

令和 2 年度事後評価 対象課題 成果報告書

(令和元年度)

○目次

1. 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（令和元年度）・・・P. 1
2. 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（令和元年度）・・・P. 166
3. 環境モニタリング線量計の現地校正に関する研究（令和元年度）・・・P. 365
4. 放射線業務従事者に対する健康診断のあり方に関する検討（令和元年度）・・・P. 404
5. 染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究（令和元年度）・・・P. 547
6. 円滑な規制運用のための水晶体の放射線防護に係るガイドラインの作成（令和元年度）・・・P. 654

平成 31 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業

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

平成 31 年度 事業成果報告書

令和 2 年 3 月

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

本報告書は、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構が実施した「平成 31 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」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. はじめに.....	1
2. 事業概要.....	2
3. 実施体制.....	3
4. 実施報告書.....	4
4.1 今年度（2019年度）の事業進捗.....	4
4.2 既存検出器を用いた測定法の確立.....	6
4.3 新甲状腺モニタの開発及び実用化.....	18
4.4 情報収集支援システムの改良.....	32
4.5 研修会.....	37
5. まとめ.....	38
5.1 今年度の成果.....	38
5.2 3カ年の成果（2017-2019年度）.....	38
6. 参考文献.....	39
7. 成果発表.....	41
付録.....	42
A 研究成果概要（2017-2019年度）.....	42
B 甲状腺簡易測定マニュアル.....	54
C 新甲状腺モニタ用ソフトウェアの取扱説明書.....	74
D 新甲状腺モニタ簡易使用法.....	128
E 情報収集支援システム取扱説明書.....	137

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震が引き金となり発生した東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島第一原発事故）により、大量の放射性物質が周辺環境中に放出されることとなり、事故の収束作業に従事した緊急作業員のみならず、一般公衆に対しても追加の放射線被ばくをもたらすこととなった。幸いにも、人々が福島第一原発事故から受けた被ばく線量は低く、放射線被ばくに起因する将来の健康リスクは検出することが困難なほど小さいと推定されている⁽¹⁾。ただし、低線量であっても、科学的に可能な限り正確な個人の被ばく線量を評価することが重要であり、福島県住民については、これまでも数多くの報告がなされてきた⁽²⁾。特に重要な事故初期の被ばく線量について、外部被ばく線量に関しては福島第一原発事故の発生から4ヵ月間の積算値として Ishikawa らが報告しており、推計を行った約42万人の99.4%が3 mSv未満であった⁽³⁾。この推計は、福島県民健康調査の一部（基本調査）として、個人の避難行動記録（滞在場所の時系列）と再構築された福島県内の空間線量率マップを用いて行われた。他方、内部被ばく線量に関しては、外部被ばく線量と同様な推計方法では不確実性が大きいため、甲状腺計測や全身計測などの個人の実測値に基づき推計を行うことが必要であったものの、事故初期の内部被ばく線量に最も寄与する放射性ヨウ素（特に、¹³¹I）の実測値が十分に取得されなかったことから、現在でも正確な推計のための検討が様々な研究が継続されている。放射性ヨウ素は人体頸部の前方に位置する甲状腺に選択的に取り込まれ、甲状腺被ばくをもたらす。福島第一原発事故の際に取得された公衆（及び初動対応者）の¹³¹Iに係る実測値としては、Tokonamiら⁽⁴⁾、Matsudaら⁽⁵⁾、Kimら⁽⁶⁾などの主要な報告での被検者数を合計しても1,300件程度しかない。この測定数は、1986年に発生したチェルノブイリ原発事故の際に住民を対象として実施された数十万件の甲状腺計測と比較して相当少ない⁽⁷⁾。ただしこれは、チェルノブイリ原発事故の場合、放射性物質に汚染した飲食物の摂取制限等が適切に行われなかったために経口摂取が継続し、物理学的半減期が約8日と短い¹³¹Iであっても長期間にわたり甲状腺計測が行えたという見方もできる。福島第一原発事故の際に国が行った小児甲状腺被ばくスクリーニング検査では、1,080名の被検者の半数以上が未検出、さらに大半が統計的有意値とは見なせない結果であった。しかしながら、同検査は福島県内の避難指示区域に指定された自治体を除く概ね30 km圏外の3市町村のみで実施されたこと（※飯舘村は2011年4月に避難指示区域に指定）や被検者の行動代表性が未確認であること等の問題を内包している。

我が国において段階的に進められている原発再稼働に際し、万一の原子力災害時における緊急時対応の一環として、緊急防護措置計画範囲（UPZ：Urgent Protective action planning Zone）圏内の近隣住民等を対象とした個人内部被ばくモニタリングを迅速かつ確実にを行うための体制整備が喫緊の課題である。本研究では、福島第一原発事故の経験を踏まえ、放射性物質の環境中への大量放出を伴う原発のシビアアクシデントに際し、近隣住民の初期内部被ばく線量を正確に把握するための個人内部被ばくモニタリングの方法を提案するとともに、様々な年齢層の公衆（特に乳幼児）に対する正確な甲状腺計測を可能とする測定器の開発等を行った。

2. 事業概要

平成 29 年度（2017 年度）の原子力規制庁放射線安全規制研究推進事業・放射線防護基盤に係る研究課題の一つとして、「放射性ヨウ素等の迅速・高精度な内部被ばくモニタリング手法に関する研究」が公募された。同課題の背景として、以下の事柄が述べられている。

- （被ばく）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。
- 放射性ヨウ素の内部被ばく線量評価には、福島第一原子力発電所事故の経験から、摂取後早期の甲状腺被ばく線量測定にあたり、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万が一の事故に対応する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。
- ついては、放射性ヨウ素の内部取込みに伴う甲状腺被ばく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が必要とされている。

本研究では、以上の要件を満足する甲状腺モニタを新規に開発するとともに、原子力災害対応では複数の機関が関わることを想定し、公衆を対象とした個人内部被ばくモニタリング及び被ばく線量評価を確実かつ円滑に実施するための種々の技術的課題についても取り組むこととした。

本研究のロードマップ（実施期間：2017 年 4 月～2020 年 3 月）を表 1 に示す。本研究の実施項目としては、①既存あるいは新規に開発する測定器の応答評価（スペクトル解析ソフトウェアの開発含む）、②研究課題に述べられた要件を満たす新しい甲状腺モニタ（以下、本報告書では新モニタと呼ぶ）の開発、③マニュアル類の作成（後述する情報収集支援システムの開発含む）及び、④実務者会合及び研修・ワークショップの開催であり、概ね当初の計画通り研究が進捗した¹。

表 1 本研究のロードマップ

項目	2017年度	2018年度	2019年度
1. 検出器応答評価 (スペクトル解析ソフトの 開発を含む)	資機材準備 応答試験 ソフトウェア試作	数値シミュレーション 応答試験 ソフトウェア改良	測定条件決定 ソフトウェア改良
2. 新モニタの開発	試作器の製作	試作器の開発	実用機の開発
3. マニュアル作成 (情報収集支援システム の開発を含む)	簡易検査見直し システム概念設計 海外調査	換算係数の整備 システム試作 海外調査	マニュアル作成 システム改良
4. 実務者会合 研修・ワークショップ	実務者会合	実務者会合	研究会 国際学会発表 に変更 WS

¹ ④実務者会合及び研修・ワークショップの開催の内、ワークショップについては、主たる目的が海外専門家から開発した新モニタの総評を得ることであったため、国際学会発表での意見収集や学術論文発表等に置き換えることとした。

3. 実施体制

今年度（平成 31 年度）の研究実施体制を図 1 に示す。同図に示す研究代表者以下の体制は、当初の研究計画どおりである。研究全体の遂行に関しては、PO 及び PO 補佐からの助言及び指導を適宜頂いた。今年度は新モニタの開発を確実にを行うために、小児内分泌及び放射線計測を専門とする学職有識者からの助言を得ることとした。また、同一課題で研究を進めている谷村氏（日本原子力研究開発機構）との情報共有を定期的に行うとともに、開発した新モニタのデモンストレーションの機会とした研修会の開催にあたっては、研究代表者らが所属する量子科学技術研究開発機構の関係部署の協力を得た。後述する新モニタ用制御ソフトウェア及び情報収集支援システムの開発、ならびに新モニタの治具製作等は外部委託により行った。

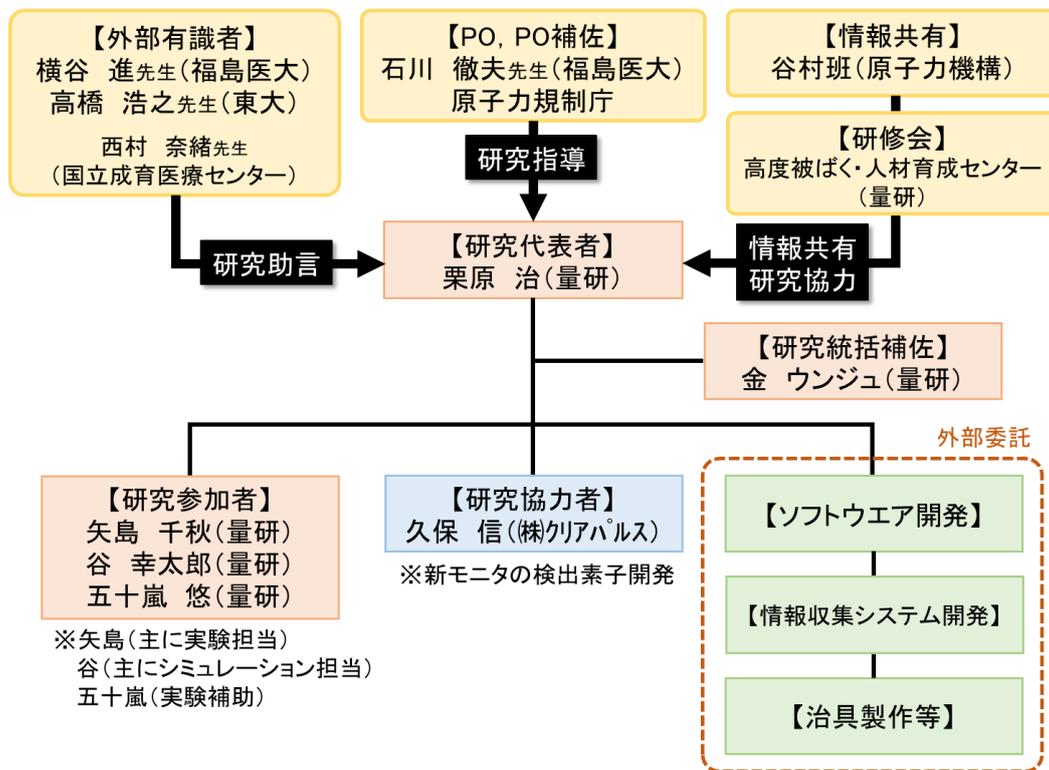


図 1 今年度の研究実施体制

4. 実施報告書

4.1 今年度（2019年度）の事業進捗

研究代表者らが提案する包括的個人内部被ばくモニタリングは、福島第一原発事故において近隣住民が受けた事故初期の内部被ばく線量、具体的には放射性ヨウ素に代表される短半減期核種による甲状腺内部被ばく線量の把握が十分に行えなかった反省を踏まえ、認識された技術的課題を克服するための新しいモニタの開発、大多数の公衆に対する内部被ばくモニタリングを確実にを行うための方法、さらには後の線量再構築に用いる避難行動データ等の情報を効率的に収集するためのシステム構築などを含むものである。今年度（2019年度）の当初計画に対応する実績は下記のとおりであり、各項目の詳細は本報告書第4章を参考にされたい。

表1 2019年度実施項目（当初予定）及び実施概要

2019年度実施項目	実施概要	備考
1. 既存検出器を用いた測定法の確立		
①NaI(Tl)サーベイメータを用いた甲状腺簡易検査の標準化	NaI(Tl)サーベイメータを用いる甲状腺簡易測定 of 標準化を図るため、当該マニュアルを整備するとともに、研修会参加者に配布し解説を行った。また、未経験者を含む研修会参加者に対し、十分な量の測定実習を行い、原子力災害初動対応者の技術を向上させた。	4. 実施報告書 4.2.1
②候補検出器の測定法の確立	年齢別ファントムを用いた実験により、甲状腺測定に適用可能な様々な既存検出器の校正データを取得するとともに、種々の測定条件での検出下限値を評価した。	4. 実施報告書 4.2.2 4.2.4
③遮へい体仕様の検討	高バックグラウンド環境下での甲状腺測定を想定し、試作した可搬型遮へい体の性能を実験的に評価した。	4. 実施報告書 4.2.3
④甲状腺簡易検査用マニュアル改良	昨年度作成した当該マニュアルの一部見直しを行った。	付録B
2. 新モニタの開発・実用化		
①新モニタの実用化に向けた検討	新モニタの開発に際し、外部有識者からの助言を参考にして様々な年齢の被検者に対する測定方法を事前に検討した。検討結果に基づき、乳幼児・子供兼用プローブ及び	4. 実施報告書 4.3.4 4.3.5

	一般用プローブの2種類を製作し、それらの性能評価を行った。	
②固定治具の作成	昨年度の検討結果を基に、プローブに内蔵する検出素子の固定治具を製作した。新モニタの操作性を考慮し、プローブは検出素子とアンプヘッドユニットを一体化した構造を考案した。	4. 実施報告書 4.3.2 4.3.3
③新モニタ用ソフトウェアの実用化	昨年度までに制作した試作版に、使用者のカテゴリー（専門家及びそれ以外）に応じたモード設定を追加や新モニタ以外の市販測定器の制御を行うための改良などを実施した。また、情報収集支援システムとのデータリンクageにより、利便性を向上させた。	4. 実施報告書 4.3.7
3. 情報収集支援システムの改良		
	昨年度までに制作した情報収集支援システムについて、データ入力機能及び避難経路表示機能の改良、データベースの統合機能の追加等を行った。	4. 実施報告書 4.4
4. 研修会		
	本研究で開発した新モニタを含む種々の測定器を用いた甲状腺測定に関する研修会を開催した。新モニタに関しては、研修参加者から更なる改良・改善のための意見を聴取した。	4. 実施報告書 4.5

4.2 既存検出器を用いた測定法の確立

4.2.1 NaI(Tl)サーベイメータを用いた甲状腺簡易測定

NaI(Tl)サーベイメータを用いる甲状腺中ヨウ素の測定は、福島第一原発事故の際に行われた小児甲状腺被ばくスクリーニング検査でも行われたが、測定器の取扱いが容易であり、測定に要する時間も比較的短いことから、大多数の被検者から高線量を受けた者を速やかに同定するための測定用途（いわゆるトリアージ）には適している。ただし、NaI(Tl)サーベイメータでは核種弁別が行えないため、想定した核種組成に基づき、指示値（周辺線量当量率など）から体内残留放射能への換算係数を事前に決定しておく必要がある。そこで、本研究事業で購入した年齢別の頸部物理ファントムを用い、NaI(Tl)サーベイメータ（TCS-172、日立製）の甲状腺中ヨウ素に対する換算係数を導出した。使用した頸部物理ファントムは、フランス放射線防護原子力研究所（IRSN）によって近年開発されたものであり、5歳、10歳、15歳及び成人の頸部及び甲状腺が模擬されている（図2）⁽⁸⁾。

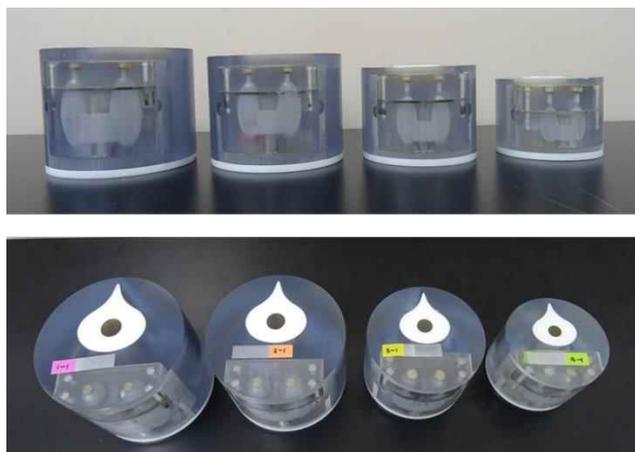


図2 換算係数の導出に使用した年齢別頸部物理ファントム
(左から成人、15歳、10歳及び5歳)

頸部物理ファントムに内蔵される甲状腺は中空構造の容器になっており、既知量の放射性標準溶液を充填することができる。実験では2セットのファントムを用い、それぞれに ^{133}Ba と ^{131}I の標準溶液を充填した。また、NaI(Tl)サーベイメータのプローブ位置の違いによる換算係数の変動を確認するため、ファントムとプローブの距離を0 cm（密着）、0.5 cm及び1.0 cmの3通り、また各距離において、プローブを甲状腺の中心から高さ方向及び横方向にずらした位置での測定を行った。一例として、ファントム-プローブ間の距離を5 mmの合わせたときの結果を図3に示す。同図には、比較のため、MIRD型数学ファントム⁽⁹⁾に対する換算係数の計算値も示した。ただし、数学ファントムの換算係数は、甲状腺中心の頸部上にプローブを配置した場合のみのものである。

同図から、年齢が上がるにつれて、換算係数が増加してゆく（すなわち検出効率が低くなる）傾向があることが分かる。これは、ファントムにおいて、年齢に応じた甲状腺容積と甲状腺前

組織厚の違いを考慮しているためであり、成人が子どもに比べて換算係数が高いのは、甲状腺容積が大きく、かつ、甲状腺前組織が厚いために幾何学的効率を含む検出効率自体が小さくなるためである。5歳児の換算係数は成人の換算係数の約2/3であったが、同様な結果が欧州の研究プロジェクトでも得られている⁽¹⁰⁾。一方、物理ファントムから導出した換算係数において、¹³¹Iは¹³³Baに比べて約10%高い結果となった。この差は数学ファントムでは約5%であったが、全体的にみれば両ファントムから導出した換算係数はよく一致しており、妥当であると考えられる。ファントム-プローブ間の距離を0 cmと1.0 cmにした場合の結果については、別添1に示した。

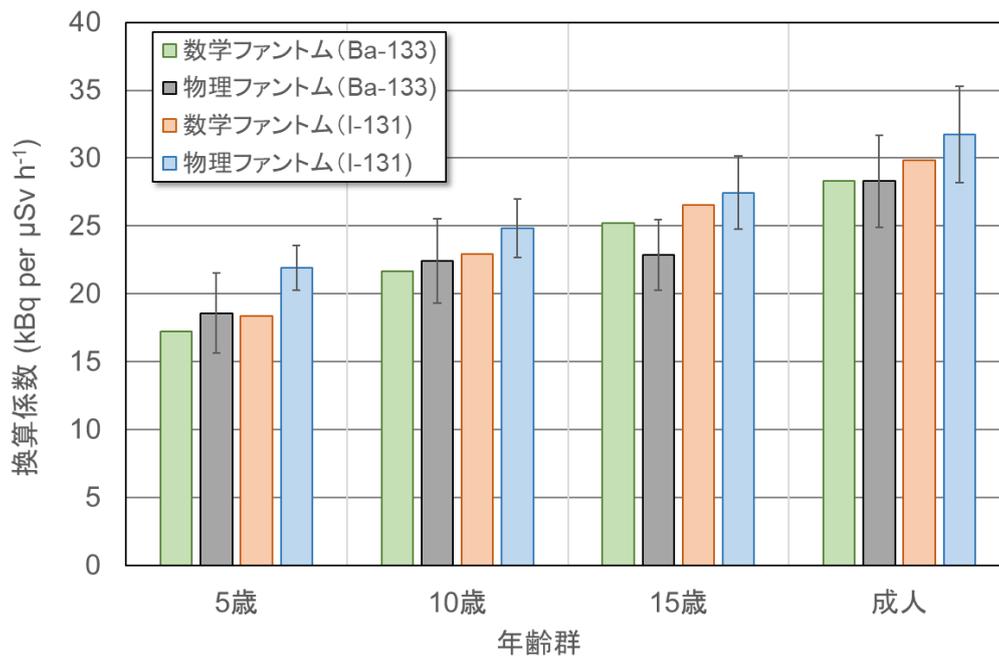
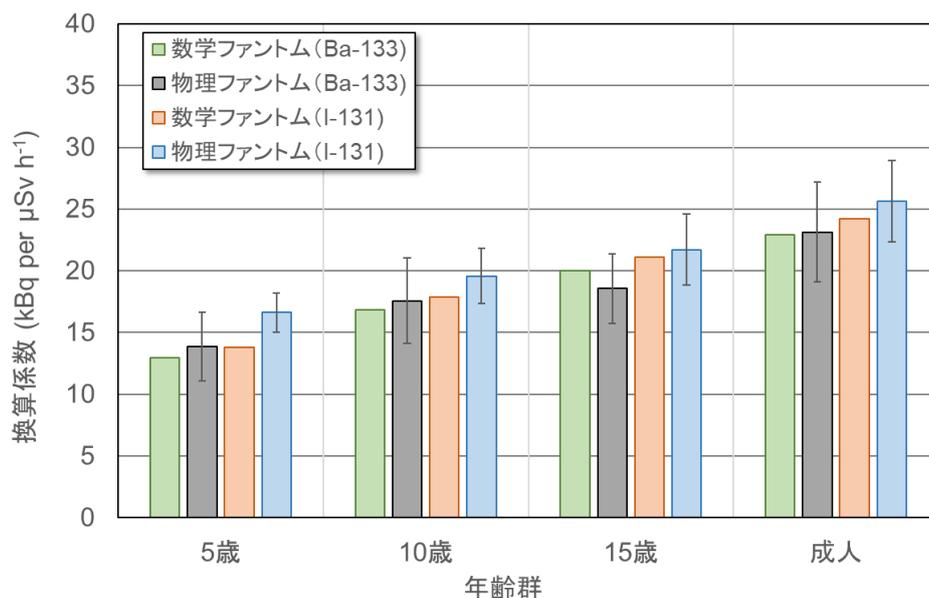


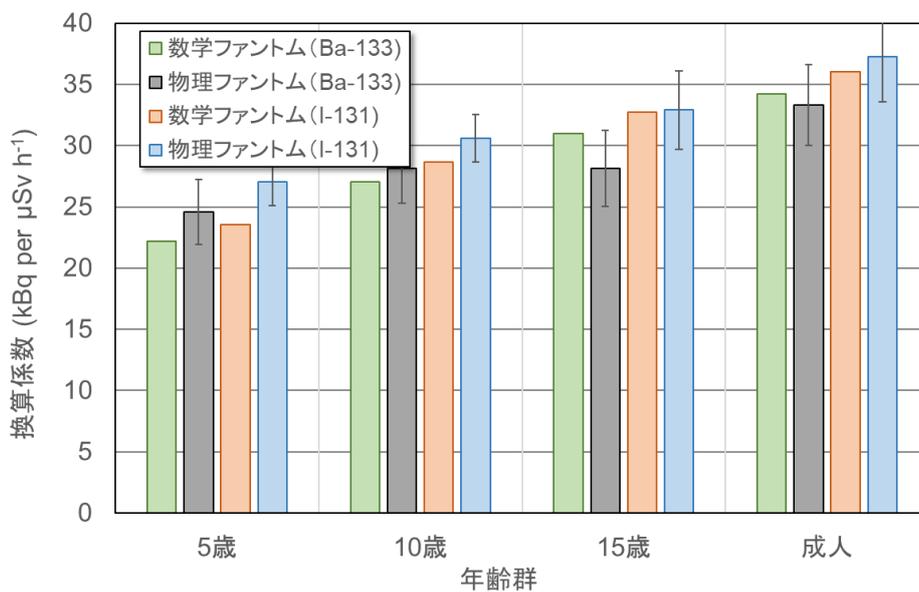
図3 NaI(Tl)サーベイメータの甲状腺中ヨウ素に対する換算係数
(ファントム-プローブ間距離が0.5 cmの場合)

以上の結果に基づき、NaI(Tl)サーベイメータを用いた甲状腺簡易測定に適用する年齢群毎の換算係数を次のように定めた：0歳，1歳，5歳について20 kBq per μ Sv h⁻¹（0歳と1歳については，5歳の換算係数を割り当て），10歳について25 kBq per μ Sv h⁻¹，15歳について30 kBq per μ Sv h⁻¹及び成人について35 kBq per μ Sv h⁻¹。これらの換算係数を用いて，年齢群毎のある甲状腺等価線量（例えば100 mSv）に相当するNaI(Tl)サーベイメータの指示値を求めておけば大多数を対象としたトリアージには有効であり，甲状腺簡易測定マニュアル（付録B）に早見表を提示した。なお，換算係数の単位はkBq per μ Sv h⁻¹であるが，上記の研究プロジェクトでは，欧州諸国で利用されている，TCS-172と同様な線量率計に対する換算係数が紹介されている⁽¹¹⁾。

別添 1



別図 1 NaI(Tl)サーベイメータの甲状腺中ヨウ素に対する換算係数
(ファントム-プローブ間距離が 0 cm の場合)



別図 2 NaI(Tl)サーベイメータの甲状腺中ヨウ素に対する換算係数
(ファントム-プローブ間距離が 1.0 cm の場合)

4.2.2 候補検出器による測定

甲状腺中 ^{131}I に対する候補測定器として、表 1 に示す市販の γ 線スペクトロメータの試験を行った。これらの測定器は全て小型・軽量であるため、測定場所への移動が容易であり、操作性にも優れている。前述した NaI(Tl)サーベイメータでも ^{131}I の測定は可能であるが、核種同定は行うことができない。一方、 γ 線スペクトロメータはスペクトル解析により核種同定及び同定した核種毎の放射能定量が可能であるものの、測定時間は NaI(Tl)サーベイメータよりも時間を要し、かつ、事前の校正作業や放射線計測に関する相応の専門知識を必要とする。したがって、 γ 線スペクトロメータは後述する新モニタとともに、NaI(Tl)サーベイメータを用いた甲状腺被ばくスクリーニング検査において一定の基準値を超えた者を対象とした詳細測定に適用するのが現実的である。なお、 γ 線スペクトロメータとしては、エネルギー分解能に優れた高純度ゲルマニウム (HPGe) 半導体検出器を備えた甲状腺モニタも利用できるが、結晶冷却や信号処理などに必要な機構が大掛かりとなるため、一部の高価な可搬型 HPGe 検出器を除けば、一般的に測定場所に移動して使用することは想定していない。特性試験を行った市販 γ 線スペクトロメータの外観 (プローブのみ) を図 4 に示す

表 1 試験を行った市販 γ 線スペクトロメータ

測定器	結晶サイズ (円柱) : 高さ×径 ※プローブ径	製造メーカ (型式)
1 インチ NaI(Tl)	25.4 mm× 25.4 mm ※30 mm	SCIONIX (25B25/1.5)
1.5 インチ NaI(Tl)	38 mm× 38 mm ※45 mm	SCIONIX (38B38/1.5)
2 インチ NaI(Tl)	51 mm× 51 mm ※58 mm	SCIONIX (51B51/2)
1.5 インチ CeBr ₃	38 mm× 38 mm ※42 mm	SCIONIX (38B38/2M-CEBR-X)



図 4 試験を行った市販 γ 線スペクトロメータの外観 (プローブのみ)

※ 左から、1.5 インチ CeBr₃、2 インチ NaI(Tl)、1.5 インチ NaI(Tl)及び 1 インチ NaI(Tl)。
2 インチ NaI(Tl)と 1 インチ NaI(Tl)には USB コネクタベース (digiBASE, ORTEC 製) が
接続している。

表 2(1)~(4)には、各測定器の甲状腺中 ^{131}I から放出される γ 線 (365 keV) に対する (全吸収) ピーク効率 (cps per ^{131}I kBq) を示した。ここで、同表中に標記したファントムは NaI(Tl) サーベイメータの試験にも使用した IRSN 製の年齢別ファントム (5 歳, 10 歳, 15 歳及び成人) であり、プローブ前面-ファントム前面間距離を 0 cm, 0.5 cm, 1 cm, 3 cm 及び 5 cm (0 cm は密着) 毎にピーク効率を示している。また、ピーク効率の測定誤差の計算には、ピークエリア計数の統計誤差及びプローブ前面-ファントム前面間距離の不確かさ (1 mm) 伴うピーク効率の変動の両因子を考慮した。

表 2(1) 甲状腺中 ^{131}I に対するピーク効率 (1 インチ NaI(Tl) スペクトロメータ)

1インチ NaI(Tl)		ピーク効率 (cps per ^{131}I kBq)				
プローブ~ファントム間距離		0 cm	0.5 cm	1 cm	3 cm	5 cm
ファントム	成人	7.7 ± 0.5	5.7 ± 0.3	4.6 ± 0.3	2.2 ± 0.1	1.3 ± 0.1
	15才	9.5 ± 0.5	7.2 ± 0.4	5.6 ± 0.3	2.6 ± 0.2	1.5 ± 0.1
	10才	10.4 ± 0.6	7.7 ± 0.5	5.9 ± 0.4	2.7 ± 0.2	1.5 ± 0.1
	5才	13.1 ± 0.8	9.3 ± 0.6	6.9 ± 0.4	3.0 ± 0.2	1.6 ± 0.1

表 2(2) 甲状腺中 ^{131}I に対するピーク効率 (1.5 インチ NaI(Tl) スペクトロメータ)

1.5インチ NaI(Tl)		ピーク効率 (cps per ^{131}I kBq)				
プローブ~ファントム間距離		0 cm	0.5 cm	1 cm	3 cm	5 cm
ファントム	成人	19.9 ± 0.9	16.0 ± 0.7	13.0 ± 0.6	6.6 ± 0.3	3.9 ± 0.2
	15才	24.1 ± 1.3	18.4 ± 1.0	14.9 ± 0.8	7.3 ± 0.4	4.3 ± 0.2
	10才	26.3 ± 1.4	20.2 ± 1.1	15.6 ± 0.8	7.6 ± 0.4	4.4 ± 0.2
	5才	32.1 ± 1.8	24.5 ± 1.3	18.9 ± 1.0	8.6 ± 0.5	4.9 ± 0.3

表 2(3) 甲状腺中 ^{131}I に対するピーク効率 (2 インチ NaI(Tl) スペクトロメータ)

2インチ NaI(Tl)		ピーク効率 (cps per ^{131}I kBq)				
プローブ~ファントム間距離		0 cm	0.5 cm	1 cm	3 cm	5 cm
ファントム	成人	33.7 ± 1.3	28.4 ± 1.1	23.6 ± 0.9	12.3 ± 0.5	7.8 ± 0.3
	15才	40.7 ± 1.9	32.6 ± 1.5	26.7 ± 1.2	13.8 ± 0.6	8.1 ± 0.4
	10才	44.8 ± 2.1	35.6 ± 1.7	28.9 ± 1.4	14.8 ± 0.7	8.7 ± 0.4
	5才	52.8 ± 2.8	40.6 ± 2.2	32.4 ± 1.7	15.9 ± 0.9	9.1 ± 0.5

表 2(4) 甲状腺中 ^{131}I に対するピーク効率 (1.5 インチ CeBr₃ スペクトロメータ)

1.5インチ CeBr		ピーク効率 (cps per ^{131}I kBq)				
プローブ~ファントム間距離		0 cm	0.5 cm	1 cm	3 cm	5 cm
ファントム	成人	24.7 ± 1.5	19.5 ± 1.2	15.6 ± 0.9	8.0 ± 0.5	4.8 ± 0.3
	15才	30.1 ± 1.7	22.9 ± 1.3	18.5 ± 1.0	9.0 ± 0.5	5.2 ± 0.3
	10才	32.8 ± 1.9	24.8 ± 1.4	19.5 ± 1.1	9.5 ± 0.5	5.5 ± 0.3
	5才	40.3 ± 2.4	30.0 ± 1.8	22.8 ± 1.4	10.2 ± 0.6	5.9 ± 0.3

図 5 には、測定時間を 180 秒としたときの、各測定器の ^{131}I に対する検出限界値をプローブとファントム間の距離の関数として示した。バックグラウンドは通常環境レベル ($0.05 \mu\text{Sv/h}$) としたが、1 インチ NaI(Tl) スペクトロメータ及び 1.5 インチ NaI(Tl) スペクトロメータについては、バックグラウンドを周辺線量当量率で約 $2.5 \mu\text{Sv/h}$ に高めた環境（同図中に高 BG と標記）した場合の検出限界値についても示した。また、検出限界値は Currie の補正式⁽¹²⁾により算出した。

図 5 に示す結晶サイズの異なる 3 種類の NaI(Tl) スペクトロメータの通常 BG での結果を比較すると、検出下限値が最も低いのが 2 インチの NaI(Tl) スペクトロメータであり、プローブとファントム間の距離を 5 cm としても検出下限値は 100 Bq 程度である。ただし、1 インチの NaI(Tl) スペクトロメータの場合でも同一条件の検出下限値は高々 200~300 Bq 程度であり、 ^{131}I の摂取から 1 週間以内の測定であれば必要十分な感度は有していると言える。甲状腺測定に伴う様々な不確実性（例えば、統計誤差、プローブ被検者頸部間距離の誤差、甲状腺形状や甲状腺前組織厚の個人差など）を低減する観点では、結晶サイズの大きい検出器を被検者の頸部からなるべく離して測定を行うのが良い⁽¹³⁾。しかしながら、検出器が測定対象となる甲状腺から離れることで検出感度が低下することに加え、周辺環境からの放射線の影響を受けやすくなることに留意する必要がある。一方で、 ^{131}I の摂取から時間が経過した場合や周辺環境のバックグラウンドが上昇した場合などを想定すると、検出器を被検者頸部に近接させて検出下限値をなるべく下げる必要性が生じる。その際、試験に用いた γ 線スペクトロメータでは、乳幼児の頸部にプローブを近接させることが難しいことが予想される（最も小型な 1 インチ NaI(Tl) スペクトロメータのプローブ径で 3 cm）。この点を除けば、市販の γ 線スペクトロメータは甲状腺中 ^{131}I の測定に適用可能であり、また既に多くの経験があるものの、乳幼児を含む小児を対象とした測定については、後述する新モニタのように実行性を検証する必要がある。

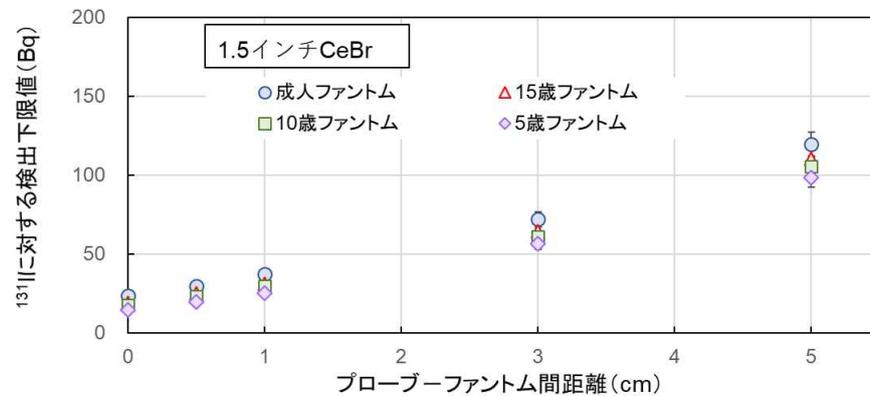
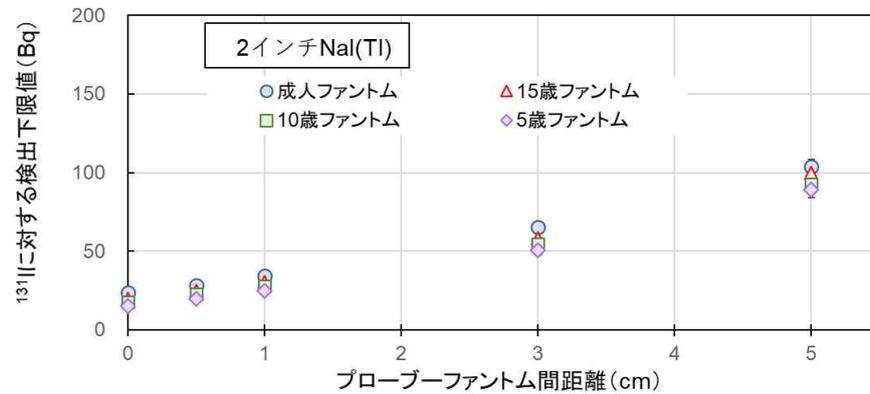
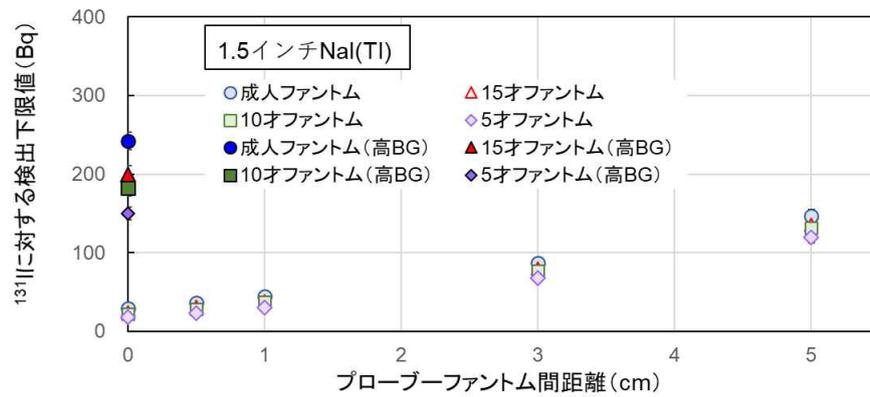
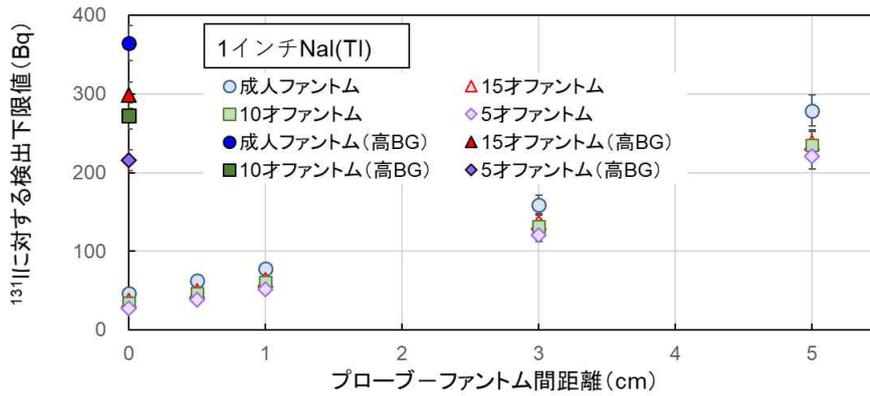


図5 各検出器の甲状腺中 ^{131}I に対する検出下限値
 上段から 1 インチ NaI(Tl), 1.5 インチ NaI(Tl), 2 インチ NaI(Tl), 1.5 インチ CeBr₃

4.2.3 遮へい体の製作

研究課題の要件の一つに挙げられた高バックグラウンド環境下での被検者の甲状腺計測について、本研究では可搬型の遮へい体を製作することとした。これは、後述する新モニタの開発に際し、特に乳幼児の測定のためには検出素子を収めたプローブ自体を薄く、軽量にする必要があったことから、プローブ周囲に遮へいを施すことは困難と考えられたためであった。製作した可搬型遮へい体の外観を図6に示す。



図6 製作した可搬型遮へい体の外観

可搬型遮へい体はコの字型形状としており、被検者は中央遮へい板を背にして椅子に座り、測定者と対面して甲状腺計測を受ける形を想定している。可搬型遮へい体の設置する遮へい板は鉛製（外側はアルミニウムで覆われている）で1枚が約15 kgであり、外寸は35 cm × 30 cm × 1 cmである。可搬型遮へい体各辺（中央及び左右）には、4枚ないし8枚（2枚重ね）の遮へい板を設置することができる。なお、可搬型遮へい体のフレームには車輪が備えられており、遮へい板設置時においても多少の移動は可能であり、また、開口部の角度を変更することができる。

遮へい性能を確認するため、図7に示すような複数の ^{137}Cs 線源を用いた実験を行った。その結果、可搬型遮へい体中央部の周辺線量当量率は、遮へい体1枚厚で約60%（2枚厚で約75%）低減した。遮へい性能は照射ジオメトリに大きく依存すると考えられるが、 ^{131}I に対しては、 ^{137}Cs よりも放出される γ 線のエネルギーが低いために、より高い遮へい効果が期待できる。なお、IAEA安全文書には、公衆の甲状腺計測を $0.2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 未満の場所で行うことを推奨しているが⁽¹⁴⁾、コンクリート建屋内で製作した可搬型遮へい体を使用することにより、屋外での周辺線量当量率が数 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ までであれば、この条件を概ね満足するものと思われる²。

² コンクリート建屋の低減率（建屋内と屋外の線量率の比）を20%、可搬型遮へい体の低減率（1-0.75）を25%と見込むと、 $0.2 \mu\text{Sv h}^{-1} \div 0.2 \div 0.25 = 4 \mu\text{Sv h}^{-1}$ となる。

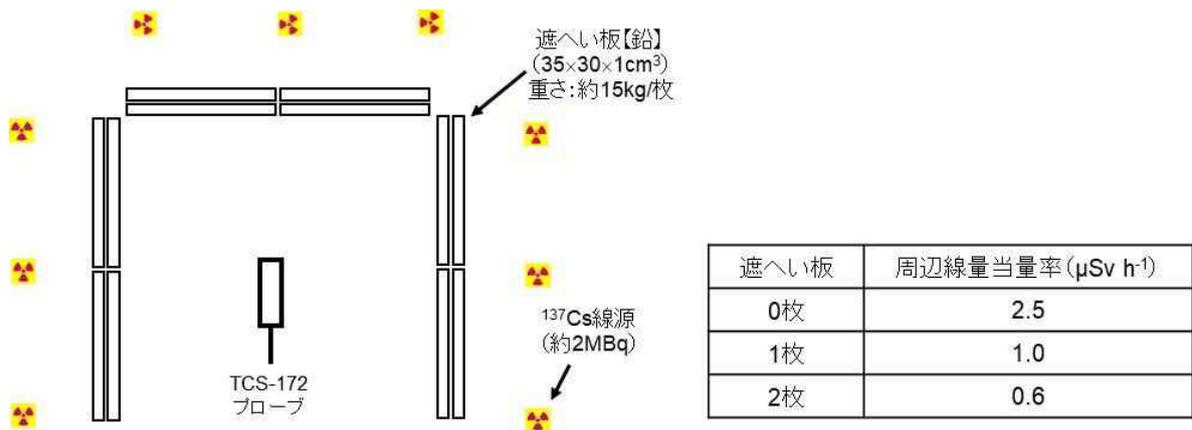


図7 遮へい性能を評価するための実験条件

4.2.4 立位型全身カウンタによる測定

福島第一原発事故後、多数の住民を対象とした $^{134/137}\text{Cs}$ の体内残留量の測定を実施するために、多くの自治体及び民間病院等で全身カウンタが導入され、特に福島県内においては約 50 機が稼働した^(15,16)。最も多く普及した全身カウンタは、図8に示す立位型の FASTSCAN (ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ 米国)⁽¹⁷⁾である。

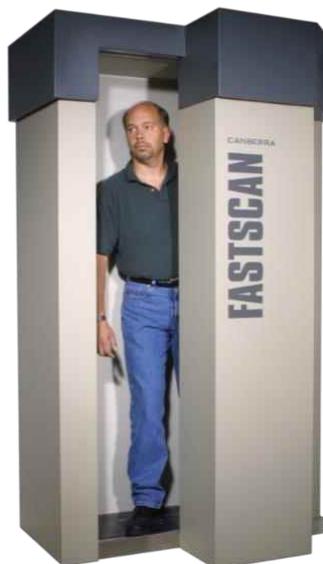


図8 FASTSCAN (ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ 米国) の外観⁽¹⁷⁾

FASTSCAN には、40.6 cm (縦) × 12.7 cm (横) × 7.6 cm (厚さ) の NaI(Tl)結晶を使用したシンチレーション検出器 2 基が、それぞれ被検者前方の上部及び下部に設置されている。自然放射線を遮蔽するために、検出器の周辺及び被検者の左右、背面、床面、天井は約 10 cm 厚の鉄材で囲まれている。本研究では、モンテカルロ放射線輸送計算コードである MCNP (Monte-Carlo N-Particle transportation code version 6.2)⁽¹⁸⁾によって FASTSCAN の構造をモデル化し、Ulanovsky

らが作成した年齢別人体数学ファントム⁽⁹⁾を使用したシミュレーションに基づいて、¹³¹I を対象とした甲状腺計測における有用性を検討した。使用した数学ファントムは、直方体や楕円柱などの単純な図形を組み合わせで作られた MIRD5 型ファントム⁽¹⁹⁾が原型となっている。Ulanovsky らは、体幹を構成する楕円柱の角を滑らかに削ることで、より現実に近い胸部の形状を再現した。図 9 に、5 歳、10 歳、15 歳及び成人の数学ファントムを対象とした FASTSCAN による測定ジオメトリを示す。

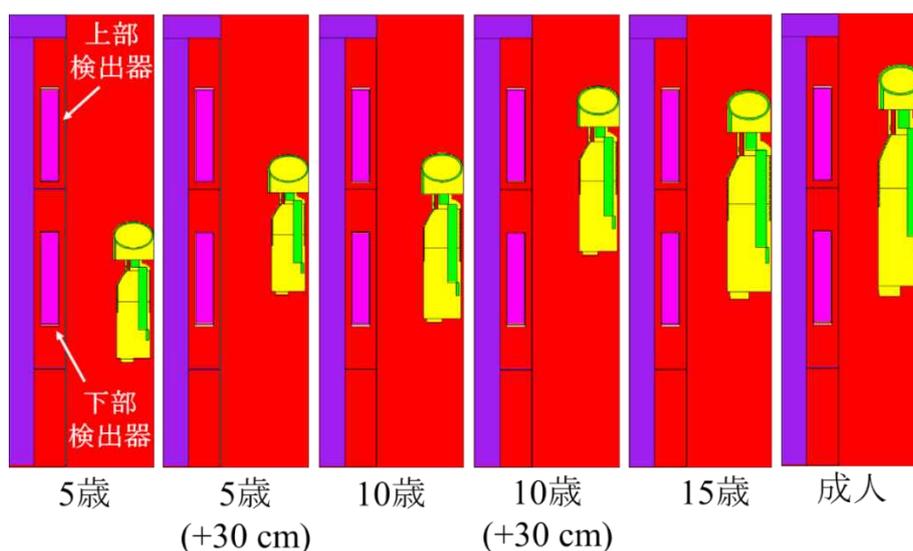


図 9 年齢別数学ファントムに対する測定ジオメトリ

福島第一原発事故後の測定では、全身に均一に分布する ^{134/137}Cs に対する FASTSCAN の計数効率を高めるために、130 cm 以下の小児に対して高さ 30 cm の踏み台を使用したため⁽²⁰⁾、本研究でも 5 歳及び 10 歳の数学ファントムについて通常より 30 cm 高い位置での測定ジオメトリを追加した。各ファントムの甲状腺に ¹³¹I の体積線源を設定し、FASTSCAN の上部及び下部検出器の NaI(Tl)結晶に対する光子のエネルギースペクトルを MCNP の F8 タリーによって計算した。¹³¹I の主要な光子エネルギーである 365 keV のピーク効率から計算した各ファントムに対する計数効率 (cps/Bq) を表 3 に示す。

表 3 年齢別数学ファントムに対する FASTSCAN の計数効率 (cps/Bq)

検出器	5 歳	5 歳 (+30 cm)	10 歳	10 歳 (+30 cm)	15 歳	成人
上部	0.00095	0.0069	0.0070	0.017	0.018	0.018
下部	0.016	0.0067	0.0071	0.0016	0.0021	0.0013
合計	0.017	0.014	0.014	0.019	0.020	0.019

成人及び15歳のファントムに対する上部及び下部検出器の計数効率の合計は、それぞれ0.019 cps/Bq 及び 0.020 cps/Bq であり、ほぼ一致した。いずれのファントムに対しても、上部検出器の計数効率は 0.018 cps/Bq であり、頸部前面に存在する上部検出器の計数効率が下部検出器と比較して非常に大きいことが確認された。一方、10歳のファントムの場合、頸部の高さが上部及び下部検出器の中間に位置しており、計数効率は 0.014 cps/Bq に低下した。しかし、通常よりも 30 cm 高い位置では、頸部が上部検出器の前面に位置することで計数効率は 0.019 cps/Bq に改善した。5歳のファントムの場合、頸部は下部検出器の前面に位置し、計数効率は 0.017 cps/Bq であった。30 cm 高い位置での計数効率は、むしろ 0.014 cps/Bq に低下した。以上のように、各ファントムに対する FASTSCAN の計数効率は概ね一定 (0.017-0.020 cps/Bq) に保たれる (ただし 10歳のファントムについては 30 cm 高い位置) ことが明らかとなった。

バックグラウンド (BG) のエネルギースペクトルに基づく典型的な定量下限 (Minimum determination limit: L_Q) の計数は、以下の式で計算できる⁽¹²⁾。

$$L_Q = 10\sigma_{BG} \quad (1)$$

ここで、 σ_{BG} は 365 keV の光子ピークに対して設定する関心領域 (Region of interest: ROI) における BG 計数の標準偏差 (計数の平方根) である。例えば、福島第一原発事故後の 2011 年 3 月 24 日に茨城県東海村において FASTSCAN による作業者の測定を実施されたが⁽²¹⁾、BG スペクトルにおいても ^{131}I 及び $^{134/137}\text{Cs}$ がわずかに検出されていた当時の環境において、ROI の BG 計数率は 32.7 cps であった。この環境において測定時間を 180 秒に設定した場合、 L_Q は式(1)から 767 カウントと計算される。また、 L_Q に相当する甲状腺残留量 A_T (Bq) は、測定時間 t (秒) 及び計数効率 ε (cps/Bq) から以下の式で計算できる。

$$A_T = L_Q / (t \cdot \varepsilon) \quad (2)$$

前述のとおり、各ファントムに対する FASTSCAN の計数効率が 0.017-0.020 cps/Bq の範囲内であったことから、その下限値である $\varepsilon = 0.017$ を代入すると、180 秒の測定で L_Q (767 カウント) に相当する A_T が 251 Bq と計算される。したがって、原発事故後によってわずかに BG が上昇した環境であっても、300 Bq の甲状腺残留量を定量できる可能性があると考えられる。

元素状の ^{131}I を吸入摂取した場合の甲状腺等価線量係数 (Sv/Bq) ⁽²²⁾及び 100 mSv に相当する摂取量を、5 歳、10 歳、15 歳及び成人ごとに表 4 に示す。

表 4 ^{131}I 吸入摂取（元素状）時の甲状腺等価線量係数及び 100 mSv に相当する摂取量

年齢	甲状腺等価線量係数 (Sv/Bq)	100 mSv に相当する摂取量 (Bq)
5 歳	1.9×10^{-6}	5.3×10^4
10 歳	9.5×10^{-7}	1.1×10^5
15 歳	6.2×10^{-7}	1.6×10^5
成人	3.9×10^{-7}	2.6×10^5

また、100 mSv に相当する ^{131}I （元素状）を吸入した後の経過日数に対する甲状腺残留量の変化（甲状腺残留関数）について、年齢ごとに MONDAL3⁽²³⁾で計算した結果を図 10 に示す。

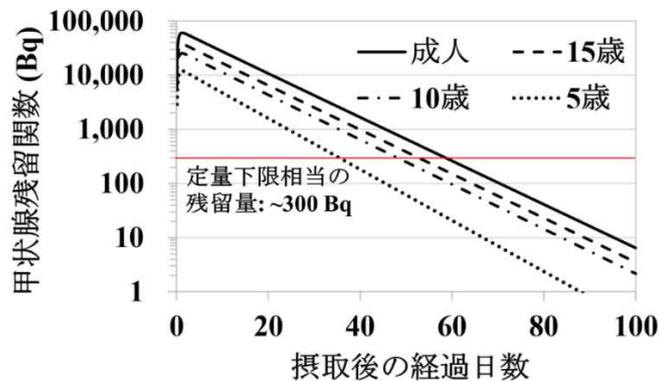


図 10 100 mSv の甲状腺等価線量に相当する ^{131}I （元素状）吸入摂取後の甲状腺残留関数

図 10 に示すように、もし定量下限に相当する甲状腺残留量が 300 Bq 以下の環境であれば、 ^{131}I の吸入摂取から 30 日以内に FASTSCAN による測定を実施することで、少なくとも 100 mSv に相当する甲状腺残留量を定量できる可能性がある。しかし、FASTSCAN による測定の課題として、設置場所及び設置台数が限られること、5 歳未満の乳幼児を対象とした測定が困難であることが挙げられるため、これらの欠点を補う乳幼児を対象とした可搬型測定器の開発は重要である。

4.3 新甲状腺モニタの開発及び実用化

4.3.1 背景と目的

福島第一原発事故に際し、2011年3月下旬に国が行った小児甲状腺被ばくスクリーニング検査では、乳幼児を含む15歳以下の子どもが測定対象となった。同検査において技術的課題として認識された事柄は前述のとおりであり(2. 事業概要)、要約すると、①放射性物質が広域に拡散したことにより、高バックグラウンド環境下での測定を余儀なくされたこと、②幅広い年齢層を含む公衆の甲状腺計測に適した測定器及び校正方法が無かったことの二つである。この内、最初の技術的課題については、各原発サイトにおいて自治体が整備している広域避難計画等を参考にし、数ある指定避難所の中から、高い遮へい効果が期待できる施設を事前に幾つか選定しておくといったソフト的な対応が有効だと思われる。他方、二番目の技術的課題については、特に乳幼児を対象とした甲状腺計測に適した測定器が現状では存在せず、この目的に特化した測定器の開発が望まれている⁽¹⁰⁾。そこで本研究では、複数の小型放射線検出素子を用いる新しいタイプの甲状腺モニタ(以下、新モニタ)を提案し、開発を進めてきた⁽²⁴⁾。新モニタのコンセプトは図11に示すとおりであり、検出素子を被検者頸部の周囲に配置することで、甲状腺中ヨウ素に対する幾何学的効率を高めつつ、測定中の被検者の動きにも影響を受けにくいジオメトリとしている。放射線検出素子には、近年開発・市販化されたガドリニウム・アルミニウム・ガリウム・ガーネット(GAGG)検出素子(5640-HRGAGGG1C1C1C型、クリアパルス、日本)を採用した。同検出素子には、シリコン光電子倍增管(SiPM)に光学接合した1cm角のGAGG結晶が内蔵しており、従来型の測定器(NaI(Tl)サーベイメータ等)と比較してプローブ自体の小型軽量化が可能である。本節では、新モニタの開発に関して、今年度実施した内容を中心に述べる。

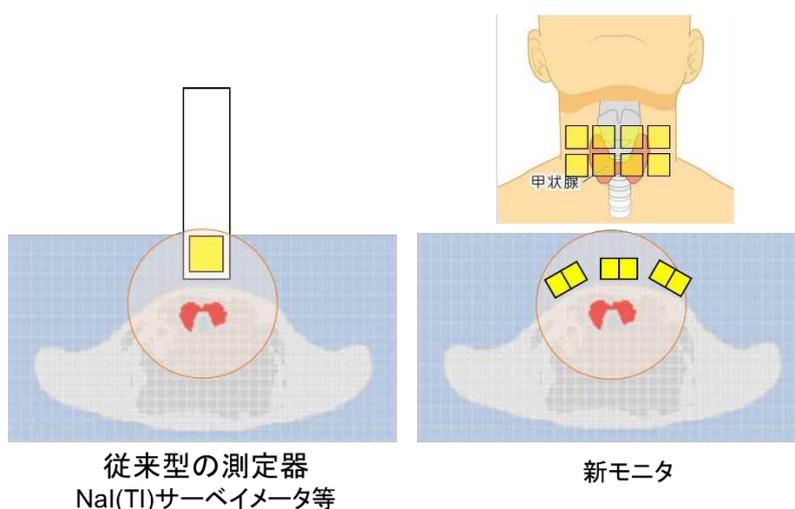


図11 新モニタのコンセプト

4.3.2 乳幼児測定に関する検討

昨年度、製作した新モニタ用プローブは、乳幼児用、子供用及び一般用の3種類であり、各プローブ内の検出素子の配列は、1段4列（乳幼児用）、2段4列（子供用）及び2段5列（一般用）である。ただし、乳幼児用と子供用のプローブに用いる検出素子は一般用プローブに用いる市販の検出素子とは異なり、より小型化した特注仕様のものである。そのため、乳幼児用及び子供用プローブの厚さは、成人用プローブに比べて薄くなっている（乳幼児用：24 mm、子供用：40 mm、一般用：48 mm）。各プローブ内の検出素子の位置は、年齢別頸部ファントム（IRSN製）を用いた実験結果等を参考に決定した。図12に各プローブの構造を示す。

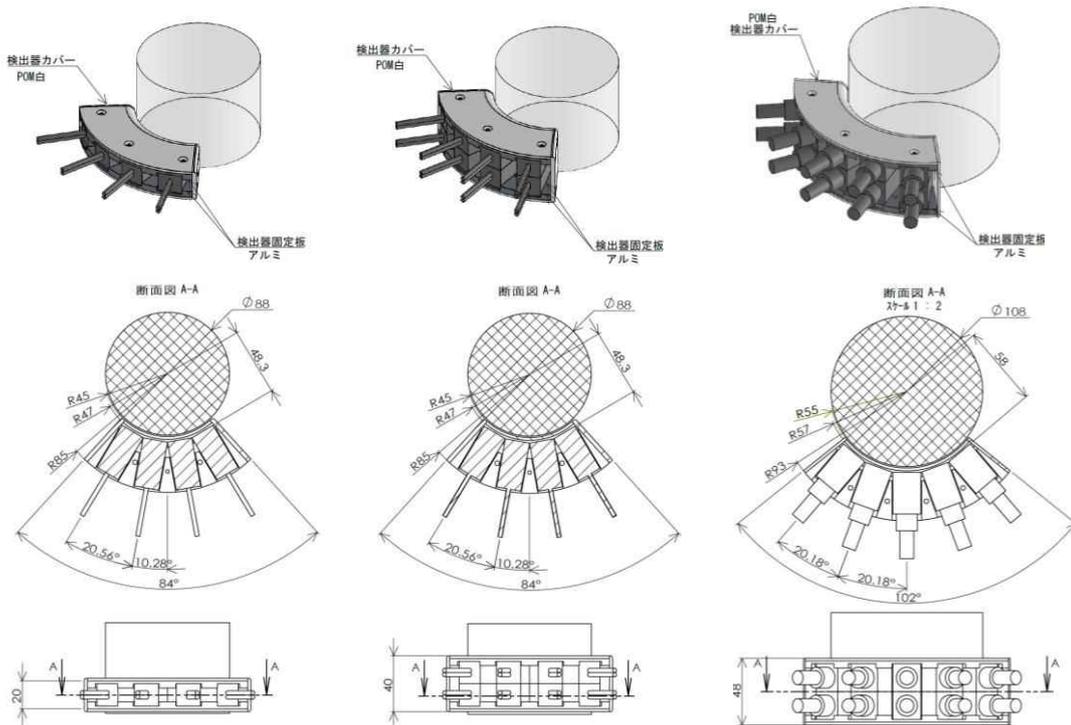


図12 新モニタプローブの構造

(左：乳幼児用，中央：子供用，右：一般用)

製作したプローブが甲状腺計測に実際に使えるかを確認するため、マネキンや実被検者の頸部にプローブが近接して配置できるかを確認した（図13）。その結果、目安として、5歳児までは乳幼児用プローブ、小学生（6歳から12歳）は子供用プローブ、中高生以降は一般用プローブを選択する一応の目安が得られた。また、甲状腺計測を行う際の被検者の体位については、医療関係の外部有識者からの助言を得て、2歳未満では母親が前に抱きかかえた状態でプローブを頸部に添え当てて測定、2歳から5歳までは測定中に動かずにいることが難しい状況が想定されることから（必要に応じて）ベッドに寝かせて測定、小学生以降は椅子に座って測定者と対面して測定といった形が現実的であると考えられた。なお、2歳未満については、母親自身がプローブを持ち、測定者となる場合もあり得る。



図 13 新モニタプローブの試験

4.3.3 新モニタ実用機の開発

新モニタ実用機として、乳幼児・子供用及び一般用の2種類のモニタを製作した(図14)。制御用PCを除く新モニタ本体の重量は、乳幼児・子供用で約1kg、一般用で約1.5kgであり、我が国で広く使用されているNaI(Tl)サーベイメータ(TCS-172, 重量は1.5kg)と比較して、同等あるいはより軽量である。図15には、新モニタ実用機(乳幼児・子供用)の構造を示す。モニタ本体は、GAGG検出素子が収められたプローブと取っ手部分からなり、後者には複数チャンネルに対応した信号処理ユニット(Model 80405/80406, Model 80415/80416, クリアパルス, 日本)が内蔵されている。プローブと取っ手部分の接合部の角度は調節することができる。なお、検出素子に内蔵されている温度センサーによってシグナルゲインの自動補正が行われるため、複数の検出素子からの波高スペクトルの合算による劣化はほとんど生じない。

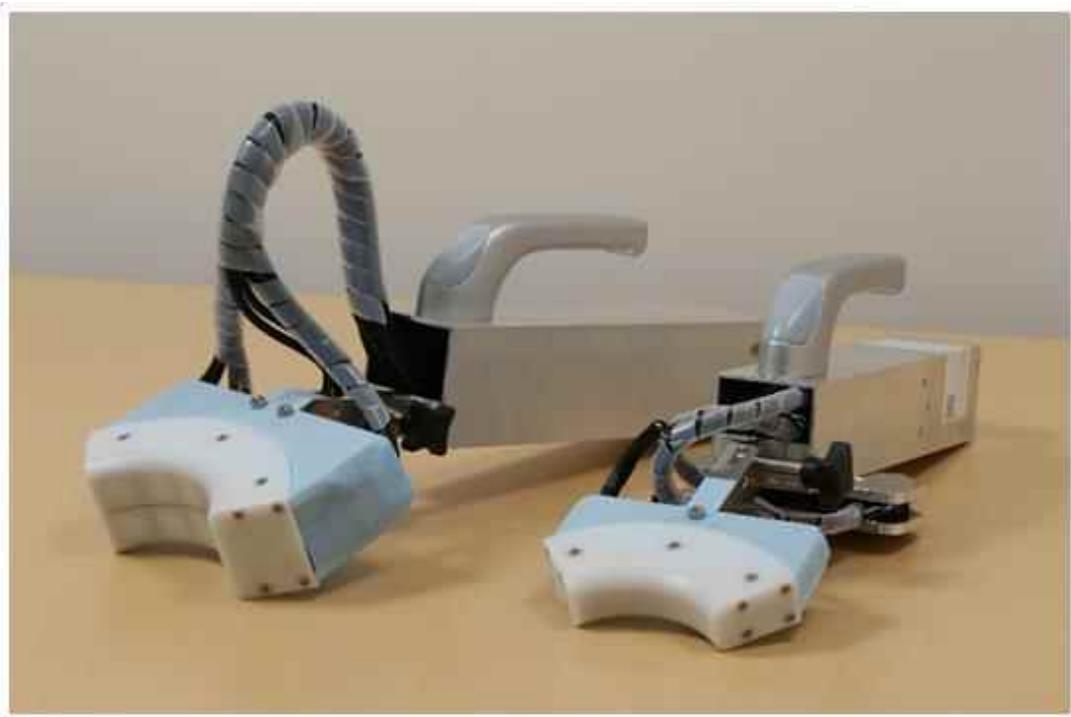


図 14 開発した新モニタ実用機
(左：一般用，右：乳幼児・子供用)

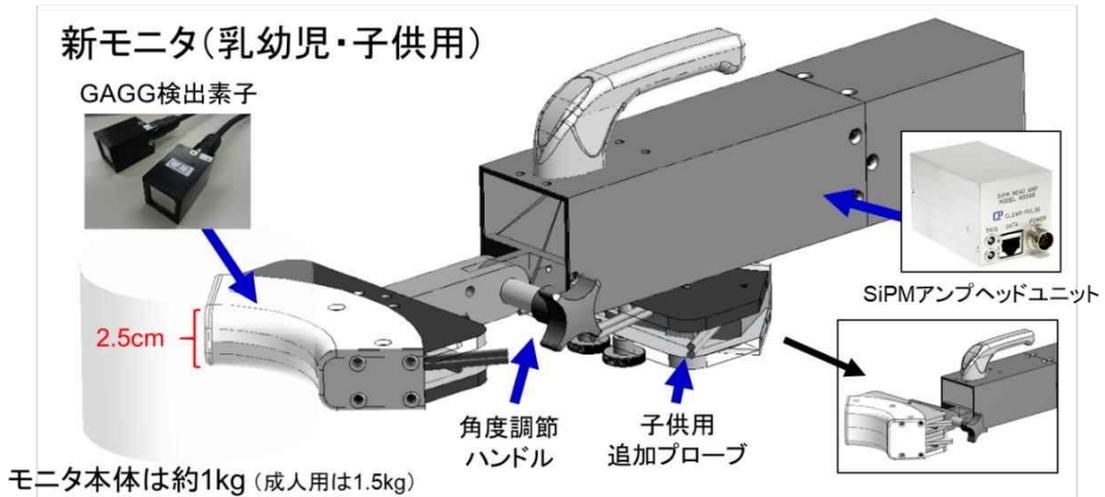


図 15 新モニタ実用機（乳幼児・子供用）の構造

4.3.4 校正及び検出下限値の評価

新モニタ実用機の甲状腺中 ^{131}I に対するピーク効率 (365 keV) は、物理ファントムを用いた実験、及び、(放射線輸送)シミュレーションによる計算から評価した。ここでシミュレーションを適用したのは、実験で使用可能な年齢別頸部ファントム (IRSN 製) が 5 歳, 10 歳, 15 歳及び成人の 4 種類しかないためである。実験では、頸部ファントム内の甲状腺形状容器に ^{133}Ba 標準溶液を充填し、取得した波高スペクトルから γ 線エネルギーを変数とするピーク効率関数を求め、これから ^{131}I のピーク効率を決定した。シミュレーションでは、新モニタのプローブと年齢別数学ファントム (0 歳, 1 歳, 5 歳, 10 歳)⁹⁾ または数値ファントム (2.7 歳, IRSN から提供されたもの) を組み込んだ計算体系を構築し、甲状腺中 ^{131}I から発生する γ 線に対する波高スペクトルを計算してピーク効率を導出した。図 16 にシミュレーションの計算体系、図 17 に評価したピーク効率の結果を示す。



図 16 シミュレーションの計算体系

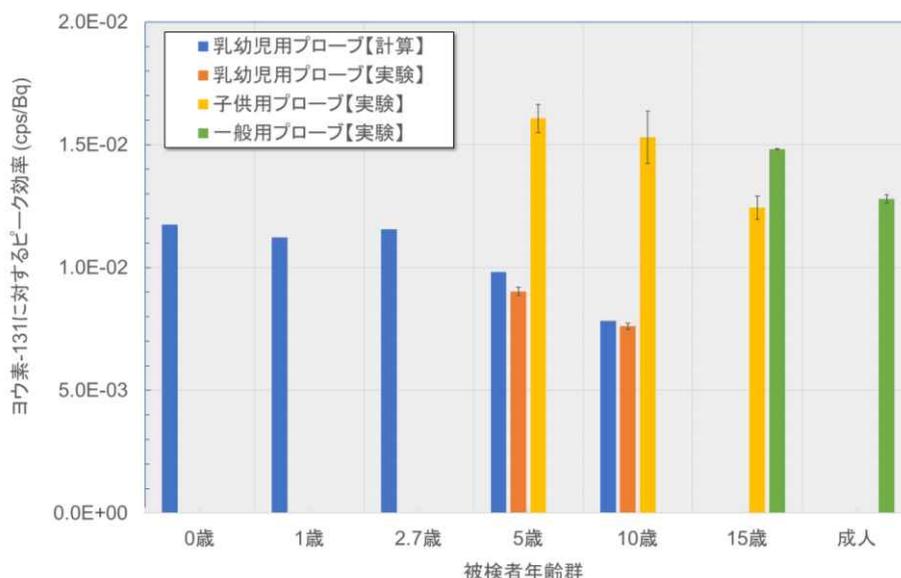


図 17 甲状腺中 ¹³¹I に対するピーク効率 (365 keV)

図 17 に示すシミュレーション（計算）の結果から、乳幼児用プローブを用いた場合、0 歳から 5 歳まではピーク効率の変化が比較的小さいことが分かる。このことは、おおよそ 5 歳以下の被検者に対しては、被検者の年齢に応じてピーク効率を細かく変更する必要がないことを意味している。シミュレーションの妥当性は、同図に示す 5 歳と 10 歳のピーク効率について、計算値が実験値とほぼ一致していることから明らかである。なお、5 歳時以上では子供用プローブ、15 歳以上では一般用プローブを使用することで、検出感度を高められる。

図 18 及び図 19 には、種々の実験条件に対する新モニタ実用機の甲状腺中 ¹³¹I に対する検出下限値を示した。検出下限値は、波高スペクトル中に ¹³¹I ピーク (365 keV) の関心領域を設定し、修正された Currie 式を用いて導出した⁽¹²⁾。なお、実験では 5 歳より低い年齢のファントムは利用できないが、ピーク効率の計算結果から、5 歳児以下でも検出下限値はそれほど変わらないと考えられる。

図 18 には、検出器近傍の周辺線量当量率と ¹³¹I に対する検出下限値の関係を示した。ただし、測定時間は 180 秒とした場合である。当然ながら、周辺線量当量率の上昇に伴い、検出下限値も増加していくが、周辺線量当量率が 2.5 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ の環境においても検出下限値は 200 Bq 程度であった。この量は、乳幼児の甲状腺等価線量が 10 mSv に相当する場合の、吸入摂取 1 週間後の甲状腺残留量 320 Bq よりも小さい。周辺線量当量率が $\sim 0.05 \mu\text{Sv h}^{-1}$ の環境（通常のバックグラウンドレベル）では、検出下限値は 30 Bq 程度であるので、同様な条件で 1 mSv 程度の甲状腺内部被ばくを検知できることになる。

図 19 には、周辺線量当量率が $\sim 0.05 \mu\text{Sv h}^{-1}$ と 2.5 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ のそれぞれの環境において、測定時間と検出下限値の関係を示したものである。乳幼児を含む子供の甲状腺計測は、3 分程度以内とするのが現実的と考えられるが、状況に応じて測定時間をより短くする必要性も想定される。同図から測定時間を 3 分間から 1 分間にすると検出下限値は約 2 倍に増加するが、通常バックグラウンドの数倍程度の環境であれば、数 mSv 程度の甲状腺等価線量を検出するのに十分な検出感度で甲状腺計測を行うことが可能である。

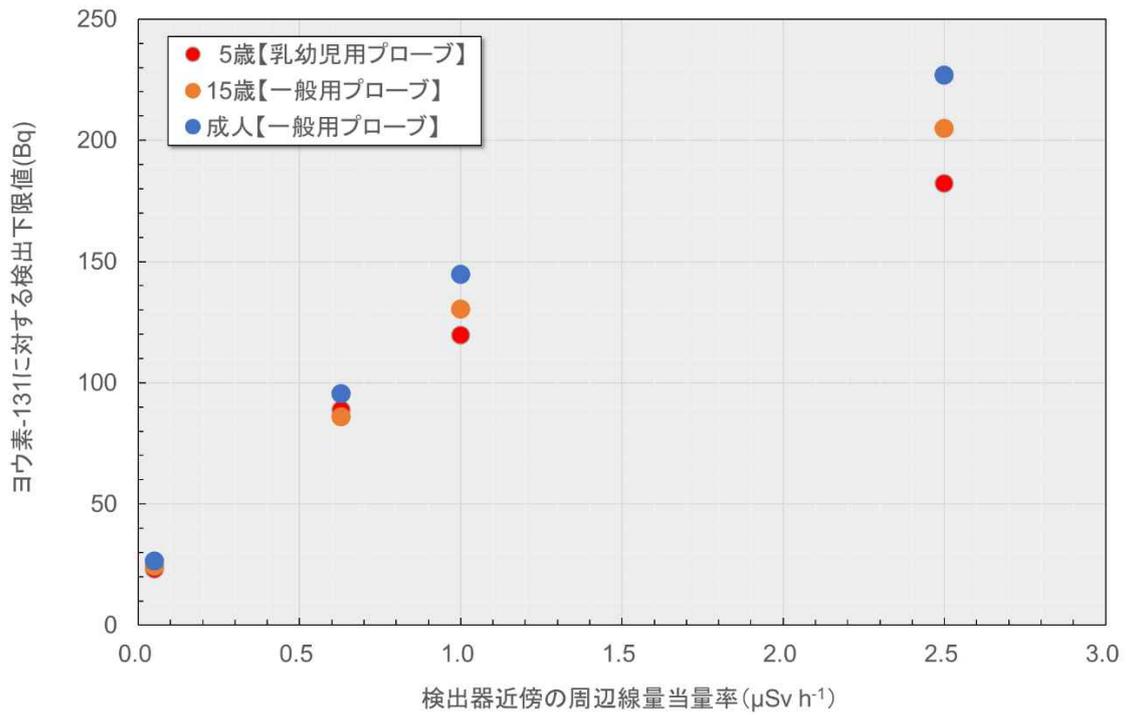


図 18 周辺線量当量率と ¹³¹I に対する検出下限値の関係
(測定時間：180 秒)

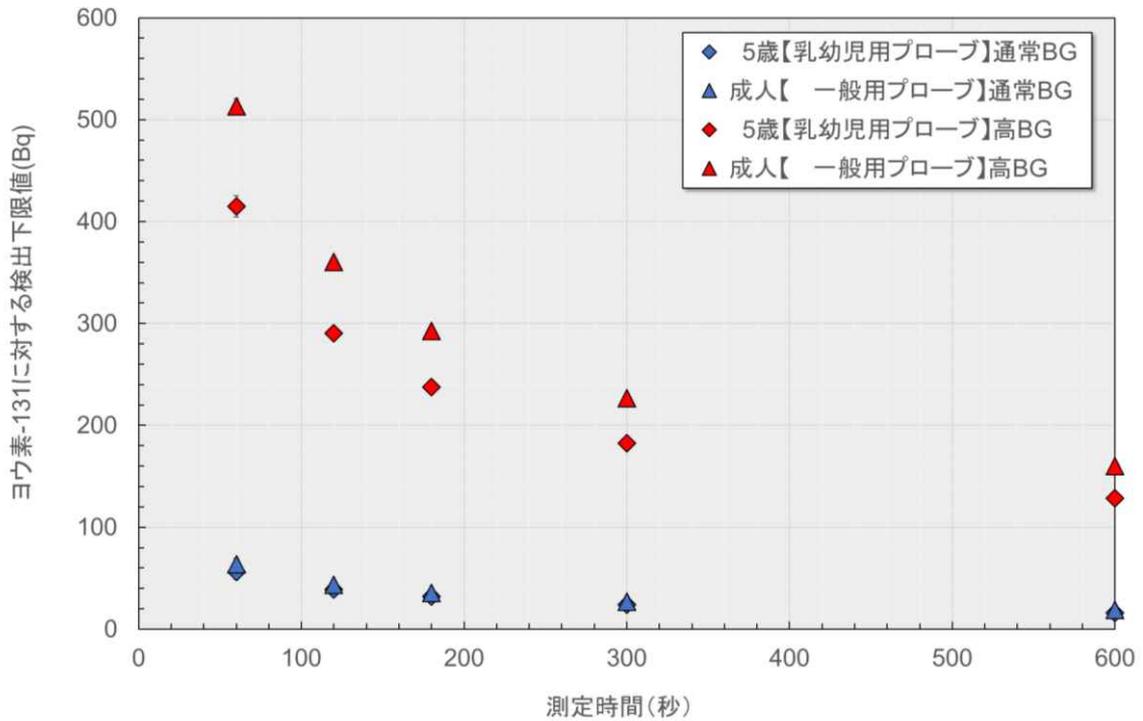


図 19 測定時間と ¹³¹I に対する検出下限値の関係
(通常 BG：～0.05 μSv h⁻¹，高 BG：約 2.5 μSv h⁻¹)

4.3.5 測定精度の評価

甲状腺測定には様々な誤差が生じることが予想される。ここでは、測定誤差の一要因となるプローブ位置のずれによる計数効率の変化に着目して、年齢別ファントムを用いた実験的評価を試みた。実験では、ファントムに内蔵する甲状腺形状線源の中央（より正確には甲状腺峡部の上端）の真上にプローブの中心を密着して合わせた配置を基準位置として、①ファントムとプローブ間の距離を変化、②プローブを基準位置から上下に移動、③プローブを基準位置から右回りに回転（ファントムは左右対称であるため左回りは省略）の各ケースについて ^{131}I ピーク効率を得た。ここで②及び③については、プローブとファントムの密着状態は保持し、年齢別ファントムに内蔵する甲状腺形状容器には既知量の ^{131}I 標準溶液を充填した。図 20 にプローブの基準位置、図 21 から図 23 に上記①、②及び③の各ケースの実験結果を基準位置に対する ^{131}I ピーク効率の相対値として示した。

プローブとファントム間の距離の変化に伴う ^{131}I ピーク効率（相対値）は図 21 に示すとおりである。新モニタ（実用機）は被検者の頸部に密着させて測定を行うことを想定しているが、頸部の起伏やプローブ内径が固定されているために、実際には数 mm 程度はプローブが頸部から離れてしまうことも想定される。プローブとファントム間の距離を 5 mm としたときの ^{131}I ピーク効率は、密着した場合に比べて相対値で 0.75~0.84 であった。したがって、数 mm の距離の誤差が ^{131}I ピーク効率に与える変化は 15%程度と評価される。新モニタを用いた甲状腺測定では、基本的にプローブを被検者頸部に密着させた状態で行うことを想定しているものの、距離を 5 mm とした場合の ^{131}I ピーク効率を用いることで、甲状腺中 ^{131}I の過小評価を防ぐことができると考えられる。

プローブを基準位置から上下に移動した場合の ^{131}I ピーク効率の変化は図 22 に示すとおりである。乳幼児用プローブの ^{131}I ピーク効率の（下方向での）変化が他プローブと比較して大きいのは、検出素子の数が少ないために（1 段 4 列、図 2 参照）、高さ方向に断面積が変化する線源（甲状腺）形状の影響を受けやすいことが理由と考えられる。同図に示す結果から、プローブ位置が基準位置から上下に 1 cm 移動した場合の ^{131}I ピーク効率の変化は、平均すると乳幼児用プローブの場合で 10%程度以内であった。

プローブを回転させたときの ^{131}I ピーク効率の変化は図 23 のとおりである。同図から、回転角が 20° の場合には ^{131}I ピーク効率は基準位置の場合と比べて 10%程度低下するが、回転角が 10° 以内では 5%の変動範囲内に収まる結果が得られた。

以上の結果から、新モニタを用いた甲状腺測定において想定されるプローブ位置のずれに伴う測定誤差は 20%程度 ($18\% = \sqrt{(15\%)^2 + (10\%)^2 + (5\%)^2}$) と評価される。被検者の測定では、この測定誤差に ^{131}I ピークエリア計数の統計誤差を加算することになる。

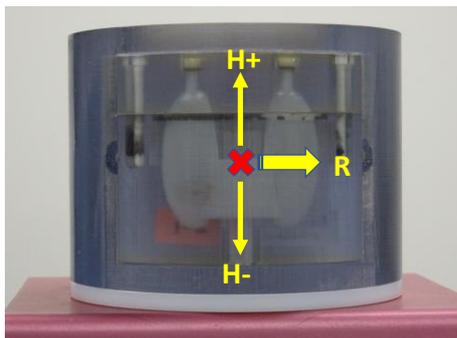


図 20 年齢別ファントムにおけるプローブの基準位置
(×印で示した甲状腺峡部上端部の直上のファントム表面)

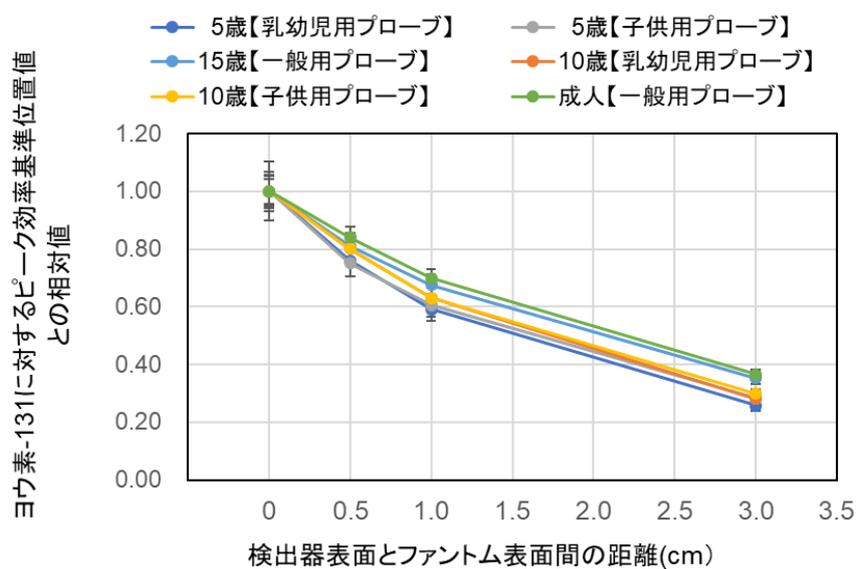


図 21 プローブとファントム間の距離の変化に伴う ^{131}I ピーク効率の変化

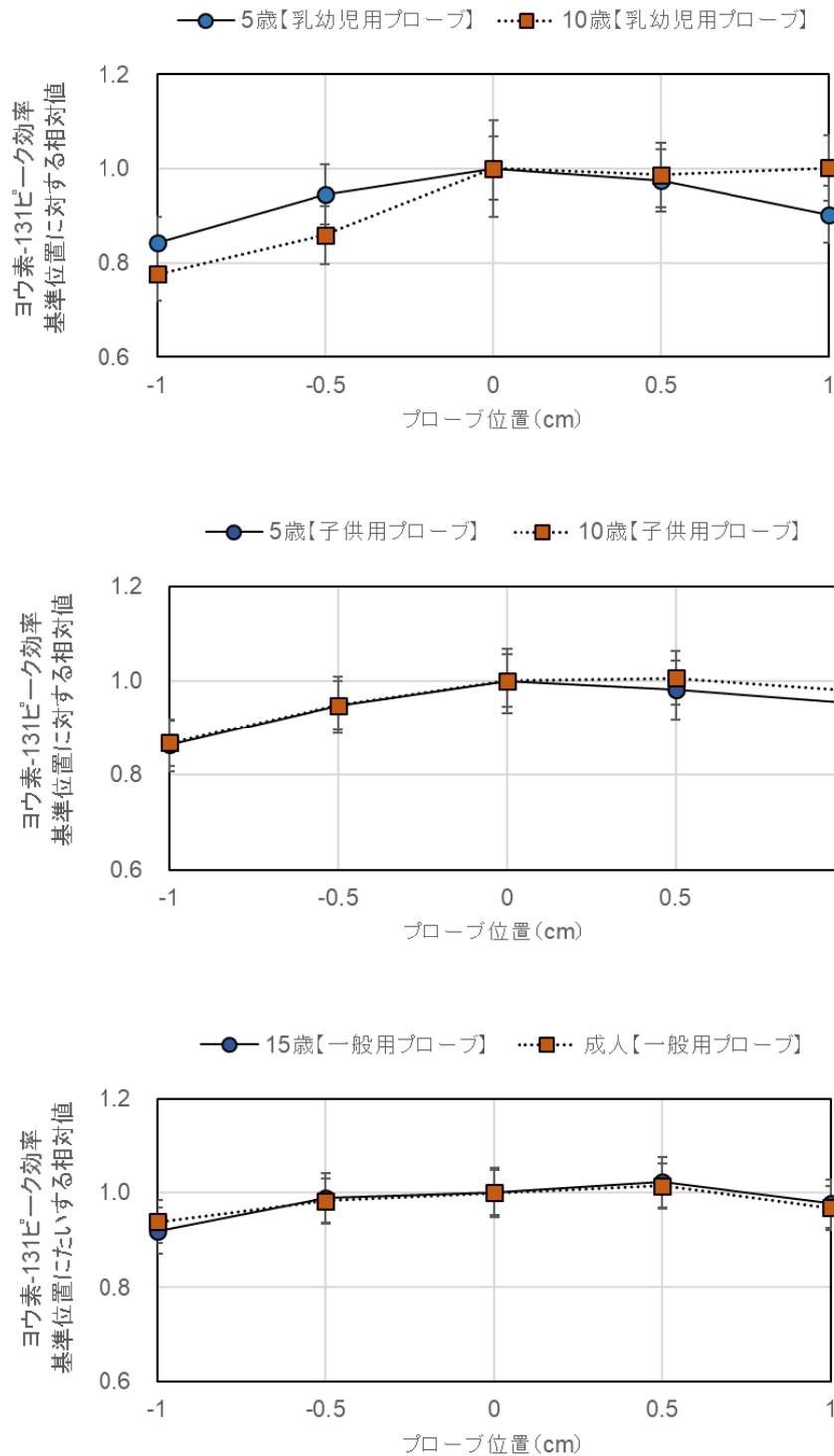


図 22 プローブを基準位置から上下に移動した場合の ¹³¹I ピーク効率の変化 (横軸が正の数値はプローブを基準位置から上方に移動, 負の数値は下方に移動)

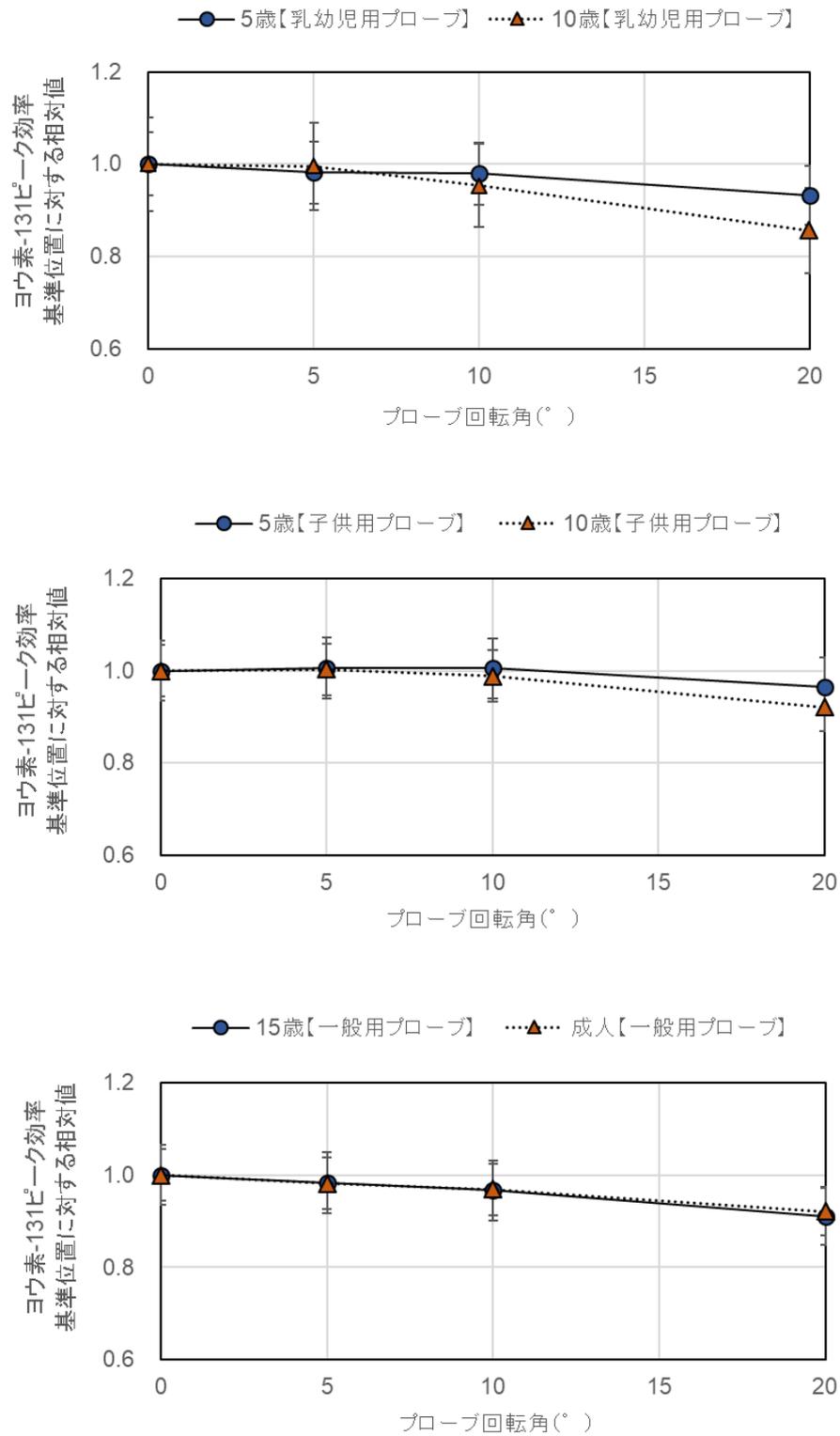


図 23 プローブを回転させたときの ^{131}I ピーク効率の変化

4.3.6 プローブ支持機構の製作

新モニターを用いた被検者の測定方法については4.3.2で検討したとおりであるが、測定者がプローブを持ち続けるのは、軽量化されたプローブ（乳幼児・子供用で約1kg、成人用で約1.5kg）であっても、被検者が多数いる場合には、測定者の負荷が相応に大きくなることが予想される。そこで、新モニターのプローブを任意の位置で固定することのできる支持機構を2種類製作した。この支持機構は測定台に設置され、被検者は測定台に対面した椅子に座った状態で測定を受ける形を想定している（図24）。2種類の支持機構は簡易式とアーム式であり、前者がプローブの傾斜角と高さのみを調節できるのに対し、後者では複数のヒンジを設けることで、より自由度の高いプローブ位置の調整を可能している。いずれの支持機構も被検者自身がプローブに頸部を乗せる形となるが、アーム式ではプローブを測定台から離すことができるため、乳幼児の甲状腺測定に使用することも考えられる。図25にはアーム式支持機構に固定されたモニター（一般用）による使用例を示す。



図24 製作した新モニタープローブ用支持機構



図25 アーム式支持機構の使用例

4.3.7 新モニタ制御用ソフトウェアの開発

原子力災害時，甲状腺検査が実施される会場においては，放射線に対する専門的な知識や熟練した測定技術を持っていない一般の現場担当者（事務職員または自治体職員等）が甲状腺検査を行う場合があり得る。そこで，本年度は，本研究で開発した新モニタによる甲状腺モニタリングの実用化のために，平成 30 年度に製作した新甲状腺モニタ制御用ソフトウェアに 1) 動作モードの追加，2) 測定系の改良，3) MONDAL3⁽²³⁾へのアクセス機能，4) 情報収集支援システムでのデータ共有機能を追加した。各改良内容は下記の通りである。

1) 動作モードの追加

新モニタ制御用ソフトウェアに甲状腺測定に必要な基本機能だけを有効にしたルーチンモードを追加した。表 5 は各動作モードで有効な機能を示している，ルーチンモードは被検者測定と測定結果管理機能だけが有効である。そのために，ルーチンモードでは，①甲状腺モニタの測定系選択，②被検者の ID 及びコメント入力，③測定時間設定，④測定開始すれば，甲状腺検査の測定結果のレポート作成から測定データの保存が自動的に行われる。一方，管理者モードは，ルーチンモードに加え，甲状腺モニタの初期設定（各測定系の検出素子登録，エネルギー校正及び効率校正，ゲイン微調整等）を含むメンテナンス機能が有効である。管理者モードで操作するためには事前に管理者登録が必要である。図 26 は各モードで操作可能な MCA 操作画面を示しており，ルーチンモードで制限されている機能は画面上で選択できない。

表 5 各動作モードでの実施可能機能

	ルーチンモード	管理者モード
MCA 設定及びコマンド実行，検出素子の指定，ゲイン微調整	×	○
エネルギー／半値幅校正，効率校正	×	○
BG 測定，被検者測定	○	○
核データライブラリ作成・編集	×	○
測定系の指定，スペクトルモニタ，結果出力等の基本機能	○	○
被検者のデータ管理(既存結果の検索，再分析，再出力)	○	○
MONDAL 起動	○	○



図 26 ルーチンモード及び管理者モードの MCA 操作画面

2) 測定系の追加

本年度、新モニタの開発(4.3.3)では、測定精度をあげるために、乳幼児・子供用及び一般用の2種類のモニタを製作した。そこで、本年度製作した新モニタの測定系に合わせて、既存の2測定系(子供用と一般用)を、乳幼児用(検出素子4個)、子供用(検出素子8個)、一般用(検出素子10個)、その他(検出素子2個)と4つの測定系に改良した。この機能により、図27に示す測定系リストから使用する測定系の選択が容易になった。他に、新甲状腺モニタ以外に4.2.2候補検出器のMCA制御(ORTEC社製及びGBS社製)機能及び管理機能を追加した。

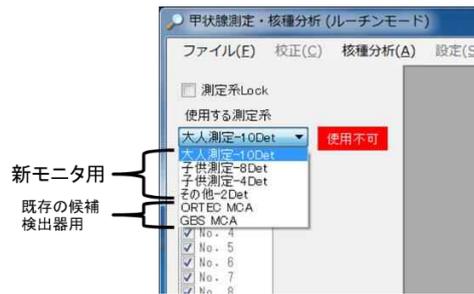


図27 制御可能な甲状腺モニタの測定系

3) MONDAL3 へのアクセス機能追加

甲状腺検査会場で、得られて検査結果から簡易的な甲状腺線量評価ができるように、MONDAL3へのアクセス機能を追加した。図28は新モニタによる測定結果(甲状腺中放射性ヨウ素残留量, Bq)を用いて、MONDAL3で行った内部被ばく線量評価結果を示している。本機能は、ルーチンモード、管理者モードいずれも使用可能である。



図28 新モニタによる測定結果を用いた MONDAL3 による内部被ばく線量評価例

4) 情報収集支援システムへのデータ共有機能

情報収集支援システムから新モニタ制御ソフトウェアへアクセスして、被検者の測定結果を一覧できるように情報収集支援システムへのデータ共有機能を追加した。図29は情報収集支援

システムから読み出した被検者の甲状腺検査結果（例）を示しており、内部被ばく線量評価に必要な個人の行動情報と甲状腺検査結果（実測データ）を連携できる。

被検者の測定結果を情報支援システムから確認、再解析可能

情報支援システムから測定結果出力

スペクトルデータ確認

No.	ピーク	ネットカウント	検出線量	核種	エネルギー	放射能
1	31.37	2597.4 ± 116.1 (s)	304.9	Ba-130	3.42E+09	8.8E+2
2	87.17	5876.4 ± 137.8 (s)	338.9	Ba-130	3.42E+09	8.8E+2
3	102.81	568.1 ± 82.6 (s)	25.4	Ba-130	3.42E+09	8.8E+2
4	117.18	1298.5 ± 73.5 (s)	221.4	Ba-130	3.42E+09	8.8E+2
5	104.31	3223.1 ± 78.1 (s)	391.5	Ba-130	3.42E+09	8.8E+2
6	100.89	840.5 ± 45.8 (s)	219.3	Ba-130	3.42E+09	8.8E+2

図 29 情報収集支援システム上で測定結果一覧例

4.4 情報収集支援システムの改良

情報収集支援システムは、原子力災害時、甲状腺検査が実施される会場にて避難者から収集される情報及び検査会場での体表面検査、甲状腺測定結果（図30）を収集してデータベース化するためのもので、避難を伴う住民の被ばく線量評価や事故後の被ばく線量再構築に必要な情報をより効率的に散逸することなく収集することを目的としている。図31には本システムの概要を示しており、昨年度は甲状腺検査会場で収集された避難者の情報を、個人毎に登録及び管理するために、(1) 避難者情報データベース管理機能、(2) 測定結果データベース管理機能、(3) 避難情報データベース管理機能を有するシステムを構築した（図31 平成30年度_構築）。本年度は、情報収集支援システムへの入力作業を簡易化するため、①入力機能の改良及び②複数の検査会場で作成された分散データベースの統合機能を追加した（図31 平成31年_追加）。

作成日	20 年 月 日	原子力災害時 避難者検査記録カード	個人識別ID
検査場			
1. 受検者登録情報			
① (ふりがな) 氏名	② 生年月日	③ 性別	
	年 月 日	男・女	
④ 住所	県 道 市 郡		
2. 検査結果 (測定担当者記入欄)			
① 体表面汚染検査			
測定者名:	測定員:	記録員:	
管理番号:	測定場所の空間線量率:	$\mu\text{Sv/h}$	
BG:	cpm		
(前面)	(背面)	部位	測定結果 cpm
右	左		
左	右		
(足裏)		表面汚染:	有・無
		除染実施:	済み・未実施
		甲状腺検査時の汚染	有・無
② 甲状腺簡易検査			
・NaIサーベイメータ測定 ($\mu\text{Sv/h}$)		・スペクトロメータ測定	
測定者名:	測定員:	測定者名:	測定員:
管理番号:	記録員:	管理番号:	記録員:
測定場所の空間線量率:	$\mu\text{Sv/h}$	測定場所の空間線量率:	$\mu\text{Sv/h}$
A 大腸部 (Bg)	B 甲状腺部	正味 (B-A)	ファイル名
1			有・無
2			チャンネル
3			ch
備考			
3. 避難行動調査			
① 避難準備指示、屋内退避指示、避難指示を受けた場所と、その時の屋内・屋外滞在の別をご記入ください。			
避難準備指示: 自宅・自宅外 (場所・住所) / 屋内・屋外			
屋内退避指示: 自宅・自宅外 (場所・住所) / 屋内・屋外			
避難指示: 自宅・自宅外 (場所・住所) / 屋内・屋外			
② 避難を開始した日時をご記入ください。 (月 日 :)			
③ 避難時に同行者 (一緒に行動した人) がいた場合、家族・その他別に代表者のお名前と人数をご記入ください。			
家族: 代表者 ()・人数 (人) / その他: 代表者 ()・人数 (人)			
④ 避難開始から避難完了までの避難経路 (行動、移動手段、期間、場所) を教えてください。			
	行動	移動手段	期間
1	移動・滞在	車・徒歩・その他 () / / : ~ / :	
2	移動・滞在	車・徒歩・その他 () / / : ~ / :	
3	移動・滞在	車・徒歩・その他 () / / : ~ / :	
4	移動・滞在	車・徒歩・その他 () / / : ~ / :	
5	移動・滞在	車・徒歩・その他 () / / : ~ / :	
6	移動・滞在	車・徒歩・その他 () / / : ~ / :	
⑤ 避難中の出来事や気づいた点があればご記入ください。			
4. 安定ヨウ素剤の服用			
① 安定ヨウ素剤*を服用しましたか? : はい・いいえ * : ヨウ化カリウム(mg), ヨウ化カリウム錠(錠)			
② ①で「はい」の場合、服用回数、服用時期、日時、服用量を教えてください 服用回数:			
1回目 服用時期: 避難前・避難後 服用日時 (月 日 :) 服用量: mg・錠			
2回目 服用時期: 避難前・避難後 服用日時 (月 日 :) 服用量: mg・錠			
3回目 服用時期: 避難前・避難後 服用日時 (月 日 :) 服用量: mg・錠			
5. 食事状況調査			
① 発災後から現在まで、摂取制限指示のあった食品等を摂取しましたか? : はい・可能性あり・いいえ			
② 発災後から現在まで、放射能汚染の可能性のある食品等を摂取しましたか? : はい・可能性あり・いいえ			
③ ①②で「はい」「可能性あり」を選択した方は、その状況について詳しく教えてください			
6. 個人情報利用の許諾			
本記録カードの記載内容は、個人特定可能な情報を除いて、放射線による被ばく線量推計または推計手法の開発等にかかわる研究に用いることがあります。上記の情報利用に同意してくださる方は自筆 (未成年者の場合は保護者) による署名をお願いします。			
氏名 (自筆)			
ご協力ありがとうございました。			

図30 避難者検査記録カード (更新版)

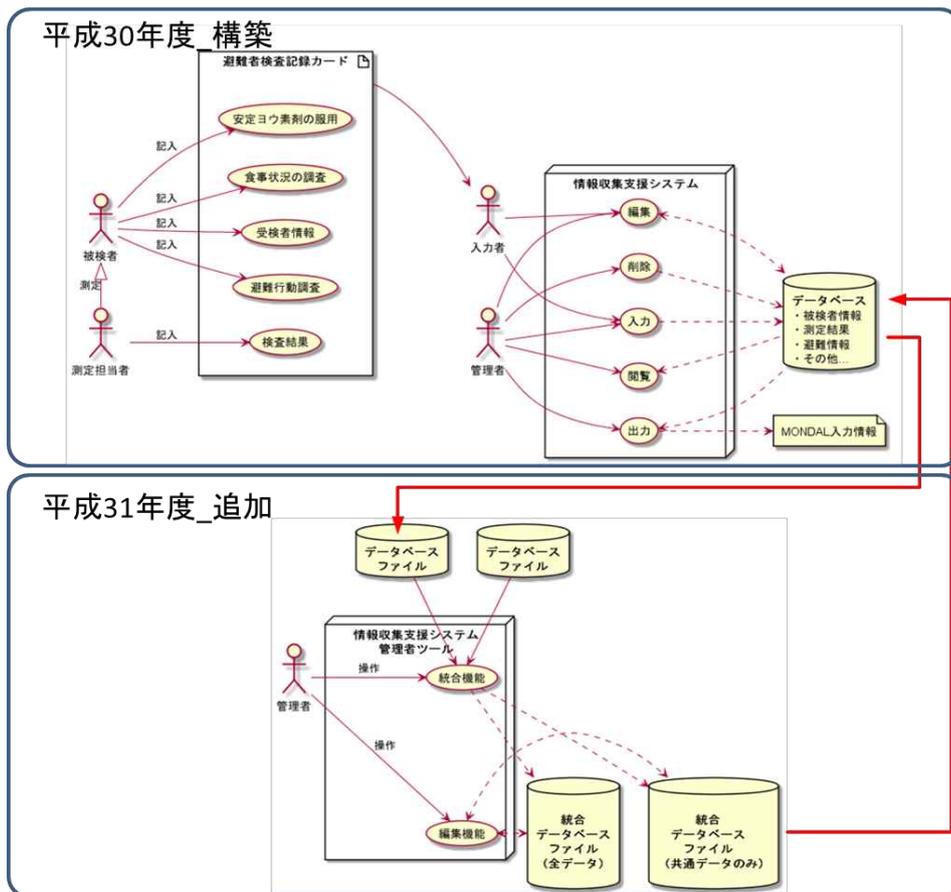


図 31 システムの概要

①入力機能の改善

体表面汚染測定部位のグループ化機能，スペクトル測定ファイルの登録機能，読み仮名入力機能，避難経路表示機能の改善を行った。体表面汚染測定部位のグループ化機能では，図 32 に示すように人体図を複数の部位に分け，クリックした位置に該当する測定部位の分類情報をデータベースへ保存して，測定部位毎にグループ化する機能を追加した。そして，体表面検査結果の入力の際，図 32 の人体図の GUI でクリックすることで測定部位の名称が体表面汚染結果表に自動的に入力される。本改良により，体表面汚染結果表上で，汚染部位とその数値は，人体図を確認せずに直接，確認することができる。図 33 は，人体図 GUI で入力時の体表面汚染測定結果表示例を示す。

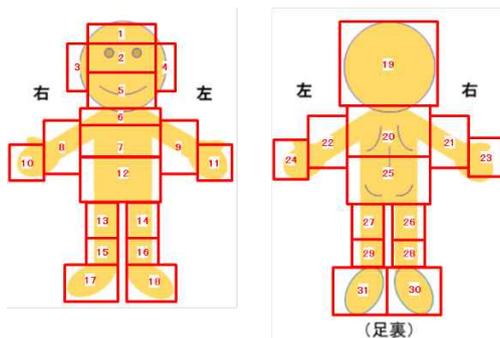


図 32 グループ化した人体図

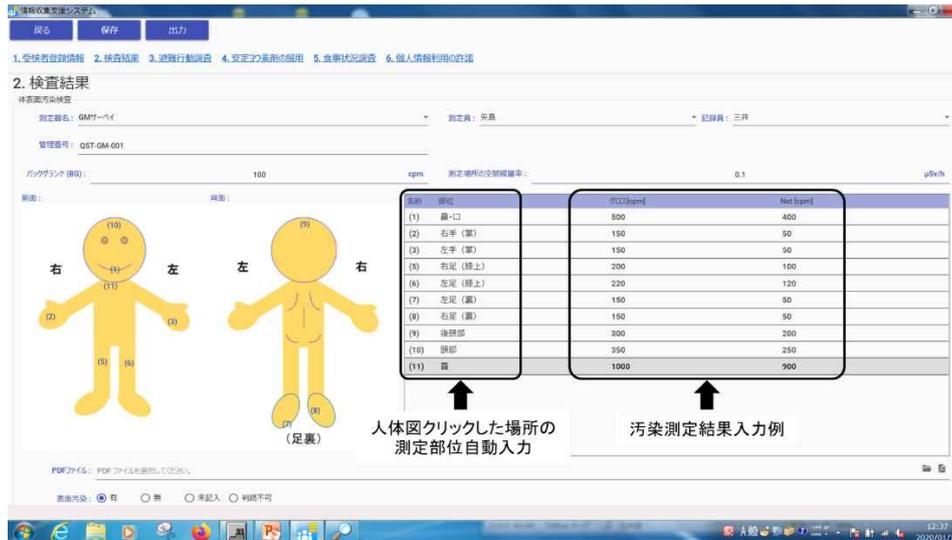


図 33 人体図 GUI 上入力時の体表面汚染測定結果の例

他に、個人の情報入力時には、被検者氏名入力時日本語の読み仮名が自動入力できるように Windows 10 に追加されている UWP(Universal Windows Platform)API を用いて読み仮名入力機能の追加、甲状腺測定結果の登録では、複数の測定結果を選択できるようにリスト型入力へ変更 (図 34) を行い、リストの追加ボタン (+) と削除ボタン (-) で測定データの追加・削除ができる機能を追加した。さらに、避難経路表示機能では、避難経路項目に入力された避難経路を地図上に道路に沿った表示 (図 35) ができるように改良しており、本システムに格納されている地域防災計画に含まれている全サイトの避難所への移動経路を道路上で推定できるようにした。

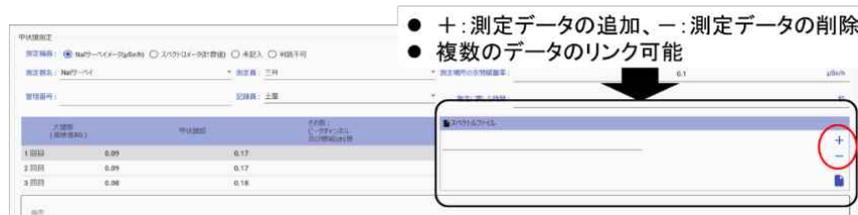


図 34 甲状腺測定結果の登録画面 (リスト型入力法, + : 追加ボタン, - : 削除ボタン)

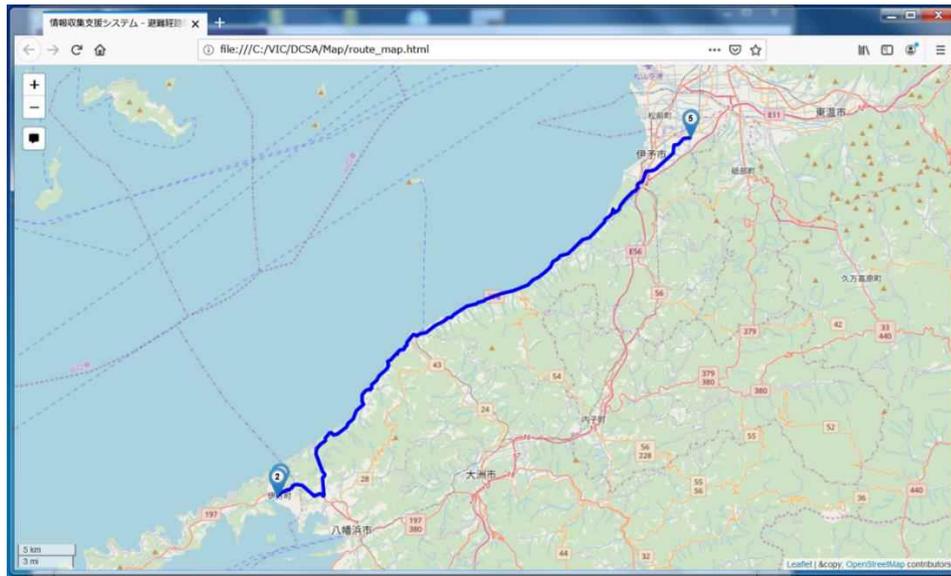


図 35 道路に沿った避難経路表示例

②分散データベースの統合機能

図 36 は、分散データベース統合例を示しており、PC 毎に作成されたデータベースを一つのデータベースへの統合機能（図 36）、避難所や測定員等の入力の際に参照する情報を共通化してシステムを運用するため、各 PC へ分散させる機能（情報収集支援システム管理者ツール：図 37）を追加した。本機能の追加により、統合化された測定データを抽出することにより、収集した情報を統計処理に適用することが可能となる。図 38 にはデータベースへ情報を統合例(a)及び分散事例(b)の概念図を示しており、本統合機能の追加により PC1~3 で入力した情報を、PC4 のデータベースへ情報を統合したり、避難所や測定員等の共通化したい情報を統合したデータベースから各 PC に分散させることができる。

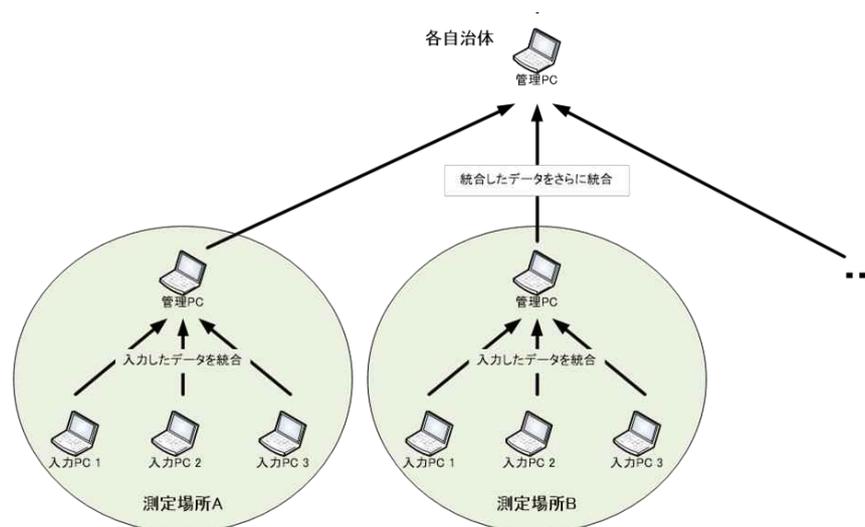


図 36 データ統合のイメージ

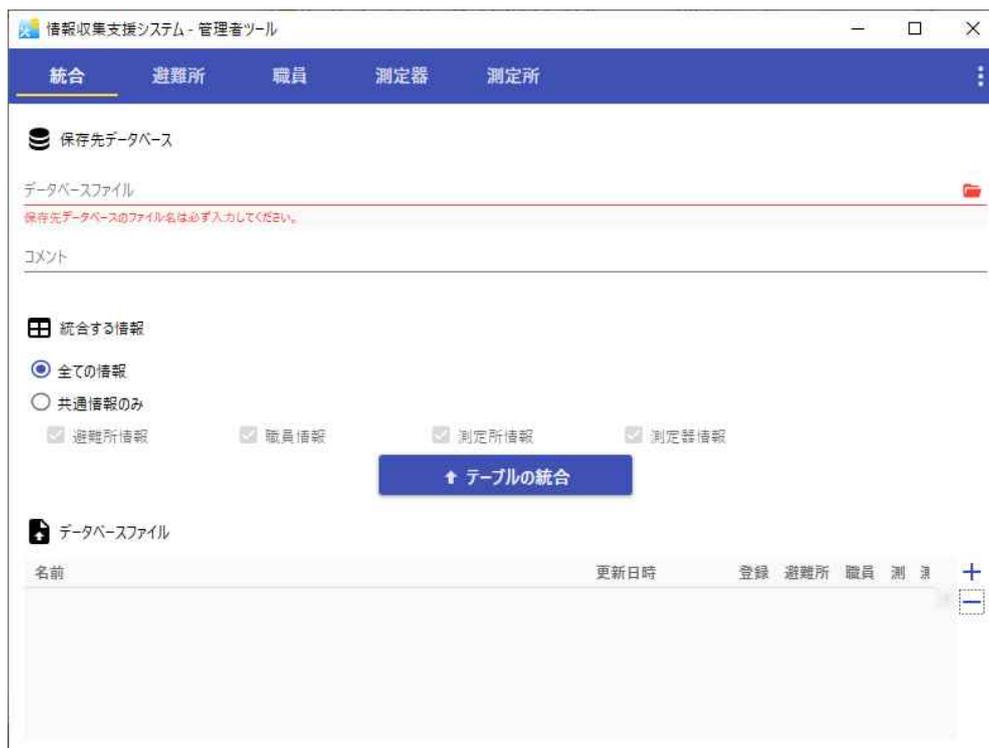


図 37 情報収集支援システム管理者ツール

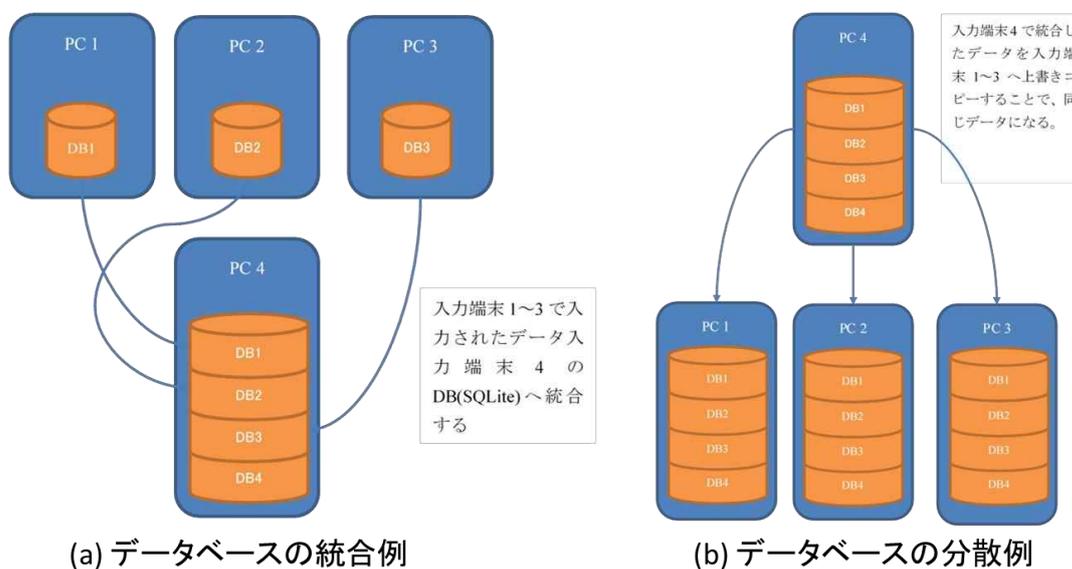


図 38 分散データベース統合及び分散の概念図

4.5 研修会

量研機構にて開催した 2019 年度甲状腺簡易測定研修（2019 年 10 月 21 日開催）において、新モニタのデモンストレーションを行い（図 39）、オブザーバーを含む研修参加者から、新モニタの操作性や今後の改良点などについてアンケートを行った。表 6 に主要な意見（一部要約）とともに、現時点での対応状況及び検討結果について示した。本研究は今年度で終了するが、次年度以降も可能な範囲で新モニタの改良を継続してゆく予定である。



図 39 甲状腺簡易測定研修でのデモンストレーション様子

表 6 新モニタのアンケート結果及び対応状況等

コメント	対応状況等
<ul style="list-style-type: none"> ● 可搬型とするのであれば PC も無くして、電池でも稼働できるようにした方がよい。表示部分をモニタ本体に付属させることや、複数素子を使用しているのであれば画像化することも考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 電池式とすることでプローブ自体の重量が増えるので、プローブ筐体（アルミ材料）の軽量化と併せて考える必要がある。 ● 各検出素子（GAGG）からの波高スペクトルは測定時に取得できるので、必要に応じて検出素子間のピークエリアカウントの違いは確認できる。ただし、自動では行えないため、ソフトウェアの改造が必要である。今後の新モニタの運用状況と併せて対応を検討してゆく。
<ul style="list-style-type: none"> ● 測定時間が一般の方々には長く感じられると思うので、音声ガイダンスなどの工夫もあると良い。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 実際の測定では、測定者が被検者と対面して声掛けすることが出来る。リラックスして測定を受けられるような工夫も考えていきたい。
<ul style="list-style-type: none"> ● 成人用で測定する場合には、測定時に被検者がリラックス出来る形状の椅子があると良い。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 製作したアーム式支持機構（報告書 4.3.6）を用いることで、リクライニングチェアでの測定も行える。
<ul style="list-style-type: none"> ● 取っ手を外してハンディタイプにすると良い。例えば、プローブの外枠部分を持ちやすい形状にするなどの工夫が考えられる。プローブ自体をより小型化することや、バッテリー駆動で無線にすることも考えられる。専用の養生用のカバーも製作すると良いと思う。 	<ul style="list-style-type: none"> ● プローブの取っ手部分については小さく持ちにくかったため、大きなパーツに変更した。バッテリー駆動については上述のとおり。 ● 専用の養生カバーについては、市販品で代用できるものを検討する。

5. まとめ

5.1 今年度の成果

新モニタについては、昨年度に実施した検出素子配置の検討結果を踏まえ、今年度は実用機としての開発を進めた。開発にあたり、模擬被検者（子供）によるプローブ適合試験、医療関係者からの測定体位についての助言、研修会参加者からの操作性に関する意見聴取などを参考にした。新モニタは、乳幼児・子供兼用と一般用の2種類を製作し、幅広い年齢の公衆の甲状腺測定に用いることができる。乳幼児プローブの厚さは25 mmであり、被検者頸部に容易にプローブを近接させることができ、さらに、被検者の測定中の動きに対しても影響を受けにくい構造となっている。このため、既存測定器では困難であった乳幼児の甲状腺測定を、高感度かつ安定して行うことが可能である。また、新モニタを制御するソフトウェアについても改良を行い、測定者用と管理者用の2種類のモード設定を追加するなど、操作性の改善を行った。

情報収集支援システムについては、昨年度までに開発したものに、測定データファイルの読み出し機能や避難経路の探索機能などを追加した。その他、年齢別頸部ファントムを用いて、既存測定器の甲状腺中¹³¹Iに対する校正データを整備した。

5.2 3カ年の成果（2017-2019年度）

万一の原子力事故に際し、乳幼児を含む様々な年齢の公衆を対象とした甲状腺測定を高感度かつ高精度に行うことのできるモニタを開発し、実用化の段階に至った。既存の測定器では乳幼児の甲状腺測定は困難であり、開発したモニタはそのギャップを埋めるものと期待される。その他、本研究で提案した原子力災害時の公衆の内部被ばくモニタリング手法に関連して、福島第一原発事故の際にも実施された甲状腺簡易測定の標準化、既存測定器の性能評価、及び、内部被ばく線量評価に必要となる種々の情報を効率的に収集するシステムの開発などを実施した。以上から、本研究の当初の目的はほぼ達成できたと考える。

なお、3カ年の研究成果概要（詳細版）は付録Aにまとめた。

6. 参考文献

- 1) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Levels of effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami: UNSCEAR 2013 Report. Vol. I. Annex A; 2014.
- 2) Ishikawa T. Radiation doses and associated risk from the Fukushima nuclear accident: a review of recent publications/ Asia Pacific Journal of Public Health. 29: 18S-28S; 2017.
- 3) Ishikawa T et al. The Fukushima Health Management Survey: Estimation of external doses to residents in Fukushima Prefecture. Sci Rep. 5: 12712; 2015.
- 4) Tokonami S et al. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. Sci Rep. 2: 507; 2012.
- 5) Matsuda N et al. Assessment of internal exposure doses in Fukushima by a whole body counter within one month after the nuclear power plant accident. Radiat Res. 179: 663-668; 2013.
- 6) Kim E et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents – Estimation and issues remaining. J Radiat Res. 57: i118-i126; 2016.
- 7) Weiss W. Thirty years after Chernobyl – overview of the risks of thyroid cancer, based on the UNSCEAR scientific reports (2008-2012). Thyroid cancer and nuclear accidents Long term aftereffects of Chernobyl and Fukushima (ed. Yamashita S., Thomas G.). 3-10; 2017.
- 8) Beaumont T et al. Development and test of sets of 3D printed age-specific thyroid phantoms for 131I measurements. Phy Med Biol. 62: 4673-4693; 2017.
- 9) Ulanovsky A V and Eckerman K F. Modification to the ORNL phantom series in simulation of the response of thyroid detectors. Radiat Prot Dosim. 79(1-4) : 429-431; 1998.
- 10) Broggio D et al. Child and adult thyroid monitoring after a reactor accident (CATHyMARA): Technical recommendations and remaining gaps. Radiat Meas. 128: 106096; 2019.
- 11) Isaksson M et al. Assessing ¹³¹I in the thyroid by non-spectrometric instrument – A European intercomparison exercise. Radiat Meas. 128: 106115; 2019.
- 12) Currie L A. Limits for qualitative detection and quantitative determination. Anal Chem. 40(3): 586-593; 1968.
- 13) Kramer G.H and Crowley P. The assessment of the effect of thyroid size and shape on the activity estimate using monte carlo simulation. Health Phys. 78(6): 727-738; 2000.
- 14) International Atomic Energy Agency. Actions to protect the public in an emergency due to severe conditions at a light water reactor. EPR-NPP Public Protective Actions; 2013.
- 15) 日本保健物理学会. 体外計測に関する標準計測法の策定に関する専門研究会報告書. 日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ. 9(1): ISSN: 1881-7297; 2016.
- 16) Kurihara O et al. Experiences of population monitoring using whole body counters in response to the Fukushima nuclear accident. Health Phys. 115(2): 259-274; 2018.
- 17) Canberra HP. <https://www.mirion.com/products/2250-fastscan-high-throughput-whole-body-counter> (accessed on 2020/2/20).

- 18) Werner C J (editor). MCNP User's Manual: LA-UR-17-29981; 2017.
- 19) Cristy M. Mathematical phantom representing children of various age for use in estimates of internal dose: ORNL/NUREG/TM-367; 1980.
- 20) Momose T et al. S. Whole-body counter of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. NIRS-M-252: 67-82; 2012.
- 21) Kurihara O et al.. Internal doses of three persons staying 110 km south of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station during the arrival of radioactive plumes based on direct measurements. Radiat Prot Dosim. 170(1-4): 420-424; 2016.
- 22) International Commission on Radiological Protection (ICRP). Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides – part 4 inhalation dose coefficients. ICRP Publ. 71 Ann. ICRP 25(3-4); 1995.
- 23) Ishigure N et al. Development of software for internal dose calculation from bioassay measurements. Radiat Prot Dosim. 109(3): 235-242; 2004.
- 24) Yajima K et al. A new thyroid monitor using multiple high resolution $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}(Ce)$ detectors for direct thyroid measurements of small children following a nuclear accident. Radiat Meas: DOI:10.1016/j.radmeas.2020.106272; 2020.

7. 成果発表

学会発表

- Yajima K et al. A reliable and robust method for monitoring large populations to assess thyroid internal exposure in a nuclear accident. 12th International conference on the Health Effects of Incorporated Radionuclides (HEIR). 8-11 October 2018, Fontenay-aux-Roses, Paris, France. BIO Web of Conference 14, 03010 (2019).
- Yajima K et al. the same presentation as the above. 4th ARADOS annual meeting. 17-19 October 2018, Seoul, Korea.
- Tani K et al. Monte Carlo simulation with computational phantom to investigate the effectiveness of a whole-body counter for thyroid measurement. 19th International conference on Solid State Dosimetry (SSD). 15-20 October 2019, Hiroshima, Japan.
- Yajima K et al. A new concept thyroid monitor using multiple GAGG detectors for population monitoring in a nuclear accident. 19th International conference on Solid State Dosimetry (SSD). 15-20 October 2019, Hiroshima, Japan.
- Yajima K et al. the same presentation as the above. 5th ARADOS annual meeting. 6-8 November 2019, Beijing, China.

論文

- Yajima K et al. A screening survey exercise for thyroid internal exposure from radioiodine after a nuclear accident. Radiat Prot Dosim. 183: 483-488; 2018.
- Yajima K et al. A new thyroid monitor using multiple high resolution GAGG detectors for direct thyroid measurements of small children following a nuclear accident. Radiat Meas. DOI:10.1016/j.radmeas.2020.106272; 2020.

付録

A 研究成果概要（2017-2019 年度）

原子力規制庁放射線安全規制研究戦略的推進事業費
原子力災害時における近隣住民の確実な初期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
－研究成果概要（2017-2019 年度）－

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に起因して発生した東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島第一原発事故）により、東日本の広い範囲において放射能汚染を生じることとなった。これまで、福島第一原発事故により周辺住民が受けた被ばく線量の推計が国内の専門家により続けられているが^(1,2)、放射性ヨウ素、特にヨウ素-131 (¹³¹I) の内部取り込みによる甲状腺被ばく線量については、その推計に必要となる実測データが限定的であることから、推計結果に大きな不確かさを有している⁽³⁾。この反省に立ち、本研究では、福島第一原発事故後に見直しがなされた我が国の原子力災害対応に係る指針類⁽⁴⁾との整合性を考慮しつつ、現時点で最も確実と考えられる公衆の内部被ばくモニタリングの方法を提案するとともに、それに必要な技術的課題について検討を行ったものである。この検討の中には、本研究の中心となる、様々な年齢の被検者の内部被ばくモニタリングに提要可能な新しい甲状腺モニタ（以下、新モニタ）の開発も含まれており、以下に3年間（2017-2019年度）の研究成果の概要を述べる。

2. 本研究で提案する個人内部被ばくモニタリング

図1に本研究で提案する内部被ばくモニタリングを示す。この方法は、複数種類の測定を組み合わせることにより、公衆に対する内部被ばくモニタリングの実行性の向上を図りつつ、可能な限り多くの被検者に対して甲状腺線量を実測するための方法として考案した⁽⁵⁾。以下に補足する。

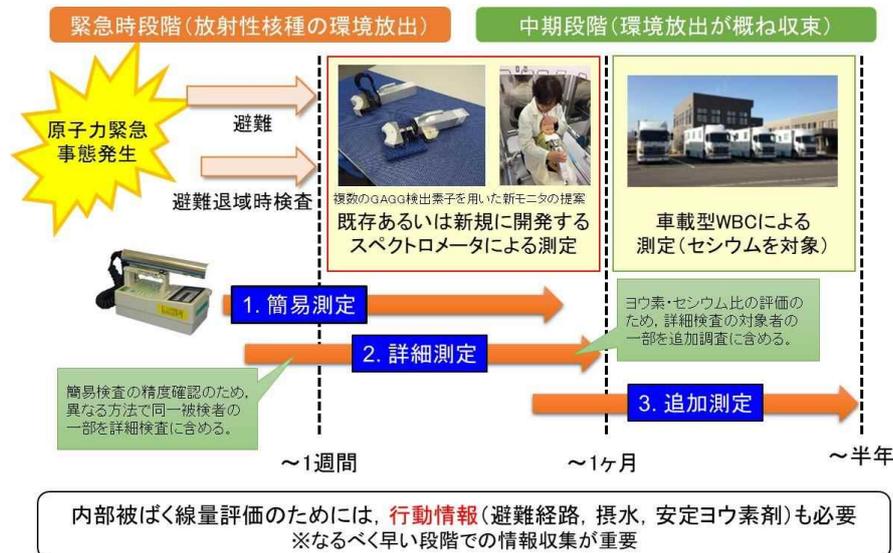


図1 提案する原子力災害時の内部被ばくモニタリング

※図中に示す時刻スケールはおおよその目安

福島第一原発事故以降に改訂された指針類では、区域の放射線量に応じた住民の段階的避難及び避難退却時検査について記述されている。また、防災基本計画（原子力災害対策編）⁽⁶⁾

には、原子力緊急事態宣言の発出後、約1週間以内を目途に放射性ヨウ素の吸入による内部被ばくの把握を行うとともに、速やかに外部被ばく線量の推計等を行うための行動調査を行うことが記述されている。これらを踏まえると、内部被ばくモニタリングは、円滑な住民避難を妨げることなく、可能な限り速やかに開始することが要件となる。しかしながら、大規模な原子力事故時においては、自然災害の対応等により十分な資機材や人員が確保できない場合も想定され、また、事故直後に優先されるべきは正確な線量測定よりも、被ばく医療の対象となる高線量被ばく者を迅速に識別するためのトリアージである。この目的に適した測定は、福島第一原発事故の際にも行われた NaI(Tl)サーベイメータを用いる甲状腺簡易測定（図1中に示す1.簡易測定）である⁽⁷⁾。この測定手法は、核種同定が行えない、また、バックグラウンドの影響を受けやすいといった欠点はあるものの、放射線計測の経験が少ない者でも簡便に行うことができる長所がある。研究代表者らが所属する量子科学技術研究開発機構（以下、量研）では、主に原発立地県における初動対応者を対象とした甲状腺簡易測定の研修会を定期的で開催しており、測定者の拡充に努めている。第二の測定法は、既存あるいは新規に開発するスペクトロメータを用いる測定である（図1中に示す2.詳細測定）。甲状腺簡易測定と同様にプローブを被検者の頸部前面に近接させることで、甲状腺中の¹³¹Iから放出されるγ線（主に放出率81.7%の365 keVのγ線）を測定する。NaI(Tl)サーベイメータと異なりスペクトロメータではエネルギースペクトル解析によって核種同定が行えるため、他核種と弁別して正確な線量測定が可能である。ただし、測定時間は甲状腺簡易測定に比べて長くなることや、放射線計測に関する一定の知識や経験を必要とするため、モニタリングのキャパシティーは甲状腺簡易測定に比べて劣ることが欠点である。したがって、甲状腺簡易測定とスペクトロメータを用いた詳細測定を目的に応じて併用することが有効であり、例えば、甲状腺簡易測定においてOIL8⁽⁸⁾などの一定の基準を超えた被検者に限定して、詳細測定を行うことなども考えられる。第三の測定法は、車載型ホールボディカウンタ（WBC）等を用いた全身中セシウム（¹³⁴Cs及び¹³⁷Cs）の測定である。公衆のセシウムによる内部被ばく線量の測定は防災基本計画（原子力災害対策編）にも記載があるが、提案した内部被ばくモニタリングでは、甲状腺中¹³¹Iが物理学的半減期等により検出が困難となった以降の追加測定（図1）に位置付けている。福島第一原発事故の際に実施された内部被ばくモニタリングの経験では、甲状腺中¹³¹Iが検出できるのは事故発生から概ね1カ月程度であった⁽⁹⁾。したがって、福島第一原発事故と同規模程度の事故が想定される場合には、事故発生から1カ月以内に甲状腺中¹³¹I及び全身中Csの測定を一定数の被検者に対して実施し、両核種の摂取量比を評価することが追加測定の結果をより有効に活用する上でも重要である⁽¹⁰⁾。（甲状腺）簡易測定と詳細測定、及び、追加測定と詳細測定を同一被検者に対して行い、双方の測定結果を比較することにより、簡易測定の測定精度の担保と追加測定からの甲状腺被ばく線量評価が可能となる。なお、事故初期の主として放射性ヨウ素による内部被ばく線量の推計に利用できる追加測定は、セシウムの実効半減期や偶発的な追加摂取の可能性のために、成人では事故発生から概ね半年以内（小児では数カ月以内）に行われたものに限られる⁽¹¹⁾。この他、提案する内部被ばくモニタリングでは、測定と併せて被検者の避難行動に係る情報（具体的には、避難経路、同行者、安定ヨウ素剤の服用状況、摂食（水）状況など）を取得することも必須事項としている。

3. 研究成果

3.1 甲状腺簡易測定

場の空間線量率の測定に広く用いられる NaI(Tl)サーベイメータを使用した甲状腺簡易測定は福島第一原発事故以前にも考案されていたが⁽¹²⁾、小児から成人までの幅広い年齢の被検者を対象とした測定について十分な検討がなされていなかった。そのため、福島第一原発事故直後に実施された小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の際、15歳以下の被検者の年齢群に応じたNaI(Tl)サーベイメータの換算係数（機器の正味値【 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ 】から甲状腺中 ^{131}I 量【Bq】への換算係数）が事前に評価されていなかった。そこで、本研究では、フランス放射線防護原子力安全研究所（IRSN）で近年製作された年齢別頸部ファントム⁽¹³⁾を用いて、NaI(Tl)サーベイメータや後述する新モニタなどの種々の測定器に対する換算係数を整備した（詳細は4.2.1, 4.2.2及び付録B）。年齢別頸部ファントムは、5歳児、10歳児、15歳児（成人女性）及び成人男性の4種類で構成されるが、NaI(Tl)サーベイメータの換算係数は上側に丸めた数値として、それぞれ20（5歳児）、25（10歳児）、30（15歳児）及び35（成人男性）（単位は ^{131}I kBq per $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ）と決定し、甲状腺等価線量100 mSvに相当する正味値を導出した（別添参照）。

その他、量研で開催した甲状腺簡易測定に係る研修会において、未経験者を含む参加者に対して測定実習を行った。測定実習では異なる線源強度の密封線源を内部に収めたマネキン頭部を複数用意し（図2）、参加者が読み取ったNaI(Tl)サーベイメータの正味値のばらつきを調べた。その結果、甲状腺簡易測定の精度としては、正味値が $0.2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 以下ではファクター2程度、 $0.2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 以上では20%程度が見込まれることを確認した（図3）⁽¹⁴⁾。IAEA安全文書にあるOIL8は $0.5 \mu\text{Sv h}^{-1}$ であり、同じ数値を甲状腺簡易測定に用いる場合には必要十分な精度と言える。ただし、使用する機器の年次校正を適切に行うことが必須である他、実際の事故対応の場合においては、使用した機器を事後に回収し、検出感度の再確認を行う必要性が認識された。なお、上記の実習を含む甲状腺簡易測定研修会は2017, 2018及び2019年度に1回ずつ開催しており、受講生の合計は約60名であった。また、本研究の成果（測定精度）は、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の再評価において参考とした⁽⁷⁾。



図2 甲状腺簡易測定実習の様子

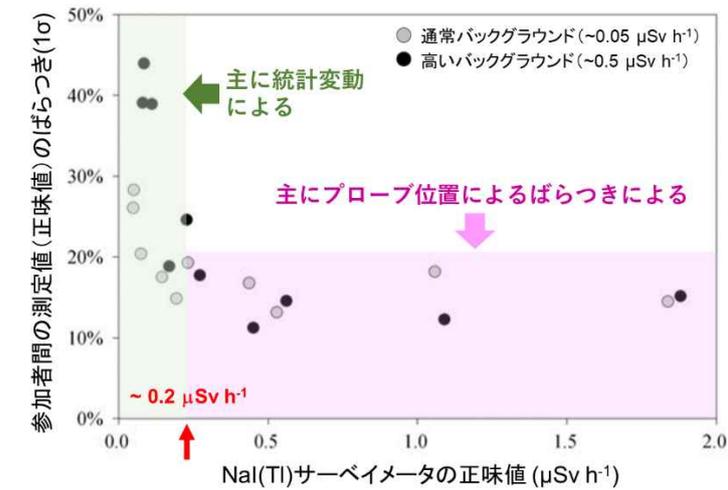


図3 甲状腺簡易測定実習で得られた参加者間の測定値（正味値）のばらつき

3.2 新モニタの開発

新モニタの開発要件としては、公募要項にも記載のあったように、①高バックグラウンド環境下での測定が可能であることと、②乳幼児から成人までの幅広い年齢群の被検者に対する甲状腺測定が可能であることの二つであった。そこで本研究では、複数の小型 GAGG 検出素子を被検者頸部周囲に配置する測定ジオメトリを着想し、乳幼児の甲状腺測定においても高い検出感度が得られる新モニタの開発に着手した⁽¹⁵⁾。

新モニタに使用した GAGG 検出素子は、市販品（5640-HRGAGGG1C1C1C 型、クリアパルス、日本）をベースとして一部改良を行ったものである。GAGG 検出素子に内蔵されるシンチレータは 1 cm 角の大きさであり、シンチレータはシリコン光電子増倍管（SiPM）と光学接合された構造であるために、光電子増倍管を用いる従来型のシンチレータ検出器と比べ小型かつ軽量である（図 4）。このため、複数の GAGG 検出素子を用いても、乳幼児の頸部に近接できるプローブの製作が可能である。前述の年齢別頸部ファントムを用いた予備試験により、検出素子の最適配置を決定し、プローブを製作した。

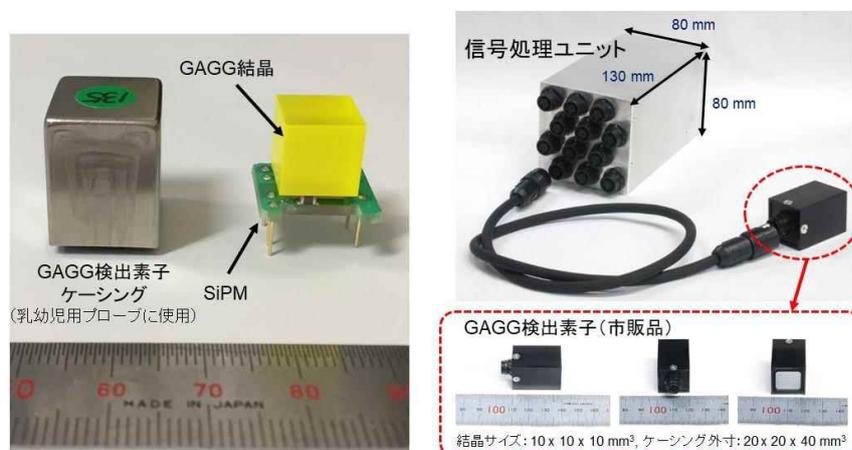


図4 新モニタに使用した GAGG 検出素子

GAGG 検出素子の優れた点としては、内蔵する温度センサーにより、シンチレータ特有のゲインの温度変化を補償する回路を揃えていることである。そのため、事前にエネルギー校正を一度行えば、温度の異なる環境でもピークチャンネルの変化はほとんどない。また、複数の GAGG 検出素子から得られる波高スペクトルを合算しても、検出素子間の個体差が少ないことから、分解能の劣化は単体素子の分解能（662keV において約 7.5%）と比較して大きく変わらないことを実験で確認した。

新モニタ実用機の開発にあたっては、特に被検者が乳幼児である場合の甲状腺測定の方法について外部有識者（医療者）から意見聴取を行った。また、プローブについては、マネキンや子供のボランティアによる実験的検討を踏まえて、被検者の体格に応じて、乳幼児用、子供用（小学生高学年まで）及び一般用（中高生以降、成人まで）の3種類を製作した。図5に新モニタ実用機の外観を示す。なお、同機を制御し、波高スペクトルの解析から検出核種の甲状腺残留量の定量までを行える専用のソフトウェアの開発も完成している（詳細は 4.3.7）。

高バックグラウンド環境下での測定については、プローブ本体に遮へいを施すことが難しいことから、脱着式の鉛プレートを備えた可搬型遮へい体を別途製作した。 ^{137}Cs 線源を用いた試験を行い、可搬型遮へい体により周辺線量当量率を約 1/4 に低減できることを確認した。新モニタ実用機の乳幼児の甲状腺中 ^{131}I に対する検出限界値は、通常のバックグラウンドレベル（ $\sim 0.05 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ）で約 30 Bq、周辺線量当量率 $2.5 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 程度の環境において約 300 Bq であった（いずれも測定時間は 3 分間）。約 300 Bq は、1 歳児の甲状腺等価線量が 100 mSv に相当する ^{131}I 吸入摂取量に対する 1 週間後の甲状腺残留量に相当する（詳細は 4.3.4）。



図5 新モニタ実用機の外観

3.3 その他の既存測定器の性能評価

甲状腺中 ^{131}I を測定するためのその他の機器として、表 1 に示す市販の γ 線スペクトロメータを数種類選定し、年齢別頸部ファントムに対する検出感度等を評価した（詳細は 4.2.2）。プ

ローブがファントムに密着した条件での検出下限値は、いずれの機器も3分間測定で50 Bq未満であり、結晶サイズが大きいほど、また、ファントムが小さくなるほど検出下限値は低い結果となった。検出下限値に関しては市販のγ線スペクトロメータと新モニタとで大きな差はないが、結晶サイズが1.5インチ以上のものはプローブ径が大きくなるため、プローブを頸部に近接させた状態での乳幼児の測定は困難になる。新モニタの乳幼児用プローブの厚さは25 mmであり、1インチ NaI(Tl)スペクトロメータのプローブ径よりも薄い。一方、乳幼児用プローブに内蔵されるGAGG検出素子は4式で結晶体積の合計は4 cm³しかないが、より大きい結晶を有する1インチ NaI(Tl)スペクトロメータ(結晶サイズ:12.9 cm³)と比べて検出下限値は同等である。なお、本研究で取得した各機器の検出効率等のデータは、甲状腺中¹³¹Iの定量に必要な基礎データとして用いることができる。

表1 試験を行った市販のγ線スペクトロメータ

測定器	結晶サイズ(円柱):高さ×径 ※プローブ径	製造メーカ(型式)
1インチ NaI(Tl)	25.4 mm×25.4 mm ※30 mm	SCIONIX (25B25/1.5)
1.5インチ NaI(Tl)	38 mm×38 mm ※45 mm	SCIONIX (38B38/1.5)
2インチ NaI(Tl)	51 mm×51 mm ※58 mm	SCIONIX (51B51/2)
1.5インチ CeBr ₃	38 mm×38 mm ※42 mm	SCIONIX (38B38/2M-CEBR-X)

追加測定に用いる車載型WBCに搭載されている立位式WBC(FASTSCAN, ミリオンテクノロジーキャンベラ)についても、甲状腺中¹³¹Iに対する応答を放射線輸送シミュレーションによって評価した。

FASTSCANは元々、放射線業務従事者の内部被ばくモニタリングを目的に設計された装置であるが、福島第一原発事故後の住民の内部被ばく線量測定のために導入され、現在でも福島県を中心に利用されている⁽¹⁴⁾。FASTSCANは2式の直方体形状のNaI(Tl)検出器を備えており、それらは被検者前方にある支柱内の上下に収められている。図6にシミュレーションの結果を示す。シミュレーションの計算体系にはFASTSCANの支柱部分と年齢別数学ファントム(5歳, 10歳, 15歳及び成人)⁽¹⁵⁾を組み込んでいる。甲状腺と両検出器の位置関係から、成人及び15歳児では上検出器が下検出器に比べて感度が高く、365 keVに対するピーク効率の差は約10倍である。一方、10歳と5歳では下検出器の感度が増加し、5歳では逆に下検出器の方が上検出器よりも感度が高くなる。したがって、15歳以上であれば、上下の検出器のピークエリア計数の違いから、甲状腺中に集積したヨウ素か、それ以外かの判別が容易であるが、10歳以下の子供については甲状腺位置(床からの高さ)を確認しながら、体表面汚染の可能性を判断する必要がある。福島第一原発事故の経験では、緊急作業員や住民のWBC測定において体表面汚染を計測する事例が報告されており^(16, 17)、事前の身体サーベイでも体表面汚染を見落とす可能性が指摘されている。

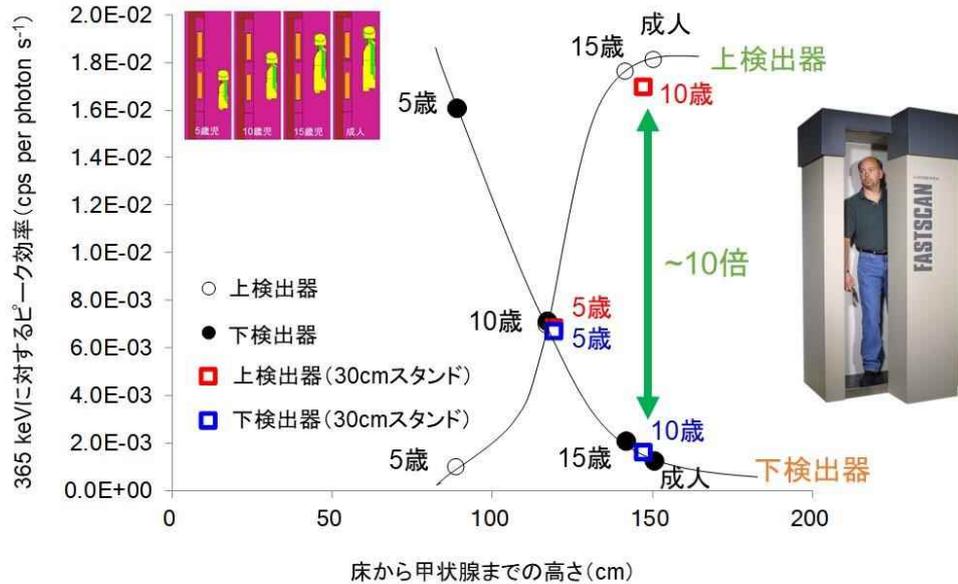


図 6 FASTSCAN の甲状腺 ¹³¹I に対する応答

3.4 情報収集支援システムの開発

原子力災害時の住民に対する内部被ばくモニタリングにおいて、測定と同様に重要なのは被検者の避難行動情報の収集である。避難行動情報には、避難経路及び避難開始時刻、安定ヨウ素剤の服用状況、甲状腺測定を受けるまでの摂食(摂水)状況、同行者等の情報が含まれる。これらの情報は、緊急時環境モニタリングで得られる大気中放射性物質濃度の時空間分布や放射性物質の地表面分布などのデータと突合することにより、内部被ばく線量評価に必須となる放射性核種の摂取シナリオの設定に用いられる。

現行の原子力防災指針類では、場の空間線量率に基づき住民の段階的避難が規制当局または地方自治体により指示されるとしている⁽⁴⁾。OIL1 または OIL2 を超過した地域の住民は居住地からの UPZ 圏外への避難を行い、その途中で避難退域時検査を受けることになる。同検査は、被検者が検査会場まで乗車してきた車両の指定箇所を先ずサーベイし、OIL4 に相当する汚染が検出された場合に被検者の身体サーベイを行う手順となっている⁽¹⁸⁾。これは、避難退域時検査が、迅速な住民避難の妨げにならないための考えに基づくものである。したがって、避難住民の甲状腺測定は、その運用や手順が関係機関において未だ検討中の段階にあるものの、おそらく避難退域時検査の後に内部被ばくモニタリングに適した施設(例えば、地域の被ばく医療拠点病院や比較的多数を収容可能な施設など)において実施されるものと考えられる。また、甲状腺測定を行う会場では、受付、体表面検査(身体サーベイ)、甲状腺測定、結果説明、除染などの対応者を配置する必要がある。

図 7 に本研究において整備した情報収集支援システムの概要を示す。(詳細は 4.4 及び付録 E) 同システムは、甲状腺測定会場において使用することを想定しており、受付にて被検者から回収した避難行動に関するアンケート、身体サーベイ結果及び甲状腺測定結果などのデータを登録する。アンケートは、体表面検査及び甲状腺測定の記録用紙を兼ねており、被検者の負担を考慮し、なるべく簡便に回答できるように工夫している(図 8)。情報収集支援システ

ムは、原発立地県が公開している地域防災計画に定められた避難所の所在地などのデータを格納しており、避難経路の可視化を行うことができる他、測定データファイル（波高スペクトル、分析レポートなど）の読出し機能を持たせている。

手順1: 所定の様式に検査結果や避難行動などに係る事項を記入

手順2: 情報収集システムにデータ格納

手順3: 避難行動情報登録

各サイトの避難計画にある避難所情報を元に避難経路を別画面で可視化

各サイトの広域避難計画の調査を基に、指定避難所のデータベースを構築（システムに格納）

原子力事故直後に避難住民に対して行われる体表面検査(身体サーベイ)や甲状腺簡易測定等のデータとともに、避難行動情報を散逸することなく収集・格納するシステムを構築

図7 情報収集支援システムの概要
(赤点線で囲んだ箇所が情報収集支援システムに該当する部分)

情報収集システムの入力データとなる避難者検査記録カード

1. 被検者情報

3. 避難行動情報

2. 体表面検査

4. 安定ヨウ素剤

5. 食事状況

6. 個人情報利用の許諾

甲状腺測定を行う会場の受付にて被検者に配布し、測定後にコピーを収集

図8 避難行動に関するアンケート用紙

4. まとめと今後の検討課題

本研究では、万一の原子力災害に際し、近隣住民の内部被ばくモニタリングを確実に行うための手順を提案するとともに、福島第一原発事故対応において顕在化した技術的課題、特に乳幼児を含む様々な年齢の被検者の甲状腺測定に対応可能な測定器の開発を実施し、さらにはNaI(Tl)サーベイメータを用いる甲状腺簡易測定の標準化、既存測定器の性能評価、情報収集支援システムの整備などを行った。本研究で開発した甲状腺モニタは、被検者の体格に応じた複数のプローブを備えており、既存測定器では困難であった乳幼児の甲状腺測定において十分な検出感度を有し、また、幼児への適用試験によって問題なく測定が行えることを確認した。高バックグラウンド環境下での測定に対しては、可搬型遮へい体を製作することで対処を図った。以上のことから、本研究の当初の目的は、ほぼ達成されたと考える。

今後の課題として、開発した甲状腺モニタについては、模擬被検者（乳幼児）への適用試験を重ね、被検者がより安心して測定を受けられるための検討を行うとともに、操作性の向上やプローブの小型・軽量化などの改良を行うことが考えられる。また、多数の一般公衆を対象とする甲状腺測定については、会場の選定条件や設営、各対応項目（受付、体表面検査、甲状腺測定、結果説明）に要する人員数や時間、対応者のスキルを習得するための研修など、様々な検討課題があると思われる。会場設営や被検者への結果説明などを含む実際の甲状腺測定を模擬したシミュレーションを行うことも、新たな課題抽出には有効であろう。

参考文献

- 1) Ishikawa T. Radiation doses and associated risk from the Fukushima nuclear accident: a review of recent publications. *Asia Pacific J. Public Health*. 29(2S): 18S–28S; 2017.
- 2) Kurihara O. External and internal dose assessments of Fukushima residents after the 2011 nuclear disaster. *J. Natl. Inst. Public Health*. 67: 11–20; 2018.
- 3) Kim E et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issue remaining. *J. Radiat. Res.* 57(S1): i118–i126; 2016.
- 4) 原子力規制委員会. 原子力災害対策指針 令和元年 7 月改正 (2019).
- 5) Yajima K et al. A reliable and robust method for monitoring large populations to assess thyroid internal exposure in a nuclear accident: a proposal based on experiences from Fukushima. *BIO Web Conference* 14: 03010; 2019.
- 6) 中央防災会議. 防災基本計画. 平成 26 年 1 月 17 日 (2014).
- 7) Kim E et al. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys.* 118: 36–52; 2020.
- 8) IAEA, Actions to protect the public in an emergency due to severe conditions at a light water reactor. *EPR-NPP PUBLIC PROTECTIVE ACTIONS*; 2013.
- 9) Matsuda N et al. Internal radioactivity of temporal residents in Fukushima within one year after the radiological accident. *J. Environ. Occup. Sci.* 2: 123–130; 2013.
- 10) Hosoda M et al. Estimation of internal exposure of the thyroid to ^{131}I on basis of ^{134}Cs accumulated in the body among evacuees of the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Environ. Inter.* 61: 73–76; 2013.
- 11) Kurihara O et al. Experiences of population monitoring using whole-body counters in response to the Fukushima nuclear accident. *Health Phys.* 115: 259–274; 2018.
- 12) 日本原子力研究所. 保健物理—管理と研究—No. 35. *JAERI-M*: 93-172; 1992.
- 13) Beaumont T et al. Development and test of sets of 3D printed age-specific thyroid phantoms for ^{131}I measurements. *Phy. Med. Biol.* 62: 4673–4693; 2017.
- 14) 日本保健物理学会. 日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ Vol.9 (1). 体外計測に関する標準測定法の策定に関する専門研究会. 2016 年 3 月 (2016).
- 15) Ulanovsky A V and Eckerman K F. Modification to the ORNL phantom series in simulation of the response of thyroid detectors. *Radiat Prot Dosim.* 79: 429–431; 1998.
- 16) Kurihara O et al. Direct measurements of employees involved in the Fukushima Daiichi nuclear power station accident for internal dose estimates: JAEA's experiences. In: *Proceedings of the first NIRS symposium on the reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident*. Chiba, Japan: National Institute of Radiological Sciences. *NIRS-M-252*:13–25; 2012.
- 17) Momose T et al. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *ibid* 67–82; 2012.
- 18) 原子力規制庁. 原子力災害時における避難退域時検査及び簡易除染マニュアル. 平成 29 年 1 月 30 日修正 (2017).

本研究の成果発表

○論文

- 1) Yajima K et al. A new thyroid monitor using multiple high resolution $Gd_3(Al,Ga)_5O_{12}(Ce)$ detectors for direct thyroid measurements of small children following a nuclear accident. Radiation Measurements. Radiat Meas, DOI:10.1016/j.radmeas. 106272; 2020.
- 2) Yajima K et al. A screening survey exercise for thyroid internal exposure from radioiodine after a nuclear accident. Radiat Prot Dosim. 183: 483-488; 2018.

○学会発表

- 1) Yajima K et al. A new concept thyroid monitor using multiple GAGG detectors for population monitoring in a nuclear accident. 19th International conference on Solid State Dosimetry (SSD). 15-20 October 2019, Hiroshima, Japan.
- 2) Tani K et al. Monte Carlo simulation with computational phantom to investigate the effectiveness of a whole-body counter for thyroid measurement. 19th International conference on Solid State Dosimetry (SSD). 15-20 October 2019, Hiroshima, Japan.
- 3) Yajima K et al. A reliable and robust method for monitoring large populations to assess thyroid internal exposure in a nuclear accident. 12th International conference on the Health Effects of Incorporated Radionuclides (HEIR). 8-11 October 2018, Fontenay-aux-Roses, Paris, France.
(BIO Web of Conference 14, 03010 (2019).)

NaI(Tl)サーベイメータを用いた
甲状腺簡易測定マニュアル

第2版（2020年3月）

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

目次

1. はじめに-----	56
2. 甲状腺簡易測定の概要-----	57
3. 甲状腺中ヨウ素の測定に用いる機器-----	58
4. NaI(Tl)サーベイメータの操作方法-----	59
5. 甲状腺簡易測定の手順-----	62
6. 適用条件-----	67
7. おわりに-----	69
8. 引用文献等-----	70
別添 甲状腺等価線量の計算等に必要データ(I-131)(1)-----	71
別添 甲状腺等価線量の計算等に必要データ(I-131)(2)-----	72
別添 甲状腺等価線量の計算等に必要データ(I-131)(3)-----	73

1. はじめに

原子力発電所において不測の事故が発生し、放射性ヨウ素や放射性セシウム等の放射性核種が大量に周辺環境に放出された場合、近隣住民が受けた被ばく線量を速やかに把握し、必要な防護措置を講じる必要がある。被ばく線量の把握に関して特に重要なものは、放射性ヨウ素による甲状腺内部被ばくである。体内に取り込まれた放射性ヨウ素は甲状腺に集積する性質を有するため、甲状腺が集中して被ばくを受けることになる。甲状腺内部被ばくによる健康影響は、成人よりも子どもに出やすい。一方、放射性ヨウ素は物理学的半減期が比較的短いことから（最も線量寄与が大きいヨウ素-131の物理学的半減期は8.02日）、内部被ばくのおそれのある住民に対して個人線量測定を迅速に行う必要がある。

本マニュアルは、我が国で広く使用されているNaI(Tl)サーベイメータを用いた甲状腺内部被ばく線量測定（以下、甲状腺簡易測定）の方法や手順について記述したものである。この手法は、従前から検討されていた手法であり、東電福島第一原発事故直後に行われた小児甲状腺被ばくスクリーニング検査にも適用された手法であるが、現時点でも多数を対象とした測定に最も適した手法である。ただし、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査では本手法の技術的課題も認識されたことから、本マニュアルの作成に際しては、これらの課題についても可能な限り改善を図っている。

本マニュアルは、甲状腺簡易測定を行う担当者及びこれに関連する国・自治体等の関係者を主な対象としている。原子力災害訓練等を通じて徐々に関係者や住民に浸透しつつある避難退域時検査と同様に、甲状腺簡易測定についても具体的な運用方針が今後策定されることが望まれる。

2. 甲状腺簡易測定の概要

吸入や経口を介して放射性ヨウ素が体内に取り込まれると、安定（放射性でない）ヨウ素と同様に甲状腺に集積するため、甲状腺内部被ばくをもたらす。原子力災害時に最も甲状腺内部被ばく線量に寄与する核種はヨウ素-131 (^{131}I) である³。甲状腺は外部放射線からも被ばくを受けるが、その線量は外部放射線による実効線量と同程度であり、甲状腺内部被ばく線量に比べて軽微である。ヨウ素-131の物理学的半減期は8.02日であるため、原子力災害時に近隣住民の内部被ばくのおそれがある場合には、速やかに対象者に対する甲状腺線量測定を開始する必要がある。

ヨウ素-131は放射性壊変（ベータ壊変）に伴い、幾つかのエネルギーの γ 線を放出する。最も放出率の高いガンマ線のエネルギーは365 keV (81.7%) であり、被測定者の頸部（前面）近傍にガンマ線検出器を配置することにより、甲状腺に集積したヨウ素-131を確認することができる（図1）。また、使用するガンマ線検出器を事前に校正（後述）しておけば、甲状腺中のヨウ素-131を定量することができる。こうした測定は体外計測とよばれ、ホールボディカウンタ（WBC）は体外計測装置の代表例である。

本マニュアルで述べる甲状腺簡易測定では、場の空間線量率（または周辺線量当量率）の測定に広く使われているNaI(Tl)サーベイメータを用いる。同機器では核種同定はできないものの、操作が簡易なために測定者の確保がしやすく、多数の住民を対象としたスクリーニングを目的とした測定には適している。また、事前に機器を適切に校正しておけば、必要十分な精度で甲状腺中ヨウ素-131の定量が可能である。

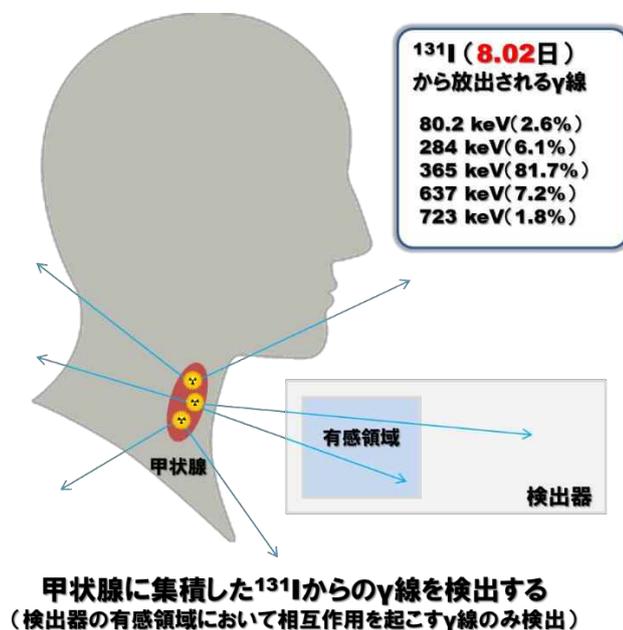


図1 甲状腺中ヨウ素の測定原理

³ ^{131}I 以外に、 ^{132}Te — ^{132}I 、 ^{133}I 等も甲状腺内部被ばく線量に寄与する可能性がある。 ^{132}Te 、 ^{132}I 、 ^{133}I の物理学的半減期はそれぞれ 3.204 日、2.295 時間、20.8 時間である (^{132}Te と ^{132}I は速やかに放射性平衡になる)。これらの核種は、原子力発電所の運転停止直後は ^{131}I よりも放射能が高い。

3. 甲状腺中ヨウ素の測定に用いる機器

甲状腺に集積した放射性ヨウ素の測定には、本マニュアルの対象とする NaI(Tl)サーベイメータ以外にも幾つか候補となる機器がある。それぞれの機器は異なる特徴を有しており（図2）、目的に応じて使い分ける必要がある。例えば、NaI(Tl)サーベイメータの測定で基準値を超えた者について、可搬型スペクトロメータや甲状腺モニタを用いたより精密な測定を行うことが考えられる。東電福島第一原発事故では、NaI(Tl)サーベイメータ、NaI(Tl)スペクトロメータ、甲状腺モニタ、WBCを用いた甲状腺線量の測定例⁽⁴⁻⁵⁾がある。緊急作業員に対しては、高純度Ge検出器を用いた測定例⁽⁶⁾も報告されている。なお、乳幼児を対象とした甲状腺線量測定については、既存の機器では難しいことから、新しい機器の開発の必要性が指摘されている⁷⁾。

機器	NaI(Tl)サーベイメータ	可搬型スペクトロメータ	(据置型)甲状腺モニタ
外観			
結晶	NaI(Tl)	NaI(Tl), LaBr ₃ (Ce)等	高純度Ge
分解能	線量率, 計数率のみ	可	良
1名測定時間	1.5 ~ 2 分間	3 ~ 5 分間	3 ~ 10分間
測定人数 (1時間当たり目安)	約 30 名	約 10 名	約 5 名
コスト	良	可	やや可
操作性	簡便(スクリーニング向)	スペクトル解析必要	スペクトル解析必要
欠点	核種同定不可	操作性 (PCで制御するタイプの方が良い)	基本的に移動不可
	避難所等		中核拠点病院等

図2 甲状腺中ヨウ素の測定に用いる機器

4. NaI(Tl)サーベイメータの操作方法

本マニュアルの対象とする NaI(Tl)サーベイメータは、日立アロカメディカル社製（現、日立）TCS-172B⁴（図3）である。機器の仕様はカタログに示されているが、甲状腺簡易測定では通常の線量率測定モード（単位は $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ）を選択する。使用上の注意点は以下の2点である。

- 定期的（1年間に1回以上）にメーカー等による機器の点検・校正を行う。
- 万一の汚染に備えてプローブ先端をガーゼまたはラップ等で養生する。

機器の操作方法については取扱説明書に解説されているが、甲状腺簡易測定に限定した操作方は以下のとおりである。

- ① 電源スイッチを ON にする（長押し）。起動時に自動的に自己点検（バッテリー、HV）が行われるので確認する（図4）。バッテリーが不足している場合には、電池（単二）を交換する。
- ② 時定数（Time Const）ボタンを押して10秒に設定する（図5）。
- ③ 30秒程度経過した後、機器に表示される**指示値の振れの中心**となるような数値を読み取る（参考1）。人を測定する際は、消音モードにする。

以上の操作は、測定会場のバックグラウンドの測定でも同様である。



図3 TCS-172Bの外観（右はプローブを外した場合）

⁴ TCS-171Bでも良い。ただし、TCS-171B/172Bともに製造中止になったため、今後は後継機種（LUCENT TCS-1172）を使用することが想定される。



図4 TCS-172 起動時の自己点検

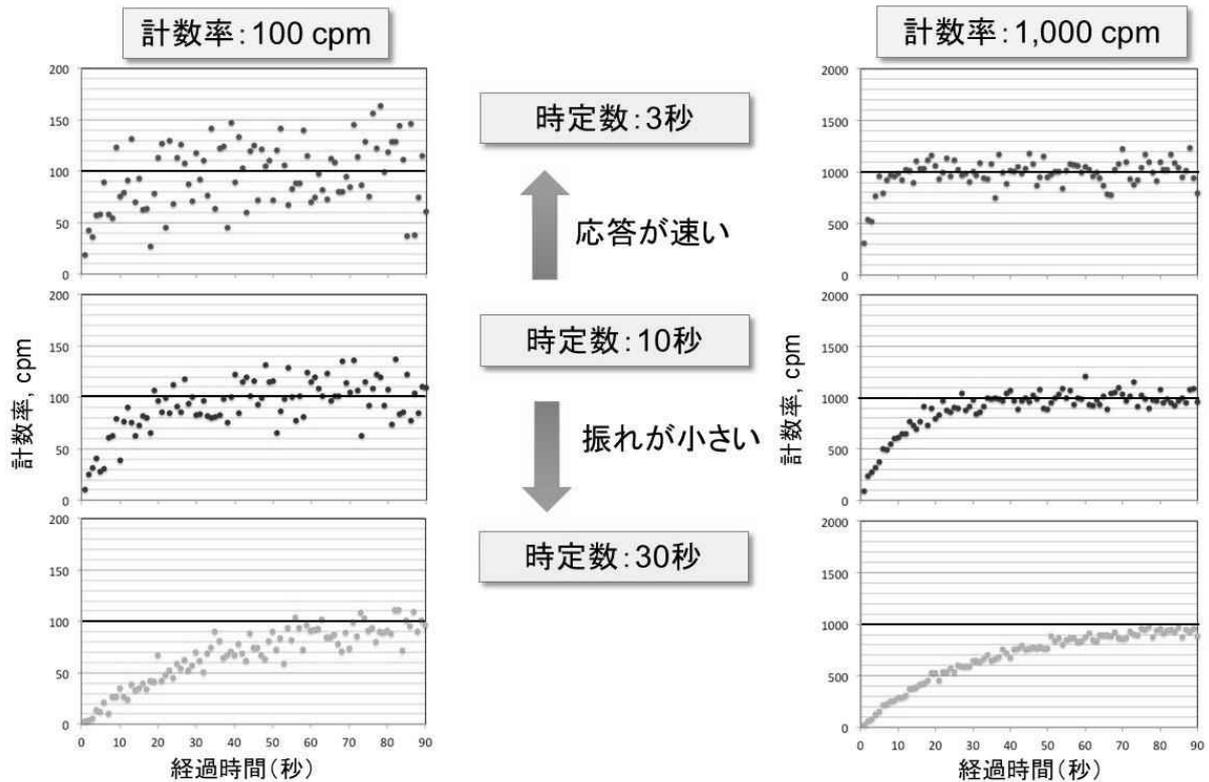
(左：バッテリーチェック ※メモリが2/4になったら電池交換,
右：HV チェック ※OK でない場合は使用しない)



図5 時定数の設定

(○内の数値が時定数 (秒) ※10 でない場合は Time Const ボタンを何回か押して設定する)

参考 1 指示値の読み方



放射線測定は確率的事象であるため、一定の指示値に落ち着くことが無いことを理解して振れ幅の中心となるような数値を読み取る。上図は GM サーベイメータの起動からの経過時間に応じた指示値の変化を時定数毎に示した例であるが、時定数が短い（3 秒）だと応答が早いですが指示値は安定せず、時定数が長い（30 秒）だと指示値は安定するが応答が遅いことが分かる。NaI(Tl) サーベイメータも同様であり、甲状腺簡易測定では時定数を 10 秒に設定し、概ね 30 秒（時定数の 3 倍）を経過したところで上記数値を読み取る。注意しなければならないのは、いつでも同様な感覚で行うことである（測定の都度、指示値の振れ幅の高い方、低い方で読み取ったりしてやり方を変えないこと）。

5. 甲状腺簡易測定の手順

図6は甲状腺簡易測定の手順を示している。各手順について以下に説明する。

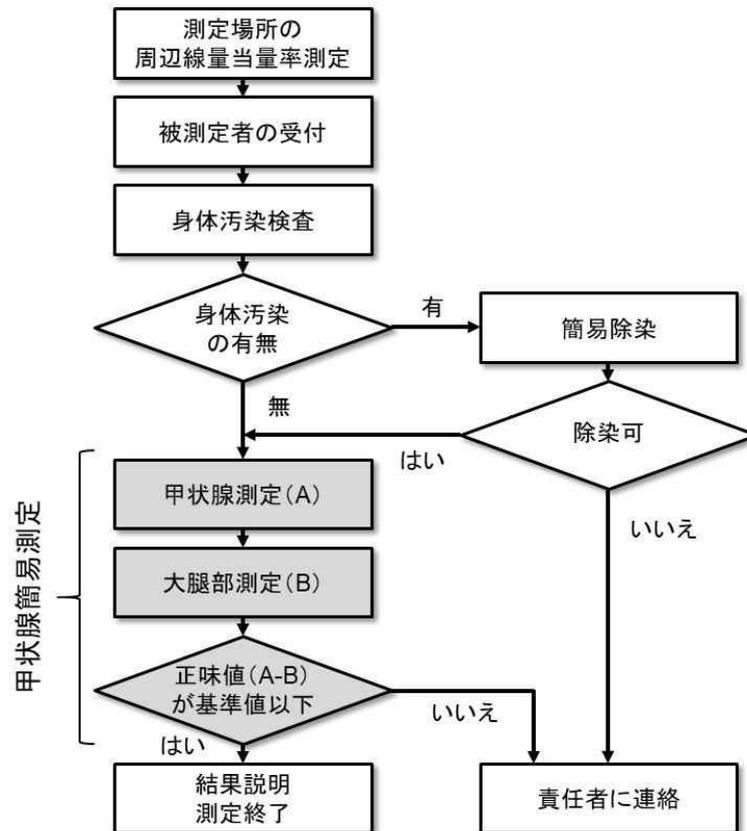


図6 甲状腺簡易測定の手順

(1) 測定場所の周辺線量当量率測定

現時点で甲状腺簡易測定を行う場所は決まっていないものの、避難退域時検査⁵⁾と併せて行うことは困難⁵⁾であることから、同検査後の移動先となる避難所の中から選定されるものと思われる。甲状腺簡易測定の対象者としては、UPZ（緊急防護措置区域、概ね当該原発から30 km 圏内）において避難指示の出された区域の住民が第一候補として想定される⁶⁾。

(2) 被測定者の受付

被測定者に対し、①氏名、②生年月日、③性別、④住所、⑤避難経路、⑥安定ヨウ素剤の服用有無、⑦食事状況等について回答してもらうためのアンケート用紙（参考2）を配布し、必要事項を記載してもらう。アンケート用紙はなるべく簡便なものとする。

⁵⁾ 避難退域時検査（OIL4を超過する身体汚染の有無を確認する検査）は、避難者が検査場所までの移動に使用した車両を測定することを基本とするため、その運用を変更しない限り甲状腺簡易測定を行うのは難しい。

⁶⁾ より近傍のPAZ（予防的措置区域）内住民については、放射性物質の放出前に避難することとされている。

(3) 身体汚染検査

避難退域時検査と同等な要領（時定数 3 秒，スキャン速度 10 cm/秒程度，測定レンジは 10 kcpm）で GM サーベイメータを用いて身体汚染検査を行う。ただし，バックグラウンドの変動範囲を超える有意な汚染を検知した場合⁷には，汚染箇所の特定を行い詳細なサーベイを行うとともに，被測定者に対して簡易除染を促す。

(4) 簡易除染

被測定者に上着を脱いでもらい，再度身体汚染の測定を行う。それでも汚染が残っているようであれば，濡れワイプ等を用いて簡易除染を行う。

(5) 甲状腺測定

Nal(Tl)サーベイメータのプローブを，着座した被測定者の頸部下側（左右鎖骨の中央付近の上側）に軽く密着させる形で保持し（図 7），前章の要領で指示値(A)を読み取る。測定中はなるべくプローブが動かないようにする。なお，被測定者に上を見るような形で頸部を伸展してもらいと，プローブを密着させやすい。



図 7 甲状腺測定におけるプローブ位置

(6) 大腿部測定

(5)と同様な要領で被測定者の大腿部上にプローブを置いて指示値(B)を読み取る。

(7) 正味値の確認

指示値(A)から指示値(B)を差し引いて正味値(A-B)を求める。正味値が下記の基準値（参考 3）を超えた場合には甲状腺簡易測定の実行者に連絡する。

⁷ 避難退域時検査に用いる OIL4 は，緊急時に行う除染の基準として用いられるものである。甲状腺簡易測定を行う前は，可能な限り身体汚染のない状況であることが必須である。これは体外計測全般に言えることである。

基準値（甲状腺等価線量 100 mSv）

7 歳以下：0.2 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ，8 歳以上 17 歳以下：0.5 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ，18 歳以上：1 $\mu\text{Sv h}^{-1}$

(8) 結果説明

(7)において基準値以下の被測定者については、測定結果を説明し終了する。また、後の詳細な線量評価や将来の健康管理に活用するために⁸、被測定者に対して測定結果を使用することの同意をなるべく得られるようにする。

以上の手順は一例であり、実態に即して適宜見直してゆくものとする。なお、(6)の大腿部の測定は、甲状腺中ヨウ素による線量率の正味値を、より正確に求めるための工夫であるが^(9,10)、難しい状況であれば測定室内の外部放射線による線量率に置き換えることもできる⁹。

⁸ 詳細に行った線量評価の結果をどのように被測定者に通知するかは今後の検討事項である。なお、甲状腺簡易測定では基準値に対する判定結果のみを被測定者に通知することを現時点では想定している。また、将来の健康管理とは、基準値を超過した者を対象とした医学的フォローアップと集団を対象とした疫学的調査のことである。

⁹ 東電福島第一原発事故に際に行われた小児甲状腺被ばくスクリーニング検査では、被検者の肩付近を測定し、個人バックグラウンドとして正味値の計算に使われた⁽¹¹⁾。

参考2 アンケート（測定結果記録）用紙の例¹⁰

作成日	20 年 月 日	原子力災害時 避難者検査記録カード	個人識別ID
検査場			
1. 受検者登録情報			
① 氏名 (ふりがな)	② 生年月日	③ 性別	
住所	年 月 日	男・女	
〒	都 府 市 区 町 村		
2. 検査結果 (測定担当者記入欄)			
① 体表面汚染検査		測定員:	記録員:
測定器名:		測定場所の空間線量率:	μSv/h
管理番号:		BG:	cpm
(前面)		(背面)	
測定結果 cpm	部位	測定結果 cpm	
		表面汚染:	有・無
		除染実施:	済み・未実施
		甲状腺検査時の汚染:	
			有・無
② 甲状腺検査			
・NaIサーベイメータ測定 (μSv/h)		・スペクトロメータ測定	
測定器名:		測定器名:	
管理番号:		管理番号:	
測定場所の空間線量率:	μSv/h	測定場所の空間線量率:	μSv/h
A 大腿部 (BG)	B 甲状腺部	正味 (B-A)	
1			
2			
3			
		ファイル名	
		ビーク	有・無
		その他	cpm
備考			

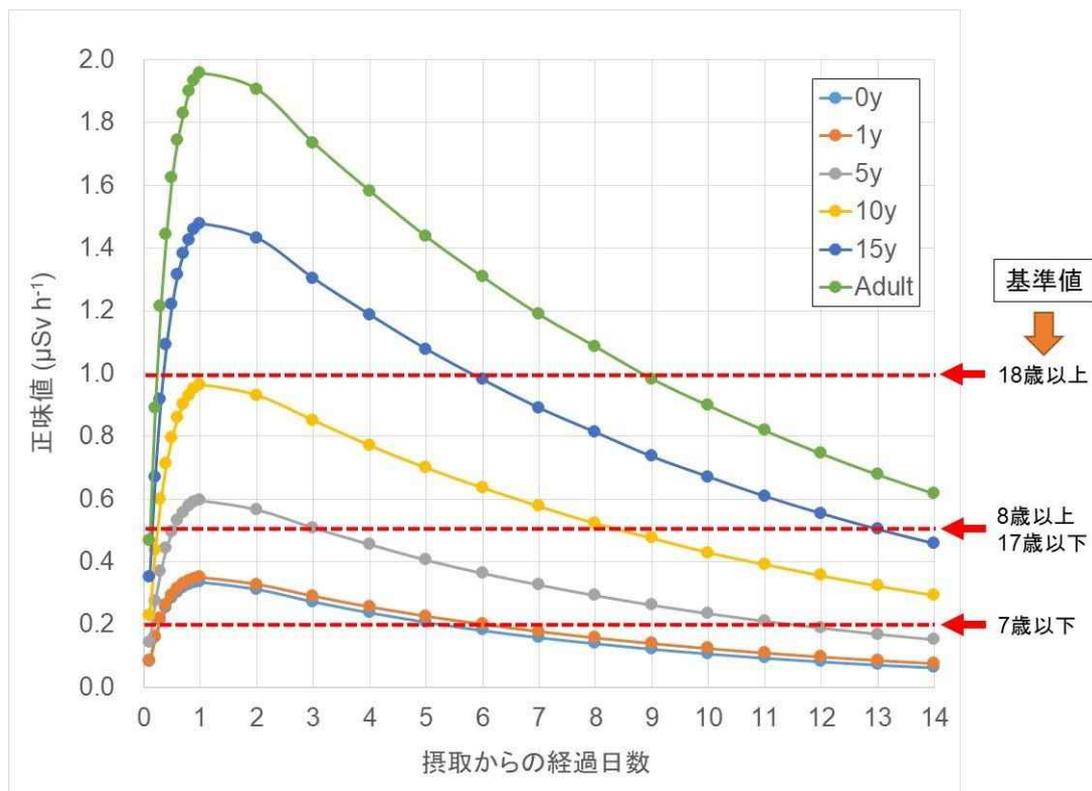
3. 避難行動調査			
① 避難準備指示: 屋内避難指示、避難指示を受け取った場所と、その時の屋内・屋外滞在の別をご記入ください。 避難準備指示: 自宅・自宅外 (場所・住所) / 屋内・屋外 屋内避難指示: 自宅・自宅外 (場所・住所) / 屋内・屋外 避難指示: 自宅・自宅外 (場所・住所) / 屋内・屋外			
② 避難を開始した日時をご記入ください。 (年 月 日)			
③ 避難時に同行者 (一緒に行動した人) がいた場合、家族・その他別に代表者のお名前と人数をご記入ください。 家族: 代表者 (人) / 人数 (人) / その他: 代表者 (人) / 人数 (人)			
④ 避難開始から避難完了までの避難経路 (行動、移動手段、期間、場所) を教えてください。			
行動	移動手段	期間	場所 (移動先・先、滞在)
1 移動・滞在	車・徒歩・その他 () / : ~ / :		
2 移動・滞在	車・徒歩・その他 () / : ~ / :		
3 移動・滞在	車・徒歩・その他 () / : ~ / :		
4 移動・滞在	車・徒歩・その他 () / : ~ / :		
5 移動・滞在	車・徒歩・その他 () / : ~ / :		
6 移動・滞在	車・徒歩・その他 () / : ~ / :		
⑤ 避難中の出来事や気づいた点があればご記入ください。			
4. 安定ヨウ素剤の服用			
① 安定ヨウ素剤を服用しましたか? : はい・いいえ * : ヨウ化カリウム(mg)、ヨウ化カリウム錠(錠)			
② ④で「はい」の場合、服用回数、服用時期、日時、服用量を教えてください			
1回目	服用時期: 避難前	服用日時 (月 日)	服用回数: mg・錠
2回目	服用時期: 避難前	服用日時 (月 日)	服用回数: mg・錠
3回目	服用時期: 避難前	服用日時 (月 日)	服用回数: mg・錠
5. 食事状況調査			
① 被災後から現在まで、摂取制限指示のあった食品等を摂取しましたか? : はい・可能性あり・いいえ			
② 被災後から現在まで、放射性汚染の可能性のある食品等を摂取しましたか? : はい・可能性あり・いいえ			
③ ①②で「はい」「可能性あり」を選択した方は、その状況について詳しく教えてください			
6. 個人情報利用の許諾			
本記録カードの記録内容は、個人同意可能な情報を除いて、放射線による健康被害の調査に活用されることがあります。上記の個人情報利用に同意していただく方は白書 (未成年者の場合は保護者) による署名をお願いします。			
氏名 (白筆)			ご協力ありがとうございました。

(上: 表面, 下: 裏面)

¹⁰ 受付にて被測定者に配布するアンケート用紙の例である。被測定者に、①氏名、②生年月日、③性別、④住所、⑤避難行動情報、⑥安定ヨウ素剤服用状況、⑦食事状況などを回答・記入してもらう (⑤から⑦は可能な範囲で)。この例のように測定結果の記入欄を設けておけば、情報が集約されて便利である。

参考3 基準値の設定について

下図は各年齢群¹¹の甲状腺等価線量が 100 mSv に相当する NaI(Tl)サーベイメータの正味値と設定した基準値（破線）の関係を示している。核種は ¹³¹I のみを考慮し、化学形は元素状ヨウ素、摂取経路は吸入（急性）を計算条件に設定した。¹³¹I 甲状腺残留量が時間とともに変化するために、正味値も連動して変化する。¹³¹I 甲状腺残留量は摂取から 1 日後に最大となり、その後は徐々に減少してゆく。今回設定した基準値は暫定的なものであり、今後必要に応じて見直しを行ってゆく。



甲状腺等価線量 100 mSv に相当する NaI(Tl)サーベイメータの正味値と設定した基準値

なお、IAEA 安全文書⁽¹³⁾には、甲状腺被ばく線量に対する介入レベルを定める OIL8 が与えられている。OIL8 も甲状腺等価線量 100 mSv から導出されている。OIL8 と本マニュアルで提示した基準値が異なるのは、使用する検出器のサイズが異なるためと考えられる¹²。

¹¹ 図中の 0y, 1y, 5y, 10y, 15y 及び Adult は下記の年齢に対応する⁽¹²⁾。

0y : 1 歳未満 (満年齢で 0 歳のみ), 1y : 1 歳以上 - 3 歳未満 (満年齢で 1 歳, 2 歳), 5y : 3 歳以上 - 8 歳未満 (満年齢で 3 歳, 4 歳, 5 歳, 6 歳, 7 歳), 10y : 8 歳以上 - 13 歳未満 (満年齢で 8 歳, 9 歳, 10 歳, 11 歳, 12 歳), 15y : 13 歳以上 - 18 歳未満 (満年齢で 13 歳, 14 歳, 15 歳, 16 歳, 17 歳), Adult : 18 歳以上 (満年齢で 18 歳以上)

¹² 有効面積が 15 cm² 以下のプローブとしている。本マニュアルの対象としている NaI(Tl)サーベイメータは直径 1 インチ×高さ 1 インチの結晶を内蔵するが、有効面積（窓面積）は約 5 cm² に過ぎない。

6. 適用条件

(1) 測定場所の周辺線量当量率

甲状腺簡易測定は可能な限り低い周辺線量当量率の場所で行うのが理想であり、IAEA 安全文書⁽¹³⁾と同様に $0.2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 以下の場所で行うことを推奨する。東電福島第一原発事故後に行われた小児甲状腺被ばくスクリーニング検査でも、同じ条件が設定された。コンクリート建屋の外部放射線に対する平均的な線量低減係数が 0.2 ⁽¹⁴⁾であるため、屋外の周辺線量当量率が $1.0 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 程度の区域であれば条件を満たす測定場所の選定は可能と考えられる。

(2) 測定可能な年齢

概ね3,4歳以上の子どもから測定可能である。乳幼児の測定についてはプローブが適切な位置に配置できないため（図8）、測定精度が担保できない可能性がある。ただし、要望に応じて、可能な限り測定は行うべきである。



図8 1歳児にNaI(Tl)サーベイメータのプローブを近接させた状況

(3) 機器

使用するNaI(Tl)サーベイメータは、メーカー等による点検・校正を少なくとも年1回は行うこと。ただし、年1回の点検・校正でも感度が変わる場合があるので、測定終了後に使用した機器を回収し、専門機関による感度の確認を行うのが良いと思われる。

(4) 測定者の要件

NaI(Tl)サーベイメータの使用経験がある者が望ましい。量子科学技術開発研究開発機構が主催する甲状腺簡易測定研修を受講すれば、必要な技能を取得できる。

(5) 測定期間

放射性ヨウ素を摂取してから 24 時間以降から概ね 2 週間程度位までに行う¹³。

(6) 測定精度

正味値で $0.2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 以下ではファクター2 程度, $0.5 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 以上では $\pm 20\%$ 程度の誤差が見込まれる。主な誤差の要因は, 放射線計測における統計変動とプローブ位置のばらつきに伴うランダム誤差である¹⁵。

¹³ ¹³¹I を摂取してから甲状腺に集積するまでに約 1 日要する。また, 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査では, 1,080 名の被検者の内, 598 名が正味値 0, 約千名が $0.02 \mu\text{Sv h}^{-1}$ (検出下限値相当) 以下であった。この結果は, 被検者の甲状腺内部被ばく線量が総じて低かったことを示す一方, より早い段階で同検査を行うべきであったことを示唆している。小児甲状腺被ばくスクリーニング検査は 2011 年 3 月 26 日から 30 日に実施された (24 日は測定場所のバックグラウンドが高かったために, 検査結果は無効となった)。

7. おわりに

放射性核種の環境放出を伴う原子力災害時に必要となる公衆の被ばく線量の速やかに把握に関して、本マニュアルではNaI(Tl)サーベイメータを用いる甲状腺線量測定の手順について解説した。放射性ヨウ素（特に問題となるのがヨウ素-131）の物理学的半減期が比較的短いことから甲状腺線量測定が行える期間は限られるが、簡便かつ迅速に行える本手法は、多数の住民を対象とした甲状腺内部被ばくの確認に適している。既に、本手法に関する技能講習会も行われてきており、受講生も増えてきている。ただし、甲状腺線量測定の運用面に関しては、まだ具体的な方針が示されておらず、規模感や原子力災害時対応のスキームの中での位置付けが不確実である。したがって、本マニュアルの次の改訂版では、これらの点についても網羅してゆく予定である。

8. 引用文献等

- 1) Kim E et al. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. Proceedings of the first NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. Chiba, Japan: National Institute of Radiological Sciences: NIRS-M-252: ; 2012.
- 2) Tokonami S et al. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. *Sci Rep* 2: 507; 2012.
- 3) Matsuda N et al. Assessment of internal exposure doses in Fukushima by a whole body counter within one month after the nuclear power plant accident. *Radiat Res* 179: 663–668; 2013.
- 4) Uchiyama K et al. A study of thyroid ¹³¹I activity of five human subjects exposed to a radioactive plume at Tamura city in Fukushima. *Health Phys* 109: 573-581; 2015.
- 5) Kurihara O et al. Internal doses of three persons staying 110 km south of the Fukushima Daiichi nuclear power station during the arrival of radioactive plumes based on direct measurements. *Radiat Prot Dosim* 170: 420-424; 2016.
- 6) Kurihara O et al. Measurements of ¹³¹I in the thyroids of employees involved in the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *J Nucl Sci Technol* 50: 122-129; 2013.
- 7) Broggio D et al. Child and adult thyroid monitoring after a reactor accident (CATHyMARA): Technical recommendations and remaining gaps. *Radiat Meas.* 128; 106115: 2019.
- 8) 原子力規制庁. 原子力災害時における避難退域時検査及び簡易除染マニュアル. 平成 29 年 1 月 30 日修正. (2017). <http://www.nsr.go.jp/data/000119567.pdf>
- 9) Rojas-Palma C et al. TMT handbook; 2009.
- 10) International Atomic Energy Agency. Generic procedures for medical response during a nuclear or radiological emergency. EPR-MEDICAL; 2005.
- 11) Hosokawa Y et al. Thyroid screening survey on children after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *REM* 2: 82-86; 2013.
- 12) ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides - part 4 inhalation dose coefficients. ICRP Publication 71. *Ann ICRP* 25(3-4); 1995.
- 13) International Atomic Energy Agency. Actions to protect the public in an emergency due to severe conditions at a light water reactor. EPR-NPP Public Protective Actions; 2013.
- 14) Akahane K et al. NIRS external dose estimation system for Fukushima residents after the Fukushima Dai-ichi NPP accident. *Sci Rep.* 3: 1670; 2013.
- 15) Yajima K et al. A screening survey exercise for thyroid internal exposure from radioiodine after a nuclear accident. *Radiat Prot Dosim.* 183: 483-488; 2018.

別添 甲状腺等価線量の計算等に必要データ(I-131) (1)

別表 1 甲状腺等価線量係数 (Sv Bq⁻¹) ※吸入摂取, 元素状ヨウ素

年齢群	0y	1y	5y	10y	15y	Adult
線量係数	3.3×10^{-06}	3.2×10^{-06}	1.9×10^{-06}	9.5×10^{-07}	6.2×10^{-07}	3.9×10^{-07}

別表 2 甲状腺等価線量 100 mSv 相当摂取量 (Bq) ※吸入摂取, 元素状ヨウ素

年齢群	0y	1y	5y	10y	15y	Adult
摂取量	3.0×10^04	3.1×10^04	5.3×10^04	1.1×10^05	1.6×10^05	2.6×10^05

別表 3 1日当たりの呼吸量 (m³ day⁻¹) ※M は男性

年齢群	0y	1y	5y	10y	15y (M)	Adult (M)
呼吸量	2.86	5.16	8.72	15.3	20.1	22.2

別表 4 甲状腺等価線量 100 mSv.相当の 1 週間空气中平均濃度 (Bq m⁻³) ※M は男性, 屋内低減効果含まず

年齢群	0y	1y	5y	10y	15y (M)	Adult (M)
濃度	1.5×10^03	8.7×10^02	8.6×10^02	9.8×10^02	1.1×10^03	1.7×10^03

別添 甲状腺等価線量の計算等に必要データ(I-131) (2)

別表 5 甲状腺残留率 (-) ※元素状ヨウ素

経過日数	0y	1y	5y	10y	15y	Adult
0.1	5.45×10^{-02}	5.45×10^{-02}	5.46×10^{-02}	5.46×10^{-02}	5.46×10^{-02}	5.46×10^{-02}
0.2	1.04×10^{-01}					
0.3	1.41×10^{-01}	1.41×10^{-01}	1.41×10^{-01}	1.42×10^{-01}	1.42×10^{-01}	1.42×10^{-01}
0.4	1.67×10^{-01}	1.68×10^{-01}	1.69×10^{-01}	1.69×10^{-01}	1.69×10^{-01}	1.69×10^{-01}
0.5	1.87×10^{-01}	1.87×10^{-01}	1.88×10^{-01}	1.89×10^{-01}	1.89×10^{-01}	1.90×10^{-01}
0.6	2.00×10^{-01}	2.01×10^{-01}	2.02×10^{-01}	2.04×10^{-01}	2.04×10^{-01}	2.04×10^{-01}
0.7	2.09×10^{-01}	2.11×10^{-01}	2.12×10^{-01}	2.14×10^{-01}	2.14×10^{-01}	2.14×10^{-01}
0.8	2.16×10^{-01}	2.17×10^{-01}	2.19×10^{-01}	2.21×10^{-01}	2.21×10^{-01}	2.22×10^{-01}
0.9	2.19×10^{-01}	2.21×10^{-01}	2.24×10^{-01}	2.26×10^{-01}	2.26×10^{-01}	2.26×10^{-01}
1	2.21×10^{-01}	2.24×10^{-01}	2.26×10^{-01}	2.29×10^{-01}	2.29×10^{-01}	2.29×10^{-01}
2	2.06×10^{-01}	2.10×10^{-01}	2.15×10^{-01}	2.21×10^{-01}	2.22×10^{-01}	2.23×10^{-01}
3	1.80×10^{-01}	1.86×10^{-01}	1.93×10^{-01}	2.02×10^{-01}	2.02×10^{-01}	2.03×10^{-01}
4	1.57×10^{-01}	1.64×10^{-01}	1.73×10^{-01}	1.83×10^{-01}	1.84×10^{-01}	1.85×10^{-01}
5	1.37×10^{-01}	1.45×10^{-01}	1.54×10^{-01}	1.66×10^{-01}	1.67×10^{-01}	1.68×10^{-01}
6	1.20×10^{-01}	1.29×10^{-01}	1.38×10^{-01}	1.51×10^{-01}	1.52×10^{-01}	1.53×10^{-01}
7	1.05×10^{-01}	1.14×10^{-01}	1.24×10^{-01}	1.37×10^{-01}	1.38×10^{-01}	1.39×10^{-01}
8	9.24×10^{-02}	1.01×10^{-01}	1.11×10^{-01}	1.24×10^{-01}	1.26×10^{-01}	1.27×10^{-01}
9	8.09×10^{-02}	8.96×10^{-02}	9.95×10^{-02}	1.13×10^{-01}	1.14×10^{-01}	1.15×10^{-01}
10	7.09×10^{-02}	7.94×10^{-02}	8.92×10^{-02}	1.02×10^{-01}	1.04×10^{-01}	1.05×10^{-01}
11	6.22×10^{-02}	7.04×10^{-02}	8.00×10^{-02}	9.31×10^{-02}	9.44×10^{-02}	9.57×10^{-02}
12	5.45×10^{-02}	6.24×10^{-02}	7.18×10^{-02}	8.46×10^{-02}	8.59×10^{-02}	8.71×10^{-02}
13	4.78×10^{-02}	5.53×10^{-02}	6.44×10^{-02}	7.68×10^{-02}	7.81×10^{-02}	7.93×10^{-02}
14	4.19×10^{-02}	4.90×10^{-02}	5.77×10^{-02}	6.98×10^{-02}	7.11×10^{-02}	7.22×10^{-02}
15	3.67×10^{-02}	4.35×10^{-02}	5.18×10^{-02}	6.35×10^{-02}	6.47×10^{-02}	6.58×10^{-02}
16	3.22×10^{-02}	3.86×10^{-02}	4.65×10^{-02}	5.77×10^{-02}	5.88×10^{-02}	5.99×10^{-02}
17	2.82×10^{-02}	3.42×10^{-02}	4.17×10^{-02}	5.24×10^{-02}	5.35×10^{-02}	5.45×10^{-02}
18	2.47×10^{-02}	3.03×10^{-02}	3.74×10^{-02}	4.76×10^{-02}	4.87×10^{-02}	4.97×10^{-02}
19	2.17×10^{-02}	2.69×10^{-02}	3.35×10^{-02}	4.33×10^{-02}	4.43×10^{-02}	4.52×10^{-02}
20	1.90×10^{-02}	2.38×10^{-02}	3.01×10^{-02}	3.94×10^{-02}	4.03×10^{-02}	4.12×10^{-02}

別添 甲状腺等価線量の計算等に必要データ(I-131) (3)

別表 6 甲状腺等価線量 100 mSv に相当する NaI(Tl)サーベイメータの応答 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)¹⁴ ※正味値

経過日数	0y	1y	5y	10y	15y	Adult
0.1	8.3×10^{-02}	8.5×10^{-02}	1.4×10^{-01}	2.3×10^{-01}	2.9×10^{-01}	4.0×10^{-01}
0.2	1.6×10^{-01}	1.6×10^{-01}	2.7×10^{-01}	4.4×10^{-01}	5.6×10^{-01}	7.6×10^{-01}
0.3	2.1×10^{-01}	2.2×10^{-01}	3.7×10^{-01}	6.0×10^{-01}	7.6×10^{-01}	1.0×10^{00}
0.4	2.5×10^{-01}	2.6×10^{-01}	4.4×10^{-01}	7.1×10^{-01}	9.1×10^{-01}	1.2×10^{00}
0.5	2.8×10^{-01}	2.9×10^{-01}	4.9×10^{-01}	8.0×10^{-01}	1.0E+00	1.4×10^{00}
0.6	3.0×10^{-01}	3.1×10^{-01}	5.3×10^{-01}	8.6×10^{-01}	1.1E+00	1.5×10^{00}
0.7	3.2×10^{-01}	3.3×10^{-01}	5.6×10^{-01}	9.0×10^{-01}	1.2E+00	1.6×10^{00}
0.8	3.3×10^{-01}	3.4×10^{-01}	5.8×10^{-01}	9.3×10^{-01}	1.2E+00	1.6×10^{00}
0.9	3.3×10^{-01}	3.5×10^{-01}	5.9×10^{-01}	9.5×10^{-01}	1.2E+00	1.7×10^{00}
1	3.3×10^{-01}	3.5×10^{-01}	5.9×10^{-01}	9.6×10^{-01}	1.2E+00	1.7×10^{00}
2	3.1×10^{-01}	3.3×10^{-01}	5.7×10^{-01}	9.3×10^{-01}	1.2E+00	1.6×10^{00}
3	2.7×10^{-01}	2.9×10^{-01}	5.1×10^{-01}	8.5×10^{-01}	1.1E+00	1.5×10^{00}
4	2.4×10^{-01}	2.6×10^{-01}	4.6×10^{-01}	7.7×10^{-01}	9.9×10^{-01}	1.4×10^{00}
5	2.1×10^{-01}	2.3×10^{-01}	4.1×10^{-01}	7.0×10^{-01}	9.0×10^{-01}	1.2×10^{00}
6	1.8×10^{-01}	2.0×10^{-01}	3.6×10^{-01}	6.4×10^{-01}	8.2×10^{-01}	1.1×10^{00}
7	1.6×10^{-01}	1.8×10^{-01}	3.3×10^{-01}	5.8×10^{-01}	7.4×10^{-01}	1.0×10^{00}
8	1.4×10^{-01}	1.6×10^{-01}	2.9×10^{-01}	5.2×10^{-01}	6.8×10^{-01}	9.3×10^{-01}
9	1.2×10^{-01}	1.4×10^{-01}	2.6×10^{-01}	4.8×10^{-01}	6.1×10^{-01}	8.4×10^{-01}
10	1.1×10^{-01}	1.2×10^{-01}	2.3×10^{-01}	4.3×10^{-01}	5.6×10^{-01}	7.7×10^{-01}
11	9.4×10^{-02}	1.1×10^{-01}	2.1×10^{-01}	3.9×10^{-01}	5.1×10^{-01}	7.0×10^{-01}
12	8.3×10^{-02}	9.8×10^{-02}	1.9×10^{-01}	3.6×10^{-01}	4.6×10^{-01}	6.4×10^{-01}
13	7.2×10^{-02}	8.6×10^{-02}	1.7×10^{-01}	3.2×10^{-01}	4.2×10^{-01}	5.8×10^{-01}
14	6.3×10^{-02}	7.7×10^{-02}	1.5×10^{-01}	2.9×10^{-01}	3.8×10^{-01}	5.3×10^{-01}
15	5.6×10^{-02}	6.8×10^{-02}	1.4×10^{-01}	2.7×10^{-01}	3.5×10^{-01}	4.8×10^{-01}
16	4.9×10^{-02}	6.0×10^{-02}	1.2×10^{-01}	2.4×10^{-01}	3.2×10^{-01}	4.4×10^{-01}
17	4.3×10^{-02}	5.3×10^{-02}	1.1×10^{-01}	2.2×10^{-01}	2.9×10^{-01}	4.0×10^{-01}
18	3.7×10^{-02}	4.7×10^{-02}	9.8×10^{-02}	2.0×10^{-01}	2.6×10^{-01}	3.6×10^{-01}
19	3.3×10^{-02}	4.2×10^{-02}	8.8×10^{-02}	1.8×10^{-01}	2.4×10^{-01}	3.3×10^{-01}
20	2.9×10^{-02}	3.7×10^{-02}	7.9×10^{-02}	1.7×10^{-01}	2.2×10^{-01}	3.0×10^{-01}

¹⁴頸部ファントムを用いた実験及びシミュレーションにより, NaI(Tl)サーベイメータの甲状腺中 ¹³¹I に対する応答を次のように決定した。20 kBq per $\mu\text{Sv h}^{-1}$ (0y, 1y, 5y), 25 kBq per $\mu\text{Sv h}^{-1}$ (10y), 30 kBq per $\mu\text{Sv h}^{-1}$ (15y), 35 kBq per $\mu\text{Sv h}^{-1}$ (Adult)

C 新甲状腺モニタ用ソフトウェアの取扱説明書

本ソフトウェアは次の環境で動作する。

OS	: Windows 7(SP1 以上)/Windows 8.1/Windows 10
PC	: AT 互換機
ディスプレイ	: XGA(1024×768)以上の解像度を推奨
MCA	: クリアパルス社 MCA(80406 後継機) ORTEC 社 MCA (digiBASE) GBS 社 MCA (MCA527)
その他	: Microsoft .Net framework 4.0 以上及び, 同 Language Pack 4.0 以上 クリアパルス社製 MCA 制御ソフトウェア ORTEC 社製 A11-BW(Connections 32) GBS 社 WinSPEC

ここでは新モニタ用制御・解析ソフトウェアの主な説明法について下記の通りまとめる。

1. 管理者モードの操作方法
2. ソフトウェア機能毎の操作方法

1. 管理者モードの操作方法

1.1 ソフトウェア起動

ディスプレイ上のアイコン（図1）「甲状腺モニタ」をダブルクリックする。クリックするとソフトウェア（図2）が起動する。



図1 アイコン

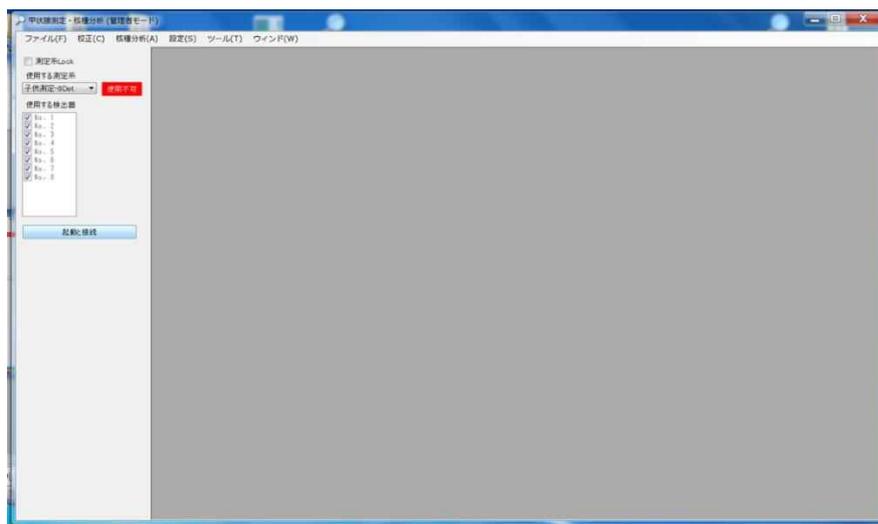


図2 起動したソフトウェアのメイン画面

（ルーチンモードで起動した場合はメニュー項目の「校正」「設定」が使用できなる。）

1.2 MCA 起動

①誤操作に対するインタロックを解除して、チェックボックス"測定系 Lock"をアンチェックする。



②使用する測定系を選択する。

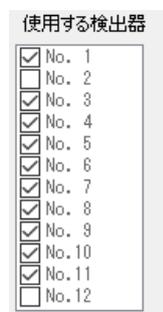
一般用測定系 : 「大人測定-10 検出器」

子供用測定系 : 「子供測定-8 検出器」

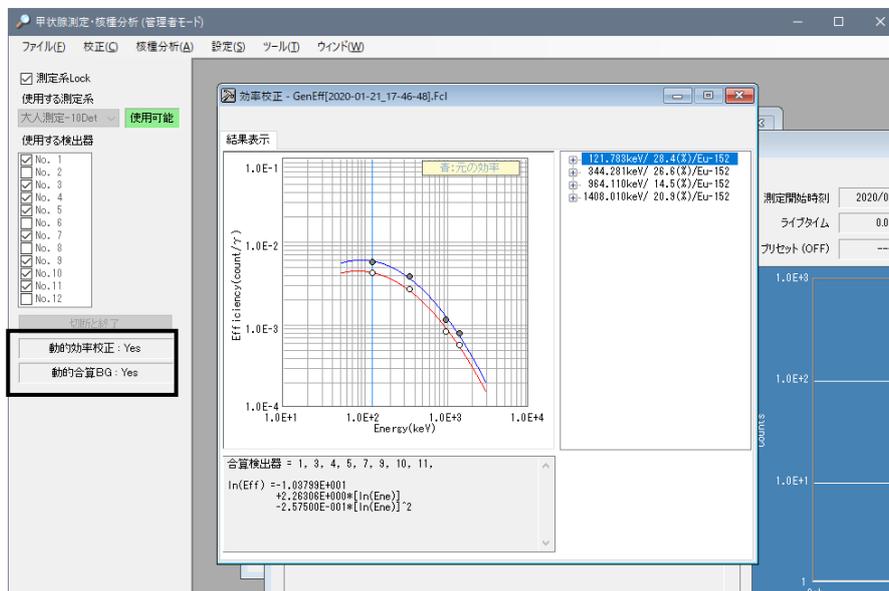
乳幼児用測定系 : 「子供測定-4 検出器」



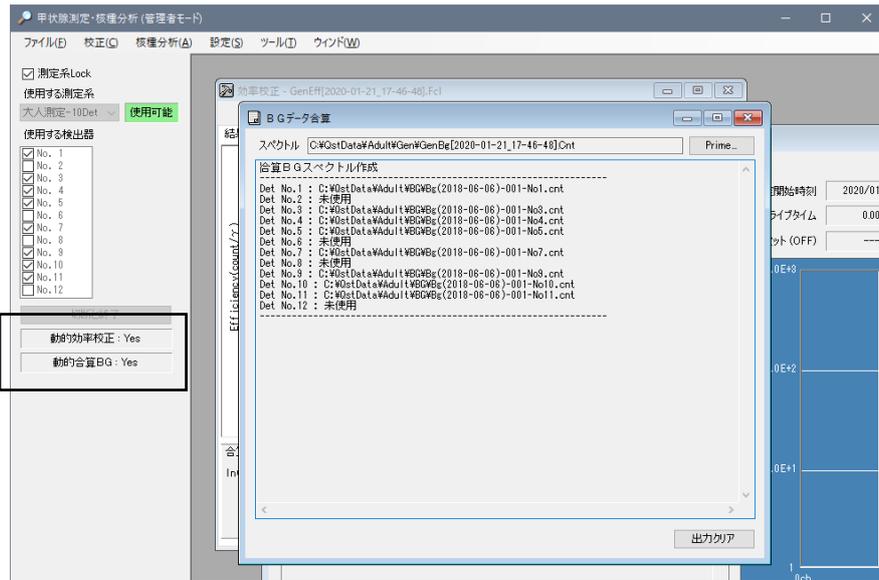
下記は「大人測定-10Det」が選択された場合で、1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 の10個の検出器が指定されている。個々の検出器を使用するか否かの指定は事前に測定系毎に登録しておく。



- 「大人測定-10Det」測定系の場合、クリアパルス社のMCA制御ソフトウェア(81416)が起動し、以降、測定が可能になる。なお、MCA起動後は誤操作に対するインタロックが有効("測定系 Lock"と"検出器 Lock"が)になり、MCAを起動、終了する機能が無効になり、測定中にMCAを終了させる等の誤操作を防ぐ。
- 「大人測定-10Det」で使用する検出器が10個に満たない場合、使用する検出器に対応する効率校正データ、使用する検出器に対応するBGデータを動的に生成する。
 ※検出器数が指定数の場合、動的生成は行われず、設定した効率データ、BGデータがそのまま使用される。



動的生成した場合：指定した検出器だけの合算スペクトルによる効率校正結果



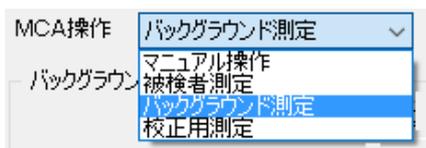
動的生成した場合：指定した検出器だけのデータによる合算BGデータ確認表示

なお、高圧印加後のしばらくの間は検出器の出力信号は不安定なため、信号が安定するまでには30分程度のウォームアップ時間を設ける。

1.3 バックグラウンド測定

被検者測定を行う前にバックグラウンド（BG）を測定する。

①検出器周辺に試料や線源がないことを確認してから、コンボボックス「MCA操作」で「バックグラウンド測定」を選ぶ。



画面の一部がバックグラウンド測定の情報入力画面に切り替わる。



※この画面は「大人測定-10 検出器」の場合

②バックグラウンド測定条件を入力する。

- BG 分析実行：測定後、合算 BG スペクトルに対して BG 分析を実行するかどうかを指定する。
(チェック(☑)すると BG 分析を実行する。)
- 許容範囲：測定した全計数率(cps)と登録してある BG 基準値(cps)との許容範囲を%単位で指定する。なおシステム導入の段階では BG 基準値が未登録なので、1 回目のバックグラウンド測定では BG 基準値が自動登録される。
- 測定時間：測定のプリセット時間(ライブタイム)を秒単位で入力する。範囲 = 1 ~ 99999 秒
測定した BG スペクトルデータは、保存ルートの下層に

大人測定-10 検出器：・・・¥Adult¥BG

子供測定-8 検出器：・・・¥Child¥BG

子供測定-4 検出器：・・・¥Child4¥BG

その他-2 検出器：・・・¥OTHER¥BG

ORTEC MCA：・・・¥ORTEC¥BG

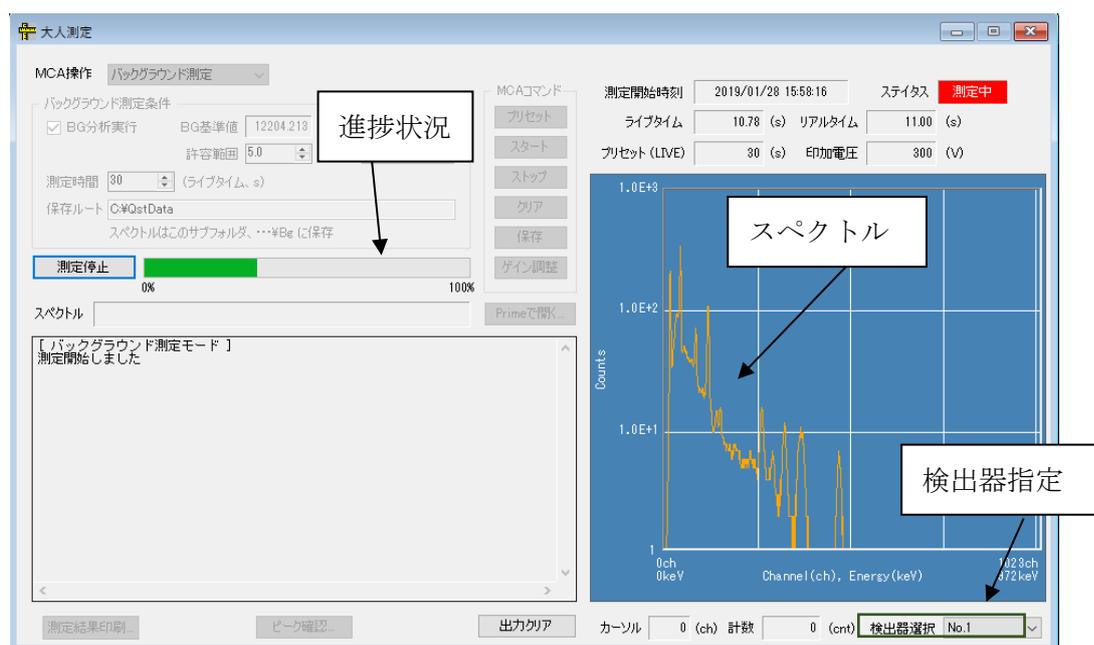
GBS MCA：・・・¥GBS¥BG

に個々の検出器のスペクトル及び合算スペクトル保存される。

③「測定開始」を押す。

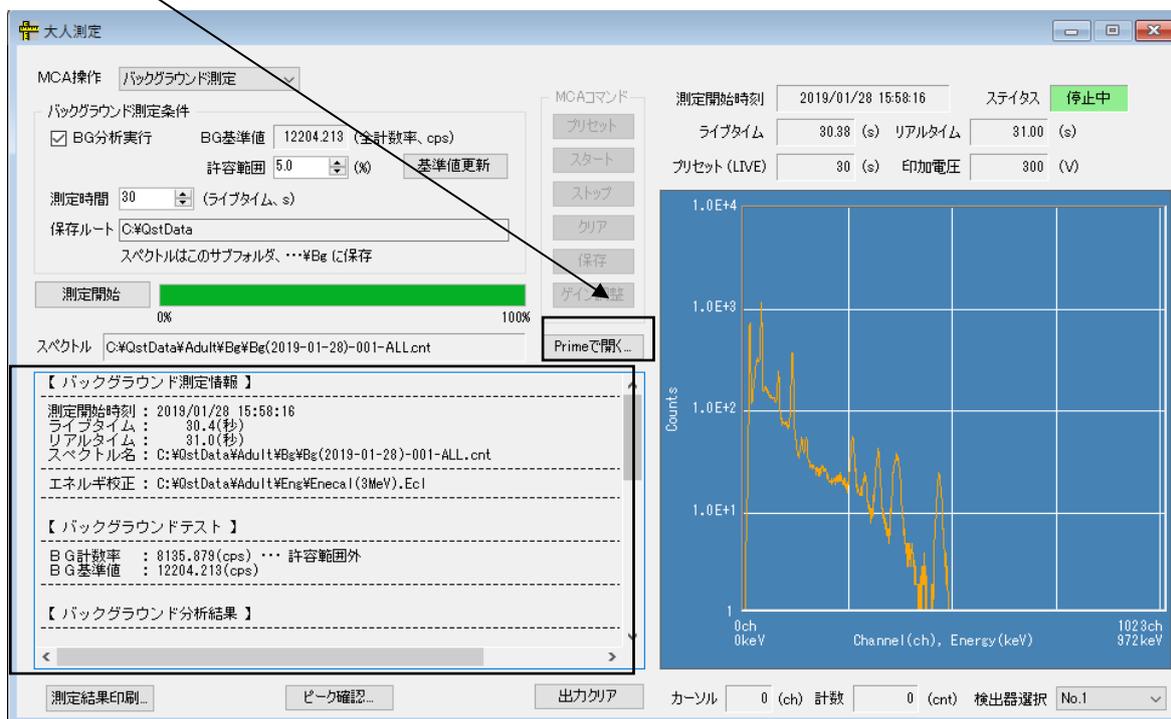
測定中は画面右側に測定時間やスペクトルがリアルタイム更新される。ただし、本システムは複数の検出器のスペクトルを扱うために、各検出器での BG を確認したいときは、検出器選択のコンボボックスから表示したい検出器(またはスペクトルの合算)を選択する。ただし、ORTEC MCA、GBS MCA の場合には検出器の選択はできない。なお、測定の進捗状況はプログレスバーでも確認できる。

BG 測定中画面



④BG 測定後、結果は出力画面に表示される。

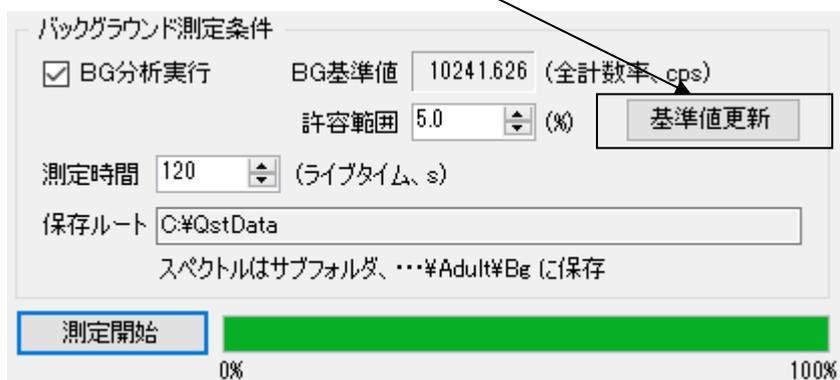
「Prime で開く...」 で合算スペクトルを確認することができる。



なお、BG 測定中はソフトウェア終了できない。下記のメッセージが出力される。



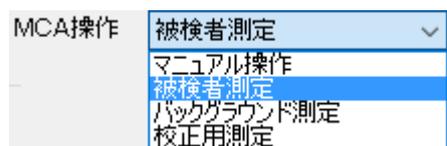
⑤BG 測定結果は更新可能で、「基準値更新」ボタンを押すとシステムデータとして保存される。



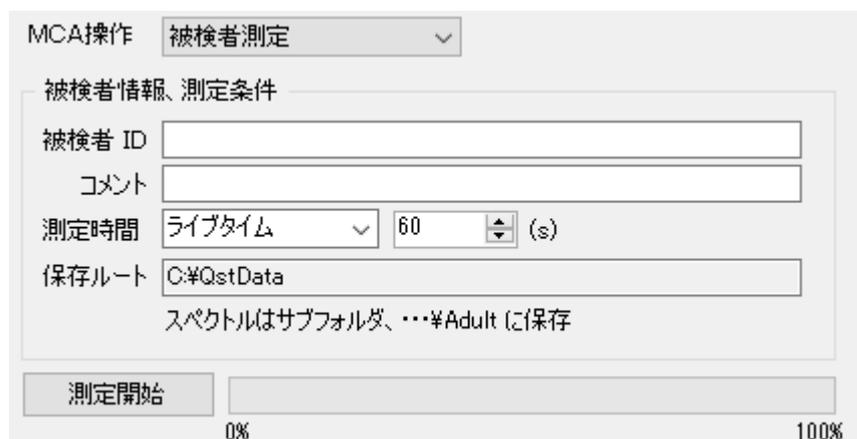
※システム導入の段階では BG 基準値が未登録なので、1 回目のバックグラウンドテストでは BG 基準値が自動登録される。

1.4 被検者測定

①コンボボックス「MCA 操作」から「被検者測定」を選択する。



画面の一部が被検者測定の情報入力画面に切り替わる。

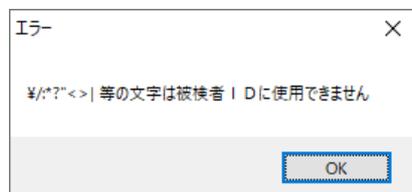
A screenshot of the '被検者測定' (Subject Measurement) information input screen. The 'MCA操作' dropdown is set to '被検者測定'. The screen contains several input fields: '被検者 ID' (Subject ID), 'コメント' (Comment), '測定時間' (Measurement Time) with a dropdown set to 'ライブタイム' (Live Time) and a value of '60' (s), and '保存ルート' (Save Path) set to 'C:\%QstData'. Below the save path, it says 'スペクトルはサブフォルダ、・・・%Adult に保存' (Spectra are saved in subfolders, ...%Adult). At the bottom, there is a '測定開始' (Start Measurement) button and a progress bar showing 0% to 100%.

②被検者測定の入力条件を入力する。

- ・被検者 ID : 被検者の ID として氏名や一意の番号を入力する。

※文字数制限はないが被検者 ID はファイル名として使用するため、以下の文字は使用できない。

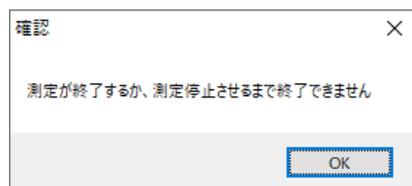
¥!:*?¥"<>| …… これらの禁止文字は、測定開始時にチェックされる。



③コメント：必要に応じて入力する。

④測定時間：測定のプリセットモードでライブタイムを選択し、プリセット時間を指定する
(範囲 = 1 ~ 99999 秒)。

④「測定開始」ボタンで測定を行う。測定中は画面右側に測定時間やスペクトルがリアルタイム更新される。なお、被検者測定中はソフトウェア終了できず、以下のメッセージが出力される。



⑤測定が終了後、スペクトルの合算、合算スペクトルは、保存ルートの下層に自動的にされ、合算スペクトルに対して核種分析結果が画面表示される。

保存ルート

大人測定-10 検出器 : ...¥Adult
 子供測定-8 検出器 : ...¥Child
 子供測定-4 検出器 : ...¥Child4
 その他-2 検出器 : ...¥OTHER
 ORTEC MCA : ...¥ORTEC
 GBS MCA : ...¥GBS

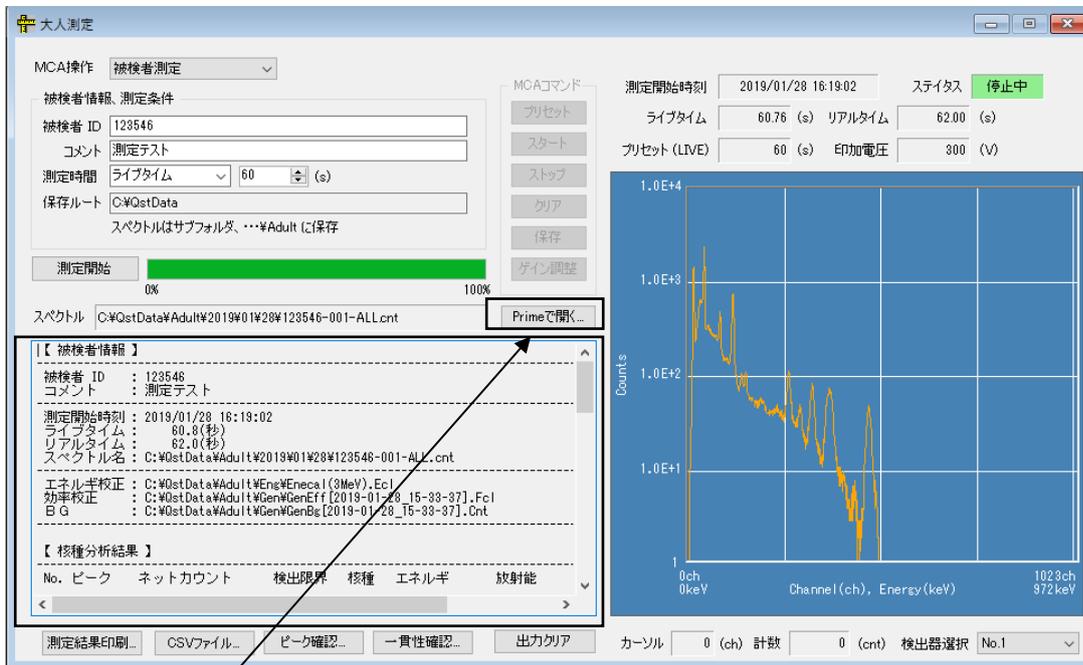
に個々の検出器のスペクトル及び合算スペクトル保存される。

例) C:\¥&&&&&&&¥Adult¥yyyy¥MM¥dd¥####-\$\$\$-%%%.cnt

ここで、&&&&&&& : 保存ルート (ユーザ指定)

Adult : 「大人測定-10 検出器」 ...測定系キーワード, フォルダは自動生成
 yyyy : 測定開始年 (2018 等) ... フォルダは自動生成
 MM : 同月 (02 等, ゼロ埋めする) ... フォルダは自動生成
 dd : 同日 (08 等, ゼロ埋めする) ... フォルダは自動生成
 #### : 被検者 ID ... 使用禁止文字 = ¥/:*?¥"<>|
 \$\$\$: 当該被検者の測定開始日での測定番号
 %%% : 検出器番号 ("No1"~"No12"), 合算スペクトルは"ALL"

結果画面



「Prime で開く...」 ボタンで、合算したスペクトルを確認できる。

⑥核種分析後は次の機能が有効になる。

- ・測定結果印刷: 画面中の測定結果出力をプリンタ出力する。印刷内容は次の画面で指定する。

出力内容の指定

被検者情報

スペクトル

核種分析結果

放射能の一貫性

否検出核種の検出限界

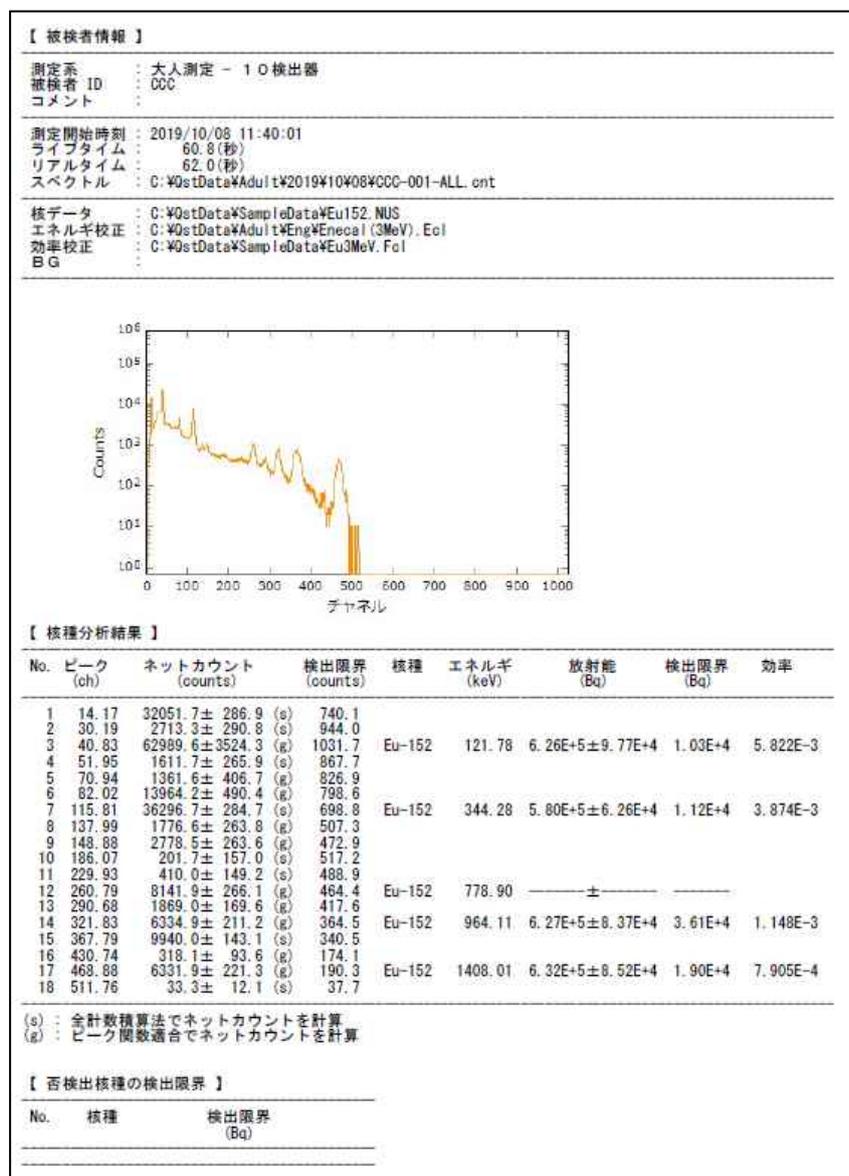
γ 線相互作用レポート(*)

(*)該当データがなければ出力しない

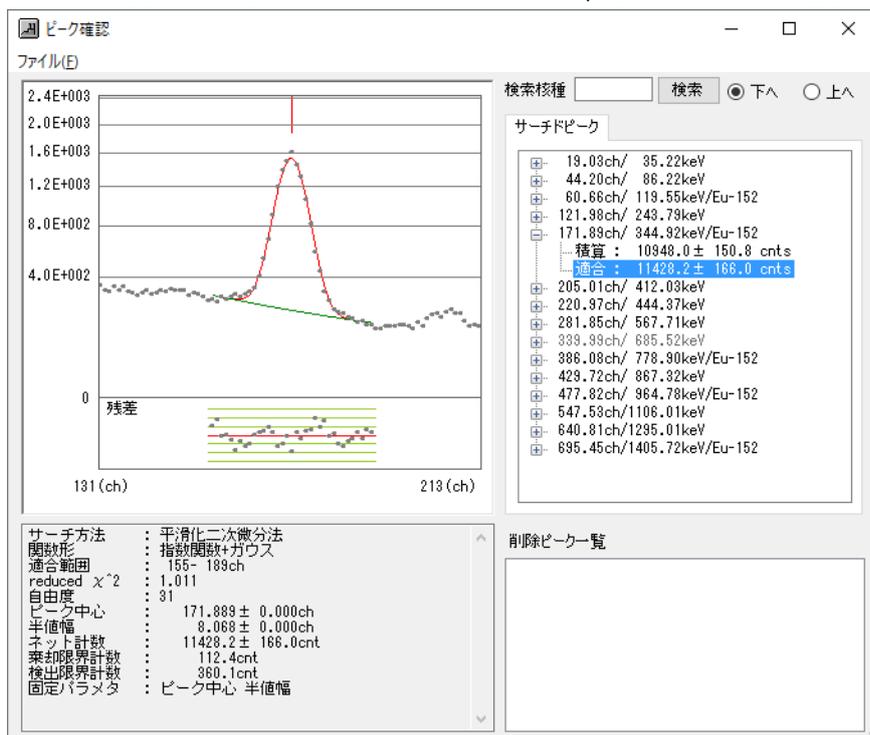
OK Cancel

スペクトルを出力する場合、「放射能の一貫性」「 γ 線相互作用レポート」は出力できない。

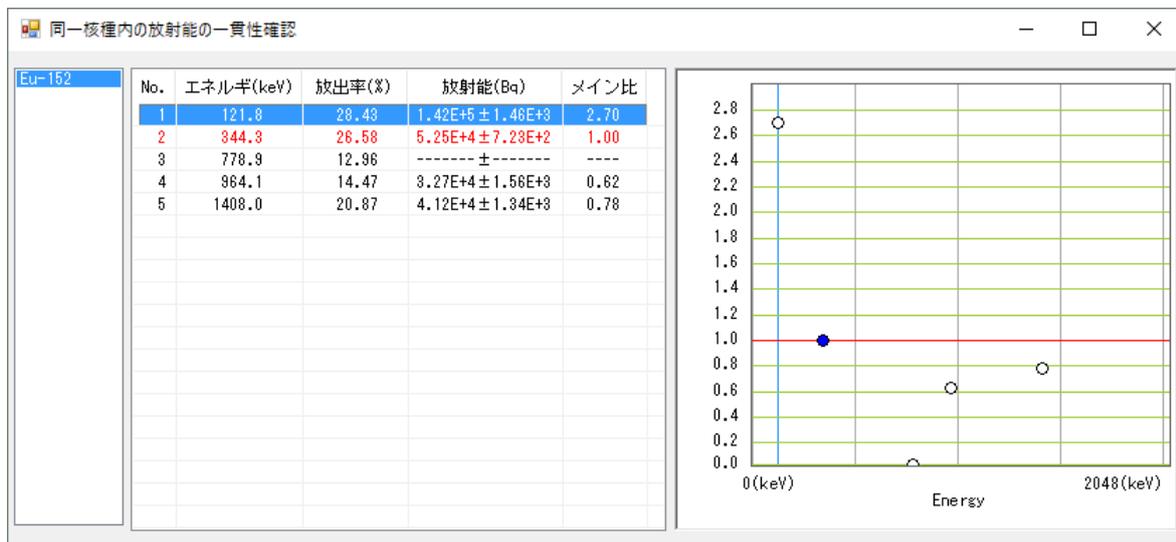
下記の図は測定結果印刷イメージである。



- CSV ファイル：画面中の測定結果出力を CSV ファイルに保存する。
- ピーク確認：本ソフトウェアで処理した γ 線ピークの処理情報詳細を画面出力する。



- 一貫性確認：核種が複数の γ 線を放出している場合、個々の γ 線による放射能計算結果は異なる。ここではメインピークによる放射能とそれ以外の γ 線による放射能との比を計算して、放射能計算の一貫性に関する情報を出力する。



1.5 校正測定

本ソフトウェアは各測定系で校正ファイルを管理し、既出のように使用しない検出器がある場合には動的な効率校正や合算 BG スペクトルを生成する。これらの動的なデータ生成は個々の検出器オリジナルのスペクトルデータが必要である。

本ソフトウェアでは、

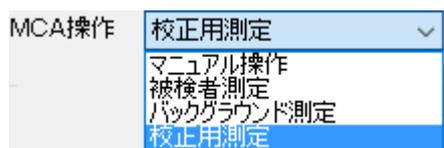
- ・ BG 測定
- ・ エネルギー校正
- ・ 効率校正

に対して、ファイル名規約を強制してファイル保存する校正測定モードを実装している。

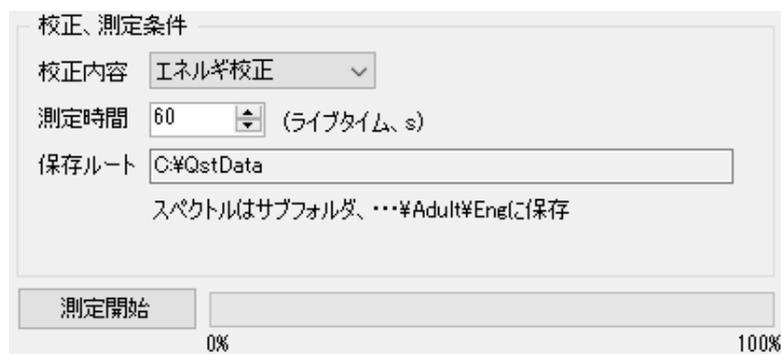
BG 測定は 1.3. バックグラウンド測定を参照し、以下はエネルギー校正、効率校正について説明する。

①エネルギー校正用測定

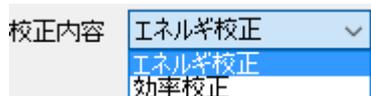
- ・ 予めエネルギー校正に使用する線源を所定の位置にセットする。
- ・ コンボボックス" MCA 操作" 「校正用測定」を選択する。



入力画面が切り替わる。



- ・ コンボボックス「校正内容」の「エネルギー校正」を選択する。



- ・ 測定時間：測定時間をライブタイムプリセットする。
- ・ ボタン「測定開始」で測定を開始する。

測定中、スペクトルはリアルタイムモニタされて、測定終了後、スペクトルデータは自動的に合算、既出のフォルダに保存ルートで保存され、エネルギー校正ソフトウェアが自動的に起動する。

測定したスペクトルデータの保存ルート

大人測定-10 検出器 : ...¥Adult¥Eng

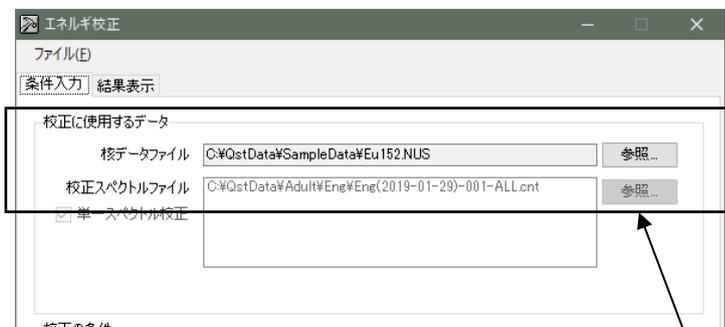
子供測定-8 検出器 : ...¥Child¥Eng

子供測定-4 検出器 : ...¥Child4¥Eng

その他-2 検出器 : ...¥OTHER¥Eng

ORTEC MCA : ...¥ORTEC¥Eng

GBS MCA : ...¥GBS¥Eng

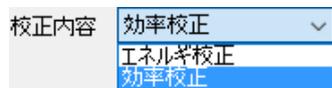


スペクトルファイルは自動的に指定されてため、変更する必要はない。

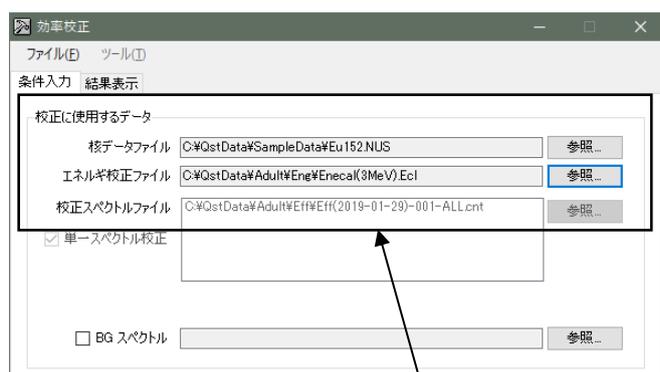
- ・以降の操作はメニューから実行する通常の「2.2.エネルギー校正」と同一である。

②効率校正用測定

- ・「MCA 操作」で「校正用測定」を選択後、コンボボックス「校正内容」で「効率校正」を選択する。



- ・エネルギー校正測定と同様に測定時間をライブタイムプリセットして「測定開始」する。
- ・測定終了後に、スペクトルは自動的に合算、既出のフォルダに保存され、効率校正ソフトウェアが自動的に起動する。



スペクトルファイルは自動的に指定される。

- ・これ以降の操作はメニューから実行する通常の「2.3 効率校正」と同一である。

1.6 ゲイン微調整

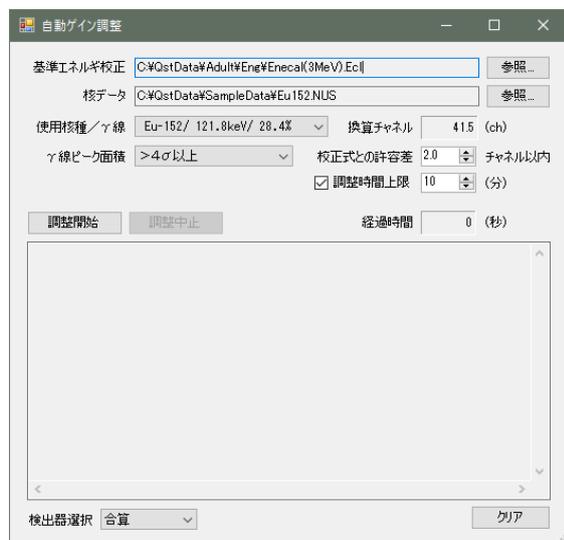
※本機能は、乳幼児・子供用及び一般用新モニタで使用するクリアパルス社製 80406 及び 80416 専用である。ORTEC 社製 digiBASE, GBS 社製 MCA527 に対する調整は後述する。

本機能は初期のゲイン調整からの数 ch 程度のズレをハードウェア調整するもので、数十 ch にも及ぶ大きなズレが発生しているような場合は、80406 及び 80416 の制御ソフトウェアで再調整する。

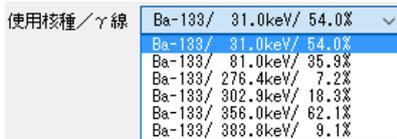
- ①コンボボックス「MCA 操作」で「マニュアル操作」を選択して、MCA コマンドを有効にする。
- ②MCA コマンドの「ゲイン調整」をクリックする。



- ③表示された画面で下記の項目を指定する。

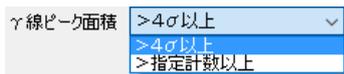


- ・基準エネルギー校正：測定系のエネルギー校正を登録したエネルギー校正ファイル(.Ecl)を指定する。本機能はハードウェアを、指定されたエネルギー校正に登録されているゲインに調整する。初期値は核種分析に使用するエネルギー校正ファイルだが、「参照...」で変更できる。
- ・核データ：用意した線源の核種/γ線情報が登録された核データファイル(.Nus)を指定する。初期値は核種分析に使用する核データファイルが、「参照...」で変更できる。
- ・使用核種/γ線：使用する核種/γ線をコンボボックスで選択する。使用核種/γ線を選択すると、γ線エネルギーは指定エネルギー校正によってチャンネル換算され、「換算チャンネル」として表示される。

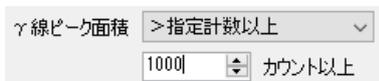


・ γ 線ピーク面積 : 使用する核種/ γ 線のピーク面積を指定する。本機能は全検出器の当該 γ 線のピーク面積がこの値を上回ったことを確認してからゲイン調整を行う。

・ ピーク面積の指定方法は以下から選択する。



・ 「>指定計数以上」 選択した場合は続けて計数 (100~) を数値入力する。



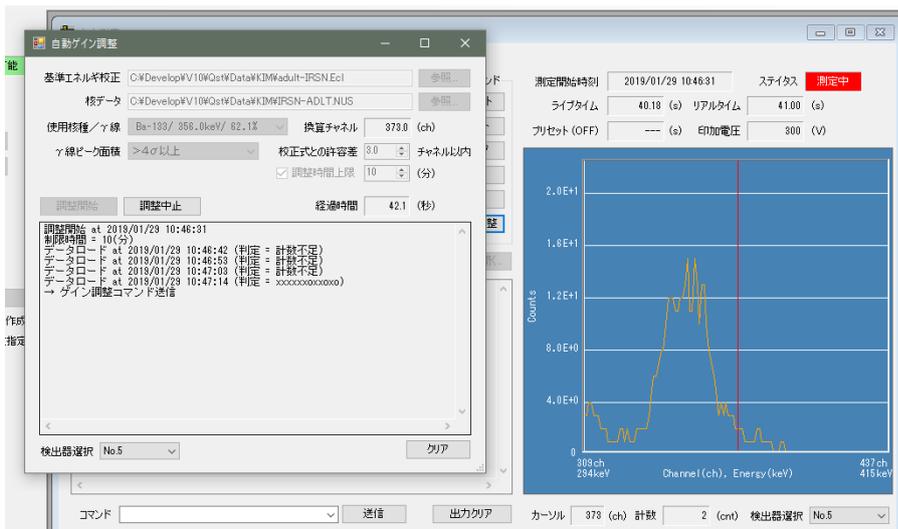
・ 校正式との許容差 : 調整後のピーク ch と既出の"換算チャンネル"を比較し, "一致"したと判断するための許容差を指定する。

※全検出器のピーク ch が 1.0ch 未満で一致することが理想だが, 計数が少ない等の理由で, なかなか指定許容差に収斂しないことも想定される。

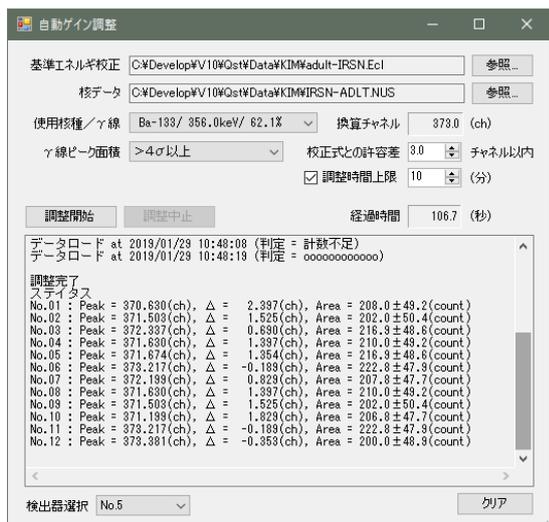
・ 調整時間上限 : ゲイン調整時間を制限するか否かを指定する。チェック()時, 上限時間が入力可能になり, この上限時間内に許容差内に収斂しなかった場合は調整処理を打ち切る。



④ 「調整開始」 でゲイン調整用測定を開始する。測定中のスペクトルはリアルタイムで更新される。



調整が完了するとステータスが表示される。



検出器毎のピーク ch, 指定エネルギーによる換算 ch との差, ネット面積等が表示される。

1.7 HW 調整 (ORTEC MCA, GBS MCA 用)

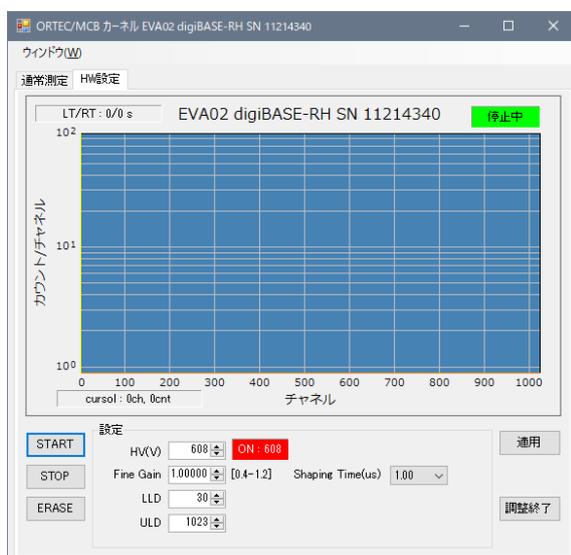
本機能は ORTEC 社製 digiBASE, GBS 社製 MCA527 の簡単な HW 調整を行うためである。DSO 機能や Threshold 設定は専用のアプリケーション (Maestro or WinSPEC) を使用する。

<ORTEC MCA>

①コンボボックス「MCA 操作」で「マニュアル操作」を選択して、MCA コマンド操作を有効にする。



②「HW 調整」をクリックすると ORTEC 社製 MCA の 調整画面が起動する。



現在の設定値が表示される。設定で、

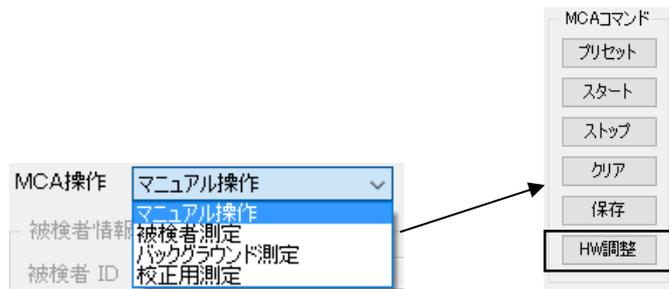
HV(V), Fine Gain, Shaping Time(μ s), LLD, ULD を入力する。

詳しい設定値は ORTEC 社 digiBASE 等の取扱説明書を参照する。

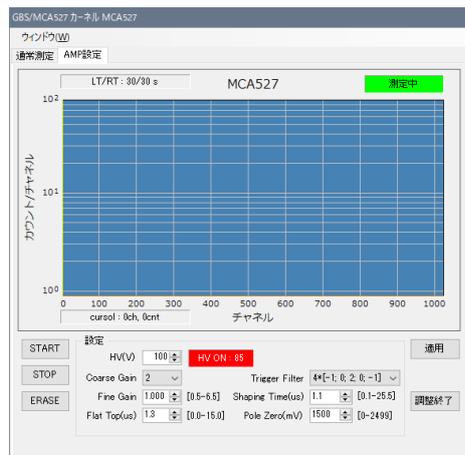
- ③ 「適用」で MCA に反映させる（次回の起動時にも適用される）。
- ④ 「調整終了」で元の画面に戻る。

< GBS MCA >

① コンボボックス "MCA 操作" で 「マニュアル操作」 を選択して、MCA コマンド操作を有効にする。



② 「HW 調整」 をクリックする。GBS 社製 MCA の調整画面が起動する。



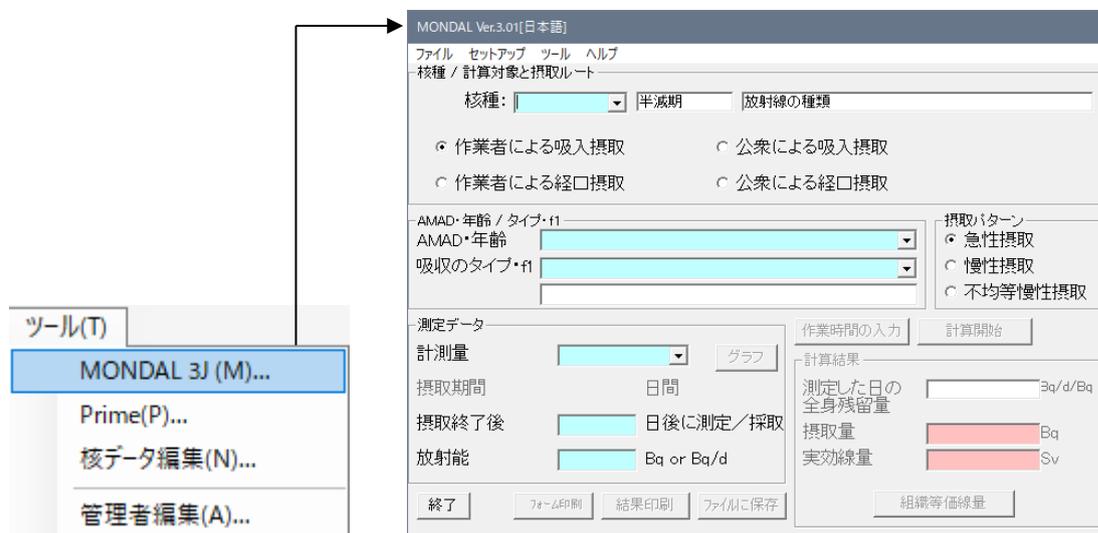
現在の設定値が表示される。設定で、HV(V), Coarse Gain, Fine Gain, Trigger Filter, Shaping Time, Flat Top, Pole Zero を入力する。詳しい設定値は GBS 社製 MCA の取扱説明書を参照する。

- ③ 「適用」で MCA に反映させる（次回の起動時にも適用される）。
- ④ 「調整終了」で元の画面に戻る。

1.8 MONDAL 3J

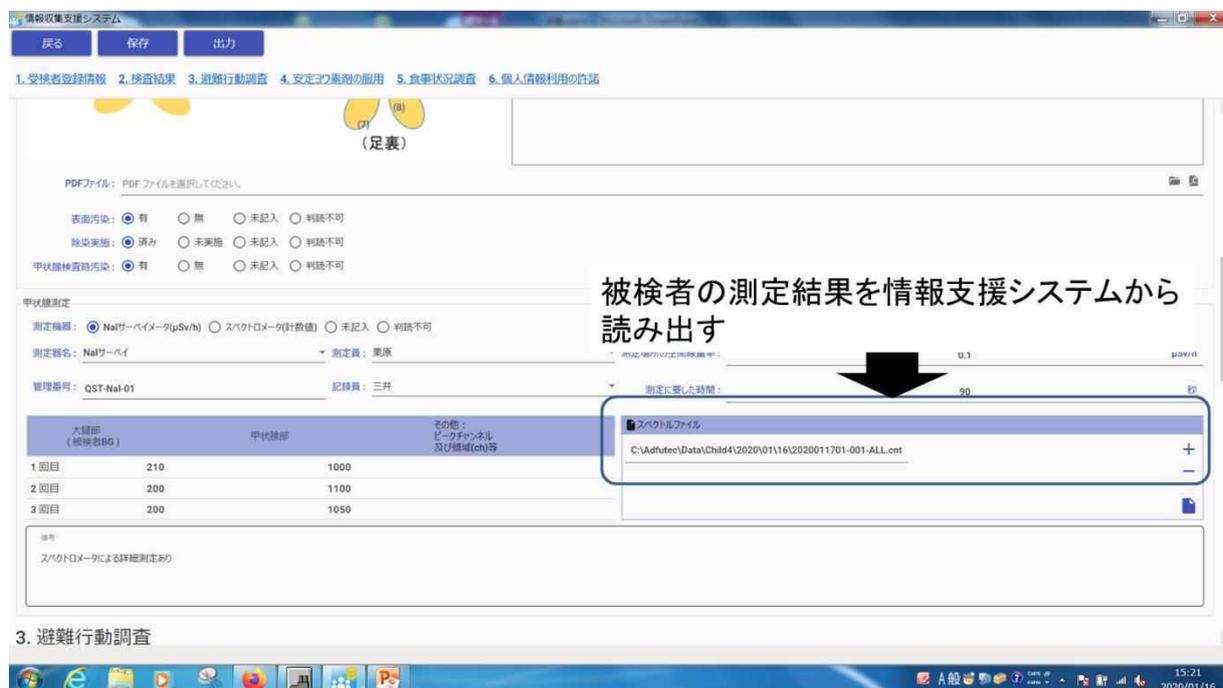
メニュー「ツール／MONDAL-3J」で、MONDAL が起動する。

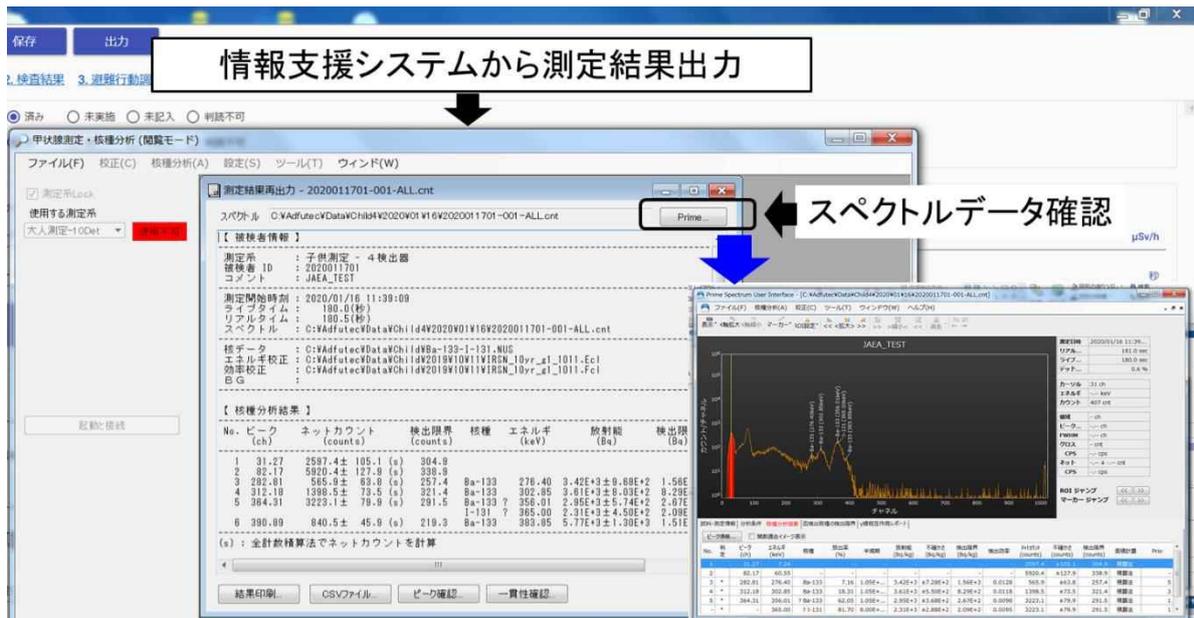
測定結果（数値入力等）は全てマニュアルで行う。MONDAL の操作方法は MONDAL の取扱説明書を参照する。



1.9 情報収集支援システムからの測定結果読み出し

情報収集支援システムが本ソフトウェアと同一コンピュータ上で構築されている場合、情報収集支援システムから本プログラムを起動させることで測定結果が読み出して表示できる。





上記の図のように、起動時の動作は閲覧モードで、測定や校正、MCA 操作はできないが、Prime によるスペクトル表示、測定結果の印刷、測定結果の CSV ファイル作成、ピーク確認、一貫性確認ができる。

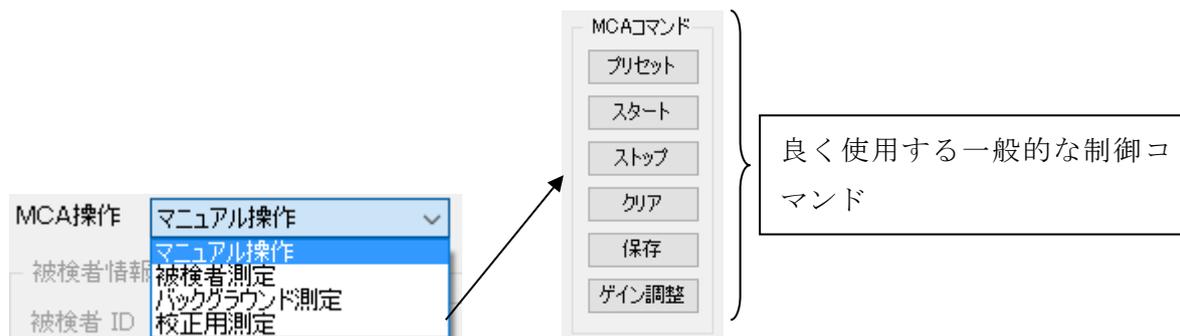
2. ソフトウェア機能毎の操作方法

2.1 マニュアル操作モード

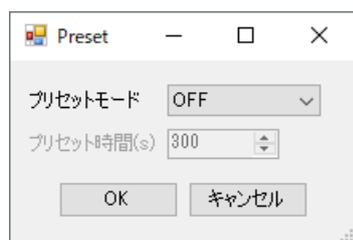
MCA に対する単一のコマンドを実行する。

※一部の処理を除いてコマンドは連動しないため、測定開始→終了してもスペクトルの自動保存は行わない。

①コンボボックス「MCA 操作」で「マニュアル操作」を選択して、MCA コマンド操作を有効にする。



・プリセット：プリセットモード (LIVE/REAL/OFF)，プリセット時間を指定する。

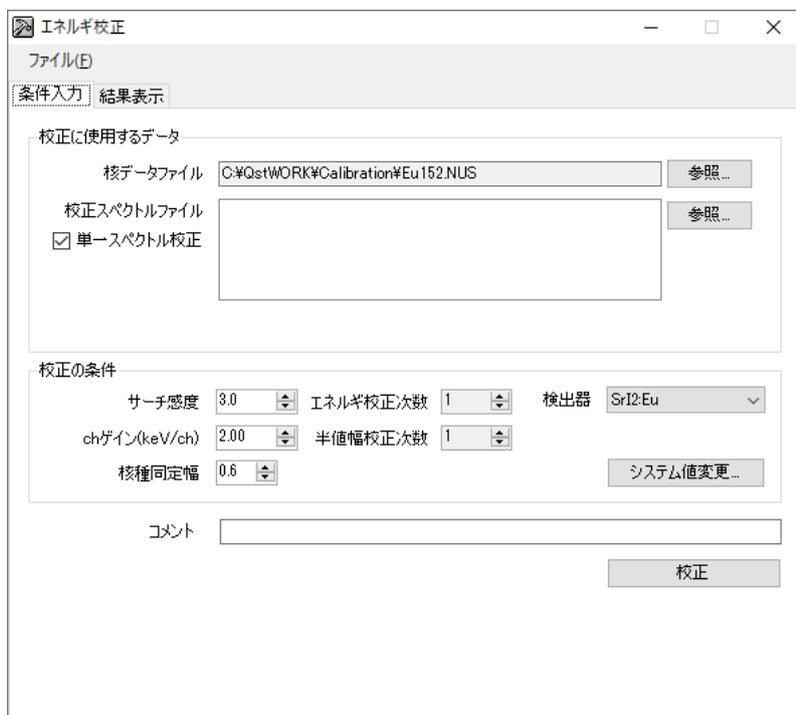


- ・スタート：MCA をスタートする（全ての検出器に対して同時に実行する。）
- ・ストップ：MCA をストップする（全ての検出器に対して同時に実行する。）
- ・クリア：MCA 上の全検出器の測定データ（測定時間情報，スペクトル）をクリアする。
- ・保存：検出器毎のスペクトル及び合算スペクトルをファイル保存する。
※ファイル名は自動ではなく，Windows 標準のファイル名入力ウィンドで行う。
- ・ゲイン調整：MCA に対してゲイン調整等を実行する。
（詳細は 1.6 ゲイン調整または 1.7 HW 調整参照）

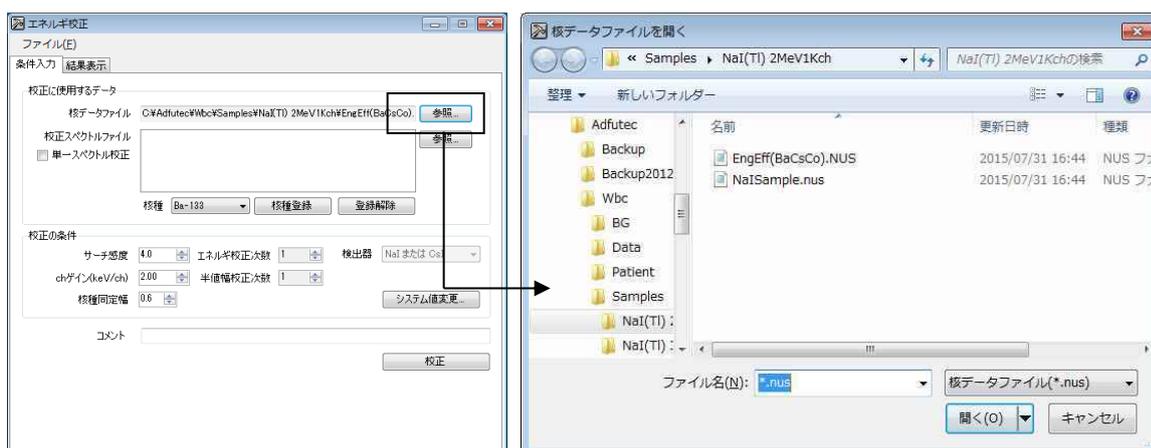
2.2 エネルギー校正

測定系のエネルギー校正／半値幅校正を行う。予め MCA マニュアル操作モード等で、校正に必要なスペクトルデータを測定、ファイル保存して置く必要がある。

- ①メニュー「校正／エネルギー校正」を実行する。
エネルギー校正／半値幅校正ソフトウェアが起動する。



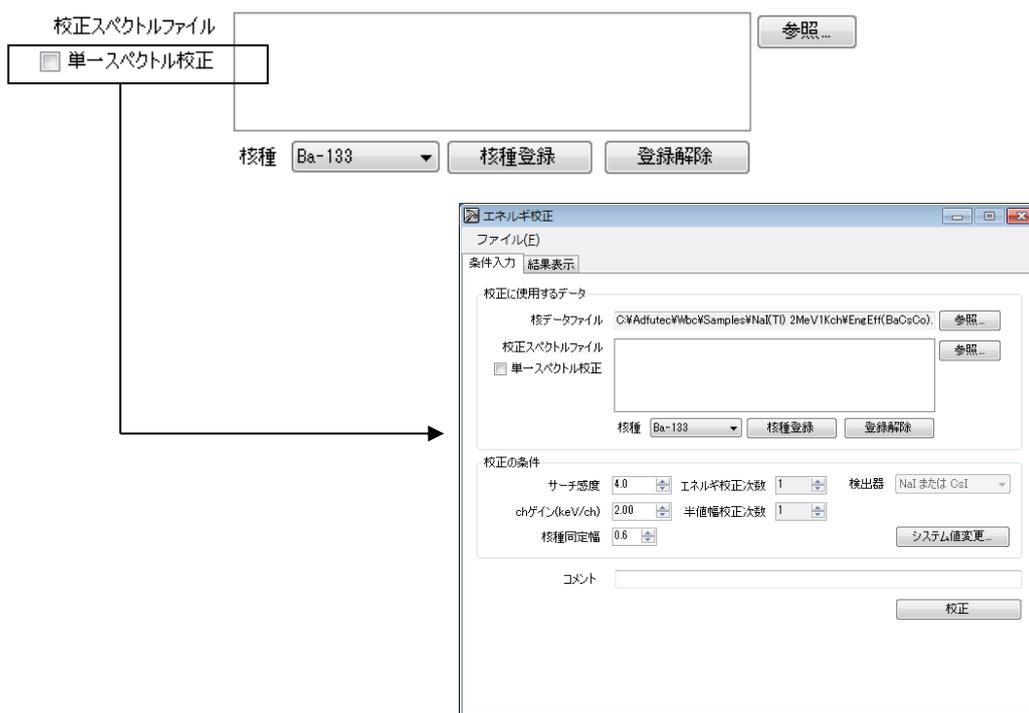
- ・エネルギー校正に使用する、核データファイルと校正スペクトルを「参照」で選択する。



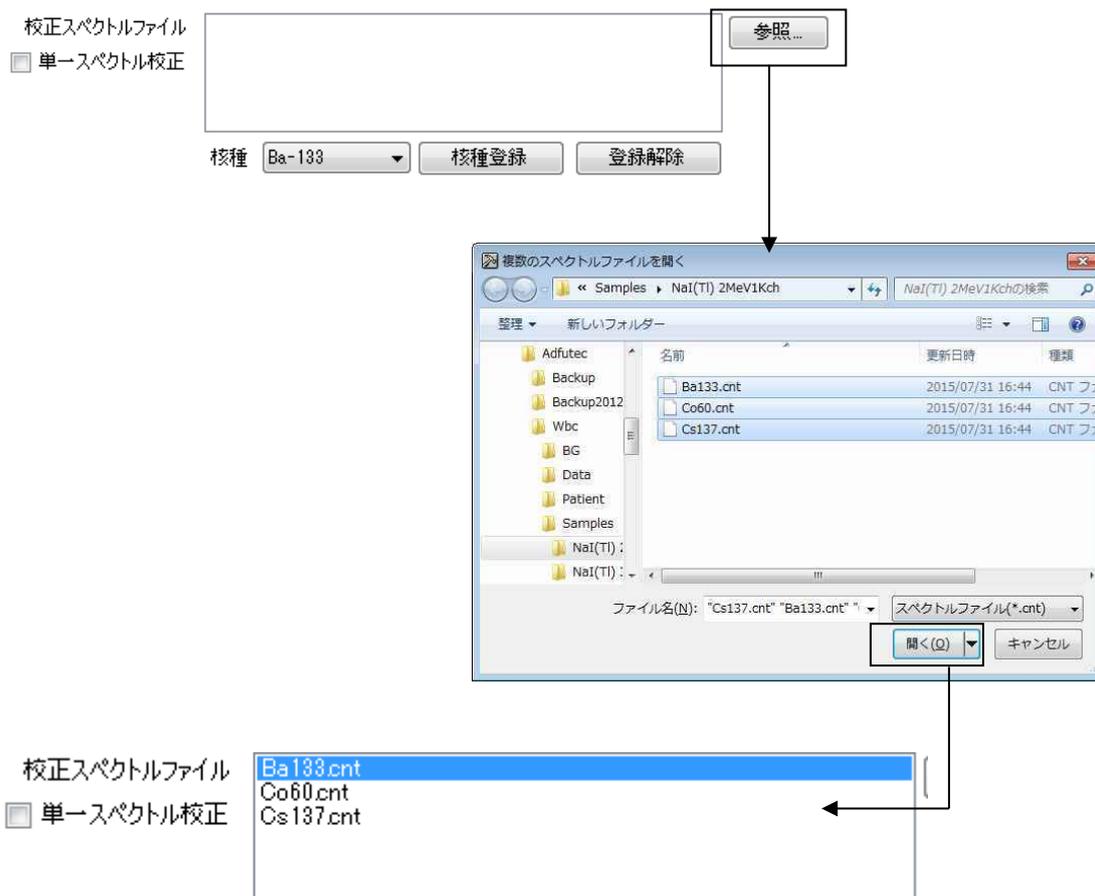
- ・エネルギー校正に使用するスペクトルを選ぶ。核種／線源によって次の2タイプがある。

タイプ1：単一核種毎の線源を個別測定し、複数のスペクトルでエネルギー校正するもの

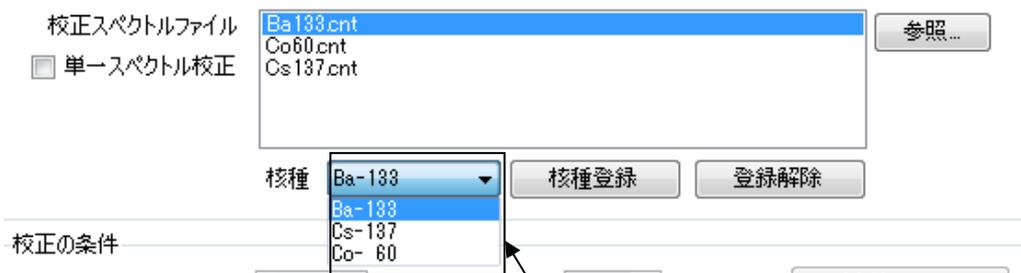
- ✓ 「単一スペクトル校正」を (チェックなし)で画面が切り換わる。



- ✓ 校正スペクトルファイルを「参照」する（複数選択可能）。



- ✓ 校正スペクトル毎に対応する核種を指定する。



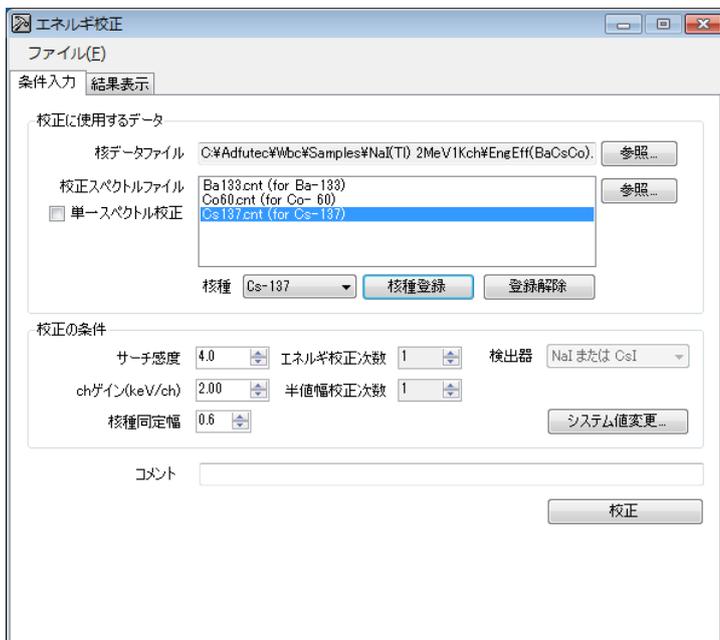
核データファイルを選択すると核種がコンボボックスで選択できる。核種を選択後、「核種登録」をクリックして校正スペクトルと対応させる。

※参照した全ての校正スペクトルに対する対応付けが必要である。

全ての校正スペクトルに対応する対応付けが完了しない状態で「校正」を実行すると、以下の確認メッセージが出力される。



「OK」をクリックして条件入力画面に戻り、対応付けられていない全てのスペクトルに対して核種を対応付ける。



校正の条件として、

- サーチ感度 (2.5～20.0)
- ch ゲイン (0.9～10.0)

- ・核種同定幅 (0.4~1.0)
- ・エネルギー校正次数 (1 or 2) ...

校正に使用可能な登録 γ 線数 - 2 が上限 (3本なら校正次数 ≤ 1)

- ・半値幅校正次数 (1 or 2) ...

校正に使用可能な登録 γ 線数 - 2 が上限 (3本なら校正次数 ≤ 1)

また、スペクトル処理の詳細な条件は「システム値変更...」で行う。

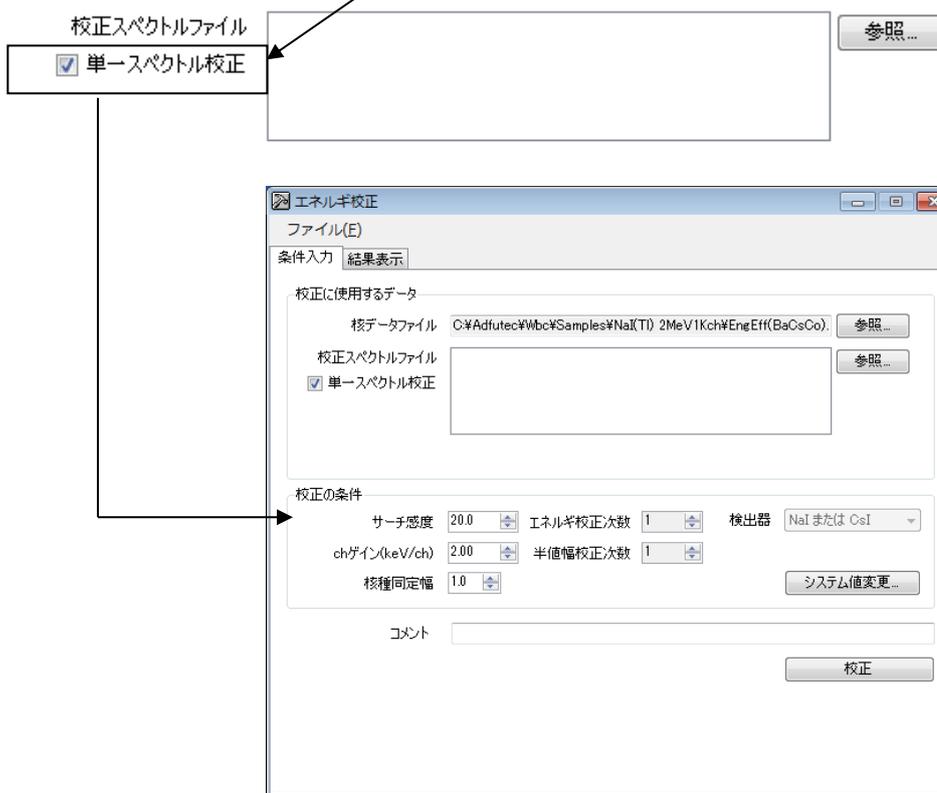
※「システム値変更...」は「設定」メニュー、「核種分析条件設定」を参照する。

条件入力後、「校正」をクリックするとエネルギー校正を開始する。

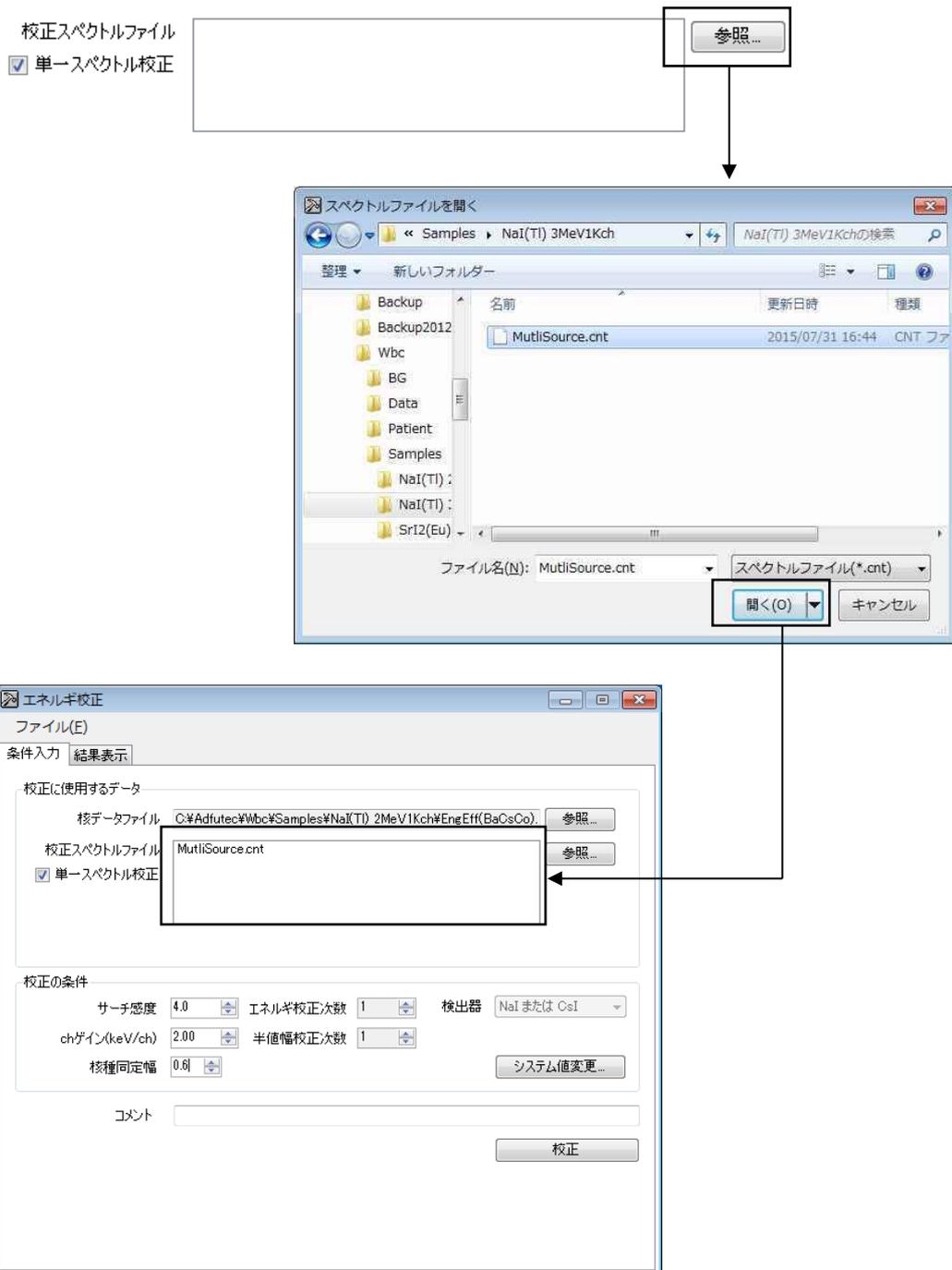


タイプ 2 : 1つの線源に複数核種 (Ba-133 + Cs-137 + Co-60 等) が含まれており、スペクトルでエネルギー校正を行う。

- ✓ 「単一スペクトル校正」を (チェックあり)とする。

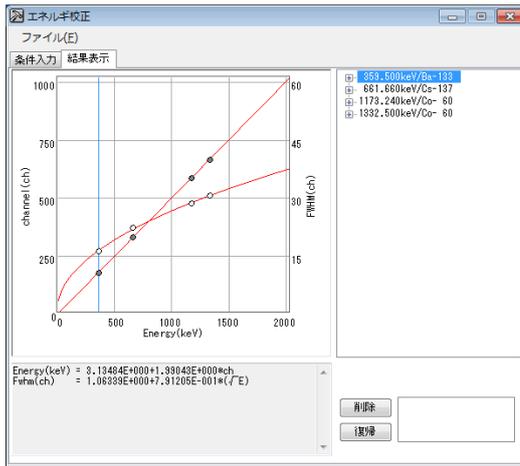


- ✓ 校正スペクトルファイルを「参照」する(複数選択不可)



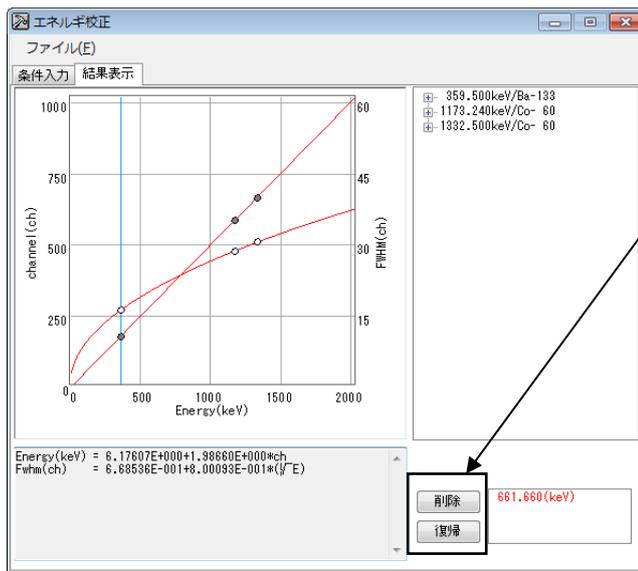
※タイプ 2 では、核種同定は自動的に行うため、タイプ 1 のような「核種指定」は行わない。

- ✓ タイプ 1 同様にサーチ感度等の校正の条件を設定して、「校正」をクリックする。
次のエネルギー校正後の画面は表示される (タイプ 1, タイプ 2 で共通)。



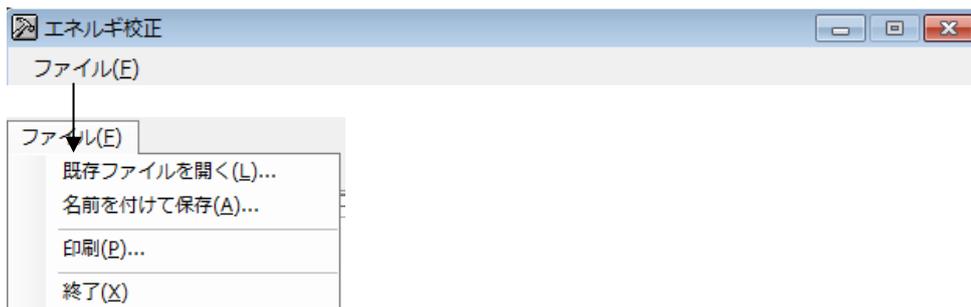
- ✓ 必要に応じて、エネルギー校正に使用したデータを「削除」、削除したデータを「復帰」する。

削除：校正に使用したデータ一覧中、削除するデータを選択して「削除」をクリックする。削除後は、直ちに再校正され、削除したデータは削除データ一覧に登録される。

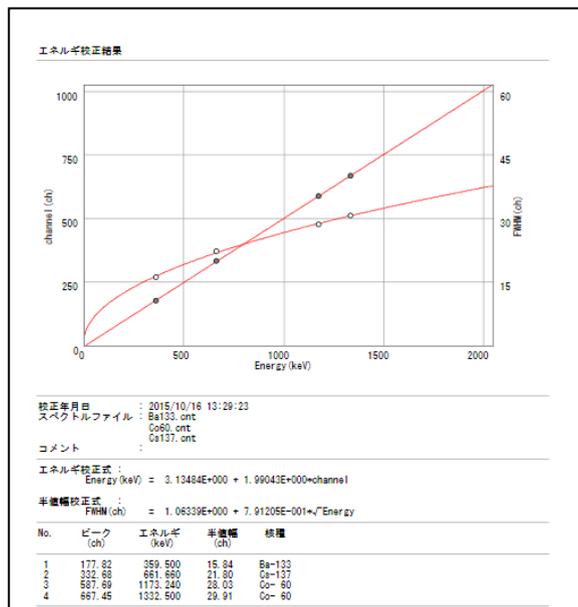


復帰：削除データ一覧のデータを選択して「復帰」をクリックする。復帰後は直ちに再校正され、また復帰したデータは削除データ一覧から除かれる。

- ✓ 他の操作は「ファイル」メニューで行う。



- 既存ファイルを開く：登録済みのエネルギー校正ファイルを読み込む（拡張子=.Ecl）。
- 名前を付けて保存：作成したエネルギー校正データをファイル保存する（拡張子=.Ecl）。
- 印刷：作成または読込んだエネルギー校正データをプリンタ出力する。

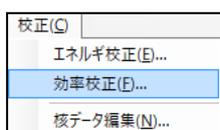


○終了：「エネルギー校正」を終了して起動画面に戻る。

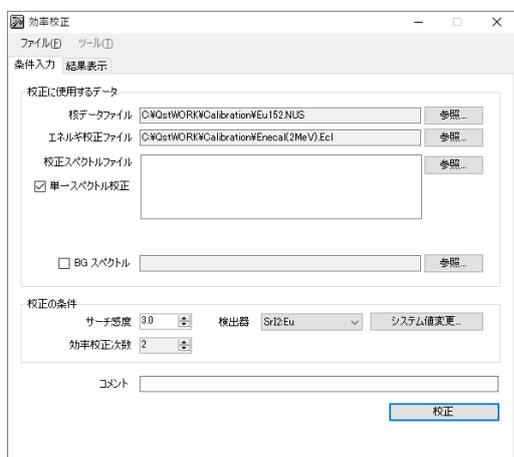
2.3 効率校正

測定系の効率校正を行う。予め MCA マニュアル操作モード等で、校正に必要なスペクトルデータを測定、ファイル保存して置く必要がある。なお、ここでは全検出器の合算スペクトルを使用する。

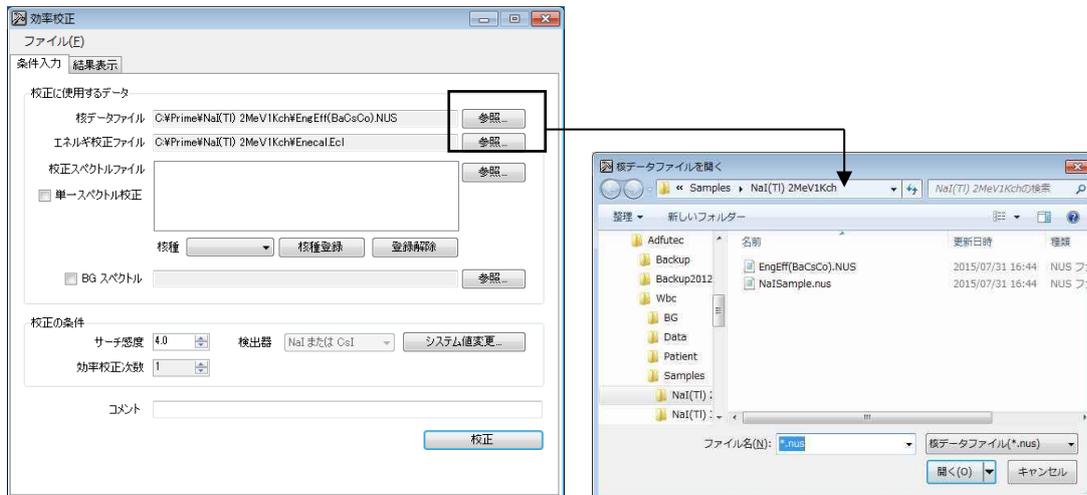
①メニュー「校正／効率校正」を実行する。



下記の効率校正ソフトウェアが起動する。



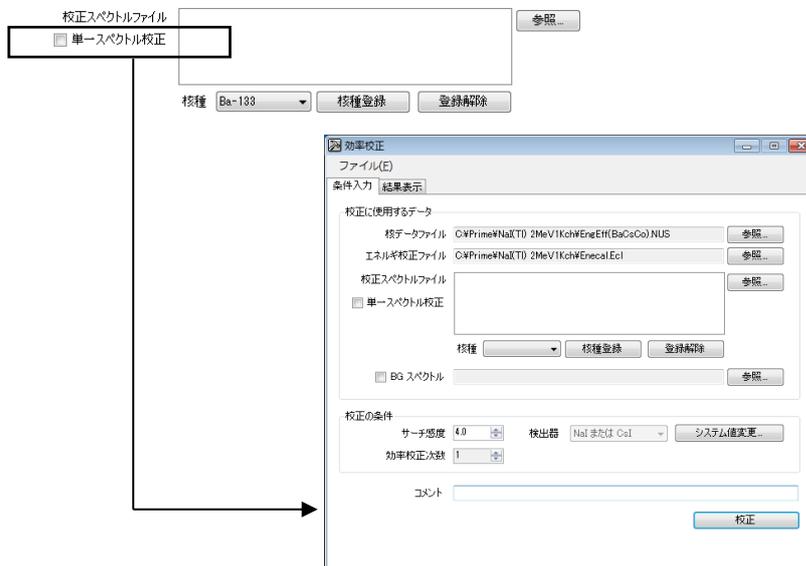
②効率校正に使用する核データファイルとエネルギー校正ファイルを「参照」で選択する。
 なお、予め、核データファイルには使用する核種の検定強度、検定日を登録しておく。



効率校正に使用するスペクトルは核種／線源によって次の3タイプがある。

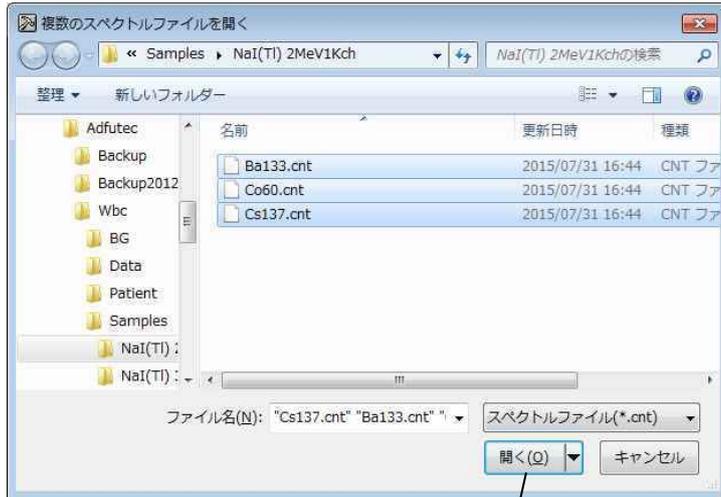
タイプ1：単一核種毎の線源を個別測定し、複数のスペクトルで効率校正するもの

- ✓ 「単一スペクトル校正」を (チェックなし)にする。



- ✓ 校正スペクトルファイルを「参照」する (複数選択可能)。





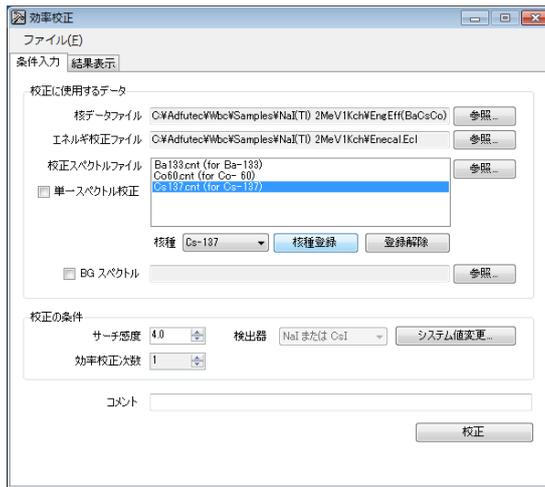
- ✓ 校正スペクトル毎に対応する核種を指定する。



核データファイルを選択すると核種がコンボボックスで選択できる。核種を選択後、「核種登録」をクリックして校正スペクトルに対応させる。
 ※参照した全ての校正スペクトルに対する対応付けを行う。
 全ての校正スペクトルに対応する対応付けが完了しない状態で「校正」を実行すると、以下の確認メッセージが出力される。



- ✓ 「OK」をクリックして条件入力画面に戻り、対応付けられていない全てのスペクトルに対して核種を対応付ける。

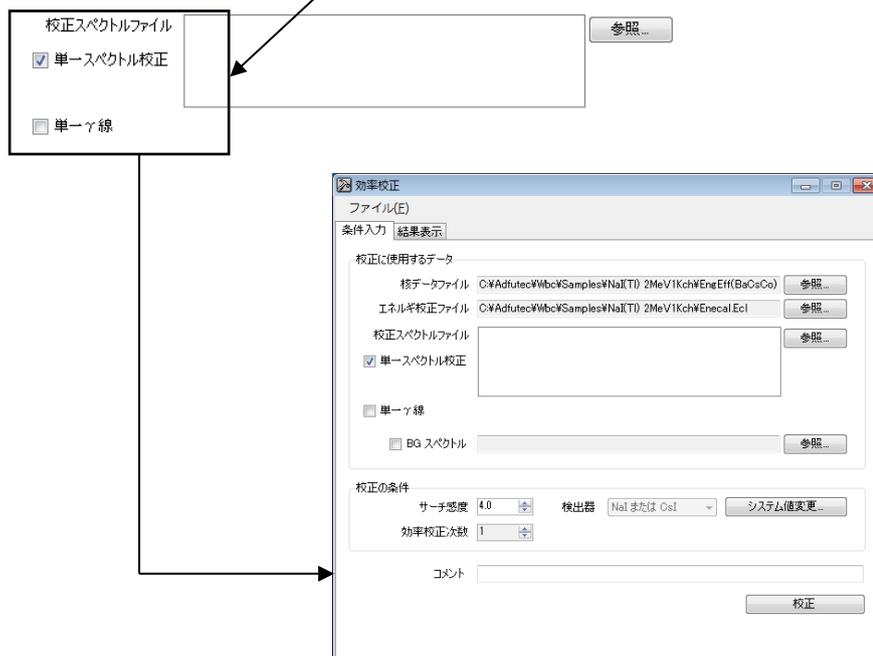


- ✓ 校正の条件として、サーチ感度 (2.5~20.0)、効率校正次数 (1 or 2)、またスペクトル処理の詳細な条件は「システム値変更...」で行う。
※「システム値変更...」は「設定」メニュー、「核種分析条件設定」を参照する。
- ✓ 条件入力後、「校正」をクリックすると効率校正を開始する。

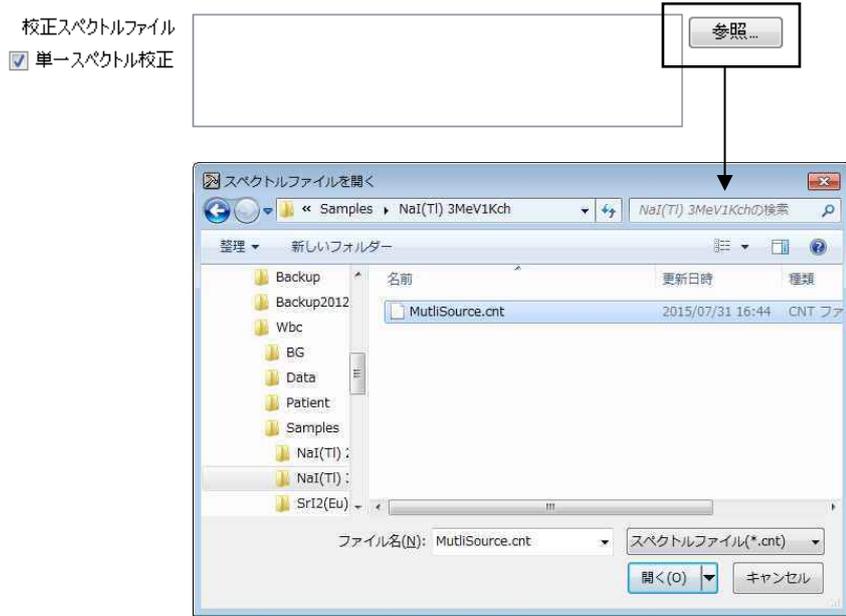


タイプ 2 : 1 つの線源に複数核種 (Ba-133 + Cs-137 + Co-60 等) が含まれており、1 本のスペクトルだけで効率校正するもの

- ✓ 「単一スペクトル校正」を (チェックあり)に切り換える。また複数 γ 線を使用するので、「単一 γ 線」はチェックなしとする。



- ✓ 校正スペクトルファイルを「参照」する (複数選択不可)。

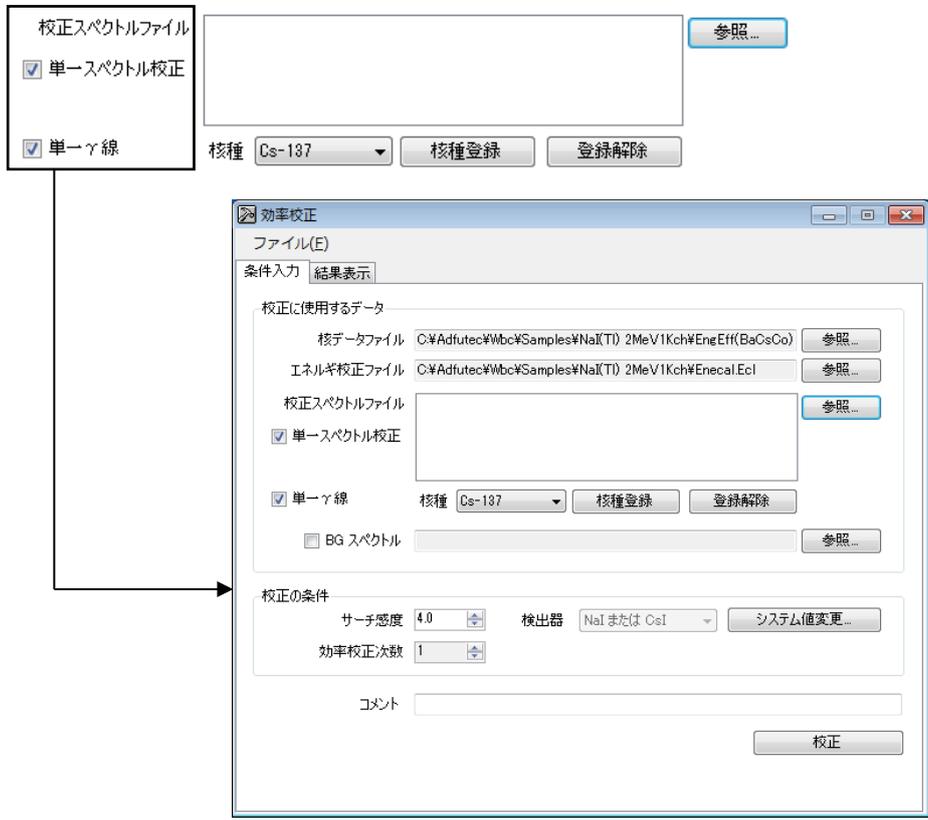


※タイプ 2 では核種同定は自動的に行うため、タイプ 1 のような「核種指定」は行わない。

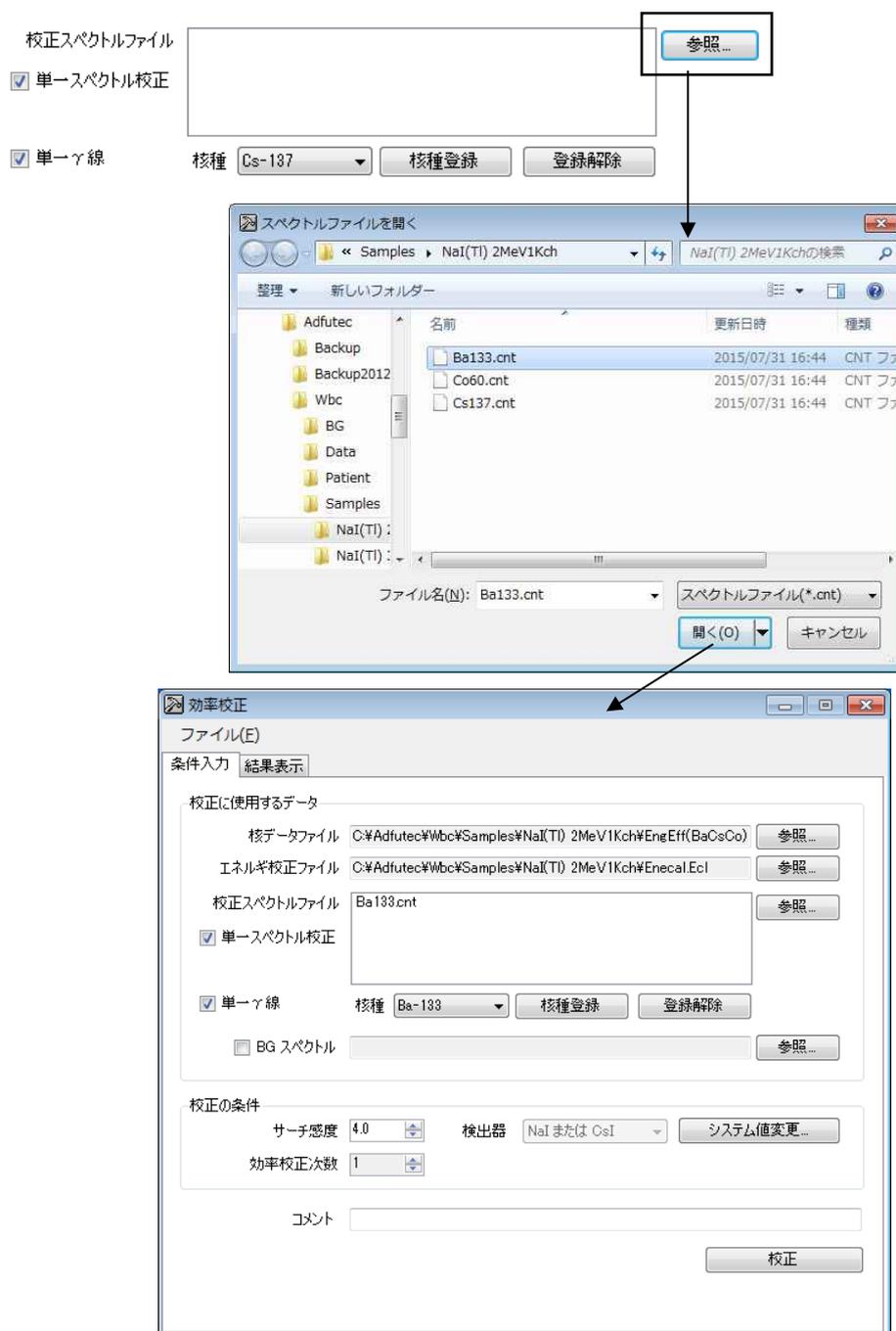
- ✓ タイプ 1 同様にサーチ感度等の校正の条件を設定して、効率校正を開始する。

タイプ 3 : 単一核種毎の線源を測定し(Mock Iodine), 1 本の γ 線だけで効率校正するもの

- ✓ 「単一スペクトル校正」, 「単一 γ 線」両方を (チェックあり) して切り換える。

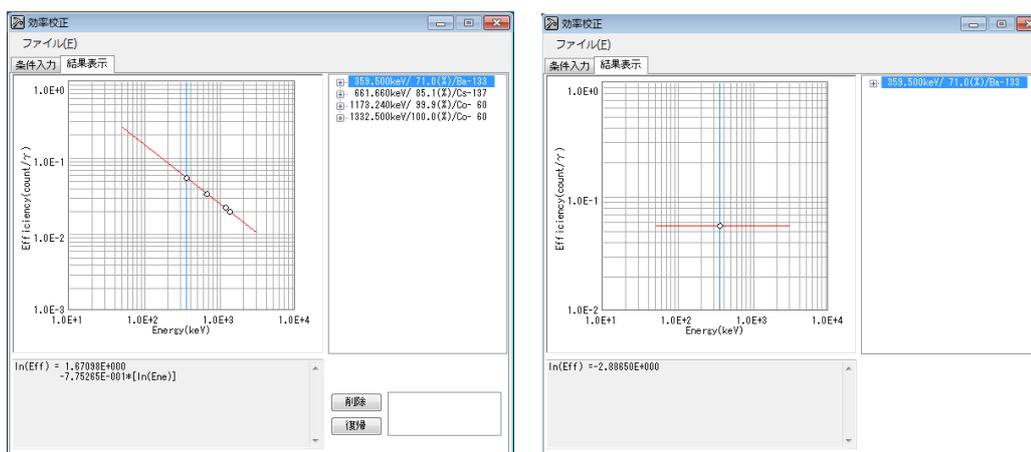


- ✓ 校正スペクトルファイルを「参照」する（複数選択可能）。



- ✓ 校正スペクトル中の核種の指定手順はタイプ1と同じなのでタイプ1の手順を参照する
- ✓ タイプ1,2同様にサーチ感度等の校正の条件を設定して、効率校正を開始する。

効率校正後の画面は次のとおりである。

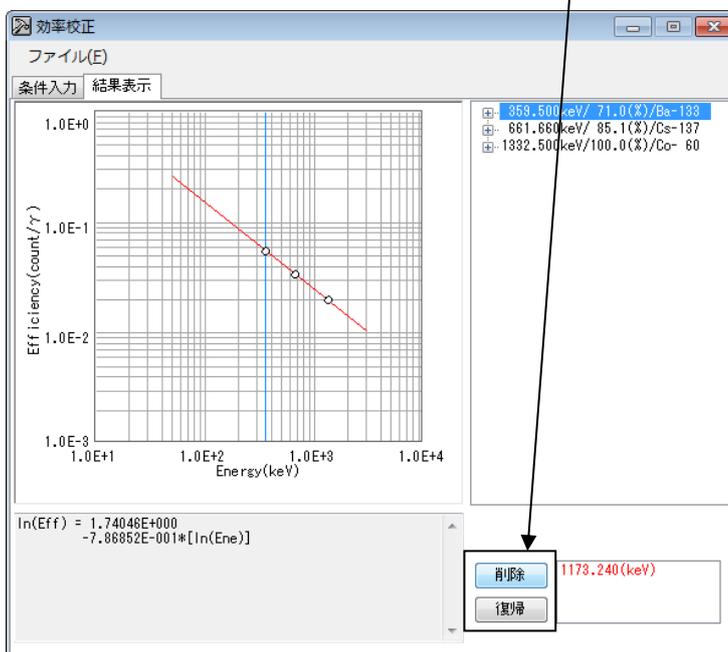


タイプ 1, 2 : 複数 γ 線による効率校正結果 タイプ 3 : 1 本の γ 線による効率校正結果

タイプ 1, タイプ 2 の場合は必要に応じて、効率校正に使用したデータを「削除」、削除したデータ「復帰」できる。

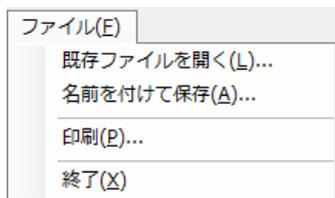
※効率データが 1 点しかないタイプ 3 は「削除」「復帰」できない。

削除 : 校正に使用したデータ一覧中、削除するデータを選択して「削除」をクリックすると直ちに再校正され、削除したデータは削除データ一覧に登録される。

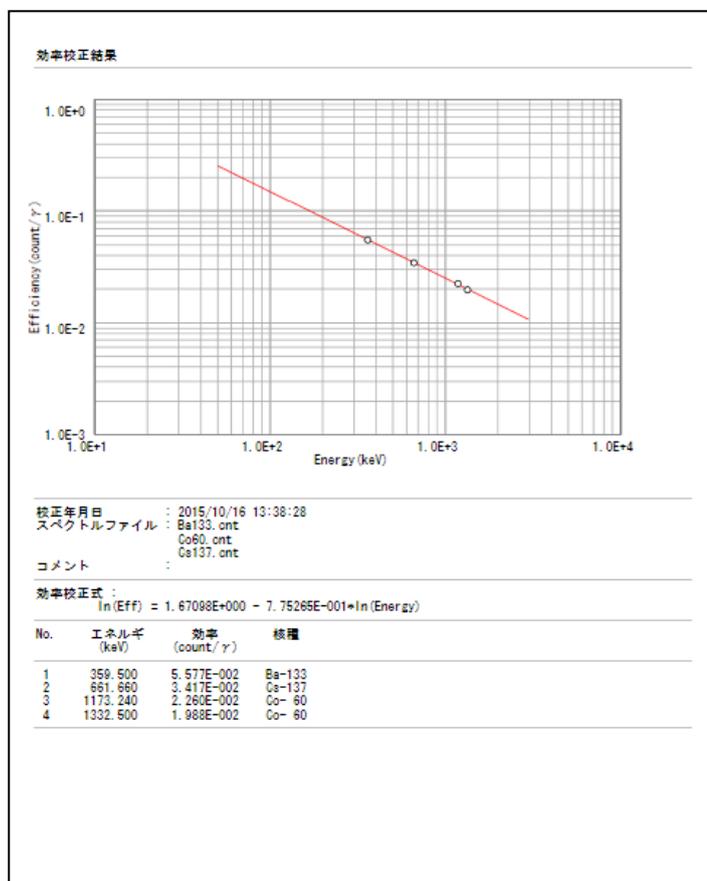


復帰 : 削除データ一覧のデータを選択して「復帰」をクリックすると直ちに再校正され、また復帰したデータは削除データ一覧から除かれる。

- ✓ 他の操作は「ファイル」メニューで行う。



- 既存ファイルを開く：登録済みの効率校正ファイルを読み込む（拡張子=.Fcl）。
- 名前を付けて保存：作成した効率校正データをファイル保存する（拡張子=.Fcl）。
- 印刷：作成または読み込んだ効率校正データをプリンタ出力する。

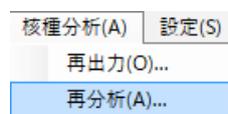


- 終了：「効率校正」を終了して起動画面に戻る。

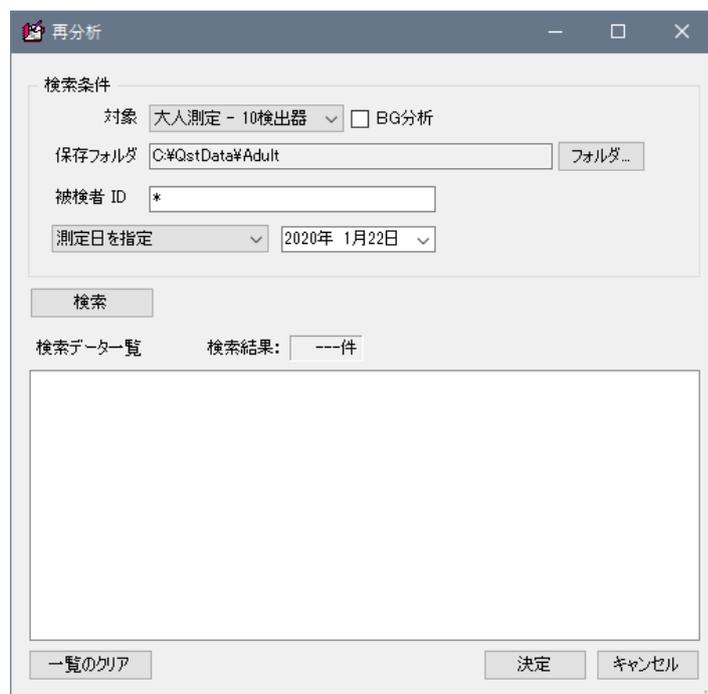
2.4 再分析

測定済みの被検者スペクトルを再分析する。

①メニュー「核種分析／再分析」を実行する。



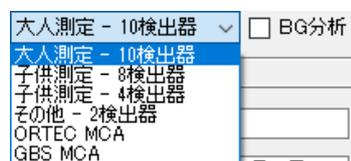
再分析対象を指定する画面が起動する。



②検索条件を指定する。

保存フォルダ中のデータファイルから、測定対象、被検者 ID と測定日時でデータを検索する。

対象 : 測定系を選択する。



BG 分析をチェック () すると、対象を BG 測定結果に変更する。

保存フォルダ : 既出の「対象」と連動し、測定系毎のフォルダが切り替わる。「フォルダ..」で変更できる。

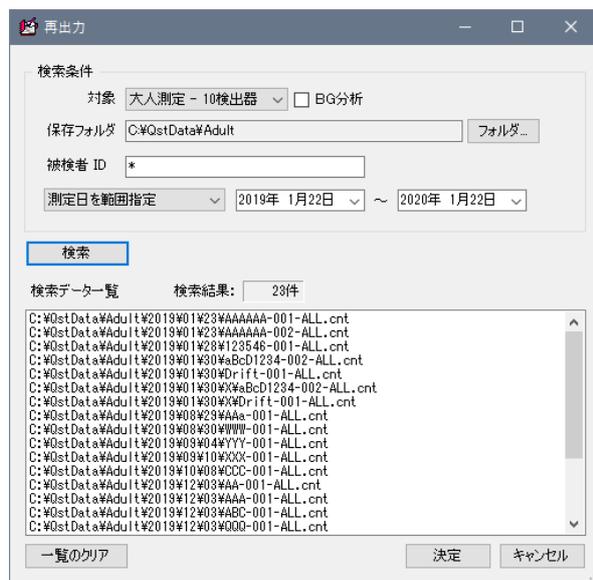
被検者 ID : 被検者識別の ID を入力する (起動時の初期表示は常に '*')。

※ワイルドカード '*', '?' が使用できる。

例) '*' のみの入力 → 全ての被検者, 123?? → 最初の 3 文字が "123" の全ての被検者

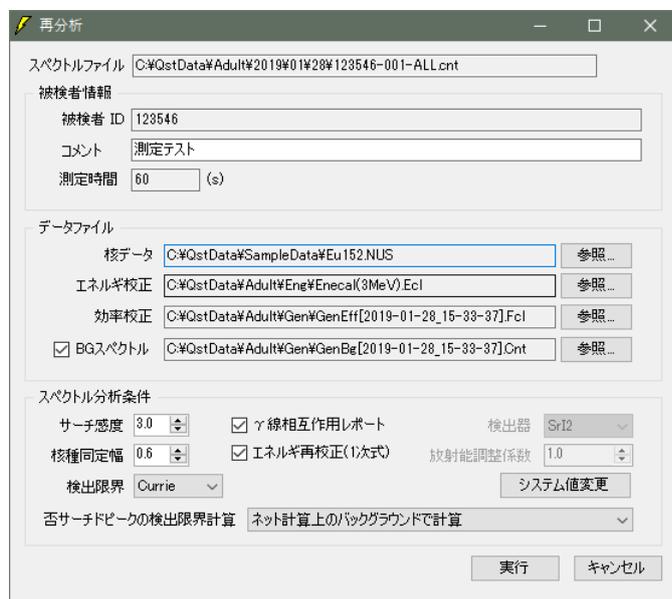
測定日 : 測定日をカレンダー入力する。※測定日は範囲入力できる。

③以上の検索条件を入力して「検索」で条件に合う被検者データを検索する。
 検索条件に合致する測定データがある場合は一覧表示される。



上記は、「大人測定」、「測定日が 2019/01/22～2020/01/22」の条件で検索した結果である。
 被検者が 1 日に何度か測定した場合も全て別のデータとして扱い、検索結果として出力される。

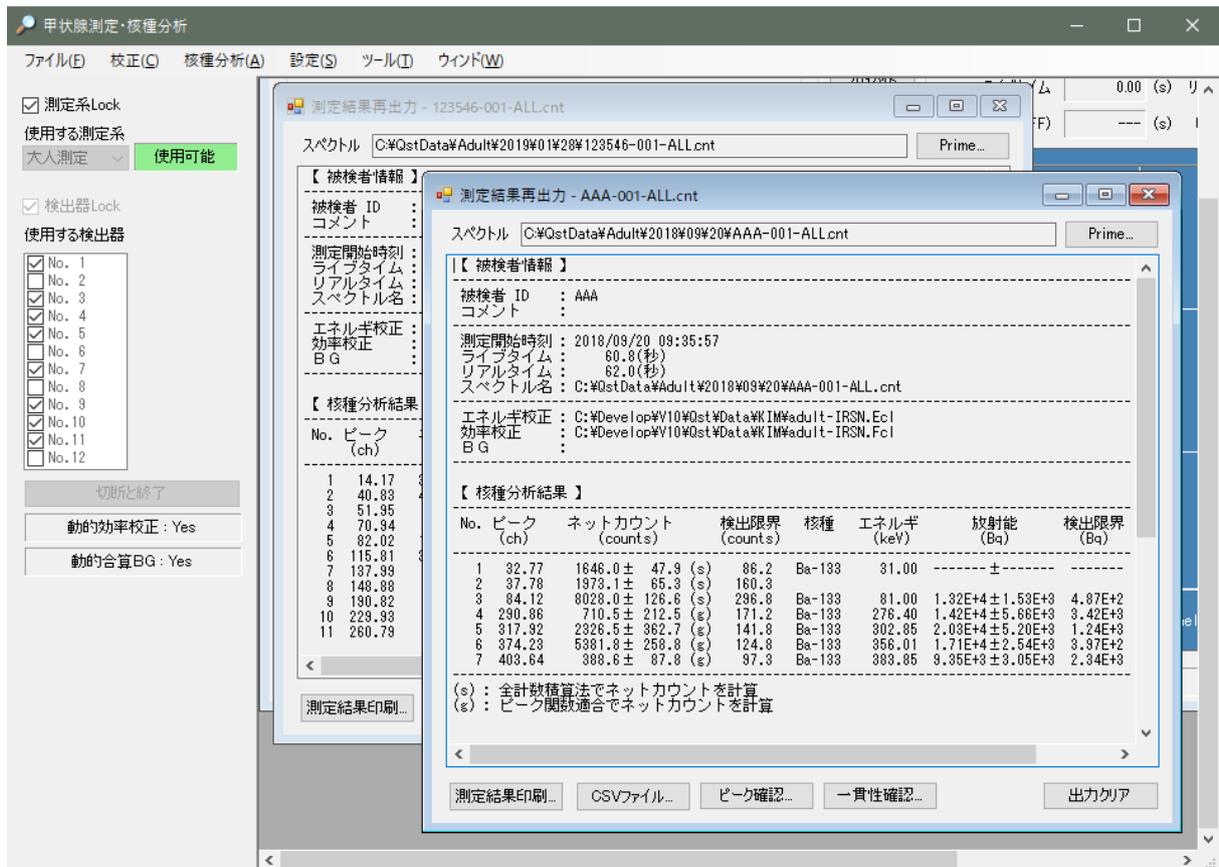
④一覧から測定データを選択し、「決定」で次の条件入力に進む。
 測定データを選択、「決定」すると被検者情報、条件設定画面が起動する。



⑤スペクトルファイル、被検者 ID と測定時間を除いた全ての項目が変更可能で、必要に応じて再設定し、「実行」で再分析する。なお、前回の核種分析結果は今回の核種分析結果によって上書きされるので、必要ならコピー等によってバックアップを行う。
 通常の「被検者測定」と異なり結果出力は別ウィンドになるが機能は同じである。



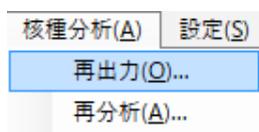
なお、再分析結果は別ウィンドのため、複数の結果を並べて表示できる。



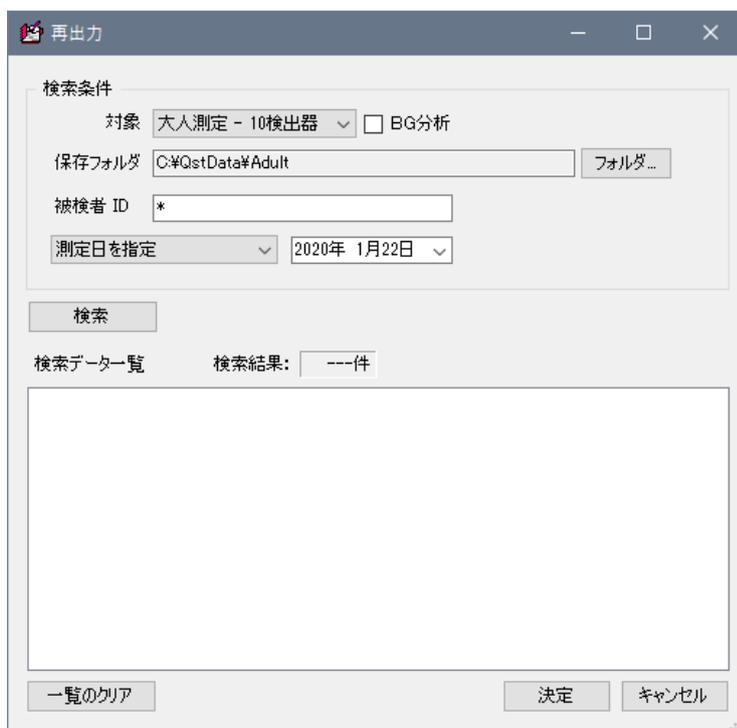
2.6 再出力

測定済みの被検者測定結果を再出力する。

①メニュー「核種分析／再出力」を実行する。

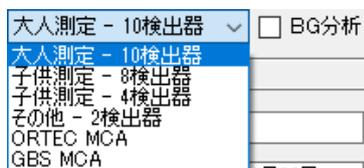


再出力対象を指定する画面が起動する。



②保存フォルダ中のデータファイルから、測定対象、被検者 ID と測定日時でデータを検索する。

対象 : 測定系を選択する。



BG 分析 : チェック()すると、対象を BG 測定結果に変更する。

保存フォルダ : 既出の「対象」と連動し、大人測定用フォルダ、子供測定用フォルダが切り替わる。「フォルダ...」で変更できる。

被検者 ID : 被検者識別の ID を入力する (起動時の初期表示は常に '*')。

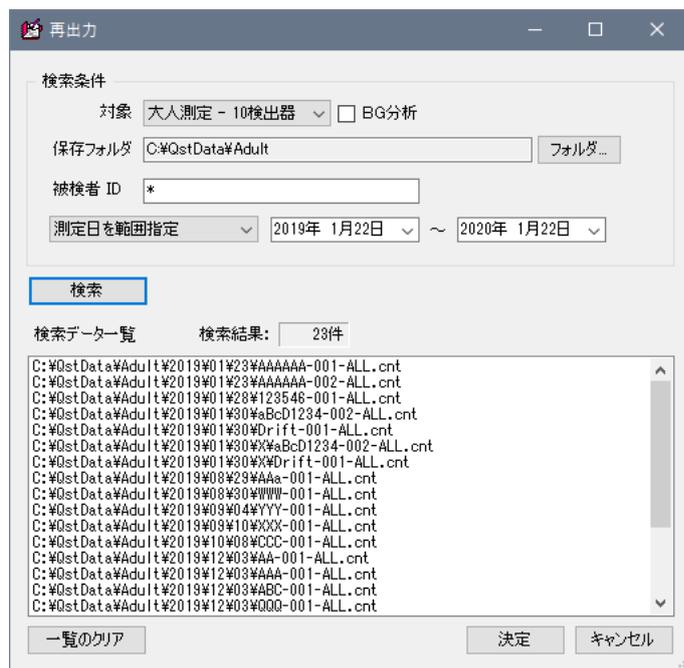
※ワイルドカード '*', '?' が使用できる。

例) '*' のみの入力 → 全ての被検者, 123?? → 最初の 3 文字が"123"の全ての被検者

測定日 : 測定日をカレンダー入力する。 ※測定日は範囲入力ができる。

③②での検索条件で被検者データを検索する。

検索条件に合致する測定データがある場合は一覧表示される。



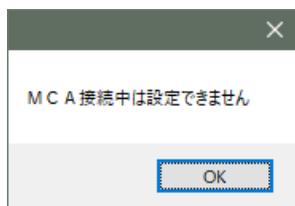
④一覧から測定データを選択し、「決定」で再出力する。

これ以降の操作は「被検者測定」と同一である。なお、選択できる測定データは1件で、再分析同様に別ウィンドが再出力される。再出力も結果を並べての比較表示ができる。



2.6 設定

本ソフトウェアの設定を行う。設定は MCA と切断状態で行う。接続中に設定しようとするると以下のメッセージが出力される。



設定項目は以下の通りである。

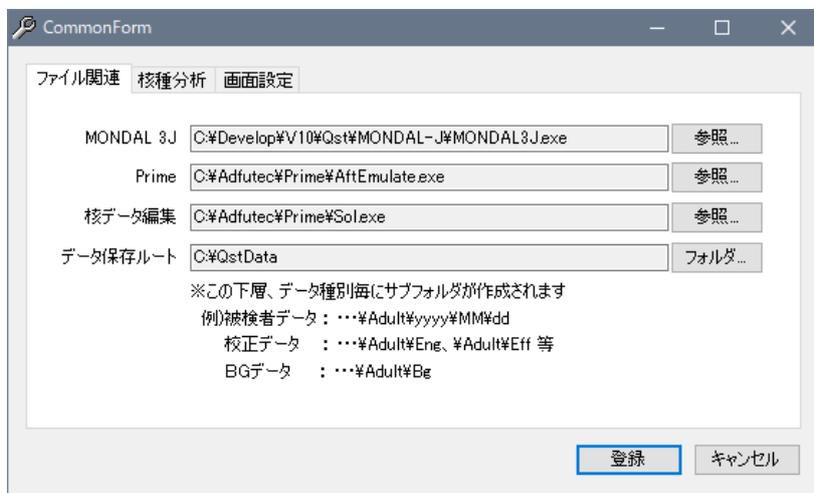
- 全ての測定系で共通の設定
- 「大人測定-10 検出器」専用の設定（一般用測定系）
- 「子供測定-8 検出器」専用の設定（子供用測定系）
- 「子供測定-4 検出器」専用の設定（乳幼児用測定系）
- 「その他-2 検出器」専用の設定
- 「ORTEC MCA」専用の設定
- 「GBS MCA」専用の設定

①共通の設定

メニュー「設定／共通」を実行する。



次の画面が表示される。



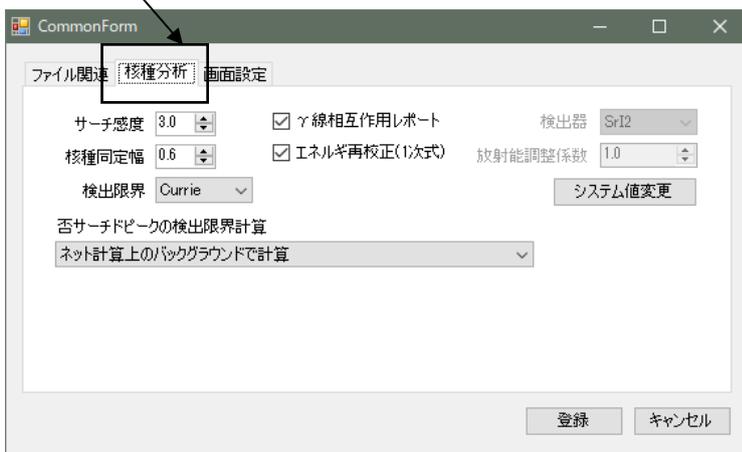
「ファイル関連」

- MONDAL 3J : MONDAL 3J を「参照」で指定する。
- Prime : Prime を「参照」で指定する。
- 核データ編集ソフトウェア : Prime 附属の核データ編集ソフトウェアを「参照」で指定する。
- データ保存ルート : 全てのデータのルートフォルダを指定する。

※全てのデータは以下のフォルダイメージに登録される。

C:\¥##### ユーザ指定のデータ保存"ルート"フォルダ C:\¥QstData 等
---- XXXXX 測定系キーワード
---- yyyy yyyy 年の被検者データフォルダ(この下層に MM¥dd が作られる)
---- Eng エネルギー校正用スペクトルフォルダ
---- Eff 効率校正用スペクトルフォルダ
---- BG BG スペクトルフォルダ
---- Gen 検出器指定時の合算校正データ, 合算バックグラウンドスペクトル
保存フォルダ, 測定系キーワード 「 XXXXX 」は,
・「大人測定-10 検出器」 ... Adult
・「子供測定-8 検出器」 ... Child
・「子供測定-4 検出器」 ... Child4
・「その他-2 検出器」 ... Other
・「ORTEC MCA」 ... ORTEC
・「GBS MCA」 ... GBS
である。

「核種分析」



- サーチ感度 : ピークサーチの検出感度。範囲 = 2.5~10.0
- 核種同定幅 : 核種同定時の許容範囲設定値。範囲 = 0.4~1.0
- 検出限界 : 検出限界指定を Currie と Cooper から選択
- γ線相互作用レポート : チェックすると(☑)γ線と周辺物質との相互作用による"ピーク"がある

かどうかをレポートする。

例) 後方散乱ピークや消滅放射線

エネルギー再校正(一次式) :

チェックすると(☑)スペクトル中の γ 線ピークを使用して再エネルギー校正を試みる。ただし再校正には2本以上の、「一核種で核種同定された、ネット面積が十分な(およそ相対的不確かさ<10%)ピークを使用するため、再エネルギー校正は必ずしも成功するとは限らない。

否サーチドピークの検出限界計算 :

当該核種/ γ 線の検出限界カウン트의計算方法の指定

- ネット計算に従って計算
- ネット計算上のバックグラウンドで計算(初期値)
- 全てをバックグラウンドとみなして計算
- 指定したBGスペクトルで計算(BGスペクトルが指定されていること)

検出器 : 処理スペクトルとして, NaI(Tl)/SrI2/Ge から選択する。これはピークサーチにおける二次微分フィルタ生成のキーになる。しかし本ソフトウェアは SrI2 固定とするため, 変更不能

放射能調整係数 : 核種分析による放射能計算結果に乗じる, 利用者定義係数。本ソフトウェアでは 1.0 固定とし, 変更不能

ピーク面積計算の詳細な設定/変更は「システム値の変更」をクリックする。

システム値変更

常に全計数積算法のネット面積で放射能換算

全計数積算法

全計数積算法の不確かさを厳密に行う

全計数積算法のベース領域を最大で5chまで拡張

ピーク幅(低側) 1.35 × FWHM

ピーク幅(高側) 1.35 × FWHM

ピーク領域を固定して棄却限界、検出限界を計算

ピーク除去レベル < 85% 棄却限界

関数適合

外部不確かさを考慮

放射能不確かさ

系統的不確かさを加味

系統的不確かさ 10.0 (%)

※:放射能には影響しません

登録 キャンセル

◎詳細条件

□常に全計数積算法のネット面積で放射能計算

チェックすると()、全てのピークネット面積を全計数積算法で計算する。

この設定は複数のピークが複合した場合にも適用されるためピークが複合しても関数適合は使用されず、形式的に2ピーク間の midpoint 近傍でピーク領域を分ける"ピーク分割"が実行される。

＜全計数積算法＞専用

□全計数積算法の不確かさ計算を厳密に行う

チェックすると()不確かさの伝搬則に厳密に従う。

アンチェック()すると、この計算をやや簡易に行う(*)。これは、バックグラウンド領域を非常に狭く取らざるを得ない状況下では、計算上の不確かさがむやみに大きくなり過ぎてしまい、目視では十分なピークでも否検出と判定されることを避けることを目的とする設定である。

(*)昭和 47 年度文部科学省指針「NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ機器分析法」

□全計数積算法のベース領域を最大で 5ch まで拡張

全計数積算法で使用するベース領域は初期値では 3ch としている。これを最大で 5ch まで拡張して設定する。ただし拡張の可否は近隣ピークとの関係に依存するため、3ch 以上に拡張できない場合もある。

□ピーク幅(低側)、ピーク幅(高側)

ピーク領域の開始、終了点決定のファクタを指定する (範囲 = 1.0~1.5)

□ピーク領域を固定して棄却限界、検出限界を計算

通常、ネット面積、棄却限界、検出限界計数の計算は上記のピーク幅で指定された値で設定される。ところが近隣にピークが存在する場合は、ピーク領域を少しだけ小さくする(ただし、>1.1)ことで複合扱いが不要になるケースがあり、本ソフトウェアは棄却限界、検出限界計数もこれに連動している。チェックすると()、棄却限界、検出限界計数の計算に使用されるピーク領域は指定されたピーク幅で設定する (従って、ピーク領域と必ずしも一致しない)

□ピーク除去レベル

棄却限界を、95%棄却限界/90%棄却限界/85%棄却限界から選択する。

※それぞれ、第一種の危険率 = 5%, 10%, 15%

＜関数適合＞専用

□外部不確かさを考慮

関数適合で求めたネット面積の不確かさは計数の不確かさだけで計算する(internal error)。

チェックすると()、計数の不確かさ以外にも適合の"良し悪し"を加味する(external error)。

<放射能不確かさ>専用

□系統的不確かさ

チェックすると(☑), %単位で指定された不確かさを加算する。

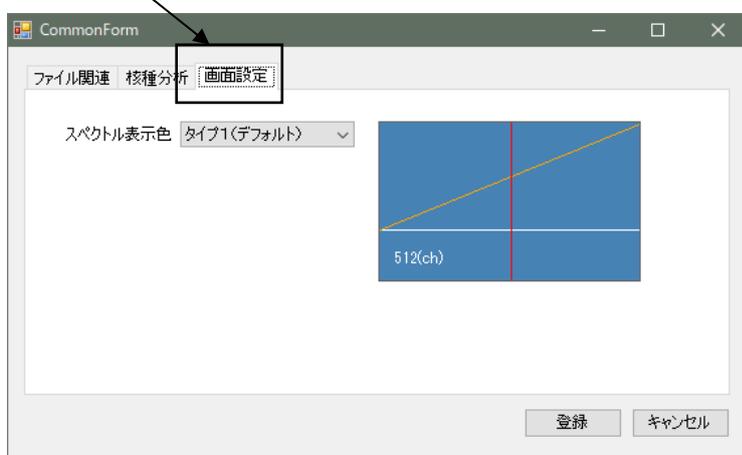
例) 放射能測定で得られた不確かさ = 15%

ユーザ指定された系統的不確かさ = 10%

→ 全体の不確かさ = 15% + 10% = 25%

「登録」で、核種分析だけでなく各種校正でも使用されるシステム値として登録し、分析条件画面に戻る。

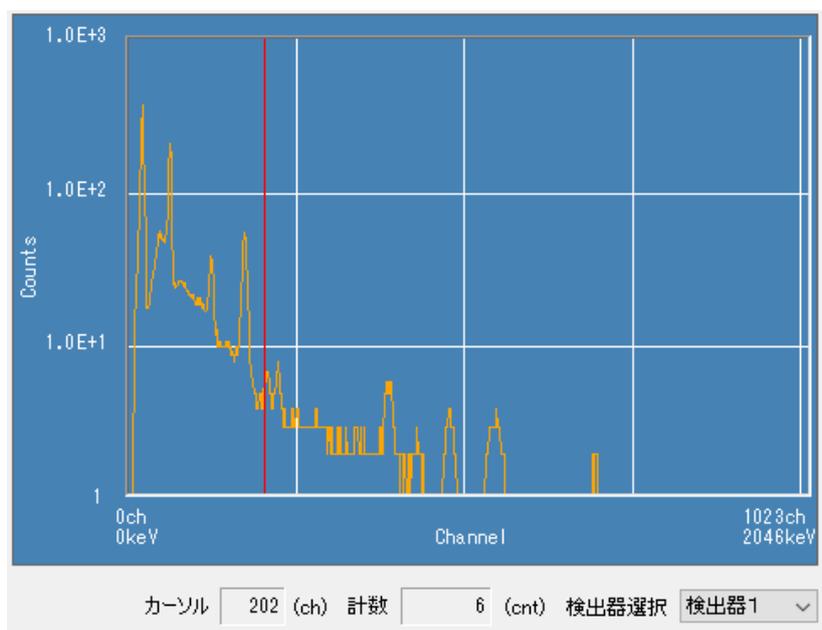
「画面設定」



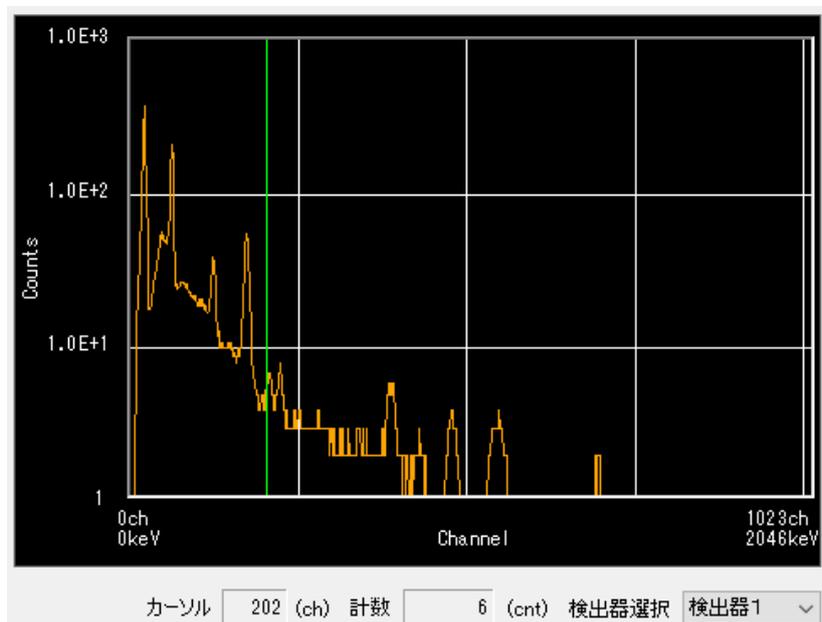
・スペクトル表示色

画面中のスペクトル表示色を選択する。

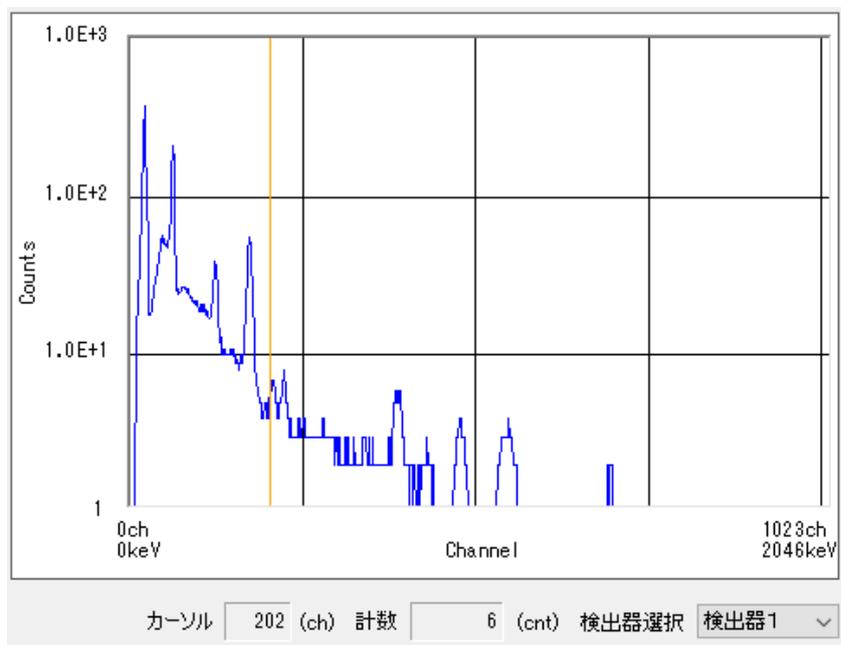
タイプ1：背景色＝青，スペクトル色＝橙，軸スケール値の表示色＝白，カーソル色＝赤



タイプ 2 : 背景色=黒, スペクトル色=橙, 軸スケール値の表示色=白, カーソル色=緑



タイプ 3 : 背景色=白, スペクトル色=青, 軸スケール値の表示色=黒, カーソル色=茶

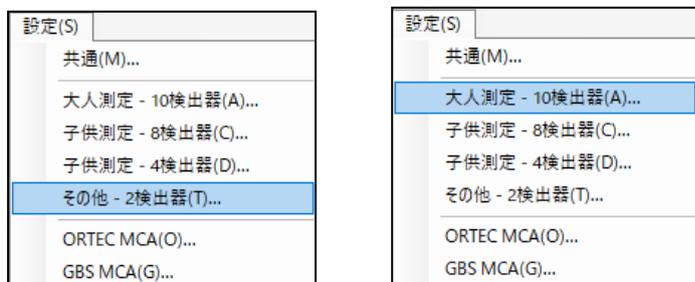


「登録」で、入力した設定値を保存して通常画面に戻り、「キャンセル」で、入力した設定値を破棄して通常画面に戻る。

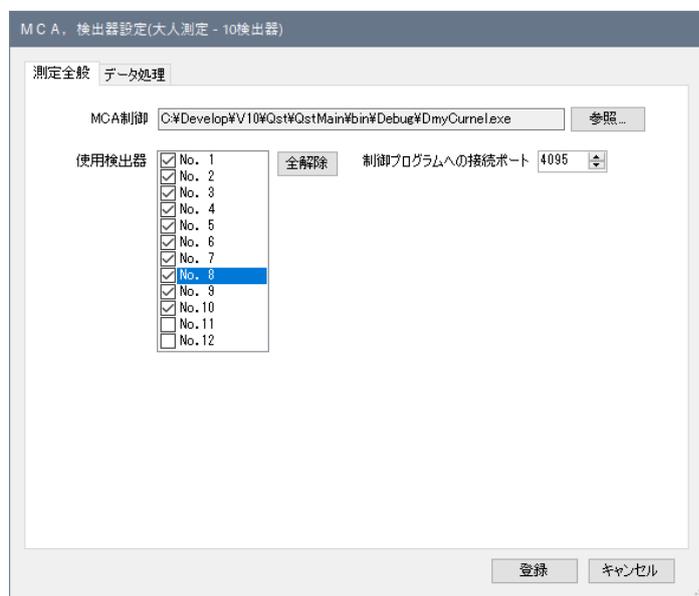
② 大人測定-10 検出器（一般用測定系），その他-2 検出器

※両測定系は共に MCA : 80416 を使用する。検出器の指定数のみ異なる。

メニュー「設定／大人測定-10 検出器」または「設定／その他-2 検出器」を実行する。



次の画面が起動する（画面は「大人測定-10 検出器」）。



MCA 制御：下記の実行ファイルを「参照...」で指定する。

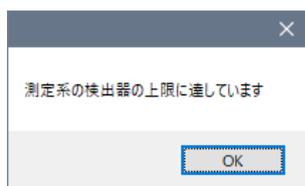
※C:¥Program Files (x86)¥CP¥80416.EXE

制御ソフトウェアへの接続ポート：MCA 制御ソフトウェアと通信するためのポート番号を指定する。もし、本ソフトウェア側だけ設定変更した場合は MCA 制御できなくなる。

これら 2 つの設定は子供測定用と重複しないように設定する必要がある。

使用検出器：測定に使用する検出器をチェックボックスで指定する。「全解除」機能が有効。

※測定系毎に指定できる検出器数の上限を超過すると確認メッセージが出力される。



「データ処理」で、測定に使用するデータファイルを指定する。
この画面は「大人測定 - 10 検出器」の場合である。



測定系固有の情報を指定する。

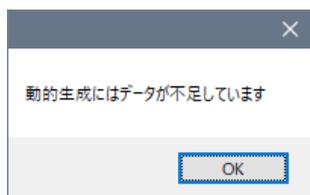
- ・核データ : 核種分析に使用する核データファイル(.Nus)を「参照...」で指定する
- ・エネルギー校正 : 測定系のエネルギー校正ファイル(.Ecl)を「参照...」で指定する
- ・効率校正 : 測定系の効率校正ファイル(.Fcl)を「参照...」で指定する
- ・BG スペクトル : バックグラウンドピーク補正用の BG スペクトルを指定する。
※エネルギー校正, 効率校正, BG スペクトルは何れも通常の検出器数(=10 or 2)で作成されているものとする。

「大人測定-10 検出器」の通常の検出器数は 10 個だが、何らかの理由により特定検出器を使用しないで測定を行う場合、使用する検出器数に応じた、効率校正, BG スペクトルが必要になる。

動的な効率校正／検出器毎のスペクトル :

先に指定した効率校正は合算スペクトル(... #:#####(yyyy-MM-dd)-\$\$\$-ALL.cnt)で作成したもので、合算前の検出器毎のスペクトルファイル(.cnt)を全て指定する。(例:No.1～No.10)。

必要数 (=指定した検出器数) に満たない場合はメッセージが出力される。



動的な効率校正／校正用核データ：

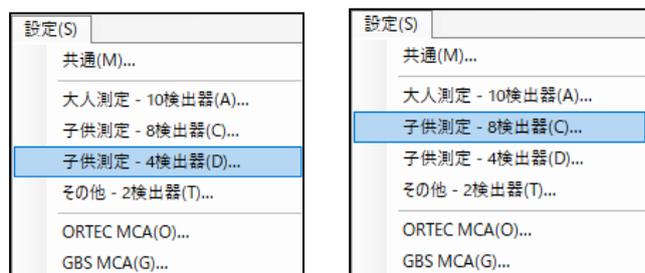
先に指定した効率校正で使用した核データファイル(.Nus)を指定する。

「登録」で保存して、「キャンセル」で入力値を破棄して元の画面に戻る。

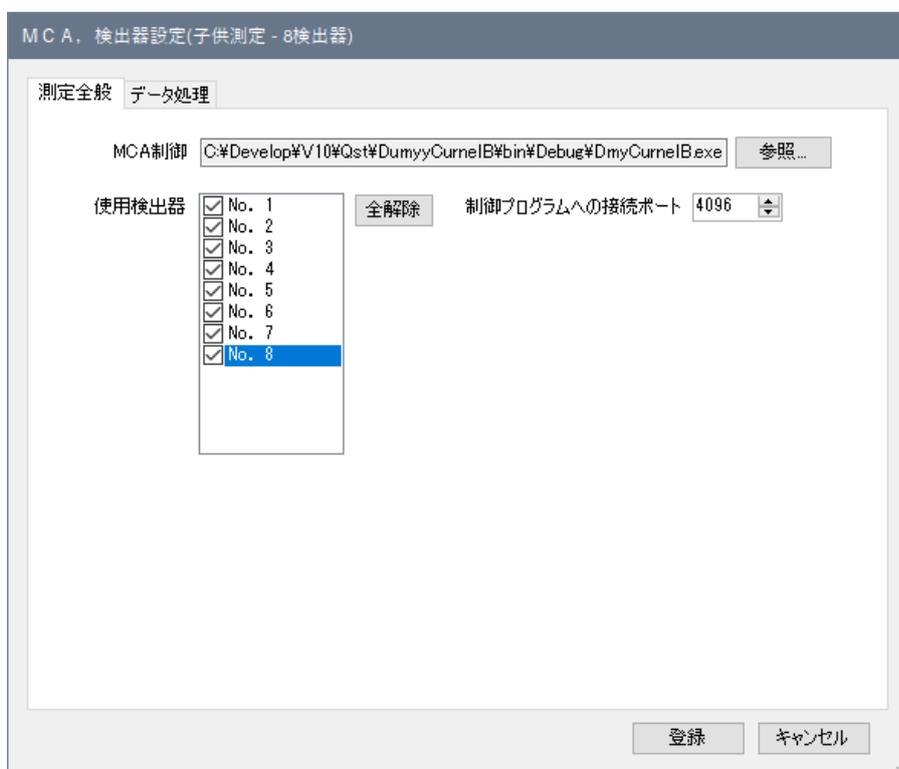
③子供測定-8 検出器（子供用測定系），子供測定-4 検出器（乳幼児用測定系）

子供用測定系は MCA 80406 を使用する。検出器の指定数のみ異なる。

メニュー「設定／子供測定-8 検出器」または「設定／子供測定-4 検出器」を実行する。



次の画面が起動する（画面は「子供測定-8 検出器」の場合）。



MCA 制御：下記の実行ファイルを「参照...」で指定する。

※C:\Program Files (x86)\CP¥80406.EXE

制御ソフトウェアへの接続ポート：MCA 制御ソフトウェアと通信するためのポート番号を指定する。もし、本ソフトウェア側だけ設定変更した場合は MCA 制御できなくなる。

これら 2 つの設定は大人測定-10 検出器，その他-2 検出器と重複しないように設定する必要がある。これ以降の操作は「大人測定 - 10 検出器」，「その他-2 検出器」と同様である。

④ORTEC MCA

メニュー「設定／ORTEC MCA」を実行する。



次の画面が起動する。



MCA 制御：ORTEC 社製 MCA(digiBASE)を制御するための，制御ソフトウェアを「参照...」で指定する。

※C:\Adfutec\Qst\MSR\OrtecCurnel.EXE

検出器名：ORTEC 社製 MCA 検出ソフトウェア(*)で検出，登録する ORTEC 社 MCA の名称を入力する。

(*)C:\Program Files (x86)\Common Files\ORTEC Shared\UMCBI\mcbCon32.EXE

ソフトウェアの操作方法は ORTEC 社 A11-BW の取扱説明書を参照する。

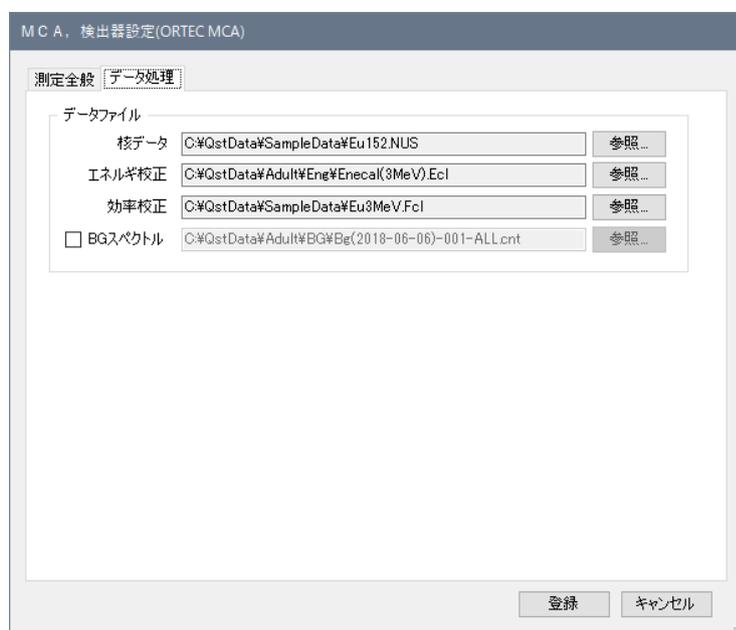
制御ソフトウェアへの接続ポート：

本ソフトウェアと通信するためのポート番号を指定する。

- 設定 : 前回の設定値が表示される。
HV(V) : 定格値を入力する
Fine Gain : 0.4～1.2 の範囲で設定する
Shaping Time(μs) : 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 から選択する
LLD : 0～の値を設定する
ULD : ～1023 の値を設定する

詳しい内容は ORTEC 社 MCA の取扱説明書を参照する。

「データ処理」で、測定に使用するデータファイルを指定する。



測定系固有の情報を指定する。

- ・核データ : 核種分析に使用する核データファイル(.Nus)を「参照...」で指定する
- ・エネルギー校正 : 測定系のエネルギー校正ファイル(.Ecl)を「参照...」で指定する
- ・効率校正 : 測定系の効率校正ファイル(.Fcl)を「参照...」で指定する
- ・BG スペクトル : バックグラウンドピーク補正用の BG スペクトルを指定する。

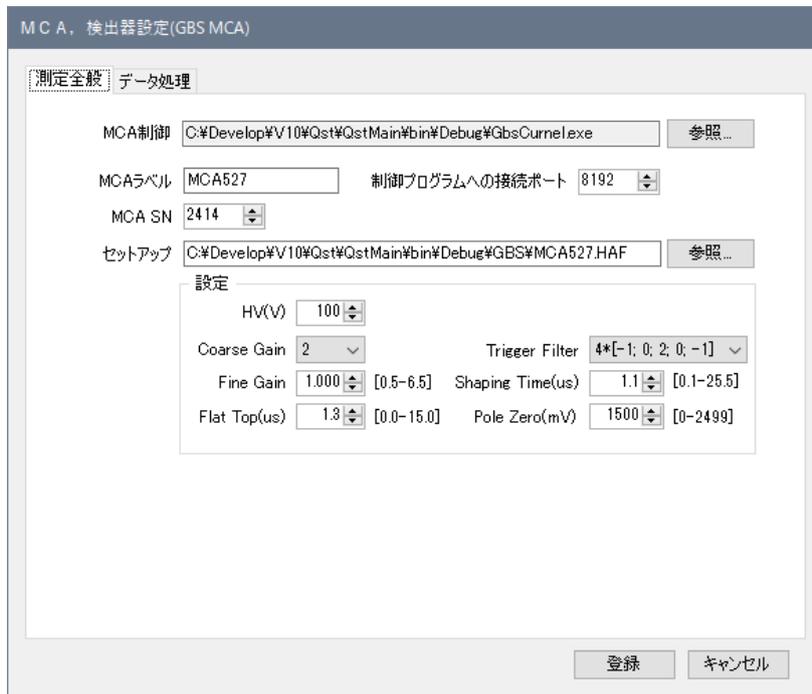
「登録」で保存して、「キャンセル」で入力値を破棄して元の画面に戻る。

⑤ GBS MCA

メニュー「設定／GBS MCA」を実行する。



次の画面が起動する。



MCA 制御 : GBS 社製 MCA(MCA527)を制御するための、制御ソフトウェアを「参照...」で指定する。※C:\¥Adfuteç¥QstMSR¥GbsCurnel.EXE

MCA ラベル : GBS 社製 MCA の名称を登録する(任意名)。

MCA SN : GBS 社製 MCA のシリアル番号を指定する。

制御ソフトウェアへの接続ポート

: 本ソフトウェアと通信するためのポート番号を指定する。

設定 : 前回の設定値が表示される。

HV(V) : 定格値を入力する

Coarse Gain : 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 から選択する

Fine Gain : 0.5～6.5 の範囲で設定する

Trigger Filter : 「-1;0;2;0;-1」, 4* 「-1;0;2;0;-1」 から選択する

Shaping Time(ms) : 0.1～25.5 の範囲で設定する

Flat Top : 0.0～15.0 の範囲で設定する

Pole Zero : 0～2499 の範囲で設定する

詳しい内容は GBS 社 MCA の取扱説明書を参照する。

タブ「データ処理」で、測定に使用するデータファイルを指定する。

項目	ファイルパス	操作
核データ	C:\QstData\SampleData\Eu152.NUS	参照...
エネルギー校正	C:\QstData\Adult\Eng\Eneca(3MeV).Ecl	参照...
効率校正	C:\QstData\SampleData\Eu3MeV.Fcl	参照...
<input type="checkbox"/> BGスペクトル	C:\QstData\Adult\BG\Bg(2018-06-06)-001-ALL.cnt	参照...

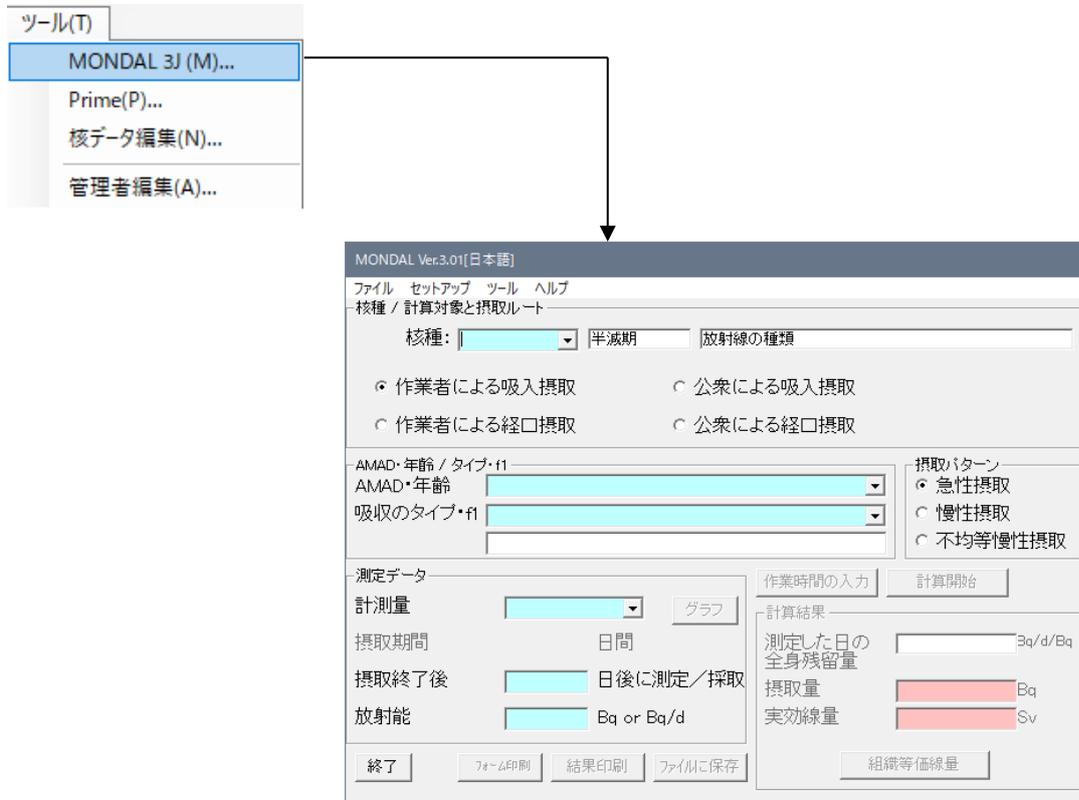
測定系固有の情報を指定する。

- ・核データ : 核種分析に使用する核データファイル(.Nus)を「参照...」で指定する
- ・エネルギー校正 : 測定系のエネルギー校正ファイル(.Ecl)を「参照...」で指定する
- ・効率校正 : 測定系の効率校正ファイル(.Fcl)を「参照...」で指定する
- ・BG スペクトル : バックグラウンドピーク補正用の BG スペクトルを指定する。

「登録」で保存して、「キャンセル」で入力値を破棄して元の画面に戻る。

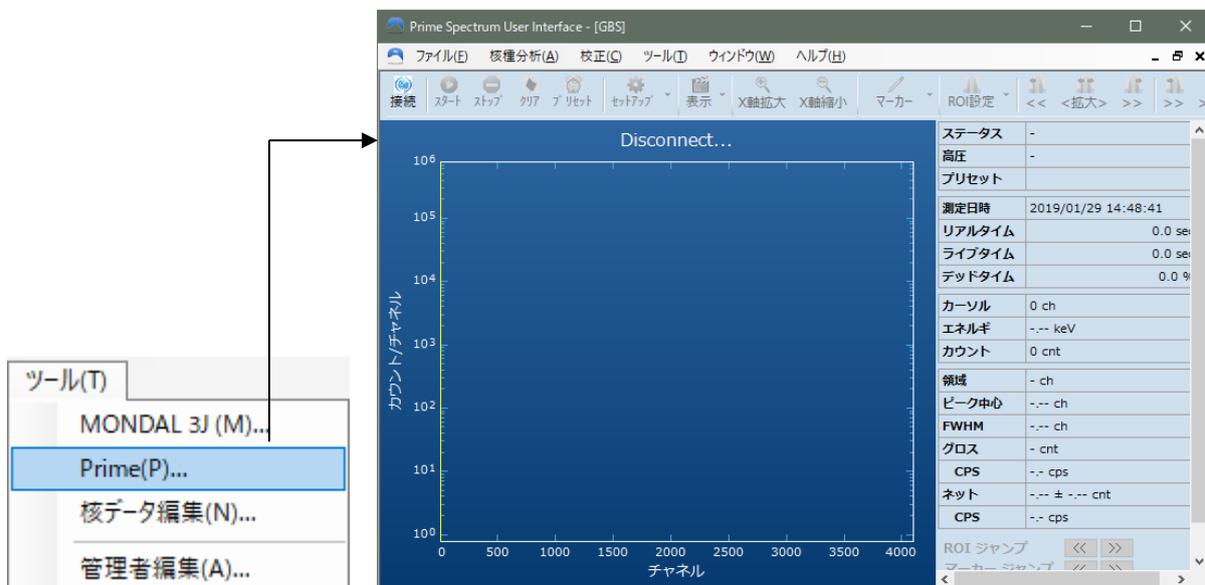
2.7 ツール

①メニュー「ツール／MONDAL-3J」で、MONDAL が起動する。



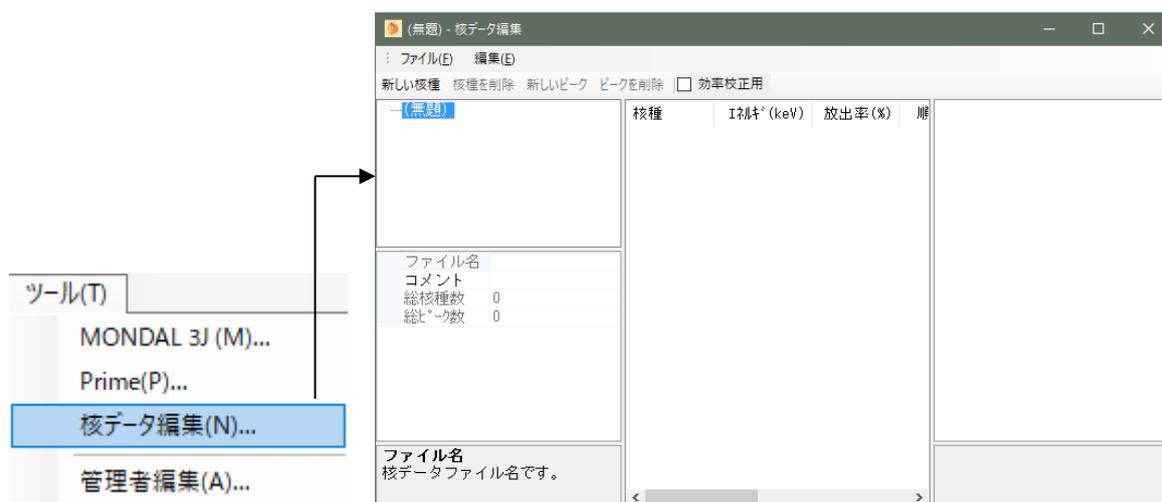
MONDAL の操作方法は MONDAL の取扱説明書を参照する。

②メニュー「ツール／Prime」で、Prime が起動する。



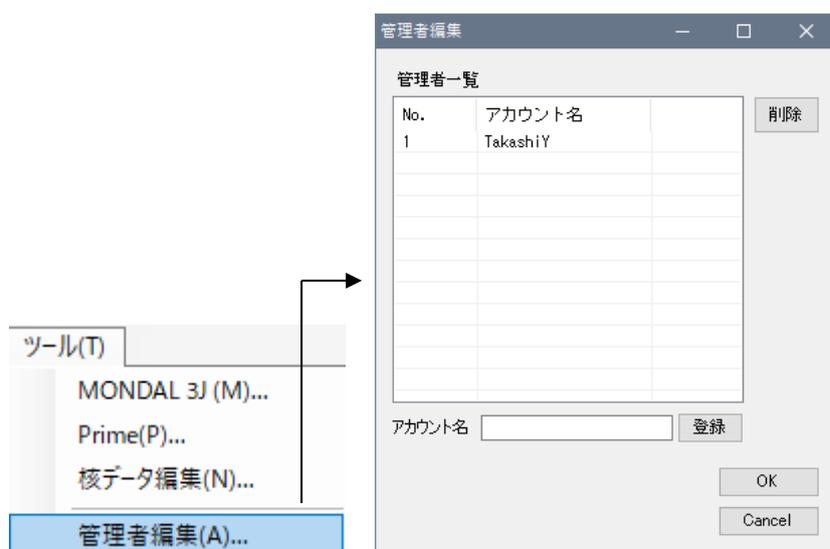
Prime の操作方法は Prime の取扱説明書を参照する。

③メニュー「ツール／核データ編集」で、標準ソフトウェア 核データ編集が起動する。



操作方法は Prime の核データ編集ソフトウェアの取扱説明書を参照する。

④メニュー「ツール／管理者編集」で、本ソフトウェアの管理者編集機能が起動する。



ここで事前に「管理者」の Login アカウント名を登録して置く。

登録された管理者は本ソフトウェアの全ての機能が使用できるが、それ以外のアカウントで Login したユーザは「現場担当者」としてルーチンモードでの使用となり、通常の測定は実行可能だが、各種校正や MCA 設定が制限される。

アカウント名 : Login アカウント名を入力する

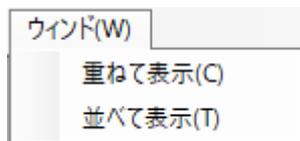
「登録」 : 入力したアカウントを管理者として登録する。

「OK」 : 管理者情報を登録して元の画面に戻る

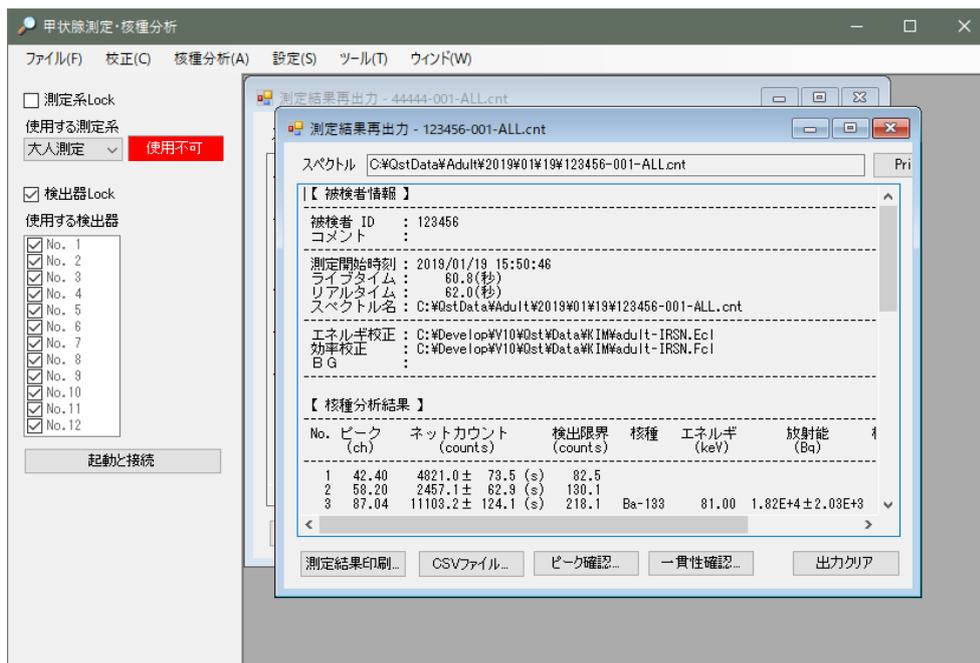
「Cancel」 : 入力した管理者情報を破棄して元の画面に戻る

2.8 ウィンド

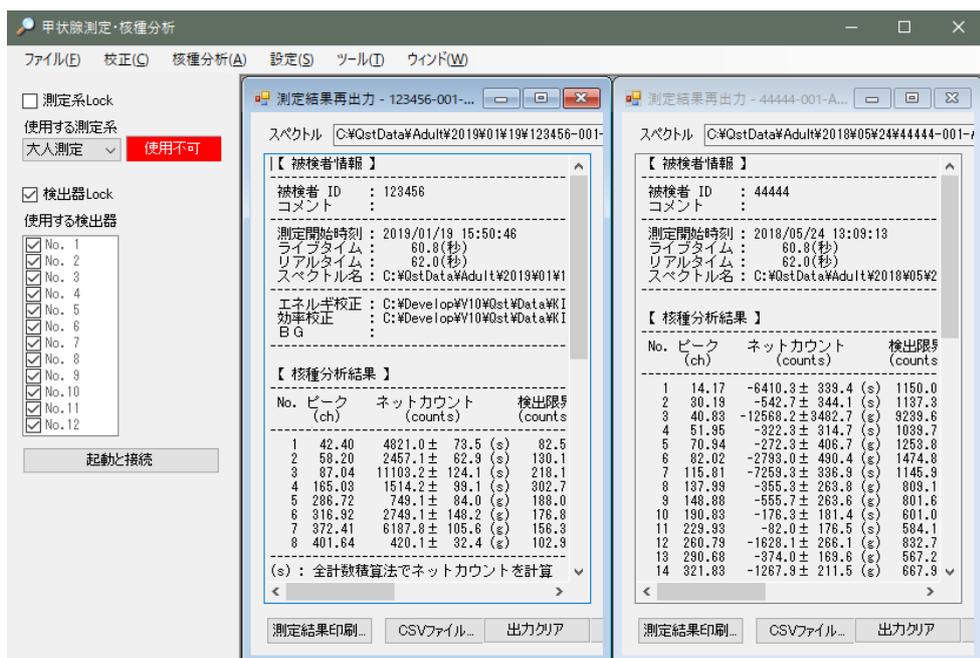
本ソフトウェアは複数のウィンド表示が可能な MDI (MultiDocument Interface) で、複数の Window を同時表示している場合は整列表示できる。



重ねて表示



並べて表示



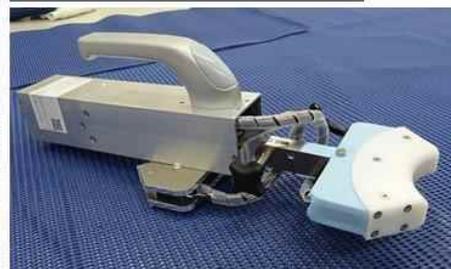
新甲状腺モニタ簡易使用法



新甲状腺モニタ: 子供(乳幼児)用

子供検査時、測定対象の年齢に合わせて設定

乳幼児用 ⇒ ① 1段4配列



子供用 ⇒ ①+② 2段4配列



新甲状腺モニタ: 一般用



2段5配列



アーム式支持機構への固定例

測定対象：一般用（中高生以上）



新甲状腺モニター式



制御用パソコン

接続用
USBケーブル
(mini-B type)

新甲状腺モニタ



新甲状腺モニタ簡易使用法

1. 制御用パソコンと新甲状腺モニタを接続用USBケーブルでつなぐ。



- ①USB(A)オスを制御用パソコンのUSBポートに差し込む



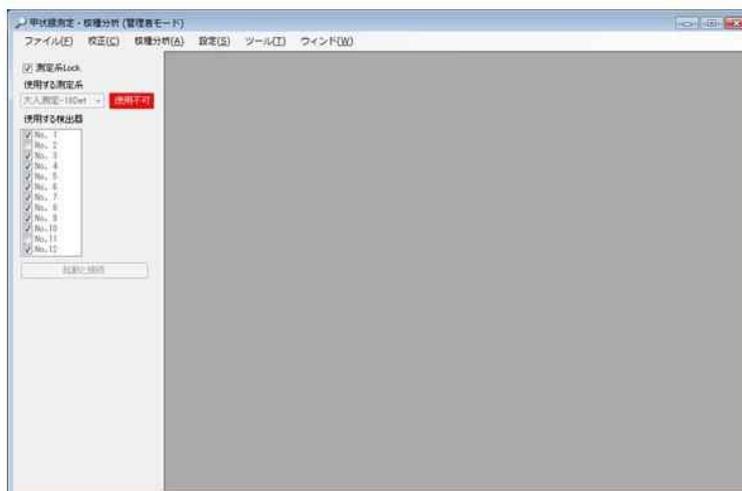
- ②USB(mini-B)オスを甲状腺モニタの信号処理ユニットのUSBポートに差し込む



新甲状腺モニタ簡易使用法

2. 新甲状腺モニタ制御用ソフトウェアを起動する。

- ディスプレイ上のアイコン、甲状腺モニタをダブルクリックする。



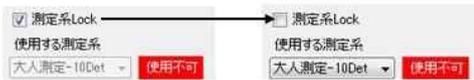
起動したソフトウェアのメイン画面



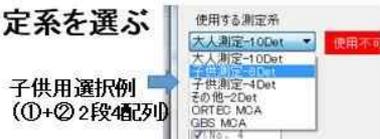
新甲状腺モニタ簡易使用法

3. 甲状腺モニタ制御用MCAを起動する。

①測定系Lockを外す(アンチェック)



②使用する測定系を選ぶ



③起動と接続ボタンをクリックする



- MCA制御ソフトウェア(80406)が起動し、以降、測定が可能になる。なお、MCA起動後はインタロックが有効(“測定系Lock”と“検出器Lock”が☑)になり、使用する測定系の選択、起動と接続機能が無効になる。



新甲状腺モニタ簡易使用法

起動と接続ボタンをクリックすると

- MCA制御用ソフトウェア(80406又は80416)が起動される。



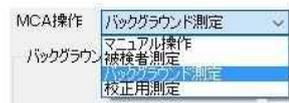
- 高圧印加後、しばらくの間は検出器の出力信号が不安定なため、信号が安定するまで**30分程度のウォームアップ時間を設ける。**



新甲状腺モニタ簡易使用法

4. バックグラウンド(BG)測定を行う。

①コンボボックス“MCA操作”で「バックグラウンド測定」を選択する



②バックグラウンド測定時間等を入力する。



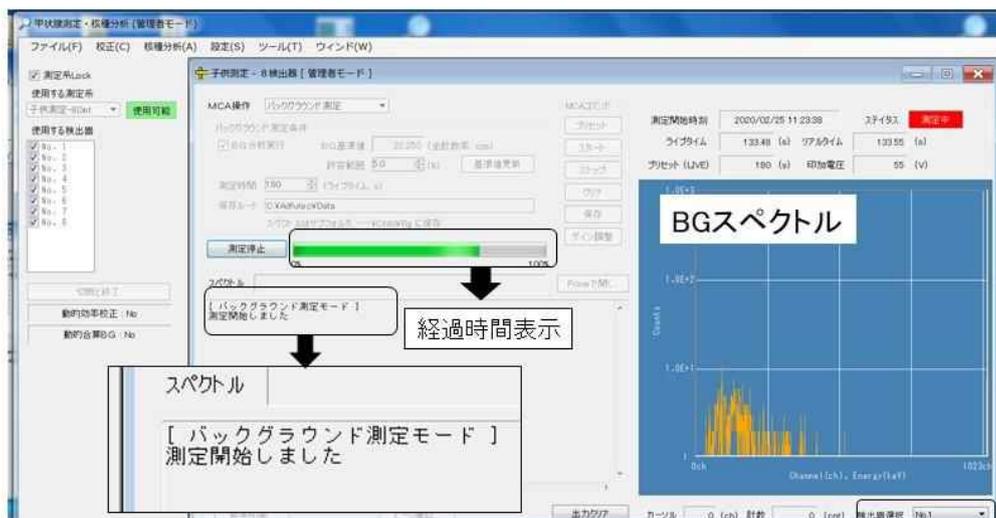
③「測定開始」ボタンを押して、測定開始する。



新甲状腺モニタ簡易使用法

BG測定を開始すると

- 下記のBG測定中画面が表示される。
- 測定中はソフトウェアの終了ができないため、ソフトウェアを終了したい場合は測定停止してからソフトウェアを終了すること。



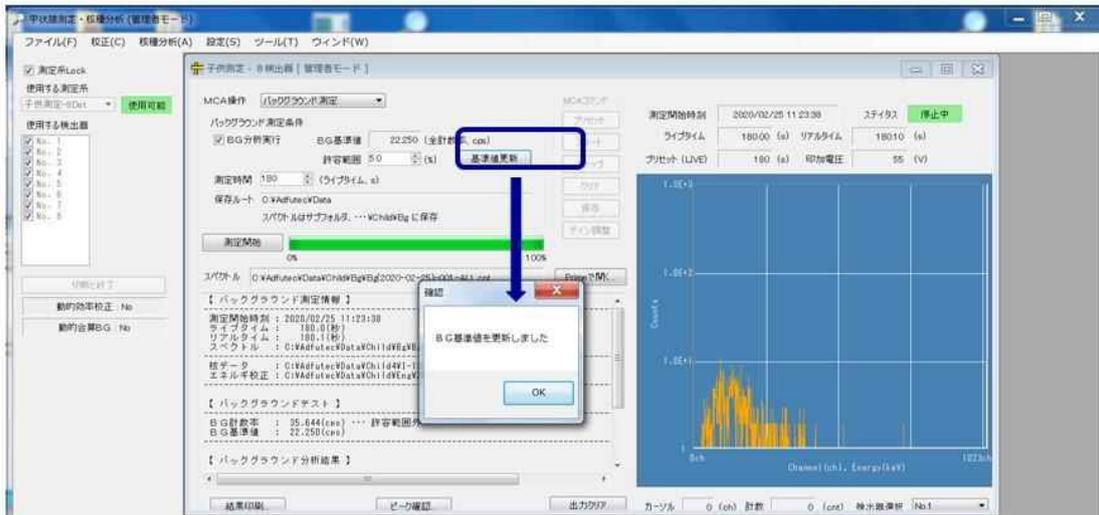
No.1 検出素子からのスペクトルを示す。検出器選択で「合算」を選ぶと8個の検出素子からのスペクトルが合算されたスペクトルが表示される。



新甲状腺モニタ簡易使用法

BG測定が終了すると

- 下記のBG終了後画面が表示される。
- BG測定結果を更新したい場合は、「基準値更新」ボタンをクリックする。



新甲状腺モニタ簡易使用法

5. 被検者の甲状腺測定を行う。

- ① コンボボックス“MCA操作”で「被検者測定」を選択する。MCA操作
 - 被検者測定
 - マニュアル操作
 - バックグラウンド測定
 - 校正用測定



- ② 被検者測定の入力する



- 被検者のIDは、測定結果を保存するファイル名になる。
(*/?*?*<>文字はファイル名として使用できない。)

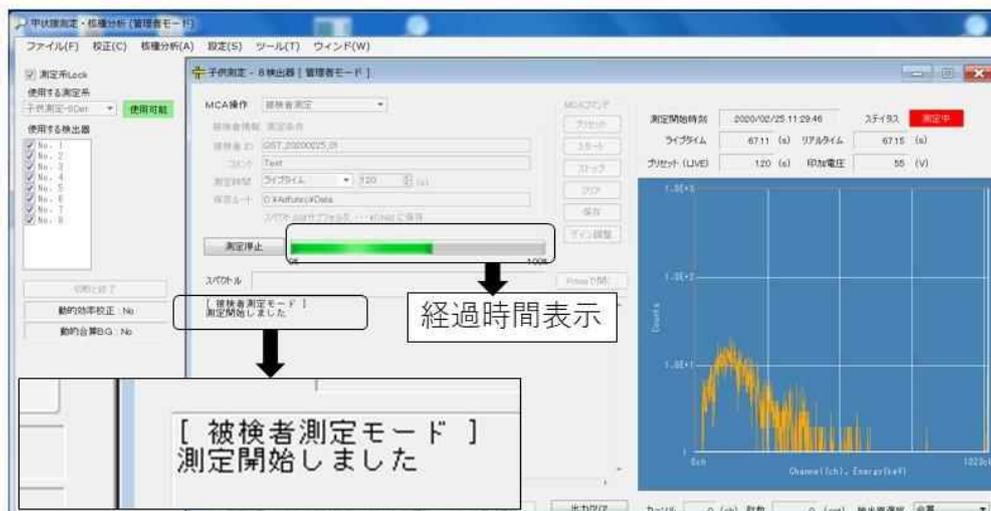
- ③ 「測定開始」ボタンを押して、測定開始する。



新甲状腺モニタ簡易使用法

被検者測定を開始すると

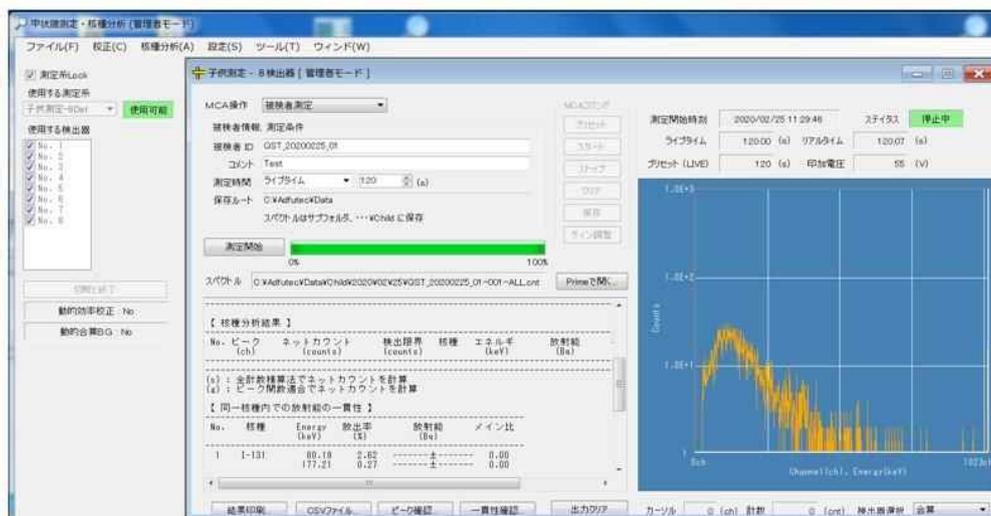
- 下記の測定モードが表示される。
- 測定途中で測定を停止すると測定データは保存されない。



新甲状腺モニタ簡易使用法

被検者測定が終了すると

- 測定データは保存ルートの下層に自動的に保存され、合算スペクトルに対して核種分析結果が下記のようにメイン画面に表示される。



新甲状腺モニタ簡易使用法

被検者測定結果の見方

被検者情報

- ID及び測定時間が確認できる。

ファイル名

- 測定データは自動保存される。
- 保存ルート及びファイル名が確認できる。

核種分析結果

核種が確認されていない例

もし、核種が確認された場合

- 核種及び放射能(Bq)が表示される。

「Primeで開く」でスペクトル確認及び解析可能

スペクトル表示

- 検出素子毎及び合算のスペクトル表示

QST

新甲状腺モニタ簡易使用法

6. 使用する測定系を変更する場合

①測定系Lockを外す(アンチェック)



②「切断と終了」ボタンをクリックする



③測定系Lockがアンチェック表示になっていることを確認してから使用する測定系を選択する。



④「起動と接続」ボタンをクリックする



- MCA制御用ソフトウェア(80406又は80416)が自動に起動される。



新甲状腺モニタ簡易使用法

7. 新甲状腺モニタの電源を落とす

①測定系Lockを外す(アンチェック)



②「切断と終了」ボタンをクリックする



③メイン画面の左上「×」を押して制御用ソフトウェアを終了する。



- MCA制御用ソフトウェアを終了(①、②)してからソフトウェア(③)を終了する。



新甲状腺モニタ簡易使用法

参考

基本となる測定体位

子供測定の場合

- 2歳未満: 母親が抱きかかえて測定
- 2~5歳: 椅子に座らせるかベットに寝かせて測定
- 5歳以上: 椅子に座って測定



一般人測定の場合



支持機構がない場合



支持機構に固定した場合



E 情報収集支援システム取扱説明書

本システムが想定している動作環境を表 1 に示す。

表 1 動作環境

分類	構成
OS	October 2018 Update (バージョン 1809) 以降のアップデートを適用した, 64bit 版 Windows10 Pro
CPU	第 6 世代 Intel Core i5 以降のプロセッサ
メモリ	8GB 以上
ハードディスク	1TB 以上
ディスプレイ	XGA (1024×768) 以上の解像度
ネットワーク	100BASE-TX 以上に対応したネットワーク環境

1. セットアップ

1.1 情報収集支援システムのセットアップ

セットアップディスク内の「¥Setup¥DataCollectionSupportApp」フォルダの「Setup.exe」(図1)をダブルクリックすると、セットアップウィザードソフトウェアが起動する。



図1 Setup.exe

セットアップウィザード(図2)の指示に従って、PCへインストールする。

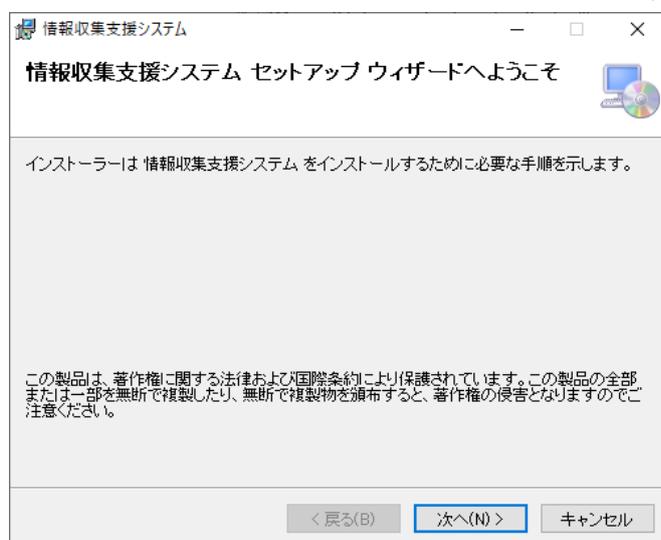


図2 セットアップウィザード

インストール終了後は、デスクトップとスタートメニューに「情報収集支援システム」のショートカット(図3)が登録される。



図3 情報収集支援システムのショートカット

記録カード

本システムの入力画面は、原子力事故において受検者が記入する避難者検査記録カード(4.4 情報収集支援システム 図30 避難者検査記録カード)を元に、入力者が違和感なく作業できるようにデザインされている。

1.2 情報収集支援システム管理者ツールのセットアップ

セットアップディスク内の「¥Setup¥DcsaAdministrator」フォルダの「Setup.exe」(図 4) をダブルクリックすると、セットアップウィザードソフトウェアが起動する。



setup.exe

図 4 Setup.exe

セットアップウィザード(図 5)の指示に従って、PCへインストールする。

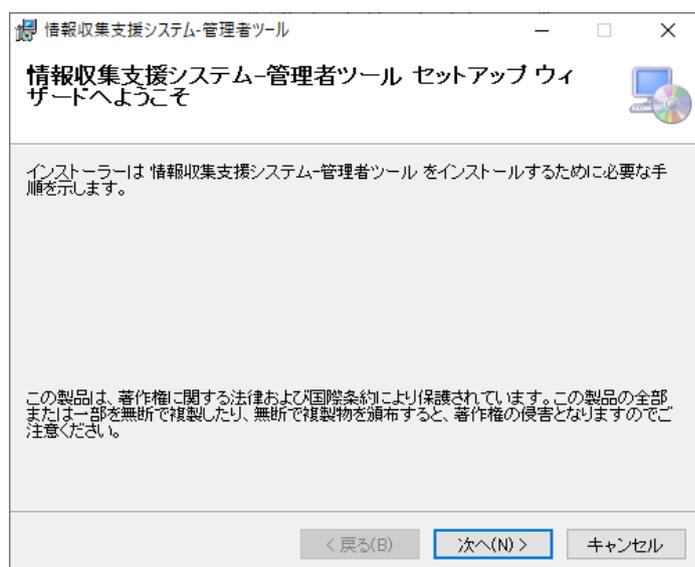


図 5 セットアップウィザード

インストール終了後は、デスクトップとスタートメニューに「情報収集支援システム-管理者ツール」のショートカット(図 6)が登録される。



図 6 情報収集支援システム-管理者ツールのショートカット

1.3 メイン画面

メイン画面の機能について解説する。

本システムを起動すると、最初にユーザーID とパスワードの入力を促す画面（図 7）が表示される。表 2 に示すユーザー名とパスワードでログインする。また、ログインするユーザーにより、使用できる機能に違いがある（表 3）。



図 7 メイン画面（ログイン）

表 2 ユーザー情報

権限	ユーザーID	パスワード
管理者	admin01	admin01
入力者	user01	user01

表 3 使用できる機能の違い

機能	管理者	入力者
入力	○	○
閲覧	○	個人識別 ID の検索のみ
編集	○	○
削除	○	
出力	○	
入力候補リストの更新	○	

ログインに成功するとメインメニューが表示される。

管理者権限を持ったユーザーがログインしたときは、全てのボタンが有効になり（図 8）。管理者権限を持たないユーザー（入力者）がログインしたときは、管理機能は使用不可能になる（図 9）。



図 8 メイン画面（管理者）



図 9 メイン画面（入力者）

1.4 受検者情報一覧画面

メイン画面において、「閲覧・修正ボタン」を押すと、受検者情報一覧画面に切り替わる。この画面では、登録している受検者情報の検索や編集対象データへ選択を行うことができる。管理者権限のユーザーは全機能が使用できるが、一般権限ユーザーでは、機能が制限される。(表 4)

表 4 ユーザー権限別の使用可能機能

機能	機能の概要	管理者権限	一般権限
戻る	メインメニューに画面に戻る。	○	○
新規登録	新規登録を行う。	○	○
検索	登録済みの受検者データを検索する。	○	機能制限有り
編集	登録済みの受検者データを編集する。	○	○
出力	一覧表に表示しているユーザーを CSV ファイルへ出力する。	○	-
削除	選択したユーザー情報と関連情報を削除する。	○	-

①メイン画面に戻る

「戻るボタン」(図 10) を押すと、メイン画面 (図 8 又は図 9) に戻ることができる。



図 10 戻るボタン

②受検者情報の新規登録

受検者情報の新規登録を行うときは、「新規登録ボタン」(図 11) を押す。ボタンを押すと画面が「受検者情報入力画面」に切り替わる。



図 11 新規登録ボタン

③受検者情報の検索

「検索ボックス」に単語を入力し「検索ボタン」(図 12) を押すと、入力した単語を含んだ受検

者情報を検索し、該当する情報を一覧表に表示する。

管理者権限を持ったユーザーが検索を行った場合、「個人識別 ID」、「氏名」、「ふりがな」、「住所」の4項目を対象に、入力した単語を全て含んだ情報の絞り込み検索を行う（図 13）。

入力者権限を持ったユーザーが検索を行った場合、「個人識別 ID」のみが検索対象になり、完全一致したデータのみを表示する（図 14）。



図 12 検索ボックスと検索ボタン



図 13 管理者ユーザーの検索



図 14 入力者ユーザーの検索

④受検者情報の編集ボタン

受検者情報の右端にある、「編集ボタン」（図 15）を押すと受検者情報の編集画面に移動する。



図 15 編集ボタン

⑤受検者情報の出力

「チェックボックス」をいずれか1つ以上のデータを選択した状態で「出力ボタン」(図 16)を押すと、チェックした受検者情報の測定結果データや避難情報データを、MONDAL の線量評価ツールの入力情報 (CSV ファイル) として一括出力する。この機能は管理者権限を持ったユーザーのみが使用できる。



図 16 チェックボックスと出力ボタン

⑥受検者情報の削除

「チェックボックス」をいずれか1つ以上のデータを選択した状態で「削除ボタン」(図17)を押すと、チェックした受検者情報と関連するデータを一括削除する。この機能は管理者権限を持ったユーザーのみが使用できる。



図17 チェックボックスと削除ボタン

1.5 受検者情報入力画面

メイン画面の「新規登録ボタン」、受検者情報一覧画面の「新規登録ボタン」、「編集ボタン」を押すと、受検者情報入力画面に切り替わる。

この画面では受検者情報の入力・確認を行うことができる。

①メイン画面，一覧画面に戻る

「戻るボタン」(図18)を押すと、メイン画面または受検者情報一覧画面に戻る。



図18 戻るボタン

②保存

「保存ボタン」(図19)を押すか、ショートカットキー (Ctrl+S キー) で、入力した情報をデータベースへ保存する。



図 19 保存ボタン

③出力

「出力ボタン」(図 20) を押すと、表示中の情報を MONDAL の線量評価ツールの入力情報 (CSV ファイル) として出力する。この機能は管理者権限を持ったユーザーのみが使用できる。



図 20 出力ボタン

④ハイパーリンク

各項目へのハイパーリンクをクリックすると、各項目が表示される位置まで自動スクロールする。(図 21)



図 21 ハイパーリンク

⑤日付・時間の入力

「作成日」、「生年月日」等の日付を入力する項目は西暦で表示される。和暦で入力した場合、西暦に変換され表示される。(図 22)

図 22 日付・時間の入力項目

⑥選択項目

「性別」、「表面汚染の有無」等の複数の選択肢から選択する入力項目は、“未記入”および“判読不可”の選択肢が追加される。(図 23)

図 23 「性別」から選択する入力項目

⑦受検者登録情報

検査記録カードの「1.受検者登録情報」の項目を入力する(図 24)。

「氏名」: 氏名を入力すると、「ふりがな」が自動で入力される。

「測定時の年齢」: 「誕生日」と「作成日」から「測定時の年齢」が自動計算される。

年齢は、乳幼児の測定結果に対応するため“〇歳〇ヶ月”のように月まで表示される。

図 24 受検者登録情報

⑧検査結果

検査記録カードの「2. 受検者登録情報」の項目を入力する(図 25, 図 27)。

- 「測定器名」、「測定員」、「記録員」: 入力候補に無い名前が入力されると、保存時に新規の入力候補としてデータベースへ登録される。
- 人体図: 人体図のクリックした位置に番号が付き、測定値の一覧表に表面汚染の測定値(グロス値)を入力する。また、クリックした位置(図 26 エラー! 参照元が見つかりません。)によって、グループ分け(表 4)が行われる。
- 測定値の一覧: 人体図と連動し、測定値(グロス値)を入力する。ネット値は、“グロス値 - バックグラウンド(BG)値”の計算結果が表示される。入力した部位を削除したいときは Delete キーを押す。
- PDF ファイル: 添付ファイルとして、PDF ファイルをデータベースに保存することができる。

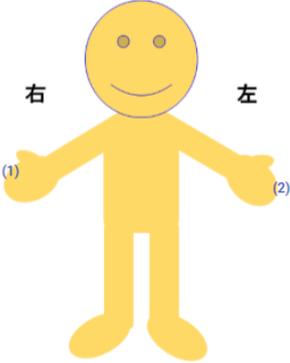
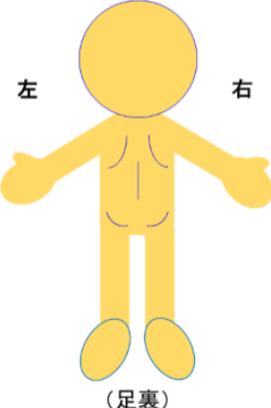
2. 検査結果

体表面汚染検査

① 測定器名: GMサーベイ 測定員: 栗原 記録員: 矢島

管理番号: _____

バックグラウンド (BG): 150 cpm 測定場所の空間線量率: _____ μSv/h

② 前面:  背面:  ③

名称	部位	グロス[cpm]	Net [cpm]
(1)	右手 (掌)	500	350
(2)	左手 (掌)	500	350

④ PDFファイル: PDF ファイルを選択してください。

図 25 検査結果 (体表面汚染)

表 4 部位グループ

図	No.	部位グループ	図	No.	部位グループ		
前面図	1	頭部	背面図	19	後頭部		
	2	目					
	3	右耳					
	4	左耳					
	5	鼻・口					
	6	首					
	7	胸部					
	8	右腕					
	9	左腕					
	10	右手 (甲)					
	11	左手 (甲)					
	12	腹部					
	13	右足 (膝上)					
	14	左足 (膝上)					
	15	右足 (膝下)					
	16	左足 (膝下)					
	17	右足 (甲)				20	胸部 (裏)
	18	左足 (甲)				21	右腕 (裏)
		22	左腕 (裏)				
		23	右手 (掌)				
		24	左手 (掌)				
		25	腹部 (裏)				
		26	右足 (裏・膝上)				
		27	左足 (裏・膝上)				
		28	右足 (裏・膝下)				
		29	左足 (裏・膝下)				
		30	右足 (裏)				
		31	左足 (裏)				

前面

背面

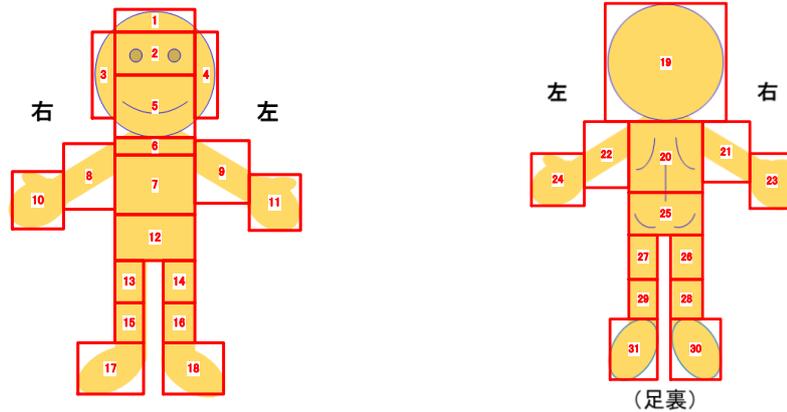


図 26 部位グループ

- NaI サーベイメータ測定による甲状腺検査の結果入力：「A.大腿部 (BG)」と「B.甲状腺部」を入力すると「正味 (B-A)」が自動計算される。
- スペクトロメータ測定によるスペクトルファイルの保存
添付ファイルとして、複数のスペクトルファイルをデータベースに保存することができる。

甲状腺簡易検査

NaIサーベイメータ測定 (μSv/h)				スペクトロメータ測定	
測定器名: NaIサーベイ	測定員: 三井	測定器名:	測定員:	測定器名:	測定員:
管理番号:	記録員: 土屋	管理番号:	記録員:	管理番号:	記録員:
測定場所の空間線量率: 0.1 μSv/h		測定場所の空間線量率: μSv/h			
⑤				⑥	
A 大腿部 (BG)	B 甲状腺部	正味 (B-A)	⑥		
1 回目	0.09	0.17	D:\MyDocuments\TEST2.csv		
2 回目	0.09	0.17			
3 回目	0.08	0.18			

ピーク: 有 無 未記入 チャンネル: _____ ch
 判読不可

図 27 検査結果 (甲状腺測定)

⑨避難行動調査

検査記録カードの「3.避難行動調査」の項目を入力する (図 28)。

- 避難経路のコピーボタン：ボタンをクリックすると、登録済みの受検者情報から代表者氏名を検索し、見つかった代表者の避難経路を入力欄にコピーする。同姓同名の同行者が存在するときは、同行者選択ダイアログ (図 29) が表示されるので、入力者が正しい同行者を判断し選択する。
- 避難経路の確認ボタン：ボタンをクリックすると避難場所の地図表示を行う (図 30)。

3. 避難行動調査

避難場所

避難準備指示: 自宅外 ▼ 住所: _____ / 未記入 ▼

屋内退避指示: 自宅 ▼ 住所: _____ / 屋内 ▼

避難指示: 自宅 ▼ 住所: _____ / 屋外 ▼

避難開始

避難開始日時: _____

同行者

家族: 代表者の氏名 _____ 人数 _____ 1

その他: 代表者の氏名 _____ 人数 _____ 0

避難経路

No.	行動	移動手段	期間	場所 (移動元・先、滞在)
1	移動	車	2018/06/13 17:30~	伊方町民会館
2	滞在		~	伊方町民会館
3	移動	車	2018/06/14 09:00~2018/06/14 19:00	伊方中学校体育館
4	滞在		~	伊方中学校体育館
5	未記入		~	
6	未記入		~	

避難経路の確認...

図 28 避難行動調査

避難経路のコピー

複数の受検者が見つかりました。
同行者に該当する人物を選択してください。

個人識別ID	氏名	住所
AGZ51HL2	山本金次	島根県出雲市高松町43134高松町ハウス204
ABCD	山本金次	

OK Cancel

図 29 同行者選択ダイアログ

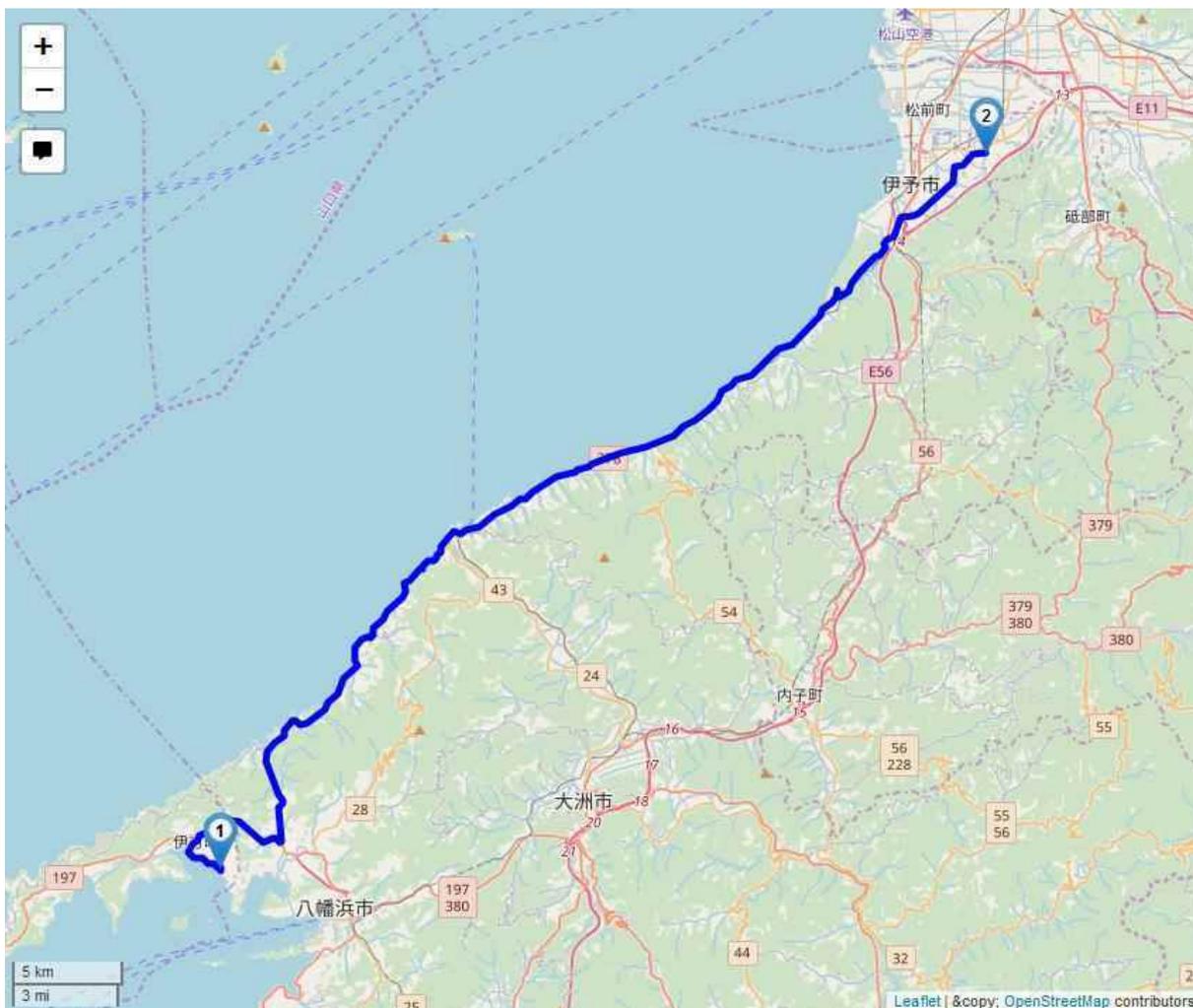


図 30 避難経路の地図表示

⑩安定ヨウ素剤の服用

検査記録カードの「4. 安定ヨウ素剤の服用」の項目を入力する（図 31）。

- 「服用回数」, 「服用時期」, 「服用日時」, 「服用量」: 「安定ヨウ素剤の服用の項目」が“はい”のとき入力可能になる。

4. 安定ヨウ素剤の服用

安定ヨウ素剤の服用: はい いいえ 未記入 判断不可

① 服用回数: 2

No.	服用時期	服用日時	服用量
1	避難後	2018/12/19 10:00	2 錠
2	避難後	2018/12/19 10:00	2 錠
3	未記入		0 錠

図 31 安定ヨウ素剤の服用

⑪食事状況調査

検査記録カードの「5.食事状況調査」の項目を入力する（図 32）。

- 食事状況の詳細：摂取制限指示のあった食品等の摂取，放射能汚染の可能性のある食品等の摂取，いずれかの項目が“はい”または“可能性あり”のとき，入力可能になる。

5. 食事状況調査

摂取制限指示のあった食品等の摂取： はい 可能性あり いいえ 未記入 判断不可

放射能汚染の可能性のある食品等の摂取： はい 可能性あり いいえ 未記入 判断不可

① 状況の詳細

図 32 食事状況調査

⑫個人情報利用の許諾

検査記録カードの「6.個人情報利用の許諾」の項目を入力する（図 33）。

個人情報利用の許諾：同意を得られなかった記録カードであっても，データベースへの登録は行われる。

6. 個人情報利用の許諾

本記録カードの記載内容は、個人同定可能な情報を除いて、放射線による被ばく線量推計または推計手法の開発等にかかわる研究に用いることがあります。上記の情報利用に同意して下さる方は自筆（未成年者の場合は保護者）による署名をお願いします。

① 署名有り

図 33 個人情報利用の許諾

1.6 管理機能画面

管理機能画面では受検者情報の登録に必要なデータの管理を行う（図 34）。

編集したいテーブル（表 6）を選択し、「ファイルへ保存ボタン」を押すとテーブル内に保存されているデータを CSV ファイルへ出力する。出力した CSV ファイルを Microsoft Excel 等で編集した後、「データベースを更新ボタン」を押して，編集した CSV ファイルを読み込むとデータベースの内容が更新される。読み込むことができる CSV ファイルは，1 行目がヘッダ行で文字コードが Shift-JIS で保存されている必要がある（図 35）。



図 34 管理機能画面

表 6 編集可能テーブル

テーブル名	
1	検査場
2	測定器
3	職員
4	移動手段
5	避難所

	A
1	Name
2	栗原
3	三井

1行目はヘッダ行

図 35 CSV ファイルの例

1.7 避難経路の地図表示

「避難経路の確認ボタン」を押すと地図ファイル（HTML 形式）が作成され、Microsoft Edge や Google Chrome 等の WEB ブラウザが起動し、避難経路の地図（図 36）が表示される。地図データはオープンストリートマップ（OpenStreetMap, OSM）を使用している。タイル地図は必要な地図情報をオープンストリートマップのサーバーからダウンロードする必要があるため、この機能はオンライン接続の必要がある。また、タイル地図を表示するために JavaScript ライブラリである Leaflet (<https://leafletjs.com/>) と各種プラグインを使用している（表 7）。避難開始場所（避難指示を受け取った場所）は住所テーブル、避難所は避難所テーブルから座標情報を検索し、該当するデータが見つかったときは、避難順番が分かる番号付きで地図上に表示される。座標情報が見つからない住所・避難場所・施設は地図上に表示されない。検索結果は画面左上の「メッセージボタン」で確認することができる（図 37, 図 38）。

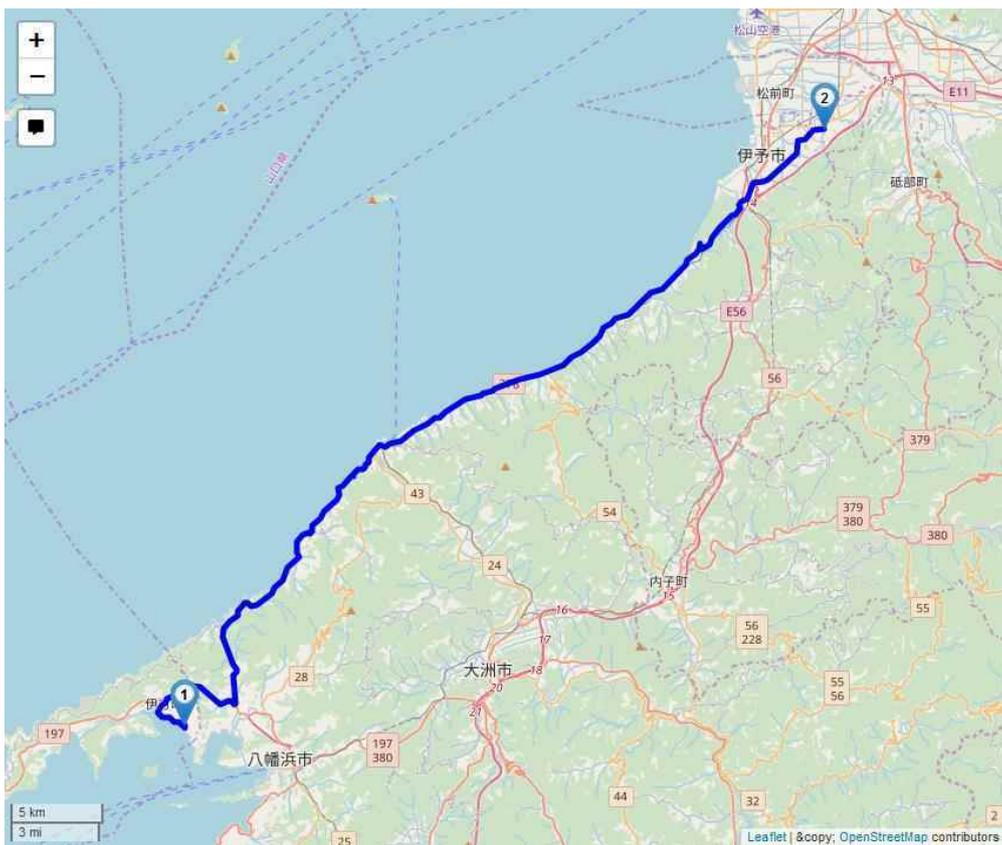


図 36 避難経路の地図

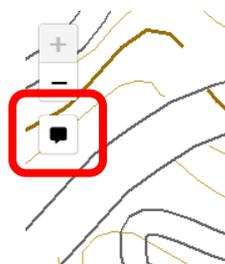


図 37 メッセージボタン



図 38 検索結果のメッセージ

表 7 地図表示機能で正在しているライブラリ

名称	プロジェクト URL
Leaflet	https://leafletjs.com/
Font Awesome	https://fontawesome.com/
Bouncemarker plugin for Leaflet	https://github.com/maximeh/leaflet.bouncemarker
leaflet-control-window	https://github.com/mapshakers/leaflet-control-window
L.EasyButton	https://github.com/CliffCloud/Leaflet.EasyButton
Leaflet Routing Machine	http://www.liedman.net/leaflet-routing-machine/
Leaflet.Polyline.SnakeAnim	https://github.com/IvanSanchez/Leaflet.Polyline.SnakeAnim
OpenStreetMap	https://www.openstreetmap.org/

1.8 CSV ファイル

CSV ファイルの出力項目と出力例を表 8 に示す。

表 8 CSV ファイルの出力項目

No	項目	出力例	備考
1	個人識別 ID	AHM1806198	
2	年齢	46 歳 2 ヶ月	
3	性別	男性	
4	自宅住所	島根県出雲市高松町 43134 高松町ハウス 204	
5	体表面汚染	有	
6	体表面汚染検査の測定結果 (cpm)	(1) 500, (2) 500	部位名と測定結果 (グロス値) 複数ある時は, カンマ区切りで結合
7	甲状腺汚染	有	
8	甲状腺汚染検査の測定結果 (大腿部)	0.09,0.09,0.08	複数ある時は, カンマ区切りで結合
9	甲状腺汚染検査の測定結果 (甲状腺部)	0.17,0.17,0.18	
10	甲状腺汚染検査の測定結果 (その他)		
11	スペクトルファイル	2018061501.chn	ファイル名を出力.
12	避難準備指示時	自宅外 (島根県出雲市) / 屋外	自宅外の際は住所を出力
13	屋内退避指示時	自宅 / 屋内	
14	避難指示時	自宅 / 屋外	
15	避難開始時期	2018 年 6 月 15 日 10 時 00 分	
16	避難経路	自宅 → 伊方町民会館 → 伊方町民会館 (滞在) → 伊方中学校体育館 → 伊方中学校体育館 (滞在)	行動が滞在のときは, 場所名の後に“ (滞在) ”
17	安定ヨウ素剤の服用回数	2	
18	安定ヨウ素剤の服用時期	2018 年 6 月 15 日 10 時:00 分, 2018 年 6 月 16 日 10 時:00 分	複数ある時は, カンマ区切りで結合
19	安定ヨウ素剤の服用量	2 錠, 2 錠	
20	摂取制限指示がある食物の摂取	可能性あり	
21	放射能汚染の可能性のある食物の摂取	可能性あり	
22	食事状況の詳細	水道水を飲んだ。	
23	個人情報利用の許諾	同意有り	

2. 情報収集支援システム管理者ツール

情報収集支援システムは、入力された情報をシステムがインストールされた PC 毎に専用のデータベース (DB ファイル) へ登録している。

情報収集支援システム管理者ツール (図 39) は、複数の PC で本システムを用いて入力作業を行った後、PC 毎に作成されたデータベースを一つのデータベースへ統合し、避難所や測定員等の共通化したい情報は各 PC へ分散させることができる。図 40 では、PC1~3 で入力した情報を本作業で追加した機能を用いて、PC4 のデータベースへ情報を統合した例を示す。



図 39 情報収集支援システム管理者ツールの初期画面

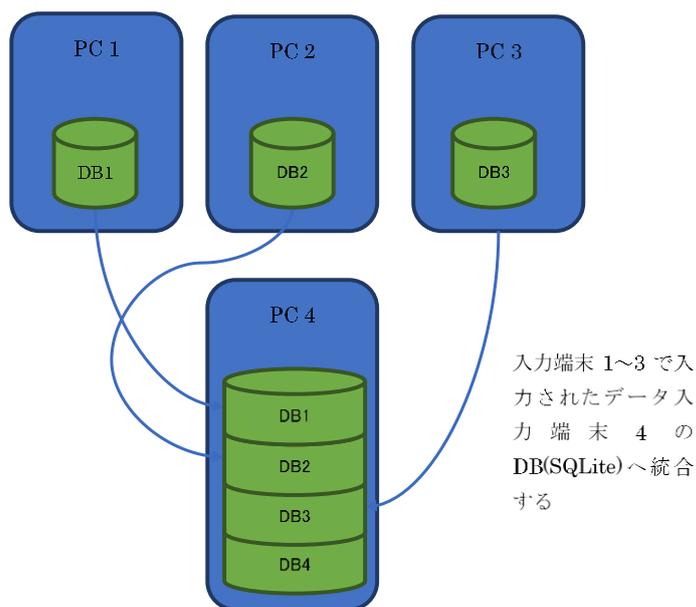


図 40 データベースへ情報を統合した例

2.1 統合機能

情報収集支援システム管理者ツールを起動すると、統合機能の画面（図 40）が表示される。

①保存先データベース

保存先データベース（図 41）では、統合したデータの保存先となるデータベースファイルを選択する。ファイルを選択するとコメント欄には、Windows にログインしているユーザー名、PC 名とファイル選択した日時が自動入力される。



図 41 保存先データベース

②統合する情報

統合対象の情報を選択できる。

- 全ての情報：避難者検査情報を含めたすべての情報を「保存先データベース」へ統合する。
- 共通情報のみ：避難者検査情報を除いた、「避難所情報」、「職員情報」、「測定所情報」、「測定機情報」を「保存先データベース」へ統合する（図 42）。

また、共通情報は統合処理の際、同じデータと判断された場合（表 9）、先に選択されたデータベースファイルのデータを優先して保存する。



図 42 統合する情報

表 9 同一データの判断基準

データ	判断基準
避難所情報	名称と住所
職員情報	氏名と所属
測定所情報	名称
測定機情報	名称

③データベースファイル

統合元になるデータを収録したデータベースファイルを選択する（図 43）。複数のファイルを選択できる。

データベースファイル						
名前	更新日時	登録	避難所	職員	測 器	測 所
D:\VIC\DCSA_ADMIN\テスト1.sqlite3	2020-01-31 12:03	1	11325	4	2	1
D:\VIC\DCSA_ADMIN\テスト2.sqlite3	2020-01-31 01:31	1	11325	4	2	1

図 43 データベースファイル

2.2 テーブルの統合

「テーブルの統合」をクリックするとテーブルの統合が行われ、統合処理が終了すると結果が表示される（図 44，図 45）。



図 44 「テーブルの統合」ボタン



図 45 統合結果の表示

2.3 データベース編集機能

情報収集支援システム管理者ツールでは、共通データの簡易編集を行うことができる（図 46）。
操作方法は各テーブル共通である。



図 46 編集画面（避難所）

① データベースファイルの読み込み

統合機能の保存先データベースで選択したファイル名が表示される。「読み込み」ボタンをクリックすると、データベースファイルを読み込む（図 47）。



図 47 データベースファイルと読み込みボタン

②登録データの一覧

データが読み込まれると、画面左の登録データ一覧（図 48）に表示される。

避難所データは「住所」フィールドを元に「都道府県」-「市区町村」で分類されたツリー形式で表示される。



図 48 登録データ一覧

③保存

「保存」ボタンをクリックすると、データの編集内容（新規登録・修正・削除）が、データベースファイルに保存される。（図 49）



図 49 保存ボタン

④新規登録

データを新規に登録するときは、「新規」ボタン（図 50）をクリックし、新規登録ダイアログ（図 51）を開く。新規登録ダイアログの各項目に値を入力し、「OK」ボタンをクリックするとデータが追加される。なお、「OK」ボタンをクリックした時点ではデータベースファイルへの保存は行われないので、データベースファイルへ保存するには、「保存」ボタンをクリックする。避難所データの新規登録または、修正を行う場合は「都道府県名」、「(群)市区町村」まで記入する。



図 50 「新規」ボタン

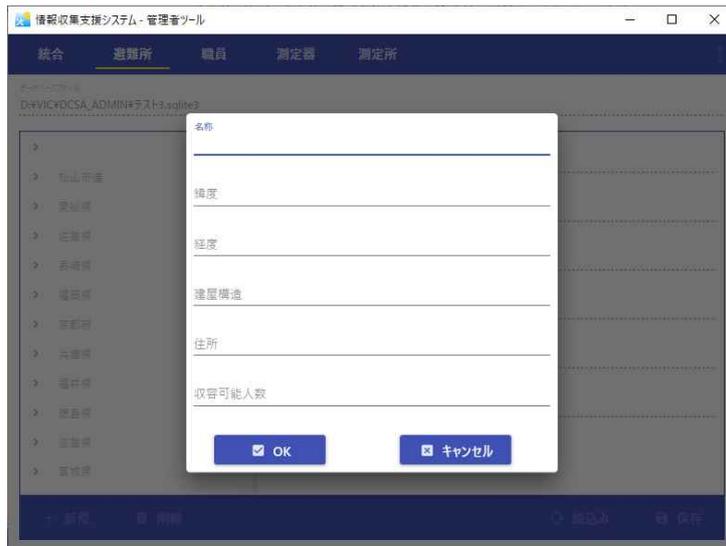


図 51 「新規登録」ダイアログ

⑤修正

登録データ一覧から修正したいデータを選択し、「修正」パネル（図 52）でデータの修正を行う。修正したデータは「保存」ボタンをクリックすると、データベースファイルへ保存される。



図 52 修正パネル

⑥削除

削除ボタン（図 53）をクリックすると、登録データ一覧で選択したデータが削除される。削除した内容をデータベースファイルへ反映するには、「保存」ボタンをクリックする。



図 53 削除ボタン

**平成 31 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**

令和 2 年 3 月 31 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 31 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 年度の研究計画と進捗	8
3. 4 平成 31 年度（令和元年度）の研究計画.....	21
4. 事業の成果.....	22
4. 1 専門家や防災業務従事者からの意見収集	22
4. 1. 1 甲状腺簡易測定研修におけるデモンストレーション	22
4. 1. 2 原子力緊急時支援・研修センターにおけるデモンストレーション	22
4. 2 甲状腺モニタの測定器の開発	24
4. 2. 1 概要.....	24
4. 2. 2 甲状腺モニタ測定器実機の製作.....	24
4. 2. 2. 1 公衆用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の改良	24
4. 2. 2. 2 検出器用遮蔽体の最適化及び可搬性の向上.....	25
4. 2. 2. 3 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器用信号処理回路の改良	26
4. 2. 2. 4 検出器制御・スペクトル解析用ソフトウェアの改良	27
4. 2. 3 甲状腺モニタ測定器実機の特性試験.....	28
4. 2. 3. 1 検出器の γ 線全吸収ピーク測定性能の評価.....	28
4. 2. 3. 2 γ 線標準校正場を用いた高線量率下での性能試験.....	33
4. 2. 3. 3 福島第一原子力事故直後の高線量率下における性能評価.....	38
4. 2. 3. 4 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の自己汚染による影響評価	42
4. 2. 3. 5 検出器の温度特性評価.....	46
4. 3 甲状腺モニタシステムの開発	50
4. 3. 1 概要.....	50
4. 3. 2 測定条件標準化法の開発.....	51
4. 3. 2. 1 測定治具（検出器固定用治具）の開発	51
4. 3. 2. 2 甲状腺モニタシステム設置用器具等の開発.....	53
4. 3. 2. 3 乳児、妊婦、身体不自由者に対する測定法の検討.....	56
4. 3. 2. 4 検出限界値評価法の検討.....	58
4. 3. 2. 5 不確かさの評価	60
4. 3. 3 甲状腺モニタシステム校正法の開発.....	66
4. 3. 4 バックグラウンド放射線の影響補正法の開発.....	68

4. 3. 5	甲状腺モニタシステム取扱マニュアルの作成.....	70
4. 3. 6	甲状腺モニタシステムの運用法の検討.....	70
4. 4	まとめ.....	72
5.	平成 31 年度（令和元年度）事業の実績.....	73
5. 1	事業の進捗報告.....	73
5. 2	本事業で得られた成果の発表.....	74
	参考文献.....	75

付録 1	：甲状腺放射性ヨウ素モニタシステム取扱マニュアル（公衆用システム編）
付録 2	：甲状腺放射性ヨウ素モニタシステム取扱マニュアル（作業用システム編）
付録 3	：19th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD-19) 発表資料
付録 4	：5th Asian Radiation Dosimetry Group annual meeting (ARADOS-5) 発表資料
付録 5	：日本原子力研究開発機構令和元年度安全研究センター報告会発表資料
付録 6	：原子力規制委員会令和元年度研究成果報告会発表資料
付録 7	：日本原子力学会 2020 年春の年会予稿

1. 事業の背景と目的

原子力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、今後の方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、 ^{131}I に代表される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 31 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、甲状腺の内部被ばくに主に寄与する ^{131}I について検討した。そして、原子力事故時に多数の公衆及び作業者について、 ^{131}I 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 31 年度（令和元年度）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 31 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 31 年度は「①甲状腺モニタ測定器の開発」及び「③甲状腺モニタシステムの開発」の 2 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実機に係る試験は、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 31 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 (令和元年 7 月 8 日及び令和 2 年 1 月 17 日の 2 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、令和 2 年 2 月 5 日から 6 日に開催された原子力規制庁が主催する令和元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 31 年度の研究成果 (進捗) を報告した (付録 6 参照)。

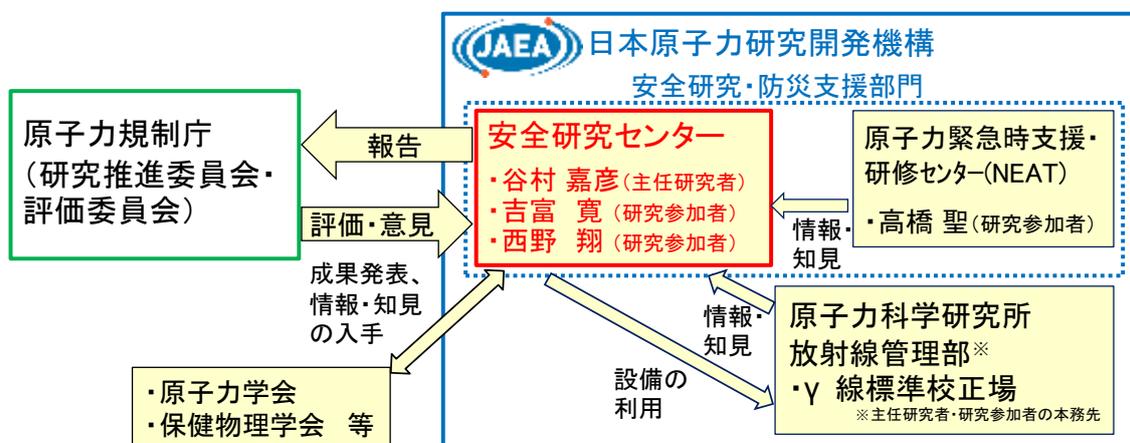


図 2-1 本事業の実施体制図 (平成 31 年度)

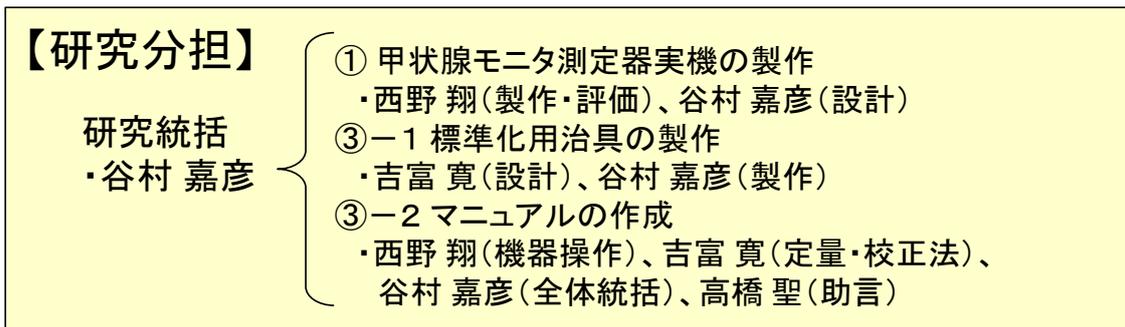


図 2-2 研究テーマごとの研究者の分担

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 ^{131}I 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 ^{131}I 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。

開発項目	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	検出器の試験・選定 遮蔽体材質等最適化 検出器及び遮蔽の選定	測定器の試作、性能評価 試作機の完成	実機の製作、性能評価 実機の完成
② 高精度 ^{131}I 定量法	年齢別頸部ファントム製作 頸部ファントムの製作	頸部・数値ファントムによる定量法の開発 定量法の完成	
③ 甲状腺モニタシステム		標準化用治具の設計	標準化用治具の製作 マニュアル作成 システム完成

図3-1 本事業の研究ロードマップ

「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。平成29年度は、検出器及び遮蔽材の選定を行い、平成30年度に甲状腺モニタ測定器の試作機を製作し、 γ 線標準校正場において性能を試験する。そして、平成31年度（令和元年度）に甲状腺モニタ測定器の実機の製作と γ 線標準校正場における性能試験を行い、測定器を完成させる。

「②高精度 ^{131}I 定量法の開発」では、甲状腺に蓄積した ^{131}I の定量に必要な校正方法を開発する。平成29年度に年齢別頸部ファントムを製作し、平成30年度に数値ファントムと組み合わせた ^{131}I の定量法を完成させる。

「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。平成30年度には、正確な甲状腺 ^{131}I の測定に必要な標準化用治具の概念設計を行う。平成31年度（令和元年度）には、標準化用治具を完成させ、測定法の開発を完了させる。さらに、甲状腺モニタシステムのマニュアルを作成し、甲状腺モニタシステムを完成させる。

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 ^{131}I 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⁾。

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 ^{131}I 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 ^{131}I 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 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があることから、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 10 mSv 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	

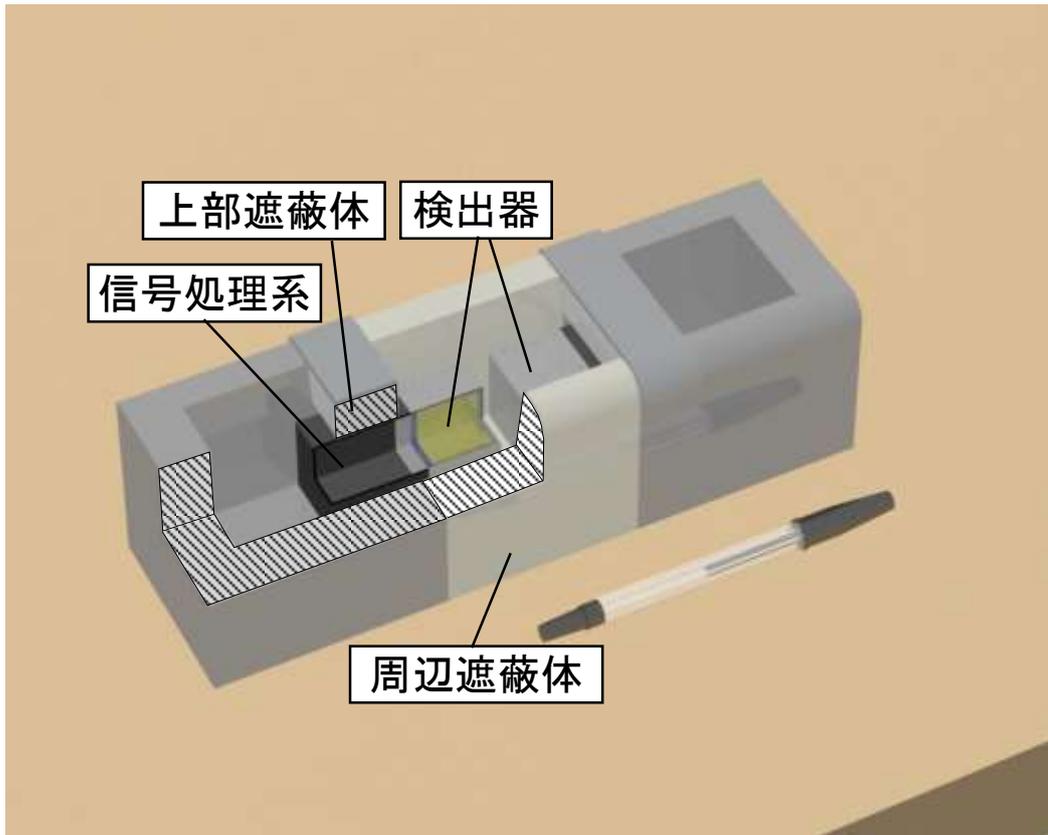


図 3-2-1 甲状腺モニタの概念図



(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 年度の研究計画と進捗

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 ^{131}I 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²⁾。

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した。

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 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 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した。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した。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した。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した。

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した。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）での照射を実施した。

② 高精度 ^{131}I 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した。

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した。

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した。

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 ^{131}I 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（図 3-3-1～3 参照）。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 ^{131}I を定量するためのソフトウェアを開発した（図 3-3-4 参照）。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（図 3-3-5～7 参照）。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 10 mSv の甲状腺等価線量が評価可能であることが分かった（表 3-3-1 参照）。

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（表 3-3-2～3 及び図 3-3-8 参照）。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（表 3-3-4～5 参照）。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（図 3-3-9 参照）。その結果、甲状腺の体積よりも甲状腺前組織厚の違いが与える影響の方が大きく、その個人差による不確かさは 25%程度であることが分かった（図 3-3-10～11 参照）。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円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを活用して開発した（図 3-3-12～13 参照）。

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（図 3-3-14～16 参照）。

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 (AOCR-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。

表 3-3-1 高バックグラウンド線量率 (20 μ 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

表 3-3-2 公衆用の甲状腺モニタ (LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器 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

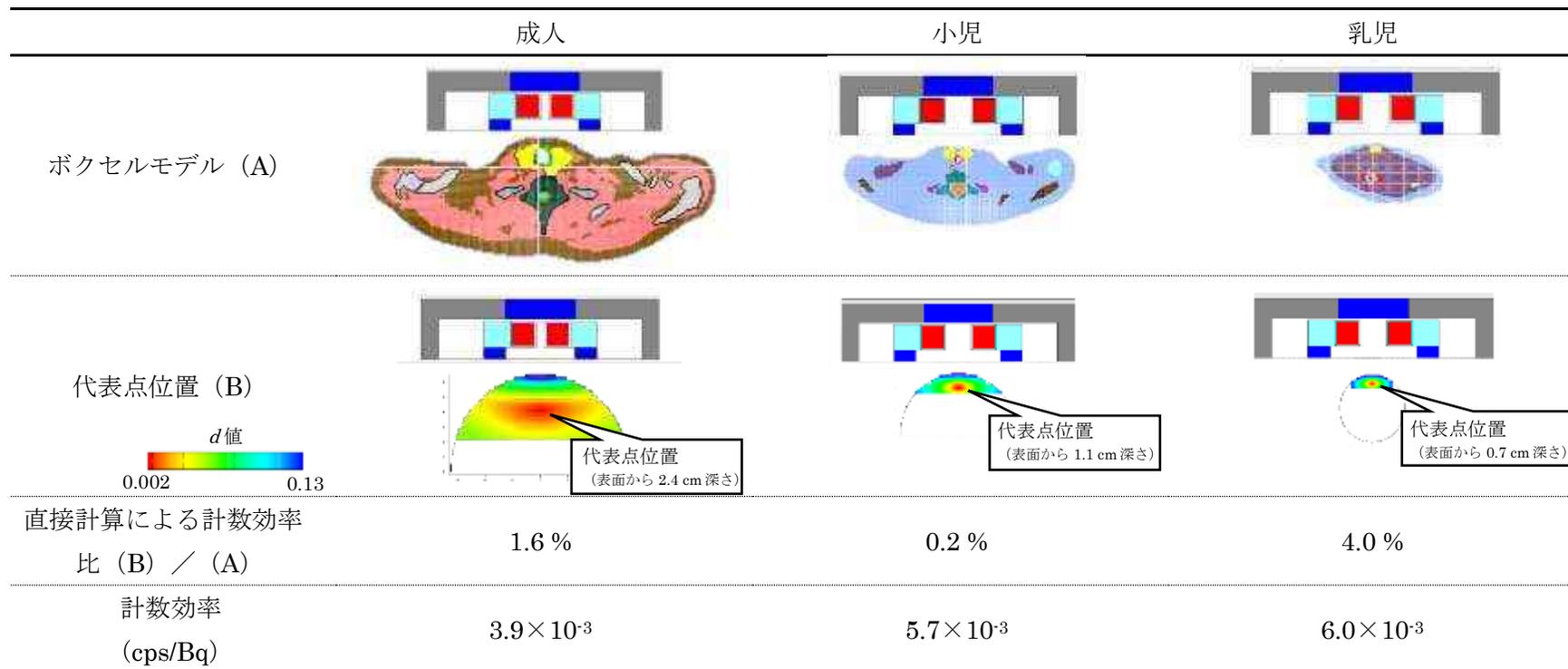
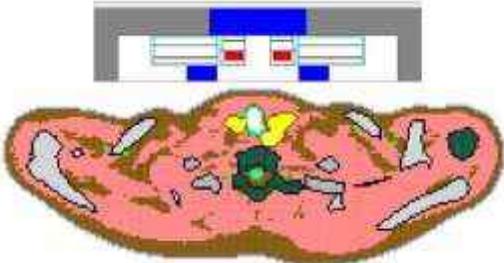
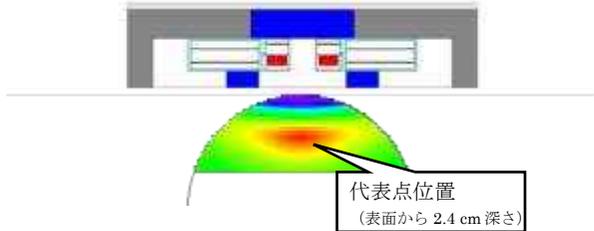


表 3-3-3 作業用の甲状腺モニタ (CdZnTe 検出器 2 個) に対して決定した代表点位置と測定により
得られた ^{131}I の 364 keV 光子に対する計数効率

作業用	
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)	4.3%
計数効率 (cps/Bq)	9.3×10^{-4}

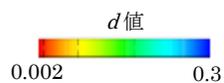


表 3-3-4 バックグラウンド放射線がない状況下での ¹³¹I 検出限界放射能

	成人	小児	乳児	作業者
測定時間 (s)	150	150	150	150
検出限界放射能 (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 3-3-5 バックグラウンド放射線がない状況下での評価下限甲状腺等価線量

	成人	小児	乳児	作業者
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}
評価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（作業者については 5 μm 粒子）の 1 回吸入摂取条件で計算した。

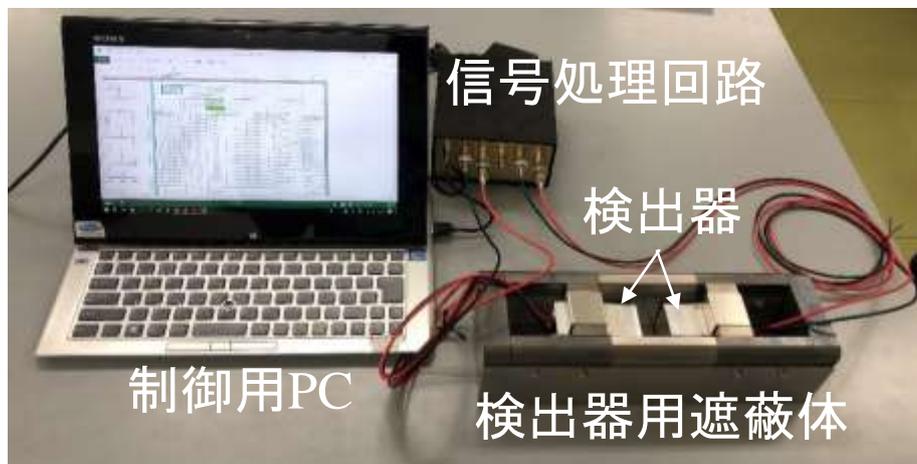
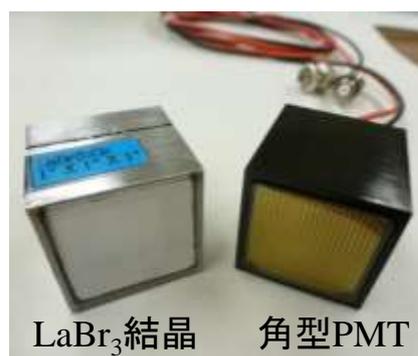


図 3 - 3 - 1 甲状腺モニタ測定器の試作機



RITEC社製 $\mu\text{spec}1500$

(a) CdZnTe 半導体検出器



LaBr₃結晶 角型PMT

(b) LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器

図 3 - 3 - 2 本事業で購入した放射線検出器

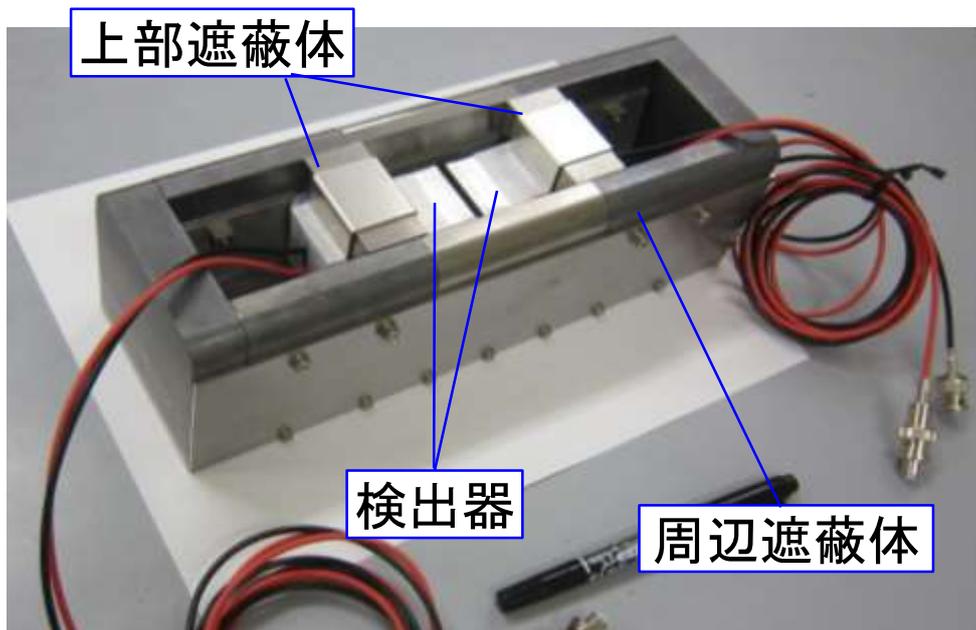


図 3 - 3 - 3 試作した検出器用遮蔽体

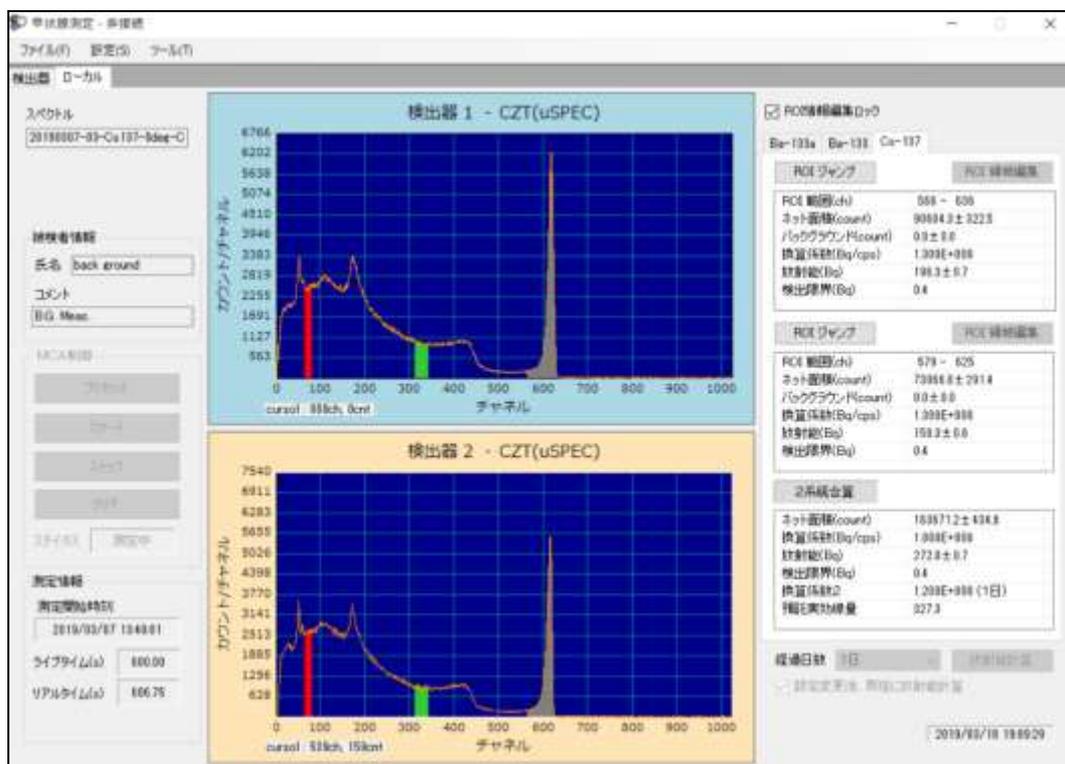


図 3 - 3 - 4 検出器制御用ソフトウェアのメイン画面

甲状腺モニタ測定器の試作機

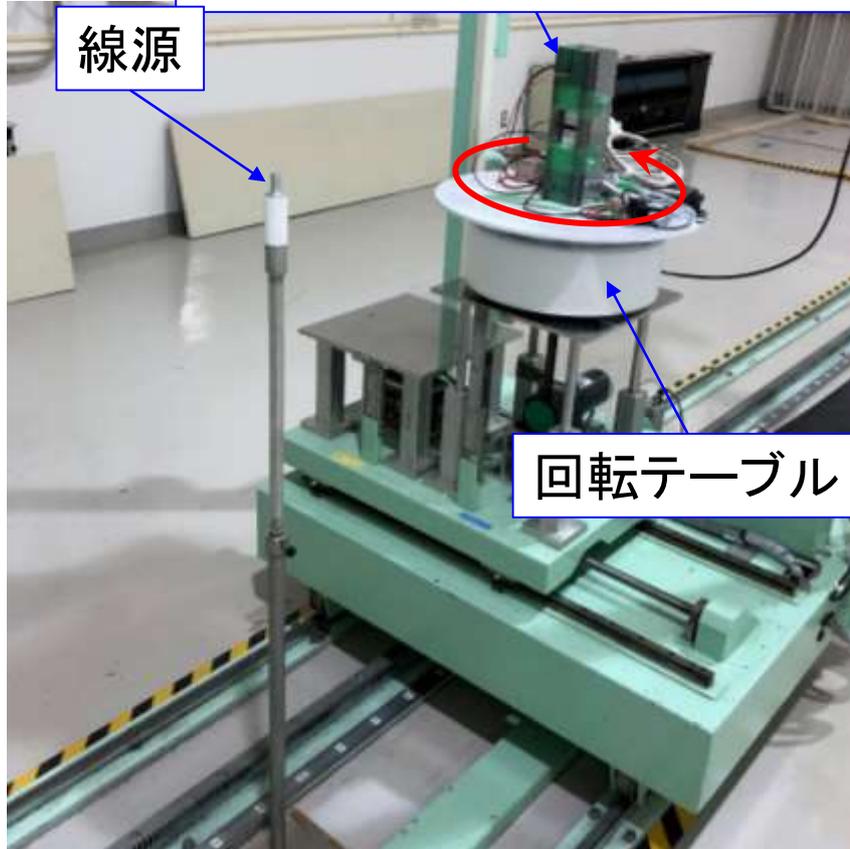


図 3 - 3 - 5 γ 線標準校正場における甲状腺モニタ試作機の実験

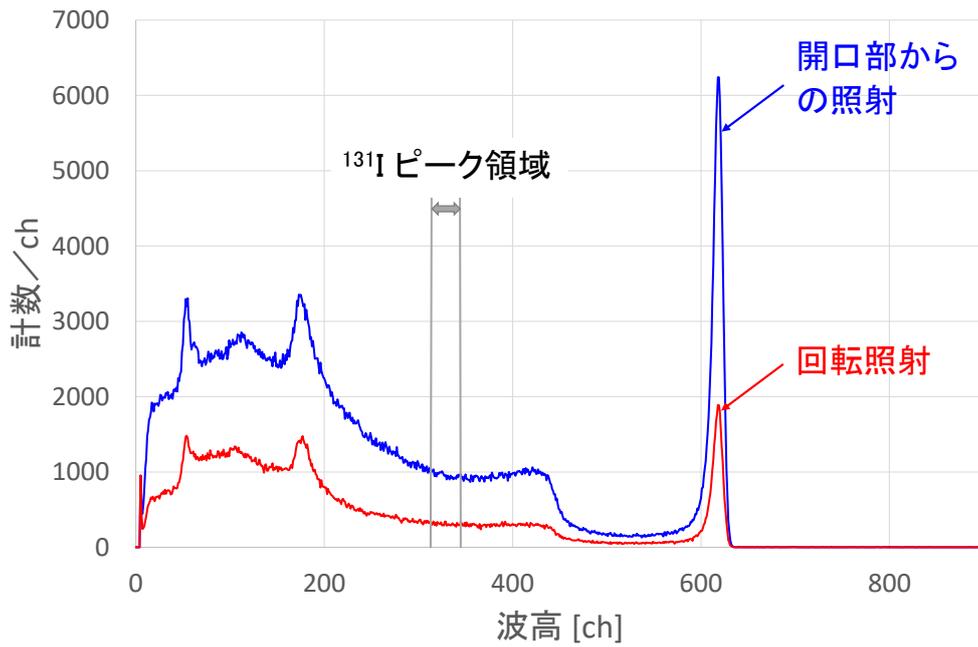


図 3 - 3 - 6 ^{137}Cs 線源 γ 線標準場において測定した波高分布の例 (CdZnTe 検出器)。
 周辺線量当量率： $20 \mu\text{Sv/h}$

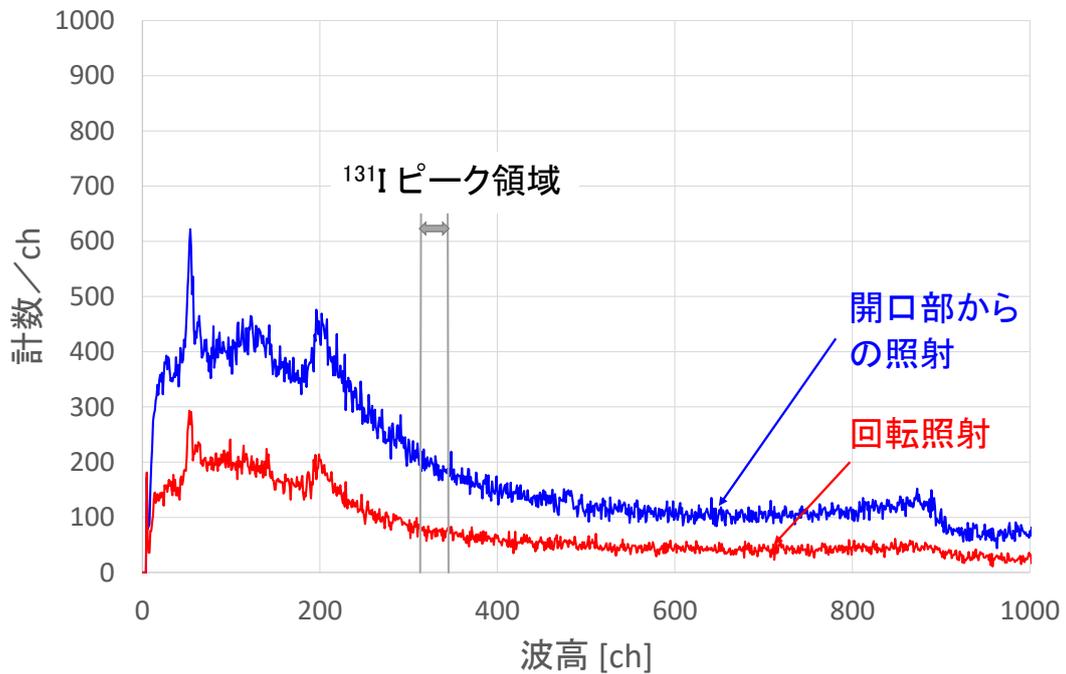


図 3 - 3 - 7 ^{60}Co 線源 γ 線標準場において測定した波高分布の例 (CdZnTe 検出器)。
 周辺線量当量率： $20 \mu\text{Sv/h}$



図 3-3-8 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）

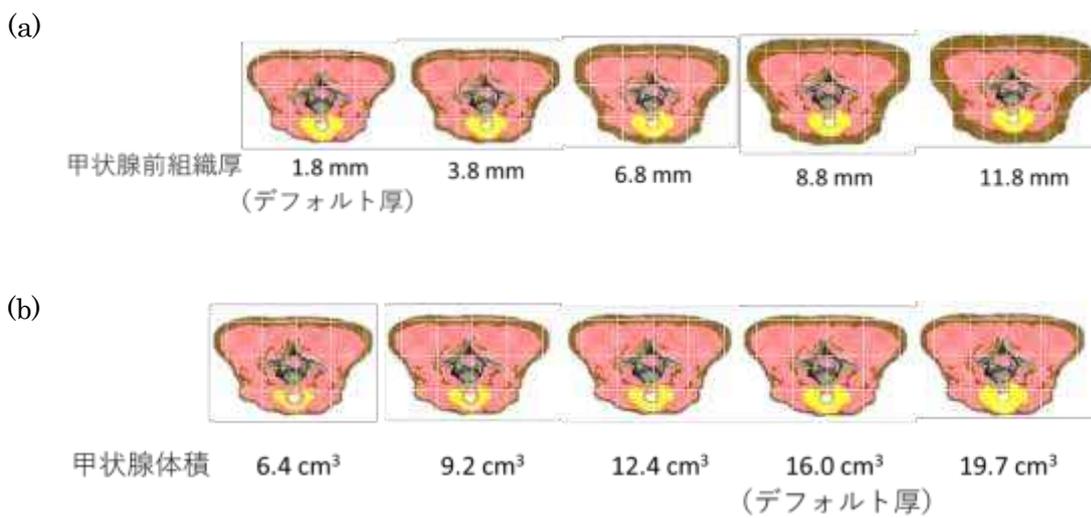


図 3-3-9 甲状腺前組織厚及び甲状腺体積を変化させた JF-103 ファントム

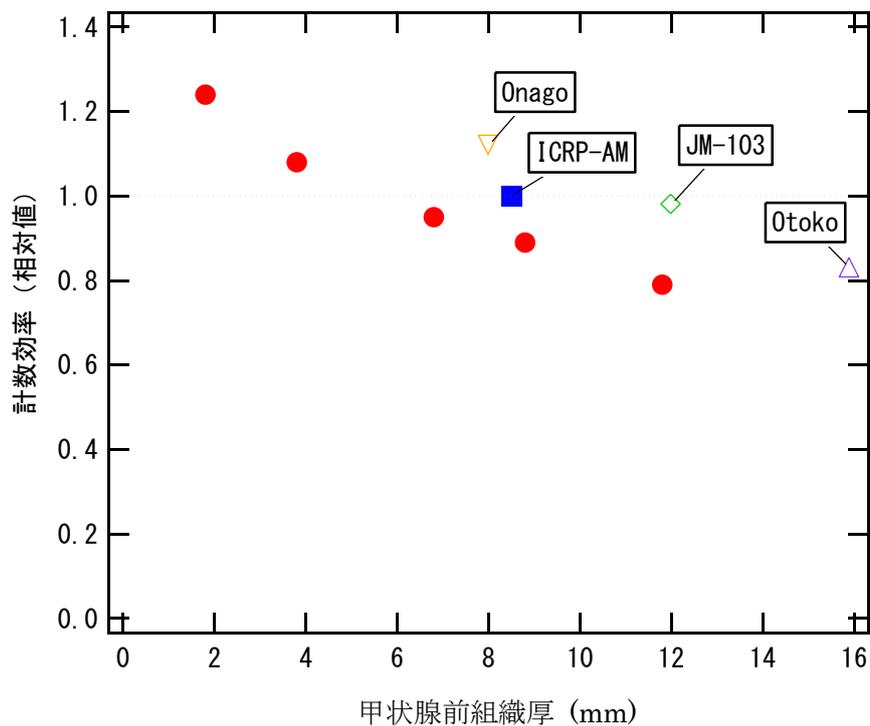


図 3-3-10 JF-103 ファントムの甲状腺前組織厚を変化させたときの計数効率の変化 (ICRP AM の計数効率で規格化。比較のため、他のボクセルファントムに対する計数効率も同時に示した。)

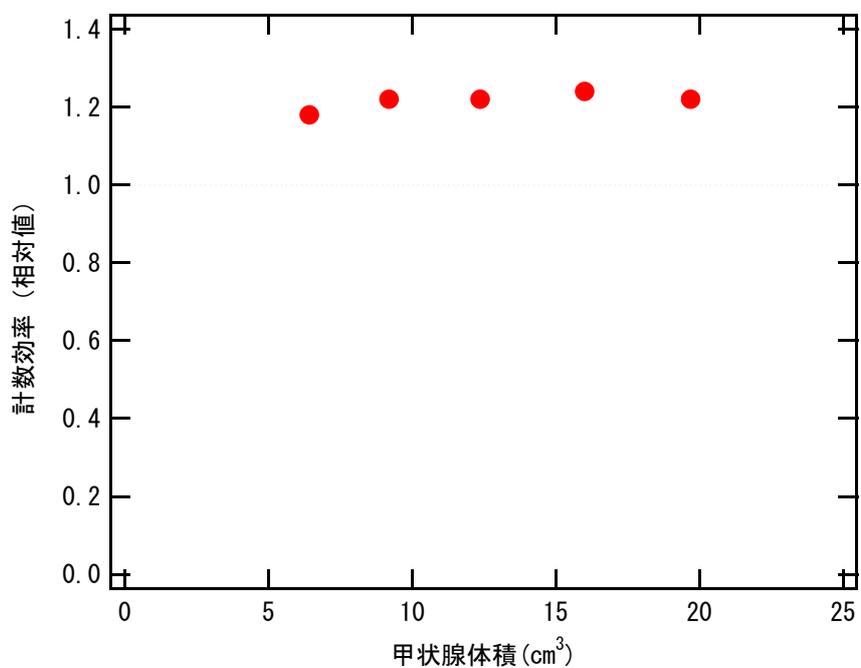


図 3-3-11 JF-103 ファントムの甲状腺体積を変化させたときの計数効率の変化 (ICRP AM の計数効率で規格化)

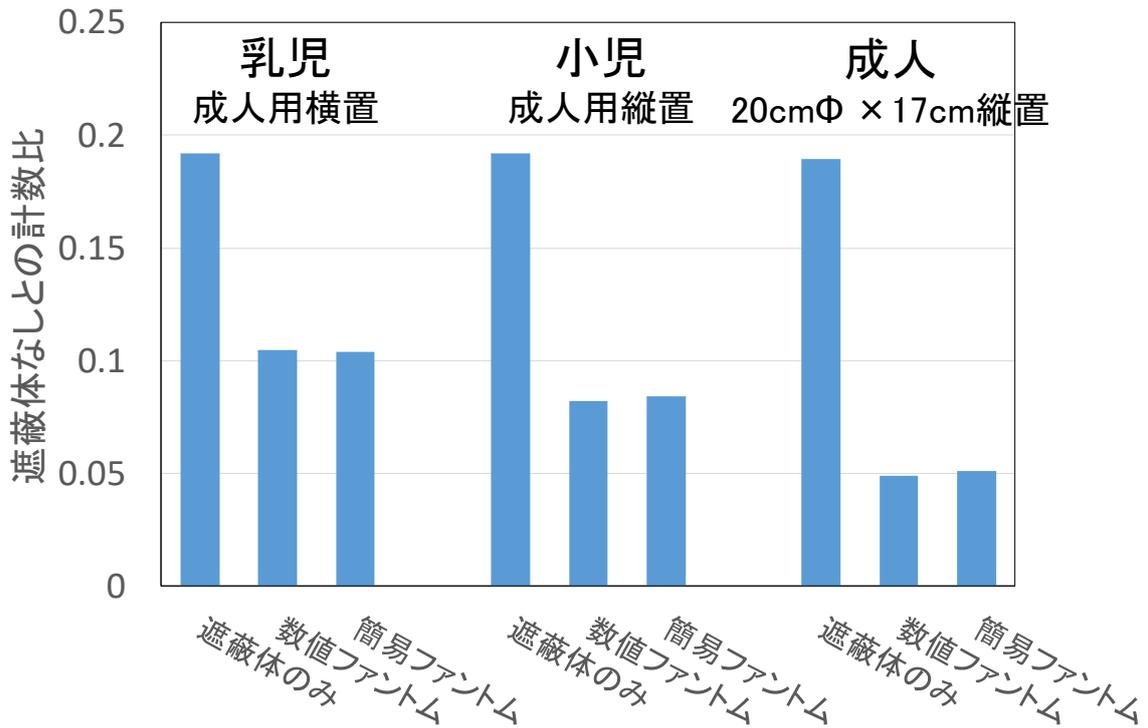


図 3-3-1-2 遮蔽体がない場合に対する ^{131}I の 364keV 光電ピーク計数の比
 数值ファントム（乳児、小児、成人男性）と甲状腺モニタを組み合わせた
 計算体系を用いて、全方位から等方に ^{131}I からの γ 線が照射したときの
 検出器の応答から評価。

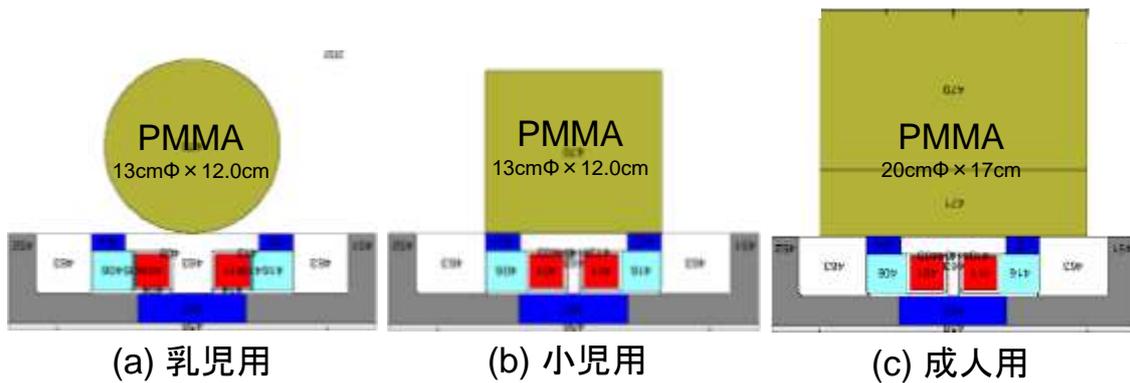


図 3-3-1-3 円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを用いたバックグラウンド放射線
 補正用データの測定方法

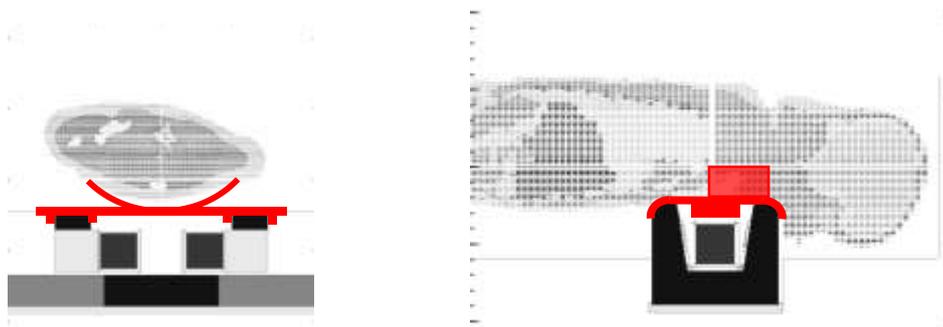


図 3 - 3 - 1 4 乳児用検出器固定用治具の概念設計結果

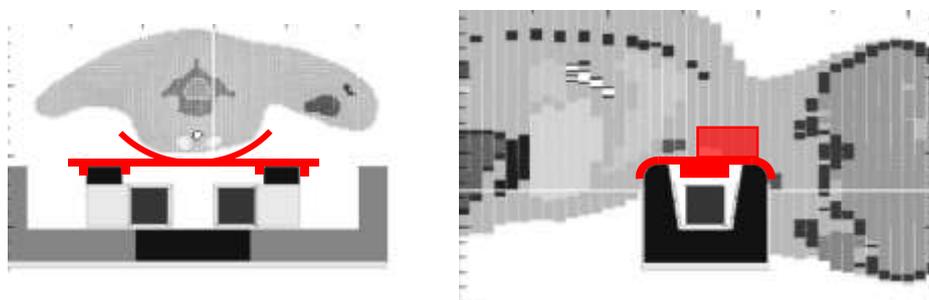


図 3 - 3 - 1 5 小児用検出器固定用治具の概念設計結果

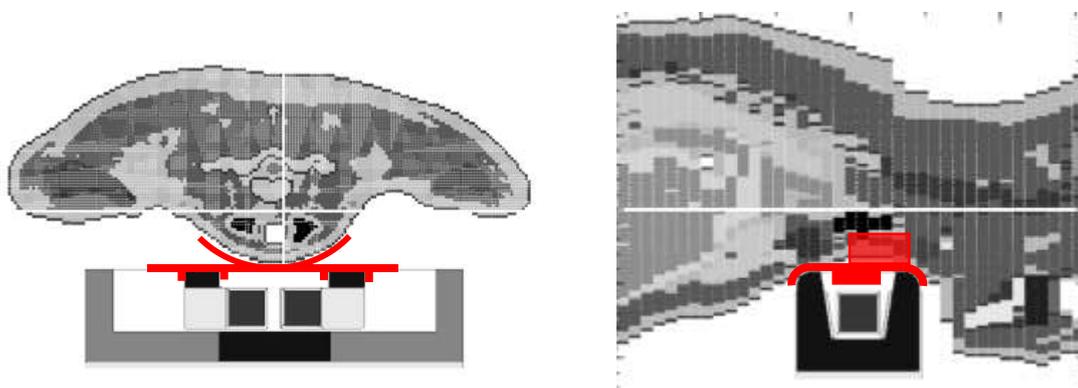


図 3 - 3 - 1 6 成人用検出器固定用治具の概念設計結果

3. 4 平成 31 年度（令和元年度）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甲状腺モニタシステムの開発」の二つのテーマについて、平成 31 年度（令和元年度）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の実機を製作するとともに、 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。

公衆用甲状腺モニタ測定器については、平成 30 年度に実施した甲状腺モニタ測定器試作機の実機特性試験の結果に基づき最適化を図った検出器用遮蔽体を製作するとともに、実機としての信頼性を確保するために、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション結晶と光電子増倍管をパッケージ化した検出器 2 個及び信号処理回路を整備する。作業用甲状腺モニタ測定器については、平成 29 年度及び平成 30 年度に整備した CdZnTe 検出器 2 個並びに平成 30 年度に試作した検出器用遮蔽体を流用する。さらに、平成 30 年度に開発した検出器の制御及びスペクトル解析用ソフトウェアを改良する。

γ 線標準校正場において、製作した甲状腺モニタ測定器実機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甲状腺モニタシステムの開発

平成 30 年度に実施した概念設計を基に、①で製作する検出器用遮蔽体への取付けが可能で、被検者又は簡易頸部ファントムと検出器の位置関係を固定して測定条件又は校正条件を標準化するために必要な検出器固定治具を製作する。また、高線量率下での測定を考慮して、バックグラウンド放射線による影響の補正を可能とするためのバックグラウンド放射線測定用治具を製作する。さらに、製作した実機及び治具類を用いた甲状腺モニタシステムの使用方法に係るマニュアルを作成する。

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）、19th International Conference on Solid State Dosimetry: SSD-19（2019 年 9 月、広島）、5th Asian Radiation Dosimetry Group annual meeting: ARADOS-5（2019 年 11 月、中国）及び日本原子力学会 2020 年春の年会（2020 年 3 月、福島）において報告するとともに、国内、アジア地域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 専門家や防災業務従事者からの意見収集

甲状腺モニタシステムの開発にあたり、原子力災害発生時に実際に現場で対応する防災業務従事者や医療従事者などの専門家の知見を活用することが、より実効的なモニタシステムとして完成させるために必須である。そこで、試作機及び実機を用いた専門家、防災業務従事者に対するデモンストレーションを実施し、実物を体感した上でのご意見をいただき、開発する甲状腺モニタシステムの改良に反映させることとした。

デモンストレーションは、2019年10月21日に国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（量研機構）高度被ばく医療センター（千葉県千葉市稲毛区穴川）で開催された甲状腺簡易測定研修及び2020年1月17日に原子力機構 原子力緊急時支援・研修センター（茨城県ひたちなか市十三奉行）において量研機構と合同で開催した第2回実務者会合において実施した。

4. 1. 1 甲状腺簡易測定研修におけるデモンストレーション

2019年10月21日に国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構で開催された甲状腺簡易測定研修において、平成30年度に製作した甲状腺モニタ測定器の試作機を用いたデモンストレーションを行った。当該研修には、原子力施設立地都道府県の地方自治体、拠点病院、大学から、原子力災害発生時の甲状腺内放射性ヨウ素の簡易測定に係る現場対応者20名以上が参加した。デモンストレーションにおいては、公衆用と作業用者の2種類の甲状腺モニタ測定器を設置し、参加者に実際に測定と機器操作を体験していただいた。参加者から以下の意見をいただいた。

- ① 首に頭部の荷重がすべてかかるため、測定時間が長くなると苦しくなる。追加のサポートを用意して顔面に荷重を分散させることが有効ではないか。
⇒この課題を解決するために、顎部サポートを作成して、頸部に集中していた荷重を分散できるように改良した（4. 3. 2. 2項参照）。
- ② 検出器遮蔽体の傾斜角度が大きくなると無理な姿勢での測定を余儀なくされる。
⇒検出器遮蔽体傾斜用台の角度を最適化した（4. 3. 2. 2項参照）。
- ③ 検出器の特性が測定環境の温度で変化することはないのか。
⇒公衆用及び作業用者の各検出器について、温度特性を評価した（4. 2. 3. 5項参照）。

4. 1. 2 原子力緊急時支援・研修センターにおけるデモンストレーション

2020年1月17日に、原子力機構の原子力緊急時支援・研修センター（NEAT）で開催

された量研機構との第 2 回実務者会合において、甲状腺モニタ測定器の実機を用いたデモンストレーションを実施した。参加者は、PO、PO 補佐、原子力機構と量研機構の受託事業関係者の他に、福島県立医科大学、弘前大学の医療関係者、NEAT の防災業務従事者、原子力機構の内部被ばく線量評価に係る専門家などであった。参加者から以下の意見をいただいた。

- ④ うつ伏せの姿勢で長時間の測定が困難な乳児についてはどのように対応するか。妊婦、腰痛を持つ方や寝たきりの方が被検者の場合、うつ伏せでの測定は困難であるため、測定法を考える必要がある。

⇒この課題を解決するために、仰臥位による測定が可能かについて検討した（4. 3. 2. 3 参照）。

- ⑤ 低い顎サポート台を使用した場合、頸部に係る荷重が大きくなるため、不快感が大きくなる。

⇒顎サポート台の最適な高さについて検討した（4. 3. 2. 2 参照）。

- ⑥ 甲状腺の位置は、個人差がある。ごくまれにはあるが、頸部よりも大きく下にずれている人や顎に近いところにずれている人がいる。また、左右で甲状腺の大きさが大きく異なる場合がある。

⇒標準的な位置から大きくずれている被検者をどこまで検知する必要があるかについては検討が必要である。検知する方法として、「(a)検出器用遮蔽体の左右の構造(上下方向の開口角)を非対称にして、左右の検出器の計数差を利用する」、「(b)左右非対称のアルミ又は SUS 板を開口部に設置して 80 keV γ 線の吸収の差を利用する」ことが考えられるが、遮蔽体及びモニタの再設計が必要となるため、今後の課題となる。

- ⑦ 商用電源なしでの連続稼働時間はどれくらいか。また、停電時の対応はどのようになっているか。

⇒連続稼働時間はノート型パソコンの機種やバッテリー容量により大きく異なるが、手持ちの NEC 製 LAVIE シリーズ (PC-GN227DADE) で計測した結果、公衆用システムについては 2.5 時間、作業用システムについては 3.5 時間の商用電源供給なしでの稼働が可能であった。停電により電源供給ができない状態が長時間にわたる場合は測定の継続は困難であるが、発電機などで断続的に電源共有が可能であれば、ノート型パソコンを使用することにより測定を継続し続けることは可能である。

- ⑧ 150 秒の測定時間は非常に長く感じる。

⇒例えば、甲状腺の被ばくや測定法に関する 150 秒程度の説明動画を作成して、測定中に視聴できるようにすれば解決可能と考えている。動画作成については今後の課題である。

4. 2 甲状腺モニタの測定器の開発

4. 2. 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、甲状腺モニタ測定器の実機を製作した。公衆用甲状腺モニタ測定器については、平成 30 年度に実施した甲状腺モニタ測定器試作機の実験の結果に基づき、寸法などの最適化を図った検出器用遮蔽体を製作した。また、実機としての信頼性を確保するために、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション結晶と光電子増倍管をパッケージ化した検出器 2 個及び信号処理回路を整備した。作業用甲状腺モニタ測定器については、平成 29 年度及び平成 30 年度に整備した CdZnTe 検出器 2 個を流用するとともに平成 30 年度に試作した検出器用遮蔽体を改造して実機を製作した。さらに、平成 30 年度に開発した検出器の制御及びスペクトル解析用ソフトウェアを改良した。

製作した甲状腺モニタ測定器実機の高線量率下における測定性能の試験を、 ^{137}Cs 又は ^{60}Co 線源を使用した γ 線標準校正場において実施した。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) での照射を実施した。また、福島第一原子力発電所事故直後に福島市内で観測された様々な核種の線源からの γ 線による高線量率下での測定性能について、PHITS³⁾ を用いた計算により評価した。さらに、甲状腺モニタ測定器で使用する検出器の温度特性を評価した。

4. 2. 2 甲状腺モニタ測定器実機の製作

公衆用甲状腺モニタ測定器については、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器 (2 個)、信号処理回路及び検出器遮蔽体を新たに製作し実機とした。前年度からの改良箇所は、4. 2. 2. 1 項～4. 2. 2. 3 項にまとめた。作業用甲状腺モニタ測定器については、前年度に調達・製作した CdZnTe 検出器 ($\mu\text{spec1500}$ ⁴⁾、信号処理回路含む) 及び検出器遮蔽体を継続利用する形で実機とした。ただし、検出器遮蔽体については、一部を加工し、4. 2. 2. 2 項で説明するような持ち手を付け加えた。公衆用・作業用甲状腺モニタで共通使用する検出器制御・スペクトル解析用ソフトウェアは、4. 2. 2. 4 項で説明する改良を施した。

4. 2. 2. 1 公衆用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の改良

公衆用に使用する検出器は、応用光研製 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション結晶 (1 インチ立方

結晶を光学窓付アルミニウムケースに収納) 及び浜松ホトニクス製小型光電子増倍管 (H11934-300) から構成される。前年度は、シンチレーション結晶と小型光電子増倍管を別々に調達し、光学グリスを用いて自前で光学接合した後、遮光処理を行っていた。そのため、接合状態によって2個の検出器の光収集効率に大きな差異が生じたり、遮光が不十分であったりする場合があった。そこで、本年度は、光学機器メーカーによる結晶と光電子増倍管の接合後に、0.8 mm 厚アルマイト化アルミニウムによりパッケージ化した (図4-2-2-1-1 参照)。これにより、検出器からの信号読み出しの信頼性が向上するとともに、製品化へのスムーズな移行が可能となった。



図4-2-2-1-1 アルミニウムパッケージ化した $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション結晶及び光電子増倍管

4. 2. 2. 2 検出器用遮蔽体の最適化及び可搬性の向上

本甲状腺モニタは、検出器の周囲をタングステン合金及び鉛で構成される遮蔽体で取り囲むことにより、バックグラウンド放射線を遮蔽する構造となっている。前年度までは、 CdZnTe 検出器を使用する作業用と、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器を使用する公衆用で、共通の検出器用遮蔽体を使用していた。検出器寸法が長い CdZnTe 検出器に合わせて、遮蔽体サイズを設計していたため、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器を使用する際は遮蔽体内部に余分な空間が生じていた。そこで、平成 31 年度は、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器のサイズに合わせた遮蔽体を新たに作成した (図4-2-2-2-1 参照)。この結果、遮蔽体の横方向の長さが 5 cm 短くなり、約 2 kg 軽量化することができた。また、遮蔽体の側面に切り欠きを設け、高圧・信号ケーブル引出せるようにした。なお、切り欠きは側面の鉛板に対し斜め方向に入れており、バックグラウンド放射線が切り欠きを通して検出器に直接入射しないように工夫している。



図4-2-2-2-1 今年度新たに製作した公衆用（ $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器）の検出器遮蔽体

さらに、図4-2-2-2-1に示したように、サイドのステンレス板と一体化した持ち手を新たに追加したことにより可搬性が大きく向上した。なお、前年度製作した作業者用（ CdZnTe 検出器使用）の遮蔽体についても、同様の持ち手を追加した（図4-2-2-2-2参照）。



図4-2-2-2-2 改造した作業者用（ CdZnTe 検出器）の検出器遮蔽体

4. 2. 2. 3 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器用信号処理回路の改良

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器用信号処理装置は、2系統の高圧電源、増幅器、波高分析器から構成され、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器から出力された信号を処理し、エネルギースペクトルを取得するために使用する。今年度、製作した信号処理装置（CP model 80404）は、ケース内の電子部品の配置を最適化することにより、前年度のモデルと比べてダウンサイズしており、可搬性が向上している。また、前年度のモデルでは、信号処理装置及び検出器の信号ラインと遮蔽体のグラウンドが共通でないために、検出器からのアナログ信号にノイズが生じる問題が見られた。このノイズは、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器のエネルギー分解能を低下させる原因となり、甲状腺モニタの定量性能に悪影響を及ぼしていた。そこで、信号処理装置に新たに GND 端子接続用のピンジャックを設け、検出器遮蔽体と共通のグラウンドを取れるように改良した。これにより、測定環境によらず安定して検出器信号を取得できるようになった。



図 4-2-2-3-1 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器用信号処理装置 (CP model 80404)

4. 2. 2. 4 検出器制御・スペクトル解析用ソフトウェアの改良

本甲状腺モニタで、2個の LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器（公衆用）また CdZnTe 検出器（作業用）を制御し、得られた波高データを処理・解析するためのソフトウェアを前年度製作した。本年度は、前年度の評価試験により得られた改良案を元に、ソフトウェアのアップデートを行った。主な変更点は以下の通りである。

- ① CdZnTe 検出器使用時の、検出器ハードウェアの登録及びハードウェア調整(印加電圧、アンプゲイン等)を行う方法を簡易化した。本ソフトウェアを初めて扱う者であっても、マニュアルを見ながら簡単に操作できるようにした。
- ② 測定画面に表示する項目を、ソフトウェア利用者にとって必要な情報に整理した。
- ③ 保存ファイルに書き出す情報を整理し、後日測定データを確認する際に、測定時の検出器パラメータ、評価条件、使用したバックグラウンドファイルなどの、必要な情報が得られるようにした。また、複数種類のファイルを同一のファイル名（拡張子を除く）で同時に保存できるように改良し、大人数の測定を行う際のソフトウェア操作者の負担を低減した。
- ④ BGデータを、ファイル名を指定して保存できるようにし、任意のBGファイルを選択し再解析できるようにした。
- ⑤ 測定結果（測定条件、評価条件、取得したスペクトル等を含む）を帳票出力（印刷）する機能を設けた。
- ⑥ 検出限界値の計算方法の選択肢に、4. 2. 3. 2項で使用する計算式を追加した。

4. 2. 3 甲状腺モニタ測定器実機の実機特性試験

4. 2. 3. 1 検出器の γ 線全吸収ピーク測定性能の評価

甲状腺モニタシステムでは、検出器から得られた γ 線の全吸収ピークの計数から甲状腺に蓄積された ^{131}I の放射能を決定する。このため、全吸収ピークの関心領域 (ROI) をきちんと設定する必要がある。そこで、甲状腺モニタ測定器実機で使用する公衆用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器及び作業用 CdZnTe 検出器について、エネルギー分解能や適切な ROI 領域の観点から複数の γ 線源を用いて γ 線の全吸収ピークの測定性能の試験を行った。

(1) 公衆用 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器で得られる全吸収ピークの波高スペクトルは、図4-2-3-1-1 (^{133}Ba ; 276, 303, 356, 383 keV)、図4-2-3-1-2 (^{137}Cs ; 662 keV、 ^{22}Na ; 511 keV) に示すように、以下に示すガウス分布により表現できる。

$$f(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-x_p)^2}{2\sigma^2}\right)$$

各ピークをガウス関数でフィッティングして得られたピークチャンネル x_p 及び標準偏差 σ の値を表4-2-3-1-1に示した。エネルギー分解能 (FWHM) は、 ^{137}Cs (662 keV) に対して 4.2%、 ^{133}Ba (356 keV) に対して 5.1% が得られた。これらの値は、テクニカルシートに記載されたエネルギー分解能 3.0% (^{137}Cs ; 662 keV) よりもやや悪い値となっている。これは、本甲状腺モニタで採用した小型光電子増倍管 (H11934-300) の有感領域 (2.3 cm \times 2.3 cm) が、結晶光学窓のサイズ (2.54 cm \times 2.54 cm) よりもわずかに小さく、シンチレーション光の収集効率にディスアドバンテージがあるためと考えられる。とはいえ、4.2.3.3項で詳細に述べるように、事故時に予想される放出核種 (^{132}I , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{136}Cs , ^{137}Cs , ^{132}Te , ^{133}Xe 等) は、300~500 keV のエネルギー領域に顕著な全吸収ピークを作らないことから、得られたエネルギー分解能で ^{131}I (364 keV) のピークを十分分離できる。

$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ スペクトルのピーク解析においては、 $x_p \pm 3\sigma$ (ピーク面積の 99.7% を内包) の範囲を ROI に設定することとした。各ピークに対して設定される ROI (3σ) の範囲を表4-2-3-1-1に追記するとともに、図4-2-3-1-1及び図4-2-3-1-2に図示した。線源を保有していない ^{131}I に対しては、上記で得られた情報からピークエネルギーとピークチャンネル x_p の関係 (図4-2-3-1-3) 及びピークエネルギーとエネルギー分解能 σ の関係 (図4-2-3-1-4) を明らかにし、 ^{131}I (364 keV) ピークに対する ROI₃₆₄ の範囲を決定した。本報告書では、 3σ ROI を用いた評価結果を記載しているが、実際の測定現場で、温度変化等によるゲインまたはエネルギー分解能の変動が予想される場合は、ROI の範囲を、 4σ または 5σ に設定する運用も考えられる。

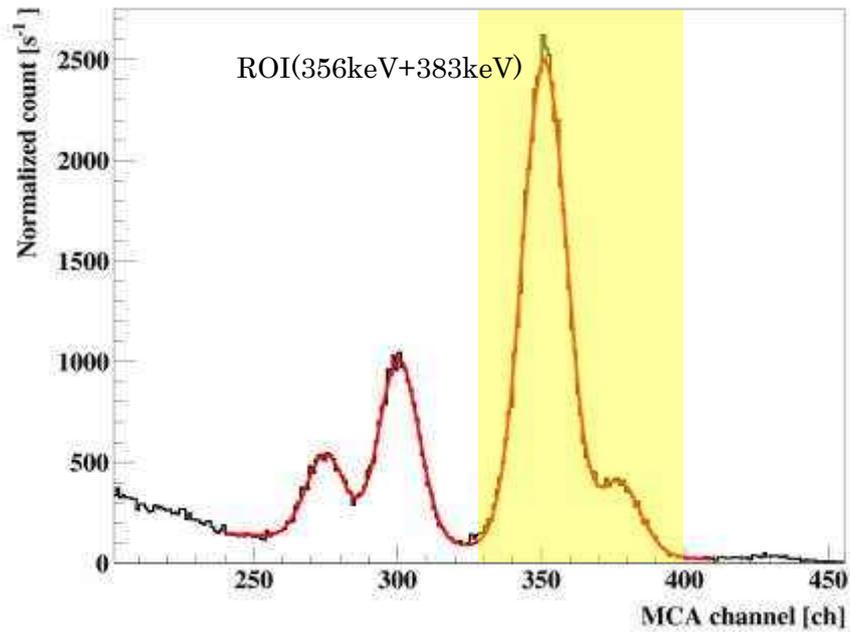


図 4-2-3-1-1 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器で取得した ^{133}Ba (276, 303, 356, 383 keV) の波高スペクトル (4つのガウス関数でフィッティング)

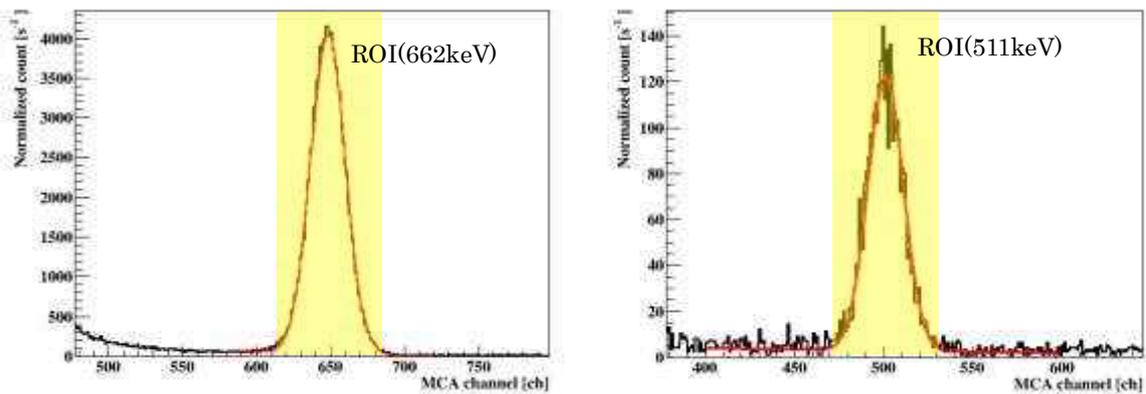


図 4-2-3-1-2 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器で取得した ^{137}Cs (662 keV) (左)、 ^{22}Na (511 keV) (右) の波高スペクトル (ガウス関数でフィッティング)

表 4-2-3-1-1 各ピークの x_p , σ 及び設定する ROI の範囲 (LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器)

エネルギー	x_p [ch]	σ [ch]		3σ ROI [ch]
276 keV	275	6.70	255-295	$(0.927x_p-1.073x_p)$
303 keV	300	6.93	280-321	$(0.931x_p-1.069x_p)$
356 keV	351	7.70	328-374	$(0.934x_p-1.066x_p)$
383 keV	377	7.22	356-399	$(0.943x_p-1.057x_p)$
511 keV	501	9.95	471-531	$(0.940x_p-1.060x_p)$
662 keV	648	11.8	613-684	$(0.946x_p-1.054x_p)$
364 keV	360	7.83	337-384	$(0.927x_p-1.073x_p)$

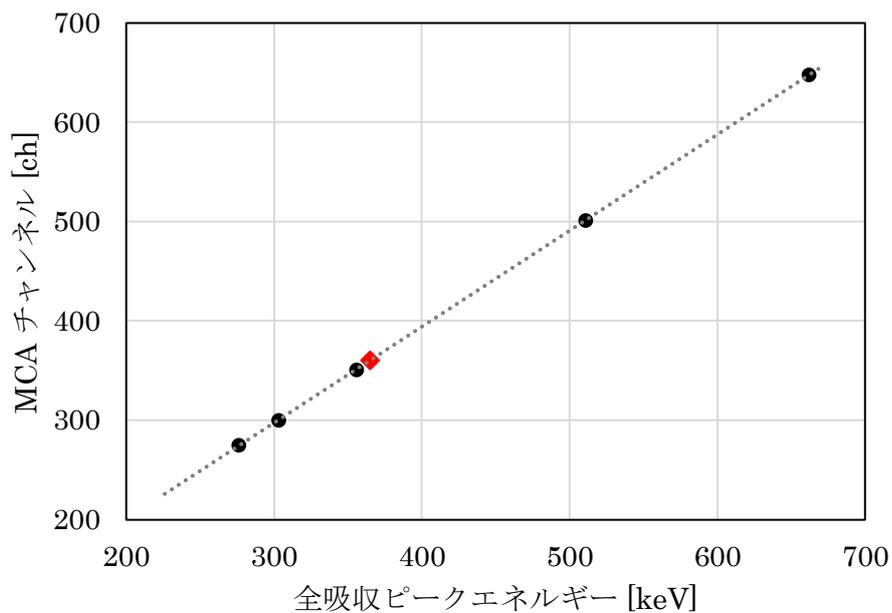


図 4-2-3-1-3 エネルギー校正直線 (ピークエネルギーとピークチャンネルの関係)

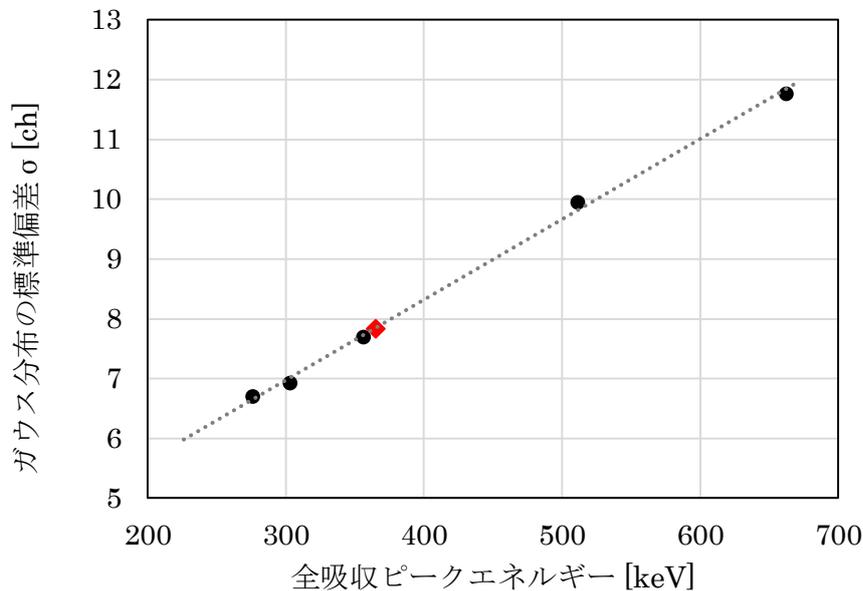


図4-2-3-1-4 ピークエネルギーとガウス分布の標準偏差 (σ) の関係

(2) 作業用 CdZnTe 検出器

CdZnTe 検出器により得られた波高スペクトル (^{133}Ba ; 356 keV, ^{137}Cs ; 662 keV) を図4-2-3-1-5に示した。エネルギー分解能 (FWHM) は、 ^{137}Cs (662 keV) に対して2.0%、 ^{133}Ba (356 keV) に対して2.8%であり、テクニカルシートと同程度の値が得られている。CdZnTe 検出器で得られる全吸収ピークは、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器のような左右対称なガウス分布ではなく低エネルギー側にテイルを引く。そこで、図4-2-3-1-5に示すように、ピークの右側半分をガウス分布で表現し、得られた標準偏差 σ に対して、右側に $+3\sigma$ 、左側に -7σ の範囲をROIに設定することにした。 ^{133}Ba (356 keV), ^{137}Cs (662 keV) の全吸収ピークに対して定義されるROIを、表4-2-3-1-2に示すとともに、図4-2-3-1-4に図示した。 ^{131}I (364 keV) ピークに対するROIは、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の場合と同様に ^{133}Ba (356 keV), ^{137}Cs (662 keV) のピーク解析から得られた結果を内挿して決定した。

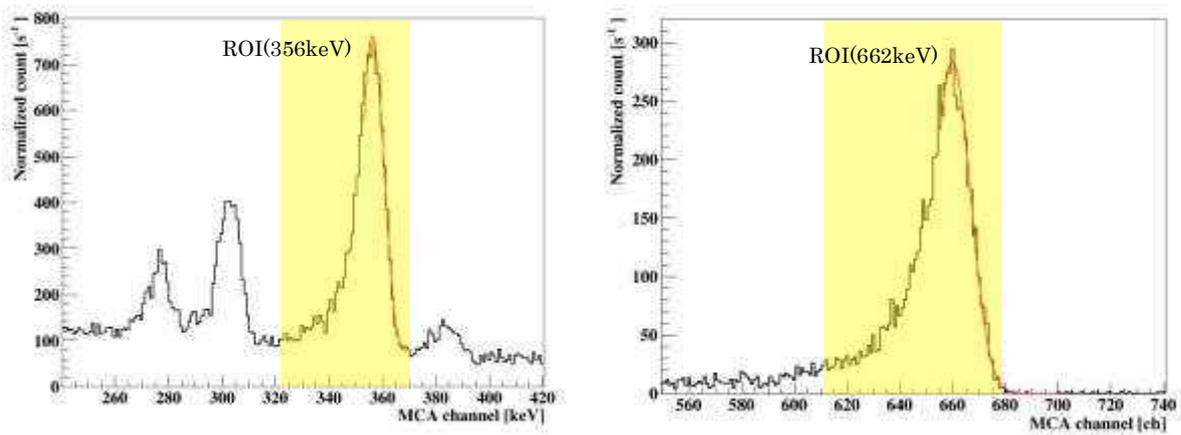


図 4-2-3-1-5 CdZnTe 検出器で取得した ^{133}Ba (356 keV) (左)、 ^{137}Cs (662 keV) (右) の波高スペクトル (ピークの右半分をガウス分布でフィッティング)

表 4-2-3-1-2 各ピークの x_p , σ 及び設定する ROI の範囲
(CdZnTe 検出器)

エネルギー	x_p [ch]	σ [ch]	$-7\sigma / +3\sigma$ ROI [ch]	
356 keV	356	4.91	322-371	$(0.903x_p - 1.041x_p)$
662 keV	660	6.88	612-681	$(0.927x_p - 1.031x_p)$
364 keV	365	4.95	330-380	$(0.905x_p - 1.041x_p)$

4. 2. 3. 2 γ 線標準校正場を用いた高線量率下での性能試験

原子力災害時においては、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、甲状腺モニタ実機について、高線量率環境下における測定性能を評価するために、放射線標準施設棟に整備している γ 線標準校正場において特性試験を実施した。実際の使用環境におけるバックグラウンド源の空間分布は分からないため、電動回転テーブル上に横置き、縦置きした測定器を一定速度（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に近い条件を模擬した（図4-2-3-2-1）。バックグラウンド環境を模擬する線源は、 ^{137}Cs 及び ^{60}Co を用い、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実機を設置して300秒（5分間）の照射を行った。

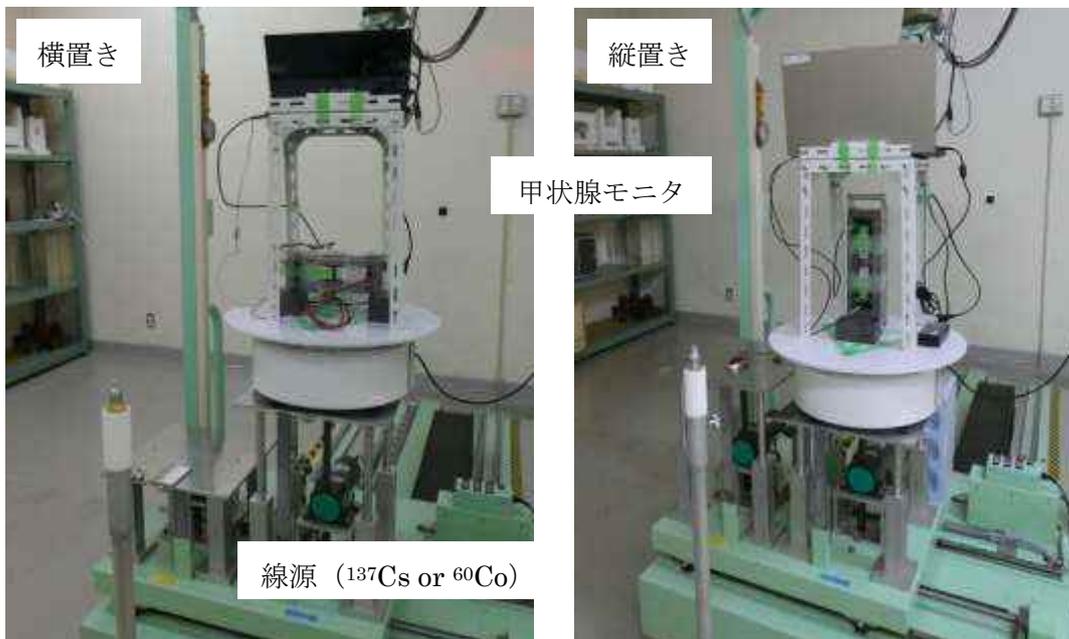


図4-2-3-2-1 高線量率下における甲状腺モニタの性能試験（ ^{137}Cs 、 ^{60}Co ）

^{137}Cs 、 ^{60}Co 線源を用いた照射により $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ 検出器で得られた波高スペクトルを図4-2-3-2-2及び図4-2-3-2-3に、 CdZnTe 検出器で得られた波高スペクトルを図4-2-3-2-4及び図4-2-3-2-5に示す。両検出器ともに、 $20\ \mu\text{Sv/h}$ の高線量率においても、信号のパイルアップ等による波高スペクトルの乱れは見られていない。両検出器ともに2対の検出器（det-1, det-2）で、 γ 線感度に多少の違いが見られているが、甲状腺 ^{131}I の定量は、2個の検出器の足し合わせにより評価するため、定量性能には影響を与えない。

$^{131}\text{I}(364\ \text{keV})$ の計数率を評価する際に使用する ROI_{364} を図中に示した。 ROI_{364} に含まれる $^{131}\text{I}(364\ \text{keV})$ ピーク計数が、連続成分のバックグラウンド計数の統計的ばらつきよりも

十分大きくなければ、有意なピークの検出とは言えない。言い換えると、ROI₃₆₄に含まれる連続バックグラウンド成分の計数が甲状腺モニタの検出限界値を決めることになる。そこで、¹³⁷Cs または ⁶⁰Co 線源で模擬した高バックグラウンド線量率下で得られた波高スペクトル情報から、以下に説明する方法で、甲状腺 ¹³¹I 放射能 [Bq]及び甲状腺等価線量の評価下限値[mSv]を見積もった。

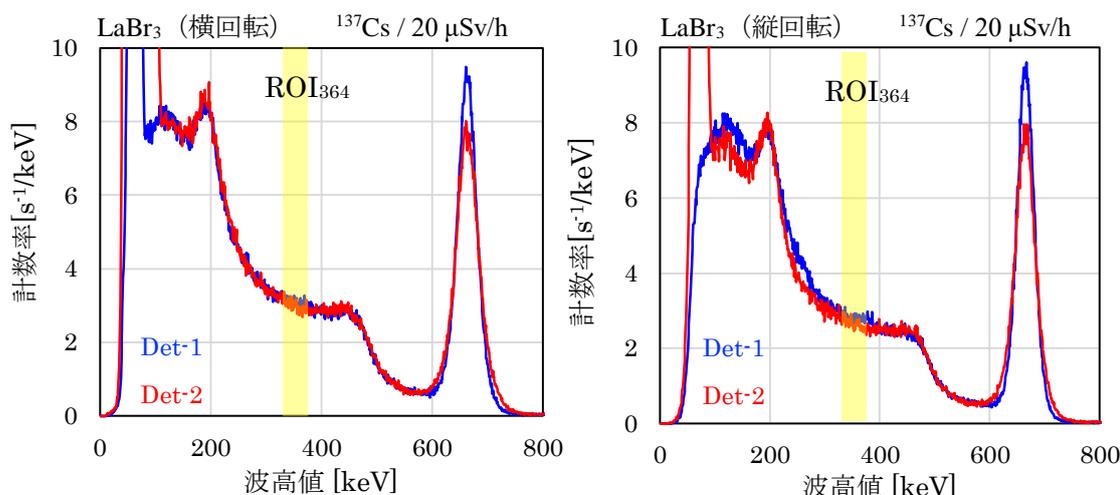


図 4-2-3-2-2 ¹³⁷Cs 20 μSv/h の高線量率下で LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器により得られた波高スペクトル

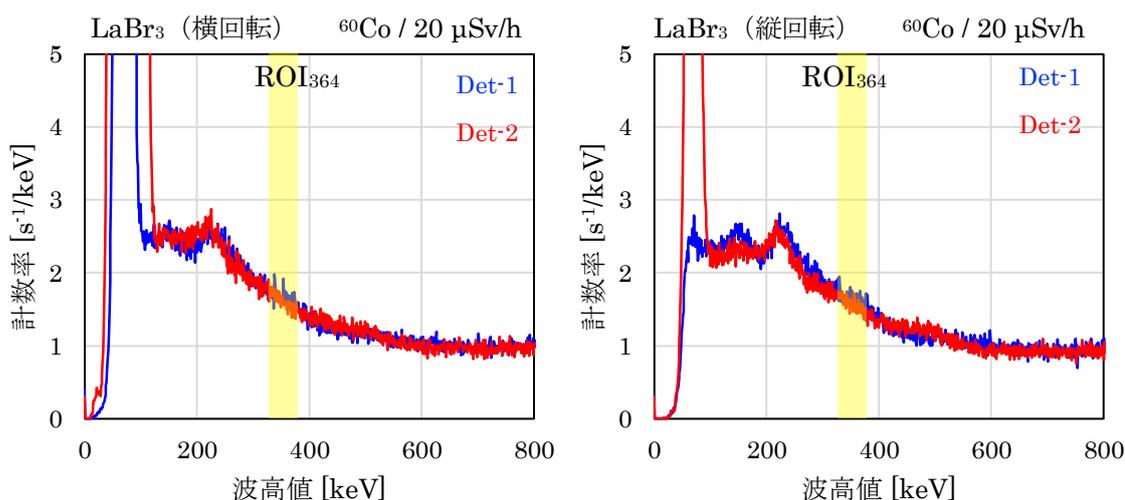


図 4-2-3-2-3 ⁶⁰Co 20 μSv/h の高線量率下で LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器により得られた波高スペクトル

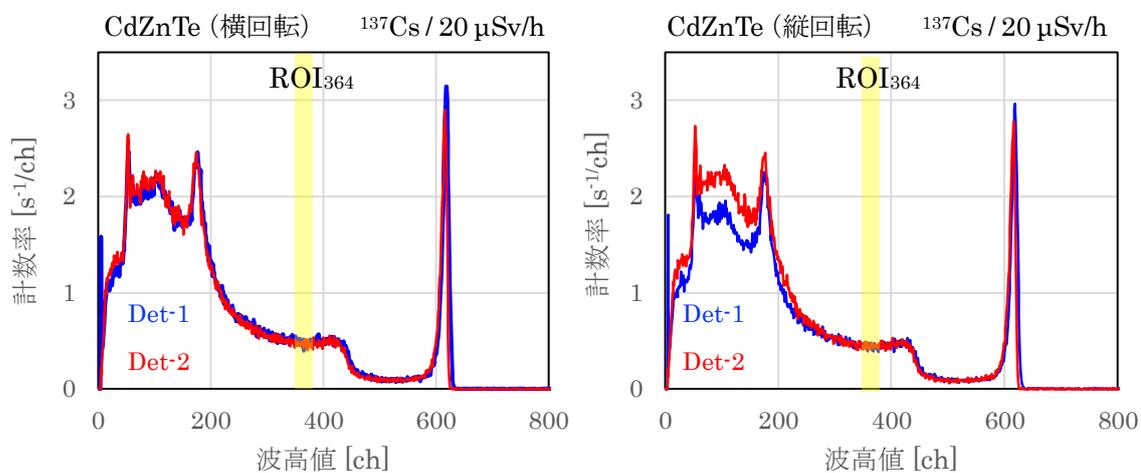


図 4 - 2 - 3 - 2 - 4 ^{137}Cs $20 \mu\text{Sv/h}$ の高線量率下で CdZnTe 検出器により得られた波高スペクト

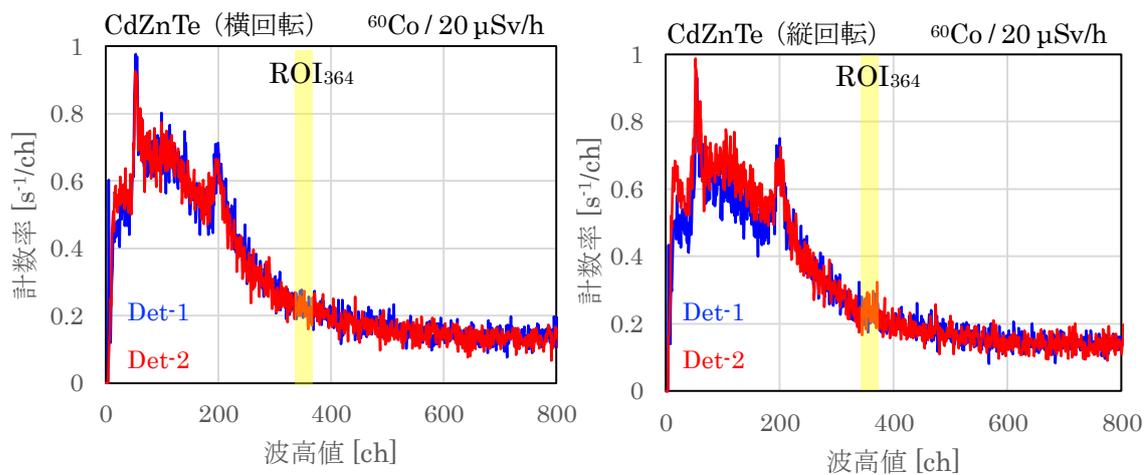


図 4 - 2 - 3 - 2 - 5 ^{60}Co $20 \mu\text{Sv/h}$ の高線量率下で CdZnTe 検出器により得られた波高スペクトル

検出限界放射能 DL[Bq]は、以下の式⁵⁾を基に計算する。

$$DL = \frac{\frac{k}{t\varepsilon_*} \left(k + 2 \sqrt{\frac{P}{2n_m} n_0 + \left(\frac{P}{2n_m} \right)^2 n_0} \right)}{1 - k^2 \frac{u^2(\varepsilon_*)}{\varepsilon_*^2}}$$

t : 測定時間 [s]

$k (=1.645)$

P : ROIに含まれるチャンネル数

n_m : ベースライン差し引きに用いるピーク隣接域のチャンネル数

n_0 : ピーク隣接域に含まれるバックグラウンド計数

ε_* : 計数効率 [s⁻¹/Bq]

ここでは簡単のため、計数効率の不確かさの項が与える影響は考慮しないこととした。また、ベースライン面積に関する項（平方根内）は、 $n_m = P/2$ とし、 n_0 をROI₃₆₄に含まれるバックグラウンド計数に置き換えることにより、以下のように簡略化した。

$$DL = \frac{k}{t\varepsilon_*} (k + 2\sqrt{2n_0})$$

n_0 : ROI₃₆₄に含まれるバックグラウンド計数

n_0 は、2個の検出器でそれぞれ得られたバックグラウンド計数を足し合わせたものとした。 ε_* は検出器2個あたりの計数効率であり、円筒型PMMA製簡易頸部ファントムを用いた校正により得られた値（表4-3-3-1）を使用した。

甲状腺等価線量の評価下限値 [mSv]は、上で得られた検出限界値から、以下の式を用いて計算した。

$$H_{thy,min} = \frac{DL}{F} \cdot CF_{thy}$$

F : 測定時における¹³¹Iの甲状腺残留率

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

公衆（成人、小児（5歳児）、乳児（3カ月児））及び作業者に対して得られた、検出限界放射能及び甲状腺等価線量の評価下限値を表4-2-3-2-1に示す。公衆については

LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器を使用した場合、作業者についてはCdZnTe検出器を使用した場合の条件を適用した。粒子状（公衆については粒径 1 μm、作業者については粒径 5 μm）の¹³¹Iを吸入摂取し、5日後に甲状腺測定を行ったと仮定した。公衆（大人、小児）及び作業者については、20 μSv/hの高線量率下においても、150秒の測定で、10 mSv以下の評価下限値が得られた。

表4-2-3-2-1 公衆及び作業者に対する甲状腺¹³¹Iの検出限界値
(20 μSv/h線量率下, 150 s測定)

BG線源	検出限界値 [Bq]			
	(甲状腺等価線量の評価下限値 [mSv])			
	公衆			作業者
	乳児 (3カ月児)	小児(5歳児)	成人	—
¹³⁷ Cs	615	633	944	2241
	(15.6)	(7.6)	(2.2)	(5.2)
⁶⁰ Co	459	473	706	1129
	(11.7)	(5.7)	(1.7)	(2.6)

公衆においては、避難所や拠点病院など、より低線量率の環境において測定が行われることが想定される。5 μSv/hの線量率下(20 μSv/h下で得られたバックグラウンド計数を1/4を適用して計算)において、測定可能な検出限界値を表4-2-3-2-6に示す。5 μSv/hの線量率下においては、乳児を含むすべての公衆及び作業者について、150秒の測定で、10 mSv以下の評価下限値が得られることが確認できた。ただし、乳児については、甲状腺モニタの上方から喉(甲状腺)を押し当てるような測定方法は困難と思われる。また、寝たきりや身体障害等により、上述の測定姿勢をとることが困難な場合も考えられる。これらの被検者に対する測定方法については、4.3.2.3項で検討した。

表4-2-3-2-2 公衆及び作業者に対する甲状腺¹³¹Iの検出限界値
(5 μSv/h線量率下, 150 s測定)

BG線源	検出限界値 [Bq]			
	(甲状腺等価線量の評価下限値 [mSv])			
	公衆			作業者
	乳児 (3カ月児)	小児(5歳児)	成人	—
¹³⁷ Cs	308	317	473	1128
	(7.8)	(3.8)	(1.1)	(2.6)
⁶⁰ Co	231	237	354	572
	(5.9)	(2.8)	(0.8)	(1.3)

4. 2. 3. 3 福島第一原子力事故直後の高線量率下における性能評価

線源核種として ^{137}Cs 及び ^{60}Co を想定した場合の高バックグラウンド線量率下での甲状腺モニタ測定器の測定性能については、4. 2. 3. 2 項で詳述した通り γ 線標準校正場において試験を行い評価した。高田らにより福島第一原子力発電所の事故直後の 2011 年 3 月 17 日から 3 月 19 日にかけて、可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用いて福島県福島市内において環境中にある γ 線放出核種の測定がなされた⁶⁾。その結果、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 以外の多数の核種が環境中の線量を上昇させる線源として観測された。そこで、事故直後の様々な核種からの γ 線がバックグラウンド放射線として存在しているときの甲状腺モニタ測定器の性能について、数値ファントムを用いた計算により評価することを試みた。

高田らの測定結果⁶⁾に基づいて、計算において線源とした核種とそれらの放射能比を表 4-2-3-3-1 に示す。このうち、親核種と娘核種の関係にある $^{132}\text{Te}-^{132}\text{I}$ 及び $^{129\text{m}}\text{Te}-^{129}\text{Te}$ については、PHITS の計算において、親核種の半減期に対して 10 倍の時間が経過して、放射平衡が成立しているものとした。なお、同様に親核種-娘核種の関係にある $^{131\text{m}}\text{Te}-^{131}\text{I}$ については、娘核種の方が長い半減期となることから、それぞれの核種について独立に計算を行った。高田らの測定は福島市内で得られた結果であるため、今回の評価対象は、公衆用のシステムとした。

表 4-2-3-3-1 評価対象とした核種と放射能比

核種 (娘核種)	^{131}I	^{132}Te (^{132}I)	^{134}Cs	^{136}Cs	^{137}Cs	^{140}La	$^{129\text{m}}\text{Te}$ (^{129}Te)	$^{131\text{m}}\text{Te}$	$^{99\text{m}}\text{Tc}$
半減期	8.04d	78.2h (2.3h)	2.062y	13.16d	30.0y	40.27h	33.6d (69.6m)	30h	6.01h
放射能比	15	90	40	9	30	0.8	50	1.5	0.8

図 4-2-3-3-1 に評価に用いた計算体系を示す。小児と成人男性の数値ファントムと甲状腺モニタ測定器を組み合わせた計算体系を作成した。そして、様々な核種から放出された γ 線について、全方位から等方に検出器に入射した場合の検出器の応答（波高分布）を PHITS コードで計算した。

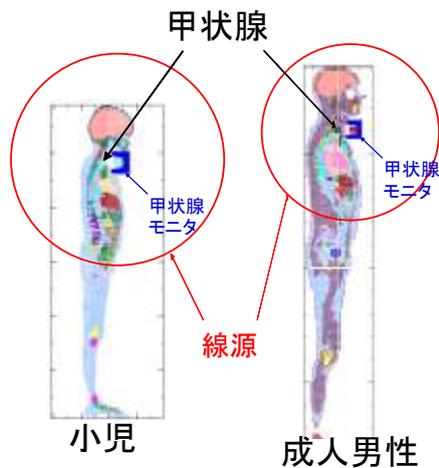


図 4-2-3-3-1 バックグラウンド放射線の影響を評価するために数値ファントムと甲状腺モニタ測定器を組み合わせた計算体系

次に、 ^{131}I からの 364 keV γ 線全吸収ピークの ROI 領域に寄与するバックグラウンド計数を導出し、この計数に基づいて甲状腺等価線量の測定下限値を評価した。なお、PHITS コードによる計算で得られた検出器の波高分布には、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器のエネルギー分解能が考慮されていない。そこで、図 4-2-3-3-2 に示す γ 線ピークエネルギーとエネルギー分解能の関係の実測結果 (4.2.3.1 項参照) を利用して、計算で得られた波高分布にガウス分布を適用することにより、甲状腺モニタの波高分布を導出した。周辺線量当量率 ($H^*(10)$) を $20 \mu\text{Sv/h}$ としたときの計算で得られた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の応答 (波高分布) を図 4-2-3-3-3 に示す。この結果から、 ^{131}I からの 364 keV γ 線全吸収ピークの ROI 領域のバックグラウンド計数と検出限界放射能、甲状腺等価線量の測定下限を評価した結果を表 4-2-3-3-2 に示す。この結果、成人、小児ともに $20 \mu\text{Sv/h}$ の高バックグラウンド線量率下でも 10 mSv の甲状腺等価線量の測定下限値を担保できることが分かった。

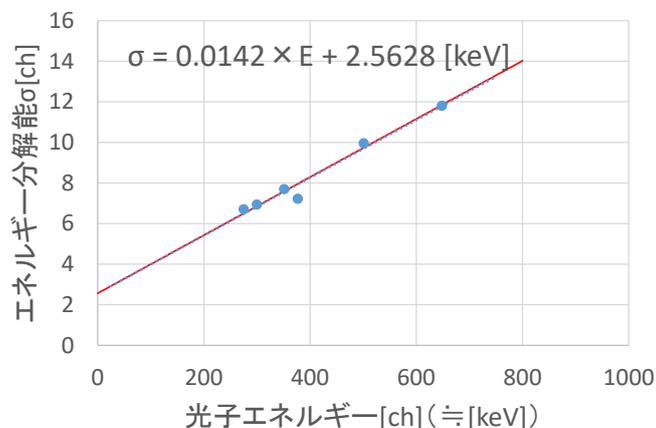
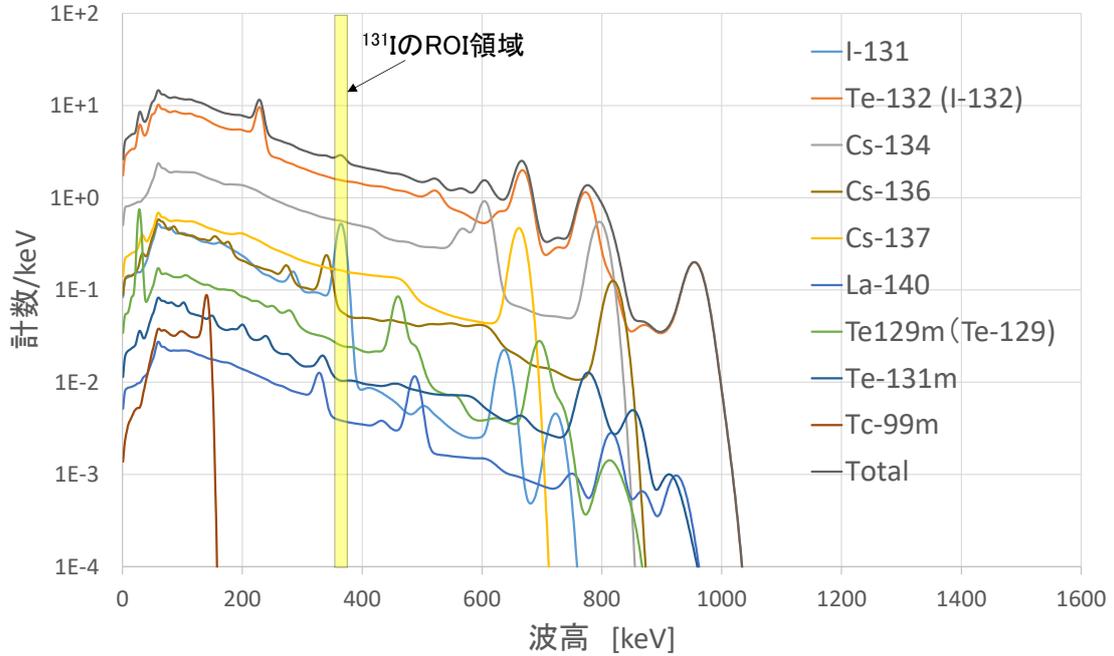


図 4-2-3-3-2 光子ピークエネルギーとエネルギー分解能の関係

(a) 成人男性測定時のバックグラウンド波高分布 $H^*(10):20\mu\text{Sv/h}$



(b) 小児測定時のバックグラウンド波高分布 $H^*(10):20\mu\text{Sv/h}$

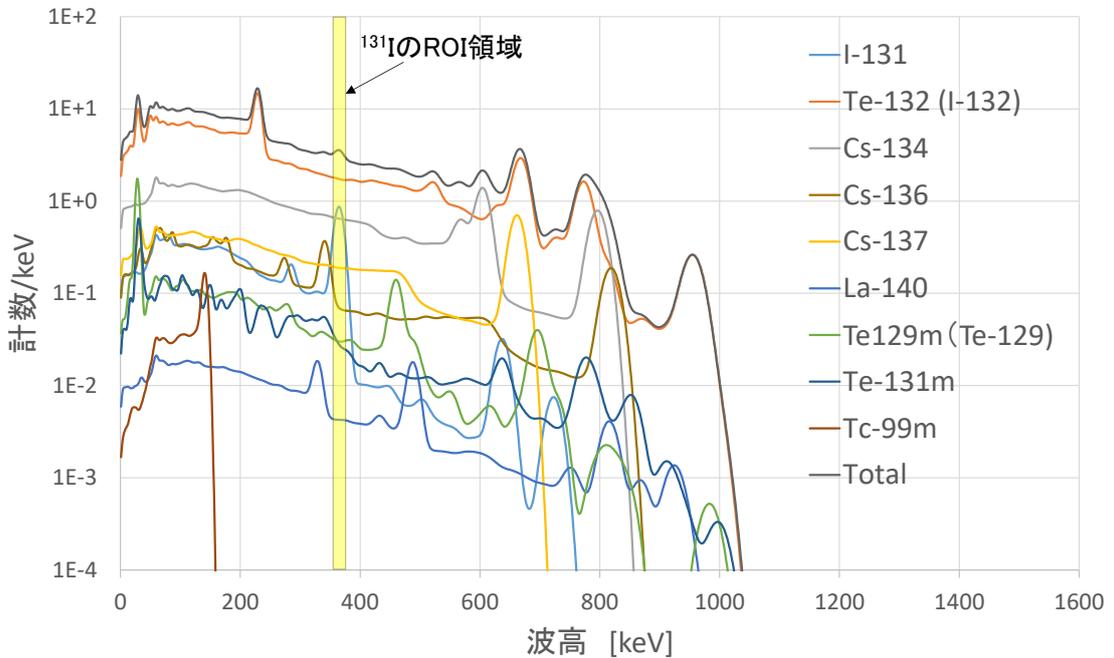


図 4 - 2 - 3 - 3 - 3 計算で得られた $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション
検出器の応答 (波高分布)

表 4-2-3-3-2 バックグラウンド計数と検出限界値

$H^*(10)$	20 μ Sv/h		5 μ Sv/h	
	成人	小児	成人	小児
B.G.計数率[cps]	130	156	32.5	39.0
検出限界放射能[Bq]	651	478	327	240
甲状腺等価線量評価 下限[mSv]	1.5	5.7	0.8	2.9

4. 2. 3. 4 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の自己汚染による影響評価

LaBr₃(Ce)シンチレーション結晶は、放射性同位体 ¹³⁸La (天然存在比 0.09)及びウラン系列・トリウム系列のα崩壊核種を自己バックグラウンド源として含んでおり、崩壊に伴い放出されたα線、β線、及びγ線 (788.7 keV, 1435.8 keV) が波高スペクトル中にイベントを形成する⁷⁾。ここでは、LaBr₃(Ce)の自己バックグラウンドイベントが、甲状腺モニタの測定性能に与える影響を評価した。

図4-2-3-4-1に示すように、周囲の環境バックグラウンド放射線を遮断するために Ge 検出器用の鉛遮蔽体の内部に検出器を設置し、通常使用時の半分のゲインにして LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の自己バックグラウンドを測定した。取得したバックグラウンドスペクトルを、図4-2-3-4-2に示す。500 ch 以上に分布する ²²⁷Ac のα線に起因するイベントは、1.5-3 MeV のエネルギー領域に局在しており、¹³¹I(364 keV)の評価領域にはイベントを形成しない。一方で、¹³⁸La 由来の 1435.8 keV 及び 788.7 keV のγ線は、¹³¹I(364 keV)評価領域にコンプトン散乱によるイベントを形成しており、甲状腺 ¹³¹I の検出限界値に影響を与え得る。なお、2個の検出器は、中心間を約4 cm 離して設置しており、1435.8 keV 及び 788.7 keV のγ線ピークは、自己の結晶だけでなく、もう一方の結晶から放出されたγ線を検出したイベントも含んでいる。



図4-2-3-4-1 Ge 用鉛遮蔽体を用いた LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の自己バックグラウンド測定の様子

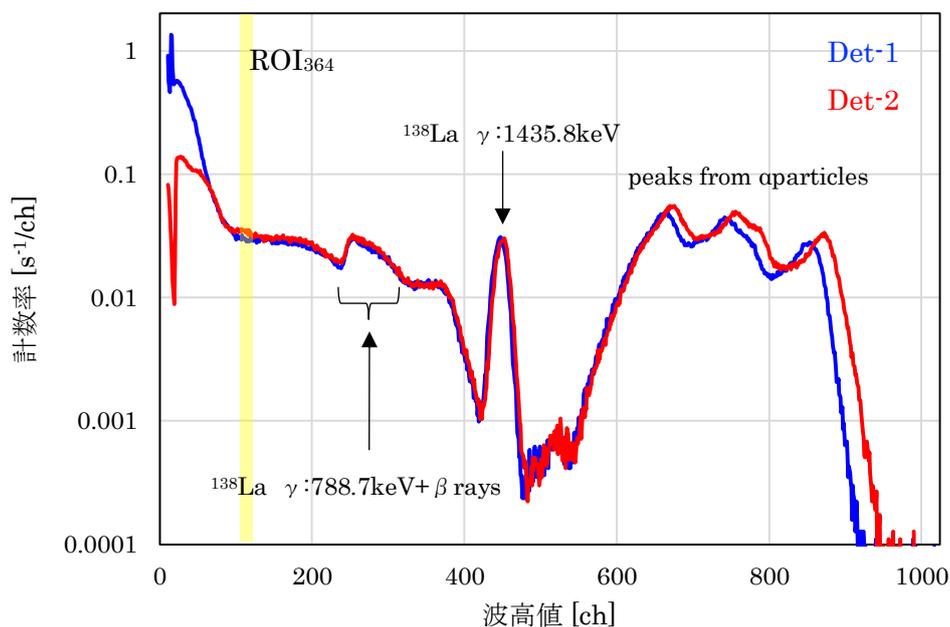


図 4-2-3-4-2 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の
自己バックグラウンドスペクトル

表 4-2-3-4-1 に、2 個の検出器(det-1, det-2)で得られた、 γ 線(1435.8 keV)イベント及び α 粒子イベントの計数率を示した。LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器を用いた甲状腺モニタを、将来的に量産するようなケースにおいては、原料ロットごとに、自己バックグラウンド源の含有率に差異が生じることが想定される。ここで得られたバックグラウンド計数率は、LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の品質を確認するための指標として利用できると思われる。

表 4-2-3-4-3 ^{138}La γ 線及び ^{227}Ac α 線のバックグラウンド計数率

	計数率 [s ⁻¹]		
	ROI	det-1	det-2
^{138}La γ (1435.8 keV)	420-480	0.6	0.6
^{227}Ac α particles	500-1023	8.0	9.3

甲状腺測定を行うときと同じゲインで測定した、Ge 用鉛遮蔽体内部で測定した自己バックグラウンドスペクトルを図 4-2-3-4-3 に、一般的な事務室(コンクリート建物の

2階)において測定したバックグラウンドスペクトル(環境放射線を含む)を図4-2-3-4-4に示した。図中に示した ^{131}I 364 keVの評価領域(ROI₃₆₄)における連続成分の計数を表4-2-3-4-2に、検出限界値及び甲状腺等価線量の評価下限値を表4-2-3-4-3に示した。この表に記載した値が、原子力事故由来の放射性物質による汚染がない状況における甲状腺モニタの性能を示すと考えられる。

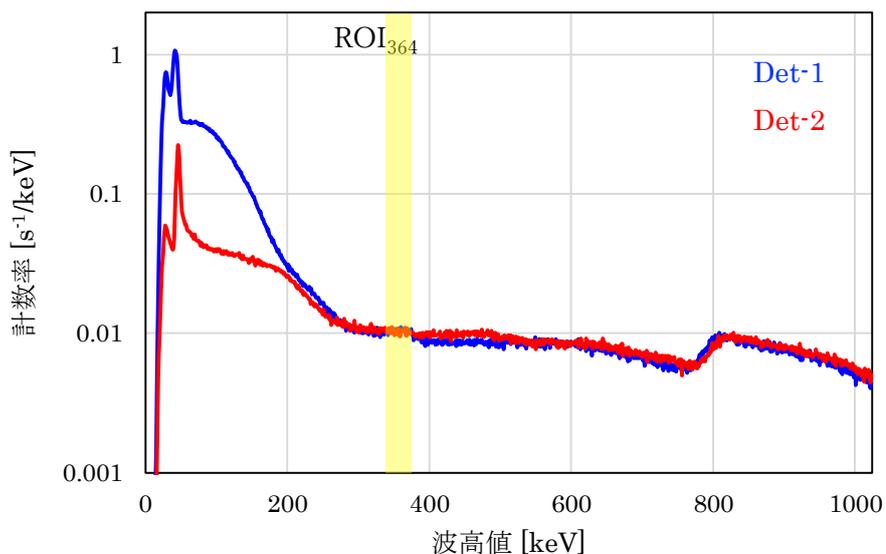


図4-2-3-4-3 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の自己バックグラウンドスペクトル(Ge用鉛遮蔽体の内部で測定)

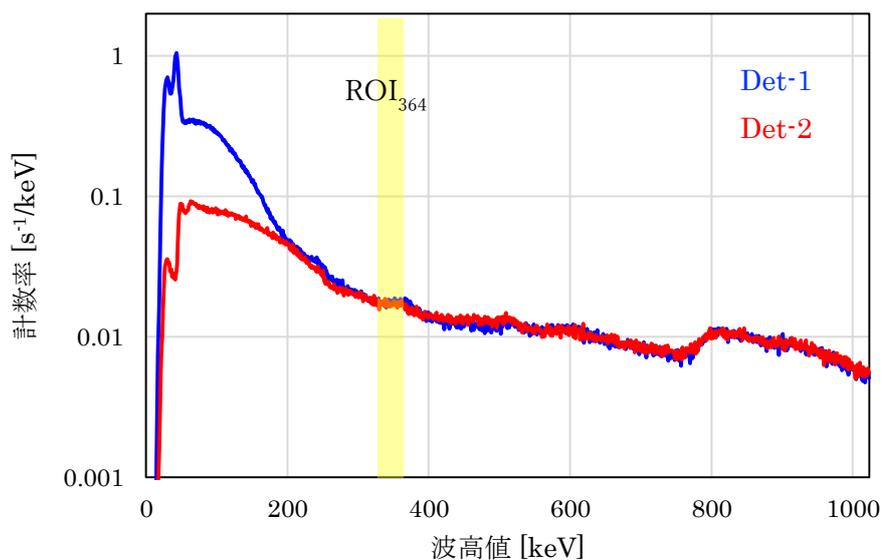


図4-2-3-4-4 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器で得られたバックグラウンドスペクトル(一般的な事務室環境中で測定)

表 4-2-3-4-2 ROI₃₆₄(364 keV 評価領域)中のバックグラウンド計数率

	ROI	計数率 [s ⁻¹]	
		Det-1	Det-2
自己バックグラウンド	337-384	0.5	0.5
環境バックグラウンド含む	337-384	0.8	0.8

表 4-2-3-4-3 公衆に対する甲状腺 ¹³¹I の検出限界値 (150 秒測定)

BG 源	検出限界値 [Bq]		
	(甲状腺等価線量の評価下限値 [mSv])		
	公衆		
	乳児 (3 カ月児)	小児(5 歳児)	成人
自己バック	38	40	59
グラウンド	(1.0)	(0.5)	(0.1)
環境バックグラ	49	50	75
ウンド含む	(1.2)	(0.6)	(0.2)

4. 2. 3. 5 検出器の温度特性評価

開発した甲状腺モニタは、緊急時に使用されることが想定される。従って、測定時の室温調節が必ずしも維持されているとは想定できず、完成した甲状腺モニタシステムについてその温度特性を把握しておく必要がある。そこで、図4-2-3-5-1に示すように、恒温槽内に $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器と信号処理回路、 CdZnTe 検出器、及び ^{137}Cs 線源と ^{133}Ba 線源を配置して、温度変化に伴う応答を調べた。各温度で、十分に熱平衡状態になっていることを確認するために、恒温槽内に2本の温度センサ(ティアンドデイ製 TR-71Ui : 1本は気中に、もう1本は検出器を模擬したアクリル内に設置)を設置し、2本の温度センサの指示値が ± 0.3 °C以内で一致するのを待ってから測定を行った。湿度気圧については、別の温湿度気圧計(ティアンドデイ製 TR73-U)で監視し、相対湿度は4~31%、気圧は1016.3~1019.5 hPaの範囲であった。

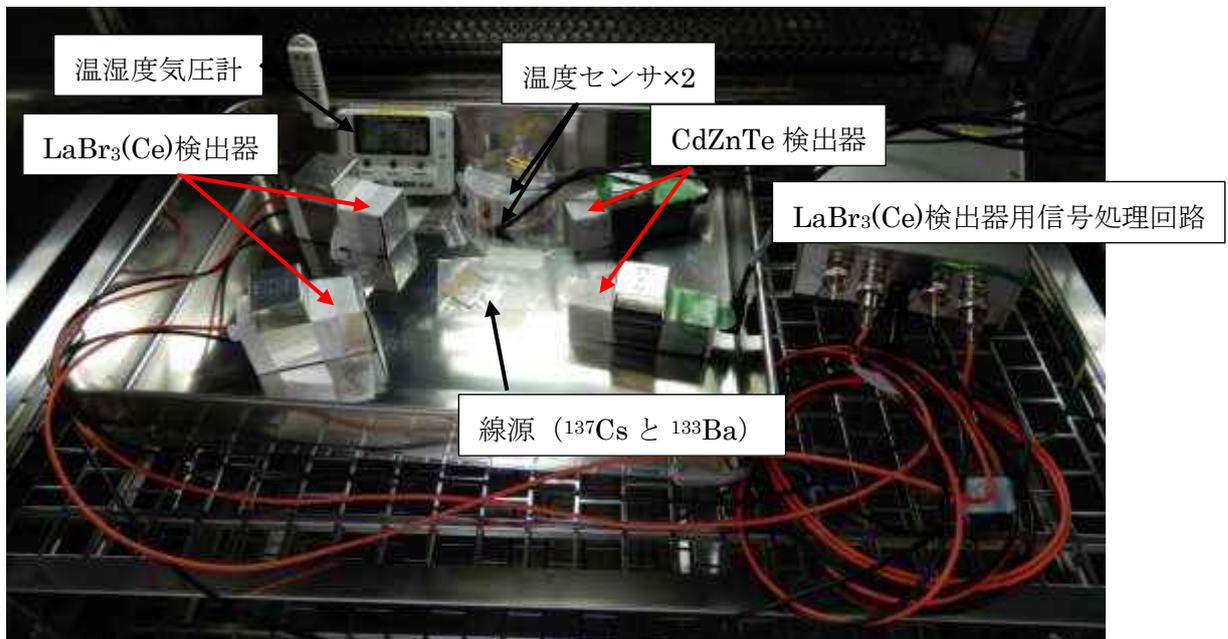


図4-2-3-5-1 温度特性試験の様子

公衆用甲状腺モニタシステム ($\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器) 及び作業用甲状腺モニタシステム(CdZnTe 検出器)について、得られた波高スペクトルを図4-2-3-5-2及び図4-2-3-5-3に示す。 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器については、Casanovasらの報告⁸⁾と同様なピークシフトが見られた(図4-2-3-5-4(a))。一方で、 CdZnTe 検出器については、有意なピークシフトは観測されず、Parkらも報告⁹⁾しているように、温度上昇に従う分解能の低下のみ認められた(図4-2-3-5-4(b)及び図4-2-3-5-5(b))。公衆用甲状腺モニタシステムに関しては、実際の測定の際、温度変化によるゲインのシフトに留意し、4. 2. 3. 1項に示すように適切なゲインの調整

あるいは ROI の設定を行う必要がある。適切なゲイン調整及び ROI 設定の基では、図 4-2-3-5-6 に示すように、公衆、作業用何れのシステムにおいても、温度変化に伴う有意なピークカウントの変化はなく、定量に影響はない。

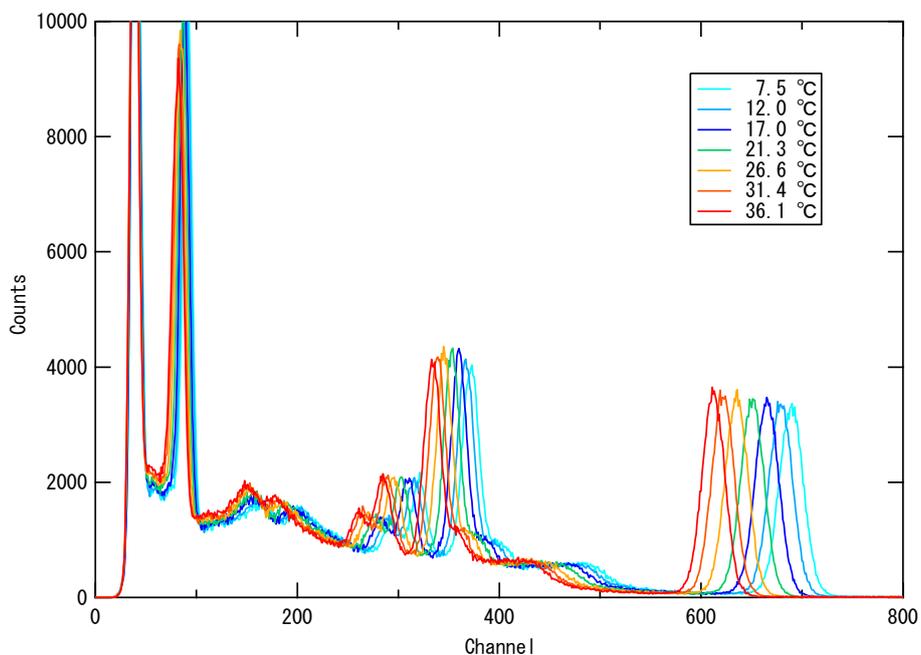


図 4-2-3-5-2 公衆用甲状腺システムの $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器（検出器 1）の各温度における波高スペクトル

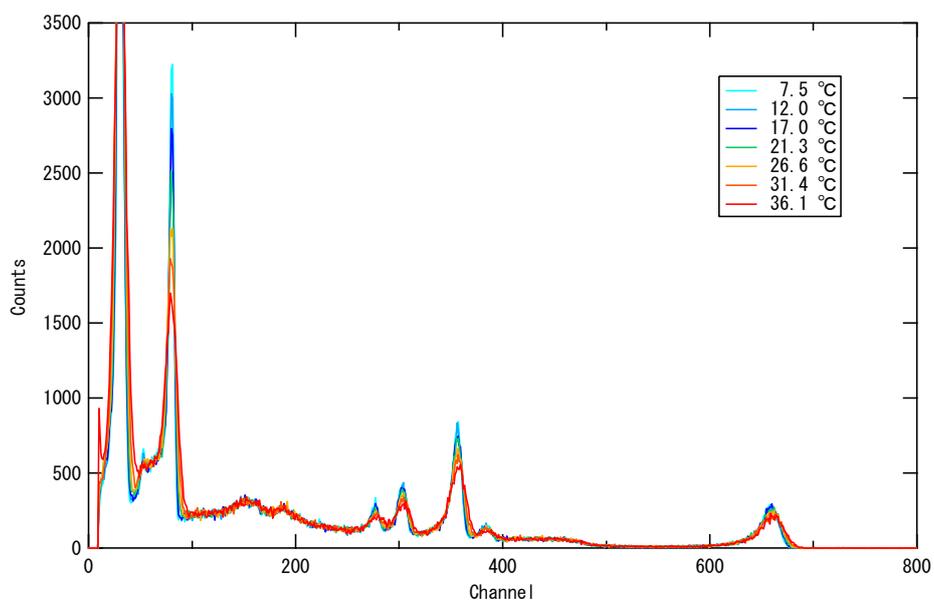
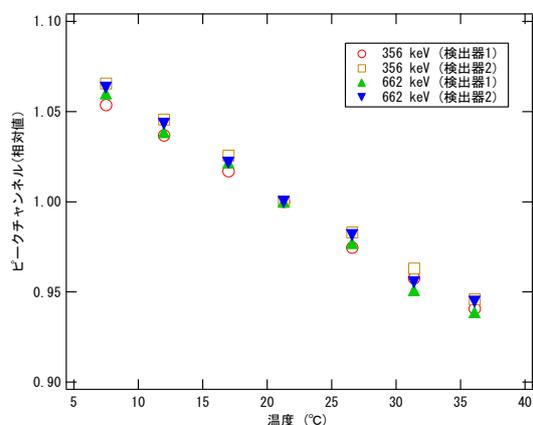


図 4-2-3-5-3 作業用甲状腺システムの CdZnTe 検出器（検出器 1）の各温度における波高スペクトル

(a)



(b)

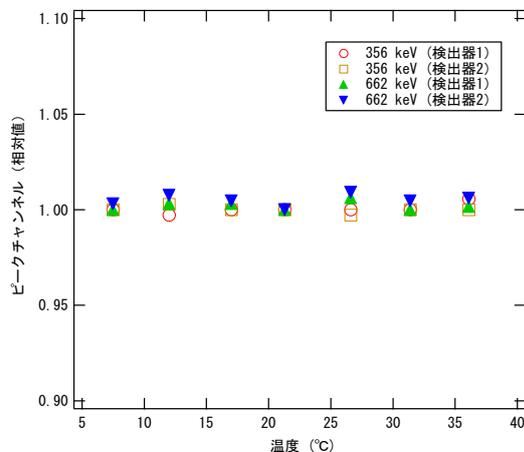
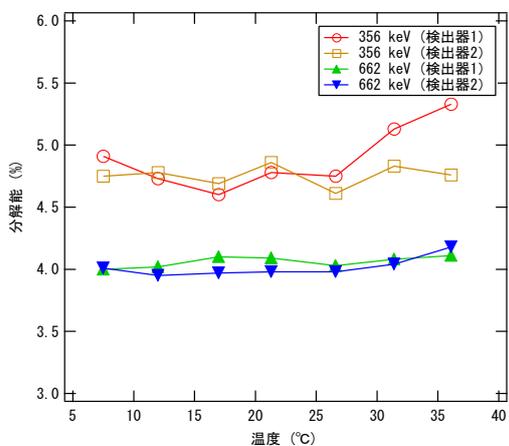


図 4-2-3-5-4 温度によるピークチャンネルの変化
(21.3°Cに対する相対値として示した)

(a) 公衆用甲状腺システム(LaBr₃(Ce))、(b) 作業用甲状腺システム (CdZnTe)

(a)



(b)

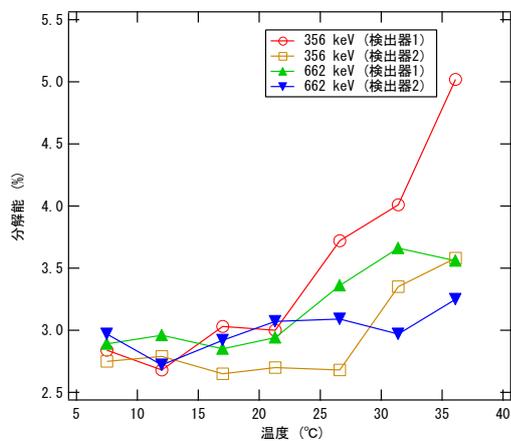


図 4-2-3-5-5 温度による分解能の変化

(a) 公衆用甲状腺システム(LaBr₃(Ce))、(b) 作業用甲状腺システム (CdZnTe)

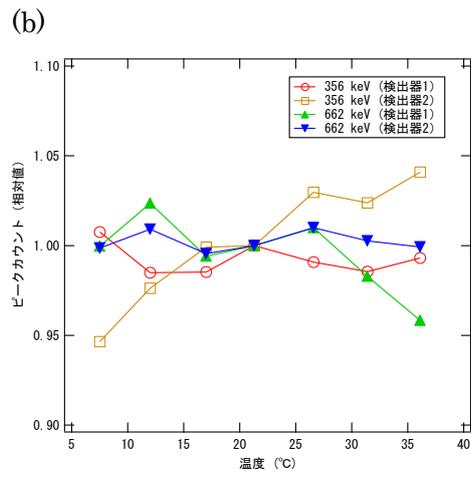
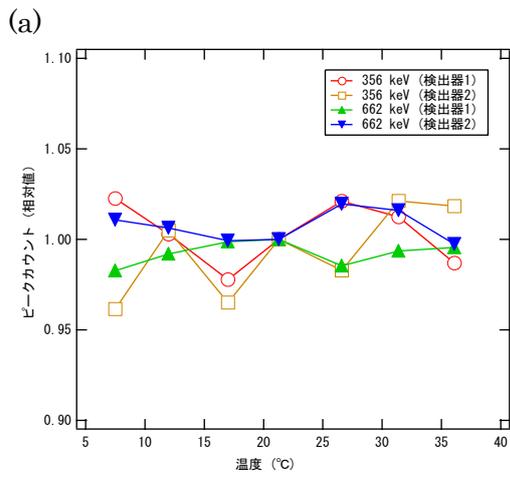


図 4-2-3-5-6 温度によるピークカウントの変化
(21.3°Cに対する相対値として示した)

(a) 公衆用甲状腺システム(LaBr₃(Ce))、(b) 作業用甲状腺システム (CdZnTe)

4. 3 甲状腺モニタシステムの開発

4. 3. 1 概要

平成 30 年度に実施した概念設計を基に、検出器用遮蔽体への取付けが可能で、被検者と検出器の位置関係を固定するための測定治具及び甲状腺モニタシステム設置用器具を製作した。うつ伏せの姿勢での長時間測定が困難な乳児、妊婦、身体不自由者について、仰臥位で寝かせた姿勢での測定が可能かについて検討した。そして、検出限界値や不確かさの評価を行い、測定条件を標準化した。また、甲状腺モニタシステムの校正に用いる円筒型 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を製作して、校正条件を標準化した。さらに、高線量率下での測定を考慮して、バックグラウンド放射線による影響の補正を可能とするためのバックグラウンド放射線測定用治具を製作した。

製作した実機及び治具類を用いた甲状腺モニタシステムについて、公衆用システム及び作業用システムのそれぞれの使用法に係るマニュアルを作成した。

4. 3. 2 測定条件標準化法の開発

4. 3. 2. 1 測定治具（検出器固定用治具）の開発

開発した甲状腺モニタシステムで被検者の甲状腺に蓄積された ^{131}I の放射能を正確に定量するためには、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器又は CdZnTe 検出器の計数効率の精度が要求される。この検出効率は線源（被検者の甲状腺）と検出器の距離に大きく依存する。このため、被検者の甲状腺と検出器の位置関係を正確に決定できる測定治具（検出器固定用治具）の開発が必須となる。そこで、平成 30 年度事業で実施した概念設計に基づいて、検出器用遮蔽体の上部に取り付け可能な測定治具を製作した。

測定治具の開発は、試行錯誤が必要と考えられたため、設計変更に対応でき、複雑な形状を自在に製作可能な 3D プリンタ（サンステラ製 UP BOX+）を用いて実施した。製作した測定治具を図 4-3-2-1-1～2 に示す。

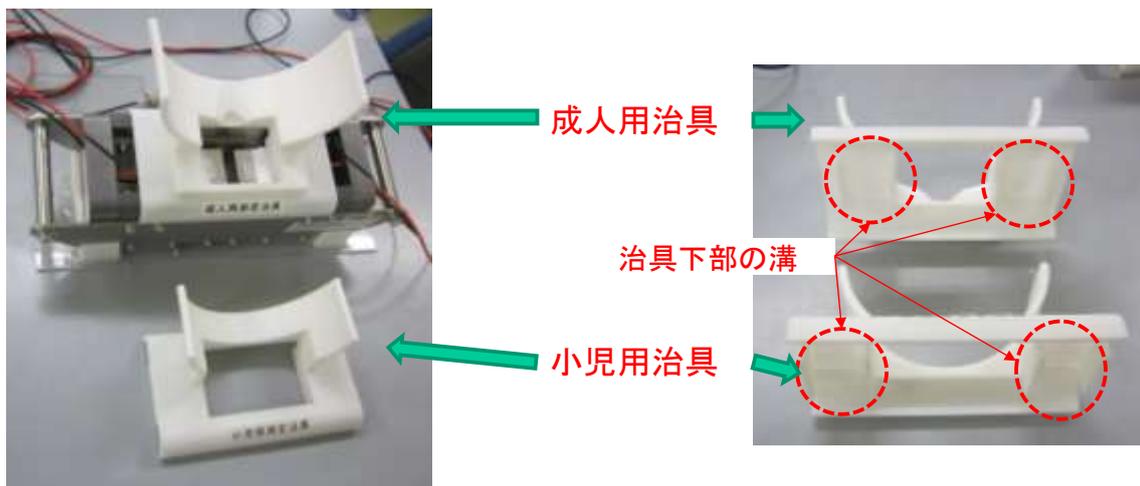


図 4-3-2-1-1 公衆用甲状腺モニタシステムの測定治具

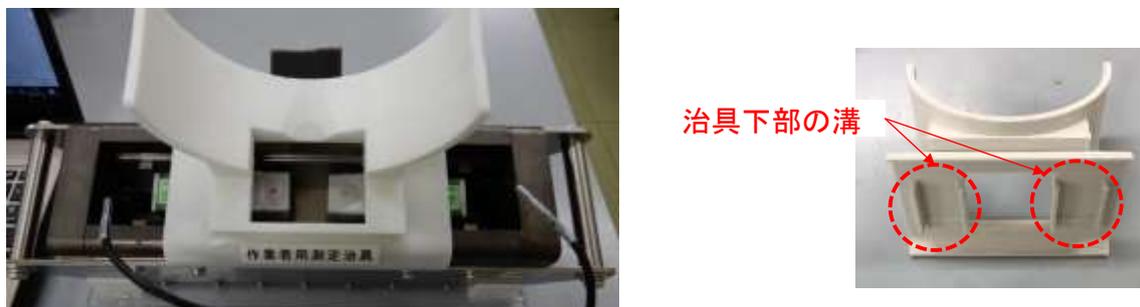


図 4-3-2-1-2 作業用甲状腺モニタシステムの測定治具

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 6 cm に、成人に対しては 4 cm と決定した⁹⁾。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、図 4-3-2-1-1～2 の右側に示すように、測定治具の下部にある溝が検出器上部遮蔽体の両側を挟み込む構造とした。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、年齢群に応じた測定治具を選択することにより、適切な検出器間距離が間違えることなく設定できる。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、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、人体への有害性が認められず、接触しても不快に感じにくい材質であることを考慮して、様々な製品に広く使用されている複数の樹脂を組み合わせることとした。

直接被検者と接する円弧型のサポート部には、軟質ウレタン樹脂であるポリウレタン系熱可塑性エラストマー (TPU) 樹脂を採用した。TPU 樹脂は、ゴムのように柔軟性を持つため、被検者により頸径などの個人差がある場合においても、それを吸収できる。また、軟質であるため、頸部を押し付けても不快に感じにくい。さらに、スマートフォンのケース、工具のグリップ、自動車のパネル表面等の人体と直接接触する製品に使用されている¹⁰⁾。

検出器用遮蔽体への取付部については、検出器位置を正確に決定できるように硬質の材質とする必要があった。そこで、生分解性でバイオマス由来であるため、環境に対する負荷が小さく、3D プリンタで硬質の成形が容易な PLA (ポリ乳酸) 樹脂を採用した¹¹⁾。PLA 樹脂は食品トレイ、家電製品の外装等にも利用されており、人体への有害性が認められていない。

4. 3. 2. 2 甲状腺モニタシステム設置用器具等の開発

開発した甲状腺モニタシステム設置用器具等一式を図4-3-2-2-1に示す。正確な測定のためには、被検者が前かがみになったときに、テーブルなどに設置した甲状腺モニタの遮蔽体上面と頸部とが平行にしなければならない。このためには、検出器遮蔽体を前向きに傾斜させる必要があるため、遮蔽体傾斜用台を製作した。さらに、測定治具のみで頭部の荷重を支えた場合、頸部への負担が大きく不快感がある事から、顎サポート台を製作して頭部の荷重を分散できるように工夫した。

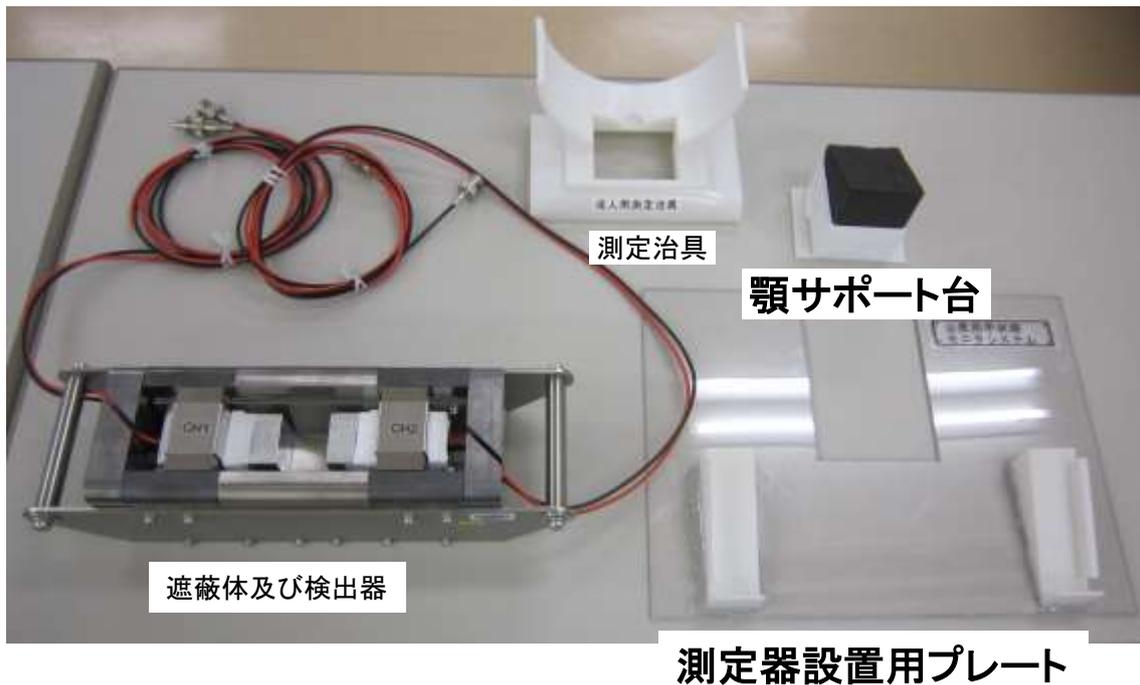


図4-3-2-2-1 公衆用甲状腺モニタシステム設置用器具類（顎サポート台及び測定器設置用プレート）の写真

遮蔽体傾斜台の製作にあたり、傾斜角度について検討した。前傾角度が15度と25度になる2種類の傾斜台を試作し、甲状腺簡易測定研修でのデモンストレーションにおいて、研修参加者に体感してもらい、その時の感想や意見を聴取した。その結果、15度が身体への負担もなく測定に適していることが判明した。そこで、図4-3-2-2-2右側に示す遮蔽体傾斜台を3Dプリンタで作製した。



測定器設置用プレートへの遮蔽体の設置／遮蔽体傾斜用台(右側)

図4-3-2-2-2 測定器設置用プレートと遮蔽体傾斜用台の写真

頭部の荷重を頸部から分散させるために、図4-3-2-2-3に示す顎サポート台を製作した。顎が直接接触する部分には荷重がかかるため、不快に感じることがないように、台の本体は硬質ウレタンフォームで作製し、PLA樹脂で作製した土台に固定した。顎サポート台の上面を水平ではなく、斜めにするるとともに、顔面の上下方向(図4-3-2-2-3右側の写真で左右方向)に自由に動かすことができるようにした。これにより、被検者の頸部と顎の距離に個人差がある場合でもその差を吸収できるように工夫した。当初、台の高さは、50 mm～70 mm と 70 mm～90 mm の2種類を用意したが、第2回実務者会合でのデモンストレーションにおいて、大多数の参加者から70 mm～90 mmの方が頸部への負担が小さいとの意見があったことから、顎サポート台の高さを70 mm～90 mmに決定した。

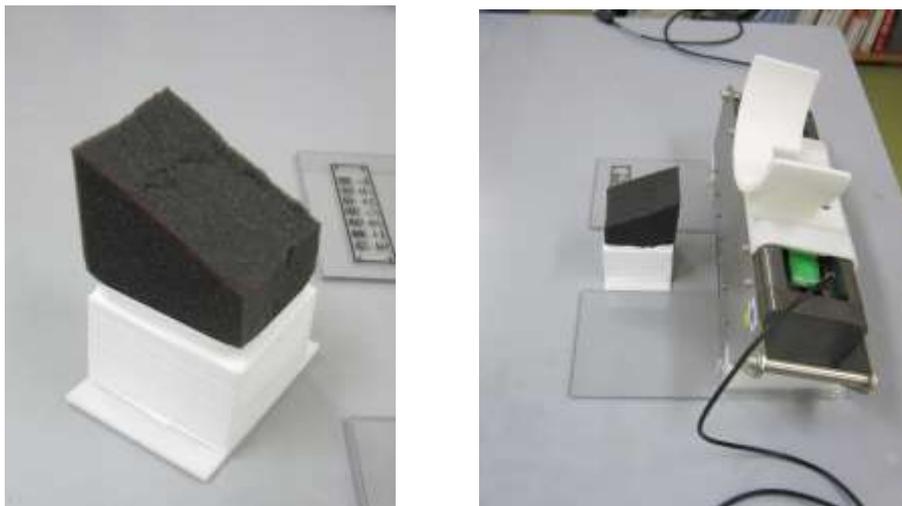


図4-3-2-2-3 製作した顎サポート台(右側が使用時の状態)

顎サポートが検出器用遮蔽体の中心軸から左右にずれた場合、被検者の甲状腺と検出器の位置にずれを生じさせ、測定精度に影響する可能性がある。そこで、厚さ 3 mm、横 300 mm、縦 225 mm のポリエチレンテレフタレート製の平板に遮蔽体傾斜用台を接着することにより、甲状腺モニタ測定器の位置を固定できる測定器設置用プレートを製作した（図 4-3-2-2-1 参照）。そして、図 4-3-2-2-3 右側のように顎サポート台の可動部分に、切り欠きを設けることにより、顎サポート台を甲状腺モニタ測定器の左右方向のずれが生じないような構造とした。これらの甲状腺モニタシステム設置用機器を用いて被検者の甲状腺測定を行うときの様子を図 4-3-2-2-4 に示す。



甲状腺モニタへの被検者の保定方法



測定時

図 4-3-2-2-4 測定時の被検者の保定方法

4. 3. 2. 3 乳児、妊婦、身体不自由者に対する測定法の検討

平成 30 年度事業では、図 3-2-2 に示すように、公衆の全ての年齢層について被検者が上体をうつ伏せにして測定を行うジオメトリ（以下、「標準測定ジオメトリ」という。）とされていた。しかしながら、首のすわっていない新生児を含めた乳児、妊婦、高齢者や体の不自由な被検者等に対しては、測定を行う間、この姿勢を維持することが困難となる場合がある。そこで、これらの被検者に対しては、専門家による助言も踏まえて仰臥位による測定（以下、「仰臥位測定ジオメトリ」という。）を検討した。

図 4-3-2-3-1 に示すように、頸部背面から甲状腺位置に合うように被検者を仰臥位で寝かせる。頸部は図 4-3-2-1-1 で示した測定用治具を用いて支持し、頭部及び体幹部は枕及びマット等により無理のない姿勢となるようにする。

仰臥位測定ジオメトリでの計数効率 ε_{sup} をモンテカルロ計算（PHITS 3.0.2³⁾）により評価し、次式で示す補正係数 k_{sup} を求めた。

$$k_{\text{sup}} = \frac{\varepsilon_{\text{sup}}}{\varepsilon}$$

ここで、 ε は、標準測定ジオメトリにおいて評価された計数効率である。乳児、小児、及び成人に対して評価した k_{sup} を表 4-3-2-3-1 に示す。仰臥位測定ジオメトリでは、甲状腺から検出部までの距離が増加することから、計数効率は減少し、検出限界は 600 秒測定で表 4-3-2-3-2 のようになる。環境バックグラウンド下では乳児においても 10 mSv を担保することが可能である。

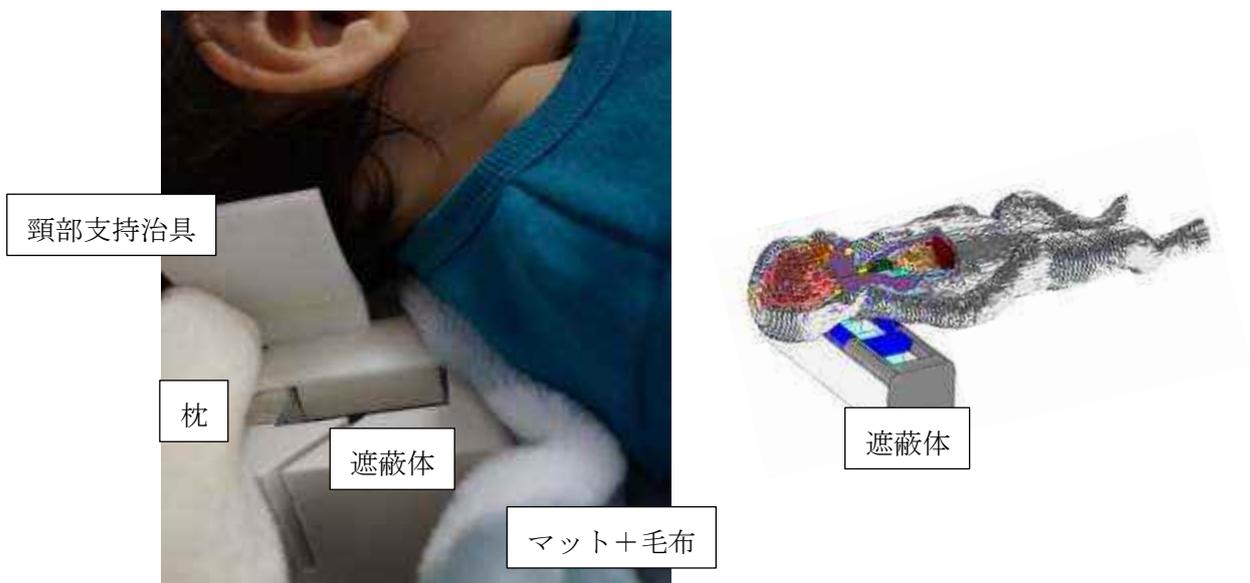


図 4-3-2-3-1 仰臥位測定ジオメトリ（左：1 歳児測定例、右： ε_{sup} 評価時の計算体系（乳児））

表 4-3-2-3-1 仰臥位測定ジオメトリの補正係数

	乳児	小児	成人
k_{sup}	0.182±0.003	0.166±0.003	0.0611±0.0005

表 4-3-2-3-2 仰臥位測定ジオメトリでの検出限界値 (600 秒測定)

BG 源	検出限界値 [Bq] (甲状腺等価線量の評価下限値 [mSv])		
	乳児	小児	成人
環境バック	393	149	202
グラウンド	(10)	(1.8)	(0.5)
^{137}Cs	2515	953	1297
5 $\mu\text{Sv/h}$	(64)	(11)	(3.1)
^{60}Co	1887	715	973
5 $\mu\text{Sv/h}$	(48)	(8.6)	(2.3)

甲状腺内 ^{131}I は以下の式により定量する。

$$A = \frac{\dot{n} - \dot{n}_b}{\varepsilon_*}$$

A : 被検者の甲状腺内 ^{131}I の放射能 (Bq)

\dot{n} : 被検者測定時のピーク領域の正味計数率

(2つの検出器を合算したもの) (cps)

\dot{n}_b : バックグラウンド測定時のピーク領域の正味計数率

(2つの検出器を合算したもの) (cps)

ε_* : ^{131}I に対する計数効率 (cps/Bq)

$\varepsilon_* = \varepsilon \cdot k_{\text{sup}}$: ε は代表点法で求めた ^{131}I に対する計数効率、 k_{sup} は、仰臥位測定ジ

オメトリの補正係数 (表 4-3-2-3-1 参照)

(標準測定ジオメトリの場合は $k_{\text{sup}} = 1$)

甲状腺等価線量は、次式により評価できる。

$$D = \frac{A \cdot CF_{\text{thy}}}{F}$$

D : 甲状腺等価線量 (mSv)

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 : ^{131}I の甲状腺残留率

4. 3. 2. 4 検出限界値評価法の検討

平成 30 年度事業では、検出限界値 DL は従来から放射線管理の分野で専ら使用されているバックグラウンド計数値の標準偏差 (σ) の 3 倍 (3σ) を基にした下式で評価した (Cooper の方法) ¹²⁾。

$$DL = \frac{K}{\varepsilon_*} \left\{ \frac{K}{t_s} + 2 \sqrt{\left(\frac{K}{t_s}\right)^2 + 4\dot{n}_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)} \right\}$$

DL : 検出限界値 (Bq)

K : 3

t : 被検者測定時間 (sec)

t_b : バックグラウンド測定時間 (sec)

\dot{n}_b : バックグラウンド測定時のピーク領域の計数率 (cps)

(図 4-3-2-4-1 参照)

ε_* : ^{131}I に対する計数効率 (cps/Bq)

しかしながら、ISO など ¹³⁾ では、Currie の考え方を取り入れており、欧州 CATHyMARA プロジェクトの報告書 ⁵⁾ においても採用されている。これに従うと、甲状腺内に ^{131}I が存在しないにも関わらず存在すると誤る確率 (第 1 種の過誤) と存在する ^{131}I が存在しないと誤る確率 (第 2 種の過誤) をともに 5% として、以下の式で検出限界値 DL_{currie} が評価される (以下、「CATHyMARA の方法」という)。

$$DL_{\text{currie}} = \frac{k \frac{1}{t\varepsilon_*} \left[k + 2 \sqrt{\sum_{j=1}^2 \left\{ \frac{P_j}{2l_m} n_{0,j} + \left(\frac{P_j}{2l_m}\right)^2 n_{0,j} + \frac{t}{t_b} \left(n_{1,j} + \frac{t}{t_b} u^2(n_{1,j}) \right) \right\}} \right]}{1 - k^2 \frac{u^2(\varepsilon_*)}{\varepsilon_*^2}}$$

$k = 1.645$

P_j : 検出器 $j(j=1, 2)$ の ^{131}I ピーク領域の ROI チャンネル数 (ch)

(図 4-3-2-4-1 参照)

l_m : ピーク領域のネット面積計算に用いる連続部のチャンネル数 (ch)

(ピーク領域の両側数チャンネル : 図 4-3-2-4-1 参照)

$n_{0,j}$: ピーク領域のネット面積計算に用いる連続部のカウント数 (count)

(図 4-3-2-4-1 参照)

ε_* : ^{131}I に対する計数効率 (cps/Bq)

$u(\varepsilon_*)$ はその不確かさを示す

t_b : バックグラウンド測定時間 (sec)

t : 被検者測定時間(sec)

$n_{l,j}$: バックグラウンド測定におけるピーク ROI 領域のネットカウント数(count)

(図 4-3-2-4-1 参照)

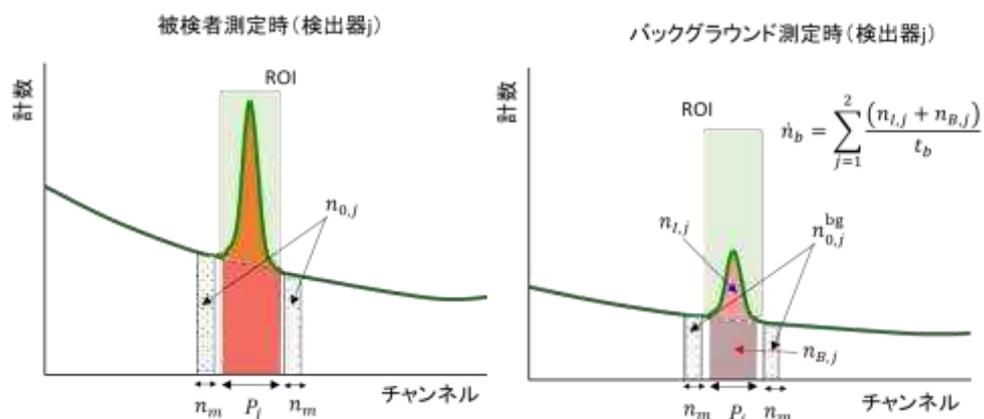


図 4-3-2-4-1 検出限界を決定するための波高スペクトルの各領域

Cooper の方法は簡便であり、バックグラウンド測定のみで評価できることから、測定システムの性能評価などでは非常に有用であり、本報告書でも用いている。一方、CATHyMARA の方法はいささか複雑ではあるが、バックグラウンドのみならず被検者の甲状腺内に存在する ^{131}I に起因する分布が考慮されていること、被検者が他の核種でも汚染されているなどして被検者測定時の ROI 連続部に影響があっても適切に評価できること、ISO 等でも標準的な方法とされていることから、実際の測定時には CATHyMARA の方法がより適していると考えられる。作成したスペクトル解析用ソフトウェアでは、両者を適宜選択できるようになっている (4-2-2-4 項参照)。

4. 3. 2. 5 不確かさの評価

平成 30 年度事業²⁷⁾では、被検者の甲状腺体積や甲状腺位置や位置ずれによる不確かさについて評価した。欧州 CATHyMARA プロジェクト⁵⁾においても、緊急時の測定であっても甲状腺内に蓄積した¹³¹I の測定における不確かさや偏差は明らかにしておくべき、と勧告している。さらに、影響因子として、計数の不確かさ、検出器の位置ずれ、甲状腺以外の臓器に蓄積した¹³¹I、校正に伴う不確かさ、被検者の年齢と被検者の甲状腺質量に関する不確かさ、を挙げている。開発した甲状腺モニタリングシステムを用いた甲状腺内¹³¹I の定量の信頼性を担保するためにも、これらの不確かさ要因を見積もっておくことは重要である。そこでの本節では、これら平成 30 年度報告以外の不確かさの要因についても考慮し、製作した実機について、被検者の甲状腺内に蓄積した¹³¹I の定量不確かさを見積もりバジェット表としてとりまとめた。

(a) 計数効率評価に係る不確かさ

計数効率 ε_* は、代表点法を用いて、以下の式で導出される。

$$\varepsilon_* = \frac{n_{cal}}{A_{Ba-133} \cdot t_{cal}} \cdot \frac{y_{I-131}}{y_{Ba-133}} \cdot k_{rep} \cdot k_{sup}$$

表 4-3-2-5-1 に、各記号の意味と公衆用甲状腺モニタリングシステム(成人)の標準測定ジオメトリの計数効率に対する不確かさ評価の例を示す。この評価例では、計数効率の相対不確かさは $k=1$ で 2.1% であった。

(b) バックグラウンド測定評価に係る不確かさ

バックグラウンド計数は、バックグラウンド用ファントムを用いて測定され、被検者測定におけるバックグラウンド計数率 \dot{n}_b は、以下の式で評価される。

$$\dot{n}_b = \frac{n_l}{t_b} \cdot k_{BG}$$

ここに、 n_l は、¹³¹I ピーク ROI 領域のネットカウント、 t_b はバックグラウンド測定時間、 k_{BG} は、不確かさの評価のための人体形状との違いにかかる補正項である。¹³¹I による $1 \mu\text{Sv/h}$ の環境下で公衆用成人のバックグラウンド測定を実施する際の不確かさ評価の例を表 4-3-2-5-2 に示す。 n_l については、¹³¹I からの光子が ISO ジオメトリで入射したときの検出器の応答計算¹⁵⁾を基に、同じ計数を与えるように¹³³Ba 線源の照射試験を行い、不確かさを導出した。

(c) 被検者の甲状腺内¹³¹I の定量に係るトータル不確かさ

甲状腺内¹³¹I 放射能 A は、4. 3. 2. 3 項の式に不確かさ評価のための補正項を加えて、以下の式で評価される。

$$A = \frac{n/t - \dot{n}_b - \dot{n}_s}{\varepsilon_* \cdot k_d \cdot k_{thy}} \cdot k_{other}$$

ここで、 n は被検者測定時の ROI ピーク領域の正味計数、 t は、被検者測定時間を表

す。その他の不確かさ評価のための各補正項について、以下にその詳細と評価方法を記載する。

(i) 被検者の位置ずれに関する補正(k_d)

平成30年度事業²⁾では位置ずれに対する不確かさを評価した。本年度事業では、被検者の頸部固定用治具を開発したことに伴い、図4-3-2-5-1におけるX方向及びY方向については、制限がかかるため位置ずれしにくい。一方、Z方向については、甲状腺の位置には個人差があるため、正確に位置合わせすることは困難である。そこで、Karachaliasら¹⁶⁾が報告している近接測定ジオメトリでの位置ずれの幅も考慮して、位置ずれの幅として、X方向に±1.0 cm、Y方向に0~+5 mm、Z方向に±2.5 cmと見積もった。平成30年度事業報告²⁾によると、これらの位置ずれに対応する計数効率の変化はX方向で-3%、Y方向で-13%、Z方向で-12%である。

(ii) 被検者の個人差による計数効率の補正(k_{thy})

校正ボクセルファントムと被検者間の甲状腺周辺の解剖学的差異による不確かさで、甲状腺前組織厚の影響が大きく、平成30年度事業報告²⁾によると、成人に対しては±24%と評価されている。

(iii) 表面汚染による補正(n_s)

表面汚染による影響を確かめるために、ボクセルファントム(AM¹⁷⁾)の①頸部表面の皮膚が一律に¹³¹Iで汚染されているとき、②頸部の検出器側表面の皮膚が¹³¹Iでスポット汚染されているとき、の2つのケースについて公衆用甲状腺モニタリングシステムのLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の応答をモンテカルロ計算により評価した。

①の場合において、表面密度あたりのLaBr₃(Ce)の応答は1.91 cps/(Bq cm²)であり、②の場合において、放射能あたりのLaBr₃(Ce)の応答は0.021 cps/Bqであった。従って、0.4 Bq/cm²で一律に汚染している場合は、LaBr₃(Ce)の応答は0.76 cpsとなる。なお、同計数率を与える頸部表面位置でのスポット汚染は、70 Bq存在するときである。

(iv) 甲状腺以外の組織に蓄積した¹³¹Iによる補正(k_{other})

ヨウ素の体内動態モデル^{18),19)}によると、摂取し血液中の取り込まれたヨウ素は、速やかに70%が直接尿中に排泄され、残り30%は甲状腺に移行する。その後、ゆっくりと他の組織へ移行し、80%が血液中は戻り、残りは糞中排泄される。成人について、粒径1 μmの¹³¹Iを吸入摂取してから5日経過した後の甲状腺、血液及びその他の組織の残留率を内部被ばく計算コードIDECにより計算したものを表4-3-2-5-3に示す。次に、ボクセルファントム(AM)の甲状腺、血液及びその他の組織のそれぞれに、¹³¹Iが1 Bq一様に存在するときのLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の応答をモンテカル

ロコードを用いて計算し、甲状腺に対する血液及びその他の組織からの相対的影響を評価した(表4-3-2-5-3)。本甲状腺モニタリングシステムは、遮蔽体に囲まれているため甲状腺以外の組織に蓄積した ^{131}I による影響は無視できるレベルである。

これらを基にして、 ^{131}I による $1\ \mu\text{Sv/h}$ の環境下で、甲状腺等価線量で $5.5\ \text{mSv}$ に相当する粒子状 ^{131}I を吸入摂取し、頸部表面に $0.4\ \text{Bq/cm}^2$ の様な表面汚染のある公衆成人を、摂取後5日後に標準測定ジオメトリで測定し、被検者の甲状腺内 ^{131}I を定量する際の不確かさ評価の例を表4-3-2-5-4に示す。 n については、上述した条件での測定と同じ計数を与えるように ^{133}Ba 線源の照射試験を行い、不確かさを導出した。表4-3-2-5-4に示すとおり、甲状腺前組織厚等の個人差による不確かさが、大きく寄与している。この条件での甲状腺内 ^{131}I 放射能の相対不確かさは $k=1$ で18.6%である。Karachaliasら¹⁶⁾の報告では、本モニタのように検出器を頸部に近づけて測定するモニタについては、そのトータル不確かさは最大で約40%($k=1$)と見積もっている。従って、本モニタの不確かさの大きさは十分に許容できると考えられる。

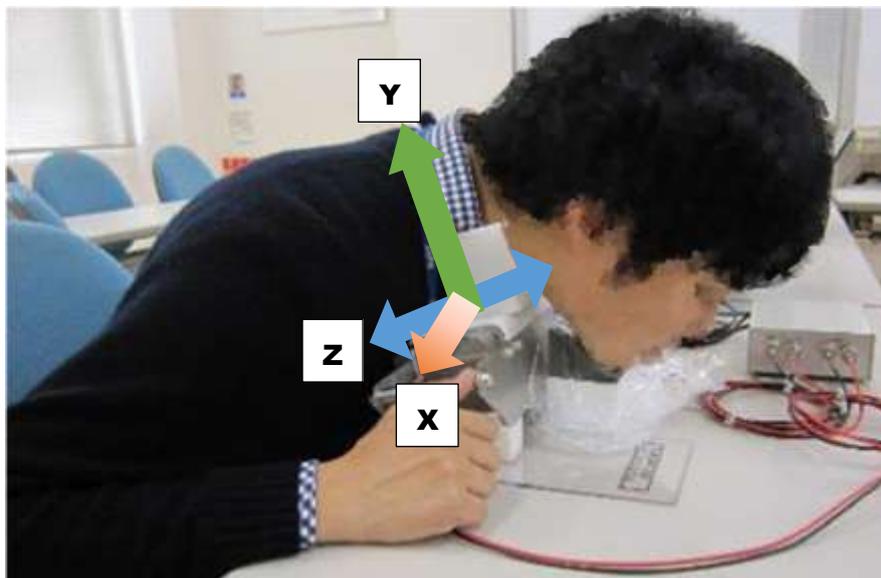


図4-3-2-5-1 被検者測定時の位置ずれの方向

表 4-3-2-5-1 公衆用システム（成人）の計数効率評価に対するバジェット表（例）

要因	記号	推定値	単位	Type	分布	感度係数	標準不確かさ	不確かさへの寄与	評価方法
ROI ピーク計数評価	n_{cal}	241021.4	counts	A	—	2.77×10^{-8}	2330.1	20.9 %	繰り返し測定により評価※
^{131}I の 364 keV 光子放出率	y_{I-131}	0.817		B	正規分布	8.17×10^{-3}	0.0025	2.1 %	文献値 ¹⁴⁾
^{133}Ba の 356+383 keV 光子放出率	y_{Ba-133}	0.71		B	正規分布	-9.40×10^{-3}	0.000996	0.4 %	文献値 ¹⁴⁾
校正時測定時間 (LT)	t_{cal}	300	sec	B	矩形分布	-2.23×10^{-5}	1.70	7.2 %	Dead time から評価
^{133}Ba 線源放射能	A_{Ba-133}	1.385×10^5	Bq	B		-4.82×10^{-8}	2.08×10^3	50.3 %	
検定日放射能	$A_{Ba,0}$	4.06×10^5	Bq	B	正規分布	0.341	6.09×10^3		線源検定書
^{133}Ba 半減期	$T_{1/2,Ba}$	10.539	year	B	正規分布	1.41×10^4	0.003		文献値 ¹⁴⁾
経過日数	t	5973	day	B	矩形分布	-24.9	0.577		±1 日の矩形分布
代表点法に伴う補正	k_{rep}	1.0		B	矩形分布	6.68×10^{-3}	0.00924	19.1 %	シミュレーション計算 ²⁾
仰臥位測定に伴う補正	k_{sup}	1.0		—	—	6.37×10^{-3}	0	0.0 %	標準測定ジオメトリなので寄与なし
計数効率	ϵ_*	6.68×10^{-3}	cps/Bq			合成標準不確かさ	1.41×10^{-4}		
						拡張不確かさ	2.8×10^{-4}		($k=2$)

※計数の統計的不確かさのみならず、設置に伴う位置ずれの不確かさや ROI ピーク面積評価の不確かさを含んでいる

表 4-3-2-5-2 バックグラウンド測定評価に対するバジェット表 (例)

要因	記号	推定値	単位	Type	分布	感度係数	標準不確かさ	不確かさへの寄与	備考
ROI ピーク計数評価	n_I	4099	counts	A	—	6.67×10^{-3}	121.1	28.3 %	^{133}Ba を用いた照射試験により模擬
校正時測定時間 (LT)	t_{cal}	150	sec	B	矩形分布	-1.82×10^{-1}	0.046	0.0%	Dead time から評価
人体形状との違いに伴う補正	k_{BG}	1.0		B	矩形分布	27.3	0.047	71.7 %	文献値 ¹⁵⁾
バックグラウンド計数率	\dot{n}_b	27.3	cps			合成標準不確かさ	1.52		
						拡張不確かさ	3.0		($k=2$)

表 4-3-2-5-3 甲状腺以外の組織の相対的寄与の評価 (例)

	甲状腺	血液	その他の組織
摂取 5 日後の残留率	6.30×10^{-2}	3.50×10^{-5}	2.20×10^{-3}
LaBr ₃ (Ce) の応答	6.86×10^{-3} cps/(Bq in thyroid)	2.31×10^{-4} cps/(Bq in blood)	8.03×10^{-5} cps/(Bq in rest of body)
甲状腺内残留量が 1 Bq である ときの LaBr ₃ (Ce) の応答	6.86×10^{-3} cps/(Bq in thyroid)	1.29×10^{-7} cps/(Bq in thyroid)	2.81×10^{-6} cps/(Bq in thyroid)
相対寄与	1	1.29×10^{-5}	4.09×10^{-4}

表 4-3-2-5-4 公衆用システム（成人）の被検者測定に対するバジェット表（例）

要因	記号	推定値	単位	Type	分布	感度係数	標準不確かさ	不確かさへの寄与	評価方法
ROI ピーク計数評価	n	6416	counts	A	—	9.98×10^{-1}	143.9	11.1%	^{133}Ba を用いた照射試験により模擬
測定時間（LT）	t	150	sec	B	矩形分布	-42.7	0.058	0.0%	Dead time から評価
バックグラウンド計数率	\dot{n}_b	27.3	cps			-1.50×10^2	1.52	27.8%	表 4-3-2-5-2
計数効率	ε_*	6.68×10^{-3}	cps/Bq			-3.46×10^5	1.4×10^{-4}	1.3%	表 4-3-2-5-1
被検者の位置ずれ補正	k_d	1.0		B	矩形分布	-2.31×10^3	0.038	4.1%	文献値 ²⁾
被検者の個人差による補正	k_{thy}	1.0		B	正規分布	-2.31×10^3	0.12	55.2%	文献値 ²⁾
表面汚染に伴う補正	n_s	0.0		B	矩形分布	-1.50×10^2	0.22	0.6%	シミュレーション計算
甲状腺以外の臓器に蓄積した ^{131}I による補正	k_{other}	1.0		B	矩形分布	2.31×10^3	1.2×10^{-4}	0.0%	シミュレーション計算
甲状腺内 ^{131}I 放射能	A	2312	Bq			合成標準不確かさ	431		
						拡張不確かさ	862		($k=2$)

4. 3. 3 甲状腺モニタシステム校正法の開発

開発した甲状腺モニタの校正は、平成 30 年度事業までに開発した ^{133}Ba 点線源と簡易アクリルファントムを用いた代表点法^{2),20)}により実施する。この方法では、簡易アクリルファントムを、被検者測定時と同様に、甲状腺モニタ検出器表面から 2.5 cm 位置に正確に設置する必要がある。位置ずれに伴う計数効率の不確かさを小さくするために、平成 31 年度事業では、校正を行うための治具（以下、「校正用治具」という。）を 3D プリンタにて製作した（図 4-3-3-1）。材質は、PLA 樹脂であり、検出器上部遮蔽体に挟み込むことで、検出器とファントムの位置関係が適切になるよう設計されている。乳児に対しては、乳児用のアダプタを小児用の治具と組み合わせて使用するよう設計されている（図 4-3-3-2 参照）。これを用いて、完成した甲状腺モニタ実機について、 ^{131}I の 364 keV の γ 線に対する計数効率 ϵ を評価した。測定の様子を図 4-3-3-2 に示す。得られた計数効率は、平成 30 年度事業報告²⁾に比べて $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器では特に大きくなっている（表 4-3-3-1 参照）。これは、今年度新規に調達した検出器を使用したためであり、検出器の状態に起因する差異と考えられる。このように、使用する検出器毎に校正を行い、計数効率を事前に測定評価しておくことが重要である。

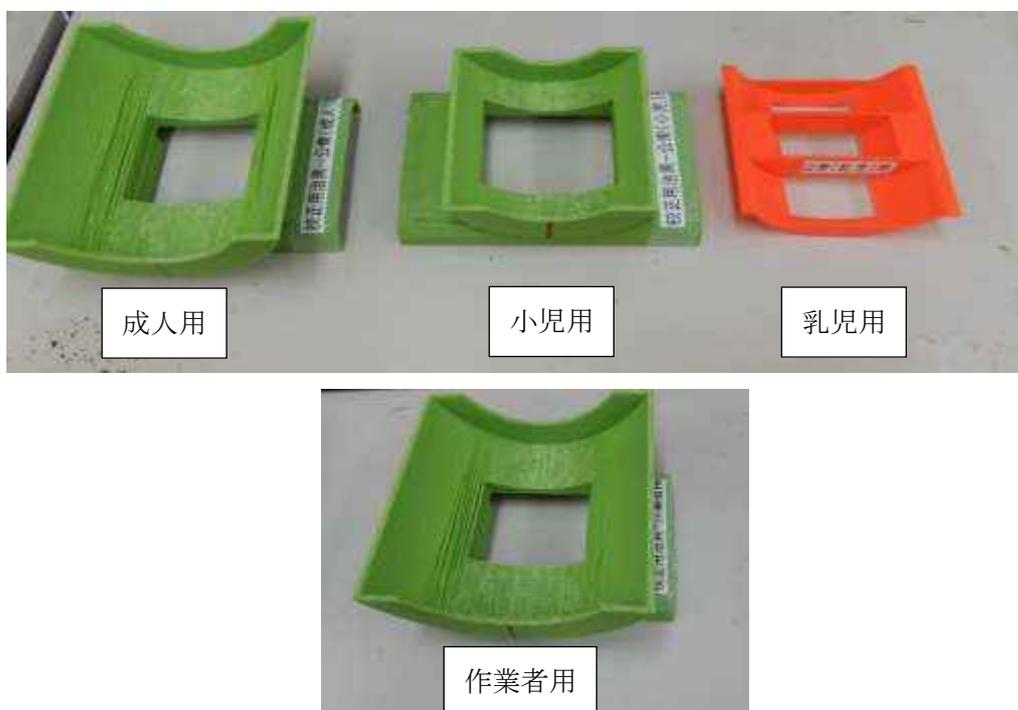


図 4-3-3-1 校正用治具

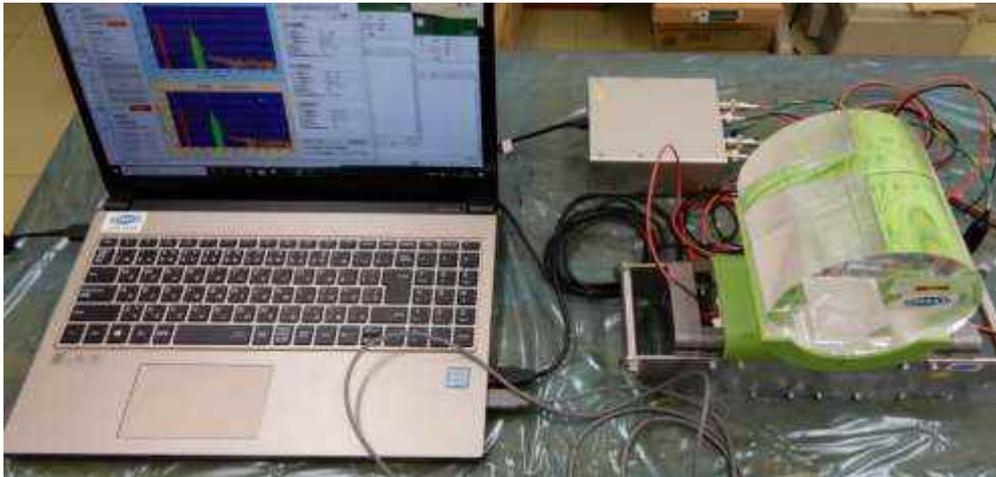
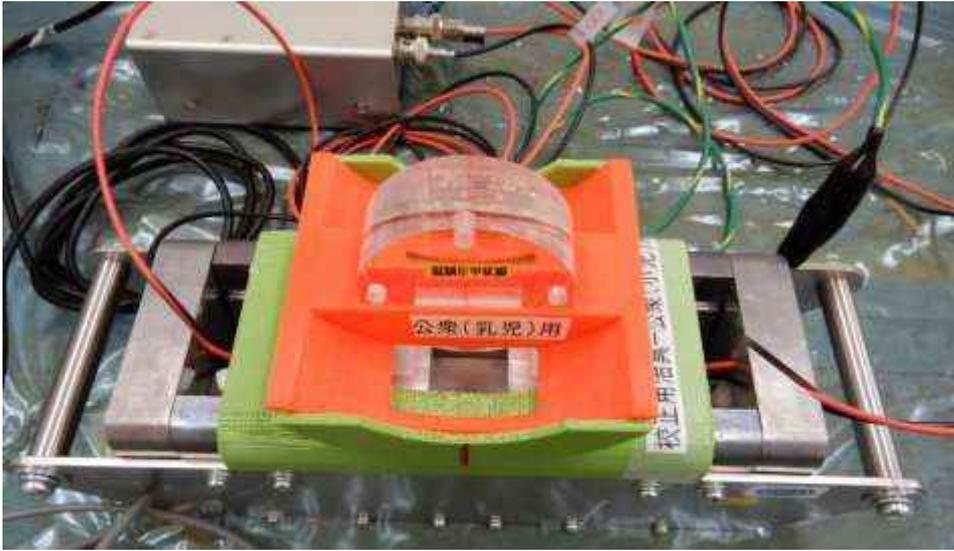


図4-3-3-2 公衆用甲状腺モニタリングシステムの乳児（上）及び成人（下）に対する校正の様子

表4-3-3-1 完成した甲状腺モニタについて評価した計数効率

	乳児	小児	成人	作業者
ε $\times 10^{-3}(\text{cps/Bq})$	10.26 ± 0.41	9.97 ± 0.40	6.68 ± 0.28	1.17 ± 0.05

4. 3. 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。そこで、平成 30 年度事業において、被検者の頸部による遮蔽効果を円筒型 PMMA 製の簡易頸部ファントムを用いて模擬し、測定したバックグラウンド放射線の影響を差し引く補正法を開発した。

平成 30 年度事業で実施した概念設計に基づいて、検出器用遮蔽体に円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを設置するための固定用治具を 3D プリンタで作製した（図 4-3-4-1 左側参照）。固定用治具の下部には、被検者の測定時に用いる測定用治具（図 4-3-2-1-1 参照）と同様に溝を設置してあり、検出器上部遮蔽体を挟み込むことにより検出器間の距離を適切に設定できるようにしている。

成人・小児用



小児用配置

(PMMA13cm Φ × 12cm)

成人用配置

(PMMA20cm Φ × 17cm)

乳児用



乳児用配置 (PMMA13cm Φ × 12cm)

図 4-3-4-1 バックグラウンド補正用測定に使用する治具（左図）及び円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムのセットアップ

成人用と小児用については、バックグラウンド補正用測定時の検出器間距離は 4cm と同じで、どちらも円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを縦置きとするため、固定用治具は共通とした。小児用配置では、図 4-3-4-1 上段中央のように、甲状腺モニタシステムの

校正時に用いる直径 13 cm、高さ 12 cm の円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを設置した状態でバックグラウンド放射線の影響補正用測定を実施する。成人用配置では、図 4-3-4-1 上段右写真に示すように、簡易頸部ファントムを直径 20 cm、高さ 17 cm にするための追加 PMMA 製ファントム (図 4-3-4-2 参照) を小児用配置の上にかぶせた状態でバックグラウンド放射線の影響補正用測定を実施する。



図 4-3-4-2 成人用追加 PMMA 製ファントム (左上)

乳児用については、検出器間距離が 6 cm となり、円筒型 PMMA 製簡易頸部ファントムを横向きに設置できる固定用治具を作成した (図 4-3-4-1 下段左参照)。そして、バックグラウンド放射線の影響補正用測定は図 4-3-4-1 下段中央の配置で実施する。

4. 3. 5 甲状腺モニタシステム取扱マニュアルの作成

平成 31 年度事業で開発した公衆用及び作業用それぞれの甲状腺モニタシステムの実機について、付録 1「甲状腺放射性ヨウ素モニタシステム取扱マニュアル（公衆用システム編）」及び付録 2「甲状腺放射性ヨウ素モニタシステム取扱マニュアル（作業用システム編）」のとおり取扱マニュアルを作成した。当該マニュアルには、測定の準備に係る手順、校正手順、バックグラウンド補正用測定の手順及び甲状腺等価線量の測定手順に加えて、それぞれのシステムの概要、測定原理、ソフトウェアインストール方法、データフォーマットが記載されている。

4. 3. 6 甲状腺モニタシステムの運用法の検討

開発した甲状腺モニタシステムは、可搬性に優れた一体型の遮蔽体を備えていることから、原子力事故によりバックグラウンド放射線量率が上昇した環境でも使用できる。また、机の上に置いて測定するという方式を採用しているため、会議室や学校など机といすがあまる場所であれば、どこにでも設置できるという特長がある。さらに、取り扱いが困難な非密封の溶液線源ではなく、 ^{133}Ba 密封点線源を用いて校正が可能であることから、それぞれの測定現場での校正頻度を上げることができ、精度の良い測定の実現につながる。

乳児を除き、一人当たりの所要時間は交換時間を含めて 5 分とし、一日あたり 12 時間検査を実施したとすると、1 システムで一日あたり 144 人、一週間あたり約 1,000 人の検査が可能となる。公衆用については、 NaI(Tl) サーベイメータを用いた簡易検査等によるスクリーニングで 10 万人に検査対象を絞ったとすると、100 システムあれば対応できる計算となる。また、作業用については、福島第一原子力発電所事故では、平成 23 年 8 月まで（5～6 か月）の緊急作業従事者が約 20,000 人であることから²¹⁾、1 月分の 4,000 人を対象とした場合、4 システムあれば対応できることになる。

これらの特徴を考慮すると、公衆用の甲状腺モニタシステムについては、原子力緊急時支援・研修センター（茨城県ひたちなか市と福井県敦賀市の 2 箇所）や原子力施設の立地道府県に設置されているオフサイトセンター（全国で 23 施設）に集中配備し、緊急時には甲状腺モニタリングを実施する拠点となる避難所や原子力災害拠点病院に輸送することが考えられる。また、被検者の甲状腺の位置の確認を合わせて実施する場合、医療従事関係者がモニタリングを実施する必要があり、この場合は、基幹高度被ばく医療支援センター（量子科学技術研究開発機構）、高度被ばく医療支援センター（弘前大学、福島県立医科大学、広島大学及び長崎大学）、原子力災害拠点病院等に常備する必要がある。

作業用の甲状腺モニタシステムについては、発災現場で直接事故対応をする作業用に各原子力施設に常備する必要がある。また、サイト内外で活動する可能性がある自衛隊

員や原子力検査官の甲状腺モニタリングを実施するために、陸上自衛隊各方面隊や原子力規制委員会原子力規制事務所に常備しておくことも必要である。さらに、オフサイトで主に活動する警察官、消防隊員、海上保安庁職員、地方自治体職員等の甲状腺モニタリングに対応するために、オフサイトセンター、海上保安本部等にも配備しておく必要がある。配備が必要なシステム数は、各箇所ですべて1～2システムで対応可能と考えられる。

4. 4 まとめ

各避難所、指揮所等に設置できる、公衆用及び作業用者の2種類の γ 線エネルギー分析方式の可搬型甲状腺モニタ測定器について、製品化を視野に入れた実機を製作した。そして、その特性を γ 線標準校正場 (^{137}Cs 又は ^{60}Co 線源) において試験した。また、福島第一原子力発電所事故直後に福島市内で観測された様々な核種の線源からの γ 線による高線量率下での測定性能について、PHITSを用いた計算により評価した。その結果、 $20 \mu\text{Sv/h}$ の高線量率環境下においても 10 mSv の甲状腺等価線量評価下限値を達成できることが分かった。

甲状腺モニタ測定器で使用する $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器及び CdZnTe 検出器の温度特性を評価した。その結果、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器については、 10°C の温度変化で4%程度 γ 線全吸収ピークの波高がずれるが、感度やエネルギー分解能には変化がないことが分かった。測定時の温度が校正時から大きくずれる場合は、観測されたピークに合わせて若干のROI領域の調整が必要になる場合がある。また、 CdZnTe 検出器については、 25°C を超えると若干のエネルギー分解能の低下がみられるが、 7°C から 35°C の範囲で γ 線全吸収ピークの波高に変化は観測されなかった。

また、平成30年度事業で実施した被検者の甲状腺と検出器の位置関係を正確に決定するための測定治具及びバックグラウンド放射線測定用治具の概念設計を基に、3Dプリンタを用いてこれらの治具を製作した。また、防災業務従事者や専門家の意見に基づいて、頸部の負担を軽減する顎サポート台や甲状腺モニタシステム設置用プレートを製作することにより、測定条件の標準化を図った。さらに、うつ伏せの姿勢での長時間測定が困難な乳児、妊婦、身体不自由者などに対して、仰臥位測定ジオメトリでの測定条件を決定した。その結果、通常のバックグラウンドレベルであれば、600秒の測定で 10 mSv の甲状腺等価線量評価下限値が得られた。また、 $5 \mu\text{Sv/h}$ の高バックグラウンド線量率下においても、小児および成人に対しては、 10 mSv 程度の甲状腺等価線量評価下限値が得られた。最も評価が厳しい乳児については、目標とする 10 mSv の評価下限値は担保できないが、 100 mSv の評価下限値は十分にクリアできるという結果が得られた。

校正に用いる円筒型PMMA製簡易頸部ファントム設置用治具を製作し、 ^{133}Ba 密封点線源を用いた校正法の開発を完了した。また、バックグラウンド放射線の影響補正用測定に用いる円筒型PMMA製簡易頸部ファントム設置用治具を製作し、当該測定が可能となった。

これにより、公衆用及び作業用者の2種類の甲状腺モニタシステムが完成した。

5. 平成 31 年度（令和元年度）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：令和元年 7 月 8 日 14:00～16:00

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：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：令和 2 年 1 月 17 日 13:30～17:00

場所：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 原子力緊急時支援・研修センター

議題：本事業の進捗状況、甲状腺モニタシステムの実演、意見交換等

○その他の進捗報告

報告日：6 月 13 日、8 月 9 日、9 月 11 日、10 月 7 日及び 11 月 14 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：令和 2 年 2 月 6 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、令和元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 6

5. 2 本事業で得られた成果の発表

○19th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD19)

日時：令和元年 9 月 16 日~20 日

場所：広島県 広島市

タイトル：Prototype Test of Potable Thyroid Dose Monitoring System using Gamma-ray Spectrometers

Uncertainties due to the body size for the radioiodine measurements using a newly developed thyroid monitor

Background Correction Method for Portable Thyroid Dose Monitor Using Gamma-ray Spectrometer Developed at JAEA in High Dose Rate Environment

備考：予稿及びポスター発表資料：付録 3

○5th Asian Radiation Dosimetry Group annual meeting (ARADOS-5)

日時：令和元年 11 月 6 日~8 日

場所：中国 北京

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

備考：口頭発表資料：付録 4

○日本原子力研究開発機構令和元年度安全研究センター報告会

日時：令和元年 11 月 26 日

場所：東京

タイトル：“可搬型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発”

備考：口頭発表資料：付録 5

○日本原子力学会 2020 年春の年会

日時：令和元年 3 月

場所：福島県 福島大学（開催されず、予稿集の発行のみ）

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 —モニタの製作と測定手法の開発

備考：予稿：付録 7

参考文献

- 1) 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
- 2) 日本原子力研究開発機構 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
- 3) Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., Kai, T., Tsai, P., Matsuda, N., Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L. and Niita, K. *Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS)*, Version 3.02, J. Nucl. Sci. Technol. 55, 684-690 (2018)
- 4) Ivanov, V., Mintcheva, J., Berlizov, A. and Lebrun, A., *Performance Evaluation of New Generation CdZnTe Detectors for Safeguards Applications*, (IAEA-CN--220).
- 5) Etherington, G. et al., 2017. *CAThyMARA report: Technical guidelines for radio-iodine in thyroid monitoring*, OPERRA Deliverable D5.31
- 6) Takada, M. and Suzuki, T., *Early in situ measurement of radioactive fallout in Fukushima city due to Fukushima Daiichi nuclear accident*, Radiat. Prot. Dosim., 155, 181-196 (2013).
- 7) G. F. Knoll, *Radiation detection and measurements* (4th ed), Wiley, New York, 2000
- 8) Casanovas, R., Morant, J.J. and Salvado, M. *Temperature peak-shift correction methods for NaI(Tl) and LaBr₃(Ce) gamma-ray spectrum stabilisation*, Radiat. Meas., 47, 588-595 (2012)
- 9) Park, S. H., Ha, J.H., Lee, J. H., Kim, H.S., Cho, T. H., Cheon, S. D. and Hong, D. G. *Effect of temperature on the performance of a CZT radiation detector*, J. Korean Phys. Soc., 56(4), 1079-1082 (2010)
- 10) 竹村泰彦, 熱可塑性エラストマーの現状と将来展望, 日本ゴム協会誌, 83, 269-276 (2010).
- 11) 川瀬至道, 総説－環境にやさしい製品の訴求点: ポリ乳酸の事例, 日本印刷学会誌, 52, 156-162 (2015).
- 12) 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).
- 13) International Organization for Standardization, *Determination of the characteristic limits (decision threshold, detection limit and limits of the confidence interval) for measurements of ionizing radiation – Fundamentals and application*, ISO11929 (2010)
- 14) Laboratoire National Henri Becquerel, Decay Data Evaluation Project , <http://www.nucleide.org/DDEP.htm>

- 15) Tanimura, Y., Yoshitomi, H., Nishino, S. and Takahashi, M., *Background correction method for portable thyroid dose monitor using gamma-ray spectrometer developed at JAEA in high dose rate environment*. Radiat Meas. DOI (to be submitted)
- 16) Karachalias, E. D. *Investigation and calibration of various detection systems which can be used for emergency internal contamination checks*, Master thesis, KTH Royal Institute of Technology (2013)
- 17) International Commission on Radiological Protection, *Adult Reference Computational Phantoms*, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39(2), (2009)
- 18) International Commission on Radiological Protection, *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 1*, ICRP Publication 56, Ann. ICRP 20(2), (1990).
- 19) International Commission on Radiological Protection, *Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 4 Inhalation Dose Coefficients*, ICRP Publication 71, Ann. ICRP 25(3-4), (1995).
- 20) Yoshitomi, H., Nishino, S., Tanimura, Y. and Takahashi, M., *A study of a calibration technique for a newly developed thyroid monitor and its uncertainties due to body size for radioiodine measurements*, Radiat. Meas., DOI:10.1016/j.radmeas.2020.106279 (2020)
- 21) 厚生労働省, 東京電力福島第一原子力発電所緊急作業従事者の長期的健康管理の実施状況について, 第 1 回 東電福島第一原発緊急作業従事者に対する疫学的研究のあり方に関する専門家検討会 資料 5、平成 26 年 2 月 14 日. <https://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-11303000-Roudoukijunkyokuanzenezenseibu-Roudoueiseika/0000047454.pdf>

**甲状腺放射性ヨウ素モニタシステム
取扱マニュアル
(公衆用システム編)**

令和2年3月31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**

目次

1. はじめに.....	1
2. 公衆用甲状腺放射性ヨウ素モニタシステムの概要.....	1
2. 1 LaBr ₃ (Ce)シンチレーション検出器.....	2
2. 2 信号処理回路.....	2
2. 3 検出器用周辺遮蔽体.....	3
2. 4 制御・解析用パーソナルコンピュータと制御用ソフトウェア.....	3
2. 5 測定治具.....	4
2. 6 測定原理.....	5
3. 測定の手順.....	6
3. 1 甲状腺モニタシステムの準備手順.....	6
3. 2 甲状腺モニタシステムの校正手順.....	10
3. 2. 1 校正の準備作業.....	10
3. 2. 2 校正データ取得作業.....	14
3. 2. 3 計数効率の算出.....	15
3. 2. 4 計数効率と換算係数の入力.....	16
3. 3 バックグラウンド補正用測定の手順.....	18
3. 4 甲状腺等価線量の測定手順.....	19
3. 5 測定終了後の手順.....	22
4. 甲状腺測定用ソフトウェアのインストール手順.....	23
4. 1 事前準備.....	23
4. 2 甲状腺測定用ソフトウェアのインストール作業.....	23
4. 3 信号処理回路の定義、登録.....	28
4. 4 検出器／信号処理回路の調整.....	31
5. おわりに.....	34
付録 A. データファイル.....	35

A.1	スペクトルファイル	35
A.2	測定データCSVファイル.....	38
A.3	印刷イメージ.....	40
A.4	ROI 情報ファイル	41
A.5	データフォルダ構造	42
付録 B.	換算係数.....	43
B.1	換算係数.....	43
B.2	甲状腺残留率.....	46
B.3	摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数	46

1. はじめに

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。そこで、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、原子力規制庁から受託した平成 31 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）事業において、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システム（以下「甲状腺モニタシステム」という。）を開発した。

本マニュアルは、避難所等に設置して公衆の内部被ばく線量測定に用いる甲状腺モニタシステム（公衆用）の概要、設置方法及び使用方法をまとめたものである。これにより、原子力事故時等の環境中に放射性ヨウ素が放出されたときに、多数の公衆について、摂取した放射性ヨウ素放射能の迅速かつ高精度な測定・評価を可能とすることを目的とする。

2. 公衆用甲状腺放射性ヨウ素モニタシステムの概要

公衆用の甲状腺放射性ヨウ素モニタシステムは、図 2-1 に示すように、 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器 2 個、信号処理用回路、検出器周辺遮蔽体、検出器上部遮蔽体、制御・解析用パーソナルコンピュータ（ソフトウェアを含む）、測定治具、測定器設置用プレート、顎サポート台で構成される。さらに、検出器の効率校正用に年齢別頸部ファントム（Ba-133 点線源を含む）とファントム用治具が、高線量率環境下での使用時に用いるバックグラウンド測定用治具等が必要となる。



図 2-1 公衆用甲状腺放射性ヨウ素モニタシステムの写真

2. 1 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器

LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器は、図2-2に示すように、1インチ（25.4 mm）立方のLaBr₃(Ce)シンチレータ（図左側）と角形光電子増倍管（図右側）を、アルミニウム製ケースで一体化することにより製品化されている。光電子増倍管には、検出器動作用の高電圧供給線（赤色、SHV 端子）と信号出力線（黒色、BNC 端子）の2種類のケーブルが取り付けられている。



図2-2 LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器の写真

2. 2 信号処理回路

図2-3に示す信号処理回路は、2個のLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器に同時に動作高電圧を印加し、それぞれの検出器からの信号を処理して信号波高分布（波高スペクトル）を取得できる。制御用パーソナルコンピュータと接続されたUSBケーブルからの給電で動作させることができ、同一のケーブルを用いて高電圧の変更を含む検出器の制御、波高スペクトルの取得を行うことができる。制御・通信はUSB2.0規格（最大供給電流500 mA）を用いているが、最大900 mAの電力供給が必要であるため、USB3.0以上の規格のUSB端子に接続する必要がある。動作高電圧は、2個の検出器に共用で同時に同じ電圧が印加される。制御用パーソナルコンピュータからの電圧の変更は検出器1に対してのみ有効である。また、内部には、光電子増倍管のアノード信号に対応する波形整形フィルタと増幅器並びに1024チャンネルのAD変換器を2系統有している。波形整形フィルタの条件と増幅器のゲインは、それぞれの検出器に対して独立に制御用パーソナルコンピュータから変更可能である。



図2-3 信号処理回路の写真

2. 3 検出器用周辺遮蔽体

図2-4に検出器用周辺遮蔽体及び検出器上部遮蔽体の写真を示す。周辺遮蔽体は、高密度タングステン合金及び鉛の遮蔽体で構成されており、両側面、内側及び底面にステンレス製のサポートが取り付けられている。最も高い遮蔽効果が要求される検出器周辺の遮蔽体（上部遮蔽体を含む）については、高密度タングステン合金（密度：17.74 g/cm³）を採用し、それ以外の遮蔽体については、遮蔽効果は低下するが、安価で重量を抑えられる鉛（密度：11.34 g/cm³）とした。両側の鉛遮蔽体には、検出器のケーブルを通すために溝が設けられている。重量は合計約14 kgであり、左右両側に取り付けられたステンレス製の取手を用いて容易に移動させることができる。

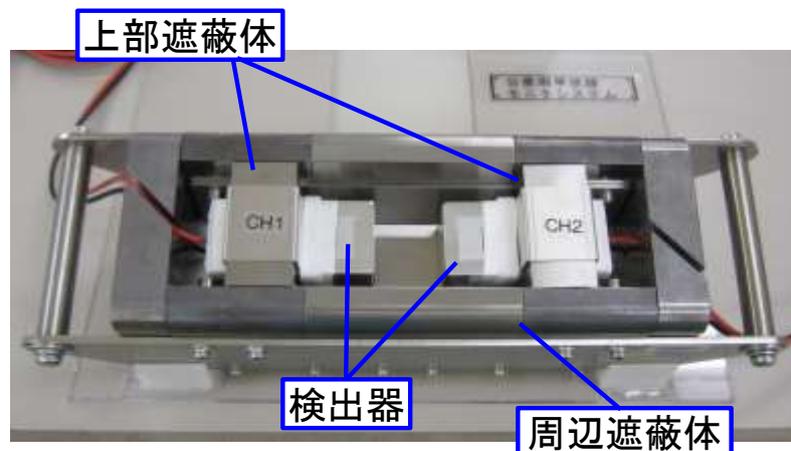


図2-4 検出器周辺遮蔽体の写真

2. 4 制御・解析用パーソナルコンピュータと制御用ソフトウェア

甲状腺モニタの制御・測定及び結果の解析を行うためには、制御用ソフトウェアがインストールされた制御・解析用パーソナルコンピュータが必要である。使用できるパーソナルコンピュータの要件は以下のとおりである。

OS : Windows 7(SP1 以上)/Windows 8.1/Windows 10

PC : AT 互換機

ディスプレイ : XGA(1024×768)以上の解像度を推奨

USB : USB3.0 以上のポート 1 つ以上

その他 : Microsoft .Net framework 4.0 以上及び、同 Language Pack 4.0 以上

デスクトップ型 PC、ノート型 PC のどちらも利用可能であるが、可搬性や停電時でも動作し続けられるなどの理由から、ノート型 PC の利用を推奨する。図2-5に制御用ソフトウェアの画面の例を示す。左側のボタンで 2 個の検出器を同時に制御して測定の開始、終了、データ保存などが可能である。画面中央では、2 個の検出器それぞれの波高スペクトルを同時に確認することができる。予め、I-131 のピーク部に関心領域 (ROI) を設定し、検

出器の効率、放射性ヨウ素放射能から預託実効線量への換算係数などのデータセットを適切に設定しておくことにより、ピーク解析を自動的に行い、画面右側のように得られた計数から預託実効線量への計算結果が表示される。

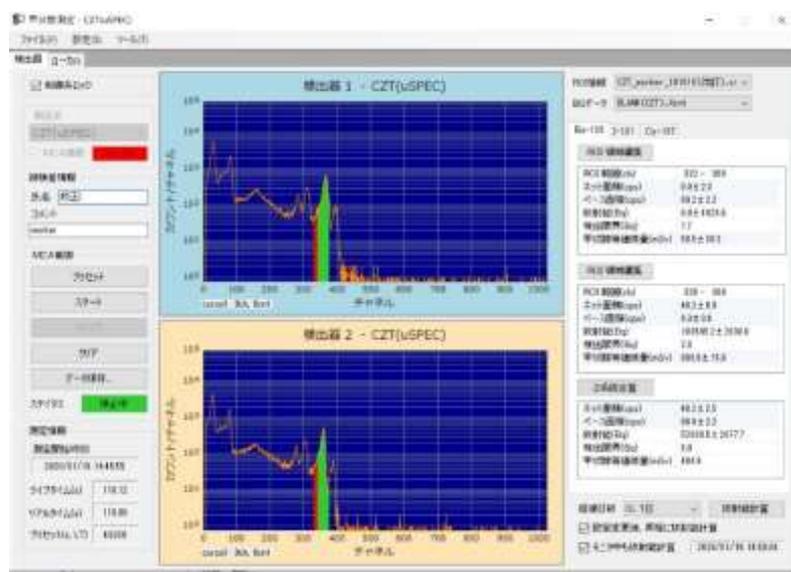


図 2-5 制御用ソフトウェアの例

2.5 測定治具

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。そこで、図 2-6 に示すような測定治具を検出器用遮蔽体の上に設置し、上部の円弧形サポートに被検者の頸部を固定することにより、被検者の甲状腺と検出器の位置関係が正確に決定できる。測定治具の裏側には上部遮蔽体を挟み込む構造の溝が設置してあり、検出器の左右方向の位置が正確に設定されていないと測定治具が取り付けられない構造となっている。これらの工夫により、被検者の甲状腺と検出器の位置関係が正確に決定できる。

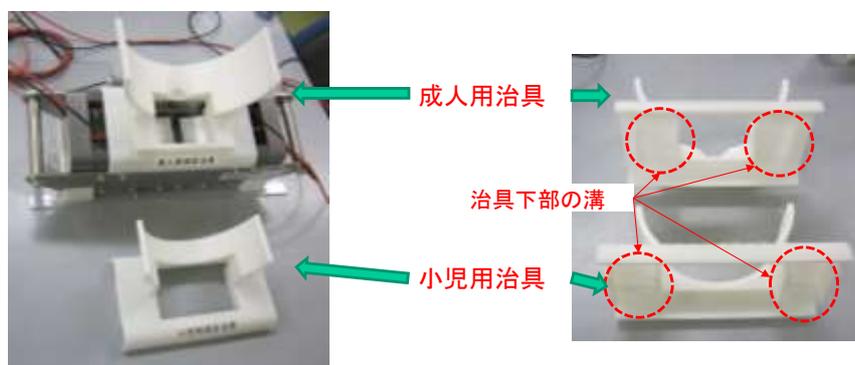


図 2-6 測定用治具

2. 6 測定原理

甲状腺モニタは、図2-4に示すように、上方のみに開口した井戸型の検出器用周辺遮蔽体の中に $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器 2 個を設置する構造である。図2-7に示すように会議室などのテーブルに設置し、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、放射性ヨウ素からの γ 線を検出器で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測定する。

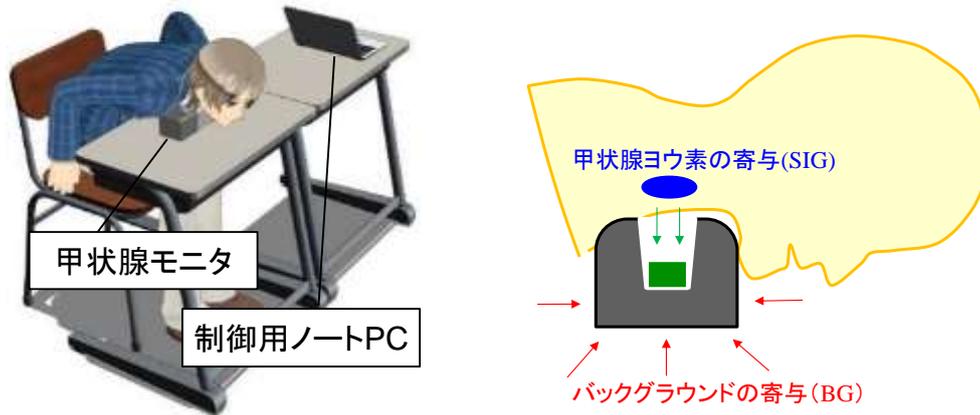


図2-7 制御用ソフトウェアの例

高線量率環境で測定する場合、周辺からのバックグラウンド放射線による寄与が加算されてしまう。特に、 Cs-137 線源からの 662 keV γ 線等は、測定対象である I-131 の 364 keV γ 線よりもエネルギーが高いため、遮蔽体を透過しやすく、図2-8の赤領域で示すように、甲状腺ヨウ素からの信号による γ 線ピークの下にバックグラウンド成分として観測され、正確な測定にはこのバックグラウンド成分の測定が必要となる。放射性ヨウ素の定量には、図中の青の領域で示したピーク部分（ネット面積）に含まれる計数を用いる。具体的には、この計数値に Ba-133 線源を用いた校正で決定した検出器の計数効率で除することにより甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素の放射能が定量できる。

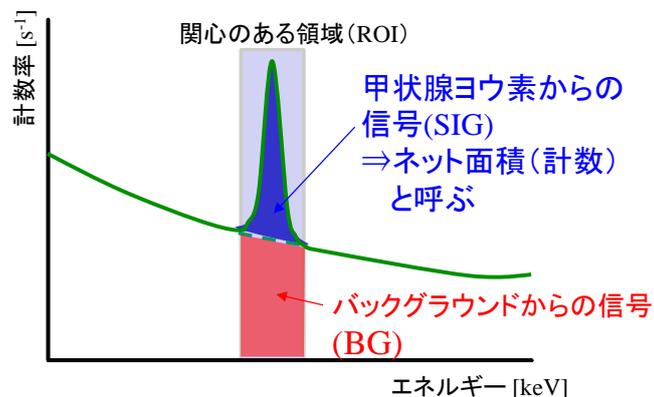


図2-8 波高スペクトルの例

3. 測定の手順

3. 1 甲状腺モニタシステムの準備手順

- ① 甲状腺モニタシステムで使用する機材を測定用テーブル（会議用など、測定場所で調達できるテーブル）の上に準備する（図3-1-1参照）。
- ② 甲状腺モニタシステム制御用ソフトウェアがインストールされたパーソナルコンピュータを準備する。
- ③ 測定器設置用プレートに遮蔽体を図3-1-2のとおり設置する。この時、プレート上の支持台両側の詰めが遮蔽体両側に係るように設置する。
- ④ $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器 2 個に、上部遮蔽体を取り付ける（図3-1-3参照）。
- ⑤ 検出器用周辺遮蔽体に $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器 2 個（上部遮蔽体付）を図3-1-3のとおり取り付ける。この時、赤と黒のケーブルを断線させないように注意して遮蔽体両側の溝にはめ込む。

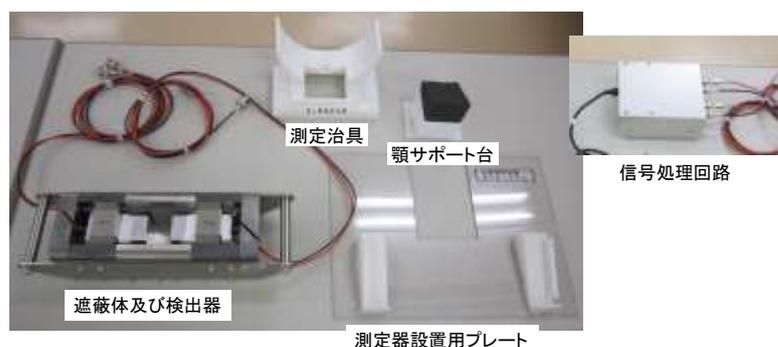


図3-1-1 甲状腺モニタシステムの機材一式



③測定器設置用プレートへの遮蔽体の設置／③遮蔽体右側の設置状況

図3-1-2 測定器設置用プレートへの取付状況



④上部遮蔽体と LaBr_3 検出器

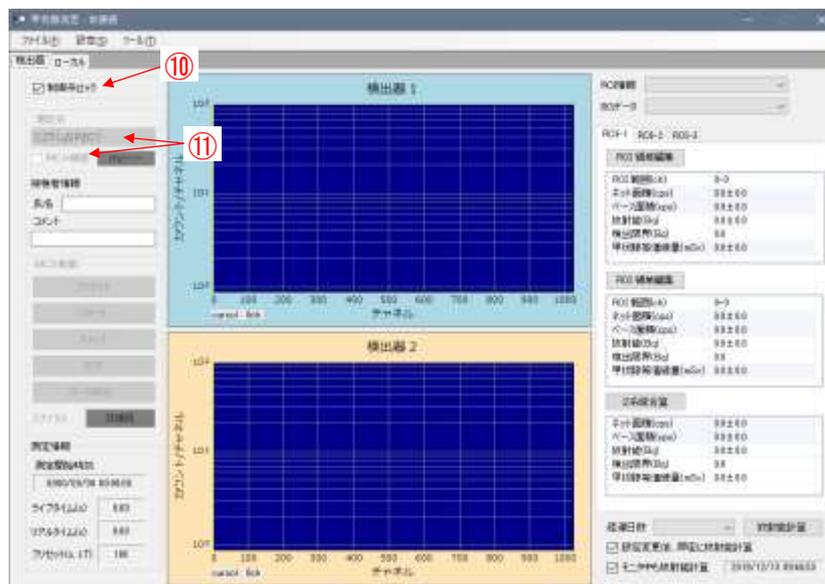
⑤遮蔽体への $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の取付

図3-1-3 $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ シンチレーション検出器の取付状況

- ⑥ 検出器 1 及び検出器 2 からのケーブル (各 2 本) を、図 3-1-4 のとおり信号処理回路のチャンネル 1 及びチャンネル 2 にそれぞれ取り付ける。(赤：動作用高圧線、黒：信号線)
- ⑦ 制御・解析用パーソナルコンピュータを起動する。
- ⑧ 信号処理回路を付属の USB ケーブルでパーソナルコンピュータの USB 端子 (USB3.0 以上) に接続する。
- ⑨ 図 3-1-5 左上のアイコンをダブルクリックして甲状腺測定用ソフトウェアを起動する。
- ⑩ 制御系ロックのチェックボックスを外して測定系の選択を可能とする。
- ⑪ 測定系コンボボックスをクリックして「LaBr3(80804)」(公衆用) を選択し、MCA 接続チェックボックスをチェックする。これにより、MCA との接続が確立する



図 3-1-4 甲状腺モニタシステムのセットアップ



ソフトウェア起動時の画面

図 3-1-5 制御用ソフトウェア起動時の画面の例

- ⑫ 図 3-1-7 のとおり、甲状腺測定用ソフトウェア左上のメニューから「設定」→「LaBr(80404)の設定」をクリックする。
- ⑬ 図 3-1-7 右側に示す LaBr(80404)設定画面で、「検出器 1」タブ及び「検出器 2」タブの増幅回路及び高電圧の設定が適切になされていることを確認する（設定値を表 3-1-1 に例示）
- ⑭ 「検出器 1」タブの「Bias」の数値を 700 に変更し、右隣の「適用」ボタンをクリックする。しばらくすると検出器に動作電圧 (700V) が印加され、「Bias」右側の表示が OFF (緑色) から ON(赤色)に変化する。
- ⑮ 右下の「終了 (MCA は停止します)」ボタンをクリックする。

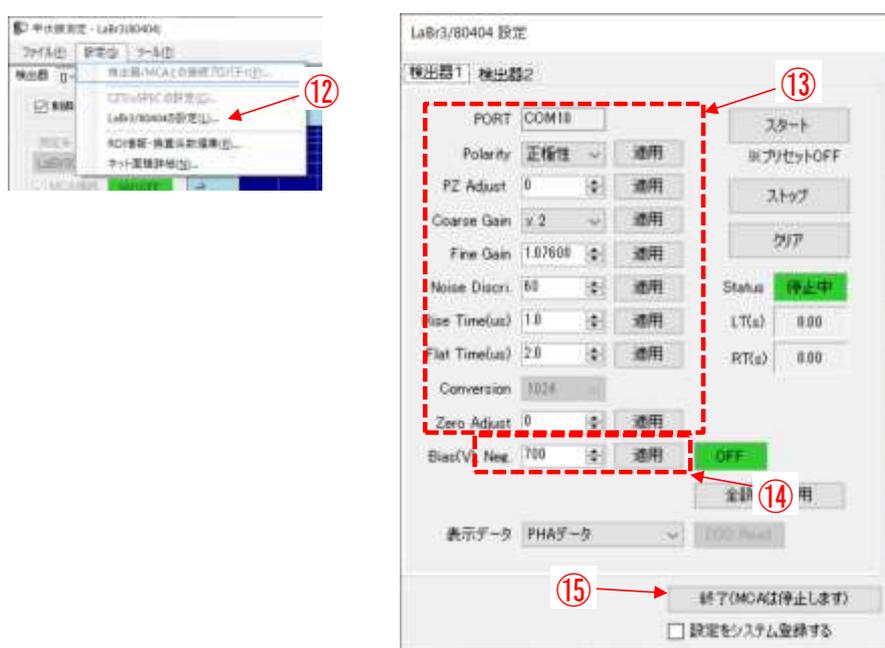


図 3-1-7 制御用ソフトウェア動作確認時の画面の例

表 3-1-1 波形整形フィルタ、増幅器等の回路条件設定値の例

項目	検出器 1	検出器 2
Polarity	正極性	正極性
Course Gain	×2	×2
Fine Gain	1.076	1.076
Rise Time	1.0	1.0
Flat Time	2.0	2.0
Bias	700	—

- ⑩ 甲状腺測定用ソフトウェア画面左側の MCA 制御の「スタート」ボタンをクリックして、グラフ画面のスペクトル（検出器信号の波高の分布）に変化が生じることを確認する（図 3-1-7 参照）。これにより、検出器が正常に動作していることを確認する。
- ⑪ 画面左側の「ストップ」ボタンをクリックして測定を停止する（図 3-1-6 参照）。
- ⑫ 画面左側の「クリア」ボタンをクリックしてグラフを消去する（図 3-1-6 参照）。

以上で甲状腺モニタシステムの準備が完了する。

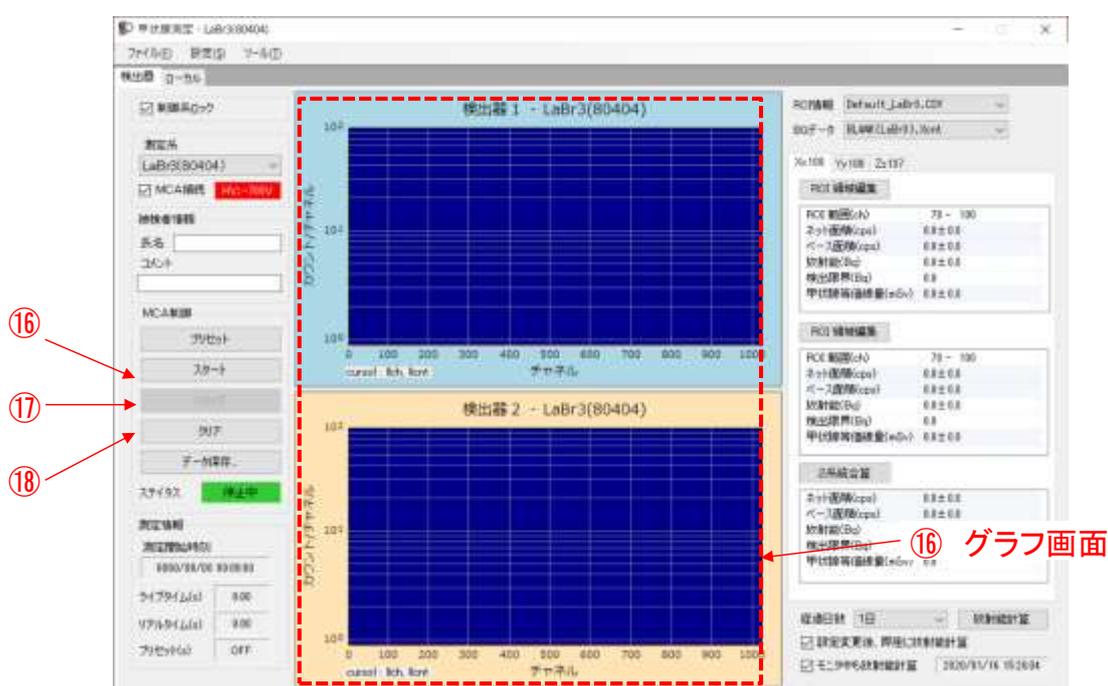


図 3-1-7 制御用ソフトウェア動作確認時の画面の例

3. 2 甲状腺モニタシステムの校正手順

本節では、線源を用いた校正及び年齢群別の線量への換算係数の設定等について記載する。校正は年齢群別校正用ファントムと ^{133}Ba 点線源を用いて行う。校正は、バックグラウンド放射線の影響が無視できる環境下で実施すること。

3. 2. 1 校正の準備作業

- ① ^{133}Ba 点線源を年齢群別校正用ファントム（図3-2-1）の線源位置に装荷する。
線源中心のファントム表面からの深さは、表3-2-1のとおりとする（この位置がそれぞれの代表点位置である）。また、高さ方向については、線源がファントムの半分の高さになるようにする（図3-2-2参照）。線源を誤って破損させないように、その取扱いには十分注意すること。
- ② 校正用治具（図3-2-3）を準備する。乳児用については、小児用治具を組み合わせ使用するので、乳児用治具を小児用治具にはめ込む（図3-2-4）。
- ③ 校正用治具の下部にある溝（図3-2-5）に合うように検出器の間の距離を、上部遮蔽体を左右に動かして調整し、治具を甲状腺モニタに設置する（図3-2-6）。
- ④ 校正用治具に ^{133}Ba 線源が真下方向になるようにファントムを設置する（図3-2-7）。

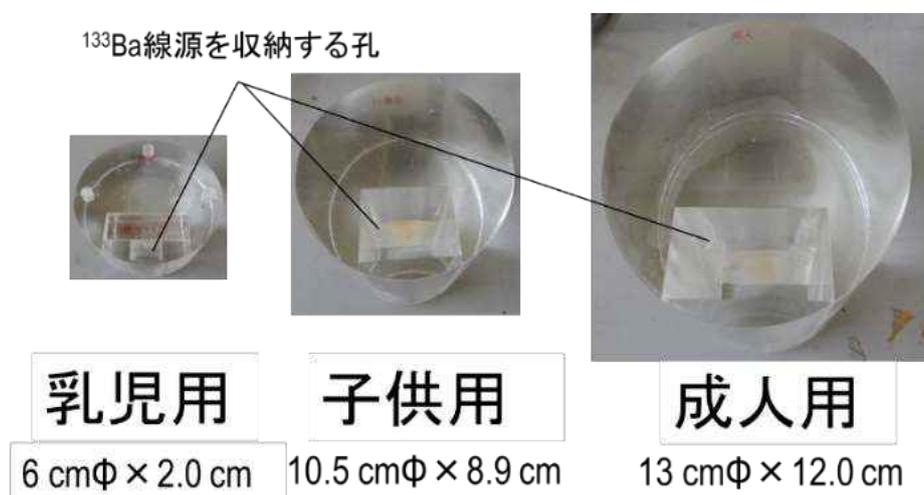


図3-2-1 年齢群別校正用ファントム

表3-2-1 ファントム表面からの線源深さ

	成人	小児	乳児
線源深さ	2.4 cm	1.1 cm	0.7 cm



図3-2-2 ファントムへ¹³³Ba線源の挿入（小児用ファントムの例）

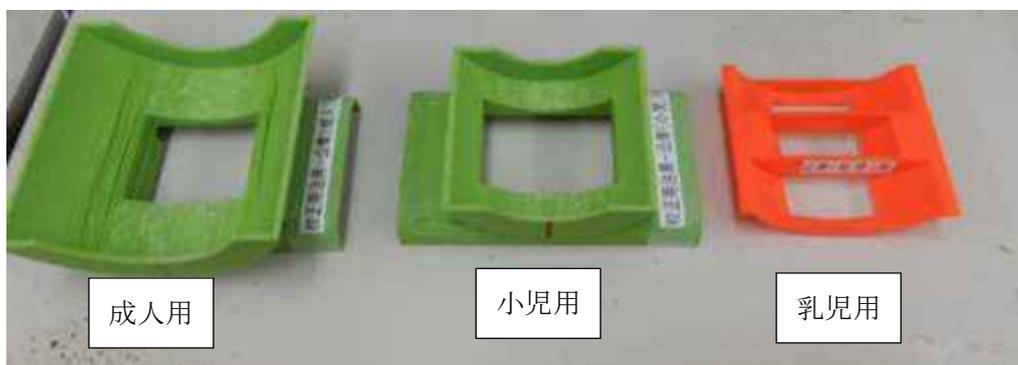


図3-2-3 校正用治具

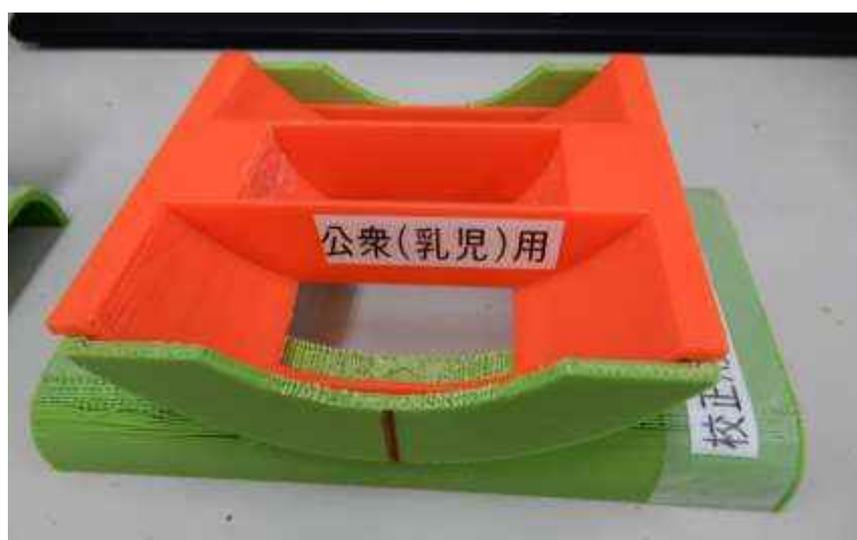


図3-2-4 乳児用治具の小児用治具へのはめ込み

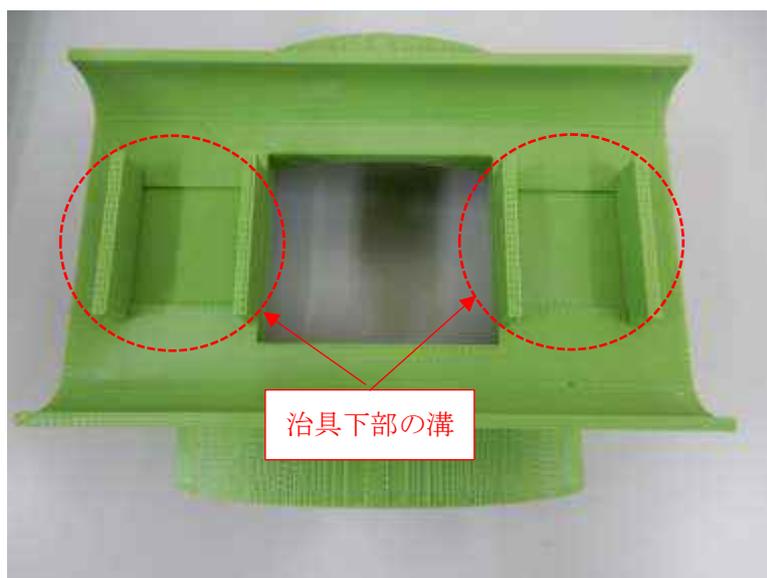


図 3 - 2 - 5 治具下部の溝 (成人用治具の例)

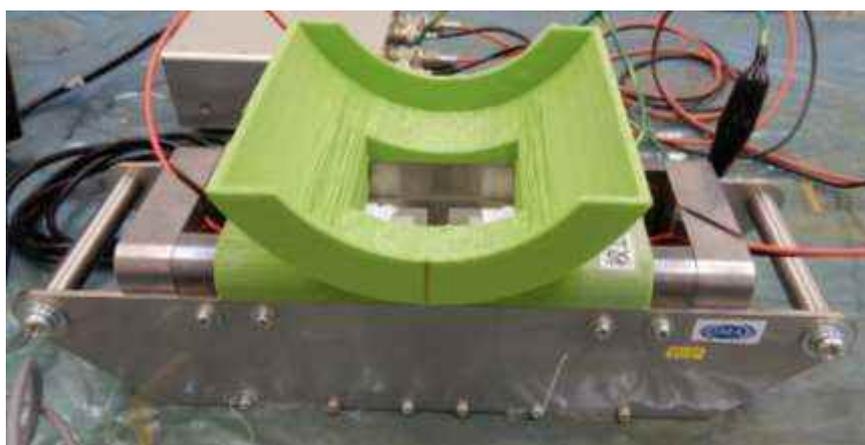


図 3 - 2 - 6 遮蔽体上部への校正用治具の設置 (成人用の例)

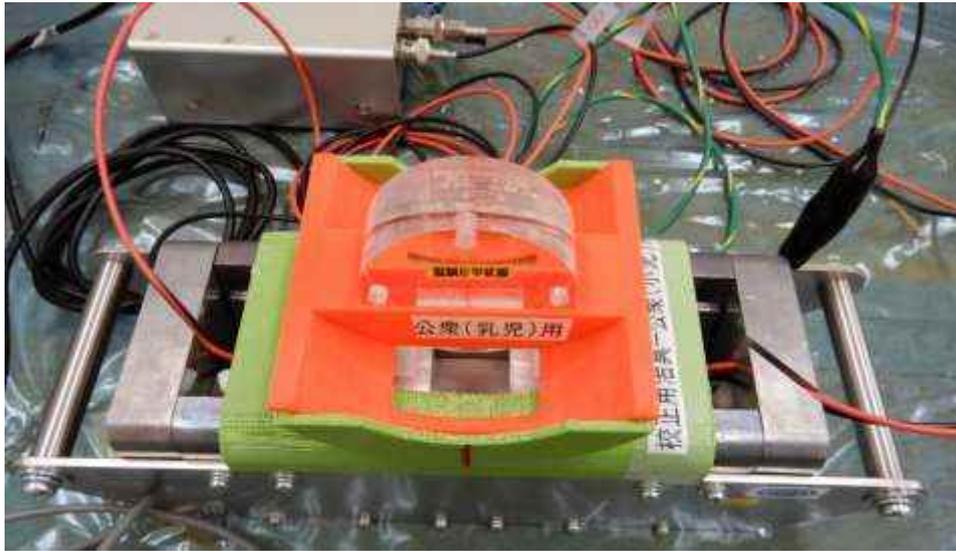


図3-2-7 ファントムの設置（上：乳児用、下：成人用）

3. 2. 2 校正データ取得作業

- ① 図3-2-8右上の ROI 情報のコンボボックスから校正対象の年齢群の ROI 情報を選択する。
- ② 「プリセット」ボタンをクリックし、コンボボックスで「ライブタイム」を選択し、ダイアログに測定時間（秒）を入力して「OK」ボタンをクリックする。
- ③ コメント欄に年齢群（成人・小児・乳児）と校正のための測定であることを記入する（例：Cal_adult）。
- ④ グラフがクリアされていることを確認して「スタート」ボタンをクリックする。
- ⑤ ステータスが「測定中」から「停止中」に変わり、測定が終了するまで待つ。

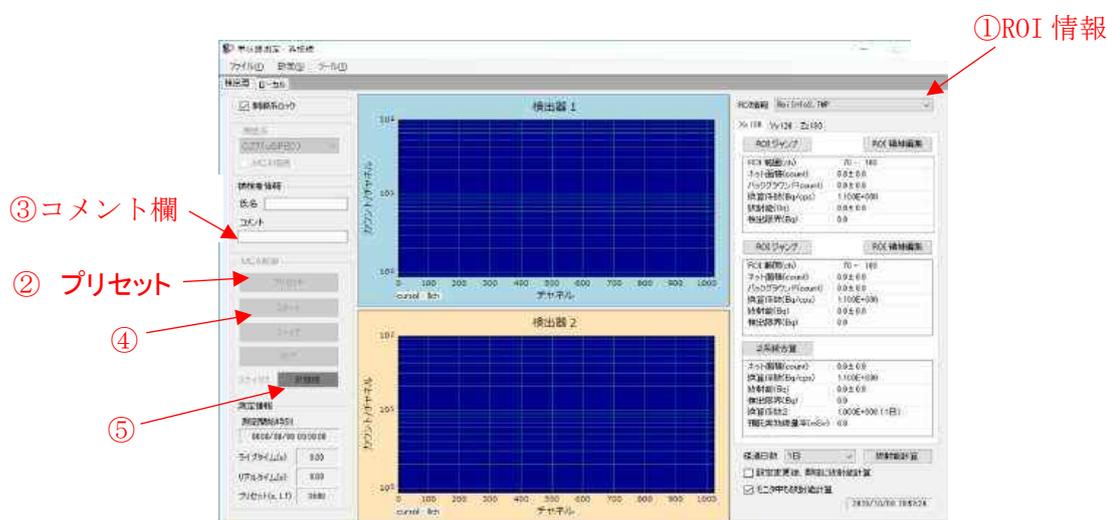


図3-2-8 測定画面

3. 2. 3 計数効率の算出

- ① ^{133}Ba の ROI 中央付近に γ 線 (356 keV) ピーク中心があり、356 keV 及び 383 keV の 2 つのピーク全体が ROI 内にあることを確認する。はみ出す場合は ROI 範囲を調整する。ROI は、356 keV のピークチャンネルを p として、 $0.934p \sim 1.137p$ となるように ROI を設定するとよい。(図 3-2-9)
- ② 次の式を用いて換算係数 K_1 (Bq/cps)、及び計数効率 ε (cps/Bq) を計算する。

$$K_1 = A_{^{133}\text{Ba}} \times \frac{t}{M_{\text{NET}}} \times \frac{\eta_{^{133}\text{Ba}}}{\eta_{^{131}\text{I}}}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{K_1}, \eta_{^{133}\text{Ba}} = 0.71 \eta_{^{131}\text{I}} = 0.817$$

$$u(\varepsilon) = u(M_{\text{NET}}) \times \frac{A_{^{133}\text{Ba}}}{t} \times \frac{\eta_{^{133}\text{Ba}}}{\eta_{^{131}\text{I}}}$$

$A_{^{133}\text{Ba}}$: ^{133}Ba 線源の放射能 (Bq)、 t : 測定時間 (ライブタイム) (sec)、

$M_{\text{NET}} \pm u(M_{\text{NET}})$: ネット面積 (検出器 1 と検出器 2 の合算) とその不確かさ (図 3-2-10)



図 3-2-9 ROI の設定画面



図 3-2-10 ネット面積確認画面

3. 2. 4 計数効率と換算係数の入力

- ① 「設定」 - 「ROI 情報・換算係数編集」をクリックする (図 3-2-1 1)。
- ② 「合算」のタブをクリックして選択する (図 3-2-1 2)。
- ③ ROI No2 (核種: I-131) の換算係数 (Bq/cps)に K_1 を、計数効率(s^{-1}/Bq)に ϵ 、標準偏差 (s^{-1}/Bq)に $u(\epsilon)$ を入力する (図 3-2-1 2)。
- ④ 「ファイル」 - 「名前を付けて ROI 情報を保存 (S)…」をクリックして、ROI 情報を保存する (図 3-2-1 3)。
- ⑤ 「換算係数 2 の編集」に経過日数に応じた換算係数 (付録 B 参照) を入力する。
※ROI-1、ROI-2、ROI-3 全てに同じ値を入力する。
- ⑥ 「OK」ボタンをクリックして ROI 情報・換算係数編集ウィンドウを閉じる (図 3-2-1 4)。
- ⑦ 「データ保存」ボタンをクリックする。
- ⑧ 年齢群を識別できるようにファイル名を付けてスペクトルを保存する。

3. 2. 1 ~ 3. 2. 4 の操作を年齢群ごとに繰り返す。



図 3-2-1 1 ROI 情報・換算係数編集

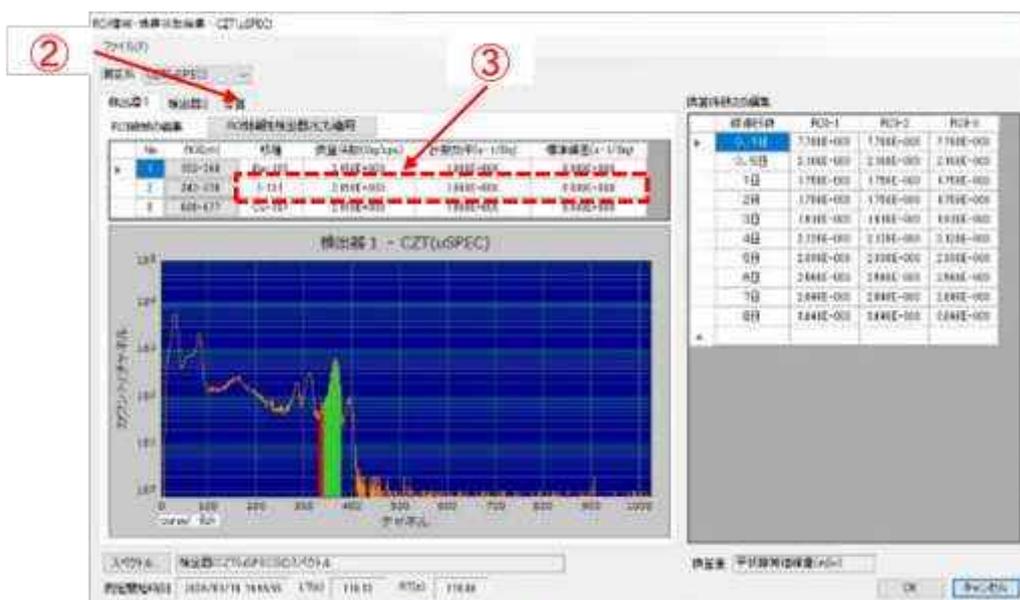


図 3-2-1 2 計数効率の入力



図 3 - 2 - 1 3 計数効率の保存

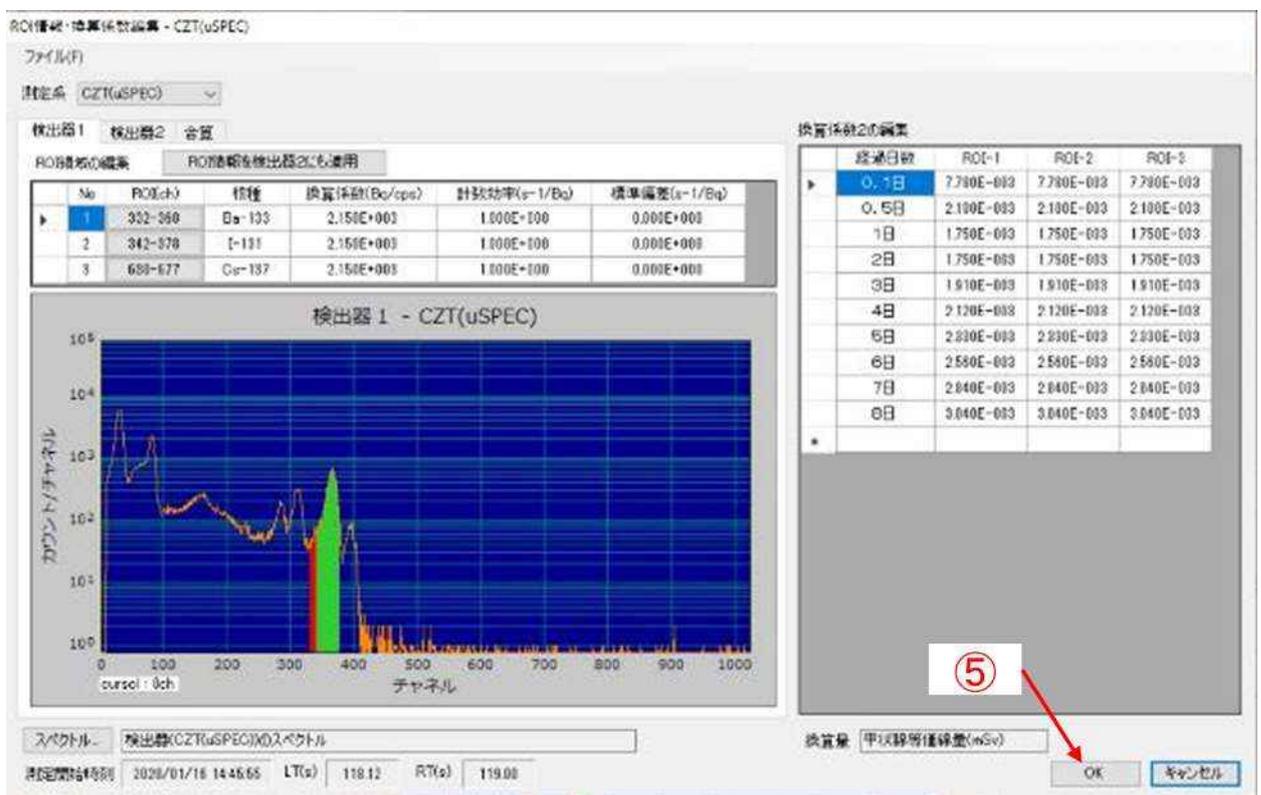


図 3 - 2 - 1 4 ROI 情報・換算係数編集画面

3. 3 バックグラウンド補正用測定の手順

- ① バックグラウンド測定用治具及び PMMA アクリル製円筒型ファントムを検出器の上に設置する。図3-3-1に示すとおり、成人、小児、幼児で使用する治具とファントムが異なる。
- ② 図3-3-2の画面左側にある「プリセット」ボタンをクリックし、ダイアログに測定時間（秒）を入力して「OK」ボタンをクリックする。
- ③ コメント欄に年齢群（成人・小児・乳児）とバックグラウンド測定であることを記入する（例：BG_adult、BG_child、BG_baby等）。
- ④ グラフがクリアされていることを確認して「スタート」ボタンをクリックする。
- ⑤ ステータスが「測定中」から「停止中」に変わり測定が終了したら、「ファイル」－「測定データをBGデータとして名前を付けて保存」をクリックする。
- ⑥ 年齢群ごとに図3-3-1の測定用治具を変更して②～⑤の測定を行う。

成人・小児用



小児用配置
(PMMA13cmΦ × 12cm)

成人用配置
(PMMA20cmΦ × 17cm)

乳児用



乳児用配置 (PMMA13cmΦ × 12cm)

図3-3-1 甲状腺モニタシステムでのバックグラウンド補正用測定のセットアップ

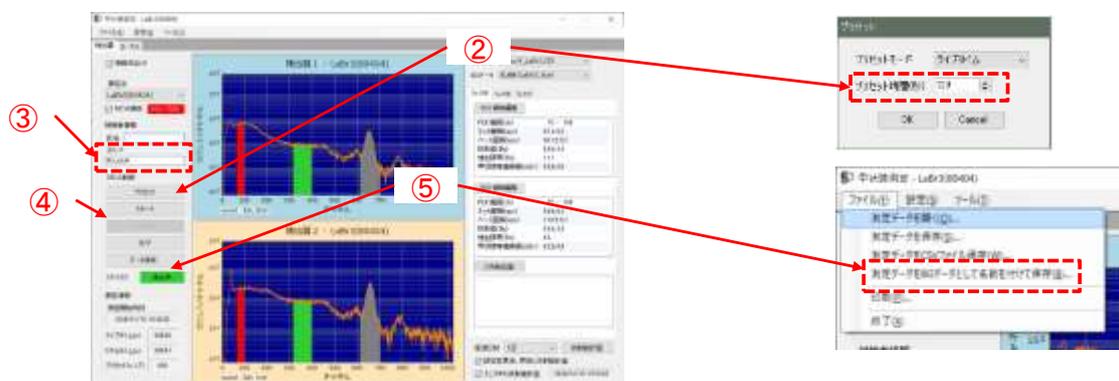


図3-3-2 バックグラウンド補正用測定時の画面の例

3. 4 甲状腺等価線量の測定手順

- ① 被検者の年齢群 (成人・小児・乳児) に応じた測定治具を準備する (図 3-4-1 参照)。なお、乳児については、小児用治具を使用する。
- ② 上部遮蔽体を左右に動かすことにより、治具下部の溝に上部遮蔽体をはまるように検出器の間の距離を調整する (図 3-4-1 参照)。治具上部に汚染防止用シートを設置する。
- ③ 図 3-4-2 の画面左側の被検者情報として、被検者の氏名とコメント (被検者 ID、受付番号、年齢群などの情報) を入力する。
- ④ 画面右上の ROI 情報のコンボボックスから適切な年齢群の ROI 情報及び BG データを選択する。これにより、甲状腺等価線量への適切な換算係数と該当する年齢群の治具で測定したバックグラウンドデータが選択される。
- ⑤ 画面右下の経過日数のコンボボックスから摂取推定日から測定日までの経過日数を選択する。

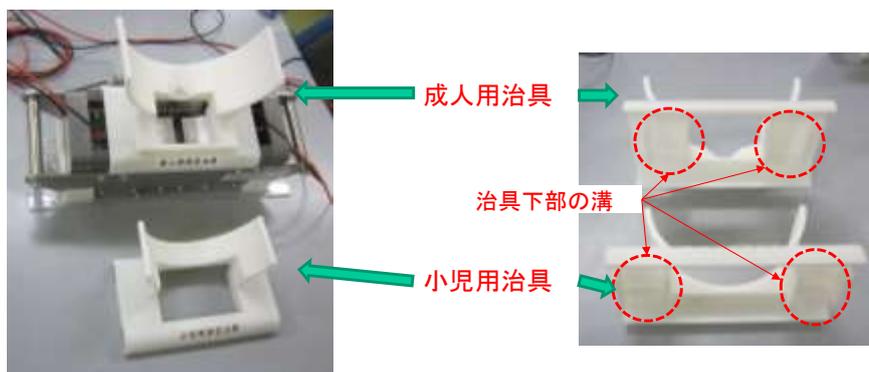


図 3-4-1 甲状腺等価線量の測定に用いる測定治具

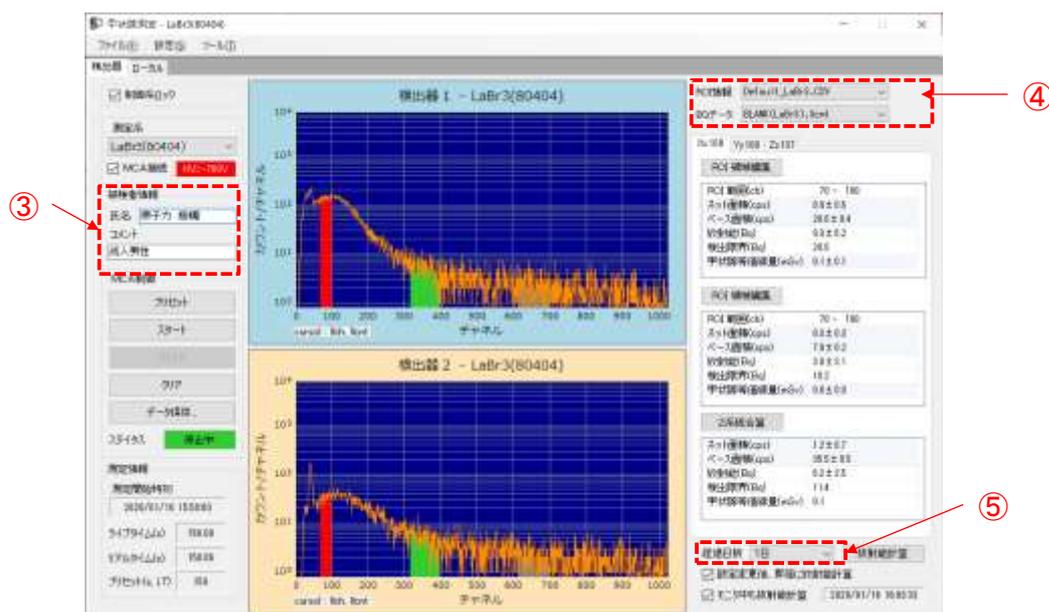


図 3-4-2 バックグラウンド補正用測定時の画面の例

- ⑥ 図3-4-3のように、被検者に甲状腺モニタに覆いかぶさってもらい、顎サポート台に顎を突き出すように乗せ、測定治具に被検者の首を乗せる（図3-4-1参照）。測定時は、首をできる限り測定治具に密着させ、なるべく動かないように注意する。小児等については、図3-4-4のように顔のみを上向きにして前方に動画を放映することにより興味を引き測定中の体動を抑えてもよい。また、乳児でうつぶせの測定が困難な場合は、周辺遮蔽体の手前側に厚手のバスタオルや毛布で段差をなくし、図3-4-5のように頭部を首部サポートに乗せて仰向けに寝かせて測定することも可能である（ROI情報を仰向け時のデータに修正すること）。



甲状腺モニタへの被検者の保定方法

測定時

図3-4-3 測定時の被検者の保定方法



図3-4-4 小児に対する体動抑制対策の一例



図3-4-5 うつ伏せ測定が困難な場合の乳児の保定方法

- ⑦ 図3-4-6の画面左側にある「プリセット」ボタンを押し、測定時間をセットする。プリセットモードのコンボボックスが、ライブタイムになっていることを確認する。測定時間は、成人及び小児については150秒、うつ伏せ測定の乳児については300秒、仰向け測定の乳児については600秒に設定する。
- ⑧ 画面中央のグラフ2つがクリアされていることを確認して、画面左側の「スタート」ボタンをクリックする。波高スペクトルが表示されている場合は「クリア」ボタンをクリックする。
- ⑨ ステータスが「測定中」から「停止中」に変わり測定が終了したら、「データ保存」ボタンをクリックする。ファイル名として、被検者のIDや受付番号など、識別できる名前を付与する。
- ⑩ 画面右側の甲状腺等価線量の数値を確認する
- ⑪ 次の被検者の測定に備えて、「クリア」ボタンをクリックしてグラフをクリアする

以上で、甲状腺等価線量の測定が完了する。

引き続き他の被検者の測定を継続する場合は、①から⑪の手順を繰り返す。



図3-4-6 甲状腺等価線量測定時の画面例

3. 5 測定終了後の手順

- ① 図3-5-1のとおり、甲状腺測定用ソフトウェア左上のメニューから「設定」－「LaBr(80404)の設定」をクリックする
- ② 「LaBr(80404)の設定」ウィンドウにある「検出器1」タブの「Bias」の数値を「0」に変更し、右隣の「適用」ボタンをクリックする。この操作により、印加されていた検出器の高電圧がOFFになる。
- ③ 「適用」ボタン右隣の表示が「OFF」(緑)となることを確認する。
- ④ 「終了 (MCAは停止します)」ボタンをクリックする。
- ⑤ 甲状腺測定用ソフトウェアのメインウィンドウのメニューから「ファイル」－「終了」(または右上×ボタン)をクリックして甲状腺測定用ソフトウェアを終了する。
- ⑥ MCA切断の確認ダイアログが表示されるので、「はい」ボタンをクリックする。
- ⑦ 甲状腺モニタシステムを片付ける。

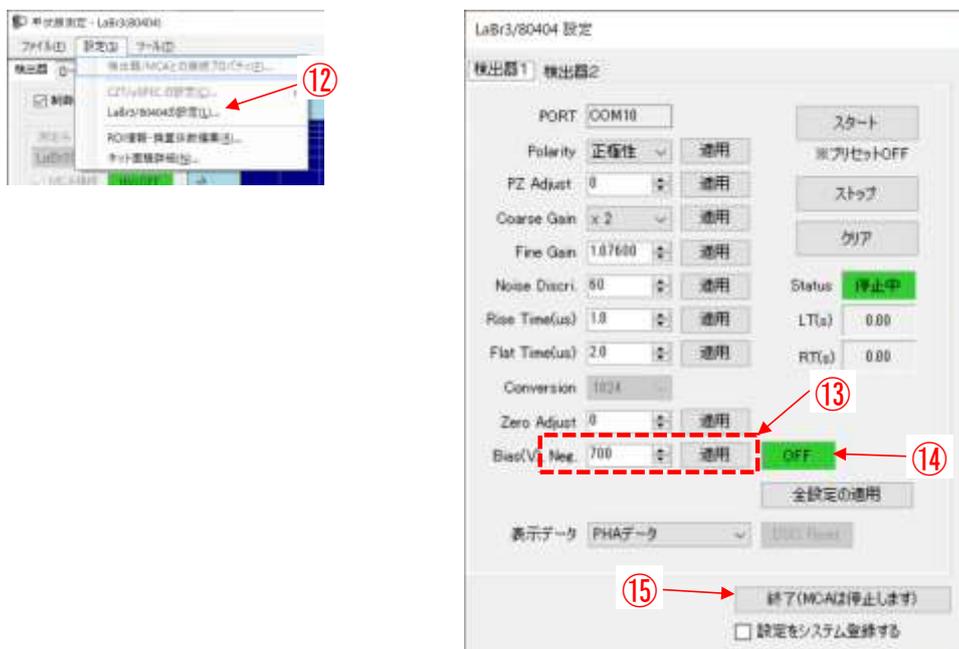


図3-5-1 検出器取外し前の処理用画面

4. 甲状腺測定用ソフトウェアのインストール手順

4. 1 事前準備

本プログラムの使用には、次のプログラムを事前にインストールする必要がある。

- ① アドフューテック社製標準プログラム Prime
- ② GBS 社製 WinSPEC
- ③ Microsoft 社製「.Net Framework 4.0 client profile」、同「.Net Framework 4.0 Language Pack」
- ④ Microsoft 社製「Visual C++ ランタイムライブラリ(x86)」

①は本プログラムのインストールCDに同梱されている次のファイルを管理者権限で実行することにより使用するコンピュータにインストールする。

¥Adfutec_Prime¥■Prime Standard¥Install¥setup.exe

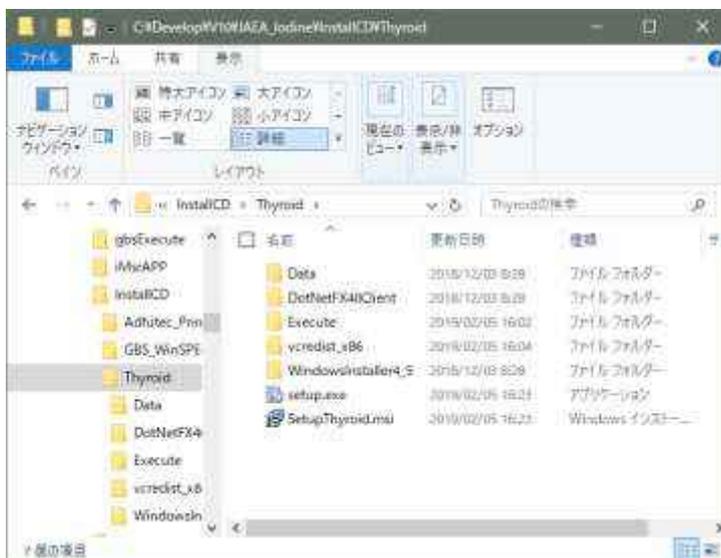
②は RITECH 社製 uSPEC 付属のインストールCD、または本プログラムのインストールCDに同梱されているファイルを用いて使用するコンピュータにインストールする。本プログラムのインストールCDを使用する場合は、次のファイルを管理者権限で実行することによりインストールする。

¥GBS_WinSPEC¥■winspec_for_inspectors_2.05.0002¥setup.exe

③と④は本プログラムをインストールする際に自動的にインストールされる。既にインストールされている場合はスキップされるか、「修復」といったメッセージが出力されるので、それらのメッセージに従ってインストールを継続する。

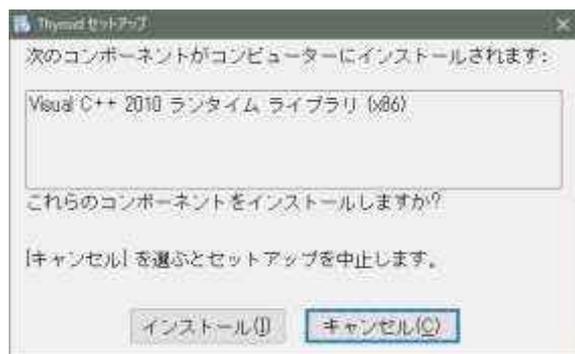
4. 2 甲状腺測定用ソフトウェアのインストール作業

- ① インストールCDをドライブにセットして Windows エクスプローラでフォルダ ¥Thyroid を開く。

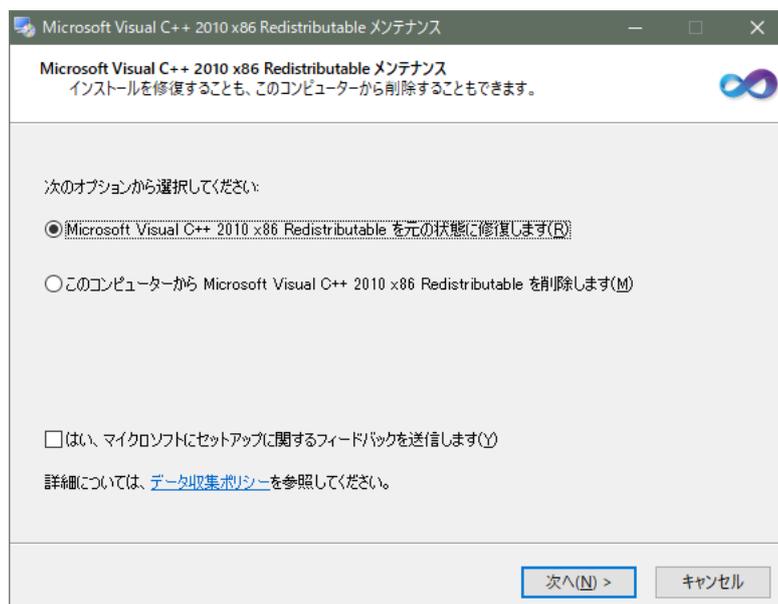


- ② プログラム `setup.exe` を管理者権限で実行する（ファイル名上にマウスを移動させ右クリックで表示されるポップアップメニューの「管理者権限で実行」を選択）。
- ③ 「この不明な発行元からのアプリがデバイスに変更を加えることを許可しますか？」等の確認があるので、「はい」をクリックする。

以下、インストーラのメッセージに従う。



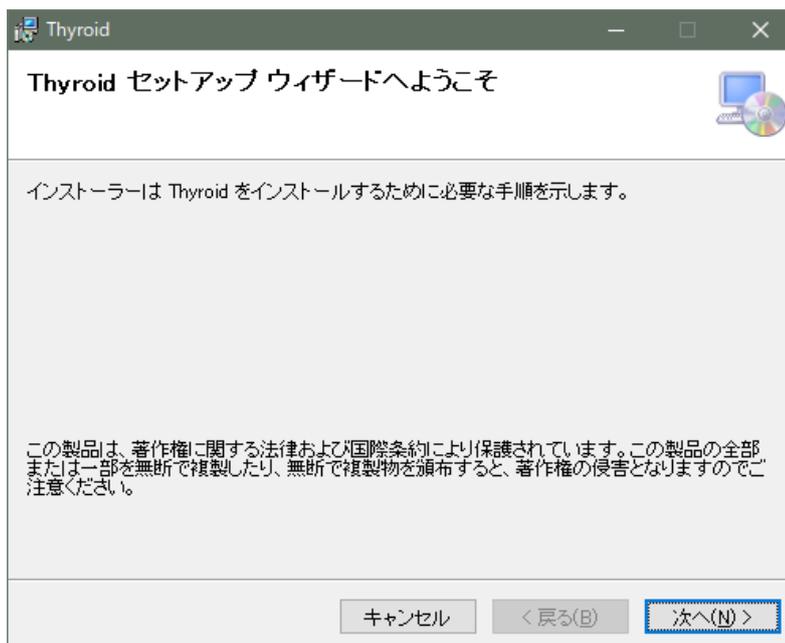
[インストール] をクリック



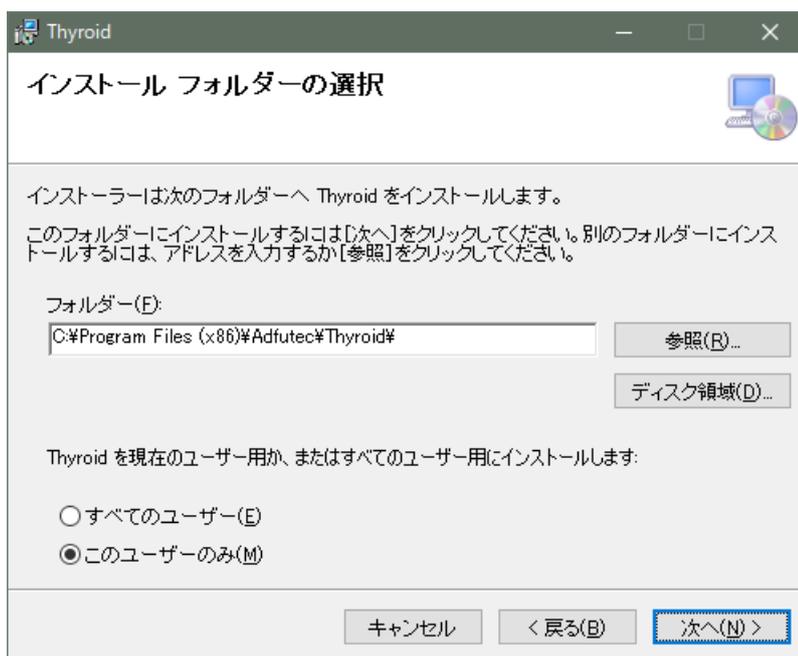
「◎… 修復します」を選択、「□はい、マイクロ…」をチェックしないで [次へ] をクリック



[完了] をクリック



[次へ] をクリック



フォルダを指定して [次へ] をクリック

※上記の画面イメージはデフォルトのフォルダである。このフォルダは UAC (User Access Control) によりファイル作成やコピー、編集が原則的にできなくなり、全て別フォルダに転送される(リダイレクタ)。

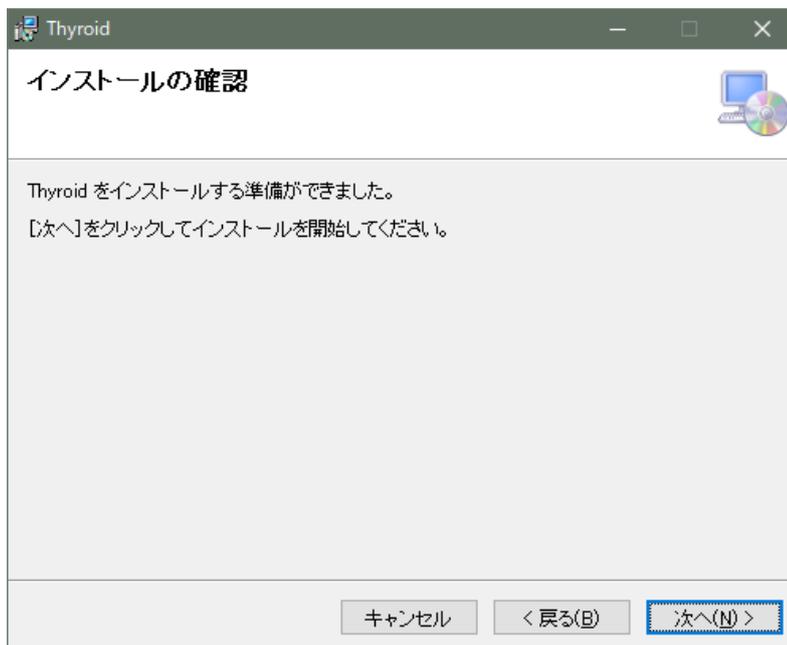
特別の理由がない限り、

C:\Program Files (x86)\Adfutech\Thyroid

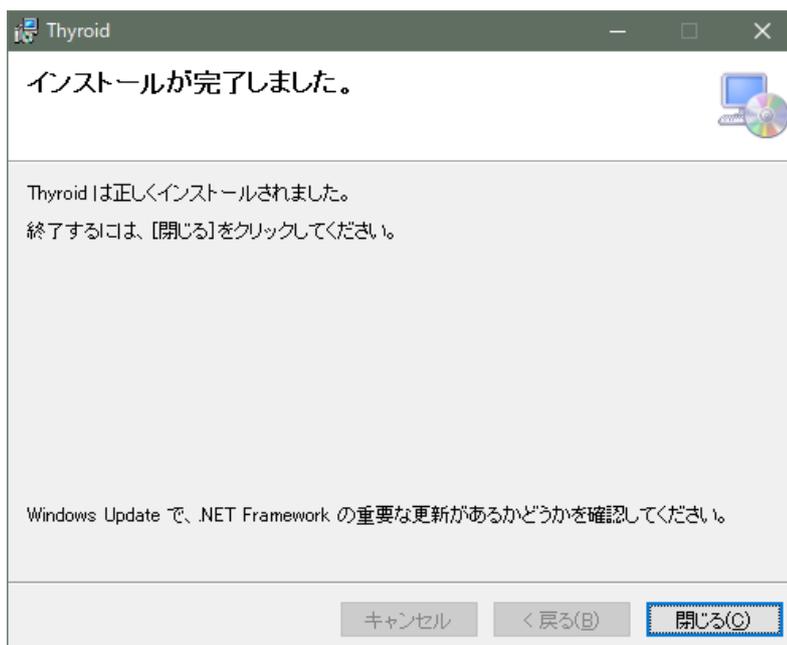
を

C:\Adfutech\Thyroid

に変更してインストールする。



[次へ] をクリックします。



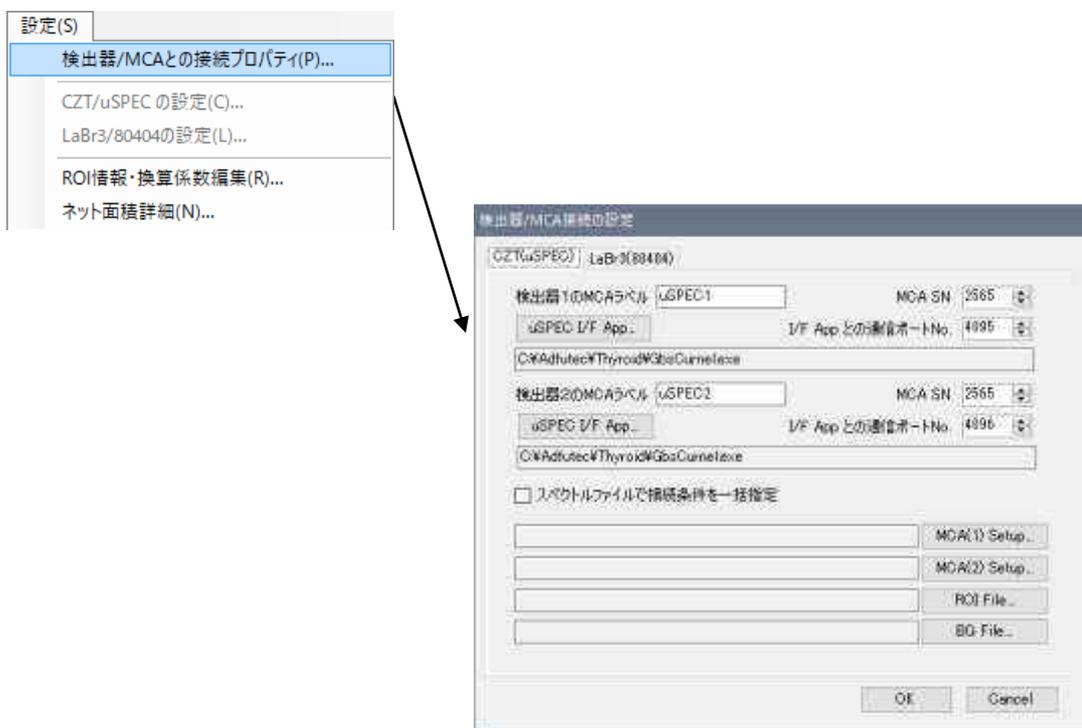
インストールは完了。[閉じる] でインストーラを終了させる。

デスクトップ上のショートカットキーをクリックし、本プログラムが正常に起動することを確認する。



4. 3 信号処理回路の定義、登録

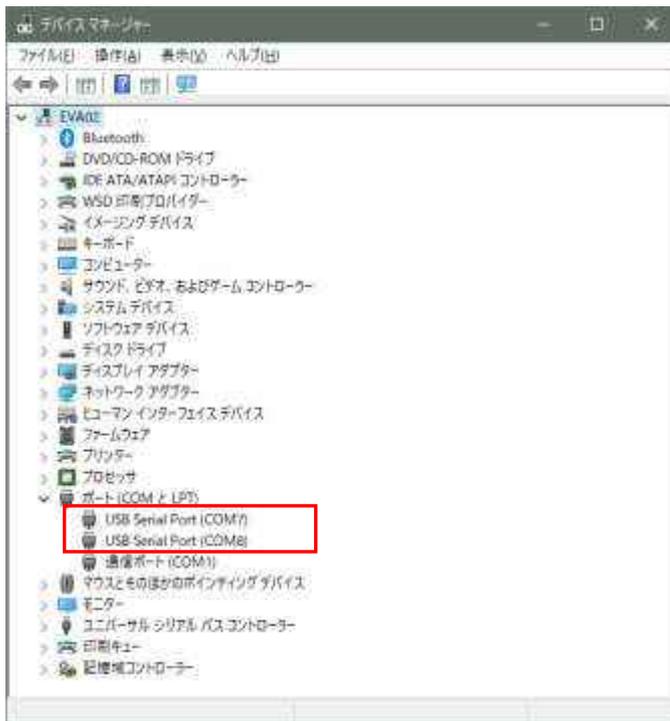
- ① 検出器と信号処理回路を未接続の状態、メニュー「設定 → 検出器/MCAと接続プロパティ」を実行する。



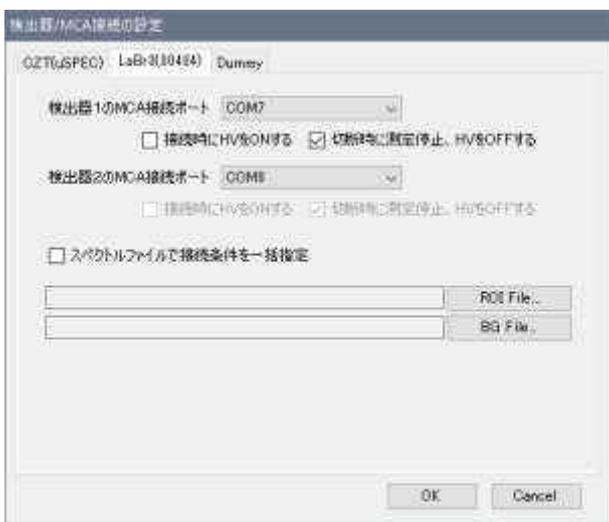
- ② パーソナルコンピュータと 信号処理回路（80404）を接続して 80404 が使用する COM ポートを調べる。

Window のデバイスマネージャーを起動*する。以下は Windows 10 の場合。

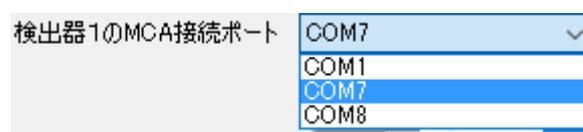
※スタートメニュー → Windows システムツール → コントロールパネル → デバイスマネージャーで、起動する。



- ① デバイス "ポート(COM と LPT)" を展開し、LaBr3(80404)が使用する COM を確認する(この例なら COM7、COM8 であるが、実際の番号は機器や他の装置の接続に依存する)。
- ② 「LaBr3(80404) タブ」をクリックして画面を切り換える。

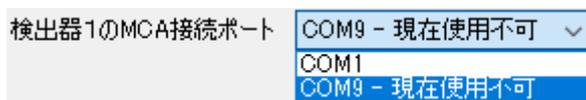


- ③ 検出器毎に、MCA接続ポートとして、先にデバイスマネージャーで確認した COM を指定する。



※接続ポートは重複できない。

※設定済み接続ポートがケーブルを外した等の理由で使用できない場合、"- 現在使用不可" と表示さる。



- ④ 信号処理回路接続時の HV の ON/OFF の動作を指定する。

接続時に HV を ON する : チェック()すると接続時に設定値で HV-ON する。

アンチェック()すると HV-ON しない。接続後に手動操作で HV-ON する必要がある。

※初期値=アンチェック()状態 … 接続時、HV-ON しない

切断時に測定停止、HV を OFF する : チェック()すると、切断時に HV-OFF し、

併せて測定も停止させる。

アンチェック()すると HV-OFF しない。測定中の場合、測定は継続される。

※初期値=アンチェック()状態 … 切断時、HV-OFF しない

※検出器 1 と検出器 2 の HV は共通で、電圧設定や HV の ON/OFF 動作は検出器 1 と共通になる。

- ⑤ 「スペクトルファイルで接続条件を一括指定」のチェックボックスが ONであることを確認する。当該チェックボックスが ON になっていないと、保存した測定データ (.xCnt 形式) に信号処理回路の設定、ROI 情報、バックグラウンドデータが含まれない。

- ⑥ LaBr3(80404) の検出器 1、検出器 2 について共に接続条件を指定したら、[OK] をクリックして接続情報を登録する。

なお、接続情報を登録しただけでは LaBr3(80404) への接続は行われない。接続を確認するには、元の画面で明示的に「MCA接続」のチェックを実行する必要がある。

4.4 検出器／信号処理回路の調整

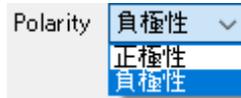
- ① 「3.1 甲状腺モニタシステムの準備手順」を実行して LaBr3(80404)と接続する。
- ② メニュー「設定→LaBr3/80404 の設定」を実行し、設定・調整画面を起動する。



設定は **Bias** を除いて検出器 1、検出器 2 で独立しており、両者はタブで切り換えができる。入力後に、個々の項目の右側にある [適用] ボタンをクリックすると設定値を信号処理回路(80404)に送信する。また、この画面での [スタート] [ストップ] [クリア] が有効で、メインウィンドウでスペクトルをモニタしながら波形整形フィルタや増幅器のゲインなどの調整が可能である。この時、プリセットは解除される。

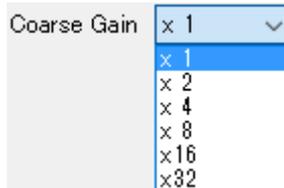
設定) **PORT** : 通信に使用する PORT 番号。この画面では変更できない。

Polarity : 入力信号の極性で正負を選択する。負極性に設定する。



PZ Adjust : Paul Zero 調整する。入力範囲 = -512 ~ +512

Coarse Gain : Coarse Gain を以下から選択する。



Fine Gain : Fine Gain を調整する。入力範囲 = $\times 0.5 \sim \times 1.5$

Noise Discr. : 入力信号のノイズとシグナルの境界を設定する。入力範囲 = 8 ~ 512

Rise Time(us) : 台形波波形整形の立ち上がり / 立下り時間を μ 秒単位で指定する。 入力範囲 = 0.5 ~ 60 μ 秒

Flat Time(us) : 台形波波形整形の上底時間を μ 秒単位で指定する。
入力範囲 = 0.2 ~ 10 μ 秒

Zero Adjust : スペクトルのゼロ点を調整する。入力範囲 = -2048 ~ 2048

Conversion : ADC Conversion GAIN。この値は変更できない。

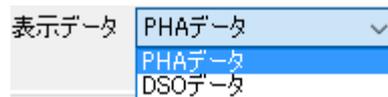
Bias(Neg.) : HV の設定値を設定する。入力範囲 = 0 (= HV : OFF) または、100 ~ 1000

※設定値はプラス表示だが実際の値は負値となる。

※1 ~ 99 までの数値が入力された場合は強制的に 0 (= HV : OFF) となる。

※80404 は検出器 1 と検出器 2 がの Bias 共通であるため、本プログラムからの設定、調整は検出器 1 に対してのみ行う (検出器 2 は検出器 1 と同じ設定になる)。

表示データ : 元の画面の MCA 表示と DSO 表示を切り換えます。



※表示データを "DSO 表示" にしている状態で上記の設定を「適用」すると、1 回だけ、DSO データを読み取り DSO 表示を更新する。

[全設定の適用] : 現在の設定値を一度に信号処理回路(80404)に送信する。

[DSO Read] : 1回だけ、DSOデータを読み取りDSO表示を更新する。

[終了(MCAは停止します)] で(調整用の)測定は停止する。

設定をシステム登録する : チェック()して[終了(MCAは停止します)] の
クリックで、入力値がその検出器の設定データと
して保持される。

5. おわりに

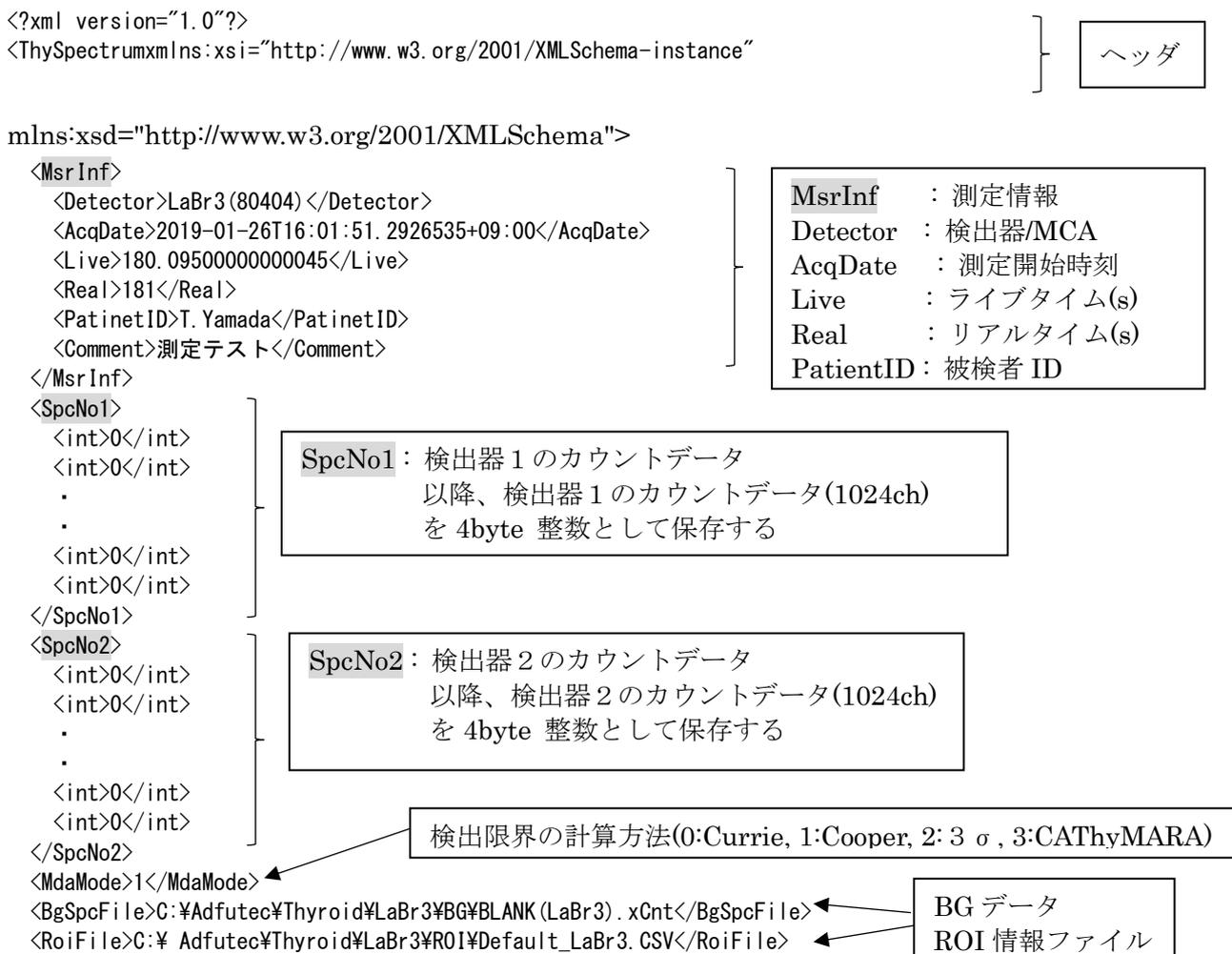
放射性ヨウ素の放出を伴う原子力事故などの緊急時には、できるだけ沢山の人を対象に、甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素の精度の高い計測により、内部被ばく線量（甲状腺等価線量）の評価を行う必要がある。本マニュアルでは、当該計測に使用することを目的として平成31年度放射線安全研究戦略的推進事業費（事故等緊急時における内部被ばく線量迅速評価法の開発に関する研究）事業で開発した甲状腺モニタシステムの使用方法を取りまとめた。

付録 A. データファイル

A.1 スペクトルファイル

- 1-2 行目 : XML ファイルのヘッダ
- グループ <MsrInf> : 測定情報
- グループ <SpcNo1> : 検出器 1 のカウントデータ
- グループ <SpcNo2> : 検出器 2 のカウントデータ
- グループ <URoiS> : 複数の ROI 情報の管理
- グループ <HwCp> : MCA 通信、設定関連情報

以下は XML ファイルイメージ。上で挙げたグループを網掛け表示している



以下、次ページへ

```

<URoiS>
<RoiInfo>
  <Nuclide>Ba-133</Nuclide>
  <RoiColor />

```

← ROI1 の核種

```

  <RoiDet1>
    <Start>70</Start>
    <Stop>100</Stop>
    <Factor1>1.1</Factor1>
    <Eff>0.1</Eff>
    <EffSgm>0.01</ EffSgm >
    <CpyFac2>1</CpyFac2>
    <TrVal>0.064166666666666677</TrVal>
    <TrSgm>0.22085770305787394</TrSgm>
    <Grs>2712</Grs>
    <Bkg>1017.8333333333334</Bkg>
    <SgmBkg>31.903500330423515</SgmBkg>
    <Pbc>169.50608101851893</Pbc>
    <SgmPbc>6.1104594087289552</SgmPbc>
    <Net>1524.6605856481476</Net>
    <SgmNet>61.3772844586583</SgmNet>
    <DIAct>76.9297068955858</DIAct>
    <Act>9.3124553386432627</Act>
    <SgmAct>0.37488554876328584</SgmAct>
    <DIAct>0.4698779954198849</DIAct>

```

RoiDet1	: <検出器 1>ROI 情報
Start	: ROI 開始 ch
Stop	: ROI 終了 ch
Factor1	: 換算係数(Bq/cps)
Eff, EffSgm	: 計数効率、標準偏差(s-1/Bq)
CpyFac2	: 換算係数 2
TrVal, TrSgm	: 甲状腺等価線量, 不確かさ (mSv)
Grs	: ROI 領域の積算値(count)
Bkg, SgmBkg	: ベース面積とその不確かさ
Pbc, SgmPbc	: BG ピーク面積とその不確かさ…(*)
Net, SgmNet	: ネット面積とその不確かさ
DIAct	: 検出限界面積
Act, SgmAct	: 放射能とその不確かさ(Bq)
DIAct	: 検出限界放射能(Bq)

```

  </RoiDet1>
  <RoiDet2>
    .

```

RoiDet2	: <検出器 2>>ROI 情報
※構造的には RoiDet1 と同じ	

```

  </RoiDet2>

```

```

  <RoiSumS>
    <Start>0</Start>
    <Stop>0</Stop>
    <Factor1>1</Factor1>
    .
    <DIAct>0.62539626252144487</DIAct>

```

RoiSumS	: <検出器 1、2 合算>>ROI 情報
※構造的には RoiDet1 と同じだが、常に	
Start = 0,	
Stop = 0 と登録する	

```

  </RoiSumS>

```

```

  <Fac2Name> 1 日</Fac2Name>

```

```

  <Factor2>
    <DayFactor>
      <Name> 1 日</Name>
      <TransFactor>1</TransFactor>
    </DayFactor>
    .

```

DayFactor	: 換算係数 2 情報
Name	: 経過日数
TransFactor	: 換算係数

```

  </Factor2>
  <TransName> 預託実効線量率 (mSv)</TransName>
  <TransVal>15.55171296681891</TransVal>
  <TransSgm>0.47330543029427091</TransSgm>
  <TransDL>0.62539626252144487</TransDL>

```

TransName	: 甲状腺等価線量 (mSv) … 固定
TransVal, TransSgm	: 甲状腺等価線量とその

```

</RoiInfo>

```

```

<URoiS>

```

```

<HwCp>

```

```

  <cpSetting>
    <PortName>COM7</PortName>
    .

```

PortName	: 接続ポート
Porarity	: 入力極性
PzAdjust	: Pole Zero
CoarseGain	: コースゲイン
FineGain	: ファインゲイン

・
<RoiFile>C:\¥Adfutech¥Thyroid¥LaBr3¥ROI¥Default_LaBr3.CSV</RoiFile>
<BgFile>C:\¥ Adfutech¥Thyroid¥LaBr3¥BG¥BLANK (LaBr3). Xcnt</BgFile>
</cpSetting>
</HwCp>

※ここに挙げた設定値や測定結果はダミーである。

A.2 測定データCSVファイル

スペクトル, TestMeasure.Xcnt
検出器, CZT(uSPEC)
測定開始時刻, 2019/01/25 17:23:30
ライブタイム(s), 180.10
リアルタイム(s), 181.00
被検者 ID, 田中衛
コメント, 測定テスト
バックグラウンド, C:\Adfutec\Thyroid\CZT\BG\BackGround.xCnt
ROI 情報, C:\Adfutec\Thyroid\CZT\ROI\Default_CZT.CSV
検出限界計算, Currie

← (改行)

ROI1, Ba-133
ネット面積(count), 2800.8, ±, 85.2
ベース面積(count), 301.7, ±, 23.7
換算係数(Bq/cps), 1.000E+000
計数効率(s-1/Bq), 1.000E-001
標準偏差(s-1/Bq), 5.000E-003
放射能(Bq), 15.5, ±, 0.5
検出限界(Bq), 0.6
換算係数 2, 1.000E+000, (1 日)
甲状腺等価線量(mSv), 15.6, ±, 0.5
<Detector No.1>
ROI 範囲, 70, -, 100
グロス面積(count), 2712.0, ±, 52.1
ベース面積(count), 1017.8, ±, 31.9
バックグラウンド(count), 169.5, ±, 6.1
ネット面積(count), 1524.7, ±, 61.4
検出限界(count), 76.9
換算係数(Bq/cps), 1.100E+000
計数効率(s-1/Bq), 1.000E-001
標準偏差(s-1/Bq), 5.000E-003
放射能(Bq), 9.3, ±, 0.4
検出限界(Bq), 0.5
甲状腺等価線量(mSv), 15.6, ±, 0.5
<Detector No.2>

← (改行)

ROI2, I-131
ネット面積(count), 2800.8, ±, 85.2
.
.
.

← (改行)

※ここに挙げた設定値や測定結果はダミーである。
次ページに続く

前ページからの継続

← (改行)

ROI3, Cs-137
ネット面積(count), 2800.8, ±, 85.2
.
.

← (改行)

MCA Setup - CZT(uSPEC)
<Detector No.1>
Bias Polarity, Auto
HighVol (V), Auto
ADC ConversionGain, 1024
LLD, 10
ULD, 1023
AMP Polarity, Positive
CoarseGain, 5
FineGain, 2.000
BLR, ----
FlatTop (us), 0.7
ShapingTime (us), 0.8
TriggerFilter, -1;0;2;0;-1
PUR, ON
Pole Zero (mV), 1714
<Detector No.2>
.
.

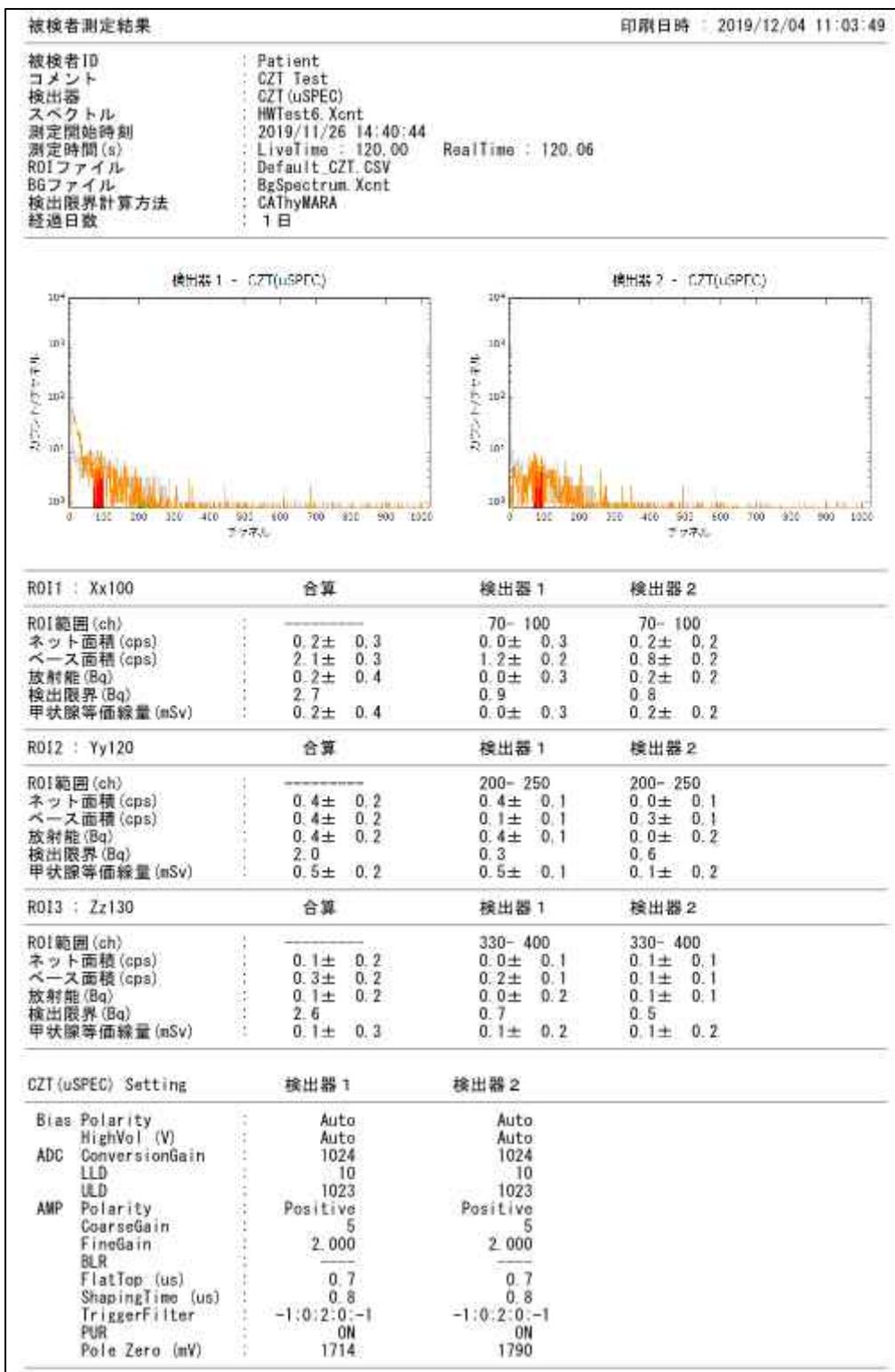
← (改行)

スペクトル, <Detector No.1>, <Detector No.2>
(ch), (count), (count)
0, 0, 0
1, 0, 0
2, 0, 0
3, 0, 0
4, 0, 0
5, 0, 0
6, 0, 0
7, 0, 0
.
.
.
1018, 0, 0
1019, 0, 0
1020, 0, 0
1021, 0, 0
1022, 0, 0
1023, 0, 0

※ここに挙げた設定値や測定結果、カウントデータはダミーである。

A.3 印刷イメージ

以下に印刷を実施した例を示す。



※ここに挙げた設定値や測定結果はダミーである。

A.4 ROI 情報ファイル

以下に例を示す。

```
[Header]
登録 ROI 数, 3
検出器, CZT(uSPEC)

[ROI-1]
核種, Xx100
REM -----
REM Key, 開始, 終了, 換算係数(Bq/cps), 計数効率(s-1/Bq), 標準偏差(s-1/Bq)
REM -----
検出器 1 , 70, 100, 1.100E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
検出器 2 , 70, 100, 1.100E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
合算, 0, 0, 1.000E+000, 1.000E+000, 0.000E+000

[ROI-2]
核種, Yy120
REM -----
REM Key, 開始, 終了, 換算係数(Bq/cps), 計数効率(s-1/Bq), 標準偏差(s-1/Bq)
REM -----
検出器 1 , 200, 250, 1.200E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
検出器 2 , 200, 250, 1.200E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
合算, 0, 0, 1.000E+000, 1.000E+000, 0.000E+000

[ROI-3]
核種, Zz130
REM -----
REM Key, 開始, 終了, 換算係数(Bq/cps), 計数効率(s-1/Bq), 標準偏差(s-1/Bq)
REM -----
検出器 1 , 330, 400, 1.300E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
検出器 2 , 330, 400, 1.300E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
合算, 0, 0, 1.000E+000, 1.000E+000, 0.000E+000

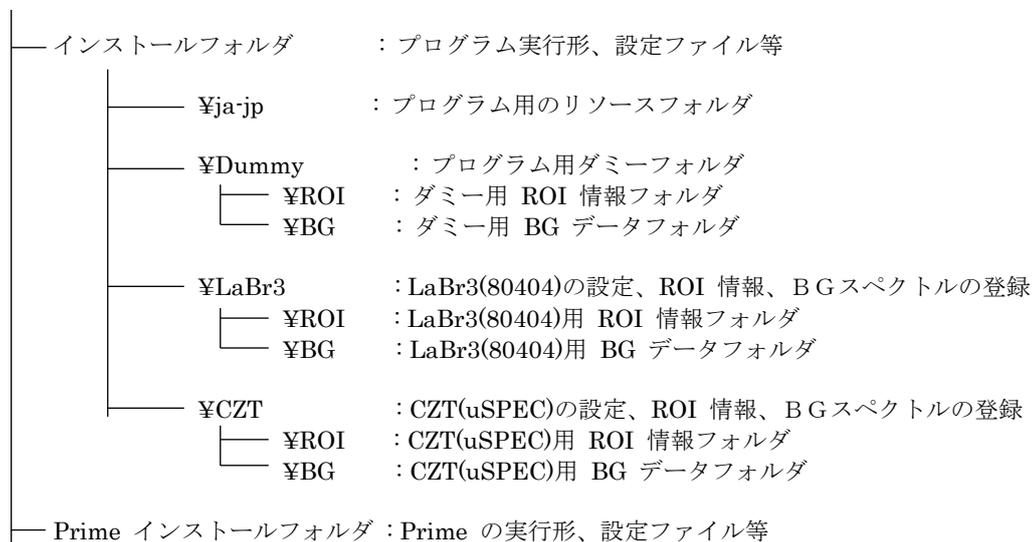
[DayFactor]
換算量, 甲状腺等価線量(mSv)
REM -----
REM Key, ID, ROI1, ROI2, ROI3
REM -----
ID-1, 1 日, 1.000E+000, 1.100E+000, 1.200E+000
ID-2, 2 日, 2.000E+000, 2.200E+000, 2.400E+000
ID-3, 3 日, 3.000E+000, 3.300E+000, 3.600E+000
```

※ここに挙げた設定値はダミーである。

A.5 データフォルダ構造

本プログラムのフォルダ構造を示す。

¥ ルート



付録 B. 換算係数

甲状腺モニタを用いて定量した甲状腺内 ^{131}I 放射能から、被検者の甲状腺預託等価線量を算出するための換算係数の例を示す。換算係数は、簡易内部被ばく線量評価コード(IDECC: Internal Dose Easy Calculation code)を用いて計算した。計算に際し、各パラメータは ICRP の標準値を採用している。摂取形態は ^{131}I 蒸気の吸入急性摂取を仮定し、預託期間は 70 歳までの期間である。年齢群としては、保守的に乳児については 3 ヶ月、小児については 5 歳とした。

B.1 換算係数

公衆に対する測定 ^{131}I 放射能から甲状腺等価線量への換算係数の例を表 B-1～表 B-3 に示す。この換算係数は、B.3 に示す摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数を B.2 に示す甲状腺残留率で除して得られる値である。

表 B-1 乳児 (3 ヶ月児) に対する測定 ^{131}I 放射能から
甲状腺等価線量への換算係数の例

摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)	摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)	摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)
0.1	6.60E-02	18	1.35E-01	85	7.45E+02
0.2	3.50E-02	20	1.67E-01	90	1.09E+03
0.5	1.84E-02	22	2.33E-01	100	3.50E+03
0.7	1.67E-02	24	3.18E-01		
1	1.59E-02	26	3.54E-01		
2	1.67E-02	28	4.67E-01		
3	1.94E-02	30	6.25E-01		
4	2.19E-02	35	1.17E+00		
5	2.50E-02	40	2.33E+00		
6	2.92E-02	45	4.12E+00		
7	3.18E-02	50	7.61E+00		
8	3.76E-02	55	1.52E+01		
9	4.27E-02	60	2.92E+01		
10	4.73E-02	65	5.38E+01		
12	6.14E-02	70	9.72E+01		
14	7.78E-02	75	1.75E+02		
16	1.00E-01	80	3.50E+02		

表 B—2 小児（5歳児）に対する測定 ^{131}I 放射能から
甲状腺等価線量への換算係数の例

摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)	摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)	摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)
0.1	3.58E-02	18	5.00E-02	85	6.13E+01
0.2	1.90E-02	20	5.94E-02	90	1.06E+02
0.5	1.00E-02	22	7.31E-02	100	3.11E+02
0.7	9.05E-03	24	9.05E-02		
1	8.26E-03	26	1.12E-01		
2	8.64E-03	28	1.46E-01		
3	1.00E-02	30	1.73E-01		
4	1.12E-02	35	2.84E-01		
5	1.19E-02	40	5.43E-01		
6	1.36E-02	45	8.64E-01		
7	1.58E-02	50	1.46E+00		
8	1.73E-02	55	2.68E+00		
9	1.90E-02	60	4.63E+00		
10	2.11E-02	65	6.79E+00		
12	2.64E-02	70	1.19E+01		
14	3.17E-02	75	2.09E+01		
16	3.80E-02	80	3.58E+01		

表 B—3 成人に対する測定 ^{131}I 放射能から
甲状腺等価線量への換算係数の例

摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)	摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)	摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)
0.1	7.36E-03	18	7.65E-03	85	3.55E+00
0.2	3.90E-03	20	8.67E-03	90	6.00E+00
0.5	2.05E-03	22	1.08E-02	100	1.34E+01
0.7	1.86E-03	24	1.34E-02		
1	1.70E-03	26	1.50E-02		
2	1.77E-03	28	1.86E-02		
3	1.95E-03	30	2.44E-02		
4	2.05E-03	35	3.55E-02		
5	2.29E-03	40	5.27E-02		
6	2.44E-03	45	9.51E-02		
7	2.79E-03	50	1.30E-01		
8	3.00E-03	55	2.17E-01		
9	3.25E-03	60	3.90E-01		
10	3.55E-03	65	5.57E-01		
12	4.38E-03	70	8.67E-01		
14	5.42E-03	75	1.34E+00		
16	6.39E-03	80	2.05E+00		

B.2 甲状腺残留率

乳児（3ヶ月児）、小児（5歳児）及び成人の吸入¹³¹I（蒸気）放射能に対する甲状腺残留率を図B-1に示す。摂取後1日で極大となることに留意が必要である。

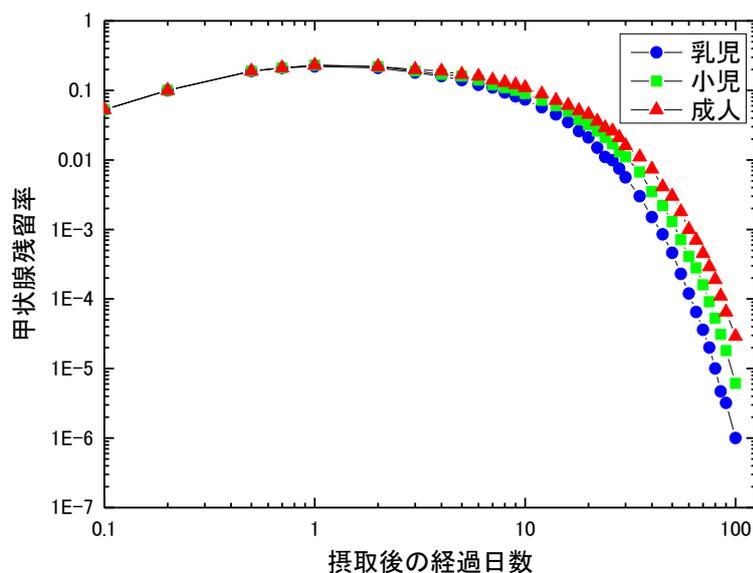


図 B—1 甲状腺残留率の例

B.3 摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数

摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数（¹³¹I 蒸気）を表 B—4 に示す。

表 B—4 摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数の例

乳児（3ヶ月児）	小児（5歳児）	成人
3.5×10^{-3} mSv/Bq	1.9×10^{-3} mSv/Bq	3.9×10^{-4} mSv/Bq

**甲状腺放射性ヨウ素モニタシステム
取扱マニュアル
(作業用システム編)**

令和2年3月31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**

目次

1. はじめに	1
2. 作業用甲状腺放射性ヨウ素モニタシステムの概要	1
2. 1 CZT 検出器	2
2. 2 検出器用周辺遮蔽体	2
2. 3 制御・解析用パーソナルコンピュータと制御用ソフトウェア	2
2. 4 測定器具	3
2. 5 測定原理	4
3. 測定の手順	6
3. 1 甲状腺モニタシステムの準備手順	6
3. 2 甲状腺モニタシステムの校正手順	9
3. 2. 1 校正の準備作業	9
3. 2. 2 校正データ取得作業	11
3. 2. 3 計数効率の算出	12
3. 2. 4 計数効率と換算係数の入力	13
3. 3 バックグラウンド補正用測定の手順	15
3. 4 甲状腺等価線量の測定手順	16
3. 5 測定終了後の手順	19
4. 甲状腺測定用ソフトウェアのインストール手順	20
4. 1 事前準備	20
4. 2 甲状腺測定用ソフトウェアのインストール作業	20
4. 3 MCA の定義、登録	25
4. 4 検出器/MCA の調整	27
5. おわりに	29
付録 A. データファイル	30
A. 1 スペクトルファイル	30

A.2	測定データCSVファイル.....	33
A.3	印刷イメージ.....	35
A.4	ROI情報ファイル.....	36
A.5	データフォルダ構造.....	37
付録 B.	換算係数.....	38
B.1	換算係数.....	38
B.2	甲状腺残留率.....	39
B.3	摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数.....	39

1. はじめに

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。そこで、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、原子力規制庁から受託した平成 31 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）事業において、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システム（以下「甲状腺モニタシステム」という。）を開発した。

本マニュアルは、指揮所等に設置して作業者の内部被ばく線量測定に用いる甲状腺モニタシステム（作業者用）の概要、設置方法及び使用方法をまとめたものである。これにより、原子力事故時等の環境中に放射性ヨウ素が放出されたときに、多数の作業者について、摂取した放射性ヨウ素放射能の迅速かつ高精度な測定・評価を可能とすることを目的とする。

2. 作業者用甲状腺放射性ヨウ素モニタシステムの概要

作業者用の甲状腺放射性ヨウ素モニタシステムは、図 2-1 に示すように、CdZnTe 半導体検出器（以下、「CZT 検出器」という。）2 個、検出器周辺遮蔽体、検出器上部遮蔽体、制御・解析用パーソナルコンピュータ（ソフトウェアを含む）、測定治具、測定器設置用プレート、顎サポート台で構成される。さらに、検出器の効率校正用に頸部ファントム（Ba-133 点線源を含む）とファントム用治具が、高線量率環境下での使用時に用いるバックグラウンド測定用治具等が必要となる。



図 2-1 作業者用甲状腺放射性ヨウ素モニタシステムの写真

2. 1 CZT 検出器

CZT 検出器は、図 2-2 に示すように、 1.5 cm^3 の有感体積を持ち、銀白色の筐体内に収められた CdZnTe 結晶と、黒色の筐体内に収められた高圧回路、プリアンプ、アンプ、及び多重波高分析器等の信号処理回路からなる。筐体には、mini USB ポートが取り付けられており、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。

2. 2 検出器用周辺遮蔽体

図 2-3 に検出器用周辺遮蔽体及び検出器上部遮蔽体の写真を示す。周辺遮蔽体は、高密度タングステン合金及び鉛の遮蔽体で構成されており、両側面、内側及び底面にステンレス製のサポートが取り付けられている。最も高い遮蔽効果が要求される検出器周辺の遮蔽体（上部遮蔽体を含む）については、高密度タングステン合金（密度： 17.74 g/cm^3 ）を採用し、それ以外の遮蔽体については、遮蔽効果は低下するが、安価で重量を抑えられる鉛（密度： 11.34 g/cm^3 ）とした。両側の鉛遮蔽体には、検出器のケーブルを通すために溝が設けられている。重量は合計約 18 kg であり、左右両側に取り付けられたステンレス製の取手を用いて容易に移動させることができる。

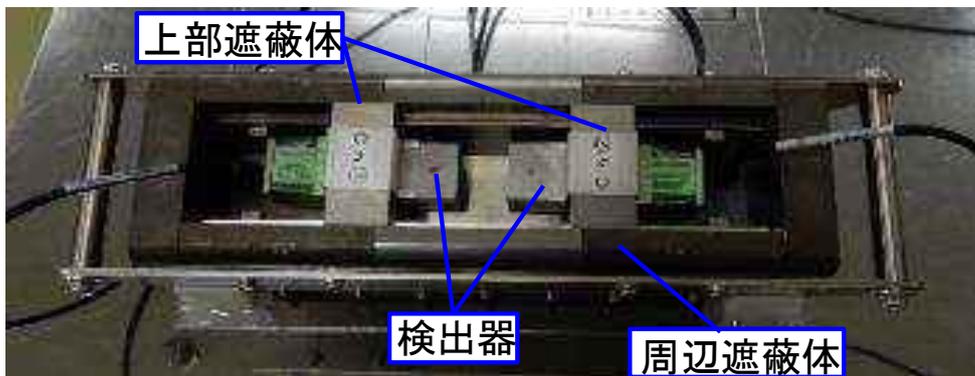


図 2-3 検出器周辺遮蔽体の写真

2. 3 制御・解析用パーソナルコンピュータと制御用ソフトウェア

甲状腺モニタの制御・測定及び結果の解析を行うためには、制御用ソフトウェアがインストールされた制御・解析用パーソナルコンピュータが必要である。使用できるパーソナルコンピュータの要件は以下のとおりである。

- OS : Windows 7(SP1 以上)/Windows 8.1/Windows 10
- PC : AT 互換機
- ディスプレイ : XGA(1024×768)以上の解像度を推奨
- USB : USB3.0 以上のポート 2 つ以上

その他 : Microsoft .Net framework 4.0 以上及び、同 Language Pack 4.0 以上

デスクトップ型 PC、ノート型 PC のどちらも利用可能であるが、可搬性や停電時でも動作し続けられるなどの理由から、ノート型 PC の利用を推奨する。図 2-4 に制御用ソフトウェアの画面の例を示す。左側のボタンで 2 個の検出器を同時に制御して測定の開始、終了、データ保存などが可能である。画面中央では、2 個の検出器それぞれの波高スペクトルを同時に確認することができる。予め、I-131 のピーク部に関心領域 (ROI) を設定し、検出器の効率、放射性ヨウ素放射能から預託実効線量への換算係数などのデータセットを適切に設定しておくことにより、ピーク解析を自動的に行い、画面右側のように得られた計数から預託実効線量への計算結果が表示される。



図 2-4 制御用ソフトウェアの例

2. 4 測定治具

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。そこで、図 2-5 に示すような測定治具を検出器用遮蔽体の上に設置し、上部の円弧形サポートに被検者の頸部を固定することにより、被検者の甲状腺と検出器の位置関係が正確に決定できる。測定治具の裏側には上部遮蔽体を挟み込む構造の溝が設置してあり、検出器の左右方向の位置が正確に設定されていないと測定治具が取り付けられない構造となっている。これらの工夫により、被検者の甲状腺と検出器の位置関係が正確に決定できる。

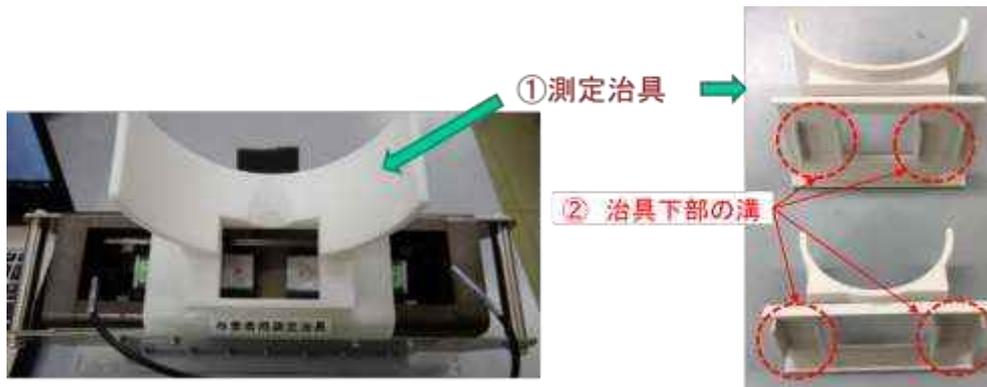


図 2-5 測定用治具

2. 5 測定原理

甲状腺モニタは、図 2-3 に示すように、上方のみに開口した井戸型の検出器用周辺遮蔽体の中に CZT 検出器 2 個を設置する構造である。図 2-6 に示すように指揮所内のテーブルなどに設置し、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、放射性ヨウ素からの γ 線を検出器で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測定する。

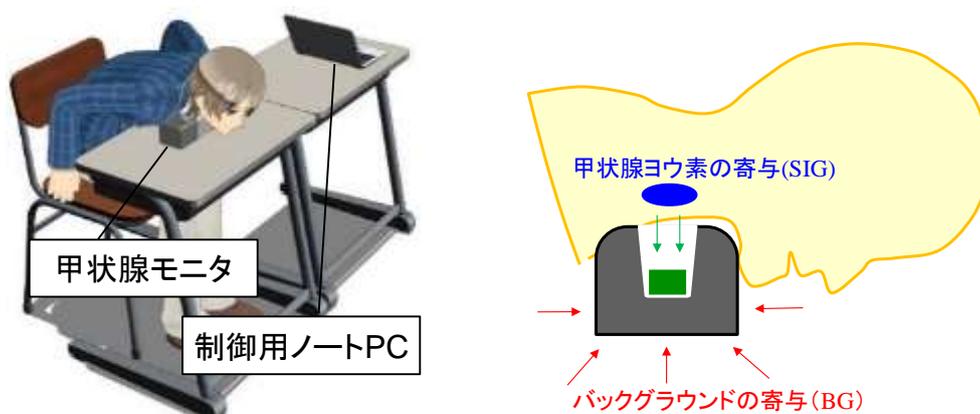


図 2-6 制御用ソフトウェアの例

高線量率環境で測定する場合、周辺からのバックグラウンド放射線による寄与が加算されてしまう。特に、Cs-137 線源からの 662 keV γ 線等は、測定対象である I-131 の 364 keV γ 線よりもエネルギーが高いため、遮蔽体を透過しやすく、図 2-7 の赤領域で示すように、甲状腺ヨウ素からの信号による γ 線ピークの下にバックグラウンド成分として観測され、正確な測定にはこのバックグラウンド成分の測定が必要となる。放射性ヨウ素の定量には、図中の青の領域で示したピーク部分（ネット面積）に含まれる計数を用いる。具体的には、この計数値に Ba-133 線源を用いた校正で決定した検出器の計数効率で除することに

より甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素の放射能が定量できる。

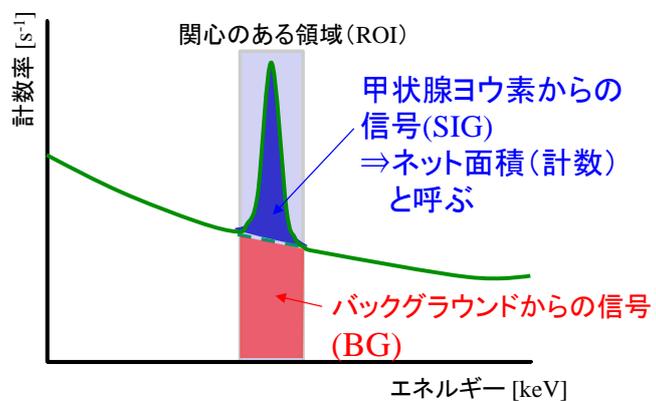


図 2 - 7 波高スペクトルの例

3. 測定の手順

3. 1 甲状腺モニタシステムの準備手順

- ① 甲状腺モニタシステムで使用する機材を測定用テーブル（会議用など、測定場所で調達できるテーブル）の上に準備する（図3-1-1参照）。
- ② 甲状腺モニタシステム制御用ソフトウェアがインストールされたパーソナルコンピュータを準備する。
- ③ 測定器設置用プレートに遮蔽体を図3-1-2のとおり設置する。この時、プレート上の支持台両側の詰めが遮蔽体両側に係るように設置する。
- ④ CZT 検出器 2 個に、上部遮蔽体を取り付ける（図3-1-3参照）。
- ⑤ 検出器用周辺遮蔽体に CZT 検出器 2 個（上部遮蔽体付）を図3-1-3のとおり取り付け。断線させないように注意してケーブルを遮蔽体の外に出す。

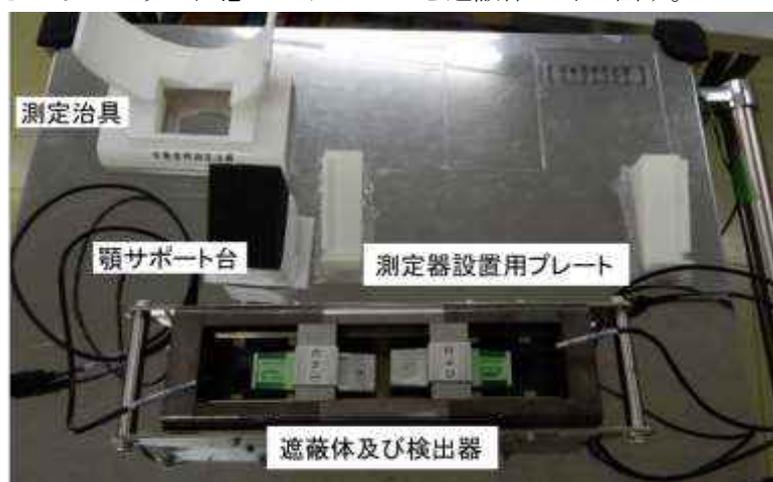


図3-1-1 甲状腺モニタシステムの機材一式



①測定器設置用プレートへの遮蔽体の設置／②遮蔽体右側の設置状況

図3-1-2 測定器設置用プレートへの取付状況



②上部遮蔽体とCZT検出器

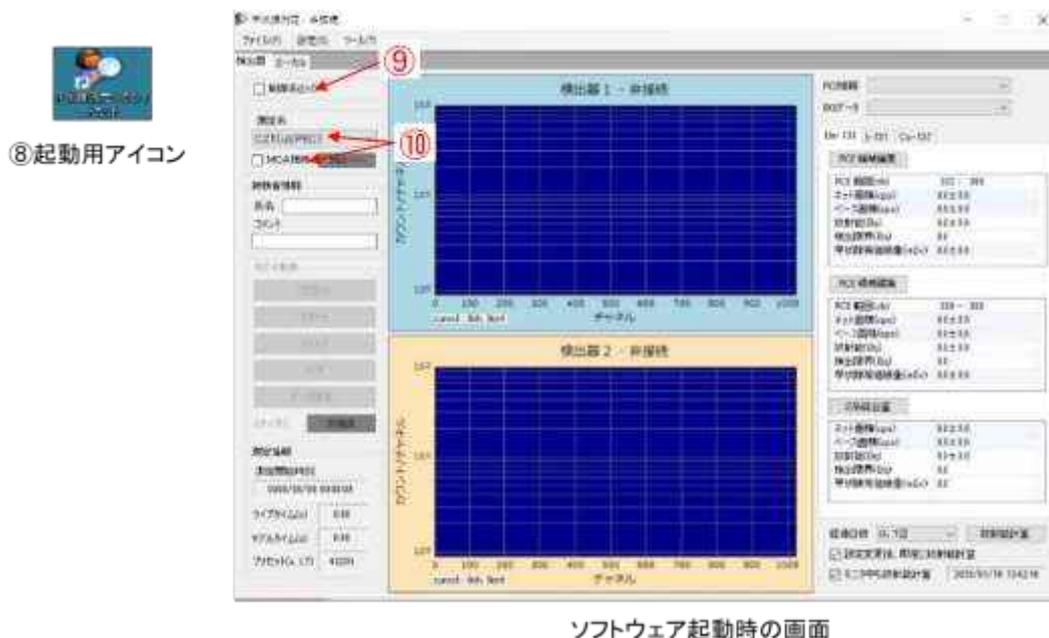
③遮蔽体へのCZT検出器の取り付け

図3-1-3 CZT 検出器の取付状況

- ⑥ 検出器からのケーブル 2 本を、パーソナルコンピュータの USB 端子 (USB3.0 以上) に接続する (図 3-1-4)。
- ⑦ 制御・解析用パーソナルコンピュータを起動する。
- ⑧ 図 3-1-5 左上のアイコンをダブルクリックして甲状腺測定用ソフトウェアを起動する。
- ⑨ 制御系ロックのチェックボックスを外して測定系の選択を可能とする。
- ⑩ 測定系コンボボックスをクリックして「CZT(uSPEC)」(作業用) を選択し、MCA 接続チェックボックスをチェックする。これにより、MCA との接続が確立し、自動的に検出器に電圧が印加される (HV:ON が赤く点灯)



図 3-1-4 甲状腺モニタシステムのセットアップ



ソフトウェア起動時の画面

図 3-1-5 制御用ソフトウェア起動時の画面の例

- ⑪ 甲状腺測定用ソフトウェア画面左側の MCA 制御の「スタート」ボタンをクリックして、グラフ画面のスペクトル（検出器信号の波高の分布）に変化が生じることを確認する（図 3-1-6 参照）。これにより、検出器が正常に動作していることを確認する。
- ⑫ 画面左側の「ストップ」ボタンをクリックして測定を停止する（図 3-1-6 参照）。
- ⑬ 画面左側の「クリア」ボタンをクリックしてグラフを消去する（図 3-1-6 参照）。

以上で甲状腺モニタシステムの準備が完了する。

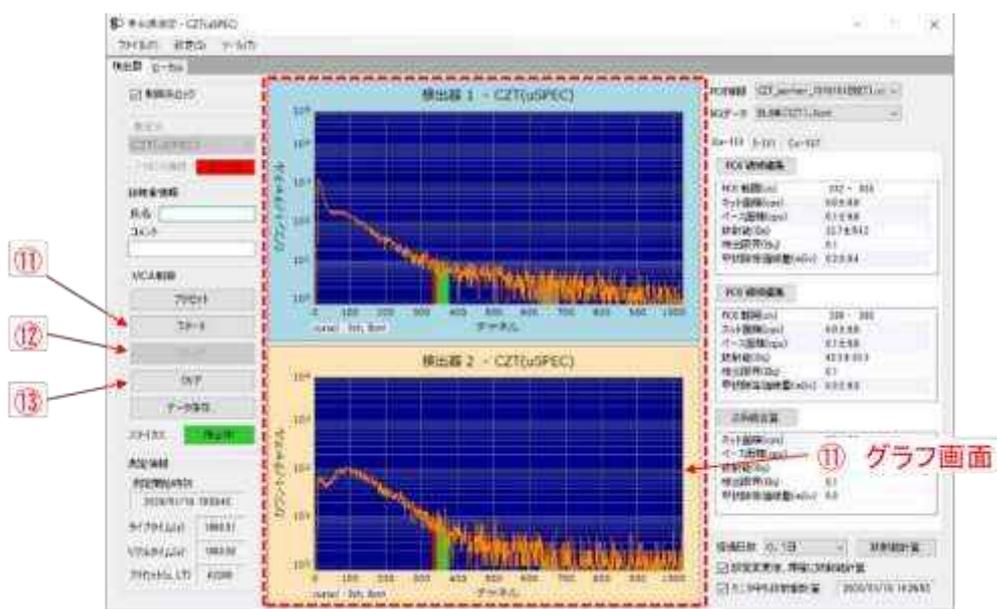


図 3-1-7 制御用ソフトウェア動作確認時の画面の例

3. 2 甲状腺モニタシステムの校正手順

本節では、線源を用いた校正及び線量への換算係数の設定等について記載する。校正は校正用ファントムと ^{133}Ba 点線源を用いて行う。校正は、バックグラウンド放射線の影響が無視できる環境下で実施すること。

3. 2. 1 校正の準備作業

- ① ^{133}Ba 点線源を校正用ファントム¹ (図 3-2-1) の線源位置に装荷する。
線源中心のファントム表面からの深さは、2.4 cm (代表点位置) である。また、高さ方向については、線源がファントムの半分の高さになるようにする。線源を誤って破損させないように、その取扱いには十分注意すること。
- ② 校正用治具 (図 3-2-2) を準備する。
- ③ 校正用治具の下部にある溝 (図 3-2-3) に合うように検出器の間の距離を、上部遮蔽体を左右に動かして調整し、治具を甲状腺モニタに設置する (図 3-2-4)。
- ④ 校正用治具に ^{133}Ba 線源が真下方向になるようにファントムを設置する (図 3-2-5)。

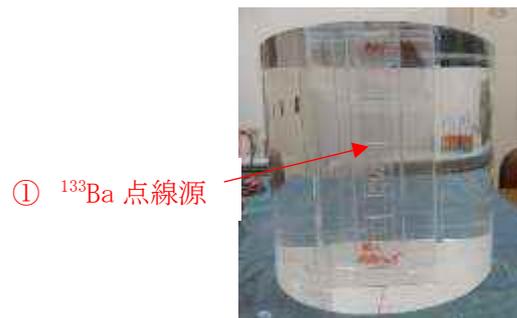


図 3-2-1 校正用ファントム (13 cm Φ × 12 cm)



図 3-2-2 校正用治具

¹ 公衆用成人の校正用ファントムと同一仕様



図 3 - 2 - 3 治具下部の溝

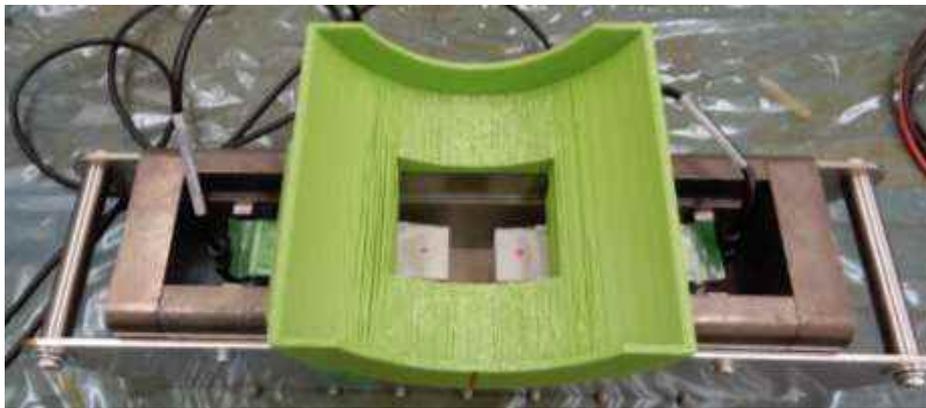


図 3 - 2 - 4 遮蔽体上部への校正用治具の設置



図 3 - 2 - 5 ファントムの設置

3. 2. 2 校正データ取得作業

- ① 図3-2-6右上のROI情報のコンボボックスからROI情報を選択する。
- ② 「プリセット」ボタンをクリックし、コンボボックスで「ライブタイム」を選択し、ダイアログに測定時間（秒）を入力して「OK」ボタンをクリックする。
- ③ コメント欄に校正のための測定であることを記入する（例：Cal_worker）。
- ④ グラフがクリアされていることを確認して「スタート」ボタンをクリックする。
- ⑤ ステータスが「測定中」から「停止中」に変わり、測定が終了するまで待つ。

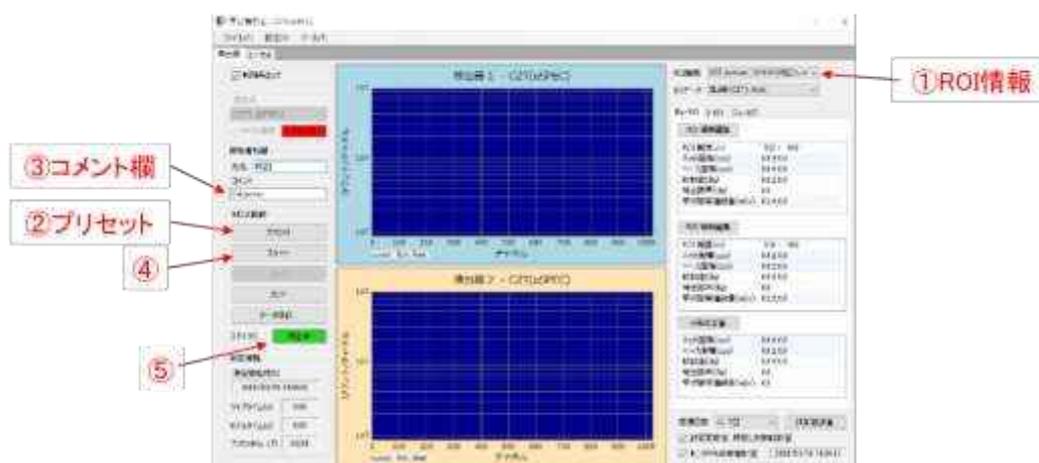


図3-2-6 測定画面

3. 2. 3 計数効率の算出

- ① ^{133}Ba の ROI 中央付近に γ 線 (356 keV) ピーク中心があり、356 keV のピーク全体が ROI 内にあることを確認する。はみ出す場合は ROI 範囲を調整する。ROI は、356 keV のピークチャンネルを p として、 $0.903p \sim 1.041p$ となるように ROI を設定するとよい。(図 3-2-7)
- ② 次の式を用いて換算係数 K_1 (Bq/cps)、及び計数効率 ε (cps/Bq) を計算する。

$$K_1 = A_{133\text{Ba}} \times \frac{t}{M_{\text{NET}}} \times \frac{\eta_{133\text{Ba}}}{\eta_{131\text{I}}}$$

$$\varepsilon = \frac{1}{K_1}, \eta_{133\text{Ba}} = 0.6205, \eta_{131\text{I}} = 0.817$$

$$u(\varepsilon) = u(M_{\text{NET}}) \times \frac{A_{133\text{Ba}}}{t} \times \frac{\eta_{133\text{Ba}}}{\eta_{131\text{I}}}$$

$A_{133\text{Ba}}$: ^{133}Ba 線源の放射能 (Bq)、 t : 測定時間 (ライブタイム) (sec)、

$M_{\text{NET}} \pm u(M_{\text{NET}})$: ネット面積 (検出器 1 と検出器 2 の合算) とその不確かさ (図 3-2-8)



図 3-2-7 ROI の設定画面



図 3-2-8 ネット面積確認画面

3. 2. 4 計数効率と換算係数の入力

- ① 「設定」 - 「ROI 情報・換算係数編集」をクリックする (図 3-2-9)。
- ② 「合算」のタブをクリックして選択する (図 3-2-10)。
- ③ ROI No2 (核種: I-131) の換算係数 (Bq/cps)に K_1 を、計数効率(s^{-1}/Bq)に ϵ 、標準偏差 (s^{-1}/Bq)に $u(\epsilon)$ を入力する (図 3-2-10)。
- ④ 「ファイル」 - 「名前を付けて ROI 情報を保存 (S)…」をクリックして、ROI 情報を保存する (図 3-2-11)。
- ⑤ 「換算係数 2 の編集」に経過日数に応じた換算係数 (付録 B 参照) を入力する。
※ROI-1、ROI-2、ROI-3 全てに同じ値を入力する。
- ⑥ 「OK」ボタンをクリックして ROI 情報・換算係数編集ウィンドウを閉じる (図 3-2-12)。
- ⑦ 「データ保存」ボタンをクリックする。
- ⑧ ファイル名を付けてスペクトルを保存する。



図 3-2-9 ROI 情報・換算係数編集



図 3-2-10 計数効率の入力



図 3 - 2 - 1 1 計数効率の保存

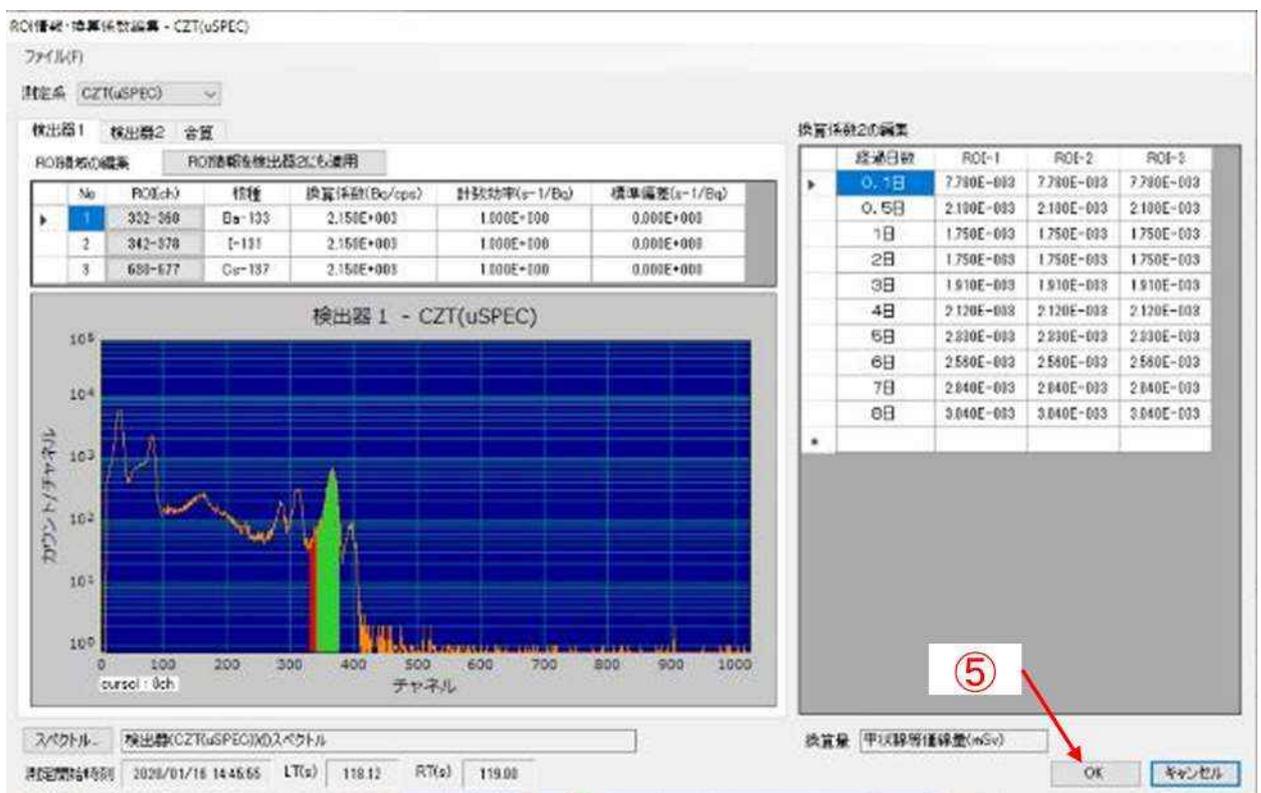


図 3 - 2 - 1 2 ROI 情報・換算係数編集画面

3. 3 バックグラウンド補正用測定の手順

- ① バックグラウンド測定用治具及び PMMA アクリル製円筒型ファントムを検出器の上に設置する。
- ② 図 3-3-2 の画面左側にある「プリセット」ボタンをクリックし、ダイアログに測定時間（秒）を入力して「OK」ボタンをクリックする。
- ③ コメント欄にバックグラウンド測定であることを記入する（例：BG_worker）。
- ④ グラフがクリアされていることを確認して「スタート」ボタンをクリックする。
- ⑤ ステータスが「測定中」から「停止中」に変わり測定が終了したら、「ファイル」－「測定データを BG データとして名前を付けて保存」をクリックする。

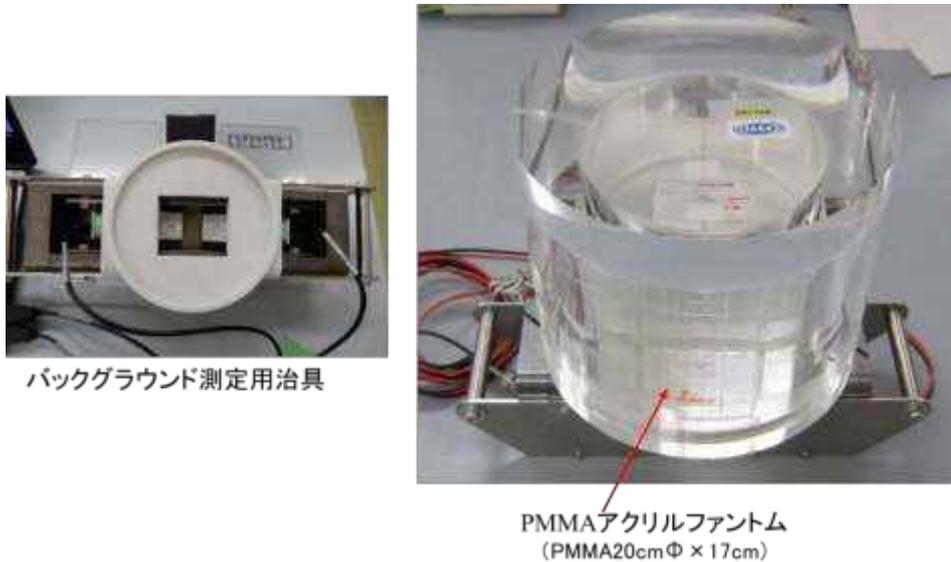


図 3-3-1 甲状腺モニタシステムでのバックグラウンド補正用測定のセットアップ

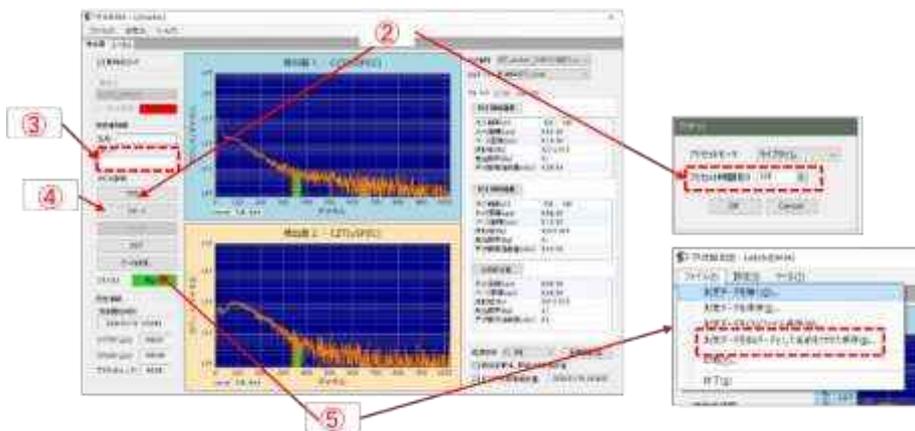


図 3-3-2 バックグラウンド補正用測定時の画面の例

3. 4 甲状腺等価線量の測定手順

- ① 測定治具を準備する（図3-4-1参照）。
- ② 上部遮蔽体を左右に動かすことにより、治具下部の溝に上部遮蔽体をはまるように検出器の間の距離を調整する（図3-4-1参照）。治具上部に汚染防止用シートを設置する。
- ③ 図3-4-2の画面左側の被検者情報として、被検者の氏名とコメント（被検者ID、受付番号などの情報）を入力する。
- ④ 画面右上のROI情報のコンボボックスからROI情報及びBGデータを選択する。これにより、甲状腺等価線量への適切な換算係数とバックグラウンドデータが選択される。
- ⑤ 画面右下の経過日数のコンボボックスから摂取推定日から測定日までの経過日数を選択する。



図3-4-1 甲状腺等価線量の測定に用いる測定治具

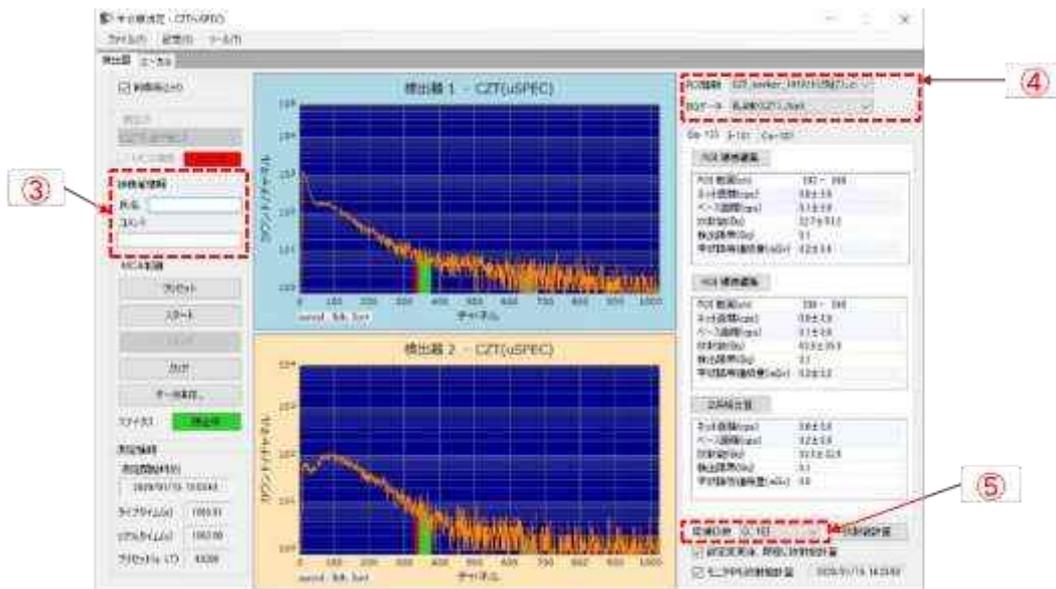


図3-4-2 バックグラウンド補正用測定時の画面の例

- ⑥ 図3-4-3のように、被検者に甲状腺モニタに覆いかぶさってもらい、顎サポート台に顎を突き出すように乗せ、測定治具に被検者の首を乗せる（図3-4-1参照）。測定時は、首をできる限り測定治具に密着させ、なるべく動かないように注意する。



甲状腺モニタへの被検者の保定方法



測定時

図3-4-3 測定時の被検者の保定方法

- ⑦ 図3-4-6の画面左側にある「プリセット」ボタンを押し、測定時間を150秒にセットする。プリセットモードのコンボボックスが、ライブタイムになっていることを確認する。
- ⑧ 画面中央のグラフ2つがクリアされていることを確認して、画面左側の「スタート」ボタンをクリックする。波高スペクトルが表示されている場合は「クリア」ボタンをクリックする。
- ⑨ ステータスが「測定中」から「停止中」に変わり測定が終了したら、「データ保存」ボタンをクリックする。ファイル名として、被検者のIDや受付番号など、識別できる名前を付与する。
- ⑩ 画面右側の甲状腺等価線量の数値を確認する
- ⑪ 次の被検者の測定に備えて、「クリア」ボタンをクリックしてグラフをクリアする

以上で、甲状腺等価線量の測定が完了する。

引き続き他の被検者の測定を継続する場合は、①から⑪の手順を繰り返す。

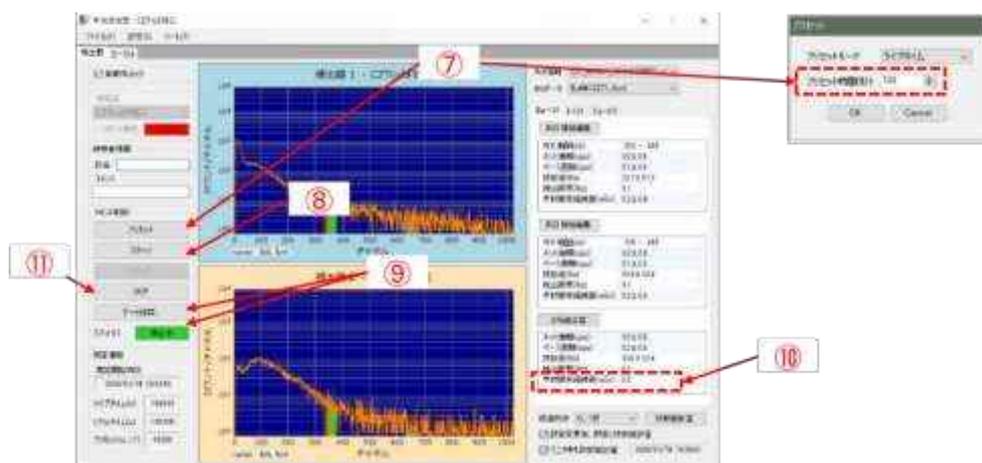


図3-4-6 甲状腺等価線量測定時の画面例

3. 5 測定終了後の手順

- ① 図3-5-1の左上の制御系ロックのチェックボックスを外す。
- ② MCA 接続チェックボックスのチェックを外す。検出器に印加されている高圧は自動的に落ちるようになっている。
- ③ 「ファイル」－「終了」(または右上の×ボタン) をクリックして甲状腺測定用ソフトウェアを終了する。
- ④ 甲状腺モニタシステムを片付ける。

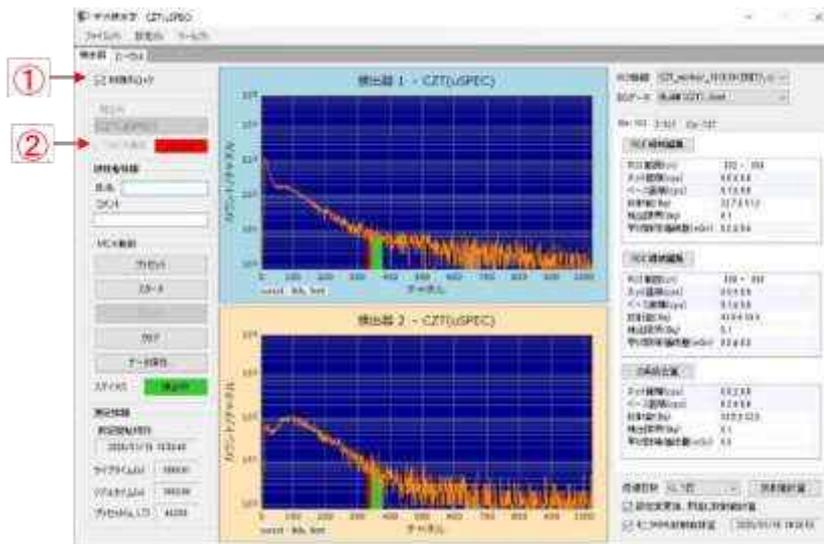


図3-5-1 検出器取外し前の処理用画面

4. 甲状腺測定用ソフトウェアのインストール手順

4. 1 事前準備

本プログラムの使用には、次のプログラムを事前にインストールする必要がある。

- ① アドフューテック社製標準プログラム Prime
- ② GBS 社製 WinSPEC
- ③ Microsoft 社製「.Net Framework 4.0 client profile」、同「.Net Framework 4.0 Language Pack」
- ④ Microsoft 社製「Visual C++ ランタイムライブラリ(x86)」

①は本プログラムのインストールCDに同梱されている次のファイルを管理者権限で実行することにより使用するコンピュータにインストールする。

¥Adfutec_Prime¥■Prime Standard¥Install¥setup.exe

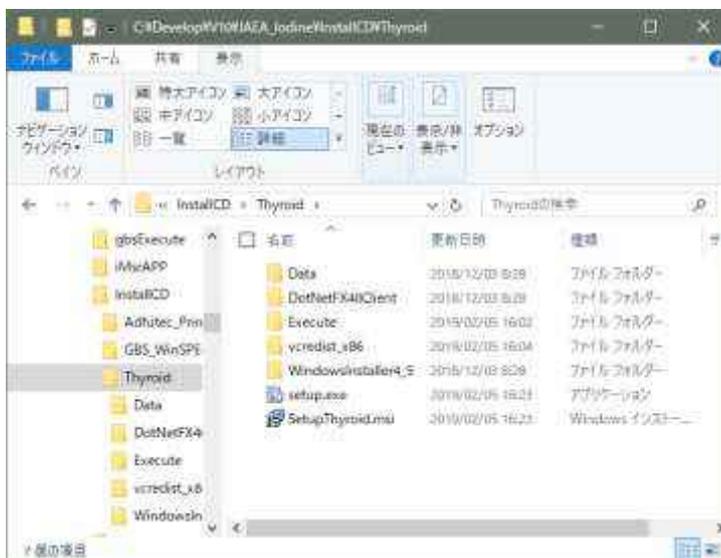
②は RITECH 社製 uSPEC 付属のインストールCD、または本プログラムのインストールCDに同梱されているファイルを用いて使用するコンピュータにインストールする。本プログラムのインストールCDを使用する場合は、次のファイルを管理者権限で実行することによりインストールする。

¥GBS_WinSPEC¥■winspec_for_inspectors_2.05.0002¥setup.exe

③と④は本プログラムをインストールする際に自動的にインストールされる。既にインストールされている場合はスキップされるか、「修復」といったメッセージが出力されるので、それらのメッセージに従ってインストールを継続する。

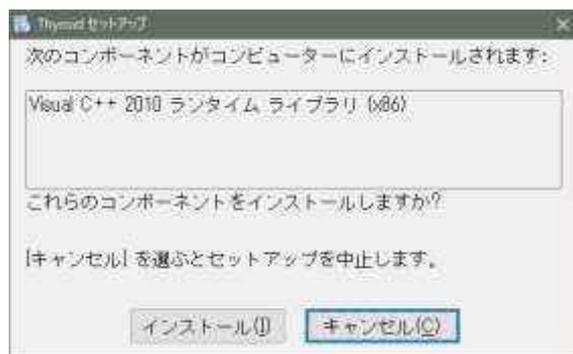
4. 2 甲状腺測定用ソフトウェアのインストール作業

- ① インストールCDをドライブにセットして Windows エクスプローラでフォルダ ¥Thyroid を開く。

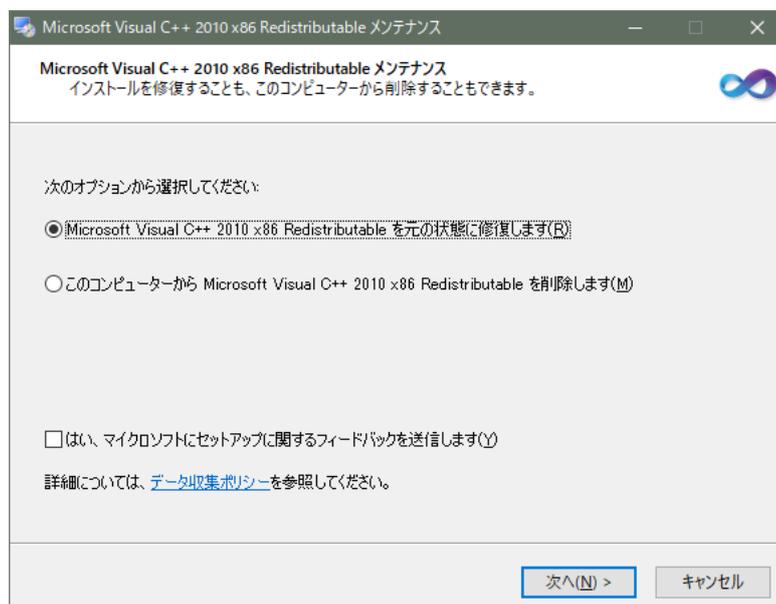


- ② プログラム `setup.exe` を管理者権限で実行する（ファイル名上にマウスを移動させ右クリックで表示されるポップアップメニューの「管理者権限で実行」を選択）。
- ③ 「この不明な発行元からのアプリがデバイスに変更を加えることを許可しますか？」等の確認があるので、「はい」をクリックする。

以下、インストーラのメッセージに従う。



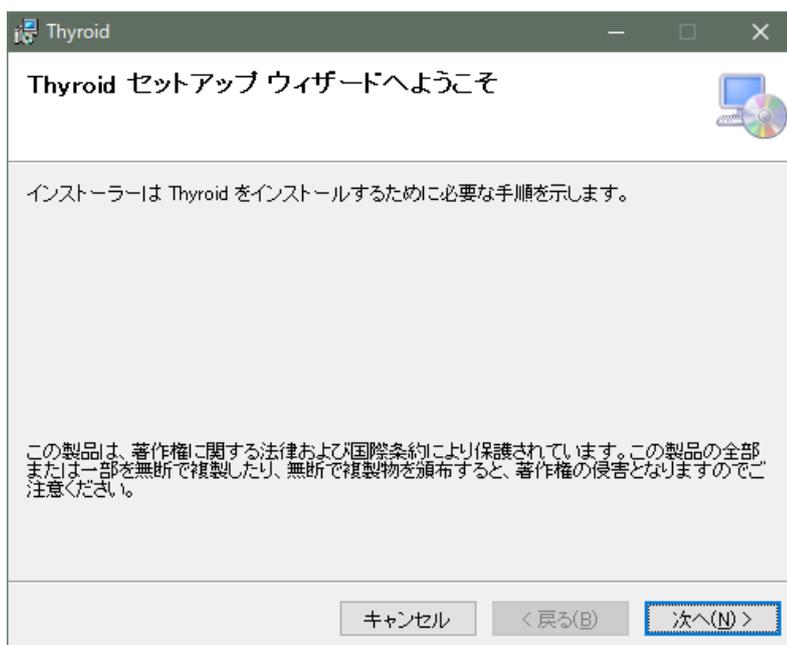
[インストール] をクリック



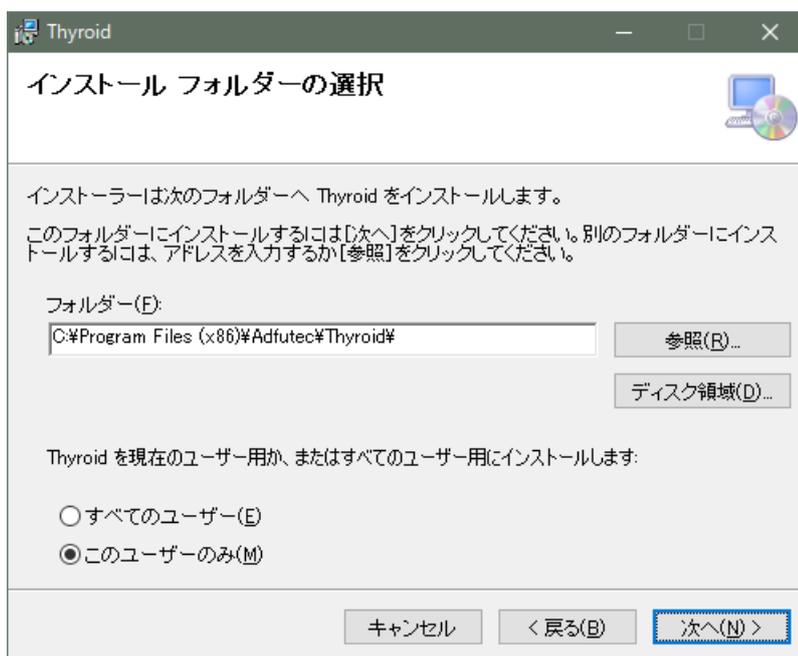
「◎… 修復します」を選択、「□はい、マイクロ…」をチェックしないで [次へ] をクリック



[完了] をクリック



[次へ] をクリック



フォルダを指定して [次へ] をクリック

※上記の画面イメージはデフォルトのフォルダである。このフォルダは UAC (User Access Control) によりファイル作成やコピー、編集が原則的にできなくなり、全て別フォルダに転送される(リダイレクタ)。

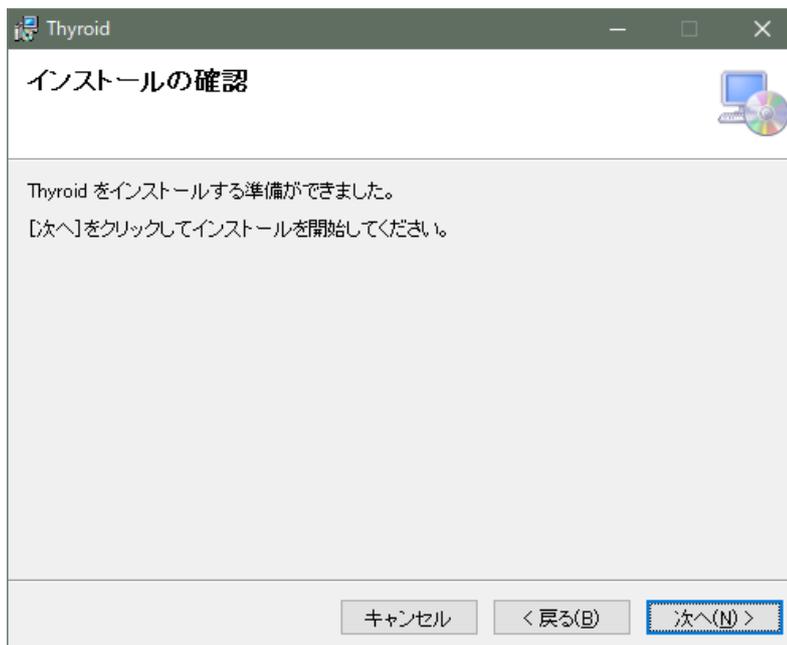
特別の理由がない限り、

C:\Program Files (x86)\Adfutech\Thyroid

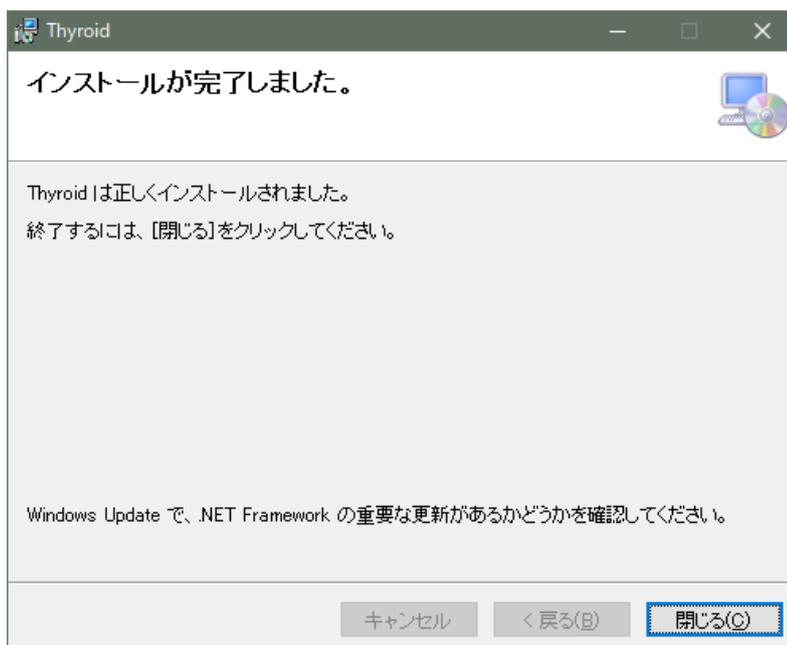
を

C:\Adfutech\Thyroid

に変更してインストールする。



[次へ] をクリックします。



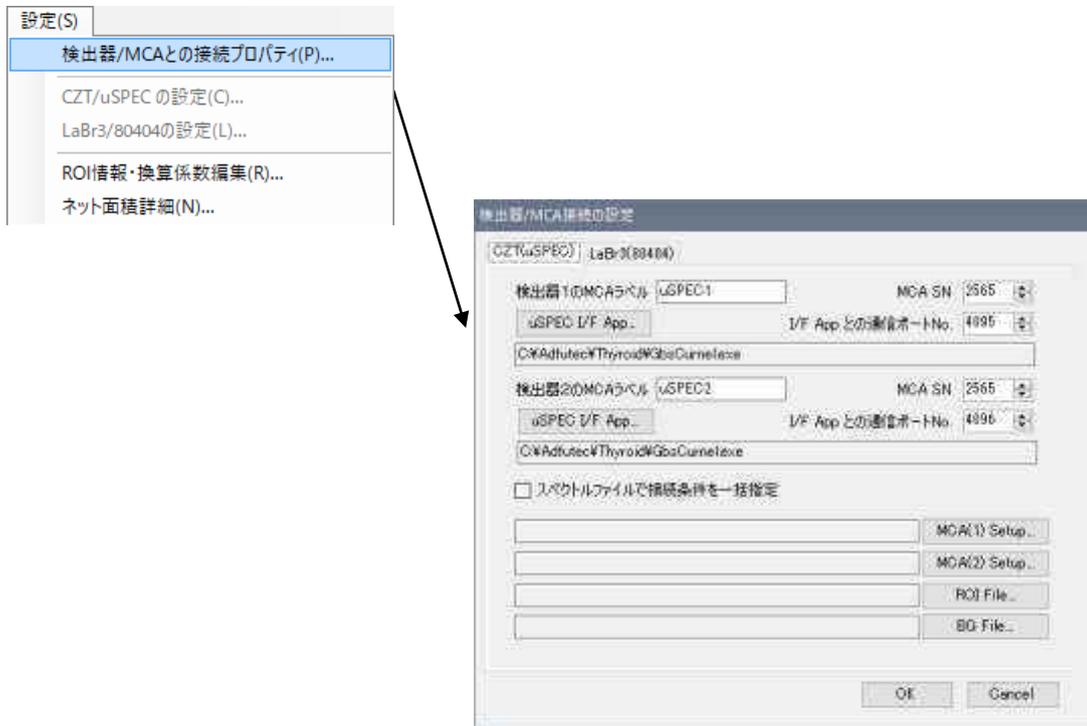
インストールは完了。[閉じる] でインストーラを終了させる。

デスクトップ上のショートカットキーをクリックし、本プログラムが正常に起動することを確認する。



4. 3 MCA の定義、登録

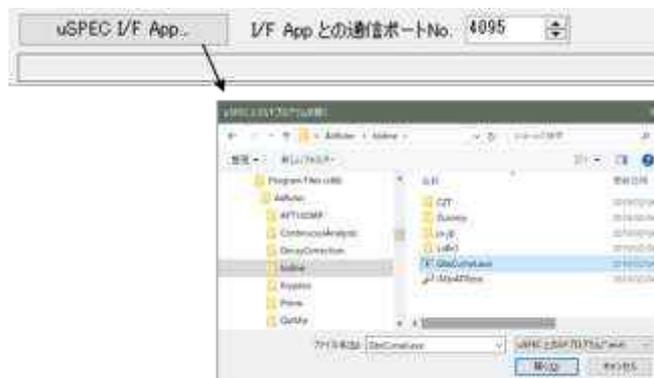
- ① 検出器と PC が未接続の状態、メニュー「設定 → 検出器/MCAと接続プロパティ」を実行する。



- ② タブ「CZT(uSPEC)」をクリックして画面を切り替える。

検出器毎に、

- ・ MCA ラベル : 任意名を指定する(重複不可)
- ・ MCA SN : uSPEC で使用されている [MCA527] の S/N を指定
※uSPEC の S/N ではなく、OEM 提供された MCA527 の S/N を指定
- ・ uSPEC I/F APP: uSPEC と通信するインターフェイスプログラムを指定する。
[uSPEC I/F APP]をクリックして、プログラム GbsCurnel.EXE を参照指定する。



インストールしたフォルダにある、[GbsCurnel.EXE] を指定すること。

※この例は、¥Program Files (x86)¥Adfutec¥Iodine にインストールした場合を示している。

- ・通信ポート : 本プログラムとインターフェイスプログラム間の通信ポートを指定する。

初期値は、

検出器 1 : 4095

検出器 2 : 4096

となっている。

重複しないように設定すること(設定値は、1024 を推奨)。

以下の設定は、検出器毎の MCA 設定、ROI 情報、BG データ指定である。この指定方法は次の 2 つで、チェックボックスで切り換えることができる。

スペクトルファイルで接続条件を一括指定・・・ チェックボックス OFF

- ・ MCA 設定 : Prime で作成した、検出器 1、検出器 2 毎の MCA セットアップファイル(.HAF)を指定

- ・ ROI 情報 : 本プログラムが作成した任意の ROI 情報ファイル(.CSV)

- ・ BG データ : 本プログラムで保存した BG データファイル(.xCnt)

それぞれを全て参照指定。

※.HAF ファイルの作成手順は Prime の取扱説明書を参照のこと。

スペクトルファイルで接続条件を一括指定・・・ チェックボックス ON

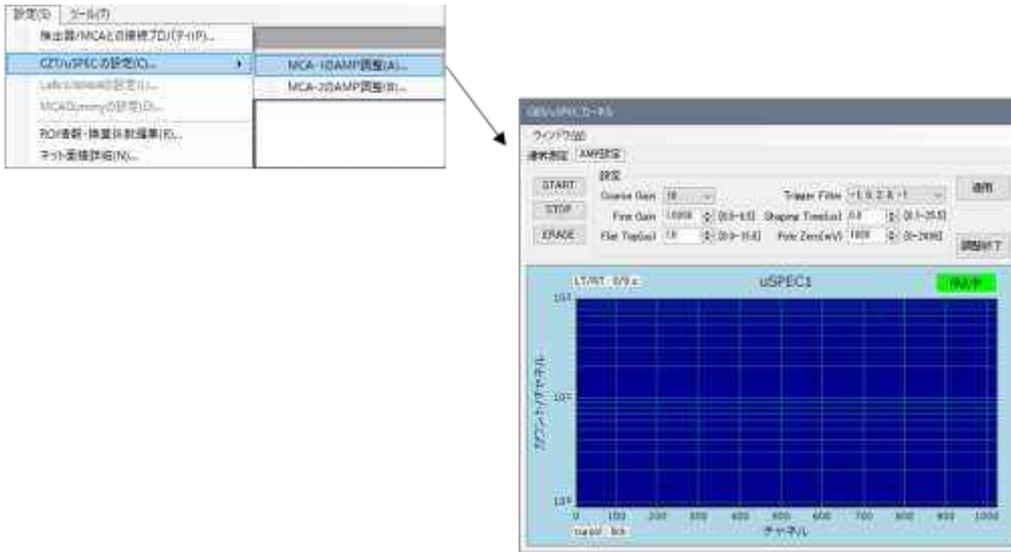
本プログラムの測定データ(.xCnt 形式)には MCA 設定、ROI 情報、BG データが登録されているので.xCnt 形式の測定データで接続条件を指定

- ③ CZT(uSPEC)の検出器 1、検出器 2 について共に接続条件を指定したら、[OK] をクリックして接続情報を登録する。

なお、接続情報を登録しただけでは CZT(uSPEC) への接続は行われぬ。接続を確認するには、元の画面で明示的に「MCA 接続」のチェックを実行する必要がある。

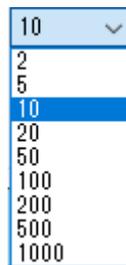
4.4 検出器/MCAの調整

- ① 「3. 1 甲状腺モニタシステムの準備手順」を実行して CZT(uSPEC)と接続する。
- ② メニュー「設定→CZT/uSPEC の設定→MCA-#の AMP 調整」等を実行し、設定・調整画面を起動する。ここで、#は検出器番号（1または2）であり、設定・調整画面を起動すると、測定プログラムは最小化される。



- 操作項目：
- [START] : 測定開始
 - [STOP] : 測定停止
 - [ERASE] : データクリア
 - [適用] : 設定を適用
 - [調整終了] : 測定画面に復帰

設定項目：Coarse Gain を以下から選択する。



Fine Gain

: 入力範囲 = 0.5 ~ 6.5

Flat Top (μs)

: 入力範囲 = 0.0 ~ 15.0

Trigger Filer を以下から選択します。

-1; 0; 2; 0; -1	▼
-1; 0; 2; 0; -1	
4*[-1; 0; 2; 0; -1]	

Shaping Time (μs)

: 入力範囲 = 0.1 ~ 25.5

Pole Zero (mV)

: 入力範囲 = 0 ~ 2499

個々の詳細項目の内容については uSPEC の取扱説明書も参照のこと。

5. おわりに

放射性ヨウ素の放出を伴う原子力事故などの緊急時には、緊急時作業に従事する作業員に対して、甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素の精度の高い計測により、内部被ばく線量（甲状腺等価線量）の評価を行う必要がある。本マニュアルでは、当該計測に使用することを目的として平成31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）事業で開発した甲状腺モニタシステムの使用方法を取りまとめた。

付録 A. データファイル

A.1 スペクトルファイル

- 1-2 行目 : XML ファイルのヘッダ
- グループ <MsrInf> : 測定情報
- グループ <SpcNo1> : 検出器 1 のカウントデータ
- グループ <SpcNo2> : 検出器 2 のカウントデータ
- グループ <URoiS> : 複数の ROI 情報の管理
- グループ <HwCp> : MCA 通信、設定関連情報

以下は XML ファイルイメージ。上で挙げたグループを網掛け表示している

```

<?xml version="1.0"?>
<ThySpectrumxmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"

```

ヘッダ

```

mlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <MsrInf>
    <Detector>LaBr3 (80404)</Detector>
    <AcqDate>2019-01-26T16:01:51.2926535+09:00</AcqDate>
    <Live>180.09500000000045</Live>
    <Real>181</Real>
    <PatinetID>T.Yamada</PatinetID>
    <Comment>測定テスト</Comment>
  </MsrInf>
  <SpcNo1>
    <int>0</int>
    <int>0</int>
    .
    .
    <int>0</int>
    <int>0</int>
  </SpcNo1>
  <SpcNo2>
    <int>0</int>
    <int>0</int>
    .
    .
    <int>0</int>
    <int>0</int>
  </SpcNo2>
  <MdaMode>1</MdaMode>
  <BgSpcFile>C:¥Adfutec¥Thyroid¥LaBr3¥BG¥BLANK (LaBr3).xCnt</BgSpcFile>
  <RoiFile>C:¥ Adfutec¥Thyroid¥LaBr3¥ROI¥Default_LaBr3. CSV</RoiFile>

```

MsrInf : 測定情報
Detector : 検出器/MCA
AcqDate : 測定開始時刻
Live : ライブタイム(s)
Real : リアルタイム(s)
PatientID : 被検者 ID

SpcNo1 : 検出器 1 のカウントデータ
 以降、検出器 1 のカウントデータ(1024ch)
 を 4byte 整数として保存する

SpcNo2 : 検出器 2 のカウントデータ
 以降、検出器 2 のカウントデータ(1024ch)
 を 4byte 整数として保存する

検出限界の計算方法(0:Currie, 1:Cooper, 2: 3 σ, 3:CAThyMARA)

BG データ
 ROI 情報ファイル

以下、次ページへ

```
<URoiS>
<Roi Info>
  <Nuclide>Ba-133</Nuclide> ← ROI1 の核種
  <RoiColor />
```

```
<RoiDet1>
  <Start>70</Start>
  <Stop>100</Stop>
  <Factor1>1.1</Factor1>
  <Eff>0.1</Eff>
  <EffSgm>0.01</EffSgm >
  <CpyFac2>1</CpyFac2>
  <TrVal>0.064166666666666677</TrVal>
  <TrSgm>0.22085770305787394</TrSgm>
  <Grs>2712</Grs>
  <Bkg>1017.8333333333334</Bkg>
  <SgmBkg>31.903500330423515</SgmBkg>
  <Pbc>169.50608101851893</Pbc>
  <SgmPbc>6.1104594087289552</SgmPbc>
  <Net>1524.6605856481476</Net>
  <SgmNet>61.3772844586583</SgmNet>
  <DIAct>76.9297068955858</DIAct>
  <Act>9.3124553386432627</Act>
  <SgmAct>0.37488554876328584</SgmAct>
  <DIAct>0.4698779954198849</DIAct>
```

RoiDet1 : <検出器 1>ROI 情報
Start : ROI 開始 ch
Stop : ROI 終了 ch
Factor1 : 換算係数(Bq/cps)
Eff, EffSgm : 計数効率、標準偏差(s-1/Bq)
CpyFac2 : 換算係数 2
TrVal, TrSgm : 甲状腺等価線量, 不確かさ (mSv)
Grs : ROI 領域の積算値(count)
Bkg, SgmBkg : ベース面積とその不確かさ
Pbc, SgmPbc : BG ピーク面積とその不確かさ…(*)
Net, SgmNet : ネット面積とその不確かさ
DIAct : 検出限界面積
Act, SgmAct : 放射能とその不確かさ(Bq)
DIAct : 検出限界放射能(Bq)

```
</RoiDet1>
```

```
<RoiDet2>
```

```
.
```

```
</RoiDet2>
```

```
<RoiSumS>
```

```
<Start>0</Start>
```

```
<Stop>0</Stop>
```

```
<Factor1>1</Factor1>
```

```
.
```

```
<DIAct>0.62539626252144487</DIAct>
```

```
</RoiSumS>
```

```
<Fac2Name> 1 日</Fac2Name>
```

```
<Factor2>
```

```
<DayFactor>
```

```
<Name> 1 日</Name>
```

```
<TransFactor>1</TransFactor>
```

```
</DayFactor>
```

```
.
```

```
.
```

```
</Factor2>
```

```
<TransName> 預託実効線量率 (mSv)</TransName>
```

```
<TransVal>15.55171296681891</TransVal>
```

```
<TransSgm>0.47330543029427091</TransSgm>
```

```
<TransDL>0.62539626252144487</TransDL>
```

```
</RoiInfo>
```

```
<URoiS>
```

```
<HwCp>
```

```
<cpSetting>
```

```
<PortName>COM7</PortName>
```

```
.
```

RoiDet2 : <検出器 2>>ROI 情報
 ※構造的には RoiDet1 と同じ

RoiSumS : <検出器 1、2 合算>>ROI 情報
 ※構造的には RoiDet1 と同じだが、常に
Start = 0,
Stop = 0 と登録する

DayFactor : 換算係数 2 情報
Name : 経過日数
TransFactor : 換算係数

TransName : 甲状腺等価線量 (mSv) … 固定
TransVal, TransSgm : 甲状腺等価線量とその

PortName : 接続ポート
Porarity : 入力極性
PzAdjust : Pole Zero
CoarseGain: コースゲイン
 シン
FineGain : ファインゲイン
 シン

·
<RoiFile>C:\¥Adfotec¥Thyroid¥LaBr3¥ROI¥Default_LaBr3.CSV</RoiFile>
<BgFile>C:\¥ Adfotec¥Thyroid¥LaBr3¥BG¥BLANK (LaBr3). Xcnt</BgFile>
</cpSetting>
</HwCp>

※ここに挙げた設定値や測定結果はダミーである。

A.2 測定データCSVファイル

スペクトル, TestMeasure.Xcnt
検出器, CZT(uSPEC)
測定開始時刻, 2019/01/25 17:23:30
ライブタイム(s), 180.10
リアルタイム(s), 181.00
被検者 ID, 田中衛
コメント, 測定テスト
バックグラウンド, C:\¥Adfutec¥Thyroid¥CZT¥BG¥BackGround.xCnt
ROI 情報, C:\¥Adfutec¥Thyroid¥CZT¥ROI¥Default_CZT.CSV
検出限界計算, Currie

← (改行)

ROI1, Ba-133
ネット面積(count), 2800.8, ±, 85.2
ベース面積(count), 301.7, ±, 23.7
換算係数(Bq/cps), 1.000E+000
計数効率(s-1/Bq), 1.000E-001
標準偏差(s-1/Bq), 5.000E-003
放射能(Bq), 15.5, ±, 0.5
検出限界(Bq), 0.6
換算係数 2, 1.000E+000, (1日)
甲状腺等価線量(mSv), 15.6, ±, 0.5
<Detector No.1>
ROI 範囲, 70, -, 100
グロス面積(count), 2712.0, ±, 52.1
ベース面積(count), 1017.8, ±, 31.9
バックグラウンド(count), 169.5, ±, 6.1
ネット面積(count), 1524.7, ±, 61.4
検出限界(count), 76.9
換算係数(Bq/cps), 1.100E+000
計数効率(s-1/Bq), 1.000E-001
標準偏差(s-1/Bq), 5.000E-003
放射能(Bq), 9.3, ±, 0.4
検出限界(Bq), 0.5
甲状腺等価線量(mSv), 15.6, ±, 0.5
<Detector No.2>

・
・

← (改行)

ROI2, I-131
ネット面積(count), 2800.8, ±, 85.2
・
・
・

← (改行)

※ここに挙げた設定値や測定結果はダミーである。
次ページに続く

前ページからの継続

← (改行)

ROI3, Cs-137
ネット面積(count), 2800.8, ±, 85.2
.
.

← (改行)

MCA Setup - CZT(uSPEC)
<Detector No.1>
Bias Polarity, Auto
HighVol (V), Auto
ADC ConversionGain, 1024
LLD, 10
ULD, 1023
AMP Polarity, Positive
CoarseGain, 5
FineGain, 2.000
BLR, ----
FlatTop (us), 0.7
ShapingTime (us), 0.8
TriggerFilter, -1;0;2;0;-1
PUR, ON
Pole Zero (mV), 1714
<Detector No.2>
.
.

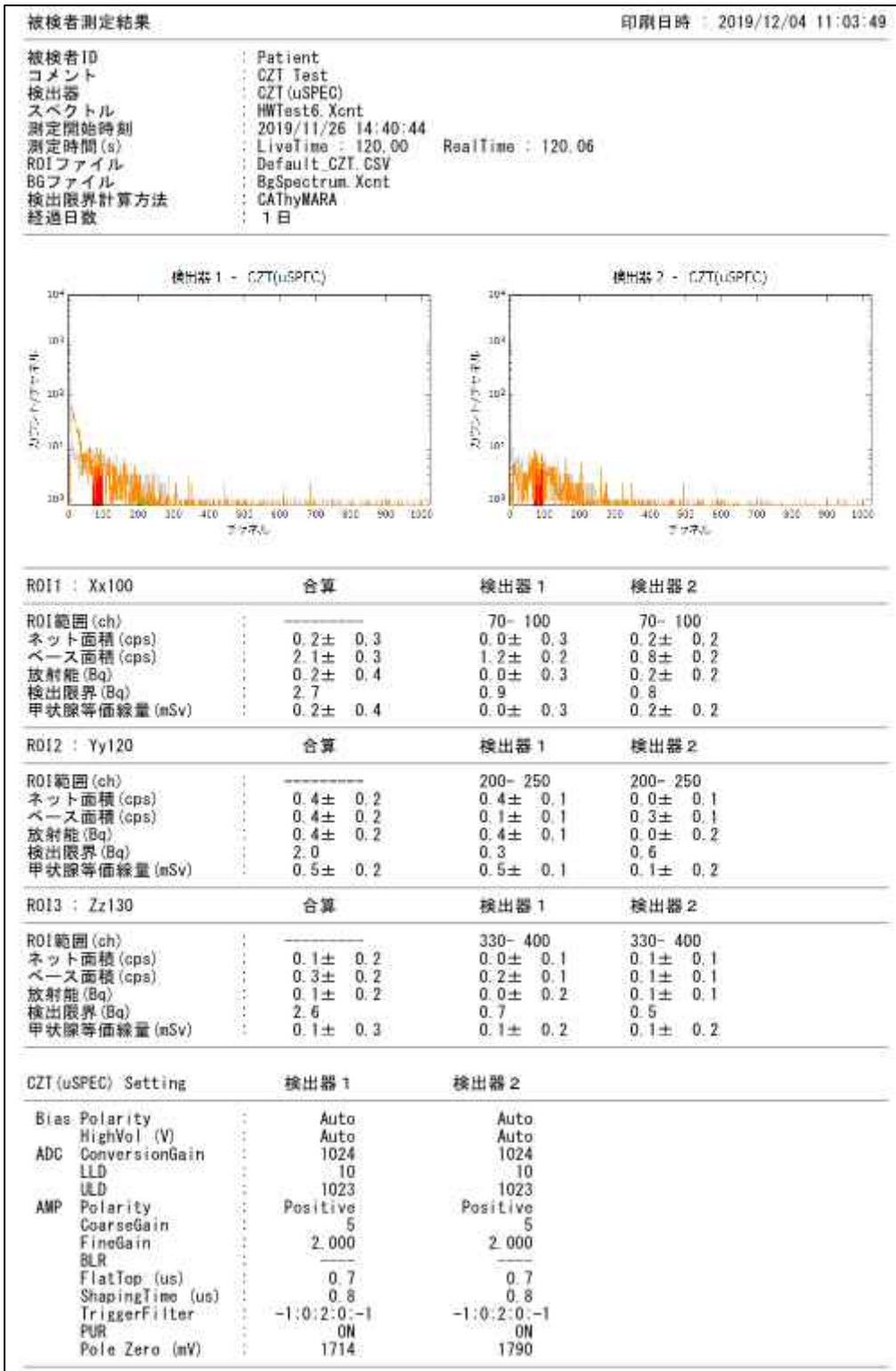
← (改行)

スペクトル, <Detector No.1>, <Detector No.2>
(ch), (count), (count)
0, 0, 0
1, 0, 0
2, 0, 0
3, 0, 0
4, 0, 0
5, 0, 0
6, 0, 0
7, 0, 0
.
.
.
1018, 0, 0
1019, 0, 0
1020, 0, 0
1021, 0, 0
1022, 0, 0
1023, 0, 0

※ここに挙げた設定値や測定結果、カウントデータはダミーである。

A.3 印刷イメージ

以下に印刷を実施した例を示す。



※ここに挙げた設定値や測定結果はダミーである。

A.4 ROI 情報ファイル

以下に例を示す。

```
[Header]
登録 ROI 数, 3
検出器, CZT(uSPEC)

[ROI-1]
核種, Xx100
REM -----
REM Key, 開始, 終了, 換算係数(Bq/cps), 計数効率(s-1/Bq), 標準偏差(s-1/Bq)
REM -----
検出器 1 , 70, 100, 1.100E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
検出器 2 , 70, 100, 1.100E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
合算, 0, 0, 1.000E+000, 1.000E+000, 0.000E+000

[ROI-2]
核種, Yy120
REM -----
REM Key, 開始, 終了, 換算係数(Bq/cps), 計数効率(s-1/Bq), 標準偏差(s-1/Bq)
REM -----
検出器 1 , 200, 250, 1.200E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
検出器 2 , 200, 250, 1.200E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
合算, 0, 0, 1.000E+000, 1.000E+000, 0.000E+000

[ROI-3]
核種, Zz130
REM -----
REM Key, 開始, 終了, 換算係数(Bq/cps), 計数効率(s-1/Bq), 標準偏差(s-1/Bq)
REM -----
検出器 1 , 330, 400, 1.300E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
検出器 2 , 330, 400, 1.300E+000, 1.000E+000, 0.000E+000
合算, 0, 0, 1.000E+000, 1.000E+000, 0.000E+000

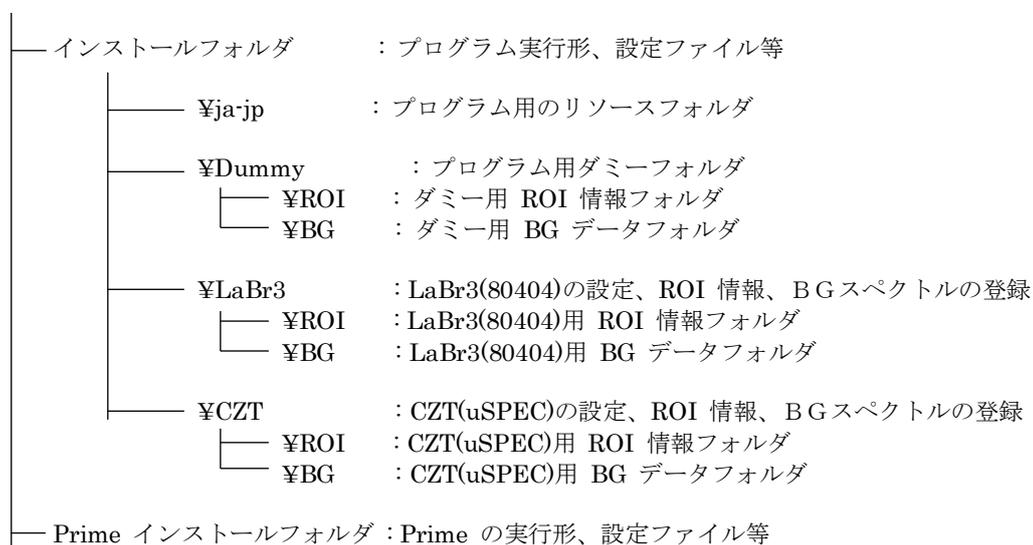
[DayFactor]
換算量, 甲状腺等価線量(mSv)
REM -----
REM Key, ID, ROI1, ROI2, ROI3
REM -----
ID-1, 1 日, 1.000E+000, 1.100E+000, 1.200E+000
ID-2, 2 日, 2.000E+000, 2.200E+000, 2.400E+000
ID-3, 3 日, 3.000E+000, 3.300E+000, 3.600E+000
```

※ここに挙げた設定値はダミーである。

A.5 データフォルダ構造

本プログラムのフォルダ構造を示す。

¥ ルート



付録 B. 換算係数

甲状腺モニタを用いて定量した甲状腺内 ^{131}I 放射能から、被検者の甲状腺預託等価線量を算出するための換算係数の例を示す。換算係数は、簡易内部被ばく線量評価コード(IDECC: Internal Dose Easy Calculation code)を用いて計算した。計算に際し、各パラメータは ICRP の標準値を採用している。摂取形態は ^{131}I 蒸気の吸入急性摂取を仮定し、預託期間は 50 年である。

B.1 換算係数

作業者に対する測定 ^{131}I 放射能から甲状腺等価線量への換算係数の例を表 B-1 に示す。この換算係数は、B.3 に示す摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数を B.2 に示す甲状腺残留率で除して得られる値である。

表 B-1 測定 ^{131}I 放射能から甲状腺等価線量への換算係数の例

摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)	摂取後の 経過日数	換算係数 (mSv/Bq)
0.1	7.36E-03	22	1.08E-02
0.2	3.90E-03	24	1.34E-02
0.5	2.05E-03	26	1.50E-02
0.7	1.86E-03	28	1.86E-02
1	1.70E-03	30	2.44E-02
2	1.77E-03	35	3.55E-02
3	1.95E-03	40	5.27E-02
4	2.05E-03	45	9.51E-02
5	2.29E-03	50	1.30E-01
6	2.44E-03	55	2.17E-01
7	2.79E-03	60	3.90E-01
8	3.00E-03	65	5.57E-01
9	3.25E-03	70	8.67E-01
10	3.55E-03	75	1.34E+00
12	4.38E-03	80	2.05E+00
14	5.42E-03	85	3.55E+00
16	6.39E-03	90	6.00E+00
18	7.65E-03	100	1.34E+01
20	8.67E-03		

B.2 甲状腺残留率

作業者の吸入 ^{131}I (蒸気) 放射能に対する甲状腺残留率を図 B—1 に示す。摂取後 1 日で極大になることに留意が必要である。

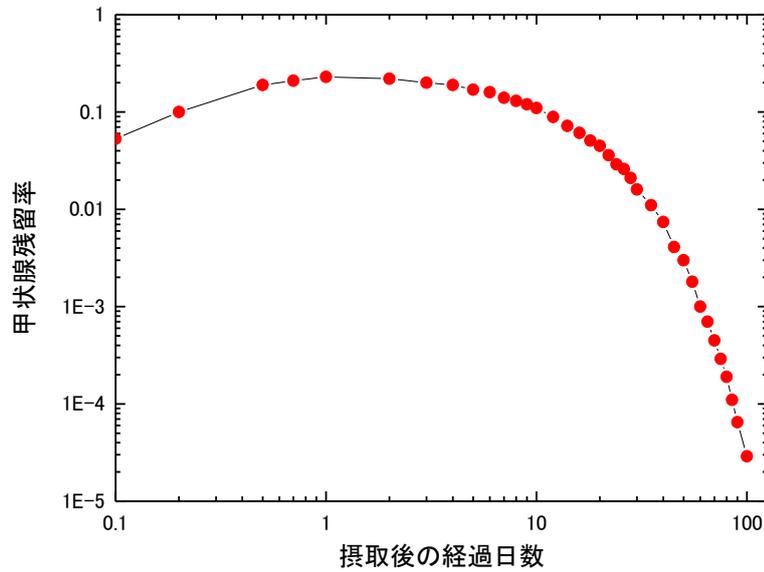


図 B—1 甲状腺残留率の例

B.3 摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数

作業者に対する摂取放射能から甲状腺等価線量への換算係数は、 ^{131}I 蒸気について、 3.90×10^{-4} mSv/Bq である。

Prototype Test of Potable Thyroid Dose Monitoring System using Gamma-ray Spectrometers

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

¹Department of Radiation Protection, Nuclear Science Research Institute,
Japan Atomic Energy Agency, 2-4 Shirakata, Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan

Highlights The portable thyroid dose monitoring system available in a situation of a severe nuclear accident is in development. In this presentation, the detailed design of the thyroid dose monitor and experimental results using prototype model will be described.

Key words Thyroid dose monitor; Thyroid equivalent dose; Internal exposure;

Background and Objectives In a situation of a severe nuclear accident, a large amount of radionuclides could be released into the environment. Intake of radionuclides by inhalation or ingestion causes internal exposure of people living or working in radiologically affected area. In order to estimate thyroid equivalent dose, individual monitoring based on a radioiodine measurement in thyroid gland should be started immediately after accident because half-lives of radioiodines are short (~8 days for ¹³¹I). Therefore, a thyroid monitoring system which is easily installed into evacuation centers and incident command posts should be prepared.

Thyroid Dose Monitor The proposed thyroid dose monitor consists of two gamma-ray spectrometers embedded into a well-type radiation shield as shown in Figure 1 (left). The subject puts their throat on the thyroid monitor from upside, as shown in Figure 1(right). The radioactivity in thyroid is determined from counting rate of ¹³¹I 365 keV photo-absorption peak appeared in the energy spectrum, using a pre-determined calibration factor.

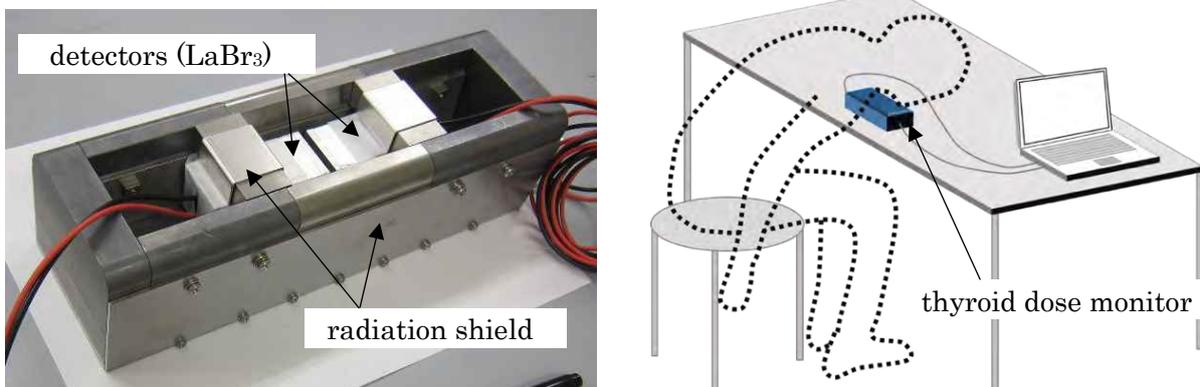


Fig 1. The appearance of the thyroid dose monitor (left) and the attitude of radioiodine measurement using thyroid dose monitor (right).

CdZnTe semiconductor detectors (1.5 cm³), which have high energy resolution, are adopted for the monitor for radiation-workers who are expected to be measured at areas highly contaminated by various kinds of radionuclides. On the other hand, LaBr₃ scintillation detectors (16 cm³), which have higher counting efficiency, are adopted for the monitor for a member of public who are expected to be measured in a relatively lower dose rate condition. The electric power for the signal processing unit consisting of amplifiers, an analogue-digital converter and a multi-channel analyzer, is supplied from a laptop computer via USB cable. Tungsten (W) heavy alloy and Lead (Pb) are used for radiation shields. W heavy alloy, which has higher shielding efficiency than Pb, is adopted to the shield close to detectors to downsize the monitor.

Prototype Test and Results Performance test using prototype model of the thyroid monitor was performed in the photon reference field established at the Facility of Radiation Standards (FRS) of the Japan Atomic Energy Agency. The monitor showed good shielding performance in high dose rate background condition simulated by ¹³⁷Cs 662 keV. The minimum assessable thyroid equivalent dose was experimentally evaluated following the technical guideline¹⁾. As a result, it was confirmed that the monitor can assess thyroid equivalent dose less than 10 mSv even in a high dose rate condition around several 10 μSv h⁻¹.

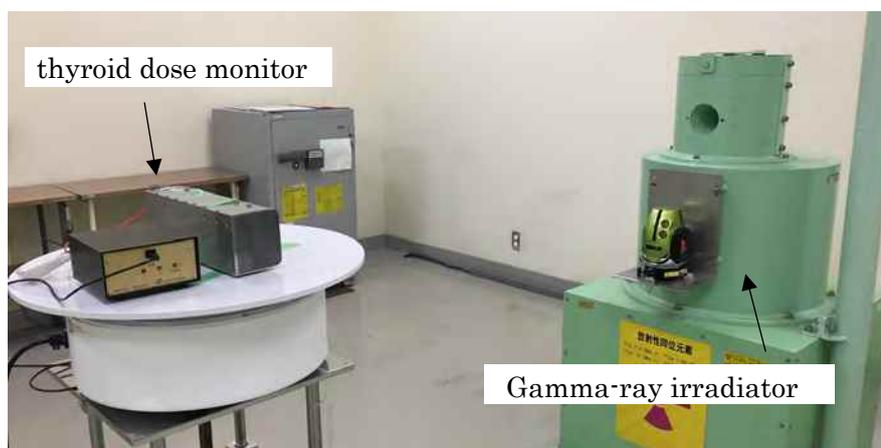


Figure 2 Performance test of prototype thyroid monitor in the photon reference field.

Acknowledgment This work is supported by Grant from Nuclear Regulation Authority, JAPAN.

References

- 1) Etherington, G. et al., 2017. “CATHyMARA report: Technical guidelines for radio-iodine in thyroid monitoring”, OPERRA Deliverable D5.31

Prototype Test of Potable Thyroid Dose Monitoring System using Gamma-ray Spectrometers

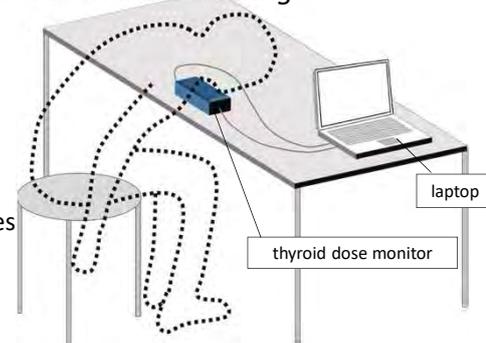
Sho Nishino, Yoshihiko Tanimura, Hiroshi Yoshitomi, Masa Takahashi
Japan Atomic Energy Agency (JAEA),

nishino.sho@jaea.go.jp

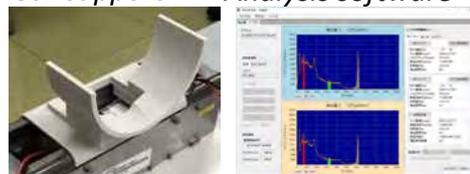
Thyroid Dose Monitor

In the situation of a severe nuclear accident, radioiodine monitoring in thyroid should be performed for a large number of people. The portable thyroid dose monitoring system which can be used in the high dose rate condition is in development. The results of performance test of the prototype model will be described.

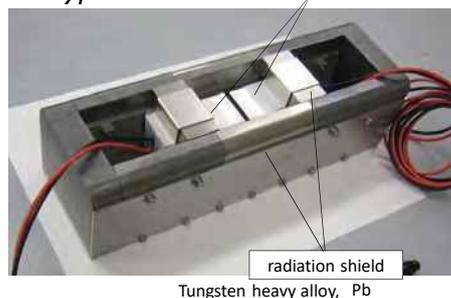
Attitude while measuring



Neck support Analysis software



Prototype model



^{131}I activity in thyroid is determined based on spectral information given with gamma-ray spectrometers.

CdZnTe for radiation workers at an incident command post (high BG rate)



high energy resolution
measurement in BG condition including various kinds of radionuclides

LaBr₃ for members of public at evacuation centers (Low BG rate)



high counting efficiency
short-time measurement for a large number of subject

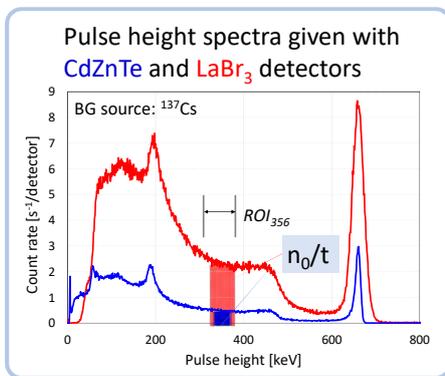
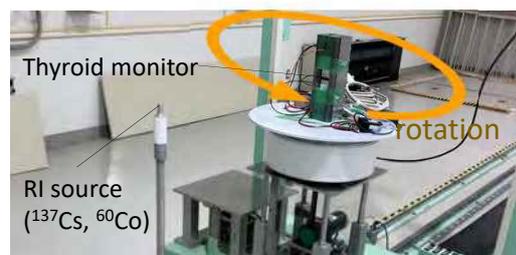


Signal processing unit for LaBr₃ detectors (USB-powered)

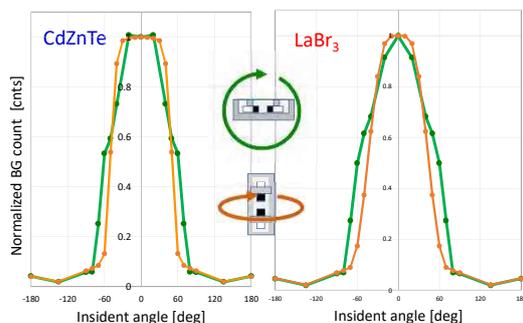
Experiments & Results

Performance tests of the prototype model in the high dose rate background (BG) condition were performed in gamma-ray calibration fields constructed in the FRS/JAEA.

High dose rate BG condition (20 $\mu\text{Sv/h}$, isotropic) simulated by ^{137}Cs or ^{60}Co



Incident-angle dependence of BG counts (n_0)



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 ROI_{356}
 CF_{thy} : thyroid dose conversion factor [mSv/Bq]
 F : retention fraction at the date of measurement

ϵ_* [s^{-1}/Bq]: obtained by calibration using ^{133}Ba source embedded in a cylindrical phantom.

... see P1-015

cylindrical phantom



$H_{thy,min}$ given in high dose rate BG condition (mSv)

BG source	members of public (LaBr ₃)			workers (CdZnTe)
	Baby (3-months)	Child (5-years)	Adult	
^{137}Cs	9.3	7.4	2.2	3.7
^{60}Co	6.7	5.3	1.6	2.7

*assuming isotropic distribution of BG source

*measuring time: 150 sec (300 sec only for baby)

*measurement 5 days after intake

Measurement in background condition including ^{131}I

... see P1-054

Summary

- Prototype thyroid monitoring system can achieve the minimum assessable thyroid equivalent dose less than 10 mSv, even in high dose rate condition around 20 $\mu\text{Sv/h}$.
- The improved model would be made after some consideration (for operability of the monitor and software, neck support...)

Uncertainties due to the body size for the radioiodine measurements using a newly developed thyroid monitor

Hiroshi Yoshitomi^{1*}, Sho Nishino¹, Yoshihiko Tanimura¹, Masa Takahashi¹

¹Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan

Highlights The effect of the body size on the detection efficiency of a newly developed thyroid monitor was estimated by Monte Carlo simulations using several voxel phantoms. The discrepancy from the efficiency in calibration was found to be 30 % at the maximum.

Key words thyroid monitor, voxel phantom, spectrometer

Background and Objectives In case of a nuclear reactor accident, a large amount of radioiodine, mostly ^{131}I , can be released in the environment, which causes internal exposure both to the members of the public and to the emergency workers. We have proposed a portable thyroid monitor using gamma-ray spectrometers with shielding¹⁾ for assessing the thyroid dose in such a situation. Although this monitor will be properly calibrated, any differences between the phantoms used in calibration and the monitored subjects can affect the accuracy of the measurement. This study aims to investigate the influence of the anatomical features of the subjects on the detection efficiency.

Materials and Methods The proposed thyroid monitor including two $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ detectors was precisely modelled for the simulations (Figure 1). To mimic the wide variety of subjects, eight different voxel phantoms (ICRP AM²⁾, ICRP AF²⁾, Otoko³⁾, Onago⁴⁾, JM-103^{5),6)}, JF-103^{5),6)}, CHILD⁷⁾ and BABYNEW⁷⁾) were used. For more detailed investigation of the difference among individuals, the JF-103, CHILD and BABYNEW phantoms were also modified to vary thyroid volume and the thickness of the overlying tissue. All the simulations were performed using the Monte Carlo code, PHITS 2.8.8. The detection efficiency was obtained from the calculated 365 keV peak counts of two $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ detectors, divided by the activity of ^{131}I uniformly distributed in thyroid gland

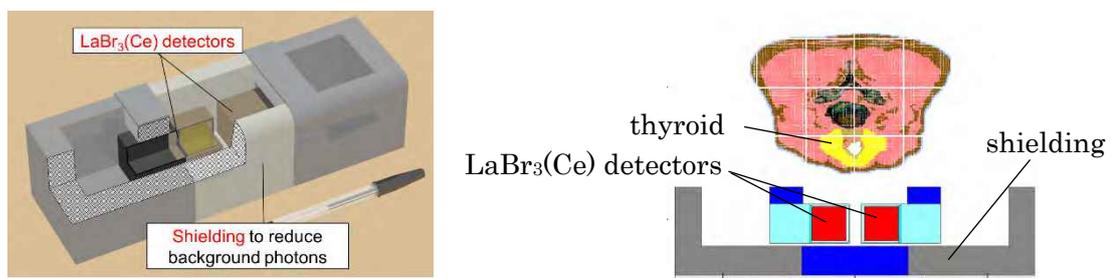


Figure 1. Illustration of the proposed thyroid monitor (left) and the cross-sectional view of the simulation model using JF-103 (right)

Results and Discussion This monitor is calibrated based on the voxel phantoms (ICRP AM, CHILD and BABAYNEW) using the representative point method with simplified physical phantoms⁸⁾. Any differences between the phantom used in calibration and the monitored subject can cause uncertainty in the measurements. Thus, the influence on the results of the measurement should be assessed. Although anatomical features, such as the thyroid shape and the dimensions, between ICRP AM and another adult voxel phantom are different, the differences in efficiency were found to be within 24 % (Table 1). For JF-103 with high resolution and the smallest neck diameter, the thickness of overlying tissue (1.8-11.9 mm) or thyroid volume (6.7-29.0 cm³) was varied, taking the normal range of their dimensions for the Japanese adult into account. Efficiency decreased with the thickness of overlying tissue but the difference in efficiency between ICRP AM and modified JF-103 was still within ± 30 %. In contrast, no major difference was observed over the changes of the thyroid volume. Hence, thickness of overlying tissue is considered to be a major impact factor as changing source-to-detector distance. The effect of these factors on the measurement of the child or baby will be also discussed in the presentation.

Table 1. Characteristics of various adult voxel phantoms and calculated efficiencies

Voxel phantom	ICRP AM	ICRP AF	Otoko	Onago	JM-103	JF-103
Thyroid volume (cm ³)	19.2	16.3	9.5	5.5	19.1	16.0
Thickness of overlying tissue (mm)	8.5	10.6	15.9	8.0	12.0	1.8
Efficiency ($\times 10^{-3}$ cps/Bq)	6.86	7.76	5.68	7.72	6.71	8.48
(Difference)	-	(+13 %)	(-17 %)	(+12 %)	(-2 %)	(+24 %)

Conclusion The detection efficiency depends on the body size such as the thickness of overlying tissue, but the difference was found to be 30 % at most for the proposed configuration and calibration of the thyroid monitor.

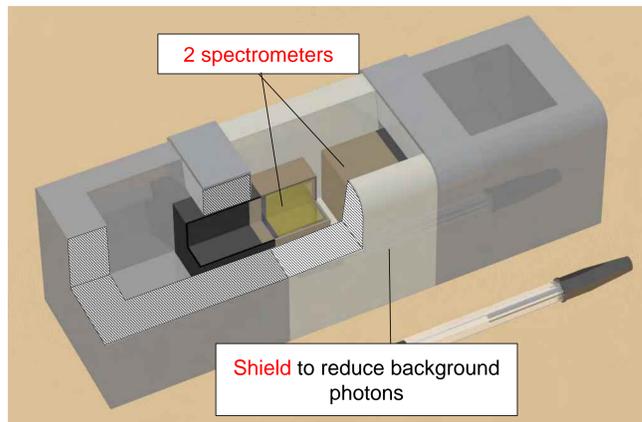
Acknowledgement This work is supported by Grant from Nuclear Regulation Authority, JAPAN.

References

- 1) S. Nishino, *et.al.* European IRPA Congress 2018
- 2) ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39(2), 1-164 (2009)
- 3) K. Saito, *et. al.* Radiat. Environ. Biophys., 40, 69-76 (2001)
- 4) K. Saito, *et. al.* Jpn. J. Health Phys., 43(2), 122-130 (2008)
- 5) K. Sato, *et. al.* JAEA-DATA/Code 2010-009
- 6) K. Sato, *et. al.* JAEA-DATA/Code 2011-013
- 7) N. Petoussi-Hens, *et.al.* Phys. Med. Biol., 47(1), 89-106 (2002)
- 8) H. Yoshitomi, *et. al.* AOCR-5, PP28 (2018)

Introduction

Proposed thyroid monitoring system

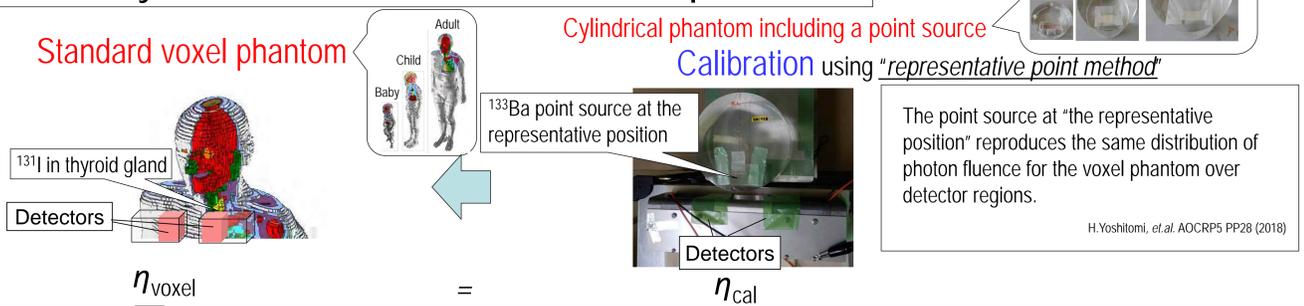


See Posters P1-045 and P1-054

- This system would be used to monitor a wide variety of affected people in case of nuclear emergency.

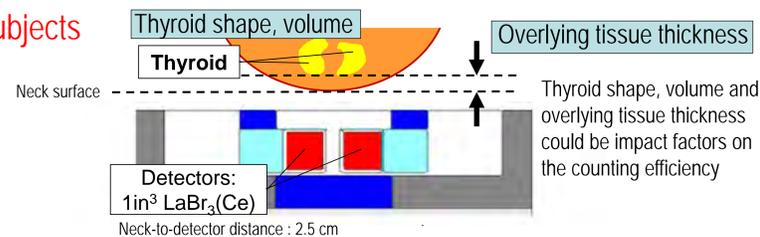
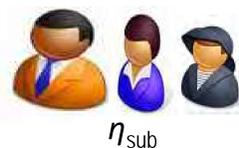
Previous works

-Efficiency calibration based on standard voxel phantoms-



How much difference of the counting efficiency does the variation of monitored subjects make?

Wide variety of monitored subjects



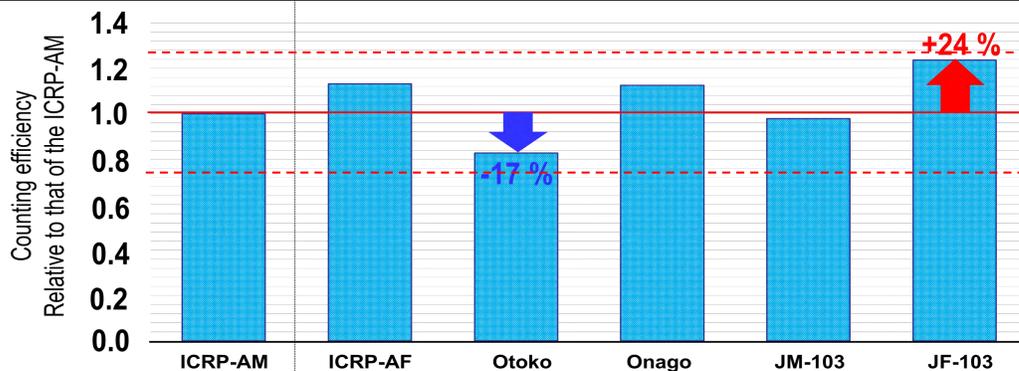
Uncertainties due to the body size

Adult

Calculated counting efficiencies using six voxel phantoms with different thyroid shape, volume and overlying tissue thickness

Monte Carlo code: PHITS 2.8.2

	ICRP-AM	ICRP-AF	Otoko	Onago	JM-103	JF-103
Sex	Male	Female	Male	Female	Male	Female
Cross sectional view around thyroid						
Overlying tissue thickness (cm)	0.85	1.06	1.59	0.80	1.20	0.18
Thyroid volume (cm ³)	19.2	16.3	9.5	5.5	19.1	16.0
Reference	ICRP reference male phantom which the calibration is based on	ICRP reference female phantom	Average Japanese adult male phantom	Average Japanese adult female phantom	High-resolution Japanese adult male phantom	High-resolution Japanese adult female phantom



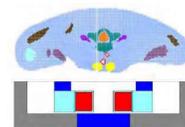
✓ Differences among these phantoms were found to be within ±25%.

✓ Overlying tissue thickness is a major impact factor?

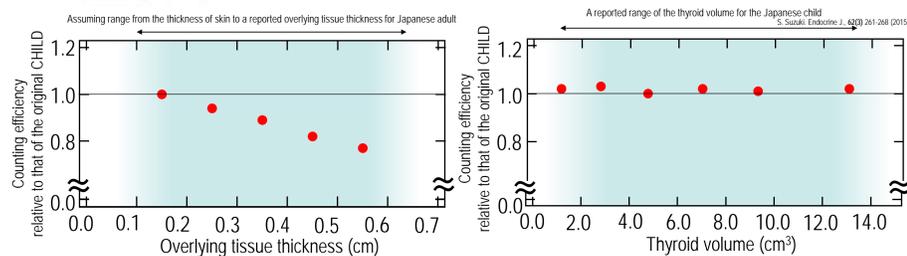
- More systematic approach for the variation of ① Overlying tissue thickness and ② Thyroid volume
- How about child and baby?

Child and Baby

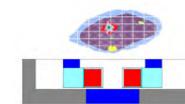
Voxel phantom used for the calibration for child : GSF CHILD phantom



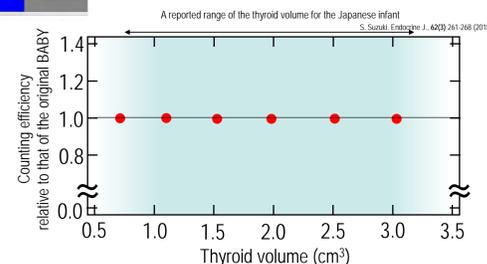
Overlying tissue thickness: 0.15 cm
Thyroid volume: 4.7 cm³



Voxel phantom used for the calibration for baby : GSF BABY phantom



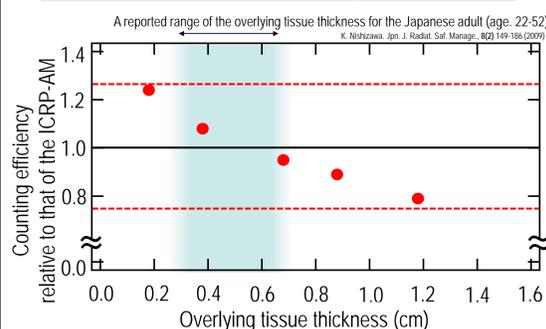
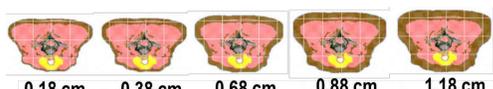
Overlying tissue thickness: 0.35 cm
Thyroid volume: 1.1 cm³



✓ Differences were also within ±25% in the case of child and baby

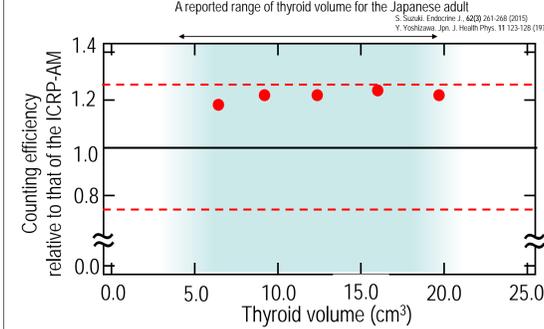
① Overlying tissue thickness

Overlying tissue thickness was changed using the JF-103 phantom



② Thyroid volume

Thyroid volume was changed using the JF-103 phantom



Summary

The shape, volume and position of the thyroid are unknown for the measurements of monitored subjects. Therefore, variation of counting efficiency due to these factors needs to be evaluated as an uncertainty component of the activity assessment in thyroid.

✓ Uncertainty related to the body size of the monitored subject was estimated to be 25%

Acknowledgements

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

Background Correction Method for Portable Thyroid Dose Monitor Using Gamma-ray Spectrometer Developed at JAEA in High Dose Rate Environment

Y. Tanimura^{1*}, H. Yoshitomi¹, S. Nishino¹, M. Takahashi¹

¹Japan Atomic Energy Agency, Ibaraki, Japan

Highlights A correction method for the background photons in high dose rate environment was developed to apply to the thyroid dose monitoring using the portable thyroid dose monitoring system developed at the Japan Atomic Energy Agency.

Key words thyroid dose, spectrometer, high dose rate, radio iodine, background photons

Introduction A portable thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers has been developed at the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) 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 accident¹⁾. The system consists of a couple of gamma-ray spectrometer and a detector shield made of tungsten heavy alloy and lead as shown in Figure 1. The shield has enough thickness to block the background (B.G.) photons entering to the spectrometers from side and bottom. However, the B.G. photons from up above cannot be blocked by the shield and can affect the measurement because there are no shielding material above the spectrometers. This makes it important to correct the B.G. photons for an accurate thyroid dose monitoring in a high dose rate environment.

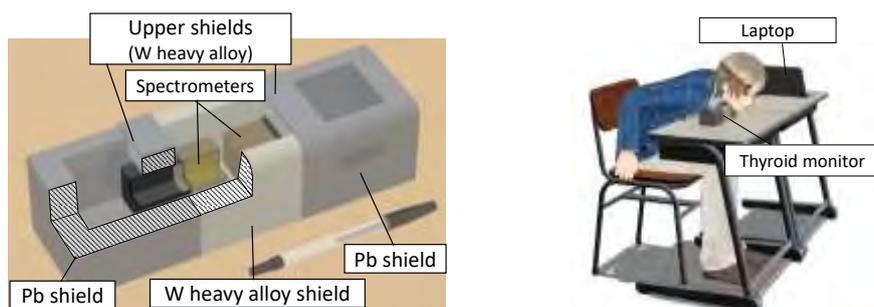


Figure 1. Schematic drawing (left figure) and measurement setup (right figure) of the portable thyroid dose monitoring system.

If the B.G. correction was performed using the measurement data without anything above the spectrometers, the B.G. photons from up above directly entered the spectrometers without any attenuation. As a part of the B.G. photons are reduced by the human body of the subject in the actual thyroid dose measurement, this makes subtraction of the B.G. photons too much and

results in under estimation of the thyroid dose. Therefore, an appropriate correction method for the B.G. photons are required for the accurate monitoring.

In this work, a correction method for the B.G. photons was developed to apply to the portable thyroid dose monitoring system developed at JAEA. In the correction method, cylindrical PMMA phantoms, one of which was used to calibrate the system²⁾, were employed and set up above the spectrometers in order to mimic the human body.

Methods The system was precisely modelled and its count rates for the B.G. photons were calculated using the PHITS 3.02 code. Three different voxel phantoms^{3,4)} (ICRP AM, CHILD and BABYNEW) were also included in the calculation models to mimic the human bodies of subjects of different aged. In the calculation the system was irradiated with the isotropic 364 keV gamma-rays from surrounding ¹³¹I sources and its peak counts were calculated under three conditions; with the voxel phantom, with a cylindrical PMMA phantom and without the detector shield and any phantom. Then the ratios to the third condition were evaluated for each age group; adult, child and baby.

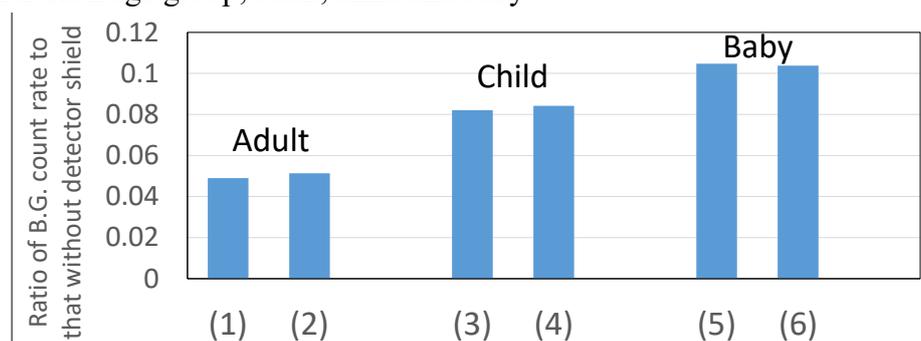


Figure 2. Ratio of the B.G. count rate to that without the detector shield. (1), (3), (5): voxel phantom (adult, child, baby), (2): 20cmΦ×17cm PMMA (vertical), (4): 13cmΦ×12cm PMMA (vertical), and (6): 13cmΦ×12cm PMMA (transverse).

Results and Discussion Figure 2 shows the ratios of the B.G. count rate to those without the detector shield. The ratios with the cylindrical PMMA phantoms are consistent with those with the voxel phantoms. It means that the cylindrical PMMA can be substitute for the human body of the subject in the B.G. photon correction.

Acknowledgment This work is supported by Grant from Nuclear Regulation Authority, JAPAN.

References

- 1) S. Nishino, *et.al.* European IRPA Congress 2018
- 2) H. Yoshitomi, *et. al.* AOCR-5, PP28 (2018)
- 3) ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39(2), 1-164 (2009)
- 4) N. Petoussi-Hens, *et.al.* Phys. Med. Biol., 47(1), 89-106 (2002)



Yoshihiko Tanimura, Hiroshi Yoshitomi, Sho Nishino, Masa Takahashi
Japan Atomic Energy Agency (JAEA),

tanimura.yoshihiko@jaea.go.jp



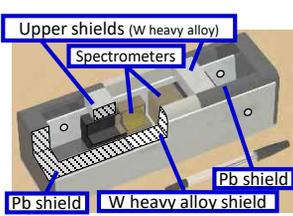
Abstract

A portable thyroid dose monitoring system has been developed at the Japan Atomic Energy Agency (JAEA) to assess the thyroid equivalent dose for workers and members of the public in a high dose rate environment. The background (B.G.) photon correction is required for an accurate measurement in a high dose rate environment at an early stage after a nuclear accident. We developed the B.G. photon correction method using cylindrical PMMA phantoms.

Summary

The attenuation effects of voxel and cylindrical phantoms were calculated by using the PHITS code and they became almost same. This means the cylindrical phantoms can mimic the human body in the high dose rate caused by ¹³¹I sources. The correction of the B.G. photons can be appropriately made by subtracting B.G. counts measured with the cylindrical phantoms made of PMMA.

Introduction



- B.G. photons entering from up above cannot block by the shield of the monitor
- A part of the B.G. photons are attenuated by the human body of a subject

Underestimate the thyroid dose when the photon correction was performed using the B.G. photon counts with nothing above the monitor

An appropriate correction method for the B.G. photons is required for the accurate monitoring.

Schematic drawing of the monitor

Measurement setup

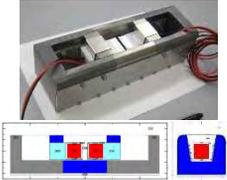
Let's visit the posters P1-015 and P1-045

A B.G. photon correction method was developed by using cylindrical phantoms which mimic the human body



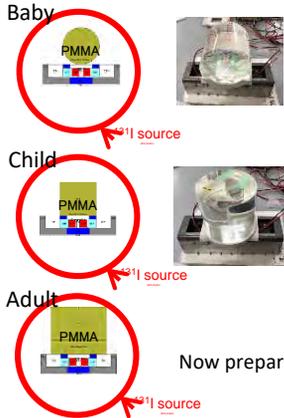
Calculation

Monte Carlo code: PHITS 3.0.2 (EGS mode)
Voxel phantom: ICRP-AM (Adult male)
 GSF CHILD
 GSF BABY
Source: ¹³¹I source on a spherical shell of 40 cm radius



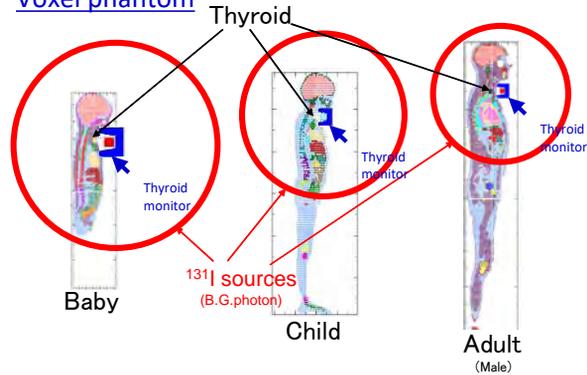
Calculation model of the monitor

Cylindrical phantom



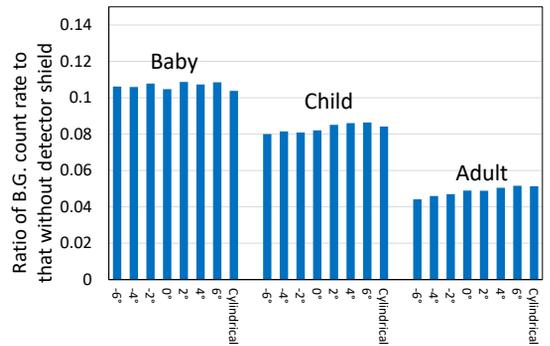
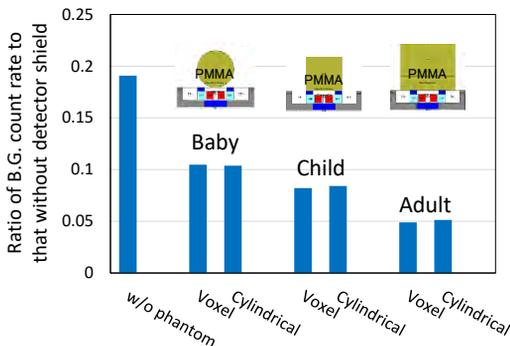
Now preparing...

Voxel phantom



Evaluate the ratio of the count rate with cylindrical/voxel phantom and shields to that without the phantom and shields

Results



Attenuation effects of voxel and cylindrical phantoms became almost same
→ Successfully mimic the human body

Less dependent on the change in the zenith angle

B.G. photon correction can be appropriately made

Acknowledgement

This work is supported by Grant from nuclear Regulation Authority, JAPAN

Development of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers



Japan Atomic Energy Agency

Y. Tanimura, S. Nishino, H. Yoshitomi

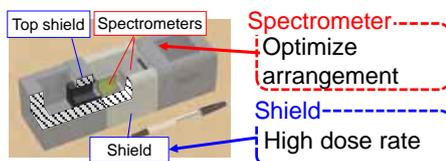
and M. Takahashi



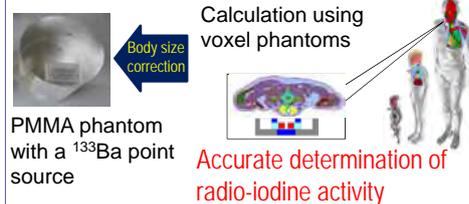
Objective

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.

(1) Measurement unit

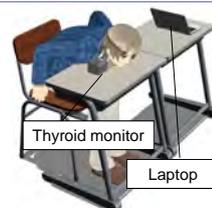


(2) Calibration & quantitative method



(3) Monitoring system

- Neck support development
 - Accurate arrangement of spectrometers and a subject
- To be manualized





Time schedule

Theme	Aug. 2017	Apr. 2018	Apr. 2019	Apr. 2020
(1) Development of measurement unit	<ul style="list-style-type: none"> Selecting spectrometers Optimizing material and size of the shield 	<ul style="list-style-type: none"> Developing and characterizing the prototype 	<ul style="list-style-type: none"> Finalization 	
(2) Development of calibration and quantitative method	<ul style="list-style-type: none"> Development of PMMA phantom 	<ul style="list-style-type: none"> Developing the method using PMMA and voxel phantoms 		
(3) Development of monitoring system			<ul style="list-style-type: none"> Neck support design Developing the supports 	<ul style="list-style-type: none"> Manualize

- Conceptual design of the monitor was introduced in ARADOS-4
- This presentation talks about the prototype monitor

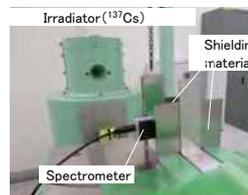
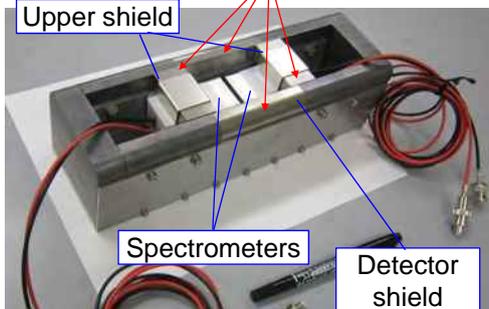
2



(1) Development of measurement unit

Detector shield

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



Testing shielding effect

Design the detector shield by optimizing material and size

Nearby the spectrometers → Select W heavy alloy

3



(1) Development of measurement unit

Development of prototype monitor

Spectrometers

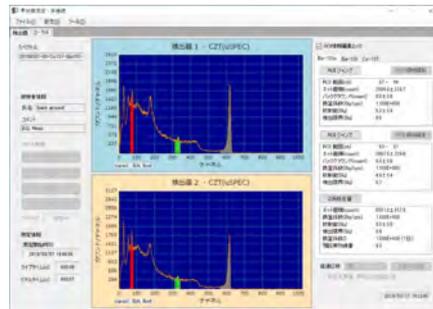


LaBr₃ (for public)



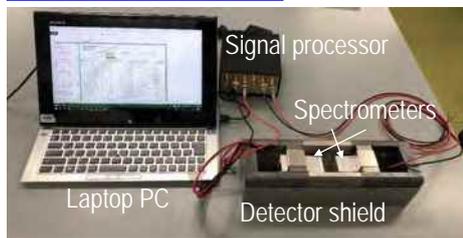
CdZnTe (for worker)

Operating software



- Operate both spectrometers in parallel
- NET peak count analysis
 → Quantitate radio-iodine

Prototype monitor

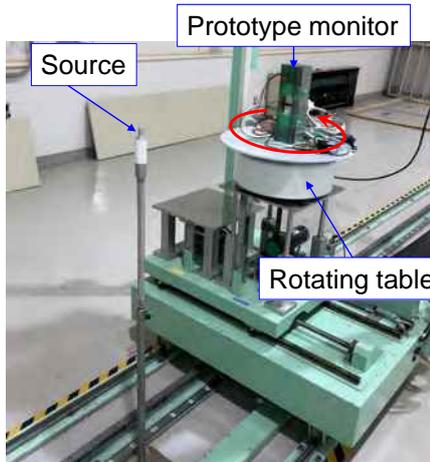


4



(1) Development of measurement unit

Characteristics of prototype monitor



Characteristics using γ -ray calibration fields

- Characterize in high dose rate (20 μ Sv/h) using ¹³⁷Cs and ⁶⁰Co
- Omnidirectional irradiation
 → mimic high dose rate environment

Detection limit of thyroid eq. dose [mSv]

Source	Public (LaBr ₃)			Worker (CdZnTe)
	Baby*	Child	Adult	
¹³⁷ Cs	9.3	7.4	2.2	3.7
⁶⁰ Co	6.7	5.3	1.6	2.7

*Meas. Time Baby: 300s, Others: 150s

10mSv can be achieved in high dose rate of 20 μ Sv/h

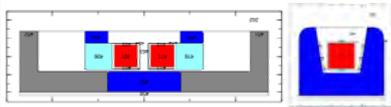
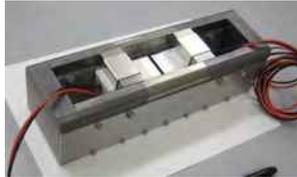
5



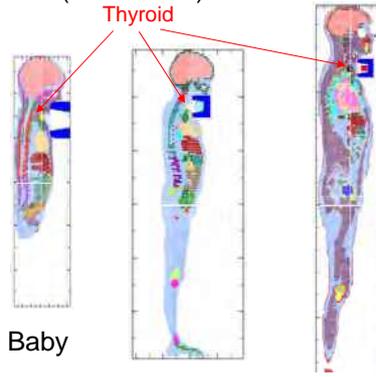
(2) Development of calibration and quantitative methods

Simulation conditions

Simulation code : PHITS 3.0.2 (EGS mode)
 Math. phantom : GSF voxel phantom (Baby, Child)
 ICRP voxel phantom (Adult male & female)
 JF-103 , Onago phantom (Adult female)
 JM-103, Otoko phantom (Adult male)



Calculation model of the thyroid monitor



Baby

Child

Adult (male)

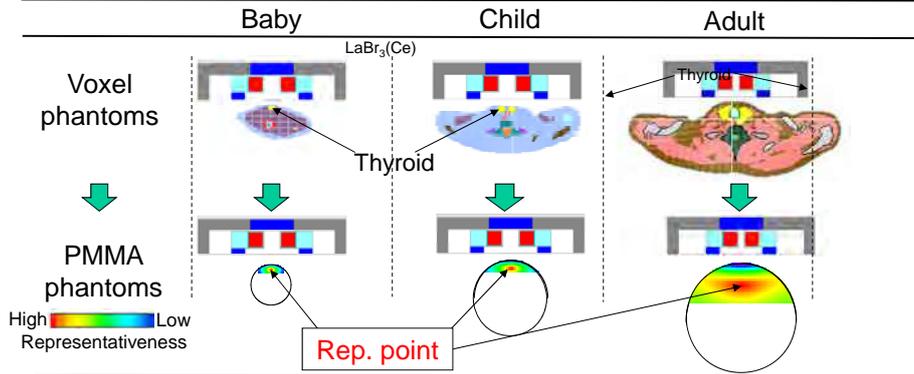
6



(2) Development of calibration and quantitative methods

Representative points*

* Gives same fluence at the spectrometer



Differences are less than 4 %

The thyroid monitor can be easily calibrated using the PMMA phantom with a ¹³³Ba point source at the rep. point.



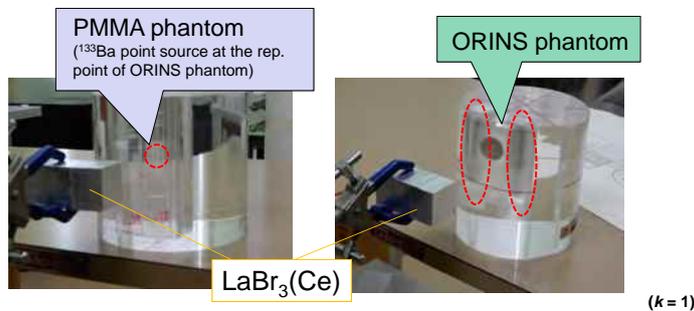
PMMA phantoms

7



(2) Development of calibration and quantitative methods

Testing the rep. point method



	PMMA phantom	ORINS phantom
Detection efficiency (cpm/photons/s)	0.18±0.01	0.19±0.04

Within the uncertainties → Confirm validity of the method

8



Summary

(1) Measurement unit

- Prototype of the thyroid monitor
 ⇒ Characterized using γ-ray calibration fields(¹³⁷Cs, ⁶⁰Co)
 10mSv (thyroid eq. dose) can be evaluated in high dose rate of 20μSv/h

(2) Calibration & quantitative method

- Determine the representative points in the PMMA phantoms where fluences of ¹³³Ba 356 keV photons are same as those for voxel phantoms
 ⇒ Confirm the validity of the method applying to the ORINS phantom
 Simple but accurate calibration method have been developed

➤ This development is funded by the Nuclear Regulation Authority (NRA) of Japan.
 (Radiation Safety Research Promotion Fund, Development of thyroid monitor for nuclear emergency)

9

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	



可搬型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発

日本原子力研究開発機構 安全研究センター 放射線安全・防災研究グループ

■ 目的・背景

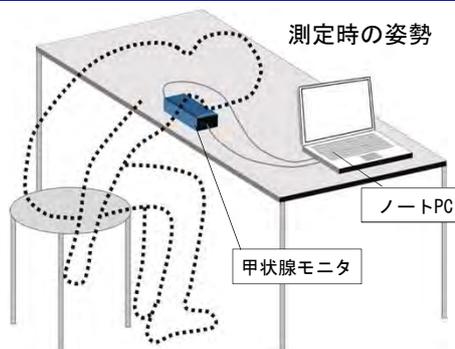
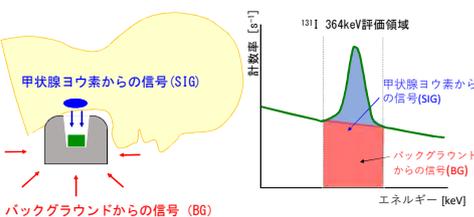
高バックグラウンド線量率下(避難所や事故サイト)で使用可能な、可搬型甲状腺ヨウ素モニタを開発する

- ・原子力災害時には、住民及び緊急時作業員の内部被ばく評価のため、甲状腺モニタリングを実施する必要がある (^{131}I の半減期:8日)
- ・現在使用されている甲状腺モニタは、研究所や医療機関に設置された大型のものが多く、避難所等に持ち込んで使用することが困難

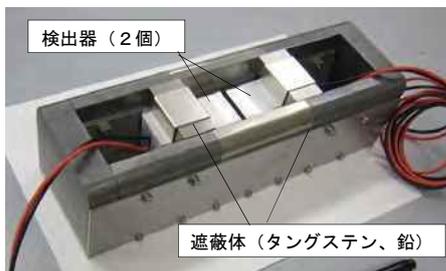
■ 開発中の甲状腺モニタ

特徴

- ・スペクトル情報に基づく甲状腺ヨウ素 ^{131}I の定量
- ・遮蔽一体型で、高BG線量率下でも使用可能
- ・机上型なので、避難所等でも設置が容易
- ・USBケーブル接続により、ノートPCから給電



甲状腺モニタ試作機

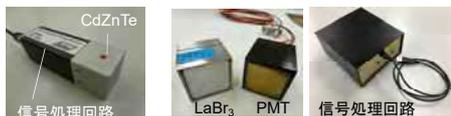


CdZnTe (高いエネルギー分解能)

様々な放射性核種を含むBG環境下における測定に有利
→ 緊急時作業員用

LaBr₃ (高い検出効率)

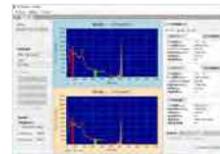
多数の被検者に対する短時間測定に有利 → 公衆用



測定用治具



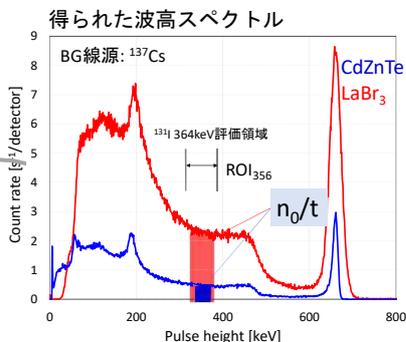
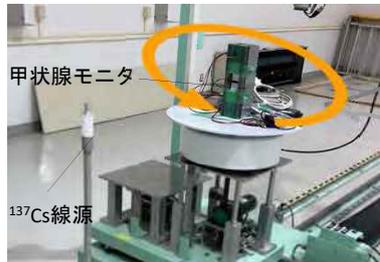
解析ソフトウェア



■ 甲状腺等価線量評価下限値

FRS/JAEAのγ線校正場を用いて、高バックグラウンド環境下におけるモニタ試作機の性能試験を実施し、評価可能な甲状腺等価線量下限値を評価

測定の様子



甲状腺等価線量の評価下限値; $H_{thy,min}$ (mSv)

BG 線量率 (等方的なBG線の分布を仮定)	公衆 (LaBr ₃)			作業員 (CdZnTe)
	乳児 (3カ月児)	子供 (5歳児)	大人	
^{137}Cs 20 $\mu\text{Sv/h}$	13.1	7.4	2.2	3.7
^{137}Cs 5 $\mu\text{Sv/h}$	6.6	3.7	1.1	1.9

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

k : (=1.65) 信頼レベル 95% CF_{thy} : 甲状腺等価線量換算係数 [mSv/Bq]
 t : 測定時間 [s] (=150秒) F : 測定日の放射性ヨウ素の残留率
 ϵ_* : 検出効率 [s⁻¹/Bq] (摂取5日後の測定を仮定)
 n_0 : ROI₁₃₅₆ 内のBGカウント

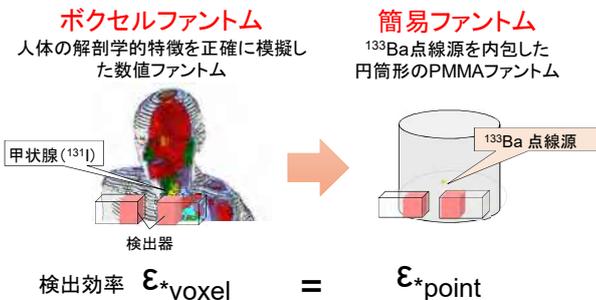
高バックグラウンド線量率下においても、150秒間の測定により、目標性能である10mSv以下の甲状腺等価線量が評価可能であることを確認した。

測定場所の線量率: 公衆~5 $\mu\text{Sv/h}$ (避難所), 緊急時作業員~20 $\mu\text{Sv/h}$ (事故現場指揮所)を想定

■ 校正法の開発

甲状腺ヨウ素の正確な定量のために、甲状腺モニタを適切かつ簡便に校正する手法が必要

代表点校正法: ボクセルファントムを使用した場合と、等価な検出効率 ϵ_* を与える簡易ファントム内の位置(代表点)に、 ^{133}Ba 点線源を設置



$$\text{検出効率 } \epsilon_{*voxel} = \epsilon_{*point}$$

	乳児	子供	大人
ボクセルファントム			
簡易ファントム			
$\epsilon_{*point} / \epsilon_{*voxel}$	4.0%	0.2%	1.6%

^{133}Ba 点線源と簡易ファントムを用いた代表点法により、甲状腺モニタを適切に校正できることを確認した。



■ 今後

- ・遮蔽体サイズ等を、公衆用・作業員用にそれぞれ最適化した実機の製作・性能試験
- ・測定用治具(喉部のサポート)の形状の最適化、使いやすい制御・解析ソフトウェアの製作
- ・被検者の体格等を考慮した測定不確かさの導出

平成31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

2020年2月6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

【概要】 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

(平成29年度～平成31年度)



【背景・目的】

原子力事故等緊急時には、高線量率下における多数の公衆及び作業者が摂取した放射性ヨウ素の迅速かつ高精度な測定・評価が必要

→ **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**

【実施状況】 ロードマップに従い、ほぼ当初の**計画どおりに進捗**

開発項目	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	検出器の試験・選定 遮蔽体材質等最適化 検出器及び遮蔽の選定 ▲	測定器の試作、性能評価 試作機の完成 ▲	実機の製作、性能評価 実機の完成 ▲
② 高精度放射性ヨウ素定量法	年齢別頸部ファントム製作 頸部ファントムの製作 ▲	頸部・数値ファントムによる定量法の開発 定量法の完成 ▲	
③ 甲状腺モニタシステム		標準化用治具の設計	標準化用治具の製作 マニュアル作成 システム完成 ▲

平成29年度: 最適な検出器の選定、遮蔽体の材質・厚さの最適化、年齢別頸部ファントムの製作

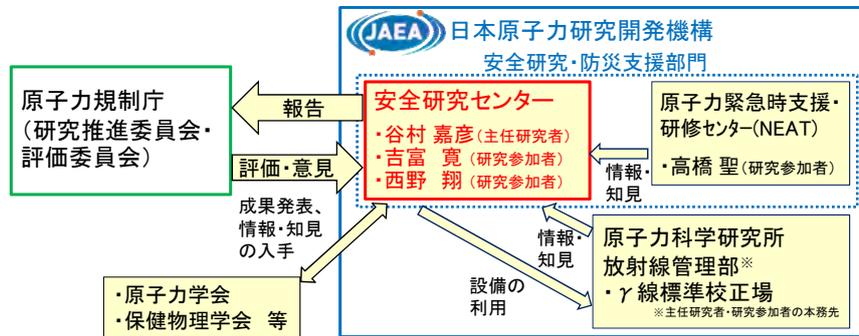
平成30年度: 甲状腺モニタ測定器の試作、放射性ヨウ素定量法の開発、標準化用治具の概念設計

平成31年度: 甲状腺モニタ測定器実機の製作、性能評価(見込)、標準化用治具の製作、マニュアル完成(見込)

【期待される効果】

NEAT、オフサイトセンターへの集中配備と、各避難所、指揮所への緊急輸送体制の構築により、多数の公衆・作業者の高精度甲状腺等価線量モニタが可能となる

【研究体制】 平成31年度事業の研究体制



【研究分担】

- 研究統括
・谷村 嘉彦
- ① 甲状腺モニタ測定器実機の製作
・西野 翔(製作・評価)、谷村 嘉彦(設計)
 - ③-1 標準化用治具の製作
・吉富 寛(設計)、谷村 嘉彦(製作)
 - ③-2 マニュアルの作成
・西野 翔(機器操作)、吉富 寛(定量・校正法)、谷村 嘉彦(全体統括)、高橋 聖(助言)

➤ 甲状腺簡易測定研修(2019年10月、量研機構)や実務者会合(2020年1月、NEAT)における甲状腺モニタシステムのデモンストレーションを通じて防災関係者の意見を収集

2

【今年度の研究概要】 平成31年度の実施内容と達成目標



平成31年度(令和元年度)の研究ロードマップ及びマイルストーン(▲)

開発項目	平成31年度(令和元年度)		
① 甲状腺モニタ測定器	実機の仕様検討	実機の製作	実機の性能評価 実機の完成▲
③ 甲状腺モニタシステム	治具の詳細設計	治具の製作	マニュアル作成 システムの完成▲
実績	実務者会合	SSD-19	甲状腺研修 ARA (試作機デモ) DOS-5 実機 納品 実務者会合 (実機デモ)

①甲状腺モニタ測定器の開発

- ・公衆用LaBr₃検出器の改良
- ・検出器遮蔽体の最適化及び可搬性の向上
- ・検出器制御・スペクトル解析用ソフトウェアの改良
- ・γ線標準校正場を用いた高線量率下での性能試験

➡ 目標: 甲状腺モニタ測定器実機の完成

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開発
- ・バックグラウンド放射線測定用治具の製作
- ・甲状腺モニタシステムのマニュアルを作成

➡ 目標: 甲状腺モニタシステムの完成

3

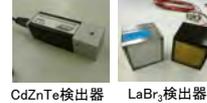
【今年度の研究概要】 ①甲状腺モニタ測定器の開発



○公衆用LaBr₃検出器

シンチレータと光電子増倍管をパッケージ化

➡ 信頼性の向上と製品化へのスムーズな移行



CdZnTe検出器 LaBr₃検出器

○検出器用遮蔽体

更なるダウンサイズによる軽量化(公衆用)

持運びし易くなる構造の工夫

➡ 可搬性の向上により、柔軟な運用が可能

○ソフトウェアの改良

検出器制御系の改良、年齢群に応じたバックグラウンド

スペクトル選択機能の追加等

➡ 操作に精通していなくても容易に操作可能



甲状腺モニタ試作機(平成30年度)

○甲状腺モニタ測定器実機の実機特性試験

実機について、 γ 線標準校正場で高バックグラウンド

線量率環境を模擬して測定下限値などを評価

➡ 事故時の高線量率下での使用の判断基準

4

【今年度の研究概要】 ③甲状腺モニタシステムの開発



○標準化用治具の開発

被検者の年齢ごとに甲状腺と検出器の配置を正確に決定できる治具を開発

➡ 位置ずれの感度への影響を軽減し測定精度の向上

○バックグラウンド放射線測定用治具の開発

高線量率下での使用時には、周辺の放射性ヨウ素からのバックグラウンド γ 線の影響を受けるため、この影響補正に用いるバックグラウンドスペクトル測定用治具を開発

➡ バックグラウンド放射線の正確な補正による測定精度の向上

○マニュアルの作成

甲状腺モニタ測定器の設置、測定器の校正方法、バックグラウンド補正用スペクトルの取得方法、検出器制御・スペクトル解析用ソフトウェアの使用方法等をまとめたマニュアルを作成

➡ 操作に精通していなくても正確な測定が可能

5

【研究の進捗】 ①甲状腺モニタ測定器の開発(1)



検出器制御・スペクトル解析用ソフトウェア

- CdZnTe検出器制御機能の改良
- 年齢別B.G.スペクトル選択機能の追加
- データ保存形式の改良
- ピーク解析機能の追加

習熟者でなくても容易に操作可能

作業用: 16.6kg

- 遮蔽体及び検出器については試作機を活用し、持ち手を追加

試作機より可搬性が大きく向上

公衆用: 14.4kg

- 遮蔽体幅の最適化(縮小)と持ち手の追加

試作機の軽量化(-2kg)と可搬性の大幅な向上

- 検出器のパッケージ化

試作機より信頼性が向上

甲状腺モニタ測定器実機を製作

6

【研究の進捗】 ①甲状腺モニタ測定器の開発(2)



試作機の実験結果(平成30年度成果)



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 μSv/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

試作機では、20 μSv/hの高線量率環境下においても10mSvの評価が可能

甲状腺モニタ測定器実機についても同様の性能であることを年度内に確認予定

7

【研究の進捗】 ③甲状腺モニタシステムの開発(1)



○標準化用治具の開発

公衆用



成人用
測定治具

小児・乳児用
測定治具

作業者用



作業者用測定治具

- 治具の製作に3Dプリンタを使用 → 複雑な形状を自在に製作可
- 人体への有害性が認められず、様々な製品にも使用されている素材を採用
→ 環境負荷が小さい生分解性プラスチック樹脂、軟質ウレタン樹脂
- 被検者の頸部が接触する箇所は、軟質のウレタン樹脂を使用
→ 測定時の不快感を軽減するとともに頸径の個人差に対応

8

【研究の進捗】 ③甲状腺モニタシステムの開発(2)



○バックグラウンド放射線測定用治具の開発



校正用簡易頸部ファントム
(PMMA製13cmΦ×12cm)



乳児用治具



小児用治具



成人用治具

- 甲状腺モニタシステム校正用簡易頸部ファントムでバックグラウンド放射線(周辺の放射性ヨウ素からの γ 線)の被検者による遮蔽効果を模擬
- 甲状腺モニタリング時にバックグラウンド放射線のスペクトルを差引く
→ バックグラウンド放射線の影響を正確に補正可能

○マニュアルの作成

- 試作機(平成30年度製作)用の簡易マニュアルを作成して、10月に量研機構で開催された甲状腺簡易測定研修においてデモンストレーションを実施
- 12月に納品された甲状腺モニタシステムの実機について、マニュアルの作成に着手

9

【成果】 主な成果の公表状況



- 19th International Conference on Solid State Dosimetry (SSD19)において
成果公表(9月15日~20日、広島、ポスター発表&論文投稿 3件)
 - S. Nishino et al.: Prototype Test of Potable Thyroid Dose Monitoring System using Gamma-ray Spectrometers
 - H. Yoshitomi et al.: Uncertainties due to the body size for the radioiodine measurements using a newly developed thyroid monitor
 - Y. Tanimura et al.: Background Correction Method for Portable Thyroid Dose Monitor Using Gamma-ray Spectrometer Developed at JAEA in High Dose Rate Environment
- 5th Asia Radiation Dosimetry Group annual meeting (ARADOS-5)において
成果公表(11月6日~8日、中国 北京、口頭発表)
 - Y. Tanimura et al.: Development of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers
- 日本原子力学会2020年春の年会で成果発表(3月16日~18日、福島大学、口頭発表予定)
 - 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 モニタの製作と測定手法の開発

【平成29年度の成果】

- 特許公開: 特開2019-138665「甲状腺モニタ用可搬型放射線測定器及び測定方法」(平成30年2月6日出願、令和元年8月22日公開)

10

【自己評価】 進捗状況及び成果公表



(1)進捗状況(平成31年度)

①甲状腺モニタ測定器の開発

- 公衆用及び作業用者の甲状腺モニタシステムについて製作を完了(12月下旬納品)
- 動作試験に着手しており、年度内に性能試験を実施できる見込み

⇒「実機の製作」を達成できる見込み

③甲状腺モニタシステムの開発

- 被検者と検出器の配置の正確な決定に用いる標準化用治具を3Dプリンタで製作
- 平成30年度に製作した試作機について、簡易マニュアルを作成し、甲状腺簡易測定研修においてデモンストレーションを実施
- 製作が完了した実機に基づくマニュアル作成に着手しており、年度内に完成できる見込み

⇒「標準化用治具の作製及びマニュアルの作成」を達成できる見込み



概ね計画どおりに進捗しており、目標を達成できる見込み

11

エネルギー分析型甲状腺放射性ヨウ素モニタの開発 モニタの製作と測定手法の開発

Development of thyroid dose monitoring system using gamma-ray spectrometers

Fabrication of the monitor and development of the measurement procedure

*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周辺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を製作し、高バックグラウンド線量率下における甲状腺放射性ヨウ素測定手法を開発した。

キーワード：甲状腺，放射性ヨウ素，内部被ばく，CdZnTe 半導体検出器，LaBr₃(Ce)シンチレーション検出器

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、公衆及び作業者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^[1,2]。今回、周辺遮蔽体、検出器2個及び検出器位置固定用治具で構成される公衆用と作業者用の2種類の甲状腺モニタを製作した。公衆用及び作業者用の検出器として、それぞれLaBr₃(Ce)シンチレーション検出器及びCdZnTe半導体検出器を採用した^[1]。さらに、被検者の甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素放射能を測定する手法を開発した。

2. 甲状腺放射性ヨウ素モニタの製作と測定手法の開発

製作した甲状腺モニタを図1に示す。検出器上部に設置する固定用治具は、プラスチック樹脂を原料として3Dプリンタで製作した。被検者の頸部が接する箇所については、軟質のウレタン樹脂を採用することで測定時の不快感を軽減する工夫を行った。これにより、測定結果への影響が大きい被検者の甲状腺と検出器の配置を正確に決めることができるようになった。試作機^[2]を基に改良した公衆用及び作業者用測定器（周辺遮蔽体及び検出器）の重量はそれぞれ14.4kg及び16.6kgであり、緊急時に避難所などへ比較的容易に持ち運び、会議用テーブル等に設置して測定することが可能である。さらに、測定器の設置、検出効率の校正、被検者の測定及び制御用ソフトウェアの操作について詳述したマニュアルを作成した。

3. 結論

原子力事故等緊急時の高線量率環境下で、公衆及び作業者の甲状腺に蓄積された放射性ヨウ素を定量できる可搬型甲状腺モニタを開発するとともに緊急時個人モニタリングへの適用を目的としたマニュアルを整備した。

本件は、原子力規制委員会「平成31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（2018年3月大阪大学）

[2] 谷村嘉彦他：日本原子力学会2019年春の年会2H17（2019年3月茨城大学）

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

¹Japan Atomic Energy Agency



図1 製作した甲状腺モニタの写真

令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進
事業費（環境モニタリング線量計の現地校
正に関する研究）事業

成果報告書

令和2年3月

国立研究開発法人 産業技術総合研究所

内容

1	本研究の目的.....	3
1-1	はじめに.....	3
1-2	研究の目的.....	3
2	高線量地域（福島県内）での実証実験地点の選定及びその光子スペクトルについて	5
2-1	高線量地域の実証実験のための MP の選定.....	5
2-2	高バックグラウンド地域に設置されているモニタリングポストの選定.....	11
2-3	サーベイメータによるモニタリングポスト周辺の線量率分布.....	11
2-4	スペクトル測定.....	14
2-5	遮へいの効果について.....	16
3	コリメート照射装置及びモニタリングポスト遮へい体の製作.....	18
3-1	照射装置及び遮へい体の製作.....	18
3-2	照射装置の線量率の決定.....	20
4	従来手法との比較.....	21
4-1	日本分析センターによる現地校正結果.....	21

4-2	本研究による現地校正手法.....	23
4-3	校正結果の比較.....	24
5.	高線量地域での実証実験.....	26
5.1.	従来の現地校正手法による校正結果との比較.....	26
5.2	現地に設置されているモニタリングポストの校正結果.....	28
5.3	本校正手法に関する考察.....	30
6	本手法の校正手順及び不確かさの評価例.....	31
6.1	本手法による校正方法.....	31
6.2	不確かさの評価.....	36
7	まとめ.....	38

1 本研究の目的

1-1 はじめに

現在、我が国では原子力施設を中心に環境の放射線量を連続的に測定するためのモニタリングポストに代表される放射線計測機器（以下「モニタリングポスト」という。）が多数設置・運用されている。連続モニタは、検出器及び演算処理部が建屋等に強固に固定されていることが多く、装置を取り外して校正施設等で校正することが困難である。また、連続測定が義務づけられている場合もあることから、欠測期間を最小限にできる現地校正が行われている。

しかしながら、東京電力福島第一原子力発電所事故以降、福島県内を中心に多くの連続モニタが配置されているが、一部の地域では、校正に用いる照射線量に対して無視できないレベルのバックグラウンド線量が存在し、現地校正を容易に行うことができない状況にある。このため高バックグラウンド線量下における現地校正技術の開発が喫緊の課題となっている。

本研究では、既存の校正手法では不得意な高バックグラウンド線量下においても精度よく校正を行うため、散乱線を低減させるためのコリメータ及び簡易遮へいを組み合わせた現地校正手法を確立し、高バックグラウンド線量下に設置している連続モニタ測定値の品質を適切に維持するための手法を構築することを目的とする。さらに、本校正手法は、コリメータを用いて散乱線を抑制できるため、現行広く行われている既存の校正手法では見積もることができない校正における不確かさを評価できる可能性がある。本研究では、校正における不確かさの評価手法についても合わせて検討する。

1-2 研究の目的

現在、我が国では原子力施設を中心に環境の放射線量を連続的に測定するためのモニタリングポストに代表される連続モニタが多数設置・運用されている。

我が国における連続モニタの測定値の品質を保証するための取り組みについては、原子力規制委員会が開催している「環境放射線モニタリング技術検討チーム」の第5回会合において議論され、「平常時モニタリングについて（原子力災害対策指針補足参考資料）」の中に取りまとめられている。当該資料では、「モニタリングポスト等による空間放射線量率の測定に関しては、測定器について定期的な校正又は確認校正により健全性を確認する必要がある。」とされ、連続モニタの測定値の品質の保証には、定期的な校正が必須であることが明記されている。

我が国における連続モニタは、検出器及び演算処理部が建屋等に強固に固定されていることが多く、装置を取り外して校正施設等で校正することが困難である。また、連続測定が義務づけられている場合もあることから、欠測期間を最小限にできる現地校正が行われて

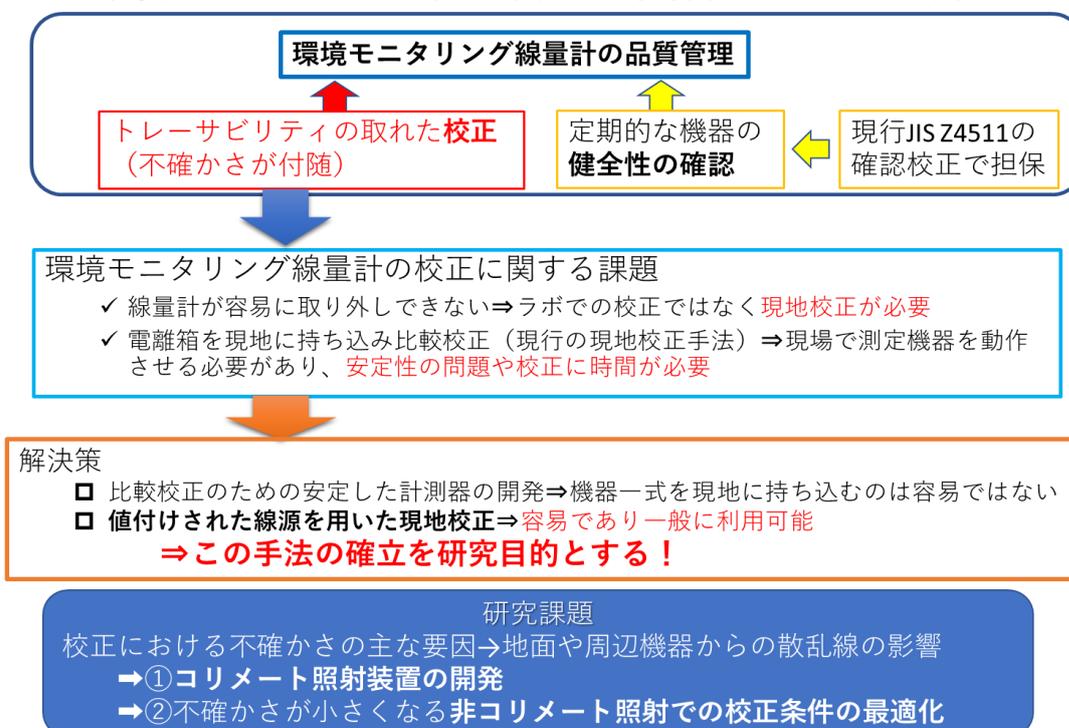
いる。

一方、東京電力福島第一原子力発電所事故以降、福島県内を中心に多くの連続モニタが配置されているが、一部の地域では、校正に用いる照射線量に対して無視できないレベルのバックグラウンド線量が存在し、現地校正を容易に行うことができない状況にある。しかしながら、この課題を解決するための系統的な研究はなされていないのが現状である。このため高バックグラウンド線量下における現地校正技術の開発が喫緊の課題となっている。

本研究では、既存の校正手法では不得意な高バックグラウンド線量下においても精度よく校正を行うため、散乱線を低減させるためのコリメータ及び簡易遮へいを組み合わせた現地校正手法を確立することを目的とする。さらに本校正手法は、コリメート照射による校正となっており、モニタリングポストの周辺機器からの散乱線を無視できる程度に低減することが可能である。線量率が付与された線源を用いる既存の校正手法では、周辺機器からの散乱線の影響があり、またこれらの影響の度合いも周辺機器の配置に大きく依存してしまう。このため、従来手法では校正の不確かさ評価が非常に困難であるが、本手法は周辺機器の配置に依存せず不確かさ評価が可能である。このため、校正における不確かさの評価手法及びその妥当性についても合わせて検討する。

H30 年度では、高バックグラウンド線量下において現地校正できるよう、既存の照射装置を改良し、下方向に向けたコリメート照射装置を開発した。本手法と基準電離箱による現地校正手法との比較を行い、その妥当性を確認した。

環境モニタリング線量計の品質管理に関する課題



環境モニタリング線量計の品質管理に関する課題点と本研究の位置づけ

令和元年度では、校正手法の妥当性確認のために、照射装置及び可搬型モニタリングポストを福島県内の高バックグラウンド地域に持ち込み校正を行い、従来手法での校正結果と比較を行う。また現地にすでに設置されているモニタリングポストについて、本手法による校正を行う。

2 高線量地域（福島県内）での実証実験地点の選定及びその光子スペクトルについて

（本章は、平成 30 年度調査に対する報告内容である）

2-1 高線量地域の実証実験のための MP の選定

福島県内に設置されている約 4000 基の MP について、高線量地域に設置されている線量計の選定（抽出）を行った。また、現地校正が可能な線量計の選定を行った。選定（抽出）は原子力規制委員会ホームページ“放射線モニタリング情報”により検索した。選定（抽出）した結果を表 1 に示す。なお、高線量地域は、 $1\mu\text{Sv/h}$ ($=1\mu\text{Gy/h}$) 以上とした。

表 1 福島県内の高線量地域（ $1\mu\text{Sv/h}$ 以上）に設置されている MP

市町村	設置場所	線量率	単位	ポスト種類
浪江町	小丸多目的集会所	8.37	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	やすらぎ荘<平成25年12月に新規設置>	7.37	$\mu\text{Sv/h}$	○
浪江町	大柿簡易郵便局（葛尾村営バス停脇）	4.442	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	昼曾根屯所	3.948	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	南津島下冷田 2（環境省設置）	3.708	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	福島県立浪江高等学校津島校	3.587	$\mu\text{Sv/h}$	○
浪江町	大字下津島字大和久地内<平成25年12月に新規設置>	3.43	$\mu\text{Sv/h}$	○
浪江町	陶芸の杜おおぼり	3.43	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	赤字木字白石森地内（環境省設置）	3.243	$\mu\text{Sv/h}$	○
浪江町	手七郎集会所	2.956	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	葛久保集会所	2.928	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	賀老集会所	2.692	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	南津島下冷田 1（環境省設置）	2.595	$\mu\text{Sv/h}$	◇
浪江町	赤字木集会所	2.529	$\mu\text{Sv/h}$	◇

浪江町	室原上組集会所<平成25年12月に新規設置>	2.309	μ Sv/h	○
浪江町	南下コミュニティーセンター	2.12	μ Sv/h	◇
浪江町	南津島上集会所<平成25年12月に新規設置>	1.895	μ Sv/h	○
浪江町	末森集会所<平成25年12月に新規設置>	1.808	μ Sv/h	○
浪江町	下津島集会所<平成25年12月に新規設置>	1.604	μ Sv/h	○
浪江町	室原公民館	1.568	μ Sv/h	◇
浪江町	赤字木字白追地内（環境省設置）	1.547	μ Sv/h	○
浪江町	浪江町立津島小学校	1.492	μ Sv/h	○
浪江町	室原北向集会所<平成25年12月に新規設置>	1.35	μ Sv/h	○
浪江町	酒井集会所	1.288	μ Sv/h	◇
浪江町	南津島広谷地（環境省設置）	1.244	μ Sv/h	◇
浪江町	末森中継ポンプ場<平成25年12月に新規設置>	1.235	μ Sv/h	○
浪江町	南津島局	1.106	μ Sv/h	■
富岡町	国道6号線富岡町新夜ノ森地内	2.066	μ Sv/h	○
富岡町	夜の森つつみ公園<平成25年12月に新規設置>	2.035	μ Sv/h	○
富岡町	小良ヶ浜多目的運動広場<平成25年12月に新規設置>	1.751	μ Sv/h	○
富岡町	桜2丁目公園<平成25年12月に新規設置>	1.732	μ Sv/h	○
富岡町	新田第三なかよし広場（福島県設置）	1.652	μ Sv/h	○
富岡町	小良ヶ浜多目的集会所	1.596	μ Sv/h	◇
富岡町	新田多目的集会所	1.342	μ Sv/h	■
飯館村	長泥字曲田地内（福島県設置）	1.853	μ Sv/h	○
飯館村	村道長泥曲田線（環境省設置）	1.787	μ Sv/h	○
飯館村	比曾字下比曾地内（福島県設置）	1.506	μ Sv/h	○
南相馬市	鉄山ダム	1.129	μ Sv/h	◇
大熊町	夫沢三区地区集会所	8.923	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町 夫沢	7.937	μ Sv/h	■
大熊町	小入野地区公民館	6.324	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町水産振興公社（福島県設置）	5.346	μ Sv/h	○
大熊町	大熊町 南台	5.294	μ Sv/h	■
大熊町	夫沢二区地区集会所	4.498	μ Sv/h	◇
大熊町	熊町小学校	4.329	μ Sv/h	◇
大熊町	小入野東平2（環境省設置）	4.233	μ Sv/h	○
大熊町	小入野東平1（環境省設置）	3.87	μ Sv/h	○

大熊町	下野上一区地区集会所	3.728	μ Sv/h	◇
大熊町	町区集落センター	3.541	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町保健センター<平成25年12月に新規設置>	2.92	μ Sv/h	○
大熊町	大熊町図書館<平成25年12月に新規設置>	2.627	μ Sv/h	○
大熊町	ふれあいパーク<平成25年12月に新規設置>	2.612	μ Sv/h	○
大熊町	大熊町スポーツセンター<平成25年12月に新規設置>	2.576	μ Sv/h	○
大熊町	野馬形地区集会所<平成25年12月に新規設置>	2.484	μ Sv/h	◇
大熊町	大和久区地区集会所<平成25年12月に新規設置>	2.28	μ Sv/h	◇
大熊町	国道6号線大熊町西大和久地内	2.203	μ Sv/h	○
大熊町	駅前地区集会所<平成25年12月に新規設置>	2.084	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町文化センター<平成25年12月に新規設置>	2.043	μ Sv/h	○
大熊町	大熊町保育所<平成25年12月に新規設置>	1.911	μ Sv/h	○
大熊町	旭台公園<平成25年12月に新規設置>	1.848	μ Sv/h	○
大熊町	下野上二区地区集会所<平成25年12月に新規設置>	1.818	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町 熊川	1.79	μ Sv/h	■
大熊町	大熊中学校	1.637	μ Sv/h	◇
大熊町	夫沢一区地区集会所	1.634	μ Sv/h	◇
大熊町	小入野東平3 (環境省設置)	1.494	μ Sv/h	○
大熊町	熊三区地区集会所<平成25年12月に新規設置>	1.4	μ Sv/h	◇
大熊町	熊川区地区集会所	1.395	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町 向畑	1.339	μ Sv/h	■
大熊町	野上二区地区集会所<平成25年12月に新規設置>	1.263	μ Sv/h	◇
大熊町	大熊町 大野	1.113	μ Sv/h	■
大熊町	野上一区地区集会所	1.05	μ Sv/h	◇
双葉町	谷沢町集会所 (福島県設置)	5.402	μ Sv/h	○
双葉町	JA双葉北部営農センター<平成25年12月に新規設置>	5.333	μ Sv/h	○
双葉町	双葉町 山田(山田農村広場)	4.578	μ Sv/h	■

双葉町	石熊公民館	1.95	μ Sv/h	◇
双葉町	双葉町青年婦人会館<平成25年12月に新規設置>	1.75	μ Sv/h	○
双葉町	双葉町 新山(双葉町体育館)	1.325	μ Sv/h	■
双葉町	双葉幼稚園<平成25年12月に新規設置>	1.323	μ Sv/h	○
葛尾村	木取場入口バス停付近(福島県設置)	3.122	μ Sv/h	○
葛尾村	野行集会所近傍<平成25年12月に新規設置>	1.789	μ Sv/h	○
葛尾村	葛尾村柏原地区	1.709	μ Sv/h	◇

○：リアルタイム線量測定システム ◇：可搬型モニタリングポスト ■：固定型モニタリングポスト

注) 原子力規制委員会ホームページ “放射線モニタリング情報”により検索した結果。

検索は平成 30 年 9 月 4 日 0:00 のデータを用いた(富岡町 南津島局は平成 30 年 9 月 5 日 0:00 の測定データ)。

検索した時間において、機器調整等による調整中が行われていた測定地点のデータは含まれていない。

原子力規制委員会ホームページ“放射線モニタリング情報”により検索した結果、 1μ Sv/h 以上の測定場所は、平成 30 年 9 月 4 日 0:00 現在 81 地点であった。最も高い測定値を示している場所は、大熊町の夫沢三区地区集会所の 8.9μ Sv/h、次いで浪江町の小丸多目的集会所の 8.4μ Sv/h であった。市町村別では、浪江町が 27 場所、富岡町が 7 場所、南相馬市が 1 場所、大熊町が 33 場所、双葉町が 7 場所、飯館村が 3 場所、葛尾村が 3 場所であった。ポストの種類別では、固定型モニタリングポストが 9 場所、可搬型モニタリングポストが 34 場所、リアルタイム線量計システムが 38 場所であった。

1μ Sv/h 以上の高線量地域の 34 場所に設置されている主な可搬型モニタリングポストについて、特徴を表 2 に示す。また、設置場所で採寸した可搬型モニタリングポストを図 1 及び 2 に示す。

表 2 高線量地域に設置されている主な可搬型モニタリングポストの特徴

設置場所		線量率 (μ Sv/h)	特徴			
			A	B	C	D
浪江町	小丸多目的集会所	8.37	無	有 約 1m	上	NaI/ 半導体型
大熊町	夫沢二区地区集会所	4.50				
浪江町	大柿簡易郵便局	4.44				

	(葛尾村営バス停脇)					
大熊町	熊町小学校	4.33				
浪江町	昼曾根屯所	3.95				
浪江町	手七郎集会所	2.96				
浪江町	賀老集会所	2.69				
浪江町	赤宇木集会所	2.53				
双葉町	石熊公民館	1.95	有	※	横	半導体型
葛尾村	葛尾村柏原地区	1.71		無		
大熊町	野上一区地区集会所	1.05	無	有 約 1m	上	NaI/ 半導体型

A：フェンスの設置

B：ソーラーパネル等、線源照射に影響の可能性がある検出器上部の付属物の有無
(表中の数字は検出器と付属物の距離)

※双葉町石熊公民館は検出器の横方向に線源を設置する際に、線源の設置位置によりフェンスが影響

C：校正時の検出器に対する線源設置方向

上：検出器の軸に対して垂直方向

横：検出器の軸に対して水平方向

D：検出器（富士電機製（原子力規制庁所有））

注）線量率は原子力規制委員会ホームページ“放射線モニタリング情報”により検索した結果である。検索は平成30年9月4日0:00のデータを用いた。

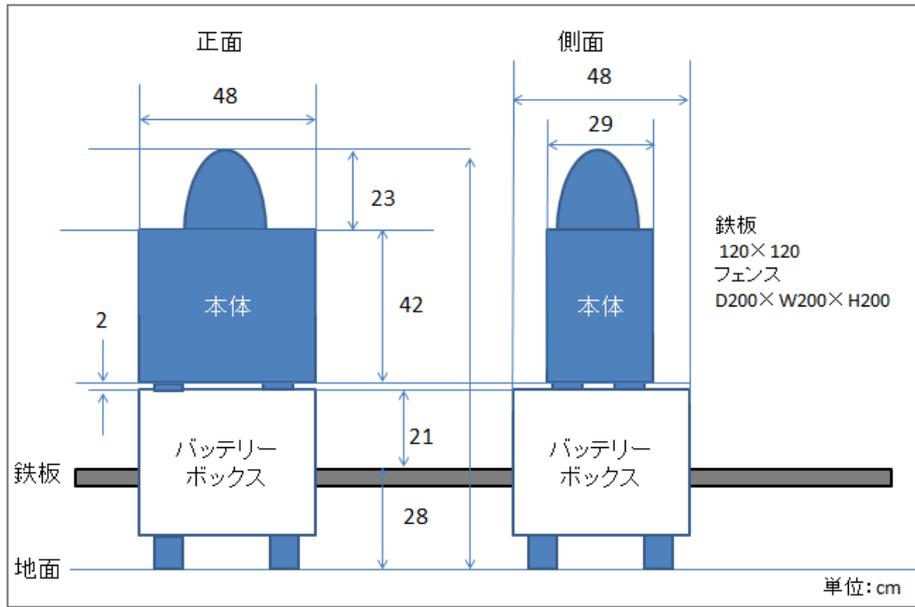


図1 設置場所で採寸した可搬型モニタリングポストの寸法(富士電機製 半導体型)

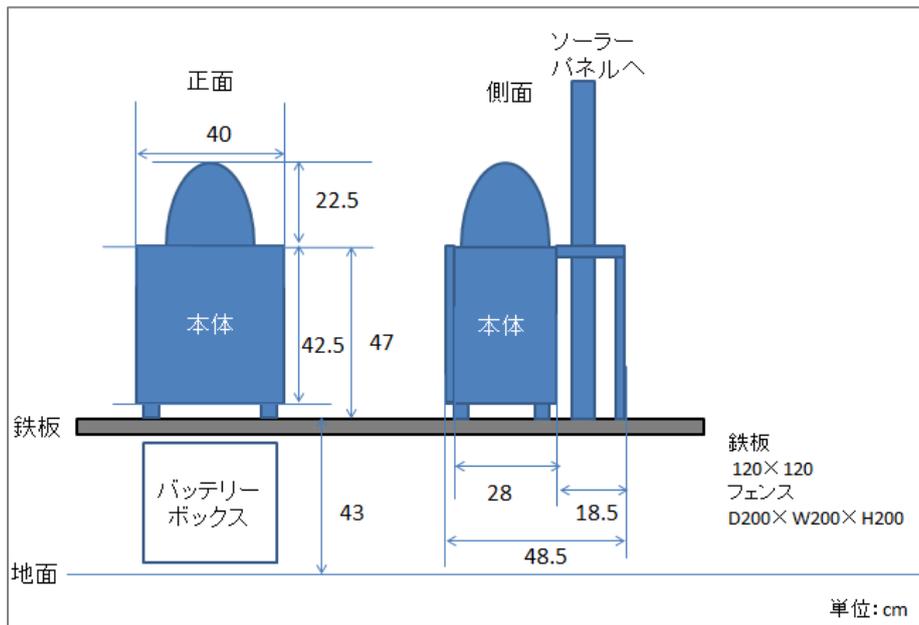


図2 設置場所で採寸した可搬型モニタリングポストの寸法

(富士電機製 NaI/半導体型)

2-2 高バックグラウンド地域に設置されているモニタリングポストの選定

1 $\mu\text{Sv/h}$ 以上の線量率となっているモニタリングポストを2か所選定し、線量率測定、スペクトル測定、遮へい効果の検証を行った。調査を行った地点は以下の通りである。

- ・福島県双葉郡双葉町

同町内の石熊公民館敷地内に設置されている可搬型モニタリングポスト（図3）

- ・福島県双葉郡大熊町

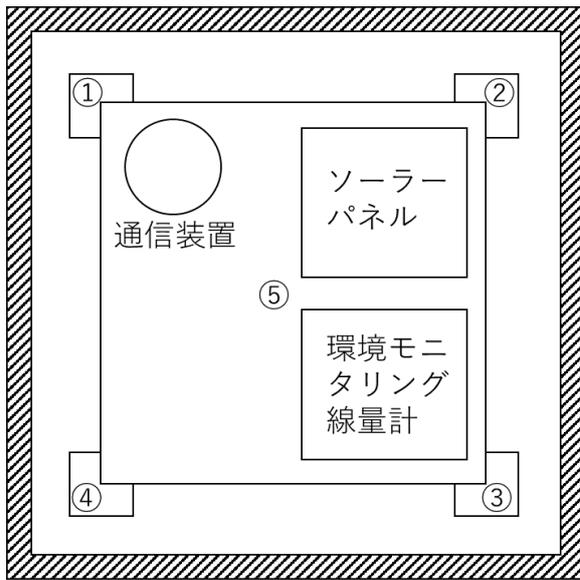
同町内の夫沢二区地区集会所敷地内に設置されている可搬型モニタリングポスト（図4）

2-3 サーベイメータによるモニタリングポスト周辺の線量率分布

（1）双葉町モニタリングポスト



図3 調査を行った双葉町に設置されている可搬型モニタリングポスト



※斜線部はフェンス

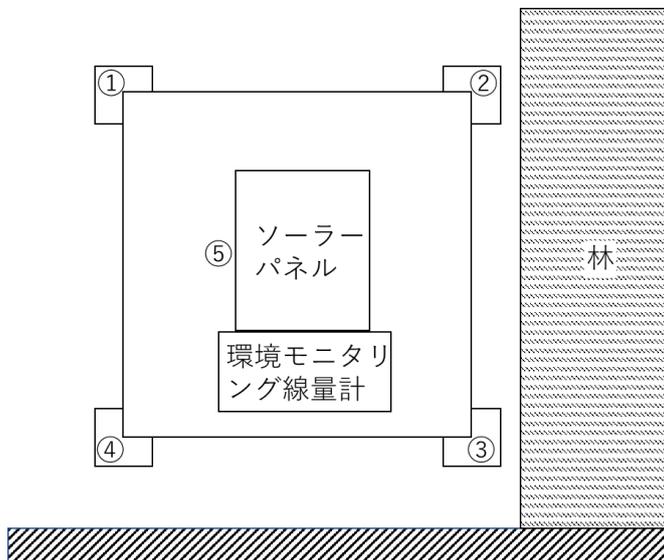
- ① 2.28 $\mu\text{Sv/h}$
- ② 2.24 $\mu\text{Sv/h}$
- ③ 2.28 $\mu\text{Sv/h}$
- ④ 2.37 $\mu\text{Sv/h}$
- ⑤ 1.97 $\mu\text{Sv/h}$

- ・ 中心では鉄板の影響のせいか、線量率が減少。地面付近で線量率が高い。
- ・ モニタリング装置とソーラーパネル間の距離は約 50 cm

(2) 大熊町モニタリングポスト



図4 調査を行った大熊町に設置されている可搬型モニタリングポスト



- ① 4.72 $\mu\text{Sv/h}$
- ② 5.57 $\mu\text{Sv/h}$
- ③ 5.32 $\mu\text{Sv/h}$
- ④ 4.24 $\mu\text{Sv/h}$
- ⑤ 4.50 $\mu\text{Sv/h}$

- ・ 駐車場（アスファルト上）に設置されたモニタリングポスト
- ・ 土の多い林に近いほど線量率が上昇

2か所のモニタリングポスト周辺はまだ除染が行われておらず、周辺の地形や設置されている地面の状況により、線量率に大きな分布があることが分かった。

2-4 スペクトル測定

それぞれのモニタリングポストそばで、CdZnTe 検出器によるスペクトル測定を行った。測定された波高分布データと応答関数をもとに、アンフォールディングにより光子スペクトルを求めた。(図 5、6)

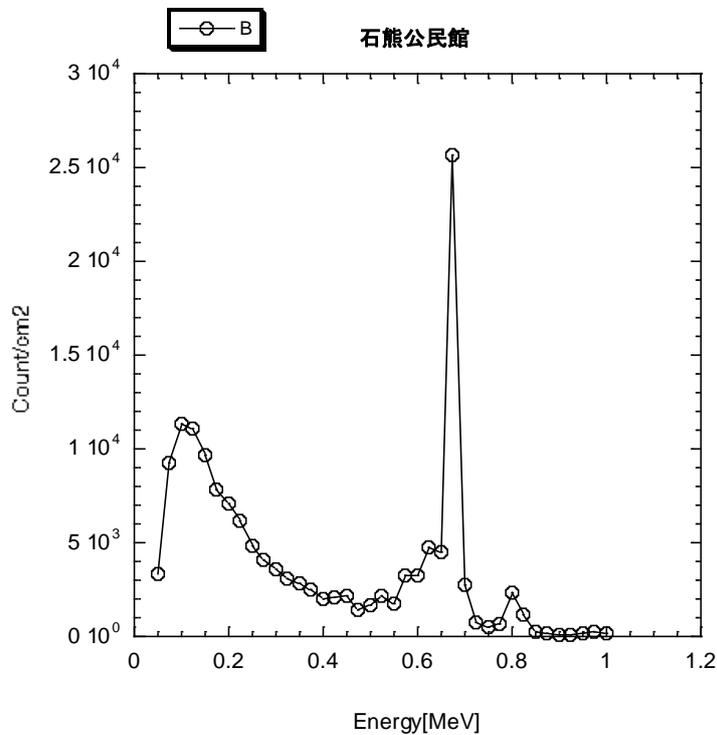


図 5 双葉町に設置されている可搬型モニタリングポスト付近の光子スペクトル

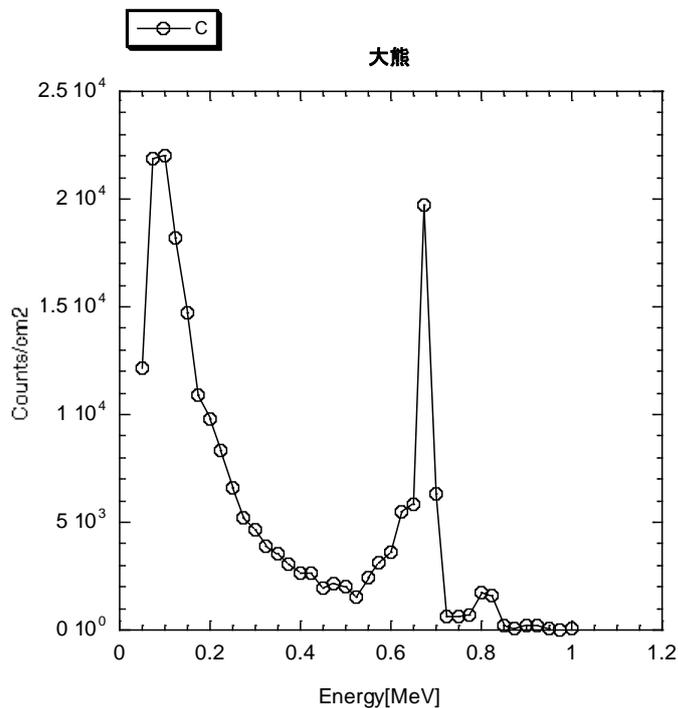


図6 大熊町に設置されている可搬型モニタリングポスト付近の光子スペクトル

両者のスペクトルを見て明らかなように、Cs-137からの0.6 MeVガンマ線のピークが確認された。また0.8 MeV付近にも小さなピークが確認され、Cs-134が存在していることが分かった。研究代表者が以前から行っている福島県内のスペクトル測定の結果からも同様のスペクトルデータが得られており、これは未除染で測定位置のすぐそばに放射性物質が沈着していることを意味している。また双葉町と大熊町のスペクトルを比較すると、大熊町の散乱線成分が多いことが分かった。双葉町のモニタリングポストは広い平地に設置されていたが、大熊町はモニタリングポストのすぐ脇に林があり、サーベイメータの計測でも林の中の線量が大きく、放射性物質が多く沈着していることが確認できた。大熊町でのこの散乱線成分が多いのは、この隣接する林から飛来しているためだと推測される。

2-5 遮へいの効果について

CdZnTe 検出器の周りに銅板を配置し、どれくらい線量率が減少するか検討を行った。以下に測定時の写真を示す。

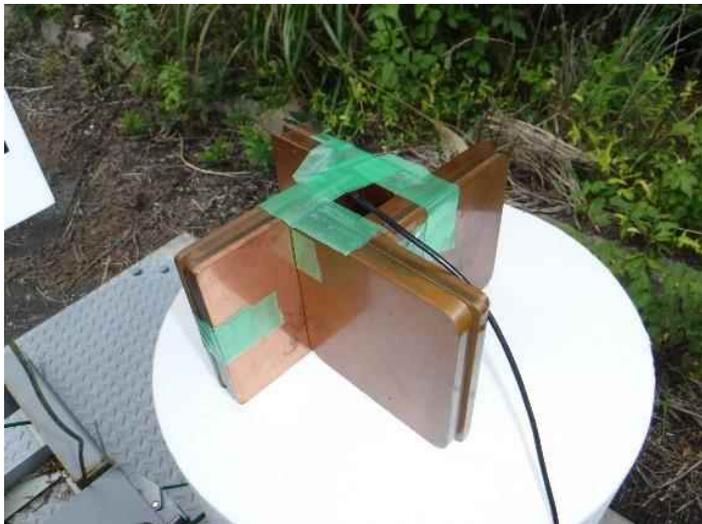


図7 側面4方向を遮へいした場合



図8 下方向及び屋根による側面2方向、上方方向を遮へいした場合



図9 下方向のみを遮へいした場合

以下に測定された線量率及び減少率を表3,4に示す。

表3 石熊公民館での測定結果

遮へいなし	下のみ Cu19mm	屋根のみ 19mm	屋根+下 19mm	側面 19mm
1.88 $\mu\text{Sv/h}$	1.01 $\mu\text{Sv/h}$	1.30 $\mu\text{Sv/h}$	0.7 $\mu\text{Sv/h}$	0.59 $\mu\text{Sv/h}$
減少率	0.54	0.69	0.37	0.31

表4 大熊町での測定結果

遮へいなし	下のみ Cu19mm	屋根のみ 19mm	屋根+下 19mm	側面 19mm
3.85 $\mu\text{Sv/h}$	3.16 $\mu\text{Sv/h}$	3.33 $\mu\text{Sv/h}$	1.92 $\mu\text{Sv/h}$	1.49 $\mu\text{Sv/h}$
減少率	0.82	0.86	0.50	0.39

減少率から、Cs-137 の 662keV ガンマ線の減弱係数とほぼ同じであることが分かった。Pbを遮へい体とした場合、厚さ 10mm で Cu20mm と同等の遮へい効果となり、Pb20mmであれば、減弱率が0.3から0.1となる。ただしこれは理想的に検出器周りを覆った場合で、実際のモニタリングポストを考えると、検出器の上部に保護用のケースがあることから、検出器と遮へい体の間に空間が生じ、遮へい効果が低下することが想定される。

この測定結果から、鉛の遮へい体を 20 mm 厚とすることとした。

3 コリメート照射装置及びモニタリングポスト遮へい体の製作

高バックグラウンド地域に多く設置されているモニタリングポストは、可搬型モニタリングポストを固定して使用されている。これらのモニタリングポストを製作している主要なメーカーに問い合わせしたところ、顧客からの特段の要請がない限り、上方からの照射による校正を行っているという回答を得た。そこで本研究でも、上方から照射する方法で校正が行える装置の開発を行った。

3-1 照射装置及び遮へい体の製作

図 10 に、設計した照射装置及び遮へい体の設計図を示す。地上に広範囲に放射性物質が沈着している状況では横方向から来る直接線や散乱線が多いことが推測できたことから、遮へい体をなるべく検出器周りに近い位置に配置できるように設計している。これにより、遮へい体の容積を最小とすることができ軽量化を図っている。鉛のリングを重ねる形となっており、リングの厚さは 20 mm である。リングの重量は 1 個約 2 kg となっており、リングを 5 個重ねて使用する。線源部分は、下方向に照射できるよう、コリメータ付きの照射装置となっている。また線源周りも周囲からの散乱線低減のため線源部分を遮へいしている。コリメータ部分の重量は、約 10 kg である。このコリメータ部分は、レーザー距離計と入れ替えることが可能となっており、これにより線源からモニタリングポストまでの距離を精度よく計測することが可能となっている。

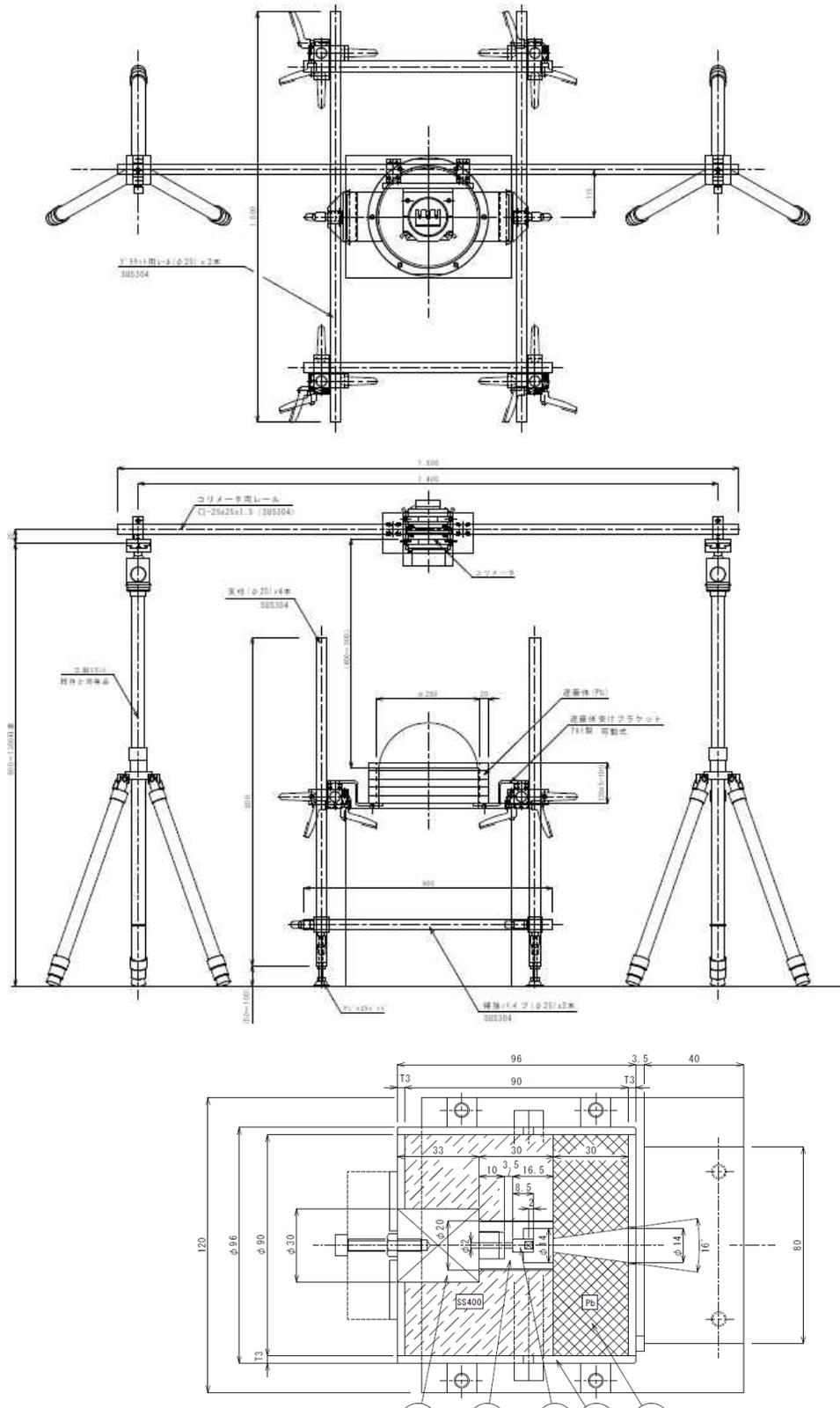


図 10 下方向照射装置及びモニタリングポスト遮へい体の設計図（上、中）と、コリメート照射部の設計図（下）

3-2 照射装置の線量率の決定

現地校正において、線源と検出器の距離合わせが最も時間を要する作業となる。そこで本研究では、実験室内において複数の線源間距離における線量率を実測により求め、この値を内挿することにより、任意の距離における線量率を求められる方法を採用した。これにより、任意の距離で校正が行えることから、セットアップの時間を大幅に短縮することが可能となった。図 11 に測定した各距離における線量率を示す。

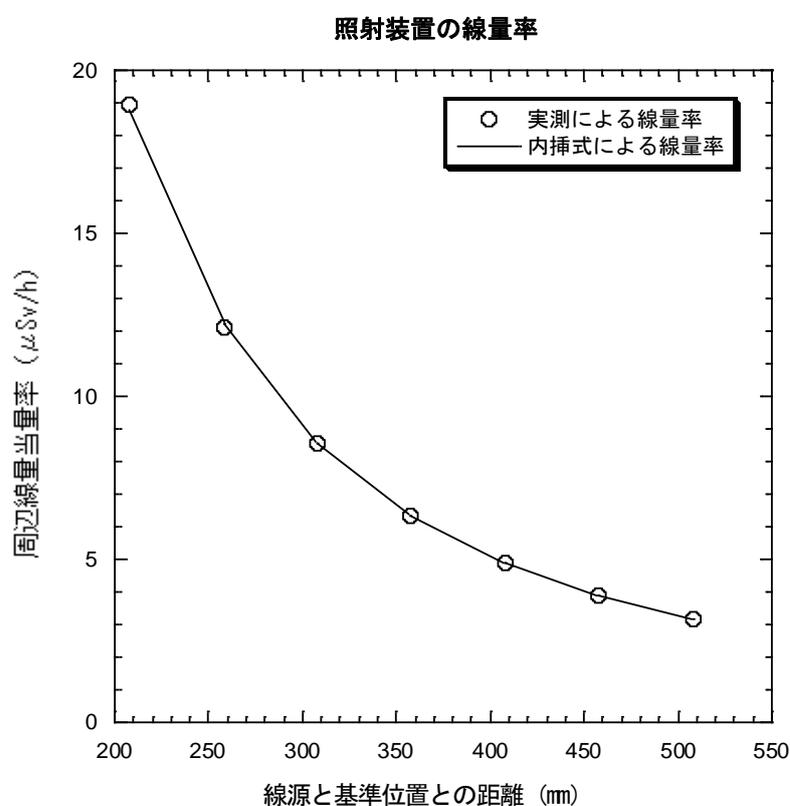


図 11 線源と各評価点における線量率の変化と、逆二乗によるフィッティングの結果。内挿式により任意の距離の線量率を決定することができることから、照射装置のセットアップの大幅な時間短縮が可能となった。

4 従来手法との比較

日本分析センターでは、基準電離箱を現地に持ち込み、比較測定を行うことによりモニタリングポストの現地校正を行っている。そこでこの従来の手法と、今回開発した手法との比較を行った。なお、現在の環境放射線モニタリングは「周辺線量当量 (Sv)」で評価することとなっているが、一部測定器では「空気吸収線量 (Gy)」で測定されている機器もある。4章以降では空気吸収線量を示す機器を対象としていることから、空気吸収線量の表記である Gy で示している。

4-1 日本分析センターによる現地校正結果

(1) 比較正器

屋外(受託事業者敷地内)に受託者が所有する被校正器を設置し、検出器の中心位置から1.5mの距離でCs-137の γ 線源を約 $1\mu\text{Gy/h}$ の線量率で照射し、1分間隔で10回の繰り返し測定を行った。 γ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を γ 線源と同様の時間及び回数で行った。10回の測定値から平均値を求め、 γ 線源の平均値からバックグラウンドの平均値を差し引き正味の値を求めて被校正器の値とした。被校正器の仕様を表5に示す。

表5 被校正器の仕様

品名	可搬型モニタリングポスト
メーカー	富士電機株式会社
型式	NAJ51001-01 型
検出器	2inch ϕ × 2inch NaI(Tl)検出器 ワイドレンジタイプ
測定線量率範囲	10nGy/h～100mGy/h

(2) 実用標準

被校正器の近傍に国家標準とトレーサビリティのとれた実用標準(基準電離箱線量計)を設置し、被校正器と同一に検出器中心位置から1.5mの距離でCs-137の γ 線源を約 $1\mu\text{Gy/h}$ の線量率で照射し、200秒間隔で5回の繰り返し測定を行った。 γ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を γ 線源と同様の時間及び回数で行った。繰り返しの測定値から平均値を求め、 γ 線源の平均値からバックグラウンドの平均値を差し引き正味の値を求めて校正定数(二次標準から供給)を乗じ、空気密度補正を行い、基準の値とした。実用標準(基準電離箱線量計)の仕様を表6に示す。

表 6 実用標準（基準電離箱線量計）の仕様

品名	空気等価電離箱線量計
メーカー	株式会社ネスコ
型式	808-MR20 STD/V 型
検出器	フェノール樹脂製 21L 円筒形
測定線量率範囲	バックグラウンド～200 μ Gy/h

現地校正の様子を図 10 及び図 11 に示す。

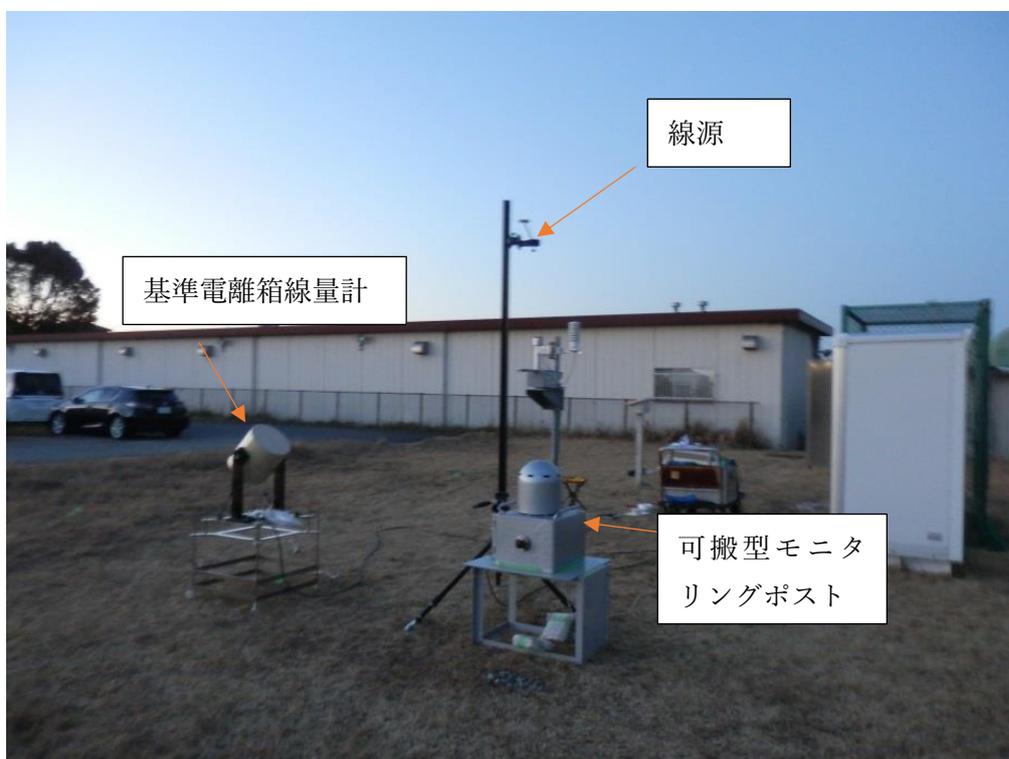


図 10 比較正器への照射風景



図 11 基準電離箱への照射風景

4-2 本研究による現地校正手法

現地校正手法による校正を行った場所において同じ被校正器（受託者所有）を用いて、産総研開発手法による校正が行われた。産総研により行われた校正の概要を以下に示す。

検出器上方にコリメート照射装置をセットし、検出器の中心が照射軸上になるよう位置調整を行った。コリメート照射装置に Cs-137 の γ 線源を取り付け、検出器の中心位置から約 0.4m の距離（距離は任意で設定）で約 $4\mu\text{Gy/h}$ の線量率で照射し、1 分間隔で 10 回の繰り返し測定を行った。 γ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を γ 線源と同様の時間及び回数で行った。10 回の測定値から平均値を求め、 γ 線源の平均値からバックグラウンドの平均値を差し引き正味の値を求めて被校正器の値とした。

照射時の線量率は、図 10 に示したように予め実測から求めた逆二乗のフィッティング式により今回校正を行った距離における線量率を算出して基準値とした。

なお、コリメート照射装置及び γ 線源は産総研が持参したものである。校正の様子を図 12 に示す。



図 12 本研究で開発した照射装置による校正風景

4-3 校正結果の比較

(1) 日本分析センターによる基準電離箱線量計を用いた校正結果

日本分析センターによる基準電離箱を用いた現地校正手法による校正結果を表 7 に示す。

表 7 日本分析センターによる基準電離箱を用いた現地校正手法による校正の結果

核種	γ 線エネルギー (keV)	校正距離 (m)	線量率 (μ Gy/h)	校正定数	不確かさ* (%)
Cs-137	660	1.5	0.84	1.03	6.7

*校正の不確かさは、拡張不確かさ(k=2)を表す。

拡張不確かさは、ISO 国際文書”Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (1995)” (「計測における不確かさの表現ガイド」)に基づき、合成標準不確かさと包含係数 k=2 とから決定されたもので、約 95%の信頼の水準を持つと推定される区間を定めたものである。

(2) 本研究手法による校正結果

産総研開発手法による校正の結果を表 8 に示す。なお日本分析センターの校正では、モニタリングポスト周辺を遮へいすることは行っていないため、本研究による校正もモニタリングポストの検出器周りの遮へい体はない状態とした。

表 8 産総研開発手法による校正の結果

核種	γ 線エネルギー (keV)	校正距離 (m)	線量率 (μ Gy/h)	校正定数
Cs-137	660	0.43	3.5	1.01

日本分析センターの現地校正手法による校正定数は 1.03、同じ被校正器に対して校正を行った産総研開発手法による校正定数は 1.01 であった。日本分析センターの現地校正手法による校正定数を基準にして産総研開発手法による校正定数を比較した結果は、0.98(−2%) であり±3%以内で一致した結果であった。

また本手法によるモニタリングポストの検出器周りの遮へい体の有無による校正結果の影響についても検証を行った。結果を表 9 に示す。

表 9 遮へい体の有無による校正結果の比較

校正手法	本研究での校正結果 (遮へい体なし)	本研究での校正結果 (遮へい体あり)
校正定数 (空気吸収線量)	1.01	1.03

2%程度の違いが見られたが、本校正手法の相対標準不確かさはおよそ 3%程度あると考えられることから、不確かさの範囲内で一致していることが確認できた。

5. 高線量地域での実証実験

5.1. 従来の現地校正手法による校正結果との比較

高線量域で本研究による校正の妥当性確認のため、従来手法による校正結果との比較を行った。比較のため、事前に日本分析センターにおいて基準電離箱を用いた従来手法による校正を行った。

1) 被校正器

屋外に被校正器を設置し、令和元年9月24日(火)に従来の現地校正手法による校正試験を実施した。被校正器の仕様を表10に示した。検出器の中心位置から鉛直方向に1.5mの距離でCs-137の γ 線源を約 $1\mu\text{Gy/h}$ の線量率で照射し、測定時間1分間で10回の繰り返し測定を行った。 γ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を同条件で行った。 γ 線源の10回の測定値から平均値を求め、バックグラウンドの平均値を差し引いた正味値を、被校正器の測定値とした。

表10 被校正器の仕様

品名	可搬型モニタリングポスト
メーカー	富士電機株式会社
型式	NAJ51001-01 型
検出器	2inch ϕ \times 2inch NaI(Tl)検出器 ワイドレンジタイプ
測定線量率範囲	10nGy/h \sim 100mGy/h

2) 実用標準

被校正器の近傍に国家標準とトレーサビリティのとれた実用標準(基準電離箱線量計)を設置し、校正試験を実施した。実用標準の仕様を表11に示した。被校正器と同条件の検出器の中心から1.5mの距離でCs-137の γ 線源で照射し、測定時間200秒間で5回の繰り返し測定を行った。 γ 線源を撤去し、バックグラウンドの測定を同条件で行った。 γ 線源の5回の測定値から平均値を求め、バックグラウンドの平均値を差し引いた正味値に校正定数(二次標準から供給)を乗じ、空気密度補正を行って基準の値とした。

表 11 実用標準の仕様

品名	空気等価電離箱線量計
メーカー	株式会社ネスコ
型式	808-MR20 STD/V 型
検出器	フェノール樹脂製 21L 円筒形
測定線量率範囲	バックグラウンド～200 μ Gy/h

3) 従来の現地校正手法による校正試験

従来の現地校正手法による校正試験結果を表 12 に示した。

表 12 従来の現地校正手法による校正試験結果

核種	γ 線エネルギー — (keV)	校正距離 (m)	線量率 (μ Gy/h)	校正定数	不確かさ* (%)
Cs-137	660	1.5	0.83	1.06	7.5

*校正の不確かさは、拡張不確かさ(k=2)を表す。

拡張不確かさは、ISO 国際文書“Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (1995)”（「計測における不確かさの表現ガイド」）に基づき、合成標準不確かさと包含係数 k=2 から決定されたもので、約 95%の信頼の水準を持つと推定される区間を定めたものである。

4) 高線量地域における本手法による校正結果

図 13 に示したように、双葉町及び大熊町において持ち込んだ可搬型モニタリングポストに対して校正を行った。校正結果を表 13 に示す。



図 13 双葉町（左）及び大熊町（右）での可搬型モニタリングポストに対する校正風景

表 13 可搬型モニタリングポストの福島県内における校正結果。照射時正味指示値は、バックグラウンドを差し引いた値である。

校正実施 地点	遮へいなし BG ($\mu\text{Gy/h}$)	遮へいあり BG ($\mu\text{Gy/h}$)	遮へい効 果(%)	照射時正味指示 値($\mu\text{Gy/h}$)	照射線量 ($\mu\text{Gy/h}$)	校正定 数
双葉町	2.81	1.50	53	3.93	4.18	1.06
大熊町	3.74	1.72	46	6.93	7.43	1.07

事前の校正結果と比較して1%以内で一致しており、高バックグラウンド環境下においても本校正手法が妥当であることを確認することができた。

5.2 現地に設置されているモニタリングポストの校正結果

前述した2か所に設置されているモニタリングポストに対して、本手法による校正を行った。(図 14) 校正結果を表 14 に示す。



図 14 双葉町（左）及び大熊町（右）における設置されているモニタリングポストに対する校正風景

表 14 双葉町及び大熊町に設置されているモニタリングポストの校正結果。照射時正味指示値は、バックグラウンドを差し引いた値である。

校正実施地点	遮へいなし BG ($\mu\text{Gy/h}$)	遮へいあり BG ($\mu\text{Gy/h}$)	遮へい効果 (%)	照射時正味指示 値 ($\mu\text{Gy/h}$)	照射線量 ($\mu\text{Gy/h}$)	校正定数
双葉町	1.61	0.72	45	2.24	2.44	1.09
大熊町	3.45	1.55	45	5.59	4.75	0.85

検出器部分を覆うように鉛のリングを遮へい体として設置しているが、バックグラウンドを約 55 %低減することが確認できた。また校正結果については、2 地点における傾向が異なることが確認できた。

実証実験を行った後まもなくメーカーによる点検が行われ、その結果を表 15 に示す。

表 15 メーカー点検による基準線量率との違い

設置場所	点検実施日	核種	線量率 ($\mu\text{Gy/h}$)	誤差 (%)
双葉町	令和元年 10 月 10 日	Cs-137	2.7	-8.1
大熊町	令和元年 10 月 16 日		2.7	+6.7

上記の表で示している値は、基準となる線量を照射した際に、基準値に対して指示値が示すずれの割合を示している。すなわち、双葉町では基準値よりも小さい値を、大熊町では基準値よりも大きな値を示していたことになる。本研究での校正結果についても、同様の傾向を示していることが分かった。この点検では、照射している線量率が $2.7 \mu\text{Sv/h}$ と、通常のバックグラウンドである $3.45 \mu\text{Sv/h}$ よりも小さな線量で行っており、バックグラウンドのばらつきが大きく影響することが想定できる。それと比較して本手法では、検出器周りを遮へいしバックグラウンドを低減させていることから、照射時の線量率がバックグラウンドに対して大きく、安定した校正が行えると考えられる。

今回の現地校正の結果に対する不確かさを評価した。その結果を表 16 に示す。

表 16 本校正結果に対する不確かさ

不確かさの要因	相対標準不確かさ (%)
基準線量計校正	1.4
内挿による線量率の不確かさ	1.6
照射位置設定	1.9
不均一照射	0.6
BG および照射時のばらつき	0.4
相対標準不確かさ	2.9
相対拡張不確かさ ($k=2$)	5.9

相対拡張不確かさとして、6%という結果となった。日本分析センターで行っている現地校正の不確かさは 7.5% (表 12) であったことから、本手法によりより高精度の校正が実現可能であることが分かった。

5.3 本校正手法に関する考察

本手法では、モニタリングポストの検出器周辺を鉛リングで遮へいしバックグラウンドを低減することにより、より高精度の校正が可能となっている。遮へい効果であるが、バックグラウンドを約 55%低減できることが分かった。当初の見込みよりも遮へい効果が少なかったが、これはモニタリングポスト下の地面に沈着している放射性物質からの γ 線に対して遮へいされていないことに起因していると考えられる。よって、追加的にバックグラウンドを低減させる必要がある場合は、モニタリングポスト下部に鉄板等の遮へい物を設置す

ることが有効であると考えられる。

本手法による校正が適応できると考えられるバックグラウンドのレベルであるが、バックグラウンド増加による校正時の指示値のばらつきに影響を与えることになる。本手法で用いている遮へい体によるバックグラウンドの低減効果を55%、最終的な校正の不確かさの許容範囲を現在実施されている日本分析センターでの校正の拡張不確かさである7.5%と仮定する。この不確かさを実現するためには、遮へい時のバックグラウンド及び照射時の指示値に対する合成不確かさを2.4%程度に抑える必要がある。モニタリングポストに用いられている検出器の種類にも起因するが、ばらつきが大きいと考えられる半導体検出器で遮へいなしのバックグラウンド線量率が16 $\mu\text{Sv/h}$ 程度まで適応できることが分かった。NaI(Tl)検出器は、指示値のばらつきが小さく検出可能な上限である10 $\mu\text{Sv/h}$ や30 $\mu\text{Sv/h}$ の遮へいなしのバックグラウンド線量率まで適応可能である。半導体検出器に対しては、校正定数の拡張不確かさを10%とした場合、遮へいなしのバックグラウンド線量率30 $\mu\text{Sv/h}$ まで適応できる。

本手法はコリメート照射となっており、モニタリングポストの周辺機器等からの散乱線の影響、またその不確かさを評価する必要がないことから、より容易に校正が行える手法となっている。非コリメートの線源を用いた際の散乱線の影響をシミュレーションによって評価したが、照射時の線源強度や距離にも起因するが2%~10%程度影響があることが分かった。この影響を評価するにはシミュレーション技術や時間や手間がかかる実測が必要であることから、本校正手法が非常に有用であると考えられる。

6 本手法の校正手順及び不確かさの評価例

6.1 本手法による校正方法

(1) 照射システムの線量率の決定

校正に用いる前に、基準器による照射システムの線量率を実験室等で評価を行う。用いる基準器は、エネルギー特性が良く、また国家標準にトレーサブルな線量計を用いる。20 cm~60 cmの間で、異なる距離4点以上で線量率を測定し、距離の逆二乗でフィッティングを行い、以下の式の定数 $A(\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^2)$ を求める。

$$H = \frac{A}{d^2} \quad (1)$$

ここで H は距離 d cm における線量率 ($\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$) である。

これにより、校正時において任意の距離における線量率を求めることができる。(図 11)

または、1 m 位置等の離れた距離において国家標準にトレーサブルな線量計で線量率を決定し、(1) 式の逆二乗則で外挿を行うことも可能である。その際には、適応する距離内 (20

cm～60 cm) で線量計等を用いた実測を行い、(1) 式で評価した線量率と±5 %以内で一致していることを確認する。

(2) 現地での照射システムの設置

(a) 遮へいリングの設置

モニタリングポストのバックグラウンド低減のためのリング型の遮へい体を設置する。遮へい体は鉛で出来ており、そのままモニタリングポストに乗せるとポスト自体に負荷をかけ破損する恐れがあることから、遮へい体を乗せるための支持具を事前に設置する。(図 15) その上に遮へいのための鉛リングを重ねる。検出器部分を効率よく遮へいするために、モニタリングポストの検出器部分を覆う半円状のカバーの最も下の位置から遮へい体を積み重ねる。リングの厚さは 2 cm であり、6 個程度積み重ねて検出器部分の側面を遮へいする。

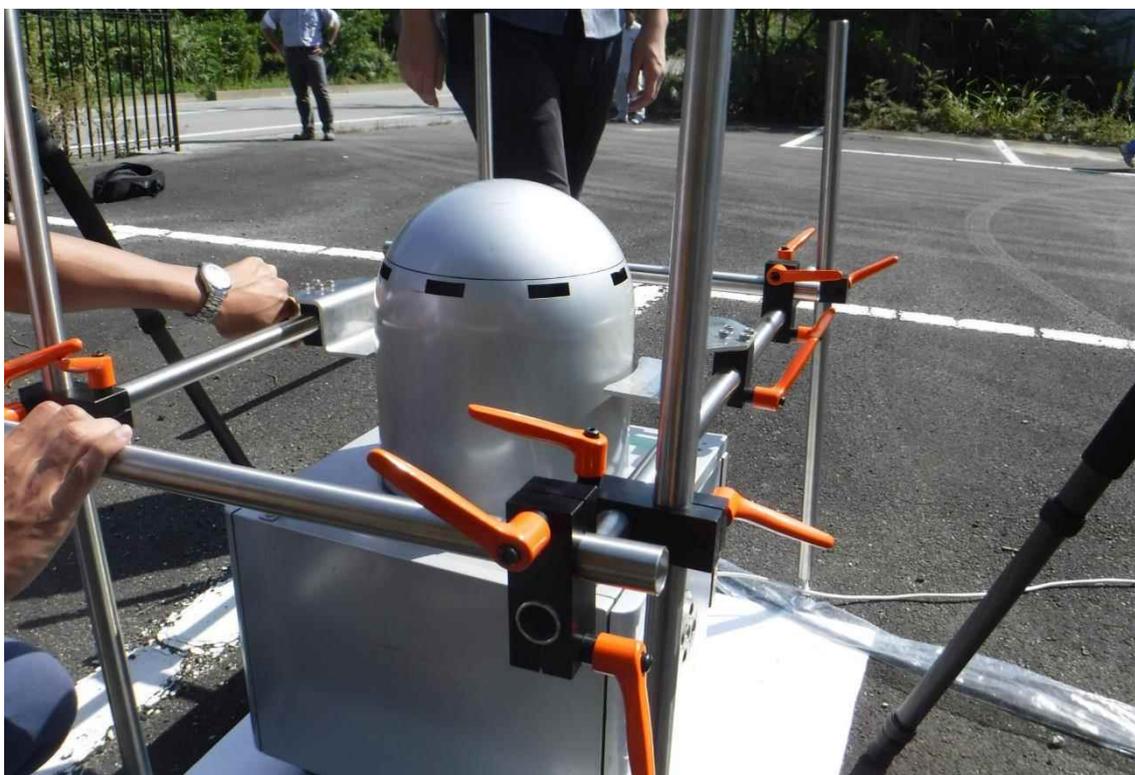


図 15 遮へい体設置のための支持具

(b) 照射部の設置

校正のための照射部をモニタリングポストの上部に設置する。(図 16) 照射距離を正確に合わせる必要はないが、大よそ 30 cm～50 cm の距離に入るよう照射部を支える三脚の高さを調整する。真下に照射することが重要であることから、水平器を用いて照射部の指示棒が水平となるよう調節する。



図 16 モニタリングポスト中心上に照射部を配置した写真

(c) 検出器への位置合わせ及び距離の測定

照射部にレーザー距離計をセットし、レーザーをモニタリングポストへ照射する。(図 17) レーザーのポイントがモニタリングポストの検出器中心に来るように、照射部の三脚等を調整する。中心に設置できたら、その時のレーザー距離計が示す距離を記録する。



図 17 レーザー距離計による照射位置の調整風景

(d) 線源コリメータのセット

レーザー距離計を外し、照射を行うための線源コリメータを照射部にセットする。(図 18)



図 18 線源コリメータ及び遮へい体を配置した風景

(3) バックグラウンド及び照射時の指示値の計測

校正用の線源をセットする前に、バックグラウンド線量率の計測を行う。10 回以上計測するのが望ましい。照射のための線源をセットし、同様に 10 回以上計測することが望ましい。またバックグラウンドや照射時において、モニタリングポスト周辺での人の作業も影響することから、バックグラウンド及び照射時の人の配置に変化がないように注意する。

(4) 校正定数の算出

レーザー距離計での距離 d_{aser} にモニタリングポストカバー表面から検出器の実効中心までの距離を加えて、校正時の線源—検出器間距離 d_{scd} を求める。カバーから検出器実効中心までは、現地での実測やメーカーからの設計図を参考に求める。この距離と基準の線量率を求めた日からの半減期補正を行うことによって、校正時における線量率を式(1)から求める。得られた線量率を指示値で除することによって、校正定数が求められる。

6.2 不確かさの評価

本手法による校正の不確かさは、以下の要因が考えられる。それぞれの要因に対する不確かさの評価例を示す。

(1) 基準線量計校正

基準線量率を求める際に用いる測定器の校正の不確かさを考慮する必要がある。校正証明書から、1.4%と見積もる。

$$u_{\text{sta}}=1.4 (\%)$$

(2) 内挿式の不確かさ

基準線量率は、距離の異なる複数点での線量率から、フィッティングによって得られた逆二乗則の式(1)から求めることになる。この式による線量率と、フィッティングの際に用いた測定値を比較し、最も大きくずれている点を最大幅として矩形分布として評価する。

実測値とのずれが最も大きい距離でのずれの割合が2.7%であった。そこで矩形分布を仮定して次式のように見積もる。

$$u_{\text{int}}=2.7/\sqrt{3}=1.6 (\%)$$

(3) 設定位置

レーザー距離計による距離の読み取りのばらつきと、モニタリングポストカバーから検出器実効中心までの距離のばらつきがある。いくつかのモニタリングポストを校正した経験で図面と実測との違いが最大で5mmずれがあったことから、最大5mmのずれがあると推定し、矩形分布を仮定して以下の式で評価した。距離の逆2乗で影響するので感度係数を2とし、最も距離が近い場合を想定して30cmを想定して次式のように見積もる。

$$u_{\text{dis}}=5 \times 2/300/\sqrt{3} \times 100=1.9 (\%)$$

(4) 不均一照射

検出器のサイズに依存するが、本研究で想定したモニタリングポストでは、2inch直径×2inch長のNaI(Tl)シンチレータが最大であった。EGS5によるシミュレーションにより、平行入射と距離30cm入射での応答の違いが1%であったことから、これをばらつきの最大幅とし、矩形分布を仮定して次式のように見積もる。

$$u_{\text{nonuni}}=1.0/\sqrt{3}=0.6 (\%)$$

(5) BG 及び照射時のばらつき

BG 及び照射時の繰り返し測定から 0.4 % と見積もる。

不確かさのバジェット表を表 17 に示す。

表 17 本測定手法での校正定数の不確かさバジェット表

不確かさの要因	値 (%)	タイプ	確立分布	除数	相対標準不確かさ (%)
基準線量計校正	1.4	B	正規	1	1.4
内挿不確かさ	2.7	B	矩形	$\sqrt{3}$	1.6
設定位置	3.3	B	矩形	$\sqrt{3}$	1.0
不均一照射	1.0	B	矩形	$\sqrt{3}$	0.6
BG 及び照射時のばらつき	0.4	A	正規	1	0.4
合成相対標準不確かさ					2.9
相対拡張不確かさ ($k=2$)					5.9

7 まとめ

本研究では、既存の校正手法では不得意な高バックグラウンド線量下においても精度よく校正を行うため、散乱線を低減させるためのコリメータ及び簡易遮へいを組み合わせた現地校正手法を確立した。H30 年度では、高バックグラウンド地域のモニタリングポストの設置状況調査、それを踏まえた高バックグラウンド線量下において現地校正できるよう、既存の照射装置を改良し、下方向に向けたコリメート照射装置を開発した。本手法と基準電離箱による現地校正手法との比較を行い、その妥当性を確認した。

R 元年では高バックグラウンド環境下での校正手法の妥当性確認のために、照射装置及び可搬型モニタリングポストを福島県内の高バックグラウンド地域に持ち込み校正を行い、従来手法での校正結果と比較を行った。事前に従来手法で行った校正結果と 1 % 以内で一致しており、本手法の妥当性を確認することができた。また現地にすでに設置されているモニタリングポストについて、本手法による校正を実施した。バックグラウンド線量率が $30 \mu\text{Sv/h}$ 程度でも、拡張不確かさ 10 % ($k=2$) で校正できることが分かった。

本研究で開発された校正手法は、基準電離箱といった電気的な機器を屋外で使用する必要がないことから、ウォーミングアップ等の時間が不要となっている。バックグラウンドが高い場所では重量物である遮へい体を用いる必要があるが、位置合わせも線源からモニタリングポストの距離を正確に合わせる必要がなく任意の距離で校正が行えるため、セットアップの作業が容易となり大幅な時間短縮となっている。従来の基準電離箱を用いた校正は、約 5 時間程度必要となるが、本手法であれば 1 時間程度で校正が行える。また現地に設置されているモニタリングポスト周辺には、通信機器や電源供給のためのソーラーパネル、蓄電池などが配置されてるが、コリメート照射による校正のため、周辺機器からの散乱線の影響を非常に小さくすることが可能となった。線量率が付与された線源を用いる従来手法では、周辺機器の配置により散乱線による影響を評価することが非常に困難であるが、本手法では容易に不確かさ評価を行うことが可能である。

平成 31 年度放射線安全規制研究推進事業

成果報告書

研究課題名：

放射線業務従事者に対する健康診断のあり方に関する検討

公益財団法人 原子力安全研究協会

令和 2 年 3 月

目次

1. 研究目的.....	1
2. 研究方法.....	2
2.1 研究の実施体制.....	2
2.2 平成 31 年度の研究計画.....	3
2.3 倫理面への配慮.....	4
3. 研究結果.....	5
3.1 アンケート調査.....	5
3.1.1 調査対象と回収率	
3.1.2 アンケート調査票	
3.1.3 単純集計	
3.1.4 アンケート調査結果のまとめ	
3.2 インタビュー調査.....	23
3.2.1 インタビュー対象	
3.2.2 インタビュー項目	
3.2.3 インタビュー結果	
3.3 海外の実態調査.....	31
3.3.1 国際的な考え方についての国際機関に対する欧州調査	
3.3.2 ICRP シンポジウムの機会を利用した海外の規制状況の調査	
3.3.3 北米についての調査	
4. 放射線業務従事者に対する健康診断のあり方の提言－論点と課題－.....	38

5. 付録		
付録 1	アンケート調査票	45
	A-1 健康診断の実施者	
	・原子力施設	
	・放射線施設	
	・医療施設	
	・産業医	
	A-2 健康診断の受診者	
	・共通	
付録 2	アンケート結果（単純集計）	61
	B-1 健康診断の実施者	
	・原子力施設	
	・放射線施設（大学）	
	・放射線施設（一般企業）	
	・医療施設	
	・産業医	
	B-2 健康診断の受診者	
	・原子力施設	
	・放射線施設（大学）	
	・放射線施設（一般企業）	
	・医療従事者	
付録 3	各国の規制状況（結果）	88
付録 4	検討にあたって参考とした法令、通達など関連文書	125
	・電離則、RI 法、人事院規則、労働安全衛生規則の関連条文	
	・電離放射線障害防止規則の解説、中央労働災害防止協会	
	・局長通達（基発第 568 号、平成 13 年 6 月 22 日）	
	・電離則 様式第 1 号の 2（第 57 条関係、電離放射線健康診断個人票）	

1 研究目的

わが国では、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（現、放射性同位元素等の規制に関する法律、以下「RI法」）が施行された当初から、放射線業務従事者に対する健康診断を作業による異常な被ばくや作業環境の欠陥を発見する手法として放射線防護の観点から採用してきた経緯があり、現在も定期的な実施が義務付けられている。

放射線審議会において放射線業務従事者に対する健康診断のあり方について様々な議論が行われており、平成23年1月に発出された放射線審議会基本部会「国際放射線防護委員会（ICRP）2007年勧告（Publ.103）の国内制度等への取入れについて－第二次中間報告－」では、「放射線防護・管理システムが進展した現在において、異常な被ばくの事実の発見および放射線作業環境の欠陥を定期的特殊健康診断に求めるべきではない。」と提言されている。そして、第139回放射線審議会（平成30年1月19日開催）では「ICRP2007年勧告の国内制度等への取入れ状況について（案）」（資料139-2）が議論され、特殊健康診断について、前年及び当該年度に実効線量が5mSvを超えない者に対して法令によって書きぶりに違いがあるものの医師の判断で柔軟に対応出来る仕組みになっていることを示した上で、「運用状況についてヒアリングし、制度の主旨に沿った対応が取られているかを把握し、必要があれば検討する」案が述べられている。

一方、旧労働省では、「労働省の所管行政に係る規制緩和要望およびその検討状況について」（平成12年1月18日）で、日本労働組合総連合会からの意見・要望として、「経済団体等から要望が出ている放射線業務従事者に対する健康診断間隔の1年への延長について、労働者の健康を確保するとの目的と設定の考えを踏まえ慎重に検討すべきである。」が示され、放射線業務従事者に対する健康診断間隔を1年に延長する予定はないと判断された。

これらを踏まえて、本研究では、計画被ばく状況および緊急時被ばく状況のそれぞれにおける放射線業務従事者に対する健康診断の医学的な見地からの意義、有効性を科学的に検討する。具体的には、(1)実態把握のために、関係者（特殊健康診断の実施者（産業医、労務管理担当者、放射線管理担当者等）と受診者（原子力施設、放射線施設及び医療施設の放射線業務従事者等））へアンケート調査を行い、(2)海外の実態調査と合わせ、(3)ICRP勧告やIAEA安全基準文書における国際的な考え方とそれらを受けた放射線審議会等での国内制度への取り入れに関する議論や論点を再整理する。これらの検討結果を基に医学・科学的に合理的な放射線業務従事者に対する健康診断のあり方を検討することを目的とする。

放射線業務従事者に対する健康診断のあり方については放射線審議会等において長年検討が続けられてきているように、放射線防護上の重要な課題であることは明らかである。医学的・科学的な考え方を確認し、海外の実態調査等を踏まえ、国際的な考え方と我が国の検討経緯を今一度整理することは、放射線防護の観点からも意義が深いと考えられる。このため、本研究では、法令上、特殊健康診断の省略規定があるにもかかわらず省略があまり行われていない背景や理由をはじめ、幅広い関係者に対してアンケート調査及びインタビュー調査を実施することにより、実態がなぜそうなっているかの理由、現状の課題やそれぞれの意識を整理することに特に留意した。

2 研究方法

2.1 研究の実施体制

本研究は、主任研究者である山本尚幸（所属：公益財団法人原子力安全研究協会・業務執行理事、専門分野：放射線医学／緊急被ばく医療）の全体統括のもと、表 2.1.1 に示す研究協力者がそれぞれの分担に応じた役割を果たす。

なお、放射線業務従事者に対する健康診断のあり方の提言等の議論・検討については、全員で行った。

表 2.1.1 研究協力者

氏名	協力内容	所属機関及び現在の専門	所属機関での職名
大久保靖司	アンケート調査（産業医） あり方の提言案作成	東京大学 産業保健	教授
飯本武志	アンケート調査（放射線施設） 海外の実態調査	東京大学 放射線防護	教授
黒田玲子	アンケート解析 あり方の提言案作成	東京大学 産業保健	助教
山本健也	アンケート解析 あり方の提言案作成	東京大学 産業保健	助教
高嶋隆太	アンケートとりまとめ	東京理科大学 社会システム工学	准教授
伊藤真理	アンケートとりまとめ	東京理科大学 社会システム工学	助教
福田一斗	アンケートとりまとめ	東京理科大学 社会システム工学	大学院生 修士1年
酒井一夫	海外の実態調査	東京医療保健大学 （ICRP 委員） 放射線防護	教授
大野和子	アンケート調査（医療施設）	京都医療科学大学 医療放射線防護	教授
杉浦紳之	総括補佐 アンケート調査（原子力施設）	原子力安全研究協会 放射線防護	理事長・所長
米原英典	放射線防護上の課題整理	原子力安全研究協会 放射線規制科学	主任研究員

2.2 平成 31 年度の研究計画

本研究は、平成 30 年度及び平成 31 年度の 2 年間の研究として実施された。

平成 30 年度は、主として放射線業務従事者に対する健康診断の国内の実態把握を目的として調査用紙によるアンケート調査を実施した。アンケート調査は、特殊健康診断の実施者及び受診者について行った。調査対象者は、実施者については a) 産業医、健康診断担当医、b) 労務管理担当者及び放射線管理担当者とし、受診者については c) 原子力施設の放射線業務従事者、d) 放射線施設の放射線業務従事者、e) 医療施設の放射線診療従事者とした。この他、放射線業務従事者に対する健康診断についての国際機関や国内における検討状況を文献等により再整理を行うとともに、海外における放射線業務従事者に対する健康診断の実態についての予備的調査を行った。

平成 31 年度は、①医療施設の特殊健康診断の実施者に対するアンケート調査の追加、②インタビュー形式による放射線業務従事者に対する健康診断のあり方に関する意見交換、③放射線業務従事者に対する健康診断の内規や実施要領の調査による運用実態の把握、④海外における放射線業務従事者に対する健康診断の実態について現地調査を行った。

1) アンケート調査

平成 30 年度、放射線業務従事者に対する健康診断の実施者側のアンケート調査対象は、当初、法令上省略の判断を行うとされている医師（産業医及び健康診断担当医）及び事業所において特殊健康診断の実施に関係する労務管理担当者と放射線管理担当者としていたが、アンケート集計にあたり、受診者側についての施設区分、すなわち原子力施設、放射線施設、医療施設の施設区分に合わせることにした。しかし、平成 30 年度の調査対象の産業医は一般企業の産業医であり、医療施設についての実態把握が行えていなかったため、平成 31 年度の調査において医療施設に対するアンケート調査を追加し、原子力施設、放射線施設（一般企業、大学等）との比較を行うことにした。なお、医療施設への調査票の配布数は 500 枚を予定した。

2) 放射線業務従事者に対する健康診断のあり方についての意見交換と取りまとめ

放射線業務従事者に対する健康診断のあり方について、平成 30 年度のアンケート調査対象者のうち、追加で協力の同意が得られた産業医、労務管理担当者及び放射線管理担当者とインタビュー形式で意見交換する。放射線業務従事者に対する健康診断の実施状況について、アンケートの集計結果がなぜそのような状況になっているか、理由や関連する要因について明らかにし、放射線業務従事者に対する健康診断のあり方についてのまとめを行う。

3) 特殊健康診断の実施に関する内規等の国内情報のとりまとめ

RI 法及び電離放射線障害防止規則（以下「電離則」）に基づく特殊健康診断の実施に関する内規や実施要領を分析・整理し、これらの特殊健康診断の実施の実態を明らかにする。提供された内規等を基に特殊健康診断対象者の選定、特殊健康診断の実施時期、特殊健康診断の項目（法定外の項目の追加、項目の省略等の運用等）、判定の基準、事後措置実施の基準等を集計し、国内におけるこれらの特殊健康診断の実施の実態を明らかにする。

4) 海外の放射線業務従事者に対する健康診断の実態調査

海外における放射線業務従事者に対する健康診断の実態を調査する。平成 30 年度に行った予備的調査では各国の放射線防護や労働安全衛生に関係する法令に放射線業務従事者に対する健康診断を取り入れている国は極めて少ないことが分かった。調査では、平常時の考え方（就業前、就業後の定期）、異常時（過剰被ばく）の考え方に分け、放射線業務従事者に対する健康診断の全体像を明らかにする。これらの情報は 2) の検討において参考とする。

調査は、(1)国際機関（ICRP、IAEA、ILO）について国際的な最新の考え方の収集・意見交換、(2)各国の規制状況の収集とする。

目標とする到達点は、(1) 包括的な調査結果をもとに就業後定期的に実施されている特殊健康診断 についての実態及び課題をまとめるとともに、(2) 計画被ばく状況および緊急時被ばく状況のそれぞれにおける放射線業務従事者に対する健康診断のあり方について意義や目的、必要性を ICRP や ILO などの国際機関で示されている考え方とも照らし合わせてまとめて、提言、提案することである。

2.3 倫理面への配慮

本研究では、生体試料等とは取り扱わない。また実験動物等も取り扱わない。

アンケート調査では個人情報を取り扱うことは予定していないが、実施にあたっては、人を対象とする医学系研究に関する倫理指針に基づき実施する。研究を担当する研究代表者及び研究協力者の在籍する機関において倫理審査を受け、研究内容全般については承認され、健康診断の受診者に対して実施するアンケートについては、倫理審査委員会の審査には該当しないとされた。

本報告書で用いた健康診断の名称について

本報告書では、放射線業務従事者に対する健康診断には様々のものがあることから、それらの区別を明確にするため、以下の名称を用いた。

一般健康診断：労働安全衛生法第 44 条に定められる定期健康診断

特定健康診断：労働安全衛生法第 45 条に定められる特定業務従事者に対する健康診断

特殊健康診断：電離則第 56 条に定められる放射線業務従事者に対する健康診断

ただし、RI 法施行規則第 22 条に定められる健康診断を含む場合あり

※それぞれの条文で規定される健康診断の具体的な内容は、報告書本文中に記述されている他、付録 4 に条文も示した。

3 研究結果

3.1 アンケート調査

本報告書は、平成 31 年度の成果報告書であるが、上述の通り、アンケート調査結果は本研究の主要部分をなすものであること、平成 31 年度に実施した医療施設に対するアンケート結果だけではなく平成 30 年度に得られた結果と比較して示すべきことから、平成 30 年度の成果報告書と重複する点は多くなるが、2 か年の調査結果をまとめて以下に示す。

3.1.1 調査対象と回収率

アンケート調査の配布数、回収数、回収率について、表 3.1.1 に示す。放射線業務従事者に対する健康診断の実施者については、①原子力施設：254 名、②放射線施設（RI 法の許可届出事業所）：205 名、③医療施設（病院）：500 名、④一般企業産業医：643 名、合計 1,602 名に配布し、回収数は 476 名（回収率：29.7%）であった。放射線業務従事者に対する健康診断の受診者については、①原子力施設：7,659 名、②放射線施設：1,673 名、③医療従事者：690 名、合計 10,022 名に配布し、回収数は 6,098 名（回収率：60.8%）であった。

原子力施設に対する調査は、電気事業連合会から各電力会社等*1 に、日本電機工業会から各原子力施設に作業員が常駐するプラントメーカー、放射線モニタリング関係の協力会社*2 に、アンケート調査への協力について連絡を行った後、電力会社及び協力会社の双方の担当窓口にてアンケート調査に対する回答の依頼をした。

*1 調査協力を依頼した電力会社等

北海道電力（株）、東北電力（株）、東京電力ホールディングス（株）、中部電力（株）、北陸電力（株）、関西電力（株）、中国電力（株）、四国電力（株）、九州電力（株）、日本原子力発電（株）、日本原燃（株）

*2 調査協力を依頼した協力会社

三菱重工業（株）、（株）日立製作所、（株）東芝、富士電機（株）

各原子力施設において協力可能な概数を把握し、労務管理担当者又は放射線管理担当者を通じてアンケート用紙を配布した。協力会社については、数次にわたる下請け構造が見られるが、下請け会社は元請け会社の放射線管理に関する方針を原則として踏襲しているとの情報がアンケート調査を依頼するにあたっての日本電機工業会との打ち合わせにおいて得られたことから階層別のアンケート用紙の配布は行わなかった。

放射線施設（RI 法の許可届出事業所）のうち大学については、原子力施設と同様に、大学等放射線施設協議会の協力のもと、各大学の担当窓口にて協力可能な枚数のアンケート用紙を配布した。一方、放射線施設のうち一般企業については、原子力規制委員会のホームページに掲載されていた「放射線障害防止法の対象事業所一覧」（平成 29 年 3 月 31 日現在）から 100 か所をランダムサンプリングで対象事業所を抽出し、1 ヶ所につき放射線業務従事者に対する健康診断の実施者 1 名、放射線業務従事者に対する健康診断の受診者 5

名分のアンケート用紙を送付した。

医療施設へのアンケート調査は平成 31 年度に追加で実施した。国立大学法人病院診療放射線技師長会の協力のもと、全国国立病院療養所放射線技師会、私立医科大学放射線技師長会、全国公立大学病院放射線業務連絡協議会、日本赤十字社診療放射線技師会、労働者健康安全機構放射線技師会、徳洲会放射線部を通じて、それぞれの会に所属する診療放射線技師が勤務する病院にアンケート調査の依頼を行った。

一般企業の産業医（健康診断の実施者）については、日本産業衛生学会の許可を得てから同学会の専門医制度委員会に登録している全産業医を対象にアンケート用紙を送付した。回収方法は、個人毎の返信用封筒（着払い）で事務局宛て送付する形の他、QR コードを付してウェブアンケートでも回答できるようにした（回答者のうち 43%がウェブアンケートで回答）。

医療従事者（健康診断の受診者）については、医療放射線防護に関する研修会の受講者に対してアンケート用紙を配布し、個人毎の返信用封筒（着払い）で事務局宛て送付する形とした。

回収率を見ると、原子力施設、放射線施設・大学、医療従事者（健康診断の受診者）は約 50%～70%と高く、放射線施設・一般企業、医療施設（健康診断の実施者）、産業医では 14～20%と低かった。

表 3.1.1 アンケート配布数、回収数、回収率

対象	健康診断の実施者			健康診断の受診者		
	配布数	回収数	回収率	配布数	回収数	回収率
原子力施設	254	178	70.1%	7,659	5,075	66.3%
放射線施設 一般企業	100	20	20.0%	500	70	14.0%
放射線施設 大学	105	55	52.4%	1,173	630	53.7%
医療施設	500	115	23.0%	—	—	—
一般企業産業医	643	108	16.8%	—	—	—
医療従事者	—	—	—	690	323	46.8%
合計	1,602	476	29.7%	10,022	6,098	60.8%

実施者について、回答者の職種を表 3.1.2 に示す。

表 3.1.2 アンケート回答者の職種内訳

		診療放射線技師	診療放射線技師 (放管担当)	放射線取扱主任者	事務 (放管担当)	事務 (労務担当)	衛生管理者	事務所内産業医	その他	未回答	回答数
原子力施設	回答数	—	—	—	78	27	15	20	36	4	180
	割合	—	—	—	43.3%	15.0%	8.3%	11.1%	20.0%	2.2%	
放射線施設 一般企業	回答数	—	—	—	6	5	3	1	4	1	20
	割合	—	—	—	30.0%	25.0%	15.0%	5.0%	20.0%	5.0%	
放射線施設 大学	回答数	—	—	15	11	2	6	5	12	4	55
	割合	—	—	27.3%	20.0%	3.6%	10.9%	9.1%	21.8%	7.3%	
医療施設	回答数	81	23	—	2	5	1	2	2	2	118
	割合	68.6%	19.5%	—	1.7%	4.2%	0.8%	1.7%	1.7%	1.7%	
産業医	回答数	—	—	—	—	—	—	86	22	—	108
	割合	—	—	—	—	—	—	79.6%	20.4%	—	

3.1.2 アンケート調査票

アンケート調査の内容は、放射線業務従事者に対する健康診断の実施者については放射線業務従事者に対する健康診断の実態及び放射線業務従事者に対する健康診断に対する認識を、放射線業務従事者に対する健康診断の受診者については放射線業務従事者に対する健康診断に対する認識を主に質問する内容とした。表 3.1.3 に、アンケート調査項目を一覧にまとめた。また、付録にアンケート調査用紙を放射線業務従事者に対する健康診断の実施者用（原子力施設、放射線施設、医療施設、産業医（一般企業））と放射線業務従事者に対する健康診断の受診者用（共通）を付した。

本調査で対象となる放射線業務従事者の特殊健康診断を規定している法令には、主に RI 法と電離則の 2 つがあり、特殊健康診断の頻度について、RI 法では年 1 回、電離則では年 2 回と規定が異なっている。事業者においてはより厳格な規定に従うことが想定されるため、年 2 回の特殊健康診断が義務づけられている電離則に関する設問とした。大学においては、教職員は労働者であるため電離則の対象となるが、学生（大学院生を含む）は労働者ではないため電離則の対象ではない。安全管理という法の趣旨を鑑みて学生（大学院生を含む）を区別することなく教職員と同様に電離則の規定に従って管理している大学もあるとの情報が事前の大学等放射線施設協議会に対するヒアリングにおいて得られたため、放射線施設における大学についても同様の考え方は適用できるものと考えた。しかしなが

ら、放射線施設については RI 法に基づいて規制や管理を直接受けることから、「電離放射線障害防止規則（労働安全衛生法）と放射線障害防止法*について、特殊健康診断に関する記載が異なっていますが、どのようにお考えですか。」との設問を追加し、RI 法と電離則の違いへの対応について情報を得ることとした。

*放射線施設についてのアンケート調査は平成 30 年度に行ったため、設問では「放射線障害防止法」と記載している。）

表 3.1.3 アンケート調査項目一覧

特殊健康診断の実施者	特殊健康診断の受診者
<ul style="list-style-type: none"> ○フェイスシート <ul style="list-style-type: none"> ・業種、事業所規模、取扱内容 ・回答者職種、経験年数 ○特殊健康診断の実施内容 <ul style="list-style-type: none"> ・特殊健康診断（検査）の機会と回数 ・<u>5mSv 超・以下</u>での対応の区別の有無 ・<u>省略する検査項目</u> ・<u>省略をする／しない理由</u> ・実施日に未受診者の対応 ・特殊健康診断の費用 ・被ばく歴の管理（複数事業所従事） ○特殊健康診断についての認識 <ul style="list-style-type: none"> ・実施する<u>目的</u> ・<u>発見できると思う病気、症状</u> ・<u>妥当と考える実施回数、項目</u> ・<u>RI 法と電離則の記載について</u> (放射線施設のみ) ・コメント、意見（自由記述） 	<ul style="list-style-type: none"> ○フェイスシート <ul style="list-style-type: none"> ・業種、取扱内容 ・管理区域への入域頻度 ○特殊健康診断の実施内容 <ul style="list-style-type: none"> ・特殊健康診断についての<u>説明</u> ・特殊健康診断（検査）の<u>機会と回数</u> ・特殊健康診断の<u>結果確認</u> ・被ばく線量の結果確認 ・被ばく歴の管理（複数事業所従事） ○特殊健康診断についての認識 <ul style="list-style-type: none"> ・実施する<u>目的</u> ・妥当と考える<u>実施回数、項目</u> ・被ばく管理、健康診断への希望の有無 ・コメント、意見（自由記述）

3.1.3 単純集計

(1) 放射線業務従事者に対する特殊健康診断の実施者

表 3.1.4 に、年 2 回の電離則に基づく特殊健康診断において検査又は健診をどのように実施しているかについての回答を示す。

表 3.1.4 特殊健康診断の機会と検査回数

<p>【特殊健康診断の機会と検査回数】</p> <p>電離放射線障害防止規則に基づいた場合、特殊健康診断における検査又は健診（問診は必須）を年 2 回（6 ヶ月を超えない期間ごと）実施することとなっておりますが、どのように検査を実施していますか。該当するものにチェックを入れてください。</p> <p><input type="checkbox"/> 定期一般健康診断とは別に年 2 回実施している</p> <p><input type="checkbox"/> 定期一般健康診断の際に 1 回実施し、約半年後に別途 1 回実施することで、年間で計 2 回実施している</p> <p><input type="checkbox"/> 定期一般健康診断の際に 1 回のみ実施し、半年後の別途 1 回は省略している</p> <p><input type="checkbox"/> 年に 1 回も実施していない</p> <p><input type="checkbox"/> その他（ ）</p>

	一般健診とは別に年2回	一般健診で1回別に1回	一般健診で1回1回は省略	実施しない(2回とも省略)	その他	未回答	回答数
原子力施設	13%	75%	1%	0%	5%	6%	178
放射線施設 一般企業	25%	40%	5%	5%	10%	15%	20
放射線施設 大学	67%	24%	2%	0%	4%	4%	55
医療施設	28%	64%	2%	0%	6%	0%	115
産業医	7%	53%	6%	3%	2%	9%	108

定期一般健康診断に合わせて特殊健康診断を行うか否かについては施設別に大きく異なるが、どの施設でも検査を省略することなく、年 2 回実施していることが分かる。本年度アンケート調査を実施した医療施設においても同様であった。原子力施設では定期一般健康診断の機会を利用しているのに対して、大学においては定期一般健康診断とは別に改めて実施している様子が分かる。年 1 回に省略する施設及び機関は数%、2 回とも省略する施設及び機関は 0% から数% に留まっている。

電離則では、前年度の実績と当該年度の見込みの実効線量が 5mSv 以下と超える場合とで特殊健康診断の省略に関する医師の判断が異なる（第 56 条第 4 項）。このため、5mSv 超の対象者と 5mSv 以下の対象者で対応を区別しているかについて表 3.1.5 に示す。

区別して対応している割合が比較的高かったのは大学及び医療施設であるが、それでも 30% 台であった。最も低かったのは原子力施設の 8% であった。線量の区分を活用していない理由として、前年度 5mSv 以下であったとしても、作業内容の変更などが原因で当該年度に 5mSv を超えないことを保証するのが困難であるというものがあげられていた。

表 3.1.5 5mSv 超・以下での対応の区別の有無

【5mSv 超・以下での対応の区別の有無】
 年間 5mSv を超えている方と年間 5mSv 以下の方に検査を実施する際に、対応を分けていますか。
 分けている 分けていない

	区別して対応	区別しない	未回答	回答数
原子力施設	8%	74%	18%	178
放射線施設 一般企業	15%	55%	30%	20
放射線施設 大学	38%	56%	5%	55
医療施設	33%	65%	2%	115
産業医	18%	56%	26%	108

これらの 2 つの結果を合わせて考えると、実効線量が 5mSv 以下であれば「医師が必要と認めないときには行うことを要しない」となっているにもかかわらず、線量で区分して対応を変えることなく年 2 回の検査が大多数の施設で実施されており、省略可能としている規定が積極的には運用されていない実態があると言える。

表 3.1.6 に、5mSv の実効線量で対応を区別するかしないかを分けて、検査項目別の省略の状況をまとめた。

原子力施設については、(標本数は少ないものの) 線量区分を導入しているところについては 5mSv 超で全員に全ての検査を実施し、5mSv 以下では眼や皮膚の検査を 6 から 7 割が省略、白血球百分率についても 3 割程度が省略を実施しており、一部の施設においては制度の趣旨に沿った運用が見られた。

大学では、線量区分をする割合が 4 割程度と最も多く、5mSv 超でもすべての検査項目について一部省略の割合が 4 割から 5 割と高かった。

表 3.1.6 省略する検査項目

a) 原子力施設

検査項目	線量で区別している						線量で区別しない		
	5mSv 超			5mSv 以下			全員実施	全員省略	一部省略
	全員実施	全員省略	一部省略	全員実施	全員省略	一部省略			
白血球 ^{*1}	100%	0%	0%	53%	7%	27%	84%	2%	13%
赤血球 ^{*2}	100%	0%	0%	80%	7%	20%	84%	2%	13%
眼	100%	0%	0%	33%	7%	53%	82%	4%	11%
皮膚	100%	0%	0%	27%	7%	60%	85%	2%	10%

n=15

n=131

b) 放射線施設・大学

検査項目	線量で区別している						線量で区別しない		
	5mSv超			5mSv以下			全員実施	全員省略	一部省略
	全員実施	全員省略	一部省略	全員実施	全員省略	一部省略			
白血球	48%	0%	33%	43%	14%	38%	68%	0%	29%
赤血球	48%	0%	38%	43%	14%	38%	68%	0%	32%
眼	38%	0%	48%	0%	14%	81%	45%	3%	45%
皮膚	38%	0%	48%	0%	14%	81%	48%	3%	45%

n=21

n=31

c) 医療施設

検査項目	線量で区別している						線量で区別しない		
	5mSv超			5mSv以下			全員実施	全員省略	一部省略
	全員実施	全員省略	一部省略	全員実施	全員省略	一部省略			
白血球	79%	3%	18%	21%	34%	47%	80%	0%	17%
赤血球	79%	3%	18%	21%	32%	50%	80%	0%	17%
眼	55%	0%	45%	11%	32%	58%	48%	11%	35%
皮膚	61%	0%	42%	8%	32%	61%	53%	7%	33%

n=38

n=75

d) 産業医

検査項目	線量で区別している						線量で区別しない		
	5mSv超			5mSv以下			全員実施	全員省略	一部省略
	全員実施	全員省略	一部省略	全員実施	全員省略	一部省略			
白血球	93%	0%	7%	30%	20%	50%	74%	10%	16%
赤血球	93%	0%	7%	28%	17%	56%	76%	10%	14%
眼	81%	0%	19%	28%	22%	50%	68%	18%	14%
皮膚	86%	0%	14%	28%	22%	50%	73%	13%	14%

n=19

n=61

*白血球：白血球数及び白血球百分率の検査

*赤血球：赤血球数の検査及び血色素量又はヘマトクリット値の検査

線量の区別がある 5mSv 以下について、施設ごとの白血球及び赤血球の検査の実施割合をみると、医療施設及び産業医（一般企業）では、全員実施の割合が 2 割から 3 割であり、原子力施設の 5 割から 8 割、放射線施設の 4 割に比べて、低目の傾向がみられた。

その他、放射線施設の 5mSv 以下で眼と皮膚の診察の全員実施が 0%であったり、原子力施設及び放射線施設の 5mSv 以下での一部省略の割合が眼と皮膚の方が白血球と赤血球の 2 倍程度となっているように、全体的に白血球及び赤血球の検査に比べて、眼と皮膚の

診察の省略の方多くなされている傾向が認められた。

特殊健康診断の実施において、医師による問診を行う際に、眼科及び皮膚科の専門医による診察等を別途実施することは難しいことが予測される。眼及び皮膚の診察等の具体的な実施方法については、インタビュー調査の聞き取り項目として重要と考えられた。

表 3.1.7 に、省略しない理由についての回答を示す。

表 3.1.7 省略しない理由（複数回答可）

【省略しない理由】	
実施回数、検査項目を省略しない理由で該当するものすべてにチェックを入れてください。	
<input type="checkbox"/>	省略の判断の手続きが煩雑であるため
<input type="checkbox"/>	省略する積極的な理由がないため
<input type="checkbox"/>	法定の項目は省略しないこととしているため
<input type="checkbox"/>	異常がないことを確認・記録するため
<input type="checkbox"/>	その他（ ）

	判断手続きが煩雑	積極的な理由がない	法定項目は実施する	異常がないことを確認	その他	回答数
原子力施設	21%	33%	33%	44%	27%	84
放射線施設 一般企業	38%	54%	31%	46%	15%	13
放射線施設 大学	18%	41%	24%	35%	12%	17
医療施設	25%	31%	33%	43%	10%	61
産業医	22%	27%	24%	24%	22%	45

複数回答可のためもあると考えられるが、「判断手続きが煩雑である」、「省略する積極的な理由がない」、「法定項目は省略しない」、「異常がないことを確認・記録する」が拮抗した結果となった。このうち「異常がないことを確認・記録する」については、線量管理が効果的・効率的に行われていれば異常な被ばくはなく、放射線障害（検査項目から検出される確定的影響）は発生しないはずなので、この選択肢の意味合いを一般的な健康状態の異常ととらえている可能性も考えられる。

放射線施設の一般企業の「積極的な理由がない」が 54%と表中で最も大きな割合となっている。これらの結果から、たとえ省略可能であっても検査項目が法定項目として定まっており、若干のコストは掛かるものの、積極的に省略せずとも実施可能なので、検討や考察をせずにとりあえず実施しているのが現状であることが示唆された。そうであるならば、省略を実施するにあたって省略の可否を判断するためのフローチャートを整備するというニーズがあることが想定される。

一方、表 3.1.8 に省略する理由についての回答を示す。

まず、原子力施設のその他が 63%と高いが、ほとんどが「医師（産業医）の判断による」

というもので、省略する背景となる考え方を聞く意図の設問であったが、法令条文上の理由を正しく記入頂いた結果となった。

省略する理由として、「被ばく線量が低い」という項目が原子力施設以外で75・81%と高く、省略を実施しているところでは、ICRP等の考え方についての理解があることが示されている。原子力施設は前述した通りこれまでの実態に照らすと、当該年度に5mSvを超える可能性が一定程度想定されることから、「線量が低い」とは言えない事情があることが伺える。加えて、「コスト、労力の削減のため」という理由が大学において際立って高くなっている。被ばく線量が低く、検査目的に対応した異常の検出がされることは考えられないところ、大学の貴重な財源を有効に活用したいとする事情が表れている結果と考えられる。

表 3.1.8 省略する理由（複数回答可）

【省略する理由】

実施回数、検査項目を省略する理由で該当するものすべてにチェックを入れてください。

コストや健診の労力の軽減のため。

被ばく量が低く、検査を行う意義が低いため。

検査項目が健康管理において有効性が低いため。

実施する積極的な理由がないため。

その他（ ）

	コスト、労力 削減	被ばく線量 が低い	検査項目 が有効でない	積極的な 理由がない	その他	回答数
原子力施設	39%	34%	16%	5%	63%※	38
放射線施設 一般企業	25%	75%	0%	25%	0%	4
放射線施設 大学	77%	81%	23%	23%	19%	31
医療施設	47%	63%	14%	27%	16%	64
産業医	21%	79%	18%	28%	21%	39

※原子力施設（その他）：大部分が「医師（産業医）の判断による」

表 3.1.9 に発見できると考えている病気や症状について示す。本設問は、医学的な正解を回答するには医師である必要があるが、本アンケート調査では特殊健康診断の実施に関係する者がどのように捉えているかの実態を把握するために行った。したがって、結果の解釈には表 3.1.2 アンケート回答者の職種内訳に注意する必要があることを申し添える。

また、平成 31 年度に医療施設について実施した調査においては、「現状の被ばく線量で確認できる異常はない」の選択肢を追加した。

表 3.1.9 発見できる病気や症状（複数回答可）

【発見できる病気や症状】

特殊健康診断における検査・健診と考えられる項目から、どのような病気や症状が発見できると考えておられますか。該当するものにチェックを入れてください（複数回答可）。

多血症（赤血球増多症） 貧血 がん 白血病

皮膚障害 白内障 緑内障

その他（ ）

現状の被ばく線量で確認できる異常はない

	多血症	貧血	がん	白血病	皮膚障害	白内障	緑内障	その他	現状の被ばく線量で確認できる異常はない	回答数
原子力施設	52%	29%	66%	20%	63%	50%	12%	8%	－	178
放射線施設 一般企業	45%	40%	15%	50%	45%	50%	10%	5%	－	20
放射線施設 大学	49%	55%	15%	64%	58%	60%	15%	4%	－	55
医療施設	23%	32%	6%	36%	38%	42%	5%	1%	47%	115
産業医	59%	75%	21%	69%	63%	58%	6%	3%	－	108

特殊健康診断の検査項目にある皮膚（皮膚障害）、眼（白内障）の回答が多い。血液検査については、選択肢が多かったこともあり、ばらついた回答となった。放射線の確定的影響として白血球数の減少はよく知られているところであるが、その選択肢がなかったことも関係していると考えられる。白血病については、この検査結果だけでは発見できないと考えるか、白血球数の異常（増加）から精密検査を行えば発見できると考えたか、設問の捉え方により値がばらついたと考えた。

医療施設のみを対象とした設問の「現状の被ばく線量で確認できる異常はない」についてであるが、約 5 割の回答にとどまった。他の選択肢にある高線量を浴びた場合に発見できる病気や症状を選択したとしても、複数回答が可能であるため、自施設における受診者の被ばく線量等に照らしてこの選択肢が正しいと考えられる場合には併せて選択できるので、「現状の被ばく線量で確認できる異常はない」という回答は、もう少し回答率が高くなることを想定していた。このことは、特殊健康診断の検査で一般的な健康状態の確認が出来ることを期待している考え方の表れでもあると考えられた。

年間被ばく線量を考慮した場合、適切と考える年の実施回数を表 3.1.10 に、実施項目を表 3.1.11 に示す。「特殊健康診断は事故など異常が発生した後にのみ行えばよい」の選択肢は平成 31 年度実施した医療施設に対する調査のみに加えた。

表 3.1.10 特殊健康診断の適切な回数

【適切な回数】年間被ばく量を考慮するとした場合、特殊健康診断の実施についてどのように考えておられますか。実施回数と健診項目について、あなたの考えに最も近いものにチェックを入れてください。

- 年間被ばく量に関係なく、年2回実施するのがよい
- 年間被ばく量に関係なく、年1回実施するのがよい
- 年間被ばく量に応じて、実施回数を変えるのがよい
- 年間被ばく量に関係なく、実施しなくてよい
- その他 ()

	年間被ばく量に関係なく年2回	年間被ばく量に関係なく年1回	年間被ばく量に応じて、実施回数を 変更	年間被ばく量に関係なく、実施不要	その他	未回答	回答数
原子力施設	34%	27%	34%	4%	1%	-	175
放射線施設 一般企業	35%	10%	35%	0%	5%	15%	20
放射線施設 大学	13%	20%	59%	6%	2%	-	54
医療施設	26%	32%	38%	1%	2%	1%	115
産業医	20%	14%	52%	4%	1%	9%	108

表 3.1.11 特殊健康診断の適切な項目

【特殊健康診断項目】

- 年間被ばく量に関係なく、項目には血液検査や診察等を含み、省略追加等は原則行わないのがよい
- 年間被ばく量に関係なく、項目は最小限とし、省略追加等は原則行わないのがよい
- 項目には血液検査や診察等を含み、年間被ばく量等に応じて項目を省略することができるのがよい
- 項目は最小限とし、年間被ばく量等に応じて項目を追加することができるのがよい
- 特殊健康診断を実施しなくてよい
- 特殊健康診断は事故など異常が発生した後にのみ行えばよい。
- その他 ()

	項目の省略追加等は実施せず	項目を最小限とし、省略追加等は実施せず	年間被ばく量に応じて項目を省略	項目は最小限とし、年間被ばく量等に応じて追加	特定健康診断を実施しなくてよい	特殊健康診断は、事故など異常が発生した後のみ	その他	未回答	回答数
原子力施設	26%	6%	26%	24%	5%	-	2%	11%	178
放射線施設 一般企業	25%	5%	35%	10%	0%	-	10%	15%	20
放射線施設 大学	9%	2%	43%	29%	13%	-	0%	4%	55
医療施設	16%	12%	29%	30%	0%	9%	2%	2%	117
産業医	11%	11%	29%	36%	2%	-	1%	10%	108

実施回数については、「年間被ばく量に応じて、実施回数を変えるのがよい」という回答が最も多かったが、表 3.1.5 5mSv 超・以下での対応の区別の有無で、区別して対応している割合の低い原子力施設および放射線施設(一般企業)では、「年間被ばく量に関係なく、年2回実施するのがよい」という回答が同数見られた。一方、5mSv 超・以下での対応の区別の有無で、区別して対応という回答が30%を超えていた放射線施設(大学)と医療施設では、「年間被ばく量に応じて、実施回数を変えるのがよい」に次いで、「年間被ばく量に関係なく、年1回実施するのがよい」という回答が多く、被ばく線量に応じて実施回数を検討する意識が強いと考えられた。

特殊健康診断の項目の省略追加についても、いずれの施設でも「年間被ばく量に応じて項目を省略」と「項目は最小限とし、年間被ばく量等に応じて追加」とするものが多かったが、原子力施設および放射線施設一般企業では、「項目の省略追加等は実施せず」の回答も同程度に見られた。

このように、被ばく線量に応じた対応が望ましいと考えられているにもかかわらず、表 3.1.5 で示したように、5mSv 超・以下で区別した対応を行っているのは比較的多い大学や医療施設でも30%台であった。被ばく線量が低くても項目を省略する等の対応が取られていない原因についてインタビュー調査で深掘りする必要がある。

また、最後に設けた下記の自由記述欄の記載の代表的なものを列挙する。

【自由記述】

現在のわが国の法制度に対する意見、要望はありませんか。

また、特殊健康診断の実施について、免除基準等の判断に困るようなことはありませんか。

放射線管理担当者

- ・健診項目の省略・追加の判断基準を定めてほしい。
- ・本当に健康リスクが高い被ばく可能性がある方のみ特殊健診を受けさせるべき。
- ・法令で定められている以上は積極的に省略できない。
- ・医師による判断にゆだねられる部分が大きすぎる。
- ・線量で区切って実施するのが分かりやすい。
- ・当該年度に5mSvを超過するか否か判断するのが難しい。

産業医

- ・本当に被ばく線量の高い人のみ健診を受けさせるべき。
- ・判断基準を明確に示してほしい。
- ・線量監視(モニタリング)に重点を置き、問題がなければ健診を省略すべき。
- ・個人被ばく線量を測定できる(する)電離放射線に関しては特殊健康診断の必要性は少ない。

(2) 受診者

※受診者についてのアンケート調査は本年度追加で実施した点はなく、以下の記述は昨年度報告書と同じであるが、本報告書の内容の一覧性を考慮し、再掲する。

表 3.1.12 に特殊健康診断についての説明をどの機会に受けたかについて、表 3.1.13 に特殊健康診断の機会と回数についての回答をそれぞれ示す。

表 3.1.12 特殊健康診断についての説明を受けた機会（複数回答可）

【特殊健康診断についての説明を受けた機会】

健康診断の実施者から特殊健康診断（電離放射線障害防止規則、放射線障害防止法に規定されている健康診断、以下同様）として実施している検査・検診の目的や実施内容等に関する説明を受けていますか。社内メール等による説明も含まれます。（複数回答可）

教育訓練のとき

初めて健康診断を受けたとき

健康診断の都度

説明を受けたことがない

	教育訓練	初めての健康診断	健康診断の都度	受けたことがない	未回答	回答数
原子力施設	58%	23%	26%	7%	2%	5,075
放射線施設 一般企業	63%	26%	10%	20%	3%	70
放射線施設 大学	70%	12%	23%	5%	4%	630
医療従事者	49%	16%	29%	18%	4%	323

表 3.1.13 特殊健康診断（検査）の機会と回数

【特殊健康診断（検査）の機会と回数】

特殊健康診断における検査又は検診（問診は必須）の受診状況を教えてください。（複数回答可）

定期一般健康診断とは別の時期に年2回

定期一般健康診断の際に1回受け、別の時期に1回で年2回

定期一般健康診断とあわせて年1回

定期的には受診していない

その他（ ）

	一般健診とは別に年2回	一般健診で1回別に1回	一般健診で1回1回は省略	定期的には受けない	その他	未回答	回答数
原子力施設	23%	47%	15%	1%	12%	2%	5,075
放射線施設 一般企業	26%	39%	11%	13%	13%	0%	70
放射線施設 大学	34%	38%	20%	5%	2%	1%	630
医療従事者	22%	50%	18%	3%	4%	4%	323

特殊健康診断を受診する者は、「放射線業務従事者に対して特殊健康診断があり、受診する必要性等について、教育訓練や放射線業務従事者に対する健康診断の際に説明を受けた」ことを覚えており、「特殊健康診断は一般健康診断とは区別されるもの」として理解していると考えられる。

表 3.1.13 の結果は、実施者側に聞いた表 3.1.4 の特殊健康診断（検査）の機会と検査回数との結果と大きく異なっていない。

さらに、特殊健康診断の結果は法令に基づき検査の都度放射線業務従事者（受診者）本人に交付されることとなっているが、表 3.1.14 に示すとおり、その結果の確認は非常に高い割合で行われている。

原子力施設に対するアンケート調査の依頼についての電気事業連合会及び日本電機工業会との打合せの際に「現場の放射線業務従事者は、特殊健康診断について理解や認識が浅く、詳細な調査項目を設けても回答できない可能性があるため、実態把握につながる最小限の情報を得るための簡易なアンケート調査として欲しい」との意見が述べられたことをはじめとし、本研究の研究計画を立案する際の多くの放射線防護関係者とのディスカッションにおいても、「放射線業務従事者は、特殊健康診断を自身の一般的な健康状態を確認する一つの機会としてとらえており、一般健康診断と区別して認識していない可能性がある」との意見は多く聞かれ、我々研究班の当初の作業仮説としてその認識も持つこととした。

しかしながら、受診者が①特殊健康診断について説明を受けた機会を把握していること、②特殊健康診断を受診する機会を把握していること、③特殊健康診断の結果を確認していることの3つの結果を合わせて考えると、放射線業務従事者は特殊健康診断について理解や認識を一定程度持っていることが明らかとなったと考えられる。厚生労働省労働基準局長通達「電離放射線障害防止規則第 56 条に規定する健康診断における被ばく歴の有無の調査・評価項目及び健康診断省略等可否について」（基発 568 号、平成 13 年 6 月 22 日、付録 4 参照）において、「各項目について、特に実施を希望する者」については「当該検査項目を省略することは適当でない」ことが述べられている。このため、特殊健康診断の受診を希望する者についての特殊健康診断の省略の判断や手続き等については、放射線業務従事者に対する健康診断のあり方の検討における一つの検討課題と考えられた。

表 3.1.14 特殊健康診断の結果確認

【特殊健康診断の結果確認】
 特殊健康診断の結果を、ご自身で確認していますか。
 確認している 確認していない その他（ ）

	確認している	確認していない	その他	未回答	回答数
原子力施設	91%	7%	0%	1%	5,075
放射線施設 一般企業	84%	7%	6%	3%	70
放射線施設 大学	89%	7%	2%	2%	630
医療従事者	89%	8%	1%	2%	323

表 3.1.15 に、特殊健康診断を定期的に受診する目的を示す。

表 3.1.15 特殊健康診断を定期的に受診する目的（複数回答可）

【特殊健康診断を定期的に受診する目的】
 特殊健康診断の目的について、あなたの考えに近いものはどれですか。（複数回答可）
 健康状態の経時的な把握
 放射線障害の判定の基礎データ取得
 放射線障害以外の病気の把握
 その他（ ）
 わからない

	通常健康状態 把握のため	放射線障害基礎 データ取得のため	放射線障害以外の 病気把握	その他	わからない
原子力施設	60%	27%	10%	1%	2%
放射線施設 一般企業	49%	31%	6%	8%	6%
放射線施設 大学	62%	30%	5%	1%	2%
医療従事者	52%	35%	11%	1%	1%

複数回答可の設問であったが、回答は1個を選んで回答した者がほぼ全員であった。選択肢の中から1個を選ぶとすれば、「放射線障害の基礎データ取得のため」が最も目的に沿った選択肢であろう。いずれの施設においても、「通常健康状態の把握のため」が約50-60%と一番高かった。

(3) RI法と電離則での規定の違いについて

放射線施設はRI法が適用されるため、放射線施設の健康診断実施者に対して、RI法と電離則の規定の違いについての意見の有無を表3.1.16の項目で確認し、意見がある場合は

自由記載をしてもらった。

表 3.1.16 RI法と電離則の規定の違いについての意見の有無（実施者）

【障害防止法と電離則の規定の違い】 電離放射線障害防止規則（労働安全衛生法）と放射線障害防止法について、特殊健康診断に関する記載が異なっていますが、どのようにお考えですか。 <input type="checkbox"/> 意見、要望は特になく、現状のままで良い。 <input type="checkbox"/> 意見要望がある。
--

	意見なし	意見あり	未回答	回答数
放射線施設 一般企業	70%	25%	5%	20
放射線施設 大学	26%	67%	7%	55

一般企業と大学は同じ放射線施設（RI法の規制や管理が主となる）であるものの、意見あり：意見なしの比が、一般企業では1:2であるのに対し、大学では2:1とまったく異なった傾向であった。

具体的な意見の内容について、主要なものをまとめて表3.1.17に列挙する。意見の内容については、一般企業と大学の間で差は認められなかった。

表 3.1.17 RI法と電離則の規定の違いについての自由記載

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">・同様の法制、同内容の法令については同じ記述として欲しい。・特殊健康診断の実施基準等が法令間で食い違う場合、結局一番厳しい法令に沿った管理とならざるを得ない。法律間で差がない一律での実施基準策定を望む。・省略の基準について、医師が「必要と認める場合に実施する」に統一すべき。年間被ばく線量を考慮して、必要性を判断できるようにすべき。・医学的には被ばく線量に応じて実施回数を変えるのが良いと思うが、きちんと運用されない、抜けが出る、などのリスクを避けるため、年1回の実施が望まれる。 |
|---|

また、受診者に対しては、法令の規定にとらわれない望まれる特殊健康診断の頻度を表3.1.18の項目で確認した。

- ・定期の一般健康診断で代替できる。
- ・一定の数値を超えた時に行うのが合理的だから。

3.1.4 アンケート調査のまとめ

○実施者

- ・年 1 回の省略、年 2 回の省略を行っている施設は、それぞれ数%。
- ・線量区分（年 5mSv を超える場合と 5mSv 以下）で運用を区別しているところは少なく、放射線施設（大学）で 38%、原子力施設で 8%。
- ・省略をしない理由は、
 - 異常がないことを確認するため
 - 法令の定めがあるため
 - 省略手続きが煩雑なため
 - 積極的な理由がないため
 とした選択肢が拮抗した。

平成 31 年度、医療施設（実施者側）について追加でアンケート調査を実施したが、その結果は、平成 30 年度の全体の傾向と大きな変わりはなかった。

○受診者

- ・一般健康診断と特殊健康診断は区別して認識。
- ・特殊健康診断結果の確認は 90%程度行われていた。
- ・特殊健康診断の目的は、「一般的な健康状態に異常がないことを確認できるため」が 50・60%の回答が多かった。
- ・望ましい特殊健康診断の頻度は、原子力施設、放射線施設・一般企業で年 2 回とする回答が 1 回とする回答に比べて多く（2 回：1 回＝50%程度：30%程度）、放射線施設・大学、医療施設では逆に年 1 回とする回答が 2 回とする回答に比べて多かった（2 回：1 回＝30%程度：50%程度）。

3.2 インタビュー調査

特殊健康診断の実施状況について、アンケート結果の背景、理由、原因及び課題について明らかにするため、前年度及び本年度のアンケート調査においてさらなる協力を得られた施設等を中心に、インタビュー形式で意見聴取及び意見交換を行った。

3.2.1 インタビュー対象

インタビューは、表 3.2.1 に示す合計 16 施設について行った。

各施設において、実施者側として産業医、労務管理担当者及び放射線管理担当者に対して、及び、受診者側として放射線業務従事者に対してインタビューの協力依頼を行ったが、一部の電力会社を除き受診者側に直接インタビューを行うことはできなかった。その場合、労務管理担当者から受診者（労働者側）の意見（考え方）を聞くように努めた。なお、意見等は各施設での実施方針に沿ったものであるが、個人としての意見も含まれるため、匿名を希望される施設が多く、施設名は匿名とした。

表 3.2.1 アンケート結果等についてのインタビュー先

施設の種類		施設数
原子力施設	電力会社	5
	協力会社	4
放射線施設	大学	2
医療施設	病院	1
健康診断実施機関		2
関連学協会・団体 (ガイドライン制定にあたっての考え方や論点など)		2

3.2.2 インタビュー項目

インタビューは、以下の項目についてフリーディスカッションの形で進めた。

- 1) 放射線業務従事者に対する健康診断を行うプロセス（特に省略している場合はその手続き）
（内規や実施要領の入手）
- 2) 検査を省略する／しない理由
- 3) マニュアルやフローチャートが整備されれば省略するために有効か
- 4) 厚生労働省の局長通達をどのように扱っているか
- 5) 一般健康診断（特定健康診断）との関係について
- 6) 個人線量が厳密に管理されている中、異常値が発見されるか、その対応
- 7) 放射線業務従事者に対する健康診断のあり方全般について

3.2.3 インタビュー結果

放射線業務従事者に対する健康診断を行うプロセス（特に省略している場合はその手続き）について聞き取る際に、内規や実施要領の入手を試みたが、社内規程であることから

文書管理上社外秘であることが多く、写しを提供いただける例はほとんどなかった。ただし、プロセスや手順については、その場で内規や実施要領を見ながら説明を受けることができた。

以下、上記の 1)から 7)に必ずしも分類できないものもあるが、インタビュー調査で述べられた意見を記す。

(1) 放射線業務従事者に対する健康診断を行うプロセス

- ・省略は行っていない。3月と9月に特殊健康診断を行っている。配置換え等があっても、必ず3月と9月に受診する。眼の検査は眼科医が細隙灯で最初に確認することとしている。皮膚の検査は手をみる他、首や顔など露出しているところもみる。その後、用紙で問診する流れになっている。検査の流れは労使交渉によって決められている。
- ・省略は行っていない。眼と爪（皮膚）の検査の方法は特に定められていない。眼の検査に関しては特殊な機械を使わず、ペンライトで照らして、水晶体が濁っていないか診ている。よほどの症状があれば、水晶体が濁って見えるのかもしれないが、異常を見つけられる方法か疑問に思うところがある。皮膚と白内障関係については、年2回は省略しても良いのではないかと思うため、省略の指示があれば省略を行いたいという気持ちもある。
- ・省略を行っている。4月に「例年通り今年も省略して良いか。」という確認を毎年行っている。4月を起点に行っているが、4月は全部の項目を実施していて、半年目にあたる秋の10月の血液検査は、一般健康診断では行っていて、特殊健康診断の方を省略している。5mSvを超えることが無い職場であるため、線量で区分して扱うことはない。
- ・省略は行っていない。特殊健康診断は外部の健康診断実施機関に委託しているため、産業医の問診を先に行うことになる。一部の人の検査項目を省略すると特殊健康診断の流れが上手くいかなることが検査を省略できない理由の一つである。外部に委託するため、自社の産業医ではない場合もあることが検査を省略できないもう一つの理由である。
また、判断の根拠を示すことができないため、産業医として省略をするという判断はできない。このアンケート結果で、特殊健康診断を受ける方の半数くらいが、この特殊健康診断が自分の健康管理の役に立つと考えているのであれば、ますます省略はできないと思う。
- ・省略を行っている。年2回、放射線健康管理医が過去1年間の実効線量を確認し、検査項目省略が適当でない者の有無を確認している。一般健康診断時に白血球百分率を検査しており、産業医が結果について確認し、必要と認められる者に対しては再検査や精密検査を勧奨しているため、特殊健康診断では採血項目を省略している。
- ・省略は行っていない。「特殊健康診断選出管理基準」という基準文書があり、それに基づき対象者はリストアップされる（基準には法令の条文に沿った内容が記述されている）。ただし、特殊健康診断は電離則で定められた健康診断だけではなく、有機溶剤などを扱う従事者もいる。各所属の所属長（課長級）が、端末で一覧を見て、原子力発

電所で勤務する人について電離則の特殊健康診断の対象者であると判断すれば、放射線業務従事者に対する健康診断の対象者として登録される。これを毎月集約して誕生日（及び半年後）に特殊健康診断を行なっている。一般健康診断は誕生日に行っているが、それに併せて特殊健康診断を行なっている。

- 省略は行っている。ただ、原子力発電所の勤務者は現地で検査を受けるため省略はされていない。本社に在籍し原子力発電所に立ち入る人は特定健康診断を受けている。秋の特殊健康診断で省略を行っている。省略の実施については、東京電力福島第一原子力発電所に入域する人は省略できないとか、社内規定上の緊急作業に従事した人の省略はできないというような取り決めに基づき省略しない放射線業務従事者を定める。省略できる放射線業務従事者に対して、特殊健康診断の受診の意向を確認し、省略を希望する放射線業務従事者については省略をしている。眼と皮膚は産業医との面談と合わせて行うため省略していない。
- 省略は行っていない。本来は産業医が事前に省略の可否判断をすることになっているが、被ばく線量が空欄の状態で見診票を預かり、検査を行い、会社の担当部署が線量を記載し、最後に産業医が判定をする流れとなっている。
- 全国労働衛生団体連合会が健康診断に関するマニュアルを作成しており、その内容に従って手順書を作成し特殊健康診断を実施している。眼の検査は細隙灯顕微鏡を使用せず、目視で行っている。
- 年1回（春）は確実に検査を実施し、前年度の被ばく線量の値をもとに産業医が判断し、もう1回（秋）は省略している。
- 春と秋に計2回実施している。春は定期一般健康診断と併せて実施している。異動や中途入社などで受診の機会がない職員は別途病院を案内し、受診することとしている。

(2) 検査を省略する／しない理由

- 検査項目だけが決められており、省略についての判断基準が明確でないように思う。明確な基準を示して欲しい。
- 放射線業務従事者に対する健康診断には受診者の健康や安全に対する意識を惹起するという意味もあると考えている。電離放射線業務では、自分の仕事は放射線による障害が起こりえるという自覚を持っていただくことが必要であるため、特殊健康診断は年2回で良いと考えている。検査する側として負担は感じていない。
- 放射線業務従事者に対する健康診断を受ける人が自身の健康維持に役に立つと考えているのであれば、例えば、一定頻度で白血病が見つかることがあるため、あえて省略する必要は無いと思う。白血病に限らず血液疾患も、あるいは白内障も、加齢によっても起こる。放射線業務従事者に対する健康診断自体に放射線障害を見出すということ以外に大きな意義があるため、放射線業務従事者に対する健康診断を積極的に省略する理由が私には見つからない。発見された症状が放射線障害によるものかは、線量管理さえきちんとしておけば判断できると思う。
- 放射線管理部門のため省略して良いか判断する立場に無いが、今の法令上、なぜ省略できていないのかが正直分からない。法令上まず特殊健康診断を実施するとあって、その後に省略とあるため、実施することが前提または必要と捉える医師が多いため

はないかと考える。放射線管理の立場からは、この特殊健康診断は必要ないと考えている。

- 労務管理部門が放射線業務従事者に対する健康診断の対象者を社内規程によりリスト化している。省略については産業医の判断になる。対象者数が多いため、法令や解説書にあるように個々の人について何が省略できるかを判断することは煩雑であり、日常業務の中でそこまでの時間は割けない。したがって、「基本的には全部実施する」というようなイメージである。
- 5mSv以下の線量基準による省略のみ行っている。当初から5mSv以下について管理側（労務管理担当者、放射線管理担当者）として省略できるものは省略しようという方針でやっている（注：省略ができるものは省略をするという会社全体の方針であるが、詳細な手順を踏み、産業医も判断をしている）。5mSvを超える場合の産業医の判断による省略は、省略の基準が当社の産業医の間で統一的に共有できないため行っていない。
- 35歳未満の作業者に対する一般健康診断では採血はかなりの割合で行われず、特殊健康診断でしか採血を行わないということもあり、省略せず実施している。
- 入城先の企業に求められているため、省略ができない。
- 省略をしない理由について、本音より建前という側面があるように思う。5mSv以下の被ばく線量で医学的、疫学的に身体影響があるとは思えない。
- 省略する手続きに手間が大変かかるため、省略していない。また、入城先の企業になぜ省略しているかを説明するのが困難である。ただ単に「産業医の省略規定による」といって入城先の企業が認めてくれるのか分からない。それならば、手間をかけずに一律にすべての検査項目を受診して入城してもらう方が良い。
- 線量が5mSv以下である（線量が低い）ことを理由として、年1回の省略を行っている。かなり以前に、省略について関係者（総務部門、放射線管理部門、保健管理部門（産業医を含む））で合意し、毎年度当初に文書を発出し変更がないことを確認している。
- 電離則の解説書では、まず、特殊健康診断を担当する医師は、特殊健康診断対象者全員について、それぞれ「被ばく歴の有無の調査及びその評価」を行い、「評価」が重要として、特殊健康診断項目の省略の可否について、対象労働者各人ごとに総合的に判断するとされているが、実際には特殊健康診断の現場を見るとそうはいかない。ここでは集団健診をやっている。例えば1年に10人くらいの事業所で、あるクリニックで特殊健康診断を専属でやってもらったら、「今回は省こうか」と省略も可能と思う。ただ、現実には難しいと思う。
- 厚生労働省が定めている様式（個人票、付録4参照）は、上部から被ばく歴と線量、次に検査結果（血液、眼、皮膚）、全身的所見、自覚症状（自覚的訴え）、医師の診断、医師の意見の順となっている。被ばく歴の有無と実効線量の実績で一度医師が省略の可否について判断し、省略しなかったものについて検査結果の確認をし、最後、業務の適合性・継続の可否について判定をする（検査を外部委託すると検査結果を確認する医師と最後の判定を行う医師は異なることになる）と計3回医師のところを通ることになる。これほど丁寧に行っても、省略の判断を行うために必要な自覚症状の確認

を検査の実施前に行うことができない。当社ではコンピューターによる管理システムが構築されているが、それでも煩雑さは変わらない。

(3) マニュアルやフローチャートが整備されれば省略するために有効か

- ・省略が進むと思えない。
- ・初めに医師の判断があつての話だと思う。そこがクリアにならないければ、マニュアルやフローチャートを整備しても、省略が進むとは思わない。医師が判断するフローチャートがあれば、クリアになると思う。放射線管理の立場（課長級）であるが、線量の数値のみで判断して良いとなれば判断はできると思う。
- ・産業医であるが、ずっとここに留まるわけでは無いため、産業医が変わるたびに判断が変わるのではなく、省略の判断についての指示書があつた方が良いと思う。本日の意見交換を聞いていても、一部については省略しても良いという雰囲気があるため、その都度産業医の判断に任せるのではなく、産業医の指示が無くても省略できる方が望ましいと思う。一方、産業医から特別の指示があつた場合にその判断を認めることは必要である。
- ・省略することに抵抗があり、省略することの理由が見つからない。マニュアルやフローチャートが作られても検査を省略できるのかは疑問である。マニュアルがあつても、そこに産業医の判断が求められることがあるのであれば、現状と何も変わらない。マニュアルの中で、明確に省略する基準が分かるフローチャートがあればそれに沿って省略するという事は理解できるが、産業医の判断が入るということであれば、現状と変わらない。
- ・実施者一人の見解としてはフローチャートはいらないと思う。検査項目が決まっているため、それに基づいてやっている。労働基準局が省略してよいと言えれば、それで省略は可能である。現場で分かりやすく判断できるものがよい。
- ・もし線量基準だけで省略が出来るとすれば、いや省略という言い方ではなく、例えば 5mSv 以上の人に放射線業務従事者に対する健康診断を実施するという規程であれば、状況は大きく変わると思う。これだけ多くの放射線業務従事者に対する健康診断を行うことは、業務上、大きなウェイトを占めている。むしろ 5mSv 以上の方について、現状より細かな要求をすることを考えてもよいと思う。高線量下で作業した人や、放射線被ばくに無関係であっても検査結果に異常のあつた人等に対象を絞って放射線業務従事者に対する健康診断を継続していく方が効果的に感じる。
- ・最終的には個別判断にならざるを得ないところがあり、クリアカットにフローチャートが書けるのか疑問である。既往歴であるとか、放射線障害によらない加齢による白内障であるとか、皮膚炎があるとか等は加味しないといけないと思うため、それをフローチャートにして意味があるのかとを感じる。
- ・最終的に何を根拠に省略したのかと言われると、産業医の判断、責任になってしまうと思う。したがって、ガイドラインやフローチャートを省略の根拠とすることは難しいと思う。

(4) 厚生労働省の局長通達をどのように扱っているか

- ・現在、省略を行っていないため、活用する機会がない。
- ・線量について「大量の」という表現であるが、具体的な線量で書いて欲しい。
- ・実施を希望する者について省略は適当ではないとあるとおり、協力会社の放射線業務従事者の中に健康診断を受診したがる方は多い。その際に放射線業務従事者に対する健康診断を省略するという判断はできない。

(5) 一般健康診断（特定健康診断）との関係について

- ・放射線業務従事者に特定健康診断として年2回、特殊健康診断としてさらに2回本当に必要であるのかという、そもそもの疑問がある。例えば、同じ特定業務従事者であっても、深夜業であると基礎疾患である高血圧とか糖尿病とか、それら疾患によって深夜業に就くリスクは相当に高くなる。過労死の防止等の労働災害を回避するため年2回実施する意味はものすごくあると思うが、放射線業務従事者で他の時間外労働時間が長い方や、深夜業等に該当しない方に対して一般健康診断を2回実施する臨床的意味は本当にあるのかと疑問である。特殊健康診断の省略を進めるとするならば、特定健康診断についても一緒に検討しないと実務的には意味が無い。つまり、特定健康診断で採血をすることになるからである。
- ・当社では、ほとんどの場合、特定健康診断と特殊健康診断は同時に実施されている。特定健康診断の方は厚生労働省から「年齢による一律省略はよくない」、「省略しないでしっかりと個別に判断して欲しい」という通達が出ている。特殊健康診断を受ける側からすると、同時に特定健康診断を受けていて、こちらは省略されても一方が省略されなければ採血されるのは一緒であり、どうせ採血されるならば検査をした方が良くなる（採血の量も大して変わらない）。さらに言うと、白血球数、赤血球数等を調べるにあたっては健診会社が別々にお金を請求しているわけではなく、同じ検査結果を当社が特定健康診断の検査項目として貧血の検査であるとか、これは特殊健康診断の結果であると分けているだけである。
- ・放射線の特定業務についての指定に線量基準がなく、特殊健康診断と足並みがそろっていない。一方だけ省略しても、もう一方が省略できないのでは意味が無いと、放射線業務従事者に対する健康診断を実施する実務者としては考えてしまう。

(6) 個人線量が厳密に管理されている中、異常値が発見されるか、その対応

- ・所見がみられる場合もあるが、記録のみ残して、特殊健康診断としては所見なしとする。対応としては、検査結果からではなく、症状によって従事を控えてもらうことはある。例えば、皮膚に術創がある人は医師と面談のうえで管理区域に入らないようにする、ゴム手袋のかぶれなど症状がひどい方については所属部署の担当に報告するなど。
- ・まず、再検査をしてもらう。再検査をしても、例えば、白血球数が低い値が続いているようであれば、産業医と面談し、必要があれば、外部の医療施設を紹介する。5mSvを超えることがほとんどないという現状であるので、放射線被ばくによる白血球減少症等の話にはならない。血液のみならず、皮膚、眼についても、特殊健康診断の結果から従事不可となった人はいない。

- ・白内障や皮膚の状況は一般の人でも異常があり得る。それが放射線の影響かを判断するのは線量が根拠になる。被ばく線量が低い値の人に異常があっても放射線の影響であるとは考えにくい。医学的な検査結果よりも被ばく線量が判断材料となるため、検査に意味がないとまでは言わないが、高齢者の白内障の場合、かなりの割合で加齢性のものであると考える。放射線の影響としての異常値が出ているということを見たり断定したりすること自体が難しい。
- ・特殊健康診断をやっている意味は、有害業務による異常を早期発見することと、有害業務と関係なく持っている基礎疾患、もしくは有害業務に従事する前の健康診断では見つからなかったけれども、例えば加齢や糖尿病による白内障であるとかを持っているときに、それらが放射線業務によって増悪しない、いわゆる二次障害を防止するという、一次障害の早期発見と二次障害の防止という二つの観点がある。ただ、二次障害の防止で従事を外すだけの客観的、医学的エビデンスが今の検査項目では少し欠けるところがあると考えている。白血病が見つければ別の話と思うが、白内障や水晶体混濁を発見できるほどのレベルで眼の検査をやっているかということ、正直そこまではしていないと思う。特殊健康診断の意義はあると思うが、実務的な今の特殊健康診断のやり方であれば、二次障害防止のために特殊健康診断の結果から従事を制限することは難しいというのが実感である。
- ・本来放射線障害ではないアトピー性皮膚炎等があり除染しにくい皮膚の状態の時、非密封作業の担当から外れさせるとするのは差別になってしまう。そういう症例にあったことは無いが、タイベックスーツを着て手袋も着用して皮膚が露出しないよう考えていくしか無いと考える。採用時や従事前であれば、競争や選別という考え方で選ばないことはできるが、一旦従事させてしまったら特殊健康診断の結果から「あなたは放射線業務に従事することはやめた方が良い」と言うことは、本人の希望があれば別であるが、出来ないと思う。本人の希望については、健康診断の話ではなく労務管理の話である。特殊健康診断の結果から、産業医が事業主にこの方は放射線業務の従事から外した方が良くと勧告するだけの医学的客観的所見には乏しいと思う。

(7) 放射線業務従事者に対する健康診断のあり方全般について

- ・確定的影響を考えると、しきい線量は決まっているため、その線量以上の線量を被ばくしない方に関しては、必要ないとしていただいた方が良くと思う。現在は、全員に対して問診の際に手や爪など診てもらっている。それが高線量を被ばくしている方に対してもっとしっかりと皮膚科、眼科の医師に診てもらえるようになるなら良い。もちろん、電離則第 56 条の 2 に緊急作業の従事者に対する特殊健康診断の規程があることは知っているが。
- ・一般的に健康診断はスクリーニングであると思う。そのスクリーニングから漏れてしまったレアケースに関して今の世の中では大変に叩かれることになる。今日の話で聞いたような線量だけで判断できる規定に変更されたら、スクリーニングから漏れてしまう人が中には出てしまうかもしれないが、99.99 点くらいは採れると思う。欧米とは違って、日本ではそれをゼロにしなければならない風土があり、0.01%のリスクに引っ張られてフルラインナップで検査をやっている感じがあると思う。そのくらいの

リスクは誰かが受けるくらいの気持ちで、マネジメントシステムのような考え方があっても良いと思う。

得られた主な意見をまとめると下記の通りであった。

●医師の判断が必要である
<ul style="list-style-type: none">・省略する場合も実施する場合もどちらにしても医師の判断が必要・医師が判断する場合、安全側に留意した判断にならざるを得ない・労務管理担当者や放射線管理担当者が線量区分（5mSv以下）のリストを作成しても、医師の判断が必要であり、省略にならない・（労務管理担当者や放射線管理担当者が）線量だけで判断できるなら、省略は進むと思う
●法令の規定にあるものは省略できない
<ul style="list-style-type: none">・入域先の企業の管理区域の立入にあたって特殊健康診断結果が必要となる可能性を考慮し、幅広に受診者を設定することになる・厚生労働省局長通達（付録4）で、検査を希望する者の省略は適当ではないとある
●対象者の振分けが煩雑
<ul style="list-style-type: none">・①5mSv超/以下で分け、②5mSv以下について医師が個々に省略の判断をし、③検査結果の確認をし、④更に総合的な判断を行うのは、煩雑で非現実的・厚生労働省様式（付録4）は、医師の確認欄が最後に設けてあるため、被ばく歴に基づいて医師が省略の判断を検査の実施前に行う手順としにくい
●特定健康診断との関係性を検討する必要がある
<ul style="list-style-type: none">・特定健康診断には線量区分がなく、省略ができない・特定健康診断と特殊健康診断を同時に実施しており、年2回の採血をすることになるので特殊健康診断の片方だけを省略する意味合いは小さい

3.3 海外調査

海外における放射線業務従事者に対する健康診断の適用状況を調査した。調査対象は、(1)国際的な最新の考え方の収集・意見交換のため、ICRP、IAEA、ILO の国際機関、及び、(2)各国の規制状況の収集・意見交換とした。

3.3.1 国際的な考え方についての国際機関に対する欧州調査

- (1)出張期間：令和元年 8 月 18 日～8 月 23 日
- (2)訪問先：8/19 国際労働機関（ILO）、（ジュネーブ、スイス）
8/20 国際原子力機関（IAEA）、（ウィーン、オーストリア）
8/22 英国安全衛生庁（HSE）、（ロンドン、イギリス）
- (3)出張者：杉浦紳之（原安協）

昨年度、海外の原子力・放射線分野の研究者とのネットワークを活用し、主に電子メールにより海外における放射線業務従事者に対する健康診断の適用状況について予備的調査を行った。各国（18 か国程度）からの回答と IAEA、OECD/NEA 及び EU の情報を勘案すると、各国の規制制度に放射線健診を取り入れている国はかなり限られていると考えられた。このため、国際原子力機関（IAEA）、国際労働機関（ILO）の国際機関における放射線健診に対する考え方を専門家に対するインタビューの形で調査・整理するとともに、労働安全衛生の観点からの法令である電離放射線規則（IRR17: Ionising Radiations Regulations 2017）に放射線業務従事者に対する健康診断についての規程がある英国安全衛生庁（HSE; Health and Safety Executive）について調査を行った。出張期間は令和元年 8 月 17～23 日であった。

(1) ICRP 及び IAEA：

国際放射線防護委員会（ICRP）の科学秘書官である C. Clement 氏が来日しており、8 月 9 日に出発に先立ちインタビューを行った。IAEA には 8 月 19 日に訪問した。放射線安全・モニタリング課課長代行の D. Tucker 氏に面会した。

【放射線防護の観点だけからは不要】

ICRP 及び IAEA では放射線防護の専門家としての視点からの意見を聞いたが、両氏ともに、血液検査及び眼・皮膚の検査は、放射線防護の観点だけから言えば不要、確定的影響の発見のための検査は線量管理が十分に行われている現在、意義が小さいとの考え方があった。

【ICRP 勧告の記述の変化】

ICRP publ.1 (1958) では血液検査（赤血球・白血球数及び白血球百分率）及び眼・皮膚の検査を求める記述があったが、ICRP publ.9 (1965) では一般産業医学と同様なものとするべきとしており大きな変更がなされている。放射線防護における主たる目的が確定的影響の防止から確率的影響のリスクの制限へと変遷した過程で放射線業務従事者に対する健康診断の意義も変化し、規制制度における扱い方も変更されたものと考えられるとのことであった。

ICRP publ.1 (1958) : (81) 検査は赤血球、白血球および白血球百分率の算定をおこなう完全な血球算定を含まなければならない。(82) 中性子および重粒子による被曝の場合にはとくに水晶体の変化に着目して眼科学的検査を、また局所的な体外照射及び体外汚染の場合には皮膚および爪の検査を含むべきである。

ICRP publ.9(1965) : (121) 健康を評価する目的は、作業者の健康が、雇用されているその業務に適合しているかどうかを決定することにある。健康管理の内容とその範囲は、一般的な産業医学上の管理方式で行われているものと大体同様のものとすべきであり、また雇用前の検査と定期的検査とを含むべきである。

【IAEA 安全基準文書の解説】

IAEA では、2018 年に刊行された GSG-7 “Occupational Radiation Protection” の放射線業務従事者に対する健康診断に関する章の我々が関心のある項目について意味合いについて意見交換した。先に、放射線防護の観点だけからは特殊健康診断は不要としたが、IAEA : GSR Part3 (BSS), GSG-7 “Occupational Radiation Protection” (2018) は、joint sponsor がいて、放射線防護以外の観点からも記述があるので、そのことにも留意して放射線業務従事者に対する健康診断のあり方について検討の必要があるとのことであった。

(2) ILO :

ILO には 8 月 18 日に訪問し、労働衛生専門家の S. Niu 氏に面会した。

【有害業務の健康診断の目的】

有害業務の健康診断の目的は、

- 1) 障害の発見と予防、
- 2) 従事への適合性の判断、
- 3) 法的な備え

など様々にあり、加えて就業前健康診断にはベースラインの把握と言うことも含まれる。

放射線業務従事者に対する健康診断の目的をどう捉えるかが重要である。その有害業務に向けた丈夫で強い人を選ぶためではなく、健診は最後の砦として考えるべきである。つまり、その作業に就いても良いかの資格を与える (qualification) の意味合いで考えるべきである。また、採用時や就業前であれば、より能力の高い人を選ぶこと (competition) を行っても構わないが、就業後は差別 (discrimination) につながらないように上記 2) の適合性の判断について配慮が必要である。

近年、BSS など国際機関の文書において呼吸保護具や皮膚についての記述がされるようになってきたが、作業環境の改善や被ばく線量管理が進んできて放射線障害の発見という意義が薄れた一方で、放射線業務への適合性について重視されるようになったことの表れであるとのことであった。

【ILO の条約や勧告】

ILO の立場からは、条約 (C115: Radiation Protection Convention) や勧告 (R114: Radiation Protection Recommendation) で記述しているように必要な放射線業務従事者に対する健康診断は実施すべきと考えるが、国によって社会保障制度のレベルが異なるた

め一律の状況となっていないことは理解している。

C115 Radiation Protection Convention (1960)

Article 12 : All workers directly engaged in radiation work shall undergo an appropriate medical examination prior to or shortly after taking up such work and subsequently undergo further medical examinations at appropriate intervals.

(Article 13 は過剰被ばく時についての記述)

R114 Radiation Protection Recommendation (1960)

VI. Medical Examinations

20. All medical examinations referred to in the Radiation Protection Convention, 1960, should be carried out by a suitably qualified physician.

21. In the cases referred to in Article 13 of the Radiation Protection Convention, 1960, all necessary special medical examinations should be carried out.

22. The medical examinations referred to in the preceding paragraphs should not involve the workers in any expense.

(以下 27 まで省略、記録の保存や過剰被ばく時についての記述)

【検査費用は雇用者負担が原則】

また、労働者が放射線業務従事者に対する健康診断を受ける権利や希望に関して、労働者の健康診断にかかる費用は雇用者負担が原則であるが、国の制度として求められていなく本人が希望する場合、別の予算（例えば、健康保険など）なり個人負担で受診すべきものと説明があった。

都道府県労働局長あて厚生労働省労働基準局長通知(基発第 568 号)

電離放射線障害防止規則第 56 条に規定する健康診断における被ばく歴の有無の調査の調査・評価項目及び健康診断の項目の省略等の可否について（平成 13 年 6 月 22 日）

次の各検査項目ごとに掲げる者については、第 56 条第 4 項の規定にかかわらず当該検査項目を実施することが望ましいこと。

(7) 各検査項目について、特に実施を希望する者

(3) HSE :

HSE は 8 月 21 日に面会し、上級専門検査官の J. Taylor 氏と C. Lee 氏にインタビューした。

【電離放射線規則(IRR17)】

年間の被ばく線量が 6mSv を超えると予測される放射線業務に就く作業者を Classified person と定義し、放射線業務従事者に対する健康診断は Classified person に就業前と年 1 回の頻度で課せられる。放射線業務従事者に対する健康診断の項目は、次の通りである。

なお、年間 6mSv 以下と予想される作業者については一切の放射線業務従事者に対する健康診断について規制が課せられない。

通常時の項目

- ・ 一般的な病歴
- ・ 過去の職歴
- ・ 以前の医療被ばく
- ・ 女性労働者
(あり得るリスクを伝える、妊娠または授乳の事実を書面で雇用主に伝える)
- ・ メンタルヘルス
- ・ 臨床検査 (皮膚、呼吸器系、血液検査)
- ・ カウンセリング

【ガイダンス】

法令である電離放射線規則 (IRR17) に放射線業務従事者に対する健康診断についての規程が詳しいが、電離放射線規則を補足するものとして、放射線業務従事者に対する健康診断に関するガイダンス (Guidance for appointed doctors on the Ionising Radiations Regulations: Medical Surveillance of Classified Persons) が整備されている。ガイダンスには、通常時と過剰被ばくの場合に分けて詳しい記述がある。通常時については上記枠内に示した各項目についての解説がある。臨床検査に関して、皮膚と呼吸器については放射線影響に着目した検査ではなく、湿疹や乾癬などの慢性的な皮膚症状やぜん息などに着目し、非密封作業や呼吸保護具の装着など、放射線作業への適合性・継続性の観点からのガイダンスが記述されている。血液検査については、就業時も継続的にも、臨床的に必要がない限り不要である旨が書かれている。法令では行うべきことを規定したり、あることを禁止したりする記述が通常であるが、あえて行わなくてよいことを書いている理由は、放射線の影響として血球数の減少はよく知られており、行わなくてもよい検査を行わないためであるとのことであった。

日本の放射線業務従事者に対する健康診断の規程について意見交換をしている際に、異常値が出ることはあるか、出た場合の対応はどうかとの質問をされた。特に白内障の疑いとされることはあるが、この場合、加齢によるものと判断し、放射線業務から外れることはまずないと答えたところ、「結果を活かさないのなら、検査をやる必要はどこにあるか」との言葉を印象的に聞いた。

【社会保障及び健康診断制度の国による違い】

電離放射線規則に規定が詳しい理由については、英国では、いわゆるかかりつけ医制度があり、国民の健康管理の基本はそこで行われており、日本で言う労働者に対する一般健康診断は存在しない。このため、有害業務に従事する労働者の健康診断が重視され、このような法整備がされていることがわかった。

3.3.2 ICRP シンポジウムの機会を利用した海外の規制状況の調査

(1)出張期間：令和元年 11 月 16 日～11 月 21 日

(2)訪問先： ICRP 2019 5th International Symposium on the System of Radiological Protection (the Adelaide Convention Centre)

(3)出張者：飯本武志（東京大学）、酒井一夫（東京医療保健大学）*

* ICRP 委員であり現地にいたため、本事業での出張ではないが、研究協力者であることから現地でサポート

ICRP シンポジウムには、ICRP 委員はもとより放射線防護に関する研究者、行政官、管理者（放射線管理）など多くの関係者が世界中から集まる。このため、海外各国の規制状況の調査を行うためには、個々の国を訪問するより、このシンポジウムの機会を利用する方が効率的と考えた。なお、飯本及び酒井の連名で”International Survey on Status of Medical Examinations for Radiation Workers – Assisting Comprehensive Discussion on”という演題でポスター発表を行い、本調査の意図を説明するとともに会場での関心を集めるのに役立てた。調査票は、酒井及び科学秘書官補佐である藤田氏から ICRP 委員及び参加者の一部に事前配布し、会場で回収する際に意見交換（ヒアリング）を行った。

なお、この調査を現地会場で行うこと及び関係者・参加者に調査票を事前配布することについて、8月9日の ICRP C. Clement 氏との面会の際に申し入れをして承諾をあらかじめ得た。

■アンケートおよびヒアリング

- ・アンケート回収数：17 か国、72 件
豪州、韓国、台湾、中国、香港、マレーシア、ベトナム、スリランカ、タイ、ベルギー、英国、フランス、デンマーク、ドイツ、ポーランド、カナダ、米国
- ・付録 3 にそれぞれの意見を表形式に集計した一覧を示す。

■集約された意見の概要

【放射線影響に関する健康診断の必要性】

実施目的：

- (1) 放射線被ばくによる人体影響のないことの確認
- (2) 既得権益の継続

実施条件：

- (1) すべての放射線業務従事者に、就業前、その後定期的に実施（半年毎、1年毎、14月毎）
- (2) すべての放射線業務従事者に、就業前、ある線量（6mSv、線量限度の25%等）を超えたとき

【放射線影響がないことを確認・保証する責任の所在】

- (1) 放射線業務従事者本人
- (2) 雇用主
- (3) 国（無料化制度、国民健康保険の利用の可能性など）

【規制や考え方のまとめ】

- ・アジア諸国で放射線業務従事者に対する健康診断は、法令要件となっている場合が多い。

(放射線利用の歴史が浅く、国内制度に取り入れる際に日本を参考としたためか)

- ・放射線業務従事者に対する健康診断の意義を放射線防護の観点で考えるのは、高線量被ばくの場合のみ
- ・雇用者と労働者（家族含む）のコミュニケーションツール（放射線作業に就いていても何も健康上問題ないことを示す）と位置づけ（主として欧州）
- ・従事者の被ばくの影響を雇用者の責任で確認をする必要はなく、健康は個人の問題（主として北米）

■得られた情報と個別意見の特徴的な事例

- ・たとえば 10mSv を超えていなければ放射線業務従事者に対する健康診断による結果に人体影響に関する科学的な所見を見出せないの、低線量被ばくが受ける放射線健診の実施費用を負担するのは、その受診を望む従事者本人に任せるべき（豪州・研究）
- ・危険労働者に対するメンタルヘルスを含む業務従事適正検査の定期実施には賛成する（豪州・規制／研究、デンマーク・コンサルタント）
- ・放射線以外の一般労働でも、一般健診を雇用者側に課しているのであれば、その内容を適切に利用すれば、実施目的は達成できるのではないか（豪州・規制）
- ・人体影響に及ぶような過剰な線量を受けていないことの証明として健診は必要（豪州・規制）
- ・従事者の被ばくの影響を雇用者の責任で確認をする必要はない。健康は個人の話題（カナダ・大学医学部、米国・研究）
- ・従事者の健康は守られ、確実に保証されるべき。国が責任を有し、国がそれを支援する仕組みを用意すべき。保険制度を充実させるなど（豪州・規制／研究）
- ・就業前と開始後の年1回の健診（問診と血液）は被ばく線量に関係なく、法で義務づけられている。科学的な意味はないと考えている。（韓国・大学）
- ・1mSv を超えたら線量管理上のある程度の管理監視下に入り、6mSv を超えたら血液検査の実施が法で義務づけられている。それ以上の線量になるとケースバイケースの対応。（ベルギー・病院）
- ・14カ月毎に健診実施が義務づけられており、その予算はすべて国が支出している（従事者の負担はない）。そのデータはすべて国が管理し、統計データをとっている（香港・規制）
- ・他国に労働者を送り出すために、EU ルール（または他国のルール）に基づいて健診等が実施されている歴史的経緯。放射線ルールは古くから続くもので、改正が難しい状況。個人的には合理的でない部分が多いと感じている。（ベルギー・病院）
- ・全従事者に対する定期健診を義務化することの大きなメリットは、それに長く関わっている既得権益者（医療関係者等）にあるのではないか。（ベルギー・病院）
- ・将来にわたって何も健康影響があり得ないことを、何らかの形で本人や家族に対して証明するのは雇用者の責任範囲（ポーランド・研究、豪州・規制）

- ・放射線業務従事者に対する健康診断実施は、雇用者と被雇用者の良好な接続と関係を維持するツールにもなる（豪州・大学）

3.3.3 北米についての調査

当初計画では、カナダに ICRP 事務局があることから、ICRP 及びカナダ原子力安全委員会（CNSC）、米国 NRC に現地調査を行うこととしていた。ICRP については日本国内で面会できることとなったこと、米国については、10CFR20 などの事前調査から放射線業務従事者に対する健康診断についての情報があまり得られなさそうなことが分かったことから、ICRP シンポジウムへと調査先を変更した。このため、北米について着目して規制状況や考え方の確認をする必要があり、日本国内に滞在する米国人研究者に紙面（メール）にて聞き取りを行った。量子科学技術研究開発機構及び理化学研究所の協力を得ることが出来、それぞれ 3 名、2 名の回答を得た。

回答の内容は、3.3.2 のカナダ・大学医学部、米国・研究の回答にもあるが、法令によって放射線業務従事者に対する健康診断は規定されておらず、健康管理の責任は個人の問題であるとするものがすべてであった。

代表的なコメントを以下に記す。

米国において、法令には放射線業務従事者に対する健康診断の規定はない。

すべての放射線業務従事者が血球数、皮膚、および目の検査を受ける必要があるという要件は、作業者のプライバシーの侵害であり、不要である。日常的な線量測定で十分と考える。健康上の問題につながる放射線事故が非常に少ないことを考えると、そのような検査は完全に不当であり、納税者のお金の浪費である。米国では、作業者は放射線の危険性についてよく知らされており、放射線作業に就かないことも自由である。つまり、作業者の安全に対する責任は、主に作業者自身の責任であり、規制当局にはない。

4 放射線業務従事者に対する健康診断のあり方の提言－論点と課題－

(1) 実態：「制度の主旨に沿った対応が取られているか」（放射線審議会の議論）への回答

アンケート調査の結果によれば、年1回の省略、年2回とも省略はいずれの施設（原子力、放射線、医療）でも数%に留まっており、省略は行われていない。また、被ばく線量が5mSvを超える場合と5mSv以下の場合を区別して運用している施設は最も多い放射線施設（大学）でも38%、最も少ない原子力施設で8%であった。

「電離放射線障害防止規則の解説」によれば（条項名を具体的に書き換えている、以下同じ）、実効線量が5ミリシーベルトを超えない労働者に対しては、定期の特殊健康診断は原則被ばく歴の有無の調査及びその評価のみを行えばよく、白血球数及び白血球百分率の検査、赤血球数の検査及び血色素量又はヘマトクリット値の検査、白内障に関する眼の検査、皮膚の検査の一部又は全部について医師が必要と認めるときに限り当該検査を実施すれば足りるとされ、さらに、被ばく線量の値が低い放射線業務従事労働者に対しては、健康診断における医学的検査の必要性が減じられるべきものであり、それでもなお医学的検査が必要と判断するには、被ばく歴の有無の調査の結果から、当該被ばく線量の値に疑問を持つべき要素（被ばく線量の値が本来の被ばく線量を大きく下回っていることが疑われる要素）があるか、放射線の影響によると疑われる自他覚症状が認められることが必要とされている。

その一方、管理区域内で常時放射線業務を行うすべての労働者に対して被ばく歴の有無の調査及びその評価から皮膚の検査まで原則実施する必要があるとし、被ばく歴の有無の調査及びその評価の結果、検査の一部又は全部について医師が実施する必要がないと認められた労働者については、事業者は、当該検査を省略することができるとしている。

これらをまとめれば、実効線量年5mSvを境目として線量が低ければ原則省略、線量が高ければ原則実施と対応を変えるのが制度の趣旨と考えられる。アンケート調査結果で示された通り、線量を区分した運用がされていなかったり、省略が進められていない現状は制度の趣旨に沿った対応が取られているとは言い難い。

(2) 省略がされていない理由：

1) 医師の判断

法令では医師が検査の省略の判断を行う規程となっており、省略・実施のいずれにしても医師の判断が必要で医師にかかる負担が大きいことが省略しない理由のひとつとしてあげられた。省略するための判断基準が明確ではないとする意見が、アンケート調査及びインタビュー調査で多く聞かれた。

特殊健康診断の実施プロセスについてのインタビュー調査結果では、5mSv以下の従事者の健康診断の検査について、特殊健康診断の意義を確定的影響の発見以外にも見出している産業医には「実施が必要」と明示的に判断している方もいたが、多くは「省略できない、省略しない」という医師の判断で検査は実施されていた。(1)で述べた「医師が必要と認めるときに限り当該検査を実施すれば足りる」としている制度の趣旨とは少し異なった運用であると考えられる。

イギリスでは、年 6mSv という線量基準のみで検査の実施・省略の判断がなされている。インタビュー調査においてこの例を紹介すると、もし線量だけで省略の判断が出来るとなると省略はもっと進むとするコメントは多かった。(1)の主旨は我が国でもほぼ線量だけで判断できると考えられるが、原則実施の網がかけられた後に線量で区分されるのと、最初から線量が低いところが枠に入っていないのとでは、医師にかかる負担が大きく異なるという意見であった。

2) 手続きの煩雑さ

省略の判断には、被ばく歴の有無の調査を行い、その「評価」が重要とされている。また、「自覚症状」についても考慮する必要がある。

「電離放射線障害防止規則の解説」によれば、特殊健康診断の手順は、

- ・ 医師は対象者についてそれぞれ「被ばく歴の有無の調査及びその評価」を行う。
- ・ 被ばく歴を有する労働者については、被ばくにかかる作業の場所、作業内容、作業期間、放射線障害の有無、自覚症状の有無、その他放射線による被ばくに関する事項について、問診等により把握して評価を行う。
- ・ 事業者は、対象者について前回の健康診断実施後に受けた線量を医師に示す。
- ・ 健診項目の省略の可否について、健診対象労働者各人ごとに総合的に判断する。

とされている。

大規模人数を抱える事業所においても登録システム（オンラインシステム）を導入するなどして、1回の特殊健康診断にあたり3回、医師が目を通しているところもあったが、多くの場合、最後の判定の際に1回確認をしている。特殊健康診断の効率化という観点から各人ごとに判断し、その結果様々に振り分けて対応を取るのは煩雑に過ぎると考えられている。

さらに、電離則様式第1号の2電離放射線健康診断個人票が定められているが、被ばく歴の有無の評価結果の記載欄がなく、自覚症状（自覚的訴え）の欄が後の方にあり、上記で示されている手順で実施しづらい様式となっている。

(3) あり方の検討にあたっての論点

1) 特定健康診断との関係

放射線業務は特定業務の1つであり、特定健康診断として一般健康診断を年2回受診する必要がある。特定健康診断にも年齢等の基準による検査項目の省略規定はあるものの全部の項目を省略することはできない。特定健康診断で採血をされるなら、たとえ特殊健康診断を省略したとしても、従事者への侵襲は変わらずあり、省略の意義は薄れる。

特定業務は、「ラジウム放射線、エックス線その他の有害放射線にさらされる業務」として定められている。ラジウムという文字から我が国で放射線作業が始められた当初の時期に定められたもので、その後、見直しの検討が行われてこなかったことは明白である。特定健康診断と特殊健康診断とその目的は異なるものではあるが、電離則が放射線作業の内容及び被ばく線量の低減の変遷に伴い頻繁に改定が重ねられてきたことを踏まえ、放射線の特定業務についての定義も現状の業務に沿ったものとなるよう改定の検討が進むことが期待される。

2) 特殊健康診断の目的

有害業務の特殊健康診断の目的には、①有害要因による障害の発見・予防、②当該作業の継続の可否の判断など様々なものがある。現行の検査項目は、放射線の確定的影響に着目したもので、海外調査においても放射線防護の観点だけからは不要と明確な意見があったものである。作業環境や作業手順の改善、被ばく線量管理により被ばく線量が低減された現在では①の障害の発見の意義は低下し、むしろ、②の作業への継続性の判断について現行の検査項目はきちんと機能していて十分なものなのか、加えて、国際的にも議論されている（確定的影響ではない）皮膚や呼吸器疾患についての検討をすべきなのではないかと考える。

3) 特殊健康診断の希望者の扱い

平成13年の法令改正時に、日本労働組合総連合会からの意見・要望として、「(旧)労働省の所管行政に係る規制緩和要望およびその検討状況について」（平成12年1月18日）で、「経済団体等から要望が出ている放射線業務従事者の健康診断間隔の1年への延長について、労働者の健康を確保するとの目的と設定の考えを踏まえ慎重に検討すべきである。」が示され、現RI法では年1回とされているところ、健康診断間隔を1年に延長する予定はないと判断され、(1)で述べた線量区分による省略の規程は取り入れられたものの検査頻度は年2回のみとされた。

また、都道府県労働局長あて厚生労働省労働基準局長通知(基発第568号)「電離放射線障害防止規則第56条に規定する健康診断における被ばく歴の有無の調査の調査・評価項目及び健康診断の項目の省略等の可否について(平成13年6月22日)」では、5mSv以下で省略できる規定にかかわらず検査を希望する者については検査を実施することが望ましいとされている。

ILOの考え方によれば、労働者は放射線健康診断を受ける権利があり、労働者の健康診断にかかる費用は雇用者負担が原則である。しかし、国の制度として求められていない場合、別の予算(例えば、健康保険など)なり、個人負担ですべきものと説明があった。

アンケート調査やインタビュー調査の結果では、受診者側の意識としても線量が低いこと、放射線健康影響についての理解が教育訓練等で浸透していることなどを背景として、30%~50%程度実施頻度を年1回とするのがよいということであった。

さらには、欧州を中心として、放射線業務従事者に対する健康診断の結果を家族へ説明するための安心材料として用いるという考え方が比較的多くあった。産業医のインタビューにおいても、アンケート調査結果で特殊健康診断の目的として「異常がないことを確認するため」が多く選択されていたことから、メンタルヘルスやリスクコミュニケーションの観点から意義があるとする意見もあった。

(4) あるべき姿に向けた法令改正の議論

1) リスクに応じた適切な検査の実施と省略

有害物質については、管理や規制の考え方としてリスクに応じたものとするのが昨今当たり前になってきている。本報告では、定期の特殊健康診断の省略に大きな焦点をあてて検討してきているが、リスクの程度に応じた適切な検査の実施と省略が必要だと考える。

眼の水晶体の線量限度の引き下げに伴い、厚生労働省の眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会では、「(医療施設など)十分な放射線防護を行っても、なお高い被ばく線量を眼の水晶体に受ける可能性のある労働者は、健康診断の項目の白内障に関する眼の検査の省略は認めないことが適当である」との報告をまとめており、「必要に応じて散瞳による水晶体の観察を伴う検査等を行うため、当該労働者に対する健康診断の項目の白内障に関する眼の検査は、眼科医により行われることが望ましい」と現行では具体的な検査方法が定められていない眼の水晶体の検査方法について、症状(障害)をきちんと発見するにはどのレベルの検査が必要か丁寧に議論されている。

一方、実効線量が 5mSv を超えない放射線業務従事者については、医学的検査は原則不要とされているところ、実態として省略はあまり進んでいないが、白内障の具体的な検査方法は規定されておらず、果たして他覚的な所見を確認できているのかとの疑問も産業医に対するインタビューで得られたほか、所見が確認されたとしても放射線障害ではない他の原因(加齢等)と区別された対応が取られておらず、結果として特殊健康診断の意味、意義が不明確になっていることは否めない。リスクに応じた意義のある形となるような検討が望まれる。

2) 法令間の規定や表記の不整合の統一

また、法令間の規定や表記の不整合の統一について、具体的には電離則と RI 法で下記のような違いがある。

頻度：年 1 回 (RI 法) と年 2 回 (電離則)

省略のための医師の判断：

「必要と認める場合に実施」(RI 法)

「必要でないと認める時に省略」(電離則)

「必要と認めない時には行うことを要しない」(電離則、 5mSv 以下)

法令にはそれぞれの目的があり、RI 法は放射線障害の防止、電離則は労働安全衛生法の労働者の保護という異なった目的から定められている。

電離則では、特殊健康診断は有害業務に従事する者の健康診断として定められている。有害業務の健康診断の目的として、①その有害要因による障害の発見と予防、②その有害業務に適合性があるか、引き続き従事が可能かの判断などがある。線量管理が進んだ現在は、①の目的が薄れ、②の目的が重要視されてきており、国際機関(IAEA)や海外(英国)の指針に、皮膚の慢性疾患を持つ者の非密封作業、喘息持ちの者の呼吸保護具の着用等についての言及がされている。

一方、現行の電離則では検査項目のみで検査方法についての規定はなく、例えば白内障の疑いの所見があった場合に①及び②について適切な判断ができる検査方法がとられているか疑問に感じているという医師の意見もインタビュー調査で得られた。

放射線業務従事者に対しては、特定健康診断(一般健康診断を年 2 回)、特殊健康診断(血液、眼、皮膚を年 2 回)の両方が義務付けられている。それぞれの健康診断で、何を

明らかにするのかという目的とそれを果たすための検査項目を議論することが必要である。特殊健康診断では確定的影響の障害の発見という目的のみを持たせ、特定健康診断で全般的な検査結果と合わせ適合性について判断することも1つの結論と考えられる。

最後になるが、論点と課題が様々に列挙されたように、それらすべてを解決したあるべき姿を示すことは困難である。また、これらがすべてではなく、他の論点や課題もあると考えられる。しかし、水晶体の線量限度引き下げに伴い、今後特殊健康診断の見直しについての議論は行われるものとする。本研究では、その議論に資するための論点や課題を整理し、2年間の研究報告書のまとめとした。

5 付録

付録1 アンケート調査票

A-1 実施者

- ・原子力施設
- ・放射線施設
- ・産業医

A-2 受診者（共通）

付録2 アンケート集計結果

B-1 実施者

- ・原子力施設
- ・放射線施設（大学）
- ・放射線施設（一般企業）
- ・医療施設
- ・産業医

B-2 受診者

- ・原子力施設
- ・放射線施設（大学）
- ・放射線施設（一般企業）
- ・医療従事者

付録3 各国の規制状況（結果）

付録4 検討にあたって参考とした法令、通達など関連文書

- ・電離則、RI法、人事院規則、安全衛生規則の関連条文
- ・電離放射線障害防止規則の解説（中央労働災害防止協会）
- ・局長通達（基発第568号、平成13年6月22日）
- ・電離則 様式第1号の2（第57条関係、電離放射線健康診断個人票）

放射線業務従事者に対する健康診断実施に関する アンケートへのご協力のお願い

放射線業務従事者の特殊健康診断については、放射線審議会などにおいて「あり方」について長く検討されており、ICRP2007年勧告の法令取り入れの検討においても改めて議論されています。本規制庁研究では、放射線業務従事者に対し義務付けられている定期健康診断の実態調査を行った上で、放射線業務従事者に対する健康診断の医学的見地からの意義を検討することとしております。

上記を踏まえて、本アンケート調査では、放射線取扱事業所（原子力施設、放射線施設（大学・研究所、産業利用）、医療施設等）における特殊健康診断の**実態調査**に加えて、特殊健康診断の実施者である産業医並びに放射線管理担当者（労務管理担当者を含む）の方の**特殊健康診断に対する考え方（認識）**をお伺いし、上記の検討の基礎資料とすることを目的としています。

また別途、特殊健康診断を受診される放射線業務従事者の皆様についても、特殊健康診断に対する考え方（認識）を合わせてアンケート調査します。

ご回答いただいたアンケート等の個人情報については、関係法令等[※]に基づき、セキュリティの確保された環境において厳重に管理し、本調査以外の目的には利用することはありません。また、調査結果についても、個人情報が特定される形での公表を行うことはありません。

本アンケート調査は、規制庁「放射線安全規制研究戦略的推進事業費」により公益財団法人原子力安全研究協会が実施します。実施に当たっては当該協会の倫理委員会の承認を経ています。内容についてご不明点がございましたら、以下のお問い合わせ窓口までお問い合わせください。

※行政機関の保有する個人情報の保護に関する法律（平成15年5月30日法律第58号）、原子力規制委員会保有個人情報等管理規程（平成24年9月19日）、人を対象とする医学系研究に関する倫理指針（平成26年12月22日文部科学省・厚生労働省）、等

原子力規制委員会 原子力規制庁
公益財団法人原子力安全研究協会

お問い合わせ窓口

放射線環境影響研究所 横山 [TEL:03-5470-1994](tel:03-5470-1994) E-mail:kenshin@nsra.or.jp

我が国の法律では、放射線業務従事者の特殊健康診断について、次のように規定されています。(一部抜粋)

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則

- ・放射線従事者に対し、管理区域に立ち入る前に健康診断を実施し、管理区域に立ち入った後は、1年を超えない期間ごとに健康診断を実施する。
- ・健康診断は問診及び検査又は検診とし、「血液検査」、「皮膚」、「眼」については、医師が必要と認める場合に実施する。(管理区域に立ち入る前の健康診断については、「血液検査」及び「皮膚」の検査が必須)

電離放射線障害防止規則

- ・事業者は、放射線業務に常時従事する労働者で管理区域に立ち入るものに対し、雇入れまたは当該業務の配置換えの際、またその後6か月ごとに1回定期的に次の項目について医師による健康診断を行う必要がある。
 - ①被ばく歴の有無 ②白血球数、白血球百分率の検査 ③赤血球数、血色素量またはヘマトクリット値の検査 ④白内障に関する眼の検査 ⑤皮膚の検査
- ・上記健康診断項目のうち、定期的に行わなければならないものについて、医師が必要でないと認めるときは②～⑤の項目全部もしくは一部を省略できる。
- ・健康診断を行おうとする日の属する年の前年一年間の実効線量が5ミリシーベルトを超えず、かつ健康診断を行う日が属する1年間で5ミリシーベルトを超えるおそれがない者に対する健康診断については、上記②～⑤の項目は、医師が必要と認めないときには、行うことを要しない。

以上を踏まえて、続く設問にご回答ください。

回答しにくい、もしくは回答できない項目がございましたら、空欄でも構いません。

【1】貴社について教えてください。

〈業種〉

- 医療機関 教育・研究機関等 国の機関 地方自治体
- 核燃料加工、原子力(電力事業を除く) 電力事業(電力会社)
- 機械、精密機器 鉄鋼、金属 科学、ゴム製品
- 輸送用機器、運輸業 輸送容器承認・設計承認 建設業
- ガラス、窯業 環境計量、産業廃棄物処理、検査サービス(非破壊を除く)
- 石油・石炭製品、鉱業 電気機器、ガス業
- 非破壊検査(法第10条6項を除く) 非破壊検査(法第10条6項)
- 紙・パルプ、印刷業、繊維業 製薬業、臨床検査、食品製造業

・①～③について、2018年度における対象者の延べ人数を教えてください。

① 電離放射線障害防止規則（労働安全衛生法）

5mSv を超えない方 （ ） 名

② 放射線障害防止法

5mSv を超えない方 （ ） 名

③ 電離放射線障害防止規則（労働安全衛生法）と放射線障害防止法の両方に該当する方

5mSv を超えない方 （ ） 名

④ その他

5mSv を超えない方 （ ） 名

【5】電離放射線障害防止規則に基づいた場合、特殊健康診断における検査又は検診（問診は必須）を年2回（6ヶ月を超えない期間ごと）実施することとなっておりますが、どのように検査を実施していますか。該当するものにチェックを入れてください。

定期一般健康診断とは別に年2回実施している

定期一般健康診断の際に1回実施し、約半年後に別途1回実施することで、年間で計2回実施としている

定期一般健康診断の際に1回のみ実施し、半年後の別途1回は省略している

年に1回も実施していない

その他（ ）

【6】年間5mSv以上を超えている方と年間5mSvを超えない方に検査を実施する際に、対応を分けていますか。

分けている

⇒【7】①と②へ

分けていない

⇒【7】③へ

【7】特殊健康診断（電離放射線障害防止規則、放射線障害防止法に規定されている健康診断、以下同様）として実施している検査・検診の項目また、実施状況にチェックを入れてください（複数回答可）。

①年間 5mSv 以上を超えている場合

〈電離放射線障害防止規則〉

	検査項目	全員実施	全員省略	医師の判断もしくは 基準を決めて省略
必須項目	被ばく歴の有無に関する 問診	<input type="checkbox"/>	—	—
省略できる 項目	白血球、白血球百分率検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	赤血球、血色素量または ヘマクリット値の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	白内障に関する眼の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	皮膚の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	その他 ()	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

※「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則」と検査項目の記載は違いますが、同じものとみなします。

②年間 5mSv を超えない場合

〈電離放射線障害防止規則〉

	検査項目	全員実施	全員省略	医師の判断もしくは 基準を決めて省略
必須項目	被ばく歴の有無に関する 問診	<input type="checkbox"/>	—	—
省略できる 項目	白血球、白血球百分率検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	赤血球、血色素量または ヘマクリット値の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	白内障に関する眼の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	皮膚の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	その他 ()	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

※「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則」と検査項目の記載は違いますが、同じものとみなします。

③対応を分けていない場合

〈電離放射線障害防止規則〉

	検査項目	全員実施	全員省略	医師の判断もしくは 基準を決めて省略
必須項目	被ばく歴の有無に関する 問診	<input type="checkbox"/>	—	—
省略できる 項目	白血球、白血球百分率検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	赤血球、血色素量または ヘマクリット値の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	白内障に関する眼の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	皮膚の検査	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	その他 ()	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

※「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則」と検査項目の記載は違いますが、同じものとみなします。

【8-1】(【5】、【7】について、実施回数、検査項目を省略していない場合にご回答ください)

【5】、【7】について、実施回数、検査項目を省略しない理由で該当するものすべてにチェックを入れてください。

- 省略の判断の手続きが煩雑であるため。
- 省略する積極的な理由がないため。
- 法定の項目は省略しないこととしているため。
- 異常がないことを確認・記録するため。
- その他

(具体的にご記入ください)

- 作業者の通常の健康状態を知るため
- 放射線障害の判定の基礎データにするため
- 放射線障害以外の病気を把握するため
- 健康リスクのマネジメントを行うため
- 経営リスク、訴訟リスク等のマネジメントを行うため
- 法令により定められているため
- その他 ()

【14】特殊健康診断における検査・検診と考えられる項目から、どのような病気や症状が発見できると考えておられますか。該当するものにチェックを入れてください(複数回答可)。

- 多血症(赤血球増多症) 貧血 がん 白血病
- 皮膚障害 白内障 緑内障
- その他 ()
- 現状の被ばく線量で確認できる異常はない。

【15】年間被ばく量を考慮するとした場合、特殊健康診断の実施についてどのように考えておられますか。実施回数と健診項目について、あなたの考えに最も近いものにチェックを入れてください。

実施回数

- 年間被ばく量に関係なく、年2回実施するのがよい
- 年間被ばく量に関係なく、年1回実施するのがよい
- 年間被ばく量に応じて、実施回数を変えるのがよい
- 年間被ばく量に関係なく、実施しなくてよい
- その他 ()

特殊健康診断項目

年間被ばく量に関係なく、項目には血液検査や診察等を含み、省略追加等は原則行わないのがよい

年間被ばく量に関係なく、項目は最小限とし、省略追加等は原則行わないのがよい

項目には血液検査や診察等を含み、年間被ばく量等に応じて項目を省略することができるのがよい

項目は最小限とし、年間被ばく量等に応じて項目を追加することができるのがよい

特殊健康診断を実施しなくてよい

特殊健康診断は事故など異常が発生した後にのみ行えばよい。

その他

()

【16】現在のわが国の法制度に対する意見、要望はありませんか。また、特殊健康診断の実施について、免除基準等の判断に困るようなことはありませんか。

意見、要望は特になく、現状のままで良い。

意見要望がある。または困ることがある。

ご意見をお書きください。

[]

以上、アンケートへのご協力ありがとうございました。

アンケート集計結果の返送を希望されますか。また、ご回答いただいた内容をもとにヒアリング調査にご協力いただけますか。当てはまる項目にチェックを入れてください。

結果の返送を希望する

ヒアリング調査に協力できる

上記にチェックを入れた方は連絡先のご記入をお願いいたします。

勤務先・部署名・お名前()

勤務先住所(〒 —)

E-mail ()

電話番号(— —)

【参考】

（放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則）一部抜粋

第二十二條 法第二十三條第一項の規定による健康診断は、次の各号に定めるところによる。

- 一 放射線業務従事者（一時的に管理区域に立ち入る者を除く。）に対し、初めて管理区域に立ち入る前に行うこと。
- 二 前号の放射線業務従事者については、管理区域に立ち入った後は一年を超えない期間ごとに行うこと。
- 四 健康診断の方法は、問診及び検査又は検診とする。
- 六 検査又は検診は、次の部位及び項目について行うこと。ただし、イからハまでの部位又は項目（第一号に係る健康診断にあつては、イ及びロの部位又は項目を除く。）については、医師が必要と認める場合に限る。
- イ 末しょう血液中の血色素量又はヘマトクリット値、赤血球数、白血球数及び白血球百分率
- ロ 皮膚
- ハ 眼
- ニ その他原子力規制委員会が定める部位及び項目

（電離放射線障害防止規則）一部抜粋

第八章 健康診断

（健康診断）

第五十六條 事業者は、放射線業務に常時従事する労働者で管理区域に立ち入るものに対し、雇入れ又は当該業務に配置替えの際及びその後六月以内ごとに一回、定期に、次の項目について医師による健康診断を行わなければならない。

- 一 被ばく歴の有無（被ばく歴を有する者については、作業の場所、内容及び期間、放射線障害の有無、自覚症状の有無その他放射線による被ばくに関する事項）の調査及びその評価
 - 二 白血球数及び白血球百分率の検査
 - 三 赤血球数の検査及び血色素量又はヘマトクリット値の検査
 - 四 白内障に関する眼の検査
 - 五 皮膚の検査
- 3 第一項の健康診断のうち、定期に行わなければならないものについては、医師が必要でないときと認めるときは、同項第二号から第五号までに掲げる項目の全部又は一部を省略することができる。
- 4 第一項の規定にかかわらず、同項の健康診断（定期に行わなければならないものに限る。以下この項において同じ。）を行おうとする日の属する年の前年一年間に受けた実効線量が五ミリシーベルトを超えず、かつ、当該健康診断を行おうとする日の属する一年間に受ける実効線量が五ミリシーベルトを超えるおそれのない者に対する当該健康診断については、同項第二号から第五号までに掲げる項目は、医師が必要と認めないときには、行うことを要しない。

放射線業務従事者に対する健康診断受診に関する アンケートへのご協力をお願い

わが国では、放射線業務従事者が健康に作業を継続するために、定期的な特殊健康診断の実施を義務付けています。現状では、放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（RI法）と労働安全衛生法（電離則）の2つの法令に健診に関する規定があり、従事者によっては両方の法令の規制を受けている者もいます。そこで、放射線業務従事者のためのよりよい健診の在り方を検討することを目的として、健診の実態調査と検診への認識を確認するアンケートを企画いたしました。

本調査を基にして放射線業務従事者の健康を保持するためのより良い健診の在り方を考察する予定です。また、回答していただいた内容は検診のあり方に係る本調査のみに使用しますので、実態についてご記入ください。お忙しいとは存じますが、本調査の趣旨をご理解いただき、ご協力のほどよろしくお願い申し上げます。

ご回答いただいたアンケート等の個人情報については、関係法令等※に基づき、セキュリティの確保された環境において厳重に管理し、本調査以外の目的には利用することはありません。また、調査結果についても、個人情報が特定される形での公表を行うことはありません。

※行政機関の保有する個人情報の保護に関する法律（平成15年5月30日法律第58号）、原子力規制委員会保有個人情報等管理規程（平成24年9月19日）、人を対象とする医学系研究に関する倫理指針（平成26年12月22日 文部科学省・厚生労働省）、等

原子力規制委員会
公益財団法人原子力安全研究協会

お問い合わせ窓口

放射線環境影響研究所 小野原、横山 [TEL:03-5470-1994](tel:03-5470-1994) E-mail:kenshin@nsra.or.jp

【10】放射線作業従事者として法令に基づいた業務を実施するときに、被ばく管理および健康診断について改善を希望することはありますか。

改善してほしいことは特になく、現状で良い。

改善してほしいことがある。または困ることがある。

(その内容 :

)

以上です。ご協力ありがとうございました。

参考資料：放射線業務従事者の特殊健康診断に関する法令文（一部抜粋）

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律施行規則

- ・放射線従事者に対し、管理区域に立ち入る前に健康診断を実施し、管理区域に立ち入った後は、1年を超えない期間ごとに健康診断を実施する。
- ・健康診断は問診及び検査又は検診とし、「血液検査」、「皮膚」、「眼」については、医師が必要と認める場合に実施する。（管理区域に立ち入る前の健康診断については、「血液検査」及び「皮膚」の検査が必須）

電離放射線障害防止規則

- ・事業者は、放射線業務に常時従事する労働者で管理区域に立ち入るものに対し、雇入れまたは当該業務の配置換えの際、またその後6か月ごとに1回定期的に次の項目について医師による健康診断を行う必要がある。
 - ①被ばく歴の有無 ②白血球数、白血球百分率の検査 ③赤血球数、血色素量またはヘマトクリット値の検査 ④白内障に関する眼の検査 ⑤皮膚の検査
- ・上記健康診断項目のうち、定期的に行わなければならないものについて、医師が必要でないときは②～⑤の項目全部もしくは一部を省略できる。
- ・健康診断を行おうとする日の属する年の前年一年間の実効線量が5ミリシーベルトを超えず、かつ健康診断を行う日が属する1年間で5ミリシーベルトを超えるおそれがない者に対する健康診断については、上記②～⑤の項目は、医師が必要と認めないときには、行うことを要しない。

電力実施者(n=178)

【1】回答者業種、事業所規模
業種(複数回答)

	地方自治体	核燃料加工・原子力 (電力事業を除く)	電力事業(電力 会社)	機械、精密機器	輸送容器承認・ 設計承認	建設業	環境計量、産業廃棄 物処理、検査サービ ス(非破壊を除く)	電気機器、 ガス業	非破壊検査(法 10条6項を除く)	その他	未回答	計
回答数	1	56	97	9	1	5	2	8	1	4	2	186
割合	0.6%	31.5%	54.5%	5.1%	0.6%	2.8%	1.1%	4.5%	0.6%	2.2%	1.1%	104.5%

事業所規模

	50人未満	50人以上	100人以上	未回答	計
回答数	0	4	171	3	178
割合	0.0%	2.2%	96.1%	1.7%	100.0%

【2】職種、経験年数

職種(複数回答)

経験年数	職種						計	割合
	事務(放管担当)	事務(労務担当)	衛生管理者	事務所内産業医	その他	未回答		
0~9年	47	21	11	11	12	0	102	57.3%
10~19年	19	4	1	7	6	0	37	20.8%
20年以上	11	1	2	1	15	0	30	16.9%
未回答	1	1	1	1	3	4	11	6.2%
回答数	78	27	15	20	36	4	180	101.2%
割合	43.8%	15.2%	8.4%	11.2%	20.2%	2.2%	101.0%	

【3】放射線業務従事者の作業場所、取り扱っている放射性同位元素、装置(複数回答)

	原子炉	核燃料物質	核原料物質	密封RI	非密封RI	加速器・放射 線発生装置	X線発生装置	電子顕微鏡	該当なし	未回答	計
回答数	113	131	31	97	66	25	23	8	1	11	506
割合	63.5%	73.6%	17.4%	54.5%	37.1%	14.0%	12.9%	4.5%	0.6%	6.2%	284.3%

【4】各法令の対象者数、特殊健診受診率

受診者数

	電離放射線障 害防止規則	放射線障害防 止法	電離則と障防 法両方	その他
0~99人	8	47	68	10
100~499人	49	11	12	1
500~999人	41	45	47	0
1000人以上	45	2	4	0
無回答	35	73	47	167
計	178	178	178	178

受診率

	電離放射線障 害防止規則	放射線障害防 止法	電離則と障防 法両方	その他
89%以下	1	2	1	6
90~99%	0	0	0	0
100%	145	107	133	4
無回答	32	69	44	168
計	178	178	178	178

対象者のうち、5mSv以下

	電離放射線障 害防止規則	放射線障害防 止法	電離則と障防 法両方	その他
0~99人	9	2	1	6
100~499人	48	107	133	4
500~999人	38	0	0	0
1000人以上	45	0	0	0
無回答	35	69	44	168
計	175	178	178	178

【5】特殊健康診断の検査実施

	定期一般健康診断と は別に年2回	定期一般健康診断の 際に1回、別途1回と 合わせ年2回	定期一般健康診断の 際に1回実施し、半年 後の検診は省略	年に1回も実 施していない	その他	未回答	計
回答数	24	134	1	0	9	10	178
割合	13.5%	75.3%	0.6%	0.0%	5.1%	5.6%	100.0%

【6】年5mSvを超えている場合と超えていない場合の対応

	分けている	分けていない	未回答	計
回答数	15	131	32	178
割合	8.4%	73.6%	18.0%	100.0%

【7】対応ごとの検査、健診の実施状況、項目

[対応を分けている場合]

①年5mSv以上

	問診		白血球		赤血球		白内障		皮膚		その他	
	全員実施	医師の判断により一部省略	全員実施	医師の判断により一部省略	全員実施	医師の判断により一部省略	全員実施	医師の判断により一部省略	全員実施	医師の判断により一部省略	全員実施	医師の判断により一部省略
回答数	12	0	12	0	12	0	13	0	12	0	0	1
回答率	80.0%	0.0%	9.2%	0.0%	86.7%	0.0%	86.7%	0.0%	86.7%	0.0%	0.0%	6.7%

②年5mSv未満

	問診		白血球			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	
回答数	15	8	1	4		
回答率	100.0%	53.3%	6.7%	26.7%		
	赤血球			白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	12	1	3	5	1	8
回答率	80.0%	6.7%	20.0%	33.3%	6.7%	53.3%
	皮膚			その他		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	4	1	9	0	1	0
回答率	26.7%	6.7%	60.0%	0.0%	6.7%	0.0%

[対応を分けていない場合]

	問診		白血球			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	
回答数	129	110	2	17		
回答率	98.5%	84.0%	1.5%	13.0%		
	赤血球			白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	110	2	17	108	5	14
回答率	84.0%	1.5%	13.0%	82.4%	3.8%	10.7%
	皮膚			その他		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	112	3	13	16	3	0
回答率	85.5%	2.3%	9.9%	12.2%	2.3%	0.0%

【8-1】健診の回数、項目を省略しない理由(複数回答)

	判断手続きが煩雑	積極的な理由がない	法定項目は実施する	異常がないことを確認	その他	未回答	計
回答数	18	28	28	37	23	94	228
回答率	10.1%	15.7%	15.7%	20.8%	12.9%	52.8%	128.1%

【8-2】健診の回数、項目を省略する理由(複数回答)

	コスト、労力削減	被ばく線量が低い	検査項目が有効でない	積極的な理由がない	その他	未回答	計
回答数	15	13	6	2	24	140	200
回答率	8.4%	7.3%	3.4%	1.1%	13.5%	78.7%	112.4%

【9】実施日に受診できない従事者への対応(複数回答)

	予備日に受診	医療機関を紹介	その他	未回答	計
回答数	98	86	15	23	222
回答率	55.1%	48.3%	8.4%	12.9%	124.7%

【10】特殊健康診断にかかる費用

	1,000円未満	1,000～3,000円未満	3,000～5,000円未満	5,000円以上	その他	未回答	計
回答数	13	44	34	19	5	63	178
回答率	7.3%	24.7%	19.1%	10.7%	2.8%	35.4%	100.0%

【11】特殊健康診断に関する概要説明の実施(複数回答)

	従事前の教育訓練	健康診断の案内と合わせて	説明未実施	その他	未回答	計
回答数	127	73	5	3	24	232
回答率	71.3%	41.0%	2.8%	1.7%	13.5%	130.3%

【12】複数機関で作業する従事者の被ばく歴管理(複数回答)

	当該機関のみ管理	当該機関ですべてを管理	他機関で管理	個人に被ばく歴の記録を提供し管理を一任	関係機関でデータベース化	その他	該当者なし	未回答	計
回答数	19	56	1	2	43	7	12	45	185
回答率	10.7%	31.5%	0.6%	1.1%	24.2%	3.9%	6.7%	25.3%	103.9%

【13】特殊健康診断実施目的(複数回答)

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務の従事について可否判断	就業前の健康状態の把握	放射線障害の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	法定のため実施	その他	未回答	計
回答数	116	105	81	38	133	1	16	490
回答率	65.2%	59.0%	45.5%	21.3%	74.7%	0.6%	9.0%	275.3%

[管理区域立ち入り後・継続実施]

	通常の健康状態把握	放射線障害判定の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	健康リスクマネジメント	経歴リスク、新発リスク等のマネジメント	法定のため実施	その他	未回答	計
回答数	102	80	38	57	26	127	2	21	453
回答率	57.3%	44.9%	21.3%	32.0%	14.6%	71.3%	1.1%	11.8%	254.5%

【14】特殊健康診断の検査、項目から発見できる病気及び症状(複数回答)

	多血症(赤血球増多症)	貧血	がん	白血病	皮膚障害	白内障	緑内障	その他	未回答	計
回答数	98	93	51	117	112	89	22	14	36	632
回答率	55.1%	52.2%	28.7%	65.7%	62.9%	50.0%	12.4%	7.9%	20.2%	355.1%

【15】年間被ばく量を考慮した場合の特殊健康診断実施回数、検査項目

被ばく量に応じた特殊健康診断実施希望回数(複数回答)

	年間被ばく量に関係なく年2回	年間被ばく量に関係なく年1回	年間被ばく量に応じて、実施回数を変更	年間被ばく量に関係なく、実施不要	その他	未回答	計
回答数	59	47	59	7	3	5	180
回答率	33.1%	26.4%	33.1%	3.9%	1.7%	2.8%	101.1%

特殊健康診断検査項目

	項目の省略追加等は実施せず	項目を最小限とし、省略追加等は実施せず	年間被ばく量に応じて項目を省略	項目は最小限とし、年間被ばく量等に応じて追加	特殊健康診断を実施しなくてよい	その他	未回答	計
回答数	47	11	47	42	9	3	19	178
回答率	26.4%	6.2%	26.4%	23.6%	5.1%	1.7%	10.7%	100.0%

【16】現在の法制度、特殊健康診断実施について

	意見なし	意見あり	未回答	計
回答数	114	28	36	178
回答率	64.0%	15.7%	20.2%	100.0%

一般企業実施者(n=20)

【1】回答者業種、事業所規模

業種

	機械、精密機器	鉄鋼、金属	輸送用機器、運輸業	建設業	環境計量、産業廃棄物処理、検査サービス(非破壊を除く)	石油・石炭製品、鉱業	非破壊検査(法10条6項)	紙・パルプ、印刷業、繊維業	製薬業、臨床検査、食品製造業	卸売・小売業(販一、買一を含む)	その他
回答数	3	2	1	2	2	1	1	2	1	1	3
割合	15.0%	10.0%	5.0%	10.0%	10.0%	5.0%	5.0%	10.0%	5.0%	5.0%	15.0%
	未回答	計									
回答数	1	20									
割合	5.0%	80.0%									

事業所規模

	50人未満	50人以上	100人以上	未回答	計
回答数	5	2	13	0	20
割合	25.0%	10.0%	65.0%	0.0%	100.0%

【2】職種、経験年数

職種

経験年数	職種					未回答	回答数	割合
	事務(放管担当)	事務(労務担当)	衛生管理者	事務所内産業医	その他			
0~9年	4	3	2	1	1	0	11	55.0%
10~19年	1	1	1	0	1	0	4	20.0%
20年以上	1	1	0	0	1	0	3	15.0%
未回答	0	0	0	0	1	1	2	10.0%
回答数	6	5	3	1	4	1	20	100.0%
割合	30.0%	25.0%	15.0%	5.0%	20.0%	5.0%	100.0%	

【3】放射線業務従事者の作業場所、取り扱っている放射性同位元素、装置(複数回答)

	原子炉	核燃料物質	核原料物質	密封RI	非密封RI	加速器・放射線発生装置	X線発生装置	電子顕微鏡	該当なし	未回答	計
回答数	0	1	0	8	3	2	4	1	5	1	25
割合	0.0%	5.0%	0.0%	40.0%	15.0%	10.0%	20.0%	5.0%	25.0%	5.0%	125.0%

【4】各法令の対象者数、特殊健診受診率

受診者数

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障防止法両方	その他
0~99人	6	6	8	1
100~499人	2	1	2	1
500~999人	1	0	0	0
1000人以上	0	0	0	0
無回答	11	13	10	18
計	20	20	20	20

受診率

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障防止法両方	その他
89%以下	1	1	0	1
90~99%	2	1	1	0
100%	6	5	7	0
無回答	11	13	12	19
計	20	20	20	20

対象者のうち、5mSv以下

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障防止法両方	その他
0~99人	7	6	10	0
100~499人	1	1	1	0
500~999人	1	0	0	0
1000人以上	0	0	0	0
無回答	11	13	9	20
計	20	20	20	20

【5】特殊健康診断の検査実施

	定期一般健康診断とは別に年2回	定期一般健康診断の際に1回、別途1回と合わせて年2回	定期一般健康診断の際に1回実施し、半年後の検診は省略	年に1回も実施していない	その他	未回答	計
回答数	5	8	1	1	2	3	20
割合	25.0%	40.0%	5.0%	5.0%	10.0%	15.0%	100.0%

【6】年5mSvを超えている場合と超えていない場合の対応

	分けている	分けていない	未回答	計
回答数	3	11	6	20
割合	15.0%	55.0%	30.0%	100.0%

【7】対応ごとの検査、健診の実施状況、項目

[対応を分けている場合]

①年5mSv以上

	問診		白血球		白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略
回答数	3	3	0	0	2	0	1
回答率	100.0%	27.3%	0.0%	0.0%	66.7%	0.0%	33.3%
	赤血球			その他			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	3	0	0	0	0	1	
回答率	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	33.3%	
	問診		白血球		白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略
回答数	3	3	1	1	3	1	0
回答率	100.0%	100.0%	33.3%	33.3%	100.0%	33.3%	0.0%
	赤血球			その他			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	3	1	0	3	1	0	
回答率	100.0%	33.3%	0.0%	100.0%	33.3%	0.0%	
	問診		白血球		白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略
回答数	11	9	0	2	10	0	1
回答率	100.0%	81.8%	0.0%	18.2%	90.9%	0.0%	9.1%
	赤血球			その他			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	11	0	0	1	0	0	
回答率	100.0%	0.0%	0.0%	9.1%	0.0%	0.0%	

②年5mSv未満

	問診		白血球		白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略
回答数	3	3	1	1	3	1	0
回答率	100.0%	100.0%	33.3%	33.3%	100.0%	33.3%	0.0%
	赤血球			その他			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	3	1	0	3	1	0	
回答率	100.0%	33.3%	0.0%	100.0%	33.3%	0.0%	
	問診		白血球		白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略
回答数	3	3	1	1	3	1	0
回答率	100.0%	100.0%	33.3%	33.3%	100.0%	33.3%	0.0%
	赤血球			その他			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	3	1	0	3	1	0	
回答率	100.0%	33.3%	0.0%	100.0%	33.3%	0.0%	

[対応を分けていない場合]

	問診		白血球		白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略
回答数	11	9	0	2	10	0	1
回答率	100.0%	81.8%	0.0%	18.2%	90.9%	0.0%	9.1%
	赤血球			その他			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	10	0	1	10	0	1	
回答率	90.9%	0.0%	9.1%	90.9%	0.0%	9.1%	
	問診		白血球		白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略
回答数	11	0	0	1	0	0	
回答率	100.0%	0.0%	0.0%	9.1%	0.0%	0.0%	

【8-1】健診の回数、項目を省略しない理由(複数回答)

	判断手続きが煩雑	積極的な理由がない	法定項目は実施する	異常がないことを確認	その他	未回答	計
回答数	5	7	4	6	2	7	31
回答率	25.0%	35.0%	20.0%	30.0%	10.0%	35.0%	155.0%

【8-2】健診の回数、項目を省略する理由(複数回答)

	コスト、労力削減	被ばく線量が低い	検査項目が有効でない	積極的な理由がない	その他	未回答	計
回答数	1	3	0	1	0	16	21
回答率	5.0%	15.0%	0.0%	5.0%	0.0%	80.0%	105.0%

【9】実施日に受診できない従事者への対応(複数回答)

	予備日に受診	医療機関を紹介	その他	未回答	計
回答数	7	8	1	6	22
回答率	35.0%	40.0%	5.0%	30.0%	110.0%

【10】特殊健康診断にかかる費用(複数回答)

	1,000円未満	1,000~3,000円未満	3,000~5,000円未満	5,000円以上	その他	未回答	計
回答数	1	2	9	0	2	7	21
回答率	5.0%	10.0%	45.0%	0.0%	10.0%	35.0%	105.0%

【11】特殊健康診断に関する概要説明の実施(複数回答)

	従事前の教育訓練	健康診断の案内と合わせて	説明未実施	その他	未回答	計
回答数	12	6	0	1	6	25
回答率	60.0%	30.0%	0.0%	5.0%	30.0%	125.0%

【12】複数機関で作業する従事者の被ばく歴管理(複数回答)

	当該機関のみ管理	当該機関ですべてを管理	他機関で管理	個人に被ばく歴の記録を提供し管理を一元	関係機関でデータベース化	その他	該当者なし	未回答	計
回答数	5	4	0	0	0	2	6	4	21
回答率	25.0%	20.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	30.0%	20.0%	105.0%

【13】特殊健康診断実施目的(複数回答)

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務の従事について可否判断	就業前の健康状態の把握	放射線障害の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	法定のため実施	その他	未回答	計
回答数	11	5	4	2	14	0	4	40
回答率	55.0%	25.0%	20.0%	10.0%	70.0%	0.0%	20.0%	180.0%

[管理区域立ち入り後・継続実施]

	通常の健康状態把握	放射線障害判定の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	健康リスクマネジメント	経営リスク、訴訟リスク等のマネジメント	法定のため実施	その他	未回答	計
回答数	9	3	1	3	2	12	0	3	33
回答率	45.0%	15.0%	5.0%	15.0%	10.0%	60.0%	0.0%	15.0%	165.0%

【14】特殊健康診断の検査、項目から発見できる病気及び症状(複数回答)

	多血症(赤血球増多症)	貧血	がん	白血病	皮膚障害	白内障	緑内障	その他	未回答	計
回答数	9	8	3	10	9	10	2	1	3	55
回答率	45.0%	40.0%	15.0%	50.0%	45.0%	50.0%	10.0%	5.0%	15.0%	275.0%

【15】年間被ばく量を考慮した場合の特殊健康診断実施回数、検査項目

被ばく量に応じた特殊健康診断実施希望回数

	年間被ばく量に関係なく年2回	年間被ばく量に関係なく年1回	年間被ばく量に応じて、実施回数を変更	年間被ばく量に関係なく、実施不要	その他	未回答	計
回答数	7	2	7	0	1	3	20
回答率	35.0%	10.0%	35.0%	0.0%	5.0%	15.0%	100.0%

特殊健康診断検査項目

	項目の省略追加等は実施せず	項目を最小限とし、省略追加等は実施せず	年間被ばく量に応じて、項目を省略	項目は最小限とし、年間被ばく量等に応じて追加	特殊健康診断を実施しなくてよい	その他	未回答1	計
回答数	5	1	7	2	0	2	3	20
回答率	25.0%	5.0%	35.0%	10.0%	0.0%	10.0%	15.0%	100.0%

【16】電離則と障防法の記載の違い

	意見なし	意見あり	未回答	計
回答数	14	5	1	20
回答率	70.0%	25.0%	5.0%	100.0%

【17】現在の法制度、特殊健康診断実施について

	意見なし	意見あり	未回答	計
回答数	16	3	1	20
回答率	80.0%	15.0%	5.0%	100.0%

大学実施者(n=55)

【1】回答者業種、事業所規模

業種

	医療機関	教育・研究機関等	その他	未回答	計
回答数	1	54	0	0	55
割合	1.8%	98.2%	0.0%	0.0%	100.0%

事業所規模

	50人未満	50人以上	100人以上	未回答	計
回答数	10	2	38	5	55
割合	18.2%	3.6%	69.1%	9.1%	100.0%

【2】職種、経験年数

職種

経験年数	職種						未回答	計	割合
	事務(放管担当)	事務(労務担当)	放射線取扱主任者	衛生管理者	事務所内産業医	その他			
0～9年	6	1	10	3	2	6	3	31	56.4%
10～19年	2	0	4	3	3	4	0	16	29.1%
20年以上	3	0	1	0	0	1	0	5	9.1%
未回答	0	1	0	0	0	1	1	3	5.5%
回答数	11	2	15	6	5	12	4	55	100.1%
割合	20.0%	3.6%	27.3%	10.9%	9.1%	21.8%	7.3%	100.0%	

【3】放射線業務従事者の作業場所、取り扱っている放射性同位元素、装置(複数回答)

	原子炉	核燃料物質	核原料物質	密封RI	非密封RI	加速器・放射線発生装置	X線発生装置	電子顕微鏡	該当なし	未回答	計
回答数	4	14	4	43	50	26	34	16	0	0	191
割合	7.3%	25.5%	7.3%	78.2%	90.9%	47.3%	61.8%	29.1%	0.0%	0.0%	347.3%

【4】各法令の対象者数、特殊健診受診率

受診者数

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障害防止法両方	その他
0～99人	16	11	17	4
100～499人	19	23	20	0
500～999人	3	5	2	0
1000人以上	0	1	3	0
無回答	17	15	13	51
計	55	55	55	55

受診率

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障害防止法両方	その他
89%以下	1	2	1	0
90～99%	5	4	10	0
100%	32	34	31	4
無回答	17	15	13	51
計	55	55	55	55

対象者のうち、5mSv以下

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障害防止法両方	その他
0～99人	19	13	17	2
100～499人	17	21	20	0
500～999人	3	5	2	0
1000人以上	0	1	3	0
無回答	16	15	13	53
計	55	55	55	55

【5】特殊健康診断の検査実施

	定期一般健康診断とは別に年2回	定期一般健康診断の際に1回、別途1回と合わせ年2回	定期一般健康診断の際に1回実施し、半年後の検診は省略	年に1回も実施していない	その他	未回答	計
回答数	37	13	1	0	2	2	55
割合	67.3%	23.6%	1.8%	0.0%	3.6%	3.6%	100.0%

【6】年5mSvを超えている場合と超えていない場合の対応

	分けている	分けていない	未回答	計
回答数	21	31	3	55
割合	38.2%	56.4%	5.5%	100.0%

【7】対応ごとの検査、健診の実施状況、項目

[対応を分けている場合]

①年5mSv以上

	問診		白血球			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	19	10	0	7		
回答率	90.5%	32.3%	0.0%	12.7%		
	赤血球			白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	10	0	8	8	0	10
回答率	47.6%	0.0%	38.1%	38.1%	0.0%	47.6%
	皮ふ			その他		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	8	0	10	5	0	3
回答率	38.1%	0.0%	47.6%	23.8%	0.0%	14.3%

②年5mSv未満

	問診		白血球			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	21	9	3	8		
回答率	100.0%	42.9%	14.3%	38.1%		
	赤血球			白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	9	3	8	0	3	17
回答率	42.9%	14.3%	38.1%	0.0%	14.3%	81.0%
	皮ふ			その他		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	0	3	17	0	0	9
回答率	0.0%	14.3%	81.0%	0.0%	0.0%	42.9%

[対応を分けていない場合]

	問診		白血球			
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	30	21	0	9		
回答率	96.8%	67.7%	0.0%	29.0%		
	赤血球			白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	21	0	10	14	1	14
回答率	67.7%	0.0%	32.3%	45.2%	3.2%	45.2%
	皮ふ			その他		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	15	1	14	2	0	7
回答率	48.4%	3.2%	45.2%	6.5%	0.0%	22.6%

【8-1】健診の回数、項目を省略しない理由(複数回答)

	判断手続きが煩雑	積極的な理由がない	法定項目は実施する	異常がないことを確認	その他	未回答	計
回答数	3	7	4	6	2	38	60
回答率	5.5%	12.7%	7.3%	10.9%	3.6%	69.1%	109.1%

【8-2】健診の回数、項目を省略する理由(複数回答)

	コスト、労力削減	被ばく線量が低い	検査項目が有効でない	積極的な理由がない	その他	未回答	計
回答数	24	25	7	7	6	24	93
回答率	43.6%	45.5%	12.7%	12.7%	10.9%	43.6%	125.5%

【9】実施日に受診できない従事者への対応(複数回答)

	予備日に受診	医療機関を紹介	その他	未回答	計
回答数	35	32	3	3	73
回答率	63.6%	58.2%	5.5%	5.5%	132.7%

【10】特殊健康診断にかかる費用

	1,000円未満	1,000～3,000円未満	3,000～5,000円未満	5,000円以上	その他	未回答	計
回答数	14	13	5	3	3	17	55
回答率	25.5%	23.6%	9.1%	5.5%	5.5%	30.9%	100.0%

【11】特殊健康診断に関する概要説明の実施（複数回答）

	従事前の教育訓練	健康診断の案内と合わせて	説明未実施	その他	未回答	計
回答数	48	22	1	2	4	77
回答率	87.3%	40.0%	1.8%	3.6%	7.3%	140.0%

【12】複数機関で作業する従事者の被ばく歴管理（複数回答）

	当該機関のみ管理	当該機関ですべてを管理	他機関で管理	雇人に被ばく歴の記録を提供し管理を任	関係機関でデータベース化	その他	該当者なし	未回答	計
回答数	26	21	1	4	0	0	2	3	57
回答率	47.3%	38.2%	1.8%	7.3%	0.0%	0.0%	3.6%	5.5%	103.6%

【13】特殊健康診断実施目的（複数回答）

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務の従事について可否判断	就業前の健康状態の把握	放射線障害の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	法定のため実施	その他	未回答	計
回答数	24	27	28	4	43	0	0	126
回答率	43.6%	49.1%	50.9%	7.3%	78.2%	0.0%	0.0%	229.1%

[管理区域立ち入り後・継続実施]

	通常の健康状態把握	放射線障害判定の基礎データの把握	放射線障害以外の病気発見	健康リスクマネジメント	経営リスク、訴訟リスク等のマネジメント	法定のため実施	その他	未回答	計
回答数	18	28	4	13	4	42	0	2	111
回答率	32.7%	50.9%	7.3%	23.6%	7.3%	76.4%	0.0%	3.6%	201.8%

【14】特殊健康診断の検査、項目から発見できる病気及び症状（複数回答）

	多血症（赤血球増多症）	貧血	がん	白血病	皮膚障害	白内障	緑内障	その他	未回答	計
回答数	27	30	8	35	32	33	8	2	3	178
回答率	49.1%	54.5%	14.5%	63.6%	58.2%	60.0%	14.5%	3.6%	5.5%	323.6%

【15】年間被ばく量を考慮した場合の特殊健康診断実施回数、検査項目

被ばく量に応じた特殊健診実施希望回数（複数回答）

	年間被ばく量に関係なく年2回	年間被ばく量に関係なく年1回	年間被ばく量に応じて、実施回数を変更	年間被ばく量に関係なく、実施不要	その他	未回答	計
回答数	7	11	32	3	1	3	57
回答率	12.7%	20.0%	58.2%	5.5%	1.8%	5.5%	103.6%

特殊健康診断検査項目

	項目の省略追加等は実施せず	項目を最小限とし、省略追加等は実施せず	年間被ばく量に応じて項目を省略	項目は最小限とし、年間被ばく量等に応じて追加	特殊健康診断を実施しなくてよい	その他	未回答	計
回答数	5	1	24	16	7	0	2	55
回答率	9.1%	1.8%	43.6%	29.1%	12.7%	0.0%	3.6%	100.0%

【16】電離則と障防法の記載の違い

	意見なし	意見あり	未回答	計
回答数	14	37	4	55
回答率	25.5%	67.3%	7.3%	100.0%

【17】現在の法制度、特殊健康診断実施について

	意見なし	意見あり	未回答	計
回答数	21	29	5	55
回答率	38.2%	52.7%	9.1%	100.0%

医療機関実施者 (n=115)

〈小数点以下第2位を四捨五入しているため、合計しても必ずしも100とはならない〉

【1】回答者業種、事業所規模

業種(複数回答)

	医療機関	教育・研究機関等	国の機関	地方自治体	核燃料加工、原子力(電力事業を除く)	電力事業(電力会社)	機械、精密機器	鉄鋼、金属	科学、ゴム製品
回答数	113	5	3	0	0	0	0	0	0
割合	98.3%	4.3%	2.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	輸送用機器、運輸業	輸送容器承認・設計承認	建設業	ガラス、窯業	環境計量、産業廃棄物処理、検査サービス(非破壊を除く)	石油・石炭製品、鉱業	電気機器、ガス業	非破壊検査(法10条6項を除く)	非破壊検査(法10条6項)
回答数	0	0	0	0	0	0	0	0	0
割合	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	紙・パルプ、印刷業、繊維業	製薬業、臨床検査、食品製造業	γ線滅菌	卸売・小売業(販一、賃一を含む)各担当の担当業種に同じ	その他	未回答	計		
回答数	0	0	0	0	0	1	122		
割合	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	106.1%		

自由記述

記載なし

事業所規模

	50人未満	50人以上	100人以上	未回答	計
回答数	2	0	92	21	115
割合	1.7%	0.0%	80.0%	18.3%	100.0%

【2】職種、経年数

職種(複数回答)

経年数	職種								回答数	割合
	診療放射線技師	診療放射線(放管担当)	事務(放管担当)	事務(労務担当)	衛生管理者	事務所内産業医	その他	未回答		
0~9年	29	10	2	5	0	1	2	0	49	42.6%
10~19年	6	5	0	0	1	0	0	0	12	10.4%
20年以上	44	7	0	0	0	1	0	0	52	45.2%
未回答	2	1	0	0	0	0	0	2	5	4.3%
回答数	81	23	2	5	1	2	2	2	118	102.5%
割合	70.4%	20.0%	1.7%	4.3%	0.9%	1.7%	1.7%	1.7%	102.4%	

【3】放射線業務従事者の作業場所、取り扱っている放射性同位元素、装置（複数回答）

	原子炉	核燃料物質	核原料物質	医療用密封RI	医療用非密封RI	
回答数	0	1	0	59	76	
割合	0.0%	0.9%	0.0%	51.3%	66.1%	
	医療用加速器・放射線発生装置	医療用X線発生装置	電子顕微鏡	該当なし	未回答	計
回答数	86	108	3	2	0	335
割合	74.8%	93.9%	2.6%	1.7%	0.0%	291.3%

【4】各法令の対象者数、特殊健診受診率

受診者数

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障害防止法両方	その他
0～99人	34	58	58	9
100～499人	40	13	13	0
500～999人	21	0	0	1
1000人以上	6	0	0	0
無回答	14	44	44	105
計	115	115	115	115

受診率

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障害防止法両方	その他
89%以下	11	6	6	3
90～99%	27	4	4	0
100%	61	52	52	1
無回答	16	53	53	111
計	115	115	115	115

対象者のうち、5mSv以下

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障害防止法両方	その他
0～99人	35	58	66	16
100～499人	40	10	21	1
500～999人	21	1	5	0
1000人以上	4	0	0	0
無回答	15	46	23	98
計	115	115	115	115

【5】特殊健康診断の検査実施（複数回答）

	定期一般健康診断とは別に年2回	定期一般健康診断の際に1回、別途1回と合わせ年2回	定期一般健康診断の際に1回実施し、半年後の検診は省略	年に1回も実施していない	その他	未回答	計
回答数	32	74	4	0	7	0	117
割合	27.8%	64.3%	3.5%	0.0%	6.1%	0.0%	101.7%

【6】年5mSvを超えている場合と超えていない場合の対応

	分けている	分けていない	未回答	計
回答数	38	75	2	115
割合	33.0%	65.2%	1.7%	99.9%

【7】対応ごとの検査、健診の実施状況、項目

[対応を分けている場合]

①年5mSv以上

	問診	白血球				
	全員実施	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略		
回答数	39	30	1	7		
回答率	102.6%	78.9%	2.6%	18.4%		
	赤血球			白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	30	1	7	21	0	17
回答率	78.9%	2.6%	18.4%	55.3%	0.0%	44.7%
	皮ふ			その他		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	23	0	16	2	0	2
回答率	60.5%	0.0%	42.1%	5.3%	0.0%	5.3%

②年5mSv未満

	問診	白血球				
	全員実施	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略		
回答数	38	8	13	18		
回答率	100.0%	21.1%	34.2%	47.4%		
	赤血球			白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	8	12	19	4	12	22
回答率	21.1%	31.6%	50.0%	10.5%	31.6%	57.9%
	皮ふ			その他		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	3	12	23	1	3	1
回答率	7.9%	31.6%	60.5%	2.6%	7.9%	2.6%

[対応を分けていない場合]

	問診	白血球				
	全員実施	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略		
回答数	70	60	0	13		
回答率	93.3%	80.0%	0.0%	17.3%		
	赤血球			白内障		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	60	0	13	36	8	26
回答率	80.0%	0.0%	17.3%	48.0%	10.7%	34.7%
	皮ふ			その他		
	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	40	5	25	1	2	9
回答率	53.3%	6.7%	33.3%	1.3%	2.7%	12.0%

【8-1】健診の回数、項目を省略しない理由(複数回答)

	判断手続きが煩雑	積極的な理由がない	法定項目は実施する	異常がないことを確認	その他	未回答	計
回答数	15	19	20	26	6	54	140
回答率	10.7%	13.6%	14.3%	18.6%	4.3%	38.6%	100.1%

【8-2】健診の回数、項目を省略する理由(複数回答)

	コスト、労力削減	被ばく線量が低い	検査項目が有効でない	積極的な理由がない	その他	未回答	計
回答数	30	40	9	17	10	51	157
回答率	26.1%	34.8%	7.8%	14.8%	8.7%	44.3%	136.5%

【9】実施日に受診できない従事者への対応(複数回答)

	予備日に受診	医療機関を紹介	その他	未回答	計
回答数	87	12	21	3	123
回答率	75.7%	10.4%	18.3%	2.6%	107.0%

【10】特殊健康診断にかかる費用(複数回答)

	1,000円未満	1,000～3,000円未満	3,000～5,000円未満	5,000円以上	その他	未回答	計
回答数	26	16	12	6	32	25	117
回答率	22.6%	13.9%	10.4%	5.2%	27.8%	21.7%	101.6%

【11】特殊健康診断に関する概要説明の実施(複数回答)

	従事前の教育訓練	健康診断の案内と合わせて	説明未実施	その他	未回答	計
回答数	53	45	22	7	7	134
回答率	46.1%	39.1%	19.1%	6.1%	6.1%	116.5%

【12】複数機関で作業する従事者の被ばく歴管理(複数回答)

	当該機関分のみ管理	当該機関ですべてを管理	他機関で管理	個人に被ばく歴の記録を提供し管理を一任	関係機関でデータベース化	その他	該当者なし	未回答	計
回答数	85	7	3	9	1	6	5	7	123
回答率	73.9%	6.1%	2.6%	7.8%	0.9%	5.2%	4.3%	6.1%	106.9%

【13】特殊健康診断実施目的(複数回答)

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務の従事について可否判断	就業前の健康状態の把握	放射線障害の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	法定のため実施	その他	未回答	計
回答数	54	58	46	8	90	1	0	257
回答率	47.0%	50.4%	40.0%	7.0%	78.3%	0.9%	0.0%	223.6%

[管理区域立ち入り後・継続実施]

	通常の健康状態把握	放射線障害判定の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	健康リスクマネジメント	経営リスク、訴訟リスク等のマネジメント	法定のため実施	その他	未回答	計
回答数	50	46	9	30	11	70	1	0	217
回答率	43.5%	40.0%	7.8%	26.1%	9.6%	60.9%	0.9%	0.0%	188.8%

【14】特殊健康診断の検査、項目から発見できる病気及び症状(複数回答)

	多血症 (赤血球増多症)	貧血	がん	白血病	皮膚障害		
回答数	26	37	7	41	44		
回答率	22.6%	32.2%	6.1%	35.7%	38.3%		
	白内障	緑内障	その他	現状の被ばく線量で確認できる異常はない	未回答	計	
回答数	48	6	1	54	8	272	
回答率	41.7%	5.2%	0.9%	47.0%	7.0%	236.7%	

【15】年間被ばく量を考慮した場合の特殊健康診断実施回数、検査項目被ばく量に応じた特殊健診実施希望回数

	年間被ばく量に関係なく年2回	年間被ばく量に関係なく年1回	年間被ばく量に応じて、実施回数を変更	年間被ばく量に関係なく、実施不要	その他	未回答	計
回答数	30	37	44	1	2	1	115
回答率	26.1%	32.2%	38.3%	0.9%	1.7%	0.9%	100.1%

特殊健康診断検査項目

	項目の省略追加等は実施せず	項目を最小限とし、省略追加等は実施せず	年間被ばく量に応じて項目を省略	項目は最小限とし、年間被ばく量等に応じて追加	特殊健康診断を実施しないでよい	特殊健康診断は、事故など異常が発生した後のみ	その他	未回答	計
回答数	19	14	34	35	0	10	3	2	117
回答率	16.5%	12.2%	29.6%	30.4%	0.0%	8.7%	2.6%	1.7%	101.7%

【16】現在の法制度、特殊健康診断実施について

	意見なし	意見あり	未回答	計
回答数	61	26	28	115
回答率	53.0%	22.6%	24.3%	100.0%

産業医実施者(n=108)

【1】回答者業種、事業所規模
業種(複数回答)

	製造業	情報通信業	運輸業、郵便業	卸売業・小売業	金融業・保険業	学術研究、専門・技術サービス業	教育学習支援業	医療、福祉	複合サービス業	サービス業	公務
回答数	54	7	5	2	2	7	2	20	1	2	2
割合	50.0%	6.5%	4.6%	1.9%	1.9%	6.5%	1.9%	18.5%	0.9%	1.9%	1.9%
	その他	未回答	計								
回答数	3	3	110								
割合	2.8%	2.8%	101.9%								

事業所規模

	50人未満	50～99人	100～999人	1000～2999人	3000人以上	未回答	計
回答数	7	4	36	34	26	1	108
割合	6.5%	3.7%	33.3%	31.5%	24.1%	0.9%	100.0%

【2】職種、経験年数

職種

経験年数	職種				回答数	割合
	事務所内産業医	その他	未回答			
0～9年	42	7	0		49	45.4%
10～19年	26	7	0		33	30.6%
20年以上	17	4	0		21	19.4%
未回答	1	4	0		5	4.6%
回答数	86	22	0		108	100.0%
割合	79.6%	20.4%	0.0%		100.0%	

【3】放射線業務従事者の作業場所、取り扱っている放射性同位元素、装置(複数回答)

	原子炉	核燃料物質	核原料物質	密封RI	非密封RI	加速器・放射線発生装置	X線発生装置	電子顕微鏡	該当なし	未回答	計
回答数	5	1	0	21	14	12	65	15	25	4	162
割合	4.6%	0.9%	0.0%	19.4%	13.0%	11.1%	60.2%	13.9%	23.1%	3.7%	150.0%

【4】各法令の対象者数、特殊健診受診率

受診者数

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障防止法両方
0～99人	63	42	38
100～499人	8	5	4
500～999人	5	0	1
1000人以上	2	1	0
無回答	30	60	65
計	108	108	108

受診率

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障防止法両方
89%以下	2	0	0
90～99%	5	1	3
100%	59	22	16
無回答	42	85	89
計	108	108	108

対象者のうち、5mSv以下

	電離放射線障害防止規則	放射線障害防止法	電離則と障防止法両方
0～99人	65	41	36
100～499人	5	6	5
500～999人	5	0	1
1000人以上	1	0	1
無回答	32	61	65
計	108	108	108

【5】特殊健康診断の検査実施

	定期一般健康診断とは別に年2回	定期一般健康診断の際に1回、別途1回と合わせて年2回	定期一般健康診断の際に1回実施し、半年後の検査は省略	年2回とも検査は省略	年に1回も実施していない	その他	未回答	計
回答数	8	57	7	3	2	10	21	108
割合	7.4%	52.8%	6.5%	2.8%	1.9%	9.3%	19.4%	100.0%

【6】年5mSvを超えている場合と超えていない場合の対応

	分けている	分けていない	未回答	計
回答数	19	61	28	108
割合	17.6%	56.5%	25.9%	100.0%

【7】対応ごとの検査、健診の実施状況、項目

[対応を分けている場合]

①年5mSv以上

	問診		白血球			
	全員実施	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	15	14	0		1	
回答率	78.9%	23.0%	0.0%		0.9%	
	赤血球			白内障		
	全員実施	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	14	0	1	13	0	3
回答率	73.7%	0.0%	5.3%	68.4%	0.0%	15.8%
	皮膚			その他		
	全員実施	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	12	0	2	5	0	1
回答率	63.2%	0.0%	10.5%	26.3%	0.0%	5.3%

②年5mSv未満

	問診		白血球			
	全員実施	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	18	6	4		10	
回答率	94.7%	31.6%	21.1%		52.6%	
	赤血球			白内障		
	全員実施	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	5	3	10	5	4	9
回答率	26.3%	15.8%	52.6%	26.3%	21.1%	47.4%
	皮膚			その他		
	全員実施	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	5	4	9	1	2	3
回答率	26.3%	21.1%	47.4%	5.3%	10.5%	15.8%

[対応を分けていない場合]

	問診		白血球			
	全員実施	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略	
回答数	58	43	6		9	
回答率	95.1%	70.5%	9.8%		14.8%	
	赤血球			白内障		
	全員実施	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	44	6	8	39	10	8
回答率	72.1%	9.8%	13.1%	63.9%	16.4%	13.1%
	皮膚			その他		
	全員実施	医師の判断により一部省略	医師の判断により一部省略	全員実施	全員省略	医師の判断により一部省略
回答数	41	7	8	6	5	4
回答率	67.2%	11.5%	13.1%	9.8%	8.2%	6.6%

【8-1】健診の回数、項目を省略しない理由(複数回答)

	判断手続きが煩雑	積極的な理由がない	法定項目は実施する	異常がないことを確認	その他	未回答	計
回答数	14	17	11	11	10	63	126
回答率	13.0%	13.5%	8.7%	8.7%	7.9%	50.0%	101.9%

【8-2】健診の回数、項目を省略する理由(複数回答)

	コスト、労力削減	被ばく線量が低い	検査項目が有効でない	積極的な理由がない	その他	未回答	計
回答数	8	31	7	11	8	69	134
回答率	7.4%	28.7%	6.5%	10.2%	7.4%	63.9%	124.1%

【9】実施日に受診できない従事者への対応(複数回答)

	予備日に受診	医療機関を紹介	その他	未回答	計
回答数	60	30	7	21	118
回答率	55.6%	27.8%	6.5%	19.4%	109.3%

【10】特殊健康診断にかかる費用

	1,000円未満	1,000～ 3,000円未満	3,000～ 5,000円未満	5,000円以上	その他	未回答	計
回答数	11	26	22	8	4	37	108
回答率	10.2%	24.1%	20.4%	7.4%	3.7%	34.3%	100.0%

【11】特殊健康診断に関する概要説明の実施(複数回答)

	従事前の教育 訓練	健康診断の案 内と合わせて	説明未実施	その他	未回答	計
回答数	40	32	20	5	20	117
回答率	37.0%	29.6%	18.5%	4.6%	18.5%	108.3%

【12】複数機関で作業する従事者の被ばく歴管理(複数回答)

	当該機関分の み管理	当該機関です べてを管理	他機関で管理	個人に被ばく歴の記 録を提供し管理を一 任	関係機関で データベース化	その他	該当者なし	未回答	計
回答数	33	5	1	3	2	1	37	28	110
回答率	30.6%	4.6%	0.9%	2.8%	1.9%	0.9%	34.3%	25.9%	101.9%

【13】特殊健康診断実施目的(複数回答)

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務の 従事について 可否判断	就業前の健康 状態の把握	放射線障害の 基礎データ取得	放射線障害以 外の病気発見	法定のため実 施	その他	未回答	計
回答数	64	64	51	18	63	1	13	274
回答率	59.3%	59.3%	47.2%	16.7%	58.3%	0.9%	12.0%	253.7%

[管理区域立ち入り後・継続実施]

	通常の健康状 態把握	放射線障害判 定の基礎データ 取得	放射線障害以 外の病気発見	健康リスクネ ジメント	経営リスク、訴 訟リスク等のマ ネジメント	法定のため実 施	その他	未回答	計
回答数	45	51	12	49	29	63	3	15	267
回答率	41.7%	47.2%	11.1%	45.4%	26.9%	58.3%	2.8%	13.9%	247.2%

【14】特殊健康診断の検査、項目から発見できる病気及び症状(複数回答)

	多血症 (赤血球増多 症)	貧血	がん	白血病	皮膚障害	白内障	緑内障	その他	未回答	計
回答数	64	81	23	74	68	63	7	3	15	398
回答率	59.3%	75.0%	21.3%	68.5%	63.0%	58.3%	6.5%	2.8%	13.9%	368.5%

【15】年間被ばく量を考慮した場合の特殊健康診断実施回数、検査項目

被ばく量に応じた特殊健診実施希望回数

	年間被ばく量 に関係なく年2 回	年間被ばく量 に関係なく年 1回	年間被ばく量に 応じて、実施回 数を変更	年間被ばく量に 関係なく、実施 不要	その他	未回答	計
回答数	22	15	56	4	1	10	108
回答率	20.4%	13.9%	51.9%	3.7%	0.9%	9.3%	100.0%

特殊健康診断検査項目

	項目の省略追 加等は実施せ ず	項目を最小限と し、省略追加等 は実施せず	年間被ばく量に 応じて項目を省 略	項目は最小限 とし、年間被ば く量等に応じて	特殊健康診断 を実施しなくて よい	その他	未回答1	計
回答数	12	12	31	39	2	1	11	108
回答率	11.1%	11.1%	28.7%	36.1%	1.9%	0.9%	10.2%	100.0%

【16】現在の法制度、特殊健康診断実施について

	意見なし	意見あり	未回答	計
回答数	53	42	13	108
回答率	49.1%	38.9%	12.0%	100.0%

電気受診者 (n=5075)

【1】業種、取り扱っている放射性同位元素 (複数回答)

業種

	電力事業者	製造業	RI事業所	医療関係	教育、研究機関等	その他	計
回答数	3995	265	75	0	0	443	4778
割合	83.6%	5.5%	1.6%	0.0%	0.0%	9.3%	100.0%

取り扱っている放射性同位元素、装置

	密封RI	非密封RI	放射線発生装置	その他	わからない	計
回答数	966	385	240	1141	1504	4236
割合	22.8%	9.1%	5.7%	26.9%	35.5%	100.0%

【2】放射線管理区域入域頻度 (複数回答)

	毎日	週の半分 以上	週2~3日	週1日	月1~2日	ほぼ立ち入らない	計
回答数	573	652	690	565	1271	1268	5019
割合	11.4%	13.0%	13.7%	11.3%	25.3%	25.3%	100.0%

【3】特殊健康診断についての説明 (複数回答)

	教育訓練	初めての健康診断	健康診断の都度	受けたことがない	計
回答数	2922	1159	1314	364	5759
割合	50.7%	20.1%	22.8%	6.3%	100.0%

【4】特殊健康診断の受診状況 (複数回答)

	定期健康診断とは別に年2回	定期健康診断の際に1回、別に1回で年2回	定期健康診断と合わせて年1回	定期的に受けていない	その他	計
回答数	1162	2383	770	68	625	5008
割合	23.2%	47.6%	15.4%	1.4%	12.5%	100.0%

【5】特殊健康診断の結果確認

	確認している	確認していない	その他	未回答	計
回答数	4632	349	24	70	5075
割合	91.3%	6.9%	0.5%	1.4%	100.0%

【6】個人被ばく線量測定結果確認 (複数回答)

	常に確認	時々確認	確認していない	その他	計
回答数	3801	1109	119	15	5044
割合	75.4%	22.0%	2.4%	0.3%	100.0%

【7-1】(複数施設に勤務)主たる勤務先の特殊健康診断の結果を他の施設に提出

	全施設に提出	一部施設に提出	提出せず	分からない	未回答	計
回答数	496	143	302	327	3808	5076
割合	9.8%	2.8%	6.0%	6.4%	75.0%	100.0%

【7-2】(複数施設に勤務)複数施設で作業した合計の個人線量を把握

	把握している	把握していない	未回答	計
回答数	935	319	3821	5075
割合	18.4%	6.3%	75.3%	100.0%

【8】特殊健康診断実施目的 (複数回答)

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務従事者が適当か判断	通常の健康状態把握	放射線障害の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	その他	わからない	計
回答数	3456	1831	1545	507	82	252	7673
割合	45.0%	23.9%	20.1%	6.6%	1.1%	3.3%	100.0%

[管理区域立ち入り後・継続実施]

	通常の健康状態把握	放射線障害判定の基礎データ取得	放射線障害以外の病気把握	その他	わからない	計
回答数	4074	1833	689	78	138	6812
割合	59.8%	26.9%	10.1%	1.1%	2.0%	100.0%

【9】妥当と考える健診頻度(複数回答)

	年2回	年1回	本人が希望したとき	不要	計
回答数	2975	1515	139	125	4754
割合	62.6%	31.9%	2.9%	2.6%	100.0%

【10】放射線作業従事者として法令に基づいた業務を実施するとき、被ばく管理や健康診断について改善を希望

	改善の希望無し	改善の希望あり	未回答	計
回答数	4791	153	131	5075
割合	94.4%	3.0%	2.6%	100.0%

一般企業受診者 (n=70)

【1】業種、取り扱っている放射性同位元素 (複数回答)

業種

	電力事業者	製造業	RI事業所	医療関係	教育、研究機関等	その他	未回答	計
回答数	0	39	8	1	2	19	1	70
割合	0.0%	55.7%	11.4%	1.4%	2.9%	27.1%	1.4%	100.0%

取り扱っている放射性同位元素、装置

	密封RI	非密封RI	放射線発生装置	その他	わからない	計
回答数	47	8	12	1	7	75
割合	62.7%	10.7%	16.0%	1.3%	9.3%	100.0%

【2】放射線管理区域入域頻度

	毎日	週の半分以上	週2~3日	週1日	月1~2日	ほぼ立ち入らない	未回答	計
回答数	15	5	12	5	14	18	1	70
割合	21.4%	7.1%	17.1%	7.1%	20.0%	25.7%	1.4%	100.0%

【3】特殊健康診断についての説明 (複数回答)

	教育訓練	初めての健康診断	健康診断の都度	受けたことがない	計
回答数	44	18	7	14	83
割合	53.0%	21.7%	8.4%	16.9%	100.0%

【4】特殊健康診断の受診状況 (複数回答)

	定期健康診断とは別に年2回	定期健康診断の際に1回、別に1回で年2回	定期健康診断と合わせて年1回	定期的に受けていない	その他	計
回答数	18	27	8	9	9	71
割合	25.4%	38.0%	11.3%	12.7%	12.7%	101.4%

【5】特殊健康診断の結果確認

	確認している	確認していない	その他	未回答	計
回答数	59	5	4	2	70
割合	84.3%	7.1%	5.7%	2.9%	100.0%

【6】個人被ばく線量測定結果確認

	常に確認	時々確認	確認していない	その他	未回答	計
回答数	44	15	9	1	1	70
割合	62.9%	21.4%	12.9%	1.4%	1.4%	100.0%

【7-1】(複数施設に勤務)主たる勤務先の特殊健康診断の結果を他の施設に提出

	全施設に提出	一部施設に提出	提出せず	分からない	未回答	計
回答数	6	6	6	2	50	70
割合	8.6%	8.6%	8.6%	2.9%	71.4%	100.0%

【7-2】(複数施設に勤務)複数施設で作業した合計の個人線量を把握

	把握している	把握していない	未回答	計
回答数	15	5	50	70
割合	21.4%	7.1%	71.4%	100.0%

【8】特殊健康診断実施目的 (複数回答)

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務従事者が適当か判断	通常の健康状態把握	放射線障害の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	その他	わからない	計
回答数	42	28	25	3	2	5	105
割合	40.0%	26.7%	23.8%	2.9%	1.9%	4.8%	100.0%

[管理区域立ち入り後・継続実施]

	通常の健康状態把握	放射線障害判定の基礎データ取得	放射線障害以外の病気把握	その他	わからない	計
回答数	49	22	5	3	4	83
割合	59.0%	26.5%	6.0%	3.6%	4.8%	100.0%

【9】妥当と考える健診頻度

	年2回	年1回	本人が希望したとき	不要	未回答	計
回答数	34	22	4	6	4	70
割合	48.6%	31.4%	5.7%	8.6%	5.7%	100.0%

【10】放射線作業従事者として法令に基づいた業務を実施するとき、被ばく管理や健康診断について改善を希望

	改善の希望無し	改善の希望あり	未回答	計
回答数	61	9	0	70
割合	87.1%	12.9%	0.0%	100.0%

大学受診者 (n=630)

【1】業種、取り扱っている放射性同位元素(複数回答)

業種

	電力事業者	製造業	RI事業所	医療関係	教育、研究機関等	その他	計
回答数	1	0	11	95	508	15	630
割合	0.2%	0.0%	1.7%	15.1%	80.6%	2.4%	100.0%

取り扱っている放射性同位元素、装置

	密封RI	非密封RI	放射線発生装置	その他	わからない	計
回答数	158	271	222	30	48	729
割合	21.7%	37.2%	30.5%	4.1%	6.6%	100.0%

【2】放射線管理区域入域頻度

	毎日	週の半分以上	週2~3日	週1日	月1~2日	ほぼ立ち入らない	未回答	計
回答数	72	63	80	53	134	224	4	630
割合	11.4%	10.0%	12.7%	8.4%	21.3%	35.6%	0.6%	100.0%

【3】特殊健康診断についての説明(複数回答)

	教育訓練	初めての健康診断	健康診断の都度	受けたことがない	計
回答数	438	75	148	29	690
割合	63.5%	10.9%	21.4%	4.2%	100.0%

【4】特殊健康診断の受診状況(複数回答)

	定期健康診断とは別に年2回	定期健康診断の際に1回、別に1回で年2回	定期健康診断と合わせて年1回	定期的に受けていない	その他	計
回答数	214	239	125	33	13	624
割合	34.3%	38.3%	20.0%	5.3%	2.1%	100.0%

【5】特殊健康診断の結果確認

	確認している	確認していない	その他	未回答	計
回答数	563	45	11	11	630
割合	89.4%	7.1%	1.7%	1.7%	100.0%

【6】個人被ばく線量測定結果確認

	常に確認	時々確認	確認していない	その他	未回答	計
回答数	413	140	59	9	9	630
割合	65.6%	22.2%	9.4%	1.4%	1.4%	100.0%

【7-1】(複数施設に勤務)主たる勤務先の特殊健康診断の結果を他の施設に提出

	全施設に提出	一部施設に提出	提出せず	分からない	未回答	計
回答数	62	27	95	46	400	630
割合	9.8%	4.3%	15.1%	7.3%	63.5%	100.0%

【7-2】(複数施設に勤務)複数施設で作業した合計の個人線量を把握

	把握している	把握していない	未回答	計
回答数	144	78	408	630
割合	22.9%	12.4%	64.8%	100.0%

【8】特殊健康診断実施目的(複数回答)

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務従事者が適 当か判断	通常の健康状態把握	放射線障害の 基礎データ取得	放射線障害以 外の病気発見	その他	わからない	計
回答数	350	242	199	46	9	28	874
割合	40.0%	27.7%	22.8%	5.3%	1.0%	3.2%	100.0%

〔管理区域立ち入り後・継続実施〕

	通常の健康状 態把握	放射線障害判 定の基礎データ 取得	放射線障害以 外の病気把握	その他	わからない	計
回答数	473	230	36	9	21	769
割合	61.5%	29.9%	4.7%	1.2%	2.7%	100.0%

【9】妥当と考える健診頻度

	年2回	年1回	本人が希 望したとき	不要	未回答	計
回答数	216	305	55	37	17	630
割合	34.3%	48.4%	8.7%	5.9%	2.7%	100.0%

【10】放射線作業従事者として法令に基づいた業務を実施するとき、被ばく管理や健康診断について改善を希望

	改善の希 望無し	改善の希 望あり	未回答	計
回答数	539	90	1	630
割合	85.6%	14.3%	0.2%	100.0%

医療機関受診者(n=323)

【1】業種、取り扱っている放射性同位元素(複数回答)

業種

	電力事業者	製造業	RI事業所	医療関係	教育、研究機関等	その他	計
回答数	0	0	1	283	24	16	324
割合	0.0%	0.0%	0.3%	87.3%	7.4%	4.9%	100.0%

取り扱っている放射性同位元素、装置

	密封RI	非密封RI	放射線発生装置	その他	わからない	計
回答数	94	154	203	18	11	480
割合	19.6%	32.1%	42.3%	3.8%	2.3%	100.0%

【2】放射線管理区域入域頻度

	毎日	週の半分以上	週2~3日	週1日	月1~2日	ほぼ立ち入らない	未回答	計
回答数	163	38	47	27	17	27	4	323
割合	50.5%	11.8%	14.6%	8.4%	5.3%	8.4%	1.2%	100.0%

【3】特殊健康診断についての説明(複数回答)

	教育訓練	初めての健康診断	健康診断の都度	受けたことがない	計
回答数	158	51	94	57	360
割合	43.9%	14.2%	26.1%	15.8%	100.0%

【4】特殊健康診断の受診状況(複数回答)

	定期健康診断とは別に年2回	定期健康診断の際に1回、別に1回で年2回	定期健康診断と合わせて年1回	定期的に受けていない	その他	計
回答数	72	160	58	10	12	312
割合	23.1%	51.3%	18.6%	3.2%	3.8%	100.0%

【5】特殊健康診断の結果確認

	確認している	確認していない	その他	未回答	計
回答数	286	27	2	8	323
割合	88.5%	8.4%	0.6%	2.5%	100.0%

【6】個人被ばく線量測定結果確認

	常に確認	時々確認	確認していない	その他	未回答	計
回答数	205	93	18	3	4	323
割合	63.5%	28.8%	5.6%	0.9%	1.2%	100.0%

【7-1】(複数施設に勤務)主たる勤務先の特殊健康診断の結果を他の施設に提出

	全施設に提出	一部施設に提出	提出せず	分からない	未回答	計
回答数	25	5	39	12	242	323
割合	7.7%	1.5%	12.1%	3.7%	74.9%	100.0%

【7-2】(複数施設に勤務)複数施設で作業した合計の個人線量を把握

	把握している	把握していない	未回答	計
回答数	34	44	245	323
割合	10.5%	13.6%	75.9%	100.0%

【8】特殊健康診断実施目的(複数回答)

[管理区域立ち入り前]

	放射線業務従事者が適当か判断	通常の健康状態把握	放射線障害の基礎データ取得	放射線障害以外の病気発見	その他	わからない	計
回答数	148	141	146	37	4	18	494
割合	30.0%	28.5%	29.6%	7.5%	0.8%	3.6%	100.0%

【管理区域立ち入り後・継続実施】

	通常の健康状態把握	放射線障害判定の基礎データ取得	放射線障害以外の病気把握	その他	わからない	計
回答数	228	151	48	2	7	436
割合	52.3%	34.6%	11.0%	0.5%	1.6%	100.0%

【9】妥当と考える健診頻度（複数回答）

	年2回	年1回	本人が希望したとき	不要	計
回答数	116	159	14	5	294
割合	39.5%	54.1%	4.8%	1.7%	100.0%

【10】放射線作業従事者として法令に基づいた業務を実施するとき、被ばく管理や健康診断について改善を希望

	改善の希望無し	改善の希望あり	未回答	計
回答数	227	49	47	323
割合	70.3%	15.2%	14.6%	100.0%

付録3 各国の規制状況（海外アンケート集計）

・アジア

国名	中国	中国
肩書き	Mr	Mr
職業の分類	コンサルティング	研究
専門の分野	専門知識（線量評価、計画、コンサルティング等）	実用的な放射線管理
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	○
眼球	○	○
その他		
作業前	○	○
作業中	○	
理由	作業者自身が健康状態を把握し、放射線防護についての認識を改善するのに役立つから	
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由	全作業者の安全を証明することは雇用主の義務であるから	電離放射線からの影響を減らすことが重要だから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	作業者の自然な権利であり、他の健診と組み合わせて用いるべき	作業者の他の病気を監視するため

国名	中国	中国
肩書き	Dr(PhD)	Ms
職業の分類	研究	政府職員 研究
専門の分野	研究	規制、公認、監督、マネジメント、 専門的知識（線量評価、計画、コン サルティング等）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	
皮膚	○	
眼球	○	
その他		
作業前	○	○
作業中		○
理由		作業者を守るため
"質問③ 被ばく影響の観点から事業 者が従事者に特殊健診を義 務付ける必要があるか"	○	○
理由	彼らの家族にとって健康を維持す るのにとっても重要だから	作業者を守るため
"質問④ 放射線防護以外での特殊健 診の目的はあると考えられ るか"	○	○
例	作業者の自然権	がんの罹患歴

国名	中国	香港
肩書き	Dr(PhD),Dr(MD)	Ms
職業の分類	研究	政府職員
専門の分野	研究	規制
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	
眼球	○	
その他	染色体異常	
作業前	○	○
作業中	○	○
理由	①熱ルミネッセンス線量計着用時の異常なギャップを埋めるため。 ②放射線照射による損傷を早期発見するため。	14か月に1度行うことが決まっているから
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	×
理由	放射線照射の被曝による健康被害についての不適切な寄与を避けるため。	中央政府の義務であり、香港政府は全て行っているから。
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	作業者の自然権(他の目的のための健康診断)	データ分析のため

国名	日本	日本
肩書き	Mr	Mr
職業の分類	産業	研究
専門の分野	専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）	
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	○
眼球		○
その他		
作業前	○	
作業中	○	
理由		
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	
理由		
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	
例	雇用主の労働者に向けた特別なサービス	

国名	日本	日本
肩書き		Dr(PhD)
職業の分類		研究 教育
専門の分野		監督 マネジメント 研究
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液		○
皮膚		○
眼球	○	○
その他		
作業前		○
作業中		
理由		
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	×	○
理由	放射線自体が危険であるから。	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	×
例	雇用主の労働者に向けた特別なサービス	

国名	日本	日本
肩書き	Mr	Dr(PhD)
職業の分類	研究	研究
専門の分野	規制 研究	研究
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	○
従う法令等		国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	×	×
皮膚	×	
眼球	×	×
その他		
作業前	×	
作業中	×	
理由	線量レベル次第かも	
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	×	○
理由	他の業界でやっていないことを特別にする必要はない	将来的に被曝する可能性のある原因を把握できるかもしれないから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	×	○
例		

国名	日本	日本
肩書き	Dr(PhD)	Dr(PhD)
職業の分類	研究	教育
専門の分野	実用的な放射線管理 研究	
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液		×
皮膚		×
眼球		×
その他		
作業前	○	×
作業中		×
理由	線量限度を超えた被曝をする可能性 があるから。	
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	×	○
理由		
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	×
例	作業者の自然権	

国名	韓国	韓国
肩書き	Mr	Prof
職業の分類	研究	教育
専門の分野	規制	研究
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	×
皮膚		×
眼球		×
その他		
作業前	○	×
作業中	○	×
理由	放射線業務後の健康を保証するため	一般的に低線量の被曝である作業 者からすると多すぎるから
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者 が従事者に特殊健診を義務 付ける必要があるか"	○	×
理由	作業者を放射線障害から守らな ければならないから	低線量被曝者からすると多すぎる から
"質問④ 放射線防護以外での特殊健 診の目的はあると考えられ るか"	×	○
例	HSRW が放射線障害における健康 を保証していたから	危険な労働作業のための適切な監 視（メンタルマネジメント等）

国名	韓国	韓国
肩書き	Dr(PhD)	Dr(PhD)
職業の分類	政府職員 研究 コンサルティング	研究
専門の分野	規制	
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	
眼球	○	
その他		
作業前	○	
作業中	○	
理由	補償などの法的問題に備えて健康 絵の影響が考えられる為	適切なスクリーニングのため
"質問③ 被ばく影響の観点から事業 者が従事者に特殊健診を義 務付ける必要があるか"	○	○
理由	事故が発生する可能性があるから	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健 診の目的はあると考えられ るか"	×	×
例		

国名	韓国	韓国
肩書き	Prof	Dr(PhD),Prof
職業の分類	教育	産業 研究
専門の分野	研究	
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚		○
眼球		○
その他		
作業前	○	○
作業中		○
理由	通常の病院で簡単に行うことができるから	疫学的データ収集のため
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	
理由	放射線作業従事者を守ることは雇用主の責任であるから。	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	×	
例		

国名	韓国	マレーシア
肩書き	Dr(PhD)	Ms
職業の分類	研究	研究 放射線防護に関するサービス
専門の分野	研究	規制、監督、マネジメント 実用的な放射線管理、研究
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	
皮膚	○	
眼球	○	
その他		
作業前		○
作業中		
理由		被曝履歴を確認し、傾向をモニタリングするため
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由	国民理解の助けになるから	放射線防護プログラム・施設が良好な状態であることを保証できるから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	自然権	雇用主の労働者に向けた特別なサービス 危険物を取り扱う作業者の適切なチェック

国名	スリランカ	スリランカ
肩書き	Mr	Mr
職業の分類	研究 TSP	政府職員、研究、 コンサルティング
専門の分野	実用的な放射線管理 専門的知識（線量評価）	実用的な放射線管理 専門的知識（線量評価）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法、ガイドライン
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	○
眼球	○	○
その他	甲状腺	甲状腺、膀胱、胸部
作業前		○
作業中	○	○
理由	放射線から起こりうる確率的影響 を特定する有効な手法であるから	放射線作業者の身体的、精神的能力 を把握し、健康被害を早期に発見す るため
"質問③ 被ばく影響の観点から事 業者が従事者に特殊健診 を義務付ける必要がある か"	○	○
理由	労働者の安全を確保することは雇 用主の責任であるから。	IAEA の一般安全基準に記載されて いるから
"質問④ 放射線防護以外での特殊 健診の目的はあると考え られるか"	○	○
例	労働者の健康、安全等を確保する ため	労働者が健康被害を心配すること なく作業できるようにするため

国名	台湾	台湾
肩書き	Mr	Mr
職業の分類	官庁職員	政府職員
専門の分野	マネジメント	規制
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	
皮膚		○
眼球		
その他		
作業前	○	
作業中		
理由		
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	×
理由	作業者の健康管理と放射線影響の監視	特殊健診を実行する余裕がないから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	作業者の自然権	雇用主の労働者に向けた特別なサービス

国名	タイ	ベトナム
肩書き	Dr(PhD)	
職業の分類	教育	政府職員
専門の分野	専門知識（線量評価、計画、コンサルティング等）	規制
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	×
従う法令等	国内法	
"質問② 検査項目の必要性"		
血液		○
皮膚		
眼球	○	
その他		
作業前	○	
作業中	○	○
理由	眼球は放射線の影響を受けやすい器官である上に、偶発的に被曝しやすいから	放射線業務従事者の健康把握及びがんの早期発見に役立つから
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由	労働者が健康被害を心配することなく作業できるようにするため	健診を受けることは労働者の権利であるから。また、作業における安全性を確保するため。
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	
例	放射線業務に対する前向きな考えを促進し、誇りをもって放射線業務に臨んでもらうため	

国名	ベトナム
肩書き	Dr (PhD)
職業の分類	研究 教育
専門の分野	マネジメント 実用的な放射線管理 研究
質問	
"質問① 特殊健診実施の有無"	×
従う法令等	
"質問② 検査項目の必要性"	
血液	○
皮膚	
眼球	
その他	
作業前	○
作業中	○
理由	作業者に放射線被曝が影響を及ぼさないことを明らかにするため
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○
理由	規則に記載があるから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○
例	雇用主の労働者に向けた特別なサービス

・北米

国名	カナダ	カナダ
肩書き	Mr	Dr(PhD)
職業の分類	産業	研究
専門の分野	マネジメント 実用的な放射線管理	
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	○
従う法令等		国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	×	○
皮膚	×	
眼球	×	
その他		
作業前	×	○
作業中	×	
理由	労働者の被曝線量は健康への影響 が予想されるレベルを大きく下回 っているから	
"質問③ 被ばく影響の観点から事業 者が従事者に特殊健診を義 務付ける必要があるか"	×	×
理由	労働者の被曝線量は健康への影響 が予想されるレベルを大きく下回 っているから	国家または地方政府の業務範囲だ から
"質問④ 放射線防護以外での特殊健 診の目的はあると考えられ るか"	○	×
例	血圧、糖尿病、心臓の健康等の一 般的な健診は労働者の健康維持の ために良い	

国名	カナダ	アメリカ
肩書き	Dr(PhD)	Dr(PhD)
職業の分類	研究	研究
専門の分野	研究	研究
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	×
従う法令等		
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	×	×
皮膚	×	×
眼球	×	×
その他		
作業前	×	×
作業中	×	×
理由	安全であるから	防護具が適切に機能していれば 健診の必要性はないから
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	×	×
理由	関係がない	前提として、雇用主は個人に対して問題を引き起こさないことを保証する必要、義務があるから。
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	×	○
例	放射線作業者は長生きし、一般市民よりも健康であるから	呼吸保護具、困難な作業、熱性ストレスにおける安全性の確認の為

国名	アメリカ	アメリカ
肩書き	Dr(MD), Prof, M.S.degree	Ms
職業の分類	教育,放射線医学	産業 コンサルティング
専門の分野	実用的な放射線管理, 小児放射線学	専門的知識(線量評価、計画、コン サルティング等)
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	×
従う法令等		
"質問② 検査項目の必要性"		
血液		×
皮膚	○	×
眼球	○	×
その他		
作業前		×
作業中		×
理由	介入型 X 線透視ガイドを扱う処置 医や核医学放射線技師、PET 施設 の医療従事者等、高線量にさらさ れる一部の労働者には必要である	必要ないから
"質問③ 被ばく影響の観点から事業 者が従事者に特殊健診を義 務付ける必要があるか"	○	×
理由	労働者は、教育、訓練、被曝線量に 関する フィードバックを必要とするか ら。	個人的な問題であるから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健 診の目的はあると考えられ るか"	○	×
例	WHO の定義に基づいて健康を管 理・評価するため	

国名	アメリカ
肩書き	Dr(MD)
職業の分類	政府職員 コンサルティング
専門の分野	規制
質問	
"質問① 特殊健診実施の有無"	×
従う法令等	
"質問② 検査項目の必要性"	
血液	×
皮膚	×
眼球	×
その他	
作業前	×
作業中	×
理由	法律は作業者を守るわけではないから。
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	×
理由	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	×
例	

・ヨーロッパ

国名	ベルギー	ベルギー
肩書き	Dr (MD)	Dr(PhD)
職業の分類	政府職員	MD
専門の分野	規制 監督	マネジメント
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	
眼球	○	
その他	非密封線源を扱う作業者の放射能汚染を目的とする検査	
作業前	○	○
作業中	○	
理由	作業前被曝は放射線事故が起きた際、責任問題において役立つ可能性があるから	6mSv を超えた時だけ
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	×
理由	労働者の安全を確保することは雇用主の法的責任であるから。	政府の義務であるから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	全ての労働者に提供される予防医学の為のサービス	医療チームの収益

国名	デンマーク	フランス
肩書き	Mr	Prof
職業の分類	コンサルティング	教育
専門の分野	監督 専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）	専門知識（線量評価、計画、コンサルティング等）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液		○
皮膚	○	○
眼球	○	○
その他	尿	グローバルヘルス
作業前	○	
作業中	○	
理由	作業前：基準（尿検査のみ） 作業中：安全確認の最適化	通常時の健康状態を把握することで、予防医学に役立てるため
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由	悪い影響が高まったとき	フランス国内の法律によって義務付けられているから。また、医学的にも有用であるから。
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	身体及び精神の安全性検査	筋骨格障害発見の為

国名	フランス	フランス
肩書き	Dr(PhD)	Dr(PhD)
職業の分類	研究	研究
専門の分野	マネジメント、研究、専門的知識 (線量評価、計画、コンサルティング等)	研究
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚		○
眼球		○
その他		
作業前	○	
作業中	○	○
理由	生物学的及び健康維持のフォロー	被曝の種類に応じた処置を行う必要があるから。
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由		健診結果は高レベル被曝作業者に自信を与え続けているから。
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	労働安全衛生的な検査	ウェルビーイング、眼等

国名	ドイツ	ポーランド
肩書き	Dr(MD)	Dr(PhD)
職業の分類	医師	研究
専門の分野	専門的知識(線量評価、計画、コンサルティング等)	実用的な放射線管理
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	
眼球	○	○
その他		
作業前	○	○
作業中		○
理由		作業者の健康を確認する手法として適切だから。作業者に対して作業時間中は安全であるということの証明になるから。
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	×	○
理由		作業者が将来病気にならないことを示すのによいから。
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"		×
例		

国名	スウェーデン	イギリス
肩書き	Dr (PhD)	Dr(PhD)
職業の分類	産業	医学
専門の分野	実用的な放射線管理 専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）	実用的な放射線管理 研究
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	
眼球	○	○
その他	心電図、肺機能、血圧、色覚	
作業前	○	
作業中	○	○
理由	低線量だとしても、作業者を観察し続ける必要があるから。	（血液）作業前に血液検査が行われるから。 （眼球）介入型 X 線透視ガイドを扱う臨床医は受ける必要あり。
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由	LNT モデルの観点から考えると低線量でもリスクがあるから。	高線量の放射線を被曝している可能性のある 人に対してのみ必要である
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	労働者の健康状態が、高温/狭い場所等の厳しい場所で働くのに適しているかどうかを検討する	一部の方の安心の為

国名	イギリス	イギリス
肩書き	Mr	Mr
職業の分類	政府職員 コンサルティング	産業 研究
専門の分野		マネジメント 実用的な放射線管理 研究、専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法、ガイドライン
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚		○
眼球		○
その他		
作業前	○	○
作業中		○
理由		がんの発病リスクを考慮して
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由		被曝線量による
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"		○
例		

国名	イギリス
肩書き	Prof
職業の分類	研究
専門の分野	研究
質問	
"質問① 特殊健診実施の有無"	○
従う法令等	国内法
"質問② 検査項目の必要性"	
血液	○
皮膚	○
眼球	○
その他	
作業前	○
作業中	○
理由	健康は放射性物質を扱う作業を改革するから。
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○
理由	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○
例	

・オセアニア

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Ms	
職業の分類	産業	
専門の分野	実用的な放射線管理 専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）	
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	ガイドライン	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚		
眼球	○	
その他	肺	
作業前		
作業中		
理由	取り扱っている線源が何かによる	被曝線量が 6mSv を超える恐れのある作業場に就く前
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	×
理由	雇用者は作業者を適切に守る責任があるから	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	×
例	被雇用者の知る権利として（放射線影響等）	

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Dr(PhD)	Dr(PhD)
職業の分類	研究	コンサルティング
専門の分野	研究 教育	専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	×
従う法令等	ガイドライン	
"質問② 検査項目の必要性"		
血液		
皮膚		
眼球	○	○
その他		
作業前		○
作業中		○
理由	眼球は放射線影響を受けやすいから（白内障）	眼球は他の体組織よりも放射線影響を受けやすく、他の体組織の線量計として用いられ得るから
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	×
理由	雇用者の義務であるが、これは線量計測で満たされていると言える	低線量＝影響なし 高線量は例外で、適切な対応がなされているから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	有害化学物質取扱 等	医学的問題 等

国名	オーストラリア	オーストラリア（南）
肩書き	Ms	Ms
職業の分類	医療	政府職員
専門の分野	実用的な放射線管理 専門的知識（線量評価、計画、コン サルティング等）	規制
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	地方自治体法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液		○
皮膚	○	○
眼球	○	○
その他		
作業前		
作業中	○	
理由	線量限度が遵守されていたり、低 線量の被曝であるから	
"質問③ 被ばく影響の観点から事業 者が従事者に特殊健診を義 務付ける必要があるか"	○	
理由	雇用主は危険な作業を扱うから。	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健 診の目的はあると考えられ るか"	×	×
例	線量は有意に低いから	

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Mr	Prof
職業の分類	医療	研究 教育
専門の分野	実用的な放射線管理	Director, Centre for Radiation Research ,Education&Innovation.
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	×
従う法令等		
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	×	×
皮膚	×	×
眼球	×	×
その他		
作業前	×	×
作業中	×	×
理由		作業者は毎回 1mSv 以上、 年間 20mSv 以上被曝しないから。
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	×
理由		雇用主は作業者の個人情報を知る必要がないから
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例		事故、緊急時のみ

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Dr(PhD)	Dr(PhD)
職業の分類	産業	政府職員
専門の分野	規制、マネジメント 実用的な放射線管理 専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）	規制 公認
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	×
従う法令等		
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	×	×
皮膚	×	×
眼球	×	×
その他		
作業前	×	×
作業中	×	×
理由	線量限度を超えていなければ特殊健診は行う必要がないから	年間被ばく線量が線量限度の 25% 以下であるから
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由		労働安全衛生（規格）の一部である必要があるが、治療が必要であることを意味するものではない。
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	×
例	雇用主の労働者に向けた特別なサービス 危険物を取り扱う作業者の適切なチェック	作業者の責任における仕事への適合性の検討。

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Mr	Dr(PhD)
職業の分類	政府職員	研究
専門の分野	規制	専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	○
従う法令等		国内法、地方自治体法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚		○
眼球	○	○
その他	肺 X 線	
作業前		○
作業中		
理由	年齢と職業による	10mSv を超えた時だけ
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由	ほとんどの雇用者は職業適性の確認が必要なものに関しては健診を行っており、長期被曝者の健康問題についても考慮しているから	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例		危険物を取り扱う作業者の適切なチェック

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Mr	
職業の分類	研究	
専門の分野	実用的な放射線管理	
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	国内法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	○
眼球	○	○
その他		
作業前	○	○
作業中		
理由	6mSv を超えた時だけ	
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由		比較的高線量の被曝作業者のみ
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	危険物を取り扱う作業者の適切なチェック	雇用者と作業者の信頼関係維持のため

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Mr	Mr
職業の分類	政府職員	政府職員
専門の分野	規制、公認、専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）	専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	○	○
従う法令等	地方自治体法	国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液		×
皮膚		×
眼球		×
その他	尿	
作業前		×
作業中	○	×
理由	ウラン濃縮物を扱っているウラン工場労働者の定期的な尿検査	回答者の作業環境においては検査するほどの線量を浴びないから
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由	不健康な作業者は安全な作業が行えないから	健康基準の確立のため
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	化学物質を扱う、危険な環境で働く作業者の検査	医学的、法的な基準の確立のため

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Mr	Mr
職業の分類	政府職員	コンサルティング
専門の分野	規制	専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	×
従う法令等		
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	×	×
皮膚	×	×
眼球	×	×
その他		
作業前	×	×
作業中	×	×
理由	回答者の作業環境においては検査するほどの線量を浴びないから	典型的な被曝線量は非常に低いから。
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	×	×
理由	高線量を被曝する可能性がないから	全員が高リスク作業員なわけではないから。
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	結核の検査	健康&ウェルビーイング&疫学の調査のため

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Mr	Mr
職業の分類		政府
専門の分野	実用的な放射線管理	規制 実用的な放射線管理
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	○
従う法令等		国内法
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	×	○
皮膚	×	○
眼球	×	
その他		
作業前	×	○
作業中	×	○
理由		我々は常に放射線を扱っているから。
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由		雇用主と作業者の両方に存在する注意義務
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"		
例		

国名	オーストラリア	オーストラリア
肩書き	Mr	Mr
職業の分類	産業	健康
専門の分野	実用的な放射線管理	マネジメント 専門的知識（線量評価、計画、コンサルティング等）
質問		
"質問① 特殊健診実施の有無"	×	×
従う法令等		
"質問② 検査項目の必要性"		
血液	○	○
皮膚	○	○
眼球		○
その他		
作業前	○	○
作業中		○
理由	問題発生時の分析に用いるための 基準を設けるため	高線量の被曝をする可能性のある 作業グループは行うべき、または 疫学的な目的から
"質問③ 被ばく影響の観点から事業者が従事者に特殊健診を義務付ける必要があるか"	○	○
理由	ウェルビーイングの基準を設ける ため	
"質問④ 放射線防護以外での特殊健診の目的はあると考えられるか"	○	○
例	作業者の知る権利	作業環境安全

付録4 検討にあたって参考とした法令、通達など関連文書

1) 電離則、RI法、人事院規則、安全衛生規則の関連条文

【電離放射線障害防止規則】

第五十六条 事業者は、放射線業務に常時従事する労働者で管理区域に立ち入るものに対し、雇入れ又は当該業務に配置替えの際及びその後六月以内ごとに一回、定期的に、次の項目について医師による健康診断を行わなければならない。

- 一 被ばく歴の有無(被ばく歴を有する者については、作業の場所、内容及び期間、放射線障害の有無、自覚症状の有無その他放射線による被ばくに関する事項)の調査及びその評価
 - 二 白血球数及び白血球百分率の検査
 - 三 赤血球数の検査及び血色素量又はヘマトクリット値の検査
 - 四 白内障に関する眼の検査
 - 五 皮膚の検査
- 2 前項の健康診断のうち、雇入れ又は当該業務に配置替えの際に行わなければならないものについては、使用する線源の種類等に応じて同項第四号に掲げる項目を省略することができる。
- 3 第一項の健康診断のうち、定期に行わなければならないものについては、医師が必要でないと認めるときは、同項第二号から第五号までに掲げる項目の全部又は一部を省略することができる。
- 4 第一項の規定にかかわらず、同項の健康診断(定期に行わなければならないものに限る。以下この項において同じ。)を行おうとする日の属する年の前年一年間に受けた実効線量が五ミリシーベルトを超えず、かつ、当該健康診断を行おうとする日の属する一年間に受ける実効線量が五ミリシーベルトを超えるおそれのない者に対する当該健康診断については、同項第二号から第五号までに掲げる項目は、医師が必要と認めないときには、行うことを要しない。
- 5 事業者は、第一項の健康診断の際に、当該労働者が前回の健康診断後に受けた線量(これを計算によつても算出することができない場合には、これを推定するために必要な資料(その資料がない場合には、当該放射線を受けた状況を知るために必要な資料))を医師に示さなければならない。

【放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則】

第二十二條 法第二十三條第一項の規定による健康診断は、次の各号に定めるところによる。

- 一 放射線業務従事者(一時的に管理区域に立ち入る者を除く。)に対し、初めて管理区域に立ち入る前に行うこと。
- 二 前号の放射線業務従事者については、管理区域に立ち入った後は一年を超えない期間ごとに行うこと。
- 三 前号の規定にかかわらず、放射線業務従事者が次の一に該当するときは、遅滞な

- く、その者につき健康診断を行うこと。
 - イ 放射性同位元素を誤つて吸入摂取し、又は経口摂取したとき。
 - ロ 放射性同位元素により表面密度限度を超えて皮膚が汚染され、その汚染を容易に除去することができないとき。
 - ハ 放射性同位元素により皮膚の創傷面が汚染され、又は汚染されたおそれのあるとき。
 - ニ 実効線量限度又は等価線量限度を超えて放射線に被ばくし、又は被ばくしたおそれのあるとき。
- 四 健康診断の方法は、問診及び検査又は検診とする。
- 五 問診は、次の事項について行うこと。
- イ 放射線（一メガ電子ボルト未満のエネルギーを有する電子線及びエックス線を含む。次のロ及び第二十三条第一号において同じ。）の被ばく歴の有無
 - ロ 被ばく歴を有する者については、作業の場所、内容、期間、線量、放射線障害の有無その他放射線による被ばくの状況
- 六 検査又は検診は、次の部位及び項目について行うこと。ただし、イからハまでの部位又は項目（第一号に係る健康診断にあつては、イ及びロの部位又は項目を除く。）については、医師が必要と認める場合に限る。
- イ 末しょう血液中の血色素量又はヘマトクリット値、赤血球数、白血球数及び白血球百分率
 - ロ 皮膚
 - ハ 眼
 - ニ その他原子力規制委員会が定める部位及び項目

【人事院規則 10-5（職員の放射線障害の防止）】

第二十六条 放射線業務従事職員に係る規則 10-4 別表第三第二号に掲げる業務に係る同規則第十九条第一項の健康診断及び同規則第二十条第二項第二号の特別定期健康診断（次条第一項の規定によるものを除く。）の検査の項目は、次に掲げるものとする。

- 一 被ばく経歴の評価
 - 二 末梢しょう 血液中の白血球数及び白血球百分率の検査
 - 三 末梢しょう 血液中の赤血球数の検査及び血色素量又はヘマトクリット値の検査
 - 四 白内障に関する眼の検査
 - 五 皮膚の検査
- 2 前項に規定する規則 10-4 第十九条第一項の健康診断については、使用する線源の種類等に応じて前項第四号に掲げる検査項目を省略することができる。
- 3 第一項に規定する特別定期健康診断は、その業務に従事した後六月を超えない期間ごとに一回行わなければならない。
- 4 第一項に規定する特別定期健康診断の検査項目のうち同項第二号から第五号までに掲げる検査項目については、当該特別定期健康診断を行おうとする日の属する年度の前年度の実効線量が五ミリシーベルトを超えず、かつ、当該特別定期健康診断を行おうとする日の属する年度の実効線量が五ミリシーベルトを超えるおそれのない職員にあつて

は、医師が必要と認めるときに限りその全部又は一部を行うものとし、それ以外の職員にあつては、医師が必要でないと認めるときは、その全部又は一部を省略することができる。

【労働安全衛生規則】

(定期健康診断)

第四十四条 事業者は、常時使用する労働者(第四十五条第一項に規定する労働者を除く。)に対し、一年以内ごとに一回、定期的に、次の項目について医師による健康診断を行わなければならない。

- 一 既往歴及び業務歴の調査
- 二 自覚症状及び他覚症状の有無の検査
- 三 身長、体重、腹囲、視力及び聴力の検査
- 四 胸部エックス線検査及び喀(かく)痰(たん)検査
- 五 血圧の測定
- 六 貧血検査
- 七 肝機能検査
- 八 血中脂質検査
- 九 血糖検査
- 十 尿検査
- 十一 心電図検査

- 2 第一項第三号、第四号、第六号から第九号まで及び第十一号に掲げる項目については、厚生労働大臣が定める基準に基づき、医師が必要でないと認めるときは、省略することができる。
- 3 第一項の健康診断は、前条、第四十五条の二又は法第六十六条第二項前段の健康診断を受けた者(前条ただし書に規定する書面を提出した者を含む。)については、当該健康診断の実施の日から一年間に限り、その者が受けた当該健康診断の項目に相当する項目を省略して行うことができる。
- 4 第一項第三号に掲げる項目(聴力の検査に限る。)は、四十五歳未満の者(三十五歳及び四十歳の者を除く。)については、同項の規定にかかわらず、医師が適当と認める聴力(千ヘルツ又は四千ヘルツの音に係る聴力を除く。)の検査をもつて代えることができる。

(特定業務従事者の健康診断)

第四十五条 事業者は、第十三条第一項第三号に掲げる業務に常時従事する労働者に対し、当該業務への配置替えの際及び六月以内ごとに一回、定期的に、第四十四条第一項各号に掲げる項目について医師による健康診断を行わなければならない。この場合において、同項第四号の項目については、一年以内ごとに一回、定期的に、行えば足りるものとする。

- 2 前項の健康診断(定期のものに限る。)は、前回の健康診断において第四十四条第一項第六号から第九号まで及び第十一号に掲げる項目について健康診断を受けた者につい

ては、前項の規定にかかわらず、医師が必要でないと認めるときは、当該項目の全部又は一部を省略して行うことができる。

3 第四十四条第二項及び第三項の規定は、第一項の健康診断について準用する。この場合において、同条第三項中「一年間」とあるのは、「六月間」と読み替えるものとする。

4 第一項の健康診断(定期のものに限る。)の項目のうち第四十四条第一項第三号に掲げる項目(聴力の検査に限る。)は、前回の健康診断において当該項目について健康診断を受けた者又は四十五歳未満の者(三十五歳及び四十歳の者を除く。)については、第一項の規定にかかわらず、医師が適当と認める聴力(千ヘルツ又は四千ヘルツの音に係る聴力を除く。)の検査をもつて代えることができる。

●特定業務（第十三条第一項第三号）

イ 多量の高熱物体を取り扱う業務及び著しく暑熱な場所における業務

ロ 多量の低温物体を取り扱う業務及び著しく寒冷な場所における業務

ハ ラジウム放射線、エックス線その他の有害放射線にさらされる業務

ニ 土石、獣毛等のじんあい又は粉末を著しく飛散する場所における業務

ホ 異常気圧下における業務

ヘ さく岩機、銚びよう 打機等の使用によつて、身体に著しい振動を与える業務

ト 重量物の取扱い等重激な業務

チ ボイラー製造等強烈な騒音を発する場所における業務

リ 坑内における業務

ヌ 深夜業を含む業務

ル 水銀、砒ひ素、黄りん、弗ふつ 化水素酸、塩酸、硝酸、硫酸、青酸、か性アルカリ、石炭酸その他これらに準ずる有害物を取り扱う業務

ヲ 鉛、水銀、クロム、砒ひ素、黄りん、弗ふつ 化水素、塩素、塩酸、硝酸、亜硫酸、硫酸、一酸化炭素、二硫化炭素、青酸、ベンゼン、アニリンその他これらに準ずる有害物のガス、蒸気又は粉じんを発散する場所における業務

ワ 病原体によつて汚染のおそれが著しい業務

カ その他厚生労働大臣が定める業務

【電離放射線障害防止規則の解説、中央労働災害防止協会】

電離則の規定について解釈例規及び解釈について、検討の参考となる箇所を抜粋する。

第 56 条関連

(ベースラインの把握)

・第 1 項において、雇入れ又は放射線業務に配置替えの際に、放射線業務歴の有無にかかわらず原則として各号に掲げる検査を行わせることとされているのは、労働者が放射線業務に従事した後において、放射線による影響と同種の影響が生じた場合に、それが放射線業務に起因するものかどうかを判断する上で、また、当該労働者が放射線業務に従事した後において当該放射線業務に従事することによってどの程度の影響を受けたかを知る上で、必要とされることによるものであること。

・第1項第1号については、放射線業務従事者の被ばく線量が大幅に減少していることを踏まえ、平成13年の改正で、第3項及び第4項において被ばく線量に応じて医師が必要でないと認めるときは、同項第2号から第5号までに規定する検査の一部又は全部を省略でき、又は行うことを要しないとされたところであるが、その省略の可否を適切に判断できるように、放射線業務従事者の「自覚症状の有無」を新たに調査項目として加えることとしたこと。なお、「その評価」を加えたのは、本号の項目によって、同項第2号から第5号までに規定する検査の省略等の可否を判断するものであることを明確にしたものであること。

・第2項において、雇入れ又は放射線業務に配置替えの際において、使用する線源の種類等に応じて眼の検査を省略することができることとしたのは、白内障が生じるおそれがある線源の種類等が限定されているためであること。その線源の種類等には、中性子線源（中性子が発生する装置を含む。）及び眼に大量の엑스線又はガンマ線を受けるおそれがある状況下でのこれら放射線の発生装置があること。・・・なお、本項の眼の検査の省略の可否は線源の種類等で決定されることから、事業者が判断すれば足りるが、「被ばく歴の有無の調査及びその評価」の結果、医師が目の検査の実施が必要と認めた場合には、実施すべきものであること。

→第2項では、第1項第4号の「白内障に関する眼の検査」の省略の判断については、規定上は医師に求めるまでもなく放射線の線源等の種類に応じて事業者が判断すれば足りるものではあるが、他の項目の省略と併せて総合的な判断を医師に求めることが適当である。

・第3項については、第1項の定期健康診断では管理区域内で常時放射線業務を行うすべての労働者に対して第1項第1号から第5号までの検査について原則実施する必要があるが、第1項第1号の検査の結果、第1項第2号から第5号までの検査の一部又は全部について医師が実施する必要があると認めない労働者については、事業者は、当該検査を省略することができること。

・第4項については、定期健康診断日の属する年の前年「1年間」（事業者が事業場ごとに定める日を始期とする1年間）に受けた実効線量が5ミリシーベルトを超えず、当該定期健康診断日の属する「1年間」に5ミリシーベルトを超えるおそれのない労働者に対しては、定期健康診断は原則第1項第1号のみを行えばよく、第1項第1号の検査の結果、第1項第2号から第5号までの検査の一部又は全部について医師が必要と認めるときに限り当該検査を実施すれば足りるものであること。

・第4項の「5ミリシーベルトを超えるおそれのない」ことの判断に当たっては、個人の被ばく歴及び今後予定される業務内容、管理区域への立ち入りの頻度、作業環境測定の結果等から合理的に判断すれば足りるものであり、事故の想定等過大な安全率を見込むことを求める趣旨ではないこと。

・本条の健康診断のほか、放射線業務従事者については、通常1年以内ごとに1回実施の一般健康診断を、特定業務従事者健康診断として6月以内ごとに実施しなければならない。

電離放射線健康診断について

(目的)

・我が国の労働安全衛生関係法令においては、有害業務に従事する労働者に実施することとされている特殊健康診断の目的は、単に有害業務によって生じる障害を発見することだけでなく、有害業務に従事する労働者をその業務に就かせてよいかどうか、あるいはその業務に継続して従事してよいかどうかの判断にも用いるものである。

電離放射線健康診断についても、放射線障害の発見のためだけでなく、むしろ広範な労働衛生管理の一環として、放射線業務に従事している労働者の健康状態を継続的に把握することで、放射線業務に従事している労働者の労働衛生管理を進めるために行うものであると捉えるべきである。

(進め方)

・まず、健診を担当する医師は、健診対象者全員について、それぞれ規則第56条第1項第1号に掲げられている「被ばく歴の有無の調査及びその評価」を行うこととなる。

被ばく歴を有する労働者については、被ばくにかかる作業の場所、作業内容、作業期間、放射線障害の有無、自覚症状の有無、その他放射線による被ばくに関する事項について、問診等により把握して評価を行うこととなる。

この際、事業者は、同条第5項の規定により、健診対象労働者全員について前回の健康診断実施後に受けた線量を医師に示さなければならない。

健診対象者の受けた線量が不明な場合であっても、放射線を受けた状況を知るための資料を提出する必要がある。

次に第2項、第3項及び第4項で規定される健診項目の省略の可否について、健診対象労働者各人ごとに総合的に判断することとなる。

なお、第2項では、第1項第4号の「白内障に関する眼の検査」の省略の判断については、規定上は医師に求めるまでもなく放射線の線源等の種類に応じて事業者が判断すれば足りるものではあるが、他の項目の省略と併せて総合的な判断を医師に求めることが適当である。

(「評価」の追加について)

・平成13年3月27日改正の電離則第56条第1項第1号では、改正前に比べ「その評価」という言葉が追加されたが、この「評価」には2通りの意味が含まれているものである。

1つは、医学的検査(血液、眼及び皮膚の検査)の省略等が可能となることを踏まえ、「被ばく歴の有無の調査」の結果が個々の放射線業務従事労働者の医学的検査の省略または実施の判断のための基礎データとしての役割を有していることを明確にすることで、検査を実施する必要がない労働者まで検査を実施したり、検査が実施されるべき労働者に検査が実施されないということがないようにすること、もう1つは、医学的検査が実施され

ない機会が増加することに伴い、問診を含む「被ばく歴の有無の調査」を労働者の健康管理の主軸にするということである。

すなわち、実質的に「被ばく歴の有無の調査」の結果が放射線業務従事労働者の健康状態を把握し就業の可否及び適正配置を評価し作業環境及び作業方法等の改善の有無及び程度を評価するための重要な根拠となるということであり、「被ばく歴の有無の調査」の中に追加した「自覚症状の有無」についても放射線業務従事労働者ごとに医学的検査の省略又は実施の判断を適切に行うために重要なものである。

(受ける実効線量による検査の省略について)

・平成13年3月27日改正の電離則では、放射線業務に常時従事する労働者で管理区域に立ち入るものに対する敵の健康診断については、1年間に受ける実効線量に応じて次のとおりとされた。

① 健康診断日の属する年の前年1年間に受けた実効線量が5ミリシーベルトを超えず、かつ健康診断日の属する1年間に受ける実効線量が5ミリシーベルトを超えるおそれがない放射線業務従事労働者については、医学的検査は原則不要、被ばく歴の有無の調査の結果、医師が必要と認めたときに、その検査を実施すれば足りるものであること。

② 上記①以外の者については、医学的検査は原則実施、被ばく歴の有無の調査の結果、医師が必要でないとして認めるとき、その検査を省略できること。

これは、放射線業務については、他の有害業務と異なり、放射線業務従事者の被ばく線量の測定を行うことができ、被ばく線量の値に対応した人体への影響がほぼ特定されているため、当該被ばく線量の測定が、他の有害業務の場合における健康診断の役割の一部を果たしているといえることができるためである。

したがって、被ばく線量の値が低い放射線業務従事労働者に対しては、健康診断における医学的検査の必要性が減じられるべきものであり、それでもなお医学的検査が必要と判断するには、被ばく歴の有無の調査の結果から、当該被ばく線量の値に疑問を持つべき要素（被ばく線量の値が本来の被ばく線量を大きく下回っていることが疑われる要素）があるか、放射線の影響によると疑われる自覚症状が認められることが必要である。

一方、被ばく線量の値が比較的高い放射線業務従事者に対しては、健康診断における医学的検査の必要性は高まることとなり、それでもなお医学的検査が省略できると判断するには、被ばく歴の有無の調査の結果から、当該被ばく線量の値に疑問を持つべき要素がなく（被ばく線量の値が本来の被ばく線量を大きく下回っていることが疑われる要素がなく）、放射線の影響により生じ得るものと同じような自覚症状が認められないことが必要である。

基 発 第 568 号
平成 13 年 6 月 22 日

都道府県労働局長 殿

厚生労働省労働基準局長

電離放射線障害防止規則第 56 条に規定する健康診断における被ばく歴の有無の調査の調査・評価項目及び健康診断の項目の省略等の可否について

労働安全衛生規則及び電離放射線障害防止規則の一部を改正する省令(平成 13 年厚生労働省令第 42 号)により改正された電離放射線障害防止規則(以下「改正電離則」という。)については、平成 13 年 3 月 30 日付け基発第 253 号「労働安全衛生規則及び電離放射線障害防止規則の一部を改正する省令の施行等について」により、その運用を指示したところであるが、同通達中の記の第 3 の 23 の(9)により別途に示すこととしていた改正電離則第 56 条第 1 項第 1 号に規定する「被ばく歴の有無の調査及びその評価」の調査・評価項目及び同条第 2 項から第 4 項までに規定する健康診断の項目の省略等の可否の判断については、下記に示す事項に留意し、関係者への周知徹底を図るとともに、その適切な運用に遺漏なきを期されたい。

記

第 1 改正電離則第 56 条第 1 項第 1 号に規定する被ばく歴の有無の調査及びその評価に係る調査・評価項目について

1 「その他放射線による被ばくに関する事項」について

改正電離則第 56 条第 1 項第 1 号に規定する被ばく歴の有無の調査において事業者が被ばく歴を有する者について調査及びその評価を行わなければならない項目については、作業の場所、内容及び期間、放射線障害の有無、自覚症状の有無その他放射線による被ばくに関する事項とされたが、そのうち「その他放射線による被ばくに関する事項」は、次の事項とすること。

(1) 前回の健康診断までに受けた累積の実効線量

(2) 前回の健康診断から今回の健康診断までに受けた実効線量並びに眼及び皮膚の等価線量

2 必要に応じ調査を実施し、その評価を行うことが適当である事項について改正電離則第 56 条第 1 項第 1 号の評価に当たっては、同号において調査しな

ければならないとされている事項に加え、必要に応じ、次の事項について調査を実施し、当該調査結果を踏まえ評価を行うことが適当であること。

- (1) 雇入れ時又は放射線業務に配置替えの際の健康診断
 - ア 放射線業務以外の有害業務歴(業務内容、時期及び期間)
 - イ 喫煙習慣の有無及び1日の本数
 - ウ 既往歴の有無
 - エ 現在治療中の病気及び服用している薬の有無及びその内容
 - オ アレルギー等の有無及びその内容
- (2) 定期の健康診断
 - ア 事業者より聴取すべき事項
 - (ア) 健康診断を受ける労働者が作業を行っている作業場所の線量当量率
 - (イ) 放射線測定器の装着状況(不均等被ばくの有無及びそれに対する対応状況)
 - イ 労働者より聴取すべき事項
 - (ア) 放射線業務における電離放射線の種類
 - (イ) 保護具の種類及び着用状況
 - (ウ) 放射線業務以外の有害業務歴(業務内容、時期及び期間。ただし(1)アから変更がない場合は除く。)
 - (エ) 喫煙の習慣の有無及び1日の本数
 - (オ) 既往歴の有無
 - (カ) 現在治療中の病気及び服用している薬の有無及びその内容
 - (キ) 前回の健康診断後に発症したアレルギー等の有無及びその内容

第2 改正電離則第56条第2項から第4項までに規定する健康診断の項目の省略等の可否について

1 改正電離則第56条第2項に規定する健康診断の項目の省略について

次の(1)から(6)に示す業務については、第56条第2項の規定により健康診断の項目を省略することは適当でないこと。

- (1) 原子炉(臨界実験装置を含む。)施設における原子炉の運転及び原子炉周辺設備の保守点検の業務(中性子線にさらされるおそれのないことが明らかな区域での業務を除く。)
- (2) 次のような加速器を取り扱う業務(中性子線にさらされるおそれのないことが明らかな区域での業務を除く。)
 - ア 最大出力が6MeVを超える直線加速器
 - イ サイクロトロン、シンクロトロン及びシンクロサイクロトロン
 - ウ 陽子線、重陽子線その他の重荷電粒子線を発生させる加速器

- エ その他中性子線が発生するおそれのある加速器
- (3) 中性子線が発生させる次の放射性物質を取り扱う業務(中性子線にさらされるおそれのないことが明らかな区域での業務を除く。)
- ア ^{252}Cf
- イ $^{226}\text{Ra}-\text{Be}$ 及び $^{241}\text{Am}-\text{Be}$
- (4) 核燃料物質(U、Pu 及び Th)を取り扱う業務(核分裂を伴うおそれがないことが明らかな業務及び中性子線にさらされるおそれのないことが明らかな区域での業務を除く。)
- (5) 核融合実験装置を取り扱う業務(核融合を伴うおそれがないことが明らかな業務及び中性子線にさらされるおそれのないことが明らかな区域での業務を除く。)
- (6) エックス線装置又はガンマ線照射装置を使用する業務であって、露出した利用線錐に近づかざるを得ないような場合、長時間の透視又は撮影の作業を行う場合において照射中に受像器の後ろに待避せざるを得ない場合等、装置の仕様又は作業方法からみて当該業務に従事する労働者が眼に大量のエックス線又はガンマ線を受けるおそれのある業務

2 改正電離則第 56 条第 3 項に規定する健康診断の項目の省略について

次の各検査項目ごとに掲げる者については、第 56 条第 3 項の規定により、当該検査項目を省略することは適当でないこと。

- (1) 白血球百分率
 - ア 白血球百分率が生理的範囲外である者
 - イ 業務上、1 年間に 250mSv 以上の実効線量を受けたことのある者
 - ウ 業務上、1 年間に 100mSv 以上の実効線量を受けて 5 年間程度の期間を経過していない者
 - エ 自他覚症状から白血球百分率に何らかの所見が認められることが疑われる者
 - オ 前回の健康診断において、白血球百分率に異常所見が認められた者
 - カ 業務内容からみて、大量の実効線量を受けていることが疑われる者
- (2) 白血球数
 - ア 白血球数が生理的範囲外である者
 - イ 業務上、1 年間に 250mSv 以上の実効線量を受けたことのある者
 - ウ 業務上、1 年間に 100mSv 以上の実効線量を受けて 5 年間程度の期間を経過していない者
 - エ 自他覚症状から白血球数に何らかの所見が認められることが疑われる者
 - オ 前回の健康診断において、白血球数に異常所見が認められた者

- カ 業務内容からみて、大量の実効線量を受けていることが疑われる者
- (3) 赤血球数
 - ア 赤血球数が生理的範囲外である者
 - イ 業務上、1年間に250mSv以上の実効線量を受けたことのある者
 - ウ 業務上、1年間に100mSv以上の実効線量を受けて5年間程度の期間を経過していない者
 - エ 自覚症状から赤血球数に何らかの所見が認められることが疑われる者
 - オ 前回の健康診断において、赤血球数に異常所見が認められた者
 - カ 業務内容からみて、大量の実効線量を受けていることが疑われる者
- (4) 血色素量又はヘマトクリット値
 - ア 血色素量又はヘマトクリット値が生理的範囲外である者
 - イ 業務上、1年間に250mSv以上の実効線量を受けたことのある者
 - ウ 業務上、1年間に100mSv以上の実効線量を受けて5年間程度の期間を経過していない者
 - エ 自覚症状から血色素量又はヘマトクリット値に何らかの所見が認められることが疑われる者
 - オ 前回の健康診断において、血色素量又はヘマトクリット値に異常所見が認められた者
 - カ 業務内容からみて、大量の実効線量を受けていることが疑われる者
- (5) 眼
 - ア 業務上、眼に大量の放射線を受けたことがある者
 - イ 白内障を疑わせる自覚症状のある者
 - ウ 前回の健康診断において異常所見が認められた者
 - エ 業務内容からみて、眼に大量の放射線を受けていることが疑われる者
- (6) 皮膚
 - ア 業務上、皮膚に大量の放射線を受けたことがある者
 - イ 皮膚疾患を疑わせる自覚症状のある者
 - ウ 前回の健康診断において異常所見が認められた者
 - エ 業務内容からみて、皮膚に大量の放射線を受けていることが疑われる者
 - オ 前回の健康診断において、皮膚に外傷、熱傷、潰瘍等、放射性物質が体内に浸透しやすく、又は放射性物質により汚染されやすい疾患があると認められた者(非密封の放射性物質を取り扱う業務に従事する者に限る。)
- (7) 各検査項目について、特に実施を希望する者

3 改正電離則第56条第4項に規定する健康診断の項目の省略等について
 次の各検査項目ごとに掲げる者については、第56条第4項の規定にかかわらず

ず当該検査項目を実施することが望ましいこと。

(1) 白血球百分率

- ア 業務上、1年間に250mSv以上の実効線量を受けたことのある者
- イ 業務上、1年間に100mSv以上の実効線量を受けて5年間程度の期間を経過していない者
- ウ 自覚症状から白血球百分率に何らかの所見が認められることが疑われる者
- エ 前回の健康診断において、白血球百分率に異常所見が認められた者
- オ 業務内容からみて、大量の実効線量を受けて、白血球百分率に異常所見が認められることが疑われる者

(2) 白血球数

- ア 業務上、1年間に250mSv以上の実効線量を受けたことのある者
- イ 業務上、1年間に100mSv以上の実効線量を受けて5年間程度の期間を経過していない者
- ウ 自覚症状から白血球数に何らかの所見が認められることが疑われる者
- エ 前回の健康診断において、白血球数に異常所見が認められた者
- オ 業務内容からみて、大量の実効線量を受けて、白血球数に異常所見が認められることが疑われる者

(3) 赤血球数

- ア 業務上、1年間に250mSv以上の実効線量を受けたことのある者
- イ 業務上、1年間に100mSv以上の実効線量を受けて5年間程度の期間を経過していない者
- ウ 自覚症状から赤血球数に何らかの所見が認められることが疑われる者
- エ 前回の健康診断において、赤血球数に異常所見が認められた者
- オ 業務内容からみて、大量の実効線量を受けて、赤血球数に異常所見が認められることが疑われる者

(4) 血色素量又はヘマトクリット値

- ア 業務上、1年間に250mSv以上の実効線量を受けたことのある者
- イ 業務上、1年間に100mSv以上の実効線量を受けて5年間程度の期間を経過していない者
- ウ 自覚症状から血色素量又はヘマトクリット値に何らかの所見が認められることが疑われる者
- エ 前回の健康診断において、血色素量又はヘマトクリット値に異常所見が認められた者
- オ 業務内容からみて、大量の実効線量を受けて、血色素量又はヘマトクリット値に異常所見が認められることが疑われる者

- (5) 眼
 - ア 業務上、眼に大量の放射線を受けたことがある者
 - イ 白内障を疑わせる自覚症状が前回の健康診断後初めて発生した者
 - ウ 業務内容からみて、眼に大量の放射線を受けて、白内障が認められることが疑われる者
- (6) 皮膚
 - ア 業務上、皮膚に大量の放射線を受けたことがある者
 - イ 皮膚疾患を疑わせる自覚症状のある者
 - ウ 前回の健康診断において異常所見が認められた者
 - エ 業務内容からみて、皮膚に大量の放射線を受け、皮膚疾患が認められることが疑われる者
 - オ 前回の健康診断において、皮膚に外傷、熱傷、潰瘍等の疾患が認められ、かつ、業務内容から見て、放射性物質が体内に浸透し、又は放射性物質により汚染されたことが疑われる者(非密封の放射性物質を取り扱う業務に従事する者に限る。)
- (7) 各検査項目について、特に実施を希望する者

電離放射線健康診断個人票

氏名		性別	男・女	生年月日	年月日	雇入年月日	年月日	
放射線業務の経歴 (他の事業におけるものを含む。)	期間	年月日から 年月日まで	年月日から 年月日まで	年月日から 年月日まで	①前回の健康診断 までの実効線量 mSv (mSv)			
	業務名							
② 被ばく歴の有無								
③ 判定と処置								
健康診断年月日								
現在の業務名								
前回の健康診断後に受けた線量	実効線量	外部被ばくによるもの(事故等によるものを除く。)(mSv)						
		内部被ばくによるもの(事故等によるものを除く。)(mSv)						
	④ 事故等によるもの(mSv)							
		計(mSv)						
	等価線量	眼の事故等によるものを除くもの(mSv)					⑤	
		⑥ 事故等によるもの(mSv)						
		計(mSv)						
	皮膚	事故等によるものを除くもの(mSv)					⑤	
		⑥ 事故等によるもの(mSv)						
		計(mSv)						
血液	白血球数(個/mm ³)							
	白血球百分率	リンパ球(%)						
		単球(%)						
		異型リンパ球(%)						
		好中球	桿状核(%)					
			分葉核(%)					
		好酸球(%)						
		好塩基球(%)						
	赤血球数(万個/mm ³)							
	血色素量(g/dl)							
ヘマトクリット値(%)								
その他の								
眼	水晶体の混濁(有無)							

皮膚	発赤 (有無)				
	乾燥又は縦じわ (有無)				
	潰瘍 (有無)				
	爪の異常 (有無)				
その他の検査					
全身的所見					
自覚的訴え					
参考事項					
⑦ 医師の診断					
健康診断を実施した医師の氏名印					
⑧ 医師の意見					
意見を述べた医師の氏名印					

備考

- 1 ①の欄は、平成13年4月1日以後の実効線量の合計を記入すること。また、同欄の()内には平成13年3月31日以前の集積線量を記入すること。
- 2 ②の欄は、被ばく歴を有する者については、作業の場所、内容及び期間、放射線障害の有無その他放射線による被ばくに関する事項を記入すること。
- 3 ③の欄は、本票記載の健康診断又は検査までの期間に採られた放射線に関する医学的処置及び就業上の措置について記入すること。
- 4 ④の欄は、(1)事故、(2)緊急作業への従事、(3)放射線物質の摂取、(4)傷創部の汚染及び(5)別表に掲げる限度の10分の1以下にすることが困難な身体の汚染によって受けた実効線量又は推定量(受けた実効線量を推定することも困難な場合には、被ばくの原因)を記入すること。
- 5 ⑤の欄は、東日本大震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則の規定による健康診断の結果を記入する場合には、除染等電離放射線健康診断個人票の「外部被ばくによるもの(事故等によるものを除く。)」の欄に記入されている実効線量を記入すること。
- 6 ⑥の欄は、(1)事故、(2)緊急作業への従事及び(5)別表に掲げる限度の10分の1以下にすることが困難な身体の汚染によって受けた等価線量又は推定量(受けた等価線量を推定することも困難な場合には、被ばくの原因)を記入すること。
- 7 ⑦の欄は、異常なし、要精密検査、要治療等の医師の診断を記入すること。
- 8 ⑧の欄は、健康診断の結果、異常の所見があると診断された場合に、就業上の措置について医師の意見を記入すること。

放射線安全規制研究戦略的推進事業費
(染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に
関する調査研究) 事業

平成 31 年度 (令和元年度) 事業成果報告書

令和 2 年 3 月

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

本報告書は、国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構が実施した「平成31年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究）事業」の成果を取りまとめたものです。

目 次

研究の概要	6
1. 研究の背景と目的	8
1.1. 染色体線量評価法	8
1.2. 染色体線量評価の現状	9
1.3. 本研究事業の目的	10
2. 研究計画・実施体制・執行状況	12
3. 研究成果（1）情報収集・検討会	16
3.1. 情報収集	17
3.2. 検討会	18
4. 研究成果（2）Phase 1 プレ試験	19
4.1. 目的	19
4.2. 材料と方法	19
4.2.1. 画像データ	19
4.2.2. アノテーション（染色体へのタグ付け）	22
4.2.3. AIによる染色体画像判別	24
4.3. 結果	25
4.3.1. 染色体の検出	26
4.3.2. クラス分類性能	26
4.3.3. 教師データ増加の効果	27
4.4. 考察	27
4.5. 二動原体染色体分析への各種染色法の適用を検討するための その他の情報	29
4.6. 結論	30
5. 研究成果（3）AI利用に適した画像データの開発	31

6. 研究成果（４）Phase 1 本試験	31
6.1. 目的	31
6.2. 材料と方法	32
6.2.1. 画像データ	32
6.2.2. データセット作成	34
6.2.3. AIによる染色体画像判別	34
6.2.4. 線量推定試験	35
6.3. 結果	36
6.3.1. 染色体の検出	36
6.3.2. クラス分類性能	38
6.3.3. 線量効果曲線の試作	42
6.3.4. 線量推定試験	44
6.4. 考察	48
6.4.1. 染色体異常の分類の性能向上	46
6.4.2. トリアージに必要なメタフェーズ数	50
6.4.3. 線量推定式の検討	54
7. まとめ	54
8. 今後の展望	55
8.1. AI自動染色体画像判定手法の本格開発	55
8.2. 原子力災害等被ばく事故における緊急時対応のストラテジー	56
8.3. AI自動染色体判定の応用	57
9. 研究成果の発表	59
9.1. 学会発表	59
9.2. 取材	63
9.3. 査読付き原著論文	63
9.4. 修士論文	64

10. 参考文献	66
11. 資料	70
資料 1 : 第 3 回 AI・人工知能 EXPO	71
資料 2 : エルピクセル社	75
資料 3 : SRL 社 遺伝子・染色体解析部	76
資料 4 : 低線量被ばく国際シンポジウム	78
資料 5 : ISO TC85 SC2 会議 WG-18 (国際標準化機構・生物線量評価分科会)	79
資料 6 : ICRR 2019 (国際放射線影響学会 2019 年年会)	80
資料 7 : 日本バイオインフォマティクス学会 2019 年年会・ 第 8 回生命医薬情報学連合大会	81
資料 8 : 第 5 回 ARADOS 年会 (アジア線量評価ネットワーク会議)	82
資料 9 : 第 2 回日本メディカル AI 学会学術集会	83
資料 10 : ラボ訪問	84
資料 11 : 文献調査	85
資料 12～14 : 研究会合議事録	87
資料 15～22 : 画像検討会議事録	102
12. 別添	
12-1. 平成 30 年度研究成果の概要	102
12-2. 研究計画の実施結果対応表	106

研究の概要

染色体解析、特に末梢血リンパ球培養による二動原体染色体異常の分析法（二動原体分析法）は、鋭敏で最も信頼性の高い生物学的線量評価法として国際的に標準化されている。しかしながら、染色体異常の判定基準のラボ間・検査者間の変動が大きいこと、結果を得るまでに要する時間と労力が大きいことなどから、実際の事故対応に際しては大きな問題をはらむことが予測される。本研究事業では、主観や習熟度の差に影響されない、しかも効率の良い、染色体画像解析法の開発を目指し、人工知能（Artificial Intelligence；以下、AI）技術導入の実現可能性を調査・検討した。

具体的には、本研究事業では、ゲノムの塩基配列の相同性に基づいて動原体領域を短時間で染め分けることのできる、蛍光標識ペプチド核酸（peptide nucleic acid, PNA）プローブを用いた蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション（fluorescence *in situ* hybridization, FISH）法（以下、PNA-FISH）を併用することで、正確な教師画像データを作成することに成功した。実験的に 0～5 Gy のガンマ線を照射した末梢血から作成した分裂中期リンパ球（以下、メタフェーズとする）の染色体画像約 15,000 枚を用いた AI 導入試験により、以下のことを達成した。

1) 基盤技術の構築

- ・ AI の一種である深層学習（ディープ・ラーニング）を導入した学習モデルの試作。
- ・ AI に適した標本作製法、画像作成法の確立。
- ・ 実際の AI 技術の運用で必要となる多検体対応の細胞培養法の確立。

2) AI 導入の評価

- ・ 二動原体染色体を指標とした線量推定試験により、試作モデルで約 50 個のメタフェーズ画像データから、2 Gy 未満と 2 Gy 以上の被ばくが判別できた。
- ・ 従来かえりみられなかった染色体断片も線量評価の良好な指標となることを見出した。二動原体染色体と併用することで、1 Gy 判別を含むより正確な判定が可能になることが期待できる。

3) 線量推定作業の高度の効率化

・1 検体当たりの画像判定 (1000 メタフェーズ) に要する時間が実質 30 時間以上 (目視) から 10 分 (AI) へと短縮化できた。

本研究の成果は、原子力災害をはじめとする多数の被ばく者を生じる放射線事故に対し、トリアージに必要な判断材料として AI 技術が染色体画像判定に適用できる可能性を強く示唆するものである。AI 導入により画像判定の標準化・効率化が達成されることで、ラボや国の別なく協働で線量評価を迅速に行うことができるようになる。

1. 研究の背景と目的

1.1 染色体線量評価法

放射線（電離放射線）は生体にとって有害である。その一つの理由として、遺伝物質の本体である DNA 損傷を与える作用があるからである。細胞が放射線被ばくし、細胞核の DNA の損傷が正常に修復されないと、DNA が折りたたまれた染色体の形態に異常を生じさせる（図1）。これらの異常は、細胞分裂中期の細胞（以下、メタフェーズ）に顕現する染色体で観察できる。被ばく線量と生成された染色体異常の頻度との間に一定の線量効果関係があることを利用して、実際に生体が被ばくした線量の推定を行う。本研究報告では、この線量評価法を「染色体線量評価」法と称することとする。

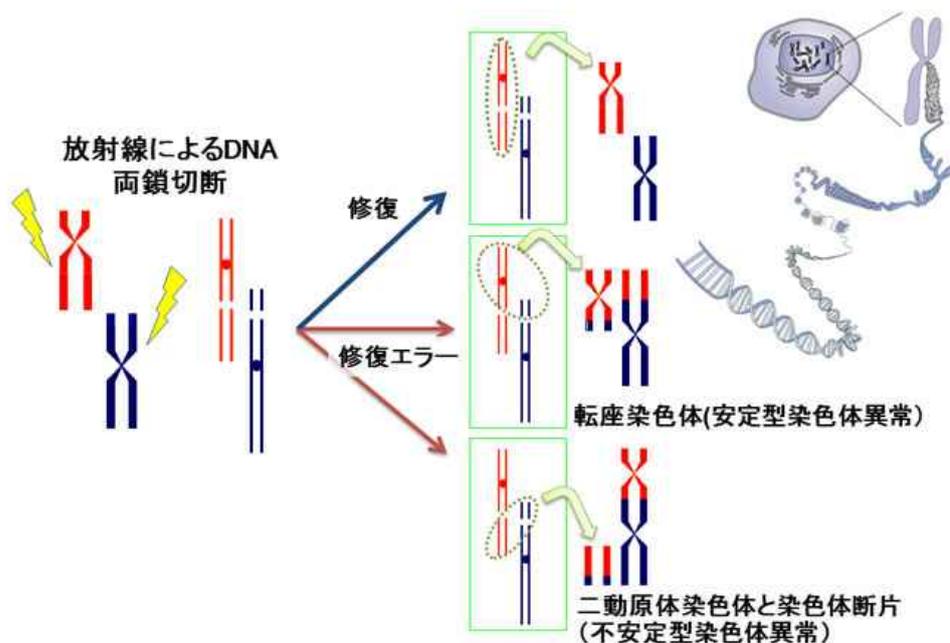


図1. 放射線被ばくによる染色体異常の生成

(QST e-learning を改変)

染色体線量評価では、具体的には、あらかじめ健常人末梢血リンパ球の *in vitro* 照射実験によって線量と染色体異常生成頻度(1細胞当たりの染色体異常数)の関係曲線(以下、線量効果曲線)を作成し、患者の染色体異常頻度から被ばく線量推定する[参考文献1]。放射線により切断され誤って2個の染色体が融合した二動原体染色体(図1)の生成頻度を指標とした推定法、「二動原体染色体分析」が、国際標準化された最も信頼されている代表的な方法である[参考文献2, 3]。実際に旧・放射線医学総合研究所、現・量子科学技術研究開発機構(以下、量研機構)では東京電力福島第一原子力発電所事故(2011年)で緊急時作業員の線量評価を実施し、被ばく医療に貢献した[参考文献4]。

1.2. 染色体線量評価の現状

二動原体染色体異常の生成頻度は個人差が小さく、かつ、バックグラウンド値が非常に低い(1000メタフェーズ当たり0~1個)[参考文献1]。このため、直近の放射線被ばくの影響を反映するといえる。メタフェーズ1個当たりの二動原体頻度はポアソン分布にしたがうため、観察すべきメタフェーズ数は線量が低いほど大きくなる。解析は人間の目視観察によるため、患者1人につき、1000メタフェーズまたは二動原体染色体100個以上を観察することが国際的に推奨されている[参考文献1, 2]。

近年、技術革新により、細胞培養や染色体標本作製の装置の自動化、顕微鏡画像撮影の自動化がなされ、血液検体受け入れから染色体画像作成までは高速化が成し遂げられた。

しかしながら、染色体異常の正確な画像判定の部分は人間の目視判断に頼っており、患者1人当たり1000メタフェーズの判定に、熟練者で実質30時間以上を要する。国際標準プロトコールでは、患者1人につき、2名以上の染色体検査担当者によるブライントテスト形式で染色体異常検出をすることが推奨されている[参考文献2]。国内には高度被ばく医療の指定機関が5機関あるが、1機関につき熟練者は最大2名しかいないのが現況である。東京電力福島第一原子力発電所事故での経験からいって、1つの担当機関が1週間に検査可能な患者数は最大3名程度と見込まれる。

染色体画像の解析自動化の開発は、この10年で、画像解析条件のパラメータを人間が設定する従来型の機械学習法によって行われてきているが、今なお実用段階には無い。

具体的には、顕微鏡画像解析の自動化 [参考文献 5, 6, 7] や、フローサイトメトリーに CCD カメラによるフロー撮影を結びつけた検出と解析の迅速化 [参考文献 8] が試みられており、自動判定結果を人間の目視により確認・修正する作業が必要であることが知られている。

このように、依然として原子力災害をはじめとする多数の被災者が発生する被ばく事故では多くの熟練者の協力が必要である。そのため、国内外で染色体線量評価のネットワーク化が進められている。しかしながら、プロトコルの国際標準化と 20 年以上続けられた努力にも関わらず、ラボ間や染色体検査担当者間の染色体画像判定の差をなくすことはできていない [参考文献 9]。染色体分析の熟練者の確保や養成は困難であり、染色体線量評価において、染色体異常の画像判定の標準化・迅速化が最大で喫緊の課題である。

1.3. 本研究事業の目的

近年、分子細胞遺伝学の発展により染色体異常の判別のための染色方法の選択肢が増えた [参考文献 1]。並行してコンピュータによる画像認識技術の発達も著しく、特に、AI 技術による機械学習を採り入れた画像判別手法の開発には目覚ましいものがある。従来の画像解析技術では、前述のように人間が指定したパラメータ（特徴）に基づき染色体の検出を行うという機械学習であったため、多様な染色体像に対応できず、取りこぼしが多かった。また、画像品質のバラつきに柔軟に対応することが難しく、研究室ごとに熟練者によるパラメータの調整などが必須であった。AI 技術のひとつである深層学習は、脳のニューラルネットワークを模した機械学習モデルであり、多量のデータを用いて膨大なパラメータを調整することで柔軟な学習が可能な情報処理の手法である。パーセプトロンという、複数の信号を受け取り、0-1 を出力するアルゴリズムを脳神経に模し、並列化と多層化によって非線形で複雑な表現を可能にしている。大量な組み合わせに起因する膨大な計算量から、実現が難しかった技術であったが、単純な並列計算に特化した GPU (graphics processing unit) の進化に伴い、ここ数年の間に現実的に利用可能な技術となった。これにより深層学習の手法は自然言語処理や画像解析など、様々な分野で高い成果をあげている。特に画像解析の分野では、医療や製造業などの領域で高い性能を発揮し [参考文献 10]、時には専門家による判断よりも高い精度を出

すこともあるという。

そこで本研究事業では、平成 30 年度、31 年度の 2 カ年で、AI 技術を含む最先端の画像判別手法を調査・試行し、線量評価における導入の実現可能性を検討した。調査・検討においては、染色体線量評価・染色体研究、コンピュータ画像解析技術、AI 知能技術の研究者、数理統計学の研究者など、諸分野の専門家の協力を得た。本研究の成果は、染色体異常の判定の標準化および高速化に向けた、本格的な解析プログラムの開発の礎となる。

2. 研究計画・実施体制・執行状況

■ 研究計画

1) 【情報収集】 染色体解線量評価（数理統計解析を含む）および人工知能技術を導入した画像判別手法に関する情報収集

1-1) 関連の国内学会、国際学会、AI 関連企業展示会等への参加

* 各国の被ばく医療における線量評価責任機関の研究者との情報交換を含む。

1-2) 先進的な研究機関への訪問による情報収集

* 染色体線量評価と数理統計解析のラボ

1-3) 文献調査

2) 【画像作成】 テスト用の画像ファイルの準備（継続）（各種画像データと目視判定結果の紐付け）

3) 【AI 導入試験】 人工知能技術を導入した機械学習(ディープラーニング)による画像判別プログラムテスト

3-1) 染色体および染色体異常の判別精度や実行速度などを評価軸として有効性や適用範囲（線量）の検討を行う。

3-2) 3-1. を参考に染色体異常認識モデルの試作および検証を行う (Phase 1)。

4) 【検討委員会】 検討委員会の開催

* 1～3 で得られる情報を共有し、コンピュータによる画像判別手法の技術の検討・評価（人工知能を含む）、画像判別結果の数理統計学的なデータ処理法・線量推定法の検討、染色体線量評価のための画像判別技術開発案の検討等を行う。

5) 【総括】 総括

* 染色体線量評価のための画像判別技術開発案の提示

[補足]

※ 本報告書においては、染色体画像の「判別」と「判定」を以下のように使い分ける。

・判別： AI により、染色体を認識（検出）しクラス分類する（染色体異常の分類

名を付する) こと。

- ・判定： 染色体検査専門家により、染色体異常の種類を決定（同定）すること。

※2 AI 導入では、一般的に、以下のプロセスにより開発が進められているため、本研究でも Phase 1 という表現を用いる。

- ・Phase 0：AI 利用に対する利用者・開発者間の正しい共通理解（目的の明確化、データの情報など）
- ・Phase 1：AI 導入効果の検証（パイロット・スタディ）；終了段階で開発の実現可能性を判断する。
- ・Phase 2：本格開発および実証実験；終了段階で実際の導入を判断する。
- ・Phase 3：運用と改善

■ 実施体制

研究実施体制は下記の通りである（図2参照）。

○ 主任研究者

数藤 由美子（量子科学技術研究開発機構 量子医学・医療部門 高度被ばく医療センター 計測・線量評価部 生物線量評価グループ、グループリーダー）

* 研究総括、情報収集、画像作成、線量評価

○ 研究協力者および専門・協力内容

長田 直樹（北海道大学大学院 情報科学研究院、准教授）

* 検討委員（画像判別手法および数理統計学の調査・検討）

弓 至（北海道大学大学院 情報科学研究院、修士課程2年）

* 検討委員（画像判別手法の調査・検討）

平井 百樹（東京大学名誉教授）

* 検討委員（染色体技術、染色体画像データ作成）

瀧川 一学（理化学研究所／北海道大学大学院 情報科学研究院、准教授）

* 検討委員（AI 技術全般、特に画像判別）

野里 博和（産業技術総合研究所 人工知能研究センター、主任研究員）

*検討委員 (AI 技術応用全般、特に医用画像)

市川 学 (芝浦工業大学工学部、教授)

*検討委員 (CBRNE 対策、シミュレーション、IT 技術全般)

江藤 亜紀子 (保健医療科学院 健康危機管理部、上席主任研究員)

*検討委員 (健康危機管理、疫学)

○ 研究参加者

高島 良生 (量子科学技術研究開発機構 生物線量評価グループ、主任研究員)

*情報収集 (9月まで)

穂山 美穂 (量子科学技術研究開発機構 生物線量評価グループ、技術員)

*画像ファイルの準備

栗原 治 (量子科学技術研究開発機構 計測線量評価部、部長)

*物理線量評価に関する助言

○ 外注

エルピクセル株式会社

[企業情報]

住所： 東京都千代田区大手町 1-6-1 大手町ビル 6階

ホームページ： <https://lpixel.net/>

事業概要および実績： 東京大学発、ライフサイエンスと画像解析を背景に独自の技術を研究・開発。オリンパス、富士フイルム、キャノンメディカル等から出資を受け複数の医療、医薬用システムを開発。医用画像解析ソフトウェア（脳動脈瘤を診断支援する医療機器）が国内初の薬事承認を取得（2019年10月）。

[契約期間]

1) Phase 1 プレ試験： 2019年4月25日～2019年6月28日

2) Phase 1 本試験： 2019年9月11日～2020年2月28日

[委託内容]

1) Phase 1 プレ試験

*予備試験として、AI技術（深層学習法）が染色体画像分析に適用可能かどうかを確認する。

①複数の染色法による少数のメタフェーズ画像サンプルを用い、深層学習により染色体の検出や分類の性能を調べ、比較する。

②教師画像データ数の増加により、染色体の検出や分類の性能の向上を確認する。

2) Phase 1 本試験

*アルゴリズム（プロトタイプ）を試作し、多数のメタフェーズ画像サンプルを用い、染色体異常の検出性能を評価する。

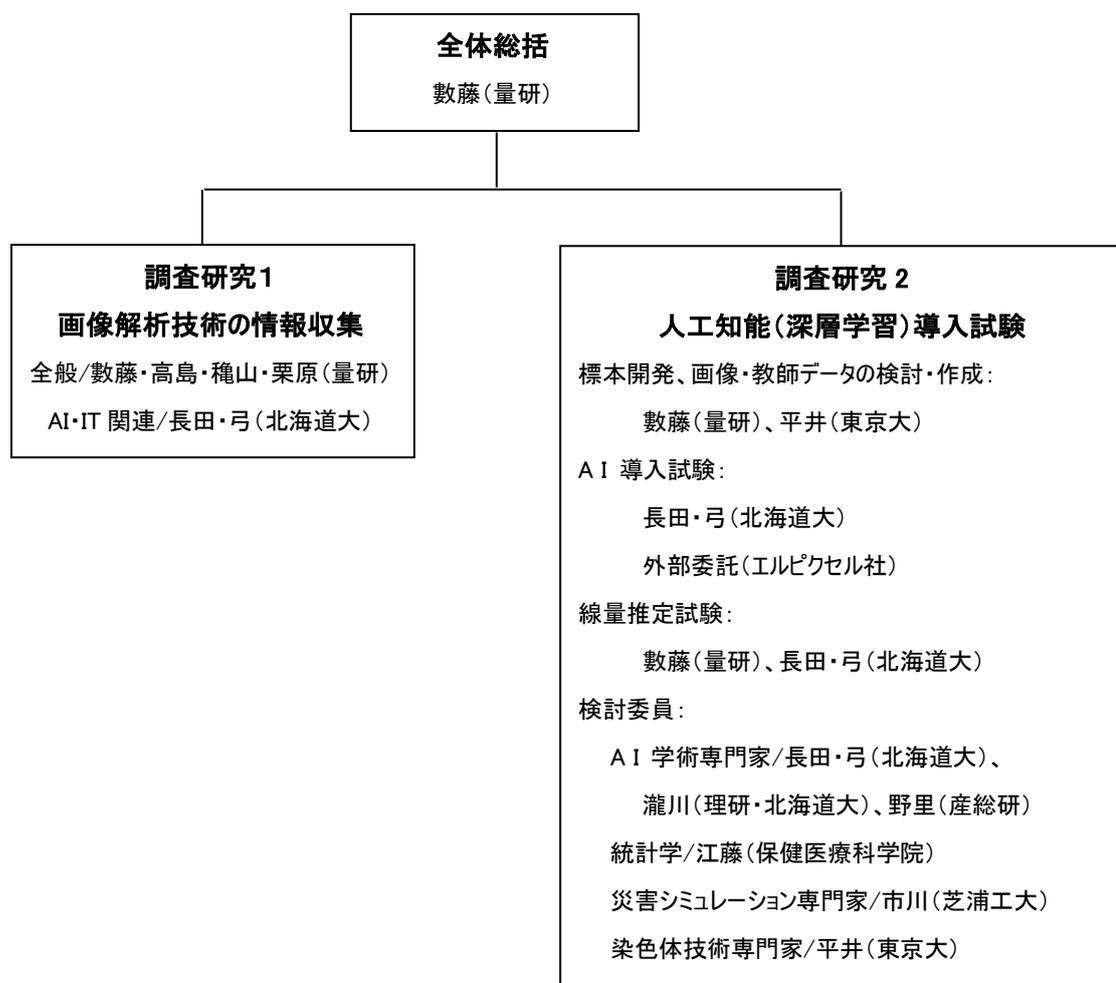


図2. 研究実施体制

■ 執行状況

図3に示す。

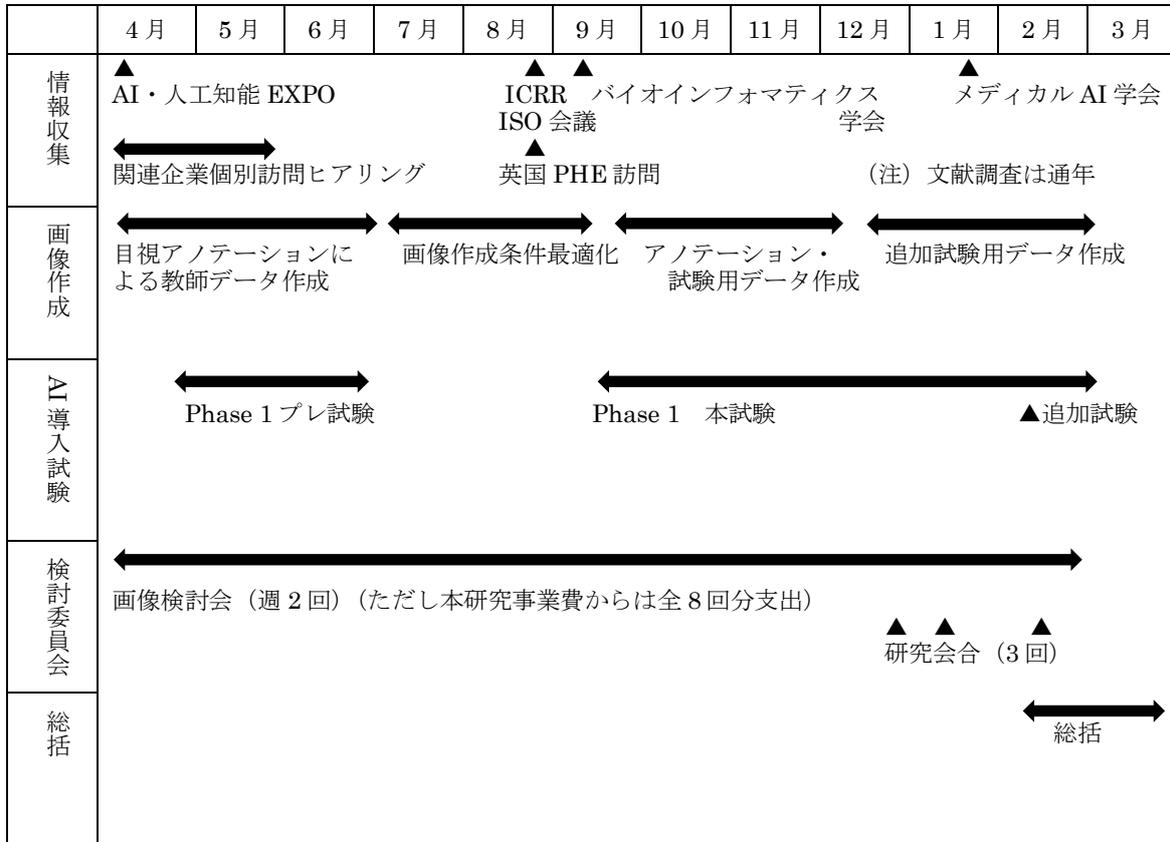


図3. 研究計画の執行状況

3. 研究成果（1）情報収集・検討会

本研究を推進する上で、随時必要に応じて研究開発の動向調査および情報収集を行った。得られた知見は研究協力者（検討委員）、研究参加者の間で共有し、研究の検討に活用した。特に、学術的な情報は AI 導入試験における手法決定や結果の考察、今後の方針決定に役立った。また、関連企業の情報は、AI 導入試験の外部委託先候補決定や、緊急被ばく医療における協力関係作りの検討において参考にした。

以下、実施項目を記載し、内容の詳細は [資料 1～2 2] で示す。

3.1. 情報収集

■ AI 関連企業ヒアリング

- 1) 第 3 回 AI・人工知能 EXPO（2019 年 4 月、東京）[資料 1]
- 2) エルピクセル社（2019 年 4～5 月、東京）[資料 2]
- 3) SRL 社 遺伝子・染色体解析部（2019 年 4 月、東京）[資料 3]

■ 学会・国際会議参加

- 1) 低線量被ばく国際シンポジウム（2019 年 5 月、ソウル）[資料 4]
- 2) ISO TC85 SC2 会議 WG-18（国際標準化機構・生物線量評価分科会）
（2019 年 8 月、マンチェスター）[資料 5]
- 3) ICRR 2019（国際放射線影響学会 2019 年年会）
（2019 年 8 月、マンチェスター）[資料 6]
- 4) 日本バイオインフォマティクス学会 2019 年年会・第 8 回生命医薬情報学連合大会
（2019 年 9 月、東京）[資料 7]
- 5) 第 5 回 ARADOS 年会（アジア線量評価ネットワーク会議）
（2019 年 11 月、北京）[資料 8]
- 6) 第 2 回日本メディカル AI 学会学術集会（2020 年 1～2 月、東京）[資料 9]

■ ラボ訪問

- 1) Public Health of England (PHE)（ジドコット英国、2019 年 8 月）[資料 1 0]

■ 文献調査

資料 1 1 参照。

3.2. 検討会

■ 研究会合

- 1) 第1回 (2019年12月23日、東京) [資料12]
- 2) 第2回 (2020年1月10日、東京) [資料13]
- 3) 第3回 (2020年2月17日、東京) [資料14]

■ 画像検討会

- 1) 第1回 (2019年4月23日、千葉) [資料15]
- 2) 第2回 (2019年4月24日、千葉) [資料16]
- 3) 第3回 (2019年10月9日、千葉) [資料17]
- 4) 第4回 (2019年10月23日、千葉) [資料18]
- 5) 第5回 (2019年11月18日、千葉) [資料19]
- 6) 第6回 (2019年11月25日、千葉) [資料20]
- 7) 第7回 (2020年2月12日、千葉) [資料21]
- 8) 第8回 (2020年2月13日、千葉) [資料22]

4. 研究成果（2）Phase 1 プレ試験

4.1. 目的

本研究事業において、染色体画像解析への AI 技術導入を試験するため、予備試験を行い、以下の項目について確認し、本試験の準備を可能にした。

- ① AI により 染色体が検出可能であること。
- ② AI により 染色体異常が分類可能であること。
- ③ AI に適した染色法を検討するための比較を行うこと。

4.2. 材料と方法

4.2.1. 画像データ

量研機構において、⁶⁰Co ガンマ線照射（2.0, 3.0, 4.0, 5.0 Gy、線量率 0.4 Gy/min）して得た末梢血由来リンパ球染色体標本の各種染色顕微鏡画像コレクションから、以下のものを選択して試験に用いた。本研究での使用に当たっては、臨床研究審査委員会で承認および血液提供者からの同意を得た [量研機構 課題番号 18-023、18-033]。

- ① ギムザ染色画像、1028 枚
- ② DAPI^(注1) 染色画像、1613 枚
- ③ PNA-FISH^(注2) 画像（動原体領域 PNA プローブ）、140 枚（図 4 参照）
- ④ 3-color FISH^(注3) 画像（#1, 2, 4 番染色体ペインティングプローブ）、121 枚

顕微鏡画像は、モノクロ CCD カメラ Axio Imager Z2 とソフトウェア Metafer 4（Zeiss / MetaSystems 社、ドイツ）を用い、自動キャプチャによって撮影した（詳細は表 1 に示す）。

(注1)

DAPI (4', 6-diaminido-2-phenylindole) は DNA に結合する蛍光物質である。核ゲノム (染色体) を青色に染色することができる。

(注2)

本研究における PNA-FISH では、Cy3-標識 (赤色) の動原体領域特異的な PNA プローブを用いた。対比染色には DAPI (青色) を用い、動原体領域が赤色で検出される。なお、PNA は人工的に合成された DNA 類似体で、DNA と異なり電氣的に中性の骨格をもつため高い結合親和性、特異性、感受性をもつ。このためハイブリダイゼーションに要する時間は短く (約 30 分。DNA プローブを用いる通常の FISH では約 17 時間)、迅速な染色体異常検出が可能となった [参考文献 1 1]。

(注3)

3-color FISH はヒト 1 番染色体特異的 DNA プローブ (TexasRed 標識、赤色)、2 番染色体特異的 DNA プローブ (FITC 標識、緑色)、4 番染色体特異的 DNA プローブ (TexasRed + FITC 標識、黄色) を用いた FISH で、交換型染色体異常 (二動原体、転座など) を検出する [参考文献 1 2]。それぞれ、対比染色として DAPI (青色) を使用する。このように各染色体全体にハイブリダイズして検出する FISH を特に染色体ペインティング (Chromosome Painting) と呼ぶ。

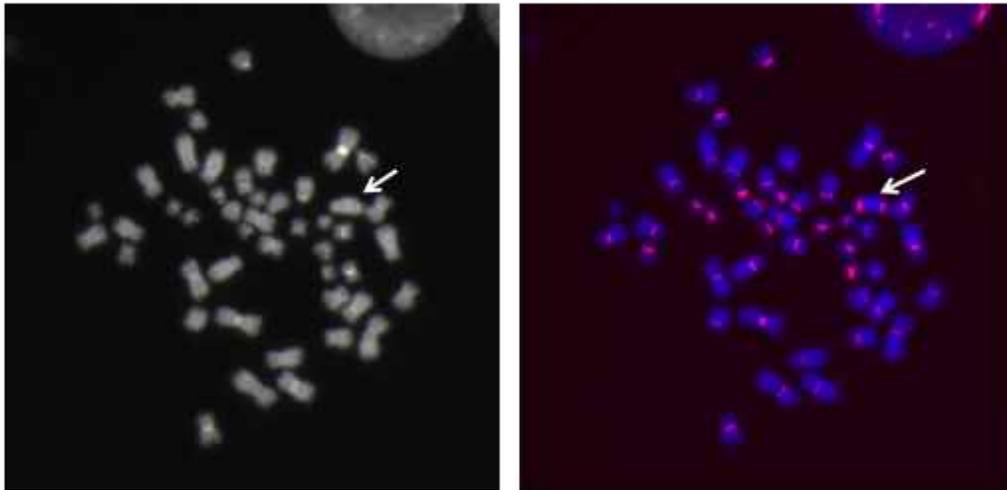


図 4. PNA-FISH を行ったメタフェーズの例

ヒト染色体の動原体領域特異的にハイブリダイズする Cy3 標識ペプチド核酸 (PNA) プローブ (赤色) を用いて蛍光 *in situ* ハイブリダイゼーション (FISH) を行い、DAPI による対比染色 (青色) を行った。モノクロ CCD カメラとバンドパスフィルターにより蛍光色素ごとに撮影した。(左) DAPI 対比染色像 (U フィルター使用)、(右) PNA-FISH 像 (U フィルターおよび Cy3 フィルターで撮影したモノクロ画像をマージし、対比染色 DAPI : 青色、Cy3 : 赤色で表示した)。矢印は二動原体染色体を指している。各図右上に見られる半円形の物体は、細胞分裂の間期にある核 (間期核) の一部で、核ゲノム全体は青色、動原体の存在箇所は赤色で検出されている。

表 1. 顕微鏡画像の情報

	ギムザ染色	PNA-FISH		3-color FISH	
		バンドパス フィルター毎 の撮影画像	マージ画像	バンドパスフ ィルター毎の 撮影画像	マージ画像
ファイル形式	JPEG	TIF	TIF	TIF	TIF
サイズ (幅)	1280 ピクセル	1280 ピクセル	1280 ピクセル	1280 ピクセル	1280 ピクセル
サイズ (高さ)	1024 ピクセル	1024 ピクセル	1024 ピクセル	1024 ピクセル	1024 ピクセル
解像度 (水平)	96 dpi	96 dpi	96 dpi	96 dpi	96 dpi
解像度 (垂直)	96 dpi	96 dpi	96 dpi	96 dpi	96 dpi
ビット深度	24 bit	8 bit	24 bit	8 bit	24 bit

(注) Axio Imager Z2 (Zeiss/Metasystems 社) を使用した場合の数値。

4.2.2. 方法

■ アノテーション（染色体へのタグ付け）

画像の一部について、アノテーション・ソフトウェア「LabelImg」(<https://github.com/tzutalin/labelImg>)を使用して熟練検査者によって目視・手動によるアノテーション（染色体異常の分類名のタグを付すこと）を行った。具体的には、染色体異常の分類名称ごとに色を指定し、表示したメタフェーズの中の染色体1個1個について染色体異常を目視判定し、対応する色の矩形で囲む（図5）。画像ごとにXML形式で保存される。XML形式のデータファイルには、染色体の画像上の位置情報と分類名情報が含まれている。対応する詳細な目視判定情報を併せて作成した（Excelファイル）。

アノテーションを実施した画像枚数は以下の通りである。

- ① ギムザ染色画像、144枚
- ② PNA-FISH 画像（DAPI 染色、動原体領域プローブ使用）、140枚
- ③ 3-color FISH 画像（DAPI 染色、#1, 2, 4 番染色体ペインティングプローブ使用）、121枚

プレ試験では、画像中の染色体の検出および染色体異常の分類（クラス分類）の性能を調べることで、AIによって判別しやすい染色標本を明らかにすることを目的としたため、前述のアノテーションデータから、以下のセットを用意した。

- ・第1セット： 各種染色画像につき、教師データとして同数を揃えた。

訓練データ 66枚

検証データ 9枚

テストデータ 10枚

- ・第2セット： 各種染色画像につき、訓練データを追加した。

訓練データ 95枚

検証データ 9枚

テストデータ 10枚

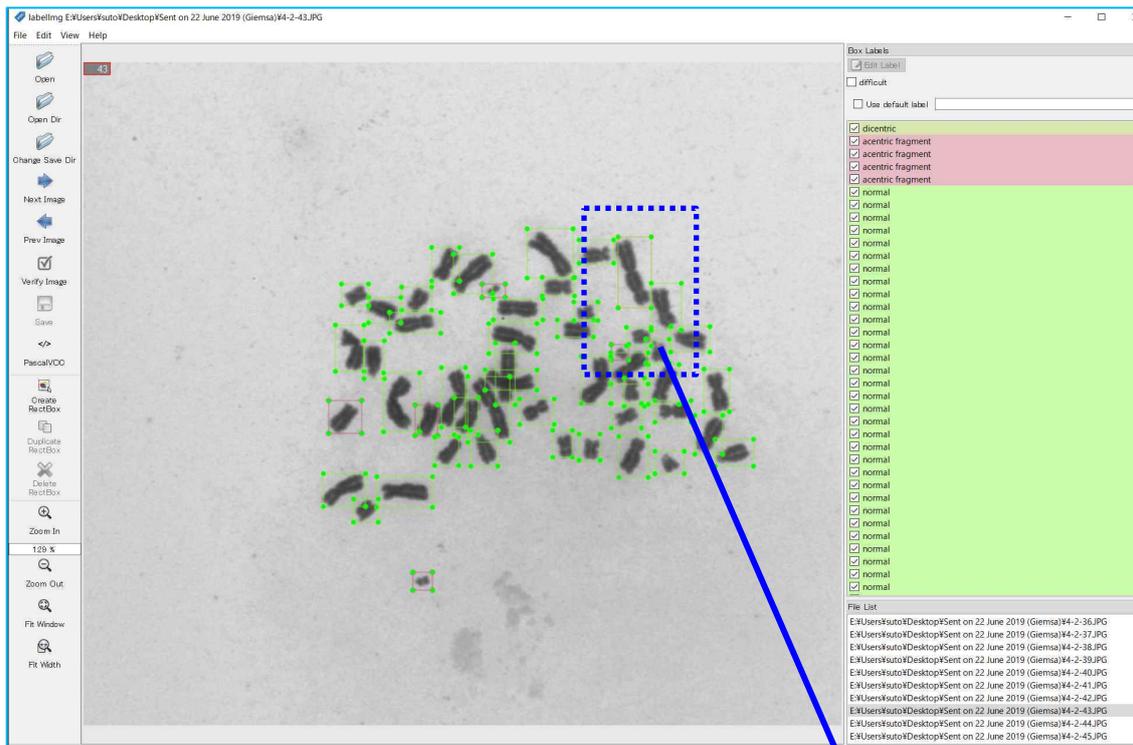
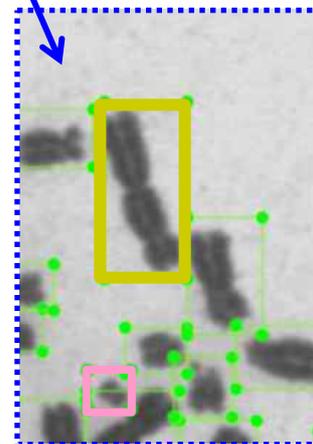


図5. LabelImg を用いたギムザ染色画像のアノテーション
実行イメージ

(上) あらかじめ染色体異常の種類名毎にラベルの色を指定しておく、画像内の染色体1個1個について熟練者が染色体判定をし、指定の色の矩形(ラベル)で囲む。ここでは緑色のラベルが正常(normal)、桃色が染色体断片(acentric fragment)、黄緑色が二動原体染色体(dicentric)を表す。ラベルの色は染色体異常の種類を、ラベルの位置は画像上の位置情報として保存される。

(右) 上図の一部を拡大し、染色体断片と二動原体染色体のラベルを強調した。



4.2.3. AI による染色体画像判別

解析方法：

染色体の検出および染色体異常の分類（クラス分類）のため、Faster R-CNN [参考文献 1 3] を用いた。これは畳み込みニューラルネットワーク（Convolutional Neural Network, CNN）を利用した深層学習手法の一種である。なお、少ない数の教師データに対処するため、事前に転移学習の手法を用いた。具体的には、20 万枚以上の一般画像を含む COCO データセット [参考文献 1 4] で学習済みのモデルを使用して、メタフェーズ画像で再学習させた。

最初に、各種染色画像につき、第一セットの教師データ（訓練データ 66 枚）を用いて染色体の検出およびクラス分類を行った。具体的には、訓練データと検証データを用いて Faster R-CNN による学習を行い、テストデータ 10 枚に対して推論を実行した。その結果を熟練検査者が目視で判定した正解データと比較した。

次に、各種染色画像につき、第二セットの教師データ（訓練データ 95 枚）を用いて同様に学習と比較試験を行った。

評価方法：

アルゴリズムで予測した染色体数や染色体分類の結果と、熟練検査者が目視で計数した染色体数や、クラス分類結果を比較した。

染色体の検出性能を評価するために、熟練検査者が目視で計数した染色体数と、自動検出できた染色体数の平均絶対誤差（Mean Absolute Error）を計算した。染色体の検出性能が高いほど、平均絶対誤差は小さな値をとる。

$$\text{平均絶対誤差} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\text{自動検出できた染色体数} - \text{実際の染色体数}|$$

(n はサンプル数)

染色体異常の分類性能を評価するために、Recall（感度）と Precision（精度）を計算した。

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Negatives}}$$

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positives}}{\text{True Positives} + \text{False Positives}}$$

Recall の値は真陽性の数が多いほど高い値をとり、偽陰性が増えると値は下がる。例えば、dicentric 染色体が normal 染色体として判断されるケース（偽陰性）が少ないと、Recall の値は高くなる。

Precision の値は真陽性の数が多いほど高い値をとり、偽陽性が増えると値は下がる。例えば、normal 染色体が dicentric 染色体として判断されるケース（偽陽性）が少ないと、Precision の値は高くなる。

4.3. 結果

図6および図7に、AIによる染色体画像判定の実行例を示す。

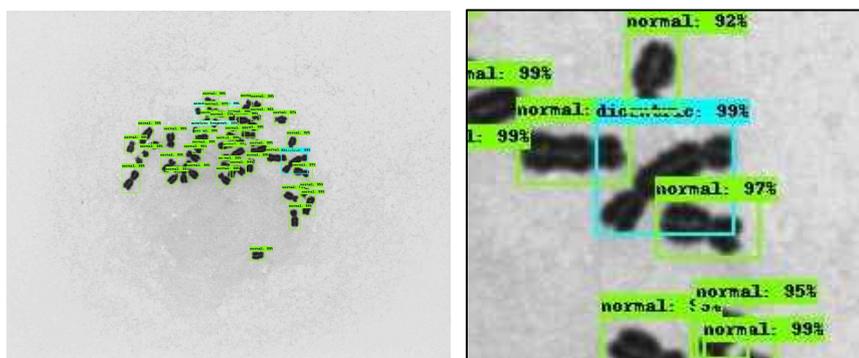


図6. AIによる染色体画像判定の実行イメージ（ギムザ染色）

メタフェーズが1個入った画像（左）およびその部分拡大図（右）。分類名の「正常」（normal, 緑色）、「二動原体染色体」（dicentric, 水色）が確度(%)とともに示される。

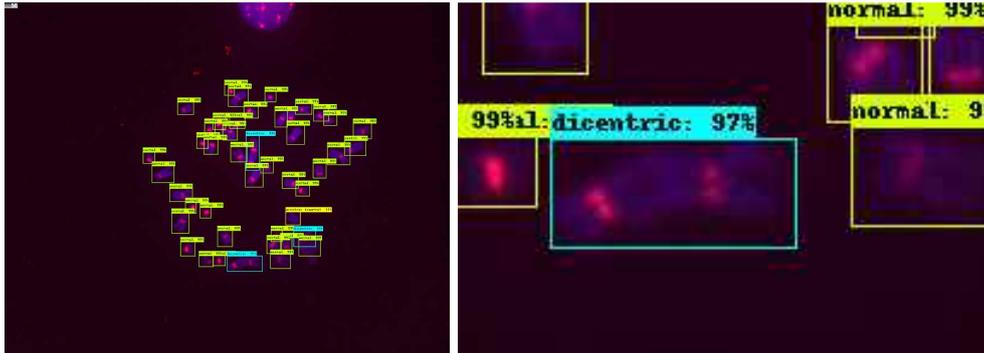


図7. AIによる染色体画像判定の実行イメージ (PNA-FISH)

メタフェーズが1個入った画像 (左) およびその部分拡大 (右) を示す。PNA-FISHにより、染色体はDNAに結合するDAPIによって青色で検出され、動原体領域は蛍光標識プローブによって赤色で検出される。分類名の「正常」(normal, 黄緑色)、「二動原体染色体」(dicentric, 水色) が確度(%)とともに示される。

4.3.1. 染色体の検出

ギムザ染色画像の場合、平均絶対誤差は8.3であったのに対し、PNA-FISH画像では7.4と、より小さい値をとった。

4.3.2. クラス分類性能

染色体異常の種類判別の性能を表2 (教師データ66枚) に示す。

二動原体染色体異常の検出において、ギムザ染色画像では感度が9.1%と低く、9割以上の二動原体が検出されなかった。PNA-FISH画像では二動原体の検出の感度は16.7%で、ギムザ染色画像より高い感度を示した。

同様に、「染色体断片」(二動原体の生成に伴って生じる染色体異常)の検出の感度においても、ギムザ染色画像(8.3%)よりPNA-FISH画像(36.4%)の方が高い分類能を示した。

4.3.3. 教師データ増加の効果

教師データを増加させることで、染色体検出やクラス分類の性能が向上するかどうかを調査した。教師データを **66 枚から 95 枚に増加**させた [表 2 (教師データ 95 枚)]。

その結果、ギムザ染色画像の場合、染色体検出の性能は平均絶対誤差として 8.3 から 4.1 へと向上した。クラス分類については、二動原体の検出の感度には変化が見られず、染色体断片の感度は 8.3%から 16.7%に向上した。また、検出の精度については二動原体、染色体断片ともに偽陽性が増え、数値は低下した。

PNA-FISH 画像では、染色体検出の性能は平均絶対誤差として 7.4 から 2.5 へと向上した。クラス分類については二動原体、染色体断片ともに感度が向上した。また、精度については二動原体で向上した。

表 2. AI による染色体異常のクラス分類性能の比較

染色法 (教師データ数)	ギムザ染色 (66 枚)	ギムザ染色 (95 枚)	PNA-FISH (66 枚)	PNA-FISH (95 枚)
Dic 検出 感度(%)	9.1	9.1	16.7	33.3
Dic 検出 精度(%)	50.0	12.5	22.2	57.1
Frg 検出 感度(%)	8.3	16.7	36.4	50.0
Frg 検出 精度(%)	50.0	33.3	80.0	73.0

(注) Dic: 二動原体染色体、Frg: 染色体断片。

4.4. 考察

1) ギムザ染色と PNA-FISH で同数の教師データ学習を行った結果、PNA-FISH 画像の方が染色体検出およびクラス分類において高い性能を示した。

2) ギムザ染色では、教師データの増加により、染色体の検出性能は向上したが、クラス分類に関しては改善がみられなかった。ギムザ染色による染色体の形態情報のみで染色体異常を判断するのは、PNA-FISH に比べて困難であると考えられる。

3) PNA-FISH では、染色体検出、染色体異常検出ともに、性能は未だ低いですが、教師データを 29 枚増やすだけで二動原体の予測性能が感度 16.7%から 33.3%へ、精度 22.2%から 57.1%へと向上した。今後、教師データを増加させ、さらなる性能向上の余地は十分にありと予想される。

4) 今後、教師データを増加させる際には、今回学習させたモデルを使って新たな画像にアノテーションを付け (AI による自動アノテーション)、それを専門家が修正することで、アノテーション作業の効率化・高速化を図る。

5) プレ試験では、3-color FISH 画像を教師データとする場合も確認した (データは省略)。3-color FISH では染色体異常の検出性能は高かった (感度 98.8%、精度 85.7%)。ハイブリダイゼーションに約 17 時間を要するためトリアージ診断の支援には向かないが、必要に応じて利用することは可能である (57 ページ、8.3.参照)。

6) プレ試験では、DAPI 染色画像の代用として、PNA-FISH および 3-color FISH それぞれの DAPI 像を教師データとする場合についても性能を確認した。染色体検出の性能は PNA-FISH 画像と同等であった (PNA-FISH 画像においても対比染色の DAPI 像が使用されるため)。二動原体の検出 (クラス分類の性能) については、DAPI 染色により動原体領域のヘテロクロマチンが濃染されることから、ギムザ染色より高い分類性能が期待されたが、実際には、染色体によってヘテロクロマチン量が異なるため動原体領域の濃染の度合いが異なり、未加工 (明るさやコントラストの調整無し) では見逃される動原体があり、ギムザ染色画像の検出性能と同等であった。

7) ギムザ染色画像に対してエルピクセル社とは異なる計算ツールや物体検出モデルを用いた AI 導入試験を行った (実施者: 北大・長田、弓)。量研機構提供の同じギムザ染色画像コレクションのうち 900 枚を用いた。UNet [参考文献 15]、Tensorflow-gpu_1.11.0 [参考文献 16] の Keras_2.1.6_tf を用いたセマンテック・セグメンテーション、画像トリミング、畳み込みニューラルネットワークによるディープラーニングに、物体検出モデル YOLOv3 [参考文献 17] を併用して、染色体の検出および染色体異常の識別を試みた。その結果、ギムザ染色による染色体の検出は可能であることが示されたが、染色体異常の分類の判別性能はエルピクセル社における検討結果と同様に低いこと

を確認した。

4.5. 二動原体染色体分析への各種染色法の適用を検討するためのその他の情報

1) 染色にかかる費用と時間 (概算)

広く使用されている調整済み試薬を用いた場合の、標本 1 枚当たりにかかるおおよその染色費用と、染色体標本作製後に染色に要する時間は、以下の通りである。

*ギムザ染色液：30 円、15 分

*DAPI 染色液：350 円、15 分

*PNA-FISH：プローブ 6 円 + 対比染色 (DAPI 染色液) 350 円、1 時間

2) データ取得の効率 (目視判定の場合)

*ギムザ染色：染色効率 100%、データ採択率 40~60%

*DAPI 染色・PNA-FISH 染色：染色効率 100%、データ採択率 90~95%

(注： 画像撮影スピードはいずれの染色でもほぼ同じ)

3) 二動原体判定の再現性 (目視判定の場合)

*ギムザ染色：ラボ間、検査者の熟練度によって差が生じる。

*DAPI 染色：動原体へテロクロマチン領域が濃染するため、ギムザ染色よりやや良好。

*PNA-FISH：ラボ間差、検査者の熟練度による差がなく、一致する [資料 8：アジア線量評価ネットワーク 2019 年ラボ間比較調査 (量研機構主催による) の結果より]。

4) 教師画像データ作成の効率 (熟練者による 1 メタフェーズ当たりの目視判定時間)

*ギムザ染色：既存の判定結果記録ありで、10 分 (既存記録の修正を要する)

*PNA-FISH：既存の判定結果記録なしで、1 分

5) 各種染色法の普及度

ギムザ染色法、DAPI 染色法、FISH 法は、量研機構のほか、国内の細胞遺伝学主要ラボ (日本人類遺伝学会臨床細胞遺伝学認定士約 190 名および高度被ばく医療支援 4 センター) では普及している。

大手染色体検査会社（3社）では日々使用されており、全自動機器導入済み。例えば SRL 社では、血液検体受け入れから画像取得までのすべての工程に対応できる。SRL 社の東京ラボでは、現在 1 日 2000 検体の染色体検査を実施しており（全国受け入れ総数の 70%）、これら通常の受け入れ検査業務を維持したままの場合、被ばく者検体は 1 日 50 検体の受け入れが可能（追加受け入れは応相談）とのこと（資料 3 参照）。

4.6. 結論

AI により、染色体の検出と染色体異常の分類が可能であることが確認できた。

ギムザ染色画像と PNA-FISH 画像について同じ量の教師データで学習させた結果、66 枚および 95 枚の訓練データという少数の画像 AI の判断根拠はブラックボックスにあって不明だが、PNA-FISH 画像を用いた教師データを増加することで、

* 単一染色の情報： 形態、濃淡、染色体断片数（二動原体に伴うことが多い）など

* FISH の情報： 動原体領域など

により、クラス分類（二動原体染色体の判別）の性能を高める可能性が示された。

PNA-FISH 法の普及度や必要経費、PNA-FISH 法を二動原体染色体分析に導入することに問題は無く、また、教師画像データ作成の正確さや効率からみて適しているといえる。

5. 研究成果（3）AI 利用に適した画像データの開発

図8に示すように、PNA-FISH により、正確な教師データが作成できる [資料8および参考文献11参照]。本試験で使用するため、AI による画像判別に適した画像データ作成法を開発し、確立した。具体的には、細胞培養条件を最適化し（染色体の凝縮度を調整）、標本作製法を改良した（染色体の重なりが少ないメタフェーズの頻度を上げた）。

（注： 方法の詳細については投稿論文準備中につき記載しない。）

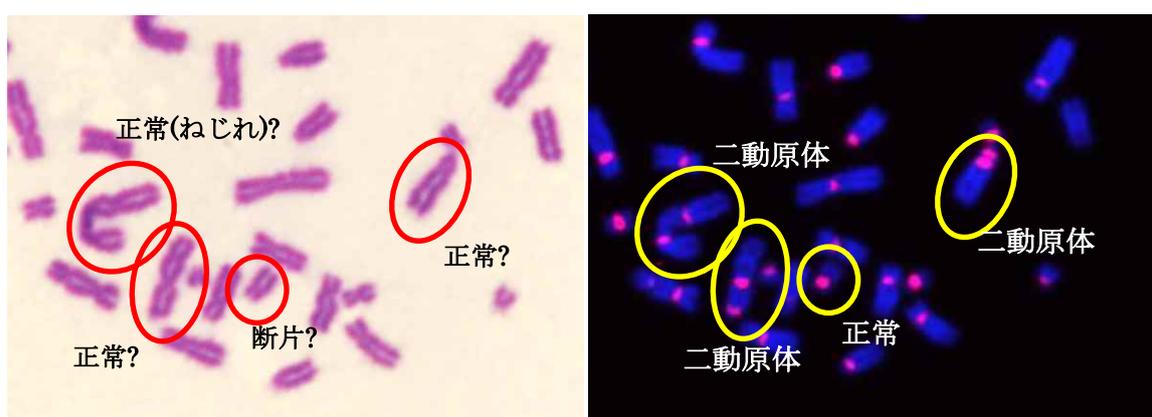


図8. 同一メタフェーズにおける染色法の比較

（左） ギムザ染色像（メタフェーズの一部）

（右） PNA-FISH 像（メタフェーズの一部）。ギムザ染色では目視による画像判定に時間を要し、染色体のねじれなどを正確に判定することは困難であることを示している。

6. 研究成果（4）Phase 1 本試験

6.1. 目的

プレ試験結果に基づいて作成した PNA-FISH 標本の画像を追加して、AI による自動画像判別の実現可能性を検証する。

6.2. 材料と方法

6.2.1. 画像データ

^{60}Co ガンマ線照射 (0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 Gy、線量率 0.4 Gy/min) をして得られたヒト末梢血リンパ球由来メタフェーズの PNA-FISH 顕微鏡画像として、14688 枚を作成した。本研究に当たっては、人研究倫理委員会で承認を得て血液提供者から同意を得た [量研 承認研究計画書番号 18-023]。

それぞれの画像に含まれる細胞は、Cy3 標識の動原体領域特異的 PNA プローブを用いた PNA-FISH により、動原体領域の蛍光標識 (赤色) と DNA 結合性の染色試薬 DAPI による対比染色 (青色) が行われている。そのうち、1190 枚の画像に対して、プレ試験で作成した AI 学習モデルによって自動アノテーションを行い、その結果を熟練した専門家が目視で修正することでアノテーションを完成させ、教師データとした (表 3)。線量毎のラベルの種類と数 (染色体異常の種類と各本数) は表 4 に示す。

表 3. 線量毎の取得画像枚総数およびアノテーション済み画像枚数

線量 (Gy)	画像総数	アノテーション枚数
0	1868	209
0.50	2260	0
1.0	2603	199
2.0	3630	217
3.0	2783	326
4.0	1432	127
5.0	112	112
合計	14688	1190

表 4. アノテーション済み画像におけるラベルの内訳

ラベル名	0 Gy	1.0 Gy	2.0 Gy	3.0 Gy	4.0 Gy	5.0 Gy	合計
normal	9460	9080	9717	14337	5341	4782	52717
dicentric	2	15	68	197	145	171	598
acentric fragment	2	26	103	353	236	278	998
centric ring	0	1	5	18	12	8	44
broken chromosome	14	1	1	23	1	0	40
acentric ring	0	0	2	1	1	6	10
tricentric	0	0	0	3	2	3	8
broken	0	0	2	0	0	4	6
noise	0	0	0	0	0	5	5
normal (chromatid break)	0	2	1	1	0	1	5
normal (ictb)	0	0	0	3	0	0	3
other abnormalities	2	0	0	0	0	0	2
normal (gap)	0	0	1	0	1	0	2
normal (chromatid gap)	0	0	0	0	0	2	2
acentric fragment with gap	0	0	1	0	0	0	1
high-background	0	0	0	1	0	0	1
broken (possible dicentric)	0	0	0	0	0	1	1
normal (possible translocation or inversion)	0	0	0	0	0	1	1
marker chromosome	0	1	0	0	0	0	1
normal (possible inversion)	0	0	0	0	0	1	1
normal (partially broken)	0	0	0	1	0	0	1
normal (possible translocation)	0	0	0	0	0	1	1
broken fragment	0	0	0	0	0	1	1
unknown (normal or fragment)	0	0	1	0	0	0	1

(注) ラベル：染色体異常の分類。

ラベル名で、normal：正常、acentric fragment：染色体断片、dicentric：二動原体染色体。

その他の染色体異常についてもすべて専門家の目視により同定し、アノテーションした。

6.2.2. データセット作成

アノテーション付きの画像（教師データ）1190 枚を、895 枚の訓練セット、105 枚の検証セット、177 枚のテストセットに分割した。含まれる染色体の内訳、「正常染色体」、「二動原体染色体」、「染色体断片」の数を表5に示す。その他のラベル（染色体異常）の発生頻度は極めて低いので、表5では「その他」として一つにまとめて示した。

表5. 訓練セット、検証セット、テストセット内のラベルの内訳

ラベル名	訓練セット	検証セット	テストセット
正常	39660	4609	7863
二動原体染色体	436	75	77
染色体断片	727	120	137
その他	93	20	19

(注) ラベル：染色体異常の分類

6.2.3. AI による染色体画像判別

画像中の染色体の検出および分類のために、Faster R-CNN [参考文献13] を用いた。モデルパラメータの初期値として COCO データセット [参考文献14] で事前学習後のパラメータを用い、それをもとに、前項 6.2.2. のデータセットで学習とテストを行った。

■ 評価指標

染色体の検出性能を評価するために、専門家が目視で計数した染色体数と自動検出できた染色体数の平均絶対誤差 (Mean Absolute Error) を、染色体の分類性能を評価するために、Recall (感度) と Precision (精度) を指標とした (プレ試験 25 ページ参照)。

6.2.4. 線量推定試験

前項 6.2.3. で学習済みのモデルを用いて、画像 14688 枚中、アノテーションを実施した 1190 枚の画像を除いた、照射線量が既知の画像 13498 枚（表 3）に対して、染色体の検出および分類を行い、各画像に含まれる全染色体、二動原体染色体、染色体断片を判別させ、計数した。

なお、稀に画像の中には、メタフェーズが壊れたり削れたりして染色体の本数（正確には、動原体の総数）が足りないケースや、複数のメタフェーズの全部または一部が 1 枚の画像中にあるケースがあった。それらを線量推定用のサンプルから除くため、 46 ± 4 個の染色体（42～50 個の染色体）が含まれる画像のみを以降の解析で採択した。また、PNA-FISH の R チャンネル（Cy3 標識プローブ）のシグナルが染色体を広く覆っているような画像が稀に存在したので、それらも除いた。

線量推定試験を行うために、採択画像を線量効果曲線作成用と線量推定用に分割した。緊急時のトリアージにおいて、50 個のメタフェーズの染色体異常頻度から線量評価が行われる [参考文献 1, 2, 3]。そこで、確実に 50 個のメタフェーズ・データが得られるよう、1 セットの画像枚数を 70 枚に設定し、0、1.0、2.0、3.0、4.0 Gy の各線量から 3 セット（線量あたり合計 210 枚）を取り置いた。残りのサンプルを用いて、国際原子力機関の生物学的線量評価に関するマニュアル [参考文献 1] に従い、線量効果曲線を作成した。その曲線式を用いて、線量推定用画像の線量と染色体異常頻度のデータから、線量推定を行った。

線量効果曲線作成および線量推定では、従来法である最尤推定法に基づく DoseEstimate v.5 [参考文献 18] を用いた。新たな試みとして、ベイズ推定法を採り入れた線量評価ツール radir [参考文献 19, 20] も試用した。

6.3. 結果

6.3.1. 染色体の検出

訓練データセットと検証データセットを用いてモデルを学習させ、177枚のテストセットに対して、染色体の検出および分類を行い、専門家の目視による正しい（真の）判定（Ground truth）と比較してモデルの性能を評価した。

まず、染色体検出について、専門家の目視判定との平均絶対誤差は0.98であった。1個のメタフェーズにつきおよそ1個の染色体を見逃すことから、染色体検出率としてはおよそ98%で、人間による特徴（パラメータ）設定に基づく従来型の機械学習による市販の自動二動原体解析ソフトウェアで40~60%であることに比して、試験段階のモデルでも好成績が得られているといえる。検出された染色体数と実際の染色体数の差の分布を見ると、目視カウントによる染色体数より少ない数の染色体が検出される傾向があった（図9）。

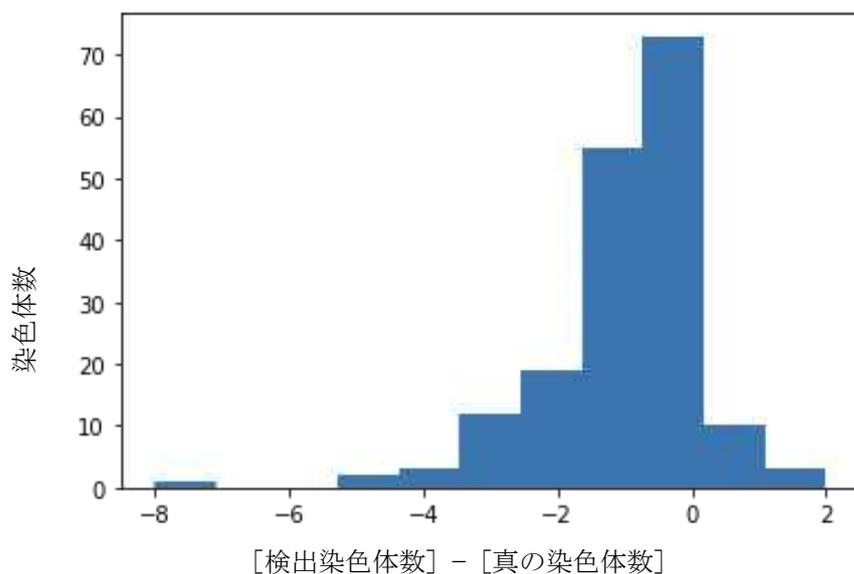


図9. 検出された染色体数と真の染色体数の差の分布を示すヒストグラム（自動検出された染色体数 - 専門家の目視カウントによる染色体数）。

染色体見落としの例として、染色体が重なっている場合や、接触している場合に複数の染色体が一つとして認識されているケースが見られた（図10 A-D）。また、染色体断片が検出されていないケースもあった（図10 E, F）。

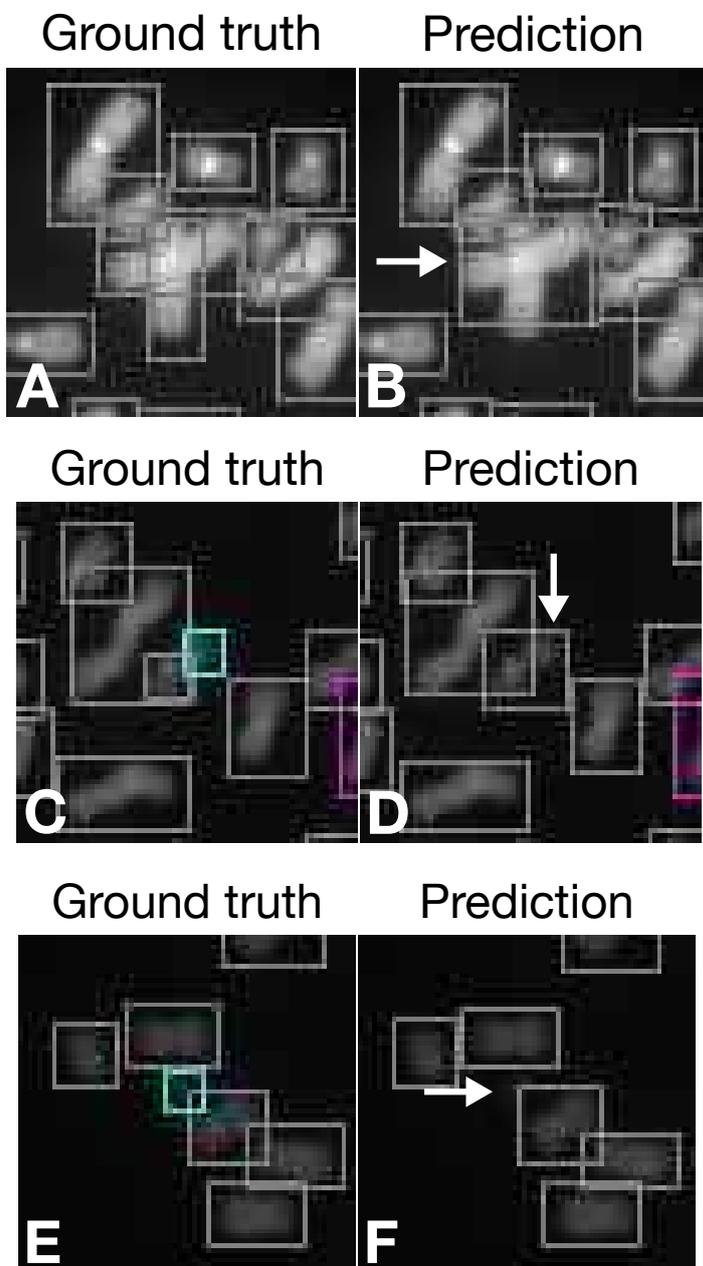


図10. 染色体を見逃した例

Ground truth : 専門家による正しい (真の) 判定、Prediction : AI による推論結果 (自動判別)。灰色の矩形は正常、マゼンタは二動原体染色体、水色は染色体断片。検出された染色体が矩形で囲まれている。(A-D) 重なっている複数の染色体 (A, B) や近接している染色体 (C, D) が一つの染色体として誤検出されている例。(E, F) 染色体断片の見落とし例。

実際の染色体数より多い数の染色体が検出されたケースでは、染色体とみなされない物体を検出していた（図11）。

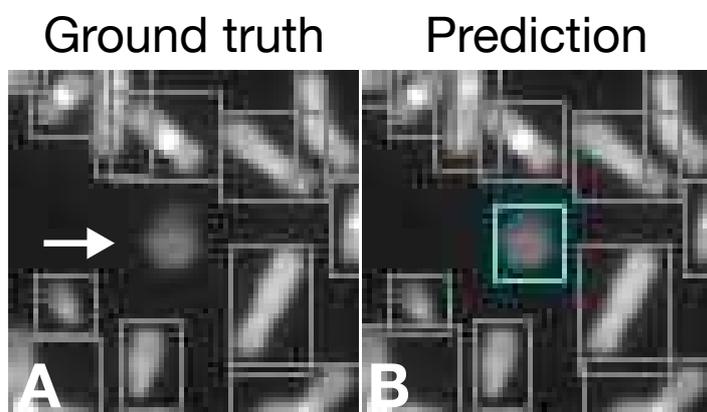


図11. 染色体ではないものが自動検出されている例

Ground truth : 専門家による正しい（真の）判定、Prediction : AI による推論結果（自動判別）。灰色のボックスは正常、水色は染色体断片。(A) Ground truth で矩形の付いていない物体（矢印）が、(B) AI により染色体として検出されている。

6.3.2. クラス分類性能

続いて、染色体の自動分類結果の評価を行った。テストセットに含まれる 77 個の二動原体染色体のうち 36 個を正確に判定し（図12）、感度（Recall）は 46.8%、精度（Precision）は 66.7%であった（表6）。また、染色体断片については、テストセットに含まれる 137 個の染色体断片のうち、94 個を正確に判定し（図12）、感度 68.6% 精度 90.4%と、比較的高い性能で判別できた（表6）。

AI による判別（推論結果）

	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
① normal	7754	17	5	0	0	0	0	0	0	132
② dicentric	36	36	0	0	0	0	0	0	0	5
③ acentric fragment	6	0	94	0	0	0	0	0	0	37
④ centric ring	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0
⑤ broken chromosome	2	0	1	0	0	0	0	0	0	6
⑥ trivalent	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
⑦ iso-chromatid break	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
⑧ other abnormalities	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
⑨ normal (partially broken)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
⑩ nothing	35	0	3	1	0	0	0	0	0	0

図 1 2. 専門家による正しい（真の）判定と AI による判別（推論結果）を示す混同行列

（注）①normal：正常、②dicentric：二動原体染色体、③acentric fragment：染色体断片。その他の染色体異常は④～⑨に含まれる。ラベルが割り当てられなかった際には、⑩無し（nothing）に分類した。マゼンタの部分は推論結果が正しかった数を示す。

表 6. AI のモデルによる染色体分類性能

ラベル	Recall	Precision
normal	0.981	0.989
dicentric	0.468	0.667
acentric fragment	0.686	0.904

（注）Recall（感度）、Precision（精度）。算出法は 25 ページ参照。

normal：正常、dicentric：二動原体染色体、acentric fragment：染色体断片。

二動原体染色体の偽陽性：

二動原体染色体の偽陽性の原因としては、ノイズ・シグナル（図 1 3 A）や、重なり合ったり隣接したりする二つの染色体が一つの染色体として誤って検出されるケース（図 1 3 B）が確認された。

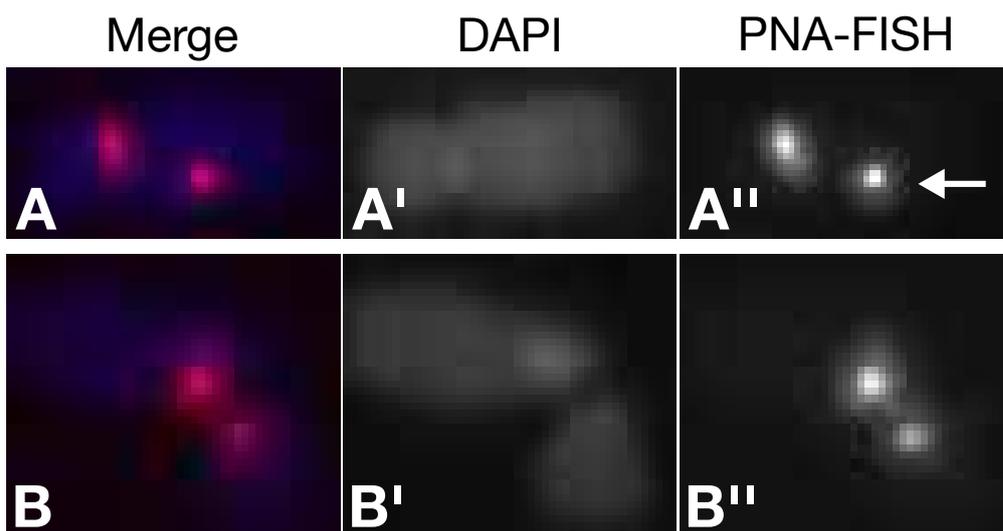


図 1 3. 二動原体染色体の偽陽性例

(A–A'') 専門家に正常と判定されたが、AI で二動原体染色体と判別された染色体。

(A) マージ画像、(A') DAPI を検出する B チャンネル、(A'') PNA プロブを検出する R チャンネル。染色体上には専門家がノイズと判断したシグナル（矢印）が存在している。

(B–B'') 二つの染色体が一つの染色体として誤認識されて、二動原体染色体と判別された例。

(B) マージ画像、(B') B チャンネル、(B'') R チャンネル。

染色体断片の偽陰性：

染色体断片の偽陰性例として、染色体断片を囲う矩形の中に他の染色体由来の動原体や（図 1 4 A”、矢印）、染色体断片上のかかったノイズ・シグナルが原因となっていると考えられるケースがあった。

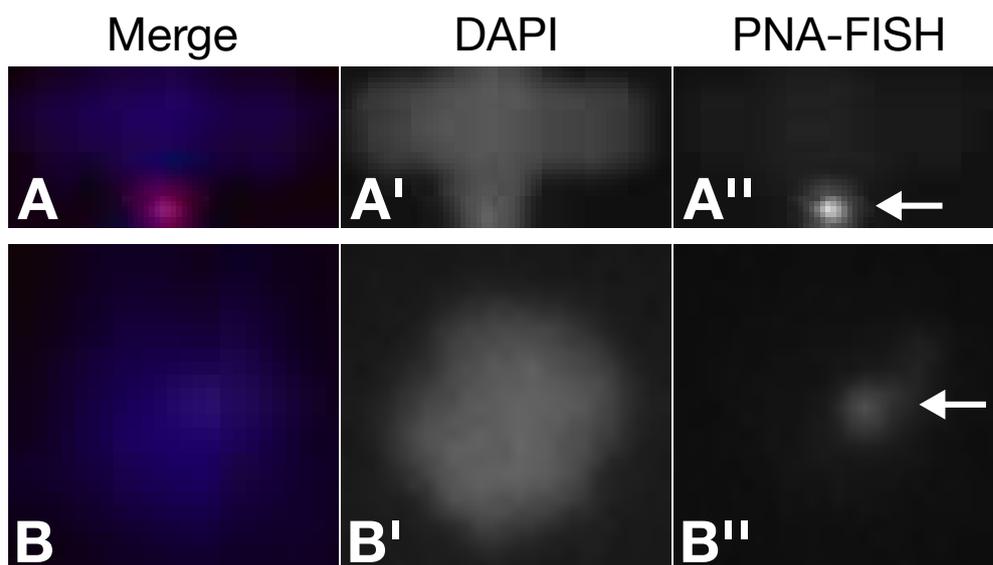


図 1 4. 染色体断片の偽陰性例

(A-A”) 染色体の重なりにより誤判定されたと考えられる例。

(A) マージ画像、(A') DAPI を検出する B チャンネル、(A”) PNA プローブを検出する R チャンネル。染色体断片とそれに重なった染色体を一つの染色体として検出したため、動原体（矢印）が認識され、染色体断片として判別されなかった。

(B-B”) PNA-FISH のノイズ・シグナルによって誤判定したと考えられる例。

(B) マージ画像、(B') B チャンネル、(B”) R チャンネル。

6.3.3. 線量効果曲線の試作

アノテーション付き画像データから作成した学習モデルを用いて、アノテーションの付いていない0～4.0 Gy 照射サンプルに対して、染色体異常の検出を行った。

画像内の染色体数が42～50個の範囲に入っているサンプルを線量効果曲線作成及び線量推定に使用した。各線量から70枚の画像を1セットとして、3セット（各線量毎に210枚）を線量推定用のサンプルとして取り置いて、残りの画像を用いて線量効果曲線を作成した。

その結果、染色体異常の頻度から線量効果曲線を得ることができた。二動原体染色体を指標とした場合を表7、図15に、染色体断片の場合を表8、図16に示す。

表7. 線量効果曲線作成用画像における線量毎の二動原体数とメタフェーズ数

線量 (Gy)	二動原体染色体 (個)	メタフェーズ (個)
0	109	1144
1.0	172	1910
2.0	516	2644
3.0	713	1876
4.0	472	855

表8. 線量効果曲線作成用画像における線量毎の染色体断片数とメタフェーズ数

線量 (Gy)	染色体断片 (個)	メタフェーズ (個)
0	102	1144
1.0	353	1910
2.0	1106	2644
3.0	1671	1876
4.0	1128	855

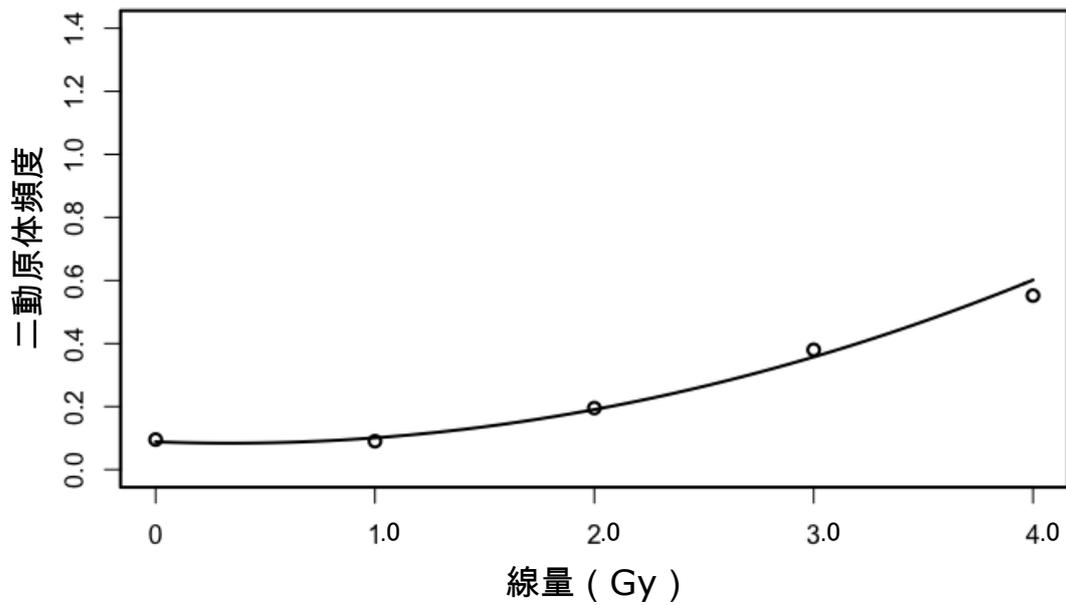


図 15. 線量と二動原体染色体頻度に関する線量効果曲線

$$\text{Yield} = (0.088 \pm 0.018) - (0.026 \pm 0.025) \times D + (0.039 \pm 0.007) \times D^2, p = 0.010$$

Yield : 染色体異常生成頻度、D : 線量 (Gy)

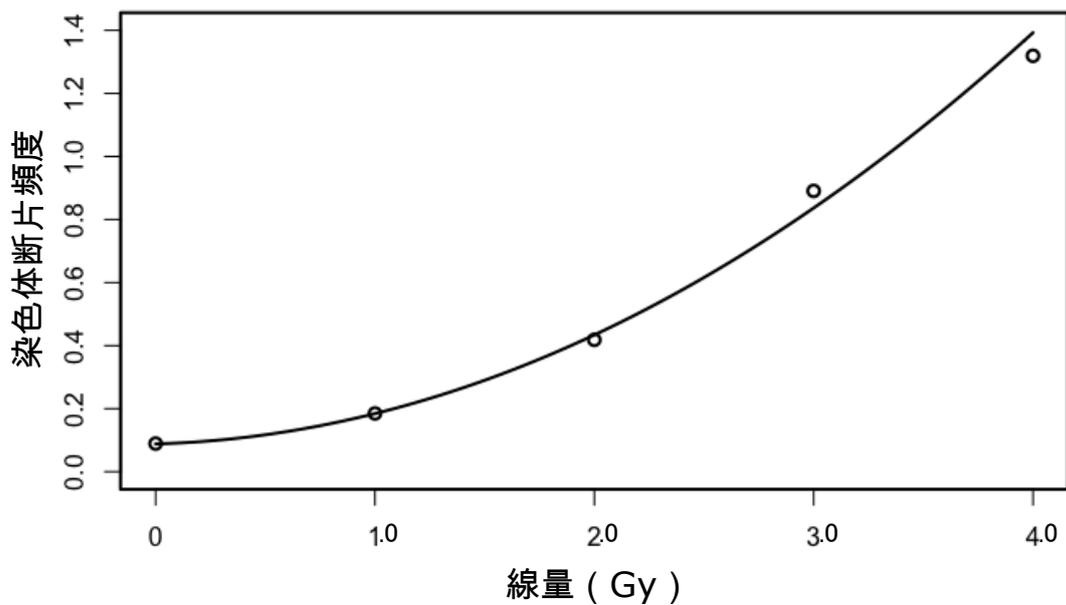


図 16. 線量と染色体断片頻度に関する線量効果曲線

$$\text{Yield} = (0.088 \pm 0.020) + (0.020 \pm 0.034) \times D + (0.077 \pm 0.011) \times D^2, p = 0.034$$

Yield : 染色体異常生成頻度、D : 線量 (Gy)

6.3.4. 線量推定試験

各線量から 70 枚の画像を 1 セットとして、3 セット（線量毎に 210 枚）取り置いて用意した線量推定用のサンプルを用いて、AI 自動判別を行った結果を、6.3.3. でアノテーションの無い画像から試作した線量効果曲線に当てはめて線量推定を行った。線量計算に主として用いた DoseEstimste v.5 は、最尤推定法に基づいている [参考文献 1, 18]。

以下、急性放射線症候群の前駆症状に対し医学的な介入が必要となる基準である 2 Gy の判定に注目して結果を検討することとする。

1) 二動原体染色体

2.0 Gy 以上のサンプルセットでは、推定線量の 95% 信頼区間の上限値が 2.0 Gy を超え、患者の見逃しは無いことを示唆する (表 9)。現時点での学習モデル性能では二動原体染色体頻度をもとに、2.0 Gy 未満の線量を正確に推定するレベルには達していないが、今後データ数を増やすなどの工夫により、精度が上がることを期待できる。

2) 染色体断片

従来、二動原体分析による線量評価で、線量評価計算には使用されなかった染色体断片が、本研究において良好な指標となることが示された。0 Gy から 1.0 Gy の放射線照射サンプルの推定線量の 95% 信頼区間上限値は 0 Gy のセット 1 を除いたすべてで 2.0 Gy 未満の値をとり、2.0 Gy 以上の放射線照射サンプルについては、推定線量の 95% 信頼区間の上限値 (95% UCL) が 2.0 Gy を超え、2 Gy 以上と推定された (表 10)。現段階のモデルのレベル、学習数では、二動原体染色体より良好な指標であるといえる。

試みに二動原体および染色体断片それぞれについて、3 セットを合算し (セット 1 + 2 + 3)、線量推定した結果、 ± 0.5 Gy 程度の信頼区間での推定が可能となる傾向にあった。これは、50 個のメタフェーズを用いた熟練した専門家の目視によるトリアージと同等の精度である [参考文献 1, 21]。

3) ベイズ推定法

以上は従来法(最尤推定法)に基づく線量推定を行った結果である[参考文献1, 2]。

近年、ベイズ推定法を採り入れた線量評価ツールがイギリス Public Health of England の E. A. Ainsbury 博士らのグループによって開発され、R (<https://cran.r-project.org/index.html>) のパッケージとして「radir」が公開・提供されている [参考文献19, 20]。線量-効果曲線の関数、線量-効果曲線の各係数と定数項の分散-共分散行列、細胞数、無動原体断片数を取って入力するものである。

本研究のデータを入力したところ、2.0 Gy 以上では最尤推定法と同様な結果が得られたが、2.0 Gy 未満の低線量域の二動原体データでは、サンプルの染色体異常発生頻度が線量効果曲線の値と比較して低い場合に、radir では線量推定ができないケースがみられた。推定線量が解なしとなり、値を持たない場合が含まれる。

ベイズ推定法では、事前分布を前提に、新たに得られたデータを加えて更新するので、本研究対象のような、データが累積し大きくなっていくケースでは適している可能性がある [参考文献22]。

表 9. 二動原体染色体頻度による線量推定結果

線量 (Gy)	セット 番号	二動原体染色体 (個)	メタフェーズ (個)	推定線量 (Gy)	95% LCL (Gy)	95% UCL (Gy)
0	1	6	61	0.95	0.34	2.17
0	2	1	57	0	0.34	0.94
0	3	10	57	1.88	0.43	2.83
0	セット 1 ～3 合算	17	175	0.92	0.34	1.70
1.0	1	3	57	0	0.34	1.68
1.0	2	3	59	0	0.34	1.63
1.0	3	5	62	0.08	0.34	1.98
1.0	セット 1 ～3 合算	11	178	0	0.34	1.17
2.0	1	10	57	1.88	0.43	2.82
2.0	2	12	60	2.07	1.05	2.96
2.0	3	15	54	2.58	1.70	3.45
2.0	セット 1 ～3 合算	37	171	2.19	1.67	2.69
3.0	1	43	57	4.51	3.80	5.25
3.0	2	18	63	2.62	1.83	3.42
3.0	3	24	59	3.23	2.48	4.01
3.0	セット 1 ～3 合算	85	179	3.52	3.10	3.95
4.0	1	29	54	3.76	3.01	4.56
4.0	2	34	61	3.84	3.14	4.58
4.0	3	41	63	4.17	3.49	4.89
4.0	セット 1 ～3 合算	104	178	3.94	3.53	4.36

(注：UCL, 信頼限界上限値、LCL, 信頼限界下限値)

表 10. 染色体断片頻度による線量推定結果

線量 (Gy)	セット 番号	染色体断片 (個)	メタフェーズ (個)	推定線量 (Gy)	95% LCL (Gy)	95% UCL (Gy)
0	1	7	61	0.48	0	1.27
0	2	3	57	0	0	0.81
0	3	4	57	0	0	0.97
0	セット1~3 合算	14	175	0	0	0.66
1.0	1	15	57	1.39	0.76	2.00
1.0	2	6	59	0.31	0	1.20
1.0	3	6	62	0.23	0	1.14
1.0	セット1~3 合算	27	178	0.79	0.29	1.19
2.0	1	20	57	1.73	1.16	2.31
2.0	2	30	60	2.19	1.68	2.73
2.0	3	24	54	2.03	1.48	2.61
2.0	セット1~3 合算	74	171	2.00	1.69	2.31
3.0	1	43	57	2.82	2.32	3.36
3.0	2	71	63	3.56	3.09	4.05
3.0	3	50	59	3.02	2.53	3.54
3.0	セット1~3 合算	164	179	3.16	2.88	3.45
4.0	1	77	54	4.05	3.55	4.58
4.0	2	78	61	3.82	3.35	4.31
4.0	3	93	63	4.13	3.67	4.61
4.0	セット1~3 合算	248	178	4.00	3.73	4.28

6.4. 考察

6.4.1. 染色体異常の分類の性能向上

本研究では、AI による線量評価支援について、トリアージの場合において実現可能性が示唆された。染色体異常の分類性能をいっそう上げるために、例えば以下のような方法が考えられ、本格的な開発研究で活用できる。

1) 学習量の増加

図 1 7 は本研究においてプレ試験および本試験で検出した染色体異常数と検出の性能の関係を示している。教師データ数の増加によって精度の向上が期待できる。

2) 学習データの質的調整

本研究で使用した画像データは、正常染色体と各染色体異常の数に大きな差があった。AI の各種技術を駆使したデータの質的調整によっても、染色体異常の分類や線量推定の精度向上が期待される。

3) 染色体の検出モデルと分類モデルの分離

研究では染色体の検出と分類の両方を **Faster R-CNN** という 1 つのニューラルネットワークで行った。線量推定の精度の向上において、二動原体染色体の偽陽性や偽陰性を減らすその他の方法として、検出と分類で異なるネットワークを用いてみるのが考えられる。現在、他のネットワークを組み込んで試みており、2 つのネットワークを使用するため解析時間がその分増えるものの、精度が向上する傾向がみられている（データ省略）。

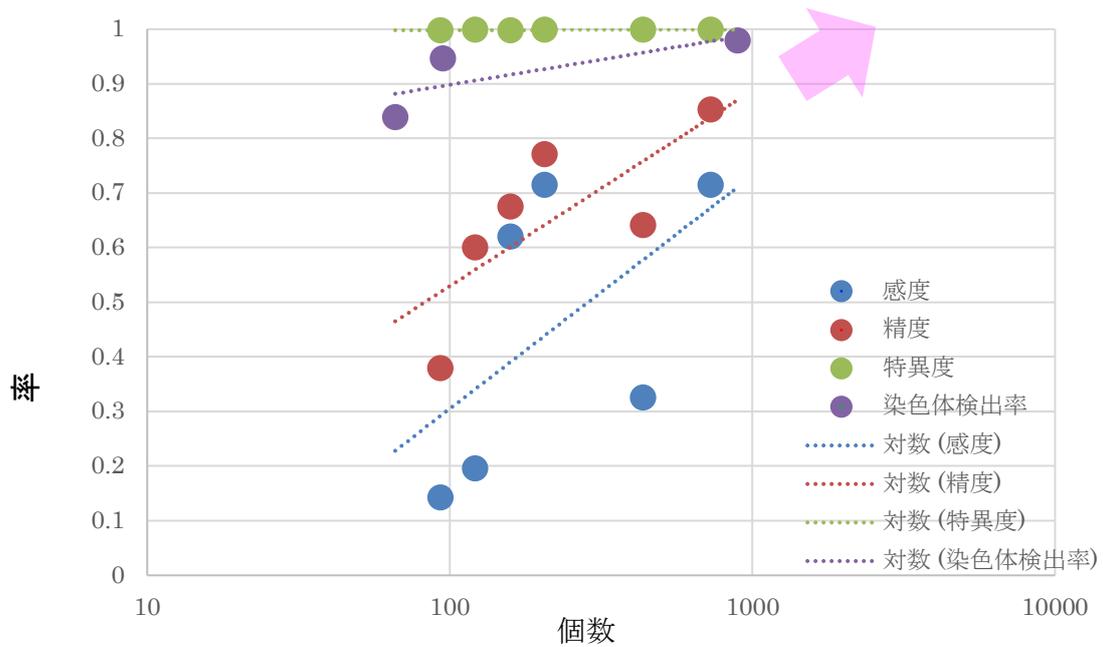


図 17. テスト毎の染色体検出率および検出された染色体異常の個数と正確さの関係

縦軸は評価指標となる感度、精度、特異度、染色体検出率を示す（最大値 1 は 100% を意味する）。感度、精度については 25 ページ参照。特異度（Specificity）は、

$$\text{Specificity} = \frac{\text{True Negatives}}{\text{False Positives} + \text{True Negatives}}$$

により算出した。矢印は今後データ数を増やすなどの工夫により見込まれる評価指標の方向性を表す。

6.4.2. トリアージに必要なメタフェーズ数

セット数をさらに増やして線量推定試験を進めている。2.0 Gy、13 セット（各セット約 50 細胞）の追加試験において、二動原体染色体、染色体断片ともに、95%信頼限界上限値はすべてで 2.0 Gy を超え、見逃しは起こらなかった（表 1 1, 1 2；セット 4～1 6 を参照）。試みに、3 セット毎の合算データ（細胞数 150 以上）、およびセット 1～1 6 すべての合算データ（細胞数 1000 弱）での線量推定を行ったところ、精度が上がり、信頼限界の幅が減少する傾向がみられた（表 1 1, 1 2）。

深層学習による解析は非常に高速であり、150 枚の画像を用いた線量推定で、画像判定に約 10 秒程度を要する。解析する画像の増加は問題にならないと言えるので、解析枚数を増やすことによる推定精度の向上が見込まれる。熟練者目視観察では 1 検体当たり 500 から 1000 個程度のメタフェーズを観察することで 95%信頼限界上限値が ± 0.15 Gy までの線量計測が可能であることが知られている [参考文献 1, 1 9]。AI の場合、1000 細胞で 10 分程度を要するので、1 検体当たり染色体標本 1 枚を検査するという目安で画像取得する方法もあり得る。さらに、今後の研究では、細胞数をあらかじめ限定するのでは無く、熟練者目視判定によるトリアージの目標細胞数 50 個の場合 [参考文献 1, 2 1] と同等の、95%信頼限界上限値が ± 0.5 Gy となるレベルの細胞数まで AI で判定させるといったような方法も考慮に入れる必要がある。

人間があらかじめパラメータ設定する機械学習に基づく市販の自動解析ソフトウェアでは、検査すべきメタフェーズ数が検討され [参考文献 5, 6]、ISO WG-18 会議（国際標準化機構 生物線量評価分科会。数藤が日本代表の委員を務める）において、1 検体につき 5000 個以上の解析を推奨する方向で話し合われているところである。これに比べ、深層学習による AI 自動分析でははるかに少ないメタフェーズ数、すなわち少ない血液検体量・標本枚数を用いて短時間で解析することができるようになる。

表 1 1. 二動原体頻度による線量推定結果 (2.0 Gy サンプル追加試験)

線量 (Gy)	セット 番号	二動原体染色体 (個)	メタフェーズ (個)	推定線量 (Gy)	95% LCL (Gy)	95% UCL (Gy)
2.0	4	13	58	2.24	1.30	3.12
2.0	5	13	55	2.33	1.38	3.22
2.0	6	8	48	1.80	0.34	2.85
2.0	7	10	64	1.71	0.34	2.63
2.0	8	16	58	2.57	1.72	3.41
2.0	9	15	57	2.49	1.62	3.35
2.0	10	18	55	2.85	2.03	3.69
2.0	11	14	57	2.38	1.48	3.25
2.0	12	10	59	1.83	0.34	2.77
2.0	13	9	54	1.80	0.34	2.79
2.0	14	9	61	1.62	0.34	2.59
2.0	15	12	60	2.07	1.05	2.96
2.0	16	9	59	1.67	0.34	2.65
2.0	セット 4~6 合算	34	161	2.15	1.61	2.68
2.0	セット 7~9 合算	41	179	2.28	1.78	2.76
2.0	セット 10~ 12 合算	42	171	2.38	1.89	2.87
2.0	セット 13~ 15 合算	30	175	1.84	1.25	2.34
2.0	セット 1~ 16 合算	193	916	2.15	1.93	2.37

(注: セット 1~3 のデータについては表 9 を参照)

表 1 2. 染色体断片頻度による線量推定結果 (2.0 Gy サンプル追加試験)

線量 (Gy)	セット 番号	染色体断片 (個)	メタフェーズ (個)	推定線量 (Gy)	95% LCL (Gy)	95% UCL (Gy)
2.0	4	22	58	1.83	1.28	2.40
2.0	5	31	55	2.37	1.84	2.92
2.0	6	21	48	2.01	1.42	2.63
2.0	7	30	64	2.11	1.60	2.63
2.0	8	26	58	2.04	1.51	2.60
2.0	9	30	57	2.27	1.74	2.82
2.0	10	37	55	2.64	2.12	3.18
2.0	11	21	57	1.79	1.23	2.37
2.0	12	29	59	2.17	1.65	2.72
2.0	13	32	54	2.44	1.91	3.00
2.0	14	25	61	1.93	1.40	2.47
2.0	15	30	60	2.19	1.68	2.73
2.0	16	34	59	2.4	1.89	2.94
2.0	セット 4~6 合算	74	161	2.08	1.76	2.40
2.0	セット 7~9 合算	86	179	2.14	1.84	2.44
2.0	セット 10~ 12 合算	87	171	2.22	1.92	2.53
2.0	セット 13~ 15 合算	87	175	2.19	1.89	2.49
2.0	セット 1~ 16 合算	451	916	2.17	2.04	2.30

(注: セット 1~3 のデータについては表 1 0 を参照)

6.4.3. 線量推定式の検討

本研究では、二動原体染色体だけでなく染色体断片も線量評価の強力な指標となることが見出された。

染色体断片を指標とした線量効果曲線の線量推定式については、過去に報告がみられない。R (<https://cran.r-project.org/index.html>) を利用し、関数 `nls()` を用いて、定数項を持たない二次曲線、定数項を持つ二次曲線、一次項を持たない二次曲線の3通りについて最小二乗法 [参考文献1] でフィッティングし、解析を試みた (画像データセットは本研究と同一であるが、用いたアルゴリズムは YOLOv3 spp [参考文献17] である)。1.0 Gy から 4.0 Gy において、定数項ありの線量効果曲線の方が定数項無しの線量効果曲線よりも、推定線量の誤差が小さく、信頼区間幅も狭いことが示された [参考文献23 ; 64 ページ参照]。

2015 年の報告で、細胞融合による未成熟染色体凝縮法において、PNA-FISH 法を組み合わせることにより二動原体分析が可能になった [参考文献24]。この場合、線量効果曲線式として以下が得られている。

[過剰な染色体断片]

$$\text{Yield} = (0.0467 \pm 0.0134) + (1.0410 \pm 0.0315) \times D, p = 0.45$$

[二動原体染色体]

$$\text{Yield} = (0.0000 \pm 0.0000) + (0.0709 \pm 0.0359) \times D + (0.0444 \pm 0.0121) \times D^2, p = 0.95$$

(注) Yield: 染色体異常生成頻度, D: 線量 (Gy)。

このように、二動原体頻度は従来の報告通り、ポアソン分布に基づく線形-二次曲線式に良く適合し、「過剰な」染色体断片は一次式とよく適合した。本研究では、「全染色体断片数」から「二動原体より派生する染色体断片」を差し引いておらず、二次曲線に適合した結果を得るにとどめた。

今後、ベイズ推定法の導入 [参考文献22] や、二動原体染色体、染色体断片といった複数の染色体異常の指標の併用も考慮に入れつつ、AI 画像判定により適した線量推定式を研究する余地があると言える。

また、本研究では、0～4 Gy の間の 5 つの線量ポイントを用いて線量効果曲線を作成したが、例えば、0.75 Gy や 1.25 Gy といった、より細かな刻みで異なる線量のサンプルを含めることによって、線量推定の精度向上が期待される。

7. まとめ

本研究ではゲノム配列に基づいて動原体を染め分ける PNA-FISH 法を併用することで正確な教師画像データを作成することに成功し、AI（深層学習）による染色体画像の自動判定の有効性が示された。具体的には、末梢血に 0 Gy から 5.0 Gy のガンマ線を実験的に照射して得られたリンパ球由来の染色体画像（約 15,000 枚）を用いた試験により、以下のことを達成した。

1) 基盤技術の構築

深層学習手法を導入した学習モデルの試作、AI に適した標本・画像作成法の確立、線量推定法の検討

2) AI 導入の評価

試作モデルで約 50 細胞の画像データ（トリアージ・レベルの線量評価対応の標準観察数）から、2 Gy 未満と 2 Gy 以上の被ばくを判別できた（95%信頼区間の上限値をもとに線量推定）。従来使用されなかった染色体断片も線量推定の良好な指標となることを見出した。二動原体染色体と併用することで、より正確な判定が可能になると期待できる。

3) 線量推定作業の高度の効率化

1 検体当たりの画像判定（1000 細胞として）に要する時間が、30 時間以上（目視）から 10 分（AI）へ。

8. 今後の展望

本研究における試験と考察および収集した情報に基づき、今後の展望として以下の課題を掲げ、開発提案とする。

8.1. AI 自動染色体画像判定手法の本格開発

本研究により、染色体線量評価のための画像判定に AI（深層学習）の導入が有効であり、実現可能性が高いことが示された。

今後、本格開発を進めることができた場合、量研機構での実装化に向けて、**6.4. 考察**に示した内容を含む、以下の課題を検討する。

- 1) 質・量ともに充実した教師画像データを作成する。
- 2) 1) を利用して、染色体の検出と分類の複数のネットワークを試用し、最適の基本アルゴリズムを完成させる。
- 3) 得られた画像判定結果からの線量推定方法を検討し決定する（最尤推定法やベイズ推定法を用いた線量推定法、トリアージ用に ± 0.5 Gy 程度の信頼区間を目指した設定作成、など）。

さらに将来は、他の検査対応機関でも使用可能にするために、汎用化のための以下の開発・検討が必要である。

- 4) ラボ間の技術差や患者の状態・溶血などによって生じる多様な画質に対応できるよう、調整機能を開発し基本モデルに付加する。
- 5) アプリケーションの開発を行う [ユーザーに使いやすい GUI (グラフィカル・インターフェース) 等の検討、インストール版・クラウド版の選択、セキュリティの取り方等の検討を含む]。(注：本研究における試作モデルは、Python をはじめとするコマンドラインでの入力となっている。)

6) データ蓄積と技術革新に伴うアルゴリズムの更新は量研機構が行い一括管理することで、染色体線量評価の国内標準化を保つ。

実際的な標準化のためには、信頼を得ることで利用者を確保・拡大することが重要となる。そのために、

7) 国内外の染色体線量評価の専門家の協力を得て、画像データの貸借、AI 自動染色体判定モデルの評価・検証を行い、信頼性を高める。

8) 国際標準化機構において標準プロトコール提案を目指す。

8.2. 原子力災害等被ばく事故における緊急時対応のストラテジー

実際の放射線被ばく事故における運用には、AI 自動判定だけ多検体対応ができて迅速化しても十分とは言えない。事故の様々な場合を想定し、染色体線量評価のための血液検体処理から画像判定・線量評価までのストラテジーを準備しておく必要がある。

1) 血液検体の保存・培養

本研究では、染色体画像を作成するにあたり、並行して血液検体の保存や培養方法についても検討した。

本報告書 **9. 研究成果の発表、9.3. 査読付き原著論文 1)** に示すように、長期凍結した末梢血リンパ球の培養法を確立した。これにより、例えば、職業上被ばくが想定される緊急作業員やファースト・レスポnder、宇宙飛行士などについて事前に採血し分離したリンパ球を凍結保存しておけば、被ばく事故が起こった時に、この凍結保存細胞を用いてバックグラウンド値（被ばく事故前の染色体異常頻度）の調査を行えるので、より精度の高い線量評価を行うことができる。

また、長期凍結保存の完全培地が利用可能であることを示す研究を行った（論文作成中）。毎年1年分の量の完全培地を分注して凍結保存し備えることで、大規模放射線被ばく事故が起こったとき、検体間のクロスコンタミネーションを起こさず迅速に多検体の培養を行うことが可能である。

2) 細胞培養から染色体画像取得まで

万一の大規模放射線事故・災害に備えて、染色体分析が行える専門要員の拡充は不可欠である。

本研究事業における情報収集から、高度被ばく医療の基幹 5 センターだけでなく、国内の臨床染色体検査会社(主要 3 社)も細胞培養から染色体標本作製、各種染色・FISH、顕微鏡画像取得まで担当可能になっていることが明らかになった(29~30 ページ参照)。日本人類遺伝学会臨床細胞遺伝学認定士制度 (<http://cytogen.jp>) のもと、染色体検査が可能または常時実施している病院や研究機関もある。これらのラボと協力関係を築き、放射線被ばく事故の状況・規模によっては検査支援要請ができるようにしておくことも重要である。

3) 染色体画像データの取り扱いについて

現在、染色体画像は医用画像の扱いとなっており、個人情報の保護は必須である。このため、染色体画像データの電子的授受には制約が大きい。今後、画像データの安全管理・安全共有のためのシステム作りも必要である。

8.3. AI 自動染色体判定の応用

本研究事業は原子力災害における緊急時線量評価に関する事業であったため、二動原体染色体分析について AI 導入を試験した。プレ試験で示したように、3 color FISH による交換型染色体異常(二動原体染色体および転座染色体)の検出[参考文献 1 2]においても、AI(深層学習)による画像判定は威力を発揮する。この方法は二動原体分析に利用可能ではあるが、1 検体(1 標本)あたり約 4000 円のプローブ費と約 17 時間のハイブリダイゼーション時間がかかるため、緊急時対応では PNA-FISH に劣るといわざるを得ない。しかしながら、染色体異常の検出効率は非常に高く[29 ページ参照; 参考文献 1 2]、国際標準化機構において 2019 年 3 月にプロトコールが標準化された[参考文献 2 5]。本研究や染色体線量評価研究では 3 色(1 番・2 番・4 番染色体)が使用されているが、染色体番号も標識する蛍光色素も多様な組み合わせが可能であり、一般に染色体ペインティングと呼ぶ。いずれの場合でも、異なる 2 色が隣接する染色体を検出するため、AI による画像判定には適している。

安定型染色体異常である転座染色体を指標とすれば、30年以上にわたる過去の被ばく事故の線量評価が、現在になってから採取する血液試料からも、長期凍結保存した染色体標本からも可能である [参考文献1, 25]。実際に、現在、東電福島原発事故の緊急時作業員の線量評価調査に用いられているところである [参考文献26]。

特徴的な染色体異常が観察される先天性疾患、がんなどの診断では核型分析が行われる。臨床染色体検査室では、安価なギムザ染色によるGバンド核型分析だけでなく、各染色体を異なる色で検出する多色FISH (M-FISH) [参考文献27] も用いられている。M-FISHはDNA配列に基づいて検出するため精度が高いが、1検体(1標本)あたりのプローブ費が約30000円と高価である。特徴的な染色体異常をもつ特定の疾患をスクリーニングするには、関わる1個以上の染色体のペインティング・プローブを使用したFISHを行う。これらの検出にもAI自動画像判定技術は適用可能である。一般的な臨床染色体検査だけでなく、放射線被ばくが原因で将来起こり得る疾患でも、染色体異常を伴うものがあれば、早期発見等スクリーニングに役立てることができる。

9. 研究成果の発表

9.1. 学会発表

1) 日本進化学会第 21 回大会

(注：研究計画外のため、本研究事業費からの支出は無い)

会期： 2019 年 8 月 7 日～10 日

会場： 北海道大学キャンパス（札幌市）

発表者： 弓至（北海道大）

[成果発表]

タイトル： Chromosome dose evaluation by image recognition AI using deep learning. (深層学習を用いた画像認識 AI による、染色体線量評価)

著者・共著者名： 弓至¹、数藤由美子²、遠藤俊徳¹、長田直樹¹

著者所属： ¹北海道大学大学院 情報科学研究科、²量研機構

概要： 染色体異常（二動原体など）の頻度は被ばく線量と相関があり、事前に検量線を作成することで被ばく患者の線量評価が可能である（染色体線量評価）。染色体線量評価のための染色体分析は熟練技術者の目視で行われ、非常に労働集約的であり、評価基準の統一も難しい。本研究では、画像認識 AI を用いて染色体線量評価を自動化することで、作業の高速化や評価基準の統一を試みた。まず、画像分類において高い性能を示す畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用い、ギムザ染色を施した細胞中期画像の染色体異常有り／無し分類を試みたが、十分な分類性能が得られなかった。次に、UNet を用いたセマンティックセグメンテーションとトリミングを行い、画像データの最適化を行なった。セグメンテーションは Dice 係数で 0.99 以上の高い精度で行われ、AI による染色体の形状認識が可能であることが示された。

2) ICRR 2019 (国際放射線影響学会 2019 年年会)

「ISCA 染色体異常に関する国際シンポジウム」

会期： 8月25日(日)～8月29日(木)

会場： マンチェスターセントラル (マンチェスター)

発表者： 数藤由美子 (量研機構)

[成果発表] (依頼講演)

タイトル： Radiation cytogenetics in QST Japan – current state and perspective.

著者： 数藤由美子

著者所属： 量研機構

概要: Cytogenetic dose assessment is based on the fact that the exposure dose correlates with the chromosome aberration yield. A dose–response curve can be prepared beforehand by *in vitro* irradiation of peripheral blood samples and subsequent chromosome analysis. By applying the chromosome aberration yield of a patient to the curve, one can estimate the exposure dose. Because more than 1000 metaphases have to be scored in cases of lower doses exposure, collaboration among laboratories and automation of analysis are necessary to support medical triage in radiation accidents with mass casualties. Metaphase image detection has been dramatically accelerated by technological innovations such as development of automated sample preparation devices and automated microscopy image acquisition devices. However, chromosome aberration scoring by manual observation is labor-intensive and time-consuming. With automatic dicentric chromosome analysis software currently commercially available, analysis now takes only a few minutes, although false-positive and false-negative results should be further reduced. Such software was developed on the basis of conventional machine learning methods. Artificial intelligence (AI) has recently had an outstanding series of breakthroughs in vision applications, driven by convolutional neural networks and deep learning. AI is being introduced in medical diagnosis including clinical cytogenetics in Japan. In this study, we assessed the power of AI and the current

state of clinical cytogenetics in Japan. In this presentation, our attempts to develop an AI-based metaphase image analysis system, AI-friendly cytogenetic protocols, and a collaboration network in Japan to support medical triage in radiation accidents will also be discussed.

3) 日本バイオインフォマティクス学会 2019 年年会・第 8 回生命医薬情報学連合大会

会期： 2019 年 9 月 9 日～9 月 11 日

会場： 東京工業大学 大岡山キャンパス

発表者： 弓至（北海道大）

[成果発表]

染色体画像全体に対する染色体異常の有無の判定、UNET による染色体領域のセグメンテーション、染色単体画像の異常判定、Yolo による染色体の検出などの結果を発表した。受けた質問として、「線量予測までを一気通貫で行うネットワークは作成可能か」「各解析に用いたネットワークの詳細について」「虫の種類の判別への、深層学習の応用可能性について」などがあつた。

タイトル: Abnormal chromosome detection by image recognition AI using deep learning.

著者・共著者: 弓至（北海道大学大学院情報科学研究科生命人間情報科学専攻）、數藤由美子（国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構）、遠藤俊徳（北海道大学大学院情報科学研究科）、長田直樹（北海道大学大学院情報科学研究科）

概要: 染色体異常（二動原体など）の頻度は被ばく線量と相関があり、事前に検量線を作成することで被ばく患者の線量評価が可能である（染色体線量評価）。染色体線量評価のための染色体分析は熟練技術者の目視で行われ、非常に労働集約的であり、評価基準の統一も難しい。本研究では、画像認識 AI を用いて染色体線量評価を自動化することで、作業の高速化や評価基準の統一を試みた。まず、画像分類において高い性能を示す畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用い、ギムザ染色を施した細胞中期

画像^{*1}全体を用いた染色体異常有り／無し分類を試みたが、十分な分類性能が得られなかった。次に、UNetを用いたセマンティックセグメンテーションとトリミングを行い、画像データの最適化を行なった。セグメンテーションは Dice 係数で 0.99 以上の高い精度で行われ、AI による染色体の形状認識が可能であることが示された^{*2}。また、画像内での染色体が存在する座標を記したアノテーションデータを用い、染色体単体画像の切り出しを行った。切り出された染色体単体画像を用い、CNN による異常染色体の分類を行ったところ、ある程度の分類性能が確認された^{*3}。この結果から、画像認識 AI による異常染色体の検出可能性が示された。分類やセグメンテーションなどの性能向上や、物体検出 AI による染色体単体の検出などが当面の課題である。

(注)

*1) ギムザ染色画像 900 枚 (うち、セグメンテーション済み画像 900 枚。その中から抽出した教師画像は、二動原体あり画像 170 枚、正常核型画像 248 枚、アノテーション済み画像 294 枚)。

*2) ギムザ染色画像において、セマンティック・セグメンテーションにより、染色体とそうでない物体との区別はうまくいっている (Dice 係数 0.99) が、染色体異常の分類には成功していない (染色体 46 本前後から成る集合画像における異常染色体の区別ができていない)。

*3) 1 個 1 個の区別がうまくいった染色体 (単体) について、異常染色体の区別の精度は、過学習を抑えることで上げることができた。

[補足]

以上の結果は、エルピクセル社の 6 月 28 日付の Phase 1 プレ試験報告と同じ画像データ・セットを用いたところ、同様の結果が得られたことを示唆する (エルピクセル社の結果を支持する)。すなわち、異なる計算ツールや物体検出モデルを用いても、ギムザ染色画像について、染色体の検出および染色体異常の検出について実現可能性は示された、ただし染色体単体の区別や異常染色体単体の区別に課題が残った、ということを示す。エルピクセル社の解析では、さらに、判定精度向上の可能性 (度合) の予測について調査し、蛍光 FISH 画像の方がより効果的に向上できることを示唆したものになっている。

9.2. 取材

6月より共同通信社の「東海村臨界事故特集」の配信が始まった。9月（臨界事故は1999年9月30日に発生）に《今後の対策・備え》ということで、本研究が大きく関連するAI導入についての取材を受けた（取材：令和元年7月10日終了）。共同通信社配信 臨界事故20年特集「被ばく線量 AIが推定」として、西日本新聞（9月6日）ほかに掲載された。

9.3. 査読付原著論文

1) Yumiko Suto, Takako Tominaga, Miho Akiyama, Momoki Hirai: Cytogenetic Examination of Human Peripheral Blood Lymphocytes Cryopreserved after Gamma Irradiation: A Pilot Study. *Cytologia* 85: 71-77, 2020.

【Abstract】 For the assessment of radiation-induced damage in human cells, the frequency of chromosomal aberrations, especially that of dicentric chromosomes in peripheral blood lymphocytes, has been used as the measure in biodosimetry. Considering mass-casualty radiological incidents, it is hoped to preserve part of the blood specimens to be examined at an appropriate time after the medical triage process. In this study, the potential usefulness of lymphocytes cryopreserved for longer than one year was assessed as a pilot study. Seven blood specimens from three healthy donors were experimentally irradiated and cryopreserved for approximately one to five years. All cryopreserved specimens examined were successfully cultured to obtain a sufficient number of mitotic cells for dosimetric analyses. Blood specimens from one donor were intensively examined for the precise comparative analysis of chromosomal aberrations between cultures of cryopreserved specimens and those of freshly prepared specimens. The frequencies of cells with chromosomal aberrations in 1.5-year-cryopreserved specimens after 2-Gy gamma irradiation were not significantly different from those examined using a fresh blood specimen. In this study, we showed the practical

significance of the cryopreservation method of peripheral blood lymphocytes that can offer a new strategy of preparedness for triage in mass-casualty radiation incidents/accidents.

[補足]

長期凍結保存の末梢血リンパ球細胞（5年保存について確認済み）も培養可能で線量評価に使用できることを示した論文である。この論文では健常人末梢血を用いた実験的照射の結果を示した。本研究成果は将来の大規模事故対応や、被ばくが予定された職業の方々の備え（個々人のバックグラウンド値を事故後に調査可能）として、生物線量評価法を運用する際に有用な知見である。本研究に関連して ICRR 2019（8月、マンチェスター）で講演し、注目を浴びた（プロトコールの公開要望が多かった）ため、3月刊行後に ISO 委員や WHO BioDoseNet 委員、ドイツ BfS、英国 PHE、フランス IRSN 等に別刷を配付する予定である。

9.4. 修士論文

北海道大学大学院 情報科学研究院 生命人間情報科学専攻 バイオインフォマティクス講座 情報生物学研究室

弓 至 （2020年3月修士号取得予定）

タイトル： 深層学習を用いた画像認識 AI による生物学的線量推定

概要：

生物学的線量測定法とは、被ばくした生体の材料を用いて被ばく線量を計測する方法である。染色体異常（二動原体染色体や無動原体断片）は優れたマーカーであり、それらの発生頻度と、細胞の被ばくした放射線量の相関を利用し、染色体を用いた生物学的線量推定が行われている。しかし、染色体異常の頻度測定は少数の技術者によってのみ行われ、非常に労働集約的であり、基準の統一も難しいなどの問題がある。これらの問題に対し、深層学習を用いた画像認識 AI の応用可能性を調査した。

本研究では、判別モデルを用いた手法、判別モデルと検出モデルを用いた手法、検出

モデルを用いた手法と、大きく 3 つのアプローチの有効性の検討を行った。

まず、画像認識における有力なモデルタイプである CNN の判別モデルを用いて、画像ごとの二動原体染色体の有無の判別を試みた。結果、複数の染色体から、二動原体染色体の微細な特徴を抽出することは難しく、学習が起きなかった。しかし、過程で行った撮影失敗画像の排除や、UNet による画像品質の向上などは成功し、染色体画像解析の効率化に寄与する可能性を示した。

次に、YOLOv3 spp という物体検出モデルと CNN の判別モデルを用いた手法を検討した。結果、染色体は正確に検出されるものの、その後の判別モデルの False Positive が結果に大きく影響を及ぼした。

次に、YOLOv3 spp を用いて染色体異常の検出を試みたところ、PNA-FISH 染色画像に対する無動原体断片の検出において、mAP83%という結果が得られた。二動原体染色体よりも無動原体断片、少数画像において PNA-FISH 染色画像よりもギムザ染色画像において、より良い結果が得られた。

最後に、PNA-FISH 染色画像を用いて線量推定を行ったところ、一度に 100 枚以上の染色体画像を使用することで、2Gy と 4Gy の判定に成功し、150 枚を用いた推定では人が行うトリアージ程度の推定精度が得られた。また、解析に要する時間は約 10 秒程度と、人によるトリアージの 360 倍の高速化が実現された。

以上の結果から、AI の生物学的線量推定への応用可能性が十分に示された。今後は画像データの増加に伴う線量-効果曲線の信頼性の上昇や、それに伴う線量推定精度の向上が期待される。

10. 参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Cytogenetic dosimetry: Applications in preparedness for and response to radiation emergencies. Vienna: IAEA Publications. 2011.
- [2] ISO 19238: Radiological Protection - Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics. Geneva: International Organization for Standardization (ISO) TC 85/SC 2; 2004.
- [3] ISO 21243: Radiation Protection - Performance criteria for service laboratories performing cytogenetic triage for assessment of mass casualties in radiological or nuclear emergencies – general principles and application to Dicentric Assay. Geneva: ISO TC 85/SC 2; 2008.
- [4] Suto Y, Hirai M, Akiyama M, Kobashi G, Itokawa M, Akashi M, Sugiura N. Biodosimetry of restoration workers for Tokyo Electric Power Company (TEPCO) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident. *Health Physics* 105: 366-373, 2013.
- [5] Gruel G et al. Biological dosimetry by automated dicentric scoring in a simulated emergency. *Radiation Research* 179(5): 557-569, 2013. doi: 10.1667/RR3196.1.
- [6] Romm H et al. Automatic scoring of dicentric chromosomes as a tool in large scale radiation accidents. *Mutation Research* 756: 174-183, 2013. doi: 10.1016/j.mrgentox.2013.05.013.
- [7] Rogan PK et al. Radiation Dose Estimation by Automated Cytogenetic Biodosimetry. *Radiation Protection Dosimetry* 172: 207-217, 2016. doi: 10.1093/rpd/ncw161.
- [8] Beaton LA et al. Analysis of chromosome damage for biodosimetry using imaging flow cytometry. *Mutation Research* 756: 192-195, 2013. doi: 10.1016/j.mrgentox.2013.04.002.

- [9] Oestreicher U et al. RENEb Intercomparisons applying the conventional Dicentric Chromosome Assay (DCA). *International Journal of Radiation Biology* 93: 20-29, 2017.
- [10] Wang D, Khosla A, Gargeya R, Irshad H, Beck AG. Deep Learning for Identifying Metastatic Breast Cancer. 2016. Available at <https://arxiv.org/abs/1606.05718>.
- [11] Suto Y, Hirai M, Akiyama M, Suzuki T, Sugiura N. Sensitive and Rapid Detection of Centromeric Alphoid DNA in Human Metaphase Chromosomes by PNA Fluorescence In Situ Hybridization and Its Application to Biological Radiation Dosimetry. *Cytologia* 77: 261-267, 2012.
- [12] Suto Y, Akiyama M, Noda T, Hirai M: Construction of a cytogenetic dose-response curve for low-dose range gamma-irradiation in human peripheral blood lymphocytes using three-color FISH. *Mutation Research - Genetic and Toxicology and Environmental Mutagenesis* 794: 32-38, 2015.
- [13] Ren S, He K, Girshick R, Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 39: 1137-1149, 2017. doi:10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- [14] Lin T-Y, Maire M, Belongie S, Bourdev L, Girshick R, Hays J, Perona P, Ramanan D, Zitnick CL, Dollár P. Microsoft COCO: Common Objects in Context. 2015. Available at <https://arxiv.org/abs/1405.0312>.
- [15] Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Lecture Notes in Computer Science*. (including subseries, *Lecture Notes in Artificial Intelligence* and *Lecture Notes in Bioinformatics*), vol. 9351, pp. 234–241. Berlin. Springer. 2015
- [16] Rucci M, Casile A. Fixational instability and natural image statistics: Implications for early visual representations. *Network and Computation in Neural Systems* 16: 121–138, 2005.

- [17] RedmJ, Farhadi A, YOLOv3: An Incremental Improvement. 2018. Available at <https://arxiv.org/abs/1804.02767>.
- [18] Ainsbury EA, Lloyd DC. Dose estimation software for radiation biodosimetry. *Health Physics* 98: 290-295, 2010. doi: 10.1097/01.HP.0000346305.84577.b4.
- [19] Moriña D, Higuera M, Puig P, Ainsbury EA, Rothkamm K. Radir package: An R implementation for cytogenetic biodosimetry dose estimation. *Journal of Radiological Protection* 35: 557–569, 2015.
- [20] Higuera M, Puig P, Ainsbury EA, Rothkamm K. A new inverse regression model applied to radiation biodosimetry. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 471, no. 2174, 2015. Available at <https://doi.org/10.1098/rspa.2014.0588>.
- [21] Lloyd DC, Edwards AA, Moquet JE, Guerrero-Carbajal YC. The role of cytogenetics in early triage of radiation casualties. *Applied Radiation and Isotopes* 52: 1107-1112, 2000.
- [22] Mano S, Suto Y. A Bayesian method to account for random effects in cytogenetic dosimetry based on calibration curves. *Radiation and Environmental Biophysics* 53: 775-780, 2014.
- [23] 弓至. 深層学習を用いた画像認識 AI による生物学的線量推定. 北海道大学 (修士論文、2020 年 3 月) (要旨は本報告書 7. 研究成果の発表、ページ参照)
- [24] Suto Y, Gotoh T, Noda T, Akiyama M, Owaki M, Darroudi F, Hirai M. Assessing the applicability of FISH-based prematurely condensed dicentric chromosome assay in triage biodosimetry. *Health Physics* 108: 371-376, 2015.
- [25] ISO 20046: Radiological protection – performance criteria for laboratories using fluorescence in situ hybridization (FISH) translocation assay for assessment of ionizing radiation. Geneva: ISO TC 85/SC 2; 2019.

[26] Suto Y. Review of cytogenetic analysis of restoration workers for Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *Radiation Protection Dosimetry* 171: 61-63, 2016.

[27] Suto Y, Hirai M, Akiyama M, Yuki M, Nakagawa T, Tominaga T, Nakayama F, Suzuki T, Sugiura N. Induction and Persistence of Multicentric Chromosomes in Cultured Peripheral Blood Lymphocytes Following High-Dose Gamma Irradiation. *Cytologia* 77: 347-358, 2012.

11. 資料

情報収集

■ AI 関連企業ヒアリング [資料 1～3]

[総括] 主として平成 30 年度に収集した情報（検討委員へのヒアリングおよび学会参加で得られた AI 利用の診断研究協力企業を含む）と平成 31 年 4 月に開催された第 3 回 AI・人工知能 EXPO で得られた約 10 社の情報に基づき、個別訪問によるヒアリングを行った。本研究における AI 導入試験の外部委託先決定のため、医用画像への適用経験のある企業を中心に 4 社以上から見積をとり、入札を行うこととした。染色体検査の受託企業およびその顕微鏡画像解析の共同研究開発担当企業から、秘密保持契約の関係で本研究の AI 導入試験・開発には協力できないものの、被ばく医療に有用な染色体検査情報を得ることができ、AI 導入にとって有用な検査システム全体の考察に役立てることとした。

■ 学会・国際会議参加 [資料 4～9]

[総括] 生物線量評価ネットワークにおける二動原体分析の自動化の導入は、細胞培養から画像取得までについて進歩していた。画像解析の自動化は、人間がパラメータ設定する従来型機械学習によっていることに変わり無く、使用コンピュータの性能向上により解析速度がアップしていた。他の疾病に関する医用画像診断における AI 導入については、メディカル AI 学会で多くの経験報告や情報を得ることができた。これらの知見は本研究での開発に生かした。

■ ラボ訪問 [資料 10]

■ 文献調査 [資料 11]

検討会

■ 研究会合 [資料 12～14]

■ 画像検討会 [資料 15～22]

資料 1 : 第 3 回 AI・人工知能 EXPO

会期 : 2019 年 4 月 3 日～5 日、10:00～18:00

会場 : 東京ビッグサイト 青海展示棟 (東京)

主催 : リード エグジビション ジャパン

後援 : 人工知能学会、日本ディープラーニング学会

出展対象 : ディープラーニング、機械学習、ニューラルネットワーク、自然言語処理、ハードウェア、ビッグデータ、AI アプリケーション、画像認識、音声・音響認識、予知・予測保全、人工知能ロボット、コンテンツ・アート制作、チャットボット、マーケティングツール等

参加 : 数藤由美子 (量研)、高島良生 (量研)

近年その活用方法に注目の高まる AI・人工知能に関する日本最大の専門展である。今回は出展 250 社 (内訳 : 要素技術・ハードウェア関連 100 社、アプリケーション・サービス関連 105 社、ディープラーニング関連 30 社、チャットボット関連 15 社)、来場者数約 5 万人。商談、技術相談、ビジネスパートナー獲得の場であり、マッチングシステム導入により、来場者は参加登録時に自分の興味と関連する出展企業との結び付けができた。特別講演会 (15 題) 出展社公開セミナー (6 題) のほか、多数の出展社によるショートプレゼンテーション (時刻ごとに反復) やデモ機の公開 (来場者が試用可能) があった。

セミナーについては表 1 3 に示す。出展の各企業については、AI 導入対象データとしてはテキスト、音声、画像、動画などがあり、特に画像認識関連の出展社を見て回った。PoC (Proof of Concept、概念実証) に重点を置いた支援サービスも多数みられた。画像認識開発を展示している多数の企業に技術的特徴、染色体画像認識 AI モデル開発の可能性についてヒアリングを行った。有力と思われる企業について表 1 4 にまとめた。一部の企業についてはさらに訪問等行い詳細なヒアリングを行った。それら複数の企業を AI 導入試験の外部委託候補とした。

表 13. 第 3 回 AI・人工知能 EXPO : セミナーの概要

演題	演者	概要
ゆたかな世界を、実装する～Use case から見るAI活用の最先端～	ABEJA代表取締役社長 岡田陽介	AI 技術に大きな進展のあった2018 年の動向について解説。世界が産業構造をAI前提にシフトしている現状で日本が取り残されている状況を説明。アマゾンにはAI人材費に年2.5兆円投入しているとのこと。
AI 開発プラットフォームを活用した次世代の予測・最適化技術について	グリッド代表取締役 曾我部完	シンプルなAI 認知技術は既にツールとなっていて専門的な数学知識やプログラミング技術を必要としない状況に達している。GUI により実装可能なReNom を紹介。量子コンピュータによる量子機械学習環境についての紹介。
最新の人工知能技術とその応用～自動車、産業用機器、バイオヘルスケア、パーソナルロボット～	Preferred Network代表取締役副社長 岡野原大輔	自動運転における環境認知、あらゆるものを適切に掴むロボット開発など、Preferred Networks が開発する最先端の高度なAI 技術の紹介。Chainer について最新バージョンの紹介と、日本語チュートリアルサイト開設の紹介など。
「ディープラーニング」の最前線と今後の展望	東京大学大学院工学系研究科教授 松尾豊	2018 年にあった主要な技術的進化について紹介 (ELMo・BERT による自然言語認知、GQN による3 次元空間認識、ODENetによるニューラルネットワーク層の新概念) 、汎用技術であるAIの将来性、日本でのAI発展のための提案など。
AI/ディープラーニングを支えるエヌビディアのプラットフォーム最前線	エヌビディアエンタープライズ事業部事業部長 井崎武士	パートナー企業によるAI開発事例の紹介、NVIDIAが開発しているGPUハードウェアの紹介、ソフトウェアプラットフォーム環境 (フレームワークのGPU対応) の紹介など。

表 14. 第 3 回 AI・人工知能 EXPO : 収集した企業情報

企業名	特徴	別途詳細ヒアリング実施
ALBERT	データソリューション（ビッグデータ分析、分析コンサルティング、AI アルゴリズム開発・システム導入、AI を用いた顧客ごとの独自プロダクト開発）を提供。AI・画像認識サービス「タクミノメ 異常検知」、「タクミノメ アノテーション」。	○（4月18日）→ 需要・供給実績は工場での不良品検出のための開発がほとんど。
CTC	総代理店。アノテーションについては ReNom 社を担当。ReNom のアノテーションソフトを試用した。単独販売はしていないが、ソースコードはウェブで無料公開。マイクロソフト社製（無料版）と異なり、タグは無限に作ることができる。→ グリッド社参照。	×（不要）
FPT	ベトナムの企業、東京支社あり。開発の委託やアノテーションの委託が可能。実績として、医用画像については網膜検査画像。	×（海外へのヒト試料提供は困難と判断）
NTT 東日本	AI・IoT の実証環境「スマートイノベーションラボ」を展開。NTT 東日本自体が開発を行うのではなく、コンサルティングして最適なAI 開発会社を紹介、さらに開発・技術検証環境（ネットワーク・計測機等）を提供する。すべて無料。	×（不要）
Rist	AI 画像認識により網膜剥離判定システムを単一の眼科単科病院と開発・実装経験あり。医用画像診断などでヒトに近い判定を行えるアルゴリズムを保有。	×（不要）
インキュビット	AI 画像認識システム開発の専門会社。マーケットの小さなカスタムメイドプロジェクトの開発実績が多数ある（農産物画像識別など）。アノテーションについて独自技術を有している。	×（平成 30 年度に実施）

表 1 4. 第 3 回 AI・人工知能 EXPO : 収集した企業情報 (つづき)

企業名	特徴	別途詳細ヒアリング実施
グリッド	クラウドベース、GUI のAI 画像認識モデル作成環境ReNom TAB およびReNom IMG を展開。プログラミングせずにアノテーションから複数の代表的アルゴリズムを検証可能。選抜したモデルはNVIDIA JETSON などのハードウェアにシームレスに実装可能。	× (不要)
クロスコンパス	外観異常検知等に多数の開発実績。電子基板など複雑な外観の異常検知でも数千枚の教師画像から実装可能。主として工場製造関係の画像解析で実績あり。	× (不要)
モルフォ	<p>独自の画像処理技術およびハードへの組み込み技術と経験を有する。</p> <p>①SRLと業務提携しており、染色体分析画像認識モデルの開発経験あり。ただし開発済み認識モデルはSRLとの秘密保持契約が障害。</p> <p>②アノテーションについては、セマンティックセグメンテーションのアプリケーションを開発。実際には、良いアプリケーションが未だ存在せず開発も遅れており、アドビの Photoshop を用いることが多いとのこと。デモンストレーションは路上撮影動画の物体検出・分類 (人、自動車、など)。大容量の元データのアノテーションは他社 (ベトナム、インドなど) を利用。個人情報やセキュリティの観点から、医用画像の場合はそのようなことは簡単にはできない。一般的な物体検出は委託が容易。</p>	<p>○ (4 月 11 日) → 秘密保持契約により、研究開発協力は不可能。同契約に基づき、委託元である SRL 社に対してヒアリング*を行った。</p>

資料 2 : エルピクセル社

・ 4 月 9 日 (火) 訪問 (担当 : 数藤)

平成 31 年 3 月に研究責任者の関係者 (東京大学) から紹介を受けた。東京大学発の企業で、ライフサイエンスと画像解析を背景に独自の技術を研究・開発。オリンパス、富士フイルム、キャノンメディカル等から出資を受け複数の医療、医薬用システムを開発。「EIRL」(エイル、脳 MRI 画像から脳動脈瘤を自動検出し診断支援する医用がオズ解析ソフトウェア) は国内初の薬事・薬機法承認を受け、2019 年 10 月 15 日に発売した。

* 研究事例 (一部抜粋。括弧内は共同研究先)

- ・ Deep Learning を用いた脳動脈瘤検出アルゴリズム (大阪市立大学)
- ・ 生物画像自動分類ソフトウェア CARTA (東京理科大学、国立がん研究センター)

* 国家プロジェクトへの参加

- ・ 経済産業省 / 戦略的基盤技術高度化支援事業 : 生体組織の立体構造情報と人工知能を活用する病理診断支援システム
- ・ 科学技術推進機構 / 戦略的創造研究推進事業(CREST) : 栽培植物倍数体のマルチオミクス技術開発プロジェクト
- ・ 厚生労働省 / 革新的がん医療実用化研究事業 : 人工知能技術を用いた大腸内視鏡検査における病変検出・診断支援技術の開発

* 特許

- ・ 第 4688954 号 能動学習型の生物医学画像自動分類ソフトウェア CARTA
- ・ 第 4696278 号 領域分割画像生成方法、領域分割画像生成装置及びコンピュータプログラム
- ・ 第 6329651 号 画像処理装置及び画像処理方法

* 論文 (2017~13 年分省略)

・ 2019 年 IMACEL: A cloud-based bioimage analysis platform for morphological analysis and image classification. PLOS ONE DOI:10.1371/journal.pone.0212619

ほか

・ 2018 年 Deep Learning for MR Angiography: Automated Detection of Cerebral Aneurysms. Radiology DOI: 10.1148/radiol.2018180901 ほか

資料 3 : SRL 社 遺伝子・染色体解析部

- ・ 4 月 11 日 (木) 電話による情報収集 (遺伝子・染色体解析部) (担当 : 数藤)
- ・ 5 月 31 日 (金) 遺伝子・染色体解析部訪問 (八王子ラボ) (担当 : 数藤・穂山)

医療検査会社の最大手である。検査室を見学し、血液検体受付から染色体分析・遺伝子検査報告までを詳細に紹介された。自社開発の自動機器・解析ソフトウェアとリムズ (LIMS、 Laboratory Information Management System) の導入により、約 100 名のスタッフで 1 日約 10 万検体を処理するとのこと (うち、染色体検査は約 2000 検体)。人材育成や検体保管についてもうかがった。核型分析 (ギムザ染色による G-バンド分析) への AI 導入の実際について具体的な説明を受けた。

AI 導入は G-バンド核型分析 (ギムザ染色法) のみで、解析ソフトの販売予定は無い。使用画像枚数は多数 (情報提供あり、ただし非公開のため明記しない) で、染色体の切り離し (セグメンテーション) と並べ替えの 2 種類のプログラムを開発。染色体に重なりがある物を加えると正解率が下がる。最終診断では人による目視確認を行っている。SRL では G-バンド核型分析の他に、SKY や市販の特定ゲノム領域特異的 FISH プローブを用いた染色体検査も行っており、これらはすべて保険適用である。

数藤が染色体線量評価についての講義を 1 時間程度行い、大規模な原子力災害の際の協力についても話し合った。SRL は多くの臨床細胞遺伝学認定士 (染色体検を担う) を抱える。今年度より開催する染色体分析研修 (規制庁研究・富永班) に参加いただくこととなった (認定士制度の認定を受けた数藤ラボが協力するため資格継続の単位が授与できる)。

実際の事故では必要な範囲の業務委託が可能になっていくものとおもわれる。方法としては、他の一般的な染色体検査のオーダーと同様にオーダーするのが今のところ最も現実的であろうということになった (ただし実施内容は特注。手法は本研究や今後の本格研究で定めるプロトコールを指示・教授できる)。他の主要な染色体検査会社 2 社の協力も同様な可能性がある。

1) AI を導入した G-バンド核型分析は、2018 年 7 月より実際の検査に導入し使用している。医師が診断予測をした疾病に特徴的な染色体異常に絞って迅速検出すること。

2) 自動機器（培養、標本作製、画像撮り込み、画像自動分析等）を使用。緊急被ばく医療の検体受入は、現在受託している臨床検査の合間で本件の検査を実施する場合、50件/日までは現行の機器で対応可能。

3) 大規模原子力災害時に量研機構または原子力規制庁が染色体検査をオーダーする場合、一部が特注の作業になる。培養時間48時間、ギムザ染色またはセントロメア検出PNAプローブを用いたFISHについて、培養から画像撮り込みまでの工程の全ての作業を実施可能。このような特殊作業になる場合でも、通常臨床検査の合間に機器を使って検査工程を行うことができる。二動原体分析は特殊検査として別料金となる。

資料4： 低線量被ばく国際シンポジウム

会期：2019年5月13日～15日、9:00～17:00

会場：Radiation Health Institute、Korea Hydro & Nuclear Power Co. LTD (ソウル)

主催：Korea Hydro & Nuclear Power Co. LTD

参加：数藤由美子（量研機構）、穂山美穂（量研機構）[招待のため旅費は不要]

情報：染色体画像分析に関する新たな知見はみられなかった。数藤が講演「放射線被ばくをした作業者の染色体線量評価」を行い、本研究について簡潔に紹介した。染色体線量評価ラボで1時間ディスカッションを行った。ギムザ二動原体分析でも FISH 分析でも、染色体異常判定基準の標準化が困難であるとのことで、数藤ラボの判定基準マニュアル（英語版）を提供した。

資料5： ISO TC85 SC2 会議 WG-18 (国際標準化機構・生物線量評価分科会)

会期： 8月25日(日) 9:00～15:00

会場： マンチェスターセントラル (マンチェスター)

参加： 数藤由美子 (量研機構)

情報： 委員として出席 [他に Health Canada、PHE、BfS、Instute of Nuclear Chemistry & Technology (ポーランド) から出席、計6名]。二動原体分析手法の改訂 (同意取得のあり方、データの位置づけと責任の所在、品質保証、自動化に関する項目、など)。将来、AI 自動画像解析法を新規提案するための提案書およびプロトコールを作成するに当たって有用。

資料6： ICRR 2019（国際放射線影響学会 2019 年年会）

会期： 8月25日（日）～8月29日（木）

会場： マンチェスターセントラル（マンチェスター）

参加： 数藤由美子（量研機構）

情報：

①AI 導入による画像解析技術の開発

- ・ プレゼンは数藤のほかに1題。量研機構の別グループの試みで、メタフェーズと間期核の細胞を区別することに成功していた。これにより、特製のメタフェーズ自動検出顕微鏡システムでメタフェーズを撮影する作業の省力化、あるいは、撮影された画像の目視判定における省力化が可能であることが期待される（事前のメタフェーズ選別により、メタフェーズの分析が速急に開始できるようになる）、とのこと。
- ・ フロアでの会話からは1件。広島大学原爆放射線医科学研究所が同大学工学部と組んでギムザ染色による二動原体分析の画像解析について AI 導入を試みたが、全くうまくいかなかったとのこと。
- ・ 企業を含む画像解析ソフトウェアの研究開発としては、カナダのサイトグノミクス者（Cytognomix）と組んだ国際ラボ間比較テストについての発表があった。従来型機会学習であることに変わりはなく、コンピュータの CPU を最大化することで速度を上げた点が進歩したところであった。

②研究の動向

- ・ 研究の重点がガンマ線被ばくから高 LET の放射線被ばくにシフトしていた。主に中性子線、アルファ線。M-FISH 法などにより、転座分析が進められ、ISO のプロトコールや従来の論文で解析から除外された複雑な転座や逆位が重要な指標となることが複数の研究者から示唆された（REACT/S、IRSN、英国ブルーネル大学など、11題）。
- ・ 被ばく者長期追跡調査の報告がみられた（数藤のほかに3題）。染色体異常の保持・消失についての追跡や、原子力関連施設の長期労働従事者の調査（ごく低線量の被ばく）であった。

資料7： 日本バイオインフォマティクス学会 2019 年年会・第8回生命医薬情報学連
合大会

会期： 2019年9月9日～9月11日

会場： 東京工業大学 大岡山キャンパス

参加者： 長田直樹（北海道大）、弓至（北海道大）

情報：

AI 関連の研究として、“Deep learning application in quantitative image analysis of bacterial behavior.”と題したポスター発表が見られた。一枚の画像に数百から数千のバクテリアが映っている画像から、バクテリア数を計数する作業を、深層学習による画像解析を用いて自動化を試みていた。ImageJなどを用いた前処理後、細胞一つ一つを検出するのではなく、畳み込みによる特徴量抽出と逆畳み込みによる各ピクセルにおける細胞の有無予測によって、細胞数を計数していた。撮影環境が安定しており画像自体にノイズが少なく、また細胞の形状の特徴が単純であるという性質から、上記の手法で高い精度での計数を実現していた。画像を用いた特定オブジェクトの計数作業の自動化を深層学習で実現している点で、本研究課題との共通点が多い成功事例であった。

資料 8 : 第 5 回 ARADOS 年会 (アジア線量評価ネットワーク会議)

[研究計画外の参加のため支出無し]

会期 : 2019 年 11 月 6 日～11 月 8 日

会場 : ガーデンホテル (北京)

主催 : NIRP, China CDC, NIM (中国)

参加者 : 数藤由美子・栗原治 (量研機構)

情報 : AI 導入については、遺伝子発現変動を指標とした生物学的線量評価においてゲノム情報 (テキストデータ) の解析で今後導入したく、検討中とのことであった (中国)。

WG-3 (生物線量評価分科会) では、量研機構 (数藤ら) が主催し第 3 回ラボ間比較エクササイズを実施し、ディスカッションを行った。

*実施内容 : 3.0 Gy 照射標本から、単色染色画像 200 枚を配付し、3 日後に同じ細胞の PNA-FISH 画像 (解答画像) 200 枚を配付。それぞれで二動原体分析を行い、線量評価を行った。

*実施期間 : 10 月 16 日～11 月 7 日

*参加者 : 分析実施は 4 カ国 (中国、韓国、日本、ベトナム) 計 11 ラボ (32 名) が参加。分析経験年数は 2 年～22 年。ディスカッションにはインドネシア 2 名も参加。

ディスカッション・ミーティング : 第 5 回 ARADOS 年会 (11 月 7 日)

*成果 : 単色染色での細胞画像採択率は平均 82% (推定線量 2.5～3.6 Gy)。FISH 画像では採択細胞、判定結果とも全ラボで一致。推定線量は全ラボで 3.0 Gy (正解と一致)。

長年、ギムザ単色染色画像にてラボ間比較を繰り返すも向上しなかった画像診断のハーモナイゼーションだったが、今回量研機構が行った FISH 導入およびエクササイズにより分析精度がラボ間の差無くほぼ 100%に達した。ディスカッション・ミーティングでは重要問題の解消、すなわち、メタフェーズの選択基準と二動原体判定基準を統一することができた。「染色体分析 判定基準プロトコール」第 1 版 (案) を作成した。

(注) 本エクササイズで使用した画像は、本研究事業で作成し、AI 自動判定を行ったものである。本研究の成果の一部として論文作成中であり、AI による判定精度を、熟練度の異なる検査者による目視判定と比較し考察する予定である。

資料9： 第2回日本メディカル AI 学会学術集会

会期： 2020年1月31日～2月1日

会場： 東京ビッグサイト TFT ホール（東京）

参加者： 数藤由美子（量研機構）、野里博和（産総研）

情報：

第3次 AI ブームの中で、医療を分野においても AI の研究開発が進み、医療機器プログラムなど承認を得るなど、社会実装へ向けた動きが加速している。第2回のテーマは「AI を医師にも患者にも」が掲げられた。基調講演が5題、シンポジウムが9セッション、一般演題が5セッション用意されたほか、自然言語処理チュートリアル、次世代医療基盤法説明会、ポスター閲覧・発表、ランチョンセミナー（共催：アマゾンウェブサービス、マイクロソフト、キヤノンメディカルシステムズ）、企業展示が設けられた。

特別講演2では、「AI・ディープラーニング時代における医用画像支援診断の新潮流」をテーマに、岐阜大学特任教授の藤田広志氏が登壇した。藤田氏は、computer-aided diagnosis / detection (CAD) について1960年代からの歩みを概観した上で、ディープラーニングにより、ヒトが特徴量を抽出していた従来の手法から、AI が自動的に特徴量を抽出するようになり、研究開発が劇的に変化したと解説。医師自身が AI をつくり、育てる時代になったと述べた。さらに、藤田氏は、ディープラーニングによって、CAD が多様化していると説明した（CADe：検出型、CADx：診断型、CADt：トリアージ型）。藤田氏は、医用画像支援診断における今後の AI について、医師のパーソナルアシスタントのような存在になると指摘したほか、AI を用いたワークフローがシームレスに統合されるようになると言及した。

シンポジウムや一般演題では、特に深層学習の医用画像診断への適用について、個々の疾病に関する開発の実際と、問題点、それを解決するための AI の各種手法を学ぶことができた。本研究に近い状況として、ビッグデータが集められない疾病への対処、組織や細胞の標本の画像診断のための開発におけるラボ間差への対処、教師データへの信頼性の確保について、参考になった。

資料 10 : ラボ訪問

訪問先 : Public Health of England (PHE)、ジドコット (英国)

期間 : 8月30日 (金) 9:30~16:00

参加者 : 数藤由美子 (量研機構)

概要 : Radiation Effects Department からの要請を受けて、Centre for Radiation、Chemical & Environmental Hazards にて依頼講演「Cytogenetic analysis of radiation accidents in Japan – past and present studies in QST/NIRS」(1時間。内容は ISCA と同じ) および情報収集 (ラボ見学、染色体線量評価に関する討議) を行った。

講演は数藤のほかフランス人研究者 (Dr. Guillaume Vares、沖縄科学技術員大学大学院) のプレゼンテーション (がんの重粒子線治療の研究) があつた (各1時間)。

夏休みでありながら、階段講義室 (小) がほぼ満席となった (約30名)。

[PHE での情報収集]

- ・ 推定線量の不確実性計算など、統計処理について支援が得られることとなった。最新版の線量評価ソフトウェアを2種入手できた (最尤推定法およびベイズ推定法)。
- ・ 長年のイギリスにおける被ばく事故について、対応経験者である Simon Bouffler 副所長から直接経験を聞くことができた。また、逆位を指標とした線量評価法について紹介された。
- ・ ヨーロッパの線量評価ネットワーク (RENEB) について、実情を聞いた。参加ラボは17~20程度ある (大学の場合、担当者が退官すると撤退するため、しばしば変動する)。その中で、実際の事故対応に確実に貢献できるのは PHE、IRSN、BfS の3ラボのみであり (他のラボの多くは国立機関・それに準じる公共機関ではなく、かつ、ほとんどのスタッフが任期制で人材が安定的に確保されない)。加えて、線量評価の品質が保証できるのは、PHE、IRSN、BfS の3ラボのみであるとのこと。
- ・ 前述のような事情もふまえ、英国内の被ばく対応に対しては、PHE でカバーできるようにしているとのこと。ジドコットのスタッフは、訓練により、血液検体受け入れから画像判定までの様々なステップのいずれかを担当できるようにしてあり、特にバイオドシメトリのチームについては前ステップを誰もができるようにしてある (通常は研究を行っていて、患者受け入れの時は全所的に対応可能)。

資料 1 1 : 文献調査

主として学会等で得た情報を中心に文献収集を行った。特に本研究で参考にしたものを挙げる。

① AI による医用画像診断

- 1) Yamamoto Y, et al.: Automated acquisition of explainable knowledge from unannotated histopathology images. *Nat Commun.* 2019 Dec 18;10(1):5642. doi: 10.1038/s41467-019-13647-8.
- 2) Poplin R, et al.: Prediction of cardiovascular risk factors from retinal fundus photographs via deep learning. *Nat Biomed Eng.* 2018 Mar;2(3):158-164. doi: 10.1038/s41551-018-0195-0.
- 3) Xie N, et al.: Statistical Karyotype Analysis using CNN and Geometric Optimization. *IEEE Access PP(99):* 1-1, Nov. 2019.

(補足) いずれの論文も医用画像への AI 利用に関する代表的例で、染色体線量評価に関するものではない [3) の論文は核型分析に関するものである]。1) の論文では、医師の診断情報が付いていない病理画像から、がんに関わる知識を AI が自力で獲得する技術の開発に成功した。AI は、前立腺がんのステージ診断に 50 年以上にわたり用いられてきた「グリソンスコア」に含まれていない、がん領域でない間質にも着目していることがわかり、がんの再発予測精度を上げる新たな特徴を見出すことができた。

② 染色体線量評価の自動化

- 4) Royba E, et al. RABiT-II-DCA: A Fully-automated Dicentric Chromosome Assay in Multiwell Plates. *Radiat Res.* 2019 Sep;192(3):311-323. doi: 10.1667/RR15266.1.
- 5) Li Y, et al.: Radiation Dose Estimation by Completely Automated Interpretation of the Dicentric Chromosome Assay. *Radiat Prot Dosimetry.* 2019 Dec 31;186(1):42-47. doi: 10.1093/rpd/ncy282.
- 6) Li Y, et al.: Automated discrimination of dicentric and monocentric chromosomes by machine learning-based image processing. *Microsc Res Tech.* 2016 May;79(5):393-402. doi: 10.1002/jemt.22642.

7) Shen X, et al.: A dicentric chromosome identification method based on clustering and watershed algorithm. *Sci. Rep.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, 2019.

8) Ryan TL, et al.: Optimization and validation of automated dicentric chromosome analysis for radiological/nuclear triage applications. *Mutat Res.* 2019

Nov;847:503087. doi: 10.1016/j.mrgentox.2019.503087. Epub 2019 Sep 23.

[補足] いずれの論文でも、深層学習ではなく、人間によるパラメータ設定に基づく機械学習法が用いられている。米国の RABiT-II（細胞培養から顕微鏡画像取得までを全自動で行う線量評価用システム）については、これまで、RABiT-II で取得したメタフェーズ画像（ギムザ染色）に対して、サイトグノミクス社のソフトウェア ADCI によって自動二動原体分析が試みられてきたが、4) の文献ではじめて PNA-FISH 法による二動原体検出が試みられている。本研究で既に PNA-FISH 法の二動原体検出の正確さは裏付けられている。

資料 12 : 第 1 回研究会合

令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費
染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究

令和元年度第 1 回研究会合

議事録

1. 日時 令和元年 12 月 23 日 (月) 16:00~17:30
2. 場所 東京都千代田区大手町 1-6-1 大手町ビル 6 階 (株)エルピクセル
会議室
(TEL. 03-6259-1713)
3. 議題
 - (1) 議事次第説明
 - (2) AI 画像解析についての進捗報告・討議
(量研・数藤、エルピクセル・竹村)
 - (3) AI 画像解析についての進捗報告・討議 (北大・弓、長田)
 - (4) 今後の予定
4. 出席者
数藤由美子 (量研機構)
竹村昌彦、袴田和巳、松田祐希、瀧野望
(AI 導入試験委託先、(株)エルピクセル)
長田直樹、弓至 (北海道大学)
江藤亜紀子 (国立保健医療科学院)
オブザーバー 原子力規制庁 PO (中村吉秀)、PO 補佐 (新井知大)
5. 議事概要

- 1) 現段階のプロトタイプ AI による自動染色体画像分析では 2 Gy の判断をつけることができたので、トリアージに資する可能性が非常に高いことが示された。
- 2) 検討委員から、検出性能の評価指標として感度、特異度などを計算し、ROC カーブを描出することを提案された。また、曝露線量のリスク評価の基準として選んだ 2 Gy について、この数値の意義を、線量レベルによる臨床症状や必要となる医学的処置と合わせて説明するとより説得力があるとの指摘があった。
- 3) 年度末報告準備に関する日程確認を行った。

以上。

資料13： 第2回研究会合

令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費
染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究

令和元年度第2回研究会合

議事録

1. 日時 令和2年1月10日（金） 14:00～17:00
2. 場所 東京都千代田区千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル22階
量研機構 東京事務所 19号室
(TEL. 070-3943-3364)
3. 議題
 - (1) 議事次第説明
 - (2) 進捗報告（北大・弓）
 - (3) 質疑・討議
 - (4) 進捗説明（量研・数藤）
 - (5) 質疑・討議
 - (6) 年度末報告会 報告資料（案）・評価票（案）（量研・数藤）
 - (7) 討議
4. 出席者
数藤由美子、亀山美穂、栗原治（量研機構）
平井百樹（東京大学名誉教授）
長田直樹、弓至（北海道大学）
瀧川一学（理研）
オブザーバー 原子力規制庁 PO（中村吉秀）、PO 補佐（新井知大、大町康）

5. 議事概要

- 1) 弓検討委員から、外注とは別のアルゴリズムを用いた検討結果が報告された。
- 2) 数藤から年度末報告会の報告資料（案）・評価票（案）を用いての進捗説明があった。プレゼンテーションの仕方について、検討委員および PO、PO 補佐より協調すべき点についてアドバイスがなされた。検討委員から染色体異常のデータ増加方法について助言があった。栗原氏より、染色体技術をもつ後継者維持の重要性について意見があった。
- 3) 1月～3月までの年度末報告会日時・年度末報告書提出期限、第3回研究会合日程について確認した。

資料13 [補足資料]

[注： 野里博和先生（産総研）につき別途ヒアリング兼打合せを行った。]

令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費 染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究

令和元年度 研究打合せ

議事録

1. 日時 令和2年1月9日（木） 10:00～12:00
2. 場所 東京都千代田区千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル22階
量研機構 東京事務所 19号室
(TEL. 070-3943-3364)
3. 議題
 - (1) 議事次第説明
 - (2) 進捗報告・年度末報告案（量研・数藤）
 - (3) 質疑
 - (4) 令和2年度以降の計画案（量研・数藤）
 - (5) 討議
4. 出席者
数藤由美子
野里博和（産総研）
オブザーバー 原子力規制庁 PO 補佐（新井知大）
5. 議事概要
 - 1) 数藤より年度末報告資料（案）に基づく進捗報告があった。

2) 野里委員より染色体異常の分類種間インバランス対策、画像のロバストネス（品質差）対策、ブラックボックスの解明手法について助言があった。

以上

資料14： 第3回研究会合

令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費
染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究

令和元年度第3回研究会合

議事録

1. 日時 令和2年2月17日（月） 10：00～12：00
2. 場所 東京都千代田区千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル22階
量研機構 東京事務所 19号室
(TEL. 070-3943-3364)
3. 議題
 - (1) 議事次第説明
 - (2) 年度末報告会についての報告（量研・数藤）
 - (3) 質疑
 - (2) 進捗説明（量研・数藤）
 - (5) 質疑・討議
 - (6) 令和2年度以降の計画案（量研・数藤）
 - (7) 討議
4. 出席者
数藤由美子、亀山美穂（量研機構）
平井百樹（東京大学）
長田直樹（北海道大学）
瀧川一学（理化学研究所）
江藤亜紀子（国立保健医療科学院）
オブザーバー 原子力規制庁 中村吉秀 PO、新井知宏 PO 補佐

5. 配付試料

- (1) 議事次第
- (2) 年度末報告会関係資料
- (3) 2月以降のスケジュール

6. 議事概要

1) 数藤から年度末報告会のプレゼンテーションの紹介と評価結果(A評価および評価委員からのコメント)について説明および追加の成果報告があった。検討委員から、今後のAI画像判定性能向上に関するアイデアが出された。

2) 数藤から年度末成果報告書や新規研究費申請に関する内容およびスケジュールについて説明があった。3月5日までにドラフト版の共有をし、3月12日正午を修正意見の締切とすることが合意された。また、検討委員から、新規研究費申請において量研機構の役割や目標設定の明確化についてアドバイスがあった。

3) 数藤から第2回研究会合以降の研究進捗(画像の開発)および第2回メディカルAI学会大会における情報収集成果について報告があった。

4) 長田委員から進捗報告および関連した修士論文(弓委員)の回覧がなされた。PO、PO補佐により謝辞の記載方法について確認があった。

4) 検討委員から、今後の共同研究上の契約等で必要な考慮事項についてアドバイスがあった。

以上

資料 15 : 第 1 回画像検討会

平成 31 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費
「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」
平成 31 年度第 1 回画像検討会議事概要

開催日時

平成 31 年 4 月 23 日 (火) 10 : 00 ~ 16 : 00

開催場所

量子科学技術研究開発機構 (千葉) 第 3 研究棟 L315 室

参加者

数藤由美子(量研)、穂山美穂(量研)、平井百樹(東大名誉教授)

議題

1. 実験解析手順の確認
2. PNA-FISH 画像の作製

議事概要

1. PNA-FISH 法の AI 解析用最適化プロトコールを試みた。
2. AI 導入試験用 PNA-FISH 画像を作製した。

以上

資料 16 : 第 2 回画像検討会

平成 31 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費
「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」
平成 31 年度第 2 回検討会議事概要

開催日時

平成 31 年 4 月 24 日（水） 10 : 00～16:00

開催場所

量子科学技術研究開発機構（千葉）第 3 研究棟 L315 室

参加者

数藤由美子(量研)、穂山美穂(量研)、平井百樹(東大名誉教授)

議題

1. 実験解析手順の確認
2. PNA-FISH 画像の作製

議事概要

1. 第 1 回検討会により修正した PNA-FISH 法の AI 解析用最適化プロトコールを試みた。
2. AI 導入試験用 PNA-FISH 画像を作製した（継続中）。

以上

資料 17： 第3回画像検討会

平成31年度（令和元年度）放射線安全規制研究戦略的推進事業費
「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」
平成31年度（令和元年度）第3回検討会議事概要

開催日時

令和元年10月9日（水）10：00～16：00

開催場所

量子科学技術研究開発機構（千葉）第3研究棟 L315 室

参加者

数藤由美子(量研)、穂山美穂(量研)、平井百樹(東大名誉教授)

議題

1. PNA-FISH 画像の作製およびアノテーション作業

議事概要

1. AI 導入試験用 PNA-FISH 画像を作製した（継続中）。

以上

資料 18 : 第 4 回画像検討会

平成 31 年度（令和元年度）放射線安全規制研究戦略的推進事業費
「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」
平成 31 年度（令和元年度）第 4 回検討会議事概要

開催日時

令和元年 10 月 23 日（水）10 : 00～16:00

開催場所

量子科学技術研究開発機構（千葉）第 3 研究棟 L315 室

参加者

数藤由美子(量研)、平井百樹(東大名誉教授)

議題

1. PNA-FISH 画像の作製およびアノテーション作業

議事概要

1. AI 導入試験用 PNA-FISH 画像を作製した（継続中）。
2. 10 月の検討会で、画像 8479 セット（うちアノテーション 6938 セット）が完成した。

以上

資料 19 : 第 5 回画像検討会

平成 31 年度（令和元年度）放射線安全規制研究戦略的推進事業費
「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」
平成 31 年度（令和元年度）第 5 回検討会議事概要

開催日時

令和元年 11 月 18 日（月）10 : 00～16:00

開催場所

量子科学技術研究開発機構（千葉）第 3 研究棟 L315 室

参加者

数藤由美子(量研)、平井百樹(東大名誉教授)

議題

1. PNA-FISH 画像の作製およびアノテーション作業

議事概要

1. AI 導入試験用 PNA-FISH 画像を作製した（継続中）。

以上

資料 20 : 第 6 回画像検討会

平成 31 年度（令和元年度）放射線安全規制研究戦略的推進事業費
「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」
平成 31 年度（令和元年度）第 6 回検討会議事概要

開催日時

令和元年 11 月 25 日（月）10:00～16:00

開催場所

量子科学技術研究開発機構（千葉）第 3 研究棟 L315 室

参加者

数藤由美子(量研)、平井百樹(東大名誉教授)

議題

1. PNA-FISH 画像の作製およびアノテーション作業

議事概要

1. AI 導入試験用 PNA-FISH 画像を作製した（継続中）。
2. 11 月の検討会で、画像 1432 枚が追加できた。

以上

資料 21 : 第 7 回画像検討会

平成 31 年度（令和元年度）放射線安全規制研究戦略的推進事業費
「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」
平成 31 年度（令和元年度）第 7 回検討会議事概要

開催日時

令和 2 年 2 月 12 日（水）10 : 00～16:00

開催場所

量子科学技術研究開発機構（千葉）第 3 研究棟 L315 室

参加者

穂山美穂(量研)、平井百樹(東大名誉教授)

数藤由美子(量研)（講義担当があったため 15:00 以降参加）

議題

1. 染色体画像の作製

議事概要

1. 同一細胞からの AI 導入試験用 PNA-FISH 画像およびギムザ染色画像技術を開発した。

以上

資料 2 2 : 第 8 回画像検討会

平成 31 年度（令和元年度）放射線安全規制研究戦略的推進事業費
「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」
平成 31 年度（令和元年度）第 8 回検討会議事概要

開催日時

令和 2 年 2 月 13 日（木）10 : 00～16:00

開催場所

量子科学技術研究開発機構（千葉）第 3 研究棟 L315 室

参加者

穂山美穂(量研)、平井百樹(東大名誉教授)、敷藤由美子(量研)

議題

1. 染色体画像の作製

議事概要

1. 同一細胞からの AI 導入試験用 PNA-FISH 画像およびギムザ染色画像技術を開発した（前回からの継続）。

以上

12. 別添

12.1. 平成 30 年度研究成果の概要

■ 平成 30 年度研究成果の概要

本研究 1 年目（平成 30 年度）は染色体線量評価における染色体異常の判定の標準化を実現するために、アカデミアおよび企業における画像解析技術開発の状況および人材・人件費についての調査・情報収集、研究会合（検討委員間での収集情報の共有および検討）、研究環境準備（倫理審査完了：[量研 承認研究計画書番号 18-023]、高セキュリティの共有サーバ設置、他）を行った。

[情報収集・検討の成果]

1) AI 技術の染色体線量評価への応用例はみられなかった。

現在、染色体画像自動分析ソフトウェアの主力は 2 種類あり、市販されている [ツァイス/メタシステムズ社「DCScore」(ドイツ) 及びサイトゲノミクス社「ADCI」(カナダ)] である。ただし、他のマイナーな開発例を含め、誤判定・必要細胞数など課題は多く、少数のラボで実用化に向け長期調整中であるものの開発途上である。DCScore の場合、メタフェーズごとの染色体検出率は 40~60% である。ADCI の場合、全染色体が検出されるメタフェーズをデータとして採択するが、メタフェーズごとの染色体検出率は低く、通常の 100 倍の検体量を要する。いずれの場合も、バックグラウンド値が高く、現状では画像を人間が目視によって見直し修正する作業を要している。また、現存ソフトウェアでも染色体異常の判別は人間が任意に決定したパラメータを用いた機械学習に依存しており、その条件設定に適合した染色体のみを分析する。このため判別の関係するパラメータや機械学習のための学習用画像は、各ラボの判断で用意・設定することになり、ラボ特有のものとなる。

一方、染色体線量評価分野でのさらに進んだ画像解析ソフトウェア開発は、他の疾病の医用画像診断や顔認証システムといった、市場規模の大きい分野で優先されている現状が判明した。また、AI 画像解析開発者の人材は供給不足しており、かつ人件費も高額であることが判明した。本研究 2 年間で最適な経験・資質をもつ研究開発者を見出して雇用し成果を上げることは困難なので、外部委託先の検討を継続することとした。

2) AI 技術を用いた臨床染色体分析の研究報告はみられなかった。

医用画像診断支援をはじめとする他分野における導入については多数進行中で本研究に参考になった。本格開発において適合するソフトウェア開発を受注可能とおもわれる企業が数社あり、プロトタイプ開発および本開発にかかる費用・期間のおおよそが判明した。

3) 手書きの染色体異常判定データのデジタル化を調査／試験し、検討した。

AI-OCR (AI を導入した光学的文字認識) は現状では不十分であることが分かった。そのほかに入力代行業者の利用とアノテーション手法の利用が可能であることがわかった。

4) 畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による画像解析テストに着手した。

一部の画像ファイルを用いて CNN 画像解析テストを行い、適した画像ファイル条件 (サイズ、解像度、クリッピング方法、アノテーション方法など) について検討した。教師データの準備を進め、200 枚程度という少数からテストを開始した。

5) ギムザ染色法、蛍光染色法、FISH 法の染色体異常検出力を比較調査した。

蛍光染色法や FISH 法は、染色体検査室では一般的な手法であり、検出力や検出効率はギムザ染色法より高いことが明らかとなった。このことはより少ない血液量で十分ということにもつながる)。

以上、情報収集・検討により、染色体線量評価における AI 技術の導入および研究開発は、本研究において率先して進めていかなければならないことが明らかになった。また、従来使用されてきたギムザ染色法だけでなく、蛍光染色法や FISH 法も検討すべきであることが明らかになった。

■ 平成 31 年度の展開

平成 31 年度は、同年 4 月 3 日～5 日に開催される第 3 回 AI・人工知能 EXPO を目途に本研究の AI 導入試験に協力可能な専門性の高い AI 関連企業の探索とヒアリングを継続し、AI 技術に関する最新情報を入手し、また AI 導入試験の外部委託先の入札の

参考にすることとした。国内外の学術的会合や文献も情報源とする。

AI 導入試験に先立ち実施するプレ試験では、各種染色法について、AI による染色体の検出力、染色体異常の判別力、画像数を増やした場合の効果を確認する（この段階で AI 導入が不適合と判明すれば、本研究は終了となる）。併せて本研究の画像検討会を行い、AI に最適な標本・画像作成条件を検討する。AI 導入の有効性が高いことが確認された場合、本試験に進む。

本試験では、プレ試験に基づいて得られた AI に最適な標本・画像作成条件により画像を作成する。プレ試験で作成した学習モデルを用いて一部については AI 自動アノテーションを行い、さらに熟練者目視による修正を行ったものを用いる。

全期間を通じて、並行して一部の検討委員（北海道大学）および量研機構により学術的立場で AI 導入試験を行うこととした。諸分野の専門家をまじえた研究会合で情報共有、検討・評価、線量評価式の検討を行う。

12.2. 研究計画と実施状況の対応

研究計画		実施状況	
大項目	小項目	実施概要	記載ページ
1. 染色体解線量評価（数理統計解析を含む）および人工知能技術を導入した画像判別手法に関する情報収集	1-1. 関連の国内学会、国際学会、AI 関連企業展示会等への参加	国際学会 1 件、国内学会 2 件、国際会合 3 件	17
	1-2. 先進的な研究機関への訪問による情報収集	Public Health of England 訪問	17
	1-3. 文献調査	文献調査	17
2. テスト用の画像ファイルの準備	（画像データ作製と目視判定結果の紐付け）	プレ試験用	19 - 23
		本試験用	31 - 34
		追加試験用	50 - 52
3. 人工知能技術を導入した機械学習（ディープラーニング）による画像判定プログラムテスト	3-1. 染色体および染色体異常の認識精度や実行速度などを評価軸とした有効性や適用範囲（線量）の検討	プレ試験 本試験・追加試験	19 - 30 31 - 54
	3-2. 染色体異常認識モデルの試作および検証（Phase1）		
4. 検討委員会の開催	情報共有、コンピュータによる画像判定手法技術の検討・評価、画像判定結果の数理統計学的なデータ処理法・線量推定法の検討、染色体線量評価のための画像判定技術開発案の検討等	研究会合（3回） ヒアリング（1回） 画像検討会（8回）	18
5. 総括	（染色体線量評価のための画像判定技術開発案の提示）	総括、今後の展望	55 - 58

令和元年度放射線対策委託費
(放射線安全規制研究戦略的推進事業)

円滑な規制運用のための水晶体の放射線防護に係る
ガイドラインの作成
成果報告書

藤田医科大学

令和2年3月

目 次

1. 初めに.....	1- 1
1.1 背景・目的.....	1- 1
1.2 研究課題及び研究体制.....	1- 1
1.3 研究概要.....	1- 2
1.3.1 分野横断的な水晶体等価線量モニタリングに係るガイドラインの作成.....	1- 2
1.3.2 医療分野のガイドライン作成—水晶体の等価線量限度改訂への対応—.....	1- 3
1.3.3 シンポジウム・講演等.....	1- 4
参考文献.....	1- 5
2. 分野横断的な水晶体等価線量モニタリングに係るガイドライン作成.....	2- 1
2.1 目的.....	2- 2
2.2 ガイドライン作成における課題整理の方法.....	2- 2
2.2.1 ガイドライン全般.....	2- 2
2.2.2 適用範囲.....	2- 2
2.2.3 線量モニタリングの考え方.....	2- 3
2.2.4 解説.....	2- 4
2.2.5 例題.....	2- 4
2.3 会議開催日程.....	2- 4
2.4 経済協力開発機構／原子力機関／放射線防護及び公衆衛生委員会／眼の水晶体の線量限度に関する専門家グループ（OECD/NEA/CRPPH /EGDLE）.....	2- 5
2.4.1 経緯.....	2- 5
2.4.2 活動内容.....	2- 6
2.4.3 パイロット調査結果.....	2- 6
2.4.4 今後の活動.....	2- 6
2.5 結論.....	2- 7
謝辞.....	2- 7
参考文献.....	2- 7
3. 医療分野のガイドライン作成—水晶体の等価線量限度改訂への対応—.....	3- 1
3.1 研究目的.....	3- 2
3.2 研究方法.....	3- 2
3.2.1 ガイドライン対象診療科と職種.....	3- 2
3.2.2 関連学会への参加依頼.....	3- 2
3.2.3 診療科横断ガイドライン検討方法.....	3- 3
3.3 研究結果.....	3- 4
3.3.1 ガイドライン参加学会.....	3- 4
3.3.2 水晶体の線量管理に関するアンケート調査結果.....	3- 4
3.3.3 ガイドラインの取りまとめ過程.....	3- 4

3.3.4	ガイドライン.....	3- 6
3.4	結論.....	3- 6
	参考文献.....	3- 6
4.	最後に.....	4- 1
添付 1	眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン	
添付 2	医療スタッフの放射線安全に係るガイドラインー水晶体の被ばく管理を中心にー	
添付 3	放射線安全に関するアンケート	

1. 初めに

1.1 背景・目的

平成 30 年 3 月、放射線審議会は、関係行政機関に対し、眼の水晶体の放射線防護検討部会がとりまとめた「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」を参考に所定の措置を講ずるよう具申した¹⁾。この具申では、水晶体の等価線量限度について、「5 年間の平均で 20 mSv/年かついずれの 1 年においても 50 mSv を超えないこととすることが適当である。」、事業者による水晶体被ばく低減や防護の最適化の取り組みが円滑に進むように、「関連学会によってガイドラインが策定されることを期待する。」としている。また、第 142 回の放射線審議会²⁾では、意見具申後の各関係行政機関のフォローアップとして、規制への取り入れ状況について報告があり、平成 31 (令和元) 年度をめどに法令改正を行い、平成 33 (令和 3) 年度から施行する予定であることが示された。

令和元年 12 月には、第 147 回放射線審議会³⁾において、放射線審議会の水晶体の放射線防護に係る在り方に関する意見具申において国内規制制度に取り入れるべきとされた項目の取入れ状況について報告があり、関係行政機関は放射線審議会に諮問した。この中でも、水晶体の線量限度の始期については、一部、規制において、経過措置を設ける場合もあるものの、概ね令和 3 年 4 月からの 5 年間につき 100 mSv、1 年につき 50 mSv とした。

平成 29 年度及び 30 年度の放射線安全規制研究戦略的推進事業^{4),5)}では、原子力及び医療分野における放射線業務従事者の水晶体等価線量の実態を明らかにするとともに、眼の水晶体の等価線量を直接測定するための線量基準 (めやす) や不均等被ばく時の実効線量管理と水晶体の等価線量の管理との関係等の課題や考え方を示した。

事業者が規制を円滑に運用するためには、これらの成果を踏まえた具体的な水晶体等価線量モニタリングの基準 (めやす)、手法、その考え方や分野個別の放射線防護及び防護の最適化方法を示したガイドラインの作成が急務である。特に、医療分野においては、個人線量の測定の徹底や被ばく低減の必要性が指摘されている^{1),6)}。そこで本研究では、目前に迫った水晶体の等価線量限度に関連する規制見直しを踏まえ、事業者及び従事者が円滑に放射線管理を行うことができるよう、分野横断的な水晶体等価線量モニタリングに係るガイドライン及び医療分野のガイドラインの 2 つのガイドラインの作成を行うための課題整理を実施した。

1.2 研究課題及び研究体制

本研究では、以下の表 1-1 に示す 2 つのガイドライン作成のための課題整理をすることとした。研究の実施体制は以下の図 1-1 に示すとおりである。

分野横断的な水晶体等価線量モニタリングに係るガイドラインの作成については、関連分野の専門家及び一般社団法人日本保健物理学会と連携・協力して研究を実施した。

医療分野のガイドライン作成—水晶体の等価線量限度改訂への対応—では、20 の関連団体の代表が研究協力者として参画し、ガイドラインの作成を行った。

表 1-1 研究項目名及び担当者

研究項目名	主任研究者 分担研究者
分野横断的な水晶体等価線量モニタリングに係る ガイドラインの作成	横山 須美 (藤田医科大学)
医療分野のガイドライン作成 —水晶体の等価線量限度改訂への対応—	大野 和子 (京都医療科学大学)

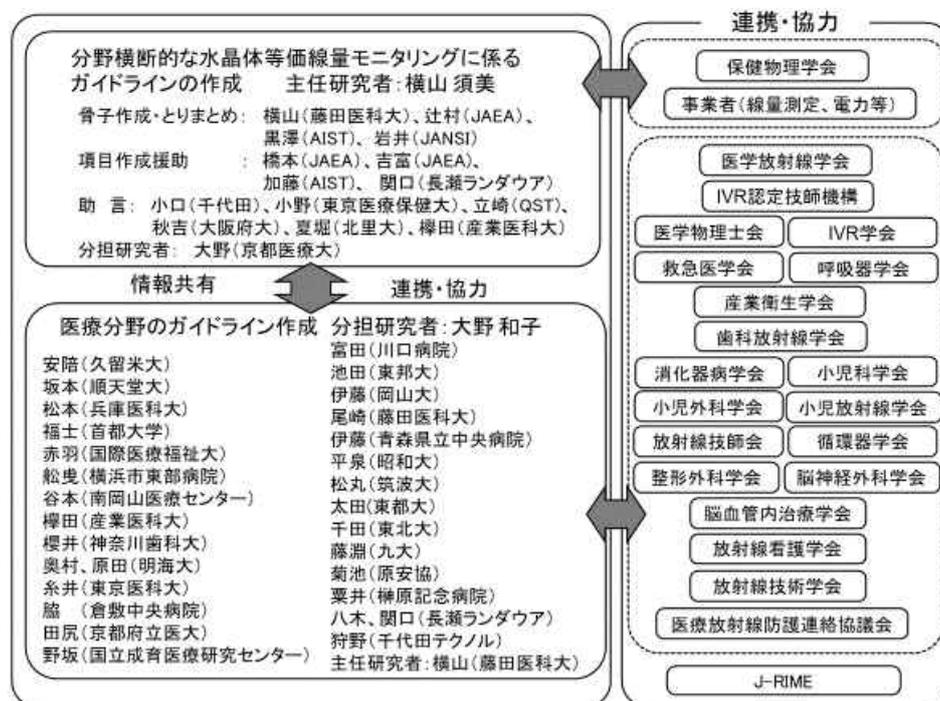


図 1-1 研究実施体制図

1.3 研究概要

1.3.1 分野横断的な水晶体等価線量モニタリングに係るガイドラインの作成

放射線審議会の意見具申¹⁾では、水晶体の等価線量限度の見直しに関連して、「個人の外部被ばくに係る測定については3 mm線量当量を法令に位置付け、これを用いた水晶体の等価線量の算定を可能にすべきである。」としている。また、防護眼鏡等を着用する場合等、水晶体の等価線量を算定するための線量計を着用する部位は、従来、規制で定められている線量計着用部位である体幹部基本部位（胸部または腹部）や最大となるおそれのある部位とは異なる可能性がある。このため、正確に水晶体の等価線量を算定するための線量の測定位置として、これまでの規制で定められた場所以外に、「眼の近傍」が追加された。

わが国では、国際放射線防護委員会（ICRP）の1990年の基本勧告⁷⁾が取り入れられて以降、線量測定及び評価については、放射線審議会の基本部会がとりまとめた外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針⁸⁾（技術指針）の考え方を踏まえ、具体的な運用を示した「被ばく線量の測定・評価マニュアル」⁹⁾を参考に、多くの事業者や放射線管理者が管理を実施してきた。しかし、これらの技術指針やマニュアルには、新しい水晶体の等価線量限度や用いる実用量の追加等、水晶体の線量測定及び評価に関しては示されていない。また、「被ばく線量の測定・評価マニュアル」では、実効線量の不均等被ばく管理の実施についての判断方法として、頭頸部に着用した線量計と体幹部基本部位の線量の差が3倍（150/50）と、現行の水晶体の等価線量限度（150 mSv/年）を基に示している。このため、新たな水晶体の等価線量限度に合ったモニタリングの考え方が実効線量の測定及び評価における不均等被ばく管理を行うか否かの判断方法と照らしても問題がないようにしておく必要がある。

以上のことから、分野横断的な水晶体の等価線量モニタリングに係るガイドラインの作成においては、どのような条件下で、水晶体の等価線量をどの部位で算定するのか、及びどの実用量を用いて算定するのかを示した。また、それらの判断方法を示すだけでなく、関連した国内外の動向や考え方の基となる根拠を解説で示すとともに、類似のケースの判断に対応できるよう実務上の具体例をQ&A形式の例題として示した。

なお、これらの検討においては、学術学会、特に、一般社団法人日本保健物理学会と連携するとともに、医療分野のガイドライン作成のための課題整理を実施した分担研究者や線量測定・評価、関連分野の専門家の協力を得た。また、早い段階から、関連学協会員等から意見を聴取し、それを反映することが重要であると考え、学会での講演やシンポジウム、意見公募等により、積極的に意見交換を実施した。本課題に関連する口頭発表（講演）を1.3.3項に示す。

また、海外動向にも注視し、経済協力開発機構・原子力機関 放射線防護及び公衆衛生委員会の「眼の水晶体の線量限度に関する専門家グループ」（OECD/NEA/CRPPH/ EGDLE）¹⁰⁾に参画して、情報を取得した。EGDLEの活動概要については、2.4節に示す。

1.3.2 医療分野のガイドライン作成—水晶体の等価線量限度改訂への対応—

医療分野においては、近年多くの診療科で放射線を用いた診療が実施され、技術の進展も目覚ましい。しかし、医療スタッフが放射線安全に対して、十分に配慮してきたとは言いがたい。今後も患者に不可欠な放射線診療の継続した発展と同時に円滑な規制の運用に資するためには、水晶体の線量測定・評価や被ばく低減を適正に行うための放射線管理全般に対するガイドラインの作成が必要不可欠である。そこで、放射線を用いた診療行為に関与する全ての医療スタッフと患者双方の放射線安全に配慮した放射線の利用方法について課題を整理した。

第2章で示す水晶体の線量モニタリングのガイドラインは、原子力や医療等の分野に係らず、すべての分野の事業者や安全管理者を対象に水晶体の線量モニタリングに関する

技術的な課題を整理した。一方、第3章に示す医療分野のガイドラインは、診療科を問わず、X線を利用する放射線診療の実務に携わる医療スタッフを対象とし、診療科横断的な、医療スタッフの放射線防護や被ばく低減に関する技術的課題を整理した。医療分野のガイドラインでは、医療スタッフの放射線防護に関する理解が進むよう図を多用した。また、ガイドラインの各項目に対する推奨度の本文表記についても、一般的な診療ガイドラインで用いられる表現に準じる等の工夫を行った。

1.3.3 シンポジウム・講演等

- 1) 横山須美, 水晶体ガイドライン作成について, 日本保健物理学会講演会: ICRP 勧告取入れにおける国内動向 (2019年6月東京大学)
- 2) 大野和子, 日本医学放射線学会第332回関西地方会 教育講演 (日本医学放射線学会必須講習会)「医療放射線防護を取り巻く潮流」 (2019年06月8日ホテルエルセラーン大阪)
- 3) 横山須美, 水晶体線量モニタリングガイドラインの概要, 日本保健物理学会シンポジウム: 水晶体防護に係るガイドラインを考える (2019年7月20日, TKP 東京駅前会議室)
- 4) 大野和子, 医療分野のガイドライン概要, 日本保健物理学会シンポジウム: 水晶体防護に係るガイドラインを考える (2019年7月20日, TKP 東京駅前会議室)
- 5) 辻村憲雄, パネルディスカッション: 管理基準と不均等被ばく, 日本保健物理学会シンポジウム: 水晶体防護に係るガイドラインを考える (2019年7月20日, TKP 東京駅前会議室)
- 6) 関口寛, パネルディスカッション: 水晶体線量の測定方法, 日本保健物理学会シンポジウム: 水晶体防護に係るガイドラインを考える (2019年7月20日, TKP 東京駅前会議室)
- 7) 加藤昌弘, パネルディスカッション: 水晶体線量評価のための線量計校正, 日本保健物理学会シンポジウム: 水晶体防護に係るガイドラインを考える (7月20日, TKP 東京駅前会議室)
- 8) 櫻田尚樹, パネルディスカッション: 医療分野における現状と課題, 日本保健物理学会シンポジウム: 水晶体防護に係るガイドラインを考える (2019年7月20日, TKP 東京駅前会議室)
- 9) 大野和子, 第28回日本心血管インターベンション治療学会 必須講習防護「医療放射線防護・安全の今後」 (2019年9月19日-21日, 名古屋国際会議場)
- 10) 横山須美, 実効的な水晶体等価線量モニタリングのガイドライン作成に向けて, 第47回日本放射線技術学会秋季大会, 放射線防護フォーラム (2019年10月19日, グランキューブ大坂)
- 11) 大野和子, 第12回全国国立大学放射線技師会・全国国立病院療養所放射線技師会 医療安全セミナー (2020年2月8日, 東京大学)

- 12) 大野和子, 医療放射線安全関連法令の改正と診療用放射線の安全利用について, 医療放射線防護連絡協議会 医療の安全利用フォーラムパネル (2020年2月23日, 首都大学東京)
- 13) 横山須美, 水晶体の線量限度改正とガイドライン, 医療放射線防護連絡協議会 第41回医療の安全利用フォーラムパネル (2020年2月23日, 首都大学東京)
- 14) 横山須美, 水晶体線量モニタリングの在り方について, 2020年日本原子力学会春の年会 (2019年3月18日, 福島大学) * 学会開催中止
- 15) Sumi Yokoyama et al., Development of Guidelines on Radiation Protection for the Lens of the Eye in Japan, IRPA 15, (2020年5月11日-15日, COEX, ソウル予定)
- 16) 大野和子, 水晶体の被ばく線量引き下げと整形外科医の放射線誘発白内障の予防, 臨床整形外科 in press.

参考文献

- 1) 放射線審議会, 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について (意見具申), 平成30年3月2日付け原規放発第18030211号 (2018).
- 2) 放射線審議会, 「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」 (意見具申) を踏まえた関係省庁における検討状況について, 放射線審議会第142回資料142-1号 (2019).
- 3) 放射線審議会, 放射線審議会意見具申において、国内制度に取り入れるべきとされた項目の取り入れ状況, 放射線審議会第147回資料147-1-2号ほか (2019).
- 4) 横山須美, 辻村憲雄, 大野和子, 藤淵俊王, 平成29年度安全規制研究戦略的推進事業成果報告書 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか?～水晶体被ばくの実態から探る～ (2018).
- 5) 横山須美, 辻村憲雄, 大野和子, 藤淵俊王, 平成30年度安全規制研究戦略的推進事業成果報告書 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか?～水晶体被ばくの実態から探る～ (2019).
- 6) 厚生労働省, 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書 (2019).
- 7) ICRP, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3) (1991).
- 8) 放射線審議会基本部会, 外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針 (1999).
- 9) 財) 原子力安全技術センター, 被ばく線量の測定・評価マニュアル (2000).
- 10) NEA, NEA Mandates and Structures, Expert Group on the Dose Limit for the Lens of the Eye (EGDLE), https://www.oecd-nea.org/tools/mandates/index/id/7972/lang/en_gb (最終アクセス; 2020年3月12日)

2. 分野横断的な水晶体等価線量モニタリングに係るガイドラインの作成

主任研究者	大学法人 藤田学園	藤田医科大学	横山 須美
研究協力者	大阪公立大学法人	大阪府立大学	秋吉 優史
	一般社団法人	原子力安全推進協会	岩井 敏
	学校法人	東京医療保健大学	小野 孝二
	国立研究開発法人	産業技術総合研究所	加藤 昌弘
	学校法人	産業医科大学	櫛田 尚樹
	国立研究開発法人	産業技術総合研究所	黒澤 忠弘
	株式会社千代田テクノル		小口 靖弘
	長瀬ランダウア株式会社		関口 寛
	国立研究開発法人	量子科学技術研究開発機構	立崎 英夫
	国立研究開発法人	日本原子力研究開発機構	辻村 憲雄
	学校法人	北里大学	夏堀 雅宏
	国立研究開発法人	日本原子力研究開発機構	橋本 周
	国立研究開発法人	日本原子力研究開発機構	吉富 寛

2.1 目的

眼の水晶体の線量モニタリングのガイドラインの作成は、眼の水晶体の等価線量限度に関する法令改正にともない、事業者が法令を遵守するとともに放射線防護の最適化の観点から、円滑に眼の水晶体の線量モニタリングが実施できるようにすることを目的としている。

また、現行法令の改正の際に作成された「被ばく線量の測定・評価マニュアル」¹⁾の眼の水晶体の線量モニタリングに関する部分を補うものとする。

2.2 ガイドライン作成における課題整理の方法

眼の水晶体の線量モニタリングのガイドラインの作成において、以下の点に注意して課題を整理することとした。ガイドラインは添付1に示す。

2.2.1 ガイドライン全般

ガイドラインを利用する上で対象者を明確にすることが重要である。そこで、本章で扱うガイドラインの被ばく状況、被ばく区分、算定部位及び実用量を明確にした。

各事項の重要度が明確になっている必要があるため、重要度がわかるようにできる限り表現を統一した。要求事項は「する」、推奨事項は「望ましい」、許容事項は「してもよい」と表現した。

ガイドラインは、主文である「1. 適用の範囲」及び「2. 線量モニタリングの考え方」、それらの考え方の根拠について文献等を引用して付記した「解説」、実際の管理の場で想定される事例を紹介する「例題」の大きく3つに区分した。

考えられる個別の事例については可能な限り、ガイドラインで取り扱うことを試みたが、すべての事例を網羅することは困難である。したがって、ガイドラインのとおり眼の水晶体の線量モニタリングを実施することを事業者に要求するものではなく、実情に応じて事業者等の判断により、適切な方法を選択すればよいものとする。

本ガイドラインは、線量モニタリングの現状を踏まえ、現時点での最新の知見に基づき作成した。このため、法令の改正や測定及び防護技術の進展等により、内容を随時見直す必要がある。

また、法令改正を見据えて眼の水晶体の線量モニタリングの方法について記載しているが、法令改正の対象となっていない実効線量の算定方法に照らしても問題がないことも重要であり、そのような考え方に基づいて整理した。

2.2.2 適用範囲

法令改正が予定されているのは、計画被ばく状況下での職業被ばくに対する眼の水晶体の等価線量限度に関連するものである²⁾。したがって、ガイドライン内に記載される内容

は、これらの線量モニタリング方法を取り扱うこととした。シンポジウム等における専門家からの意見聴取においては、公衆被ばくや医療被ばくについても取り扱ってはどうかという意見もあったが、論点を絞り、明確化することで、ガイドラインを事業者の安全管理に有効に活用できるものとする。このため、計画被ばく状況下での職業被ばくに限定することとした。

2.2.3 線量モニタリングの考え方

眼の水晶体の線量モニタリングを実施するにあたり明確にしておく必要がある点は、① 眼の水晶体の等価線量をモニタリングする部位及び ② モニタリングに使用する実用量である。また、判断の助けとなるようフロー図を添付した。

眼の水晶体の等価線量モニタリングをする部位は、第一段階として、「体幹部均等被ばく」か「体幹部不均等被ばく」かで判断した。第二段階として、それぞれの条件に対して、水晶体の等価線量が「管理基準」に近づくか又は超えるおそれがあるかで判断した。「管理基準」については、線量限度を超えることがないように線量限度以下に設定しておく必要がある。その値については、作業内容や作業環境によって異なり、一つの数値を示すことができない。そこで、事業者が労働安全衛生マネジメントの一環として、自らが選択できるように、解説等に参考となる考え方や数値レベルを示した。

等価線量のモニタリングに使用する実用量には、周辺線量当量と個人線量当量がある。しかしながら、放射線審議会の意見具申²⁾では、場所に係る測定に関しては、3 mm 線量当量を測定できる測定器は普及していないことから、「法令に取り入れる必要性は薄い」としている。また、水晶体の等価線量を算定するための実用量として、「 $H_p(3)$ （個人線量当量）で水晶体の等価線量を算定することを可能とするべきである。」との記載がある。このため、本ガイドラインでは主に個人線量当量の取り扱いを明記した。

水晶体の等価線量を 3 mm 線量当量を用いて算定することは必須ではない。法令改正案³⁾でも、「眼の水晶体の等価線量は、一センチメートル線量当量又は三ミリメートル線量当量又は七十マイクロメートル線量当量のうち、適切な方とすること。」（放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則）とされている。多くの放射線業務従事者は、線量限度を超えることがないため、事業者等の負担を考えると、現行の線量モニタリングを基本として、追加的な方法として、眼の近傍での線量モニタリングの実施及び 3 mm 線量当量を用いての測定を位置づけることが適当であると考えた。

なお、線量換算係数は放射線の種類とエネルギーに依存する。放射線の種類ごとにどのような場合に 3 mm 線量当量を眼の水晶体の等価線量の算定に用いる必要があるかについては、解説に示した。

中性子については、現在、3 mm 線量当量に対して換算係数が与えられていない。このため、法令改正後も従来と同様に、水晶体の等価線量の算定に用いる実用量は、1 cm 線量当量である。このことについては、主文に明記した。

2.2.4 解説

解説には、ガイドラインの目的、適用範囲、眼の水晶体の線量モニタリングにおける算定の方法について、根拠となる文献等を参考に付記するとともに、関連する国内の法規制、国内外の任意規格、用語一覧を示すこととした。眼の水晶体の線量モニタリングにおける算定の方法は、国際放射線防護委員会（ICRP）や国際原子力機関（IAEA）の報告書、その他海外のガイドライン、放射線審議会で示された意見具申等を参考にした。解説に記載する内容は、必要最小限にとどめ、ガイドライン作成の経緯や国内動向等、さらなる詳細な内容は添付資料に記載した。

2.2.5 例題

研究協力者、事業者、放射線防護の専門家等から寄せられた意見を参考に、体幹部不均等被ばくの判断方法や現在使用できる水晶体専用の線量計の種類、各分野での水晶体被ばくの特徴と一般的なモニタリング方法等について、26例題を提示した。

「体幹部不均等被ばく」の判断は、法令改正の対象となっていない実効線量の算定と関連したものである。しかし、法令改正後、水晶体の等価線量限度を遵守するためには、被ばく線量の測定・評価マニュアル¹⁾に記載されている従来の不均等被ばくの考え方では十分とは言えない。そこで、ICRP等の考え方を参考に新たに不均等被ばくの考え方を例示することとした。また、各分野における水晶体被ばくの特徴と一般的なモニタリング方法については、平成29年度及び30年度の放射線安全規制研究戦略的推進事業^{4,5)}等において得られた成果を参考とした。

2.3 会議開催日程

第1回 水晶体線量モニタリングガイドライン作成作業検討会

開催日時：令和元年6月13日（木） 13:30～16:25

開催場所：三菱総合研究所

第2回 水晶体線量モニタリングガイドライン作成作業検討会

開催日時：令和元年10月11日（金） 9:30～12:30

開催場所：東京医療保健大学国立病院機構キャンパス

日本保健物理学会シンポジウム 講演

開催日時：令和元年6月20日（木） 9:30～11:00

開催場所：東京大学 工学部2号館213講義室

内 容：ICRP勧告取入れにおける国内動向

1. 水晶体ガイドライン作成について 横山須美（藤田医科大）
2. ICRP2007年勧告等の取入れに関する国内での検討状況 原子力規制庁

令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業/日本保健物理学会放射線防護標準化委員会 シンポジウム：水晶体防護に係るガイドラインを考える

開催日時：令和元年7月20日（土）13：30～16：30

開催場所：TKP スター貸会議室 日本橋 カンファレンスルーム 3B

内 容：

第1部 水晶体の放射線防護に係るガイドラインについて 司会：橋本 周（JAEA）

- | | |
|-------------------------|---------------|
| 1. 標準化委員会の活動経緯 | 橋本 周（JAEA） |
| 2. 水晶体線量モニタリングガイドラインの概要 | 横山須美（藤田医科大） |
| 3. 医療分野におけるガイドライン概要 | 大野和子（京都医療科学大） |

第2部 パネルディスカッション

司会：岩井 敏（JANSI）

- | | |
|----------------------|---------------|
| 1. 管理基準と不均等被ばく | 辻村憲雄（JAEA） |
| 2. 水晶体線量測定方法 | 関口 寛（長瀬ランダウア） |
| 3. 水晶体線量評価のための線量計の校正 | 加藤昌弘（産総研） |
| 4. 医療分野における現状と課題 | 樺田尚樹（産業医科大） |
| 5. 総合討論 | |

第47回 日本放射線技術学会秋季学術大会

開催日時：令和元年10月19日（土）8：50～9：50

開催場所：グランキューブ大阪

内 容：放射線防護フォーラム 実効的な水晶体等価線量モニタリングのガイドライン作成に向けて 横山須美（藤田医科大）

2.4 経済協力開発機構／原子力機関／放射線防護及び公衆衛生委員会／眼の水晶体の線量限度に関する専門家グループ（OECD/NEA/CRPPH/EGDLE）

2.4.1 経緯

平成23（2011）年にICRPが計画被ばく状況における職業人に対して、新しい眼の水晶体の等価線量限度を勧告⁶⁾し、IAEAの国際基本安全基準（BSS）⁷⁾やEU指令⁸⁾にもこの新しい水晶体の等価線量限度が取り入れられている。わが国でも、関係行政機関において、線量限度の見直しが進められているが、世界的に見ても各国の規制に大きな影響を及ぼしている。そこで、経済協力開発機構・原子力機関（OECD/NEA）の常設委員会の一つである放射線防護及び公衆衛生委員会（CRPPH）では、各国が規制を見直しする中で、原子力及び非原子力（医療等）分野の従事者に対して水晶体の等価線量限度を適用するにあたり、得られた教訓（良好事例及び課題）を共有することを目的として、眼の水晶体の線量限度に関する専門家グループ（EGDLE）を設置した⁹⁾。令和元（2019）年3月のCRPPHの総会で設置が承認され、令和3（2021）年3月末まで活動し、報告書を取りまとめる予定である。OECD加盟各国に参画メンバーを募集し、各国の規制機関、研究機関及びCRPPH事務局の10名により活動を開始した。主査はカナダ原子力安全委員会のChristina Dodkin、副査はミラノ大学のMaire Claire Cantoneである。わが国からは本研究の主任研究者である横山が参画している。

2.4.2 活動内容

令和元（2019）年7月25日及び26日にOECD本部（パリ）にてキックオフ会合を開催し、参加メンバーから各国の現状について紹介があった。より多くの事例を収集するためのOECD加盟各国に向けたアンケート調査について検討を実施した。詳細な調査内容については、令和元（2019）年10月24日に第1回目のWeb会合を実施し、検討した。調査項目としては、法改正の各国の現状、水晶体の等価線量限度の法令への取り入れを成功させるためのステークホルダーの関与の在り方、法改正後の水晶体の等価線量の測定や算定方法、使用する実用量、防護具の使用等の10項目とした。12月までに会合メンバーに対してパイロット調査を実施し、質問項目を精査することとした。

令和2（2020）年2月13日に第2回目のWeb会合を開催し、パイロット調査を基にOECD加盟各国に向けた本調査の内容についての検討を行った。同年3月4日に加盟各国に調査用紙を送付、同年6月1日までに回答するよう依頼がなされた。アンケート調査結果については取りまとめを行い、令和3（2021）年開催のCRPPHの年次会合にて報告する予定である。

2.4.3 パイロット調査結果

今後、CRPPH年次会合等で報告される予定であるため、ここでは概要のみを報告する。

水晶体の等価線量限度の法令取り入れを成功させる策として、EGDLEの多くのメンバーが賛同したことは、水晶体の線量限度の見直しに際して、ステークホルダー（関係者）が関与することである。技術報告書の作成、ワークショップ等の実施、Web会合や専門家会合の開催等、関与の在り方や程度は国によって異なるものの、ステークホルダーが関与することの重要性については異論がなかった。特に検討の早い段階から、ステークホルダーが関与することにより、法令等への取り入れが円滑に進むといった意見もあった。

また、関係者の懸念として、放射線防護や被ばく低減への取組について医療従事者が消極的であること、追加対策にかかるコストの増加、線量計の設計、作業場で実現可能な放射線防護方法（特に医療分野）等が挙げられた。これらは、わが国が直面している課題でもある。

水晶体の線量モニタリングに使用する実用量については、多くのメンバーが1cm線量当量及び70 μ m線量当量による代用も認めるが、3mm線量当量を優先すると回答した。

2.4.4 今後の活動

2.4.1項及び2.4.2項に示したとおり、EGDLEの活動は令和3（2021）年3月末まで継続する。本研究での調査は、前半部分のみとなったが、EGDLEメンバー国の現状や懸念についての情報を入手することができ、一定の成果を得ることができた。今後、OECD加盟各国の本調査が実施されるが、わが国の水晶体の線量モニタリングのガイドライン作成に大きな影響を与えるものではないと考える。しかしながら、このようなネットワークを介し

て、諸外国と情報共有を密にして、わが国の現状を発信するとともに、情報収集することで、水晶体の等価線量限度に関連した規制のみならず、わが国の放射線防護の在り方を考える上で有益なものとなるだろう。

2.5 結論

分野横断的な水晶体の線量モニタリングのガイドラインを作成することは、水晶体の等価線量限度に関する法令改正後の法令遵守と放射線防護の最適化のために、急務であり、非常に有意義なことである。

今後、事業者等に対してより正確な水晶体の等価線量の算定が求められることになるものの、対象となる放射線業務従事者は限られている。眼の近傍でのモニタリングについては、対象となる放射線業務従事者が所属する事業者等及び対象となる放射線業務従事者自身の負担をできる限り軽減するように努めた。

「不均等被ばく」の判断方法については、ICRP Publ. 75¹⁰⁾の考え方等を踏まえ、現時点で適切と考えられる方法を示すこととしたが、従来の考え方よりは厳しいものとなる。事業者は、本ガイドラインを参考に、法令改正までに各作業環境の実情を踏まえた適切な管理方法を十分に検討しておく必要があるだろう。

さらに近い将来、実用量の考え方が大きく変わることが予想される¹¹⁾。眼の水晶体の等価線量モニタリングのみならず、実効線量や皮膚の等価線量の測定及び評価も含め、包括的な線量管理方法を継続的に議論していく必要がある。

謝辞

眼の水晶体の線量モニタリングのガイドラインの作成にあたり、貴重かつ有益なご意見を数多くいただきました。以下の方々に心より深く感謝申し上げます。

三菱総合研究所 高木 俊治様、フジタ株式会社 青天目 州晶様、東芝エネルギーシステムズ株式会社 川島 恒憲様、東京電力ホールディングス株式会社 夏目 良典様、中部電力株式会社 出来島 誠様、九州電力株式会社 廣瀬 友紀様、上村 孝雅様 渡邊 強史様、関西電力株式会社 三浦 晃三様、中村 孝年様、鶴野 善之様、一般社団法人日本電機工業会 瀧上 浩幸様、株式会社日立製作所 金野 朋博様、三菱重工業株式会社 福井 基一様、一般社団法人日本保健物理学会放射線防護標準化委員会委員の皆様

参考文献

- 1) 財) 原子力安全技術センター，被ばく線量の測定・評価マニュアル (2000).
- 2) 放射線審議会，眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について (意見具申)，平成 30 年 3 月 2 日付け原規放発第 18030211 号 (2018).
- 3) 放射線審議会，参考資料 (新旧対照表) (原子力規制委員会提出資料) 放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則の一部改正に関する表など (147-1-7-2 号)

- 4) 横山須美, 辻村憲雄, 大野和子, 藤淵俊王, 平成 29 年度安全規制研究戦略的推進事業成果報告書 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか?～水晶体被ばくの実態から探る～ (2018).
- 5) 横山須美, 辻村憲雄, 大野和子, 藤淵俊王, 平成 30 年度安全規制研究戦略的推進事業成果報告書 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか?～水晶体被ばくの実態から探る～ (2019).
- 6) ICRP, ICRP Statement on Tissue Reactions / Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs; Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context. ICRP Publication 118, Ann. ICRP 41(1/2) (2012).
- 7) IAEA, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, No. GSR Part 3 (2014).
- 8) Council of the European Union, Council Directive 2013/59/Euratom on basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. OJ of the EU. L13; 57: 1–73 (2014).
- 9) NEA, NEA Mandates and Structures, Expert Group on the Dose Limit for the Lens of the Eye (EGDLE), https://www.oecd-nea.org/tools/mandates/index/id/7972/lang/en_gb (最終アクセス ; 2020 年 3 月 12 日)
- 10) ICRP, General Principles for the Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 75, Ann. ICRP 27(1) (1997).
- 11) ICRP, Operational Quantities for External Radiation Exposure (draft).

3. 医療分野のガイドライン作成 — 水晶体の等価線量限度改訂への対応 —

分担研究者	大野 和子	京都医療科学大学	医療科学部	教授
研究協力者	安陪 等思	久留米大学	医学部	教授
研究協力者	赤羽 正章	国際医療福祉大学	医学部	教授
研究協力者	池田 隆徳	東邦大学	医学部	教授
研究協力者	伊藤 浩	岡山大学	医学部	教授
研究協力者	尾崎 行男	藤田医科大学	医学部	教授
研究協力者	松丸 祐司	筑波大学	医学部	教授
研究協力者	糸井 隆夫	東京医科大学	医学部	教授
研究協力者	野坂 俊介	国立研究開発法人 国立成育医療研究センター	放射線診療部	部長
研究協力者	谷本 安	独立行政法人国立病院機構 南岡山医療センター		院長
研究協力者	伊藤 淳二	青森県立中央病院	整形外科	部長
研究協力者	平泉 裕	昭和大学	整形外科	客員教授
研究協力者	船曳 知弘	済生会横浜市東部病院	救急科	部長
研究協力者	脇 研自	倉敷中央病院	小児科	主任部長
研究協力者	田尻 達郎	京都府立医科大学		教授
研究協力者	櫻井 孝	神奈川歯科大学		学長
研究協力者	奥村 泰彦	明海大学	保健医療学部	教授
研究協力者	原田 康雄	明海大学	歯学部	客員教授
研究協力者	樺田 尚樹	産業医科大学	産業保健学部	教授
研究協力者	福士 政広	東京都立大学	健康福祉学部	教授
研究協力者	坂本 肇	順天堂大学	保健医療学部	前任准教授
研究協力者	松本 一真	兵庫医科大学病院	診療放射線技師	
研究協力者	千田 浩一	東北大学大学院医学系研究科		教授
研究協力者	藤淵 俊王	九州大学	医学研究院	教授
研究協力者	富田 博信	埼玉済生会川口病院	診療放射線技師	
研究協力者	太田 勝正	東都大学沼津ヒューマンケア学部開設準備室		(前名古屋大学大学院医学系研究科看護学専攻 教授)
研究協力者	菊地 透	原子力安全研究協会		技術参与
研究協力者	栗井 一夫	榊原記念病院	放射線科技師長	
研究協力者	関口 寛	長瀬ランダウア株式会社		技術室統括
研究協力者	八木 信行	長瀬ランダウア株式会社		企画部
研究協力者	狩野 好延	株式会社千代田テクノル		線量計測事業本部

3.1 研究目的

平成30年3月、放射線審議会（審議会）は「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」を取りまとめ、この中で水晶体の等価線量限度の改正に併せて、「医療分野の事業者による最適化の取組が円滑に進むように、関連学会等によってガイドラインが策定されることを期待する。」とした¹⁾。

放射線診療の手技は診療科毎に開発されてきたため、放射線診療従事者（以下「従事者」という。）が有する放射線防護に関する情報量や医療現場での防護への配慮も診療科により異なる。国民に有益な放射線診療が安全に持続・発展するためには、従事者の放射線安全管理を目的としたガイドラインを作成し、関係する医療スタッフ（本報告書では「医療従事者」を「医療スタッフ」と表記する。）へ広く周知することが喫緊の課題である。そこで従事者が水晶体の等価線量限度の新基準を遵守することを目的とした、診療科横断的な医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン（添付2）を作成し、各学会の承認を得てとりまとめることとした。

3.2 研究方法

3.2.1 ガイドライン対象診療科と職種

主に、従事者の被ばくの可能性が高いと想定される、インターベンション手術（IVR）に係る診療科の医師・診療放射線技師・看護師を対象としてガイドラインを作成する。

放射線治療と核医学診療を行う医師のほとんどは、放射線科専門医又は核医学専門医資格を有しており専門的な知識を持ち合わせていること、平成29年度及び平成30年度放射線安全規制研究戦略的推進事業^{2,3)}において、放射線治療及び核医学診療分野は、取り入れを予定している水晶体の等価線量限度を遵守できることを確認していることから、本ガイドラインの対象領域からは除外した。

3.2.2 関連学会への参加依頼方法

医療放射線防護連絡協議会（以下「協議会」という。）に協力を依頼し加盟学会10学会（日本医学放射線学会、血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構、日本医学物理学会、日本インターベンショナルラジオロジー学会、日本救急医学会、日本歯科放射線学会、日本診療放射線技師会、日本循環器学会、日本脳神経血管内治療学会、日本放射線技術学会）へ参加を依頼した。協議会に加盟する日本脳神経血管内治療学会を経由して脳神経外科学会の参加を依頼した。また、日本整形外科学会、日本消化器病学会、日本呼吸器学会、日本小児外科学会、日本小児科学会、日本小児放射線学会、産業衛生学会、放射線看護学会には学会事務局へ個別にガイドラインの主旨を説明して参加を依頼した。ガイドラインの作成にあたっては、診療ガイドラインに準じた三段階の推奨度で作成することとし、その三

段階の選択にあたっては、デルファイ法を用いて参加学会の了承のもと取りまとめることとした。

3.2.3 診療科横断ガイドライン検討方法

(1) 原案作成ワーキンググループ

分担研究者と日本インターベンショナル学会からの代表者と日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構の理事長と理事、医療放射線防護連絡協議会の専務理事と役員の名で構成するワーキンググループ（WG）を作成し、ガイドライン案を作成した。ガイドライン案は、医療放射線の安全利用フォーラム（令和元年（2019年）2月東京）終了後に開催した協議会加盟学会と日本整形外科学会、日本消化器病学会からの参加者を加えた学会関係者による、診療科横断的なガイドラインの準備検討会議での合意事項（表 3-1）を基本とした。

表 3-1 診療科横断的なガイドラインの準備検討会議での合意事項

1. ガイドライン目次
 - 1) ガイドライン作成の背景
 - 2) 放射線の安全利用の基本
 - 2) 放射線の安全利用（診療科共通次項）
診療ガイドラインに準じたQ&A方式とし推奨度がわかる文章にする。
図、写真を多用する
医療スタッフが違和感を持たないように考慮して専門用語を記載する。
 - 3) 歯科領域の放射線防護
2. 資料作成
 - IVR患者の皮膚障害に関するガイドラインと対応（要改訂）

(2) 水晶体の線量管理に関するアンケート調査

ガイドラインに記載する、従事者の水晶体等価線量管理方法の検討資料とする目的で、令和元年度医療放射線安全管理講習会（令和元年（2019年）10月京都）の参加者330名を対象とした、質問紙を用いた無記名のアンケート調査（添付3）を実施した。講習会では水晶体の等価線量限度の改正の経緯と医療領域の課題がテーマであった。講習会参加者は保健所職員等の行政担当者、医師、診療放射線技師等の施設の放射線管理実務担当者である。質問は一項目のみで、不均等被ばくの状況で防護メガネの内側に専用の線量計を装着する眼の近傍の計測が必要となる水晶体の等価線量の値として、1. 5 mSv を超えた場合、2. 10 mSv を超えた場合、3. 20 mSv を超えた場合、4. その他のいずれが良いかを訊ねた。

(3) ガイドラインの取りまとめと配布

3回のWG会議と2回の全体会議及び医療放射線の安全利用フォーラムの総合討論で議論を重ねガイドラインを取りまとめた。その後、各参加学会の理事会における承認を経て完成したものを、日本語のデジタルブックと英語のPDF版として関係学会のウェブサイト等を通して会員へ周知する。

3.3 研究結果

3.3.1 ガイドライン参加学会

ガイドラインの策定には、20の学協会が参加した（表3-2）。日本保健物理学会がオブザーバーとして参加し個人線量測定機関2社も参加した。

表3-2 ガイドライン参加学協会正式名称

公益社団法人	日本医学放射線学会
一般社団法人	血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構
公益財団法人	日本医学物理士会
一般社団法人	日本インターベンショナルラジオロジー学会
一般社団法人	日本救急医学会
一般社団法人	日本呼吸器学会
公益財団法人	日本産業衛生学会
特定非営利活動法人	日本歯科放射線学会
一般財団法人	日本消化器病学会
公益社団法人	日本小児科学会
一般社団法人	日本小児外科学会
一般社団法人	日本小児放射線学会
公益社団法人	日本診療放射線技師会
一般社団法人	日本循環器学会
公益社団法人	日本整形外科学会
一般社団法人	日本脳神経外科学会
特定非営利活動法人	日本脳神経血管内治療学会
一般社団法人	日本放射線看護学会
公益社団法人	日本放射線技術学会
	医療放射線防護連絡協議会

3.3.2 水晶体の線量管理に関するアンケート調査結果

131名から回答を得た。結果は図3-1に示すように、不均等被ばくでの水晶体の等価線量の値が20 mSvを超えた時点で防護メガネの内側に線量計の装着を義務付け、眼の近傍で測定する管理を希望する意見が最も多かった。

「その他」には自由記載の欄を設けた。多くの者の記載は無かったが、「IVRの専門医師には初めから着用を義務づけるべき」との職種による対応を求める意見を認めた。

3.3.3 ガイドラインの取りまとめ過程

ガイドラインの取りまとめを表3-3に示す検討会議等で実施した。

ガイドライン班会議では、一人の医師に IVR が集中することが、被ばく量を増加させているかについても意見交換を行った。平成 29 年度及び 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業成果報告書^{2,3)}の循環器グループの結果には月 50 件以上複雑な手技に対応するいわゆるスーパードクター2名も含まれていたが、十分な防護策と放射線防護の知識を持つことで新しい水晶体の等価線量以下で診療を行っていたことを、分担研究者から紹介した。さらに、同報告書には消化器内科医師の一部が当初は年間 20 mSv 以上となる可能性が指摘されたが、適切な教育受講後は被ばくを低減できたことも記載したことを紹介した。その結果、本ガイドラインに記載する事項を遵守することで、スーパードクターを含む全医療スタッフの良好な放射線安全管理は可能となるとの意見で一致した。ガイドライン発表後は医療放射線防護連絡協議会が事務局となりガイドライン作成班員のネットワークを利用して、適切な管理が各学会内で実施されているかを調査し不適切な事例には助言を行うこととした。

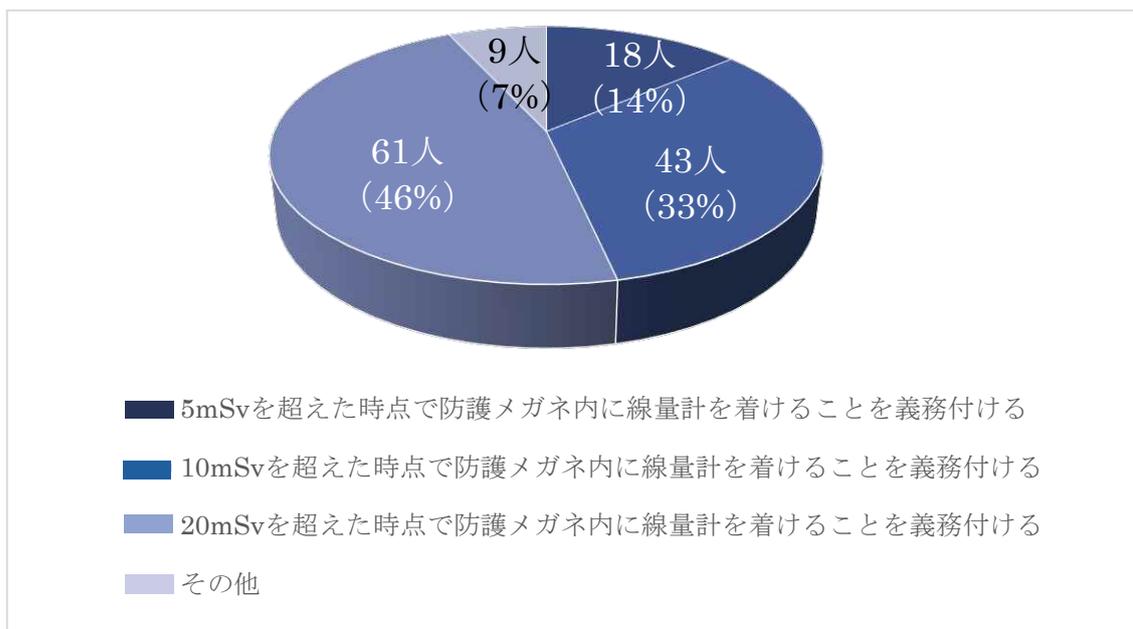


図 3-1 水晶体の線量管理に関するアンケート調査結果

表 3-3 検討会議等一覧

開催日	会議種別	検討事項
令和元年 6 月 11 日	第 1 回 WG	事前配布のガイドライン案の作成
7 月 13 日	第 2 回 WG	ガイドライン案への各委員の意見を反映した修正作業
7 月 28 日	第 1 回班会議	修正案について議論、各自理事会提出版を作成
令和 2 年 2 月 17 日	第 3 回 WG	各理事会からの意見に基づいた修正作業
2 月 23 日	フォーラム	ガイドライン紹介と意見聴取
2 月 23 日	第 2 回班会議	各理事会承認時の修正意見を取り入れた最終版確定 (レイアウト修正へ)

3.3.4 ガイドライン

ガイドラインを添付 2 に示す。本ガイドラインは各学会の理事会で承認されている。

関係学会には完成版を（本ガイドラインは電子版のみ）を配布し、それぞれの学会員に周知を図る。また現在改訂中の循環器学会のガイドラインには、本研究の研究協力者が参画しており、本ガイドラインの引用が決定している。

3.4 結論

水晶体の等価線量限度の改正に対応する目的で、20 の学協会の参加と日本保健物理学会のオブザーバー参加、さらに個人線量計測機関の協力を得て、診療科横断的な、医療スタッフの安全に特化したガイドラインを作成した。これは我が国で初の試みである。特に看護の分野からの参加を得たことはチーム医療に関与する全ての医療スタッフを対象とした実行性のあるガイドラインになると期待できる。また、ガイドラインを作成する過程で放射線を利用する診療科のネットワークも形成することができた。患者のためにより良い放射線診療を提供するという共通の目的を持つ、この医師の集団が、今後それぞれの得意分野を生かして協力を進めることは、従事者の安全を担保しつつ、さらに放射線診療を発展させる原動力となると期待できる。

参考文献

- 1) 放射線審議会，眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について（意見具申），平成 30 年 3 月 2 日付け原規放発第 18030211 号 (2018).
- 2) 横山須美，辻村憲雄，大野和子，藤淵俊王，平成 29 年度安全規制研究戦略的推進事業成果報告書 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～ (2018).
- 3) 横山須美，辻村憲雄，大野和子，藤淵俊王，平成 30 年度安全規制研究戦略的推進事業成果報告書 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～ (2019).

4. 最後に

本研究では、放射線業務従事者の眼の水晶体の等価線量限度のわが国の法令取入れを踏まえ、計画被ばく状況における職業人を対象とした「眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン」と「医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン—水晶体の被ばく管理を中心に—」の2つのガイドラインについて検討した。

これらのガイドラインは、事業者や放射線業務従事者が実際にどのような線量管理や放射線防護の最適化を行えばよいのかを考える上で大いに役立つものと考えられる。今後、関連学会等においてガイドラインを作成するための重要な資料となるだろう。また、放射線教育の場でもこれらを活用することで、放射線防護文化の醸成にもつながるものと考えられる。

本研究で示したガイドラインは、現時点における最新の知見等を踏まえて作成したものである。今後、法令が施行され、実際に運用が開始されると、新たな課題が生まれるだろう。技術の進展、新たな知見等が得られた場合やさらなる法令改正等があれば、適宜ガイドラインを見直す必要がある。

また放射線防護文化の醸成には時間がかかる。長期的な視点に立ち、国内国外の動向に注視して情報の収集に努めるとともに、関連研究を継続し、今後、新たに直面する課題解決に向けた取り組みが必要である。

添付 1

眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン

眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン目次

1. 適用の範囲.....	1
2. 線量モニタリングの考え方.....	1
2.1 眼の水晶体の等価線量をモニタリングする部位.....	1
2.2 眼の水晶体の等価線量のモニタリングに使用する実用量.....	2
解説 眼の水晶体の線量モニタリング.....	4
例題 眼の水晶体の線量モニタリング.....	35

1. 適用の範囲

このガイドラインは、光子、電子（700 keV 以上）、中性子による計画被ばく状況における放射線業務従事者の眼の水晶体の等価線量のモニタリングに適用する。

2. 線量モニタリングの考え方

事業所の線量管理に責任を有する者（事業者、放射線取扱主任者等）は、眼の水晶体の等価線量限度の遵守及び防護の最適化を実施するために、以下に示す考え方に従い、眼の水晶体の等価線量をモニタリングする部位及びモニタリングに使用する実用量を決定する（図1参照）。

また、眼の近傍で線量を測定することを開始すべきかを判断する線量レベル（管理基準）及び線量の記録を開始するレベル（記録レベル）は、作業環境に応じて設定する。

2.1 眼の水晶体の等価線量をモニタリングする部位

(1) 体幹部均等被ばくの場合

① 眼の水晶体の等価線量が、管理基準に近づく又は超えるおそれのない場合

体幹部基本部位^{注1)}に装着した個人線量計で眼の水晶体の等価線量を算定する。

② 眼の水晶体の等価線量が、管理基準に近づく又は超えるおそれのある場合

体幹部基本部位での測定に追加して、眼の近傍に装着した個人線量計で眼の水晶体の等価線量を算定する。

(2) 体幹部不均等被ばくの場合^{注2)}

① 体幹部不均等被ばく管理時の個人線量計装着部位で測定し、その結果で算定した眼の水晶体の等価線量が管理基準に近づく又は超えるおそれのない場合

通常、体幹部不均等被ばく管理時の個人線量計装着部位（体幹部基本部位＋線量が最大となる体幹部）で測定し、眼に近い部位に装着した個人線量計で眼の水晶体の等価線量を算定する。

② 体幹部不均等被ばく管理時の個人線量計装着部位で測定し、その結果で算定した眼の水晶体の等価線量が管理基準に近づく又は超えるおそれのある場合

通常、体幹部不均等被ばく管理時の個人線量計装着部位（体幹部基本部位＋線量が最大となる体幹部）の測定に追加して、眼の近傍に装着した個人線量計で眼の水晶体の等価線量を算定する。

(3) 体幹部の被ばくが均等・不均等に関わらず、より正確に眼の水晶体の等価線量を算定する場合について、眼の近傍での線量を追加で測定することを妨げない。防護眼鏡を装着した場合に防護眼鏡の内側に個人線量計を装着してより正確に眼の水晶体の線量を算定する場合などが該当する。

- (4) 中性子については、通常、均等被ばくとして扱う。ただし、事業所の線量管理に責任を有する者の判断で、中性子について不均等被ばく管理が必要となった場合は、その被ばくの状況に応じて、眼の水晶体の等価線量を算定できるような適切な個人線量計を選択する。

2.2 眼の水晶体の等価線量のモニタリングに使用する実用量

本ガイドラインで取り扱う実用量は個人線量当量である。眼の水晶体の等価線量の算定に用いる実用量は3 mm 線量当量である。しかしながら以下の①及び②の場合を除いて、眼の水晶体の等価線量を著しく過小に算定しない場合には、従来用いられてきた1 cm 線量当量又は70 μm 線量当量のいずれかの値の高い方を眼の水晶体の等価線量としてもよい。

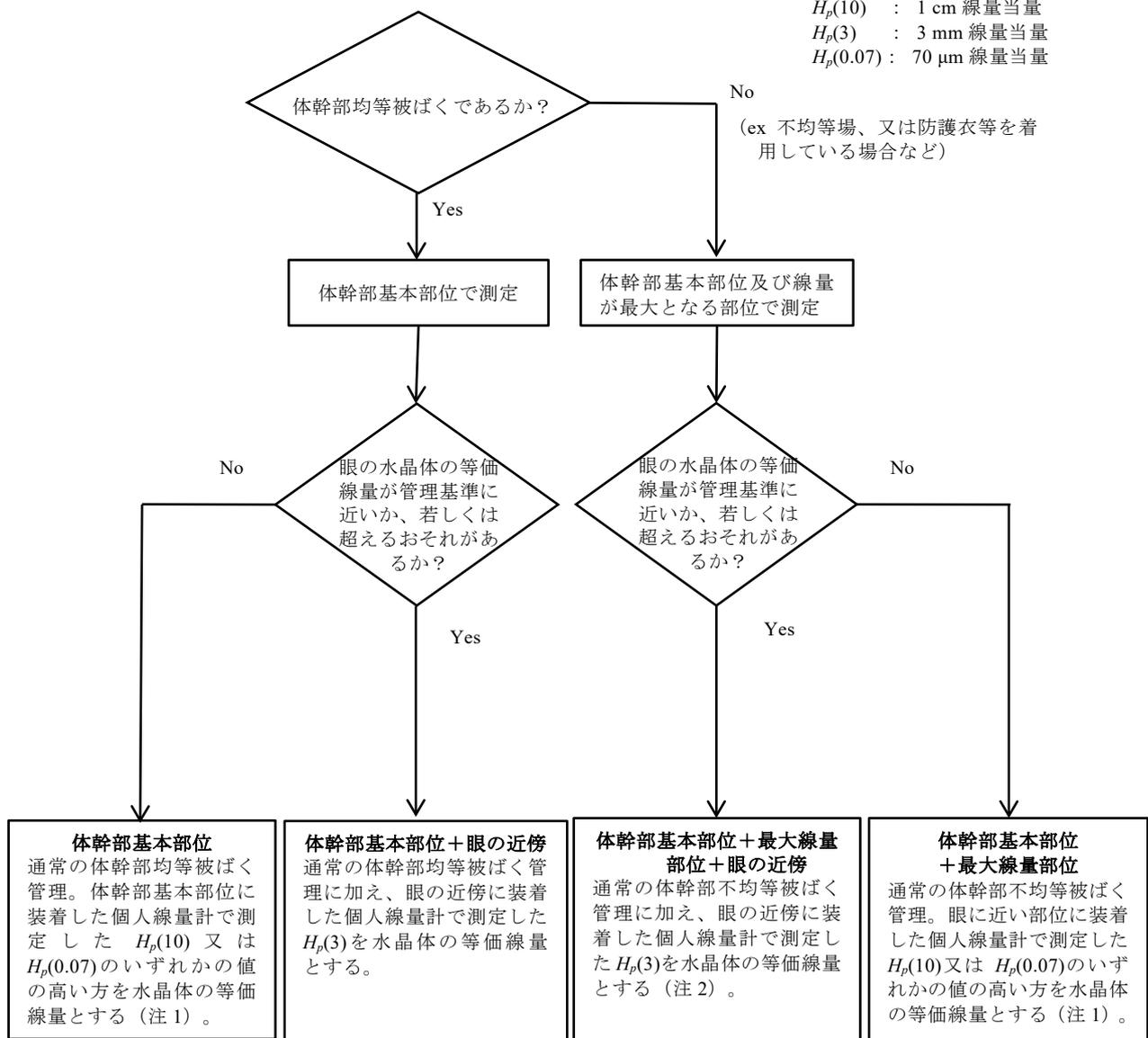
- ① 眼の水晶体の等価線量が管理基準に近づく、又は超えるおそれがある場合
- ② 上述 ① 以外で、より正確に眼の水晶体の等価線量を算定する場合

なお、中性子による被ばくの場合は、1 cm 線量当量を眼の水晶体の等価線量とする。

注1) 個人線量計を装着する「体幹部基本部位」とは、男性（妊娠する可能性がないと診断された女性を含む）の場合は胸部、女性（妊娠する可能性がないと診断された女性を除く）の場合は腹部のことをいう。

注2) 場の均等、不均等に関わらず、防護衣等を体幹部基本部位に着用している場合もこれに相当する。

$H_p(10)$: 1 cm 線量当量
 $H_p(3)$: 3 mm 線量当量
 $H_p(0.07)$: 70 μm 線量当量



(注1) $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ に追加して $H_p(3)$ を測定した場合は、 $H_p(3)$ を眼の水晶体の等価線量とする。

(注2) 眼の水晶体の近傍に装着する個人線量計は原則 $H_p(3)$ を測定するものとする。ただし、眼の近傍が体幹部において最大線量部位になる場合は、眼の水晶体の等価線量を著しく過小に算定しない場合に限り、眼の近傍に装着する個人線量計は $H_p(10)$ 及び $H_p(0.07)$ を測定するもので代用してもよい。

- ※ 体幹部の被ばくが均等・不均等に関わらず、眼の水晶体の等価線量を算定するための体幹部位での線量が、眼の近傍での線量と著しく異なることが想定される場合は眼の近傍での線量を追加で測定することを妨げない。これは、防護眼鏡を装着した場合に防護眼鏡の内側に個人線量計を装着してより正確に眼の水晶体の等価線量を算定する場合などが該当する。
- ※ 中性子の場合は、通常、体幹部基本部位に装着した個人線量計で測定した $H_p(10)$ を、眼の水晶体の等価線量とする。
- ※ 「体幹部基本部位」とは、男性（妊娠する可能性がないと診断された女性を含む）の場合は胸部、女性（妊娠する可能性がないと診断された女性を除く）の場合は腹部のことをいう。

図1 眼の水晶体の等価線量の算定方法を決定するためのフロー図

【解説】眼の水晶体の線量モニタリング

眼の水晶体の被ばく管理は、眼の水晶体の線量モニタリングと眼の水晶体の防護の最適化（被ばく低減等）から構成される。本解説では、計画被ばく状況における眼の水晶体の線量モニタリングのガイドラインの「適用の範囲」及び「線量モニタリングの考え方」について解説する（個別の具体的な事例等については【例題】を参照）。

【解説】項目

1. 目的
2. 適用範囲
3. 関連法規等
 - (1) 関係法令、規定類等
 - (2) 任意規格
 - (3) その他
4. 用語
5. 眼の水晶体の線量モニタリングにおける算定の方法
 - (1) 基本的な考え方
 - (2) 適用する放射線の種類
 - (3) 眼の近傍で直接測定することが望ましい線量レベル（管理基準）
 - (4) 眼の水晶体の等価線量の記録レベル
 - (5) 眼の水晶体の等価線量を算定するための測定部位
 - 1) 個人モニタリングに係る測定部位の考え方
 - 2) 国内法令での不均等被ばく管理における線量の測定
 - 3) 体幹部不均等被ばく状況の判断
 - 4) 眼の水晶体の線量モニタリングとしての測定部位
 - (6) 眼の水晶体の等価線量の算定に使用する実用量
 - 1) 光子
 - 2) 電子
 - 3) 中性子
 - (7) 眼の水晶体の等価線量が管理基準に近いか超えるおそれがあることの判断方法

参考文献

- 添付資料 1 眼の水晶体の等価線量限度の引き下げに係る国内並びに国際機関の動向
添付資料 2 IAEA での眼の水晶体の等価線量に係る線量モニタリングの考え方
添付資料 3 従来の眼の水晶体の等価線量に係る線量モニタリング方法

1. 目的

本ガイドラインは、眼の水晶体の線量限度に関する法令改正にともない、事業者が法令を遵守し、円滑に眼の水晶体の線量モニタリングが実施できるようにすることを目的として、「被ばく線量の測定・評価マニュアル」¹⁾の眼の水晶体の線量モニタリングに関する部分を補うものとする。

検討にあたっては、放射線審議会の「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について（意見具申）」²⁾（以下、「意見具申」という。）で示された考え方を踏まえ、放射線安全規制研究戦略的推進事業の成果³⁻⁵⁾等を利用した。また、一般社団法人 日本保健物理学会 放射線防護標準化委員会（以下、「保物標準化委員会」という。）から学術的な立場からの意見を得た。

眼の水晶体の等価線量については、線量限度等に関する法令を遵守するだけでなく、防護の最適化を考慮しなければならない。防護の最適化を実施するには、事業者がリーダーシップを発揮し、放射線防護の専門家（放射線取扱主任者等）の指導のもとに、防護の最適化を目指す作業環境を整備するとともに、事業所で作業する放射線業務従事者が作業手順等確立して、それらの継続的な改善を図らなければならない（【例題5】参照）。そのためには、労働安全衛生マネジメントシステム⁶⁾の考え方を応用することが有効である。

また、ICRP Publ.75⁷⁾の（167）項によると、線量モニタリングは、放射線業務従事者に対して安心感を与えるのに役立つとともに、防護の最適化プログラムを検討する際に役立つデータを提供することもあるとされている。このため、事業所の線量管理に責任を有する者（事業者、放射線取扱主任者等）が、放射線業務従事者に対して眼の水晶体の線量モニタリング及び線量の算定を円滑に実施できるようにすることは重要である。本ガイドラインでは、その方法を決定するための指針を示す。

意見具申²⁾には、事業者による最適化の取り組みが円滑に進むように、関連学会等によってガイドラインが策定されることを期待すると、記述されている。これを受けて、保物標準化委員会では、眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン策定を行うこととなった。なお、意見具申²⁾に至る経緯については添付資料1に示す。

2. 適用範囲

本ガイドラインは、事業所において、ICRP Publ.103⁸⁾に記載された計画被ばく状況下の放射線業務従事者に対する個人の線量モニタリングに適用する。緊急時被ばく状況や、現存被ばく状況での線量モニタリングについては、本ガイドラインの適用範囲外として、これらの状況下で被ばく線量管理に責任を有する者等が、その状況に応じた線量モニタリングにおける測定の方法を別途決定するものとする。ただし、各作業環境における眼の水晶

体の等価線量を算定する際に考慮すべき電子、光子及び中性子のエネルギーや測定すべき実用量の考え方は本ガイドラインを参考にしてよい。

3. 関連法規等

本ガイドラインに関連する法令、規格、標準等を以下に示す。これらの法規等の改正や変更等の動向に併せて、必要に応じて本ガイドラインを見直していくことがある。

(1) 関係法令、規定類等

- ・ 人事院規則 10-5（職員の放射線障害の防止）
- ・ 医療法施行規則
- ・ 臨床検査技師等に関する法律施行規則
- ・ 放射性物質の数量等に関する基準（告示）
- ・ 電離放射線障害防止規則
- ・ 獣医療法施行規則
- ・ 獣医療法施行規則に基づき農林水産大臣が定める方法を定める件（告示）
- ・ 鉱山保安法施行規則に基づき経済産業大臣が定める基準等（告示）
- ・ 船員電離放射線障害防止規則
- ・ 放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則
- ・ 放射線を放出する同位元素の数量等を定める件（告示）
- ・ 核原料物質又は核燃料物質の精錬の事業に関する規則等の規定に基づく線量限度等を定める告示（告示）
- ・ 核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示（告示）
- ・ 東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関して必要な事項を定める告示（告示）
- ・ 船舶に設置する原子炉（研究開発段階にあるものを除く。）の設置、運転等に関する規則の規定に基づく線量限度等を定める告示（告示）
- ・ 放射線審議会基本部会，外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針，平成 11 年 4 月
- ・ 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について（意見具申）（原規放発第 18030211 号），平成 30 年 3 月 2 日

(2) 任意規格

1) 校正関連

- JIS Z 4511:2018, X線及び γ 線用線量(率)測定器の校正方法
- ISO 4037-1:2019, Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 1: Radiation characteristics and production methods
- ISO 4037-2:2019, Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1.3 MeV and 4 MeV to 9 MeV
- ISO 4037-3:2019, Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence
- ISO 4037-4:2019, Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy — Part 4: Calibration of area and personal dosimeters in low energy X reference radiation fields
- JIS Z 4514:2010, β 線組織吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法
- ISO 6980-1:2006, Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 1: Methods of production
- ISO 6980-2:2004, Nuclear energy – Reference beta-particle radiation – Part 2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field
- ISO 6980-3:2006(R2015), Nuclear energy - reference beta -particle radiation - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle incidence
- JIS Z 4521:2006, 中性子線量当量(率)計の校正方法
- ISO 8529-1:2001, Reference neutron radiations — Part 1: Characteristics and methods of production
- ISO 8529-2:2000, Reference neutron radiations — Part 2: Calibration fundamentals of radiation protection devices related to the basic quantities characterizing the radiation field
- ISO 8529-3:1998, Reference neutron radiations — Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and determination of response as a function of energy and angle of incidence

- ISO 29661:2012, Reference radiation fields for radiation protection — Definitions and fundamental concepts
- ISO 29661:2012/AMD1:2015, Reference radiation fields for radiation protection — Definitions and fundamental concepts — Amendment 1: Reference point of personal dosimeters
- JIS Z 4331:2005, 個人線量計校正用ファントム

2) 受動形個人線量計

- JIS Z 4345:2017, X・ γ 線及び β 線用受動形個人線量計測装置並びに環境線量計測装置
- IEC 62387:2020, Radiation protection instrumentation – Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation
- JIS Z 4416:2005, 中性子用固体飛跡個人線量計
- ISO 21909-1:2015, Passive neutron dosimetry systems — Part 1: Performance and test requirements for personal dosimetry

3) 能動形個人線量計

- IEC 61526:2010, Radiation protection instrumentation - Measurement of personal dose equivalents $H_p(10)$ and $H_p(0,07)$ for X, gamma, neutron and beta radiations - Direct reading personal dose equivalent meters
- JIS Z 4312:2013, X線、 γ 線、 β 線及び中性子用電子式個人線量（率）計

(3) その他

- 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)
- JEAG 4610:2015, 個人線量モニタリング指針 第5版, 日本電気協会, 2016年1月

4. 用語

本ガイドラインに関係する主な専門用語及び略語について、以下に示す。

計画被ばく状況

ICRP Publ.10³⁸⁾では被ばくの状態を、計画被ばく状況、緊急被ばく状況及び現存被ばく状況の3種類に分類した。そのうち計画被ばく状況とは、線源の意図的な導入とその運用を伴う線源の計画的操業に係る状況のことを示す。なお、線源の計画的操業に

は通常の操業だけでなく、廃止措置、放射性廃棄物管理と処分、及び以前の占有した土地や施設の復旧も含まれる。また、計画被ばく状況では、起こることが確実な被ばく（通常被ばく）だけでなく、確実に生じるとは予測できないが、線源の事故又は機器の故障及び操作上の過失を含む確率的性質を持つ事象により生じるおそれのある被ばく（潜在被ばく）も考慮される。さらに、計画被ばく状況には、職業被ばく、公衆被ばく、並びに介護者や介助者を含めた患者の医療被ばくが含まれる。（ICRP Publ.103⁸⁾日本語訳参照）

等価線量

人体の各組織、臓器が放射線を被ばくするとき、その組織に対する生物学的効果を勘案した放射線の線量を等価線量という。組織・臓器の平均吸収線量を基にして、線質が異なった放射線の吸収線量に、対応する放射線加重係数を乗じて求める線量である。国内法令は、平成12年にICRPの1990年勧告（ICRP Publ.60⁹⁾）の取り入れにより、「組織線量当量」に代わって「等価線量」に改正された。等価線量の単位はJkg-1であるが、通常は特別の名称としてシーベルト（Sv）が使用される。（「原子力百科事典 ATOMICA」及びICRP Publ.103⁸⁾（日本語訳）参照）

実用量

外部線量限度等の防護基準に対応する防護量（等価線量及び実効線量）は直接測定できない線量であるため、その評価のために導入された線量概念であり、ほとんどの照射条件下で防護量の保守的な推定値を与える。外部被ばくにおいては、場のモニタリングに用いる周辺線量当量（ $H^*(d)$ ）、方向性線量当量（ $H'(d,\alpha)$ ）と個人モニタリングに用いる個人線量当量（ $H_p(d)$ ）がある。周辺線量当量と方向性線量当量はサーベイメータ等で測定、評価され、個人線量当量は個人線量計などを用いて測定、評価される。 d は実用量を求めるのに使用するファントム中の点の表面からの深さをmm単位で表しており、実効線量に対応する実用量は10mm（1cm）、眼の水晶体等価線量に対応する実用量は3mm、皮膚等の等価線量に対応する実用量は0.07mm（70 μ m）を用いている。わが国では1cm線量当量、3mm線量当量、70 μ m線量当量が法令用語としてあるが、場のモニタリングと個人モニタリングの両者に使用される。

体幹部均等被ばく/不均等被ばく

体幹部を頭部及び頸部、胸部及び上腕部並びに腹部及び大腿部に大きく分割したとき、それぞれの部位の被ばく線量に差異があると特定されない場合を「体幹部均等被ばく」、特定される場合を「体幹部不均等被ばく」と区分する。体幹部不均等被ばくの場合、通常の個人線量計を装着する胸部（男性及び妊娠する可能性がないと診断された女性）又は腹部（妊娠する可能性がないと診断された女性を除く女性）以外に最も被ばくする部位にも個人線量計を装着する必要がある。（「被ばく線量の測定・評価マニュアル」¹⁾参照）

個人線量計を装着する体幹部基本部位

男性（妊娠する可能性がないと診断された女性を含む）の場合は胸部、女性（妊娠する可能性がないと診断された女性を除く女性）の場合は腹部のことをいう。

線量モニタリング

放射線防護体系に関連した測定、並びに被ばくの評価と管理における測定値の解釈のことであるが、測定値の解釈による防護の最適化を支援することもある。（ICRP Publ.75⁷⁾ 参照）

放射線審議会

「放射線障害防止の技術的基準に関する法律」（昭和 33 年法律第 162 号）に基づき、放射線障害の防止に関する技術的基準に斉一を図ることを目的として、文部科学省の所管を経て 2012 年 9 月より原子力規制委員会に設置されている諮問機関である。関係行政機関の長は、放射線障害の防止に関する技術基準を定めるとき、放射線審議会に諮問しなければならない。また、放射線審議会は必要に応じ、関係行政機関の長に対し意見を述べる（『意見具申』）ことができる。（原子力百科事典「ATOMICA」参照）

ICRP, International Commission on Radiological Protection

国際放射線防護委員会。設立は 1928 年。専門家の立場から放射線防護に関する勧告を行う国際的学術組織であり、現在、主委員会と 4 つの専門委員会が設置されている。ICRP はイギリスの非営利団体（NPO）として公認の団体であり、現在の科学事務局の所在地はカナダのオタワに設けられている。

IAEA, International Atomic Energy Agency

国際原子力機関。原子力の平和利用について科学的、技術的協力を進める世界の中心的フォーラムであり、IAEA は 1957 年、国連傘下の自治機関として設置された。本部はオーストリアのウィーンに置かれている。

IRPA, International Radiation Protection Association

国際放射線防護学会。設立は 1965 年で、各国の放射線防護、保健物理学会に所属する放射線防護関連の研究や業務をしている専門家が容易にコミュニケーションできる場を、同学会の関連する国際会議を通じて提供する国際学会である。

主な加盟学会：日本保健物理学会、米国保健物理学会等、66 の国の 52 の関連学会（2020 年 1 月現在）。

ISO, International Organization for Standardization

国際標準化機構。設立は 1947 年。各国の国家標準化団体で構成される非政府組織である。162 の標準化団体で構成される。国際規格の世界的相互扶助を目的とする独立

組織で、国家間に共通な標準規格を提供し、世界貿易を促進している。眼の水晶体の等価線量算定のために用いる Hp(3)及び H'(3)の換算係数等も定めている。

ICRU, International Commission on Radiation Units and Measurement

国際放射線単位測定委員会。設立は 1925 年である。ICRU は設立当初から非営利組織 (NPO) で非政府組織 (NGO) であり、世界の物理学者、科学者、技術者等がボランティアで参加している。事業目的は、(1)放射線と放射能の単位、(2)放射線医学的診断、放射線治療、放射線生物学、核医学、放射線防護、産業・環境活動等における放射線と放射能の計測と手順、及び(3)この手順の決定に必要な物理的データの検討と適切な勧告、である。(原子力百科事典「ATOMICA」参照)

IEC, International Electrotechnical Commission

国際電気標準会議。設立は 1906 年。電気、電子、及びこれらに関連した技術の標準化について扱う国際的な団体で、2019 年現在において 86 か国の会員からなる。

JIS, Japanese Industrial Standards

日本産業規格。設立は 1949 年で、わが国の産業標準化の促進を目的とする産業標準化法に基づき制定される任意の国家規格のこと。1995 年の WTO (世界貿易機関) /TBT 協定 (貿易の技術的障害に関する協定) 発効に伴い、国際規格との整合化が行われている。日本産業標準調査会によって JIS の制定、改正等に関する審議が行われている。

5. 眼の水晶体の線量モニタリングにおける算定の方法

眼の水晶体の等価線量の限度の変更に関する法令等の改正に伴う眼の水晶体の等価線量のモニタリングの考え方を以下に示す。なお、これらの考え方を検討するにあたっては、添付資料 2 の IAEA が提示した考え方などを参考にした。

(1) 基本的な考え方

眼の水晶体の線量モニタリングは、改正する前の法令下での方法を踏襲する。すなわち、体幹部基本部位や、不均等被ばく管理が必要な場合に線量が最大になる部位などに装着した個人線量計で測定した実用量による算定を基本とする。より正確に眼の水晶体の等価線量を算定する場合などは、眼の近傍に装着した個人線量計で直接測定した実用量により算定する (これまでの眼の水晶体の線量モニタリングにおける算定の方法は添付資料 3 を参照)。

また、本ガイドラインで規定する線量モニタリングの考え方は、国内の線量測定サービス機関等によって現在供給されている (あるいは今後供給される予定の) 個人線量計の運用形態 (例えば、体幹部に装着する個人線量計は 1 cm 線量当量及び 70 μm 線量当量を測定するもの、眼の近傍に装着する個人線量計は 3 mm 線量当量を測定するために特別の設

計又は校正がなされたもの)を考慮したものである。線量測定サービス機関等から供給される測定内容の動向に併せて、本ガイドラインを見直す。

(2) 適用する放射線の種類

放射線業務従事者が一般的に従事する作業で受ける α 線やその他の線エネルギー付与が高い荷電粒子は、人体組織中での飛程が短いことから、これらの荷電粒子による眼の水晶体への影響を考慮する必要がない。また、700 keV以下の電子も、眼の水晶体へ到達しないことから考慮する必要はない。

したがって、眼の水晶体の線量モニタリングとしては、光子、電子(700 keV以上)及び中性子を対象とする。

(3) 眼の近傍で直接測定することが望ましい線量レベル(管理基準)

ICRP Publ.75⁷⁾の(172)項では、「個人モニタリング」とは作業者が装着した装置による測定と、その測定の解釈を行うこととされている。また、「被ばく線量の測定・評価マニュアル」⁹⁾によれば、個人モニタリングの目的は、

- ① 放射線業務従事者の被ばくが線量限度を超えていないことの確認
- ② 線量限度に近いか、それを超えている場合は、対策の発動
- ③ 個人被ばく線量の解析に基づく、作業環境の管理状況の把握と、必要ならば、施設又は作業方法の改善

となっている。これらの目的には、眼の水晶体の等価線量のモニタリングを行うために、個人線量計を眼の近傍に装着することに関する直接の言及はないが、眼の水晶体の等価線量が線量限度に近づくような状況であれば、眼の近傍での実用量の測定が必要になると解釈することができる。このような考え方に従い、事業所の線量管理に責任を有する者が、その事業所の作業環境や作業状況を考慮して、眼の近傍に個人線量計を装着して眼の水晶体の等価線量を算定するための実用量の測定を開始するための線量レベル(管理基準)を設定し(【例題3】参照)、そして、眼の水晶体の等価線量が管理基準に近いか、又は管理基準を超えるおそれがあると判断した場合には、眼の近傍に個人線量計を装着させ、眼の水晶体の等価線量の線量管理として実施する。

なお、事業所の線量管理に責任を有する者は、その事業所の作業場や作業者のモニタリング結果等を反映して、管理基準を必要に応じて見直していくことが望ましい。

(4) 眼の水晶体の等価線量の記録レベル

放射線審議会基本部会の「国際放射線防護委員会(ICRP)2007年勧告(Pub.103の国内制度等への取入れについて—第二次中間報告—(平成23年1月)」¹⁰⁾(以下、「基本部会中間報告」という。)において、

記録レベルは調査レベルと同様に ICRP によって定義され「それを超えたらその結果が記録されるべきであり、それより低い値は無視される」というレベルとして用いられるものである。

と記載されている。

また、ICRP Publ.75⁷⁾の(232)項では、記録レベルについて以下のように記述されている。

委員会は現在、個人モニタリングの記録レベルは、モニタリング期間と、1 mSv を下回らない年実効線量、又は関連する線量限度の約 10% の年等価線量から導かれるべきであると考えられている。・・・

基本部会中間報告¹⁰⁾並びに ICRP Publ.75⁷⁾の考え方に基づけば、眼の水晶体の等価線量限度が 5 年平均で年間 20 mSv (年間最大 50 mSv) であるため、眼の水晶体の等価線量限度の 10% である年間 2 mSv と、個人線量計のモニタリング期間から、記録レベルを導出するが、個人線量計の最低検出レベルを記録レベルとして用いてもよい¹⁾。

(5) 眼の水晶体の等価線量を算定するための測定部位

1) 個人モニタリングに係る測定部位の考え方

放射線業務従事者等に対して、一様に放射線に曝される場合は、体幹部基本部位（胸部、腹部）に装着した 1 個の個人線量計による測定だけで、その者の被ばく線量を代表させてよい。しかし、一様ではなく偏りがある放射線に曝される場合は、体幹部基本部位に装着した個人線量計による線量だけでは、個人被ばく管理のために必要な情報が得られず、被ばく線量を正確に算定できない可能性がある。その場合、線量が最大となる部位が手指などの人体の末端部であれば手指等に、体幹部に防護衣を着用している場合は防護衣の外側の頸部付近等に、個人線量計を追加して測定をしなければならないと法令で定められている。このような被ばく形態を「不均等被ばく」、また、そうした被ばく形態に対応するため複数の個人線量計を用いる被ばく管理を行うことを「不均等被ばく管理」と呼ぶ。

2) 国内法令での不均等被ばく管理における線量の測定

ICRP Publ.75⁷⁾の(210)項には、複雑で不均等な放射線場においては、複数の個人線量計の装着がしばしば必要であろう、と記載されている。国内法令においても、このような ICRP の考え方と同様に、不均等被ばくの場合は必要な部位に追加で個人線量計を装着して測定しなければならないとされている。

不均等被ばくと判断された場合、実効線量を算定するための個人線量計を体幹部基本部位（胸部、腹部）だけでなく、最も多く放射線に曝されるおそれのある部位にも装着

¹⁾ この考え方では、個人線量計の測定期間を 1 ヶ月とすれば、1 ヶ月間の記録レベルは月間 0.17 mSv (≒ 2 mSv/12 ヶ月) 以下と設定される。しかし、ICRP Publ.75⁷⁾の(233)項の記載内容に基づけば、このような記録レベルが用いられることは少なく、実際は個人線量計の最低検出レベルが記録レベルとして用いられている。

することが法令により規定されている。具体的には、男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性については胸部、その他の女性については腹部に個人線量計を装着して線量（実用量）を測定しなければならない。さらに、男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性については、頭・頸部及び腹・大腿部のうち、多く放射線にさらされる箇所に追加で、その他の女性については、頭・頸部及び胸・上腕部のうち、多く放射線にさらされる箇所に追加で個人線量計を装着させなければならない（体幹部不均等被ばく状況）。さらに、頭・頸部、胸・上腕部、腹・大腿部以外の部位が、多くの被ばくを受ける場合は、その最も多く被ばくする部位に個人線量計を装着させなければならない（末端被ばく状況）。

線量（実用量）の測定は、上述した部位に装着した個人線量計により測定しなければならない。ただし、個人線量計による測定が著しく困難な場合は、放射線測定器によって測定した線量当量率を用いて算出する、これも著しく困難な場合は、計算によってその値を求めることができる。なお、この『著しく困難な場合』については、厚生労働省の通達¹¹⁾により、『その放射線に対する放射線測定器がまだ開発されていない場合等』と定義されている（【例題 4】、【例題 16】及び【例題 20】参照）。

3) 体幹部不均等被ばく状況の判断

放射線審議会会長から関係行政機関の長に対して眼の水晶体の等価線量限度を年間 150 mSv から 5 年平均 20 mSv（年間最大 50 mSv）に引き下げるという意見具申²⁾が行われた。この変更は眼の水晶体の線量モニタリングに影響するだけでなく、放射線業務従事者が体幹部不均等被ばくを受けるか否かを判断する条件にも影響を与える。

従前は、頭・頸部が体幹部基本部位に比べて高い不均等被ばくを受ける場合、有意な体幹部不均等被ばくか否かを判断する明確な条件はないが、実効線量に対する眼の水晶体の等価線量の比が、改正する前の法令に定めるそれぞれの線量限度の比（3 倍 = 150/50）を超える場合、体幹部基本部位（胸部等）のほかに、頭・頸部にも個人線量計を装着して、体幹部不均等被ばくの実効線量を評価する根拠として使用されてきた。しかし、眼の水晶体の等価線量限度の引き下げに伴って、頭・頸部が有意な体幹部不均等被ばくを受けると判断する 3 倍という数値をそのまま使用することが困難になる。そのため、体幹部不均等被ばくの考え方について整理し直すことが必要となる。

なお、中性子の場合は、ビーム状の中性子による被ばくがあるような特殊な環境を除けば、通常は、均等被ばくとして取り扱うことで差し支えない。

ICRP の 1977 年勧告（ICRP Publ.26¹²⁾）の国内法令への取入れにより、1989 年の法改正において導入された体幹部不均等被ばくの実務適用にあたっては、次のような考え方が提示された（（財）原子力安全研究協会「国際放射線防護委員会 1977 年勧告の法令取入れについて（法令改正に関する質問に答えて）」（1988 年 3 月）¹³⁾から抜粋）。

問： 体幹部不均等被ばくが新しく規定されるが、常に胸以外もモニタしなければならないのか？

回答： 複数の線量計を着けるかどうかは、不均等の程度と線量当量の大きさの両方に依存する。仮に頭頸部/胸腹部=10 であっても線量当量が限度に比べて非常に小さな値であれば、頭頸部のみに線量計を着け、その指示値を実効線量当量としてもよいだろう²。反対に、頭頸部/胸腹部=2 にすぎなくても、その値が限度に近ければ、複数の線量計を着用せざるを得ないだろう。管理担当者がケースバイケースで判断すべきである。

したがって、体幹部不均等被ばくか否かを判断するためには、この考え方「不均等の程度と線量当量の大きさの両方に依存する」に立ち戻って、これを具体化する必要がある。

一つ目の「不均等の程度」については、身体の体幹部上の異なる位置で測定された線量の相違の程度とし、それら測定値間に有意な違いがあると言えるかどうかは不均等か否かと等価であると解釈できる。例えば、ANSI/HPS N13.41-2011¹⁴⁾ は不均等被ばくの指標として 1.5 という値を示している（【例題 1】参照）。

一方、ICRP Publ.75⁷⁾（及び ICRP Publ.35¹⁵⁾）、IAEA GSG-7¹⁶⁾には不均等被ばくの指標ではなく、線量の許容される不確かさの範囲が示されており、いずれも、個人モニタリングとして許容される不確かさは、1.5～2 程度とされている（【例題 2】参照）。これらの範囲を超える測定値間の相違は、不均等な放射線被ばくをもたらすような要因（例えば、それらの測定位置間における線量（率）勾配）が存在することを意味し、不均等被ばくであると解釈することが望ましい。こうした場合は、体幹部基本部位（胸腹部）に装着する個人線量計だけではなく、別の適切な位置に個人線量計を追加して装着することが求められる。なお、体幹部基本部位（胸腹部）が受ける線量が最大の場合は、その測定値だけから、実効線量及び眼の水晶体の等価線量を保守的に算定してもよい。なお、体幹部上の異なる位置での線量の相違の程度については、作業前の作業場の空間線量率のサーベイ結果や過去の経験等から判断する。

線量の許容される不確かさを超えるような線量の相違をもたらす要因には、作業場の線量（率）の勾配だけでなく、防護衣等の使用によるものも挙げられる。防護衣等の使用による線量の相違については、その使用の有無により、そのまま不均等被ばくをもたらすか否かの判断をしてもよい。

二つ目の「線量（当量）の大きさ」については、高線量域や低線量域などで分けて考えるとよい。高線量域、すなわち線量限度に近い又は線量限度と同じ程度の線量域では、不均等の程度に関わらず、より正確に線量を測定、評価できるような個人線量計の使用上の工夫（複数装着及び装着部位の検討）が望ましい。

反対に、低線量域では、そうした工夫をする必要性は薄い。予想される線量が、いわゆる記録レベル程度を下回るような作業環境であれば、体幹部不均等被ばく管理として

² これは、ICRP Publ.26（1977年勧告）取入れにあたっての質疑を原文（文献13）からそのまま引用したものであるため、「線量計を頭部のみに着け」という記載は、法令とは整合が取れていないことに注意が必要である。

複数の個人線量計を装着することが必須ではなく、また、追加して眼の近傍に個人線量計を装着して眼の水晶体の等価線量を算定することも必須ではない。

なお、防護衣等を使用する場合、防護衣等の外側で記録レベルを超える線量になることが想定される場合には、防護衣等の内外にそれぞれ 1 個ずつ個人線量計を装着する。

このように、体幹部不均等被ばく管理が必要かどうかは、作業環境等の状況を各種実測値等により把握し、線量管理に責任を有する者がケースバイケースで判断する（【例題 1】参照）。また、体幹部不均等被ばく状況の判断については、実効線量の線量管理としての視点から行わなければならない、実効線量を算定する上での影響を考慮することが重要である。

4) 眼の水晶体の線量モニタリングとしての測定部位

体幹部均等被ばく状況で、かつ、眼の水晶体の等価線量が管理基準に対して十分低ければ、これまでどおり、体幹部基本部位（胸部又は腹部）に装着した個人線量計により測定した実用量で眼の水晶体の等価線量を算定してもよい。ただし、体幹部均等被ばくでも管理基準に近づく又は超えるおそれがある場合には、図 E.1 に示す眼の近傍に追加で個人線量計を装着して実用量を測定し、眼の水晶体の等価線量限度を超えないことを確認する。

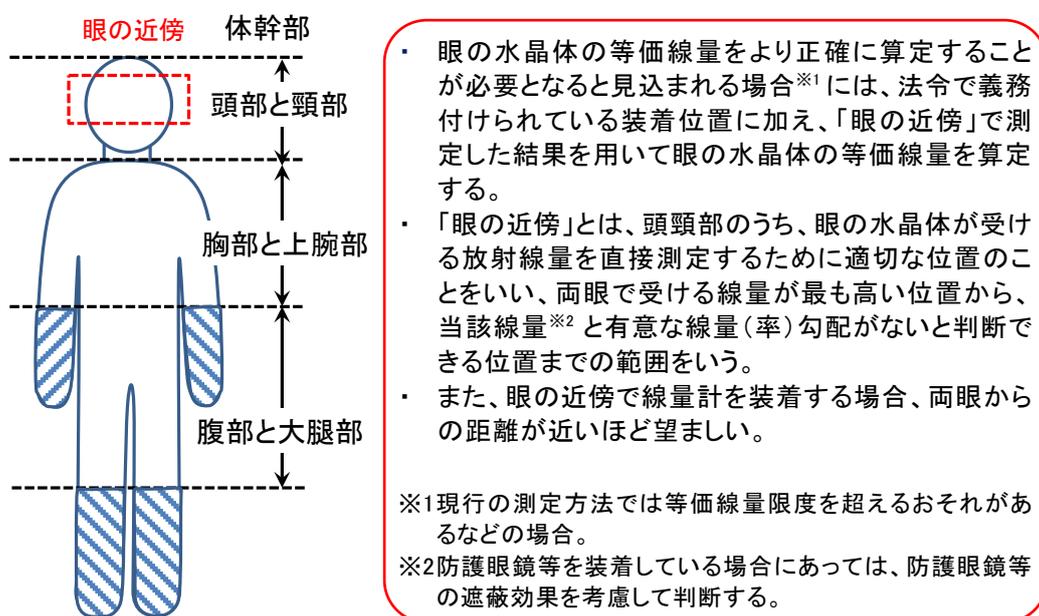


図 E.1 眼の近傍の位置

(放射線安全規制研究戦略的推進事業成果報告書⁴⁾より)

体幹部不均等被ばく状況でも、眼の水晶体の等価線量が管理基準に近づくおそれがない場合、又は、超えるおそれがない場合には、眼の近傍に個人線量計を装着せずに、体幹部不均等被ばくでの実効線量の評価のために眼に一番近い部位に追加で装着した個

人線量計で測定した実用量から眼の水晶体の等価線量を算定してもよい。ただし、体幹部不均等被ばくで、眼の水晶体の等価線量が管理基準に近づく、又は超えるおそれがある場合には、図 E.1 に示す眼の近傍に追加で個人線量計を装着して実用量を測定し、眼の水晶体の等価線量限度を超えないことを確認する。

なお、体幹部均等・不均等被ばくに関わらず、例えば、防護眼鏡を装着した場合などに、眼の水晶体の等価線量をより正確に測定するために、防護眼鏡の内側に個人線量計を装着してもよい。

放射線審議会でも検討されたとおり、図 E.1 に示すように「眼の近傍」とは頭・頸部のうち、眼の水晶体が受ける放射線量を直接測定するための適切な位置のことをいい、両眼で受ける線量を最も高く評価する位置から、当該線量と有意な線量（率）勾配がないと判断できる位置までの範囲のことである。カナダのガイドライン¹⁷⁾では、最も高い線量を受ける位置としているが、左眼の左側、右眼の右側、額の中央部が装着部位の候補として例示されている。オランダのガイドライン¹⁸⁾では、最も被ばくする眼に可能な限り近い、線源に向いた皮膚表面に装着することを推奨しており、いくつかの研究の結果から襟部への装着では、適切ではない場合もあることが示唆されている。わが国でも同様に、眼の水晶体の放射線防護検討部会において、インターベンショナルラジオロジー等の医療現場において、術者の頸部中心に装着した線量計で測定した実用量で眼の水晶体の等価線量を算定すると過小になるため、装着位置については配慮が必要との指摘があった¹⁹⁾。スウェーデンの原子力施設ではヘッドバンド型の個人線量計を用いて、額の中央部で試験的に測定したパイロットスタディを実施している^{3),20)}。中国においても、原子力発電所の作業従事者の眼の横に個人線量計を装着したパイロット試験の実施についての報告がある²¹⁾。

なお、ここでいう体幹部とは、胸部、腹部だけでなく、頭部、頸部、上腕部、大腿部も含まれる。体幹部均等被ばくの場合、個人線量計は体幹部基本部位（男性は胸部、女性は腹部）に装着する。体幹部不均等被ばくの場合、体幹部基本部位だけでなく、もっとも被ばくを受ける部位に装着するため、頭・頸部の被ばくが多い体幹部不均等被ばくがある場合は、襟にも個人線量計を装着することがある。したがって、体幹部に装着した個人線量計というのは、必ずしも体幹部基本部位の個人線量計だけでなく、襟などに付けた個人線量計を指す場合がある。

(6) 眼の水晶体の等価線量の算定に使用する実用量

放射線審議会は、ICRP の 1990 年勧告（ICRP Publ.60⁹⁾）の国内制度等への取り入れについて検討し、1997 年に意見具申を行った。この際に放射線審議会基本部会は「外部被ばく及び内部被ばくの評価法にかかる技術的指針」²²⁾（以下、「技術的指針」という。）を取りまとめた。その中で、「3 mm 線量当量率については、1 cm 線量当量率と 70 μm 線量当量率の測定評価を行うことにより防護のために必要な情報は得られる。」として、「測定の義務を課さないことが適当である。」としている。一方、「測定に係る量及びそれらの名称は以下のとおりとすることが適当である。」として、個人の外部被ばくに係る測定に

用いる量のうち、眼の水晶体の等価線量についての個人線量当量は、3 mm 線量当量として
いる。すなわち、技術的指針²²⁾では、眼の水晶体の等価線量は、3 mm 線量当量の測定結果
で評価することを否定しているわけではない。

なお、意見具申²⁾では、 $H_p(3)$ (3 mm 線量当量) で眼の水晶体の等価線量を算定すること
を可能とすべきであるとしているが、事業者において眼の水晶体の等価線量を適切に算定
することを示せる場合には、従前の $H_p(10)$ (1 cm 線量当量) 又は $H_p(0.07)$ (70 μm 線量当
量) による算定も認めるべきであるとしている。

意見具申²⁾を受けて、例えば、「眼の水晶体の線量限度の変更のための放射性同位元素
等の規制に関する法律施行規則の一部を改正する規則案」(令和元年 10 月 17 日、原子力
規制委員会)では、放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則(昭和三十五年総理府
令第五十六号)の第二十条の 2 項の一に、「眼の水晶体の等価線量を算定するための線量
の測定は、イからハマまでの測定(注: 1 cm 線量当量又は 70 μm 線量当量の測定)のほか、
眼の近傍その他の適切な部位について三ミリメートル線量当量を測定することにより行う
ことができる。」とされている。

以上の技術的指針²²⁾、意見具申²⁾及び放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則の
一部を改正する規則(案)に沿って、本ガイドラインのフロー図は作成されている。体幹
部基本部位又は線量が最大となる体幹部位に装着した個人線量計による実用量で眼の水晶
体の等価線量を算定する場合、本ガイドラインの図 1 のフロー図に従えば、現状使用され
ている個人線量計の仕様に鑑み、1 cm 線量当量か 70 μm 線量当量のどちらか値の高い方
の実用量を用いることとなっているが、3 mm 線量当量の使用を妨げるものではない。

また、外部被ばくの物理量(フルエンス又は空気カーマ)を線量(ここでは眼の水晶体の
等価線量)に関係付ける係数(線量換算係数)は、放射線の種類及びエネルギーに依存す
る。以下に放射線の種類ごとにどのような場合に 3 mm 線量当量を眼の水晶体の等価線量
の算定に用いる必要があるかを示す。

1) 光子

ISO 4037-3:2019²³⁾に、光子による実用量(1 cm 線量当量、3 mm 線量当量、70 μm 線量
当量)の単位空気カーマに対する換算係数が示されており、そのうち入射方向が 0°方向
(すなわち、人体前方から入射する方向)の換算係数の比について図 E.2 に示す。

図 E.2 に示すように 40 keV 以上のエネルギー領域では 1 cm 線量当量が 3 mm 線量当
量より大きくなり、また、30 keV 以下のエネルギー領域では 70 μm 線量当量が 3 mm 線
量当量より大きくなる。30 keV~40 keV の限定されたエネルギー領域において選択的に
被ばくする状況が通常は想定されないこと、また、70 μm 線量当量でも 3 mm 線量当
量とは大きく乖離しないことから、3 mm 線量当量を測定しなくても、従来通り 1 cm 線
量当量又は 70 μm 線量当量のいずれか適切な方(高い方)を眼の水晶体の等価線量として
よい。ただし、図 E.2 に示すように 30 keV~40 keV では 70 μm 線量当量が 3 mm 線量当
量に対して僅かに低くなること、20 keV 以下では 70 μm 線量当量は 3 mm 線量当量に対

して過大になるため、より正確に眼の水晶体の等価線量を算定する必要がある場合は、3 mm 線量当量を測定することが望ましい。

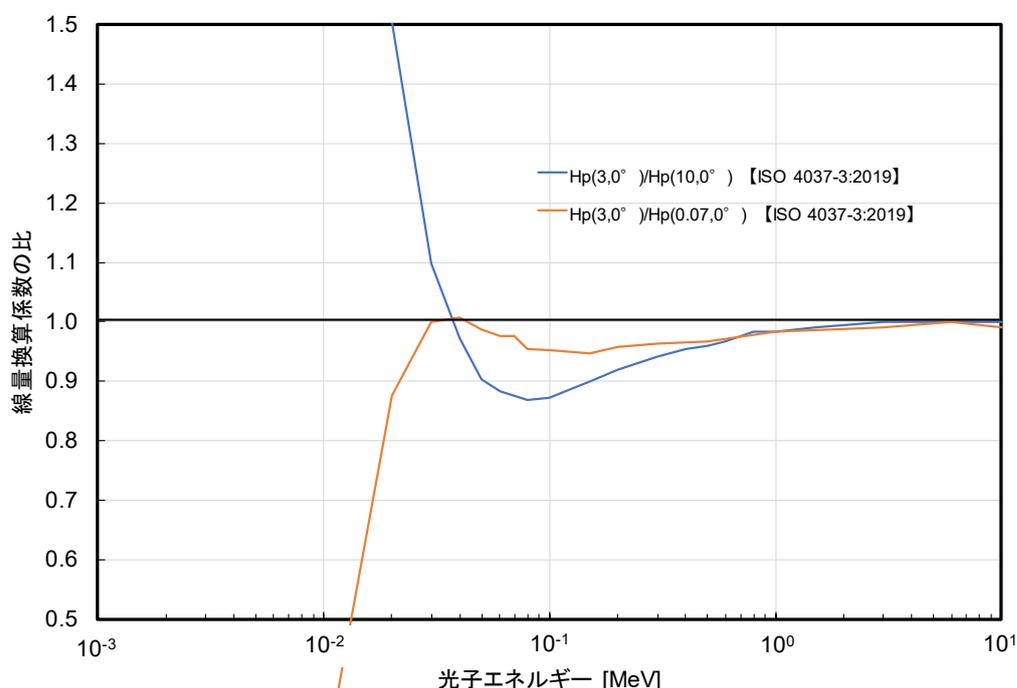


図 E.2 光子による実用量の換算係数²³⁾の比

2) 電子

ICRP Publ.74²⁴⁾の (251) 項、(266) 項及び Table A.44 によれば、電子の実用量については、70 keV～10 MeV では方向性線量当量は個人線量当量の十分な数値的近似値とみなすことができるとしている。ICRP Publ.74²⁴⁾の Table A.44 に電子による実用量（方向性線量当量である 1 cm 線量当量、3 mm 線量当量、及び 70 μm 線量当量）の単位フルエンスに対する換算係数が示されており、そのうち入射方向が 0°方向の換算係数について、図 E.3 に実用量（方向性線量当量）の比を示す。

図 E.3 に示すように 1 MeV～3.5 MeV の電子については、70 μm 線量当量や 1 cm 線量当量では 3 mm 線量当量を担保することはできないが、β 線は、エネルギースペクトルが連続であること、通常は容易に遮蔽が可能であり、このエネルギー領域の電子を選択的に被ばくするような状況は極めて稀であることから、3 mm 線量当量の測定を必要とせず、従来通り 1 cm 線量当量又は 70 μm 線量当量のいずれか適切な方（高い方）を眼の水晶体の等価線量としてよい（【例題 17】参照）。

なお、1 MeV 以下の電子については、70 μm 線量当量が 3 mm 線量当量より高くなるため、70 μm 線量当量の測定値を使用としてもよいが、著しく過大な評価になる可能性が高いことに留意する。また、1 MeV～3.5 MeV の電子については 3 mm 線量当量が 70 μm 線量当量又は 1 cm 線量当量より高くなることも留意する。

そのため、電子による被ばくが無視できない場合などは、3 mm 線量当量を測定することが望ましい。

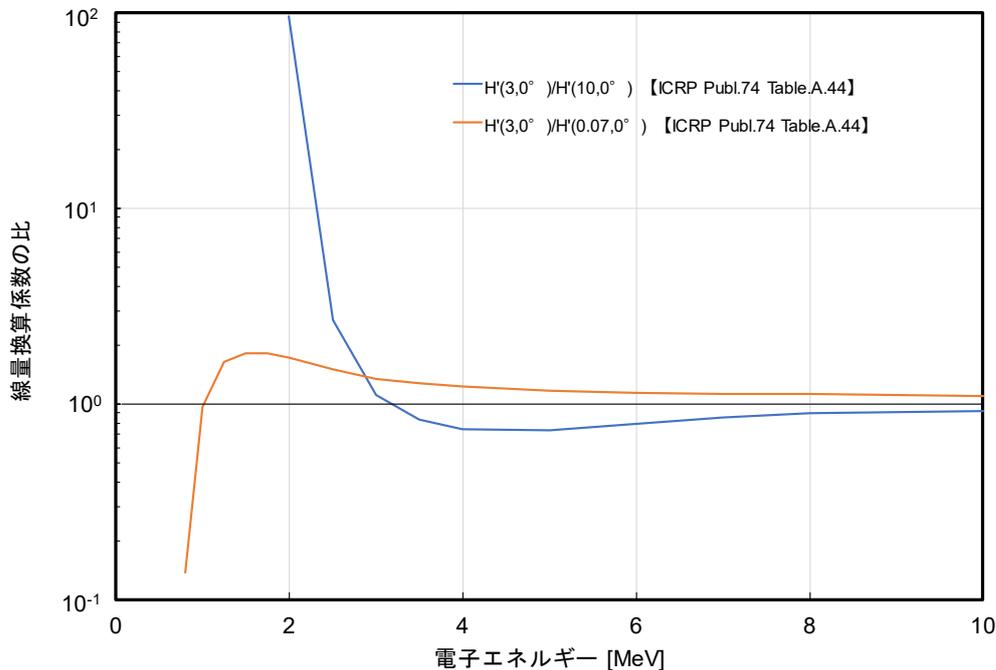


図 E.3 電子による実用量（方向性線量当量）の換算係数²⁴⁾の比

3) 中性子

ICRP Publ.74²⁴⁾の(246)項には、「実務上、実効線量を制限すれば、眼の水晶体は十分に防護される。」と記載されている。実効線量に対応する実用量は1 cm 線量当量であるため、中性子による被ばくの場合は、様々な周辺状況を踏まえ、従来通り、1 cm 線量当量を測定し、眼の水晶体の等価線量を算定する。ただし、Ferrari らが算定した中性子の個人線量当量によると、中性子の1 cm 線量当量は3 mm 線量当量より30 keV 以上では小さくなり、原子力、核燃料、加速器施設等の中性子被ばくがある代表的な作業場においては1 cm 線量当量が3 mm 線量当量より低くなると評価されている²⁵⁾。

一方、意見具申²⁾によれば、「中性子被ばくについては必ずしも保守的とは言い切れない場合でも、3 mm 線量当量を測定できる環境が整っているとは言い難い状況を考慮して、明らかに眼の水晶体の等価線量限度を下回る場合には、1 cm 線量当量の測定を基本とすることが適当である。」とされている。

なお、年間の眼の水晶体の中性子被ばくが管理基準に近いか超えるおそれがある場合は、月間等の管理目標値設定と被ばく実績管理により、年間中性子による3 mm 線量当量が管理基準を超えないようにする方法もある。例えば、対象となる中性子場のエネルギースペクトルを測定、評価して、3 mm 線量当量と1 cm 線量当量の差異を把握することが可能である。Ferrari らの報告²⁵⁾を参考にすれば、1 cm 線量当量を3 mm 線量当量の75%に設定して、3 mm 線量当量の管理基準を超えないように月間等の1 cm 線量当量

の管理目標値を設定する方法などがある。なお、通常は中性子による被ばくは光子等との混合放射線場での被ばくとなるため、光子被ばく等の寄与も考慮して、中性子の被ばくに対する管理基準を設定する。

(7) 眼の水晶体の等価線量が管理基準に近いか超えるおそれがあることの判断方法

眼の水晶体等価線量の管理基準を超えているおそれがあるかどうかについては、作業に伴う線量評価を事前に行う必要がある（【例題 19】参照）。事前に行う線量評価の方法として、IAEA TECDOC No.1731²⁶⁾を参考にすると以下の4つの方法がある。

① 作業場のモニタリング

放射線場が対象となる作業期間で予測可能であり、作業手順も明確になっている場合は、作業場のモニタリングで作業者の線量推定が可能となる。IEC62387:2020²⁷⁾では光子と β 線の $H'(3)$ が規定されている。作業場のモニタリングで、作業場の3 mm線量当量（方向性線量当量）である $H'(3)$ を測定する放射線測定器を使用することができれば、それを使用することが望ましい。光子と β 線の $H'(3)$ が測定できる測定器は十分には普及していないものの、フィルタ等を用いて $H'(3)$ の測定に対応した電離箱式サーベイメータが、国内メーカーで製作・販売されており、入手することができる。

② 文献データの使用

放射線発生装置や放射性核種等の情報を利用することができる場合は、その情報を有効利用することが望ましい。

③ シミュレーション計算による評価

作業場の線源状況や作業場の幾何学的形状と材質情報が分かっているならば、シミュレーション計算コードを用いて、場の様々な空間線量率を評価してもよい。ただし、部分的にでも、測定によるシミュレーション計算結果の検証が必要である。

④ 個人モニタリングによる測定

眼の水晶体の等価線量が管理基準を超えることが予想される作業者に、作業の準備又は初期の段階の一定期間個人線量計を着用させるなどの測定を実施して、その結果に基づき予測してもよい。

なお、意見具申²⁾では、場所に係る3 mm線量当量（ $H'(3)$ ）の測定について、以下のよう示されている。

$H'(3)$ については、事業者等が簡易に測定できる環境が整っているとは言い難い。また、個人の線量が適切に測定されていれば水晶体の等価線量は十分適切に管理できると考

えられるほか、1 cm 線量当量又は 70 μm 線量当量のどちらか、またはその両方により、場所については保守的に評価することができる。

これらを踏まえれば、今後の国際規格の整備状況等を注視する必要があるものの、現時点においては $H'(3)$ を法令に取り入れる必要性は薄いと考えられる。

ただし、東京電力福島第一原子力発電所のような特殊な作業環境において、事前に作業者の被ばく評価をする等のために、事業者等が自主的に $H'(3)$ を測定することを妨げるものではない。

関連法令の改正案では、意見具申²⁾を踏まえて $H'(3)$ の測定については規定されていない。したがって、 $H'(3)$ の測定については、法令で定められたものではなく、あくまで作業計画等を策定する等、「自主的に」測定する場合に限られる。

参考文献

- 1) 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編，東京（2000）。
- 2) 放射線審議会，眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について（意見具申），平成 30 年 3 月 2 日付け原規放発第 18030211 号（2018）。
- 3) 平成 29 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業）原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告（2018）。
- 4) 平成 30 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業）原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告（2019）。
- 5) 令和元年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業）円滑な規制運用のための水晶体の放射線防護に係るガイドラインの作成 成果報告(2020)。
- 6) 厚生労働省，眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書，令和元年 9 月（2019）。
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_06824.html（最終アクセス：2019 年 12 月 20 日）
- 7) International Commission on Radiological Protection (ICRP), General Principles for the Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 75, Ann. ICRP 27(1) (1997).
- 8) International Commission on Radiological Protection (ICRP), The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4) (2007).
- 9) International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. ICRP 21 (1-3) (1991).
- 10) 放射線審議会基本部会，国際放射線防護委員会（ICRP）2007 年勧告（Pub. 103）の国内制度等への取入れについて－第二次中間報告－（平成 23 年 1 月）
- 11) 厚生労働省労働基準局長，労働安全衛生規則及び電離放射線障害防止規則の一部を改正する省令の施行等について，基発第 253 号，（平成 13 年 3 月 30 日）

- 12) International Commission on Radiological Protection (ICRP), Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 26, Ann. ICRP 1 (3) (1977).
- 13) 浜田達二他, 国際放射線防護委員会 1977 年勧告の法令取入れについて (法令改正に関する質問に答えて), (財) 原子力安全研究協会 (昭和 63 年 3 月)
- 14) ANSI/HPS N13.41-2011, Criteria for Performing Multiple Dosimetry, Health Physics Society (2011).
- 15) International Commission on Radiological Protection (ICRP), General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 35, Ann. ICRP 9 (4) (1982).
- 16) International Atomic Energy Agency (IAEA), Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7, IAEA, Vienna (2018).
- 17) Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), Dosimetry: Ascertaining Occupational Dose, REGDOC-2.7.2, Volume I (2019).
- 18) Netherlands Commission on Radiation Dosimetry (NCS), Guidelines for Radiation Protection and Dosimetry of the Eye Lens, Report 31 of the Netherlands Commission on Radiation Dosimetry (2018).
- 19) 放射線審議会, 第 3 回放射線審議会 眼の水晶体の放射線防護検討部会議事録 (平成 29 年 10 月 5 日).
- 20) 岩井敏, 仙波毅, 青天目州晶, 眼の水晶体の線量限度に関する国外動向調査～スウェーデンの原子力発電所における取組を中心に～, 日本保健物理学会企画シンポジウム プロシーディング (2018 年 3 月 20 日) (2018).
- 21) Xiao, Y., The preliminary investigation and study on the eye-lens dose measurement during the outage of PWR, Proceedings of the 5th Conference of AOCR, Melbourne, Australia, 20-23/05/2018 (2018).
- 22) 放射線審議会基本部会, 外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針 (平成 11 年 4 月).
- 23) International Organization for Standardization (ISO), ISO 4037-3:2019, Radiological Protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence (2019).
- 24) International Commission on Radiological Protection (ICRP), Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26 (3-4) (1996).
- 25) Ferrari, P., Gualdrini, G., Tanner, R., Fantuzzi, E., $H_p(3)/\Phi$ conversion coefficients for neutrons: discussion on the basis of the new ICRP recommended limit for the eye lens, Radiat. Prot. Dosim., 161(1-4), 17-22 (2014).
- 26) International Atomic Energy Agency (IAEA), Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, IAEA-TECDOC-1731, IAEA, Vienna (2013).

- 27) IEC 62387:2020, Radiation protection instrumentation - Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation.

添付資料 1

眼の水晶体の等価線量限度の引き下げに係る国内並びに国際機関の動向

放射線審議会では、「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について（意見具申）」¹⁴⁾（以下、「意見具申」）において、眼の水晶体の等価線量限度改定に係る動向とそれを取り入れるわが国の動きについて以下のように記載している。

（以下「はじめに」の章より抜粋）

眼の水晶体（以下単に「水晶体」という。）は電離放射線への感受性の高い組織として知られており、わが国の放射線業務従事者に対する各種規制において、その等価線量の限度を定めている。現在、当該限度は、国際放射線防護委員会（*International Commission on Radiological Protection*; 以下「ICRP」という。）Pub.60「国際放射線防護委員会の1990年勧告」を踏まえ、年間150 mSvを超えないこととされている。

一方、ICRPは平成23年4月に「組織反応に関する声明」（以下「ソウル声明」という。）において計画被ばく状況における職業被ばくに関する水晶体の等価線量限度について、「定められた5年間の平均で20 mSv/年、かついずれの1年においても50 mSvを超えない」ことを勧告し、また、その勧告内容は、国際原子力機関（*International Atomic Energy Agency*; 以下「IAEA」という。）の「放射線防護と放射線源の安全：国家基本安全基準」（*Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*、以下「BSS」という。）に取り入れられている。・・・

放射線審議会は、ICRPやIAEA等で国際的に合意された放射線防護体系の考え方を尊重し、放射線障害の防止の技術基準として規制に取り入れるとの観点から、ソウル声明を踏まえた新たな水晶体の等価線量限度をわが国の制度に取り入れるための検討を行うこととし、第135回総会（平成29年7月開催）において「眼の水晶体の放射線防護検討部会（以下「水晶体部会」という。）を設置した。

水晶体部会は、同月から同年12月までに5回の会合を開催し、水晶体の防護及び被ばくの実態について関係者にヒアリングを行ったほか、新たな等価線量限度の取り入れの実行可能性及び取り入れに当たっての課題について検討し、「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について（中間取りまとめ）」（以下「中間取りまとめ」という。）を取りまとめた。この中間取りまとめについて、放射線審議会第138回総会に報告した上で、任意の意見募集（パブリックコメント）を実施した。その後、平成30年2月までに2回の会合を開催する中で、関係者へのヒアリングを追加し、あわせて中間取りまとめに追加すべき論点について検討した。

本報告書は、その内容を取りまとめ、新たな等価線量限度の取り入れに伴う水晶体の放射線防護の在り方について整理するものである。

眼の水晶体の放射線防護検討部会（以下、「水晶体部会」）の最終報告書は放射線審議会第140回総会（平成30（2018）年3月2日）で承諾され、同日に放射線審議会会長から関係行政機関の長に対して意見具申が行われた。

放射線審議会第142回総会（平成30（2018）年9月28日）の配布資料142-1号『「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」（意見具申）を踏まえた関係省庁における検討状況』^{1.2)}によれば、厚生労働省と原子力規制庁は関連法令の改定に関して、2020年度中の公布、2021年4月の施行を予定している。

厚生労働省では、2018年12月より、電離放射線障害防止規則における水晶体の被ばく限度の見直し等に伴う所要の改正に資することを目的として、「眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会」を開催し、放射線審議会の意見具申を電離放射線障害防止規則等関係法令へ取り入れるに当たっての労働衛生管理上の留意事項や問題点等について、科学的調査の結果等を踏まえた検討を行った上で、電離放射線障害防止規則等関係法令の見直しの方向について報告書^{1.3)}として取りまとめた。

参考文献

- 1.1) 放射線審議会，眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について（意見具申），平成30年3月2日付け原規放発第18030211号（2018）.
- 1.2) 放射線審議会，「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」（意見具申）を踏まえた関係省庁における検討状況について，142-1号（平成30年9月28日）（2018）.
- 1.3) 厚生労働省，眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書（令和元年9月），
https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_06824.html（最終アクセス：2019年12月20日）

添付資料 2

国際原子力機関（IAEA）での眼の水晶体の等価線量に係る線量モニタリングの考え方

IAEA TECDOC No.1731^{2,1)}では、眼の水晶体の線量モニタリングの考え方を、中性子、光子、 β 線についてそれぞれ表 2.1～2.3 に、眼の水晶体のモニタリングに使用する個人線量計について、表 2.4 のように示している。

表 2.1 中性子による線量
(出典:IAEA TECDOC No.1731^{2,1)} P.16 Table 2 から和訳転載)

影響要因	説明	
A (エネルギー及び入射角度)	任意のエネルギー及び入射角の中性子に対し、全身の線量モニタリングでは、眼の水晶体の線量を保守的に必ずしも評価できない(引用 1)。作業場によっては、中性子による眼の水晶体の線量の評価が必要になるかもしれない(引用 1)。どのような場合に必要になるかは今後さらなる研究が必要である。	
B (幾何学的形状)	均一な放射線場であるか？	
	はい ↓ 体幹部でのモニタリング結果を使用。	いいえ ↓ 眼の近傍でのモニタリングが必要 ^{注釈)} 。
C (防護具)	どんな個人用の防護具も中性子から眼の水晶体を防護することはできないだろう。	

注釈) 現時点では眼の近傍で中性子による眼の水晶体の等価線量を測定できる個人線量計は開発されていない。

(引用 1) G. GUALDRINI, P. FERRARI, AND R. TANNER, Fluence to $H_p(3)$ conversion coefficients for neutrons from thermal to 15 MeV., Radiat. Prot. Dosim., 157(2), 278-290 (2013).

表 2.2 光子による線量

(出典:IAEA TECDOC No.1731^{2,1)} P.17 Table 3 から和訳転載)

影響要因	説明		
A (エネルギー 及び 入射角度)	平均光子エネルギーが約 40 keV 未満か？		
	<p>はい ↓ $H_p(0.07)$を使用し、$H_p(10)$は使用しないほうがよい(引用1)、(引用2)。</p>	<p>いいえ ↓ 光子が主に正面から照射されるか、又は人が放射線場の中を移動するのか？</p> <table border="1"> <tr> <td> <p>はい ↓ $H_p(0.07)$又は $H_p(10)$を使用 (引用2)。</p> </td> <td> <p>いいえ ↓ $H_p(0.07)$を使用し、 $H_p(10)$を使用しない (引用2)。</p> </td> </tr> </table>	<p>はい ↓ $H_p(0.07)$又は $H_p(10)$を使用 (引用2)。</p>
<p>はい ↓ $H_p(0.07)$又は $H_p(10)$を使用 (引用2)。</p>	<p>いいえ ↓ $H_p(0.07)$を使用し、 $H_p(10)$を使用しない (引用2)。</p>		
B (幾何学的形 状)	均一な放射線場であるか？		
	<p>はい ↓ 体幹部でのモニタリング結果を使用。</p>	<p>いいえ ↓ 眼の近傍でのモニタリングが必要。</p>	
C (防護具)	防護具（鉛入眼鏡、遮蔽用の天板、台、カーテン）を使用しているか？		
	<p>眼の防護のために使用。 ↓ 眼の近傍及び防護具の内側でのモニタリングが必要。 又は、遮蔽に適切な遮蔽係数を使用。</p>	<p>体幹部の防護のために使用 (例えば鉛エプロン)。 ↓ 防護具の内側で測定した線量は眼の水晶体の線量を過小評価する。 ↓ 眼の近傍のモニタリングが別途必要。</p>	

(引用 1) Fig.6 in BEHRENS, R., DIETZE, G., Monitoring the eye lens: which dose quantity is adequate?, Phys. Med. Biol. 55 4047-4062 (2010).

(引用 2) Fig.1 in BEHRENS, R., Monitoring the Eye Lens, Proceedings of the IRPA13 conference, paper TS7e.3, Glasgow, (2012).

(http://www.ptb.de/en/org/6/63/f_u_e/ts7e_3.pdf (最終アクセス : 2019 年 12 月 20 日))

表 2.3 β線による線量

(出典:IAEA TECDOC No.1731^{2.1}) P.18 Table 4 から和訳転載)

影響要因	説明	
A (エネルギー 及び 入射角度)	β線の最大エネルギーが 0.7 MeV 以上か？	
	いいえ ↓ β線が水晶体まで到達しないので、 モニタリングは不要。	はい ↓ 以下で説明するようなモニタリン グが必要。
B (幾何学的 形状)	β線の放射線場は通常不均一であるため、個人線量計を眼の近傍に装着して測定する必要がある。ただし、以下に示す十分に厚い遮蔽が用いられる場合には、それが必要でないかもしれない。	
C (防護具)	β線を吸収できるほどの厚さのある遮蔽（たとえば、防護眼鏡、遮蔽板）が使用されているか？	
	<p>眼の防護のために使用されている。</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>β線は遮蔽に完全に吸収されるので、「光子線」について検討する。しかし、制動放射は考慮しなければならぬ（遮蔽の外部で生み出されたものと、遮蔽の内部で生み出されたものの両方の寄与分）。</p>	<p>眼の防護のために使用されていない。</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p>$H_p(3)$が唯一の妥当な数量となる。</p>

表 2.4 混合放射線場における眼の水晶体の線量のモニタリングに必要とされる個人線量計の選択に関する考え方

(出典:IAEA TECDOC No.1731^{2.1)} P.19 Table 5 から和訳転載)

放射線の種類			使用する線量計*
中性子	光子	β	
x			中性子による $H_p(10)$ を測定する線量計
	x		光子による $H_p(0.07)$ 及び/又は $H_p(10)$ を測定する線量計
		x	β 線による $H_p(3)$ を測定する線量計
x	x		中性子による $H_p(10)$ を測定する線量計と、光子による $H_p(0.07)$ 及び/又は $H_p(10)$ を測定する線量計
x		x	中性子による $H_p(10)$ を測定する線量計と、 β 線による $H_p(3)$ を測定する線量計
	x	x	光子及び β 線による $H_p(3)$ を測定する線量計
x	x	x	中性子による $H_p(10)$ を測定する線量計と、光子及び β 線による $H_p(3)$ を測定する線量計

※ 中性子はほぼ常に光子が伴っているが、ここでは中性子のみの可能性として示している。

* 表 2.1、2.2、2.3、2.4 は、文献^{2.1)}の TABLE 2、TABLE 3、TABLE 4、TABLE 5 の翻訳で、IAEA の許可を得て、転載したものである。

なお、この翻訳は日本保健物理学会 放射線防護標準化委員会 水晶体線量モニタリングガイドライン検討作業部会が行った。この文書の原版は、IAEA 又は IAEA に代わって正当な権限を与えられた者により配布された英語版である。IAEA は、この翻訳及びその出版物の正確性、品質、真正性、又は仕上がりに対して一切の保証をせず、一切の責任を負わず、この翻訳の使用から直接的又は間接的に生じる、損失又は損害、結果的又はその他の責任を負わない。

参考文献

- 2.1) International Atomic Energy Agency (IAEA), Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, IAEA-TECDOC-1731, IAEA, Vienna (2013).

添付資料 3

従来の眼の水晶体の等価線量に係る線量モニタリング

眼の水晶体の等価線量の限度の変更前の眼の水晶体の等価線量の算定方法について以下に示す^{3.1, 3.2}。

(1) 線量の測定

放射線業務従事者、緊急作業に従事する労働者及び放射線管理区域に一時的に立ち入る労働者が、管理区域内において受ける外部被ばくによる線量を、1 cm 線量当量及び 70 μm 線量当量（ただし、中性子については 1 cm 線量当量）について、身体に装着した個人線量計で測定しなければならない。

(2) 線量を測定する部位

放射線業務従事者等の身体に対して、一様に放射線に曝される場合は、体幹部基本部位（胸部、腹部）に装着した 1 個の個人線量計による測定だけで、その者の被ばく線量を代表させてよい。しかし、一様ではなく偏りがあって放射線に曝される場合は、体幹部基本部位に装着した個人線量計による線量だけでは、その者の被ばく線量を代表できない可能性があるため、線量が最大になる部位が、手指のような人体の末端部であれば手指等に、防護衣を着用した体幹部であれば防護衣の外側の頸部付近等に、別の個人線量計を追加して測定をしなければならない。このような被ばく形態を「不均等被ばく」、また、そうした被ばく形態に対応するため複数の個人線量計を用いる被ばく管理を行うことを「不均等被ばく管理」と呼ぶ。

不均等被ばくと判断された場合、実効線量を評価するための個人線量計を基本装着部位（胸部、腹部）だけでなく、最も多く放射線にさらされるおそれのある部位にも装着することが法令により規定されている。具体的には、男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性については胸部、その他の女性については腹部（体幹部基本部位）に個人線量計を装着させて線量を測定しなければならない。さらに、男性又は妊娠する可能性がないと診断された女性については、頭・頸部及び腹・大腿部のうち、多く放射線にさらされる箇所を追加で、その他の女性については、頭・頸部及び胸・上腕部のうち、多く放射線にさらされる箇所を追加で個人線量計を装着させなければならない（体幹部不均等被ばく状況）。さらに、頭・頸部、胸・上腕部、腹・大腿部以外の部位が、多くの被ばくを受ける場合は、その最も多く被ばくする部位に個人線量計を装着させなければならない（末端被ばく状況）。

線量の測定は、上述した部位に装着した個人線量計により測定しなければならない。ただし、個人線量計による測定が著しく困難な場合は、放射線測定器によって測定した線量当量率を用いて算出する、これも著しく困難な場合は、計算によってその値を求めることができる。

(3) 線量の算定

眼の水晶体の等価線量については、上述した部位に装着した個人線量計のうち、適切な部位で測定した 1 cm 線量当量及び 70 μm 線量当量（ただし、中性子については 1 cm 線量当量）について適切なものを用いて算定する。

(4) 眼の水晶体の線量モニタリングにおける測定の方法

放射線審議会の「外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針」^{3.1)}や、この指針に基づく「被ばく線量の測定・評価マニュアル」^{3.2)}において、眼の水晶体の等価線量を算定する方法は以下のように記載されている³⁾。

個人線量計から得られた $H_{1\text{cm}}$ あるいは $H_{70\mu\text{m}}$ のうち、適切な値をもって眼の水晶体の等価線量とする。体幹部に複数個の個人線量計を着用している場合は、眼に近い位置につけた個人線量計からの評価した値を採用する。

....

眼の水晶体の等価線量については、 $H_{1\text{cm}}$ 又は $H_{70\mu\text{m}}$ のうち放射線の種類やエネルギーを考慮して適切と判断される方をもって評価値とする必要があるが、特定のエネルギーの電子線による直接被ばくという極めて特殊な条件を除けば、 $H_{1\text{cm}}$ 又は $H_{70\mu\text{m}}$ のうち値が大きい方を採用することで眼の水晶体の等価線量に関する合理的な範囲での安全側の評価をすることができる。

ただし、個人線量計の着用位置と眼の位置との線量（率）が極端に異なり、個人線量計の $H_{1\text{cm}}$ 又は $H_{70\mu\text{m}}$ の値の大きい方をもって眼の水晶体の等価線量とすることが著しく過小あるいは過大な評価値を与える場合は、作業場所の線量（率）の位置分布やエネルギー分布の測定等に基づき、 $H_{1\text{cm}}$ と $H_{70\mu\text{m}}$ から眼の水晶体の等価線量を推定する必要がある。この場合、その測定結果や評価方法を文書化し、保存しておくことが望ましい。....

以下、被ばく形態別に具体的な評価の考え方を説明する。

(1) 体幹部均等被ばくの場合

....

(ハ) 眼の水晶体の等価線量は、胸腹部に装着した個人線量計から求めた $H_{1\text{cm}}$ 又は $H_{70\mu\text{m}}$ のうち、どちらか値の大きい方とする。ただし、 β 線あるいは 30 keV 以下の極めてエネルギーの低い γ (X) 線による被ばくのおそれが無い場合には、 $H_{1\text{cm}}$ と $H_{3\text{mm}}$ の値の差は小さいので、眼の水晶体の等価線量は胸腹部に装着した個人線量計から求めた $H_{1\text{cm}}$ とすることができる。

(2) 体幹部不均等被ばくの場合

....

(ハ) 眼の水晶体の等価線量

³⁾ 被ばく線量の測定・評価マニュアルに記載された $H_{1\text{cm}}$, $H_{3\text{mm}}$, $H_{70\mu\text{m}}$ はそれぞれ、1 cm 線量当量($H_p(10)$)、3 mm 線量当量($H_p(3)$)、70 μm 線量当量($H_p(0,07)$)を示す。

頭部又は頸部に装着した個人線量計から得られた H_{1cm} 又は $H_{70\mu m}$ のうち、どちらか値の大きい方をもって眼の水晶体の等価線量 (H_{3mm}) とする。 β 線による被ばくのおそれがある場合についても、 H_{3mm} が $H_{70\mu m}$ を上回るようなエネルギー領域の β 線を選択的に被ばくする可能性は少なく、通常は $H_{70\mu m}$ を測定することで十分な管理が可能である。なお、防護眼鏡を使用している場合には、防護眼鏡によって遮蔽された条件での眼の水晶体の等価線量を評価することが望ましいが、個人線量の測定サービスを外部業者に委託している場合や、 H_{3mm} の値が線量限度を十分に下回っていることが明らかな場合には、遮蔽されていない条件下での $H_{70\mu m}$ の値を個人の被ばくとして記録することも容認されるであろう。

中性子については、皮膚の等価線量と同様に、中性子による H_{1cm} を β 線、 γ (X) 線による線量に加える。

これらの眼の水晶体の線量モニタリングにおける測定の考え方をまとめると図 3.1 に示すフロー図になる。

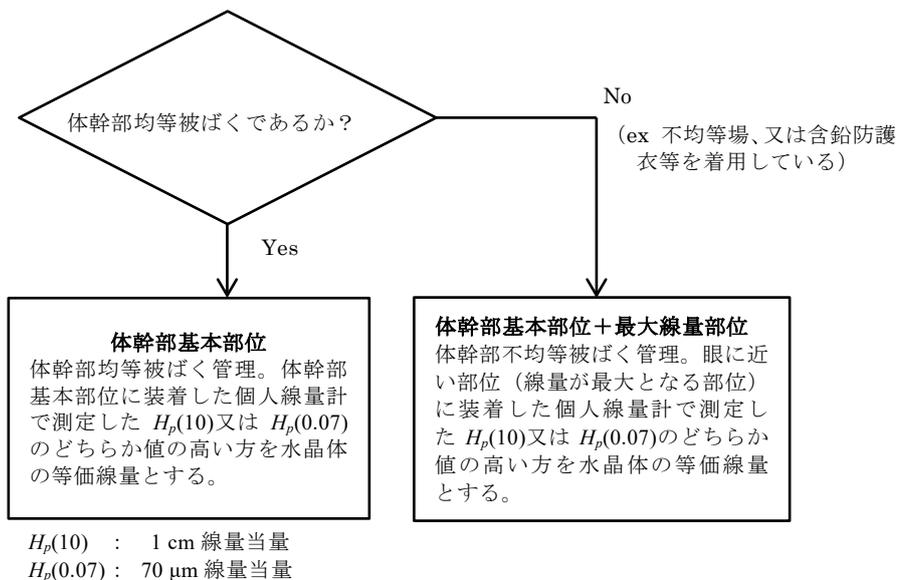


図 3.1 従来の眼の水晶体の等価線量の算定方法を決定するフロー図

2001 年の法改正に際して発行された「被ばく線量の測定・評価マニュアル」^{3.2)}では、複数の個人線量計によるモニタリングの実施条件の一つとして、

水晶体の等価線量と実効線量の比が、法令等に定めるそれぞれの線量限度の比 (3 倍 = 150/50) を超えるおそれがある場合については、胸腹部の他に頭頸部にも個人線量計を着用する理由になる。

という説明がされた。線量限度の比（3倍）に基づく考え方は、主に「分かりやすい」という理由から、前掛け式防護エプロン等を常用する放射線業務従事者等を中心に広く活用されてきた。

参考文献

- 3.1) 放射線審議会基本部会，外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針（平成11年4月）.
- 3.2) 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編，東京（2000）.

【例題】眼の水晶体の線量モニタリング

【例題】項目

- 例題 1 体幹部不均等被ばくはどのように判断すればよいでしょうか？また、計画被ばく状況で年間の累積線量が極めて低い場合においては、体幹部均等・不均等被ばく状況の判断をしないで、体幹部基本部位に装着した個人線量計で測定した結果のみで眼の水晶体の等価線量を算定できないのでしょうか？
- 例題 2 個人線量計で測定される線量の不確かさはどのように評価すればよいでしょうか？
- 例題 3 眼の近傍で線量を測定することが必要となるかを判断する線量レベル(管理基準)は、事業所の線量管理に責任を有する者が作業環境に応じて設定するとありますが、どのような数値を採用すればよいでしょうか？
- 例題 4 全面マスクを装着した場合、全面マスクの外側に個人線量計を装着して全面マスクでの減衰計算等から眼の水晶体の等価線量を算定することはできますか。
- 例題 5 眼の水晶体の被ばくに対する防護の最適化において、線量モニタリング結果はどのように使えばよいでしょうか？
- 例題 6 眼の水晶体の専用の個人線量計とは何か、どのようなものがありますか？
- 例題 7 3 mm 線量当量による測定に関する国際規格の検討状況はどのようになっていますか？
- 例題 8 眼の水晶体の専用の個人線量計の校正はどのように実施されるのですか？
- 例題 9 原子力施設での眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？
- 例題 10 医療施設での眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？
- 例題 11 獣医療従事者の眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？
- 例題 12 クルックス管からの X 線に対して眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？
- 例題 13 非破壊検査の場合の眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？
- 例題 14 核燃料施設での眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？
- 例題 15 防護眼鏡、防護マスク等の個人用防護具に電子線 (β 線) が入射したときに発生する制動 X 線を含めた眼の水晶体の等価線量はどのように算定するのでしょうか？
- 例題 16 眼の水晶体の等価線量を計算で算定することはできないのでしょうか？
- 例題 17 β 線による被ばくが無視できない状況における眼の水晶体の等価線量を 3 mm 線量当量の測定で算定する必要はないのでしょうか？
- 例題 18 体幹部均等被ばく状況において、眼の水晶体の等価線量が高い場合、遮蔽材等を使用すると、体幹部不均等被ばく状況での線量管理になるのでしょうか？
- 例題 19 眼の近傍に個人線量計を装着した線量モニタリングの要否の判断は作業計画立案時に行うことはできないのでしょうか？

- 例題 20 月の途中から眼の近傍で線量モニタリングが必要となった場合や眼の近傍での線量モニタリングが必要となる作業とその必要がない作業が混在するなどの場合は個人線量計の装着をどうすればよいでしょうか？
- 例題 21 体幹部均等被ばく状況において、眼の近傍に個人線量計を追加で装着しましたが、眼の近傍の線量が体幹部基本部位での線量より小さくなりました。眼の水晶体の等価線量の算定は、どうすればよいですか？
- 例題 22 体幹部均等被ばく状況において、眼の近傍に個人線量計を追加して線量のモニタリング対象になった場合、頭・頸部（眼の近傍）の線量の測定結果も踏まえて実効線量を算定するのでしょうか？
- 例題 23 受動形個人線量計を使用している場合、正式な線量測定結果が判明する前に、他事業所で作業に従事する場合の眼の水晶体の等価線量はどのように算定すればよいですか？
- 例題 24 フランス放射線防護学会の眼の水晶体の線量モニタリングのガイドラインに示されている「Bordy の考え方」は国内の事業所では適用できないのでしょうか？
- 例題 25 眼の近傍以外の部位に装着した個人線量計を使用する場合で、眼の水晶体の等価線量を算定するために 3 mm 線量当量を測定することが望ましい場合とは具体的にどのような事例が挙げられるのでしょうか？
- 例題 26 眼の水晶体用線量計の測定結果の妥当性の評価はどのように実施されるのですか？

【例題 1】

体幹部不均等被ばくはどのように判断すればよいでしょうか？また、計画被ばく状況で年間の累積線量が極めて低い場合においては、体幹部均等・不均等被ばく状況の判断をしないで、体幹部基本部位に装着した個人線量計で測定した結果のみで眼の水晶体の等価線量を算定できないでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章 (5) 節 2)、3)、4) 項並びに添付資料 2]

【回答 1】

体幹部不均等被ばく管理のため体幹部に複数の個人線量計を装着する必要があるかどうかは、不均等の程度と線量当量の大きさの両方によって変わると考えられます。

まず、一つ目の「不均等の程度」についてですが、これを、身体（ここでは体幹部）上の異なる位置で測定された線量の相違の程度とし、それら測定値間に有意な違いがあると言えるかどうかを不均等か否かと等価であると解釈することは、その最も明解な定義と言えます。ICRP Publ.75^{A1.1)} (及び ICRP Publ.35^{A1.2)}) では、個人線量計による測定への要求性能として、ファクター1.5～2 の不確かさが容認されており、したがって、その容認範囲を超える測定値間の相違は、その者に不均等な放射線被ばくをもたらす明らかな別の要因（例えば、それらの測定位置間における線量（率）勾配、など）が存在することを意味します。こうした場合は、体幹部基本部位に装着する個人線量計だけではなく、別の適切な位置に個人線量計を追加することが必要になります。ファクター1.5～2 を超える線量の相違をもたらす要因には、身体の一部を覆う防護衣の使用や、作業場における線量（率）勾配があげられます。前者については、その使用の有無が、そのまま不均等被ばくをもたらすか否かの判断の参考にすることができます。後者については、作業前の線量率サーベイや過去の経験等から判断することができます。過去に経験したことのない作業等で、不均等被ばくに該当するかどうかの予測が難しい場合は、その作業の初期段階で実際に複数の個人線量計を使用するなどして確認することも一つの方法です。

次に、二つ目の「線量（当量）の大きさ」ですが、高線量域や低線量域などで分けて考えるとよいです。高線量域、すなわち線量限度に近い又は線量限度と同じ程度の線量域では、不均等の程度に関わらず、より正確に線量を測定、評価できるような個人線量計の使用上の工夫（複数装着及び装着部位の検討）は一般に望ましいことと考えられます。反対に、低線量域では、そうした工夫をする意味はあまりありません。予想される線量が、実効線量で例えば年間 1 mSv、眼の水晶体の等価線量で例えば年間 2 mSv の、いわゆる記録レベルを下回るような作業環境であれば、前者については、複数の個人線量計を用いる体幹部不均等被ばく管理、後者については、眼の近傍や頭・頸部に装着する個人線量計を用いる眼の水晶体の等価線量管理は必須ではないと考えられます。また、それぞれの作業場における体幹部不均等被ばくの程度に基づいて、体幹部基本部位に装着した個人線量計による線量当量と体幹部不均等被ばくの場合の実効線量の違いをあ

らかじめ把握しておき、ある特定の線量レベルを超えるときにのみ複数の個人線量計を用いるといった内部ルールを定めておくことも管理を円滑に進める上で有効です。

ICRP Publ.75^{A1.1)}は、記録レベルという概念を提示しており、実効線量では年間 1 mSv を下回らない値、眼の水晶体の等価線量の場合は年間 2 mSv (5 年間で平均した年線量限度 20 mSv の 10%) から個人線量計のモニタリング期間を考慮して導出される値とされています。この数値の程度を超えるおそれがない場合は、個人線量計のもつ不確かさの大きさから考えますと、線量が最大となる部位を特定することは困難であり、体幹部均等被ばく状況であると見なして線量管理することが可能と考えられます。このような場合であれば体幹部均等被ばく状況として体幹部基本部位に装着した個人線量計で眼の水晶体の等価線量を評価することも可能であると考えられます。

これらのことを参考にして、作業場所の被ばく状況をサーベイ等した結果に基づいて、線量管理に責任を有する者が眼の水晶体の被ばくについて体幹部不均等被ばく状況であるかどうかを適切に判断すればよいと考えます。

なお、米国の規格である ANSI/HPS N13.41-2011, Criteria for Performing Multiple Dosimetry^{A1.3)}の「4.0 章 複数の個人線量計を使用するときの基準」には以下の記載があります。

複数の個人線量計は、その使用が適切と考えられる場合、特定の期間あるいは特定の活動中における放射線への起こりうる被ばくが、下記条件の両方を満たす各個人に対して使用される。

1. 任意の身体部位への個人線量当量が、基準線量計位置で予想される個人線量当量から 50% 変わる可能性がある場合、かつ
2. 外部線源からの実効線量の有意な割合が均一でない放射線場に起因するときで、個人線量当量が制限値⁴の 10% を超過する可能性がある場合

これによりますと、体幹部基本部位（胸部等）の線量と 50% 以上異なる部位があり（1.5 倍以上の違いがある）、かつ事前に定めた数値を超える被ばくを受ける場合、その部位に線量計を追加することになります。このような規格を参考に体幹部不均等被ばく状況であるかどうかを判断することも考えられます。

なお、中性子による被ばくの場合は、特殊な環境を除けば、通常は、均等被ばくとして取り扱うことができます。特殊な環境には、例えば、中性子がビーム状に照射されるような作業場や、コリメートされて特定の大きさの特定の方向からの中性子にしか被ばくしないような作業場などが想定されます。

⁴ 管理のための使用者が定義した線量値。ANSI/HPS N13.41 では、制限値を 13 mSv、すなわち 1.3 mSv を超える場合に線量計を追加する例が示されています。なお、この例での制限値は年 50 mSv の四半期相当分であると考えられます。

参考文献

- A1.1) International Commission on Radiological Protection (ICRP), General Principles for the Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 75, Ann. ICRP 27(1) (1997).
- A1.2) International Commission on Radiological Protection (ICRP), General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 35, Ann. ICRP 9 (4) (1982).
- A1.3) ANSI/HPS N13.41-2011, Criteria for Performing Multiple Dosimetry, Health Physics Society (2011).

【例題 2】

個人線量計で測定される線量の不確かさはどのように評価すればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章 (5) 節 3) 項]

【回答 2】

ICRP Publ.75^{A2.1)} (及び ICRP Publ.35^{A2.2)})、IAEA GSG-7^{A2.3)}において、線量の許容される不確かさの範囲が以下のように示されています。

a) ICRP Publ.75^{A2.1)}の (251) 項では、不確かさ (uncertainty) について、以下の記載があります。

作業場においては、放射線場のエネルギースペクトルと方向は一般によく分かっておらず、個人線量計で計られた測定値の不確かさは著しく大きいであろう。放射線場が均質でなく、方向がはっきりしないことによって、標準モデルの使用には誤差が生じる。関連する線量限度付近の実効線量を推定する際の 95%信頼度での不確かさは、光子についてはプラスマイナスどちらの方向についても係数 1.5 となり、・・・あらゆる線質に対して、低レベルの実効線量では、さらに大きな不確かさもまた免れない。

ここでは線量の不確かさの目安を示す指標として、線量限度付近では 1.5 という数値が示され、低レベルの線量では不確かさはより大きくなるとしています。なお、ICRP Publ.35^{A2.2)}の (109) 項では、「不確かさは 95%信頼度で係数 1.5 を超えるべきではない。線量当量が 10 mSv に達しない場合には、95%の信頼度で係数 2 の不確かさが容認できる。」との記載があります。

b) IAEA GSG-7^{A2.3)}では 7.45 項で、ICRP Publ.75^{A2.1)}の記載に基づき、以下の 2 つの線量の不確かさレベルを記載しています。

(a) 関連する線量限度に近い領域では、どちらの方向にも 1.5 倍の係数が許容できると考えられている。

(b) 記録レベルの領域では、±100%の許容できる不確かさが含まれている。

したがって、線量の不確かさが許容されるレベルは、記録レベルに近い低線量域では 2 ですが、線量限度に近くなるにつれて 1.5 となります。

IAEA GSG-7^{A2.3)}では、7.46 項において、この許容される不確かさを、線量に対する連続的な関数として表現できるように、許容される不確かさの上限値 R_{UL} と下限値 R_{LL} について、以下のような式 (A2.1) 及び (A2.2) で表されています。

$$R_{UL} = 1.5 \times \left(1 + \frac{H_0}{2H_0 + H_1} \right) \quad (A2.1)$$

$$R_{LL} = \begin{cases} 0 & \text{for } H_1 \leq H_0 \\ \frac{1}{1.5} \times \left(1 - \frac{2H_0}{H_0 + H_1}\right) & \text{for } H_1 > H_0 \end{cases} \quad (\text{A2.2})$$

なお、 H_1 は真の線量値、 H_0 は測定する必要のある線量の下限值を示し、通常は記録レベルで、以下の式 (A2.3) で示される R が採用されています。

$$R = L \times \frac{\text{monitoring period(months)}}{12} \quad (\text{A2.3})$$

ここで、 L は1 mSv、又は、年等価線量限度の10%が通常用いられています。

例えば、実効線量又は眼の水晶体の等価線量について、測定期間を1ヶ月、 $L=1$ mSv又は2 mSv (5年平均での年等価線量限度20 mSvの10%)とした場合の、1 cm線量当量、70 μm 線量当量、及び3 mm線量当量の許容される不確かさは図A2.1に示すようになります(この曲線の形から、「トランペットカーブ」と呼ばれることがあります。)

個人線量計による線量測定に係る不確かさについては、ICRP Publ.35^{A2.2)} (109項)とICRP Publ.75^{A2.1)} (251項)とで説明が必ずしも同じではありませんが、両者の説明を組み合わせて、線量限度の近辺では、ファクター1.5(あるいは $\pm 50\%$)、記録レベルの近辺では、ファクター2(あるいは $\pm 100\%$)までを個人線量計が潜在的に持ちうる測定の不確かさと解釈することは妥当です。この不確かさの範囲を、連続的な線量の関数として表現したものは、俗にトランペットカーブ (IAEA GSG-7^{A2.3)}、p.149~152、Fig.4)と呼ばれ、個人線量計のブラインド試験等における性能の善し悪しの判定等に利用されています。

また、照射条件等が良好に整えられた実験室ではなく、実際の作業現場で得られた測定値の不確かさを評価することは容易ではありませんが、実験室で良好な性能を有していることが確かめられた個人線量計同士の相互比較は、実際の現場での測定の不確かさを推量する一つの方法と考えられます。

参考文献

- A2.1) International Commission on Radiological Protection (ICRP), General Principles for the Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 75, Ann. ICRP 27(1) (1997).
- A2.2) International Commission on Radiological Protection (ICRP), General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 35, Ann. ICRP 9 (4) (1982).
- A2.3) International Atomic Energy Agency (IAEA), Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7, IAEA, Vienna (2018).

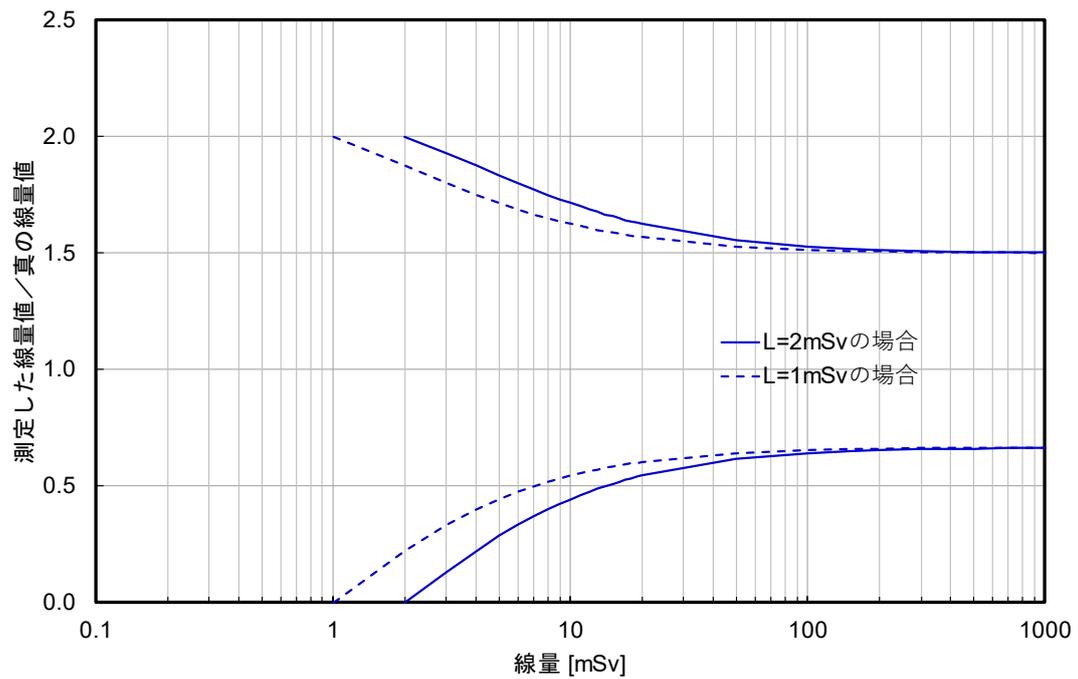


図 A2.1 測定期間を1ヶ月とした場合に個人線量計として許容される不確かさの範囲
 (L=1 mSv の場合は実効線量、L=2 mSv の場合は眼の水晶体の等価線量の算定において
 許容される不確かさの範囲を示す)

【例題 3】

眼の近傍で線量を測定することが必要となるかを判断する線量レベル（管理基準）は、事業所の線量管理に責任を有する者が作業環境に応じて設定するとありますが、どのような数値を採用すれば良いでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章（3）節]

【回答 3】

眼の近傍に個人線量計を装着することによる作業への負担及び、放射線管理者の個人線量計管理の手間等を考慮の上、眼の近傍に個人線量計を装着するための通常に必要な条件として、眼の水晶体の等価線量が 5 年間の年平均の等価線量限度 20 mSv を超える可能性がある場合が考えられます。

もちろん、本ガイドラインは線量管理に責任を持つ者の専門的な指導の下で、必要に応じて上記以外の値でも眼の水晶体の等価線量限度（5 年間で 100 mSv（5 年間の年平均 20 mSv））かついずれの 1 年においても 50 mSv を超えないこと）を遵守できれば、事業者が個々の事業所の状況を考慮して自主的な判断で管理基準を採用して眼の近傍への個人線量計を装着させることを妨げるものではありません。例えば、個人線量計の不確かさ 1.5 を考慮して、使用している個人線量計が年間 13 mSv（ $=20/1.5$ ）を超える可能性がある場合、眼の近傍に水晶体専用の個人線量計を装着するという考え方もあります。また、それぞれの事業所において使用している個人モニタリングの不確かさの実態が把握できているようでしたら、それに合わせて弾力的に決めてよい数値であると考えます。例えば、個人モニタリングの不確かさが 1.2 と評価できるような場合は、管理基準を年 17 mSv（ $\approx 20 \text{ mSv}/1.2$ ）とするような考えもできます。しかし一方で、作業の種類と必要性によっては防護の最適化を図ってもやむを得ず年間 20 mSv を超える作業員がいる場合、その時点で、眼の水晶体の等価線量の 5 年間管理の対象者として、水晶体の専用の個人線量計を装着するという方法も考えられます。

参考として、眼の近傍で直接測定を実施することが望ましい管理基準として、ISO 15382:2015^{A3.1)}、IRPA ガイドライン^{A3.2)}では 6 mSv（ただし、1 年だけの被ばくの場合、ISO 15382:2015^{A3.1)}は年間 15 mSv）、IAEA TECDOC No.1731^{A3.3)}では年間 5 mSv が、EU 指令（Council Directive 2013/59/EURATOM）^{A3.4)}では年間 15 mSv が提案されており、オランダ^{A3.5)}、カナダ^{A3.6)}のガイドラインでは年間 15 mSv が採用されています。また、放射線安全規制研究戦略的推進事業成果報告書（平成 29、30 年度）^{A3.7),A3.8)}では、10～15 mSv/年の範囲で適切な値を事業者が選択することを提案しています。これらの数値を表 A3.1 にまとめて示します。

ICRP は ICRP Publ.9^{A3.9)}において、放射線作業員について、線量限度の 10 分の 3 を超える作業員（カテゴリー A）と超えない作業員（カテゴリー B）に分類して、カテゴリー A の作業員のみ個人モニタリングを必要とするという考え方を示しています。眼の水晶体の等価線量限度である 5 年間の年平均で 20 mSv の 10 分の 3 は年間 6 mSv であり、ま

た、いずれの1年においても超えてはいけない線量である年間50 mSvの10分の3は年間15 mSvです。ISO 15382:2015^{A3.1)}、IRPA ガイドライン A3.2)、及びEU 指令^{A3.4)}では線量限度の10分の3という値を参考にして眼の近傍への個人線量計の装着を提案していると考えられます。

なお、フランス放射線防護学会^{A3.10)}では直接測定が必要となる判断基準として眼の水晶体の等価線量限度を年間最大50 mSvで管理する場合は、眼の近傍での3 mm 個人線量当量が年間20 mSvを超えるケースもあり得ることが示されています。

表 A3.1 眼の近傍で直接測定を実施することが望ましいと考えられる管理基準

提言文書	眼の水晶体の等価線量の管理基準
IAEA TECDOC No.1731 ^{A3.3)}	5 mSv/年
EU 指令 (Council Directive 2013/59/EURATOM) ^{A3.4)}	15 mSv/年
ISO 15382:2015 ^{A3.1)}	6 mSv/年 (被ばくが連続する複数年の場合) 15 mSv/年 (被ばくが単年の場合)
IRPA guideline protocol ^{A3.2)} (注)	1~6 mSv/年(0.2~0.5 mSv/月) : 推奨勧告 > 6 mSv/年(> 0.5 mSv/月) : 必要
放射線安全規制研究戦略的推進事業成果報告書 ^{A3.7, A3.8)}	10~15 mSv/年

(注) IRPA guideline protocol では、最も精度の良い眼の水晶体の等価線量のモニタリングは実際に眼の近傍に装着した個人線量計で個人線量当量 Hp(3)を測定することであると記載しているが、襟部又は頭部でも十分な測定値を得ることができると考えられるとも記載している。

参考文献

- A3.1) International Organization for Standardization (ISO), ISO 15382:2015, Radiological protection – Procedures for monitoring the dose to the lens of the eye, the skin and the extremities (2015).
- A3.2) International Radiation Protection Association (IRPA), IRPA Guidance on Implementation of Eye Dose Monitoring and Eye Protection of Workers (2017).
- A3.3) International Atomic Energy Agency (IAEA), Implications for Occupational Radiation Protection of the New Dose Limit for the Lens of the Eye, IAEA-TECDOC-1731, IAEA, Vienna (2013).
- A3.4) Council Directive 2013/59/Euratom of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom, Official Journal of the European Union, L 13, 1–73 (2014).

- A3.5) Netherlands Commission on Radiation Dosimetry (NCS), Guidelines for Radiation Protection and Dosimetry of the Eye Lens, Report 31 of the Netherlands Commission on Radiation Dosimetry (2018).
- A3.6) Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), Dosimetry: Ascertaining Occupational Dose, REGDOC-2.7.2, Volume I (2019).
- A3.7) 平成 29 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業）原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告, (2018).
- A3.8) 平成 30 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業）原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告, (2019).
- A3.9) International Commission on Radiological Protection (ICRP), Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Adopted September 17, 1965), ICRP Publication 9 (1966).
- A3.10) French Radiological Protection Society (SFRP), Technical Information Sheets: Eye lens: Regulatory limits, measurements, dosimetry and medical surveillance (2016).

【例題 4】

全面マスクを装着した場合、全面マスクの外側に個人線量計を装着して全面マスクでの減衰計算等から眼の水晶体の等価線量を算定することはできますか？

[関連箇所：解説第 5 章 (5) 節 2)、4) 項、添付資料 2 並びに【例題 16】]

【回答 4】

個人用防護具である全面マスクを装着する場合、眼の水晶体の等価線量を正確に算定するため、全面マスクの内側に放射線測定器（この場合は個人線量計）を装着して測定することが適当であると厚生労働省の「眼の水晶体の被ばく限度見直し等に関する検討会報告書」^{A4.1)}に記載されています。電離放射線障害防止規則の第 8 条の第 3 項には、「・・・放射線測定器を用いてこれを測定することが著しく困難な場合には、放射線測定器によって測定した線量当量率を用いて算出し、これが著しく困難な場合には、計算によってこれを求めることができる。」と記載されています。「著しく困難な場合」として、厚生労働省の通達^{A4.2)}によれば、第 8 条関係の (7) として「第 3 項ただし書きの「これを測定することが著しく困難な場合」又は「これが著しく困難な場合」とは、その放射線に対する放射線測定器がまだ開発されていない場合等をいうこと」となっております。従いまして、全面マスク外側に装着した個人線量計の値を全面マスクでの減衰効果で補正して眼の水晶体の等価線量を算定することは法令上、適切ではありません。

作業計画の立案時等に、全面マスクの遮蔽効果を考慮して計算により線量を評価することは可能ですが、「正確に等価線量を算定する」ことを考えますと、直接測定することが適当であると考えられます。

なお、ガンマ線放出核種のみでの作業環境においては、全面マスクに被ばく低減効果はなく、眼の近傍であれば、全面マスクの内側でも外側でも同様に評価が可能です。また、主に β 線による被ばくのみを考えればよい作業環境においては、 β 線を十分に遮蔽できる全面マスク内で眼の水晶体の等価線量が記録レベル以下であることを実測等で確認した上で、全面マスク内に個人線量計を装着しないという考え方もあり得ます。

参考文献

A4.1) 厚生労働省，眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書，令和元年 9 月，

https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_06824.html（最終アクセス：2019 年 12 月 20 日）

A4.2) 厚生労働省労働基準局長，労働安全衛生規則及び電離放射線障害防止規則の一部を改正する省令の施行等について，基発第 253 号，（平成 13 年 3 月 30 日）

【例題 5】

眼の水晶体の被ばくに対する防護の最適化において、線量モニタリング結果はどのように使えばよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 1 章]

【回答 5】

眼の水晶体の等価線量については、白内障発症のしきい線量が 0.5 Gy であることから、線量限度を遵守するだけでなく、防護の最適化を考慮することが必要となります。防護の最適化を実施するには、事業者がリーダーシップを発揮し、放射線防護の専門家（放射線取扱主任者等）の指導のもとに、防護の最適化を目指す作業環境を整備するとともに、作業者が作業手順等を確立して、それらの継続的な改善を図る必要があります。そのためには、労働安全衛生マネジメントシステムの考え方を応用することが有効です^{A5.1)}。

ICRP Publ.75^{A5.2)}によれば、防護の最適化は、防護手段に係る時間、金銭、諸機材等で表したコストを考慮に入れながら、防護手段によって達成される被ばく線量の低減対策を必要に応じて実施していくこととなります。

被ばく低減の手段として、以下の内容について段階的に考慮することとなります。最初の段階で工学的管理を行い、次の段階で、管理的対策を行い、これらの手段では合理的な被ばく低減が十分でないときは、個人用防護具の使用が行われます。

線量モニタリング結果は、防護の最適化のための施策の妥当性の確認に用います。例えば、モニタリング結果が想定と異なった場合等には、その原因を分析し、十分でなかった施策を抽出し、それに対する改善を行うことが必要です。有効な施策があった場合等には、それを良好事例として取りまとめ、同様の作業環境下での作業を計画する際に参考できるようにすることが大切です。ちなみに防護の最適化とは以下のステップで実施されます。

(1) 工学的管理

線量管理に責任を有する者（事業者、放射線取扱主任者等）は放射線業務従事者の水晶体防護の最適化のため、第一に工学的管理を実施する必要があります。工学的管理の目的は、作業員から線源を物理的に隔離し、外部被ばく等をなくすか低減することです。工学的管理は通常、危険性及び有害性の除去を前提として、例えば被ばく線量の低い機器の使用など作業場の機器・設備の設計段階で導入されますが、防護の最適化に適切であることが認識されたと、稼働中の施設においても導入することができます。例えば遮蔽板等の遮蔽材を線源又は散乱体と従事者の間に設置するなど様々な追加や変更が必要になることがあります。工学的管理は他の防護措置に先立って考慮されるべきです。

工学的管理が被ばく低減に対して想定どおりに役に立っていることを定期的に確認することが必要です。とくに設備の保守や変更があった場合は、その時点で確認を行うことが必要であり、確認の記録は保管しておくことが大切です。

(2) 管理的対策

管理的対策では実施する作業計画に基づき、環境測定やシミュレーション計算等による場の線量率と推定される作業時間から眼の水晶体が受ける被ばくの計画線量を事前に把握して、作業手順、手法の改良や、場合によっては工学的管理である遮蔽の追加によって線量低減の可能性を検討します。ただし、作業者は、自分の作業を適切に行うための技術を持ち、必要な知識を持つとともに、十分な訓練を受けることが必要です。そのためには、被ばく低減の啓発普及とともに、放射線場での作業をする前に、被ばくを伴わない環境での模擬作業(コールドラン又はモックアップを使用した訓練)などによる具体的な作業手順の確認と課題検討が有効です。これらを実施することは、被ばくを伴う作業場で、可能な限り円滑に作業を遂行することで作業時間を短縮でき、不必要な危険が回避され、被ばくを最小化することに役立ちます。

(3) 個人用防護具の使用

上記の工学的管理と管理的対策を用いても眼の水晶体の防護が十分でない場合、個人用防護具の使用が必要となります。

個人用防護具を用いる場合、作業効率を低下させ、その結果として作業時間が長くなる可能性や一般的な安全性に関するリスク増加も考えられるため、適切な防護具を選ぶことが重要です。眼の水晶体の個人用防護具としては必要に応じて防護眼鏡、防護マスク(全面マスク)⁵を装着することにより、電子線(β線等)及び低エネルギー光子に対しては、遮蔽効果により被ばく線量の低減が期待できますが、中性子に対しては期待できません。鉛入りガラスやアクリル等を用いていない防護眼鏡等では低エネルギーでない光子に対する遮蔽効果は期待できません。鉛入りの遮蔽材を用いている防護眼鏡等はエネルギーの高い電子線に対しては、防護具中で発生する制動X線を考慮することが必要となる場合があります。

参考文献

- A5.1) 厚生労働省, 眼の水晶体の被ばく限度の見直し等に関する検討会 報告書, 令和元年9月, https://www.mhlw.go.jp/stf/newpage_06824.html (最終アクセス: 2019年12月20日)
- A5.2) International Commission on Radiological Protection (ICRP), General Principles for the Radiation Protection of Workers, ICRP Publication 75, Ann. ICRP 27(1) (1997).

⁵ 防護マスクは呼吸器系の防護具ですが、電子線や低エネルギー光子に対しては遮蔽効果があると考えられる場合が多いです。

【例題 6】

眼の水晶体の専用の個人線量計とは何か、どのようなものがありますか？

[関連箇所：解説第 5 章]

【回答 6】

防護メガネ内側の 3 mm 線量当量を測定するための水晶体専用の受動形個人線量計があります。写真の線量計は、いずれも熱ルミネセンス線量計で 0.1 mSv オーダーから 1 Sv オーダーまでの X・ γ 線及び β 線の 3 mm 線量当量を測定することが出来ます。これらの個人線量計の測定値には、バックグラウンドからの線量が含まれています。バックグラウンドの差し引きにつきましては、IAEA GSG-7^{A6.1)}の 7.128 項から 7.131 項に記載があります。国内の線量測定サービス機関等においては、これと同様な考え方に従いバックグラウンドを差し引いて線量を算定しています。なお、事業場の線量管理に責任を有する者は、バックグラウンドを差し引くためにコントロール線量計を利用する場合、線量測定サービス機関等からの取り扱い上の注意事項に従い、適切にコントロール線量計を管理する必要があります。詳しくは体幹部用のバッジサービスを受けている線量測定サービス機関等へお問い合わせ下さい。

写真 6.1 眼の水晶体専用の受動形個人線量計の例
熱ルミネセンス線量計 A 熱ルミネセンス線量計 B



写真は執筆当時のものです。

参考文献

A6.1) International Atomic Energy Agency (IAEA), Occupational Radiation Protection, IAEA Safety Standards Series No. GSG-7, IAEA, Vienna (2018).

【例題 7】

3 mm 線量当量による測定に関する国際規格の検討状況はどのようになっていますか？

[関連箇所：解説第 3 章 (2) 節]

【回答 7】

光子による照射の場合の校正方法の規格である ISO 4037-3:2019^{A7.1)}には光子の空気カーマから $H'(3)$ 、 $H_p(3)$ への換算係数が示されています。 $H_p(3)$ については、頭部を模擬した円柱の ICRU ファントムの深さ 3 mm で定義されています。

β 線については、ISO 6980 シリーズ^{A7.2)}がありますが、現行のものには $H_p(3)$ は含まれていません。ただし、2019 年から見直しの検討が開始されており、今後 2、3 年中には改定されると予想されます。

また、受動形線量計の規格である IEC 62387:2012A7.3)は 2020 年 1 月 31 日に IEC 62387:2020^{A7.4)}に改定されました。 $H_p(3)$ の校正について当該規格の 2012 年版^{A7.3)}ではスラブファントムが規定されていましたが、2020 年版^{A7.4)}では円柱ファントムが規定されています。IEC 62387:2020^{A7.4)}には、光子及び β 線の $H'(3)$ 、 $H_p(3)$ への換算係数が示されています。また、当該規格には 70 μm 深さでの個人吸収線量 $D_p(0.07)$ から $H'(3)$ 並びに円柱ファントムに対する $H_p(3)$ への換算係数も示されています。

参考文献

- A7.1) ISO 4037-3:2019, Radiological protection — X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy —Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence.
- A7.2) ISO 6980-3:2006(R2015), Nuclear energy - reference beta-particle radiation - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle incidence.
- A7.3) IEC 62387:2012, Radiation protection instrumentation - Passive integrating dosimetry systems for personal and environmental monitoring of photon and beta radiation.
- A7.4) IEC 62387:2020, Radiation protection instrumentation - Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation.

【例題 8】

眼の水晶体の専用の個人線量計の校正はどのように実施されるのですか？

[関連箇所：解説第 3 章 (2) 節並びに【例題 26】]

【回答 8】

X・ γ 線については、光子による照射の場合の校正方法の規格である ISO 4037-3:2019^{A8.1)} に規定された空気カーマから $H'(3)$ 、 $H_p(3)$ の換算係数を用いて線量当量を求めることとなります。 $H_p(3)$ の個人線量計については、装着部位である頭部を模擬した円柱 (20 cm 直径、20 cm 長) の水ファントムに取り付けて校正することとなります。

β 線の $H'(3)$ 及び $H_p(3)$ については、校正方法の規格である ISO 6980 シリーズ^{A8.2)} の改定作業が終わり次第、この規格に従った方法で実施されます。当面は IEC 62387:2020^{A8.3)} に 70 μm 深さでの個人吸収線量 $D_p(0.07)$ から $H'(3)$ 並びに円柱ファントムに対する $H_p(3)$ への換算係数が示されていますので、この換算係数を適用することができると考えられます。 $H_p(3)$ の個人線量計の校正を行う場合には、光子と同様に円柱ファントムを用いることとなります。

参考文献

- A8.1) ISO 4037-3:2019, Radiological protection - X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy -Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence.
- A8.2) ISO 6980-3:2006(R2015), Nuclear energy - reference beta-particle radiation - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta radiation energy and angle incidence.
- A8.3) IEC 62387:2020, Radiation protection instrumentation - Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation.

【例題 9】

原子力施設での眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章]

【回答 9】

平成 29 年度及び 30 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業において、稼働している商業用の原子力発電所（加圧水型軽水炉）、原子力研究施設（再処理、MOX 燃料施設、ホットセル）、廃止措置作業を行っている原子力発電所（沸騰水型軽水炉）、廃炉作業中の東京電力福島第一原子力発電所において、放射線業務従事者の眼の水晶体における被ばくの実態調査を行っています^{A9.1, A9.2}。

原子力発電所（加圧水型軽水炉）の定期検査中の作業については、⁵⁸Co 及び ⁶⁰Co が主な線源となること、低エネルギーの散乱線成分はほとんど存在しないことを確認しました。また、作業場の線源近傍では 70 μm 線量当量と 1 cm 線量当量に差がある場合でも、作業する放射線業務従事者は線源から少し離れているため、β 線の寄与はほとんどなく、装着した個人線量計の 70 μm 線量当量、3 mm 線量当量、1 cm 線量当量の読み値には有意な差はみられませんでした。

胸部に装着した個人線量計で測定し、算定した実効線量と眼の近傍に装着した個人線量計で測定し、算定した眼の水晶体の等価線量を比較したところ、原子炉容器開放・復旧作業、一次冷却材ポンプインターナル分解点検及び放射線測定を実施した従事者や廃止措置の従事者の中には、眼の水晶体の等価線量（眼の近傍に装着した個人線量計の 3 mm 線量当量）が胸部で実効線量の 1.5 倍を超える場合がありますが、2 倍を超えることはありませんでした。そして、場の線量率としては、胸部と眼の水晶体の位置で 5 倍も異なる場合がありますが、作業者の姿勢は常に変化することから、このような場で作業をした作業者においても、胸部での実効線量と眼の水晶体の等価線量の値はほぼ等しい値でした。

再処理施設においては線源となる主な核種は、使用済み燃料貯蔵プールでは ⁶⁰Co、それ以降の工程では ¹³⁷Cs 等の核分裂生成物です。これらの工程機器の多くは、遠隔操作となります。放射線業務従事者の外部被ばくのほとんどは、定期点検等でセル内の工程機器の保守作業を行う際、特に補修・改修等の大型工事の際に生じます。このようなセル内作業時の調査では、ほぼ体幹部均等被ばくであることがわかっています。このため、眼の近傍での測定は管理基準を超える可能性のある人のみ実施すればよいことになります。ただし、上半身だけセル内に入るような作業では、胸部と頭部の比が約 2 となる場合があります。眼の近傍での線量測定の必要性の有無に判断については、作業効率や線量に応じて慎重に行う必要があります。

東京電力福島第一原子力発電所では、汚染水タンクの解体作業（β 線被ばくが優位な場）において、全面マスク内で測定した 70 μm 線量当量は、胸部で測定した 70 μm 線量当量の 20% となっており、また、線量限度を十分に下回る結果となることがわかりまし

た。このようなβ線被ばくが優位な場では、胸部で測定した70μm線量当量を眼の水晶体の等価線量として算定すると、事業所で設定した管理基準を超える可能性が高くなるため、眼の水晶体の等価線量をより正確に算定するためにマスク内に眼の専用の個人線量計を装着し、測定することが望ましいと考えられます。

原子炉建屋周辺では、¹³⁴Cs及び¹³⁷Csのγ線（直接線）だけでなく、散乱線の寄与も高くなりますが、胸部と眼の水晶体位置の線量が2倍を上回ることはなく、遮蔽ベスト外側の上腕部での線量の1.5倍を上回ることはありませんでした。

以上の結果を整理しますと、原子力施設（廃止措置段階の施設を含む）、再処理施設及び東京電力福島第一原子力発電所で通常行われている作業では、（1）作業者は常に姿勢が変化することから、場の線量率の差異ほど作業者の部位での線量率の差異は見られない、（2）最大でも2倍を上回ることがなく、（3）作業者によっては、胸部と水晶体位置の線量に差がないことから、計画段階で2倍の差を判断することは極めて困難であると考えられます。また、眼の近傍に個人線量計を装着することで視野が狭まり可動域が制限されることにより、作業に負荷がかかることや線量計が脱落することによる施設機器内部への異物混入の危険性が高まる等からも、β線被ばくが優位な場を除けば、合理的に考えて、体幹部均等被ばく管理（胸部又は腹部に個人線量計を1つ装着）が適切であり、併せて適切な管理基準を設けることで線量限度を遵守することが可能であると考えられます。

ただし、事業者は、これまでに実施していない新たな作業を開始する場合等においては、様々な要因を考慮し、作業者の眼の水晶体の等価線量が著しく体幹部基本部位での線量と異なることがないかどうか慎重に判断することが必要です。

原子力研究施設（セル内作業やグローブボックス作業）についても同じく、上記事業において、過去の放射線量記録等をもとに不均等被ばくを受ける作業を調査しています。この結果、眼の水晶体に高線量の被ばく又は不均等な被ばくを受ける作業は、高線量率下でのセル内作業と遮蔽ベストを着用する作業に限られます。このうち、高線量率下でのセル内作業については、ほとんどの場合はγ線による体幹部均等被ばくです。β線が混在する場では内部被ばくに対する防護のために全面マスク等が用いられます。アイピースの遮蔽効果を考慮すればβ線の寄与は十分に小さいものと考えられます。また、防護衣を着用する作業は20mSvを超える事例は極めて少数であり、適切な管理基準を設けることによって線量限度を遵守することが可能であると考えられます。

参考文献

- A9.1) 平成29年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業） 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告書（2018）。

A9.2) 平成 30 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業） 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告書 (2019).

【例題 10】

医療施設での眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章]

【回答 10】

医療施設での基本的な眼の水晶体の等価線量モニタリングの考え方は、他の全ての施設と同様に、本ガイドラインのフロー図を参考に眼の水晶体の等価線量を算定していただければよいものと考えます。

放射線管理区域に入室する放射線診療従事者の多くは、防護衣を着用しているので体幹部不均等被ばく管理を実施していると考えられます。この場合、防護衣の内側の胸部に個人線量計を 1 つ装着し、実効線量及び眼の水晶体の等価線量算定のために防護衣の外側（頸部）にもう一つ個人線量計を装着することとなります。防護衣の外側（頸部）で測定し、算定した眼の水晶体の等価線量と実際の眼の水晶体の等価線量が、防護眼鏡等を装着することで著しく異なる場合は、眼のできるだけ近くで眼の水晶体の等価線量に使用する実用量を測定のための専用の個人線量計を用いて、眼の水晶体の等価線量を算定することが望ましいと考えます。

眼の近傍での眼の水晶体の等価線量に使用する実用量を測定する時の注意点としては、線源に近い方の眼の近傍で測定することです。特に、防護眼鏡内で眼の水晶体の等価線量を算定する際には個人線量計の装着位置等に注意してください。防護眼鏡の内側に個人線量計が装着されていないと実際よりも著しく高く等価線量を算定することになります。また、防護眼鏡の下から散乱線が入射してきますので、より被ばく低減が必要な場合においては、防護眼鏡下部にも放射線を遮蔽できる遮蔽体があるものを使用すると効果的です。透視検査中に室内を動き回るような場合には、個人線量計をどちらに装着してもよいと考えます。放射線管理者は、治療・診断の状況に応じて、個人線量計の装着位置を総合的に判断してください。

なお、医療分野では、他の従事者に比べて線量が高い人の割合が高いです。このため、眼の水晶体の等価線量限度に関する法令を遵守するためには、適切な位置に線量計を装着することや被ばく低減を行うことも重要となります。

平成 29 年度及び 30 年度の安全規制研究戦略的推進事業の報告書では、IVR や透視を行う放射線診療従事者のほか、CT や一般撮影時に介助を行う放射線診療従事者の眼の水晶体の等価線量が高くなるおそれがあることが報告されています^{A10.1,A10.2}。一方、核医学検査による放射線診療従事者の線量はそれほど高くありませんでした。しかしながら SPECT-CT では、CT を使用します。その場合、介助件数が多くなると線量が高くなる可能性があります。

一般撮影（救急撮影、病室撮影を含む）や CT の介助者の被ばくについては、介助件数が多い場合には、眼の水晶体の等価線量限度を超えるおそれがあるため、注意が必要

です。介助者の被ばく低減には、防護具を使用する前に、撮影時の介助回数を減らす等（患者さんのご家族に介助を依頼する^(注)、一人のスタッフに業務が偏らないようにする等）を行うことが望ましいと考えられます。

防護具（防護眼鏡を装着する等）の使用も被ばく低減に有効です。一般撮影は、IVR や透視検査などを行う場合とは、線源の位置や散乱線の入射方向等が異なりますので、介助者の被ばく線量や作業性を考慮して、各施設の一般撮影の介助に適した方法で被ばく低減に努めてください。

マンモグラフィーでは管電圧 25 kV～35 kV 程度の X 線を利用します。20 keV 以下の X 線では、1 cm 線量当量、3 mm 線量当量そして 70 μm 線量当量の値が異なります。眼の水晶体の等価線量が管理基準に近いか、超えるおそれのある場合には、正確に眼の水晶体の等価線量を算定する必要があり、3 mm 線量当量を測定する必要があります。

医療分野における被ばく線量測定、評価、防護策に関する多くの論文が報告されています^{A10.3, A10.4}。これらも参考にしてください。

また、医療分野においては、手技によって、線源、被ばく形態や防護方法が異なります。『医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン—水晶体の被ばく管理を中心に—』^{A10.5}では、通常、眼の水晶体の等価線量が高くなる X 線を取り扱う医療スタッフについては防護衣を着用しており、体幹部不均等被ばく管理（胸部又は腹部及び頭・頸部に個人線量計を着用装着）をしていることから、眼の近傍に個人線量計を装着する管理基準として年間 20 mSv を推奨しています。詳細につきましては、当該ガイドラインを参考にしてください。

(注) 介助により患者の家族が受ける被ばくは医療被ばくになります。1 回あたりの被ばく線量は低く、一方、一般撮影や CT により患者に対する医療上の有益な情報が得られることから、このような被ばくは正当化されていると考えられます。

参考文献

- A10.1) 平成 29 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業） 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告書 (2018).
- A10.2) 平成 30 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業） 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告書 (2019).
- A10.3) 赤羽恵一他，水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書（III）－海外における放射線業務従事者の水晶体被ばくレベルと防護に関する研究－，保健物理，49(4)，171-179 (2014).
- A10.4) 赤羽恵一他，水晶体の放射線防護に関する専門研究会中間報告書（V）－わが国の各分野における従事者の水晶体被ばく及び防護の現状－，保健物理，50(1)，76-89 (2015).

A10.5) 医療スタッフの放射線安全に係るガイドライン—水晶体の被ばく管理を中心に—，
令和元年度放射線対策委託費（原子力安全規制研究戦略的推進事業），(2020).

【例題 11】

獣医療従事者の眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章]

【回答 11】

獣医療従事者の放射線防護及び眼の水晶体の等価線量の算定については、人医療の方法が参考になると考えられます。防護エプロンを着用する際には、防護エプロンの外側の頭頸部へ個人線量計を追加し、その線量計が示す値が管理基準に近付くか、超えるおそれがないならば、その値を眼の水晶体の等価線量としてください（本ガイドラインの 4 ページにあるフロー図参考）。また、防護エプロンの着用の有無にかかわらず、防護眼鏡を装着する場合や眼の水晶体の等価線量が線量管理基準に近いか、又は、超えるおそれがある場合には、正確に眼の水晶体の等価線量を測定するため、頭頸部に装着した線量計以外に、眼の近傍に $H_p(3)$ を測定できる線量計を装着させてください。

伴侶動物に対する高度獣医療の需要の高まりとともに、小動物臨床では X 線による診断が必要不可欠となっています。

近年、わが国の線量測定サービス機関等から報告されている職業別の実効線量及び眼の水晶体の等価線量の算定結果をみると、獣医療従事者は、いずれも年間 1 mSv 未満の従事者が 99% を占めています^{A11.1)}。しかし、中には眼の水晶体の等価線量が年間 84.1 mSv、実効線量が年間 65.2 mSv になる獣医療従事者もいます。このように実効線量や眼の水晶体の等価線量が高くなる獣医療従事者は特に注意が必要です。

Hupe ら^{A11.2)}によると、一般的な X 線の撮影時の保定するスタッフの実効線量は 1 検査あたり小型動物の場合で 2 μ Sv、犬の腹部等の場合で 30 μ Sv 程度と報告されています。このような場合、検査数を 6000 件（30 頭/日×200 日）とすると、眼の水晶体の等価線量は、小型動物の場合で年間 12 mSv、犬の腹部等の場合で 180 mSv となります。

また、横山ら^{A11.3)}の実験では、30 cm（縦）×30 cm（横）×15 cm（厚）の人体等価ファントムを用いて、大型動物保定時を模擬し、動物病院の検査条件でスタッフの立ち位置で線量を推定したところ、従事者の眼の水晶体の等価線量は 1 回の撮影で 1.3 μ Sv と推定されました。30 頭/日×3 回撮影/検査×200 日とした場合、年間約 23 mSv となります。

産業動物診療では、あまり X 線撮影は行われませんが、今後、機会が増える可能性があります。大型の動物の診療では、ポータブルの装置を使用して撮影する場合があります。このような場合は照射野も広く、線量も高くなる可能性がありますので、診療時には、撮影部位と十分に距離を取るなどの工夫をしてください。

獣医療における放射線防護の一般的な方法については、日本獣医師会が放射線診療技術支援の e-learning system^{A11.4)}において紹介しています。

眼の水晶体の等価線量のモニタリングを含む線量測定に関しては、本ガイドラインのフロー図を参考に、適切な線量測定と被ばく低減に努めてください。

参考文献：

A11.1) 株式会社千代田テクノル，平成 30 年度個人線量の実態，FBNews, 513, 6-14 (2019).

A11.2) Hupe, O., Ankerhold, U., Determination of the dose to persons assisting when X-radiation is used in medicine, dentistry and veterinary medicine, Radiation Protection Dosimetry, 144(1-4), 478-481 (2011).

A11.3) 横山須美ら，私信 (2019).

A11.4) 日本獣医師会，放射線診療技術支援 e-learning system,
<http://www.020329.com/x-ray/> (最終アクセス：2019 年 12 月 20 日)

【例題 12】

クルックス管からの X 線に対して眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章]

【回答 12】

クルックス管は 1895 年にレントゲンが X 線を発見した際に用いられた、放射線研究の歴史上極めて重要な装置です。現行の中学理科の学習指導要領解説^{A12.1)}において、電子・電流に関する単元においてクルックス管による電子線の観察をすることが記載されています。また、平成 29 年に公示された新学習指導要領^{A12.2)}では、真空放電と関連づけながら放射線の性質と利用にも触れることが新たに追加されています。このためクルックス管は学校教育での利用が主となります。教育現場では、クルックス管と同様な装置として X 線を発生するクロス真空計と呼ばれている装置やガイスラー管などが存在します。

クルックス管からの漏洩 X 線により、15 cm の距離で皮膚表面における線量が 5 分で 15 mSv を超える場合があります^{A12.3)}。X 線のエネルギーは 15 keV~20 keV 程度と極めて低いため、全身への実効線量はその 10 分の 1 程度ですが、眼の水晶体に対しては注意を要します。さらに、電子線を観察するための装置であるため、線源を見つめる必要があります。

しかし、運用方法によって大幅に線量を低減することが可能であることが確かめられています。電源装置の空中放電極の距離を 20 mm 以下にし、必要以上に高い電圧が印加されないようにすることで、X 線の透過率は大幅に低下します。発生源の制御に加えて、放射線防護三原則に従い、距離、時間及び遮蔽を適切に設定することも重要です。距離は 1 m 以上、時間は 10 分というのを目安としています。簡易なガラスの水槽を用いた遮蔽等も被ばく低減に有効な手段です。

このような運用指針を遵守することにより、生徒が観察する距離と時間では、国際原子力機関の国際基本安全基準 (IAEA BSS^{A12.3)}) に示された免除レベル (実効線量で年間 10 μ Sv のオーダー) を下回ることを現在実証中です^{A12.4)}。2019 年度に実施した、上記の運用指針を遵守し、遮蔽は行わない条件での全国調査において、191 本の装置のうち、187 本の装置については 1 m 距離、10 分間の 70 μ m 線量当量が、100 μ Sv 以下に抑制されていることが確認されました^{A12.5)}。最も線量の高い装置では 400 μ Sv 程度と評価されていますが、ガラスの水槽などを用いて遮蔽を行えば、さらに 20 分の 1 以下に線量を下げることが出来ます。

教員は授業で複数回クルックス管を利用する可能性がありますが、電子線発生中は生徒が観察を行う距離 1 m よりも遠くにいることとなります。このため、教員及び生徒の

眼の水晶体の等価線量については、十分に低いものと考えられ、眼の水晶体の線量モニタリングの必要はないと考えられます。

クルックス管による被ばくやその低減策については、2019年4月から2021年3月まで設置されている、日本保健物理学会の「教育現場における低エネルギーX線を対象とした放射線安全管理に関する専門研究会」^{A12.6)}でも議論を行っています。詳細につきましては、当該ホームページ等を参考にしてください。

参考文献

- A12.1) 中学校学習指導要領解説理科編，平成20年7月，文部科学省
- A12.2) 中学校学習指導要領，平成29年3月，文部科学省
- A12.3) European Commission, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, International Labour Organization, OECD Nuclear Energy Agency, Pan-American Health Organization, United Nations Environment Programme, World Health Organization, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, IAEA, Vienna (2014)
- A12.4) 秋吉優史，クルックス管安全取扱のガイドライン（暫定），研究教育紹介ホームページ，
<http://bigbird.riast.osakafu-u.ac.jp/~akiyoshi/Works/index.htm#CPro>（最終アクセス：2019年12月20日）
- A12.5) 秋吉優史、学校教育現場におけるクルックス管の安全管理とその活用、放射線教育誌、24(2020)（印刷中）
- A12.6) 教育現場における低エネルギーX線を対象とした放射線安全管理に関する専門研究会、日本保健物理学会ホームページ，
<http://www.jhps.or.jp/cgi-bin/info/page.cgi?id=61>（最終アクセス：2019年12月20日）

【例題 13】

非破壊検査の場合の眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章]

【回答 13】

非破壊検査では、 ^{169}Yb 、 ^{192}Ir 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 等の γ 線源を用いて配管の放射線透過試験や、管電圧が 90 kV から 600 kV の X 線発生装置を用いて透過試験を行います。通常、これらの線源や装置はコンクリート製の遮蔽壁内か、遮蔽された照射室内で使用します。野外で使用する場合には、コリメータ等を用いて点線源状にして線源から 5 m 以上離れるのが一般的です。

医療を除く産業分野では、非破壊検査の作業者が、比較的線量の高い傾向を示しますが、年間の実効線量の評価結果は、80%以上の作業者において 1 mSv 以下です。中には 10 mSv を超える作業者もいますが、その人数は年間数名程度です。

平成 29 年度及び平成 30 年度の放射線安全規制研究戦略的推進事業^{A13.1), A13.2)}では、 γ 線源及び X 線発生装置を使用する非破壊検査に従事する作業者 23 名に対して、眼の水晶体の被ばくの実態調査を行いました。頭部で測定した線量の、胸部で測定した線量との比は平均で 1.1 倍であり、0.77 から 2.1 倍の間で変動しました。特殊な作業は実施していないこと等から、この結果はほぼ不確かさの範囲内にあると考えられます。したがって体幹部均等被ばくとして管理することが適切かつ合理的であると考えます。

参考文献

- A13.1) 平成 29 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業） 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告書 (2018).
- A13.2) 平成 30 年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業） 原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか？～水晶体被ばくの実態から探る～成果報告書 (2019).

【例題 14】

核燃料施設での眼の水晶体の線量モニタリングはどうすればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章]

【回答 14】

光子及び電子による被ばくについては、医療系従事者や一般的な原子力施設の放射線業務従事者と同様に、体幹部不均等被ばくを受ける場合は、必要に応じて複数の個人線量計を装着し、眼の水晶体の等価線量は、それら個人線量計のうち最も適切な位置に着けた個人線量計による測定に基づきます。

中性子については、前掛け式防護エプロン等の使用による遮蔽効果は小さいため線量率はほとんど変化せず、また、グローブボックス近傍では位置による線量（率）勾配も小さいので、防護エプロンの内側胸部に装着した個人線量計から測定した実用量から眼の水晶体の等価線量を算定することが適切であると考えられます。

【例題 15】

防護眼鏡、防護マスク等の個人用防護具に電子線（ β 線）が入射したときに発生する制動 X 線を含めた眼の水晶体の等価線量はどのように算定するのでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章（6）節 1）、2）項、【例題 4】及び【例題 16】]

【回答 15】

眼の水晶体の等価線量を正確に算定するためには、防護眼鏡、防護マスク等の個人用防護具の内側に個人線量計を装着して実用量を測定してください。そのようにすれば、個人線量計の測定値には制動 X 線による線量も含まれることになります。

しかし、ゴーグル型の防護眼鏡等を使用する場合、防護眼鏡の内側に個人線量計を装着することが、防護眼鏡の顔面を覆う面積が非常に狭い範囲に限られている等の理由で事実上不可能な場合、防護眼鏡の外部又はその近傍に装着しなければならない場合があります。このような場合、防護具による電子線（ β 線）の減弱効果（【例題 4】参照）を評価するとき、発生する制動 X 線も含めて求めておくことが必要となります。これは実験又はシミュレーション計算で評価することは可能ですが、シミュレーション計算を用いた場合は、実験による検証が必要です。この値は作業計画の立案時等に

使用することはできますが、例題 4 に記載したように、シミュレーション計算結果を、防護眼鏡の外側又はその近傍に装着した個人線量計の測定値の補正に用いて、眼の水晶体の等価線量とすることは、法令上適切ではありません。

【例題 16】

眼の水晶体の等価線量を計算で算定することはできないのでしょうか？

[関連箇所：添付資料 3、【例題 4】及び【例題 24】]

【回答 16】

放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則（RI 規制施行規則）や電離放射線障害防止規則（電離則）等の法令では、放射線の量の測定の義務等を課しています。

RI 規制施行規則では、「放射線の量及び放射性同位元素による汚染の状況の測定は、放射線測定器を用いて行うこと。ただし、放射線測定器を用いて測定することが著しく困難である場合には、計算によってこれらの値を算出することができる。」とあり、電離放射線障害防止規則の第八条第三項には、「・・（略）外部被ばくによる線量の測定は、次の各号に掲げる部位に放射線測定器を装着させて行わなければならない。ただし、放射線測定器を用いてこれを測定することが著しく困難な場合には、放射線測定器によって測定した線量当量率を用いて算出し、これが著しく困難な場合には、計算によってその値を求めることができる。」とあります。

この「著しく困難な場合」について、厚生労働省は、通達 A16.1)において、『「これを測定することが著しく困難な場合」又は「これが著しく困難な場合」とは、その放射線に対する放射線測定器がまだ開発されていない場合等をいうこと。』、また、『「計算によって」とは、放射線又は放射性物質の種類及び数量、労働者の被ばくの状況等によって計算することをいうこと。』と定めています。

装着していた眼の水晶体専用の個人線量計の紛失、破損、誤使用、装着者の間違い、測定機関における取り扱いミスによるデータ欠損により測定値が得られない場合等においては、装着していた体幹部用の個人線量計や同種の作業を実施した従事者の結果を用いて、眼の水晶体の等価線量を算定することが適切であると考えられます。

事業所の現状が「著しく困難な場合」に該当するかは、事業所の責任において慎重かつ合理的な判断を行い、判断に迷う場合は関係行政機関に確認し、法令を遵守するようにしてください。

参考文献

A16.1) 厚生労働省労働基準局長，労働安全衛生規則及び電離放射線障害防止規則の一部を改正する省令の施行等について，基発第 253 号，(平成 13 年 3 月 30 日)

【例題 17】

β線による被ばくが無視できない状況における眼の水晶体の等価線量を 3 mm 線量当量の測定で算定する必要はないのでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章 (6) 節 2) 項]

【回答 17】

1 MeV～3.5 MeV の電子・陽電子については 3 mm 線量当量が 70 μm 線量当量又は 1 cm 線量当量より高くなりますが、電子の場合は通常連続エネルギーであり、このエネルギー帯特有のエネルギーだけによる被ばくは通常は想定されないため、1 cm 線量当量又は 70 μm 線量当量を測定することで十分と考えます。

一方、1 MeV～3.5 MeV のこの範囲の特定のエネルギーを有する電子による被ばくの場合は、3 mm 線量当量を測定することが望ましいと考えられます。

また、1 MeV 以下の電子については 70 μm 線量当量が 3 mm 線量当量より過大になるため、1 MeV 以下の電子による被ばくが無視できない場合で、より適切に評価する必要がある場合は、3 mm 線量当量を測定することが望ましいと考えます。

一例として、⁹⁰Sr-⁹⁰Y からの β線 (エネルギースペクトルは ICRP Publ.107^{A17.1)} に基づく) による実用量について算定した結果は以下の表 A17.1 に示すようになり、70 μm 線量当量が 3 mm 線量当量を十分上回ります。また、個人線量計の校正において国内外で広く利用されている ISO 6980-1:2006 の ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 線源によるシリーズ 1 標準場では 70 μm 線量当量に対して 3 mm 線量当量はおおよそ 40% となります^{A17.2), A17.3)}。

表 A17.1 ⁹⁰Sr、⁹⁰Y からの β線被ばくに対する実用量

	1 崩壊当たりの任意線量単位			備考
	$H_p(0.07)$	$H_p(3)$	$H_p(10)$	
⁹⁰ Sr	0.68	-	-	最大エネルギー0.548 MeV
⁹⁰ Y	0.39	0.22	0.0004	最大エネルギー2.28 MeV
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y	1.07	0.22	0.0004	⁹⁰ Sr: ⁹⁰ Y=1:1

参考文献

A17.1) International Commission on Radiological Protection (ICRP), Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38(3) (2008).

A17.2) Kato, M. et al., Tissue transmission factors of ⁹⁰Sr+⁹⁰Y beta-particle radiation field calculated for tissue equivalent materials, KEK Proceedings 2015-8 (2015).

A17.3) Behrens, R., Correction factors for the ISO rod phantom, a cylinder phantom, and the ICRU sphere for reference beta radiation fields of the BSS 2, J. Instrum., 10, P03014 (2015).

【例題 18】

体幹部均等被ばく状況において、眼の水晶体の等価線量が高い場合、遮蔽材等を使用すると、体幹部不均等被ばく状況での線量管理になるのでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章 (5) 節]

【回答 18】

実効線量や眼の水晶体の等価線量がそれぞれの管理基準よりできるだけ低くなるように低減措置をとることが想定されますが、それにより体幹部不均等被ばく状況が生じた場合は、体幹部不均等被ばく管理として眼の水晶体の等価線量の管理を行うことになります。

一方で、体幹部均等被ばく状況において実効線量が管理基準に近くなることが想定されても、作業内容によっては低減対策を適用できない場合が想定されます。そのような場合は、体幹部均等被ばく状況においても眼の近傍に 3 mm 線量当量を測定する専用の個人線量計を装着して眼の水晶体の等価線量を算定することが必要となります。

【例題 19】

眼の近傍に個人線量計を装着した線量モニタリングの要否の判断は作業計画立案時に行うことはできないのでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章 (7) 節]

【回答 19】

作業計画立案時に作業環境の線量と作業姿勢を考慮した放射線作業計画を作成し、作業員の被ばく線量を予測してください。その予測した線量に基づき、本ガイドラインのフロー図に従って、眼の近傍に個人線量計を装着した線量モニタリングの要否の判断をしてください。

具体的には、作業環境の線量と作業姿勢を考慮した放射線作業計画に基づいて予測した頭部／胸部の線量比が 1.5 ないし 2 を超えない場合（体幹部均等被ばくの場合）で、予想される眼の水晶体の等価線量が管理基準を超える可能性があるとは判断できる場合は、眼の近傍に個人線量計を装着した線量モニタリングが必要になります。

一方、作業環境の線量と作業姿勢を考慮した放射線作業計画に基づいて予測した頭部／胸部の線量比が 1.5 ないし 2 を超える場合（体幹部不均等被ばくの場合）で、実効線量が記録レベル程度以上になると予想される場合（第 5 章(5)節 3) 項参照）、個人線量計を頭・頸部に追加して装着する必要があるとあり、さらに、予想される眼の水晶体の等価線量が管理基準を超える可能性があるとは判断できる場合は、眼の近傍に個人線量計を装着した線量モニタリングが必要になります。

なお、被ばく実績を踏まえ、類似作業を参考にモニタリング要否を判断することも可能です。この場合は、作業環境の線量、作業姿勢等の作業条件（被ばく条件）を比較して判断を行うことが必要となります。なお、具体的には解説の第 5 章の(7)節に示されている方法を参考にしてください。

【例題 20】

月の途中から眼の近傍での線量モニタリングが必要となった場合や、眼の近傍での線量モニタリングが必要となる作業とその必要がない作業が混在するなどの場合は、個人線量計の装着をどうすればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章（5）節 2）項]

【回答 20】

月の途中から眼の近傍に個人線量計を装着する線量モニタリングが必要となった場合は、それまで体幹部に装着していた受動形個人線量計を外して、それまでの眼の水晶体の等価線量と実効線量を取外した受動形個人線量計で算出します。そしてその値に、それ以降に眼の近傍に装着した受動形個人線量計の測定結果を足し合わせることで当月の眼の水晶体の等価線量を算出することができます。あるいは、日々の立入管理に使用している電子式個人線量計の値を用いて算出することも可能です。

月途中で眼の近傍に個人線量計を装着する線量モニタリングが必要な作業が終了して、眼の近傍に個人線量計を装着する線量モニタリングを必要としないような作業を行う場合は、当月終了まで眼の近傍での線量測定を必要としない作業を行う期間中も含めて、眼の近傍に受動形個人線量計を装着することを継続して、当月の眼の水晶体の等価線量を評価することが線量モニタリングとしては望ましいです。しかし、作業者に負担がかかる場合は、当月終了までの眼の近傍での線量測定を必要としない作業を行う期間中でも、襟などなるべく眼に近い部位に装着する方法も考えられます。あるいは、眼の近傍に個人線量計を装着した線量モニタリングを必要としない作業を行う期間、受動形個人線量計を交換するか、又は、日々の立入管理に使用している電子式個人線量計の値を用いて、眼の近傍に線量計を装着する線量モニタリングを必要としない作業期間の線量を積算して、その値に眼の近傍に装着した受動形個人線量計の測定値を加算することにより、当月の眼の水晶体の等価線量を算定することも可能です。

他にも、眼の近傍に装着した個人線量計を体幹部均等被ばくの場合は体幹部基本部位に、体幹部不均等被ばくの場合は線量が最大となる体幹部部位に当月終了まで装着する方法もあります。この場合、【例題 8】に記載されたように眼の近傍に装着する 3 mm 線量当量を測定する個人線量計は円柱ファントム（20 cm 直径、20 cm 長）で校正されたものになります。それを体幹部基本部位に装着する場合、厳密にはスラブファントム（30 cm×15 cm×15 cm）で校正した値を用いる必要があります。しかし、1 つの個人線量計に対して 2 種類の校正方法を用いることは測定値の取り扱いが複雑になり実用的ではありません。そして、光子に対しては、図 A20.1 に示した換算係数からわかりますように入射角 60 度以内では円柱ファントムによる校正定数とスラブファントムによる校正定数には大きな違いはありません。電子についても入射角 60 度以内では換算係数に大きな相違はなく、校正定数はほぼ等しいと考えられます^{A20.3), A20.4)}。そして、眼の近傍に装着した個人線量計を胸部に装着すれば、入射角 60 度以内では後方散乱線が増加するため、

少しですが高めの値となります。これらのことを考慮しますと、円柱ファントムで校正した 3 mm 線量当量の個人線量計を体幹部基本部位に装着しても、線量モニタリングとしての実用上の問題はないと考えられます。

以上に示しましたように月途中で眼の近傍に個人線量計を装着する線量モニタリングが必要な作業が終了した場合の対処方法にはいくつかの選択肢がありますが、線量管理に責任を有するものがそれぞれの事業所の状況を考慮して判断すればよいと考えます。

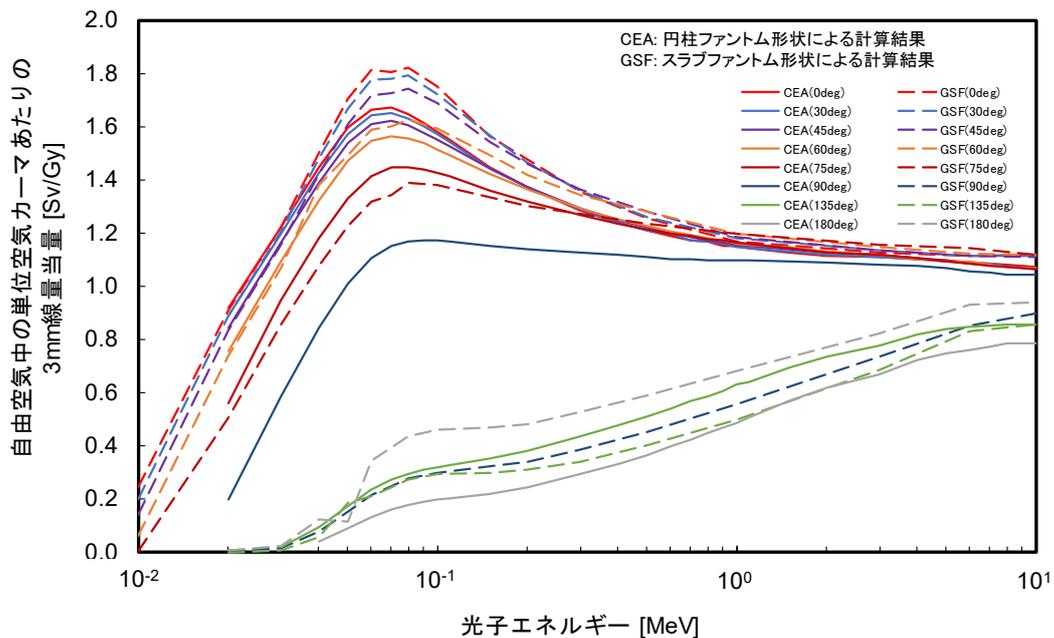


図 A20.1 円柱ファントム A20.1)とスラブファントム A20.2)の 3 mm 線量当量の換算係数

参考文献

A20.1) Gualdrini, G., Bordy, J.M., Daures, J., Fantuzzi, E., Ferrari, P., Mariotti, F., Vanhavere, F., Air kerma to Hp(3) conversion coefficients for photons from 10 keV to 10 MeV, calculated in a cylindrical phantom, Radiat. Prot. Dosim., 154(4), 517-521 (2013).

A20.2) Till, E., Zankl, M., Drexler, G., Angular dependence of depth doses in a tissue slab irradiated with monoenergetic photons, GSF-Bericht 27/95, GSF (1995).

A20.3) Bhrens, R., Monitoring the Eye Lens, Paper to talk presented at IRPA13:TS7e.3 (2012), <http://www.irpa.net/page.asp?id=54517> (最終アクセス：2019年12月20日)

A20.4) Behrens, R., Hupe, O., Influence of the phantom shape (Slab, Cylinder or Alderson) on the performance of Hp(3) eye dosimeter, Radiation Protection Dosimetry, 168(4), 441-449 (2016).

【例題 21】

体幹部均等被ばく状況において、眼の近傍に個人線量計を追加で装着しましたが、眼の近傍の線量が体幹部基本部位での線量より小さくなりました。このような場合、眼の水晶体の等価線量の算定は、どうすればよいでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章（5）節]

【回答 21】

眼の近傍での眼の水晶体の線量モニタリングの趣旨は、正確な眼の水晶体の等価線量の算定であることから胸部より線量が小さくなった場合でも眼の近傍に装着した個人線量計による実用量の測定結果を眼の水晶体の等価線量とするのが適切です。なお、この考え方は、保守的に評価するため線量の高い値を用いることを妨げるものではありません。

【例題 22】

体幹部均等被ばく状況において、眼の近傍に個人線量計を追加して線量のモニタリング対象になった場合、頭・頸部（眼の近傍）の線量の測定結果も踏まえて実効線量を算定するのでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章（5）節]

【回答 22】

体幹部均等被ばくで眼の水晶体の等価線量が線量限度を超える恐れがある場合のモニタリングでは、眼の近傍に装着した個人線量計で 3 mm 線量当量を測定しますが、この結果を体幹部不均等被ばく状況としての実効線量の算定に使用する必要はありません。ただし、体幹部不均等被ばく管理として頭・頸部での 1 cm 線量当量、及び 70 μm 線量当量を追加して測定した場合は、眼の水晶体の等価線量の算定に使用する他に、実効線量についても体幹部不均等被ばく管理として算定を行う必要があります。

【例題 23】

受動形個人線量計を使用している場合、正式な線量測定結果が判明する前に、他事業所で作業に従事する場合の眼の水晶体の等価線量はどのように算定すればよいですか？

[関連箇所：解説第 5 章 (5) 節]

【回答 23】

一例として、日々の管理に使用する電子式個人線量計等を用いている場合について示します。

体幹部均等被ばくとみなして管理している場合は、体幹部基本部位に装着した電子式個人線量計等の読み値を暫定値として使用すればよいです。

体幹部不均等被ばくとして管理している場合には、遮蔽エプロンや遮蔽ベストなどの外側の最も高くなると想定された部位に装着した電子式個人線量計の測定値を使用するなど、眼の水晶体の等価線量の暫定的な値を算定するとよいです。

基本的な線量管理の考え方は従来と変更ありませんので、これまで実施してきた各事業所での管理方法に従って評価してください。

【例題 24】

フランス放射線防護学会の眼の水晶体の線量モニタリングのガイドラインに示されている「Bordy の考え方」は国内の事業所では適用できないのでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章 (5) 節並びに【例題 3】、【例題 4】、【例題 16】]

【回答 24】

フランス放射線防護学会が 2016 年に出した技術資料^{A24.1)}では、光子に対する眼の水晶体の等価線量を評価するため、眼の近傍に専用の個人線量計を装着する必要性を判断するための考え方として、Bordy の論文^{A24.2)}を引用しています。この技術資料によれば、眼の近傍に個人線量計を装着する体幹部不均等性の判断は、体幹部基本部位における 1 cm 線量当量 ($H_p(10)$) と、体幹部基本部位の 1 cm 線量当量 ($H_p(10)$) に対する眼の近傍の 3 mm 線量当量 ($H_p(3)$) の比率 ($H_p(3)/H_p(10)$) によって異なっています。

ただし、Bordy の考え方は、線量によって体幹部基本部位に装着した個人線量計の値に補正を加える方式が示されていますが、この補正する量を具体的に決めることが難しいため、実際に取り入れるには技術的な課題が多いです。また、体幹部基本部位で測定した線量に対して補正を加えることは、体幹部において最大となる部位での直接測定が要求されるわが国の法規とは整合が取れていないため、Bordy の考え方をわが国で眼の水晶体の線量モニタリングに用いることは適切ではありません。【回答 16】に記載したように、「その放射線に対する測定器がまだ開発されていない場合等」以外は法令で指定された部位に放射線測定器（この場合は個人線量計）を装着して測定することが要求されています。これに従えば Bordy の考え方にある体幹部基本部位で測定した線量に対して補正を加える方式を採用することは困難です。

参考文献

A24.1) French Radiological Protection Society (SFRP), Technical Information Sheets: Eye lens: Regulatory limits, measurements, dosimetry and medical surveillance (2016).

A24.2) Bordy, J. M., Monitoring of Eye Lens Doses in Radiation Protection, Radioprotection, 50(3), 177-185 (2015).

【例題 25】

眼の近傍以外の部位に装着した個人線量計を使用する場合で、眼の水晶体の等価線量を算定するために 3 mm 線量当量を測定することが望ましい場合とは具体的にどのような事例が挙げられるでしょうか？

[関連箇所：解説第 5 章 (2)、(5) 及び (6) 節並びに【例題 3】、【例題 10】、【例題 17】]

【回答 25】

眼の近傍に個人線量計を装着して線量を測定することが必要となる管理基準は各事業所の状況に合わせて設定されますが、この管理基準に線量が達しない間は、眼の近傍以外の部位に装着した個人線量計で眼の水晶体の等価線量を算定することになります。その場合、防護の最適化の観点から、被ばく線量を過度に保守側に算定しないことが適切であると考えます。

例えば、40 keV 以下の光子を被ばくする場合、70 μm 線量当量では 3 mm 線量当量と比較して高めに測定する可能性があります (20 keV で 1.2 倍)。その場合は、できるだけ 3 mm 線量当量で眼の水晶体の等価線量を算定することが望ましいです。また、【回答 17】に記載しましたように、1 MeV 以下の電子については 70 μm 線量当量が 3 mm 線量当量より過大 (800 keV で 7.3 倍など) になるため、これらの被ばくが無視できない場合で、管理基準に近い被ばくをする可能性がある場合は、3 mm 線量当量を測定することが望ましいと考えます。

なお、本ガイドラインは計画被ばく状況における放射線業務従事者の眼の水晶体の等価線量のモニタリングについて適用するものであります。高線量被ばくの可能性がある場合や事故的な被ばくが生じた場合は、70 μm 線量当量や 1 cm 線量当量で算定した値を 3 mm 線量当量により再評価することも可能であると考えられます。

【例題 26】

眼の水晶体用線量計の測定結果の妥当性の評価はどのように実施されるのですか？

[関連箇所：解説第3章(2)節並びに【例題8】]

【回答 26】

2016年のIAEAの総合規制評価サービス(IRRS)^{A26.1)}において、原子力規制委員会は個人モニタリングサービス提供者が実施する放射線モニタリングについて、承認のプロセスの要件を定めるようにという勧告を受けました。

そこで、2018年7月1日に、日本における適合性評価機関である(公財)日本適合性認定協会(Japan Accreditation Board: JAB)は、試験所及び校正機関を認定する基準(JIS Q 17025:2018 (ISO/IEC 17025:2017)^{A26.2)}の放射線モニタリング分野について、『「認定の基準」についての指針－放射線個人線量測定試験分野－(JAB RL380)』^{A26.3)}を制定しました。この文書は、ISO/IEC 17025:2017^{A26.2)}の要求事項を、線量計を用いた個人線量測定試験分野の特殊性に合わせてより詳細に記述した指針です。この指針が定める試験所の認定の範囲は、以下のとおりです。

体幹部用の個人線量計：X・ γ 線	$H_p(10)$, $H_p(0.07)$
β 線	$H_p(0.07)$
中性子	$H_p(10)$
末端部用の個人線量計：X・ γ 線、 β 線	$H_p(0.07)$

これらの認定範囲の測定結果の妥当性については、指針 JAB RL380^{A26.3)}が要求する計量トレーサビリティを満たすように測定サービスが行われていることのサーベランスと、技能試験で技術能力を見ていることから評価できます。

JAB が要求する計量トレーサビリティについては、「測定のトレーサビリティについての指針 (JAB RL331:2017)」^{A26.4)}があり、試験所に対する要求事項として内部校正を行う試験所は、校正機関と同様に校正機関に対する要求事項(トレーサビリティの確保)が要求されます。

なお、JAB RL380^{A26.3)}において $H_p(3)$ は認定の対象外ですが、 $H_p(3)$ の認定については今後議論される予定です。

参考文献

A26.1) 国際原子力機関, 日本への総合規制評価サービス (IRRS) ミッション, IAEA-NS-IRRS-2016 (2016).

<https://www.nsr.go.jp/data/000148263.pdf> (最終アクセス: 2020年3月19日)

A.26.2) ISO/IEC 17025:2017 (JIS Q 17025:2018) 試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項

- A26.3) 公益財団法人日本適合性認定協会、「認定の基準」についての指針－放射線個人線量測定試験分野－, JAB RL380:2018D1 (2018).
- A26.4) 公益財団法人日本適合性認定協会, 測定のトレーサビリティについての指針, 第 8 版, JAB RL331:2017 (2017).

医療スタッフの 放射線安全に係る ガイドライン

～ 水晶体の被ばく管理を中心に～



目次

1. ガイドライン作成の背景と目的

2. 放射線の安全利用

2-1 放射線安全利用の基礎知識

- 1) 放射線領域で用いる単位
 - 2) 医療放射線の安全衛生管理の原則
 - 3) 被ばく管理の基本と法令
-

2-2 透視を用いた検査・治療

- 1) 防護衣の着用効果
- 2) 防護メガネの効果
- 3) 遮へい板の具体的利用方法、簡易な防護方法の紹介
- 4) 立ち位置への配慮
- 5) 手指の被ばくへの配慮
- 6) パルスレート
- 7) エックス線撮影
- 8) 絞りの活用
- 9) 拡大透視とデジタルズーム
- 10) 手技時の線量記録
- 11) 手技内容の共有
- 12) 患者線量低減と術者の線量低減の関係
- 13) 放射線診療時の検査室内の線量分布
- 14) 水晶体の線量が高くなる恐れがあるときの対応策

2-3 エックス線検査室内での患者対応

3. 歯科領域の放射線防護

3-1 歯科における水晶体の放射線防護に係るガイドラインの背景

3-2 歯科領域の放射線検査

- 1) 同室撮影の放射線防護
 - 2) 室外撮影の放射線防護
-

4. 参考文献

5. 資料

- 資料1 水晶体への放射線影響
 - 資料2 放射線による皮膚障害
 - 資料3 妊娠と放射線検査
 - 資料4 患者の皮膚障害に関するガイドラインと対応
-

ガイドライン作成委員会名簿

- 公益財団法人 日本医学放射線学会
大野 和子[京都医療科学大学(委員長)]
安陪 等思[久留米大学]
- 一般社団法人 血管撮影・
インターベンション専門診療放射線技師認定機構
坂本 肇[順天堂大学] 松本 一真[兵庫医科大学病院]
- 公益財団法人 日本医学物理士会
福士 政広[東京都立大学]
- 一般社団法人 日本インターベンショナルラジオロジー学会
赤羽 正章[国際医療福祉大学]
- 一般社団法人 日本救急医学会
船曳 知弘[済生会横浜市東部病院]
- 一般社団法人 日本呼吸器学会
谷本 安[独立行政法人国立病院機構 南岡山医療センター]
- 公益財団法人 日本産業衛生学会
樺田 尚樹[産業医科大学]
- 特定非営利活動法人 日本歯科放射線学会
櫻井 孝[神奈川歯科大学] 奥村 泰彦、原田 康雄[明海大学]
- 一般財団法人 日本消化器病学会
糸井 隆夫[東京医科大学]
- 公益社団法人 日本小児科学会
脇 研自[倉敷中央病院]
- 一般社団法人 日本小児外科学会
田尻 達郎[京都府立医科大学]
- 一般社団法人 日本小児放射線学会
野坂 俊介[国立研究開発法人 国立成育医療研究センター]
- 公益社団法人 日本診療放射線技師会
富田 博信[埼玉済生会川口病院]
- 一般社団法人 日本循環器学会
池田 隆徳、天野 英夫[東邦大学] 伊藤 浩[岡山大学]
尾崎 行男[藤田医科大学]
- 公益社団法人 日本整形外科学会
伊藤 淳二[青森県立中央病院] 平泉 裕[昭和大学]
- 一般社団法人 日本脳神経外科学会・特定非営利活動法人
日本脳神経血管内治療学会
松丸 祐司[筑波大学]
- 一般社団法人 日本放射線看護学会
太田 勝正[東都大学沼津ヒューマンケア学部開設準備室(前名古屋大学)]
- 公益社団法人 日本放射線技術学会
千田 浩一[東北大学] 藤淵 俊王[九州大学]
- 医療放射線防護連絡協議会
菊地 透[原子力安全研究協会] 粟井 一夫[榊原記念病院]
- 日本保健物理学会
横山須美[藤田医科大学]
- 長瀬ランダウア株式会社
関口 寛、八木 信行
- 株式会社千代田テクノル
狩野 好延

イラスト制作:高橋 玲香

01.

…ガイドライン作成の背景と目的…

エックス線（以下X線と略）透視を用いた検査・治療等に代表される放射線診療の維持・発展は、高齢化社会を支える骨幹となっています。多くの診療科がそれぞれの専門領域で患者救命を目的として技術を発展させてきました。しかし、技術革新と同時に医療関係者の放射線安全にも配慮してきたとは言えない現状があります。実効線量限度や水晶体または皮膚の等価線量限度を超えて働く医療スタッフの存在や労働災害も報告されています¹⁾。このような現状の中で、平成29年3月放射線審議会が関係行政機関の長に対し、眼の水晶体の放射線防護検討部会がとりまとめた「眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について」²⁾を参考に所定の措置を講ずるよう意見具申をしました。ここでは、水晶体の等価線量限度について、「5年間の平均で20mSv/年かついずれの1年においても50 mSv を超えないこととすることが適当である。」とし、放射線を扱う全ての事業者による水晶体被ばく低減や最適化の取り組みが円滑に進むように、「関連学会によってガイドラインが策定されることを期待する。」としています。その後、厚生労働省では、電離放射線障害防止規則の改正を行い、令和3年度から施行する予定です³⁾。

今後も患者に不可欠な放射線診療が継続して発展しつつ規制を円滑に運用するためには、具体的な水晶体等価線量モニタリングのめやす、その考え方や分野個別の放射線防護及び最適化方法を示したガイドラインの作成が急務であると考えます。そこで、放射線を用いた診療行為に関与する全ての医療スタッフと患者双方の放射線安全に配慮した放射線の利用方法について令和元年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（円滑な規制運用のための水晶体の放射線防護に係るガイドラインの作成）事業において20の関係学協会の協力を得て検討し、提言としてまとめました。

◎ガイドライン利用上の注意事項

診療科を問わず放射線診療に係わる医師・看護師に理解し易い内容に限定しています。専門用語についても平易な表現に随所で置き換えています。

各学会でさらに詳細なガイドラインを作成する場合には、本ガイドラインの班員がサポートし整合性のある内容を目指してください。

「2-2.透視を用いた検査・治療」では具体的に遵守すべき事項を掲載しています。ここでの本文表記は、診療ガイドラインの一般的な表現に準じて、ガイドライン作成委員会の委員の合意により、推奨度が高い内容から順に、原則的に次の表記を用いています。

- 必ず〇〇〇〇してください。
- 〇〇〇〇してください。
- 〇〇〇〇したほうが望ましい事項です。

02.

… 放射線の安全利用 …

2-1 放射線安全利用の基礎知識

1) 放射線領域で用いる単位

放射線の管理で問題となることは、①物質からどのくらい放射線が出ているのか、②放射線が出るものの傍に居た人はどのくらいの放射線を受けたのか、③放射線を受けた人にどのような影響があるのか、の3点です。それぞれを数値で表現するために専用の単位が定められています。

①の物質から出ている放射線の強さを放射能といい、ベクレル(Bq)という単位で表します。医療では放射性医薬品に対して用います。医薬品の患者への投与量何mgというところを、核医学検査では投与量〇〇Bqとカルテに記載しています。

②の放射線を受けた量はグレイ(Gy)という単位で表します。外照射で放射線治療をする場合には、医師が標的とする悪性腫瘍がどのくらい放射線を受ければ最適治療結果になるかを勘案して「何グレイ照射する」という指示を出します。また、CT検査等のX線検査で患者が受ける放射線量を検討する時は専用の測定器を用いた実験をしますが、このときに推計する患者が受ける放射線量の単位もGyです。

③放射線を用いる職場で働く人々(放射線診療従事者)が放射線を受けたことによる身体への影響の度合いを表す時はシーベルト(Sv)という単位を用います。この影響量には実効線量と等価線量があります。従事者のために、放射線の影響を十分に安全側に考慮して、実際に受けた放射線量から算定した値です。例えば「A医師の1ヶ月間の診療による被ばくは実効線量で2mSv」というように用います。また放射線検査室内の放射線量の計測器の値もSvで表示されます。

2) 医療放射線の安全衛生管理の原則

放射線を医療スタッフが安全に利用する原則は、労働安全衛生管理の5原則に準じています。①放射線に係る安全管理体制を院内で構築し、放射線QA委員会等の設置や統括安全管理責任者、実務担当者の選任、②放射線診療室内やその周辺の放射線量の計測、個人線量計を用いた実効線量や等価線量の個人モニタリング等の作業環境管理、③放射線診療の手技毎の手順書の作成や防護用具の整備を行う作業管理、④放射線診療従事者を対象として、一般定期健康診断に追加する特殊健康診断の実施による健康管理、⑤放射線診療に従事する者への配置前と定期的教育訓練です。なお、令和2年度から医療法の改定により患者に対する放射線安全もさらに推進されます。患者の放射線安全は医療スタッフの安全にも繋がります⁴⁾。

3) 被ばく管理の基本と法令

放射線利用では人々の放射線被ばくを適切に管理する目的で、その立場により分類して管理します。医療分野でも、この基本を取り入れた法令が整備されており、人々の立場により、「医療被ばく」、「職業被ばく」、「公衆被ばく」の3つに分類して管理します。「医療被ばく」のグループには、患者本人、患者の家族等と治験参加のボランティアを含めます。「職業被ばく」は、放射線診療に従事する人々(放射線診療従事者)です。職種は問わず医療機関で放射線診療従事者として指定した人々が該当します。「公衆被ばく」はそれ以外の人々です。患者に見舞いに来る会社の同僚や病院周辺の住民などが「公衆被ばく」に含まれる人々です。

国際放射線防護委員会(ICRP)の2007年勧告では⁵⁾、「職業被ばく」について実効線量で5年間100mSvかつ1年間で最大50mSvを被ばく線量の上限値としており、皮膚、眼の水晶体に関する等価線量の上限値もあります。この上限値は「線量限度」と呼ばれており、日本の関係法令に規定されています。各病院においては、従事者がこの線量限度を下回るよう対応しなければなりません。個人線量評価を測定機関に委託している場合がほとんどですが各個人にも結果が届きます。国際放射線防護委員会(ICRP)の勧告では、「公衆被ばく」の実効線量限度は1年間で1mSvです。しかし「職業被ばく」と「公衆被ばく」の線量限度ともに危険と安全の境界値ではありません。線量限度は十分な安全への尤度をもって決めた値です。生物学的な影響の詳細については、本ガイドラインの資料を参照してください。

なお、放射線に関して医療スタッフが確認すべき法令に、放射性同位元素等の規制に関する法律(RI法)、医療法、労働安全衛生法の電離放射線障害防止規則(電離則)等があります。

2-2 透視を用いた検査・治療

放射線を安全に利用するために必要な事項をQA方式で記載します。

さまざまな対策を記載しましたが、発生源のコントロールに最も注力してください。具体的には、発生装置の条件設定や撮影手法の検討、次いで遮へい板等の適切な利用による作業の管理、これらで十分なコントロールができない時に保護具の利用を検討することが、労働安全衛生管理の基本です。なお、医療領域では、個人被ばく線量管理の基本である、個人線量測定が不十分です⁶⁾。



Q1 — 防護衣の着用効果

**放射線を用いる手技に従事するスタッフは
防護衣を必ず着用してください。
被ばくを90%以上減らすことができます。**

防護衣はIVRやCT透視等の放射線を用いる手技に従事するスタッフが着用します。

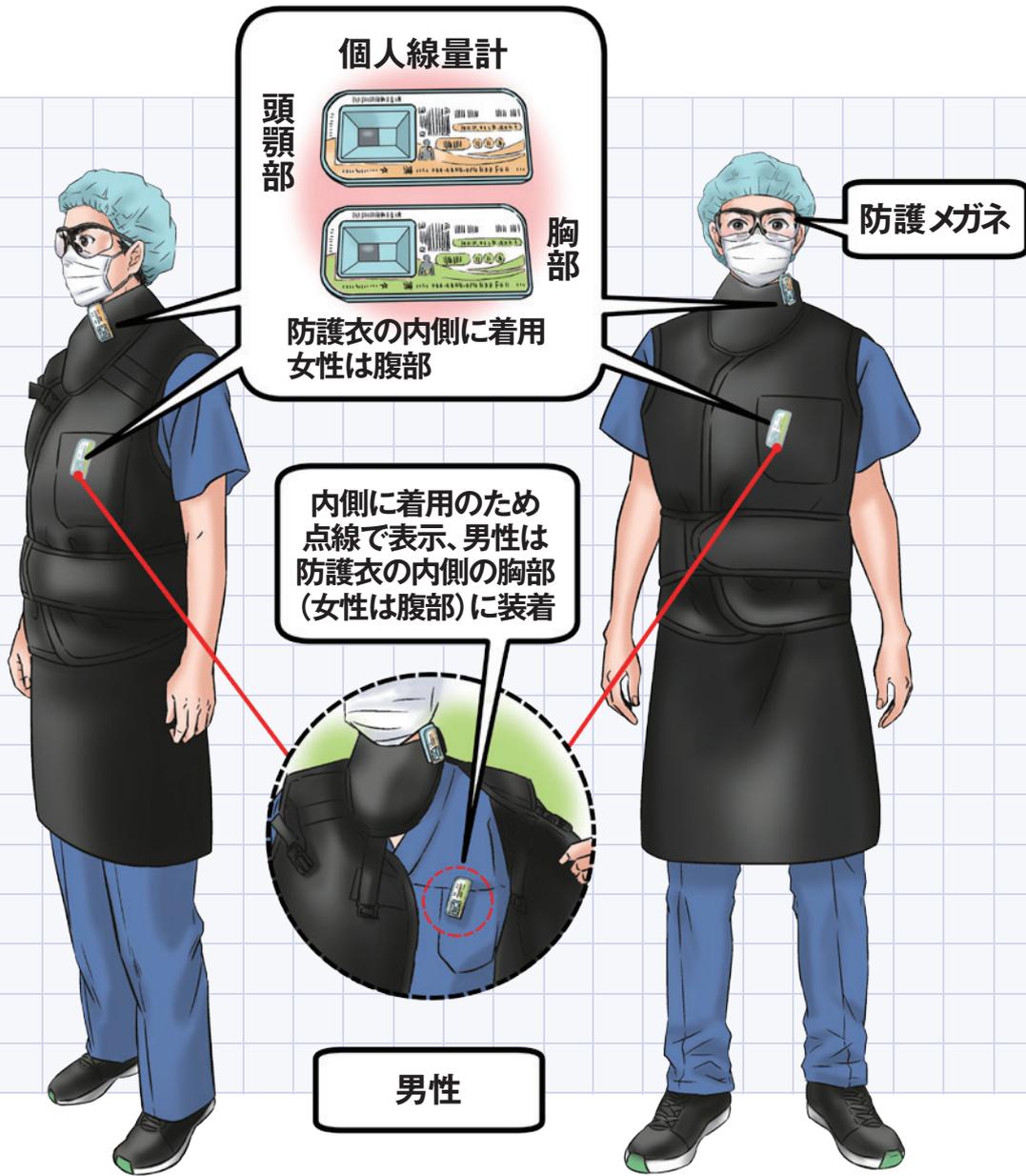
放射線を遮る割合は、鉛を基準(鉛当量)として表示され、0.25mmと0.35mmの鉛当量の防護衣があります。一般的に、IVRやCT透視などで使用する放射線の強さでは、0.25mmの防護衣の場合、検査室内に散乱する放射線を90%、0.35mmでは95%遮蔽する能力を持っています。0.25mm鉛当量防護衣に比較し、0.35mm鉛当量防護衣での放射線の遮蔽効果は高くなりますが、防護衣の重量が増すこととなります。

腰への負担を軽減するためには、上下セパレートタイプが適していますが、介助等で同じ場所に立つ等、放射線を受ける体の面が患者さんの方に固定される場合は、背面が開いたエプロン様の形状でも十分に防護できます。

各自の診療内容に合わせて防護衣を選択してください。

ネックガードは甲状腺と頸髄の被ばく低減⁷⁾に効果があります。

しかし、頸部に密着させて巻くことによる身体的負担や作業性の低下を伴います。成人の場合は甲状腺は放射線の影響を強く受ける臓器ではありません。各自の被ばく線量に応じて、無理の無い範囲で着用してください。



Q2— 防護メガネの効果

従事者は、IVR患者の検査等どうしても撮影室内に残る必要があるときは、水晶体の被ばく低減のために防護メガネを着用してください。

基本的には放射線防護の原則である線源管理として遮へい板を用いてください(Q3③参照)。その後防護メガネの着用を検討します。

防護メガネには、一般的な眼鏡と同様の形の物から、顔の両横までレンズが広がる形状やゴーグルタイプの物まで、様々な形のものがあります。レンズの放射線遮へい効果は50%程度あり⁸⁾適切な利用は水晶体の被ばく低減に効果的です。

X線管を2個備える装置やX線管の位置を細かく変える手技では幅広く放射線を防護できるゴーグルタイプの物が効果的です。しかしレンズの遮へい能力が高いほど重い眼鏡になりますから、各自のこれまでの水晶体の被ばく線量を確認し、被ばくが少ない場合は、遮へい能力は低くても軽い物を用いるなど、個別に判断して下さい。

放射線科、整形外科、消化器科、呼吸器科のIVRで、手技の際に透視台の近傍に立つ術者と医療スタッフ、CT検査時に患者の容体管理等の目的で検査室内に残る医師等は、防護メガネを着用してください。循環器科のIVR術者はゴーグルタイプの着用が望まれます。

なお、労働安全衛生規則第596条では、保護具は同時に作業をする従事者の人数と同数以上を備え、常時有効かつ清潔に保持することを事業者に求めていますので、安全衛生管理上も、病院管理者が必要な人数分以上の防護メガネを揃えておくことが望ましいといえます。

Q3— 遮へい板の具体的利用方法、簡易な防護方法の紹介

遮へい板を用いると術者の立ち位置における放射線量を大幅に低減することができます。手技に合った物を必ず用いて下さい。

遮へい板の有効な利用方法は用いる装置により異なります。以下に装置毎の代表的な遮へい板の設置方法を紹介します。

①血管系の透視装置に用いる遮へい板

天井吊り遮へい板を、患者を透視するX線管と術者との間に置き、患者からの散乱線を遮へいします。テーブルカーテン型の遮へい板を、患者が臥床するテーブルに取り付けることで、X線管と患者からの散乱線を遮へいします。腹部IVRのように患者に対して術者がX線管と同じ側に居る場合は、L型遮へい板を設置すると患者からの散乱線を効果的に遮へいできます。

術者の位置やX線管の位置が頻繁に変わる循環器系のIVR等では、可動型の遮へい板が有効です。

②術中透視

手術室内に天井吊りのアクリル板が装備されている場合は、これを清潔なビニールで覆い、患者と術者の間に設置して散乱線を遮へいします(本ガイドライン表紙のイラストと血管系の透視装置の写真を参考にしてください)。

適当な遮へい板が無い時は、装置の画像ホールド機能等を用いてできるだけ照射しないように努めて下さい。

③消化器、呼吸器の内視鏡手技との併用時に用いる遮へい板

患者の臥床するテーブルよりも上方にX線管がある場合は、放射線防護用掛布を装着することで、散乱線を遮へいできます⁹⁾。できるだけ用いるようにしてください。下端が患者の体表に到達するように調節してください。患者の臥床するテーブルよりも下方にX線管がある場合は、患者の体調が許せば、患者の身体の上で照射範囲外に放射線防護用掛布をかけるか防護衣をかけて下さい。また、L型遮へい板の利用は一定の効果があります¹⁰⁾。

④CT透視に用いる遮へい板

CTのガントリを塞ぐことを目的とした天井吊りのCT専用の遮へい板が効果的です。

専用の遮へい板を用意できないときは、患者の体調が許せば、患者の身体の上で照射範囲外に放射線防護用掛布をかけるか防護衣をかけて下さい。

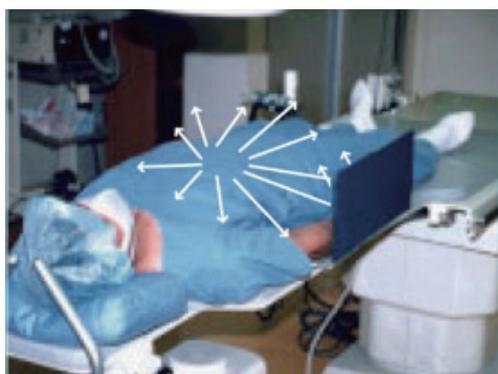
①血管系の透視装置に用いる遮へい板



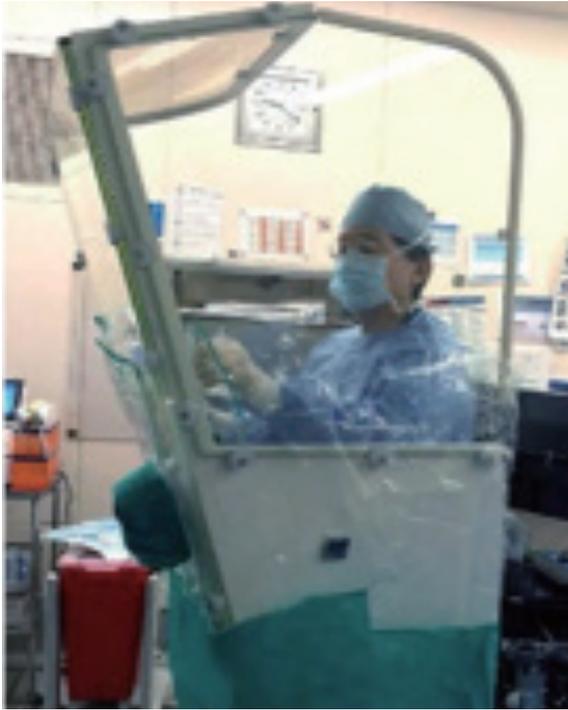
実際にはこのアクリル板を市販されている
専用の清潔ビニールで覆って利用



テーブルカーテン型の遮へい板
テーブルにレールがありスライド可能



L型遮へい板
(白矢印は放射線が散乱しているイメージ)



キャビン(移動型遮へい板)

③消化器、呼吸器の内視鏡手技との併用時に用いる遮へい板(防護用掛布)
患者の臥床するテーブルよりも上方にX線管がある場合に利用します。



遮へい無



遮へい有

④CT透視に用いる遮へい板

上段が専用の遮へい板の写真、下段は防護用掛布による散乱線の低下を表示

(『医療放射線防護の常識・非常識』より許可を得て転載)



図1 CT透視時空間線量率分布 (mSv/h)

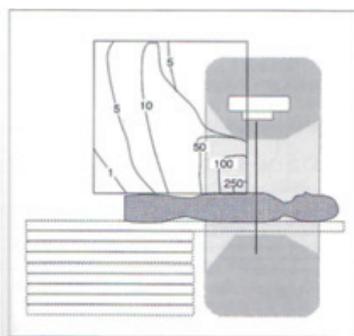
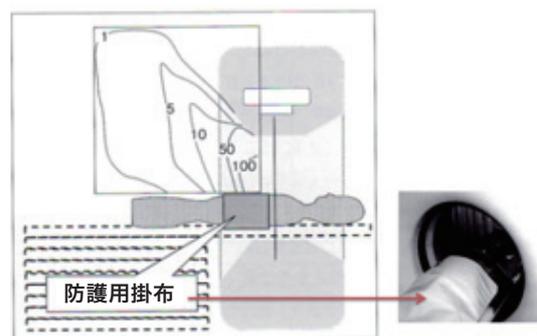


図2 CT透視時の患者からの散乱線防護 (mSv/h)



Q4—立ち位置への配慮

医療スタッフはX線管の位置を確認しながら、
できるだけX線管から離れた位置に立つようにしてください。

患者に照射したX線はほとんどが患者体内に吸収され、一部が受像機に到達して画像となります。その他は患者体内で散乱を繰り返した後に散乱線として患者体外に放出されます。この散乱線により医療スタッフは被ばくします。

散乱線の量は、下図に示すように場所によるムラがあり、X線管側が高くなります。これを理解して医療スタッフはできるだけX線管から離れた位置に立つように配慮しましょう。

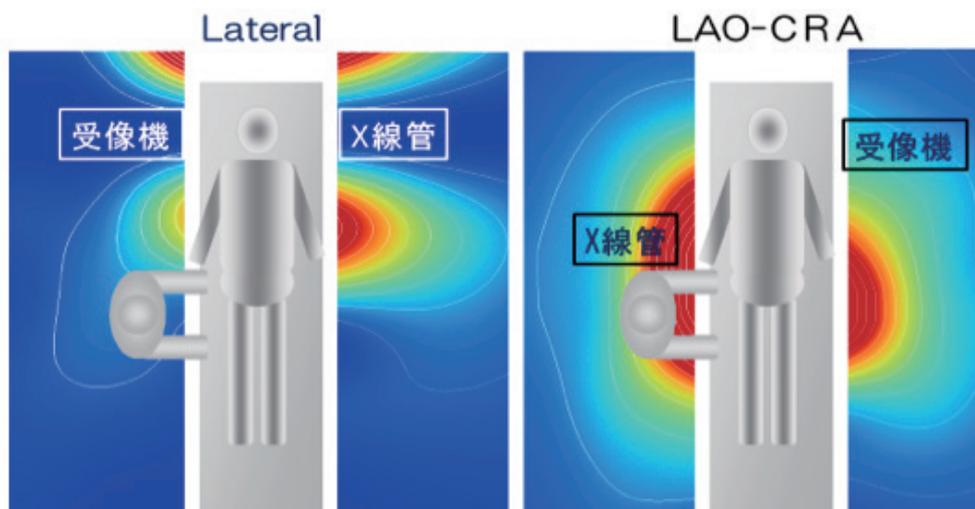


図 術者の立ち位置と放射線量

赤色が側ほど高線量となるX線管側のほうが線量は高くなる

Q5—手指の被ばくへの配慮

手指を直接線には曝さないようにしてください。
曝すと非常に高線量の被ばくとなります。
また、散乱線による手の被ばくが懸念される場合には
低減のために可能ならば、防護手袋を利用してください。

清潔手技に対応した防護手袋は、散乱線の被ばく低減には効果的です。しかし、術者の手が透視されるような直接線被ばくの低減を考慮して開発された物ではありません。

ほとんどの透視装置には、被写体の大きさに応じて自動的に画質を調整する自動調節機能があります。このため、術者の手が患者の上に乗ると装置は体厚の大きな被写体になったと判断して自動的にX線量を増加させます。

診療手段としてやむを得ず直接線下での操作を余儀なくされる時は、医療スタッフの手への放射線被ばくが低減できるような手段（防護器材の使用、X線管からの距離を取る、低いパルスレート、照射時間の短縮など）をできるだけ講じてください。

Q6—パルスレート

パルスレートは、手技に影響が無い範囲で、必ず低いレートに設定してください。術者と患者の被ばく線量低減につながります。

透視時のX線照射は連続ではなく、間欠的なパルス透視です（パラパラ漫画を想像してください）。1秒間に放射線が照射される数を、フレーム数またはパルスレート（f/秒）と呼びます。X線透視装置は、複数のパルスレートからその検査に合ったものを選択できます。パルスレートが低いほどパルスの間隔が空くため、画像はコマ飛びしたように見にくくなりますが照射する放射線量は減ります（図1）。最近は「動き補正」などのデジタル処理技術の発達により低いパルスレートを選択する施設が増えていきます（図2）。常に鮮明な透視画像を求めるのでは無く、カテーテルの先端や塞栓物質が確認できる範囲でパルスレートをこまめに下げてください。診療放射線技師が透視線量の管理を担当する施設が多い場合、事前に術者が診療放射線技師と許容できるパルスレートを打合わせておく必要があります。

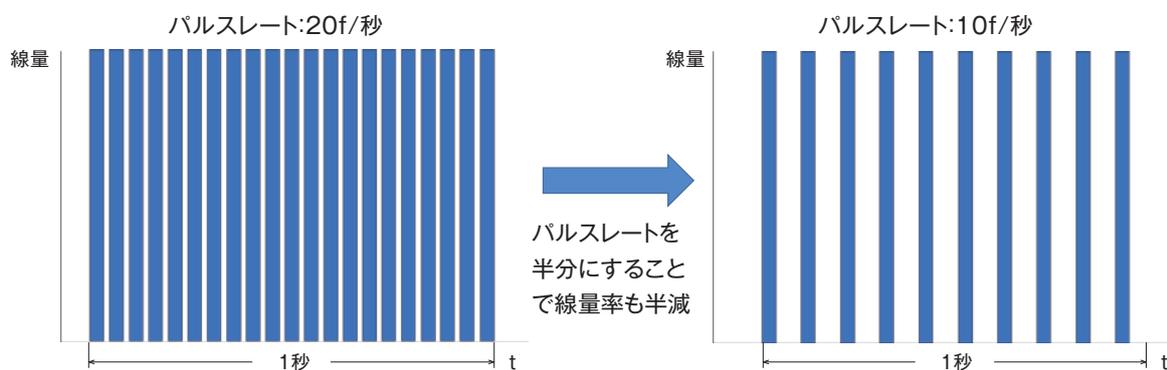


図1 パルスレートと照射線量の関係

パルスレートが1/2になると照射線量も1/2に低下します。

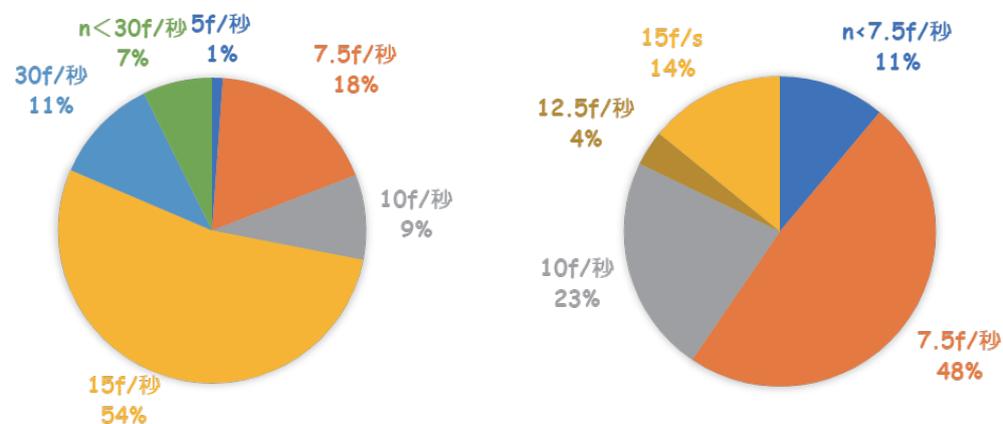


図2 施設で選択されているパルスレートの変化¹¹⁾

Q7— エックス線撮影

高画質を求めすぎると撮影時の患者被ばく線量が増加します。
診断に許容される画質の範囲で撮影線量を調整してください。

装置からのX線出力は、撮影条件(管電圧、管電流、1フレーム当たりの撮影時間、1秒間の撮影フレーム数(フレームレート))、撮影時間、装置の付加フィルタにより変化します。透視のパルスレートと同様に診断に影響のない範囲で出来る限り低いフレームレートを選択することで患者の被ばく低減に繋がります。付加フィルタは画質に影響しない低エネルギー成分のX線をろ過する目的のものです。患者被ばく線量低減に重要な役割を果たします。また、これは術者の被ばく低減に直結します。通常はX線管前面のコリメーターに内蔵されており、撮影条件を決定する際に数種類の中から選択します。

ほとんどの撮影装置は、撮影条件を事前に数種類設定できます。例えば、「通常」、「低い線量」、「極めて低い線量」などと設定しておき、検査・治療の種類に応じ、適切な条件を撮影の度を選択するようにしてください。

なお、画質と撮影線量はトレードオフの関係ですが、一定線量以上では画質の向上は頭打ちとなります。

X線撮影は透視の10倍程度の線量になります。可能な限り検査台から離れ、できれば室外に退避してください。

Q8—絞りの活用

**照射野を、必要な範囲に必ず絞ってください。
適正な照射野にすることで患者からの散乱線も減り、
術者の被ばく低減につながります。**

X線管前面のコリメーターに「絞り」が内蔵されており、撮影範囲の調節ができます。例えばガイドワイヤーを挿入していく際は、ガイドワイヤーが写っている部分以外は不要です。ここで、「絞り」を使用しないことは、目的外の多くの臓器の被ばくを意味します。観察を要する範囲以外をトリミングするつもりで「絞り」を効果的に使ってください。患者線量の低減だけでなく、患者からの散乱線による術者の被ばく低減にも繋がります。ただし、極端な絞りは患者の皮膚線量増加につながることもあり注意してください。

なお、絞りを効果的に利用して直接線内に手指を入れないようにして下さい。

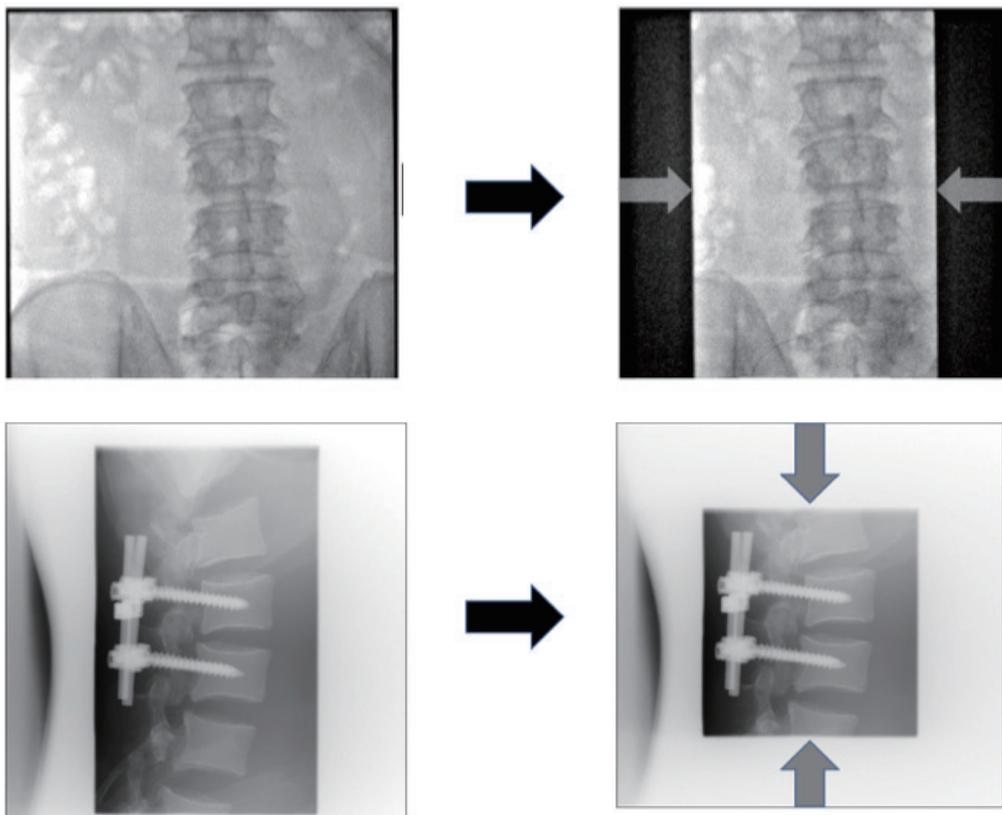


図 絞りの効果的な利用例

左が絞りが少ない場合、右は適切絞りを入れた場合の画像

Q9— 拡大透視とデジタルズーム

幾何学的拡大透視(通常の拡大透視)は小さな範囲を鮮明に画像化できますが、患者に照射する線量が増加します。多用すると皮膚線量の増加の原因となるため、限定的に用いて下さい。代用としてデジタルズームの使用を推奨します。

通常の拡大透視は一般的なカメラのレンズによるズームと同様で、小さな範囲を鮮明な画像として表示できます。しかし、拡大するほど、画像ノイズを低減するために1画素(1素子)あたりの線量は増加して患者被ばくも増えます。単位容積当たりの患者被ばくは増えても、照射される容積が小さくなるため、術者への散乱線はそれほど多くなりません。術者の被ばく増加につながらないことが多いため、医師が患者線量を上げていることに気づかずに幾何学的拡大を多用してしまう場合があります。患者の皮膚障害を回避するためにも拡大透視の使用には配慮が必要です。一方、画像を画素ごと単純に拡大するデジタルズームが可能な装置も多く存在します。多少解像度は落ちますが、通常の拡大透視ほど線量は増加しないため、積極的に利用してください。

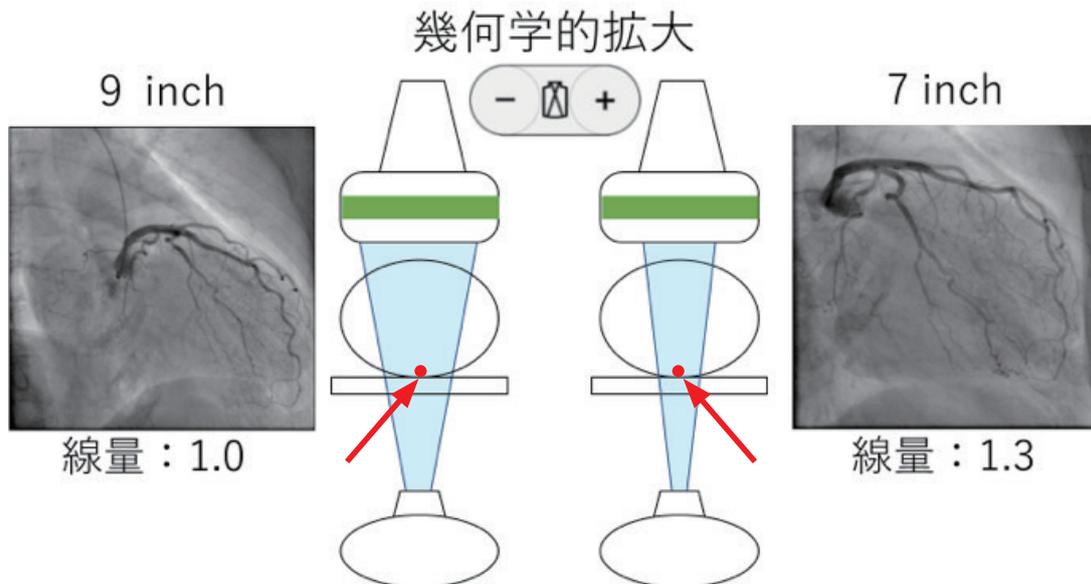


図1 幾何学的拡大の例

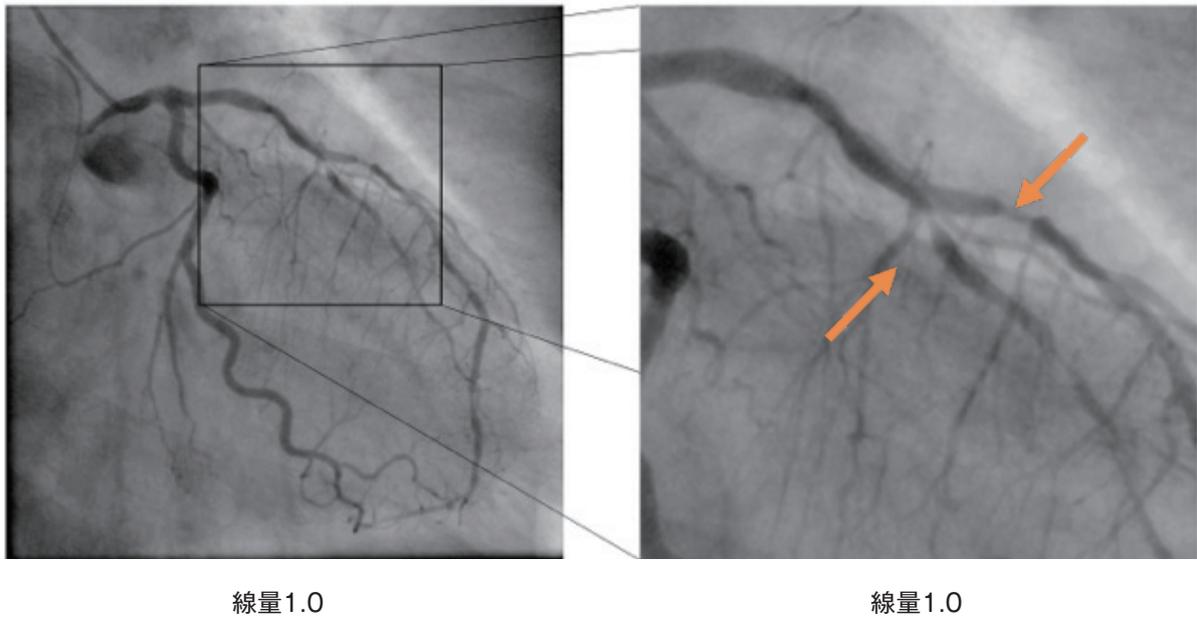


図2 デジタルズームの例

画質は少し劣るが病変部(狭窄部)の確認は容易にできる

Q10—手技時の線量記録

各々の装置に表示される線量を、電子カルテや放射線情報システム(Radiology Information System:RIS)に必ず記録してください。

検査・治療の終了後に装置に表示されている線量値や透視時間(min)を電子カルテやRISに記録してください。線量値とは患者照射基準点での空気カーマ(mGy)、面積線量($\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$)などです。装置により単位が異なる場合があるので確認が必要です。また、多くの装置にはRadiation Dose Structure Report:RDSRが記録されており、より詳細な線量情報も取得できます。

手技毎の線量を記録すれば、診断参考レベル(Diagnostic Reference Levels : DRL)¹²⁾と施設毎の線量値の比較が可能となり、医療スタッフが線量を意識するようになります。日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構では、これが線量低減の啓発になると報告しています¹³⁾。なお、DRLは日本国内のできるだけ多くの医療機関から、放射線診療で用いている線量値を収集し、その結果をもとに判断した値です。患者の被ばく線量管理のめやす値として利用しています。

Q11 — 手技内容の共有

**従事者があらかじめ手技を知ることは、適切な防護に役立ちます。
当日の手技の概略を、事前に従事者間で共有できるように
説明してください。**

ほとんどの病院では手術の前等に「タイムアウト」を導入し医療安全の防止に役立てています。放射線診療も手術同様に、医師、看護師、診療放射線技師、臨床工学技士等の、さまざまな職種の方が関与します。医師の診療科が複数の場合もあります。当日の手技の概略を、事前に術者が説明するようにしてください。あらかじめ手技内容を共有することは、患者情報の収集ミスの防止にも繋がり、より安全な放射線診療に繋がります。従事者防護の観点からも、手技の行程表が事前に用意されていれば、遮へい板と清潔ビニール、防護メガネ等を適切に準備でき、また、適切な術者の立ち位置の事前予測も可能です。

Q12 — 患者線量低減と術者の線量低減の関係

**患者からの散乱線が減少すれば、術者の線量低減につながります。
必ず、患者の線量を低減するあらゆる努力をしてください。**

患者の線量を低減させる行為は、そのほとんどが患者からの散乱線を低減させるため、従事者の被ばく低減につながります。特に以下の4項目は効果的な手法です。

- ① X線受像器をできるだけ患者に近づけます。
- ② 透視時間を短く、透視する場面を限定します。
例えば、透視が無くても安全にカテーテルを操作する場面では積極的に透視を切ります。
- ③ 透視のパルスレートを画質が許容される範囲でできるだけ低レートにします。
- ④ 照射野を必要な範囲に絞ります。
照射野を絞るとは、検査や治療に不要な透視範囲をトリミングしてしまうことです。

Q13—放射線診療時の検査室内の線量分布

検査室内の線量分布を理解して、
できるだけ線量の低いところに立ちましょう。

X線透視装置で用いる放射線のエネルギーは低く、装置からの放射線が届くのは1.5m～2m程度です。また、X線管からの距離と放射線被ばく量は大きく関係します。血管撮影等の検査室内の線量分布は、各病院にある空間の放射線を測るサーベイメータを利用すれば、誰でも簡便に計測できます。検査室毎に、下に例示するような線量分布図を貼り、術者以外の医療スタッフが線量の少ない場所を容易に確認できるように準備しておきます。

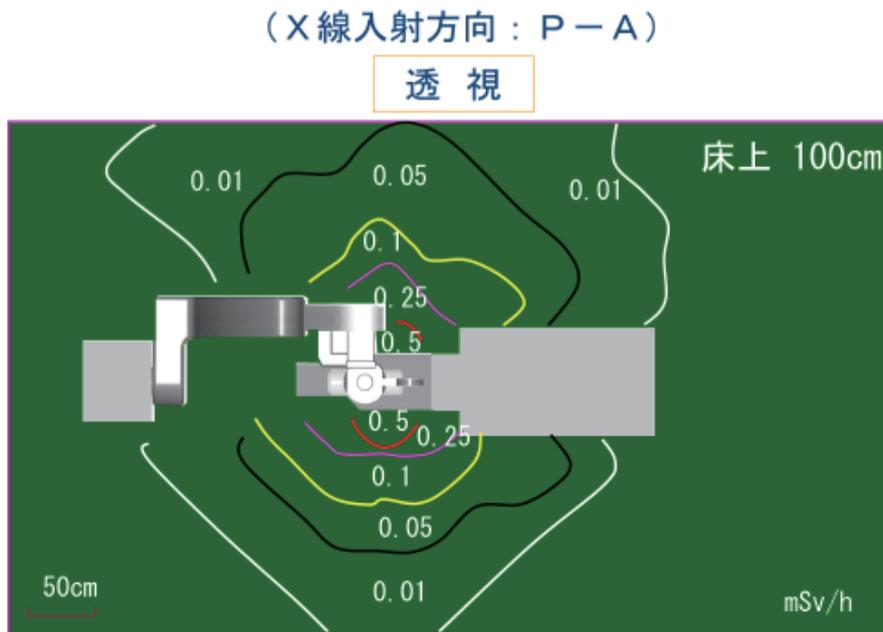


図 心カテ検査室内の空中線量分布

『医療放射線防護の常識・非常識』より許可を得て転載

Q14— 水晶体の線量が高くなる恐れがあるときの対応

防護用具を利用し、適切な撮影条件の管理が行われているかを確認してください。

それでも線量限度を超える恐れがあるときは、水晶体用の線量計を用いるようにしましょう。

水晶体の等価線量限度は、2020年度の改訂後は1年間で最大50mSv、5年で100mSvとなります。適切な防護具の利用や被ばくに配慮した透視手技を行うことで、水晶体の線量はいずれの手技においても年間20mSv以下となることが予測されています¹⁰⁾。しかし、防護策を適切に行ったとしても、一時的に診療件数が極端に増えることなどで、被ばく量が増加する場合も考えられます。現在、実効線量が5年間の線量限度の1年当たりの平均値である20mSvを超えた場合は5年間管理へ移行し、5年間で100mSvを超えないように各病院の責任者が管理をすることが広く浸透しています。そこで、本ガイドラインでは、これまでの個人線量計を用いた測定方法で放射線診療に従事した結果、水晶体の等価線量が年間20mSvを超えた従事者は、その時点で、5年間管理の対象者とし、5年間で100mSvを超えないように管理することを推奨します。さらに該当者には、水晶体の専用の線量計を渡し、これを防護メガネの遮へい範囲内に装着して、放射線診療に従事し、十分に放射線安全に努める等の管理者からの指導を受けることを推奨します。

医療において、従事者の放射線安全は、地域を管轄する労働基準監督署及び保健所が担当します。保健所は、医療法第25条第1項に基づく立入り検査を実施し適正は管理を行っているかを検査します。

2-3 エックス線検査室内での患者対応

従事者による検査時の頻回の患者対応は被ばく増大を招くため、十分に注意してください。被ばく線量が多いCT検査では、防護衣の着用と水晶体の防護メガネの着用も必要です。特に救急対応の患者に対して撮影中検査室内で患者の傍に立つる医師は、一度の検査で水晶体の被ばく線量が数mSvに達します。頻繁にCT検査に関与する医師やこれらの介助を担当する医療スタッフは、放射線診療従事者として登録を受け、教育訓練の受講と個人被ばく線量計による管理と特殊健康診断を受けてください。

03.

… 歯科領域の放射線防護 …

3-1 歯科における水晶体の放射線防護に係るガイドラインの背景

平成29年度と30年度の放射線安全規制研究戦略的推進事業費（原子力・医療従事者等の標準的な水晶体の等価線量モニタリング、適切な管理・防護はどうあるべきか～水晶体被ばくの実態から探る～）の大野班分担研究で、歯科領域を含め医療で放射線診療従事者の水晶体被ばくが高くなり得る分野の線量実態調査が行われました。調査された各診療科における1箇月間のVisionによる水晶体線量（3ミリメートル線量当量Hp(3)）頻度分布のグラフを下図に示します。

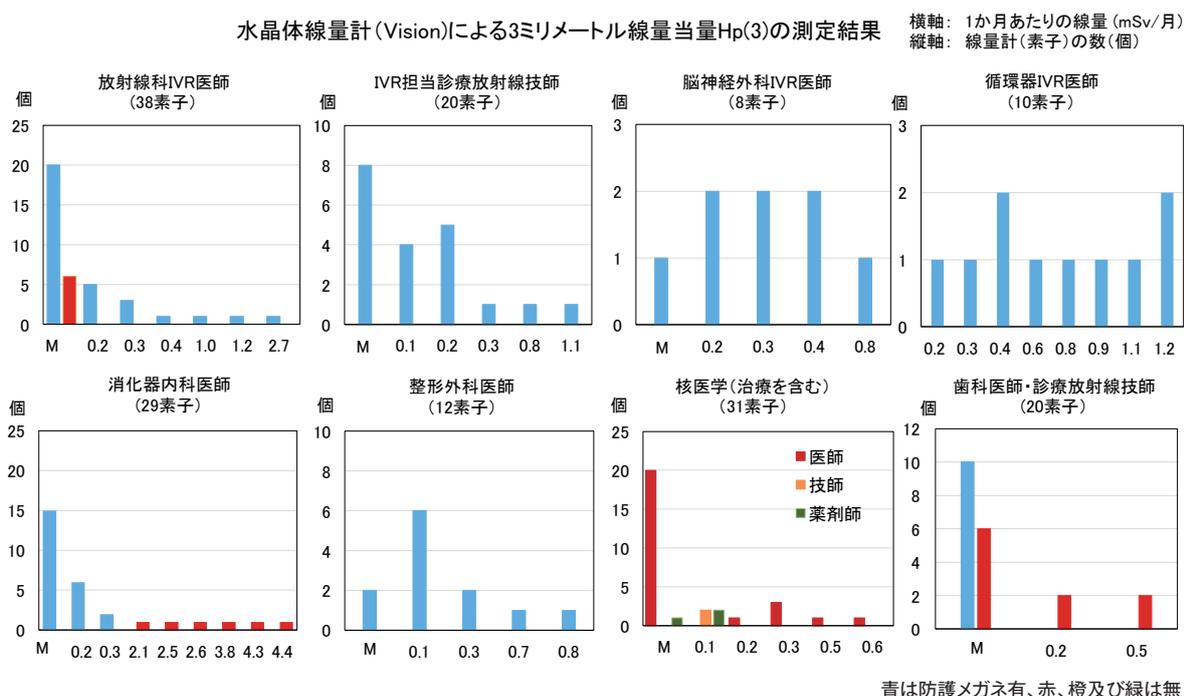


図 様々な診療科における1箇月間のVisionによる水晶体線量モニタリングの結果
(MはVision線量計の検出限界0.1mSv未満を示す)

調査の結果、防護メガネはほとんどの医師が装着していました。年間20mSvを超える恐れがある放射線科医師1名の診療内容は、特殊な手法であるCT透視下の腫瘍治療でした。診療放射線技師以外の医療スタッフや小線源治療に伴う被ばくは低い値でした。年間20mSvを超える恐れがある消化器内科医師の人数は3名でした。核医学領域において比較的被ばくが多い医師は、治療（患者投与量は数GBq）担当者でした。歯科医師で最も被ばくが多かった者は、法医学領域における検死のための撮影を多数行っていました。

歯科領域における放射線診療従事者の水晶体被ばく線量は、診療科全体の中では低い水準にあることが分りましたが、その中でも現状で水晶体被ばくが懸念されるX線検査として次のものがあげられます。近年、手持ち撮影が可能な携帯型口内法X線装置が各社から市販され広く使用されるようになってきました。それらを利用した撮影では、放射線診療従事者の水晶体被ばくが問題となります。携帯型口内法X線装置を用いた手持ち撮影のための指針『携帯型口内法X線装置による手持ち撮影のためのガイドライン』（以下“手持ち口内法撮影ガイドライン”）[https://jsomfr.sakura.ne.jp/wp-content/uploads/2017/12/portable_guideline.pdf] が日本歯科放射線学会から公表されています。特にX線撮影のための防護施設（X線診療室／X線撮影室、以下X線室と略）などが無い状態で口内法撮影が行われる場合（以下室外撮影と略）、あるいは、X線室内であってもしばしば小児や介助を必要とする患者に対して口内法撮影を行わなければならない場合（以下同室撮影と略）には注意が必要です*。

* 上述平成29年度と30年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費大野分担研究の平成29年3月25日の「歯科診療における水晶体被ばくに関する暫定調査報告」参照。

同室撮影や室外撮影を行う場合、あるいは撮影補助等を行う放射線診療従事者（歯科医師／診療放射線技師／歯科衛生士／看護師等）は、後述のガイドラインに示すように、防護メガネを常用するようにしてください。また、照射スイッチを操作する際に、患者や線源から2m以上の距離を取れない場合には、鉛当量0.25mm以上の防護衣（防護エプロン等）を着用するようにしてください。歯科の口内法撮影では、利用されるX線の透過力が小さいため鉛当量0.07mm程度の軽い防護メガネの使用でも水晶体防護に有効です。また、放射線診療従事者が線源に近接した状態でも鉛当量0.25mm以上の防護衣を着用することにより、十分に防護が可能です。

3-2 歯科領域の放射線検査

Q1 — 同室撮影の放射線防護

小児や介助を必要とする患者に対し同室撮影、
または撮影補助する放射線診療従事者は、
必ず“手持ち口内法撮影ガイドライン”に
準じた放射線防護をしてください。

※『携帯型口内法X線装置による手持ち撮影のためのガイドライン』

[https://jsomfr.sakura.ne.jp/wp-content/uploads/2017/12/portable_guideline.pdf] 参照

同室撮影は、日常的に全口内法撮影検査の20%近い頻度になることが調査により知られており、その場合には放射線診療従事者は防護メガネを使用してください。また、照射スイッチを操作する際に患者や線源から2m以上離れることができない場合には、防護衣を着用してください。防護衣によって四肢や頭部を除く体幹部の被ばくは大幅に低減されます。防護衣を着用した際は、不均等被ばくモニタリングのための個人線量計は、防護衣の外側（襟元をお奨めします）に装着してください。歯科領域における水晶体の被ばく線量は一般的に高くありません。しかし年間の水晶体被ばくが20mSvを超える恐れがあるような特殊な状況下にある場合には、必ず専用の水晶体線量計（DOSIRISやVision等）を用いて3ミリメートル線量当量のモニタリングを実施してください。

Q2— 室外撮影の放射線防護

訪問診療あるいは大規模災害時等で室外撮影を行う場合には、
放射線診療従事者のみでなく、一般人の安全のため、
必ず“手持ち口内法撮影ガイドライン”に準じた
放射線防護をしてください。

訪問診療や特殊な理由により、X線室がない環境下において携帯型口内法X線装置を用いた室外撮影を行う必要がある場合、撮影あるいは撮影補助する歯科医師、診療放射線技師、歯科衛生士、看護師等の放射線診療従事者は、3-2-1)の同室撮影と同様な被ばく状況におかれるため、同室撮影と同じ放射線防護が必要となります。またX線遮へい物がないため、放射線診療従事者以外の人々(例えば患者家族や同室患者、見舞客等)の放射線防護に対しても必ず配慮してください。直接X線が照射される方向を避け、患者や線源から2m以上距離が取れるようにしてください。2m以上の距離を取ることができれば、迷放射線の影響は非常に制限されます。携帯型口内法X線装置を用いた撮影時における迷放射線の空間線量分布については、大高らによる【参考図】に示されるような詳細な報告がなされています。

【参考図】

携帯型口内法X線装置(DEXICO ADX4000W)を用いて、図2(a)に示すように円柱ファントム(直径16cm×高さ15cmのPMMA)の中心を座標原点とし、コーン先端をファントム表面に接して撮影したとき(図中の矢印)、床面からの高さ1mの原点から半径0.5mと1.0mの距離における迷放射線の空間線量分布を、水平面上(図2(b))とそれに直交する垂直面上(図2(c))で測定した結果(コーン先端空気カーマ1mGyあたりに規格化した μ Gy単位の空気カーマ)†。

†(Otaka Y, Harata Y, Izawa M, et al., On the safe use of portable intraoral X-ray units in large-scale disasters, Jpn J Oral Diag/Oral Med., 30(3): 311-326, 2017より著者の許可を得て改編)

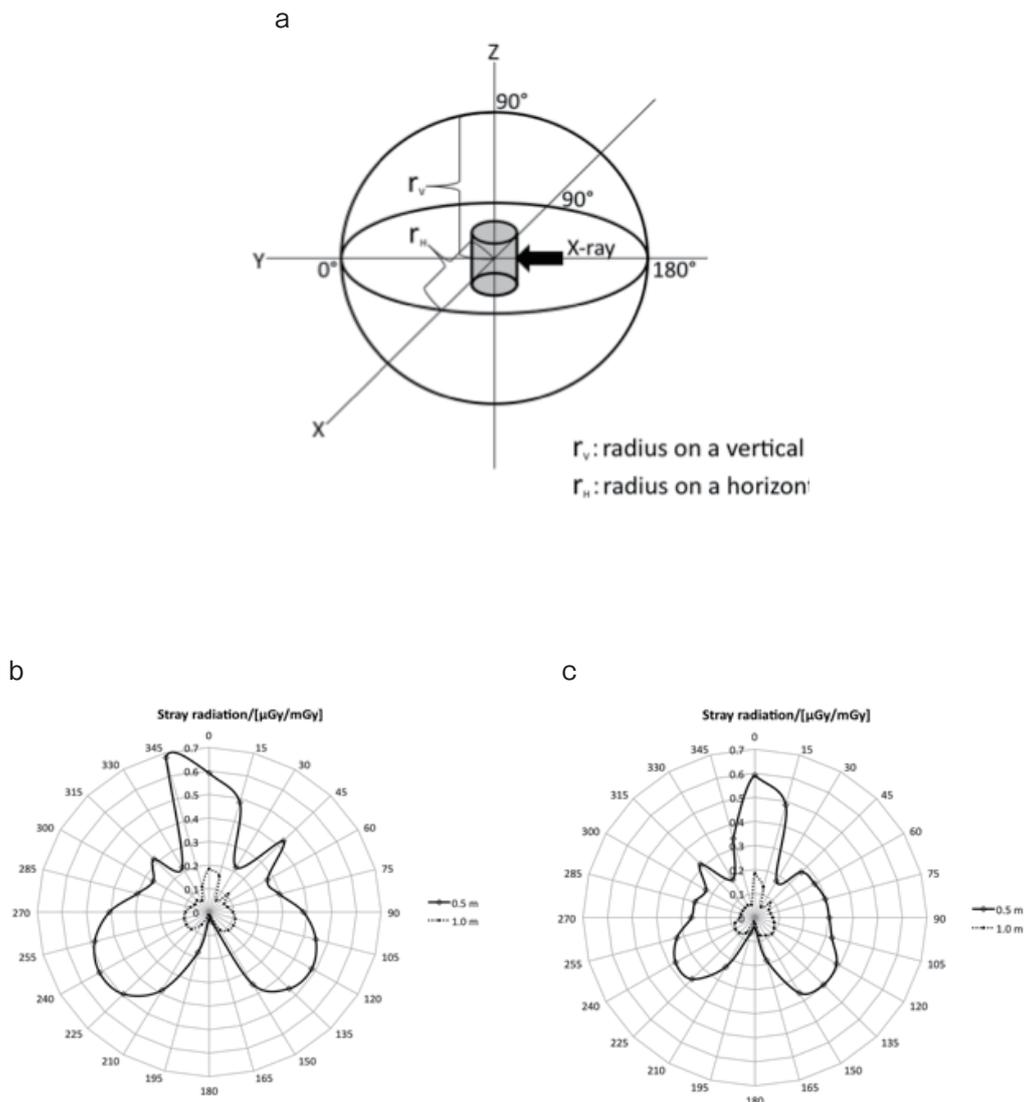


図 測定の幾何学的配置(a)、水平面上(b)と垂直面上(c)での迷放射線分布

災害時の個人識別等を目的に室外撮影を行う場合には、日本歯科放射線学会から公表されている前述の“手持ち口内法撮影ガイドライン”「5. 歯科法医学分野における手持ち撮影についての指針」に準じた放射線防護を必ず行ってください。その防護指針は概ね同室撮影のものと同様ですが、撮影件数が多くなる場合には特に十分な注意を払う必要があります。

その際の種々の具体的問題に対するQ and Aは、前述平成29～30年度大野分担班研究に対して平成30年11月30日に提出された資料「法医学における歯科X線撮影(口内法撮影)の管理啓発方法の検討」を参照してください。

04.

… 参考文献 …

- 1) 医療従事者の電離放射線に係る皮膚がんの労災認定について
(平成24年度～平成29年度(9月7日現在))
<https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-10801000-Iseikyoku-Soumuka/0000191785.pdf> (H30.1.19)
- 2) 眼の水晶体に係る放射線防護の在り方について;放射線審議会 眼の水晶体の放射線防護検討部会
<https://www.nsr.go.jp/data/000221800.pdf> (H30.3.2)
- 3) 厚生労働省所管法令に関する諮問文書;第147回放射線審議会総会資料 147-1-4-2号
<https://www.nsr.go.jp/data/000295234.pdf> (R1.12.23)
- 4) 医療法施行規則の一部を改正する省令の施行等について;医政発 0312 第 7 号
https://hodanren.doc-net.or.jp/anzen/19/0701_isei0312_7.pdf (H31.3.12)
- 5) ICRP publ.103国際放射線防護委員会の2007年勧告.5.10 線量限度,日本アイソトープ協会.
2009;59-62.
- 6) 樺田尚樹 . 診療放射線従事者に対する個人管理の現状と課題. 医療放射線防護誌.
2019; 81: 5-11.
- 7) Zuguchi M, Chida K, Taura M, et al. Usefulness of non-lead aprons in radiation protection for physicians performing interventional procedures. Radiat Prot Dosimetry. 2008;131(4):531-4. doi:10.1093/rpd/ncn244.
- 8) Haga Y, Chida K, Kaga Y, et al. Occupational eye dose in interventional cardiology procedures. Sci Rep. 2017 ;7(1):569. doi: 10.1038/s41598-017-00556-3.
- 9) Kurihara T, Itoi A, Itokawa F, et al. Novel protective lead shield and pulse fluoroscopy can reduce radiation exposure during the ERCP procedure. Hepatogastroenterology. 2012; 59:709-12. doi: 10.5754/hge11764
- 10) 飯田 泰治, 茶島 光浩, 清水 満, 他. 血管撮影領域における術者に対する放射線防護.
日放技会誌:2001;57(12):1548-1555
- 11) 日本血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構資料機構報告
<http://ivr-t.kenkyuukai.jp/special/?id=18190>
- 12) 最新の国内実態調査結果に基づく診断参考レベルの設定
<http://www.radher.jp/J-RIME/report/DRLhoukokusyo.pdf>

資料1 放射線による水晶体の障害

放射線の被ばくによる白内障の発生は以前から知られています。放射線性白内障の発生は主として放射線が水晶体上皮細胞の異常分化を誘発し、異形成の線維性細胞を生み、微小混濁を形成するためです。しかし従来はこの微小混濁が必ずしも視力低下を伴う白内障にまで発展するとは考えられていませんでした。このため、線量限度決定の根拠として国際的にも視覚障害性白内障発生のしきい値(1%の異常出現値)を採用してきました。この値は慢性被ばくで8Gy、急性被ばくで2~10Gyです。ところが最近になり、原爆被爆者やチェルノブイリ事故清掃員の疫学調査結果やマウスを用いた実験結果などから、微小混濁が視力障害性白内障へと進行する可能性があるとの考えが主流となり、現在は微小混濁のしきい値0.5Gyを放射線による水晶体障害のしきい線量として採用しています。

資料2 皮膚への放射線影響の紹介

皮膚は体表面にあるため、放射線の影響を最も確認しやすい場所です。皮膚に放射線が大量に当たった場合には、火傷に似た皮膚障害の発生と将来の皮膚癌発生のリスク増加という2種類の影響を受ける可能性があります。皮膚障害は、紅斑や脱毛、落屑、潰瘍などがあり、それぞれが発生する最低線量(集団の1%に異常が発生する線量で、しきい線量と呼ぶ)が判っています。このように障害発生の最低線量が明らかな異常を放射線領域では確定的影響と呼びます。障害の詳細は、資料4.患者の皮膚障害に関するガイドラインと対応の表1で確認してください。なお、通常の火傷との違いは、放射線感受性の高い基底膜細胞に障害が発生するため、新陳代謝により表皮が脱落后初めて異常が明らかになることです。しきい線量を超えて被ばくをした場合は、その後の皮膚の変化を注意深く観察する必要があります。

皮膚癌発生のリスクは、発がんのメカニズムに則るためどの程度の線量でリスクが増加するかを明言できません。このため、発がんは組織反応と分けて、確率的影響と呼んでいます。皮膚癌は大量に被ばくした居所から発生しますので、放射線診療に従事する者は手指など局所の被ばくが増加しないように注意を払う必要があります。

資料3 妊娠可能な女性の放射線管理

妊娠がわかった時は職場の所属部署の長に申告し、管理者に報告しなければいけません。管理方法が異なるからです。妊娠から出産までの間は胎児の被ばくが実効線量1mSv以下になるように、妊婦の腹部表面での等価線量が2mSvを超えないようにします。

なぜこのような管理をするのでしょうか？それは、胎児は妊婦の従事者の体内にいますが、別の一人の“一般公衆”として考えるからです。胎児には一般公衆の実効線量限度としている年間1mSvを適応する目的で、妊婦の従事者の被ばく線量を下げているのです。

一般公衆は放射線に関する知識を得る機会が少ないこと、乳幼児や高齢者を含むあらゆる人々を対象とすることから、可能な限り低い値を設定しています。自然放射線被ばく線量の半分程度であれば、危険性はほとんどないとの判断によります。この数値を胎児にも当てはめようという公衆衛生的な配慮がなされています。

なお、通常業務で8割の医療スタッフの被ばくは実効線量で年間1mSv以下に抑えられています。

資料4 患者の皮膚障害に関するガイドラインと対応(2019年改訂)

平成14年頃からIVRを受けた患者の皮膚に潰瘍等の障害が生じることが、各国で問題となりました。日本でも同様の障害が報告されるようになったため、IVRにともなう放射線皮膚障害の防止に関するガイドラインを13の学協会が共同で発表しました。

医療放射線防護連絡協議会、日本医学放射線学会、日本医学物理学会、日本画像医学会日本血管造影・IVR学会、日本歯科放射線学会、日本心血管インターベンション学会、日本心血管カテーテル治療学会、日本循環器学会、日本脳神経血管内治療学会、日本皮膚科学会、日本放射線技術学会、日本放射線腫瘍学会、日本保健物理学会の共同で平成16年に発表されたガイドライン(令和元年一部改訂)を紹介します。なお、この内容を補完する具体的なQA集も作成されていますので、参考にしてください(令和元年改訂)

◎IVRに伴う放射線皮膚障害の防止に関するガイドラインについて

1. はじめに

近年、画像診断用機器や診断技術などを応用することによりX線透視下で治療を行うインターベンショナルラジオロジー(IVR)は目覚ましい進歩を遂げ、多くの疾患の治療法として普及しています。IVRでは、拡大透視や高線量率の透視を長時間使用し、撮影回数も多くなることがあり、患者に放射線皮膚障害を生じる事例が発生するようになりました。

IVRにおいて発生した患者の放射線皮膚障害防止に関する注意は、米国のFDAから1994年に公表され、我が国では翌1995年に日本医学放射線学会が警告文を発しました。しかし、それ以降もIVRによって発生した放射線皮膚障害の報告が散見されており、より充実した放射線防護対策が求められています。

そのため、関連学会で構成した本検討会が中心となり、IVRにおける皮膚障害防止に関するガイドラインを作成しました。このガイドラインと測定マニュアルに基づいて、IVRに伴う皮膚障害の発生を防止し、またやむをえず障害が生じた場合の対応にも務めてください。

2. インフォームドコンセント

IVRを施行するにあたり、皮膚線量がしきい線量を超えた場合には皮膚障害が発生する可能性が高くなります。主治医は患者とその家族に、治療の必要性、方法および合併症に関する説明のほか、放射線被ばくによって生じる皮膚障害等の確定的影響とその防止策、皮膚障害が発生したときの治療方法についても説明をしてください。なお、皮膚線量がしきい線量を超える可能性が高い場合には、あらかじめその旨の説明も付け加えてください。

3. IVR手技における皮膚線量の管理目標値の決定

放射線による皮膚障害などの確定的影響にはしきい線量が存在し、それ以下の被ばくでは発生しないことが明らかになっています。

IVRの施行に際し、あらかじめ、施設の管理目標として皮膚線量の上限值を定めてください。但し、緊急の救命医療の場合など、軽微な確定的影響よりも治療完遂を優先する場合がありますから、患者にとっての最良な結果を得るため、管理目標値を超えて継続する場合の判断を誰がどのようにするか、という手続きも含めて定めておく必要があります。

4. IVRに使用する装置の線量率の把握

日常のIVRで使用している装置の患者皮膚面における線量率を把握しておくことは、皮膚障害防止のために不可欠です。IVRの安全性を担保するために、測定マニュアルを参考に線量率を実測してください。なお、現在の透視用装置は、医療法施行規則において「透視中の患者への入射線量率は、患者の入射面の利用線錐の中心における空気カーマ率が50mGy毎分以下になるようにすること。ただし、操作者の連続した手動操作のみで作動し、作動中連続した警告音等を発するようにした高線量率透視制御を備えた装置にあっては125mGy毎分以下になるようにすること」と規定されています。

5. 皮膚障害の影響線量を超えたと考えられる患者への対応

放射線皮膚障害のしきい線量を超えたと考えられる場合（例えば、皮膚線量が初回症例では3Gy、頻回症例では1Gyを超えた場合）は、以下の手順に従って患者の健康維持に務め、照射部位、皮膚線量や行った処置などをカルテに記載してください。

- (1) 治療が必要不可欠なものであったことを、再度説明してください。
- (2) 放射線皮膚障害の起こる可能性が高い部位（照射部位）と皮膚線量をカルテに記載し、繰り返し行われるIVRでは情報が次に伝わるようにしてください。
- (3) 皮膚の紅斑などの影響が起こる可能性を患者と家族に伝え、IVR手技後1週間から

2週間は、入浴等の際に照射部位を観察するように説明してください。

観察には家族の協力が必要なことを付け加えてください。

入院が継続される場合は主治医と病棟看護師にその旨を伝え、継続した皮膚観察をお願いしてください。

- (4) 皮膚障害が起こる可能性のある部位は、擦ったり掻いたりしないこと、入浴時には刺激の強い入浴剤や石鹸を使用しないこと、絆創膏や湿布類は使用してはならないことを説明してください。
- (5) 皮膚に何らかの変化があった場合には、主治医に連絡するよう説明してください。
- (6) 皮膚障害の発生が予想される場合は、皮膚科医に相談して下さい。その際、皮膚障害を起こす可能性がある部位と、生じる皮膚障害は放射線によるものであることを伝えて下さい。

表のような施設基準を規定し、患者にはそれに沿った説明をするのも一法です。

なお、これらの線量と影響の関係は個人差があります。

レベル0	1Gy未満	特別な対応は不要
レベル1	1Gy以上3Gy未満	被ばく線量と部位を診療録などに記載する
レベル2	3Gy以上5Gy未満	一過性の脱毛、発赤の可能性を説明する
レベル3	5Gy以上	脱毛、発赤、びらんなどの可能性を説明する(18~20Gyで皮膚壊死、潰瘍形成の可能性)

6. 装置の品質管理

患者の皮膚障害などの放射線障害を防止するためには、患者の皮膚線量を把握するとともに、被ばく低減のための有効な対策を講じて線量を抑制することが重要です。そのためには、使用している装置がどのように制御されているかを理解し、その最適化と安定性の維持に努めてください。以下、被ばく低減のための環境整備に関する具体的な項目を列記します。

- (1) 付加フィルタの最適化
- (2) 透視撮影条件の最適化
- (3) 撮影記録の最適化
- (4) 装置の幾何学的配置と設定の最適化
 - ①焦点—患者間距離(患者をできる限りX線管から遠ざける)
 - ②受像器—患者間距離(受像機(検出器)をできる限り患者に近づける)
 - ③照射野を絞る
- (5) ユーザとメーカーによるシステムの性能維持管理

7. スタッフの教育訓練

放射線を安全に利用するには、被ばくのメカニズムと影響、および防護策についての知識が必要です。IVRに関わる医師、診療放射線技師、看護師などに対しては、施設や学会において、セミナーなどの教育訓練を行ってください。

8. まとめ

IVRは、患者への「低侵襲性」に利点があり、従来は外科手術でしか対処できなかった疾患あるいは外科手術が困難であった疾患の治療において患者の身体的な負担を大きく軽減しています。一方、患者の放射線被ばくを伴うことにより一部の患者に放射線皮膚障害が生じています。IVRにおいて放射線皮膚障害を発生させない環境を整え、万一障害が発生した場合においても的確な対処ができるような体制作りが急務です。本ガイドラインは、そのような主旨に沿って関連学会の協力により作成しました。

放射線による影響は確率的なものと確定的なものがあります。今後も、放射線に起因するさまざまな問題が発生する可能性があるため、確率的影響への対応も視野に入れよ、という意見もあります。しかし、本ガイドラインに、いま問題になっている放射線皮膚障害の防止以外のことを盛り込むことは、対応を複雑にするだけでなく、標記目的の達成を阻害するおそれがあるので、本ガイドラインはあくまでも、IVRに伴う放射線皮膚障害の防止を目的とすることを明記します。

放射線診療、特にIVRにおいては、患者と医療スタッフが信頼をもって協力し合う関係を築くことが重要です。そのためには、各施設において、どのレベルの被ばくまでを容認するのか、また、障害が発生するおそれのある線量に達した場合には、どのような対処をするのかという戦略を確立し、患者にも公開する必要があります。さらに、IVR術者の放射線防護にも配慮する必要があります。

2) IVRの患者と術者の被ばく管理

IVRは、患者にも術者にも適切な管理が求められます。

IVR治療では長時間のX線透視が、放射線治療の場合は細胞を放射線で死滅する線量が必要であり、放射線検査よりも放射線量は遙かに高いので、適切な線量管理が特に求められます。巻末に資料として、患者と術者の放射線安全を呼びかけるIAEAのポスターの日本語訳を掲載しました。

(注:本ガイドラインには未収載、医療放射線防護連絡協議会のホームページよりダウンロード可能 (<http://jarpm.kenkyuukai.jp/information/>))

共同編集

公益財団法人 日本医学放射線学会

一般社団法人 血管撮影・インターベンション専門診療放射線技師認定機構

公益財団法人 日本医学物理士会

一般社団法人 日本インターベンショナルラジオロジー学会

一般社団法人 日本救急医学会

一般社団法人 日本呼吸器学会

公益財団法人 日本産業衛生学会

特定非営利活動法人 日本歯科放射線学会

一般財団法人 日本消化器病学会

公益社団法人 日本小児科学会

一般社団法人 日本小児外科学会

一般社団法人 日本小児放射線学会

公益社団法人 日本診療放射線技師会

一般社団法人 日本循環器学会

公益社団法人 日本整形外科学会

一般社団法人 日本脳神経外科学会

特定非営利活動法人 日本脳神経血管内治療学会

一般社団法人 日本放射線看護学会

公益社団法人 日本放射線技術学会

医療放射線防護連絡協議会

放射線安全に関するアンケートのお願い

放射線作業従事者に対する目の水晶体の等価線量限度の改定に向けた準備が、現在各方面で進められています。

現在の線量限度は1年間で150mSvですが、改定後は5年間で100mSv、単年度は最大50mSvまでとなります。実効線量限度と皮膚の等価線量限度は従来通りで変更はありません。

医療関係者や放射線安全管理担当者が新たな規制の下でスムーズに業務を遂行するために、皆様がどのような管理方法をご希望されるかをお伺いし、規制担当の方々と、今後のよりよい管理方法を考える基礎資料を作成したいと思います。ご記入のほどよろしくお願い申し上げます。

記入後の用紙は受付の専用箱に入れて下さい。よろしくお願い致します。

なお、集計結果は当連絡協議会の2020年2月フォーラムで報告します。

以下の（方法1）と（方法2）を踏まえたうえで、あなたが、望ましいと思う従事者の水晶体の被ばく管理の方法を1つ選んで、番号に○をつけて下さい。

（方法1）眼の水晶体の等価線量は、現在は頭部用と胸部（腹部）の個人線量計の計測結果を基に算定されています。この値は、防護眼鏡の外側の数値を近似しています

（方法2）最近では防護眼鏡の内側に装着するタイプの線量計もあり、これを用いれば防護眼鏡の遮へいを考慮した値が得られます。しかし、別途料金がかかることと、視野の邪魔になるという欠点があります。

1. 方法1の値が5mSvを超えた時点で方法2の線量計を義務付ける。単年度20mSv以下になるように対応する。
2. 方法1の値が10mSvを超えた時点で方法2の線量計を義務付ける。単年度20mSv以下になるように対応する。
3. 方法1の値が20mSvを超えた時点で方法2の線量計を義務付ける。5年間管理の対象者へ移行し5年間で100mSvを超えないように対応する。
4. その他（具体的に書いてください）