

労災疾病臨床研究事業費補助金「創傷部アクチノイド汚染の迅速定量分析法に関する研究」

研究結果の概要(平成 29 年度)

研究代表者 吉井裕 (国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構)

研究の目的: 事故により創傷部が放射性物質で汚染された時、汚染の検出と定量は治療計画策定の上で欠くことができない。しかし、 α 核種による創傷部汚染では、 α 線が血液によって遮蔽されるため検出は困難である。本研究では、蛍光 X 線 (XRF) 分析法とカドミウムテルル (CdTe) 検出器による汚染イメージングを組み合わせた、創傷部アクチノイド汚染の迅速な検出・定量法を提案する。このような手法は我々が初めて提案している独創的な手法である。

研究結果の概要: 本研究の成果を以下に示す。捕集法については平成 28 年度の研究までに十分な成果が得られていたので、今年度は、直接法の実験系および Am イメージングとの組み合わせについて検討した。ヒト皮膚に近い表面構造を持つユカタンピッグ皮膚の表面に Am を 5%ほど含む硝酸 Pu 溶液を滴下して表面から α 線エネルギースペクトルを観測し、モンテカルロシミュレーションの結果と比較した。実測されたスペクトルとシミュレーションに比較から、Pu は皮膚表面から $0.5\mu\text{m}$ 程度の深さに分布しているのに対し、Am は $1.5\sim 2.5\mu\text{m}$ の深さに分布していることが明らかになった。ただし、この分布深さの相違は、Am イメージング及び蛍光 X 線分析においては問題にはならない。傷をつけたユカタンピッグ皮膚に各種濃度の硝酸プルトニウム溶液または硝酸プルトニウム溶液と実験用ヒト血液を滴下したものを凹型ポリエチレンブロックに埋め込み、表面をマイラ膜で覆ったモデルの作成に成功した (豚皮モデル、豚皮出血モデル)。これを用いて検量線を作成し、蛍光 X 線分析における信号強度から創傷部に付着しているプルトニウムの放射能を算出できるようになった。平成 27 年度に購入したハンドヘルド XRF 装置 S1 Tracer III-SD (BRUKER) について、X 線管から放出される入射 X 線をヒト皮膚に照射した場合の被ばく線量を推定するため、ガフクロミック線量計を用いて空気カーマの測定を行った。この結果、1 分間照射での空気カーマは $3.1\text{mGy}/\text{cm}^2$ となった。ユカタンピッグ皮膚による密封型汚染創傷モデルの作成方法を応用して、冷凍ヒト皮膚を用いて 1500 Bq の硝酸プルトニウム溶液を滴下したヒト皮膚切傷モデルを作成した。ここで、Am イメージングと組み合わせるため、Tracer-III-SD の照射野よりも広い約 13 mm の長さの切り傷モデルとした。モデル中の Am の分布を低エネルギー γ 線イメージング装置 MGC1500 (アクロラド) で明らかにし、その中で特に Am の分布量の高い領域を Tracer-III-SD で直接測定した。XRF 測定の結果から、照射範囲に分布する Pu の放射能は約 1100 Bq と推定された。これと Am イメージングにおける Am の分布を組み合わせることによって推定された創傷部全体の Pu の放射能は $1763\pm 440\text{ Bq}$ であり、誤差の範囲で滴下量 (1500 Bq) と一致した。これにより、創傷部の Am をイメージングして、かつ、その一部を XRF 測定し、これを組み合わせることにより創傷部全体の Pu 汚染量を算出する手法が確立された。

研究の実施経過:

(1) 豚皮に滴下した硝酸 Pu 溶液の皮膚への浸透に関する検討

ユカタンピッグ皮膚 (チャールス・リバー(株)) に汚染核種として ^{239}Pu 溶液 (^{241}Am を含む) 又は ^{241}Am 溶液を $10\mu\text{l}$ (約 50 Bq) 滴下し、滴下後経時的に α 線スペクトロサーベイメータ (PASS-100DD、(株)プロテック) で計測したデータを用いモンテカルロシミュレーションとの比較を行った。実測されたスペクトルとシミュレーションに比較から、Pu は皮膚表面から $0.5\mu\text{m}$ 程度の深さに分布しているのに対し、Am は $1.5\sim 2.5\mu\text{m}$ の深さに分布

していることが明らかになった。

(2) 豚皮及びヒト皮を用いた密封型汚染創傷モデルの作成法の検討

豚皮やヒト皮の表面に傷をつけたモデルに硝酸プルトニウム溶液を滴下したモデルを作成する際、汚染拡大防止のために表面をマイラ膜などで覆う必要がある。しかし、皮膚の表面にマイラ膜などを接着するのは容易ではない。そこで、凹型ポリエチレンブロックに傷をつけた豚皮やヒト皮を埋め込み、そこに硝酸プルトニウム溶液および実験用ヒト血液を滴下して、ポリエチレンブロックに両面テープを貼ってマイラ膜を取り付ける方法を考案した。ユカタンピッグ皮膚に傷をつけ、硝酸プルトニウム溶液のみを滴下したものを豚皮モデル、硝酸プルトニウム溶液と実験用ヒト血液を滴下したものを豚皮出血モデル、実験用ヒト皮膚に傷をつけ、硝酸プルトニウム溶液と実験用ヒト血液を滴下したものをヒト皮膚切傷モデルと呼ぶ。

(3) 豚皮出血モデルを用いたプルトニウム検量線の作成

豚皮出血モデルとして、150, 300, 450, 600, 750 Bq のプルトニウムを含む硝酸プルトニウム溶液と 2 μ L の実験用ヒト血液を滴下したモデルを作成し、XRF 分析をおこなった。これにより、創傷部プルトニウム汚染を定量するための検量線を作成した。

(4) ガフクロミック線量計による線量測定

本研究で提案している汚染検査法は創傷部に X 線を照射することになるため、被ばく線量の推定が欠かせない。平成 28 年度まではポリマーゲル線量計による線量評価を目指して研究を進めてきたが、ゲルを封入するプラスチックケースによる低エネルギー X 線の吸収と散乱が無視できないため、今年度は方針を変更してガフクロミック線量計で線量評価を行うこととした。ハンドヘルド XRF 装置 Tracer III-SD について、X 線管から放出される入射 X 線をヒト皮膚に照射した場合の被ばく線量を推定するため、ガフクロミック線量計を用いて空気カーマの測定を行った結果、1 分間照射での空気カーマは 3.1 mGy/cm² となった。

(5) Am イメージングとの組み合わせによる汚染定量法の確立

平成 29 年度は、ヒト皮膚切傷モデルのイメージングを行い、蛍光 X 線分析装置の測定可能面積中のアメリシウムが、アメリシウム全汚染量の 58 % であるという結果を得た。この結果と、蛍光 X 線分析の測定領域での汚染量 1014 \pm 253 Bq から、プルトニウム汚染全量が 1763 \pm 440 Bq であると推定された。

(6) プルトニウムの検出に適した一次 X 線フィルターの探索

一次 X 線フィルターとして Pu L α 線の周辺でのバックグラウンドを削減しつつ、プルトニウムの励起光はできるだけ削減しないような一次 X 線フィルターを探索することで、装置付属のフィルターよりも検出下限値を引き下げることが可能である。平成 29 年度は 100 μ m の亜鉛箔がプルトニウムの定量に最適であることを明らかにした。

(7) 広照射野蛍光 X 線分析装置の開発と基礎検討

広照射野蛍光 X 線分析装置の開発では、平成 27 年度と平成 28 年度に既存の XRF 装置を用いて基礎検討を行い、薄型コリメータによって広い照射野が実現できることを明らかにした。これに基づき、平成 29 年度に装置を制作し、レジンモデルによってその基本性能を評価した。

結論及び今後の展望：

蛍光 X 線分析によって創傷部アクチノイド汚染を迅速に評価するための手法を確立することができた。今後は、フィルターのさらなる改良などによって、検査による被ばく量の低減を図り、実用化に道筋をつけることが肝要であると思われる。