

**低線量・低線量率放射線被ばくによる
臓器別酸化ストレス状態の検討
(委託研究)**

—令和2年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業—

The Study of Oxidative Stress Status in the Organs Exposed to
Low Dose/Low Dose-rate Radiation
(Contract Research)

-FY2020 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource
Development Project-

福島研究開発部門 福島研究開発拠点 廃炉環境国際共同研究センター
東北大学

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Tohoku University

January 2022

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ 表示 4.0 国際 ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).
Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under
the same terms and conditions as CC-BY.
For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail: ird-support@jaea.go.jp

低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討

(委託研究)

－令和２年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業－

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点
廃炉環境国際共同研究センター

東北大学

(2021 年 10 月 26 日受理)

日本原子力研究開発機構（JAEA）廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）では、令和２年度 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業（以下、「本事業」という）を実施している。

本事業は、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所の廃炉等をはじめとした原子力分野の課題解決に貢献するため、国内外の英知を結集し、様々な分野の知見や経験を、従前の機関や分野の壁を越えて緊密に融合・連携させた基礎的・基盤的研究及び人材育成を推進することを目的としている。

平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築した。

本研究は、研究課題のうち、令和元年度に採択された「低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討」の令和２年度の研究成果について取りまとめたものである。

本研究は、廃炉作業などの社会的関心が高い低線量・低線量率長期放射線被ばく影響に関する知見を収集するために、福島第一原子力発電所事故後の旧警戒区域で被ばくした野生ニホンザルや動物実験マウスの試料解析を通じて持続的な酸化ストレスと放射線影響との関連性を検討する。被ばく線量評価グループと生物影響解析グループが参画し、被ばく線量と科学的知見が必要とされている被ばく領域の生物影響の相関を検討する学際共同研究である。

本報告書は、日本原子力研究開発機構の英知事業における委託業務として、東北大学が実施した成果を取りまとめたものである。

廃炉環境国際共同研究センター：〒979-1151 福島県双葉郡富岡町大字本岡字王塚 790-1

The Study of Oxidative Stress Status in the Organs Exposed to Low Dose/Low Dose-rate Radiation

(Contract Research)

— FY2020 Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project —

Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science,
Fukushima Research Institute, Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Tomioka-machi, Futaba-gun, Fukushima-ken

Tohoku University

(Received October 26, 2021)

The Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), Japan Atomic Energy Agency (JAEA), had been conducting the Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project (hereafter referred to “the Project”) in FY2020.

The Project aims to contribute to solving problems in the nuclear energy field represented by the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. (TEPCO). For this purpose, intelligence was collected from all over the world, and basic research and human resource development were promoted by closely integrating/collaborating knowledge and experiences in various fields beyond the barrier of conventional organizations and research fields.

The sponsor of the Project was moved from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology to JAEA since the newly adopted proposals in FY2018. On this occasion, JAEA constructed a new research system where JAEA-academia collaboration is reinforced and medium-to-long term research/development and human resource development contributing to the decommissioning are stably and consecutively implemented.

Among the adopted proposals in FY2019, this report summarizes the research results of the “The study of oxidative stress status in the organs exposed to low dose/low dose-rate radiation” conducted in FY2020.

The present study aims to investigate the biological effects of low dose/low dose-rate radiation exposure, which is of great social interest, on the oxidative stress status of individual organs and will contribute to the collection of scientific data in a dose range to be required. An interdisciplinary collaborative study discussed the correlation between radiation dose and the biological effect by analyzing the samples of wild Japanese macaques exposed to radiation due to the accident of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and of animal experiments.

Keywords: Low Dose/Low Dose-rate Radiation, Oxidative Stress, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Japanese Macaque, Electron Spin Resonance, Particle and Heavy Ion Transport Code System

This work was performed by Tohoku University under contract with Japan Atomic Energy Agency.

目次

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要	1
2. 平成 30 年度 採択課題	2
3. 令和元年度 採択課題	5
4. 令和 2 年度 採択課題	8
付録 成果報告書	11

Contents

1. Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	1
2. Accepted Proposal in FY2018.....	2
3. Accepted Proposal in FY2019.....	5
4. Accepted Proposal in FY2020.....	8
Appendix Result Report	11

This is a blank page.

1. 英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業の概要

文部科学省では、「東京電力（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等研究開発の加速プラン（平成 26 年 6 月文部科学省）」等を踏まえ、平成 27 年度から「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」（以下、「本事業」という。）を立ち上げ、「戦略的原子力共同研究プログラム」、「廃炉加速化研究プログラム」及び「廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」を推進している。

具体的には、国内外の英知を結集し、国内の原子力分野のみならず様々な分野の知見や経験を、機関や分野の壁を越え、国際共同研究も含めて緊密に融合・連携させることにより、原子力の課題解決に資する基礎的・基盤的研究や産学が連携した人材育成の取組を推進している。

一方、日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、平成 27 年に廃炉国際共同研究センター（以下、「CLADS」という。現：廃炉環境国際共同研究センター）を組織し、「東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ」等を踏まえ、東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所廃炉（以下、「1F 廃炉」という。）に係る研究開発を進めている。

また、平成 29 年 4 月に CLADS の中核拠点である「国際共同研究棟」の運用を開始したことを踏まえ、今後は CLADS を中核に、廃炉の現場ニーズを踏まえた国内外の大学、研究機関等との基礎的・基盤的な研究開発及び人材育成の取組を推進することにより、廃炉研究拠点の形成を目指すことが期待されている。

このため、本事業では平成 30 年度の新規採択課題から実施主体を文部科学省から JAEA に移行することで、JAEA とアカデミアとの連携を強化し、廃炉に資する中長期的な研究開発・人材育成をより安定的かつ継続的に実施する体制を構築することとし、従来のプログラムを、①共通基盤型原子力研究プログラム、②課題解決型廃炉研究プログラム、③国際協力型廃炉研究プログラム、④研究人材育成型廃炉研究プログラム（令和元年度より新設）に再編した。

2. 平成 30 年度 採択課題

平成 30 年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム	11 課題（若手研究 6 課題、一般研究 5 課題）
課題解決型廃炉研究プログラム	6 課題
国際協力型廃炉研究プログラム	2 課題（日英共同研究）

平成 30 年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
被災地探査や原子力発電所建屋内情報収集のための半自律ロボットを用いたセマンティックサーベイマップ生成システムの開発	河野 仁	東京工芸大学
汚染土壌の減容を目的とした重液分離による放射性微粒子回収法の高度化	山崎 信哉	筑波大学
ラドンを代表としたアルファ核種の吸入による内部被ばくの横断的生体影響評価	片岡 隆浩	岡山大学
炉心溶融物の粘性及び表面張力同時測定技術の開発	大石 佑治	大阪大学
iPS 細胞由来組織細胞における放射線依存的突然変異計測系の確立	島田 幹男	東京工業大学
レーザー共鳴イオン化を用いた同位体存在度の低いストロンチウム 90 の迅速分析技術開発	岩田 圭弘	東京大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
放射性核種の長期安定化を指向した使用済みゼオライト焼結固化技術の開発	新井 剛	芝浦工業大学
燃料デブリ取り出しを容易にするゲル状充填材の開発	牟田 浩明	大阪大学
レーザー蛍光法を用いた燃料デブリ変質相の同定	斉藤 拓巳	東京大学
過酷炉心放射線環境における線量測定装置の開発	岡本 保	木更津工業 高等専門学校
レーザー加工により発生する微粒子の解析と核種同定手法の開発	長谷川 秀一	東京大学

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
合金相を含む燃料デブリの安定性評価のための基盤研究	桐島 陽	東北大学
ガンマ線画像スペクトル分光法による高放射線場環境の画像化による定量的放射能分布解析法	谷森 達	京都大学
燃料デブリ取出し時における放射性核種飛散防止技術の開発	鈴木 俊一	東京大学
アルファダストの検出を目指した超高位置分解能イメージング装置の開発	黒澤 俊介	東北大学
ナノ粒子を用いた透明遮へい材の開発研究	渡邊 隆行	九州大学
先端計測技術の融合で実現する高耐放射線燃料デブリセンサーの研究開発	萩原 雅之	高エネルギー 加速器研究機構

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
放射性微粒子の基礎物性解明による廃炉作業リスク低減への貢献	五十嵐 康人	茨城大学
放射線耐性の高い薄型 SiC 中性子検出器の開発	三澤 毅	京都大学

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度採択課題については以下のとおりである。

課題数：19 課題

共通基盤型原子力研究プログラム 7 課題（若手研究 2 課題、一般研究 5 課題）
 課題解決型廃炉研究プログラム 4 課題
 国際協力型廃炉研究プログラム 4 課題（日英共同研究 2 課題、日露共同研究 2 課題）
 研究人材育成型廃炉研究プログラム 4 課題

令和元年度 採択課題一覧

共通基盤型原子力研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
ウラニル錯体化学に基づくテーラーメイド型新規海水ウラン吸着材開発	鷹尾 康一朗	東京工業大学
動作不能からの復帰を可能とする多連結移動ロボットの半自律遠隔操作技術の確立	田中 基康	電気通信大学

共通基盤型原子力研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
一次元光ファイバ放射線センサを用いた原子炉建屋内放射線源分布計測	瓜谷 章	名古屋大学
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学
単一微粒子質量分析法に基づくアルファ微粒子オンラインモニタリングに向けた基礎検討	豊嶋 厚史	大阪大学
幹細胞動態により放射線発がんを特徴付ける新たな評価系の構築	飯塚 大輔	量子科学技術 研究開発機構
耐放射線性ダイヤモンド半導体撮像素子の開発	梅沢 仁 (令和元年度まで) 大曲 新矢	産業技術総合 研究所

課題解決型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
Multi-Physics モデリングによる福島 2・3 号機ペデスタル燃料デブリ深さ方向の性状同定	山路 哲史	早稲田大学
燃料デブリ取出しに伴い発生する廃棄物のフッ化技術を用いた分別方法の研究開発	渡邊 大輔	日立 GE ニュークリ ア・エナジー
アパタイトセラミックスによる ALPS 沈殿系廃棄物の安定固化技術の開発	竹下 健二	東京工業大学
拡張型スーパードラゴン多関節ロボットアームによる圧力容器内燃料デブリ調査への挑戦	高橋 秀治	東京工業大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
高い流動性および陰イオン核種保持性を有するアルカリ刺激材料の探索と様々な放射性廃棄物の安全で効果的な固化	佐藤 努	北海道大学
再臨界前の中性子線増に即応可能な耐放射線 FPGA システムの開発	渡邊 実	静岡大学 (令和2年度 まで) 岡山大学

国際協力型廃炉研究プログラム（日露共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取出し臨界安全技術の高度化	小原 徹	東京工業大学
微生物生態系による原子炉内物体の腐食・変質に関する評価研究	金井 昭夫	慶應義塾

研究人材育成型廃炉研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリ取り出し時における炉内状況把握のための遠隔技術に関する研究人材育成	浅間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティクスを融合したデブリ性状把握手法の開発とタイアップ型人材育成	高貝 慶隆	福島大学
放射線・化学・生物的作用の複合効果による燃料デブリ劣化機構の解明	大貫 敏彦 (平成30年度まで) 竹下 健二	東京工業大学
燃料デブリ分析のための超微量分析技術の開発	永井 康介	東北大学

4. 令和2年度 採択課題

令和2年度は、2つのプログラムにおいて、研究課題の採択を決定した。
公募の概要は以下のとおりである。

公募期間：令和2年3月17日～令和2年5月14日（課題解決型）
令和2年5月13日～令和2年7月15日（国際協力型）

課題数：10 課題

課題解決型廃炉研究プログラム 8 課題（若手研究 2 課題、一般研究 6 課題）
国際協力型廃炉研究プログラム 2 課題（日英共同研究）

これらの提案について、外部有識者から構成される審査委員会において、書面審査及び面接審査、日英共同研究については二国間の合同審査を実施し、採択候補課題を選定した。

その後、PD（プログラムディレクター）・PO（プログラムオフィサー）会議での審議を経て、採択課題を決定した。

令和2年度 採択課題一覧

課題解決型廃炉研究プログラム

【若手研究】

課題名	研究代表者	所属機関
燃料デブリにおける特性の経年変化と環境劣化割れの調査	楊 会龍	東京大学
健全性崩壊をもたらす微生物による視認不可腐食の分子生物・電気化学的診断及び抑制技術の開発	岡本 章玄	物質・材料研究機構

課題解決型廃炉研究プログラム

【一般研究】

課題名	研究代表者	所属機関
遮蔽不要な臨界近接監視システム用ダイヤモンド中性子検出器の要素技術開発	田中 真伸	高エネルギー加速器研究機構
α / β / γ 線ラジオリシス影響下における格納容器系統内広域防食の実現：ナノバブルを用いた新規防食技術の開発	渡邊 豊	東北大学
β 、 γ 、X 線同時解析による迅速・高感度放射性核種分析法の開発	篠原 宏文	日本分析センター
合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価	丸山 一平	東京大学
溶脱による変質を考慮した汚染コンクリート廃棄物の合理的処理・処分の検討	小崎 完	北海道大学
マイクロ波重畳 LIBS によるデブリ組成計測の高度化と同位体の直接計測への挑戦	池田 裕二	アイラボ

国際協力型廃炉研究プログラム（日英共同研究）

課題名	研究代表者	所属機関
革新的水質浄化剤の開発による環境問題低減化技術の開拓	浅尾 直樹	信州大学
無人航走体を用いた燃料デブリサンプルリターン技術の研究開発	鎌田 創	海上・港湾・航空技術研究所

本報告書は、以下の課題の令和 2 年度の研究成果を取りまとめたものである。

共通基盤型原子力研究プログラム

課題名	研究代表者	所属機関
低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討	鈴木 正敏	東北大学

研究成果を取りまとめた成果報告書を付録として添付する。

付録

成果報告書

This is a blank page.

令和 2 年度

日本原子力研究開発機構
英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業

低線量・低線量率放射線被ばくによる
臓器別酸化ストレス状態の検討
(契約番号 R02I035)

成果報告書

令和 3 年 3 月
国立大学法人東北大学

本報告書は、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構の「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」による委託業務として、国立大学法人東北大学が実施した「低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器別酸化ストレス状態の検討」の令和2年度の研究成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vi
1. はじめに	1. 1-1
2. 業務計画	2. 1-1
2.1 全体計画	2. 1-1
2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法	2. 2-1
2.2.1 被ばく線量評価	2. 2-1
2.2.2 生物影響解析とアーカイブ構築	2. 2-1
2.2.3 研究推進	2. 2-1
3. 令和2年度の実施内容及び成果	3. 1-1
3.1 被ばく線量評価	3. 1-1
3.1.1 野生ニホンザル歯の ESR 分析による積算外部被ばく線量評価	3. 1-1
3.1.2 臓器被ばく線量の推定（再委託先：広島大学）	3. 1-4
3.1.3 野生ニホンザル臓器放射能の測定と放射性物質取り込み履歴の推定	3. 1-31
3.2 生物影響解析とアーカイブ構築	3. 2-1
3.2.1 マウス動物実験による実験的検証（再委託先：大阪大学）	3. 2-1
3.2.2 酸化ストレスマーカーの検出と骨髄影響解析	3. 2-7
3.2.3 野生ニホンザル試料アーカイブの構築	3. 2-15
3.3 研究推進	3. 3-1
4. 結言	4-1
参考文献	5-1

執筆者リスト

事業代表者	国立大学法人東北大学	講師	鈴木正敏
		准教授	木野康志
	国立大学法人広島大学	教授	遠藤 暁
	国立大学法人大阪大学	准教授	中島裕夫
	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構	研究副主幹	岡 壽崇

表一覧

表 3.1-1	各臓器の大きさ	3.1-5
表 3.1-2	Cs-134 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル)	3.1-7
表 3.1-3	Cs-134 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル)	3.1-8
表 3.1-4	Cs-134 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル)	3.1-9
表 3.1-5	Cs-137 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル)	3.1-10
表 3.1-6	Cs-137 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル)	3.1-11
表 3.1-7	Cs-137 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル)	3.1-12
表 3.1-8	I-131 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル)	3.1-13
表 3.1-9	I-131 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル)	3.1-14
表 3.1-10	I-131 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル)	3.1-15
表 3.1-11	I-132 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル)	3.1-16
表 3.1-12	I-132 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル)	3.1-17
表 3.1-13	I-132 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル)	3.1-18
表 3.1-14	Te-129 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル)	3.1-19
表 3.1-15	Te-129 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル)	3.1-20
表 3.1-16	Te-129 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル)	3.1-21
表 3.1-17	Te-129m の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル)	3.1-22
表 3.1-18	Te-129m の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル)	3.1-23
表 3.1-19	Te-129m の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル)	3.1-24
表 3.1-20	Te-132 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル)	3.1-25
表 3.1-21	Te-132 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル)	3.1-26
表 3.1-22	Te-132 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル)	3.1-27
表 3.1-23	ボクセルファントムの各臓器の質量	3.1-28
表 3.2-1	A/J マウスへの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 4 週間給水による給水直後、 2 週間後、4 週間後の内部被ばく影響検討実験	3.2-4
表 3.2-2	A/J マウスへ Cs-137 水 (100 Bq/ml) の 16 週間給水、 4 週間休止、4 週間給水の断続処理による内部被ばく影響検討実験	3.2-5
表 3.2-3	マウス解剖時の測定、採取検体一覧表	3.2-5
表 3.2-4	A/J マウス外部照射実験	3.2-7

図一覧

図 2. 1	年次計画.....	2. 1-1
図 2. 2	実施体制.....	2. 1-3
図 3. 1-1	化学処理したエナメル質試料の ESR スペクトルの例.....	3. 1-2
図 3. 1-2	比較的良好な ESR スペクトルの拡大図.....	3. 1-3
図 3. 1-3	5-10 kg 群の回転楕円体の (a) 及び (b) での断面図.....	3. 1-5
図 3. 1-4	CT データからボクセルファントムの構築.....	3. 1-28
図 3. 1-5	線源臓器と標的臓器が一致時の換算係数の重量依存性.....	3. 1-30
図 3. 1-6	測定試料.....	3. 1-31
図 3. 1-7	測定装置.....	3. 1-31
図 3. 1-8	大腿筋中放射性セシウム (Cs-137) 濃度と採取日の関係.....	3. 1-32
図 3. 1-9	採取地別の大腿筋中放射性セシウム (Cs-137) 濃度と採取日の関係.....	3. 1-33
図 3. 1-10	大腿筋中放射性セシウム (Cs-137) 濃度と各臓器中濃度の関係.....	3. 1-34
図 3. 1-11	血液中放射性セシウム (Cs-137) 濃度と各臓器中濃度の関係.....	3. 1-35
図 3. 1-12	臓器ごとの放射性セシウム (Cs-137) 濃度.....	3. 1-35
図 3. 2-1	Cs-137 水 (100 Bq/ml) 自由摂取による臓器組織内 Cs-137 蓄積量.....	3. 2-2
図 3. 2-2	Cs-137 水 (100 Bq/ml) 自由摂取による平衡状態から真水飲水開始後の 組織内 Cs-137 量経時的变化.....	3. 2-2
図 3. 2-3	A/J マウスへの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水による経時的組織内 Cs-137 量 (Bq/g 組織) の変化.....	3. 2-2
図 3. 2-4	A/J マウスの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水日数における内部被ばく線量率... 3. 2-3	3. 2-3
図 3. 2-5	A/J マウスの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水日数における内部被ばく積算線量. 3. 2-3	3. 2-3
図 3. 2-6	A/J マウスへの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水による内部被ばく実験.....	3. 2-4
図 3. 2-7	A/J マウスへの Cs-137 γ 線外部照射.....	3. 2-6
図 3. 2-8	A/J マウスへの Cs-137 γ 線外部照射装置と照射条件.....	3. 2-6
図 3. 2-9	野生ニホンザル臓器 MDA 濃度と内部被ばく線量率の相関.....	3. 2-9
図 3. 2-10	野生ニホンザル膀胱の SOD 活性と内部被ばく線量率の相関.....	3. 2-10
図 3. 2-11	動物実験マウスへの外部照射による血液細胞数の変化.....	3. 2-12
図 3. 2-12	動物実験マウスへの外部照射による肝臓の MDA 濃度変化.....	3. 2-13
図 3. 2-13	動物実験マウスへの外部照射による腎臓の MDA 濃度変化.....	3. 2-14

略語一覧

CT	:Computed tomography (コンピュータ断層撮影)
EDTA	:Ethylenediaminetetraacetic acid (エチレンジアミン四酢酸)
ESR	:Electron Spin Resonance (電子スピン共鳴法)
ICRP	:International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会)
ICRU	:International Commission on Radiation Units and Measurements (国際放射線単位・測定委員会)
MDA	:Malondialdehyde (マロンジアルデヒド)
PBS	:Phosphate buffered saline (リン酸緩衝生理食塩水)
PHITS	:Particle and Heavy Ion Transport code System (モンテカルロ計算コード)
SOD	:Superoxide dismutase (スーパーオキシドディスムターゼ)
WST	:Water-soluble tetrazolium salt (水溶性テトラゾリウム塩)

概略

日常の原子力・放射線業務への従事や東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所事故（以下、「福島第一原発事故」と略す。）に伴う廃炉作業、事故時に環境中へ放散した放射性物質による被ばく影響への社会的な関心は高い。このような「低線量・低線量率放射線への長期被ばく」は、これまでに科学的知見が十分に蓄積されてきた高線量・高線量率領域とは対照的な線量・線量率領域での被ばくとなる。このため過去に生じた放射線被ばく事例の疫学研究と細胞・動物実験の基礎研究によって蓄積されてきた科学的知見を低線量・低線量率領域へ外挿して、放射線被ばく影響リスクが評価されている。社会的関心が高い放射線被ばく影響をより正確に評価するために低線量・低線量率放射線影響研究の充実が必要不可欠であり、その結果として放射線安全管理、放射線防護、放射線災害医学などの関連分野への貢献が期待される。

近年では、低線量・低線量率放射線被ばくと酸化ストレスとの関連性が着目されている。高線量被ばくでは致死性の高い DNA 二重鎖切断が誘発されるために、細胞致死や大規模なゲノム配列の変化など、顕著な変化が検出されてきた。モデル動物実験による解析では、放射線被ばく部位で特定遺伝子部位の大規模なゲノム配列変化が生じており、DNA 二重鎖切断は放射線被ばく影響を誘発する要因として考えられてきた。DNA 二重鎖切断は線量依存的に誘発されるために、DNA 二重鎖切断の誘発が少ない低線量・低線量率領域では高線量被ばくとは異なる機序で放射線影響が生じることが予想される。実験的に低い線量率照射によって上昇した細胞内酸化ストレスが高線量率照射と比べて長時間持続することや、酸化ストレスに対して防護的に機能する転写因子を欠損するマウスに低線量率照射を行なうと野生型マウスと比べて造血能が低下する報告がある。酸化ストレスは老化などの放射線以外の原因でも上昇して発がんや生活習慣病などの要因となるため、低線量・低線量率放射線の長期被ばくでは慢性的な酸化ストレス環境を形成することが放射線被ばく影響を誘発するメカニズムとなる仮説が考えられる。

本研究課題では福島第一原発事故後の旧警戒区域に生息している野生ニホンザルから収集し、調製した試料を解析して、低線量・低線量率放射線被ばくと酸化ストレス状態の変化について検討している。旧警戒区域に生息している野生ニホンザルは事故後から外部・内部複合被ばく状態が継続している。ニホンザルに最適化した系で被ばく線量を評価すると、1日あたりの被ばく線量率は μGy 単位となることを我々は明らかにしてきた。前述したような実験的に低い線量率は1時間あたり mGy 単位での照射が多い。このため野生ニホンザル試料を用いる解析結果は社会的関心が高い被ばく線量率範囲を含み、実験レベルよりも低い線量率の被ばく影響を提示することが期待される。ニホンザルは旧警戒区域に生息している野生動物の中で人間に近縁な霊長類である。人間の放射線被ばく影響の知見は、原爆被ばく者や原子力業務従事者の数十年以上に渡る長期間の疫学調査から得られてきた。野生ニホンザルの平均寿命は20-25年とされており、福島第一原発事故時に誕生していた個体はすでに10年を超えて被ばくを継続している。野生ニホンザル試料の解析によって、動物実験での実施が難しい被ばく線量・線量率領域や被ばく期間に関する知見を得ることが可能となる。これまでに収集してきた野生ニホンザル試料の解析から、内部被ばく線量率に依存して大腿骨髄の造血能が軽度低下することを明らかにし、前述の動物実験と共通した結果が得られている。また、解析した一部の臓器で酸化ストレスが上昇することを示してきた。この結果は、低線量・低線量率放射線被ばくによって酸化と抗酸化のバランスに変化が生じ、そのような酸化ストレス状態の変化が臓器ごとに異なることを示唆している。低線量・低線量率放射線被ばく影響の出現には時間を要するため、形態的な変化が確認されない臓器で放射線被ばくに依存する持続的な変化を明らかにすることは放射線被ばく影響を予測する上で重要な情報となる。本研究課題では酸化ストレス状態を指標として継続的に収集する野生

ニホンザル試料を解析し、低線量・低線量率放射線の長期被ばくによって酸化ストレスが持続的に上昇する臓器を特定する。また、実験的に低い線量・線量率で被ばくをさせた動物実験マウスの試料解析から野生ニホンザルの解析結果を検証するとともに、旧警戒区域から動物実験までの被ばく線量・線量率範囲における酸化ストレス状態の変化と放射線被ばくの相関を検討する。

本課題で収集する試料は、霊長類、被ばく線量・線量率範囲、被ばく期間の観点から動物実験による再現は難しく、科学的に貴重である。さらに、環境中の放射性物質の減衰によって時々刻々とニホンザルの被ばく状況が変動するために取り直しができない試料である。今後の解析で新たな知見が得られる場合に時間をさかのぼって解析するためには、収集してきた試料を多目的に解析できるように保管する試料アーカイブを整備することが必要である。平成 24 年から収集してきた被災霊長類試料アーカイブに本研究課題で収集する試料を順次追加していき、個体情報や解析結果などの資料と紐付けすることも本課題で実施している。このような国際的にも他に類を見ない被災霊長類アーカイブを研究コミュニティで共有できる体制の構築と、次世代への継承によって、現在ではとらえられない変化を将来の科学技術の進展で解明することに役立てる体制を整備している。

以上の研究内容について、被ばく線量評価グループと生物影響解析グループ間で試料や情報を相互に提供・共有しながら、分野横断的な協力体制で実施している。

被ばく線量・線量率は、歯のエナメル質を電子スピン共鳴 (ESR) 法で分析する方法と、PHITS コードを用いるモンテカルロシミュレーションによって評価している。ニホンザルの行動範囲や体内の放射性セシウム濃度が個体ごとに異なるため、収集した試料の分析結果や測定結果に基づいて被ばく線量を個体ごとに評価する必要がある。ESR 法は、放射線との相互作用によって生じる炭酸ラジカルが歯のエナメル質内で消去されずに蓄積する特徴を利用して積算被ばく線量を評価する。野生ニホンザルの歯を適当な粒子サイズになるまで破碎し、重液分離によってエナメル質を抽出した後に、ESR 分析の阻害因子を取り除く化学処理を行なって分析試料を調製している。各個体から一定重量のエナメル質試料を調製し、ESR 分析によって得られる炭酸ラジカル強度を定量する。非被ばく個体のエナメル質に既知線量の γ 線を照射してあらかじめ作成した線量—ESR 強度の検量線を用いて各個体試料の分析結果をもとに積算被ばく線量を推定する。行動履歴を把握することが困難な野生動物では、放射線の痕跡を分析して積算外部被ばく線量の評価に利用する ESR 法は強力な評価ツールとなる。モンテカルロシミュレーションによる被ばく線量評価では、野生ニホンザルや動物実験マウスについて被ばく線量・線量率を評価する。それぞれの動物と臓器のサイズや重量を計測したデータを参考に PHITS 上でモデルファントムを作成し、土壌や特定臓器に線源を配置したときの様々な臓器における線量率換算係数をモンテカルロシミュレーションによって計算する。計算された換算係数とニホンザルやマウスの臓器中放射性セシウム濃度測定値から、臓器ごとの被ばく線量・線量率を評価する。ESR 法は個体ごとの被ばく履歴を反映する線量評価が可能となる一方で、試料調製や分析に時間を要する。他方、シミュレーションによる評価は臓器中放射性セシウム濃度の測定が完了すると比較的短時間で多数の被ばく線量を評価できる一方で、外部被ばく線量には不確かさが含まれてしまう問題が残っている。本課題ではお互いの評価方法の特徴を考慮して補いながら、被ばく線量評価を実施している。

生物影響解析では野生ニホンザル、動物実験マウスともに採取した試料から解析試料を調製して酸化ストレスマーカーを測定している。有害鳥獣駆除後に協力自治体から提供される野生ニホンザルを受け取り、解析臓器や組織のサンプリング、目的用途ごとに調製した試料を各担当に分配して測定・解析を行なった。動物実験では 100 Bq/ml の Cs-137 水を自由飲水させる内部

被ばく実験と、Cs-137 線源の照射装置を使って 0.5、1、3、6 mGy/h で 6 mGy あるいは 30 mGy を照射する外部被ばく実験を行なった。外部被ばく実験では照射が完了してから 24 時間後に血漿と野生ニホンザルのサンプリングと対応する臓器を採取した。サンプリング時には臓器重量や、抹消血中の血液細胞数を測定して放射線被ばくによる変化を検討した。酸化ストレス状態を検討するために、酸化ストレスマーカーであるマロンジアルデヒド (MDA) と抗酸化酵素スーパーオキシドジスムターゼ (SOD) の活性を測定し、放射線被ばくとの相関を検討した。

以上の研究内容について、令和 2 年度は以下に示す概要の知見が得られた。

ESR 法による線量評価では、旧警戒区域に生息していたニホンザル 11 個体から抜歯し、令和元年度に決定したニホンザルに最適化した方法でエナメル質の分離と化学処理による分析試料の調製を行なった。各個体から複数本抜歯し、それぞれの歯から抽出したエナメル質を使って ESR 分析を行なった。その結果、約半数の個体で炭酸ラジカルに相当するスペクトルの分離が可能であったが、ベースラインが若干右下がりになっていた。スペクトル分離操作において、ベースラインがさらに平らになることが望ましいため、化学処理方法をさらに最適化することで ESR スペクトルを改善できる可能性について検討する必要性が示された。これらの個体について線量評価を行なったところ、100 mGy を超えた個体は 1 頭で、残りはすべて 100 mGy 以下と評価された。この他、スペクトル分離操作が困難であった 3 個体の試料については、1 本の歯から得られる試料重量が少ないためであることが明らかとなった。このため、それぞれの歯から抽出したエナメル質についてスクリーニング目的の ESR スキャンを行い、分析阻害因子が含まれていないエナメル質同士を混合することで目的重量を確保し、分析する必要があることを確認した。

PHITS コードを用いるモンテカルロシミュレーション線量評価では、楕円体臓器を配置したニホンザル楕円体ファントムを用いて、12 臓器 (脳、肺、心臓、胃、肝臓、腎臓、脾臓、膵臓、膀胱、精巣、骨、軟組織) ごとに内部被ばく換算係数の導出を行なった。臓器中放射能濃度一定を仮定すると、全身を 1 楕円体として計算した値と 3 %以内で一致した。また、令和元年度に作成したマウスボクセルファントムを用いた内部被ばく線量率換算係数の信頼度を推定するため、解像度・コントラストが不十分な CT 画像を用いてボクセルファントムを作成した。作成したファントムを用いて計算した換算係数と、令和元年度に作成した digimouse ファントムで決定した換算係数を比較したところ、おおよそ 20 %以内の値であり、差異の最大値は精巣で 34 %であった。マウスの個体差と臓器セグメント分けの不十分なボクセルファントムの影響は、20-34 %程度と考えられる。また、CT データのスライスロケーションを変更して作成した体重が 1.5 倍、2 倍、8 倍のファントムを用いて内部被ばく臓器線量換算係数の体重依存性の評価したところ、数%の誤差を許容すれば臓器ごとに 1 つの関数で体重依存性の補正ができることを確認した。

令和 2 年度は野生ニホンザル 60 個体分の試料を収集し、被災霊長類アーカイブに調製した試料と関連する個体情報や測定結果などの資料を紐付けして追加した。福島第一原発事故 2 年後から構築してきた試料アーカイブには、令和 2 年度に収集した試料を含めると総計 649 頭分の資試料が整備されている。放射性セシウムは骨格筋に最も多く蓄積することから、大腿筋の放射性セシウム濃度を野生ニホンザル体内汚染スクリーニングの指標に用いた。原子炉が停止した平成 23 年 3 月 11 日に改変補正した Cs-134 と Cs-137 の比から野生ニホンザル試料で検出された放射性セシウムは福島第一原発事故由来のものであると考えられた。このため、アーカイブに収集されている試料は原発事故後の継続的な被ばく影響を解明するための試料として活用できると考えられる。採取日に対する大腿筋放射能セシウム濃度の変化を見ると、個体ごとのバラツキが大きいものの物理学的半減期よりも環境要因による減少が早い傾向が示され、その半減期が 1.3-3.2 年であった。臓器中の放射性セシウム濃度は、大腿筋中および血中の放射性セシウム

濃度と良い相関があることが示唆された。試料数が増えてきたため、臓器中の放射性セシウム推定のための情報が蓄積されつつある。

野生ニホンザル試料を用いた生物影響解析では、放射性セシウム濃度の蓄積状況が異なる臓器（肺、心筋、肝臓、脾臓、膀胱）の酸化ストレス状態を、マロンジアルデヒド（MDA）を指標に検討した。大腿筋で測定された放射性セシウム濃度が全身に均等に分布することを仮定して評価された内部被ばく線量率を指標に検討した結果、MDA 濃度が増加する臓器は肝臓と膀胱、減少する臓器は肺、心筋、脾臓に分類された。福島第一原発事故 7-8 年後の期間に捕獲された個体と事故後 9 年目に捕獲された個体試料で酸化ストレス状態が一致して変動していたことから、旧警戒区域における低線量・低線量率放射線被ばくに応答して変動する各臓器の酸化ストレス状態は長期間持続していることを示した。

実験的に低い放射線被ばくによる臓器中酸化ストレス状態の影響を検討するための動物実験を実施した。内部被ばくについては 100 Bq/ml の Cs-137 水を一定期間自由飲水させたマウスと、Cs-137 水で飼育した後に真水に切り替えて飼育したマウス、さらには再度 Cs-137 水を飲水させるなど、内部被ばく状況の変動による臓器内酸化ストレス状態を解析することができる試料を 72 匹のマウスから作成した。外部被ばくについては、4 種類の線量率で 6、30 mGy の照射を完了してから 24 時間後に 32 匹のマウスから血漿や臓器・筋肉組織を合計 19 部位から剥出し、試料として採取した。外部照射マウスの肝臓と腎臓では被ばく線量が増加すると非被ばく群の MDA 濃度範囲を超えて酸化ストレスが誘発される個体が増えるが、誘発個体数の増加に線量率依存性はなかった。放射線被ばくによる MDA 濃度の増加について、肝臓ではニホンザルとマウスで共通して観察された一方で、腎臓ではマウスのみで MDA 濃度の増加が確認された。野生ニホンザルの外部被ばく線量評価では不確かさが多く含まれる現状であるため、ESR 法による評価結果との相関を調べることによって腎臓の応答反応を正確に評価することが必要となる。また、旧警戒区域での放射線被ばくによる MDA の変動は、解析したすべての臓器で対照群のばらつきの範囲内であったが、動物実験マウスの試料では非被ばく群のばらつき範囲を超えて MDA 濃度が上昇する個体が見られた。このため、旧警戒区域と同等レベルの放射線被ばくでは、生理学的な要因で変動する MDA 濃度範囲を超えないレベルで酸化ストレス状態が変動する可能性が考えられた。

令和 2 年度は本研究課題 3 年計画の 2 年目を実施した。被ばく線量評価と生物影響解析では初年度に確立した方法を用いて低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器中酸化ストレス状態の変動について MDA を中心に知見を蓄積してきた一方で、新たに解決すべき課題も出てきた。当初の計画通りに進む中で、引き続き分野横断的な協力体制によって幅広い視点から課題の解決と社会的関心の高い線量・線量率領域の生物影響に関する知見を集約する所期の目標達成にむけた研究計画を最終年度（令和 3 年度）も継続する。

1. はじめに

国際放射線防護委員会（ICRP）が平成 19 年に出した勧告[1]では、放射線被ばくを職業被ばく、公衆被ばく、医療被ばくに分類している。自然放射線による被ばくが主要な経路となる公衆被ばくに対して、職業被ばくと医療被ばくは社会的活動の中で産業や医療分野における原子力・放射線利用の結果として生じる被ばくが含まれる。このため、放射線業務従事者や放射線診療従事者、放射線検査受診者に対する放射線防護の観点から、放射線被ばくによる健康影響の科学的知見が必要とされてきた。福島第一原発事故以後は、廃炉作業従事者や環境中に放散した低濃度放射性物質による被ばくを含めた低線量・低線量率放射線への長期被ばく影響に対して社会的関心が高まった。

放射線被ばく影響は、過去の放射線被ばく事例の疫学研究と細胞・動物実験の基礎研究による検証によって蓄積されてきた科学的知見をもとに推定されている。放射線リスク・防護研究基盤準備委員会が平成 29 年にまとめた報告書[2]では、低線量・低線量率放射線被ばくによるリスク評価に直接的に結びつくような成果が十分に得られていないことを指摘している。すなわち、従来実施されてきた基礎研究データが蓄積されている線量・線量率範囲と、廃炉作業などの放射線業務従事者や福島第一原発事故による被ばくを含めた社会的関心がある低線量・低線量率範囲の間には、データが不足している線量・線量率領域が存在していることになる。このため、従来得られてきた科学的知見を社会的関心がある低線量・低線量率領域へ外挿するための根拠となる知見が必要とされている。この知見を収集するためには、低線量・低線量率放射線影響研究を充実することが必要不可欠であり、放射線安全管理、放射線防護、放射線災害医学などの関連分野への貢献が期待される。

福島第一原発事故後に設定された警戒区域は、福島第一原子力発電所から半径 20 km 以内の立ち入り禁止区域であった。環境汚染の回復状況に従って避難指示区域の解除・見直しが繰り返されており、本報告書ではかつての警戒区域を「旧警戒区域」と記載する。旧警戒区域では福島第一原発事故によって放散した放射性物質に持続的に曝露する環境となったことから、そこに取り残された動植物を対象とする放射線被ばく影響調査が開始された。モミの木やワタムシでは事故後 2 年以内に顕著な形態異常が確認されたが、その頻度は経年的に減少したことが報告されている[3][4]。植物や昆虫で形態異常が報告された一方で、野生ネズミや家畜における形態異常は福島第一原発事故後 10 年が経過した現在でも確認されていない。野生動物の末梢血を用いる解析によって染色体異常の誘発が示されたことから細胞レベルの放射線影響は確認されているが[5]、その変化が個体レベルの影響に至っていないことが考えられる。ワタムシの被ばくを想定したシミュレーションによって、哺乳類では体内深部まで到達しないベータ線がワタムシ体内へのエネルギー付与に寄与することが示された。同じ環境に生息していても生物の特徴によって被ばく線量に差が生じる結果、放射線影響の出現が生物種ごとに異なることが示唆された。福島第一原発事故によるフィールド調査はデータが不足する低線量・低線量率放射線の科学的知見として貴重であるが、人間の被ばく影響に応用するデータの取得には調査する対象の生物種を選別する必要性を示す事例となった。

放射線の晩発影響は長い潜伏期を伴うことが知られている。広島・長崎の原爆被ばく者の疫学調査結果では、白血病は被ばく後 2 年以降、固形腫瘍は 10 年以降、非がん影響では数十年以降に確認されている。本課題で対象とする被ばく線量・線量率は原爆被ばく者よりも低いことから、放射線被ばく影響の解明にはより長い期間の調査が必要になると予想される。旧警戒

区域で有害鳥獣として駆除されている野生動物の中で、ニホンザルは人間に最も近縁な霊長類である。野生ニホンザルの平均寿命は約 20-25 年とされており、一般的な実験動物の寿命より長い。野生ニホンザルは群れごとに限られた範囲内で生息するために、旧警戒区域の自治体で駆除された野生ニホンザルは、福島第一原発事故後から継続して低線量・低線量率放射線に被ばくしてきた個体と考えられる。自治体から個体が提供される協力体制は平成 24 年に始まり、今後も継続される予定であることから、福島第一原発事故後約 10 年の長期被ばく影響を解析できることになる。以上のことから、本課題で得られる研究成果を人間の放射線被ばく影響の指標として応用できることが期待される。低線量・低線量率放射線に長期被ばくした霊長類試料は本課題を除いて入手が困難であり、また、動物実験で再現することも容易でない。国際的にも極めてユニークな本被災霊長類試料を多目的に利用できるように長期保管し、提供する体制を構築することは、当該分野の研究推進に寄与する。また、取り直しができない試料を次世代に継承することで、現在ではとらえられない変化を将来の科学技術の進展で解明することに役立てることが可能となる。

酸化ストレスに対して防護的に機能する転写因子 NRF2 を欠損するマウスに低線量率照射を行なうと野生型マウスに比べて造血能が低下する報告がある[6]。この結果は、低線量率放射線による生物影響の誘発に酸化ストレスが関与していることを示唆している。また、我々は旧警戒区域で捕獲されたウシの血漿を用いて酸化ストレスマーカーを定量し、内部被ばく線量率に依存して軽度酸化ストレスが誘発されていたことを報告した[7]。そして、これまでに収集してきた野生ニホンザルの大腿骨髓と抹消血の血球細胞数を解析して、内部被ばく線量率に依存して造血能が軽度低下することを示してきた[8]。前述の動物実験と共通した結果が得られていることから、低線量・低線量率長期被ばくによって慢性的な酸化ストレス状態が誘発された結果として放射線影響が生じるという仮説が考えられる。これまでに解析したニホンザル臓器の一部でのみ酸化ストレスが上昇していたことから、特定臓器でのみ酸化ストレスが上昇することが予想される。このため、本研究課題では継続的に収集する野生ニホンザル試料を解析して、低線量・低線量率放射線の長期被ばくによって将来に放射線被ばく影響が出現するリスクがある酸化ストレスが持続的に上昇する臓器を特定することを第一の目的とする。また、実験的に低い線量・線量率照射による動物実験を行ない、野生ニホンザルの解析結果を検証する。

「ヒトの防護体系は、放射線量評価のための解剖学的及び生理学的な標準モデル、分子及び細胞レベルでの研究、動物実験を用いた研究、疫学的研究の利用に基づいている」ことが、ICRP が平成 19 年に出した勧告に記述されている。本課題では疫学的研究以外の項目に対して幅広く検討する課題を推進する。野生ニホンザルと動物実験マウスの被ばく線量・線量率を評価するために、それぞれの解剖学的特徴に基づく標準モデルを作成した上で被ばく線量評価を行い、被ばく線量が評価されたニホンザル試料や動物実験マウス試料を用いた分子細胞生物学的解析を実施する。この研究課題を実施するためには異なる専門分野の知見、ベンチワークとフィールドワークを融合させた包括的な解析が必要となるため、各種解析・分析・先端技術に精通した研究者が分野横断的に結集する学際融合研究グループを構成した。本課題を通じて、放射線影響の理解に資する知見を蓄積することが期待される。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を図 2.1 に示す。

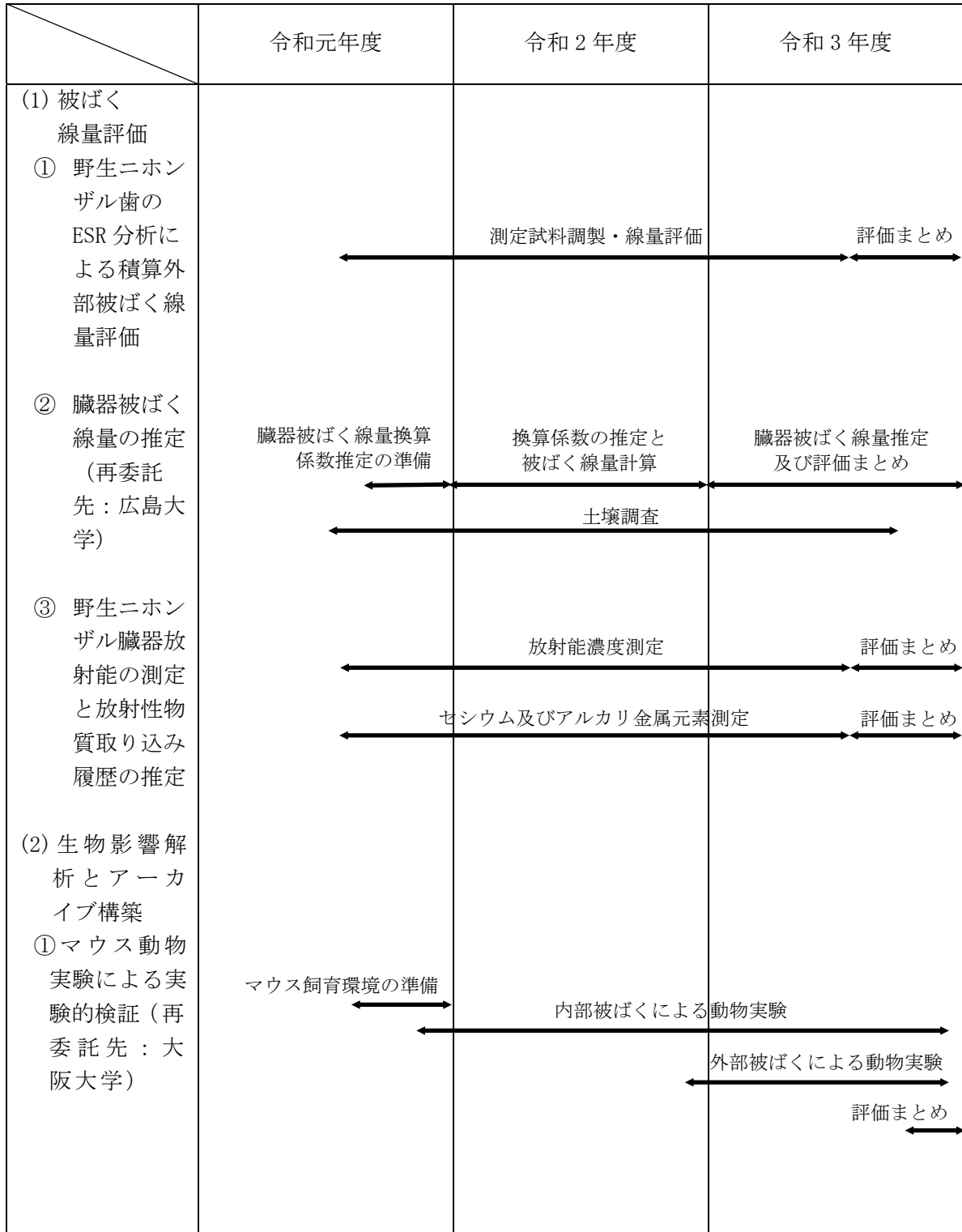


図 2.1 年次計画（1/2）

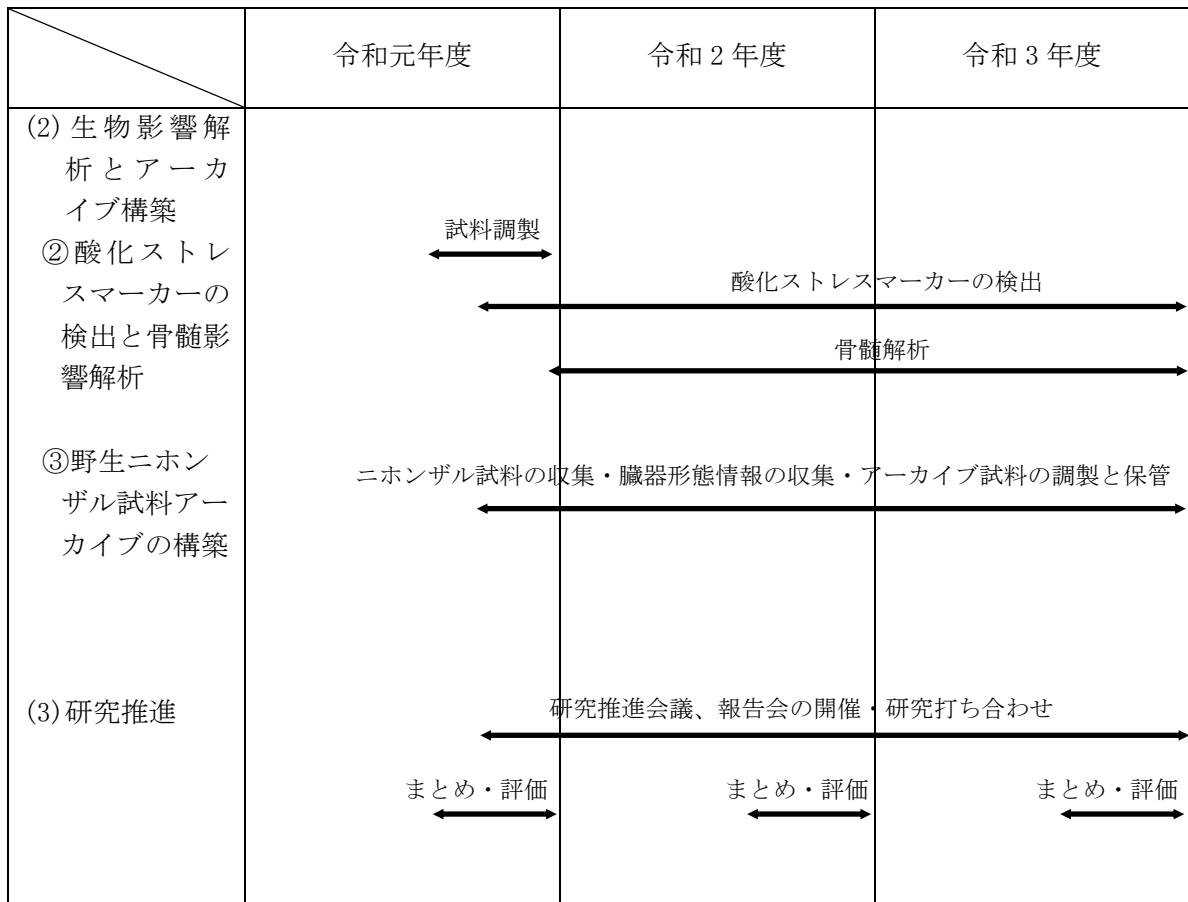


図 2.1 年次計画 (2/2)

以下に実施体制図（図 2.2）を示す。

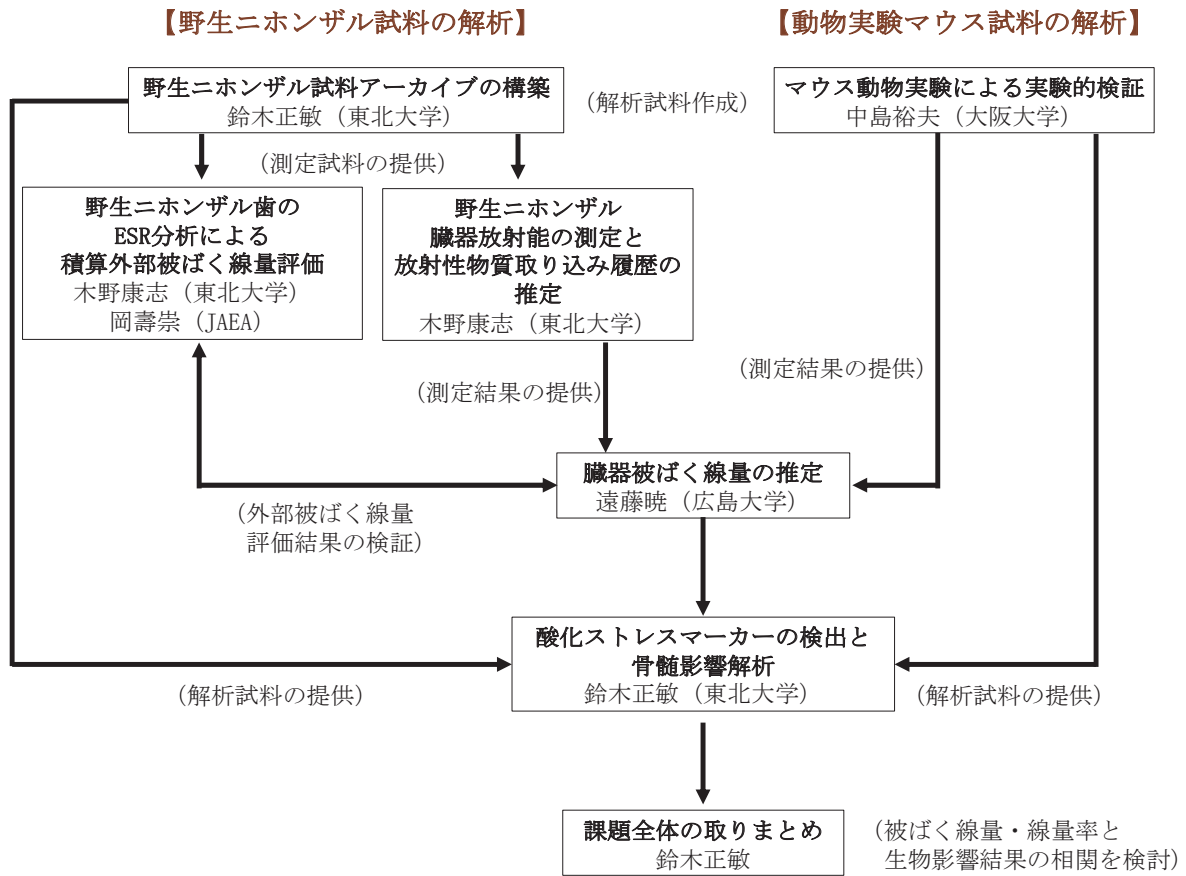


図 2.2 実施体制

2.2 令和2年度の成果の目標及び業務の実施方法

2.2.1 被ばく線量評価

①野生ニホンザル歯のESR分析による積算外部被ばく線量評価

令和元年度に引き続き、捕獲される野生ニホンザルの歯からエナメル質を抽出し、分析試料を調製する。試料中の炭酸ラジカルをESR装置で分析し、外部被ばく線量を推定する。

②臓器被ばく線量の推定（再委託先：広島大学）

モンテカルロ計算による臓器被ばく線量換算係数の推定について、前年度に引き続き実施する。ICRP文献値等を参考に、モンテカルロ計算にフィードバックする。また、土壌調査を継続して実施する。

③野生ニホンザル臓器放射能の測定と放射性物質取り込み履歴の推定

前年度に引き続き、ゲルマニウム半導体検出器を用いて、野生ニホンザルから採取した各種臓器中に含まれる放射能濃度を測定する。測定結果は、臓器被ばく線量を推定するために広島大学と共有する。また、元素分析装置（ICP-MS）を用いて放射性物質の取り込み履歴の推定を継続して実施する。

2.2.2 生物影響解析とアーカイブ構築

①マウス動物実験による実験的検証（再委託先：大阪大学）

前年度に引き続き、実験に必要な動物実験マウスを準備する。Cs-137水や真水を自由飲水させる時期を実験目的にあわせて設定することで内部被ばく状態を変動させる動物実験マウスから血漿や臓器を採取し、臓器内のCs-137放射エネルギーを測定する。また、低線量率での外部被ばく実験を行い、血漿や臓器を採取する。採取した試料を東北大学へ提供し、測定結果は臓器被ばく線量評価を実施するために広島大学と情報を共有する。

②酸化ストレスマーカーの検出と骨髄影響解析

前年度に引き続き、収集する野生ニホンザルあるいは動物実験マウスから採取した臓器を用いて、酸化ストレスマーカーごとに適した方法で解析試料を作成する。作成した試料を用いて酸化ストレスマーカーの解析を継続し、データを蓄積する。また、試料作成に使用した臓器に含まれるタンパク質量を測定し、酸化ストレスマーカーの解析結果をタンパク質量で標準化し、酸化ストレス状態の変動について検討を進める。

③野生ニホンザル試料アーカイブの構築

前年度に引き続き、協力関係にある自治体から野生ニホンザル検体を受け取り、令和2年度の捕獲個体から生体試料をサンプリングして、目的用途ごとに試料を作成するとともに、アーカイブ試料として保管する。また、臓器の形状や重量データは、広島大学と共有する。長期保管するアーカイブ試料の作成においては、個体情報や解析結果の資料をまとめたデータベースの作成を継続して実施する。

2.2.3 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間ならびに廃炉環境国際共同研究センター（CLADS）等との連携を密にして、研究を進める。また、研究実施計画を推進するための打合せや会議等を開催する。

3. 令和2年度の実施内容及び成果

3.1 被ばく線量評価

3.1.1 野生ニホンザル歯の ESR 分析による積算外部被ばく線量評価

ESR 法を用いて野生ニホンザルの歯のエナメル質中の炭酸ラジカルを測定し、個体の積算外部被ばく線量を評価することが本項の目的である。令和2年度は、捕獲される野生ニホンザルの歯からエナメル質を抽出し、分析試料を調製した。そして、試料中の炭酸ラジカルを ESR 装置で分析し、外部被ばく線量の推定に取り組んだ。

ヒトの歯は主にエナメル質と象牙質でできている。エナメル質は 96 %の無機物（ほとんどがハイドロキシアパタイト）と 3 %の水分、1 %以下の有機物（タンパク質成分）から構成される。一方、象牙質は無機物が 70 %、有機物と水分が 30 %を占める。エナメル質は結晶性が高いため、放射線に対する ESR シグナル生成の感度が高い。放射線によってエナメル質中に生成する炭酸ラジカルは、通常は線量に対して線形に増えるため、この炭酸ラジカルを指標にすれば、個体の外部被ばく線量が推定可能である。歯のラジカルには、被ばくによって生成する炭酸ラジカルのほかに、有機物由来のラジカルが存在する。この有機物ラジカルは炭酸ラジカルの ESR スペクトルに重なるように得られるため、炭酸ラジカル測定の妨害シグナルになる。そのため、歯からエナメル質部分のみを抽出して有機物由来の寄与を減らして計測する必要がある。ヒトと同じ霊長類のニホンザルの歯も、エナメル質と象牙質から構成されており、基本的にはヒトと同じ方法で外部被ばく線量が推定できると考えている。

これまでの研究で、ヒトと異なり、動物の歯からは、金属由来と想定される幅広い ESR スペクトルが得られることがあり、それが炭酸ラジカル測定及び ESR スペクトルの解析を阻害することがわかってきた。この妨害ラジカルは、エナメル質に対して適切な化学処理を行うことで除去することができる。また、化学処理を行うと、炭酸ラジカル、有機物ラジカル、金属由来と想定される幅広いラジカルのほかに、もう 1 つ別のラジカルが生成することがあり、これも ESR スペクトルの解析を阻害するが、当該ラジカルは化学処理の最後に酢酸に浸漬することで除去できる。

令和2年度は、福島県で捕獲した 11 頭の野生ニホンザルを測定の対象とした。抜歯後、歯の表面を洗浄、歯を細かく砕き、ふるいで直径 0.425 mm から 1 mm の粒径の粉末のものを抽出した。これらのエナメル質と象牙質の混合粉末試料を比重 2.6 g/cm^3 のメタタングステン酸ナトリウム溶液に入れ、遠心分離によってエナメル質と象牙質を分離した。抽出したエナメル質を蒸留水やエタノールでよく洗浄し、さらに、妨害シグナル除去のため、Titriplex III（エチレンジニトリロ四酢酸二ナトリウム塩・二水和物）溶液に浸漬して超音波洗浄、蒸留水で超音波洗浄、NaOH 水溶液に浸漬して 40 °C で超音波洗浄、蒸留水で超音波洗浄後、酢酸とエタノールで洗浄し、40 °C の乾燥機で乾燥させることで、測定試料を調製した。

このようにして調製した 11 個体分のエナメル質試料の ESR 測定は、ドイツ Magnettech 社製 MS-400 で行った。測定条件は、マイクロ波出力 2 mW、磁場変調幅 0.2 mT、倍率 900 倍、標準試料である Mn マーカーの 6 本の信号のうち 3 本目と 4 本目が左右の端に入るように中心磁場約 336 mT、掃引幅±5.5 mT で掃引した。高い S/N 比の ESR スペクトルを得るために、1 回 30 秒の掃引を 120 回分積算した（1 スペクトルあたりの測定時間は約 1 時間）。得られた ESR スペクトルには、調べたい炭酸ラジカルのほかに有機物由来のラジカル、試料の等方性や

異方性に関連した成分、バックグラウンドに関連した成分などがあり、これらの複合スペクトルから炭酸ラジカルに関する成分だけを抽出する必要がある。EPR Dosimetry プログラムでこれらの成分をフィッティングし、炭酸ラジカルに関連する成分の強度を抽出した。

11 個体の ESR 測定の結果は、(i) 5 個体は ESR 測定後のピーク分離によって炭酸ラジカル強度抽出が可能、(ii) 3 個体はサンプル重量が少なく炭酸ラジカル強度抽出が困難、(iii) 3 個体は非常に大きな妨害シグナルがあり炭酸ラジカル強度抽出が不可能、の 3 つに分類できた。図 3.1-1 に得られた ESR スペクトルの典型例を示す。(i) と (ii) のスペクトルは図中の比較的良好なスペクトル（上）に該当し、(iii) のスペクトルは図中の妨害シグナルが大きなスペクトル（下）に該当する。

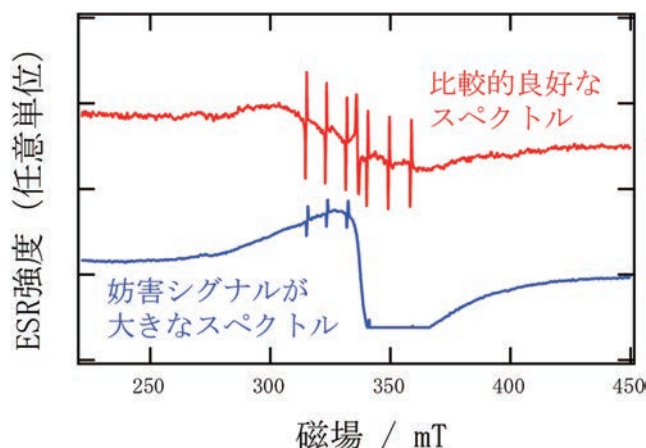


図 3.1-1 化学処理したエナメル質試料の ESR スペクトルの例

（上）比較的良好な ESR スペクトルと（下）妨害シグナルが大きなスペクトル

比較的良好なスペクトルは EPR Dosimetry ソフトで炭酸ラジカル強度を抽出することができるが、妨害シグナルが大きなスペクトルは、化学処理を行ったにもかかわらず妨害シグナルが重なっている。

(i) の 5 スペクトルは、ESR スペクトルの形状が比較的平らであるが、図 3.1-2 に示すように、ベースライン（破線）が若干右下がりである。ベースラインが平らになるのが望ましいが、この程度の変動であれば、EPR Dosimetry プログラムで解析可能な場合が多い。(ii) の 3 スペクトルについては、ESR スペクトルの形状に問題はないが、試料重量が少なかったため S/N 比が悪く、炭酸ラジカルの強度が低く、炭酸ラジカルと有機物ラジカルの分離をうまくできなかったと考えられる。(iii) については、図 3.1-1（下）に示すように、非常に大きな妨害シグナルが重なっているために炭酸ラジカルも有機物ラジカルも隠れてしまい、ピーク分離ができず、炭酸ラジカル強度の抽出ができなかった。

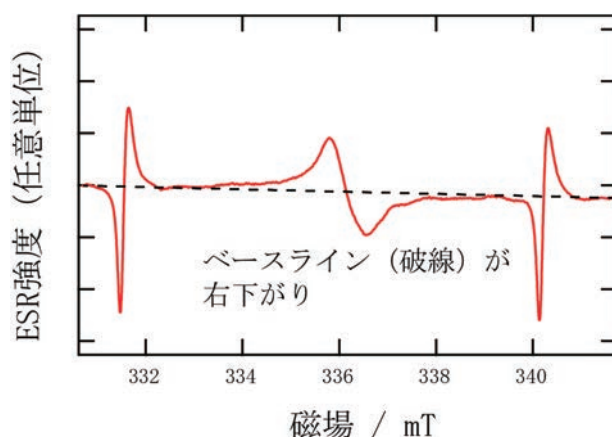


図 3.1-2 比較的良好な ESR スペクトルの拡大図

左右のピークは Mn マーカー、中心のピークに炭酸ラジカルと有機物ラジカルが含まれている。化学処理を施したにもかかわらず、ベースラインが若干右下がりである。

(i)、(ii) の試料について、化学処理を行ったにもかかわらずベースラインの右下がり完全に解消されなかったのは、化学処理が不十分であったことが原因だと考えられる。今回化学処理を行った試料には、茶色の粉末が混じっていることがあった。純粋なエナメル質であれば白色に近い色になるはずだが、化学処理の時間（特にアルカリ溶液によるエッチング）が不十分だったために、茶色の粉末が残ったのだと考えられる。野生のニホンザルの場合は生活環境が個体ごとに異なるため、決まった工程では化学処理が不十分の可能性はある。そのため、化学処理後の試料の色を確認し、さらに ESR 測定を行った際にスペクトルの改善の必要が認められた場合は、追加の化学処理を行う必要があることがわかった。試験的に NaOH 処理の時間を 15 時間まで延ばしたところ、スペクトル形状が改善することが確認できた。その一方で、エナメル質重量が減少したことによって炭酸ラジカル量も減少したために、追加の化学処理を行う前は (i) のスペクトル形状が (ii) に近づくこともわかった。野生動物の場合はエナメルに含まれる元素の個体差に応じて試料量の減少を抑えながら、NaOH 処理時間を調整する必要があると考えられる。

(ii) の試料について、試料重量が少なかったのは、歯 1 本からエナメル質を抽出したことに原因がある。サル歯にも個体差や年齢による発育の違いがあり、1 本の歯から抽出できるエナメル質の量はいつも一定ではない。1 本の歯から十分にエナメル質が確保できない場合には、同一個体の複数歯からエナメル質を抽出し、それらを混合して試料量を確保する必要がある。しかし、同一個体から抜歯した 2 本の歯の ESR 測定をそれぞれ別々に行ったところ、両者の ESR スペクトルが大きく異なる、つまり、歯に含まれる妨害原因が歯によって異なる場合があることがわかった。歯の形成順や口腔内での歯の位置によって、妨害要因の歯への付着の仕方が違う可能性を示唆しており、たとえ同一個体であっても、複数の歯を利用する場合は、最初から歯を混合するのではなく、1 本 1 本で ESR 測定を行い、妨害原因が少ない歯を選ぶスクリーニングが必要となることが明らかになった。

(iii) の試料について、非常に大きな妨害シグナルが得られたのは、試料中に黒い粉末が含まれていることが原因であると考えられる。これは化学処理では取り切れなかった妨害要

因だと考えられる。このような試料の場合は、ピンセットを用いて 1 つ 1 つ取り除く必要がある。また、このようにして取り除いた黒い粉末や上述の茶色粉末の元素分析によって、どのような元素が妨害要因になる可能性があるのかを調べるのが可能かもしれない。

試料重量は、外部被ばく線量推定を行う際に考慮すべきパラメータである。令和元年度に外部被ばく線量推定のために検量線を作成した際、試料重量は 100 mg に統一した。ラジカルの量は試料重量に依存するため、本検量線を利用する場合は、試料重量を 100 mg に揃える必要がある。しかし、令和 2 年度は 1 本の歯からエナメル質を抽出したために、全体的に試料重量が不足していた。そこで ESR スペクトルの有機物ラジカルと炭酸ラジカルの形状から、被ばく線量を簡易的に推定することにした。5 個体のうち、100 mGy を超える可能性のある個体は 1 個体だけであり、残り 4 個体は 100 mGy 以下と予想された。より正確な線量評価を行うため、令和 3 年度は複数歯を用いて試料重量を増やす、あるいは試料重量の違いによって検量線がどのように変化するかを調べ、炭酸ラジカル強度を試料重量で補正することで外部被ばく線量を推定することを検討したい。もし、複数歯を用いても十分な試料重量を確保できない場合は、検量線法ではなく、付加線量法（外部被ばく線量を推定したい歯の ESR 測定と放射線照射を繰り返し、元々の外部被ばく線量を推定する方法）での外部被ばく線量推定も検討する必要がある。

令和 2 年度は、外部被ばく線量推定に平行して、コントロール地域で捕獲したニホンザルのエナメル質試料を調製し、新たな検量線作成用の候補試料の選別を開始した。令和元年度に作成した検量線はニホンザルの永久歯を利用したものであるが、外部被ばく線量推定を行うのが幼獣の場合は乳歯を利用することになる。ヒトの場合、永久歯と乳歯ではエナメル質の構造が完全に同じではなく、サルにおいても同様のことが予想される。エナメル質の構造が違えば、検量線の傾き（線量に対する炭酸ラジカル生成の感度）が異なる可能性が考えられる。また、上述のように試料重量の違いによって検量線がどのように変化するかを検討しておくことは、今後の研究に重要な情報を与える。現在までにコントロール地域で捕獲した 3 個体のエナメル質試料を準備し、大きな妨害シグナルがなく、比較的良好なスペクトルが得られている。今後は永久歯と乳歯それぞれで検量線を作成するとともに、より平坦な ESR スペクトルが得られるように化学処理の条件検討も行う予定である。

3.1.2 臓器被ばく線量の推定（再委託先：広島大学）

令和 2 年度においては、1) 令和元年度に作成した楕円体ニホンザルファントムを用いて、臓器ごとに線源を配置して内部被ばく臓器線量の換算係数の計算、2) 解像度が不十分な CT 画像を用いたボクセルファントムを新たに作成し、マウスの個体差を含む CT 画像による換算係数の違いについて検討、3) 令和元年度に作成したマウスボクセルファントムを用いて、CT データのスライスロケーションを変更して作成した体重が 1.5 倍、2 倍、8 倍のファントムを用いて、内部被ばく臓器線量換算係数の体重依存性の評価の 3 項目と、原発事故後 10 年目の土壌調査を実施した。それぞれについて以下にまとめる。

1) 臓器を加えた楕円体ニホンザルファントム

令和元年度に作成した楕円体ニホンザルファントム[9]に精巣を追加し、PHITS コードを用いてモンテカルロ計算で各臓器に配置した線源から臓器ごとに付与されるエネルギーを計算した。精巣の大きさは、東北大学で野生ニホンザルのサンプリング時に測定した精巣のデー

タより S、M、L モデルの各軸方向の長さ (a、b、c) を決定した。サル ID が 524、525、527 は L モデルに分類できるため、3 つの平均値 (a=3.50、b=2.50、c=2.50) を L モデルの各軸方向の長さとした。仮定した臓器等の楕円体のパラメータを表 3.1-1 に示す。作成した楕円体ファントムのうち、5-10 kg 群の例を図 3.1-3 に示す。

表 3.1-1 各臓器の大きさ (a-c の単位はcm)

body or organ	Density (g/cm ³)	10 kg 群			5-10 kg 群			2 kg 群		
		a	b	c	a	b	c	a	b	c
Body	1.0	30.0	12.0	8.0	25.0	9.7	6.4	15.0	6.2	4.1
Skull	1.61	3.2	4.3	4.3	3.1	4.1	4.1	1.9	2.5	2.5
Brain	1.04	2.5	2.9	3.5	2.4	2.8	3.4	1.5	1.7	2.0
Eye ball	1.07	1.3	1.3	1.3	1.0	1.0	1.0	0.6	0.6	0.6
Lung	0.26	7.8	2.5	3.4	6.6	2.2	3.5	3.9	1.6	2.5
Heart	1.06	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	1.2	1.2	1.2
Liver	1.06	4.1	4.1	4.1	3.4	3.4	3.4	2.0	2.0	2.0
Kidney	1.05	1.8	1.8	1.8	1.5	1.5	1.5	0.9	0.9	0.9
Femur	1.92	8.5	0.7	0.7	6.5	0.6	0.6	4.0	0.3	0.3
Femoral-marrow	1.03	8.2	0.4	0.4	6.3	0.3	0.3	3.9	0.2	0.2
Testis	1.04	3.5	2.5	2.5	2.835	2.025	2.025	1.750	1.25	1.25
Thyroid	1.04	0.9	0.4	1.0	0.9	0.4	0.9	0.9	0.4	0.9

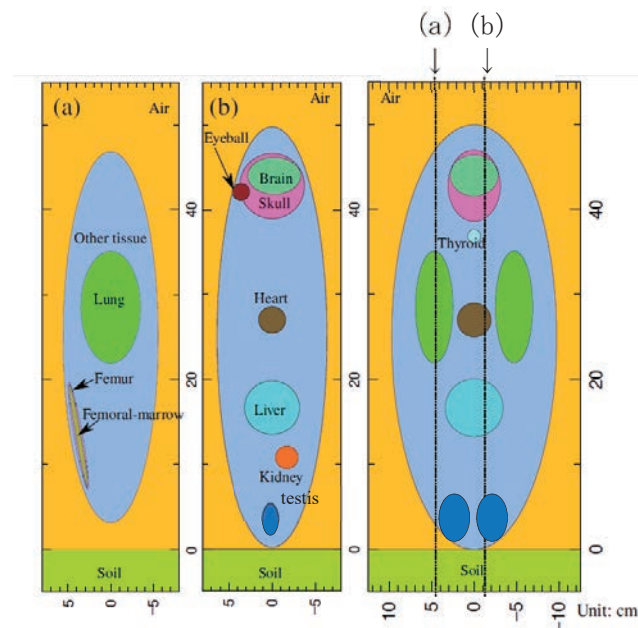


図3.1-3 5-10 kg群の回転楕円体の(a)及び(b)での断面図
令和元年度に作成したファントムに精巣を追加した。
右図中の線a及びbでの断面図を(a)及び(b)に示す。

2) ニホンザル臓器線量換算係数の計算

内部被ばく臓器線量率換算係数の計算は、令和元年度に報告したマウスボクセルファントム[10]と同様に、12の臓器のうち1つを線源臓器としてその臓器に7核種(Cs-134、Cs-137、I-131、I-132、Te-129、Te-129m、Te-132)を1 Bq 配置した。各核種から放出されるβ線及びγ線の楕円体近似した各臓器へのエネルギー付与を、PHITS コードを用いて計算した。12種類の各臓器を線源臓器として同様の計算を12臓器分行った。PHITS 計算で得られた7核種(Cs-134、Cs-137、I-131、I-132、Te-129、Te-129m、Te-132)の各臓器へのエネルギー付与から放出されるβ線、γ線の各臓器へのエネルギー付与から次式を用いて各臓器の内部被ばく線量率換算係数: C_{st}^i を算出した。

$$C_{st}^i = \sum_{j=\beta\gamma} a E_{st}^{ij} I_{st}^{ij} \frac{m_s}{m_t}$$

ここで、 a は、単位換算係数 24×3600 (d/s)、 E は計算で得られた線源 s から標的 t へのエネルギー付与を示す。

3) ニホンザル臓器線量換算係数の計算結果

計算した7核種に対する内部被ばく換算係数の計算結果を、それぞれ表 3.1-2 から表 3.1-22 に示す。石井によるシミュレーションは全身を1つの楕円体ファントムとして扱い、内部被ばく線量率換算係数を推定した[11]。令和2年度の計算結果を用いて、各臓器の放射能濃度を1 Bq/kg として、石井が推定した内部被ばく線量率換算係数と比較した。その結果、石井の報告に一部間違いが確認され、その修正を行ったところ、7核種について2%以内で一致した。この結果は、今回決定した楕円体臓器の換算係数を用いて、全身一様な汚染の場合、1つの楕円体ファントムの換算係数を再現することを示す。

表 3.1-2 Cs-134 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル) 単位は $[\mu\text{Gy/d}]/[\text{Bq/kg}]$

Cs-134-S												
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	Source organ			
									cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	4.69×10^{-3}	5.62×10^{-3}	2.25×10^{-3}	2.33×10^{-3}	6.07×10^{-3}	1.69×10^{-3}	7.11×10^{-3}	1.22×10^{-3}	6.07×10^{-6}	2.31×10^{-6}	3.32×10^{-6}	3.30×10^{-5}
skull	1.76×10^{-3}	3.15×10^{-3}	3.42×10^{-4}	2.97×10^{-5}	1.88×10^{-5}	3.67×10^{-6}	4.48×10^{-6}	4.10×10^{-7}	3.40×10^{-7}	1.40×10^{-7}	7.18×10^{-6}	1.02×10^{-6}
brain	1.36×10^{-3}	6.65×10^{-4}	2.98×10^{-3}	1.58×10^{-5}	1.39×10^{-5}	2.66×10^{-6}	3.50×10^{-6}	3.29×10^{-7}	2.72×10^{-7}	1.12×10^{-7}	3.41×10^{-6}	8.26×10^{-7}
eyeball	1.61×10^{-3}	6.64×10^{-4}	1.81×10^{-4}	2.35×10^{-3}	1.70×10^{-5}	3.33×10^{-6}	4.22×10^{-6}	3.87×10^{-7}	3.07×10^{-7}	1.26×10^{-7}	4.11×10^{-6}	9.60×10^{-7}
lung	2.42×10^{-3}	2.37×10^{-5}	9.13×10^{-6}	9.81×10^{-7}	2.32×10^{-3}	3.15×10^{-5}	3.41×10^{-5}	2.21×10^{-6}	2.20×10^{-6}	8.94×10^{-7}	2.08×10^{-6}	4.77×10^{-6}
heart	2.97×10^{-3}	2.05×10^{-5}	7.74×10^{-6}	8.54×10^{-7}	1.39×10^{-4}	2.70×10^{-3}	4.55×10^{-5}	2.45×10^{-6}	2.32×10^{-6}	9.38×10^{-7}	2.00×10^{-6}	5.12×10^{-6}
liver	2.70×10^{-3}	5.36×10^{-6}	2.23×10^{-6}	2.35×10^{-7}	3.26×10^{-5}	9.84×10^{-6}	3.16×10^{-3}	1.90×10^{-5}	8.86×10^{-6}	3.67×10^{-6}	3.61×10^{-7}	2.55×10^{-5}
kidney	2.62×10^{-3}	2.72×10^{-6}	1.15×10^{-6}	1.18×10^{-7}	1.18×10^{-5}	2.97×10^{-6}	1.11×10^{-4}	2.59×10^{-3}	5.83×10^{-6}	2.38×10^{-6}	1.64×10^{-7}	1.31×10^{-4}
cortical	3.52×10^{-3}	6.39×10^{-6}	2.68×10^{-6}	2.65×10^{-7}	3.23×10^{-5}	7.65×10^{-6}	1.37×10^{-4}	1.65×10^{-5}	2.19×10^{-3}	2.10×10^{-4}	3.84×10^{-7}	4.04×10^{-5}
red marrow	2.32×10^{-3}	4.42×10^{-6}	1.88×10^{-6}	1.89×10^{-7}	2.25×10^{-5}	5.33×10^{-6}	9.64×10^{-5}	1.16×10^{-5}	3.75×10^{-4}	2.02×10^{-3}	2.68×10^{-7}	2.80×10^{-5}
thyroid	2.91×10^{-3}	2.02×10^{-4}	4.98×10^{-5}	5.24×10^{-6}	4.64×10^{-5}	1.00×10^{-5}	8.36×10^{-6}	6.73×10^{-7}	5.78×10^{-7}	2.37×10^{-7}	2.33×10^{-3}	1.60×10^{-6}
testis	1.87×10^{-3}	1.79×10^{-6}	7.77×10^{-7}	8.03×10^{-8}	6.84×10^{-6}	1.65×10^{-6}	3.81×10^{-5}	3.46×10^{-5}	3.92×10^{-6}	1.58×10^{-6}	1.04×10^{-7}	2.86×10^{-3}

表 3.1-3 Cs-134 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル) 単位は $[\mu\text{Gy/d}] / [\text{Bq/kg}]$

Cs-134-M	Source organ												
	Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
	tissue	6.03×10^{-3}	8.61×10^{-5}	3.55×10^{-5}	3.58×10^{-6}	7.69×10^{-5}	2.82×10^{-5}	1.23×10^{-4}	2.08×10^{-5}	1.59×10^{-5}	2.62×10^{-6}	1.22×10^{-6}	4.48×10^{-5}
	skull	2.72×10^{-3}	3.94×10^{-3}	5.31×10^{-4}	4.89×10^{-5}	2.65×10^{-5}	5.92×10^{-6}	6.07×10^{-6}	4.83×10^{-7}	6.12×10^{-7}	1.05×10^{-7}	3.38×10^{-6}	8.67×10^{-7}
	brain	1.97×10^{-3}	9.39×10^{-4}	3.57×10^{-3}	2.72×10^{-5}	1.59×10^{-5}	3.47×10^{-6}	3.86×10^{-6}	3.21×10^{-7}	4.07×10^{-7}	6.96×10^{-8}	1.20×10^{-6}	5.92×10^{-7}
	eyeball	2.18×10^{-3}	9.59×10^{-4}	3.00×10^{-4}	2.62×10^{-3}	2.05×10^{-5}	4.60×10^{-6}	4.91×10^{-6}	3.85×10^{-7}	4.89×10^{-7}	8.32×10^{-8}	1.49×10^{-6}	6.99×10^{-7}
	lung	3.81×10^{-3}	4.12×10^{-5}	1.42×10^{-5}	1.67×10^{-6}	2.51×10^{-3}	6.45×10^{-5}	5.42×10^{-5}	3.11×10^{-6}	4.17×10^{-6}	7.10×10^{-7}	8.76×10^{-7}	4.54×10^{-6}
	heart	4.40×10^{-3}	2.87×10^{-5}	9.88×10^{-6}	1.19×10^{-6}	2.03×10^{-4}	3.16×10^{-3}	7.28×10^{-5}	3.57×10^{-6}	4.76×10^{-6}	8.09×10^{-7}	6.35×10^{-7}	4.97×10^{-6}
	liver	3.90×10^{-3}	5.92×10^{-6}	2.27×10^{-6}	2.64×10^{-7}	3.47×10^{-5}	1.48×10^{-5}	3.91×10^{-3}	3.81×10^{-5}	2.57×10^{-5}	4.46×10^{-6}	9.50×10^{-8}	2.93×10^{-5}
	kidney	3.89×10^{-3}	2.77×10^{-6}	1.09×10^{-6}	1.22×10^{-7}	1.17×10^{-5}	4.28×10^{-6}	2.24×10^{-4}	2.93×10^{-3}	2.06×10^{-5}	3.54×10^{-6}	4.00×10^{-8}	1.17×10^{-4}
	cortical	2.32×10^{-3}	2.89×10^{-6}	1.13×10^{-6}	1.24×10^{-7}	1.25×10^{-5}	4.54×10^{-6}	1.19×10^{-4}	1.63×10^{-5}	2.51×10^{-5}	1.07×10^{-4}	4.14×10^{-8}	3.55×10^{-5}
	red marrow	2.97×10^{-3}	3.60×10^{-6}	1.41×10^{-6}	1.53×10^{-7}	1.62×10^{-5}	5.81×10^{-6}	1.58×10^{-4}	2.14×10^{-5}	8.60×10^{-4}	2.18×10^{-3}	5.16×10^{-8}	4.51×10^{-5}
	thyroid	4.82×10^{-3}	4.21×10^{-4}	8.64×10^{-5}	9.66×10^{-6}	7.00×10^{-5}	1.64×10^{-5}	1.19×10^{-5}	8.64×10^{-7}	1.08×10^{-6}	1.84×10^{-7}	2.34×10^{-3}	1.47×10^{-6}
	testis	2.45×10^{-3}	1.42×10^{-6}	5.93×10^{-7}	6.49×10^{-8}	5.02×10^{-6}	1.73×10^{-6}	5.02×10^{-5}	3.44×10^{-5}	1.31×10^{-5}	2.20×10^{-6}	1.92×10^{-8}	3.37×10^{-3}

表 3.1-4 Cs-134 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル) 単位は[$\mu\text{Gy/d}$]/[Bq/kg]

Cs-134-L Target organ	Source organ											
	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	6.98×10^{-3}	1.00×10^{-4}	2.38×10^{-5}	5.19×10^{-6}	6.71×10^{-5}	3.67×10^{-5}	1.38×10^{-4}	2.27×10^{-5}	1.91×10^{-5}	4.55×10^{-6}	8.38×10^{-7}	5.75×10^{-5}
skull	1.77×10^{-3}	3.93×10^{-3}	3.34×10^{-4}	5.20×10^{-5}	1.44×10^{-5}	2.89×10^{-6}	2.63×10^{-6}	2.03×10^{-7}	2.86×10^{-7}	7.04×10^{-8}	1.80×10^{-6}	4.29×10^{-7}
brain	2.26×10^{-3}	1.81×10^{-3}	3.62×10^{-3}	4.86×10^{-5}	1.67×10^{-5}	3.32×10^{-6}	3.15×10^{-6}	2.53×10^{-7}	3.53×10^{-7}	8.65×10^{-8}	1.31×10^{-6}	5.45×10^{-7}
eyeball	2.43×10^{-3}	1.40×10^{-3}	2.41×10^{-4}	2.79×10^{-3}	1.93×10^{-5}	3.93×10^{-6}	3.55×10^{-6}	2.67×10^{-7}	3.85×10^{-7}	9.37×10^{-8}	1.49×10^{-6}	5.80×10^{-7}
lung	4.90×10^{-3}	5.84×10^{-5}	1.29×10^{-5}	3.02×10^{-6}	2.56×10^{-3}	7.28×10^{-5}	3.91×10^{-5}	2.32×10^{-6}	3.65×10^{-6}	8.89×10^{-7}	7.08×10^{-7}	3.95×10^{-6}
heart	5.57×10^{-3}	2.40×10^{-5}	5.43×10^{-6}	1.29×10^{-6}	1.51×10^{-4}	3.43×10^{-3}	8.36×10^{-5}	3.97×10^{-6}	6.48×10^{-6}	1.57×10^{-6}	2.71×10^{-7}	6.17×10^{-6}
liver	4.73×10^{-3}	4.94×10^{-6}	1.19×10^{-6}	2.72×10^{-7}	1.84×10^{-5}	1.89×10^{-5}	4.28×10^{-3}	4.70×10^{-5}	3.44×10^{-5}	8.60×10^{-6}	4.39×10^{-8}	4.26×10^{-5}
kidney	4.66×10^{-3}	2.26×10^{-6}	5.74×10^{-7}	1.25×10^{-7}	6.53×10^{-6}	5.32×10^{-6}	2.81×10^{-4}	3.11×10^{-3}	2.35×10^{-5}	5.81×10^{-6}	1.86×10^{-8}	1.84×10^{-4}
cortical	4.68×10^{-3}	4.12×10^{-6}	1.01×10^{-6}	2.22×10^{-7}	1.27×10^{-5}	1.09×10^{-5}	2.48×10^{-4}	2.86×10^{-5}	2.73×10^{-3}	1.92×10^{-4}	3.47×10^{-8}	6.58×10^{-5}
red marrow	3.22×10^{-3}	2.61×10^{-6}	6.67×10^{-7}	1.44×10^{-7}	8.50×10^{-6}	7.28×10^{-6}	1.77×10^{-4}	2.01×10^{-5}	5.81×10^{-4}	2.25×10^{-3}	2.19×10^{-8}	4.49×10^{-5}
thyroid	5.19×10^{-3}	6.34×10^{-4}	8.67×10^{-5}	1.98×10^{-5}	6.06×10^{-5}	1.10×10^{-5}	8.03×10^{-6}	5.51×10^{-7}	8.59×10^{-7}	1.94×10^{-7}	2.35×10^{-3}	1.04×10^{-6}
testis	3.18×10^{-3}	1.25×10^{-6}	3.22×10^{-7}	7.01×10^{-8}	2.99×10^{-6}	2.21×10^{-6}	6.81×10^{-5}	4.96×10^{-5}	1.45×10^{-5}	3.48×10^{-6}	9.44×10^{-9}	3.70×10^{-3}

表 3.1-5 Cs-137 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル) 単位は[μGy/d]/[Bq/kg]

Target organ	Cs-137-S	Source organ											
		Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue		3.83×10^{-3}	2.22×10^{-5}	8.20×10^{-6}	9.79×10^{-7}	2.67×10^{-5}	6.65×10^{-6}	2.73×10^{-5}	4.82×10^{-6}	2.71×10^{-6}	8.43×10^{-7}	1.39×10^{-6}	1.33×10^{-5}
skull		6.92×10^{-4}	3.21×10^{-3}	1.55×10^{-4}	1.40×10^{-5}	6.85×10^{-6}	1.34×10^{-6}	1.62×10^{-6}	1.47×10^{-7}	1.23×10^{-7}	5.01×10^{-8}	2.63×10^{-6}	3.66×10^{-7}
brain		4.97×10^{-4}	3.02×10^{-4}	3.18×10^{-3}	5.78×10^{-6}	5.03×10^{-6}	9.65×10^{-7}	1.25×10^{-6}	1.17×10^{-7}	9.78×10^{-8}	4.05×10^{-8}	1.24×10^{-6}	2.93×10^{-7}
eyeball		6.79×10^{-4}	3.14×10^{-4}	6.62×10^{-5}	2.85×10^{-3}	6.22×10^{-6}	1.20×10^{-6}	1.54×10^{-6}	1.35×10^{-7}	1.11×10^{-7}	4.63×10^{-8}	1.50×10^{-6}	3.47×10^{-7}
lung		1.06×10^{-3}	8.64×10^{-6}	3.30×10^{-6}	3.57×10^{-7}	2.82×10^{-3}	1.15×10^{-5}	1.25×10^{-5}	8.05×10^{-7}	8.02×10^{-7}	3.26×10^{-7}	7.61×10^{-7}	1.73×10^{-6}
heart		1.17×10^{-3}	7.45×10^{-6}	2.82×10^{-6}	3.10×10^{-7}	5.10×10^{-5}	3.05×10^{-3}	1.66×10^{-5}	8.94×10^{-7}	8.44×10^{-7}	3.42×10^{-7}	7.31×10^{-7}	1.85×10^{-6}
liver		1.03×10^{-3}	1.93×10^{-6}	7.94×10^{-7}	8.45×10^{-8}	1.19×10^{-5}	3.59×10^{-6}	3.25×10^{-3}	6.92×10^{-6}	3.23×10^{-6}	1.34×10^{-6}	1.31×10^{-7}	9.32×10^{-6}
kidney		1.06×10^{-3}	9.73×10^{-7}	4.10×10^{-7}	4.23×10^{-8}	4.28×10^{-6}	1.08×10^{-6}	4.05×10^{-5}	3.02×10^{-3}	2.12×10^{-6}	8.66×10^{-7}	5.92×10^{-8}	4.77×10^{-5}
cortical		1.56×10^{-3}	2.28×10^{-6}	9.68×10^{-7}	9.54×10^{-8}	1.19×10^{-5}	2.82×10^{-6}	5.00×10^{-5}	6.06×10^{-6}	2.63×10^{-3}	2.26×10^{-4}	1.41×10^{-7}	1.49×10^{-5}
red marrow		8.45×10^{-4}	1.54×10^{-6}	6.72×10^{-7}	6.66×10^{-8}	8.17×10^{-6}	1.95×10^{-6}	3.51×10^{-5}	4.22×10^{-6}	4.08×10^{-4}	2.52×10^{-3}	9.70×10^{-8}	1.03×10^{-5}
thyroid		1.22×10^{-3}	7.38×10^{-5}	1.82×10^{-5}	1.92×10^{-6}	1.69×10^{-5}	3.67×10^{-6}	3.01×10^{-6}	2.51×10^{-7}	2.08×10^{-7}	8.35×10^{-8}	2.83×10^{-3}	6.04×10^{-7}
testis		7.55×10^{-4}	6.41×10^{-7}	2.77×10^{-7}	2.84×10^{-8}	2.46×10^{-6}	5.95×10^{-7}	1.39×10^{-5}	1.26×10^{-5}	1.43×10^{-5}	5.73×10^{-7}	3.71×10^{-8}	3.12×10^{-3}

表 3.1-6 Cs-137 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル) 単位は[μGy/d]/[Bq/kg]

Cs-137-M Target organ	Tissue	Source organ										
		skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	4.33×10^{-3}	3.25×10^{-3}	1.29×10^{-3}	1.38×10^{-6}	3.06×10^{-3}	1.06×10^{-6}	4.57×10^{-5}	7.96×10^{-6}	6.36×10^{-6}	9.55×10^{-7}	4.89×10^{-7}	1.72×10^{-3}
skull	1.03×10^{-3}	3.53×10^{-3}	2.13×10^{-4}	1.99×10^{-5}	9.67×10^{-6}	2.15×10^{-6}	2.18×10^{-6}	1.72×10^{-7}	2.19×10^{-7}	3.74×10^{-8}	1.23×10^{-6}	3.07×10^{-7}
brain	7.17×10^{-4}	3.77×10^{-4}	3.42×10^{-3}	9.92×10^{-6}	5.77×10^{-6}	1.25×10^{-7}	1.38×10^{-6}	1.12×10^{-7}	1.43×10^{-7}	2.44×10^{-8}	4.37×10^{-7}	2.05×10^{-7}
eyeball	8.49×10^{-4}	3.92×10^{-4}	1.10×10^{-4}	3.01×10^{-3}	7.44×10^{-6}	1.67×10^{-6}	1.73×10^{-6}	1.36×10^{-7}	1.75×10^{-7}	3.02×10^{-8}	5.40×10^{-7}	3.57×10^{-7}
lung	1.51×10^{-3}	1.50×10^{-5}	5.15×10^{-6}	6.07×10^{-7}	2.94×10^{-5}	2.36×10^{-5}	1.97×10^{-5}	1.13×10^{-6}	1.51×10^{-6}	2.58×10^{-7}	3.20×10^{-7}	1.63×10^{-6}
heart	1.66×10^{-3}	1.03×10^{-5}	3.56×10^{-6}	4.32×10^{-7}	7.42×10^{-3}	3.25×10^{-3}	2.65×10^{-5}	1.30×10^{-6}	1.72×10^{-6}	2.93×10^{-7}	2.32×10^{-7}	1.79×10^{-6}
liver	1.45×10^{-3}	2.12×10^{-6}	8.12×10^{-7}	9.38×10^{-8}	1.27×10^{-6}	5.39×10^{-6}	3.55×10^{-3}	1.39×10^{-5}	9.40×10^{-6}	1.63×10^{-6}	3.43×10^{-8}	1.06×10^{-5}
kidney	1.48×10^{-3}	9.69×10^{-7}	3.83×10^{-7}	4.35×10^{-8}	4.25×10^{-6}	1.55×10^{-6}	8.18×10^{-5}	3.15×10^{-3}	7.49×10^{-6}	1.29×10^{-6}	1.42×10^{-8}	4.29×10^{-5}
cortical	9.25×10^{-4}	1.01×10^{-6}	4.03×10^{-7}	4.38×10^{-8}	4.54×10^{-6}	1.67×10^{-6}	4.38×10^{-5}	5.95×10^{-6}	2.88×10^{-3}	8.18×10^{-5}	1.49×10^{-8}	1.29×10^{-5}
red marrow	1.08×10^{-3}	1.30×10^{-6}	4.93×10^{-7}	5.43×10^{-8}	5.78×10^{-6}	2.11×10^{-6}	5.73×10^{-5}	7.76×10^{-6}	6.67×10^{-4}	2.70×10^{-3}	1.87×10^{-8}	1.65×10^{-5}
thyroid	1.94×10^{-3}	1.55×10^{-4}	3.12×10^{-5}	3.52×10^{-6}	2.55×10^{-6}	5.84×10^{-6}	4.23×10^{-6}	3.18×10^{-7}	3.70×10^{-7}	6.65×10^{-8}	2.84×10^{-3}	4.79×10^{-7}
testis	9.39×10^{-4}	4.97×10^{-7}	2.08×10^{-7}	2.28×10^{-8}	1.81×10^{-7}	6.22×10^{-7}	1.83×10^{-5}	1.26×10^{-5}	4.77×10^{-6}	7.99×10^{-7}	6.81×10^{-9}	3.34×10^{-3}

表 3.1-7 Cs-137 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル) 単位は [μGy/d]/[Bq/kg]

Cs-137-L Target organ	Source organ											
	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	4.68×10^{-3}	3.75×10^{-5}	8.66×10^{-6}	1.98×10^{-6}	2.61×10^{-5}	1.37×10^{-5}	5.10×10^{-5}	8.57×10^{-6}	7.33×10^{-6}	1.66×10^{-6}	3.30×10^{-7}	2.16×10^{-5}
skull	6.63×10^{-4}	3.53×10^{-3}	1.32×10^{-4}	2.06×10^{-5}	5.25×10^{-6}	1.04×10^{-6}	9.35×10^{-7}	7.18×10^{-7}	1.01×10^{-7}	2.46×10^{-8}	6.59×10^{-7}	1.50×10^{-7}
brain	8.20×10^{-4}	7.18×10^{-4}	3.44×10^{-3}	1.77×10^{-5}	6.03×10^{-6}	1.19×10^{-6}	1.11×10^{-6}	8.85×10^{-7}	1.22×10^{-7}	2.99×10^{-8}	4.78×10^{-7}	1.87×10^{-7}
eyeball	9.28×10^{-4}	5.55×10^{-4}	8.80×10^{-5}	3.09×10^{-3}	7.00×10^{-6}	1.41×10^{-6}	1.24×10^{-6}	9.32×10^{-7}	1.32×10^{-7}	3.32×10^{-8}	5.40×10^{-7}	1.96×10^{-7}
lung	1.90×10^{-3}	2.12×10^{-5}	4.67×10^{-6}	1.10×10^{-6}	2.97×10^{-3}	2.66×10^{-5}	1.42×10^{-5}	8.36×10^{-7}	1.32×10^{-6}	3.22×10^{-7}	2.59×10^{-7}	1.40×10^{-6}
heart	2.08×10^{-3}	8.68×10^{-6}	1.96×10^{-6}	4.66×10^{-7}	5.53×10^{-5}	3.36×10^{-3}	3.05×10^{-5}	1.43×10^{-7}	2.35×10^{-6}	5.72×10^{-7}	9.83×10^{-8}	2.20×10^{-6}
liver	1.75×10^{-3}	1.75×10^{-6}	4.22×10^{-7}	9.62×10^{-8}	6.71×10^{-6}	6.90×10^{-6}	3.69×10^{-3}	1.72×10^{-6}	1.26×10^{-5}	3.14×10^{-6}	1.58×10^{-8}	1.55×10^{-5}
kidney	1.75×10^{-3}	7.97×10^{-7}	1.97×10^{-7}	4.37×10^{-8}	2.35×10^{-6}	1.92×10^{-6}	1.03×10^{-4}	3.23×10^{-3}	8.55×10^{-6}	2.11×10^{-6}	6.52×10^{-9}	6.74×10^{-5}
cortical	1.79×10^{-3}	1.48×10^{-6}	3.58×10^{-7}	7.86×10^{-8}	4.63×10^{-6}	3.99×10^{-6}	9.10×10^{-5}	1.05×10^{-6}	3.02×10^{-3}	1.23×10^{-4}	1.25×10^{-8}	2.41×10^{-5}
red marrow	1.17×10^{-3}	9.09×10^{-7}	2.33×10^{-7}	5.00×10^{-8}	3.10×10^{-6}	2.65×10^{-6}	6.44×10^{-5}	7.26×10^{-6}	3.78×10^{-4}	2.76×10^{-3}	8.13×10^{-9}	1.62×10^{-5}
thyroid	2.07×10^{-3}	2.32×10^{-4}	3.16×10^{-5}	7.24×10^{-6}	2.21×10^{-5}	4.05×10^{-6}	2.92×10^{-6}	2.09×10^{-7}	3.06×10^{-7}	7.67×10^{-8}	2.84×10^{-3}	3.68×10^{-7}
testis	1.19×10^{-3}	4.34×10^{-7}	1.12×10^{-7}	2.42×10^{-8}	1.06×10^{-6}	7.91×10^{-7}	2.48×10^{-5}	1.81×10^{-5}	5.29×10^{-6}	1.27×10^{-6}	3.28×10^{-9}	3.46×10^{-3}

表 3.1-8 I-131 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル) 単位は[$\mu\text{Gy/d}$]/[Bq/kg]

I-131-S Target organ	Tissue	Source organ										
		skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	3.12×10^{-3}	1.47×10^{-3}	5.51×10^{-6}	6.39×10^{-7}	1.75×10^{-5}	4.47×10^{-6}	1.85×10^{-5}	3.22×10^{-6}	1.76×10^{-6}	5.69×10^{-7}	9.23×10^{-7}	8.84×10^{-6}
skull	4.75×10^{-4}	2.72×10^{-3}	1.03×10^{-4}	9.20×10^{-6}	4.78×10^{-6}	9.33×10^{-7}	1.07×10^{-6}	9.28×10^{-8}	7.85×10^{-8}	3.23×10^{-8}	1.87×10^{-6}	2.26×10^{-7}
brain	3.34×10^{-4}	1.98×10^{-4}	2.69×10^{-3}	3.97×10^{-6}	3.30×10^{-6}	6.23×10^{-7}	7.62×10^{-7}	6.77×10^{-8}	5.79×10^{-8}	2.37×10^{-8}	8.50×10^{-7}	1.65×10^{-7}
eyeball	4.40×10^{-4}	2.02×10^{-4}	4.51×10^{-5}	2.47×10^{-3}	4.11×10^{-6}	7.94×10^{-7}	9.19×10^{-7}	8.01×10^{-8}	6.64×10^{-8}	2.65×10^{-8}	1.03×10^{-6}	1.93×10^{-7}
lung	6.94×10^{-4}	5.76×10^{-6}	2.17×10^{-6}	2.36×10^{-7}	2.46×10^{-3}	7.96×10^{-6}	8.56×10^{-6}	5.34×10^{-7}	5.41×10^{-7}	2.19×10^{-7}	5.25×10^{-7}	1.11×10^{-6}
heart	7.87×10^{-4}	4.92×10^{-6}	1.82×10^{-6}	2.03×10^{-7}	3.52×10^{-5}	2.60×10^{-3}	1.14×10^{-5}	5.94×10^{-7}	5.59×10^{-7}	2.30×10^{-7}	5.02×10^{-7}	1.19×10^{-6}
liver	7.02×10^{-4}	1.20×10^{-6}	4.81×10^{-7}	5.18×10^{-8}	8.19×10^{-6}	2.47×10^{-6}	2.73×10^{-3}	4.79×10^{-6}	2.22×10^{-6}	9.22×10^{-7}	8.55×10^{-8}	6.37×10^{-6}
kidney	7.12×10^{-4}	5.72×10^{-7}	2.38×10^{-7}	2.48×10^{-8}	2.85×10^{-6}	7.18×10^{-7}	2.80×10^{-5}	2.58×10^{-3}	1.46×10^{-6}	5.94×10^{-7}	3.65×10^{-8}	3.29×10^{-5}
cortical	1.05×10^{-3}	1.52×10^{-6}	6.21×10^{-7}	6.31×10^{-8}	8.46×10^{-6}	2.03×10^{-6}	3.64×10^{-5}	4.39×10^{-6}	2.35×10^{-3}	1.33×10^{-4}	9.80×10^{-8}	1.07×10^{-5}
red marrow	5.70×10^{-4}	9.40×10^{-7}	4.01×10^{-7}	3.97×10^{-8}	5.48×10^{-6}	1.29×10^{-6}	2.43×10^{-5}	2.87×10^{-6}	2.38×10^{-4}	2.28×10^{-3}	6.10×10^{-8}	6.83×10^{-6}
thyroid	8.08×10^{-4}	5.07×10^{-5}	1.24×10^{-5}	1.31×10^{-6}	1.16×10^{-5}	2.53×10^{-6}	2.00×10^{-6}	1.56×10^{-7}	1.33×10^{-7}	5.45×10^{-8}	2.46×10^{-3}	3.60×10^{-7}
testis	5.02×10^{-4}	3.64×10^{-7}	1.54×10^{-7}	1.63×10^{-8}	1.59×10^{-6}	3.83×10^{-7}	9.53×10^{-6}	8.70×10^{-6}	9.66×10^{-7}	3.88×10^{-7}	2.24×10^{-8}	2.65×10^{-3}

表 3.1-9 I-131 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル) 単位は $[\mu\text{Gy/d}]/[\text{Bq/kg}]$

Target organ	I-131-M	Source organ											
		Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue		3.46×10^{-3}	2.18×10^{-5}	8.66×10^{-6}	9.14×10^{-7}	2.07×10^{-5}	7.27×10^{-6}	3.14×10^{-5}	5.38×10^{-6}	4.95×10^{-6}	7.62×10^{-7}	3.29×10^{-7}	1.21×10^{-5}
skull		7.26×10^{-4}	2.94×10^{-3}	1.49×10^{-4}	1.37×10^{-5}	6.95×10^{-6}	1.53×10^{-6}	1.43×10^{-6}	1.06×10^{-7}	1.74×10^{-7}	2.98×10^{-8}	9.03×10^{-7}	1.91×10^{-7}
brain		4.83×10^{-4}	2.56×10^{-4}	2.85×10^{-3}	6.86×10^{-6}	3.70×10^{-6}	7.82×10^{-7}	7.81×10^{-7}	5.98×10^{-8}	9.90×10^{-8}	1.69×10^{-8}	3.00×10^{-7}	1.10×10^{-7}
eyeball		5.59×10^{-4}	2.61×10^{-4}	7.54×10^{-5}	2.58×10^{-3}	4.82×10^{-6}	1.05×10^{-6}	1.02×10^{-6}	7.14×10^{-8}	1.20×10^{-7}	2.07×10^{-8}	3.68×10^{-7}	1.34×10^{-7}
lung		1.03×10^{-3}	1.00×10^{-5}	3.31×10^{-6}	3.95×10^{-7}	2.53×10^{-3}	1.65×10^{-5}	1.37×10^{-5}	7.30×10^{-7}	1.39×10^{-6}	2.35×10^{-7}	2.24×10^{-7}	1.04×10^{-6}
heart		1.14×10^{-3}	6.82×10^{-6}	2.22×10^{-6}	2.75×10^{-7}	5.20×10^{-5}	2.74×10^{-3}	1.85×10^{-5}	8.49×10^{-7}	1.57×10^{-6}	2.67×10^{-7}	1.61×10^{-7}	1.16×10^{-6}
liver		9.99×10^{-4}	1.27×10^{-6}	4.62×10^{-7}	5.45×10^{-8}	8.76×10^{-6}	3.75×10^{-6}	2.94×10^{-3}	9.77×10^{-6}	8.29×10^{-6}	1.44×10^{-6}	2.19×10^{-8}	7.92×10^{-6}
kidney		1.00×10^{-3}	5.32×10^{-7}	2.03×10^{-7}	2.34×10^{-8}	2.77×10^{-6}	1.01×10^{-6}	5.75×10^{-5}	2.67×10^{-3}	5.26×10^{-6}	9.00×10^{-7}	8.35×10^{-9}	3.42×10^{-5}
cortical		7.69×10^{-4}	8.73×10^{-7}	3.23×10^{-7}	3.58×10^{-8}	4.63×10^{-6}	1.71×10^{-6}	4.23×10^{-5}	4.61×10^{-6}	2.51×10^{-3}	4.97×10^{-5}	1.37×10^{-8}	8.22×10^{-6}
red marrow		8.63×10^{-4}	9.01×10^{-7}	3.37×10^{-7}	3.75×10^{-8}	5.27×10^{-6}	1.90×10^{-6}	5.07×10^{-5}	5.37×10^{-6}	3.99×10^{-4}	2.39×10^{-3}	1.43×10^{-8}	9.34×10^{-6}
thyroid		1.32×10^{-3}	1.07×10^{-4}	2.15×10^{-5}	2.40×10^{-6}	1.79×10^{-5}	4.15×10^{-6}	2.64×10^{-6}	1.84×10^{-7}	3.19×10^{-7}	5.20×10^{-8}	2.47×10^{-3}	3.17×10^{-7}
testis		6.62×10^{-4}	2.79×10^{-7}	1.11×10^{-7}	1.26×10^{-8}	1.16×10^{-6}	3.97×10^{-7}	1.36×10^{-5}	1.00×10^{-5}	2.72×10^{-6}	4.57×10^{-7}	3.93×10^{-9}	2.79×10^{-3}

表 3.1-10 I-131 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル) 単位は[μGy/d]/[Bq/kg]

Target organ	Source organ											
	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	3.70×10^{-3}	2.52×10^{-3}	5.81×10^{-6}	1.32×10^{-6}	1.78×10^{-3}	9.47×10^{-6}	3.53×10^{-5}	5.87×10^{-6}	4.93×10^{-6}	1.13×10^{-6}	2.24×10^{-7}	1.47×10^{-5}
skull	4.73×10^{-4}	2.94×10^{-3}	9.34×10^{-5}	1.44×10^{-5}	3.81×10^{-6}	7.43×10^{-7}	5.96×10^{-7}	4.34×10^{-8}	6.15×10^{-8}	1.52×10^{-8}	4.86×10^{-7}	8.91×10^{-8}
brain	5.53×10^{-4}	4.89×10^{-4}	2.86×10^{-3}	1.23×10^{-5}	3.91×10^{-6}	7.24×10^{-7}	5.95×10^{-7}	4.55×10^{-8}	6.40×10^{-8}	1.59×10^{-8}	3.31×10^{-7}	9.58×10^{-8}
eyeball	6.15×10^{-4}	3.73×10^{-4}	6.08×10^{-5}	2.63×10^{-3}	4.59×10^{-6}	8.59×10^{-7}	6.79×10^{-7}	4.89×10^{-8}	7.01×10^{-8}	1.75×10^{-8}	3.73×10^{-7}	1.01×10^{-7}
lung	1.30×10^{-3}	1.43×10^{-5}	3.03×10^{-6}	7.27×10^{-7}	2.55×10^{-3}	1.89×10^{-5}	9.70×10^{-6}	5.21×10^{-7}	8.53×10^{-7}	2.08×10^{-7}	1.83×10^{-7}	8.11×10^{-7}
heart	1.44×10^{-3}	5.54×10^{-6}	1.19×10^{-6}	2.93×10^{-7}	3.92×10^{-5}	2.81×10^{-3}	2.15×10^{-5}	9.38×10^{-7}	1.57×10^{-6}	3.85×10^{-7}	6.77×10^{-8}	1.35×10^{-6}
liver	1.22×10^{-3}	9.89×10^{-7}	2.31×10^{-7}	5.37×10^{-8}	4.58×10^{-6}	4.86×10^{-6}	3.04×10^{-3}	1.22×10^{-5}	8.82×10^{-6}	2.21×10^{-6}	9.69×10^{-9}	1.07×10^{-5}
kidney	1.21×10^{-3}	4.21×10^{-7}	1.04×10^{-7}	2.32×10^{-8}	1.47×10^{-6}	1.26×10^{-6}	7.28×10^{-5}	2.72×10^{-3}	5.99×10^{-6}	1.48×10^{-6}	3.64×10^{-9}	4.73×10^{-5}
cortical	1.30×10^{-3}	9.66×10^{-7}	2.31×10^{-7}	5.18×10^{-8}	3.45×10^{-6}	3.13×10^{-6}	7.14×10^{-5}	8.22×10^{-6}	2.59×10^{-3}	7.67×10^{-5}	8.77×10^{-9}	1.83×10^{-5}
red marrow	7.96×10^{-4}	4.84×10^{-7}	1.18×10^{-7}	2.66×10^{-8}	1.99×10^{-6}	1.73×10^{-6}	4.50×10^{-5}	5.05×10^{-6}	2.31×10^{-4}	2.42×10^{-3}	4.64×10^9	1.09×10^{-5}
thyroid	1.40×10^{-3}	1.62×10^{-4}	2.20×10^{-5}	5.01×10^{-6}	1.58×10^{-5}	2.83×10^{-6}	1.83×10^{-6}	1.09×10^{-7}	1.65×10^{-7}	4.16×10^{-8}	2.47×10^{-3}	2.08×10^{-7}
testis	8.13×10^{-4}	2.25×10^{-7}	5.68×10^{-8}	1.26×10^{-8}	6.13×10^{-7}	4.75×10^{-7}	1.70×10^{-5}	1.27×10^{-5}	3.60×10^{-6}	8.58×10^{-7}	1.74×10^{-9}	2.88×10^{-3}

表 3.1-11 I-132 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル) 単位は $[\mu\text{Gy/d}]/[\text{Bq/kg}]$

I-132-S		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	9.30×10^{-3}	7.49×10^{-5}	2.66×10^{-5}	3.40×10^{-6}	9.44×10^{-5}	2.24×10^{-5}	9.06×10^{-5}	1.64×10^{-5}	9.66×10^{-6}	2.84×10^{-6}	4.84×10^{-6}	4.56×10^{-5}
skull	2.33×10^{-3}	7.19×10^{-3}	5.54×10^{-4}	5.10×10^{-5}	2.22×10^{-5}	4.33×10^{-6}	5.31×10^{-6}	4.86×10^{-7}	4.03×10^{-7}	1.65×10^{-7}	8.45×10^{-6}	1.22×10^{-6}
brain	1.61×10^{-3}	1.09×10^{-3}	7.15×10^{-3}	1.86×10^{-5}	1.64×10^{-5}	3.15×10^{-6}	4.17×10^{-6}	3.95×10^{-7}	3.25×10^{-7}	1.33×10^{-7}	4.02×10^{-6}	9.91×10^{-7}
eyeball	2.34×10^{-3}	1.15×10^{-3}	2.13×10^{-4}	5.87×10^{-3}	2.01×10^{-5}	3.96×10^{-6}	5.02×10^{-6}	4.50×10^{-7}	3.71×10^{-7}	1.52×10^{-7}	4.83×10^{-6}	1.18×10^{-6}
lung	3.75×10^{-3}	2.79×10^{-5}	1.08×10^{-5}	1.16×10^{-6}	5.77×10^{-3}	3.71×10^{-5}	4.01×10^{-5}	2.61×10^{-6}	2.60×10^{-6}	1.05×10^{-6}	2.45×10^{-6}	5.64×10^{-6}
heart	3.93×10^{-3}	2.43×10^{-5}	9.17×10^{-6}	1.01×10^{-6}	1.64×10^{-4}	6.70×10^{-3}	5.36×10^{-5}	2.91×10^{-6}	2.72×10^{-6}	1.11×10^{-6}	2.36×10^{-6}	6.09×10^{-6}
liver	3.43×10^{-3}	6.37×10^{-6}	2.65×10^{-6}	2.80×10^{-7}	3.84×10^{-5}	1.16×10^{-5}	7.40×10^{-3}	2.23×10^{-5}	1.04×10^{-5}	4.32×10^{-6}	4.27×10^{-7}	3.00×10^{-5}
kidney	3.66×10^{-3}	3.24×10^{-6}	1.39×10^{-6}	1.41×10^{-7}	1.40×10^{-5}	3.51×10^{-6}	1.30×10^{-4}	6.56×10^{-3}	6.85×10^{-6}	2.79×10^{-6}	1.95×10^{-7}	1.54×10^{-4}
cortical	5.52×10^{-3}	7.64×10^{-6}	3.19×10^{-6}	3.16×10^{-7}	3.79×10^{-5}	9.01×10^{-6}	1.61×10^{-4}	1.95×10^{-5}	4.98×10^{-3}	9.36×10^{-4}	4.49×10^{-7}	4.75×10^{-5}
red marrow	2.85×10^{-3}	5.33×10^{-6}	2.29×10^{-6}	2.24×10^{-7}	2.64×10^{-5}	6.26×10^{-6}	1.14×10^{-4}	1.36×10^{-5}	1.69×10^{-3}	4.52×10^{-3}	3.18×10^7	3.31×10^{-5}
thyroid	4.24×10^{-3}	2.38×10^{-4}	5.84×10^{-5}	6.16×10^{-6}	5.41×10^{-5}	1.18×10^{-5}	9.84×10^{-6}	8.12×10^{-7}	6.98×10^{-7}	2.84×10^{-7}	5.80×10^{-3}	1.92×10^{-6}
testis	2.59×10^{-3}	2.15×10^{-6}	9.27×10^{-7}	9.59×10^{-8}	8.10×10^{-6}	1.95×10^{-6}	4.49×10^{-5}	4.07×10^{-5}	4.62×10^{-6}	1.86×10^{-6}	1.24×10^{-7}	6.93×10^{-3}

表 3.1-12 I-132 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル) 単位は $[\mu\text{Gy/d}]/[\text{Bq/kg}]$

I-132-M		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	1.09×10^{-2}	1.07×10^{-4}	4.19×10^{-5}	4.63×10^{-6}	1.04×10^{-4}	3.48×10^{-5}	1.49×10^{-4}	2.63×10^{-5}	2.53×10^{-5}	3.64×10^{-6}	1.66×10^{-6}	5.96×10^{-5}
skull	3.37×10^{-3}	8.30×10^{-3}	7.20×10^{-4}	6.81×10^{-5}	3.13×10^{-5}	6.98×10^{-6}	7.21×10^{-6}	5.80×10^{-7}	9.23×10^{-7}	1.58×10^{-7}	3.97×10^{-6}	1.10×10^{-6}
brain	2.32×10^{-3}	1.28×10^{-3}	7.96×10^{-3}	3.20×10^{-5}	1.88×10^{-5}	4.12×10^{-6}	4.63×10^{-6}	3.84×10^{-7}	6.14×10^{-7}	1.05×10^{-7}	1.41×10^{-6}	7.44×10^{-7}
eyeball	2.82×10^{-3}	1.35×10^{-3}	3.53×10^{-4}	6.52×10^{-3}	2.42×10^{-5}	5.47×10^{-6}	5.87×10^{-6}	4.62×10^{-7}	7.41×10^{-7}	1.23×10^{-7}	1.76×10^{-6}	8.87×10^{-7}
lung	5.12×10^{-3}	4.85×10^{-5}	1.68×10^{-5}	1.98×10^{-6}	6.25×10^{-3}	7.58×10^{-5}	6.38×10^{-5}	3.68×10^{-6}	6.76×10^{-6}	1.14×10^{-6}	1.03×10^{-6}	5.72×10^{-6}
heart	5.44×10^{-3}	3.40×10^{-5}	1.17×10^{-5}	1.42×10^{-6}	2.39×10^{-4}	7.40×10^{-3}	8.57×10^{-5}	4.25×10^{-6}	7.64×10^{-6}	1.30×10^{-6}	7.47×10^{-7}	6.27×10^{-6}
liver	4.73×10^{-3}	7.06×10^{-6}	2.72×10^{-6}	3.14×10^{-7}	4.08×10^{-5}	1.74×10^{-5}	8.39×10^{-3}	4.47×10^{-5}	3.83×10^{-5}	6.66×10^{-6}	1.13×10^{-7}	3.76×10^{-5}
kidney	4.91×10^{-3}	3.33×10^{-6}	1.32×10^{-6}	1.47×10^{-7}	1.39×10^{-5}	5.05×10^{-6}	2.63×10^{-4}	7.04×10^{-3}	2.46×10^{-5}	4.19×10^{-6}	4.84×10^{-8}	1.58×10^{-4}
cortical	3.65×10^{-3}	4.32×10^{-6}	1.72×10^{-6}	1.85×10^{-7}	2.02×10^{-5}	7.34×10^{-6}	1.78×10^{-4}	1.95×10^{-5}	5.97×10^{-3}	3.43×10^{-4}	6.32×10^{-8}	3.57×10^{-5}
red marrow	4.11×10^{-3}	5.44×10^{-6}	2.24×10^{-6}	2.30×10^{-7}	2.63×10^{-5}	9.36×10^{-6}	2.36×10^{-4}	2.54×10^{-5}	2.81×10^{-3}	5.25×10^{-3}	7.90×10^{-8}	4.57×10^{-5}
thyroid	6.50×10^{-3}	4.95×10^{-4}	1.02×10^{-4}	1.13×10^{-5}	8.18×10^{-5}	1.92×10^{-5}	1.39×10^{-5}	1.02×10^{-6}	1.67×10^{-6}	2.79×10^{-7}	5.84×10^{-3}	1.87×10^{-6}
testis	3.27×10^{-3}	1.80×10^{-6}	7.40×10^{-7}	8.23×10^{-8}	6.35×10^{-6}	2.19×10^{-6}	6.46×10^{-5}	4.63×10^{-5}	1.32×10^{-5}	2.20×10^{-6}	2.43×10^{-8}	7.68×10^{-3}

表 3.1-13 I-132 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル) 単位は[$\mu\text{Gy/d}$]/[Bq/kg]

I-132-L		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	1.21×10^{-2}	1.23×10^{-4}	2.81×10^{-5}	6.59×10^{-6}	8.72×10^{-5}	4.46×10^{-5}	1.66×10^{-4}	2.82×10^{-5}	2.45×10^{-5}	5.36×10^{-6}	1.11×10^{-6}	7.12×10^{-5}
skull	2.17×10^{-3}	8.29×10^{-3}	4.46×10^{-4}	6.93×10^{-5}	1.69×10^{-5}	3.41×10^{-6}	3.14×10^{-6}	2.45×10^{-7}	3.45×10^{-7}	8.37×10^{-8}	2.12×10^{-6}	5.15×10^{-7}
brain	2.66×10^{-3}	2.43×10^{-3}	8.03×10^{-3}	5.71×10^{-5}	1.97×10^{-5}	3.95×10^{-6}	3.82×10^{-6}	3.02×10^{-7}	4.28×10^{-7}	1.04×10^{-7}	1.54×10^{-6}	6.63×10^{-7}
eyeball	3.09×10^{-3}	1.88×10^{-3}	2.83×10^{-4}	6.82×10^{-3}	2.28×10^{-5}	4.65×10^{-6}	4.23×10^{-6}	3.25×10^{-7}	4.74×10^{-7}	1.13×10^{-7}	1.75×10^{-6}	7.11×10^{-7}
lung	6.35×10^{-3}	6.91×10^{-5}	1.53×10^{-5}	3.57×10^{-6}	6.35×10^{-3}	8.55×10^{-5}	4.62×10^{-5}	2.76×10^{-6}	4.32×10^{-6}	1.05×10^{-6}	8.32×10^{-7}	4.72×10^{-6}
heart	6.76×10^{-3}	2.86×10^{-5}	6.46×10^{-6}	1.53×10^{-6}	1.78×10^{-4}	7.78×10^{-3}	9.83×10^{-5}	4.69×10^{-6}	7.65×10^{-6}	1.86×10^{-6}	3.19×10^{-7}	7.36×10^{-6}
liver	5.69×10^{-3}	5.93×10^{-6}	1.44×10^{-6}	3.27×10^{-7}	2.17×10^{-5}	2.22×10^{-5}	8.85×10^{-3}	5.52×10^{-5}	4.04×10^{-5}	1.01×10^{-5}	5.24×10^{-8}	5.02×10^{-5}
kidney	5.77×10^{-3}	2.70×10^{-6}	7.03×10^{-7}	1.52×10^{-7}	7.79×10^{-6}	6.27×10^{-6}	3.30×10^{-4}	7.31×10^{-3}	2.77×10^{-5}	6.82×10^{-6}	2.22×10^{-8}	2.16×10^{-4}
cortical	5.94×10^{-3}	4.95×10^{-6}	1.19×10^{-6}	2.65×10^{-7}	1.49×10^{-5}	1.28×10^{-5}	2.91×10^{-4}	3.36×10^{-5}	6.48×10^{-3}	4.97×10^{-4}	4.10×10^{-8}	7.74×10^{-5}
red marrow	3.79×10^{-3}	3.19×10^{-6}	7.92×10^{-7}	1.78×10^{-7}	1.02×10^{-5}	8.58×10^{-6}	2.08×10^{-4}	2.35×10^{-5}	1.54×10^{-3}	5.49×10^{-3}	2.67×10^{-8}	5.27×10^{-5}
thyroid	6.85×10^{-3}	7.46×10^{-4}	1.02×10^{-4}	2.32×10^{-5}	7.18×10^{-5}	1.32×10^{-5}	9.53×10^{-6}	6.55×10^{-7}	9.98×10^{-7}	2.55×10^{-7}	5.86×10^{-3}	1.44×10^{-6}
testis	3.93×10^{-3}	1.51×10^{-6}	3.92×10^{-7}	8.48×10^{-8}	3.58×10^{-6}	2.63×10^{-6}	8.02×10^{-5}	5.84×10^{-5}	1.72×10^{-5}	4.10×10^{-6}	1.14×10^{-8}	8.10×10^{-3}

表 3.1-14 Te-129 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル) 単位は [pGy/d]/[Bq/kg]

Te-129-S	Target organ	Source organ											
		Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
	tissue	6.20×10^{-3}	1.26×10^{-5}	9.52×10^{-7}	8.79×10^{-7}	3.02×10^{-5}	3.70×10^{-6}	1.13×10^{-5}	3.01×10^{-6}	3.26×10^{-6}	2.22×10^{-7}	1.27×10^{-6}	9.61×10^{-6}
	skull	4.05×10^{-4}	5.81×10^{-3}	2.05×10^{-4}	2.11×10^{-5}	7.95×10^{-7}	1.43×10^{-7}	1.51×10^{-7}	1.30×10^{-8}	1.13×10^{-8}	4.57×10^{-9}	4.00×10^{-7}	3.15×10^{-8}
	brain	6.04×10^{-5}	3.93×10^{-4}	5.98×10^{-3}	6.38×10^{-7}	4.56×10^{-7}	8.62×10^{-8}	1.08×10^{-7}	9.64×10^{-9}	8.36×10^{-9}	3.38×10^{-9}	1.17×10^{-7}	2.39×10^{-8}
	eyeball	6.02×10^{-4}	4.69×10^{-4}	6.80×10^{-6}	5.30×10^{-3}	5.98×10^{-7}	1.14×10^{-7}	1.34×10^{-7}	1.08×10^{-8}	1.00×10^{-8}	3.86×10^{-9}	1.50×10^{-7}	2.70×10^{-8}
	lung	1.19×10^{-3}	8.31×10^{-7}	2.98×10^{-7}	3.48×10^{-8}	5.21×10^{-3}	1.57×10^{-6}	1.43×10^{-6}	7.86×10^{-8}	4.34×10^{-8}	3.36×10^{-8}	9.26×10^{-8}	1.60×10^{-7}
	heart	6.49×10^{-4}	7.01×10^{-7}	2.50×10^{-7}	2.93×10^{-8}	6.87×10^{-6}	5.80×10^{-3}	1.86×10^{-6}	8.71×10^{-8}	8.35×10^{-8}	3.37×10^{-8}	8.25×10^{-8}	1.70×10^{-7}
	liver	4.30×10^{-4}	1.70×10^{-7}	6.81×10^{-8}	7.36×10^{-9}	1.35×10^{-6}	4.00×10^{-7}	6.03×10^{-3}	8.47×10^{-7}	3.61×10^{-7}	1.49×10^{-7}	1.23×10^{-8}	1.01×10^{-6}
	kidney	8.08×10^{-4}	8.23×10^{-8}	3.49×10^{-8}	3.58×10^{-9}	4.17×10^{-7}	1.03×10^{-7}	5.02×10^{-6}	5.80×10^{-3}	2.31×10^{-7}	9.37×10^{-8}	5.15×10^{-9}	6.28×10^{-6}
	cortical	1.94×10^{-3}	2.16×10^{-7}	8.69×10^{-8}	9.08×10^{-9}	2.01×10^{-6}	4.08×10^{-7}	1.07×10^{-5}	1.20×10^{-6}	4.45×10^{-3}	8.52×10^{-4}	1.52×10^{-8}	2.53×10^{-6}
	red marrow	2.16×10^{-4}	1.37×10^{-7}	5.58×10^{-8}	5.78×10^{-9}	8.06×10^{-7}	1.86×10^{-7}	3.80×10^{-6}	4.41×10^{-7}	1.53×10^{-3}	4.12×10^{-3}	8.43×10^{-9}	1.02×10^{-6}
	thyroid	1.11×10^{-3}	7.74×10^{-6}	1.70×10^{-6}	1.94×10^{-7}	2.04×10^{-6}	4.14×10^{-7}	2.93×10^{-7}	2.17×10^{-8}	1.93×10^{-8}	7.81×10^{-9}	5.24×10^{-3}	4.87×10^{-8}
	testis	5.41×10^{-4}	5.35×10^{-8}	2.27×10^{-8}	2.38×10^{-9}	2.28×10^{-7}	5.44×10^{-8}	1.50×10^{-6}	1.64×10^{-6}	1.49×10^{-7}	5.94×10^{-8}	3.20×10^{-9}	5.87×10^{-3}

表 3. 1-15 Te-129 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル) 単位は [pGy/d] / [Bq/kg]

Te-129-M		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	6.33×10^{-3}	9.72×10^{-6}	1.34×10^{-6}	6.29×10^{-7}	1.90×10^{-5}	3.16×10^{-6}	1.07×10^{-5}	3.12×10^{-6}	4.52×10^{-6}	1.20×10^{-7}	3.16×10^{-7}	7.18×10^{-6}
skull	3.20×10^{-4}	6.06×10^{-3}	1.44×10^{-4}	1.54×10^{-5}	9.88×10^{-7}	2.08×10^{-7}	1.96×10^{-7}	1.47×10^{-8}	2.44×10^{-8}	4.13×10^{-9}	1.58×10^{-7}	2.72×10^{-8}
brain	7.72×10^{-5}	2.49×10^{-4}	6.15×10^{-3}	1.00×10^{-6}	5.08×10^{-7}	1.09×10^{-7}	1.12×10^{-7}	8.67×10^{-9}	1.47×10^{-8}	2.49×10^{-9}	4.02×10^{-8}	1.67×10^{-8}
eyeball	3.83×10^{-4}	2.97×10^{-4}	1.06×10^{-5}	5.71×10^{-3}	6.78×10^{-7}	1.48×10^{-7}	1.48×10^{-7}	1.11×10^{-8}	1.78×10^{-8}	3.05×10^{-9}	5.09×10^{-8}	2.02×10^{-8}
lung	9.39×10^{-4}	1.39×10^{-6}	4.54×10^{-7}	5.57×10^{-8}	5.53×10^{-3}	3.00×10^{-6}	2.02×10^{-6}	1.02×10^{-7}	1.98×10^{-7}	3.33×10^{-8}	3.57×10^{-8}	1.47×10^{-7}
heart	4.96×10^{-4}	9.37×10^{-7}	3.09×10^{-7}	3.82×10^{-8}	9.35×10^{-6}	6.03×10^{-3}	2.65×10^{-6}	1.18×10^{-7}	2.22×10^{-7}	3.71×10^{-8}	2.32×10^{-8}	1.63×10^{-7}
liver	3.42×10^{-4}	1.80×10^{-7}	6.61×10^{-8}	7.81×10^{-9}	1.29×10^{-6}	5.38×10^{-7}	6.19×10^{-3}	1.57×10^{-6}	1.23×10^{-6}	2.10×10^{-7}	3.03×10^{-9}	1.12×10^{-6}
kidney	5.81×10^{-4}	7.73×10^{-8}	3.08×10^{-8}	3.55×10^{-9}	3.85×10^{-7}	1.39×10^{-7}	9.26×10^{-6}	5.91×10^{-3}	7.69×10^{-7}	1.30×10^{-7}	1.21×10^{-9}	5.57×10^{-6}
cortical	6.94×10^{-4}	1.18×10^{-7}	4.42×10^{-8}	5.03×10^{-9}	7.52×10^{-7}	2.48×10^{-7}	8.54×10^{-6}	8.64×10^{-7}	5.22×10^{-3}	2.69×10^{-4}	1.85×10^{-9}	1.38×10^{-6}
red marrow	1.35×10^{-4}	1.30×10^{-7}	5.16×10^{-8}	5.63×10^{-9}	7.38×10^{-7}	2.63×10^{-7}	7.26×10^{-6}	7.62×10^{-7}	2.18×10^{-3}	4.77×10^{-3}	2.03×10^{-9}	1.31×10^{-6}
thyroid	1.25×10^{-3}	1.54×10^{-5}	2.85×10^{-6}	3.34×10^{-7}	2.86×10^{-6}	6.06×10^{-7}	3.92×10^{-7}	2.85×10^{-8}	4.23×10^{-8}	7.43×10^{-9}	5.27×10^{-3}	4.33×10^{-8}
testis	3.92×10^{-4}	4.13×10^{-8}	1.65×10^{-8}	1.92×10^{-9}	1.64×10^{-7}	5.60×10^{-8}	1.92×10^{-6}	1.62×10^{-6}	3.91×10^{-7}	6.45×10^{-8}	5.82×10^{-10}	6.07×10^{-3}

表 3.1-16 Te-129 の内部被ばく線量率換算係数 (1 モデル) 単位は[$\mu\text{Gy/d}$]/[Bq/kg]

Te-129-L Target organ	Source organ											
	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	6.39×10^{-3}	1.01×10^{-5}	8.41×10^{-7}	7.67×10^{-7}	1.26×10^{-5}	3.10×10^{-6}	9.78×10^{-6}	2.62×10^{-6}	3.08×10^{-6}	1.63×10^{-7}	1.87×10^{-7}	6.50×10^{-6}
skull	1.87×10^{-4}	6.07×10^{-3}	8.19×10^{-5}	1.26×10^{-5}	5.28×10^{-7}	9.86×10^{-8}	8.15×10^{-8}	6.21×10^{-9}	8.75×10^{-9}	2.15×10^{-9}	8.32×10^{-8}	1.27×10^{-8}
brain	8.17×10^{-5}	4.31×10^{-4}	6.16×10^{-3}	1.76×10^{-6}	5.36×10^{-7}	1.01×10^{-7}	8.75×10^{-8}	6.91×10^{-9}	9.78×10^{-9}	2.37×10^{-9}	4.42×10^{-8}	1.44×10^{-8}
eyeball	3.58×10^{-4}	3.29×10^{-4}	8.45×10^{-6}	5.83×10^{-3}	6.44×10^{-7}	1.21×10^{-7}	1.02×10^{-7}	7.24×10^{-7}	1.12×10^{-8}	2.65×10^{-9}	5.25×10^{-8}	1.55×10^{-8}
lung	9.23×10^{-4}	1.97×10^{-6}	4.15×10^{-7}	1.01×10^{-7}	5.60×10^{-3}	3.20×10^{-6}	1.34×10^{-6}	7.23×10^{-8}	1.20×10^{-7}	2.88×10^{-8}	2.79×10^{-8}	1.17×10^{-7}
heart	4.73×10^{-4}	7.72×10^{-7}	1.67×10^{-7}	4.09×10^{-8}	6.58×10^{-6}	6.11×10^{-3}	2.98×10^{-6}	1.28×10^{-7}	2.18×10^{-7}	5.25×10^{-8}	9.26×10^{-9}	1.90×10^{-7}
liver	3.38×10^{-4}	1.45×10^{-7}	3.38×10^{-8}	7.87×10^{-9}	6.31×10^{-7}	6.72×10^{-7}	6.24×10^{-3}	1.87×10^{-6}	1.26×10^{-6}	3.08×10^{-7}	1.36×10^{-9}	1.48×10^{-6}
kidney	5.40×10^{-4}	6.39×10^{-8}	1.55×10^{-8}	3.46×10^{-9}	2.05×10^{-7}	1.73×10^{-7}	1.12×10^{-5}	5.99×10^{-3}	8.46×10^{-7}	2.05×10^{-7}	5.33×10^{-10}	7.42×10^{-6}
cortical	7.96×10^{-4}	1.34×10^{-7}	3.16×10^{-8}	7.07×10^{-9}	4.73×10^{-7}	4.21×10^{-7}	1.22×10^{-5}	1.33×10^{-6}	5.54×10^{-3}	3.41×10^{-4}	1.16×10^{-9}	2.94×10^{-6}
red marrow	1.15×10^{-4}	7.49×10^{-8}	1.75×10^{-8}	4.05×10^{-9}	2.71×10^{-7}	2.38×10^{-7}	6.20×10^{-6}	6.93×10^{-7}	1.05×10^{-3}	4.98×10^{-3}	6.70×10^{-10}	1.51×10^{-6}
thyroid	1.15×10^{-3}	2.32×10^{-5}	2.93×10^{-6}	7.12×10^{-7}	2.40×10^{-6}	3.84×10^{-7}	2.58×10^{-7}	1.49×10^{-8}	2.49×10^{-8}	5.91×10^{-9}	5.29×10^{-3}	2.81×10^{-8}
testis	3.58×10^{-4}	3.41×10^{-8}	8.86×10^{-9}	1.92×10^{-9}	8.88×10^{-8}	6.69×10^{-8}	2.35×10^{-6}	1.99×10^{-6}	5.11×10^{-7}	1.19×10^{-7}	2.59×10^{-10}	6.14×10^{-3}

表 3.1-17 Te-129m の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル) 単位は [μGy/d]/[Bq/kg]

Te-129m-S		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	5.22×10^{-3}	1.02×10^{-5}	5.63×10^{-7}	7.30×10^{-7}	2.53×10^{-5}	2.92×10^{-6}	8.58×10^{-6}	2.44×10^{-6}	2.74×10^{-6}	2.02×10^{-7}	1.05×10^{-6}	7.81×10^{-6}
skull	3.06×10^{-4}	4.90×10^{-3}	1.65×10^{-4}	1.74×10^{-5}	3.50×10^{-7}	6.80×10^{-8}	8.12×10^{-8}	7.30×10^{-9}	6.27×10^{-9}	2.53×10^{-9}	1.37×10^{-7}	1.83×10^{-8}
brain	3.43×10^{-5}	3.32×10^{-4}	5.06×10^{-3}	2.88×10^{-7}	2.47×10^{-7}	4.73×10^{-8}	6.17×10^{-8}	5.79×10^{-9}	4.88×10^{-9}	1.99×10^{-9}	6.12×10^{-8}	1.44×10^{-8}
eyeball	5.05×10^{-4}	4.02×10^{-4}	3.29×10^{-6}	4.48×10^{-3}	3.05×10^{-7}	5.98×10^{-8}	7.56×10^{-8}	6.77×10^{-9}	5.55×10^{-9}	2.30×10^{-9}	7.37×10^{-8}	1.73×10^{-8}
lung	9.93×10^{-4}	4.30×10^{-7}	1.63×10^{-7}	1.76×10^{-8}	4.41×10^{-3}	5.81×10^{-7}	6.17×10^{-7}	3.97×10^{-8}	4.02×10^{-8}	1.62×10^{-8}	3.78×10^{-8}	8.49×10^{-8}
heart	5.05×10^{-4}	3.73×10^{-7}	1.38×10^{-7}	1.52×10^{-8}	2.56×10^{-6}	4.91×10^{-3}	8.24×10^{-7}	4.42×10^{-8}	4.19×10^{-8}	1.69×10^{-8}	3.64×10^{-8}	9.10×10^{-8}
liver	3.23×10^{-4}	9.62×10^{-8}	3.93×10^{-8}	4.13×10^{-9}	5.91×10^{-7}	1.78×10^{-7}	5.10×10^{-3}	3.45×10^{-7}	1.63×10^{-7}	6.68×10^{-8}	6.44×10^{-9}	4.60×10^{-7}
kidney	6.57×10^{-4}	4.86×10^{-8}	2.05×10^{-8}	2.11×10^{-9}	2.11×10^{-7}	5.30×10^{-8}	2.02×10^{-6}	4.91×10^{-3}	1.07×10^{-7}	4.32×10^{-8}	2.87×10^{-9}	2.48×10^{-6}
cortical	1.50×10^{-3}	1.19×10^{-7}	5.02×10^{-8}	4.89×10^{-9}	6.23×10^{-7}	1.47×10^{-7}	2.72×10^{-6}	3.28×10^{-7}	3.76×10^{-3}	7.08×10^{-4}	7.21×10^{-9}	7.86×10^{-7}
red marrow	1.94×10^{-4}	7.70×10^{-8}	3.47×10^{-8}	3.21×10^{-9}	4.02×10^{-7}	9.51×10^{-8}	1.74×10^{-6}	2.07×10^{-7}	1.28×10^{-3}	3.49×10^{-3}	4.76×10^{-9}	5.05×10^{-7}
thyroid	8.93×10^{-4}	3.71×10^{-6}	8.99×10^{-7}	9.48×10^{-8}	8.39×10^{-7}	1.82×10^{-7}	1.50×10^{-7}	1.26×10^{-8}	1.06×10^{-8}	4.17×10^{-9}	4.44×10^{-3}	2.79×10^{-8}
testis	4.34×10^{-4}	3.19×10^{-8}	1.36×10^{-8}	1.40×10^{-9}	1.22×10^{-7}	2.93×10^{-8}	6.89×10^{-7}	6.46×10^{-7}	7.18×10^{-8}	2.86×10^{-8}	1.83×10^{-9}	4.97×10^{-3}

表 3.1-18 Te-129m の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル) 単位は[μGy/d]/[Bq/kg]

Te-129m-M		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	5.31×10^{-3}	7.43×10^{-6}	7.50×10^{-7}	4.98×10^{-7}	1.52×10^{-5}	2.28×10^{-6}	7.35×10^{-6}	2.37×10^{-6}	3.71×10^{-6}	6.51×10^{-8}	2.55×10^{-7}	5.48×10^{-6}
skull	2.23×10^{-4}	5.10×10^{-3}	1.11×10^{-4}	1.21×10^{-5}	4.88×10^{-7}	1.08×10^{-7}	1.08×10^{-7}	8.55×10^{-9}	1.40×10^{-8}	2.36×10^{-9}	6.33×10^{-8}	1.60×10^{-8}
brain	4.16×10^{-5}	2.03×10^{-4}	5.19×10^{-3}	4.90×10^{-7}	2.82×10^{-7}	6.13×10^{-8}	6.74×10^{-8}	5.58×10^{-9}	8.99×10^{-9}	1.53×10^{-9}	2.14×10^{-8}	1.06×10^{-8}
eyeball	3.05×10^{-4}	2.48×10^{-4}	5.39×10^{-6}	4.83×10^{-3}	3.68×10^{-7}	8.18×10^{-8}	8.52×10^{-8}	6.73×10^{-9}	1.06×10^{-8}	1.78×10^{-9}	2.67×10^{-8}	1.32×10^{-8}
lung	7.44×10^{-4}	7.44×10^{-7}	2.53×10^{-7}	2.98×10^{-8}	4.68×10^{-3}	1.18×10^{-6}	9.78×10^{-7}	5.53×10^{-8}	1.04×10^{-7}	1.74×10^{-8}	1.59×10^{-8}	8.46×10^{-8}
heart	3.51×10^{-4}	5.18×10^{-7}	1.75×10^{-7}	2.12×10^{-8}	3.71×10^{-6}	5.10×10^{-3}	1.31×10^{-6}	6.40×10^{-8}	1.17×10^{-7}	1.97×10^{-8}	1.14×10^{-8}	9.34×10^{-8}
liver	2.30×10^{-4}	1.06×10^{-7}	4.00×10^{-8}	4.62×10^{-9}	6.25×10^{-7}	2.66×10^{-7}	5.22×10^{-3}	6.91×10^{-7}	6.01×10^{-7}	1.02×10^{-7}	1.68×10^{-9}	5.73×10^{-7}
kidney	4.35×10^{-4}	4.94×10^{-8}	1.90×10^{-8}	2.14×10^{-9}	2.10×10^{-7}	7.61×10^{-8}	4.07×10^{-6}	5.00×10^{-3}	3.83×10^{-7}	6.43×10^{-8}	7.11×10^{-10}	2.44×10^{-6}
cortical	5.07×10^{-4}	6.66×10^{-8}	2.57×10^{-8}	2.82×10^{-9}	3.25×10^{-7}	1.18×10^{-7}	2.97×10^{-6}	3.21×10^{-7}	4.39×10^{-3}	2.29×10^{-4}	9.91×10^{-10}	5.78×10^{-7}
red marrow	7.23×10^{-5}	7.79×10^{-8}	3.16×10^{-8}	3.38×10^{-9}	3.94×10^{-7}	1.41×10^{-7}	3.58×10^{-6}	3.88×10^{-7}	1.89×10^{-3}	4.03×10^{-3}	1.15×10^{-9}	6.88×10^{-7}
thyroid	1.00×10^{-3}	7.75×10^{-6}	1.54×10^{-6}	1.73×10^{-7}	1.27×10^{-6}	2.94×10^{-7}	2.11×10^{-7}	1.55×10^{-8}	2.42×10^{-8}	4.18×10^{-9}	4.46×10^{-3}	2.76×10^{-8}
testis	2.95×10^{-4}	2.61×10^{-8}	1.07×10^{-8}	1.19×10^{-9}	9.41×10^{-8}	3.23×10^{-8}	9.83×10^{-7}	7.14×10^{-7}	2.03×10^{-7}	3.35×10^{-8}	3.53×10^{-10}	5.13×10^{-3}

表 3.1-19 Te-129m の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル) 単位は[$\mu\text{Gy/d}$]/[Bq/kg]

Te-129m-L		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	5.36×10^{-3}	7.58×10^{-6}	4.55×10^{-7}	5.96×10^{-7}	9.88×10^{-6}	2.12×10^{-6}	6.40×10^{-6}	1.91×10^{-6}	2.45×10^{-6}	8.30×10^{-8}	1.49×10^{-7}	4.73×10^{-6}
skull	1.27×10^{-4}	5.10×10^{-3}	6.23×10^{-5}	9.66×10^{-6}	2.65×10^{-7}	5.23×10^{-8}	4.67×10^{-8}	3.58×10^{-9}	5.10×10^{-9}	1.23×10^{-9}	3.38×10^{-8}	7.49×10^{-9}
brain	4.28×10^{-5}	3.49×10^{-4}	5.20×10^{-3}	8.74×10^{-7}	2.97×10^{-7}	5.82×10^{-8}	5.55×10^{-8}	4.37×10^{-9}	6.18×10^{-9}	1.49×10^{-9}	2.35×10^{-8}	9.39×10^{-9}
eyeball	2.77×10^{-4}	2.70×10^{-4}	4.32×10^{-6}	4.94×10^{-3}	3.43×10^{-7}	6.84×10^{-8}	6.07×10^{-8}	4.74×10^{-9}	6.60×10^{-9}	1.62×10^{-9}	2.66×10^{-8}	9.67×10^{-9}
lung	7.12×10^{-4}	1.06×10^{-6}	2.30×10^{-7}	5.39×10^{-8}	4.74×10^{-3}	1.33×10^{-6}	7.02×10^{-7}	4.11×10^{-8}	6.60×10^{-8}	1.58×10^{-8}	1.28×10^{-8}	6.91×10^{-8}
heart	3.17×10^{-4}	4.30×10^{-7}	9.60×10^{-8}	2.28×10^{-8}	2.76×10^{-6}	5.16×10^{-3}	1.50×10^{-6}	7.05×10^{-8}	1.17×10^{-7}	2.82×10^{-8}	4.86×10^{-9}	1.09×10^{-7}
liver	2.17×10^{-4}	8.69×10^{-8}	2.08×10^{-8}	4.75×10^{-9}	3.30×10^{-7}	3.40×10^{-7}	5.26×10^{-3}	8.53×10^{-7}	6.33×10^{-7}	1.55×10^{-7}	7.76×10^{-10}	7.64×10^{-7}
kidney	3.87×10^{-4}	3.94×10^{-8}	9.96×10^{-9}	2.15×10^{-9}	1.14×10^{-7}	9.47×10^{-8}	5.10×10^{-6}	5.07×10^{-3}	4.31×10^{-7}	1.05×10^{-7}	3.20×10^{-10}	3.34×10^{-6}
cortical	5.55×10^{-4}	7.44×10^{-8}	1.79×10^{-8}	3.95×10^{-9}	2.37×10^{-7}	2.05×10^{-7}	4.81×10^{-6}	5.51×10^{-7}	4.66×10^{-3}	2.89×10^{-4}	6.24×10^{-10}	1.25×10^{-6}
red marrow	5.79×10^{-5}	4.72×10^{-8}	1.13×10^{-8}	2.47×10^{-9}	1.50×10^{-7}	1.29×10^{-7}	3.17×10^{-6}	3.58×10^{-7}	9.08×10^{-4}	4.21×10^{-3}	3.94×10^{-10}	7.92×10^{-7}
thyroid	9.09×10^{-4}	1.16×10^{-5}	1.56×10^{-6}	3.57×10^{-7}	1.10×10^{-6}	2.02×10^{-7}	1.36×10^{-7}	9.77×10^{-9}	1.48×10^{-8}	3.69×10^{-9}	4.47×10^{-3}	2.02×10^{-8}
testis	2.57×10^{-4}	2.17×10^{-8}	5.52×10^{-9}	1.21×10^{-9}	5.23×10^{-8}	3.89×10^{-8}	1.22×10^{-6}	9.00×10^{-7}	2.66×10^{-7}	6.23×10^{-8}	1.63×10^{-10}	5.18×10^{-3}

表 3.1-20 Te-132 の内部被ばく線量率換算係数 (S モデル) 単位は[$\mu\text{Gy/d}$]/[Bq/kg]

Te-132-S		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	9.07×10^{-4}	7.33×10^{-6}	2.94×10^{-6}	2.96×10^{-7}	8.09×10^{-6}	2.32×10^{-6}	9.86×10^{-6}	1.65×10^{-6}	7.82×10^{-7}	3.09×10^{-7}	4.47×10^{-7}	4.40×10^{-6}
skull	2.94×10^{-4}	7.36×10^{-4}	5.71×10^{-5}	4.74×10^{-6}	3.15×10^{-6}	6.22×10^{-7}	6.55×10^{-7}	5.35×10^{-8}	4.56×10^{-8}	1.87×10^{-8}	1.28×10^{-6}	1.26×10^{-7}
brain	1.85×10^{-4}	9.07×10^{-5}	6.83×10^{-4}	2.24×10^{-6}	1.74×10^{-6}	3.25×10^{-7}	3.63×10^{-7}	3.08×10^{-8}	2.69×10^{-8}	1.12×10^{-8}	4.74×10^{-7}	7.13×10^{-8}
eyeball	2.05×10^{-4}	8.49×10^{-5}	2.47×10^{-5}	5.98×10^{-4}	2.11×10^{-6}	4.07×10^{-7}	4.44×10^{-7}	3.51×10^{-8}	3.07×10^{-8}	1.26×10^{-8}	5.61×10^{-7}	8.26×10^{-8}
lung	3.27×10^{-4}	3.09×10^{-6}	1.11×10^{-6}	1.24×10^{-7}	5.97×10^{-4}	4.54×10^{-6}	4.89×10^{-6}	2.87×10^{-7}	2.95×10^{-7}	1.20×10^{-7}	3.00×10^{-7}	5.72×10^{-7}
heart	4.15×10^{-4}	2.63×10^{-6}	9.27×10^{-7}	1.07×10^{-7}	2.01×10^{-5}	6.43×10^{-4}	6.61×10^{-6}	3.22×10^{-7}	3.08×10^{-7}	1.26×10^{-7}	2.88×10^{-7}	6.20×10^{-7}
liver	3.79×10^{-4}	5.91×10^{-7}	2.27×10^{-7}	2.51×10^{-8}	4.65×10^{-6}	1.42×10^{-6}	7.04×10^{-4}	2.76×10^{-6}	1.26×10^{-6}	5.22×10^{-7}	4.57×10^{-8}	3.61×10^{-6}
kidney	3.59×10^{-4}	2.65×10^{-7}	1.03×10^{-7}	1.15×10^{-8}	1.53×10^{-6}	3.90×10^{-7}	1.62×10^{-5}	6.27×10^{-4}	8.17×10^{-7}	3.34×10^{-7}	1.85×10^{-8}	1.86×10^{-5}
cortical	6.43×10^{-4}	9.39×10^{-7}	3.70×10^{-7}	3.87×10^{-8}	6.26×10^{-6}	1.54×10^{-6}	2.86×10^{-5}	3.41×10^{-6}	5.98×10^{-4}	2.39×10^{-5}	6.82×10^{-8}	7.98×10^{-6}
red marrow	3.07×10^{-4}	4.44×10^{-7}	1.81×10^{-7}	1.78×10^{-8}	2.97×10^{-6}	7.01×10^{-7}	1.35×10^{-5}	1.59×10^{-6}	3.41×10^{-5}	5.65×10^{-4}	3.06×10^{-8}	3.73×10^{-6}
thyroid	4.04×10^{-4}	2.85×10^{-5}	6.87×10^{-6}	7.29×10^{-7}	6.78×10^{-6}	1.48×10^{-6}	1.09×10^{-6}	7.98×10^{-8}	7.05×10^{-8}	2.86×10^{-8}	5.97×10^{-4}	1.73×10^{-7}
testis	2.52×10^{-4}	1.62×10^{-7}	6.67×10^{-8}	7.12×10^{-9}	8.14×10^{-7}	1.97×10^{-7}	5.38×10^{-6}	4.92×10^{-6}	5.29×10^{-7}	2.13×10^{-7}	1.06×10^{-8}	6.64×10^{-4}

表 3.1-21 Te-132 の内部被ばく線量率換算係数 (M モデル) 単位は [μGy/d]/[Bq/kg]

Te-132-M		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	1.09×10^{-3}	1.14×10^{-5}	4.63×10^{-6}	4.58×10^{-7}	1.07×10^{-5}	4.01×10^{-6}	1.75×10^{-5}	2.90×10^{-6}	2.49×10^{-6}	4.17×10^{-7}	1.70×10^{-7}	6.40×10^{-6}
skull	4.73×10^{-4}	8.70×10^{-4}	9.41×10^{-5}	8.21×10^{-6}	4.64×10^{-6}	1.02×10^{-6}	8.65×10^{-7}	5.99×10^{-8}	9.87×10^{-8}	1.70×10^{-8}	6.27×10^{-7}	1.05×10^{-7}
brain	2.68×10^{-4}	1.34×10^{-4}	7.69×10^{-4}	3.90×10^{-6}	1.90×10^{-6}	3.89×10^{-7}	3.46×10^{-7}	2.54×10^{-8}	4.23×10^{-8}	7.31×10^{-9}	1.66×10^{-7}	4.65×10^{-8}
eyeball	2.81×10^{-4}	1.27×10^{-4}	4.14×10^{-5}	6.31×10^{-4}	2.45×10^{-6}	5.21×10^{-7}	4.43×10^{-7}	3.04×10^{-8}	5.06×10^{-8}	8.82×10^{-9}	1.99×10^{-7}	5.74×10^{-8}
lung	5.44×10^{-4}	5.41×10^{-6}	1.68×10^{-6}	2.07×10^{-7}	6.21×10^{-4}	9.74×10^{-6}	7.94×10^{-6}	3.87×10^{-7}	7.53×10^{-7}	1.28×10^{-7}	1.32×10^{-7}	5.06×10^{-7}
heart	6.40×10^{-4}	3.62×10^{-6}	1.10×10^{-6}	1.41×10^{-7}	3.05×10^{-5}	7.05×10^{-4}	1.08×10^{-5}	4.57×10^{-7}	8.61×10^{-7}	1.47×10^{-7}	9.44×10^{-8}	5.67×10^{-7}
liver	5.67×10^{-4}	6.02×10^{-7}	2.07×10^{-7}	2.51×10^{-8}	5.05×10^{-6}	2.19×10^{-6}	8.14×10^{-4}	5.77×10^{-6}	4.77×10^{-6}	8.31×10^{-7}	1.15×10^{-8}	4.48×10^{-6}
kidney	5.51×10^{-4}	2.36×10^{-7}	8.99×10^{-8}	1.02×10^{-8}	1.47×10^{-6}	5.42×10^{-7}	3.41×10^{-5}	6.74×10^{-4}	3.02×10^{-6}	5.17×10^{-7}	4.02×10^{-9}	1.99×10^{-5}
cortical	5.36×10^{-4}	5.40×10^{-7}	1.97×10^{-7}	2.26×10^{-8}	3.47×10^{-6}	1.32×10^{-6}	3.43×10^{-5}	3.71×10^{-6}	6.42×10^{-4}	1.54×10^{-5}	9.65×10^{-9}	6.24×10^{-6}
red marrow	4.69×10^{-4}	4.06×10^{-7}	1.41×10^{-7}	1.65×10^{-8}	2.82×10^{-6}	1.02×10^{-6}	2.89×10^{-5}	3.03×10^{-6}	9.44×10^{-5}	5.81×10^{-4}	6.91×10^{-9}	5.04×10^{-6}
thyroid	7.02×10^{-4}	6.16×10^{-5}	1.18×10^{-5}	1.35×10^{-6}	1.08×10^{-5}	2.46×10^{-6}	1.49×10^{-6}	8.79×10^{-8}	1.55×10^{-7}	2.61×10^{-8}	5.98×10^{-4}	1.39×10^{-7}
testis	3.55×10^{-4}	1.17×10^{-7}	4.58×10^{-8}	5.35×10^{-9}	5.51×10^{-7}	1.94×10^{-7}	7.64×10^{-6}	5.81×10^{-6}	1.49×10^{-6}	2.50×10^{-7}	1.76×10^{-9}	7.35×10^{-4}

表 3.1-22 Te-132 の内部被ばく線量率換算係数 (L モデル) 単位は[$\mu\text{Gy/d}$]/[Bq/kg]

Te-132-L		Source organ										
Target organ	Tissue	skull	brain	eyeball	lung	heart	liver	kidney	cortical	red marrow	thyroid	testis
tissue	1.23×10^{-3}	1.33×10^{-5}	3.11×10^{-6}	6.78×10^{-7}	9.58×10^{-6}	5.37×10^{-6}	2.01×10^{-5}	3.24×10^{-6}	2.57×10^{-6}	6.20×10^{-7}	1.18×10^{-7}	7.99×10^{-6}
skull	3.12×10^{-4}	8.70×10^{-4}	5.98×10^{-5}	8.95×10^{-6}	2.58×10^{-6}	4.88×10^{-7}	3.51×10^{-7}	2.41×10^{-8}	3.42×10^{-8}	8.41×10^{-9}	3.42×10^{-7}	5.00×10^{-8}
brain	3.07×10^{-4}	2.60×10^{-4}	7.77×10^{-4}	7.04×10^{-6}	2.03×10^{-6}	3.54×10^{-7}	2.60×10^{-7}	1.90×10^{-8}	2.70×10^{-8}	6.64×10^{-9}	1.86×10^{-7}	4.19×10^{-8}
eyeball	3.16×10^{-4}	1.89×10^{-4}	3.35×10^{-5}	6.53×10^{-4}	2.38×10^{-6}	4.24×10^{-7}	2.89×10^{-7}	1.96×10^{-8}	3.02×10^{-8}	7.29×10^{-9}	2.07×10^{-7}	4.35×10^{-8}
lung	7.18×10^{-4}	7.76×10^{-6}	1.56×10^{-6}	3.88×10^{-7}	6.28×10^{-4}	1.14×10^{-5}	5.53×10^{-6}	2.65×10^{-7}	4.51×10^{-7}	1.10×10^{-7}	1.09×10^{-7}	3.78×10^{-7}
heart	8.34×10^{-4}	2.89×10^{-6}	5.93×10^{-7}	1.49×10^{-7}	2.35×10^{-5}	7.45×10^{-4}	1.28×10^{-5}	5.07×10^{-7}	8.74×10^{-7}	2.12×10^{-7}	3.92×10^{-8}	6.61×10^{-7}
liver	7.05×10^{-4}	4.53×10^{-7}	1.01×10^{-7}	2.40×10^{-8}	2.60×10^{-6}	2.89×10^{-6}	8.71×10^{-4}	7.31×10^{-6}	5.14×10^{-6}	1.29×10^{-6}	4.86×10^{-9}	6.11×10^{-6}
kidney	6.79×10^{-4}	1.80×10^{-7}	4.42×10^{-8}	9.69×10^{-9}	7.49×10^{-7}	6.80×10^{-7}	4.38×10^{-5}	6.99×10^{-4}	3.47×10^{-6}	8.58×10^{-7}	1.68×10^{-9}	2.80×10^{-5}
cortical	9.45×10^{-4}	5.98×10^{-7}	1.35×10^{-7}	3.22×10^{-8}	2.51×10^{-6}	2.43×10^{-6}	5.86×10^{-5}	6.70×10^{-6}	6.77×10^{-4}	2.99×10^{-5}	5.90×10^{-9}	1.42×10^{-5}
red marrow	4.34×10^{-4}	2.13×10^{-7}	4.84×10^{-8}	1.12×10^{-8}	1.01×10^{-6}	9.31×10^{-7}	2.57×10^{-5}	2.84×10^{-6}	6.81×10^{-5}	5.88×10^{-4}	2.04×10^{-9}	5.96×10^{-6}
thyroid	7.75×10^{-4}	9.41×10^{-5}	1.23×10^{-5}	2.90×10^{-6}	9.63×10^{-6}	1.68×10^{-6}	9.02×10^{-7}	5.02×10^{-8}	8.28×10^{-8}	2.02×10^{-8}	5.99×10^{-4}	9.18×10^{-8}
testis	4.47×10^{-4}	9.59×10^{-8}	2.47×10^{-8}	5.44×10^{-9}	2.80×10^{-7}	2.31×10^{-7}	9.71×10^{-6}	7.50×10^{-6}	2.00×10^{-6}	4.78×10^{-7}	7.53×10^{-10}	7.82×10^{-4}

4) 北里大学 CT 画像を用いたマウスボクセルフアントムの作成

令和元年度に南カリフォルニア大学の Digimouse ウェブサイト[10]の CT データを用い、ボクセルフアントムを作成し報告した[12]。令和 2 年度は、北里大学所有の CT 装置で撮影したデータを用いてボクセルフアントムの作成を行った。使用した CT 装置が小動物仕様でなかったために良好な解像度とコントラストが得られず、当初はボクセルフアントムの作成を行わなかった。ただ、輪郭が不明瞭な CT データから作成したボクセルフアントムでどの程度換算係数が変わるかの参考とする目的で、今回はファントム（北里大ボクセルフアントム）の作成を試みた。この北里大ボクセルフアントムを用いて換算係数を計算し、Digimouse ボクセルフアントムの結果と比較することで、マウスの個体差と臓器セグメント分けの不十分なボクセルフアントムの影響を推定することとした。作成した 3D モデルのボクセルフアントムを図 3.1-4(a)、(b)に示す。北里大ボクセルフアントムと Digimouse ボクセルフアントムの臓器質量の違いを表 3.1-23 に示す。全体重は 20 %程度で一致しているのに対し、臓器質量は概ね 40 %程度の違いがあった。最大の違いは精巣で 5 倍の違いがあった。

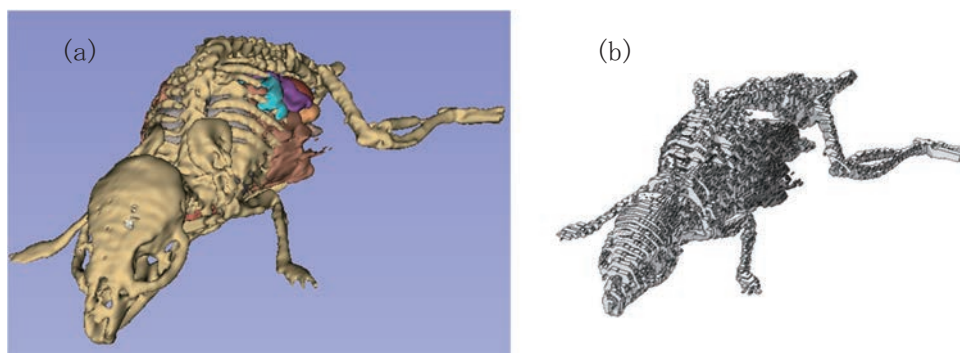


図 3.1-4 CT データからボクセルフアントムの構築
(a) 北里大学 CT データから作成したマウス臓器の 3D 画像、
(b) 作成したボクセルフアントム

表 3.1-23 ボクセルフアントムの各臓器の質量

	臓器重量 (g)		臓器重量/全身重量		差異
	Digi mouse	Kitasato mouse	Digi mouse	Kitasato mouse	
Tissue	17.41	20.27	72.81 %	70.73 %	3.0 %
Bone	2.29	5.12	9.58 %	17.86 %	-46.4 %
Brain	0.43	0.29	1.80 %	1.01 %	77.7 %
Heart	0.23	0.12	0.96 %	0.42 %	129.7 %
Bladder	0.20	0.11	0.84 %	0.38 %	117.9 %
Testis	0.16	0.03	0.67 %	0.10 %	539.3 %
Stmach	0.23	0.18	0.96 %	0.63 %	53.2 %
Spleen	0.15	0.09	0.63 %	0.31 %	99.8 %
Pancreas	0.05	0.09	0.21 %	0.31 %	-33.4 %
Liver	2.13	1.73	8.91 %	6.04 %	47.6 %
Kidney	0.52	0.45	2.17 %	1.57 %	38.5 %
Lung	0.11	0.18	0.46 %	0.63 %	-26.7 %
Body weight	23.91	28.66			

5) 内部被ばく臓器線量率換算係数の計算

上述のように作成したボクセルファントムを用いて、令和元年度同様に PHITS 計算により、臓器間の内部被ばく線量係数の計算を行った。ボクセルファントムを $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$ の空気領域と深さ 30 cm の土壌を配置した空間の中央に配置し、12 臓器のいずれかを線源臓器 i (i =骨、脳、心臓、膀胱、精巣、胃、脾臓、膵臓、肝臓、腎臓、肺、軟組織) とし、1 Bq の Cs-137 線源 (β 線及び γ 線) により標的臓器 j に付与されるエネルギーを計算した。

線源臓器 i から標的臓器 j に計算された付与エネルギーと Cs-137 の放射線 k (β 線、 γ 線) の崩壊当たりの放出エネルギー E^k を用いて、各臓器への付与エネルギー割合を示す Absorbed Fraction を推定した。Cs-137 の放出エネルギー E^k は γ 線で 0.565 MeV、 β 線で 0.262 MeV を用いた。Absorbed Fraction は、

$$f_{ij}^k = \frac{\varepsilon_{ij}^k}{E^k} \quad 3.2.1-1$$

で与えられる。ここで、 ε_{ij}^k は、それぞれ線源臓器 i の放射線 k が標的臓器 j に付与しエネルギーである。この f_{ij}^k を用いると線源臓器 i から標的臓器 j への内部被ばく線量率換算係数は、行列形式で

$$\eta_{ij} = a \frac{m_i}{m_j} \left[E^\gamma f_{ij}^\gamma + E^\beta f_{ij}^\beta \right], \quad 3.2.1-2$$

と表せる。ここで η_{ij} は、線源臓器 i から標的臓器 j への内部被ばく線量率換算係数行列要素で ($\mu\text{Gy/d}$) / (Bq/kg) の単位で与えられる。また、 a は、単位換算係数 $1.602 \times 10^{-7} (\mu\text{J/MeV}) \cdot 3600 (\text{h/s}) \cdot 24 (\text{d/h})$ 、 m_i と m_j は i 番目の線源臓器と j 番目の標的臓器の質量を示す。

北里大ボクセルファントムを用いた計算結果と Digimouse ボクセルファントムの結果と比較を表 3.1.2-23 に示す。線源臓器と標的臓器が一致している場合、おおよそ 20 %以内であり、差異の最大値は精巣で 34 %であった。精巣の大きさは、北里大ボクセルファントムと Digimouse ボクセルファントムで 5 倍の違いがあったが、線量換算係数は 34 %の誤差に抑えられている。また、線源臓器と標的臓器が異なる場合、最大 20 倍の違いが認められる。線源臓器と標的臓器が異なる場合の換算係数は、線源臓器と標的臓器が一致している場合の換算係数より 2-3 桁低いことから、特別な場合を除き、臓器線量に対する寄与は少ない。したがって、Digimouse ボクセルファントムで決定した換算係数を利用した臓器線量の誤差は、平均的に 20 %、最大 40 %程度見込んでおけば、十分と考えられる。

6) 換算係数の体重依存性

Digimouse 及び北里大ボクセルファントムについて、ボクセル数を一定にし、1 ボクセルのサイズを変更させることにより、全長と重量を変化させ、内部被ばくでの各臓器のエネルギー付与を計算した。重量はそれぞれ 23.9 g、28.67 g を基準値として、1.5、2、8 倍のマウスボクセルファントムを作成した。また空気領域内に占めるマウスの割合が一定になるように、空気領域も拡大し、シミュレーション計算を行った。

計算結果を、線源臓器と標的臓器が一致している場合の換算係数を体重の関数として図 3.1-5 に示す。軟組織、肺、脾臓では、換算係数がスムーズな体重の関数として表されること

がわかる。心臓では、北里大ボクセルファントムと digimouse ボクセルファントムで、系統的なずれが認められるが、その大きさは数%であり、1つの関数で与えても今回の目的では十分な精度と考えられる。

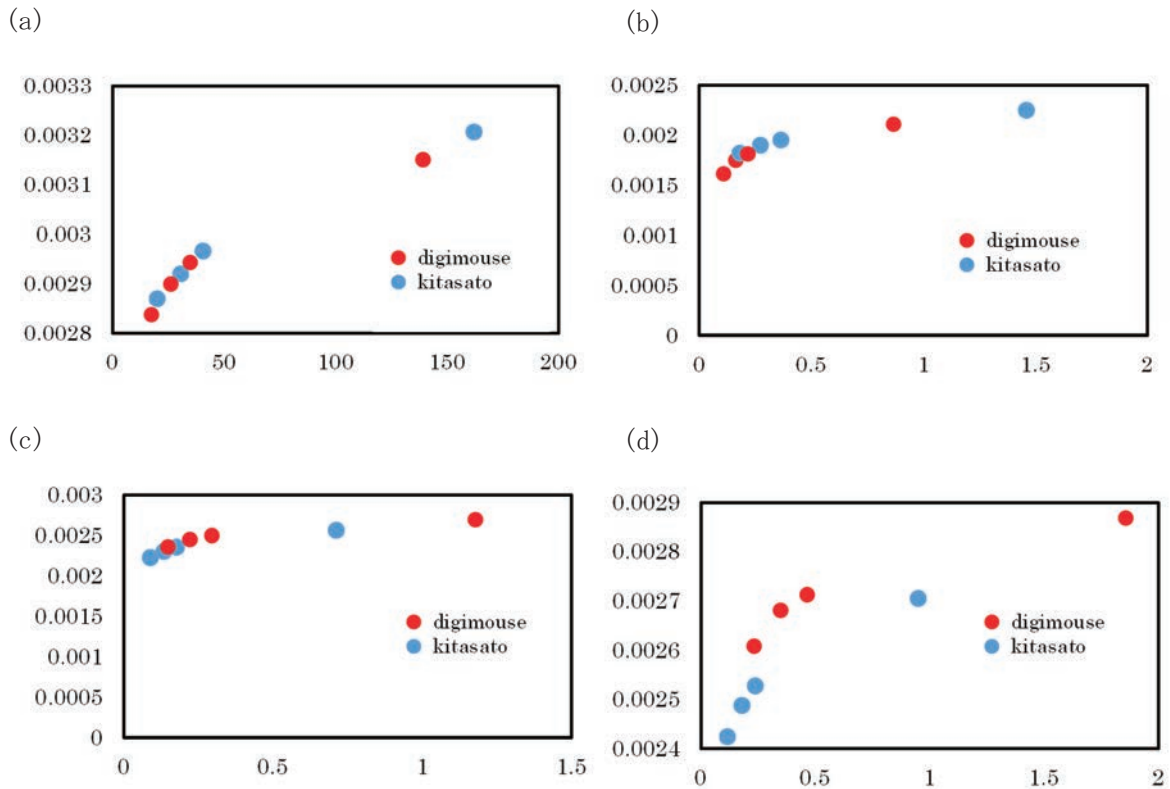


図 3.1-5 線源臓器と標的臓器が一致時の換算係数の重量依存性
(a) 軟組織、(b) 肺、(c) 脾臓、(d) 心臓

7) まとめ

令和2年度においては、楕円体臓器を配置したニホンザル楕円体ファントムを用いて、内部被ばく換算係数の導出を行った。臓器中放射能濃度を一定を仮定すると、全身を1楕円体として計算した値と3%以内で一致した。また、昨年作成したマウスボクセルファントムを用いた内部被ばく線量率換算係数の信頼度を推定するため、解像度・コントラストが不十分なCT画像を用いてボクセルファントムを作成した。作成したファントムを用いて計算した換算係数と、令和元年度に作成した digimouse ファントムで決定した換算係数を比較したところ、おおよそ20%以内の値であり、差異の最大値は精巣で34%であった。マウスの個体差と臓器セグメント分けの不十分なボクセルファントムの影響は、20-34%程度と考えられる。また、CTデータのスライスロケーションを変更して作成した体重が1.5倍、2倍、8倍のファントムを用いて内部被ばく臓器線量換算係数の体重依存性の評価したところ、数%の誤差を許容すれば臓器ごとに1つの関数で体重依存性の補正ができることを確認した。

3.1.3 野生ニホンザル臓器放射能の測定と放射性物質取り込み履歴の推定

捕獲された野生ニホンザルから、臓器（大腿筋、肝臓、腎臓、脾臓、甲状腺、精巣、卵巣、子宮）、及び胃内容物、腸内容物、血液を採取した。それぞれの測定試料（図 3.1-6）は、汚染防止のため表面を取り除き、細かく切り刻み均一化し、円筒状の 100 ml のプラスチック容器（U8 型容器）に詰め、放射性セシウム測定を行なった。



図 3.1-6 測定試料
均一化して U8 型容器に詰め、上面は発泡スチロールで固定

放射性セシウムの定量[13]には、高純度 Ge 半導体検出器（Ortec Co.、USA）を用いた。10 cm の厚さの鉛（Pb-210 を含まない低バックグラウンド鉛）を用いて、環境中の放射線を遮蔽した（図 3.1-7）。鉛からの X 線を遮蔽するためするために、鉛内部には 1 cm の厚さの鉄で内張した。



図 3.1-7 測定装置
高純度 Ge 半導体検出器を 10 cm の厚さの鉛で遮蔽

臓器の大きさにより試料の体積が異なるため、体積の違う標準線源を用意し、試料による自己吸収や検出効率の違いを補正した。標準線源は、定量された放射性核種（Cs-137、Eu-152）を溶かした水溶液をポリマーに吸収させゲルを作成し、放射性核種が均一に分布しているこ

とを確かめ、様々な質量を分取した。この標準線源を用いて、検出効率の体積依存性を求めた。Cs-137 の定量では、カスケードγ線が存在するため、サムピーク補正を行なった。

測定時間は、各試料（1-100 g）に対し、放射能の大きさにより 10,000-300,000 秒測定した。半減期 30 年の Cs-137 及び半減期 2 年の Cs-134 も定量した。Cs-134 と Cs-137 の放射能比は、原子炉が停止した平成 23 年 3 月 11 日に壊変補正すると、 $0.870 \pm 0.051 \pm 0.005$ となり、検出された放射性セシウムは福島第一原発事故由来であることが示された。放射性セシウム濃度は個体によるバラツキが大きく、2 桁以上の違いがあった。図 3.1-8 に、採取日に対する大腿筋中の放射性セシウム（Cs-137）の濃度の変化を示す。ここに示す値は、物理学的半減期は除かれている。バラツキが大きい中であるが、環境からニホンザルに取り込まれる放射性セシウムの量が、物理学的半減期（30 年）と比べて速く減少していることがわかる。令和元年度の結果と比べて測定数が増えたため、減少の傾向が浪江町と南相馬市で違いも見えてきた。統計学的には有意性は低い、環境要因による減少の半減期は、浪江町で 1.3 年、南相馬市で 3.2 年であった。

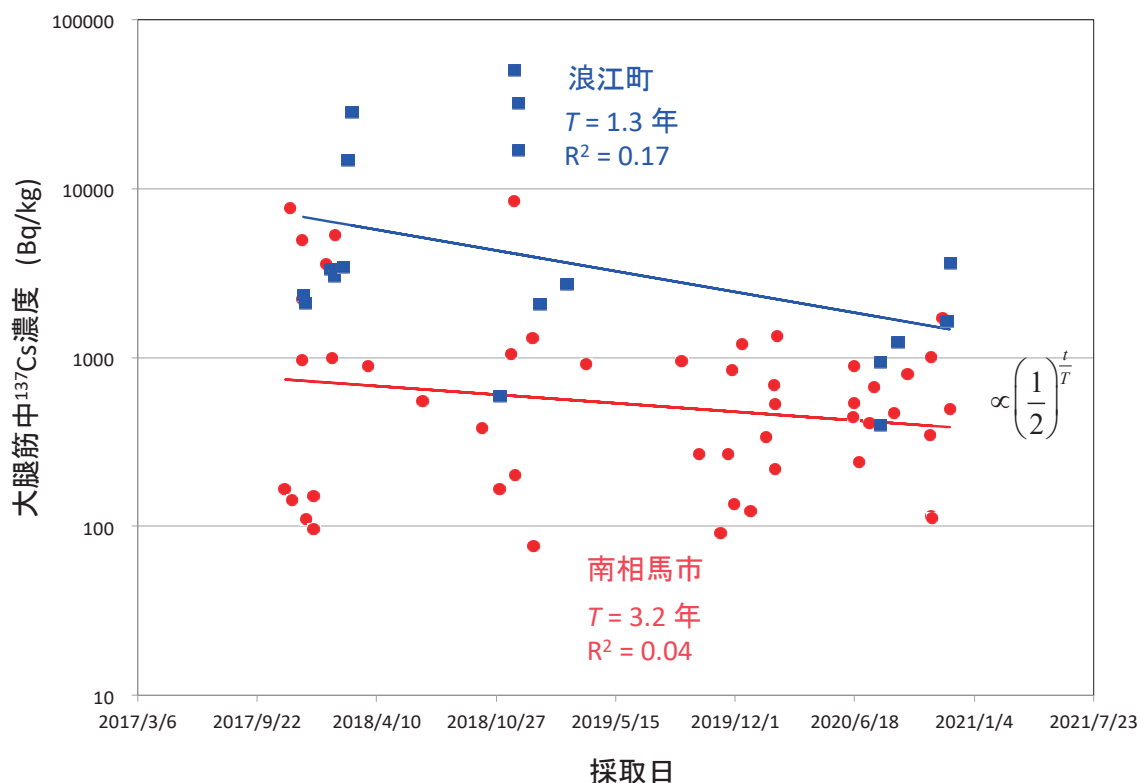


図 3.1-8 大腿筋中放射性セシウム（Cs-137）濃度と採取日の関係

図 3.1-9 に、大腿筋中の Cs-137 濃度を採取された地区別に分類したものを示す。浪江町と南相馬市の範囲では違いがあるが、空間線量率の高い地区と低い地区での違いは見えていない。採取地区によって試料数の偏りが大きいいため確定的なことは言えないが、ニホンザルの行動範囲が地区の範囲より広いことが示唆される。

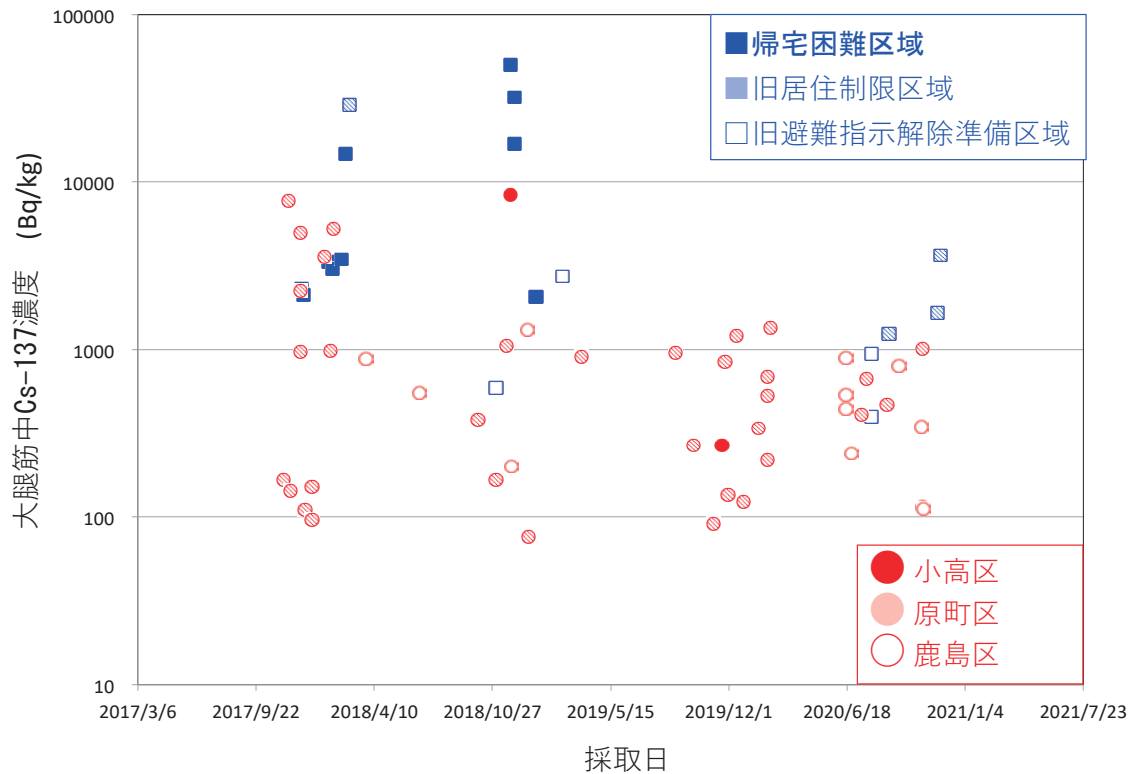


図 3.1-9 採取地別の大腿筋中放射性セシウム（Cs-137）濃度と採取日の関係

各臓器の放射性セシウム濃度の中で大腿筋の放射能濃度が最も高く、臓器ごとに Cs-137 濃度が異なった。ニホンザル各臓器への放射性セシウムの蓄積の機構は、過去に調査した旧警戒区域のウシの研究結果[13]と一致していると考えられる。令和元年度の測定結果からのデータが増え、大腿筋と他の臓器の放射性セシウム濃度を比較すると良い直線性が得られた(図 3.1-10)。放射性セシウムの生物学的半減期がそれぞれ違う各臓器間に相関があることは、環境中において放射性セシウムの取り込み量が一定になっていると考えられる。

令和2年度は、放射性セシウム測定のための血液が確保できた。図 3.1-11 に、血液と臓器中の放射性セシウム濃度の関係を示す。データは少ないが、大腿筋と臓器との関係と同様な結果が得られた。大腿筋と比べて放射性セシウムの体内半減期ははるかに短い血液についても同様な結果が得られたことは、ニホンザル体内の放射性セシウム取り込み履歴の推定に関して重要な知見が得られた。さらに臓器ごとについて、放射性セシウム濃度を細かく分析する必要がある。図 3.1-12 に臓器ごとの放射性セシウム濃度の例を示す。個体の採取地や採取日により、臓器ごとの分布の傾向に違いがあることがわかる。臓器ごとの分布の傾向は、放射性セシウムの摂取と代謝の影響を受ける。図 3.1-10 の回帰直線が臓器中放射性セシウム濃度の平衡状態であると仮定すると、直線のズレと臓器中放射性セシウム半減期から、放射性セシウムの取り込み量の変化を推定することができると考えている。例えば、腸内容物は代謝の速い腸壁の老廃物が大部分である。腸内容物から、採取日近く放射性セシウムの取り

込みの情報が得られる。環境中には安定なセシウムが存在するが、生体は放射性と安定セシウムを区別することができない。

放射性セシウムと安定セシウムの比を比放射能とよぶ。環境中の安定と放射性セシウムが完全に混ざり合っていれば、比放射能は一定となるが、現在は場所と時間により異なる。このため、臓器内の比放射能も代謝速度により臓器ごとに異なる。比放射能を正確に測定すれば一定になるが、放射性セシウムの取り込みの履歴を推定することができる。環境中や安定セシウムは ICP-MS により測定されるが、現在十分な再現性が得られていない。これは、セシウム元素は天然の存在量が極めて少ないためであり、サンプリング方法や試料の処理法の検討を行なっている。

令和 2 年度の結果から、1) 野生ニホンザル体内の放射性セシウム濃度は減少傾向にある、2) 放射性セシウム濃度は個体によりバラツキが大きいため、被ばく線量の評価は個体ごとに行う必要がある、3) 各臓器の放射性セシウム濃度は、大腿筋中及び血中の放射性セシウム濃度と良い相関がある、ことが示唆された。試料数が増えてきたため、臓器中の放射性セシウム推定のための情報が蓄積されつつある。

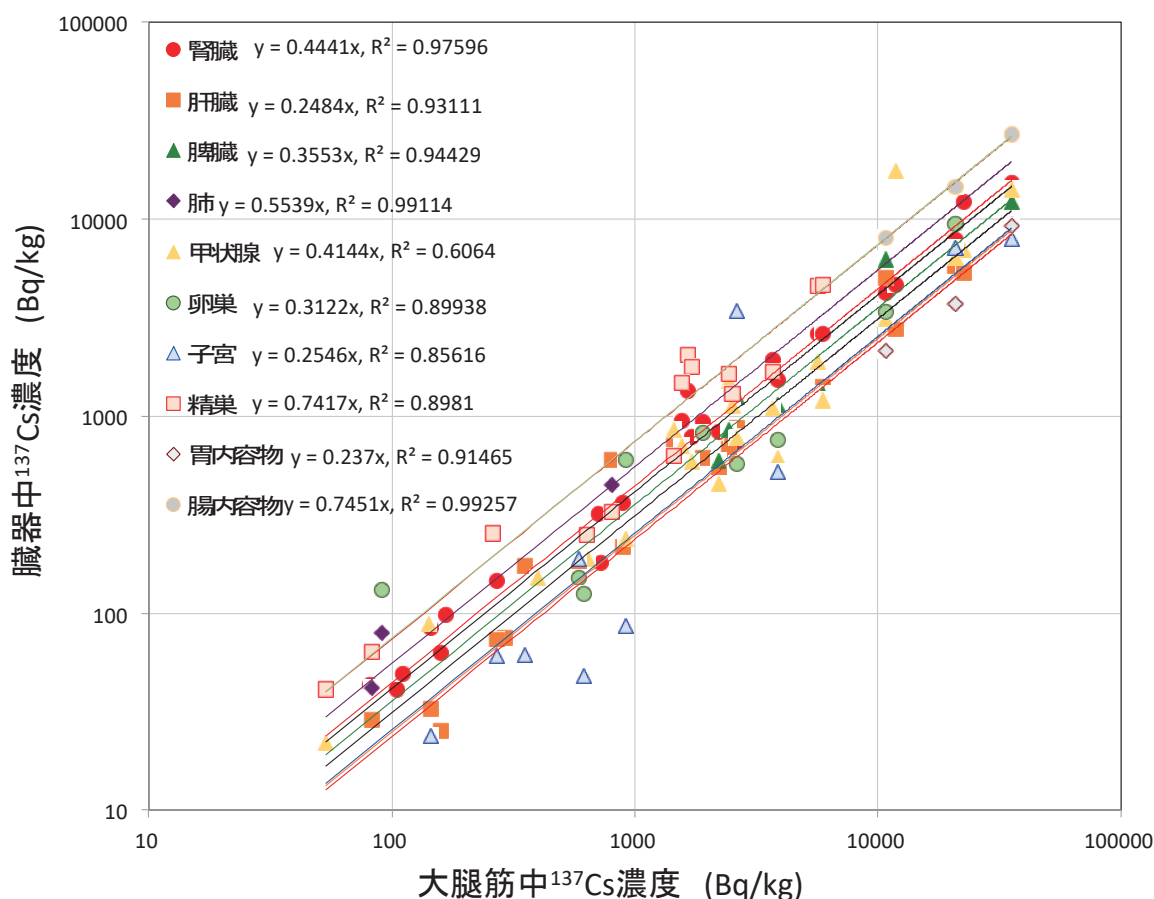


図 3.1-10 大腿筋中放射性セシウム (Cs-137) 濃度と各臓器中濃度の関係

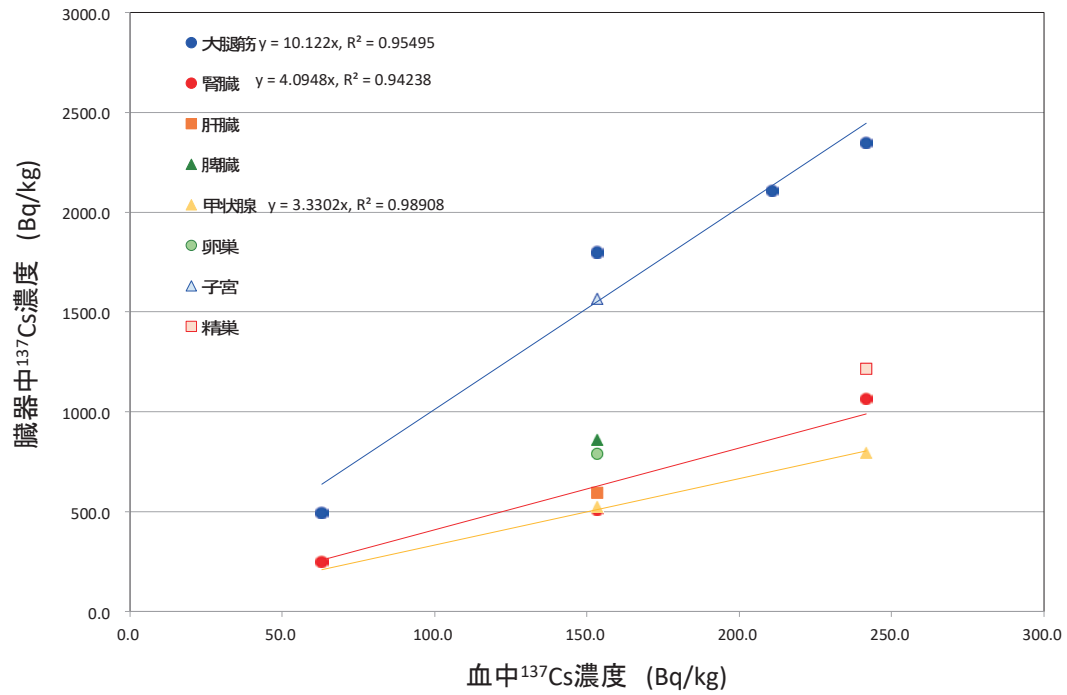


図 3.1-11 血液中放射性セシウム（Cs-137）濃度と各臓器中濃度の関係

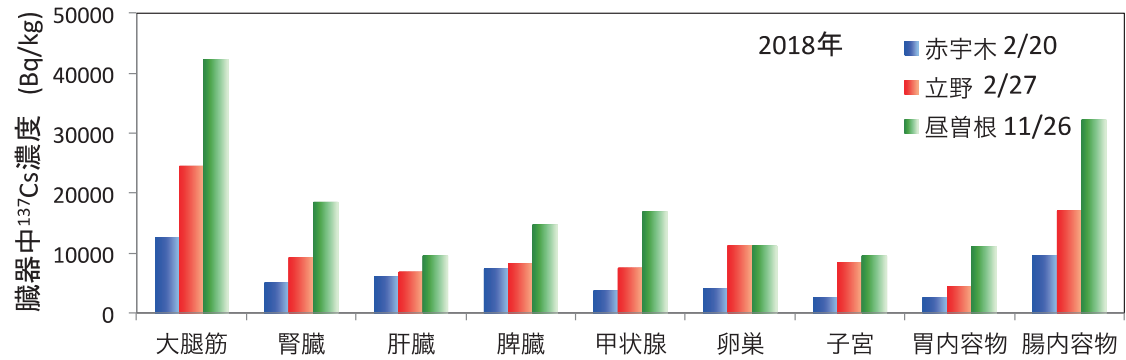


図 3.1-12 臓器ごとの放射性セシウム（Cs-137）濃度

3.2 生物影響解析とアーカイブ構築

3.2.1 マウス動物実験による実験的検証（再委託先：大阪大学）

大阪大学にはCs-137による外部被ばくと内部被ばくの動物実験を実施できる、国内でも数少ない施設を有しており、本課題の目的に沿った低い線量・線量率の影響を解析するための動物実験マウス試料を作成、提供することが可能である。

令和2年度の動物実験では、大阪大学放射線科学基盤機構附属ラジオアイソトープ総合センターのマウス飼育室にて、室温 25 °C（±1 °C）、照明 14 時間明、10 時間暗（4：00-18：00 点灯、18：00-4：00 消灯）の条件下で、γ線滅菌 CRF-1 飼料（オリエンタル酵母）にて、当施設で 40 世代の兄妹交配を続けた A/J マウス近交系を用いて、内部被ばくマウス 72 匹、外部被ばくマウス 32 匹を実験目的ごとのスケジュールで飼育した。その後に、血漿や臓器・筋肉組織を合計 19 部位から剥出し、試料として採取した。解析用途ごとに適切な方法で調製・保管した試料を東北大学へ提供した。また、測定結果を被ばく線量評価の目的として共有した。

なお、本実験は、大阪大学動物実験規程、大阪大学大学院医学系研究科動物実験規程に準拠し、動物実験委員会の承認（動物実験計画書承認番号第 動医 02-005-000）、また、放射性同位元素利用施設内での動物飼育については、大阪大学医学系研究科飼養保管施設等設置の承認（承認番号飼医 19-01-0 号）を受けている。放射性同位元素利用施設内での実験操作に関しては、大阪大学ラジオアイソトープ総合センター放射線障害予防規定を遵守して行った。

1) 内部被ばく実験

令和2年度は合計 72 匹の A/J 系統マウスに以下の条件で内部被ばく実験を実施した。4 週間の Cs-137 水（100 Bq/ml：Cs-137Cl₁、4 MBq/10 ml 水（公益社団法人日本アイソトープ協会）を滅菌水にて希釈）を飲料水として自由摂取による給水を行った後、直後に解剖する群、2 週間の真水を給水した後に解剖する群、4 週間真水を給水した後に解剖する群を設定して、内部被ばく直後の影響と真水に切り替えて以後の回復状況を調べる目的で行なった。

この 4 週間の Cs-137 水給水と、最大 4 週間の真水給水の条件を決めた根拠は、予備実験結果（図 3.2-1 から図 3.2-5）に基づいている。図 3.2-1 は、A/J マウスに飲料水として Cs-137 水の自由摂取を開始してから 8 か月目までの各組織（凡例上から血液、肺、肝臓、腎臓、小腸、筋肉、脾臓、心臓、脳）内の Cs-137 蓄積量（Bq/g 組織）の変化を示しており、毎日の飲水によって一定量の Cs-137 が摂取されるにもかかわらず、体内蓄積量は永久に増え続けるのではなく、おおよそ 3 週から 1 か月で水平状態となり、8 か月まで平衡状態が維持される。また、Cs-137 水の給水を停止して、真水に変えた場合には、図 3.2-2 のごとく、筋肉以外の組織（凡例 2 段目から肺、心臓、腎臓、肝臓）では、ほぼ 10 日で、筋肉（凡例最上段）においても、おおよそ 1 か月で減衰し、組織内の殆どの Cs-137 が体外へ排泄されることがわかっている[14][15]。また、100 Bq/ml の Cs-137 水は、ヒトなどの大動物の飲水に換算すると 100,000 Bq/l の Cs-137 水を摂取していることに相当するが、この濃度の Cs-137 水では、多世代（18 世代）に渡って給水したマウス子孫で産仔数、性比に影響を当て与えないことがわかっている[14]。

Cs-137 水の自由摂取による Cs-137 の蓄積速度、被ばく線量率、被ばく積算線量を求めるために、給水開始後 2.5、5、7、9、15 日目の各群 5 匹ずつの Cs-137 の臓器（肝臓、筋肉）内蓄積量を測定し（図 3.2-3：右が雄マウス、左が雌マウス）、広島大学の分担課題の成果である PHITS コードによるモンテカルロシミュレーションで計算された線量率換算係数を用いて、給水日数における内部被ばく線量率（図 3.2-4：右が雄マウス、左が雌マウス）、給水日

数における積算線量を求めた（図 3.2-5：右が雄マウス、左が雌マウス）。1 か月の雄雌平均積算線量は、肝臓で 3.5 mGy/月、筋肉では 6.3 mGy/月と推定された。

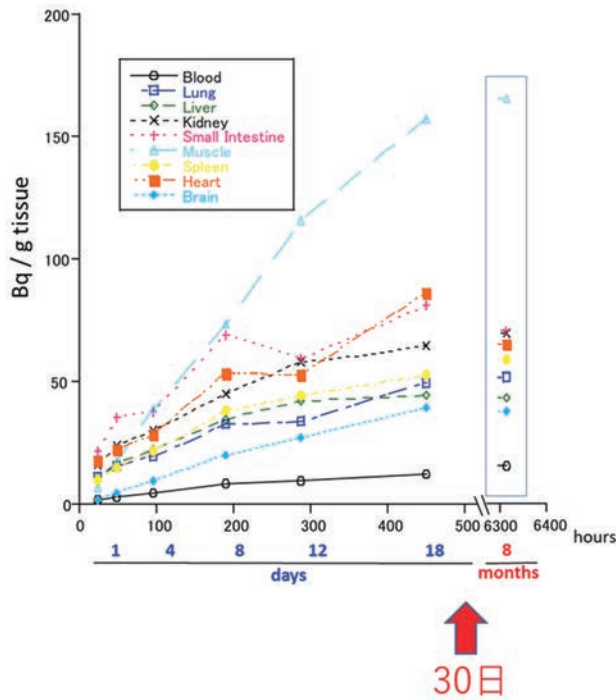


図 3.2-1

Cs-137 水 (100 Bq/ml) 自由摂取による
臓器組織内 Cs-137 蓄積量

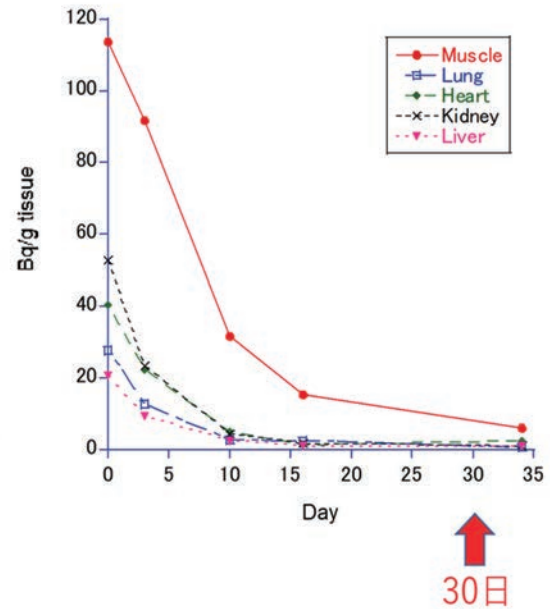


図 3.2-2

Cs-137 水 (100 Bq/ml) 自由摂取による
平衡状態から真水飲水開始後の組織内
Cs-137 量経時的变化

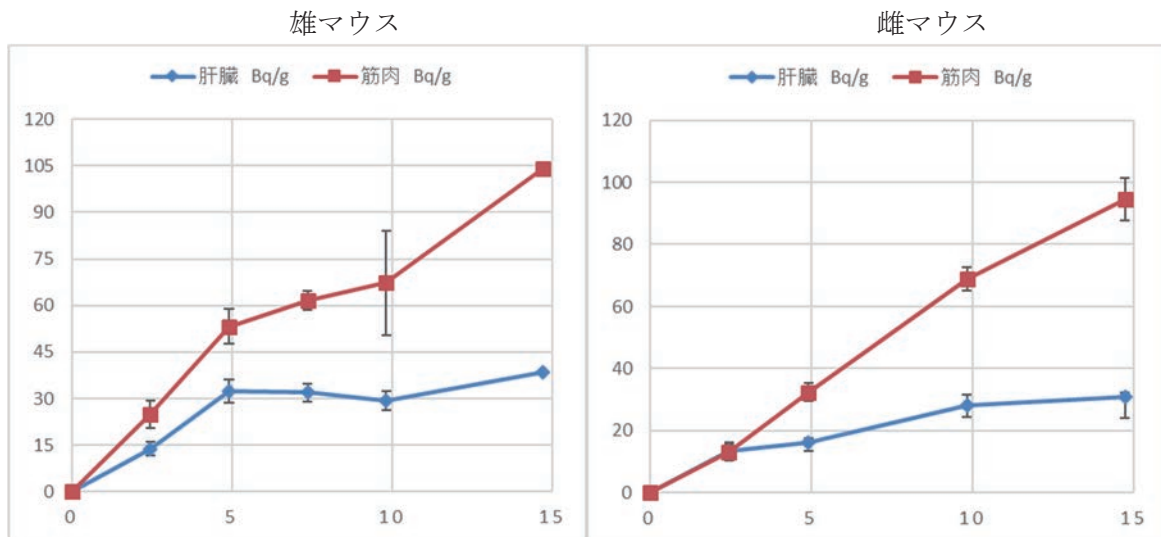


図 3.2-3 A/J マウスへの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水による
経時的組織内 Cs-137 量 (Bq/g 組織) の変化

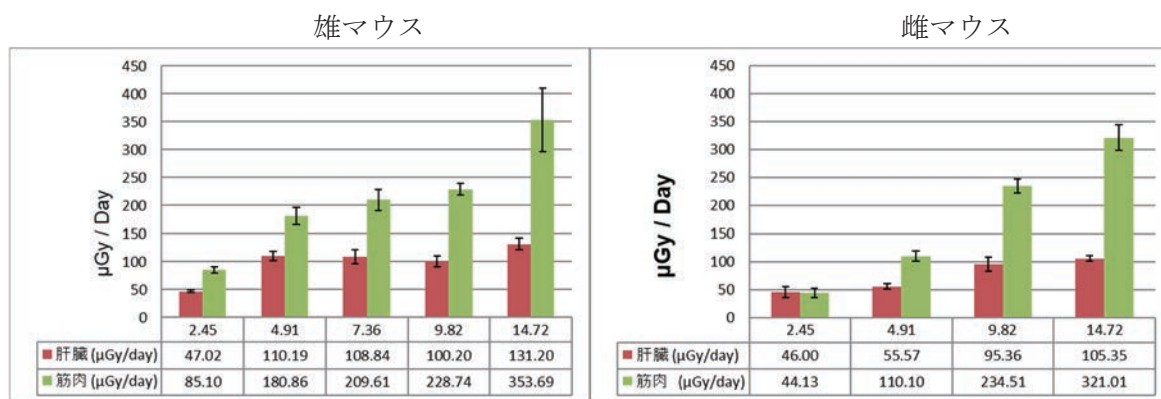


図 3.2-4 A/J マウスの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水日数における内部被ばく線量率

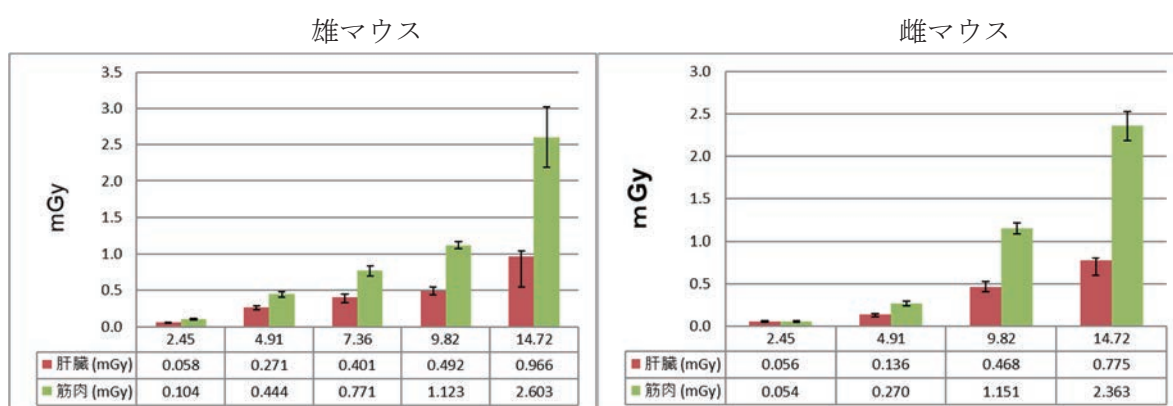


図 3.2-5 A/J マウスの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水日数における積算線量

内部被ばく実験開始に先立ち、実験に供する 13 週齢から 16 週齢のマウスを得るために、10 ペアの親マウスを交配し、交尾確認後に母マウスを隔離し、3 週後の出産時に出生匹数を確認、それから 4 週間の離乳までを母親と同居させ、離乳後に雄雌 5 匹ずつの群に分け、実験開始までの 13 週間の飼育を行った。

この準備したマウスを用い、図 3.2-6 に示す実験環境において、表 3.2-1 に示す実験条件で A/J マウスに Cs-137 水 (100 Bq/ml) を 4 週間給水し、その直後、真水に変えて 2 週間と 4 週後にマウスを安楽死させ、表 3.2-3 に示すマウスの血液を含む主要臓器組織（脳、眼球、舌、甲状腺、心臓、肺、腸管、脾臓、脾臓、腎臓、膀胱、精巣、精巣上体、卵巣、子宮、筋肉、大腿骨、骨髓細胞、胸骨、血液、血漿）を剥出して計測、凍結、ホルマリン固定等の処置を行った。

また、引き続き、間歇的内部被ばく影響を調べるために、同様にマウスを準備して、表 3.2-2 の実験条件で 16 週間の Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水後、飲料水を真水に変えて 4 週間休止、続いて再度 4 週間の Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水の断続内部被ばく処理を行い、24 週間連続の Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水群とともにマウスを安楽死させた後、前述と同様の試料採取を行った。

前述、後述の試料を RI 混入試料として、酸化ストレス解析のために東北大学 RI 施設へ提供した。



図 3.2-6 A/J マウスへの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 給水による内部被ばく実験

表 3.2-1 A/J マウスへの Cs-137 水 (100 Bq/ml) 4 週間給水による給水直後、2 週後、4 週後の内部被ばく影響検討実験

実験群	♀	動物番号	♂	動物番号	出生日	開始日	採取予定日	解剖日月齢
対照群	♀	590	♂	593	2019/10/8	-	2020/3/8 2020/3/12 2020/3/13	5 M
	♀	591	♂	594				
	♀	543	♂	595				
	♀	544	♂	599				
	♀	545	♂	600				
	♀	546	♂					
Cs-137水4W	♀	559	♂	564	2019/11/7	2020/3/7	2020/4/7	5 M
	♀	560	♂	565				
	♀	561	♂	566				
	♀	562	♂	629				
	♀	563	♂	630				
				631				
Cs-137水4W + 真水2W	♀	632	♂	637	2019/12/30	2020/3/30	2020/5/13 2020/5/14	4.5 M
	♀	633	♂	638				
	♀	634	♂	639				
	♀	635	♂	640				
	♀	636	♂	641				
Cs-137水4W + 真水4W	♀	577	♂	580	2019/12/10	2020/3/10	2020/5/10 2020/5/12	5 M
	♀	578	♂	581				
	♀	579	♂	582				
	♀	584	♂	583				
	♀	585	♂	587				

表 3.2-2 A/J マウスへ Cs-137 水 (100 Bq/ml) の
16 週間給水、4 週間休止、4 週間給水の断続処理による内部被ばく影響検討実験

実験群	♂ ♀	動物番号	♂ ♀	動物番号	出生日	開始日	解剖日	解剖日月齢
対照群	♀	653	♂	655				
	♀	659	♂	656				
	♀	660	♂	657	2020/1/30	2020/5/27	2020/11/29	10 M
	♀	661	♂	658	2020/2/6			
	♀	662	♂	663				
Cs-137水24W	♀	664	♂	644				
	♀	665	♂	645				
	♀	666	♂	646	2020/1/15	2020/5/27	2020/11/28	10 M
	♀	678	♂	681	2020/1/22			
	♀	679	♂	682				
Cs-137水16W + 真水4W + Cs-137水4W	♀	671	♂	667				
	♀	672	♂	668				
	♀	673	♂	669	2020/1/15	2020/5/27	2020/11/28	10 M
	♀	674	♂	670				
	♀	675	♂	677				

表 3.2-3 マウス解剖時の測定、採取検体一覧表

	サイズ			重量	放射能測定	凍結	血球数測定	遠心分離 (ヘパリン)	
	a	b	c				(EDTA)	血漿	赤血球
血液							○	○	○
骨髄					○				
脳	○	○	○	○	○	○			
眼球	○	○	○	○	○	○			
甲状腺	○	○	○	○	○	○			
肺	○	○	○	○	○	○			
心臓	○	○	○	○	○	○			
肝臓	○	○	○	○	○	○			
腎臓	○	○	○	○	○	○			
脾臓	○	○	○	○	○	○			
膵臓	○	○	○	○	○	○			
腸					○	○			
膀胱	○	○	○	○	○	○			
精巣	○	○	○	○	○	○			
卵巣	○	○	○	○	○	○			
子宮	○	○	○	○	○	○			
咬筋					○	○			
舌					○	○			
大腿筋					○	○			

2) 外部被ばく実験

Cs-137 による内部被ばくと外部被ばく影響の同等性、差異を検討するために内部被ばくと同様のマウス条件で、産業科学株式会社製 γ 線照射装置 (Cs-137 線源、平成 29 年 12 月 1 日現在 53.45 GBq) にて A/J マウス 32 匹への Cs-137 γ 線外部照射実験を行った (図 3.2-7、図 3.2-8)。

マウスへの照射条件は、表 3.2-4 に示すごとく、内部被ばく実験で得られた、1 か月平均とほぼ同じ総線量 6 mGy とその 5 倍の 30 mGy を設定し、それぞれ、線量率を毎時 0.5、1、3、6 mGy になるように各群雌雄 2 匹ずつ照射した。毎時 0.5、1、3、6 mGy の照射には、線源からの距離をそれぞれ 3,327、2,352、1,358、960 mm にして、それぞれ、60、30、10、5 時間の照射を室温 25 °C、照明を 14 時間明、10 時間暗 (4:00-18:00 点灯、18:00-4:00 消灯) の条件下で行った。以前に実施した実験より得られている生化学的酸化ストレスの指標 (血漿タンパク質の MDA 濃度) が被ばく後 24 時間でピークに達することから、各群の照射終了から 24 時間後にマウスを安楽死させた後、内部被ばく実験時と同様に試料採取を行い、計測、凍結、ホルマリン固定等の処理を行った。すべての試料を採取したのち、まとめて、酸化ストレス解析のために東北大学へ提供した。



図 3.2-7 A/J マウスへの Cs-137 γ 線外部照射



線量率	距離
mGy/h	mm
0.5	3327
1.0	2352
3.0	1358
6.0	960
令和3年3月20日	

図 3.2-8 A/J マウスへの Cs-137 γ 線外部照射装置と照射条件

表 3.2-4 A/J マウス外部照射実験 (Cs-137 γ 線)

Total mGy	Rate mG/h	照射時間 (h)	動物番号				生年月日			
			♂		♀		♂		♀	
30	0.5	60	518	519	513	514	11/15/2020	11/15/2020	11/15/2020	11/15/2020
	1	30	509	510	515	516	10/30/2020	10/30/2020	11/15/2020	11/15/2020
	3	10	511	512	504	505	10/30/2020	10/30/2020	10/30/2020	10/30/2020
	6	5	536	537	506	507	11/9/2020	11/9/2020	10/30/2020	10/30/2020
6	0.5	12	523	524	520	521	11/20/2020	11/20/2020	11/20/2020	11/20/2020
	1	6	525	530	526	527	11/20/2020	11/22/2020	11/22/2020	11/22/2020
	3	2	531	532	534	535	11/22/2020	11/22/2020	11/22/2020	11/22/2020
	6	1	538	539	528	529	11/9/2020	11/9/2020	11/22/2020	11/22/2020
Control	0	0	555	556	558	559	12/20/2020	12/20/2020	12/20/2020	12/20/2020

3.2.2 酸化ストレスマーカーの検出と骨髄影響解析

低線量・低線量率放射線被ばくによる臓器内の酸化・抗酸化のバランス（酸化ストレス状態）に及ぼす影響を検討することが本項の目的である。そのために、3.2.3 項で収集した野生ニホンザル試料、及び 3.2.1 項で収集した実験動物試料から解析試料を調製し、酸化ストレスに対しては MDA、抗酸化状態については SOD 活性を指標として各種酸化ストレスマーカーを定量した。脂質は酸化を受けやすく、放射線によって活性酸素種やフリーラジカルが生じると、細胞膜を構成しているリン脂質の不飽和脂肪酸部分に付加される脂質過酸化反応がおこる。脂質過酸化生成物の分解によって MDA が形成されるために、MDA は酸化ストレスマーカーとして一般的に利用されている。一方、SOD は放射線によって生じ、MDA 生成に関与するスーパーオキシドを酸素と過酸化水素に不均化し、無毒化する反応を触媒する酵素であるため、酸化ストレスを減少させる役割を担っている。このため、SOD 酵素の活性を抗酸化反応の指標として MDA の変動との比較対象とした。

1) MDA 解析試料の調製

令和元年度に確立した方法を基本に若干の変更を行ない、下記の通り試料調製を行なった。採取した臓器は試料調製直前まで -80°C の超低温冷凍庫で保管した。目視による形態変化がない部位から湿重量約 60 mg の小片を切り出した。5 mm ステンレスビーズを入れてドライアイス上で冷却したマイクロ遠心チューブに切り出した小片を入れて、さらに 15 分ドライアイス上で冷却した。試料調製行程における脂質酸化を抑制するために、組織の切り出し行程では試料と組織破砕関連物品を十分に冷却し、試料処理過程では 0.1 %ジブチルヒドロキシトルエン (BHT) を加えた氷冷の EDTA 含有リン酸バッファー (pH 7.0、日研ザイル株式会社日本老化制御研究所) を使用した。BHT 含有リン酸バッファーを組織小片とステンレスビーズが入っているマイクロ遠心チューブに加え、TissueLyser LT (キアゲン) を用いて 10 % w/v の組織ホモジネートを作成した。組織ホモジネートを 14,000 rpm、 4°C で 10 分の遠心分離を行い、上清を回収して組織解析試料とした。組織解析試料 50 μl と MDA 測定キット (日研ザイル株式会社日本老化制御研究所) の反応液は、マイクロプレートリーダー (MULTISCAN GO、Thermo Fisher) を用いて 1 nm の分解能で 400–700 nm の吸光スペクトルを測定し、3 次微分解析によって MDA に該当するシグナルを検出した。組織試料反応液では MDA とチオバルビツール酸 (TBA) が形成する MDA-TBA₂ 付加体を 532 nm 波長付近で検出する。ヘモグロビンが MDA-TBA₂ 付加体を検出する波長付近で検出されるため、脱血していない臓器試料を用いた反応液に対してブタノール-水酸化ナトリウム処理によって解析試料からヘモグロビンを除去した。

具体的には、1.3 倍量のブタノール（富士フイルム和光純薬株式会社）を反応液に添加し、ボルテックス後に 10,000 rpm で 3 分遠心後のブタノール画分を回収した。ブタノール画分に 1.3 倍量の 1N 水酸化ナトリウム水溶液（メルク株式会社）を添加し、ボルテックス後に水酸化ナトリウム画分を回収した。水酸化ナトリウム画分の 0.25 倍量の 3.7 M リン酸（富士フイルム和光純薬株式会社）を添加し、吸光スペクトルを測定した。組織試料中の MDA 濃度（ μM ）は、ヘモグロビン除去処理を行った MDA 標準試料の測定結果より作成した検量線を用いて決定した。さらに、MDA 濃度は解析試料中のタンパク質量で補正（ $\mu\text{M}/\text{mg}$ ）し、放射線被ばくとの相関解析に用いた。組織解析試料中のタンパク質は BCA 法（Thermo Fisher）で定量した。組織解析試料と 150 倍量の BCA 試薬を混合して 37 °C で 30 分間反応させた後、マイクロプレートリーダーを用いて 562 nm の波長を計測し、2 μg 相当の BSA を測定した吸光度値を用いて定量した。

2) 野生ニホンザル臓器中の MDA 濃度の定量

令和 2 年度の解析では臓器ごとに酸化ストレス状態を検討することと、令和元年度の結果と比較することで酸化ストレス状態の持続性について検討を行なった。このため、令和元年度の解析結果において、内部被ばく線量率に対して酸化ストレス状態が変動していた肺、心筋、肝臓、脾臓、膀胱について MDA 濃度を解析した。令和元年度は福島第一原発事故後 7-8 年の期間に収集した個体試料を解析したことから、令和 2 年度はその後の福島第一原発事故後 9 年目に収集した個体試料について、対照地域で捕獲された非被ばく個体 5 頭、旧警戒区域で捕獲された被ばく個体については捕獲地情報から当該期間に収集した試料の中で被ばく線量が高いことが予想された 9 頭を選別し、各個体から採取された上記の臓器を解析に使用した。内部被ばく線量率は 3.1.2 項で全身を 1 楕円体とみなした条件で評価した結果を参照した。令和元年度に解析した個体の内部被ばく線量率は上限が 100 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ を少し越えた範囲であったが、令和 2 年度解析した個体については上限が約 60 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ の範囲であった。解析した臓器において、被ばく個体の解析結果で内部被ばく線量率に対して MDA 濃度が軽度の上昇傾向を示したのは肝臓、膀胱の 2 臓器、軽度の減少傾向を示したのは肺、心臓、脾臓の 3 臓器であった。肝臓における 1 個体を除き、ほぼすべての個体試料の変動範囲は非被ばく個体の変動範囲を超えていなかった（図 3.2-9）。この結果から、旧警戒区域での放射線被ばくによる酸化ストレス誘発への影響は、非被ばく個体の解析結果で示された個体差、あるいは放射線被ばく以外の生理的要因などが考えられる変動範囲内におさまることがわかった。また、令和元年度の解析結果を含めると、MDA 濃度の増加傾向あるいは減少傾向を示す臓器が一致していた。被ばく線量率に対する相関は捕獲時の生物影響を示していると理解されるため、内部被ばく線量率に対する各臓器の酸化ストレスの変動は持続していると考えられる。放射線被ばく以外の要因として、一過性の最大運動によって酸化ストレスが誘発されることが知られている。代表的な臓器として骨格筋、心筋、肝臓などで MDA が増加することが報告されているが、ニホンザル試料の解析結果より低線量・低線量率放射線被ばくによって MDA が増加する臓器では肝臓のみが一致していた。肝臓は幅広いストレスに対して酸化ストレスが誘発されやすい臓器であると考えられる一方で、骨格筋や心筋では酸化ストレスの変動状況が異なっていたことから低線量・低線量率放射線被ばくに特異的な臓器ごとの酸化ストレス状態の変動を解析する必要性が示された。

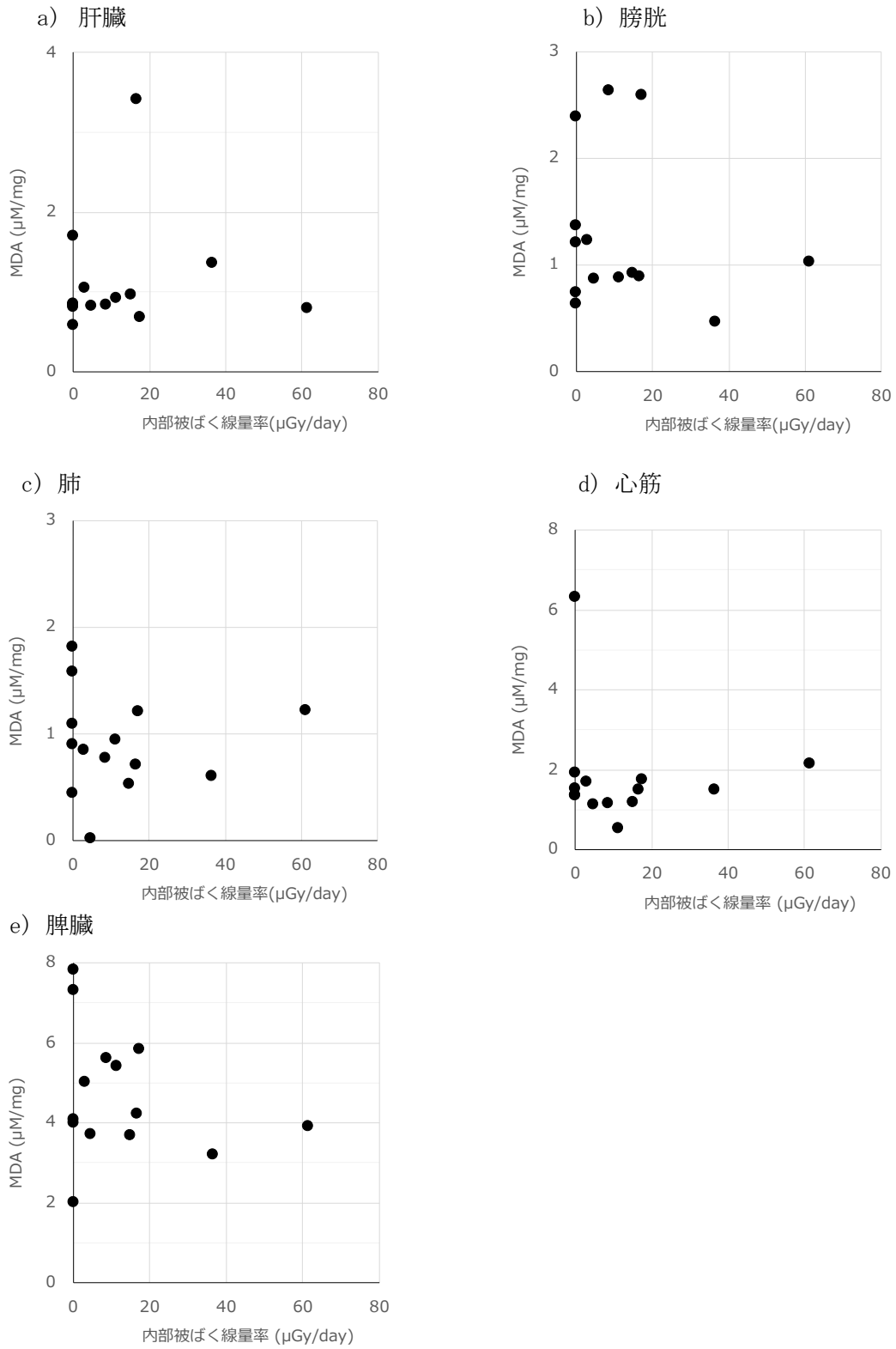


図 3.2-9 野生ニホンザル臓器 MDA 濃度と内部被ばく線量率の相関

3) SOD 解析試料の調製

令和元年度に確立した方法を基本に若干の変更を行ない、下記のとおり試料調製を行なった。赤血球の混入によって SOD 活性が大きく変動するために、令和 2 年度の解析では MDA が内部被ばく線量率依存的に上昇し、血液の混入が少ない臓器である膀胱を用いて解析を行なった。100 mg 以下で切り出した膀胱試料を氷冷 PBS 中での 5 分間浸とうを 3 回繰り返して脱血処理を行なった。脱血処理後に臓器試料の余分な水分をふき取り、湿重量の 4 倍量のショ糖緩衝液（0.25M ショ糖、10 mM トリス塩酸緩衝液；pH 7.4、1 mM EDTA）と 5 mm ステンレスビーズとともにマイクロ遠心チューブに入れ、TissueLyser LT で組織ホモジネートを作成した。組織ホモジネートを 10,000 g、4 °C で 60 分の遠心分離を行い、上清を回収して組織解析試料とした。組織解析試料と同量のショ糖緩衝液で 2 倍希釈したものを SOD 活性解析のオリジナル試料とした。オリジナル試料からショ糖緩衝液を用いて 3 倍ずつ希釈する行程を計 6 回繰り返し、SOD Assay kit（株式会社同仁化学研究所）を用いて SOD 阻害曲線を作成した。この反応ではキサンチンオキシダーゼをスーパーオキシド生成系とし、水溶性の還元型発色試薬の WST-1 ホルマザンの生成を促進させている。この反応系に希釈をしていないオリジナルサンプルと希釈した一連の組織解析試料を加え、WST-1 ホルマザンの生成量の変化を調べることによって SOD 活性の阻害曲線を作成できる。WST-1 ホルマザンの生成を 50 % 阻害する SOD 活性を 1 U と定義することから、50 % 阻害を示す希釈率を用いて試料中の SOD 活性を算出した。WST-1 ホルマザンの検出には、マイクロプレートリーダーを用いて 450 nm の吸光度を測定した。

4) 野生ニホンザル膀胱の SOD 活性の定量

MDA 濃度を測定した個体のうち、非被ばく個体 1 頭と旧警戒区域で同じ日に捕獲された 2 頭の膀胱試料から SOD 解析試料を作成し、内部被ばく線量率に対する SOD 変化の相関を検討した（図 3.2-10）。3.1.2 項における被ばく線量評価結果より、内部被ばく線量率 8.6 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ 以下、福島第一原発事故時に誕生していた個体と仮定すると 138 mGy 以下の内部被ばく線量・線量率範囲での SOD 活性の変動を評価する試料となる。非被ばく個体の SOD 活性に対して、2 頭の被ばく個体の膀胱では 3 割程度まで SOD 活性が低下していることが明らかとなった。Cs-137 水を自由飲水させた動物実験マウスに関して解析した結果では、内部被ばく線量率 500 $\mu\text{Gy}/\text{日}$ 以下の範囲で血漿中 SOD 活性が真水で飼育した対照群の SOD 活性のばらつきの中で低値に収束することを報告してきた。ニホンザル膀胱を用いた予備的検討の結果も同様の傾向を示していることから、低線量・低線量率領域では SOD 活性が低下することにより MDA の上昇として観察されたように酸化ストレスが誘発されやすい環境が形成される可能性が示唆された。このため、令和 3 年度は本格的に SOD 活性の解析数を増やすとともに、MDA の変動と SOD の変動の相関について検討し、低線量・低線量率放射線被ばくによる酸化ストレス状態

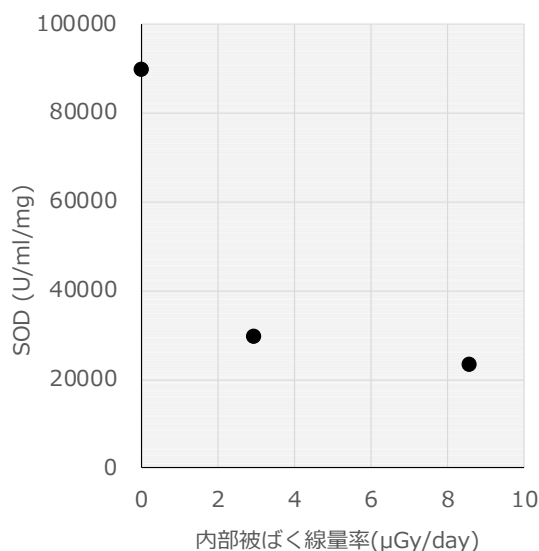


図 3.2-10 野生ニホンザル膀胱の SOD 活性と内部被ばく線量率の相関

の変動に関するメカニズム解明に取り組む予定である。

5) 外部照射動物実験マウス試料を用いた酸化ストレス状態の検証

3.2.1 で収集された試料のうち、令和 2 年度は外部被ばく試料を用いて MDA を解析した。野生ニホンザル試料の解析結果では内部被ばくに依存した変化が複数の生物学的指標を用いて確認されてきたが、外部被ばくに対する依存性は観察されてこなかった。これは外部被ばく評価に対する不確かさが原因と考えてきたため、本項目では実験的に低い線量・線量率に対する臓器中 MDA 濃度の変化を検討した。ニホンザル試料の解析では、放射線被ばくに対して肝臓では MDA 濃度が軽度上昇し、腎臓では変化が見られなかったことから、令和 2 年度は外部照射マウスの肝臓と腎臓を用いた解析結果とニホンザル解析結果の比較を行なった。野生ニホンザル試料と同じ調製方法で MDA 解析試料を作成した。

動物実験の外部照射では、0.5、1、3、6 mGy/h の線量率で 6、30 mGy に達するまで外部照射を行い、血漿解析の結果として MDA 濃度の上昇が観察された、照射完了後 24 時間の時点で臓器試料のサンプリングを行なった。サンプリング時に計測した臓器重量を対照群と比較すると解析試料を作成した肝臓、腎臓や他に採取した臓器で大差はなく、低い線量・線量率放射線の外部被ばくによる臓器への著しい影響は照射後短期間では予想通り観察されなかった。次に、抹消血中の白血球と赤血球数の変化を調べた（図 3.2-11）。白血球数は末梢血をチュールク液で 10 倍希釈、赤血球数は末梢血をガワーズ液で 200 倍に希釈した後に、血球計算板を用いて算出した。白血球数は雄では 1、3 mGy/h の線量率で照射すると線量の増加によって白血球数が顕著に減少したが、今回照射した線量率範囲では依存性は観察されなかった。雌でも 1、3 mGy/h の線量率で照射すると線量の増加によって白血球数が減少する傾向が見られたが、線量率依存性はなく、6 mGy/h では顕著な変動は見られなかった。赤血球について、雄では放射線照射によって減少したが、雌では変動はなかった。また、雄で観察された減少に線量・線量率依存性は見られなかった。赤血球は寿命が長いために、照射後短期間での赤血球の変化は報告されていない。また、低線量・低線量率照射であるために細胞死による赤血球の減少も考えにくい。雄の非被ばく群を除くと雌雄ともに赤血球数がほぼ同じ値であったことや、本試験では各群 2 匹の計測結果であることから、非被ばく群の雄マウスの数を増やしたときの赤血球数で再度検討することが必要と考えている。

肝臓の MDA 濃度を検討すると、雌雄ともに被ばく線量率の増加によって MDA 濃度が増加する個体数が増えることがわかった（図 3.2-12 a & b）。しかしながら、照射した線量・線量率が高い条件でも、非被ばく群と比べて MDA が変化しなかった個体があったことから、低い線量・線量率領域の生物影響を検討する際には同一照射条件での平均値ではなく、個体ごとの解析値を比べて評価することが必要になることが示された。そこで、非被ばく群の MDA 濃度範囲を超えて、MDA 濃度が放射線照射によって誘発された個体数を雌雄別に検討すると（図 3.2-12 c）、線量・線量率依存的に MDA 濃度が上昇する傾向にあること、線量率 3 mGy/h が最も効率良く MDA 濃度が上昇する可能性が示唆された。次に、腎臓の MDA 濃度について、肝臓と同様の検討を行なった（図 3.2-13）。肝臓と同様に、被ばく群でも非被ばく群と類似の MDA 濃度を示す個体と、非被ばく群の MDA 濃度範囲を超えて誘発される 2 群が観察され、誘発群では線量依存性が確認された。この傾向は雌雄に共通していたが、雄は誘発量が大きく、雌では誘発されるもののその量は雄に比べて少なかった。また、MDA 濃度が増加したマウス個体数を調べると、線量率 3 mGy/h で MDA が最も多く誘発されており、その他の照射条件では線量率依存性は見られなかった。

以上の動物実験マウスの検証結果より、肝臓ではニホンザルの解析結果と同様に放射線被ばくによって MDA 濃度が増加することを検証できた一方で、ニホンザルの腎臓では変化しなかった MDA 濃度が外部照射マウスでは増加していた。ニホンザルとマウス試料の解析で異なる傾向となった要因の 1 つとして、野生ニホンザルの外部被ばく線量評価の不確かさがあげられる。シミュレーションによる外部被ばく評価は福島第一原発事故後から捕獲時までの期間に捕獲地にとどまり、土壌中の放射性セシウム濃度が物理学的半減期のみによって減衰する過程で評価している。群れの行動範囲内を野生ニホンザルは移動するために外部被ばく線量評価結果に不確かさが生じるため、個体ごとの外部被ばく線量をより正確に評価できる ESR 評価結果との相関を明らかにすることが、臓器中酸化ストレスの外部被ばく影響を正確に議論するために必要となる。また、野生ニホンザルは非被ばく群の MDA 濃度変動範囲内で放射線被ばくに依存する変化を示したことに対し、マウス試料解析結果では、非被ばく群の MDA 濃度範囲を超えて酸化ストレスが誘発されることが明らかになった。これは被ばく線量率の違いが影響するものと考えられる。このため、MDA を指標として酸化ストレス誘発状態の線量率依存性や非被ばく群よりも高い酸化ストレスを誘発する線量率のしきい値、及び MDA の変動に関与するメカニズムと抗酸化酵素活性変動との関連性を明らかにすることは、低線量・低線量率被ばくによる健康影響リスクを検討する上で重要な知見になると考えられる。

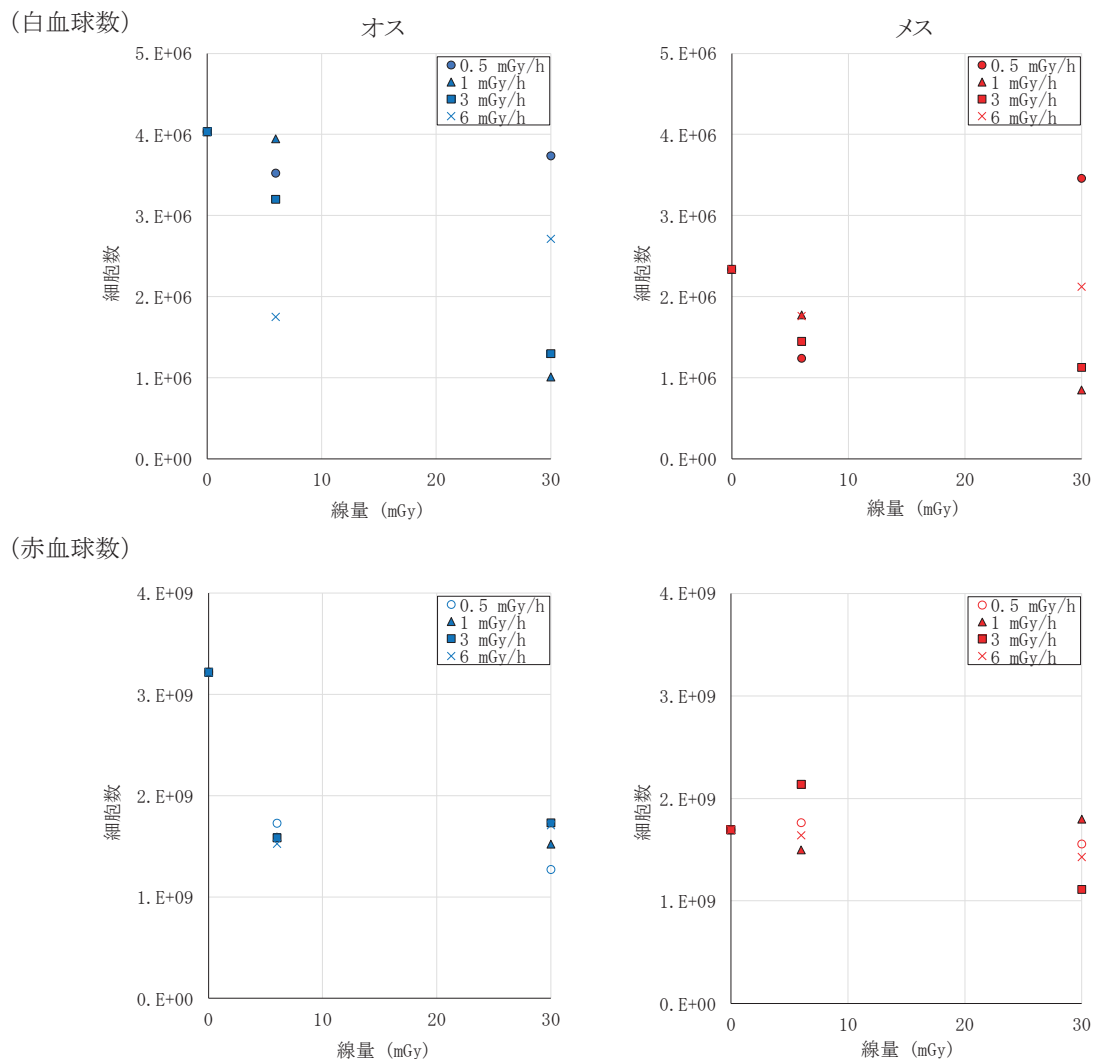


図 3.2-11 動物実験マウスへの外部照射による血液細胞数の変化

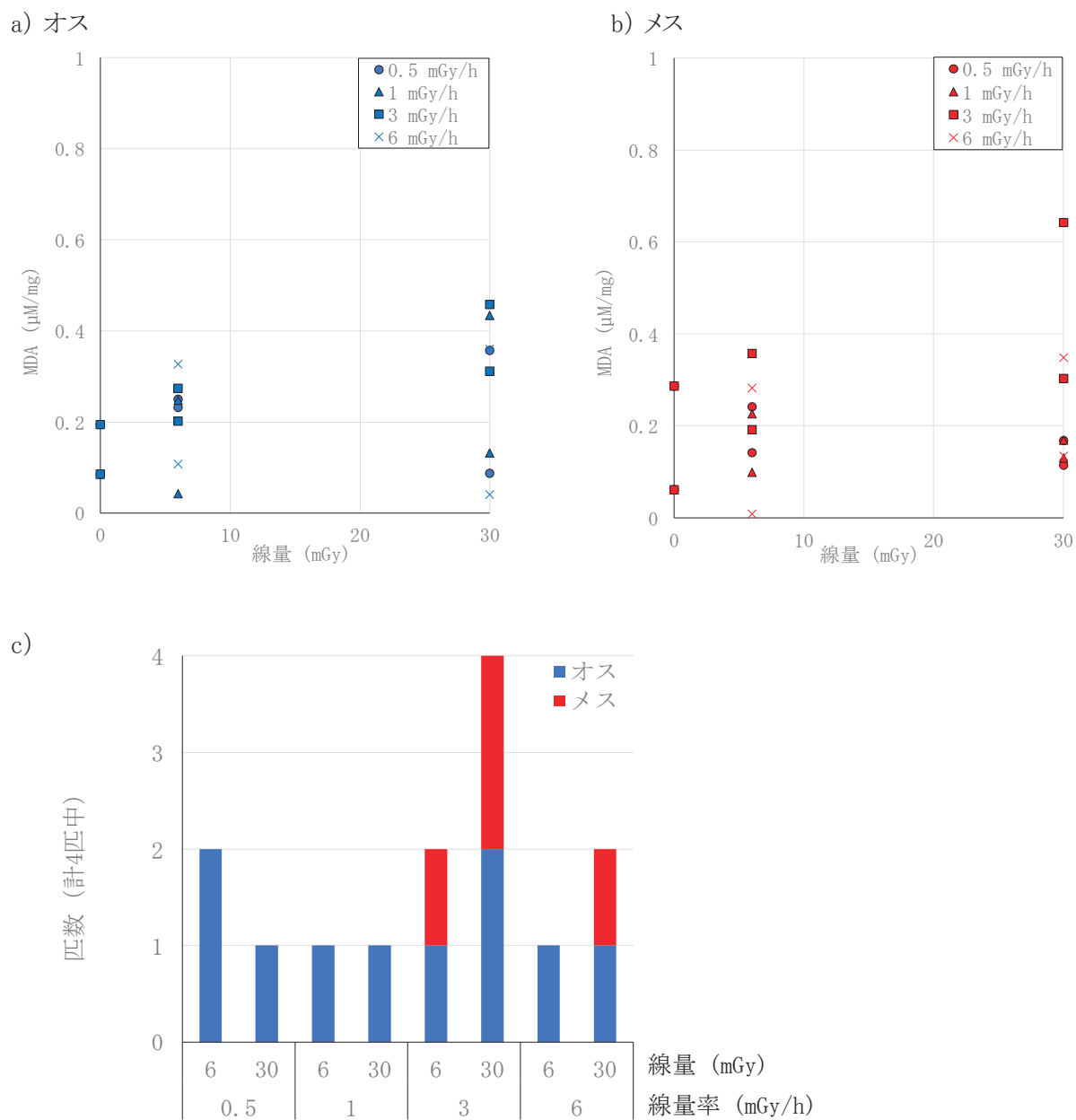
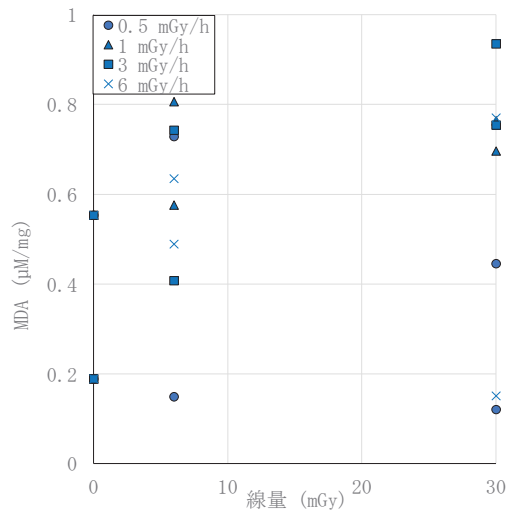
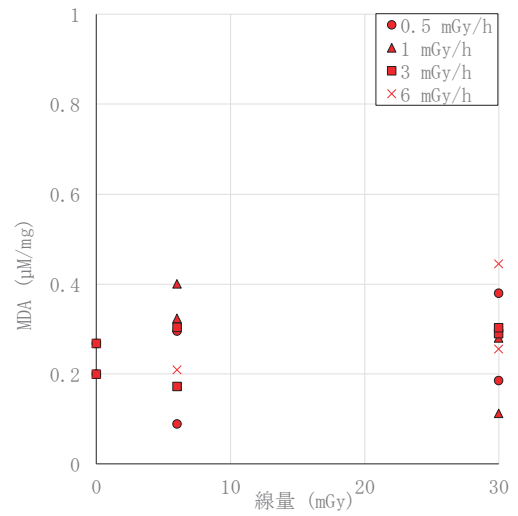


図 3.2-12 動物実験マウスへの外部照射による肝臓のMDA濃度変化

a) オス



b) メス



c)

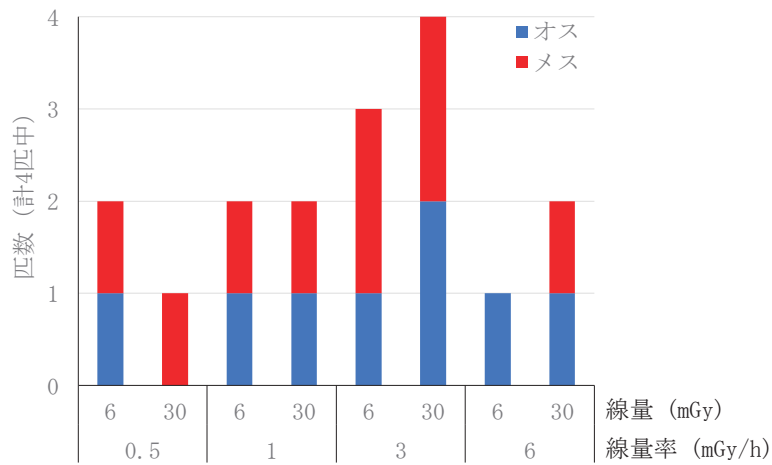


図 3.2-13 動物実験マウスへの外部照射による腎臓の MDA 濃度変化

3.2.3 野生ニホンザル試料アーカイブの構築

協力関係にある自治体が有害鳥獣として駆除した後に提供される野生ニホンザルを受け取り、試料を採取してアーカイブ試料を調製し、超低温冷凍庫で保管している。旧警戒区域の個体は、福島県南相馬市と浪江町から個体が提供されている。放射性物質非汚染地域である対照地域の個体は新潟県下越地方の自治体と協力体制を構築している。対照地域の個体提供については、宮城県加美町と新たな協力体制を構築した。個体提供は不定期であり、駆除後に提供者から連絡を受けた後に素早く受け取りに行く体制を構築している。品質の良い試料を採取するために、対照地域、旧警戒区域のすべての個体について、連絡を受けてから24時間以内に試料を採取してきた。有害鳥獣駆除は各自治体の捕獲体制などで年度ごとに変動するが、令和2年度は61頭の提供を受け、試料を採取した。採取した試料は本課題の解析や多目的に利用できるように組織ブロック、組織標本、凍結標本、血漿分離、エナメル質分離など利用目的にあわせて調製し、各分担者へ解析試料を配布するほか、超低温冷凍庫で長期保管を行っている。長期保管試料ではバーコードラベルを作成し、適切な体制で管理している。令和2年度に収集した個体を含め、福島第一原発事故2年後から構築している被災霊長類試料アーカイブは総計649頭分の試料で構成されている。体形、体重、捕獲地などの個体情報や、臓器中放射性セシウム濃度などの解析情報をアーカイブ試料と紐付けし、利用するアーカイブ試料の選別に役立てている。また、試料採取時に緒臓器のサイズ、重量を計測し、データを広島大学と共有して項目3.1.2の被ばく線量評価における基礎資料を収集した。

3.3 研究推進

本研究を推進するにあたり、研究分担者全員と研究協力者が参加する成果報告会をオンライン会議で実施した。令和 2 年度の進捗状況の報告に加え、研究分担間の情報・試料の共有が特徴である本研究課題において令和 3 年度計画や今後の方針について意見交換を行い、特に担当間の要望や調整を行う機会となった。令和 3 年 3 月 11 日に東北大学にて被ばく線量評価グループと生物影響解析グループの打ち合わせを実施した。異分野融合研究である本課題において、研究成果の共有とともに各分野の背景について理解を深めることで本課題における連携協力体制の強化をはかった。また、メールなどで必要に応じた研究担当間の調整を行うとともに、CLADS とも連絡をとりながら本課題を実施した。令和 2 年度には、本課題で得られた成果について、学会発表では 4 件の口頭発表と 2 件のポスター発表、論文発表では国際誌 1 報と国内誌 3 報で積極的な発信を行った。

4. 結言

本課題では、廃炉作業者を含めた原子力・放射線作業従事や環境中に放出された放射性物質による低線量・低線量率長期被ばく影響について、酸化ストレス状態に及ぼす影響を指標に検討を行っている。データが不足している線量・線量率領域の放射線被ばく影響については、旧警戒区域の野生ニホンザル試料の解析と、動物実験による検証によって、臓器別の酸化ストレス状態に着目した課題を推進している。ESR 法と PHITS シミュレーションによる被ばく線量評価体制を整備し、両者の特徴で補完しながら、生物影響評価の放射線被ばく依存性を検討するための指標を構築している。基本的な評価体系を整備・改良しながら線量評価を行っているが、特に ESR 評価法では野生動物試料に特徴的な個体差が原因となる分析阻害要因が令和 2 年度の解析から明らかになった。ESR 法は線量評価の不確かさを改善するための手段と位置づけていることから、分析阻害要因を取り除く方法の改良と線量評価を継続する。

生物影響解析では、旧警戒区域の被ばく線量・線量率領域と、実験的には低い、旧警戒区域よりも高い線量・線量率範囲を組み合わせることによって、変動の見極めが難しい生物学的変化をとらえられるような工夫をしている。旧警戒区域における被ばくでは、一部の臓器で酸化ストレス状態が変動すること、酸化ストレスの増加だけではなく、抗酸化酵素の活性が低下して酸化ストレスの影響を受けやすくなる可能性、酸化ストレス状態の変化が持続していることなどの知見が得られてきた。以上の結果から、臓器ごとに両者のバランスを明らかにすることが放射線影響リスクの予測で重要な知見となると考えられた。また、実験的に低い線量・線量率では非被ばく群と比べて酸化ストレスが誘発されるが、旧警戒区域の被ばくによる酸化ストレスは非被ばく群の変動の範囲内で変化することを明らかにしたことも、放射線影響リスクの推定で非常に重要な知見となる。低線量・低線量率被ばくによる抗酸化反応の変動を明らかにするとともに、非被ばく群における変動範囲を超えて酸化ストレスを誘発する線量率を明らかにすることは、令和 3 年度の検討における重要な課題である。

参考文献

- [1] ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP, vol.37, no.2-4, 2007.
- [2] 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構放射線医学総合研究所, 放射線リスク・防護研究基盤準備委員会報告書, 平成 29 年 3 月 31 日, 2017.
- [3] Watanabe, Y. et al., Morphological Defects in Native Japanese Fir Trees around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Sci. Rep., vol.5, 2015, 13232.
- [4] Akimoto, S., Morphological Abnormalities in Gall-forming Aphids in a Radiation-contaminated Area near Fukushima Daiichi: Selective Impact of Fallout?, Ecol. Evol., vol.4, no.4, 2014, pp.355-369.
- [5] Fujishima, Y. et al., Assessment of Chromosome Aberrations in Large Japanese Field Mice (*Apodemus Speciosus*) in Namie Town, Fukushima, Int. J. Radiat. Biol., 2020.
- [6] Rodrigues-Moreira, S. et al., Low-Dose Irradiation Promotes Persistent Oxidative Stress and Decreases Self-Renewal in Hematopoietic Stem Cells, Cell Reports, vol.20, no.13, 2017, pp.3199-3211.
- [7] Urushihara, Y. et al., Analysis of Plasma Protein Concentrations and Enzyme Activities in Cattle within the Ex-Evacuation Zone of the Fukushima Daiichi Nuclear Plant Accident, PLoS ONE, vol.11, no.5, 2016, e0155069.
- [8] Urushihara, Y. et al., Haematological Analysis of Japanese Macaques (*Macaca Fuscata*) in the Area affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Sci. Rep., vol.8, no.1, 2018, 16748.
- [9] 森宏祐, 広島大学工学部卒業論文: 福島原発事故に伴うニホンザルの臓器線量の推定, 2019.
- [10] Endo, S. et al., Internal Exposure Rate Conversion Coefficients and Absorbed Fractions of Mouse for ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{90}Sr Contamination in Body, J. Radiat. Res., vol.61, no.4, 2020, pp.535-545.
- [11] 石井賢一, 広島大学工学部卒業論文: 福島原発事故に伴うニホンザルの被曝線量推定用換算計数の評価, 2018.
- [12] Fedorov, A. et al., 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network, Magnetic Resonance Imaging, vol.30, no.9, 2012, pp.1323-1341.
- [13] Fukuda, T. et al., Distribution of Artificial Radionuclides in Abandoned Cattle in the Evacuation Zone of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, PLoS ONE, vol.8, no.1, 2013, e54312.
- [14] Nakajima, H. et al., Fukushima Simulation Experiment: Assessing the Effects of Chronic Low-Dose-rate Internal ^{137}Cs Radiation Exposure on Litter Size, Sex Ratio, and Biokinetics in Mice, J. Radiat. Res., vol.56, 2015, pp.i29-i35.
- [15] Nakajima, H., Effects of Radioactive Cesium-containing Water on Mice, Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems: Long-Term Study on the Fukushima Nuclear Accident (Editors: Manabu Fukumoto), Springer, 2019, pp.221-235.

