

# 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

## Study on advancement of *in vivo* counting using mathematical simulation

日本原子力研究所 東海研究所  
保健物理部 内部被ばく防護研究室  
木名瀬 栄

本研究では、ICRP1990年勧告の要件である内部被ばく線量測定に必要な精度、摂取時期不明などを起因とする不確かさファクター3を満たした高精度体外計測法の確立を目的として、モンテカルロ法を用いた計算シミュレーションによる体外計測装置の数学的校正手法を開発するとともに、体外計測装置校正の体格依存性補正法の開発、体外計測装置による体内放射能評価の不確かさ解析を行った。開発した数学的校正手法は、被検者について多種多様な人体形状、放射能分布の模擬を容易にし、放射能を含有した人体形状模型である物理ファントムを要さない体外計測装置の校正を可能にした。また、数学的校正手法を用いて、体外計測装置校正に係る体格依存性補正法を開発し、体表面積を補正因子とした体格補正式を考案した。さらに、実測および計算シミュレーションにより、体外計測装置による体内放射能評価の不確かさについて解析し、体内放射能評価の不確かさにおいて体内放射能分布による体外計測装置計数効率の変動などが大きく影響することを明らかにした。

### 1. はじめに

内部被ばくによる預託実効線量の評価には、個人が摂取した放射能（摂取量）を測定評価する必要がある。その測定評価に関する方法は、体外計測法、バイオアッセイ法および空気中放射性物質濃度からの計算法の3つに大別され、内部被ばくモニタリングにおいては、摂取する放射性物質の種類や放射能測定にかかる労力と経費を考慮して適用される。尿や糞などの排泄物中の放射能を評価するバイオアッセイ法や空気中の放射能を評価する計算法に比べ、体内に沈着する放射性物質から放出される光子を体外で直接検出することにより体内放射能を直接的に測定する体外計測法は、放射能測定に多大な労力と費用が必要となる。しかし、体外計測法は、体内に残留する放射能を直接モニタリングするこ

とができる長所があり、光子を放出する放射性核種に対しては評価精度が高く、放射性物質の体内分布や経時変化も評価できる有効な体内放射能測定方法である。

放射線防護分野における体外計測法には、主な装置として、全身カウンタ、甲状腺よう素モニタおよび肺モニタなどがあり、使用目的に応じて開発されてきた。全身カウンタは全身負荷量および放射性物質の体内分布測定を目的としたもの、甲状腺よう素モニタは甲状腺に沈着した放射性よう素測定を目的としたもの、肺モニタはプルトニウムなどから放出される低エネルギー光子測定より肺負荷量を推定することを目的としたものである。日常の測定においては、全身中の負荷量を決定すれば、放射線防護の目的には多くの場合十分であるため、全身カウンタが一般的に利用

されている。放射線防護における体外計測法の要件は、放射線防護・安全に関する基本的な考え方や線量限度などの放射線防護で用いる基本的な基準値などを勧告してきた国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection : ICRP) の刊行物 (ICRP Publication 10<sup>1)</sup>、Publication 54<sup>2)</sup>、Publication 78<sup>3)</sup>) や 国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency : IAEA) の刊行物<sup>4-6)</sup> に記述されている。体外計測法は、放射性核種の摂取に関する個人モニタリングの有効手段として、体内放射能を測定評価するために用いられ、その評価結果である負荷量は放射線防護上、摂取量、預託等価線量あるいは預託実効線量に換算して解釈される。したがって、体外計測法による測定精度は、身体に入った放射能の摂取量とそれに関連した線量の不確かさに関係する。ICRP1990年勧告 (ICRP Publication 60<sup>7)</sup>) によると、預託等価線量は、体内に取り込まれた後に複数の組織・臓器に分布している放射性核種から放出される放射線により、1つの組織・臓器が受ける吸収線量に、線質に係る放射線荷重係数を乗じて得られるものであり、預託実効線量は、各組織・臓器の等価線量に組織荷重係数を乗じて身体のすべての組織・臓器について加算したものと定義される。その預託期間は、放射能を摂取した時点から、放射線作業者が50年間、公衆が70歳までである。摂取量および線量推定は、評価する放射性核種に対し標準人体内動態モデルや呼吸気道モデルなど<sup>8-12)</sup>を用いて、体外計測法によって評価された負荷量を基に行われ、少なくともファクター3の不確かさを認めなければならないとしている。したがって、体外計測法は、摂取量や線量推定に用いる放射性核種の標準人体内動態モデルなどの不確かさを考慮し、評価量の不確かさをファクター3より小さくするように、開発されなければならない。全身カウンタに代表される体外計測法は、

事故時の体内放射性核種の同定や負荷量定量測定、フォールアウトによる体内負荷量の測定など、放射線防護分野を中心に利用され、放射線防護上要求される測定精度を担保できるように開発が続けられてきた。理想的な全身カウンタは、放射性核種が身体のいずれの部位に局在している場合でも同一の測定感度および検出効率で測定できる装置であるが、放射性核種の同定に必要なエネルギー分解能の確保、幾何学的検出効率の均一性に関する検出器固有の問題、検出器配置に係る重遮蔽体内スペースの制限、校正用物理ファントムの数・種類の制約などにより、現実的には開発が困難である。そこで、全身カウンタに関する体外計測法の開発は、被検者の体軸方向の測定感度を一定にするなどの検出器配置の工夫を行うとともに、被検者の体格に合うような幾何形状をしたアクリル樹脂製容器からなるリアリスティック人体形状全身校正用物理ファントム<sup>13)</sup>が開発されてきた。

近年、コンピュータのめざましい発達により、計算シミュレーション手法を用いて、既存の体外計測法を大きく進展させることが可能になってきた。形状や組成を容易に変化させることができる数学ファントムを用いた柔軟な計算解析と、これまでに得られてきた検出器配置の工夫などの知見を融合することにより、高精度体外計測法の確立ができるようになった。本研究では、この点に着目し、体外計測法の測定精度向上を図るため、日本原子力研究所東海研究所 (原研東海研) の全身カウンタを対象にして数学的校正手法を開発し、実測ができない条件下でも校正を可能にするとともに、全身カウンタの体格依存性補正法を開発した。また、全身カウンタの測定に係る不確かさ因子を抽出し、実測および計算シミュレーションにより、体内負荷量評価結果の不確かさを解析した。さらに、ゲルマニウム (Ge) 半導体検出器や人体を数値により正確に表現するボクセルファントムを用い

た数学的校正手法を開発し、被検者個人毎の体内放射能測定法を確立した。

## 2. 数学的校正手法の開発

原子力施設などの全身カウンタによる内部被ばくモニタリングでは、光子を放出する様々な放射性核種を測定対象とする。体内放射能を精度良く測定するには、放射性核種の分布や人体を模擬し、対象とする放射性核種を含有した物理ファントムにより全身カウンタを校正する必要があるが、すべての場合に対応できるように物理ファントムの種類や数を整備することは不可能である。そこで、本研究では、数学ファントムに着目し、物理ファントムを利用することなく、全身カウンタを数学的に校正する手法を開発した<sup>14)</sup>。この数学的校正手法の基本となるモンテカルロ計算コードには、汎用電磁カスケードモンテカルロ計算コードEGS4<sup>15)</sup>を利用した。EGS4コードは、電子、陽電子あるいは光子の輸送計算を原子番号1から100までの任意元素、化合物、混合物について解析することが可能で、任意の3次元体系における放射線の相互作用を忠実にシミュレーションする。また、光子相互作用断面積は、Hubbell *et al.* が編集したPHOTXライブラリー<sup>16)</sup>を用いた。

EGS4コードは、検出器のエネルギー分解能を考慮しないため、計算によって得られる応答関数を直接実測により得られる波高分布と比較することができない。そこで、本研究では、計算結果に対しては、式(2-1)<sup>17)</sup>を用いてガウス分布にしたがう統計的分散をもつ応答関数に広げた(フォールディング)。

$$G_i = \sum_{j=1}^{j_{max}} \frac{M_j}{\sqrt{2\pi}\sigma(E_j)} \cdot \int_{E_i - \frac{W}{2}}^{E_i + \frac{W}{2}} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{E_j - E}{\sigma(E_j)}\right]^2\right\} \cdot dE, \quad (2-1)$$

ここで、

$E_j$ : jチャンネルの平均エネルギー、

$\sigma(E_j)$ : エネルギー  $E_j$  でのガウス分布の標準

偏差、

$W$ : チャンネル幅。

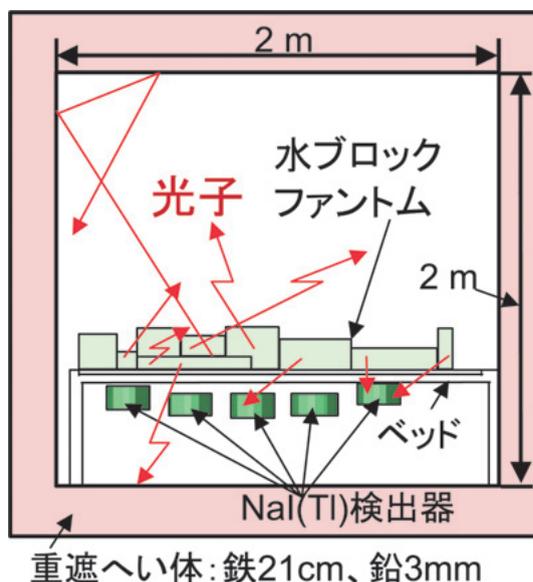


図1 原研東海研の全身カウンタと水ブロックファントム。

開発した数学的校正手法の妥当性を検証するため、実際に原研東海研の放射線管理に利用されている全身カウンタ(NaI(Tl)シンチレーション検出器)を評価対象として、<sup>137</sup>Csや<sup>40</sup>Kが全身に分布する水ブロック型人体形状物理ファントム(以下、水ブロックファントムという)に対する応答関数について計算し、実測結果と比較した。モデル化した全身カウンタおよび水ブロックファントムの幾何学的配置図を図1に示す。モデルの配置は、極力実測条件に基づくようにした。水ブロックファントムモデルに含有する<sup>137</sup>Csや<sup>40</sup>Kは、全身均一分布とし、含有核種の原子数密度が極めて低いことから容器封入材は水のみと仮定した。その結果、図2に示すように、応答関数の評価結果は、実測結果と良く一致し、全吸収ピークのみならず、後方散乱ピーク、コンプトン端などについても十分に再現でき、計算手法のみで全身カウンタの精度良い校正が可能であることを実証した。

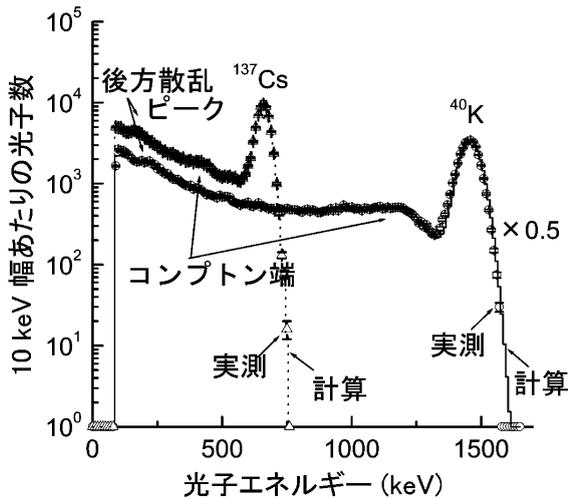


図2 計算と実測による応答関数の比較.

また、日常の内部被ばくモニタリングでは、簡便かつ信頼性が高い体内放射能定量的解析方法が必要となるため、開発した数学的校正手法により、全身カウンタの計数効率曲線（計数効率と光子エネルギーの関係）を評価した<sup>18)</sup>。計数効率の評価は、式(2-2)により求めた。

$$\epsilon = \frac{\sum_{k=a}^b n_k}{A}, \quad (2-2)$$

ここで、

$a$ : ピーク中心エネルギーからピークの半値幅を引いたエネルギー値、

$b$ : ピーク中心エネルギーにピークの半値幅を加えたエネルギー値、

$n_k$ : NaI(Tl)シンチレーション検出器のエネルギー  $k$  に対する光子数、

$A$ : 計算ヒストリー数。

図3に示すように、数学的校正手法は、<sup>137</sup>Csや<sup>40</sup>Kを含有する水ブロックファントム（大人）の全身カウンタ計数効率について、実測結果と±10%以内で評価できることを示し、有用であることを明らかにした。また、大人以外の異なる大きさの水ブロックファントム（小人および中人）の計数効率曲線

を評価し、放射線作業員以外の公衆に対しては体内放射能測定が行えるようにした。

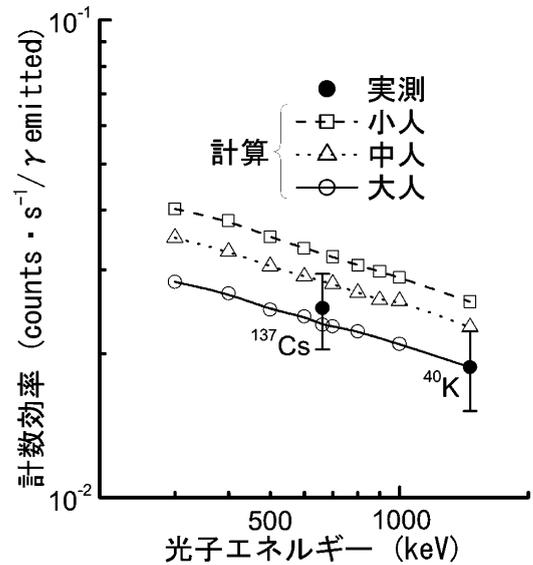


図3 全身カウンタの計数効率曲線.

### 3. 体格依存性補正法の開発

体外計測法によって体内放射能を精度良く測定するためには、被検者の体格に応じた校正が不可欠である。しかし、体外計測法の代表的な装置である全身カウンタの校正では、一般的に、平均体格の放射線作業員を模擬した物理ファントムが用いられているため、様々な身体特性を有する被検者の最適な校正には必ずしもなっていない。このため、内部被ばくモニタリングにおいて有意な体内汚染が検出された場合に、簡便かつ精度良く、全身カウンタ計数効率を被検者の体格に依存して補正する方法を開発する必要がある。本研究では、数学的校正手法により評価した、放射性核種を含有する3種類の大きさが異なる水ブロックファントム（小人、中人および大人）の全身カウンタ計数効率を用いて、個人的差異を反映する人体表面積を体格補正因子とした体格依存性補正法を開発した<sup>19)</sup>。また、全身カウンタに対する米国標準仕様ボマブファントム(Bottle Manikin Absorption Phantom)<sup>20)</sup>と従来の水ブロックファントムの計数効率の相違を明らかにするとともに、今後

の我が国における標準化に対する議論の基礎データを提供するため、ボマブファントムと水ブロックファントムに対する計数効率を比較検討した<sup>21)</sup>。ここでは、全身均一分布になる<sup>40</sup>Kについて、数学的校正手法による体外計測装置の計数効率評価結果例を紹介する。

図4に示すように、<sup>40</sup>Kを含有した水ブロックファントム（小人、中人および大人）の全身カウンタ計数効率はファントム表面積の大きき順に減少する。この計数効率減少の傾向は、ファントムに含有する放射能と検出器の距離が実質的に大きくなり、検出器に入射する光子数が減少するためである。本研究では、小人、中人および大人を模擬した水ブロックファントムの計数効率評価結果と体表面積の関係を2次関数で近似し、式(3-1)で示す体格補正式Cfを考案した。

$$Cf = -1.654 \times 10^{-1} S^2 + 5.190 \times 10^{-2} S + 1.371, \quad (3-1)$$

ここで、

S: 体表面積 ( $S = 0.0072 W^{0.425} H^{0.725}$  W体重、H身長)<sup>22)</sup>。

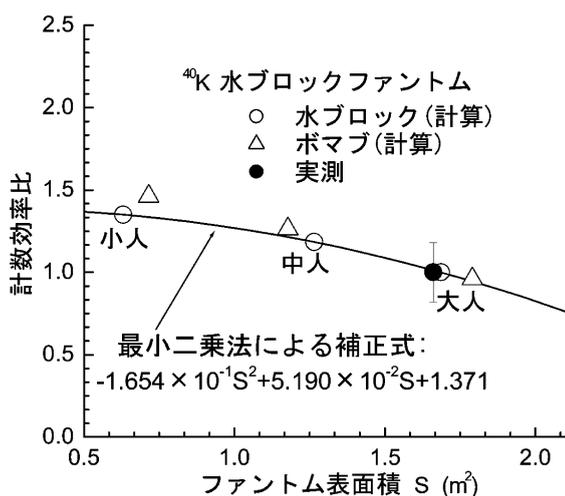


図4 大人の水ブロックファントムを基準とした計数効率比の体格依存性。

図4には、<sup>40</sup>K含有水ブロックファントムの実測結果も示してあり、体格補正式によ

て表現される曲線上にプロットされることから、体格補正式の妥当性を示している。さらに、図中には、ボマブファントム計数効率をプロットした結果も示している。ボマブファントムに対する計算結果は、一般的傾向として、小（標準4歳児）、中（標準10歳児）、大（標準男子）の順に全身カウンタの計数効率は減少し、体表面積の小さいファントムでは水ブロックファントムより高めの、体表面積の大きいファントムでは低めの計数効率を示している。たとえば、小ボマブファントムの計数効率は、同じ体表面積の水ブロックファントムより11%高い。中ボマブファントムでは、5%高い。逆に、大ボマブファントムでは1%低いことを示している。以上より、水ブロックファントムの体表面積を米国標準仕様のボマブファントムの体表面積に見かけ上合わせたとき、両者の計数効率は±11%の範囲で一致していると言える。

また、開発した体格依存性補正法の妥当性は、ボランティア50名の身長、体重、体脂肪率、体内<sup>40</sup>K量などをそれぞれ測定評価し、体重から脂肪量を引いた除脂肪量と体内<sup>40</sup>K量の関係が、体格依存性補正法により、理論値である直線関係に近づくかどうかにより判断した。その結果、体表面積1.55m<sup>2</sup>から2.06m<sup>2</sup>の範囲において、体格補正式により再評価した体内<sup>40</sup>K量と除脂肪量の直線関係は、相関係数が0.69から0.90と飛躍的に向上したことから、開発した体格依存性補正法が妥当であることを明らかにした。本研究により、様々な体格を有する公衆に対しても簡便に精度良く体内放射能を測定する方法を確立した。

#### 4. 体外計測装置による体内放射能評価の不確かさ

測定評価の不確かさを見積もり、その大きさを最小に保つことは極めて重要なことである。体外計測装置による体内放射能評価においても、その測定値に係る不確かさ評価の重

要さは同様である。体内放射能の測定過程において生じる不確かさは、最終的な評価量である摂取量や線量に対して大きな誤差をもたらす可能性がある。摂取量が体内動態モデルなどを用いて算出されることを考慮すると、そのモデルの不確かさにより、さらに大きな誤差が生じる可能性があるため、体外計測装置による体内放射能測定は正確に行なわれる必要がある。本研究では、内部被ばく防護上代表的核種である $^{137}\text{Cs}$ に対し、全身カウンタを用いて体内負荷量を評価した場合の不確かさを解析した<sup>23)</sup>。不確かさの見積もり具体例は、日本人の放射線作業者を対象にした原研東海研全身カウンタの内部被ばくモニタリングとし、実測および計算シミュレーションを用いて行なった解析結果である。被検者を起因とする体内負荷量評価の不確かさについては、実際に $^{137}\text{Cs}$ を人体に投与して調べることは極めて困難であるため、数学的校正手法および体格依存性補正法により解析した。なお、計測の質の表現法は、誤差（測定値の真の値からの差）ではなく、不確かさ（測定の結果に付随した、合理的に測定量に結びつけられ得る値のばらつきを特徴づけるパラメータ）を用いた。

不確かさについては、原研における内部被ばくモニタリングの経験から重要と考えられる因子を抽出し、標準的な放射線作業者を対象に評価することにした。不確かさ因子は、以下のとおりである。

- ①体内放射能分布、体内放射能、身体特性などを起因とした不確かさ
- ②校正用ファントムの含有線源、被検者の表面汚染に関する系統的な不確かさ
- ③バックグラウンド計数値、測定値の統計誤差に起因した不確かさ

ここでは、全身カウンタの測定に係る不確かさの中で最も寄与の大きい放射能分布変化および全体としての不確かさを紹介する。詳細な解析については、別記<sup>24)</sup>を参照されたい。

## 放射能分布変化

体内 $^{137}\text{Cs}$ 負荷量を適切に測定評価するため、全身カウンタは一般的に全身均一分布を仮定する $^{137}\text{Cs}$ 含有ファントムを用いて校正されている。これは、摂取されたセシウムが全身にほぼ均一に分布することを反映したものである。これに対し、Iinuma *et al.*<sup>25)</sup>は、経口摂取された $^{137}\text{Cs}$ のほとんどが数時間、胃腸管領域に分布することを実測により示した。こうした状況を踏まえ、本研究では、 $^{137}\text{Cs}$ を経口摂取した場合の人体に対する全身カウンタの計数効率について数学的校正手法を用いて評価し、線源の体内分布に起因する体内負荷量の推定誤差を調べた。

計算シミュレーションの人体モデルは、仰臥位姿勢としたMedical Internal Radiation Dose Committee(MIRD)-5型ファントム<sup>26)</sup>を用いた。その脚部については、ベッドに接するように修正した。MIRD-5型ファントムにおける $^{137}\text{Cs}$ は、胃領域と全身領域の $^{137}\text{Cs}$ 量の濃度比を0.0091（全身分布）から1（すべて胃にある）まで変化させて、その時の全身カウンタの計数効率がどのように変化するかを評価した。 $^{137}\text{Cs}$ が全身に分布する場合、組織内 $^{137}\text{Cs}$ の濃度比は、肺0.07、骨格/軟組織1.00とした。この仮定は、ICRP標準人<sup>21)</sup>の組織内 $^{137}\text{Cs}$ 濃度比(肺0.07:骨格0.90:軟組織1.00)に基づいて決定した。

図5に、全身 $^{137}\text{Cs}$ 量に対する胃領域 $^{137}\text{Cs}$ 量の比と全身カウンタ計数効率との関係を示す。各計数効率は、全身分布の計数効率に対し規格化している。図に示されるように、胃領域の $^{137}\text{Cs}$ 量が増加するにしたがい、全身カウンタの計数効率は減少している。また、胃領域のみに $^{137}\text{Cs}$ が分布する場合、その計数効率は全身分布の計数効率の約3分の1になることが示されている。その相違は、線源と検出器間距離の相違が直接反映していると考えられる。以上の結果より、経口摂取した $^{137}\text{Cs}$ が胃領域周辺に分布した場合、最大約66%の過小評価

になることが示された。

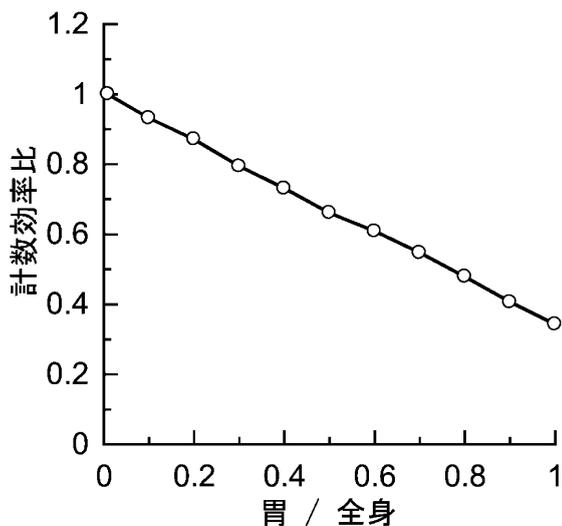


図5  $^{137}\text{Cs}$ 全身分布を基準とした計数効率比の放射能分布影響。

#### 全体の不確かさ

全身カウンタによる $^{137}\text{Cs}$ 負荷量評価の不確かさ因子それぞれの不確かさまたは誤差分布は、ガウス分布と異なる場合もあるが、本研究では、放射線防護の観点から、保守的な評価を行うこととし、ガウス分布にならない体内放射能分布などによる不確かさや誤差については最大値を用いて、全体の不確かさを評価した。代数和方式による誤差成分合成法ではなく、不確かさ成分の合成の基礎となっている成分の2乗和で表現される不確かさ伝播則を適用した。すなわち、全身カウンタによる $^{137}\text{Cs}$ 負荷量評価の不確かさは、不確かさ因子それぞれの最大値を用いて、負荷量に対する過大評価および過小評価それぞれについて二乗和平方根方式により算出した。表に示すように、全体としての不確かさは-90%~60%であった。体外計測装置による体内放射能評価の不確かさの見積もりでは、測定の幾何学的条件による不確かさや測定値に係る統計誤差が全体の不確かさに大きく影響することが示されている。しかしながら、人体内放射能分布は、5個のNaI(Tl)シンチレーション検出器個々の応答変化により解析できるた

め、不確かさ因子とする必要はない場合もある。そうした場合、人体内放射能分布による不確かさ-66%は取り除くことができるため、全体としての不確かさは±60%以内となり、人体内放射能評価の不確かさ(誤差)はファクター3より小さくなる。

表  $^{137}\text{Cs}$ 負荷量計測における不確かさ

不確かさ因子	不確かさ (%)
放射能分布	-66~0 → -
被検者の特性(身長、体重など)	-22~13
フォールアウト	-
$^{137}\text{Cs}$ 以外の体内放射能の影響( $^{40}\text{K}$ からの散乱)	±10
統計誤差	±52
バックグラウンド	-
校正用線源の系統誤差	±18
全体の不確かさ	-90~60 → ±60

#### 5. 体外計測法の高度化

NaI(Tl)シンチレーション検出器を用いた全身カウンタでは、多核種を含む波高分布解析は困難なことが多く、人体内 $^{40}\text{K}$ の散乱成分が $^{137}\text{Cs}$ 等の体内核種同定に影響し不確かさ因子の1つとなる。エネルギー高分解能を有するGe半導体検出器を用いた全身カウンタを用いることにより、そうした問題点が解決できるが、人体の大きさに較べ小さな結晶のGe半導体検出器では、測定視野が不十分になるため、計数効率等を考慮し、その配置や数を最適化しなければならない。そうした状況を踏まえ、本研究では、Ge半導体検出器を用いた全身カウンタの設計に資するため、開発した体外計測装置の数学的校正手法を拡張し、水ブロックファントムに対するGe半導体検出器の計数効率や応答関数を評価した<sup>27)</sup>。

計算シミュレーションのモデルは、モデルとしたGe半導体検出器(p型同軸型)、水ブロックファントムおよび原研全身カウンタ構成物の形状、サイズを極力忠実に模擬した。

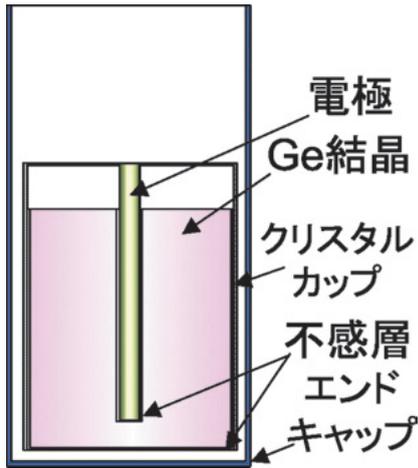


図6 Ge半導体検出器の計算モデル.

一般的にGe半導体検出器の有感部の精密モデルは複雑かつ検出器固有な形状になるが、本研究では外側不感層部の厚さを0.7mm(検出器メーカーの情報に基づく)とした同軸円筒型簡易モデル(図6)を用いた。

本研究により、Ge半導体検出器に対する数学的校正手法は、<sup>137</sup>Csや<sup>40</sup>Kを含有する水ブロックファントム(大人)の全身カウンタ計数効率について、実測結果と±4%以内の誤差で計数効率を評価できることを示すとともに、応答関数評価においても、図7に示すように、特性X線、後方散乱ピーク、エスケープピーク、コンプトン端などの様々な光子相互作用事象を正確にシミュレーションできることを明らかにした。

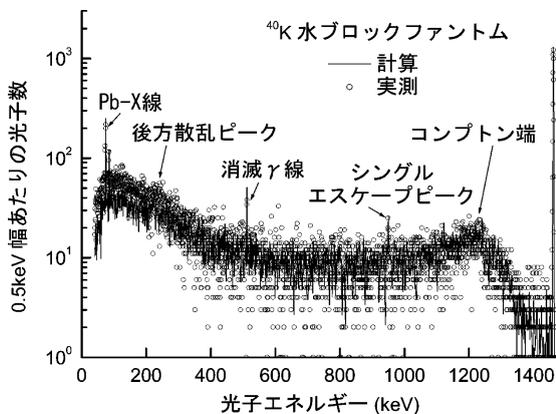


図7 計算と実測によるGe半導体検出器の応答関数比較.

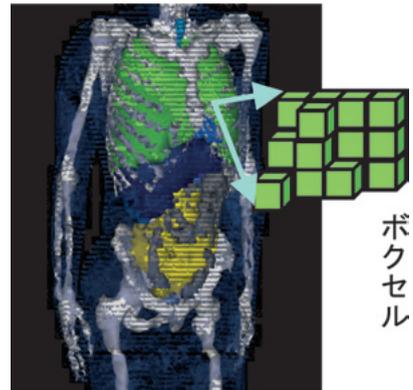


図8 ボクセルファントム.

線量限度近くあるいはそれを超える被ばくが予想された場合には、被検者個人の体格や臓器形状はもとより体内放射能分布を考慮した測定が必要になる。このため、個人の人体構造を正確に表現できるボクセルファントム(図8)を用いた全身カウンタの数学的校正手法を開発した。開発した手法を用いて、日本人成人男性(Otoko)、成人女性(Onago)のCT画像から構築した全身ボクセルファントム<sup>28,29)</sup>について、Ge半導体検出器の計数効率等を計算評価した。その結果、図9に示すように、従来の水ブロックファントムの計数効率より最大1.7倍大きくなり、正確な人体構造を有するファントムによる校正の重要性を明らかにした。以上の研究により、大量に放射能を摂取した緊急時被ばくの場合や体

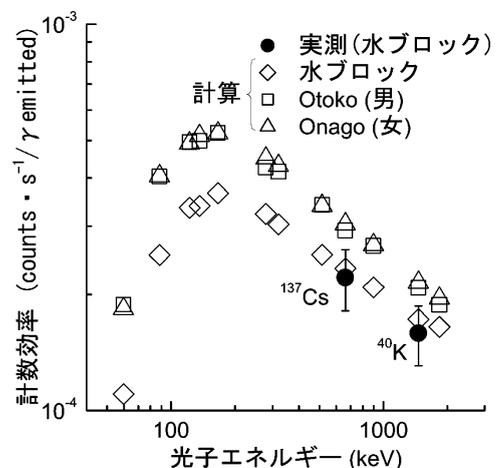


図9 Ge半導体検出器の計数効率率曲線.

内<sup>24</sup>Na量評価から中性子の外部被ばく線量を推定する場合に必要な個人毎の体外計測装置校正法を確立した。

## 6. まとめ

放射線防護に既成する体外計測法の高度化を直接の目的として、計算シミュレーション手法を利用した(1)体外計測装置の校正法、(2)体外計測装置の体格依存性補正法、(3)体外計測装置による体内放射能評価の不確かさ、(4)体外計測法の高度化、について研究を行った。計算の醍醐味ともいえる実測による評価が不可能な課題、たとえば所有しない物理ファントムに対する解析などについて、本研究で開発した数学的校正手法の有効性を明らかにするとともに、世界的でも非常に少ない研究事例となる、体外計測法による体内放射能評価の誤差を理解する有効なデータを示した。また、正確な人体構造を表現するボクセルファントムを用いた体外計測装置の校正法を開発し、個人毎の体内放射能測定法を確立した。

## 参考文献

- 1) ICRP: Evaluation of Radiation Doses to Body Tissues from Internal Contamination due to Occupational Exposure. ICRP Publication 10, Pergamon Press, Oxford (1968).
- 2) ICRP: Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers: Design and Interpretation. ICRP Publication 54, Pergamon Press, Oxford (1988).
- 3) ICRP: Individual Monitoring for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 78, Elsevier Science, Oxford (1997).
- 4) IAEA: Whole-body Counting. IAEA, Vienna (1962).
- 5) IAEA: Assessment of Radioactivity in Man. IAEA, Vienna (1964).
- 6) IAEA: Direct Methods for Measuring Radionuclides in the Human Body. Safety Series No.114, IAEA, Vienna (1995).
- 7) ICRP: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Pergamon Press, Oxford (1991).
- 8) ICRP: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56, Pergamon Press, Oxford (1989).
- 9) ICRP: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2: Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67, Pergamon Press, Oxford (1993).
- 10) ICRP: Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66, Pergamon Press, Oxford (1994).
- 11) ICRP: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 3: Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67, Pergamon Press, Oxford (1995).
- 12) ICRP: Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 4: Inhalation Dose Coefficients. ICRP Publication 71, Pergamon Press, Oxford (1995).
- 13) Ishikawa, T., Uchiyama, M., Hoshi, M., Takada, J., Endo, S., Sugiura, N., Kosako, T. and Shimizu, I.: New In-vivo Calibration Phantoms and Their Performance. Health Phys., 82:348 (2002).
- 14) Kinase, S.: Evaluation of Response of Whole-body Counter using the EGS4

- Code. J. Nucl. Sci. Technol., 35:958 (1998).
- 15) Nelson, W. R., Hirayama, H. and Rogers, D. W. O.: The EGS4 Code System. SLAC-265 (1985).
  - 16) RSIC: DLC-136/PHOTX Photon Interaction Cross Section Library (contributed by National Institute of Standards and Technology) (1989).
  - 17) 斎藤公明, 森内茂: モンテカルロ計算によるNaI(Tl)シンチレーション検出器ガンマ線応答関数のデータカタログ. JAERI 1306 (1987).
  - 18) Kinase, S., Yoshizawa, M. and Noguchi, H.: Evaluation of Counting Efficiency of a Whole-body Counter using the EGS4 Code. J. Nucl. Sci. Technol., 37:1103 (2000).
  - 19) Kinase, S.: Correction Factor for Potassium-40 Whole-body Counting. J. Nucl. Sci. Technol., 36:952 (1999).
  - 20) HEALTH PHYSICS SOCIETY: Specifications for the Bottle Manikin Absorption Phantom. ANSI/HPS N13, 35-1999 (2000).
  - 21) 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 (2000).
  - 22) 藤本薫喜, 渡辺孟, 湯川幸一, 坂本淳: 日本人の体表面積に関する研究; 第17編性・年齢・体型と部位別比率. 日衛誌, 23:437 (1968).
  - 23) Kinase, S. and Noguchi, H.: Uncertainties in Estimated Body Burdens of Caesium-137 by Whole-body Counter. Radiat. Prot. Dosim., 93:341 (2001).
  - 24) 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).
  - 25) Iinuma, T. A., Izawa, M., Watari, K., Enomoto, Y., Matsusaka, N., Inaba, J., Kasuga, T. and Nagai, T.: Application of Metal Ferrocyanide-anion Exchange Resin to the Enhancement of Elimination of <sup>137</sup>Cs from Human Body. Health Phys., 20:11 (1971).
  - 26) Cristy, M. and Eckerman, K. F.: Specific Absorbed Fractions of Energy at Various Ages from Internal Photon Sources. ORNL/TM-8381/V1-V7 (1987).
  - 27) Kinase, S., Noguchi, H. and Nakamura, T.: Application of Ge Semiconductor Detector to Whole-body Counter. Radiat. Prot. Dosim., 105:467 (2003).
  - 28) Saito, K., Wittmann, A., Koga, S., Ida, Y., Kamei, T., Funabiki, J. and Zankl, M.: Construction of a Computed Tomographic Phantom for a Japanese Male Adult and Dose Calculation System. Radiat. Environ Biophys. 40: 69 (2001).
  - 29) Kinase, S., Zankl, M., Kuwabara, J., Sato, K., Noguchi, H., Funabiki, J. and Saito, K.: Evaluation of Specific Absorbed Fractions in Voxel Phantoms using Monte Carlo Simulation. Radiat. Prot. Dosim., 105:557 (2003).