平成26年度

原子力災害影響調査等事業

(放射線の健康影響に係る研究調査事業)

報告書

平成 27 年 3 月

公益財団法人 原子力安全研究協会

本報告書は、環境省の平成26年度原子力災害影響調査等事業に よる委託業務として、公益財団法人原子力安全研究協会が実施した 放射線の健康影響に係る研究調査事業の成果をとりまとめたもの です。

目 次

1. 事業の背	『景及び目的・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
2. 事業の実	ミ施内容・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・
2.1 新規研	究課題に関する公募の事務・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
2.2 継続研	究課題に関する事務・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
2.3 委員会	等の開催・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
2.3.1	第1回推進委員会」の開催・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
2.3.2	研究成果発表会」の開催・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
2.3.3	評価委員会」の開催・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
2.3.4	第2回推進委員会」の開催・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
2.4 研究計	画書(案)の作成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
2.5 研究報	告書の作成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6
2.6 平成 2	7年度の事務委任契約額案の作成・・・・・・・・・・・・・・ 6
3. 各研究刊	Fの報告・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・6
テーマ1:	放射線被ばく線量の評価に関する研究・・・・・・・・・・・・・・・ 7
1 - 1	歯を用いた包括的被ばく線量評価
	佐々木 啓一(東北大学大学院歯学研究科)
1 - 2	日本家屋におけるしゃへい係数及び屋内汚染に関わる調杏研究
1 2	吉田 浩子(東北大学大学院薬学研究科)
テーマ2:	放射線によろ健康影響の解明及び放射線以外の要因によろ健康リスクの
/ 1	低減を含めた総合的な健康リスクに関する研究・・・・・・・・・・ 34
2 - 1	低線量率放射線被ばくの健康影響ーインド・中国の高自然放射線被ばく地域
	住民の調査結果を中心として
	秋葉 澄伯(鹿児島大学大学院医歯学総合研究科)
2 - 2	細胞動態のシステマティックレビューと実験データ解析による低線量・低線
	量率における放射線がんリスクの描写
	甲斐 倫明(大分県立看護科学大学看護学部看護学科)
2 - 3	お射線の非がん影響の解明
	近藤 隆 (宮山大学大学院医学薬学研究部 (医学))
2 - 4	低線量率・低線量放射線被げくに上ろ組織幹細胞の放射線暗害の萎積に
	国する研究
	会大
2 - 5	低線量放射線は心血管疾事発症の原因と成りうるか?―動物実験による
2 0	
	1799
2 - 6	民外活動を制限された子供の放射線成受性変化に関する動物モデル研究
2 0	根土 茶(放射線医学総合研究所 放射線防護研究やシスー)
	コムフェーフェー (ルスオ) 1751 (ムーナーかい ロージリフロリアー ルスオ) 1757 (ウブリアコービー・シープ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

- 2-7 低線量率放射線長期被ばくによる生体影響の低減化 山内 一己(環境科学技術研究所生物影響研究部)
- 2-8 極低線量率放射線連続被ばくマウスを用いた健康影響解析 杉原 崇(環境科学技術研究所生物影響研究部)
- テーマ3:放射線による健康不安対策の推進に関する研究・・・・・・・・・ 268
 - 3-1 保健師による実際的な放射線防護文化のモデル開発・普及と検証:放射線防 護専門家との協働によるアクションリサーチ 麻原 きよみ(聖路加看護大学看護学部地域看護学分野)
 - 3-2 福島県川内村の帰村促進のための取り組み 浦田 秀子(長崎大学大学院医歯薬学総合研究科)
 - 3-3 地域特性を生かしたリスクコミュニケーターによる放射線健康不安対策の 推進

大野 和子 (京都医療科学大学医療科学部・放射線技術学科)

- 3-4 福島県における放射線健康不安の実態把握と効果的な対策手法の開発に 関する研究
 - 川上 憲人(東京大学大学院医学系研究科)
- 3-5 放射線測定と行動調査による子どもの線量低減化と健康不安の軽減に関する 研究

細野 眞(近畿大学医学部附属病院)

3-6 まるごと線量評価に基づく詳細なリスク分析に伴ったリスクコミュニケーションの確立

宮崎 真(福島県立医科大学医学部)

- 3-7 里山地域の生活・生産活動を支える放射線被ばくと里山資源汚染の実態調査 と動向予測研究
 - 原田 浩二(京都大学大学院医学研究科)
- 3-8 放射線による健康不安対策を実践する保健師・養護教諭のための教育プログ ラムの検討

川崎 裕美(広島大学大学院医歯薬保健学研究院)

3-9 リスクの多元性を考慮したリスクコミュニケーションの実施とそのあり方に 関する研究

中川 恵一 (東京大学医学部附属病院放射線科)

- 3-10 福島の乳幼児を原発事故の影響から守るための統合的支援システムの開発 氏家 達夫(名古屋大学大学院教育発達科学研究科)
- 3-11 原子力災害事故後の中長期的にわたる放射線ヘルスプロモーションの確立 に向けて~なみえまちからはじめよう。~

西沢 義子(弘前大学大学院保健学研究科)

- テーマ4:放射線被ばく線量の再構築・評価に関する研究・・・・・・・・ 589
 - 4-1 東京電力福島第一原子力発電事故における住民の線量評価に関する包括研究
 鈴木 元 (国際医療福祉大学クリニック)

4. 今	∲後の事業∽	、の提言・	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	69	4
------	--------	-------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---

1. 事業の背景及び目的

原子力災害からの福島の復興及び再生に関する施策の総合的な推進を図るための基本的 な方針として、平成24年7月に福島復興再生基本方針が閣議決定されたところであり、 国内外の英知を結集した放射線の人体への影響等に関する調査の重要性等について指摘さ れているところ。また、平成24年7月に公表された東京電力福島原子力発電所事故調査 委員会報告書や東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会報告書において も、継続的な健康影響に関する調査を行っていく必要がある旨の提言を行っているところ である。

本事業では、このような状況を踏まえて、平成24年度から放射線の健康影響に係る研 究調査を行っている。本事業では、昨年度までの内容を踏まえつつ、放射線の健康影響に 係る研究調査を推進することを目的としている。

2. 事業の実施内容

2.1 新規研究課題に関する公募の事務

環境省より公募された「平成26年度放射線の健康影響に係る研究調査事業」新規研 究課題について、公募の事務を行った。本年度は下記の4つのテーマについて公募が行 われ、公募時に提出された研究計画書を受領し、記載内容を確認した。公募テーマごと の応募件数を表 2.1-1 に示す。

【公募課題の内容】

(1) 放射線被ばく線量の評価に関する研究

今般の事故における被ばく線量評価として、現在、個人線量計による外部被ばく 線量の測定や、ホールボディカウンターによる内部被ばく線量の測定等が実施され ている。これらの取組みを補完し、一般住民の被ばく線量の評価に資する研究、測 定技術の改良開発による一般住民の被ばく線量評価に資する研究を行う。

(2) 放射線による健康影響の解明及び放射線以外の要因による健康リスクの低減を 含めた総合的な健康リスクに関する研究

放射線による健康影響については、広島・長崎の原爆被爆者に関する調査を初め とする疫学調査、動物実験等による放射線生物学に係る研究等により、これまで様々 な科学的知見の集積が行われており、これらの知見を踏まえて、一般住民の健康管 理を行う必要性や健康管理の内容の検討が行われている。こうした取組に資する極 低線量(10mGy 未満)及び低線量(10~100mGy)の放射線被ばくによる分子レ ベルの変化が個体レベルでの発がんにつながるのか否かを明らかにする研究や、生 活習慣等自然発がん頻度を修飾することが明らかである要因について放射線発がん への影響とその機構を解明する研究、福島県民健康管理調査等の既存の取組で指摘 されている課題の解決に資する研究を行う。

(3) 放射線による健康不安対策の推進に関する研究 放射線による健康影響、特に低線量被ばくの健康影響については、多様な意見が あることもあり、国民は健康不安を抱えている。健康不安に対応する上では、正確 かつ迅速な情報提供を行うとともに、個々の住民が有する健康不安の内容に適切に 対応する必要があることから、これらの取組をより一層適切に行うことに資する研 究を推進する。特に、放射線に対する健康不安の背景や原因に対し、一定の妥当性 を有するアプローチで対話を試みる研究や、健康に関する正確な情報に基づき、職 種横断的に取り組む健康不安対策について、福島県内の自治体と連携して住民の参 加を促しながら、総合的かつ客観的に評価する研究を行う。

(4) 事故後の住民の被ばく線量の包括的な把握に関する研究

放射線による健康影響を検討するためには、福島第一原子力発電所事故後の累積 被ばく線量を把握することが必要である。これまで、事故後の外部被ばく線量や内 部被ばく線量については様々な実測や推計結果が地域やグループ単位で報告されて いるところである。そこで、これらを網羅的に考慮の上、事故後の住民の被ばく線 量を包括的に把握する研究を推進する。なお、推計に際しては、「ヒトへの被ばく維 計に資する環境放出量推移と放出放射性物質の環境拡散プロセスの再構築」、「薬物 動態モデル」、ヨウ素等の短半減期核種も念頭においた「外部被ばく線量再構築」、 「内部被ばく線量再構築」等の分野について考察するものとし、原則としてこれら が関連する分野の専門家を研究グループに含むものとする。

	テーマ	件数
(1)	放射線被ばく線量の評価に関する研究	6
(2)	放射線による健康影響の解明及び放射線以外の	16
	要因による健康リスクの低減を含めた総合的な	
	健康リスクに関する研究	
(3)	放射線による健康不安対策の推進に関する研究	9
(4)	事故後の住民の被ばく線量の包括的な把握に関	2
	する研究	
		33

表 2.1-1 平成 2 6 年度新規研究課題応募件数

また、推進委員会(「2.3.1 「推進委員会」の開催」を参照)における審議の結果、平 成26年度新規研究課題として採択された課題については、研究採択者と事務委任契約 の締結等に関する事務を行った。なお、推進委員会での検討結果を踏まえ、研究課題応 募者に採用の可否、研究計画への反映等についての連絡文案を作成するとともに、契約 締結に先立って、積算された経費の内訳が妥当なものであるかの確認を行った。

事務委任契約締結後は、研究の進捗及び経費執行状況について、年間スケジュールに 基づき、確認を行った。進捗管理において、研究計画の変更申請への対応、学会等外部 発表に関する手続き等も実施した。

2.2 継続研究課題に関する事務

「平成24年度原子力災害影響調査等事業(放射線の健康影響に係る研究調査事業) (以下「平成24年度事業」という。)」で採択された11人の研究採択者及び「平成25年度原子力災害影響調査等事業(放射線の健康影響に係る研究調査事業)(以下「平成25年度事業」という。)」で採択された4人の研究採択者に対し、評価委員会等が指摘した事項、本年度契約額等を踏まえた最終研究計画書の提出を指示するとともに、研究 採択者と受託者間の事務委任契約の締結等に関する事務を行った。なお、契約締結に先立って、評価委員会等の指摘にきちんと回答しているか、積算された経費の内訳が妥当なものであるかの確認を行った。

なお、平成24年度事業及び平成25年度事業で採択された研究の実施にあたっては、 仕様書別紙「再委任等に関する内容」により再委任した。

事務委任契約締結後は、研究の進捗及び経費執行状況について、年間スケジュールに 基づき、確認を行った。進捗管理において、研究計画の変更申請への対応、学会等外部 発表に関する手続き等も実施した。

2.3 委員会等の開催

本事業を進めるため、外部の専門家7名で構成した「推進委員会」、外部の専門家5名 で構成した「評価委員会」を設置した。推進委員会委員構成を表2.3-1に、評価委員会 委員構成を表2.3-2に示す。

委員	所属・役職
稻葉 次郎	公益財団法人放射線影響協会研究参与
梅田 泉	国立がん研究センター東病院
	機能診断開発分野 ユニット長
遠藤 啓吾	京都医療科学大学学長
木下 冨雄	公益財団法人国際高等研究所フェロー
	(京都大学名誉教授)
酒井 一夫	独立行政法人放射線医学総合研究所 特別上席研究員
○佐々木康人	湘南鎌倉総合病院附属臨床研究センターセンター長
柴田 義貞	公立大学法人福島県立医科大学
	放射線医学県民健康管理センター特命教授

表 2.3-1 推進委員会委員構成

○:委員長

委員		所属・役職
○遠藤	啓吾	京都医療科学大学学長
緒方	裕光	国立保健医療科学院
		研究情報センターセンター長
小田	啓二	神戸大学大学院海事科学研究科教授
神田	玲子	独立行政法人放射線医学総合研究所
		放射線防護研究センター上席研究員
木下	冨雄	公益財団法人国際高等研究所フェロー
		(京都大学名誉教授)

表 2.3-2 評価委員会委員構成

○:委員長

2.3.1 「第1回推進委員会」の開催

「第1回推進委員会」を平成26年7月11日に(公財)原子力安全研究協会地下会 議室にて開催した。上記「2.1新規研究課題に関する公募の事務」で公募された研究課 題に関し、評価方法について検討を行うとともに、採択の可否等について審議を行った。 なお、各研究課題の研究計画書については、推進委員に事前に送付し、事前評価とコメ ントの依頼を行った。事前評価とコメントについては、委員会開催前に集計・取りまと めを行った。これらの結果については、資料として配付し、審議の際に用いた。審議の 結果、以下の通り7件の研究を採択した。

<新規に採択された研究課題及び主任研究者>

- (1) 放射線被ばく線量の評価に関する研究
 - ・該当なし
- (2) 放射線による健康影響の解明及び放射線以外の要因による健康リスクの 低減を含めた総合的な健康リスクに関する研究
 - ・極低線量率放射線連続被ばくマウスを用いた健康影響解析
 杉原 崇(公益財団法人環境科学技術研究所)
- (3) 放射線による健康不安対策の推進に関する研究
 - ・里山地域の生活・生産活動を支える放射線被ばくと里山資源汚染の実態 調査と動向予測研究
 - 原田 浩二 (京都大学大学院医学研究科)
 - ・放射線による健康不安対策を実践する保健師・養護教諭のための教育 プログラムの検討
 - 川崎 裕美(広島大学大学院医歯薬保健学研究院)
 - リスクの多元性を考慮したリスクコミュニケーションの実施とその あり方に関する研究

中川 恵一(東京大学医学部附属病院放射線科)

- ・福島の乳幼児を原発事故の影響から守るための統合的支援システムの開発
 氏家 達夫(名古屋大学大学院教育発達科学研究科)
- ・原子力災害事故後の中長期的にわたる放射線ヘルスプロモーションの
 確立に向けて~なみえまちからはじめよう。~
 西沢 義子(弘前大学大学院保健学研究科)
- (4) 事故後の住民の被ばく線量の包括的な把握に関する研究
 - ・東京電力福島第一原子力発電事故における住民の線量評価に関する包括研究
 鈴木 元(国際医療福祉大学クリニック)

2.3.2 「研究成果発表会」の開催

平成26年12月3日、17日の2日間、「研究成果発表会」を開催し、平成27年度 に継続を希望する各研究課題について、主任研究者による本年度途中までの研究成果の 発表を行った。さらに、平成27年2月10日、12日の2日間、平成26年度で終了 予定となっている研究課題について、主任研究者等が当研究調査事業における研究成果 について最終発表を行った。

開催場所については、全て(公財)原子力安全研究協会地下会議室とした。

評価委員は、この研究成果発表会に参加し、各研究成果を評価した。また、参加を希望した推進委員は、オブザーバとして参加した。なお、12月17日については、線量評価等に関する専門的知見を提供し、評価結果に反映させるため、百瀬琢麿氏(日本原子力研究開発機構東海研究開発センター)が臨時委員として参加した。

各日の発表終了後には、その日の研究成果発表についてまとめ及び評価を行った。得 られたコメントについては、各研究課題の主任研究者に伝え、研究報告書及び平成27 年度研究計画書への参考としていただくとともに、評価結果については、評価委員会

(「2.3.3 「評価委員会」の開催)を参照)における、平成27年度研究計画書(案)を 評価する際の参考とした。

2.3.3 「評価委員会」の開催

「評価委員会」を平成27年1月20日に(公財)原子力安全研究協会地下会議室に おいて開催し、後述の平成26年度研究計画書(案)(「2.4研究計画書(案)の作成」 を参照)の評価を行った。

各研究課題の平成26年度研究計画書(案)については、評価委員に事前に送付し、 事前評価とコメントの依頼を行った。事前評価とコメントについては、集計・取りまと めを行い、評価のための参考とした。また、前述のとおり、「研究成果発表会」での評価 結果についても、評価のための参考とした。なお、「評価委員会」での評価結果について は、後述の「第2回推進委員会」(「2.3.4 「第2回推進委員会」の開催」を参照。)にお いて資料として配付し、審議の際に用いた。

2.3.4 「第2回推進委員会」の開催

「第2回推進委員会」を平成27年2月6日に(公財)原子力安全研究協会地下会議

室において開催し、「評価委員会」での評価結果を踏まえ、来年度継続予定の研究課題に ついての継続の可否、経費の配分額について検討を行った。

その結果、「(2) 放射線による健康影響の解明及び放射線以外の要因による健康リス クの低減を含めた総合的な健康リスクに関する研究」のうちの1件については、来年度 継続しない旨が決定された。経費の配分額については、評価委員会・推進委員会による コメント内容、評価結果、経費の内訳等を勘案し、研究費を適宜調整することとした。

また、平成27年度事業における新規研究課題の公募テーマについても検討を行い、 今後の研究の方向性等に関する基本方針を以下のように決定した。

2.4 研究計画書(案)の作成

平成27年度に研究の継続を希望する研究課題の主任研究者に対して、平成26年1 2月3日、17日に開催した「研究成果発表会」でのコメント等をとりまとめて研究者 に送付し、平成27年度研究計画書(案)を作成するよう依頼した。平成27年度研究 計画書(案)については、内容の確認及び取りまとめを行い、「評価委員会」、「第2回 推進委員会」において、審議を行った。

2.5 研究報告書の作成

平成27年2月10日、12日に開催した「研究成果発表会」でのコメント等をとり まとめて平成26年度に研究を終了した研究者に送付し、最終報告書への反映を依頼し た。また、平成27年度に研究を継続する研究者も含め、各研究課題の主任研究者に対 し、平成26年度研究報告書の作成・提出を依頼し、全ての研究班から研究報告書を受 領し、取りまとめた。

2.6 平成27年度の事務委任契約額案の作成

「研究成果発表会」での評価及び提出された平成27年度の研究計画書(案)についての「評価委員会」、「推進委員会」による評価結果を踏まえ、平成27年度において研究採択者が事務委任契約に基づいて研究を継続する際の適正な契約額案を作成した。

3. 平成26年度研究報告書

各研究課題の平成26年度研究報告書を以下に示す。

テーマ(1) 放射線被ばく線量の評価に関する研究

- 1-1 歯を用いた包括的被ばく線量評価 佐々木 啓一(東北大学大学院歯学研究科)
- 1-2 日本家屋におけるしゃへい係数及び屋内汚染に関わる調査研究 吉田浩子(東北大学大学院薬学研究科)

歯を用いた包括的被ばく線量評価

佐々木 啓一 (東北大学大学院・歯学研究科長)

研究要旨

本研究は、福島県に在住する乳幼児を中心に永久歯列への交換期に脱落する乳歯を収集し、 それら乳歯に取り込まれた放射性物質や、放射線被ばくにより歯質中に発生・保持されたラジ カルを測定することにより、個体の内部被ばく量や外部被ばく量を包括的に推測しようとする 新しい試みである。本年度においては、福島県を中心に、対照となる地域からの歯も含め、2800 本を超える乳歯を収集した。これまでに収集した乳歯は、いずれも3.11以前に形成された歯で、 内部被ばくという点では基本的には原発事故の影響は受けていない歯と考えられる。平成 26 年度における本研究では、これら乳歯についてイメージングプレートを用いたオートラジオグ ラフィーと、Sr-90、Cs-134、Cs-137の定量を行い、内部被ばく量を評価するための基礎データ を得た。得られた結果は以下の通りである。

内部被ばく量評価の基準となる歯質中の放射性物質の量は、イメージングプレートによる検 討、Sr-90の測定結果ともに、福島県と他県(新潟県、熊本県、静岡県、北海道)の間に現時点 では差は認められなかった。また、福島県内の主要4都市(福島市、いわき市、郡山市、会津 若松市)から収集した乳歯の間にも特に差は認められなかった。今年度までに収集した歯はい ずれも3.11以前に形成された乳歯なので、今年度に得られた結果は、次年度以後に収集可能と なる3.11以後に形成された歯の測定値の対照値として重要な意味を持つと考えられる。継続し て歯の収集を行い、データを集積して行くことが必要である。

キーワード:内部被ばく量、外部被ばく量、乳歯、放射性ストロンチウム、放射性セシウム 福島第一原発事故

研究協力者	大野 欨	奥羽大字歯字部 歯字部長	
	廣瀬 公冶	奥羽大学歯学部 教授	
	木野 康志	東北大学大学院理学研究科 准教授	
	岡 壽崇	東北大学高度教養教育・学生支援機構	助教
	関根 勉	東北大学高度教養教育・学生支援機構	教授
	福本 学	東北大学加齢医学研究所 教授	
	高橋 温	東北大学病院 助教	
	細井 義夫	東北大学大学院医学系研究科 教授	

I 研究目的

福島第一原子力発電所事故により、環境中に多量の放射性物質が放出された。それらがわれわ れの健康にどのような影響を与えるかについて理解するためには、各個体がどのような被ばく状 態にあるのかについての理解が不可欠である。放射性物質に対する被ばく状況を推測するこれま での方法としては、空間線量率や行動調査からの推定や、ホールボディカウンターによる計測が 行われている。しかし行動記録の不正確さや、半減期の短い核種や放射線の種類によっては測定 が困難な場合があり、内部被ばく量や外部被ばく量を包括的に評価する方法が求められている。

骨や歯などの硬組織、特に歯は、その形成過程において放射性ストロンチウム(Sr)やセシウム(Cs)を取り込み、それらは歯が脱落するまで代謝されることなく蓄積性に歯質中に保持されている。従って、歯の中に保持されている放射性同位元素の量は、乳歯が形成される乳幼児期(放射線被ばくに対して最も感受性が高い時期)の内部被ばくの状況を忠実に反映している。また、放射線被ばくにより、歯質中に(炭酸)ラジカルが発生し、それらも生涯にわたり蓄積性に歯質中に保持されることから、そのラジカルを電子スピン共鳴法(ESR法)により測定することにより、過去の外部被ばく量を推測することも可能である。本研究は、歯が持つこのような非代謝性、記録性に着目し、これを個体の内部被ばく量・外部被ばく量の指標として積極的に活用しようとするものである。

本研究の平成 26 年度の具体的目標は、福島第一原子力発電所事故被災地およびその周辺地域に 居住する幼小児を中心に、永久歯列への交換過程で脱落する乳歯や、歯科治療により抜去される 歯を十分なインフォームドコンセントのもとに収集し、それらの歯に蓄積した放射性物質を分析 評価することである。これまでの WHO などの報告によれば、今回の原発事故により放出された 放射性物質の量は、過去の大気圏核実験やチェルノブイリ原発事故に比較すると少ないとされる ことから、被ばく量も多くないことが予測されるが、このことを科学的データとして被災者・国 民に提供することは、大きな社会的意義がある。また、本研究で得られる成果は、今回の福島第 一原発事故による放射線被ばくの影響を評価するための基礎資料を国際的に提供するものとなる。

Ⅱ 研究方法

1. 原発事故被災地および関連地域からのヒト乳歯の収集とアーカイブ化



乳歯収集事業概略図

平成26年1月20日より歯の収集を開始

前年度のフィージビリティスタディーに引き続き、歯の収集を実施した。歯の収集は福島県歯 科医師会、奥羽大学、東北大学歯学研究科の共同により実施した。収集に先立ち、「ヒト歯に含有 される放射性物質測定委員会」を設立し(平成25年11月5日)、この委員会は歯の収集に関する ガイドラインを策定し、これを関連機関の倫理委員会へ申請、承認を受けた(倫理面への配慮の 項参照)。当該委員会は、承認されたガイドラインに基づき、協力歯科医院、病院歯科、関係医療 機関に対して歯の収集を依頼し、収集したすべての歯は東北大学歯学研究科の環境歯学研究セン ター内に設置された「乳歯バンク」に登録した。同センターでは、目的に対応した短期、中期、 長期的なデータ保存が可能な管理体制を構築し、歯の提供者に関する個人情報はセンター内で厳 密に管理し、守秘する体制を整えた。歯の収集事業の概略は図1に示す通りである。

歯の収集は、福島県内の各地を中心として行った。また、その対照(コントロール)となる地 域からの歯も必要となるため、原発事故による放射線の影響が軽微ないし無視できると想定され る地域からの乳歯の収集も併せて行った。具体的には、熊本県、静岡県、新潟県、北海道の各県 歯科医師会や歯科医療機関に対して協力を依頼し、これらの地域からの歯の収集を行った。

収集した歯については、以下の手順によりアーカイブ化を行い、保守・保管した。

- (1) 基本情報の記録・ファイル化(氏名、年齢、男女別、震災時住所、現住所・連絡先、関係 歯科医院など)
- (2) 歯の鑑別(歯種の同定、部位の同定)
- (3) 歯の洗浄・ブラッシング、充填物・カリエスの有無、歯根の吸収程度の観察
- (4) 写真撮影(唇面、咬合面、遠心面)
- (5) 鍵付き保管庫に保管 (管理責任者のみがアクセス可能)

(倫理面への配慮)

本調査研究で遂行する乳歯の収集方法から結果の開示に至るまでの一連の過程については、東 北大学大学院歯学研究科研究倫理専門委員会による承認をすでに得ている(平成25年1月31日、 承認番号23·19)。また、研究グループにおける乳歯収集・被ばく線量測定に関する倫理面での共 通認識ならびに住民への配慮をより徹底させるために、福島県歯科医師会および奥羽大学におい ても倫理委員会での審議を経、承認を得ている(福島県歯科医師会倫理委員会、平成25年12月 17日承認および奥羽大学倫理審査委員会、平成26年3月18日承認)。乳歯収集の過程や研究結 果から得られる個人情報は連結可能匿名化し、連結表は主任研究者及び疫学解析責任者(東北大 学歯学研究科小坂教授)のみが鍵を持つ戸棚で厳重に保管している。また得られた測定値の被験 者への伝達に当たっては、結果が適切に理解されるよう最大限の注意を払うことに留意する。関 係者の情報管理を徹底するとともに、研究機関と福島県歯科医師会が定期的に協議を行い、必要 に応じて、関係自治体とも協議することとしている。

2. ヒト歯に含まれる放射性物質の分析・評価

(1) イメージングプレート(IP) を用いた歯質中放射性物質含有量のスクリーニング

イメージングプレート(IP)上に収集歯を載せ、1か月間露光(露曝)させて対象歯のオート ラジオグラフを作成した。IPの露光は、厚さ5cmの鉛ブロックで作成した鉛箱の内部を、さらに 厚さ1cmの鉄板で覆った遮蔽箱の中で行い、環境放射線の影響を極力排除した低バックグラウン ド環境下で行った。IPは、BAS-MS 2040(20×40cm)(富士フィルム社製)を、読み取り装置は フロオル・イメージアナライザー FLA-7000(富士フィルム社製)を使用し、IPの発光強度を IP 画像読み取りソフト(Image Quant TL Ver.8.1、GE Healthcare 社製)を用いて QL 値(Quantum Level; IP 読み取り装置で読み取った発光量を16 ビットの濃度階調(65536 階調)に変換した値)として 測定した。また、K-40を0~1000mBq/g含むKCL基準尺を作成し,K-40濃度とQL 値の間に直 線的な比例関係があることを確認したのち、このKCL基準尺を標準試料としてどのIPにも入れ、 使用 IP や測定時期の違いによる測定値のバラツキを補正した。 (2) 歯質中放射性セシウムとストロンチウムの測定

本研究グループでは福島第一原発事故の被災地、警戒区域内において、過去3年間において、 ウシ、サル、野ネズミ、ブタ等の多数の被災動物から歯を採取し、その中に含まれる放射性物質 の測定を行ってきた。これまでの研究から、ウシや野生ニホンザルなどの被災動物の歯の中には γ線放出核種として Cs-134、Cs-137 を、またβ線放出核種として Sr-90 を検出しており、これら 放射性同位元素の歯質中線量は動物が棲息する環境中の空間線量や土壌中線量と比例することも 確認している(平成25年度におけるフィージビリティ研究)。

ヒト乳歯についても Sr-90 や Cs-134、Cs-137 を対象核種として線量測定を行った。Sr-90 につい ては、灰化した試料について、発煙硝酸法により大量に共存する Ca から Sr を分離・抽出し、さ らに、Cs、Ra、Y 等の放射性核種を BaCrO₄や Fe(OH)₂沈殿法により化学分離したのち、低バッ クグラウンド 2π ガスフローGM 管により測定した。Cs-134、Cs-137 については粉砕した歯試料に ついて高感度ゲルマニウム半導体検出器により測定した。

Ⅲ 研究結果

1. 原発事故被災地および関連地域からのヒト乳歯の収集とアーカイブ化

福島県を中心に全国各地よりヒト乳歯の収集を行い、2015年3月1日現在で、2800本を超える 乳歯を収集した。その詳細を図2および図3に示す。福島県から収集した乳歯が3分の2を超え るが、新潟県、静岡県、熊本県、北海道の各県歯科医師会の協力を得て、福島県の対照となる乳 歯を収集した。福島県内においては、福島市、郡山市、いわき市等の人口が多い都市から多くの 歯が収集されている。





図 3

2. ヒト歯に含まれる放射性物質の分析・評価

2-1. イメージングプレートを用いた歯質中放射性物質含有量のスクリーニング

図4の上段にはヒト乳歯200本の、IPを用いたオートラジオグラフを示してある。下段は、用 いた乳歯の試料標本のディジタイジング画像で、上段のオートラジオグラフ上に正確に重ね合わ せて各乳歯のROI(関心領域)を決定するために用いている。左端の1列はKCLを用いた基準尺 (通常、0-1000mBq/gの放射能範囲)で、その隣の1列と中央付近の2列にはバックグラウンド 計測用の円形領域が設けてある。他の列には乳歯の唇側面を IP 側に向けて乳歯が配列させてある。



基準尺の KCL の Bq 値と測定した QL 値(Quantum Level)の間にはどの IP においても極めて高い相関と再現性が見られるので(図5にその1例を示す)、この基準尺をどの IP にも設置し、使用する IP 間の感度の違いや季節によるバックグラウンドの変動を補正した。

図5



図6には、福島県内から収集した200本の上顎切歯(AおよびB)をIP上で1か月間露光させ、 歯質中に含まれる放射性物質のスクリーニングを行った結果を示した。福島県内から収集した切 歯の分布は正規性を示し(左図)、また、県内の主要4都市間(福島市、郡山市、いわき市、会津 若松市)の歯質中放射性物質の濃度(QL値)にも、統計学的な差は認められなかった。



福島県内より収集したヒト乳歯(上顎A&B) 200本のQL値の分布

いずれの歯も3.11以前に形成されており、都市間に差は認 められない。



図 7 上段には、200 本の乳歯についてその QL 値を県別に比較した結果を示してある。現在までに収集されている歯は、いずれも 3.11 以前に形成されたものであり、県間に有意の差は認められなかった。

2-2. Sr-90、Cs-134、Cs-137の定量

図7の下段には、乳臼歯(DおよびE)を県別、あるいは福島県内の都市別に8-10本単位でま とめ、その中に含まれるSr-90とCs-134、Cs-137の測定を行った結果を示してある。どの歯サン プルについても48時間の測定において有意のCs-134、Cs-137は検出されなかった。一方、Sr-90 は、どのサンプルからも検出され、その量はおよそ0.2-0.4mBq/g ash の範囲にあった。これらの 値はどのサンプルにおいても計測誤差を越えており、検出限界を超えた値であることが確認され た。また、県間、都市間においても計測誤差を越えた違いは特に観察されなかった。

IV 考察

今年度に収集され、測定対象となった歯はいずれも 3.11 以前に形成された歯であり、形成期に 歯に取り込まれる放射性物質の量には地域差がないことは当初から予測された。IP によるスクリ ーニングや放射性 Sr、Cs の測定においてもそれらが裏付けられる結果が得られた。今回の原発事 故とは直接関係していないと考えられるコントロール地域(熊本県、北海道、静岡県、新潟県な ど)の乳歯からも微量の Sr-90 (0.25-0.41 mBq/g-ash)が検出されたが、そのレベルも福島県内の レベルと特に変わりはなく、どちらも過去の大気圏核実験に由来するものと推測される。今回の 原発事故の影響を評価するためには次年度以降に収集可能となる 3.11 以降に形成された歯の分析 が大きな意味を持つことになると考えられるが、今年度に得られた結果は、その基礎データとな るもので、今後の研究に重要な意味をもつと考えられる。

歯からは、内部被ばくのみならず、ESR 法などにより、外部被ばくの状況も把握できる可能性 もある。本研究では示していないが、年間の被ばく量が 10-15mGy と推測される南相馬の被ばく ニホンザルの歯からもコントロールザルに比べて十分に差のある ESR シグナルを検出できると

14

いう結果も得ている。歯質中の放射性物質やラジカルの測定は、個体の内部被ばく量、外部被ば く量を推測する上で有用な情報を提供し得ると考えられる。

V 結論

平成 26 年度においては、福島県内を中心に、対照となる地域からの歯を含め、2800 本を超え る乳歯を収集した。それら乳歯についてイメージングプレートを用いたオートラジオグラフィー 、歯質中 Sr-90 と Cs-134、Cs-37 の定量を行った。その結果、内部被ばく量評価の基準となる歯質 中の放射性物質の量は、福島県と対照県の間に現時点で差は認められないことが確認された。ま た、福島県内の主要都市間にも差は認められなかった。今年度までに収集した歯はいずれも 3.11 以前に形成された乳歯なので、今年度に得られた結果は、次年度以後に収集可能となる 3.11 後に 形成された歯の測定値の対照値として重要な意味を持つと考えられる。継続して歯の収集を行い 、データを集積することが必要である。

VI 次年度以降の計画

- (1) 福島県を中心としたヒト歯の収集とバンク化の継続的実施
- (2) 収集した歯の線量評価(内部被ばく量の評価)
- ・IP イメージングプレートによる歯質中放射性物質濃度のスクリーニングとグレード化
- ・地域、年齢、年代、歯種等を基準とした放射性 Cs、Sr 濃度の測定(必要に応じて個人レベルで 実施)

現在までの研究状況

「学会発表」

- 福島原発事故被災牛の血漿生化学検査と病理解析による被ばく線量評価 川角 浩、平河 泰子、木野 康志、関根 勉、桑原 義和、鈴木 正敏、井上 和也、高橋 慎太郎、山城 秀昭、阿部 靖之、磯貝 恵美子、篠田 壽、新井 敏郎、福本 学 日本放射線影響学会題 57 回大会 平成 26 年 10 月 1 日—3 日(鹿児島)
- 2) 被ばく線量評価における歯の重要性

篠田 壽

日本放射線影響学会題 57 回大会 平成 26 年 10 月 1 日—3 日(鹿児島)

3) 福島第一原発事故被災動物とその環境中の放射能測定

木野 康志、小荒井一真、入澤 歩、林 剛平、鈴木 正敏、阿部 靖之、山城 秀昭、福田 智一、磯貝 恵美子、小林 仁、岡 壽崇、関根 勉、篠田 壽、福本 学

日本放射線影響学会題 57 回大会 平成 26 年 10 月 1 日—3 日 (鹿児島)

- 4) 福島第一原発事故に伴う旧警戒区域内の被災動物歯質中放射性 Sr の比放射能測定
- 小荒井一真、高橋 温、鈴木 敏彦、清水良央、千葉 美麗、小坂 健、
- 福田 智一、磯貝 恵美子、岡 壽崇、福本 学、篠田 壽

日本放射線影響学会題 57 回大会 平成 26 年 10 月 1 日—3 日 (鹿児島)

5) 福島第一原発事故被災ニホンザルの全身骨組織への放射性物質取り込み

清水良央、鈴木 敏彦、高橋 温、千葉美麗、小坂 健、福田 智一、小荒井一真、木野 康
 志、関根 勉、磯貝 恵美子、篠田 壽、福本 学
 日本放射線影響学会題 57 回大会 平成 26 年 10 月 1 日—3 日(鹿児島)

6)福島第一原発事故による被災牛の硬組織に取り込まれた放射性物質の濃度と分布様相 千葉美麗、清水良央、高橋 温、小荒井一真、小坂 健、福田 智一、関根 勉、磯貝 恵美 子、福本 学、篠田 壽

日本放射線影響学会題 57 回大会 平成 26 年 10 月 1 日—3 日 (鹿児島)

7) 歯を用いた野生サルの外部被曝量の測定 - E S R 法を用いた検討-高橋 温、木野 康志、鈴木 敏彦、清水良央、千葉美麗、福田 智一、磯貝 恵美子、

関根 勉、漆原 佑介、福本 学、篠田 壽

日本放射線影響学会題 57 回大会 平成 26 年 10 月 1 日—3 日 (鹿児島)

Dosimetric assessment of radiation exposure using teeth

Keiichi Sasaki

Division of Advanced Prosthetic Dentistry, Tohoku University Graduate School of Dentistry

Key words: exposure to radiation; deciduous teeth; radioactive Sr; radioactive Cs; Fukushima-daiichi nuclear power plant accident

Abstract

Four years have passed since the Fukushima-Daiichi -Nuclear-Power-Plant (FDNPP) accident. Among the various radionuclides released following the FDNPP, Sr-90 and Cs-137 are now major contributors to environmental contamination. These radionuclides are incorporated into teeth during the process of calcification and remain there until the tooth falls out or is extracted. Because deciduous teeth are formed when children are thought to be most sensitive to radiation, we hypothesized that radionuclide levels in deciduous teeth could serve as an index of internal exposure to radiation during the growth period.

Exposure to radiation also generates stable carbonic radicals that accumulate and remain in the teeth for extremely long periods of time. Therefore, the levels of these radicals can serve as an index of an individual's external exposure to radiation.

To assess both internal and external radiation, we started collecting deciduous teeth at the beginning of 2014 from children in the Fukushima area and control area where the effects of the FDNPP accident were considered negligible. Approximately 2,800 deciduous teeth have been collected through February 2015. We continue to analyze these teeth using autoradiography with imaging plates, physicochemical determination of radionuclides (Sr-90, Cs-137, and Cs-134), and carbonic radical quantification with electron spin paramagnetic resonance (ESR).

The deciduous teeth collected so far were formed before March 2011, so we have not found any significant differences in tooth radionuclides levels between those collected from Fukushima and control Prefectures (Niigata, Shizuoka, Kumamoto, and Hokkaido), or among the teeth collected from four major cities in Fukushima Prefecture (Fukushima, Kohriyama, Iwaki, and Aizuwakamatsu). These findings might be important control data for future studies on teeth formed after March 2011, which will be collected in the next several years.

ESR quantification of carbonic radicals seemed to be useful for teeth exposed to high radiation doses (e.g.,>100mGy). However, the technique was not sensitive enough for exposure to lower radiation doses (e.g., <50mGy). We are currently optimizing the technique accurately quantify low amounts of radicals in the teeth.

In this 2014 annual report, we discuss the results obtained to date and address the problems associated with dosimetry using teeth.

日本家屋におけるしゃへい係数及び屋内汚染に関わる調査研究 吉田浩子(東北大学大学院薬学研究科 ラジオアイソトープ研究教育センター・講師)

研究要旨

本研究では、福島第一原子力発電所事故後の住民の外部被ばく線量評価をより正確に行うた めに、しゃへい(低減)係数及び代表的範囲について原発事故被災地である東北地方の日本木 造家屋での適正な数値を取得するとともに、屋内汚染の実態を把握することを目的とする。空 間線量率を用いて外部被ばく線量を評価する際に、屋内の空間線量は通常住家外の空間線量に しゃへい(低減)係数(住家内/外空間線量率比)を乗じて求める。滞在時間が長い住家内の 空間線量の算出にあたっては、しゃへい(低減)係数が適正であるかどうかは特に重要となる。 政府はこれまで年間被ばく線量の推定にあたっては、国際原子力機関によるIAEA-TECDOC -225「核施設の放射線事故へのオフサイト対応プラニング」及び1162「放射線緊急事態の評価 および対応のための一般的手順」に示される1階および2階建ての木造の家におけるしゃへい係 数0.4(代表的な範囲0.2-0.5を用いてきた。しかし、これらの数値は事故直後の緊急時に適用さ れるものであり、屋内の沈着が無視できる場合にだけ適切であるとされている。また、米国オ ークリッジでのほぼ平坦な平地での実験値を元にしているため、背面や側面に山の斜面を持つ 住家が多い避難指示区域では適切ではない可能性がある。そこで、本研究では、以下を評価す ることとした。1) 避難指示区域の住家で除染前の実態調査に基づくしゃへい(低減)係数 2) 除染後の住家でのしゃへい(低減)係数 3)屋内汚染の実態調査に基づくしゃへい(低減)係 数への影響

3年の研究期間中に避難指示区域の木造住家計102戸(飯舘村59戸、南相馬市小高区27戸、 富岡町8戸、大熊町7戸、双葉町1戸)を調査し、以下の結果を得た。

1)平成24年12月から平成25年12月までに調査を行った除染前の避難指示区域の木造住家69 戸(飯舘村59戸、南相馬市小高区10戸)について、しゃへい(低減)係数分布(n=522)の中央 値、四分位範囲は0.43(0.34-0.53)であり、中央値はIAEA-TECDOC-225,1162で示された値0.4 とほぼ同じであることがわかった。しかし、頻度分布はしゃへい(低減)係数が大きい方に向 かって広がっており、IAEA-TECDOC-1162で示される代表的範囲0.2-0.5では全体の66.5%しか カバーしていなかった。代表的な範囲はより広い範囲の、0.2-0.6(80.7%をカバー)、0.2-0.7(87.7% をカバー)もしくは0.2-0.8(93.3%をカバー)が適切と考えられる。しゃへい(低減)係数が 高くなる原因として、その家の立地と部屋の配置及びセメン瓦の影響の2つがある。背面や側 面に山の斜面を持つ住家の山の斜面に面している部屋では、土のノリ面及び放射性物質が沈着 した落葉からの影響によりしゃへい(低減)係数が高くなる。セメン瓦は多孔性であるため湿 性沈着が生じた際放射性物質が中に吸収され、瓦自体が線源となっていることがサンプリング により示された。

2) 除染が終了した住家 37 戸について再調査を行った結果、除染後のしゃへい(低減)係数分布(n=307)は0.63(0.50-0.81)と評価され、同一の測定ポイントにおけるしゃへい(低減)係数は除染前の1.3-1.4倍になっていることがわかった。除染による周辺線量当量率の低下率は屋外では0.37±0.12、屋内では0.48±0.10(それぞれ平均±1σ)であり、屋外より屋内での低下率が小さいことがわかった。モンテカルロ計算による結果においても同様の傾向が確認された。
3) 屋内汚染は、地域によって大きな差が見られ、福島第一原子力発電所からの距離や位置関係

18

により差があることが示唆された。地域によっては、室内の周辺線量当量率を上げ、しゃへい (低減)係数にも影響を与えるレベルの汚染が生じていた。屋外空間線量率と室内表面汚染の 相関は地域によって異なっており、屋外の周辺線量当量率が低くても屋内汚染のレベルが高い 住家があることに注意を払う必要がある。また、屋内汚染は遊離性であるので内部被ばくの原 因となることにも注意を払う必要がある。

キーワード:避難指示区域、木造家屋、しゃへい(低減)係数、セメン瓦、除染、屋内汚染 研究協力者:細田 正洋(弘前大学医学部保健学科講師),黒澤忠弘(独立行政法人産業技術総 合研究所計測標準研究部門 主任研究員)

I 研究目的

福島第一原子力発電所事故の発生後、福島県内では11市町村が計画的避難指示区域に指定された。これらの地域は、推定年間被ばく線量に応じて3つの区域、帰還困難区域、居住制限区域及び避難指示解除準備区域に順次再編され、除染等などの措置が進められてきた。平成26年には田村市都路町の避難指示が解除されたのを始めとして、川内村の避難指示解除準備区域、南相馬市の特定避難勧奨地点の解除が続いたが、解除後においても住民の帰還は進んでいるとは言えず、自主避難者を含めて現在も12万人を超える住民が避難生活を送っている。なかでも被ばく線量は住民の大きな関心事であり、一時帰還や帰還の判断材料、帰還後の生活の目安とするためには正確な被ばく線量評価予想が必要である。特に、子供や若い住民にはより正確な情報が求められている。

外部被ばく線量の評価法としては、個人線量計の装着により実測評価する方法と空間線量率を 用いて被ばく線量を評価する方法の2つがある。前者は、小型軽量な線量計を用いることで簡便 かつ正確に被ばく線量を把握することが可能であり、帰還後や一時立ち入りの評価には最適であ るが、実測であるため線量評価の予想はできない。また、個人の行動によって大きな差が出るた め、個人の被ばく線量を一般化すると大きな誤差を生じる可能性がある。かつ、装着状態により 値は不確実になる可能性があり、特に安定した継続装着の難しい子供については実測そのものが 現実には難しい場合もある。このため、後者の計算による方法と状況に応じて相補的に使用して 被ばく線量を予想・評価する必要がある。空間線量率を用いて外部被ばく線量を評価する際に、 屋内の空間線量は、通常、住家外の空間線量にしゃへい(低減)係数(住家内/外空間線量率比) を乗じて求める。主任研究者は、子供の屋内、屋外滞在時間数を宮城県南部地域の保育所、小学 校、中学校の子供900人を対象として平成24年から2年間調査した。その結果、年齢に関わらず 子供の自宅屋内の滞在時間は一番長く、平均14.5時間(60%)であった。¹¹住家内の線量評価は 長い時間を過ごす子供で特に重要であり、屋内の空間線量の算出にあたっては適切なしゃへい(低 減)係数を用いて評価することが求められる。

政府はこれまで年間被ばく線量の推定にあたっては、国際原子力機関による IAEA-TECDOC -225²⁾「核施設の放射線事故へのオフサイト対応プラニング」及び 1162³⁾「放射線緊急事態の評価 および対応のための一般的手順」に示される1階および2階建ての木造の家におけるしゃへい係 数 0.4 (代表的な範囲 0.2-0.5)を用いてきた。しかし、これらの数値は事故直後の緊急時に適用さ れるものであり、屋内の沈着が無視できる場合にだけ適切であるとされている。また、米国オー クリッジでのほぼ平坦な平地での実験値⁴⁾を元にしているため、背面や側面に山の斜面を持つ住 家が多い避難指示区域では適切ではない可能性がある。そこで、本研究では、1)避難指示区域の

19

住家で除染前の実態調査を行いしゃへい(低減)係数を評価した。2)除染後の住家でしゃへい(低減)係数がどう変化するかを調べた。3)屋内汚染の実態調査を行いしゃへい(低減)係数への影響を評価した。

なお、しゃへい係数と低減係数は同じ意味と定義に用いられることがあり同じ式(住家内/外 空間線量率比)で評価されるが、双方とも家の構造体によるしゃへい効果と上屋の真下の地面が 放射性物質により汚染されていないことによる低減効果を合わせた係数である。避難指示区域の 住家の大半は木造家屋であり、木造家屋ではしゃへい効果は小さく後者の影響のほうが主になる。 そこで、本報告ではこれ以降しゃへい係数の代わりに低減係数を用いることとした。

Ⅱ 研究方法

3年の研究期間中に避難指示区域の木 造住家計102戸(飯舘村59戸、南相馬 市小高区27戸、富岡町8戸、大熊町7 戸、双葉町1戸)を調査した。調査住家 の場所を図1中青い丸印で示す。丸印の 大きさは調査住家の数を表す。このうち、 除染前・後で調査を行った住家は37戸

(飯舘村28戸、小高区9戸)である。

住家内外の空間線量率を地表または 床から 1m の地点で、1" φx1" NaI シンチ レーションサーベイメータ(TCS-172, 日 立アロカメディカル(株)社製))を用い て測定し、1cm 線量当量率, *H**(10) (µSv/h) を取得した。測定にあたっては、住家外

(家屋や植木などから充分に離れ地面は



図1 避難指示区域と調査場所

土もしくは砂利、開けた場所を選定)及び住家内(住民がよく使う部屋、居間、寝室、子供部屋 などについて窓から離れた各部屋中心)において時定数 30 秒で検出器の方向を東西南北に向けて 各 3 回行い、その平均をとった。NaI シンチレーションサーベイメータ検出器周囲を 5cm 厚鉛で 遮へい(周囲から入射する¹³⁴Cs,¹³⁷Csの線量率への寄与を 1/100以下にする)し、検出器先端面だ けを遮へいせず開口しておき、開口部を上方に向けることで屋根方向からの入射の状況を測定し た。5cm 厚鉛の蓋を別途用意して開口部を塞ぎ、蓋をした時としない時の差を屋根から直接入射 してくる線量として評価した。

住家内外の空間線量率の測定と同じ要領で 3"φx3" Nalγ線用スペクトロメータ(JSM-112、日立 アロカメディカル(株)社製)を用いてガンマ線スペクトルを測定した。900秒間測定しガンマ 線波高分布を得た。22x22行の応答行列法⁵⁻⁷⁾により、波高分布を unfolding して入射γ線のエネル ギー・スペクトルを得た。自然環境γ線である⁴⁰K,²¹⁴Bi(²³⁸Uの娘核種)、²⁰⁸Tl(²³²Thの娘核種) のピークを利用して K、U、Th 濃度を決定し⁵⁻⁷⁾、自然環境ガンマ線と原発事故による放射性セシ ウムからの寄与分を分離した。0.4~0.9 MeV の散乱線を直線で近似して散乱線成分とし、全体か ら散乱線成分を差し引いた残差を直接線成分とすることにより両者を分別し、それぞれの線量率 (μGy/h)を取得した。低減係数の除染前後の変化についてモンテカルロ計算により評価を行った。 屋内表面汚染の調査は乾式スミア(拭き取り)法による間接測定で行った。部屋の大きさに応 じて1部屋あたり1~6箇所について、床や家具などの主に木の表面をJISZ4504 (2008)⁸⁾に準 じ10cm角(100cm²)の表面を同じ強さで均一にこすり、ほぼ一様に汚染が付着するようにして 試料を採取した。プラスチックシンチレータ検出器(JDC-5300、日立アロカメディカル(株)社 製)または液体シンチレーションカウンタ(LS-6500, BECKMAN)で¹³⁴Cs、¹³⁷Csからのベータ線 を5分間測定した。放射能の値付けはゲルマニウム半導体検出器(ORTEC-GMX-20195-S、ORTEC 社製)で行った。

(倫理面への配慮)

本調査研究は個々の住家を調査するものであり、結果には個人情報が含まれるので開始前に当 大学内に設けられた「ヒトを対象とする研究に関する倫理審査委員会」に調査内容と方法を申請 し、承認を得た。調査の方法は承認を受けた以下の手順によった。

対面もしくは書面の通知により「調査の目的と方法の説明および調査へのご協力のお願い」を 説明し、同意を書面で得た。住民が避難している場合は住民への通知及び測定時の立ち会いは自 治体を通して行った。得られた結果について、住民に対し線量結果のお知らせを通知した。さら に、個人の人権への対策として、研究実施に際しては、人間の尊厳を尊重するとともに、個人の 人権の保障が科学的又は社会的利益に対して優先することを基本とし、個人情報の保護の徹底を はかった。そのための具体的な配慮を以下に示す。

○住民は本人の自由意思で実験への同意、非同意を決定することができる。

○住民はいつでも本人の自由意思で実験の中止を決定できる。

○実験者は、住民の人権を尊重し、実験終了後も結果の利用等において、住民のプライバシーの 保護を優先する。

○個人情報は実施責任者が厳格に管理及び取扱うこととし、研究目的以外には用いない。

○個人情報利用の際は、個人の特定に至ることはないように配慮する。

Ⅲ 研究結果

1 除染前の住家での低減係数

平成24年12月から平成25年12月までに調査を行った除染前の避難指示区域の木造住家69戸 (飯舘村59戸、南相馬市小高区10戸)についての屋外と屋内の1cm線量当量率の相関を図2に 示す。(n=522)両者間にはゆるやかな正の相関が観察され、線形近似により傾きは0.44(SE=0.30) と評価された。



低減係数を下記の式(1)により算出した。

 $R_{\rm f} = H^*(10)_{\rm in} / H^*(10)_{\rm out}$ (1)

ここで、R_fは低減係数、H*(10)_{in}、H*(10)_{out}はそれぞれ屋内、屋外の1cm線量当量率(検出器 を東西南北に向けて各3回行ったその平均値)を表す。

(1)式で計算した 522 の低減係数について頻度分布を図 3 に示す。中央値及び四分位範囲(中央の 値 50%が含まれる範囲)Q1-Q3 は 0.43 (0.34-0.53)と評価され、この中央値は図 2 で得られた傾 きとほぼ同じであった。



図3 低減係数の頻度分布、IAEA-TECDOC - 1162³⁾の代表的な範囲の数値の出所である EX-59.13⁴⁾の実験結果を■で示している。

屋内の調査を行った部屋の種類、位置(表側か裏側か)及びそれぞれの調査数について表1に まとめ、中央値と四分位範囲,Q1-Q3を示した。1階の間取りはどの住家でもほぼ同じで、家族が 集う居間は1階の陽当りのより表側に位置しており、寝室は裏手(山側)に位置していた。

First floor	Location *	Numbers	Rf^{**}	Second floor	Numbers	Rf
			0.38	Room for all		0.46
Living room	F	80	(0.31-0.47)	purposes	32	(0.39-0.55)
			0.49			0.44
Bedroom	В	40	(0.40-0.61)	Child's room	19	(0.40-0.56)
			0.34			0.44
kitchen	F,B,F&B	13	(0.32-0.44)	Bedroom	17	(0.37-0.52)
			0.54			0.58
Child's room	F,B	6	(0.46-0.93)	Living room	1	(0.52-0.60)
			0.39			0.53
Others	F	15	(0.32-0.43)	Attic	2	(0.52-0.53)
			0.51	Freestanding		0.60
	В	7	(0.42-0.67)	small house	2	(0.55-0.61)
Freestanding			0.69			
small house	-	2	(0.51-1.23)			
		(163)	0.41	All data at second	(73)	0.45
All data at first floo	or		(0.33-0.53)	floor		(0.38-0.56)
Total						0.43
					236	(0.34-0.53)

表1 屋内の調査を行った部屋の種類、位置(表側か裏側か)及びそれぞれの調査数及び、中央 値と四分位範囲,Q1-Q3

*F and B indicate the location of the room within the house. F: on the front of the house, B: on the back of the house, F&B: facing the both sides. Most rooms on the second floor are located on the front side of the house.

**Reduction factors are expressed as the median (Q1-Q3).

2 除染後の住家の低減係数及び除染前後のガンマ線スペクトルの変化

図3で示した低減係数を評価した69戸のうち37戸について平成25年12月及び26年9月~11 月に除染後の再調査を行った。除染による周辺線量当量率の低下率は屋外では0.37±0.12、屋内 では0.48±0.10(それぞれ平均±1σ)であり、屋外より屋内での低下率が小さいことがわかった。 除染後の住家の低減係数の頻度分布を図4に示す。低減係数分布(n=307)の中央値、四分位範囲 は0.63(0.50-0.81)と評価された。同一の測定ポイントにおける低減係数は除染前の1.3-1.4倍にな っていた。ガンマ線スペクトルから評価した放射性Csによる散乱線(S)と直接線(U)の線量率比 (S/U)の屋外と屋内それぞれ除染前後についての変化を図5に示す。S/U比は除染前は屋外、内 でそれぞれ0.94±0.17、2.16±0.59(平均±1σ)であったが除染後には2.14±0.77、2.68±0.94と なり、除染後に住家外でのS/U比が大きく上がっていた。



図4 除染後の住家の低減係数の頻度分布



図 5 散乱線(S)と直接線(U)の線量率比(S/U) の屋外と屋内それぞれ除染前後についての変化

3 屋内表面汚染の評価

スミアした(ふき取った)表面の単位面積当たりのベータ線放出核種の遊離性表面汚染の放射能(表面汚染密度) A_{sr} (Bq/cm²) を式(2)⁸により求めた。

 $\mathbf{A}_{\mathrm{sr}} = (\mathbf{n} - \mathbf{n}_{\mathrm{b}}) / (60 \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{i}} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{s}})$ (2)

ここで、n は測定された全計数率 (min⁻¹) 、n_bはバックグラウンド計数率 (min⁻¹) 、 ϵ_i はベータ 線に対する機器効率、F はふき取り効率、S はふき取り面積(cm²)、 ϵ_s は 放射性表面汚染の線源効 率を表す。スミアろ紙に付着した放射能をゲルマニウム半導体検出器(ORTEC-GMX-20195-S, ORTEC 社製)で測定することによりベータ線による計数率の値付けを行い、補正係数 ($\epsilon_i x \epsilon_s$)を求 めた。ふき取り効率F は繰り返しふき取りによりスミアしたそれぞれの対象物 (木、金属、プラ スティック、ガラス) について評価を行った。検出限界値は式(3)により求めた。

 $N_d = 3/2 \cdot \{3/T_s + [(3/T_s) 2 + 4 \times N_b \times (1/T_s + 1/T_b)]^{1/2}\}$ (3) ここで、 N_d は検出限界計数率(cpm)、 N_b はバックグラウンド計数率(cpm)、 T_s は試料測定時間 (min)、 T_b はバックグラウンド測定時間 (min)を表す。 T_s 、 T_b はともに 5min である。

本調査で取得したスミア試料数は総計 3,414 個(飯舘村 52 戸 1,419 個、南相馬市小高区 27 戸 1,211 個、富岡町 8 戸 408 個、大熊町 7 戸 339 個、双葉町 1 戸 37 個、くりかえしふき取りの試料 も含める。)であった。このうちもっとも多いスミア対象物は板の間、木製家具の表面、床の間 などの木の表面であり、試料数は 2,061 個(95 戸)であったので本報告では木についての結果を 代表して示す。木のふき取り効率 F は繰り返しふき取りにより求めた幾何平均値 0.21 を用いた。 各地域についての屋内の木表面汚染密度の平均値を表 2 に示す。検出限界以下の試料については 検出限界値の値で計算した。屋内汚染はプルーム通過時の住家への空気の入り込みによる乾性沈 着で生じていることから、天井裏の梁などの木の表面についても調査した。その結果も合わせて 表 2 に示す。地域によって屋内汚染に大きな差のあること、室内汚染と同レベルで天井裏も汚染 が生じていることがわかった。 表2各地域についての屋内及び天井裏の梁などの木表面汚染密度の平均値, Bq/cm²

Area	Average value of surface contamination for wood in the room, Bq/cm ²	Average value of surface contamination for wood in the ceiling space, Bq/cm ²
Iitate village	0.03	0.02
Odaka district	0.31	0.24
Okuma and Futaba	4.05	2.07
Tomioka	0.74	0.32

Ⅳ 考察

1. 除染前の住家での低減係数の評価

1-1. IAEA-TECDOC -225 及び 1162 におけるしゃへい係数及び代表的な範囲と本調査結果との相違

図3で得られた中央値0.43は、IAEA-TECDOC -225²)及び1162³におけるしゃへい係数の代表値 0.4 とほぼ同じ値であり、統計的な差は見られなかった。図3に示す低減係数は平成24年12月か ら平成25年12月までに飯舘村と南相馬市小高区で調査を行った結果であり、これらの地域で除 染はほとんど始まっていなかった。屋外の1cm線量当量率、H*(10)out は0.60-5.88 µSv/hの範囲 で、この地域の自然放射線のレベル(ガンマ線スペクトルから37.6±7.6 nGy/hと評価。事故前の 文献値⁹⁾と同じレベルであった。)よりかなり大きい値であった。従って、本調査の結果は、事 故直後の状況が続いていた環境でのものであり、事故直後緊急時に適用されるIAEA-TECDOCの しゃへい係数と同意義のものと考えられる。しかしながら、代表的な範囲については違いが見ら れた。IAEA-TECDOC - 1162³における1階および2階建ての木造の家に対して与えられているし ゃへい係数の代表的な範囲0.2-0.5を図3中に■で示した。本調査による低減係数の分布は、明ら かにこの■の分布より低減係数が大きい方に広がっており、IAEA-TECDOC - 1162³の代表的な範囲 はより広い範囲の、0.2-0.6 (80.7%をカバー)、0.2-0.7 (87.7%をカバー)もしくは0.2-0.8 (93.3% をカバー)が適切と考えられる。

IAEA-TECDOC - 1162³⁾の代表的な範囲 0.2-0.5 の数値の出所は、Strickler らによる CEX-59.13⁴⁾ にある。CEX-59.13 は兵器実験による影響について検討した結果をまとめた報告書で、カプセル に封入した Co-60 線源をチューブ内で循環させることによりフォールアウトの放射線場を模擬し、 米国オークリッジの木造家屋を含む 9 軒の住家(このうち 2 軒が木造住宅)で実験を行うことに より protection factor(しゃへい(低減)係数の逆数)を評価している。本調査方法との違いは、 オークリッジの実験住家はほぼ平面に建てられていて、福島の避難指示区域の山や里山の斜面を 背面、側面にもつ立地条件が異なること、屋外の空間線量率(分母)は無限平面での計算値を用 いていること、屋内の空間線量率(分子)は家のセンターラインでのみ評価していることなどが あり、これらの違いが図 3 で示された低減係数の頻度分布の違いの原因となったと考えられる。

1-2. 大きい低減係数の原因

図3において、低減係数が0.7を超える例が10%あった。この10%に含まれるケースについて

25

詳細に調べた結果、低減係数が大きくなる原因には2つあることがわかった。1つは当該部屋が 住家の裏手に位置している場合である。特に飯舘村では、山の斜面を切り開いて建てられた住家 が多く、このような住家では家の裏手が山の斜面に直接面していて、土のノリ面がむき出しにな っているかもしくは狭い裏庭をはさんで山が迫っている。ノリ面の土及び放射性物質が沈着した 落葉からの影響などにより裏手の部屋は表側の部屋に比べて線量が高くなる。表1の結果に示す とおり、部屋の位置と低減係数は密接に関係していた。特に、1階では居間は表側に面している が、寝室は裏側に配置される。そのため、低減係数は、居間に比べて寝室では大きな値となって いる。図6に表1の結果を基に居間(表側)と寝室(裏手)の低減係数の頻度分布を比較した結 果を示す。裏手の寝室の低減係数の方が大きいことがわかる。この結果は部屋の位置と部屋の用 途及び低減係数のパターンとが関連していることを示すとともに、事故の後に裏手の部屋に長く 滞在すると表側の居間に滞在するより被ばく線量が高くなることを意味している。図3及び図6 において、低減係数が1を超える例がある。屋外の測定ポイントは家屋や植木などから充分に離 れた開けた場所で行うので、山斜面が迫っている家の裏手ではなく表側のポイントを取ることに なり分母が小さくなるため、結果的に裏手の部屋では低減係数が表側の部屋より大きくなり1を 超える例が生じる。



図 6 表 1 の結果を基にした居間(表側、青で表示)と寝室(裏手、赤で表示)の低減係数の頻度分布の比較

低減係数が大きくなるもう1つの原因はセメン瓦である。本調査でセメン瓦の住家は7戸であったが、その内4戸で低減係数は0.7を超えていた。建て増しによりセメン瓦と陶器瓦の2種の 屋根をもつ住家が4戸あったが、セメン瓦の屋根をもつ部屋の室内の空間線量率は、陶器瓦の屋 根を持つ部屋よりも高く、結果として低減係数が高くなっていた。前者の例(斜面の影響)では、 裏手の部屋だけ低減係数が高いが、セメン瓦の住家では表裏に関係なく複数の部屋で低減係数が 高くなる特徴がある。5 cm 厚鉛のコリメーターを用いた測定により、セメン瓦では屋根からの入 射ガンマ線量がトタンや陶器瓦より大きいことが示された。実際にセメン瓦に放射性物質がどの 程度入り込んでいるか、そして室内周辺線量当量率にどの程度影響を与えるかについて本調査と は別途調べた。宮城県丸森町筆甫のセメン瓦の住家での調査(2013/6/15)の結果、γ線スペクト ロメトリーにより、セメン瓦に含まれている¹³⁴Cs、¹³⁷Cs はそれぞれ 3,162±23、6,756±30 Bg/kg と 評価された。居間の上に瓦屋根 270 枚がある。検出された最大値を使って、一枚につき ¹³⁴Cs、¹³⁷Cs がそれぞれ 3,162、6,756 Bq/kg 含まれている面線源と仮定して、モンテカルロ計算を行なった。 屋根瓦の放射能強度に対する室内高さ 1m の周辺線量当量率 D は ¹³⁴Cs について D=0.042 μ Sv/h、¹³⁷Cs について D=0.033 μ Sv/h の計 0.075 μ Sv/h と評価された。同時に測定した室内 1m の高さでの空間線量率は 0.24 μ Sv/h であったため、30%以上がセメン瓦からの寄与ということに なる。実際は、セメン瓦には放射性物質はまだらに存在しており、最大値を使ったため過大評価 になっている可能性がある。一方、セメン瓦への放射性物質の入り込みは雨水によるものであり、 地面への沈着量に比例していると考えられるため、飯舘村や南相馬市小高区でのセメン瓦内の放 射性物質の沈着は宮城県丸森町筆甫のセメン瓦よりもっと高いレベルである可能性も高い。セメ ン瓦は多孔性であるため雨水により湿性沈着が生じた際放射性物質が中に吸収、吸着され瓦自体 が線源となっていると考えられる。

飯舘村と小高区との地域間に低減係数の違いは認められず、また、低減係数と線量率との間に 相関関係は認められなかった。

図4において、低減係数が1を超える例が10%あった。ここに含まれる住家、部屋は図3において低減係数が0.7を超えていた住家、部屋、すなわち山側に位置している住家、部屋及びセメン瓦をもつ住家であり、除染後にも同じ傾向が続いていることが示された。

2 除染後の住家の低減係数の変化とその原因

除染による周辺線量当量率の低下率は屋外より屋内で小さいこと、低減係数は除染前の1.3-1.4 倍になっており、また、除染後に住家外でのS/U比が大きく上がっていることが観察された。S/U 比の変化の原因は、除染前は直近の庭の汚染からの直接線の寄与が大きく屋外のS/U比は小さか ったが、庭の土剥ぎ除染(5cm 深さ、20m径)により直接線の寄与が減り、除染範囲以遠からの 散乱線の影響が相対的に大きくなりS/U比が上がったと考えられる。低減係数に関しても同様に、 除染前の低減係数における分母は主には直近の汚染で数値が大きく、分子は室内における散乱線 であるため低減係数の値は小さかったが、除染後では直接線の影響が減って分母の主体も散乱線 となるため値が小さくなり、低減係数が大きくなったと考えられる。この傾向をモンテカルロ計 算による結果(産総研黒澤氏による)で確認した。



図7 モンテカルロ計算の条件 住家周囲を150mの範囲まで同心円状に区切り、各区分からの 住家へのガンマ線の寄与を計算した。家の周囲10mを土剥ぎ除染すると仮定。



<除染前>

<除染後>

図8 各区分からの住家へのガンマ線の寄与を計算した結果。除染前(左)と除染後(右) ガンマ線の寄与は全線量を1としたときの相対比で示す。除染前は、屋内外とも直近(庭)から の寄与が大半を占めているが、除染後は屋外では直近(庭)からの寄与が大きく減り除染範囲以 遠からの影響が相対的に大きくなる。屋内でも直近(庭)からの寄与は減っているが屋外ほどの 差はない。



図 9 除染前後の屋外・屋内の周辺線量当量率 (計算例)低減率は屋外のほうが屋内より大きく、 低減係数は除染後に大きくなる。



図 10 除染前後の屋外・屋内のガンマ線スペ クトル(計算例) 除染後に屋外の直接線の比 率は低下し、散乱線の比率が大きく増加してい る。

図7にモンテカルロ計算の条件を、図8に各区分からの住家へのガンマ線の寄与を計算した結 果をそれぞれ示す。ガンマ線の寄与は除染前は、屋内外とも直近(庭)からの寄与が大半を占め ているが(左図)、除染後(右図)は屋外では直近(庭)からの寄与が大きく減り除染範囲以遠 からの影響が相対的に大きくなっていることが示されている。屋内でも直近(庭)からの寄与は 減っているが屋外ほどの差はない。図9に除染前後の屋外・屋内の周辺線量当量率としての計算 例を示す。低減率は屋外のほうが屋内より大きく、低減係数は除染後に大きくなる。図10に除染 前後の屋外・屋内のガンマ線スペクトルの例を示す。除染後に屋外の直接線の比率は低下し、散 乱線の比率が大きく増加している。このように、計算結果においても実測と同様の傾向が確認さ れた。

28

3 屋内汚染による影響

表2に示す表面密度限度について、しゃへい(低減)係数に影響を与えるほどの(屋内の周辺線量当量率を上げるほどの)屋内汚染のレベルであるかどうかを評価した。

半径 R(m)の面線源の中心から距離 h(cm)の位置で評価を行う。1 崩壊当たり n 個の γ 線を出 す放射性核種が 1Bq/cm²で一様に分布している場合、周辺線量当量率,D は、1cm 線量当量率定数 Γを使って下記の式(4)¹⁰⁾で計算することができる。

$$D = \frac{\pi}{10^2} \Gamma \ln \frac{R_0^2 + h^2}{h^2}$$
(4)

ここで、R₀は実効半径(m)、h は高さ(m)を表す。

日本家屋の天井高の平均は 2.4mであることから、10(m) x 10 (m) x 2.4(m)の部屋を考えると実効 半径 $R_0 = 5.64m$ となる。h = 1.2 m として面線源の中央で計算する。 $\Gamma_{Cs-134} = 0.249$ 、 $\Gamma_{Cs-137} = 0.0927^{11}$ であるので、沈着時の Cs-134、137 の比率が 1:1 で、平成 26 年 11 月 30 日の時点で部屋の n 面が 一様にある表面密度限度(Bq/cm²)で汚染しているとすると、部屋中央での周辺線量当量率 D が 0.1 µSv/h 上がるのに要する表面密度限度は 1 面のみ(床面のみ)の場合は 11.9 Bq/cm²、2 面(床面と 天井裏)の場合は 5.96 Bq/cm²と算出される。(空気による減衰は考慮していない。)室内汚染と 同レベルで天井裏も汚染が生じている(表 2)こと、また、本調査では調べていないものの住家 上屋の下も同様に汚染していることも想定されることから、少なくとも 2 面以上で汚染している と考えると、地域によっては、室内の周辺線量当量率を有意に上げ、しゃへい(低減)係数にも 影響を与えるレベルの汚染が生じていることが示唆される。

また、表2は、屋内汚染には大きな地域差があることを意味している。屋内汚染のレベルは、 大熊町・双葉町>富岡町>南相馬市小高区>>飯舘村の順になっており、大まかには福島第一原 子力発電所からの距離と相関しているように見える。飯舘村の屋内汚染のレベルは他の地域と比 べてかなり低く、距離のほかに飯舘村の標高が関係している可能性がある。

湿性沈着により主に生じる屋外の汚染と屋内汚染との関連性を調べるために、各地域について の各住家ごとの屋内の木表面汚染密度の平均値とその住家の屋外の周辺線量当量率との相関を図 11 に示した。検出限界以下の試料については検出限界値の値で計算した。図 11 より、地域によ りどのタイプの沈着が優勢か状況が異なっていることがわかる。福島第一原子力発電所に近い大 熊町・双葉町では屋外の周辺線量当量率と屋内汚染ともに高い住家がある。左図の 1、2、3 とナ ンバリングした住家は福島第一原子力発電所から約 2 km の範囲内に位置しており(No.1 は原発 の西、No.2 は南西、No.3 は真南)屋内汚染の数値が飛び抜けて高い。しかしながら、周辺線量当 量率については No.1 は No.3 の約 1/10 の線量率しかない。左図の点線枠内のデータを右図に拡大 して示している。飯舘村では屋外の周辺線量当量率は高いところにまで広がっているが屋内汚染 は低く、湿性沈着が主に生じたことを示す。一方、南相馬市小高区と富岡町では屋外の周辺線量 当量率、屋内汚染ともに低い値から高い値にまで広がっており、湿性沈着と乾性沈着とが混合し て生じていることが示唆される。屋外空間線量率と室内表面汚染の相関は地域によって異なって おり、飯舘村以外の地域では、屋外の周辺線量当量率が低くても屋内汚染のレベルが高い住家が あることに注意を払う必要がある。



図 11 飯舘村、南相馬市小高区、富岡町、大熊町と双葉町の各地域についての屋内の木表面汚染 密度の各住家ごとの平均値とその住家の屋外の周辺線量当量との相関 左図の点線枠内のデータ を右図に拡大して示している。

V 結論

本研究では、3年の研究期間中に避難指示区域の木造住家計102戸の実態調査を行うことにより、以下の結果を得た。

1) 除染前の木造住家について、しゃへい(低減)係数分布の中央値、四分位範囲は 0.43(0.34-0.53) であり、中央値は IAEA-TECDOC-225,1162 で示された値 0.4 とほぼ同じであった。しかし、頻度 分布はしゃへい(低減)係数が大きい方に向かって広がっており、IAEA-TECDOC-1162 で示され る代表的範囲 0.2-0.5 では全体の 66.5%しかカバーしていなかった。代表的な範囲はより広い範囲 の、0.2-0.6 (80.7%をカバー)、0.2-0.7 (87.7%をカバー)もしくは 0.2-0.8 (93.3%をカバー)が 適切と考えられる。しゃへい(低減)係数が高くなる原因として、その家の立地と部屋の配置及 びセメン瓦の影響の 2 つがあることがわかった。

2) 除染後のしゃへい(低減)係数分布は 0.63(0.50-0.81)と評価され、同一の測定ポイントにおけるしゃへい(低減)係数は除染前の 1.3-1.4 倍になっていることがわかった。過小評価になるため、除染後には低減係数として 0.4 を用いるべきではない。

3) 屋内汚染は、地域によって大きな差が見られ、福島第一原子力発電所からの距離や位置関係に より差があることが示唆された。地域によっては、室内の周辺線量当量率を有意に上げ、しゃへ い(低減)係数にも影響を与えるレベルの汚染が生じていた。屋外空間線量率と室内表面汚染の 相関は地域によって異なっており、屋外の周辺線量当量率が低くても屋内汚染のレベルが高い住 家があることに注意を払う必要がある。また、屋内汚染は遊離性であるので内部被ばくの原因と なることにも注意を払う必要がある。

今後の課題として、帰還・一時帰還する住民の被ばく線量を実測し、本調査で得た低減係数に よる被ばく線量評価を行い被ばく線量評価法として検証する必要がある。また、低減係数を用い て、除染により被ばく線量をどれだけ低減できるかの効果評価を行う方法を確立することが必要 である。屋内汚染について、日本木造建築の特徴、特に屋外から住家内へのInfiltration(浸入)率、 住家外へのExfiltration(浸出)率を考慮したうえで、地域差、住家による差を明らかにし、屋内汚染 のレベルが高い住家・地域について住民の被ばくリスクを低減するための対応策につなげていく 必要がある。

この研究に関する現在までの研究状況、業績

学会発表

- 1) 吉田 浩子、日本家屋内外の光子スペクトル計測 ~飯舘村等での調査結果~ 日本保健物理学会第46回研究発表会,千葉 (2013)
- 2) Hiroko Yoshida, In-situ measurements of shielding factors for the wooden houses in the Fukushima nuclear exclusion zone. IRPA Fourth European IRPA Congress, Switzerland (2014)
- 3) 吉田 浩子、避難指示区域内住家の室内表面汚染と周辺線量当量率に及ぼす影響 日本原子力 学会秋の年会,京都(2014)
- 4) 吉田 浩子、避難指示区域内木造住家の低減係数と除染後の変化 日本原子力学会 2015 年春 の年会,茨城: 2015 予定

論文

Hiroko Yoshida-Ohuchi Masahiro Hosoda Takashi Kanagami, et al. Reduction factors for wooden houses due to external γ -radiation based on in situ measurements after the Fukushima nuclear accident, Scientific Reports 2014; 4 (7541) : 1-6.

引用文献

- 1) 吉田浩子ほか. 宮城県南部地域の子どもを対象とした福島第一原子力発電所事故後の被ばく線 量及び屋内外滞在時間調査結果報告. Radioisotopes 印刷中
- 2) IAEA. Planning for off-site response to radiation accidents in nuclear facilities, IAEA-TECDOC-225 1979.
- 3) IAEA. Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency, IAEA-TECDOC-1162 2000.
- 4) Strickler T D Auxier J A. Experimental evaluation of the radiation protection afforded by typical Oak Ridge homes against distributed sources, CEX-59.13 (1960).
- 5) 湊進.環境γ線解析用3"φx3"NaI(TI)シンチレータのレスポンス行列. 名古屋工業技術試験所報告. 1978; 27(12): 384-397.
- 6) 湊進.応答行列法による環境ガンマ線波高分布の解析. JCAC. 1998; 32: 2-13.
- 7) Minato S. Diagonal elements fitting technique to improve response matrixes for environmental gamma ray spectrum unfoding, Radioisotopes 2001; 50: 463-471.
- 8) JIS Z 4504(2008) 放射性表面汚染の測定方法-β線放出核種(最大エネルギー0.15 MeV 以上) 及びα線放出核種
- 9) Minato S. Distribution of terrestrial c ray dose rates in Japan, J. Geography (Chigaku Zasshi) 2006; 115: 87–95. (in Japanese)
- 10) 平山英夫 私信「一様な密度で汚染がある室内の周辺線量当量の推定」
- 11) アイソトープ手帳(10版). 東京:社団法人日本アイソトープ協会,2001;52
Shielding Factors for External γ-radiation Based on In Situ Measurements and Indoor Deposition after The Fukushima Nuclear Accident

Hiroko Yoshida

Graduate School of Pharmaceutical Sciences, Tohoku University

Keywords: Evacuation zone; Wooden house; Shielding (Reduction) factor; Cement roof tile; Decontamination; Indoor surface contamination

Abstract

For accurate estimation of residents' exposure dose after a nuclear accident, the shielding (reduction) factor, which is the ratio of the indoor dose to the outdoor dose, is essential, as most individuals spend a large portion of their time indoors. The aim of this study is to evaluate and determine the shielding (reduction) factor for Japanese single-family detached wooden houses based on in situ measurements in the evacuation zones after the Fukushima nuclear accident. The results were compared with those given in the International Atomic Energy Agency (IAEA) document, validating the representative shielding (reduction) factor and the representative range for wooden houses. An influence of indoor surface contamination on the shielding (reduction) factor was also evaluated. The Japanese government used 0.4 as the shielding (reduction) factor for one and two-story wooden frame houses referring to the IAEA-TECDOC-225 and 1162, in which the representative shielding (reduction) factor for surface deposition is 0.4, and the representative range is 0.2–0.5 for wooden houses. However, these values given in the IAEA document were defined to apply for assessment and response during a radiological emergency, they are appropriate if indoor deposition is negligible, and there are the different geographical conditions of house locations in the Fukushima exclusion zones, where most houses are located facing a steep upward slope of a hill or a mountain, compared with the locations where the original shielding (reduction) factor in the IAEA document was collected. In this study, we evaluated 1) the shielding (reduction) factor for detached wooden houses before decontamination based on in situ measurements in the evacuation zones. 2) the shielding (reduction) factor for the same houses after the decontamination work. 3) an influence of indoor surface contamination on the shielding (reduction) factor based on actual measurements.

From 2012 to 2015, one hundred and two detached wooden houses in five evacuation zones were investigated. (59 in Iitate village, 27 in Odaka district in Minami-Soma, 8 in Tomioka, 7 in Okuma, and 1

in Futaba in Fukushima Prefecture, where all of these administrative districts has been designated as evacuation zone.) The following results were obtained.

1) From December 2012 to December 2013, sixty-nine detached wooden houses in two evacuation zones, litate village and Odaka district were investigated before decontamination. The median shielding (reduction) factor with an interquartile range of 0.43 (0.34–0.53) was evaluated based on 522 survey results. The results indicated no statistically significant difference in the median reduction factor to the representative value of 0.4 given in the IAEA-TECDOC-225 and 1162. However, with regard to the representative range of the reduction factor, we recommend the wider range of 0.2 to 0.7 or at least 0.2 to 0.6, which covered 87.7% and 80.7% of the data, respectively, rather than 0.2 to 0.5 given in the IAEA document, which covered only 66.5% of the data. We found that the location of the room within the house and area topography, and the use of cement roof tiles had the greatest influence on the reduction factor. 2) Thirty-seven houses were investigated again after decontamination work was completed. The median shielding (reduction) factor with an interquartile range of 0.63(0.50-0.81) was evaluated based on 307 survey results. The values of the shielding (reduction) factor at the same point became 1.3-1.4 times larger than those before decontamination. A decreasing rate of the ambient dose equivalents after the decontamination work was 0.37 ± 0.12 outdoors and 0.48 ± 0.10 (average $\pm \sigma$ each) indoors, respectively, showing smaller decreasing rate indoors than outdoors. The same tendency was obtained by calculation using a Monte Carlo method.

3) The indoor surface contamination level varied largely among five evacuation zones, indicating the effect of a distance and the positional relationship from the Fukushima Daiichi nuclear power plant (FDNPP) on the contamination level. In some areas, the indoor surface contamination level was found to be enough high to increase the indoor ambient dose equivalent and give an influence on the shielding (reduction) factor. No consistent relationship in the level between outdoor ambient dose equivalent and indoor surface contamination was observed. It should be noted that the area with a high level indoor surface contamination exists even if outdoor ambient dose equivalent there is very low. It also should be noted that indoor surface and removable.

テーマ(2)

放射線による健康影響の解明及び放射線以外の 要因による健康リスクの低減を含めた 総合的な健康リスクに関する研究

- 2-1 低線量率放射線被ばくの健康影響-インド・中国の高自然放射線被ばく地域住民の調査結果を中心として
 秋葉 澄伯(鹿児島大学大学院医歯学総合研究科)
- 2-2 細胞動態のシステマティックレビューと実験データ解析による低線量・低線量率 における放射線がんリスクの描写 甲斐 倫明(大分県立看護科学大学看護学部看護学科)
- 2-3 放射線の非がん影響の解明近藤 隆(富山大学大学院医学薬学研究部(医学))
- 2-4 低線量率・低線量放射線被ばくによる組織幹細胞の放射線障害の蓄積に
 関する研究
 鈴木 啓司(長崎大学原爆後障害医療研究所)
- 2-5 低線量放射線は心血管疾患発症の原因と成りうるか? 一動物実験による検証-丹羽保晴(放射線影響研究所放射線生物学/分子疫学部副主任研究員)
- 2-6 屋外活動を制限された子供の放射線感受性変化に関する動物モデル研究 根井 充(放射線医学総合研究所 放射線防護研究センター)
- 2-7 低線量率放射線長期被ばくによる生体影響の低減化 山内一己(環境科学技術研究所生物影響研究部)
- 2-8 極低線量率放射線連続被ばくマウスを用いた健康影響解析 杉原 崇(環境科学技術研究所生物影響研究部)

低線量率放射線被ばくの健康影響

―インド・中国の 高自然放射線被ばく地域住民の調査結果を中心として―

秋葉澄伯(鹿児島大学大学院医歯学総合研究科健康科学専攻人間環境学講座疫学・予防医学教授) 床次眞司(弘前大学被ばく医療総合研究所放射線物理学部門教授)

研究要旨

本研究の目的は、内部被ばくの影響や線量推定の不確実性を考慮したうえで、低線量率放射 線の外部被ばくによる健康・疾病リスクが中・高線量率と異ならないか(どの程度異なるか) を明らかにすることである。初年度の研究では、インド・ケララ州カルナガパリでのがん罹患 率調査、中国広東省陽江地域の死亡率調査で、自然放射線への外部被ばくにより過剰ながんリ スクがないことを確認した。また、インド・ケララ州での調査で得られた白血病を除くがんの 線量当たりの過剰相対リスクを原爆被爆者の固形がんリスクと比較し、前者が統計学的に有意 に低いことを明らかにした(P=0.011)。次年度および最終年度に非がん疾患リスクについて検 討を行った。累積線量と非がん疾患死亡率には関連が見られなかった。死因別の解析は、現在、 注目を集めている循環器疾患を中心に行った。循環器疾患(心疾患、脳卒中を含む)と累積線 量の間に関連は認められなかった。既に、非がん疾患死亡率の検討結果を英文論文の形でまと めてあり、共同研究者の了解を得たので、今年度中に、国際誌に投稿する予定である。また、 線量推定における内部被ばくの影響を検討するために、ラドン・トロンとその壊変核種による 呼吸器の内部被ばく、食物の摂取による内部被ばくの調査を行った。カルナガパリではラドン・ トロンとその壊変生成核種濃度を260家屋において測定し、それらによる内部被ばく線量を評 価した。さらに、食事試料を収集、放射性物質含有量を測定し、経口摂取による被ばくの線量 を評価した。また、自動車走行サーベイにより空間線量率マップを作成し、外部被ばく線量を 評価した。内部被ばくが、がん罹患、非がん疾患死亡に影響を与える影響は無視できるほど小 さいと判断された。陽江地域では、ラドン・トロンとその壊変生成核種濃度及び空間線量率を 59家屋で測定し、内部被ばく線量及び外部被ばく線量を調査した。屋内のラドンやトロン及び のその壊変核種の濃度は、これまで考えられていた以上に高く、肺がんリスクに与える影響は 無視できない可能性があると結論した。しかし、陽江地域と対照地域の肺がん死亡率には差が 認められなかった。今後、外部被ばく線量推定値の不確実性検討、医療被ばくの評価を行う必 要がある。

キーワード:高自然放射線、インド・ケララ州カルナガパリ、中国広東省陽江、線量当たりの 過剰相対リスク、固形がん罹患、非がん死亡

I 研究目的

背景:

被ばく線量が同じでも、線量率が異なると健康影響は異なる可能性がある。in vitro や動物実験 では、線量当たりの生物影響は、低線量・低線量率のほうが高線量・高線量率より小さい可能性 が示されているが、ヒトでは十分な証拠は得られていない。広島・長崎の原爆被爆は高い線量率 での被ばくであったが、低い線量率の放射線被ばくの疫学調査で重要なのが、高自然放射線地域・ Techa 川流域・台湾の⁶⁰Co で汚染された鋼材を用いたビルなどの住民や原子力作業者を対象とし た調査である。この中でもインドの 高自然放射線地域住民のコホート調査は、がん罹患の情報が 得られていること、線量が対象者全員について推定されていること、生活習慣が得られているこ となどから特に重要であり¹⁾、近年、国際的な注目を集めつつある。主任研究者秋葉澄伯と分担 研究者床次眞司は、(公財)体質研究会がインド・中国の研究者と共同で行ってきた高自然放射線 地域 (High Background Radiation (HBR)地域と呼ばれることもある)の住民の疫学調査に協力して きた。

インドの高自然放射線地域住民のコホート調査結果によると、固形がん罹患の線量当たりの過 剰相対リスクは-0.13/Gy (95% CI: 0.58, 0.46)であった²⁾。初年度の調査では、この値が原爆被爆者 の固形がんリスクと比較して統計学的に有意に低いことを明らかにした(P=0.011)³⁾。また、イ ンドでの調査の追跡期間を5年間延長したが、推定値は殆ど変らなかった。しかし、95%信頼区 間は半分程度の幅となった。したがって、原爆被爆者から得られている線量当たりの過剰相対リ スクとの違いはさらに明確となった。なお、中国の高自然放射線地域での研究でも、インドでの 研究結果とほぼ同様の結果が得られている⁴⁾。しかし、これらの調査で内部被ばく線量の定量的 な評価は十分なものとは言えなかった。予備的調査結果から、インド・中国の高自然放射線地域 住民での内部被ばくは殆ど無視できると考えてきたが、この点を確認する必要がある。また、白 血病リスク、非がんリスクに関する検討も必要である。

インド・中国などの高自然放射線地域住民以外の調査で、低線量率の放射線被ばくを考える上 で特に重要と思われるのは、テチャ川流域住民(固形がん)、チェルノブイリ事故の復旧作業者、 原子力作業者、台湾の⁶⁰Co汚染建材を使ったビルの住民などの調査である³⁾。これらのうち、低 線量率(0.1mGy/m 未満)ながら線量率が比較的高いテチャ川流域住民被ばくを取り扱った調査 では、線量当たりの過剰相対リスクが原爆被爆者の追跡調査結果と似ており、一方、高自然放射 線地域住民や台湾の⁶⁰Co汚染建材使用ビル住民などのように線量率の低い被ばくでは、比較的低 い値が得られている。主要な研究における例外の一つが原子力作業者のデータのプール解析を行 った IARC(国際がん研究機関) 15 ヶ国解析である。この研究では、15 ヶ国の原子力作業者のデ ータをプールして解析が行われた ^{5,0}。しかし、用いられたデータのうち、カナダのデータには問 題点があったことが分かっており、また、喫煙の交絡も疑われている。そこで、主任研究者らは 別にメタ解析を行い、その結果を 2012 年に公表した⁷⁰。IARC15 ヶ国解析では、米国、英国、カ ナダ、フランスの原子力作業者のデータが人数・線量から考えて主要な部分と考えられるが、こ の四か国の原子力施設(IARC15 ヶ国解析に含まれたこれら四カ国の原子力施設を全て含む)の 作業者の最新の結果を用いてメタ解析を行ったところ、線量当たりの過剰相対リスクは 0.14/Gy (95%CI = -0.12, 0.41)であった。IARC15 ヶ国解析で得られた値とは大きく異なる。高線量率にお ける線量当たりの固形がんリスクと低線量率のそれの比を計算すれば、2 以上になる可能性が高 1V.

目的:

本研究の目的は、内部被ばくの影響や線量推定の不確実性を考慮したうえで、低線量率放射線 の外部被ばくによる健康・疾病リスクが中・高線量率と異ならないか(どの程度異なるか)を明 らかにすることである。具体的には、インド・中国の高自然放射線地域で、内部被ばく線量の推 定を行い、その上で、被ばく(外部被ばく、外部被ばく+内部被ばく)による健康影響(主にが ん罹患・死亡、非がん死亡)を定量的に評価する。さらに、外部被ばく線量推定値の評価を行い、 線量推定の不確実性を考慮した線量当たりのリスク評価を行う。また、調査で蓄積されたデータ を詳細に検討するとともに、これを原爆被爆者の追跡調査を含む他の主要研究から得られた結果 と比較して、被ばく線量が同じでも、線量率が異なると健康影響の大きさが異なる可能性を検討 する。本研究の成果は、福島第一原発の事故で、主に低線量率の放射線被ばくを受けた可能性が ある緊急作業者や住民の健康影響を考える上でも重要である。

Ⅱ 研究方法

インド・カルナガパリ地域住民のがん罹患リスクの解析は、グループデータのポアソン回帰分 析を行った。がん症例、追跡人年などからなるデータを性、年齢、到達年齢(30-84 歳を 5 歳階 級に分けた)、追跡期間(1990-1997 年(ベースライン調査期間)、1998-2005 年、2006-10 年)、 宗教(ヒンズー教、イスラム教、キリスト教)、家族の収入で層別し、ビーディタバコ喫煙、噛み タバコ、飲酒を皆既モデルに共変数として加えた。その他は、Nair らの報告で記述された方法と 同じである。非がん死亡率も、同様のモデルを用いて行った。固形がん罹患、非がん死亡の解析 では、線量は外部被ばくによる結腸線量を用い、10 年のラグを仮定して累積線量を得た。線量当 たりの過剰相対リスク(ERR/Gy)の計算では、直線閾値なしモデルを用いた。白血病の解析には赤 色骨髄の線量を用い、ラグタイムを2年とした。95%信頼区間は、尤度に基づく値を計算し、推 定値が得られない場合、ND とした。

中国広東省陽江地域の住民の死亡率の解析も、上記とほぼ同様に行われた。すなわち、がん死 亡率と外部被ばくによる累積被ばく線量との関連をグループデータのポアソン解析を用いて検討 した。線量は結腸線量を用い、10年のラグを仮定して累積線量を得た。性、到達年齢、観察期間 で層別して解析を行った。白血病の解析には赤色骨髄の線量を用い、ラグタイムを2年とした。 線量当たりの過剰相対リスクの計算では、直線閾値なしモデルを用いた。

分担研究者(床次眞司)は、インド・ケララ州カルナガパリで走行サーベイによる外部被ばく 線量の評価と内部被ばくの調査を行った。外部被ばく線量調査は、Oachira パンチャイや Alappad パンチャイ(パンチャイは、南インドにおける行政単位の名称。郡部における町・村に相当する と思われる)などにおいて実施した。また、内部被ばく線量調査として 60 軒の家屋に設置したラ ドン・トロン測定器を回収して分析を行った。詳細は、分担研究者(床次眞司)の報告書に記載 した。

Ⅲ 研究結果

1)インドでのコホート研究

インド・ケララ州カルナガパリでのコホート研究で得られたデータを解析した Nair らの論文に 示されている白血病を除くがん罹患数は 1349 例で、線量当たりの過剰相対リスクは-0.13/Gy (95% CI: 0.58, 0.46)であった。この値を曝露時年齢・到達年齢などを調整して原爆被爆者の固形がんリ スクと比較したところ、カルナガパリ調査で得られた値は統計学的に有意に低かった (P=0.011)³。 追跡調査を Nair らの報告²⁾より5年間延長し、2010年末までのがん罹患率・非がん死亡率と外 部被ばくによる累積被ばく線量との関連を検討した(表1)。追跡期間を延長しても、推定値は大 きくは変らなかったが、症例数が 2120 例に増加した結果、95%信頼区間は半分程度の幅となった。 したがって、固形がんの線量あたりの過剰相対リスクを原爆被爆者と比較して得られる P 値は、 さらに小さくなった。なお、カルナガパリ調査のデータの解析では直線モデルを用いたが、線量 に関する二次の項を追加することによるモデルの適合性を示唆する結果は得られなかった。また、 線量の累積に関するラグを5年または15年に変更しても、結果に大きな違いは見られなかった。 白血病はNairらの報告より18例増加して48例となった。過剰相対リスクは-0.6/Gy(95%CI=-2.42, 1.23)であった(表1には示していない)。

表1 カルナガパリコホート がん罹患率(1990-2010年)の解析結果

	症例数	ERR/Gy	95%CI)	P値
白血病を除く全か	 ん			
	2120	-0.08	-0.44 - 0.38	>0.5
男性	1153	-0.27	-0.64 - 0.26	0.276
女性	967	0.29	-0.38 - 1.19	0.463
病理学的に確認さ	されたがん	6		
	1650	-0.05	-0.60 - 0.39	>0.5
口腔咽頭がん	326	0.17	ND - 1.61	>0.5
消化管のがん	424	-0.039	ND - 0.53	>0.5
肺がん	267	-0.073	ND - 1.75	>0.5
乳がん(女性)	188	-0.83	-2.05 - 0.40	>0.5

がん以外の疾患による死亡は 11,981 例で、線量当たりの過剰相対リスクは 0.09(95%信頼区間 -0.26,0.07, P=0.271)であった(表 2)。循環器疾患死亡は 1740 例で、線量当たりの過剰相対リスク は 0.23 (95%信頼区間=-0.26,0.72; P>0.5)であった。解析では直線モデルを用いたが、線量に関す る二次の項を追加することによるモデルの適合性を示唆する結果は得られなかった。また、線量 の累積に関するラグを5年または15年に変更しても、結果に大きな違いは見られなかった。なお、 循環器疾患死亡からは、心停止などの循環器疾患死亡と確認できない死亡例を循環器疾患死亡か ら除いた。循環器死亡のうち、虚血性心疾患による死亡は 76、脳卒中死亡は 73 例であった。こ のように小さな数が得られていることから、死亡診断書に記載されている死因の正確性には問題 がある可能性を否定できない。線量当たりの過剰相対リスクを推定したが(結果は示していない)、 症例数が少ないため、信頼区間は広く、追跡期間をさらに延長して、症例を積み上げた上での検 討が必要と考えられた。

表2 カルナガパリコホート 非がん死亡率(1990-2010年)の解析結果

	死亡数	ERR/Gy	95%CI	P値
がん以外の疾患	11981	-0.09	-0.26, 0.07	0.271
循環器疾患	1740	0.23	-0.26, 0.72	0.363
心疾患	708	0.07	-0.62, 0.77	>0.5
高血圧	514	1.02	-0.18,2.22	0.097
外因死	327	-0.29	-1.32, 0.74	>0.5

循環器疾患:ICD9=390-459 心疾患:ICD9=390-398,402,404,410-429

高血圧:ICD9=401,403,405

2)中国でのコホート研究

また、中国広東省陽江地域の死亡率調査を Tao らの報告⁴⁾より4年間延長し、2002年末までの

非がん死亡率とデータを用いて、非がん死亡率と外部被ばくによる累積被ばく線量との関連を検 討した。循環器疾患死亡は 2,773 例で、線量当たりの過剰相対リスクは 0.40(95%CI=-0.80, 1.59, P>0.5)、虚血性心疾患死亡は 297 例で、線量当たりの過剰相対リスクは-0.14 (95%CI=-3.83, 3.55、 P>0.5)、脳卒中死亡は 1,514 例で、線量当たりの過剰相対リスクは 0.35 (95%CI=-1.23, 1.93, P>0.5) であった。なお、過剰相対リスクの推定値は予備的な計算で得られたものである。解析では直線 モデルを用いたが、線量に関する二次の項を追加することによるモデルの適合度改善を示唆する 結果は得られなかった。また、線量の累積に関するラグを5年または 15年に変更しても、結果に 大きな違いは見られなかった。

3) インド・カルナガパリでの線量測定の結果

ここでは、カルナガパリ地区 12 パンチャイのうち、Oachira、Thevalakkara、Thodiyoor、Thazhava、 低レベル HBR 地域、Thekkumbhagam、Karunagappally、K. S. Puram、Clappana を中レベル HBR 地 域、Chavara、Neendakara、Panmana、Alappad を高レベル HBR 地域と呼ぶ事にする。なお、線量 調査結果の詳細は分担研究者の報告書に示した。

走行サーベイによる外部被ばく線量の評価:カルナガパリ地区 12 パンチャイの全てを網羅する ように走行サーベイを行い、外部被ばく線量を測定した。比較的高い空気カーマ率は海岸沿いに 分布していた。外部被ばく線量測定結果をもとに、実効線量を計算したが、評価手法を単純にす るため、空気カーマから実効線量への換算係数を 0.7 (Sv/Gy)、1 年間を 8760 時間 (24 時間 × 365 日)として屋外の空気カーマ率のみで算出した。年間実効線量の最大値は Chavara パンチャイで あり、その値は 13.0 mSv/y であった。また、平均値では Neendakara パンチャイが最も高く、2.3 mSv/y であった。Alappad パンチャイも平均的にみれば 1.9 mSv/y とカルナガパリ地区の中では高かった。

²³⁸U 系列及び ²³²Th 系列の空気カーマ率に対する寄与率:走行サーベイで得られた γ 線波高分布 を用いて ⁴⁰K、²³⁸U 系列及び ²³²Th 系列の空気カーマ率に対する寄与率を評価した。空気カーマ率 に対する ²³²Th 系列の寄与率が 52%から 79%と最も大きかった。特に、空気カーマ率が 0.34 μGy/h 以上の測定ポイントに限定すると、その寄与率は 70%と大きく、空気カーマ率に寄与する核種と して ²³²Th 系列が重要であると示唆された。

吸入による内部被ばく線量評価:260 軒の家屋(高線量率のパンチャイから 183 家屋、低線量率のパンチャイから 77 家屋にラドン・トロン弁別測定器を設置し、ラドン及びトロン濃度を測定した。さらに、トロンに起因する内部被ばくをより正確に評価するため、トロン子孫核種濃度測定器を設置した。ラドン濃度は、260 軒中 76 軒が検出下限値未満であり、検出下限値を超えた値の大部分は 10 Bq/m³以下であった。また、トロン濃度については 260 軒中 246 軒から検出下限値を超える値が得られた。多くが 10-20 Bq/m³であったが、100 Bq/m³を超える家屋が 10 軒程度存在した。トロン子孫核種濃度は、平衡等価トロン濃度として評価した。適切に濃度評価がなされたのは 260 軒中 191 軒で、その濃度は 0.5-3.0 Bq/m³が大部分を占めた。本調査で得られたラドン濃度及びトロン子孫核種濃度を用いて、ラドン及びトロンの吸入による内部被ばく線量を評価したところ、線量は 0.13 mSv から 2.60 mSv の間に分布し、平均値及び中間値は、それぞれ 0.65 ± 0.44 mSv、0.50 mSv と評価された。ラドンの寄与は平均 0.14 mSv、トロンの寄与は平均 0.55 mSv であり、ほ

ぼ全ての家屋において、トロンの寄与が卓越した。また、高レベル HBR 地域と低レベル HBR 地 域を比較すると、前者は 0.61 ± 0.39 mSv (0.18-1.98 mSv)、後者は 0.74 ± 0.52 mSv (0.13-2.60 mSv) と評価され、明らかな差は認められなかった。

食事による内部被ばく線量評価:陰膳方式により食事試料(1日分)12サンプルを入手した。²³⁸U 系列元素及び²³²Th系列元素の1日摂取量は1.5 Bq/dから20.5 Bq/d、2.5 Bq/kgから31.2 Bq/kgの 範囲の値を示し、明確な地域差は認められなかった。また、六つの主要な食品を入手して異なる 地域から入手して放射能を測定したが、明確な地域差は確認されなかった。

飲水による内部被ばく線量の評価:低レベル HBR 地域(Oachira 及び Thevalakkara)及び高レベル自然放射線地域(Chavara 及び Panmana)の各4家屋からそれぞれ飲料水を250 mL 採水した。 採水した飲料水は宿泊先に持ち帰り、静電捕集型ラドンモニタ(RAD7, Durridge 社, U.S.A)を用いてバブリング後に水中から発生したラドンを測定した。高レベル HBR 地域で得た水サンプル中のラドン濃度は最大で11.0 Bq/L であった。低レベル HBR 地域では全て最小検出ラドン濃度(2.5 Bq/L)未満であった。

その他の内部被ばく調査: ケララでは頸部もしくは大腿部に3インチ NaI(TI)シンチレーションス ペクトロメータを当て15分間のγ線の測定を実施した。陸域のバックグラウンドが高いため、バ ックグラウンドが低い(5.4 nGy/h)船上で調査を実施した。被験者は29歳から60歳までの11 名であり、男性が4名、女性が7名であった。全ての被験者において⁴⁰Kのフォトピーク(1461 keV) は検出されたが、他の核種由来のフォトピークは検出されなかった。

4) 中国・広東省・陽江での外部及び内部被ばく線量評価の調査

屋内外の空間線量率の測定を4集落から8家屋を選定して行い、1集落において屋外空間線量率の歩行サーベイを行った。空気カーマ率は屋内・屋外ともに、0.1µGy/hから0.54µGy/hの範囲の値を示した。家屋ごとに比較すると、全ての家屋において屋内の空気カーマ率が高い傾向が認められた。集落内において、0.1µGy/hから0.3µGy/hの範囲を示し、住居が密集する居住地区で高く外周で低い傾向が認められる。これらの結果から、建材に含まれる放射性核種が外部被ばくに寄与する放射線源の1つとなっていることが示唆される。

陽江地域の西に位置する陽西県の1集落及び陽東県の3集落から計60家屋を選定し、ラドン、 トロン及びトロン子孫核種濃度をパッシブ型の手法を用いて評価した。60軒中1軒は測定器を回 収できなかったため、59軒の家屋において結果が得られた。ラドン濃度については59軒の全て が検出下限値を超えていた。また、トロン濃度については59軒中23軒が検出下限値を超えてい た。トロン子孫核種濃度は、平衡等価トロン濃度として評価した。ラドン、トロン及びトロン子 孫核種濃度の中央値は115Bq/m³、825bq/m³、4Bq/m³であった。ラドンの吸入による年間実効線量 は0.7 mSvから12.0 mSvの間に分布し、平均値及び中央値はそれぞれ3.1±2.0 mSv及び2.9 mSv であった。同様に、トロンでは0.2 mSvから10.1 mSvの間に分布し、平均値及び中央値はそれぞ れ2.2±2.5 mSv及び1.2 mSvであった。この結果から、トロンによる年間実効線量はラドンと同 程度と推定される。また、ラドンとトロンを合計した年間実効線量は1.5 mSvから16.4 mSvの間 に分布し、平均値及び中央値はそれぞれ5.3±3.5 mSv及び4.4 mSvと評価された。

5)他の調査で得られた結果の文献的検討

背景で述べたように、高自然自然放射線地域での調査のほかで重要なものは、人工的な放射線 汚染による HBR 地域住民の調査(テチャ川流域住民、台湾の⁶⁰Co汚染建材使用ビル住民など)、 原子力作業者の調査などである(通常は、HBR 地域は高自然放射線地域を指すが、近年、人工的 な汚染による HBR 地域での調査の重要性が増しており、我々が作成して討議されている UNSCEAR 報告書でも man-made HBR 地域との名称を用いていることから、ここでも HBR 地域と 呼ぶ事にする)。テチャ川流域住民の調査では 2007 年に 1956-2002 年のがん罹患率の調査結果が 公表され、線量あたりの過剰相対リスクは 1.0/Gy (95% CI=0.3, 1.9)であった⁸⁾。この調査では線量 評価に Techa River Dosimetry System (TRDS)-2000 が用いられ、調査地域はがん罹患調査が可能な チェリアビンスク オブラストに限定された(オブラストはロシアにおける行政単位の名称。郡 に相当するものと思われる)。その後、2013 年(本研究の第2年度)に 1950-2007 年のがん死亡 率の調査結果が公表された⁹⁾。線量あたりの過剰相対リスクは 0.61/Gy (95% CI=0.04, 1.27)であ った。この調査の対象地域はチェリアビンスク オブラストとコルガン オブラストであった。線 量評価システムは TRDS-2009 が用いられた。この調査で得られた線量あたりの過剰相対リスクは、 2007 年に公表されたがん罹患調査で得られたあたいより低い値となった。なお、この値を原爆被 爆者のそれと比較するには、性、被爆時年齢、到達年齢の調整が必要である。

原子力作業者では、2013年にフランスの作業者の新しい調査結果が公表された¹⁰。これは、 フランス原子力庁(CEA)、フランス電力会社(EDF)、アレヴァ社での放射線作業者を1950年から 1994年まで追跡して得た死亡率のデータを解析したものである。線量あたりの過剰相対リスクは 0.34/Gy (95%CI=-0.56, 1.38)であった。主任研究者が2012年に公表したメタ解析では、このうち、 フランス原子力庁とフランス電力会社の作業者の古い調査結果が含まれていた。新しい調査結果 を用いてメタ解析を行っても、結果は殆ど異ならなかった。

本研究では白血病に関しても検討を行った。主な原子力作業者の調査結果を表3に示した。そ れぞれの研究で得られた線量あたりの過剰相対リスクの荷重和を分散の逆数を重みにして計算し たところ、1.4/Gy (95% CI: -1.1, 3.9)という値が得られた²²⁾。なお、文献的考察の結果は、日本と ロシアが中心となって提案した UNSCEAR 報告書案「Cancer epidemiology after low dose-rate exposure to environmental radiation」でも引用されている。

研究	平均	白血病死亡	ERR/Gy	追跡期間
	線量	数		
	(mGy)			
米国 Rocky Flats facility	41	6	-7.2	1952-1983 年
workers [Gilbert et al.			90% CI: <0, 42	
1993] ¹¹⁾				
米国 Nuclear Power Plant	25.7	26	5.67	1979-1997 年
workers [Howe et al.			95% CI: -2.56, 30.4	

表3 主な原子力作業者の調査結果(全てコホート研究)

2004] ¹²⁾				
米国 Rocketdyne workers,	13.5	159	0.6	1948-2008 年
[Boice <i>et al.</i> 2011] ¹³⁾			95% CI: -5.0, 12.3	
英国. National Registry for	24.9	198	1.71	2001 年まで
Radiation Workers			90% CI: 0.06, 4.29	
[Muirhead et al. 2009] ¹⁴⁾				
フランス	22.5	60	3.96	1968-2004 年
French combined cohort			90% CI: <0, 16.8	
[Metz-Flamant <i>et al.</i> 2014] ¹⁰⁾				
日本	12.2	80, including	-1.93	1991-2002 年
Japanese nuclear workers		a CLL death	95% CI: -6.12, 8.6	
[Akiba and Mizuno, 2012] ³⁾				
A weighted sum of ERRs		793	1.4	
listed above			95% CI: -1.1, 3.9	

IV 考察

インド・ケララ州カルナガパリ・中国広東省陽江の高自然放射線地域住民を対象として行われ た疫学調査(コホート調査)で、がんの過剰リスクは確認できなかった。また、インド・カルナ ガパリ住民のコホート調査で得られた白血病を除く全がんの線量当たりの過剰相対リスクは原爆 被爆者での推定値より有意に低かった。しかし、このコホート調査では、社会経済状態の他に喫 煙などの放射線のリスク解析において交絡を生じる可能性がある生活習慣の調整を行ったが、生 活習慣は追跡期間中に変化しうるものであり、生活習慣による交絡を完全には取り除けてはいな い可能性がある。また、原爆被爆者とカルナガパリ住民とでは、がん罹患率が大きく異なること、 また、表4に示すようにがん部位の分布が大きく異なることにも注意が必要である。

線量推定における内部被ばくの影響を検討するために、ラドン・トロンとその壊変核種による 呼吸器の内部被ばく、食物の摂取による内部被ばくの調査を行った。カルナガパリではラドン・ トロンとその壊変生成核種濃度を 260 家屋において測定し、それらによる内部被ばく線量を評価 した。さらに、食事試料を収集、放射性物質含有量を測定し、経口摂取による被ばくの線量を評 価した。また、自動車走行サーベイにより空間線量率マップを作成し、外部被ばく線量を評価し た。内部被ばくが、がん罹患、非がん疾患死亡に影響を与える影響は無視できるほど小さいと判 断された。

陽江地域では、ラドン・トロンとその壊変生成核種濃度及び空間線量率を59家屋で測定し、内 部被ばく線量及び外部被ばく線量を調査した。屋内のラドンやトロン及びのその壊変核種の濃度 は、これまで考えられていた以上に高く、肺がんリスクに与える影響は無視できない可能性があ ると結論した。しかし、陽江地域と対照地域の肺がん死亡率には差が認められなかった。今後、 外部被ばく線量推定値の不確実性検討、医療被ばくの評価を行う必要がある。

陽江地域では、ラドン・トロンとその壊変生成核種濃度及び空間線量率を 59 家屋で測定し、内

42

部被ばく線量及び外部被ばく線量を調査した。屋内のラドンやトロン及びのその壊変核種の濃度 は、これまで考えられていた以上に高く、肺がんリスクに与える影響は無視できない可能性があ ると結論した。しかし、陽江地域と対照地域の肺がん死亡率には差が認められなかった。

	広島 (1	1991-95)	Karunagappally (1993-97)	
	男	女	男	女
固形がん	348	202	91	71
口腔	6	2	17	6
胃	86	34	5	2
大腸	86	40	3	3
肝臓	43	6	4	0
その他の消化器	28	20	10	4
肺	40	12	19	3
その他の呼吸器	6	1	4	0
乳房		37		15
子宮		18		16
上記以外の部位	53	32	29	22

表4 がん罹患率の比較(悪性黒色腫以外の皮膚がんを除く) (「世界人口」を用いて年齢調整した100,000人当たりの1年間の発生数)

自血病の線量反応関係は原爆被爆者の調査結果から線型 2次と考えられている。実際、原爆被 爆者では、1Gy で白血病の過剰相対リスクが3程度と報告されており、これを単純に 100mSv に 外挿すれば 0.3 となるが、観測された値は 0.15程度である¹⁵⁾。最近、米国の研究者が行ったメタ 解析の結果が報告された¹⁶⁾。この解析では以下の研究から得られたリスク推定値が用いられた。 ①原子力作業者、

②チェルノブイリ事故の復旧作業者、

③インド・ケララ州などのHBR 地域住民、

④事故などにより生じた高バックグランド 放射線地域(チェルノブイリ施設周辺地域、ロシア南 ウラルのテチャ川流域、台湾の⁶⁰Co で汚染された建材を使ったビル)

対象となった研究は主に低線量被ばくを対象としたもので、メタ解析で得られた 1Sv での白血病の過剰相対リスクの推定値は 1.9 (95% 信頼区間: 0.7, 3.2)であった。この値は、原爆被爆者で報告されている値に近い。また、IARC15 ヶ国解析も 1Sv での白血病の過剰相対リスクの推定値を 1.9 (90% 信頼区間: <0, 8.5)と報告している^{5.6)}。最近米国の原子力作業者の追跡調査の結果が公表されたが、この調査では、1Sv での白血病の過剰相対リスクの推定値は 0.9 (95% 信頼区間: -1.7, 6.5) であった⁹⁾。結論として、低線量域での白血病の線量値の過剰相対リスクは高線量域の半分程度の値になると推測される。しかし、線量率効果に関しては、十分なデータがなく検討できない。

インド・ケララ州カルナガパリ・中国広東省陽江の HBR 地域住民を対象として行われた疫学 調査(コホート調査)で、自然放射線被ばくによる非がん疾患死亡率を検討したが、過剰がん罹 患、過剰非がん死亡は観察されなかった。原爆被爆生存者の追跡調査結果では、寿命調査集団で 循環器疾患死亡率が被ばく線量と関連していると報告されている。しかし、死因を細かく見た場 合、関連しているのはリウマチ性心疾患、高血圧性心疾患などであり、虚血性心疾患死亡との関 連は明らかでない¹⁸⁾。2年ごとに健康診断を行っている成人健康調査集団では被ばく時年齢 40 歳未満の場合に、1968-98年の機関の心筋梗塞罹患率が被ばく線量と関連していた。被ばく時年 齢が高い群で有意な関連が見られていない¹⁹⁾。脳卒中死亡率は被ばく線量とともに増加し、線量 が高い群でな量当たりの過剰相対リスクが高く、線量にかんして線形のモデルよりも線形二次モ デルの当てはまりが良いとの結果が寿命調査集団の死亡率の解析から得られている⁸⁾。なお、成 人健康調査集団では、高血圧の罹患率が線量とともに増加していた¹⁹⁾。しかし、血圧が高く、脳 卒中が多い被爆者は、高血圧などの治療を受けていた可能性が高いが、リスク解析では治療の状 況は十分に考慮されていない。また、観察された過剰リスクが放射線被ばくによる直接的な生物 学的影響によるものか、あるいは被爆による心理的ストレスなどによるものかなどは明確でない。 以上のごとく、これまでの原爆被爆生存者の追跡調査で得られた循環器疾患と被ばく線量との関 連は必ずしも説得力のあるものではない。したがって、原爆被爆者の調査で得られた循環器疾患 死亡等の線量当たりのリスクをインドや中国の HBR 地域住民で得られた結果と比較するのは時 期尚早ではないかと思われる。

Little らは、循環器疾患リスクと放射線被ばくの関連を検討するためのメタ解析を行った²⁰)。 解析に含まれたのは、原爆被爆者の追跡調査結果(寿命集団の死亡追跡調査、成人健康調査集団 の罹患調査)、カナダのエルドラド鉱山の鉱夫の追跡調査結果、フランス電力公社の従業員の追跡 調査結果、IARC の 15 か国解析結果、英国の全国放射線作業登録者の追跡調査結果、マヤックエ 場作業者、チェルノブイリの緊急作業従事者などである。彼らは、低・中線量の放射線被ばくが 循環器疾患と関連していると結論している。しかし、どの調査でも喫煙の影響が十分に考慮され ていないなど、放射線以外の影響に関する調整が不十分であり、そのような調査結果を集めてメ タ解析を行っても、循環器疾患が放射線被ばくと関連しているかどうかに関する結論を下せるか 疑問である²¹)。

V 結論

本調査の結果は、低線量率放射線に被ばくした住民で、がん罹患、非がん死亡は増加しておら ず、インドでの調査結果は、線量当たりの固形がんリスクは、高線量率の場合に比べて低いこと を示唆している。これまで、我々のインド・中国の HBR 地域住民での調査では、内部被ばくは 小さいと考え無視してきたが、実際、インドの HBR 地域(カルナガパリ)では、ほぼ無視でき ると結論された。したがって、健康リスクに与える影響も無視できる。一方、中国の陽江地域で は、屋内ラドンによる放射線被ばくは無視できないと結論された。しかし、陽江地域の肺がんが 対照地域と比べて増加しているという証拠は得られなかった。

引用文献

- 1) Boice JD Jr. Hendry JH Nakamura N et al. Low-dose-rate epidemiology of high background radiation areas. Radiat Res. 2010; 173(6): 849-54.
- 2) Nair RR Rajan B Akiba S et al. Background radiation and cancer incidence in Kerala, India-Karanagappally cohort study. Health Phys. 2009; 96(1): 55-66.

- 3) Akiba S. Cancer risk associated with low dose and low dose-rate ionizing radiation exposure. Genes and Environment. 2013;35:80-87.
- 4) Tao Z Akiba S Zha Y et al. Cancer and non-cancer mortality among Inhabitants in the high background radiation area of Yangjiang, China (1979-1998). Health Phys. 2012; 102(2): 173-181.
- 5) Cardis E Vrijheid M Blettner M et al. Risk of cancer after low doses of ionizing radiation: retrospective cohort study in 15 countries. BMJ 2005; 331: 77–82.
- Cardis E Vrijheid M Blettner M et al. The 15-country collaborative study of cancer risk among radiation workers in the nuclear industry: estimates of radiation related cancer risks. Radiat Res 2007; 167:396–416.
- 7) Akiba S Mizuno S. The third analysis of cancer mortality among Japanese nuclear workers, 1991-2002: estimation of excess relative risk per radiation dose. J Radiol Prot. 2012; 32(1): 73-83
- 8) Krestinina LY Davis F Ostroumova EV et al. Solid cancer incidence and low-dose-rate radiation exposures in the Techa River cohort: 1956–2002. Int. J Epidemiol. 2007; 36: 1038–1046.
- 9) Schonfeld SJ Krestinina LY Epifanova S et al. Solid cancer mortality in the Techa river cohort (1950-2007). Radiat Res. 2013; 179(2): 183-189.
- Metz-Flamant C Laurent O Samson E et al. Mortality associated with chronic external radiation exposure in the French combined cohort of nuclear workers. Occup Environ Med. 2013; 70(9): 630-638.
- Gilbert ES Cragle DL Wiggs LD. Updated analyses of combined mortality data for workers at the Hanford Site, Oak Ridge National Laboratory, and Rocky Flats Weapons Plant. Radiation Research 1993; 136: 408-421.
- Howe GR Zablotska LB Fix JJ et al. Analysis of the mortality experience amongst U.S. nuclear power industry workers after chronic low-dose exposure to ionizing radiation. Radiation Research 2004; 162: 517-526.
- 13) Boice JD Jr Cohen SS Mumma MT et al. Updated mortality analysis of radiation workers at Rocketdyne (Atomics International), 1948-2008. Radiation Research 2011; 176: 244-258.
- 14) Muirhead CR O'Hagan JA Haylock RG et al. (2009) Mortality and cancer incidence following occupational radiation exposure: third analysis of the National Registry for Radiation Workers. British Journal of Cancer 100: 206-212.
- 15) Ozasa K Shimizu Y Suyama A et al. Studies of the mortality of atomic bomb survivors, Report 14, 1950-2003: an overview of cancer and noncancer diseases. Radiation Research 2012; 177: 229-243.
- 16) Daniels RD Schubauer-Berigan MK. A meta-analysis of leukaemia risk from protracted exposure to low-dose gamma radiation. Occupational and Environmental Medicine 2011; 68: 457-464.
- Daniels RD Bertke S Waters KM et al. Risk of leukaemia mortality from exposure to ionising radiation in US nuclear workers: a pooled case-control study. Occupational and Environmental Medicine 2013; 70: 41-48.
- Shimizu Y et al. Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003. BMJ 2010; 340; b5349.
- 19) Yamada M Wong FL Fujiwara S et al. Non-cancer disease incidence in atomic bomb survivors, 1958-98. Radiat Res. 2004;161:622-632.

- 20) Little MP Azizova TV Bazyka D et al. Systematic review and meta-analysis of circulatory disease from exposure to low-level ionizing radiation and estimates of potential population mortality risks. Environ Health Perspect. 2012; 120: 1503-1511.
- 21) Akiba S. Commentary: circulatory disease risk after low level radiation exposure. REM. 2013; 2: 13-22.
- 22) Akiba S. Chapter 10. The effects of dose rate in radiation related cancer risk a brief review of epidemiological studies in high background radiation areas and others. In: Sutou S, editor. Fukushima Nuclear Accident Global implications, long-term health effects and ecological consequences. New York: Nova Science Publishers Inc; 2015; 167-184

Health risk associated with exposure to low-dose-rate ionizing radiation – risk evaluation mainly based on epidemiological studies of residents in high natural background radiation areas in India and China

Suminori Akiba^{*1}, Shinji Tokonami^{*2}

*1 Department of Epidemiology and Preventive Medicine, Kagoshima University Graduate School of Medical and Dental Sciences.
*2 Department of Radiation Physics, Institute of Radiation Emergency Medicine, Hirosaki University

Keywords: high background radiation; Karunagappally in Kerala State, India; Yangjiang in Guangdong Province, China; excess relative risk per dose; solid cancer; circulatory diseases

Abstract

The purpose of this three year project (from 2012 to 2014) is to examine whether the magnitude of health effects associated with external exposure to low-dose-rate radiation is different from those related to medium-high dose-rate exposure. In the fiscal year 2012, we confirmed the absence of excess cancer risk in relation to external exposure to high background natural radiation among residents in Karunagappally in Kerala State, India and Yangjiang in Guangdong Province, India. In addition, this study has shown that the Indian estimate of excess relative risk per gray of cancer excluding leukemia is significantly lower (P=0.011) than that of solid cancer among atomic-bomb survivors in Hiroshima and Nagasaki. In fiscal year 2013, similar analyses of non-cancer diseases were conducted. Cumulative radiation dose was not related to the mortality of non-cancer disease mortality. Cause-specific analysis was focused on circulatory diseases, which are the topic of interest. Cumulative radiation dose was not related to the mortality of circulatory diseases, including heart diseases and stroke. It is necessary to evaluate uncertainties involved in estimating doses from external exposure, and evaluate medical exposure. Shinji Tokonami, the co-investigator of this project started those surveys involved in dosimetry. In the final year of this project, over-all evaluations of results were conducted.

低線量率放射線被ばくの健康影響

—インド・中国の高自然放射線被ばく地域住民の調査結果を中心として—

高自然放射線地域における線量評価に関する研究

床次眞司(弘前大学被ばく医療総合研究所放射線物理学部門教授)

研究要旨

本研究の目的は、内部被ばくの影響や線量推定の不確実性を考慮したうえで、低線量率放射 線の外部被ばくによる健康・疾病リスクが中・高線量率と異ならないか(どの程度異なるか) を明らかにすることである。本研究では、主任研究者がインド・ケララ州カルナガパリでのが ん罹患率調査、中国広東省陽江地域の死亡率調査を行っている。これと対応する形で、分担研 究者は両地域における外部・内部被ばく線量評価を行っている。これらの地域における従来の 線量評価では、内部被ばくがあまり考慮されていなかった。そこで、これらの地域における従来の 線量評価では、内部被ばくがあまり考慮されていなかった。そこで、これらの地域におけるで、 育物の摂取による内部被ばくの調査を行う計画である。さらに、外部被ばく線量推定値の不確 実性検討のため、当該地域における詳細な空気カーマ率マップの作成を行う計画である。この 計画に沿って今年度は、カルナガパリではラドン・トロンとその子孫核種濃度を 260 家屋にお いて測定し、それらによる内部被ばく線量を評価した。さらに、食事試料を収集、放射性物質 含有量を測定し、経口摂取による被ばくの線量を評価した。また、自動車走行サーベイにより 空間線量率マップを作成し、外部被ばく線量を評価した。陽江地域では、ラドン・トロンとそ の子孫核種濃度及び空気カーマ率を 60 家屋で測定し、内部被ばく線量及び外部被ばく線量を調 査した。

キーワード:高自然放射線、インド・ケララ州カルナガパリ、中国広東省陽江、内部被ばく、 ラドン・トロン、外部被ばく、走行サーベイ

研究協力者:石川徹夫(福島県立医科大学医学部放射線物理化学講座),反町篤行(福島県立医科 大学医学部放射線物理化学講座)、大森康孝(福島県立医科大学医学部放射線物理化学講座),サ フー・サラタ・クマール(放射線医学総合研究所福島復興支援本部環境動態・影響プロジェクト), 赤田尚史(核融合科学研究所へリカル研究部環境放射線研究部門),

HUANG Kezan (Yangjiang Center for Disease Control and Prevention 所長), MO Kaisun (Yangdong Center for Disease Control and Prevention 所長), LU Can (Yangxi Center for Disease Control and Prevention 所長), WU Zhongpin (Enping Center for Disease Control and Prevention 所長), SU Xu (National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention 所長)

I 研究目的

背景:被ばく線量が同じでも、線量率が異なると健康影響は異なる可能性がある。in vitro や動 物実験では、線量当たりの生物影響は、低線量・低線量率のほうが高線量・高線量率より小さい 可能性が示されているが、ヒトでは十分な証拠は得られていない。広島・長崎の原爆被爆は高い 線量率での被ばくであったが、低い線量率の放射線被ばくの疫学調査で重要なのが、高自然放射 線地域・Techa 川流域・台湾のコバルト 60 で汚染された鋼材を用いたビルなどの住民や原子力作 業者を対象とした調査である。この中でもインドの高自然放射線地域住民のコホート調査は、が ん罹患の情報が得られていること、線量が対象者全員について推定されていること、生活習慣が 得られていることなどから、特に重要であり¹⁾、近年、国際的な注目を集めつつある。主任研究 者秋葉澄伯と分担研究者床次眞司は、(公財)体質研究会がインド・中国の研究者と共同で行って きた高自然放射線地域の住民の疫学調査に協力してきた。これまでの調査結果によると、高自然 放射線地域住民で、放射線の外部被ばくによるがんリスク等の過剰はなく、仮にあっても高線量 率での被ばくより、線量当たりのリスクがかなり低い可能性が高い。しかし、これらの調査で内 部被ばく線量の定量的な評価は十分なものとは言えなかった。予備的調査結果から、インド・中 国の高自然放射線地域住民での内部被ばくは殆ど無視できると考えるが、この点を確認する必要 がある。さらに、当該地域ではホットスポットが局在化して、線量が高い場所と低い場所が複雑 に入り組んでいるため、外部被ばくをより詳細に評価するために空間線量率マップの作成が必要 である。

目的:本研究の目的は、内部被ばくの影響や線量推定の不確実性を考慮したうえで、低線量率 放射線の外部被ばくによる健康・疾病リスクが中・高線量率と異ならないか(どの程度異なるか) を明らかにすることである。このため分担研究者としては、より詳細な外部被ばく、内部被ばく 線量評価を行うことを目的としている。本研究の成果は、福島第一原発の事故で、主に低線量率 の放射線被ばくを受けた可能性がある緊急作業者や住民の健康影響を考える上でも重要である。

Ⅱ 研究方法

1) 外部被ばく線量評価(インド・ケララ州)

分担研究者である床次眞司は、インド・ケララ州カルナガパリ地区内の12パンチャイの全てを 網羅するように走行ルートを計画し、走行サーベイによる外部被ばく線量の評価を行った。本調 査の走行ルートを図1に示す。調査は、低レベル高自然放射線地域のパンチャイとして、Oachira、 Thevalakkara、Thodiyoor、Thazhava、中レベル高自然放射線地域のパンチャイとして Thekkumbhagam、Karunagappally、K. S. Puram、Clappana、高レベル高自然放射線地域のパンチャ イとして Chavara、Neendakara、Panmana、Alappad において実施した。測定には、3 インチ × 3 インチ NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ(EMF-211, EMF Japan Co.)を用い、車内に測 定器を搭載して走行しながら 30 秒間隔で計数率を取得した。この測定器には GPS も搭載されて おり、空気カーマ率に加えて同時に測定地点の緯度・経度も取得する事が可能である。なお、自 然環境中に存在する γ線のエネルギー範囲では空気カーマ率は空気吸収線量率と等価とみなすこ とができる。



図1 ケララ州カルナガパリ地区内における走行ルート

この手法によって得られる計数率は車内での値であるため、車体によるγ線の遮蔽効果を評価 する必要がある。今回の調査では、車内計数値から車外計数値に換算するためカルナガパリ地区 内の 34 ヶ所において、車内外でのそれぞれ 2 分間の測定を行った。さらに、30 秒間の測定で得 られるガンマ線波高分布をアンフォールディングして出した空気カーマ率の精度は低いため、得 られた計数率から空気カーマ率への換算係数を求めた。換算係数の算出にはカルナガパリ地区内 の 35 ヶ所の車外において 5 ~ 15 分間の測定を行った。測定時間はポケットサーベイメータ (PDR-111,日立アロカメディカル株式会社)による実測値を参考にして決定した。なお、屋外に おけるγ線波高分布の取得はいずれも地表面から1 m の高さにおいて実施した。本調査で得られ たγ線波高分布は、22 行 × 22 行の応答行列法によって空気カーマ率を算出した。走行サーベイ による空気カーマ率の評価は、30 秒間の計測によって得られた計数率に換算係数と遮蔽係数を乗

じる事によって評価した。 また、得られた γ 線波高分布を用いて⁴⁰K、²³⁸U系列及び²³²Th系列の空気カーマ率に対する寄 与率を評価した。本研究では、湊²⁾によって開発された不等間隔の22 行 × 22 行の応答行列法を 用いて逐次差引法を行い、測定で得られた γ 線波高分布を入射 γ 線のエネルギー・ビンスペクト ルに変換している。評価対象となる γ 線エネルギー範囲は0から3.2 MeV である。自然界に存在 する γ 線のエネルギーの最大値は²⁰⁸Tlの2.61 MeV であるため、この範囲でもって大地からの γ 線のエネルギーは全て網羅される。⁴⁰K、²³⁸U系列及び²³²Th系列の空気カーマ率に対する寄与率 は、それぞれ1.46 MeV (⁴⁰K そのもの)、1.76 MeV と 2.20 MeV (²³⁸U系列の²¹⁴Biの γ 線)及び 2.61 MeV (²³²Th系列の²⁰⁸Tlの γ 線)の γ 線によるフォトピークから評価した。なおこの評価手 法は、無限の平面を持つ大地及び空気を対象としており、⁴⁰K、²³⁸U系列及び²³²Th系列の放射性 核種は土壌中に一様に分布していると仮定されている。さらに、²³⁸U系列及び²³²Th系列は土壌 中において放射平衡状態にあるとして考えられている。

なお、本調査は平成25年9月23日から27日にかけて実施したが、走行サーベイ中の天候は全 て晴天であり、測定値に降雨の影響は受けていない。

50

2) 内部被ばく線量評価(インド・ケララ州)

内部被ばくは吸入摂取によるものと経口摂取によるものがある。吸入摂取は、ラドン・トロン の吸入、経口摂取としては飲食物の摂取が主要な要因として考えられる。

吸入摂取による内部被ばくを評価するために、インド・ケララ州では、260 軒の家屋にラドン・ トロン弁別測定器を設置し、ラドン及びトロン濃度を測定した。調査家屋は、高線量率のパンチ ャイ(Chavara、Neendakara、Panmana 及び Alappad)から 183 家屋、低線量率のパンチャイ(Oachira 及び Thevalakkara)から 77 家屋が選定されている。測定器は、分担研究者が開発し、商用化され た Raduet (Radosys Ltd., ハンガリー)を使用した。さらに、トロンに起因する内部被ばくをより 正確に評価するため、トロン子孫核種濃度測定器を設置した。この測定器も、前述の測定器と同 様に、分担研究者が開発したものである。これらの測定器は、家屋内で曝露後、独立行政法人放 射線医学総合研究所に返送され、同所において濃度評価がなされた。

また、ラドン・トロンの親核種であるウラン・トリウムの大気中粉じんの評価は、粒子径を選 別して捕集できる多段式インパクター捕集装置(カスケードインパクター)を用いて3家屋で実 施した。

経口摂取による被ばくを評価するために、同州から食事試料および食品試料を入手した。食事 試料は、陰膳方式により採取され、現地協力者により凍結乾燥させ灰化処理されたものである。 食事試料を U-8 分析容器に密封して 40 日経過した後、高純度ゲルマニウム半導体検出器を用い たガンマ線スペクトロメトリー法により試料中のウラン及びトリウム含有量を測定した。

同様に飲水による経口摂取にともなう内部被ばく線量の評価を行うため、低レベル高自然放射 線地域(Oachira 及び Thevalakkara)及び高レベル高自然放射線地域(Chavara 及び Panmana)の 各4家屋からそれぞれ飲料水を250 mL 採水した。採水した飲料水は宿泊先に持ち帰り、静電捕 集型ラドンモニタ(RAD7, Durridge 社, U.S.A)を用いてバブリング後に水中から発生したラドン を測定した。本調査で用いた RAD7 は事前に²²⁶Ra 標準線源で校正されている液体シンチレーシ ョンカウンタとの比較実験によって 0.68 の校正定数を得ている。したがって、測定によって得ら れたラドン濃度に採水からの時間経過にともなう減衰補正をし、0.68 で除すことで採水時の水中 ラドン濃度とした。また、予備実験によって最小検出ラドン濃度(MDC)を評価したところ、大 気中ラドン濃度が 20 Bq/m³程度までは 2.5 Bq/L 程度であった。水中ラドン濃度 *Q*w(Bq/m³)から 飲水にともなう内部被ばく線量 *D*w(mSv)は(1)式から求めた。

$$D_{\mathrm{W}} = K_{\mathrm{W}} \cdot W \cdot Q_{\mathrm{W}} \tag{1}$$

ここで、 K_W は飲用した場合の線量換算係数であり、 $3.5 \times 10^{-6} \text{ mSv/Bq}$ 、Wは1年間の水摂取量(m³/y)である。本試算では、1日に1Lの水を365日(365 L/y = 0.365 m³/y)飲むと仮定した。

3) 外部及び内部被ばく線量評価の調査(中国・広東省・陽江市)

また、分担研究者らは、2012 年 12 月及び 2014 年 1 月に中国・広東省・陽江市を訪問した。同 地は、インド・ケララ州と同様に高自然放射線地域に属する。本調査では、陽西県の 1 集落及び 陽東県の 3 集落から計 60 家屋を選定し、ラドン、トロン及びトロン子孫核種濃度をパッシブ型の 手法を用いて評価した。使用した測定器は、インド・ケララ州における調査で使用したものと同 様である。また、屋内外の空間線量率の測定を 4 集落から 8 家屋を選定して行い、1 集落におい て屋外空間線量率の歩行サーベイを行った。空間線量率の測定は、CsI(Tl)シンチレーションサー ベイメータ(PDR-101 及び PDR-111、日立アロカメディカル株式会社)を用いた。 Ⅲ 研究結果

1) 走行サーベイによる外部被ばく線量の評価

カルナガパリ地区内の 34 か所において実施した車内外の計数率の比は 1.47 であった。この値 は既報の範囲内であった。さらに、35 ヶ所における測定結果より、計数率から空気カーマ率への 換算係数は 0.00244 (nGy/h/cpm) と評価された。したがって、車内で得られた 30 秒間の計数値を n_{in} とすると、車外の地表面から 1 m の高さにおける空気カーマ率 K_{out} (nGy/h) は (2) 式によっ て求められる。

$$K_{\rm out} = 2N_{\rm in} \,({\rm cpm}) \times 1.47 \times 0.00244 \,({\rm nGy/h/cpm})$$
 (2)

ここで、 N_{in} は 30 秒間当たりに得られた計数値であり、1 分間当たりの計数値(cpm)に換算するため N_{in} を2 倍した。

図2に各パンチャイにおける空気カーマ率を箱髭図で示す。特に高レベルのパンチャイでは空 気カーマ率のバラツキが大きかった。これは、高レベルのパンチャイでは局所的に高い地域が存 在し、その結果、空気カーマ率の分布が均一ではないことを示唆している。図3にカルナガパリ 地区の空気カーマ率の等値線図を示す。等値線図はハワイ大学が開発した Generic Mapping Tools

(GMT)によって作成した。GMT では、曲率最小化アルゴリズムを基にした補間方法を用いて、 任意の位置に与えられたデータ(実測値)から等間隔のグリッド上のデータ(未測定値)に変換 している。図3からもわかるように、比較的高い空気カーマ率は海岸沿いに分布していた。空気 カーマ率の最大値は Chavara パンチャイ内で観測され、その値は 2.1 μ Gy/h であった。また、 Neendakara パンチャイ内においても 1.9 μ Gy/h の空気カーマ率が観測された。いずれも、モナザ イトを含んでいると思われる砂上で観測された。



図2 各パンチャイの空気カーマ率



図3 カルナガパリ地区の空気カーマ率の等値線図

図4及び表1に空気カーマ率に対する⁴⁰K、²³⁸U系列、²³²Th系列の寄与率を示す。空気カーマ 率に対する²³²Th系列の寄与率が52%から79%と最も大きかった。特に、空気カーマ率が0.34 µGy/h 以上の測定ポイントに限定すると、その寄与率は70%と大きく、空気カーマ率に寄与する核種と して²³²Th系列が重要であると示唆された。



図 4 空気カーマ率に対する ⁴⁰K、²³⁸U 系列、²³²Th 系列の寄与率(AL: Alappad、CH: Chavara、NE: Neendakara、OA: Oachira、PA: Panmana、TH: Thevalakkara)。

	(44) (24)	公文正式	空気オ	リーマ率に		
パンチャイ	経 度	栓皮	:	寄与率(%)	表面状態
	(°)	(°)	⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th	
	9.0369	76.5087	1	25	74	土壌
Alappad	9.0524	76.5068	10	24	66	土壤
	9.1352	76.4639	31	17	52	土壤
	8.9696	76.5361	1	22	78	土壤
	8.9704	76.5450	0	22	77	土壌
	8.9877	76.5616	10	26	64	土壌
Chavara	8.9848	76.5527	3	30	67	草
	8.9889	76.5314	1	21	78	土壌
	8.9698	76.5294	3	25	72	土壤
	8.9928	76.5242	2	26	72	砂
	8.9680	76.5316	4	25	71	土壌
	8.9634	76.5317	2	30	68	土壤
Neendakara	8.9557	76.5328	2	28	70	砂
	8.9557	76.5328	2	26	72	砂
	8.9534	76.5418	1	21	77	草
	8.9420	76.5360	1	22	77	砂
	9.1352	76.5281	6	27	67	土壌
	9.1329	76.5338	8	26	66	土壤
Oachira	9.1167	76.5293	4	25	71	土壤
	9.1170	76.5180	2	25	73	土壤
	9.1351	76.5088	1	22	77	土壤
	9.0309	76.5501	2	24	74	土壤
	9.0019	76.5429	1	20	79	土壤
Panmana	9.0041	76.5365	3	26	70	土壤
1 anniana	9.0008	76.5254	3	27	70	土壤
	9.0162	76.5340	4	23	73	土壤
	9.0250	76.5378	0	23	77	土壤
	9.0177	76.5617	6	24	70	土壤
	9.0135	76.5881	4	24	73	土壤
Thevalakkara	9.0106	76.5934	4	25	72	土壤
	9.0061	76.5909	1	23	76	土壤
	8.9920	76.5746	4	24	72	土壤

表1 空気カーマ率に対する⁴⁰K、²³⁸U系列、²³²Th系列の寄与率

表2に各パンチャイの年間実効線量を示す。ここでは、評価手法を単純にするため、空気カーマから実効線量への換算係数を0.7(Sv/Gy)、1年間を8760時間(24時間×365日)として屋外

の空気カーマ率のみで算出した。年間実効線量の最大値は Chavara パンチャイであり、その値は 13.0 mSv/y であった。また、平均値では Neendakara パンチャイが最も高く、2.3 mSv/y であった。 Alappad パンチャイも平均的にみれば 1.9 mSv/y とカルナガパリ地区の中では高かった。

パンチャイ	デーカ粉	平均值	最大値	最小値	中央値	お計約し、べれ
107771	ノーク致	(mSv/y)	(mSv/y)	(mSv/y)	(mSv/y)	成別称レイル
Alappad	136	1.9	5.1	0.4	1.9	高レベル
Chavara	214	1.2	13.0	0.5	0.9	高レベル
Clappana	50	0.8	1.1	0.6	0.8	中レベル
Karunagappally	112	0.9	1.6	0.5	0.9	中レベル
K. S. Puram	74	0.8	1.1	0.5	0.9	中レベル
Neendakara	125	2.3	12.0	0.6	1.5	高レベル
Oachira	115	0.6	1.5	0.2	0.5	低レベル
Panmana	273	1.1	2.9	0.6	1.0	高レベル
Thazhava	138	0.6	0.8	0.5	0.6	低レベル
Thekkumbhagam	112	1.1	4.3	0.4	0.9	中レベル
Thevalakkara	215	0.7	1.0	0.5	0.7	低レベル
Thodiyoor	109	0.7	0.9	0.5	0.7	低レベル

表2 各パンチャイの年間実効線量のまとめ

2) 内部被ばく線量評価

260 軒の家屋において得られたラドン、トロン及びトロン子孫核種濃度の頻度分布を図5、6及 び7 に示す。ラドン濃度は、260 軒中76 軒が検出下限値未満であり、検出下限値を超えた値の大 部分は10 Bq/m³以下であった。また、トロン濃度については260 軒中246 軒から検出下限値を超 える値が得られた。その濃度は、10-20 Bq/m³の範囲で家屋数が最大を示しているものの、100 Bq/m³ を超える家屋が10 軒程度存在した。トロン子孫核種濃度は、平衡等価トロン濃度として評価した。 適切に濃度評価がなされたのは260 軒中191 軒で、その濃度は0.5-3.0 Bq/m³が大部分を占める。 ラドン、トロン及びトロン子孫核種濃度の詳細な分析値を表3にまとめた。



図5 屋内ラドン濃度に関する頻度分布



図6 屋内トロン濃度に関する頻度分布



図7 屋内トロン子孫核種濃度に関する頻度分布

表 3 ラドン	トロン及びト	、ロン子孫核種濃度	の分析値	(総家屋数·	260 軒)
		- ビマ 」 」/小/公/里/(反/文			200 +17

核種	家屋 (NA ¹)	平均值 (Bq/m ³)	中央值 (Bq/m ³)	範囲 (Bq/m ³)
ラドン	184 (76)	6 ± 5	4	1-43
トロン	246 (14)	38 ± 32	27	3-212
トロン子孫核種	191 (69)	1.95 ± 1.44	1.44	0.36-8.00

¹NA:検出下限値未満あるいは濃度評価せず

本調査で得られたラドン濃度及びトロン子孫核種濃度を用いて、ラドン及びトロンの吸入による内部被ばく線量を評価した。本評価は、UNSCEAR報告書に依った。すなわち、屋内滞在時間を年間7000時間とし、線量換算係数は、ラドン及びトロン子孫核種に関して、それぞれ9nSv/(Bqm⁻³h)、40 nSv/(Bqm⁻³h)を使用した。なお、ラドンガス及びトロンガスの内部被ばく線量への寄

与は無視できるとし、ラドン子孫核種濃度は、ラドン濃度に平衡ファクタ 0.4 を乗じて得た。ラ ドン及びトロンの吸入による内部被ばく線量(実効線量)の頻度分布を図 8 に示す。線量は 0.13 mSv から 2.60 mSv の間に分布し、平均値及び中間値は、それぞれ 0.65 ± 0.44 mSv、0.50 mSv と評 価された。ラドンの寄与は平均 0.14 mSv、トロンの寄与は平均 0.55 mSv であり、ほぼ全ての家屋 において、トロンの寄与が卓越した。また、高線量率地域と低線量率地域を比較すると、前者は 0.61 ± 0.39 mSv (0.18-1.98 mSv)、後者は 0.74 ± 0.52 mSv (0.13-2.60 mSv) と評価され (表 4)、明 らかな差は認められなかった。



図8 ラドン及びトロンの吸入による実効線量の頻度分布

衣4 /トノ及いトロノの吸入による内部放は、の美効歳里(総豕産数:20	くの実効線量(総家屋数:260	の実	内部被ば	よえ	′の吸入に]	トロン	夜び	ドン	ラ	表 4
--------------------------------------	-----------------	----	------	----	---------	-----	----	----	---	-----

地域	家屋 (NA ¹)	平均值 (mSv/y)	中央值 (mSv/y)	範囲 (mSv/y)
全地域	191 (69)	0.65 ± 0.44	0.50	0.13-2.60
高線量率地域	129 (54)	0.61 ± 0.39	0.49	0.18-1.98
低線量率地域	62 (15)	0.74 ± 0.52	0.64	0.13-2.60

¹NA: 検出下限値未満あるいは濃度評価せず

飲水中のラドン濃度及びその経口摂取にともなう内部被ばく線量の評価を表5に示す。低レベル高自然放射線地域の水中ラドン濃度はほとんどが最小検出ラドン濃度(2.5 Bq/L)未満であった。また、高レベル高自然放射線地域であるPanmanaパンチャイの水中ラドン濃度はではNDから11.0 Bq/Lであった。一方、Chavaraパンチャイでは海に近い3家屋から採水した水中ラドン濃度は最小検出ラドン濃度未満であったが、内陸の1家屋から採水した水中ラドン濃度は10.3 Bq/Lであった。これらの結果より1日に1Lの水を1年間(365日)経口摂取したとした場合の実効線量は4µSvから14µSv程度であると評価された。

パンチャイ	m	水中ラドン濃度	実効線量
ハンリャイ	ID	(Bq/L)	$(\mu Sv/y)$
	P-1	11.0 ± 1.0	14
Panmana	P-2	10.5 ± 1.3	13
(高レベル)	P-3	ND	—
	P-4	9.3 ± 0.7	12
	T-1	ND	—
Thevalakkara	T-2	ND	—
(低レベル)	T-3	ND	—
	T-4	ND	—
	C-1	ND	—
Chavara	C-2	10.3 ± 1.2	13
(高レベル)	C-3	ND	—
	C-4	ND	—
	O-1	ND	—
Oachira	O-2	ND	—
(低レベル)	O-3	2.9 ± 0.6	4
	O-4	ND	_

表5 飲水中のラドン濃度及びその内部被ばく線量

図9に、3軒の家屋において得られたウラン・トリウムの大気中放射能濃度の粒径分布を示す。 ウランについては、2家屋で2.5-10 µm(中粒)の粒子が多く含まれていた。また、トリウムについては、3家屋で2.5-10 µm(中粒)の粒子が多く含まれていた。





ND: 最小検出ラドン濃度以下

食事試料については、現地協力者により陰膳方式の食事試料(1日分)12サンプルを入手した。 試料中の濃度が検出限界以下の場合、検出限界値の1/2の濃度で放射性核種が含まれていると仮 定して求めた1日摂取量を図10に示す。²³⁸U系列元素及び²³²Th系列元素の1日摂取量は1.5 Bq/d から20.5 Bq/d、2.5 Bq/kgから31.2 Bq/kgの範囲の値を示し、明確な地域差は認められなかった。 食品試料の結果を表6に示す。食品についても明確な地域差は見られなかった。



図 10 ²³⁸U 及び ²³²Th 系列核種の一日摂取量

合口夕	14H H-15	²²⁶ Ra	Ra	40 K
及吅勹	地域	(Bq/kg)-ash	$\begin{array}{c} 228 \\ \text{Ra} \\ (\text{Bq/kg)-ash} \\ \hline 6.7 \pm 0.3 \\ 21.3 \pm 1.8 \\ 16.3 \pm 0.8 \\ 26.9 \pm 2.1 \\ 26.2 \pm 2.5 \\ 21.8 \pm 0.4 \\ \hline 44.1 \pm 1.2 \\ 15.6 \pm 0.5 \\ 30.4 \pm 1.5 \\ \end{array}$	(Bq/kg)-ash
井しくて	Oachira	1.4 ± 0.1	6.7 ± 0.3	532.3 ± 2.8
ットイモ	Chavara	9.1 ± 0.9	21.3 ± 1.8	7214.3 ± 27.3
タピオカ	Oachira	3.1 ± 0.3	16.3 ± 0.8	1347.6 ± 9.4
	Chavara	7.0 ± 1.4	26.9 ± 2.1	4888.7 ± 27.1
ココナッツ	Oachira	5.3 ± 1.4	26.2 ± 2.5	9191.9 ± 37.6
	Alappad	4.5 ± 0.1	21.8 ± 0.4	722.2 ± 3.6
日 米石	Alappad	13.3 ± 0.6	44.1 ± 1.2	1590.7 ± 10.3
只知	Chavara	3.4 ± 0.2	16.3 ± 0.8 26.9 ± 2.1 26.2 ± 2.5 21.8 ± 0.4 44.1 ± 1.2 15.6 ± 0.5 30.4 ± 1.5 15.8 ± 0.5 80.9 ± 2.0	274.1 ± 3.2
ホウレンソウ	Oachira	14.6 ± 1.0	30.4 ± 1.5	3893.4 ± 18.8
	Neendakara	3.4 ± 0.2	15.8 ± 0.5	765.9 ± 4.7
	Thevalakkara	19.3 ± 0.9	80.9 ± 2.0	6606.1 ± 23.2
	Alappad	4.6 ± 1.0	29.6 ± 2.5	7043.3 ± 33.1

表6 食品試料の放射能濃度

ケララでは頸部もしくは大腿部に 3 インチ NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータを当て 15 分間のγ線の測定を実施した。陸域のバックグラウンドが高いため、バックグラウンドが低い (5.4 nGy/h) 船上で調査を実施した。被験者は 29 歳から 60 歳までの 11 名であり、男性が 4 名、 女性が 7 名であった。全ての被験者において⁴⁰K のフォトピーク (1461 keV) は検出されたが、他 の核種由来のフォトピークは検出されなかった。

3) 外部及び内部被ばく線量評価(中国・広東省・陽江市)

分担研究者らの現地調査で得られた屋内外の空気カーマ率の結果を図 11 に示す。屋内、屋外と もに、0.1 μGy/h から 0.54 μGy/h の範囲の値を示した。家屋ごとに比較すると、全ての家屋におい て屋内の空気カーマ率が高い傾向が認められた。図 12 には、屋外の空気カーマ率の集落内空間分 布を示す。集落内において、0.1 μGy/h から 0.3 μGy/h の範囲を示し、住居が密集する居住地区で 高く外周で低い傾向が認められる。特に北方の居住地区と外周を比較すると、0.1 μGy/h 程度の差 があった (図 13)。これらの結果から、建材に含まれる放射性核種が外部被ばくに寄与する放射 線源の1つとなっていることが示唆される。



図11 調査家屋における屋内外の空気カーマ率



図 12 集落内における屋外の空気カーマ率の空間分布



図 13 外周及び住居地区における屋外の空気カーマ率の箱ひげ図。大きい箱の横線は、低線量率からそれぞれ 25%値、中央値及び 75%値を表し、小さい箱は平均値を表す。ひげは、最小値と最大値を表す。

前項と同様に、UNSCEAR 報告書に基づき、年間の屋内滞在時間を 7000 時間及び線量換算係数 を 0.7 Sv/Gy として屋内で測定された空気カーマ率から外部被ばく線量を評価すると、調査家屋 における最小値、最大値及び平均値は、それぞれ 0.6 mSv、1.8 mSv 及び 1.2 ± 0.5 mSv となった。

ラドン、トロン及びトロン子孫核種濃度の頻度分布を図 14 から図 16 に示す。60 軒中 1 軒は測 定器を回収できなかったため、59 軒の家屋において得られた結果を示す。なお、ラドン濃度につ いては 59 軒の全てが検出下限値を超えていた。また、トロン濃度については 59 軒中 23 軒が検出 下限値を超えていた。トロン子孫核種濃度は、平衡等価トロン濃度として評価した。ラドン、ト ロン及びトロン子孫核種濃度の詳細な分析値を表 7 に示す。



図 14 屋内ラドン濃度に関する頻度分布



図 16 屋内トロン子孫核種濃度に関する頻度分布

表7 ラドン、トロン及びトロン子孫核種濃度の分析値(総家屋数:59軒)

核種	家屋 (NA ¹)	平均值 (Bq/m ³)	中央值 (Bq/m ³)	範囲 (Bq/m ³)
ラドン	59 (0)	124 ± 78	115	27-476
トロン	23(36)	1197 ± 1217	825	10-3957
トロン子孫核種	59(0)	7.8 ± 9.1	4.2	0.6-36.2

1NA: 検出下限値未満あるいは濃度評価せず

本調査で得られたラドン濃度及びトロン子孫核種濃度を用いて、ラドン及びトロンの吸入による内部被ばく線量を評価した。なお、屋内滞在時間及びラドン、トロン子孫核種の線量換算係数

は前述のインド・ケララ州での調査と同様に UNSCEAR の報告書に基づき、屋内滞在時間を年間 7000 時間とし、線量換算係数は、それぞれ 9 nSv/(Bq m⁻³ h)及び 40 nSv/(Bq m⁻³ h)を用いた。ラド ン及びトロンの吸入による内部被ばく線量(実効線量)の頻度分布を図 17 に示す。また、ラドン 及びトロンの詳細な線量評価の値を表 8 にまとめた。



図17 ラドン及びトロンの吸入による実効線量の頻度分布

核種	平均值 (mSv/y)	中央值 (mSv/y)	範囲 (mSv/y)
ラドン	3.1 ± 2.0	2.9	0.7-12.0
トロン	2.2 ± 2.5	1.2	0.2-10.1
ラドン及びトロン	5.3 ± 3.5	4.4	1.5-16.4

表8 ラドン、トロン、ラドン及びトロンの吸入による実効線量(総家屋数:59軒)

ラドンの吸入による年間実効線量は 0.7 mSv から 12.0 mSv の間に分布し、平均値及び中央値は それぞれ 3.1 ± 2.0 mSv 及び 2.9 mSv であった。同様に、トロンでは 0.2 mSv から 10.1 mSv の間に 分布し、平均値及び中央値はそれぞれ 2.2 ± 2.5 mSv 及び 1.2 mSv であった。この結果より、トロ ンによる年間実効線量はラドンと同程度であった。また、ラドンとトロンを合計した年間実効線 量は 1.5 mSv から 16.4 mSv の間に分布し、平均値及び中央値はそれぞれ 5.3 ± 3.5 mSv 及び 4.4 mSv と評価された。

4) ラドン濃度、トロン濃度、トロン子孫核種濃度と空気カーマ率との相関関係(中国及びインド) 中国・陽江市の8家屋において測定したラドン濃度、トロン濃度、トロン子孫核種濃度と空気 カーマ率との相関関係を図18に示す。ラドン濃度及びトロン濃度は静電捕集型ラドン・トロンモ ニタ(RAD7, Durridge 社, U.S.A)を用いて測定した結果である。トロン子孫核種はフィルタサン プリングによって捕集し、固体飛跡検出器を用いて検出した。ラドン・トロン濃度及びトロン子 孫核種濃度の測定家屋における空気カーマ率はポケットサーベイメータを用いて測定した。空気

カーマ率は、ラドン濃度、トロン濃度、トロン子孫核種濃度のいずれにおいても相関は認められ なかった。



図18 中国・陽江市の8家屋において測定したラドン濃度、トロン濃度、トロン子孫核種濃度と 空気カーマ率との相関関係

インド・ケララ州の家屋において測定したラドン濃度、トロン濃度、トロン子孫核種濃度と 空気カーマ率との相関関係を図 19 に示す。ケララの調査では一部の家屋においてトロン子孫核種 濃度の測定ができなかったため、データ数はラドン・トロン濃度よりも少ない。ケララの結果も 中国での調査結果と同様に、空気カーマ率はラドン濃度、トロン濃度、トロン子孫核種濃度のい ずれにおいても相関は認められなかった。



図 19 インド・ケララ州の家屋において測定したラドン濃度、トロン濃度、トロン子孫核種濃度 と空気カーマ率との相関関係

IV 考察

1) インド・カルナガパリ地区での走行サーベイによる外部被ばく線量の評価

カルナガパリ地区全域を網羅するような走行サーベイの結果、高レベルのパンチャイでは海岸 沿いの局所に高い地域が存在し、空気カーマ率の分布が均一ではないことが示唆された。空気カ ーマ率の最大値は Chavara パンチャイ内で観測され、その値は 2.1 µGy/h であり、モナザイトを含 んでいると思われる砂上で観測された。また、その年間実効線量は 13.0 mSv/y と評価された。ま た、平均値では Neendakara パンチャイが最も高く、2.3 mSv/y であった。Alappad パンチャイも平 均的にみれば 1.9 mSv/y とカルナガパリ地区の中では高かった。

空気カーマ率に対する天然放射性核種(⁴⁰K、²³⁸U 系列、²³²Th 系列)の寄与率は²³²Th 系列が 52%から79%と最も大きかった。特に、空気カーマ率が0.34 µGy/h 以上の測定ポイントに限定す ると、その寄与率は 70%と大きく、空気カーマ率に寄与する核種として ²³²Th 系列が重要である と示唆された。

2) インド・ケララ州での内部被ばく線量の評価

ラドン濃度は概して低く、平均値で 6 Bq/m³という結果であった。一方、トロン濃度は平均値 38 Bq/m³と、ラドン濃度と比較して一桁高い値を示した。トロン子孫核種濃度は平均値 1.95 Bq/m³ であった。UNSCEAR 報告書に基づく線量評価では、ラドン及びトロンの吸入による被ばくは年 間 0.65 mSv となり、外部被ばく線量と比較すると概して低いものの、高線量率地域と低線量率地 域では差がなく、さらに低線量率地域で年間 2.6 mSv を示す家屋が存在することから、被ばくの 形態(被ばくの主因子)には地域差があると考えられる。

大気中に含まれる²³⁸U 系列元素及び²³²Th 系列元素からの被ばくについては、ICRP Publication 72 の実効線量係数と各粒径サイズの濃度合計値を用いて線量を計算すると 0.018-0.19mSv/y と計算された。

経口摂取による内部被ばく線量に関しては、図 10 の結果を基に、ICRP Publication 72 に記載されている実効線量係数を用いて 1 日の預託実効線量を評価した。²³⁸U 系列元素及び ²³²Th 系列元素による預託実効線量は、それぞれ以下のように評価された。

²²⁶Ra : $4.1 \times 10^{-5} \text{ mSv}$ $(1.3 \times 10^{-5} - 8.0 \times 10^{-5} \text{ mSv})$

²²⁸Ra : $1.4 \times 10^{-4} \text{ mSv}$ $(3.5 \times 10^{-5} - 2.9 \times 10^{-4} \text{ mSv})$

2つの高レベル高自然放射線地域と2つの低レベル高自然放射線地域のそれぞれ4家屋から飲 用水を採水し、水中ラドン濃度を評価した。高レベル高自然放射線地域の8家屋のうち4家屋で は有意に水中ラドンが検出され9.3から11.0 Bq/L であった。この水中ラドン濃度は、わが国の天 然水中のラドン濃度と同レベルであり⁶⁰、高レベル高自然放射線地域であっても特に濃度が高い ということはなかった。残りの4家屋は最小検出ラドン濃度(2.5 Bq/L)未満であった。低レベ ル高自然放射線地域の8家屋のうち7家屋は最小検出ラドン濃度未満であり、1家屋で2.9 Bq/L の極低い水中ラドン濃度が検出された。有意に検出された水中ラドン濃度を用いて、1 日に1 L の水を1年間(365日)経口摂取したとした場合の実効線量を評価した結果、4 µSv から 14 µSv 程度であり、水中のラドンを経口摂取することによる内部被ばくは無視できるレベルであった。 3) 外部及び内部被ばく線量評価(中国・広東省・陽江)

本地域では、外部被ばくよりも内部被ばくによる線量が卓越し、トロンの線量への寄与はラド ンのそれと同等と評価される。また、概して屋外より屋内の空間線量率のほうが高かったが、こ れはおそらく建材の影響と考えられる。このことは屋内空間線量率測定の重要性を示すものであ り、さらには個人の屋内・屋外の滞在時間も考慮した被ばく線量評価も必要である。

また、内部被ばくの評価を行うにあたり、長期間にわたるパッシブ型測定器を用いてラドン、 トロン及びトロン子孫核種濃度の測定を行った。ラドン濃度、トロン濃度及びトロン子孫核種濃 度は広範囲に分布していた。その中でも、トロン濃度は特に広範囲に分布していた。また、われ われが昨年度に報告した同地域での短期間での測定結果は、ラドン濃度は19 Bq/m³から98 Bq/m³、 トロン濃度は18 Bq/m³から1120 Bq/m³、トロン子孫核種濃度は0.4 Bq/m³から10.3 Bq/m³であった。 この結果から今回の長期間にわたる測定結果は、何れの結果も短期間で測定したものよりも高い 結果となった。

さらに、ラドンとトロン子孫核種濃度の測定結果を基に、ラドンとトロンの吸入による年間実 効線量を評価したところ、それらの算術平均値はそれぞれ 3.1 mSv 及び 2.2 mSv と推定され、ト ロンの線量への寄与はラドンのそれとほぼ同等であった。ラドン及びトロンの吸入による年間実 効線量の平均値は 5.3 mSv であり、外部被ばく線量(1.2 mSv)と比べて 4 倍以上高かった。陽江 における内部被ばくによる年間実効線量は、インド・ケララ州の年間実効線量(0.65mSv)と比 べて 8 倍以上高かった。

V 結論

本研究により得られた知見をまとめると以下の通りである。

1) インド・ケララ州カルナガパリ地区における走行サーベイによる外部被ばく線量の評価

- ・ 沿岸域のごく一部において高い空気カーマ率を呈した。空気カーマ率に寄与する放射性 核種は主として²³²Th系列によるものであることが明らかとなった。
- ・ 得られた空気カーマ率を用いて推定した外部被ばくによる年間実効線量の最大値は 2.1 mSv (Chavara パンチャイ) であった。
- 2) インド・ケララ州カルナガパリ地区におけるラドン・トロンによる内部被ばく線量の評価
 - ・ ラドン及びトロンの吸入による実効線量は 0.13 mSv から 2.60 mSv の間に分布した。
 - ・ ラドンの寄与は平均 0.14 mSv、トロンの寄与は平均 0.55 mSv であり、ほぼ全ての家屋に おいてトロンの寄与が卓越した。
 - 高線量率地域と低線量率地域を比較した結果、明らかな差は認められなかった。
 - 1日に1Lの水を経口摂取したとした場合の年間実効線量の最大値は14 µSv であり、水中のラドンの経口摂取による内部被ばくは無視できる。
 - ・ 陰膳方式の食事試料から評価した²³⁸U系列及び²³²Th系列の放射性核種の経口摂取による預託実効線量の最大値は、それぞれ 0.73 µSv 及び 0.66 µSv であり、食事による内部被ばくは無視できる。
- 3) 中国・広東省陽江における外部及び内部被ばく線量の評価
 - ・ 得られた空気カーマ率を用いて推定した外部被ばくによる年間実効線量の最大値は 1.8 mSv であった。
 - ・ ラドン及びトロンの吸入による年間実効線量は 1.5 mSv から 16.4 mSv の間に分布した。
 - ラドンとトロンの吸入による年間実効線量の平均値はそれぞれ 3.1 mSv 及び 2.2 mSv で あり、トロンの線量への寄与はラドンのそれとほぼ同等であった。

インド及び中国における内部及び外部被ばく線量評価によって、インドでは主として²³²Th 系 列核種による外部被ばく、中国ではラドン及びトロンの吸入による内部被ばくが線量への寄与が 大きいことが明らかとなった。

引用文献

- 1) Boice JD Jr Hendry JH Nakamura N, et al. Low-dose-rate epidemiology of high background radiation areas. Radiat Res. 2010; 173(6): 849-854.
- 2) 湊進. 環境 γ 線解析用 3" (×3" NaI(Tl)シンチレータのレスポンス行列. 名古屋工業技術試験所 報告. 1978: 27(12): 384-397.
- Porstendörfer J. Physical parameters and dose factors of the radon and thoron decay products. Radiat. Prot. Dosim. 2001: 94(4): 365-373.
- 4) United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Sources and effects of

ionizing radiation, UNSCEAR 2000 report to the general assembly, with scientific annexes, Volume I, Sources, United Nations, New York, 2000.

- 5) International Commission on Radiological Protection: Dose Coefficient for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 68, Pergamon Press, Oxford, 1994.
- 6) 水中ラドンに関する専門研究会.日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ.日本保健物理 学会,編.日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ Vol2-No.1. 東京:日本保健物理学会, 2004;1-112
Dosimetric studies of residents in high natural background radiation areas in India and China

Shinji Tokonami

Department of Radiation Physics, Institute of Radiation Emergency Medicine, Hirosaki University

Keywords: high natural background radiation; Karunagappally in Kerala State, India; Yangjiang in Guangdong Province, China; internal exposure; radon and thoron; external exposure; car-borne survey

Abstract

The purpose of this study is to examine whether magnitude of health effects associated with external exposure to low-dose-rate radiation is different from those related to medium-high dose-rate exposure. In collaboration with the principal investigator of this project, we are going to investigate internal and external exposure to high background natural radiation among residents in Karunagappally in Kerala State, India and Yangjiang in Guangdong Province, China. In this fiscal year, in Karunagappally, radon thoron and its progeny concentrations in 260 dwellings and radionuclides in diet samples were measured to estimate internal exposure. In addition, car-borne survey was conducted to create a gamma-dose-rate distribution map and to evaluate external exposure. In Yangjiang area, short-term measurements of radon thoron and its progeny concentrations and gamma dose rate were made in 60 dwellings to evaluate internal and external exposure.