

放射線の生物への影響と防護・影響緩和

^{1 2} 安定な原子核と不安定な原子核, 放射線とその種類については付録参照.

1 初めに: 放射線の影響とその評価をめぐる表層と深層

関係する研究分野および周辺 [1]:

- 物理学 (原子核物理学, 放射線物理学): 放射線と物質粒子 (電子, 原子, 分子などミクロな粒子) との相互作用, 放射線のマクロな物質への集積効果
- 生物学 (放射線生物学) と医学 (放射線医学): 放射線の生体への影響: 生物は分子システムであり, 微視的影響を拡大するしくみを持つ. 進化の過程で生物に備わった, 種々の損傷に対する修復機構と放射線の作用のせめぎ合い.
- 放射線防護体系または放射線防護学:[2]
- 疫学 [3],[4] とリスク論 [5],[6],[7], [8]:

関連する組織・機関・グループ:

- 国内: 放射線影響研究所 [22] とこれに批判的な原子力資料情報室 [23] など.
- 国際: 国際放射線防護委員会 (ICRP)[24] とこれに批判的な欧州放射線リスク委員会 (ECRR)[25] など.

放射線被ばくの影響の評価における中立性・客観性・独立性の保持はどうか?

- 利益相反の可能性—意識的または無意識的バイアス—
放射線の影響とその評価については, 歴史的な事実として, 「科学」とは本来無縁なはずの種々のバイアスがかけられてきたことも現在では知られている [9],[10],[11] [12],[13],[14],[8], [15],[16]. そのことも背景や原因となって, チェルノブイリ原発事故の影響評価の大きな差違など, 放射線の影響とその評価, 特に低線量被ばくの影響については現在に至るまで, 関連する研究者や組織の間で見解の隔たりは決して小さくない.

¹ファイル名=radiation-effect-text20190302.tex

²作成者: 岡本良治 (九州工業大学名誉教授). このノートは筆者が担当している講義「原子力概論」の標題についての教材として準備したもので, それに応じた配慮をしています. 興味関心をもつ人に対しても, できるだけ自足的に理解でき, 独立した立場からの客観的な判断材料になれば幸いです. 誤りの可能性, 説明の分かりにくい点をお気づきの場合, 本ファイル名 (特に, 作業年月日を示す数値の部分) と該当箇所を特定して, okamoto.ryoji.munakata_at_gmail.com (-at_を@に修正後) 宛に電子メールで御連絡いただければ, 幸いです.

- 原子力利用の自主・民主・公開の原則が場合により実質的に守られていないように思われる。

極めて不十分であるが、本稿の説明を見ると、放射線の影響とその評価が単純ではなく、相当に複雑であるという印象が強くなるかもしれない。これは生物が単なる巨視的な固体ではなく、複雑な分子システムであることと、[4]のp.43には「どのような因果メカニズムも複数の原因構成要素の連携作用による」という認識を認めれば、ある程度納得できることかもしれない。

2 放射線の被ばくとその影響についての基本

2.1 放射線被ばくによる生体の影響発生の過程の概略

放射線の生物への作用の全過程は時間順序に従って次のように分類される。

1. 物理的变化:物理的变化は放射線と生体を構成する物質粒子との相互作用であり、主として原子分子の電離（イオン化）と励起である。経過時間は(10^{-18} ~ 10^{-15}) 秒の範囲である。
2. 化学的变化: 化学的变化は原子分子の電離（イオン化）と励起の結果、反応性に富んだ無機遊離基（無機ラジカル）や有機遊離基（有機ラジカル）などが生成されることから始まる。その後、遺伝子DNAを構成する分子の変化が起こる。（正確には、DNA損傷には修復機構があるが、熱的原因や放射線の作用で修復ミスなど機能が低下する。）。経過時間は 10^{-12} 秒から100分程度の範囲である。
3. 生物学的変化:影響(病状)により数時間から数十年に及ぶ。

図1に影響の概観を示す。

2.2 放射線の影響の現れ方の概略-ガン発症を例として一

まず、概略を述べる。

ガンは遺伝子の病気である。

1. ガンの発生
 - (a) まず、修復遺伝子などが変化する。
 - (b) さらに、複数のガン遺伝子(アクセル)やガン抑制遺伝子(ブレーキ)が変化する。
 - (c) 細胞が変化し、無限増殖するようになる。

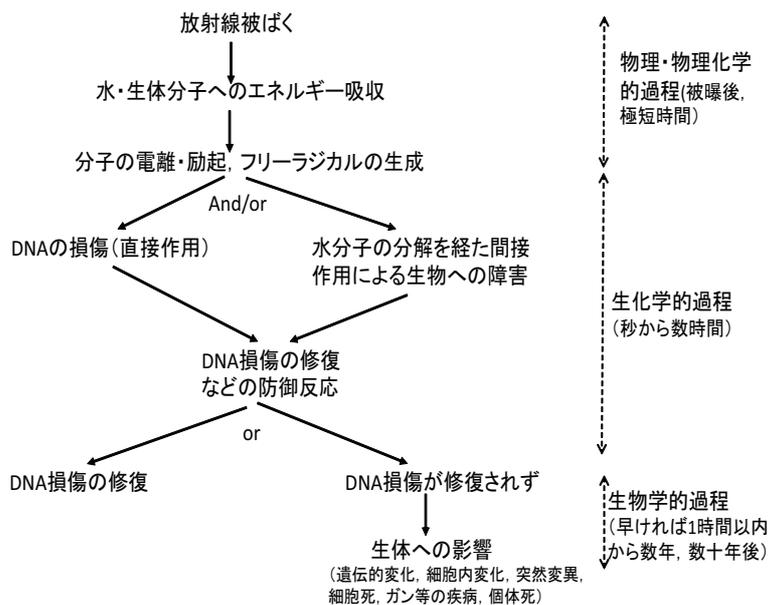


図 1: 放射線被ばくによる生物への影響の概観

2. ガン発生を防ぐメカニズム

- (a) 遺伝子の損傷を修復する.
- (b) 損傷の多い細胞は細胞死によって除去する.
- (c) 免疫力 (=病気への抵抗力)³によって, ガン細胞を殺す.

人体はおよそ 60 兆個の細胞からできていて, 新陳代謝により 1 日に約 4000 億個の細胞が死滅 (細胞の自死, アポトーシス). ふけや垢などは, 古くなった細胞が定期的に入れ替わった結果である. 神経細胞を除く全ての細胞は, およそ 90 日から 120 日で入れ替わっていくことになる.

細胞が細胞分裂によりコピーされるとき, その細胞の遺伝子が化学物質や放射線などにより変異することがある. この場合, 正常細胞と異なる細胞になり, 生体中で死滅する場合もあるが, この変異した細胞が無限に増殖するとがんになる.

われわれの体内では頻繁にがん細胞が生まれているのに, なぜ人はがんにならずに済むのか.

詳細な解説は文献 [17] などにあるが, ここでは簡単のために, 文献 [18, 19] に従って説明する. それは (血液内の) リンパ球により異常な細胞が処理されているからに他ならない. 毎日生成する数千個の異常細胞は, リンパ球によってほぼ完全に駆逐される.

³参考: 免疫力を高める 6 つの健康習慣 (<https://www.mylohas.net/2018/02/immunity.html>) には, 1. 何を食べるかだけでなく, どう食べるかも考える, 2. よく笑い, 泣きたいときには泣く, 3. ヨーグルトで腸を健康に, 4. つらくない程度の“ちんたら運動”をする, 5. 慣れない夜更かしをしない, 6. お風呂にゆっくりつかると, という 6 つの具体的な方法が提案されている.

しかし、1個でもがん細胞が残っていると、細胞分裂により2個、4個、8個と増えて行き、数億個、直径1cm近くになると、X線写真、CT⁴、PET⁵などの画像検査で、がんとして発見される。

2.3 放射線による生体影響の仕組み (やや詳細)

[61]

1. X線、ガンマ線について光電効果やコンプトン散乱（効果）、電子陽電子対生成などを起こさずに、物質中を通過（貫通）する場合には、生物の身体に影響を与えない。
2. しかし、アルファ線とベータ線など荷電粒子の場合、軌跡全体にわたって生物の組織に作用する。それゆえ、荷電粒子が生体組織内を通過すれば、生物学的効果が確実に発生する。
3. 放射性の原子核から出るアルファ線は、ガンマ線と同様に、単一のエネルギーをもつか、あるいはいくつかの離散的なエネルギーをもつかのいずれかである。

4. 放射性原子核から出るベータ線（高速の電子の流れ）のエネルギーは単一ではない。ベータ線のエネルギーには、それを放出する原子核に固有の最大値があり、ベータ線はその最大値からゼロまでの連続的なエネルギー分布を持つ。その理由は、ベータ崩壊においては、反ニュートリノ（逆ベータ崩壊においてはニュートリノ）という粒子が同時に放出され、いろいろの値のエネルギーを持ち去るためである。

ベータ線の平均のエネルギーは、近似的に最大値の約1/3と見なすことができる。いったん原子核から出たベータ線粒子（高速の電子の流れ）は、同一のエネルギーをもつ高速の電子と全く同じように振る舞う。

5. アルファ線もまた、電離によって生体に影響する。アルファ線は原子に作用して電子をもぎ取る。これらの電子も生体内ではやはり、他の原因で生じた同じエネルギーの電子と全く同じように振る舞う。

6. 放射線のエネルギーは化学的、生物学的エネルギーに比べて桁違いに大きい物質中で費やされるX線やガンマ線のエネルギーの全ては、最終的には電子の運動エネルギーになる。がん、白血病や遺伝的な障害という放射線の生物学的影響は、電子の物質への作用にもとづいている。この作用について考える前に、高速電子（高エネルギー電子）のエネルギーの「大きさ」一実はエ

⁴Computed Tomography, コンピュータ断層撮影法の略称

⁵Positron emission Tomography, 陽電子放射断層撮影法の略称

エネルギーの高さ-(付録参照)と、身体の内外で生じている通常の化学反応の大きさを比較してみる。

- (a) 化学的過程は、生物、非生物を問わず、本質的にエネルギー変化を伴う。
 - (b) 生体組織の数千種類もの化合物や分子には、炭素、水素、窒素、酸素、硫黄あるいはリンといった原子が含まれている。
 - (c) このような化合物に含まれる原子は「化学結合」と呼ばれる力で互いに結合している。
 - (d) 化学結合には、炭素・炭素結合、炭素・水素結合、炭素・窒素結合、炭素・リン結合、リン・酸素結合など多数ある。
 - (e) 体内の生化学的過程で、この化学結合を切断するには、エネルギーが必要である。化学反応の切断に必要なエネルギーは、一般に(5~7) eV くらいである。しかし、その切断に必要なエネルギーをすべて与えることは、必ずしも必要ではない。というのは、別の化学的結合が同時に起こって、それによりエネルギーが放出されるからである。
 - (f) もし、100 keV(= 100,000 eV)のX線のエネルギーが光電効果で電子に移され、電子が生体組織中に飛び出せば、その電子はほぼ100 keVのエネルギーを持つ。(なぜならば、原子に束縛されていた電子をはぎ取るのに必要なエネルギーは元の100 keVに比べて極小さいからである。)
 - (g) 100 keVという値は、化学結合のエネルギーに比べると桁違いに大きい。
7. しかし、放射線のもつ全てのエネルギーが単純に莫大な個数の化学結合を切断するわけではなく、その相互作用は極めて複雑である。

放射線を構成する粒子1個のエネルギーが100 keVの場合、平均して実に14,000個から20,000個もの結合エネルギーを(原理的には)切断できる。このような桁違いのエネルギーによって切断できないような化学結合は、生体組織には存在しない。(もっとも強力な化学結合でも、高速電子のエネルギーの約1/14,000しかない。)

しかし、実際には、X線により生じた100 keVの電子が、単純に14,000個から20,000個もの化学結合を切断するわけではない。その相互作用は極めて複雑である。

100 keVのエネルギーの一部は、電離過程(原子や化合物から、さらに電子をはぎとることに費やされる。また一部は、原子から電子をはぎ取るまでに至らず、より高いエネルギー準位に電子を「励起」することに費やされる。

励起電子をもつ化合物は、不安定な、高いエネルギー準位の状態になる。このような励起状態では、通常では起きない様々な化学反応が生じる。電離により電子を失い、非常に不安定な状態にある化合物は、新しい化合物に転化したり、また他の化合物と活発に反応したりする。

極少量のエネルギーを原子間や化合物間で秩序正しくやり取りしながら巧緻に機能している生体組織に、例えば、100 keV のエネルギーをもつ電子が入ることは、化学的にみても生体にとって、とんでもないぶち壊しと言えよう。

8. 放射線によるイオン対生成の特殊性

化学反応では常にイオンが生成される。例えば、ナトリウム (金属) が塩素ガスと反応して、塩化ナトリウムができると、1 個の電子がナトリウム原子から塩素原子に移され、ナトリウムイオン (Na^+) と塩素イオン (Cl^-) が作られる。この化学反応では、電子が原子間の距離の何千倍も離れたところまでさまよいていくことはない！ すなわち、ナトリウムと塩素が反応するとき、電子は数オングストロームの距離を移動するだけである。

数ある化学反応のどれが起こっても電子の移行が生じる。しかし、ここでは電子の移動距離は数オングストロームの距離に限られる。しかし、放射線によってエネルギーを得た電子は、原子の (平均的な) 大きさよりはるかに大きな距離を跳梁し、いかなる化学結合を切断できる (物理的) 能力を持っている。生化学系では、化合物の空間的配置によって、化学反応が微妙にコントロールされている場合が多い。高速電子はこの微妙な空間的配置におかまいなく、どこでも何でも破壊してしまう。そして、ひとたび、分子中の原子から電子がはぎ取られると、その分子は高エネルギー準位に励起され、放射線によらねば不可能な種々の化学反応を引き起こす。

2.4 放射線の細胞への影響—放射線生物学— (計画中)

[1, 21]

2.5 放射線の人体への影響—放射線医学—

2.5.1 被ばくの形態と影響の種類

6

(a) 急性被ばくと慢性被ばく:

放射線が人体に与える影響を考える場合、放射線の量 (線量) と被ばくする時間 (回数) を考慮する必要がある。原爆など短時間に強い線量を浴びるのが急性被ばく (または瞬間的被ばく) であり、ある程度の線量を継続的または断続的に浴びるのが慢性被ばくである。

⁶原爆により、爆風、熱線、放射線の影響を受けることを被爆といい、放射線にさらされることを被曝 (radiation exposure) という。表記の混同をさけるために、以下、「被曝」を「被ばく」と表記する。近年、被爆者 (ひばくしゃ) は英語で Hibakusha と表記される。

(b) 外部被ばくと内部被ばく:

放射線を放出する物質を誤ってまたは気づかずに飲食したり吸いこんだりすることによる内部被ばく(体内被ばく)と、放射線を体外から被ばくする外部被ばく(体外被ばく)の二種類がある。

(c) 全身被ばくと局所被ばく:

2.5.2 確定的影響-ICRP の 2007 年勧告までに基づく-

[29] 確定的影響 (Deterministic effect) :

(相対的に) 高い線量を集中して浴びると、DNA などの修復機能が働く事が間に合わず、身体組織 (body tissue) などを構成している細胞が被ばくして、細胞の死を引き起こすためにおこり、確定的影響という。被ばく後の相対的に短い期間に起こる急性傷害(おう吐, 脱毛, 造血・消化管・皮膚の障害)と、被ばく後相当の時間経過後に起こる晩発性傷害(不妊, 奇形, 白内障など)と分類される。後述のように、放射線に対する感受性(耐性)は身体組織により差違がある。

1. 強い放射線(高い線量)を受けた場合、必ず発症する傷害。
2. 確定的影響が現われる最低線量(しきい値)が存在する。病気の種類にもよるが、被ばく線量(後述)で 100 ミリシーベルト(100mSv)以上。
3. 線量が増大するほど、影響の重篤度(severity)が重くなる。
4. 影響には、被ばくした全線量よりも、線量率(=1年あたりの線量)が重要な役割を果たす。
5. 以上の確定的影響の特徴は「細胞死モデル」で説明がつく。

確定的影響の重篤度と線量の関係を図2に示す。

2.5.3 被ばく線量に依存した確定的影響の概略

被ばく線量に依存した確定的影響を身の回りの放射線被ばくと比較して図3に示す。図3を見ると、「自然放射線」は「微弱な放射線」と感じるかもしれないが、「結構強い」という感じている研究者もいる[27]ように、自然放射線や診断用医療放射線が私たちをとりまく多くの発がん要因のひとつである[32]。

2.5.4 確率的影響

確率的影響 (Stochastic effect) :

細胞の一部の障害が原因で、白血病, 固形ガン, 遺伝的影響など。その重篤度ではなく、影響が発生する確率がしきい値なしの線量の関数と見なされる。悪性疾患

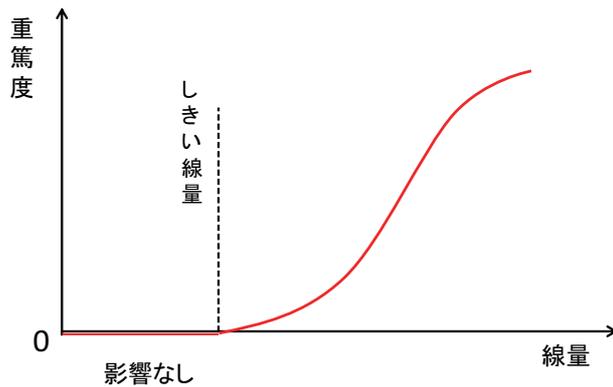


図 2: 確定的影響の重篤度と線量の関係

や遺伝的影響。図 4 に、確率的影響と線量の関係についての複数のモデルを示す。直線しきい値なしの (LNT) モデル (Linear-non-threshold model)[29] とは低線量領域でも、ゼロより大きい放射線被ばく線量は、単純比例で過剰がん及び又は遺伝性疾患のリスクを増加させる、という仮説に基づく線量反応モデルである。

LNT モデルは過大評価であるとする立場 [31]、過小評価であるとする立場 [30] の両面から批判されている。しかし、現時点では十分に合理的なモデルであると考えてよいであろう [61, 27, 32]。

2.5.5 確定的影響に関する ICRP の新見解—ICRP Publication118(2012年)—

国際放射線防護委員会 (ICRP) は 2012 年に確定的影響に関する ICRP の新見解 Publication118「組織反応に関する ICRP 声明ならびに正常組織・器官における放射線被ばくの早期および晩発影響 - 放射線防護の観点から見た組織反応のしきい線量」 [72] を発表した。その主な内容は次の通りである。 [73]

- (a) 確定的影響という用語を (少なくとも一部の症状に対しては) 「組織反応」 (Tissue Reaction) という用語に修正している。
- (b) 白内障と循環器疾患について、「実務的閾値」 (practical threshold の仮訳) を 0.5 Gy と判断する。
- (c) 「実務的閾値」は、これ以下でリスクがないことを意味しない。「実務的閾値」以下のリスクは不明である。
- (d) 白内障と循環器疾病のような低線量晩発性の反応の発生率は線量率により変わらない。瞬時的被ばくと慢性的被ばくでリスクに差はない。
- (e) 低線量晩発性の組織の損傷は回復不可能型のシングルヒット (single hit) の事象から起こる。

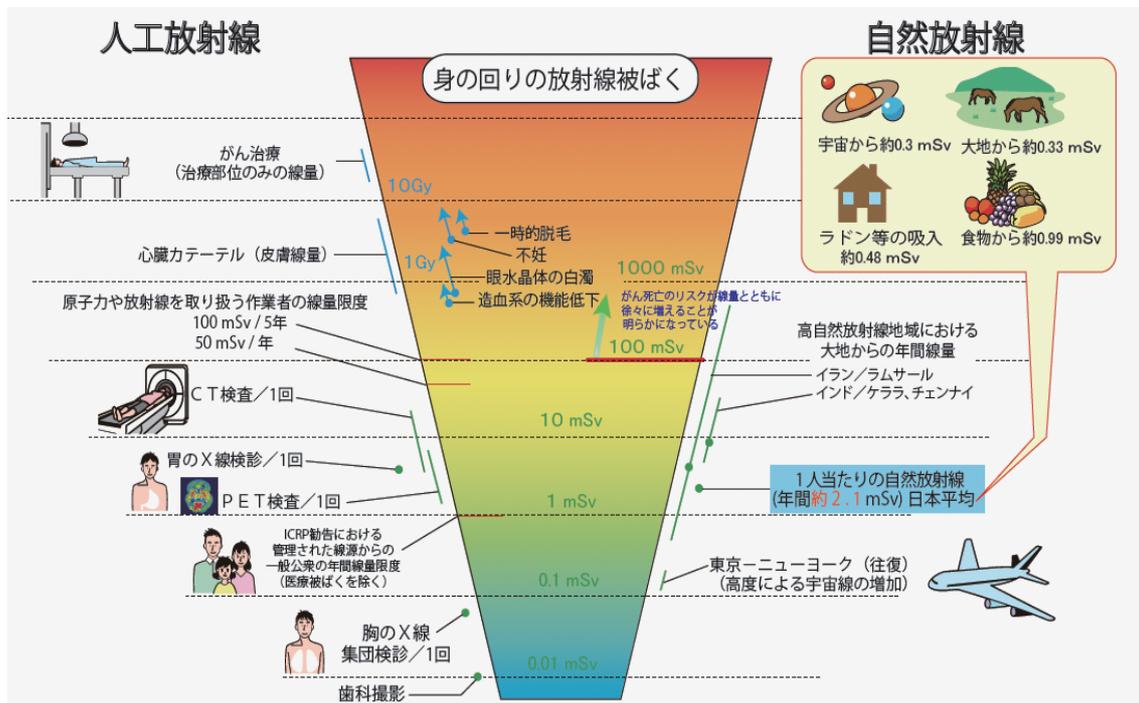


図 3: 被ばく線量と確定的影響と身の回りの放射線. 出典: 放射線影響研究所のホームページ [26]

- (f) 組織の損傷は、細胞死だけではなく、細胞破壊を伴わない機能不全と二次的な組織反応によっても起こる。
- (g) 影響は個人の遺伝子によって異なる。
- (h) 単位についての注意 5.6: 組織反応 (確定的影響) が生じる線量には、確率的影響であることが明らかなきに用いられる Sv より、Gy か、生物学的効果比 (RBE) を加味した線量 RBE-D(Gy) を使うべきである。(Gy, Sv という単位については後述の「放射線の被ばくに関する諸量 (1)」を参照のこと.)

*背景として、以下のような近年の研究の集積がある:

1. 広島長崎の5年間生存した原爆被爆者の循環器疾患の死亡調査 [74]
2. 米国国立がん研究センターの Little らによる循環器疾患の研究総括 [75]
3. 米国宇宙局 (NASA) による宇宙飛行士の白内障調査 [76]
4. 広島長崎の5年間生存した原爆被爆者の白内障の調査 [77]
5. 遺伝子ハプロ不全マウスを用いた白内障の実験 [78]
6. 米国放射線技師の白内障の調査 [79]

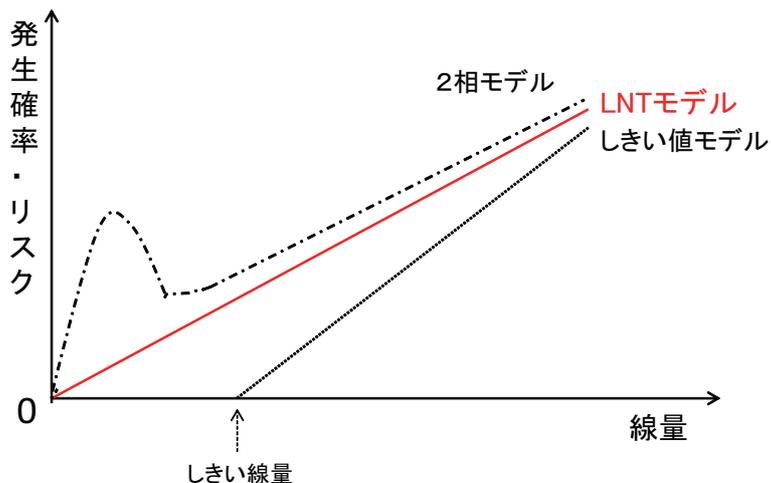


図 4: 確率的影響と線量の関係についての複数のモデル. LNT:直線しきい値なしモデル [29], 2相モデル [30], しきい値モデル [31].

7. 英国保険庁, 放射線化学物質環境センターの Ainsbury らによる白内障の研究レビュー [80]

これらの研究から得られる特徴:

- (1) 閾値はないか, あっても相当に小さい,
- (2) 虚心性心疾患の線量-反応曲線は直線に近い,
- (3) 影響は 30 年, 40 年, 50 年を経て大きくなる,
- (4) 影響は線量率に依存しないようである,
- (5) 細胞死モデルでは説明できない.

2.6 放射線に対する組織の感受性

放射線が体に及ぼす影響は、体の組織や臓器によって異なる。放射線に対する影響度の違いを放射線感受性という。放射線に対する感受性は

1. 細胞分裂の頻度が高い組織ほど感受性が高い、
2. 将来行う細胞分裂の数が多い組織ほど感受性が高い、
3. 形態機能が未分化な細胞ほど感受性が高い

とされている（ベルゴニー・トリボンドーの法則⁷⁾）。分裂が盛んな血液や骨髄などの造血器、皮膚、消化管粘膜などの組織は放射線感受性が高く、一方、分化が終了している筋肉組織や神経組織は放射線感受性が低い。

一般に、放射線への感受性または放射線耐性を決める要因は細胞分裂の頻度（活発さ）とDNAレベルにおける修復機構、および全身における栄養状態、免疫力などであると考えられる。

年齢性別ごとの放射線への感受性は以下の順で高い（＝放射線耐性は弱い）と考えてよいであろう：

胎児 > 幼児 > 児童 > 青年 > 老年 > 中年。

2.7 放射線感受性の個人差

同じものを食べても、食中毒になる人とならない人がいるのは、なぜか。

「同じものを食べても、すべての人が食中毒を起こすわけではありません。健康な人では、胃酸によって食中毒菌が殺菌されたり、腸内にいる乳酸菌などにより食中毒菌が繁殖しにくい環境が作られたりしています。しかし、小さなお子さんやお年寄りなど成人に比べ免疫力（病気に対する抵抗力）が弱い場合や、成人でも体調の状態により免疫力が弱っている場合は、食中毒にかかりやすくなります。さらに、食中毒菌を取り込んだ量によっても、発症時間や症状の強さなどが異なることがあります。」[34]

薬物による感受性は人によって大変に異なることが昔から知られており、その原因として、環境的な要素、遺伝的な要素の2つがあることが分かっている。実は、放射線を被曝したときの反応も人によって大きく異なる。例えば、ガン治療の1つとして放射線治療があるが、放射線治療の効果の大きさや、放射線治療に伴う副作用（有害事情）の現れ方は、患者によって大きく異なることが臨床現場では昔から知られていた。[35]

従来、広島、長崎の原爆被爆者についての疫学調査などでは、100 mSv 以下の低線量放射線被ばくによる発がんの増加は不明であり、医学関係者を含むかなり多くの専門家は「100 mSv 以下の低線量放射線被ばくによる発がんの増加はない」とも解釈してきた。

放射線被ばくによる発がんには、染色体異常など染色体DNAの障害が関わっていると考えられる。しかし、染色体異常の解析には非常に高度な技術を要し、さらに低線量放射線被ばくによる軽微な染色体への影響を解析するためには多数の細胞の解析を行う必要があるため、これまで低線量放射線被ばくと染色体異常の関係については不明であった。

近年、研究の進展により、放射線への感受性、特に低線量被ばくの影響の個人差は、当初の予想よりも大きいことが徐々に判ってきている。[35, 36, 37, 38, 39,

⁷Bergonie-Tribondeau's law. フランスの医師・生物学者の、ジャン＝アルバン・ベルゴニエ（1857-1925）とルイ・トリボンドー（1872-1918）が、1906年に発見した

40, 41, 42] 放射線への感受性に個人差が現れる理由は次の通りである。

1. 年齢が若いほど感受性が高い。
2. 遺伝子の異常の存否には個人差がある
3. 遺伝子損傷の修復能力には個人差がある。
4. 生物学的半減期の長さには個人差がある。
5. 免疫力には個人差がある。

放射線の低線量被ばくの影響をめぐっては歴史的には重層的な伏線があった。

妊娠中のレントゲンで胎内被ばくした子どもが小児白血病にかかることを1955年に発見したイギリス人の医師、疫学者アリス・スチュアートと、米ハンフォード核施設の作業員に低線量放射線によるがん死が増加していることを調査したトーマス・マンキューソが1977年に共同で出した論文[43]によって、二人はイギリス・アメリカ政府と原子力ムラに迫害されてきた。[44, 45]。

日本の原子力産業に関係する組織による原子力百科事典の「米国ハンフォード原子力施設従事者の疫学調査」（1998年3月更新）[46]という事項についての概要は「ワシントン州のハンフォード原子力施設の労働者の放射線被ばくとその健康影響についてアメリカの研究者グループが解析を行い、微量の放射線被ばくによる発がんの危険性について論文を発表した。これを通じて論争が行われ、種々の疫学的解析方法による多くの論文が発表されているが明確な結論はまだ出ていない。」と記されている。

しかし、2015年10月「低線量でもがん死リスク増 被曝100ミリシーベルト未満 欧米で30万人調査」[47, 59]という研究によれば、「1944年～2005年に英米仏の原発などで働いた約30万人（大腸の平均被曝量約20ミリシーベルト相当）のうち、白血病以外のがんで死亡した約1万9千人について欧米の研究チームが被曝量との関係を調べた。すると被曝量が1ミリシーベルト増えたとがん死亡するリスクが0.048%高まるとの結果が出た」という。さらに、「（100ミリ未満の被曝でも）線量に応じたリスクの増加は原爆被爆者の調査と似たような傾向を示した」と、広島・長崎原爆投下後に5年以上生存した原爆被爆者の調査の傾向と整合的であることはこの研究の信頼性を高め、米国ハンフォード原子力施設従事者の疫学調査についてのスチュアートの研究を支持する内容であると思われる。

以上に加えて、2017年7月「放射線に対する強さ・弱さの個人差を決める遺伝子変化を同定」[39]、2018年10月「CT検査などの、放射線の人体への軽微な影響が評価可能になった」という広島大学の研究グループによる成果[41]は放射線感受性の個人差を臨床的に裏付ける技術で画期的と言え、放射線の低線量被ばくの影響についての論争に決着が付けられる可能性を高めると思われる。

現在の放射線防護基準は公衆に対して一律に設定されているが、2016年、新しい概念として放射線感受性の考え方「個別化実効線量 Personalized Effective Dose」

が提唱 [49] されているように、将来的には個々人の放射線感受性に応じてテーラーメイド化される可能性 [39] があるし、そうなるべきである。

2.8 放射線被ばくによる影響の特徴

放射線障害の特徴はつぎの通りである。

1. 症状の非特異性

放射線被ばくによる症状は、吐き気、嘔吐、脱力感、出血、白血球減少など他の病気の症状と基本的な差異はない [32]。

2. 症状の遅発性

放射線被ばくによる症状は必ずしもすぐ症状が現れるのではなく、潜伏期を経由するなど被ばくからかなり遅れて発症する。

3. 被ばくの無自覚性

放射線は短時間に大量の被ばくではないかぎり、その被ばくが直接に知覚されることはほとんどない。

2.9 放射線障害の防護・軽減の原則と方法

2.9.1 放射線被ばくの影響の防護 または軽減 (緩和) の一般的な原則と方法

1. 外部被ばく：まず、外部被ばくにおける防護または軽減のための原則はつぎの通りである。

- (a) 遮蔽: 放射線発生源からの放射線の放出をできるだけ防ぎ、または放射線を減衰させるために、遮蔽する (shielding)。
- (b) 距離: 一般には、点状の線源の場合、放射線の強度は距離の二乗に反比例して弱くなる。したがって、放射線源からできるだけ距離を遠くにとる。
- (c) 時間: 一般に、放射線を吸収する量は被ばくしている時間に比例する。したがって、放射線を被ばくする時間をできるだけ短くする。

放射線を防ぐための遮蔽材料にはつぎのような性質をもつものが望ましい。

- (a) 放射線をよく減衰させること。
- (b) 散乱現象の少ないこと。
- (c) 二次放射線の出ないものであること。
- (d) 放射線により材料の性質が悪くならないこと。

放射線の遮蔽には放射線の種類ごとに異なる方法を考えなければならない。

(a) α 線、陽子線などの重荷電粒子線

空気中で数 cm 程度で、紙 1 枚でも遮蔽することができるので、吸気または飲食により摂取しない限り、特別な対策は必要ではない。

(b) β 線

β 線は、そのエネルギーに依存するが、空気中の飛程は 10m を越える場合もあるが、水中では高々 1 cm 以下である。しかし、金属であれば十分に遮蔽できる。

(c) γ 線または X線

高エネルギーの電磁波である γ 線や X線は物質粒子（特に電子）との相互作用の性質から一般に原子番号の大きな元素を含む物質は望ましい。鉛は γ 線または X線の良い遮蔽材であるが、機械的に弱く熱にも弱いのが欠点である。この点コンクリートは優れているが、 γ 線を吸収するとそのエネルギーが内部で熱になり、その高温を外に出しにくい。これらの欠点を補うために種々の遮蔽材が工夫されている。

(d) 中性子線

中性子はそのエネルギーにより種々の核反応を起こすのでエネルギーごとに異なる方法を組み合わせる必要がある。まず、高速中性子は重い原子核との非弾性散乱により中速中性子に減速させる。その材料としてはコンクリートなどがよい。次に、中速中性子を軽い原子核との弾性散乱により熱中性子まで減速させる。この目的には水や水素原子を多く含むパラフィンや（蝋燭の）蝋は優れている。しかし、熱中性子を原子核が吸収して二次 γ 線を発生する場合があるので、ホウ素 (^{10}B) により熱中性子を吸収させる。このとき、重荷電粒子が放出されるが、それらの遮蔽は α 線などの重荷電粒子の場合と同じく容易である。

2. 内部被ばく：内部被ばくの場合には、誤って体内に摂取された放射性核種をできるだけ早く除去することが必要不可欠である [50]。

(a) 水分の大量摂取による希釈

最も単純な方法は大量の水分を強制的に与えて希釈により排泄を促進させるものである。

(b) 錯体の生成による除去

放射性核種がウラン，プルトニウムなど重金属元素の場合には、錯体（キレート化合物）⁸の形にして除去するのが普通である。

⁸錯体（さくたい、英語：complex）もしくは錯塩（さくえん、英語：complex salt）とは、広義には、配位結合や水素結合によって形成された分子の総称である。狭義には、金属と非金属の原子が結合した構造を持つ化合物（金属錯体）を指す。この非金属原子は配位子である。ヘモグロビ

(c) 吸着による除去

放射性核種を不溶性の吸着体に吸着させて体外に排泄する方法もある。活性炭、イオン交換体、プルシアンブルー（フェロシアン化鉄のこと）などが用いられる。

(d) 代謝の攪乱による除去

生物は化学的性質が同じ同位体（同位元素）は区別できないという性質を利用する。例えば、甲状腺に重要なヨウ素には非放射性のヨウ素だけではなく放射性のヨウ素¹³¹などが存在する。放射性のヨウ素を摂取した場合、または、まもなく摂取する可能性が高い場合、強制的に非放射性のヨウ素を摂取することにより、排泄作用を刺激、促進させることができる。（しかし、放射性のヨウ素を摂取して約6時間経過した場合にはこのような排泄作用は期待できないことが知られている。）

(e) 天然物質による除去

細菌、放線菌などの微生物などには種々の放射性核種に対して強い親和性を示すものがある。このような天然物質はいわゆる放射性物質（核種）の生物濃縮という機能があり、それが放射性核種の排泄促進剤として利用できる可能性がある。

2.9.2 ICRP による放射線防護の原則 [29]

- 正当化の原則：

放射線被ばくの状態を変化させるいかなる決定も、害よりも便益を大きくすべきである。

- 防護の最適化の原則：

被ばくする可能性、被ばくする人の数、及びその人たちの個人線量の大きさは、すべて、経済的及び社会的な要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保たれるべきである。（「合理的に達成できる限り低く（As Low As Reasonably Achievable；ALARA）」はALARA原則とも略される。）

- 線量限度の適用の原則：

患者の医療被ばくを除く計画被ばく状況においては、規制された線源からのいかなる個人への総線量も、委員会が勧告する適切な限度を超えるべきではない。

ンやクロフィルなど生理的に重要な金属キレート化合物も錯体である。また、中心金属の酸化数と配位子の電荷が打ち消しあっていないイオン性の錯体は錯イオンと呼ばれる。金属錯体は、有機化合物・無機化合物のどちらとも異なる多くの特徴的性質を示す。

* 「合理的に達成できる限り低く (As Low As Reasonably Achievable ; ALARA)」という表現への批判的コメント:

個人の同意無しに危害(死)を加えるのは、最も基本的な人権の侵害である。「経済的有用性」. 富, 産業, 化学, その他のどんな目的を追求するためでも, 人権を犠牲にしてはならない。「便益と危険」を天秤にかける思想は、最も強い人権侵害である。[61]

3 放射線の被ばくに関係する諸量(1)

3.1 放射能の強さ

1秒間に1回の放射性崩壊(または壊変)が起きる場合の放射能の強さを1ベクレル(Bq)という。ベクレルから派生した単位に

$$1 \text{メガベクレル (MBq)} = 1,000,000 \text{ Bq} = 10^6 \text{ Bq} = 10^{-3} \text{ Sv}, \quad (3.1)$$

$$1 \text{ギガベクレル (GBq)} = 1,000 \text{ MBq} = 10^9 \text{ Bq}, \quad (3.2)$$

$$1 \text{テラベクレル (TBq)} = 1,000 \text{ GBq} = 10^{12} \text{ Bq} \quad (3.3)$$

がある。

3.2 照射線量

照射線量とは、空気との相互作用の結果電離を生ずる能力に基づいて、X線または γ 線の放射線の量を計るための物理量である。X線や γ 線の照射により空気1kgにつき1クーロン(C)の電気量に相当する正または負のイオン群を生じさせる照射線量を1C/kgとする。この単位と従来からのレントゲン(R)単位とは $1 \text{ R} \equiv 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ の関係にある。

3.3 吸収線量

物質が単位質量あたりに吸収したエネルギーを吸収線量(absorbed dose)といい、ここでは D と表す。その単位は1グレイ(G) $\equiv 1 \text{ J/kg}$ である。

$$[D] = \frac{\text{J}}{\text{kg}} \equiv \text{Gy}. \quad (3.4)$$

放射線のエネルギーはMeV(百万電子ボルト)単位で与えられることが多い:

$$[D] = \frac{\text{J}}{\text{kg}} \equiv \text{Gy}. \quad (3.5)$$

したがって、 $1 \text{ Gy} \approx 0.24 \text{ cal/kg}$ 表すこともできる。

コメント:

- (a) 致死線量の10グレイで細胞を構成する全分子のどれだけが影響を受けるか。1ジュール $= 0.24 \text{ cal} \rightarrow 10 \text{ グレイ} = 2.4 \text{ cal}$ 水1グラムの温度を1度だけ高める熱量が1cal. $\rightarrow 10 \text{ グレイ}$ で1キログラムの水の温度上昇はわずか 0.0024°C

しかし、この種の説明ではエネルギーの量と質の違いと関連を考慮していない可能性がある(付録参照)。

- (b) グレイの吸収線量によって、1立方ミクロンの細胞体積中に生成するイオン対の数＝約200個。1個の細胞の容積を500立方ミクロンとすれば、1個の細胞全体の生成イオン対数＝1グレイにつき10万個、10グレイで100万個。1個の細胞中の分子数を 10^{12} 個とすれば、細胞全体のわずか100万分の1だけが傷つけられるにすぎない。
- (c) 吸収線量 D は物理量であるから、後述する等価線量または線量当量、実効線量、預託線量とは異なり、確定した値をもつと解釈されることがある。しかし、関与するエネルギーは確定できることが多いが、実際にはどれくらいの領域で吸収されたかを特定しない限り、関係する質量は確定できない、すなわち吸収過程についてのモデルが必要である。後述するように、この事情が内部被ばくの評価の違いを生じる原因の1つとなる。

3.4 等価線量または線量当量 (ICRP)

放射線には α 線、 β 線、中性子線、陽子線や重イオンなどの粒子線とエックス線、ガンマ線などの高エネルギーの電磁波がある。

放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮した線量を等価線量または線量当量 (equivalent dose) と言い、次の式で定義される。

(等価線量 Sv) = (放射線荷重係数, または生物学的効果比) \times (吸収線量 Gy)。

放射線荷重係数 (radiation weighting factor) をここでは w_R と表すことにする。生物学的効果比 (relative biological effectiveness) は RBE と略称されることもある。

等価線量を H と表すと、その定義式と単位は以下のとおりである。

$$H_T \equiv \sum_R w_R \times D_{T,R}, \quad (3.6)$$

$$[H_T] = \text{Sv}. \quad (3.7)$$

ここで、 $D_{T,R}$ は組織または臓器 T が放射線 R から受ける平均吸収線量である。 w_R は無次元量なので、等価線量の単位は吸収線量と同じ J/kg, また特別の名称はシーベルト (sievert)[Sv] である。シーベルトから派生する単位として

$$1 \text{ ミリシーベルト (mSv)} = \frac{\text{Sv}}{1000} = 10^{-3} \text{ Sv}, \quad (3.8)$$

$$1 \text{ マイクロシーベルト } (\mu\text{Sv}) = \frac{\text{mSv}}{1000} = 10^{-6} \text{ Sv} \quad (3.9)$$

がある。

種類の異なる複数の放射線が混在して関与している場合、放射線ごとにそれぞれの平均吸収線量に放射線荷重係数を掛けて足し合わせる。⁹

シーベルト (sievert)[Sv] についてのコメント：

⁹異なる種類の放射線は物質中で、それぞれ異なったパターンで不均質かつ不連続なエネルギー吸収を起こす。同じ吸収線量でも、放射線の種類によって生物効果が異なるのは、この微視的なエネルギー吸収の空間分布の違いによるためであると考えられる。すなわち、放射線の生物効果は、巨視的な吸収エネルギーの量である吸収線量に依存するだけでなく、吸収エネルギーの微視的な空間分布にも依存する。そのような微視的な吸収エネルギーを実際に測定しようというのがマイクロドシメトリ (Microdosimetry, 微小域線量評価) である [53]。

表 1: 生物学的効果比 (relative biological effectiveness, RBE), または線質係数 Q または放射線荷重係数 w_R の値 [28]

入射放射線の線種とエネルギー	放射線荷重係数 (w_R)
光子 (ガンマ線, エックス線), すべてのエネルギー	1
電子及びミュー粒子 (すべてのエネルギー)	1
陽子	5
中性子, エネルギー < 10 keV	5
中性子, エネルギー 10 keV-100 keV	10
中性子, エネルギー > 100 keV-2 MeV	20
中性子, エネルギー > 2 MeV-20 MeV	10
中性子, エネルギー > 20 MeV	5
アルファ粒子, 核分裂片, 重イオン	20

1. ガンマ線とエックス線の放射線荷重係数は 1 とされ, アルファ線のそれは 20 とされている. このように, 大雑把な切りのよい数値になっているのは, この指標が大して精度が良くないことを示している.
2. (先述のように)ICRP の勧告 118(2012)における被ばくの単位についての注意 (5.6 節): 組織反応 (確定的影響) が生じる線量には, 確率的影響であることが明らかなきときに使われる Sv より, Gy か, 生物学的効果 (RBE) を加味した線量 RBE-D(Gy) を使うべきである.

3.5 実効線量 (ICRP)

等価線量が同じでも, 人体の臓器に対する影響の現れ方 (=放射線感受性) が異なるために, 臓器ごとに組織荷重係数 (tissue weighting factor) という相対的な重み付けをして合算して, 全身の被ばく線量としたものを, 人体が部分的に被ばくする場合の効果を全身に対する一様な被ばくの影響に換算した線量を実効線量 (effective dose) と定義し, 等価線量と同じ単位であるシーベルト (Sv, Sievert) が使われる. ここで, 組織荷重係数は, その定義により, 全臓器の合計で 1 となるように設定されている. 組織荷重係数をここでは w_T と表す. 実効線量を E と表すと, その定義式と単位は以下のとおりである.

$$E \equiv \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} = \sum_T w_T H_T, \quad (3.10)$$

$$\sum_T w_T = 1, \quad (3.11)$$

$$[E] = \text{Sv}. \quad (3.12)$$

式 (3.10) において, w_T は臓器 T に対する組織荷重係数, H_T は臓器 T に対する等価線量である.

コメント：ECRR は、ICRP の内部被ばくの取扱において外部被ばくの結果に基づくりスク係数を使い、臓器単位のサイズで被ばく線量を平均化しているところを一貫して批判している。例えば、ベータ線を考えれば、それはその飛跡周辺の細胞にしか影響を与えないにも関わらず、線量は kg サイズの質量で平均化されてしまう。[52]

3.6 内部被ばくによる影響評価と預託線量 (ICRP)

国際放射線防護委員会 (ICRP) の放射線防護システムにおいては、内部被ばくについては預託線量 (committed dose) を用いることになっている。この場合、放射線の種類による相対的影響を考慮した預託等価線量、臓器による影響の違いを考慮した預託実効線量を用いる [1], [60]。

内部被ばくの影響評価についてのコメント：

1. 内部被ばくが外部被ばくより危険かどうかは、被ばくの状況一均等分散か極所集中か—によって異なるという見解もある。吸収線量 Gy は外部被ばくのように均一の平行飛跡を想定して考えられたものであり、内部被ばくの中で、極所集中、すなわち、臓器の一部に局在化した状況は想定されていない。この場合は、放射性微粒子から発せられる放射線の飛跡や電離した場所の密度が微粒子周辺で高くなり、均等分散の場合と異なる影響を及ぼす可能性が考えられる。これを根拠に、しかし、外部被ばくより内部被ばくの方が発がんリスクは「増大する」という考え方と「同じか減少する」という正反対の考え方に分岐し、長年論争の対象になっている。
 - (a) 「増大する」と考える理由は、至近距離からの強い被ばくに加えて、電離や飛跡の密度が高いことで、線源粒子周辺の細胞の発がんのチャンスが増加するというものである。
 - (b) 一方、「同じか減少する」と考える理由は、電離は同時多発的に起きているのではなく、体内に取り込まれて排出されるまでの期間に時間差で起きている。そのため、空間的な密度は高くても、時間的な密度は高いわけではなく電離と電離の間に修復が起きると考えられ、そのために発がんリスクは小さくなるというものである。仮に、高密度となり、細胞障害が大きくなれば、その細胞は細胞死を起こして消滅するから、ガンの元になる細胞にならない。ICRP は「同じか減少する」という考え方を取っている。[69]
2. 後述するように、欧州放射線リスク委員会 (ECRR) は ICRP 防護体系における内部被ばくの影響評価についても批判的である。
3. ICRP 防護体系における内部被ばくの影響評価についても批判的な文献 [62, 63, 64, 65, 66, 67, 68]。
4. 沢田による原爆症における内部被ばくの影響評価 [70, 71]
5. 外部被ばくより内部被ばくの方が発がんリスクは「増大する」という考え方と「同じか減少する」という正反対の考え方の分岐について、ICRP の 118 勧告 (2012 年) が一石を投じることになるかもしれない。

3.7 「放射線量」と「積算線量」

「放射線量」と「積算線量」という用語が報道で使われることがある。「放射線量」は1時間当たりの実効線量のことで、その単位は毎時マイクロシーベルト ($\mu\text{Sv/h}$) である。

「積算線量」は「被ばく線量」と言われることもあるが、「放射線量」に（被ばくする時間）を掛けたものである：「放射線量」×（被ばくする時間）＝「積算線量」。

計算例1：毎時1マイクロシーベルトを1年間、継続して被ばくする場合の「積算線量」は何mSvか。

$$\frac{1\mu\text{Sv}}{\text{h}} \times 24 \times 365 \text{ h} = 8760 \mu\text{Sv} = 8.76 \text{ mSv}. \quad (3.13)$$

計算例2：1年間での「積算線量」が1mSvになる場合の、「放射線量」は毎時何マイクロシーベルトか。

$$\frac{1\text{mSv}}{24 \times 365 \text{ h}} = 0.114 \mu\text{Sv/h}. \quad (3.14)$$

ただし、「放射線量」を実効線量の意味で使う場合もあるようである[?].

3.8 放射能，放射能濃度から「被ばく線量」(実効線量)の計算

1. 実効線量係数の定義と変換式:[] は単位.

(被ばく線量 [Sv]) = (実効線量係数 [Sv/Bq]) × (放射能の強さ [Bq]).

実効線量係数 (Effective Dose Coefficient) の本来の単位は Sv/Bq (1ベクレルあたり1シーベルト) である。しかし、実際的な場合の便宜を考えて、 $\text{mSv/Bq} = 10^{-3}\text{Sv/Bq}$ (1ベクレルあたり1ミリシーベルト) $\mu\text{Sv/Bq} = 10^{-6}\text{Sv/Bq}$ (1ベクレルあたり1マイクロシーベルト) が用いられることもある。

2. 放射能濃度が与えられる場合の被爆線量の計算式:

- (a) 放射能濃度が単位体積当たりで与えられる場合:

(被ばく線量 [Sv])

$$= (\text{実効線量係数 [Sv/Bq]}) \times (\text{放射能濃度 [Bq/m}^3\text{]}) \times (\text{体積 [m}^3\text{]}).$$

- (b) 放射能濃度が単位重量(質量) 当たりで与えられる場合:

(被ばく線量 [Sv])

$$= (\text{実効線量係数 [Sv/Bq]}) \times (\text{放射能濃度 [Bq/kg]}) \times (\text{重量 [kg]}).$$

3.9 放射線のリスク係数

放射線のリスク係数:

がんリスクは、遺伝リスク (1%/Sv) に比べ寄与が大きいため、「確率的影響の確率＝がんの確率」と見なすと、低線量・低線量率の放射線のリスク係数はICRP1990年勧告に基づき、5%/Sv又は0.005%/Svである。例えば、一般公衆10万人に平均1mSvの被ばくが起ると、この放射線起因の生涯がん死亡数は5人と計算される。日本のがん死亡は全死亡の約1/3から、1mSv被ばくによりがん死亡は約1/3 + 5/100,000になる。この計算法が、現在の科学的知見に照らしてどの程度妥当なのか、仮に問題があれば、それは何か又は他の優れた計算法は何か、が放射線リスク評価上、重要な課題である。

3.10 個人線量と集団線量(計画中)

集団線量 (Collective dose) と集団実効線量 (Collective effective dose)

4 放射線に関する諸量(2)(計画中)

5 関連する諸問題と情報

5.1 保健物理(放射線影響学, 放射線防護学)の始まりと近年の動向について

専門分野として「放射線防護学」[54]と称したり, または放射線防護または評価についての「科学体系」という見方[64]もある。しかし, 次の見解が妥当な見方ではないかと筆者は考える:

「低線量被ばくに関する生物学的な放射線影響研究, 疫学的な放射線影響研究は, 不確実性が大きく挑戦的な課題が多く残っている基礎的・基盤的な一貫した取り組みの必要な研究分野である。(中略)。科学的根拠の不確実性が大きいということは, 科学的なアプローチの限界であるということである。その上で行う政策的な判断には, 科学的な知見に伴う不確実性や複雑さを, 単純化して, 割り切ることが含まれている。(中略)。したがって, いわゆる放射線防護体系は, 客観的ではあり得ず、『科学』ではない。しかしながら, 放射線防護体系は, しっかりした体系的な放射線影響研究評価を実証的な根拠として持たなければ, 機能しないものである」[2]

保健物理という研究分野の始まりの経緯は[9]に, 近年の経緯と問題点は[13]に指摘されている。

5.2 自然放射線と人工的放射線

5.3 医療用診断被ばく

5.4 原子力施設から定常運転時に放出される放射線の影響

5.5 国際放射線防護委員会(ICRP)と欧州放射線リスク委員会(ECRR)の違いはどこにあるのか?

5.6 ICRP Publication-118(2012)の単位についての注意の全文

単位についての注意:[72] ICRP-publication118(2012)のp.23
ICRPの慣例に従えば, 組織反応(確定的影響)が生じる線量には, 確率的影響であることが明らかなきに用いられるSvより, Gyか, 生物学的効果比(RBE)を加味した線量RBE-D(Gy)を使うべきである。ICRPは, 「シーベルト(Sv)という特別な単位で表す等価線量や実効線量といった量を被曝を定量化するのに使ったり, 組織反応がおこるような状況で治療の判断をするのに使うべきではない」, 「一般に, このような場合には, 線量

は吸収線量グレイ (Gy) で与えるべきで、高 LET 放射線（例えば 中性子またはアルファ粒子）が関与する場合は、RBE 加重の線量 RBE-D (Gy) を使用すべきである」と述べている (ICRP、2007)。多くの専門家がこれまで使い慣れていることから、多くの文献で線量に Sv や mSv が使われているのが現実である。また、白内障および循環器疾患の特定のエンドポイント (終点) に 閾値モデルが使用できるかという不確かさがあるのも事実である。低 LET 放射線の場合には、どちらの単位でも数値は同じになる。

5.7 世界保健機関 (WHO) と国際原子力機関 (IAEA) との間の協定「WHA12-40」とその評価

世界保健機関 (WHO) は 1959 年 5 月 28 日、国際原子力機関 (IAEA) との間に協定「WHA12-40」を締結した。この協定の主な内容は：

- 国際原子力機関と世界保健機関は、提供された情報の守秘性を保つために、ある種の制限措置を取らざるを得ない場合があることを認める。
- IAEA と WHO の事務局長は、両者に関連のある全プロジェクトと全プログラムについて、相互に情報を交換することとする。
- WHO は、研究、その他全ての活動を含む国際的な保健衛生活動の推進、開発、支援、調整に取り組む WHO の権利を侵害することなく、全世界における原子力の平和利用の研究・開発・実用化を奨励、支援、調整するのは、主に IAEA の義務であることを認める。
- 両者の一方が、他方にとって大いに重要性のある、あるいはその可能性がある分野でのプログラムに着手する際には毎回、前者は合意の上で課題を解決するために、後者の意見を求める。

この協定の締結後、WHO は放射線防護に関する目標を遵守するための独立性や自主性を全く示していない、という評価がある [56]。

謝辞

確定的影響に関する ICRP の新見解— ICRP Publication118(2012 年) —と関連する論文の御教示と有益な討論について、永井宏幸氏、森永 徹氏に感謝する。

A 安定な原子核と不安定な原子核

現在、数千個の原子核が知られているが、天然に存在するのは約 320 個であり、その他は人工的に生成されたものである。天然に存在する原子核のうち約 265 個は安定である。人工的に生成された原子核のほとんどは不安定である。不安定な原子核がより安定になろうとして、原子核の外に粒子や電磁波を放出する。これらの放出される粒子や電磁波を放射線 (radioactive ray) と総称する。また、放射線の放出により元の原子核 (親核, parent nucleus) は別に原子核 (娘核, daughter nucleus) に変化する。これを原子核の崩壊 (または壊変, disintegration, decay) という。娘核は一般に不安定であり、崩壊は安定な原子核に到達するまで続く。

A 放射線とその種類

1. 放射線とは、基本的には原子核から放出される 高エネルギー の粒子線（粒子の線束）または電磁波である。粒子線としては α 線、 β 線、中性子線、陽子線や重イオンなどが含まれる。高エネルギー の電磁波は γ 線と呼ばれる。
2. α 線は 高速 のヘリウム 4 原子核 (${}^4\text{He}$) の流れである。
3. β 線は 高速 の電子の流れである。電子と電荷だけが逆符号である陽電子の流れも総称する場合がある。
4. γ 線は原子核から出る 高エネルギー の電磁波である。電磁波、すなわち光の一種である。光は波長によっていろんな種類に分けられる。波長の長い順に電波、赤外線、可視光線、紫外線、X線、 γ 線と呼ばれる。X線と γ 線の境界は明かではないが、原子から放出される 高エネルギー の電磁波が歴史的にX線と呼ばれている。一般には γ 線がより エネルギーが高い。
5. 「放射能」というのは「放射線」を放出できる能力のことをいう。従って、放射線と放射能は本来は異なる。放射性物質とは放射線を放出する原子（核）を含む物質のことである。しかし、現在では放射能という言葉が放射性物質という意味で使用されることもあり、注意すべきである。例えば、「放射線漏れ」とは放射線を出す源（放射性同位元素を含む物質）を囲む遮蔽などが不十分で外に放射線が漏れていることを意味する。「放射能漏れ」とは、文字通りでは、放射線を放出する能力が外に漏れていることであるから、源が外に漏れていることを意味する。しかし、「放射線漏れ」の意味で使用される場合もあるので、放射性物質が外に漏れたかどうかを確認する必要がある。

A エネルギーの量と質

エネルギーを測る単位には、カロリー (cal)、ジュール (J)、キロワット時 (kwh) のように、いくつかあるが、それらは相互に換算可能である。このことから、エネルギーは量であって質の違いなどはないと思われがちである。

しかし、私たちにとって重要なのは、抽象的概念としてのエネルギーではなく、物理的な実体としてのエネルギーである。言い換えれば、エネルギーを運ぶ粒子を考えないでエネルギーの移動を論じるのはあまり意味がない。私たちに身近なラジオ、テレビ、携帯電話で情報を運んでいる電磁波も「光子」とよばれる（量子的）粒子の集まりまたは流れであるが、1個の粒子が運ぶエネルギーの量こそが、物理現象あるいは生物現象に基本的かつ決定的な役割を果たすのである [55]。だから物理学では1個の粒子が運ぶエネルギーの大きさを エネルギーの高低 とよび、エネルギーの質の違いを明示している。例えば「核反応によって生じるエネルギーは化学反応のそれに比べて約 100 万倍高い」などという。全エネルギーの量は (1個の粒子が運ぶエネルギーの量) \times (関与する粒子の個数) = (全エネルギーの量) と計算される。

参考文献

- [1] 鳥居他「放射線を科学的に理解する 基礎からわかる東大教養の講義」丸善、2012年。

- [2] 独立行政法人放射線医学総合研究所「虎の巻 低線量放射線と健康影響—先生、放射線を浴びても大丈夫? と聞かれたら」医療科学社, 2012年. 特に p.4.
- [3] 津田敏秀「市民のための疫学入門—医学ニュースから環境裁判まで」緑風出版, 2003年.
- [4] K.J. ロスマン「ロスマンの疫学—科学的思考への誘い」篠原出版新社, 2013年.
- [5] 吉川肇子「リスクとつきあう—危険な時代のコミュニケーション」有斐閣選書, 2000年.
- [6] K. シュレーダー=フレチェット「環境リスクと合理的意思決定—市民参加の哲学」昭和堂, 2007年.
- [7] 柴田義貞編「放射線リスクコミュニケーション」長崎新聞社, 2012年. 特に, p.417.
- [8] 尾内隆之・調麻佐志 編「科学者に委ねてはいけないこと—科学から『生』をとりもどす」岩波書店, 2013年.
- [9] カール・Z. モーガン, ケン・M. ピーターソン「原子力開発の光と影—核開発者からの証言」昭和堂, 2003年.
- [10] 中川保雄「(増補)放射線被曝の歴史」明石書店, 初版1991年, 増補版2011年.
- [11] 日野行介「福島原発事故 県民健康管理調査の闇」岩波新書, 2013年.
- [12] 高橋博子「[新訂増補版] 封印されたヒロシマ・ナガサキ」凱風社, 2013年.
- [13] 島藪 進「つくられた放射線「安全」論 —科学が道を踏みはずすとき」河出書房新社, 2013年.
- [14] 牧野淳一郎「原発事故と科学的方法」岩波書店, 2013年.
- [15] 牧野淳一郎「被曝評価と科学的方法」岩波書店, 2015年
- [16] study2007「見捨てられた初期被曝」岩波科学ライブラリー, 2015年.
- [17] R.A.Weinberg「ワインバーグ がんの生物学」南江堂, 2008年. 特に, 2章 がんの本性.
- [18] 高橋成人「最新の RI. 放射線によるがん診断・治療」, 日本の科学者, Vol.54, No.10(2016), 40.
- [19] がんの基礎知識: 国立がん研究センター がん情報サービス. http://ganjoho.jp/public/dia_tre/knowledge/
- [20] 公益財団法人日本対がん協会. <http://www.cancer.jp/>
- [21] 増田康治「改訂4版 放射線生物学」南山堂, 2002年.
- [22] 放射線影響研究所. <http://www.rerf.or.jp/index-j.html>
- [23] 原子力資料情報. <http://www.cnic.jp/>
- [24] 国際放射線防護委員会. <http://www.icrp.org>
- [25] 欧州放射線リスク委員会. ECR (European Committee on Radiation Risk) <http://www.euradcom.org/>

- [26] 放射線影響研究所, 放射線被ばく早見表, 2013年5月. <http://www.nirs.go.jp/data/pdf/hayamizu/j/20130502.pdf>
- [27] 今中哲二「低線量放射線被曝—チェルノブイリから福島へ」岩波書店, 2012年
- [28] 国際放射線防護委員会勧告 92(2003年)(生物効果比 (RBE), 線質係数 (Q) 及び放射線荷重係数 (w_R)).
http://www.icrp.org/docs/P92_Japanese.pdf
- [29] 国際放射線防護委員会の2007年勧告, ICRP Publ.103. http://www.icrp.org/docs/P103_Japanese.pdf
- [30] 欧州放射線リスク委員会 (ECRR) 編「放射線被ばくによる健康影響とリスク評価-欧州放射線リスク委員会 (ECRR)2010年勧告」明石書店, 2011年.
- [31] 近藤宗平「人は放射線になぜ弱い—第3版」講談社ブルーバックス, 1998年.
- [32] 米国科学アカデミー・放射線の健康影響に関する第7次報告 (BEIR-VII), 2006年. 「一般向け概要」日本語訳 <http://archives.shiminkagaku.org/archives/radi-beir%20public%20new.pdf>
- [33] 米国科学アカデミー・放射線の健康影響に関する第7次報告 (BEIR-VII), 2006年. Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2 (2006) <http://books.nap.edu/catalog/11340.html>
- [34] 東京都食品安全 FAQ. <https://food-faq.jp.net/modules/faq/?action=Detail&faqid=41>
- [35] 福永久典 (東北大学加齢医学研究所)「一般の方々へ」(放射線の感受性個人差と福島第一原発事故による放射線被ばく影響). www2.idac.tohoku.ac.jp/dep/nmr/docs/fukunaga_research.pdf
- [36] 花岡文雄, DNA 損傷とは何か—日本鎖切断の危険性と個人差, 「科学」Nov.2011, Vol.81, No.11(2011年11月号)p.1132.
- [37] 長山淳哉「胎児と乳児の内部被ばく—国際放射線防護委員会のカラクリ」緑風出版, 2013年. 特に, 2章, (1) 生物学的半減期の個人差, (2) ICRP の生物学的半減期との比較.
- [38] 本行忠志「放射線の人体影響—低線量被ばくは大丈夫か」, 『生産と技術』第66巻4号(2014), 68-75. <http://seisan.server-shared.com/664/664-68.pdf>
- [39] 広島大学, 2017年7月20日. 【研究成果】放射線に対する強さ・弱さの個人差を決める遺伝子変化を同定 ～放射線防護基準のテーラーメイド化への第一歩～, <https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/40784>
- [40] Ekaterina Royba, Tatsuo Miyamoto, Silvia Natsuko Akutsu, Kosuke Hosoba, Hiroshi Tauchi, Yoshiki Kudo, Satoshi Tashiro, Takashi Yamamoto, Shinya Matsuura, *Evaluation of ATM heterozygous mutations underlying individual differences in radiosensitivity using genome editing technology*, NATURE, Scientific Reports volume 7, Article number: 5996 (2017). <https://www.nature.com/articles/s41598-017-06393-8>

- [41] 広島大学, 【研究成果】低線量放射線に対する感受性には個人差があることが判明—CT検査などの人体への軽微な影響が評価可能に—, 2018年10月10日. <https://www.hiroshima-u.ac.jp/news/47744>
- [42] Lin Shi *et al*, *Chromosomal Abnormalities in Human Lymphocytes after Computed Tomography Scan Procedure*, *Radiation Research* 190(4):424-432. 2018, <https://doi.org/10.1667/RR14976.1>
- [43] T. F. Mancuso, A. Stewart and G. Kneale, *Radiation exposure of Hanford workers dying from cancer and other causes*. *Health Physics* **33**, 369-385, 1977. https://journals.lww.com/health-physics/Abstract/1977/11000/Radiation_Exposures_of_Hanford_Workers_Dying_from.2.aspx.
G. W. Kneale, A. M. Stewart and T. F. Mancuso, *Re-analysis of data relating to the Hanford study of the cancer risks of radiation workers*. *Proc. Sympo. on the Late Biological Effects of Ionizing Radiation held by the Inter. Atomic Energy Agency in Vienna, I*, 387-412, 1978.
- [44] 低線量放射線の被害を初めて証明した二人の科学者. 2016年3月21日1976年議会セミナー記事 <https://noimmediatedanger.net/contents/455#notes>
- [45] Gayle Greene, *The Woman Who Knew Too Much: Alice Stewart and the Secrets of Radiation*, Univ of Michigan Press, 1999, 2017. https://www.amazon.co.jp/Woman-Who-Knew-Too-Much/dp/0472073567/ref=sr_1_8?s=english-books&ie=UTF8&qid=1544669176&sr=1-8&keywords=the+woman+who+knew+too+much.
- [46] ATOMICA(一般財団法人 高度情報科学技術研究機構 (RIST) による原子力百科事典), 米国ハンフォード原子力施設従事者の疫学調査 (09-03-01-02) ,http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-03-01-02
- [47] 「低線量でもがん死リスク増 被曝100ミリシーベルト未満 欧米で30万人調査」, 朝日新聞, 2015年10月23日.
- [48] David B. Richardson *et al*, *Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)*, *BMJ(British medical Journal)* 2015; 351 doi:<https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
- [49] Hisanori Fukunaga, Akinari Yokoya, Yasuyuki Taki, *Now Is the Time to Consider Personalized Effective Dose*, *International Journal of Radiation Oncology Biology Physics*, Volume 96, Issue 2, pp. 479-480. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.06.012>
- [50] 青木芳朗、渡利一夫編「人体内放射能の除去技術」講談社サイエンティフィック、1996年.
- [51] 国立研究開発法人・日本原子力研究開発機構・大洗研究開発センター「原子力機構大洗研究開発センター燃料研究棟における汚染について」, 2017年6月6日. <https://www.jaea.go.jp/02/press2017/p17060701/>
- [52] ICRP と ECRR それぞれの勧告について, 2011年5月31日. [http://smc-japan.org/?p=1941Ver.2.0\(110525-18:38\)](http://smc-japan.org/?p=1941Ver.2.0(110525-18:38))

- [53] Microdosimetry による放射線生物効果の理論. <http://tdl.libra.titech.ac.jp/hkshi/xc/contents/pdf/117193624/4>
- [54] 安齋育郎「増補改訂版 家族で語る食卓の放射能汚染」新日本出版社, 2010 年.
- [55] 豊田利幸「新・核戦略批判」岩波新書, 1983 年. pp.6 – 9.
- [56] Independent WHO 原子力と健康への影響 <http://independentwho.org./jp/http://independentwho.org/jp/who%E3%81%A8iaea%E3%81%A8%E3%81%AE%E5%8D%94%E5%AE%9A/>
- [57] 核戦争防止国際医師会議ドイツ支部「UNSCEAR 報告書『2011 年東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響』」の批判的分析, 2014 年 6 月 6 日. <https://docs.google.com/file/d/OB9SfbxMt2FYxYV9QZERZRppaTA/edit>
- [58] 朝日新聞 2015 年 10 月 23 日「低線量でもがん死リスク増 被ばく 100 ミリシーベルト未滿 欧米で 30 万人調査」.
- [59] David B Richardson et al, *Risk of cancer from occupational exposure to ionising radiation: retrospective cohort study of workers in France, the United Kingdom, and the United States (INWORKS)* British Medical Journal 2015; 351 doi: <https://doi.org/10.1136/bmj.h5359>
- [60] ATOMICA(原子力百科事典), 預託線量 http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=09-04-02-09
- [61] J.W. ゴフマン「新装版 人間と放射線—医療用 X 線から原発まで—」明石書店, 2011 年. 特に, 2,3,11 章. (旧版の出版は 1991 年で, 2011 年に起きた福島第一原発事故を契機に新装版として再出版された.)
- [62] J.M. グールド「低線量内部被曝の脅威」緑風出版, 2011 年. 明石書店, 2011 年.
- [63] 医療問題研究会編「低線量・内部被曝の危険性」(耕文社, 2011 年)
- [64] 矢ヶ崎克馬「隠された被曝」新日本出版社, 2010 年.
- [65] 肥田舜太郎, 鎌仲ひとみ「内部被曝の脅威—原爆から劣化ウランまで」筑摩書房 (ちくま新書), 2005 年.
- [66] 児玉龍彦「内部被曝の真実」幻冬舎新書, 2011 年.
- [67] 松井英介「見えない恐怖—放射線内部被曝」旬報社, 2011 年.
- [68] 落合栄一郎「放射能と人体-細胞・分子レベルからみた放射線被曝-」講談社ブルーバックス. 2014 年.
- [69] 田中司朗, 角山雄一, 中島裕夫, 坂東昌子「放射線 必須データ 32:被ばく影響の根拠」創元社, 2016 年.
- [70] S. Sawada, *Cover-up of the effects of internal exposure by residual radiation from the atomic bombing of Hiroshima and Nagasaki*, Medicine, Conflict and Survival, 58-74, **23** (2007).

- [71] S. Sawada, *Estimation of Residual Nuclear Radiation Effects on Survivors of Hiroshima Atomic Bombing, from Incidence of the Acute Radiation Disease*, 社会医学研究 第 29 卷 1 号, 2011 年 (急性放射線症状発症率から広島原爆被爆者に対する残留放射線 影響評価)
- [72] ICRP-publication118(2012).
 ”ICRP Statement on Tissue Reactions and Early and Late Effects of Radiation in Normal Tissues and Organs - Threshold Doses for Tissue Reactions in a Radiation Protection Context” (組織反応に関する ICRP 声明ならびに正常組織・器官における放射線被ばくの早期および晩発影響 - 放射線防護の観点から見た組織反応のしきい線量) http://files.site-fusion.co.uk/webfusion117640/file/icrp118_1.pdf, http://www.researchgate.net/publication/230747328_ICRP_publication_118_ICRP_statement_on_tissue_reactions_and_early_and_late_effects_of_radiation_in_normal_tissues_and_organ
- [73] 永井宏幸「放射線の非がんリスクに閾値がない? —ICRP で大事件—」 (市民科学研究室・低線量被曝研究会), 2016 年 12 月 20 日.
<http://www.shiminkagaku.org/30101020161220/>
- [74] Y. Shimizu et al., *Radiation exposure and circulatory disease risk: Hiroshima and Nagasaki atomic bomb survivor data, 1950-2003*, BMJ 340: b5349; doi:10.1136/bmj.b5349 (2010). <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.b5349> (BMJ とはイギリス医師会雑誌 British Medical Journal の略称).
- [75] M. P. Little et al., *Systematic Review and Meta-analysis of Circulatory Disease from Exposure to Low-Level Ionizing Radiation and Estimates of Potential Population Mortality Risks*, Environ. Health Perspectives, **120**, 1503-1511(2012).
- [76] F. A. Cucinotta et al., *Space radiation and cataracts in astronauts*, Radiat. Res. **156**, 460-466 (2001).
- [77] E. Nakashima, K. Neriishi, A. Minamoto, *A reanalysis of atomic-bomb cataract data, 2000-2002: a threshold analysis*, Health Physics, 2006 Feb, **90**(2);154-60.
- [78] N. J. Kleiman et al., *Mrad9 and Atm Haploinsufficiency Enhance Spontaneous and X-Ray-Induced Cataractogenesis in Mice*, RADIATION RESEARCH **168**, 567-573 (2007).
- [79] G. Chodick et al., *Risk of Cataract after Exposure to Low Doses of Ionizing Radiation: A 20-Year Prospective Cohort Study among US Radiologic Technologists*, Am. J. Epidemiol. 2008;**168**:620-631.
- [80] E. A. Ainsbury et al., *Cataractogenesis: A Review of Recent Studies*, Radiation Research **172**, 1-9(2009)