

## 【連載】

## 線量 —第2回—

多田 順一郎

Tada Jun Ichiro

### 2.3 遺伝の時代

1950年代に入って規模も回数も増加の一途を辿った米ソの大気圏内核実験は、北半球全体に大量の $^{137}\text{Cs}$ や $^{90}\text{Sr}$ を降下させ、そうした放射性降下物が、広汎な（いわば人類全体への）放射線曝露を与え始めました（図3）。一人ひとりが放射性降下物から受ける放射線曝露は僅かですが、一人一人の遺伝子に放射線が引き起こす僅かな突然変異が積み重なれば、遂には人類の“生物種”としての遺伝子プールを損なうのではないかという懸念が広まりました。なぜなら、MullerがX線によるショウジョウバエの人工突然変異に成功して（H.J. Muller, 1927）以来、遺伝学者の間には、“突然変異誘発率と線量との間に閾値のない比例関係がある”とする考え方が定着していたからだと思われます（館野之男, 1995）<sup>\*23</sup>。当時のICRPが“大きな人口が継続して放射線を受ける場合の最大許容線量は、放射線作業者の1/10以下にすべきだ”と勧告していたのは、こうした時代背景に基づくものであったと考えられます（ICRP, 1954）。

そうした危惧に加えて、冷戦が核戦争に発展しかねない国際情勢を受けて、米国科学アカデミー（National Academy of Science : NAS）は、1954年に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）を設置し、翌1955年には、国連が原子放射線の影響に関する国連科学委員会（United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation : UNSCEAR）を設置しました。BEAR委員会は、“どんなわずかの放射線であっても遺伝子の突然変異を起こし得る”として、30歳までに受ける国民の平均生殖腺集積線量を10 r以下にし（ただし、自然放射線寄与分は除き医療被ばくは含める）、個人が同じ期間に受ける生殖腺集積線量も50 rを越えないようにすることを勧告しました（BEAR, 1965）。

放射線防護の主な目標が急性の皮膚傷害や慢性の放射線曝露がもたらす白血病から“閾値のない直線（LNT : linear non-threshold）モデル”を仮定する遺伝的影響の誘発に移行したため、放射線防護のパラダイムは大きく変わることになりました。つまり、放射線への曝露がもたらす害は、もはや“防止”することができず、どこまで抑制すれば“許容”できるかを議論せざるを得なくなったのです。その結果、放射線防護の枠組みは、“How safe is safe enough?”という個人の価値観に依存する要素を抱え込み、聊か饒舌で歯切れの悪いものに変貌して行かざるを得ませんでした。

そのような段階を経て世に出たICRPの勧告（ICRP Publication 1, 1959）は、NCRPの“決定臓器”の考え方を引き継いで、生殖腺、造血組織及び水晶体に対して、19歳以降1年間に5 rem ずつという最大許容集積線量を規定すると

<sup>\*23</sup> ただし、その考え方が根拠とした動物実験の条件は、決して低線量でも低線量率でもなかった。

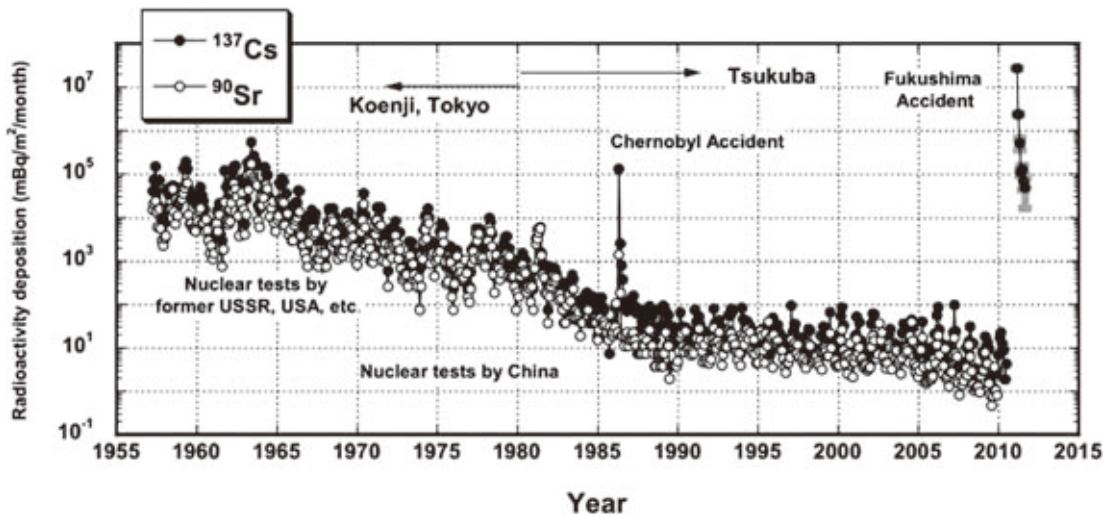


図3 気象研究所が1950年代の後半から継続してきた放射性降下物の測定では、1960年代に、 $1\text{ m}^2$  当たり数十～数百 Bq の $^{137}\text{Cs}$ と $^{90}\text{Sr}$ が毎月降下していたことが観測されている (気象研究所のご厚意により転載)

ともに、皮膚を決定臓器から外して甲状腺と共に3月間で8 rem、手足に3月間で20 remという最大許容線量を規定しました。そして、公衆とそれより遥かに人数の少ない放射線作業員の集団の間で、それぞれの集団が受ける遺伝的影響の指標である遺伝線量 (genetic dose)<sup>\*24</sup>を均衡させるため、公衆の最大許容線量を1年間に0.5 remにしました<sup>\*25</sup>。これらの考え方は、後のICRPの勧告にも引き継がれ<sup>\*26</sup> (ICRP

Publication 6, 1962 ; ICRP Publication 9, 1965), 我が国の法令にも取り入れられました。

この間ICRUは、LET (linear energy transfer)<sup>\*27</sup>や阻止能<sup>\*28</sup>の定義を取り入れ (ICRU Report 9, 1959), 初めて“放射線の量と単位 (Radiation Quantities and Units)”と題する報告書を刊行して、放射線に関する量概念の定義の集大成を試みました (ICRU Report 10a, 1962)。以下の章で詳しく説明する現在の線量の体系は、この報告書で骨格が出来上がったと言えるでしょう。そのため、この報告書の中で、今日使われている幾つかの量概念——フルエンス、エネルギー・フルエンス<sup>\*29</sup>、質量エネルギー減弱係数<sup>\*30</sup>、質量エネルギー転移係数、質量エネルギー吸収係数<sup>\*31</sup>、w値<sup>\*32</sup>、カーマ<sup>\*33</sup>など——が新たに

<sup>\*24</sup> ある集団に属する両親が平均出産年齢 (30歳) までに受ける生殖腺線量の平均値に、その集団の夫婦の子供の期待数を乗じた値で、親の世代の遺伝子に放射線から受けたダメージが、その集団の子供の世代にどのくらい伝わるかの目安。

<sup>\*25</sup> 集団の中の線量分布は対数正規分布で近似できるので、最大許容線量に一桁の差をつけることで、職業人と公衆の集団線量を均衡させられると考えたものと思われる (職業人の全人口に対する割合を0.1～0.2%、将来も高々1.7%と評価していた: ICRP, 1959)。

<sup>\*26</sup> ただし、皮膚、骨、甲状腺の最大許容線量は1年間に30 rem、手足は1年間に75 rem、水晶体を含むその他の組織は1年間に15 remと、少し異なった値が規定された。なお、公衆の最大許容線量は、いずれの項目も1/10の値であった。

<sup>\*27</sup> 線エネルギー付与。電荷を帯びた放射線粒子が、物質 (通常は水) 中を短距離移動する間に、衝突した軌道電子に与えたすべてのエネルギーと、移動距離との比。LETは、物質中に生じる電離の微視的な空間密度の目安であり、LETの値が大きいほど、生物学的な作用が強いとみなされた。

<sup>\*28</sup> 物質が、その中を通過する電荷を帯びた放射線粒子との相互作用で、放射線粒子からエネルギーを奪う能率を表す量である。

定義されました。興味深いことに、1962年の $w$ 値の定義は、照射線量の定義と平仄を合わせるためか、二次電子の制動輻射を再吸収することによって生じる電離を除外することになっていました。線量概念として特筆すべき進展は、真空中や水中など空気のない場所での照射線量という概念が明確に規定されたことです。1928年の自由空気電離箱で測定される物理量から出発し、1937年の放射線と物質の相互作用だけで規定される量へと進んだ照射線量の概念は、1962年の段階でその抽象化がほぼ完成の域に達したと言えると思います。

カーマ(kerma: kinetic energy released per mass)という線量概念の歴史は、照射線量のエネルギー表現であるKERMA(W.C. Roesch, 1958)と、同じ頃に中性子の線量として考えられていたfirst collision dose(NCRP, 1957, 1960, 1961)とに遡ります。両者のアイデアを非荷電粒子放射線<sup>\*34</sup>の線量として統一するまでには紆余曲折があったようですが(F.H. Attix, 1966)、ICRUがカーマを定義することで決着を見ました。カーマは、測定とは無関係に、放射線と物質の相互作用のみに基づいて思弁的に規定され

たという点で特異な線量概念です。そのため、カーマは概念の明確さという点で優れた線量ですが、定義通りの絶対測定が困難であるという難点が、当初から指摘されていました。

ICRUは、それまでRBE doseを量の定義のリストに加えることなく参考程度に記載していましたが、1962年の報告書で、線量当量(dose equivalent)という名称に改め、放射線防護のための線量として定義するとともに、remを放射線防護の目的専用にする放射線の量の単位として位置付けました。以降、ICRUの報告書には、放射線防護のための線量も記載されるようになりました。

ICRUは、1962年の報告書の後、比較的短い間隔で放射線の量と単位に関する報告書を改訂し、1962年に導入した放射線に係わる量の体系を整備していきました(ICRU Report 11, 1968; ICRU Report 19, 1971)。その中で、概念的に大きな変更は、1968年の改訂で、今日と同じように $w$ 値に制動輻射の再吸収による電離も含めるよう変えたことが挙げられます。また、不可解なことに、1971年の報告書では、照射線量の1Rが“厳密に” $1.58 \times 10^{-4}$  C/kgであると規定されました<sup>\*35</sup>。従来のcgs単位系で定義される1Rの値とは0.01%程度の違いしかありませんが、一時期、量の定義に単位系による数値的な不整合を生じていたのは、科学史上の小さな奇譚だったと言えるかもしれません。

## 2.4 がんの時代

広島と長崎に原爆が投下されてから20年を経過した頃になると、原爆の放射線を受けその健康影響を追跡調査されている人々の間に、固形がんの過剰発生が認められるようになりました(図4)。そこで、ICRPは、白血病以外のがんの誘発にも閾値がないかもしれないという推

<sup>\*29</sup> フルエンス(fluence)は、その場所に何個の放射線粒子が来ているか、エネルギー・フルエンスは、その場所に放射線粒子がどのくらいのエネルギーを運んできているかを表す量である。

<sup>\*30</sup> 物質の、X線や $\gamma$ 線や中性子線に対する遮蔽能率を表す量。

<sup>\*31</sup> X線や $\gamma$ 線や中性子線が、作用した物質中で電子などの電荷を帯びた放射線粒子にエネルギーを与える能率と、その電荷を帯びた放射線粒子が物質を電離したり励起したりすることにエネルギーを費やす能率とを表す量。

<sup>\*32</sup> 気体(通常は乾燥空気)中に一對の電離を作り出す間に、電荷を帯びた放射線粒子(通常は電子)が費やす平均の運動エネルギー。

<sup>\*33</sup> X線や $\gamma$ 線や中性子線の作用で物質中に生じた電荷を帯びた放射線粒子の運動エネルギーの合計と、作用を受けた物質の質量の比。

<sup>\*34</sup> X線、 $\gamma$ 線、中性子線など電荷を持たない粒子(光子や中性子)からなる放射線。

<sup>\*35</sup> この値は、真空中の光速を $3.00 \times 10^8$  m/sと近似したときの値である。なお、1962年の報告書の脚注にも、 $1.58 \times 10^{-4}$  C/kgという値が、cgs単位系で規定された従来の1Rと、“数値的に同じである”とやや曖昧な表現で記載されていた。

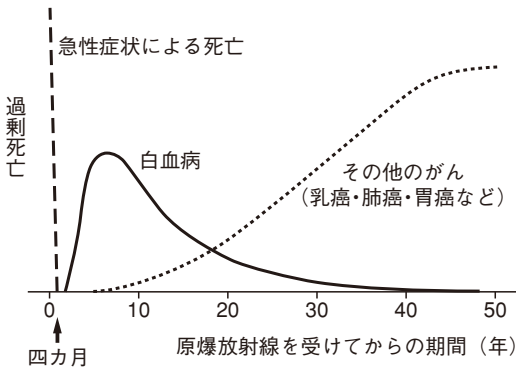


図4 原爆被爆後の期間と過剰死亡原因の推移

測に基づいて、決定臓器の考え方を棄却することで、再び放射線防護のパラダイムを転換しました (ICRP Publication 26, 1977)。つまり、皮膚傷害から白血病と遺伝的影響の誘発へと動いた放射線防護の重心は、再び、あらゆる種類のがんの誘発へと移動したことになります。ICRPは、このパラダイムの転換に対応する“放射線防護のための線量”として、体外にある線源が放出する放射線への曝露と体内に摂取した放射性物質が放出する放射線への曝露とを、統一して扱うことのできる**実効線量当量** (effective dose equivalent)<sup>\*36</sup>を導入しました。実効線量当量は、その後、加重係数の修正を受けて現在使われている**実効線量** (effective dose) となりましたが、組織や器官の吸収線量を、放射線の種類による重み付けと、全身にわたる組織や器官のがん誘発に関する放射線感受性に応じた重み付けとで加重平均するという枠組みは受け継がれています<sup>\*37</sup>。

なお、ICRPが最新の基本勧告 (ICRP Publication 103, 2007) で再定義した実効線量は、放

射線防護の線量概念に大きな改革をもたらすものでした。ICRPがそうした改革に踏み切った原因には、わずかの量の放射線を受けている非常に大きな集団に対して、ICRPが用いている実効線量とがんの誘発率との間の比例係数を用いて、その集団で将来増加するがんの人数を予測するなど、実効線量の不適切な使い方が広がってしまったことが大きく係わっています。ICRPは、実効線量を特定の個人や集団のリスク評価に使用されないよう、標準的な体形を持った男女のコンピュータ・モデル (数値ファントム) を定義して (ICRP Publication 110, 2009)、年齢や性別や体格の違いとは無関係に、その標準的な人間が受ける放射線の量として実効線量を再定義しました。

線量当量を導く際に使われる線質係数の具体的な値は、ICRPが1954年に導入した荷電粒子の水中における平均線エネルギー付与 (LET) に対するR.B.E.の値 (ICRP, 1954) を、1962年にICRPとICRUの合同作業部会が線質係数  $QF$  という名称に変更 (ICRP/ICRU, 1963) したものが、1990年まで使い続けられました。そして、ICRPは、1990年勧告で、LETが非常に大きな放射線では、同じ細胞に重複して損傷を与えてしまうため吸収線量当たりの影響が却って弱まる効果 (over-kill) を反映して値を引き下げた線質係数の函数形  $Q(L_{\infty})$  に変更し現在に至っています。しかし、体内でどのような線エネルギー付与を持つ荷電粒子がどのくらいの吸収線量に寄与するかは、通常容易に把握できるものではありません。そこで、ファントム内での平均値を参考にして、1990年勧告以前は放射線の種類ごとの線質係数の近似値  $\bar{Q}$  が定義され、1990年勧告以降は放射線加重係数  $w_R$  が定められました (4. (第4回) 参照)。

“遺伝からがんへ”という第二のパラダイムの転換は、第一の転換ほど目立ったものではありませんでしたが、放射線防護の枠組みを考える上で大きな違いをもたらしました。なぜならば、遺伝的影響は、誰が放射線に曝露しようと

<sup>\*36</sup> 個々の器官や組織の平均線量当量を、それぞれの器官や組織の相対的な放射線感受性を表す“組織加重係数  $w_T$ ”を用いて、全身にわたって加重平均した線量。

<sup>\*37</sup> 組織加重係数の値は、放射線の種類による重み付け (線質係数の近似値又は放射線加重係数) の値と共に、1990年と2007年の二度にわたって改定された。



も人類の遺伝子プールに対する共通のリスクであったのに対し、がんの誘発は、放射線に曝された本人のみが蒙る個人のリスクであるからです。その結果、“集団線量”で放射線に曝露した人々のリスクを議論することが、非常に限定された意味しか持たなくなりました<sup>\*38</sup>。ICRPは、1990年と2007年に防護のシステムを見直しましたが（ICRP Publication 60, 1991；ICRP Publication 103, 2007）、遺伝的影響に対応する生殖腺の組織加重係数 $w_{\text{gonad}}$ は、原爆の放射線を受けた人々に対する追跡調査で、その人々の子供の世代まで含めて遺伝的影響の増加が観測されないことなどを反映して、変更のたびに小さくなっていきました（1977年： $w_{\text{gonad}} = 0.25$ 、1990年： $w_{\text{gonad}} = 0.2$ 、2007年： $w_{\text{gonad}} = 0.08$ ）。

“遺伝からがんへ”という第二のパラダイムの転換は、実はもう1つの重要な変革を孕んでいるはずでした。つまり、防護の指標が集団の平均値である遺伝線量から個人の実効線量当量へと変化したとき、1956年に公衆の線量限度を職業人の1/10に引き下げた理由が消失していたからです。つまり、がんの誘発抑制を目的とする個人の放射線防護であれば、同じ人間である職業人と公衆の構成員の間で、遺伝線量を均衡させるために導入された異なった防護基準を継続する必要はなくなっていたからです。しかし、ICRPは、公衆と職業人の“受け入れることのできる”リスクの大きさが一桁違うという議論に基づいて、公衆の構成員に対する線量限度を従来通り職業人の1/10である1年間に5 mSv (0.5 rem) のまま据え置いてしまいました<sup>\*39</sup>。以降、ICRPは、リスク論に基づいて、公衆と職業人とは対して異なった線量限度を設け続けていますが、「なぜ職業人は、同じ人間

である公衆より大きなリスクを受け入れねばならないのか」という根本的な問いに対して、倫理的に筋の通った説明は、できていないと筆者は思っています<sup>\*40</sup>。

ICRPの1977年勧告は、前述のように職業人と公衆の線量限度に“遺伝の時代”と同じ1年間に50 mSvと5 mSvという値を採用しましたが、のちに原爆線量の再評価によって、放射線曝露のリスクが4倍に評価されたことを受け、まず“公衆の構成員に対する限度”が1年間に5 mSvから1 mSvに引き下げられ（ICRP, 1985）、職業人に対する限度に対しても、5年間に100 mSvという条件が追加されて今日に

<sup>\*39</sup> 実は、当初 large population に対する制限として議論されていた限度は、1965年の時点で members of the public に対する制限と表現され、集団線量に対する制限であることが曖昧になっていた。

<sup>\*40</sup> この問題を“自由意思による職業選択”と、危険に対する“報酬の受給”によって説明しようとする議論もあるが、現実には、その職業に従事することで曝露する放射線の量と、その健康影響の程度を理解した上で職業選択をすることはまれであるし、いわゆる“被ばく手当”の支給は、むしろ弊害の方が大きいと、現在ではほとんど廃止されている。

<sup>\*41</sup> 電荷を持つ放射線粒子が物質中を通過して行くようすを計算機でシミュレーションするとき、軌道電子との衝突で物質の単位質量当たりにおいていくエネルギーとして評価される量。

<sup>\*42</sup> 放射線粒子が物質中で起こす単一の衝突で物質に受け渡されるエネルギー。

<sup>\*43</sup> 電荷を持つ放射線粒子が停止するまでに気体中に作り出すイオン対の数の期待値と、その放射線粒子の最初の運動エネルギーの比で、 $w$  値の逆数に相当する量。

<sup>\*44</sup> ICRU Report 51 には、組織に吸収線量を与える放射線ではなく身体に入射する放射線で値が決まる放射線加重係数を用いる等価線量は測定できないので、測定には線質係数を用いた線量当量で規定される実用線量（4.2参照）を用いるべきだと主張されていることや、1990年勧告が発表される前にICRPとICRUが何度も打ち合わせを繰り返したことを、その理由に挙げる人々もいる。しかし、昨年ICRUの委員長に就任し、ICRPの第2委員会（Dose from radiation exposure）の主査も務めているH.G. Menzelは、そうした指摘を否定している。

<sup>\*38</sup> それにもかかわらず、集団線量をその集団に将来誘発される過剰ながん罹患数や死亡数の評価に用いる誤った議論が、今日でもしばしば繰り返されている（e.g., A. Berrington de González, et al., 2004）。

至っています (ICRP Publication 60, 1991)。

一方、線量の定義は、ICRU が 1971 年以降にも 3 回の改訂を加えました (ICRU Report 33, 1980 ; ICRU Report 60, 1998 ; ICRU Report 85a, 2011)。これらの改訂では、1998 年にシーマ (cema)<sup>\*41</sup> と付与エネルギー (energy deposit)<sup>\*42</sup> という二種類の量を導入したことと、2011 年に気体中のイオン生成率 (Y 値)<sup>\*43</sup> を導入したのが目新しいことで、ほかの変更は、従来の定義や解説に含まれていた不正確な事項や誤りの修正でした。ほぼ 10 年ごとという頻度で ICRU が放射線に関する量の定義を見直しているのは、放射線に関する量が、必ずしも科学の第一原理から導けるものばかりではないため、計測技術や放射線の作用に対する理解の進歩に応じて、量の定義も進化し得るからです。なお、ICRU は新しい報告書を出すたびに、以前の定義を置き換える (*supersede*) と宣言して

きました。しかし ICRU の意図に反して、定義の切り替えは必ずしも徹底して来なかったように思われます。今日、専門家間でさえ、異なった時代の定義が並行して使われている状況は、全く ICRU の意図に反するものであり、何か抜本的な対応策を講じる必要があることを示唆しています。

ICRU は、1980 年の報告書を最後に、放射線防護に関係した線量の定義を放射線に関する基本的な量の定義から分離しました (ICRU Report 51, 1993)。その理由として、ICRP が 1990 年勧告で実効線量当量を実効線量に切り替えた際、ICRP と ICRU の考え方が調整できなかったことを挙げる方もありますが、真相はよく分かりません<sup>\*44</sup>。筆者は、放射線防護に関係した線量は ICRP によって導入され定義されているので、ICRU 自身が責任を持つ事項と区別するためであろうと解釈しています。

## 2.5 関係年表

表 2 関連年表

1895	W.C. Roentgen	X 線の発見	
1896	J. Daniel	X 線照射後の脱毛の報告	Science, <b>III</b> (1986)
1902	G. Holtzknecht	Chromoradiometer の発明	Fortschr. Gebiete Röntgenstr., <b>6</b> (1902)
1920	Am. Roentgen Ray Soc.	X 線防護委員会の設置	
1925	Internat. Congress of Radiol.	ICRP の前身である IXRPC と ICRU の前身である IXUC の創設	BJR, <b>30</b> (1925)
1925	A. Matscheller	耐用線量の概念を提案 (皮膚紅斑線量の 1%/月)	AJR, <b>13</b> (1925)
1927	H.J. Muller	X 線による突然変異の誘発	Science, <b>66</b> (1927)
1928	ICXU (forrunner of ICRU)	統一放射線量単位 roentgen を定義	BJR (new series), <b>1</b> (1928)
1929	US government	NCRP の前身である X 線及びラジウム防護諮問委員会の創設	
1931	US ACXRP (forerunner of NCRP)	最初の耐用線量 0.2 r/d を勧告	NBS Handbook <b>15</b> (1931)
1931	G. Failla	RBE の概念を提唱	Radiology, <b>17</b> (1931)
1932	J. Chadwick	中性子の発見	Proc. Royal Soc., <b>rep</b> (1932)
1934	IXRPC (forrunner of ICRP)	許容線量 0.2 r/d を勧告	Radiology, <b>23</b> (194)
1936	US ACXRP (forerunner of NCRP)	許容線量 0.1 r/d を勧告	NBS Handbook <b>20</b> (1936)
1936	L.H. Gray	空洞理論	Proc. Royal Soc., <b>A-156</b> (1936)
1937	ICRU	roentgen 単位表す量の定義を“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	Radiology, <b>25</b> (1937)

1941	L.S. Taylor	最大許容線量 0.02 r/d を提案	J. Am. Med. Soc., <b>116</b> (1941)
1945	H.M. Parker	rep (=83 erg/g), rem の概念を提唱	U. S. Atom. Ener. Com., MDDC-100
1950	ICRP	最大許容線量 0.3 r/w	BJR, <b>24</b> (1951)
1952	ICRP	生殖器の許容線量 10 r	(by L. S. Taylor, Health Phys., <b>1</b> (1958))
1954	ICRU	吸収線量の導入 (単位 rad)	Radiology, <b>62</b> (1954)
1954	NCRP	集積線量管理 (19 歳以上は平均で年 5 rem) の導入。皮膚、造血器官、生殖腺、及び眼を決定臓器としてそれぞれに限度を設ける考え方の導入 (rem 単位で表示)	NBS Handbook <b>59</b>
1954	Nat. Acad. Sci.	BEAR 委員会を設置	
1954	ICRP	決定臓器の考え方による許容線量 (rem 単位で表示)。LET の函数としての RBE を規定。Prolonged exposure for a large population に対して作業者の最大線量の 1/10 以下を提唱	BJR Supplement <b>6</b> (1955)
1954	United Nations	UNSCEAR を設置	
1956	BEAR	大気圏内核実験の放射性降下物で人類が薄く広く放射線に曝露する影響として、遺伝的影響に着目。遺伝線量 (30 歳までの集団生殖腺集積線量) の限度 10 R	Report of the Committee on Genetic Effects of Atomic Radiation (1956)
1956	ICRU	RBE dose を定義 (単位 rem)	NBS Handbook <b>62</b> (1957)
1957	NCRP	基本的に 1954 の基準に基づき、緊急時の限度 25 rem (生涯に一度だけ) を追加	AJR, <b>77</b> (1957)
1957	NCRP (subcommittee 4)	中性子の線量に first collision dose を規定	NBS Handbook <b>63</b> (1957)
1958	UNSCEAR	自然放射線と並び核実験 (及び核実験を継続した場合の) 遺伝有意線量と一人当たりの骨髓線量が示される	UNSCEAR Report (1958)
1958	ICRP	自然放射線と医療放射線以外から全人類が受ける遺伝線量を 5 rem 以下にすべきだと勧告。遺伝線量 (集団の集積生殖腺量) を均衡させるという考えに基づき、職業人の 5 rem/a, 公衆の 0.5 rem/a という最大許容線量を導いた。職業人と公衆の中間に特殊グループを導入	Publication, <b>1</b>
1958	W. C. Roesch	中性子の線量に照射線量のエネルギー表現である KERM を提案	Radiat. Res., <b>9</b> (1958)
1959	ICRU	放射能の単位 curie, LET, 質量阻止能を規定	NBS Handbook <b>78</b> (1961)
1962	ICRU	はじめて Radiation Quantities and Units のタイトルを用い、フルエンス, エネルギー・フルエンス, 質量エネルギー減弱係数, 質量エネルギー転移係数, 質量エネルギー吸収係数, w 値, カーマなどを定義。また, RBE dose を線量当量と命名	NBS Handbook <b>84</b> (1962)
1963	ICRP/ICRU (RBE Committee)	ICRP 1954 年の RBE を継続し, 放射線防護のための RBE に線質係数という名称を定める	Health Phys., <b>9</b> (1963)
1965	ICRP	作業者と公衆とに対する最大許容線量を, 後者が前者の 1/10 になるように定める	Publication, <b>9</b>
1970	ICRP	線質係数を制限のない線エネルギー付与の連続関数 $Q(L_{\infty})$ として再定義	Publication, <b>15</b> (1970)
1971	ICRU	ICRU 球を定義。ICRU 球内の最大値として absorbed dose index と dose equivalent index を定義	Report, <b>19</b> (1971)
1977	ICRP	実効線量当量を定義。決定臓器の考え方を破棄して, 実効線量当量限度 50 mSv/a を勧告。公衆の実効線量当量限度に対しては, 受容可能なりスクという議論に基づいて, 従来と同じ作業者の 1/10 を適用	Publication, <b>26</b> (1977)

1980	ICRU	線量を一般の目的に使われる量と放射線防護に使われる量に大別し、前者を、放射線場の量、相互作用の係数、計測線量に分けて記述する現在の線量体系が完成	Report, <b>33</b>
1985	ICRP	原爆線量の再評価に応じて、公衆の限度を 1 mSv/a に引き下げ	Ann. ICRP, <b>15</b> (1985)
1985	ICRU	整列拡張場などを定義して 4 種類の実用線量を導入	Report, <b>39</b>
1985	M. Zaider & D.J. Brenner	Microdosimetric quality factor を導く	Radiat. Res., <b>103</b> (1985)
1986	ICRP/ICRU	Lineal energy の函数としての線質係数を導出	Report, <b>40</b>
1988	A.M. Kellerer & K. Harn	$L_{\infty}$ の函数としての線質係数を導き, fitting functions を提案	Radiat. Res., <b>114</b> & Univ. Würzburg int. rep., <b>IMSK 88/119</b> (1988)
1988	ICRU	実用線量に望ましい性質を提示。Report 39 で導入した実用線量がそれに該当すると主張	Report, <b>43</b>
1990	G.R. Drexler, <i>et al.</i>	ICRP の 1990 年勧告が採用する $Q(L_{\infty})$ を導出	Radiat. Prot. Dos., <b>32</b> (1990)
1990	ICRP	作業者の限度に付帯条件 100 mSv/5a を導入。妊婦の腹部表面 2 mSv/pregnancy を導入。線量当量と実効線量当量に変えて放射線加重係数と(改訂した)組織加重係数に基づく等価線量と実効線量を定義。免除レベルを導入	Ann. ICRP, <b>21(1-3)</b> (1991), Publication, <b>60</b>
1992	ICRU	1985 年に導入した個人モニタリングのための 2 種類の実用線量を 1 つに統合	Report, <b>47</b>
1993	ICRU	放射線防護のための線量体系をまとめる。Publication <b>60</b> の線量体系を批判	Report, <b>51</b>
1996	ICRP	実用線量などへの換算係数を提供	Ann. ICRP, <b>26(3-4)</b> (1996) Publication, <b>74</b>
1997	ICRP	妊娠が判明してからの胎児線量限度 1 mSv を勧告	Ann. ICRP, <b>27(1)</b> (1997), Publication, <b>75</b>
1997	ICRP	公衆に対する最大線量拘束値 0.3 mSv/a	Ann. ICRP, <b>27(S)</b> (1997), Publication, <b>77</b>
1998	ICRU	実用線量などへの換算係数を提供 (Publication <b>74</b> のデータを訂正)	Report, <b>57</b>
1998	ICRU	基本線量の体系を再定義。放射線場の量を系統的に定義。シーマ、付与エネルギーを導入	Report, <b>60</b>
2007	ICRP	放射線加重係数と組織加重係数を改訂し、実効線量をファントム・ベースの量として再定義して適用範囲を限定。Planned, existing and emergency situation に対して band を規定、などなど	Ann. ICRP, <b>37(2-4)</b> (2007), Publication, <b>103</b>
2009	ICRP	Reference person を定義	Ann. ICRP, <b>39(2)</b> (2009), Publication, <b>110</b>
2010	ICRP	換算係数 (Publication <b>74</b> ) を改訂	Ann. ICRP, <b>40(2-5)</b> (2010), Publication, <b>116</b>
2011	ICRU	Report <b>60</b> の不備を修正。Y 値を導入	J. ICRU, <b>11(1)</b> (2011), Report, <b>85a</b>

表 3 放射線防護基準の変遷

勧告年	実施者	主な防護の対象	使われた量	勧告された放射線防護基準の値
1931	USACXRP	皮膚	空中の照射線量*	0.2 r/day X 線
1934	IXRPC	皮膚	表面の照射線量*	0.2 r/day X 線
1936	USACXRP	造血組織	空中の照射線量*	0.1 r/day X 線と $\gamma$ 線



by 1945	US regulatory (by Cantril & Parker, 1945)			空中の照射線量*		0.1 r/day	X線とγ線	
				組織線量 (rep)		0.1 rep/day	β線外部被曝	
						0.025 rep/day	速中性子線	
1952	ICRP	遺伝		生殖腺線量	30歳までの 集積線量	10 r	自然放射線の寄与を 除く	
1954	NCRP (Handbook 59)	決定臓器	全身・頭部と体 幹部・造血組織 及び生殖腺	RBE dose	最大許容線量	(年齢-18)×5 rem		
			皮膚			3 rem/13weeks		
		それ以外	水晶体			(年齢-18)×10 rem		
			手・前腕・足 及び踝			6 rem/13 weeks	頭部の制限による	
		緊急作業		75 rem/year				
			皮膚	25 rem/13weeks				
			皮膚	25 rem		生涯に一度だけ		
			造血組織・生 殖腺・水晶体	RBE dose		許容週線量	600 mrem/week	
							300 mrem/week	
			管理区域外の人				0.5 rem/year	
	ICRP	決定臓器	皮膚 造血組織・生 殖腺・水晶体	RBE dose	許容週線量	600 mrem/week		
						300 mrem/week		
1956	ICRP	決定臓器	全身又は生殖 腺	RBE dose	許容週線量	0.1 rem/week	多くの人々が長期間放射 線を受けるときは、職業 人の1/10に制限する	
1957	NCRP	決定臓器	すべての決定 臓器	RBE dose	最大許容線量	(年齢-18)×5 rem		
		全身			許容週線量	0.3 rem/week		
		緊急作業	全身			25 rem	生涯に一度だけ	
1958	NCRP	決定臓器	全身・頭部と体 幹部・造血組織 及び生殖腺	RBE dose	最大許容線量	(年齢-18)×5 rem		
			皮膚			3 rem/13 weeks		
		決定臓器以外	水晶体			(年齢-18)×10 rem		
			手・前腕・足 及び踝			6 rem/13 weeks	頭部の制限による	
		緊急作業				75 rem/year		
						25 rem/13weeks		
			緊急作業				25 rem	生涯に一度だけ
	管理区域外の人		0.5 rem/year					
1958	ICRP (Publication 1)	決定臓器	生殖腺・造血 組織及び水晶 体	RBE dose	最大許容線量	(年齢-18)×5 rem	全体に遺伝線量率則の 体系が作られた	
		緊急被曝				3 rem/13weeks	線量集積率の制限として	
		決定臓器以外	皮膚・甲状腺			12 rem	集積線量に加算	
			甲状腺以外の 内部臓器			8 rem/13 weeks		
		特殊グループの決定臓器				4 rem/13 weeks		
		特殊グループの皮膚・甲状腺				1.5 rem/year	特殊グループ a 及び b	
		3 rem/year	特殊グループ a 及び b					

1959	ICRP (Addendum)	公衆の構成員	遺伝		最大許容線量	0.5 rem/year	特殊グループ c の値を適用
1962	ICRP (Publication 6)	決定臓器	生殖腺・造血組織	線量当量	最大許容線量	(年齢-18)×5 rem	決定臓器から水晶体を除いた
			3 rem/13weeks				
		決定臓器以外	皮膚・甲状腺			8 rem/13 weeks	
			甲状腺以外の内部臓器			4 rem/13 weeks	
		妊娠している放射線作業者の腹部				1.3 rem/13weeks	放射線診断の 10-day rule も示される
		緊急作業				25 rem	生涯に一度だけ
		放射線作業者でない労働者の決定臓器				1.5 rem/year	
公衆の構成員	遺伝	0.5 rem/year					
1965	ICRP (Publication 9)	決定臓器	生殖腺・赤色骨髄	線量当量	最大許容線量	5 rem/year	柔軟に運用する場合でも (年齢-18)×5 rem を越えない
			30 rem/year				
		決定臓器以外	皮膚・甲状腺及び骨			75 rem/year	
			手・前腕・足及び踝			15 rem/year	
			その他の個々の臓器			1.3 rem/13weeks	
		妊娠している放射線作業者の腹部					
		公衆の構成員	生殖腺・赤色骨髄			皮膚・甲状腺及び骨	手・前腕・足及び踝
3 rem/year							
7.5 rem/year							
1.5 rem/year							
1977	ICRP (Publication 26)	放射線作業者	全身の組織や器官	実効線量当量	実効線量当量限度	50 mSv/year	
			水晶体以外の組織や器官	線量当量	線量当量限度	500 mSv/year	
			水晶体			300 mSv/year	
		公衆の構成員	全身の組織や器官	実効線量当量	実効線量当量限度	5 mSv/year	
1985	ICRP	公衆の構成員	全身の組織や器官	実効線量当量	実効線量当量限度	1 mSv/year	
1990	ICRP (Publication 60)	放射線作業者	全身の組織や器官	実効線量	実効線量限度	100 mSv/5years	ただし、どの1年間も 50 mSv を越えない
			水晶体以外の組織や器官	等価線量	等価線量限度	500 mSv/year	
			水晶体			300 mSv/year	
		妊娠している放射線作業者の腹部表面		等価線量	等価線量限度	2 mSv/pregnancy	胎児の線量限度 1 mSv
公衆の構成員	全身の組織や器官	実効線量	実効線量限度	1 mSv/year			

2007	ICRP (Publication 103)	放射線作業 者	全身の組織や 器官	実効線量	実効線量限度	100 mSv/5years	ただし、どの1年間も 50 mSvを越えない
			水晶体以外の 組織や器官	等価線量	等価線量限度	500 mSv/year	
			水晶体			300 mSv/year	
		妊娠している放射線作業 者の腹部表面	等価線量	等価線量限度	2 mSv/pregnancy	胎児の線量限度 1 mSv	
		公衆の構成員	全身の組織や 器官	実効線量	実効線量限度	1 mSv/year	

\*レントゲンを単位とする放射線の量に照射線量という名前がついたのは1956年のことであった。

USACXRP : US Advisory Committee on X-ray and Radium Protection

IXRPC : International X-ray and Radium Protection Committee

NCRP : National Committee on Radiation Protection and Measurement

ICRP : International Commission on Radiological Protection

### 参考文献

- 42) Attix, F.H., *Health Physics*, **12**, 793-799 (1966)
- 43) BEAR, "The Biological Effects of Atomic Radiation," Report of the Committee on Genetic Effects of Atomic Radiation, National Academy of Sciences (1956)
- 44) Berrington de González, A. and Darby, S., *Lancet*, **363**, 345-351 (2004)
- 45) ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," *British Journal of Radiology, Supplement* **6**, (1955); ICRP 1954 Recommendations
- 46) ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," Pergamon Press, Oxford (1959); ICRP Publication **1**
- 47) ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," Pergamon Press, Oxford (1962); Publication **6**
- 48) ICRP/ICRU, *Health Physics*, **9**, 357-384 (1963)
- 49) ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," Pergamon Press, Oxford (1965); Publication **9**
- 50) ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," Pergamon Press, Oxford (1977); Publication **26**
- 51) ICRP, *Annals of the ICRP*, **15**, i-ii (1985)
- 52) ICRP, "1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," *Annals of the ICRP*, **21/1-3** (1991); Publication **60**
- 53) ICRP, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection," *Annals of the ICRP*, **37/2-4** (2007); Publication **103**
- 54) ICRP, "Adult reference computational phantoms," *Annals of the ICRP*, **39-2** (2009); Publication **110**
- 55) ICRU, "Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) 1959," NBS Handbook **78** (1961); ICRU Report **9**
- 56) ICRU, "Radiation quantities and units," NBS Handbook **84** (1962); ICRU Report **10a**
- 57) ICRU, "Radiation Quantities and Units," ICRU Report **11** (1968)
- 58) ICRU, "Radiation Quantities and Units," ICRU Report **19** (1971)
- 59) ICRU, "Radiation Quantities and Units," ICRU Report **33** (1980)
- 60) ICRU, "Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry," ICRU Report **51** (1993)
- 61) ICRU, "Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation," ICRU Report **60** (1998)
- 62) ICRU, "Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation (*Revised*)," J. ICRU, **11** (2011); ICRU Report **85a**
- 63) Muller, H.J., *Science*, **66**, 84-87 (1927)
- 64) NCRP, "Protection against neutron radiation up to 30 million electron volts," NBS Handbook **63**, (1957)
- 65) NCRP, "Measurement of neutron flux and spectra for physical and biological applications," NBS Handbook **72** (1960)
- 66) NCRP, "Measurement of absorbed dose of neutrons, and of mixtures of neutrons and gamma rays," NBS Handbook **75** (1961); NCRP Report **25**
- 67) Roesch, W.C., *Radiation Research*, **9**, 399-410 (1958)
- 68) Tateno, Y. (館野之男), 放射線医学物理, **15**(3), 181-209 (1995)
- (NPO 法人放射線安全フォーラム)