

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K07017

研究課題名(和文) 環境に流出した放射性核種による外部被ばくと内部被ばくの統合線量評価システムの開発

研究課題名(英文) Integrated system for evaluating external and internal doses from radionuclides released into the environment

研究代表者

佐藤 大樹 (SATO, Daiki)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主幹

研究者番号：00370403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、生活環境に流出した放射性核種に対し、公衆の外部被ばく及び内部被ばく線量を包括的に評価できるシステムを構築した。外部被ばくについては、公衆を代表する年齢別の人体数値モデルを組み込んだ放射線輸送計算コードPHITSによる解析結果を基に、放射性核種の分布する環境中での外部被ばく線量評価プログラムを開発した。また、環境から吸入摂取する放射性核種の化学形態及びエアロゾル粒径に対応した体内動態モデルを考案し、内部被ばく線量評価プログラムを開発した。さらに、開発したプログラムを簡易な操作で制御できるインターフェースを整備し、統合線量評価システムを完成させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した統合線量評価システムは、線量評価上重要となる環境被ばく形態(大気分布、水分布、土壌沈着)に対応して公衆の外部被ばくと内部被ばく線量を合算して評価できる。原子力災害やテロリズム等による生活環境への放射性核種の流出事象が発生した場合、本システムは迅速な公衆の被ばく線量評価を可能とし、緊急時対応策の立案に貢献できる。また、高度な専門知識を要しない簡易な操作体系を整備したことで、一般市民による自身の被ばく線量を自ら評価したいという要望に対応した。さらに、本研究で開発した人体数値モデルに関する技術は、放射線治療における線量解析をはじめ、他分野への応用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：We developed an integrated system for evaluating external and internal doses from radionuclides released into the environment. The external doses in the environment were analyzed using the age-dependent human anatomical models incorporated into the radiation transport code PHITS. The internal doses were assessed by the biokinetic model considering the chemical forms and particle sizes of the inhaled radioactive materials. Database used in the external and internal dose calculations were constructed from those results. The integrated system equipped a graphical user interface to execute those external and internal dose calculations by easy operations.

研究分野：保健物理

キーワード：外部被ばく線量評価 内部被ばく線量評価 統合線量評価システム 環境中の放射性核種 公衆の被ばく線量 PHITS 体内動態モデル 人体数値モデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生活環境に放射性核種が流出した場合、そこで生活する公衆の被ばく線量評価は最優先の課題となる。この際に考慮すべき被ばく形態は、大気への流出初期に観測される放射性雲やその後の大気、水もしくは土壌への放射性核種の拡散及び沈着による外部被ばくと、大気中に浮遊する放射性核種を含む微小粒子(放射性エアロゾル)の吸入による内部被ばくである。これらに対応して、流出初期から沈着後の長期に渡って被ばく線量を評価するには、環境中の放射線モニタリングとともに、計算による推定が不可欠であった。

本研究課題の申請時点の国内において、環境中の多種多様な放射性核種の種類や被ばく形態に対応可能な線量評価システムは存在しなかった。そのため、福島第一原子力発電所事故後の積算実効線量の評価でも、文部科学省は国際原子力機関(IAEA)の編集したデータを参照しつつ手作業で数値を算出したが、参照元のデータに誤りがあったため、公表後のセシウム134の50年間積算実効線量を訂正する事態となった[1]。国外に目を向けると、米国と欧州はそれぞれRASCAL(Radiological Assessment System for Consequence Analysis)及びRODOS(Real-time On-line Decision Support System)と呼ばれる評価システムを所有しているが、それらは被ばく形態に水を考慮していないため、河川や水道水への放射性核種の流入により想定される遊泳や入浴時の外部被ばく線量を評価できず、風向や地形に影響され複雑な挙動を示す放射性雲内部の放射能濃度分布の再現や、吸入したエアロゾルの粒径に依存した内部被ばく線量も評価できない。これらはいずれも環境に流出した放射性核種に対する公衆の被ばく線量を適切に推定するには不可欠であり、福島第一原子力発電所事故後の線量評価においても重要であった。また、RASCALやRODOSは、米国及び欧州の政府機関による政策判断支援の目的で開発されているため、操作体系が複雑で高度な専門知識を必要とした。よって、一般市民による自身の被ばく線量を自ら評価したいという要望には対応できなかった。

2. 研究の目的

生活環境への放射性核種の流出に対して、外部被ばくと内部被ばく線量を統一したインターフェースによる簡便な操作で、迅速かつ高精度に算出できる統合線量評価システムを開発し公開する。このシステムでは、公衆を代表する新生児から成人の人体数値模型、環境中の放射線輸送アルゴリズム及び化学形と粒径に依存した体内動態模型の技術を導入し、既存のシステムでは対応していなかった被ばく形態を含めた高精度な線量評価を実現する。十分に検証されたデータベースとプログラムから成るシステムにより、手作業による誤評価を排除し、公衆の放射線安全性の確保に大いに貢献することが期待できる。

3. 研究の方法

環境中に分布する放射性核種による外部被ばく線量評価において、本研究課題の申請時における当初計画では、新生児から成人までの人体数値模型を独自に開発し、外部被ばく線量の解析に利用することとしていた。しかし、事業初年度の平成29年において、国際放射線防護委員会(ICRP)による成人男女と米国フロリダ大学が開発した新生児、1歳、5歳、10歳、15歳男女の人体数値模型が利用可能となったため、これらの模型を採用し外部被ばく線量の解析を前倒しして進めることとした。

一方、当初計画していたポリゴン技術を導入した人体数値模型の開発も継続し、事業期間内に任意の姿勢を取れる四肢可動式人体数値模型の構築に成功した。ポリゴン人体数値模型の開発では、既存の微小立方体素子(ボクセル)で記述した人体数値模型を二次元スライス画像に分割し、画像処理ソフトウェア上で身体及び臓器輪郭をポリゴンに変換した後、三次元模型として再構築した。その際、標準体型データを参照し、身長、体重、臓器質量及びボクセルでは記述できなかった部位を現実の解剖学的構造に合うように調整した。さらに、臓器配置を維持したまま、四肢の自然な可動を実現するアルゴリズムを開発し実装した。

外部被ばく線量は、人体数値模型を組み込んだ放射線輸送計算コードPHITSにより解析した。半無限の環境を模擬するため、大気もしくは水に対する光子の平均自由行程の5倍のサイズ(大気中の600keV光子で約500m)を持つ計算体系を構築し放射線輸送計算を実施した。大気、土壌及び水中に0.1MeVから8MeVまでの単色エネルギーの光子もしくは電子放出線源を一様分布させ、計算体系の中心に配置した人体数値模型において各臓器の吸収線量を計算した。得られた単色エネルギー線源に対する臓器吸収線量データから、ICRPの核種崩壊データベースを利用して環境中に分布した放射性核種(1252核種、72元素)による外部被ばく線量を年齢別に解析した。解析結果はデータベースとしてまとめ、短時間で環境中の放射性核種に対する外部被ばく線量を評価できるプログラムを開発した。

内部被ばく線量は、放射性雲からの降下及び土壌沈着後の再浮遊によって大気に浮遊した放射性エアロゾルの吸入による被ばくを対象とした。放射性エアロゾルは、その粒径の違いにより吸入時に沈着する体内部位が異なり、その後の体内動態にも影響する。本研究では、エアロゾルの粒径に依存した呼吸気道(鼻道、気管支、肺胞等)における部位別沈着割合を、エアロゾルの熱力学的挙動(拡散沈着)と空気力学的挙動(慣性沈着)に基づき解析し、任意の粒径分布に対応して内部被ばく線量を導出可能な体内動態模型に基づくプログラムを開発した。

統合線量評価システムは、開発した外部被ばく及び内部被ばく線量評価プログラムを計算エンジンとし、放射性核種の流出事象に対応した評価対象者の包括的な被ばく線量を算出できる

よう設計した。また、利用者に一般市民も想定し、専門的な知識を必要とせずグラフィカル・ユーザー・インターフェース（GUI）上での簡易な操作に基づくデータ入力で、解析結果が出力されるようにした。各被ばく形態に対して入力パラメータのデフォルト値を用意しておくが、放射性核種の種類、放射能濃度、エアロゾルの粒径、評価対象者の年齢等は、GUIを通して変更可能である。GUIは移植性を重視し、Tcl/Tkライブラリを利用してPython言語で開発した。

4. 研究成果

(1) 外部被ばく線量評価プログラム

図1に地表面に一樣分布した単色エネルギーの光子放出線源に対する新生児、1歳、5歳、10歳、15歳及び成人の実効線量を示す。光子エネルギーが大きくなると放射線防護上重要な臓器の存在する体内深部にまで光子が到達するため、実効線量も大きくなった。また、対象者の年齢が小さいほど、体表面の脂肪及び筋肉層が薄くなり、光子が深部臓器に到達するため、大きな実効線量を与えた。この傾向は、放射性核種が大気及び水中に分布する場合も同様であった。

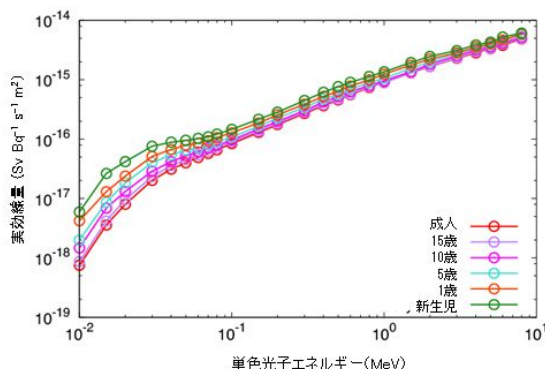


図1 土壤表面に沈着した光子線源による年齢別実効線量

本来、広大な環境中の放射線輸送計算は膨大な計算資源を要するが、開発した外部被ばく線量評価プログラムは、単位放射能もしくは空間線量当たりの臓器吸収線量及び実効線量のデータベースを参照することで、環境で測定した放射性核種の放射能濃度もしくは空間線量率を入力すれば大規模な放射線輸送計算を行わずとも即座に対象者の被ばく線量を評価できるようになった。

(2) 内部被ばく線量評価プログラム

図2に成人男性による¹³⁷Csの吸入における実効線量の粒径及び運動状態への依存性を示す。粒径が5 μ m以下では粒径の増大とともに実効線量も増加したが、5 μ mより大きな領域ではほぼ一定値を示した。これは、エアロゾルの粒径がある程度大きくなると、エアロゾルは呼吸気道の深部にまで到達できず鼻動にのみ沈着し飽和するためである。また、運動状態に対しては、軽い作業時の実効線量が最も大きくなることが分かった。実効線量は、エアロゾルの呼吸気道深部の肺胞への到達確率と慣性運動による呼吸気道壁への衝突確率が増すほど大きくなる。これらは運動状態に依存した呼気及び吸気の流速によって変化するが、流速が増すほど到達確率は減少するが衝突確率は増加する。これにより、中程度の運動状態である軽い作業時に実効線量が最大となった。

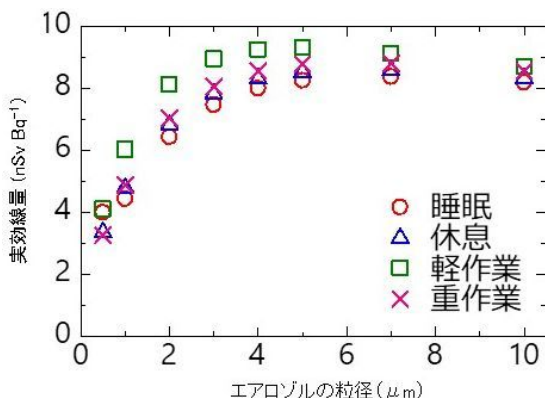


図2 ¹³⁷Csを吸入した成人男性の実効線量のエアロゾル粒径に対する依存性

本研究で開発した内部被ばく線量評価プログラムにより、環境の被ばく線量評価で重要となる吸入エアロゾルの粒径や評価対象者の運動状態を反映した線量評価が可能となった。

(3) 統合線量評価システム

図3に統合線量評価システムのGUIを示す。計算に必要な情報は、GUI上でドロップダウンリストから選択するか直接記述することで入力できる。また、GUI上のボタンをクリックすることで、外部被ばく及び内部被ばく線量評価プログラムが呼び出され、即座に合算した被ばく線量が表示される。

当初計画では、事業年度内での統合線量評価システムの公開を目指した。しかし、多種多様な放射性核種と被ばく形態に対応した計算結果の検証とGUIプログラム開発の遅延により、外部への公開は次年度以降に持ち越された。まず、外部公開に先立ち内部の専門家に利用を依頼し、そこから得られる意見を反映してGUIの改良等を行う。その後、速やかに被ばく線量評価プログラムを含めてオープンソースとして外部無償提供する予定である。

米国及び欧州がそれぞれ所有する類似のシステムはソースコードが公開されておらず、その運用も米国及び欧州におけるものを想定している。一方、本研究で開発したシステムは、国内はもちろん同様の線量評価システムを持たない東南アジアをはじめとした国外においても利用さ

れることが期待される。

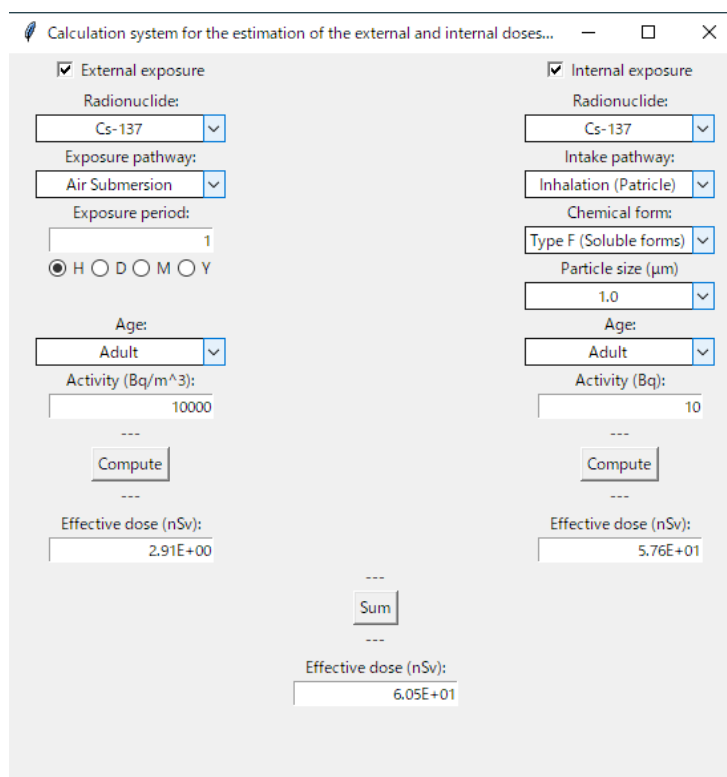


図3 統合線量評価システムのグラフィカル・ユーザー・インターフェース (GUI)

(4) 人体数値模型に関連した技術

既に述べたように、当初計画にあったポリゴン人体数値模型は、新たに利用可能となった他機関が開発した模型での代用により、統合線量評価システムの開発過程では利用されなかった。しかし、当初計画に新たな着想を加えることで、今後の放射線防護研究において有益な可動式人体数値模型と眼球数値模型を開発した。

図4に四肢可動式人体数値模型を示す。人体数値模型上で関節を定義することにより、様々な姿勢を再現することが可能となった。これまでも、原子力事故時の作業者の線量評価や放射線治療で受けた患者の線量推定に人体数値模型が利用されたが、被ばく時の姿勢を適切に再現することが線量評価において極めて重要であった。四肢可動式人体数値模型を利用することで、線量評価の精度向上が期待できる。



図4 四肢可動式人体数値模型の取り得る姿勢の例

図5に眼球数値模型を示す。放射線業務に従事する職業人及び公衆の放射線防護において、放射線感度の高い眼球中の水晶体の線量を精度良く評価することは重要である。しかし、従来の模型では、個人間の差異を反映して眼球の内部構造を詳細に再現することができなかった。そこで、眼球の大きさや形状の違いを反映できる新たな眼球数値模型を開発した[2]。この模型は、眼球の構造的特徴と緑内障発症の相関関係の解明等への応用が期待される。

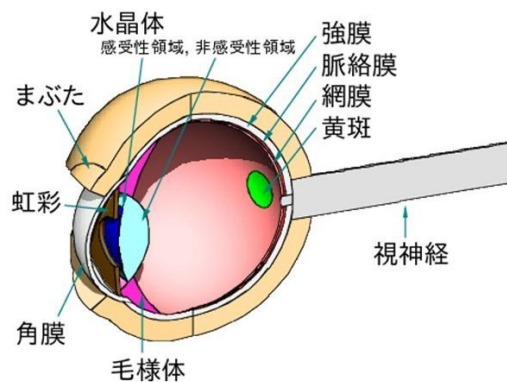


図5 眼球数値模型の断面

<引用文献>

[1] 原子力規制委員会, 「文部科学省による、プルトニウム、ストロンチウムの核種分析結果について(平成23年9月30日)」の訂正について(平成25年7月1日), http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5048/25/5600_130701.pdf, 2013.

[2] Furuta Takuya, Basha Daniel El, Iyer Siva S R, Alfonso Camilo M Correa, Bolch Wesley E, "Dosimetric dependence of ocular structure on eye size and shape for external radiation fields of electrons, photons, and neutrons, Journal of Radiological Protection, 39, 825-837, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 El Basha Daniel, Furuta Takuya, Iyer Siva S R, Bolch Wesley E	4. 巻 63
2. 論文標題 A scalable and deformable stylized model of the adult human eye for radiation dose assessment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physics in Medicine & Biology	6. 最初と最後の頁 105017 ~ 105017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6560/aab955	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Furuta Takuya, Basha Daniel El, Iyer Siva S R, Alfonso Camilo M Correa, Bolch Wesley E	4. 巻 39
2. 論文標題 Dosimetric dependence of ocular structures on eye size and shape for external radiation fields of electrons, photons, and neutrons	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Radiological Protection	6. 最初と最後の頁 825 ~ 837
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6498/ab2bcb	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 佐藤大樹, 中山浩成, 古田 琢哉
2. 発表標題 任意形状の放射性雲からの外部被ばく線量評価コードの開発
3. 学会等名 日本原子力学会2018年秋の大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 真辺健太郎, 高橋史明
2. 発表標題 改訂ヒト呼吸気道モデルに対応した吸入エアロゾルの沈着割合計算機能の開発
3. 学会等名 日本原子力学会2018年秋の大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古田 琢哉, Daniel El Basha, Siva S. R. Iyer, Camilo M. Correa Alfonso, Wesley E. Bolch
2. 発表標題 線量評価に用いるサイズおよび形状の変更が可能な数値眼球モデルの開発
3. 学会等名 日本原子力学会2019年春の年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Satoh daiki, Nakayama Hiromasa, Furuta Takuya
2. 発表標題 A computer code for dose estimation from external exposure to radioactive plume
3. 学会等名 3rd International Conference on Dosimetry and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Furuta Takuya, Basha Daniel El, Iyer Siva S R, Alfonso Camilo M Correa, Bolch Wesley E
2. 発表標題 Development of a scalable and deformable stylized eye model and its application to the standard radiation exposure geometries
3. 学会等名 3rd International Conference on Dosimetry and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤薫, 古田琢哉, 高橋史明
2. 発表標題 線量評価用成人日本人ポリゴンファントムの構築
3. 学会等名 第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤大樹, 高橋史明
2. 発表標題 光子外部被ばくに対する年齢別実効線量と新しい実用量との相関
3. 学会等名 第2回日本放射線安全管理学会・日本保健物理学会合同大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	真辺 健太郎 (MANABE Kentaro) (60414520)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究副主幹 (82110)	
研究分担者	佐藤 薫 (SATO Kaoru) (80354702)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究主幹 (82110)	
研究分担者	古田 琢哉 (FURUTA Takuya) (40604575)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・研究副主幹 (82110)	