

ISSN 1881-7297

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

Vol.9 No.1

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

2016年3月

一般社団法人 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 ISSN 1881-7297
Vol. 9, No. 1, 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

2016年3月

発行者 日本保健物理学会企画委員会
発行所 一般社団法人 日本保健物理学会
〒105-0004 東京都港区新橋 3-7-2 吉松ビル 3階
日本保健物理学会事務局
TEL : 03-6205-4649
FAX : 03-6205-4659
E-mail : exec.off@jhps.or.jp
<http://www.jhps.or.jp/>

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

2016年3月

概 要

福島第一原子力発電所事故を契機とし、福島県住民をはじめとする多数の一般公衆を対象とした内部被ばく検査がホールボディカウンタ（Whole-Body Counter: WBC）を用いて開始され、現在も継続されている。我が国における WBC の利用は従前まで職業被ばく管理の目的にほぼ限定されていたことから、一般公衆の測定に際しては幾つかの課題が認識された。その主なものは、装置の校正に用いるファントムの標準化、WBC のトレーサビリティの維持確保、体格の変化が大きな子どもを含む被検者を対象とする WBC 測定における精度であった。さらに、WBC 測定によって得られる体内放射能を基に内部被ばく線量を評価する方法についても、十分な理解が得られずに混乱を生じる場面が見受けられた。このような諸課題を専門的知見に基づき解決するため、本専門研究会が 2012 年度に発足した。

本専門研究会では、福島第一原子力発電所事故後に我が国で行われてきた WBC 測定に係る様々な対応状況を調査するとともに、種々の WBC から取得されたデータの解析を行うことで、科学的根拠に基づく課題解決のための具体的な提案を行った。

目次

| | | |
|------|--|----|
| 第1章 | はじめに..... | 1 |
| 1-1 | 本専門研究会の設立趣旨..... | 1 |
| 1-2 | 目的とスコープ..... | 1 |
| 1-3 | 本報告書の概要..... | 1 |
| 第2章 | 本専門研究会での検討事項..... | 2 |
| 第3章 | 国内における WBC の稼働状況及び代表的機種の様相..... | 4 |
| 3-1 | 国内における WBC の稼働状況..... | 4 |
| 3-2 | 国内 WBC の代表的機種..... | 6 |
| 第4章 | WBC 運用面の課題..... | 9 |
| 4-1 | WBC 校正用ファントムの標準化..... | 9 |
| 4-2 | 小児の WBC 測定..... | 13 |
| 4-3 | その他の WBC 運用面の課題..... | 18 |
| 第5章 | WBC から得られる測定結果の解釈..... | 27 |
| 5-1 | 福島県住民の内部被ばく線量評価の方法と課題..... | 27 |
| 5-2 | 福島原発事故に係る住民等の WBC 測定..... | 36 |
| 第6章 | 本専門研究会からの提言..... | 37 |
| 引用文献 | | 39 |
| 別添1 | 福島県内の WBC 設置状況等..... | 42 |
| 別添2 | FASTSCAN の検出特性..... | 44 |
| 別添3 | 富士電機製 WBC の体格補正等..... | 48 |
| 別添4 | その他のソフトウェアによる波高スペクトルの解析..... | 49 |
| 付録A | ANSI/HPS N13.35-1999 Specifications for the Bottle Manikin Absorption Phantom の要約..... | 51 |
| 付録B | 活動記録..... | 54 |
| 補遺 | 日本工業規格 JIS Z4343「体内放射能測定装置— γ 線放出核種(エネルギー100 keV 以上 3000 keV 以下)」の制定について..... | 55 |

図目次

| | | |
|------|--|----|
| 図 1 | キャンベラ社製 FASTSCAN の外観と構造図 | 6 |
| 図 2 | 椅子型 WBC の外観..... | 7 |
| 図 3 | その他の椅子型 WBC..... | 8 |
| 図 4 | 福島県内の WBC 精度調査に使用した放医研ファントムの外観 | 10 |
| 図 5 | ファントム中の放射能 (^{137}Cs) に対する各 WBC の定量結果のバイアス | 11 |
| 図 6 | トランスファーファントムの外観..... | 12 |
| 図 7 | FASTSCAN における BOMAB ファントム及びトランスファーファントムの計数効率の比較 | 12 |
| 図 8 | IGOR ファントムの外観..... | 13 |
| 図 9 | 福島県住民の測定に使用された WBC の外観 | 14 |
| 図 10 | ベッド型 WBC の体格補正式..... | 16 |
| 図 11 | 日本人平均身長・体重に基づく体表面積と体格別ファントムの体表面積の比較 | 18 |
| 図 12 | FASTSCAN の MDA 頻度分布 (左: ^{134}Cs , 右: ^{137}Cs) | 20 |
| 図 13 | 定量された体内放射能とピークエリアの解析不確かさの関係 (左: ^{134}Cs , 右: ^{137}Cs) | 20 |
| 図 14 | WBC の波高スペクトル例..... | 21 |
| 図 15 | ^{134}Cs のピークライン毎に算出された定量値と ^{137}Cs の定量値の比較..... | 22 |
| 図 16 | GENIE-2K での核種ライブラリの設定例..... | 23 |
| 図 17 | GENIE-2K でのピーク面積計算のためのパラメータ設定例..... | 24 |
| 図 18 | FASTSCAN の日常点検記録様式の一例..... | 25 |
| 図 19 | エネルギー分解能が劣化した WBC の波高スペクトル | 25 |
| 図 20 | エネルギー分解能の計算式..... | 26 |
| 図 21 | ^{137}Cs の全身残留割合 (吸入摂取, タイプ F) | 28 |
| 図 22 | 親子の実効線量評価値の比較 | 30 |
| 図 23 | 毎日 1Bq の ^{137}Cs を経口摂取した場合の全身残留割合の変化 | 31 |
| 図 24 | 日常的な摂取シナリオに基づき年間 1 mSv に達する場合の ^{137}Cs の全身残留量 | 32 |
| 図 25 | ^{134}Cs と ^{137}Cs の体重 1 kg 当たりの全身残留量平衡値..... | 35 |
| 図 26 | 内部被ばく検査結果様式..... | 35 |
| 図 27 | WBC 校正専門機関の位置付けと役割 | 37 |

表目次

| | | |
|------|--|----|
| 表 1 | 福島原発事故直後の我が国の WBC 設置状況 | 5 |
| 表 2 | 放医研ファントム（成人男性）各部位の外形の仕様等 | 10 |
| 表 3 | 福島県住民の測定に使用された放医研及び原子力機構の WBC の仕様 | 14 |
| 表 4 | 年齢別 BOMAB ファントムに対する FASTSCAN の計数効率(成人ファントムに対する相対値) | 15 |
| 表 5 | 実験に使用したファントムの全長，重量及び体表面積 | 16 |
| 表 6 | WBC の点検項目，判定基準及び頻度等の目安 | 26 |
| 表 7 | ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の摂取から 300 日後の全身残留割合 | 29 |
| 表 8 | ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の実効線量係数（吸入摂取） | 29 |
| 表 9 | 毎日 1 Bq のセシウムを 1 年間または 1000 日間にわたって経口摂取し続けた場合の最終日にお ける全身残留量 | 31 |
| 表 10 | ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の実効線量係数（経口摂取） | 32 |
| 表 11 | ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の 1 mSv に相当する摂取量 | 32 |
| 表 12 | セシウムの代謝パラメータ | 33 |
| 表 13 | 1 日 1 Bq 摂取した場合の ^{134}Cs と ^{137}Cs の平衡値（理論値） | 34 |
| 表 14 | 体重 1 kg 当たりの $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 量から年間実効線量への換算係数 | 34 |

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メンバー

| | | |
|-------|--------------------|----------------|
| 主査 | 栗原 治 | 放射線医学総合研究所 |
| 幹事 | 仲野 高志 | 放射線医学総合研究所 |
| 委員 | 武田 浩光 | 札幌医科大学 |
| | 森山 竜也 | 日本原燃株式会社 |
| | 浅利 靖 | 弘前大学 |
| | 宮崎 真 | 福島県立医科大学 |
| | 高橋 聖 | 日本原子力研究開発機構 |
| | 高田 千恵 | 日本原子力研究開発機構 |
| | 木名瀬 栄 | 日本原子力研究開発機構 |
| | 柚木 彰 | 産業技術総合研究所 |
| | 脇谷 雄一郎 | 日本アイソトープ協会 |
| | 飯本 武志 | 東京大学 |
| | 杉浦 紳之 | 放射線医学総合研究所 |
| | 鈴木 敏和 | 放射線医学総合研究所 |
| | 大熊 健郎 | 安西メディカル株式会社 |
| | 中葉 仁 | 東京電力株式会社 |
| | 須子 雅好 | 日立アロカメディカル株式会社 |
| | 小笠原 強二 | キャンベラジャパン株式会社 |
| | 山田 隆志 | 株式会社アドフューテック |
| | 山田 宏治 | 富士電機株式会社 |
| | 岩井 敏 | 日本原子力技術協会 |
| | 細井 義夫 | 広島大学 |
| 森田 直子 | 長崎大学 | |
| 林 文成 | セイコー・イージーアンドジー株式会社 | |
| 水井 雅之 | セイコー・イージーアンドジー株式会社 | |
| 小泉 彰 | RS テクノ株式会社 | |
| 企画委員長 | 百瀬 琢磨 | 日本原子力研究開発機構 |

※所属は本専門委員会発足時のもの

第1章 はじめに

1-1 本専門研究会の設立趣旨

我が国では、これまで、主として職業被ばく管理の一環として内部被ばく線量の測定が行われてきたが、東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、福島原発事故）を契機として、福島県内各地の医療機関や市町村の関連施設等にホールボディカウンタ（以下、WBC）が設置され、住民等の内部被ばく測定が実施されるようになった。これに伴い、住民を対象とした内部被ばく線量のあり方についても一定の考え方を取りまとめる必要性が関係者間で認識されており、日本保健物理学会が先に取りまとめた「福島第一原子力発電所事故に関する放射線防護上の課題と提言」[1]においても、内部被ばく線量測定及び評価方法に関する標準の整備を、学会が取り組むべき課題の一つに掲げられている。こうした背景の下、「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」を設置し、主に現存被ばく状況における住民の内部被ばく検査を行うための技術的指針の策定に向けた現状調査と技術的課題の検討を行うことになった。他方、WBCを初めとした内部被ばく線量測定装置の区分と性能要求については、国際規格に準拠した体内放射能測定装置に関する日本工業規格（JIS）の整備が現在進められている。したがって、本専門研究会では、特に住民の測定に使用されているWBCの測定の運用面に関する課題を抽出し、測定標準化に向けた検討と提言を行った。

1-2 目的とスコープ

国内で稼働中の様々なWBCの内、特に福島原発事故以降に住民の内部被ばく線量測定のために導入されたWBCを対象とし、その運用面に係る技術的指針とするための提言を行うことを目的とする。

1-3 本報告書の概要

本報告書の第1章では、本専門研究会の設立趣旨や目的について述べた。第2章では、本学会が取りまとめた「福島第一原子力発電所事故に関する放射線防護上の課題と提言」から、本専門研究会が検討すべき事項を明確化した。第3章では国内におけるWBCの稼働状況と住民の内部被ばく検査の目的で使用されているWBCの代表的な機種の様相に関する情報を提供し、第4章ではWBCの運用面に関する課題、具体的には、校正用ファントム、体格補正、検出限界等の諸課題を取り上げ、それらの対応について検討した。第5章ではWBCから得られる測定結果の解釈、特に福島原発事故以降に行われてきた放射性セシウムを対象とした内部被ばく線量評価の方法に関して解説した。以上を踏まえ、第6章で本専門研究会からの提言を述べる。

第2章 本専門研究会での検討事項

本専門研究会が検討すべき項目を明確にするため、日本保健物理学会が取りまとめた「福島第一原子力発電所事故に関する放射線防護上の課題と提言」[1]から、今も継続されている住民を対象としたWBC測定に関連した課題と提言を下記に再掲した（ただし文言は一部修正している）。

第2期 福島プロジェクト特別シンポジウムで出された課題（2013年5月25日開催）

- WBCは沢山導入されているが、精度管理が重要であり、特に、測定の信頼性を確保する観点からトレーサビリティの確保が重要である。日本には規格がないため、本学会の専門研究会の活動を踏まえて規格化していく必要がある¹。
- 校正用標準ファントム、検出限界、スペクトル解析方法、線量評価等についての標準化が必要であり、WBCを取り扱う人のための標準マニュアルの整備が必要である。
- 検査要員の養成も含めて、多数のWBCの今後の維持管理方法を検討する必要がある。
- 住民にWBCの測定結果を十分に説明するため、どのように発言したらいいのか等の理解を進めるQA集の作成やリスクコミュニケーションも考慮に入れたマニュアル集を作るべきである。
- WBC測定は、これまでに職業被ばくが対象であり、原子力防災では内部被ばくといえれば甲状腺モニタリングに限られていたこともあり、測定が遅れたのが一番の課題であった。
- 限られたWBCの中で、感受性の高い子どもや、子どもと一緒にいる家族を優先するなど、優先順位をあらかじめ考えておく必要がある。
- 子ども等体格の異なる一般公衆に対して測定精度を高めるにはどうすべきが課題である。

課題27 住民の被ばく—WBCによる内部被ばく線量評価—調査体制

平成23年6月から開始された福島県の県民健康管理調査の一環で、外部被ばく線量評価については、行動調査に基づき、基本調査の被ばく線量調査として調査された。しかし、WBCを用いた内部被ばく線量調査については、基本調査の被ばく線量推計調査として実施されなかった。このため、WBCの測定結果については、被検者の了解なく他の目的に活用できない情報であることから、各自治体や病院等が個別に管理している現状が生まれてしまっている。また、WBCを用いた内部被ばく測定は、原子力防災には位置づけられていなかったため、測定が遅れることとなった。

● 提言27-1 住民の被ばく—WBCによる内部被ばく線量評価—調査体制

全国のWBCの保有状況を把握し、検査要員の養成を行ってWBC及び検査要員の被災地への一時的貸与及び派遣が行える体制を構築し、事故後迅速に国や県が主導してWBCを用いた内部被ばく線量調査が実施できる体制を十分に整備しておくこと。

● 提言27-2 住民の被ばく—WBCによる内部被ばく線量評価—調査体制

事故後配備される多数におよぶWBCの維持管理方法やWBCの測定結果をいかに十分に公衆に説明できるか等の理解を深めるためのQA集やマニュアル集を作成しておくこと。

¹ より正確には、我が国ではWBCの校正基準となるファントムの国内規格が決められていないため、体内放射能測定に関する国内トレーサビリティが未整備であるということである（第3章参照）。課題28（次項）でも同様である。

課題 28 住民の被ばく—WBCによる内部被ばく線量評価—測定方法

WBCを用いた住民の内部被ばく線量評価は、住民のニーズが高く、福島県直営以外にも、市町村、病院や民間団体によって個別にWBCが設置され、標準的な方法で統一されないまま実施されてしまった。また、測定の信頼性を確保する観点から、トレーサビリティの確保が重要であるが、それを定める規格がなく²、測定結果を十分に説明するためのマニュアル等も整備されていなかった。

● 提言 28 住民の被ばく—WBCによる内部被ばく線量評価—測定方法

WBCやバイオアッセイ法による内部被ばく線量の評価方法を、過去の知見や技術を踏まえ、子ども等の体格の異なる一般公衆に対する測定精度等に係る技術的な妥当性を検証した上で、専門研究会や他学協会と連携して標準化を検討すること。

以上の課題と提言を整理した結果、本専門研究会が検討すべき事項を次の項目とした。

1. WBC測定の標準化を検討する材料として、我が国におけるWBCの設置台数やその稼働状況、現状の測定精度、標準とすべき校正用ファントムの仕様等に関する情報を提供するとともに、WBCのトレーサビリティ構築のための具体的な提案を行うこと。
2. 子どもから成人までの幅広い体格の被検者を対象として、信頼性のあるWBC測定を行うための方法（体格補正法）を検討すること。
3. WBCの測定精度の維持に必須となる機器の点検・校正の具体的な内容を示すこと。
4. 一般公衆を対象としたWBCの測定結果に基づく内部被ばく線量評価方法について、その標準的な考え方を示すこと。

なお、原子力災害におけるWBCの位置付け及びその運用は本専門研究会のスコープを超えるため、特に検討は行わなかった。また、WBC測定結果を被検者に説明する際のマニュアルやQA集についても、これらに必要な参考情報を本報告書で紹介するのみとした。

² 原文通り引用した。ここで述べられているトレーサビリティの確保とは、統一した仕様に基づくファントムを用いて、種々の型式のWBCの校正がなされることを指している。

第3章 国内におけるWBCの稼働状況及び代表的機種の様

3-1 国内におけるWBCの稼働状況

国内におけるWBCの設置台数は、小佐古らの1994年の調査において83機と報告され[2]、その後、1999年に発生した東海村ウラン加工工場における臨界事故を受けて、全国約20カ所の被ばく医療機関にWBCが配備された。福島原発事故の直後における内閣府・原子力被災者生活支援チームの調査によれば、2011年6月時点での国内のWBCの設置台数は106機であった(表1)[3]。その後、福島県を中心に多数のWBCが住民等の内部被ばく線量測定のために導入されたことから、2015年時点での国内におけるWBCの設置台数は150機以上におよぶと推定される。なお、福島県内では、福島県、福島県内の各自治体及び民間病院等でWBCを所有しており、全体で約50機のWBCが現在稼働している(別添1)。

表 1 福島原発事故直後の我が国の WBC 設置状況

| 所在地 (都道府県) | 原子力発電所等 | | 二次・三次被ばく医療機関 | | その他の保健所、 研究機関等 | | |
|---------------|----------------------|------------------|-------------------------------------|-------------|---|-----------------------|-----|
| | | 保有台数 | | 保有台数 | | 保有台数 | |
| 北海道 | 泊 | 2 | 札幌医科歯科大学付属病院 国立病院機構北海道がんセンター | 1 1 | 岩内地域保健室除染検査室 神恵内除染検査室 | 1 1 | |
| 青森 | 東通 日本原燃（六ヶ所） | 2 4 | 青森県立中央病院 八戸市立市民病院 弘前大学医学部付属病院 | 1 1 1 | 国立病院機構弘前病院 | 1 | |
| 宮城 | 女川 | 2 | 国立病院機構仙台医療センター 宮城県立循環器・呼吸器病センター | 1 1 | | | |
| 福島 | 福島第一 福島第二 | 4 4 | 福島県立医科大学医学部附属病院 | 1 | 福島県環境医学総合研究所 | 2 | |
| 茨城 | 東海第二 | 2 | 国立病院機構水戸医療センター 茨城県立中央病院 | 1 2 | 日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所 核燃料サイクル工学研究所 大洗研究開発センター 原子力緊急時支援研修センター | 3 4 2 3 | |
| 千葉 | | | 放射線医学総合研究所 | 3 | | | |
| 神奈川 | | | 北里大学病院 | 1 | | | |
| 群馬 | | | | | 日本原子力研究開発機構 高崎量子応用研究所 | 1 | |
| 新潟 | 柏崎刈羽 | 4 | 新潟県立がんセンター新潟病院 | 1 | | | |
| 静岡 | 浜岡 | 3 | 静岡県立総合病院 | 1 | | | |
| 石川 | 志賀 | 2 | 石川県立中央病院 国立病院機構金沢医療センター | 1 1 | | | |
| 福井 | 敦賀 美浜 大飯 高浜 | 2 2 2 2 | 福井県立病院 | 1 | 日本原子力研究開発機構 高速増殖炉研究開発センター 原子炉廃止措置研究開発センター 二州健康福祉センター 若狭健康福祉センター 原子力防災除染検査所 | 2 2 1 1 1 | |
| 京都 | | | | | 京都府緊急時放射線検査施設 | 1 | |
| 大阪 | | | 国立病院機構大阪医療センター | 1 | 大阪大学 | 1 | |
| 鳥取 | | | | | 日本交通(株)倉吉営業所 | 1 | |
| 島根 | 島根 | 3 | 島根県立中央病院 | 1 | | | |
| 岡山 | | | 国立病院機構岡山医療センター | 1 | | | |
| 広島 | | | 広島大学 | 1 | | | |
| 愛媛 | 伊方 | 3 | | | 伊方町民会館 | 1 | |
| 佐賀 | 玄海 | 4 | 唐津赤十字病院 | 1 | | | |
| 長崎 | | | 長崎大学病院 | 1 | | | |
| 鹿児島 | 川内 | 2 | 済生会川内病院 | 1 | 川薩保健所 | 1 | |
| | | 小計 | | 小計 | | 小計 | 30 |
| | | | | | | 合計 | 106 |

※参考文献[3]から転載。

3-2 国内 WBC の代表的機種

国内で稼働中の WBC の内、特に住民の内部被ばく線量測定に利用されている代表的機種の仕様について以下に紹介する。

(1) 立位型 WBC

福島県内で稼働している WBC の多くは米国キャンベラ社製の FASTSCAN[4]である（別添 1）。図 1 には、FASTSCAN の外観と構造図を示した。FASTSCAN の被検者前方に位置する支柱部分に、直方体（結晶サイズ 12.7 cm × 7.62 cm × 40.6 cm）の NaI(Tl)シンチレーション検出器 2 式を内蔵する。被検者の周囲及び検出器の周囲（ただし、被検者に対向する面を除く）は厚さ約 10 cm の鉄材が配置されており、装置の外部からの放射線が直接検出器に入射しない構造（シャドーシールド構造）を採用している。装置の総重量は 4.8 ton、装置の設置面積は 1.24 m × 0.9 m、装置の高さは 2.11 m である。検出限界値は、装置の仕様上の数値で 150 Bq（⁶⁰Co, 1 分間測定）である。福島県内では約 40 機の FASTSCAN が稼働しており（別添 1）、その内 10 機（福島県所有 8 機及び福島市所有 2 機）は車に搭載されている。なお、FASTSCAN の検出特性については別添 2 に参考情報として示した。

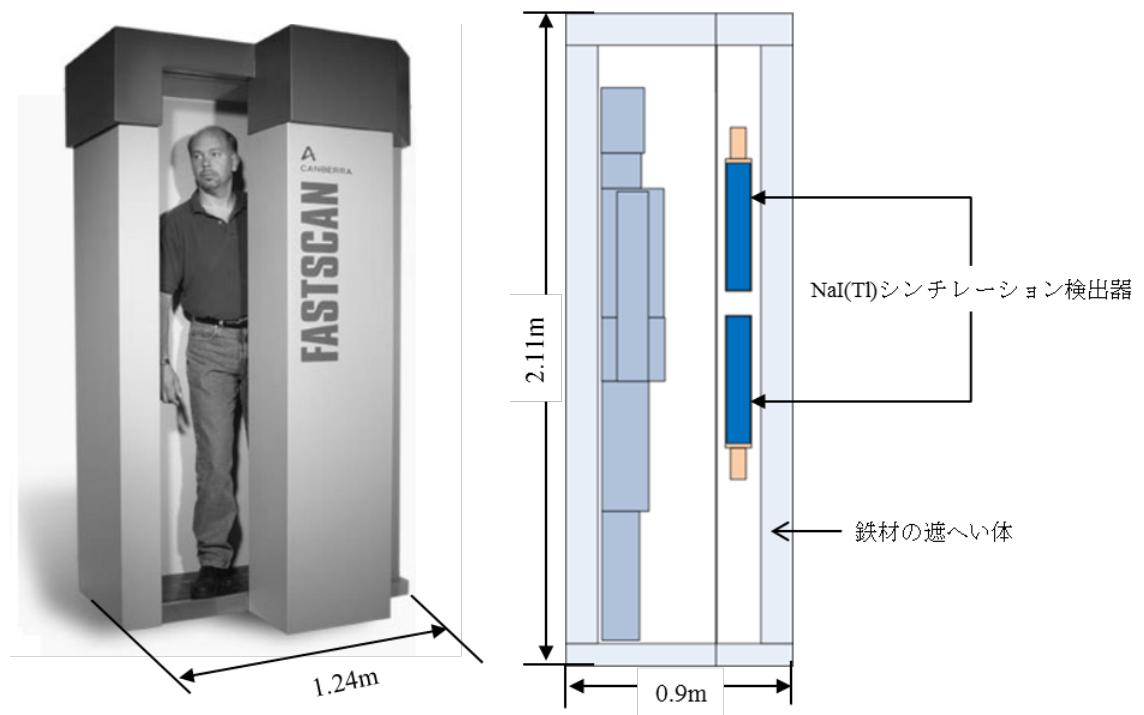


図 1 キャンベラ社製 FASTSCAN の外観と構造図

(2) 椅子型 WBC

国内で運用されている椅子型 WBC の構造としては、被検者が着座する椅子の背もたれ部分または被検者の前面に検出器が内蔵してあるタイプがある。遮へい体は検出器周囲（ただし、被検者に対向する面を除く）と被検者の前面に配置される。国内では下記の製造元から椅子型 WBC が市販されている。

- 日立アロカメディカル社製 WBC

図 2 (左) に同社の椅子型 WBC (型式 WBC-R48, 301) の外観を示す。被検者が着座する椅子の背もたれ部分に FASTSCAN に使われているものと同様の NaI(Tl)シンチレーション検出器が 2 式 (もしくは 1 式) 内蔵されている。この WBC の重量は約 5 ton である。検出限界値は、装置の仕様上の数値で 45 Bq (^{60}Co 胸部線源, 1 分間測定, ただし, 装置周辺の空間線量率が 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 以下) とされている。測定中, 被検者は背中を背もたれに密着させる必要がある。なお, 同社の製品には, 被検者の体幹部の前方に配置した円筒形の NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いるタイプの機種 (型式 WBC-112) もある。

- 富士電機社製 WBC

図 2 (中央) に同社の椅子型 WBC の外観を示す。構造としては日立アロカメディカル社製のものとほぼ同様であり, NaI(Tl)シンチレーション検出器 (結晶サイズ 12.7 cm \times 7.62 cm \times 40.6 cm) 2 式が椅子の背もたれ部分に内蔵されている。遮へい体は, 検出器周り及び側面で鉛 80 mm 相当, 被検者の前面及び床面で鉛 50 mm 相当とされており, WBC 本体の重量は簡易遮へいタイプ (図 2) で約 5 ton である。使用者の要望に応じて, 追加の遮へい体や甲状腺計測用の検出器を備えることができる。

- 安西メディカル社製 WBC

図 2 (右) に安西メディカル社製 WBC の外観を示す。椅子の背もたれ部分に, 体幹部測定用及び甲状腺測定用の 2 式の円筒型 NaI(Tl)シンチレーション検出器を内蔵している。検出器の結晶サイズは体幹部測定用が 12.5 cm(ϕ) \times 10 cm(t), 甲状腺測定用が 5 cm(ϕ) \times 5 cm(t)である。それぞれの検出器は円筒形状の鉛製遮へい体に収納されており, 遮へい体の厚さは体幹部用が 50 mm, 甲状腺用 20 mm である。同 WBC の総重量は 0.9 ton であり, 他製造元の WBC と比べて軽量である。



図 2 椅子型 WBC の外観

日立アロカメディカル社製 WBC (左), 富士電機社製 WBC (中央), 安西メディカル社製 WBC (右)

- その他の WBC

国内への導入台数は少ないが、ロシア周辺諸国の製造元で開発された WBC が一部の施設で稼働している (図 3)。いずれの WBC も検出器のみを遮へい体で覆う構造となっており、非常に軽量である (200 kg 程度)。検出器には円筒型の NaI(Tl)シンチレーション検出器が用いられる。



図 3 その他の椅子型 WBC

ATOMTEX 社製 (左), AKP 社製 (中央), ANTIDOZA 社製 (右)

※ATOMTEX 社製 WBC : <http://www.atomtex.com/en/products/spektrometry-izlucheniya-cheloveka>

AKP 社製 WBC : http://akp.com.ua/en/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=57&Itemid=93&lang=en

ANTIDOZA 社製 WBC : <http://antidoza.madein.ua/en/skriner>

第4章 WBC 運用面の課題

4-1 WBC 校正用ファントムの標準化

我が国では、従来からWBCの校正に水ブロックファントムが利用されてきたが[5,6]、近年では米国国家規格協会（ANSI）で規定されたBottle Manikin Absorption（BOMAB）ファントム[7]がWBCの校正基準として用いられるようになった。しかしながら、国内のWBCの校正基準となるファントムの仕様は、本専門研究会の前身となる「内部被ばく評価のための体外計測器に関する標準校正方法（2006~2007年度）において検討がなされたものの未だ決定されていない。なお、ここでいう校正基準とは、WBCから得られる波高スペクトル上の着目するピーク領域の計数率（cps）から体内放射能（Bq）への換算係数（cps Bq⁻¹）、いわゆる検出効率（計数効率とも言う³⁾）を決定するための基準である。

この目的に用いるファントムは、被検者集団の平均的な体格を模擬したものを利用するのが合理的であり、かつ現実的である。WBCが測定対象とする比較的高いエネルギー（数百 keV 以上）の γ 線放出核種の場合は、精密に人体形状を再現したファントムを作成して校正に用いても、簡易形状の体積線源で構成される水ブロックファントムと比較して計数効率に大きな差異を生じないことが実験的に確認されている [8]。また、前述の水ブロックファントムについても、特定のWBCでの結果ではあるが、BOMABファントムとの計数効率の差異は10%程度であることが報告されている[9]。他方、ANSIでは、WBCによる体内放射能を含む様々な生体試料の放射能測定の精度要件として、基準放射能からのバイアスを75%以上から150%以下の範囲内とすることを定めている [10]。以上のことから、校正基準のための標準ファントムとしてBOMABファントムを国内においてオーサライズすることが適当であると考えられるが、そうした際に生じうるWBCの定量精度を事前に把握しておくことが重要である。

放射線医学総合研究所（以下、放医研）では、環境省からの委託事業として、2012年度から福島県内のWBCの精度調査を継続して行っている。同調査で使用したファントムは、ANSI/HPS N13.35-1999にある成人男性の平均的な体格を模擬したBOMABファントムの形状を参考に製作されたものである（図4）。同ファントムの各部位を構成する容器の形状及び重量を表2に示す。放医研では同型のファントムを4体所有しており、それぞれに¹³⁷Cs、⁶⁰Co、¹³³Baを均一に含む溶媒（寒天）及び水（バックグラウンド用）が封入されている。各ファントム中に含まれる放射能（全身）は20 kBq（¹³⁷Cs）、80 kBq（⁶⁰Co）及び70 kBq（¹³³Ba）であり⁴、放射能の拡張不確かさは約±7%（ $k=2$ ）である。なお、本調査では、¹³⁷Csと⁶⁰Coについて、使用したファントム中に含まれる基準放射能に対する各WBCのバイアスを次式により評価した。

$$Bias(\%) = \frac{B - A}{A} \times 100(\%) \cdots (1)$$

上式において、 A は基準放射能（Bq）、 B は各WBCから得られる定量値（Bq）である。

³ JIS Z4001 原子力用語には次のように定義される。検出効率とは、「特定の検出条件の下で、放射線検出器が検出した粒子の数を、同じ時間内に放射線源から放出される同じ種類の粒子で割った値。計数効率ともいう」。

⁴ 精度調査に使用したファントムは、線源の下限数量等の限度値が定められた改正放射線障害防止法（平成16年6月改正）以前に製作されたため、使用・保管に関して規制対象外となるが、今後製作するファントムに関しては下限数量を考慮する必要がある。



図 4 福島県内の WBC 精度調査に使用した放医研ファントムの外観

表 2 放医研ファントム（成人男性）各部位の外形の仕様等

| | 短径(cm) | 長径(cm) | 高さ(cm) ±5%以内 | 充填容積(cc) ±10%以内 | 重量(kg)* |
|----------|--------|--------|-----------------|--------------------|------------|
| 頭部 | 14 | 19 | 21.3 | 3500 | 4.34 |
| 頸部 | 13 | 13 | 12.1 | 1050 | 1.54 |
| 胸部 | 20 | 30 | 41.5 | 17000 | 19.50 |
| 腹部 | 20 | 36 | 21.5 | 9990 | 11.97 |
| 大腿部（2 個） | 15 | 15 | 40.3 | 6060 x 2 | 6.95, 6.97 |
| 足（2 個） | 12 | 12 | 40.3 | 3740 x 2 | 4.46 x 2 |
| 腕（2 個） | 10 | 10 | 60.2 | 3790 x 2 | 4.61 x 2 |
| 全高及び重量 | — | — | 177 | — | 69.4 |

* 重量は仕様含まず（製品の実測値）

2012 年度から 2013 年度に行った精度調査で得られた結果（全 40 機）の一例を図 5 に示す[11]。同図は ^{137}Cs を含むファントムを用いて得られた結果であるが、ほぼ全数についてバイアスは 10%以内であり、10%を超えた WBC は 4 機種のみであった。 ^{60}Co についても、全体的に過小評価の傾向が見受けられたものの、バイアスとしてはほぼ全数で 10%以内であった。

この結果から、福島県内で稼働中の WBC については、放医研が所有するファントムに対して相対的に精度が確保されていると言える。福島原発事故の発生後、比較的早い段階から稼働していた WBC の中には、体内放射能を適切に定量しなかったものがあったことが報告[12]されていたが、2012 年度から放医研が実施してきた WBC の精度調査では、そうした機種が 1 機も確認されなかった。この要因として、各製造元が出荷時に WBC の値付け（計数効率の設定）を適切に行っていること、また、ソフトウェアの改良による複合ピークの分離等の解析能力が向上したためと推察される。前述のように我が国では WBC の校正標準となるファントムが規定されていないが、放医研では福島原発事故以前から自治体や医療機関等の要請に応じ、これらの機関が所有する WBC の校正や精度調査を実施してきた経緯があり、その際に放医研が所有するファントムが参考にされたことも精度調査の結果に影響しているものと思われる。

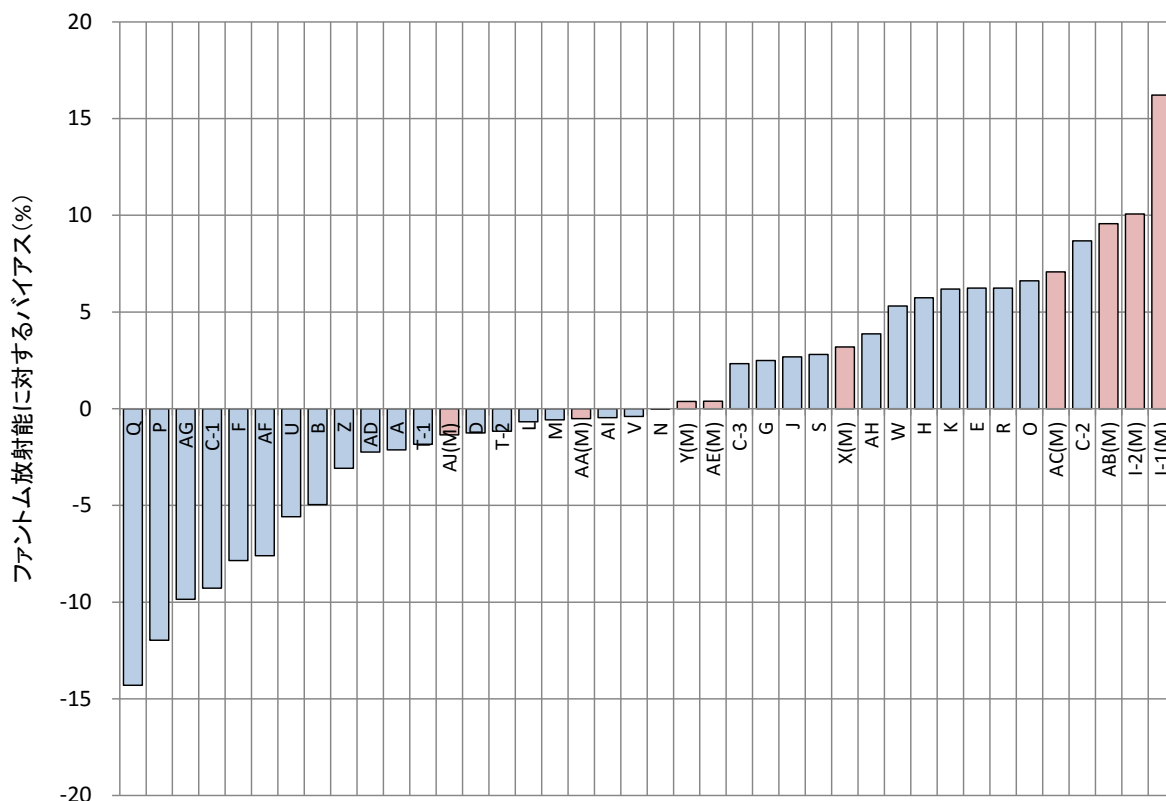


図 5 ファントム中の放射能 (^{137}Cs) に対する各 WBC の定量結果のバイアス
(赤色ヒストグラムデータは車載型 WBC の結果。放医研の独自事業として実施した分を一部含む。)

BOMAB ファントムや水ブロックファントム以外にも、次に述べるような WBC 校正用ファントムがある。米国キャンベラ社は自社製のリニアジオメトリを有する WBC について、BOMAB ファントムと同等の計数効率が得られるトランスファーファントム[13]をユーザに提供している (図 6)。同ファントムの優れた点は安価に製作することが可能であり、かつ、全身均一分布以外の放射能分布にも対応した校正が行える点である[14]。ただし、トランスファーファントムに内蔵するバイアル形状の線源を調達する必要がある。図 7 は、日本原子力研究開発機構 (以下、原子力機構)・核燃料サイクル工学研究所にある FASTSCAN を用いて、成人男性の体格を模擬した BOMAB ファントムとトランスファーファントムを測定して得られた計数効率を比較した結果であるが、両者はほぼ 10%以内の差異で一致している[15]。福島県内で稼働中の FASTSCAN も同様な結果であったことを前述の WBC 精度調査でも確認している。

WBC 校正用ファントムとして、欧州では IGOR ファントム[16]も利用されている。同ファントムの外観は図 8 に示すとおりであり、棒状の線源を内蔵するポリエチレンブロックを組み合わせ、体格や姿勢を任意に変えることができる。IGOR ファントムで得られる計数効率は、BOMAB ファントムともものほぼ同等であるとの報告がある[17]。その他、多数のボトル容器に封入した線源で全身を模擬した WBC 校正用ファントムも考案されている。

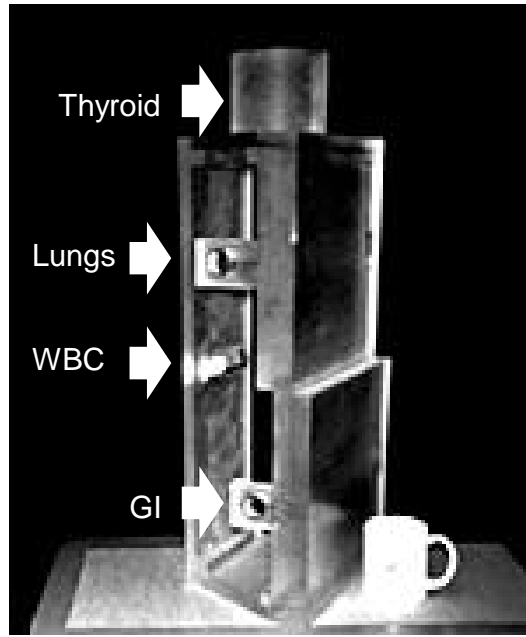


図 6 トランスファーファントムの外観[13]

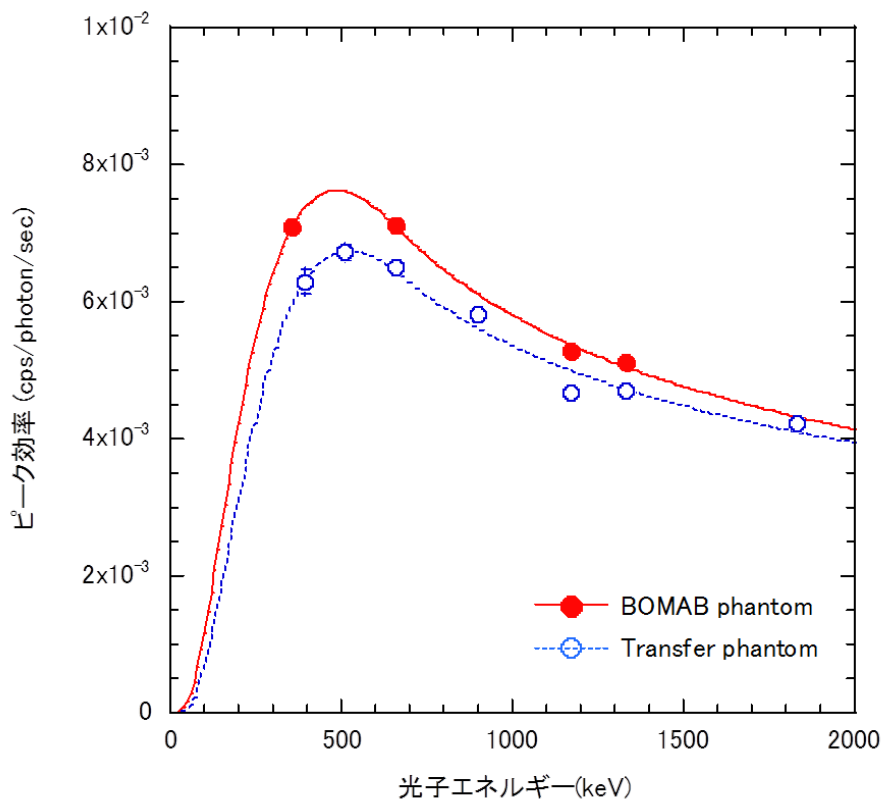
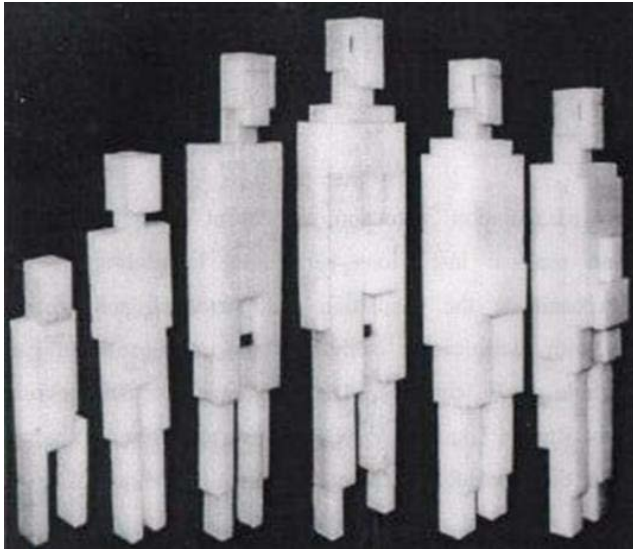


図 7 FASTSCAN における BOMAB ファントム及びトランスファーファントムの計数効率の比較



| Type of the phantom (reference sample index of the set) | Age and anthropometric characteristics of human body | | | |
|---|--|---------------|--------------|--------------------------|
| | Age, years | Weight, kg | Height cm | Average thickness, cm |
| F ₁ | 2 | 12 | 82,5 | 8,8 |
| F ₂ | 6 | 24 | 121,0 | 10,9 |
| F ₃ | 14 | 50 | 160,0 | 11,8 |
| F ₄ | ≥ 18 | 70 | 170,5 | 14,3 |
| F ₅ | ≥ 18 | 90 | 170,5 | 15,7 |
| F ₆ | ≥ 18 | 110 | 170,5 | 19,4 |

図 8 IGOR ファントムの外観[18]

校正用ファントムを含めた WBC 測定の標準化に関する議論は以前からあったものの [2, 19], 国内での基準類を制定するまでには至っていない。ようやく我が国でも国際電気標準会議 (IEC) が定めた体外計測装置の性能要件に関する規格[20]を参考にして国内規格の開発に着手される運びとなったが、同規格には校正用ファントムの仕様に関しては具体的な記述がない。よって、校正用ファントムの仕様については前述した ANSI を準用する等の対応が必要となるが、個人線量測定の標準化や認証システム等の近年の国際的な動向も視野に入れつつ、今後の対応を議論することが急務である。

4-2 小児の WBC 測定

この課題は、福島原発事故を契機として一般住民の WBC 測定が開始されてから、その重要性が強く認識された。福島県住民の WBC 測定が放医研や原子力機構で開始された当初は、測定中の安全面や測定精度の問題から被検者は 4 歳以上に限定されていた[15]。4 歳未満の小児の内部被ばく線量評価については、原発事故以降、類似した行動をしたと考えられる親や親戚の WBC 測定の結果を用いて行われることになった。しかしながら、4 歳児未満であっても WBC により内部被ばくの有無を直接確認したいという要望が次第に高まり、福島県内で最も稼働数の多い立位型 WBC を対象として測定方法が検討され、2013 年 8 月から運用されている[21]。近年では、乳幼児の測定に特化した WBC も開発されており、一部の機関では運用が既に開始されている[22]。小児の WBC 測定における課題は、測定精度上の課題と線量評価上の課題とに分けられるが、ここでは前者について、放医研及び原子力機構による住民の測定対応の経験等も踏まえて考察する。

小児の WBC 測定を行う際に考慮すべき点は、1) 職業人 (主として成人男性) の体格を想定して開発された WBC を用いて小児を測定できるか、2) 被検者の体格に応じて定量された体内放射能をどのように補正するか の 2 点である。1) については WBC の測定ジオメトリが大いに関係する。参考として、放医研と原子力機構が福島県住民の測定に用いた WBC の外観と仕様を図 9 と表 3 に示す。



図 9 福島県住民の測定に使用された WBC の外観

(左：ベッド型 WBC (放医研)，中央：立位型 WBC (原子力機構) [15]，右：座位型 WBC (原子力機構) [15])

表 3 福島県住民の測定に使用された放医研及び原子力機構の WBC の仕様 [15, 23, 24]

| WBC | 製造元 | 検出器 | 遮へい | 検出限界値(MDA)* | スペクトル解析 |
|---------------------------------|------------------------|--|---------------------------------|--|----------------------------------|
| ベッド型 WBC (放医研) | Harshaw (米国) ※検出器のみ | Nal(Tl) 検出器 (8 インチ ϕ × 4 インチ厚) 4 式 | 検出器周囲に鉛遮へい体 (鉛 2.5cm, 鉄 0.77cm) | ^{134}Cs : 320 Bq ^{137}Cs : 570 Bq (測定時間 3 分) | SEIKO EG&G Gamma Studio |
| 立位型 WBC FASTSCAN™ (原子力機構) | Canberra (米国) | Nal(Tl) 検出器 (16 × 5 × 3 インチ) 2 式 | 検出器周囲及び被検者背面に鉄板 (約 10cm) | ^{134}Cs : 300 Bq ^{137}Cs : 300 Bq (測定時間 2 分) | Canberra GENIE 2K |
| 座位型 WBC (原子力機構) | 日立アロカメディカル | Nal(Tl) 検出器 (8 インチ ϕ × 4 インチ厚) 2 式 | 検出器周囲及び被検者背面に鉛板 (約 5cm) | ^{134}Cs : 340 Bq ^{137}Cs : 370 Bq (測定時間 2 分) | SEIKO EG&G Spectrum-Navigator |

* 福島県住民の測定開始の際に評価された数値。福島原発事故の影響による周辺環境の空間線量率の上昇のため、事故前と比較して検出限界値が増加している。

小児を測定する際の要件としては、WBCの検出視野に被検者の測定部位（セシウムであれば全身）が収まることである。立位型WBC（FASTSCAN）の場合、その検出部は直列した2式の直方体形状のNaI(Tl) 検出器で構成されている。同WBCの検出感度の線源位置による変化は、床からおおよそ0.8 mから1.6 mの高さの範囲（1パーセントイル成人女性の下腹部の位置から95パーセントイル成人男性の甲状腺の位置に相当）において-15%から+5%程度とされている [25]。しかしながら、小児を立位姿勢で測定する場合は、被検者が上の検出器の検出視野から大きく外れ、検出感度が低下すること予想されたことから、原子力機構・原子力科学研究所が所有する体格の異なる3体のBOMABファントム（それぞれ成人男性、10歳児及び4歳児を模擬）を用いて検証実験が行われた。各ファントムの全長と重量は175 cm・66.0 kg（成人男性）、147 cm・33.8 kg（10歳児）及び114 cm・17.7 kg（4歳児）であり、4歳児ファントムの場合には、高さ30 cmと45 cmの台の上に設置した測定も行った。表4には、成人ファントムの計数効率に対する相対値として示した各ファントムの結果を示す。

^{137}Cs (662 keV) に着目すると、10歳児ファントムの計数効率成人ファントムのそれとほぼ同じであり、4歳児ファントムの場合は約1割程度の計数効率の減少が認められた。この程度の計数効率の差異は許容範囲内と考えられるが、日本人の4歳児の平均身長は100 cm前後であり[26]、4歳児ファントムに比べて小柄であるため、計数効率はさらに減少することが予想された。その一方、4歳児ファントムを高さ30 cmまたは45 cmの台に設置して測定した場合は、それぞれ成人ファントムより21%と28%高い計数効率が得られたことから、身長の高い小児の場合には同様な方法により検出感度を高めることが検討された。その後、安全面等を考慮し、身長130 cm未満の小児の測定では、高さ30 cmの台に載せて測定することが決定された⁵。この方法は、福島県内での同WBCを用いた住民等の内部被ばく検査で現在も運用されている。

小児のWBC測定を行う際に考慮すべきもう一つの点である2) 被検者の体格に応じて定量された体内放射能に対する体格補正法に関しては、関連する研究が木名瀬によって総括されている[27]。木名瀬は、人体に含まれる ^{40}K を精度良くWBCによって定量する方法として、被検者の身長と体重の二つのパラメータで表現される体表面積を変数とする体格補正法を提案した。体表面積 S は次式で与えられる。

$$S = 0.0072W^{0.425}H^{0.725} \dots(2)$$

ここで、 W は体重(kg)、 H は身長(cm)である。

体表面積を選定した理由は、①個人に適用する体水分量推定式として体表面積を変数とすることが妥当であること、②体表面積が、体幅方向と身長方向の積である検出器の被検者側検出面積に対応し、検出器の立体角にも対応すると考えられること、の二点であった。木名瀬が提案した体格補正法は、成人男性50名のボランティアによる体内 ^{40}K 量を対象とした研究により、その妥当性が証明されている[27]。

表 4 年齢別 BOMAB ファントムに対する FASTSCAN の計数効率 (成人ファントムに対する相対値) [15]

| 核種 | I補正 ^a (keV) | 4歳児 (台無) | 4歳児 (台30cm) | 4歳児 (台45cm) | 10歳児 (台無) |
|--------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ba-133 | 356 | 1.01 | 1.31 | 1.40 | 1.11 |
| | 356+384 | 0.89 | 1.15 | 1.22 | 0.97 |
| Cs-137 | 662 | 0.91 | 1.21 | 1.28 | 1.02 |
| Co-60 | 1173 | 0.87 | 1.14 | 1.22 | 0.98 |
| | 1333 | 0.83 | 1.12 | 1.18 | 0.97 |



⁵ 4歳児ファントム (114 cm) と10歳児ファントム (147 cm) の成人ファントムに対する ^{137}Cs の計数効率の相対値はそれぞれ0.91と1.02であるため、130 cmの場合は0.97となる。また、4歳児の身長の平均 -2.5σ は90 cmとなるが、高さ30 cmの台に乗せることにより、床面からの頭頂高が120 cmになる。この場合の計数効率は4歳児ファントムの実験結果 (台無, 台30 cm, 台40 cm) から1.01と算定した。



AMファントム



4-yファントム

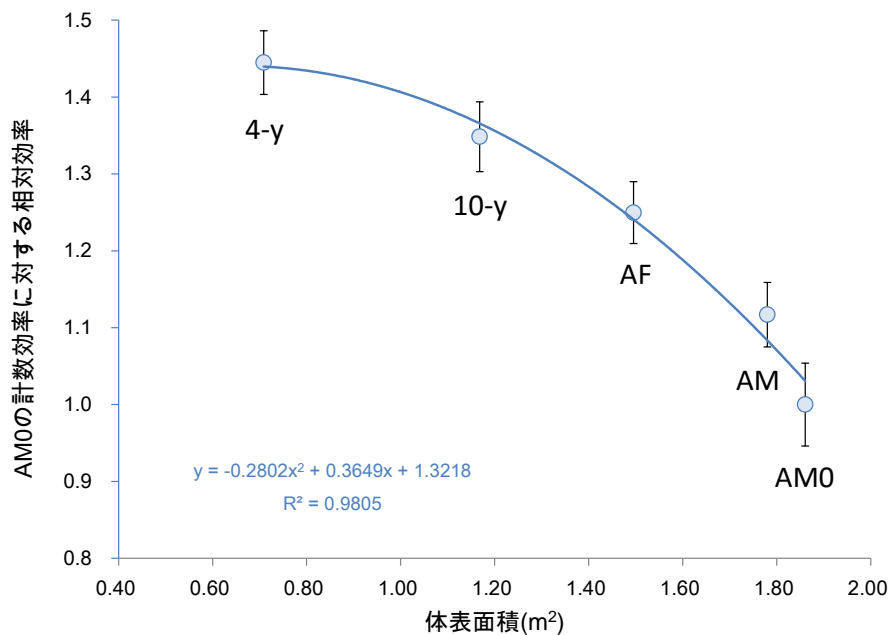


図 10 ベッド型 WBC の体格補正式

体格補正式の適用例として、放医研で所有するベッド型 WBC (図 9) の場合の結果を図 10 に示す。実験に使用したファントムは、福島県内の WBC の精度調査に用いられたファントム (AM0) と放医研で所有する体格別ファントム 4 体 (成人男性 : AM, 成人女性 : AF, 10 歳児 : 10-y, 4 歳児 : 4-y の BOMAB ファントムの形状仕様にほぼ準ずる) の計 5 体であり、これらのファントムを頭頂面がベッドの端に位置するように配置した。図 10 に示すのは前者のファントムの ^{137}Cs に対する計数効率で規格化した結果である。体格補正式には同図に示す近似式を用いれば良い。なお、体格が小さいほど計数効率は増加する傾向が見られるのは、体格が小さいファントムほど、ファントム内部で発生する光子の自己吸収が減少する効果によるものと考えられる。他に検出立体角が増加する効果も考えられるが、体格が小さいファントムではその下半身が検出視野から外れてゆくために単純ではない。実験に使用したファントムの全長、重量及び(2)式を用いて計算された体表面積を表 5 に示す。

表 5 実験に使用したファントムの全長、重量及び体表面積

| ファントム | AM0 | AM | AF | 10-y | 4-y |
|-----------------------|------|------|------|-------|-------|
| 体格 | 成人男性 | 成人男性 | 成人女性 | 10 歳児 | 4 歳児 |
| 全長(cm) | 177 | 170 | 161 | 142 | 105.6 |
| 重量(kg) | 69.4 | 67.0 | 48.8 | 33.8 | 17.3 |
| 体表面積(m ²) | 1.86 | 1.78 | 1.50 | 1.17 | 0.71 |

WBCの体格補正の重要性は本学会が取りまとめた「福島原発事故に係る放射線防護上の課題と提言」[1]でも言及されており、福島県住民のWBC測定が開始される前にも検討がなされたものの、結果的に体格補正は行わないことになった。この理由は、福島県住民の内部被ばく検査に使用された3種類のWBC (図 9) のいずれについても小児の方が成人に比べて計数効率がよく (ただし、立位型WBCでは小児を台に乗せて測定)、成人に対応した計数効率を小児にも適用することで体内放射能を過小評価しないこと、また、限られた時間内で

多数の被検者から体格補正に必要となる個人の身長、体重等の情報を取得することが困難であったためである⁶。しかしながら、より正確な内部被ばく線量評価を目的として、特に、初期内部被ばく線量の推定のための基礎データとして活用するために、可能な範囲で被検者の協力を得て、少しでも多くの情報を収集する必要もあったかと思われる。

次に、日本人体格を模擬したファントムを製作することが過去に何度か検討されたことがあったが、この点について検討する。図 11 には、厚生労働省から公開されている最近の日本人の平均身長・体重のデータ⁷を(2)式に代入して得られた体表面積と表 5 に示した体格別ファントムとの体表面積との比較を示しているが、成人男性と成人女性では比較的良い一致を示している。同図の横軸には、各年齢区分(5 歳, 10 歳, 15 歳及び成人)の線量係数が適用される年齢範囲(第 5 章 5-1 参照)を記載しているが、4-yファントムと10-yファントムの体表面積は、それぞれ5 歳区分と10 歳区分の体表面積の範囲内である。一方、15 歳区分では性別による体表面積の違いが大きく、女性では加齢に伴う変化がほとんど無く、成人女性の体表面積とほぼ同じであるのに対し、男性では加齢とともに体表面積が増加してゆくの分かる。ANSIによれば、AF(BOMAB)ファントムは成人女性と5分の1相当成人男性のリファレンスとされるが、日本人の15 歳区分に属する男性の体格と比べるとやや小さい。しかし、この点を除けばBOMABファントムの形状仕様は日本人にも適用可能と思われる。すなわち、被検者個人の身長や体重を特に考慮する必要がない場合、5 歳区分の被検者では4-yファントム、10 歳区分の被検者では10-yファントム、15 歳区分及び成人女性の被検者ではAFファントム、成人男性の被検者ではAMファントムをそれぞれの場合の校正用ファントムに対応させ、体内放射能の評価に用いるのが適当である。なお、国内製のWBCの中には、被検者の身長、体重を用い、数値シミュレーションに基づく独自の体格補正を行う機種も存在する。参考情報として、別添 3 に富士電機製WBCの一部で使われている体格補正等に関する情報を示した。どのような体格補正法を用いるかは、WBC測定の目的によって変わるものと思われるが、体内放射能の定量精度の他、線量係数の年齢区分との対応や体格補正式の適用範囲等も考慮し、十分に検討する必要がある。BOMABファントムを国内標準としている米国及びカナダでは、小児ファントムを用いた相互比較試験が行われており[28, 29]、我が国でも、WBC測定における体格補正法を議論する材料として、同様な仕組みを構築することが望まれる。

⁶ 2011 年 7 月上旬から原子力機構で開始された福島県住民の WBC 測定では、1 日当たりの被検者数が 100 名を超えることもあった。被検者は当日午前中に福島県が手配したバスに乗り原子力機構・核燃料サイクル工学研究所/原子力科学研究所のある東海村に移動し、WBC 測定の受検後に測定結果の説明を受けて福島県に戻るために、測定可能な時間帯は被検者の到着後 3~4 時間程度に限られていた。

⁷ 厚生労働省. 厚生統計要覧(平成 26 年度)第 2 編保健衛生第 1 章保健(第 2-6) [26]. 参考にしたのは平成 24 年度データ。

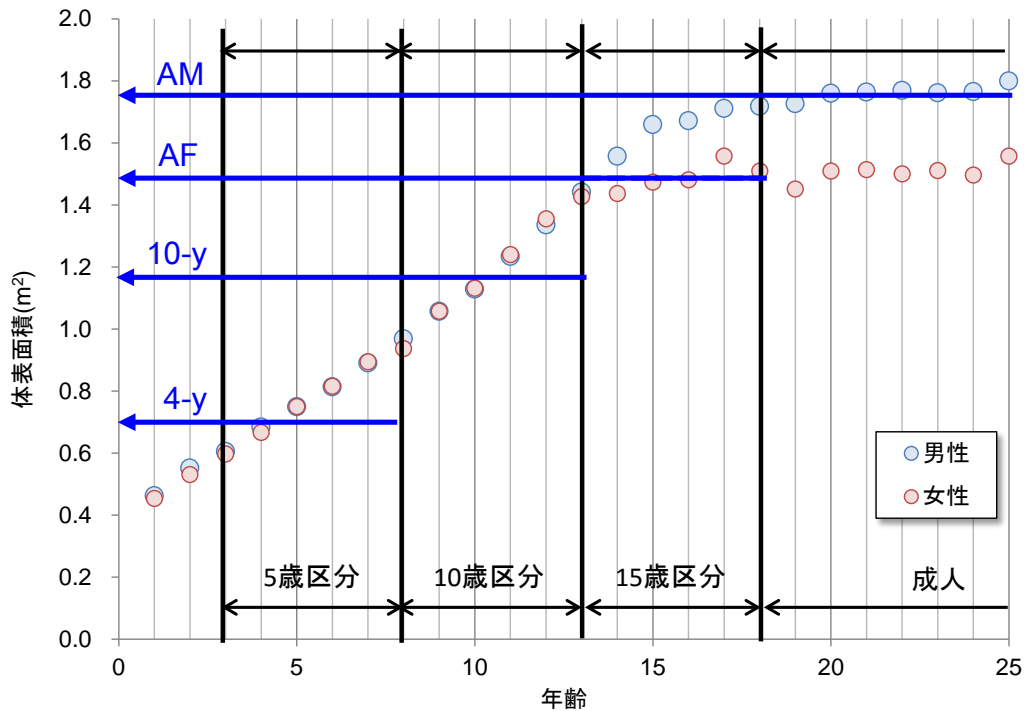


図 11 日本人平均身長・体重に基づく体表面積と体格別ファントムの体表面積の比較

4-3 その他の WBC 運用面の課題

1) 検出限界値の考え方

検出限界（値）の定義は文献によって様々であるが、JIS Z 4001 原子力用語[30]によれば、「相対偶然不確かさが、95%の確率レベルで±100%に等しくなるような測定器の指示値」、検出限界値は「規定のバックグラウンド放射線が存在する場合において、ある量、例えば、放射能がある平均指示値を与えるとき、この指示値がバックグラウンド放射線単独では起こらないことを95%の確率でいえるような測定量の最小値」とされる。補足すると、これは判定限界 (decision limit), 検出限界 (detection limit), 定量下限 (determination limit) の3系統の概念を導入した Currie[31]の定義に基づいた考えである。しかしながら、従来から放射線管理等で使われてきた Kaiser ら[32]の提唱に基づく、いわゆるブランク計数値 (空試験値) の平均値 + nσ (nは3が取られることが多い) を検出限界値とする考えも依然として残っており、各社の WBC でも検出限界値の算出方法が混在していることが確認された。検出限界値の詳細な説明は他の文献[33-35]にあるので、ここでは検出限界値の計算例を示すに留める。

仮にある WBC において、¹³⁷Cs (662 keV) の関心領域 (ROI) のバックグラウンド計数が 4600 (測定時間 20 分間) であったとする⁸。計数効率を 0.006 (cps/Bq) であったとすると、Currie の検出限界値 (Minimum Detectable Amount: MDA) は次のとおり計算される⁹。

$$MDA = \frac{4.65 \cdot s_b + 3}{KT} = \frac{4.65 \cdot \sqrt{4600} + 3}{0.006 \cdot 20 \cdot 60} = 44.2 \text{ Bq} \cdots (3)$$

ここで、 s_b はバックグラウンド計数、 K は計数効率、 T は測定時間である。

⁸ Canberra Genie-2K では、検出限界値を計算する際の ROI の幅を 1.2FWHM とすることをデフォルトとしている。

⁹ ANSI/HPS N13.30-1996 の(A.10)式 (引用文献[10]の 44 頁)

他方、3 σ 法での MDA は次のとおり計算される。

$$\begin{aligned}
 MDA &= \frac{k}{2} \left\{ \frac{k}{t_s} + \sqrt{\left(\frac{k}{t_s}\right)^2 + 4n_b \left(\frac{1}{t_s} + \frac{1}{t_b}\right)} \right\} / K \\
 &= \frac{3}{2} \left\{ \frac{3}{1200} + \sqrt{\left(\frac{3}{1200}\right)^2 + 4 \times \frac{4600}{1200} \times \left(\frac{1}{1200} + \frac{1}{1200}\right)} \right\} / 0.006 = \frac{0.24}{0.006} = 40\text{Bq} \cdots(4)
 \end{aligned}$$

ここで、 n_b はバックグラウンド計数率、 K は計数効率、 t_s は試料（被検者）の測定時間、 t_b は試料（被検者）の測定時間、 t_b はバックグラウンドの測定時間（ t_s と同じとする）、 k は有意水準を決める定数（3 σ とするので3）である。

両者の違いの理由は、Currieの方法で求めたMDAは、第1種の過誤（false positive: α ）と第2種の過誤（false negative: β ）の確率が等しく5%（すなわち、 $\alpha = \beta = 0.05$ ）である場合の値であるのに対し、3 σ 法で求めたMDAは $\alpha = \beta$ と考えれば約7%の過誤に相当する値のためである[35]。後者の方が過誤を僅かに大きく許容する分、MDAは低くなる。

MDAを評価する際に用いるバックグラウンド計数に何をを用いるかについても考え方が統一されていないように思われる。具体的には、バックグラウンド計数には、人工核種を含まない人体等価物質で充填したファントムをWBCに設置して得られる計数値を用いるのか、あるいは、ファントムを設置せずに空の状態（ブランク）で得られる計数値を用いるのか、の違いである。BOMABファントムの仕様を規定するANSI/HPS N13.35-1999[7]には、MDAを評価する際には規定量の ^{40}K を全身均一に含むBOMABファントムを用いることが明記されている。ブランクの状態でもDAを評価した場合は、被検者の体内にある ^{40}K からの散乱成分の影響を考慮しないことになるため、実測定でのMDAを過小評価することが予想されるが、WBCの測定ジオメトリによっては、周辺環境中の ^{40}K からの γ 線が被検者の身体によって遮へいされる場合もあり、ファントムの有無によってMDAが顕著に変化しないことも予想される。この点に関しては、個々のWBCの構造や設置状況等によって決定される因子であるため、個別に評価してゆく必要がある。

ファントムが利用できない場合、体内汚染の無い複数の人をWBCで測定し、得られた波高スペクトルからMDAを評価する方法も考えらえる。体内の ^{40}K 量には個人差があるため、MDAにも個人差を生じることになるが、運用面での煩雑さを避けるために公称値としてのMDAを示す場合が多い。表8に示した立位型WBC（FASTSCAN）のMDAは、原子力機構・核燃料サイクル工学研究所職員100名から得られた波高スペクトルから求められたMDAの95パーセンタイル値である（図12）。また、有意値として検出された ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の体内放射能とピークエリアの統計不確かさの関係は図13に示すとおりであり、MDA相当となる体内放射能300 Bqでの統計不確かさは20%（1 σ ）程度であった。統計不確かさが10%程度となる体内放射能は500 Bq程度であった。

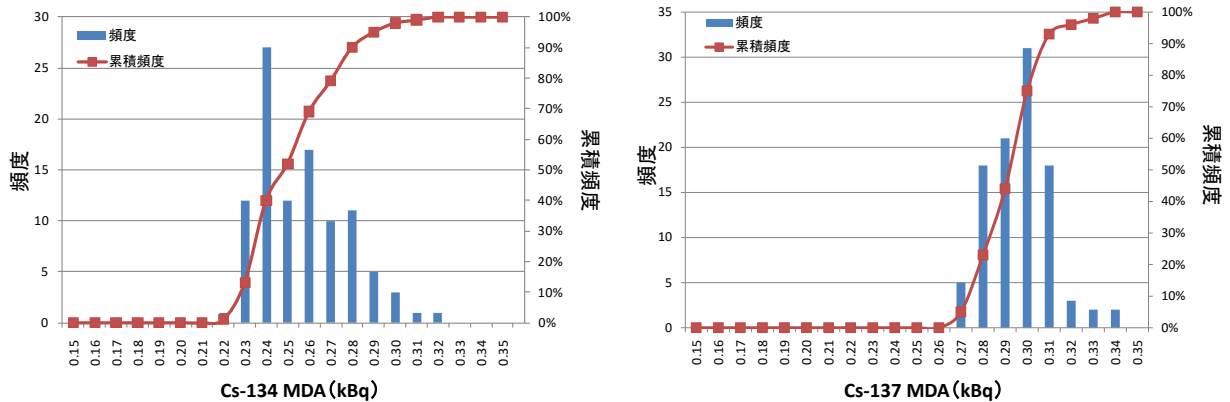


図 12 FASTSCAN の MDA 頻度分布 (左: ^{134}Cs , 右: ^{137}Cs)

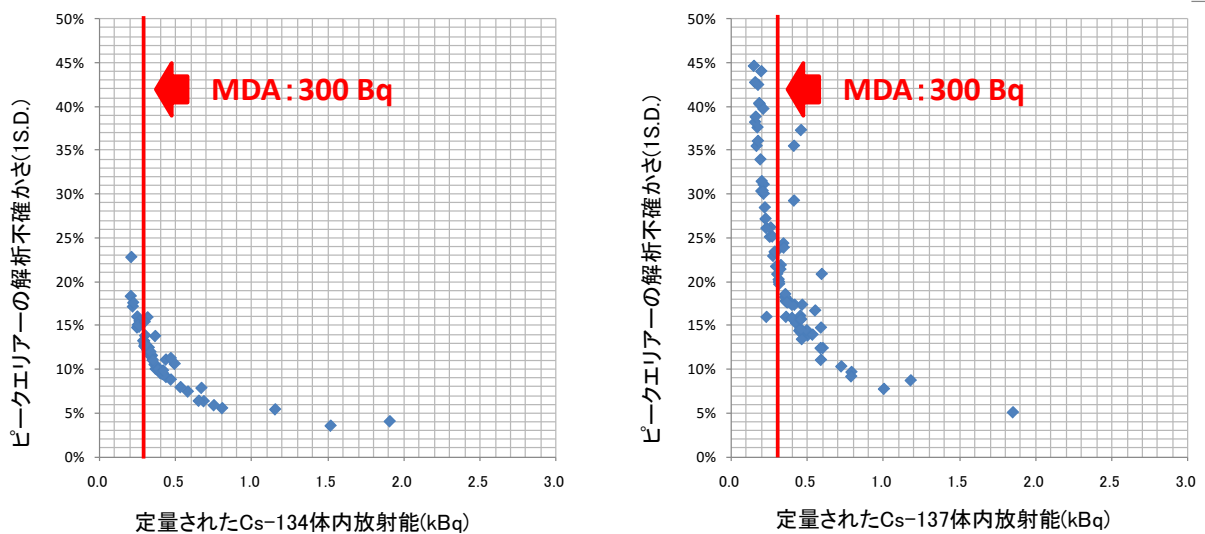


図 13 定量された体内放射能とピークエリアの解析不確かさの関係 (左: ^{134}Cs , 右: ^{137}Cs)

2) 天然放射性核種等の影響

福島県住民を対象とした WBC 測定における評価対象核種は ^{134}Cs 及び ^{137}Cs であるが、福島原発事故の発生から数年が経過する中、特に冬季において ^{134}Cs のみが検出される事象があることが報告されている [36]。福島原発事故に伴う ^{134}Cs と ^{137}Cs の総放出量はほぼ 1:1 と評価されており [37], 物理半減期の短い ^{134}Cs (2.06 年) が物理半減期の長い ^{137}Cs (30.2 年) よりも早い段階で検出されなくなるため、 ^{134}Cs のみが検出される事象は矛盾している。

調査の結果、原因は ^{134}Cs から放出される 605 keV の γ 線によるピークを、天然放射性核種の ^{214}Bi (^{222}Rn 子孫核種の一つ) の 609 keV のそれと誤認識した可能性が高いことが確認された。両ピークは NaI(Tl) 検出器のエネルギー分解能では弁別できない。冬季にこの事象が多発するのは、WBC 測定室内の機器類が静電気によって帯電しやすくなるため、これによりイオン化した ^{214}Bi が付着するものと考えられた。そのため、WBC 測定室内の湿度管理や静電気除去スプレーの使用により静電気の発生を抑える対策がとられるとともに、環境中の ^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比との乖離を判定する手順の追加が考案され、効果が得られている。この問題を回避する別の方法としては、 ^{134}Cs の複数のピークラインから個々に定量される体内放

射能の差異を確認することが考えられる。図 14 に示す WBC (FASTSCAN) の波高スペクトルの例を用いて以下に説明する。

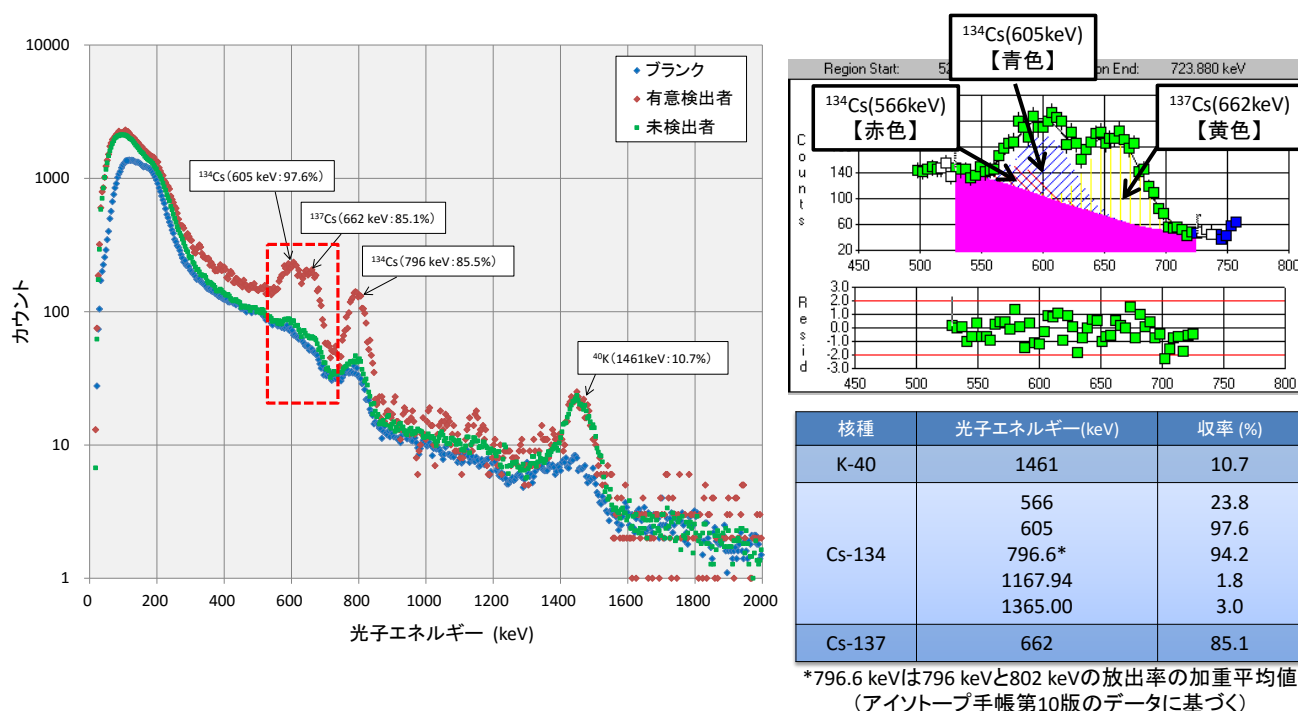


図 14 WBC の波高スペクトル例

^{134}Cs から放出される γ 線の内、WBC の波高スペクトルを解析する上で重要となるのは 566 keV (23.8%), 605 keV (97.6%) 及び 797 keV (94.2%¹⁰) のエネルギーの γ 線である。この内、566 keV と 605 keV の γ 線によるピークは放出率の差が大きいことからシングルピークとして検出され、これに ^{137}Cs の 662 keV の γ 線によるピークの一部が重なるように複合ピークが形成される。NaI(Tl) 検出器を有する標準的な WBC の波高スペクトルでは、この複合ピークに隣接して ^{134}Cs の 797 keV のピークが見られる。したがって、 ^{134}Cs の検出判定には、 ^{134}Cs の 797 keV のピーク解析の結果を用いるのが良いことは自明であるが、各ピークに対する解析精度と検出限界値を事前に評価する必要がある。

図 15 には、GENIE-2K (Canberra, US) を用いて ^{134}Cs のピークライン毎に算出された定量値と ^{137}Cs の定量値を比較した結果を示す。同図から、 ^{134}Cs の 797 keV と 605 keV の各ピークから得られた定量値は、同程度に ^{137}Cs の定量値と相関があり、また検出限界値もほぼ同等であることが確認された。他方、566 keV のピークは解析精度が悪く、検出限界値が高いことが分かる。以上のことから、良好に校正がなされている WBC であれば、 ^{134}Cs の 605 keV のピークが単独で検出される可能性は低く、797 keV のピーク検出の有無によって ^{214}Bi による誤認識を判断できると考えられる。

¹⁰ 796 keV (85.5%) と 802 keV (8.7%) の放出率を合算。光子エネルギーは放出率の加重平均値 (アイソトープ手帳第 10 版のデータを使用)。

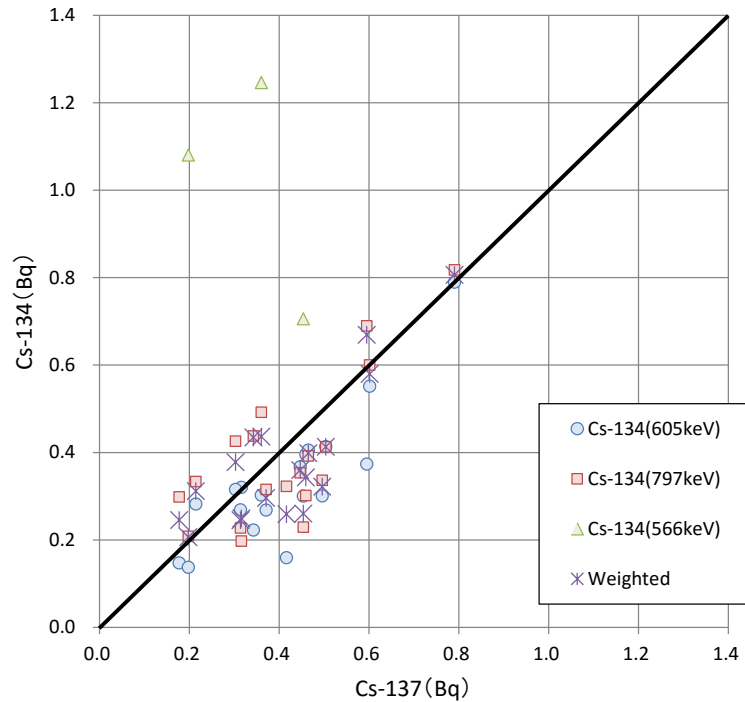


図 15 ^{134}Cs のピークライン毎に算出された定量値と ^{137}Cs の定量値の比較
 (※Weighted は各ピークの解析誤差の逆二乗で加重平均した ^{137}Cs の定量値)

3) 波高スペクトルの解析

WBCの元データとなるのがバックグラウンド、ファントム及び被検者を測定した際に得られる波高スペクトルである。WBCでは波高スペクトル上にあるピークを同定し、そのピーク中心エネルギーとピーク面積を計算することにより核種の同定と放射能の定量を行う。核種の同定には波高スペクトルの横軸（チャンネル）を光子のエネルギーに対応させる必要があり、検出した核種の放射能を定量にはファントムを測定して得られる（全吸収ピーク）計数効率を事前に評価しておく必要があるため、波高スペクトル解析の信頼性はWBCの重要な要件となる。波高スペクトルの解析方法は、各WBC製造元が提供するソフトウェアの仕様によって様々であるが、ここではFASTSCANに標準装備されているGENIE-2K(Canberra, US)¹¹での解析方法を参考に紹介する。

GENIE-2K では数種類のピーク同定アルゴリズムを有しており、ユーザが状況に応じて最適な解析アルゴリズムを選択できるようになっている。核種が事前に想定できない場合の波高スペクトルの解析には2階微分法が適しているとされるが、核種が既知の場合にはライブラリ法の方が適している[38]。その一つである Gamma-M は、特に NaI(Tl)検出器の波高スペクトルの解析に特化して開発されたアルゴリズムであり[39]、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の検出感度は2階微分法よりもライブラリ法の方が高い。

GENIE-2Kに登録する核種ライブラリファイルの一例を図16に示す。同ファイルには、測定対象とする核種名とそのピークラインの情報（光子エネルギーと収率）を入力する。複数のエネルギーの γ 線を放出する核種については、最も検出しやすい（あるいは核種の同定が行いやすい）ピークラインをキーラインとして選択する¹²。なお、 ^{134}Cs の563 keV(8.4%)と569 keV(15.4%)、796 keV(85.5%)と802 keV(8.7%)の2本2組の γ 線はNaI(Tl)検出器では分離できないため、合計した放出率を有するシングルピークとしてファイル

¹¹ GENIE-2K を含む FASTSCAN 自体の制御は別のソフトウェア (Apex-In Vivo) によって行われる。

¹² 「*」の印が付いたピークライン (図13)。同図に示した例では、 ^{134}Cs のキーラインを797 keV に設定している。

に登録している（ただし、エネルギーは放出率の加重平均値）。

同定したピークの面積の計算は、GENIE-2Kでは基本的にガウス分布適合によって行う。この計算に必要なパラメータ設定画面の一例を図17に示す。個々のパラメータの詳細は省略するが、特に重要と思われるものについて若干触れておく。

- **Continuum** : ピーク下面積の計算に用いるモデル (Liner or Step) 及びピーク両側のチャンネル数。NaI(Tl)検出器では 0.2 FWHM が推奨値となる。
- **ROI Limits Determination** : 複合ピークの判定に用いるパラメータ。NaI(Tl)検出器では 2.5 FWHM / 1.25 FWHM が推奨値となる。
- **Used fixed FWHM** : 校正で得られた半値幅校正式を用いる。チェックを外すとピーク幅は任意に設定される。

解析に用いるソフトウェアに熟知するのは当然のことであるが、使用者は解析に用いられるパラメータの意味や数値に関して十分に理解し、実データ（波高スペクトル）を用いて計算がどのように行われるのか、手計算でも一度確認しておくことが重要である。各製造元においても、そうした計算の具体例を示した資料を準備しておくことが望ましい。その他のソフトウェアによる波高スペクトルの解析（特にピークサーチ）については、別添4に解説した。

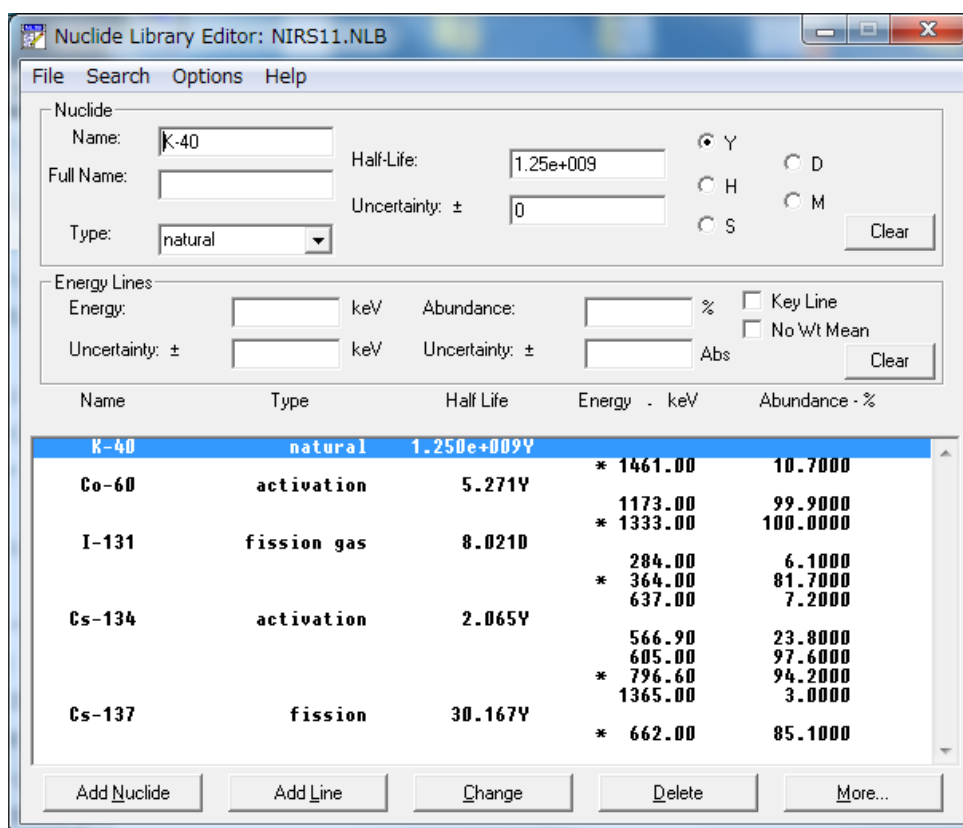


図 16 GENIE-2K での核種ライブラリの設定例

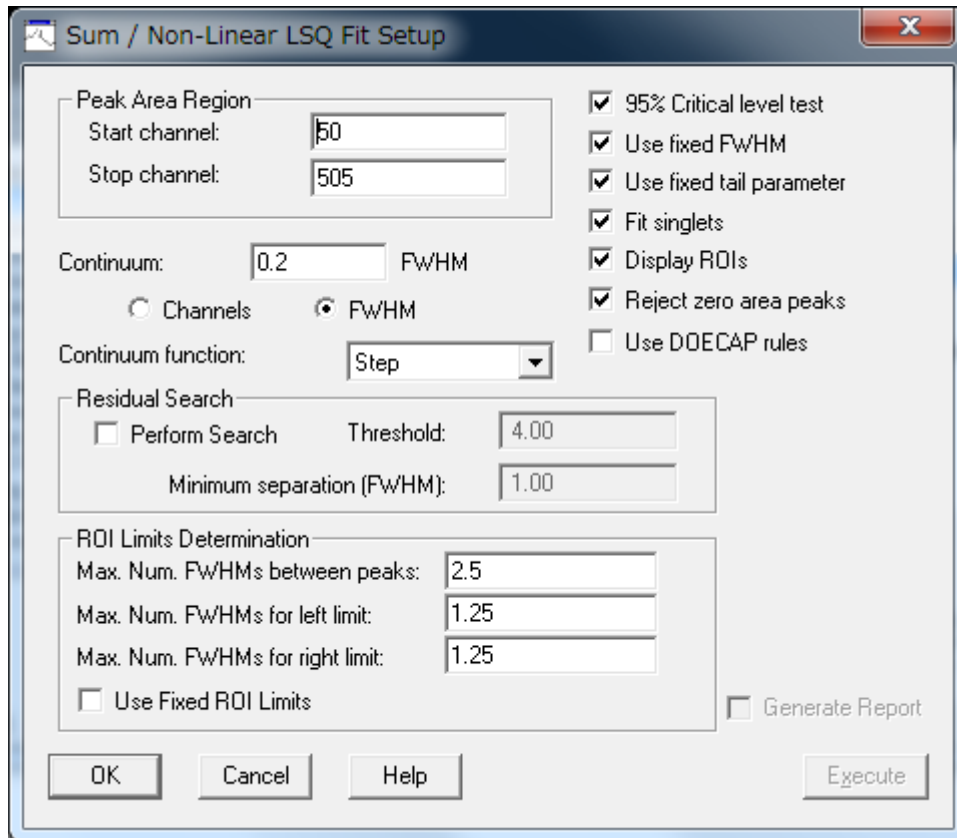


図 17 GENIE-2K でのピーク面積計算のためのパラメータ設定例

4) WBC の点検・校正

我が国で稼働中の WBC の大半は NaI(Tl)検出器を備えた機種であるが、使用において最も留意することは温度変化による NaI(Tl)検出器のゲインシフトであると思われる。使用前には、バックグラウンド計数とともに、決まった線源を所定の位置に配置し、ピークチャンネル、ピークカウント及びエネルギー分解能の 3 項目の変動の有無を確認する必要がある。図 18 に示すのは、原子力機構・核燃料サイクル工学研究所で運用している FASTSCAN の日常点検記録の様式である。原則として稼働日は毎日 1 回以上、2 式の NaI(Tl)検出器のアウトプットとなる合算スペクトルを自動解析して日常点検を行う。各検出器のゲイン調整もその際併せて行う。個々の点検項目の判定基準は、装置の故障等の不具合の無い通常時における変動範囲内 (3σ) としている。

以上は使用者がその都度行う点検であり、時間もさほど必要としないが、月単位（または年単位）で検出器の性能を詳細に評価する目的の点検も考えられる。例えば、NaI(Tl)検出器のエネルギー分解能の劣化は緩やかに進行するため、日々の点検記録を見ただけでは分かりにくい場合が多い。分解能が劣化した NaI(Tl)検出器の波高スペクトルは、図 19 に示すように ^{60}Co の 2 本の γ 線 (1173 keV と 1333 keV) から形成される複合ピークの谷部が浅くなる。なお、キャンベラ社は FASTSCAN 納品時検査において、エネルギー分解能を図 20 に示す方法で手計算により行っている。この方法で求めたエネルギー分解能は、GENIE-2K によってガウス分布適合で計算した結果に比べて若干大きくなるが、納品時の状態と比較するにはこちらの方が良い。

その他、ファントムを用いた計数効率校正を定期的に行う必要である。その頻度は、前述した点検が適切に行われていれば、数年に一度でも十分であると思われる。その際、前回の校正時と比較して、計数効

率の変動幅が小さいこと（例えば 10%以内¹³）を確認することが重要である。表 6 にはWBCの点検項目、判定基準及び頻度等の目安を示した。

| 体外計測機器日常点検記録 (平成18年8月) | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|------------------|-------------|---|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|----|-----------|
| 全身カウンタ1号機 | | | | | | | | | | | |
| 日付 | 実施者 | Background check | | Calibration check (¹³⁷ Cs:662keV, ⁶⁰ Co:1333keV) | | | | | | 判定 | 担当者 確認 |
| | | Low Energy | High Energy | Peak Centroid (ch) | | Activity (kBq) | | FWHM (keV) | | | |
| | | 10-100ch | 101-500ch | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | ¹³⁷ Cs | ⁶⁰ Co | | |
| 1 | | 110.98 | 47.85 | 172.73 | 342.31 | 7.48 | 6.91 | 49.78 | 71.99 | 良 | 否 |
| 2 | | 112.40 | 47.45 | 173.07 | 342.72 | 7.15 | 6.63 | 49.82 | 72.04 | 良 | 否 |
| 3 | | 114.47 | 47.75 | 173.08 | 342.41 | 7.30 | 6.52 | 49.84 | 72.01 | 良 | 否 |
| 4 | | 114.28 | 48.60 | 173.05 | 342.29 | 7.50 | 6.52 | 49.82 | 71.99 | 良 | 否 |
| 29 | | 110.10 | 48.86 | 172.91 | 342.36 | 7.30 | 6.75 | 49.81 | 72.00 | 良 | 否 |
| 30 | | 114.35 | 49.33 | 173.23 | 342.90 | 7.30 | 6.79 | 49.86 | 72.06 | 良 | 否 |
| 31 | | 115.43 | 48.06 | 173.51 | 343.41 | 7.22 | 6.90 | 49.90 | 72.12 | 良 | 否 |
| 判定基準上限 | | 140.0 | 70.0 | 174 | 344 | 7.68 | 8.07 | 62.0 | 93.0 | | |
| 判定基準下限 | | 100.0 | 30.0 | 170 | 338 | 7.14 | 5.98 | - | - | | |
| 備考 8月21日、22日、25日は計画停電に伴い、測定及び点検を実施せず。 | | | | | | | | | | | |

図 18 FASTSCAN の日常点検記録様式の一部

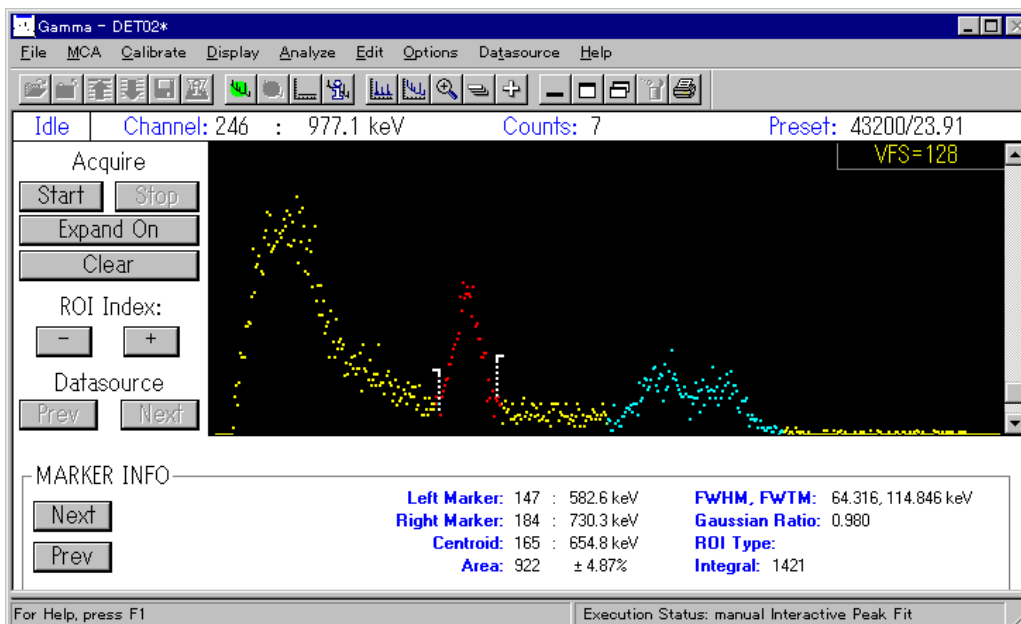
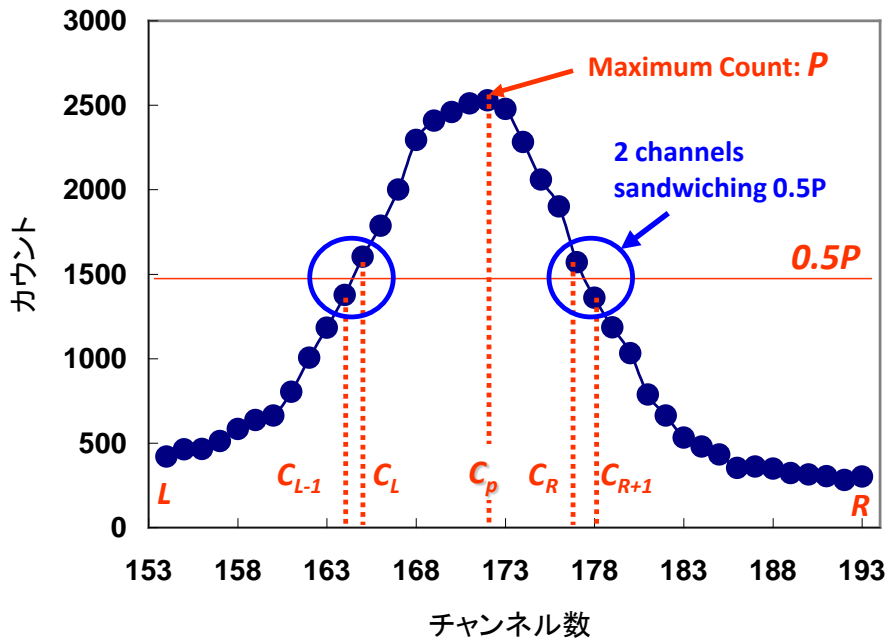


図 19 エネルギー分解能が劣化した WBC の波高スペクトル

※青色の関心領域が ⁶⁰Co のピーク部分

¹³ 実現可能な範囲で利用者が決めれば良い。参考として高エネルギー(100 keV 以上)を測定対象とした体外計測装置の校正時の SF (Scattering Factor : ある測定量を繰り返し測定したときに対数正規分布になると仮定し、その際に得られる幾何標準偏差) の目安値は 1.05 とされている[40]。



$$FWHM(ch) = R - L + \frac{C_L - C_P/2}{C_L - C_{L-1}} + \frac{C_R - C_P/2}{C_R - C_{R+1}}$$

図 20 エネルギー分解能の計算式

表 6 WBC の点検項目、判定基準及び頻度等の目安

| 点検・校正 (頻度) | 項目 | 判定基準 |
|--|--|--|
| 使用前点検 (使用日) ※主として使用者が行う。 | <ul style="list-style-type: none"> ● バックグラウンド計数 ● エネルギー分解能 ● ピーク中心チャンネル ● ピーク面積 | いずれも、通常の変動範囲内 (3σ) 以内。 |
| 定期点検 (月 1 回または年 1 回) ※主として製造元が行う。 | ※使用前点検と基本的に同じ項目で良いが、線源の測定時間を長くし、計数値の統計変動を少なくする (例えば、ピーク面積カウントを 1 万以上とする等)。 | 前回値と比較して 10% の変動範囲以内、及び検出器の仕様を満足すること (エネルギー分解能)。 |
| 校正 (3 年に 1 回。ただし、上記の点検が行われた場合) ※主として校正機関等が行う。 | <ul style="list-style-type: none"> ● エネルギー軸校正 (ポイント線源等を使用) ● 半値幅校正 (ポイント線源等を使用) ● 計数効率校正 (ファントムあるいは相対レスポンスが評価された線源を使用) ※必要に応じて検出限界値の評価等を行う。 | 前回値と比較して 10% の変動範囲以内であること。 |

5-1 福島県住民の内部被ばく線量評価の方法と課題

福島県住民のWBC測定による内部被ばく検査が2011年6月27日から開始され、現在でも続けられている。その結果は定期的に福島県のホームページに公表されており、これまでに257,623名の検査が終了するとともに、放射性セシウムによる(預託)実効線量が1 mSvを超えたのは内26名であった(2015年6月末時点)[41]。

WBC測定から内部被ばく線量を算定するには摂取シナリオの設定、すなわち、WBC等で検出された核種がいつ体内に取り込まれたのか、どのように取り込まれたのか(吸入、経口または経皮)、さらには当該核種の物理化学的性状(粒子形や化学形等)の条件を決定する必要がある。しかしながら、これに必要な情報が全て得られる場合は稀であり、状況に応じて合理的な仮定を置くのが普通である。前述の福島県住民内部被ばく検査では、その時期に応じて以下の2つの仮定が置かれた[42]。

- 急性摂取シナリオ (WBC測定期間：2011年6月27日から2012年1月末まで)

WBC測定で検出された放射性セシウムが、福島第一原子力発電所から放射性物質の環境中への放出が始まった2011年3月12日に吸入によって全量が体内に取り込まれたと仮定し、内部被ばく線量を算出。

- 日常的な摂取シナリオ (WBC測定期間：2012年2月1日から現在まで)

WBC測定で検出された放射性セシウムが、2011年3月12日から1年間毎日継続して日常的に経口摂取したと仮定し、内部被ばく線量を算出。

1) 急性摂取シナリオ

急性摂取シナリオは、事故初期の放射性プルームのばく露による吸入摂取を想定している。摂取日が2011年3月12日に設定されたのは、保守的な内部被ばく線量評価を行うためであった。すなわち、福島第一原子力発電所から最初の環境放出があった3月12日を摂取日にするすることで、放射性セシウムの摂取量を最大に見積もることになる。しかしその後、後述する日常的な摂取シナリオに変更されることになった。この一因として、特に子どもの評価が困難になったことが挙げられる。以下に具体的な計算方法を示して説明する。

急性摂取シナリオでの内部被ばくによる預託実効線量(以下は単に実効線量とする)は次式で計算される。

$$E_i = \frac{A_{134}}{R_{i,134}(t)} \cdot e_{i,134} + \frac{A_{137}}{R_{i,137}(t)} \cdot e_{i,137} \cdots (5)$$

ここで、 E_i ：年齢区分*i*の実効線量、 A_{134} 、 A_{137} ： ^{134}Cs 及び ^{137}Cs それぞれの体内残留量、 $R_{i,134}(t)$ 、 $R_{i,137}(t)$ ： ^{134}Cs 及び ^{137}Cs それぞれの年齢区分*i*に応じた全身残留割合(t は摂取日からの経過日数)、 $e_{i,134}$ 、 $e_{i,137}$ ： ^{134}Cs 及び ^{137}Cs それぞれの年齢区分*i*に応じた実効線量係数である。

上式において、体内残留量はWBC測定から得られる。全身残留割合と実効線量係数は、それぞれ放医研が開発したMONDAL3[43]や国際放射線防護委員会(ICRP)のCD-ROM[44]等から得られる。これらは年齢区分毎に決まる数値であり、各年齢区分の年齢範囲は次のように決められている[45]¹⁴。

¹⁴ ICRP Publication 71の原文には次のように記載されている。3 mo: from 0 to 12 mo of age, 1 y: from 1 y to 2y, 5 y: more than 2 y to 7 y, 10 y: more than 7 y to 12y, 15 y: more than 12 y to 17 y, adult: more than 18 y.

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

各年齢区分の¹³⁷Csの全身残留割合の摂取からの時間変化を図21に示す。ただし、全身残留割合は条件によって変わるため、同図には急性摂取シナリオで仮定された吸入摂取及びタイプF（Fast：比較的急速に肺から血中に吸収される分類）の場合のみ示した。同図から分かるように、子どもの方が成人よりも放射性セシウムの体内での実効半減期は短いため、年齢が若いほど急速に体内残留割合が減少してゆく。具体的な数値を挙げれば、吸入摂取から300日後の全身残留割合は、成人では4.50E-02、10歳児では3.83E-03、5歳児では1.86E-04となる。すなわち、吸入摂取から300日後には、成人では摂取の約5%、10歳児では摂取量の約0.4%、5歳児では摂取量の約0.02%まで体内残留量が減少することになる。そのため、子どもは大人に比べて、比較的早期にWBCによる検出が難しくなることが想定される。

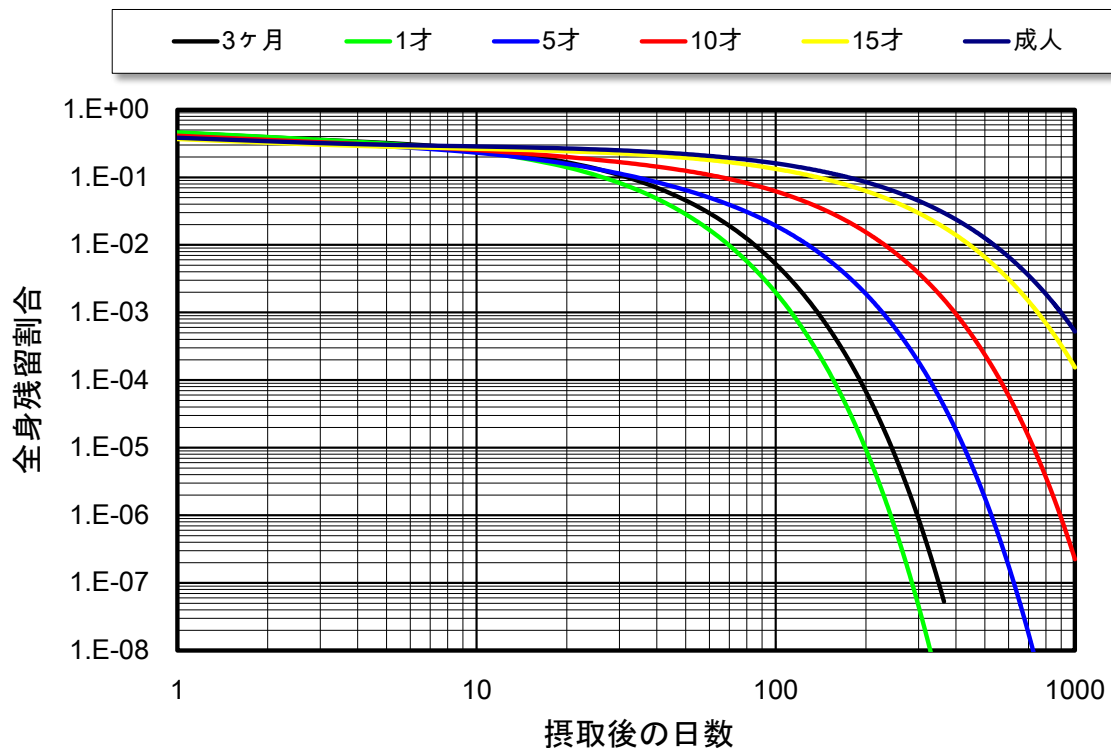


図 21 ¹³⁷Cs の全身残留割合（吸入摂取，タイプ F）

ここで、同じく吸入摂取から300日後にWBCの検出限界値（例えば¹³⁴Cs，¹³⁷Csともに300 Bqとする）に等しい体内放射能が検出されたとして実効線量を計算する。この計算に用いる全身残留割合と実効線量係数は、表7と表8に示すとおりである。

表 7 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の摂取から 300 日後の全身残留割合 [43]

| 核種 | 3 ヶ月児 | 1 歳児 | 5 歳児 | 10 歳児 | 15 歳児 | 成人 |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| ^{134}Cs | 6.87E-07 | 3.52E-08 | 1.44E-04 | 2.97E-03 | 2.29E-02 | 3.48E-02 |
| ^{137}Cs | 8.88E-07 | 4.56E-08 | 1.86E-04 | 3.83E-03 | 2.96E-02 | 4.50E-02 |

※吸入摂取, タイプ F の場合

表 8 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の実効線量係数 (吸入摂取) [44]

| 核種 | 3 ヶ月児 | 1 歳児 | 5 歳児 | 10 歳児 | 15 歳児 | 成人 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ^{134}Cs | 1.1E-08 | 7.3E-09 | 5.2E-09 | 5.3E-09 | 6.3E-09 | 6.6E-09 |
| ^{137}Cs | 8.8E-09 | 5.4E-09 | 3.6E-09 | 3.7E-09 | 4.4E-09 | 4.6E-09 |

※単位 (Sv/Bq)

10 歳児の場合の計算式は次のとおりであり, ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計の実効線量は 0.83 mSv となる。

$$E_{10} = \frac{A_{134}}{R_{10,134}(t)} \cdot e_{10,134} + \frac{A_{137}}{R_{10,137}(t)} \cdot e_{10,137} = \frac{300}{2.97 \times 10^{-3}} \cdot 5.3 \times 10^{-9} + \frac{300}{3.83 \times 10^{-3}} \cdot 3.7 \times 10^{-9}$$

$$= 5.35 \times 10^{-4} (\text{Sv}) + 2.90 \times 10^{-4} (\text{Sv}) = 8.25 \times 10^{-4} (\text{Sv}) = 0.83 (\text{mSv}) \dots (6)$$

同様に計算すると成人では 0.09 mSv, 5 歳児では 16.6 mSv となり, 摂取日からの時間が経過するにつれて年齢間の実効線量の差は相当大きくなる。これと同様な傾向が, 福島県住民の WBC 測定でも実際に得られている。

図 22 に示すのは, 原子力機構が 2011 年 7 月 11 日から 2012 年 1 月 31 日までに行った WBC 測定において, 有意な体内放射能が検出された 8 歳未満の子どもの内, その親の測定もなされた場合の両者の実効線量を比較したグラフである[15]。同図にあるように, 子どもの実効線量が親の実効線量を大幅に上回っている。

ただし, このような結果は急性摂取シナリオの前提とする仮定では若干考えにくい。すなわち, 初期の放射性セシウムの摂取量は呼吸量の大きい成人の方が子どもより大きいと考えられ, その一方で放射性セシウムの実効線量係数 (表 8) には WBC 測定の対象外とされた乳幼児を除いて年齢間の差異が比較的小さいため, 実効線量は摂取量に応じて成人の方が子どもよりも大きくなるはずである。また, 前述したとおり, 放射性セシウムの実効半減期は子どもの方が成人よりも短いため, 子どもの方が WBC 測定の早い段階で検出下限値未満となる割合が大きかったと推測される。おそらく, 急性摂取シナリオにより子どもの摂取量を過大に評価している可能性があるが, 図 22 に示す結果の解釈については WBC の測定精度と併せて今後さらに検証してゆく必要がある。なお, 原子力機構による WBC 測定では, その開始当初から GM サーベイメータを用いた被検者の着衣汚染の確認を行っていたが, この方法では検出できない程度の微量の汚染でも, WBC 測定では有意に検出される事象が一時帰宅の時期に増加したことが報告されている[15]¹⁵。

¹⁵ 2012 年 1 月以前は被検者の負担を考慮して着衣のまま測定を行っていたが, 以降は測定時にガウンに着替えることが決められた[15]。

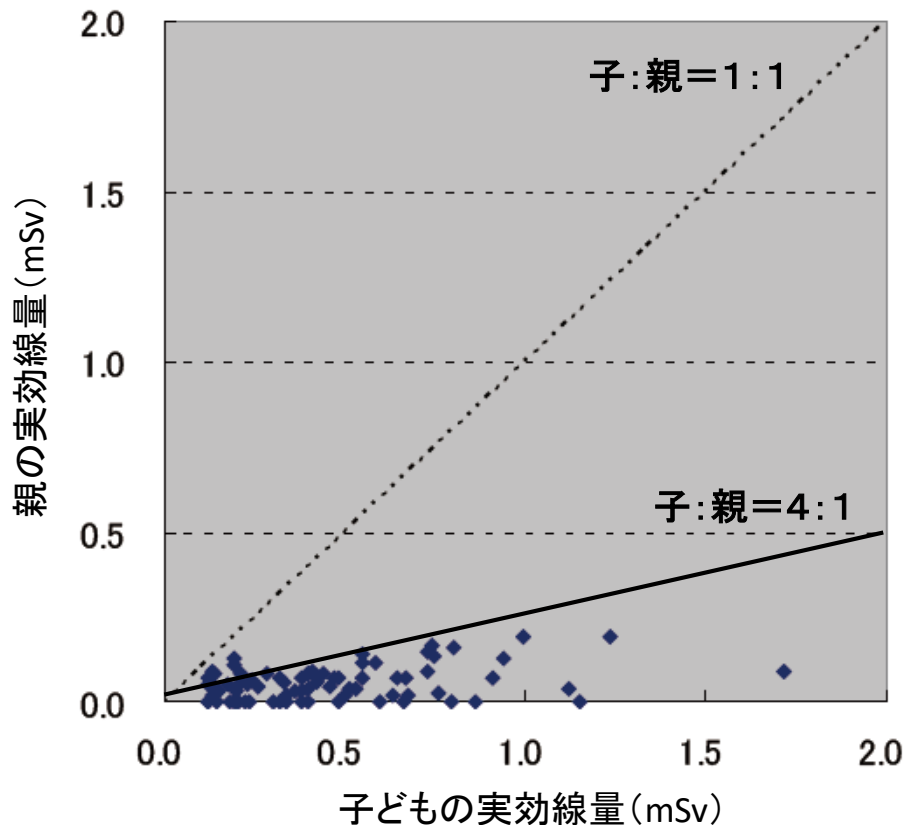


図 22 親子の実効線量評価値の比較 [15, 一部改編]

2) 日常的な摂取シナリオ

日常的な摂取シナリオは、2011年3月12日から1年間、毎日均等な量を継続して日常的に経口摂取したとする摂取シナリオであるとしている[42]。

毎日1 Bqの¹³⁷Csを経口摂取し続けた場合の、各年齢の全身残留量は図23に示す様に変化する。¹³⁴Csの場合もほぼ同様である。同図に示す全身残留量は、次式によって計算される。

$$A(T) = \sum_{i=1}^T I \cdot R(i) \cdots (7)$$

ここで、 $A(T)$ は摂取期間(T 日間)後の全身残留量、 I は日々摂取量(ここでは1 Bq)、 $R(i)$ は摂取から i 日目の全身残留割合である。例えば、5日間連続して摂取した後の全身残留量は、 $R(1)=9.77\text{E-}01$ 、 $R(2)=9.38\text{E-}01$ 、 $R(3)=8.99\text{E-}01$ 、 $R(4)=8.61\text{E-}01$ 、 $R(5)=8.25\text{E-}01$ であることから4.5 Bqと計算される¹⁶。

¹⁶ 5日間連続して摂取とは、厳密には1日1回の急性摂取を5日間繰り返した意味である。摂取期間の各日の0時に摂取があり、その24時間後の全身残留量割合が $R(i)$ である。本文の例では、 $t=0\text{ h}$ 、 24 h 、 48 h 、 72 h 、 96 h に計5回の摂取があり、 $t=108\text{ h}$ 時点での全身残留量を計算している。MONDAL3で行う慢性摂取の計算も同様に行われている。

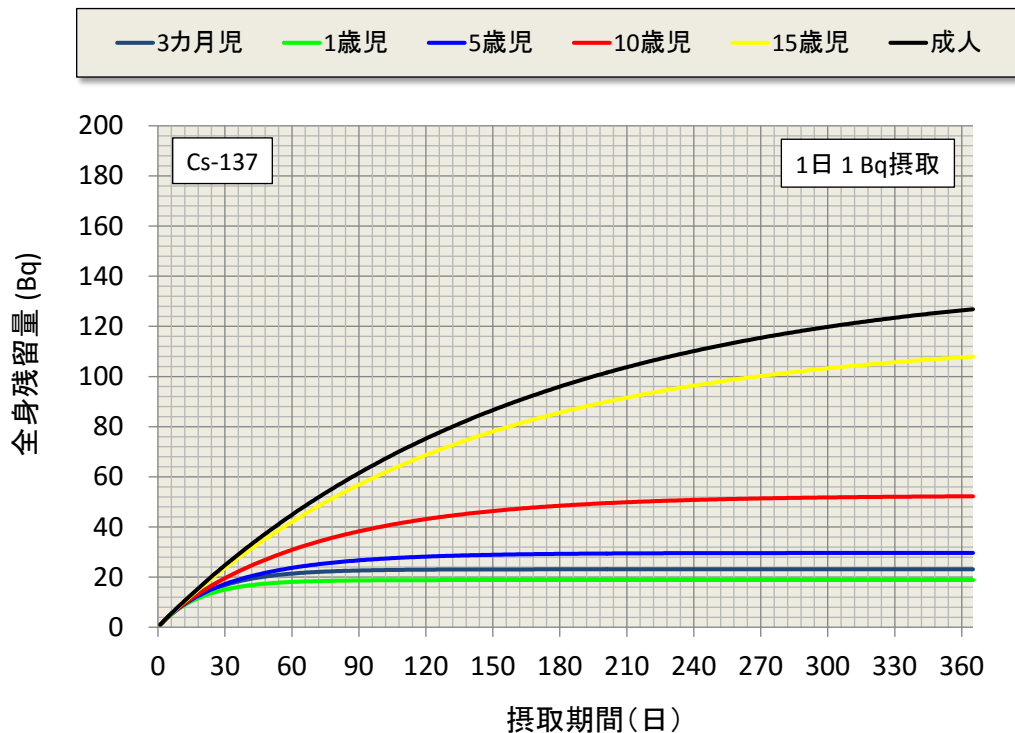


図 23 毎日 1Bq の ^{137}Cs を経口摂取した場合の全身残留割合の変化

毎日 1 Bq の ^{137}Cs を 1 年間または 1000 日間 (3 ヶ月児, 1 歳児除く) 経口摂取し続けた場合, その最終日における各年齢の全身残留量を表 9 に示す¹⁷。図 23 から分かるように, 10 歳児以下は摂取期間 1 年以内で, 日々の摂取による増加分と排泄や物理半減期による減少分が等しくなって全身残留量がほぼ平衡状態になる。

表 9 毎日 1 Bq のセシウムを 1 年間または 1000 日間にわたって経口摂取し続けた場合の最終日における全身残留量

| 核種 | 3 ヶ月児 | 1 歳児 | 5 歳児 | 10 歳児 | 15 歳児 | 成人 |
|-------------------|---------|---------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| ^{134}Cs | 22.7 Bq | 18.5 Bq | 28.7 Bq (28.7 Bq) | 49.4 Bq (49.6 Bq) | 98.7 Bq (103.5 Bq) | 115.0 Bq (123.8 Bq) |
| ^{137}Cs | 23.1 Bq | 18.8 Bq | 29.6 Bq (29.6 Bq) | 52.2 Bq (52.5 Bq) | 107.9 Bq (115.2 Bq) | 126.9 Bq (140.4 Bq) |

※括弧内の数値は 1000 日目の全身残留量, それ以外は 1 年目の全身残留量。なお, 実効線量係数の有効数字は 2 桁であるが, 計算条件による違いを明示するために表中の標記とした (表 11 及び表 13 も同様)。

日常的な摂取シナリオにおける内部被ばく線量の計算は次のように行われる。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の経口摂取の実効線量係数 (表 10) から, 1 mSv に相当する摂取量 (表 11) が計算できる。これを 365 (1 年間の日数) で除した量に表 9 に示す全身残留量を乗じることにより, 日常的な摂取シナリオに基づき年間で 1 mSv に達する場合の全身残留量(A)を求めることができる (図 24)。WBC 測定で得られる全身残留量を(B)とすると, その被検者の実効線量は(B)/(A) mSv と計算される。

¹⁷ 表 10 を参照。なお, MONDAL3 には摂取後 1000 日以降の全身残留割合のデータが無いいため計算できない。

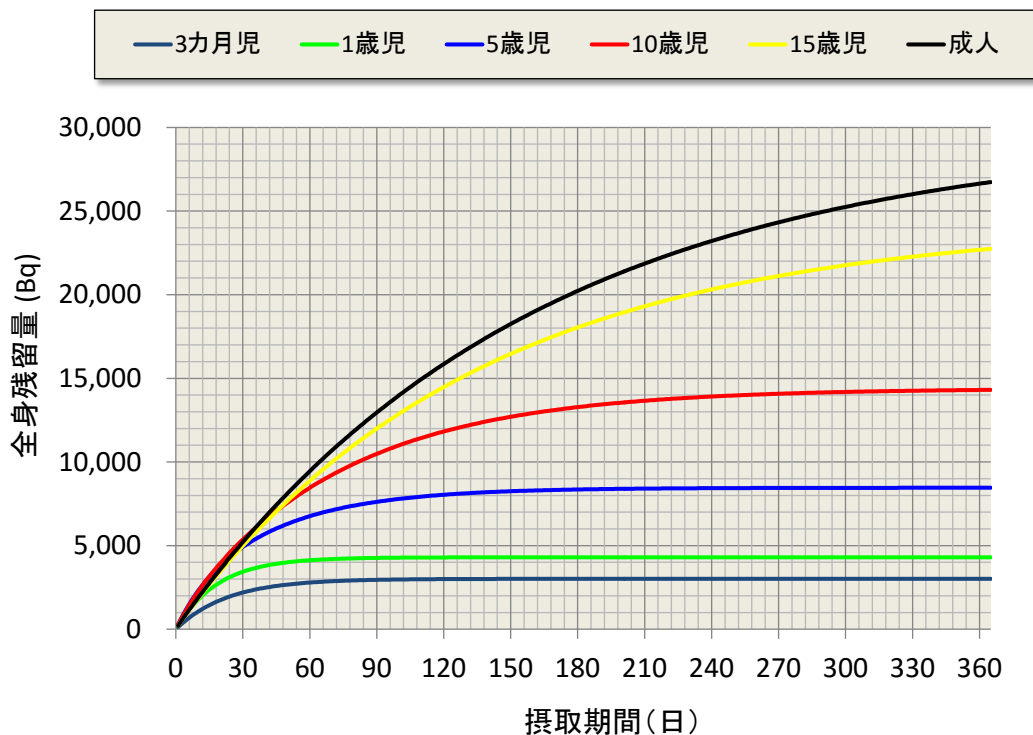


図 24 日常的な摂取シナリオに基づき年間 1 mSv に達する場合の ^{137}Cs の全身残留量

表 10 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の実効線量係数（経口摂取） [44]

| 核種 | 3ヶ月児 | 1歳児 | 5歳児 | 10歳児 | 15歳児 | 成人 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ^{134}Cs | 2.6E-08 | 1.6E-08 | 1.3E-08 | 1.4E-08 | 1.9E-08 | 1.9E-08 |
| ^{137}Cs | 2.1E-08 | 1.2E-08 | 9.7E-09 | 1.0E-08 | 1.3E-08 | 1.4E-08 |

※単位：Sv/Bq

表 11 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の 1 mSv に相当する摂取量

| 核種 | 3ヶ月児 | 1歳児 | 5歳児 | 10歳児 | 15歳児 | 成人 |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| ^{134}Cs | 3.85E+04 Bq (1.05E+02 Bq) | 6.25E+04 Bq (1.71E+02 Bq) | 7.69E+04 Bq (2.11E+02 Bq) | 7.14E+04 Bq (1.96E+02 Bq) | 5.26E+04 Bq (1.44E+02 Bq) | 5.26E+04 Bq (1.44E+02 Bq) |
| ^{137}Cs | 4.76E+04 Bq (1.30E+02 Bq) | 8.33E+04 Bq (2.28E+02 Bq) | 1.04E+05 Bq (2.85E+02 Bq) | 1.00E+05 Bq (2.74E+02 Bq) | 7.96E+04 Bq (2.11E+02 Bq) | 7.96E+04 Bq (2.11E+02 Bq) |

※括弧内の数値は 1 mSv 相当摂取量を 365 で除した数値

以下に計算例を挙げる。10歳児の場合、1 mSvに相当する ^{137}Cs の（経口）摂取量は $1.00\text{E}+05$ Bqである。日常的な摂取シナリオでは毎日の均等摂取を考えるため、年間 1 mSvに達する 1日当たりの摂取量は 274 Bq (= $1.00\text{E}+05$ Bq/365)となる。1日 1 Bqの摂取量を継続した場合の 365日後の全身残留量は表 9 から 52.2 Bqである

ので、年間 1 mSvに相当する全身残留量は 1.43E+04 Bqである。WBC測定で ^{137}Cs が 1000 Bq検出されたとする
と、実効線量は 0.07 mSv (=1.0E+03/1.43E+04)となる。摂取期間が複数年にわたる場合でも実効線量の計算方法
は基本的に同じで良いと思われるが、算定する実効線量は日常的な摂取シナリオの摂取の起点となる 2011 年 3
月 12 日からの総線量ではなく、WBC測定を行った当該年度のみ線量として解釈する必要がある。なお、子
どもでは対応する年齢区分が成長とともに変わってゆくが、放射性セシウムの全身残留量は 1 年以内に平衡値
に達するため、線量評価はWBC測定時点の年齢区分に応じて行うのが適切である¹⁸。

しかしながら、以上の日常的な摂取シナリオの計算方法はやや複雑であるように思われる。体内に恒常的に
存在する ^{40}K と同様に、全身を線源として各臓器（組織）に付与される放射線のエネルギーから実効線量を計
算する方法も考えられるが[46]、ここではより簡単な考え方を紹介する。チェルプイリ笹川医療協力プロジェ
クトの一環として実施された WBC による住民の ^{137}Cs の測定では、体重 1 kg 当たりの ^{137}Cs 量から換算係数
 $2.5 \times 10^{-3} \text{ (mSv/y)/(Bq/kg)}$ を用いて年間の実効線量を計算している[47]。同換算係数は ICRP Publication 67[48]から
導出されたものとされるが、その導出方法は次のとおりと考えられる。経口摂取によって体内に入った放射性
セシウムは腸管吸収を経て血中に移行するが、その後速やかに全身組織に分布し、表 12 に示す代謝パラメー
タに従って体外に除去される[49]。同表にある全身(A)と全身(B)はクリアランス速度の異なる 2 つのコンパ
ートメントを意味しており、成人では生物半減期が 2 日と 110 日のコンパートメントが存在し、それぞれに血中
に移行したセシウムの 10%と 90%が分配されるとされる。3 ヶ月児と 1 歳児ではコンパートメントは 1 つしか
ない。

表 12 セシウムの代謝パラメータ

| 年齢区分 | 胃腸管吸収割合 | 分布(%) | | 生物半減期 (日) | |
|-------|---------|-------|-------|-----------|-------|
| | | 全身(A) | 全身(B) | 全身(A) | 全身(B) |
| 3 ヶ月児 | 1 | — | 100 | — | 16 |
| 1 歳児 | 1 | — | 100 | — | 13 |
| 5 歳児 | 1 | 45 | 55 | 9.1 | 30 |
| 10 歳児 | 1 | 30 | 70 | 5.8 | 50 |
| 15 歳児 | 1 | 13 | 87 | 2.2 | 93 |
| 成人 | 1 | 10* | 90* | 2* | 110* |

* 女性の線量係数を計算するために用いた場合には過大評価となる。

コンパートメント中の放射能濃度 $C(t)$ 及び平衡値 C_{equib} は次式のとおり与えられる。

$$\frac{dC(t)}{dt} = I - \lambda \cdot C(t), \quad C_{equib} = I / \lambda \quad \dots(8)$$

ここで、 I は放射性核種の流入フラックス (Bq/day)、 λ は放射性核種の崩壊定数 (1/day) に相当するもので、
実効半減期と $T=0.693/\lambda$ の関係がある。実効半減期は、表 12 中の生物半減期と物理半減期から求まる。平衡
値を求める式において I を 1 Bq/day、すなわち、1 日 1 Bq の経口摂取を考えると、この場合の ^{134}Cs と ^{137}Cs の
平衡値は表 13 に示す数値になる。MONDAL3 も同じモデルに基づき放射性セシウムの全身残留割合を計算し
ているため (表 9)、ほぼ同じ結果となる。

¹⁸ 急性摂取シナリオでは、摂取日 (2011 年 3 月 12 日) 時点での年齢区分に応じて内部被ばく線量評価を行った。

表 13 1日1Bq摂取した場合の¹³⁴Csと¹³⁷Csの平衡値(理論値)

| 核種 | 3ヶ月児 | 1歳児 | 5歳児 | 10歳児 | 15歳児 | 成人 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|
| ¹³⁴ Cs | 22.6 Bq | 18.4 Bq | 28.8 Bq | 49.9 Bq | 104 Bq | 125 Bq |
| ¹³⁷ Cs | 23.0 Bq | 18.7 Bq | 29.6 Bq | 52.8 Bq | 116 Bq | 142 Bq |

この平衡値を、実効線量係数の算出過程に用いられているMIRD型数学ファントムの重量[49]¹⁹で割ると、1日1Bqの経口摂取した場合の体重1kg当たりの平衡値 S_{equib} が求まる。一方、1日1Bqの経口摂取を1年間継続した場合の実効線量 $E_{chronic}$ は、摂取量を365Bqとして実効線量係数(表10)を乗じれば求まる。したがって、 $E_{chronic}$ を S_{equib} で割れば、体重1kg当たりの年間実効線量を算定できる。結果を表14に示す。

表 14 体重1kg当たりの¹³⁴Cs/¹³⁷Cs量から年間実効線量への換算係数

| 核種 | 3ヶ月児 | 1歳児 | 5歳児 | 10歳児 | 15歳児 | 成人 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ¹³⁴ Cs | 1.4E-03 | 3.1E-03 | 3.1E-03 | 3.3E-03 | 3.7E-03 | 3.9E-03 |
| ¹³⁷ Cs | 1.1E-03 | 2.3E-03 | 2.3E-03 | 2.2E-03 | 2.2E-03 | 2.5E-03 |

※単位：(mSv/y)/(Bq/kg)

同表から、3ヶ月児を除き、換算係数の数値は年齢間で良く一致していることが分かる。この理由は、実効線量係数及び体重1kg当たりの全身残留量平衡値(図25)の年齢間の差が小さいためである。したがって、年齢を問わず、成人に対する換算係数(¹³⁴Cs: 3.9×10^{-3} (mSv/y)/(Bq/kg), ¹³⁷Cs: 2.5×10^{-3} (mSv/y)/(Bq/kg))を用いて年間実効線量を求めるのが合理的である。体重1kg当たりの全身残留量を内部被ばくの尺度として用いることは、チェルノブイリ原発周辺の子どものWBC測定において経験があり、全体的な傾向として、性や年齢による違いは殆ど見られないという結果が得られている[50]。

以上の方法により評価された内部被ばく線量を被検者に分かりやすく説明することは、測定と同様に重要なことである。その実際の対応状況やノウハウに関しては、既に幾つか参考となる報告[51, 52]があるので、本報告書では福島県によるWBC測定で使用されている被検者への報告様式の紹介に留める(図26)。同様式では、WBCの測定値及び実効線量を記載欄があり、また自然放射線や医療行為等による被ばく線量を分かりやすく説明したチャート図が掲載されている。

¹⁹ 3ヶ月児: 3.4 kg, 1歳児: 9.8 kg, 5歳児: 19 kg, 10歳児: 32 kg, 15歳児: 55 kg, 成人: 70 kg

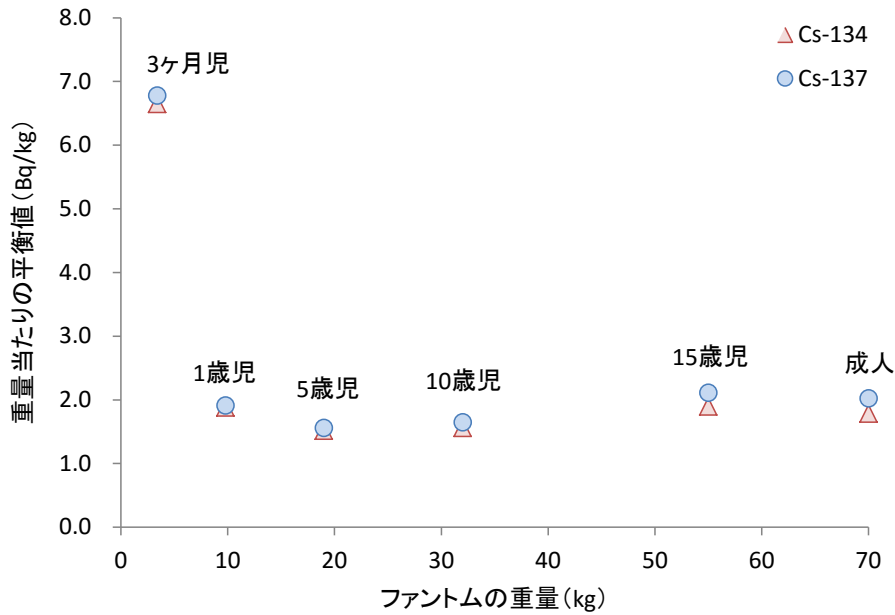


図 25 ¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs の体重 1 kg 当たりの全身残留量平衡値
(1 日 1 Bq の経口摂取を継続した場合)

平成 年 月 日

検査結果

検査実施機関：(独)放射線医学総合研究所

氏名： _____ 様 (職・種 年 月 日生、男女)

検査日： 平成 年 月 日

検査結果：

- 1) 体表面検査 体表面汚染の有無： 有 (_____ cpm) ・ 無
- 2) 甲状腺検査 甲状腺残留 I-131 の有無： 有 (_____ Bq) ・ 無
(I-131：放射性ヨウ素)
- 3) 全身検査

| 測定器 | 測定時 (秒) | 核種 | 測定値 (Bq) | 預託実効線量 (mSv) ^{注1,2} |
|-------------------|---------|--------|----------|------------------------------|
| ベクト型サーボデテクタ (WBC) | | Cs-134 | | |
| | | Cs-137 | | |

(Cs-134, Cs-137：放射性セシウム)
- 4) 尿検査

| 測定器 | 測定時 (秒) | 核種 | 測定値 (Bq/cm ²) |
|----------------|---------|--------|---------------------------|
| 遮蔽体付き 5"Na線測定器 | | I-131 | |
| | | Cs-134 | |
| | | Cs-137 | |

線量 自然放射線

大気から受ける線量が高い地域 (年間)

| | |
|----------|---------------|
| 100 mSv | がんの発症確率が認められる |
| 10 mSv | がんの発症確率が認められる |
| 1 mSv | 世界年平均 2.4mSv |
| 0.1 mSv | 日本年平均 1.5mSv |
| 0.01 mSv | 東京一帯 1 年 |

今年度の検査の結果、あなたの体内にある放射性物質から、概ね一生の間にかかると思われる線量 ^{注1,2} は、 _____ と推定しました。

注1) 成人では 50 年間、子供では 70 歳までに体内から受けると思われる内部被ばく線量を表す
注2) 線量推定においては、線量が最大となる摂取条件 (3 月 12 日に全量を吸入摂取) で推定

裏面に検査結果の見方と解説を示します。裏面もご覧ください。

-検査結果の見方-

- 1) 体表面検査
 - ・体の表面に放射性物質が付着しているか、どのくらいかを調べる検査
 - ・測定値の単位：シーピーエム (cpm) で 1 分間当たりのカウント数を表す
- 2) 甲状腺検査
 - ・甲状腺部に放射性ヨウ素が残留しているか、どのくらいかを調べる検査
 - ・測定値の単位：ベクレル (Bq) で放射性物質の量を表す

参考：今回の検査における検出限界 I-131: 38 Bq
- 3) 全身検査 (ホールボディカウンター-WBC)
 - ・体内に放射性物質が残留しているか、どのくらいかを調べる検査
 - ・測定値の単位：ベクレル (Bq) で放射性物質の量を表す
 - ・線量の単位：シーベルト (Sv) で放射線による人体への影響の度合いを表す
ミリシーベルト (mSv) はシーベルト (Sv) の 1000 分の 1

参考：今回の検査における検出限界 Cs-134: 320 Bq, Cs-137: 570 Bq
参考：1mSv に相当する放射線量 (検査日： 6 月 27 日時点)
成人の場合 Cs-134: 約 21,000 Bq, Cs-137: 約 33,000 Bq
- 4) 尿検査
 - ・尿中に放射性物質が排出しているか、どのくらいかを調べる検査
 - ・測定値の単位：ベクレル (Bq/cm²) で尿 1 cm² 当たりの放射性物質の量を表す

参考：今回の検査における検出限界 I-131: 0.008 Bq/cm², Cs-134: 0.013 Bq/cm², Cs-137: 0.013 Bq/cm²

放射線量とがん

低線量放射線の人体への影響については必ずしも全てが解明されている訳ではありませんが、安全側で評価するために、低い線量でも影響があると考える場合があります。この考え方に基づいた場合、がんのリスクは広島、長崎の被爆者を基にしたこれまでの結果から、100 ミリシーベルトの被ばくでは 0.5% のリスクが増加するとされています。しかし、実際には 100 ミリシーベルトを超えなければ、がんの増加は認められていません。なお、外部被ばくでも、内部被ばくでも、線量が同じならばリスクは同じと考えます。

図 26 内部被ばく検査結果様式

5-2 福島原発事故に係る住民等の WBC 測定

福島県がこれまでに行ってきた福島県住民の WBC 測定については、本章の冒頭でも述べたように、その結果が福島県から定期的に公表されている。ここでは、それ以外の主要な WBC 測定の報告について紹介する。

Tsubokura らは、福島第一原発から 23 km 北に位置する南相馬市において自主的に行われた住民の WBC 測定の結果を 2012 年に報告している[53]。使用された WBC は、立位型のキャンベラ社 FASTSCAN であり、2 分間の測定時間での検出限界値は 210 Bq (^{134}Cs)、250 Bq (^{137}Cs) であった。解析された被検者数は 9498 名であり、その内訳は 1432 名が子ども（中央値年齢 11 歳 [6-15 歳]、内 720 名が女性）、8066 名が大人（中央値年齢 44 歳 [15-97 歳]、内 4512 名が女性）であった。また、これらの被検者は 2011 年 9 月 26 日から 2012 年 3 月 31 日の間に測定されている。その結果の要約は次のとおりである。3286 名から有意値が検出され、その内訳は子ども 235 名 (210-2953 Bq [中央値 590 Bq])、2.8-57.9 Bq/kg [中央値 11.9 Bq/kg]、大人 3051 名 (210-12771 Bq [中央値 744 Bq])、2.3-196.5 Bq/kg [中央値 11.4 Bq/kg]) であり、両者の測定値には統計的有意差が認められた。最大被ばく線量は 1.07 mSv であったが、1 mSv を超過した者は 1 名のみであった。なお、南相馬市での WBC 測定に関する情報は、同市のホームページでも公表されている[54]。

Hayano らは、ひらた中央病院（福島県平田村）において WBC (FASTSCAN) を用いて検査された 32811 名の結果を報告している[55]。被検者は 2011 年 10 月 17 日から 2012 年 11 月 30 日までに測定を受けた者であり、福島県以外の出身者も含まれる。得られた主な結果として、①WBC 測定から得られた福島県住民の内部被ばく線量は、チェルノブイリ事故後に得られた放射性セシウムの土壌沈着量とその土地に居住する住民の内部被ばく線量との関係を用いて推定した内部被ばく線量よりも相当低い。②2012 年 5 月以降は、子ども被検者 ($n = 10237$) のセシウム検出率は 0%（検出限界値： ^{134}Cs 、 ^{137}Cs ともに 300 Bq）であった。③一部の被検者から高い放射能濃度 (^{134}Cs : 108 Bq/kg、 ^{137}Cs : 184 Bq/kg) が検出され、実効線量は 1.06 mSv であった。この原因は当該者が野生のキノコや淡水魚を食していたためであった。食事制限を行ってからは体内のセシウムは生物学的半減期に従って減少した。④三春町の学童のほぼ全人数を対象とした WBC 測定を行い、一部の被検者からセシウムが検出されたが、着衣の汚染が原因であることが 2 回目の測定の結果から示唆された。

Matsuda らは、長崎大学に設置された WBC を用いて行われた福島県内への派遣職員や同県からの避難住民等の測定結果を報告している[56, 57]。使用された WBC は 8 インチφ×4 インチ厚の NaI(Tl)検出器を 2 式有するベッド型の WBC であり、低バックグラウンドでの測定が行えるように厚さ 20 cm の鉄遮へい室内に設置されている。2 式の NaI(Tl)検出器は被検者用ベッドの上下に配置され、被検者の体軸方向に沿ってスキャンされる。20 分間測定での検出限界値は、30 Bq (^{131}I)、33 Bq (^{134}Cs 、 ^{137}Cs) であった。Matsuda らの最初の報告[56]は、福島原発事故の発生から 1 カ月以内に実施された 173 名の被検者の WBC 測定に関するものである。これらの被検者は 2011 年 3 月 11 日から 4 月 10 日までの間に福島県内に居り、平均滞在期間は 4.8 日であった。測定の結果、被検者の 30% 以上から ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs が検出された。3 月 12 日から 3 月 18 日の間に福島県内に滞在した被検者グループの検出率は約 50% であり、別の期間に滞在した被検者グループよりも高かった。検出された 3 核種の体内放射能についても、前者の被検者グループでは高かった。被検者の実効線量と甲状腺等価線量の最大値は、それぞれ 1 mSv と 20 mSv であった。Matsuda らの続報[57]は、2011 年 4 月以降の福島原発事故後 1 年間に福島県内に派遣された 372 名の WBC 測定に関するものである。被検者の実効線量と甲状腺等価線量の最大値は、それぞれ 22.4 μSv と 0.4 mSv であり、2011 年 4 月に測定された被検者から確認された。WBC 測定の結果と環境放射能からの予測との比較により、2011 年 3 月から 5 月までは空気中の放射性核種の吸入による摂取が主な被ばく経路であり、それ以降は飲食物の経口摂取による摂取が主な被ばく経路であったと考察している。

第6章 本専門研究会からの提言

前章までに WBC 測定の実用面に係る諸課題の検討を行った。その結果に基づき、本専門研究会で検討すべき事項（第2章）について以下のとおり提言する。

1. WBC のトレーサビリティ構築

- 我が国の WBC の校正基準に用いるファントムは、①国際的にも広く認知され、利用されていること、②従前まで使用されてきた水ブロックファントムと類似した応答が得られると予想されること、③我が国でもデファクトスタンダードとして既に利用されていること、④国内製造が可能であること、等の理由から、米国国家規格協会（ANSI）に規定される BOMAB ファントムが適当である。
- BOMABファントムには次のものがある：①放射性物質を含まないBOMABファントム、②⁴⁰Kを規定量（Reference Manでは140 g）含むBOMABファントム、③正確に定量された放射性核種（ γ 線放出核種：200 keV~3 MeV以内）²⁰を含むBOMABファントム及び④体格別BOMABファントム。
- 我が国の WBC のトレーサビリティの構築及び維持には、上記の所定のファントムを用いた計数効率の定期的な校正を行う必要がある。しかしながら、我が国では推定 150 機以上の WBC が稼働しており、これら全ての WBC に対する校正を行うことは容易ではないため、所定のファントムとの相対レスポンスが評価された線源等を使用して計数効率を確認する方法が現実的である。このような線源は、所定のファントムを所有する機関の協力を得て、各製造元が制作するのが適当であると思われる。
- 諸外国での事例を参考にし、WBC 測定の実用面構築及び維持を担う専門的機関の設置が必要である。このような専門的機関は国際的な相互比較試験等に参加し、国際間トレーサビリティとの水準を評価できることが望まれる。図 27 に専門的機関の位置付けと役割を示す。

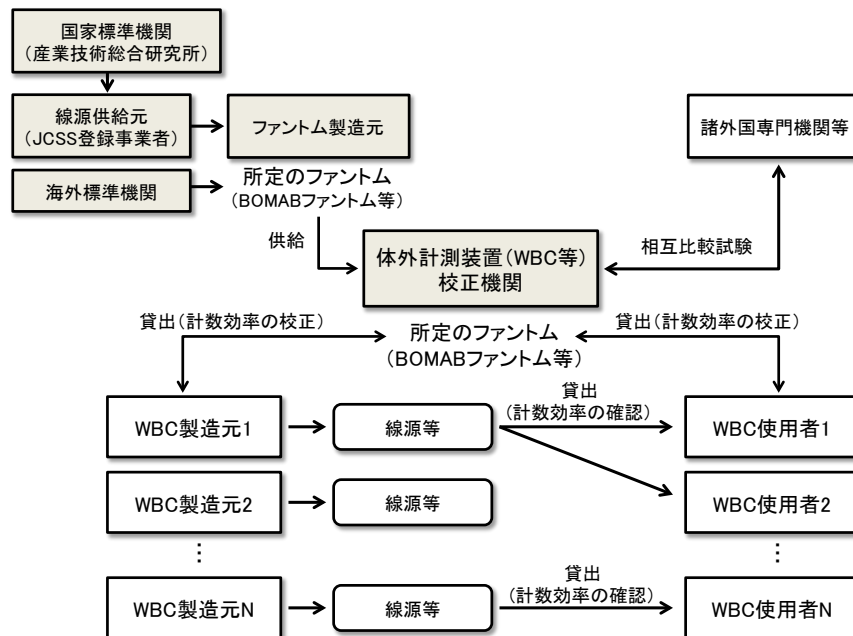


図 27 WBC 校正専門機関の位置付けと役割

²⁰ ANSI/HPS N13.35-1999 では、BOMAB ファントムに封入する放射性核種の放射能は NIST トレーサブルであることを規定している。我が国における放射線・放射能のトレーサビリティは、JCSS(Japan Calibration Service System)制度の下で国家標準機関(産業技術総合研究所)と登録事業者の間で確保される。ファントム製造元が JCSS 登録事業者である必要はない。

2. WBC 測定における体格補正

- 子どもを含む一般公衆を測定対象とする WBC では、体格別ファントムを用いてレスポンスの体格依存性を評価し、体内放射能を適切な精度で測定が行えるように測定条件を決定する。
- 上記に用いる体格別ファントムには ANSI に規定される体格別 BOMAB ファントムが適当である。
- 後の再評価のために、被検者の身長・体重を可能な範囲で取得しておくことが望ましい。

3. WBC の点検・校正

- 使用者が行う使用前点検と製造元が行う定期点検がある。前者の点検は温度変化によるゲインシフトを生じやすい NaI(Tl)検出器の調整や異常の早期発見を主たる目的とし、後者の点検は製造元が装置の性能が仕様の基準範囲内であることを確認することを主たる目的とする。
- 校正にはエネルギー校正、半値幅校正、計数効率校正がある。上記の点検が適切な頻度で行われていれば、所定のファントムを用いた計数効率の校正は概ね 3 年に一度の頻度で行うことで十分である。また、所定のファントムとの相対レスポンスが評価された線源等による計数効率の確認は毎年行うことが望ましい。

4. WBC 測定に基づく内部被ばく線量評価

- 福島原発事故以降、多数の住民の内部被ばく検査が WBC を用いて行われ、内部被ばく線量が評価された。適用された 2 種類の摂取シナリオである急性摂取シナリオと日常的な摂取シナリオは、いずれも合理的かつ適切な仮定であったが、緊急被ばく状況から現存被ばく状況への移行期においてどちらの摂取シナリオを用いるべきか、また、どのような判断で摂取シナリオを変更すべきか等に関して今後検討する必要がある。

日本工業標準調査会(JISC)のホームページ [58]には、“標準化(Standardization)とは、自由に放置すれば、多様化、複雑化、無秩序化する事柄を少数化、単純化、秩序化すること”，また、“標準(= 規格: Standards)とは、標準化によって制定される「取決め」と述べられている。福島県内において稼働中の WBC が無秩序化（多様化はしているが...）している訳では決していないが、WBC 測定のための標準となるガイドライン等が存在しなかったために混乱を招いたことは確かである。それでは何故、これまでも何度か標準化の議論が本学会の中でなされてきたにもかかわらず、WBC 測定の標準化が進まなかったのか？その原因を関係者は再度考える必要がある。BOMAB ファントムを 90 年代に既に標準化した米国やカナダは、当初から子どもの体格を模擬した BOMAB ファントムの仕様を決定していたことを鑑みるに、一般公衆に対する内部被ばくモニタリングが必要となる事態を現実的なものと認識していたことに相違ない。BOMAB ファントムを初めとする様々な体外計測用標準校正ファントムが、両国の研究機関（NIST: National Institute of Standards and Technology と BRMD: Bureau of Radiation and Medical Devices）が主催した国際ワークショップにおいて提案され、世界各国の関係者に認知されるとともに、ファントムの製造方法、トレーサビリティ、供給体制の整備等が NIST と BRMD（現 Health Canada）が果たすべきミッションとして言及された[59]。同様な仕組みが我が国でも必要である。また、本専門研究会でスコープ外とした多様な緊急被ばく状況下における体外計測法についても十分に検討する必要がある。最後に、本報告書が我が国における WBC 測定の標準化、そして信頼性のある体内放射能の測定の一助となることを期待し、本報告書の結語とする。

引用文献

1. 日本保健物理学会; 福島第一原子力発電所事故に関する放射線防護上の課題と提言, 平成 26 年 11 月 28 日 (2014), http://www.jhps.or.jp/jhp/wp-content/uploads/2014/12/2ndteigen_j.pdf (Accessed on 2016/03/20).
2. 小佐古敏荘, 他; 全身カウンタの現状と標準化に関する課題, 保健物理, **29**, 217-228 (1994).
3. 総務省 HP, 放射性物質等による内部被ばく検査に関する実態把握の結果, http://www.soumu.go.jp/main_content/000140109.pdf (Accessed on 2016/03/20).
4. Canberra HP, http://www.canberra.com/products/hp_radioprotection/pdf/Fastscan-C39771.pdf (Accessed on 2016/03/20).
5. S. Suguri; Measurements with a whole body counter, Proc. Symp. on Whole Body Counting, IAEA, Vienna, 219-233 (1962).
6. 山本哲夫, 他; ホールボディカウンタによる全身カリウム量の測定: レファレンス値の応用, RADIOISOTOPES, **50**, 331-342 (2001).
7. American National Standard. Specifications for the bottle manikin absorption phantom, ANSI/HPS N13.35-1999 (1999).
8. T. Ishikawa *et al.*; New in-vivo calibration phantom and their performance, *Health Phys*, **82**, 348-357 (2002).
9. 木名瀬栄,野口宏; モンテカルロ計算による全身カウンタ校正用ボマブファントムと水ブロックファントムの計数効率の比較, 保健物理, **35**, 443-447 (2000).
10. American National Standard. Performance criteria for radiobioassay, ANSI/HPS N13.30-1996 (1996).
11. 環境省; 平成 25 年度原子力災害影響調査等事業「東京電力福島第一原子力発電所事故に係る被ばく線量の把握調査等」成果報告書, 平成 26 年 3 月 (2015).
12. 宮崎真,大津留晶; 第 1 回ホールボディカウンター学術会議はなにを明らかにしたのか? -福島県内に配備の進むホールボディカウンターの運用について考える-. 保健物理,**47**, 108-112 (2012).
13. Canberra HP, http://www.canberra.com/products/hp_radioprotection/calibration-phantom.asp (Accessed on 2016/02/23).
14. Canberra; The Canberra RMC-II (model 2257) transfer phantom (Limited distribution).
15. T. Momose *et al.*; Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident, The 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident (Kurihara *et al.* ed.), Chiba, Japan, NIRS-M-252, 67-82 (2012).
16. A. N. Kovtun *et al.*; Metrological parameters of the unified calibration whole-body phantom with gamma-emitting radionuclides, *Radiat. Prot. Dosim.*, **89**, 239-242 (2000).
17. A. Ansraji *et al.*; Improvement and recommendations for operating procedures in internal contamination monitoring. ARC-G-0006 (2005).
18. RADEC HP, <http://www.radek.ru/en/fantoms/up-02t/> (Accessed on 2016/03/20).
19. 石川徹夫,他ら; 全身放射能計測装置の校正方法の標準化(I) 人体計測学的ファントムを用いた校正, 日本原子力学会誌, **37**, 420-429 (1995).
20. International Electrotechnical Commission, Radiation protection instrumentation - In vivo counters – Classification, general requirements and test procedures for portable, transportable and installed equipment, IEC 61582 first edition 2004-001 (2004).
21. 福島県, 4 歳未満の子供を対象とした内部被ばく検査について,

- <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/113965.pdf> (Accessed on 2016/03/20).
22. R. S. Hayano *et al.*; BABYSCAN: A whole body counter for small children in Fukushima, *J. Radiol. Prot.*, **34**, 645-653 (2014).
 23. T. Nakano *et al.*; Direct measurements for highly-exposed TEPCO workers and NIRS first responders involved in the Fukushima NPS accident, The 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident (Kurihara *et al.* ed.), Chiba, Japan, NIRS-M-252, 27-34 (2012).
 24. 福島県; 平成 23 年度第 3 回福島県「県民健康管理調査」検討委員会資料－放射線医学総合研究所における内部被ばく調査について, <https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/6497.pdf>.
 25. F. L. Bronson *et al.*; FASTSCAN-A computerized, anthropometrically designed, high throughput whole body counter for the nuclear industry.
http://www.canberra.com/literature/invivo_counting/tech_papers/fastscan.pdf (Accessed on 2016/03/20).
 26. 厚生労働省; 厚生統計要覧 (平成 26 年度) 第 2 編保健衛生第 1 章保健 (第 2-6) ,
http://www.mhlw.go.jp/toukei/youran/indexyk_2_1.html (Accessed on 2016/02/23).
 27. 木名瀬栄; 計算シミュレーション手法に基づく体外計測法の高度化に関する研究, JAERI-Research 2003-011 (2003).
<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAERI-Research-2003-011.pdf> (Accessed on 2016/03/20).
 28. G. H. Kramer *et al.*; The 1993 intercomparison of the measurement of in vivo radioactivity, *Radiat. Prot. Dosim.*, **86** (3), 197-205 (1999).
 29. G. H. Kramer *et al.*; The BRMD BOMAB phantom family, *Health Phys.*, **61**(6), 895-902 (1991).
 30. 日本工業規格. JIS ハンドブック放射線計測 2013 JIS Z 4001 原子力用語 (2013).
 31. L. A. Currie; Limits for quantitative detection and quantitative determination, *Anal. Chem.*, **40**, 586-593 (1968).
 32. H. Kaiser and H. Specker; Bewertung and Vergleich von Analysenverfahren, Fresenius Z., *Anal Chem.*, **149**, 46-66 (1956).
 33. 実用ガンマ線測定ハンドブック(米沢仲四朗ら共訳), ISBN4-526-04963-8, 日刊工業新聞社 (2002).
 34. 南健太郎, 佐藤信之; 放射線管理における計測装置の検出感度について, 日本原子力研究所 第 2703 号 (1967).
 35. 上本道久; 入門講座 検出限界と定量下限の考え方, ぶんせき(日本分析化学会機関誌), **2010 5**, 216-221 (2010).
 36. 寺門義則, 他; WBC 測定における天然放射性核種の影響, 日本保健物理学会 第 47 回研究発表会講演要旨集 (2014).
 37. 原子力安全・保安院 (現, 原子力規制委員会); 第 77 回原子力安全委員会資料第 1 号(平成 23 年 10 月 24 日), <http://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8382007/www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2011/genan077/siryol.pdf> (Accessed on 2016/03/20).
 38. Canberra; GENIE-2K manual.
 39. L. V. East *et al.*; A fresh approach to NaI scintillation detector spectrum analysis, *Nucl. Instr. Meth.*, **193**, 147-155 (1982).
 40. H. Doerfel *et al.*; IDEAS General Guidelines-June 2006 (2006).
 41. 福島県; ホールボディカウンターによる内部被ばく検査・検査の結果について,
<http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/21045b/wbc-kensa-kekka.html> (Accessed on 2016/03/20).
 42. 福島県; 福島県住民のホールボディカウンタ測定の線量評価の方針について(平成 24 年 2 月 1 日),

<https://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/21045b/wbc-hyoka.html> (Accessed on 2016/03/20).

43. N. Ishigure *et al.*; MONDAL3: Support system for internal dosimetry, National Institute of Radiological Sciences. <http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/RPD/mondal3.php> (Accessed on 2016/03/20).
44. International Commission on Radiological Protection; ICRP Database of dose coefficients: workers and members of the public Ver. 3.0., <http://www.icrp.org/page.asp?id=145> (Accessed on 2016/02/23).
45. International Commission on Radiological Protection; Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 4. ICRP Publication 71 (1995).
46. 谷幸太郎, 他; セシウム 134 及び 137 の慢性摂取に対する年齢別年間内部被ばく線量の導出, 日本保健物理学会 第 48 回研究発表会講演要旨集 (2015).
47. M. Hoshi *et al.*; Radiocesium in children residing in the western districts of the BRYANSK oblast from 1991-1996, *Health Phys.*, **79**, 182-186 (2000).
48. International Commission on Radiological Protection; Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. ICRP Publication 67 (1993).
49. International Commission on Radiological Protection; Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56 (1989).
50. 山下俊一, 他; チェルノブイリ原発事故被災児の検診成績 [放射線科学第 42 巻第 10 号-12 号掲載], (財)笹川記念保健協力財団, http://www.smhf.or.jp/data01/chernobyl_1991_1996.pdf (Accessed on 2016/03/20).
51. 古野朗子, 他; 東京電力福島第一原発事故後のリスクコミュニケーションの実践ー内部被ばく検査を受検した福島県民の意識ー, JAEA-Review 2014-022 (2014).
52. 大津留晶, 宮崎真; <総説>東京電力福島第一原子力発電所事故後の福島県内の状況と取り組み, 保健医療科学, **62**, 132-137 (2013).
53. M. Tsubokura *et al.*; Internal radiation exposure after the Fukushima Nuclear Power Plant Disaster, *JAMA*, **308**, 669-670 (2012).
54. 福島県南相馬市; 内部被ばく検診結果, <http://www.city.minamisoma.lg.jp/index.cfm/10,0,61,344,html> (Accessed on 2016/03/20).
55. R. S. Hayano *et al.*; Internal radiocesium contamination of adults and children in Fukushima 7 to 20 months after the Fukushima NPP accident as measured by extensive whole-body surveys, *Proc. Jpn. Acad. Ser. B Phys.Biol. Sci.*, **89(4)**, 157-163 (2013).
56. N. Matsuda *et al.*; Assessment of internal exposure doses in Fukushima by whole body counter within one month after the nuclear power plant accident, *Radiat. Res.*, **179**, 663-668 (2013).
57. N. Matsuda *et al.*; Internal radioactivity of temporary residents in Fukushima within one year after the radiological accident, *J. Environ. Occup. Sci.*, **2**, 123-130 (2013).
58. 日本工業標準調査会(JISC)HP, 工業標準化について, <https://www.jisc.go.jp/std/> (Accessed on 2016/03/20).
59. G. H. Kramer and K. G. W. Inn.; A summary of the proceedings of the workshop on standard phantoms for in vivo radioactivity measurement, *Health Phys.*, **61**, 893-894 (1991).
60. T. Nakagawa *et al.*; In-vivo measurements for small children using standing-type whole body counters in Fukushima. IM-2015, April 20-24, 2015 Bruges, Belgium (2015).

別添1 福島県内のWBC設置状況等

別表1 福島県内のWBC設置状況等

(2014年11月17日現在)

| | 設置者, 設置場所等 | | 製造元 | ジオメトリ | 導入時期 |
|-----------|------------|--------------------|----------------|----------|-----------|
| 福島県 | 車載1 | — | キャンベラ | 立位 | H23.11.21 |
| | 車載2 | — | キャンベラ | 立位 | H23.12.23 |
| | 車載3 | — | キャンベラ | 立位 | H23.12.23 |
| | 車載4 | — | キャンベラ | 立位 | H24.1.18 |
| | 車載5 | — | キャンベラ | 立位 | H24.1.26 |
| | 車載6 | — | キャンベラ | 立位 | H24.3.12 |
| | 車載7 | — | キャンベラ | 立位 | H24.12.5 |
| | 車載8 | — | キャンベラ | 立位 | H25.7.31 |
| 小計8台 | | | | | |
| 福島市 | 車載1 | 福島市保健福祉センター | キャンベラ | 立位 | H24.2.27 |
| | 車載2 | 〃 | キャンベラ | 立位 | H25.8.29 |
| 二本松市 | 据置1 | 二本松市放射線被ばくセンター | 安西メディカル | 椅子 | H23.11.10 |
| | 据置2 | 〃 | ウクライ製 ANTIDOZA | 椅子 | H25.3.22 |
| 伊達市 | 据置1 | なかのクリニック (旧: 中野病院) | キャンベラ | 立位 | H24.8.10 |
| | 据置2 | 伊達市梁川病院 | キャンベラ | 立位 | H24.8.22 |
| 本宮市 | 据置 | 本宮市元いきいき応援プラザ「えぼか」 | 富士電機 | 椅子 | H23.12.1 |
| 桑折町 | 据置 | 桑折町保健福祉センターやすらぎ園 | 富士電機 | 椅子 | H24.3.15 |
| 川俣町 | 据置 | 済生会春日診療所 | キャンベラ | 立位 | H25.1.10 |
| 郡山市 | 据置1 | 郡山市保健所放射線健康管理センター | キャンベラ | 立位 | H24.6.7 |
| | 据置2 | 〃 | 日立アロカ | 椅子 | H24.6.7 |
| | 据置3 | 〃 | 富士電機 | 椅子 | H24.10.25 |
| | 据置4 | 〃 | キャンベラ | 立位 | H25.7.5 |
| 公立岩瀬病院企業団 | 車載 | | キャンベラ | 立位 | H24.9.3 |
| 田村市 | 据置 | 田村市放射線健康管理センター | キャンベラ | 立位 | H24.6.11 |
| 小野町等企業団 | 据置 | 公立小野町地方総合病院 | キャンベラ | 立位 | H25.1.15 |
| 白河市 | 据置 | 白河厚生総合病院 | キャンベラ | 立位 | H25.5.26 |
| 相馬市 | 据置1 | 相馬中央病院 | キャンベラ | 立位 | H24.6.11 |
| | 据置2 | 公立相馬総合病院 | キャンベラ | 立位 | H25.2.6 |
| 南相馬市 | 据置1 | 南相馬市立総合病院 | キャンベラ | 立位 | H23.9.26 |
| | 据置2 | 〃 | キャンベラ | 立位 | H24.9.1 |
| | 据置3 | 〃 | キャンベラ | BABYSCAN | H26.6.30 |
| 広野町 | 据置 | 広野町保健センター | キャンベラ | 立位 | H25.6.4 |
| 檜葉町 | 据置 | JFA メディカルセンター | キャンベラ | 立位 | H25.6.16 |
| 双葉町 | 据置 | 双葉町いわき事務所 | キャンベラ | 立位 | H25.6.30 |

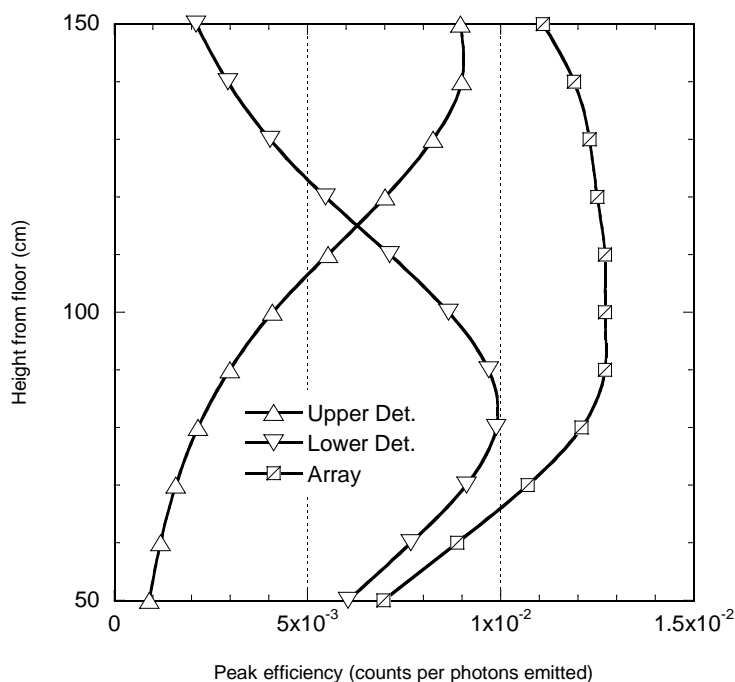
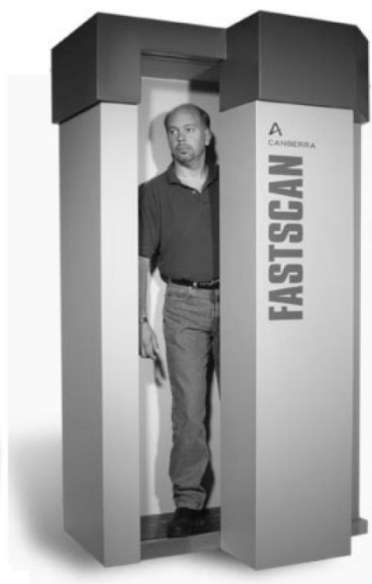
| | | | | | |
|------------------------|------|------------------|---------|----------|-----------|
| 浪江町 | 据置 | 浪江町仮設診療所（二本松市） | キャンベラ | 立位 | H.24.4.26 |
| 飯舘村 | 据置 | あづま脳神経外科病院 | キャンベラ | 立位 | H24.8.1 |
| いわき市 | 据置 1 | いわき好間コミュニティ検診プラザ | キャンベラ | 立位 | H24.5.11 |
| | 据置 2 | いわき市総合保健福祉センター | キャンベラ | 立位 | H24.5.31 |
| 小計 29 台 | | | | | |
| (福島県による精度確認済のもののみ計上) | | | | | |
| 民間 | 据置 1 | 福島県労働保健センター | 安西メディカル | 椅子 | H23.11 |
| | 据置 2 | 〃 | キャンベラ | 立位 | H24.9.10 |
| | 据置 3 | 〃 | キャンベラ | 立位 | H24.9.10 |
| | 据置 1 | ひらた中央病院 | キャンベラ | 立位 | H23.10.17 |
| | 据置 2 | ひらた中央病院 | キャンベラ | 立位 | H24.6 |
| | 据置 3 | ひらた中央病院 | キャンベラ | BABYSCAN | H25.12 |
| | 据置 | 福島赤十字病院 | キャンベラ | 立位 | H24.4.9 |
| | 据置 1 | 常盤病院 | キャンベラ | 立位 | H24.5.12 |
| | 据置 2 | 〃 | キャンベラ | BABYSCAN | H26.5 |
| | 据置 | 渡辺病院 | 日立アロカ | 椅子 | H24.7 |
| | 据置 | 馬場医院 | キャンベラ | 立位 | H24.9 |
| | 据置 | わたり病院 | キャンベラ | 立位 | H26.1 |
| 小計 12 台 | | | | | |
| (市町村から委託等を受けているもののみ計上) | | | | | |
| 合計 49 台 | | | | | |

福島県の許可を得て掲載。

別添 2 FASTSCAN の検出特性

1. ポイント線源を用いた計数効率の位置依存性

FASTSCAN の被検者背部側の壁面に、垂直方向に直列する 2 式の NaI(Tl) 検出器の中心軸に対向した位置に配置したポイント線源 (^{137}Cs) に対する計数効率を、床面からの高さを 50 cm から 150 cm の範囲で 10 cm 刻みで変えながら取得した (別図 1)。個々の NaI(Tl) 検出器の計数効率は、ポイント線源がそれぞれの検出器の中心高さ付近にある場合に最大となり、中心高さから離れるに伴い減少してゆくが、2 式の NaI(Tl) 検出器の計数効率を合算した応答は成人被検者の体幹部をほぼカバーする範囲で一定となり (同図中の Array), 高さ 80 cm から 140 cm までの計数効率の変化は 3% 以内であった [60]。



別図 1 ポイント線源 (^{137}Cs) に対する計数効率の位置依存性 [60]

2. 成人男性 BOMAB ファントムの部位別相対計数効率

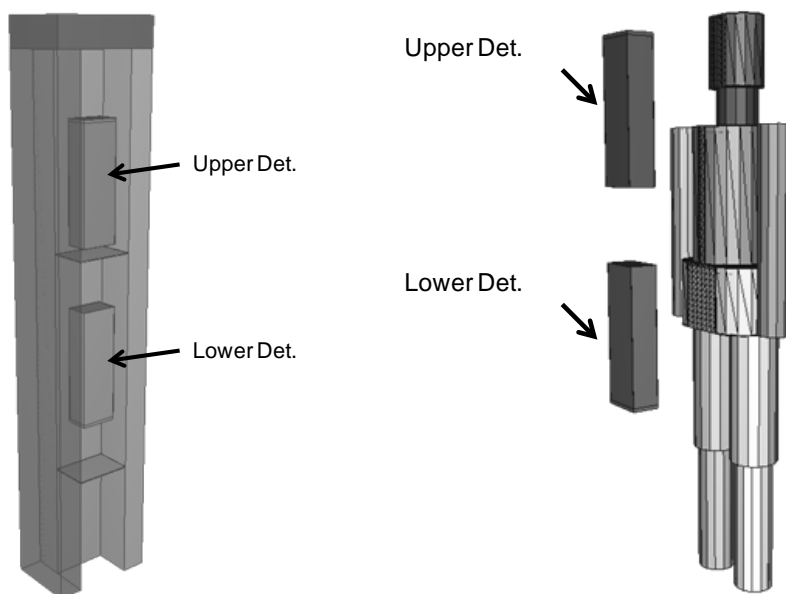
成人男性の体格を模擬した BOMAB ファントム (全長 175 cm, 重量 66 kg) に対する計数効率 (実測値) を約 10% 以内で再現する MCNP5 による数値シミュレーションモデル (別図 2) を用いて、同ファントムの部位別相対計数効率を次式により算出した。

$$R_{i,j} = \frac{A_{i,j} \cdot \varepsilon_{i,j}}{\sum_j A_{i,j} \cdot \varepsilon_{i,j}} \quad \dots(A)$$

ここで、 $R_{i,j}$ は核種 i , 部位 j に対する部位別相対計数効率, $A_{i,j}$ は部位 j に封入された核種 i の放射能, $\varepsilon_{i,j}$ は核種 i , 部位 j に対する着目ピークに対する計数効率である。 $\varepsilon_{i,j}$ は数値シミュレーションにより計算される。

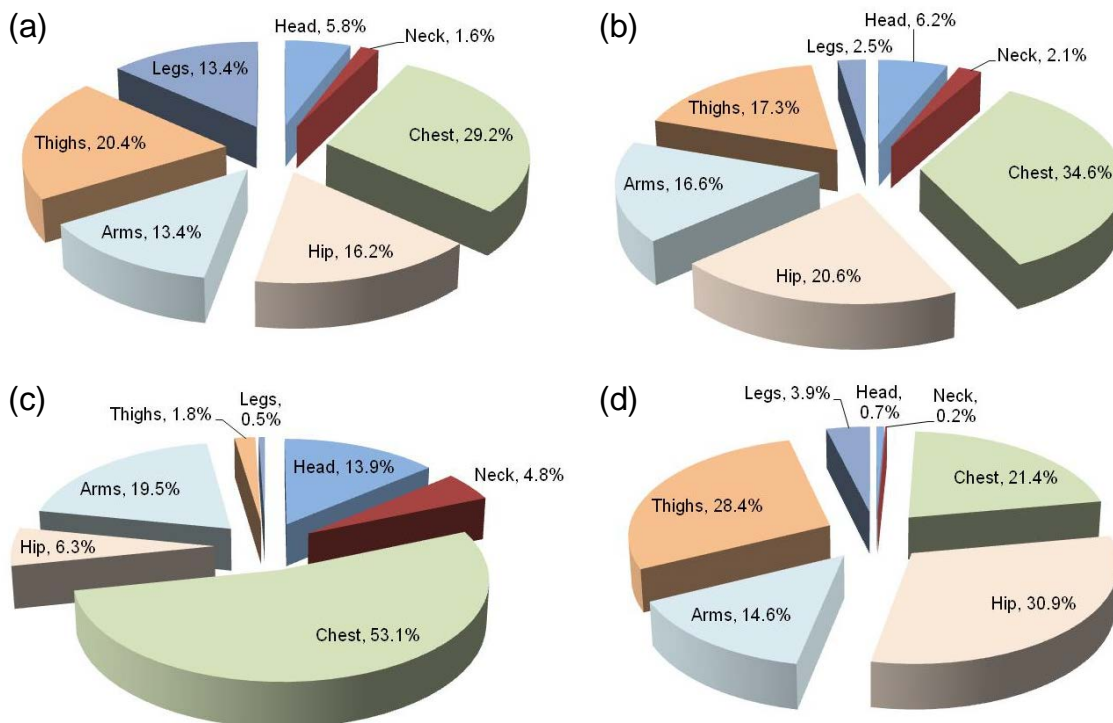
BOMAB ファントムの部位別相対計数効率 (^{137}Cs : 662 keV) を別図 3 に示す。同図には、BOMAB ファントム各部位の放射能比も比較のため示しており、検出器アレイ (2 式の検出器を 1 ユニットとする) の部位別

相対計数効率に近い関係が得られている。



別図2 数値シミュレーションモデル

(左：FASTSCAN の Detector Column, 右：BOMAB ファントムと NaI(Tl)検出器)

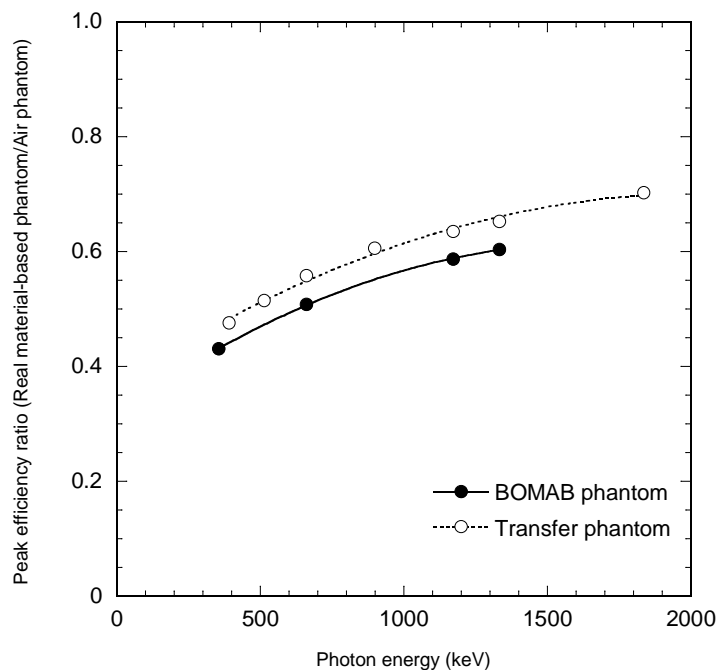


別図3 BOMAB ファントムの部位別相対効率

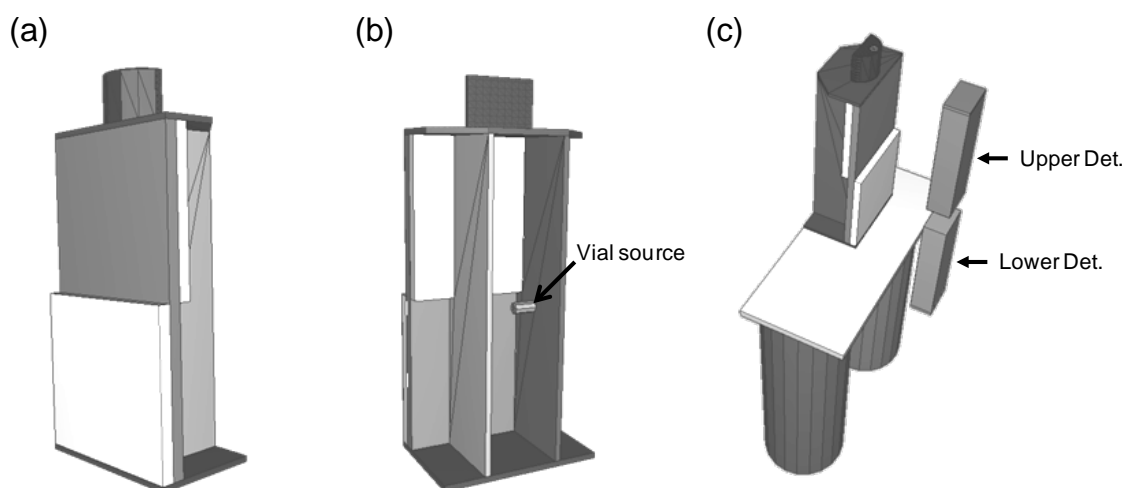
(a) 放射能比, (b) 検出器アレイ, (c) 検出器(上), (d) 検出器(下)

3. BOMAB ファントムと Transfer ファントムの自己吸収の比較

数値シミュレーションモデルを用いて得られた両ファントムの計数効率を、元のファントムの材質から空気 ($1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$) に置き換えた場合の計数効率で除し、各ファントムの自己吸収を算出した結果を別図 4 に示す。 ^{137}Cs (662 keV) に対する自己吸収は、BOMAB ファントムで 0.51, Transfer ファントムで 0.56 であり、両ファントムで類似した結果が得られた。別図 5 には、Transfer ファントムの数値シミュレーションモデルを示した。



別図 4 BOMAB ファントムと Transfer ファントムの自己吸収の比較



別図 5 Transfer ファントムの数値シミュレーションモデル

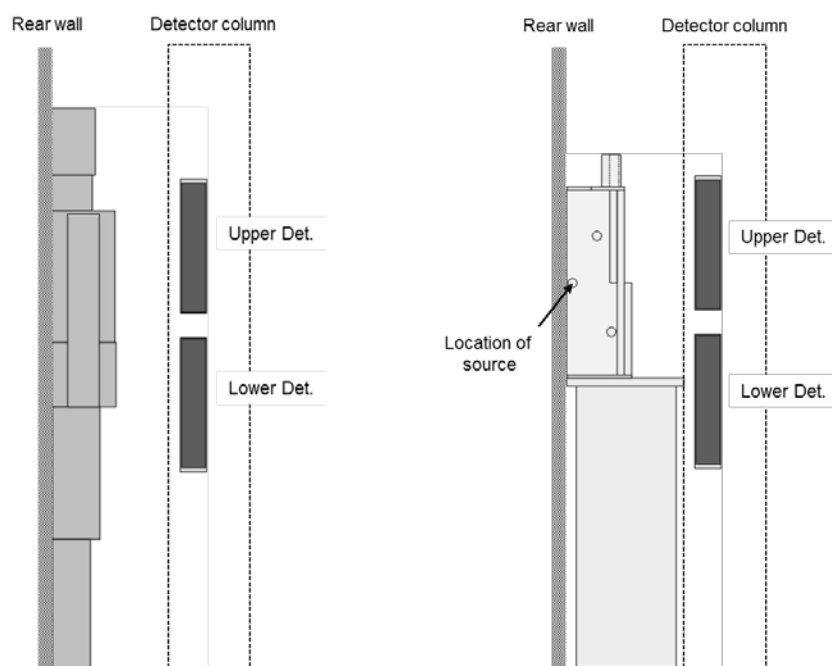
(a) 前面, (b) 背面, (c) FASTSCAN 内での設置状況 (ファントムベース含む)

4. BOMAB ファントムと Transfer ファントムの計数効率の比較

Transfer ファントムの所定の位置に 20 ml バイアル形状（アクティブボリュームは 12 ml）の混合核種線源（ ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{88}Y , ^{60}Co ）をセットし得られた計数効率を BOMAB ファントム（成人男性）の計数効率と比較した（別表 1，報告書本文中の図 7 を表にしたもの）。ただし，混合核種線源の幾つかの核種は物理半減期が短いため実験時点で検出が困難であったため，同表には記載していない。別図 6 には，両ファントムの測定ジオメトリを示した。検出器アレイとしての計数効率は両ファントム間で大きな差はないが，検出器(上)と検出器(下)の計数効率の比は両ファントムで異なる。 ^{137}Cs (662 keV) の場合 BOMAB ファントムが 4(上):6(下)にあるのに対し，Transfer ファントムは 6(上):4(下)であった。これは，Transfer ファントム設置時における混合核種線源の床面から高さが 121.5 cm であり，検出器(下)よりも検出器(上)の方が近接しているためである。

別表 1 BOMAB ファントムと Transfer ファントムの計数効率の比較

| Photon energy (keV) | Transfer ファントム | BOMAB ファントム | Transfer/BOMAB |
|---------------------------|----------------|-------------|----------------|
| 356 (^{133}Ba) | --- | 7.09E-03 | --- |
| 392 (^{113}Sn) | 6.29E-03 | --- | --- |
| 514 (^{85}Sr) | 6.72E-03 | --- | --- |
| 662 (^{137}Cs) | 6.49E-03 | 7.10E-03 | 0.914 |
| 898 (^{88}Y) | 5.81E-03 | --- | --- |
| 1173 (^{60}Co) | 4.68E-03 | 5.29E-03 | 0.885 |
| 1333 (^{60}Co) | 4.69E-03 | 5.10E-03 | 0.920 |
| 1836 (^{88}Y) | 4.22E-03 | --- | --- |

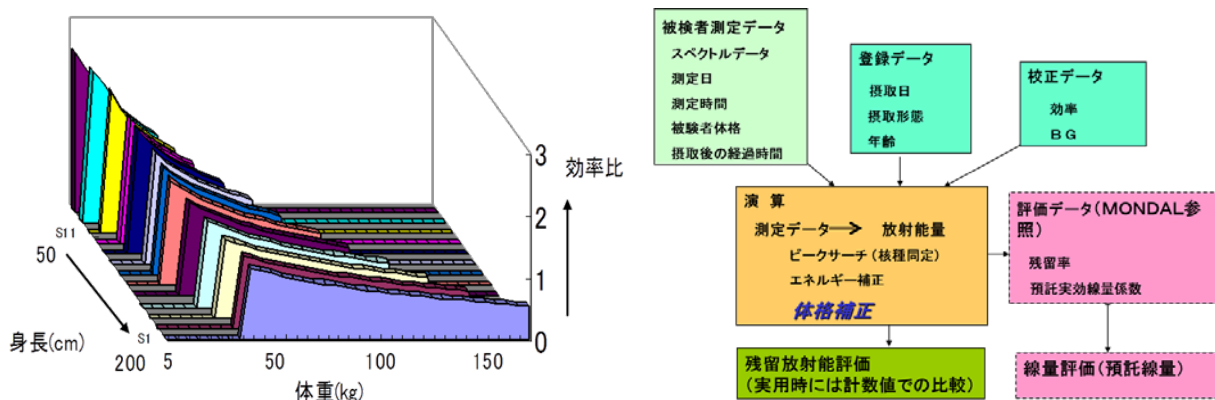


別図 6 BOMAB ファントムと Transfer ファントムの測定ジオメトリ

別添 3 富士電機製 WBC の体格補正等

富士電機製の座位型 WBC は、機器の設置場所の省スペース化を図る観点から、WBC 本体と甲状腺モニタを一体化した。前者の検出部には角柱型 (3" × 5" × 16") NaI(Tl)シンチレーション検出器 2 式を、後者には円筒形の遮へい体を備えた円柱型 (2"φ × 2") NaI(Tl)シンチレーション検出器 1 式を備えており、全身と甲状腺の同時計測が可能である。全身用の 2 式の検出器からの信号は合成され、全身計測及び甲状腺計測の波高スペクトルが独立して得られる。波高スペクトルのチャンネル数はどちらも 1000 である。波高スペクトルの解析は、核種ライブラリに登録した核種に対して自動ピークサーチを行った後、ピーク面積から検出核種の体内放射能を算出する。

全身計測用の角柱型 NaI(Tl)シンチレーション検出器については、コリメートした ^{137}Cs 線源を用いて長軸方向の感度分布試験を行い、±2%以内に収まることを確認している。WBC の計数効率の基準には、放医研所有の成人男性ファントム (本報告書 9 頁参照) を使用し、富士電機所有のワーキングファントムとの相対レスポンスを評価している。被検者の体格に応じた計数効率の補正は、身長及び体重をパラメータとしたファントムモデルを用い、モンテカルロシミュレーション (EGS4) により求めた (計数) 効率比をデータ処理装置に組み込んでいる (別図 7)。また、バックグラウンドについては、成人または子どもの体幹部を模擬した水ブロックファントムを数体用い、被検者の体格に応じたバックグラウンドデータを設定できる (別図 8)。



別図 7 富士電機製 WBC の体格補正法

成人標準体型水ファントム



子供相当水ファントム



別図 8 バックグラウンド用水ブロックファントム

別添 4 その他のソフトウェアによる波高スペクトルの解析

他社のソフトウェアでは、NaI(Tl)シンチレーション検出器の波高スペクトル解析に2階微分法を用いてピーク同定するものもある。本報告書（第4章4-3-3）波高スペクトルの解析）でも述べられているように、2階微分法による ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の検出感度はライブラリ法と比較するとやや低いことが知られている。これは、波高スペクトルの2階微分値を計算する際、隣接するピークに影響して、着目ピークの周辺チャンネルでの2階微分値が低くなる場合があることが原因と考えられる。一例として、隣接する ^{134}Cs の605 keVのピークが影響し、 ^{137}Cs の662 keVのピークが同定できなかった波高スペクトルの解析結果を別図9に示す。同様な現象はNaI(Tl)シンチレーション検出器の波高スペクトルに限るものではなく、ピークが隣接する状況ではHPGe検出器の波高スペクトルでも発生しうる。

したがって、2階微分法をピーク同定に使用するソフトウェアでは、この事象に対して何らかの対策をとる必要がある。その際、考えられる対策としては、①ピークの目視、②関数適合による剰余サーチ、③同定し難いピークライブラリ登録などの方法が考えられる。以下に各方法について補足する。

① ピークの目視

この方法は、文字通り、ユーザーが波高スペクトルを目で見確認する方法である。ソフトウェアが目視にて明らかに存在するピークを同定できなかった場合、そのピークの関心領域を手動で設定し、ピーク面積を計算する。これは、GENIE-2KのIPF (Interactive Peak Fit) 等を用いて行うことが出来る。この方法の効果は比較的高いものの、ソフトウェアによる波高スペクトルの解析を中断させてしまうことや、ユーザーの熟練度によって解析結果が変わる可能性があるのが欠点である。

② 関数適合による剰余サーチ

この方法は、ピークサーチを実行した後に関数適合を行い、適合関数と波高スペクトルの計数値の差が大きいチャンネルにピークを挿入する方法であり、①の方法をソフトウェア上で自動化したものと言える。この処理が行えるソフトウェアとしては、GENIE-2K(Non-Liner LSQ FitやResidual Search)やCanberra Japan社製のガンマエクスペローラ（剰余サーチ）等がある。この方法は、ユーザーによる介入やライブラリへの事前登録を必要とせず汎用性が高い。しかし当然ながら、関数適合をするには十分な計数値が必要であり、そうでない場合は、波高スペクトルのチャンネル数を圧縮する等の対応も考えられる。

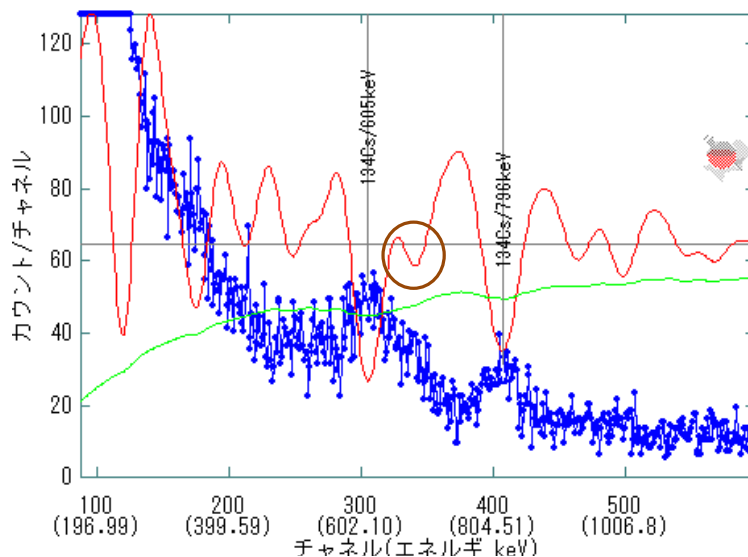
③ 同定し難いピークのライブラリ登録

この方法は、2階微分法で同定し難いピークをライブラリに事前に登録する方法である。本質的には本報告書で解説したライブラリ法と同じであるが、通常のピークサーチ（2階微分法）の核種同定結果を参照するため、相互に関連する複数のピークの同定を効率的に行うことが可能であり、①と②の方法と比べて偽ピークの同定を極力防ぐことが出来る。しかしながら、測定系のゲイン変動の影響を受けやすいため、細目にエネルギー校正を確認する必要がある。別図10に適用例を示す（同図の波高スペクトルは別図9のものと同じである）。解析の処理フローは次のとおりである。

- 2階微分法によるピークサーチにおいて、 ^{137}Cs の662 keVのピークが同定できなかったことを確認。
- ライブラリに登録した γ 線エネルギー（662 keV）をチャンネル変換し、関数適合を行うピーク位置を設定。
- 隣接するピークを含めて、非線形最小二乗法による関数適合を実行。

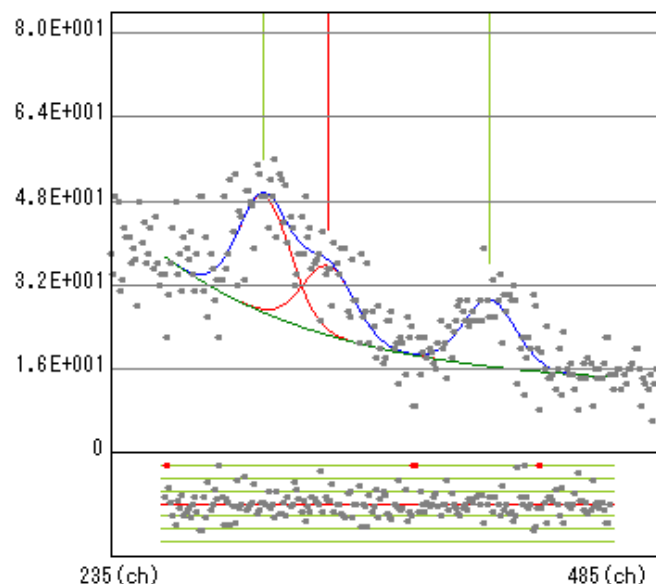
- 追加したピークの高さ、半値幅、関数適合度等を検証し、ピークネット面積とその統計誤差を計算。有意なピークであることを確認。

以上の方法にはそれぞれ一長一短があり、どれが最善ということではない。使用する機器（ハードウェア/ソフトウェア）の仕様や利用者の運用上の利便性等を考慮して、適切な方法を選定するのが良いと思われる。



別図9 2階微分法による波高スペクトルの解析例

セイコー・イージーアンドジー社製スペクトルナビゲータで出力。図中の赤線が2階微分値、緑線がピーク同定のしきい値（サーチ感度を3.0に設定）。図中の丸印は ^{137}Cs の662 keVの付近の2階微分値に対応する。なお、2階微分値の計算には平滑化フィルタ²¹を使用。



別図10 同定し難いピークのライブラリ登録による方法を適用した例

図中の赤色のラインが ^{137}Cs のピーク位置（662 keV）に対応

²¹ 科学技術庁（現文部科学省）放射能測定法シリーズ7 ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリ（平成4年改訂）

付録 A ANSI/HPS N13.35-1999 Specifications for the Bottle Manikin Absorption Phantom の要約

BOMAB ファントムの各部位は、殻 (Shell) となる容器とこれに充填する組織等価物質から構成される。ファントムを構成する物質は、人体軟組織中の高エネルギー光子 (200 keV から 3 MeV) の放射線相互作用を再現するものでなければならない。候補となる物質は、容器が高密度ポリエチレン (密度は $0.940 \text{ g/cm}^3 \sim 0.965 \text{ g/cm}^3$ のもの)、充填物質がポリエチレン、 CaCO_3 等添加ポリウレタン、水である。いずれも物質の密度は規定されており、容器が $0.950 \text{ g/cm}^3 \pm 5\%$ 、充填物質は $1.005 \text{ g/cm}^3 \pm 5\%$ である。付表 1 に平均軟組織及び人体等価物質の質量減弱係数を示す。付表 2 には、最小検出可能放射能 (MDA: Minimum Detectable Activity) の評価に用いるファントムに封入するカリウム量を示す。

付表 1 平均軟組織及び人体等価物質の質量減弱係数

| 光子エネルギー MeV | 軟組織 | ポリエチレン | ポリウレタン | | 水 |
|--------------------|----------|----------|-----------------|-------------------------|----------|
| | | | CaCO_3 | Bi_2O_3 | |
| m ² /kg | | | | | |
| 0.2 | 1.36E-02 | 1.40E-02 | 1.34E-02 | 1.41E-02 | 1.37E-02 |
| 0.5 | 9.62E-03 | 9.95E-03 | 9.50E-03 | 9.46E-03 | 9.69E-03 |
| 1.0 | 7.02E-03 | 7.26E-03 | 6.93E-03 | 6.87E-03 | 7.07E-03 |
| 1.5 | 5.72E-03 | 5.91E-03 | 5.64E-03 | 5.58E-03 | 5.76E-03 |
| 2.0 | 4.91E-03 | 5.06E-03 | 4.84E-03 | 4.84E-03 | 4.94E-03 |
| 2.5 | 4.34E-03 | 4.48E-03 | 4.30E-03 | 4.20E-03 | 4.40E-03 |
| 3.0 | 3.94E-03 | 4.04E-03 | 3.88E-03 | 3.84E-03 | 3.97E-03 |

※ ANSI/HPS N13.35-1999 Table 1 を翻訳し転載。

付表 2 BOMAB ファントム中のカリウム量

| ファントムタイプ | カリウム量(g) |
|----------|--------------|
| 4 歳児 | 30 ± 3 |
| 10 歳児 | 60 ± 6 |
| 標準女性 | 100 ± 10 |
| 標準男性 | 140 ± 14 |
| 95% 男性 | 190 ± 19 |

※ ANSI/HPS N13.35-1999 Table 2 を翻訳し転載。

BOMAB ファントムの形状は、付表 3 に示す年齢毎の身長・体重の参考値に基づき、付表 4 から付表 8 に与えられる。同表に示すのは、標準 4 歳児、標準 10 歳児、標準成人女性 (5 分の 1 成人男性)、標準成人男性、95 パーセントイル成人男性を模擬した各ファントムの部位の殻の形状である。腕、大腿、下肢及び頸部は円柱であり、頭部、胸部、腹部は楕円柱である。誤差の許容範囲は、容器の厚さは $0.5 \text{ cm} \pm 5\%$ 、各容器及び全容器の体積は 10% 以内、(各部位組み合わせ時の) ファントムの全長及び重量はそれぞれ 5% 以内と 10% 以内と定められている。

付表3 各年齢の標準人の身長・体重

| 年齢 | 1歳児 | 5歳児 | 10歳児 | 成人女性 | 成人男性 | 95%男性 |
|-------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 身長±1SD (cm) | 76 ± 0.7 | 109 ± 0.9 | 136 ± 2.3 | 163 ± 4.0 | 175 ± 4.3 | 185 ± 4.6 |
| 体重±1SD (kg) | 10 ± 0.3 | 18 ± 0.6 | 31 ± 1.9 | 59 ± 1.1 | 70 ± 3.6 | 77 ± 3.9 |

※ ANSI/HPS N13.35-1999 Table 3 を翻訳し転載。

付表4 標準4歳児 BOMAB ファントムの形状

| 部位 | 短径(cm) | 長径(cm) | 高さ(cm) | 内容体積(cc) |
|----|--------|--------|--------|----------|
| 頭部 | 9.4 | 12.2 | 12.2 | 840 |
| 頸部 | 8.4 | 8.4 | 6.8 | 250 |
| 胸部 | 13.2 | 19.1 | 25.6 | 4300 |
| 腹部 | 12.5 | 23.1 | 12.5 | 2300 |
| 大腿 | 9.8 | 9.8 | 24.5 | 1490 |
| 下肢 | 8.0 | 8.0 | 24.6 | 920 |
| 腕 | 6.1 | 6.1 | 35.8 | 730 |

※ ANSI/HPS N13.35-1999 Table 4 を翻訳し転載。

付表5 標準10歳児 BOMAB ファントムの形状

| 部位 | 短径(cm) | 長径(cm) | 高さ(cm) | 内容体積(cc) |
|----|--------|--------|--------|----------|
| 頭部 | 11.4 | 14.8 | 16.3 | 1740 |
| 頸部 | 10.5 | 10.5 | 8.9 | 560 |
| 胸部 | 16 | 23.3 | 34 | 8730 |
| 腹部 | 15.2 | 28.2 | 16.5 | 4760 |
| 大腿 | 12 | 12 | 33.5 | 3100 |
| 下肢 | 9.4 | 9.4 | 32.8 | 1780 |
| 腕 | 7.5 | 7.5 | 45.9 | 1520 |

※ ANSI/HPS N13.35-1999 Table 5 を翻訳し転載。

付表6 標準成人女性 BOMAB ファントムの形状

| 部位 | 短径(cm) | 長径(cm) | 高さ(cm) | 内容体積(cc) |
|----|--------|--------|--------|----------|
| 頭部 | 13 | 17.5 | 18 | 1670 |
| 頸部 | 12 | 12 | 9 | 780 |
| 胸部 | 18 | 28 | 39 | 13850 |
| 腹部 | 16 | 30 | 19 | 6230 |
| 大腿 | 13.5 | 13.5 | 38 | 4570 |
| 下肢 | 10 | 10 | 38 | 2380 |
| 腕 | 8.5 | 8.5 | 52 | 2280 |

※ ANSI/HPS N13.35-1999 Table 6 を翻訳し転載。

付表 7 標準成人男性 BOMAB ファントムの形状

| 部位 | 短径(cm) | 長径(cm) | 高さ(cm) | 内容体積(cc) |
|----|--------|--------|--------|----------|
| 頭部 | 14 | 19 | 20 | 3500 |
| 頸部 | 13 | 13 | 10 | 1050 |
| 胸部 | 20 | 30 | 40 | 17000 |
| 腹部 | 20 | 36 | 20 | 9990 |
| 大腿 | 15 | 15 | 40 | 6060 |
| 下肢 | 12 | 12 | 40 | 3740 |
| 腕 | 10 | 10 | 60 | 3790 |

※ ANSI/HPS N13.35-1999 Table 7 を翻訳し転載。

付表 8 95 パーセンタイル男性 BOMAB ファントムの形状

| 部位 | 短径(cm) | 長径(cm) | 高さ(cm) | 内容体積(cc) |
|----|--------|--------|--------|----------|
| 頭部 | 15 | 21 | 22 | 4600 |
| 頸部 | 14 | 14 | 11 | 1400 |
| 胸部 | 22 | 32 | 43 | 21000 |
| 腹部 | 22 | 39 | 22 | 13000 |
| 大腿 | 16 | 16 | 43 | 7300 |
| 下肢 | 13 | 13 | 43 | 4800 |
| 腕 | 11 | 11 | 65 | 5200 |

※ ANSI/HPS N13.35-1999 Table8 を翻訳し転載。

付録 B 活動記録

○ 第 1 回専門研究会会合

日 時：平成 24 年 8 月 30 日 13:30~17:30

場 所：放射線医学総合研究所・重粒子治療推進棟セミナー室

出席者：委員 26 名，オブザーバー 14 名

○ 第 2 回専門研究会会合

日 時：平成 26 年 2 月 28 日 14:00~17:30

場 所：東京大学工学部 8 号館 502 号室

出席者：委員 17 名，オブザーバー 7 名

補遺 日本工業規格 JIS Z4343「体内放射能測定装置－ γ 線放出核種(エネルギー100 keV 以上 3000 keV 以下)」の制定について

平成 25 年度に一般社団法人日本電気計測器工業会を事務局として原案作成が行われた，体外計測器に係る日本工業規格（JIS）が，平成 27 年 10 月 20 日付で制定された。本 JIS は 100keV から 3,000keV の γ 線放出核種の放射能測定に関わる要求性能や試験方法等が標準化されており，IEC61582:2004 "Radiation protection instrumentation - In vivo counters - Classification, general requirements and test procedures for portable, transportable and installed equipment"を対応国際規格としている。なお，工業製品に係る標準であるという JIS の性質から，装置の校正及び維持管理方法、スペクトル解析方法、測定結果の取り扱い（内部被ばく線量評価を含む）等は規格の範囲外である。