



# 高放射線量被ばく時の人体試料を用いた物理学的測定に基づく線量評価に関する研究

高橋, 史明

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2007-03-25

(Date of Publication)

2009-07-23

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲3966

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003966>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 3 5 9 】

氏 名・（本 籍） 高橋 史明 （ 岐阜県 ）

博士の専攻分野の名称 博士（工学）

学 位 記 番 号 博い第450号

学位授与の 要 件 学位規則第5条第1項該当

学位授与の 日 付 平成19年3月25日

【 学位論文題目 】

高放射線量被ばく時の人体試料を用いた物理学的測定に  
基づく線量評価に関する研究

審 査 委 員

主 査 教 授 小 田 啓 二  
教 授 石 田 紀 久  
教 授 北 村 晃  
教 授 山 内 知 也

(氏名：高橋 史明 NO.1, 全4頁)

現在、我が国における放射線あるいは原子力の平和利用は、産業界にとっては経済規模からも不可欠となっており、基礎科学分野の進展にも必要とされている。一方、放射線には被ばくによる有害な健康影響の発現という側面もあり、その利用は安全が確保されて初めて社会の福利に貢献を果たすと言える。そのため、各施設は運転手順の整備、安全設計などの施策が講じられている。しかし、過去の国内外における経験からも、人的、技術的なエラーに起因した放射線事故の発生を完全に否定することはできない。その他、地震などの天災による事故の発生も想定され、近年では、悪意を持った放射線の使用（核テロ）を原因とする緊急時への対応が国際的に検討されている。

緊急時対応の中で、より正確な被ばく線量の情報は、健康引いては生命に関係する医療措置の遂行などに重要となる。各施設で放射線作業に従事する者は、線量計を装着することが義務付けられている。しかし、これらの線量計は、主に低線量被ばくでの使用を想定しており、放射線事故などでは有効な情報を与えない可能性もある。また、いくつかの過去の事例は、公衆などの線量計を携行しない者の被ばく評価を必要とした。そのため、緊急時の中でも有効な計測情報のない状況について、より正確な線量推定法の確立が技術的な課題とされていた。

本研究は、このような緊急時において、放射線との相互作用により人体組織に生じた効果からの線量評価法を確立することを目標とした。その中でも、物理学的な測定に基づき、体外からの光子または中性子による被ばく線量を推定する手法を研究した。具体的には、光子被ばくにおける歯エナメル質の電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance, ESR) 計測、中性子被ばくを伴う臨界事故時における体内組織に生成された放射性同位元素  $^{24}\text{Na}$  の放射能値に基づく迅速な線量評価に関する研究を進めた。

本論文は、6章から構成されている。

第1章では、本研究の背景、人体組織試料に基づく線量評価などを概観した。特に、調査結果に基づき、歯エナメル質の ESR 計測、体内  $^{24}\text{Na}$  量に基づく線量評価法を確立するための課題を提示した。

(氏名：高橋 史明 NO.2, 全4頁)

第2章では、光子被ばくを受けた歯エナメル質の受ける線量（エナメル質線量）について、他の臓器・組織の線量（臓器線量）との定量的な換算関係を明確にした。既に、国内外の多くの機関が、エナメル質線量と ESR 計測で測定される信号強度の関係付けを研究していた。しかし、被ばく評価では、造血組織、消化管などの健康影響の発現しやすい臓器・組織の臓器線量の導出が最終的に必要とされる。そこで、3次元体系の放射線輸送計算を模擬するモンテカルロ計算コード EGS4 及び UCGEN を使用して、光子被ばくに対する体内のエナメル質線量、各臓器線量及び両者の関係を解析した。解析にあたっては、人体形状を数式で表現するファントム (MIRD 型モデル) に歯の定義を新たに組み入れたモデルを開発した。放射線輸送計算では、人体に入射する光子のエネルギー及び方向を変化させて様々な被ばく条件を想定した。その結果、低エネルギー光子による被ばくでは、光電効果の発生確率の違いに起因して、エナメル質線量が他の臓器線量よりも著しく高くなることを明らかにした。これに加えて、頭部前方にあるエナメル質線量と体幹部の臓器線量の関係は、人体への光子入射方向により大きく変化する可能性のあることが分かった。一方で、300keV 以上の光子が人体の前方より入射した場合、エナメル質線量は体幹部の臓器線量あるいは全身被ばく線量と近い値となった。特に、作業者が装着していた線量計の計測値が ESR 計測による評価結果と近い場合、その値は体幹部の線量を合理的に与えることを提示した。

第3章には、前章の計算解析で得たエナメル質線量を実験的に検証して、ESR 計測に基づく線量評価法を確立するために実施した研究を記した。実験では、人体とほぼ組織等価な材質の頭部模型の口腔部に熱ルミネッセンス線量計 (TLD) を配置した。ここで、TLD の材質は、光子に対して歯エナメル質とほぼ同等の相互作用を与える硫酸カルシウム ( $\text{CaSO}_4$ ) とした。また、頭部模型の医用 (CT) 画像に基づくボクセル (voxel) 型モデルを作成して、これを用いたモンテカルロ計算を実行した。その結果、TLD による実測値は、2つの人体モデルによる解析結果と近い値を示しており、前章の解析結果の妥当性が確認された。これに加えて、MIRD 型及び voxel 型モデルを用いた計算解析の比較から、頭部構造がエナメル質線量に与える影響を解析した。エネルギーが 30keV の光子が入射する条件以外では、人体モデルの違いによるエナメル質線量の大きな差異は見られなかった。以上の検証から、前章の解析結果は、歯エナメル質の ESR 計測に基づく線量評価に十分適用できると考えた。そこで、複数ある歯のエナメル質線量の口腔内の空間分布傾向から、光子入射方向を推定する手法を検討した。最後に、単エネルギーで解析または実測されたデータについて、エネルギー分布を有する光子被ばくに対する適用性を考察し、歯エナメル質の ESR 計測に基づく臓器線量の評価について指針を与えた。

第2章及び第3章の研究成果を反映させることにより、光子被ばくを伴う緊急時において、歯エナメル質の ESR 計測に基づき、従来よりも正確な体幹部の線量の導出が可能となったと考える。

(氏名：高橋 史明 NO.3, 全4頁)

光子と同様に重要な放射線種である中性子を伴う緊急時については、臨界事故を想定して、体内に生成される<sup>24</sup>Na量に基づく線量評価法を研究した。第4章では、中性子と体内の安定ナトリウムの相互作用、 $^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$  で生成される<sup>24</sup>Naの放射能値に基づき、線量を評価するための基礎データを解明した。体内での<sup>24</sup>Naの生成と被ばく線量の中性子エネルギーに対する依存性は大きく異なり、人体に入射する中性子と $\gamma$ 線の混在の様態も事故条件により変化する。線量評価に影響を与える放射線特性は、核燃料の組成や大きさ、その周辺に存在する遮へい体の材質や厚さに大きく依存する。そこで、まず、<sup>235</sup>Uを含む核燃料及び主要な遮へい材を組み合わせた種々の体系を想定し、モンテカルロ計算コードMCNPにより核分裂で発生した中性子及び $\gamma$ 線が各体系を漏洩した場合の特性を解析した。続いて、この解析で得た特性を持つ放射線に被ばくした条件について、体内組織に生成される<sup>24</sup>Na量及び全身被ばく線量を解析した。その結果、中性子被ばくで生成される<sup>24</sup>Na量から体内元素の中性子捕獲反応に伴い発生する $\gamma$ 線による線量への換算係数は、想定した線源条件に依らずほぼ一定となった。一方、解析結果は中性子被ばくで他の荷電粒子が関与する線量(中性子線量)及び $\gamma$ 線被ばくによる線量への換算係数は、想定した条件により大きく変化することを示した。また、放射線の人体への入射方向及び体格について異なる条件を設定して、これらの因子が<sup>24</sup>Na量からの線量評価に与える影響を解析した。その結果、体内での中性子の透過距離をより変化させる被ばく幾何条件の違いの方が、線量評価に大きな影響を与えることが確認された。以上で得た知見に基づき、従来よりも正確な体内<sup>24</sup>Na量に基づく線量評価が可能になったと考える。

第5章では第4章の解析結果について、臨界事故の状態を模擬できる日本原子力研究開発機構の過渡臨界実験装置(TRACY)における実験で検証した。ここでは、人体と水素の含有量の近い塩化ナトリウム(NaCl)水溶液をポリメチルメタクリル樹脂(PMMA)からなる水槽型のファントムに封入して中性子照射を行い、人体組織中の<sup>24</sup>Na生成を模擬した。中性子照射されたNaCl溶液中の生成<sup>24</sup>Na量に基づく線量評価においては、前章の解析で得たデータを内蔵し、迅速な線量評価を可能とするために構築したシステムを利用した。ここでは、国際原子力機関(IAEA)が事故後48時間以内の評価として許容する不確かさの範囲±50%以内で、システムによる線量評価が可能であるか否かを検討した。また、実験では線源からの直達線以外の散乱線が線量評価に与える影響についても解析した。その結果、他の手法から推定された中性子線量との比較から、詳細なエネルギースペクトルの情報を利用した場合は、正確な評価が期待されることが分かった。一方で、実験のような散乱線を含む場でも、システムにより線源体系の情報及び生成<sup>24</sup>Na量から迅速に算出した中性子線量は、他の評価手法による値と比較して+35%程度となった。以上より、開発したシステムは事故後の迅速な線量評価に十分適用できることが確認された。最後に、システムの不均等被ばくにおける適用、体内ナトリウム量が線量評価へ与える影響を考察した。

第4章及び第5章の成果により、臨界事故時における体内<sup>24</sup>Na量に基づく、従来よりも正確かつ迅速な線量評価が可能になったと考える。

(氏名：高橋 史明 NO.4, 全4頁)

本論文の最終章である第6章は本研究の結論であり、第2章から第5章までの結果を総合的に述べ、将来の展望についてふれた。

本研究で得られたエナメル質線量と臓器線量の関係については、IAEAの示す技術報告書にも取り入れられ、国内外で歯エナメル質試料に基づく線量評価に利用されている。また、本研究で開発した臨界事故時における迅速な線量評価システムは、公開される予定であり、緊急時対策での利用が期待される。

以上

氏名	高橋 史明		
論文 題目	高放射線量被ばく時の人体試料を用いた物理学的測定に基づく線量評価に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	小田 啓二
	副査	教授	石田 紀久
	副査	教授	北村 晃
	副査	教授	山内 知也

要 旨

1999年茨城県東海村にあるウラン加工施設で起こった臨界事故は、2名の死者を出すという我が国でも最悪の放射線事故となった。これを契機として、原子力界では、危機管理や技術者の倫理問題などとともに、人的・技術的エラーに起因する、あるいは地震など天災によって引き起こされる放射線事故時の緊急対応の見直しが行われた。その中でも、被ばく線量の出来るだけ迅速かつ正確な情報は、被ばく直後の初期医療措置にとって極めて重要で、生死を分かつことになる可能性がある。

あらかじめ管理区域内での作業員として登録されている放射線業務従事者は、個人線量計を装着しているが、緊急時にはその測定範囲を超えた線量を被ばくする可能性があるし、公衆を含む放射線業務従事者以外には特別な線量計を持っていない。そこで、このような場合に、如何に被ばく線量を推定するかという技術的な問題の解決が必要である。近年、テロを含む悪意を持った放射線被ばく事故の可能性が指摘されており、本問題は一層重要性が増してきている。

本論文では、以上のような緊急時において、生体に記録された放射線効果の情報から被ばく線量を評価する手法の確立を目的としている。具体的には、被ばくの主な原因となる放射線を光子(γ線)と中性子の2つに分け、各々、歯エナメル質の電子スピン共鳴 (Electron Spin Resonance, ESR) 計測、中性子によって体内組織に生成された<sup>24</sup>Na量に基づく線量評価法について検討している。

論文は6章から構成されている。

第1章で目的と過去の研究を概観した後、第2章では、光子被ばくの場合の歯エナメル質に記録された情報と、人体臓器・組織における線量の関係を明確にしている。従来、歯エナメル質 ESR 信号とエナメル質の線量の間の定量性については多くの機関で研究されていたが、実際に健康影響が問題となる臓器の線量との定量的な関係は未解明であった。そこで、人体を模擬するファントム (MIRD 型モデル) に歯の定義を組み込んだモデルを開発し、3次元放射線輸送計算コード (EGS4 及び UCGEN) を用いて、種々の光子エネルギーや入射方向に対する計算を繰り返し、エナメル質線量と臓器線量の関係を定量的に求めている。

第3章では、前章で得られた計算結果を検証するため、人体組織等価物質からなる頭部模型と硫酸カルシウムの熱ルミネッセンス線量計 (TLD) 素子を用いた実験を行っている。さらに、より正確な線量評価を目指して、実験に使用した模型のCT画像から計算用モデル (voxel モデル) を作成し、標準的な MIRD 型モデルとの比較、すなわち頭部構造の違いの影響についても検討している。これらより、歯エナメル質の ESR 計測に基づく臓器線量評価法の指針を与えている。

一方、放射線防護上もうひとつの重要な放射線である中性子については、体内中のナトリウム原子の中性子捕獲反応、<sup>23</sup>Na(n,γ)<sup>24</sup>Na により生成される<sup>24</sup>Na量を物理的に測定し、これから全身被ばく線量を推定するという手法について検討している。両者の関係は、入射する中性子のエネルギー分布と混在するγ線量に大きく依存するため、核燃料や周辺の遮蔽体、人体までに透過する物質、被ばく者の体格、入射方向など多くのパラメータが線量評価に影響を与えることになる。第4章では、種々の線源体系や照射条件に対してモンテカルロ計算 (MCNP) を繰り返し、<sup>24</sup>Na量と臓器線量との関係を詳細に求めている。これらの知見を用いることによって、実際の被ばくにおいても数10%程度の不確かさの範囲(被ばく状況の情報が加われば加わるほど小さくできる)で線量評価が可能であることが示されている。

氏名	高橋 史明		
論文 題目	高放射線量被ばく時の人体試料を用いた物理学的測定に基づく線量評価に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	小田 啓二
	副査	教授	石田 紀久
	副査	教授	北村 晃
	副査	教授	山内 知也

要 旨

これら計算結果は、第5章において、臨界事故を模擬できる過渡臨界実験装置 (TRACY、日本原子力研究開発機構) を用いた測定値と比較することによって検証している。実験では人体組織に近いポリメチルメタクリル樹脂に NaCl 溶液を注入して中性子照射を行い、体内ナトリウムの放射化を模擬している。また、以上の解析結果を基礎データとして内蔵させた線量評価プログラムを開発しており、これを用いることによって、実際の事故直後に得られると予想される情報から線量をすばやく推定することを可能にしたと言える。

第6章では、得られた結果をまとめ、今後の展開を示唆している。

以上のように、本研究は、放射線緊急時における生体試料(歯のエナメル質および体液)を用いた物理学的な測定結果に基づき線量を推定する手法を研究したものであり、放射線防護学に関する重要な新知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者の高橋史明は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。

よって、学位申請者の高橋史明は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。

よって、学位申請者の高橋史明は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。

よって、学位申請者の高橋史明は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。