

平成 25 年度原子力災害影響調査等事業
「東京電力福島第一原子力発電所事故に係る被ばく線量の
把握調査等」

成果報告書

平成 26 年 3 月

独立行政法人

放射線医学総合研究所

本報告書は、環境省からの平成 25 年度委託事業として独立行政法人放射線医学総合研究所が行った「東京電力福島第一原子力発電所事故に係る被ばく線量の把握調査等」の成果を取りまとめたものです。従って、本報告書の著作権は環境省に帰属しており、本報告書の全部または一部の無断複製等の行為は、法律で認められたときを除き、著作権の侵害にあたるので、これらの行為を行うときは環境省の承認手続きが必要です。

要 約

本報告書は、環境省からの委託事業（平成 25 年度原子力災害影響調査等事業）「東京電力福島第一原子力発電所事故に係る被ばく線量の把握調査等」として、独立行政法人・放射線医学総合研究所（以下、放医研）が実施した調査研究の成果をまとめたものである。調査対象としたのは、1. 事故初期内部被ばく線量推計の精度向上に係る検討（第 3 章）、2. 個人被ばく線量モニタリングのガイドライン策定に資する情報収集（第 4 章）、及び、3. WBC の精度調査等（第 5 章）に関する項目である。

1 については、初期内部被ばく線量推計の基礎となる人の個人モニタリングに関する文献を可能な限り収集するとともに、その代表的なものについては数値シミュレーションによる検証を試みた。すなわち、文献に書かれた情報に基づき、数値シミュレーションによる個人モニタリングの状況を再現することにより、体内放射能の定量に用いられた装置の校正定数の精度の評価を行った。また、将来予定している個人の行動情報を活用した初期内部被ばく線量の推計方法について、予備的検討を行った。

2 については、福島県内各地で行われている県民を対象とした様々な個人モニタリングに関して、主として実務関係者を対象とした統一的なガイドラインの内容について素案を提示し、その材料に資する文献等を広範に収集した。

3 については、福島県内において県民の内部被ばく線量測定に活用されているホールボディカウンタ（WBC）の精度調査の結果、及び WBC の標準化への取り組みの一つとして、体格別ファントムを用いて導出した椅子型 WBC の体格補正式を示した。

目次

第1章 はじめに.....	6
第2章 事業概要及び実施方法.....	8
2.1 事業目的.....	8
2.2 事業の実施方法.....	8
(1) 事故初期の内部被ばく線量の把握.....	8
(2) 個人被ばく線量モニタリング運用マニュアルに必要な情報の収集.....	9
(3) WBC 校正事業等.....	9
第3章 事故初期内部被ばくの線量推計の精度向上のための検討.....	11
3.1 初期内部被ばくの線量測定に関する文献等.....	11
3.2 内部被ばく線量測定の精度検証.....	11
(1) 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査における測定器の年齢別校正定数.....	11
(2) WBC によって定量された ^{131}I	20
3.3 ヨウ素とセシウム の摂取量比.....	27
(1) ヨウ素とセシウム の摂取量比の導出.....	27
(2) 考察.....	31
3.4 初期内部被ばく線量推計の精度向上に向けて.....	34
3.5 拡散シミュレーションによる内部被ばく線量の推計精度.....	35
第3章 参考資料.....	38
第4章 個人線量測定ガイドラインのための資料収集.....	44
4.1 個人線量測定ガイドラインの内容.....	44
4.2 個人線量測定ガイドラインに資する資料収集.....	44
第5章 WBC の精度調査等.....	53
5.1 福島県内で稼働中の WBC の精度調査.....	53
(1) 方法.....	53
(2) 結果と考察.....	55
5.2 体格別ファントムを用いた椅子型 WBC の計数効率の体格補正法の検討.....	58
(1) 方法.....	58
(2) 結果と考察.....	59
別添1.....	62
別添2.....	63
第5章 参考資料.....	65
第6章 本事業のまとめと今後の課題.....	66
本事業の成果.....	68
付録.....	69

図目次

図 1	甲状腺中 ^{131}I 測定における NaI(Tl)サーベイメータの校正定数.....	12
図 2	ORNL phantom series 2 (フロリダ大学)	14
図 3	Pediatric phantom series (フロリダ大学)	14
図 4	ファントムに対する NaI(Tl)サーベイメータの校正定数.....	16
図 5	ファントムに対する NaI(Tl)サーベイメータの校正定数.....	16
図 6	各ファントムの頸部断面図 (左: A ファントム, 右: B ファントム)	17
図 7	C ファントムの数値シミュレーションモデル及び校正定数 (単位: $\text{kBq}/\mu\text{Sv h}^{-1}$)	18
図 8	C ファントム (U3, U4) の甲状腺ボクセル (赤で表示した部分)	19
図 9	小児甲状腺中 ^{131}I 測定の再現実験	20
図 10	放射線医学総合研究所が所有するスキャニング型 WBC.....	21
図 11	放医研 WBC の数値シミュレーションモデル.....	22
図 12	BOMAB ファントム (^{137}Cs) に対するピーク効率に対する実験値と計算値の比較..	23
図 13	BOMAB ファントム (^{137}Cs) 各部位のピーク効率の検出器位置による変化	23
図 14	BOMAB ファントム (^{137}Cs) 各部位及び全部位のスキャン測定におけるピーク効率	24
図 15	数値シミュレーションモデル (ボクセルファントム)	25
図 16	AM ファントムのピーク効率の検出器位置による変化.....	26
図 17	AM ファントムのピーク効率の検出器位置による変化.....	26
図 18	^{131}I の ^{137}Cs の摂取量比の導出過程	28
図 19	摂取量比を 1 としたときの成人の実効線量から各年齢区分の甲状腺線量への換算 ..	28
図 20	小児甲状腺被ばくスクリーニング検査から評価した甲状腺等価線量分布	29
図 21	WBC 測定から得られた成人の実効線量分布.....	29
図 22	^{131}I の ^{137}Cs に対する摂取量比の導出	30
図 23	日本原子力研究開発機構・核燃料サイクル工学研究所で測定された ^{131}I 及び ^{137}Cs の 大気中放射性核種濃度.....	34
図 24	行動情報を用いる内部被ばく線量推計.....	35
図 25	小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果から推計された甲状腺線量分布及び大 気拡散シミュレーションによる推計値.....	36
図 26	福島県内の放射線状況等.....	45
図 27	成人男性模擬の BOMAB ファントム.....	53
図 28	WBC の精度調査結果—BOMAB ファントム (^{137}Cs) 基準放射能に対するバイアス (2012 年度及び 2013 年度実施分)	57
図 29	WBC の精度調査結果—BOMAB ファントム (^{137}Cs) 基準放射能に対するバイアス (2013 年度実施分のみ)	57
図 30	調査対象とした 2 機の椅子型 WBC.....	58
図 31	体格別 BOMAB ファントムの外観及び仕様	59
図 32	体格別 IGOR ファントムの外観及び仕様	59
図 33	^{137}Cs のピーク効率 (662 keV) と体表面積の関係	60
図 34	H 社の WBC による IGOR ファントム (2 歳児) の測定の様子	61

表目次

表 1	各ファントムの甲状腺前組織厚.....	17
表 2	小児甲状腺被ばくスクリーニング検査から評価された甲状腺等価線量の 80%, 90% 及び 95%累積頻度値	29
表 3	WBC 検査から評価された実効線量の 80%, 90%及び 95%累積頻度値	30
表 4	^{131}I の ^{137}Cs に対する摂取量比の計算結果.....	31
表 5	日本人のヨウ素の甲状腺移行率	32
表 6	各避難行動モデルケースの ^{131}I 吸入摂取による年齢群別甲状腺線量の推計値	36
表 7	福島県住民の甲状腺線量推計値 (90 パーセンタイル値)	37
表 8	個人線量測定ガイドラインの内容 (案)	45
表 9	精度調査を行った WBC 及び施設等 (その 1)	54

第1章 はじめに

東京電力福島第一原子力発電所における過酷事故により、多量の放射性核種が環境中に漏えいする事態となった。その影響を受けた地域については、住民の被ばく線量の正確な把握が必要である。福島県では、個人行動調査票に基づく事故発生から4ヶ月間の初期外部被ばく線量の推計、及び、ホールボディカウンタ（WBC）による大規模な内部被ばく線量計測を進めており¹⁾、また、福島県内外の一部の自治体では、自主的に個人線量計による外部被ばく線量測定を行っている²⁾。

しかしながら、事故初期の被ばく線量推計や現在進行中である個人線量測定について、課題とするとところは多い。懸念される小児の甲状腺被ばくによる健康影響に関しては、その客観的評価に不可欠となる甲状腺等価線量（特に、事故初期段階における）の推計が、環境省からの委託事業（平成24年度原子力災害影響調査等事業「事故初期のヨウ素等短半減期核種による内部被ばく線量評価調査」）において行われたところである³⁾。しかし、同推計は、個人の行動情報を反映したものではなく、その根拠とした多くの情報についても不確かさが排除できていない。更なる推計精度の向上のためには、放射性核種の拡散過程を詳細に解明するとともに、事故初期における避難住民の行動及び生活実態を把握することが不可欠であり、推計方法の見直しを図る必要がある。また、現在進められている福島県住民等の個人線量測定においても、我が国ではこれまでに経験のない一般公衆を対象としていることから、職業被ばくにおける個人線量測定との相違に起因する様々な課題が生じている。したがって、公衆を対象とした個人線量測定に関する統一的なガイドラインの様な素材を策定し、関係者間で共通の理解を持つことが望まれる。

本報告書では、昨年度に引き続き、環境省からの委託事業である「平成25年度原子力災害影響調査等事業（東京電力福島第一原子力発電所事故に係る被ばく線量の把握調査等）」において、受託元である独立行政法人・放射線医学総合研究所（以下、本報告書では放医研と略す）が実施した調査結果を取りまとめたものである。本報告書の内容は次のとおりである。第1章では、本調査の背景と意義について述べた。第2章では、委託事業の概要及び実施方法について述べる。第3章から第5章は、本調査の具体的な項目になる。第3章では、事故初期の内部被ばく線量推計の精度向上の検討のため、入手可能な個人モニタリングに関する文献を集約するとともに、その代表的なものについて数値シミュレーションによる検証を行った結果を中心に述べる。第4章では、前述した個人線量測定のガイドラインを将来作成するにあたり、有用と思われる文献や公開資料についてまとめた。第5章では、昨年度から実施している福島県内で県民の測定に使われているWBCの精度調査の結果、及び、WBCの測定標準化の課題の一つである被検者の体格補正について述べる。第6章では、本事業のまとめと今後の課題について述べる。

第1章参考資料

- 1) 福島県県民健康管理調査 HP,
http://wwwcms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet?DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_DISPLAY_ID=U000004&CONTENTS_ID=24287
- 2) 福島市 HP,
<http://www.city.fukushima.fukushima.jp/soshiki/71/hkenkou-kanri14022601.html>
- 3) 独立行政法人・放射線医学総合研究所, 平成 24 年度原子力災害影響調査等事業「事故初期のヨウ素等短半減期による内部被ばく線量調査」成果報告書, 平成 25 年 2 月 (2013).

第2章 事業概要及び実施方法

本章では、環境省からの委託事業（平成25年度原子力災害影響調査等事業「東京電力福島第一原子力発電所事故に係る被ばく線量の把握調査等」）の概要及び実施方法について述べる。

2.1 事業目的

東京電力福島第一原子力発電所の事故時に放出された放射性物質による福島県等の住民の健康リスク評価を行うための基礎データとして、住民の被ばく線量の把握は重要である。福島県では、事故後の行動調査をもとにした事故発生後の4カ月間の外部被ばく線量推計や、ホールボディカウンタ（WBC）（以下、WBCという。）による内部被ばく線量測定等が行われ、福島県内の各市町村等においても、福島県民健康管理基金からの補助を受け、個人線量計による外部被ばく線量測定が実施されている。

また、平成24年度原子力災害影響調査等事業「事故初期のヨウ素等短半減期による内部被ばくの線量評価調査」において、放射性ヨウ素等の短半減期核種による事故初期段階の内部被ばくに関し、小児甲状腺のスクリーニング検査結果の他、WBCによる検査結果や環境モニタリングの実測データ等により、線量の推計が行われたところである。

しかしながら、それらの検査結果や実測データは限られており、内部被ばく線量推計についての精度向上のためには、事故発生後の住民の行動・生活実態や、気象条件等からの影響等、多角的な視点から、その推計過程・方法を検証することが課題となっている。また、現在、福島県内外の地方自治体等で、WBCや個人線量計による住民の被ばく線量測定が実施されているが、それらの機器や技術的仕様、あるいは、使用される場所のバックグラウンドに差異が生じているなどの事情から、住民の健康管理に資する基礎データとしての信頼性が確保されるよう、WBCや個人線量計の測定精度を保つことが不可欠となっている。

そこで、本事業においても引き続き、事故初期における内部被ばく線量の把握調査を行うとともに、WBCや個人線量計による測定精度を保つための方法を検討し、住民の健康管理に資するものとする。

2.2 事業の実施方法

(1) 事故初期の内部被ばく線量の把握

事故発生後の約1ヶ月の放射性ヨウ素等短半減期核種による内部被ばく線量について、その推計の精度に関する検討を行う。具体的には、これまでに得られた実測データを集約し、個人線量評価における仮定、測定条件等を集約するとともに、それらの精度及び妥当性を評価する。そのため、以下①から③を行う。

- ① 既存の個人内部被ばく線量計測データの集約及び数値シミュレーションによる精度検証

これまでに学術誌等で公表された文献を中心に、個人内部被ばく線量計測の方法や線量評価の条件等について集約する。個人内部被ばく線量計測データの妥当性及び精度検証については、文献に記載のある測定条件に基づき、数値シミュレーションにより装置の校正定数やその体格依存性等を評価し、定量された体内放射能の精度を検証する。数値シミュレーションでは、用いられた体外計測装置を可能な限り詳細に再現したモデルと人体モデル（CT画像等から構築されたボクセルファントム等）を用いる。

② WBCにより評価された甲状腺中ヨウ素量の精度検証

福島第一原子力発電所事故において取得された個人内部被ばく線量計測データには、可動式の検出器を備えたベッド式のWBCにより、事故初動対応者や避難者の計測を行い、 ^{131}I 及びCs (^{134}Cs 及び ^{137}Cs)の体内量が定量されたものも含まれている。このWBCの校正には全身を模擬した物理ファントムが使われたが、同ファントムは全身均一とした線源であるため、甲状腺に局在する ^{131}I とは測定ジオメトリが大きく異なる。この測定の妥当性を検証するため、数値シミュレーション等によりWBCの応答を評価する。

③ 個人行動情報を活用した内部被ばく線量推計の検討

入手可能な個人行動情報の解析方法の検討を進めるとともに、大気拡散シミュレーションによる内部被ばく線量推計の精度を検証する。

(2) 個人被ばく線量モニタリング運用マニュアルに必要な情報の収集

WBCや個人線量計を用いて行う個人被ばく線量モニタリングに関して、測定方法、結果の分析・活用方法等、測定実施のガイドラインとなる運用マニュアルを作成するために必要な技術・学術情報を収集・整理し、電子媒体にて提出することとする。そのため、以下④を行う。

④ 福島県の現状を考慮した個人被ばく線量モニタリングマニュアルの必要な資料収集

個人被ばく線量モニタリングマニュアル（案）を策定することを視野に入れ、参考資料を収集する。また、各種の個人被ばく線量計測機器の概要（個人線量計やWBCなど）や実測データを踏まえた解説についても参考資料として含める予定である。事業に際しては、具体的なマニュアルの内容に関する情報を委託元から提供頂き、収集すべき必要資料に反映する。

(3) WBC 校正事業等

1) 福島県内のWBCの校正

ごく微量な体内のセシウムを正確に測定するために、WBCの測定の精度を保つことは

不可欠である。そこで、環境省担当官の指示に基づき、1回につき2名程度、WBCが設置されている現地に赴き、ファントム（ヒトの全身を模した体積線源）を用いた校正を行い、体内放射能の定量精度を誤差 $\pm 30\%$ 程度に確保する。その際、 γ 線の測定エネルギー範囲として、概ね100 keV \sim 2 MeVを考慮するものとする。

また、WBCの校正にあわせ、必要に応じて、測定担当者等を対象としたWBCの操作等に関する説明を行う。その内容として、機器の点検方法、校正の原理及び測定結果から内部被ばく線量を計算する方法等を含むものとする。

実施に当たっては、地方自治体と協議し、福島県内を中心に3台程度実施する。なお、二次・三次被ばく医療機関に設置されたWBCについては、原則として本事業の対象としないが、具体的な実施箇所の選定等、実施方法の詳細については環境省担当官と協議のうえ決定する。そのため、以下⑤を行う。

⑤ 標準体格ファントムを用いたWBC校正及び精度調査

福島県内に設置されたWBCを中心に9台程度の校正を行う。校正には、放医研が所有する米国規格（ANSI）に準拠した成人男性模擬のBOMABファントム（全4体。それぞれ ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 及び水を含む体積線源を内蔵する）を用いる。また、一部のWBCについては、体格別BOMABファントムを使用して試験的に校正データを取得する。

2) WBCによる測定標準化に係る事業

本事業では、メーカーの異なる種々のWBC間の共通化・最適化に向け、数値シミュレーションまたは体格の異なるファントムを用いてのWBCの計数効率における体格補正を検討する。そのため、以下⑥を行う。

⑥ 体格別ファントムを用いたWBCの体格補正法の検討

椅子型WBCを対象として、放医研が所有するWBC校正用体格別BOMABファントムを使用し、計数効率の体格依存性を明らかにする。また、体格パラメータを変数とする計数効率の体格補正式を導出する。

第3章 事故初期内部被ばくの線量推計の精度向上のための検討

本章では、昨年度実施した初期内部被ばく線量（主に、甲状腺等価線量）の精度向上を図るため、これまでに得られている事故初期の個人内部被ばく線量計測に関する文献を集約するとともに、その代表的なものについて数値シミュレーションによる検証を試みた。また、将来、個人行動情報に基づく初期内部被ばく線量推定を行うことを想定し、その手順を検討した。

3.1 初期内部被ばくの線量測定に関する文献等

事故発生から3年が経過し、人の個人線量測定に関する知見が徐々に蓄積されてきたと言える。別表1には、これまでに公表された一般公衆を対象とした個人線量測定事例の内、内部被ばくに関するものを集約した。

一方、初期内部被ばくに最も寄与する¹³¹Iを直接計測した個人線量測定例は、一般公衆については高々1,500件程度でしか得られていない。したがって、初期内部被ばく線量（特に、甲状腺等価線量）の再構築のためには、事故から数か月後経って開始された（現在も続けられている）WBCの測定結果を有効に活用する必要がある。ただし、この測定結果に¹³¹Iによる内部被ばく線量は含まれないため、¹³¹IとWBCの測定対象となるCs（¹³⁴Csと¹³⁷Cs）の摂取量比を決定する必要がある¹⁾。

¹³¹Iを直接計測した個人線量測定は、原子力安全委員会（当時、後の原子力規制委員会）の要請を受けて、現地対策本部が川俣町、飯館村及びいわき市において実施した小児甲状腺被ばくスクリーニング検査（1,080名）^{2,3)}、Tokonamiらが浪江町民62名について行った甲状腺中¹³¹Iの直接測定⁴⁾、及びMatsudaらがWBCを用いて行った初動対応者及び福島県外避難者（事故発生から1ヶ月以内に測定した被検者173名）の測定⁵⁾、が主である。また、事故発生から1年以内に得られた福島県住民のWBC測定結果については、Momoseらが報告している⁶⁾。同結果は、昨年度実施した初期内部被ばく線量推計において最も重要な基礎となっている。

3.2 内部被ばく線量測定の精度検証

(1) 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査における測定器の年齢別校正定数

前述した小児甲状腺被ばくスクリーニング検査は、福島第一原子力発電所事故に係る福島県等住民を対象とした初期の個人モニタリングとしては最大の被検者数（1,080名）を網羅している。同検査は高い精度を有するものではなかったものの、初期内部被ばく線量の再構築には重要でデータである。小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果から、¹³¹Iの体内摂取による甲状腺等価線量を導出するには、被検者の行動情報に基づく摂取シナリオの構築と使用された測定器の校正定数¹⁾の評価が必要である。本調査では、後者について調査検討を行った。

¹⁾ 本稿ではNaI(Tl)サーベイメータの1μSv/h当たりの甲状腺中¹³¹I放射能(kBq)とした。

小児甲状腺被ばくスクリーニング検査においては、スクリーニングレベルに設定した甲状腺等価線量 100 mSv の超過の有無を迅速に判定することを主眼に置いていたことから、解析に時間を要するスペクトロメータではなく、空間線量率の測定に広く利用、普及している NaI(Tl)サーベイメータ (TCS-161, 171 及び 172, 日立アロカメディカル社製) が用いられた⁷⁾。同サーベイメータの甲状腺中 ¹³¹I に対する検出感度は、頸部ファントムを用いた実験により、1 歳児相当の被検者について 1 μ Sv/h あたり 22 kBq と評価された⁸⁾。この結果から、上記のスクリーニングレベルに相当する NaI(Tl)サーベイメータの指示値 (バックグラウンドを差し引いたネット値) は 0.2 μ Sv/h と評価された。

昨年度の初期内部被ばく線量推計では、検査当時に使われた校正定数と Tanaka と Kawamura⁹⁾ が導出した校正定数を参考にした推定値の平均値を用い、1,080 名の被検者の ¹³¹I 量及び甲状腺等価線量の算出を行った。NaI(Tl)サーベイメータの校正定数を図 1 に示す。同図に示す SRP-68-01 は、チェルノブイリ事故で使用された同様の測定器であり、文献¹⁰⁾を参考にして示した。

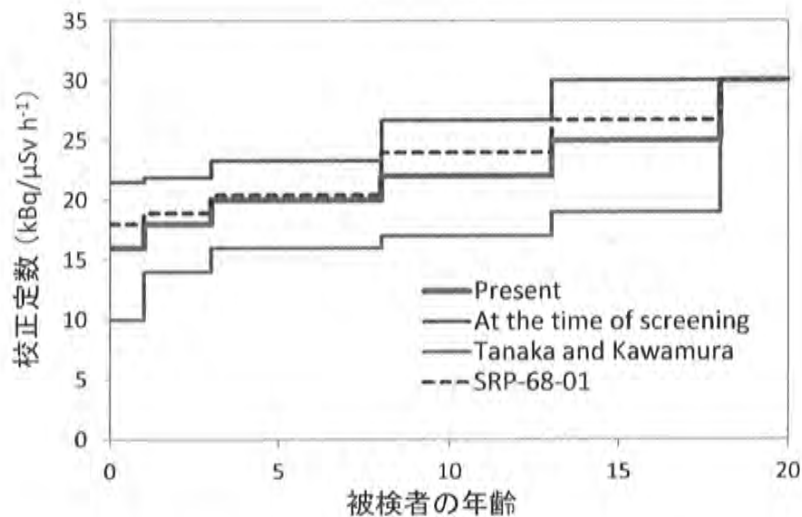


図 1 甲状腺中 ¹³¹I 測定における NaI(Tl)サーベイメータの校正定数
 ※成人に対する校正定数を 30 kBq/μSv h⁻¹ と規格化²⁾

より正確な校正定数を得るには、実際の人体と解剖学的に近い物理ファントムを製作することが考えられる。しかしながら、これには時間と費用を要するため、本調査では年齢区分毎に定義された数値ファントムを用いた数値シミュレーションによって検討した。数値ファントム

²⁾ 使用された頸部ファントムの形状及び内蔵する甲状腺形状溶液は成人を模倣したものであり、小児に対する校正定数を求めるのに、年齢に応じた甲状腺体積に相当する放射性溶液 (¹³³Ba) を容器に封入した。成人に対する校正定数は 30.15 kBq/μSv h⁻¹ と評価されており、これを丸めた 30 kBq/μSv h⁻¹ で規格化した年齢別の校正定数を示した。

には以下を使用した。

- A. ORNL phantom series 1 (Ulanovsky)
- B. ORNL phantom series 2 (UF)
- C. Pediatric phantom series

AとBのファントムは、オークリッジ国立研究所（米国）において個人線量評価の目的で開発されたファントムをベースに修正が加えられたものである。AのファントムはUlanovskyら¹¹⁾、Bのファントムはフロリダ大学（米国）による修正¹²⁾である。前者については、さらに著者らにより、頸部の傾斜を変更している。これらのファントムは、人体及び臓器の外形を数式によって定義している。Cはフロリダ大学が開発した小児のボクセルファントムである^{13,14)}。ボクセルファントムとは、CTやMRIなどの人体断面画像から構築された微小体積要素（ボクセル：volume pixel）からなる数値ファントムであり、近年の体外計測研究でも数多く利用されている¹⁵⁻¹⁷⁾。これらのファントムを図2から図4に示す。

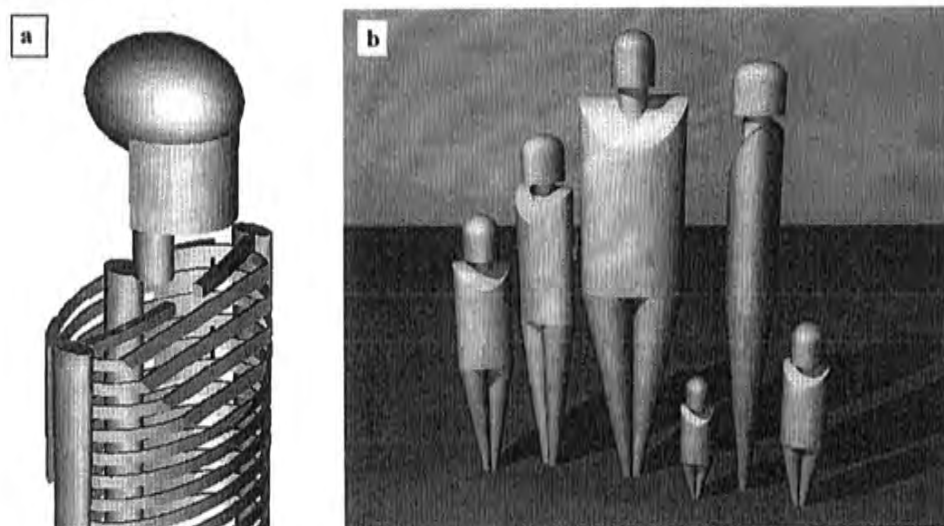
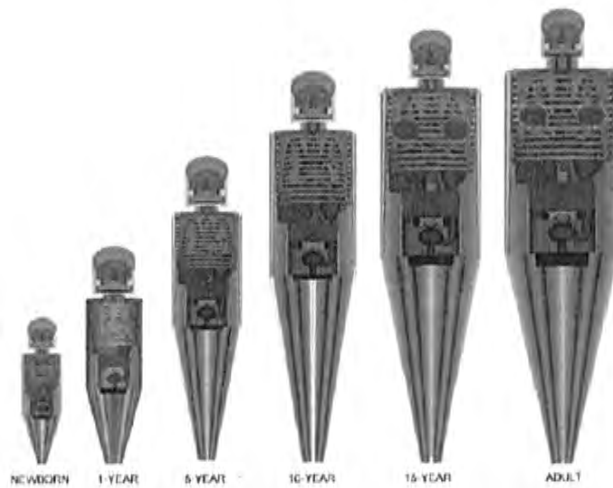


Figure 1. Modified phantom skeleton (a) and 'family' of the modified phantoms (b).

図 2 ORNL phantom series 1 (Ulanovsky)³

³ 数値シミュレーションに用いた数学ファントムのデータは、Ulanovsky による好意により提供を受けた。



Frontal views of UF Revised ORNL phantoms

図 2 ORNL phantom series 2 (フロリダ大学)

UNCLASSIFIED

U. Florida Pediatric Phantoms

- Whole Body Voxel Phantoms
- 72 anatomical regions defined

File	Age, Gender	Millions of voxels	Resolution (mm)
ufv02	9 month male	12.5	0.8 x 0.8 x 3
ufv03	4 year female	15.3	0.9 x 0.9 x 5
ufv04	8 year female	12.11	1.1 x 1.1 x 6
ufv05	11 year male	24.2	0.9 x 0.9 x 6
ufv06	14 year male	16.9	1.1 x 1.1 x 6.7

- Created by Choonik & Choonsik Lee



<http://www.nre.ufl.edu>

UNCLASSIFIED



9-month male



14-year male



図 3 Pediatric phantom series (フロリダ大学)

甲状腺中 ^{131}I に対する NaI(Tl)サーベイメータの応答 R (1 cm 線量当量 $H^*(10)$, $\mu\text{Sv/h}$) は、次式によって計算した。

$$R = \int G(E) \cdot n(E) dE \quad \dots (1)$$

ここで、 $n(E)$ は検出器の有感領域において生じる γ 線の波高スペクトルであり、 $G(E)$ は通称 G 関数と呼ばれる波高スペクトルから 1cm 線量当量に変換するための関数である¹⁸⁾。 $n(E)$ の計算には、MCNP5¹⁹⁾及びMCNPX2.6²⁰⁾を用いた。その他、検出器の内部構造、1cm 線量当量への演算処理などの数値シミュレーションに必要な情報はメーカーから提供を受けた。数値シミュレーションの妥当性は、ポイント線源などを用いた実験との比較により確認している。

図4及び図5にAとBのファントムに対する校正定数を比較して示した。NaI(Tl)サーベイメータは数値ファントムの頸部に密着、かつ、検出面の中心が甲状腺中央の高さにほぼ一致する様に数値シミュレーション上で配置した。ただし、Bのファントムの内、0歳児、1歳児及び5歳児については、頭部と胴体間のギャップがNaI(Tl)サーベイメータの直径よりも狭いため、NaI(Tl)サーベイメータをファントムへのオーバーラップを許容して頸部に密着させた。以上から、同図に示す校正定数は、最も検出感度の高い条件（校正定数が最も低くなる）での数値と考えられる。

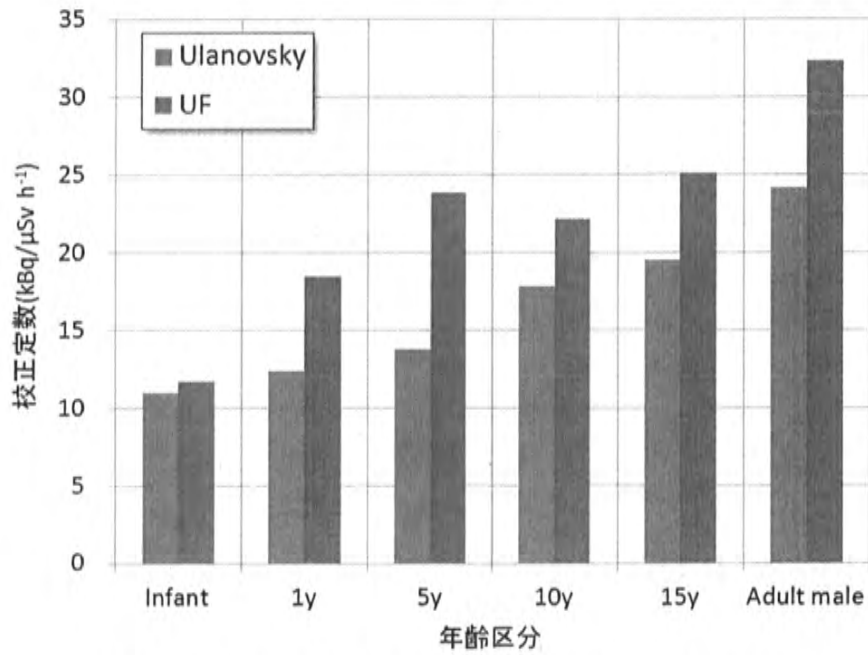


図 4 ファントムに対する NaI(Tl)サーベイメータの校正定数
(Ulanovsky: A ファントム, UF : B ファントム)

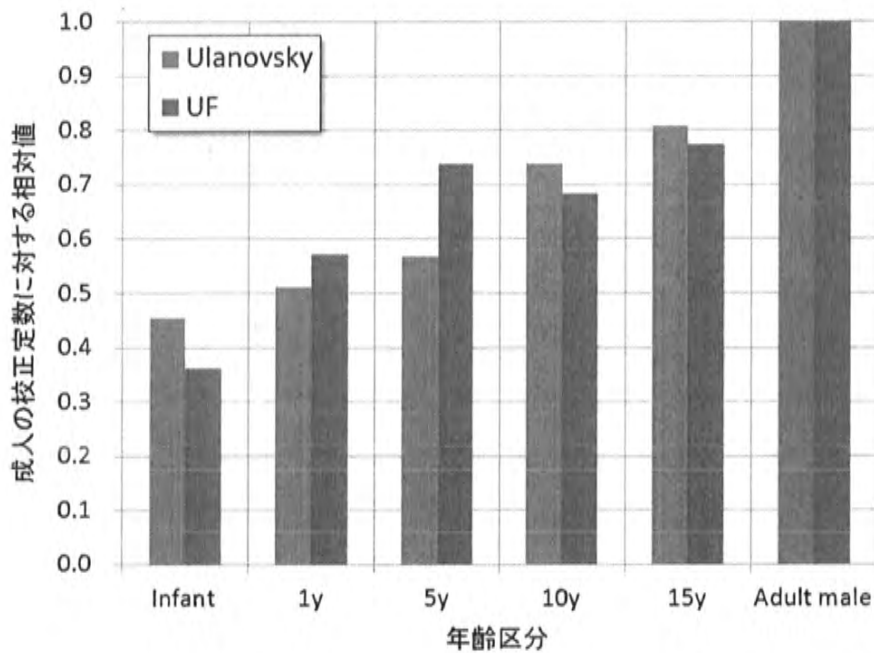


図 5 ファントムに対する NaI(Tl)サーベイメータの校正定数
—成人の校正定数に対する相対値
(Ulanovsky: A ファントム, UF : B ファントム)

B ファントムでは 5 歳児と 10 歳児について校正定数に逆転はあるものの、両ファントムともに年齢が低くなるにつれて校正定数が低くなる傾向がある。これは、年齢が低くなるほど甲状腺の体積が小さくなり、かつ、甲状腺前組織厚が薄くなることで、検出立体角が増加して検出感度が増加するためである。両ファントムの校正定数の違いは、甲状腺前組織厚の差異による影響が大きいと考えられる。図 6 には両ファントムの頸部断面、表 1 には両ファントムの甲状腺前組織厚の比較を示した。

人の甲状腺の解剖学的特徴としては、元々チェルノブイリ原子力発電所事故の住民の線量再構築のために開発されてきた A ファントムの方が実際に近いと思われる。B ファントムでは、1 歳児の甲状腺前組織厚が 1 cm 以上であることや、甲状腺峡部がモデル化されていないこと等、やや不自然な点が見受けられる。ただし、総じて言えば、両ファントムともに図 1 に示した年齢別校正定数と近い結果と言える。

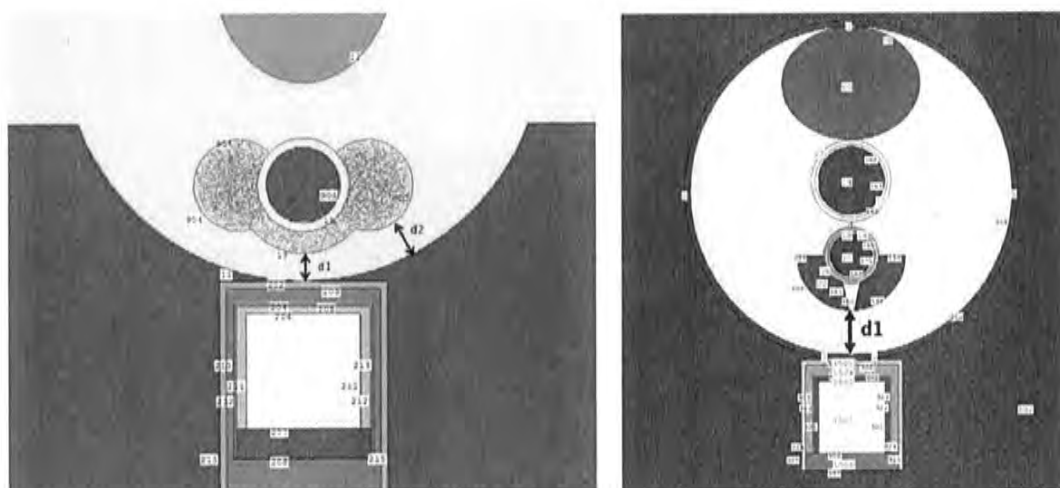


図 6 各ファントムの頸部断面図 (左: A ファントム, 右: B ファントム)

表 1 各ファントムの甲状腺前組織厚

	0y	1y	5y	10y	15y	Adult Male
A ファントム-d1	0.4	0.4	0.4	0.5	0.565	0.61
A ファントム-d2	0.58	0.6	0.66	0.73	0.88	0.8
B ファントム-d1	0.7	1.41	1.75	1.31	1.44	1.76

(単位: cm)

次に、C ファントムの数値シミュレーションモデル及び校正定数を図 7 に示した。NaI(Tl)サーベイメータはファントムになるべく重ならない様に頸部前面に近接させた。ただし、9ヶ月男児(U2)ファントムについては、頸部と頭部もしくは胸部との境界が明確でないため NaI(Tl)サーベイメータの検出器位置を胸部上部とした。

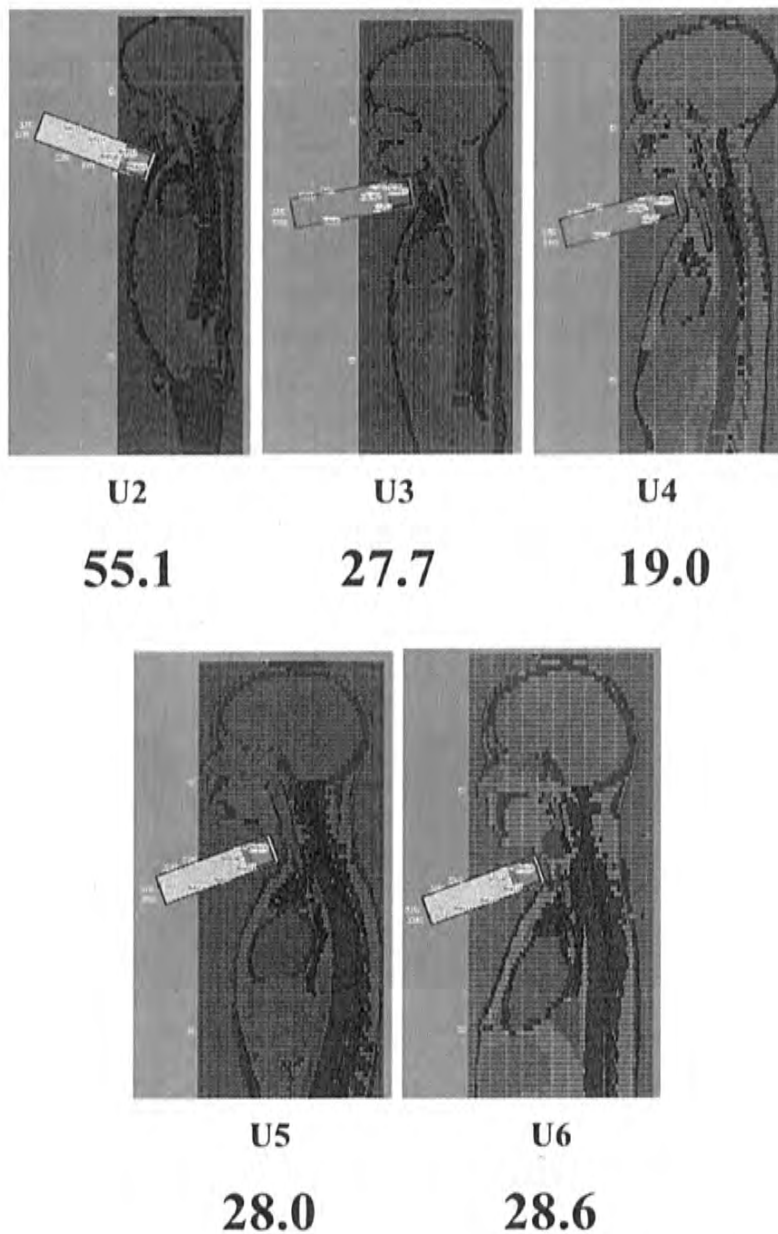


図 7 Cファントムの数値シミュレーションモデル及び校正定数 (単位: $\text{kBq}/\mu\text{Sv h}^{-1}$)

※U2: 9ヶ月男児, U3: 4歳女児, U4: 8歳女児, U5: 11歳男児, U6: 14歳男児

Cファントムの校正定数は, A または Bファントムと比較して高めであり, また, 前述した様な年齢依存性も見られない。Cファントムの校正定数が高めとなる理由は, NaI(Tl)サーベイメータと頸部表面との間にギャップを生じるためである。ファントムを構成するボクセルの高さ方向の分解能 (U2 以外は 5 mm 以上) が粗く, 検出面を頸部に密着させることが難しい。ま

た、9ヶ月児モデルであるU2と4歳児モデルであるU3では頸部が短いために、NaI(Tl)サーベイメータを近接させることが出来ない。なお、U3と8歳児モデルであるU4の校正定数を比較すると年齢の低いU3の方が大きい、これは甲状腺を構成するボクセルの位置に関係している様に思われる。すなわち、図9に示すようにU3の甲状腺は3層のボクセルで構成されているが、内1層は体幹部に含まれている。甲状腺の位置や形状には個人差が大きいと予想されるが、さらに多くのボクセルファントムによる検証が必要である。

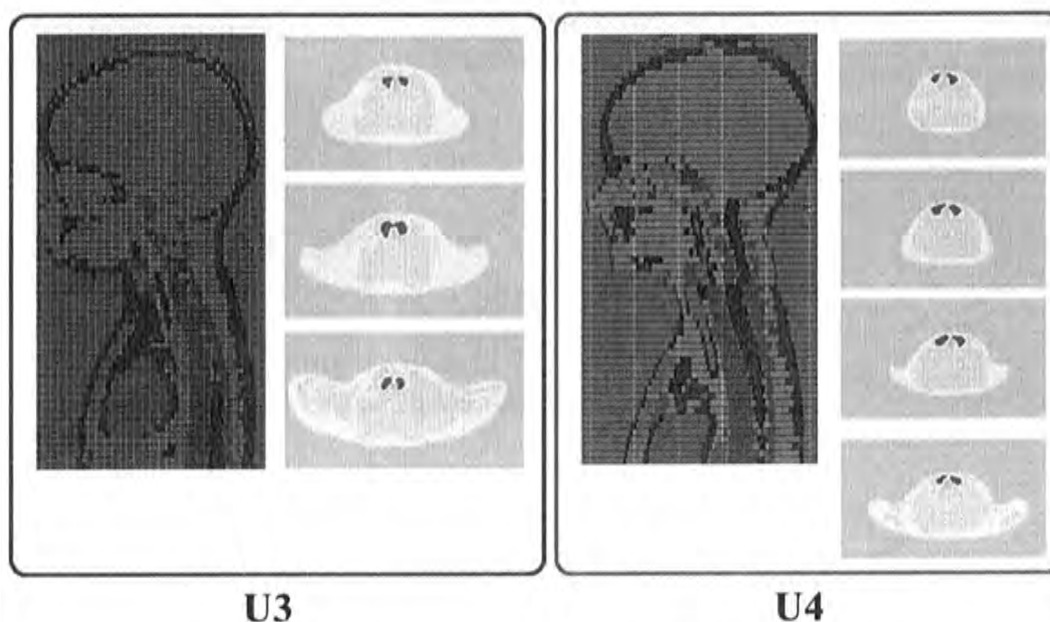


図8 Cファントム(U3, U4)の甲状腺ボクセル(赤で表示した部分)

以上から、昨年度の初期内部被ばく線量の再構築に用いた年齢別校正定数は、数式で表現されたMIRDファントムとは同様な結果であるものの、引き続き調査が必要であると考え。特に、ボクセルファントムを用いた数値シミュレーションでも示唆された様に、乳幼児の測定ではNaI(Tl)サーベイメータを頸部に密着させることが困難な状況があったことも予想される。今回行った計算結果によれば、NaI(Tl)サーベイメータが頸部から僅かに離れても校正定数に影響する(検出感度が低下するので校正定数は増加する)。また、実際の状況を再現するため、著者らは図9に示すような測定ジオメトリの検証を行っている。検出器や被検者の頭部の傾きは、少なからず校正定数に影響すると思われる。



図 9 小児甲状腺中 ^{131}I 測定の再現実験
(左：4歳男児，中：8歳女児，右：11歳女児)

(2) WBC によって定量された ^{131}I

Matsuda らは、被検者の身長方向に可動する検出器を備えた WBC を用いて、事故初期に避難者及び初動対応者の体内残留放射能の計測を行っている⁵⁾。文献によれば、同 WBC の校正には、ANSI N13.35²¹⁾に準拠した BOMAB ファントム（第 5 章を参照）を利用したと記載がある。BOMAB ファントムは、10 個の円柱または楕円柱の容器によって人の全身を模擬しており、各容器には既知量の放射能を含む線源が均一に封入されている（第 5 章参照）。したがって、BOMAB ファントムの放射能分布は、甲状腺に集積する ^{131}I の体内分布とは大きく異なることになる。然るに、両者の体内分布に対する WBC の計数率の差異を明らかにすることが重要である。

この予備的検証のため、放医研が所有する類似した機構を有する WBC（図 10）について、以下の数値シミュレーションを行った。数値シミュレーションには、前節と同様に MCNP5 及び MCNPX2.6 を用いた。構築した数値シミュレーションモデルを図 11 に示す。

先ず、数値シミュレーションの妥当性の確認のため、WBC の被検者用ベッド上に BOMAB ファントムを設置した状態において、ベッドの上下にある 2 個の NaI(Tl)検出器（8 インチ×4 インチ）を BOMAB ファントム頭頂から足先まで 10 cm 刻みで移動し、各検出器位置で取得したピーク効率とこれに相当する計算値を比較した。ピーク効率は、対象物を測定して得られる

γ 線波高スペクトルに検出される光電吸収ピークの面積を計算し、これを測定時間に対象物から放出される全 γ 線数で除して得られる。

BOMAB ファントム全部位のピーク効率は、次式によって計算した。

$$\varepsilon(x_j) = \frac{\sum_j A_j \cdot \varepsilon_j(x_j)}{\sum_j A_j} \quad \dots (2)$$

ここで、 $\varepsilon(x)$ は検出器位置 x_j における BOMAB ファントム全部位のピーク効率、 $\varepsilon_j(x_j)$ と A_j は BOMAB ファントムの各部位 j に対するピーク効率及び放射能である。

図 12 に ^{137}Cs 線源 (662 keV) を封入した BOMAB ファントム (全部位) のピーク効率について、実験値と計算値を比較した結果を示す。計算値は実験値に比べて約 20% 過大評価であるが、その差異は検出位置によってほぼ一定であることから、数値シミュレーションは BOMAB ファントム内部から発生する光子の輸送過程を概ね模擬していると考えられる。実験値と計算値の系統的な差異は、数値シミュレーションでは考慮していないシンチレーションの受光ロスなどの影響と予想される。なお、 ^{60}Co 線源 (1173 keV, 1333 keV) の封入した BOMAB ファントムについても、ほぼ同様な結果であった。

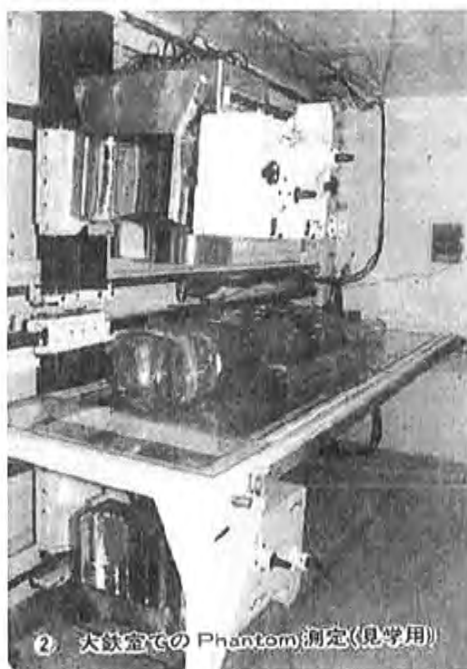


図 10 放射線医学総合研究所が所有するスキャン型 WBC

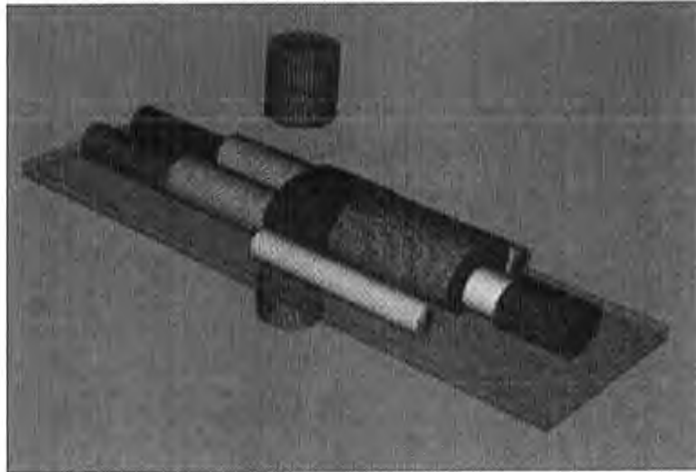


図 11 放医研 WBC の数値シミュレーションモデル

図 13 には、BOMAB ファントム各部位のピーク効率（計算値）の検出器位置による変化を示した。頸部部位のピーク効率は、当然ながら、検出器が頸部付近に位置するとき最大となり、検出器が頭頂あるいは足先に移動するにつれて減少する。

ところで、検出器を被検者の頭頂から足先まで移動させた後に得られる波高スペクトルを取得する測定条件（スキャン測定）では、ピーク効率は次式のように近似できる。

$$\varepsilon_{scan} = \frac{\int_0^L \varepsilon(x) dx}{L} \approx \frac{\sum_i \varepsilon(x_i)}{n} \quad \dots (3)$$

ここで、 L はスキャン範囲である。スキャン範囲を等分化して、各検出器位置 x_i においてピーク効率を求め、それらの平均をとることでスキャン測定のピーク効率の近似値が得られる。実際、BOMAB ファントムの全身をスキャン測定したときのピーク効率と、検出器を BOMAB ファントムの頭頂から足先まで 10 cm 間隔で移動して得たピーク効率（全 19 位置）を平均して得られたピーク効率とは 5% 以内で一致することを実験で確認した⁴。図 14 には、各部位及び全部位のスキャン測定でのピーク効率を示した。同図に示すように、頸部と全部位のピーク効率に大きな差はなく、両者の差異は 10% 程度である結果が得られた。

⁴ BOMAB ファントムの全部位を組み立てると全長 177 cm になる。検出器の中心を頭頂に合せたときの検出器位置を $x = 0$ cm として、スキャン測定では $x = 180$ cm まで足先方向に移動させた。

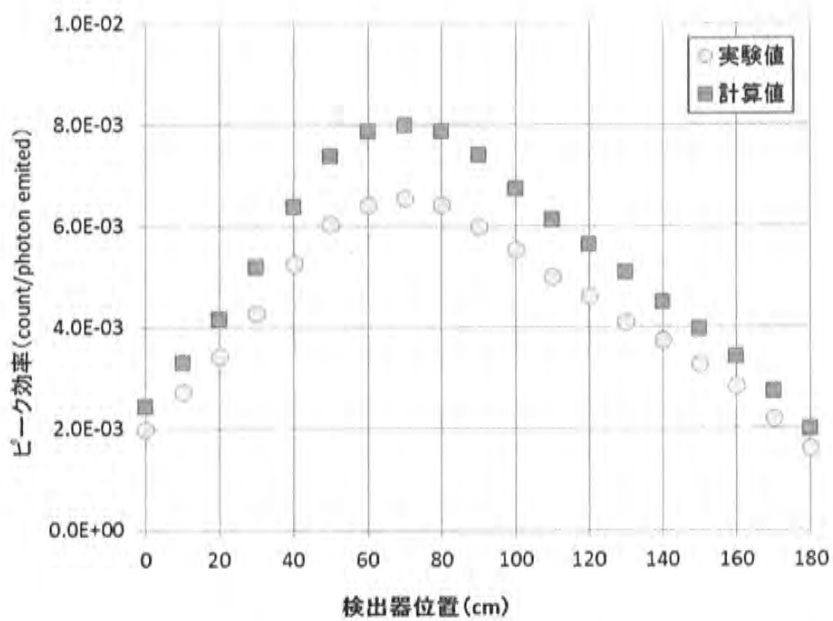


図 12 BOMAB ファントム (^{137}Cs) に対するピーク効率に対する実験値と計算値の比較
(※ピーク効率は 2 検出器の合計)

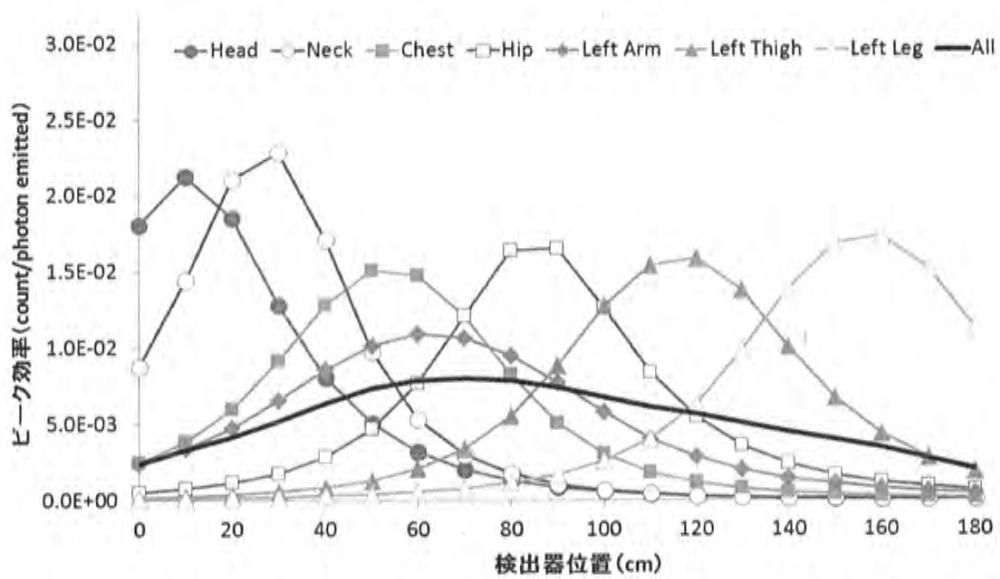


図 13 BOMAB ファントム (^{137}Cs) 各部位のピーク効率の検出器位置による変化

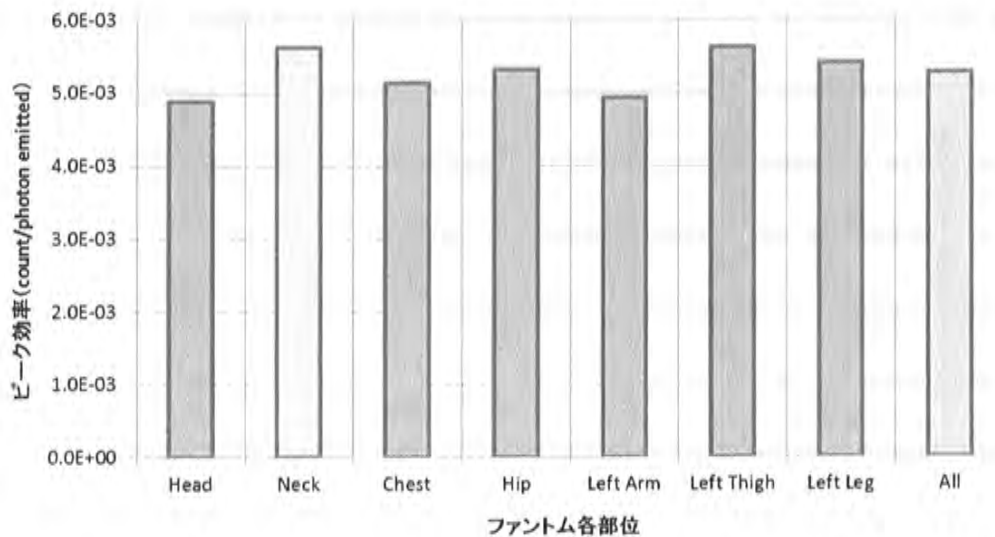


図 14 BOMAB ファントム (^{137}Cs) 各部位及び全部位のスキャン測定におけるピーク効率

より人体に近いモデルによる WBC の応答を推定するため、ICRP Publ. 100²²⁾ において公開された成人男性ボクセルファントム (AM ファントム) を WBC に配置し、同様な計算を行った。図 15 に数値シミュレーションモデルを示した。AM ファントムを構成するボクセルのサイズは縦 2.137 mm×横 2.137 mm×高 8.0 mm であり、AM ファントム全体で約 200 万個のボクセルから構成される。

先ず、AM ファントムにおいて、全身に ^{137}Cs が均一に分布する場合の WBC のピーク効率を検出器の位置を 5 cm 間隔で変更して計算した。線源臓器は、AM ファントムの筋肉とその他の臓器として設定した。Cs は体内に取り込まれた後、特定の臓器・器官に集積することなく、軟組織全体に分布するとされている²³⁾。よって、厳密には線源の設定は正しくないが、本調査の目的には十分であると考えられる。図 16 に計算結果を示す。

同図から、AM ファントムと BOMAB ファントムのピーク効率の全身プロファイルは全体的な傾向としては類似していることが示された。2 個の検出器のピーク効率には差異がないことも、両ファントムで同様な結果である。AM ファントムと BOMAB ファントムのスキャン測定でのピーク効率 (count /photon emitted) は、それぞれ 5.4E-03 と 5.3E-03 であった。このことは、BOMAB ファントムが、人に極めて近い放射線透過特性を有していることの示唆を与える。

図 17 には、AM ファントムの甲状腺に ^{131}I (365keV) を設定したピーク効率のプロファイルを示す。検出器が頸部付近に位置するとき、ピーク効率は最大となる。注目すべき点は、2 個の検出器間にピーク効率の差が顕著に認められることである。甲状腺は頸部内の前方に位置するため、遮へい効果が少ない上側の検出器のピーク効率の方が高くなる。また、全身スキャンでの甲状腺中の ^{131}I のピーク効率は 6.3E-03、 ^{133}Ba (356 keV) を含む BOMAB ファントムのピーク効率は 5.7E-03 (計算値) であり、両者の差異は 10%程度以内に収まっている。

以上得られた結果から、暫定的な結論ではあるが、Matsuda らが WBC を用いて評価した甲状腺中 ^{131}I 量は、これが全身均一分布とした BOMAB ファントムのピーク効率を用いて得られたとしても、検出器を全身スキャンさせた測定条件であれば概ね妥当な結果が得られたものと思われる。

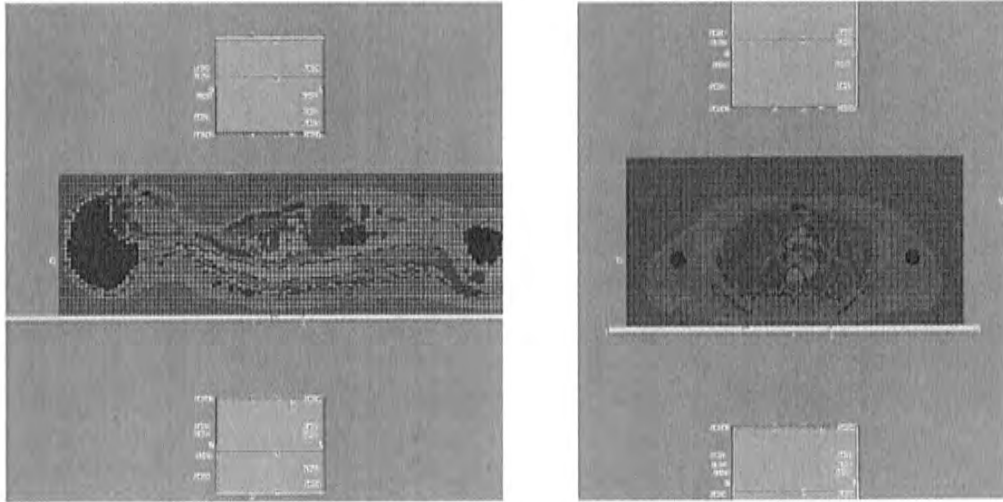


図 15 数値シミュレーションモデル (ボクセルファントム)

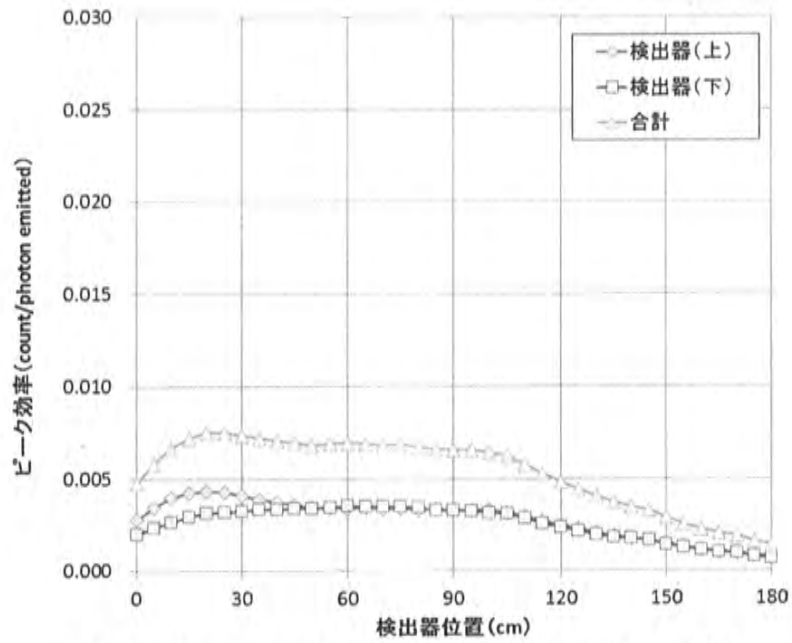


図 16 AM ファントムのピーク効率の検出器位置による変化
(線源：筋肉及びその他の臓器に ^{137}Cs が分布)

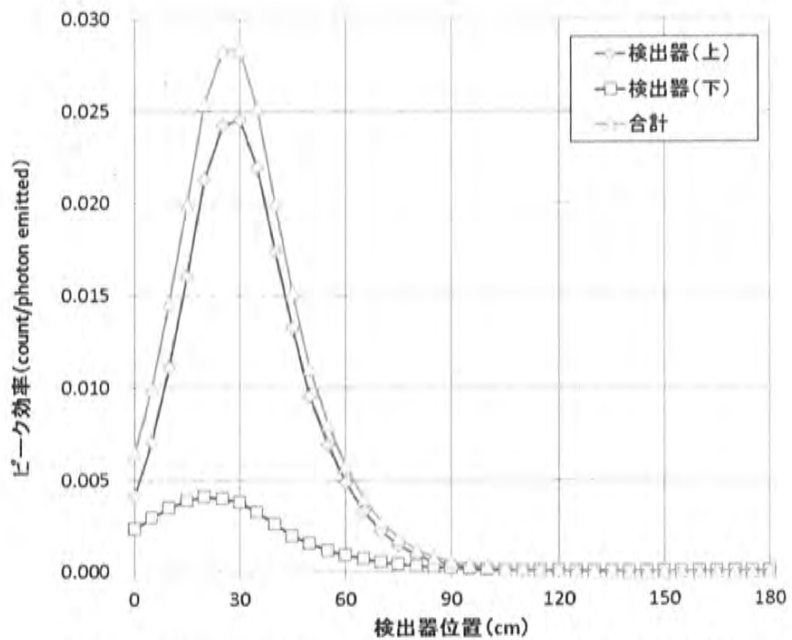


図 17 AM ファントムのピーク効率の検出器位置による変化
(線源：甲状腺中に ^{131}I が分布)

3.3 ヨウ素とセシウムの摂取量比

(1) ヨウ素とセシウムの摂取量比の導出

昨年度の初期内部被ばく線量推計において、WBCの測定結果から甲状腺等価線量の導出に必要な ^{131}I と ^{137}Cs の摂取量比については、当該地域に居住する成人と子供がそれぞれの呼吸率で ^{131}I と ^{137}Cs を同一の割合で吸入するとした仮定に基づき算定した²⁴⁾。具体的には、WBCの測定結果とした得られた実効線量分布（成人のみ）から ^{137}Cs の摂取量を逆算し、これに両核種の摂取量比及び成人に対する呼吸率比を乗じることで年齢区分毎の ^{131}I の摂取量を計算する。 ^{131}I の甲状腺等価線量は、摂取量に甲状腺等価線量係数を乗じて求められる。他方、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査が実施された3市町村の内、飯舘村と川俣町についてはWBCの測定結果も得られている。よって、摂取量比を変数として年齢区分毎の ^{131}I の甲状腺等価線量を計算することができ、これと小児甲状腺被ばくスクリーニング検査から評価した甲状腺等価線量を比較することにより、摂取量比の最適値を得ることが出来る。摂取量比の導出過程を図18に、摂取量比($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$)を1としたときの成人の実効線量から各年齢区分の甲状腺線量への換算については図19に例示した。また、摂取量比の導出に用いた飯舘村及び川俣町の甲状腺等価線量分布（子供）、及び、実効線量分布（成人）をそれぞれ図20及び図21に示した。

昨年度の初期内部被ばく線量推計において導出した ^{131}I の ^{137}Cs に対する摂取量比は約2であり、 ^{131}I 以外の短半減期核種による線量寄与や小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の精度等も考慮して3とした。ただし、前述した甲状腺等価線量分布（子供）と実効線量分布（成人）のそれぞれの90%累積頻度値のみから摂取量比を決定しており、他の累積頻度値でも摂取量比を導出して比較する必要がある。表2及び表3には、両分布の80%、90%及び95%の各累積頻度値に相当する線量を示した。

図22には、上述した方法によって摂取量比を導出した結果を示す。これらの図のプロットは、横軸の摂取量比を変数として、実効線量分布（成人）の各累積頻度値から求めた10歳児の年齢区分（8歳以上13歳未満）の甲状腺等価線量である。例えば、飯舘村の図では、摂取量比が1の場合、10歳児の甲状腺等価線量の90%累積頻度値は、実効線量分布（成人）の同じ累積頻度値である0.17 mSvに50 mSvを乗じて8.5 mSvと計算される。摂取量比が2倍であれば、この2倍になる。図22の縦軸には、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査から評価した甲状腺等価線量分布の範囲を示しているが、この範囲に一致する摂取量比は2~3の範囲にある。10歳児以外の年齢区分の子供についても、結果はほぼ同じであると考えられる。摂取量比の計算結果を表4にまとめた。

利用可能なデータ(2種類)

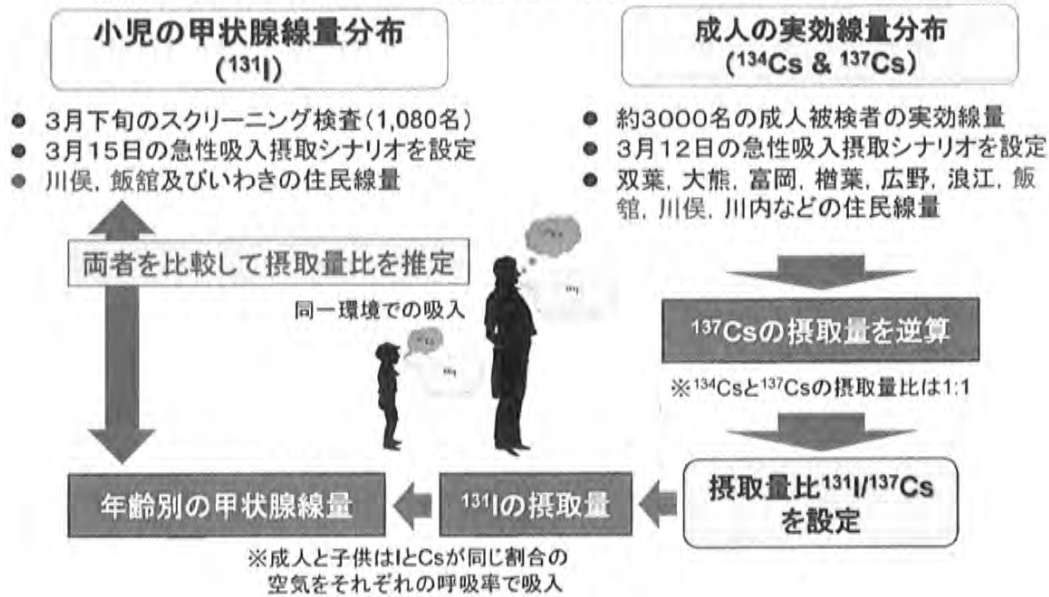


図 18 ^{131}I の ^{137}Cs の摂取量比の導出過程

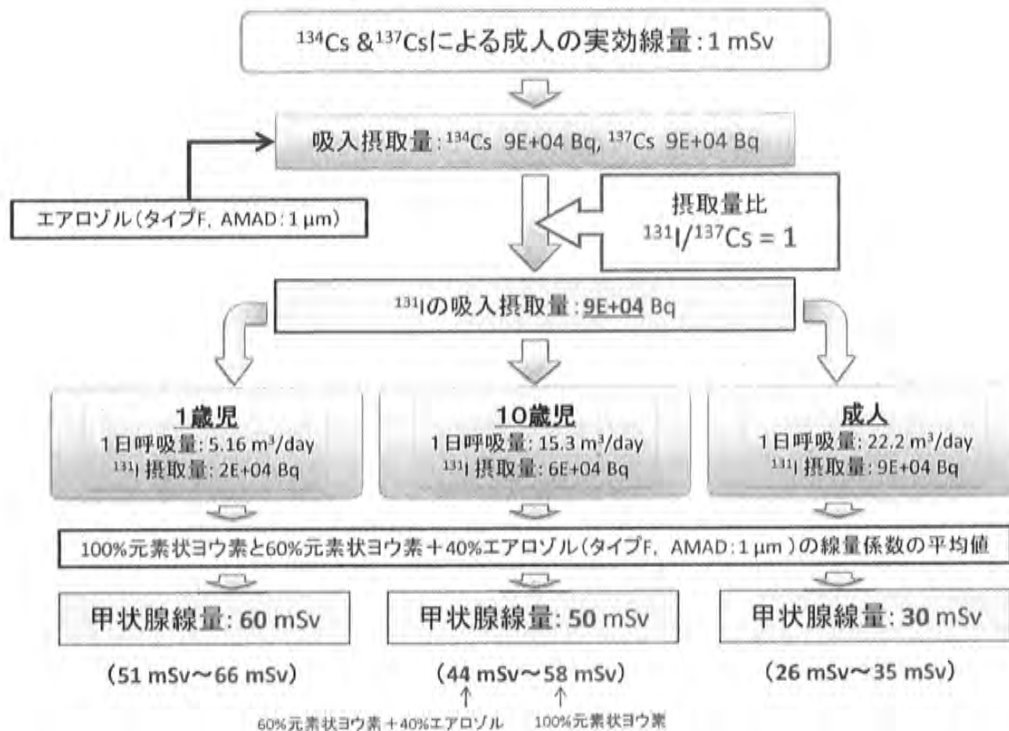
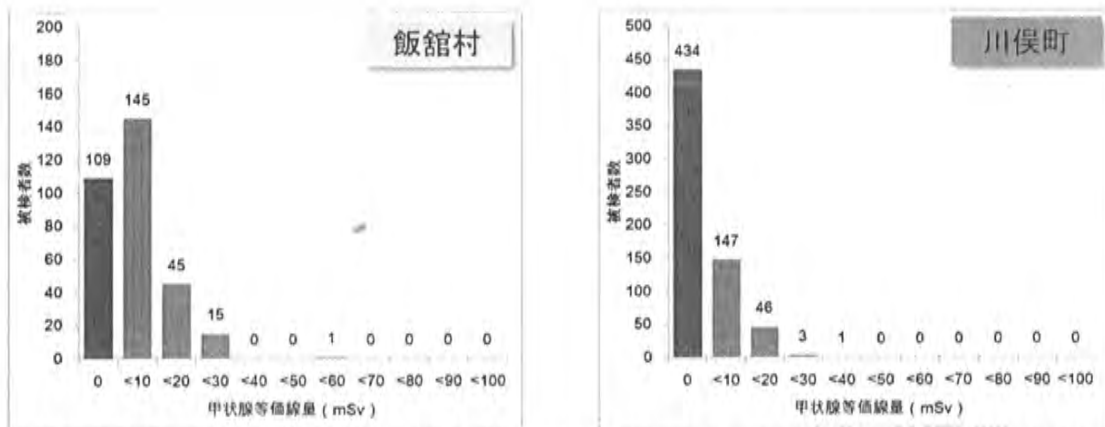
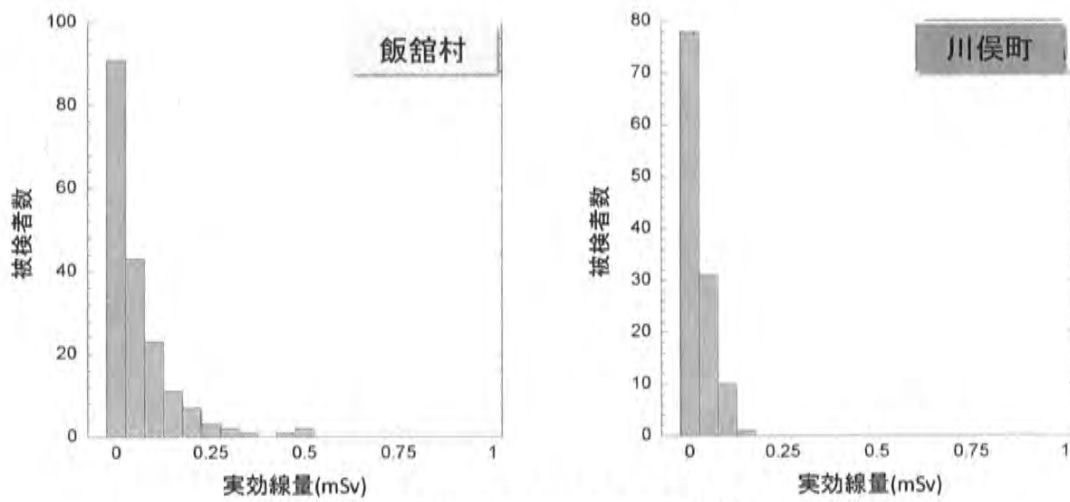


図 19 摂取量比を1としたときの成人の実効線量から各年齢区分の甲状腺線量への換算



摂取シナリオ: 3月15日の急性吸入摂取(化学形は元素状ヨウ素としているが他にもほぼ変化なし)

図 20 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査から評価した甲状腺等価線量分布



摂取シナリオ: 3月12日の急性吸入摂取

図 21 WBC 測定から得られた成人の実効線量分布

表 2 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査から評価された甲状腺等価線量の 80%, 90%及び 95%累積頻度値

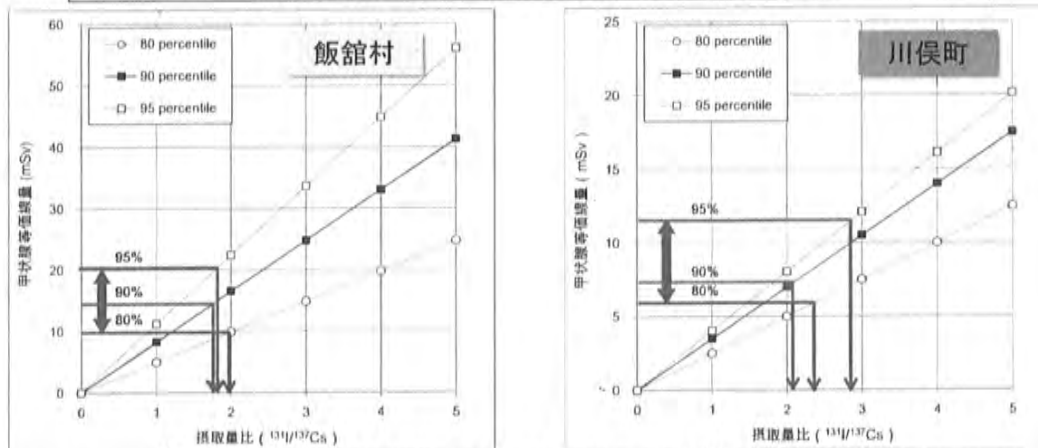
(単位: mSv)

累積頻度値	飯舘村	川俣町
80%	9.9	5.9
90%	14.7	7.3
95%	20.4	11.8

表 3 WBC 検査から評価された実効線量の 80%、90%及び 95%累積頻度値
(単位：mSv)

累積頻度値	飯舘村	川俣町
80%	0.10	0.05
90%	0.17	0.07
95%	0.22	0.08

実効線量(成人)から計算した小児(10歳児年齢区分)の甲状腺等価線量
(横軸:摂取量比($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$), 縦軸:甲状腺線量)



小児甲状腺被ばくスクリーニングで推定された甲状腺線量のバンド

摂取量比($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$)は概ね2~3

図 22 ^{131}I の ^{137}Cs に対する摂取量比の導出

表 4 ^{131}I の ^{137}Cs に対する摂取量比の計算結果

累積頻度(パーセンタイル値)		80%	90%	95%
飯舘村	小児甲状腺被ばくスクリーニング検査からの 甲状腺線量(mSv)	9.9	14.7	20.4
	摂取量比($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$)	2.0 ^{*1} (1.7~2.3) ^{*2}	1.8 ^{*1} (1.5~2.0) ^{*2}	1.8 ^{*1} (1.6~2.1) ^{*2}
川俣町	小児甲状腺被ばくスクリーニング検査からの 甲状腺線量(mSv)	5.9	7.3	11.8
	摂取量比($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$)	2.4 ^{*1} 2.0~2.7	2.1 ^{*1} 1.8~2.4	2.9 ^{*1} 2.5~3.3

*1 Cs による実効線量 1 mSv からの ^{131}I 甲状腺等価線量を 1 歳児:60mSv, 10 歳児:50mSv 及び成人:30mSv ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}=1$ のとき) とした場合

*2 (XX~YY): XX はヨウ素の化学形を元素状ヨウ素とした場合, YY は 60%元素状, 40%を粒子状とした場合

(2) 考察

導出したヨウ素とセシウムとの摂取量比は、ダストサンプル等で得られた環境試料中の両核種の存在比と比較すると低い結果である^{25, 26)}。例えば、茨城県東海村に所在する日本原子力研究開発機構核燃料サイクル工学研究所で測定されたダストサンプルの結果では、 ^{131}I と ^{137}Cs の存在比は概ね 10 程度となっている²⁵⁾。また、土壌試料中のヨウ素とセシウムの存在比は、福島第一原子力発電所の南方の方が、汚染レベルの高い北西方向と比べて高い傾向があることが解っている^{27, 28)}。他方、人の実測から評価されたヨウ素とセシウムの摂取量比について、本法の他に幾つかの報告がある。Hosoda ら²⁹⁾ は、浪江町住民 62 名の甲状腺中 ^{131}I の測定結果から、内 5 名に全身に分布する ^{134}Cs が有意に検出されたと報告しており、全身均一線源を模擬したファントムを用いて実験により、 ^{134}Cs の全身残留放射能を求め、これから ^{131}I の ^{134}Cs に対する摂取量比を導出している。その結果は、5 名の幾何平均値で 0.2、最大値で 0.9 であった。Morita ら³⁰⁾ は、2011 年 3 月 11 日から同年 4 月 20 日までに福島県内に滞在した住民または初動対応者 196 名について WBC による測定を行い、この内、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs が全て有意に検出された 49 名の摂取量比を報告している。それによれば、ヨウ素とセシウムの摂取量比は、福島県内での滞在時期及び滞り場所によって異なっており、49 名の幾何平均値で 6.65、最大値で 40.32 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ の場合) と報告している。特に、福島第一原子力発電所から南方に避難した住民 16 名の摂取量比について、県外への避難時期の違いによって顕著な差があることを示しており、2011 年 3 月 15 日以前に県外に避難した 10 名の摂取量比は 3、同年 3 月 16 日に県外に避難した 6 名の摂取量比は 10 前後と評価している。

人の摂取量比と環境中の存在比の乖離の主たる要因は、日本人のヨウ素の甲状腺移行率が、日常生活におけるヨウ素の摂取量の少ない欧米人を対象として開発された ICRP のヨウ素体内動態モデルと比較して顕著に低いことが挙げられる³¹⁾。ICRP モデルでは、血中にあるヨウ素の甲状腺移行率を 30%としている³²⁾。これは、1日の安定ヨウ素の摂取量を 200 μg 程度とした欧米人に対応している³³⁾。一方、日本人の1日の安定ヨウ素の摂取量は、近年の文献においても 1,000~3,000 μg 程度と報告されている³⁴⁾。古い文献がほとんどであるが、核医学診断等から得られた日本人のヨウ素の甲状腺移行率は表 5 に示すとおりであり、ヨウ素の甲状腺移行率としては ICRP モデルの半分程度が現実的だと思われる。

表 5 日本人のヨウ素の甲状腺移行率

報告書	被検者 (例数 年齢)	I_w 測定値 ^{*1}	備考
中島 (千葉大) (1959)	85例 (3~10才) (小児)	22.3% (21.07~20.57) ^{**} 〔男 23.7% (26.61~20.93) 女 20.9% (23.07~18.81)〕 6才以下 25.7% (28.35~23.05) 6才以上 20.8% (22.81~17.79)	(1) 成人との有意差なし (2) 性による有意差なし (3) 6才以下と以上は、 1%の危険率で有意差あり
中村 (松江市立H) (1966)	31例 (成人)	20.5% (4.8~43.2)	
中村 (鳥取大) (1965)	47例 (成人)	11.7% (2.8~29.8)	
久保 (東邦大) (1958)	31例 (小児)	24.6±8.3%	(1) 年齢差なし
越山 (京都大) (1962)	81例 〔男 48〕 〔女 33〕 (成人)	10~49才 (51例) 17.3±1.5% 50~79才 (30例) 18.5±3.6%	(1) 年齢差なし (2) 性差なし
岡田 (太田H) (1961)	80例 (3~14才) 小児	23.2%	
木下 (大久保H) (1966)	400例 〔男 78〕 〔女 322〕 (10才以上)	20.7±8.3% (1.0~55.4)	(1) 性差なし (2) 年齢差なし (3) 季節差なし

*1 投与24時間後の甲状腺の¹³¹Iのとりこみ割合

*2 信頼限度 (%)

※発電所軽水炉型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針(平成13年3月29日原子力安全委員会改訂)から転載

本調査で導出した ^{131}I の ^{137}Cs に対する摂取量比は、福島第一原子力発電所から北西に位置する飯舘村と川俣町の住民のデータから得られたものである。したがって、この摂取量比を、異なる地域に適用することは適当ではない。前述した様に、福島第一原子力発電所から南方の地域では、地表沈着量の ^{131}I の ^{137}Cs に対する比は、北西方向に比べて顕著に高いことが報告されている。しかしながら、この結果が、そのまま人の摂取量比に結び付くものでない。 ^{131}I の地表沈着量としては、 ^{137}Cs と同様に北西が南方よりも高いことから、 ^{131}I の地表沈着の機構に大きな違いがなければ、通過した放射性プルームの ^{131}I の積算濃度は地表沈着量に正の相関を持つものと考えられる。北西方向の地表沈着量の比が低いのは、多量放出のあった3月15日の午後に降雨があったためであり、 ^{131}I と比較して湿性沈着の影響を強く受ける ^{137}Cs が選択的に地表に沈着した結果だと思われる。

次に Morita らが報告した県外避難者の摂取量比について考察する。同論文によれば、3月15日にいわき市中心部またはいわき市の南部にある勿来から県外（東京）に避難した者（10名）の摂取量比は3程度であり、3月16日に勿来から県外（東京）に避難した者（6名）の摂取量比は10前後であった。この避難時期の違いによる摂取量比の差異は、南方に流れた放射性プルーム中の核種組成に関連するものと推察される。

図23には、日本原子力研究開発機構・核燃料サイクル工学研究所（茨城県東海村）で測定された ^{131}I 及び ^{137}Cs の大気中濃度の時間変化を示した。同研究所は福島第一原子力発電所から南方約100 km、いわき市中央と勿来を結ぶ直線のほぼ延長上に所在しており、上記避難者の内部被ばくに影響した放射性プルームが数時間の遅れで到達したものと予想される。避難者に影響したと考えられる放射性プルームは、図23中に示す①と②のピークに相当する放射性プルームである。①は3月15日の未明から早朝にかけて到来した放射性プルームであり、短時間ではあるが ^{131}I の空気中濃度（サンプリング期間の平均値）は 1600 Bq/m^3 に達している。他方、②は翌日の午前中に飛来した放射性プルームであり、 ^{131}I の空気中濃度は 400 Bq/m^3 であった。注目すべきは、①と②の ^{131}I の ^{137}Cs に対する空気中濃度比であり、それぞれ7.8と68.6であった。したがって、3月16日に避難した者の摂取量比が高いのは②の放射性プルームによる影響と考えられるが、摂取量比と大気中濃度比には依然大きな乖離（前者か後者の1/5～1/10）が生じることになる。仮にこの関係が成り立つのであれば、 ^{131}I 濃度の高い①と③（3月21日）の放射性プルームが主な内部被ばく要因となる住民については摂取量比を3としても十分に保守的である予測が付く。①の放射性プルームについては比較的短期間であり、また、未明から早朝にかけての流出であったために、住民への内部被ばく源としては小さかったかもしれない。しかしながら、同様な考察を行うことが重要であり、摂取量比についても引き続き検討が必要である。

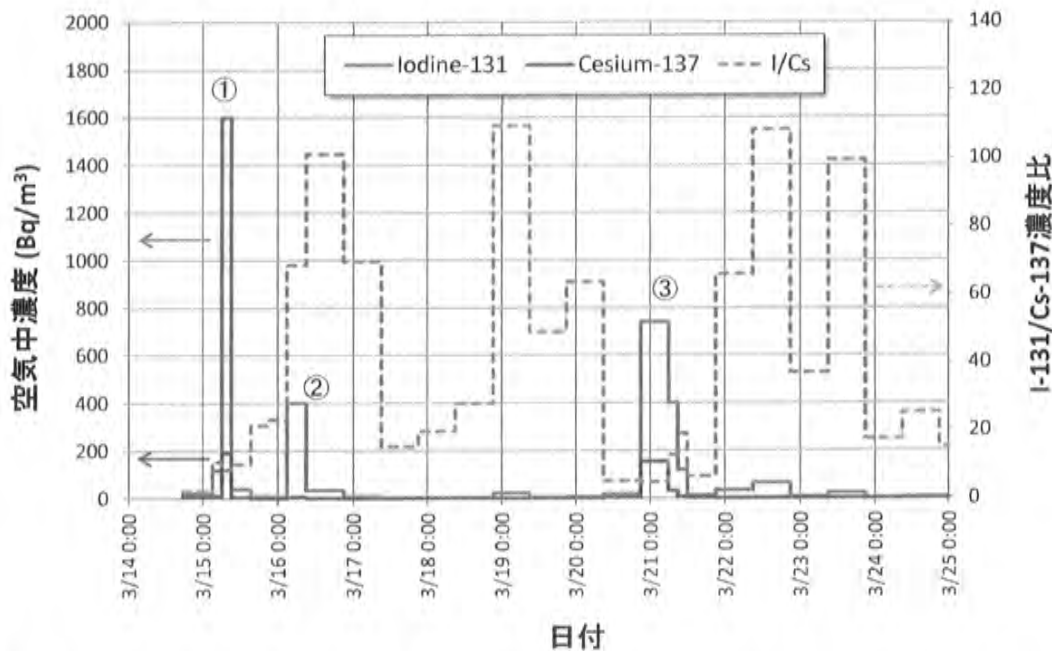


図 23 日本原子力研究開発機構・核燃料サイクル工学研究所で測定された ^{131}I 及び ^{137}Cs の大気中放射性核種濃度

3.4 初期内部被ばく線量推計の精度向上に向けて

初期内部被ばく線量推計の精度向上，すなわち，より現実的な推計値を得るには，個人の行動情報の解析が不可欠と思われる。放射性プルームの到達した時刻に屋内に居たか屋外に居たか，さらには，屋内滞在時においても活動中であるか就寝中であるかの違いは吸入摂取量に大きく影響すると考えられる。また，昨年度の調査では把握できなかった経口摂取の有無についても早急な確認が望まれる。これらの情報の大部分は，福島県が現在進めている県民健康管理調査において，個人の外部被ばく線量の推計のために使われている行動調査票から推察できると思われる。同調査票は，これまでのところ，福島県民の外部被ばく線量の推計の目的のみに利用されている。

以下は，個人の行動情報が利用できた場合に，どのように初期内部被ばく線量の推計に反映させてゆくかを述べる。図 24 にその概要を示した。まず，WBC や甲状腺計測などの内部被ばく線量計測に係る実測値を有し，かつ，行動情報が利用できる者を抽出する。続いて，これらの対象者について，震災時の居住地域や類似した避難行動パターン毎にグループ化し，既に評価された内部被ばく線量分布（あるいは測定値）を解析する。各グループにおいて極端に高い内部被ばく線量の個人が存在した場合は，当該者の行動情報に立ち返り，経口摂取の可能性が無いかを確認する。

次に，各グループを代表する摂取シナリオを構築する。初期内部被ばくに関しては，吸入摂取が主な摂取経路と考えられるため，この目的には大気拡散シミュレーションが有力な手段として

考えられる。大気拡散シミュレーションには放出源情報（ソースターム）を初めとした多くの不確かさ要因が残っているが、福島県内各地への放射線ブルームの到達時期を大まかに把握することは十分に可能であると思われる。現行の内部被ばく線量評価の条件とされている保守的な摂取シナリオ（2011年3月12日の急性摂取シナリオ等）に代えて、再検討した摂取シナリオに置き換え、実測値から内部被ばく線量を再計算する。実測値のない者に対する内部被ばく線量推計は、当該者が属するグループの代表値を割り振るのが現実的であるが、摂取時期から測定日までの体内放射能の減衰を考慮してWBCや甲状腺計測などの実測値を再現することが可能なモデルにより行うことも考えられる。こうしたモデルの構築を行うには、実測値を有する者の行動情報を用いて多くの検証を行う必要がある。経口摂取については、別のモデル構築が必要となろう。

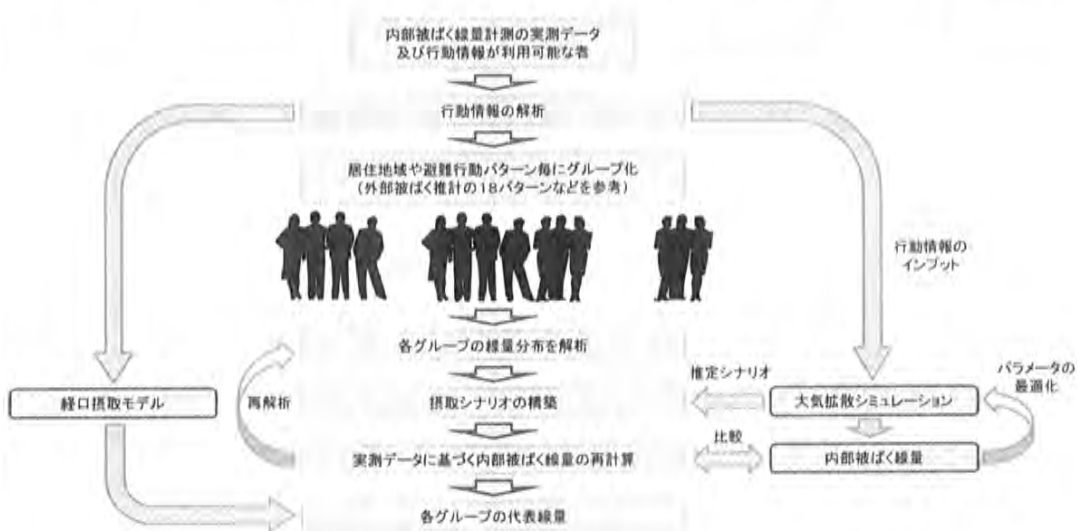


図 24 行動情報を用いる内部被ばく線量推計

3.5 拡散シミュレーションによる内部被ばく線量の推計精度

大気拡散シミュレーションによる線量推計の精度を確認するため、数は限られるが、人の実測データ（甲状腺計測やWBCによる全身計測）から推計した甲状腺線量との比較を試みた。後者は実測値に基づく推計であるため、摂取シナリオ（摂取日や摂取経路等の内部被ばく線量を計算する際に必要となる条件）の不確実性は残るものの、より真値に近い評価と言える。

図25には、平成23年3月下旬に、川俣町、いわき市及び飯舘村において実施された小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果から推計した甲状腺線量分布を示す。ただし、摂取シナリオとしては、全量の ^{131}I を3月15日に吸入摂取する条件を設定した。同図には、比較対象とする大気拡散シミュレーションから推計した甲状腺線量も併せて示す。ただし、個々の被検者の住所や行動に関する情報が得られていないため、各市町村の役場に最も近いWSPEEDI-IIの計算領域中の格子点及びそれに隣接する8格子点の ^{131}I 大気中濃度を抽出し、これらの幾何平均値（GM）と幾何

標準偏差 (σ_g) から甲状腺線量 (5歳児) を計算した。同図から解るように、大気拡散シミュレーションから推定した甲状腺線量は、実測データから求めた甲状腺線量分布の上限付近にある。

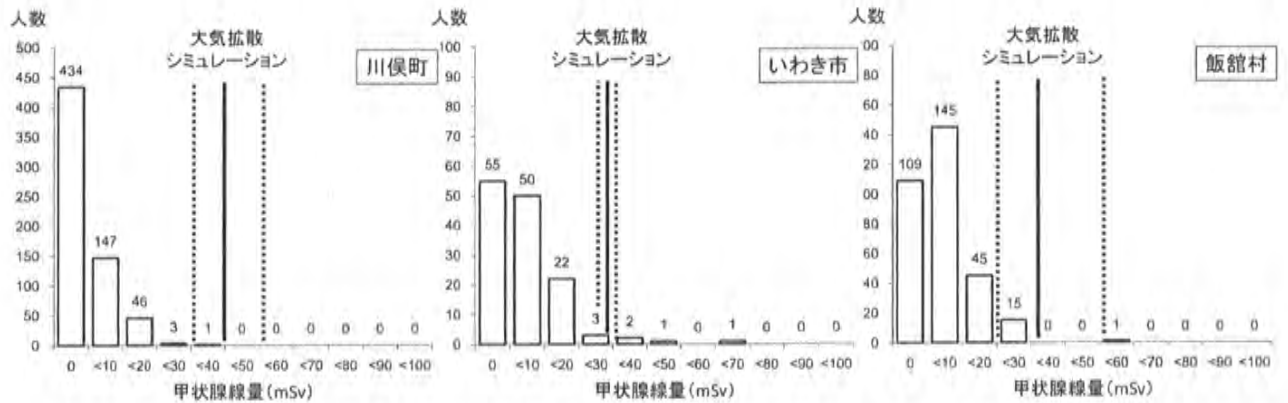


図 25 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果から推計された甲状腺線量分布及び大気拡散シミュレーションによる推計値 (実線がGM, 点線がGM/ σ_g 及びGM $\times\sigma_g$)

その他の避難住民に対する推計値の比較については、次のとおりである。ただし、個人の行動情報が不明のため、あくまでも参考である。

弘前大学の床次らの研究グループが浪江町住民に対して行った甲状腺計測の結果を報告している⁴⁾。同測定の対象者は、沿岸部からの避難者45名と津島地区住民17名を含む計62名であり、推計された甲状腺線量の最大値は成人で33 mSv、子供で23 mSvであった。これらの数値は、浪江町を起点とする避難行動モデルケース (表6のNo.7とNo.13) の甲状腺線量と比較すると数分の一程度である。すなわち、大気拡散シミュレーションによる線量推計値の方が大きくなる。他方、20km圏内の市町村住民の甲状腺線量については、当該市町村を起点とする避難行動モデルケースの推計値に比べ、人の実測データに基づく線量推計値 (表7) の方が高いケースが見られる。

表 6 各避難行動モデルケースの¹³¹I 吸入摂取による年齢群別甲状腺線量の推計値

モデルケース No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1歳児	<10	<10	40	90	30	10	90	<10	<10
10歳児	<10	<10	40	70	30	<10	80	<10	<10
成人	<10	<10	20	40	20	<10	50	<10	<10
モデルケース No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1歳児	10	<10	<10	100	40	30	30	80	70
10歳児	<10	<10	<10	90	30	30	30	70	60
成人	<10	<10	<10	50	20	20	20	40	30

(単位: mSv)

表 7 福島県住民の甲状腺線量推計値 (90 パーセンタイル値)

市町村	一歳児	成人	線量推計の参考データ
双葉町	30	10	全身計測
大熊町	20	< 10	全身計測
富岡町	10	< 10	全身計測
楡葉町	10	< 10	全身計測
広野町	20	< 10	全身計測
浪江町	20	< 10	全身計測, 甲状腺*
飯館村	30	20	甲状腺計測, 全身計測
川俣町	10	< 10	甲状腺計測, 全身計測
川内村	< 10	< 10	全身計測
葛尾村	20	< 10	浪江の数値で代用
いわき市	30	10	大気拡散シミュレーション, 甲状腺計測
南相馬市	20	< 10	浪江の数値で代用
他	< 10	< 10	大気拡散シミュレーション

*Tokonami ら⁴⁾

(単位 : mSv)

第3章 参考資料

- 1) O. Kurihara, E. Kim, K. Fukutsu, M. Matsumoto, S. Suh, K. Akahane, K. Sakai, NIRS's project for the reconstruction of early dose to inhabitants in Fukushima after the nuclear disaster, Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident (*Takahashi ed.*), 177-188, Springer Open, ISBN 978-4-431-54582-8.
- 2) 福島靖正, 小児甲状腺簡易測定調査等の結果について, *Jpn. J. Health Phys.* 47, 17-19 (2012).
- 3) E. Kim, O. Kurihara, T. Suzuki, M. Matsumoto, K. Fukutsu, Y. Yamada, N. Sugiura, M. Akashi, Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident, NIRS-M-252, The 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, 59-66, Chiba, Japan (2012).
- 4) S. Tokonami, M. Hosoda, S. Akiba, A. Sorimachi, I. Kashiwakura, M. Balanov, Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident, *Science Report*, 2: 507 (2012).
- 5) N. Matsuda, A. Kumagai, A. Ohtsuru, N. Morita, M. Miura, M. Yoshida, T. Kudo, N. Takamura, S. Yamashita, Assessment of internal exposure in Fukushima by whole body counter within one month after the nuclear power plant disaster, *Radiation Research*, 179, 663-668 (2013).
- 6) T. Momose, C. Takada, T. Nakagawa, K. Kanai, O. Kurihara, N. Tsujimura, Y. Ohi, T. Murayama, T. Suzuki, Y. Uezu, S. Furuta. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident, NIRS-M-252, The 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, 67-82, Chiba, Japan (2012).
- 7) 原子力安全委員会緊急技術助言組織, シンチレーションサーベイメータによる甲状腺線量の簡易測定法 (改訂版), 2011年3月25日.
- 8) 鈴木敏和, 小児甲状腺モニタリング, 放射線事故医療研究会第15回放射線事故医療研究会抄録集, 平成23年8月27日.
- 9) G. Tanaka, H. Kawamura. Measurement of ¹³¹I in the human thyroid gland using a NaI(Tl) scintillation survey meter. *J. Radiat. Res.*, 19, 78-84 (1978).
- 10) V. F. Stepanenko, A. F. Tsyb, E. M. Parshkov, V. V. Shakhtarin, A. E. Kondrashov, V. G. Skvortsov, E. K. Iaskova, A. I. Ivannikov, M. Hoshi., M. Ohtaki, J. Takada, S. Endo, S. Davis, K. Kopecky., P. Voilleque, Yu. I. Gavrilib, V. T. Khrousch, S. M. Shinkarev, M. Yu. Orlov, V. P. Snykov, E. V. Spirin, N. N. Isamov, Retrospective thyroid absorbed doses estimation in Russia following the Chernobyl accident: Progress and application to dosimetrical evaluation of childhood thyroid cancer morbidity., Hiroshima University, Hiroshima, July 23-25, 1996, Proc. of the Second Hiroshima International Symposium (*Hoshi, J. Takada, R. Kim, Y. Nitta ed.*), 31-84 (1996).
- 11) A. V. Ulanovsky, K. F. Eckerman, Modifications to the ORNL phantom series in simulation of the responses to thyroid detectors, *Radiat. Prot. Dosim.*, 79, 429-431 (1998).

- 12) E. Y. Han, W. E. Bolch, K. F. Eckerman, Revisions to the ORNL series of adult and pediatric computational phantoms for use with the MIRS schema, *Health Phys.*, 90, 337-356 (2006).
- 13) Choonik Lee, Choonsik Lee, Wesley Bolch. Age-dependent organ and effective dose coefficients for external photons: a comparison of stylized and voxel-based pediatric phantoms, *Phys. Med. Biol.*, 51, 4663-4688 (2006).
- 14) Choonik Lee, Choonsik Lee, Jonathan L. Williams, Wesley Bolch. Whole-body voxel phantoms of paediatric patients - UF series B, *Phys. Med. Biol.*, 51, 4649-4661(2006).
- 15) S. Kinase, S. Takagi, H. Noguchi, K. Saito, Application of voxel phantoms and Monte Carlo method to whole-body counter calibration, *Radiat. Prot. Dosim*, 125, 189-193 (2007).
- 16) S. Lamart, E. Blanchardon, A. Molokanov, G. H. Kramer, D. Broggio, D. Frank, Study of the influence of radionuclide biokinetics of the efficiency of in vivo counting using Monte Carlo simulation, *Health. Phys.*, 96, 558-567 (2009).
- 17) D. Broggio, J. Bento, M. Caldeira, E. Cardenas-Mendez, J. Farah, T. Fonseca, C. Konvalinka, L. Liu, B. Perez, K. Capello, P. Cowan, J.-A. Cruzate, L. Freire, J.-M. Gómez-Ros, S. Gossio, B. Heide, J. Huikari, J. Hunt, S. Kinase, G.H. Kramer, O. Kurihara, A. Kyrieleis, A.-L. Lebacq, D. Leone, C. Li, J. Li, L.-C. Mihailescu, M. Moraleda , J.-F. Navarro, C. Oliveira, N. Puerta, U. Reichelt, C. Simões, D. Sommer, M. Takahashi, P. Teles, F. Vanhavere, T. Vrba, D. Franck , G. Gualdrini, M.-A. Lopez: Monte Carlo modeling for the in vivo lung monitoring of enriched uranium: Results of an international comparison, *Radiation Measurements* 47, 492-500 (2012).
- 18) 堤正博, 斎藤公明, 森内茂, 実効線量当量単位に対応した NaI(Tl)シンチレーション検出器 G(E)関数 (スペクトル線量変換演算子) の決定, *JAERI-M 91-204* (1991).
- 19) J.F. Briesmeister, MCNP - A general Monte Carlo N-particle Transport Code Version 4B. Oak Ridge National Laboratory Report (1997).
- 20) D. Pelowitz, MCNPX User's Manual. Los Alamos National Laboratory Report, LA-CP-05-0368 (2005).
- 21) American National Standard, Specification for the Bottle Manikin Absorption Phantom, ANSI/HPS N13.35-1999 (1999).
- 22) International Commission on Radiological Protection (ICRP), Adult Reference Computational Phantoms, ICRP Publication 100, Ann. ICRP, 39(2), Elsevier Science (2009).
- 23) International Commission on Radiological Protection (ICRP), Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. ICRP Publication 67, Ann. ICRP 23 (3/4), Elsevier Science (1993).
- 24) 栗原治, 金ウンジュ, 徐素熙, 福津久美子, 松本雅紀, 林津雄厚, 内山優子, 川口勇生, 酒井一夫, 東京電力福島第一原子力発電所事故における福島県住民の初期内部被ばく線量推計, Proceedings of the 14th workshop on environmental radioactivity, Tsukuba, Japan, Feb. 26-28, 2013, KEK Proceedings 20113-7, 7-16 (2013).

- 25) 古田ら, 福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果 - 中間報告 (空間線量率, 空气中放射性物質濃度, 降下じん中放射性物質濃度, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2011-035 (2011).
- 26) T. Ohkura et al., Emergency monitoring of environmental radiation and atmospheric radionuclides at Nuclear Science Research Institute, JAEA following the accident of Fukushima Daiichi nuclear power plant, Japan Atomic Energy Agency, JAEA-Data/Code 2012-010 (2012).
- 27) 文部科学省, 文部科学省による放射線線量等分布マップ (ヨウ素 131 の土壌濃度マップ) の作成について, 平成 23 年 9 月 21 日.
- 28) T. Torii, T. Sugita, C. E. Okada, M. S. Reed, D. J. Blumenthal, Enhanced analysis methods to derive the spatial distribution of ^{131}I deposition on the ground by airborne surveys at an early stage after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, *Health Phys.* 105, 192-200 (2013).
- 29) M. Hosoda, S. Tokonami, S. Akiba, O. Kurihara, A. Sorimachi, T. Ishikawa, T. Momose, T. Nakano, Y. Mariya, I. Kashiwakura, Estimation of internal exposure of the thyroid to ^{131}I on the basis of ^{134}Cs accumulated in the body among evacuees of the Fukushima Daiichi nuclear power station accident, *Environmental International*, 61, 73-76 (2013).
- 30) N. Morita, M. Miura, M. Yoshida, A. Kumagai, A. Ohtsuru, T. Usa, T. Kudo, N. Takamura, S. Yamashita, N. Matsuda, Spatiotemporal characteristics of internal radiation exposure in evacuees and first responders after the radiological accident in Fukushima, *Radiation Research*, 180, 299-306 (2013).
- 31) 吉沢康雄, 草間朋子. 日本人の甲状腺に関する正常値について, *保健物理*, 11, 123-128 (1976).
- 32) International Commission on Radiological Protection (ICRP), Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56, *Ann. ICRP* 20 (2), Pergamon Press (1989).
- 33) 原子力安全委員会, 発電所軽水炉型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針 (平成 13 年 3 月 29 日原子力安全委員会改訂)
- 34) Theodore T. Zeva, David T Zeva, Assessment of Japanese iodine intake based on seaweed consumption in Japan: A literature-based analysis, *Thyroid Res.* 4:14 (2011).
- 35) 栗原治, 被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーションー東京電力福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量再構築, *日本原子力学会誌*, 55 (12), 34-38 (2013).

別表 1 東京電力福島第一原子力発電所事故に関連した個人内部被ばく線量測定に関する文献及び測定条件等 (1)

No.	文献等	対象者	測定条件	線量評価条件
1	S. Tokonami, M. Hosoda, S. Akiba, A. Sorimachi, I. Kashiwakura, M. Balanov, Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident, Science Report, 2: 507 (2012).	浪江町住民 62 名 (0-83 歳), 内訳は 45 名が海岸地域からの避難者, 17 名が津島地区住民	3 インチ×3 インチ NaI(Tl)スペクトロメータ, 校正定数は文献値 (^{131}I) について 3.49E-02 cps/Bq) を使用, 頸部計測	測定日: 2011/4/12-4/15, 摂取シナリオ: 2011/3/15 のみの吸入摂取, 性状: 記載なし, 甲状腺等価量の最大値: 33 mSv (成人), 23 mSv (子供)
2	E. Kim, O. Kurihara, T. Suzuki, M. Matsumoto, K. Fukutsu, Y. Yamada, N. Sugiura, M. Akashi, Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident, NIRS-M-252, The 1 st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, 59-66, Chiba, Japan (2012).	小児甲状腺被ばくスクリーニング検査対象者 1,080 名 (15 歳以下), 測定場所 (川俣町, 飯館村, いわき市)	1 インチ×1 インチ NaI(Tl)サーベイメータ, 頸部計測, 校正定数は ^{131}I Ba 溶液を封入した甲状腺形状容器を内蔵した頸部ファントムによる実験値を使用, 1 歳児の校正定数: 22 kBq/ $\mu\text{Sv h}^{-1}$	摂取期間: 2011/3/12~測定日前日, 摂取シナリオ: 上記期間の連続摂取, 性状: 蒸気状ヨウ素, 甲状腺等価量の最大値: 43 mSv
3	福島清正, 小児甲状腺簡易測定調査等の結果について, Jpn. J. Health Phys. 47, 17-19 (2012).	2 と同じ	2 と同じ	記載なし
4	Y. Hosokawa, M. Hosoda, A. Nakata, M. Kon, M. Urushizawa, M. A. Yoshida, Thyroid screening survey on children after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident, Radiation Emergency Medicine, 2, 82-86 (2013).	2 と同じ	2 と同じ ※小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の内, 特に弘前大学が実施した分についての解説有り (※飯館村では測定場所のバックグラウンドは 0.1 $\mu\text{Sv/h}$ 程度)	他文献からの引用記載, 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査での甲状腺等価線の最大値: 35 mSv
5	N. Matsuda, A. Kumagai, A. Ohtsuru, N. Morita, M. Miura, M. Yoshida, T. Kudo, N. Takamura, S. Yamashita, Assessment of internal exposure in Fukushima by whole body counter within one month after the nuclear power plant disaster, Radiation Research, 179, 663-668 (2013).	2011/3/11~2011/4/10 までに福島県内に滞在した初動対応者及び避難者 (173 名)	長崎大学が所有するスキヤン型 WBC で測定, 8 インチ×4 インチの NaI(Tl)検出器 2 式を搭載, 計数効率率は BOMAB ファントムで取得	摂取シナリオ: 福島滞在期間の初日または最終日での吸入摂取, 性状: 粒子状タイプ F (AMAD 1 μm), 甲状腺等価線の最大値: 20.04 mSv

別表 1 東京電力福島第一原子力発電所事故に関連した個人内部被ばく線量測定に関する文献及び測定条件等 (2)

No.	文献等	対象者	測定条件	線量評価条件
6	N. Morita, M. Miura, M. Yoshida, A. Kumagai, A. Ohtsuru, T. Usa, T. Kudo, N. Takamura, S. Yamashita, N. Matsuda, Spatiotemporal characteristics of internal radiation exposure in evacuees and first responders after the radiological accident in Fukushima. Radiation Research, 180, 299-306 (2013).	5と同じ。	5と同じ。	5と同じ(ただし、滞在期間の初日または最終日の摂取シナリオで評価された線量の中央値を採用する旨が付記)
7	C. Takada, O. Kurihara, K. Kanai, T. Nakagawa, N. Tsujimura, T. Momose. Results of whole body counting for JAEA staff members engaged in the emergency radiological monitoring for the Fukushima nuclear disaster. NIRS-M-252, The 1 st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, 3-12, Chiba, Japan (2012).	事故の初動対応に従事したJAEA職員50名	立位式WBC (FASTSCAN TM) による全身計測、12.7 cm×7.6 cm×40.6 cmのNaI(Tl)検出器を2式搭載、校正にはキャンベラ Transfer ファントム (CTP) を使用。	摂取シナリオ: 2011/3/15 または作業開始日での吸入摂取、性状: 粒子状タイプF (ANAD 5 μm)、実効線量の最大値: 0.8 mSv ※作業者 (ICRP Publication 78) とし、て評価
8	M. Hosoda, S. Tokonami, S. Akiba, O. Kurihara, A. Sorimachi, T. Ishikawa, T. Momose, T. Nakano, Y. Mariya, I. Kashiwakura, Estimation of internal exposure of the thyroid to ¹³¹ I on the basis of ¹³⁴ Cs accumulated in the body among evacuees of the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. Environmental International, 61, 73-76 (2013)	浪江町からの避難住民 2393 名	1と同じ測定条件において、使用したNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータの全身 ¹³⁴ Csに対する計数効率をBOMABファントムを用いた実験により評価	¹³¹ Iと ¹³⁴ Csの両方が検出された被検者から、 ¹³¹ Iの ¹³⁴ Csに対する摂取量比を導出(最大値: 0.9)して、 ¹³¹ Iの甲状腺等価線量の算定、 ¹³¹ Iの線量評価条件は1と同じ、甲状腺等価線量の最大値: 18 mSv
9	N. Kamada, O. Saito, S. Endo, A. Kimura, K. Shizuma, Radiation doses among residents living 37 km northwest of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant. Journal of Environmental Radioactivity, 110, 84-89 (2012)	川俣町住民5名及び飯館村住民10名	100 ml 尿試料のγ線計測(15名中5名の尿試料から ¹³¹ I検出)	摂取シナリオ: 2011/3/20の経口摂取、甲状腺等価線量の最大値: 66 mSv

別表1 東京電力福島第一原子力発電所事故に関連した個人内部被ばく線量測定に関する文献及び測定条件等 (3)

No.	文献等	対象者	測定条件	線量評価条件
10	T. Momose, C. Takada, T. Nakagawa, K. Kanai, O. Kurahara, N. Tsujimura, Y. Ohi, T. Murayama, T. Suzuki, Y. Uezu, S. Furuta. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. NIRS-M-252. The 1 st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, 67-82, Chiba, Japan (2012).	福島県住民 (主として警戒区域内の市町村) 9,927名	7と同じ (ただし, 身長 130 cm 以下の被検者は台に乗せて測定し, 検出感度の補正を実施)	摂取シナリオ: 2011/3/12 の吸入摂取, Cs の性状: 粒子状タイプ F (AMAD 1 μm)
11	放射線医学総合研究所, 平成 23 年度第 3 回福島県「県民健康管理調査」検討委員会資料, 放射線医学総合研究所における内部被ばく調査について, http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/230724shiryou.pdf	先行調査対象地域の住民 109名	WBC (検出限界値 ¹³⁴ Cs: 320 Bq, ¹³⁷ Cs: 570 Bq), 尿バイオアッセイ (検出限界値: 13 Bq/L)	摂取シナリオ: 2011/3/12 の吸入摂取 ※ ¹³¹ I 検出者なし (検出限界値 ¹³¹ I: 38 Bq)
12	M. Tsubokura, S. Gilmour, K. Takahashi, T. Oizawa, Y. Kanazawa, Internal radiation exposure after the Fukushima nuclear power plant disaster, JMMA, 308, 669-670 (2012).	福島県住民 9,498名	7と同じ	成人については事故直後の急性吸入摂取, 子供については慢性経口摂取を仮定
13	R. Hayano, M. Tsubokura, M. Miyazaki, H. Satou, S. Masaki, Y. Sakuma, Internal radiocesium contamination of adults and children in Fukushima 7 to 20 months after the Fukushima NPP accident as measured by extensive whole-body counter surveys, Proc. Jpn. Acad., Ser. B 89, 157-163 (2013).	福島県住民 32,811名	7と同じ	記載なし

第4章 個人線量測定ガイドラインのための資料収集

本章では、現在、福島県で進められている住民の個人線量測定に関するガイドライン策定のために有用と思われる資料についてまとめた。これらの資料には、線量概念、個人線量測定のための機器（個人線量計やホールボディカウンタ（以下、WBC）など）の仕様、及び、環境モニタリングによる実際の線量測定結果等に関する文献を網羅している。

4.1 個人線量測定ガイドラインの内容

現在、福島県内では、個人線量計による外部被ばく線量測定や、WBCによる内部被ばく線量測定などが行われているが、これまでに我が国では経験のない一般公衆を対象とした個人モニタリングであることから、混乱を招く状況もあると聞き及んでいる。そのため、自治体等で個人線量測定を担当する実務者及びその関係者を対象としたガイドラインが望まれる。

表8に、個人線量測定ガイドライン（案）の内容を示した。同ガイドラインは全4章から構成される。個人線量測定の方法自体は放射線業務従事者を対象とした方法に準じたものとなるが、福島県における現在の放射線状況（図26）を考慮した知見も必要である。すなわち、外部被ばく線量測定では、前方照射で校正された個人線量計が地表を線源とする放射線場において正しく測定されるか、個人線量計と空間線量率計（サーベイメータなど）との応答の違い等に関する疑問に答えられるものでなければならない。内部被ばく線量測定では、検出下限値程度のピークを含む波高スペクトルの解析結果のばらつき、自然放射性核種を人工核種として誤認識、WBCの測定結果からの内部被ばく線量の導出方法（そもそも預託線量とは何か）等の技術的課題や疑問が生じている。こうしたニーズに即したガイドラインの作成を進める必要がある。

4.2 個人線量測定ガイドラインに資する資料収集

個人線量測定ガイドライン（案）の各章に関連する資料を収集し、別表2に示した。これらの資料は、本報告書を収録したCD-ROMに収録した。

表 8 個人線量測定ガイドラインの内容 (案)

目次	内容	参考情報
第1章: 序論	<ul style="list-style-type: none"> ● 個人線量把握の必要性 ● 外部被ばくと内部被ばく ● 現在の被ばく状況 ● 自然放射線による被ばく 	<ul style="list-style-type: none"> ● 図説ハンドブック放射線の基礎知識 (放医研) ● 自治体公表の外部被ばく線量データなど
第2章: 外部被ばく線量の測定	<ul style="list-style-type: none"> ● 個人線量計の種類(積算と電子式)と仕様 ● 個人線量計の使用法(均等・不均等被ばく状況における個人線量計の着用方法など) ● 線量概念(個人線量, 周辺線量, 実効線量) ● 測定結果の評価と管理 	<ul style="list-style-type: none"> ● 各個人線量計メーカーからの情報(HPなど) ● ICRP Publ.74, 113及びICRU56 ● 被ばく線量の測定・評価マニュアル(原安技セ) ● 航空機モニタリング, 走行サーベイ
第3章: 内部被ばく線量の測定	<ul style="list-style-type: none"> ● 内部被ばくの測定方法(体外計測とバイオアッセイ) ● 線量計算モデルと預託線量の概念 ● WBC測定原理と校正 ● WBC測定での内部被ばく線量の計算方法 ● 測定結果の評価と管理 ● WBCの日常点検と維持管理(測定上の注意事項含む) 	<ul style="list-style-type: none"> ● ICRP 78及びICRU69 ● 被ばく線量の測定・評価マニュアル(原安技セ)
第4章: 把握した個人線量の活用 付録	<ul style="list-style-type: none"> ● 健康管理の基礎となる情報として ● 日常生活における線量低減に向けて 	



図 26 福島県内の放射線状況等

別表2 個人被ばく線量モニタリング運用マニュアル(案) 関連参考資料リスト

No	参考資料のタイトル	発行元	発行年	出典 (URL 含む)
第1章 序論				
1-1	食品と放射能 Q&A	消費者庁	平成25年9月2日(第8版)	http://www.caa.go.jp/jisim/pdf/130902_food_qa.pdf
1-2	日本の自然放射線量	産業技術総合研究所 地質調査総合センターHP		https://gbank.gsj/geochemmap/setumeci/radiation/setumeci-radiation.htm
1-3	新版 生活環境放射線(国民線量の算定)	生活環境放射線編集委員会	平成23年12月	書籍
1-4	日本の国民線量一特に外国との比較一	日本アイソトープ協会	平成24年	http://www.roudouhokenkyoukai.or.jp/RADIOISOTOPES_62_927-938_(2013)
1-5	放射線一基礎と影響、汚染の状況と対応一	日本放射線安全管理学会 放射線勉強会	平成24年6月30日	http://www.jrsm.jp/shinsai/basics1-1.pdf
1-6	放射能を正しく理解するために 教育現場の皆様へ	文部科学省	平成23年4月20日	http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/fieldfile/2011/06/24/1305089_0624_1.pdf
1-7	放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料の掲載 について(お知らせ) HP	環境省総合環境政策局環境保健部 放射健康管理担当参事官室	平成25年8月29日	http://www.env.go.jp/chemi/rhm/kisoshiryo-01.html
1-8	線量水準に関連した考え方	原子力規制委員会		http://www.nsr.go.jp/committee/youshikisyakikan_kentou/data/0001_04.pdf
1-9	特集 放射線防護に用いられる線量概念	日本原子力学会 放射線工学会 線量概念検討ワーキンググループ		日本原子力学会誌, Vol. 55, No. 2(2013)
1-10	放射線防護に用いられる線量概念	高エネルギー研究所 KEK Preprint 2012-44	平成24年	http://ccdb5fs.kek.jp/tuff/2012/1227/1227044.pdf
1-11	環境γ線の性質と被曝評価	日本原子力研究所		原子力学会誌 Vol. 28, No. 8 (1996)
1-12	自然放射線に対する建物遮蔽効果とその国民線量評価への影響	日本保健物理学会		保健物理, 15, 135-146 (1980)
1-13	生活空間の放射線測定 基礎知識	環境省	平成24年8月	http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=15557
1-14	新しい放射線の利用拡大に向けて	放射線計測協会	平成13年	http://www.irm.or.jp/news27.pdf

1-15	1センチメートル線量当量等の実用量の校正と測定、並びに環境モニタリング量の測定評価について	放射線計測協会	平成13年	http://www.irm.or.jp/news27.pdf
1-16	放射線教育副読本 放射線を正しく知ろう	伊達市教育委員会	平成24年	http://www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/9874.pdf
1-17	放射線検出の原理と放射線測定の方法	緊急被災く医療研修HP	平成23年7月	http://www.remnet.jp/lecture/forum/sb05_01.html
1-18	できるだけ正確な放射線計測のために	福島大学放射線計測チーム	平成24年	http://www.sss.fukushima-u.ac.jp/FURAD/FURAD/data_%26_documents.html
1-19	放射線・放射能の基礎と測定の実際 放射線・放射能を正しく理解するために	公立紅工業試験研究機関長協議会	平成24年	https://www.iri-tokyo.jp/oshirase/sasshi.html
1-20	簡易的な環境放射線測定に関するガイドライン	日本電子計測器工業会放射線計測委員会	平成24年	http://www.jemima.or.jp/activity/radiation/smr_guideline.html
1-21	放射線測定に関するガイドライン	日本原子力研究開発機構	平成23年11月	http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/1000/108/24/111021R_adiation_measurement_guideline.pdf
1-22	日本における地表γ線の線量分布,	地学雑誌	2006年	http://www.i.s3.starcat.ne.jp/resinote/TERRES.pdf 地学雑誌, 115, 87-95.
第2章 外部被ばく線量の測定				
2-1	測定値（空气中放射線量）と実効線量	日本原子力学会放射線工学会 線量概念検討WG		http://www.aesj.or.jp/~rst/fukushima/120726_01.pdf
2-2	地表に広く分布した ¹³⁷ Cs及び ¹³⁴ Csを対象とする個人線量計の評価	高エネルギー加速器研究機構 KEK Preprint 2012-43	平成24年	http://ccdb5fs.kek.jp/titf/2012/1227/1227043.pdf
2-3	講座 個人被ばく線量計の最近の展開	日本アイソトープ協会		RADIOISOTOPE, Vol. 51, No.2 http://www.fujielectric.co.jp/
2-4	個人線量計 高機能個人被ばく線量計シリーズ	富士電機株式会社		http://www.hitachi-aioka.co.jp/
2-5	個人線量計 電子ポケット線量計 マイドーズシリーズ	日立ロカメデikal株式会社		http://www.techohill.co.jp/
2-6	個人線量計 個人用電子線量計 DMC 2000 S/X	テクノヒル株式会社		http://www.kosenkyo.jp/sokuteiki.htm
2-7	個人モニタリング 環境モニタリング	個人線量測定協議会		
2-8	デジタル式個人線量計のテスト結果	国民生活センター	平成24年5月24日	http://www.kokusen.go.jp/news/data/n-20120524_1.html
2-9	個人モニタリングサーブスの歴史（その1）～（その5）	千代田テクノル		放射線安全管理総合情報誌 FBNews No.433—No. 43

2-10	モニタリングサーブिसについて モニタの装着 個人線量の求め方	千代田テクノロ		http://senkei-c-technol.co.jp/src/manual/monitoring/8kosenryou.html
2-11	電子式個人線量計 ZP-144P	Panasonic		https://www.measureworks.co.jp/ZP144.html
2-12	原子力百科事典 ATOMICA 個人線量計	一般財団法人 高度情報科学技術 研究機構 (RIIST)		http://www.rist.or.jp/atomica/index.html
2-13	日々の線量を記録できる個人向け放射線種類線量計	産総研		http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2012/pr20120213/pr20120213.html
2-14	技術報告 市販の簡易線量計の性能調査	日本アイントープ協会		RADIOISOTOPE, 61, 185-192(2012)
2-15	放射線測定器を正しく利用するために	福島県 災害対策本部原子力班	平成 25 年 2 月	http://www.wcms.pref.fukushima.jp/
2-16	Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection, ICRU 56	International commission on Radiation Units and Measurements	1997	ICRU report
2-17	広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質 拡散状況調査	日本原子力研究開発機構福島技術 本部福島環境安全センター	平成 23 年	JAEA-Technology-2012-036
2-18	山と登山道の放射線量測定結果について	日本勤労者山岳連盟	平成 23 年	http://www.jwai.jp/upload/info/277.pdf
2-19	福島県山岳放射線量調査	福島県勤労者山岳連盟	平成 24 年	http://ftk-ac.net/research/research_data.pdf
2-20	走行サーベイシステムKURAMA-IIを用いた測定の基礎整 備と実測への適用	日本原子力研究開発機構福島技術 本部福島環境安全センター	平成 24 年	JAEA-Technology-2013-037
2-21	平成23年度放射線測定調査委託事業「福島第一原子力発電 所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査 研究」成果報告書	日本原子力研究開発機構	平成 25 年 3 月	http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/mapping_report/2nd-japanese/2ndlist.html
2-22	走行サーベイを活用した空間線量率の分布状況調査	日本原子力研究開発機構		http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf/04/1-4-11.pdf
2-23	外部被ばく線量の推計について 外部被ばく線量評価シス テムの概要と非難行動のモデルパターン別の外部被ばく線 量計算結果	放射線医学総合研究所	平成 23 年 12 月 13 日	http://www.pref.fukushima.jp/mmu/kenkoukanri/231213senryosuitei.pdf
2-24	福島県原発周辺地域における保健師のガラス線量計着用による蓄積放射線量測定について	東京医療保健大学 医療保健学部		http://www.ncc.go.jp/jp/information/press/pdf/20110913/20110913_shuryo1.pdf
2-25	福島第一原子力発電所事故に係る避難区域における除染実 証業務「個人線量調査事業編」	日本原子力研究開発機構	平成 24 年 6 月	http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report.html
2-26	日本の職業被曝の評価	(旧) 日本原子力研究所		原子力学会誌 Vol. 34, No.10 (1992)

2-27	環境γ線の性質と被曝評価	(旧) 日本原子力研究所		原子力学会誌 Vol. 28, No.8 (1996)
2-28	自然放射線に対する建物遮蔽効果とその国民線量評価への影響	日本保健物理学会		保健物理, 15, 135-146(1980)
2-29	＜特集：法令改正に伴うマニュアルの概要＞被ばく線量の測定・評価マニュアル外部被ばくについて	日本保健物理学会		保健物理, 36(1), 18-23 (2001)
2-30	福島県内における住民の被ばく線量評価	日本原子力研究開発機構	平成 24 年 1 月 16 日	http://www.jaea.go.jp/04/anzen/archives/seikahoukokoku/seikahoukokoku_24/pdf/24-1-1.pdf
2-31	福島県郡山市公式ウェブサイトを放射線対策 個人積算線量計 (クイクセルバッジ) 第1回測定結果概要～第3回測定結果概要等	郡山市		http://www.cty.koriyama.fukushima.jp/scene/hoshasen/index.html
2-32	福島県東白川郡鮫川村公式ウェブサイト	鮫川村		http://www.vill.samegawa.fukushima.jp/dir.php?code=2
2-33	福島県須賀川市公式ウェブサイト	須賀川市		http://www.city.sukagawa.fukushima.jp/saigai/joho_gensai_kanren.html
2-34	福島県双葉町公式ウェブサイト	双葉町		http://www.town.fukushima-futaba.lg.jp/2725.htm
2-35	福島県相馬市公式ウェブサイト	相馬市		http://www.city.soma.fukushima.jp/0311_jishin/glass/
2-36	福島県田村郡小野町公式ウェブサイト	小野町		http://www.town.ono.fukushima.jp/uploaded/attachment/2848.pdf
2-37	福島県会津若松市公式ウェブサイト	会津若松		http://www.city.aizuwakamatsu.fukushima.jp/docs/2013013000033/
2-38	福島県白河市公式ウェブサイト	白河市		http://www.city.shirakawa.fukushima.jp/view.rbz?cd=3411
2-39	福島県楢葉町公式ウェブサイト	楢葉町		https://www.town.naraha.lg.jp/information/infor/000330.html
2-40	福島県福島市公式ウェブサイト	福島市		http://www.city.fukushima.fukushima.jp/life/16/
2-41	市民放射線被ばく量調査結果報告会 資料	福島県二本松市		http://www.city.nihonmatsu.lg.jp/uploaded/attachment/10014.pdf
2-42	福島県矢吹町公式ウェブサイト	矢吹町		http://www.town.yabuki.fukushima.jp/info.rbz?nd=240&ik=1
2-43	福島県浪江町公式ウェブサイト	浪江町		http://www.town.namie.fukushima.jp/site/shinsa/112.html
第3章 内部被ばく線量の測定				
3-1	Direct Determination of the Body Content of Radionuclides, ICRU 69	International commission on Radiation Units and Measurements	2003	ICRU report

3-2	Individual Monitoring for internal exposure of Workers (preface and glossary missing), ICRP publication 78	International Commission on Radiological Protection	1997	Annals of the ICRP
3-3	Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency	International Commission on Radiological Protection	2009	Annals of the ICRP
3-4	総説 内部被ばくの防護に用いられる線量	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPE. 62, 465-492 (2013)
3-5	福島における内部被ばくの現状について～最近の調査から～	首相官邸	平成 24 年	http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g39.html
3-6	慢性摂取による内部被ばく線量評価コードの開発	日本原子力研究機構	平成 23 年	http://joissrch-intertokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-COde-2012-027.pdf
3-7	ホールボディカウンター等の維持・管理等において踏まえるべき事項について	原子力安全委員会原子力施設等防護専門部会	平成 23 年 11 月	JAEA-Data/Code 2012-027 http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/shinsashishin/pdf/3/ho3036.pdf
3-8	放射性物質等による内部被ばくの検査に関する実態把握の結果	総務省行政評価局	平成 23 年 12 月	http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/52460.html
3-9	ホールボディカウンター(WBC)による内部被ばく検査	福島県郡山市		http://www.city.koriyama.fukushima.jp/216200/shinsai/kensa.html
3-10	ホールボディカウンターと臨界事故	NL だより 平成 23 年 4 月 No. 400		http://www.nagase-landauer.co.jp/nl_letter/index.html
3-11	市民の内部被ばく検査結果 南相馬市公式ウェブサイトを 福島県公式ウェブサイト	南相馬市		http://www.city.minamisoma.lg.jp/index.cfm/10,0,61,344.html
3-12	ホールボディカウンターによる内部被ばく検査	福島県		http://www.ems.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet?N_EXT_DISPLAY_ID=U000004&CONTENTS_ID=26211
3-13	放医研におけるホールボディカウンターの測定方法について	放医研 HP	平成 23 年	http://www.nirs.go.jp/information/info_php?121
3-14	話題 物理学的線量評価ネットワーク会議(WBC)ワークショップ「緊急被ばく医療における WBC の現状とあり方について～東電福島第一原子力発電所事故を踏まえて～」開催報告	日本保健物理学会	平成 23 年	保健物理, 47(2), 970191(2012)
3-15	特別記事 個人線量測定に関する課題	保健物理学会	平成 23 年	保健物理, 47(1), 34-36(2012)
3-16	内部被ばくの線量管理方法	放射線防護標準化委員会	平成 25 年	http://www.jbhs.or.jp/archives/1195

第 4 章 把握した個人線量の活用

4-1	福島第一原子力発電所事故後の福島県川俣町における近畿 大学原子力研究所の支援活動	近畿大学	平成 22 年	http://www.keea.or.jp/rdp/kkweb/kankyokanri41/kankyou41-5.pdf
4-2	個人住宅を対象とするホットスポット発見除染マニュアル 20110729 放射線安全管理学会	放射線安全管理学会	平成 23 年 7 月	http://www.jrsm.jp/shinsai/0728soil.pdf
4-3	除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイ ドライン概要	茨城労働局	平成 22 年	http://ibaraki-roundoukyoku.jstie.mhlw.go.jp/var/rev/00061/8860/20111228133639.pdf
4-4	放射線関連情報について	日本建設業連合会	平成 23 年	http://www.nikkenren.com/rss/pdf/238/201203_hoshasen.pdf
4-5	長期汚染地域での居住についての ICRP の基本的考え方。 ICRP Pub 103 から Pub. 111	日本原子力研究開発機構	平成 22 年	http://www.jaea.go.jp/fukushima/pdf/decon_j_01.pdf
4-6	福島での系統的な土壌試料採取と測定のはじまりと意義	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 705-708 (2013)
4-7	二本松の穂さん実地本部の設置とそこでの作業	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 709-710 (2013)
4-8	土壌中の γ 線放射核種分析による福島周辺放射線マップ	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 711-723 (2013)
4-9	福島の土壌調査から理解できること	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 724-740 (2013)
4-10	東京電力福島第一原子力発電所事故による環境汚染調査に 関する日本学術会議の働き	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 741-745 (2013)
4-11	原子核物理学者による環境放射線の大規模緊急測定とそこ から学べること	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 746-751 (2013)
4-12	パイロット調査委による 1311 の土壌放射線測定	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 752-760 (2013)
4-13	2011 年における福島県汚染されたのうちにおける収穫期稲 の放射性セシウム濃度分布	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 25-29 (2013)
4-14	すり身製造における水さらし工程を利用した魚肉中の放射 性セシウムの低減法	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 31-18 (2013)
4-15	直接沈着及び根吸収による放射性核種の植物への移行	日本アイソトープ協会	平成 23 年	RADIOISOTOPES, 61, 267-279 (2012)
4-16	福島県の自製土壌に対する放射性セシウム濃度分析	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 461-464 (2013)
4-17	福島県川俣町における環境放射線調査_土壌中放射性セシ ウム濃度	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 62, 259-268 (2013)
4-18	福島第一がん発事故が及ぼしたセシウム期限空間放射線量 率の福島県における経時変化と場所依存性	日本アイソトープ協会	平成 24 年	RADIOISOTOPES, 61, 373-378 (2012)

4-19	福島第一原発事故に起因した土壌野菜の放射性核種濃度測定_東京福島低濃度汚染地域事例2	日本アイソトープ協会	平成24年	RADIOISOTOPES, 62, 149-157(2013)
4-20	福島第一原発事故後の住家の空間線量率低減を目的とした遮蔽材の効果	日本アイソトープ協会	平成24年	RADIOISOTOPES, 62, 203-210(2013)
4-21	帰還に向けた安全・安心対策に関する基本的考え方	原子力規制委員会	平成25年11月	http://www.nsr.go.jp/committee/kisei/data/0032_01_1.pdf
4-22	△福島第一原子力発電所事故に関する放射線防護上の課題と提言ドフラフト1_保物学会	日本保健物理学会	平成24年4月	http://www.jhps.or.jp/archives/826
4-23	Radiological protection issues arising during and after the Fukushima nuclear reactor accident	Journal of Radiological Protection	2013年	J. Radiol. Prot. 33 (2013) 497-571
4-24	放射線の影響を、どう考えればいいのか？	環境省	平成24年12月	http://josen-plaza.env.go.jp/materials_links/pdf/handbook_think.pdf

第5章 WBCの精度調査等

本章では、昨年度に引き続き実施した福島県内のWBCの精度調査、及び、WBCの測定標準化の課題の一つである体格補正に関する検討結果についてまとめた。

5.1 福島県内で稼働中のWBCの精度調査

福島県では、現存被ばく状況下における福島県民の内部被ばくの実態把握のために、WBCによる体内放射能の測定を継続している。その測定件数は、WBCの測定が開始された2011年6月27日から今日に至るまでに約18万件に達しており（2014年1月末時点）、そのほぼ全てが放射性セシウムの内部取込みによる（預託）実効線量が1 mSv未満と報告されている¹⁾。こうした測定の信頼性を担保、維持してゆくことは今後も重要であり、そのためには機器の継続的な精度管理が不可欠である。本節では、放医研が実施した福島県下で稼働中のWBCの精度調査の結果について述べる。

(1) 方法

放医研で所有する物理ファントムを用いて、以下のWBCの精度調査を行った。使用した物理ファントムは、米国規格であるANSI (ANSI/HPS 13.35-1999)²⁾に準拠したBOMAB (BOttle MAnikin aBorption) ファントムであり、全身の各部位を10個の円筒または楕円柱とした体積線源で模擬している。全部位を組み立てると、身長177 cm、重量70 kgの成人男性の模擬になる（図27）。同ファントムを被検者と同様にWBCの所定の位置に配置し、基準放射能とのバイアスを調査した。すなわち、BOMABファントム中には検定された放射能が含まれており、これを適切に再現するかを調査で確認した。なお、放医研が所有するBOMABファントムは、3核種毎（¹³³Ba、¹³⁷Cs及び⁶⁰Co）及びバックグラウンド（水）の4体ある。本節では、¹³⁷Csを線源としたBOMABファントムの結果についてまとめた。なお、BOMABファントムの¹³⁷Csの基準放射能は21,893 Bq（基準日：2004年3月31日12時）、機構拡張不確かさ（ $k=2$ ）で6.5%である。

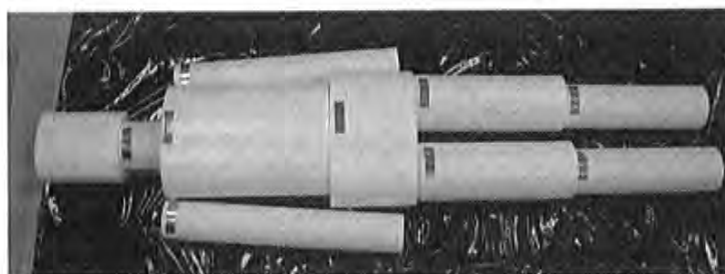


図27 成人男性模擬のBOMABファントム

表9には、2013年度及び2014年度に精度調査を行ったWBC及び施設等を示した。同表の内、本委託事業で実施したのはNo.30からNo.40である（No.19からNo.29までは放医研の独自事業として行った）。

表 9 精度調査を行った WBC 及び施設等 (その 1)

(2012 年度)

No.	調査日	施設	機種	車載
1	2012 年 6 月 23 日	郡山市保健所放射線健康管理センター (1)	C	
2	2012 年 10 月 2 日	本宮市民元気いきいき応援プラザ「えぼか」	F	
3	2012 年 10 月 23 日	郡山市保健所放射線健康管理センター	F	
4	2012 年 10 月 24 日	二本松市油井地区仮設 (浪江町)	C	
5	2012 年 11 月 3 日	いわき市立総合磐城共立病院	C	
6	2012 年 11 月 4 日	いわき市保健所放射線健康管理センター	C	
7	2012 年 11 月 13 日	田村市放射線健康管理センター	C	
8	2012 年 11 月 19 日	あづま脳神経外科病院	C	
9	2012 年 12 月 3 日	福島市健康福祉部放射線健康管理室 (1 号車)	C	レ
10	2012 年 12 月 4 日	桑折町保健福祉センター「やすらぎ園」	F	
11	2012 年 12 月 5 日	相馬中央病院 (相馬市の委託)	C	
12	2012 年 12 月 11 日	済生会春日診療所 (川俣町委託)	C	
13	2013 年 1 月 10 日	福島赤十字病院 (福島市委託)	C	
14	2013 年 1 月 11 日	福島県労働保健センター (1)	C	
15	2013 年 1 月 11 日	福島県労働保健センター (2)	C	
16	2013 年 1 月 11 日	福島県労働保健センター	A	
17	2013 年 1 月 31 日	市民放射線測定所・福島	AT	
18	2013 年 2 月 16 日	二本松市放射線被ばく測定センター	A	

※ 機種 C : Canberra 社製, F : 富士電機社製, A : 安西メディカル社製, AT : ATOMTEX 社製
同施設に同機種がある場合には施設名の後に括弧書きで番号を記した。

表 9 精度調査を行った WBC 及び施設等 (その 2)

(2013 年度)

No.	調査日	施設	機種	車載
19	2013 年 6 月 30 日	郡山市保健所放射線健康管理センター (2)	C	
20	2013 年 6 月 30 日	郡山市保健所放射線健康管理センター	F	
21	2013 年 6 月 30 日	郡山市保健所放射線健康管理センター	H	
22	2013 年 11 月 8 日	ひらた中央病院 (1)	C	
23	2013 年 11 月 8 日	ひらた中央病院 (2)	C	
24	2013 年 11 月 11 日	広野町保健センター	C	
25	2013 年 11 月 12 日	福島県労働保健センター (1 号車)	C	レ
26	2013 年 12 月 3 日	福島県労働保健センター (4 号車)	C	レ
27	2013 年 12 月 4 日	仁泉会 梁川病院	C	
28	2013 年 12 月 5 日	福島県庁 (2 号車)	C	レ
29	2013 年 12 月 12 日	福島県庁 (3 号車)	C	レ
30	2013 年 12 月 24 日	福島市健康福祉部放射線健康管理室 (1 号車)	C	レ
31	2013 年 12 月 24 日	福島市健康福祉部放射線健康管理室 (2 号車)	C	レ
32	2013 年 12 月 25 日	敬仁会 中野病院	C	
33	2013 年 12 月 26 日	福島県労働保健センター (5 号車)	C	レ
34	2014 年 1 月 7 日	南相馬市立総合病院 (1)	C	
35	2014 年 1 月 7 日	南相馬市立総合病院 (2)	C	
36	2014 年 1 月 8 日	伸裕会 渡辺病院	H	
37	2014 年 1 月 25 日	郡山市保健所放射線健康管理センター	F	
38	2014 年 1 月 25 日	郡山市保健所放射線健康管理センター	H	
39	2014 年 2 月 21 日	公立相馬総合病院	C	
40	2014 年 3 月 6 日	須賀川市保健センター	C	レ

※ 機種 C : Canberra 社製, F : 富士電機社製, A : 安西メディカル社製, AT : ATOMTEX 社製, H : 日立アロカメディカル社製 (同施設に同機種がある場合には施設名の後に括弧書きで番号を記した。)

(2) 結果と考察

WBC の精度調査結果を、基準放射能 (BOMAB ファントムの検定放射能 (^{137}Cs)) に対するバイアスを百分率で示した結果を図 28 及び図 29 に示す。図 28 は 2012 年度及び 2013 年度の結果 (全 40 機種) を示しており、図 29 は 2013 年度の結果 (全 22 機種) のみを示した。これらの結果から、福島県内で稼働中の WBC の精度は、概ね確保されていると予想される。 ^{137}Cs の基準放射能に対して 10% を超える WBC は 4 機 (10%) 確認されたが、いずれも国際規格等に定められる基準⁵の範囲内で

⁵ ANSI/HPS N13.30-1996 (Performance Criteria for Radiobioassay)³⁾では、真値からのバイアスの基準として -25% から +50% の範囲内としている。IEC61582-2004⁴⁾では、国内の簡易型 WBC の多くが対応するタイプ 2 の WBC では、基準放射能に対するバイアスを ±20% 以内であることを要求している。

あった。 ^{60}Co についても同様な結果が得られているが、一部の WBC は核種同定が出来なかった。

事故発生後、比較的早い段階で稼働していた WBC の中には、体内放射能を適切に定量しない機種があったと報告されている。しかしながら、こうした WBC は 2012 年度からの調査では 1 機も確認されなかった。この要因として、各メーカーが出荷前に WBC の値付けを確実に実施していること、また、ソフトウェアの改良により、環境バックグラウンドの補正や複合ピークの解析等が見直されてきたためと推察する。放医研では、事故発生以前より、自治体や被ばく医療機関等からの要請により、これらの機関が所有する WBC の校正や精度調査に協力してきた。これまでに放医研が外部機関の WBC を行った件数は計 67 件（事故前 24 件、事故後 43 件）に及んでいる。この一連の活動により、我が国では WBC 校正用ファントムに関する規格が未だ整備されていないものの、放医研が所有する BOMAB ファントムが徐々にデファクトスタンダードとして認知される様になったと思われる。実際、主要な国内メーカーでは、放医研の BOMAB ファントムを基準として検出感度の調整を出荷前に実施していると聞き及んでいる。他方、米国メーカーでは、自社で BOMAB ファントムとトレーサブルな二次ファントムを考案しており、これを用いて機器毎に校正を行っている。

今後も WBC の精度調査を継続するとともに、調査を通して得られたデータをきめ細かく見直してトレーサビリティの向上に繋げることが重要と考える。また、長期的に WBC の保守、維持管理を行う枠組みの構築が、国の施策としても必要であると思われる。他方、WBC の技術的な側面、例えば、WBC の体格補正、波高スペクトルの解析、疑似計数の取扱いなどの諸課題については、関連学会等でも検討してゆくのが良いかと思われる。本節の結びとして、WBC の精度調査にご協力頂いた各機関ならびに関係者に厚くお礼を申し上げる。

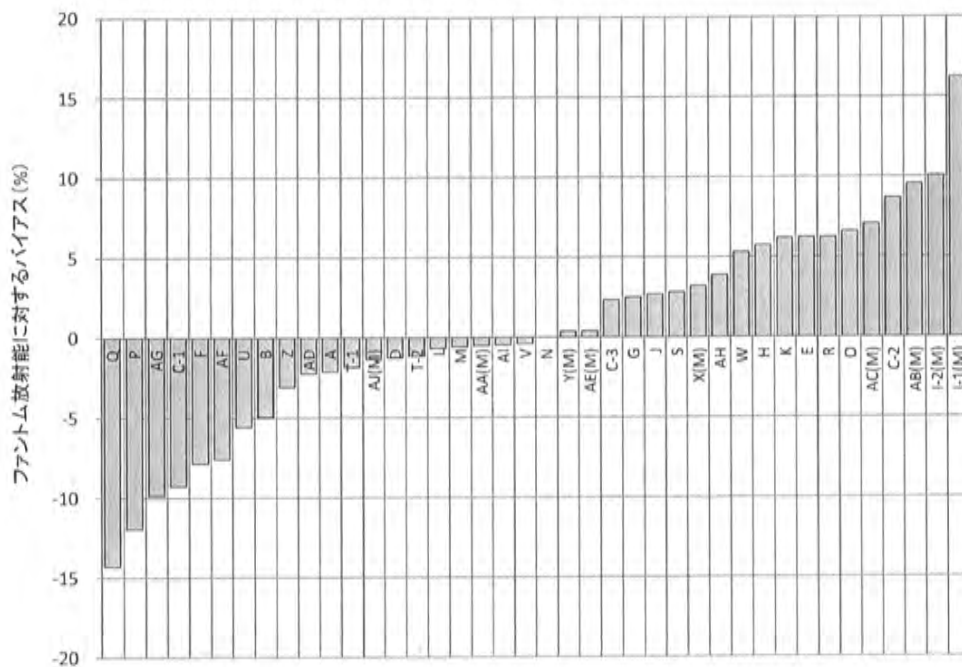


図 28 WBC の精度調査結果－BOMAB ファントム (^{137}Cs) 基準放射能に対するバイアス (2012 年度及び 2013 年度実施分)

※赤色で示した WBC は車載型)

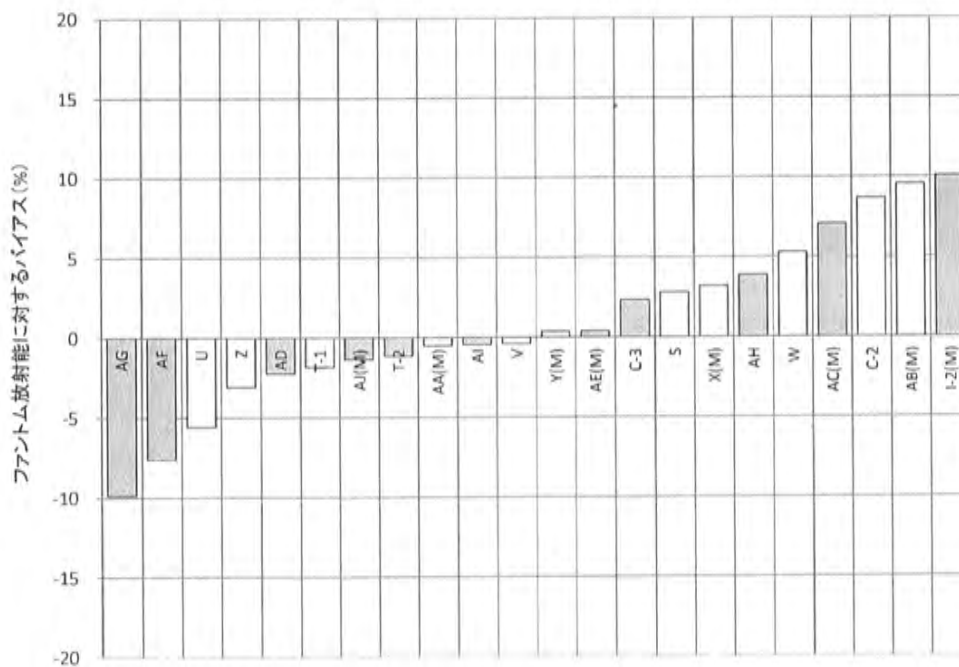


図 29 WBC の精度調査結果－BOMAB ファントム (^{137}Cs) 基準放射能に対するバイアス (2013 年度実施分のみ)

(※黄色で示した WBC は放医研独自事業として調査を行った機種)

5.2 体格別ファントムを用いた椅子型 WBC の計数効率の体格補正法の検討

4 歳児未満を対象とした WBC 測定については、福島県内で最も多く利用されている立位式 WBC (Fastscan™, Canberra 社) に限定して、日本原子力研究開発機構が最適な方法を検討し、既に運用が始まっている⁵⁾。本節では、椅子型 WBC に対して、体格別ファントムを用いた実験により、同様な検討を行った結果について述べる。

(1) 方法

以下の実験は、図 30 に示す郡山市保健センターに設置された 2 機の椅子型 WBC を用いて行った。これらの WBC は、両機とも検出器 (2 式) を被検者の背部に配置した測定ジオメトリであり、検出器の仕様は共通である。両機の違いは、主として遮へい体の形状とチャイルドシート (CS) の使用有無であり、F 社の機種では小児の測定の際に CS を使用しないのに対して、H 社の機種では小児の体重に応じて CS を使用するのが標準となっている。また、被検者の測定時間にも差がある。



F 社製 WBC
(測定時間：5 分間)



H 社製 WBC
(測定時間：2 分間)

図 30 調査対象とした 2 機の椅子型 WBC

実験には 2 種類の体格別ファントム (BOMAB ファントムと IGOR ファントム) を使用した。それぞれのファントムの外観は図 31 及び図 32 に示すとおりであり、IGOR ファントムについては、2 歳児と 6 歳児を模擬したものだけを今回の実験で使用した。また、体格別 BOMAB ファントムは計 4 体 (成人男性、成人女性、10 歳児、4 歳児) であるが、これに前節で述べた WBC 精度調査に使用した BOMAB ファントム (^{137}Cs のみ) を加えた計 5 体を用いた。

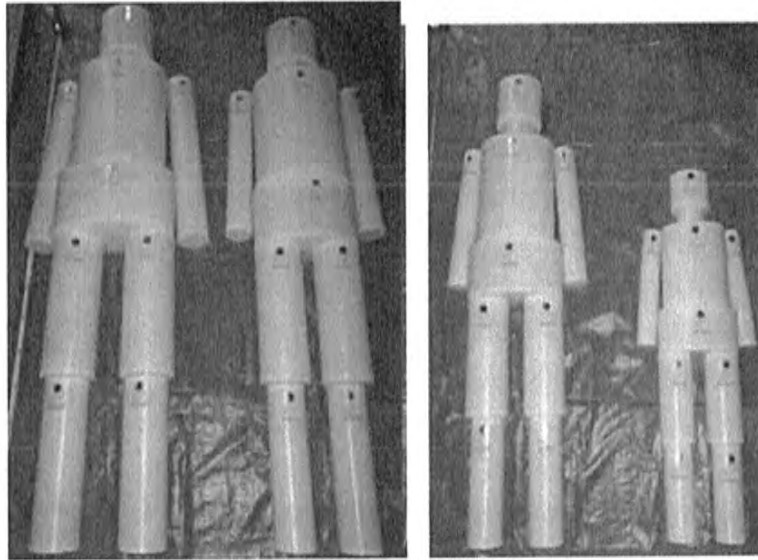
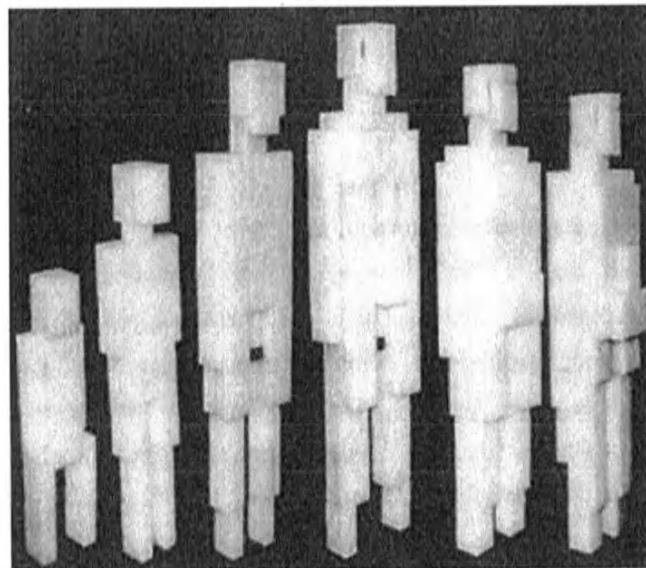


図 31 体格別 BOMAB ファントムの外観及び仕様



Type of the phantom (reference sample index of the set)	Age and anthropometric characteristics of human body			
	Age, years	Weight kg	Height cm	Average thickness, cm
F ₁	2	12	82.5	8.8
F ₂	6	24	121.0	10.9
F ₃	14	50	160.0	11.8
F ₄	≥ 18	70	170.5	14.3
F ₅	≥ 18	90	170.5	15.7
F ₆	≥ 18	110	170.5	19.4

図 32 体格別 IGOR ファントムの外観及び仕様

(2) 結果と考察

体格別ファントムを測定して得られた波高スペクトルを解析して求めた ^{137}Cs のピーク効率 (662 keV) を、個々のファントムの体表面積を変数として示した結果を図 33 に示す。体表面積は、Kinase

らの論文⁷⁾を参考にして、次式により計算した。

$$S = 0.0072W^{0.425} \cdot H^{0.725}$$

ここで、 S は体表面積 (m^2)、 W は体重 (kg)、 H は身長 (cm) である。

同図に示すように、ピーク効率は、体表面積を変数としたべき乗関数によって良好に近似できることが解る。しかしながら、4歳児 BOMAB ファントム (体表面積 $0.71 m^2$) と6歳児 IGOR ファントム (体表面積 $0.86 m^2$) 間にピーク効率の不連続性が見られ、両ファントムの放射線透過特性や測定ジオメトリ等について今後精査する必要がある。他方、小児の測定でCSを使用するH社のWBC (図34) については、CSを使用することにより、当然ながら被検者の検出器の距離が増加するためにピーク効率は低下するが、その値は成人模擬のファントムのものに近くなる。したがって、上記の体格補正式を用いなくても、一定の誤差 (概ね1.5倍程度の過大評価) が許容できるのであれば、成人模擬のファントムから得られたピーク効率を変更することなく小児の測定を行うことが可能である。今後の課題として、数値シミュレーション等を活用して体格補正式の精度向上を図るとともに、CSの形状の最適化等が考えられる。本節の結びに、本調査に多大なるご協力を頂きました郡山市保健センターの各位に感謝申し上げます。

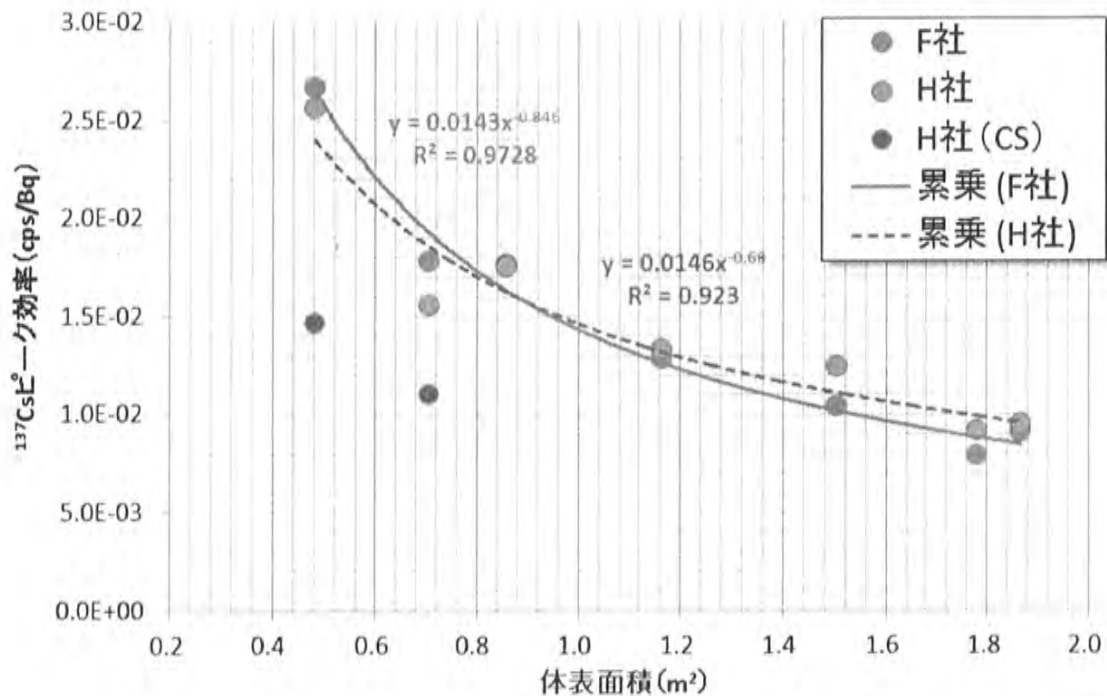
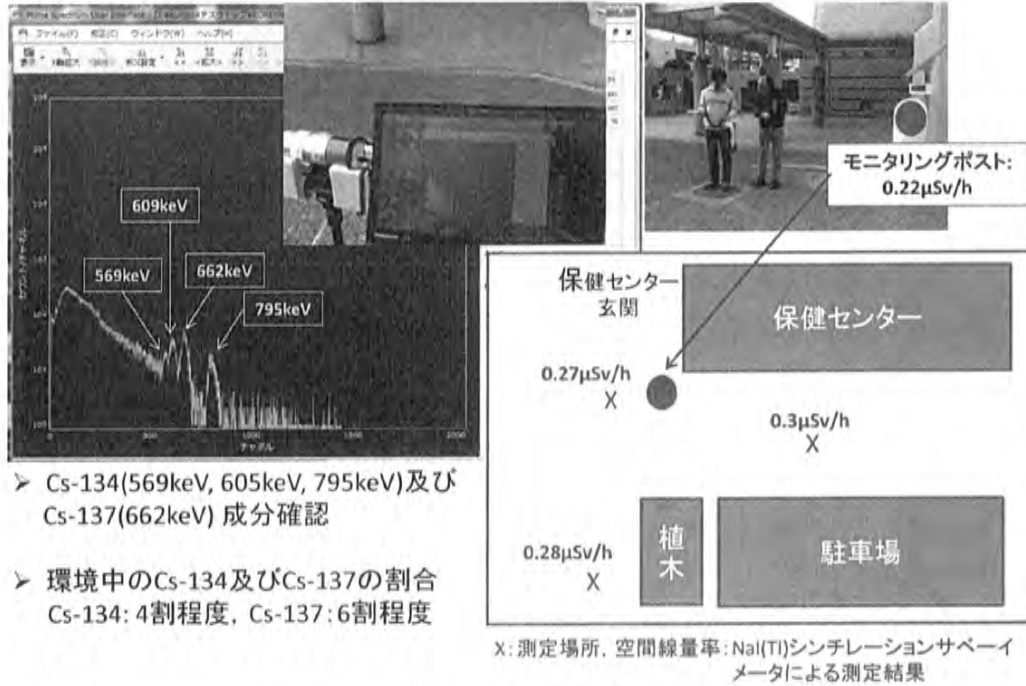


図 33 ^{137}Cs のピーク効率 (662 keV) と体表面積の関係



図 34 H社のWBCによるIGORファントム(2歳児)の測定の様子
左:CSなし, 右:CSあり

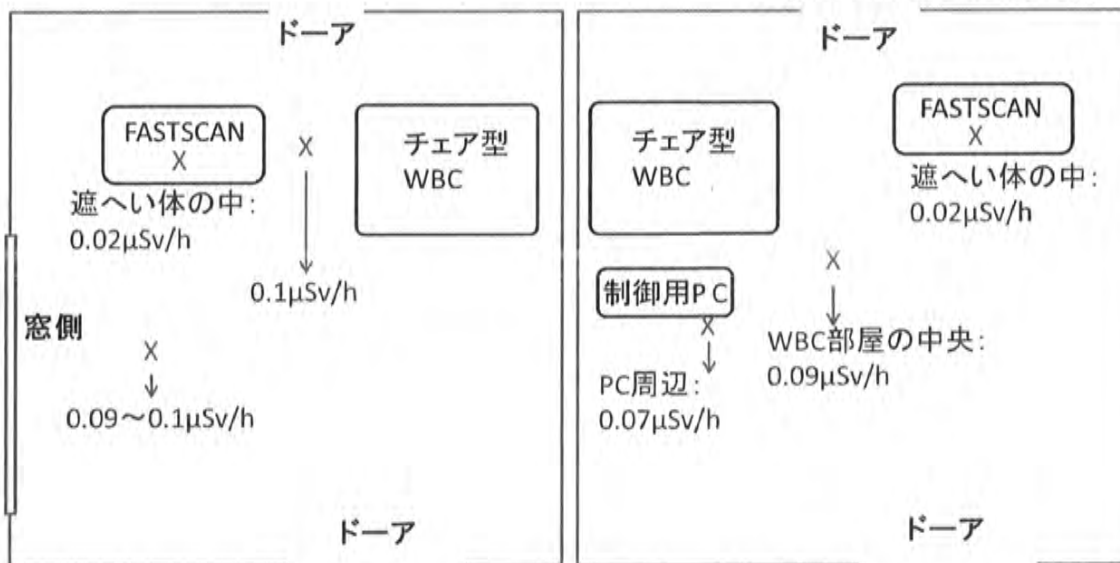
郡山市保健センターにおける放射線計測の結果



- Cs-134(569keV, 605keV, 795keV)及びCs-137(662keV)成分確認
- 環境中のCs-134及びCs-137の割合 Cs-134: 4割程度, Cs-137:6割程度

別図 1 郡山市保健センターの建屋周囲の空間線量率及び波高スペクトルの測定結果

X :空間線量率測定場所,
測定日:2014年1月25日



別図 2 郡山市保健センター内の WBC 設置室内での空間線量率の測定結果

WBC の校正実施状況 (2013 年度)

1. 調査対象とした WBC

2013 年度は、昨年度の WBC 校正事業において調査を行えなかった WBC 設置機関を中心に希望を募り、各機関の担当者との日程調整の上、現地調査を実施した。2013 年度の WBC 校正事業は、2013 年 12 月 17 日から 2014 年 3 月までの期間で行った。

2. WBC の調査項目

- ① WBC 本体の動作確認 (外観検査を含む)
- ② WBC 周囲の空間線量率測定
- ③ 波高スペクトルのエネルギー及び分解能の確認
- ④ BOMAB ファントムを基準放射能としたバイアス (偏り) 試験

3. 実施手順

- ① WBC 設置機関の担当者との日程調整
- ② 調査実施日の前日 (休日をはさむ場合にはその前日) に放医研から資機材の搬出
- ③ 調査日当日、資機材の受取りと搬入及び WBC の養生
- ④ BOMAB ファントムの組み立て、設置及び測定
- ⑤ WBC の動作確認 (人体中 K-40 の定量値の確認等を含む)
- ⑥ WBC 周囲の空間線量率測定
- ⑦ 担当者に結果の説明、意見交換
- ⑧ 調査終了後、片付け、資機材の搬出
- ⑨ 放医研にて資機材の受取り及び点検

4. 結果

- ① 2013 年度に調査した WBC は、全て問題なく動作した。ただし、車載型 WBC については、室内の温度設定に時間を要する場合がある (特に冬季)。測定中にも波高スペクトルのピーク位置がずれる状況も見られた。
- ② WBC 周囲 (機器が設置された室内) の空間線量率は概ね $0.05 \sim 0.07 \mu\text{Sv/h}$ の範囲であったが、車載型の場合は屋外の空間線量率に影響し、調査した WBC については $0.1 \sim 0.2 \mu\text{Sv/h}$ の範囲であった。
- ③ 調査した全ての WBC の全身放射能の定量精度は、IEC 規格の範囲内であった ($\pm 20\%$ 以内、ただし、タイプ 2 の分類される装置)。
- ④ WBC の全身放射能に対するピーク効率、Canberra 社の装置については $0.0065 \sim 0.0073 \text{ count/photon}$ 、日立アロカメディカル社の装置については $0.012 \text{ count/photon}$ であった (ただし、

662 keV について)。

- ⑤ 波高スペクトルのピーク半値幅は、Canberra 社の装置については 7.2～7.7%、日立アロカメディカル社の装置については 9.1%であった (ただし、662 keV について)。

5. 課題など

- ① 現在、WBC 測定において検出限界値を超える被検者は非常に僅かであると聞いている。WBC のメーカーにより検出限界値の考え方が異なるので、統一的な考え方を示すことが必要である。また、最近では、自然放射性核種による誤検出の事象が問題となっているとの報告もあった。
- ② 車載型 WBC の台数が増えているが、屋外の温度変化の影響を強く受けるために装置のウォームアップに相当な時間を要する場面もある (特に冬季)。また、設置場所の空間線量率についても注意が必要である。

6. 福島県内における WBC の新規導入状況等

昨年度の環境省委託事業の報告以降に新規に導入された WBC は 8 台であり、全て Canberra 社製の立位式 WBC (Fastscan™) であった。導入機関は次のとおりである。

福島県	車載型
福島市	
白河厚生総合病院	据置型
広野町保健センター	
JFA メディカルセンター	
いわき市双葉町役場仮庁舎	
郡山市保健所	
医療生協 わたり病院	

なお、ひらた中央病院 (福島県石川郡平田村) に設置の 2 機の Fastscan™ の内、1 機が乳児用 WBC (ベビースキャン) に置き換わった。



別図3 ベビースキャンの外観

第5章 参考資料

- 1) 福島県県民健康管理調査 HP,
http://wwwcms.pref.fukushima.jp/pcp_portal/PortalServlet?DISPLAY_ID=DIRECT&NEXT_DISPLAY_ID=U000004&CONTENTS_ID=24287
- 2) American National Standard, Specification for the Bottle Manikin Absorption Phantom, ANSI/HPS N13.35-1999 (1999).
- 3) American National Standard, Performance Criteria for Radiobioassay, ANSI/HPS N13.30-1996 (1996).
- 4) International Standard, Radiation protection instrumentation – In vivo counters – Classification, general requirements and test procedures for portable, transportable and installed equipment, IEC61582 (2004).
- 5) 福島県 HP, <http://www.pref.fukushima.jp/imu/wbc/4saimiman.pdf>,
<http://www.pref.fukushima.jp/imu/wbc/sokuteihouhou-4saimiman.pdf>
- 6) 木名瀬栄, 計算シミュレーション手法に基づく体外計測法の高度化に関する研究, JAERI-Research 2003-011 (2003).

第6章 本事業のまとめと今後の課題

本報告書は、環境省からの委託事業「平成25年度原子力災害影響調査等事業（東京電力福島第一原子力発電所事故に係る被ばく線量の把握調査等）」に関して、その受託元である独立行政法人・放射線医学総合研究所が調査を行った成果を取りまとめたものである。本章では、本報告書の第3章から第5章までの各章の内容について要約するとともに、今後の課題について述べる。

● 第3章 事故初期内部被ばくの線量推計の精度向上のための検討

福島第一原子力発電所事故に係る事故初期に内部被ばく線量測定に関して、一般公衆を対象としたものは数が限られている。したがって、これらの実測データの精度を十分に精査し、可能な限り多くの情報を得るために最大限の努力をする必要がある。今年度の調査では、代表的な測定事例である小児甲状腺被ばくスクリーニング検査及びホールボディカウンタ（WBC）による甲状腺中¹³¹Iの測定の2例について、数値シミュレーションによる精度検証を試みた。前者については、幾つかの数値ファントムを用いて同検査に使用されたNaI(Tl)サーベイメータの年齢別校正定数の導出を行った。この過程で、特に乳幼児ではNaI(Tl)サーベイメータを頸部に密着させて測定することが困難な場面があった可能性について示唆された。後者については、測定が概ね妥当である根拠が得られたが、引き続き検証をしてゆく必要がある。

事故発生から数か月経た後に行われたWBCの実測データを初期内部被ばく線量の推計に活用するには、ヨウ素とセシウムの摂取量比を決定する必要がある。小児の甲状腺線量分布と成人の実効線量分布から導出した摂取量比は、福島第一原子力発電所から北西方向の地域については概ね妥当であると見ているが、南方向については本章でも述べた様に更なる検討が必要である。併せて、甲状腺へのヨウ素移行率について、近年の日本人のデータが望まれる。

個人の行動調査を活用した内部被ばく線量推計については、この実現のために、受託元と関係機関で準備を進めている。本報告書（3.4）で述べた手法を実行するには、膨大な個人行動情報を解析することが必要である。その際、個人行動パターンの分類化や、大気拡散シミュレーションから摂取時期の推定等の処理を行えるシステムの開発が必須になると思われる。

● 第4章 個人線量測定ガイドラインのための資料収集

次年度以降に標記のガイドラインを作成することを想定し、これに有用となる資料を収集した。このガイドラインの主たる読み手としては個人線量測定の実務担当者を意図しているが、これ以外の読者にも受け入れられるものを作るべきである。一般公衆を対象とした個人線量管理及び結果の活用法、種々の放射線場における個人線量計の特性、WBCによる内部被ばく線量推計の考え方など、関連する分野の専門家でも回答が決して容易ではない諸課題について、具体的な根拠を示しながら分かりやすく解説したガイドラインとすべきである。

● 第5章 WBCの精度調査等

2012年度から2013年度末までに、福島県内で県民の内部被ばく線量測定に活用されている40機のWBC（放医研の自主事業として実施した分を含む）の精度調査を行った。その結果、全身の体内放射

能 (^{137}Cs) の基準としたファントムに対する定量精度は、全ての WBC について誤差 20%以内であり、その 9 割が誤差 10%以内であった。今後も調査が継続される予定であるが、次年度以降は WBC の精度を更に向上させてゆくための具体的な提案も行う必要があると認識している。併せて、今年度の調査では十分な結論が得られなかった WBC の体格補正法の一般化、検出限界値程度の放射性セシウムを測定した際の波高スペクトルの解析安定性、統一的な検出限界値の考え方等の課題について、関連学会とも連携して取り組んでゆくことが望まれる。

最後になるが、本報告書が、福島第一原子力発電所事故に係る周辺住民の方々の被ばく線量の把握に多少なりとも資することを期待し、結語とする。

本事業の成果

1. National Institute of Radiological Sciences, The 1st NIRS symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Chiba, Japan 2012, Proceedings (O. Kurihara, K. Akahane, S. Fukuda, N. Miyahara, S. Yonai, ed.) (2012).
2. 放射線医学総合研究所, 第2回国際シンポジウム東京電力福島第一原子力発電所事故における初期内部被ばく線量の再構築—講演集 (2013) (配布限定)
3. O. Kurihara, E. Kim, K. Fukutsu, M. Matsumoto, S. Suh, K. Akahane, K. Sakai, NIRS's project for the reconstruction of early dose to inhabitants in Fukushima after the nuclear disaster, Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident (*Takahashi ed.*), 177-188, Springer Open, ISBN 978-4-431-54582-8.
4. 栗原治, 金ウンジュ, 徐素熙, 福津久美子, 松本雅紀, 林津雄厚, 内山優子, 川口勇生, 酒井一夫, 東京電力福島第一原子力発電所事故における福島県住民の初期内部被ばく線量推計, Proceedings of the 14th workshop on environmental radioactivity, Tsukuba, Japan, Feb. 26-28, 2013, KEK Proceedings 20113-7, 7-16 (2013).
5. 栗原治, 被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーション—東京電力福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量再構築, 日本原子力学会誌, 55 (12), 34-38 (2013).
6. 栗原治, 放射性ヨウ素による初期内部被ばく線量の再構築, 第50回アイソトープ・放射線研究発表会, 東京, 平成25年7月4日(2013).
7. 栗原治, 福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量推計: 現状と課題, 平成25年度放射線安全取扱部会年次大会, 鹿児島市民文化ホール, 平成25年11月15日 (2013).
8. O. Kurihara, NIRS estimation of internal doses to the thyroid, The international workshop on radiation and thyroid cancer, Shinagawa Prince Hotel, Tokyo, Japan 21-23 Feb. (2014).

付録

- (A) O. Kurihara, E. Kim, K. Fukutsu, M. Matsumoto, S. Suh, K. Akahane, K. Sakai, NIRS's project for the reconstruction of early dose to inhabitants in Fukushima after the nuclear disaster, *Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident (Takahashi ed.)*, 177-188, Springer Open, ISBN 978-4-431-54582-8.
- (B) 栗原治, 金ウンジュ, 徐素熙, 福津久美子, 松本雅紀, 林津雄厚, 内山優子, 川口勇生, 酒井一夫, 東京電力福島第一原子力発電所事故における福島県住民の初期内部被ばく線量推計, *Proceedings of the 14th workshop on environmental radioactivity*, Tsukuba, Japan, Feb. 26-28, 2013, KEK Proceedings 20113-7, 7-16 (2013).
- (C) 栗原治, 被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーションー東京電力福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量再構築, *日本原子力学会誌*, 55 (12), 34-38 (2013).
- (D) O. Kurihara, NIRS estimation of internal doses to the thyroid, *The international workshop on radiation and thyroid cancer*, Shinagawa Prince Hotel, Tokyo, Japan 21-23 Feb. (2014). 発表スライド

(A) NIRS's project for the reconstruction of early dose to inhabitants in Fukushima after the nuclear disaster,
O. Kurihara, E. Kim, K. Fukutsu, M. Matsumoto, S. Suh, K. Akahane, K. Sakai
Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident, 177-188, Springer Open,
ISBN 978-4-431-54582-8

Chapter 16

NIRS's Project for the Reconstruction of Early Internal Dose to Inhabitants in Fukushima After the Nuclear Disaster

Osamu Kurihara, Eunjoo Kim, Kumiko Fukutsu, Masaki Matsumoto, Soheigh Suh, Keiichi Akahane, and Kazuo Sakai

Abstract In 2012, National Institute of Radiological Sciences (NIRS) launched a project on the reconstruction of the early internal dose, namely the thyroid dose to inhabitants in Fukushima and adjacent prefectures from the intake of short-lived nuclides, mainly ^{131}I after the nuclear disaster. Limited human measurements make it difficult to estimate individual doses, and thus it is necessary to collect all information available and explore possible methods for dose reconstruction. As the first action of the project, a symposium was organized by NIRS on 10–11 July 2012. This chapter provides human or environmental measurement data collected and describes the current status of the project.

Keywords Dose reconstruction • Early internal dose • Fukushima • Inhabitants • Nuclear disaster • Thyroid dose

16.1 Introduction

The Tokyo Electric Power Company (TEPCO) Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS) accident triggered by the Tohoku Region Pacific Coast Earthquake on 11 March 2011 resulted in reactor core meltdown with several hydrogen explosion events, following an enormous release of radioactive materials into the environment [1]. Airborne surveys after this nuclear disaster have shown the spatial distribution of ambient dose rates and the Cs ground deposition on a regional scale,

O. Kurihara (✉) • E. Kim • K. Fukutsu • M. Matsumoto • S. Suh • K. Akahane • K. Sakai
Research Center for Radiation Emergency Medicine, National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Inage-ku, Chiba-City, Chiba 263-8555, Japan
e-mail: osakuri@nirs.go.jp

S. Takahashi (ed.), *Radiation Monitoring and Dose Estimation of the Fukushima Nuclear Accident*, DOI 10.1007/978-4-431-54583-5_16,
© The Author(s) 2014

revealing that heavily contaminated areas were generated mainly in a northwesterly direction from FDNPS [2]. It is thus of great importance to understand the magnitude of individual doses to populations in affected areas from the aspect of foreseeing health effects attributed to radiation exposure in the accident. Preliminary dose estimations for inhabitants in Fukushima Prefecture and the whole of Japan have been reported by the World Health Organization (WHO) [3].

The Fukushima government has also initiated dose estimations of the inhabitants inside the prefecture and results obtained are described as follows. External dose estimations of 228,512 inhabitants have been completed as of the end of October 2012, demonstrating that 99.6 % of these are 5 mSv in effective dose for the first 4 months after the accident [4]. These estimations have been performed using a system for calculating individual external doses based on time-series maps of ambient dose rates in Fukushima Prefecture and personal behavior records. Human measurements of the inhabitants with whole-body counters (WBCs) have been performed for estimating their internal doses. It has been reported that 26 of 90,050 subjects exceeded 1 mSv in the committed effective dose (CED) [5]. However, it should be noted that this result is for internal doses only from ^{134}Cs and ^{137}Cs . The early internal dose, which is expected to be received by the intake of short-lived nuclides (e.g., ^{131}I , ^{132}I , ^{132}Te) during the first few months after the accident, still remains unknown because of limited information available. Concern is thus raised concerning thyroid exposure to small children from the intake of radioiodine, as with situations found after Chernobyl accident [6].

In 2012, the National Institute of Radiological Sciences (NIRS) launched a project on the reconstruction of the early internal dose to the inhabitants in Fukushima and adjacent prefectures. As the first action of this project, the 1st NIRS symposium on "Reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima nuclear power station accident" was held on 10–11 July 2012. The main aims of this symposium were twofold: (1) to collect human and environmental measurement data available for estimating the early internal dose to the inhabitants and (2) to discuss methods for reconstructing the thyroid equivalent dose (hereinafter, thyroid dose) among invited experts from Japan and overseas. The proceedings of the symposium, including 17 peer-reviewed papers and the summary of the discussion, have been published by NIRS [7]. Table 16.1 lists authors and titles of the papers included in the proceedings. The goals of the project this year are set as (1) to propose best methods for the internal dose estimation and (2) to estimate representative doses to the inhabitants of each area in Fukushima prefecture. This chapter briefly describes the current status of the project.

16.2 Measurement Data Collection

Main information on human and environmental measurements for reconstructing the thyroid dose to the inhabitants is described as follows.

Table 16.1 Contents of the proceedings of the 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident [7]

Authors	Title of paper
<i>Part 1: Current status of internal doses estimation</i>	
(1) For responders	
C. Takada et al.	Results of whole body counting for JAEA staff members engaged in the emergency radiological monitoring for the Fukushima nuclear disaster
O. Kurihara et al.	Direct measurements of employees involved in the Fukushima Daiichi nuclear power station accident for internal dose estimates: JAEA's experiences
T. Nakano et al.	Direct measurements for highly-exposed TEPCO workers and NIRS first responders involved in the Fukushima NPS accident
N. Matuda et al.	Retrospective assessment of internal doses for short-term visitors to Fukushima within 1 month after the nuclear power plant accident
M. Miyazaki et al.	Lessons learned from early direct measurements at Fukushima medical university after the Fukushima nuclear power station accident
(2) For residents and visitors	
S. Tokomami et al.	Thyroid equivalent doses due to radioiodine-131 intake for evacuees from Fukushima Daiichi nuclear power plant accident
E. Kim et al.	Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident
T. Momose et al.	Whole-body Counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident
I. Yamaguchi et al.	Estimation of ingestion dose due to I-131 in the initial month by using food-monitoring data after the Fukushima nuclear disaster in Japan
<i>Part 2: Measurement of radioactivity in the environment</i>	
H. Tsuruta	Summary of atmospheric measurements and transport pathways of radioactive materials released by the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident
T. Nakamura	Radiation and radioactivity monitoring in the surrounding environment after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident—Overview
<i>Part 3: Atmospheric dispersion simulations for radionuclides</i>	
M. Chino et al.	Reconstruction of the atmospheric releases of ¹³¹ I and ¹³⁷ Cs resulting from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident
H. Nagai et al.	Atmospheric dispersion simulations of radioactive materials discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant due to accident: consideration of deposition
T. Ohara and Y. Morino	Atmospheric transport and deposition modeling of radioactive materials: current status and future tasks
G. Sugiyama et al.	National atmospheric release advisory center dispersion modeling during the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident
<i>Part 4: Atmospheric dispersion simulations for radionuclides</i>	
M. Balonov and I. Zvonava	Methodology and results of internal dose reconstruction in Russia after the Chernobyl accident: generic approach and thyroid dose
A. Bouville et al.	Dose reconstruction related to the nuclear weapons tests conducted by the US in the Pacific in the 1950s

16.2.1 Human Thyroid Measurements

Through the symposium, it was revealed that human thyroid measurement data of the inhabitants were much fewer in this accident compared to those collected in the Chernobyl accident. The total number of such measurements totals ~1,500 at most; the largest dataset was a screening survey on the thyroid exposure that was conducted for 1,080 children in late March 2011 [8]. The subjects of this screening survey were inhabitants of Kawamata Town, Iwaki City, or Iitate Village where only indoor evacuation was advised because it was outside the restricted zone (20-km radius of FDNPS). The results demonstrated that net readings of the devices used in the screening survey were 0 for 598 of the 1,080 subjects and also suggested that no one had a thyroid dose that exceeded 100 mSv. Kim et al. [9] first introduced the thyroid dose distribution of the 1,080 subjects, showing that the maximum thyroid dose was 43 mSv on the assumption of a chronic intake scenario. However, difficulty was recognized in evaluating the quantitative capability of the nonspectrometric devices being used under elevated levels of radiation background. On the other hand, Tokonami et al. [10] performed thyroid measurements with a NaI(Tl) scintillation spectrometer on 12–16 April 2011 of 62 subjects of Namie Town: 45 evacuees from coastal areas and 17 inhabitants in Tsushima district. Positive detection was found in 39 in the evacuees and 7 in the inhabitants. The maximum thyroid dose among the subjects was 23 mSv in the group less than 20 years old and 33 mSv in the group over 20 years old. Other human thyroid measurements were obtained from responders or workers in charge of emergency operations at FDNPS [11, 12].

16.2.2 Human Whole-Body (WB) Measurements

Although measurement data of WBCs directly give internal doses from Cs only, these data would be available for reconstructing the thyroid dose to the inhabitants if the intake ratio of I to Cs can be determined in some way. NIRS was in charge of the pilot survey as a part of Fukushima Health Management Survey [13]. This survey was performed for 122 inhabitants of pilot survey areas (Namie Town, Iitate Village, and Yamakiya district of Kawamata Town) from June 27 to July 16 in 2011 by means of the thyroid/WB measurements and urinalysis. Table 16.2 summarizes numbers of the subjects with positive detection in the thyroid/WB measurements. Only the WB measurements provided meaningful results, showing that neither ^{134}Cs nor ^{137}Cs was detected for about half the subjects. This result indicates that a median CED of the adult subjects was below 0.035 mSv, which was derived from the detection limit of the WB measurements based on an acute intake scenario via inhalation on 12 March 2011. The Japan Atomic Energy Agency (JAEA) subsequently started WB measurements of the inhabitants on 11 July 2011 at the request of the Fukushima government. The total number of the subjects (mainly children) reached 9,927 at the end of January in 2012. Momose et al. [14] have reported their analysis results of

Table 16.2 Thyroid and whole-body measurement results of subjects of the pilot survey (as of 10 July 2011) [13]

Target nuclide	4–7 years		8–12 years		13–17 years		≤18 years		All	
	Pos. ^a	No. ^b	Pos. ^a	No. ^b	Pos. ^a	No. ^b	Pos. ^a	No. ^b	Pos. ^a	No. ^b
¹³¹ I	0	9	0	14	0	6	0	80	0	109
¹³⁴ Cs only	2		6		2		42		52	
¹³⁷ Cs only	0		0		0		32		32	
¹³⁴ Cs and ¹³⁷ Cs	0		0		0		26		26	

Detection limits: 38 Bq for ¹³¹I, 320 Bq for ¹³⁴Cs, and 570 Bq for ¹³⁷Cs

^aPositive detection

^bSubject number for each age group

the CED distributions of two age groups, 13–17 years old and older than 17 years. The median CED values of the two groups were evaluated to be 0.02 and 0.025 mSv, respectively. Here we note that all the individual CEDs were introduced based on the same intake scenario as described above for conservative estimations. Raw data of the WB measurements (e.g., the body content of Cs, measurement date, subject's age and sex, etc.) have not been published so far.

16.2.3 Environmental Measurements

Airborne sampling data are much needed because inhalation, rather than ingestion, is a main route of the intake by most of the inhabitants. However, such data were also rarely obtained in the first week after the accident. Continuous air sampling was performed only outside Fukushima Prefecture. Tsuruta et al. [15] have reported the gaseous/aerosol ratio of ¹³¹I and the activity ratio of ¹³¹I/¹³⁷Cs in air from their analyses on existing information. Both items are of importance for reconstructing the thyroid dose.

Figure 16.1 displays the relationship of the ¹³¹I air concentration between gaseous and particulate forms at FDNPS, TPCO Fukushima Daini NPS (located 10 km south from FDNPS), and three sites of JAEA in Ibaraki Prefecture, showing that all the plots follow a common trend with a mean ratio of 0.5 in the ¹³¹I concentration of higher than 10 Bq m⁻³. This ratio significantly influences thyroid dose values because the dose coefficient for inhalation of ¹³¹I in the elemental form becomes doubled compared to that in the particulate form (Table 16.3) [16]. Although little analysis has been performed on the chemical form of iodine in the accident, most of the iodine was assumed to exist in the methylated state.

The activity ratio of ¹³¹I/¹³⁷Cs also varied with time and location. This ratio changed significantly with two orders of magnitudes (1–100). It became around 10 on March 15 and March 20–21 when large releases of the nuclides from FDNPS occurred and was calculated as 8 from the average air concentrations of ¹³¹I and ¹³⁷Cs at the site of the Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories of JAEA

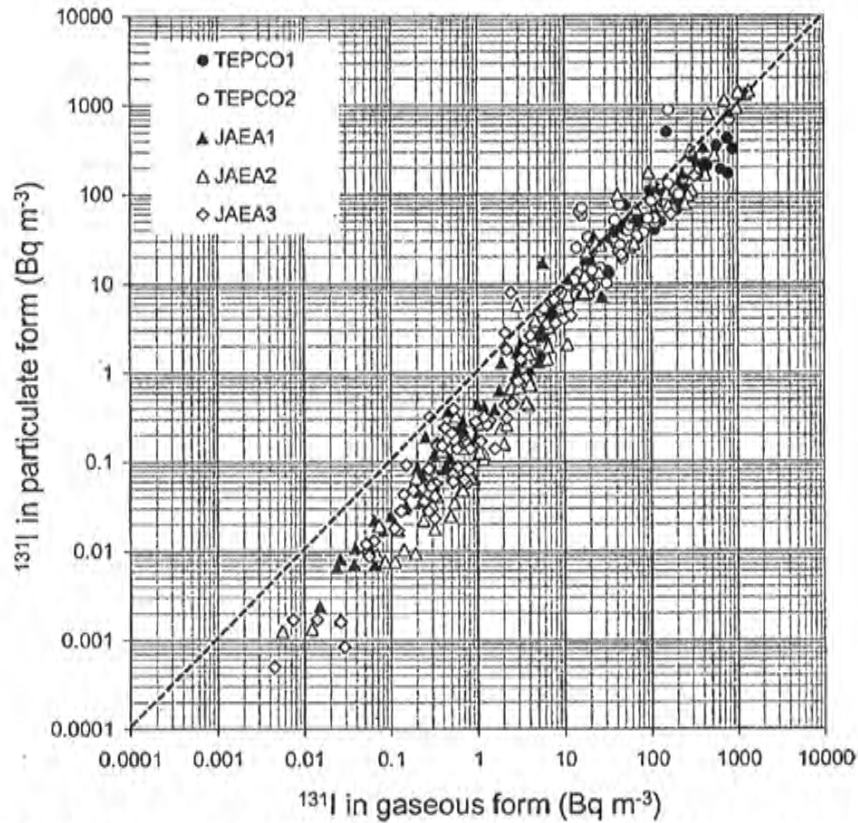


Fig. 16.1 Relationship of the physicochemical form of ^{131}I between gaseous and particulate forms. *TEPCO1* Fukushima Daiichi nuclear power station, *TEPCO2* Fukushima Daini nuclear power station

Table 16.3 Thyroid equivalent dose coefficient via inhalation for different age groups [16]

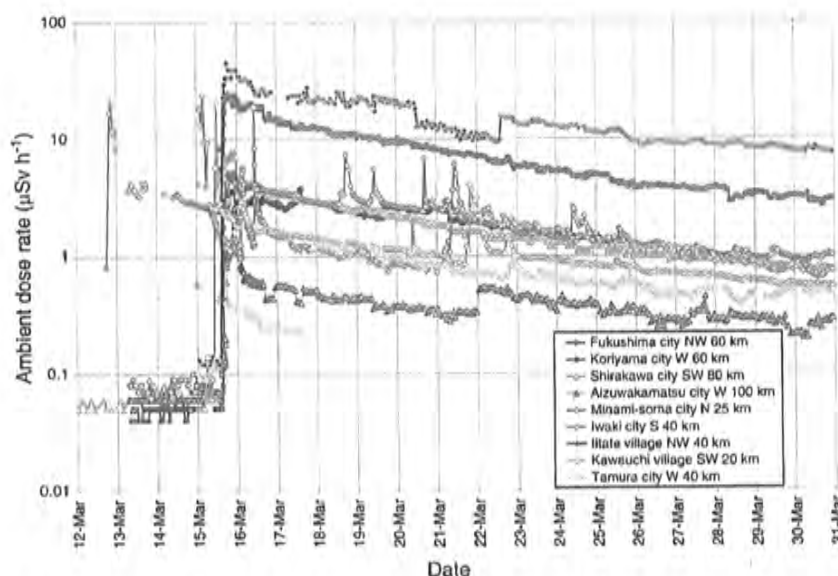
Physicochemical form	3 months	1 year	5 years	10 years	15 years	Adult
Methyl	2.6E-06	2.5E-06	1.5E-06	7.4E-07	4.8E-07	3.1E-07
Elemental	3.3E-06	3.2E-06	1.9E-06	9.5E-07	6.2E-07	3.9E-07
Particulate	1.4E-06	1.4E-06	7.3E-07	3.7E-07	2.2E-07	1.5E-07

Unit, Sv Bq⁻¹

(Table 16.4) [17]. These values seem to be consistent with a core inventory calculation. The activity ratio of $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ on the ground surface shows a spatial distribution with higher ratios in a southerly direction and lower ratios in north and northwest directions from FDNPS, which is explained by the difference in meteorological conditions at the time of the ground deposition. Details are described elsewhere.

Table 16.4 Dose contributions from various nuclides detected in air [17]

Nuclide	Averaged air concentration (Bq m ⁻³) ^a	Adult (mSv)		1-year-old child (mSv)	
		Effective dose	Thyroid equivalent dose	Effective dose	Thyroid equivalent dose
^{130m} Te	1.5	1.9E-02	3.1E-02	1.8E-02	7.7E-02
¹³² Te	3.7	3.0E-02	4.4E-01	6.1E-02	1.1
¹³¹ I	12.0	3.8E-01	7.4	7.0E-01	14
¹³² Ib	3.7	1.8E-03	2.1E-02	3.1E-03	5.1E-02
¹³³ I	0.56	3.6E-03	6.8E-02	8.5E-03	1.7E-01
¹³⁴ Cs	1.3	4.1E-02	1.3E-02	3.0E-02	7.6E-03
¹³⁶ Cs	0.21	9.0E-04	3.2E-04	8.2E-04	2.9E-04
¹³⁷ Cs	1.5	9.4E-02	1.1E-02	5.6E-02	6.1E-03
Total		0.57	7.9	0.88	15

^aAverage air concentration from March 12 to May 23, 2011^bAssuming the equilibrium state with ¹³²Te**Fig. 16.2** Time trend of ambient dose rates at various locations in Fukushima Prefecture

Other short-lived nuclides such as ¹³²I, ¹³³I, or ¹³²Te were observed in the air sampling at several locations [17, 18]. Their contribution to the thyroid dose is estimated to be from 10 % to 20 %, although this may vary with assumed physico-chemical forms of the nuclides and an intake period of the evaluation.

Figure 16.2 displays trends of ambient dose rates at various locations in the Fukushima prefecture. The first peak appears on March 15 at most of the locations

except for Minami-some city located north of FDNPS (on March 12). Thus, the first intake event for the inhabitants of the areas on the figure is also likely to occur on the same day. However, it is still difficult to know when and how the inhabitants, especially evacuees from the restricted zone, were exposed. Information on personal behavior records is needed: most of the evacuees moved outside the restricted zone before March 15. Atmospheric dispersion simulations for reproducing the behavior of enriched plumes may be also useful for this purpose.

16.3 Proposed Methods

Figure 16.3 displays proposed methods for reconstructing the thyroid dose to the inhabitants. The methods are classified into direct and indirect approaches: the former uses human data and the latter uses nonhuman data (including atmospheric dispersion simulations). The top priority in the dose reconstruction is placed on dose estimations from thyroid measurements. However, as mentioned earlier, such data are insufficient in terms of number and area. Thus, the direct approach utilizes available WB measurement data, which requires determining an appropriate intake ratio of I to Cs. Realistic scenarios of the intake are essential in the direct approach.

The dose estimation from the WB measurements is illustrated as follows. Here suppose the use of a CED value (^{134}Cs and ^{137}Cs) of the adult as the WB measurement data (currently available). Figure 16.4 displays a calculation flow from the CED of the adult to the thyroid doses to the children on the assumption that they both inhale the nuclides (^{131}I and Cs) with average ventilation rates for each age group under the same environment. The intake amounts of ^{134}Cs and ^{137}Cs giving a unit dose (1 mSv in the CED) are calculated as 90,000 Bq for each; here the existing ratio of $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ is set as equal. When the intake ratio of $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ is 1, the thyroid dose to the adult is 30 mSv, taking into account the gaseous/particulate ratio of ^{131}I and thyroid doses from nuclides other than ^{131}I . The thyroid doses to a 1-year-old child and a 10-year-old child are also calculated as 60 and 50 mSv, respectively. Note that these thyroid doses increase in proportion to the intake ratio of $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$. For instance, when using a CED value of 0.025 mSv (from the average CED for the adult inhabitants in Fukushima) and an intake ratio of 10 (from the average existing ratio in air at the JAEA site), the thyroid dose to the 1-year-old child is calculated as 15 mSv ($=0.025 \times 60 \times 10$).

In the direct approach, internal doses received via inhalation or ingestion are separately estimated using materials on the figure. Dose estimation results from the indirect approach need to be compared with those from the direct approach for validation.

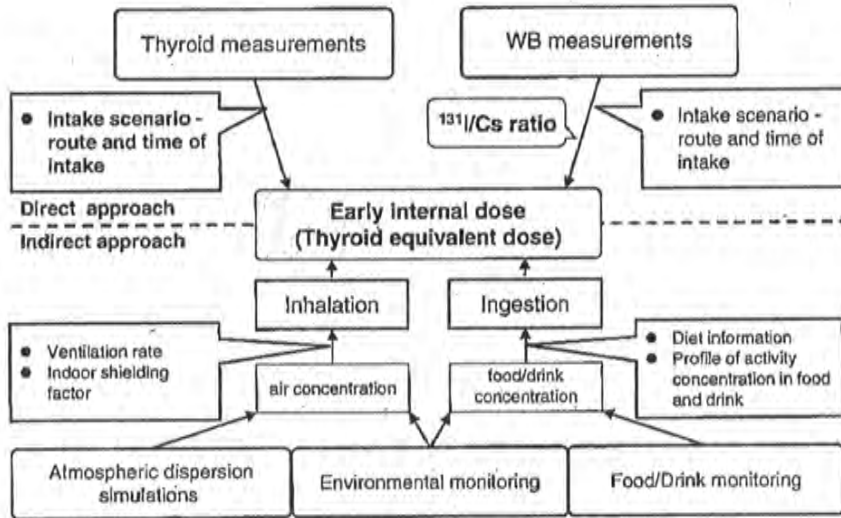


Fig. 16.3 Proposed methods for reconstruction of thyroid dose to inhabitants

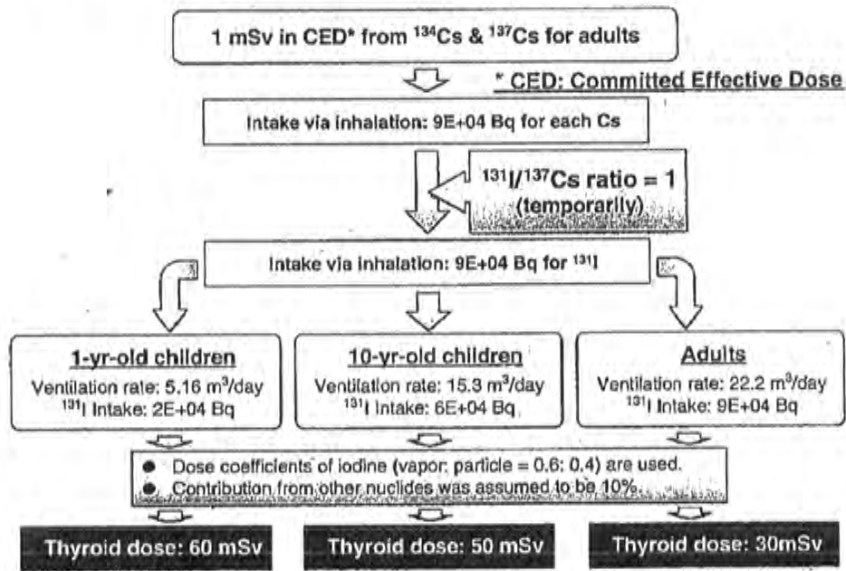


Fig. 16.4 Calculation flow of thyroid doses to different age groups from committed effective dose (CED) value of adult

16.4 Discussion and Future Tasks

The project has just started. Thus, discussion is provided only on the feasibility of the proposed methods for dose reconstruction.

In the direct approach, the WB measurements would compensate a relatively-small number of the thyroid measurements if appropriate intake ratios of $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ can be determined. From an inverse estimation by the System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information (SPEEDI), the discharge amount ratio of $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ resulted in 10 [19]. On the other hand, the ground deposition ratio of $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ is found to significantly vary with location [20], which suggests that it is difficult to make use of the relationship between Cs ground deposition and the thyroid doses to inhabitants [21]. The WB measurements of early responders to the accident have shown that estimated intake ratios of $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$ are considerably different between individuals [11]. Taking this fact into account, it would be necessary to carefully examine individual behavior.

In the indirect approach, the feasibility of atmospheric dispersion simulations for estimating the intake via inhalation is now under investigation. Figure 16.5 displays thyroid dose maps obtained from simulations by a worldwide version of SPEEDI (WSPEEDI-II) [22]. Note that these maps are given for hypothetical 1-year-old children and adults staying outside all the time from March 12 to March 31 in 2011. Thereby, these maps cannot be applied to persons moving during this period (e.g., the evacuees from the restricted zone), but would be useful for estimating thyroid doses to inhabitants on a regional scale. Preliminary calculations by WSPEEDI-II show reasonable overestimations for the thyroid dose in comparison to results of the

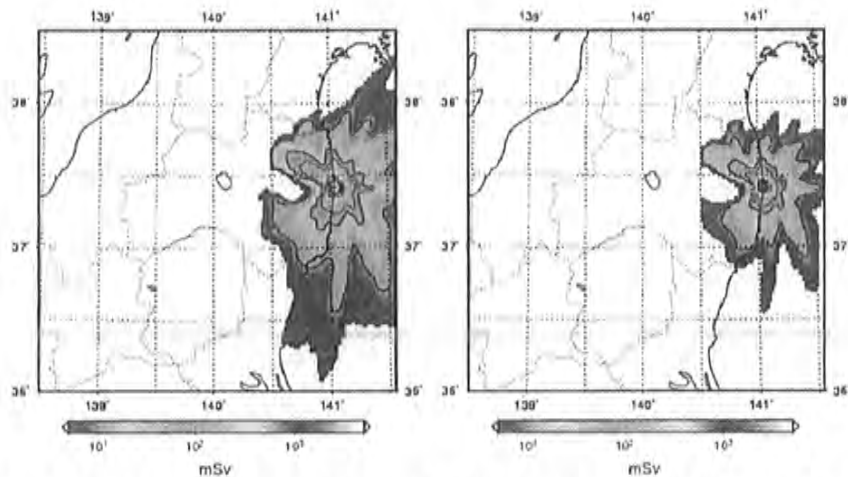


Fig. 16.5 Thyroid dose maps from inhalation of ^{131}I from the simulation by WSPEEDI-II (period of intake, March 12–31)

screening survey for the 1,080 children (data not shown here). Such a discrepancy would be minimized by adjusting parameters related to effects of indoor sheltering, a daily pattern of the ventilation rate, and so on.

Intake via ingestion in the accident is considered to be negligible for most of the inhabitants because of rapid action prohibiting the ingestion of contaminated food and water. In theory, the intake of the nuclides can be calculated using information on the diet intake and the concentration in food and water. However, this may not be easy to perform. It is expected that the diet intake during the evacuation varies considerably from person to person and is more dependent on preserved foods than usual. Thereby, it is necessary to obtain information on the individual diet from personal interviews. This point was also stressed in the discussion of the last symposium.

Finally, future tasks for the dose reconstruction are listed as follows.

- To compile and validate all available data
- To track individual behavior for persons with human measurement data
- To analyze doses for each group with a similar behavior
- To determine appropriate intake ratios of $^{131}\text{I}/\text{Cs}$
- To pursue investigations on the thyroid uptake of iodine in the Japanese

Acknowledgments This work has been conducted under the contract with Ministry of the Environment: Investigation on consequences of the nuclear disaster for 2012. Air concentration data from WSPEEDI-II were provided by Japan Atomic Energy Agency.

Open Access This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Noncommercial License which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited.

References

1. Prime Minister of Japan and his Cabinet (2011) Report of Japanese government to the IAEA ministerial conference on nuclear safety: the accident at TEPCO's Fukushima nuclear power station [Internet]. http://www.kantei.go.jp/foreign/kan/topics/201106/iaea_houkokusho_e.html. Accessed 13 Nov 2013
2. Nuclear Regulation Authority [Internet]. <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/258/list-1.html> (in Japanese)
3. World Health Organization (2012) Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization, Geneva, Switzerland
4. Fukushima Prefecture [Internet] (2012) <http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/241118kihontyosa.pdf> (in Japanese). Accessed 13 Nov 2013
5. Fukushima Prefecture [Internet] (2012) http://www.pref.fukushima.jp/imu/wbc/20121206wbc_joukyou.pdf. (in Japanese). Accessed 13 Nov 2013
6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (2008) Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. Source and effects of ionizing radiation, annex J

7. National Institute of Radiological Sciences (NIRS). NIRS-M-252 the 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident [Internet]. http://repo.nirs.go.jp/dspace/bitstream/918273645/330/1/nirs_m_252.pdf
8. Fukushima I (2012) Results of simplified survey for thyroid internal exposure of children in Fukushima and other surveys. *Jpn J Health Phys* 47:17–19
9. Kim E, Kurihara O, Suzuki T, Matsumoto M, Fukutsu K, Yamada Y, Sugiura N, Akashi M (2012) Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. NIRS-M-252, Chiba, Japan, pp 59–66
10. Tokonami S, Hosoda M, Akiba S, Sorimachi A, Kashiwakura I, Balonov M (2012) Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. *Sci Rep* 2:507
11. Takada C, Kurihara O, Kanai K, Nakagawa T, Tsujimura N, Momose T (2012) Results of whole body counting for JAEA staff members engaged in the emergency radiological monitoring for the Fukushima nuclear disaster. NIRS-M-252, Chiba, Japan, pp 3–12
12. Matsuda N, Kumagai A, Otsuru A, Morita N, Miura M, Yoshida M, Kudo T, Takamura N, Yamashita S (2012) Retrospective assessment of internal doses for short-term visitors to Fukushima within one-month after the nuclear power plant accident. NIRS-M-252, Chiba, Japan, pp 35–39
13. Fukushima Prefecture [Internet]. <http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukaori/230724shiryu.pdf>. (in Japanese)
14. Momose T, Takada C, Nakagawa T, Kanai K, Kurihara O, Tsujimura N, Ohi Y, Murayama T, Suzuki T, Uezu Y, Furuta S (2012) Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. NIRS-M-252, Chiba, Japan, pp 67–82
15. Tsuruta H, Takigawa M, Nakajima T (2012) Summary of atmospheric measurements and transport pathways of radioactive materials released by the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. NIRS-M-252, Chiba, Japan, pp 101–111
16. International Commission on Radiological Protection (ICRP) (2001) The ICRP database of dose coefficients; workers and members of the public. Elsevier, New York
17. Takeyasu M, Nakano M, Fujita H, Nakada A, Watanabe H, Sumiya S, Furuta S (2012) Results of environmental radiation monitoring at the nuclear fuel cycle engineering laboratories, JAEA, following the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *J Nucl Sci Technol* 49:281–286
18. Nagaoka K, Sato S, Araki S, Ohta Y, Ikeuchi Y (2012) Changes of radionuclides in the environment in Chiba, Japan after the Fukushima nuclear plant accident. *Health Phys* 102:437–442
19. Chino M, Nakayama H, Nagai H, Terada H, Katata G, Yamasawa H (2011) Preliminary estimation of release amounts of ^{131}I and ^{137}Cs accidentally discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere. *J Nucl Sci Technol* 48:1129–1134
20. Nuclear Regulation Authority [Internet] (2011) http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/6000/5047/24/5600_110921_rev130701.pdf (in Japanese). Accessed 13 Nov 2013
21. Balanov MI, Bruk GY, Zvonova IA, Pitkevich VA, Bratilova AA, Jesko TV, Shutov VN (2000) Methodology of internal dose reconstruction for a Russian population after the Chernobyl accident. *Radiat Prot Dosim* 92:247–253
22. Katata G, Terada H, Nagai H, Chino M (2012) Numerical reconstruction of high rate zones due to the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *J Environ Radioact* 111:2–12

(B) 東京電力福島第一原子力発電所事故における福島県住民の初期内部被ばく線量推計
栗原治, 金ウンジュ, 徐素熙, 福津久美子, 松本雅紀, 林津雄厚, 内山優子, 川口勇生, 酒井一夫,
Proceedings of the 14th workshop on environmental radioactivity

Proceedings of the 14th Workshop on Environmental Radioactivity

KEK, Tsukuba, Japan

February 26-28, 2013

Edited by

Kotaro Bessho, Keiko Tagami,
Koichi Takamiya and Taichi Miura

主催

高エネルギー加速器研究機構 放射線科学センター
日本放射化学会 α 放射体・環境放射能分科会

共催

日本原子力学会保健物理・環境科学部会
日本放射線影響学会
日本放射線安全管理学会

東京電力福島第一原子力発電所事故における福島県住民の 初期内部被ばく線量推計

栗原治, 金ウンジュ, 徐素熙, 福津久美子, 松本雅紀, 林津雄厚, 内山優子, 川口勇生, 酒井一夫
(放射線医学総合研究所)

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故により環境中に放出された多量の放射性核種は、東日本周辺の広い範囲に拡散し、そして地表に沈着したために、一般公衆への放射線被ばくをもたらしこととなった。放射線による人への健康影響を把握する観点から、事故に起因する個人被ばく線量の評価は重要である。福島県では現在、県民に対して、個人の行動情報に基づく外部被ばく線量推計に加え、ホールボディカウンタ (WBC) を用いての体内放射性セシウムを対象とした内部被ばく検査を進めており¹⁾、これまでのところ、一般公衆が過度な被ばくを受けたとされる事実は見出されていない。しかし、放射性ヨウ素等に代表される短半減期核種による事故初期 (本稿では、事故発生から概ね一ヶ月程度の期間とする) の内部被ばく線量、特に、甲状腺等価線量 (以下、甲状腺線量) については、その線量推計に必要となる情報が極めて限られており、詳細な数値は今もなお明らかになっていない。こうした状況を踏まえ、事故初期に実測された人や環境のデータを可能な限り収集するとともに、本稿で述べる複数の方法を組み合わせて福島県住民の甲状腺線量の推計を試みた。

2. 実測データの収集

本推計では、主に以下の実測データを参考にした。

2-1 甲状腺計測

甲状腺計測は、放射性ヨウ素が甲状腺に集積する性質を利用し、頸部に近接させた放射線検出器によって放射性ヨウ素からの γ 線を直接計測し、校正用ファントムで事前に求めておいた校正定数を用いて甲状腺中の放射性ヨウ素残留量を定量する方法である。本推計では、小児甲状腺被ばくのスクリーニング検査²⁾で得られた実測データを活用した。この実測データは、今回の事故における公衆の甲状腺計測に関するデータとしては、最大数の被検者 (1,080名) を含む。

同検査は、2011年3月23日に公表された緊急時迅速放射能影響システム (SPEEDI) の結果を受け、原子力安全委員会 (当時) の要請により、原子力災害現地対策本部が3月24日から30日にかけて川俣町、いわき市、飯館村の3市町村において、15歳以下の小児を対象として実施された。これらの市町村は住民避難が必要とされた警戒区域 (20 km 圏内) の外側に位置しているものの、SPEEDIによる小児甲状腺線量の予測値が100 mSvを超える地域が一部含まれていたことから同検査の対象地域となった³⁾。Fig. 1には、1,080名の被検者から得られたNaI (TI) サーベイメータの正味値の分布を示した。ここで正味値とは、NaI (TI) サーベイメータの頸部付近の読み値から、バックグラウンドとして測定した体幹部付近での読み値を差し引いた値である。全被検者の55% (598名) については、正味値が $0 \mu\text{Sv h}^{-1}$ であった。スクリーニング検査の実施当時は、正味値とスクリーニングレベルとして定められた $0.2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ との比較がなされたのみであり、個人毎の線量評価は行われなかった。このスクリーニングレベルは、1歳児の甲状腺線量が100 mSvに相当する数値として設定された。

2-2 全身計測

全身計測は、全身を測定視野とした放射線検出器を被検者の近傍に配置し、全身の体内放射能を定量する方法である。この目的で利用される機器としてホールボディカウンタ (WBC) がある。福島県では、2011年6月27日からWBCを用いた内部被ばく検査を開始し、これまでに約14万人の検査が終了している (2013年7月時点)⁴⁾。その結果、被検者のほぼ全員が (預託) 実効線量で1 mSv未満であった。ただし、これは放射性セシウム (^{134}Cs と ^{137}Cs) のみによる内部被ばく線量である。同検査の開始時には、物理半減期の短い ^{131}I の検出は既に困難であった。したがって、同検査の結果は初期内部被ばくに関する情報を直接与えるものではないが、もしヨウ素とセシウ

ム比の摂取量比を何かの方法により決定することができれば甲状腺線量を算定する材料となる。

本推計では、(独)日本原子力研究開発機構が福島県からの委託で実施した WBC による内部被ばく検査の内、2011 年 7 月 11 日から 2012 年 1 月末までの成人被検者 (約 3,000 人分) から評価された実効線量分布を利用した。WBC 測定の際のデータとなる放射性セシウムの全身残留量、測定日、被検者の年齢性別等に関する情報は、今回の推計では得られなかったため利用していない。なお、上記期間において、放射性セシウム (^{134}Cs と ^{137}Cs) による内部被ばく線量評価のための摂取シナリオは、2011 年 3 月 12 日における 1 回吸入摂取に統一された。成人被検者の実効線量分布は、95 パーセンタイル値 (以下、%頻度値) として約 0.1 mSv、50%頻度値として約 0.025 mSv であった⁵⁾。

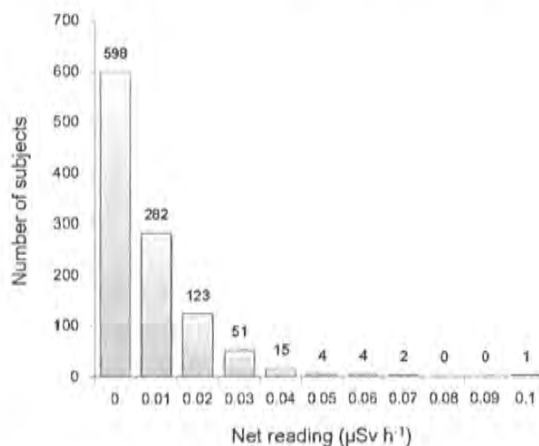


Fig. 1 Distribution of net readings from NaI(Tl) scintillation survey meters in screening survey for thyroid exposure to children in Kawamata town, Iwaki city and litate village.

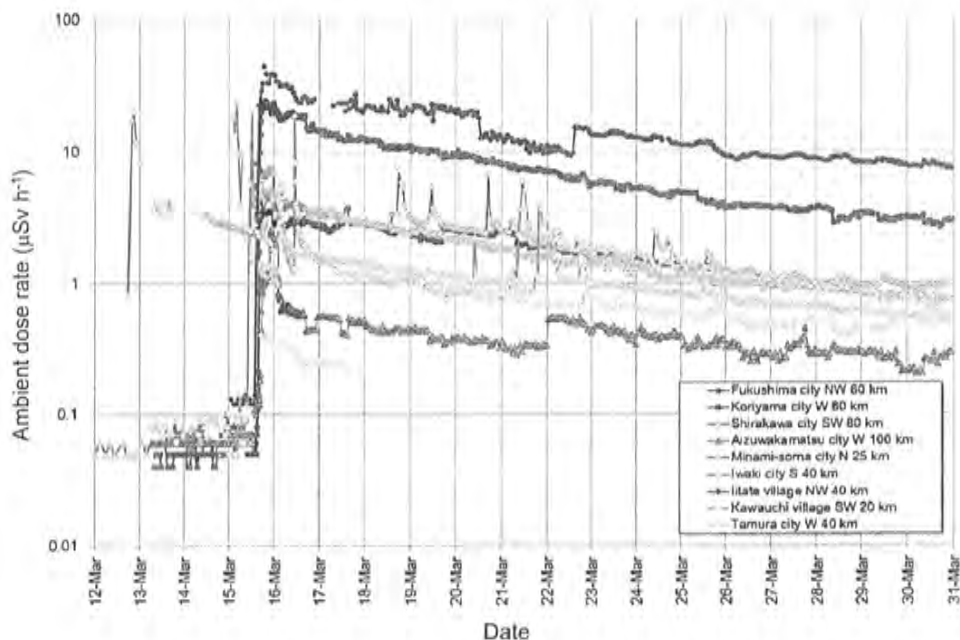


Fig. 2 Time trend of ambient dose rates at various locations in Fukushima prefecture.

2-3 環境モニタリング

(1) 大気中ヨウ素の化学組成

吸入摂取量の推定に必要な放射性核種の大気中濃度に関する実測データは非常に少ない。事故発生後、継続

的な空気サンプリングが実施されたのは、福島第一及び第二原子力発電所敷地内を除いては福島県外においてのみである^{6,8)}。一方、放射性ヨウ素に関しては、吸入摂取による線量係数がヨウ素の物理化学的性状によって大きく異なることから、その把握が重要となる⁹⁾。通常、空気中の放射性ヨウ素は、ダストサンプリング用紙と活性炭入りカートリッジを組み合わせて捕集される。前者には粒子成分が、後者には揮発成分であるヨウ化メチル又は蒸気状ヨウ素が捕集される。本推計では、福島第一原子力発電所、福島第二原子力発電所、日本原子力研究開発機構3事業所(いずれも茨城県)の5地点で得られた放射性ヨウ素の空気サンプリングのデータを参考にした¹⁰⁻¹²⁾。¹³¹Iの空气中濃度で加重した揮発成分の全体に対する割合は、5地点の平均値として約0.6であった。

(2) ¹³¹I以外の短半減期核種

¹³¹I以外の短半減期核種の実測データは極めて限られることから、それらの線量寄与率を概算して甲状腺線量に含めるのが現実的である。炉心解析から試算された放射性核種の大気中放出量から、全ての核種からの甲状腺線量に占める¹³¹Iの線量寄与率は約80%、次いで¹³²Teが約10%、¹³³Iが約5%となった¹³⁾。他方、福島県外で採取された空気サンプリングから概算すると、¹³¹Iの線量寄与率は90%以上となった¹⁴⁾。ただし、期間や場所等によって核種毎の線量寄与は変化すると考えられる。

3. 方法

甲状腺線量を推計する上で、基礎となる人の甲状腺計測の実測データは限られている。そこで、WBCの実測データと放射性核種の大気拡散シミュレーションも活用し、以下に述べる方法により甲状腺線量の推計を試みた。

3-1 甲状腺計測からの線量推計

甲状腺計測によって直接定量された甲状腺中¹³¹I残留量から、国際放射線防護委員会(ICRP)の方法に従って甲状腺線量を導出した¹⁴⁾。この導出においては、摂取シナリオの設定及び使用されたNaI(Tl)サーベイメータの校正定数の見直しを行った。

(1) 摂取シナリオ

放射性核種の摂取シナリオ、すなわち、いつ、どのように放射性核種を摂取したか等の条件設定は、内部被ばく線量の計算に大きく影響する。小児甲状腺被ばくのスクリーニング検査は2011年3月下旬に実施されたが、同検査は各被検者につき1回のみであるため、残留放射能の変化から摂取日を特定できない。そのため、福島県各地において実測された周辺線量当量率の時間推移(Fig. 2)から摂取日を推定することとした。同図から、2011年3月15日に福島県内の多くの場所で周辺線量当量率の急激な上昇が認められる。スクリーニング検査が実施された川俣町、いわき市、飯舘村における周辺線量当量率の推移も同様であり、3月15日を摂取日の一つの候補として考えることができる。そこで、次の二つの摂取シナリオを設定した。

- 摂取シナリオ1: 3月15日に全量を一回摂取
- 摂取シナリオ2: 3月12日から測定日前日までの連続均等摂取

ここで、摂取シナリオ1は、前述したWBCを用いた内部被ばく検査において、放射性セシウムによる実効線量の算定の際に使われた摂取シナリオに類似しており、摂取シナリオ2はスクリーニング検査の実施当時に想定された摂取シナリオである。より現実的な摂取シナリオを設定するには、個人の行動情報が必要となるが、摂取シナリオの不確かさに伴う甲状腺線量の推定値の幅としては、以上の二つの摂取シナリオを考慮すれば十分だと思われる。なお、甲状腺計測からの甲状腺線量の算出においては、摂取経路(吸入/経口)及びヨウ素の物理化学的性状(吸入摂取時)の条件設定の違いは、計算結果に殆ど影響しないことを確認している。

(2) 校正定数の見直し

甲状腺計測に用いられたNaI(Tl)サーベイメータの甲状腺中¹³¹Iに対する校正定数は、 $1 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 当たり30 kBqと評価されている¹⁵⁾。ただし、この校正定数は成人被検者に対するものであり、小児については校正定数が異なることが予想される。スクリーニング検査に際しては、成人の頸部を模擬した物理ファントムを用いて、小児に対する校正定数が決定された。そこで、過去にTanakaとKawamura¹⁶⁾及びStepanenkoら¹⁷⁾が導出した校正定数も参考にして、校正定数の見直しを行った。Fig. 3に、成人の校正定数に対する相対値として、ICRPの線量係数の年齢区分に対応した小児の校正定数を示した。年齢の低い被検者になるほど、甲状腺中¹³¹Iに対する検出感度が高くなるため、校正定数は低下する。

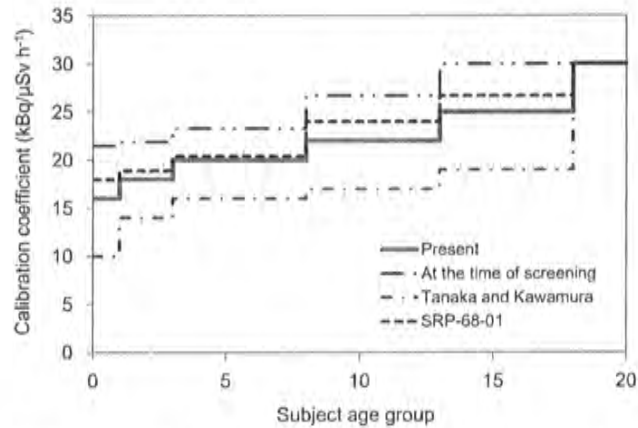


Fig. 3 Calibration coefficients of the NaI(Tl) scintillation survey meter used in the screening survey.
(Calibration coefficient for SRP-68-01 is normalized to 30 kBq/μSv h⁻¹ for adult)

(3) 甲状腺線量

評価した被検者（1,080名）の甲状腺線量分布をFig. 4に示した。摂取シナリオ1は、摂取シナリオ2と比べ、甲状腺線量が高く評価される。なお、甲状腺計測の正味値が0であった被検者は甲状腺線量が0となるが、その人数は摂取シナリオによって変化しない。30 mSv未滿と評価された被検者の割合は、摂取シナリオ1では99.4%、摂取シナリオ2では99.9%であった。Table 1には、スクリーニング検査から得られた線量評価の結果をまとめた。ただし、バックグラウンドを考慮すると、スクリーニング検査の検出限界値に相当する甲状腺線量としては10 mSv程度になるものと予想される。

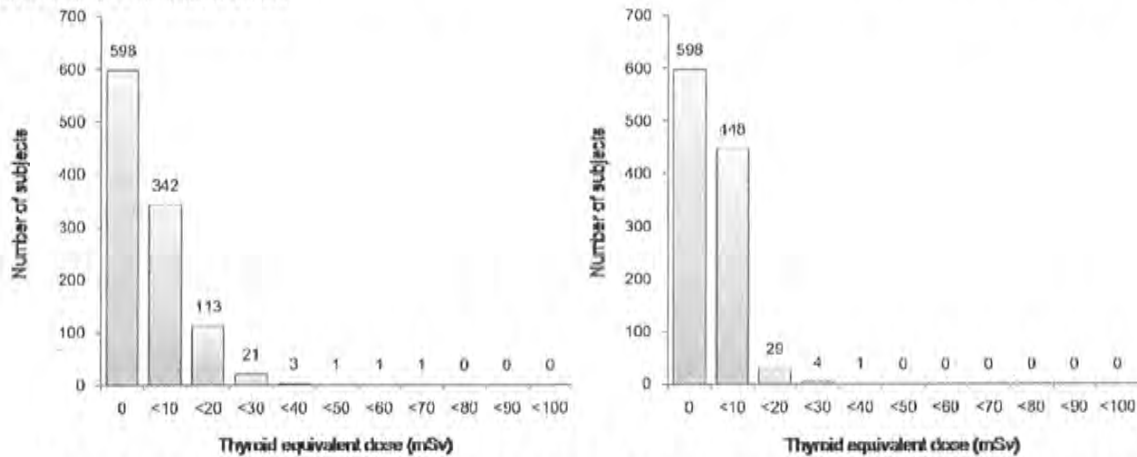


Fig. 4 Distributions of thyroid equivalent doses estimated for the subjects of screening survey for thyroid exposure.
(left: intake scenario 1, right: intake scenario 2)

Table 1 Summary of thyroid equivalent doses estimated for the subjects of the screening survey.

Municipality	Number	Intake scenario 1		Intake scenario 2		Estimated from WSPEEDI (mSv)
		90%-tile (mSv)	< 30 mSv (%)	90%-tile (mSv)	< 30 mSv (%)	
Kawamata	631	7.3	99.8	3.5	100	40
Iwaki	134	16	97.0	9.3	99.3	28
Iitate	315	15	99.7	9.8	100	32
All	1,080	12	99.4	6.0	99.9	—

3-2 全身計測からの線量推計

(1) 地域別住民の実効線量分布

Fig. 5には、WBCによる内部被ばく検査から得られた成人被検者（18歳以上）の実効線量分布を、幾つかの市町村について例示した。WBCの測定では、大半の被検者で放射性セシウムの全身残留量が検出限界値（DL）未満であった。同図では、DL未満を実効線量0として示した。Table 2には、各市町村の被検者の実効線量分布の90%頻度値及び50%頻度値（中央値）を示した。ここで後者については、検出限界値未満の被検者の集団に含まれてしまい直接求められないため、実効線量分布が対数正規分布に従うとして算出した。実効線量分布から両頻度値が得られたのは、双葉町、大熊町、富岡町、楡葉町、広野町、浪江町、飯館村、川俣町、川内村の9市町村であった。

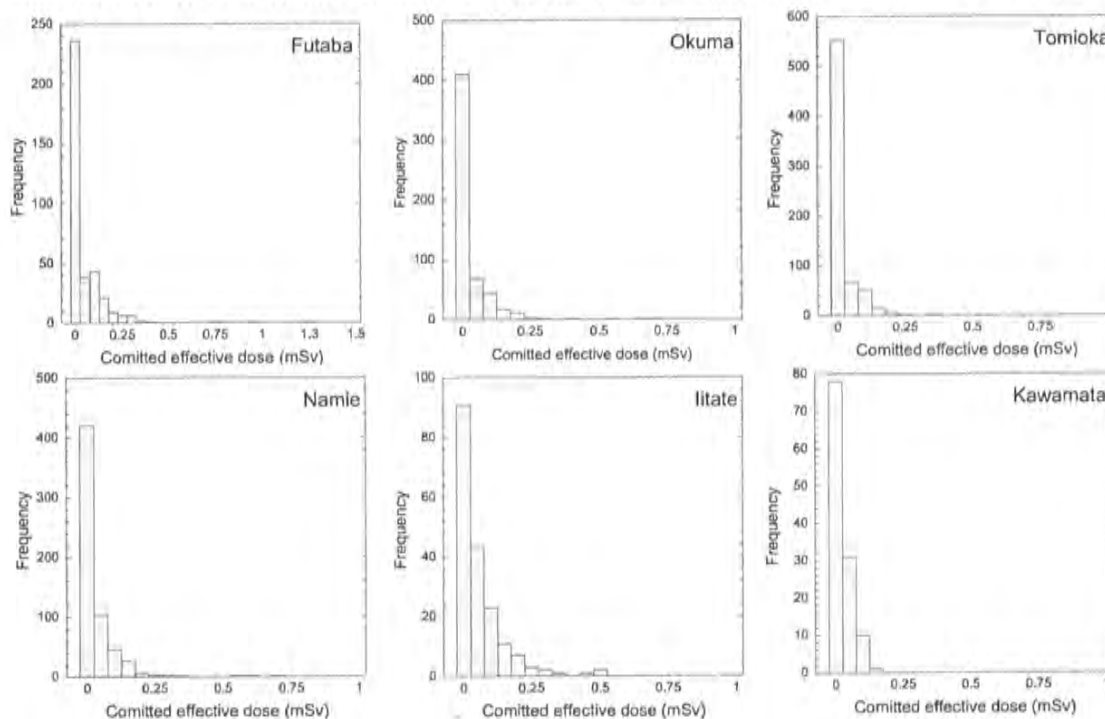


Fig. 5 Distributions of effective doses for subjects of internal dose examinations using WBCs for several municipalities.

Table 2 Summary of effective doses for subjects of internal dose examinations using WBCs for several municipalities

Municipality	Number of subjects	90%-tile effective dose (mSv)	50%-tile effective dose (mSv)
Futaba	365	0.15	0.04
Okuma	561	0.10	0.02
Tomioka	696	0.08	0.01
Naraha	241	0.06	0.01
Hirono	210	0.10	0.05
Namie	614	0.10	0.02
Iitate	184	0.17	0.03
Kawamata	120	0.07	0.01
Kawauchi	64	<0.01	<0.01

(2) 実効線量から甲状腺線量への誘導

実効線量から甲状腺線量への誘導は、以下に述べるとおりである。

WBC測定から評価された実効線量は、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計線量である。事故初期には ^{134}Cs と ^{137}Cs はほぼ等量で環境中に存在し、WBC測定からも両核種の摂取量はほぼ等しい結果が得られた。実効線量1 mSvを与える両核種の摂取量は、成人に対する実効線量係数(^{134}Cs : $6.6\text{E-}09\text{ Sv Bq}^{-1}$, ^{137}Cs : $4.6\text{E-}09\text{ Sv Bq}^{-1}$)から、それぞれ89,000 Bqずつとなる。ここで仮に、 ^{137}Cs と等量の ^{131}I を吸入摂取するならば、甲状腺線量は30 mSvとなる。ただし、 ^{131}I の甲状腺等価線量係数を、化学組成(元素状ヨウ素: 60%, 粒子状ヨウ素: 40%)を考慮して設定した。また、他核種からの甲状腺線量への寄与を、 ^{131}I の10%として与えた。以上の計算は、成人についてである。

次に、同一環境中で成人と小児が吸入摂取をする場合、それぞれの摂取量は呼吸量に比例すると考えられる。1歳児、10歳児及び成人の1日当たりの呼吸量は、それぞれ 5.16 m^3 、 15.3 m^3 及び 22.2 m^3 である。成人の ^{131}I の摂取量が89,000 Bqであれば、1歳児と10歳児の摂取量は、それぞれ21,000 Bqと62,000 Bqと計算される。これらに、各年齢区分に対応する甲状腺等価線量係数を乗じて、ヨウ素の化学組成と他核種からの線量寄与による補正を行うと、1歳児と10歳児の甲状腺線量は、それぞれ60 mSvと50 mSvになる(成人の甲状腺線量は前述のとおり、30 mSv)。

摂取量比($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$)は、スクリーニング検査からの甲状腺線量(小児)とWBC測定からの実効線量(成人)の両方が得られた飯館村と川俣町のデータを用いて次の様に推定した。実効線量の90%頻度値は、飯館村では0.17 mSvであった(Table 2)。摂取量比を1とすると、1歳児と10歳児の甲状腺線量は、それぞれ 10.2 mSv ($=0.17 \times 60$)と 8.5 mSv ($=0.17 \times 50$)と計算される。摂取量比が2であれば、これらの数値が単に2倍になる。この関係を図に示したのがFig. 6である。同図において、飯館村の甲状腺線量の90%頻度値として得られた15 mSvに対応する摂取量比としては1.8となる。スクリーニング検査の被検者の大半は、5歳児と10歳児の年齢区分に属する。川俣町で得られた甲状腺線量(90%頻度値: 7 mSv)と実効線量(90%頻度値: 0.07 mSv)からも、ほぼ同じ摂取量比が導かれる。スクリーニング検査の精度の不確かさ(2倍の過小評価)を見込むと、摂取量比は3.5から4の間となるが、本推計では摂取量比の最確値を3に決定した。この摂取量比を用いて、9市町村の実効線量から甲状腺線量を導出した。

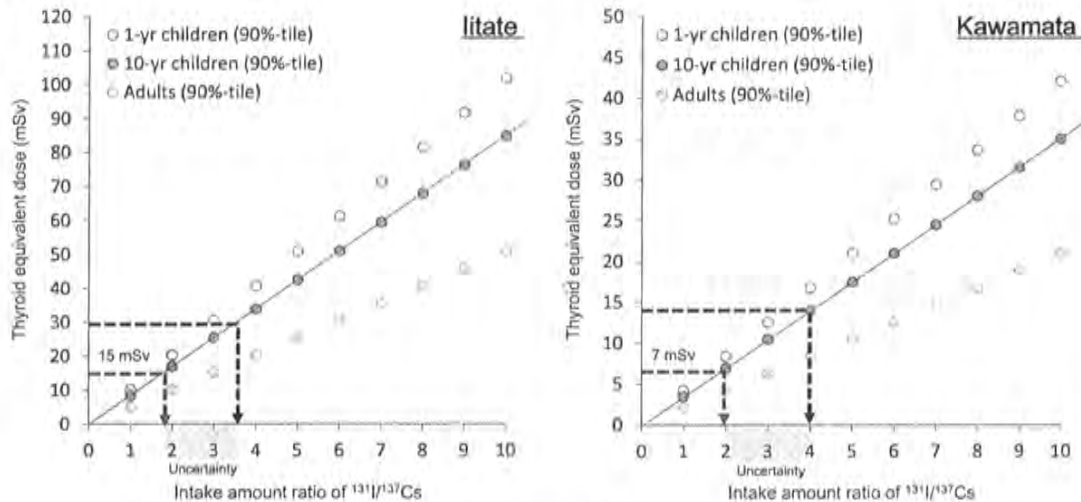


Fig. 6 Relationship between intake amount ratio ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) and thyroid dose equivalent.
(left: Iitate village, right: Kawamata town)

3-3 大気拡散シミュレーションからの線量推計

以上の線量推計の方法は、人の実測データ(体外計測)に基づくものであるが、これらの方法が適用できる地域は限られている。そこで、より広域での住民の線量推計を行うため、放射性核種の大気拡散シミュレーションを用いる方法を検討した。ここで、大気拡散シミュレーションには、日本原子力研究開発機構が開発した世界版 SPEEDI ver.2 (WSPEEDI-II)¹⁸から得られた ^{131}I の大気中濃度マップを使用し、吸入摂取による甲状腺線量を計算した。同マップのデータは堅田ら¹⁹が行ったシミュレーションから得られており、その空間分解能は約3 km 平方、時間分解能は1時間間隔である。Fig. 7には、積算された ^{131}I の大気中濃度マップに呼吸率と甲状腺等価線量を乗じて計

算した甲状腺線量マップを示した。ただし、同図は、2011年3月12日から2011年3月31日まで、毎日、屋外に滞在した場合を想定している。甲状腺計測（スクリーニング検査）から推計された甲状腺線量と比較すると、大気拡散シミュレーションはその上限値を概ね捉えているように思われる（Table 1）。ただし、大気拡散シミュレーションによる計算値は、各市町村の役場に最も近いグリッドの ^{131}I 濃度から算出している。

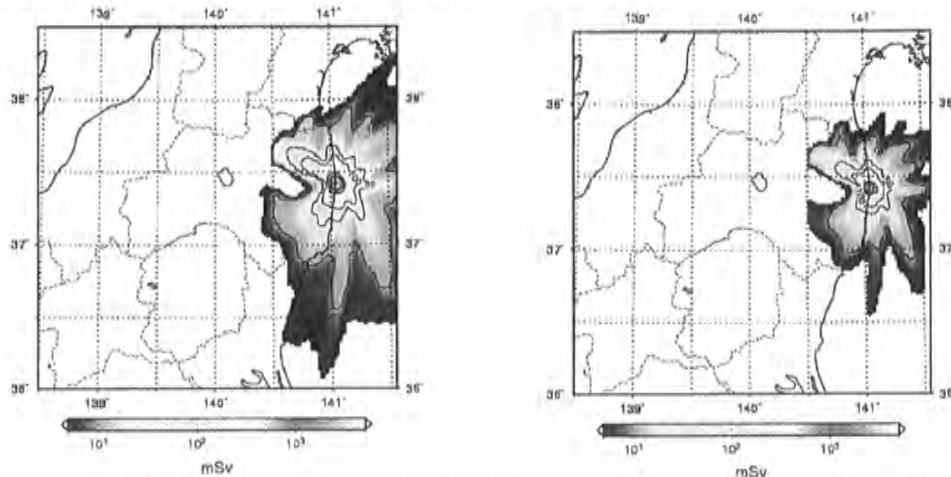


Fig. 7 Thyroid dose equivalent map calculated from accumulated ^{131}I air concentration map from March 12 to March 31.
(left: 1-yr-old children, right: adults)

4. 結果と考察

前述した複数の線量推計法を組み合わせ、福島県住民の甲状腺線量を下記の方針により求めた。

- ① 人の実測データに基づく線量推計値を用いることを基本とする。WBC測定からの甲状腺線量の算出には、摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) 3を用いた。
- ② 大気拡散シミュレーションは、人の実測データが得られなかった地域（福島県内の中通り地方及び会津地方）に適用する。大気拡散シミュレーションから計算される甲状腺線量は、過大評価が見込まれるため、これを90%頻度値と見なした。
- ③ 福島県内の浜通り地方で人の実測データが十分に得られていない南相馬市と葛尾村については、隣接する浪江町の線量推計値を割り当てた。いわき市については、大気拡散シミュレーションからの甲状腺線量も参考にした。この理由は、いわき市では小児甲状腺被ばくのスクリーニング検査が実施されたものの、同市の検査対象人口に占める被検者数の割合が低いためである。

今回の線量推計の最終的な結果をTable 3に示した。ただし、その精度を考慮して、同表に示す数値の有効数字は1桁とした。福島県住民の甲状腺線量は、比較的線量高い双葉町、飯館村、いわき市の小児に対する90%頻度値として約30 mSvと推計された。成人に対する甲状腺線量の90%頻度値は、福島県内のほぼ全域で10 mSvまたはそれ未満と推計された。以下に、本推計の考察として、他の線量推計との比較及び摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) について述べる。

● 他の線量推計との比較

浪江町の避難住民等については、床次らがNaI(Tl)検出器を備えたスペクトロメータを用いて甲状腺計測を行っている。62名の被検者の内、46名から ^{131}I が検出され、甲状腺線量の最大値は子供で23 mSv、成人で33 mSvと評価された²⁰⁾。摂取シナリオは、2011年3月15日の単一摂取（吸入及び経口）が仮定された。床次らの調査において、同被検者の行動パターンによって ^{131}I の検出率が有意に異なっている点は注目すべき点である。沿岸地域からの避難住民と津島地区の住民では、前者の集団の方が ^{131}I の検出率が高い。

その他、事故初期に福島第一原子力発電所近傍に派遣された日本原子力研究開発機構職員の全身計測の結果が報告されている。同報告によれば、これらの被検者の摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) は個人間で大きくばらつくものの、甲状腺線量の最大値は20 mSv程度と評価されている²¹⁾。また、福島県外では、空気サンプリングの結果から、甲状腺

線量は数 mSv と算定されている²²⁾。以上の結果は、本推計とも比較的良く一致している。

● 摂取量比 (¹³¹I/¹³⁷Cs)

WBC 測定からの甲状腺線量の誘導に大きく影響する因子である。人の実測データから得られた摂取量比 3 は、大気拡散シミュレーションから逆推定された放出量比や空気サンプリングから得られた積算濃度比 (約 10) と大きく乖離する結果となった。この理由の一つとして予想されることに、日本人のヨウ素甲状腺移行率の低さが挙げられる。ICRP が提案するヨウ素の体内動態モデルでは、血中から甲状腺への移行率を 0.3 としているが、日本人ではこの半分程度であると言われている²³⁾。一方、放射性セシウムによる実効線量については、事故から半年以上経過して行われた WBC 測定の結果も多く含まれており、事故初期以外の追加摂取の寄与を含む可能性が考えられる。この場合、摂取シナリオは 2011 年 3 月 12 日の一回摂取を仮定しているため実効線量は過大評価となり、結果として摂取量比は実際よりも低い値となる。

その他、¹³¹I と ¹³⁷Cs の地表沈着量の比が場所によって大きく異なることから、摂取量比も類似した傾向であった可能性がある。地表沈着量の比 (¹³¹I/¹³⁷Cs) は、放射性セシウムによる汚染が高い原発から北西方向には低く、南から南西方向には高い²⁴⁾。しかしながら、¹³¹I の地表沈着量としては、やはり北西方向が高く、小児甲状腺被ばくのスクリーニング検査が行われた飯館村、川俣町及びいわき市で測定された ¹³¹I の地表沈着量は、それぞれ中央値として、2,000 Bq m⁻²、830 Bq m⁻²、720 Bq m⁻²であった。スクリーニング検査からの甲状腺線量の推計値を見ても、いわき市が他に比べて数値が顕著に高い訳ではない。以上のことを踏まえて、摂取量比については今後詳細に調査する必要がある。

Table 3 Summary of thyroid dose estimation (rounded to nearest 10%)

Municipality	90%-tile value for children (1 yr-old) (mSv)	90%-tile value for adults (mSv)	Method
Futaba	30	10	WBC
Okuma	20	< 10	WBC
Tomioka	10	< 10	WBC
Naraha	10	< 10	WBC
Hirono	20	< 10	WBC
Namie	20	< 10	WBC
Iitate	30	20	Screening, WBC
Kawamata	10	< 10	Screening, WBC
Kawauchi	< 10	< 10	WBC
Katsurao	20	< 10	Same as Namie
Iwaki	30	10	Simulation, Screening
Minami-soma	20	< 10	Same as Namie
Other Fukushima areas	< 10	< 10	Simulation

5. まとめ

東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う周辺公衆の初期内部被ばく線量、特に甲状腺線量の推計方法として、個人の実測データ (甲状腺計測、全身計測) 及び大気拡散シミュレーションを用いる方法を試みた。小児甲状腺被ばくのスクリーニング検査の実測データから、摂取シナリオの設定及び使用された計測機器の校正定数の見直しを行い、同検査の対象となった川俣町、いわき市、飯館村の 15 歳以下の被検者 1,080 人の甲状腺線量分布を導出した。また、全身計測の実測データとして、2011 年 7 月 11 日から 2012 年 1 月末までに得られた成人被検者約 3,000 人分の放射性セシウム (¹³⁴Cs と ¹³⁷Cs) による実効線量分布を利用した。実効線量から甲状腺線量への誘導は、同一環境中に滞在する成人と小児が、それぞれの呼吸率に応じて放射性核種を吸入摂取する条件を想定して行った。摂取量比 (¹³¹I/¹³⁷Cs) は、飯館村と川俣町において甲状腺線量分布 (小児) と実効線量分布 (成人) の両方が得ら

れていることに着目し、これらの分布から3と算定した。同じ摂取量比を用いて、実効線量分布が得られた9市町村（双葉町、大熊町、富岡町、楡葉町、広野町、浪江町、飯館村、川俣町、川内村）の甲状腺線量を算定した。福島県内のその他の地域住民の甲状腺線量については、WSPEEDIによる大気拡散シミュレーションから再現された¹³⁾の大気中濃度マップから算出した。

以上の方法から、福島県住民の甲状腺線量は、比較的線量の高い地域の小児に対する90%頻度値として、約30 mSvと推計された。しかしながら、今回の推計には多くの不確かさ要因があり、今後も詳細に検証される必要がある。特に、放射性核種の摂取シナリオについては個人差が大きいと考えられ、現時点での推計で考慮していない個人の行動情報を利用して、線量推計の精度向上を早急に図る必要がある。

6. 謝辞

本研究の遂行にあたり、日本原子力研究開発機構の百瀬琢磨氏、永井晴康氏らには線量再構築に必要となる貴重な情報の提供に関して、多大なるご協力、ご支援を賜った。なお、本研究は、環境省の平成24年度原子力災害影響調査等事業「事故初期のヨウ素等短半減期による内部被ばくの線量調査」として、放射線医学総合研究所が実施した成果である。

7. 参考文献

- 1) 福島県ホームページ, <http://www.cms.pref.fukushima.jp/>
- 2) 福島靖正, 小児甲状腺簡易測定調査等の結果について, *Jpn. J. Health Phys.* 47, 17-19 (2012).
- 3) 原子力規制庁ホームページ, http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/mext_speedi/0312-0324_in.pdf
- 4) 福島県, ホールボディカウンタによる内部被ばく検査について, http://www.pref.fukushima.jp/imu/wbc/20130801wbc_joukyou.pdf
- 5) T. Momose, C. Takada, T. Nakagawa, K. Kanai, O. Kurihara, N. Tsujimura, Y. Ohi, T. Murayama, T. Suzuki, Y. Uezu, S. Funata. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident, NIRS-M-252, The 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Chiba, Japan, 67-82, (2012).
- 6) H. Amano, M. Akiyama, B. Chunlei, T. Kawamura, T. Kishimoto, T. Kuroda, T. Muroi, T. Odaira, Y. Ohta, K. Takeda, Y. Watanabe, T. Morimoto. Radiation measurements in the Chiba metropolitan area and radiological aspects of fallout from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plants accident, *J. Environ. Radioact.*, 111, 42-52 (2012).
- 7) 高エネルギー加速器研究機構 (KEK). つくば市で観測された空气中放射性物質の種類と濃度の測定結果について, <http://legacy.kek.jp/quake/radmonitor/GeMonitor3.html>
- 8) 永川栄泰, 鈴木隆司, 金城康人, 宮崎則幸, 関口正之, 櫻井昇, 伊瀬洋昭. 福島第一原子力発電所事故による放射性物質漏えいに係る都内環境放射能測定及び被ばく線量測定. *Radioisotopes*, 60, 467-472 (2011).
- 9) ICRP. The ICRP database of dose coefficients; workers and members of the public, Elsevier Science (2001).
- 10) 東京電力 HP. <http://www.tepco.co.jp/index-j.html>
- 11) 古田ら, 福島第一原子力発電所事故に係る特別環境放射線モニタリング結果 - 中間報告 (空間線量率, 空气中放射性物質濃度, 降下じん中放射性物質濃度). 日本原子力研究開発機構, JAEA-Review 2011-035 (2011).
- 12) T. Ohkura et al., Emergency monitoring of environmental radiation and atmospheric radionuclides at Nuclear Science Research Institute, JAEA following the accident of Fukushima Daiichi nuclear power plant, Japan Atomic Energy Agency, JAEA-Data/Code 2012-010 (2012).
- 13) 原子力安全・保安院, 第77回原子力安全委員会資料第1号, 平成23年度6月6日付「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に係る1号機, 2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価」(訂正版) <http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/anzen/shidai/genan2011/genan077/siryo1.pdf>
- 14) ICRP. Individual monitoring for internal exposure of workers. ICRP Publication 78, Ann. ICRP 27 (3/4), Pergamon Press (1997).
- 15) 日本原子力研究所, 保健物理—管理と研究—No.35 (1992年度), JAERI-M 93-172 (1993).

- 16) G. Tanaka, H. Kawamura. Measurement of ^{131}I in the human thyroid gland using a NaI(Tl) scintillation survey meter. *J. Radiat. Res.*, 19, 78-84 (1978).
- 17) V. F. Stepanenko, A. F. Tsyb, E. M. Parshkov, V. V. Shakhtarin, A. E. Kondrashov, V. G. Skvortsov, E. K. Iaskova, A. I. Ivannikov, M. Hoshi, M. Ohtaki, J. Takada, S. Endo, S. Davis, K. Kopecky, P. Voilleque, Yu. I. Gavrilin, V. T. Khrousch, S. M. Shinkarev, M. YuOrlov, V.P. Snykov, E.V. Spirin, N. N. Isamov, Retrospective thyroid absorbed doses estimation in Russia following the Chernobyl accident: progress and application to dosimetric evaluation of childhood thyroid cancer morbidity, Proceedings of the Second Hiroshima International Symposium, Hiroshima University July 23-25, 1996 (Edited by M. Hoshi, J. Takada, R. Kim, Y. Nitta), 31-84 (1996).
- 18) 寺田宏明, 永井晴康, 古野朗子, 掛札豊和, 原山卓也, 茅野政道. 緊急時環境線量情報予測システム (世界版) WSPEEDI 第2版の開発, 日本原子力学会和文論文誌, 7, 257-267 (2008).
- 19) G. Katata, H. Terada, H. Nagai, M. Chino. Numerical reconstruction of high rate zones due to the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident, *J. Environ. Radioact.*, 111, 2-12 (2012).
- 20) S. Tokonami, M. Hosoda, S. Akiba, A. Sorimachi, I. Kashiwakura, M. Balonov. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident, *Scientific reports*, 2, 507 (2012).
- 21) C. Takada, O. Kurihara, K. Kanai, T. Nakagawa, N. Tsujimura, T. Momose. Results of whole body counting for JAEA staff members engaged in the emergency radiological monitoring for the Fukushima nuclear disaster, NIRS-M-252, The 1st NIRS symposium on reconstruction of early internal dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, Chiba, Japan, 3-12, (2012).
- 22) N. D. Priest. Radiation doses received by adults Japanese populations living outside Fukushima Prefecture during March 2011, following the Fukushima I nuclear power plant failure, *J. Environ. Radioact.*, 114, 162-170 (2012).
- 23) 吉沢康雄, 草間朋子. 日本人の甲状腺に関する正常値について, *保健物理*, 11, 123-128 (1976).
- 24) 文部科学省, 文部科学省による放射線線量等分布マップ (ヨウ素 131 の土壌濃度マップ) の作成について, 平成 23 年 9 月 21 日, http://radioactivity.mext.go.jp/ja/contents/6000/5047/24/5600_0921.pdf

Reconstruction of early internal dose to Fukushima residents in the Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi nuclear power station accident

Osamu Kurihara, Eunjo Kim, Soheigh Suh, Kumiko Fukutsu, Masaki Matsumoto,
Yukou Rintsu, Yuko Uchiyama, Isao Kawaguchi, Kazuo Sakai
(National Institute of Radiological Sciences)

The Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi nuclear power station accident resulted in an enormous release of radionuclides into the environment. Therefore, it is of great importance to estimate resulting exposure doses to members of the public in affected areas. Fukushima government has investigated external and internal doses to residents in Fukushima Prefecture; however, the early internal dose due to the intake of short-lived radionuclides still remains unknown because of insufficient information. This paper describes the first reconstruction of the thyroid dose to the Fukushima residents mainly from ^{131}I using human data, namely, thyroid measurements of children (1,080) and whole-body measurements of adults (3,000), and also atmospheric dispersion simulations. The reconstruction of the thyroid dose based on the human data included refined intake scenarios of the radionuclides in the thyroid measurements and the derivation of the intake amount ratio of ^{131}I to ^{137}Cs in the whole-body measurements. As a result, the thyroid dose was estimated to be 30 mSv as a 90 percentile value for hypothetical 1-yr-old children in relatively high dose areas and be less than 10 mSv for residents in most other areas. However, there remain a lot of uncertainty factors in this estimation; thus, further investigations are much needed.

(C) 被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーションー東京電力福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量再構築, 栗原治, 日本原子力学会誌



被ばく線量評価のための大気拡散シミュレーション 東京電力福島第一原子力発電所事故における 周辺住民の初期内部被ばく線量再構築

放射線医学総合研究所 栗原 治

東京電力福島第一原子力発電所事故における周辺住民の初期内部被ばく線量の推計において、人や環境の実測データが限られている状況を鑑みると、大気拡散シミュレーションは不可欠な手段である。昨年度、(独)放射線医学総合研究所が実施した福島県住民を対象とした初期内部被ばく線量の再構築においても、その一部は大気拡散シミュレーションからの推計値を参考にした。本稿では、大気拡散シミュレーションによる内部被ばく線量推計の現状とともに、今後の展望について述べる。

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故により環境中に放出された放射性核種は、東日本を中心とした広い範囲に拡散し、そして地表に沈着することにより、公衆への放射線被ばくをもたらした。これまでに公衆が過度な放射線被ばくを受けたとされる事実はないが、放射線による将来の健康影響を議論する上で、個人が受けた被ばく線量を正確に評価することが重要である。福島県では、全県民を対象とした県民健康管理調査¹⁾を進めており、その基礎データとして、個人の外部被ばく線量の推計値を取り入れている。同推計は、事故初期に福島県各地で実測された空間線量率データ(ただし、事故発生翌日の3月12日から3月14日までは緊急時放射線影響迅速予測システム SPEEDI からの計算値)から構築された2次元マップに、個人の行動記録から得られた滞在地点の時系列データを併せて行われる。これに係る一連の計算は、(独)放射線医学総合研究所(以下、放医研)が開発した外部被ばく線量評価システムが担っている²⁾。放医研では同システムを運用し、福島県立医科大学と共同して、これまでに40万人を超える福島県民の外部被ばく線量を推計した³⁾。

一方、個人の内部被ばく線量については、福島県を含む全国各地でホールボディカウンタ(WBC)を用いた検

査が行われており、その結果に基づき推計が行われている。これまでに10万人を超える福島県民の検査が終了しており、ほぼ全ての被検者で1 mSv未未満であった⁴⁾。ただし、ここで推計された内部被ばく線量は、放射性セシウムの体内摂取による預託実効線量である。事故初期に存在していた放射性ヨウ素等の短寿命核種による内部被ばく線量については、これに必要な人や環境の実測データが不足しているため、未だ詳細な数値が把握できていない。また、チェルノブイリ事故の際に周辺住民の線量再構築に用いられた手法、すなわち、核種の地表沈着量と個人の内部被ばく線量を関連付ける方法⁵⁾は、地表沈着量のヨウ素/セシウム比が地域によって顕著に変化することや、20km圏内の住民については早期に圏外へと避難したこと等の理由で、今回の事故では適用することが難しいと予想される。よって、実測データに基づく線量推計を補完する方法として、現状では唯一と考えられる大気拡散シミュレーションの可能性を探ることは、今後の公衆の線量再構築において重要な意味を持つ。

昨年度、放医研では、限られた実測データと大気拡散シミュレーションを併用し、福島県住民の初期内部被ばく線量、特に甲状腺等価線量(以下、甲状腺線量)の再構築を試みた⁶⁾。その結果は第1表に示すとおりであり、一部は大気拡散シミュレーションからの推計値を参考にした。本稿では、その経緯とともに、大気拡散シミュレーションによる初期内部被ばく線量推計の現状と今後の展望について述べる。

Atmospheric Dispersion Simulations for Estimating Radiation Dose to the Public: Reconstruction of early internal dose to the public in the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident: Osamu KURIHARA.

(2013年9月15日受理)

第1表 福島県住民の甲状腺線量推計値(90パーセンタイル値)

市町村	1歳児	成人	線量推計の参考データ
双葉町	30	10	全身計測
大熊町	20	<10	全身計測
富岡町	10	<10	全身計測
楢葉町	10	<10	全身計測
広野町	20	<10	全身計測
浪江町	20	<10	全身計測, 甲状腺計測*
飯館村	30	20	甲状腺計測, 全身計測
川俣町	10	<10	甲状腺計測, 全身計測
川内村	<10	<10	全身計測
葛尾村	20	<10	浪江町の数値を代用
いわき市	30	10	大気拡散シミュレーション, 甲状腺計測
南相馬市	20	<10	浪江町の数値を代用
他	<10	<10	大気拡散シミュレーション

* 庄次ら¹³⁾

(単位: mSv)

II. 計算方法

吸入摂取による内部被ばく線量は、大気拡散シミュレーションから得られた評価対象核種の大気中濃度マップを用い、次式によって計算する。

$$D_i = e_i \int C_i(x(t), t) \cdot B(t) \cdot F(t) dt$$

ここで、添え字 i は核種を意味し、 D_i は核種 i からの内部被ばく線量、 e_i は吸入摂取による内部被ばく線量係数、 $C_i(x(t), t)$ は個人の滞在場所 $x(t)$ 及び時刻 t における大気中濃度、 $B(t)$ は呼吸率、 $F(t)$ は屋内滞在による線量低減効果等を含む補正係数である。

昨年度、放医研で実施した福島県住民の初期内部被ばく線量の再構築では、世界版 SPEEDI 第2版 (WSPEEDI-II)⁷⁾ によって計算された ^{131}I と ^{137}Cs の大気中濃度マップを利用した。この大気中濃度マップは、平成23年3月12日から4月30日までの2次元(地表面を含む最下層の大気中濃度のみを使用)の時系列データとして与えられており、計算領域は東日本全域を含む範囲(東西690km×南北960km)であった。また、同マップの水平空間分解能と時間分解能は、それぞれ約3km平方と1時間刻みであった。WSPEEDI-IIの福島第一原子力発電所事故への適用例については、文献⁸⁻¹⁰⁾に述べられている。

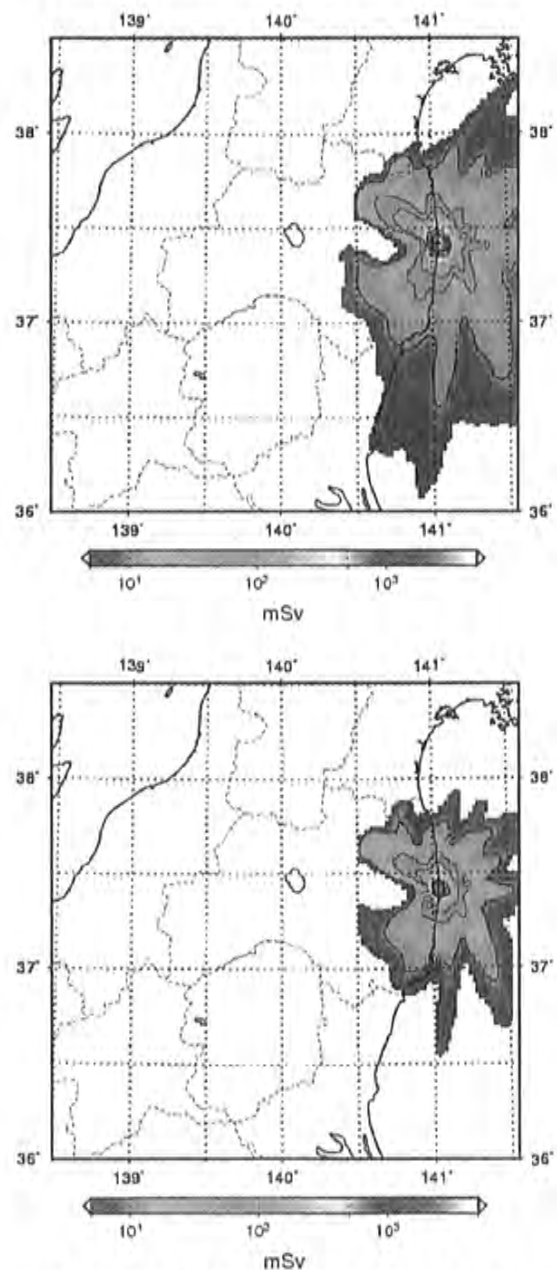
上式中にある内部被ばく線量係数と呼吸率については、国際放射線防護委員会(ICRP)の刊行物等^{11,12)}に与えられる各年齢グループ(3ヶ月児, 1歳児, 5歳児, 10歳児, 15歳児及び成人)に対応する数値を参考にした。屋内滞在による線量低減効果については参考値¹³⁾があるが、今回の計算では考慮しなかった。

以下に、 ^{131}I の吸入摂取による甲状腺線量の計算結果を中心に紹介する。

III. 結果と考察

1. 甲状腺線量マップ

第1図に、1歳児と成人に対する甲状腺線量マップを示す。これらのマップは、 ^{131}I の大気中濃度マップに、当該年齢群の甲状腺等価線量係数(吸入)と日平均呼吸率を乗じ、これを時間積分して得られた。甲状腺線量の評価期間は、平成23年3月12日から3月31日までである。評価期間をこれ以上延長しても、甲状腺線量の増加はほとんどない。甲状腺等価線量係数には、60%を元素状ヨウ素、40%を粒子状ヨウ素(タイプF)として、それぞれの係数の加重平均値を用いた。ヨウ素の物理的性



第1図 甲状腺線量マップ(上:1歳児, 下:成人)

状の割合については、東京電力福島第一、第二原子力発電所及び茨城県にある(独)日本原子力研究開発機構で測定された空気サンプリングの結果を参考にした。

第1図の甲状腺線量マップは、その場所に屋外に居続けたと仮定した場合に受ける線量として示したものである。したがって、避難等の移動を伴う住民に対しては適用できない。実際、20km圏内の市町村住民は、3月12日終日までには大半が圏外に避難している¹⁴⁾。また、屋内滞在による線量低減効果や、日本人の血中ヨウ素の甲状腺取り込み率¹⁵⁾等を考慮すれば、過大評価が見込まれる。よって、第1図に示した甲状腺線量マップの解釈には注意を要するが、移動の少ない地域住民、あるいは近隣県住民を対象とした甲状腺線量の大きな把握には有用であると思われる。1歳児の甲状腺線量マップを見ると、甲状腺線量が10 mSvを大幅に超える地域は、福島県内の浜通り地方及びその周囲であることがわかる。

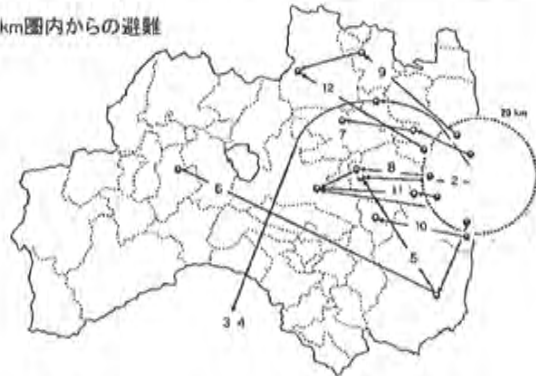
2. 避難住民の甲状腺線量の試算

20km圏内または計画的避難区域から避難した住民が受けた¹³¹Iの吸入摂取による甲状腺線量を、外部被ばく線量推計の際の参考とした避難行動モデルケース(第2図及び第3図)²⁾に基づき試算した。これらのモデルケースは、実際の避難状況に関する情報から、代表的行動パターンとして検討されたものである。第2表に、各モデルケースに対する1歳児、10歳児及び成人の甲状腺線量を示す。ただし、精度を考慮して有効数字1桁に丸めた。

一般的に、20km圏内からの避難行動モデルケースの

方が、計画的避難区域からのものと比較して、線量が低く抑えられている。これは、福島第一原子力発電所から多量放出のあった3月15日以前に圏外に避難したことによる効果が大い。ただし、福島第一原子力発電所か

20 km圏内からの避難



計画的避難区域からの避難



第2図 避難行動モデルケース(上:20km圏内からの避難、下:計画的避難区域からの避難)

モデルケース No.	3月11日	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	富岡町役場	川内村役場																				
2	大熊町役場																					
3	双葉町役場	千原		川俣小学校																		
4	双葉町役場	千原		川俣小学校																		
5	楢葉町役場																					
6	楢葉町役場	いわき市役所																				
7	浪江町役場	つしま活性化センター(浪江町)																				
8	田村市某所																					
9	南相馬市某所																					
10	広野町某所																					
11	川内村某所	川内小学校																				
12	葛尾村某所																					
13	つしま活性化センター(浪江町)																					
14	葛尾村役場																					
15	飯館村役場(5月20日まで)																					
16	飯館村役場(6月21日まで)																					
17	南相馬市某所(5月20日まで)																					
18	川俣町某所(6月1日まで)																					

第3図 避難行動モデルケースの時系列(モデルケースNo.1~No.12:20km圏内からの避難、No.13~No.18:計画的避難区域からの避難)

第2表 各避難行動モデルケースの¹³¹I吸入摂取による年齢群別甲状腺線量の推計値

モデルケース No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1歳児	<10	<10	40	90	30	10	90	<10	<10
10歳児	<10	<10	40	70	30	<10	80	<10	<10
成人	<10	<10	20	40	20	<10	50	<10	<10

モデルケース No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1歳児	10	<10	<10	100	40	30	50	80	70
10歳児	<10	<10	<10	60	30	20	30	70	60
成人	<10	<10	<10	50	20	20	20	40	30

(単位: mSv)

ら北西方向へ避難した場合には数値が高くなる。計画的避難区域からの避難行動モデルケースでは、避難が遅いため、全線量のほとんどを避難経路の起点となる場所で受ける形となる。

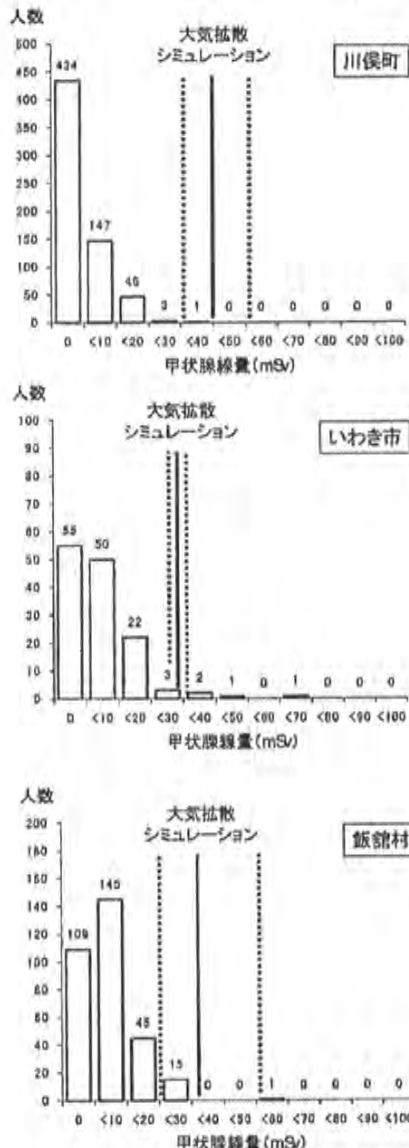
3. 人の実測データからの線量推計値との比較

大気拡散シミュレーションによる線量推計の精度を確認するため、数は限られるが、人の実測データ(甲状腺計測やWBCによる全身計測)から推計した甲状腺線量との比較を試みた。後者は実測値に基づく推計であるため、摂取シナリオ(摂取日や摂取経路等の内部被ばく線量を計算する際に必要となる条件)の不確実性は残るものの、より真値に近い評価と言える。

第4図には、平成23年3月下旬に、川俣町、いわき市及び飯館村において実施された小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果から推計した甲状腺線量分布を示す。ただし、摂取シナリオとしては、全量の¹³¹Iを3月15日に吸入摂取する条件を設定した。同図には、比較対象とする大気拡散シミュレーションから推計した甲状腺線量も併せて示す。ただし、個々の被検者の住所や行動に関する情報が得られていないため、各市町村の役場に最も近いWSPEEDI-IIの計算領域中の格子点及びそれに隣接する8格子点の¹³¹I大気中濃度を抽出し、これらの幾何平均値(GM)と幾何標準偏差(σ_g)から甲状腺線量(5歳児)を計算した。同図からわかるように、大気拡散シミュレーションから推定した甲状腺線量は、実測データから求めた甲状腺線量分布の上限付近にある。

その他の避難住民に対する推計値の比較については、次のとおりである。ただし、個人の行動情報が不明のため、あくまでも参考である。

弘前大学の床次らの研究グループが浪江町住民に対して行った甲状腺計測の結果を報告している¹⁶⁾。同測定の実測者は、沿岸部からの避難者45名と津島地区住民17名を含む計62名であり、推計された甲状腺線量の最大値は成人で33 mSv、子供で23 mSvであった。これらの数値は、浪江町を起点とする避難行動モデルケース(第2表のNo.7とNo.13)の甲状腺線量と比較すると数分の一程度である。すなわち、大気拡散シミュレーションによる線量推計値の方が大きくなる。他方、20km圏



第4図 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査の結果から推計された甲状腺線量分布及び大気拡散シミュレーションによる推計値 (実線がGM、点線がGM/ σ_g 及びGM $\times\sigma_g$ 、本文参照)

内の市町村住民の甲状腺線量については、当該市町村を起点とする避難行動モデルケースの推計値に比べ、人の実測データに基づく線量推計値(第1表)の方が高いケー

スが見られる。

4. 大気拡散シミュレーションによる初期内部被ばく線量再構築の現状

大気拡散シミュレーションによる内部被ばく線量の推計は、その精度が未だ十分に検証できていない。そのため、昨年度の福島県住民を対象とした初期内部被ばく線量の再構築では、人の実測データが得られなかった地域に限定して大気拡散シミュレーションを適用した(第1表)。福島県内の中通りと会津の両地方については、大気拡散シミュレーションによる推計が主となる。該当する市町村における甲状腺線量の推計値は低い数値であるが(例えば、福島市や郡山市では数 mSv 未満)、推計自体の不確実性を考慮し、現時点では推計の信頼限界(10 mSv と仮定)未満であることを示すことが適当と考えた。例外として、いわき市については、大気拡散シミュレーションによる線量推計値も参考にした。これは、いわき市では小児甲状腺被ばくスクリーニング検査が実施されたものの、被検者の数が少ないため、補強が必要と考えたためである。また、葛尾村と南相馬市については、隣接する浪江町の線量推計値が人の実測データから得られていることから、これを両市町村に割り当てた。

IV. まとめと今後の展望

放医研では、東京電力福島第一原子力発電所事故による福島県住民の初期内部被ばく線量の再構築のため、大気拡散シミュレーションを用いる方法を検討した。大気拡散シミュレーションと人の実測データのそれぞれから推計された甲状腺線量はオーダーとしてはおおむね一致したものの、両者には未だ乖離が大きい。よって、大気拡散シミュレーションによる内部被ばく線量推計は、現時点では参考と位置付けるのが適当かと思われる。

今後の展望として、外部被ばく線量の推計と同様に、個人の行動情報を活用した内部被ばく線量の推計がある。その実現のため、個人の行動情報が得られ且つ、甲状腺計測や実測データを有する者について、大気拡散シミュレーションによる線量推計を行い、再度、実測データからの線量推計との比較を行うことが考えられる。その際、大気拡散シミュレーションの結果等を参考にし、より現実的な個人の摂取シナリオを構築することもできる。例えば、放射性プルーム(放射性物質が気流に乗って煙のように流れていく現象)の通過時間帯に、個人が屋内と屋外のどちらにいたか、または、活動中か睡

眠中かといった行動の違いは、核種の吸入量に大きく影響すると思われる。個人の行動情報をきめ細かくモデル化することにより、内部被ばく線量の推計精度を飛躍的に向上させることが可能であると筆者は考えている。そのプロセスにおいて、大気拡散シミュレーションの精度向上は不可欠であり、この分野の専門家の今後の更なる活躍を期待したい。

本稿の内容は、環境省の平成24年度原子力災害影響調査等事業「事故初期のヨウ素等短半減期による内部被ばく線量調査」を放医研が受託し、実施した内容の一部を含むものである。WSPEEDI-IIの計算値は、(独)日本原子力研究開発機構から提供を受けた。

— 参考資料 —

- 1) S. Yasumura, *et al.*, *J. Epidemiol.*, 22, 375-383 (2012).
- 2) K. Akahane, *et al.*, *Sci. Rep.*, 3, 1670 (2013).
- 3) 福島県, 県民健康管理調査,
<http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/250820siryou1.pdf> (Accessed 23 September 2013).
- 4) 福島県, 県民健康管理調査,
http://www.pref.fukushima.jp/imu/wbc/20130902wbc_joukyou.pdf (Accessed 23 September 2013).
- 5) M. I. Balonov, *et al.*, *Radiat. Prot. Dosim.*, 92, 247-253 (2000).
- 6) 福島県, 県民健康管理調査,
<http://www.pref.fukushima.jp/imu/kenkoukanri/250213siryou2.pdf> (Accessed 23 September 2013) 又は、栗原, 他, KEK-proceedings (投稿中).
- 7) 寺田, 他, 日本原子力学会和文論文誌, 7, 257-267 (2008).
- 8) G. Katata, *et al.*, *J. Environ. Radioact.*, 109, 103-113 (2012).
- 9) H. Terada, *et al.*, *J. Environ. Radioact.*, 112, 141-154 (2012).
- 10) G. Katata, *et al.*, *J. Environ. Radioact.*, 111, 2-12 (2012).
- 11) ICRP, The ICRP database of dose coefficients: workers and members of the public, (2001).
- 12) ICRP, Publication 71, (1995).
- 13) US EPA, Manual of protective action guides and protection, actions for nuclear incidents-second printing (1992).
- 14) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 国会事故調報告書, (2012).
- 15) 吉澤, 他, 保健物理, 11, 123-128 (1976).
- 16) S. Tokonami, *et al.*, *Sci. Rep.*, 2, 507 (2012).

著者紹介



栗原 治 (くりはら・おさむ)
(独)放射線医学総合研究所
(専門分野/関心分野) 個人被ばく線量評価/放射線計測

(D) NIRS estimation of internal doses to the thyroid
The international workshop on radiation and thyroid cancer

NIRS Estimation of Internal Dose to the Thyroid

The International Workshop on Radiation and Thyroid Cancer
(Organized by OECD/NEA)
at Prince Hotel, Tokyo – Japan
22 February, 2014

Osamu KURIHARA, Ph.D
National Institute of Radiological Sciences (NIRS)

1

Contents

- **Background**
- **Methods for Estimating Early Internal Doses (Thyroid Equivalent Doses) to Fukushima Residents**
- **Results of the Estimation**
- **Summary and Discussion**

2

Background

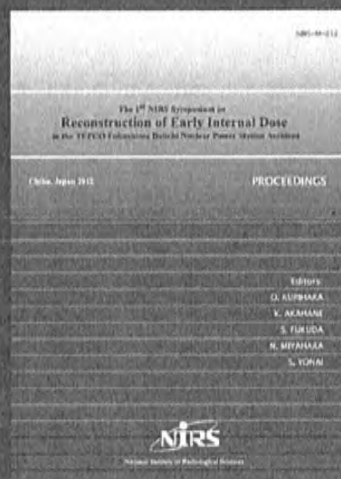
- Limited human/environmental data available for estimating early internal doses to the public due to the intake of short-lived nuclides (mainly, ^{131}I).
- The number of direct human measurements in the first three months is only ~ 1,300.
 - Screening survey on thyroid exposure to 1,080 children: Fukushima (2012), Kim et al. (2012)
 - Measurements of ^{131}I in the thyroid for 62 Namie residents: Tokonami et al. (2012)
 - Measurements for 173 subjects (first responders/evacuees) in the first month: Matsuda et al. (2013)
- NIRS started a project on the reconstruction of internal doses to Fukushima residents in 2012 (ongoing).

3

Symposium by NIRS



First symposium
on Jul. 10-11, 2012
(at NIRS)



Proceedings
of the first symposium*
(including 17 reviewed papers)



Second symposium
on Jan. 27, 2013
(at Tokyo)

* Available from http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_252.pdf

4

Methods for Estimating Thyroid Dose

NIRS Approach

Thyroid measurements



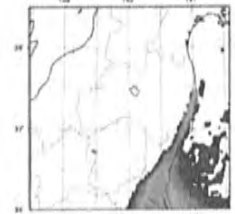
- The most reliable data for the dose estimation
- However, a relatively small number...

WB measurements



- A relatively large number of measurements
- Intake ratio I to Cs is needed.

Atmospheric dispersion simulations



- Spatiotemporal map of radionuclides in air
- Not enough data for the validation

ICRP model for Internal Dose Calculation

Representative values of the thyroid dose for Fukushima residents

5

Main Resources for the Estimation

Method	Data
Thyroid measurements	<ul style="list-style-type: none"> ● 1,080 subjects (≤ 15 y) of the screening survey on thyroid exposure to children in Kawamata, Iwaki and Iitate <ul style="list-style-type: none"> ➢ Fukushima, J. Health Phys. (2012) ➢ Kim et al., NIRS-M-252 (2012) ✓ <u>Available data</u>: subjects' information (age, sex), measurement place and date, raw data of readings of NaI survey meters
WB measurements	<ul style="list-style-type: none"> ● ~ 3,000 adult subjects of twelve municipalities <ul style="list-style-type: none"> ➢ Momose et al., NIRS-M-252 (2012) ✓ <u>Available data</u>: only committed effective doses based on an acute intake scenario (via inhalation) on March 12, 2011.
Atmospheric dispersion simulation	<ul style="list-style-type: none"> ● WSPEEDI-II with the latest source term (provided from JAEA) <ul style="list-style-type: none"> ➢ Terada et al., J. Environ. Radioact. (2012)

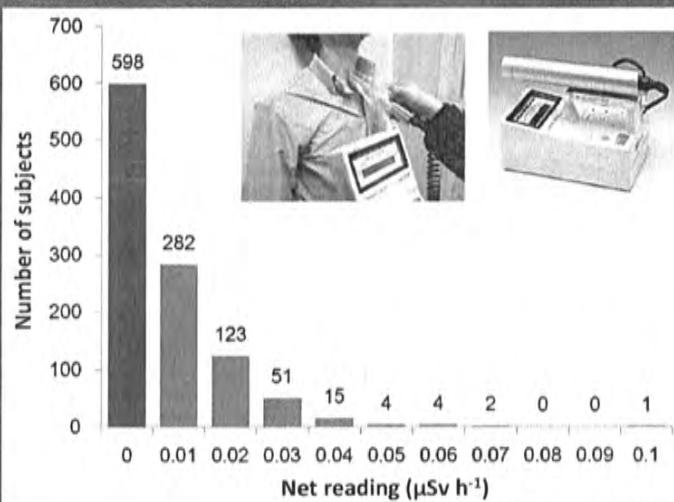
Additional information: mainly air sampling by JAEA or TEPCO

- Physicochemical form of iodine: 60% of volatile form and 40% of particulate form (as concentration-weighted mean)
- Contribution to the thyroid dose from nuclides other than ^{131}I : ~ 10%

6

Thyroid Measurements

- Measurements were performed using NaI(Tl) survey meters (TCS-161, 171 and 172, Hitachi-Aloka Medical, Ltd.).
- Calibration was performed using a human neck phantom containing thyroid-shaped bottle (Kyoto Kagaku Co. Ltd).
- No collimator
- BG level (room): $< 0.2 \mu\text{Sv h}^{-1}$ (instructed by the protocol)
- BG was also measured at the subject's shoulder.

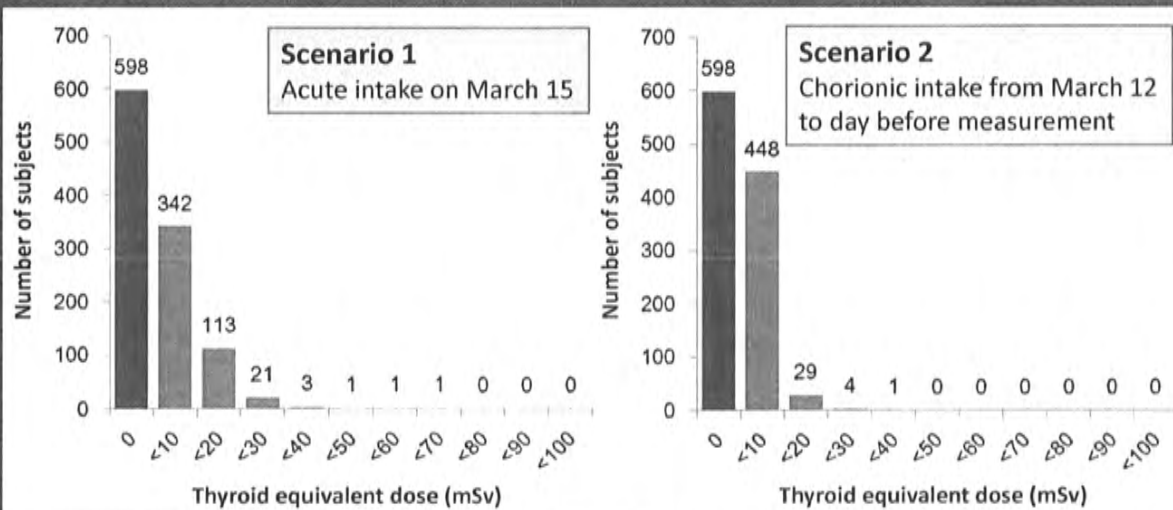


All subjects were below the screening level ($0.2 \mu\text{Sv h}^{-1}$) corresponding to 100 mSv for 1-yr-old children.

Calculations of thyroid doses based on the revised calibration factors of devices and two possible intake scenarios.

7

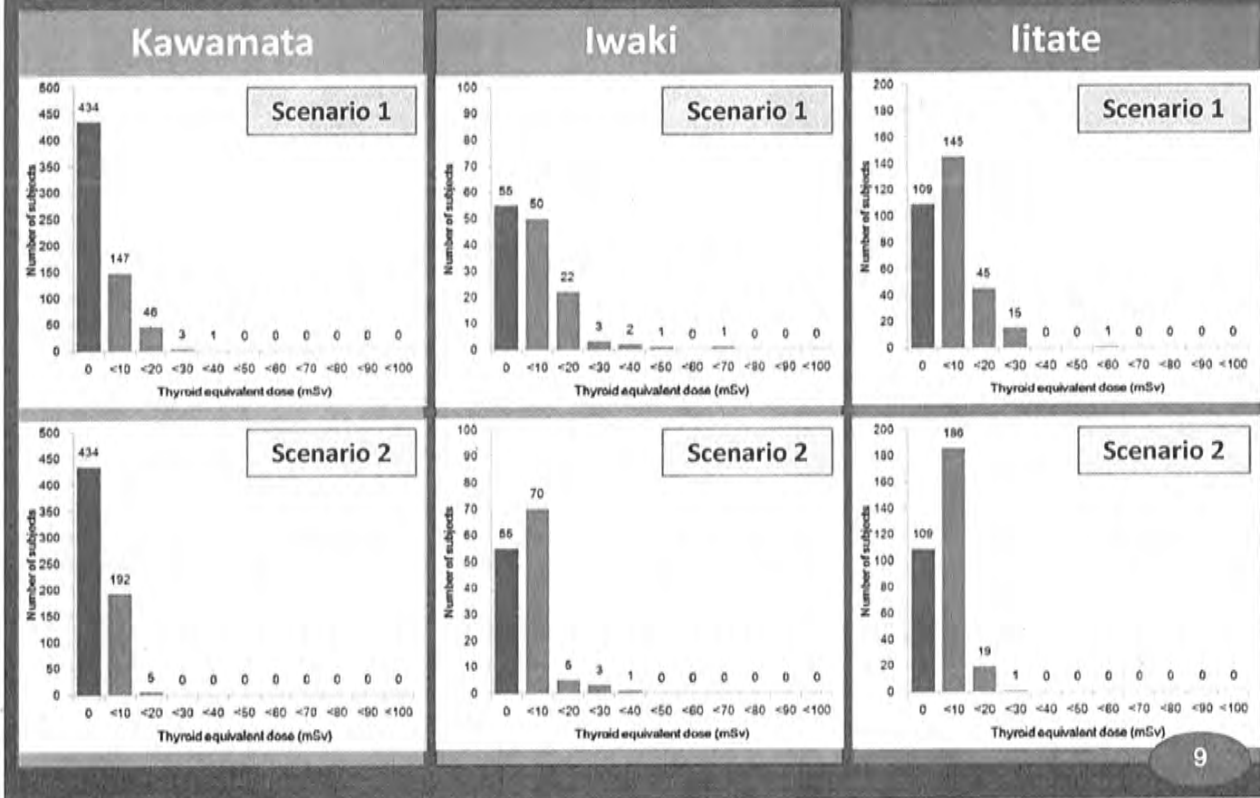
Estimated Thyroid Doses (1)



99% subjects are below 30 mSv.

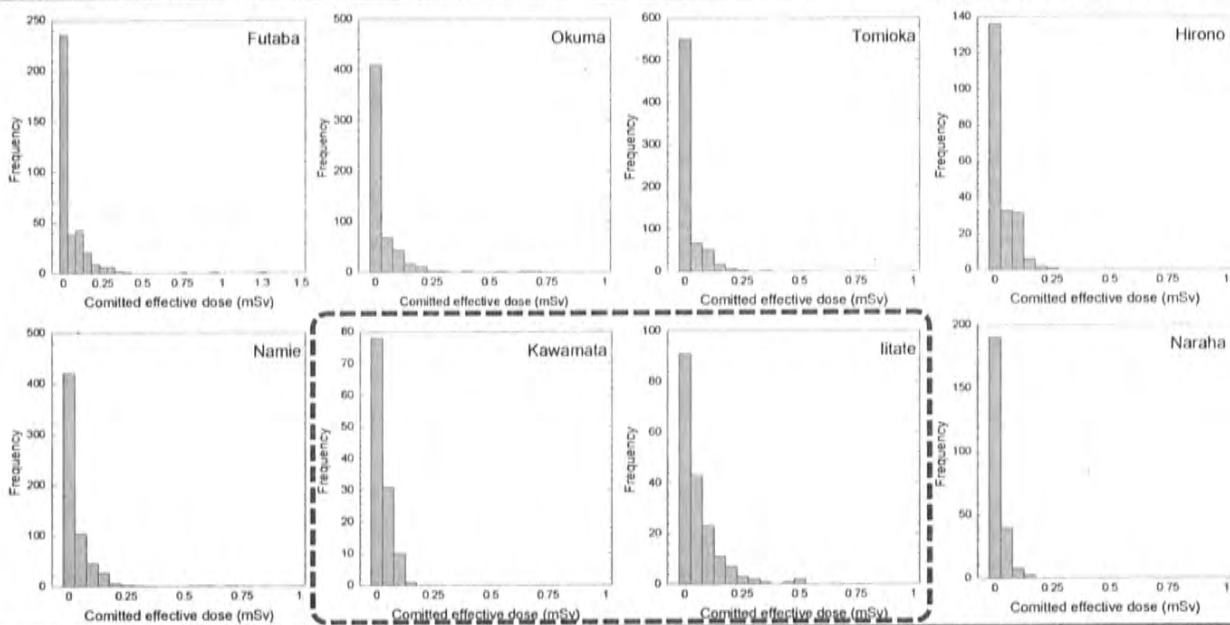
8

Estimated Thyroid Doses (2)



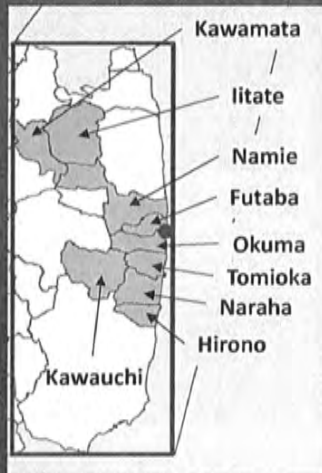
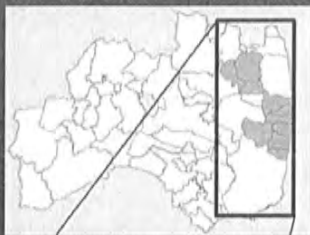
CED Distribution from WB Meas. (1)

Committed Effective Dose (CED) for Adult Subjects of Each Municipality



- Figures are reproduced from the published data of WB meas. from Jul. 2011 to Jan. 2012 (Momose et al., 2012).
- CEDs are estimated from WB contents of ^{134}Cs and ^{137}Cs on the assumption of acute intake on March 12.
- The lowest band on each figure corresponds to subjects with no significant detection.

CED Distribution from WB Meas. (2)



CEDs for Adult Subjects of Each Municipality

Municipality	Number of subjects	90 percentile (mSv)	50 percentile ^{*1} (mSv)
Futaba	365	0.15	0.04
Okuma	561	0.10	0.02
Tomioka	696	0.08	0.01
Naraha	241	0.06	0.01
Hirono	210	0.10	0.05
Namie	614	0.10	0.02
Iitate	184	0.17	0.03
Kawamata	120	0.07	0.01
Kawauchi	64	< 0.01	< 0.01
All ^{*2}	3128	0.10	0.02

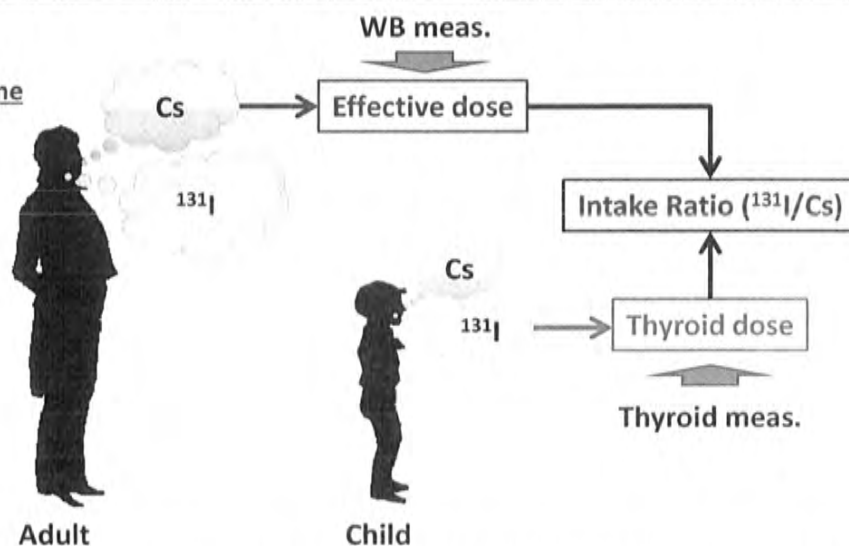
*1 The 50 percentile values of CEDs are calculated assuming a log-normal distribution (excluding Iitate and Kawamata).

*2 Including CEDs of Date, Minami-soma, Katsurao (not shown in Table)

Estimation of Intake Ratio ($^{131}\text{I}/\text{Cs}$)

Estimation of intake ratio ($^{131}\text{I}/\text{Cs}$) from two dose distributions

Assumption: Adult and child inhale ^{131}I and Cs with the same ratio (but different volume).



Effective doses of adults (^{134}Cs and ^{137}Cs)

Thyroid doses of children (^{131}I)

→ The both are available in Iitate and Kawamata.

Converting CED to Thyroid Doses

1 mSv of CED* from $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ for adults

* CED: Committed Effective Dose

Intake via inhalation: $9\text{E}+04$ Bq for each Cs

If $^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs} = 1$

Intake via inhalation: $9\text{E}+04$ Bq for ^{131}I

1-yr children

Ventilation rate: $5.16\text{ m}^3/\text{day}$
 ^{131}I Intake: $2\text{E}+04$ Bq

10-yr children

Ventilation rate: $15.3\text{ m}^3/\text{day}$
 ^{131}I Intake: $6\text{E}+04$ Bq

Adults

Ventilation rate: $22.2\text{ m}^3/\text{day}$
 ^{131}I Intake: $9\text{E}+04$ Bq

- Dose coefficients of iodine (vapor: particle = 0.6; 0.4) are used.
- Contribution from other nuclides was assumed to be 10%.

Thyroid dose: **60 mSv**

Thyroid dose: **50 mSv**

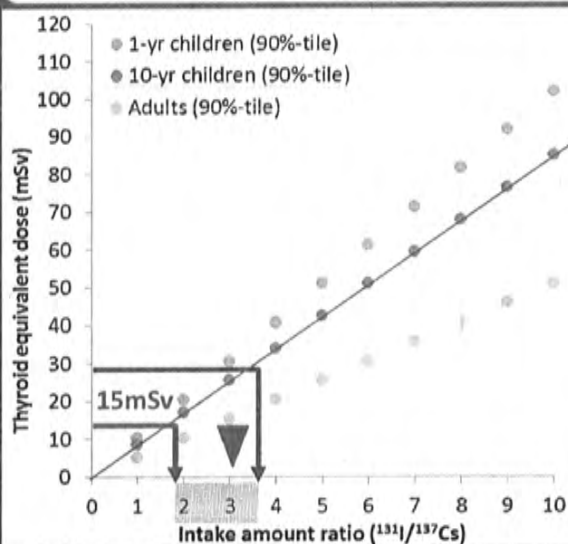
Thyroid dose: **30 mSv**

13

Derivation of Intake Ratio ($^{131}\text{I}/\text{Cs}$)

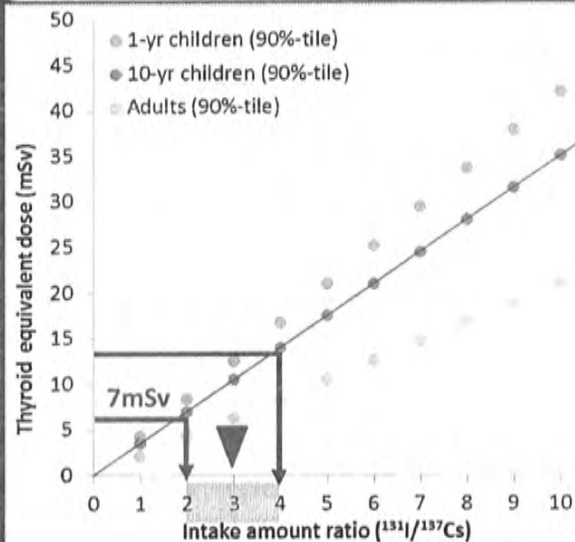
litate

- CED from WB: 0.17 mSv (adults)
- Thyroid dose: 15 mSv (children) (90%-tile value)



Kawamata

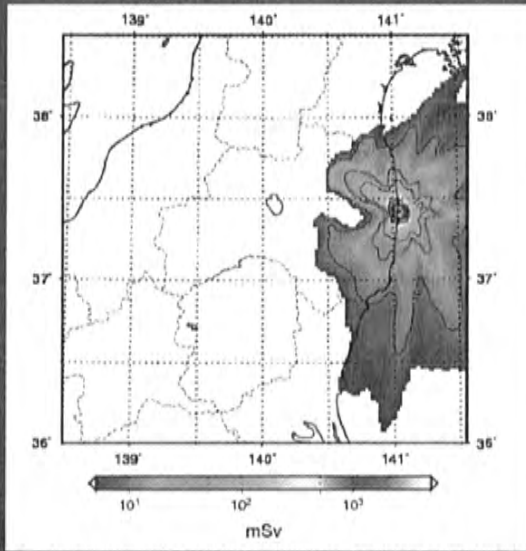
- CED from WB: 0.07 mSv (adults)
- Thyroid dose: 7 mSv (children) (90%-tile value)



Intake amount ratio ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) of 3 was used in the present study.

Thyroid Doses by Simulations

Thyroid dose map for 1-yr-old children (inhalation)



Integrated period: from March 12 to March 31

Assumption: staying outside all the time up to March 31

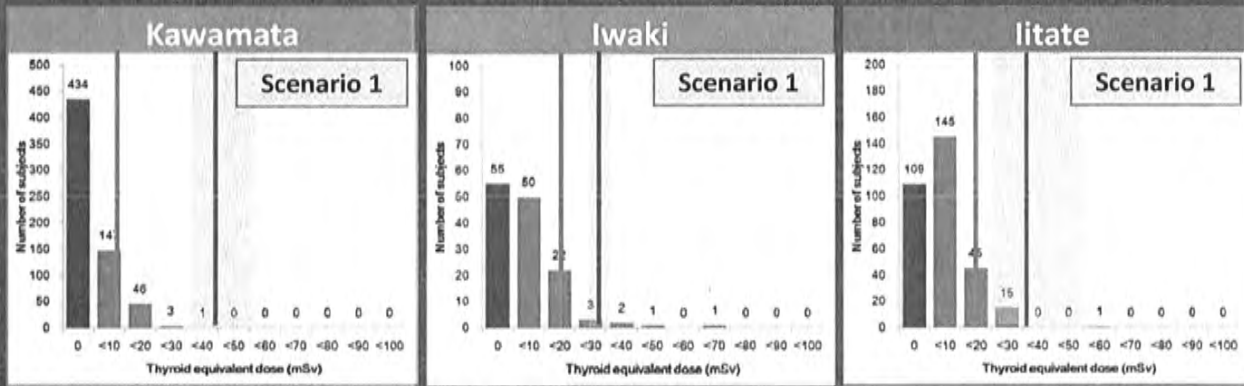


Aizu < 10 mSv Naka-dori ≤ 10 mSv Hamadori 10 mSv <

Comparing with thyroid doses estimated from human data

Comparison between simulations and thyroid measurements

- Thyroid doses by simulations are calculated using air concentrations at the mesh where a local government office of each is placed and surrounded eight meshes.



Blue lines: thyroid measurements, Red lines and pink bands: simulations

Simulations predict thyroid doses higher than 90 percentile values of those from thyroid measurements.

Applicable to residents in Nakadori and Aizu where human measurement data are unavailable.

Results of the Estimation

90 percentile of thyroid equivalent dose (rounded to nearest 10%)

Unit: mSv

Municipality	Children (1-yr-old)	Adults	Methods ^{*1}
Futaba	30	10	WB
Okuma	20	< 10	WB
Tomioka	10	< 10	WB
Naraha	10	< 10	WB
Hirono	20	< 10	WB
Namie	20	< 10	WB, Thyroid ^{*2}
Iitate	30	20	Thyroid, WB
Kawamata	10	< 10	Thyroid, WB
Kawauchi	< 10	< 10	WB
Katsurao	20	< 10	Same values as Namie
Iwaki	30	10	Simulations, Thyroid
Minami-soma	20	< 10	Same values as Namie
Other Fukushima areas	< 10	< 10	Simulations

*1: WB: Whole-Body meas., Thyroid: Thyroid meas., Simulations: WSPEEDI-II

*2: Tokonami et al., (2012)

17

Summary and Discussion (1)

- The present estimation seems to be comparable to other estimations by different methods. Internal thyroid doses were estimated to be around 30 mSv (as 90 percentile) for small children in relatively high dose areas.
- The (effective) intake ratio of $^{131}\text{I}/\text{Cs}$ results in 3, being much lower than environmental data (~ 10). A main reason for this discrepancy may be due to a relatively small uptake factor of iodine to the thyroid for Japanese. However, the intake ratio should be carefully considered, taking into account great difference between individuals and also spatiotemporal variation in the environment.

18

Summary and Discussion (2)

- The accuracy of the present estimation largely depends on the representativeness of measured subjects in terms of the individual behavior during exposure. This should be examined based on interview sheets, which is also useful to create realistic intake scenarios for individuals.
- International collaboration is necessary for further dose reconstruction.



National Institute of Radiological Sciences

Thank you very much for your kind attention.