

を誘発する可能性の増加を意味することも、共通の理解であると言ってよいでしょう。

がんは、言わばがん関連遺伝子の変異で起きる病気ですから、その起こり方には個人差があります。なぜならば、世の中にがんの家系とそうでない家系があるように、がんの起こりやすさは、個人の遺伝形質に影響されるからです。また、幹細胞にがん関連遺伝子の突然変異が積み重なって生じたがん細胞の排除に関わる免疫作用は、成長過程で個人がさらされた環境からの刺戟によって形成される後天的形質に関係しますから、一卵性双生児の間ですら同じとは限りません。実効線量は、そうした多様な放射線感受性を、一律の加重係数で表していますので、同じ実効線量の放射線を受けたとしても、がんの誘発という影響の起こり方は、個人の遺伝形質や後天的形質によってさまざまです。したがって、個人が受けた放射線の影響の度合いを実効線量で表わすことなど、原理的にできるはずがありません。ICRPが2007年勧告の中で実効線量を再定義した背景には、これほど明白な事実さえ理解されていないことへの苛立ちがあったのだろう、と筆者は考えて居ります。

3. シーベルトは「個人が受けた放射線の量を表わす単位」ですらない

実効線量は、2007年の再定義で、線量を評価する特定の個人ではなく、Reference Personと呼ばれる標準的な体格をもった成人の白人男女の組織や器官の平均吸収線量を、男女それぞれの全身にわたって加重平均し、さらに男女間で算術平均したものになりました。つまり、人種・性別・年齢・体格などの違いに関係なく、その場所にReference Personがいたならば受けたであろう加重平均吸収線量が実効線量である、ということです。しかし、このような定義の改訂を明確に認識している人は、あまり多くないかも知れませんし、ICRPがそのように再定義をせざるを得なかった理由を考えた人は、さらに少ないのではないかと

思います。

筆者のように、実効線量当量の時代からこの量と付き合いのあった人間のほとんどは、2007年勧告の再定義を突き付けられるまで、実効線量（実効線量当量）は、一人ひとりの身体に応じて定義され、それゆえ同じ場所で同じ姿勢で同じ放射線を受けても、体格や性別が異なる人の実効線量は異なった値をもつ、と漠然と考えていたと思います。年齢の異なるReference Personを導入し、子供の“実効線量”などを計算する研究もあるのには、そうした背景かも知れません。しかし、がんの誘発に関する放射線感受性には、組織や器官ごとに異なった年齢変化がありますが、組織加重係数は、たった4種類の数値しかない定数です。そんな組織加重係数を用いながら、組織や器官の平均吸収線量だけを、年齢や性別や体格に応じてどれほどリアルに評価しようと努めても、得られる実効線量は少しも現実性を増すわけではありません。

4. シーベルトは「放射線防護の目安を表わす単位」である

ICRPが実効線量の定義を改訂した背景には、本来、放射線防護のための道具である実効線量とLNTモデルが、1シーベルトでがんのリスクが5%増えるという名目リスク係数と組み合わせられて、放射線影響の目安として使われてしまった、という事情があったからだと思います。そのことが最も象徴的に表れたのは、Chernobyl原子力発電所の事故から20年目のことでした。WHOが、事故処理に直接かわり比較的大きな線量（平均集積線量66ミリシーベルト）を受けた約60,000人の中から4,000人くらいが放射線によるがんで亡くなるだろうと予測したのに続いて、IAEAが、強制避難を受けた周辺住民まで含めた約6,000,000人（平均集積線量約14ミリシーベルト）の中から9,000人くらいが放射線によるがんで亡くなるという予測を発表し、最後に国際がん研究機構（IARC）が、全欧州の汚染地域に住む約570,000,000人

(平均集積線量約0.5ミリシーベルト)まで含めれば、16,000人くらいが放射線を原因とするがんで亡くなるという予測を発表しました。

この苦い経験の教訓から、ICRPは、すでに受けてしまった放射線のリスク評価、とくに僅かな放射線を受けた大集団のリスク評価に実効線量を用いないよう、2007年勧告の中で明示的に警告しました。そして、実効線量が放射線防護の目安であることを強調するため、実効線量の主な用途を提示しさえしました。ICRPが実効線量を個人から切り離して全くartificialなanthropomorphic phantomに基づく量として再定義した意味は、そうした文脈の中で考えれば、非常に明解だと思えます。それにも関わらず、実効線量に関する放射線防護の目安と放射線影響の目安の混同は今なお継続し、故人の安らかな眠りを妨げているようです。

5. そもそもレムに次元を与えたのが間違いの始まりだった

 実効線量が放射線影響の目安だと誤解される根底には、それを吸収線量やカーマと同様精密に測定・評価できる、という思い違いがあるのかも知れません。2007年の再定義に直面して、「これでは必要に応じて実効線量を精密に評価できなくなる」と主張した人たちは、明らかにそうした思い込みに囚われていたのだと思います。しかし、そうした認識は、どうして生じたのでしょうか。

放射線防護に用いる線量のルーツであるレムを単位とする「RBEを乗じた吸収線量」をICRPが勧告したのは、1954年のことでした²⁾。この量に対してICRUは、1956年のReport 8で「RBEには持ち前の不正確さがあり、必ずしも測定に基づかない習慣的な値が用いられているので、レムを単位とするRBE doseの用途を、

放射線防護に関連する事項を記述する場合に限定する」よう勧告しました。そして、1962年のReport 10では、放射線防護の目的で用いるRBEに線質係数という名称を与え、放射線生物学で放射線影響を記述するときに用いるRBEと明確に区別しようとしていました。つまり、放射線防護に用いる線量が導入されて間もないころは、それが本質的に曖昧さをもつ量であることが、明確に認識されていたと考えられます。

筆者は、放射線防護に用いる線量に関する当初の認識を変容させる契機となったのは、ICRUがRBE doseに対して吸収線量と同じ次元をもつことを規定したとき(Report 19s, 1973)ではないかと考えて居ります。導入から10年余りの間、次元のことなど気にせずRBE doseを使えたのは、「放射線防護に関連する事項を記述する場合」には、厳密な評価など必要なかったからだ、と言えるでしょう。ところが、レムを単位とする線量に吸収線量と同じ次元が定義された結果、当時は線量当量と名前を変えていた放射線防護に用いる線量も、精密な計量の対象となる運命を免れ難くなってしまいました。

そして、本質的に曖昧さをもつ放射線防護に用いる線量を、恰も精密計測の対象であるかのように誤解させたダメ押しは、ICRUによる実効線量の導入でした。今日から見れば、実効線量当量に対する“共通の近似手順”を規定したに過ぎなかったものを、わざわざ実効線量と銘打って導入・定義したのは、当時のICRUを支配していた「我々が線量を規定するのだ」という一種arrogantな雰囲気なせ業ではなかったか、と思われま³⁾。それは兎も角、実効線量は、放射線障害防止法ばかりか、こともあろうに計量法にまで取り入れられ、一体、放射線防護に用いる線量をどのくらいの精度で論じればよいか、という本質的

2) レムという単位は、おそらく、H. M. Parker等が1945年に米国原子力委員会のThe Tolerance Doseという報告書に記載したものが初出であろうと思われる。

3) 実効線量の導入によって、放射線防護で用いる線量の評価や測定は、一見精密になったかのような錯覚を受けるが、その実「1レントゲン≒1ラド≒1レム」というそれ以前の遣り方から実質的な改善があったとは言い難い。

な問題が消し飛んでしまいました。

ひとたび放射線防護に用いる線量が精密に測定・評価できることになれば、LNTモデルやリスク係数と組み合わせて、「受けた放射線の健康影響の度合い」の目安に利用されるのは、ほとんど避け難かったと思います。そして、放射線防護に用いる線量には±3dBくらいの曖昧さが許容できる（二倍～半分OK!）ことを忘れ、有効数字が二桁もあるシーベルト単位の基準を平気で作る専門家まで現れる始末です。そして、放射線防護の目安と放射線影響の目安が混同されてしまった結果、1時間当たりのマイクロシーベルト単位で表した線量率の二桁目の数字の違いが、被災地の人々に不安や不満をもたらすようになってしまいました。

筆者は、1999年に始まったICRPの基本勧告改訂に関する議論が、この不健全な流れを完全に断ち切るチャンスだったと思います。筆者は、現在の基本勧告にバンドという概念で取り入れられた、いわゆるクラーク・スケールについて、クラーク委員長（当時）と議論したとき、放射線防護のための線量は、例えば、自然放射線被ばくの世界平均+3σ⁴⁾の値で規格化することで無次元化した方が良く、更にその対数を放射線防護の目安にする方がもっと分かり易くなる⁵⁾、という議論をしたことがあります。懼らくそんなアイデアが実現していれば、放射線防護の目安と放射線影響の目安の混同は、払拭されていたでしょう。

6. シーベルトの静謐な眠りのために

放射線防護の目安と放射線影響の混同が続く原因の一つには、ICRPが提示した「放射線防護の目安」としての用途がやや抽象的で、具体的に何を意味するか、業界外の人々には理

解され難い点があったのではないかと思います。そこで筆者は、高校生などにお話する機会には、次のような例を使うことにしています。

実効線量の用途は、(1)放射線防護のための規制や基準の値を示したり、(2)放射線防護のための選択肢を比較したり、(3)講じられている放射線防護のための方策が規制や基準に適合していることを確認したりするための“尺度”です。

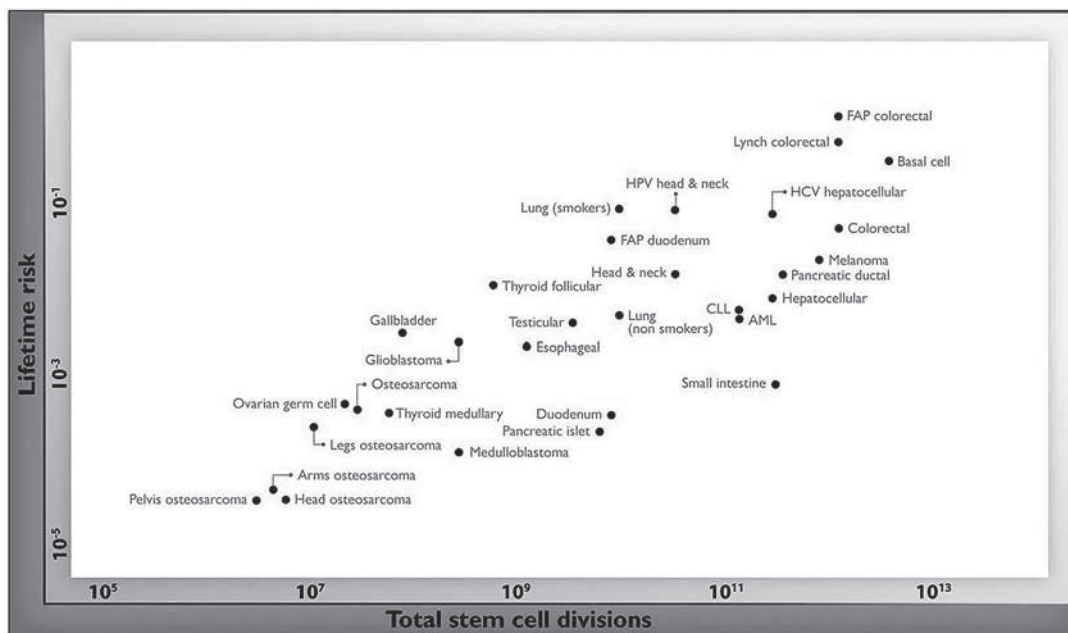
壁の外側の線量で判断
すると、遮蔽をラセンチ
増やせば、週にも時間
長く運転できませんよ



例えば、病院などの新たな放射線施設を建設する際、事業所境界の実効線量を3カ月間で250μSv以下に定めている法令は(1)の、この基準に適合させるため、十分に厚い遮蔽壁を設けて何の制約もなしに放射線装置を稼働させる方法と、遮蔽壁を設けず装置の性能や稼働時間を厳しく制限する方法との両極端の間のさまざまな選択肢から、コストや使い勝手などを考えて、最も都合のよい遣り方を選ぶのが(2)の⁶⁾、そして、施設の稼働後に敷地境界の線量を継続的にモニタリングし、法令が遵守されていること（したがって、採用した放射線防護措置が適切であったこと）を確認するのが(3)の用途に当たります。

このような説明で放射線防護の目安と放射線影響の目安の混同が一挙に解消するわけはありませんが、高校生たちに考えるきっかけ

4) 規格化に用いた基準を越える自然放射線を被ばくする人がほとんどないようにするため、自然放射線被ばくの世界平均+3σで規格化することが議論された。
5) 負の値であれば何の対応も要せず、0から1までは通常の放射線防護の対象であり、1以上は速やかに対処すべき事態だと判定できる。対数を取れば、僅かな線量の違いに囚われなくなる利点もある。また、対数を取った値を用いるのは、刺激に対する反応が相乗的である生物の性質にも合致する。
6) このような防護措置のtrade-offを容易にしているのがLNTモデルであることは、言うまでもない。



FAP = Familial Adenomatous Polyposis ◊ HCV = Hepatitis C virus ◊ HPV = Human papillomavirus ◊ CLL = Chronic lymphocytic leukemia ◊ AML = Acute myeloid leukemia

from Tomasetti, C and Vogelstein, B: Variation in cancer risk among tissues can be explained by the number of stem cell divisions, Science 347-6217, pp.78-81 (2015)

を与えることはできたと感じています。

こうした説明に加えて、筆者は、原爆の放射線を受けて生き延びた方々⁷⁾に対する生涯健康追跡調査で、がんの増加を統計学的に確認できなかった100ミリシーベルト以下の領域では、個人が受けた線量の多寡を論じることも止めるべきだと考えています。それが各人の被った健康影響の大小を意味しない上に、線量から評価される“virtualなリスク”は、放射線防護の方策を論ずるときを除き、意味をもたないほど小さいからです。

Tomasetti等が2015年に発表した上のグラフは、さまざまな組織や器官の幹細胞が一生の間に細胞分裂する回数と、それぞれの組織や器官に生じるがんの生涯リスクとを比べたもので、両者が見事に相関し、がんの主な原因が、幹細胞の遺伝子の複写ミスであることを示唆

7) 筆者は、かつて「ヒバクシャ」という言葉が差別的な意味で使われた歴史に鑑み、英語のAtomic bomb survivorsの邦訳を用いることにしている。
8) 皮肉な言い方をすれば、がんの最大の原因は「生きていること」だということになる。

しているように見えます⁸⁾。強い発がん要因である喫煙のような環境要因は、喫煙者と非喫煙者の肺がんのリスクを明確に分離して見せてくれますが、100ミリシーベルトの放射線曝露は、仮にnominalに算出される0.5%のリスクが現実にあったとしても、このTomasetti-plot上にその違いを表記しようがありません。

今後、各方面で努力を積み重ね、「シーベルト」が受けた放射線の影響の度合いを表わす単位ではないという理解が定着して、墓の中のロルフ・シーベルトが安眠を取り戻すことを願って居ります。

著者プロフィール

現役時代、日本赤十字社医療センター、聖マリアンナ医科大学病院、筑波大学粒子線科学センター、SPring-8、理研（横浜）で放射線管理に従事した。定年を迎える年度末に福島第一原子力発電所の事故に遭遇し、長年「飼い馴らされた放射線源」を勿体ぶって管理することで生活の糧を得てきた罪滅ぼしに被災地のお手伝いをはじめ、今日に至っている。