

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和6年度年度報告書

研究課題名	不溶性セシウム粒子の生物影響に関する理解深化を目指す分野横断共同研究
令和6年度研究期間	令和6年4月1日～令和7年2月28日
研究期間	令和5年度～令和7年度（2年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	鈴木 正敏	東北大学・特任講師（研究）
分担研究者	二宮 和彦	広島大学・教授
分担研究者	遠藤 暁	広島大学・教授
分担研究者	山田 裕	量子科学技術研究開発機構放射線医学研究所・専門業務員
若手研究者		

キーワード	不溶性セシウム粒子、福島第一原子力発電所事故、局所内部被ばく、線量評価、発がん実験
-------	---

本年度研究成果
I 研究背景 生体内に放射性微粒子が沈着すると距離に応じて線量率が低下し、不均等な線量率分布で被ばくが生じる。均一な線量率での被ばくよりも生物影響が誘発されやすくなる、いわゆる「ホットパーティクル問題」が核燃料断片由来の放射性微粒子を用いた研究で提起されている¹⁾。核燃料断片はα線を放出するので粒子沈着部位の局所線量が高くなり、<i>in vitro</i> トランスフォーメーションアッセイでは均等被ばく時よりも形質転換率が上昇した。福島第一原発事故では二酸化ケイ素が主成分の放射性微粒子が放出された。本課題ではこれを不溶性セシウム粒子と呼称する²⁾。主に放射性セシウムが濃集しているため、不溶性セシウム粒子による被ばくではα線の寄与が極めて少ないと考えられている^{2,3)}。事故後の環境中で発見された不溶性セシウム粒子は、2号炉・3号炉から放出されたと推定される10μm以下の球形に100 Bq以下の放射能をもつタイプAと、タイプAよりも大きな不定形で数十から数千 Bqの放射能をもつ1号炉由来と推定されるタイプBの2種類がある⁴⁻⁶⁾。放射能が高い核燃料断片由来の放射性微粒子は発癌性を有するが、肺深部まで到達できるタイプA⁷⁾のように放射能が低く、α線を放出しない放射性微粒子に関する被ばく影響の知見は少ない。不溶性セシウム粒子のリスク評価にむけて、基礎的な知見の整備が必要である。 II 目的 不溶性セシウム粒子及び不溶性セシウム粒子の性状を模倣して実験的に作成した放射性模擬粒子を用いた生物影響解析と、不均等被ばく線量評価で得られる線量・効果関係から不溶性セシウム粒子の生物影響について検討する。

III 研究方法

土壌から不溶性セシウム粒子を単離し、放射化学的解析を行った。肺組織切片とシリカ粒子を用いてマイクロ PIXY 分析を行い、組織切片中のシリカ粒子の検出に関する検討を行った。シリカ粒子吸入による体内沈着と微粒子の性状との関連性についてシミュレーションを行うとともに、シリカ粒子の細胞内取り込みと影響解析を実施した。動物実験は、量子科学技術研究開発機構の動物実験委員会、東北大学動物実験専門委員会において審議され、承認を受けて実施した。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

- ・ 福島第一原発事故で放出された不溶性セシウム粒子 30 粒子を土壌から分離した。元素分析によって主成分が二酸化ケイ素、その他に Na、Al、Fe を含むこと、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ は約 0.95、 $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ は約 10^{-5} であることを示した。 ^{137}Cs をシリカ粒子に吸着させて約 100 kBq の放射性模擬粒子を作成した。(二宮・広島大学)
- ・ マイクロ PIXE 分析による肺組織切片中の Cs 含有微粒子の検出法を検討した。(1) 粒子を組織上にのせた場合と、(2) 組織切片で挟んだ場合のシリカ粒子を測定したスペクトル分析によって Si と Cs のピークを検出した。(2)と(1)のカウント比が Si で 0.062、Cs で 0.39 となり、この減衰が 15 μm 厚の組織切片による減衰をシミュレーションで計算した結果と矛盾がなく、肺胞に取り込まれた Cs 含有粒子を本法で解析可能であることを確認した。(遠藤・広島大学)
- ・ 粒径 3 μm のシリカ粒子を気管内投与したマウスの気道内の初期沈着割合を MPPD ソフトでシミュレーションした。この粒径の粒子が肺胞に到達可能であること、粒子の幾何標準偏差が主に肺胞の初期沈着に影響することを明らかにし、粒径、密度、幾何標準偏差が初期沈着へ及ぼす影響に関するデータを整備した。(鈴木・東北大学)
- ・ 気管内投与後のシリカ粒子が肺胞に到達しても肺胞上皮細胞内に取り込まれる頻度は低く、動物実験で示された発がん頻度の変化は、放射性模擬粒子が細胞表面に沈着して生じた影響である可能性を示唆した。また、細胞サイズよりも大きい不溶性セシウム粒子と共培養したヒト正常上皮細胞の遺伝子発現が主に放射線被ばくが原因であること、インターフェロンによるシグナル伝達経路の活性化をマイクロアレイ解析で明らかにした。(鈴木・東北大学)
- ・ 動物実験では供給業者の感染事故で実験動物の出荷が停止となったため、凍結受精卵を移植し、繁殖を継続した。(山田・量研機構)

V 結論

本課題の成果は、肺がんを誘発しやすいモデル動物へ放射性模擬粒子を気管内投与して得られた結果である。気管内投与は肺内への粒子の取り込みと被ばく線量推定の正確性を高めることができる一方で、原子力災害後の放射性微粒子が呼気吸入で取り込まれる経路とは異なる。微粒子の気道内沈着を推定するために使用しているソフトは、吸入と気管内投与にわけて微粒子の気道内沈着をシミュレーションすることが可能である。次年度は当初の計画内容に加えて、粒子投与法（取り込み経路）による微粒子の気道内沈着率の違いを推定し、気管内投与で得られる実験データから呼気吸入による影響を推定することを目的としたデータの整備に取り組む。最終年度は、不溶性セシウム粒子のリスクの有無やリスクを有する場合の条件などを検討し、環境保健行政に寄与する成果の取りまとめを目指す。

引用文献

- 1) Charles MW, Mill AJ, Darley PJ. Carcinogenic risk of hot-particle exposures. J. Radiol. Prot., 2003; 23: 5-28.
- 2) Adachi K, Kajino M, Zaizen Y, *et al.* Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident. Sci. Rep., 2013; 3: 2554.
- 3) Ninomiya K. Properties of radioactive Cs-bearing particles released by the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. Fukumoto M, editor. Low-dose radiation effects on animals and ecosystems. Singapore: Springer Nature; 2020. p. 195-204.
- 4) Igarashi Y, Kogure T, Kurihara Y, *et al.* A review of Cs-bearing microparticles in the environment emitted by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. J. Environ. Radioact., 2019; 205-206: 101-18.
- 5) Miura H, Kurihara Y, Yamamoto M, *et al.* Characterization of two types of cesium-bearing microparticles emitted from the Fukushima accident via multiple synchrotron radiation analyses. Sci. Rep., 2020; 10: 11421.
- 6) Satou Y, Sueki K, Sasa K, *et al.* Analysis of two forms of radioactive particles emitted during the early stages of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. Geochemical Journal 2018; 52: 137-43.
- 7) International Commission on Radiological Protection (ICRP) (1994) Human respiratory tract model for radiological protection. Ann ICRP 24(1-3). ICRP publication 66