



実効線量の意味が分かりません

伊藤 泰男

Ito Yasuo

私たちの NPO 科学技術社会研究所では“科学・技術と社会”の関係を考える研究会を定期的に行っているほか、いろいろな人と意見交換する機会を持っています。ある日、某物理学者 Q 氏との懇談の中で、Q 氏はタイトルのように私（以下 I）に質問を向けてきました。以下、対話形式でその内容を再構成します。

Q：私、放射線物理のことは知っているつもりなのですが、最近福島第一原子力発電所の事故との関連で巷でも頻繁に使われるようになった放射線の用語とその使い方には首をかしげることがあります。例えば、Gy という単位は放射線が照射されたとき物質に吸収される放射線エネルギーで、 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ Joule/kg}$ ですから物理的に明確な量です。その限りでは異論はないのですが、これを 0.24 cal/kg と換算して、水の温度を 0.00024°C だけ上昇させる程度のエネルギーですと説明しているのをときどき目にします。keV~MeV という極めて大きな量子のエネルギーを、0.1 eV 以下の熱エネルギーに言わば“細切れ”にしまったことで、物理的な意味を分からなくしてしまったように見えます。

I：実は私もそれをやったことがあります。温

度に換算するとこんなに小さなエネルギーだけど、放射線の量子という形では人体に障害を与えるのです、という風に使うのですが。その理由を説明するために、一つひとつの放射線はエネルギーが大きいので身体の分子を破壊することができるということを言わないといけない。そのためには更に二次電子やイオン化などの話をしなくてはならなくなって、話が専門的になるのでそこまで話を進めることは少ないですね。しかしそういうことを省略して、単に放射線エネルギーを温度に換算して示すだけだと、放射線の物理的な像が分からなくなってしまいます。

Q：そうですね。私のように専門的に近い位置にいる人なら、どういう関係になっているのか分かりますが、一般の人は 0.00024°C の温度上昇と 1 Gy の放射線の危険性を結びつけて理解できないばかりか、逆に訳が分からなくなってしまうのではないのでしょうか。Sv という単位も分かりにくいです。同じ放射線エネルギー吸収でも、例えば γ 線と α 線では放射線影響の現れ方が違うということを含めるために、 γ 線による影響の程度を基準にした線質係数を Gy に掛けたものを Sv と定義するというこ

すね。

- I : 吸収線量 Gy が同じでも、例えば α 線だと γ 線の影響に比べて 20 倍大きな影響が現れるというようなことを取り入れるために工夫した量が“等価線量”です。

$$[\text{等価線量}] = [\text{放射線加重係数}] \times [\text{吸収線量}] \quad (1)$$

と定義され、Sv という単位が与えられています。陽子、 α 線などに放射線加重係数として 1, 2, 5, 10, 20 のいずれかの値が与えられています。切れの良い数字になっているのは、その程度の精度であるということなのでしょう。中性子についても、以前は幾つかのエネルギー領域に分けて 5, 10, 20 の値が与えられていたのですが、2007 年 ICRP 勧告 (Publ.103) では任意の中性子エネルギーについて放射線加重係数を与える関数が示されています。計算しやすくするためのようですが、勧告書の同じところで「基本データの精度がより高くなったことを意味するものではない」とわざわざ書かれています。

- Q : データが粗いことは科学の営みの途上では当然あることで、仕方のないことですが、関数化したことでデータが精密になったと勘違いする人がいそうですね。ところで、その先に私が知りたいところの“実効線量”があります。その定義は大抵詳しく説明されています。等価線量が同じでも臓器によって影響の現れ方 (放射線感受性) が違うという臓器側の事情を組み入れるために、放射線感受性の高い臓器に重み (組織加重係数) をつけて主要な臓器について重み付け平均したものということですね。

$$[\text{実効線量}] = \sum_i [\text{組織加重係数}]_i \times [\text{等価線量}]_i \quad (2)$$

$$\sum_i [\text{組織加重係数}]_i = 1 \quad (i : \text{臓器の識別}) \quad (2')$$

- I : 臓器の違いによらず一元的に放射線影響を表すための工夫ですね。

- Q : しかし“実効線量”の物理的な意味が分かりません。(2)式を定義として出発しているものの、その意味は説明されていない。インターネットで意味を探したのですが、“実効線量は体全体のダメージの程度を表します”のようにおそらく間違っているだろうものもありました。“組織ごとの影響の起こりやすさを考慮して、全身が均等に被曝した場合と同一尺度で被曝の影響を表す量を実効線量という”(ウィキペディア)とか“臓器または組織が放射線照射を受けたとき、これらに及ぼす影響の全身的な共通尺度を実効的な線量 (生物学的な効果を考慮した値) に換算して健康障害を評価する尺度”(原子力放射線用語)という説明も、間違っていないのかもしれませんが、ピンときません。

- I : そうですね。例えば、放射性ヨウ素を甲状腺に取り込んで等価線量 1 Sv の内部被曝があったとして、これに甲状腺の組織加重係数 0.04 (ICRP103 より) を掛けて実効線量 = 0.04 Sv となるのですが、等価線量 1 Sv と実効線量 0.04 Sv の数字の乖離が大きすぎて、訳が分かりませんね。

「甲状腺だけの被曝のような局所被曝なら等価線量で良いが、全身被曝を考えるとときには実効線量を考える」と言う人もいるのですが、ますます分からなくなってしまう。甲状腺への 1 Sv の内部被曝に加えて全身均一に 0.01 Sv の外部被曝があったとしましょう。(2)式から実効線量 = 0.05 Sv と計算されます。甲状腺が等価線量で 1 Sv (厳密には 1.01 Sv) 被曝している事実、一方甲状腺を除いた全身は 0.01 Sv 被曝している事実は変わらないのに、実効線量は 0.05 Sv です。どちらを使うべきだと言っているのでしょうか?

別の例では、CT スキャンを受けた人が

病院から受け取る CT 検査記録票に記載されている線量は Gy で表されています。放射線は X 線なので、これをそのまま等価線量 Sv と読むことには問題ありません。しかし“実効線量”という言葉が巷に溢れているものだから、つい“実効線量”を計算してみるのです。ところが何を計算したのか分からない。“実効”とはどういう意味の実効なのだろう？ とモヤモヤしている人は少なくないはずです。

Q：与えられた式を使えば数字は出てくるのだけど意味が分からないで使っているというのは「マニュアル人間症候群」と言うべきでしょうか。意味が分からないまま、出てきた数字や考えを鵜呑みにして掛かることが今の世の中多いように思います。放射線のことに限らず、あらゆることにおいて……おっーと、脱線しそうだ。それで“実効線量”の意味は何ですか？

I：インターネットで探しても意味が見付からなかったということですが、実は ICRP の勧告書にも“意味”は書かれていないようです。肝心の“意味”が抜け落ちているのは不可解なことです。説明しにくい話ではないと思うのですが…。それでは、私なりの説明を申し上げることにしましょう。

・特定の臓器に放射線被曝があったとき、がんなどの放射線障害が被曝線量に比例して発生するとします。話の都合上 LNT モデルに拠っていることになります。

$$\begin{aligned} & \text{[臓器 } i \text{ に発生する放射線障害の確率]} \\ & = f_i m_i [\text{等価線量}]_i \end{aligned} \quad (3)$$

f_i ：臓器 i で等価線量当たり発生する放射線障害の確率を表し、放射線感受性に比例する係数

m_i ：臓器の重量

・(3)式を全ての臓器について加算した値

が全身の放射線障害の発生確率です。

$$\begin{aligned} & \text{[全身に発生する放射線障害の確率]} \\ & = \sum_i f_i m_i [\text{等価線量}]_i \end{aligned} \quad (4)$$

・一方仮想的に全身をある線量（これが [実効線量]）で均一照射して、(4)式の [全身に発生する放射線障害の確率] と同じ確率で障害を生じさせることができたとすると、

$$\begin{aligned} & \text{[全身に発生する放射線障害の確率]} \\ & = \text{const} \cdot M \cdot [\text{実効線量}] \end{aligned} \quad (5)$$

$$M = \sum_i m_i \quad (\text{= 全臓器の重量})$$

(4)式と(5)式から

$$\begin{aligned} \text{[実効線量]} & = \frac{1}{M} \sum_i \frac{f_i m_i}{\text{const}} [\text{等価線量}]_i \end{aligned} \quad (6)$$

・実体において全身均一被曝の場合、全ての臓器の [等価線量] は同じであり、それがそのまま [実効線量] であるので $\frac{1}{M} \sum_i \frac{f_i m_i}{\text{const}} = 1$ 。形式的に $\frac{1}{M} \frac{f_i m_i}{\text{const}}$ が“組織加重係数”に相当しています。

このように考えると、ある被曝をしたとして、それと同じ程度の放射線障害を単に数 (= 確率) の問題として全身均一被曝で引き起こすための仮想的な線量は幾らかを表す値が“実効線量”であると読むことができます。

先の甲状腺への内部被曝の計算例では、実効線量 = 0.04 Sv と計算されましたが、この数字に実体上の意味があるわけではなくて、“甲状腺に 1 Sv 局所被曝したときに障害が発生する確率は全身が均一に 0.04 Sv 被曝したときに障害が発生する確率と同じ程度です”という比喩的な意味があるだけです。別の言い方をすれば、仮想的に（無理矢理）全身被曝に置き換えて障害の指標を一元表示しようとしていると理解できます。

Q：なんとなく分かったような気がします。何だそんなことなのですか…という感じですが。そうすると、CT スキャンのように少数の特定の臓器にわたる被曝についても使ってよいのですね。

I：使えるとは思いますが。「実効線量は全身被曝にのみ定義できる量である」と言う人もいますが、前記の解釈ならば、局所被曝でも、複数臓器の被曝でも、あるいは臓器ごとに異なる放射線によって被曝した場合でも、全身均一被曝を想定して換算した“実効線量”の数値は計算上ともかくあるわけです。

しかし、例えばCT スキャンの線量を実効線量に換算しても実際上の意味はほとんどないのではないのでしょうか。甲状腺の等価線量 1 Sv の局所被曝を実効線量は 0.04 Sv であると表現することによって、障害が全身に分散するかのように誤解を招くかもしれません。実際、そう考えてしまった人を私は知っています。また、複数の臓器にわたる被曝を全身に“平坦化”された実効線量にしてしまうと、個々の臓器の障害を見積もることができなくなってしまいます。仮想的・比喩的な数字に一元変換した代償に、個々の臓器における実体を見失ってしまうわけです。“実効線量”は放射線防護のためだけの便宜的な指標としてのみ意味があるのであって、実体は“等価線量”に求めなくてはなりません。2007 年の ICRP 勧告にも「実効線量は防護量として使用するよう意図されている…実効線量を疫学的評価のために使用することは推奨されない…」と書かれています。しかし実効線量の意味を説明していないので、なぜ防護の目的以外には使ってはならないのか伝わってきません。CT スキャンの放射線被曝データをマニュアル的に実効線量に

換算して意味が分からなくなるような事態を招いているのも、そういうことが原因になっているのではないのでしょうか。

“実効線量”は“放射線防護の目的のためだけ”に発明された一元化された指標なのですが、結局意味を伝えきれないで混乱が招いているとすれば、何をやっているのでしょうか？

Q：物理的な意味を問うなどと言われてしまったようで、何をか言わんやですね。私は物理的に意味のある理解にこだわりりたいので“実効線量”という仮想的な取扱いには距離を置きたいですが、放射線防護の複雑な現場で放射線影響を一元的に指標化する工夫をしている努力も分かります。そうではあっても、そういうせっかくの工夫が、説明不在のために、生きていないだけでなく誤解されているということが起きているようです。難しいことはともかく、実効線量って何ですか？ という巷に広くある疑問に対して、専門家は分かりやすい説明を与える義務があるようです。

I：そう思います。そういうことに放射線防護の専門家は気が付いていないのではないのでしょうか？ 先ほど Q 先生が引用されたウィキペディアなどの文章のように、ああいう言い方をして説明したツモリになっているように見えます。

説明不在は今の問題に限りません。科学と技術が広く社会を覆っている今の時代、このような問題は全ての場面で見られるのではないのでしょうか。一般の人たちが理解できるように、専門家が本当の意味で説明責任を果たすことを要求することは非常に大切なことだと思います…おっと、今度は私が同じ脱線をしそうです。

(NPO 科学技術社会研究所)