

【連載】

線量 —第1回—

多田 順一郎

Tada Jun Ichiro

1. 線量とは何か

放射線の作用で生じる様々な影響について、その因果関係を定量的に記述しようとするとき、原因の大きさを記述するために用いられる量を総称して、私たちは線量 (radiation dose) と呼んでいます。影響の原因は、明らかに作用した放射線そのものですから、どのような放射線がどれだけ作用したかを記述すれば事足りるはずですが、しかしながら、作用した放射線を定量的に記述しようとするとき、どのような種類の放射線粒子が、どのようなエネルギー分布と方向分布を持ち、どのくらいの数がどのように時間変化しながら作用する場所に到達しているかを記述しなければなりません。しかし、それほど詳しい情報を悉く列挙することは、放射線の場が特別な対称性を持たない限り、ほとんど不可能でしょう。ですから、もし、それら無数の情報をただ1つの数値に集約できたとすれば、非常に便利に違いありません。ただし、無数の情報をただ1つの数値に集約する方法は、無限に考えられます。その無数の可能性の中から目的に合った性質を持つものを合目的的に選択したものが、私たちが線量と呼んでいる代物の正体です。

ところが、“合目的な選択”という行為は、選択した人の価値観に依存しますから、必ずしも科学的な必然性だけで説明できる過程ではありません。別な言い方をすれば、線量は、熱学や電磁気学などで使われる諸量のように、科学の第一原理から論理的に導けるものではないと

言えます。線量という概念の分かり難さは、^{おそ}らくそうした聊か怪しげな素性に起因しているのだろう、と筆者は考えております。ともあれ、どのような線量も特定の目的に適うよう選ばれたものですから、それが放射線の作用と影響の因果関係を適切に記述できるのは、その特定の目的の範囲に限られるはずですが、いかなる現象に対しても“同じ値が同じ影響をもたらす”ように表せる線量など、固より存在するはずがありません。しかし、概念の一般化への願望は、いわば科学者の本能のようなものですから、先人たちは、導入した線量概念の適用範囲を拡張しようと、涙ぐましい努力を積み重ねてきました。私たちの立ち位置は、現在もなお続けられているそうした努力の先端にあります。

本稿では、第2章(第1~2回)で私たちがどのような線量をどんな経緯で考案し、それをどのように用いてきたかを振り返り、私たちの立ち位置を再確認します。そして、第3章(第3回)で現在の放射線の基本量の体系を、第4章(第4回)では放射線防護に用いられる量の体系を議論し、現在の線量体系の問題点と解決の方向を探ります。

2. 線量と線量制限の歴史

この章では、線量と線量制限の歴史を、(独)放射線医学総合研究所客員研究員の館野之男先生に倣って4期に分けて振り返ることにします(館野之男, 1995)。線量は様々な目的に利用さ

れてきましたが、放射線の人体への影響に関連する放射線治療や放射線防護が、常に用途の重要な部分を占めていました。それゆえ、線量の歴史を振り返るとき、放射線が人の健康に及ぼす影響に関する考え方を象徴する線量制限の状況を併せ見ること、その時々線量概念の意味をより深く理解できると思います。本稿では、4つの時期を、それぞれの時期の放射線防護に対する関心の在り方を象徴して、年代順に**皮膚の時代**、**骨髄の時代**、**遺伝の時代**及び**がんの時代**と呼ぶことにします。各時代の間に画然とした境界線を引くことは困難ですが、敢えて1つの象徴的な出来事をもって時代の境界とするならば、皮膚の時代と骨髄の時代の境界は今日の米国放射線防護審議会（National Council on Radiation Protection and Measurements：NCRP）の前身に当たる米国のX線とラジウムの防護に関する諮問委員会（U.S. Advisory Committee on X-Ray and Radium Protection：1929年創立）が深部線量を意識して耐用線量の値を改訂した1936年、骨髄の時代と遺伝の時代の境界は米国科学アカデミーの原爆放射線の生物学的影響に関する委員会（Committees on Biological Effects of Atomic Radiation：BEAR）が原子放射線の遺伝的影響に関する報告書を発表した1956年、そして遺伝の時代とがんの時代の境界は国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection：ICRP）の基本勧告に実効線量当量が入り入れられた1977年に置くのが妥当ではないかと思えます。

2.1 皮膚の時代

X線が発見されてから20世紀はじめの四分の一くらいまでを“皮膚の時代”と名付けたのは、この時代の放射線防護の目標が——そもそも防護が必要だと認識するまでに多くの時間と多数の犠牲を払わねばなりませんでしたが——皮膚の傷害を防ぐことにあったからです。なぜならば、当初のX線装置は管電圧が低く、軟線除去フィルターの使用が一般化し始めたのが

第一次世界大戦（1914～18年）前後のことだったため、X線による障害は、いわゆるX線火傷や脱毛などの急性傷害と皮膚の色素沈着や毛細血管の拡張などの慢性症状、及びそれらが進行して起きる皮膚の潰瘍形成や皮膚がんであったからです*1。

X線が発見された19世紀の末、私たちはまだ前章で述べたような放射線の量子的な描像など持ち合わせていませんでしたので*2、X線の量をもっと直感的に捉えねばなりませんでした。当時の人々も、X線が物質に作用すると、作用したX線の量に応じた一定の反応が得られることを経験的に理解していました。例えば、Röntgenは、はじめ白金シアン酸バリウムの蛍光の強さを、そこに到達するX線の強さの目安にしました*3。

今日的な感覚では随分大胆に思えますが、X線にどのような作用があるかよく分かっていなかったにもかかわらず、早くもX線発見の翌年には、医学への応用——診断や皮膚疾患などの治療への応用——が始まり、たちまち様々な傷害を引き起こしました*4。そのため、X線の**処方量**（=dose）を客観的に定める手段が、直ぐにでも必要になりました。当初、X線の処方量は“皮膚からX線管球までの距離”と“X線の照射時間”とで表わされていましたが、当時の高電圧発生装置と真空ポンプの性能やX線管球の出来にばらつきがあり、その目論見に十分応えられませんでした。

*1 X線による皮膚障害の頻発に対応するため、ドイツでは、1905年にX線装置の取扱いに免許制を導入し、1913年には世界で初めての放射線防護規則を制定した（館野之男，1995）。また、英国のレントゲン学会が、X線取扱い者の防護に関して勧告したのは、1915年になってからのことであったと言われている。

*2 Plankの光量子仮説の論文は1900年であったし、その仮説に基づいてEinsteinが光電効果の論文を発表したのは1905年であった。

*3 後に、標準ランプの発光強度と蛍光の強さを比較する測定法が提案された（M. Contremoulins, 1902）。

X線の量を科学的な方法で規定しようとした最も初期の報告は、充電した箔検電器の放電に関するものではないかと思われます(L. Benoist, 1896)。今日、世界の線量標準施設(standard laboratory)で採用されているX線の標準量の測定が、乾燥空气中に生じる電離の電荷量密度——すなわち照射線量——の測定であることを考えると、科学的な線量測定が電荷量の測定を端緒としていたことには、科学技術史的に興味深いものがあります。なお、Benoistの測定は、箔検電器そのものをX線で照射していましたから、検電瓶の壁から放出された二次電子による瓶内の空気の電離と、箔検電器の電極表面から光電子が放出される効果とを併せて観測していたものと思われます。

“放射線が物質に作用して得られる反応の量”と言っても、放射線は物質に多様な反応を引き起こすことができますから、どのような反応に着目するかによって、様々な線量を考案することができました。例えば、照射された空気の温度上昇を気体温度計で測定した試み(E. Dorn, 1897)は、吸収線量を熱量計で測定する今日の測定技術(カロリメトリー)の魁とみなせるものでしょう。

しかし、19世紀末から20世紀の初頭にかけての時期は、“放射線の物質に対する作用”を、

*4 長時間のX線透視の後、目に痛みを覚えたEdisonが報告したことが1896年2月のNatureに記載されている(NOTES欄, 1896)。最初の放射線傷害(脱毛)の事例は、早くも1896年4月に報告され(J. Daniel, 1896)、マサチューセッツ総合病院は1896年から6年の間に167例のX線火傷を扱ったことを報告している(E. Codman, 1902)。ただし、こうした皮膚傷害の原因がX線そのものの作用であるという認識は、20世紀に入るまで確立しなかったようで、X線管から放出される紫外線、装置の周囲で発生するオゾン、静電気など様々な原因説が議論された(N. Scott, 1897)。医学利用によるX線曝露ではないが、初期の死亡例のうち、1904年に皮膚癌の縦隔転移で亡くなったEdisonの助手C. Dallyの例は、それを機にEdisonがX線の研究を放棄したこともあり、特に有名である(P. Brown, 1936)。

電荷やエネルギーなど、いわば物理学の基本量で測ろうとするよりも、X線の量の目安をできるだけ簡便に定量する手段が模索された時代だったと言えます。何よりも、当時の電荷やエネルギーの測定は、道具立てが大掛かりになり、診療の現場で利用するには不向きだったからでしょう。一方、放射線化学的手法は、反応が飽和に近づくまで、照射されたX線の量と反応生成物の量が比例しますから、反応生成物が比較的安定で、それを定量するときの手間があまり面倒でなければ、“コンパクトで簡便な測定手段”という医療側の要望に合う可能性がありました。

そのため、表1に主な例を示すように、様々な放射線化学反応を利用した“実用線量計”が考案されました。そして、それらの実用線量計で測定される値に対して、考案者が独自に単位を定めていました。その意味で、この時代の線量は、いわば測定法に従属するものだったと言えます。

表1の最初の欄に掲げたHolzknechtのChromoradiometer(図1)は、X線を照射した結晶

表1 20世紀初頭に考案された線量測定法と単位

発案者	考案された化学作用などに基づく線量
G. Holzknecht, 1902年	KClとNa ₂ CO ₃ の結晶の混合物の着色を利用。標準色と比較して線量を決定するChromoradiometerを商品化。皮膚紅斑線量の1/3を1Hと規定した。
R. Sabouraud and H. Noiré, 1904年	蛍光物質(白金シアン化バリウム)の着色を利用したX線の定量法を提案。単位:B
R. Kienböck, 1905年	現像したフィルムをキットに付属する標準黒化度と比較してX線の量を決定する測定法を提案。単位:X
H. Bordier and J. Galmard, 1906年	ヨードホルムの2%クロロホルム溶液中に生成するヨウ素の量で、X線の量を定量する方法を提案。0.1mg/ccのヨウ素が生成するX線の量を1Iと規定。
G. Schwartz, 1907年	しょう 蔞酸アンモニウムと塩化第二水銀の溶液から沈殿する塩化第一水銀の量で、kalomという単位の線量を規定。

を副尺に乗せて移動し、標準色と合せてそのときの管電圧に相当するスケールの数値を読み取るという簡便な仕組みであったため、当時、一種の標準線量計のような役割を果たしていたようです。なお、化学反応を利用した線量計は、決して黎明期^{アンティイノグ}の遺物ではなく、写真乳剤中の潜像形成を利用する“フィルム・バッジ”は20世紀末まで主要な個人線量計として広く利用されましたし、1927年に考案されたフリック線量計^{*5}は、40~400 Gyの比較的大線量領域の水吸収線量を測定するために、今日でも用いられています。

前述のように、当時の人々がX線から受けた被害は主に皮膚の傷害でしたので、皮膚紅斑線量^{*6}が放射線防護の目安になっていました。やがて、“1月当たりの曝露が皮膚紅斑線量の1/100を越えないX線の取扱いは傷害が認められない”という経験則に基づいて、これをX線の耐用線量 (tolerance dose) にしようという初めての放射線防護基準が提案されました (A. Mutscheller, 1925)。しかし、耐用線量を具体的に表現しようとしても、当時はHolzknechtのH単位を除いて、共通に使える線量の尺度がありませんでした。

今から100年前も現在と同様に、電気信号を介した方法が、精密な測定に適していました。

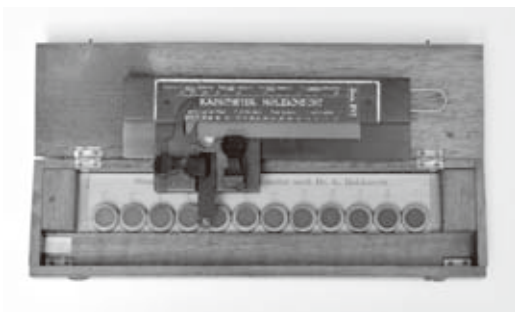


図1 Chromoradiometer
(Deutsches Röntgen-Museum 提供)

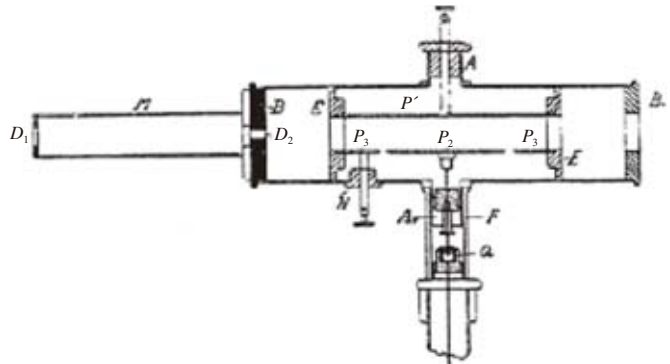


図2 KrönigとFriedrichが用いた自由空気電離箱の図
コリメータDで絞られたX線ビームは、高電圧の陰極P'と集電極P₂の間に導かれ、電極の幅とビームの断面積で決まる体積の空気中に生成する電離電荷が測定された。P₃は電場を並行に保つための電極

そして、今日の照射線量の濫觴^{らんしょう}となった空気中に生成するイオンの電荷密度に基づいてX線の量を規定しようとする考え方が提案され (M.P. Villard, 1908)、そうした量を定義に即して測定するため、検出器の壁からX線の作用で放出される二次電子の影響を避けて空気中のイオン生成量を測定するための自由空気電離箱が考案されるとともに、二次電子平衡の概念が確立されて行きました (図2)。

しかし、こうした装置で測定される量に対して、それを“照射されているX線の量だ”とする解釈 (I. Solomon, 1921) と、“空気に対するX線の作用の大きさだ”とする解釈 (H. Behnken, 1924) とがあり、それぞれをフランス科学アカデミーとドイツ・レントゲン協会が1924年に公認する、という聊かややこしい事態になってしまいました。

不幸なことに、ドイツとフランスそれぞれが

^{*5} 硫酸鉄 (I) の酸性溶液で、放射線の作用による非可逆的な酸化反応で鉄 (II) イオンが生成する量を、光の吸収で測定する線量計。ほぼ水等価の線量計であるため、水 (軟組織) 吸収線量の測定に利用される (H. Fricke and S. Morse, 1927)。

^{*6} 皮膚紅斑線量 (Hauterythemdosis) は、健康な成人の顔面の皮膚に紅斑を生じさせる線量をいう。急性曝露の場合、皮膚の吸収線量で5~6 Gyに相当する。

導入したX線の量は、同じレントゲンという単位（単位記号：R）を用いながら、ドイツの単位系で1Rと表されるX線の量が、フランスの単位系で1Rと表されるX線の量の2倍以上もありました。そこで、1925年にロンドンで開かれた第1回国際放射線学会議（International Congress of Radiology）は、X線の最大の利用分野である医学界からの要望を受け、X線の統一単位を定めるための国際委員会（International X-ray Unit Committee：IXUC）を組織しました。

医師や物理学者などからなるIXUCは、1928年にストックホルムで開かれた第2回国際放射線学会議で、“壁の影響のない状態で二次電子による電離がすべて取り入れられたとき、標準状態の乾燥空気1cc中に1静電単位^{*7}のイオンを作り出すX線の量”を1r（レントゲン）とする統一単位を規定しました（IXUC, 1928）^{*8}。この単位は、Behnkenの定義を室温から0℃に改めたもので、後に、放射線の単位に関する国際委員会（International Committee for Radiological Unit：ICRU）と名称を改めた委員会は、空気に対してX線と同じような作用をするγ線にもその適用範囲を拡大し、併せて着目する電離を“ある領域内で起きる電離”からある領域内で発生した二次電子が引き起こす電離に変更して、今日の“空間の一点で定義される（point specific）”線量への礎を創りました（ICRU, 1937）。つまり、1928年の国際統一X線単位の導入は、それまで特定の測定手段に依存して定められていた放射線の量を、空気の電離という物理現象によって規定した点で、科学史上の重要な転換点であったと言えますが、規定された

量を自由空気電離箱という特定の測定装置の頸木からも解き放ち、純粹に物理現象（放射線と物質の相互作用）だけに依存する形に整えたのは、1937年の再定義であったこととなります。なお、Grayが空洞理論（L.H. Gray, 1936）を著す以前から、空洞電離箱を用いてdepth-dose分布の測定などが行われていたことも（G. Failla, 1933）、そうした再定義の動機になっていたと考えられます^{*9}。

しかし、統一単位を導入した際、IXUCは、その単位で表現されるX線の量（the quantity of X-radiation）を頸に定義せず、量の概念としてSolomonとBehnkenのいずれの解釈を適用すべきかも明示しませんでした。そして、IXUCの後身である放射線の単位と測定に関する国際委員会（International Commission on Radiation Units, and Measurements：ICRU）が、この線量にexposure dose^{*10}という名称を与え（ICRU, 1956）、その後“a measure of radiation”であると説明したため（ICRU, 1959）、量の解釈に関する混乱は長く尾を引いてしまいました^{*11}。ICRUは、後にこの線量の名称を単なるexposureに変更し、単位記号も大文字のRに改めました（ICRU, 1962）。しかし、1980年になるとSI単位系が導入されて、無味乾燥なC/kgという単位を使用することになったため、X線の発見者にちなむ歴史的な単位名は、とうとう科学の表舞台から姿を消してしまいました。

話をもう一度1928年に戻すと、X線の量に

^{*7} 1 cmの距離に置かれたとき1 dyne（ $=10^{-5}$ N）の力を及ぼし合う点電荷の電荷量で、約 3.3×10^{-10} Cに相当する。

^{*8} 定義されたX線の量を測定する装置を線量計（dosage-meter）と呼ぶことや、X線の線質を管電圧やフィルターによって規定することの重要性も併せて勧告された。

^{*9} ただし、1937年の再定義が可能にした“空気以外の物質中（あるいは真空中）での照射線量”という概念が明示され、照射線量の概念の抽象化が一段と進んだのは、さらに25年も後になってからのことであった（ICRU, 1962）。

^{*10} 照射線量という和名はこの名称に基づいている。

^{*11} 照射線量がX線作用量（dose）なのか照射された（exposed）X線の量なのかという混乱は、用語の紛らわしさもあいまって、いまだに「照射線量と吸収線量は、光源の明るさと照度の関係だ」などという誤った説明を目にするほど、根深いものになっている。

関する統一単位ができたことを受けて、X線に対する防護基準も万国共通の言葉で定量的な議論ができるようになりました。そこで、米国のX線とラジウムの防護に関する諮問委員会（U.S. Advisory Committee on X-Ray and Radium Protection）は、1931年に世界で初めて1日当たり0.2 rという許容線量（permissible dose）を勧告しました（NBS Handbook 15, 1931；L.S. Taylor, 1958）。この許容線量は、皮膚紅斑線量を600 rとみなし、Mutschellerの経験則に基づいて定められたものでしたから、皮膚傷害を防止するための基準に他なりませんでした^{*12}。

放射線診断に使われるX線は、1 rがほぼ10 mSvの皮膚の等価線量^{*13}に相当しますから、1931年の許容線量と現在使われている皮膚の等価線量限度（1年間に500 mSv）は、ほとんど同じ値による線量制限であることが分かります^{*14}。言い換えるならば、同じ基準が既に80年もの長い期間にわたって使われ、その間、その限度を守っていた人たちに、放射線による皮膚傷害が発生しなかった実績から、Mutschellerの経験則を起源とする皮膚の線量限度は、十分安全側の基準であったことが分かります。

第2回国際放射線学会議の際に設置されたX

線とラジウムの防護に関する委員会（International X-ray and Radium Protection Committee：IXRPC）は、1934年に米国と同じ1日0.2 rという許容線量を勧告しました（IXRPC, 1934）。しかし、米国の許容線量が空中線量であったのに対して、IXRPCの許容線量は（当時の欧州の習慣に従い）皮膚線量で規定されていたため、人体からの散乱線の寄与も併せた放射線の量で制限するIXRPCの限度の方が2倍近く厳しい基準になっていました。なお、米国の許容線量は、1 MVを越える高電圧のX線装置が使われ、体の深部の線量が高くなる可能性が出てきたことに対応して^{*15}1日0.1 rに引き下げられ（NBS Handbook 20, 1936；L.S. Taylor, 1958）、大西洋を挟んだ防護基準の格差は実質的に縮まりました。

2.2 骨髄の時代

放射線が血液の障害をもたらし得ることは、1920年代から報告されていましたが（R.D. Carman and A. Miller, 1924）、放射線科医師などの白血病が放射線防護の問題として広く意識されるようになったのは、透過性の強いX線の利用が広まった1930年代半ば頃のことであったと思われます。米国のX線とラジウムの防護に関する諮問委員会が1936年に許容線量を引き下げたのは、放射線防護の主たる対象が、皮膚傷害から骨髄（造血組織）障害に移行したことを象徴しています。また、米国のX線とラジウムの防護に関する諮問委員会の委員長を務めるTaylorは、1941年に“人が継続的又は繰り返し受けても血液や生殖器に障害を受けないX線の量”である耐用線量を1日0.02 rまで引き下げることを提案しています（L.S. Taylor, 1941）。そして、1940年代の後半に、広島や長崎で原爆の放射線を受けた人々の中に、

^{*12} $600 \text{ r} \div 30 \text{ d} \times 1/100 = 0.2 \text{ r/d}$ ：なお、診断用X線をほぼ200 r以上で急性曝露したとき、2～24時間後に出現する紅斑は一過性のもので、“早期一過性紅斑”と呼ばれる。300 r以上の急性曝露では、照射から3週間以内に一過性の脱毛が起こり、600 rを越えると、照射から10日程度で皮膚紅斑（主紅斑）が出現し、治癒後しばしば色素沈着や脱色として瘢痕化する（ICRP, 2001）。

^{*13} 皮膚の等価線量は、放射線に曝露した皮膚の基底細胞層（表面から約70 μm の深さの場所）の平均吸収線量を放射線加重係数（後出）で修飾したものであるが、通常は100 cm^2 くらいの皮膚面の平均表面線量を考える。

^{*14} $0.2 \text{ r/d} \times 5 \text{ d/w} \times 50 \text{ w/a} \times 10 \text{ mSv/r} = 500 \text{ mSv/a}$ ：なお、1954年から1958年の間は、年に600 mSvに相当するやや大き目の限度が（ICRP, 1954）、また、1958年から1977年の間は、年300 mSvに相当する小さ目の限度（ICRP, 1959）が使われていた。

^{*15} 低エネルギーのX線では、皮膚の線量が深部臓器の線量より大きいので、皮膚線量さえ制限すれば傷害を防止できるが、高エネルギーのX線では、electron build-upによって皮膚線量より深部線量の方が大きくなることを考慮したものと推定される。

慢性骨髄性白血病（CML）の過剰発生が認められるようになると、放射線による白血病誘発への懸念は更に高まりました。なぜならば、広島や長崎の人たちの受けた原爆放射線の量は、初期のレントゲン技師や放射線科医のように職業上慢性的にX線を曝露していた人たちに比べ、ずっと少なかったからです。

1930年代はまた、利用される放射線の種類が急速に拡大していった時代でもありました^{*16}。既に1920年代の後半には、X線とγ線の生物作用の違いが注目されていて、生物学的効果比（relative biological effectiveness : RBE）が議論されるとともに（G. Failla, 1931）、今日の等価線量の魁となる“様々な放射線で同じ生物作用を引き起こす量”という概念が生まれていました。そうした議論が可能になったのは、飛程の長い二次電子を発生させるラジウムのγ線や管電圧の高いX線の測定に、空洞電離箱が使われるようになったためであると考えられます。そして、^{おそ}懼らく空洞理論の成立を契機に、レントゲン単位で表す量の概念を光子線以外の放射線へ拡張する試みが顕著になっていったのではないかと思います。

しかし、時代はやがて第二次世界大戦（1939～45年）の混乱へと向かった時期であり、誰がどのようにして概念を拡大させていったのか、現在のところ文献的にまだ十分解明できていません^{*17}。しかし、遅くとも1945年には、“多くの研究者”が、中性子線やβ線を含む放射線によって組織（^マ）1gに83 ergのエネルギーが吸収されたり、1g当たり 1.62×10^{12} 個の電離が生じたりする量^{*18}を、tissue roentgen,

roentgen equivalent, equivalent roentgenなどの名称で呼び、欧州では単位記号“e”も用いていたことが報告されています（S.T. Cantril and H.M. Parker, 1945）。この報告書では、同じ量に対して既にrep（roentgen equivalent physical）という単位が言及されていますから、今日多くの文献でParkerが提唱したとされている1950年より5年以上前からrepという単位が使われていたことになります。

同じ報告書には、当時受け入れられていた“耐用線量”は、X線やγ線が1日に0.1 r, β線の皮膚線量が1日に0.1 rep, 速中性子線が1日に0.025 repであると記されています。また、空洞電離箱で測定したエネルギー吸収量にそれぞれの放射線が作り出す電離密度に基づく係数で重み付けした放射線の量を、同等の生物学的効果を与える放射線の量（単位rem : roentgen equivalent man, mouse, or mammal）と規定し、混合放射線に対する耐用線量をrem単位で提案しています（also H.M. Parker, 1948）。

$$\{I_x + I_\gamma + I_\beta + 10 \cdot I_n + 10 \cdot I_\alpha + 4 \cdot I_p\} \leq 0.1 \text{ rem/d}$$

IXRPCもICRUも戦争中は活動を休止していましたが、戦後、国際放射線防護委員会（International Commission on Radiological Protection : ICRP）の名前で活動を再開した前者の委員会は、“週に1 rという皮膚傷害に対する許容線量が白血病を引き起こす閾値に近すぎるかも知れない”として、最大許容線量の値を1週間当たり0.3 rに引下げました（ICRP, 1950）。

また、戦後、アメリカ国立標準局（National Bureau of Standards : NBS, 今日のアメリカ国

^{*16} この時期に様々な粒子加速器が考案され造られた。また、中性子が発見されたのも1932年であった。

^{*17} 例えば、空気1gに83 ergのエネルギーを与えるβ線の量を1 e.r. (equivalent roentgen) と規定した例が報告されている（L.D. Marinelli, 1948）が、誰がそうした概念を最初に提案し、どのような人々がその概念をどう発展させて行ったかは、現在のところ十分な情報を集められていない。

^{*18} 1.62×10^{12} ions/g という値は、1 Rで生じる空気中の電離密度を単位質量当たりに換算した値なので、組織中の値ではないと思われる。また、83 erg/g という値は、1 Rに相当する二次電子平衡状態にある空気の吸収線量の値（ 8.7×10^{-3} Gy）より小さいが、当時使われていた空気のW値が現在より4%あまり小さかったためではないと思われる。

立標準技術研究所 National Institute of Standards and Technology : NIST) の資金的な援助の下で活動を再開した ICRU は^{*19}, X 線や γ 線以外の放射線にも適用できる新しい線量概念として, 物質の単位質量あたりに放射線の作用でもたらされるエネルギーである吸収線量 (absorbed dose) を導入しました^{*20} (ICRU, 1954)。吸収線量の単位は, rep 単位を定義する数値を丸めて, 放射線から物質に 1 g 当たり 100 erg のエネルギーが受け渡されたとき 1 rad とする cgs 単位が定められましたが, 1980 年に SI 単位系が導入されると J/kg に切り替えられ, グレイ^{*21} という特別の単位名と, 特別の単位記号 Gy が定められました。なお, ICRU が RBE で重み付けした吸収線量 (RBE dose) とその単位 rem とに言及したのは^{*22}, 1956 年になってからのことでした (ICRU, 1956)。

ICRU が吸収線量を導入した 1954 年の 9 月

は, NCRP が決定臓器 (critical organ) の考え方を導入し, 皮膚 (皮膚傷害の防止), 造血器官 (白血病の防止), 生殖腺 (遺伝的影響の抑制) 及び水晶体 (白内障の防止) に, それぞれ 1 週間当たりの“許容線量”を勧告しました (NCRP, 1954)。NCRP は, 同時に, 18 歳以下の若年者の許容線量を 1/10 にすることや, 45 歳以上は水晶体を除いて許容線量を 2 倍にすることを勧告し, 更に全身, 頭部, 体幹部, 造血組織, 生殖腺, 皮膚, 及び手足に対して, 19 歳以降に受けた集積線量 (18 歳以下は放射線作業を禁じられている) に対する最大許容線量を勧告しました。ICRP も同じ年の 12 月に NCRP と同じ決定臓器に基づく許容線量を勧告していますが, 18 歳以下の若年者や 45 歳以上の年長者に関する付帯条件は取り入れませんでした。

参考文献

- *19 委員会の名称は, 1934 年以降何度か変更されたが, ICRU という略称は継続的に使われてきた。なお, 現在の名称は International Commission on Radiation Units and Measurement である。なお, 現在, ICRU は NIST と同じ建物内に事務局を置いているが, 資金的な援助は受けていない。
- *20 放射線のエネルギーは, 主に, 電離や励起を介して物質の電子系に受け渡されるが, その大部分は直ちに散逸し, 熱に変わってしまう。そうした transient な状態に関する量を “absorbed : 吸収” と表現したことが, 筆者には聊か不適切なネーミングであったように思われる。
- *21 この特別の単位の名称は, 放射線生物学の創始者で, W. Bragg と共に空洞電離箱による吸収線量の測定理論を確立した L. Gray の名にちなむ。
- *22 RBE は, 既に NCRP と ICRP が 1954 年に導入していたが, ICRU は, 1956 年の報告書の中で RBE を recognised symbol として収録し, 水中の (二次電子の) 線エネルギー付与が 3 keV/ μ m である X 線や γ 線をおよそ 10 rad/min の線量率で照射した場合を基準放射線に規定した。そして, 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慣的な値が用いられているので, rem を単位とする RBE dose の用途は, 放射線防護に関連することを述べる場合に限定するよう勧告している。
- 1) Behnken, H., *Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, **31**, 479-482 (1924)
- 2) Benoist, L. and Humuzescu, D., *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, **122**, 235-236 (1896)
- 3) Bordier, H. and Galmard, J., *Archives on Roentgen Ray*, **11**, 164-167 (1906)
- 4) Brown, P., *reprinted in American J. Radiology*, **164**, 237-239 (1995)
- 5) Cantril, S.T. and Parker, H.M., “The tolerance dose,” US atomic Energy Commission, MDDC-1100 (1945)
- 6) Carman, R.D. and Miller, A., *Radiology*, **3**, 408-419 (1924)
- 7) Codman, E., *The Philadelphia Medical Journal*, **9**, 438-442, 499-503 (1902)
- 8) Contremoulins, M., *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, **134**, 649 (1902)
- 9) Daniel, J., *Science*, **111**, 562-563 (1896)
- 10) Dorn, E., *Annalen der Physik und der physikalischen Chemie*, **63**, 160-176 (1897)
- 11) Failla, G., *Radiology*, **17**, 1-43 (1931)
- 12) Failla, G., *American J. Roentgenology and Radium Therapy*, **29**, 293-307 (1933)
- 13) Fricke H. and Morse, S., *American Journal of Roentgenology*, **18**, 430-432 (1927)

- 14) Gray, L.H., *Proceedings of the Royal Society, London*, series A, **156**, 578–596 (1936)
- 15) Holzknacht, G., *Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, **6**, 49, 102 (1902); *Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, **4**, 25–28 (1902)
- 16) ICRP, “International recommendations on radiological protection. Revised by the ICRP at 6th ICR, 1950,” *British Journal of Radiology*, **24**, 46–53 (1951); ICRP 1950 Recommendations
- 17) ICRP, “Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” *British Journal of Radiology, Supplement* **6**, (1955); ICRP 1954 Recommendations
- 18) ICRP, “Recommendations of the International Commission on Radiological Protection,” Pergamon Press, Oxford (1959); ICRP Publication **1**
- 19) ICRP, “Avoidance of radiation injuries from medical interventional procedure,” *Annals of the ICRP* **30/2** (2001); ICRP Publication **85**
- 20) ICRU, “Recommendations of the International Committee for Radiological Units (Chicago, 1937),” *Radiology*, **25**, 634–636 (1937); ICRU Report **5**
- 21) ICRU, “Recommendations of the International Commission on Radiological Units. Revised by the ICRP at 7th ICR, 1953,” *British J. Radiology*, **27**, 243–245 (1954); ICRU Report **7**
- 22) ICRU, “Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) 1956,” *NBS Handbook*, **62** (1957); ICRU Report **8**
- 23) ICRU, “Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) 1959,” *NBS Handbook*, **78** (1961); ICRU Report **9**
- 24) ICRU, “Radiation quantities and units,” *NBS Handbook*, **84** (1962); ICRU Report **10a**
- 25) IXRPC, “International Recommendations for X-ray and Radium Protection,” *Radiology*, **23**, 682–685 (1934); ICRP 1934 Recommendations
- 26) IXUC, “International X-ray unit of intensity,” *Brit. J. Radiology*, **1**, 363–364 (1928); ICRU Report **2**
- 27) Kienböck, R., *Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, **9**, 276–295 (1905)
- 28) Mutscheller, A., *American Journal of Roentgenology*, **13**, 65–70 (1925); *Radiology*, **10**, 467–476 (1928)
- 29) NCRP (US Advisory Committee on X-ray and Radium Protection), “X-ray protection,” *NBS Handbook*, **15** (1931)
- 30) NCRP (US Advisory Committee on X-ray and Radium Protection), “X-ray protection,” *NBS Handbook*, **20** (1936)
- 31) NCRP, “Recommendations of the National Committee on Radiation Protection,” *NBS Handbook*, **59** (1954)
- 32) Notes of Nature, *Nature*, **53**, 421 (1896)
- 33) Parker, H.M., in *Advances in Biological and Medical Physics*, **1**, 243, Academic Press (1948)
- 34) Sabouraud, R. and Noiré, H., *La Presse Médicale*, **12**, 825–827 (1904)
- 35) Schwartz, G., *Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, **11**, 114–119 (1907)
- 36) Scott, N., *The American X-ray Journal*, **1**, 57–66 (1897)
- 37) Solomon, I., *J. de Radiologie et d’Electrologie*, **5**, 509–512 (1921)
- 38) Tateno, Y. (館野之男), *放射線医学物理*, **15**(3), 181–209 (1995)
- 39) Taylor, L.S., *J. American Medical Society*, **116**, 136–140 (1941)
- 40) Taylor, L.S., *Health Physics*, **1**, 97–104 (1958)
- 41) Villard, M.P., *Archives d’électricité Médicale Experimentale et Cliniques*, **16**, 692–699 (1908)

(NPO 法人放射線安全フォーラム)