

【連載】

線量 —第3回—

多田 順一郎

Tada Jun Ichiro

3. 放射線の基本量

2. で述べましたように、測定技術に付随して導入された線量は、やがて放射線と物質の相互作用に基づいて定義されるようになり、測定技術から独立した概念に抽象化されていきました。そうした線量 (dosimetric quantity) は、放射線の物理的な作用の程度を客観的に表わす量であり、以下では計測線量と呼ぶことにします。計測線量は、物質に作用する“放射線の量”と、放射線の種類やエネルギー、及び作用を受ける物質の種類に依存する“相互作用の起こり易さを表す量”との組み合わせで表現され、ICRU が Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation の中で定義しています。以下、ICRU の最新の定義 (ICRU Report 85a, 2011) を引きながら^{*45}、放射線の基本量の体系を説明します。

3.1 放射線場の量

放射線—すなわち電離性放射線—の基本量を考えようとする、そもそも電離 (ionisation) とはどのような現象を言い電離性放射線 (ionising radiation) とは何物か、という根本的な問題に突き当たります。無論、ここで言う電離とは、放射線の作用で起こる電離のことであり、溶液中でイオン結合が解離することで生じ

る電離は含みません。孤立した原子が相手であれば、“放射線による電離とは、原子が粒子の衝突によって1つ又は複数の軌道電子を失うことである”と容易に定義できますが、相手が凝縮体 (condensed matter: 液体や固体) になると一筋縄ではいかなくなります。例えば、半導体検出器の空乏層に放射線が作用して電子-正孔対をつくる現象は、軌道電子が高いエネルギー状態に励起される現象に過ぎませんが、通常は、半導体中に電離が起きたと認識されています。況して金属にはもともと原子核に束縛されていない伝導電子がありますから、電離の概念は更に難しくなります。結局、現在のところ、放射線の作用による電離をうまく包括的に定義する方法は見付かっていないように思われます。

凝縮体の電離を定義することの難しさはさておいて、電離性放射線を定義することも容易ではありません。なぜならば、衝突する粒子の運動エネルギーが軌道電子の最少電離エネルギー (第一電離ポテンシャル) より小さくなくても、原子核反応^{*46} や素粒子反応^{*47} が起きる場合には、その反応の結果、原子を直接又は間接に電離できる粒子が放出され得るからです。そこで、“電離性放射線とは、物質を直接又は間接に電離したり、電離性放射線の放出をもたらす原子核反応や素粒子反応を引き起こしたりする、

^{*45} > で示した ICRU Report 85a からの引用は原文の直訳である。ただし、質量電子阻止能の引用箇所は、原文が定義に引き続いて記載した補足説明の内容を組み合わせている。

^{*46} 中性子捕獲反応

^{*47} 素粒子の自然崩壊や、原子核による π^- 粒子の捕獲反応、及び陽子による μ^- 粒子の捕獲反応など。

荷電粒子又は非荷電粒子である”という、聊かいささ循環論法めいた表現で定義せざるを得ません。

物質に作用する放射線の量は、放射線の粒子フルエンス Φ と放射線粒子が運ぶエネルギー R を基本にして組み立てられています。放射線粒子がその場所にどれだけ来ているかを表す粒子フルエンスが、微小な球に入射する放射線粒子の数と球の断面積の比であることはよく知られています。

➤ 粒子フルエンス (fluence)

粒子フルエンス Φ は、 dN を da で除した量である。ただし、 dN は、断面積 da の球に入射する粒子の数である。すなわち；

$$\Phi = dN/da \quad (\text{単位: } m^{-2})$$

しかし、粒子フルエンスが揺らぎを持つ量 (stochastic quantity) なのか、それとも揺らぎのないマクロな量なのかという解釈では、必ずしも見解が一致すると限らないようです。揺らぎを持つ量だと主張する人たちは、粒子フルエンスを観測すれば、放射線の強さが一定の場所でも測定値が変動することを挙げます。一方、そうでないと主張する人たちは、粒子数 N はゼロ又は自然数の値しかとれないので、 dN を断面積 da の球に入射する放射線粒子の数の“期待値” $d\bar{N}$ であると解釈しないと dN/da という表記が数学的に意味をなさないことを挙げます。筆者には、この論争はどうやら後者に分がありそうに思えます。なぜならば、粒子フルエンスを期待値として解釈しないと、様々な現象を“単位フルエンス当たり”に規格化することが、概念的に難しくなるからです。

放射線粒子のエネルギー R からは、伝統的に粒子の静止エネルギーが除外されています。

➤ 放射線粒子のエネルギー (radiant energy)

放射線粒子のエネルギー R は、放出され、運ばれ、受け取られる粒子のエネルギーで、静止エネルギーを除くものである (単位: J)。筆者も、例えば百万 V の電位差で加速された電子のエネルギーを 1 MeV と表記することを

違和感なく受け入れています。しかし、放射線の係わる現象の多くは、粒子の相対論的な運動状態に関係しますから、論理的に考えると、素粒子物理学の研究者たちのように、粒子のエネルギーを全エネルギーで表記する方が自然であると思います。少なくとも、粒子の対生成や対消滅などの現象を議論するときは、粒子の運ぶエネルギーを全エネルギーで記述しないと上手くいきません。

ともあれ、粒子フルエンス Φ と放射線粒子のエネルギー R とを組み合わせ、時間、エネルギー、及び方向ベクトルで系統的に微分して様々な放射線場の量を体系的に規定したのは、ICRU Report 60 の主査を務めた BIPM (国際度量衡局) の A. Allisy の考えであったと言われてしています*48。しかし、個人的には、これほど多くの量をわざわざ定義して名前を付ける必要はなかったと思いますし、粒子数の時間微分 dN/dt に、通常はベクトル場の面積分を意味する“flux”という名称を与えたのも感心しないと思っています。

3.2 相互作用の係数

放射線粒子は、電磁気力や核力を介して物質と相互作用すると、エネルギーや運動量を変化させます。一方、作用を受けた物質は、エネルギー状態が変化し、新たに放射線粒子を放出したりします。そうした相互作用の起こり易さを特徴付ける量を総称して相互作用の係数と言います。相互作用の係数は、放射線粒子の種類やエネルギー及び作用を受ける物質の種類に依存します。相互作用の係数のうち最も基本的な量は、相互作用の確率に比例する断面積です。

➤ 反応の断面積 (cross section)

ある標的に特定の種類とエネルギーの荷電粒子又は非荷電粒子が入射したとき引き起こす特定の反応の断面積 σ は、 N を Φ で除し

*48 ICRU Report 60 に、volumic とか massic といった Oxford や Webster にさえ載っていないフランス語風 (?) の形容詞が登場するのもそのためだと言われている。

た量である。ただし、 N は標的がフルエンス Φ の入射粒子に曝されたとき、標的 1 個当たりが生じる相互作用の数の期待値である。すなわち；

$$\sigma = N/\Phi \quad (\text{単位：m}^2)$$

断面積 σ は着目した相互作用が起きる割合ですから、標的に作用した放射線の粒子フルエンス Φ と作用を受けた標的の数とで規格化した相互作用の数の“期待値”にほかなりません。この概念が余りに明白であったため、ICRU Report 33 以来ほぼ 30 年もの間、“標的 1 個当たりの相互作用の確率を粒子フルエンスで除した量”と不適切に*⁴⁹ 表現されてきたことに誰も気付かなかつたのは、人のなせる業が完璧に及ばぬことへの戒めかもしれません。ともあれ、原子量が M で密度が ρ の物質の単位体積当たりの断面積の総和 $\sigma \cdot \rho \cdot N_A / M$ である線減弱係数 (linear attenuation coefficient) μ は、アボガドロ数 N_A を乗じた量という意味で、断面積の巨視的表現と理解すべきものです。断面積や線減弱係数は、物質が一次放射線と着目した相互作用をする確率ですから、物質が一次放射線の場にどのような影響を与えるかを表す量でもあります。

これに対して、一次放射線が物質にどのような影響を及ぼすかを表す相互作用の係数が、質量エネルギー転移係数 μ_{tr}/ρ や質量電子阻止能 (質量衝突阻止能) S_{el}/ρ です*⁵⁰。

➤ 質量エネルギー転移係数 (mass energy-transfer coefficient)

特定の種類とエネルギーの非荷電粒子に対する物質の質量エネルギー転移係数 μ_{tr}/ρ

は、 dR_{tr}/R を ρdl で除した量である。ただし、 dR_{tr} は、運動エネルギー R を持って入射した非荷電粒子が、密度 ρ の物質中を距離 dl 横断する間に物質との相互作用で荷電粒子に受け渡される運動エネルギーの期待値である。すなわち；

$$\mu_{tr}/\rho = (1/\rho dl) (dR_{tr}/R) \quad (\text{単位：m}^2 \text{ kg}^{-1})$$

➤ 質量電子阻止能 (mass electronic/collision stopping power)

特定の種類とエネルギーの荷電粒子に対する物質の質量電子阻止能 (又は質量衝突阻止能) S_{el}/ρ は、 dE_{el} を ρdl で除した量である。ただし、 dE_{el} は荷電粒子が質量 ρ の物質中を距離 dl 横断する間に、物質中の軌道電子との相互作用で原子を電離したり励起したりすることで失うエネルギーの期待値である。すなわち；

$$S_{el}/\rho = (1/\rho) dE_{el}/dl \quad (\text{単位：J m}^2 \text{ kg}^{-1})$$

つまり、これらの相互作用の係数は、一次放射線の作用によって、どれほどのエネルギーが物質中の荷電粒子に運動エネルギーとして渡されるかを表す係数です。したがって、素直に考えれば、質量エネルギー転移係数と質量電子阻止能は、同じ $\text{J m}^2 \text{ kg}^{-1}$ (又は $\text{eV cm}^2 \text{ g}^{-1}$ など) という単位を持つのが自然です。しかし、質量エネルギー転移係数は、もともと光子線の質量減弱係数に補正を加えて導かれた量であったため (ICRU Report 10a, 1962)、二次荷電粒子の初期運動エネルギーの総和を一次放射線の放射線粒子の運動エネルギー R で規格化し、質量減弱係数 μ/ρ と次元を合わせています。しかし、入射する非荷電粒子線を光子線に限定しなければ、二次荷電粒子放射線の発生には、一次非荷電粒子放射線と物質の相互作用で解放される静止エネルギーも寄与し得るので、こうした規格化は必ずしも合理的ではありませんでした*⁵¹。

無論、質量エネルギー転移係数にせよ質量電子阻止能にせよ、二次荷電粒子の運動エネルギー

*⁴⁹ フルエンスは任意の値をとれるので、ゼロでない断面積を持つ反応の確率を 1 より大きくできる。

*⁵⁰ ただし、質量電子阻止能は荷電粒子が“失う”運動エネルギーとして定義されているので、二次荷電粒子を生成させるため、二次荷電粒子の束縛を解くために消費されたエネルギーも含んでいる点に、質量エネルギー転移係数と違いがある。

ーに受け渡されるエネルギーの期待値が、作用する物質の量（一次放射線粒子が通過した媒質中の距離）に比例することを前提としていますから、一次放射線と物質の相互作用の空間的な変化が連続的だとみなせる範囲で成り立つ概念です。質量電子阻止能の場合、これは荷電粒子の連続減速近似（constant slowing-down approximation：CSDA）が成り立つことを前提することを意味しますから、一次荷電粒子が電子であるときには、適用条件に注意が必要です。

線電子阻止能 S_{el} と類似した概念に線エネルギー付与 L があります。

➤ 線エネルギー付与 (linear energy transfer: LET)

特定の種類とエネルギーの荷電粒子に対する物質の線エネルギー付与又は制限付き線電子阻止能 L_{Δ} は、 dE_{Δ} を dl で除した量である。ただし、 dE_{Δ} は、荷電粒子が物質中を距離 dl 横断する間に、電子との散乱で失うエネルギーの期待値から、 Δ より大きな運動エネルギーで放出された二次電子の初期運動エネルギーの合計の期待値を差し引いたものである。すなわち；

$$L_{\Delta} = dE_{\Delta}/dl = S_{el} - dE_{ke > \Delta}/dl \equiv S_{el, \Delta} \quad (\text{単位: } J m^{-1})$$

ただし S_{el} 及び $S_{el, \Delta}$ は、それぞれ線電子阻止能及び制限付き線電子阻止能であり、 $dE_{ke > \Delta}$ は、荷電粒子が物質中を距離 dl 横断する間に Δ より大きな運動エネルギーで発生した二次電子の初期運動エネルギーの総和の期待値である。

線エネルギー付与と阻止能が導入されたとき

*51 極端な事例としては、一次非荷電粒子放射線が熱中性子線で、捕獲核分裂を引き起こす場合が挙げられる。こうした反応の寄与を考慮しなかった結果、ICRU Report 33 以降の質量エネルギー転移係数の定義には、“入射非荷電粒子線の運動エネルギーに対する二次荷電粒子の初期運動エネルギーの割合”という表現が用い続けられてきた。

(ICRU Report 9, 1959)、前者は、一次荷電粒子から飛跡近傍の物質へのエネルギーの移動に着目した量—今日の制限付線エネルギー付与 L_{Δ} に相当する概念—であるのに対して、後者は、相互作用の結果、一次荷電粒子放射線にどのような影響（運動エネルギーの減少）が生じるかに着目していると説明されていました。その後、線エネルギー付与が二次電子の運動エネルギー*52 に下限 Δ —もはや一次荷電粒子の飛跡に沿った物質へのエネルギーの移動とはみなせないほど遠くまで到達する“ δ 線”の最小運動エネルギー—を設けた L_{Δ} という形に再定義されると (ICRU Report 11, 1968)、それ以降は、線電子阻止能を、二次電子の運動エネルギーに制限がない線エネルギー付与の特別な場合である (L_{∞}) とみなすようになりました。

相互作用の係数の中で、 W 値は線量測定の際に重要な役割を担う量です。

➤ W 値 (mean energy expended in a gas per ion pair formed)

気体中に一對のイオンを生成するために費やされる平均のエネルギー W は、 E を N で除した量である。ただし、 N は、初期運動エネルギーが E の荷電粒子が気体中で完全にエネルギーを消費する間に*53 生成する電荷のいずれかの符号のものの和の期待値を素電荷で除した値である。すなわち；

$$W = E/N \quad (\text{単位: } J)$$

しかし、“気体中に一對の電離を作り出すのに

*52 ただし、1980年のICRU Report 33までは、 Δ を二次電子の初期運動エネルギーではなく、一次荷電粒子が失うエネルギーの上限と規定していたので、放出される軌道電子の平均束縛エネルギー分だけ今日と定義が異なっていた。

*53 この“完全にエネルギーを消費する”という表現及び照射線量の定義で使われている“完全に停止する”という表現は、荷電粒子が完全に停止することがあり得ないので、聊か適切とは言い難いものである。正確を期すには、“運動エネルギーが媒質中の熱運動のエネルギーと同程度になる”とすべきであろう。

要する平均のエネルギー”という概念は、よく考えると不自然な点があります。なぜなら、 W 値は、前述の定義に示されているように、気体中にある確定した個数の電離を作り出すのに要した荷電粒子の“初期運動エネルギーの期待値”を、電離の個数で除した量ではないからです。実際、 W 値を実験的に求めるには、ある確定した運動エネルギーを持つ荷電粒子を気体中に放ち、観測される電離の個数の“平均値”を粒子の運動エネルギーを除した量の逆数を得ようとするはずです。実験ばかりでなく、 W 値の荷電粒子運動エネルギー依存性を表す $w(E)$ の表記も、聊か不自然な形で表現されます。しかし、どんな経緯でこんな捻くれた量を定義してしまったのか、筆者にも今のところ掴めておりません。

W 値の定義の不自然さは、放射線化学収率 G が、化学物質の収量（モル数）の期待値を、作用した放射線のエネルギーで除している点からも際立っています。そのため、ICRU は 2011 年に、新たに放射線電離収率〔仮訳〕 Y を定義しました。今後、 Y 値が W 値に置き換わっていくかどうかは、いわば習慣と科学的合理性の綱引きということになりそうです。

➤ 放射線電離収率〔仮訳〕(ionisation yield in a gas)

放射線電離収率 Y は、 N を E で除した量である。ただし、 N は、初期運動エネルギーが E である特定の種類の荷電粒子が気体中で完全にエネルギーを消費する間に生成する電荷のいずれかの符号のものの和の期待値を素電荷で除した値である。すなわち；

$$Y=N/E \quad (\text{単位: } J^{-1})$$

なお、気体中に電離を引き起こす一次荷電粒子の電荷は、 W 値を算出する場合の電荷に加えないことも明示的に示されました。これは、 W 値の定義からほとんど明らかかもしれませんが、低エネルギー光子の光電効果を利用して W 値を測定する場合、最初の光電効果による

電離の電荷を数えるか否かが%オーダーで寄与し得るので、念のため講じられた措置です。

3.3 計測線量

1989 年の Report 60 以降、ICRU は、計測線量をエネルギーの転移に関する計測線量とエネルギーの付与に関する計測線量とに大別しています。前者は、一次放射線から作用した物質に移動するエネルギーに関する量であり、後者は物質が最終的に受け取るエネルギーに関する量です。先に述べたように、計測線量は放射線場の量と相互作用の係数の組み合わせで作られる量ですが、放射線が物質に作用すると、散乱や吸収や新たな放射線の放出によって放射線場が変化します。そのため、相互作用の係数を組み合わせる放射線場の量は、転移に関する計測線量では一次放射線のそれですが、エネルギーの付与に関する計測線量では、放射線と物質の作用によって変化した放射線場の量になります。ICRU が計測線量を二分類した背景には、そうした事情があると考えられます。なお、以下では、マイクロシメトリーに関する量には言及しないことにしました。マイクロシメトリーに関する量は、現在の線質係数を導く過程には関係しましたが、現在の線量体系そのものには直接関与しないためです。

3.3.1 エネルギーの転移に関する計測線量

エネルギーの転移に関する計測線量は、一次放射線から二次荷電粒子へのエネルギーの移行に関する量です。この範疇に属する計測線量には、カーマ、シーマ^{*54}、及び照射線量があります。

2. で説明しましたように、カーマは一次放射線と物質の相互作用だけに基づいて定義された量でした。ところが、カーマのルーツの一方である first collision dose という計測線量が、中

*54 日本医学物理学会では、日産車の名称との重複を避け“セマ”と呼んでいるが、本稿では ICRU 委員たちの発音—[sɪ:mə] 又は [kɪ:mə]—に従い長母音の“シーマ”を用いている。

粒子の反応のうち陽子との弾性散乱にしか着目していなかった影響で^{*55}、従来のカーマの定義には、原子核反応などで発生する二次荷電粒子の寄与が考慮されていませんでした。それにもかかわらず、カーマは、いかなる種類の非荷電粒子のどんなエネルギーの放射線にも、また、作用を受ける物質の種類にも制限なく適用できる概念として定義されたので、量の定義とそれが表現しようとしている量の概念とが乖離してしまいました。その状態が実に半世紀近くにわたって継続していたのは驚くべきことですが、そうしたことが起き得たのも、カーマが荷電粒子平衡状態にある組織や空気や水—いずれも核反応の起こりにくい原子核—の吸収線量を近似するために使われてきたに過ぎないためでしょう。

ともあれ、ICRUは、最近の改訂で^{ようや}漸くこうした不具合を是正しました。その結果、これまで相互作用の直接の結果として放出されるもの—光電子、コンプトン電子、反跳陽子など—以外でカーマに寄与する荷電粒子として、オージェ電子のみを明示していましたが、相互作用を受けた原子・分子や原子核の緩和過程や壊変で放出される総ての荷電粒子がカーマに寄与するという記述に変わりました。

➤ カーマ (kerma)

電離性非荷電粒子放射線のカーマ K は、 dE_{tr} を dm で除した量である。ただし、 dE_{tr} は、質量 dm の物質に入射した非荷電粒子によって、質量 dm の物質内で発生した総ての荷電粒子の初期運動エネルギーの総和の期待値である。すなわち；

$$K = dE_{tr} / dm \quad (\text{単位：J kg}^{-1})$$

^{*55} もともと first collision dose は、“小さな体積の組織の吸収線量”を模擬した概念だった。したがって、速中性子線が水素原子核との弾性散乱で発生させる反跳陽子による寄与が主要なもので、捕獲反応で放出される γ 線の作用は“小さな体積内”には寄与しないとされていた (NBS Handbook 63, 1957)。

なお、相互作用で放出された二次荷電粒子の運動エネルギーの期待値 dE_{tr} から、二次荷電粒子が物質と相互作用したときに放射過程で失われる部分を除いたものを dm で除した量に対して、かつて Attix が提唱して以来 (F.H. Attix, 1979) 慣用的に使われてきた衝突カーマ (collision kerma) という名称が、30 年余りの歳月を経て漸く正式に採用されました。

シーマは、一次放射線が荷電粒子である場合のカーマに対応した概念として提案された計測線量で (A.M. Kellerer, et al., 1992), 1998 年の ICRU Report 60 から定義が記載されるようになりました。しかし、シーマの定義で、なぜ着目した微小質量の中で荷電粒子が失うエネルギーのうち、二次電子による寄与を除くのかは、多くの人にとって不可解な記述であったと思います。なぜならば、例えば一次荷電粒子が電子線である場合、着目した微小質量に飛び込む電子が一次電子か二次電子か判定しようがないからです。それゆえ、シーマは、計測線量でありながら、本質的に実測しようのない甚だ概念的に矛盾した存在であると言えます^{*56}。

➤ シーマ (cema)

電離性荷電粒子のシーマ C は、 dE_{el} を dm で除した量である。ただし、 dE_{el} は、質量 dm の物質に入射した二次電子以外の荷電粒子が、質量 dm の物質内で電子との散乱によって失うエネルギーの期待値である。すなわち；

$$C = dE_{el} / dm \quad (\text{単位：J kg}^{-1})$$

シーマの定義で二次電子の寄与を除く理由は、二次電子が運んでいるエネルギーが、“上流”にある物質と一次荷電粒子が相互作用して失ったエネルギー—すなわち、上流側の別の場所で既にシーマにカウントされてしまったエネルギー—であるからです。別の言い方をすれば、シーマという計測線量は、荷電粒子の輸送

^{*56} 荷電粒子平衡が成り立てば、シーマは数値的に吸収線量と同じ値をとる。

計算をするとき、連続減速近似の成り立つ軌道電子との衝突を通じて、一次荷電粒子から物質へエネルギーが移行する有様を捉えた計算線量であったわけです。そうした量をわざわざ定義して名前を付ける必要があったのか、個人的には甚だ疑問を覚えます。輸送計算をする人たちは、シーマが定義される遙か以前から、プログラムの中でそれに相当する量を使ってきましたし、その量に名称がないことなど全く苦にしていなかったはずだからです。

照射線量は、最も長い歴史を持つ計測線量でありながら、レントゲン単位が公に使えなくなって以来、だんだん肩身の狭い立場に追い込まれつつあるようです。しかし、世界の線量標準は、今日でも本質的に照射線量の測定に基づいていますから、供給される標準量が単位と名前を変えて“空気衝突カーマ”になったとしても、その重要性が減じるわけではありません。その長い歴史を持つ照射線量の定義にも、実は、まだ曖昧な部分が残されていました。最近の定義の改訂で、実に半世紀ぶりに、作用を受ける空気が“乾燥”空気であるという条件が復活しました。

➤ 照射線量 (exposure)

照射線量 X は、 dq を dm で除した量である。ただし、 dq は、質量 dm の乾燥空気に入射した光子が電離した軌道電子又は対生成した電子及び陽電子が、乾燥空気中^{*57}で完全に停止するまでに作り出したイオンの、一方の符号の電荷の和の期待値の絶対値である。すなわち；

$$X = dq/dm \quad (\text{単位: } C \text{ kg}^{-1})$$

誰もが、照射線量は乾燥空気と定義するものだと信じていましたから、この記述がなくても実質的に混乱は起きなかったのですが、空気の W 値が湿度依存性を持つことから、量の定義

としては漸く不完全さが減ったこととなります。しかし、よく考えてみると、そもそも“乾燥空気”とはどのような組成のものであるか、世の中に統一された定義はなさそうです^{*58}。過去には、空気ではなく水蒸気を用いた定義に代えることを検討した時代もあったそうですが、技術的な難しさと、空気中の微量元素の存在が測定値に及ぼす影響が実質的に小さいことから、実現には至らなかったようです。

なお、照射線量の定義には、二次電子が放射過程で放出した光子が乾燥空気に再吸収されて起こす電離を除外する、という付帯条件があります。しかし、照射線量の概念規定の抽象化が進んだため、筆者には、自由空気電離箱による測定法に起源を持つこの付帯条件を維持することが、もはや合理的であると思えません。

空気衝突カーマは、照射線量を W 値によってエネルギーに換算したものと等価であると理解されています。しかし、両者が厳密には等価であり得ないことも ICRU Report 85a に明記されました。なぜならば、(1) 照射線量が光電効果などの一次電離で生じる電荷を含めているのに対して、 W 値が二次電子の減速過程で生じる電荷だけを考慮していること、(2) W 値が電子の運動エネルギーに依存する量であること、及び (3) 照射線量では二次電子の放射過程で放出された光子の再吸収による電離を除外するのに対して、 W 値ではその電荷を含めていることなどの違いがあるからです。

3.3.2 エネルギーの付与に関する計測線量

放射線が物質に相互作用して(主に)二次荷電粒子に受け渡されたエネルギーは、その後、二次荷電粒子と物質の相互作用を通じて更に物質中に散逸していき、最終的にはほとんどが熱

^{*57} 日本語で表すと不明確であるが、原文ではこの乾燥空気には定冠詞が付いていない。

^{*58} NOAA/NASA/USAF が出版した US Standard Atmosphere (1976) は比較的よく参照されるが、大気の組成は、地質や植生及び高度によって変わり、また、二酸化炭素のように人の活動によって変化し続けている成分もあるので、“標準乾燥空気”の成分を定義するのは容易でない。

エネルギーになります。その過程で、一部のエネルギーが、物質の化学的状態を変化させ、生物学的な効果の引き金ともなります。エネルギーが物質に付与されるとは、放射線が運ぶエネルギーが、物質中ではや電離性の放射線という形では移動できなくなることを意味すると解してよいでしょう。

ICRUは、放射線から物質へのエネルギーの付与に関して、1998年に付与エネルギーという概念を導入しました。付与エネルギー ε_i は、一個の電離性放射線粒子が、1つの相互作用で物質に受け渡すエネルギーとして、“相互作用点”でのエネルギー収支（電離性放射線粒子が運び込むエネルギーと、電離性放射線粒子によって運び去られるエネルギーの差に、相互作用の結果解放される静止エネルギーを加えた量）によって定義しました。しかし、この概念規定には科学的に不合理な点があり、こうした量を定義したことが、放射線と物質の相互作用に関する誤った描像を、人々に与えてしまったのではないかと懸念されます。

付与エネルギーの定義の問題点は、電離性放射線から非電離性の放射線や物質の励起状態にエネルギーを移行させる相互作用一例えば結晶中のフォノンのような素励起の発生一が、決して空間の一点で起こらないことや^{*59}、そもそも、静止エネルギーが解放されるような相互作用では、電離性の放射線しか放出されないの、エネルギーの収支が常にゼロになることなどが挙げられます。2011年の改訂作業の際、ICRU report committeeではそうした不条理を随分議論したのですが、“相互作用点”という物理的に馬鹿げた記述は除かれたものの、付与エネルギーの定義そのものは残されてしまいました。個人的には、付与エネルギーに寄与する様々な素過程を具体的に記述できない限り、こ

^{*59} 量子論的な描像を考えれば、光電効果はもちろんのことコンプトン散乱さえ“一点”で起きる現象ではない。

うした量をわざわざ規定しても意味がないと考えております。

➤ 付与エネルギー (energy deposit)

付与エネルギー ε_i は、単一の相互作用によって付与されるエネルギーである。すなわち；

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} + Q \quad (\text{単位: J})$$

ただし、 ε_{in} は、入射する電離性放射線粒子のエネルギー（静止エネルギーを除く）、 ε_{out} は、相互作用の結果放出される総ての電離性荷電粒子と電離性非荷電粒子のエネルギーの和（静止エネルギーを除く）であり、 Q は、相互作用による原子核や総ての素粒子の静止エネルギーの変化である（ $Q > 0$: 静止エネルギーの減少； $Q < 0$: 静止エネルギーの増加）。

➤ エネルギー付与 (energy imparted)

エネルギー付与 ε は、着目している体積内の総ての付与エネルギーの合計である。すなわち；

$$\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i \quad (\text{単位: J})$$

➤ 吸収線量 (absorbed dose)

吸収線量 D は、 $d\bar{\varepsilon}$ を dm で除した量である。ただし、 $d\bar{\varepsilon}$ は、電離性放射線による質量 dm の物質へのエネルギー付与の期待値である。すなわち；

$$D = d\bar{\varepsilon}/dm \quad (\text{単位: J kg}^{-1})$$

その点、1962年に導入定義されたエネルギー付与は、ある程度の大きさを持った物質の小領域内で起きる（期待値が意味をなすほど）多数の相互作用によるエネルギー収支を合計した量なので、荷電粒子放射線が小領域内で起こす連続減速的な相互作用過程も含んでおり、概念的な破綻がありません^{*60}。そして、吸収線量はエネルギー付与の期待値に基づいて定義されていますから、筆者には、付与エネルギーの必要性が益々分かりません。

吸収線量は、単位質量当たりのエネルギー付

与の期待値として定義される計測線量ですが、その名称は、誤解を与え易いものであると思います。なぜならば、放射線から物質に付与されたエネルギーは、必ずしもその場所に留まらず、様々な形で散逸していくからです。

物質に付与されたほとんど総てのエネルギーは、最終的に熱エネルギーになりますから、吸収線量の絶対測定法としてカロリメトリーが利用されてきました。とは言うものの、放射線がもたらしたエネルギーのうち熱に変わる部分は、放射線が物質に及ぼす（興味の対象である）影響の原因とはなり難いものです。例えば、鉄(I)イオンが鉄(II)イオンになる酸化ポテンシャルは約0.77 mVですが、この反応の放射線化学収率は約 1.6×10^{-6} mol/Jですから、物質（溶液）に付与されたエネルギーの一部しか化学反応に寄与していないことが分かります。それでも、吸収線量が現在の線量体系の中で最も基本的な計測線量たり得るのは、物質に付与されたエネルギーのうち一定の割合が物質に生じる変化に費やされると考えられるからにはほかなりません。

最後に計測線量全体の問題に戻りますが、カーマの項目で触れましたように、二次荷電粒子

の発生過程には、相互作用で形成される原子や原子核及び素粒子の励起状態の緩和過程も含まれます。それらの緩和過程は、それぞれに有限の平均寿命を持ちますから、その二次荷電粒子の放出は、一次放射線と物質の相互作用から様々に遅れて発生します。そうした遅れを考慮しなくてよい緩和時間の範囲を恣意的でなく決めることはできませんから、発生する二次荷電粒子に渡されるエネルギーは、不可避的に相互作用からの経過時間に対する依存性を持ちます。つまり、仮に一次放射線と物質の相互作用が瞬間的に生じたとしても、カーマの値は時間の経過とともに連続的に変化することになります。同様に、カーマ以外のすべての計測線量も、そうした時間遅れの性質を本質的に持ちます^{*61}。

参考文献

- 69) Attix, F. H., *Health Physics*, **36**, 347-354 (1979)
- 70) ICRU, "Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) 1959," NBS Handbook **78** (1961); ICRU Report **9**
- 71) ICRU, "Radiation quantities and units," NBS Handbook **84** (1962); ICRU Report **10a**
- 72) ICRU, "Radiation Quantities and Units," ICRU Report **11** (1968)
- 73) ICRU, "Radiation Quantities and Units," ICRU Report **33** (1980)
- 74) ICRU, "Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation," ICRU Report **60** (1998)
- 75) ICRU, "Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (Revised)," J. ICRU, **11** (2011); ICRU Report **85a**
- 76) Kellerer, A.M., Harn, K. and Rossi, H.H., *Radiation Research*, **130**, 15-25 (1992)
- 77) NCRP, "Protection against neutron radiation up to 30 million electron volts," NBS Handbook **63** (1957)
- 78) NOAA/NASA/USAF (National Oceanic and Atmospheric Administration/National Aeronautics and Space Administration/U.S. Air Force), "U.S. Standard Atmosphere, 1976." (1976)

(NPO 法人放射線安全フォーラム)

^{*60} そもそもそんな小領域が存在し得るかという反論があるが、十分に大きな粒子フルエンスで放射線が照射したときの相互作用に基づく期待値を考えれば、原理的には可能だと思われる。しかし、1998年以來、エネルギー付与は、小領域内の付与エネルギーの和と言う形で表現されるようになったため、付与エネルギー自体が持つ不合理性を抱え込むようになってしまった。

^{*61} その最も極端な例は、一次放射線と物質の相互作用で放射性同位体が形成される場合だろう。例えば、熱中性子が⁵⁹Coに作用したとき、中性子を捕獲した原子核は、直ちに約7.5 MeVの励起エネルギーを多数の即発 γ 線の形で放出するが、結果として生じる基底状態の⁶⁰Coは、約5.3年の半減期で、最大約0.3 MeVの β 線を放出して⁶⁰Niの励起状態になり、直後に約2.5 MeVの励起エネルギーを2個の γ 線の形で放出する。この過程を通じて、カーマも吸収線量も値が変化し続ける。