

論文題名： 福島第一原子力発電所事故後に住民が受けた内部汚染放射性核種からの甲状腺等価線量の再構築

発表誌： Scientific Reports 誌 (2020) 10 : 3639 | <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60453-0>[1] を鈴木が抄訳した。

著者： 大葉隆 (福島県立医大)、石川徹夫 (福島県立医大)、永井晴康 (JAEA)、床次眞司 (弘前大)、長谷川有史 (福島県立医大)、鈴木元 (国福大クリニック)

**要旨：** 福島第一原子力発電所 (FDNPS) 事故のあと、住民のあいだに近い将来子供達が甲状腺がんを患うのではないかとの懸念が生じた。しかし、甲状腺等価線量 (TED) の人口動態および地理的な分布は十分に評価されておらず、また摂取された放射性ヨウ素の動態を考慮して個人の線量を評価するための直接的な甲状腺測定は 1,200 名程度の子供にしか実施されていなかった。私たちは、避難地区 7 市町村の子供達の行動調査票の中から 100 ないし 300 名の行動調査票を無作為抽出し、それらの階層的クラスター解析を行い、プルーム曝露の高くなる、あるいは低くなる避難シナリオを再構築した。吸入による TED を推計するために、大気拡散沈着シミュレーションによる時間空間的放射性種濃度分布データベース (WSPEEDI\_2019DB) を使って、福島県「県民健康調査」から合計 896 の行動調査票を解析した。屋内退避の吸入被ばく防護係数、および日本人のヨウ素 (甲状腺) 取り込み率の低さを反映するための線量換算係数の補正項を適用すると、推計された TED は甲状腺実測値に基づくそれと近似した。1 歳児の TED の中央値と 95% 値は、それぞれ 0.6~16 mSv と 7.5~30 mSv に分布した。これらの結果は、福島の甲状腺がんの疫学研究に有用である。

#### 方法：

**行動調査票の解析：** 国際医療福祉大学倫理委員会 (2016 年 8 月 13-B-185, 2019 年 3 月 13-B-339)、福島県立医大倫理委員会 (2018 年 8 月 No. 29100, 2019 年 7 月 No. 29100-003) から承認を受け、県民健康調査データベースから南相馬市 300 名、大熊町、楡葉町、富岡町、双葉町、浪江町、飯舘村からそれぞれ 100 名の 19 歳以下の対象者について匿名化された行動調査票を入手し、解析した。記録の完全でない個票を除き合計 896 名を解析対象とした。詳細版の行動調査票を使い 2011 年 3 月 11 日 0 時から 3 月 26 日 0 時まで 6 時間ステップの主な滞在场所に従い、吸入線量を評価した。

**吸入による TED の推計：** WSPEEDI\_2019DB データベース[2]から地上 1 m 高の 3 種類の化学型の  $^{131}\text{I}$  濃度 (メチル化ヨウ素、元素蒸気、粒子) を参照し、152 ランドマークの 6 時間ステップの平均濃度 ( $C_i$ ) を計算した。避難途上の経路で隣接する 1 km グリッドで  $^{131}\text{I}$  濃

度の変化が大きい南相馬市、いわき市、浪江町から多くのランドマークを選んだ。年齢別 1 日換気量( $m^3$ )、および  $^{131}I$  甲状腺等価線量換算係数  $e_{inhal}$  (mSv/Bq)は、ICRP Publication 71 の値を使った。日本人のヨウ素甲状腺取り込み率は、Kudo ら[3]の報告値(18.6+/-6.0%)を採用し、 $^{131}I$  甲状腺等価線量換算係数の補正項 (FC) を (18.6+/-6.0) /30%として推計した。屋内退避の吸入被ばく防護係数 ( $DF_{shelter}$ ) は、JAEA の Hirouchi 等の報告[4]から建造物年代別の防護係数と福島県の 2010 年の住宅統計を使い、風速 2.5 m/s 時の防護係数を最小 0.1, 最大 0.95、ピーク 0.5 の三角分布として評価した。FC と  $DF_{shelter}$  の合成された 95%不確実性幅はモンテカルロシミュレーション法によって評価した。

$$E_{Thyroid (inhal)} = \sum_i \frac{V}{4} \times (C_{i-p} \times e_{inhal-Thy-p} + C_{i-el} \times e_{inhal-Thy-el} + C_{i-met} \times e_{inhal-Thy-met}) \times FC \times DF_{shelter}, \quad (1)$$

**短半減期核種 ( $^{131}I, ^{132}I/^{132}Te, ^{133}I$ ) からの TED の推計：** 2011 年 3 月 12 日のプルームに曝露し、福島県立医大における体表面汚染の核種組成から得られた係数 (SF) [5]および 3 月 15 日東海村でのプルームの核種組成から得られた係数 (SF) を使い、数式 (2) で計算した。3 月 12 日のプルームおよび 3 月 15~16 日のプルームに関して、1 歳児の SF は、おのおの 1.59 および 1.08 である。

$$E_{Thyroid (inhalation) with short} = E_{Thyroid (inhal)} \times SF, \quad (2)$$

**飯舘村の水道水の経口被ばくと吸入被ばくによる  $^{131}I$ -TED の推計：** 先行論文で飯舘村の水道水からの TED が他の地域に比べて高いため[6]、吸入被ばくの TED と甲状腺実測値に基づく TED を比較するのは問題がある。そこで、飯舘村に関しては 100 名の行動調査票に基づき吸入被ばくと経口摂取による TED を式 (3) により評価した。飯舘村の 3 カ所の浄水場からの水道供給地域と井戸の使用状況を考慮している。ここで、水道水からの経口摂取量は、ボトル水や清涼飲料水の使用量を全て水道水から摂取した場合の摂取量 ( $V_{tap}$ ) で、1 歳児、5 歳児、10 歳児の平均摂取量はそれぞれ 0.76L/日、1.03L/日、1.65L/日である。年齢別  $^{131}I$  経口摂取の等価線量換算係数( $e_{ing/thy}$ )は、ICRP Publication 67 のデータを使った。 $X_j$  は j 日に飯舘村で摂った食事の回数 (1, 2, ないし 3) である。

$$E_{Thyroid(ingestion)} = \sum_j^{14} V_{tap} \times C_{tap} \times e_{ing/thy} \times FC \times Sf \times \frac{X_j}{3}, \quad (3)$$

## 結果

表 1, 表 2 にそれぞれ  $^{131}\text{I}$  吸入被ばくによる 1 歳児の TED と短半減期核種 ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}$ ,  $^{133}\text{I}$ ) 吸入被ばくによる 1 歳児の TED を示す。ここで、95%UI は、屋内退避の防護係数と日本人の甲状腺ヨウ素取り込み率の低さを反映するための等価線量換算係数の補正項の合成不確実性幅である。3 月 12 日のプルームに曝露した双葉町、浪江町、南相馬市からの避難住民は、短半減期核種の TED が増加している。それでも避難地区 7 市町村の 1 歳児の TED の平均値は 1.2 mSv~15 mSv であり、95%不確実性の幅を考慮しても 31 mSv 以下であった。また、避難地区 7 市町村の 1 歳児の TED の 95 パーセンタイルは 7.5 mSv ~30 mSv の範囲であり、95%不確実性の幅を考慮しても 63 mSv 以下であった。

図 1、図 2 に、クラスター解析を例示する。(詳細は省略)

表 1.  $^{131}\text{I}$  吸入被ばくによる 1 歳児の甲状腺等価線量(mSv)

市町村	双葉町	富岡町	楡葉町	大熊町	浪江町	南相馬市 小高区	南相馬市 原町区・ 鹿島区	飯館村
平均値 (95% UI)	3.6 (0.9, 7.5)	1.1 (0.3, 2.3)	2.1 (0.5, 4.4)	2.1 (0.5, 4.3)	4.0 (1.0, 8.4)	9.8 (2.4, 21)	4.7 (1.2, 9.9)	4.0 (1.0, 8.5)
中央値 (95% UI)	1.3 (0.3, 2.8)	0.5 (0.1, 1.1)	0.9 (0.2, 1.9)	1.7 (0.4, 3.5)	0.8 (0.2, 1.7)	10 (2.5, 21)	3.2 (0.8, 6.6)	5.1 (1.3, 11)
95 パーセ ンタイル (95% UI)	19 (4.7, 39)	7.4 (1.9, 16)	8.9 (2.2, 19)	7.8 (1.9, 16)	20 (5.0, 42)	19 (4.8, 41)	18 (4.5, 38)	8.0 (2.0, 17)

表 2. 短半減期核種 ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}/^{132}\text{Te}$ ,  $^{133}\text{I}$ ) 吸入被ばくによる 1 歳児の甲状腺等価線量(mSv)

市町村	双葉町	富岡町	楡葉町	大熊町	浪江町	南相馬市 小高区	南相馬市 原町区・ 鹿島区	飯館村
平均値 (95%UI)	5.3 (1.3, 11)	1.2 (0.3, 2.5)	2.3 (0.6, 4.7)	2.9 (0.7, 6.0)	5.7 (1.4, 12)	15 (3.7, 31)	6.3 (1.6, 13)	4.5 (1.1, 9.3)
中央値 (95%UI)	1.5 (0.4, 3.1)	0.6 (0.1, 1.2)	1.0 (0.3, 2.1)	2.4 (0.6, 5.1)	0.9 (0.2, 2.0)	16 (4.0, 33)	4.8 (1.2, 10)	5.6 (1.4, 12)
95 パーセ ンタイル (95%UI)	30 (7.5, 63)	7.5 (1.9, 16)	9.7 (2.4, 20)	9.1 (2.3, 19)	30 (7.4, 62)	25 (6.3, 53)	19 (4.9, 41)	9.1 (2.3, 19)

表 3. 甲状腺実測値に基づく TED とシミュレーションによる TED の比較

方法論	シミュレーション			甲状腺直接測定							
	<sup>131</sup> I-TEDs (mSv) 本研究			<sup>131</sup> I-TEDs (mSv)* Kim 等				<sup>131</sup> I-TEDs (mSv)# Tokonami 等			
	25 パーセント ンタイル (95%UI)	中央値 (95%UI)	75 パーセント ンタイル (95%UI)	(N)	25 パー セン タイル	中央値	75 パ ーセン タイル	(N)	25 パ ーセン タイル	中 央 値	75 パ ーセン タイル
南相馬市, 1 歳児, (吸入)	2.7 (0.7, 5.7)	3.5 (0.9, 7.4)	7.4 (1.7, 15)	(31)	0	3.9*	11*	N.E.#			
小高区 1 歳児、(吸 入)	6.6 (1.6, 14)	10 (2.5, 21)	12 (3.0, 25)								
小高区、成 人 (吸入)	3.3 (0.8, 7)	5 (1.3, 11)	6 (1.5, 13)	N.E.				(32)	1.6	4	6
飯館村 5 歳児 (吸 入+水道)	1.5 (0.4, 2.9)	7 (1.9, 15)	14 (4.7, 26)	(99)	0	7.3	14.7	N.E.			
飯館村 10 歳児 (吸入 +水道)	1.2 (0.4, 2.5)	6.1 (1.6, 12)	12 (3.7, 22)	(114 )	0	3.7	7.5				

\*Kim 等[7]の南相馬市 1 歳児の評価値を 1.4 倍することにより、3 月 15 日曝露から 3 月 12 日曝露の場合の TED として再計算した。

#Tokonami 等[8]オリジナルデータを使い、3 月 12 日曝露として再計算した。

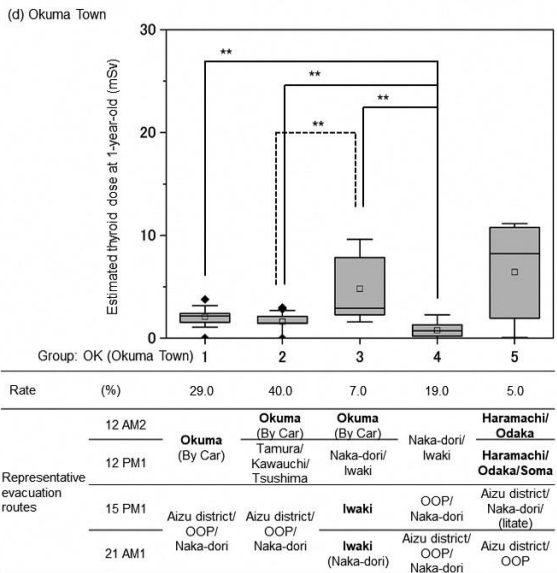
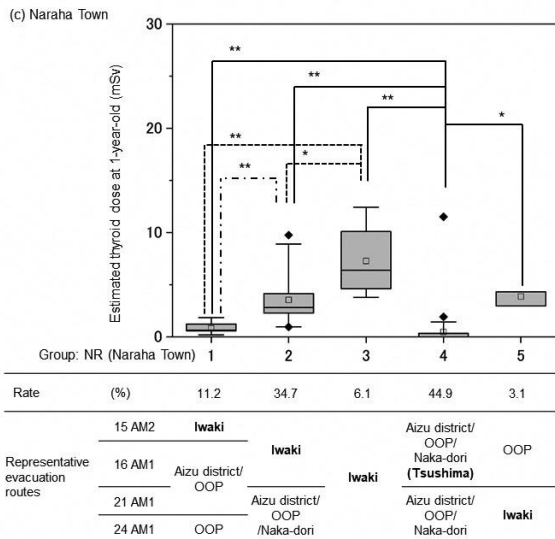
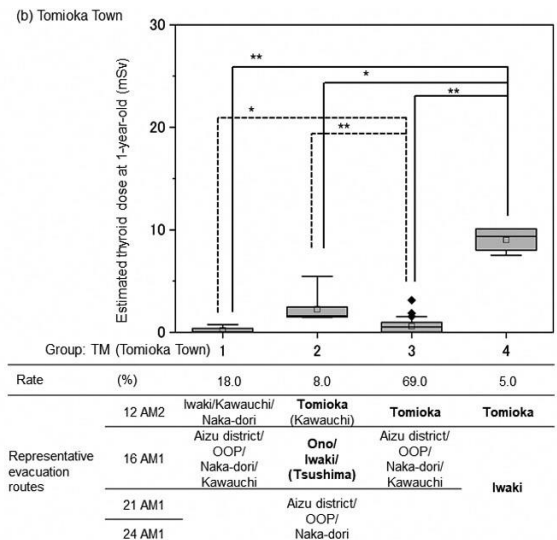
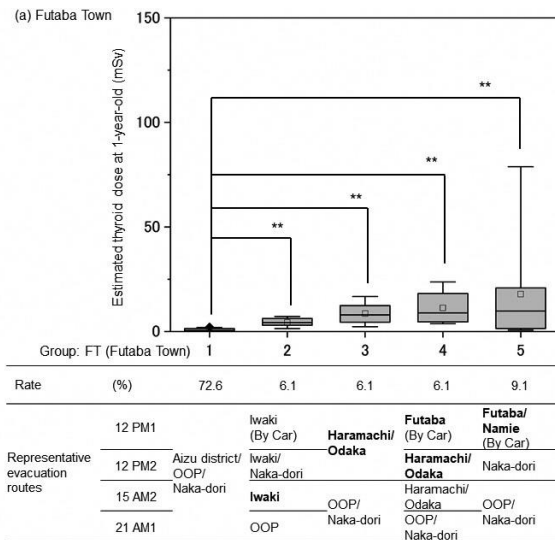


図 1. 双葉町、富岡町、楡葉町、大熊町の代表的な避難シナリオ

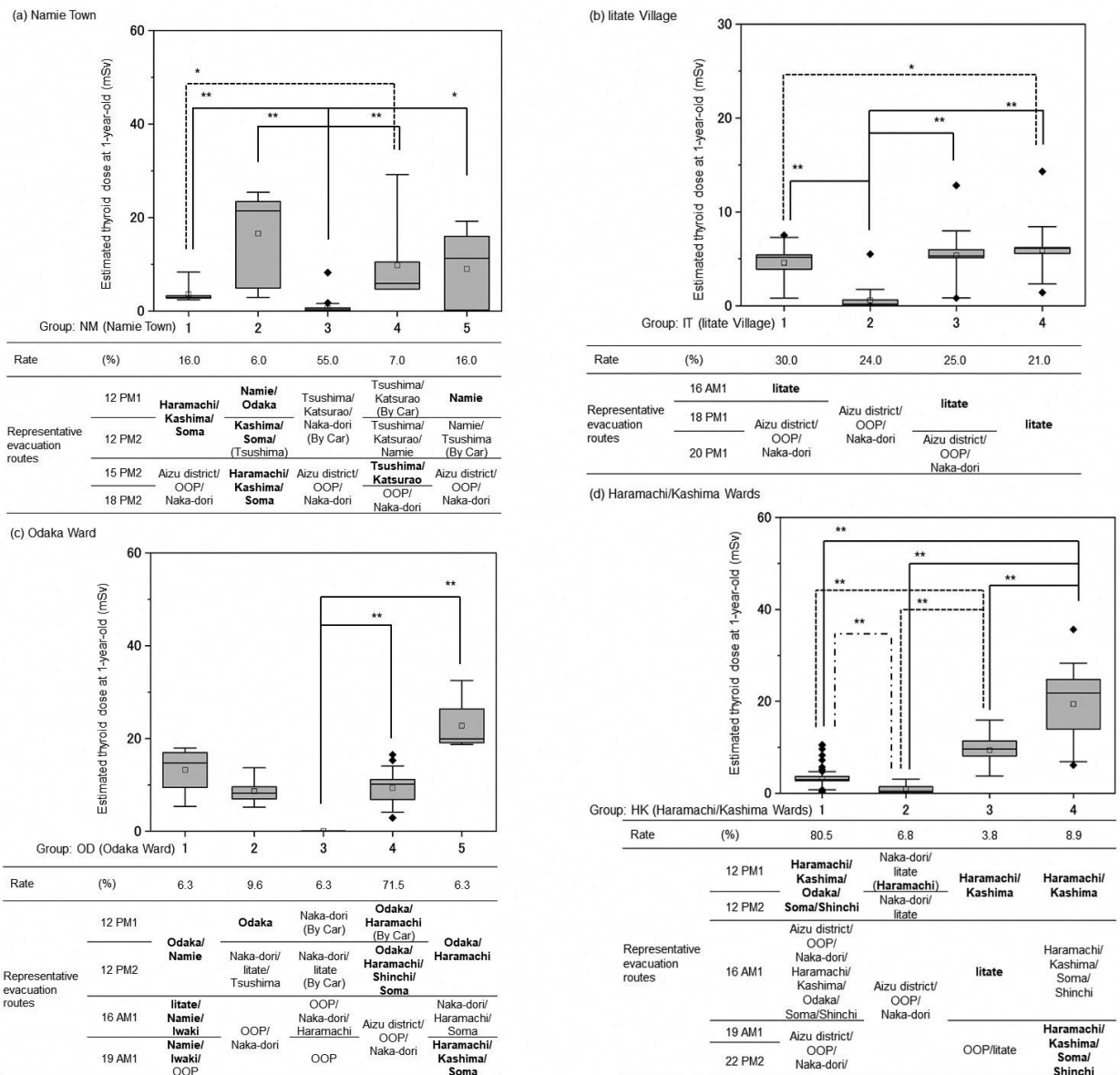


図 2. 浪江町、飯舘村、南相馬市の代表的避難シナリオ

## 考察

本研究では、無作為抽出した行動調査票と改訂された放射性核種の時間空間的分布データベースを用いて TED を推定した。WSPEEDI\_2019DB は、複数地点の一時間毎の大気中  $^{137}\text{Cs}$  濃度測定値を参照して改良されている。更に、屋内退避による吸入被ばく低減係数と日本人の甲状腺ヨウ素取り込み率の低さを反映するための線量換算係数の補正係数を取り入れて線量推計がなされている。これらの手法により私たちは  $^{131}\text{I}$  による TED をできる限り現実的に推計した。私たちの推計値の妥当性を検討するためには、甲状腺の直接計測に基づく TED と比較することが必須である。表 3 は、WSPEEDI\_2019DB と行動調査票の組み合わせで評価した TED と、甲状腺実測値に基づく TED の分布を比較したものである。

Kim 等[7]の簡易甲状腺測定データのデータで 25 パーセントが全て 0 mSv となっているが、解釈する場合注意が必要である。これは甲状腺に  $^{131}\text{I}$  活性が無かったことを意味しているのではなく、むしろ環境中のガンマ線量率が  $0.12 \mu\text{Sv/h}$  と高いバックグラウンドでは甲状腺内の小さな  $^{131}\text{I}$  活性を検出できなかった事を意味していると考えられる。25 パーセントを除くと、私たちのシミュレーション・ベースの TED と甲状腺の  $^{131}\text{I}$  実測値ベースの TED 評価は、非常に良く整合している。この結果、WSPEEDI\_2019DB と個人の行動調査票を組み合わせた線量評価が、一定の妥当性を持つことが証明された。また、Morita ら[9]が広野町からいわき市に避難し、長崎でホールボディカウンター検査を受けた 16 名の TED と、類似の避難行動をとっていた檜葉の子供 (NR2) の TED もまた、よく整合していた。

国連科学委員会 2013 年報告書[10]では、避難市町村の代表的避難シナリオとしてそれぞれ 1 ないし 2 のシナリオを使って線量評価していた。このため同じ市町村の住民の線量の分布は不明であった。行動調査票を使った個人線量の評価は、症例対照研究を実施する上で有用である。本研究は、個人線量の評価する手法を開発し、市町村毎に異なる線量レベルの数個の避難シナリオを抽出した。これらの方法論は、将来の福島甲状腺研究に役立つであろう。

本研究は、幾つかの限界をかかえている。第 1 に大気拡散沈着シミュレーションの持つ限界である。例えば、気象場の再現性に問題が残っている。第 2 に、詳細版の行動調査票は 3 月 25 日までの行動しか記録されていないので、それ以降のプルーム曝露は評価されていない。第 3 に、事故後時間が経ってからアンケートに答えているため、行動調査票は精度に問題がある可能性がある。また、線量評価に必要な (プルームが飛んでいた時間帯の) 詳細な避難ルートは判っていない。第 4 に、個々人が屋内退避した家屋の状況は判っていない。そこで、今回は代わりに日本家屋の多様性を考慮した不確実性の分布として評価した。第 5 に、個々人の食生活や安定ヨウ素剤服用は判っていない。そこで、今回は代わりに日本人の甲状腺ヨウ素取り込み率の分布を使って不確実性の分布として評価した。第 6 に、短半減期核種の寄与割合をプルームの飛んだ日で一律に評価したが、3 月 12 日のプルームは 2 種類の混合物であり、それぞれ  $^{132}\text{Te}$  の寄与割合は違う可能性がある。最後に、100 ないし 300 の 19 歳以下の行動調査票は各年齢階層全体を代表するとして線量評価したが、年齢階層により違う可能性がある。

## 結論

大気拡散沈着シミュレーションの改良、避難シナリオの見直し、日本家屋の屋内退避防護係数の導入、日本人の甲状腺ヨウ素取り込み率の低さを反映するための甲状腺等価線量換算係数の補正項の導入などにより、線量評価の不確実性を減じた結果、福島第一原子力発電所事故吸入被ばくによる甲状腺等価線量の推計値は、甲状腺直接測定に基づく甲状腺等価線量評価値とともに良く整合した。1 歳児の甲状腺等価線量の中央値と 95 パーセントは、それぞれ  $0.6 \sim 16 \text{ mSv}$ 、 $7.5 \sim 30 \text{ mSv}$  の範囲であり、国連科学委員会 2013 年報告書

[10]の評価値より大分小さくなった。

1. Ohba, T., et al., *Reconstruction of residents' thyroid equivalent doses from internal radionuclides after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident*. Sci Rep, 2020. **10**(1): p. 3639.
2. Terada, H., 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**: p. 106104.
3. Kudo, T., et al., *Determination of the Kinetic Parameters for <sup>123</sup>I Uptake by the Thyroid, Thyroid Weights, and Thyroid Volumes in Present-day Healthy Japanese Volunteers*. Health Phys, 2020. **118**(4): p. 417-426.
4. Hirouchi, J., Takahara, S., Komagamine, H., Munakata, M. *Investigation of reduction factor of internal exposure for sheltering in Japan*. 2018.
5. Ohba, T., et al., *Body Surface Contamination Levels of Residents under Different Evacuation Scenarios after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident*. Health Phys, 2017. **113**(3): p. 175-182.
6. Miyatake, H., et al., *Estimation of internal dose from tap water after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident using newly obtained data*. J Radiat Res, 2020. **61**(2): p. 231-236.
7. Kim, E., 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**(1): p. 36-52.
8. Tokonami, S., et al., *Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident*. Sci Rep, 2012. **2**: p. 507.
9. Morita, N., et al., *Spatiotemporal characteristics of internal radiation exposure in evacuees and first responders after the radiological accident in fukushima*. Radiat Res, 2013. **180**(3): p. 299-306.
10. UNSCEAR 2013 Report, V., *Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami*. 2014.