JAEA-Review 2020-048 DOI:10.11484/jaea-review-2020-048



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)

- 令和元年度 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) -FY2019 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 A-Review

January 2021

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒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. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, 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

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

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)

-令和元年度 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

(2020年10月29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、令和元年度 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始めとした原 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、「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」の令和元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、社会的関心の高い低線量・低線量率放射線被ばくによって緒臓器の酸化ストレス状 態に対する生物影響を検討し、科学的知見が必要とされている被ばく領域の生物影響データを収 集することを目指している。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、福島原 発事故によって放射線に被ばくした野生ニホンザルと動物実験マウスから採取した試料の解析結 果を用いて被ばく線量と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

i

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

- FY2019 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 29, 2020)

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 FY2019.

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".

This study investigates 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 nuclear power station and of animal experiments.

Keywords: Low Dose/Low Dose-rate Radiation, Oxidative Stress, Fukushima 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(継続分)	2
3.	令和元年度 採択課題	5
付	録 成果報告書	9

Contents

1.	Outline of Nuclear Energy Science & Technology and Human Resource Development Project	. 1
2.	Accepted Proposal in FY2018 ~Continued~	. 2
3.	Accepted Proposal in FY2019	. 5
Ap	pendix Result Report	.9

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 カホールディングス(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)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。

- 1 -

2. 平成 30 年度 採択課題(継続分)

平成30年度採択課題(継続分)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	山﨑 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	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	渡邉 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

JAEA-Review 2020-048

3. 令和元年度 採択課題

令和元年度は、4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:平成31年4月24日~令和元年6月7日
 令和元年5月30日~令和元年7月18日 ※日露共同研究のみ

· 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

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	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	渡邉 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

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	慶應義塾大学

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	淺間 一	東京大学
化学計測技術とインフォマティックスを融合したデ 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	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

本報告書は、採択課題のうち、共通基盤型原子力研究プログラム(一般研究)「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」の令和元年度の研究成果について記したものである。

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.

令和元年度

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 311123)

成果報告書

令和2年3月 国立大学法人東北大学

JAEA-Review 2020-048

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」の令和元年度の研究成果を取りまとめたも のです。

目次

概	略 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
1.	はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1
2.	業務計画
	2.1 全体計画 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・2.2-1
3.	令和元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 · · · · · · · · · · · 3.1-1
	3.1.2 臓器被ばく線量の推定(再委託先:広島大学) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.1.3 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 ・・・・・・ 3.1-12
	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) ・・・・・・・・・・ 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 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
	3.2.3 野生ニホンザル試料アーカイブの構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・.3.2-9
	3.3 研究推進 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4.	結言・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

表一覧

表 3-1	各臓器の大きさ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1–4
表 3-2	$Cs-137$ の γ 線による全身線量の換算係数と臓器線量換算係数 ···········	3. 1–6
表 3-3	$Cs-134$ の γ 線による全身線量の換算係数と臓器線量換算係数 ···········	3. 1–6
表 3-4	楕円体モデルと ICRP116 ボクセルファントム計算値・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	3. 1–7
表 3-5	Cs−137 内部被ばく臓器線量率換算係数 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	3. 1–10
表 3-6	Cs-137 水摂取日数に依存した内部被ばく線量・線量率 ·····	3. 2–1

図一覧

図 2-1	年次計画・・・・・・・
図 3-1	ニホンザルの検量線(200 mGy まで) ······ 3.1-3
図 3-2	PHITS コードを用いたシミュレーションによる推定外部被ばく線量と
	ESR 分析による推定外部被ばく線量の関係
図 3-3	5-10 kg 群の回転楕円体との(a)および(b)での断面図 ······ 3.1-5
図 3-4	計算体系······3.1-5
図 3-5	人体楕円体ファントム
図 3-6	マウスボクセルファントムの作成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
図 3-7	脳を線源としたエネルギー付与の計算例
図 3-8	半導体検出器による大腿筋のγ線スペクトル
図 3-9	大腿筋中放射性セシウム(Cs-137)濃度と採取日の関係 3.1-13
図 3-10	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 3.1-14
図 3-11	大腿筋中放射性セシウム(Cs-137)比放射能
図 3-12	Cs-137 量 (Bq)の体内推移 ······ 3.2-2
図 3-13	Cs-137 水給水日数における内部被ばく線量率 ····································
図 3-14	Cs−137 水給水日数における内部被ばく積算線量 · · · · · · · · · · · · · · · · 3.2−3
図 3-15	MDA 濃度に変動がなかった臓器 ······ 3.2-8
図 3-16	内部被ばく線量率の増加とともに MDA 濃度が上昇した臓器
図 3-17	内部被ばく線量率の増加とともに MDA 濃度が下降した臓器 ··········· 3.2-8

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)
- $\ensuremath{\mathsf{ICRU}}$: 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

原子力利用や廃炉作業、福島原発事故に関連する放射線被ばくなど、低線量・低線量率放射線 の長期被ばく影響に対する社会的関心は高く、関連領域の科学的知見を集積することは放射線安 全管理、放射線防護、放射線災害医学など多岐の分野に貢献することが期待される。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から蓄積 される科学的知見をもとに推定されてきた。知見が充足している線量・線量率領域と社会的関心 の高い線量・線量率領域との間には、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 とが指摘されている。ヒトの低線量・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 く研究成果の積み重ねによって、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が得られる。

本研究課題では低線量・低線量率放射線被ばくの知見を収集するために、福島原発事故後の旧 警戒区域に生息している野生ニホンザルから収集した試料を解析している。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り、得られる知見を人間の被ばく影 響の指標として応用できる可能性が高い。低線量・低線量率放射線に対応する照射施設や内部被 ばく実験施設は国内外で極めて少なく、社会的関心の高い放射線被ばく影響を解明する研究資源 の入手が課題となっている。また、過去の放射線被ばく事例の疫学調査結果より、放射線影響の 出現までに少なくとも数年以上の長期間を要することが報告されている。線量・線量率が低くな ると、より長期間の調査が必要になると予想される。平均寿命が 20 年を超え、群れの行動範囲 内で生息する習性を持つ野生ニホンザルは、原発事故後から持続的に外部内部複合被ばくの影響 を受ける動物モデルとなり得る。入手が容易ではない低線量・低線量率長期被ばく試料のなかで も、特に人間に近縁な霊長類試料は科学的に貴重となる。本課題では収集する試料を解析に用い るだけではなく、個体情報や解析結果などの資料と紐付け、多目的な解析に利用できる状態で長 期保管する資試料アーカイブの構築も実施している。国際的にも他に類を見ない被災霊長類アー カイブ試料を研究コミュニティーで共有できる体制を構築するとともに、次世代へ継承すること 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こと が可能となる。このように、本課題の研究成果と被災霊長類資試料アーカイブは低線量・低線量 率放射線被ばくの生物影響を正しく理解するための研究資源とすることを目指している。

放射線被ばくと生物影響との因果関係は、被ばく線量と生物影響の相関によって判断する必要 がある。本課題では被ばく線量評価グループと生物影響解析グループによる学際共同研究を実施 し、個体の被ばく線量を評価した上で生物影響を解析する体制を構築している。ニホンザルの行 動範囲や摂取物に含まれる放射性物質濃度によって被ばく状況が個体ごとに異なるため、ニホン ザルに最適化された方法で、個体ごとに被ばく線量を評価する体制を整備した。収集した試料の 分析・測定結果を利用して個体ごとに被ばく線量を評価するために、本課題では電子スピン共鳴 (ESR)法による積算外部被ばく線量評価と、モンテカルロシミュレーションによる外部・内部 被ばくの線量・線量率評価を実施した。ESR 法による被ばく線量評価は、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性を利用した評価法で ある。被ばくの痕跡を分析し、その結果を利用する ESR 評価法は、行動履歴の把握が困難な野生 動物の被ばく線量を個体ごとに評価する必要がある本研究課題において強力なツールとなる。本 年度は、放射性物質非汚染地域(対照地域)の個体から抽出したエナメル質試料に対して人為的

iv

にガンマ線を照射し、ESR 分析より得られた炭酸ラジカル強度と吸収線量の相関を検討した。この結果、本 ESR 法による被ばく線量推定の下限値が 33.5 mGy であった。国際的に実施されている ESR 評価法の中でもより低い被ばく線量から評価できる極めて高水準な評価プロトコールを本課題で確立できたことを明らかにし、福島原発事故による放射線被ばく線量の推定に応用できることを示唆した。本課題のアーカイブ試料から中程度以上の被ばくが見込まれる地域の7 個体を選別して ESR 法による評価を実施し、積算外部被ばく線量が 45-300 mGy の範囲にあると推定した。この ESR 法評価結果を、PHITS シミュレーションによる外部被ばく線量評価結果と比較したところ、100 mGy よりも高い被ばく線量域では両法の評価結果の差が数十 mGy 以下であったが、100 mGy 以下の線量域では外部被ばくシミュレーション条件を再検討する必要性が示された。

本課題では主要臓器の酸化ストレス状態を検討するため、全身の被ばく線量に加えて、各臓器 の被ばく線量・線量率を PHITS シミュレーションで評価する。本年度は臓器被ばく線量換算係数 の算定とその妥当性を検討した。野生ニホンザル全身の被ばく線量を推定する楕円体ファントム に、線量評価の対象となる臓器の楕円体ファントムを追加し、PHITS コードを用いたモンテカル ロシミュレーションで線量換算係数を決定した。サンプリング時に計測された臓器重量やICRU44 に掲載されている臓器平均密度を用いて臓器ファントムの大きさを決定した。体重を指標に区分 した3群のニホンザル全身ファントムにあわせて、緒臓器ファントムのサイズを3通り作成した。 放射性セシウム(Cs-134、Cs-137)について外部被ばく線量換算係数を計算し、全身線量換算係 数に対する各臓器換算係数の比は 0.88-1.08 の範囲にあることが分かった。ICRP116 では、人体 のボクセルファントムを用いて Cs-137 ガンマ線に対する臓器線量が全身被ばく線量に対して 0.87-1.17 の範囲で分布している結果が示されており、楕円体ファントムを用いたニホンザルの 計算結果と類似した傾向にあることを確認した。ICRP ボクセルファントム体系を参考にヒトの楕 円体ファントムを PHITS 上で作成し、全身線量換算係数に対する臓器線量換算係数比を人間のボ クセルファントムと楕円体ファントムで比較することで楕円体ファントムを用いるシミュレーシ ョンの妥当性について検討した。肺以外の臓器はおおむね一致したが、肺では25%の違いが確認 された。この原因の確認とニホンザルボクセルファントムの作成による改善について今後検討す る予定である。

野生ニホンザル試料解析の他に、放射性セシウム飲水マウス動物実験による緒臓器の酸化スト レス状態の検証実験を計画している。このため、マウスボクセルファントムを PHITS 上で作成し、 使用する動物実験マウスの緒臓器に最適化した線量換算係数を計算した。配置した臓器のいずれ かを線源臓器とし、飲水実験で用いる Cs-137 のベータ線、ガンマ線による緒臓器へ付与するエ ネルギーを計算した。ベータ線は線源臓器中でのエネルギー付与が集中し、線源臓器以外への寄 与が少ないことが確認された。これに対してガンマ線では、線源臓器以外へも高い割合でエネル ギー付与することを確認し、線源臓器から標的臓器への内部被ばく線量換算係数を決定した。次 年度以降に、動物実験で得られる臓器 Cs-137 濃度から緒臓器の内部被ばく線量・線量率を評価 する環境を整備した。

令和元年度は野生ニホンザル 44 個体分の試料を収集し、アーカイブ試料を調製した。福島原 発事故2年後から構築してきた試料アーカイブには、本年度の収集試料を含めて総計 588 頭分の 試料を整備した。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。福島原発事故で放出された放 射性物質の中で、放射性セシウムだけが本年度に実施したニホンザル試料の測定で検出された。 対照地域の大腿筋では Cs-134 は検出限界以下、Cs-137 についても検出限界以下、あるいは検出 された試料でも2 Bq/kg 以下と微量であった。一方で、旧警戒区域で捕獲された個体では現在で も Cs-134 と Cs-137 が検出されており、被ばくが継続している試料であることが示された。原子 炉が停止した平成23 (2011) 年 3 月 11 日に改変補正すると、Cs-134 と Cs-137 の放射能比が 0.94 となり、福島原発事故由来の放射性セシウムが検出されていることを確認した。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、物理学的半減期を除いてもわずかに減少傾向がみら れ、2 年程度の環境半減期であると推定された。大腿筋以外の緒臓器の放射性セシウム濃度も測 定し、次年度以降に実施するニホンザル臓器別内部被ばく線量を評価するための基礎資料を収集 した。

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、心臓、肝臓、腎臓、脾臓、膀胱、大腿筋)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。全身の内部被ばく線量率を指標に検討した結果、内部被ばく線量率 に対する MDA 濃度の変動が臓器ごとに異なる可能性が示唆された。本年度の解析結果では、肝臓 と膀胱の MDA 濃度が内部被ばく線量率と共に増加した一方で、肺、心臓、脾臓では内部被ばく線 量率が上昇すると MDA 濃度が減少する可能性が示唆された。また、腎臓と大腿筋の MDA 濃度に変 動は確認されなかった。MDA 濃度の変動が確認されなかった腎臓と大腿筋は放射性セシウムの蓄 積が他の臓器よりも高く、臓器ごとに評価される被ばく線量・線量率と MDA 濃度の相関を検討す る必要性が示唆された。

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への影響を検討するための動物実験 を実施した。実験の開始に先立ち、13 週齢の雌雄合計 50 匹のマウスを準備した。100 Bq/ml の Cs-137 水を自由飲水したマウスの肝臓、筋肉の放射能濃度を測定し、筋肉では肝臓の約 3 倍の Cs-137 が蓄積し、給水開始後 15 日間は直線的に蓄積した。18-20 週以降の組織内 Cs-137 濃度が 横ばいとなり、以上の体内動態解析結果は被ばく線量評価に応用するための基礎資料となった。 また、週齢を揃えたマウスの Cs-137 飲水群に対して給水を開始し、計画にしたがって飼育と臓 器の採取を実施している。

本年度の被ばく線量評価に関する項目のうち、歯の ESR 分析による積算外部被ばく線量評価に 関する論文と、マウスボクセルファントムの作成と内部被ばく線量換算係数の計算結果に関する 論文を国際誌へそれぞれ投稿し、受理された。

本研究課題初年度では、野生ニホンザルと実験動物マウスの臓器別被ばく線量評価体制の整備 と妥当性を検証するとともに、解析する生物試料の収集・調製と組織中 MDA 濃度については臓器 ごとに放射線応答が異なる可能性を示す知見が得られた。次年度以降に臓器ごとの被ばく状態と 対応する組織内酸化ストレス状態を検討する研究計画を実施することで、低線量・低線量率放射 線被ばくによる緒臓器の酸化ストレス状態を指標とする生物影響解析を実施する予定である。

1. はじめに

国際放射線防護委員会(ICRP)2007年勧告では、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。福島第一原子力発電所(福島原発)事故以後は、環境中に放出された低濃度放射性物質による被ばく影響や廃炉作業従事者に対する被ばく影響に高い関心がよせられた。いずれも、低線量・低線量率放射線の被ばく影響となり、特にその長期影響に関する社会的関心が高まっている。

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。一方、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では、ヒトの低線量・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。

福島原発事故後に設定された警戒区域は、福島原発から半径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原発事故によって放 出され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。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原発事故後10年を向かえる現 在でも確認されていない。野生ネズミの末梢血では染色体異常が誘発されていたので細胞レベル の放射線影響は確認されているが、その変化が個体レベルの影響に及んでいないと考えられる。 ワタムシの被ばくを想定したシミュレーションの結果より、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、放射線影響の表れ方が生物種ごとに異な ることが示唆された。福島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、ヒト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であった。

このような背景より、有害鳥獣として駆除されている野生動物の中で人間に最も近縁な霊長類 のニホンザルを本課題の研究対象とすることで、得られる知見をヒト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。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・長崎の原爆被バク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 原爆被バク者よりも低いことから、より長期の調査が必要になると予想される。野生ニホンザル

1-1

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。群れで移動する野生 ニホンザルは決められた範囲内で行動するので、旧警戒区域の自治体で駆除された野生ニホンザ ルは、福島原発事故後から持続的に低線量・低線量率放射線に被ばくしてきた個体と考えられる。 本課題期間内に自治体で駆除した個体が提供されるので、福島原発事故後最大で 11 年の長期被 ばく影響を本課題で調製する試料を用いて解析できることになる。このように低線量・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 直しがきか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。

低線量率長期放射線被ばくによって動物実験マウスの寿命が短縮し、この寿命短縮が抗酸化剤 投与によって軽減することが報告されている。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、我々は旧警戒区域のウシ血漿中の 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に酸化ストレスが誘発された ことを報告した。ただ、酸化ストレス状態に変化が見られない組織がある可能性も示された。本 課題では、低線量・低線量率放射線被ばくによって酸化ストレスが誘発される臓器・組織につい て包括的に検討し、その臓器に起因する放射線影響の有無について野生ニホンザルと動物実験マ ウス試料を用いて検討する。

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 2007 年勧告で記述されている。本課題では疫学的研究を除く項目に焦点をあてた課題を推進する。野 生ニホンザルやその解析結果を検証する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。

項目	年度	令和元年度		令和2年度	令和3年度
(1) 被ばく					
線量評	価				
① 野生:	ニホン			測完計約調制 . 線長莎/	エージン 証価まとめ
ザルす	歯の	•		例 仁 略 相 购 衣 「 豚 里 町	
ESR 乞	分析に				
よる利	漬算外				
部被に	ゴく線				
量評任	Τ				
 (2) 臓器 	疲ばく	臓器被ばく線	量換算係数	換算係数の推定と	臓器被ばく線量推定
線量の	の推定		推定の準備	被ばく線量計算	及び評価まとめ
(再考	委託				
先:/	広島大			土壤調査	
学)					
③ 野生:	ニホン				
ザル肌	藏器放			放射能濃度測定	評価まとめ
射能の	の測定		4		
と放り	射性物				
質取	り込み			セシウム及びアルカリ金属元素	東測定 新価まとめ
履歴の	の推定				
(2) 生物影	響解析				
とアー	カイブ				
構築					
①マウス	動物実	マウス飼育環	境の準備		
験によ	る実験	•		内部被ばくによる	動物実験
的検証	(再委				→
託 先 :	大 阪			-	外部被ばくによる動物実験
大学)					評価まとめ
					↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓

図 2-1 年次計画 (1/2)

2.1-1 - 21 -

JAEA-Review 2020-048

年項目	三度 /	令和元年度	令和2年度	令和3年度
		試料調製		
②酸化ストレ	ノス		酸化ストレスマ	ーカーの検出
マーカーの)検			▶ #古 伯刀 十斤-
出と骨髄影	響			10月牛17月
解析				
③野生ニホン	ィザ	ニホンザル試料の	収集・臓器形態情報の収集・	アーカイブ試料の調製と保管
ル試料アー	- カ			• • • • • • • • • • • • • • • • • • •
イブの構築				
			研究推進会議、報告会の	開催・研究打ち合わせ
(3) 研究推進				
		まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価

図 2-1 年次計画 (2/2)

2.2 令和元年度の成果の目標及び業務の実施方法

令和元年度の計画の概要を以下に示す。

- (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

令和元年度までに捕獲された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)

臓器被ばく線量を推定するため、ニホンザルをモデル化した楕円体中に臓器モデルを配置 したモンテカルロ計算を行う。マウス臓器を考慮したボクセルファントムの作成とモンテ カルロ計算によって、臓器被ばく線量換算係数を推定する体制を整備する。また、土壌調 査を実施する。

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

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)を用いて安定同位体および同族元素を測定して比放射 能を定量し、放射性物質の取り込み履歴を推定する。

(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)

近交系マウスの交配ペアを準備し、実験に必要な匹数と週齢をそろえて動物実験マウスを 準備する。Cs-137 水を自由飲水させた動物実験マウス、および Cs-137 水を自由飲水させ た後に真水に切り換えて飼育した動物実験マウスから血漿や臓器を採取し、解析を行う東 北大学へ提供する。採取した臓器の形状や重量の計測、臓器中放射能濃度を計測し、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

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 を解析する。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を検討する。

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から野生ニホンザル検体を受け取り、令和元年度の捕獲個体から生 体試料をサンプリングする。サンプリング試料から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、臓器の形状や重量を計測し、得られたデータ は、臓器被ばく線量推定で利用するために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を作成する。 (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. 令和元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

電子スピン共鳴(ESR)法を用いて野生ニホンザルの歯のエナメル質の炭酸ラジカルを 測定し、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。

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、象牙質は有機物と水分が30%を占め、無機物は70%である。このうち、 エナメル質は結晶性が高いために放射線に対するESRシグナル生成の感度が高い。また、 被ばくによって生成した炭酸ラジカルのESRスペクトルに重なるように、有機物由来のラ ジカルが得られる。有機物由来のラジカルは炭酸ラジカルの妨害シグナルになるため、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。

これまでの研究において、我々はエナメル質と象牙質の密度差を利用して、両者の混合 溶液を遠心分離して象牙質を失うことなくエナメル質を分離する方法を開発してきた。こ の方法は、歯科用ハンドドリルで象牙質を削って除去することが不可能だったニホンザル の歯からのエナメル質抽出を可能にした。また、動物の歯には金属由来と想定される幅広 な ESR スペクトルが生じることがあり、それが炭酸ラジカル測定および ESR スペクトルの 解析を阻害していたが、適切な化学処理を行うことで、妨害スペクトルを除去することが できるようにした。これらの確立した分離法および化学処理法を用いて、コントロール地 域のニホンザルのエナメル質で検量線を作成し(炭酸ラジカル強度とコバルト 60 ガンマ線 の吸収線量の関係)、ESR 線量計測法の検出限界を従来の 100 mGy-200 mGy から引き下げて きた。令和元年度は、検出限界の推定を行うとともに、実際に福島県で捕獲した 7 頭の野 生ニホンザルの歯からエナメル質を抽出し、エナメル質中の炭酸ラジカルを ESR 装置で分 析し、検量線を用いて外部被ばく線量を推定した。

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掃引幅±5.5 mT でスキャンし(中心磁場約 336 mT)、 1回の掃引時間は 30 秒とした。掃引回数は 40 回以上とするのが推奨されているが、本研究 では S/N 比向上のために積算回数を 120 回(1 スペクトルあたり約1時間)とした。エナメ ル質の構成物質であるハイドロキシアパタイトは結晶性のため、試料の異方性によって炭 酸ラジカル強度が変化する可能性がある。そのため、測定後にはかならず試料をいれた試 料管を取り出し、よく振った上で、最低 5 回の繰り返し測定を行った。

得られた ESR スペクトルには、調べたい炭酸ラジカルの他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

3.1-1

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。イワノフ 博士(ロシア)から提供してもらった 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。

検量線は、コントロール地域で収集したニホンザルのエナメル質にコバルト 60 ガンマ線 を50 mGy ずつ照射し、ESR 測定を繰り返すことで作成してきた。これまでは、150 mGy ま での検量線を用いていたが、さらに50 mGy の照射を加えて、200 mGy までの検量線を作成 した(図 3-1)。実線は直線フィッティングの結果、上下の破線は90 %予測区間を示して いる。この結果の未照射の90 %予測区間上限値から、本システムの検出限界は33.5 mGy で あると推定された。

令和元年度に外部被ばく線量推定を行った 7 頭の野生ニホンザルは、福島県浪江町の立 野、末森、大堀、昼曽根で捕獲した。測定には、それぞれの個体から抜歯した臼歯を利用 した。歯の表面を洗浄後、歯を細かく砕き、ふるいにかけて直径 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/cm³ 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た。ESR 測定の妨害シグ ナル除去のため、抽出したエナメル質を 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 ℃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 ℃ の乾燥機で乾燥させ、測定試料とした。

このようにして調製した 7 頭の野生ニホンザルから採取したエナメル質の ESR 分析を行った。図 3-1 の検量線の式は y=0.000982257x×0.01772522 なので、ESR 分析によって得た y の値(炭酸ラジカル強度)を本式に代入し、x の値(線量)を求めた。その結果、7 頭の 野生ニホンザルの外部被ばく線量は 45 mGy から 300 mGy の範囲にあることがわかった。

図 3-2 に、ESR で推定した外部被ばく線量(横軸)と、項目 3.1.2 の PHITS コードを用 いたシミュレーションより推定した外部被ばく線量(縦軸)の相関をとったグラフを示す。 高線量域では両者の推定値が比較的近い値になることがわかった。また、青の破線で囲っ た低線量域では、PHITS コードで推定した外部被ばく線量がほとんど同じ値を示すのに対 し、ESR で推定した外部被ばく線量には 100 mGy 程度の幅があることがわかった。PHITS コ ードで推定した外部被ばく線量は、ニホンザル捕獲地点周辺で推定される土壌中放射性セ シウム濃度から算定される線量率を基に推定しているため、捕獲地点の線量率が近ければ、 推定した外部被ばく線量も近い値になってしまう。一方、ESR で推定した外部被ばく線量 は、捕獲地点の線量率や行動によらず、個体が被ばくした総線量を推定できるため、より 現実的な値を示していると考えられる。今後は検体数を増やして PHITS コードで推定した 被ばく線量と ESR で推定した外部被ばく線量の関係を詳細に調べるともに、ESR で推定し た外部被ばく線量と個体の内部被ばく線量との関係、あるいは外部被ばく線量と生物影響 との関係の解明のため、ESR を用いて外部被ばく線量を推定していく予定である。



図 3-1 ニホンザルの検量線 (200 mGy まで)

線量の増加とともに炭酸ラジカル強度が増加する。各線量のプロットおよびエラーバーは、3本 の検体のそれぞれ平均値と繰り返し測定のばらつきである。実線は直線フィッティングを行った 結果、破線は90%予測区間を示す。

(Reprinted from External exposure dose estimation by electron spin resonance technique for wild Japanese macaque captured in Fukushima Prefecture, T. Oka et al., Radiation Measurements, 134, 106315, Copyright (2020) with permission from Elsevier.)



ESR 分析による推定外部被ばく線量の関係

直線は両者の相関を、青の破線は低線量域での両者の値が一致しない点を示している。

(Reprinted from External exposure dose estimation by electron spin resonance technique for wild Japanese macaque captured in Fukushima Prefecture, T. Oka et al., Radiation Measurements, 134, 106315, Copyright (2020) with permission from Elsevier.)

> **3.1-3** - 26 -

3.1.2 臓器被ばく線量の推定(再委託先:広島大学)

本研究年度においては、次の、1) 楕円体ニホンザルファントムに、楕円体の臓器を加え たファントムを作成しその試験、2)マウスボクセルファントムの作成と内部被ばく臓器線 量換算係数マトリクスの作成の2項目について実施した。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

令和元年に終了した英知事業「福島原発事故による生物影響の解明に向けた学際共同研 究」において作成した楕円体ニホンザルファントムに楕円体の臓器を配置し、PHITS コー ドを用いたモンテカルロ計算で各臓器の外部被ばく線量換算係数を計算した。臓器の大き さは、肺と甲状腺を除き、東北大学にて解剖測定した臓器重量と ICRU44 中にまとめられ た臓器の平均密度を用いることで決定した。肺の大きさは、アカゲザルの体重と肺の体積 の相関¹⁾を用いた。また、甲状腺は、成獣に体重の近い小児の甲状腺の大きさ²⁾を参考に した。小児の平均体重は0歳で3 kg、1歳で11.4 kgと設定されていたので、体重2 kg 群 のニホンザルの甲状腺を0歳児の値、10 kg 群のニホンザルの甲状腺を1歳の値、5-10 kg 群のニホンザルの甲状腺は0歳と1歳の中間の値を仮定した。仮定した臓器等の楕円体 のパラメータを表 3-1 に示す。作成した楕円体ファントムの内、5-10 kg 群の例を図 3-3 に示す。

	Density	1	0 kg 群	2	5-10 kg 群			2 kg 群		
body or organ	(g/cm^3)	а	b	с	а	b	с	а	b	с
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
Thyroid	1.04	0.9	0.4	1.0	0.9	0.4	0.9	0.9	0.4	0.9

表 3-1 各臓器の大きさ a-c の単位は cm

3.1-4

- 27 -

JAEA-Review 2020-048



図3-3 5-10 kg群の回転楕円体との(a) および(b)での断面図

2) ニホンザル臓器線量換算係数の計算

外部被ばく臓器線量率換算係数の計算は、10 m×10 m×10 mの空気層と50 cmの土壌を 定義し、表層から 0.5 cm に均一分布した Cs-134 と Cs-137 について実施した。PHITS コー ドを用いて Cs-134 と Cs-137 からの γ 線、 β 線を発生し各臓器セルへのエネルギー付与を 計算した。計算体系を図 3-4 に示す。



3) ニホンザル臓器線量換算係数の計算結果

Cs-137とCs-134による汚染土壌に対する計算結果を、それぞれ表 3-2、表 3-3に示す。 計算結果では全身の外部被ばく線量率換算係数に対し、臓器に対して 0.88-1.08 の範囲内 で変化することが確認された。大腿部骨髄と甲状腺では、0.9 倍程度と小さい傾向を示し た。ICRP116³にまとめられた人体のボクセルを用いた Cs-137 からのγ線に対する外部被 ばくによる臓器線量では、臓器により 0.87-1.17 で変化し、今回の楕円体ファントムの計 算結果とよく似た傾向を示している。

	10kg 群		5-10kg 群		2kg 群	
body or organ	$(mGy/d)/(Bq/m^2)$	Error	$(mGy/d)/(Bq/m^2)$	Error	$(mGy/d)/(Bq/m^2)$	Error
Body	4. 07×10^{-5}	0.10%	4. 30×10^{-5}	0.07%	4.65 $\times 10^{-5}$	0.19%
	Organ/body ratio	Error	Organ/body ratio	Error	Organ/body ratio	Error
Body except for bellow organs	1.00	0.14%	1.01	0.11%	1.00	0.28%
Skull	0.92	0.59%	0.90	0.36%	0.93	1.03%
Brain	0.93	0.85%	0.93	0.51%	0.96	1.48%
Eye ball	0.91	2.01%	0.90	1.59%	0.98	4.81%
Lung	0.98	0.72%	0.99	0.48%	1.01	1.18%
Heart	0.91	1.01%	0.94	0.83%	0.96	2.42%
Liver	0.96	0.52%	0.97	0.40%	0.98	1.17%
Kidney	1.05	1.26%	1.04	0.95%	1.08	2.81%
Femur	1.08	1.26%	1.03	1.07%	1.00	2.99%
Femoral- marrow	0.90	2.57%	0.92	2.01%	0.88	4.92%
Thyroid	0.88	6.41%	0.98	4.10%	0.93	5.53%

表 3-2 Cs-137 の y 線による全身線量の換算係数と臓器線量換算係数 臓器線量換算係数は全身線量に対する比として示している。

表 3-3 Cs-134 の γ線による全身線量の換算係数と臓器線量換算係数

	10 kg 群		5-10 kg 群		2 kg 群	
body or organ	$(mGy/d)/(Bq/m^2)$	Error	$(mGy/d)/(Bq/m^2)$	Error	$(mGy/d)/(Bq/m^2)$	Error
Body	1.12×10^{-4}	0.10%	1.18×10^{-4}	0.07%	1.28×10^{-4}	0.19%
	Organ/body ratio	Error	Organ/body ratio	Error	Organ/body ratio	Error
Body except for bellow organs	1.00	0.13%	1.01	0.11%	1.00	0.22%
Skull	0.93	0.54%	0.90	0.38%	0.92	0.79%
Brain	0.94	0.77%	0.93	0.54%	0.96	1.14%
Eye ball	0.96	1.90%	0.95	1.75%	0.98	3.75%
Lung	0.98	0.65%	0.99	0.50%	1.00	0.90%
Heart	0.89	0.90%	0.97	0.89%	0.97	1.89%
Liver	0.96	0.47%	0.97	0.42%	0.97	0.91%
Kidney	1.05	1.15%	1.03	0.99%	1.07	2.19%
Femur	1.05	1.13%	1.04	1.11%	1.01	2.27%
Femoral- marrow	0.94	2.36%	0.95	2.14%	0.93	3.93%
Thyroid	0.90	5.86%	0.90	3.86%	0.92	4.36%

臓器線量換算係数は全身線量に対する比として示している。

4)人体ボクセルファントムと楕円体ファントムの比較

人体ボクセルファントムとニホンザル楕円体ファントムを直接比較することができない ため、ICRP116の体系を参考に、人の楕円体ファントムを作成した。人の楕円体ファント ムの概念図を図 3-5 に示す。各臓器の大きさは、ICRP110⁴⁾に示された人体 X 線画像、臓器 体積および ICRU44の臓器質量密度を用いて決定した。ICRP116³⁾の人体ボクセルファント ムに 662 keV y 線を ISO (等方照射)条件で照射した場合の臓器線量率/全身線量の比と作 成した人の楕円体ファントムの ISO 照射条件の臓器線量率/全身線量の比を比較した値を 表 3-4 に示す。肺を除き±10%で一致した。しかしながら、肺では、25%の違いであり、さ らなる確認が必要と考えられる。今後、原因を確認するとともに、ニホンザルのボクセル ファントムの作成を検討する。



図 3-5 人体楕円体ファントム³⁾

	Ellipsoid	l phantom	ICDD yoursl phontom	Ellingsid/waysl motio
0rgan	Ratio	Er	ickr voxel phantom	Ellipsolu/voxel ratio
Skull	1.26	0.10%		
Brain	1.11	0.08%	1.06	1.05
Eye ball	1.14	0.82%	1.17	0.97
Lung	1.18	0.11%	0.94	1.25
Heart	0.96	0.10%		
Liver	0.91	0.07%	0.87	1.05
Kidney	0.90	0.16%		
Femur	0.89	0.10%		
Femoral-marrow	0.75	0.20%	0.84	0.90

表 3-4 楕円体モデルと ICRP116³⁾ボクセルファントム計算値

5)マウスボクセルファントムの作成

マウス実験を実施するため、内部被ばく臓器線量推定用にマウスボクセルファントム の作成を行った。

JAEA-Review 2020-048

南カリフォルニア大学の Digimouse ウェブサイト⁵⁾から CT データをダウンロードし、CT 画像をフリーソフトウエア:3D slicer ⁶⁾を用いて、3D 画像を作成した。作成した 3D 画像 において、12 臓器(軟組織(軟組織+以下の 11 臓器以外を含む)、骨、脳、心臓、膀胱、 精巣、胃、脾臓、膵臓、肝臓、腎臓、肺)を同定し、セグメント分けを行った。同定した 12 臓器を画像から DICOM 形式の画像を出力した。得られた DICOM データから JAEA の PHITS 事務局が提供する DICOM2PHITS ⁷⁾を用いてボクセルファントムを作成した。作成した 3D 画 像とボクセルファントムを図 3-6(a)、(b)に示す。



図 3-6 マウスボクセルファントムの作成

(a) CT 画像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ァントム

6) 内部被ばく臓器線量率換算係数の計算

作成したボクセルファントムを用いて臓器間の内部被ばく線量係数の計算を行った。計算には PHITS を用いた。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 i 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、

$$f_{ij}^{k} = \frac{\varepsilon_{ij}^{k}}{E^{k}}$$
 3. 2. 1 - 1

で与えられる。ここで、 $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}^{k}$ 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

$$\boldsymbol{\eta}_{ij} = a \frac{m_i}{m_j} \Big[E^{\gamma} f_{ij}^{\gamma} + E^{\beta} f_{ij}^{\beta} \Big] , \qquad 3.2.1 - 2$$

3.1-8 - 31 - 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(μ Gy/d)/(Bq/kg)の単位で与えられる。また、*a*は、単位換算係数1.602×10⁻⁷(μ J/MeV) ・3600(*h/s*)・24(*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。

計算例を図 3-7 に示す。この例では、線源臓器を脳とした場合の各臓器部位へのエネル ギー付与の様子を示している。 β 線の場合、線源臓器中にエネルギー付与が集中しており、 他の臓器への寄与が少ないことが確認できる。これに対し γ 線では、 β 線に比べ他の臓器 へも高い割合でエネルギー付与があることがわかる。 β 線の Absorbed fraction は線源と 標的が同一の場合 0.5-0.8 となり、線源と標的が異なる場合は、10⁻³-10⁻⁸ と極端に小さい 値を示した。これに対し γ 線は最大 0.04 程度、10⁻³-10⁻⁸ であった。このことより内部被ば く計算では γ 線の影響は小さく、 β 線では線源と標的が異なる場合の影響小さい。したが って、線源と標的が同一の β 線が内部被ばく臓器線量率を支配することを示している。



式 3.2.1-2 を用いて求めた Cs-137 内部被ばく臓器線量率換算係数を、表 3-5 に示す。 この行列を用いることで、各臓器の Cs-137 汚染濃度(Bq/kg)を測定することで、それぞ れの臓器の内部被ばく線量率を決定可能である。

7)まとめ

本研究年度においては、楕円体臓器を配置したニホンザル楕円体ファントムの作成、換 算係数の導出およびそのテストを実施した。また、マウスボクセルファントムの作成と内 部被ばく線量率換算係数の導出を行った。被ばく線量率換算係数は、論文にまとめ現在 JRR誌に投稿中である。

Cs-137 内部被试く臓器線量率換算係数	単位は(hGy/d)/(Bq/kg)
3-5	

表

4. 53×10^{-6} 2. 13×10^{-5} 8.36×10⁻⁹ 7. 69×10^{-5} 2. 18×10^{-9} 2. 10×10^{-8} 1.09×10^{-8} 1.40×10^{-5} 1.19×10^{-8} 1.78×10^{-3} 3. 73×10^{-9} 1.45×10^{-8} Lung 1. 40×10^{-7} 9. 16×10^{-7} 1. 11×10^{-5} 2. 41×10^{-8} 1. 39×10^{-5} 2. 88×10^{-3} 8. 46×10^{-9} 2. 77×10^{-8} 5. 27×10^{-8} 2. 98×10^{-5} 2. 18×10^{-4} 3. 66×10^{-8} Kidney 4. 26×10^{-5} 6. 47×10^{-6} 4. 45×10^{-5} 1.09×10^{-4} 1. 40×10^{-5} 3. 08×10^{-3} 5. 34×10^{-6} 7. 09×10^{-5} 9.92 $\times 10^{-5}$ 2. 91×10^{-4} 1. 52×10^{-4} 53×10^{-4} Liver с. 1.60×10^{-6} 2. 14×10^{-7} 1.22×10^{-9} 2. 50×10^{-9} 1. 16×10^{-5} 4.81×10^{-5} 2. 61×10^{-5} 4.66×10^{-9} 5.06×10^{-9} 2. 15×10^{-3} 3.66×10^{-6} Pancreas 6.32×10^{-9} 1.04×10^{-6} 1.02×10^{-6} 9. 21×10^{-7} 2. 45×10^{-7} 6. 60×10^{-5} 2. 61×10^{-3} 5. 39×10^{-6} 5. 75×10^{-7} 1. 28×10^{-4} 4. 94×10^{-6} 1. 39×10^{-5} 1. 17×10^{-6} Spleen 6. 91×10^{-9} 3. 17×10^{-8} 3.93 $\times 10^{-5}$ 2. 21×10^{-5} 3. 72×10^{-6} 1.02×10^{-6} 1. 79×10^{-8} 9.85×10^{-9} 2.81×10⁻³ 6. 43×10^{-7} 4. 61×10^{-8} 1. 15×10^{-4} Stomach organ Source 7.53×10⁻⁶ 3. 50×10^{-6} 4.42 $\times 10^{-8}$ 3. 37×10^{-9} 7.41 $\times 10^{-9}$ 3. 48×10^{-7} 2. 68×10^{-3} 2. 04×10^{-8} 2. 53×10^{-8} 3. 43×10^{-8} 1.61×10^{-8} 93×10^{-9} Testis ÷. 1. 71×10^{-8} 2.87×10⁻³ 4. 66×10^{-8} 1.83×10^{-7} 7. 58×10^{-6} 6. 36×10^{-6} 5. 35×10^{-9} 4. 02×10^{-7} 5. 15×10^{-8} 6. 64×10^{-8} 9. 22×10^{-8} 2. 29×10^{-8} Bladder 2.83 $\times 10^{-3}$ 6.64×10^{-9} 7.80 $\times 10^{-6}$ 5.37×10⁻⁸ 4. 11×10^{-8} 6. 58×10^{-6} 3.99 $\times 10^{-8}$ 3. 69×10^{-8} 1.33×10^{-8} 8. 66×10^{-8} 5. 72×10^{-6} 2. 14×10^{-4} Heart 4. 69×10^{-6} 3. 82×10^{-5} 2. 91×10^{-3} 2. 86×10^{-9} 9. 35×10^{-9} 2. 08×10^{-8} 3. 86×10^{-9} 7. 75×10^{-9} 6. 55×10^{-9} 1.04×10^{-8} 6. 86×10^{-9} 21×10^{-8} Brain сi 1.09×10^{-4} 2. 38×10^{-3} 2. 75×10^{-4} 5. 35×10^{-5} 1.81×10^{-7} 2. 19×10^{-6} 1.03×10^{-5} 2. 04×10^{-7} 3. 38×10^{-5} 4. 63×10^{-7} 6. 77×10^{-6} 4. 98×10^{-4} Sku11 $94 \mathbf{X} 10^{-4}$ 3. 03×10^{-3} 4. 42×10^{-4} 5. 98×10^{-4} 7. 84×10^{-4} 2. 88×10^{-4} 5. 60×10^{-4} 7.94 $\times 10^{-4}$ 3. 41×10^{-4} 3. 28×10^{-4} 5.87×10⁻⁴ 2. 57×10^{-4} Tissue 6. Target organ (a) Cs-137 Pancreas Stomach Spleen Tissue Brain Bladder Testis Kidney Heart Skul1 Liver Lung

JAEA-Review 2020-048

参考文献

- B. Asgharian, O. Price, G. McClellan, R. Corley, D. R. Einstein, R. E. Jacob, J. Harkema, S. A. Carey, E. Schelegle, D. Hyde, J. S. Kimbell, and F. J. Miller, Development of a Rhesus Monkey Lung Geometry Model and Application to Particle Deposition in Comparison to Humans, Inhal Toxicol. 24(13), 869-899, (2012).
- (2) S. Suzuki, S. Midorikawa, T. Fukushima, H. Shimura, T. Ohira, A. Ohtsuru, M. Abe, Y. Shibata, S. Yamashita, S. Suzuki, Systematic Determination of Thyroid Volume by Ultrasound Examination from Infancy to Adolescence in Japan: The Fukushima Health Management Survey, Endocrine Journal, 62 (3), 261-268, (2015).
- (3) ICRP, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, (2010).
- (4) ICRP, Adult Reference Computational Phantoms, ICRP Publication 110, Ann. (2009).
- (5) https://neuroimage.usc.edu/Digimouse.html.
- (6) A. Fedorov, R. Beichel, J. Kalpathy-Cramer et al., 3D Slicer as an Image Computing Platform for the Quantitative Imaging Network, Magnetic Resonance Imaging. 30(9):1323-41, (2012), http://www.slicer.org.
- (7) PHITS website, PHITS Utility tool: DICOM2PHITS, https://phits.jaea.go.jp/index.html.
- (8) ICRU REPORT 46: Photon, Electron, Proton and Neutron Interaction Data for Body Tissues (1992).

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

高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いて捕獲された野生ニホンザルの臓器(大腿筋、 腎臓、肝臓、脾臓、甲状腺、卵巣、子宮、精巣)、および胃内容物、腸内容物の放射性セ シウム濃度を測定した。それぞれの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(1)。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(図 3-8)。半減期 30 年の Cs-137 および半減期 2 年の Cs-134 も定量した。



図 3-8 半導体検出器による大腿筋の y 線スペクトル Cs-134 から放出されるいくつかのガンマ線のうち 605 keV (放出率 97.6%)、 796 keV (放出率 85.5%)、Cs-137 から放出される 662 keV (放出率 85.1%) を用いて放射能を定量した。

Cs-134 と Cs-137 の放射能比は、原子炉が停止した平成 23 (2011) 年 3 月 11 日に壊変 補正すると、0.94±0.09 となり、検出された放射性セシウムは福島原発事故事故由来で 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。また、採取日に対してプロットすると、物理学的半減期を除いてもわずか に減少傾向がみられた(図 3-9)。バラツキが大きい中であるが、2 年程度の環境半減期 が推定された。



各臓器の放射性セシウム濃度のなかで大腿筋の放射能濃度が最も高く、臓器により値が 異なった。放射性セシウムの蓄積の機構は、今回調査したニホンザルにおいても、これ までの研究¹⁾と一致していると考えられる。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 3-10)。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。

比放射能は、ニホンザルの採取地でほぼ同じ値をとった(図 3-11)。系統的にこれから さらに調査する必要はあるが、放射性セシウムの取り込みが、場所により限定されてい ることが示唆された。

今年度の結果から、[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 毎に行う必要があることが示唆された。[3] 各臓器の放射性セシウム濃度は、大腿筋中 の放射性セシウム濃度と良い相関があった。体内で放射性セシウム濃度は平衡に達して おり、環境中から取り込まれる放射性セシウムは一定であることが示唆された。[4] 放 射性セシウムの比放射能は、測定数が少ないが、採取地により一定の値を示した。この ことは、環境中で放射性セシウムは安定セシウムと一緒に動いていることが示唆される。 福島原子力発電所事故により環境中に沈着した放射セシウムは、事故直後は樹木や土壌 の表面に存在し、安定セシウムは土壌中や樹木内部に存在し、それぞれ別々に分布して いたが、事故から数年経過した現在では、野生ニホンザルをとおして見る限りでは、均 一化したとみられる。



大腿筋中¹³⁷Cs濃度 (Bq/kg)

図 3-10 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 3-11 大腿筋中放射性セシウム (Cs-137) 比放射能

参考文献

 T. Fukuda et. al., Distribution of Artificial Radionuclides in Abandoned Cattle in the Evacuation Zone of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, PLoS one 8, e54312 (2013).

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、本課題の目的にそった低い線量・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。本年度は、管理された被 ばく条件の元で実験用近交系マウス(A/J)を飼育し、各臓器や血漿中の酸化ストレスマー カーの変動を解析する試料を作成し、解析を担当する東北大学へ提供した。本項目で作成 した試料の解析結果は、野生ニホンザル試料の解析結果を検証するための科学的知見とし て利用されることに加えて、単調な被ばくモデル以外に廃炉作業の従事で想定される被ば く状況などの複雑化した被ばくモデルの影響もあわせて検証することが可能である。また、 短期的な被ばくと長期的な被ばく影響を比較することで、酸化ストレス状態に及ぶ影響が 長期間の被ばくによって適応反応を示すか否かを検討することも期待できる。

実験開始に先立ち、実験に供する 13 週齢から 16 週齢の 50 匹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。

必要マウスが整った時点で、本年度の計画に則り Cs-137 水(100 Bq/ml)を自由摂取さ せ続けた日数とマウスにおける臓器内線量の推移、ならびに、それぞれの測定時期におけ る内部被ばく線量率を求めるために、給水開始後 2.5、5、7.5、10、15 日目の各期日にお ける雌雄 5 匹ずつ合計 50 匹のマウスの筋肉、肝臓の Cs-137 蓄積量を測定した(表 3-6)。

給水日数	性別	肝臓	筋肉	肝臓	筋肉	肝臓	筋肉
	17,11	Bq∕g	Bq∕g	(µGy∕day)	(µGy∕day)	(mGy)	(mGy)
	ď	13.83	25.03	47.02	85.10	0.058	0.104
2.5		0.71	1.79	2.42	6.08	0.003	0.007
	우	13.53	12.98	46.00	44.13	0.056	0.054
		3.11	2.77	10.58	9.43	0.013	0.012
	ď	32.41	53.19	110.19	180.86	0.271	0.444
4.9		2.60	5.00	8.83	17.02	0.022	0.042
	우	16.35	32.38	55.57	110.10	0.136	0.270
		1.56	3.16	5.29	10.74	0.013	0.026
74	ď	32.01	61.65	108.84	209.61	0.401	0.771
/.4		4.24	6.07	14.41	20.65	0.053	0.076
	ð	29.47	67.28	100.20	228.74	0.492	1.123
0.0		3.26	3.46	11.10	11.77	0.054	0.058
9.0	ዮ	28.05	68.97	95.36	234.51	0.468	1.151
		4.16	4.19	14.16	14.24	0.07	0.07
	ď	38.59	104.03	131.20	353.69	0.966	2.603
147		3.29	17.89	11.18	60.83	0.082	0.448
14./	우	30.98	94.41	105.35	321.01	0.775	2.363
		1.53	7.31	5.19	24.84	0.038	0.183
						各下段	2 95%CI

表 3-6 Cs-137 水摂取日数に依存した内部被ばく線量・線量率

その結果、給水開始から15日目までの間に肝臓、筋肉の両組織内で直線的なCs-137の 増加が認められた。また、筋肉(雄104.0 Bq/g、雌94.4 Bq/g)では、肝臓(雄38.6 Bq/g、 雌31.0 Bq/g)の約3倍量のCs-137の平均蓄積量が認められた(図3-12)。





得られた各給水日数における肝臓、筋肉組織内 Cs-137 濃度(Bq/g)をもとに、その時点 での内部被ばく線量率を、PHITS コードを用いて算出した換算係数を用いて計算した。そ の結果を、表 3-6、図 3-13 に示す。それぞれの測定時点での線量率は、蓄積した Cs-137 濃 度に応じてほぼ直線的に増加している。



図 3-13 Cs-137 水給水日数における内部被ばく線量率 左:雄 右:雌

3.2-2 - 40 - 給水期間に比例して線量率が直線的に逓増していることから、線量率測定日までの積算 線量を求めるにあたり、近似曲線を求めて積分するかわりに、給水期日を底辺として線量 率(μGy/day)を高さとした三角形の面積を求める単純な以下の式より各線量率を測定し た日まで(給水期間)の内部被ばく積算線量を求めた(表 3-6、図 3-14)。

給水期間(日)×得られた線量率(μGy/day)×0.5

この結果から、マウスにおける一定濃度の Cs-137 水を摂取した場合の経時的な線量 (これまでの Bq ではなく Gy による線量)、線量率(µGy/day)を知ることができるように なった。なお、この一定濃度の Cs-137 水を摂取し続けた場合でも、18 週~20 週以後には Cs-137 量の増加が横ばいとなり、組織内での蓄積量は平衡状態になる。

今回得られた Cs-137 水自由摂取によるマウス体内での Cs-137 の Bq による経時的推移が、先の研究結果とほぼ同じことから再現性のある実験ができていると考えられる^{1,2)}。

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/0 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、多世代に渡っ て給水したマウス子孫で産仔数、性比に影響を与えないことが分かっている¹⁾。

なお、飼育途中における給水器の不具合で水没事故が発生したために 7.4 日目の雌のデ ータは欠値となっている。



図 3-14 Cs-137 水給水日数における内部被ばく積算線量 左:雄 右:雌

参考文献

(1) H. Nakajima, Y. Yamaguchi, T. Yoshimura, M. Fukumoto and T. Todo, Fukushima simulation experiment: Assessing the Effects of Chronic Low-dose Internal ¹³⁷Cs Radiation Exposure on Litter Size, Sex Ratio, and Biokinetics in Mice. J. Radiat. Res., 56, i29-i35, (2015). (2) H. Nakajima, Effects of Radioactive Cesium-containing Water on Mice, Low-Dose-Rate Radiation Effects on Animals and Ecosystem, Long-Term Study on the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident (Editors: Manabu Fukumoto), Springer Nature, 221-235, (2019), Print book ISBN: 978-981-13-8217-8 / eBook ISBN: 978-981-13-8218-5.

3.2.2 酸化ストレスマーカーの検出と骨髄影響解析

(MDA 解析試料調製方法の確立)

福島原発事故による低線量・低線量率放射線被ばくによって緒臓器の酸化ストレス状態 に及ぼす影響を検討するために、脂質過酸化分解生成物である MDA を酸化ストレスの指標 として検出する解析試料の調製方法を検討した。項目 3.2.3 で採取した臓器を、試料調製 直前まで-80 ℃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 100 mg 以下の小片を切り出した。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。 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、処理中の酸化を抑制し た。また、試料処理過程における脂質酸化を抑制するために 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、日本老化制御研究所) 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 ℃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、三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、組織 ブロック中に赤血球が高濃度に残る臓器では測定値に影響を及ぼす可能性がある。そこで 組織試料反応液からヘモグロビンを除去する工程を加えた。組織試料反応液に対して 1.3 倍量のブタノール(富士フイルム和光純薬)を添加し、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)を添加し、ボルテックス後に NaOH 画分を回収した。NaOH 画分の 0.25 倍量の 3.7 M リン酸(富士フイルム和光純薬)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たんぱく質量で補 正(µM/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100 倍量の BCA 試薬を混合して 37 ℃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、BSA を 用いた吸光度を用いて定量した。肝臓や脾臓のように血液が多く含まれている臓器ではへ モグロビンが十分に除去されずに MDA を示すスペクトルに影響がでることが確認された。 そこで、肝臓と腎臓では組織ブロックから切り出す組織重量を 30 mg 以下にすることでへ モグロビンを他の臓器試料と同様に除去できることがわかった。このため、MDA 解析用の 組織試料調製では、肝臓と脾臓は 30 mg 以下、その他の臓器については 30-80 mg の臓器を 用いて解析試料を作成することとした。

(SOD 解析試料調製方法の確立)

生体内の酸化状態を示す MDA は、放射線によって誘発される活性酸素種やラジカルによって増加する。スーパーオキシドアニオンは放射線によって誘発される活性酸素の一つであるが、スーパーオキシドジスムターゼ (SOD) によって過酸化水素への不均化反応が触媒され、活性酸素障害を軽減する。このため、組織内の SOD 活性を指標に緒臓器の抗酸化状態を調べることができる。令和元年度は、野生ニホンザルの臓器試料に最適化する SOD 解析試料調製法について検討した。

赤血球の影響を取り除くために、組織ブロックとして凍結保管されている臓器試料から 脱血する条件を検討した。約100 mgの肝臓、腎臓、大腿筋を切り出し、氷冷 PBS⁻に入れて 5分間の浸とうを複数回行った。腎臓と大腿筋は5分間の浸とう洗浄1回でほぼ脱血できた が、肝臓は少なくとも2回の浸とう洗浄が必要であった。このため、全ての臓器について 氷冷 PBS⁻による5分間の浸とう洗浄を2回繰り返すことで脱血処理を行うことにした。

脱血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(0.25 M シ ョ糖、10 mM トリス塩酸緩衝液; pH 7.4、1 mM EDTA)と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 ℃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。 SOD 活性を調べるために、組織解析試料を希釈しないオリジナルサンプルと、オリジナル サンプルを順次3倍希釈する一連の試料を作成し、SOD Assay kit (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 1U 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。

通常は希釈をしていないオリジナルの組織解析試料と反応させた場合に WST-1 ホルマザ ン生成量が最も少なくなるので、SOD 阻害率が最大となる。今回調整したニホンザル組織 解析試料では、軽度に希釈した場合に SOD 阻害率が最大となり、希釈していないオリジナ ル試料では軽度に希釈した試料の SOD 阻害率よりも低くなった。この結果は、試料調製で 使用した臓器部位に関わらず共通して確認された。SOD 阻害率が最大であった希釈倍率以 後は、希釈とともに徐々に SOD 阻害率が低下していたことから、オリジナルの組織解析試 料には SOD 活性を阻害する物質が混入しており、軽度に希釈すると阻害効果が抑制された ために SOD 阻害率が最大になったことが考えられた。

まず、ショ糖緩衝液成分の影響を検討するために、組織破砕を行っていないショ糖緩衝 液のみを本アッセイの反応液を用いて希釈し、WST1 ホルマザンの生成を調べたところ、希 釈の有無に関わらず同程度の吸光度が得られたことから、ショ糖緩衝液成分は SOD 反応を 阻害していないことを確認した。次に、大腿筋ホモジネートから作成した組織解析試料を 反応液で 2-4 倍希釈したものそれぞれを、希釈率 0 のオリジナルサンプルとし、それぞれ の系統で 3 倍ずつ希釈した解析試料を用いて SOD アッセイを行った。すると、組織解析試 料を 2 倍以上に希釈することによって、希釈率 0 で SOD 阻害率が最大となる曲線を作成す ることができた。このため、ニホンザル組織試料中に SOD 活性を阻害する物質が含まれて いるが、2 倍以上に希釈して使用することで SOD アッセイに適用できることが分かった。 ただ、4 倍希釈の試料では試料中の SOD 活性が低く、SOD 阻害率を十分に低下させることが できなかったため、SOD アッセイでは 2 倍希釈の組織ホモジネートが最適条件であると考 えられる。

(野生ニホンザルの臓器別 MDA 濃度解析)

本年度に確立した試料調製方法を用いて、野生ニホンザルの肺、心臓、肝臓、腎臓、脾 臓、膀胱、大腿筋の MDA 濃度を解析した。MDA 変動の傾向を調べるために、対照地域の2個 体、旧警戒区域の個体試料の中で被ばく量が高いことが予想された地域の 3-7 個体の緒臓 器から MDA 解析試料を調製した。また、本年度は項目 3.1.2 において臓器別線量評価体系 を構築中であることから、3.1.3 で測定した大腿筋の放射性セシウム濃度をもとに評価し た全身の内部被ばく線量率を指標に MDA 濃度の変動を検討した。今回の解析では、放射性 セシウム濃度の蓄積状況が異なる部位の臓器を選別しており、大腿筋が最も多く蓄積し、 腎臓が大腿筋の約半分、その他は膀胱を除いて大腿筋の 3-4 割の放射性セシウムが蓄積し ている。タンパク質量で補正した組織中 MDA 濃度と内部被ばく線量率との相関は 3 つに区 分される傾向が見られた。1 つ目は、内部被ばく線量率が上昇しても MDA 濃度に変動が見 られず、腎臓、大腿筋のように放射性セシウムが多く蓄積する臓器で観察される傾向であ った(図 3-15)。2 つ目の傾向としては、内部被ばく線量率の増加とともに MDA 濃度も上 昇し、肝臓と膀胱で観察された(図 3-16)。3 つ目の区分は内部被ばく線量率が増加する 一方で MDA 濃度が減少傾向を示し、肺、心臓、脾臓で確認された(図 3-17)。次年度以降 に解析数を増やすことによって、本年度得られた傾向について検証するとともに、本年度 未解析であった、比較的サイズの小さい緒臓器の MDA 濃度についても解析を始める予定で ある。

放射性セシウム飲水マウスから採取した血漿中 MDA 濃度の解析結果より、内部被ばく線 量・線量率が極めて低い範囲では抗酸化酵素活性が一過的に高まるために MDA 濃度が減少 し、その後は内部被ばくに依存して MDA 濃度が上昇する線量・線量率領域が存在し、これ 以上の内部被ばく線量・線量率領域では MDA 濃度が一定となるように、MDA 濃度が不規則 に変動する線量域があることを報告してきた。本年度の解析結果より、MDA 濃度の変動傾 向が 3 種類存在する可能性が示されたが、変動傾向の違いが臓器ごとの被ばく線量域を反 映した結果であることを考察するために、次年度以降に実施する臓器別被ばく線量評価結 果との相関を検討する予定である。また、3.1.1 の ESR 法による積算外部被ばく線量評価 体制が整備され、3.1.2 で示したように全身外部被ばく線量に対する緒臓器の比が整備さ れたことから、ESR 法による評価を進めることで外部被ばくによる MDA の変動に及ぼす影 響を評価することが可能になると期待される。



図 3-15 MDA 濃度に変動がなかった臓器



図 3-16 内部被ばく線量率の増加とともに MDA 濃度が上昇した臓器



図 3-17 内部被ばく線量率の増加とともに MDA 濃度が下降した臓器

3.2-8 - 46 -

3.2.3 野生ニホンザル試料アーカイブの構築

本課題では、協力関係にある自治体が有害鳥獣として駆除したあと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。特に対照地域の個体受け取り場所を1箇所増やし、個体を保管するための冷蔵庫を設 置することで受け取り個体の品質保持に努めた。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、旧警戒区域の全ての個体について、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や天候(令和元年度は捕獲 最盛期に台風 19 号が上陸した) などの要因で年度ごとに異なるが、本年度は 44 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。本年度に収集した個 体を含め、福島原発事故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588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、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、令和2年2月22日に東北大学東京オフィスにて研究分担者 全員と研究協力者が参加する成果報告会を実施した。令和元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次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2年2月22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合同カンファレンスを実 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の理 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。特に教員と学生が参加す る合同カンファレンスによって人材育成にも寄与した。本年度の成果のうち、ESR 法による 被ばく線量評価に関する論文と、マウスの内部被ばく線量率換算係数の構築に関する論文の 2報をそれぞれ国際誌へ投稿し、受理された。この他、著書2件、プロシーディング1件に より研究成果を公表した。また、世界防災会議 WBF2019において本課題の成果を含めた講演 を行い、世界に向けて積極的に成果の発信を行った。この他、大学院生の発表も含め、国際 会議・国内会議をあわせて4件の学会発表を行った。

4. 結言

この研究では、社会的関心があり、データが不足している低線量・低線量率領域の放射線被ば く影響について、旧警戒区域の野生ニホンザルを試料とする解析と、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、両者の評価結果が一定の相関を示すことを示した。ただ、 シミュレーションによる評価体制において改良すべき点も示され、次年度以降の課題を明確にし た。また、本課題で目指す臓器別の被ばく評価体制を構築した。野生ニホンザルの外部被ばくに おける全身と緒臓器の被ばく線量の比と、動物実験マウスにおける緒臓器の換算係数を決定した。 次年度以降は、線量評価の検証を行うとともに、実際にニホンザル、動物実験マウスの緒臓器で 被ばく線量評価が開始できる体制となった。

生物影響解析では、本課題の基盤となる野生ニホンザルの試料収集が例年と同様に順調に進ん でいる。あわせて、各種臓器試料で酸化ストレス状態を検討するための試料調製方法について、 本年度は抽出された課題を順次解決しており、次年度よりアーカイブ試料と新規に調整する試料 を用いて本格的な検討を開始できる体制となった。また、予備的検討により臓器ごとに酸化スト レスの誘発状態が異なる可能性が示されたことから、低線量・低線量率放射線被ばくによる標的 臓器を特定できることが期待される。

本年度は、線量評価グループと生物影響解析グループともに評価・解析方法を確立できたこと から、動物実験試料もあわせた次年度以降の成果によって、被ばく線量と生物影響の相関を雌雄 差なども考慮に入れて多面的な解析を目指していく。 This is a blank page.

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	名称	記号		
長さ	メートル	m		
質 量	キログラム	kg		
時 間	秒	s		
電 流	アンペア	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	モル	mol		
光度	カンデラ	cd		

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例			
AI 立 是 SI 組 立 単位	SI 組立単位			
名称	記号			
面 積 平方メートル	m ²			
体 積 立方メートル	m ³			
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s			
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2			
波 数 毎メートル	m ⁻¹			
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m ²			
比体積 立方メートル毎キログラム	m ³ /kg			
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m ²			
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m			
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ⁸			
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m ³			
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m ²			
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1			
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1			
(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度				

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体鱼	ステラジアン ^(b)	$sr^{(c)}$	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	-	s ⁻¹
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m ²	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60 s			
時	h	1 h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(π/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad			
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1 t=10^3 kg$			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表され						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J				
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ^{·27} kg				
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da				
天 文 単 位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m				

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 尾	属さないその他の単位の例
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$