

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和4年度研究報告書

研究課題名	個人避難行動及び大気拡散シミュレーションに基づく福島第一原発事故における住民の初期内部被ばく線量推定の精緻化に関する研究
令和4年度研究期間	令和4年4月1日～令和5年2月28日
研究期間	令和3年度 ～ 令和4年度（2年目）

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	栗原 治	量子科学技術研究開発機構・部長
分担研究者		
若手研究者		

キーワード	福島第一原発事故，線量評価，初期内部被ばく，ヨウ素，避難行動，大気拡散シミュレーション
-------	---

本年度研究成果
<p>I 研究背景</p> <p>福島第一原発事故を受けて、福島県では県民の健康影響を長期にわたり見守るための大規模調査（福島県民健康調査）が2011年6月から開始された。同調査の中には、事故発生当時年齢が18歳以下の全県民を対象とした甲状腺検査（いわゆる、超音波診断装置を用いた診断）が含まれており、その結果や検査自体の意義については様々な議論があり、県民に対しては今まで以上に科学的エビデンスに基づく丁寧な説明をしてゆくことが望まれる。甲状腺検査が18歳以下の全県民を対象とした理由は、事故による甲状腺線量の把握が十分に行えなかったためであるが、甲状腺検査の結果を科学的かつ公平に解釈するためには、事故後の一人一人の避難行動の違いを考慮に入れた正確な線量推計値を得ることが不可欠である。本研究は、申請者らがこれまでに実施してきた福島県住民、特に原発近隣地域からの避難住民に対する甲状腺内部被ばく線量の推計を継続・発展させるものであり、福島県民健康調査への貢献が期待されるとともに、県民の安心にも繋がるものである。</p> <p>II 目的</p> <p>福島第一原発事故の発生から10年以上が経過し、この間、国内外の多くの研究者によって、同事故による福島県住民の被ばく線量の調査が行われてきた^{1,2)}。研究代表者らが所属する量子科学技術研究開発機構（以下、量研）においても、主として放射性ヨウ素による事故初期の甲状腺内部被ばく線量の推計を2012年度から継続してきた。2012年度の推計では、国が事故直後に実施した小児甲状腺被ばくスクリーニング検査及び福島県が避難地域の住民に対してホールボディカウンタ（WBC）を用いて行った放射性セシウムを対象とした内部被ばく検査から得られた人の実測データを基礎とし、これに大気拡散シミュレーションを補完的に用いることにより、避難地域各自治体の住民が受けた甲状腺等価線量の代表値（90パーセンタイル値）を導出した³⁾。この結果は、後に行われた他の研究者</p>

による推計値と大きく乖離するものではない。2012年度以降、量研では福島県立医科大学から前述の実測データを有する者の避難行動データの提供を受け、事故直後の避難行動とWBC実測値との関連性について解析を行うとともに、膨大な避難行動の類型化やアップデートされた大気拡散シミュレーションを用いた吸入摂取量の算出等を行ってきた^{4,6)}。また、本事業の先行研究(2019-2020年度)において、研究のために収集及び加工した様々な形式のデータのアーカイブ化を実施した⁷⁾。本研究(2021-2022年度)は、これまでの研究を発展させ、本事業において優先的に取り組むべき課題とされている福島県住民の初期内部被ばく線量の推計について、更なる精緻化と信頼性の向上を図ることを目的とするものである。研究最終年度となる今年度は前年度に引き続き、大気拡散シミュレーションを用いた放射性ヨウ素(特に¹³¹I)の吸入線量の妥当性評価を中心に検討を行った。

III 研究方法

本事業の先行研究(2019-2020年度)⁷⁾において作成した避難行動データ及び線量データのアーカイブ、ならびに、2020年に公開されたWSPEEDI-IIによる大気拡散シミュレーションデータ(¹³¹I, ¹³⁷Cs等の地表大気中時系列マップの内、3km平方メッシュのもの)⁸⁾を使用した。個人の吸入摂取量は、解析対象者の避難行動データから推定される各時刻(毎時)の居場所(緯度経度)から、これに最も近いWSPEEDI-IIの計算格子点の空气中濃度を抽出し、これに年齢グループに応じた単位時間当たりの吸入量を乗じ、評価対象期間である2011年3月12日から31日まで積算して求めた。屋内防護係数については、後述するとおり、吸入線量に対する感度解析を行った。

(倫理面への配慮)

甲状腺中ヨウ素または全身セシウムを対象とした人の実測値及び個人の避難行動データの本研究での利用については、研究代表者らが所属する量研及び福島医大の臨床研究審査委員会での承認を得ている(量研 13-011, 福島医大 1892)。研究目的外での利用、また、他機関への譲渡はしない。

IV 研究結果、考察及び今後の研究方針

1. 研究結果

① 大気拡散シミュレーションによる吸入線量推計の検証

大気拡散シミュレーションによる初期内部被ばく線量、特に放射性ヨウ素の吸入による甲状腺等価線量の検証について、小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者の内、避難行動データを有する約300名について前述した方法で当該線量を計算し、実測値(¹³¹I甲状腺残留量)から求めた甲状腺等価線量との比較を行った。同検査被検者の2011年3月11日から31日までの滞り場所は図IV-1に示すとおりであり、飯館村及びいわき市の被検者については、大量放出のあった15日以降に自主避難者の増加があったが、3月下旬にかけて同自治体に帰還している様子が確認された。

甲状腺中ヨウ素の実測値と避難行動データの両方を有する308名について、実測値から推定された甲状腺等価線量と新旧のWSPEEDI-IIから計算した甲状腺等価線量(屋内防護係数は0.5に設定)を比較した結果を図IV-2に示す。ここで、新旧のWSPEEDI-IIとは、それぞれ2020年及び2012年に発表された大気拡散シミュレーションの結果であり^{8,9)}、ソースタームの設定や放射性核種の地表沈着プロセス等のスキームが両者で異なる。また、実測値に基づく甲状腺等価線量は、摂取日を3月15日に設定し、測定日までの¹³¹I甲状腺残留量の減少を考慮し算出した。図IV-3には、実測及び新旧のWSPEEDI-IIから導出した甲状腺等価線量分布をそれぞれ示した。以上の結果から、新旧のWSPEEDI-IIともに、実測値に基づく甲状腺等価線量に対する再現性は個人毎に見れば低いものの、被検者全体の甲状腺等価線量分布に関しては、新しいWSPEEDI-IIにおいて再現性が向上した。

② 屋内防護係数の検討

屋内防護係数は屋滞在時に見込まれる吸入摂取量（放射能）の低減効果を考慮するファクターであり、WSPEEDI-II によって得られる ^{131}I の地表高空中濃度に対する屋内の空气中濃度の比として定義される。屋内防護係数の検討を行う前に、実測値及び WSPEEDI-II から得られる甲状腺等価線量分布の特徴について QQ プロットを用いて確認したところ、図 IV-4 に示すように両者とも対数正規分布に近いことが分かった。ただし、前者については、未検出者が約半数を占めるために打切り分布となることから、QQ プロット上で直線回帰を行い線量分布の再構成を行い、各累積頻度（5%、10%、25%、50%、75%、90%及び95%）における甲状腺等価線量を求めた。WSPEEDI-II からの甲状腺等価線量についても屋内防護係数毎に同様に算出し、実測値から得られる甲状腺等価線量との比較を行った（表 IV-1）。

同表中の数値が示すように、WSPEEDI-II からの甲状腺等価線量は屋内防護係数によって変化し、屋内防護係数が 0.3 から 0.7 の範囲で約 2 倍の変化があった。実測値から得られる甲状腺等価線量は、①3 月 15 日を摂取日に設定した場合と②WSPEEDI-II と避難行動データから吸入量が最大となる日を摂取日に設定した場合の両方について求めた。後者の摂取日は被検者毎に個別に設定している。①の場合、屋内防護係数を 0.5 に設定したときに実測値及び WSPEEDI-II からの甲状腺等価線量が最も良く一致する結果となった。

③ 福島第一原発近隣住民の甲状腺等価線量推計値

先行研究⁷⁾においてアーカイブ化を行った福島第一原発近隣自治体住民の避難行動データを用い、同様な方法により、 ^{131}I の吸入摂取による甲状腺等価線量を計算した。ここで、使用した避難行動データは 2011 年度の WBC 被検者（3 歳以上）から得られたものであり、前述の屋内防護係数は 0.5 に設定した。表 IV-2 に計算結果の一例（5 歳児群 {3 歳から 7 歳まで} と成人群 {18 歳以上}）を示す。また、行動データを有する WBC 被検者 5,401 名（浪江町，大熊町，富岡町，双葉町，楢葉町，飯舘村，広野町，川内村，川俣町及び葛尾村の被検者全員）について、甲状腺等価線量分布を計算した結果、甲状腺等価線量の中央値は 1.6 mSv，90%累積頻度値は 12.3 mSv となった。

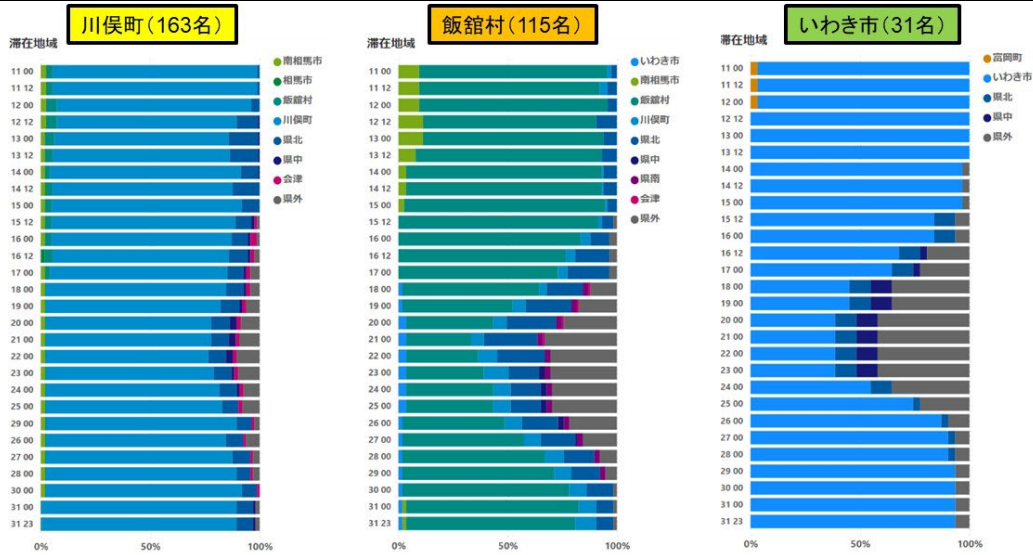


図 IV-1 小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者の滞在場所の時系列

※行動データが得られた 309 名の内 1 名は被検者照合が行なえなかったため線量計算からは除外

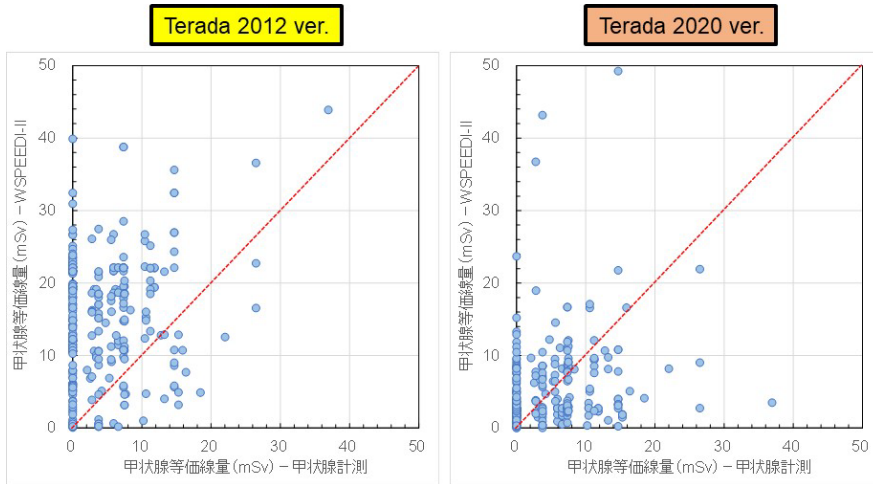


図 IV-2 実測値 (甲状腺 ^{131}I 残留量) 及び WSPEEDI-II (屋内防護係数 0.5) から算定した甲状腺等価線量の比較

※左パネル：WSPEEDI-II (2012)⁹⁾, 右パネル：WSPEEDI-II (2020)⁸⁾



図 IV-3 実測値 (甲状腺 ^{131}I 残留量) 及び WSPEEDI-II (屋内防護係数 0.5) から算定した甲状腺等価線量分布の比較

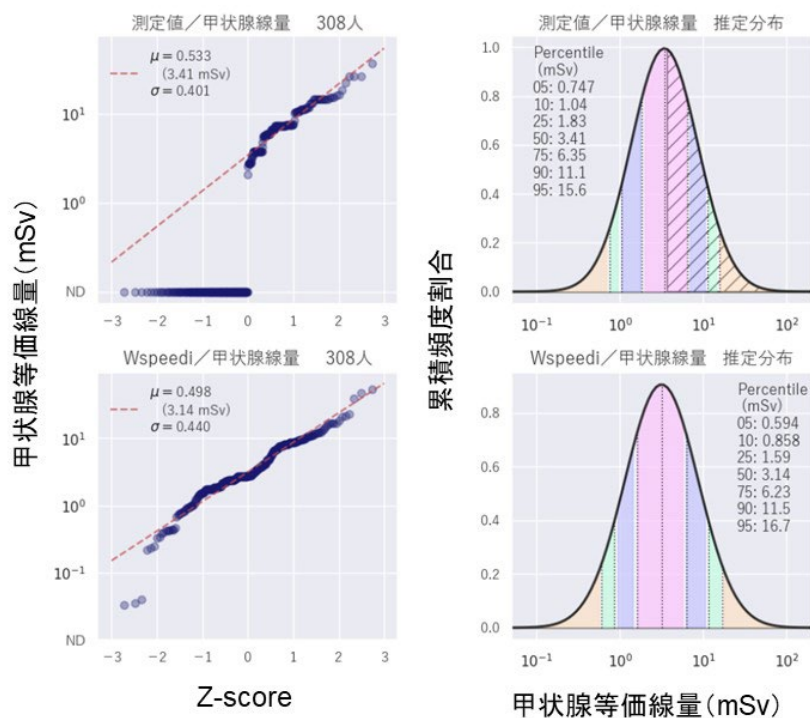


図 IV-4 甲状腺等価線量分布の再構成

※上段：実測値（甲状腺 ^{131}I 残留量），下段：WSPEEDI-II（2020年版，屋内防護係数 0.5）

表 IV-1 実測値（甲状腺 ^{131}I 残留量）及び WSPEEDI-II から算出した甲状腺等価線量分布の比較

累積 頻度	実測		WSPEEDI-II (Terada 2020 ver.)				
	摂取日		屋内防護係数				
	3/15	WSP 最大日	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9
5%	0.7	0.5	0.1	0.4	0.6	0.8	1.1
10%	1.0	0.8	0.2	0.5	0.9	1.2	1.5
25%	1.8	1.4	0.3	1.0	1.6	2.2	2.8
50%	3.4	2.8	0.7	1.9	3.1	4.4	5.6
75%	6.3	5.5	1.4	3.8	6.2	8.7	11.1
90%	11.1	10.0	2.5	7.0	11.5	16.0	20.5
95%	15.6	14.5	3.7	10.2	16.7	23.2	29.7

(mSv)

表 IV-2 WSPEEDI-II から算出した近隣自治体 WBC 被検者の甲状腺等価線量分布

5歳年齢Gr(屋内防護係数=0.5) (mSv)							成人年齢Gr(屋内防護係数=0.5) (mSv)						
累積頻度	浪江	双葉	大熊	富岡	飯舘	川内	累積頻度	浪江	双葉	大熊	富岡	飯舘	川内
(人数)	347	151	242	221	90	31	(人数)	316	211	282	338	47	31
10%	0.2	0.4	0.6	0.1	0.6	0.1	10%	0.1	0.2	0.3	0.1	0.9	0.1
25%	0.5	0.9	1.3	0.3	1.3	0.3	25%	0.5	0.6	0.7	0.2	1.7	0.2
50%	1.8	2.1	2.7	0.9	3.2	1.0	50%	1.6	2.2	1.5	0.7	3.3	0.6
75%	6.5	4.8	5.6	2.6	7.8	2.8	75%	6.0	7.2	3.5	2.0	6.6	1.4
90%	20.5	16.5	11.0	6.8	17.3	7.3	90%	19.2	21.2	7.3	5.5	12.2	3.1

2. 考察

福島第一原発事故に際し、近隣住民の事故初期の内部被ばく線量に最も寄与したとされる¹³¹Iについては、人及び環境の実測データが限られているため、線量推計及びその精度検証は課題とされてきた。大気拡散シミュレーションは、広範囲の時空間的な放射性核種の挙動を再現することができるため、実測値が全く得られていない地域については有効な線量評価手法ではあるものの、実測値に基づく甲状腺等価線量との比較検証が必要である。図 IV-2 に示すように個人線量に対する一対一の再現性は低く、新しい WSPEEDI-II でも改善は見られなかった。この原因として、WSPEEDI-II で計算された空气中放射性物質濃度の精度の問題に加えて、呼吸量や代謝等の生理学的パラメータに関する個人差や屋内防護係数のばらつき等の要因も大きく影響した可能性が考えられる。他方、実測値に基づく甲状腺等価線量についても、NaI(Tl)サーベイメータを用いて得られた計測値であることから、主にその統計変動に由来するファクター2程度の計測誤差が見込まれる¹⁰⁾。また、吸入摂取と比べて小さいと考えられるものの、潜在的な経口摂取による線量寄与も含むものである。以上から、WSPEEDI-II による個人線量の推計には限界があるものの、結果的に解析対象者全体の甲状腺等価線量分布は良好に再現された(図 IV-3)。新旧の WSPEEDI-II による線量推計に及ぼす顕著な違いは川俣町と飯舘村の被検者に現れており、3月15日の当該地区の空气中濃度が新しい WSPEEDI-II では減少したために、甲状腺等価線量もそれに準じた結果となった。

屋内防護係数については、表 IV-1 に示す結果から 0.5 程度に設定するのが適当と考えられる。この結果は過去の報告例^{11,12)}とも整合している。しかしながら、屋内防護係数は建屋の放射性プルームによるばく露時間や放射性ヨウ素の性状にも影響することにも留意する必要がある^{13,14)}。解析対象者は全般的に屋内滞在時間が長く、屋内防護係数は甲状腺等価線量に大いに影響することが示されたが(表 IV-1)、同様な傾向は避難地域住民にも当てはまるものと思われる。

以上の検証結果を踏まえ、WSPEEDI-II 及び避難行動データを用いて近隣自治体の甲状腺等価線量分布を算出した(表 IV-2)。成人と子供が同一の行動をしていれば、両者の甲状腺等価線量の差異は、それぞれの呼吸量と線量係数の違いによって決まり、5歳児群は成人群の約2倍の線量になるが、浪江町や双葉町等では線量の差は比較的小さかった。この結果は、両年齢群の避難開始時期や屋内退避時間の差異によるものであり、5歳児群の方が成人群に比べて、より線量低減効果の高い避難行動をしていたことを示唆している。同一家族であれば両年齢群の行動履歴はほぼ同じと考えられるが、この点に関して、各自治体及び各年齢群の避難行動データを網羅的に解析することで明らかにする必要がある。なお、避難行動データには同一家族を識別できる情報は付与されていない。

他の線量推計法と比較するため、昨年度報告した浪江町、双葉町、大熊町、及び、富岡町の WBC

成人被検者のセシウム吸入摂取による実効線量から、摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) を用いて 1 歳児群及び成人群の甲状腺等価線量 (90%累積頻度値) を算出した結果を表 IV-3 に示す。この方法は研究代表者らの論文に解説されており^{15, 16)}、摂取量比は 3.9 とした¹⁷⁾。同表中の早い避難 Gr と遅い避難 Gr は、3 月 12 日 15 時点の福島第一原発から推定滞在場所までの距離によって分類しており、前者は 25 km 圏外、後者は 25 km 圏内とした。なお、1 歳児群と 5 歳児群は、それぞれの吸入量と線量係数の積はほぼ同じであるため、1 歳児群の数値は表 IV-2 の 5 歳児群のものと比較できる。二つの推計方法を比較すると、浪江町の早い避難 Gr を除き、摂取量比を用いる方法の方が全体的に高い線量となっている。ただし、昨年度報告したとおり、浪江町以外については、一時帰宅 (自家用車による自宅からの物品搬出が許可された第 2 巡目以降) に伴う微量な着衣汚染の影響が WBC 測定において確認された事例があったことから、セシウムの実効線量を過大評価している可能性がある¹⁸⁾。この詳細については論文査読中であるため、説明は別の機会に譲る。

表 IV-3 摂取量比 ($^{131}\text{I}/^{137}\text{Cs}$) を用いて推定した甲状腺等価線量の 90%累積頻度値

90% 頻度値線量 (mSv)	浪江		双葉		大熊		富岡	
	早い避難Gr	遅い避難Gr	早い避難Gr	遅い避難Gr	早い避難Gr	遅い避難Gr	早い避難Gr	遅い避難Gr
実効線量 (Cs)	0.043	0.13	0.13	0.16	0.093	0.12	0.080	0.089
甲状腺等価線量 (成人)	4.3	12.8	12.8	15.9	9.3	11.8	7.9	8.9
甲状腺等価線量 (1歳児)	8.4	25.1	25.0	31.1	18.3	23.0	15.6	17.5

3. 今後の研究方針

本研究の後継研究「原子力災害時における被災者の個人被ばく線量把握及び健康管理に資するインテリジェンスデータベースの構築」が本事業において採択され、2023 年度から 3 ヶ年の予定で研究を遂行する予定である。後継研究では、研究代表者らがこれまでに収集または導出した福島第一原発近隣住民の様々な線量関連データを最大限に利活用するために、動的解析が可能なデータベースの開発を行うとともに、将来の原子力災害における公衆の被ばく線量推計に必要なデータベースの要件定義を示すことを予定している。

V 結論

研究最終年度となる今年度は、WSPEEDI-II を用いた ^{131}I 吸入摂取による甲状腺等価線量の推計の妥当性評価を主に行った。結論として、現時点では WSPEEDI-II による線量推計は不確実性が大きく、個人を対象とした線量推計に用いることは適当ではないものの、他の手法による線量推計結果と比較することを前提として、対象地域住民の線量分布を把握するには有効な手段と思われる。大気拡散シミュレーションの線量推計における最大の利点は、放射性プルームによる主要な曝露イベントを個人の行動履歴と併せて推定できることであり、これは人の実測値から線量評価を行う際にも必要となる摂取シナリオを決定するための有力な検討材料となることである。小児甲状腺被ばくスクリーニング検査被検者 309 名については、大量放出のあった 3 月 15 日を摂取日とする急性摂取シナリオを用いることで、適度に保守的な線量推計を行えることを確認した。WSPEEDI-II による同被検者の甲状腺等価線量の分布は、屋内防護係数を 0.5 に設定した場合に、実測値から推定された分布と全体的によく一致した。

引用文献

1. Ishikawa T. Radiation doses and associated risk from the Fukushima nuclear accident: a review of recent publications. *Asia. Pac. J. Public Health*, 2017; 29 (Suppl 2): S18 –S28.
2. Kurihara O. Review: external and internal dose assessments of Fukushima residents after the 2011 nuclear disaster. *J. Natl. Inst. Public Health*, 2018; 67: 11–20.
3. Kim E, Kurihara O, Kunishima N, et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. *J. Radiat. Res.*, 2016; 57: i118–i126.
4. Igarashi Y, Kim E, Hashimoto S, et al. Difference in the cesium body contents of affected area residents depending on the evacuation timepoint following the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys.*, 2020; 119: 733–745.
5. Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, et al. Estimation of the early ^{137}Cs intake of evacuees from areas affected by the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident using their personal behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulation. *Health Phys.*, 2021; 121: 133–149.
6. Kim E, Igarashi Y, Hashimoto S, et al. Estimation of the thyroid equivalent doses to residents in areas affected by the 2011 Fukushima nuclear disaster due to inhalation of ^{131}I based on their behavioral data and the latest atmospheric transport and dispersion model simulations. *Health Phys.*, 2022; 122: 313–325.
7. 栗原治. 避難行動データの多角的解析に基づく福島原発事故初期の内部被ばく線量推計. 環境省. 令和2年度 放射線健康管理・健康不安対策事業（放射線の健康影響に係る研究調査事業）報告書等.
8. Terada H, Nagai N, Tsuduki K, et al. Refinement of source term and atmospheric dispersion simulations of radionuclides during the Fukushima Daiichi nuclear power station accident. *J. Environ. Radioact.*, 2020; 213: 106104.
9. Terada H, Katata G, Chino M, et al. Atmospheric discharge of radionuclides during the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. Part II: verification of the source term and analysis of regional-scale atmospheric dispersion. *J. Environ. Radioact.*, 2012; 112: 141–154.
10. Kim E, Yajima K, Hashimoto S, et al. Reassessment of internal thyroid doses to 1,080 children examined in a screening survey after the 2011 Fukushima nuclear disaster. *Health Phys.*, 2020; 118: 36–52.
11. 日本原子力研究所. 保健物理—管理と研究—No. 29 (1986年度) 3.3 環境放射線管理技術の開発. *JAERI-M87-147*: 225–227. 1987.
12. Ishikawa T, Sorimachi A, Arae H, et al. Simultaneous sampling of indoor and outdoor airborne radioactivity after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Environ. Sci. Technol.*, 2014; 48: 2340–2435.
13. US EPA. Manual of protection action guides and protection actions for nuclear incidents. 1992.
14. Horiuchi J, Takahara S, Komagamine H, et al. Penetration factor and indoor deposition rate of elementary and particulate iodine in a Japanese house for assessing the effectiveness of sheltering for radiation exposure. *J. Radiol. Prot.*, 2021; 41: S139–S149.
15. Kim E, Kurihara O, Tani K, et al. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to Fukushima residents. *Radiat. Prot. Dosim.*, 2016; 168: 408–418.
16. Kim E, Yajima K, Igarashi Y, et al. Intake ratio of ^{131}I to ^{137}Cs derived from thyroid and whole-body doses to residents of Iwaki City in Japan’s Fukushima Prefecture. *Health Phys.*, 2021; 120: 387–399.
17. Kim E, Kurihara O, Kunishima N, et al. Early intake of radiocesium by residents living near the TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear power plant after the accident. Part 1: internal doses based on whole-body

measurements by NIRS. *Health Phys.*, 2016; 111: 451–464.

18. Momose T, Takada C, Nakagawa T, et al. Whole-body counting of Fukushima residents after the TEPCO Fukushima Daiichi nuclear power station accident. In: *Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident*. Chiba, Japan: National Institute of Radiological Sciences, NIRS-M-252, 2012; 67–82.