

# 東電福島第一原発事故後の小児甲状腺被ばく線量の再評価—UNSCEAR 2013年報告書より大幅に低くなる

鈴木 元  
Suzuki Gen

## 1. はじめに

2011年3月11日の福島第一原子力発電所の事故（以下、福島原発事故）は、1986年のチェルノブイリ原発事故と共に国際原子力事象評価尺度（INES）のカテゴリー7と評価されている。しかし、同じカテゴリー7と評価されているが、原子炉が露出した状態で黒鉛火災が10日間続いたチェルノブイリ原発事故とは異なり、福島原発事故では原子炉や格納容器の防御機能が一定程度保たれていた。このため、炉心の核分裂生成物のうち、揮発性の高い核種が選択的に漏洩した。原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）2013年報告書によれば、放射性ヨウ素 $^{131}\text{I}$ が100～500 PBq、放射性セシウム $^{137}\text{Cs}$ が6～20 PBq漏洩し、その量はチェルノブイリ原発事故で漏洩した推定放出量のそれぞれ約10%と20%と評価されている。そして、その半分は太平洋に沈着したとされている<sup>1)</sup>。

放射性ヨウ素は、呼吸や汚染食品・水を摂取することにより体内に取り込まれると小さな甲状腺に取り込まれ濃縮されるため、甲状腺の被ばく線量が高くなる。緊急時作業者を除くと、原発事故の放射線健康影響は小児甲状腺癌の増加として顕れる可能性がある。実際、チェルノブイリ原発事故後4～5年後から小児甲状腺癌が増え始め、事故後10年から15年にピークを迎え、2004年のWHOチェルノブイリ・フォーラムによれば4,000名の小児甲状腺癌患者が発症したと報告されている<sup>2)</sup>。このため、福島原発事故後の住民の甲状腺被ばく線量は、将来の

放射線影響を考えるうえで重要である。

## 2. 甲状腺被ばく線量の推計手法

最初に、甲状腺被ばく線量の推計方法について解説する。

甲状腺の吸収線量に係わるパラメータには、甲状腺体積、甲状腺への $^{131}\text{I}$ 取込み率、 $^{131}\text{I}$ の生物学的半減期がある<sup>3)</sup>。ICRPは、各国共通の年齢別の甲状腺体積と、体内に入った後の $^{131}\text{I}$ の代謝動態に関するICRP甲状腺モデルを採用し、単位放射能摂取当たりの甲状腺等価線量換算係数を定義している。吸入被ばくの場合は、大気中の $^{131}\text{I}$ 濃度とその吸入持続時間が判れば、ICRPの年齢別呼吸換気量を使って吸入摂取量が計算でき、甲状腺等価線量換算係数を使って甲状腺等価線量を計算できる。同様に、経口被ばくの場合には、飲料水や食品の $^{131}\text{I}$ 濃度と飲料水や食品の摂取量が判れば、 $^{131}\text{I}$ 摂取量が計算でき、経口摂取の甲状腺等価線量換算係数を用いて甲状腺等価線量を計算できる。

実際には、甲状腺の体積や $^{131}\text{I}$ 取込み率や $^{131}\text{I}$ の生物学的半減期には個体差があり、ICRPのモデルは平均的世界市民あるいはリファレンス・パーソンの代謝モデルである。日常的に安定ヨウ素の摂取量が多い日本人の場合は、甲状腺の $^{131}\text{I}$ 取込み率が10～20%とICRPモデルの30%より低いことが以前より報告されていた。年齢別の甲状腺体積がICRPのリファレンス・パーソンと同じであるなら、日本人の場合にはICRPの甲状腺等価線量換算係数をその

まま使うと、2～3倍過大評価になる。しかしながら、現代の日本人の甲状腺体積がICRPモデルより小さいという指摘もあり、線量評価の不確実性の一因となっていた。

最も信頼性が高い手法は、甲状腺に蓄積している<sup>131</sup>I活性を低バックグラウンド環境下で専用機器（甲状腺モニタやホールボディカウンタ）を使ってγ線スペクトル解析を行う手法である。この方法では、事故前48時間の安定ヨウ素の摂取量に応じて変動する<sup>131</sup>I甲状腺取込み率を反映した形で甲状腺内の<sup>131</sup>I活性を測定する。急性摂取だったのか、慢性あるいは分割摂取だったのが明確であれば、個人の甲状腺等価線量は高い精度で推計できる。事故後、長崎大のグループが、福島からの避難者や帰還した作業員をこの手法で測定していた<sup>4)</sup>。次に信頼性が高い手法は、バックグラウンドの問題や衣服等の汚染が問題ではあるが、甲状腺の<sup>131</sup>I活性を携帯可能な簡易型のγ線スペクトル解析機器を用いて現場で測定する手法である。事故後、弘前大の床次らはこの手法で避難住民の測定を行っている<sup>5)</sup>。そして精度は低くなるが、頸部の総γ線量率を測定する簡便的な手法もある。この手法は1,080名の小児に対して実施された<sup>6)</sup>。しかし、福島原発事故後に甲状腺に蓄積していた<sup>131</sup>I活性を測定された住民の総数は、1,200名に満たない。

甲状腺実測値が無いが住民の居住地区の<sup>131</sup>Iの大気濃度や水道や食品の連続測定値があるのなら、それらの数値を使って推計する手法がある。しかし、環境中の<sup>131</sup>Iの大気濃度の連続測定は、限られた場所でのみ記録されており、住民全体の線量の分布を推計することは難しい。

このような測定値のない場合には、大気拡散シミュレーション（ATDM）という手法により居住地区の<sup>131</sup>Iの大気濃度や水道の汚染濃度を推計する。ATDMとは、原子炉から放出される核種の濃度とその化学型や粒子径の経時変化（ソースタームという）と気象場データを組み合わせて、環境中の放射性核種濃度の時間空間的広がりを推計し、土壌沈着量や空間線量率を推計する手法である。経時的な大気中の核種濃度や空間線量率の実測値があると、ATDMシミュレーションの精度を高めることができる。福島原発事故後には、事故初期の実測値が少なかったこともあり、UNSCEARは、寺田ら<sup>7)</sup>によっ

て報告されたソースタームを使い、ATDMにより線量評価を行っている。

### 3. UNSCEAR 2013 報告書における線量評価

表1にUNSCEAR 2013年報告書の福島県の避難住民の1歳児甲状腺吸収線量の推計値を示す。双葉町や楢葉町等2つの評価値が記載されている市町村があるが、避難のタイミングや避難場所の違いのある2つの避難シナリオに基づいて線量評価したためである。一見して福島県内の避難先での線量が高いことが判る<sup>1)</sup>。この理由はUNSCEARが福島県内での経口摂取による甲状腺吸収線量を一率1歳児32.8 mGy、10歳児15.2 mGy、成人7.8 mGyと高めに評価したためである。UNSCEARは、2012年10月までに公表されたデータを使い報告書をまとめたが、いくつかの保守的な仮定で線量評価していた。第1に、UNSCEARが利用した食品の汚染データは、自治体が汚染レベルの高いと思われる食品を選択し流通前に測定していたもので、無作為抽出されたデータではない。また、暫定基準値を超した場合は流通制限を行ったので、実際は食卓にのぼらなかった汚染食品のデータである。第2に、UNSCEARは、福島県では100%福島県産の食品を消費していたと仮定していた。筆者らの調査で、事故前年の福島県産の市場占有率は25%以下であり、事故後は震災の影響で集荷や流通が止まったため、更に福島県産の農産物の消費は落ち込んでいたことが判っている<sup>8)</sup>。食品に関する過大評価以外にも、第3に、UNSCEARは、日本人の<sup>131</sup>I甲状腺取込み率の低さは考慮していなかった。第4に、UNSCEARは、屋内退避による吸入被ばくの防護はないものとして線量評価していた。別の言い方をすれば、冬3月、福島県民は1日中屋外で生活していたと仮定している。第5に、UNSCEARが採用していた代表的18避難シナリオの代表性にも問題があった。UNSCEAR 2013報告書が発表された当時より、上記の1,080名の小児甲状腺実測値や事故後3～4か月後の<sup>137</sup>CsのWBC実測値に基づく評価値より推定される甲状腺等価線量より表1の推計値は過大評価になっているとの指摘があった。

### 4. 線量評価の不確実性を低減するための研究

甲状腺実測値が少ないため、福島県民の甲状腺被

表1 UNSCEAR 2013 報告書 Table C-18.6 1 歳児甲状腺吸収線量 (mGy)

	富岡町	大熊町	双葉町	楢葉町	浪江町	田村市	南相馬市	広野町	川内村	葛尾村	飯館村	川俣町・山木屋
放医研シナリオ	1	2	3, 4	5, 6	7, 13	8	9, 17	10	11	12, 14	15, 16	18
避難先	郡山市	田村市	さいたま市	田村市・会津美里	二本松市	郡山市	福島市・南相馬市	小野町	郡山市	福島市	福島市	川俣町
避難途上の線量	5.2	0	12, 16	46, 35	37, 59	1.9	6.4, 45	0	5	0, 46	52, 53	63
避難先の線量	42	36	3, 3	36, 34	44, 24	42	47, 2.3	34	42	49, 27	3.8, 2.7	1.9
合計線量	47	36	15, 19	82, 69	82, 83	44	53, 47	34	47	49, 73	56, 56	65

ばく線量の分布を知るためには、ATDM シミュレーションをベースに行わざるをえない。このため、第1に ATDM シミュレーションの精度を高めるための研究が重要である。ATDM シミュレーションを高めるためには、環境中の連続した実測値が欠かせない。UNSCEAR 2013 年報告書の時は、主に地表面に沈着した  $^{131}\text{I}$  や  $^{137}\text{Cs}$  の濃度分布を使い ATDM シミュレーションの最適化を図っていたが、福島県内の  $^{131}\text{I}$  測定ポイント数は未だ少なく、また、どのような時間経緯で地表面沈着していったのかが不明で、避難途上の吸入被ばくの評価には大きな不確実性があった。この問題を解消したのは、浮遊粒子状物質 (SPM) モニタリングステーションのフィルタに残っていた放射性セシウムの1時間毎の連続測定値である<sup>9,10)</sup>。それまでは3月15日以降に茨城や千葉で観察されていた放射性ヨウ素や放射性セシウムの連続測定データはあったが、地理的な広がりを知ることはできなかった。SPM のデータは、3月12日に原発から北方向に流れた放射性プルームも捉えており、福島県の浜通り、中通り、東京都や宮城県等プルームの地理的経時的な大気中の放射性セシウム濃度変化に関するデータを提供してくれた。これにより、第1の ATDM シミュレーションの不確実性を低減させるための研究が進展した。JAEA は、ATDM プログラムの一種である緊急時環境線量情報予測システム (WSPEEDI) の計算プログラムを5年かけて最新化し、SPM データを用いて ATDM シミュレーション及びソースタームの最適化を行った。その成果は、時間空間放射能濃度データベース (WSPEEDI\_2019DB) として公開された<sup>11)</sup>。

第2に、JAEA の広内らのグループは、日本家屋を用いて家の換気率を実測し、屋内退避による吸入被ばくの防護効果に関する論文を発表した<sup>12)</sup>。それによれば、建築コードの変遷により建造時期が換気

率に影響を与えており、更に、風速や屋内退避経過時間等が防護効果に関係していることが判った。筆者らは、福島県の家屋の建造年代別割合を考慮し、風速 2.5 m/s、屋内退避経過時を6時間としたときの屋内退避による吸入被ばく防護効果を0.5、その不確実性の確率密度分布を最小値 0.1、ピーク値 0.5、最大値 0.95 の三角分布として屋内退避の防護効果を評価し、その不確実性幅もモンテカルロシミュレーションにより評価した。

第3に、日本人の甲状腺ヨウ素代謝の特性と甲状腺体積に関して、東大の楠原らのグループが報告した<sup>13)</sup>。それによれば、日本人の甲状腺重量の分布は、ICRP のリファレンス・パーソンの年齢別の値とほぼ同じであること、しかし、放射性ヨウ素の甲状腺取込み率は  $18.6 \pm 6.0\%$  と低いことが判った。この報告を根拠に、筆者らは ICRP の甲状腺等価線量換算係数の補正項 ( $= (18.6 \pm 6.0) / 30$ ) を提案し、線量評価に応用し、その不確実性幅もモンテカルロシミュレーションにより評価した。

第4に、筆者らは、19歳以下の避難住民の行動記録を南相馬市 300名、富岡町、楢葉町、双葉町、大熊町、浪江町、飯館村からそれぞれ100名ずつ無作為抽出し、市町村毎の避難シナリオの代表性を高めた。そして、100ないし300の避難行動をそれぞれの市町村の各年代の子供の代表的行動パターンと仮定し、WSPEEDI\_2019DB を組み合わせて吸入被ばく線量及び飯館村に関しては吸入被ばくと共に飲水による経口被ばく線量を評価した<sup>14)</sup>。

その他、日本人の年齢階層別の水道水等の摂取量をアンケート調査し、摂取量の平均値とその分布を調べて線量評価に使った他、短半減期核種の寄与に関しては、3月12日に避難した住民の衣服の核種分析結果を利用して評価した。

表2 短半減期核種 (<sup>131</sup>I, <sup>132</sup>I/<sup>132</sup>Te, <sup>133</sup>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	楢葉町	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	5.3	1.2	2.3	2.9	5.7	15	6.3	4.5
(95% UI <sup>§</sup> )	(1.3, 11)	(0.3, 2.5)	(0.6, 4.7)	(0.7, 6.0)	(1.4, 12)	(3.7, 31)	(1.6, 13)	(1.1, 9.3)
中央値	1.5	0.6	1.0	2.4	0.9	16	4.8	5.6
(95% UI <sup>§</sup> )	(0.4, 3.1)	(0.1, 1.2)	(0.3, 2.1)	(0.6, 5.1)	(0.2, 2.0)	(4.0, 33)	(1.2, 10)	(1.4, 12)
95パーセンタイル	30	7.5	9.7	9.1	30	25	19	9.1
(95% UI <sup>§</sup> )	(7.5, 63)	(1.9, 16)	(2.4, 20)	(2.3, 19)	(7.4, 62)	(6.3, 53)	(4.9, 41)	(2.3, 19)

\* Ohba 論文<sup>15)</sup>のTable 2を日本語に翻訳し引用。

§ 95%不確実性範囲

## 5. 再評価された小児甲状腺等価線量と妥当性検討

表2は、筆者らのグループが発表した1歳児の甲状腺等価線量評価値である<sup>14)</sup>。避難行動の多様性を反映した中央値、平均値及び95パーセンタイルを示している。95%不確実性幅は、屋内退避の防護効果及び甲状腺<sup>131</sup>I取込み率の補正項の不確実性を評価している。屋内退避効果の少ない建造物に居住していた場合や甲状腺取込み率の高い個人は、95%不確実性幅の上限に近い線量と考えて良い。表2に示すように、避難7市町村の1才児の甲状腺等価線量の平均値は、1.2~15 mSvとUNSCEARの評価値より低くなっている。線量の平均値が最も高かったのは、3月12日の避難時期が遅れ、かつ、プルームの流れる北方向に避難した南相馬市小高区の住民である。一方、95パーセンタイルで見ると、3月12日のプルームに避難前ないし避難途上に原発に近い自宅近くでばく露した双葉町と浪江町の住民で、30 mSvと評価された。水道水の経口摂取が多かった飯館村に関しては、個人毎に水道水からの経口被ばく線量を含めて計算した値を表2に示しているが、その他の市町に関しては水道水からの甲状腺等価線量が1~2 mSv追加になる。自家野菜を消費していた住民は例外的にいると思われるが今回の評価からは除外している。

紙面の都合で具体的な表の掲載は省くが、上記論文の中で筆者らは放医研の金らが1,080名の小児甲状腺等価線量を再評価した論文<sup>15)</sup>から、ばく露日を3月12日に変更した値として比較し、シミュレーションの妥当性を検討している。また、南相馬市小高地区から避難した成人に関しては、弘前大の床次から<sup>5)</sup>実測値を入手し、ばく露日を3月12日として再評価した値と比較している。詳細は論文を参照してもらいたいが、筆者らの評価値は、金氏や床次氏の実測

値ベースの評価値と極めて良く整合している。周辺市町村の甲状腺等価線量の推計も引き続き進めており、未発表データであるが、いわき市及び川俣町の子供達に関しても、筆者らの推計値は金氏らの甲状腺実測値に基づく甲状腺等価線量と整合している。

## 6. 最後に

現在、UNSCEARは福島原発事故後の甲状腺吸収線量の再評価を進めており、この文章が皆さんに届く頃には、もしかするとUNSCEARのホームページで公開されているかもしれない。UNSCEARは、2013年以降に報告された論文を精査し、過大評価だったUNSCEAR 2013報告書をより現実的な線量評価に改める方針だとうかがっている。本小論が、甲状腺線量評価の改訂作業を理解するうえで参考になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) UNSCEAR 2013 Report
- 2) WHO, The Chernobyl Forum: 2003-2004
- 3) Ishikawa, T., et al., *J.Rad.Prot.*, **38**(4),1253-68 (2018)
- 4) Morita, N., et al., *Rad.Res.*, **180**(3),299-306 (2013)
- 5) Tokonami, S., et al., *Sci.Rep.*, **2**, 507 (2012)
- 6) Kim, E., et al., *Rad.Prot.Dos.*, **171**(3),398-404 (2016)
- 7) Terada, H., et al., *J.Env.Rad.*, **112**, 141-54 (2012)
- 8) Hirakawa, S., et al., *Shokuhin eiseigaku zasshi*, **58**(1), 36-42 (2017)
- 9) Tsuruta, H., et al., *Sci.Rep.*, **4**, 6717 (2014)
- 10) Oura, Y., et al., *J Nucl Radiochem Sci.*, **15**, 15-26 (2015)
- 11) Terada, H., et al., *J.Env.Rad.*, **213**, 106104 (2020)
- 12) Hirouchi, J., et al., ASTRAM2018-010 (2018)
- 13) Kudo, T., et al., *Health phys.*, **118**(4), 417-26 (2020)
- 14) Ohba, T., et al., *Sci.Rep.*, **10**(1), 3639 (2020)
- 15) Kim, E., et al., *Health phys.*, **118**(1), 36-52 (2020)

(国際医療福祉大学クリニック)