開発	47
4. 3. 1 概要	47
4. 3. 2 検出器固定用治具の概念設計	47
4. 4 まとめ	50
5. 平成 30 年度事業の実績	51
5. 1 事業の進捗報告	51
5. 2 本事業で得られた成果の発表	52
参考文献	53

付録 1 : 5th Asian and Oceanic IRPA Congress on Radiation Protection (AOCR-5)
発表資料

付録 2 : 5th European IRPA Congress 発表資料

付録 3 : 4th Asian Radiation Dosimetry Group annual meeting (ARADOS-4) 発表資料

付録 4 : 原子力規制委員会平成 30 年度研究成果報告会発表資料

付録 5 : 日本原子力学会 2019 年春の年会発表資料

1. 事業の背景と目的

事故などの緊急時には、事故後早い段階においてできるだけ沢山の人を対象に、精度の高い計測により、内部被ばく線量評価を行う必要がある。特に、半減期が短い放射性ヨウ素の内部被ばく線量評価には、摂取後早期の甲状腺被ばく線量の計測が必要となる。東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の経験から、甲状腺及び周囲組織の解剖学的な個人差や核種同定等、今後の万が一の事故に対応するための計測装置開発を含めた評価手法の確立が必要とされている。そこで、原子力規制委員会は、放射性ヨウ素の内部取込みに伴う甲状腺被ばく線量測定の精度向上のために、高バックグラウンド環境に対応する小型、高感度、スペクトル分析が可能な甲状腺モニタの開発を重点テーマとして設定し、放射線安全規制研究戦略的推進事業の公募を平成 29 年 4 月から開始した。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下「原子力機構」という。）は、同テーマに対する研究計画（平成 29 年度から 3 か年計画）を提案した。そして、原子力規制庁が設置する研究推進委員会による審査を経て原子力機構が提案した研究計画が採択された。これを受けて、原子力機構が受託した平成 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（事故等緊急時における内部被ばく迅速評価法の開発に関する研究）事業（以下「本事業」という。）では、原子力事故時に多数の公衆及び作業者について、放射性ヨウ素による内部被ばく線量の迅速かつ高感度な評価を可能とするために、各避難所、指揮所等に設置できる可搬型の γ 線スペクトル分析型甲状腺モニタ（以下「甲状腺モニタ」という。）を開発した。

本報告書は、平成 30 年度における本事業の成果等を取りまとめたものである。

2. 事業の実施体制

平成 30 年度の本事業の実施体制図を図 2-1 に示す。原子力機構 安全研究・防災支援部門 安全研究センター リスク評価研究ディビジョン 放射線安全・防災研究グループに所属する主任研究者 1 名及び研究参加者 2 名に加えて、原子力緊急時支援・研修センター (NEAT) 緊急時対応研究課に所属する研究参加者 1 名の合計 4 名で事業を実施した。平成 30 年度は「①甲状腺モニタ測定器の開発」、「②高精度放射性ヨウ素定量法の開発」及び「③甲状腺モニタシステムの開発」の三つのテーマを図 2-2 に示す研究分担で実施した。

線源を用いた甲状腺モニタ測定器の試作機に係る試験は、主任研究者及び研究参加者の本務先である原子力科学研究部門 原子力科学研究所 放射線管理部 放射線計測技術課の放射線標準施設棟において実施した。また、定量法の開発に必要な数値ファントム及び簡易頸部ファントムを用いたシミュレーション計算についても、放射線計測技術課が保有する計算機等の設備を利用した。

本事業と同一の重点テーマで国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所が受託した平成 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（原子力事故時における近隣住民の確実な初期内部被ばく線量の把握に向けた包括的個人内部被ばくモニタリングの確立）事業とともに開催した実務者会合（平成 30 年 6 月 11 日、平成 30 年 10 月 2 日及び平成 31 年 1 月 28 日の 3 回開催）において、本事業の進捗状況を報告した。当該会合においては、原子力規制庁が任命するプログラム・オフィサー (PO) 及び PO 補佐に参加いただき、研究内容について議論を行うなかで得られたコメントを適宜反映しつつ事業を進めた。それ以外の事業の進捗状況については、主任研究者から月 1 回を目安に、電子メールにて PO 及び PO 補佐に報告することとした。さらに、平成 31 年 2 月 14 日から 15 日に開催された原子力規制庁が主催する平成 30 年度研究成果報告会（放射線安全規制研究戦略的推進事業）において、平成 30 年度の研究成果（進捗）を報告した（付録 4 参照）。

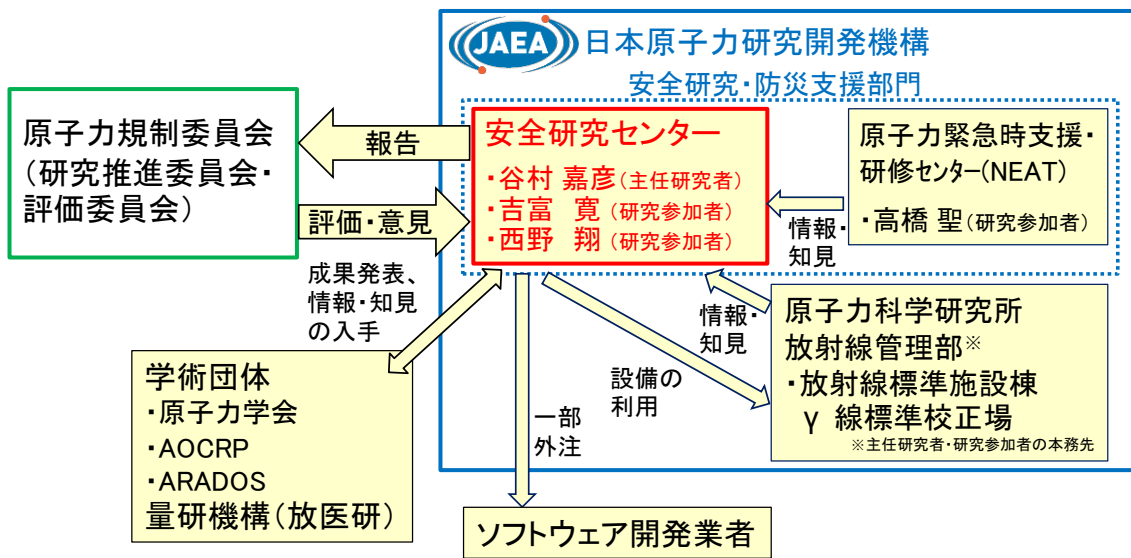


図 2-1 本事業の実施体制図 (平成 30 年度)

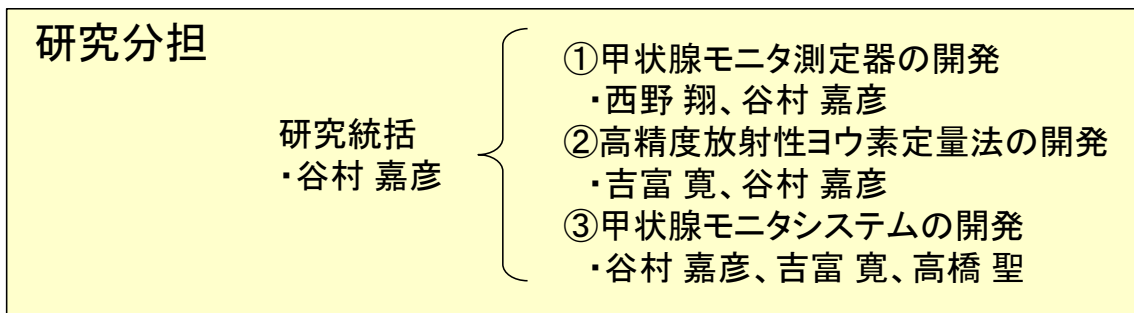


図 2-2 研究テーマごとの研究者の分担

3. 事業の概要

3. 1 全体計画

本事業では、原子力事故等緊急時に、各避難所、指揮所等に設置できるγ線エネルギー分析方式の可搬型甲状腺モニタシステムを開発し、多数の公衆及び作業者が摂取した放射性ヨウ素の放射能を迅速かつ高精度に測定・評価可能とする。このために、「①甲状腺モニタ測定器の開発」、「②高精度放射性ヨウ素定量法の開発」及び「③甲状腺モニタシステムの開発」の3つのテーマに分けて研究を実施する。

具体的な研究のロードマップを図3-1に示す。「①甲状腺モニタ測定器の開発」では、γ線スペクトルの測定に適した検出器を選定し、高バックグラウンドでも使用可能とするための遮蔽体を含めた測定系を開発する。また、「②高精度放射性ヨウ素定量法の開発」では、甲状腺に蓄積した放射性ヨウ素の定量に必要な校正方法を開発する。さらに、「③甲状腺モニタシステムの開発」では、検出器固定用治具を設計・制作するとともに試作したシステムの使用マニュアルを整備する。

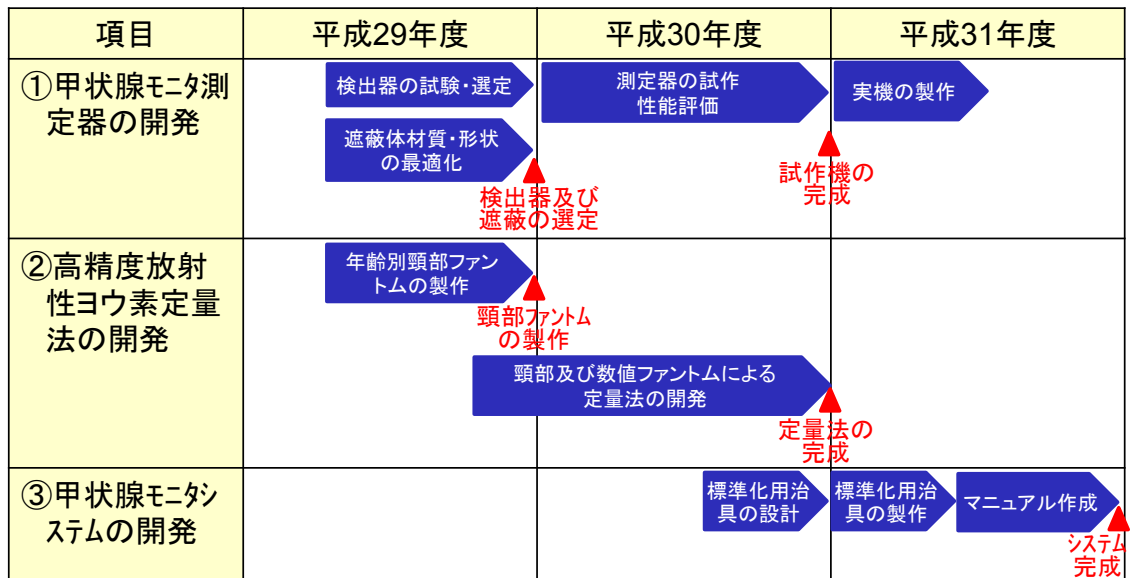


図3-1 本事業の研究ロードマップ

3. 2 平成 29 年度の研究計画と進捗

平成 29 年度は、甲状腺モニタの開発に必要な「甲状腺モニタ測定器の開発」「高精度放射性ヨウ素定量法の開発」の二つのテーマについて以下の計画で研究を実施した。

① 甲状腺モニタ測定器の開発

以下の方法により、最適な検出器を選定するとともに、高線量率下での測定に必要な周辺遮蔽体を試作した。

先行研究で候補に挙げた CdZnTe 半導体検出器、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレータ及び $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ シンチレータについて、シンチレータ用の光電子増倍管及び信号処理回路と組み合わせ、エネルギー分解能及び γ 線感度に着目した試験を実施し、甲状腺モニタに最適な検出器を選定した。

高線量率下での測定を可能とするために、検出器周辺に設置する遮蔽体の材質及び厚さを検討し、試作した遮蔽体を用いて γ 線標準校正場を利用した実測により遮蔽性能を評価した。

② 高精度放射性ヨウ素定量法の開発

以下の方法により、甲状腺モニタの測定結果から甲状腺の放射性ヨウ素量を定量するために必要な検出器の校正に用いる年齢別頸部ファントムを製作した。

甲状腺及び周囲組織の解剖学的形状を考慮した 3 種類（乳児、幼児及び成人に対応）の年齢別頸部ファントムを製作した。

性別・年齢別による体格の個人差をさらに詳細に反映し、校正結果を補正するために必要な、性別・年齢別数値人体モデル（ボクセルファントム）を用いた検出器の応答計算を実施した。

これらの研究を実施した結果、以下の成果等を得た。

各避難所、指揮所等に設置できる、 γ 線エネルギー分析方式の可搬型甲状腺モニタの概念設計を行い、設計目標を設定するとともに新たな測定方法を開発した（表 3-2-1、図 3-2-1 及び図 3-2-2）。これらの成果については、特許として出願した（出願日：平成 30 年 2 月 6 日、特願 2018-019507：「甲状腺モニタ用可搬型放射線測定器及び放射線測定方法」）。

甲状腺モニタで使用する放射線検出器については、エネルギー分解能などの観点から選定した結果、混在核種が多く、高バックグラウンド線量率下での使用が想定される作業用のシステムについては、 CdZnTe 半導体検出器が適していることがわかった。また、迅速かつ高感度での測定が求められる乳幼児を含む公衆用システムについては、大型化による感度向上が可能な $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器が適していることが分かった。

^{137}Cs γ 線標準校正場において $20 \mu\text{Sv/h}$ の高バックグラウンド線量率環境下を想定して試験を実施した結果、目標とする 10mSv の甲状腺等価線量の測定下限値を達成するために

は鉛の場合は 3 cm、タングステン合金の場合は 2.5 cm の厚さが必要であることがわかった。人体の上下方向については、サイズの制限が厳しく遮蔽体の寸法をできるだけ小さくする必要のあることから、検出器有感部の側面方向のみに高価なタングステン合金を採用することにより、遮蔽体全体の価格及び重量の増加を抑制した最適な設計が可能であることがわかった。

年齢別数値ファントム（ボクセルファントム）を用いた計算結果から、甲状腺モニタに使用する放射線検出器の最適な配置（頸部表面からの距離及び 2 個の検出器間の距離）を決定した。また、甲状腺内に均一分布する ^{131}I 放射能と等価な計数効率を与える簡易物理ファントム内の代表点を計算により求めた。そして、その位置に点線源を配置することによって、管理上の難しさを抱える溶液線源を使用することなく、点線源と簡易頸部ファントムのみで簡便かつ正確に校正が可能な手法を開発した。

これらの成果については、平成 30 年 3 月 26 日に日本原子力学会 2018 年春の年会において報告した。

表 3-2-1 甲状腺モニタの目標性能・仕様

項目	目標	備考
測定方式	エネルギー分析型	
バックグラウンド線量率 (使用上限値)	数十 $\mu\text{Sv/h}$	
測定時間	5 分/人 以内	
測定可能人数	150 人/日 以上	1 システム当たり
定量下限値	1kBq 以下	摂取後 3~5 日後に測定の場合、成人で甲状腺等価線量 10mSv に相当
電源	ノート PC 等のバッテリー で数時間以上動作可能	

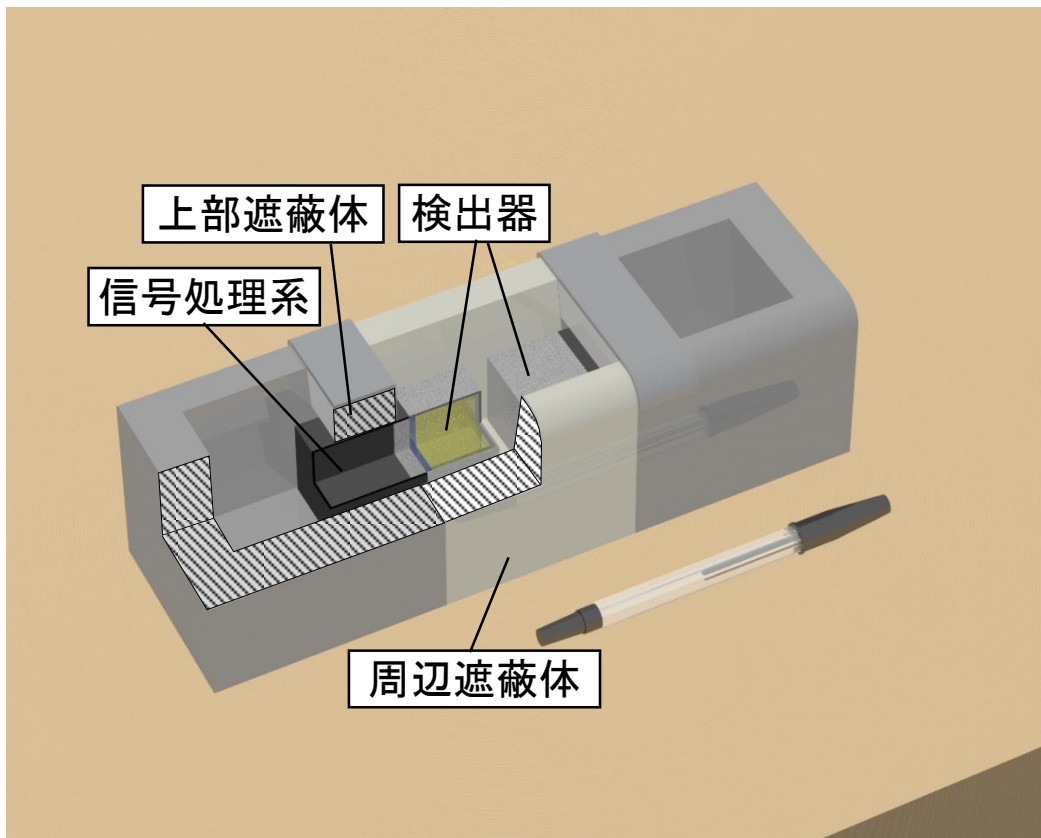
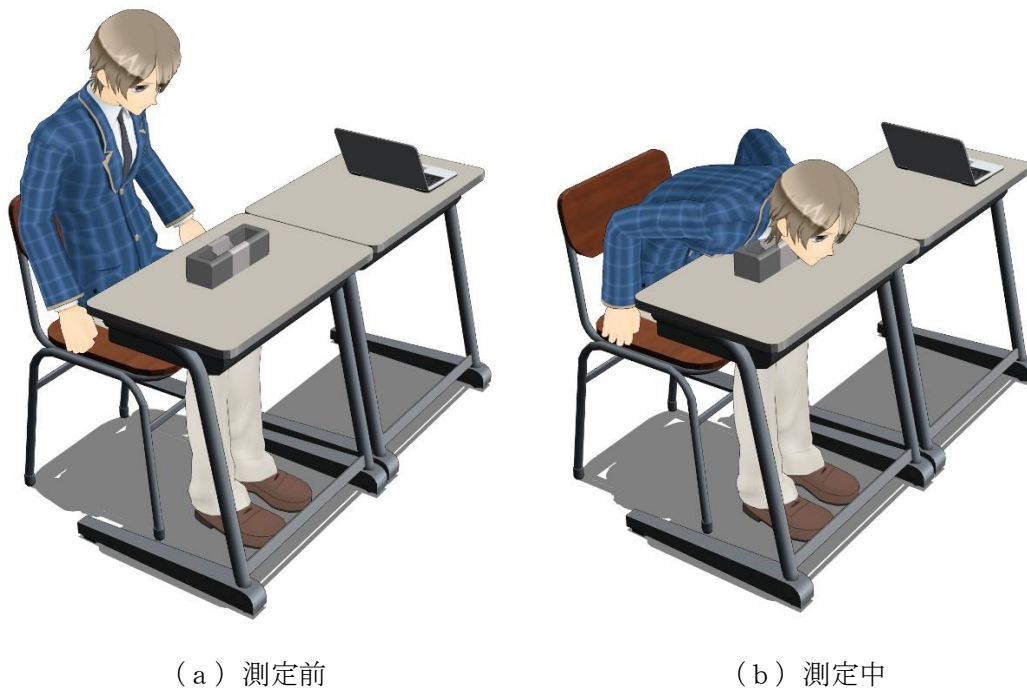


図 3-2-1 甲状腺モニタの概念図



(a) 測定前

(b) 測定中

図 3-2-2 甲状腺モニタによる測定のイメージ

3. 3 平成 30 年度の研究計画

当該甲状腺モニタの開発に必要な「①甲状腺モニタ測定器の開発」、「②高精度放射性ヨウ素定量法の開発」及び「③甲状腺モニタシステムの開発」の三つのテーマについて、平成 30 年度は以下の研究を実施した。

① 甲状腺モニタ測定器の開発

以下の方法により、甲状腺モニタ測定器を試作するとともに、 γ 線標準校正場を用いた高線量率下における測定性能評価を実施する。

平成 29 年度に選定した検出器 2 個（作業用については CdZnTe 検出器、公衆用についてはシンチレーション検出器をそれぞれ使用）及び最適化した材質・厚さの検出器遮蔽体を製作し、これらを組み合わせることにより作業用及び公衆用の甲状腺モニタ測定器を試作する。さらに、検出器の制御及び測定結果の解析に必要なソフトウェアを開発する。なお、検出器 2 個の内 1 個は、平成 29 年度に試験用に購入したものを流用する。また、検出器遮蔽体は作業用及び公衆用に共用できる設計とする。

γ 線標準校正場において、甲状腺モニタ測定器の高線量率下における測定性能の試験を実施する。試験においては、側面等の一方向からの照射に加えて、電動回転テーブルを用いて γ 線の入射方向を特定しない回転させた条件（ROT）での照射を実施する。

② 高精度放射性ヨウ素定量法の開発

以下の方法により、性別、年齢、体格等による解剖学的な相違を考慮した頸部ファントムによる最適な定量法を開発する。

性別・年齢別ボクセルファントムで計算した結果を用いた体格補正方法を開発し、平成 29 年度に製作した 3 種類の年齢別頸部ファントムと ^{133}Ba 点線源を用いて①のテーマで試作した甲状腺モニタ測定器の計数効率を評価する。

さらに、甲状腺の大きさ、周辺組織の厚さ等の個人差が計数効率に与える影響を評価する。

③ 甲状腺モニタシステムの開発

測定条件を標準化するために必要な検出器固定治具を設計する。

成果の公表及び情報収集

上述の研究により得られた成果については、原子力規制庁が開催する成果報告会（東京）、5th Asian and Oceanic IRPA Congress on Radiation Protection : AOCR5 (2018 年 5 月、オーストラリア)、5th European IRPA Congress (2018 年 6 月、オランダ) 及び日本原子力学会 2019 年春の年会 (2019 年 3 月、水戸) において報告するとともに、

国内、アジア太平洋地域及び欧州における放射性ヨウ素の測定に係る最新の知見を入手する。

4. 事業の成果

4. 1 甲状腺モニタの測定器の開発

4. 1. 1 概要

一つ目の研究テーマである「①甲状腺モニタ測定器の開発」においては、平成 29 年度に最適化した材質及び厚さに基づいて設計した検出器用遮蔽体を試作し、同じく平成 29 年度に選定した検出器各 2 個と組み合わせることにより、甲状腺モニタ測定器を試作した。また、検出器を制御するとともに、測定された波高分布を解析して放射性ヨウ素を定量するためのソフトウェアを開発した。なお、検出器として、公衆用には高感度で、低い甲状腺等価線量の測定が可能な $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器を、作業用にはエネルギー分解能が高く、周辺の線量が高い中でも測定が可能な CdZnTe 半導体検出器を選定した。

次に、製作した甲状腺モニタ測定器の試作機について、 γ 線標準校正場を用いた高線量率下における測定性能の試験を実施した。当該試験にあたっては、高バックグラウンド環境を模擬するために、電動回転テーブルを利用して遮蔽体を含めた試作機全体を連続的に回転させ、周辺から均一に照射した条件での照射を実施した。

4. 1. 2 甲状腺モニタ測定器の試作

平成 30 年度に整備した、公衆用及び作業用検出器、シンチレーション検出器用信号処理用装置（平成 29 年度に整備した検出器 1ch 用の信号処理回路を検出器 2ch 用に改造）、検出器用遮蔽体及び検出器制御用ソフトウェアを組み合わせることにより、図 4-1-1 に示す甲状腺モニタ測定器を試作した。整備したそれぞれのコンポーネントの詳細を以下に示す。

4. 1. 2. 1 公衆用及び作業用検出器

本事業において、平成 30 年度に追加で整備した公衆用及び作業用の甲状腺モニタ測定器に用いる放射線検出器（2 種類）の写真を図 4-1-2 に、寸法などの緒元を表 4-1-1 にまとめる。なお、平成 29 年度に整備した検出器各 1 個を流用し、同一型式のものを追加で購入することにより、試作に必要な各 2 個の検出器を整備した。

作業用として使用する CdZnTe 半導体検出器には、同タイプの検出器では大型である 1.5cm^3 の有感体積を持つ RITECH 社製 $\mu\text{spec}1500$ を選択した。図 4-1-2 (a) の銀白色の筐体内に CdZnTe 結晶が配置されており、高圧回路、プリアンプ、アンプ、多重波

高分析器等の信号処理回路は黒色の筐体内に収められている。そして、パーソナルコンピュータから USB ケーブルを介して給電及び制御が可能である。

公衆用として使用する $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器には、図 4-1-2 (b)に示す寸法 1 インチ立方の光学結晶が、外寸 30 mm×30 mm×30 mm のアルミニウム製筐体に収められている応用光研製の検出器を整備した。光学窓には、天然由来の放射性物質の混入が少ない合成石英が使用されている。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器と組み合わせて用いる光電子増倍管には、立方体形状のシンチレーション検出器との接合を考慮して浜松ホトニクス製 H11934-300 を採用した。当該光電子増倍管は、光学結晶に近い 23mm×23mm の受光面を有しており、後述する検出器用遮蔽体に設置するうえで適した形状をしている。

4. 1. 2. 2 シンチレーション検出器用信号処理装置

公衆用の甲状腺モニタ測定器で用いる $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器については、光電子増倍管に必要な動作電圧を供給するとともに、出力される信号を増幅・整形し、波高分布を取得するための信号処理装置が必要となる。平成 29 年度には、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器 1 系統に高電圧を印加し、光電子増倍管のアノードから出力される信号を処理して波高分布を得られるシンチレーション検出器用信号処理装置（クリアパルス製 80403 型）を整備している。甲状腺モニタ測定器の試作機においては、2 個の検出器からの信号を同時に測定する必要があるため、平成 30 年度には、当該信号処理装置をクリアパルス製 80404 型に改造することにより、2 系統の $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の制御・測定器に対応できるようにした。当該装置の写真を図 4-1-3 に、主な仕様を表 4-1-2 に示す。

4. 1. 2. 3 検出器用遮蔽体

平成 29 年度に最適化した材質及び厚さに基づいて、図 4-1-4 及び図 4-1-5 に示す検出器用遮蔽体を試作した。十分な遮蔽効果が要求される一方、寸法の制限が厳しい頸部の上下方向の検出器有感部周辺及び検出器上部の遮蔽体については、遮蔽効果が高いことが確認されているタングステン合金¹⁾を使用した。その他の部分については、鉛を使用することにより、全体の重量を軽減した。当初、検出器側面の遮蔽体については、底板とねじで固定する設計としていた。検出器の有感部から離れている鉛遮蔽体部分については、ねじを設置することによる遮蔽への影響は無視できるが、有感領域直近のタングステン合金製遮蔽体部分に遮蔽効果が低いステンレス製ねじを配置した場合、 γ 線の入射角度によっては遮蔽効果が低い箇所が生じてしまうことが判明した。そこで、図 4-1-5 の断面図に示すように、側面の遮蔽をステンレス製の板で両側を挟み込み、鉛遮蔽体部分において

ボルトとナットでこのステンレス製の板をしっかりと固定することにより、タングステン合金部分にねじを配することなく、側面遮蔽を固定する方法を考案した。

4. 1. 2. 4 検出器制御用ソフトウェア

甲状腺モニタ測定器の試作機では、2個の検出器を同時に制御し、波高分布を測定するとともに、当該波高分布を解析することにより甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素を定量する必要がある。このために、Windows PC上で動作する検出器制御用ソフトウェアを製作した。当該ソフトウェアでは、作業用用の2台のCdZnTe検出器(RITECH社製 μ spec1500)、又は、シンチレーション用信号処理回路(クリアパルス製80404型)に接続された公衆用の2個のLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器を同時に制御し、それぞれの検出器からの波高分布を測定できる。CdZnTe検出器2台を同時に制御して、波高分布を測定したときのソフトウェア画面の例を図4-1-6に示す。測定されたそれぞれの波高分布が上下に表示され、図4-1-7に示すように任意のチャンネルに設定した関心領域(ROI)のピーク計数及び統計誤差や検出下限値などの情報が右側に表示される。公衆用のLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器と作業用用のCdZnTe検出器は、図4-1-8に示すコンボボックスでグラフィカル・ユーザー・インターフェイス(GUI)上から容易に選択することができる。関心領域(ROI)については、図4-1-9に示すように最大3つまでの領域を波高分布上のピークを参照しながらGUI上で容易に設定することができる。ピーク計数については、コベル法²⁾によりベースラインの計数を差し引いて自動的に解析され、メイン画面の右側に表示される。それぞれの領域について、ピーク計数から甲状腺の放射能への換算係数と放射能から甲状腺等価線量への換算係数を設定することにより、甲状腺に蓄積された放射能と等価線量がリアルタイムで表示される。波高分布を含む測定結果は、測定開始時刻、測定時間(ライブタイム/リアルタイム)、被検者ID等の測定に係る基本情報とともにファイルに出力して保存することができる。また、後日、測定結果を読み込み、評価条件を変更して再解析・再出力することが可能である。

4. 1. 3 甲状腺モニタ測定器（試作機）の特性試験

事故等緊急時においては、放射性物質により周辺が汚染された高バックグラウンド線量率の環境の下で甲状腺モニタ測定器が使用されることが想定される。そこで、試作した甲状腺モニタ測定器について、高線量率環境下における測定性能を評価するために、 γ 線標準校正場において特性試験を実施した。高バックグラウンド線量率の環境下では、全方位から測定器にバックグラウンド放射線が入射することが想定されるため、図4-1-10に示すように電動回転テーブルに試作した甲状腺モニタ測定器を設置して、一定速度（1回転/分）で回転させることにより、全方位からの均一な照射を模擬した。 ^{137}Cs 及び ^{60}Co 線源を使用して、周辺線量当量率が $20\mu\text{Sv/h}$ となる距離に甲状腺モニタ測定器の試作機を設置して照射を行った。測定時間は300秒（5分間）とした。

図4-1-11及び図4-1-12に、開口部から照射した場合（遮蔽なし）と、回転させることにより全方位から均一に照射した場合の波高分布を示す。図中の310~340チャンネル付近が ^{131}I からの364keV γ 線の光電ピーク領域に該当する。この364keV γ 線よりも高いエネルギーのバックグラウンド放射線が遮蔽体を透過して放射線検出器に入射した場合、図4-1-11（ ^{137}Cs 線源）及び図4-1-12（ ^{60}Co 線源）に示す波高分布の例のように、364 keV ピーク付近にバックグラウンド信号として計数されることがある。目的とする γ 線ピークの計数に対してこのバックグラウンド計数が大きくなった場合、ピークの定量に影響を与えることがある。そこで、このバックグラウンド計数から次式を用いて測定下限値を計算した³⁾。

$$DL = \frac{K}{\varepsilon} \left\{ \frac{K}{t_s} + 2\sqrt{\left(\frac{K}{t_s}\right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)} \right\} \frac{CF_{thy}}{F} \dots \dots (1)$$

DL ：甲状腺等価線量の定量下限値（mSv）

K ：3

t_s （ $= t_b$ ）：測定時間（sec）

n_b ：バックグラウンド計数率（cps）

ε ：甲状腺 ^{131}I 放射能当たりの検出効率

CF_{thy} ：摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数*（mSv/Bq）

F ：摂取5日後の放射性ヨウ素の残留率*

* $1\mu\text{m}$ 粒子（作業者については $5\mu\text{m}$ 粒子）の1回吸入摂取条件での値
高バックグラウンド線量率下（ ^{137}Cs 線源： $20\mu\text{Sv/h}$ 又は ^{60}Co 線源： $20\mu\text{Sv/h}$ ）における、甲状腺等価線量測定下限値を表4-1-3に示す。300秒（5分）の測定時間を確保できれば、高バックグラウンド線量率環境下においても甲状腺等価線量の評価下限値として10mSv以下が担保できることが分かった。また、線量係数が大きく最も評価が厳しい乳児を除けば150秒の測定時間で10mSvの評価下限値が担保できることが分かった。

表 4-1-1 本事業で購入した放射線検出器の仕様と ^{133}Ba 線源からの 356keV γ 線に対する試験結果

検出器	CdZnTe	LaBr ₃ (Ce)
原子番号	48/30/53	57/35
結晶寸法	1.5 cm×1.5 cm×0.75 cm	2.54 cm×2.54 cm×2.54 cm
有感体積[cm ³]	1.5	16
エネルギー分解能	2.8%	5.5%
γ 線感度	0.39 cm ²	1.9 cm ²

表 4-1-2 シンチレーション検出器用信号処理装置の主な仕様

項 目	仕 様
コネクタ	信号入力及びテストパルス信号入力：BNC コネクタ 各 2 個 PMT 用 高圧出力（負極性）：SHV コネクタ 2 個 給電及び通信制御：USB Mini-B（ch1/ch2 共通）
波高分析器（PHA）	デジタルサンプリング方式：40Msps 10bit 変換ゲイン：256/512/1024 チャンネル データ幅：30 ビット/チャンネル システムゲイン：×0.5～×48 コースゲイン：×1～×32 ファインゲイン：×0.5～×1.5 入力極性：POS./NEG. 波形整形：台形波フィルタ Rise Time：0.5~60.0 μ s Flat Time：0.2~10.0 μ s
高圧電源	Ch1/ch2 共通 出力電圧：負極性 0（OFF） / -100V~-1000V 出力電流：最大 0.5mA
通信	Ch1/ch2 共通 通信方式：調歩同期式 通信速度：119200bps USB 接続（仮想 COM ポート）

表 4-1-3 高バックグラウンド線量率 ($20 \mu\text{Sv/h}$) 環境下における甲状腺等価線量の
評価下限値 (mSv)

線源	測定時間	乳児	小児	成人	作業者
^{137}Cs	300 秒	8.62	4.82	1.42	2.36
	150 秒	12.20	6.83	2.02	3.35
^{60}Co	300 秒	6.21	3.48	1.03	1.68
	150 秒	8.80	4.93	1.45	2.39

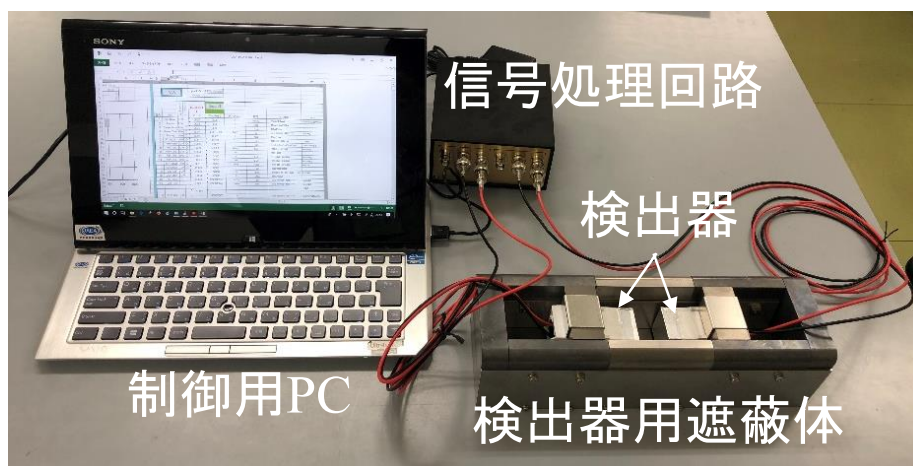
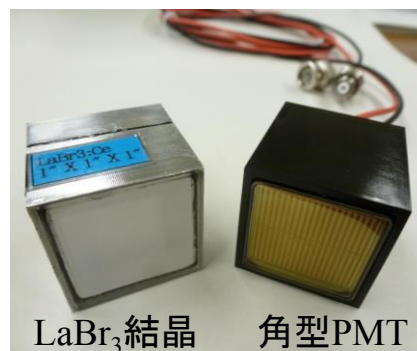


図4-1-1 甲状腺モニタ測定器の試作機



RITEC社製 μspec1500



LaBr₃結晶 角型PMT

(a) CdZnTe 半導体検出器

(b) LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器

図4-1-2 本事業で購入した放射線検出器

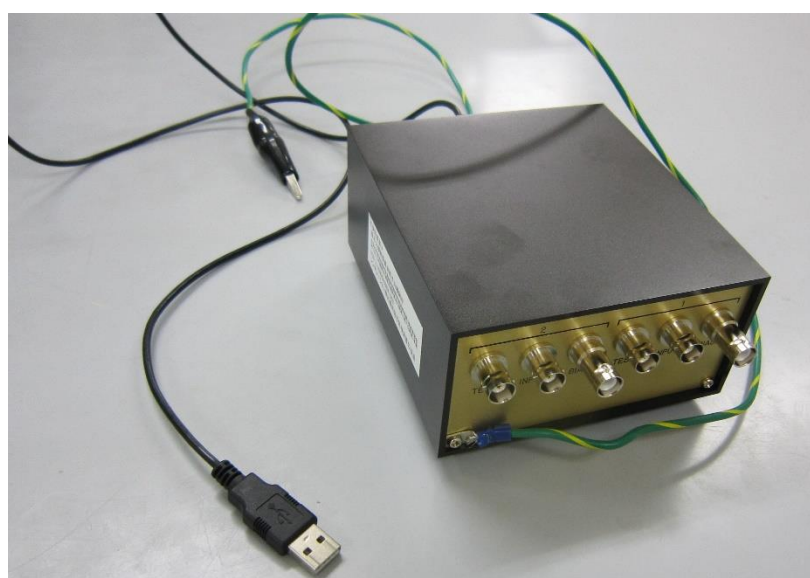


図4-1-3 シンチレーション検出器用信号処理装置 (クリアパルス製 80404 型)

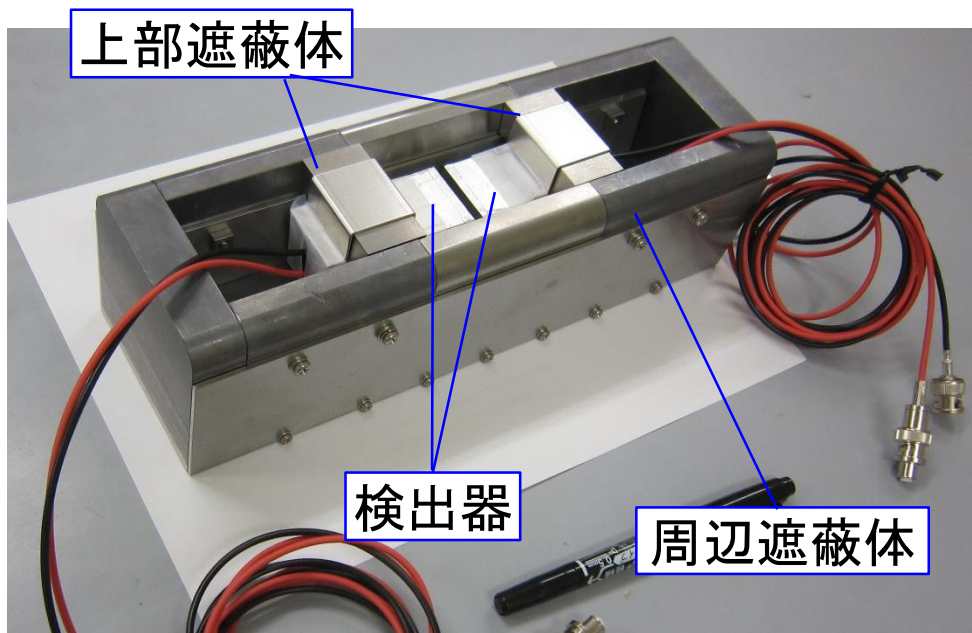


図 4 - 1 - 4 試作した検出器用遮蔽体

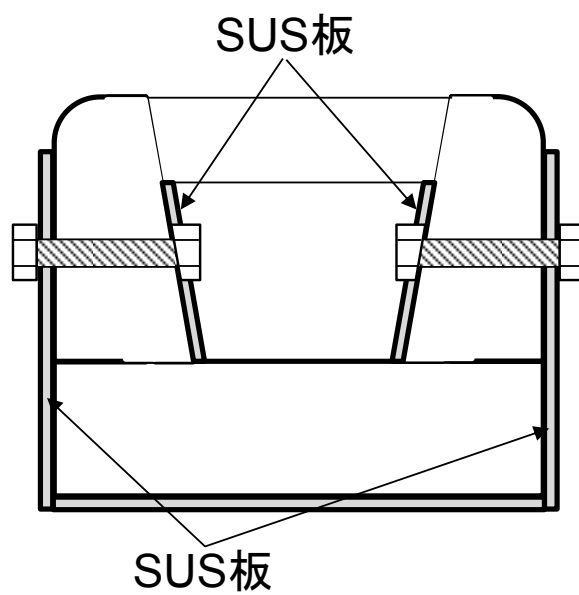


図 4 - 1 - 5 試作した検出器用遮蔽体の断面図

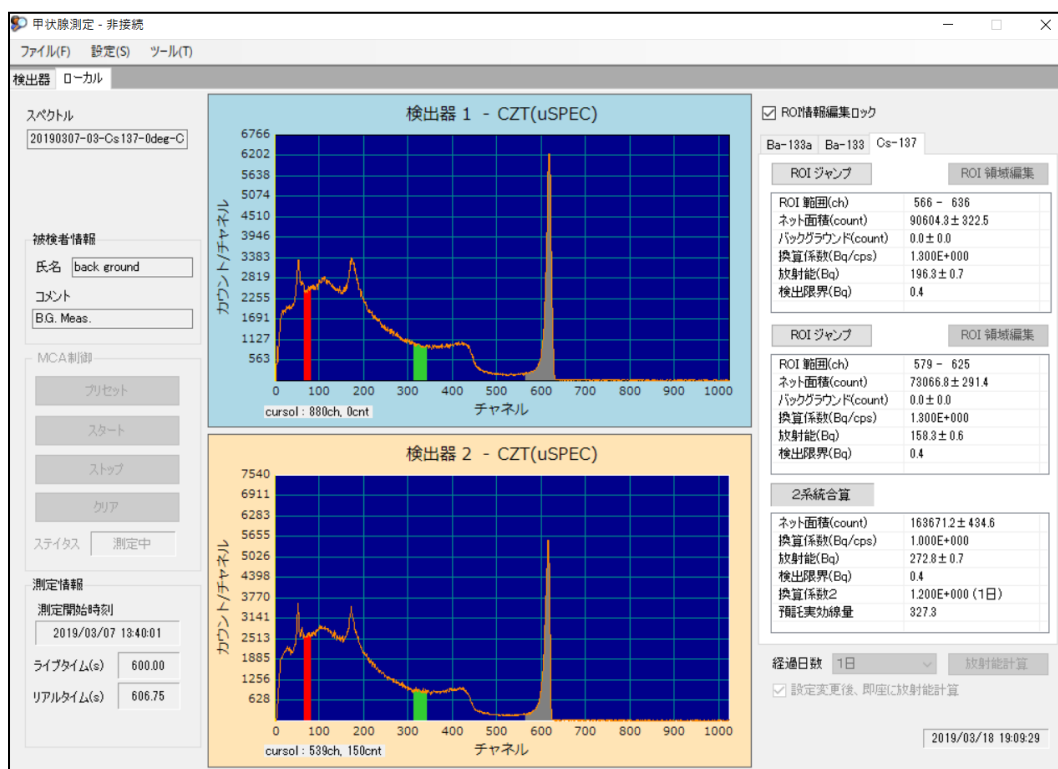


図 4-1-6 検出器制御用ソフトウェアのメイン画面

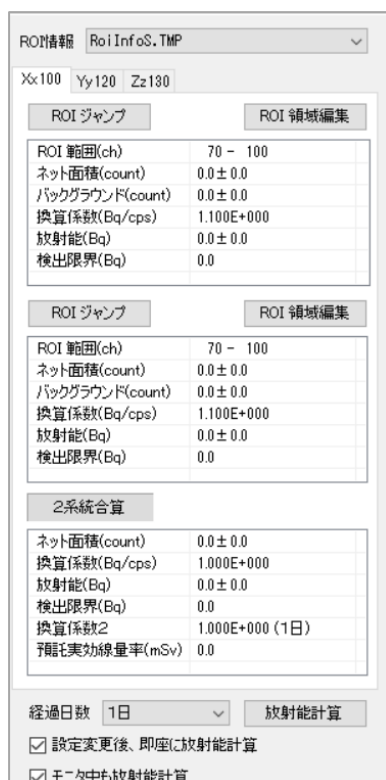


図 4-1-7 公衆用又は作業用検出器の選択画面

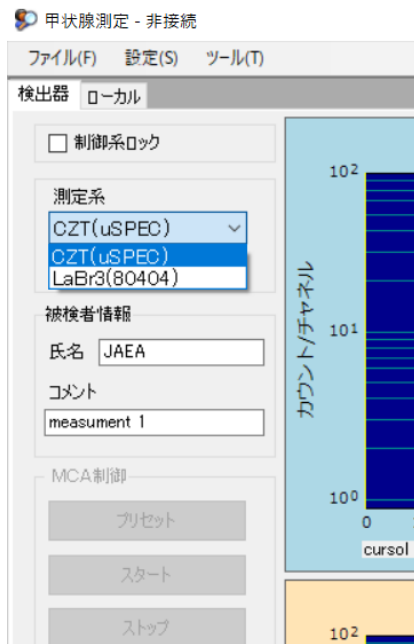


図 4 - 1 - 8 公衆用又は作業用検出器の選択画面

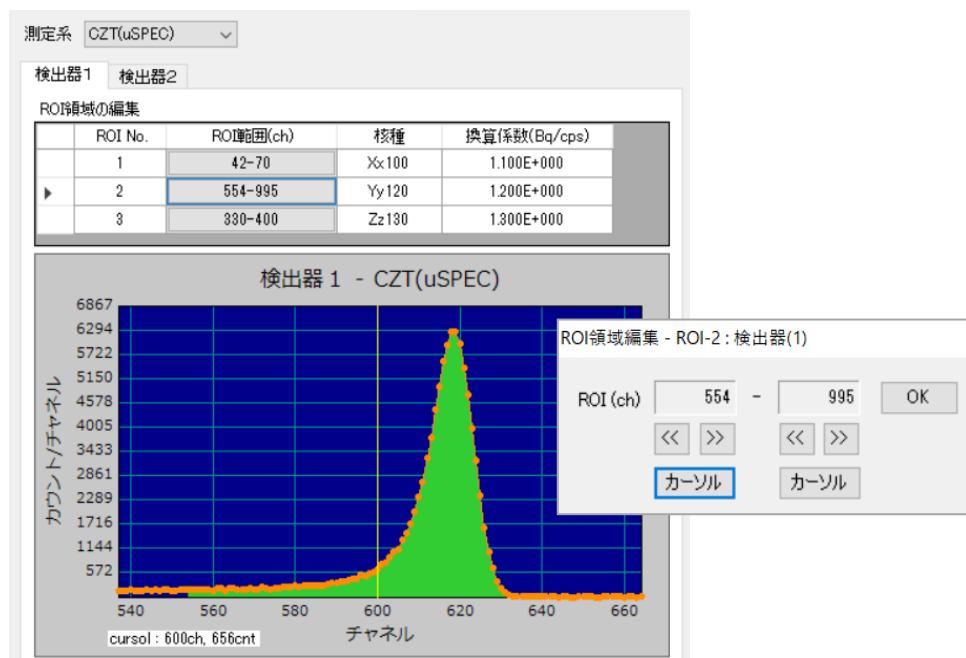


図 4 - 1 - 9 関心領域 (ROI) の設定画面

甲状腺モニタ測定器の試作機

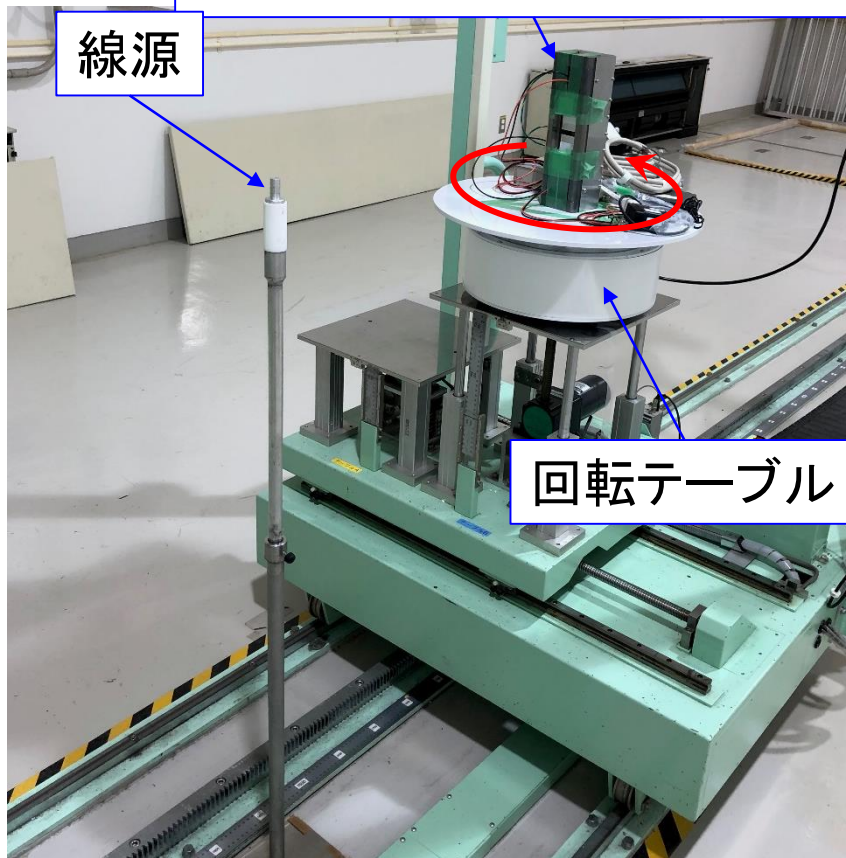


図4-1-10 γ 線標準校正場における甲状腺モニタ試作機の実験

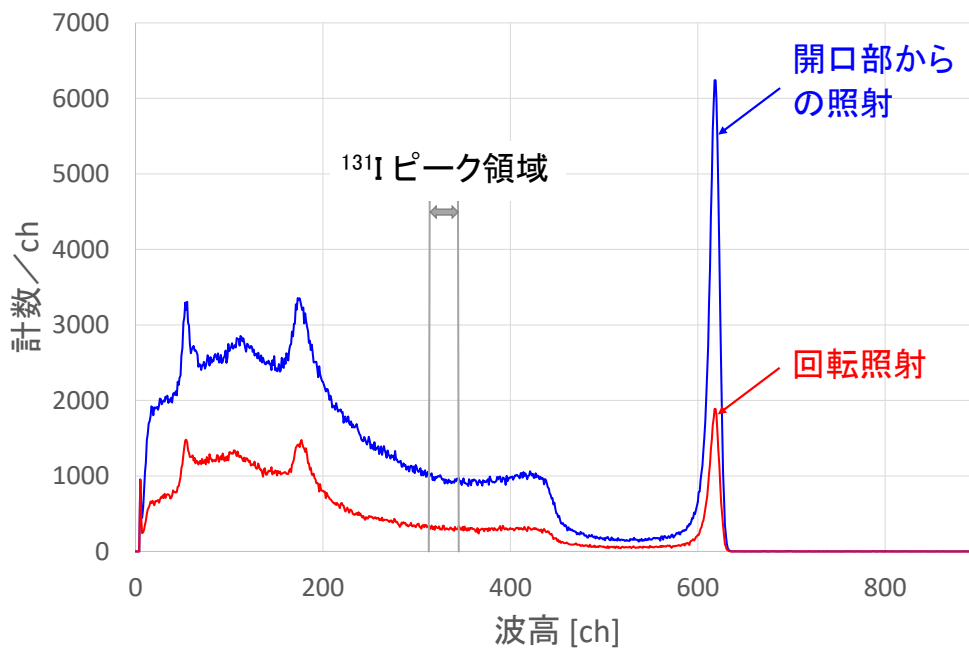


図 4-1-1-1 ^{137}Cs 線源 γ 線標準場において測定した波高分布の例 (CdZnTe 検出器)。周辺線量当量率： $20 \mu\text{Sv/h}$

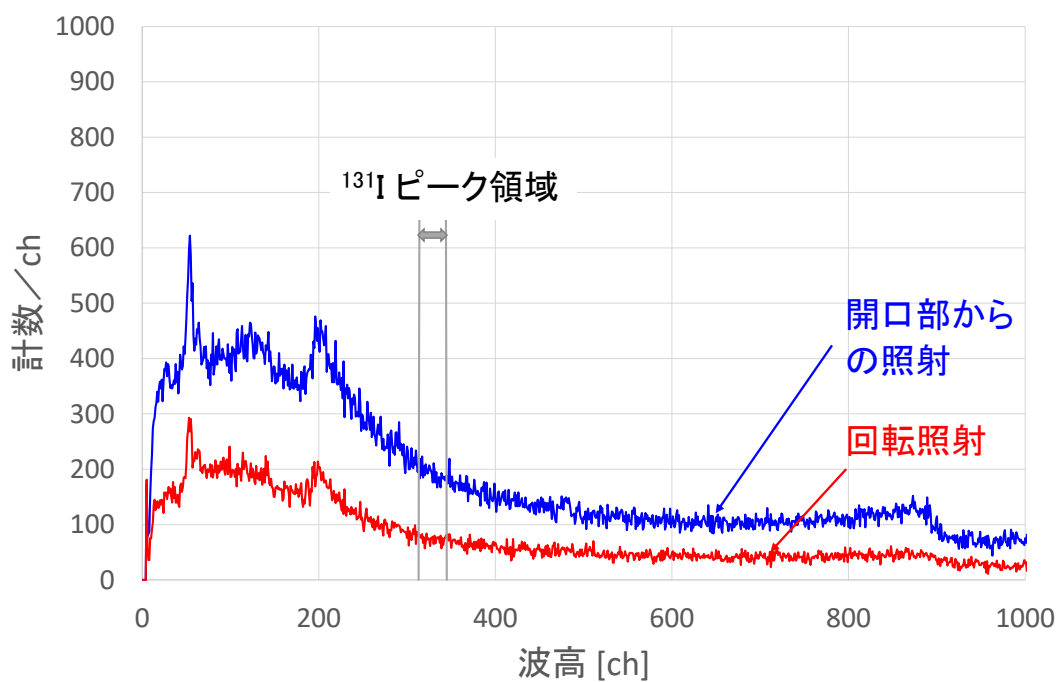


図 4-1-1-2 ^{60}Co 線源 γ 線標準場において測定した波高分布の例 (CdZnTe 検出器)。周辺線量当量率： $20 \mu\text{Sv/h}$

4. 2 高精度放射性ヨウ素定量法の開発

4. 2. 1 概要

性別・年齢別ボクセルファントムで計算した結果を用いた体格補正方法を開発し、平成 29 年度に製作した 3 種類の年齢別頸部ファントムと ^{133}Ba 点線源を用いて、試作した甲状腺モニタ測定器の計数効率を評価した。また、甲状腺の大きさ、周辺組織の厚さ等の個人差について、様々な数値ファントムとこれを修正することによりシミュレーション計算上で模擬し、これが計数効率に与える影響を評価した。さらに、事故直後の周辺環境中に ^{131}I が存在し、甲状腺モニタ測定器を用いた甲状腺モニタリングに影響する場合のバックグラウンド放射線の影響補正法を開発した。

これにより、性別、年齢、体格等による解剖学的な相違を考慮した頸部ファントムによる最適な定量法を完成させた。

4. 2. 2 甲状腺モニタ校正方法の開発

甲状腺モニタの校正は、従来、ORINS ファントム等を用いて行われてきた⁴⁾。しかし、これらのファントムは、 ^{131}I や ^{133}Ba 標準溶液線源を必要とすることに加えて、年齢群ごとに異なるサイズの溶液線源を多数用意する必要がある。開発する甲状腺モニタは、前述したとおり、原子力事故等の緊急時に指揮所や避難所に多数配備することを想定している。こうした甲状腺モニタを、緊急時に備えて維持管理していく上で、校正のための煩雑な線源管理が課題となっていた。また、校正に使用したファントムと公衆の様々な年齢層の実際の頸部や甲状腺の大きさや形状との違いによって、負荷量を過小評価することが指摘されてきた⁵⁾。

平成 29 年度の事業では、甲状腺モニタの校正のため、甲状腺を模擬した体積線源ではなく、より取り扱いが簡便な点線源と頸部ファントムを用いて校正する方法を開発した⁶⁾。この方法は、甲状腺やその周辺組織の解剖学的な知見を反映した年齢別の 3 体の標準ボクセルファントム (ICRP 成人男性標準ファントム⁷⁾ (以下、「ICRP-AM」と表記する)、GSF 小児ボクセルファントム⁸⁾ (以下、「CHILD」と表記する)、及び GSF 乳児ボクセルファントム⁸⁾ (以下、「BABY」と表記する)。図 4-2-1 参照) を基にして、計数効率を実験的に評価するものである。平成 29 年度報告書⁶⁾では、1 つの $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器に対して、ボクセルファントムの甲状腺内に均一分布する ^{131}I 線源からの 364 keV 放出光子あたりの計数効率と、等価な放出光子あたりの計数効率を与えるような簡易頸部ファントム中の ^{133}Ba 線源の位置 (代表点) を示した。本甲状腺モニタは、前述したとおり、遮蔽体に囲まれた 2 つの検出器により甲状腺内の ^{131}I 放射能を定量するものである。従って、本甲状腺モニタの校正も検出器ごとに行うよりも、2 つの検出器セットに対して行う方が望ましい。さらに、

平成 29 年度報告では、代表点を算出するのに、計算不確かさを考慮しておらず、また、作業用検出器として採用した CdZnTe 検出器に対する代表点も評価していなかった。そこで、本年度は、2 つの LaBr₃(Ce) 検出器を内包する公衆用（成人、小児、乳児）及び 2 つの CdZnTe 検出器を内包する作業用検出器の甲状腺モニタについて、平成 29 年度事業で決定した測定配置に対して代表点を求め、実際に製作した簡易頸部ファントム（図 4-2-2）と試作した甲状腺モニタを用いて計数効率を決定した。さらに、決定した計数効率と得られたスペクトルから、検出下限放射能を試算した。

(1) 代表点法

体積線源の代わりに、代表点に配置した点線源による校正は、放射線管理試料等に対する放射能測定器の効率校正法として用いられてきた⁹⁾。本手法は、これを応用して次のようにして、代表点を求めた。

- ① 各ボクセルファントム（ICRP AM、CHILD、BABY）の甲状腺内に均一分布する ¹³¹I 線源から等方放出される 364 keV の光子に対して、ファントム前方の空間メッシュ（5 mm 刻み）の各点 (i, j, k) における 364 keV 光子のフルエンス $\Phi_{i,j,k}^{\text{voxel}}$ をモンテカルロ計算により算出（図 4-2-3 (a)）
- ② ①のそれぞれのボクセルファントムに対応する簡易頸部ファントム（成人、小児、乳児）をモデル化し、ファントム内の位置 (x, y, z) に配置した ¹³³Ba 点線源から等方放出される 356 keV 光子に対して、ファントム前方の空間メッシュ（5 mm 刻み）の各点 (i, j, k) における 356 keV 光子のフルエンス $\Phi_{i,j,k}^{\text{point}}$ をモンテカルロ計算により算出（図 4-2-3 (b)）
- ③ ②において、¹³³Ba 点線源を簡易頸部ファントム内で動かし、それぞれの位置 (x, y, z) に対して、以下で定義される d を算出。ここで、 (i, j, k) の和は、配置する甲状腺モニタの検出器領域 V にわたって行った。 d は、モンテカルロ計算における統計誤差を加味して、検出器領域にわたってボクセルモデルと簡易頸部モデルでの計数効率の一致度を表したものであり、小さいほど、一致度は高い。

$$d = \sqrt{\frac{\sum_{i,j,k \in V} \left[\left(\frac{\Phi_{i,j,k}^{\text{point}} - \Phi_{i,j,k}^{\text{voxel}}}{\Phi_{i,j,k}^{\text{voxel}}} \right) / u_{i,j,k} \right]^2}{\sum_{i,j,k \in V} \frac{1}{u_{i,j,k}^2}}} \dots \dots (2)$$

n : 検出器領域 V 内のメッシュ数

$u_{i,j,k}$: モンテカルロ計算における統計誤差から求めた $(\Phi_{i,j,k}^{\text{point}} - \Phi_{i,j,k}^{\text{voxel}}) / \Phi_{i,j,k}^{\text{voxel}}$ の不確かさ

- ④ ③で評価した d が最小となるときの簡易頸部ファントム内の ¹³³Ba 点線源の位置 (x_r, y_r, z_r) が、代表点である。

モンテカルロ計算には、PHITS 2.8.8 (EGS モード) コード¹⁰⁾を使用した。まず、本手法の妥当性を検証するために、甲状腺を模擬した体積線源を持つ ORINS ファントムに対して本手法を適用した。ORINS ファントムをモデル化し、1 インチ立方の LaBr₃(Ce) 検出器 1 個に対して、成人用簡易頸部ファントム内の代表点を求めた。決定した代表点に ¹³³Ba 点線源を挿入し 356 keV 光子に対する計数効率を実験的に評価した。一方で、ORINS ファントムに対して、同様の条件で計数効率を直接評価し、両者を比較した。実験の様子を図 4-2-4 に、得られた計数効率を表 4-2-1 に示す。両者の差異は 8% であり、不確かさの範囲内で一致したことから、本手法の妥当性を検証することができた。

(2) 計数効率の決定 (校正)

各ボクセルファントムと甲状腺モニタの組み合わせに対して、代表点位置を計算により求めた。基にしたボクセルファントムを用いて直接計算した計数効率と、代表点位置の点線源から計算した計数効率を比較したところ、その差は 5% 以内であり、適切に代表点を選定されていることが確認できた (表 4-2-2 及び表 4-2-3)。次に、簡易頸部ファントム内の決定した代表点位置に ¹³³Ba 点線源を挿入して、試作した甲状腺モニタの応答を測定し、そこから代表点法を用いて ¹³¹I の 364 keV 光子に対する計数効率を評価した (図 4-2-5)。代表点位置とともに、実測により得られた計数効率を表 4-2-2 及び表 4-2-3 に示す。

(3) 検出下限放射能の試算

得られた計数効率と、茨城県東海村にある日本原子力研究開発機構原子力科学研究所構内の屋内で得られたバックグラウンドスペクトルを用いて、バックグラウンド放射線がない状況での ¹³¹I の検出下限放射能を試算した (表 4-2-4)。検出下限放射能は (1) 式を用い、測定時間は 150 秒として算出した。さらに、算出した検出下限放射能から、検出下限甲状腺等価線量を評価した。等価線量評価において仮定した条件とともに、結果を表 4-2-5 に示す。また、364 keV の光電ピークの計数について、150 秒の測定でその統計精度が 10% 以下となる放射能及び甲状腺等価線量を評価した結果を表 4-2-4 及び表 4-2-5 に示す。この結果より、10mSv 以下の甲状腺等価線量の評価が可能であることが分かった。なお、10% という統計精度は、甲状腺周辺組織の個人差や被検者の位置ずれによる不確かさと比べて十分小さい。

これにより、点線源と簡易的なアクリル製ファントムを使用した、簡便かつ正確な甲状腺モニタの校正が可能になった。

4. 2. 3 計数効率の不確かさの評価

前項で示した校正手法を用いることで、詳細な解剖学的特徴を反映した標準的な数値ファントムに基づいた甲状腺モニタの簡便な校正が可能になった。しかしながら、計数効率に影響を及ぼすと考えられる甲状腺体積や甲状腺前組織厚は年齢や性別、また個人により差異があることが指摘されている^{11),12)}。また、被検者の甲状腺位置と甲状腺モニタの位置ずれによっても計数効率が変化する。欧州 CATHyMARA プロジェクト¹³⁾においても、甲状腺内に蓄積した放射性ヨウ素の測定における不確かさや偏差は、緊急時の測定であっても明らかにしておくべき、と勧告している。そこで、これらの影響を詳細に評価し、不確かさを評価（必要であれば、補正方法の検討も含めて）しておくことは重要である。

(1) 体格による不確かさ評価

甲状腺形状やその位置による計数効率の不確かさを評価するため、異なるボクセルファントムに対する甲状腺モニタの計数効率を計算評価した。評価に用いたファントムは、校正に用いた ICRP-AM とは性別や甲状腺形状などが異なる種類の成人ボクセルファントムを選んだ（表 4-2-6 参照）。表 4-2-6 には、甲状腺寸法の日本人男性平均値も同時に示したが、これらのファントム群で、概ね日本人平均はカバーしていると考えられる。検出器の応答計算は、モンテカルロコード PHITS 2.8.8 (EGS モード) を用い、各ボクセルファントムの甲状腺内に均一分布した ^{131}I からの 364 keV 光子に対して行った。計算体系の中で、頸部表面と検出器表面の距離は 2.5 cm に固定した（図 4-2-6 及び図 4-2-7）。公衆用甲状腺モニタ（2つの $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器を内包）に対して、ICRP-AM の計数効率で規格化した、各ボクセルファントムの計数効率を図 4-2-8 に示した。校正は代表点法を用いて ICRP-AM ファントムに基づいて行われるので、首径が大きく甲状腺前組織厚が厚い Otoko ファントムのような被検者を測定した場合は、甲状腺内の残留 ^{131}I 放射能を 17% 過小評価する。一方で、JF-103 のように首径が小さく甲状腺前組織厚が薄い被検者を測定した場合は、24% 残留放射能を過大評価するものの、過小（過大）評価の程度は 25% 程度に留まることが明らかになった。また、これらの結果は、甲状腺の形状よりも甲状腺前組織厚が計数効率に大きく影響している傾向が見られた。

そこで、甲状腺前組織厚及び甲状腺体積が計数効率に及ぼす影響を系統的に調べるために、ICRP-AM との差異が最大であった JF-103 ファントムを基に、甲状腺前組織厚及び甲状腺体積を改変したボクセルファントム群を作成した（図 4-2-9）。甲状腺前組織厚については、22 から 52 歳までの日本人成人に対して、非伸展位で 5.5 ± 1.1 mm、伸展位で 3.9 ± 0.8 mm という報告がある¹²⁾。従って、甲状腺前組織厚を 1.8 mm（元の JF-103 ファントムの甲状腺前組織厚）から 11.8 mm まで変化させれば十分であると考えられる。甲状腺体積は、日本人で 14.3~19.2 g との報告があるが¹⁸⁾、福島県民健康調査において超音波検査から推定した甲状腺体積の下限は、18、19 歳の年齢群で数 cm^3 であったため¹¹⁾、6.4

cm³から 19.7 cm³まで変化させた（元の JF-103 ファントムは 16.0 cm³）。

また、甲状腺体積は年齢とともに大きく変化するため、小児用甲状腺モニタの校正の基となる CHILD ファントム（7 歳児、4.7 cm³）の甲状腺体積を 1.1 cm³から 13.0 cm³まで変化させた（福島県民健康調査に基づく文献¹¹⁾においては、3 歳～17 歳までの年齢群に対し、甲状腺体積は約 1 cm³から 15 cm³までの幅がある）。また、甲状腺前組織厚についても、1.5 mm（元の CHILD ファントムの甲状腺前組織厚）から 5.5 mm まで変化させた。乳児については、BABY ファントム（0 歳児（生後 8 週）、1.1 cm³）の甲状腺体積を 0.7 cm³から 3.0 cm³まで変化させた。これは、概ね文献¹¹⁾で示された 0 歳～2 歳の年齢群の甲状腺体積の幅である。

これらのファントムに対する公衆用甲状腺モニタの¹³¹I からの 364 keV 光子の計数効率を計算評価した（図 4-2-10 から図 4-2-14）。被検者の甲状腺が頸部表面からどの深さに位置しているかについては通常は不明であるため、本甲状腺モニタを用いた測定は、頸部中心の頸部表面から検出器表面までの距離（2.5 cm）を一定にして行うこととしている。そのため、甲状腺組織厚の増加に伴い、甲状腺-検出器間の距離が大きくなり、計数効率は減少する。ただし、今回考慮した範囲内での計数効率の変化は、成人公衆用で 24 %、小児用で 23 %に留まっていた。また、甲状腺体積による変化は小さく、変化割合は成人公衆用で 5 %以内、小児用で 3 %以内であった。

以上のことから、甲状腺形状や甲状腺前組織厚の個人差による不確かさは、概ね 25 %程度である。欧州の CATHyMARA プロジェクト¹³⁾によると、頸部-検出器間距離が近い(< 5 cm)場合、校正用ファントムに起因する不確かさは 20-30 %になるとしており、本甲状腺モニタで評価した不確かさの大きさは許容できるとみなせる。

（2）位置ずれによる不確かさ評価

平成 29 年度事業により、位置ずれの影響を受けづらくするように検出器配置を決定した。また、測定時の被検者の頸部を支持固定する治具によって、位置精度の向上を見込んでいる。しかしながら、被検者の甲状腺位置が正確には不明なこと、測定時の体動等によって校正時に想定したジオメトリと異なってしまう可能性が考えられる。そこで、本年度事業では、検出器周りの遮蔽体も含めて決定した甲状腺モニタ配置に対し、位置ずれによる計数効率の変化をモンテカルロ計算により評価した。

図 4-2-15 に示すように、ICRP-AM、CHILD、BABY のそれぞれに対して、鉛直方向、左右方向、前後方向に甲状腺モニタを移動させ、それによる計数効率の変化を評価した。結果を図 4-2-16 から図 4-2-18 に示す。鉛直方向に関しては、計数効率の変化は 13 %以内で、左右方向については、さらに小さく 4 %以内であった。前後方向に関しては、±5 mm の変化範囲内では、±20 %以内に収まっている。

欧州の CATHyMARA プロジェクトでは¹³⁾、頸部-検出器間距離が 10 cm の甲状腺モニタでは、5 mm のずれが±10 %の不確かさの原因になると報告されている。本モニタは、

頸部－検出器間距離を 2.5 cm で測定することを想定しており、また、頸部固定治具により前後方向の位置ずれの程度は小さいと考えられることを勘案すると、許容できる不確かさの範囲内であるといえる。

4. 2. 4 バックグラウンド放射線の影響補正法の開発

事故直後の高バックグラウンド線量率の環境下において、開発した甲状腺モニタ測定器を使用する場合、被検者の甲状腺が配置される上方には遮蔽がないため、 ^{131}I から放出される 364 keV γ 線について、被検者の甲状腺からの寄与と周辺環境からの寄与を弁別して測定することは原理的に不可能である。このため、周辺環境からの寄与のみを別途測定して、バックグラウンドとして差し引いて補正する必要がある。しかし、実際の測定時には、甲状腺モニタ測定器の上部に被検者が覆いかぶさるため、周辺環境からの γ 線に対して被検者の頸部が一定の遮蔽効果を持つことになる。甲状腺モニタ測定器の上方に何も設置しない状態でバックグラウンド補正のための測定を実施すると、被検者による遮蔽効果が考慮されなくなるため、バックグラウンドの影響を過大補正することとなり、結果として甲状腺等価線量を過小評価することになる。正確な甲状腺等価線量の測定・評価のためには、被検者の頸部による遮蔽効果を考慮したバックグラウンド放射線の影響補正法の開発が必須となる。

そこで、数値ファントムを用いたモンテカルロシミュレーション計算により、被検者の頸部による遮蔽効果を考慮して適切にバックグラウンド放射線の影響を差し引くことができる補正法を開発した。

まず、被検者の遮蔽効果を評価するために数値ファントム（乳児、小児又は成人男性）と甲状腺モニタ測定器の試作機を組み合わせた計算体系を作成し、全方位から等方に ^{131}I からの γ 線が照射された場合の検出器の応答（ 364 keV γ 線の光電ピーク計数）を評価し、被検者及び検出器用遮蔽体がない場合の応答との比を評価した。使用した計算体系を図 4-2-19 及び図 4-2-20 に示す。計算には PHITS3.02 コードを EGS モードで使用した。 ^{131}I 線源は、甲状腺モニタ測定器の検出器を中心とした半径 40cm の球殻表面に設置した。なお、計算効率を向上させるために球殻の内側方向にのみ γ 線が放出される条件で計算を行った。

被検者及び検出器用遮蔽体の両方がない場合の応答に対する比について評価した結果を図 4-2-21 に示す。検出器用遮蔽体のみの場合の比は約 0.19 であるのに対して、被検者の代わりに数値ファントムを上部に配した場合（図 4-2-20）の比は、乳児、小児及び成人男性に対してそれぞれ約 0.10 、約 0.082 、約 0.049 であった。この結果から、被検者の頸部による遮蔽効果で、 ^{131}I からの 364keV γ 線の光電ピーク計数は、 $1/2$ から $1/4$ に減少することが分かった。

甲状腺モニタシステムでは、測定器を校正するために円筒型 PMMA 製の簡易頸部ファントムを利用する。そこで、この簡易頸部ファントムを活用することにより、被検者自身による周辺環境からの γ 線の遮蔽効果を、実測において模擬できる手法を考案した。まず、円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを図 4-2-22 に示すような配置で甲状腺モニタ測定器の上部に配置した計算体系を作成した。そして、PHITS3.02 を用いて数値ファントム

の計算と同様に、 ^{131}I 線源を甲状腺モニタ測定器の検出器を中心とした半径 40cm の球殻表面に設置して計算を行った。計算結果から導出した比を図 4-2-2 1 中に簡易ファントムとして示す。乳児については、成人用の簡易頸部ファントム（直径 13cm、高さ 12cm）の円筒側面が検出器に向く方向で設置した場合（図 4-2-2 2 (a)参照）に、遮蔽なしに対する比が約 0.10 となり、被検者頸部の遮蔽効果を模擬できることが分かった。小児については、成人用の簡易頸部ファントム（直径 13cm、高さ 12cm）の底面が検出器に向く方向で設置するとともに、2 個の検出器間距離を 4cm に近づけた場合（図 4-2-2 2 (b)参照）に、遮蔽なしに対する比が約 0.084 となり、被検者頸部の遮蔽効果を模擬できることが分かった。成人については、校正用とは別に円筒型 PMMA 製ファントム（直径 20cm、高さ 17cm）を作成して、その円筒側面が検出器に向く方向で設置した場合（図 4-2-2 2 (c)参照）に、遮蔽なしに対する比が約 0.051 となり、被検者頸部の遮蔽効果を模擬できることが分かった。

測定場所の周辺環境中に ^{131}I が存在して、バックグラウンド計数として寄与する場合においても、上述の円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを活用した測定を合わせて行い、被検者の測定結果から差し引くことにより、バックグラウンド放射線の影響を補正できる。

表 4-2-1 ORINS ファントムに対する LaBr₃(Ce) 検出器の計数効率の比較

	(a) 代表点法	(b) 直接測定
計数効率 [cpm/photons · s ⁻¹]	0.18 ± 0.01	0.19 ± 0.04

(k = 1)

表 4-2-2 公衆用の甲状腺モニタ (LaBr₃(Ce) 検出器 2 個) に対して決定した代表点位置と測定により得られた ¹³¹I の 364 keV 光子に対する計数効率

	成人	小児	乳児
ボクセルモデル (A)			
代表点位置 (B)			
直接計算による計数効率 比 (B) / (A)	1.6 %	0.2 %	4.0 %
計数効率 (cps/Bq)	3.9×10^{-3}	5.7×10^{-3}	6.0×10^{-3}

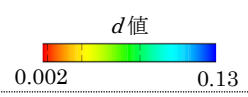


表 4-2-3 作業用の甲状腺モニタ (CdZnTe 検出器 2 個) に対して決定した代表点位置と測定により得られた ^{131}I の 364 keV 光子に対する計数効率

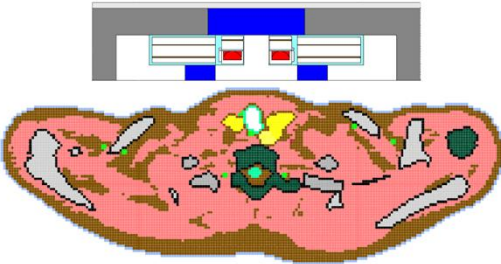
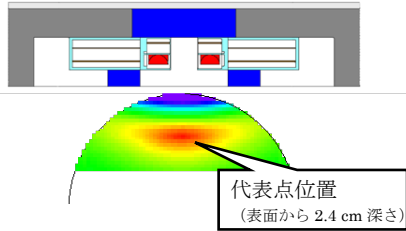
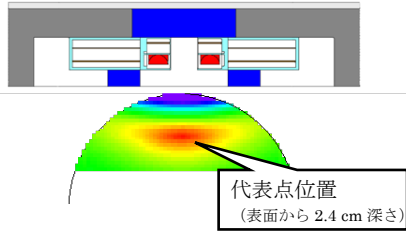
作業者	
ボクセルモデル (A)	
代表点位置 (B) 	
直接計算による計数効率 差 (B) / (A) 計数効率 (cps/Bq)	4.3% 9.3×10^{-4}

表 4-2-4 バックグラウンド放射線がない状況下での ¹³¹I 検出下限放射能

	成人	小児	乳児	作業員
測定時間 (s)	150	150	150	150
検出下限放射能 (Bq)	102	70	66	206
測定精度が 10%以下となる放射能 (Bq)	171	117	111	714

表 4-2-5 バックグラウンド放射線がない状況下での検出下限甲状腺等価線量

	成人	小児	乳児	作業員
摂取形態	吸入	吸入	吸入	吸入
物理・化学形	粒子状	粒子状	粒子状	粒子状
評価対象	成人公衆	5歳児	3ヶ月児	作業従事者
5日後の甲状腺残留率*	6.30×10^{-2}	6.00×10^{-2}	5.90×10^{-2}	9.00×10^{-2}
甲状腺等価線量換算係数* (mSv/Bq)	1.50×10^{-4}	7.20×10^{-4}	1.50×10^{-3}	2.10×10^{-4}
検出下限甲状腺等価線量 (mSv)	0.24	0.84	1.7	0.48
測定精度が 10%以下となる等価線量 (mSv)	0.41	1.4	2.8	1.7

*)IDEC¹⁹⁾により 1 μm 粒子 (作業員については 5 μm 粒子) の 1 回吸入摂取条件で計算した。

表4-2-6 計数効率の比較に用いたボクセルファントム

	ICRP-AM	ICRP-AF ⁷⁾	Otoko ¹⁴⁾	Onago ¹⁵⁾	JM-103 ¹⁶⁾	JF-103 ¹⁷⁾	(参考)日本人男性平均 ¹²⁾
性別	男性	女性	男性	女性	男性	女性	男性
首 径 (cm)	14.3	13.0	14.5	12.0	14.5	11.7	11.8
甲状腺前組織厚 (cm)	0.85	1.06	1.59	0.80	1.20	0.18	0.55 ^{*1)}
甲状腺長 (cm)	5.00	4.84	4.00	3.00	4.80	3.50	4.8
甲状腺幅 (cm)	6.62	5.29	5.87	4.12	5.83	4.86	6.6
甲状腺厚 (cm)	2.99	2.48	1.98	1.96	2.54	2.87	1.3
甲状腺体積 (cm ³)	19.2	16.3	9.5	5.5	19.1	16.0	17.1 ^{*2)}
備考	ICRP 成人男性 標準ボクセル ファントム	ICRP 成人女性 標準ボクセル ファントム	平均的日本人成 人男性ボクセル ファントム	平均的日本人成 人女性ボクセル ファントム	平均的日本人成 人男性精密ボク セルファントム	平均的日本人成 人女性精密ボク セルファントム	^{*1)} 非伸展位 ^{*2)} 甲状腺の平均密度を 1.04 g/cm ³ として換算

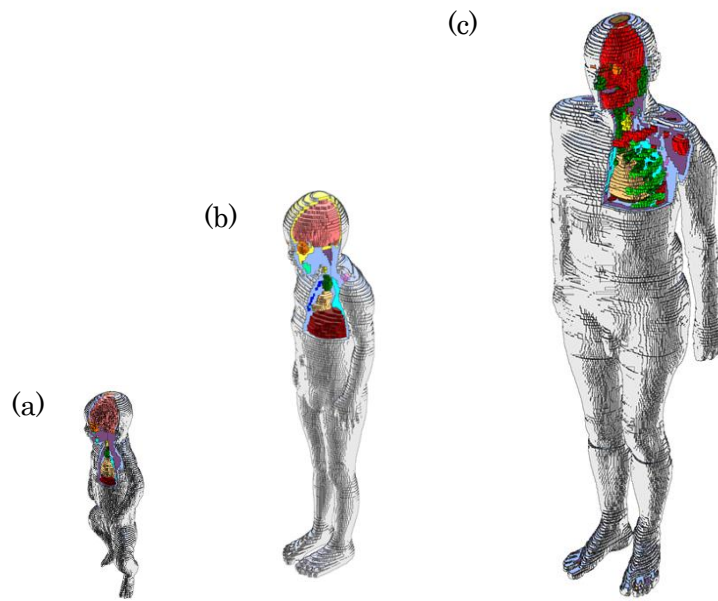


図 4-2-1 甲状腺モニタ校正に使用したボクセルファントム
(a) BABY、(b) CHILD、(c) ICRP AM



図 4-2-2 甲状腺モニタ校正に使用した簡易物理ファントム (上)
とファントムへの ^{133}Ba 点線源挿入の様子 (下)

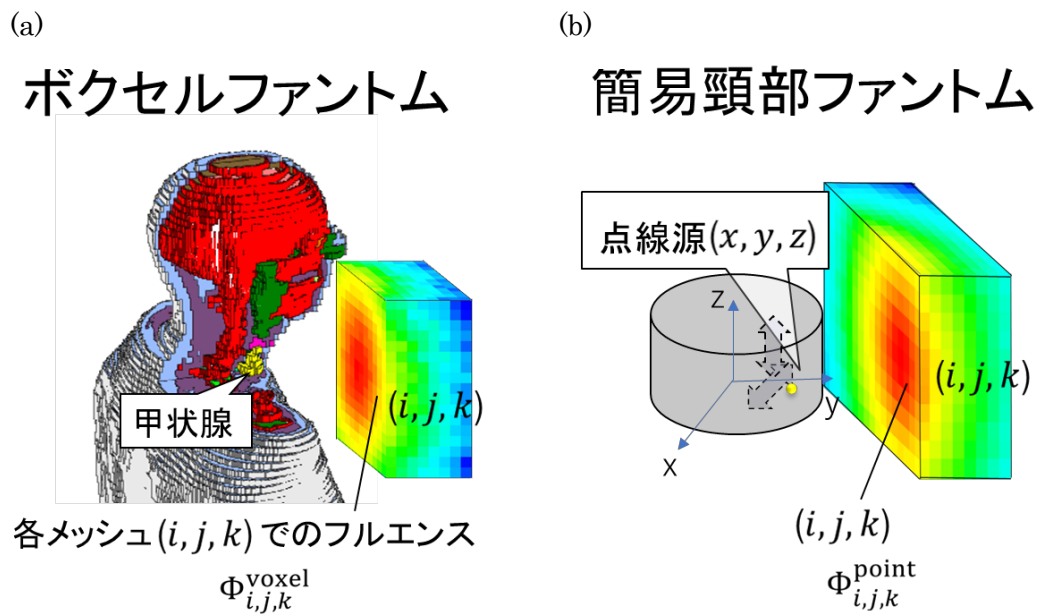


図 4-2-3 代表点を評価するための計算体系の例

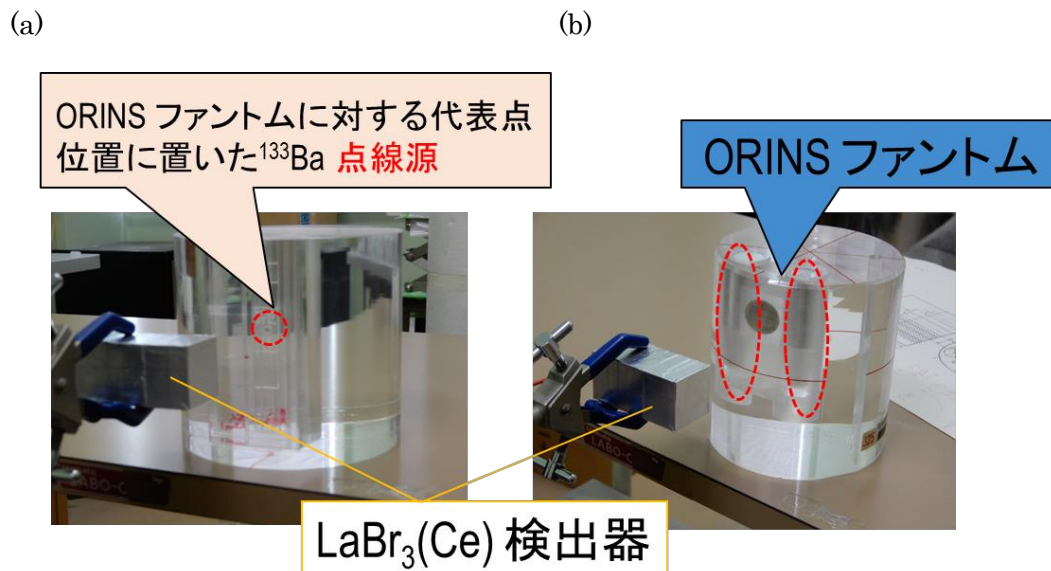


図 4-2-4 ORINS ファントムを用いた代表点法の妥当性検証実験の様子
 (a) ¹³³Ba 点線源 (代表点法)、(b) ORINS ファントム (直接測定)

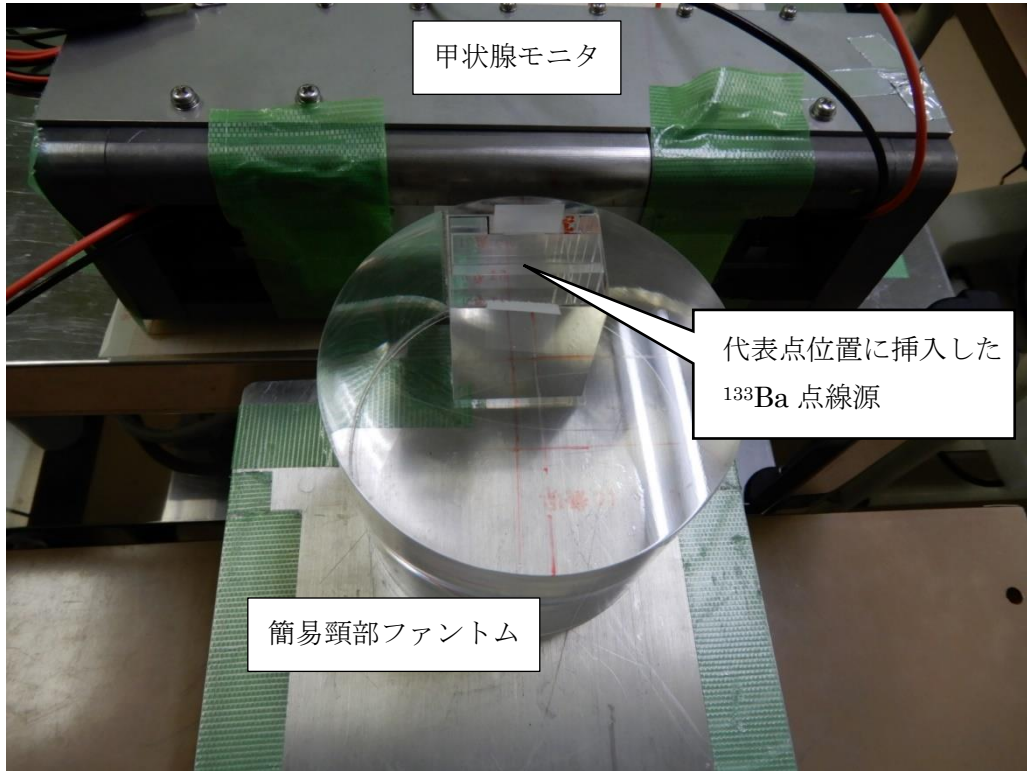


図4-2-5 代表点法による甲状腺モニタの校正の様子
(小児公衆用の甲状腺モニタ校正の例)

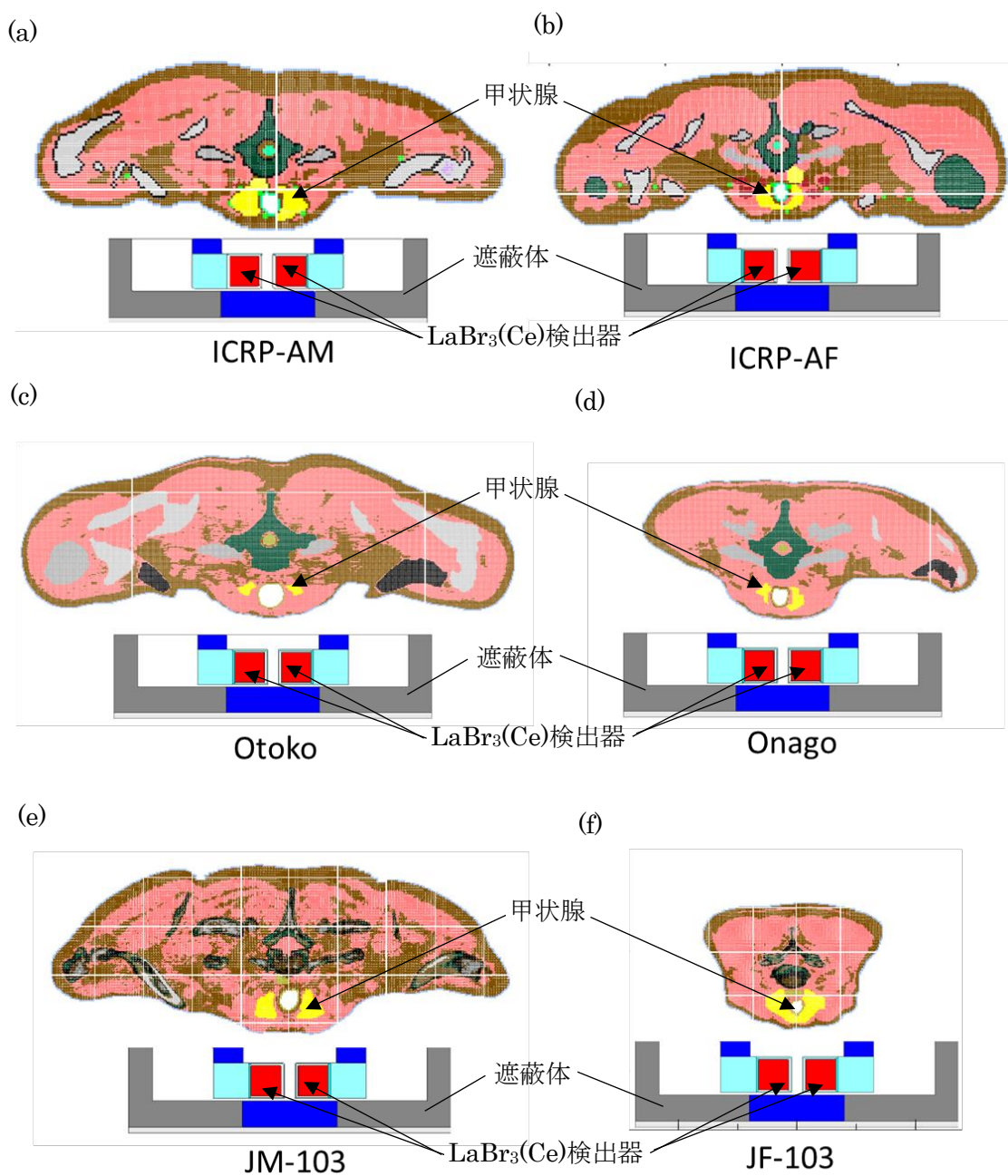


図4-2-6 異なるボクセルファントム間での計数効率評価に用いた計算体系

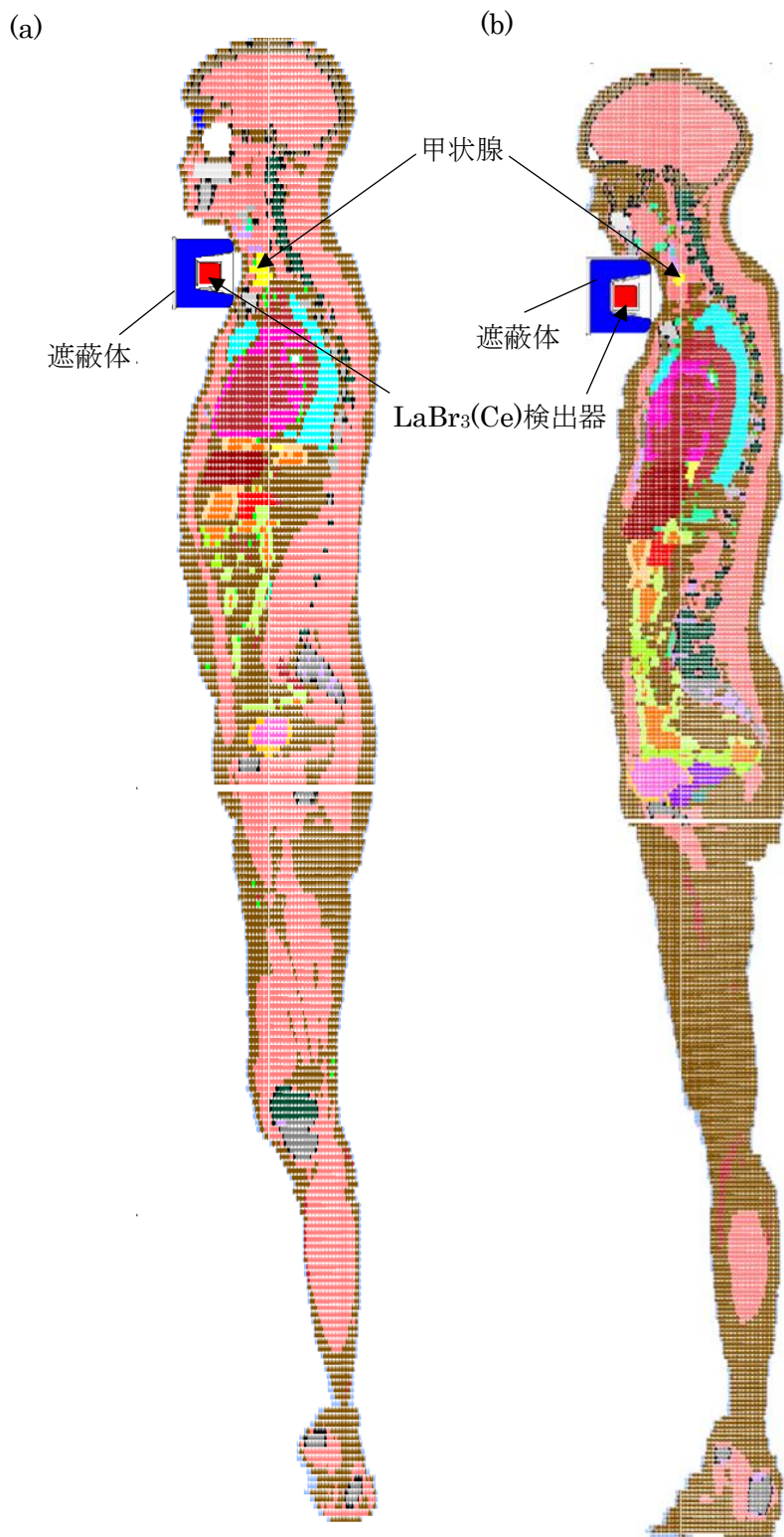


図4-2-7 計数効率評価に用いた計算体系（鉛直方向）
 (a) ICRP-AM と(b) ICRP-AF の例

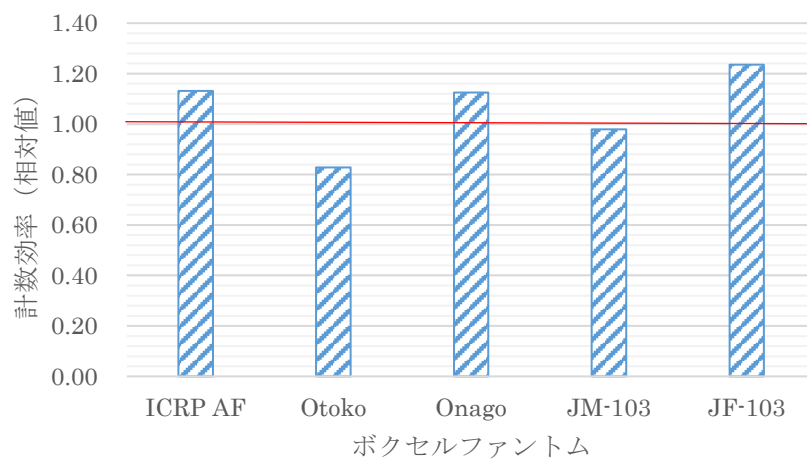


図 4-2-8 公衆用甲状腺モニタについて、異なるボクセルファントムでの計数効率 (ICRP AM の計数効率で規格化)

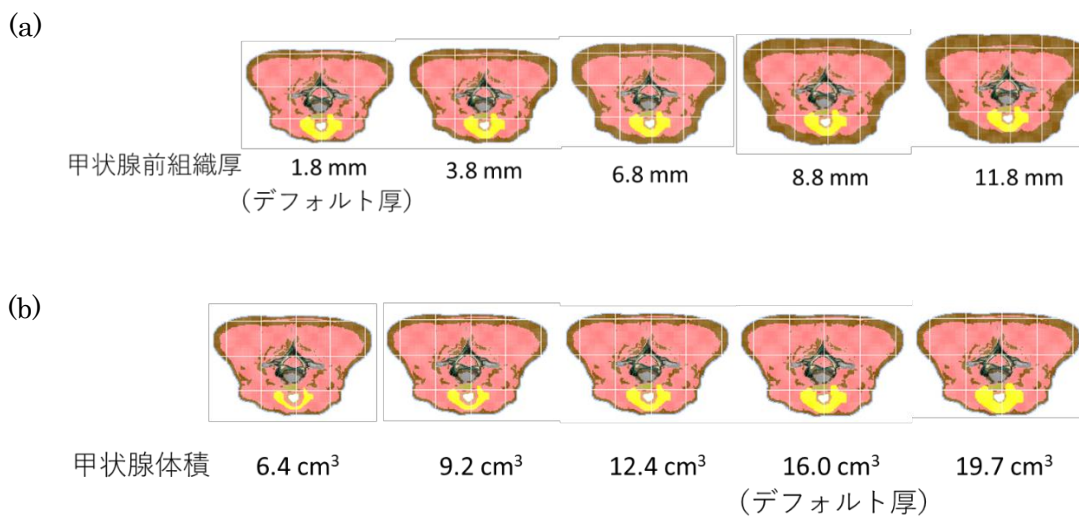


図 4-2-9 甲状腺前組織厚及び甲状腺体積を変化させた JF-103 ファントム

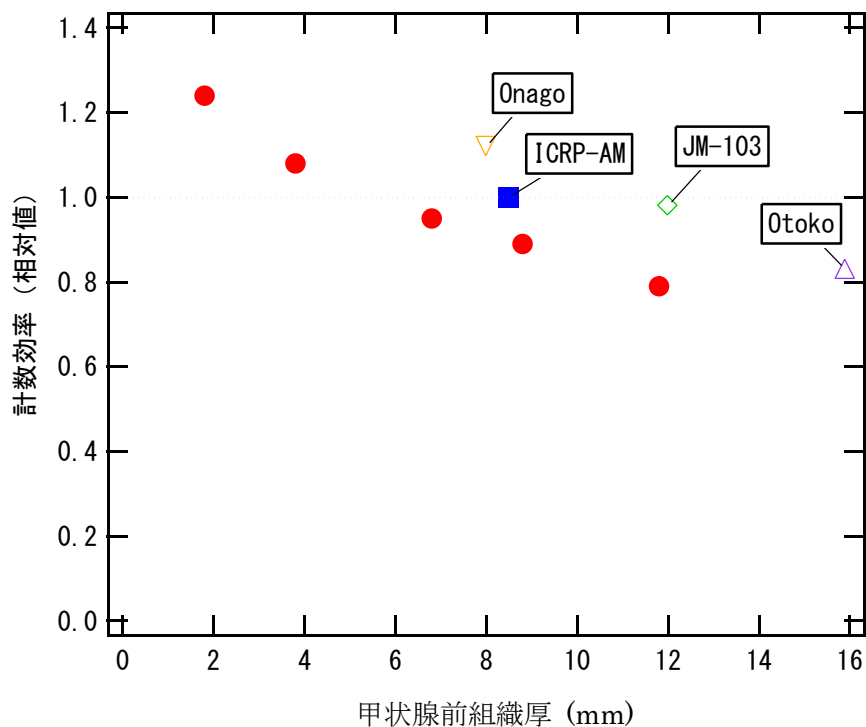


図4-2-10 JF-103ファントムの甲状腺前組織厚を変化させたときの計数効率の変化 (ICRP AM の計数効率で規格化。比較のため、他のボクセルファントムに対する計数効率 (図4-2-8) も同時に示した。)

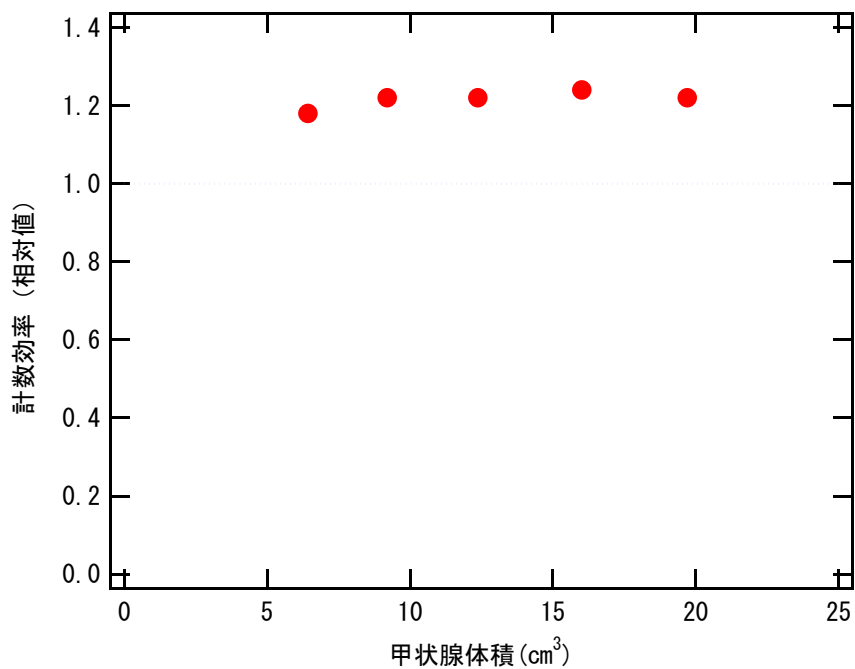


図4-2-11 JF-103ファントムの甲状腺体積を変化させたときの計数効率の変化 (ICRP AM の計数効率で規格化)

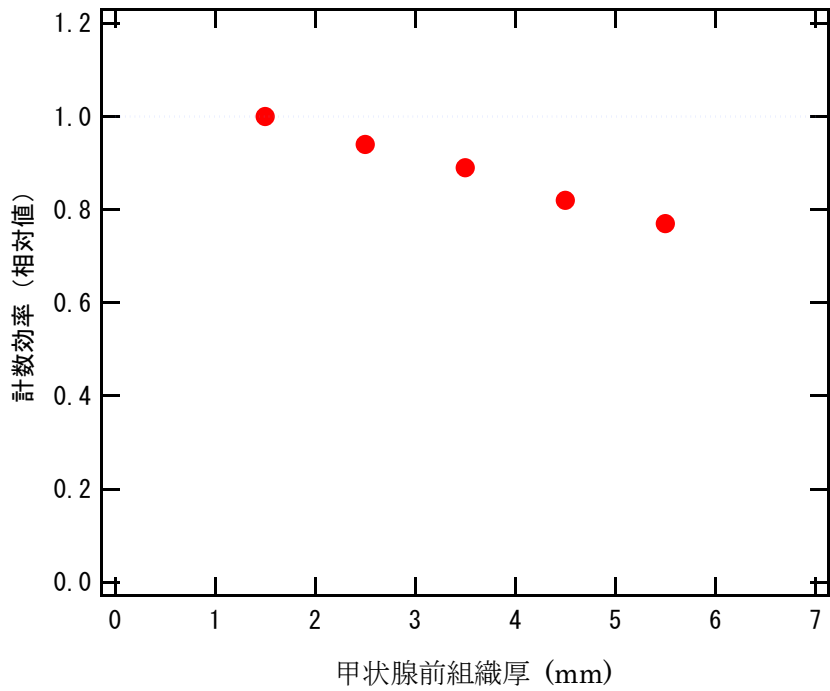


図 4-2-1 2 CHILD ファントムの甲状腺前組織厚を変化させたときの計数効率の変化 (元の CHILD ファントムの計数効率で規格化)

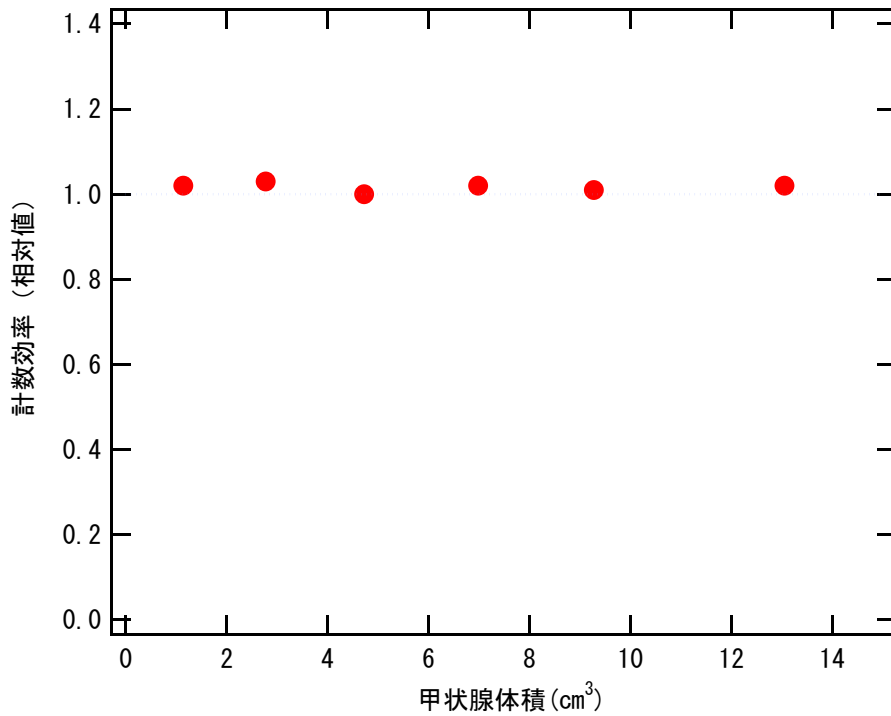


図 4-2-1 3 CHILD ファントムの甲状腺体積を変化させたときの計数効率の変化 (元の CHILD ファントムの計数効率で規格化)

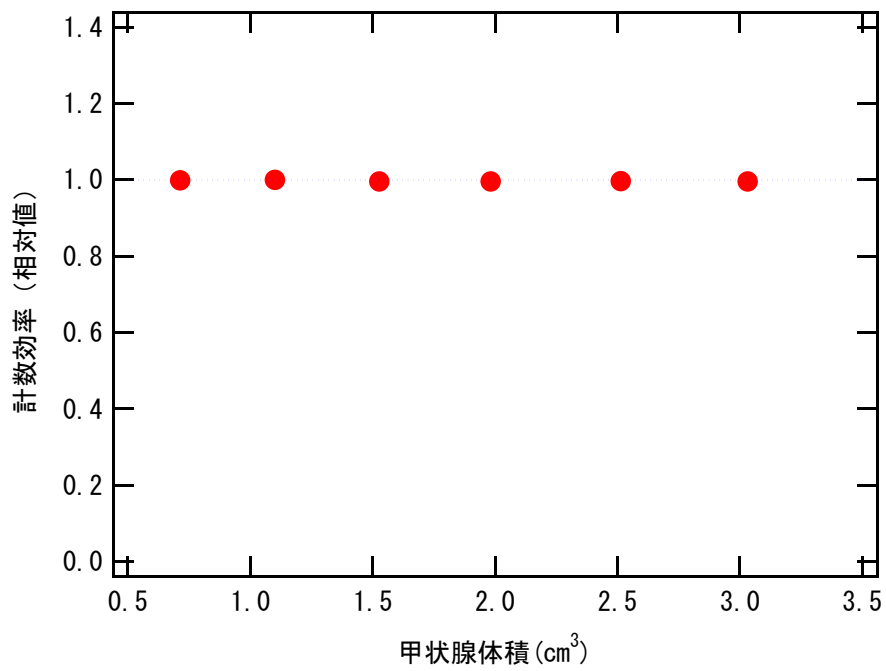


図 4-2-14 BABY ファントムの甲状腺体積を変化させたときの計数効率の変化 (元の BABY ファントムの計数効率で規格化)

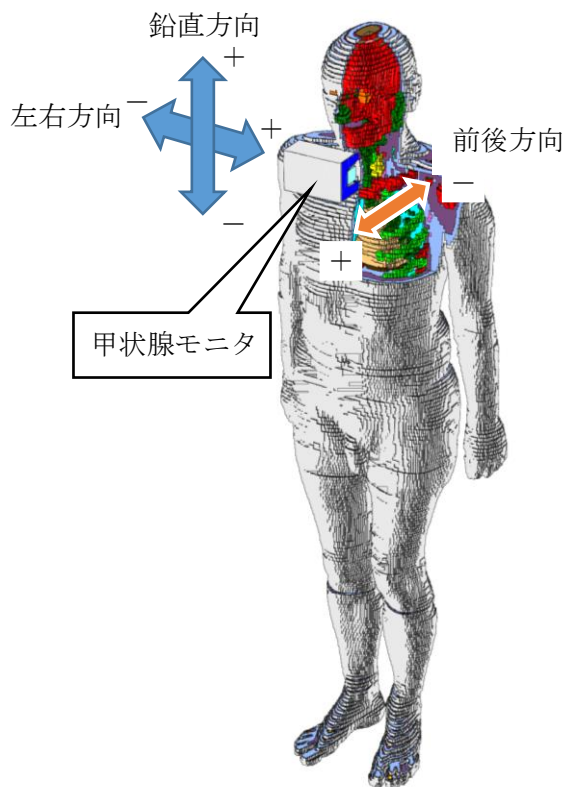


図 4-2-15 位置ずれの影響を調べるための計数効率評価の計算体系

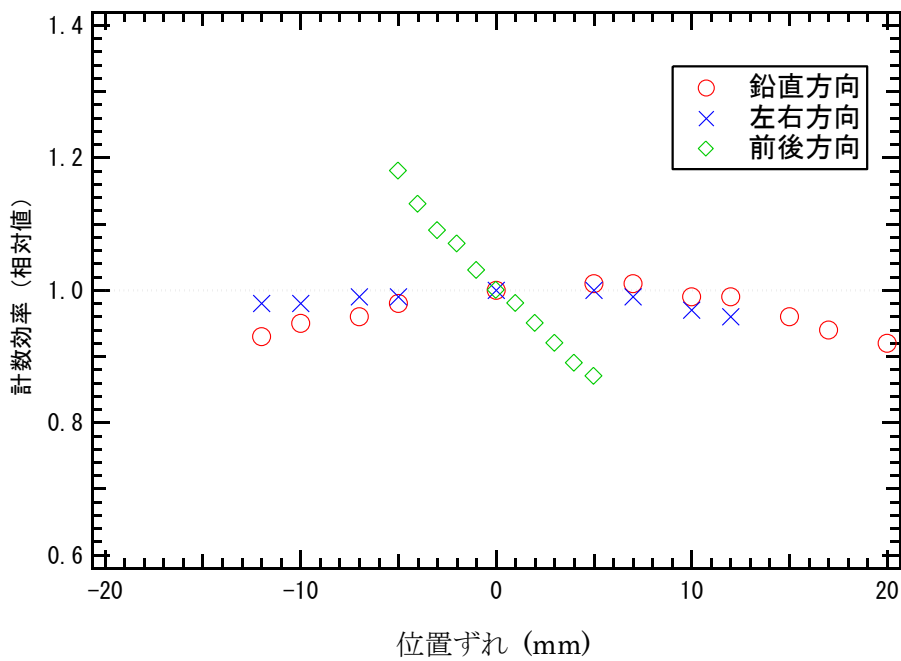


図 4-2-16 ICRP-AM に対する位置ずれによる計数効率の変化

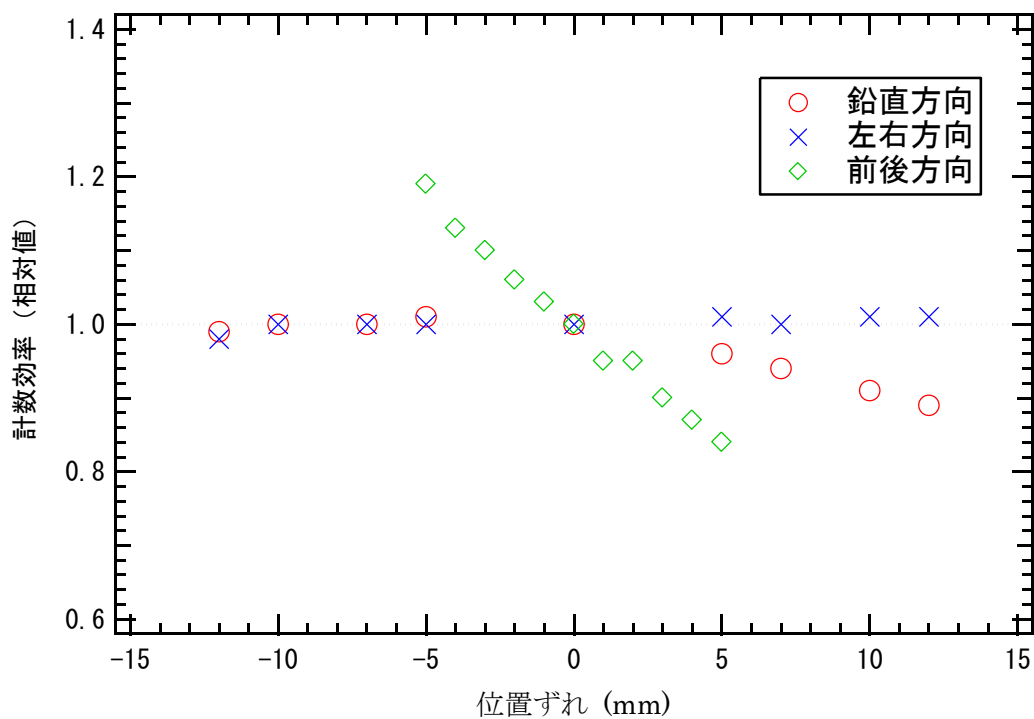


図 4-2-17 CHILD に対する位置ずれによる計数効率の変化

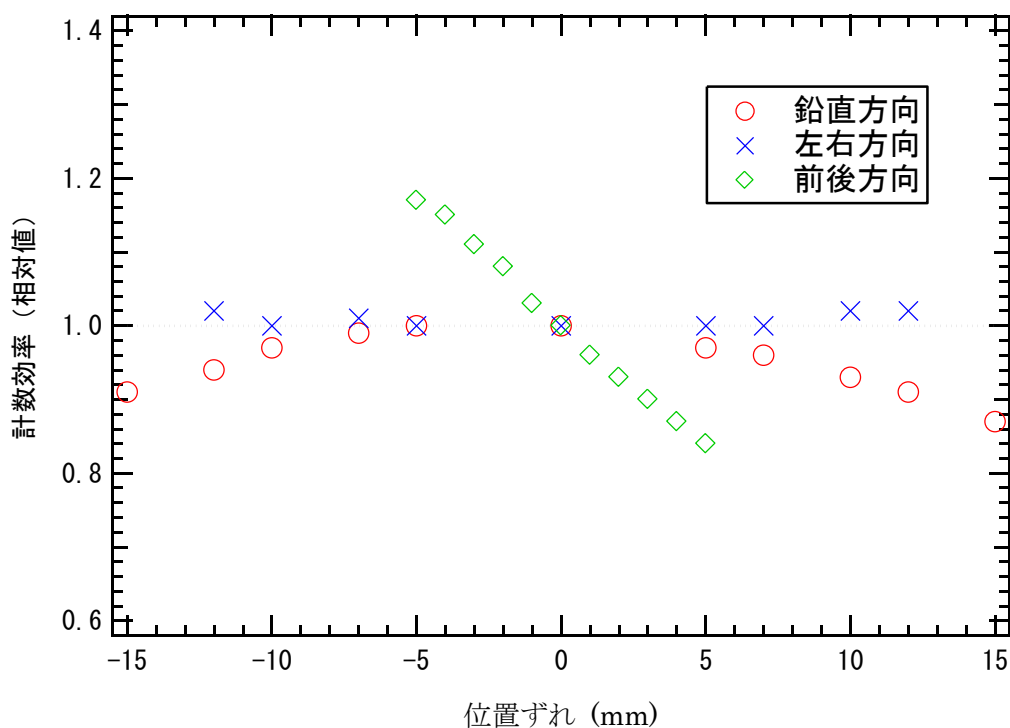


図 4-2-18 BABY に対する位置ずれによる計数効率の変化

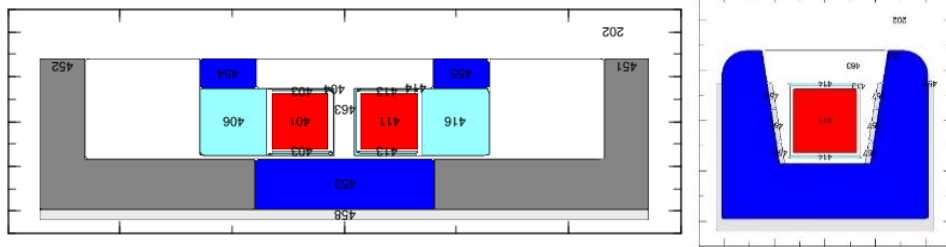
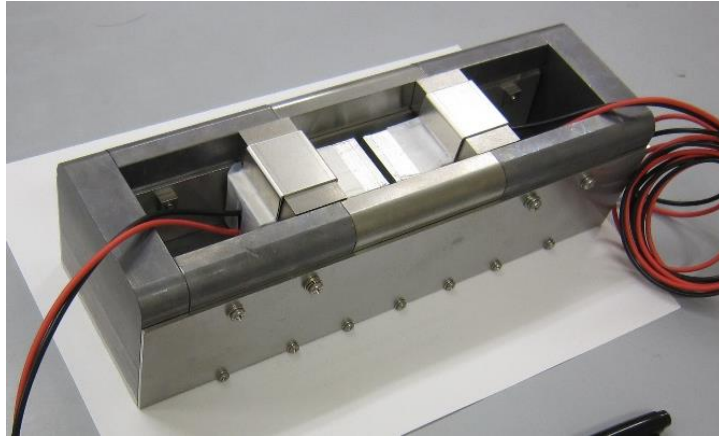


図 4 - 2 - 1 9 甲状腺モニタ測定器試作機の写真と計算体系

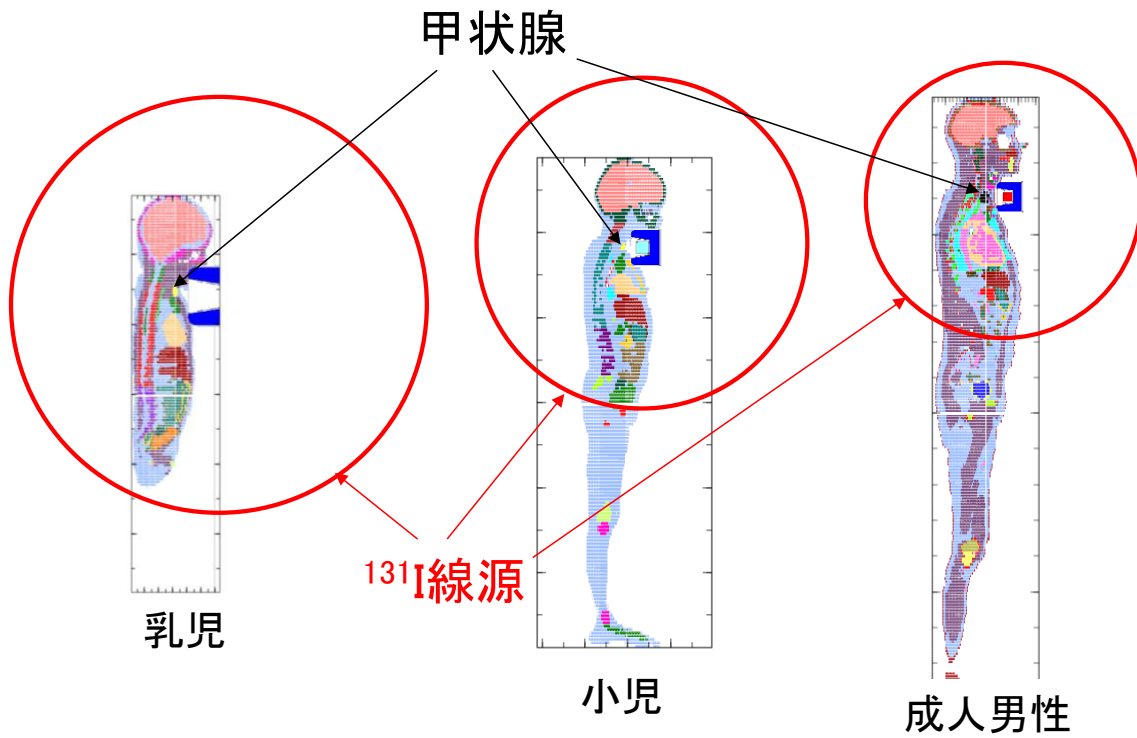


図 4 - 2 - 2 0 数値ファントムを用いた被検者頸部の遮蔽効果評価用計算体系

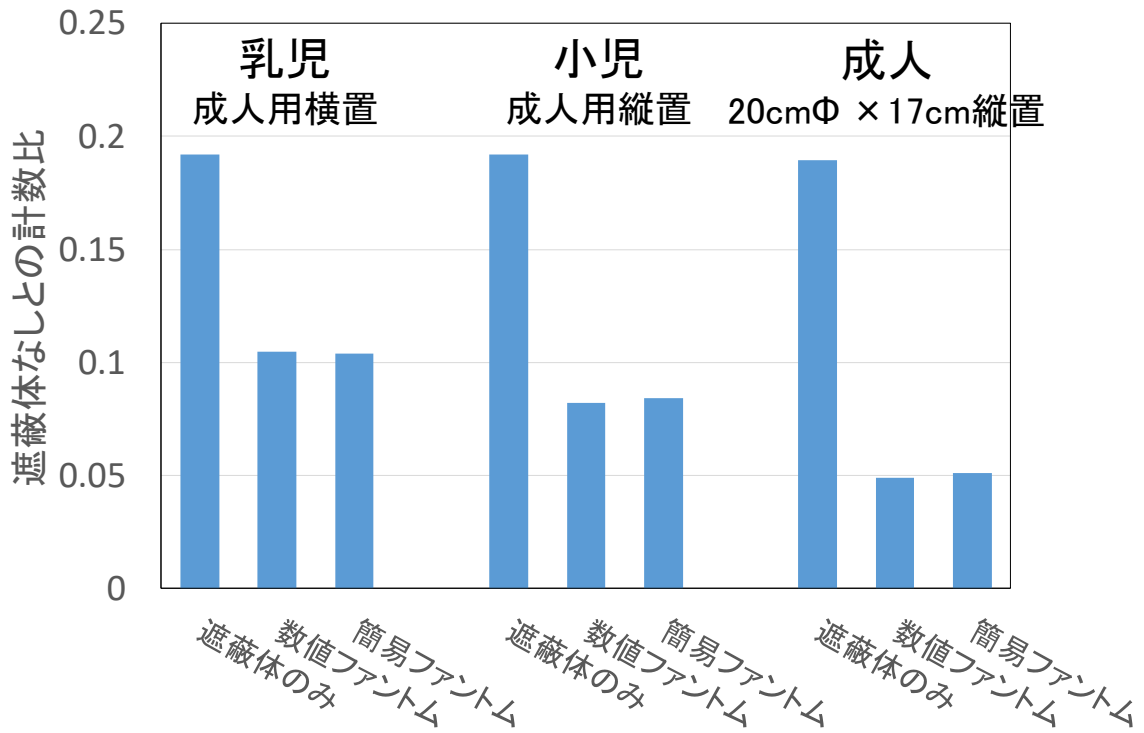


図4-2-2-1 遮蔽体がない場合に対する¹³¹Iの364keV光電ピーク計数の比

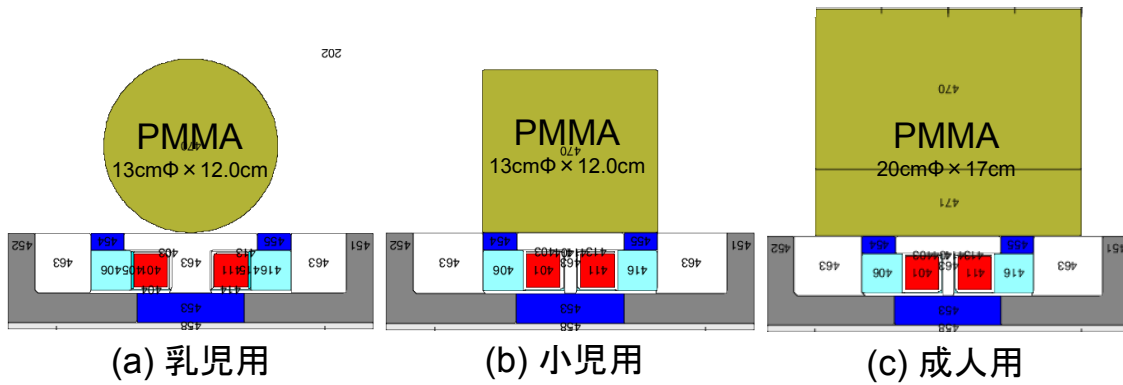


図4-2-2-2 円筒型PMMA製簡易頸部ファントムを用いたバックグラウンド放射線補正用データの測定方法

4. 3 甲状腺モニタシステムの開発

4. 3. 1 概要

甲状腺モニタシステムを用いて甲状腺等価線量を精度よく測定するためには、被検者の甲状腺と検出器用遮蔽体内部に配置された検出器の位置関係を正確に決定することが重要である。また、円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを用いたバックグラウンド放射線の影響補正に係る測定時にも、ファントムと検出器の位置関係を正確に決定できるようにしておく必要がある。そこで平成 30 年度には、甲状腺モニタシステムの開発として、検出器と被検者又は簡易頸部ファントムとの位置関係を固定するための固定用治具の概念設計を行った。

4. 3. 2 検出器固定用治具の概念設計

被検者と甲状腺モニタ測定器内の検出器との位置関係を正確に決めるための検出器固定用治具について、乳児、小児及び成人の年齢群別に概念設計を行った結果を図 4-3-1 から図 4-3-3 に示す。検出器固定用治具は図中の赤色で示しており、検出器用遮蔽体の上部に取り付けられる構造とした。平成 29 年度に最適化した検出器の配置では、2 個の検出器実効中心間の距離について、乳児及び小児に対しては 6cm に、成人に対しては 4cm と決定した⁶⁾。甲状腺モニタシステムを用いた測定時に、この検出器間距離を間違えて設定することがないように、各図の左側に示すように、検出器固定用治具の一部が検出器上部遮蔽体の両側を挟み込む設計とした。これにより、検出器と被検者の左右方向の位置関係が確実に固定されるのみならず、年齢群に応じた検出器固定用治具を選択することにより、適切な検出器間距離が設定されることになる。甲状腺は首の付け根にあるため、検出器固定用治具の上部側半分のみに、年齢群ごとの平均的な首の直径を考慮した円弧型のサポートを取り付けることにより、検出器に対する被検者の中心軸と上下方向の位置が決定できるようにした。検出器固定用治具は、被検者と直接接触するため、除染が容易であることに加えて、有害性がなく不快に感じにくい材質として樹脂の使用を検討している。

バックグラウンド放射線測定時に使用する、円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムと検出器の位置関係を固定する治具の概念設計の結果を図 4-3-4 に示す。当該治具についても、被検者用の治具と同様に、2 個の検出器間距離を適切に設定できるように、上部遮蔽体を両側から挟み込む構造とした。

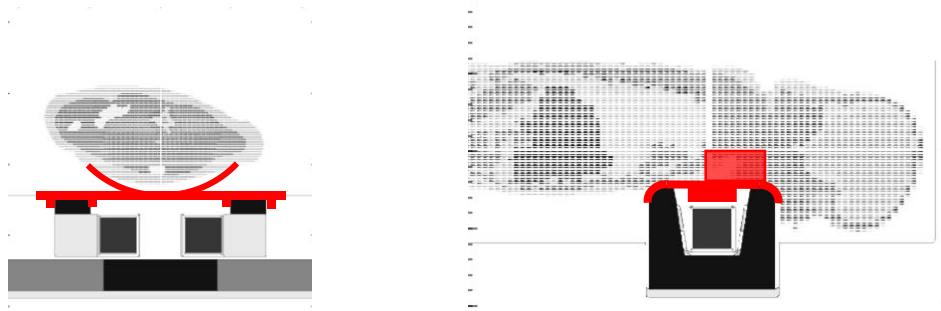


図4-3-1 乳児用検出器固定用治具の概念設計結果

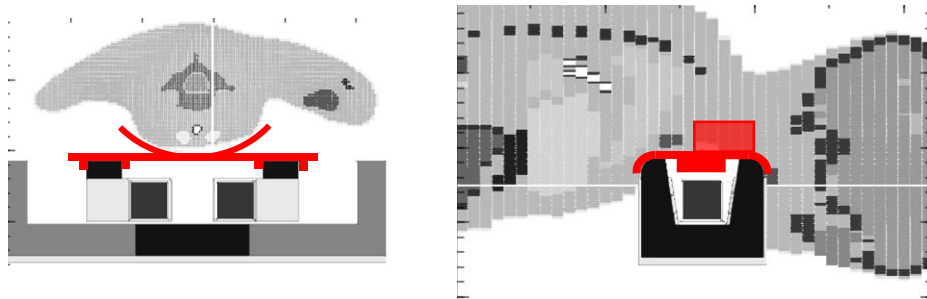


図4-3-2 小児用検出器固定用治具の概念設計結果

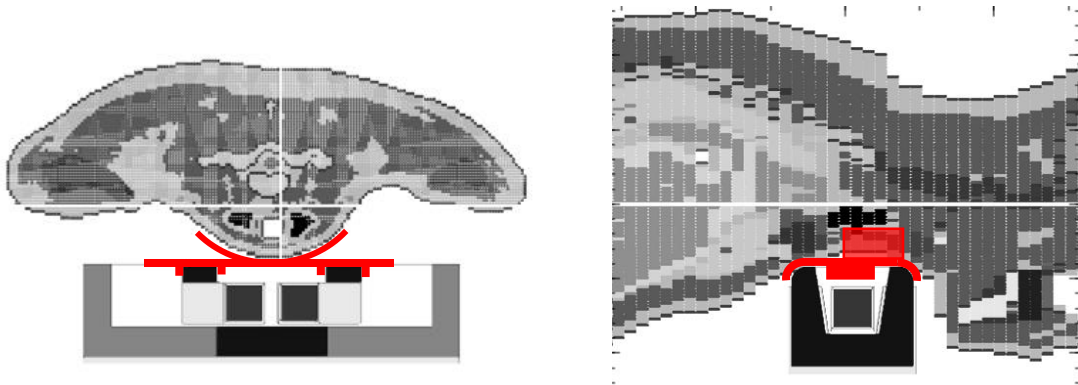


図4-3-3 成人用検出器固定用治具の概念設計結果

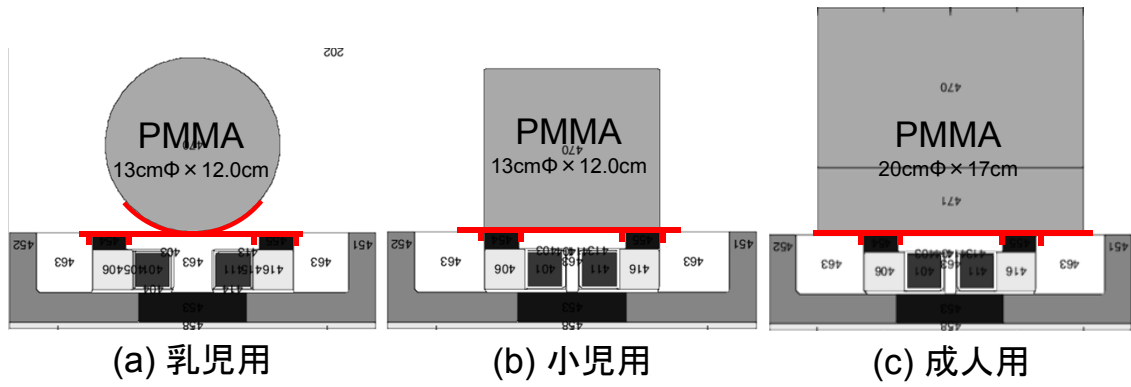


図 4-3-4 バックグラウンド測定用検出器固定用治具の概念設計結果

4. 4 まとめ

各避難所、指揮所等に設置できる、 γ 線エネルギー分析方式の可搬型甲状腺モニタ測定器を試作し、その特性を γ 線標準校正場において試験した。また、開発した甲状腺モニタ測定器使用時の放射性ヨウ素の放射能を精度よく定量する方法を開発した。さらに、被検者又はバックグラウンド放射線測定用ファントムと検出器の位置関係を正確に決定するための検出器固定用治具の概念設計を実施した。

甲状腺モニタ測定器については、平成 29 年度に最適化した材質及び厚さに基づいて設計した検出器用遮蔽体を試作し、同じく平成 29 年度に選定した検出器各 2 個と組み合わせることにより、甲状腺モニタ測定器を試作した。また、検出器を制御するとともに、測定された波高分布を解析して放射性ヨウ素を定量するためのソフトウェアを開発した。そして、製作した甲状腺モニタ測定器の試作機について、 γ 線標準校正場を用いた高線量率下における測定性能の試験を実施した。当該試験にあたっては、高バックグラウンド環境を模擬するために、電動回転テーブルを利用して遮蔽体を含めた試作機全体を連続的に回転させ、周辺から均一に照射した条件での照射を実施した。その結果、 $20 \mu\text{Sv/h}$ の高線量率下においても 150～300 秒の測定時間で 10mSv の甲状腺等価線量が評価可能であることが分かった。

平成 29 年度に製作した 3 種類の年齢別頸部ファントム内の ^{133}Ba 点線源を設置すべき代表点を、数値ファントムと試作した測定器の計算体系を用いて決定した。そして、試作した甲状腺モニタ測定器の計数効率を評価した結果、十分な検出効率を有することを確認した。また、甲状腺の大きさ、周辺組織の厚さ等の個人差について、様々な数値ファントムを修正することによりシミュレーション計算上で模擬し、これらの個人差が計数効率に与える影響を評価した。さらに、事故直後の周辺環境中に ^{131}I が存在し、甲状腺モニタ測定器を用いた甲状腺モニタリングに影響する場合のバックグラウンド放射線の影響補正法を開発した。

甲状腺等価線量の評価結果に影響を与える被検者と甲状腺モニタ測定器の検出器との位置関係を固定するための検出器固定用治具の概念設計を実施した。

これらの成果については、平成 30 年 5 月 20 日～23 日に 5th Asian and Oceanic IRPA Congress on Radiation Protection (AOCRP-5)において、平成 30 年 6 月 4 日～8 日に 5th European IRPA Congress において、平成 30 年 10 月 17 日～19 日に 4th Asian Radiation Dosimetry Group annual meeting (ARADOS-4) において、平成 31 年 3 月 21 日に日本原子力学会 2019 年春の年会において報告した（付録 1～付録 3 及び付録 5 参照）。

5. 平成 30 年度事業の実績

5. 1 事業の進捗報告

○放射線安全規制研究戦略的推進事業 第 1 回実務者会合

日時：平成 30 年 6 月 11 日 13:30～15:30

場所：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所

議題：本事業の進捗状況、意見交換等

○放射線安全規制研究戦略的推進事業 第 2 回実務者会合

日時：平成 30 年 10 月 2 日 13:00～15:30

場所：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所

議題：本事業の進捗状況、意見交換等

○放射線安全規制研究戦略的推進事業 第 3 回実務者会合

日時：平成 30 年 1 月 28 日 10:00～12:00

場所：国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所

議題：平成 30 年度研究成果報告会資料の確認、意見交換等

○毎月の進捗報告

報告日： 7 月 5 日、8 月 6 日、9 月 7 日、11 月 12 日、12 月 6 日、1 月 11 日 及び
3 月 13 日

方法：電子メールにて PO 及び PO 補佐に送付

○原子力規制委員会平成 30 年度研究成果報告会（放射線安全規制研究戦略的推進事業）

日時：平成 31 年 2 月 15 日 10:30～11:00

場所：原子力規制委員会

概要：本事業の概要、研究計画、平成 30 年度成果等について、研究評価委員に報告

備考：発表用資料：付録 4

5. 2 本事業で得られた成果の発表

○5th Asian and Oceanic IRPA Congress on Radiation Protection (AOCR-5)

日時：平成 30 年 5 月 20 日～23 日

場所：オーストラリア メルボルン

タイトル：“Characteristics of spectrometer and shield for portable thyroid dose monitoring system in high dose rate environment”

“A new method to evaluate radioiodine activity in thyroid by the spectroscopy measurements using a simplified phantom incorporated with simulation”

備考：予稿及びポスター発表資料：付録 1

○5th European IRPA Congress

日時：平成 30 年 6 月 4 日～8 日

場所：オランダ デン・ハーグ

タイトル：“Conceptual design of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers”

備考：予稿及びポスター発表資料：付録 2

○4th Asian Radiation Dosimetry Group annual meeting (ARADOS-4)

日時：平成 30 年 10 月 17 日～19 日

場所：韓国 ソウル

タイトル：“Conceptual design of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers”

備考：口頭発表資料：付録 3

○日本原子力学会 2019 年春の年会

日時：平成 31 年 3 月 21 日 16:55～17:10

場所：茨城大学 水戸キャンパス

タイトル：エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発 (4) 試作機の製作と特性試験

備考：予稿及び発表資料：付録 5

参考文献

- 1) 日本タングステン株式会社：高密度タングステン合金「ヘビーアロイ」
<https://www.nittan.co.jp/tech/gihou/vol35-1.html>.
- 2) 野口正安、富永洋：放射線応用計測 基礎から応用まで，日刊工業新聞社 (2004).
- 3) 原子力安全技術センター（編）：被ばく線量の測定・評価マニュアル，原子力安全技術センター(2000).
- 4) Palmer, H.E. *et. al.* *Standard field methods for determining ^{137}Cs and ^{131}I in-vivo*, Health Phys., **30**, 113-118 (1976).
- 5) Ishikawa, T. and Uchiyama, M. 異なるサイズのファントムを用いた ^{131}I 甲状腺負荷量測定装置の校正，保健物理, **32(1)**, 67-79 (1997).
- 6) 日本原子力研究開発機構 平成 29 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（事故等緊急時における内部被ばく線量迅速評価法の開発に関する研究）事業成果報告書
- 7) International Commission on Radiological Protection, *Adult Reference Computational Phantoms*, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39(2), (2009).
- 8) Henss N.P., Zanke M., Fill U. and Regulla D. *The GSF family of voxel phantoms*, Phys. Med. Biol, 47, 89-106 (2002).
- 9) Saegusa, J., Oishi, T., Kawasaki, K., Yoshizawa, M., Yoshida, M., Sawahata, T. and Honda, T. *Determination of gamma-ray efficiency curves for volume samples by the combination of Monte Carlo simulations and point source calibration*, J. Nucl. Sci. Technol., **37 (12)**, 1075- 1081 (2000)
- 10) Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Noda, S., Ogawa, T., Iwase, H., Nakashima, H., Fukahori, T., Okumura, K., Kai, T., Chiba, S., Furuta, T. and Sihver, L. *Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52*, J. Nucl. Sci. Technol. **50:9**, 913-923 (2013)
- 11) Suzuki, S., Midorikawa, S., Fukushima, T., Shimura, H., Ohira, T., Ohtsuru, A., Abe, M., Shibata, Y., Yamashita, S. and Suzuki, S. *Systematic determination of thyroid volume by ultrasound examination from infancy to adolescence in Japan: The Fukushima Health Management Survey*. Endocrine J. **62(3)**, 261-268 (2015)
- 12) 西澤邦秀. 放射性ヨウ素の安全管理に関する技術指針（その2）. 日本放射線安全管理学会誌 8(2) 149-186 (2009)
- 13) CaThyMARA report Technical guidelines for radioiodine in thyroid monitoring. (2017)
- 14) Saito, K., Wittmann, A., Koga, A., Ida, Y., Kamei, T., Funabiki, J. and Zankl, M. *Construction of a computed tomographic phantom for a Japanese male adult and dose calculation system*. Radiat. Environ. Biophys., **40**, 69-76 (2001)
- 15) Saito, K., Koga, S., Ida, Y., Kamei, T. and Funabiki, J. *Construction of a voxel phantom based*

- on CT data for a Japanese female adult and its use for calculation of organ doses from external electrons. Jpn. J. Health Phys.*, **43(2)**, 122-130 (2008)
- 16) Sato, K., Takahashi, F., Satoh, D. and Endo, A. *Development of adult Japanese voxel phantoms and their application to evaluation of radiation exposure doses. JAEA-DATA/Code 2010-009*
- 17) Sato, K., Takahashi, F., Satoh, D. and Endo, A. *Construction of average adult Japanese voxel phantoms for dose assessment. JAEA-DATA/Code 2011-013*
- 18) Yoshizawa, Y. and Kusama, T. 日本人の甲状腺に関する正常値について. 保健物理 **11** 123-128 (1976)
- 19) 日本原子力研究開発機構 簡易内部被ばく線量評価コード IDEC Ver.1.0 (2000)

Characteristics of Spectrometer and Shield for Portable Thyroid Dose Monitoring System in High Dose Rate Environment

Yoshihiko Tanimura¹, Sho Nishino¹, Hiroshi Yoshitomi¹, Masa Takahashi¹

¹ Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai, Ibaraki, 319-1195, Japan

A portable thyroid dose monitoring system consisting of spectrometers and a shield has been developed in order to assess the equivalent dose to the thyroid for workers and members of the public in a high dose rate environment at an early stage after a nuclear accident. The LaBr₃(Ce), SrI₂(Eu) scintillation and CdZnTe semiconductor detectors were selected as the spectrometers of the system in the view point of the energy resolution, sensitive volume, which affects the detection efficiency of the detector, and ease of handling such as non-cooling requirements. The material and thickness of the shield were optimized by the calculation and experiment. As the size of the shield is limited on upper and lower sides of the throat especially for small children, tungsten heavy alloy, whose large stopping power can achieve a downsize of the shield, was selected as a shielding material of these two sides. Lead was employed as the material for the other part. Their characteristics in a high dose rate environment were studied in the photon calibration fields at the Facility of Radiation Standards of the Japan Atomic Energy Agency. We confirmed that the spectrometers with the shield have enough high energy resolutions and efficiencies to assess the thyroid equivalent dose in a high dose rate environment. In this presentation, the performance test of the spectrometers and the shielding materials will be introduced.

Characteristics of Spectrometer and Shield for Portable Thyroid Dose Monitoring System in High Dose Rate Environment



Yoshihiko TANIMURA, Sho NISHINO, Hiroshi YOSHITOMI and Masa TAKAHASHI
 Nuclear Safety Research Centre, Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirakata, Tokai, Naka, IBARAKI 319-1195, Japan

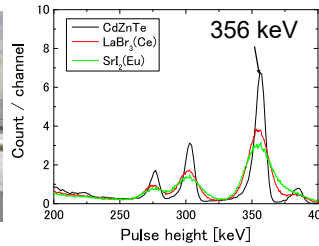
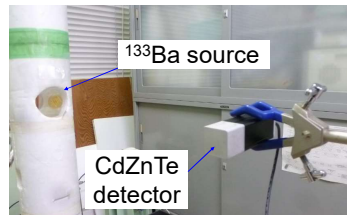
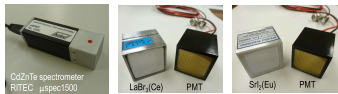
Abstract

A portable thyroid dose monitoring system consisting of a couple of spectrometers and a shield has been developed in order to assess the equivalent dose to the thyroid for workers and members of the public at an early stage after a nuclear accident. Characteristics of the spectrometer and shielding materials were evaluated using 356 keV photons from a ^{133}Ba source to mimic 364 keV photons from ^{131}I .

- Enough high energy resolution and detection efficiency are required. → The $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ and $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ scintillation and CdZnTe detectors were selected
- A shield is necessary in a high dose rate environment. → A shield consisting of tungsten heavy alloy and lead was designed.

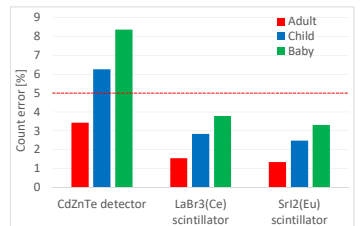
Characteristics of spectrometers

Energy resolution and responses of the spectrometers were evaluated using 356 keV photons from a ^{133}Ba source.



Requirement for the monitor

Measurement time: 150 s
 Assessable thyroid eq. dose: 10mSv
 Count error : <5 %



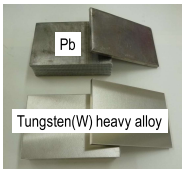
Count error (1σ) when a couple of the spectrometers detect photons from the ^{131}I correspond to 10 mSv thyroid equivalent dose. The measurement time is 150 s and distance from neck surface to center of the spectrometer is 2.5 cm.

Detector	CdZnTe	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	$\text{SrI}_2(\text{Eu})$
Dimensions	$1.5 \times 1.5 \times 0.75 \text{ cm}^3$	$2.54 \times 2.54 \times 2.54 \text{ cm}^3$	$2.54 \times 2.54 \times 2.54 \text{ cm}^3$
Effective volume	1.5 cm^3	16 cm^3	16 cm^3
Energy resolution @ 356 keV	2.8%	5.3%	5.5%
Response @356 keV	0.39 cm^2	1.9 cm^2	2.5 cm^2

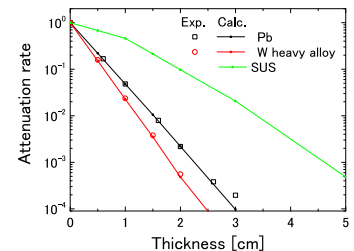
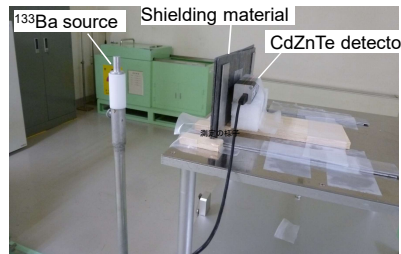
- **CdZnTe** Energy resolution: **quite high**, Detection efficiency: enough high to assess the dose **only for adult**
- **$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$** Energy resolution: **relatively high**, Detection efficiency: enough high to assess the dose for **all public members**

Characteristics of shielding materials

Attenuation rates of 356 keV photons was evaluated for a few shielding materials by the calculations using PHITS code and the experiments using a ^{133}Ba source.

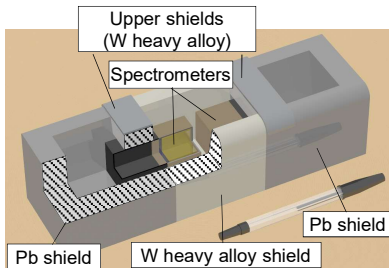


	Pb	W heavy alloy
Atomic number	82	~74
Density (g/cm^3)	11.34	17.74

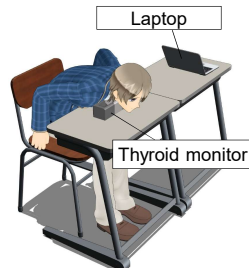


- Tungsten (W) heavy alloy can effectively shield photons
- Attenuation rate of 10^{-4} can be achieved by using **2.5-cm tungsten heavy alloy and 3 cm lead**.

Shield design



Schematic drawing of the designed monitor



Measurement setup of the thyroid monitor

- Using a couple of spectrometers
 - increase the detection efficiency and decrease the effect of misalignment
- Aperture size was determined to be 5 cm height
 - considering the typical thyroid height
- Shield size ($27 \text{ cm(L)} \times 8 \text{ cm(W)} \times 7 \text{ cm(H)}$) and total weight (about 16 kg) has been decreased by the combination of W heavy alloy and Pb shields.
 - easily set up on common desks

Summary

- Energy resolution and detection efficiency of the $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ and CdZnTe spectrometer were characterized by using a ^{133}Ba source.
- Though the CdZnTe is applicable to assess the dose only for adult, the $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ is applicable to assess the dose for all public members.
- Performance test of W heavy alloy and Pb shields were examined by experiments using a ^{133}Ba source and Monte Carlo calculations.
 - Optimum thickness: 2.5 cm for W heavy alloy and 3 cm for Pb
- Portable thyroid dose monitor consisting with a couple of spectrometers and a shield was designed.

Acknowledgements

This study was supported by Grant from the Nuclear Regulation Authority, Japan

A new method to evaluate radioiodine activity in thyroid by the gamma spectroscopy measurements using a simplified physical phantom incorporated with numerical simulations

Hiroshi YOSHITOMI¹, Sho NISHINO¹, Masa TAKAHASHI¹, Yoshihiko TANIMURA¹

¹ Japan Atomic Energy Agency

A new portable thyroid monitoring system equipped with gamma spectrometers has been developed in our project. To evaluate radioiodine activity in thyroid, it should be properly calibrated. The calibration of a thyroid monitor has been widely performed using a neck phantom with a thyroid shaped volume source. However, they cannot reflect the anatomical feature of the thyroid and its surroundings in detail, because their shape, dimension and location can be varied depending on the age and sex of the monitored subject. For the precise assessment of radioiodine activity in thyroid, the difference of the counting efficiency between the calibration and the measurements of the wide variety of the subjects should be corrected. However, it is not practical to manufacture various volume sources reflecting anatomical feature precisely.

To solve this problem, we have developed a novel method to evaluate radioiodine activity in thyroid precisely by the measurements using a simplified physical phantom in conjunction with numerical simulations. The primary photon fluences around the neck were firstly evaluated by Monte Carlo calculations using mathematical phantoms reflecting anatomical feature around the thyroid. Secondly, the combinations of an acrylic phantom with ¹³³Ba point sources were selected by calculations so as to provide the equivalent photon fluence varying the phantom size and the source location. By applying the corresponding physical phantom for the test of the thyroid monitor, the same counting efficiency as measured in the realistic situation was obtained.

A New method to evaluate radioiodine activity in thyroid by the spectroscopy measurements using a simplified phantom incorporated with simulation



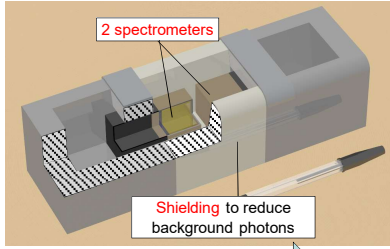
Hiroshi YOSHITOMI, Sho NISHINO, Masa TAKAHASHI and Yoshihiko TANIMURA

Department of Radiation Protection, Nuclear Science Research Institute, Japan Atomic Energy Agency, 2-4, Shirakata, Tokai, Naka, IBARAKI 319-1195, Japan

E-mail: yoshitomi.hiroshi@jaea.go.jp

Motivation

Proposed thyroid monitoring system



See Poster PP. 27

- Large sets of systems would be deployed for nuclear emergency.
- All systems must be properly calibrated in order to evaluate radioiodine activity in thyroid.

Conventional method for calibration

Neck phantom

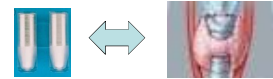


volume sources



Problems

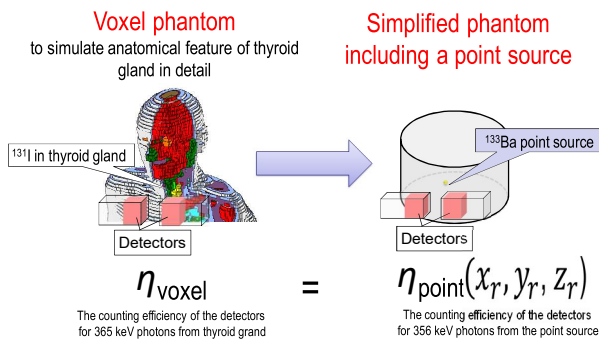
- Different size of volume sources corresponding to the age group would be required.
- Radioactive standard solutions are required for the preparation of volume sources in some cases.
- Geometrical differences between calibration and measurements of the monitored subjects



Simple and reliable calibration method is required

New method for calibration

Simplified phantom including a point source at a "representative position"

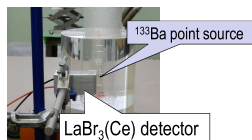


- Monte Carlo calculations were performed to find a "representative position" (x_r, y_r, z_r) of the point source so as to have the same fluence over the detector volume

Monte Carlo Code: PHITS 2.8.8 (EGS mode)
 Voxel phantom: GSF voxel phantom (BABYNEW, CHILD)
 ICRP reference phantom (Adult male, Adult female)

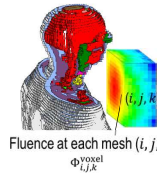
- Measurement using a simplified physical phantom including a point source at the "representative position"

Detector: 1 in³ LaBr₃(Ce)

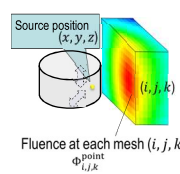


① Method to find a representative position

Voxel phantom



Simplified phantom



For all the positions of the point source (x, y, z) , following d were calculated over the detector volume V

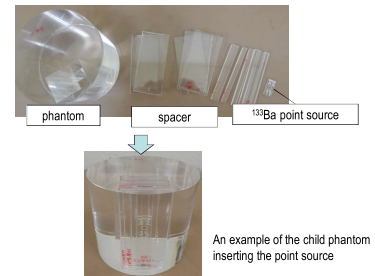
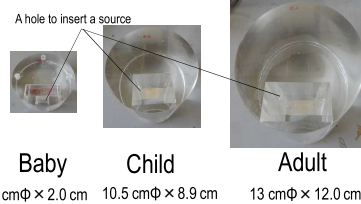
$$d = \sqrt{\sum_{i,j,k \in V} \left(\frac{\Phi_{i,j,k}^{\text{point}} - \Phi_{i,j,k}^{\text{voxel}}}{\Phi_{i,j,k}^{\text{voxel}}} \right)^2 \sum_{i,j,k \in V} \frac{1}{u_{i,j,k}^2}}$$

n : number of the mesh points inside the detector volume V
 $u_{i,j,k}$: uncertainty of the difference of the fluence at each point

d represents the difference between voxel model and simple phantom model.
 The representative position (x_r, y_r, z_r) is a point at which d is minimized.

② Simplified phantom

3 acrylic cylinder phantoms corresponding to the age group

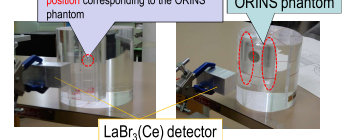


③ Validation

This method was applied to the calibration using the ORINS phantom including a volume source which has been widely used for the calibration of a thyroid monitor.

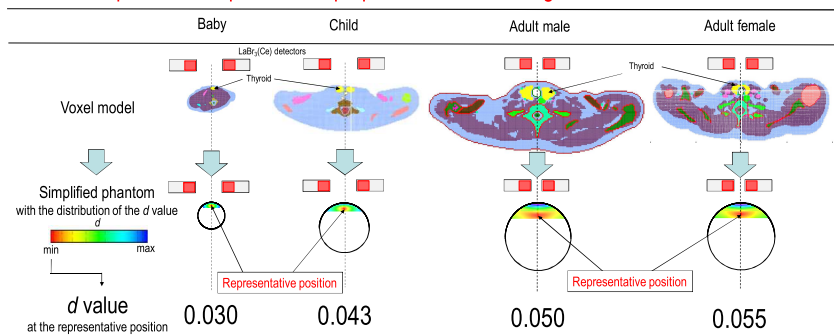
Counting efficiencies for LaBr ₃ (Ce) detectors	$(k=1)$	
	Representative point method	Direct measurement using the ORINS phantom
Counting efficiency (cpm/photons/s)	0.18 ± 0.01	0.19 ± 0.04

The two values are comparable within uncertainty (8% difference)



Results

The representative positions of proposed detector arrangement for each voxel model



Summary

- A novel calibration method for the thyroid monitor was proposed.
- Only an acrylic phantom including a sealed point source is sufficient for the calibration regardless of the age group.
- This method enables the calibration based on the voxel model which mimics the measurements of the monitored subjects.
- Large sets of proposed monitoring system could be easily but precisely calibrated using this method.

Acknowledgements

This study was supported by Grant from the Nuclear Regulation Authority, Japan

Conceptual Design of Thyroid Dose Monitoring System using Gamma-ray Spectrometers

Sho Nishino¹, Hiroshi Yoshitomi¹, Yoshihiko Tanimura¹, Masa Takahashi¹

¹ Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

Abstract (less than 400 words)

In the situation of a severe nuclear accident, a large amount of radionuclides could be released into the environment, and cause internal exposure of residents and workers. In order to estimate thyroid equivalent dose that largely contributes to the total internal dose, individual monitoring based on the radioiodine measurement in thyroid gland should be started immediately after the accident because half-lives of radioiodines are short (8.02 days for ¹³¹I). In-vivo measurement method using thyroid dose monitor is generally used for determination of radioiodine activity in thyroid. However, the most of currently-used thyroid monitors includes large radiation shields and is not supposed to be used at evacuation centers or emergency command posts in the radiologically affected area. Consequently, early measurements for a lot of people are significantly difficult.

Here, we propose conceptual design of the portable thyroid dose monitoring system that satisfies the following requirements; (1) a few mSv in thyroid equivalent dose is measurable under a highly-dosed environment around several 10 μSv/h. (2) portable enough to install into the each evacuation center and command post in the affected area. (3) easy to measure even for small children or people who need special care. The portable thyroid monitor consists of two gamma-ray spectrometers embedded into well-type radiation shields. The distance between two detectors is variable to fit physical size of the thyroid which depends on subject's age. The radiation shield consists of lead(Pb) and partially tungsten(W), and has an aperture only for upward. The adoption of tungsten allows to downsize the monitor so as to be applicable to small child's throat. The subject sitting on a chair puts their throat on the thyroid monitor from upside, and the radioactivity in thyroid is measured based on spectral analysis of gamma-ray energy.

The performance tests of CdZnTe detector (1500 mm³), LaBr₃:Ce and SrI₂:Eu scintillation detectors (1 inch³), which are candidates of spectrometer, were performed in the photon reference field at the Facility of Radiation Standards of the Japan Atomic Energy Agency. We confirmed that detectors show high energy resolution in the room temperature, and have enough detection capability even in the high-dose-rate field, by using an appropriate radiation shield. In this presentation, we introduce the detailed design of the monitor and give discussion on applicability of each detector to the thyroid dose monitor.

Thyroid Dose Monitor

Thyroid dose monitoring for a large number of people should be performed immediately after severe nuclear accident.

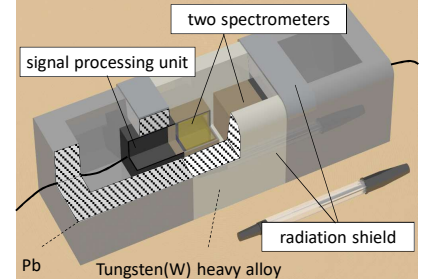
Conventional monitors

- fixed at laboratory
- large radiation shields

Proposed monitor

- portable and can be installed easily to evacuation centers and incident command post
- available under a high dose rate condition
- reliable estimation based on spectral information

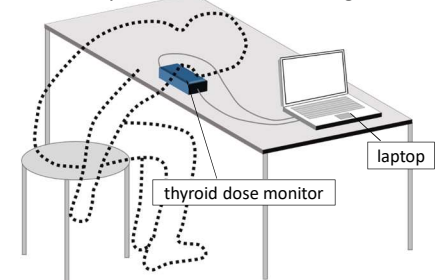
Schematic drawing of the thyroid monitor



Requirement for proposed thyroid monitor

	Requirement	Notes
Minimum assessable thyroid dose	< 10 mSv	when measured 3-5 days after intake
Acceptable background dose rate	several tenth $\mu\text{Sv/h}$	evacuation centers, command posts in the radiologically affected area.
Measurement time	< 5 minutes / subject	>150 subjects / day/1system
Power supply	supplied via USB cable	operational with connecting to a laptop PC or a mobile battery

Iodine-in-thyroid measurement using the monitor



Experiments & Results

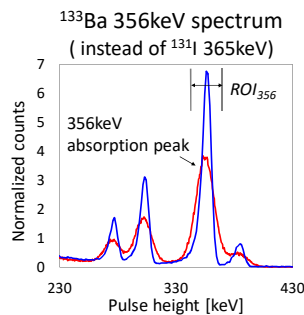
Spectrometers to be tested

CdZnTe: 1.5cm³ LaBr₃(Ce): 16cm³

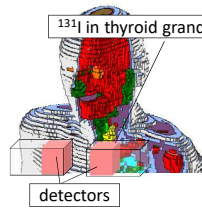


$\Delta E/E$ 2.8%
sensitivity 0.39 cm²

5.3%
1.9 cm²



Evaluation of counting efficiency



Fluence rate [$\text{s}^{-1}\text{cm}^{-2}/\text{Bq}$] at detector position is obtained by Monte-Carlo calculation.

※ Detector arrangement is optimized so as to minimize an influence of uncertainty due to positional displacement divided by detector sensitivity [cm^2] given in experiment (see left).

⇒ ϵ_* : counting efficiency [s^{-1}/Bq]

Minimum Assessable thyroid equivalent dose; $H_{thy,min}$

$$H_{thy,min} = \frac{k}{t\epsilon_*} (k + 2\sqrt{2n_0}) \cdot \frac{CF_{thy}}{F}$$

k : (=1.65) gives 95% confidence level
 t : measurement time [s]
 ϵ_* : counting efficiency [s^{-1}/Bq]
 n_0 : BG counts within ROI₃₅₆
 CF_{thy} : thyroid dose conversion factor [mSv/Bq]
 F : retention fraction at the date of measurement

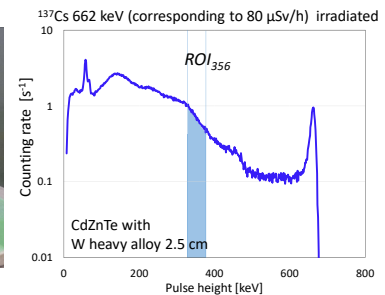
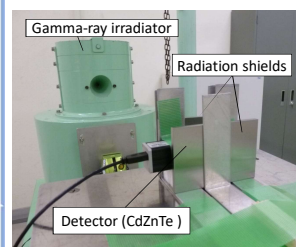
Rough estimation of BG counts

n_0 : number of continuous-BG counts within evaluation area of 356 keV (ROI₃₅₆).

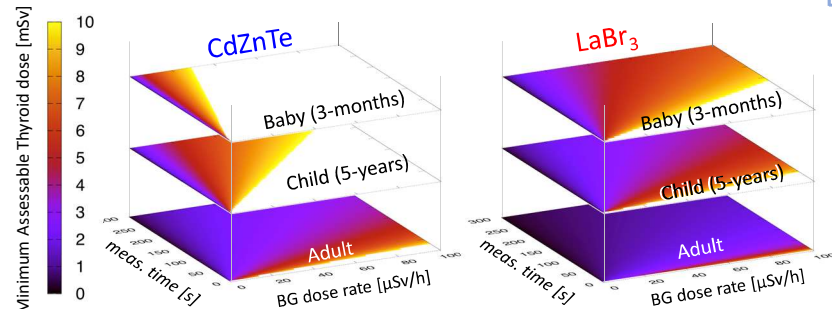
The gamma-ray reference field (¹³⁷Cs) in FRS/JAEA was used to simulate a high dose rate condition.

n_0 given with the detector shielded by W heavy alloy 2.5 cm³ ※ was examined.

(※ optimized so as to be; thyroid ¹³¹I 365keV rate >> BG ¹³¹I 365keV rate)



$H_{thy,min}$ as a function of measurement time [s] and BG dose rate [mSv/h]



Summary

Performance requirements can be satisfied by using CdZnTe or LaBr₃ detectors with W heavy alloy shield.

• For adult-radiation workers at a incident command post :
High BG dose rate, small-number of subjects, various kinds of radionuclides



CdZnTe
(higher energy resolution)

• For members of public at evacuation centers :
Low BG dose rate, large-number of subjects, necessity of short-time measurement



LaBr₃
(higher counting efficiency)

Conceptual Design of a Portable Thyroid Dose Monitoring System Using Gamma-ray Spectrometers



Japan Atomic Energy Agency

Y. Tanimura, S. Nishino, H. Yoshitomi
and M. Takahashi

Background



Internal dose assessment in the nuclear accident at Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant(FDNPP)

Nuclide	Evaluand	Method	Feature and problems
Radio-Cs	Many public and workers	WBC	-Relatively rapid and accurate measurement is available
Radio-Iodine	Limited public and worker	-Dosemeter -WBC -Guess from I/Cs ratio, Airborne Iodine conc. etc.	-Rapid measurement is required due to short half live of radio-Iodine -measurement using dosimeter has many difficulty under high dose rate environment

Rapid internal dosimetry procedure for Iodine is required

➡ We started to develop the portable thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers from Aug 2017 to Mar 2020 as the Radiation Safety Research Program of Nuclear Regulation Authority in Japan.



Objectives

A portable thyroid dose monitoring system using photon spectrometers has been developed for the rapid and accurate assessment of the thyroid dose for workers and public at an early stage after a nuclear accident. The system has been designed in consideration of using in evacuation centers or incident command posts.

Following subjects have been studied

(1) Development of the thyroid monitor

Selecting suitable spectrometers and designing photon shields in consideration of high dose rate environment

(2) Development of calibration method

Developing the calibration method to determine the Iodine activity using a simplified phantom and voxel phantoms

2



Performance target of the system

Subject	Target	Remarks
B.G. dose rate (Upper limit)	A few tens of $\mu\text{Sv/h}$	
Measurement time	Within 5 min./body	
Assessable number	More than 150 body/day	Using one system
Lower limit of assessment	10 mSv (Thyroid)	Measurement on 3 to 5 days after inhalation
Power supply	Operation available for a few hours using a Laptop PC without AC power	

3



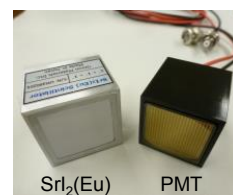
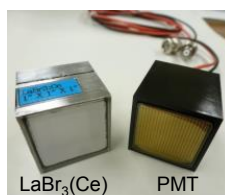
(1) Development of the thyroid monitor

4

Characteristics of spectrometers



	Semiconductor		Scintillator	
	CdZnTe	LaBr ₃ (Ce)	SrI ₂ (Eu)	
Atomic Number	48/30/52	57/35	38/53	
Dimensions	1.5 × 1.5 × 0.75 cm ³	2.54 × 2.54 × 2.54 cm ³	2.54 × 2.54 × 2.54 cm ³	
Effective volume	1.5 cm ³	16cm ³	16 cm ³	



Energy resolution and responses of the spectrometers were evaluated using 356 keV photons from a ¹³³Ba source.

5



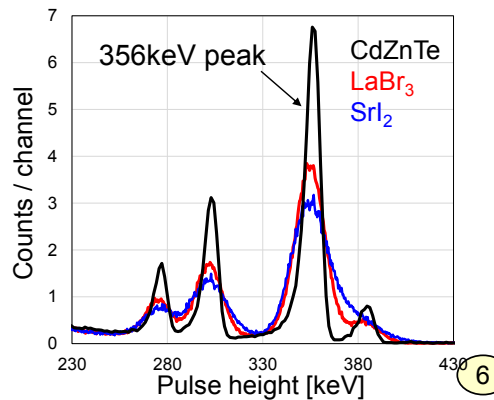
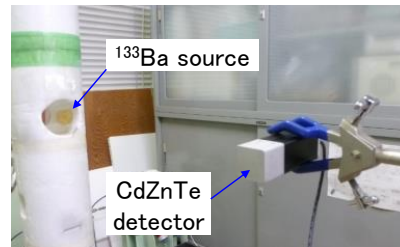
Energy resolution and sensitivity

Following characteristics were evaluated using 356 keV photons from a ¹³³Ba source (which mimic the 365 keV photons from ¹³¹I)

- Energy resolution $\Delta E/E$ (FWHM)
- Photon sensitivity R

	$\Delta E/E$	R
CdZnTe	2.8 %	0.39 cm ²
LaBr ₃	5.3 %	1.9 cm ²
SrI ₂	5.5 %	2.5 cm ²

Energy resolution $\Delta E/E$
 CdZnTe: quite high
 LaBr₃: relatively high



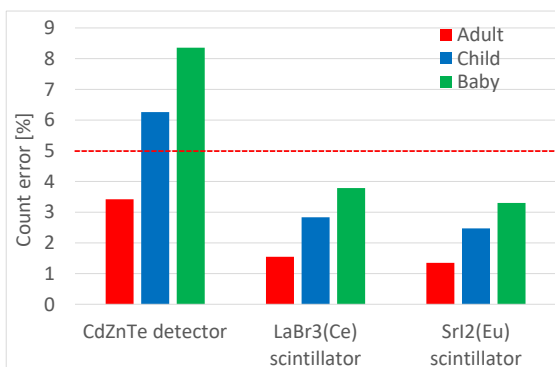
6



Selection of the spectrometer

Requirement for the monitor

- Measurement time : 150s (5 min. including exchange time)
- Assessable thyroid eq. dose : 10mSv
- Count error : <5%



CdZnTe spectrometer

Enough high sensitivity to assess the dose only for adult

◆ Applicable to workers

LaBr3(Ce) spectrometer

Enough high sensitivity to assess the dose for not only adult but also child and baby

Energy resolution: higher than SrI(Eu) spectrometer

◆ Applicable to public members

Count error (1 σ) when a couple of the spectrometers detect photons from the ¹³¹I correspond to 10 mSv thyroid eq. dose.

Meas. time: 150s, spectrometer center : 2.5 cm from neck surface

7

Characteristics of shielding materials

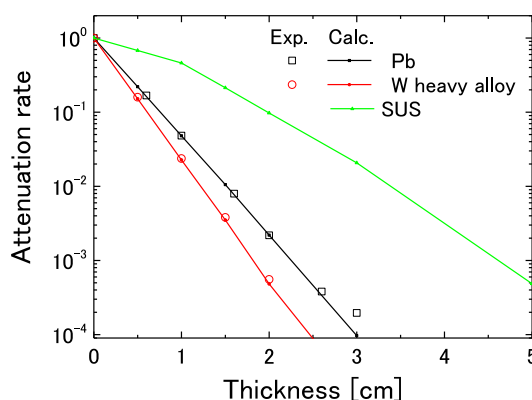
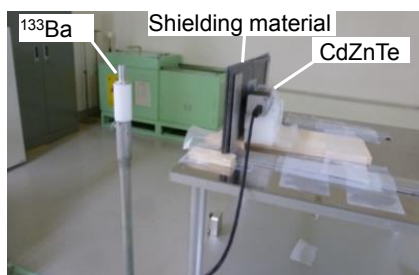


	Lead	W heavy alloy
Atomic number	82	~74
Density	11.34 g/cm ³	17.74 g/cm ³



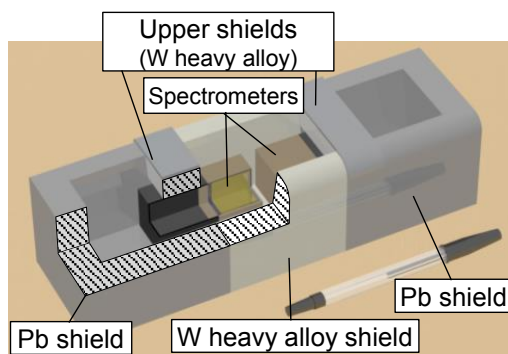
Attenuation rates of 356 keV photons were evaluated for the shielding materials by the calculations using PHITS code and the experiments using a ¹³³Ba source.

Characteristics of shielding materials

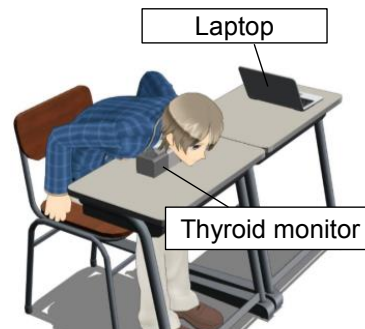


Tungsten (W) heavy alloy can effectively shield photons
 Attenuation rate of 10⁻⁴ can be achieved by using **2.5-cm tungsten heavy alloy and 3 cm lead.**

Designed thyroid monitor



Schematic drawing of the designed monitor



Measurement setup of the thyroid monitor

Using a couple of spectrometers
➔ increase the detection efficiency and decrease the effect of misalignment
Aperture size was determined to be 5 cm height
➔ considering the typical thyroid height
Shield size (27 cm(L) × 8 cm(W) × 7 cm(H)) and total weight (about 16 kg)
has been decreased by the combination of W heavy alloy and Pb shields.
➔ easily set up on common desks

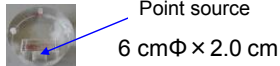
(2) Development of calibration method



Simplified neck phantom

Three age groups

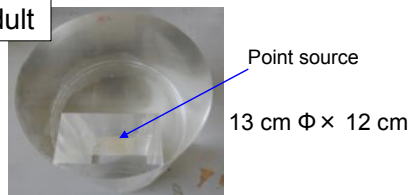
Baby



Child

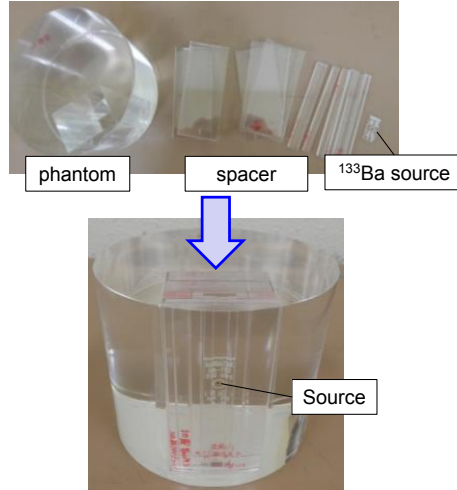


Adult



Acrylic cylinder phantoms with a point source

Phantom and source



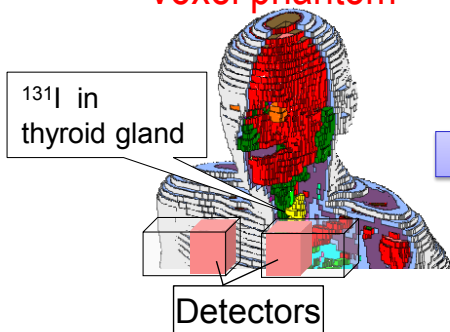
The source position is variable

12

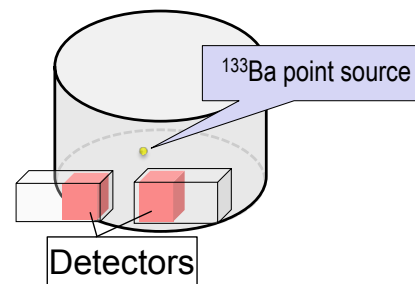


New method for calibration using a point source

Voxel phantom



Simplified phantom



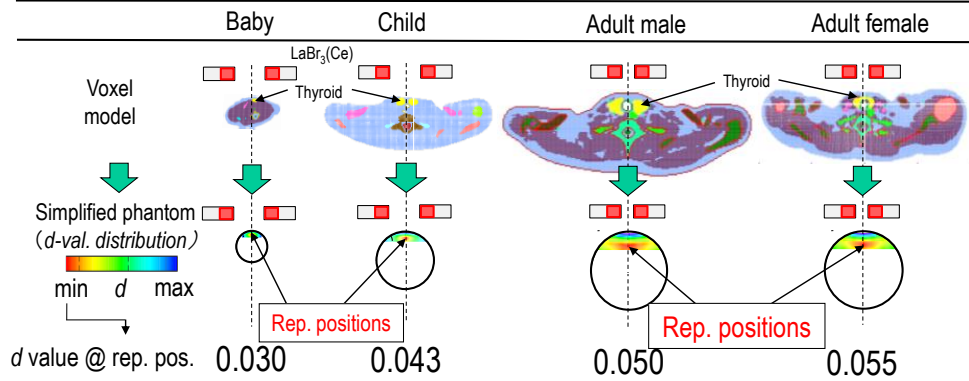
$$\eta_{\text{voxel}} = \eta_{\text{point}}(x_r, y_r, z_r)$$

A "representative position" (x_r, y_r, z_r) of the point source, which gives the same fluence at the detector, was determined from Monte Carlo calculations.

13

Representative positions

The representative positions for baby, child and adults were calculated



d value represents the difference between voxel model and simplified phantom model

Differences (d value) are less than 6%

➡ The thyroid monitor can be easily calibrated using the simplified phantom with a ^{133}Ba point source at the representative position.

14

Summary

(1) Development of the thyroid monitor

- Energy resolution and detection efficiency of the $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$, $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ and CdZnTe spectrometers were characterized by using a ^{133}Ba source.
 - The CdZnTe is applicable to assess dose for workers and the $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ is applicable to assess the dose for all public members.
 - Performance test of W heavy alloy and Pb shields were examined by experiments using a ^{133}Ba source and Monte Carlo calculations.
- ↓
- Portable thyroid dose monitor consisting with a couple of spectrometers and a shield was designed.

(2) Development of calibration method

- A novel calibration method for the thyroid monitor was proposed by using the simplified phantoms with a point source at the representative position.
- Large sets of proposed monitoring system could be easily but precisely calibrated using this method.

15

Acknowledgement



This research has been conducted as the Radiation Safety Research Program of Nuclear Regulation Authority in Japan.

平成30年度 放射線安全規制戦略的推進事業費
一事故等緊急時における内部被ばく線量迅速評価法の
開発に関する研究一

平成31年2月15日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門 安全研究センター
リスク評価研究ディビジョン 放射線安全・防災研究グループ



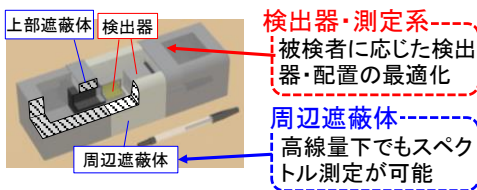
(主任研究者)谷村 嘉彦

【研究の概要】 本研究の目的

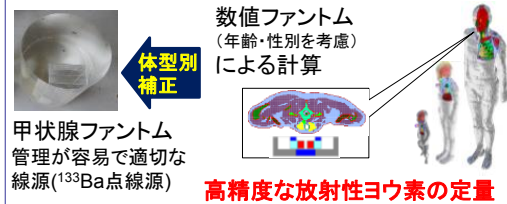


原子力事故等緊急時に、各避難所、指揮所等に設置できる γ 線エネルギー分析方式の**可搬型甲状腺モニタシステムを開発し、多数の公衆及び作業者が摂取した放射性ヨウ素の放射能について、迅速かつ高精度な測定・評価を可能とする。**

① 甲状腺モニタ測定器の開発



② 高精度放射性ヨウ素定量法の開発



③ 甲状腺モニタシステムの開発



- 検出器固定用治具の開発
体型(年齢群)に応じて検出器と甲状腺の位置関係を正確に決定できる治具を開発する。
高線量率下におけるバックグラウンド測定時に使用する治具を開発する。
- 測定法の標準化
測定法及びモニタシステムのマニュアルを作成する。



1

【研究の概要】 ロードマップ及びH29年度の達成状況



項目	平成29年度	平成30年度	平成31年度
①甲状腺モニタ測定器の開発	<ul style="list-style-type: none"> 検出器の試験・選定 遮蔽体材質・形状の最適化 	<ul style="list-style-type: none"> 測定器の試作性能評価 	<ul style="list-style-type: none"> 実機の製作
②高精度放射性ヨウ素定量法の開発	<ul style="list-style-type: none"> 年齢別頸部ファントムの製作 	<ul style="list-style-type: none"> 頸部ファントムの製作 頸部及び数値ファントムによる定量法の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 定量法の完成
③甲状腺モニタシステムの開発		<ul style="list-style-type: none"> 標準化用治具の設計 	<ul style="list-style-type: none"> 標準化用治具の製作 マニュアル作成 システム完成

【H29年度の達成状況】 概ね計画どおりに進捗

- ①甲状腺モニタ測定器の開発
 - ・甲状腺モニタで使用する検出器、最適な材質・厚さの遮蔽体を選定
- ②高精度放射性ヨウ素定量法の開発
 - ・数値ファントムを用いた検出器応答(配置)の評価
 - ・年齢別頸部ファントムを製作

2

【研究の概要】 平成30年度の実施計画と目標(1)

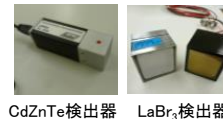


①甲状腺モニタ測定器の開発

(1) 甲状腺モニタ試作機の開発

- ・最適化した材質・厚さに基づく検出器遮蔽体の製作
- ・選定した検出器(公衆用:高感度LaBr₃検出器、作業用:高エネルギー分解能CdZnTe検出器)各2個を準備
- ・検出器制御・スペクトル解析用ソフトウェアの開発

➡ 甲状腺モニタの試作機を開発

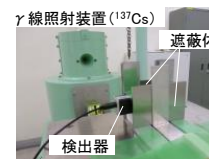


CdZnTe検出器 LaBr₃検出器

(2) 試作機の高線量率下における特性試験

- ・γ線標準校正場を用いた高線量率下での性能試験
- ・高バックグラウンド線量率環境を模擬した照射試験

➡ 試作機の測定性能を確認



γ線標準校正場

今年度の目標: 甲状腺モニタ試作機の完成

3

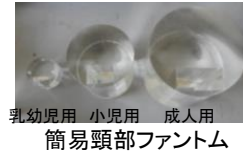
【研究の概要】 平成30年度の実施計画と目標(2)



②高精度放射性ヨウ素定量法の開発

- 性別・年齢別ボクセルファントムを使用した体格補正方法の開発
- 簡易頸部ファントムを用いた試作機の計数効率の評価
- 甲状腺の大きさ、周辺組織の厚さ等の個人差が計数効率に与える影響の評価
 - ➔ 性別、年齢、体格等による解剖学的な相違を考慮した簡易頸部ファントムによる最適な定量法を開発

今年度の目標: 放射性ヨウ素定量法の完成



③甲状腺モニタシステムの開発

- 測定条件を標準化するために必要な検出器固定治具の設計

今年度の目標: 検出器固定治具の設計

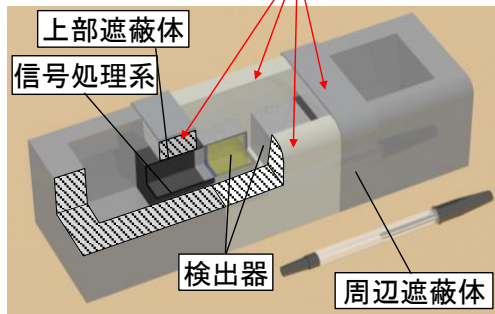
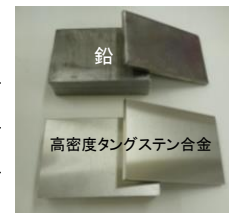
4

【研究の進捗】 ①甲状腺モニタ測定器の開発(1)

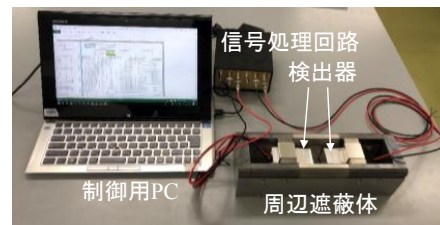


(1) 甲状腺モニタ試作機の開発

	高密度タングステン合金	鉛
原子番号	~74	82
密度	17.74 g/cm ³	11.34 g/cm ³



検出器周辺については遮蔽効果が高い高密度タングステン合金を採用



甲状腺モニタ試作機の写真
検出器制御用ソフトウェアを製作中
(~2月末)

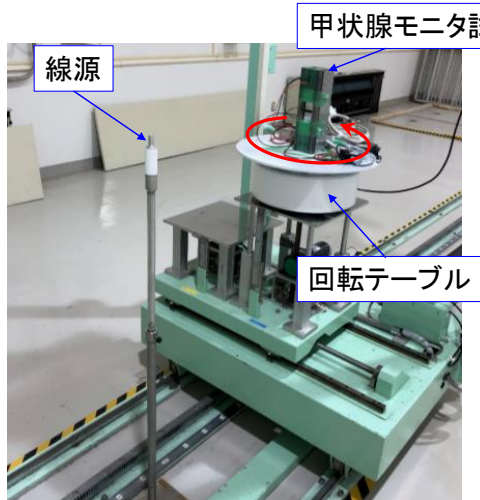
試作機の完成(見込み)

5

【研究の進捗】 ①甲状腺モニタ測定器の開発(2)



(2) 試作機の高線量率下における特性試験



甲状腺モニタ試作機

- γ 線標準校正場において、高線量率下における特性試験に着手
- 高バックグラウンド環境を模擬するために回転テーブルを用いた全方位照射試験を実施
⇒シミュレーション計算結果と整合
- 検出器制御用ソフトウェアの開発完了後に総合的な特性試験を実施予定

年度内に測定性能の確認(見込み)

γ 線標準校正場における特性試験の様子

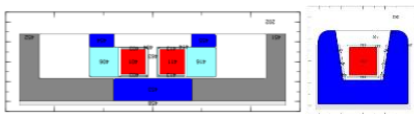
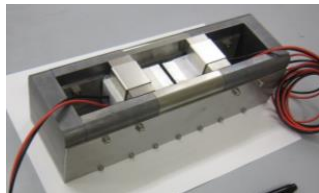
6

【研究の進捗】 ②高精度放射性ヨウ素定量法の開発(1)

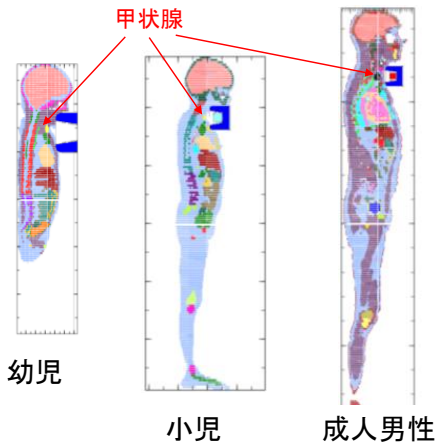


甲状腺モニタ試作機の計算体系⇒数値ファントムに組み込み済

- 計算コード : PHITS 3.0.2 (EGS mode)
 数値ファントム : GSFボクセルファントム(幼児、小児)
 ICRP標準ボクセルファントム(成人男性・女性)
 JF-103、Onago ファントム(成人女性)
 JM-103、Otoko ファントム(成人男性)



甲状腺モニタ試作機の計算体系



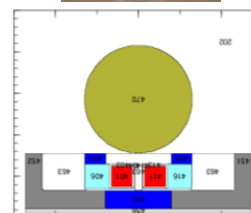
7

【研究の進捗】 ②高精度放射性ヨウ素定量法の開発(2)
③甲状腺モニタシステムの開発



②高精度放射性ヨウ素定量法の開発

- 年齢・性別・体型の異なる様々な数値ファントムを用いて検出効率を計算
⇒目標の性能(評価下限:10mSv)を達成可能
- 簡易頸部ファントムを活用した高線量率下におけるバックグラウンドの影響補正法を開発
- 今後、甲状腺、周辺組織の大きさの違いが甲状腺モニタ検出効率に与える影響を評価予定
⇒補正の要否を検討するとともに放射性ヨウ素定量の精度を検証



簡易頸部ファントム



放射性ヨウ素定量法の完成(見込み)

③甲状腺モニタシステムの開発

- 検出器と被検者の位置関係を決定するための治具について、**概念設計を完了**

8

【成果】 成果の公表状況



- 5th Asia and Oceanic IRPA Congress on Radiation Protection (AOCR-5) において成果公表(5月20日~23日、オーストラリアメルボルン、ポスター発表)
Y. Tanimura et al.: Characteristics of spectrometer and shield for thyroid dose monitoring system in high dose rate environment.
H. Yoshitomi et al.: A new method to evaluate radioiodine activity in thyroid by the gamma spectroscopy measurements using a simplified physical phantom incorporated with numerical simulations
- 5th European IRPA Congressにおいて成果公表(6月4日~8日、オランダデン・ハーグ、ポスター発表)
S. Nishino et al.: Conceptual design of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers
- 4th Asia Radiation Dosimetry Group annual meeting (ARADOS-4)において成果公表(10月17日~19日、韓国ソウル、口頭発表)
Y. Tanimura et al.: Conceptual design of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers
- 日本原子力学会2019年春の年会で成果発表(3月19日~21日、茨城大学、口頭発表)
谷村 他: エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発 (4) 試作機の製作と特性試験

9

【自己評価】 進捗状況及び成果公表



(1) 進捗状況(平成30年度)

①甲状腺モニタ測定器の開発

- ・ 周辺遮蔽体と検出器を組み合わせた試作機を製作し、 γ 線標準校正場での特性試験に着手しており、平成30年度の目標(試作機の製作及び特性評価)を達成できる見込みである。

②高精度放射性ヨウ素定量法の開発

- ・ ボクセルファントムと試作機を組み合わせた計算体系を作成し、目標評価下限値に対して十分な検出効率を得られる見通しを得るとともに、簡易頸部ファントムを用いた高線量率下におけるバックグラウンド放射線補正方法を開発できたことから、平成30年度の目標(放射性ヨウ素定量法の完成)を達成できる見込みである。

③甲状腺モニタシステムの開発

- ・ 標準化用治具の概念設計を完了したことから、平成30年度の目標(検出器固定治具の設計)を達成できる見込みである。

⇒自己評価として、概ね計画どおりに進捗

10

【次年度計画】 テーマ別開発項目(1)



当初の計画どおり以下の研究テーマを実施予定

①甲状腺モニタ測定器の開発

- ・ 試作機の実験で得られた成果に基づき、周辺遮蔽体寸法などの最適化
- ・ 公衆用及び作業員用の2種類の甲状腺モニタ測定器の実機を製作



○指揮所等に設置する作業員用システム

多数の核種が混在、高線量率環境下

⇒エネルギー分解能に優れるCdZnTe検出器

○避難所等に設置する公衆用システム

幼児等を考慮した短時間測定、より低い評価下限値

⇒大型化による感度向上が可能なLaBr₃検出器

11

③甲状腺モニタシステムの開発

- 検出器と被検者の位置関係を決定し測定条件を標準化するための
検出器固定治具を製作
- 高線量率下でのバックグラウンドを補正するための治具を作成
- 簡易頸部ファントムを用いた校正・定量方法の検証
- 甲状腺モニタシステムのマニュアルを作成



公衆用及び作業用者の甲状腺モニタシステムの完成

成果の公表

- Solid State Dosimetry 19(SSD-19)等の国際会議において成果報告
- 原子力学会等の国内学会において成果を報告
- 成果のとりまとめ⇒論文の投稿

エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発 (4) 試作機の製作と特性試験

Development of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers

(4) Fabrication and characteristic test of the prototype monitor

*谷村 嘉彦¹, 西野 翔¹, 吉富 寛¹, 高橋 聖¹

¹原子力機構

γ線スペクトロメータと検出器用遮蔽体を組み合わせたエネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタ試作機を開発し、γ線標準校正場を用いた試験と及び数値ファントムを用いた計算によりその特性を試験した。

キーワード：甲状腺，放射性ヨウ素，内部被ばく，CdZnTe 検出器，LaBr₃(Ce)検出器

1. 緒言

日本原子力研究開発機構では、原子力施設での事故等の高バックグラウンド線量率下において、公衆及び作業員の甲状腺の内部被ばく線量を測定するために、γ線スペクトロメータを用いたエネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタ（甲状腺モニタ）を開発している。これまでに、γ線標準校正場及びシミュレーション計算を用いて検出器の選定と遮蔽体材質・厚さの最適化を行ってきた^[1]。今回、CdZnTe 検出器を用いた作業員用及び LaBr₃(Ce)検出器を用いた公衆用の2種類の甲状腺モニタについて、周辺遮へい体と2個の検出器で構成される試作機を製作し、γ線標準校正場等を利用してその特性を試験した。さらに、高バックグラウンド線量率下での使用を考慮して、バックグラウンド放射線の補正法を検討した。

2. 甲状腺モニタ試作機の特性試験とバックグラウンド補正法の開発

試作した甲状腺モニタの写真を図1に示す。試作機について¹³¹Iからのγ線を模擬した¹³³Ba線源を用いて、高線量率下における遮蔽効果等の特性を放射線標準施設棟のγ線標準校正場において試験した。また、年齢別数値ファントムを用いた計算により、試作した甲状腺モニタの検出効率を評価し、甲状腺等価線量を十分な精度で測定できることを確認した。さらに、バックグラウンド放射線が測定に与える影響について、甲状腺モニタの校正に用いるアクリル樹脂（PMMA）製簡易頸部ファントムを活用して補正する手法を開発した。

3. 結論

甲状腺モニタの試作機について、γ線標準校正場における試験と年齢別数値ファントムを用いた計算から、必要な遮蔽性能及び検出効率を有していることを確認した。また、事故時のバックグラウンド放射線の補正法を開発した。これにより、甲状腺モニタの実用化へのめどを得た。

本件は、原子力規制委員会「平成30年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（事故等緊急時における内部被ばく線量迅速評価法の開発に関する研究）事業」により得られた成果の一部である。

参考文献

[1] 谷村嘉彦他：日本原子力学会2018年春の年会1E08～1E10「エネルギー分析型甲状腺放射線ヨウ素モニタの開発(1)～(3)」(2018年3月大阪大学)

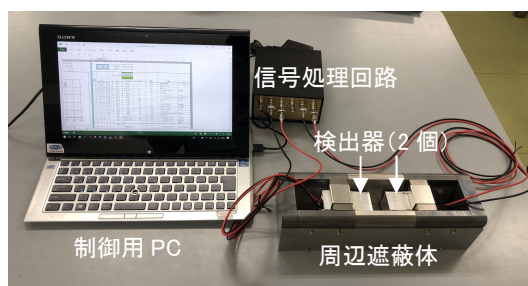


図1 甲状腺モニタ試作機の写真

*Yoshihiko Tanimura¹, Sho Nishino¹, Hiroshi Yoshitomi¹ and Masa Takahashi¹

¹Japan Atomic Energy Agency

エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素 モニタの開発

(4) 試作機の製作と特性試験



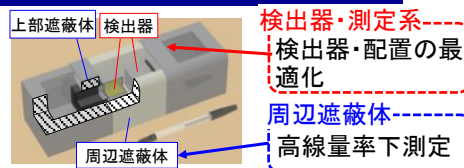
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
○谷村 嘉彦、西野 翔、吉富 寛、高橋 聖

目的

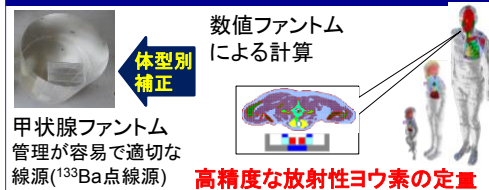


γ線エネルギー分析方式の**可搬型甲状腺モニタシステムを開発**
→ 多数の公衆及び作業者の迅速かつ高精度な測定・評価

① 甲状腺モニタ測定器の開発



② 高精度放射性ヨウ素定量法の開発



③ 甲状腺モニタシステムの開発

- 検出器固定用治具の開発
 - ・ 検出器と被検者の位置を正確に決定
- 測定法の標準化
 - ⇒ マニュアル作成



- 原子力規制委員会 放射線安全規制研究戦略的推進事業に採択
- 平成29年度~平成31年度の3年間で開発する計画



研究計画と進捗状況

項目	平成29年度	平成30年度	平成31年度
①甲状腺モニタ測定器の開発	<ul style="list-style-type: none"> 検出器の試験・選定 遮蔽体材質・形状の最適化 	<ul style="list-style-type: none"> 測定器の試作性能評価 	<ul style="list-style-type: none"> 実機の製作
②高精度放射性ヨウ素定量法の開発	<ul style="list-style-type: none"> 年齢別頸部ファントムの製作 	<ul style="list-style-type: none"> 頸部ファントムの製作 頸部及び数値ファントムによる定量法の開発 	<ul style="list-style-type: none"> 定量法の完成
③甲状腺モニタシステムの開発		<ul style="list-style-type: none"> 標準化用治具の設計 	<ul style="list-style-type: none"> 標準化用治具の製作 マニュアル作成 システム完成

平成30年(2018年)春の年会での報告内容

- ・最適な検出器、遮蔽体(材質・厚さ)を選定
- ・数値ファントムを用いた検出器配置の決定
- ・年齢別頸部ファントムを製作

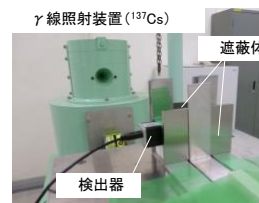
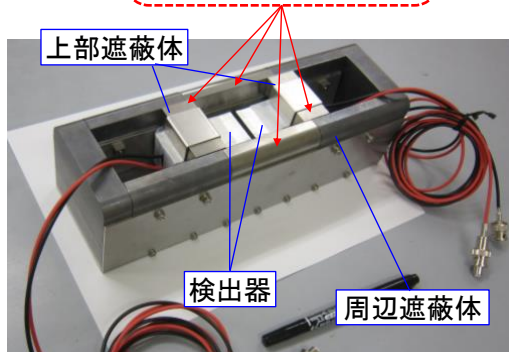
2



①甲状腺モニタ測定器の開発(1)

検出器用遮蔽体の試作

	高密度タンゲステン合金	鉛
原子番号	~74	82
密度	17.74 g/cm ³	11.34 g/cm ³



遮蔽効果の試験

材質・構造を最適化した遮蔽体を試作

検出器周辺 → 高密度タンゲステン合金を採用

3



①甲状腺モニタ測定器の開発(2)

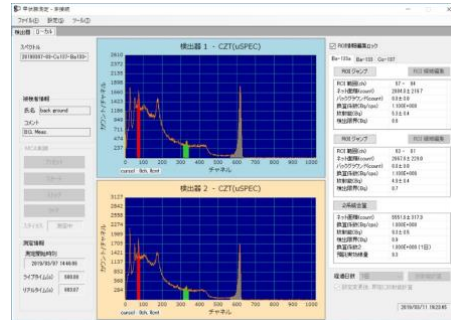
甲状腺モニタ測定器の試作

検出器



LaBr₃(公衆用) CdZnTe(作業用)

制御用ソフトウェア



- ・2個の検出器を同時に制御
- ・ γ 線ピークの解析
- ➡ 放射性ヨウ素の定量

甲状腺モニタ試作機

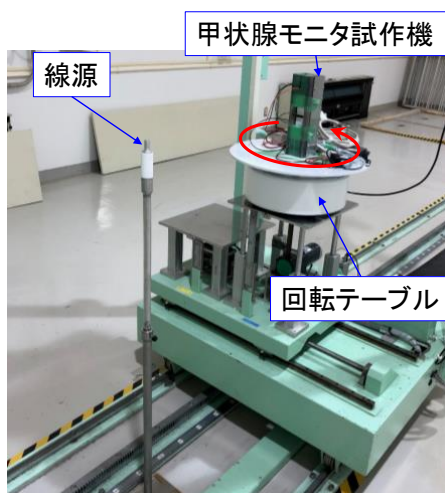


4



①甲状腺モニタ測定器の開発(3)

試作機の実験



γ 線標準場における特性試験

- ・ Cs-137、Co-60の高線量率環境下(20 μ Sv/h)での特性試験
- ・ 回転テーブルによる全方位照射
- ➡ 高B.G.環境を模擬

甲状腺等価線量評価下限値[mSv]

線源	公衆(LaBr ₃)			作業者(CdZnTe)
	乳児*	小児	成人	
¹³⁷ Cs	9.3	7.4	2.2	3.7
⁶⁰ Co	6.7	5.3	1.6	2.7

*乳児のみ測定時間: 300秒、その他: 150秒

20 μ Sv/hの高線量率環境下においても**10mSvの評価が可能**

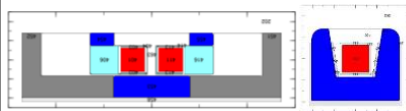
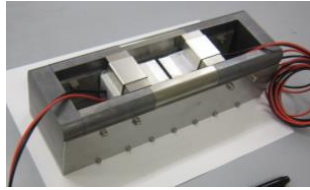
5



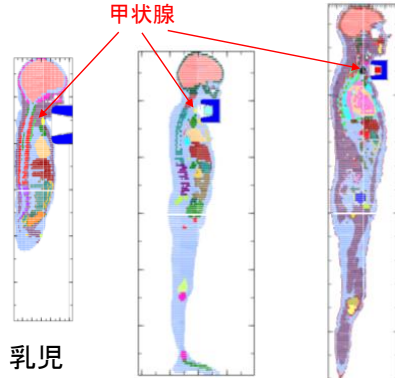
②高精度放射性ヨウ素定量法の開発(1)

甲状腺モニタ試作機・数値ファントムの計算体系

- 計算コード : PHITS 3.0.2 (EGS mode)
- 数値ファントム : GSFボクセルファントム(乳児、小児)
ICRP標準ボクセルファントム(成人男性・女性)
JF-103、Onago ファントム(成人女性)
JM-103、Otoko ファントム(成人男性)



甲状腺モニタ試作機
の計算体系



乳児

小児

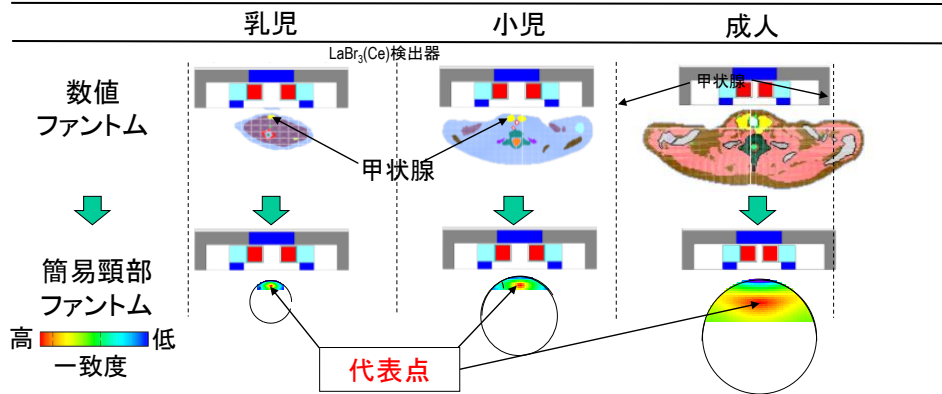
成人男性

6



②高精度放射性ヨウ素定量法の開発(2)

数値ファントムと等価な検出効率を与える代表点



4%以内で一致

簡易頸部ファントム内の代表点に点線源を配置して、モニタの校正が可能



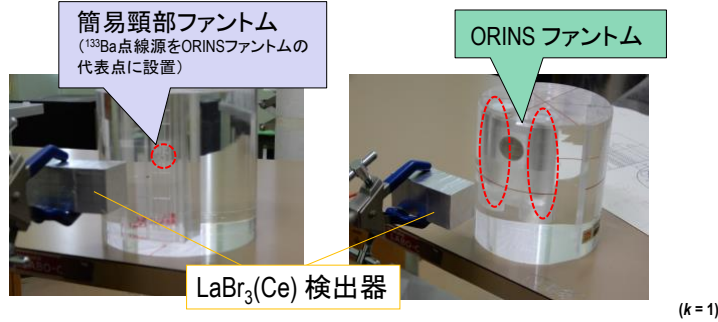
簡易頸部ファントム

7



②高精度放射性ヨウ素定量法の開発(3)

開発した校正法の検証



	簡易頸部ファントム	ORINSファントム
検出効率 (cpm/photons/s)	0.18 ± 0.01	0.19 ± 0.04

不確かさの範囲で一致⇒開発した手法の妥当性を確認

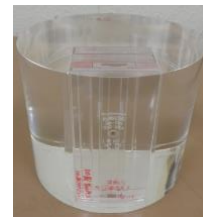
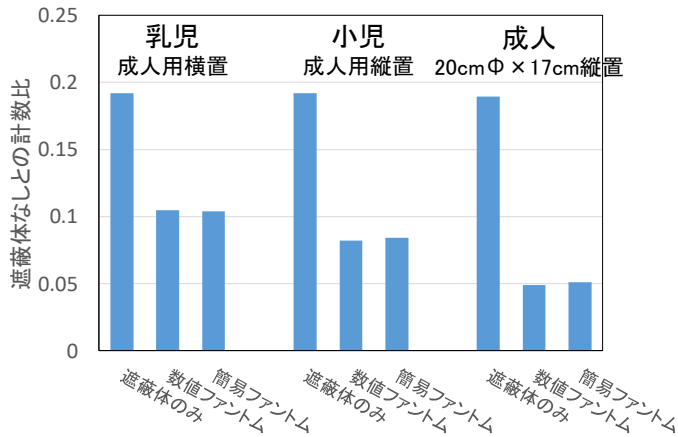
8



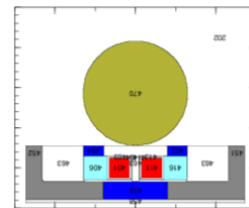
②高精度放射性ヨウ素定量法の開発(4)

バックグラウンド補正法の開発

高線量率下においては、周辺の放射性ヨウ素(バックグラウンド)の影響補正が必須



簡易頸部ファントム (成人用)
13cmΦ × 12cm



乳児向け配置例

簡易頸部ファントムの活用で補正が可能

9



まとめ

開発内容

① 甲状腺モニタ測定器の開発

- 甲状腺モニタ測定器の試作機が完成
⇒ γ 線標準校正場(^{137}Cs 、 ^{60}Co)において試験
高線量率下($20\ \mu\text{Sv/h}$)でも 10mSv (甲状腺等価線量)の評価が可能

② 高精度放射性ヨウ素定量法の開発

- 数値ファントムと等価なフルエンスを与える簡易頸部ファントム中の代表点を決定
⇒ 体積線源入りORINSファントムに適用して妥当性確認
- 周辺からの放射性ヨウ素の影響補正法を開発
簡易頸部ファントムを用いた甲状腺モニタの校正法及びバックグラウンド補正法が完成

- 本件は、原子力規制委員会「平成30年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費(事故等緊急時における内部被ばく線量迅速評価法の開発に関する研究)事業」により得られた成果の一部である。