

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和3年度年次報告書（詳細版）

研究課題名	不溶性セシウム粒子による生物影響の解明に向けた分野横断的共同研究 「細胞実験・個体解析結果をモデルとする被ばく線量評価」
研究期間	令和3年4月1日～令和4年2月28日

氏名		所属機関・職名
主任研究者	鈴木 正敏	東北大学災害科学国際研究所・講師
分担研究者	遠藤 暁	広島大学大学院先進理工系科学研究科・教授

氏名		所属機関・職名
研究協力者	田中 憲一	広島大学大学院先進理工系科学研究科・准教授
研究協力者	梶本 剛	広島大学大学院先進理工系科学研究科・助教
研究協力者	畑 和鷹	広島大学大学院先進理工系科学研究科・M1

研究要旨	放射性微粒子による被ばく線量の推定を行うことを目的に、3つのテーマ、(1)放射性微粒子を用いた細胞照射実験条件における照射線量率推定、(2)肺胞に沈着した放射性微粒子による線量分布計算、(3)細胞切片中の放射性微粒子のマイクロPIXEシミュレーションを実施した。(1)では、放射性微粒子を用いた細胞実験の被ばく線量を決定し、(2)では、肺胞中の局所線量は、ICRPの換算係数で評価した線量より2～3桁高いことを明らかにした。(3)では、細胞切片中の放射性微粒子は、マイクロPIXE分析で探索でき、(1)の結果を用いて局所線量を推定できることを確認した。
キーワード	放射性微粒子、内部被ばく、被ばく線量、 ¹³⁷ Cs、局所線量

I 研究目的

福島第一原子力発電所（福島原発）事故によって大量の放射性物質が放出され、陸地・海洋を広く汚染した。放出された放射性物質の中には、高い放射性 Cs 濃度を示し、酸化ケイ素を主成分とする放射性微粒子が含まれていることが報告されている。酸化ケイ素が主成分のため不溶性を示し、粒径は数 μm ～数 $100\mu\text{m}$ のものがあり、小さな微粒子は再浮遊して体内に取り込まれると、長時間同じ場所に留まり、局所的な内部被ばくの要因となることが予想される。

放射性微粒子による内部被ばくの影響を明らかにするため、生物実験に必要な被ばく線量の導出と放射性微粒子近傍の局所線量の推定を目的として、3つのテーマ、(1) 放射性微粒子を用いた細胞照射実験条件における被ばく線量率推定、(2) 肺胞に沈着した放射性微粒子による線量分布計算、(3) 細胞切片中の放射性微粒子のマイクロPIXEシミュレーションを実施した。

II 研究方法

II-1 これまでの研究

2019 年度：放射性微粒子を用いた細胞照射実験条件における被ばく線量率推定

東北大学・鈴木は、放射性微粒子を用いた細胞実験を行った。この細胞実験ではヒト上皮細胞を $\phi 10\text{cm}$ のディッシュに蒔き放射性微粒子をディッシュ表面に配置し、照射を行っていた。細胞の放射線被ばく応答は、53BP1 の DNA 二重鎖切断を蛍光免疫染色法で検出している。放射性微粒子による被ばく線量を推定するため、PHITS コードを利用し、直径 10cm のディッシュ内に、細胞を模擬した高さ $10\mu\text{m}$ の細胞領域、培地を模擬する高さ 2mm の水、細胞領域に接するようにディッシュ中心に線源を配置した。細胞領域へのエネルギー付与を動径の関数（R-Z 座標系）として計算した。1 Bq の ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{90}Sr の3種類の放射性微粒子線源に対して、直径 1、10、50、75、100、150、200、500 μm の SiO_2 で8つの大きさに対して計算を行った。線源 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 及び ^{90}Sr から放出される γ ・X 線を考慮した光子および β 線・内部転換電子・オージェ電子を発生させ、細胞層への付与エネルギーを微粒子からの距離の関数として計算した。この結果は、細胞実験の解析に利用された。

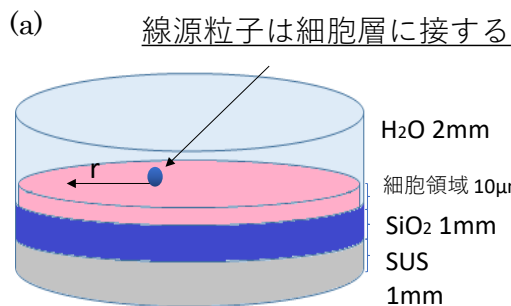
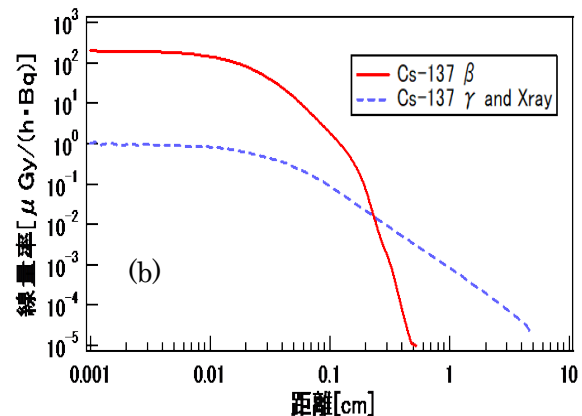


図1 (a)計算幾何形状、(b) ^{137}Cs の計算結果



2020 年度：肺胞に沈着した放射性微粒子による線量分布計算

気管支領域に沈着した不溶性粒子は線毛細胞による線毛運動により咽頭まで運ばれるか、咳反射によって取り除かれる。一方、肺胞に沈着した不溶性粒子は主に肺胞マクロファージによって取り除かれるが、一般に粘膜線毛輸送で排出される軌道に沈着した粒子より保持期間が長い¹⁾。直径 $1.2\mu\text{m}$ と $3.9\mu\text{m}$ の粒子を ^{85}Sr または ^{88}Y でラベルし、7名のボランティアに吸入させて不溶性粒子のクリアランスについての実験を行った結果では、 $1.2\mu\text{m}$ の粒子は約8%、 $3.9\mu\text{m}$ の粒子は約40%が6日以内に初期沈着場所からの移動が確認されたが、肺から除去される半減期はどちらの粒子も約600日との報告がある¹⁾。したがって、大気中に浮遊した粒径の小さな放射性微粒子は、吸入摂取により肺胞に取り込まれる可能性がある。また、放射性微粒子が沈着した肺胞細胞周辺では、局所的に被ばく線量が高まる可能性がある。本研究では、直径 $200\mu\text{m}$ 球およびその表層部分に厚さ $0.1\mu\text{m}$ の上皮細胞とモデル化した肺胞中に沈着した直径 $1\mu\text{m}$ の球状放射性微粒子を仮定し、核種は ^{90}Sr 、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の3種について、肺中の局所線量分布を計算した。そ

の結果、放射性微粒子の沈着場所周辺の線量率は、粒子の沈着点で ICRP の線量換算係数を用いた線量率に比べ最大 5 桁高い値を示した。また、沈着点より 1 cm 程度離れた肺胞では、ICRP の線量換算係数を用いた線量率と同程度と推定された。これらの結果は、不溶性粒子による被曝の特徴である空間分布を持った局所線量は、ICRP 計算モデルでは再現されず、局所的な生物応答を過小評価する可能性が示唆された。

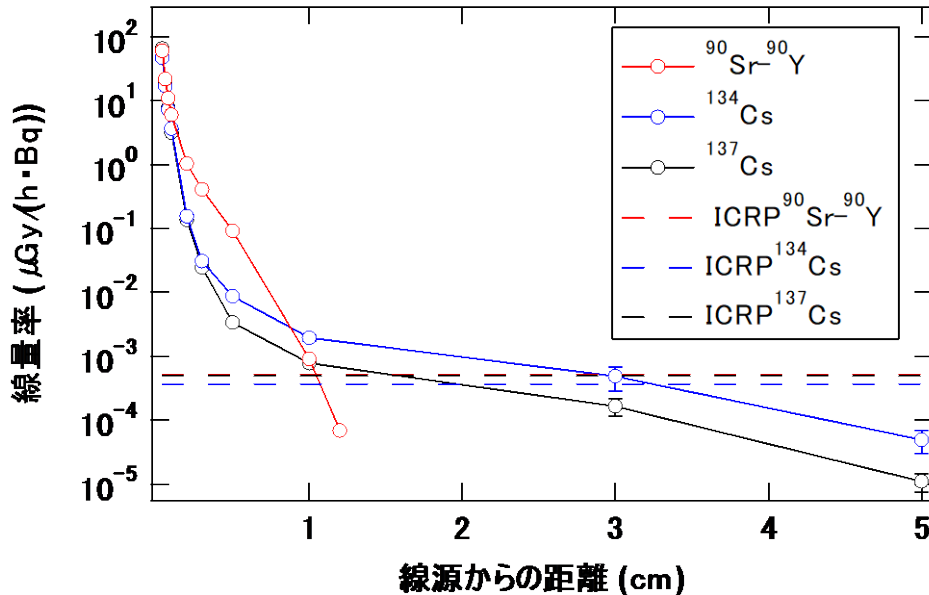


図2 肺胞に沈着した放射性微粒子による線量分布

II-2 最終年度

最終年度においては、肺細胞中の放射性微粒子のマイクロ PIXE 探索試験実施に向けて PHITS コードを用いた放射性微粒子のマイクロ PIXE シミュレーションとマウス微粒子投与実験の線量評価を実施した。その概要を以下にまとめるとともに、2022年3月24、25日に量子科学技術研究開発機構(QST)放射線医学研究所マイクロ PIXE 分析ラインにおいて、肺細胞中の放射性微粒子のマイクロ PIXE 探索試験実験を実施したので、プレリミナリーなファーストデータを示す。

II-2-1 肺細胞中の放射性微粒子のマイクロ PIXE シミュレーション

肺組織中に放射性微粒子が存在するとき、元素分析によって放射性微粒子を同定・分析が可能であれば、2019、2020年度に実施した評価法を用いて、肺胞中もしくは肺中の局所線量分布を決定できる。そこで、マイクロ PIXE 分析により放射性微粒子を同定・分析が可能かを判断するため、モンテカルロシミュレーションを実施した。

シミュレーションには PHITS モンテカルロコードを使用した。PHITS コードには、陽子入射 X 線放射過程が組み込まれていない。そこで、任意の元素に対する陽子入射 X 線放射断面積を計算するツールを作成し、陽子線のエネルギーと元素濃度を入力することで X 線収量を決定した。得られた X 線収量を PHITS コードの線源へ入力し、測定器である Si (Li) 検出器へのエネルギー付与をスコアすることで計測される X 線スペクトルをシミュレートすることとした。

元素ごとの電離断面積は、NEA の PIXE ライブラリ²⁾を利用した。図3に PIXE ライブラリから抽出した K と L 殻の電離断面積の例を示す。

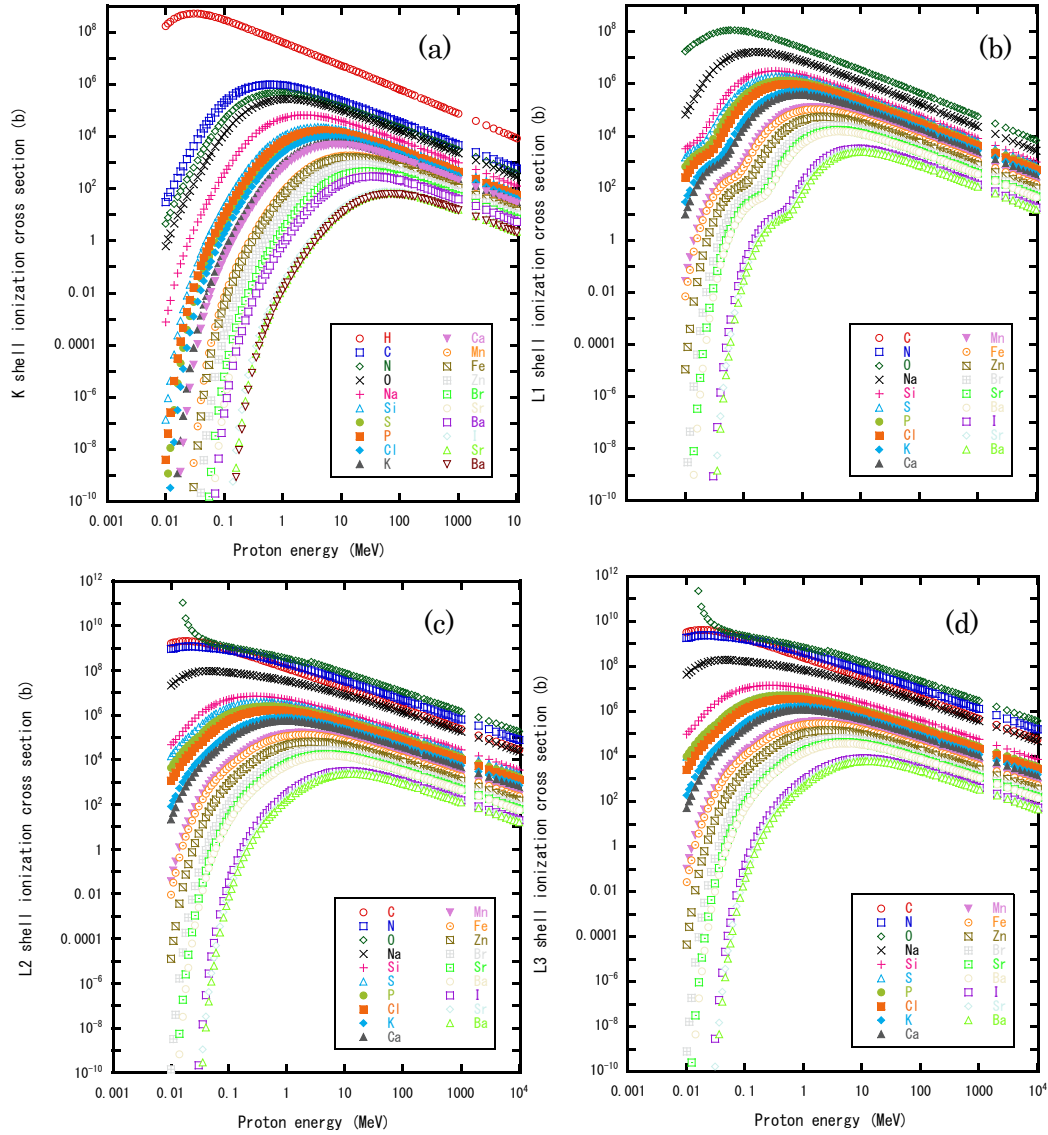


図3 NEA から抽出した電離断面積の陽子エネルギー依存性の例。
 (a) K 殻、(b) L1 殻、(c) L2 殻、(d) L3 殻

NEA の PIXE ライブラリから抽出した電離断面積を PIXE 分析で使用する 0.1~10 MeV の範囲でフィッティングすること関数化した。それぞれの殻の電離断面積を用いて、K、L、M 殻の X 線生成断面積は次式で与えられる³⁾。

K 殻 :

$$\sigma_{K_\alpha}^x = \left(\frac{\Gamma_{K_\alpha}}{\Gamma_K} \right) \omega_K \sigma_K^l, \quad K_\alpha \quad (II-1)$$

$$\sigma_{K_\beta}^x = \left(\frac{\Gamma_{K_\beta}}{\Gamma_K} \right) \omega_K \sigma_K^l, \quad K_\beta \quad (II-2)$$

L 殻

$${}^1\sigma_{Lp}^x = \sigma_{L1}^l \omega_{L1} \left(\frac{\Gamma_{Lp}}{\Gamma_{L1}} \right), \quad p = \beta_3, \beta_4, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_{44}, p_{23} \quad (II-3)$$

$${}^2\sigma_{Lp}^x = (\sigma_{L1}^l f_{L1,2} + \sigma_{L2}^l) \omega_{L2} \left(\frac{\Gamma_{Lp}}{\Gamma_{L2}} \right), \quad p = \beta_1, \eta, \gamma_1, \gamma_5, \gamma_6 \quad (II-4)$$

$${}^3\sigma_{Lp}^x = (\sigma_{L1}^l (f_{L1,2} f_{L2,3} + f_{L1,3} + f'_{L1,3}) + \sigma_{L2}^l f_{L2,3} + \sigma_{L3}^l) \omega_{L3} \left(\frac{\Gamma_{Lp}}{\Gamma_{L3}} \right), \quad (II-5)$$

$$p = \alpha_1, \alpha_2, \beta_5, \beta_6, \beta_{215}, l$$

M 殻

$${}^1\sigma_{Mp}^x = \sigma_{M1}^l \omega_{ML1} \left(\frac{\Gamma_{Mp}}{\Gamma_M} \right), \quad p = M1-N23, M1-O23 \quad (\text{II-6})$$

$${}^2\sigma_{Mp}^x = (\sigma_{M1}^l f_{M1,2} + \sigma_{M2}^l) \omega_{M2} \left(\frac{\Gamma_{Mp}}{\Gamma_{M2}} \right), \quad p = M2-N1, M2-O1, M2-O4, M2-N4 \quad (\text{II-7})$$

$${}^3\sigma_{Mp}^x = (\sigma_{M1}^l (f_{M1,2} f_{M2,3} + f_{M1,3}) + \sigma_{M2}^l f_{M2,3} + \sigma_{M3}^l) \omega_{M3} \left(\frac{\Gamma_{Mp}}{\Gamma_{M3}} \right), \quad (\text{II-8})$$

$$p = M3-N1, M3-N2, M3-O1, M3-O45, M3-N5, M3-N4, M3-N67$$

$${}^4\sigma_{Mp}^x = \left(\sigma_{M1}^l (f_{M1,4} + f_{M1,2} f_{M2,4} + f_{M1,3} f_{M3,4} + f_{M1,2} f_{M2,3} f_{M3,4}) + \sigma_{M2}^l (f_{M2,4} + f_{M2,3} f_{M3,4}) + \sigma_{M3}^l f_{M3,4} + \sigma_{M4}^l \right) \omega_{M4} \left(\frac{\Gamma_{Mp}}{\Gamma_{M4}} \right), \quad (\text{II-9})$$

$$p = M4-N2, M4-N3, M4-N6, M4-O3, M4-O2$$

ここで、 ω_K は K 殻蛍光収率、 σ_K^l は K 殻電離断面積、 Γ_{K_α} 、 Γ_{K_β} 、 Γ_K は K 殻の α 、 β および全放出比である。同様に、 ω_{L_i} ($i=1, 2, 3$) は L 副殻の蛍光収率、L 副殻電離断面積を $\sigma_{L_i}^l$ ($i=1, 2, 3$)、 Γ_{L_p} は L 殻の p 線の放出比、 Γ_{L_i} ($i=1, 2, 3$) は、L 副殻の全放出比、 $f_{L_{i,j}}$ は L 殻のコスタークローニツヒ遷移確率を表す。 ω_{M_i} ($i=1, 2, 3, 4, 5$) は M 副殻の蛍光収率、M 副殻電離断面積を $\sigma_{M_i}^l$ ($i=1, 2, 3, 4, 5$)、 Γ_{M_p} は M 殻の p 線の放出比、 Γ_{M_i} ($i=1, 2, 3, 4, 5$) は、L 副殻の全放出比、 $f_{M_{i,j}}$ は M 殻のコスタークローニツヒ遷移確率を表す。これらのパラメータは、参考文献³⁾に記載されている値を用いた。これらのデータをエクセルにまとめ、陽子エネルギーと元素を選択すると各元素の各殻からの X 線の生成断面積を出力する計算ツールを作成した。

PHITS の線源を作成するために、ICRU44⁴⁾に記載されている肺細胞の主要元素と Nolan 等により報告させた肺の微量元素⁵⁾を仮定し相対的な X 線収量を計算した。仮定した元素質量比を表 1 に示す。また、放射性微粒子は、密度 2 g/cm³ の SiO と仮定し、¹³⁷Cs 放射能 5Bq、⁹⁰Sr 放射能 0.013Bq を仮定した (表 2)。これらの元素濃度より 1 g 当たりの標的原子数 N_t^i ($i=H, C, \dots, V, Si, \dots, Sr$) とし、2.6MeV 陽子入射当たり ($\Phi_p=1$ (p/cm²)) の X 線の収量 (Y_X^i) を以下の式で決定した。

$$Y_X^i = \Phi_p \cdot \sigma_X^i \cdot N_t^i \quad (\text{II-10})$$

ここで、 σ_X^i は、元素 i ($i=H, C, \dots, V, Si, \dots, Sr$) の X 線生成断面積を示す。ビーム領域から X 線発生して X 線が Si (Li) 検出器に付与エネルギースペクトルを計算した。Si (Li) 検出器の配置は、量子科学技術研究開発機構 (QST) 放射線医学研究所 PIXE 分析ライン⁶⁾の幾何形状 (図 4) を参考に入力した。量子科学技術研究開発機構 (QST) 放射線医学研究所マイクロ PIXE ビームラインでは、ビーム径が 1 mm 角 \sim 0.1 mm 角ビームが可能であることから、1 mm、0.1 mm、0.01 mm ϕ で計算を行った。また、散乱陽子の効果を考慮するため、組織切片模擬物質に 2.6 MeV 陽子を入射させ、散乱線が Si (Li) 検出器に付与するエネルギー分布も別途計算した。

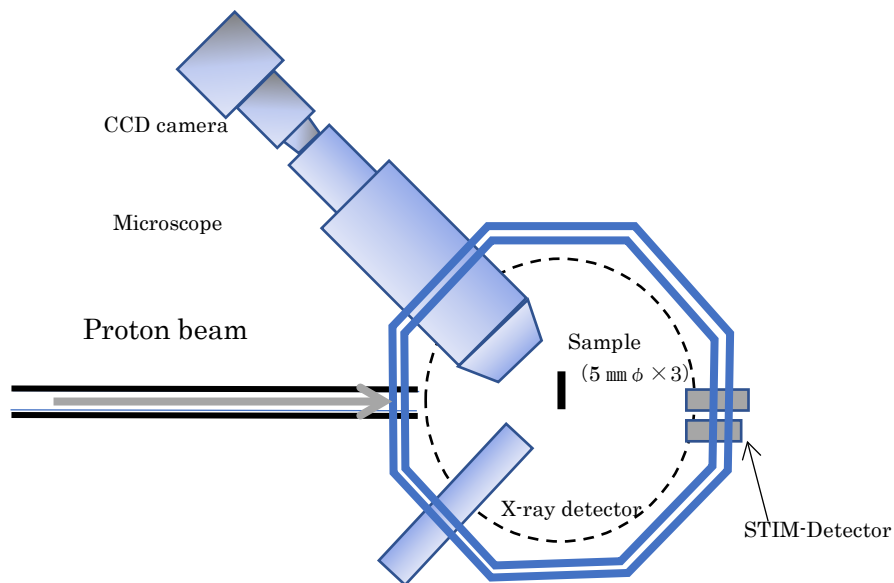


図4 量子科学技術研究開発機構（QST）放射線医学研究所 PIXE 分析ラインの幾何形状⁶⁾

表1 肺細胞の主要元素⁴⁾と肺の微量元素⁵⁾の質量比

H	C	N	O	Na	P	S	Cl	K	
%									
10.3	10.5	3.1	74.9	0.12	0.2	0.3	0.26	0.14	
Ca	Zn	Mn	Fe	Rb	Mg	Ce	Br	Cr	V
ppm									
239	8.8	0.24	139	6.16	440	0.12	7	0.255	3

表2 放射性微粒子の元素濃度

Si	O	Cs	Sr
%		Bq	
46.6	53.3	5	0.013

II-2-2 マウス微粒子投与実験の線量評価

研究分担者の山田により、マウスへの模擬微粒子投与実験が実施されている。この実験のマウス個体ごとの線量評価を実施した。線量評価にはマウスボクセルファントムを用いた。使用したマウスボクセルファントムは、遠藤等が作成し、¹³⁷Cs、¹³⁴Cs および ⁹⁰Sr 1 Bq を 12 の各臓器を線源臓器とし、12 の標的臓器ごとに付与されたエネルギーより臓器線量率換算係数を推定したものである⁷⁾。マウスボクセルファントムを図5に示す。

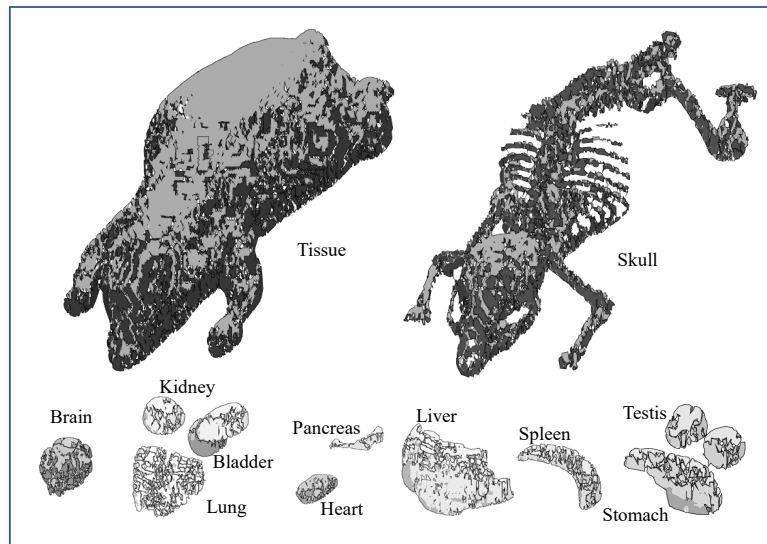


図5 使用したマウスボクセルファントム⁸⁾ (Endo et al JRR 2020 より転載)

遠藤等の報告⁷⁾に記載された¹³⁷Csの肺線量換算係数と量子科学技術研究開発機構(QST)放射線医学研究所・山田から提供されたマウス肺中の¹³⁷C放射能実測値を用いて肺線量率を決定後、¹³⁷C投与からの経過時間で積分して肺線量を求めた。

II-2-3 マイクロPIXE分析試験

これまで、新型コロナウイルス蔓延防止のため、見送られてきたマイクロPIXE分析試験を、2022年3月24～25日に実施した。プレリナリであるが、簡単に報告しておく。

本試験実験は、量子科学技術研究開発機構(QST)放射線医学研究所マイクロPIXE分析ラインで実施した。試験では、放射性粒子による汚染が心配されたため、今回の実験では広島原爆由来と報告⁸⁾されている宇品海岸の砂浜で採取した熔融粒子を用いてマイクロPIXE分析試験を行った。試験に用いた熔融粒子のSEM-EDS分析の結果では、福島原発事故由来の放射性粒子⁹⁾とよく似た成分が検出された他、Feの含有量が高く、ほとんど¹³⁷Cs検出されていない。1gをGe測定で測定した結果、¹³⁷Cs含有量は 5.8 ± 4.2 mBq/gと得られており、粒子1個(～0.3 μg)当たりの放射能は、概算で～3 nBqと見積もられる。

測定は2種類で、1)薄膜上に粒子(直径約100 μm)を配置して、約500 μm角の領域を分析、2)肺組織切片上に粒子(直径約100 μm)を肺組織切片に載せ、約2000 μm角の領域を分析した。

(倫理面への配慮)

該当なし

III 研究結果

最終年度においては、肺細胞中の放射性微粒子のマイクロPIXE探索試験実施に向けてPHITSコードを用いた放射性微粒子のマイクロPIXEシミュレーション、マウス微粒子投与実験の線量評価および放射性微粒子のマイクロPIXE分析試験を実施した。それぞれの項目に分けて結果を以下に示す。

III-1 放射性微粒子のマイクロPIXEシミュレーションの結果

計算結果を図6に示す。この図中には、原子制動放射の成分を合わせて示している。原子制動放射の成分は、0.5~1 MeV陽子がAl標的で生成する原子制動放射⁷⁾を用いて外挿で推定した。ビーム径0.1 mmまでは、肺組織中元素からのX線が支配的で放射性微粒子からのX線は同定できない。0.01 mmでは¹³⁷CsからのLX線が確認できる。この結果より、10 μm相当のマイクロビームを用いることで、組織切片中の放射性微粒子の探索が可能と考えられる。

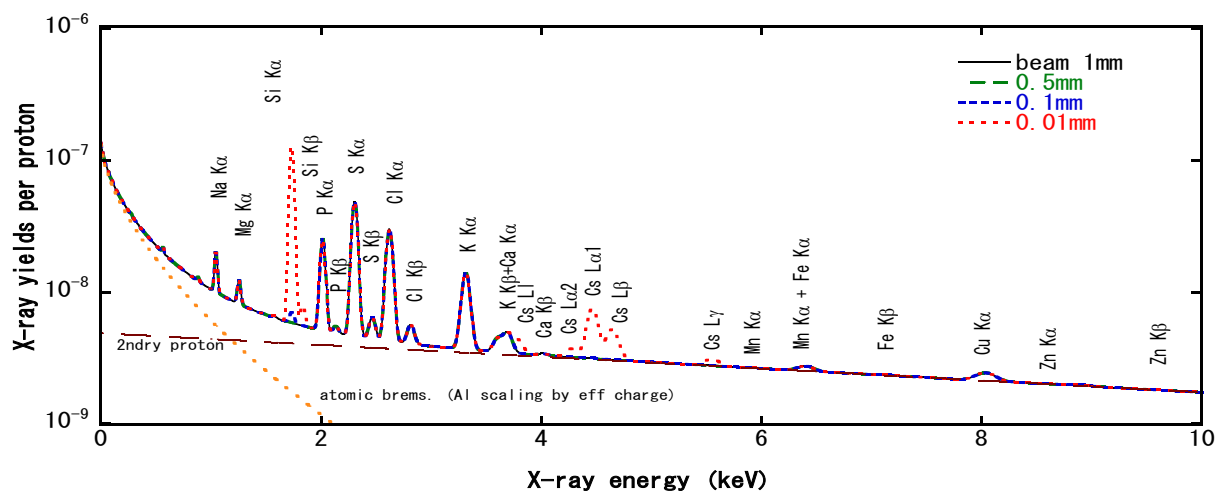


図6 2.6 MeV陽子入射当たりのX線測定スペクトル計算結果。

放射性微粒子のマイクロPIXEシミュレーションでは、ビーム径に依存した測定スペクトルを推定し、10 μm程度のマイクロビームで、放射性微粒子の探索および同定が可能であることが示された。この結果を元にマイクロPIXE試験実験を行い、現在、そのデータ解析が進行中である。

III-2 マウス微粒子投与実験の線量評価結果

山田から提供されたマウス肺中の¹³⁷C放射能実測値データを表3に示し、線量率の経時変化を図7に示す。線量率の経時変化を2成分の指数関数で最少二乗回帰を行い、時間積分地を決定した。得られた積分線量を表3に合わせて示す。この結果をもとに、山田のマウス実験のデータ解析が行われている。

表3 マウス肺中の¹³⁷Cs放射能実測値

マウス 番号	投与後日数	体重 (g)	肺重量 (g)	肺放射活 性(Bq)	肺+気 管・縦隔 組織 放射活 性(Bq)	Bq/kg in lung	Bq/kg in tissue	conv fact lung	conv fact tissue	dose rate of lung (uGy/d)	Cumulative lung dose (uGy) double exp
1	1	18.9	0.243	125.1	155.9	514814.	1650.9	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	9.15×10^2	1443
2	1	18.8	0.158	91.9	118.4	581645	1421.5	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	1.03×10^3	1443
3	7	17.6	0.116	7.9	9.0	68103.4	62.92	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	1.21×10^2	3351
4	7	17.0	0.117	11.9	13.8	101709	112.5	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	1.81×10^2	3351
5	21	21.3	0.111	3.9	4.3	35135.1	18.88	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	6.24×10^1	4780
6	21	21.5	0.113	4.5	4.7	39823.0	9.352	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	7.07×10^1	4780
7	52	22.4	0.140	0.7	0.7	5000.0	0	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	8.88×10^0	5730
8	52	23.0	0.118	0.7	0.6	5932.2	0	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	1.05×10^1	5730
9	80	24.2	0.133	0.4	0.4	3007.5	0	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	5.34×10^0	5882
10	80	22.5	0.117	0.1	0.1	854.7	0	1.78×10^{-3}	6.94×10^{-4}	1.52×10^0	5882

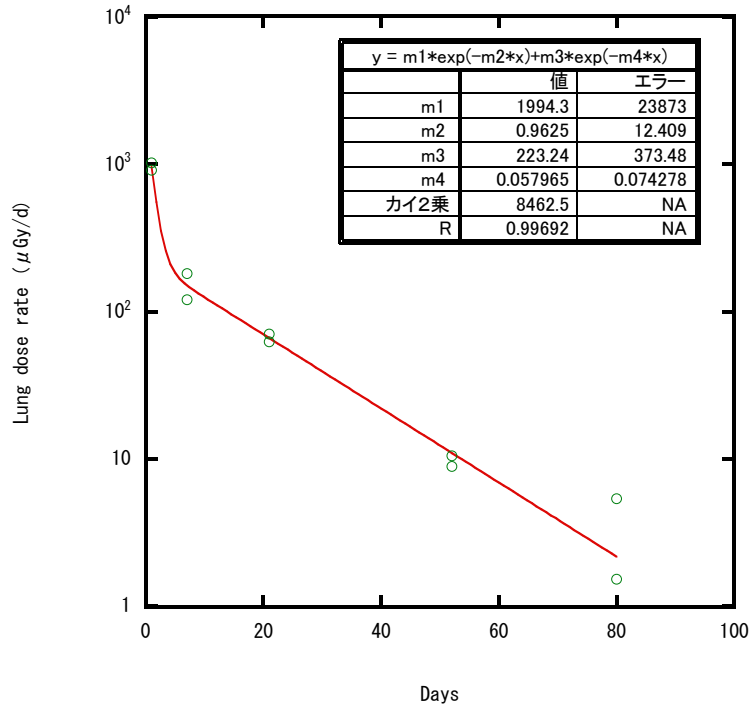


図7 線量率の経時変化

III-3 マイクロPIXE分析試験の結果

薄膜上に粒子（直径約 100 μm）を配置し、約 500 μm 角の領域を分析で得られた元素マップと X 線スペクトルを図 8 に、肺組織切片上に粒子（直径約 100 μm）を肺組織切片に載せ、約 2000 μm 角の領域を分析で得られた元素マップと X 線スペクトルを図 9 に示す。薄膜上の粒子はバックグラウンドが少なく粒子の元素分析とマッピングが綺麗に観察できる。それに対し、肺組織切片上に配置した微粒子では、組織に含まれる P、Cl、S、K が検出された。この結果より、肺胞中に取り込まれた放射性微粒子の探索できるの可能性が示唆された。今後、解析を進めるとともに、再度実験を実施する予定である。

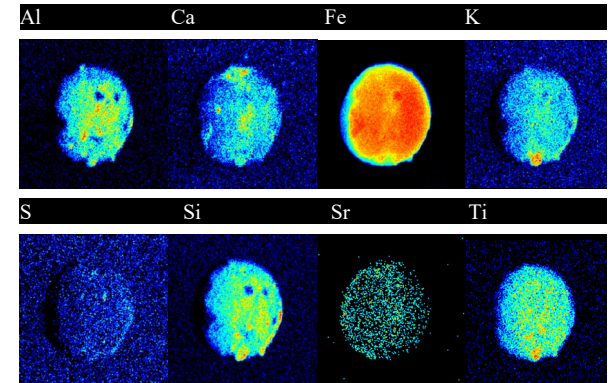
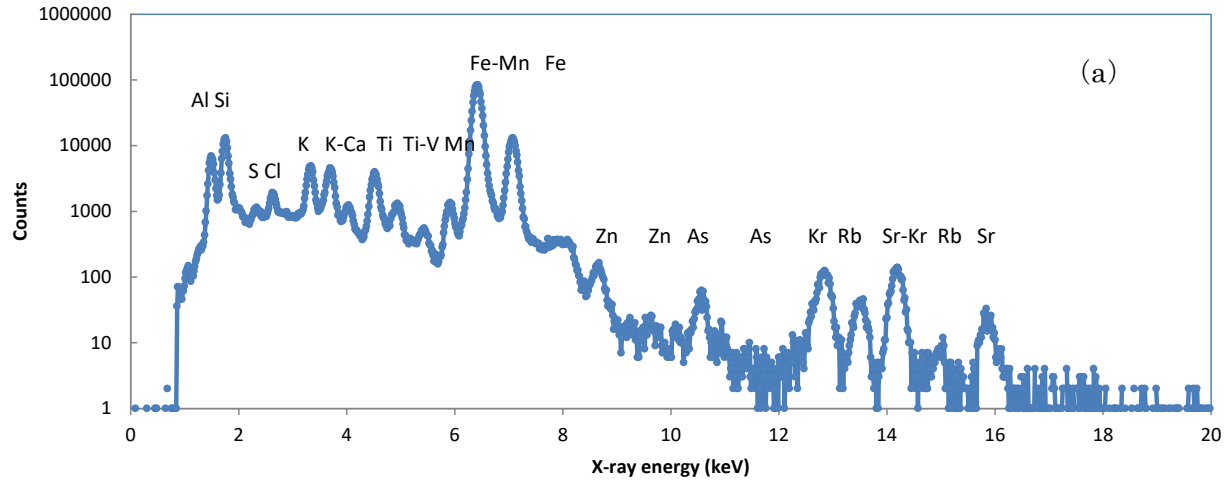


図8 薄膜上に粒子の分析結果. (a) 測定スペクトル、(b) 元素マッピング

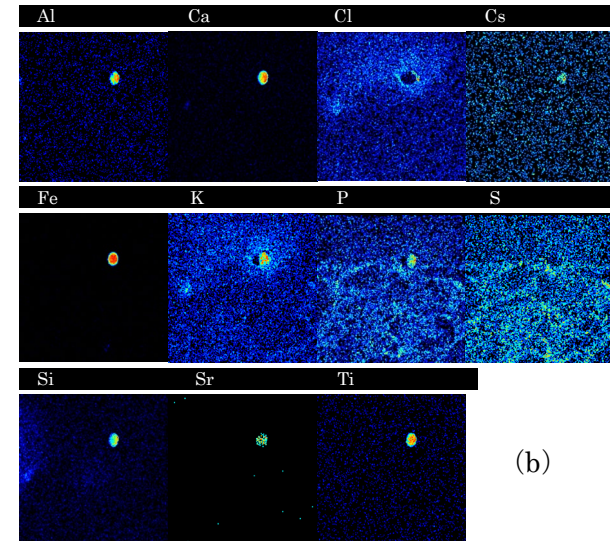
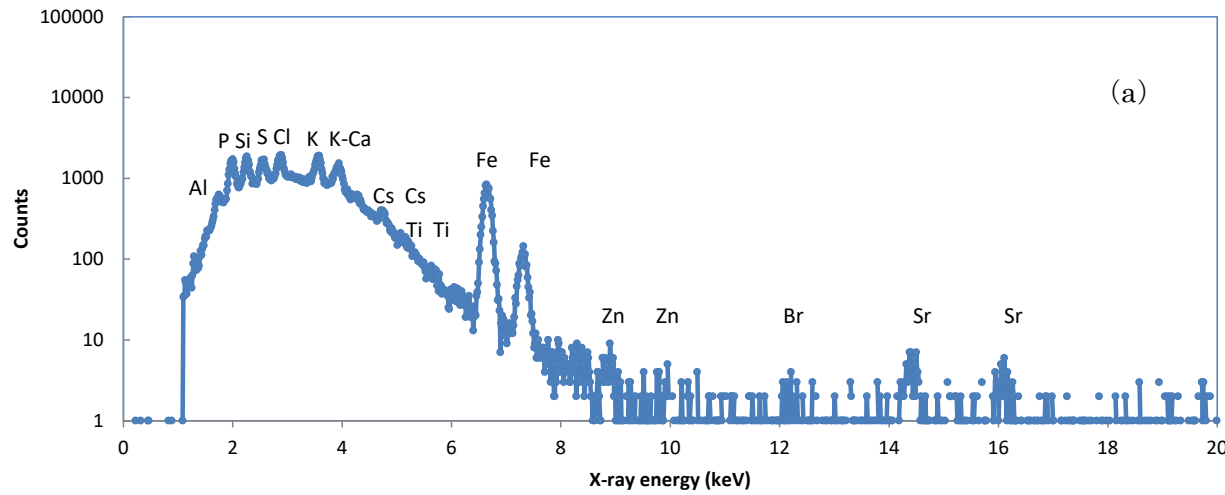


図9 組織切片上の粒子の分析結果. (a) 測定スペクトル、(b) 元素マッピング

IV 考察

初年度に実施した研究により、放射性微粒子の位置が決定されれば、微粒子からの距離の関数で被ばく線量の推定が可能である。また、2年度に実施した研究により、肺胞中に沈着した放射性微粒子は、局所的に高い線量を与え、ICRPにまとめられた換算係数を用いた線量に対し、5桁で高い線量を与えることになる。したがって、肺組織中に放射性微粒子が沈着した場合、その位置を同定できれば、局所被ばくを議論できると考えられる。更に、最終年度の研究から、肺組織中の放射性微粒子の位置はマイクロPIXE分析で決定可能であり、ひいては放射性微粒子による局所被ばくの位置と線量の推定が可能であると考えられる。これらの手法を用いることで、ICRPの換算係数で評価した線量が低い場合であっても、局所的に高い障害が議論できる可能性が示唆された。このような放射性微粒子は、通常のICRPの線量評価の結果よりも、見かけ上高い生物効果比（RBE）を示すと考えられる。

V 結論

3年間の研究によって、放射性微粒子による内部被ばくは、見かけ上高い生物効果をしめす可能性が示された。したがって、今後も本研究は継続されるべき研究と考えられる。このような研究は、生物のみでなく、線量評価を担う放射線物理や病理学や統計解析の手法も必要であり、他分野横断的な研究が必要である。

この研究に関する現在までの研究状況、業績
なし

引用文献

- 1) 第5回微小粒子状物質健康影響評価検討会 資料1-3,
http://www.env.go.jp/air/info/mpmhea_kentou/05/
- 2) NEA, PIXE2010: Proton/alpha ionization (K,L,M shell) tabulated cross section library, 2020.
- 3) J. Crawford, D. Cohen, G. Doherty, Calculated K, L and M-shell X-ray line intensities for light ion impact on selected targets from Z=6 to 100. the Institute for Environmental Research Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ISSN 10307745, ISBN 1921268131, 2011.
- 4) International Commission on Radiation Units and Measurements; ICRU, Tissue substitutes in Radiation Dosimetry and Measurements, Report 44, 1989,
- 5) Nolan et al, PROTON INDUCED X-RAY EMISSION ANALYSIS OF BIOLOGICAL SAMPLES: SOME APPROACHES AND APPLICATIONS, JRadioanal Nucl Chem, 133-42, 1997.
- 6) H. Imaseki, M. Yukawa, F. Watt, T. Ishikawa, H. Iso, T. Hamano, K. Matsumoto, N. Yasuda, The scanning microbeam PIXE analysis facility at NIRS, Nucl. Instr. Meth. B 210, 42-47, 2003.
- 7) K. Ozawa, J. H. Chang, Y. Yamamoto, and S. Morita, Atomic bremsstrahlung produced by light-ion-atom collisions below 1 MeV/amu, Phys Rev A 33(5), 1986.
- 8) S. Endo, Y. Matsutani, T. Kajimoto, K. Tanaka, M. Suzuki, Internal exposure rate conversion coefficients and absorbed fractions of mouse for ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs and ⁹⁰Sr contamination in body, J. Radiat. Res., 61(4), 2020, pp. 535-545, doi: 10.1093/jrr/rraa030, 2020.
- 9) M.A. M, Wannier, M, Urreiztieta, H, Wenk, V. C, Stan, N, Tamura, B, Yue, Fallout melt debris and aerodynamically-shaped glasses in beach sands of Hiroshima Bay, Japan, Anthropocene 25, 100196, 2019.
- 10) S. Nakamura, T. Kajimoto, K. Tanaka, M. Maeda, S. Endo, Measurement of ⁹⁰Sr radioactivity in cesium hot particle originating from Fukushima Nuclear Power Plant Accident, J. Radiat. Res. 59, 677-684, 2018.

Dose evaluation for the experiments using Cs-hot particle *in vitro* and *in vivo*

Satoru Endo¹, Kazutaka Hata¹, Tsuyoshi Kajimoto¹, Kenichiro Tanaka¹

¹ Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima, Japan

Keywords: radioactive microparticle; external exposure; radiation dose; ¹³⁷Cs; local dose

Abstract

We estimated local dose around the Cs-hot particle under two cases, (1) the cell exposed to the Cs-hot particle as the model for the *in vitro* experiments and (2) alveolar and lung in which the Cs-hot particle deposited as the model for the *in vivo* experiments our collaborator in this study performed. We also simulated for the micro-PIXE analysis in order to find out the Cs-hot particle in the lung tissue section.

We created the geometrical models in the PHITS Monte Carlo simulation code to reproduce the *in vitro* or *in vivo* experiment, calculated the dose-rate around the Cs-hot particle, and evaluated the local dose of the cell or entire lung exposed to the Cs-hot particle. The results of dose estimation were provided to investigate the relevance with biological changes shown in the experiments *in vitro* or *in vivo*. We also summarized the particle size- and distance-dependency on the local dose evaluation. Our evaluation also demonstrated that the local dose in the alveoli was 2-3 orders of magnitude higher than the dose evaluated by the ICRP conversion factor. In the simulation for micro-PIXE experiment, we demonstrated that the Cs-hot particle in tissue section can be detected by the micro-PIXE analysis and the local dose can be estimated using the dose evaluation system shown in this study.