

**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**

平成 30 年 3 月 30 日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

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	3
4. 事業の成果	4
4. 1 甲状腺モニタの概念設計	4
4. 1. 1 背景	4
4. 1. 2 設計の目標	4
4. 1. 3 甲状腺モニタの概念設計	6
4. 1. 4 甲状腺モニタによる測定方法	6
4. 2 甲状腺モニタ用測定器の開発	9
4. 2. 1 概要	9
4. 2. 2 放射線検出器の選定	9
4. 2. 3 周辺遮蔽体の材質及び形状（厚さ）の最適化	10
4. 3 高精度放射性ヨウ素定量法の開発	22
4. 3. 1 概要	22
4. 3. 2 検出器配置の最適化	22
4. 3. 3 頸部ファントムの開発	23
4. 4 まとめ	28
5. 平成 29 年度事業の実績	29
参考文献	31
付録 1：原子力規制委員会平成 29 年度第 1 回研究成果報告会（放射線安全規制研究 戦略的推進事業）報告資料	33
付録 2：日本原子力学会 2018 年春の年会発表資料	39

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、平成 29 年度放射線安全研究戦略的推進事業を開始した。

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。）が受託した平成 29 年度放射線安全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（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。）を開発する。

2. 事業の実施体制

平成 29 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 29 年度は「甲状腺モニタ測定器の開発」及び「高精度放射性ヨウ素定量法の開発」の二つのテーマを図 2-2 に示す研究分担で実施した。

線源を用いた検出器の試験、 γ 線標準校正場における遮蔽体の最適化に係る試験は、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、定量法の解析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。

事業開始後、平成 29 年 11 月 13 日に原子力規制委員会が指名するプログラム・オフィサー（PO）及び PO 補佐とキックオフミーティングを開催し、事業の実施内容、役割分担及び成果の発表予定について報告するとともに得られたコメントを基に事業を進めた。その後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、原子力規制委員会が平成 30 年 2 月 26 日に開催した平成 29 年度第 1 回研究成果報告会（放射線安全規制研究戦略的推進事業）において、平成 29 年度の成果を報告した（付録 1 参照）。

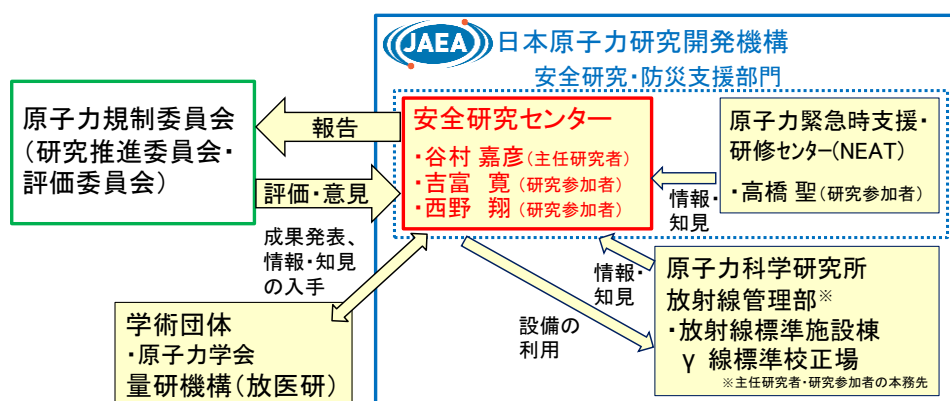


図 2-1 本事業の実施体制図（平成 29 年度）

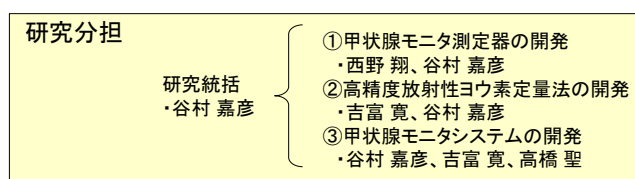


図 2-2 研究テーマごとの研究者の分担

3. 事業の概要

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、「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」及び「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。

「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、「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、「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。

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、LaBr₃(Ce)シンチレータ及びSrI₂(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て、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。

4. 事業の成果

4. 1 甲状腺モニタの概念設計

4. 1. 1 背景

吸入または経口摂取により人体に取り込まれた放射性ヨウ素は、頸部前面に位置する甲状腺に蓄積しやすいという性質をもつ。甲状腺モニタは、体外計測により、被検者の甲状腺に蓄積した放射性ヨウ素を定量し、内部被ばく線量を推定するために使用する。放射性ヨウ素のうち、比較的半減期が長い¹³¹Iにおいては8.02日の半減期で減衰するため、放射性ヨウ素を定量するためには、摂取後1週間以内を目途に測定を行う必要がある。しかしながら、従来の全身カウンタ等に装備された甲状腺モニタは、放射性ヨウ素の定量性能には優れているが、大型の遮蔽体と測定器から構成されるため、避難所や指揮所へ持ち込んで使用することは難しい[1,2]。そのため、被検者自身が測定器の設置された施設へ移動する必要があり、事故後、短期間で大人数の作業員・住民の測定を行うことが困難であった。東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故（以下「福島第一原発事故」という。）においては、避難所等で、空間線量測定用のNaI(Tl)サーベイメータ等で代用することにより、簡易的に甲状腺の放射性ヨウ素を測定した例がある[3]。しかし、事故で放出された放射性核種により周辺環境が汚染しており、これらによるバックグラウンド信号（甲状腺からではなく、周囲の組織や環境中から測定器へ入射する放射線）との区別が容易ではなく、放射性ヨウ素の定量性能が乏しい。以上のような理由から、原子力事故時等において、大人数の作業員及び住民に対して、信頼性の高い甲状腺ヨウ素の定量測定を行うことが難しく、内部被ばく線量の評価を行う上で、大きな問題となっていた。また、従来の甲状腺モニタでは、遮蔽体で囲まれた狭い空間において喉元に測定器を当てた状態で、一定時間静止する必要があり、体動の多い幼児・乳児・新生児の測定には困難を伴っていた。

福島第一原発事故のように、大規模地震等の大きな災害に起因する事故の場合、発電所の停止や送電網の断絶により大規模な停電が長時間にわたり発生することが想定される。この場合、発電機で電源が確保できたとしても、大きな電力容量を必要とする従来の全身カウンタに装備された甲状腺モニタの使用が困難となる等の課題がある。

4. 1. 2 設計の目標

本事業では、原子力事故等が発生した際に、大多数の作業員や公衆に対して、甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素の迅速かつ精度良い定量測定を実現するために、各避難所や指揮所に容易に設置できる可搬性に優れた甲状腺ヨウ素モニタを開発する。甲状腺モニタが目標とする性能を表4-1-1にまとめる。

福島第一原発事故時のように、環境中に放射性物質が放出されバックグラウンド線量率が上昇した状況の下で、被検者の甲状腺に蓄積した放射性ヨウ素から放出される γ 線 (^{131}I から放出される 365 keV など) を弁別して測定するために、エネルギー分析型の測定方式を採用した。甲状腺モニタの放射線検出器には、エネルギー分解能のよい半導体検出器 (CdZnTe、CdTe、TlBr) 及びシンチレーション検出器 (LaBr₃(Ce)、SrI₂(Eu)) を候補に挙げた。これらの放射線検出器は従来の測定でよく使用される NaI(Tl)シンチレーション検出器と比較して、エネルギー分解能が良く、バックグラウンド放射線との識別能力が優れるため、放射線ヨウ素の定量性能の向上が期待できる。また、従来の測定でよく使用される Ge 半導体検出器のように、使用時に液体窒素等を用いて検出器を冷却する必要がなく、検出部の小型化も容易である。

開発する甲状腺モニタは、避難所や指揮所等の人が比較的長い時間滞在する場所での使用を想定している。このため、極端にバックグラウンド線量率が高い場所での使用を考慮する必要はないが、比較的高いバックグラウンド線量率でも使用できる必要がある。そこで、使用上限のバックグラウンド線量率を数十 $\mu\text{Sv/h}$ と設定した。これは、通常時の低いバックグラウンド線量率から測定が可能な NaI(Tl)シンチレーション式サーベイメータを用いた測定が可能な空間線量率から決定した。バックグラウンド放射線の入り込みを抑制するために、周囲に遮蔽体を設置することとした。

定量可能な放射性ヨウ素の放射能を引き下げるためには、測定時間を可能な限り長く設定することが有効である。しかし、体動が多い乳幼児や小児などが測定対象に含まれることを考えると、測定時間を短くする必要がある。そこで、妥協できる測定時間として、測定準備を含めて一人当たり 5 分間の測定時間を目標に設定した。また、できるだけ多くの公衆に対して測定による線量評価を可能とするためには、測定可能な人数を大きくする必要がある。そこで、1日に12~15時間程度稼働させると考え、1台の甲状腺モニタで一日当たり150人以上を測定できることを目標に設定した。この目標が達成できれば、例えば学校の体育館に1,000人が避難していると想定した場合、2台の甲状腺モニタを配備することにより、3~4日で全員の測定が可能となる。

開発する甲状腺モニタで定量できる甲状腺に蓄積した放射性ヨウ素放射能の下限値として、1kBq以下を目標に設定した。これにより、摂取後3~5日の測定が実施できた場合、成人で10mSvの甲状腺等価線量(実効線量に換算すると0.5mSv)を評価できることになる。

大規模災害に伴う原子力事故で、停電などが発生した状況においても測定可能とするために、ノートPC等のバッテリーで数時間以上動作可能とすることを目標として、低消費電力の測定系を選択することとした。これにより、発電機などの低容量の電源のみが確保できる場合においても、測定を継続することが可能となる。

4. 1. 3 甲状腺モニタの概念設計

開発する甲状腺モニタは、検出効率の向上を図るために放射線検出器を 2 個使用して、図 4-1-1 に示すように、上方のみに開口した井戸型の周辺遮蔽体の中に設置する構造とした。さらに、斜め上方から入射するバックグラウンド放射線を遮蔽するために、検出器の信号処理回路の上に上部遮蔽体を設置した。被検者の体格（年齢）により異なる甲状腺の形状を考慮して最適な測定条件となるように、2 個の放射線検出器の間隔を調整できる構造とした。

周辺遮蔽体は、鉛、タングステン（タングステンを高い比率で含有する合金を含む）等を用い、外部からのバックグラウンド放射線（ ^{131}I 365keV、 ^{137}Cs 662keV 等）を十分に遮蔽できる形状とする。タングステンは鉛よりも高価であるが、単位厚み当たりの γ 線遮蔽効果が鉛よりも優れる。そこで、サイズの制限が厳しい頸部の上下方向の遮蔽にはタングステンを、サイズの制限が緩い横方向には鉛を用いるなど、使用条件に応じて遮蔽体形状・材料を工夫することで、十分な遮蔽性能を確保しつつ、材料費及び重量の低減を図る。

周辺遮蔽体を含めて角形ブロック状とすることにより、コンパクトにして、多数の甲状腺モニタを通常の倉庫などで容易に保管・管理できる形状とした。また、原子力事故時には、他の支援物資などとともに自動車に積み込んで避難所や指揮所に容易に輸送することができる。

4. 1. 4 甲状腺モニタによる測定方法

開発する甲状腺モニタは、図 4-1-2 (b) に示すように甲状腺が開口部の上部に配置されるように被検者の喉部を井戸型遮蔽体開口部の上部に密着させ、検出器で放射性ヨウ素の γ 線を計数することにより、甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素を定量できる測定方法とした。周辺遮蔽体は、開口方向以外（下方、横方向）からのバックグラウンド放射線の遮蔽に用いる。開口の大きさは甲状腺の形状に合わせて必要十分なサイズとする。また、検出器と遮蔽体を一体型の構造にすることにより、効果的にバックグラウンド放射線を遮蔽することができ、被検者自身が遮蔽体に囲まれた空間に閉じ込められる必要がない。このため、被検者が測定時に感じる圧迫感、恐怖感を低減できる。

従来の甲状腺モニタは、被検者が遮蔽壁に囲まれた空間に設置された椅子に座り、またはベッドの上で仰向けになり、放射線検出器（Na(Tl)シンチレーション検出器等）を喉元に当てて計測していた。本事業で開発する甲状腺モニタは、直接机の上に設置できるため、測定器の位置を調整するための支持アーム等の特別な治具は必要としない。被検者は椅子に座り、机の上に上半身を伏せるような姿勢をとり、測定器に喉元を密着させ、上半身の体重を顎または額の位置に設置した支持台に預けるため、楽な姿勢で測定できる。体動の多い子供が被検者の場合でも、甲状腺と測定器の幾何学的配置が変化しにくい。使用する机・椅子

については限定されず、指揮所や避難所で準備できるものがそのまま利用可能である。

幼児・乳幼児・新生児が被検者の場合、保護者が隣に寄り添う、保護者の膝に乗せる、またはテーブル等の上うつ伏せ寝の姿勢で測定を行うことができる。従来の狭い空間に閉じ込められて行う測定と異なり、被検者に与える恐怖心、圧迫感を低減できる。また、遮蔽空間への出入りが不要なため、大人数の測定を効率よく実施できる。

上半身を伏せて測定を実施する際、テレビ、PC、タブレット、スマートフォン等の映像デバイスまたは観賞用動植物を被検者の顔面部の前方（下方）に設置し、アニメーション等の動画を流すことや、動植物の癒し効果により、被検者がストレスを感じることなく測定中に静止できるように工夫できる。特に、被検者が小児・乳幼児の場合、同じ姿勢を強いるのは困難であるが、本工夫により数分間の測定の間、被検者の興味を引き付けることが可能である。

表 4-1-1 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 μ 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	

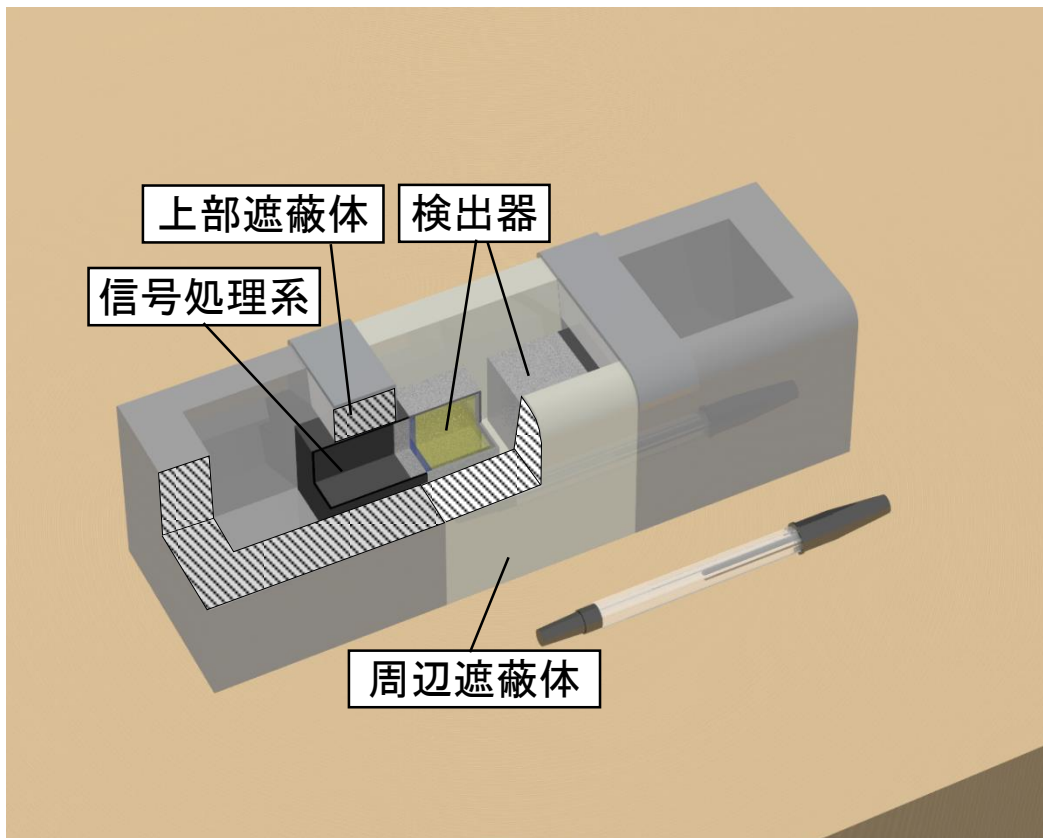
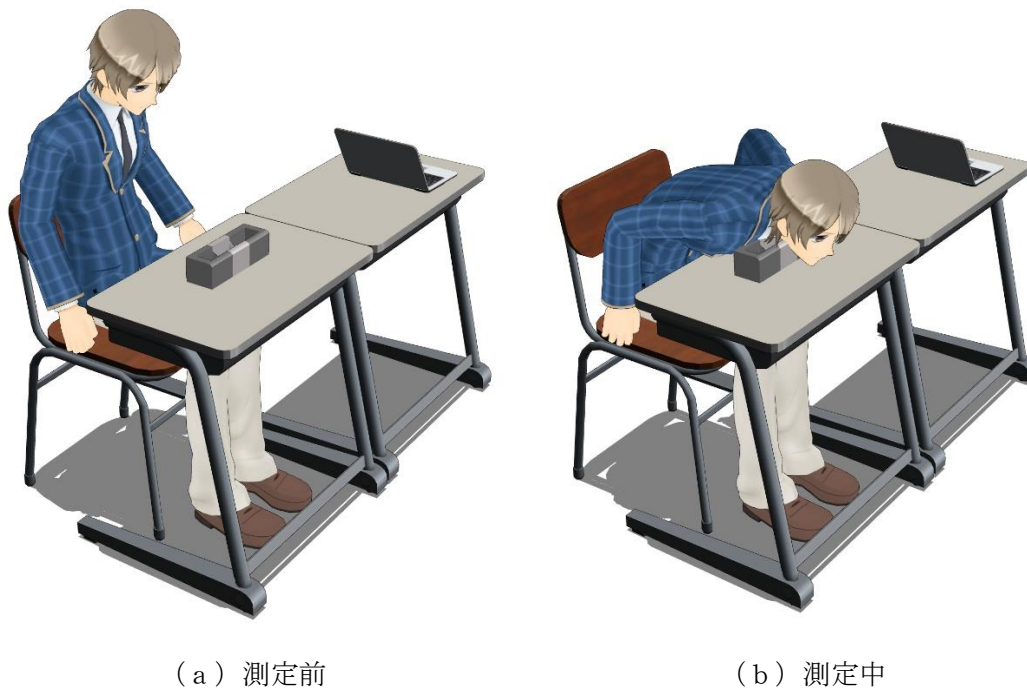


図 4-1-1 甲状腺モニタの概念図



(a) 測定前

(b) 測定中

図 4-1-2 甲状腺モニタによる測定のイメージ

4. 2 甲状腺モニタ用測定器の開発

4. 2. 1 概要

本事業の開始に先立ち、開発する甲状腺モニタで使用するエネルギー分析型放射線検出器として、NaI(Tl)シンチレーション検出器よりも高いエネルギー分解能が期待できる3種類の半導体検出器(CdZnTe、CdTe、TlBr)と2種類のシンチレーション検出器(LaBr₃(Ce)、SrI₂(Eu))を候補にあげた。そして、エネルギー分解能の観点から、CdZnTe 検出器、LaBr₃(Ce)及び SrI₂(Eu)シンチレーション検出器を、甲状腺モニタに適した放射線検出器として選定した。

次に、選定した放射線検出器について、甲状腺モニタに使用可能な有感体積を有する検出器を本事業で購入し、線源を用いた感度試験を実施した。また、 γ 線標準校正場において遮蔽体と組み合わせた性能試験を実施した。そして、目標とする定量下限値を満足できるように、遮蔽体の材質及び形状を最適化した。

4. 2. 2 放射線検出器の選定

候補となりうるそれぞれの放射線検出器(5種類)のエネルギー分解能を評価するために取得した¹³⁷Cs線源からの662keV γ 線に対する波高スペクトルを図4-2-1に示す。また、662keV γ 線に対するエネルギー分解能及び特徴を表4-2-1にまとめる。CdZnTe半導体検出器は非常に高いエネルギー分解能が得られ、かつ、CdTe半導体検出器と比べると高価であるが、大きな有感体積の検出器が入手可能である。一方、CdTe半導体検出器は安価で高いエネルギー分解能が得られるが、十分な有感体積を得るためには、アレイ化などの工夫が必要であり、信号処理回路が複雑になる。LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器及び SrI₂(Eu)シンチレーション検出器は、従来の甲状腺モニタで使用されている NaI(Tl)シンチレーション検出器と比べて高いエネルギー分解能が得られ、大型化が容易である上に安価であることが分かった。TlBr半導体検出器については、原子番号が高いという γ 線スペクトルの測定には適した特性を有する材料であるが、単純な信号処理回路では十分なエネルギー分解能が得られず、複雑な信号処理が必要であることがわかった。これらの特徴を考慮して、CdZnTe半導体検出器、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器及び SrI₂(Eu)シンチレーション検出器の3種類について、十分な有感体積を有する検出器を用意して試験を実施することとした。

本事業で購入した放射線検出器(3種類)の写真を図4-2-2に、寸法などの緒元を表4-2-2にまとめる。CdZnTe半導体検出器には、有感体積が1.5cm³と同タイプの検出器では大型のRITEC社製 μ spec1500を選択した。図4-2-2(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。LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器には、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選択した。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。SrI₂(Eu)シンチレーション検出器には、寸法 1 インチ立方の光学結晶が外寸 33 mm×33 mm×33 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選択した。光学窓には、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器と同じく合成石英を使用している。LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器及び SrI₂(Eu)シンチレーション検出器に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 23 mm×23 mm の受光面を有しており、図 4-1-1 の周辺遮蔽体に設置するうえで最適な形状をしている。

上記の 3 種類の放射線検出器について、¹³¹I の γ 線 (364keV) を模擬した ¹³³Ba 線源からの γ 線 (356keV) に対するエネルギー分解能及び γ 線感度 (ピーク検出効率) を試験した。試験の様子を図 4-2-3 に、得られた波高スペクトルを図 4-2-4 に示す。また、波高スペクトルから評価した 356keV γ 線に対するエネルギー分解能及び γ 線感度を表 4-2-2 にまとめる。

4. 2. 3 周辺遮蔽体の材質及び形状 (厚さ) の最適化

周辺遮蔽体の材質を選定するために、PHITS2.88 を用いて ¹³³Ba 線源からの 356keV γ 線及び ¹³⁷Cs 線源からの 662keV γ 線の減衰率を計算により評価した[4]。材質の候補として、通常の見守り体としてよく用いられている鉛、密度が高いためより高い遮蔽性能が期待できるタングステン及びタングステン合金並びに参照用にステンレスを取り上げ、それぞれの材質について計算を実施した。なお、タングステンは非常に高い硬度を持つ金属で、機械加工が困難であることから、タングステンにニッケル、銅を加えて機械加工を可能としたタングステン合金を候補材料に加えた[5]。光子の輸送計算においては、EGS モードを使用した[6]。計算の概念図を図 4-2-5 に、¹³³Ba 線源からの 356keV γ 線の減衰率の計算結果を図 4-2-6 に、¹³⁷Cs 線源からの 662keV γ 線の減衰率の計算結果を図 4-2-7 に示す。

図 4-2-6 及び図 4-2-7 より、タングステン合金が鉛よりも優れた遮蔽性能が期待できることがわかった。そこで、遮蔽体として、5 mm 厚さの鉛製板及びタングステン合金製板を複数枚用意して、 γ 線標準校正場において遮蔽性能の試験を行った。使用した遮蔽体の写真を図 4-2-8 に、原子番号及び密度を表 4-2-3 に示す。遮蔽体として寸法 95 mm×65 mm×5 mm の板を用い、図 4-2-9 の概念図に示すように放射線検出器の両側に遮蔽板を設置し、側面から ¹³⁷Cs 線源からの γ 線を照射することにより遮蔽性能

の試験を実施した。試験の様子を図4-2-10に、タングステン合金遮蔽体を透過した¹³³Ba線源からのγ線及び¹³⁷Cs線源からのγ線をCdZnTe半導体検出器で測定した波高スペクトルの例をそれぞれ図4-2-11及び図4-2-12に示す。356keVγ線の遮蔽試験は、検定日（1986年6月12日）の放射能が111MBqの¹³³Ba密封線源を使用し、線源からCdZnTe半導体検出器までの距離を25cmに設定して照射を行った。図4-2-11の356keVピーク部（黄色いハッチング部）の計数から導出した、遮蔽体厚さと356keVγ線の減衰率との関係を実測した結果を図4-2-13に示す。周辺から入り込むバックグラウンドγ線の減衰率の目安として1/10,000以下と設定した場合に、必要となる遮蔽体の厚さは、鉛の場合は3cm、タングステン合金の場合は2.5cmであることがわかった。

次に、¹³³Baの356keVγ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、¹³⁷Cs線源からの662keVγ線が入射する図4-2-12の波高分布の例（黄色いハッチング部）に示すように、356keV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[7]。

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

DL : 甲状腺等価線量の定量下限値

K : 3

t_s (= *t_b*) : 測定時間

n_b : バックグラウンド計数率

ε : 甲状腺¹³¹I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

F : 摂取5日後の放射性ヨウ素の残留率

高バックグラウンド線量率下（¹³⁷Cs線源：20μSv/h）における、CdZnTe半導体検出器を用いた場合の甲状腺等価線量測定下限値と遮蔽体（タングステン合金）厚さとの関係を図4-2-14に示す。測定時間は150秒とした。上述の2.5cm厚さとすることにより、乳児についても目標とする10mSvを担保できることがわかる。また、図中にはLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器及びSrI₂(Eu)シンチレーション検出器を使用した場合の乳児に対する測定下限値を2.5cmの遮蔽厚について評価した結果を追記している。どちらのシンチレーション検出器でも10mSvの目標を十分に担保できており、甲状腺モニタの放射線検出器として使用できることがわかる。なお、LaBr₃(Ce)シンチレータ中には、天然の放射線核種である¹³⁸Laが含まれており、この自己汚染により測定下限値に影響を受ける可能性がある。そこで、厚さ15cmの鉛遮蔽体の中にLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器を設置して、自己汚染に起因する波高スペクトルの測定を行った（図4-2-15参照）。その結果、最

も条件が厳しい乳児についても、自己汚染に起因する甲状腺等価線量測定下限値は0.38mSvであることがわかり、実際の測定には影響しないことが確認できた。

上記の試験結果を踏まえ、指揮所等に設置して作業者を対象として測定する甲状腺モニタの放射線検出器には、CdZnTe半導体検出器を採用した。これは、指揮所等は、放出源からの距離が近く、多数の核種が混在する可能性があることから、核種弁別性能が優れる（エネルギー分解能が高い）検出器を選択する必要があるためである。また、避難所と比べて高線量率下での測定が求められることから、高エネルギー γ 線の混入によるバックグラウンド計数に対するピークの弁別性能が求められることを考慮すると、エネルギー分解能が高いCdZnTe半導体検出器が適していることも選択の理由としてあげられる。

次に、多くの公衆を対象とした避難所に設置する甲状腺モニタについては、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器を採用することとした。これは、体動が多い、線量換算係数が大きい等、測定条件が厳しい乳幼児を含む公衆については、大型の検出器を用いることにより、感度を向上させる必要があることが選択の理由としてあげられる。また、SrI₂(Eu)シンチレーション検出器については、自己汚染がないことに加えて同様に大型化が可能であるが、時間応答が良好ではなく、計数率が高くなると測定が困難になる。このため、時間応答が優れ、より高いエネルギー分解能が得られるLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器を選択した。なお、上述のとおり自己汚染の影響は十分に小さいことを実測により確認している。

表 4-2-1 候補となる放射線検出器のエネルギー分解能等の試験結果

検出器	CdZnTe	CdTe	LaBr ₃ (Ce)	SrI ₂ (Eu)	TlBr
有感体積 [cm ²]	1.5	0.1	1.0	1.0	0.3
エネルギー 分解能	2.2%	2.8%	3.3%	3.2%	10.4%
備考	高分解能、高 価	高分解能、安 価、有感体積 が小(大型化 にはアレイ 化が必要)	大型化が可 能、安価	大型化が可 能、安価	原子番号高、 高分解能に は品質(信号 処理)が課題

表 4-2-2 本事業で購入した放射線検出器の仕様と ¹³³Ba 線源からの 356keV γ 線に
対する試験結果

検出器	CdZnTe	LaBr ₃ (Ce)	SrI ₂ (Eu)
原子番号	48/30/53	57/35	38/53
結晶寸法	1.5 cm × 1.5 cm × 0.75 cm	2.54 cm × 2.54 cm × 2.54 cm	2.54 cm × 2.54 cm × 2.54 cm
有感体積	1.5 cm ³	16 cm ³	16 cm ³
エネルギー分解能	2.8%	5.5%	6.6%
γ 線感度	0.39 cm ²	1.9 cm ²	2.5 cm ²

表 4-2-3 試験で用いた遮蔽体の仕様

遮蔽体	鉛	高密度タングステン合金
原子番号	82	74 (W 成分 : 93.7wt%)
密度	11.34 g/cm ³	17.74 g/cm ³

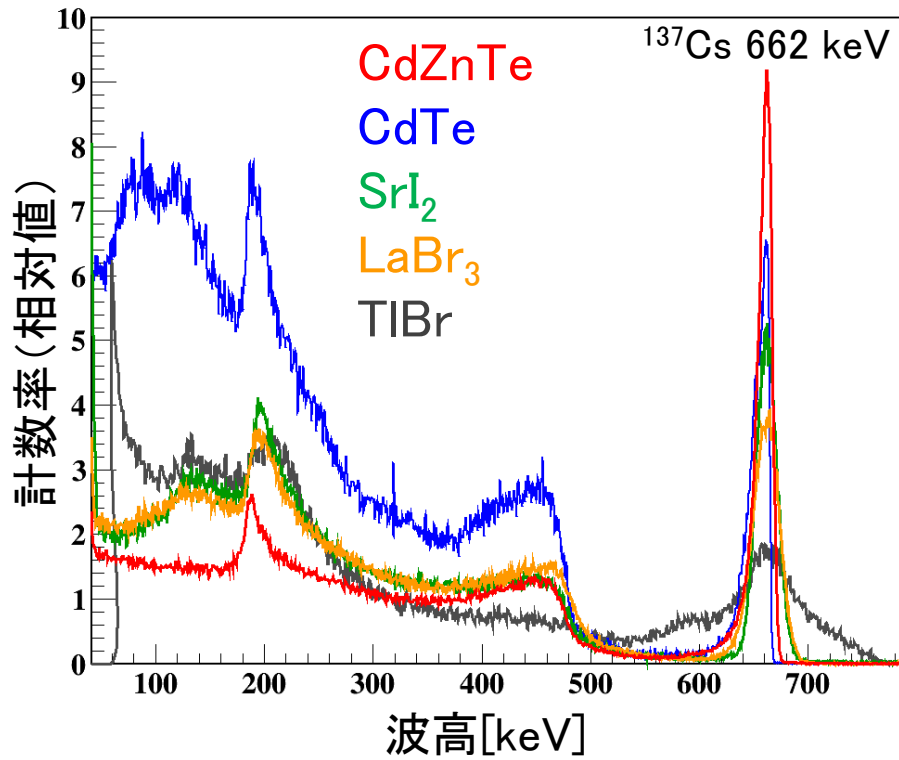
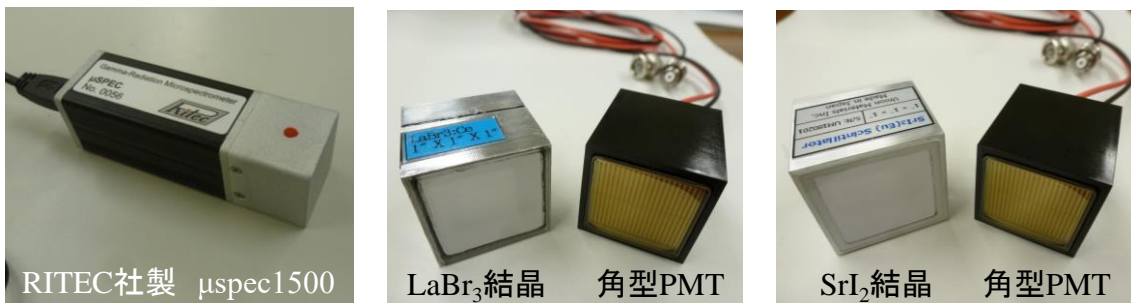


図 4-2-1 候補となる放射線検出器（5種類）の波高スペクトル測定結果



(a) CdZnTe 半導体
検出器

(b) LaBr₃(Ce)シンチ
レーション検出器

(c) SrI₂(Eu)シンチ
レーション検出器

図 4-2-2 本事業で購入した放射線検出器の写真

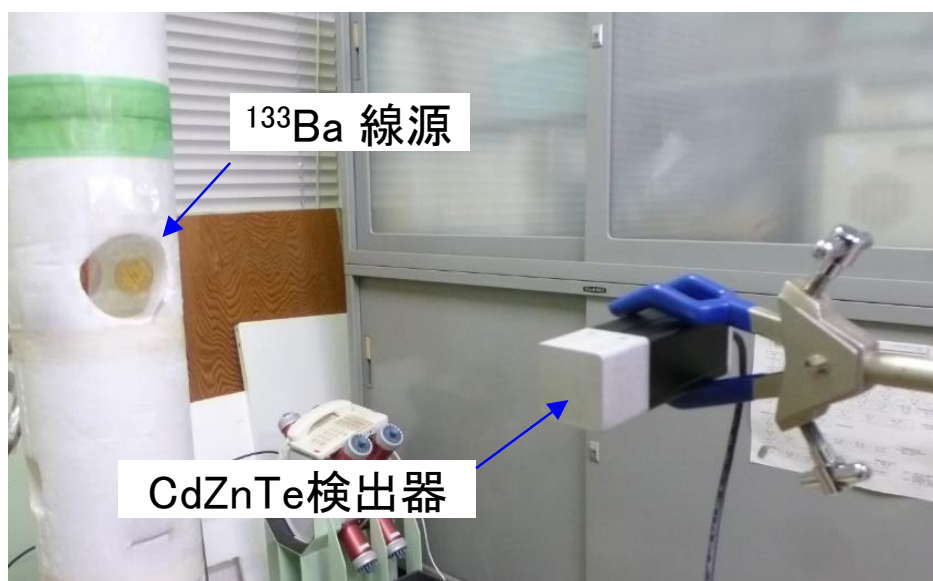


図 4-2-3 ^{133}Ba 線源を用いたエネルギー分解能及び γ 線感度測定試験の様子

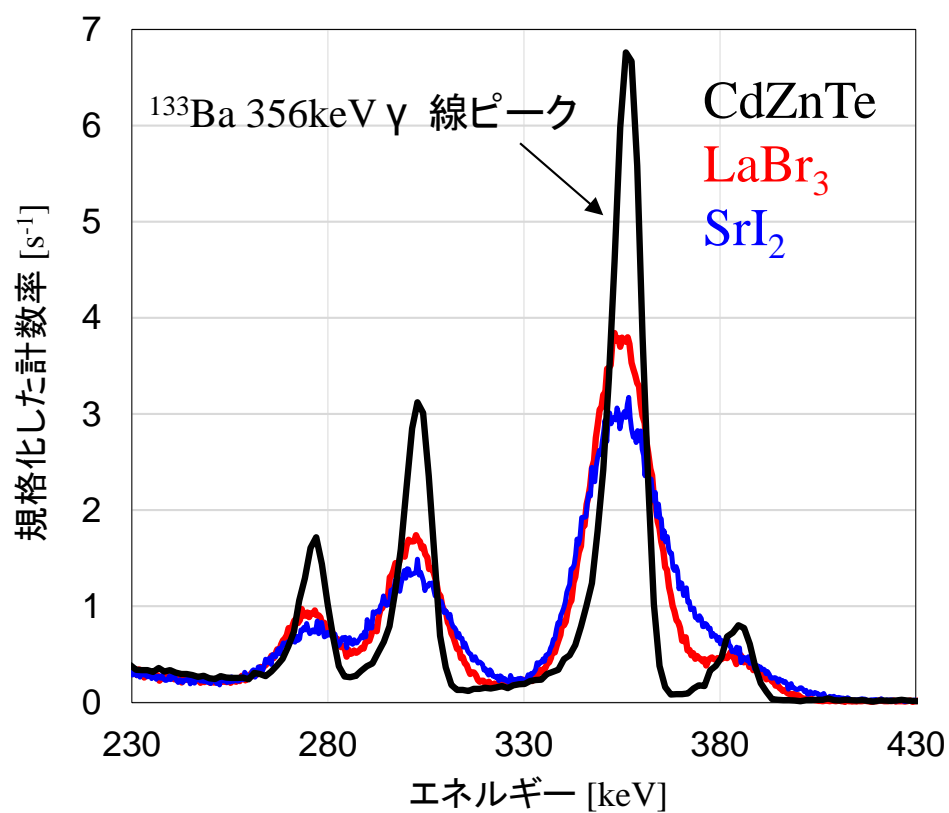


図 4-2-4 ^{133}Ba 線源からの γ 線に対する検出器の波高スペクトル測定結果

● 評価点

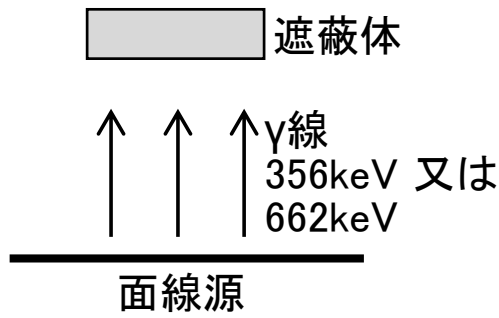


図 4-2-5 PHITS (EGS モード) を用いた遮蔽体減衰率計算の概念図

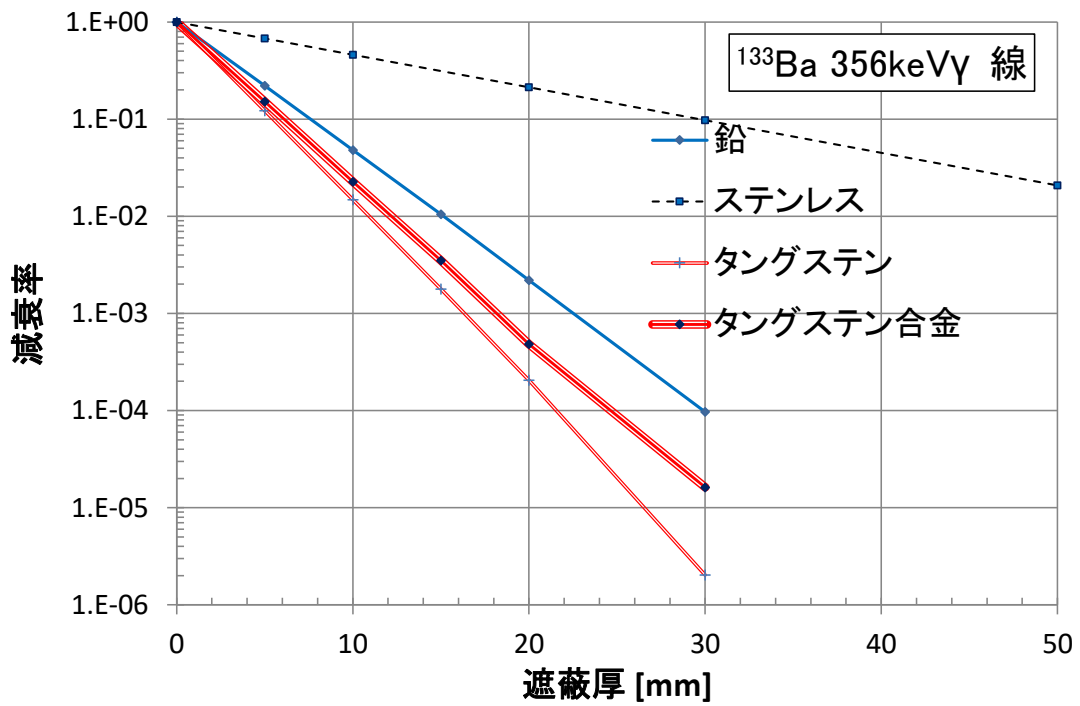


図 4-2-6 ^{133}Ba 線源からの 356keV γ 線減衰率の計算結果

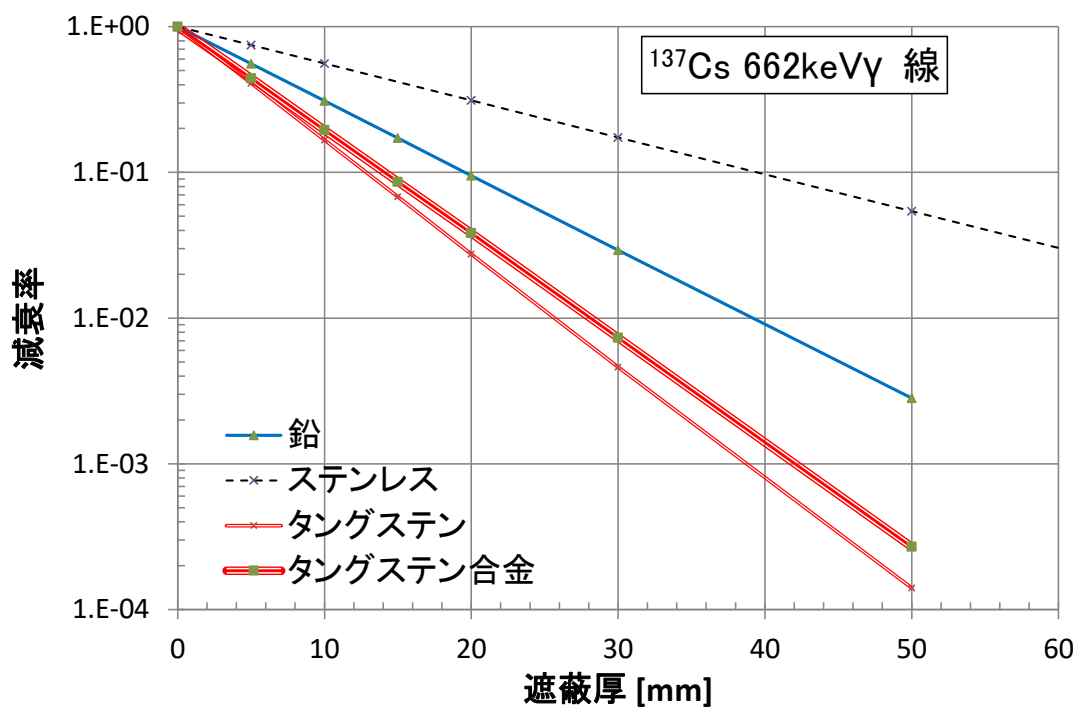


図 4-2-7 ^{137}Cs 線源からの 662keV γ 線減衰率の計算結果

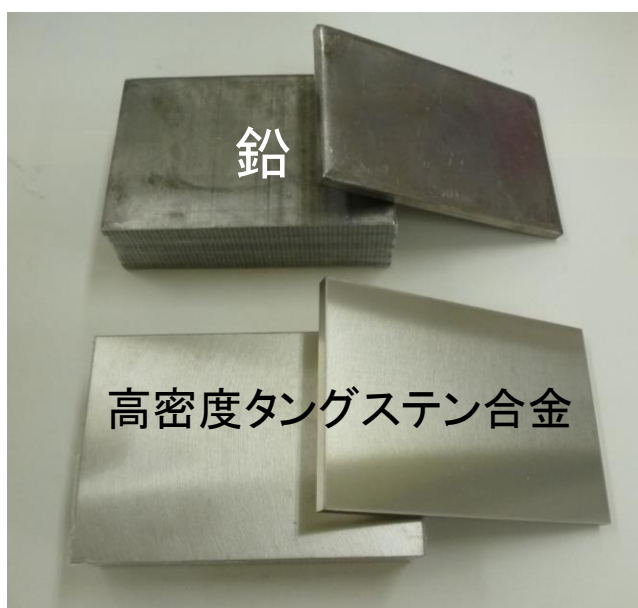


図 4-2-8 試験で使した遮蔽体の写真

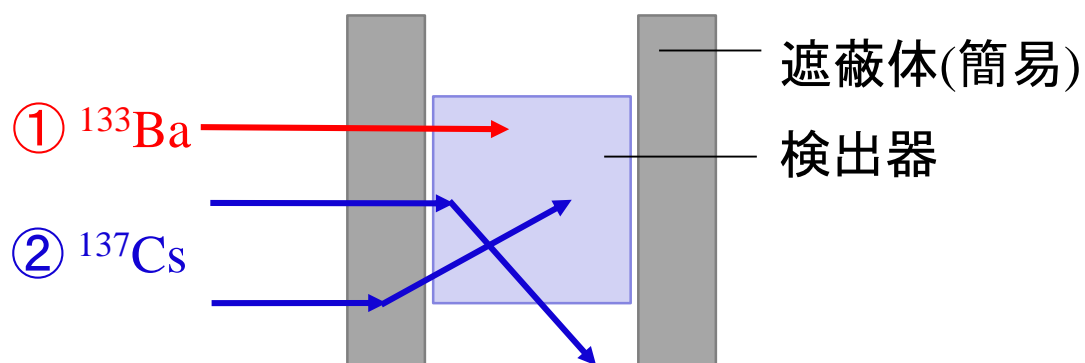


図4-2-9 遮蔽体性能試験の概念図

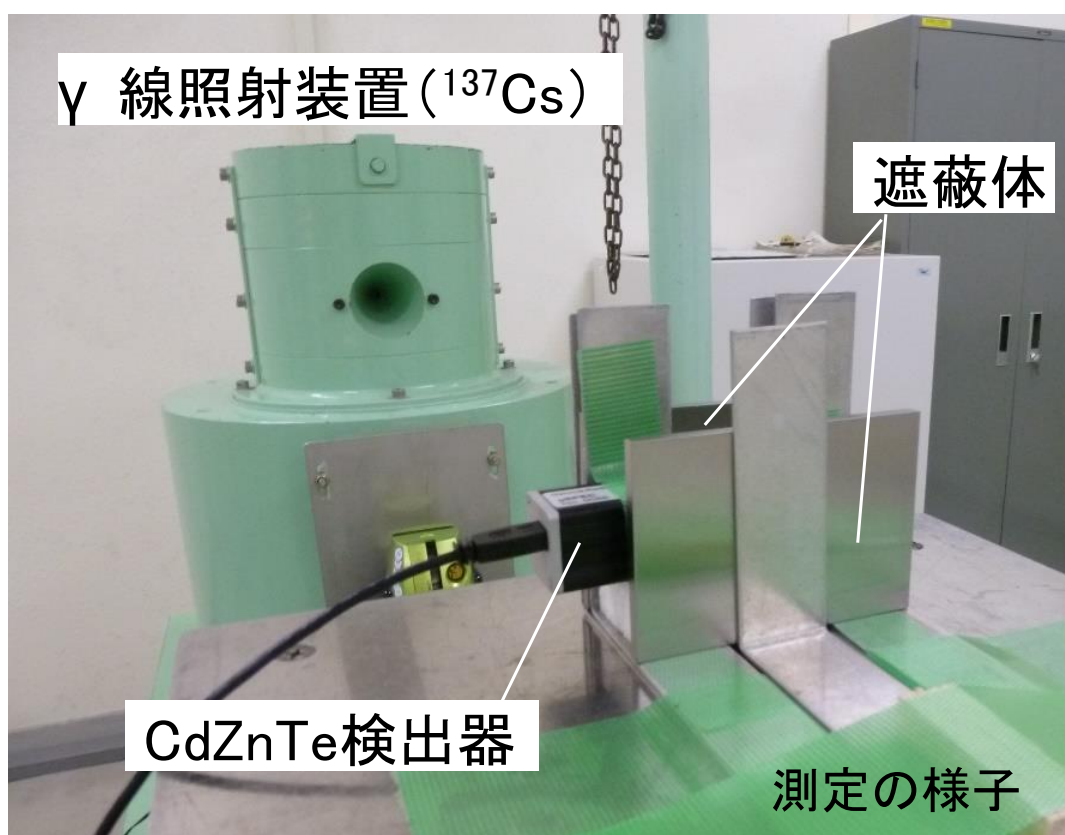


図4-2-10 γ線標準校正場における遮蔽体の性能試験の様子

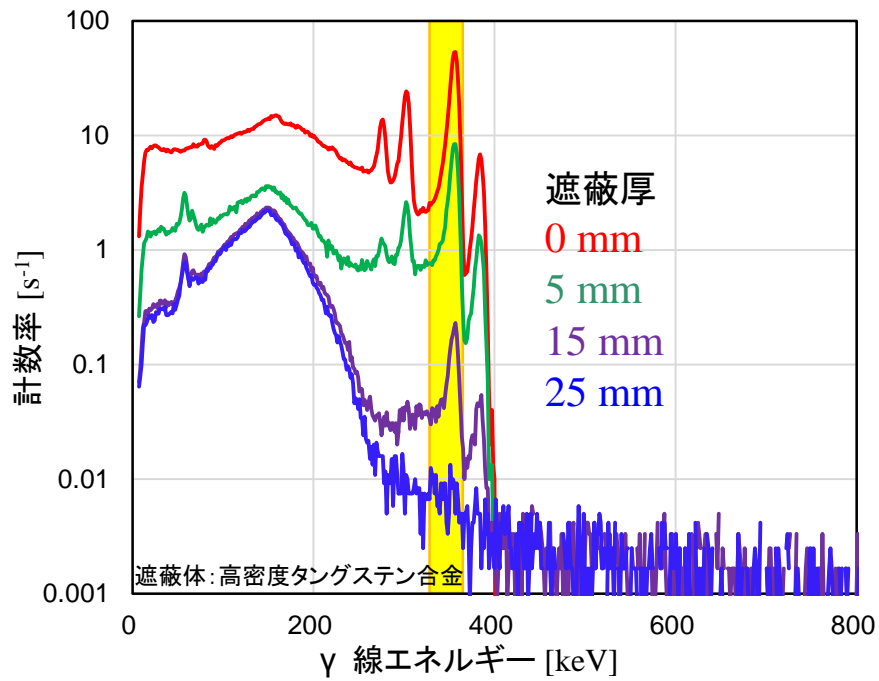


図 4-2-1-1 ^{133}Ba 線源からの 356keV γ 線の CdZnTe 検出器による波高スペクトル測定結果 (タングステン合金遮蔽体透過後)

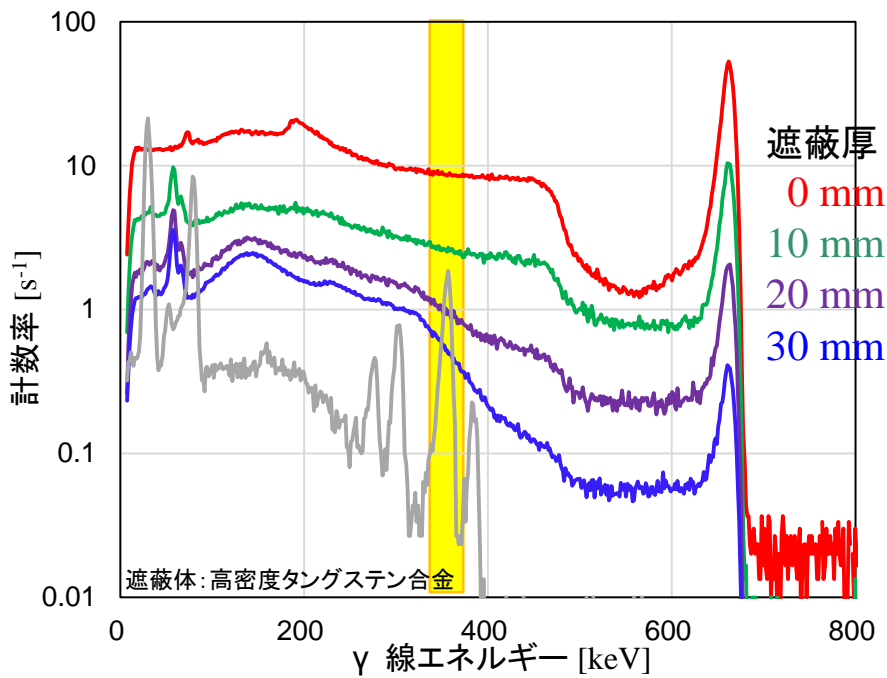


図 4-2-1-2 ^{137}Cs 線源からの 662keV γ 線の CdZnTe 検出器による波高スペクトル測定結果 (タングステン合金遮蔽体透過後)

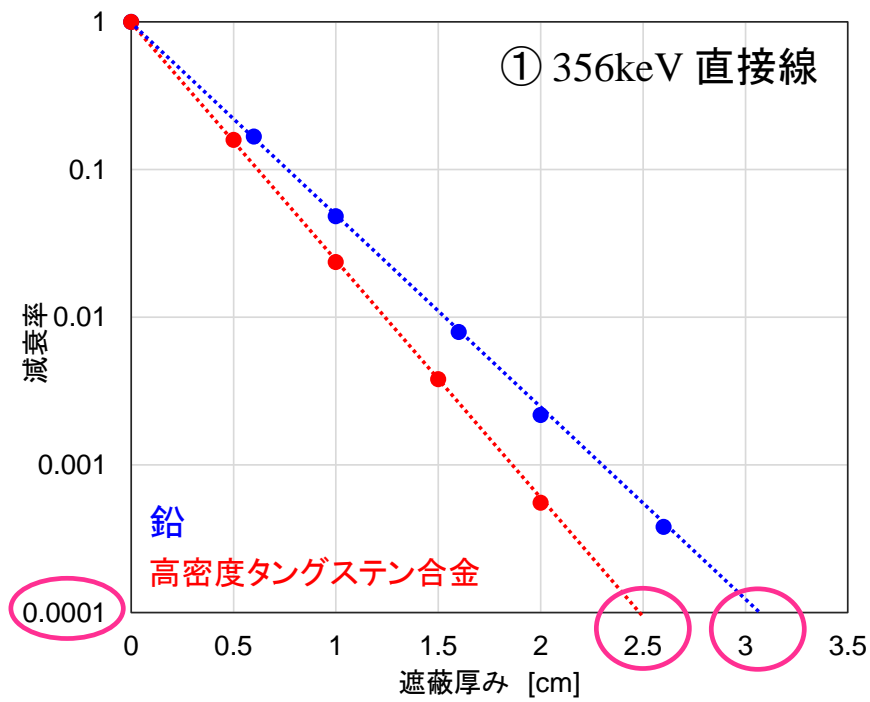


図 4-2-1-3 ^{133}Ba 線源からの 356keV γ 線の減衰率測定結果

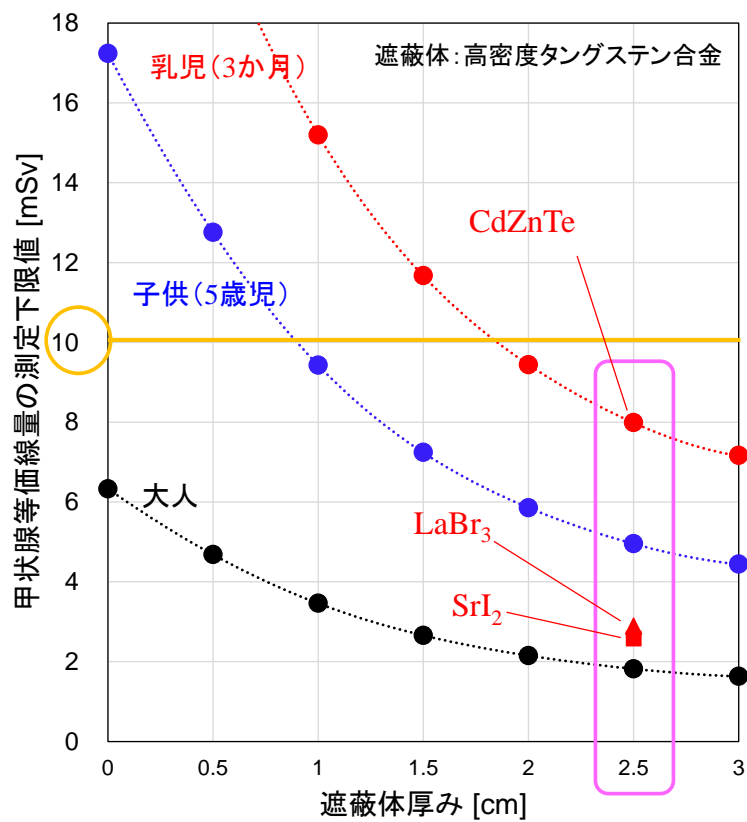


図 4-2-1-4 甲状腺等価線量の測定下限値と遮蔽体厚さの関係

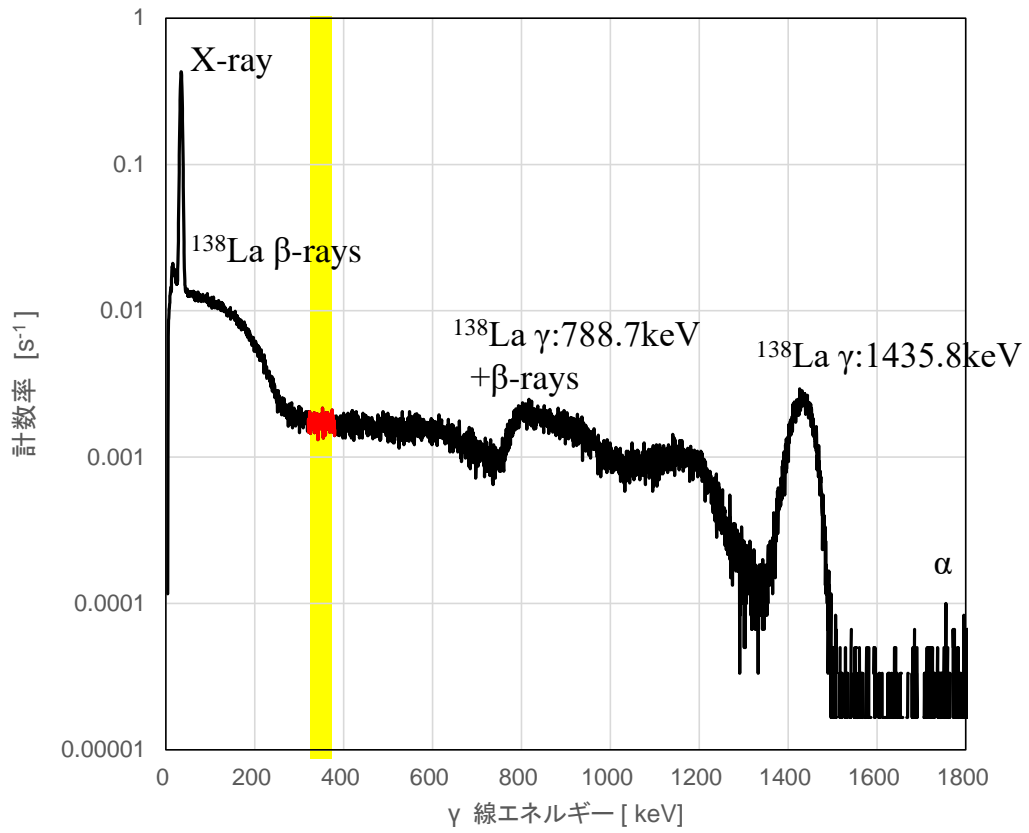


図 4-2-15 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の自己汚染による波高スペクトル

4. 3 高精度放射性ヨウ素定量法の開発

4. 3. 1 概要

開発を行っている甲状腺モニタは、作業者はもとより乳幼児等を含む多数の公衆構成員に対して甲状腺内放射性ヨウ素を定量することを目的としている。そこで、被検者の年齢による甲状腺の大きさ等の体格による計数効率への影響を評価して検出器配置等の測定条件を検討し、それに基づいた適切な校正条件を決定し、本モニタの計数効率を求める手法を確立しておく必要がある。このために、年齢別ボクセルファントムを用いた「検出器配置の最適化」及び年齢別「頸部ファントムの開発」を実施した。

4. 3. 2 検出器配置の最適化

甲状腺内放射性ヨウ素 ^{131}I の定量に必要な検出感度を確保するためには、頸部表面から放射線検出器までの距離を小さくすることが有効である。しかし、この距離が小さくなるにつれて、甲状腺と検出器の位置関係のずれが検出感度に大きく影響することから、正確な定量のためには配置を最適化することが重要である。そこで、目標とする検出感度（甲状腺等価線量測定下限値）を得るために必要な頸部表面から検出器までの距離をモンテカルロシミュレーション計算により求めた。図4-3-1に示す計算体系を用いて、PHITS 2.8.8をEGSモードで使用することにより計算を実施した[4,6]。年齢別数値ファントム（ボクセルファントム）を用いて、甲状腺に均一に分布する ^{131}I の放射能に対する $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の 364keV γ 線検出感度と頸部表面—検出器間距離との関係を求めた。幼児及び小児についてはGSFボクセルファントムを、成人についてはICRP標準ボクセルファントムを使用した[8,9]。そして、計算した検出感度と4.2.3節のデータを用いて ^{137}Cs 線源 $20\mu\text{Sv/h}$ の高バックグラウンド線量率下で 2.5cm 厚のタングステン合金製遮蔽が存在する条件におけるバックグラウンド計数を基に甲状腺等価線量の測定下限値と頸部表面—検出器間距離の関係を導出した（図4-3-2参照）。その結果、 4cm 以下の距離に設定すれば、最も厳しい条件の幼児についても設計目標である 10mSv の甲状腺等価線量評価下限値を満足できることから、遮蔽体厚さ及び構造を考慮して無理なく近づけられる距離である 2.5cm とした。

次に、甲状腺と検出器の位置のずれが与える影響を最小にするように配置を最適化した。開発する甲状腺モニタでは、検出器の感度を向上させるために、甲状腺の形状に合わせて2個の検出器を配置する設計となっている。そこで、この位置ずれの影響を小さくするように、2個の検出器間の距離について、最適化を被検者の年齢別に実施した。最適化のための計算体系を図4-3-3に示す。位置ずれの影響を評価するために、ボクセルファントム

と検出器の位置関係を上下・左右にそれぞれ 1 cm、前後に 0.5 cm ずらした計算を行い、得られた検出効率の変化の割合を位置ずれによる応答変化として評価した。検出器 1 個を使用した場合と比較した検出効率及び位置ずれによる応答変化の評価結果を表 4-3-1 及び図 4-3-4 に示す。計算結果より、1 台の検出器を頸部中央に配置するよりも、2 台の検出器を配置した方が位置ずれによる測定の不確かさを軽減でき、十分な検出感度を得られることがわかった。検出器の間隔は、位置ずれの影響を低減できるように成人に対しては 4 cm、小児及び乳幼児に関しては 6 cm に最適化した。

4. 3. 3 頸部ファントムの開発

甲状腺モニタの校正はこれまで主として、ORINS ファントムを用いて行われてきた[10]。しかし、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[11]。また、このファントムは、 ^{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ことから、線源管理も甲状腺モニタの維持管理上、問題であった。

そこで、本事業では、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。製作した頸部ファントムの写真を図 4-3-5 に示す。ファントムは全てアクリル製で成人、小児及び乳幼児の頸部の平均的なサイズを模擬し、 ^{133}Ba 密封点線源（チェックソース）を内蔵することが可能な構造とした。ファントムの線源設置孔は線源サイズに対して十分に大きな孔を設置しており、複数のサイズで作成したアクリル製スペーサーの組み合わせを変えることにより、ファントム内で線源の位置を自由に変更できる設計とした。

次に、図 4-3-6 に示すボクセルファントムを用いた計算体系と簡易頸部ファントムを用いた計算体系を使用して、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代表点を求めた。図 4-3-7 に計算で評価された代表点の位置を、表 4-3-2 に、ボクセルファントムと簡易頸部ファントム内の代表点で得られた検出効率を比較した結果を示す。その結果、2.5%以内の精度でボクセルファントムの甲状腺内の ^{131}I と等価な検出効率を与える代表点を簡易頸部ファントム内に決定できた。得られた代表点に点線源を配置することによって、簡便かつ正確に校正が可能であることがわかった。

表 4-3-1 検出器配置最適化後の甲状腺等価線量測定下限値

	計数効率 [cpm/Bq]	位置ずれによる検 出器応答の変化	甲状腺等価線量測 定下限値 [mSv]
成人	0.40	-15~20%	0.67
小児	0.60	-15~17%	2.2
幼児	0.71	-15~18%	4.0

表 4-3-2 ボクセルファントムの甲状腺に分布する ^{131}I と簡易頸部ファントムの代表点に設置した ^{133}Ba 点線源に対する検出効率(cpm/photons/s)の計算結果

	成人	小児	幼児
ボクセルファントム (A)	0.243±0.003	0.371±0.003	0.441±0.007
簡易頸部ファントム (B)	0.240±0.003	0.362±0.005	0.437±0.005
差 (B) / (A)	-1.4%	-2.5%	-0.9%
検出器をずらした時の差 (B) / (A) の変化	-6.7%~2.5%	-5.1~3.7%	-2.1~2.7%

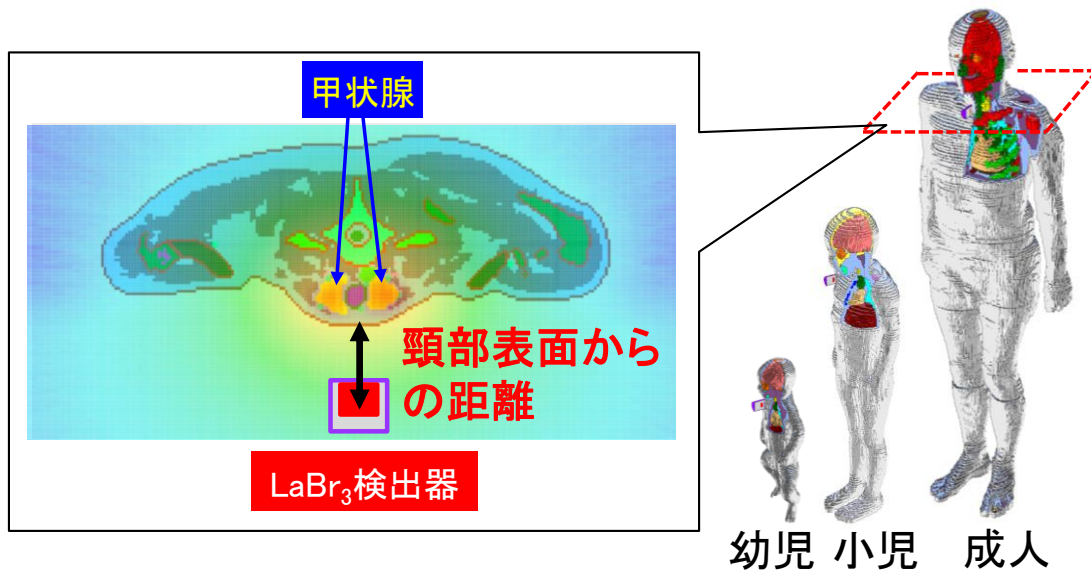


図 4-3-1 頸部表面から検出器までの距離最適化のための計算体系

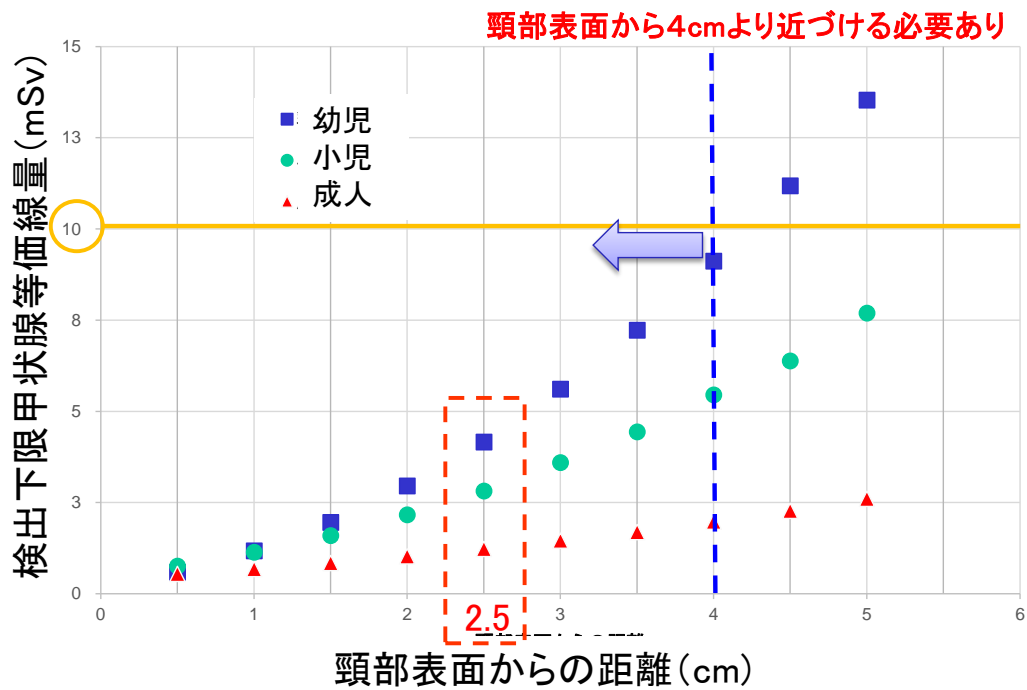


図 4-3-2 頸部表面から検出器までの距離と甲状腺等価線量の測定下限値との関係

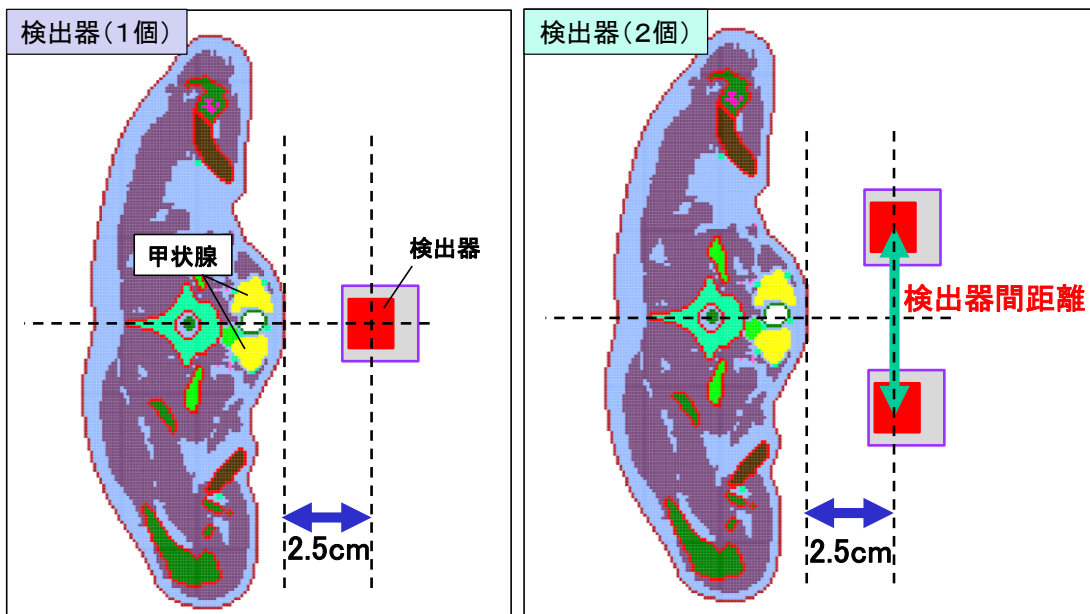


図 4-3-3 検出器間距離最適化のための計算体系

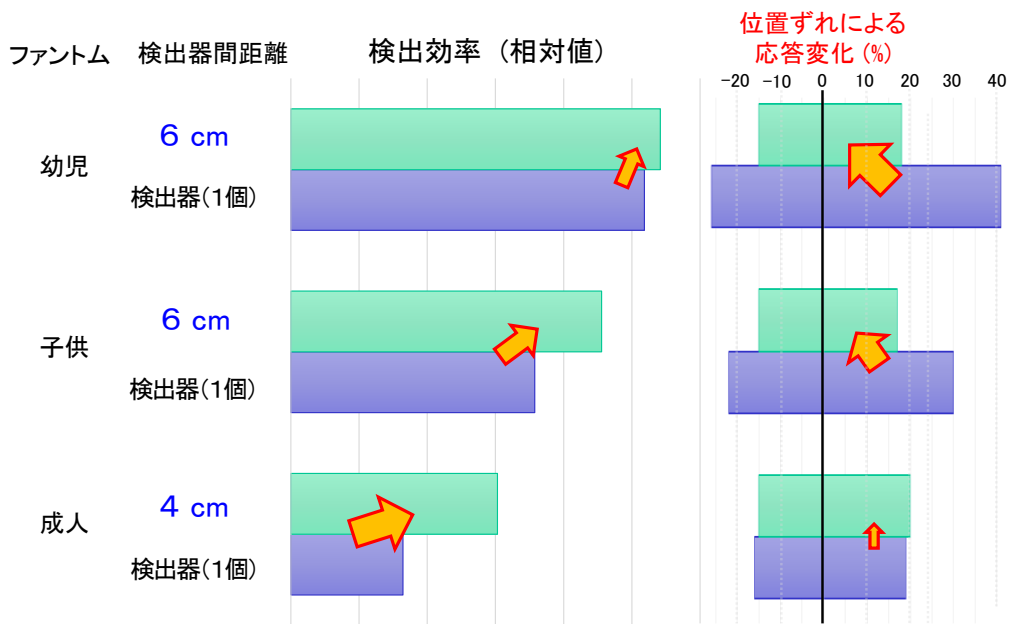


図 4-3-4 検出器間距離最適化による検出効率の変化及び位置ずれの影響

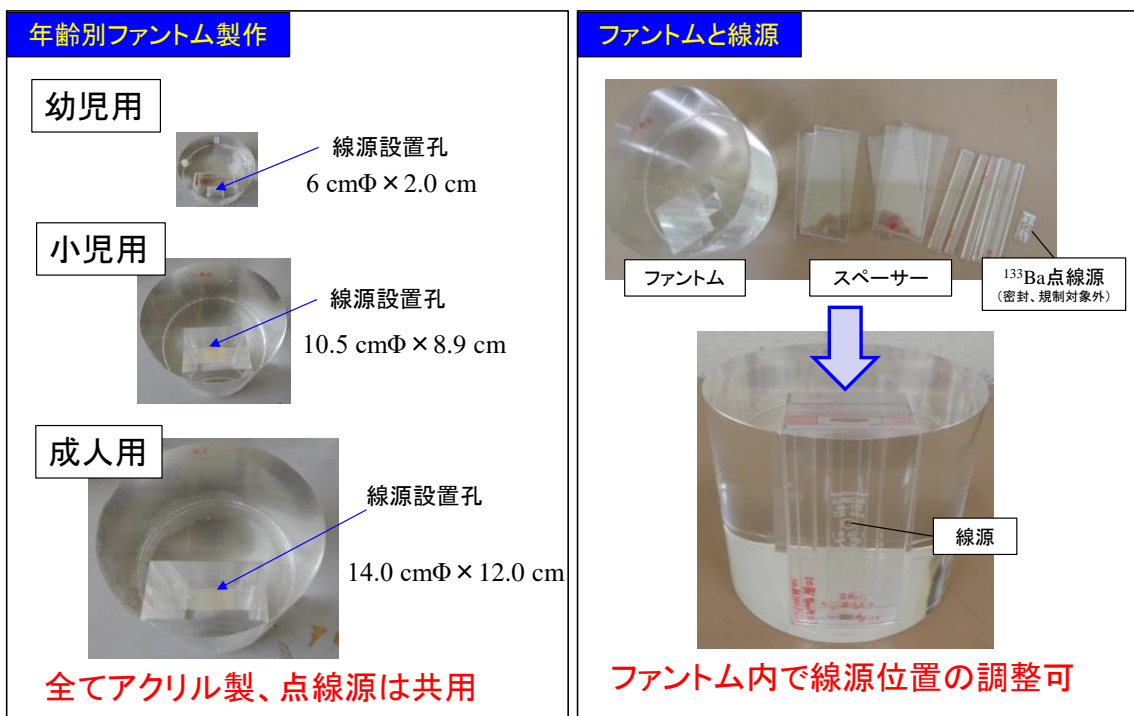


図 4-3-5 製作した頸部ファントムの写真

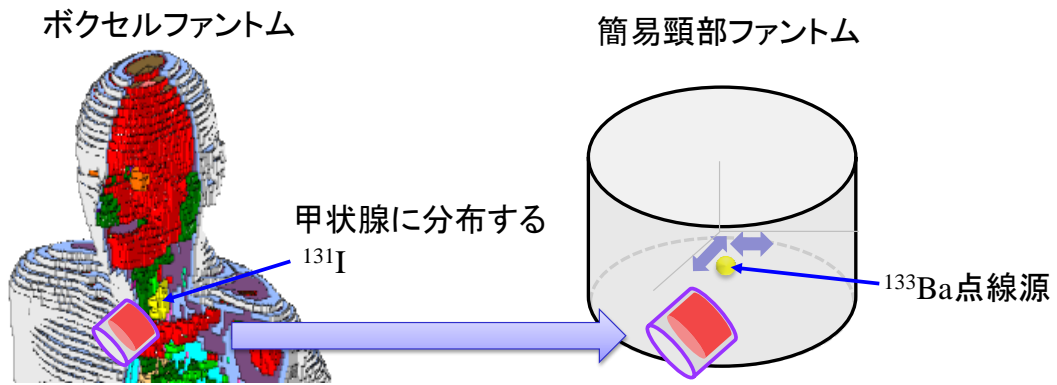


図 4-3-6 簡易頸部ファントム内の点線源設置位置決定のための計算の概念図

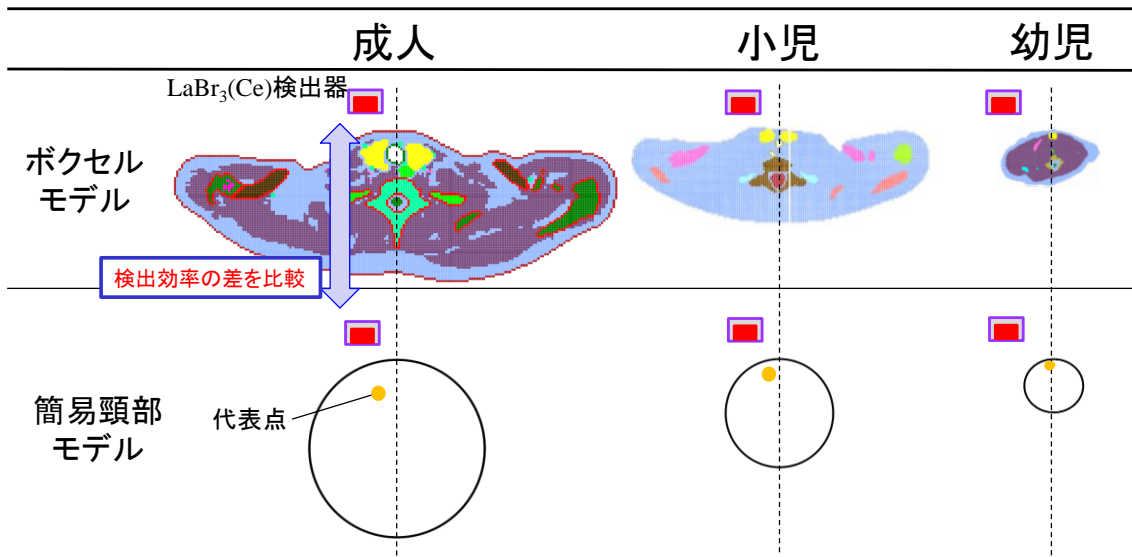


図 4-3-7 ボクセルファントムと等価な検出効率となる代表点の評価結果

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。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、測定条件が厳しく、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LaBr₃(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。

¹³⁷Cs γ 線標準校正場において20 μ Sv/hの高バックグラウンド線量率下を想定した試験を実施した結果、目標とする10 mSv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¹³¹I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、点線源と簡易物理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（付録2参照）。

5. 平成 29 年度事業の実績

○キックオフミーティングの開催

日時：平成 29 年 11 月 13 日 10:30～12:00

場所：日本原子力研究開発機構 東京事務所 及び 原子力科学研究所

議題：メンバー紹介、事業の概要、年度ごとの計画及び成果の公表予定、事業開始後の進捗報告

○毎月の進捗報告

報告日：毎翌月上旬（12 月 8 日、1 月 9 日、2 月 1 日、3 月 5 日）

方法：電子メールにて PO 及び PO 補佐に送付

○特許出願

出願日：平成 30 年 2 月 6 日

出願番号：特願 2018-019507

名称：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

備考：契約書の様式に基づき平成 30 年 2 月 23 日付で原子力規制委員会に産業財産権出願通知書を送付

○原子力規制委員会平成 29 年度第 1 回研究成果報告会（放射線安全規制研究戦略的推進事業）

日時：平成 30 年 2 月 26 日 13:30～18:00

概要：本事業の概要、研究計画、平成 29 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 1

○日本原子力学会 2018 年春の年会

日時：平成 30 年 3 月 26 日 14:45～15:30

場所：大阪大学 吹田キャンパス

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（1）全体概要、（2）検出器及び遮蔽体の最適化、（3）頸部ファントム及び定量法の開発（3 件のシリーズ発表）

備考：発表用資料：付録 2

○放射線医学総合研究所との情報交換

日時：平成 30 年 3 月 28 日 15:00～18:00

場所：量子科学技術研究機構 放射線医学総合研究所

議題：甲状腺モニタの開発に係る受託研究の進捗状況の報告及び情報交換

参考文献

- 1) 高田千恵. 内部被ばくの評価 (1) 体外計測法による評価. *Radioisotopes*, **63**, 239-247 (2014).
- 2) Nakano T., Kim E., Akahane K., Tominaga T., Tatsuzaki H., Kurihara O. and Sugiura N. *A Direct Measurements for Highly-exposed TEPCO Workers and NIRS First Responders Involved in the Fukushima NPS Accident*. NIRS-M-252, 27-34 (2012)..
- 3) Kim E, Kurihara O, Suzuki T., Matsumoto M., Fukutsu K., Yamada Y., Sugiura N. and Akashi M. *Screening Survey on Thyroid Exposure for Children after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident*. NIRS-M-252, 59-66 (2012).
- 4) 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)
- 5) 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>.
- 6) Hirayama, H., Namito, Y., Bielajew, A.F., Wilderman, S.J. and Nelson, W.R. *The EGS5 code system*, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
- 7) 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).
- 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) International Commission on Radiological Protection, *Adult Reference Computational Phantoms*, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39(2), (2009).
- 10) Palmer, H.E. et. al. *Standard field methods for determining ^{137}Cs and ^{131}I in-vivo*, *Health Phys.*, **30**, 113-118 (1976).
- 11) 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).

平成29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30年2月26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】 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。

以下の3つのテーマを実施する

① 甲状腺モニタ測定器の開発

→ γ 線スペクトル測定に最適な検出器を選定し、高B.G.用遮
蔽体を含めた測定系を開発

② 高精度放射性ヨウ素定量法の開発

→ 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

③ 甲状腺モニタシステムの開発

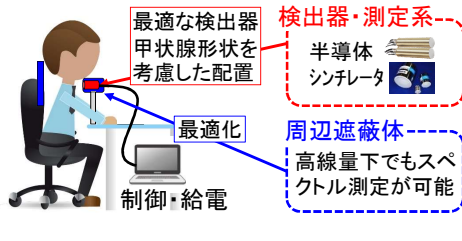
→ 検出器固定治具を製作するとともに試作したシステムの使
用マニュアルを整備する

1

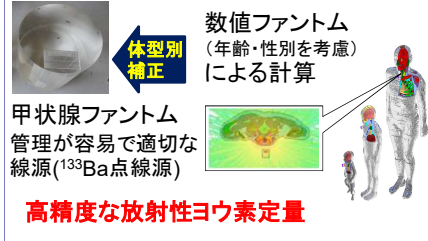
【研究の概要】甲状腺モニタシステムの概念図



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。



測定器の取扱説明書を作成する

迅速・高精度甲状腺モニタシステムを開発(事故時の公衆・作業者の放射線防護に貢献)

2

【研究の概要】システムの開発目標



甲状腺モニタシステムの目標性能・仕様

項目	目標	備考
B.G.線量率 (使用上限値)	数十 μ Sv/h 以上	
測定時間	5分/人 以内	
評価可能人数	150人/日 以上	1システム当たり
評価下限値	1 kBq 以下	摂取3~5日後に測定
電源	ノートPC等のバッテリーで数時間以上動作可能	測定系及び線量評価ソフトを含む

3

【研究の概要】 研究計画



項目	平成29年度	平成30年度	平成31年度
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"> 検出器及び遮蔽の選定 測定器の試作性能評価 	<ul style="list-style-type: none"> 実機の製作 試作機の完成
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
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

4

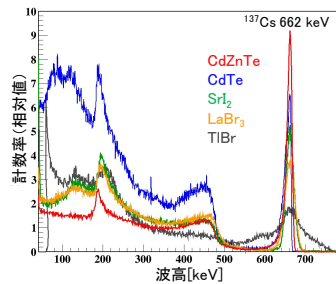
【研究の進捗】 ① 甲状腺モニタ測定器の開発



○ 検出器の試験・選定

検出器	CdZnTe	CdTe	LaBr ₃	SrI ₂	TlBr
有感部体積	1.5cm ³	0.1cm ³	1cm ³	1cm ³	0.3cm ³
エネルギー分解能*	2.2%	2.8%	3.3%	3.2%	10.4%
備考	高分解能、高価	高分解能、安価	大型化が可能、安価	大型化が可能、安価	原子番号高品質に課題

*Cs-137線源からの662keVγ線で評価



・分解能が優れるCdZnTe及び大型化が容易なLaBr₃、SrI₂が有望

用途に応じて最適な検出器を選択

○ 指揮所等に設置する作業用システム

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

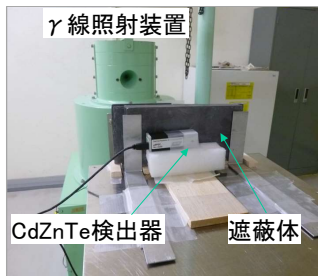
幼児等を考慮した短時間測定、より低い評価下限値
⇒ 大型化による感度向上が可能なLaBr₃、SrI₂検出器(1インチ立方)

5

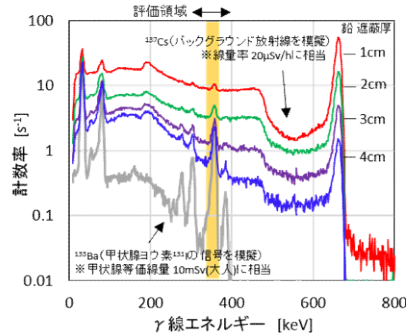
【研究の進捗】 ①甲状腺モニタ測定器の開発



○遮蔽体材質・形状の最適化



Cs-137 γ 線標準校正場において、遮蔽体の種類及び厚さを变化させて遮蔽効果を確認



- 鉛遮蔽体: 2.5cm程度の厚さで高線量率下(20 μ Sv/h)において甲状腺に蓄積したI-131について1kBqの測定下限値を達成可能
- より遮蔽効果が高いタングステン合金について試験・評価を実施中

6

【研究の進捗】 ②高精度放射性ヨウ素定量法の開発



○年齢別頸部ファントムの製作

取扱が容易なBa-133点線源(密封、規制対象外)と頸部ファントムを用いた校正法の開発に必要な、年齢別頸部ファントムを製作

- 甲状腺内に均一分布するI-131と等価な計数効率を与える代表点を求め、そこに点線源を配置
- 簡便かつ正確な校正を実現

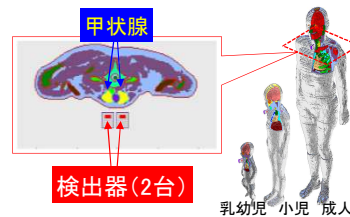


乳幼児用 小児用 成人用
製作した頸部ファントム

○頸部及び数値ファントムによる定量法の開発

甲状腺形状を考慮して検出器(2台)を配置
数値ファントムを用いて、小児及び乳幼児で計数効率が同程度となる検出器の配置を決定

- 検出感度の向上(測定時間の短縮、評価下限の引き下げ)
- 体格及び甲状腺位置のずれが検出効率に与える影響を低減(測定精度の向上)



乳幼児 小児 成人

7

【自己評価】 進捗状況及び成果公表



(1) 進捗状況(平成29年度)

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を選定
- ・ 遮蔽体の性能評価を実施し最適な材質・厚さを選定

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

⇒ 自己評価として、概ね計画どおりに進捗

(2) 成果の公表

- ・ 特許(平成30年2月6日出願)
- ・ 日本原子力学会 2018年春の年会にて口頭発表(3件)
 - 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 (1) 全体概要
 - 西野 他: エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発 (2) 検出器及び遮蔽体の最適化
 - 吉富 他: エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発 (3) 頸部ファントム及び定量法の開発

8

【次年度計画】 テーマ別開発項目



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

- ・ 材質及び厚さを最適化した遮蔽体の設計・試作
- ・ 公衆用及び作業用者の2種類の検出器を試作
- ・ 検出器制御用ソフトウェアを開発

↓
公衆用及び作業用者の甲状腺モニタ試作機の完成

② 高精度放射性ヨウ素定量法の開発

- ・ 性別、年齢、体格等の相違を反映させるための補正方法を開発
⇒ 簡易頸部ファントムを用いた校正結果に適用

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の検出器固定治具を設計

9

【次年度計画】 成果の公表



- AOCRP-5(5月20日～23日)で成果公表(予稿2件提出済)
「Characteristics of spectrometer and shield for thyroid dose monitoring system in high dose rate environment」
「A new method to evaluate radioiodine activity in thyroid by the gamma spectroscopy measurements using a simplified physical phantom incorporated with numerical simulations」
- 5thEuropean IRPA Congress(6月4日～8日)で成果公表(予稿提出済)
「Conceptual design of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers」
- 原子力学会で進捗を報告

エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素 モニタの開発

(1) 全体概要



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

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

背景



福島第一原子力発電所事故時の公衆・作業者の内部被ばく線量評価

核種	評価対象	評価方法	特徴・課題
放射性Cs	多くの公衆及び 作業者	WBC	・比較的迅速かつ正確に測定・評価 が可能
放射性 ヨウ素	限定された公衆、 作業者	・線量計 ・WBC ・推定(放射性Cs比、 大気中濃度)	・短半減期のため迅速測定が必要 ・高線量率下での線量計を用いた 測定は困難

放射性ヨウ素による内部被ばく線量の迅速評価法の開発が必要

➡ γ 線スペクトル分析に基づき、迅速かつ高精度に甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素の放射能を計測・評価できる可搬型システムを開発

- 原子力規制委員会 平成29年度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

1

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

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。

以下の3つのテーマを実施する

①甲状腺モニタ測定器の開発

⇒ γ線スペクトル測定に最適な検出器を選定し、高B.G.用遮
蔽体を含めた測定系を開発

②高精度放射性ヨウ素定量法の開発

⇒ 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
を数値ファントムと簡易物理ファントムを用いて開発

③甲状腺モニタシステムの開発

⇒ 検出器固定治具を製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(平成30～31年度に実施予定)

2

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26～28日、大阪大学)

システムの開発目標



甲状腺モニタシステムの目標性能・仕様

項目	目標	備考
B.G.線量率 (使用上限値)	数十μSv/h 以上	
測定時間	5分/人 以内	
評価可能人数	150人/日 以上	1システム当たり
評価下限値	10 mSv 以下	摂取3～5日後に測定
電源	ノートPC等のバッテリーで数時 間以上動作可能	測定系及び線量評価ソフト を含む

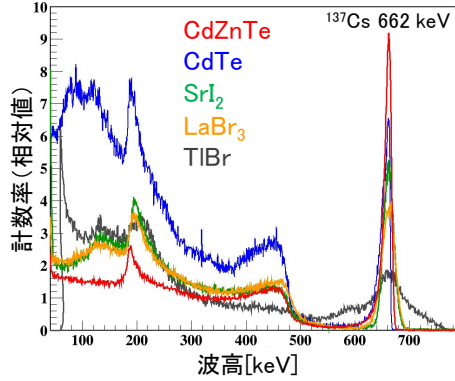
3

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26～28日、大阪大学)

① 甲状腺モニタ測定器の開発



○ 検出器の試験・選定



候補となる5種類の検出器について、Cs-137線源からの662keV γ 線エネルギー分解能を確認

検出器	CdZnTe	CdTe	LaBr ₃	SrI ₂	TlBr
有感体積 [cm ³]	1.5	0.1	1.0	1.0	0.3
分解能	2.2%	2.8%	3.3%	3.2%	10.4%

・分解能が優れるCdZnTe及び大型化が容易なLaBr₃、SrI₂が有望

詳細はシリーズ発表「(2) 検出器及び遮蔽体の最適化」で報告

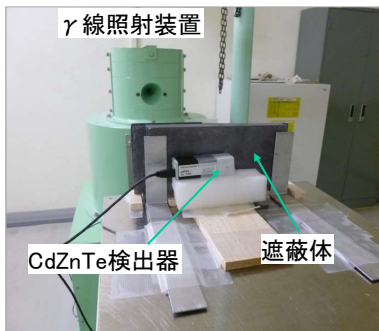
日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

4

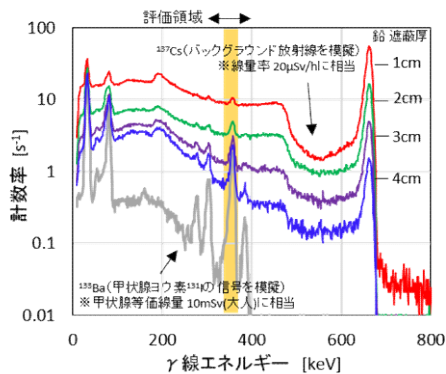
① 甲状腺モニタ測定器の開発



○ 遮蔽体材質・形状の最適化



Cs-137 γ 線標準校正場での試験



高線量率下でのCdZnTe検出器波高スペクトル測定例(鉛遮蔽体)

目標とする評価下限値を満足できる遮蔽体の材質及び形状(厚さ)を評価

詳細はシリーズ発表「(2) 検出器及び遮蔽体の最適化」で報告

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

5

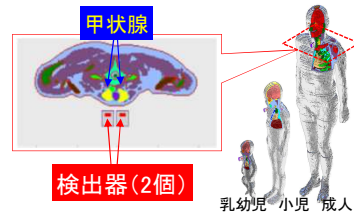
②高精度放射性ヨウ素定量法の開発



○検出器配置の最適化

甲状腺形状を考慮して2個の検出器を配置
数値ファントムを用いて、最適な検出器の配置を決定

- 検出感度の向上(測定時間の短縮、評価下限の引き下げ)
- 甲状腺位置のずれが検出効率に与える影響を低減(測定精度の向上)



○甲状腺モニタ校正方法の開発

取扱いが容易なBa-133点線源(密封、規制対象外)を用いた年齢別頸部ファントムを製作

- 甲状腺内のI-131と等価な計数効率を与える代表点を求め、そこに点線源を配置
→ 簡便かつ正確な校正を実現



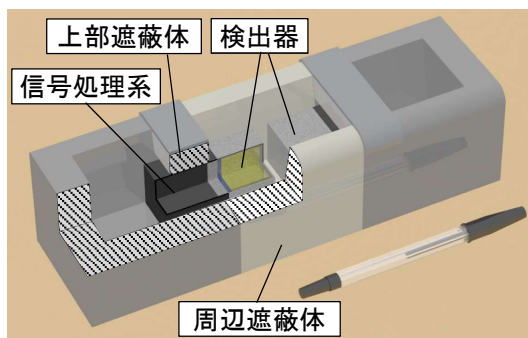
乳幼児用 小児用 成人用
製作した頸部ファントム

詳細はシリーズ発表「(3)頸部ファントム及び定量法の開発」で報告

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

6

甲状腺モニタ及び測定法



開発する甲状腺モニタの概念図

- 2個の検出器を使用(測定精度の向上)
- 遮蔽体により高線量率下でも使用可能
- 避難所や指揮所の会議机などにも容易に設置できる

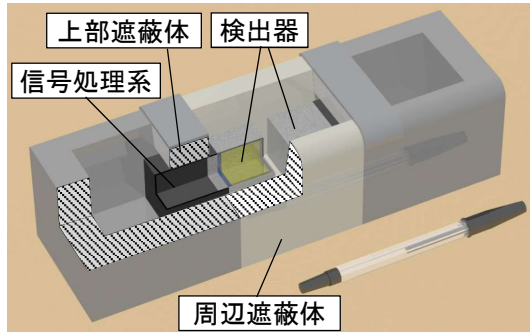


甲状腺モニタを用いた測定のイメージ(測定前)

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

7

甲状腺モニタ及び測定法



開発する甲状腺モニタの概念図

- 2個の検出器を使用(測定精度の向上)
- 遮蔽体により高線量率下でも使用可能
- 避難所や指揮所の会議机などにも容易に設置できる



甲状腺モニタを用いた測定のイメージ(測定時)

甲状腺モニタの構造及び測定法について特許出願

8

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

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システム**の開発を開始
⇒ 多数の公衆及び作業者について、放射性ヨウ素摂取量の迅速かつ高精度な測定・評価が可能

開発内容

① 甲状腺モニタ測定器の開発

検出器の選定及び遮蔽体材質・形状を最適化
⇒ シリーズ発表「(2) 検出器及び遮蔽体の最適化」にて報告

② 高精度放射性ヨウ素定量法の開発

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数値ファントムと簡易物理ファントムを用いて開発
⇒ シリーズ発表「(3) 頸部ファントム及び定量法の開発」にて報告

➤ 本件は、原子力規制委員会「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」により得られた成果の一部である。

9

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)



エネルギー分析型甲状腺放射線モニタの開発 (2) 検出器及び遮蔽体の最適化

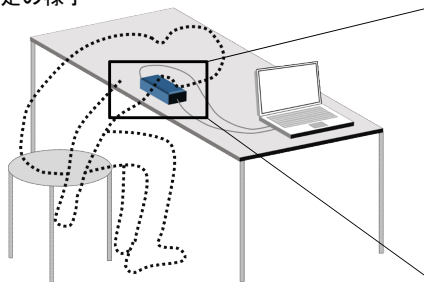
日本原子力研究開発機構
西野 翔、谷村 嘉彦、吉富 寛、高橋 聖

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26日-28日(大阪大学))

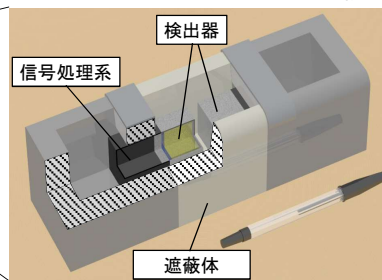
本研究の目的



測定の様子



甲状腺モニタの構造



数 $10 \mu\text{Sv/h}$ の高バックグラウンド線量率下における、
5分以下(1人当たり)の測定で、
甲状腺等価線量の測定下限値 10 mSv (大人、子供、乳児)
が達成可能な、検出器及び遮蔽体を選定する

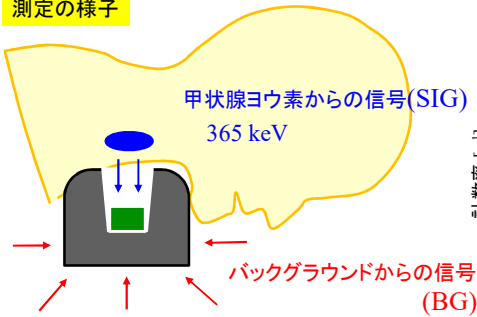
1

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26日-28日(大阪大学))

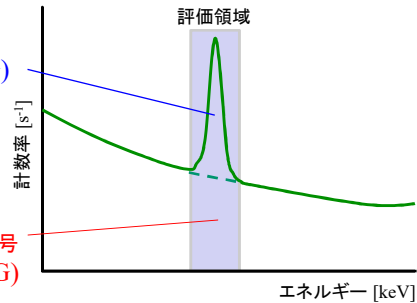
検出器&遮蔽体に求められる性能



測定の様子



甲状腺モニタで得られるスペクトル



検出器への要求

- ・ γ 線感度が高いこと \Rightarrow 短時間の測定で十分な統計精度
- ・エネルギー分解能が良いこと \Rightarrow 評価領域中のBGイベントを低減

遮蔽体への要求

- ・バックグラウンド環境からの¹³¹I直接線を十分に遮蔽できること
- ・評価領域中のBGイベントを十分低減できること

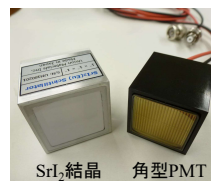
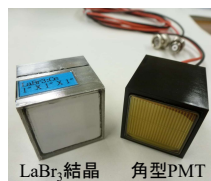
日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

2

検出器&遮蔽体の候補



検出器	半導体検出器		シンチレーション検出器	
	CdZnTe	LaBr ₃ (Ce)	SrI ₂ (Eu)	
原子番号	48/30/52	57/35	38/53	
有感体積	1.5 cm ³	16 cm ³	16 cm ³	



遮蔽体

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



日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

3

エネルギー分解能とγ線感度

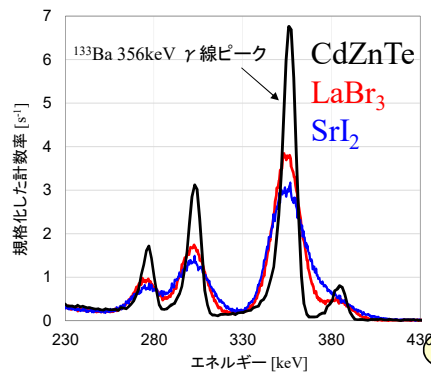
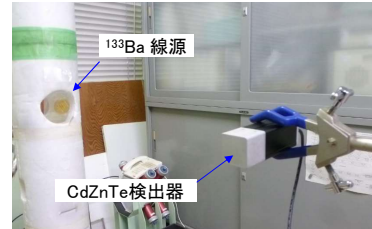


^{133}Ba 線源 356 keV (^{131}I 365 keVを模擬)を用いて、

- ・ エネルギー分解能 $\Delta E/E$ (FWHM)
- ・ γ線感度 R

を評価

	$\Delta E/E$	R
CdZnTe	2.8 %	0.39 cm^2
LaBr_3	5.3 %	1.9 cm^2
SrI_2	5.5 %	2.5 cm^2



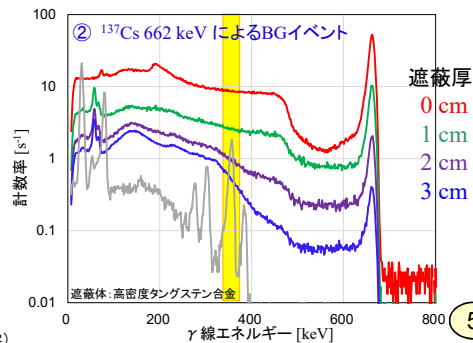
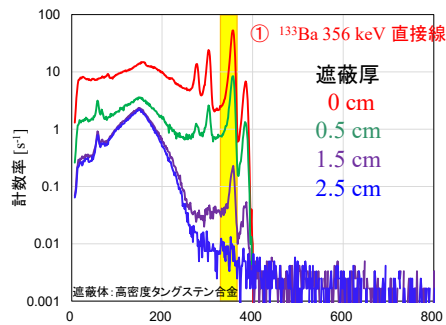
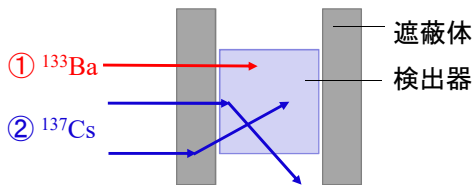
日本原子力学会2018年春季の年会(平成30年3月26日~28日、大阪大学)

4

遮蔽性能試験



放射線標準施設(JAEA/FRS)において、鉛、高密度タングステン合金の遮蔽性能を評価



日本原子力学会2018年春季の年会(平成30年3月26日~28日、大阪大学)

5

遮蔽試験の結果(① ^{133}Ba 356 keV 直接線)



数10 uSv/hのバックグラウンド環境下において、甲状腺等価線量 10 mSv を測定する上で、

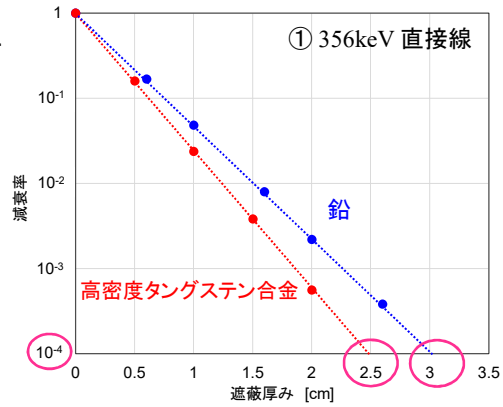
$\text{BG}^{131}\text{I} 365\text{keV} \ll \text{甲状腺}^{131}\text{I} 365\text{keV}$

となる減衰率の目安 10^{-4}

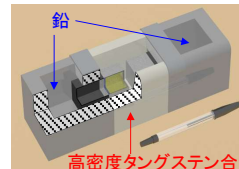


鉛で、3.0 cm

高密度タングステン合金で、2.5 cm



サイズの制限が厳しい頸部の上下方向は、
高密度タングステン合金 2.5 cm を採用
その他の部分は、鉛でよい



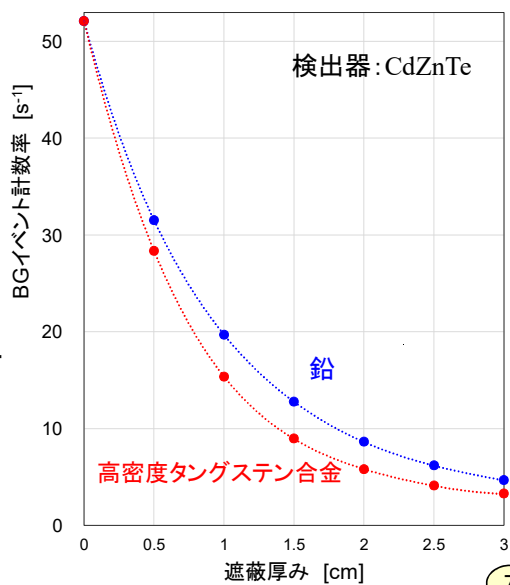
6

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

遮蔽試験の結果(② ^{137}Cs 662 keV によるBGイベント)



高密度タングステン合金
2.5 cm厚を用いることで、
BGイベント計数率を1/10 以下
に低減することが可能



7

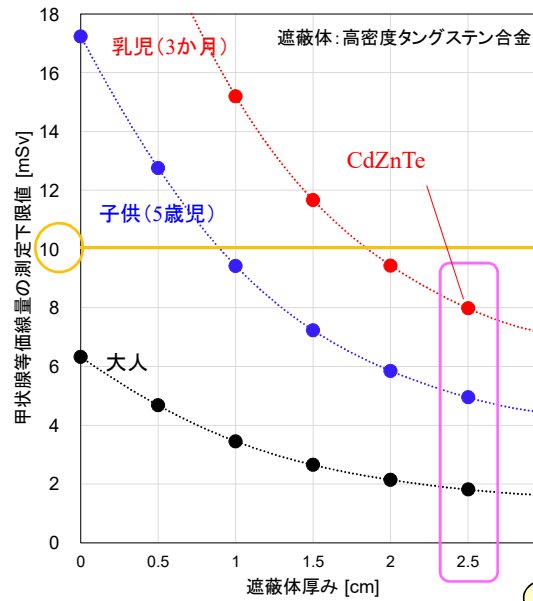
日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

甲状腺等価線量の測定下限値



評価の条件

- ・バックグラウンド線量率
20uSv/h
- ・摂取5日後に測定
- ・測定時間 150秒
- ・取込形態: 吸入粒子



日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

8

甲状腺等価線量の測定下限値



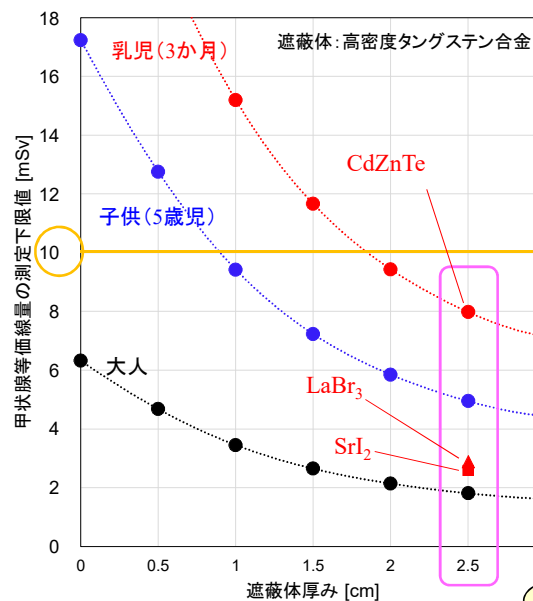
評価の条件

- ・バックグラウンド線量率
20uSv/h
- ・摂取5日後に測定
- ・測定時間 150秒
- ・取込形態: 吸入粒子

**CdZnTe, LaBr₃, SrI₂ の
いずれを使用した場合でも、
測定下限値 10 mSv 以下を
達成可能**

LaBr₃と SrI₂ には大差なし

⇒ 時間応答に優れ、かつ安価な
LaBr₃がより適当



日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

9

まとめ

**CdZnTe, LaBr₃, SrI₂ のいずれを使用した場合も、
高密度タングステン合金 2.5 cm厚 の遮蔽を用いることにより、
甲状腺等価線量の測定下限値 10 mSv が達成可能**

(※バックグラウンド線量率: 20 μ Sv/h、測定時間: 150秒)

指揮所等に設置する作業用モニタ

多核種が混在、高線量率 \Rightarrow 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モニタ

短時間測定、より低い評価下限値 \Rightarrow γ 線感度の高い LaBr₃検出器

今後

実機により近い形で性能試験を実施し、測定器デザインの最適化を行う

本件は、原子力規制委員会「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」により得られた成果の一部である。

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発

(3) 頸部ファントム及び定量法の開発



○吉富 寛、西野 翔、高橋 聖、谷村 嘉彦
原子力機構 安全研究センター

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

背景と目的



○開発する甲状腺モニタ

多数の公衆及び作業者に対して迅速に甲状腺内の放射性ヨウ素を精度よく定量

○課題と目的

① 検出器配置の決定(十分な感度の確保)

検出器近接による感度向上 → 位置ずれによる影響増大

2個の検出器による測定で解決

頸部表面からの距離と検出器間距離の決定

② 甲状腺モニタの校正方法(高精度な定量)

甲状腺模擬ファントムによる校正

溶液封入線源の使用
体格ごとに線源が必要



線源の管理が難しい

密封点線源で置き換え

頸部ファントムの製作、点線源位置の最適化

1

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

① 検出器配置の決定



○モンテカルロ計算による検出器の応答評価

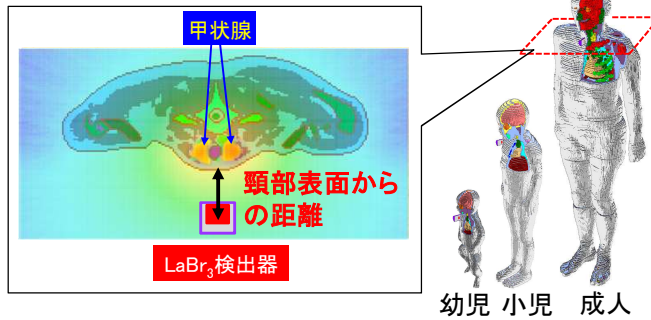
モンテカルロコード: PHITS 2.8.0 (EGS mode)

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)

線源 : 甲状腺内の¹³¹I (364 keV光子)

検出器 : 1インチ立方 LaBr₃(Ce)シンチレータ

評価条件 : 摂取後5日後の150秒測定、BG線量率: 20μSv/h(¹³⁷Cs)
2.5cm厚タンゲステン合金遮蔽下



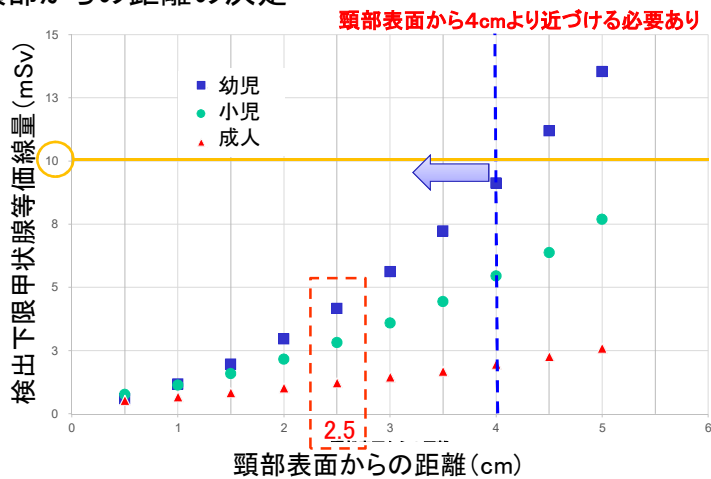
日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

2

① 検出器配置の決定



○頸部からの距離の決定



甲状腺モニタの遮蔽構造を考慮して、2.5 cm位置に決定

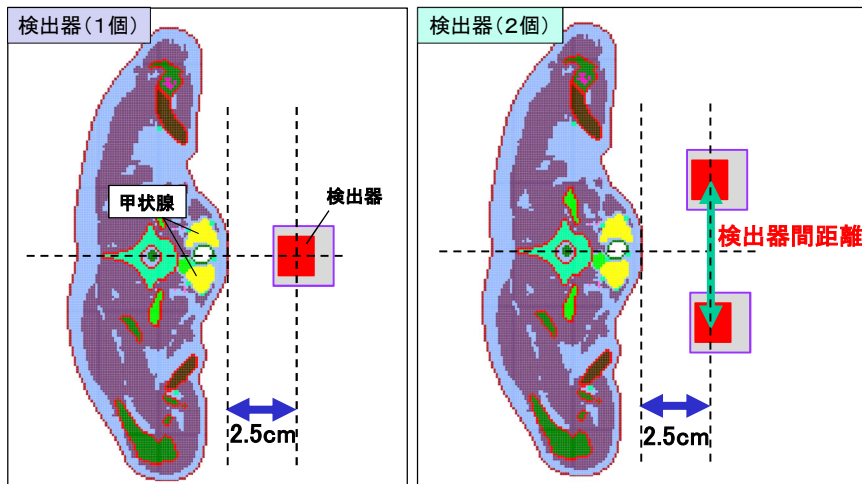
日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

3

① 検出器配置の決定



○ 検出器間距離の決定



前後上下左右にファントムを動かし、位置ずれによる応答変化を評価

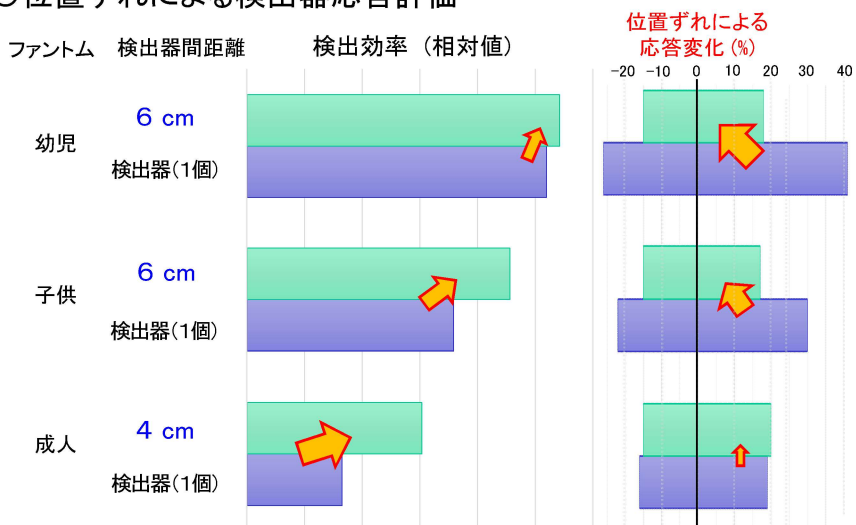
日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

4

① 検出器配置の決定



○ 位置ずれによる検出器応答評価



日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

5

① 検出器配置の決定



○ 決定した検出器配置での検出下限評価

1インチ立方LaBr₃(Ce)シンチレータ使用時

	計数効率 (cpm/Bq)	位置ずれによる 検出器応答変化	検出下限 甲状腺等価線量 (mSv)
成人	0.40	-15~20 %	0.67
小児	0.60	-15~17 %	2.2
幼児	0.71	-15~18 %	4.0

位置ずれによる影響を抑え、十分な感度を確保できた

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

6

② 甲状腺モニタ校正方法の開発



○ 点線源内蔵型頸部ファントムの製作

年齢別ファントム製作

幼児用

線源設置孔
6 cmΦ × 2.0 cm

小児用

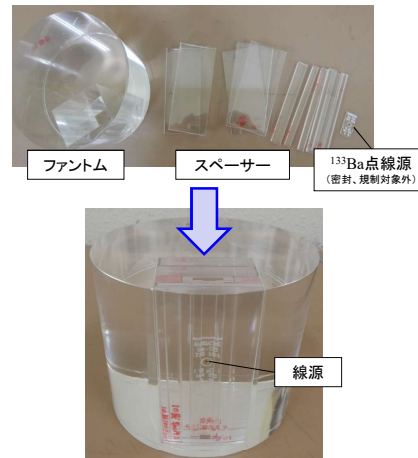
線源設置孔
10.5 cmΦ × 8.9 cm

成人用

線源設置孔
14.0 cmΦ × 12.0 cm

全てアクリル製、点線源は共用

ファントムと線源



ファントム内で線源位置の調整可

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

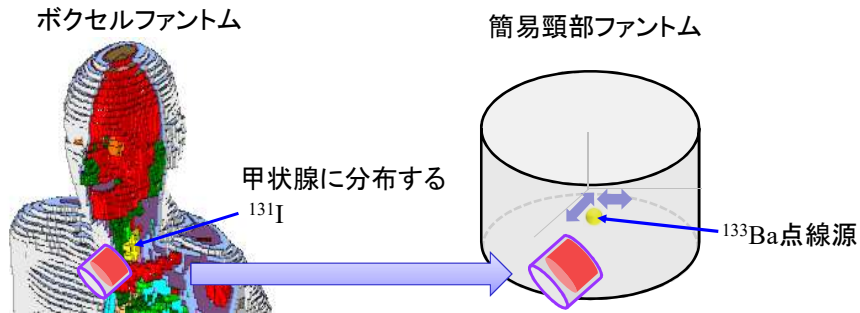
7

② 甲状腺モニタ校正方法の開発



○点線源位置の最適化

人体を詳細に模擬したボクセルモデルと等価になる点を見つける



検出器配置位置及びその近傍において、ボクセルファントムと等価な検出効率を与える点線源の位置(代表点)を求める

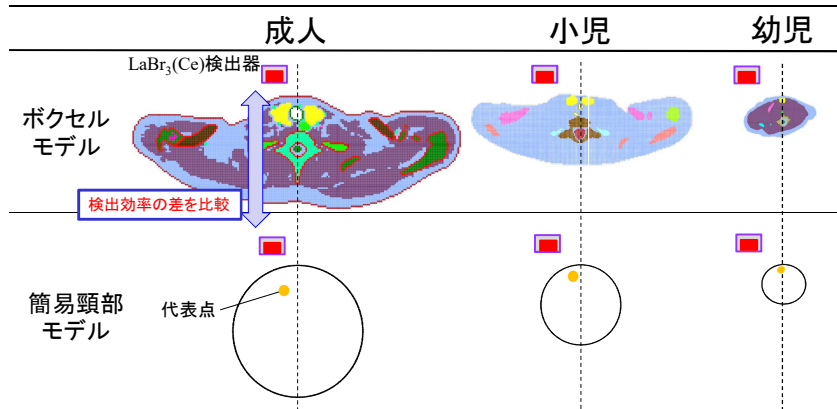
日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

8

② 甲状腺モニタ校正方法の開発



○ボクセルファントムと等価な検出効率を与える代表点



検出効率の差: -2.5 ~ 0.9 %

検出器を近傍で1cmずらしたときも、その差は-6.7~3.7 %

➡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

日本原子力学会2018年春の年会(平成30年3月26~28日、大阪大学)

9

① 検出器配置の決定

○ 2個の検出器を頸部表面から2.5cm位置に配置
検出器間距離は成人で4cm、子供、幼児で6cm

➡ 位置ずれによる影響を低減しつつ、20 μ Sv/h環境下、5日後の測定でも甲状腺等価線量で5mSv程度を測定可能

② 甲状腺モニタの校正方法

○ 点線源内蔵型年齢別頸部ファントムを製作
ボクセルモデルと等価な検出効率を与える代表点位置を決定

➡ 簡易頸部ファントム内の代表点位置に¹³³Ba密封点線源を配置し、甲状腺モニタを校正することが可能

本件は、原子力規制委員会「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」により得られた成果の一部である。