

集中連載

放射線発がんリスクの推定 (第3回)

甲斐 倫明

8. ICRP 以外の国際機関のリスク評価

国連科学委員会は核実験からの環境汚染による影響を評価することから設立されたが、現在では原子力エネルギー、医療被ばく及び自然放射線におよぶあらゆる被ばく源からの線量とその影響を評価している。最新の報告書ではリスク推定について、次のように記述している。がん罹患率が線量と共に増加し、1 Sv で被ばくしない集団に比べて白血病を除くすべてのがんが1.5 倍に増加することが明らかになっている。しかし、統計的に有意な増加が観察されているのは100~200 mSv 以上の線量においてである。リスク評価のためには、この線量以下のところでは数学的モデルを用いて、生涯過剰死亡確率は100 mSv で固形がんが0.36~0.77%、白血病で0.03~0.05%と推定されている(UNSCEAR, 2010)。また、米国のBEIR-VII 報告書(NRC, 2006) のデータを表1 に示す。BIER-VIIでは、米国のがん統計をベースに計算しているため、原爆被爆データの相対リスクを

基礎にするか絶対リスクを基礎にしたモデルを利用するかで異なってくる。また、DDREF を1.5 としている。しかし、基本的には原爆被爆データを基礎にしたリスク評価であることは同じである。

9. ラドンのリスク評価

内部被ばくのリスクの考え方については参考文献に線量概念と共に記載があるので、それを参照してほしい(ICRP 国内メンバー, 2011)。ここでは線量をベースにしたリスク推定ではない方法を採用してきたラドンのリスク評価について述べる。

ラドンの放射線防護のためにはラドンのリスク評価が基礎となる。放射線は測定が可能であることからラドンの濃度測定に基づいて、呼吸気道の線量評価が試みられてきた。ラドンの壊変生成物である子孫核種の動態といった線源側の情報とα線の標的細胞とそのRBEなどの生体側に関する情報の不確かさから、線量評価法はいまだ放射線防護の基礎にはなっていない。ラドンの疫学から推定される濃度当たりの肺癌リスクと同じ大きさのγ線のリスクに相当する線量をもってラドンの線量を推定する疫学的アプローチがとられてきた。近年は、ICRP がPubl.66 で開発した呼吸気道モデルをラドン吸入に適用して呼吸気道の線量を直接推定する方法と比べても両者の値が接近してきているという研究が報告されているが、ラドンの線量評価

表1 全 BEIR-VII 報告書で推定された 100 mGy の固形がん生涯寄与リスク (10 万人当たり)

	罹患率		死亡率	
	男性	女性	男性	女性
全年齢集団	800	1,310	410	610
10 歳	1,330	2,530	640	1,050
30 歳	600	1,000	320	490
50 歳	510	680	290	420

主任者 コーナー

法としてまだ十分な評価を得ているわけではない。

ラドンの健康影響の科学は、ウラン鉱夫の疫学が中心となってラドン被ばくと肺癌との関係を論証してきた。鉱山のようなラドン濃度の高い環境がそうであっても、ラドンの濃度の低い居住環境ではどうなのか。居住ラドンの健康影響に対する多くのケースコントロール研究が実施されたが、結論は明確ではなかった。そこで、既に実施されているヨーロッパの複数のケースコントロール研究の生データを集めて解析する研究（プール解析）が英国の Darby のグループによって、北アメリカでは Krewski のグループによって行われ、100 Bq/m³ レベルの濃度でも統計的に有意な結果が導かれた。プール解析は、単独のケースコントロール研究ではサンプルサイズが小さいために検出力が十分でなかった問題を解決するために採用された方法である。

ラドンと肺癌との関係において、喫煙が交絡することは鉱夫のコホート研究やラットでの実験研究からも知られていた。ラドンと喫煙は複合的に影響することは明らかとなっていたが、その仕組みや定量性には不確かさがあった。前記のプール解析は、居住環境のラドンと肺癌との関係を明らかにすると同時に、喫煙とラドンとの複合影響を立証することになった。つまり、ラドンの影響は喫煙者と非喫煙者では大きく異なった。このラドンの科学をいかにリスク評価に反映するのか。しかし、放射線防護は放射線だけに注目し、喫煙習慣の有無は集団を構成する年齢などと同じ特性の1つとして平均化してしまっ

た。ラドンと喫煙の相互作用は、相乗的か相加的かが古くから議論されてきた問題ではあるが、放射線防護の問題として取り上げられることはなかった。居住環境のラドンを対象としたヨー

ロッパのプール解析の研究から明らかになった注目点は、ラドン被ばくのコントロールに対する相対リスク係数は、喫煙者の場合と非喫煙者の場合で統計的に有意な違いがなかったことである。喫煙者はラドンの曝露がなくてももともと喫煙による肺癌リスクが大きいために、喫煙習慣の有無はラドンの絶対リスクに大きく影響することになる。ラドンの相対リスクが喫煙者と非喫煙者とで同じだとすると、絶対リスクは、ラドンの曝露がないとき、ベースとなる肺癌確率が喫煙者で比較的大きいために、ラドンの絶対リスクが非喫煙者に比べて大きくなることを意味している（図1）。

放射線防護のリスクには、絶対リスクとしての生涯死亡確率（あるいは罹患確率）を用いてきた。Darby らの計算では、85歳までの生涯死

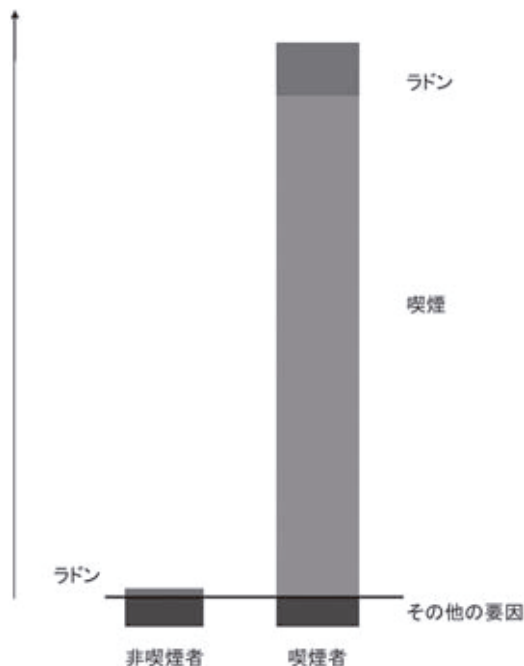


図1 喫煙者と非喫煙者におけるラドンの肺癌生涯リスクの比較

亡確率は、非喫煙者は、WLM 当たり 1.2×10^{-4} であるのに対して、喫煙者は WLM 当たり 24×10^{-4} と推定された。一般の集団では喫煙者と非喫煙者が一定の割合で含まれているので、平均化されて WLM 当たり 5×10^{-4} となる。つまり、一般集団で見ると、喫煙者は過小評価され、非喫煙者は過大評価されることになる（注：WLM は、ラドンの曝露量として古くから使用されている単位で、1 WL のラドン濃度で 170 時間（1 か月の作業時間）曝露を受けること。1 WL は、 $7,400 \text{ Bq/m}^3$ の平衡等価ラドン濃度）。

ICRP は、従来、性や年齢あるいは民族（国）で異なるリスクを平均して nominal（名目的）リスクとして扱ってきた。ICRP は、線量限度や組織加重係数の決定において、世界どこでも適用できる唯一の数値を導くために、リスク推定において nominal risk の考え方をとった。喫煙習慣も年齢と同じ仮想的な集団の修飾要因の 1 つであるという認識で、ラドンの放射線防護は仮想的集団の平均リスクを対象にした。

プール解析から得られたラドンの過剰相対リスクは、ヨーロッパのプール解析では 8%（95%信頼限界：3~16%）、北米のプール解析では 11%（95%信頼限界：0~28%）であり、喫煙習慣の有無に関係なく、過剰相対リスクには有意な違いがなかった。一方、喫煙は、我が国の研究によると、肺癌リスクは 1 日の喫煙本数（箱）と年数の積で決まり、20 箱年以上では相対リスクがおよそ 10~20 と報告されている。生涯リスクに注目すると、喫煙者と非喫煙者のラドン、喫煙、それ以外の原因に分けて肺癌のリスクを比較すると、喫煙者の喫煙のリスクが圧倒的に大きいものであることが分かる。このようなリスクの基礎情報を基に放射線防護は考えるべき時代になってきた。

10. 内部被ばくのリスク評価

ラドンの吸入は内部被ばくである。内部被ばくは、一般に蓄積性と不均一性の点で外部被ばくと異なっていることが注目される。リスク評価の基礎情報である線量評価では、蓄積性の点で体内動態を表現する数学モデルを利用して体内に残留する期間に放出される放射線の線量を預託線量として計算する。しかし、預託線量がリスクに比例すると考えるのは放射線防護上の仮定である。預託線量を基礎にしたリスクは、物理的半減期が長くかつ体内に長く残留する放射性核種（実効半減期が長い）では、動物実験データから過大評価の可能性が示唆される（Raabe, 2010）。放射性物質が体内組織に不均一に分布する場合、発がんの標的細胞での線量評価を行う必要があり、呼吸器系、消化管及び骨格について、放射性物質の沈着部位と高感受性部位の分布を考慮した線量評価の開発が進められてきた。

チェルノブイリ原発事故の健康影響として、国際的にも明らかになっているのが甲状腺癌の増加である。乳幼児が制限されなかった牛乳の飲食によって、放射性ヨウ素を多量に摂取して甲状腺線量が高くなったためであるとされている。甲状腺線量と甲状腺癌罹患率との関係は、外部被ばくと類似していることが報告されている（Cardis, 2005 ほか）。動物実験でも、X 線外部被ばくと放射性ヨウ素による内部被ばくによる線量とがん発症率との関係には差がないことが示されている。このように、内部被ばくの線量評価にはモデルや摂取量による不確かさが伴うことの問題は認識しておく必要があるが、線量が同じであれば内部被ばくのリスクは外部被ばくと変わらないか、あるいは小さいことに反する明確な証拠はない。しかし、チェルノブイリ原発事故で増加した甲状腺癌の発症メカニズムについては更に検討が進むことで内部被ば

くの特徴を明らかにすることができるかもしれない (Williams, 2009)。特に、ヨウ素欠乏が甲状腺癌のリスクに影響することが示唆されていることから、リスクの特徴をより明らかにするために、放射線がんの発症機構を定量的な観点から研究が進められることが期待される。

11. おわりに

本稿では、Pub.103 までの ICRP 勧告の歴史を振り返り、放射線防護の中で扱ってきたリスク評価、特に放射線防護に関わる人間は実効線量とその単位実効線量当たりの名目リスク係数を中心に解説した。

リスク評価は、基本的には放射線防護上の概念である。線量限度などの線量規準値の選定に利用されている。しかし、がんの発症機構に関する生物学的な知見やリスク評価の目的によって簡素化するあまり、年齢依存性などのリスクの特性が隠れてしまい、リスクの実体が伝わらないという欠点がある。名目リスクの問題についてはラドンの喫煙問題でも少し触れた。一方で、低線量率効果やほかの生活習慣との複合効果などリスクを単一の数字で表現することで伝えることができない様々なリスク評価上の特性を言葉や説明で補っていくことが求められる。さもなければ、100 mSv 当たり 0.5% という数値の背後にある意味や限界を伝えることができない。

医療分野において、実効線量がリスク評価に誤用されていることが指摘されている。従来、放射線防護上の計画のために生まれたリスク評価と、健康影響の将来推定とが混同され、現状では放射線専門家の間でも混乱が生じているように見える。国際機関においても、健康影響の将来推定のための様々な因子の考慮や不確実さ、更にはその基礎にある科学的情報を一般に向けた説明が行われてこなかった。福島第一原

子力発電所の事故を契機に、放射線のがんリスクをどのように理解し、リスクコミュニケーションしていくべきか。そのとき、新たな低線量に関する疫学データ及び生物学的知見を取り込む機能を備え、リスク計算ではないリスクを説明する役割を国内及び国際機関が果たすことが期待される。

放射線防護において ICRP が果たした役割は大きい。特に、リスクの概念を他分野に先んじて早く導入し、適切に放射線防護が実施されれば晩発影響の発生を抑制し、実際的には影響をもたらさない管理方策を勧告してきたからである。ICRP 勧告は、産業界からは厳し過ぎるという批判を受ける一方で、リスクを過小に評価しているという一部の団体からの批判もある。低線量放射線の問題は科学的な実証が難しいだけに、今後もリスク評価の不確かさからくる論争は続くであろう。一方で、リスクコミュニケーションにあまり関心のなかった ICRP も今後、新たな役割が求められるであろう。放射線防護の基礎にあるのは科学であるが、科学だけで対応できない現実の判断に社会的な価値が伴っていることも理解しておく必要がある。ICRP は、この点について、「科学的推定と価値判断の基礎及びそれらの間の区別は、どのように決定がなされているかの透明性を高め、かくして決定への理解を増すために、可能であればいつでも明らかにすべきである (ICRP Pub.103, 27 項)」と述べている。放射線防護に関わるすべての関係者の共通の認識としなければならない。

参考文献

- 1) Cardis, E., *et al.*, Risk of thyroid cancer after exposure to ¹³¹I in childhood, *J Natl Cancer Inst*, **97**, 724-732 (2005)
- 2) ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 1. Pergamon Press, Oxford, UK (1959)

- 3) ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3), (1977)
- 4) ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP 21 (1-3), (1991)
- 5) ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4), (2007)
- 6) ICRP, Lung cancer risk from radon and progeny and statement of radon. ICRP Publication 115. Ann. ICRP 40 (1), (2010)
- 7) ICRP 国内メンバー, 放射性物質による内部被ばくについて, *Isotope News*, No.690, 33-43 (2011)
- 8) National Research Council, Health risks from exposure to low levels of ionizing radiation, BEIR VII Phase 2, National Academic Press, Washington D.C. (2006)
- 9) Preston, D.L., *et al.*, Solid cancer incidence in atomic bomb survivors : 1958-1998, *Radiat Res*, **168**(1), 1-64 (2007)
- 10) Raabe, O.G., Concerning the health effects of internally deposited radionuclides, *Health Phys*, **98**(3), 515-536 (2010)
- 11) UNSCEAR, Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2010. United Nations, New York (2011)
- 12) Williams, D., Radiation carcinogenesis : lessons from Chernobyl, *Oncogene*, **27**, S9-S18 (2009)

【Appendix】

1. 疫学データにおけるモデル適合

発がんリスクは、被ばく時年齢 e 、被ばく線量 d 、性別 s 、出生年 b 及びがんの発症年齢 t に影響を受けるために、これらの変数を考慮した解析が行われる。がんの発症年齢 t におけるがんの罹患率（以下、死亡率も同じ式）を $h(s, e, t, d, b)$ 、同じ年齢のベースライン（自然発症）のがん罹患率を $h_0(s, t, b)$ とするとき、次の2つのリスクモデル（過剰相対リスクモデル、過剰絶対リスクモデル）が使用される。

$$h(s, e, t, d, b) = h_0(s, t, b) [1 + ERR(d, e, s, t)]$$

$$h(s, e, t, d, b) = h_0(s, t, b) + EAR(d, e, s, t)$$

$ERR(d, e, s, t)$ あるいは $EAR(d, e, s, t)$ は、それぞれ、過剰相対リスク、過剰絶対リスクを表す。過剰相対リスクあるいは過剰絶対リスクは、白血病以外のがんについては、次の式で記述されるモデルが利用される。

$$ERR(e, t) \text{ or } EAR(e, t) = \omega \exp(\gamma \cdot e) \cdot t^k \cdot \alpha d$$

前記のモデルを用いて、過剰相対リスクあるいは過剰絶対リスクが解析される。白血病については線量に対して線形ではなく、線形2次モデルが適用されている。

2. 生涯リスクの計算

前記の推定された年齢別罹患率（ハザード関数）のモデルを用いて、生涯リスク計算が行われる。生涯死亡リスクの計算には定義上、下記の2つの式が利用されている。

2.1 過剰生涯リスク (Excess Lifetime Risk : ELR)

被ばくした集団と非被ばく集団のがん死亡確率の差として定義される。

$$ELR(e, t, d)$$

$$= \int_e^{\infty} h(e, t, d) S(t|e, d) dt - \int_e^{\infty} h_0(t) S(t|e) dt$$

ここで、 $S(t|e, d)$ は、被ばく集団の被ばく時年齢 e 、被ばく線量 d 、年齢 t における生存率、 $S(t|e)$ は、非被ばく集団の年齢 t における生存率である。この計算は BEIR 委員会で使用された。

2.2 被ばく誘発死亡リスク (Risk of Exposure-Induced Death : REID)

ある個人が放射線誘発がんて死亡する生涯確率を計算するものであり、次のように定義され

主任者 コーナー

る。

$$REID(e, t, d) = \int_0^{\infty} [h(e, t, d) - h_0(t)] S(t|e, d) dt$$

REID は、国連科学委員会の計算で利用されてきた。ELR と REID の違いは、REID が被ばく集団のみの生存率をベースに計算していることである。ELR は、放射線が死亡リスクに寄与しても、すべての死因による ELR はゼロで

なければならないため、放射線のリスク情報を完全には記述することができない。一方、REID は、放射線が死亡率をある年齢で低下する場合にはマイナスとなってしまう。通常の計算においては有意な違いはないが、それぞれの特性を理解して使用する必要がある。

(大分県立看護科学大学)

新刊

ICRP Publ.111

原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に 居住する人々の防護に対する委員会勧告の適用

監修 甲斐 倫明

翻訳 本間俊充・木村仁宣・高原省五

編集 ICRP 勧告翻訳検討委員会

発行 日本アイソトープ協会

B5判・47頁 定価 3,780円 会員割引価格 3,360円(消費税込)【2012年3月発行】

本書は、長期汚染地域に住む人達を防護しつつ、復旧・復興への対応を進めるための専門的助言です。世界の歴史が示すように、事故後の状況は複雑で、放射線防護も日常生活のあらゆる側面を考慮しながら進める必要があります。このような現存被ばく状況下での防護戦略について、その正当化と最適化、国と地域当局が果たすべき責任を検討。さらに過去の事例から、行政・専門家・被災した住民・一般市民などがどのように関われば有効で復興につながる防護を実現できるのかを考え、放射線モニタリング、健康サーベイランス、汚染された食品や他の物品の管理について具体的に説明しています。付属書には、ピキニ、チェルノブイリなどの歴史的経験による教訓を多数収載。



公益社団法人

日本アイソトープ協会

Japan Radioisotope Association

〒113-8941 東京都文京区本駒込 2-28-45
TEL (03) 5395-8082 FAX (03) 5395-8053

◆ご注文はインターネットまたは FAX にてお願いいたします。

JRIA Book Shop : <http://www.bookpark.ne.jp/jria>

BookPark サービス : FAX (03) 5227-2060

◆書店でご注文の際は「発売所 丸善出版」とお申し付け下さい。