

公衆被ばく線量限度とリスク等価な 帰還時被ばく線量の推計

下村 遼平^{1*}、近藤 均²、島田 洋子¹、米田 稔¹

¹ 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C クラスター)

² 東芝環境ソリューション株式会社 (〒230-0034 神奈川県横浜市鶴見区寛政町 20-1)

Estimation of Exposure Dose at the Time of Return Which is Risk Equivalent to the Dose Limit for General Public

Ryohei SHIMOMURA^{1*}, Hitoshi KONDO², Yoko SHIMADA¹, and Minoru YONEDA¹

¹Graduate School of Engineering, Kyoto University

(C Cluster, Kyoto University Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8540, Japan)

²TOSHIBA Environmental Solutions Corp.

(20-1 Kanseicho, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa 230-0034, Japan)

Summary

Evacuation orders after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident will be lifted with the condition that annual cumulative dose estimated from the air dose rates monitored in the evacuation areas must be 20 mSv/year or lower and primary living infrastructure has been sufficiently restored. However, it is possible that evacuees might hesitate to return because the value 20 mSv/year exceeds the annual dose limit for the general public: 1mSv. And additional exposure dose which an individual person is exposed after returning home will show a wide range depending on age and lifestyle. With regard to these situations, we created some scenarios for evacuees' lifestyle after returning home classified by gender, age and working status and estimated the ambient radiation dose rate in the place to return which led to be equivalent to the dose limit for general public: 1mSv. We calculated individual external dose directly using cumulative ambient radiation dose and ignored an internal exposure and an effect of biological half-life of ¹³⁷Cs. As a result, it is revealed that the ambient radiation dose rate in the case of return by aged evacuees or people who will spend long time indoor like office worker or the unemployed after returning is higher than that in the other cases. The estimation result in this study can show evacuees a criterion for deciding to return.

Key Words: Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Return for evacuees, Exposure dose after return, Multiplicative risk model, Individual future scenarios

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所の事故後の放射線防護の基準は、国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告に基づいて設定されている。ICRPは、2007年勧告¹⁾において被ばくの状況を3つに分類している。1つ目は緊急時被ばく状況であり、これは原子力事故などによる高度の汚染による健康影響を避けたり減らしたりするために緊急の対策を必要とする状況のことである。2つ目は現存被ばく状況であり、これは緊急事態が収束し安定

した後に、その後の長期の被ばくについて適切な管理を施すべき状況のことである。3つ目は計画被ばく状況であり、これは線源の意図的な導入と運用をともなう状況、つまり平常時における状況のことである。緊急時被ばく状況と現存被ばく状況においては防護の最適化の原理に基づいてそれ以下にすることが望ましい線量、いわゆる参考レベルが設定される。参考レベルは選択可能な数値のバンドからそれぞれの状況に応じて政府などによって選択される。ICRPの2007年勧告では参考レベル

*Corresponding author: E-mail: shimomura.ryohei.68w@st.kyoto-u.ac.jp

のバンドを、緊急時被ばく状況では 20 mSv/年から 100 mSv/年、現存被ばく状況では 1 mSv/年から 20 mSv/年に通常設定するべきであると勧告されていることを考慮し、日本政府は福島第一原発事故後、周辺住民に対し緊急時被ばく状況の参考レベルのバンドの下限值である 20 mSv/年を基準として避難指示を行った。

ICRP は、計画被ばく状況において、全ての線源からのいかなる個人の総線量も適切な限度を超えるべきではないとして、線量限度を設定している。公衆被ばくの線量限度としては、実効線量で 1 mSv/年が勧告されている。これは、1990 年勧告の付属書 C²⁾におけるリスク予測モデルを用いたリスクの推計結果と、ラドン²²²の被ばくを除いた自然放射線源からの年実効線量はおおよそ 1 mSv であり、海拔の高いところなど地域によってはその 2 倍であることを考慮して決定された。日本政府は、計画被ばく状況における平常時の公衆被ばくの線量限度が 1 mSv/年であること、現存被ばく状況での参考レベルのバンドが 1 mSv/年から 20 mSv/年であることを考慮し、最終的に追加被ばく量を 1 mSv/年以下にすることを目標にしている。

よって、福島第一原発事故後の避難指示の基準は 20 mSv/年とされ、最終的な目標は 1 mSv/年以下とされている。年間 20 mSv 以下になることが確実になり、インフラ整備などが完了すれば避難指示が解除されるが、帰還の際、計画被ばく状況における平常時の公衆被ばくの線量限度である 1 mSv/年より被ばく量が多くなることから不安を感じ帰還をためらう人が出る可能性がある。また、同じ空間線量率の場所に帰還する場合でも、年齢やライフスタイルによってリスクは大きく異なると考えられる。例えば、若者と高齢者では、帰還後の生涯にわたる被ばく量の予測値は若者のほうが大きくなり、放射線が原因で死亡するリスクも高くなると考えられる。また、屋外滞在時間の長い農業従事者と屋外滞在時間の短い事務従事者では、前者のほうが被ばく量は大きくなり、リスクも高くなると考えられる。

以上の状況をふまえ、本研究では、福島第一原発事故からの避難者が帰還した場合に、性・年齢・職業別に分類された個人の将来シナリオを設定し、各個人分類について帰還時の空間線量率がいくらであれば、平常時における最大のリスクである誕生から生涯にかけて 1 mSv/年を被ばくし続けた場合とリスク等価となるかを 5 つのリスク指標を用いて推定した。

2. リスク評価モデル

ICRP1990 年勧告の付属書 C²⁾では相加リスク予測モデルと相乗リスク予測モデルにより、被ばくによるリスクの算定を行った。相加リスク予測モデルは、「自然の癌死亡確率（追加の被ばくの影響を受けない場合の癌死亡確率）と放射線による過剰癌死亡確率は独立している」という仮定に立っている。相乗リスク予測モデルは、「自然の癌死亡確率と放射線による過剰癌死亡確率との間に単純な比例関係がある」という仮定に

立っている。いずれのモデルも単純化をしすぎているとされるが、相乗リスク予測モデルの方が疫学的な観察には適合すると考えられている³⁾。

ICRP1990 年勧告²⁾での解析は、様々な人間集団の算術的な平均値をもとに行われた。中村(1992)⁴⁾は日本人集団に対して ICRP と同様に、相加モデルと相乗モデルを用いて公衆被ばくと職業被ばくによるリスクの計算を行い、ICRP の計算との大きな差異が認められないことを示した。

そこで、本研究では、これらを勘案して、日本人集団を対象に相乗リスク予測モデルを用いてリスク評価を行った。

(1) バックグラウンド生存率 $L(u)$ 、 バックグラウンド死亡確率 $B(u)$

相乗モデルによるリスクの推計には、バックグラウンド生存率 $L(u)$ のほかに、白血病およびその他の癌のバックグラウンド死亡確率 $B(u)$ のデータが必要である。本研究では、バックグラウンド生存率を、厚生労働省の統計による 2013 年（平成 25 年）簡易生命表⁵⁾を用いて 1 歳ごとの各年齢について設定した。白血病およびその他の癌のバックグラウンド死亡確率は、2013 年（平成 25 年）人口動態調査⁶⁾を用いて設定した（表 1）。人口動態調査⁶⁾では、0 から 4 歳までは 1 歳ごと、5 歳以上では 5 歳ごとに死亡数が与えられているが、計算には 1 歳ごとのデータが必要なので、5 歳ごとのバックグラウンド死亡確率を線形補間することでデータを補った。

(2) リスク係数 (C_D)

本研究では、ICRP1990 年勧告²⁾での計算と同様に、原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) 1988 年報告書⁷⁾に記載されたリスク係数を用いた（表 2）。表 2 で示しているのは 1 Sv あたりの過剰相対リスク、つまり追加の被ばくによる過剰癌死亡確率がバックグラウンド死亡確率の何倍になるかを表したものである。このリスク係数は広島と長崎の原爆被ばく者における癌死亡確率に基づいて算出されたものであることから、ICRP の計算でも行われたように、高線量・高線量率被ばくと比較して、低線量・低線量率被ばくでは生物学的効果が半分になると仮定して、線量・線量率効果係数 (DDREF) を 2 とした。

(3) リスク指標 (I_R)

本研究では、帰還後の追加の被ばくによるリスクを、癌死亡確率や平均余命などの指標を用いて示すことが、避難者が帰還の判断をする際に有用な情報として提供できると考え、以下の 5 つのリスク指標を用いて、福島第一原発事故からの避難者が帰還した場合に、性・年齢・帰還後の職業シナリオごとに帰還時の空間線量率がいくらであれば、誕生から生涯にかけて 1 mSv/年を被ばくし続けた場合と同じ大きさのリスクになるかを算出した。なお、a) c) d) e) は本研究のオリジナルの指標であ

表1 バックグラウンド死亡確率

男性			女性		
年齢	1000 人あたりの死亡人数 (人)		年齢	1000 人あたりの死亡人数 (人)	
	白血病	白血病以外癌		白血病	白血病以外癌
0	0.01	0.01	0	0.01	0.01
5	0.01	0.01	5	0.00	0.02
10	0.01	0.01	10	0.00	0.01
15	0.01	0.02	15	0.01	0.01
20	0.01	0.03	20	0.01	0.02
25	0.01	0.03	25	0.01	0.04
30	0.01	0.06	30	0.01	0.10
35	0.01	0.12	35	0.01	0.19
40	0.02	0.24	40	0.01	0.34
45	0.03	0.49	45	0.01	0.60
50	0.03	1.09	50	0.02	1.00
55	0.05	2.18	55	0.04	1.45
60	0.10	4.14	60	0.05	2.19
65	0.14	6.37	65	0.07	2.85
70	0.20	9.26	70	0.11	3.85
75	0.31	13.97	75	0.15	5.83
80	0.43	20.86	80	0.19	8.71
85	0.50	27.72	85	0.26	12.41
90	0.48	33.60	90	0.22	16.03
95	0.50	37.60	95	0.22	18.30
100	0.29	31.57	100	0.10	16.69

出典:「平成 25 年簡易生命表の概況」厚生労働省 HP (<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/life13/>)

表2 1 Sv あたり過剰相対リスク係数 (UNSCEAR, 1988)

被ばく時 年齢	男		女	
	白血病	白血病以外 癌	白血病	白血病以外 癌
	ERR/Sv	ERR/Sv	ERR/Sv	ERR/Sv
0- 9	18.7	1.06	19.5	2.06
10-19	4.4	0.65	4.6	1.27
20-29	5.6	0.57	5.8	1.11
30-39	3.9	0.24	4.1	0.48
40-	3.3	0.18	3.4	0.34

出典:UNSCEAR: Sources, effects and risks of ionizing radiation, 1988
Report to the General Assembly, with annexes, New York (1988)

り、ICRP 1990 年勧告の付属書 C の計算では用いられていない。

a) 最大の年死亡確率 ($\max(\text{dr}/\text{du})$)

最大の年死亡確率は、追加の被ばくを受けたことによる無条件年死亡確率 dr/du の最大値である。無条件年死亡確率 dr/du は、年齢 T から被ばくを開始する人が、追加の放射線が原因となり年齢 u で死亡する確率である。無条件年死亡確率は、以下の式①のように条件付年死亡確率 dp/du と修正生存率 $S(T, u)$ の積で求められる。

$$\frac{\text{dr}}{\text{du}} = S(T, u) \cdot \frac{\text{dp}}{\text{du}} \quad \dots\dots\dots \text{式①}$$

条件付年死亡確率 dp/du は、定義する年齢 u において被ばく者が生存している条件下での追加の被ばくに由来する死亡確率である。被ばくによる年死亡確率は、最小潜伏期を過ぎたのちに増大する。本研究では、UNSCEAR1988 年報告書⁷⁾の仮定のもとに、白血病の最小潜伏期を 2 年、プラトーを 40 年とし、他の癌は最小潜伏期を 10 年、プラトーを無制限として計算を行った。年齢 T から被ばくを開始したとき、年齢 i における被ばく量を Di 、白血病による過剰相対リスク係数を $C(L, \text{Di})$ 、白血病以外の癌による過剰相対リスク係数を $C(C, \text{Di})$ とすると、条件付年死亡確率は、バックグラウンド死亡確率 $B(u)$ を用いて以下の式②のように求められる。

$$\frac{\text{dp}}{\text{du}} = \begin{cases} 0 & (u \leq T+2) \\ B(u) \sum_{i=T}^{u-2} C(L, \text{Di}) & (T+2 < u \leq T+10) \\ B(u) \left\{ \sum_{i=T}^{u-2} C(L, \text{Di}) + \sum_{i=T}^{u-10} C(C, \text{Di}) \right\} & (T+10 < u \leq T+42) \\ B(u) \left\{ \sum_{i=u-42}^{u-2} C(L, \text{Di}) + \sum_{i=T}^{u-10} C(C, \text{Di}) \right\} & (T+42 < u) \end{cases} \quad \dots\dots\dots \text{式②}$$

修正生存率 $S(T, u)$ は、年齢 T まで生存している集団の、追加の被ばくによって修正された年齢 u における生存率である。年齢 u での修正生存率はバックグラウンドの生存率 $L(u)$ を用いて以下の式③で求められる。

$$S(T, u) = \frac{L(u)}{L(T)} \cdot \prod_{i=T}^u \left(1 - \frac{dp}{di} \right) \quad \text{式③}$$

b) 寄与生涯癌死亡率 (R)

寄与生涯癌死亡率 R は、生涯において追加の被ばくによる癌で死亡する確率を表す。寄与生涯癌死亡率は無条件年死亡率 dr/du の生涯積分で与えられ、年齢 T から被ばくし始める場合は以下の式④のように求められる。

$$R = \int_T^{\infty} \frac{dr}{du} du \quad \text{式④}$$

c) 損失余命 ($\Delta e(u)$)

損失余命 $\Delta e(u)$ は、年齢 T から被ばくを開始する場合の、追加の被ばくによって減少する平均余命のことであり、単位は年である。バックグラウンド平均余命 $e(u)$ から修正平均余命 $e(T, u)$ をひくことで求められる。

$$\Delta e(u) = e(u) - e(T, u) \quad \text{式⑤}$$

バックグラウンド平均余命 $e(u)$ は、年齢 u における平均余命であり、簡易生命表⁵⁾に記載されている。また、以下の式のようにバックグラウンド生存率 $L(u)$ を用いて求めることができる。

$$e(u) = \frac{\int_u^{\infty} L(x) dx}{L(u)} \quad \text{式⑥}$$

修正平均余命 $e(T, u)$ は、年齢 T から被ばくを開始する場合の、年齢 u における平均余命である。修正平均余命は修正生存率 $S(T, u)$ を用いて以下の式⑦で求められる。

$$e(T, u) = \frac{\int_u^{\infty} S(T, x) dx}{S(T, u)} \quad \text{式⑦}$$

d) 損失余命割合 ($\Delta e_{\text{rate}}(u)$)

損失余命割合 $\Delta e_{\text{rate}}(u)$ は損失余命 $\Delta e(u)$ を割合で表したものである。損失余命 $\Delta e(u)$ をバックグラウンド平均余命 $e(u)$ で除すことで求められる。

$$\Delta e_{\text{rate}}(u) = \frac{\Delta e(u)}{e(u)} \quad \text{式⑧}$$

e) 平均寿命まで生存する確率の減少 (Δp)

平均寿命とは0歳時における平均余命のことであり、バックグラウンドの平均寿命は $e(0)$ である。平均寿命まで生存する確率の減少は、追加の被ばくによってバックグラウンドの平均寿命まで生存する確率の減少分を表す。

$$\Delta p = \frac{L(e(0))}{L(T)} - S(T, e(0)) \quad \text{式⑨}$$

表3 誕生から生涯にかけて1 mSv/年を被ばくし続けた場合のリスク

リスク指標	男性	女性
a) 最大の年死亡率 (%)	0.022	0.027
b) 寄与生涯癌死亡率 (%)	0.56	0.70
c) 損失余命 (年)	0.069	0.096
d) 損失余命割合 (%)	0.086	0.111
e) 平均寿命まで生存する確率の減少 (%)	0.25	0.36

(4) 年間1 mSvの生涯被ばくのリスク ($I_{R,dl}$)

誕生から生涯にかけて1 mSv/年を被ばくし続ける場合のリスクを(2)で示した5つのリスク指標を用いて男女別に計算した。計算結果を表3に示す。

3. 推計結果と考察

(1) 設定

a) 個人分類および個人分類別生活時間の設定

本研究では、年齢・職業を表4に示す10の個人分類を設定した。さらに、8つの滞在場所(学校(校庭)、公共施設(屋外)、職場(屋外)、道路、住宅、学校(校舎)、公共施設(屋内)、職場(屋内))を設定した。表4に示した個人分類を(a)～(j)の10個のカテゴリーに分類し、2011年(平成23年)社会生活基本調査⁸⁾やベネッセ教育研究所の第4回幼児の生活アンケート⁹⁾を参考にして、滞在場所ごとの1日の生活時間を設定した(表5)。なお、個人分類(a)の乳児に関しては、生活時間に関する文献が得られなかったため、仮定により滞在場所ごとの1日あたりの生活時間を設定した。

b) 個人分類別外部被ばく量の推計

放射線医学総合研究所と日本原子力研究開発機構による調査結果¹⁰⁾によると、個人の標準的な体型の成人男性が着用した個人線量計で実測した積算個人線量は、空間線量率から推定される積算空間線量に0.7を乗じることで推計できる。しかし、

表4 職業による個人分類

個人分類	年齢	職業
a	0	乳児
b	1～2	保育園児
c	3～5	幼稚園児
d	6～12	小学生
e	13～15	中学生
f	16～18	高校生
g	19～64	農業従事者
h	19～64	事務従事者
i	65～	農業従事者
j	65～	無業者

表5 個人分類別滞在場所ごとの1日あたりの生活時間(時間/日)

滞在場所	個人分類									
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
学校(校庭)	0.0	1.4	1.4	0.8	1.4	1.7	0.0	0.0	0.0	0.0
公共施設(屋外)	1.0	1.1	1.1	1.0	0.8	0.5	0.3	0.4	0.3	0.8
職場(屋外)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	0.5	5.9	0.0
道路	0.8	0.7	0.7	1.0	1.0	1.5	0.7	1.4	0.7	0.5
住宅	21.2	14.5	16.8	15.4	14.9	14.4	15.6	15.2	15.6	20.9
学校(校舎)	0.0	5.1	2.8	4.7	4.6	4.7	0.0	0.0	0.0	0.0
公共施設(屋内)	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	0.9	0.9	1.2	0.9	1.8
職場(屋内)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	5.3	0.5	0.0

個人により体格は異なり、特に子どもの体は小さいので、本研究では安全側の仮定として0.7を乗じず計算して、個人分類xがCs由来の空間線量率d(μSv/時間)の場所を中心に生活する場合の個人の1年間のCs由来の外部被ばく量D_x(d)(mSv/年)を以下の式⑩で求める。

$$D_x(d) = 365 \left\{ \frac{d}{1000} \cdot T_x + 0.4 \cdot \frac{d}{1000} \cdot (24 - T_x) \right\} \dots \text{式⑩}$$

式⑩において、学校(校庭)、公共施設(屋外)、職場(屋外)、道路での1日あたりの滞在時間の合計をT_x(時間/日)としている。また、遮蔽による低減係数を、住宅、学校(校舎)、公共施設(屋内)、職場(屋内)では0.4とした。

放射線医学総合研究所・日本原子力研究開発機構は、生活パターンを仮定し、調査地点の空間線量率の測定値から2013

年9月時点での川内村、田村市都路町、飯舘村の住民について外部被ばく量を推計した結果を報告している¹⁰⁾。また、郡山市は定期的に未就学児童及び小・中学生の個人積算線量の測定結果と年間推計値を公表している。そこで、本研究で提案する推計方法を用いて、2013年9月時点の川内村と郡山市での個人分類別のCs由来の外部被ばく量を推定し、放射線医学総合研究所と日本原子力研究開発機構による推計結果及び郡山市の年間推計値^{11,12)}と比較した。その結果を表6に示す。なお、推計には原子力規制委員会が集計した川内村と郡山市の空間線量率のデータ¹³⁻¹⁶⁾を用い、Cs由来ではないバックグラウンドの空間線量率を0.04(μSv/時間)とした。観測地点によって空間線量率が異なるため、表6の外部被ばく量の推定結果は幅をもつが、既推定結果との大きな差は見られない。よって、本研究の推計は妥当であるといえる。

表6 2013年9月の川内村、郡山市の個人分類別外部被ばく量の推計結果(mSv/年)

職業	川内村		郡山市	
	本研究	既推定結果 ^{*1}	本研究	既推定結果 ^{*2,*3}
乳児	0.6～2.6	-	1.0～2.2	-
保育園児	0.7～2.8	-	1.1～2.4	～2.6
幼稚園児	0.7～2.8	-	1.1～2.4	～2.6
小学生	0.7～2.7	-	1.1～2.3	～3.0
中学生	0.7～2.8	-	1.1～2.4	～3.0
高校生	0.7～2.9	-	1.1～2.4	-
農業従事者	0.8～3.3	1.7～3.5	1.3～2.8	-
教職員	-	1.1～1.8	-	-
事務従事者	0.6～2.7	-	1.0～2.3	-
林業従事者	-	4.8～5.5	-	-
無業者	0.6～2.5	1.1～2.1	1.0～2.1	-

出典：*1「『東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査』について(概要版)」日本原子力研究開発機構 HP (<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf99/summary.pdf>)

*2「平成25年度個人積算線量計(小中学生)第3回測定結果概要」

郡山市 HP (https://www.city.koriyama.fukushima.jp/512000/shinsai/documents/3421_kekka3.pdf)

*3「平成25年度個人積算線量計(未就学児童)第2回測定結果について」

郡山市 HP (<https://www.city.koriyama.fukushima.jp/221000/shinsai/documents/12.pdf>)

c) 帰還後の職業シナリオ

帰還後のリスクを算定するためには、現在の職業だけではなく将来の職業まで考える必要があるため、帰還時の年齢ごとに帰還後の生涯の職業シナリオを設定した(表7)。

d) 空間線量率の減衰

現在では半減期の短い ^{134}Cs は半減期の長い ^{137}Cs に比べて少なくなっており、また、ウェザリングの効果は場所によって異

なると考えられる。そこで、本研究では安全側の仮定として、空間線量率は ^{137}Cs の物理的な減衰のみによって減衰していくものとし、生物学的半減期を考慮しなかった。つまり、式⑩を変形して、空間線量率 $D(\mu\text{Sv}/\text{時間})$ の場所に帰還した人が、 t 年後に年齢 u となり、個人分類 x に分類される場合のCs由来の年間外部被ばく量 $D_{x,u}(D, t)(\text{mSv}/\text{年})$ は以下の式⑪で求められるものとした。

表7 帰還後の職業シナリオ

シナリオ	帰還時の年齢	職業							
		0歳	1歳～2歳	3歳～5歳	6歳～12歳	13歳～15歳	16歳～18歳	19歳～64歳	65歳～
1	0	乳児	保育園児	幼稚園児	小学生	中学生	高校生	農業従事者	農業従事者
2		乳児	保育園児	幼稚園児	小学生	中学生	高校生	農業従事者	無業者
3		乳児	保育園児	幼稚園児	小学生	中学生	高校生	事務従事者	無業者
4	5	-	-	幼稚園児	小学生	中学生	高校生	農業従事者	農業従事者
5		-	-	幼稚園児	小学生	中学生	高校生	農業従事者	無業者
6		-	-	幼稚園児	小学生	中学生	高校生	事務従事者	無業者
7	10	-	-	-	小学生	中学生	高校生	農業従事者	農業従事者
8		-	-	-	小学生	中学生	高校生	農業従事者	無業者
9		-	-	-	小学生	中学生	高校生	事務従事者	無業者
10	15	-	-	-	-	中学生	高校生	農業従事者	農業従事者
11		-	-	-	-	中学生	高校生	農業従事者	無業者
12		-	-	-	-	中学生	高校生	事務従事者	無業者
13	20	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
14		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
15		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
16	25	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
17		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
18		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
19	30	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
20		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
21		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
22	35	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
23		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
24		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
25	40	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
26		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
27		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
28	45	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
29		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
30		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
31	50	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
32		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
33		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
34	55	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
35		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
36		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
37	60	-	-	-	-	-	-	農業従事者	農業従事者
38		-	-	-	-	-	-	農業従事者	無業者
39		-	-	-	-	-	-	事務従事者	無業者
40	65	-	-	-	-	-	-	-	農業従事者
41		-	-	-	-	-	-	-	無業者
42	70	-	-	-	-	-	-	-	農業従事者
43		-	-	-	-	-	-	-	無業者

$$D_{s,u}(D, t) = 365 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{30.2}} \cdot \left\{ \frac{D}{1000} \cdot T_x + 0.4 \cdot \frac{D}{1000} \cdot (24 - T_x) \right\} \dots\dots\dots \text{式⑩}$$

(2) 推計結果

式⑩を用いることで、表7に示す帰還後の職業シナリオ(n=1～43)ごとに、空間線量率D(μSv/時間)の場所に帰還する場合の帰還後の被ばく量が推計できる。さらに、推計したDの値を用いて、式①～⑨によって将来シナリオnにおけるa)～c)のリスク指標の値 $I_{R,n}(D)$ が求められる。

将来シナリオごとに、帰還時のCs由来の空間線量率がいくらであれば、誕生から生涯にかけて1 mSv/年を被ばくし続けた場合のリスク $I_{R,dl}$ と同じ大きさのリスクになるかを5つのリスク指標の評価方法ごとに推計した。具体的には、将来シナリオごとに以下の式⑫を満たすような帰還時のCs由来の空間線量率Dを推計した(表8、表9)。

$$I_{R,dl} = I_{R,n}(D) \dots\dots\dots \text{式⑫}$$

環境省は、1日に8時間を屋外、16時間を屋内に滞在する生活パターンを仮定し、追加被ばく量1 mSv/年は1時間あたりに換算すると0.19 μSv/時間に相当するとしている¹⁷⁾。本研究の推計では、0歳から生涯にかけて1 mSv/年を被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時のCs由来の空間線量率は、男女とも帰還時の年齢が0歳であれば、評価するリスク指標や将来シナリオに関わらず、およそ0.35 μSv/時間であり、0.19 μSv/時間の約2倍となった。これは、空間線量率の減衰を考慮し、また、どの職業も屋外滞在時間が環境省の仮定である8時間よりも短く設定しているためであると考えられる。

図1、図2にシナリオ13、15、25、27、37、39についての男女別の推計結果をそれぞれ示す。シナリオ15、27、39は帰還時から64歳まで事務職に就き、その後は無職である将来シナリオである。シナリオ13、25、37は帰還時から生涯にかけて農業に従事する将来シナリオである。性別やリスク指標に関係なく、誕生から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時のCs由来の空間線量率は、シナリオ15はシナリオ13に対して、シナリオ27はシナリオ25に対して、シナリオ39はシナリオ37に対して、約1.3倍であった。事務従事者は農業従事者よりも屋内での滞在時間が長いので、このようにリスク等価となる帰還時の空間線量率は事務に従事する将来シナリオのほうが高くなる。

また、帰還時の年齢が高ければ高いほど年間1 mSvのリスクと等価となる帰還時の空間線量率は大きくなった。例えば、帰還時の年齢が20歳のシナリオ13と帰還時の年齢が60歳のシナリオ37を比べると、リスク等価となる空間線量率は、男性の場合ではシナリオ37はシナリオ13の2.6～7.2倍であり、女性の場合ではシナリオ37はシナリオ13の3.0～7.3倍であった。

リスク指標によっても、リスク等価となるCs由来の帰還

時の空間線量率は異なる。特に、帰還時の年齢が中高年以上ではリスク指標による違いが大きくなった。帰還時の年齢が60歳のシナリオ37において、男性では、平均寿命まで生存する確率の減少による評価が最大で4.48 μSv/時間であり、損失余命割合による評価が最小で1.27 μSv/時間であった。女性では、損失余命による評価が最大で4.83 μSv/時間であり、損失余命割合による評価が最小で1.58 μSv/時間であった。性別、帰還時の年齢、将来シナリオに関わらず、損失余命割合による評価が最小であった。

年間1 mSvは危険と安全の境界を表しているものではない。同様に、本研究で求めた0歳から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時のCs由来の空間線量率も危険と安全の境界を表しておらず、注意が必要である。しかしながら、本研究で得られたリスク等価となる帰還時の空間線量率は帰還の判断の1つの目安となりうる。本研究では、5つのリスク指標による推計を行ったが、帰還時の年齢が大きくなるほどリスク指標間の推計結果の違いが顕著になることから、判断にマイナスの効果をもたらす可能性がある。その場合は、安全側の評価結果を示している損失余命割合を参考にするのも1つの方法である。

5. まとめ

本研究では、相乗リスク予測モデルを用いて福島第一原発事故からの避難者が帰還した場合に、性・年齢・帰還後の将来シナリオごとに帰還時の空間線量率がいくらであれば、誕生から生涯にかけて1 mSv/年を被ばくし続けた場合と同じ大きさのリスクになるかを推定した。なお、外部被ばく量の推計にあたっては、空間線量率から推定される積算空間線量率を用い、空間線量率は¹³⁷Csの物理的な減衰のみによって減衰し、内部被ばくは考慮しないと仮定している。そして、以下の結論を得た。

- ・帰還時の年齢が0歳であれば、0.35 μSv/時間であり、屋外に1日8時間滞在する生活パターンを仮定した場合1 mSv/年に相当する0.19 μSv/時間の約2倍であった。
- ・帰還時の年齢が高いほど0歳から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時の空間線量率は高い。
- ・事務従事者は農業従事者よりも屋内での滞在時間を長く設定しているため、事務に従事する将来シナリオは0歳から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時の空間線量率は農業に従事する将来シナリオよりも高い。
- ・リスク指標によってリスク等価となる帰還時の空間線量率は異なり、性・年齢・帰還後の将来シナリオによらず損失余命

表8 0歳から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時のCs由来の空間線量率(μSv/h) (男性)

シナリオ	性別	帰還時の年齢	最大の年死亡確率 による評価	寄与生涯癌死亡確率 による評価	損失余命による評価	損失余命割合 による評価	平均寿命まで生存する 確率の減少による評価
1	男	0 歳	0.36	0.36	0.34	0.34	0.35
2			0.37	0.36	0.35	0.35	0.35
3			0.40	0.39	0.37	0.37	0.38
4	男	5 歳	0.42	0.41	0.40	0.38	0.40
5			0.42	0.41	0.40	0.38	0.40
6			0.46	0.46	0.44	0.42	0.44
7	男	10 歳	0.50	0.50	0.49	0.43	0.49
8			0.51	0.50	0.50	0.44	0.49
9			0.58	0.57	0.57	0.50	0.56
10	男	15 歳	0.55	0.55	0.55	0.45	0.54
11			0.56	0.55	0.55	0.45	0.54
12			0.66	0.66	0.66	0.54	0.64
13	男	20 歳	0.64	0.63	0.64	0.48	0.62
14			0.65	0.64	0.64	0.49	0.63
15			0.80	0.79	0.80	0.61	0.78
16	男	25 歳	0.76	0.77	0.80	0.55	0.76
17			0.78	0.78	0.80	0.56	0.77
18			0.96	0.97	1.00	0.69	0.95
19	男	30 歳	0.98	1.02	1.11	0.70	1.03
20			1.01	1.05	1.12	0.71	1.04
21			1.23	1.29	1.39	0.88	1.29
22	男	35 歳	1.05	1.14	1.28	0.73	1.17
23			1.09	1.18	1.31	0.75	1.19
24			1.32	1.43	1.61	0.92	1.47
25	男	40 歳	1.13	1.31	1.57	0.80	1.42
26			1.19	1.37	1.61	0.83	1.45
27			1.43	1.66	1.97	1.01	1.79
28	男	45 歳	1.23	1.48	1.87	0.85	1.70
29			1.32	1.57	1.95	0.89	1.75
30			1.57	1.88	2.36	1.07	2.14
31	男	50 歳	1.38	1.74	2.35	0.93	2.14
32			1.51	1.87	2.48	0.99	2.23
33			1.77	2.21	2.98	1.18	2.70
34	男	55 歳	1.59	2.12	3.12	1.06	2.91
35			1.80	2.37	3.40	1.16	3.10
36			2.05	2.72	3.98	1.36	3.69
37	男	60 歳	1.89	2.75	4.44	1.27	4.48
38			2.27	3.24	5.13	1.47	5.04
39			2.47	3.57	5.74	1.65	5.76
40	男	65 歳	2.38	3.82	6.91	1.63	8.61
41			3.17	5.08	9.19	2.17	11.44
42	男	70 歳	3.29	5.89	12.20	2.30	24.94
43			4.38	7.84	16.22	3.06	33.16

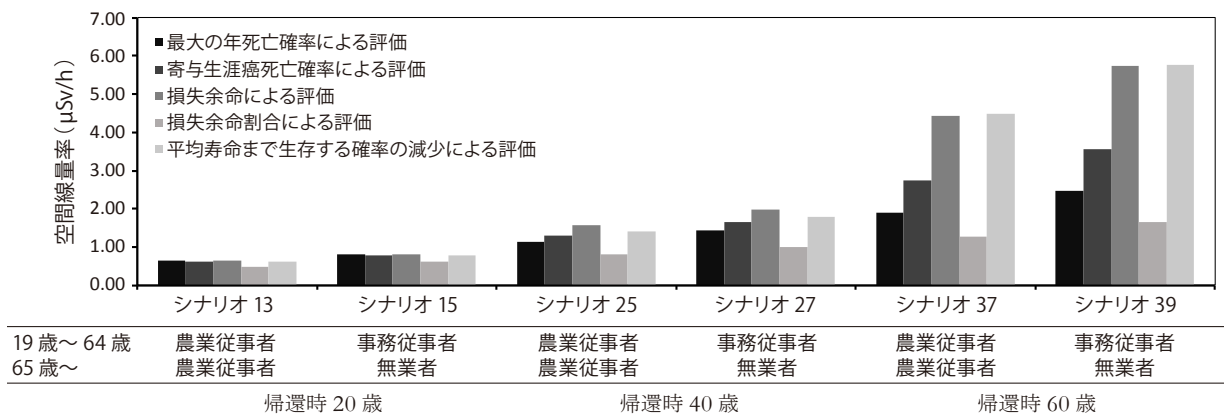


図1 誕生から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価な帰還時のCs由来の空間線量率(男性)

表9 0歳から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時のCs由来の空間線量率(μSv/h)(女性)

シナリオ	性別	帰還時の年齢	最大の年死亡確率 による評価	寄与生涯癌死亡確率 による評価	損失余命による評 価	損失余命割合に よる評価	平均寿命まで生存する 確率の減少による評価
1	女	0 歳	0.36	0.35	0.34	0.34	0.35
2			0.37	0.35	0.34	0.34	0.35
3			0.39	0.38	0.37	0.37	0.37
4	女	5 歳	0.42	0.41	0.40	0.38	0.40
5			0.42	0.41	0.40	0.38	0.40
6			0.46	0.45	0.44	0.41	0.45
7	女	10 歳	0.50	0.50	0.49	0.44	0.49
8			0.51	0.50	0.50	0.44	0.49
9			0.58	0.57	0.57	0.50	0.57
10	女	15 歳	0.56	0.55	0.56	0.46	0.55
11			0.57	0.56	0.56	0.46	0.55
12			0.67	0.66	0.66	0.55	0.66
13	女	20 歳	0.65	0.65	0.66	0.51	0.65
14			0.66	0.66	0.67	0.52	0.65
15			0.82	0.82	0.83	0.64	0.81
16	女	25 歳	0.79	0.80	0.85	0.60	0.80
17			0.81	0.82	0.86	0.61	0.81
18			0.99	1.01	1.06	0.76	1.01
19	女	30 歳	1.04	1.10	1.22	0.80	1.11
20			1.08	1.13	1.24	0.82	1.14
21			1.31	1.38	1.54	1.01	1.40
22	女	35 歳	1.13	1.24	1.45	0.87	1.27
23			1.19	1.29	1.48	0.89	1.31
24			1.44	1.57	1.82	1.09	1.60
25	女	40 歳	1.26	1.46	1.81	0.99	1.52
26			1.35	1.53	1.87	1.02	1.58
27			1.60	1.84	2.28	1.24	1.92
28	女	45 歳	1.34	1.63	2.16	1.05	1.76
29			1.45	1.74	2.26	1.10	1.84
30			1.70	2.07	2.73	1.33	2.22
31	女	50 歳	1.48	1.88	2.68	1.16	2.12
32			1.64	2.05	2.85	1.24	2.26
33			1.90	2.40	3.40	1.47	2.69
34	女	55 歳	1.68	2.26	3.49	1.32	2.68
35			1.93	2.54	3.83	1.45	2.95
36			2.17	2.90	4.46	1.69	3.43
37	女	60 歳	1.97	2.85	4.83	1.58	3.68
38			2.39	3.39	5.64	1.84	4.27
39			2.58	3.70	6.26	2.04	4.76
40	女	65 歳	2.43	3.85	7.33	2.01	5.74
41			3.23	5.12	9.75	2.67	7.64
42	女	70 歳	3.21	5.77	12.68	2.83	11.41
43			4.27	7.67	16.86	3.76	15.17

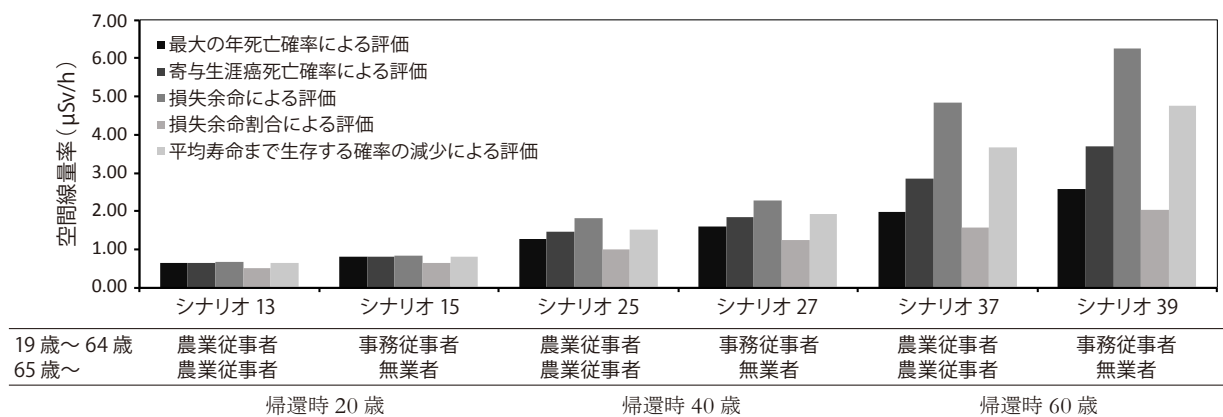


図2 誕生から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時のCs由来の空間線量率(女性)

割合による評価が最も低い。

- ・年間1 mSvは危険と安全の境界を表しているものではなく、また、本研究で求めた0歳から生涯にかけて年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時のCs由来の空間線量率も危険と安全の境界を表しておらず、注意が必要であるが、本研究の推計結果は帰還の判断の1つの目安となりうる。

しかし、避難者が帰還する際に、より有用な情報を提供するためには、以下の課題がある。

- ・職業ごとの場所別滞在時間を単一に設定したが、本来場所別の滞在時間は人それぞれである。そこで、滞在時間の分布を考慮し評価を行う必要がある。
- ・場所によって空間線量率は異なるが、本研究では生活の中心となる場所の空間線量率で個人の外部被ばく量を推定できるとしている。場所による空間線量率のばらつきを考慮したうえで外部被ばく量を推定する必要がある。
- ・本研究では帰還する以前の被ばくを考慮していない。避難する前の被ばくを含めたリスク評価が必要である。
- ・本研究では、年間1 mSvを被ばくし続けた場合とリスク等価となる帰還時の空間線量率を求めたが、帰還の判断を容易にするためには、個人分類別に帰還しない場合のリスクと等価となる帰還時の空間線量率を示すことが望ましい。

謝 辞

本研究は、科研費15H04068(研究代表者: 島田 洋子)により実施したものです。厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 日本アイソトープ協会:「国際放射線防護委員会の2007年勧告(初版)」, 6.委員会勧告の履行, pp.63-81, 日本アイソトープ協会, 東京(2009).
- 2) 日本アイソトープ協会:「国際放射線防護委員会の1990年勧告(初版)」, C.放射線の影響の重要性を判断するための基礎, pp.193-226, 日本アイソトープ協会, 東京(1991).
- 3) 日本アイソトープ協会:「国際放射線防護委員会の1990年勧告(初版)」, 3.4.放射線被ばくの影響の定量的推定, pp.23-24, 日本アイソトープ協会, 東京(1991).
- 4) 中村 裕二:日本人集団に対する放射線リスク諸量の計算. 保健物理, **28**, 47-61(1993).
- 5) 「平成25年簡易生命表の概況」, 厚生労働省 HP(<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/life/life13/>), 2016年4月閲覧.
- 6) 「平成25年人口動態統計月報年計(概数)の概況」, 厚生労働省 HP(<http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/geppo/nengai13/>), 2016年4月閲覧.
- 7) UNSCEAR: Sources, effects and risks of ionizing radiation, 1988 Report to the General Assembly, with annexes, New York (1988).
- 8) 「平成23年社会生活基本調査 調査の結果 統計表一覧」, 総務省統計局 HP (<http://www.stat.go.jp/data/shakai/2011/h23kekka.htm>), 2016年4月閲覧.
- 9) 「第4回幼児の生活アンケート・国内調査報告書[2010年]第1章 幼児の生活」, ベネッセ教育総合研究所 HP (http://berd.benesse.jp/jisedaiken/research/pdf/research13_8.pdf), 2016年4月閲覧.
- 10) 「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に係る個人線量の特性に関する調査」について(概要版), 日本原子力研究開発機構 HP(<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf99/summary.pdf>), 2016年4月閲覧.
- 11) 「平成25年度個人積算線量計(小中学生)第3回測定結果概要」, 郡山市 HP (https://www.city.koriyama.fukushima.jp/512000/shinsai/documents/3421_kekka3.pdf), 2016年7月閲覧.
- 12) 「平成25年度個人積算線量計(未就学児童)第2回測定結果について」, 郡山市 HP (<https://www.city.koriyama.fukushima.jp/221000/shinsai/documents/12.pdf>), 2016年7月閲覧.
- 13) 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20 km以遠のモニタリング結果について(平成25年8月30日)」, 原子力規制委員会 HP (http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8047/24/207_0830.pdf), 2016年4月閲覧.
- 14) 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20 km圏内の空間線量率測定結果(平成25年8月27日~29日)」, 原子力規制委員会 HP (http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8053/24/206_0902.pdf), 2016年4月閲覧.
- 15) 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20 km以遠のモニタリング結果について(平成25年9月24日)」, 原子力規制委員会 HP (http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8167/24/207_0924.pdf), 2016年7月閲覧.
- 16) 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の20 km以遠のモニタリング結果について(平成25年9月25日)」, 原子力規制委員会 HP (http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/9000/8172/24/207_0925.pdf), 2016年7月閲覧.
- 17) 「追加被ばく線量年間1ミリシーベルトの考え方(平成23年10月10日災害廃棄物安全評価検討会・環境回復検討会第1回合同検討会資料)」, 環境省 HP (http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=18437&hou_id=14327), 2016年4月閲覧.

2016年6月11日受付

2016年8月17日受理

和 文 要 約

福島第一原発事故後の避難指示は、基準とされている年間 20 mSv 以下になることが確実となり、十分なインフラ整備が行われれば解除されるが、帰還の際、公衆被ばくの線量限度である 1 mSv/ 年より被ばく量が多くなることを不安に感じ帰還をためらう人が出る可能性がある。また、同じ空間線量率の場所に帰還する場合でも、年齢や生活様式によってリスクは大きく異なると考えられる。そこで、本研究では、避難者が帰還した場合の、性・年齢・職業別に分類された個人の将来シナリオを設定し、各個人分類について、帰還時の空間線量率がいくらであれば、平常時に誕生から生涯にかけて 1 mSv/ 年を被ばくし続けた場合と等価のリスクになるかを推計した。なお、外部被ばく量の推計にあたっては、空間線量率から推定される積算空間線量を用い、空間線量率は ^{137}Cs の物理的な減衰のみによって減衰し、内部被ばくは無視できると仮定した。その結果、帰還時の年齢が高いほど、帰還後に屋内での滞在時間が長い人（事務従事者や無業者など）ほど、公衆被ばく線量限度とリスク等価となる帰還時の空間線量率が高いことが明らかになった。本研究の推計結果は、帰還の判断の 1 つの目安となりうる。

