

食品に対する放射能の基準値はどのようにして導かれたか

平成 23 年 9 月 6 日
広島大学大学院先端物質科学研究科
量子物質科学専攻
松村 武

目次

1	はじめに	2
2	放射性元素と放射線	3
2.1	放射性元素とその崩壊, 放射線の放出	3
2.2	半減期と放射能	4
3	放射線被曝: 人体による放射線の吸収	7
3.1	吸収線量	7
3.2	等価線量	7
3.3	実効線量	8
3.4	^{40}K からの放射線内部被曝による実効線量	9
4	放射線による生物的影響	10
4.1	影響発生のメカニズム	10
4.2	長期間低線量被曝	10
4.3	組織荷重係数と等価線量, 実効線量	12
4.4	被曝限度	13
4.5	自然放射線	15
5	食品に対する基準値の由来	16
5.1	放射性物質を含む食品摂取による内部被曝: ^{137}Cs を例にして	16
5.1.1	汚染食品を 1 回摂取した後 50 年間での実効線量: 預託線量	16
5.1.2	放射能を含む食品を 1 年間食べ続けた場合の 50 年間実効線量	19
5.2	基準値	20
5.2.1	基本式	20
5.2.2	実際の基準値	21
5.2.3	注意点: mSv/年とはどういう意味か	25
5.2.4	I_0 が毎日一定の場合	28
6	おわりに: 個人的感想	29

1 はじめに

このようなものを勉強してまとめようと思ったのは、言うまでもなく、東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故を目の当たりにしてのことである。以前からある程度気にはなっていたことだが、これを機に一気に勉強せねばという気が起こってきた。いい機会なので、4月からの大学院の講義でも学生と一緒に勉強することにした。知りたいと思ったのは次のようなことである。

- (1) 電力の単位のこと。キロワット (kW) とはどれくらいか。3.11 以後、何百万 kW とか目にすることが多いが、一体どれくらいのエネルギーなのか。全然想像がつかないので、いろいろ具体的に計算してみ、身体感覚として理解したい。
- (2) 原子力エネルギーの元である核分裂について勉強し直し、電力とどのような関係になっているか、きちんと数値的に追ってみたい。また、実際の原子炉の運転で、どれくらいの核分裂生成物が出てきて、それがどれくらいエネルギー（崩壊熱）を出し続けるのか、およその数値でいいから実際に計算してみ、感覚として理解したい。
- (3) ベクレルとシーベルトの関係。放射線が体に与える影響とその仕組み。体内被曝した場合のリスクのこと。基準値はどのように導かれたか。「何 mSv だから大丈夫です」と言われたときの受け止め方をしっかりと確立させたい。
- (4) そもそも現代社会ではどうしてこんなに電力が必要なのか。どこでどれだけ電力を使っているのか。仕事も生活もみんな電気を使っているのはなぜか。

その他にも学生達から、太陽電池のこと、蓄電方法のこと、50Hz と 60Hz のこと、送電システムのことなど、知りたいことの提案があつて一緒に勉強した。全部を一気にまとめるまでには至っていないが、順次まとめていきたいと考えている。

本稿では、(3) を扱うことにする。(1)(2) は最初から最後まで物理の問題としてエネルギーを計算していけば追うことができる。それに対して、(3) は途中までが物理で途中から生物になり、最後は政治・社会の問題になる。私は物性物理を専攻する人間であつて、これらの問題のどの専門家でもない。かろうじて(3)の前半の物理の話まではある程度の自信を持てるといった程度だ。それでも世間から見れば完全に専門家だと思う。放射線作業従事者として登録されていて、放射線を使って実験をする身である。自分なりの判断ができて見解が述べられるようでありたい。

テレビ・新聞・ネット上でも(3)についての話は毎日のように出てくる。ネットで「基準値」と検索すれば実に多くの情報が出てくる。しかし、物理屋である私が理解したい仕方でなされている説明に出会ったことはない。本稿ではそれを行いたい。ただし、ネット上には[6, 17, 18, 19, 20]など、きれいな図と一緒に提供されている説明も既に多いので、そこでよく見る図や情報は積極的に載せていない。これらも見比べながらお読みいただくと理解が深まるかと思う。

いろいろ調べたり、自分で計算してみたりしながら本稿をまとめていくうちに、ずいぶんすっきり理解できたと思う。[8]でかなり理解が進んだ。[7, 9]もとても参考になった。つじつまが合ったことから判断して、たぶん間違っていないと思うが、もしとんでもない誤解があつたらご連絡いただきたい^{*1)}。

本稿の目標は、放射性核種が崩壊して放射線を出すところから始まって、そのエネルギーが人体に吸収されて何らかの作用をなし、発がん等のリスク評価で使われている等価線量や実効線量（シーベルト）とどのようにつながって、食品への汚染は何 Bq/kg まで許されるかという基準値がどのように導き出されたかを、論理的に、できるところは数値的に、きちんと追うことである。専門の機関で行われている詳細な計算ではなく、その計算のからくりを理解するために自分にもできる簡単な計算を試してみたことのみである。

^{*1)}tmatsu[at]hiroshima-u.ac.jp まで。本当の専門家ではない、私のようなちよつと専門家が犯す微妙な間違いはとてはやっかいらしい。その危険は重々承知している。なにせこれは査読を経ていないのだから。

2 放射性元素と放射線

2.1 放射性元素とその崩壊、放射線の放出

原子核は複数個の陽子と中性子が集まった集合体である。その結合エネルギーは核種によって異なっている。いま、陽子数 Z 、中性子数 N の核種 (Z, N) の質量を $M(Z, N)$ で表すことにする。原子番号 = Z であり、 $A = Z + N$ を質量数と呼ぶ。アインシュタインによる $E = Mc^2$ の関係が示すように、質量とエネルギーは等価の関係にある。そのため、 $M(Z, N)$ がそれと同数の核子（陽子と中性子）を持つ系 $M(Z', N')$ （ただし、質量数は等しく $A = Z + N = Z' + N'$ ）より重いときには、系 $M(Z, N)$ のエネルギーは系 $M(Z', N')$ のエネルギーより高く、原子核 $M(Z, N)$ は自発的に $M(Z', N')$ へ変換する確率を有する*2)。このようなエネルギー的に安定な核種に変わる現象を原子核の**崩壊 (decay)** と呼ぶ*3)。次の3種類がある。

α崩壊 (Z, N) の原子核が ${}^4\text{He}$ の原子核（陽子2個、中性子2個の原子核）を放出して $(Z - 2, N - 2)$ の原子核に壊変する。質量数は $A' = A - 4$ に減り、原子番号は $Z' = Z - 2$ に減る*4)。放出されて飛んてくる ${}^4\text{He}$ の原子核を **α線** と呼ぶ。

β崩壊 (Z, N) の原子核中で中性子が陽子になるとき、電子 e^- が放出されて $(Z + 1, N - 1)$ の原子核に変化する。質量数は $A' = A$ で変化せず、原子番号は $Z' = Z + 1$ となり1だけ増える。このとき、同時に反ニュートリノが生成される ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$)。これを β^- 崩壊という。逆に、陽子が中性子に変わって陽電子 e^+ が放出され、 $(Z - 1, N + 1)$ の原子核に変化する場合もある。このとき、同時にニュートリノが生成される ($p \rightarrow n + e^+ + \nu$)。これを β^+ 崩壊という。放出されて飛んてくる電子を **β線** と呼ぶ。β線は放出しないが、質量数が変わる崩壊過程の一つに**軌道電子捕獲 (Electron Capture, EC)** がある。最も原子核に近いK殻の電子を原子核に取り込み、陽子が中性子に変わって $(Z - 1, N + 1)$ の原子核に変化する。結果だけ見れば β^+ 崩壊と同じである*5)。

γ崩壊 α崩壊やβ崩壊、あるいは電子捕獲で生じた原子核の内部状態は一般にエネルギーの高い状態*6)に

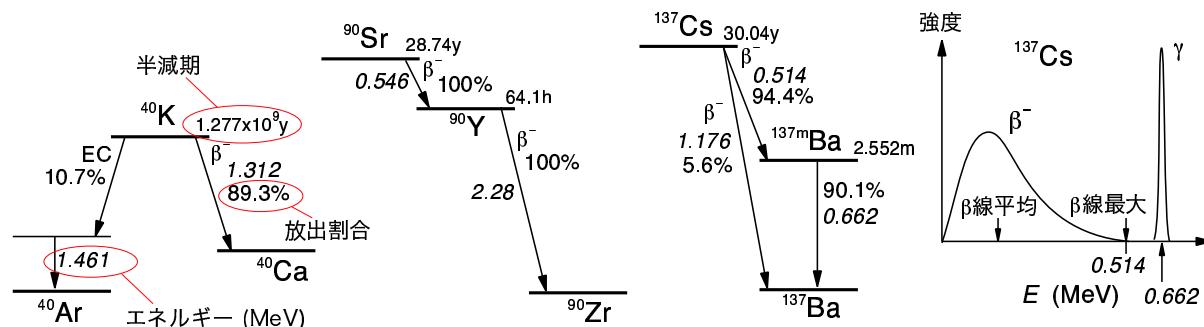


図 1: ${}^{40}\text{K}$, ${}^{90}\text{Sr}$, ${}^{137}\text{Cs}$ の崩壊図式。表 1 を図示したもの。β崩壊で原子番号が1つ増える場合は右側に、減る場合は左側に崩壊後の核種を描く。真下に遷移するのはγ崩壊。 ${}^{137\text{m}}\text{Ba}$ からのγ線放出割合が90.1%になっているのは ${}^{137\text{m}}\text{Ba}$ からの放出割合という意味。 ${}^{137}\text{Cs}$ からの放出割合にすると $0.944 \times 0.901 = 0.851$ で表1の数値になる。一番右は ${}^{137}\text{Cs}$ から出るβ線(94.4%のみ)とγ線の強度のエネルギー分布の概略。β線のエネルギーは連続的に分布しており、最大値が0.514 MeVで、平均はその約1/3。γ線のエネルギーはぴったり0.662 MeV。

*2) これは量子力学的現象であり、いつ変換されるか確定することはできない。統計的に τ 秒に1回の割合で変換するとき、寿命が τ 秒であるという。

*3) 壊変ともいう。

*4) この場合、 $Z = 2, N = 2, A = 4$ の ${}^4\text{He}$ 原子核と合わせれば、全体の質量数は変わっていない。

*5) 電子を取り込むのは、陽電子を放出する逆バージョンだとも言える。

*6) エネルギー準位。量子力学的な固有状態。

表 1: 主な放射性同位元素の崩壊特性 [1]. β 線のエネルギーは連続的に分布しており, ここに示す数値はその最大値. ほとんどの場合, 最大値の約 1/3 が β 線の平均エネルギーと考えてよい. γ 線のエネルギーはとびとびの離散的なスペクトルをもっており, ここに示す数値のとおり. ^{134}Cs の γ 線の比率の合計が 100% を超えるのは, β 崩壊後の ^{134}Ba から γ 線が出てくるときに, 7つのエネルギー単位から何段階かに分かれて複数回放出されてくるため [4]. 放出割合は最初の核種に対する割合である. 半減期の単位で, y は年, d は日, h は時間, m は分を表す.

核種	半減期	壊変形式	放射線の種類, エネルギー (MeV), 放出割合	主な生成反応
$^{14}_6\text{C}$	5730 y	β^-	β^- : 0.156 (100 %)	$\rightarrow ^{14}_7\text{N}$ $^{14}_7\text{N}+n\rightarrow^{14}_6\text{C}+p$
$^{40}_{19}\text{K}$	1.277 $\times 10^9$ y	β^- EC	β^- : 1.312 (89.3 %) γ : 1.461 (10.7 %)	$\rightarrow ^{40}_{20}\text{Ca}$ 天然存在比 0.0117% $\rightarrow ^{40}_{18}\text{Ar}$
$^{89}_{38}\text{Sr}$	50.53 d	β^-	β^- : 1.495 (100 %)	$\rightarrow ^{89}_{39}\text{Y}$ $\text{U}(n,f)\rightarrow^{89}_{38}\text{Sr}$
$^{90}_{38}\text{Sr}$	28.74 y	β^-	β^- : 0.546 (100 %)	$\rightarrow ^{90}_{39}\text{Y}$ $\text{U}(n,f)\rightarrow^{90}_{38}\text{Sr}$
$^{90}_{39}\text{Y}$	64.1 h	β^-	β^- : 2.28 (100 %)	$\rightarrow ^{90}_{40}\text{Zr}$
$^{131}_{53}\text{I}$	8.021 d	β^-	β^- : 0.248 (2.1 %), 0.334 (7.3 %), 0.606 (89.9 %) γ : 0.284 (6.1 %), 0.364 (81.7 %), 0.637 (7.2 %)	$\text{U}(n,f)\rightarrow^{131}_{53}\text{I}$ $\rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe}$
$^{134}_{55}\text{Cs}$	2.065 y	β^-	β^- : 0.089 (27.3 %), 0.415 (2.5 %), 0.658 (70.2 %) γ : 0.563 (8.4 %), 0.569 (15.4 %), 0.605 (97.6 %), 0.796 (85.5 %), 0.802 (8.7 %), 1.365 (3.0 %)	$\text{U}(n,f)\rightarrow^{133}_{55}\text{Cs}$ $\rightarrow ^{134}_{56}\text{Ba}$ $^{133}_{55}\text{Cs}+n\rightarrow^{134}_{55}\text{Cs}+\gamma$
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30.04 y	β^-	β^- : 0.514 (94.4 %) β^- : 1.176 (5.6 %)	$\rightarrow ^{137m}_{56}\text{Ba}$ $\text{U}(n,f)\rightarrow^{137}_{55}\text{Cs}$ $\rightarrow ^{137}_{56}\text{Ba}$
	2.552 m	IT	γ from $^{137m}_{56}\text{Ba}$: 0.662 (85.1 %) X-ray from $^{137}_{56}\text{Ba}$: 0.0322 (5.6 %), 0.0364 (1.3 %)	

ある. これがより低い準位へ遷移するとき, そのエネルギー差に相当するエネルギーの光 (電磁波) が放出される. この光を γ 線と呼んでいる*7). これが γ 崩壊である.

原子核の崩壊を引き起こす確率を有する核種のことを**放射性核種**と呼び, 放射性核種を含む物質のことを**放射性物質**と呼ぶ. 原子核の崩壊によって放出される α 線, β 線, γ 線, および X 線が**放射線**である*8). 放射線を出す能力のことが**放射能**である*9). 表 1 に本稿で出てくる主な核種の特徴をまとめておく. 図 1 は崩壊の様子を表す図である. 下に落ちるときにエネルギーが下がり, あるエネルギーの放射線が放出される.

2.2 半減期と放射能

放射線を出して崩壊し, 最も安定なエネルギー状態に落ち込めば, それで終わりであり, それ以上放射線は出てこない. 従って, 一定量の放射性物質に含まれる放射性核種の量は時間の経過と共に減少していく.

*7) 原子核のエネルギー単位差はだいたい $10^2 \sim 10^3$ keV の程度なので, γ 線のエネルギーは $10^2 \sim 10^3$ keV である. 一方, 原子に束縛された電子の固有状態 ($1s$ とか $2p$ とか $3d$ とか) の間のエネルギー差は $1 \sim 10^2$ keV である. 電子の準位間遷移によって発生する光を **X 線**と呼んでいる. γ 線も X 線も電磁波である点は同じであり, どのエネルギーから上を γ 線と呼ぶかという明瞭な境界線はない. 原子核の準位間遷移で生じるものが γ 線, 電子系の準位間遷移で生じるものが X 線であろう.

*8) がん治療に使われる様々な人工粒子線, 飛行機で上空を飛ぶと浴びる確率が高くなる宇宙線も放射線である.

*9) 「放射能を浴びる」とは言わず, 「放射線を浴びる」と言う. 「放射能もれ」という言葉もおかしい. 「放射性物質がもれた」のである.

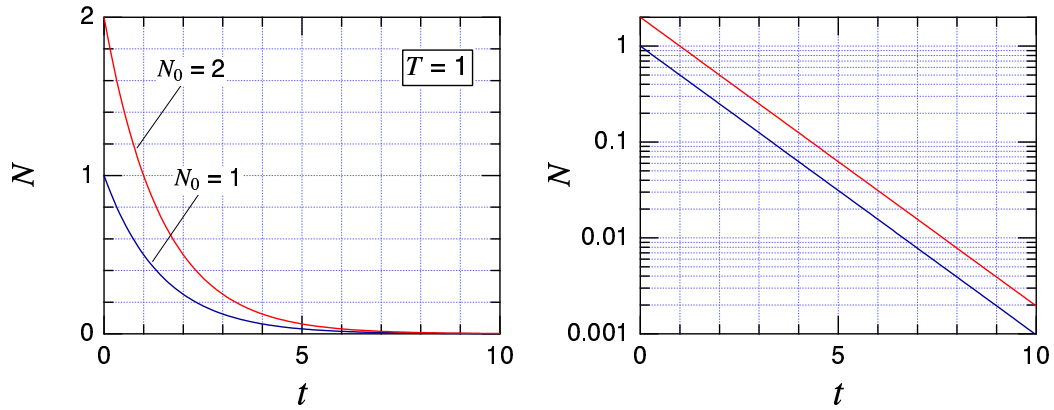


図 2: 時刻 $t = 0$ のとき $N = 1$ と仮定したときの N の時間変化の様子. 半減期 $T = 1$ としてある. $t = 1, 2, 3, \dots$ で $N = 0.5, 0.25, 0.125, \dots$ となっている. 左は縦軸を線形にとった図, 右は縦軸を対数にとった図.

いま, N 個の放射性核種があるとする. N が減少する割合 dN/dt は現在の N の数が多いほど大きいから,

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1)$$

が成り立つ. λ は定数である. 時刻 $t = 0$ のとき $N = N_0$ とすると, この方程式の解は,

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \quad (2)$$

である. 時刻 $t = T$ のとき, $N = N_0/2$ になるとすると,

$$\lambda = \frac{\log 2}{T} = \frac{0.69}{T} \quad (3)$$

となるので,

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} \quad (4)$$

が成り立つ. すなわち, 時間が T だけ経過するごとに N は半分に減っていく. この時間 T のことを**半減期**という. 図 2 に N の時間変化の様子を示す. 縦軸を線形にとった図だと, 半減期の 10 倍くらいの時間が経つとほとんど放射能がゼロになっているかのように見えるが, 縦軸を対数にとった図からわかるように, 残留放射能は $t = 0$ での N の値 N_0 に依存しており, N_0 が 2 倍なら残留放射能もずっと 2 倍である. さらに, 対数の図からは N が $1/10$ に減るのに $\log 10 / \log 2 = 3.322T$ だけ時間がかかることがわかる. $1/1000$ まで減るのにおよそ半減期の 10 倍の時間がかかる^{*10}. 最初 $1,000,000$ Bq の放射能があるとする, 半減期の 10 倍の時間が経っても $1,000$ Bq 残っているわけである.

単位時間あたりの崩壊量は

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{N_0 \log 2}{T} \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T} \quad (5)$$

で与えられる. 1 秒間に 1 回崩壊が起こるときの放射能が **1 Bq (ベクレル)** である.

いくつかの例

⁴⁰K カリウムは人体に必須のミネラルの一種である. 自然界に存在するカリウムの同位体の比率は, ³⁹K が 93.258%, ⁴⁰K が 0.0117%, ⁴¹K が 6.73% であり, このうち ⁴⁰K が放射性同位元素である. 表 1 に示され

^{*10} $2^{10} = 1024$ だから $1/1000 \approx (1/2)^{10}$. 半減期を 10 回くり返すと $1/1000$ になる.

ているように、半減期は 1.277×10^9 年 (12 億年) で、89.3%が β 崩壊を起こして最大 1.312 MeV の β 線を出し^{*11)}、 ^{40}Ca に変化する。10.7%は電子捕獲を起こして ^{40}Ar となり、基底状態に落ち込むときに 1.461 MeV の γ 線を出して安定化する。カリウム 1 g の放射能 (^{40}K が 1 秒間に何回崩壊するか) を (5) で見積もってみると、

$$\frac{\log 2 \times (6.02 \times 10^{23}) \times \frac{1}{40} \times 0.000117}{1.277 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 30 \text{ 回/s} = 30 \text{ Bq}$$

となる。ただし、半減期は 12 億年なので、現在の自然存在比が確定してからの時間は無視してよく、 $t = 0$ と考えてよい。人体には体重 1 kg あたり 2 g のカリウムが含まれるとされている^{*12)}。すると、体重 60 kg の大人であれば 120 g のカリウムを体内に含んでいる。従って、体内のカリウムの放射能は

$$30 \times 120 = 3600 \text{ Bq}$$

と見積もられる。毎秒 3600 個の ^{40}K が体内で β 崩壊し、 β 線と γ 線を出しているのである^{*13)}。

^{60}Co ^{60}Co は半減期 5.271 年で β 崩壊して ^{60}Ni になる。0.318 MeV の β 線、1.173 MeV と 1.333 MeV の γ 線を出す。1 g の ^{60}Co の放射能は

$$\frac{\log 2 \times (6.02 \times 10^{23}) \times \frac{1}{60}}{5.271 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 4.2 \times 10^{13} \text{ Bq}$$

である (42 兆ベクレル, 42 テラベクレル)。日本アイソトープ協会から入手可能な学生実験用などの ^{60}Co 密封線源で典型的な放射能のものに 10 kBq (1 万ベクレル) のものがある。この線源の中に含まれる ^{60}Co の質量は

$$\frac{10000}{4.2 \times 10^{13}} = 2.4 \times 10^{-10} \text{ g} = 2.4 \times 10^{-4} \mu\text{g}$$

であり、原子数にすると、

$$(6.02 \times 10^{23}) \times 2.4 \times 10^{-10} \div 60 = 2.4 \times 10^{12} \text{ 個} \quad (2.4 \text{ 兆個}).$$

^{90}Sr ^{90}Sr は自然界には存在せず、ウランの核分裂で生成する核分裂生成物である。半減期 28.74 年で 0.546 MeV の β 線を出して ^{90}Y に崩壊し、 ^{90}Y は半減期 64.1 時間で 2.280 MeV の β 線を出して ^{90}Zr に崩壊する (表 1)。いずれの場合も、純粋に単一エネルギーの β 線だけを出し、 γ 線は出てこない。1 g の ^{90}Sr の放射能は

$$\frac{\log 2 \times (6.02 \times 10^{23}) \times \frac{1}{90}}{28.74 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60} = 5.1 \times 10^{12} \text{ Bq}$$

である (5.1 兆ベクレル, 5.1 テラベクレル)。日本アイソトープ協会から入手可能な ^{90}Sr 密封線源で 10 kBq (1 万ベクレル) のものがある。この線源の中に含まれる ^{90}Sr の質量は

$$\frac{10000}{5.1 \times 10^{12}} = 2.0 \times 10^{-9} \text{ g} = 2.0 \times 10^{-3} \mu\text{g}$$

であり、原子数にすると、

$$(6.02 \times 10^{23}) \times 2.0 \times 10^{-9} \div 90 = 1.3 \times 10^{13} \text{ 個} \quad (13 \text{ 兆個})^{*14)}.$$

^{*11)} β 線のエネルギースペクトルは連続分布であり、表 1 に示されている数値はその最大値である。平均エネルギーは約 $1.312 \div 3 = 0.437$ MeV である。

^{*12)} 本稿で使われている物理定数に間違いはないと思うが、このような生物関係の数値はなるべくもっともらしい数値を使うよう心がけただけである。お手軽にネット上からそれらしい数値を引っ張ってきただけの場合もある。目的は正しい数値を出すことではなく、計算方法を正しく理解することなので、このあたりはあまり厳しく見ないでいただきたい。

^{*13)} 体重 60 kg の人の体内には $(6.02 \times 10^{23}) \times 0.000117 \times 120/40 = 2.1 \times 10^{20}$ 個の ^{40}K があるので毎秒 3600 個程度が崩壊しても数の上での変化は無視できるほど小さい。仮に全く ^{40}K が新しく補給されず、崩壊して減っていくだけだとしても、1 年間に $3600 \times 3600 \times 24 \times 365 = 1.1 \times 10^{11}$ 個減るだけである。60 年かかっても $1.1 \times 10^{11} \times 60 = 6.8 \times 10^{12}$ 個の減少である。 2.1×10^{20} 個の 3 千万分の 1 しか減らない。

^{*14)} 新聞やテレビで兆とか京とかテラとか言われるととてつもない数字であるかのように聞こえるが、原子や分子の世界の数というのはいつもこんな感じである。空気中の酸素分子や窒素分子の数だって、22.4 リットルに 1 モルだから、1 cm^3 の中におよそ $6.02 \times 10^{23} / 22.4 / 1000 = 2.7 \times 10^{19}$ 個、2700 京個あるのだ。

3 放射線被爆：人体による放射線の吸収

3.1 吸収線量

α 線や β 線などの電荷を持った放射線は、物質を直接電離させたり、励起することによって物質にエネルギーを与える。X線や γ 線は光電子やコンプトン電子などの2次的な荷電粒子を介して、中性子線は核反応によって生成される高速のイオンを介して物質にエネルギーを与える [2]。このとき放射線は物質によって吸収され、放射線のエネルギーは物質に移る^{*15)}。物質が放射線から与えられるエネルギーを表すのが**吸収線量** D である。単位質量あたりの吸収エネルギーとして定義され、単位はJ/kgで、Gy(グレイ)と呼ぶ^{*16)}。

【例 1】 1 MeV のエネルギーをもった放射線が人体の一部に当たり、その付近の質量 10 g 程度の部分ですべてのエネルギーが吸収されるとする。合計で 10^9 個 (10 億個) の放射線粒子が当たったとすると、その部位での吸収線量は

$$D = (1 \times 10^6 [\text{eV}]) \times (1.6 \times 10^{-19} [\text{J/eV}]) \times 10^9 \div 0.01 [\text{kg}] = 1.6 \times 10^{-6} [\text{J/kg=Gy}] = 1.6 \mu\text{Gy}.$$

実際に計算するとき難しいのは、放射線が人体のどの部分でどれだけ吸収されたかを見積もるところにある。放射線が体のどの部分にどの方向からどれだけ当たったかが決まらなければこの計算は正しくはできない。恐らく、実際の被爆について正しくこのような計算をすることはできないだろう。実用的には、計算できるようにモデル化し、だいたいこれくらいか、という推定をするのである^{*17)}。

3.2 等価線量

同じ吸収線量 ($\text{Gy}=\text{J/kg}$) であっても、放射線の種類やエネルギーにより、生物に対する影響の表れ方は異なる。10 keV の X 線と 1 MeV の中性子線では、吸収線量が同じでも生物に対する影響は中性子線のほうが大きい。この違いを加味して、生物に対する影響を表すようにした数値が**等価線量**(線量当量)と呼ばれる量である。組織 T に放射線が照射されたとき、組織 T 全体で平均した吸収線量を D_T とする。このとき、組織 T に対する等価線量 H_T は、

$$H_T = D_T Q \tag{6}$$

与えられる^{*18)} ^{*19)}。Q は**放射線荷重係数**と呼ばれる単位のない数値で、放射線の性質による生物学的な影響の違いを表す。Q は放射線の種類だけでなく、エネルギーによっても異なる数値になるが、様々なエネルギーの放射線に対して厳密な Q の値を求めるのは困難なので、被曝量の計算をするときの実用的な数値としては表 2 の値を用いる^{*20)}。放射線が複数の種類から成っているときは、もちろんそれらすべての寄与

^{*15)}要するにエネルギー保存則のこと。詳しくは次節。

^{*16)}rad(ラド)という名称もある。1 rad = 100 erg/g = 0.01 Gy。

^{*17)}だから全く信用できないという考え方は現実的ではない。何十倍、何百倍という違いでなければ、たとえ推定であっても数値がないよりずっとましで、十分実用には堪えられると思う。

^{*18)}§3.1 までは物理の話で、エネルギーの計算できちっと話を進めることができたが、この小節あたりからだんだんと明確な定義がしにくい量が現れてくる。それは話の性質上、仕方のないことだ。実用重視、現実重視だ。ここも本当の定義としては、吸収線量を組織 T 全体で平均するのではなく、組織の部分ごとに異なった吸収線量があるはずで、それを足し合わせなければ正しい等価線量にはならない。しかし、現実にはどの組織にどのように放射線が当たったかを3次元的に厳密に計算するためには、放射線の強度や組織への具体的な当たり方などの正確なデータがなければできないことであり、それが無い場合は推定に頼る以外にない。推定であれば平均がせいぜいであろう。強度と具体的な当たり方が厳密に決められるのは医療での放射線を用いた治療の場面などだけだと思う。

^{*19)}等価線量は ICRP1990 年勧告での用語。線量当量は 1977 年勧告での用語。線量当量のときは「数学的に厳密な」単位質量あたりの吸収線量 D に Q をかけたものとして定義されており、組織 T について平均化するという定義ではなかった。厳密には線量当量の定義が正しいのだろうか、実際には平均化して考えることがほとんどなので、1990 年勧告ではそうなったのではないだろうか。「等価線量」では「組織ごと」という意識がより鮮明にされているのだと感じる。

^{*20)}アイソトープ手帳によると、X線、 γ 線、 β 線についてはすべてのエネルギーに対して $Q = 1$ 。中性子については、 $E < 10 \text{ keV}$ のとき $Q = 5$ 、 $10 \text{ keV} \leq E < 100 \text{ keV}$ のとき $Q = 10$ 、 $100 \text{ keV} \leq E < 2 \text{ MeV}$ のとき $Q = 20$ 、 $2 \text{ MeV} \leq E < 20 \text{ MeV}$ のとき $Q = 10$ 、 $20 \text{ MeV} \leq E$ のとき $Q = 5$ とされている。実際は 1 MeV 付近に高さ 20 のピークを持った連続的な関数である。本稿では中性子被曝は出てこないで、そこまで詳しくせず、表では一律に 10 とした。

表 2: 放射線荷重係数 Q [1, 2]

放射線の種類	放射線荷重係数 Q
X線, γ 線, β 線 (電子線)	1
中性子, 陽子	10
α 線	20

表 3: 組織荷重係数 w_T [1, 2]

組織・臓器	荷重係数 w_T	組織・臓器	荷重係数 w_T
生殖腺	0.20	肝臓	0.05
骨髄 (赤色)	0.12	食道	0.05
結腸	0.12	甲状腺	0.05
肺	0.12	皮膚	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
膀胱	0.05	残りの組織・臓器	0.05
乳房	0.05	計	1.00

を足し合わせたものが H_T である。吸収線量 D の単位が $\text{Gy}=\text{J/kg}$ であるときの等価線量 H の単位が Sv (シーベルト) である^{*21)}。

【例 2】 1 MeV のエネルギーをもった β 線が人体に当たり、質量 10 g の組織で 10^9 個 (10 億個) の β 線粒子が吸収されたとすると、その組織に対する等価線量は

$$H_T = D = 1.6 \mu\text{Sv}.$$

X線, γ 線, β 線では, $Q = 1$ であり, 吸収線量 (Gy) がそのまま等価線量 (Sv) になる。

3.3 実効線量

放射線は体に一様にあたるわけではなく、体の部位によって吸収線量は異なるのがふつうである。外部被曝の場合、体の表面に近いほど吸収線量は大きく、体の奥深くに入るほど放射線は吸収されて弱くなるので被曝量は少なくなる。内部被曝の場合は、取り込まれた放射性元素がどの部位に存在しているかによって体の場所ごとの被曝量は異なる。このように不均一に被曝した場合の人に対する危険性の尺度を定量的に考えるための量として**実効線量** H_E が次のように定義されている^{*22)}。

$$H_E = \sum_T w_T H_T \quad (7)$$

ここで, w_T は組織 T の荷重係数, H_T は組織 T の等価線量であり, \sum_T は放射線を受けた組織について足し合わせることを意味する。手を被曝した場合と、同じ線量で生殖腺を被曝した場合とでは、生殖腺を被曝した場合のほうが、生命の存続にとって影響はより深刻である。その効果を取り込むのが w_T であり、表 3 に数値をまとめてある^{*23)}。一様な被曝で等価線量が全身で均等である場合、どの組織でも H_T は同じであり, $\sum_T w_T = 1$ なので, $H_E = H_T$ (単位は Sv) である。

^{*21)} D の単位が rad のときの H_T の単位が rem (レム) である。1 rem = 0.01 Sv。

^{*22)} 人体の組織は沢山あるが、人間の体は一つだけである。様々な組織がそれぞれの被曝を受けたとき、一個の生命体としてどの程度の危険性があるかを考えるのが実効線量。

^{*23)} この w_T の起源は次節に示されている表 5 である。

【例 3】 1 MeV のエネルギーをもった β 線が人体に一様に当たり、質量 10 g の部分ごとに 10^9 個 (10 億個) ずつの β 線粒子が吸収されたとすると、実効線量は

$$H_E = H_T = D = 1.6 \text{ } \mu\text{Sv}.$$

ここで注意したいのは、人体を質量 10 g の部分ごとに切り分けている点である。体重 60 kg として全部で 6000 個の 10 g の部分に分割し、それぞれで 10^9 個ずつ、全身で 6×10^{12} 個 (6 兆個)、の β 線粒子が吸収されたというのである。このとき、人体のどの組織の等価線量も等しく $1.6 \text{ } \mu\text{Sv}$ であり、全身に対する実効線量も $1.6 \text{ } \mu\text{Sv}$ である。線量には「単位質量あたりの吸収エネルギー」という考えが含まれていることに注意。 $H_E = 6000 \times H_T = 9.6 \text{ mSv}$ とするのは誤り。

【例 4】 1 MeV のエネルギーをもった β 線が質量 10 g の甲状腺だけに当たり、全部で 10^9 個 (10 億個) の β 線粒子が甲状腺だけですべて吸収されたとすると、甲状腺に対する等価線量は

$$H_T = D = 1.6 \text{ } \mu\text{Sv}.$$

実効線量は、表 3 にある荷重係数をかけて、

$$H_E = 0.05 \times 1.6 = 0.08 \text{ } \mu\text{Sv}.$$

実効線量が等価線量よりずっと小さいというのはどういうことだろうか。これについては次節で説明する。

3.4 ^{40}K からの放射線内部被曝による実効線量

人体に含まれている ^{40}K からの放射線がすべて体内で均等に吸収されると仮定して、その等価線量を計算してみよう。§2.2 で行った計算より、体重 60 kg の人の体内における ^{40}K の放射能は約 3600 Bq である。表 1 より、このうち 89.3% が最大 1.312 MeV の β 線を出す。つまり、1 秒間に放出される β 線粒子の数は、 $3600 \times 0.893 = 3200$ 個である。この β 線のエネルギーは連続的に分布している。その平均エネルギーを最大値の約 $1/3$ として、 β 崩壊 1 回あたり $1.312 \div 3 = 0.437 \text{ MeV}$ のエネルギーが吸収されると考える。従って、1 秒間に体内で吸収されるエネルギーは、

$$(0.437 \times 10^6 [\text{eV}]) \times (1.6 \times 10^{-19} [\text{J/eV}]) \times 3200 [1/\text{s}] = 2.2 \times 10^{-10} [\text{J/s}]$$

である。同様に、1.461 MeV の γ 線について計算すると、1 秒間の崩壊数は $3600 \times 0.107 = 400$ 個であり、 γ 線のエネルギーは単一エネルギーなので、1 秒間に体内で吸収されるエネルギーは、

$$(1.461 \times 10^6 [\text{eV}]) \times (1.6 \times 10^{-19} [\text{J/eV}]) \times 400 [1/\text{s}] = 1.0 \times 10^{-10} [\text{J/s}]$$

となる。両者を合計すると、 $3.2 \times 10^{-10} \text{ J/s}$ のエネルギー吸収率となる。1 年間に換算すると、

$$(3.2 \times 10^{-16}) \times 3600 \times 24 \times 365 = 1.0 \times 10^{-2} \text{ J/y}$$

である。このエネルギーが体重 60 kg に均等に分布したと仮定すれば^{*24)}、単位質量あたりの吸収エネルギー、すなわち吸収線量 D は、1 年間で、

$$D = (1.0 \times 10^{-2} [\text{J/y}]) \div 60 [\text{kg}] = 1.7 \times 10^{-4} \text{ Gy/y} = 170 \text{ } \mu\text{Gy/y}$$

となる。 β 線と γ 線の場合、放射線荷重係数 Q は 1 と考えてよいので、実効線量に換算するとそのまま Sv となって、

$$H = 170 \text{ } \mu\text{Sv/y}$$

となる。表 7 に示されている ^{40}K からの体内被曝の実効線量とほぼ一致する結果となった。

^{*24)}カリウムはほぼ全身に均等に分布していると考えてよい。

4 放射線による生物的影響

4.1 影響発生のメカニズム

放射線によって人体が影響を受けるプロセスの概要は、(1) 原子レベル、(2) 分子レベル、(3) 細胞レベル、(4) 組織レベル、(5) 個体レベルに至るまでの各段階について、およそ次のようなものである [2]。

- (1) 放射線を浴びると、人体を構成する原子が電離されたり、励起されたりする。放射線のエネルギーは数百 keV から数 MeV であり、それに対して原子内に電子が束縛されているエネルギーは数 eV から数十 eV である。従って、放射線が当たると原子内の電子ははじき飛ばされて束縛されていた原子を離れたり（電離）、高いエネルギー準位に励起されたりする。ただし、これは本質的には量子力学的なプロセスであり、確率的な現象であって、放射線が当たると必ずそうなるというものではない。電離が起こるか励起が起こるかも確率的な法則に従っている。もちろん、放射線の強度が強いほど^{*25)}、確率は高くなる。また、どのような電離や励起がどれくらいの確率で起こるかは、放射線の種類（X線、 γ 線、 β 線、 α 線、中性子線）やそのエネルギーによって異なってくる。原子1個のレベルでは、このようなことが起こっている。
- (2) 原子レベルで起こった電離や励起により、分子レベルでは DNA が損傷される。直接 DNA が損傷される場合と、生体の 70%以上を占める水分子が電離・励起された結果、活性に富んだフリーラジカル（遊離基）が形成され、それによって間接的に DNA が損傷される場合とがある。
- (3) DNA が損傷されても、ほとんどは短時間のうちに修復され、細胞は損傷から回復する。しかし、中には修復されなかったり誤修復されたりする DNA もある。損傷が致命的であれば細胞死を起し、致命的でない場合は DNA 情報が変化したまま細胞分裂が行われる。
- (4) 臓器や組織は数多くの細胞から構成されている。その中の相当数の細胞が死ねば、機能障害が起こり、放射線の影響が症状として観察されるようになる。これが**確定的影響**である。強い放射線を一度に浴びると回復が間に合わず、これが起こる。表4にどのような症状が現れるかが示されている。確定的影響にはしきい値（被爆を受けた人の1～5%に影響が現れ始める線量）があつて、それを大きく超えるほど影響の重篤度が増大する。被曝量がしきい値より少ないと、細胞死の数も少なく、症状としては表れない。しかし、臓器・組織のある割合の細胞が死ぬと症状が現れ始める。それがしきい値である。さらに大きな線量を被曝すると、細胞死の数が増加して症状は重くなる。
- (5) 弱い放射線を長期間にわたって受け、短期的には細胞が十分回復して症状が現れない場合でも、DNA 情報が変化し、そのまま細胞分裂が繰り返されることがあり、そうすると突然変異を起こしてがんや遺伝的影響が発生する可能性がある。突然変異が体細胞に起こるとがんとなり、生殖細胞に起こると遺伝的影響となる。これが**確率的影響**である。確率的影響にはしきい値はない。線量が増加すると、突然変異が起こる確率が増大し、影響の発生頻度が増大する。表5に実効線量 1 Sv あたりのがん発生確率および重篤な遺伝障害の発生確率が示されている。長期間であつても合計で 1 Sv の被曝をすればおよそ 7% の確率で何らかの悪い影響が現れるということである。

4.2 長期間低線量被曝

実際にあり得る被曝を考えたときに重要なのは、弱い放射線を長期間にわたって受けるときの確率的影響である。確定的影響が現れるほどの多量の被曝は、とんでもない操作ミスや事故など、よほど特別な出来事が起こらない限り、普通の状況ではまず考えられない。確率的影響についても、普通に生活していれば合

^{*25)}放射線が当たる回数が多いほど、ということ。X線や γ 線のような電磁波も、量子力学的には、ある特定のエネルギーをもち、1個2個と数えられる粒子と考えることができる。

表 4: 大量の放射線を短時間に被爆した場合の確定的影響. 全身被爆の場合と皮膚だけの場合. [2]

全身実効線量 (Sv)	影響
~ 0.15 以下	臨床症状は確認されず
~ 0.25	リンパ球 (白血球の一種) の減少
~ 1	吐き気, 食欲不振, 全身倦怠感, めまい
3 ~ 5	骨髄の損傷. 被爆した人の半数が 30~60 日で死亡.
5 ~ 15	胃腸管および肺の損傷. 被爆した人のほとんどが 10~20 日で死亡.
~ 15 以上	神経系の損傷. 被爆した人のほぼ全数が 1~5 日で死亡.
皮膚等価線量 (Sv)	影響
~ 3 以上	脱毛
3 ~ 6	紅斑 (赤くなる)
7 ~ 8	水泡の形成
~ 10 以上	潰瘍形成
~ 20 以上	潰瘍慢性化, 皮膚がんへの移行

表 5: 実効線量 1 Sv あたりの組織別がん発生確率および重篤な遺伝障害の発生確率 [2]. 組織別名目確率係数と呼ばれる. ICRP1990 年勧告. ここから表 3 の係数 w_T が導かれている.

組織	致死がんの発生確率 (%/Sv)		総合障害の発生確率 (%/Sv)	
	全集団	作業員	全集団	作業員
膀胱	0.30	0.24	0.29	0.24
骨髄	0.50	0.40	1.04	0.83
骨表面	0.05	0.04	0.07	0.06
乳房	0.20	0.16	0.36	0.29
結腸	0.85	0.68	1.03	0.82
肝臓	0.15	0.12	0.16	0.13
肺	0.85	0.68	0.80	0.64
食道	0.30	0.24	0.24	0.19
卵巣	0.10	0.08	0.15	0.12
皮膚	0.02	0.02	0.04	0.03
胃	1.10	0.88	1.00	0.80
甲状腺	0.08	0.06	0.15	0.12
残りの臓器・組織	0.50	0.40	0.59	0.47
合計	5.00	4.00	5.92	4.74
重篤な遺伝障害の発生確率 (%/Sv)				
生殖腺	1.00	0.60	1.33	0.80
総計			7.30	5.60

計で 1 Sv などという大きな被爆はまず考えられない. 表 5 の数値を単純に 10 で割って, 100 mSv の被爆でおおよそ 0.7 % の確率で何らかの悪影響が現れる, といったあたりが実際に起こり得るところか. 致死がんだとおおよそ 0.5% だ.

ただし, 表 5 は純粋に余計な被爆による影響だけを表す数値である点に注意したい. 自然被爆以外の余計な被爆が全くないときに, 食生活や喫煙, 農薬や食品添加物, 公害, 精神的ストレスなど現代生活での他の要因, またはラドンなどによる自然放射線で自然に発生するがんの発生確率は含まれていない. 自然発

生がんによる死亡確率がたとえば30%だとすると、100 mSvの余計な被爆をすると30.5%くらいに上がるという意味だ*26)。

4.3 組織荷重係数と等価線量、実効線量

表5から表3の係数 w_T が導かれている。ここで、その意味を考えてみたい。表5の3列目、総合障害の発生確率(全集団)の総計は7.3%である。1万人が同じように1 Svの実効線量の被爆をすると、およそ730人に何らかの悪影響が生じるということだ。組織ごとの数値は、具体的にどの組織に悪影響が発生するかを確率で示したものである。つまり、1万人のうち29人は膀胱、104人は骨髄、7人は骨表面、36人は乳房、103人は結腸、16人は肝臓、80人は肺、24人は食道、4人は皮膚、100人は胃、15人は甲状腺、残りの臓器・組織に障害を起こす人は59人、生殖腺に重篤な遺伝障害を起こす人は133人、という具合であり、これが730人の内訳である。この数字から、障害を起こす場合にどの組織がどれくらいの確率で障害を起こすかを単純に割り算で求めてみると、膀胱は $29 \div 730 = 0.04$ 、骨髄は $104 \div 730 = 0.14$ 、骨表面は $7 \div 730 = 0.01$ 、乳房は $36 \div 730 = 0.05$ 、結腸は $103 \div 730 = 0.14$ 、肝臓は $16 \div 730 = 0.02$ 、...という具合である。他の1, 2, 4列目でやってもだいたい似た結果になり、表3の係数 w_T がほぼ再現されるので、表3はおおよそこのようにして得られた割合に若干の修正を加えたものと思われる*27)。

前節でも出てきた等価線量、組織荷重係数、実効線量の関係について、次の例で考えてみよう。

【例5】 1万人が全身に一樣に1 Svの実効線量を被爆したときに致死がんに至る人数が500人(5%)であるとしよう。このうち甲状腺から致死がんを発生する人数は、甲状腺に対する荷重係数 $w_T = 0.05$ より、

$$500 \times 0.05 = 25 \text{ 人}$$

【例6】 1万人が甲状腺だけに等価線量1 Svの被爆を受けた。このとき、がんは甲状腺だけから発生する。甲状腺から致死がんを発生する人数は何人か。また、実効線量はいくらか。

(答え)

$$25 \text{ 人}$$

なぜなら、上の例で全身に一樣に実効線量1 Svの被爆をしたとき、甲状腺の等価線量も1 Svだからである*28)。全身に一樣に実効線量1 Svの被爆をしたということは、人体のどの組織も1 Svの等価線量を受けているということである。一樣に1 Svの被爆をしたときに甲状腺から致死がんを発生する人数が25人なら、甲状腺だけに1 Svの等価線量を受けたときも甲状腺だけの被曝量は同じであり、甲状腺から致死がんを発生する確率も同じはずである。従って、1万人が甲状腺だけに等価線量1 Svの被爆を受けたとき、致死がんに至る確率は

$$25 \div 10000 = 0.0025 = 0.25 \%$$

だと言える。実効線量1 Svでの致死がんの発生確率が5%なので、単純な比例関係を当てはめると、0.25%というのは実効線量50 mSvに相当する。定義の式(7)で表すと、

$$\sum_T H_T \times w_T = 1 \times 0.05 = 0.05 \text{ Sv} = 50 \text{ mSv}$$

*26) 現在、日本における年間志望者数は約100万人である。このうち約30万人ががんによるらしい。今、すべての日本人が生涯で100 mSvの余計な被爆をすると、30%が30.5%になってがんによる死が約5千人増えるのだ。この数字に対する人々の反応はいろいろであるようだ。「5千人などとてもない!絶対に許されない。」「がんになったとしても、被爆が原因かどうかはわからないから気にしない。」「他の要因を改善したほうがよっぽどがんは減らせる。」はつきり言えるのは、0.5%程度であれば30万5千人のうち誰がその5千人のうちの一人なのか、誰かががんで亡くなったときにその原因が余計な100 mSvの被爆なのかは絶対にわからないだろう、ということだ。「100 mSvの被爆があった」という事実と「がん死者数が5千人増加した」という事実との相関が統計的に明瞭に証明されたときに、被爆の影響で5千人が余計にがんで亡くなったということが言える、という意味なのである。

*27) 正確にどのようにしてあるのかはわからない。

*28) 線量には「単位質量あたり」(の吸収エネルギー)という意味が入っている。定義を振り返ってみよう。

表 6: ICRP による見積もり

年間被曝量 (mSv/y)	50 年間被曝量 (Sv)	総死亡確率	平均余命損失
10	0.5	2 %	0.2 年
20	1.0	4 %	0.5 年
30	1.5	5 %	0.7 年
50	2.5	9 %	1.1 年

ということだ。前節の最後の例で実効線量のほうが等価線量よりずっと小さい結果になったことを不思議に思ったが、こういうからくりだったのだ。エネルギーで考えてみると、甲状腺だけに等価線量 1 Sv の被曝をしたとき、甲状腺に与えられるエネルギーは、甲状腺の質量を 10 g として、

$$1 \text{ [J/kg]} \times 0.01 \text{ [kg]} = 0.01 \text{ [J]}$$

一方、全身に一樣に実効線量 1 Sv の被曝をしたとき、全身に与えられるエネルギーは、体重を 60 kg として、

$$1 \text{ [J/kg]} \times 60 \text{ [kg]} = 60 \text{ [J]} \quad \text{うち甲状腺には } 0.01 \text{ [J]}$$

甲状腺だけを見れば被曝量は同じだが、全身での被曝量は実効線量 1 Sv のほうが圧倒的に大きい。

要するに、**すべての現象に対して比例関係が成り立つ**と仮定しているのである。

4.4 被曝限度

ICRP は、放射線作業従事者が 1 年間に 10 mSv, 20 mSv, 30 mSv, 50 mSv の放射線を被曝し続けたときの死亡確率、死亡による寿命損失、18 才の平均余命損失を調べた。表 6 にその結果を示す。この数値の元になっているのが、恐らく図 3 に示す年齢別年間死亡率の推定曲線である。図 3(b) の曲線より下の部分の面積が表 6 で総死亡率とされている数値であろう。ここでも注意しておきたいのは、自然放射線以外の余計な被曝が全くないときの自然死亡率という巨大なバックグラウンドがあって、それに加えて図 3(a) や (b) の死亡率が加算されるという意味だ。例えば、平成 20 年度の統計で日本人の全死者数は約 110 万人で、うち男性 60 万人、女性 50 万人である [5]。このうち 80 才の男性の死者数は、図 3(c) より、約 3.6% の $600,000 \times 0.036 = 22,000$ 人である^{*29)}。ここで全男性が放射線作業従事者の職に就いたとして、現在の規制値の上限である年間 20mSv の職業被曝を 18 才～65 才まで続けたとすると、図 3(b) より、80 才での死亡率が 0.14% 上昇して、 $600,000 \times 0.0014 = 840$ 人増え、22,840 人になるというわけだ。全年齢で合計すると 3.9% 上昇して、60 万人から $600,000 \times 0.039 = 23,400$ 人増えて 623,400 人になる^{*30)}。

さて、いかなる被曝であれ、発がんリスクの増大を否定できない以上^{*31)}、避けるに越したことはない。しかし一方で、医療や研究、産業など様々な場面で我々は放射線を利用し、役立てている。それは被曝によるデメリットよりも放射線を利用することのメリットのほうが大きいと判断してのことである^{*32)}。その場合、たとえば仕事として放射線を扱い、そのために一般公衆より高い被曝を受けざるを得ない場合、どの程度までなら許容されるべきかという問いが発生し、それに対して何らかの基準を設定しなければならない。また、放射線作業施設の近隣住民や、施設に出入りはするが放射線は扱わない一般人に余計な被曝をさせないために、施設付近や施設内の放射線レベルほどの程度以下でなければならないか、という基準を設定

^{*29)}[5] では 5 才ごとにまとめてあるので、80 才～84 才までで 11 万人という数になっている。

^{*30)}ふつうはこんなことはあり得ないようにももっとずっと低い被曝レベルで管理されている。ここでこんな例を持ち出しているのは、あくまで具体的な計算から考え方を理解するためである。

^{*31)}自然被曝を除いた余計な被曝のこと。自然被曝だけは避けようがない。地球における何億年という生命の歴史の間ずっと自然界からの放射線を受け続けていたわけで、生命はそれに対応できるよう遺伝子レベルでの進化を続けてきたという考え方もある。自然放射線レベルの放射線被曝があるのが生命（人間）にとっては最も自然だという考えか。

^{*32)}原発もそうかという問いはかなり政治的社会的な問題なのでここでは立ち入らない。

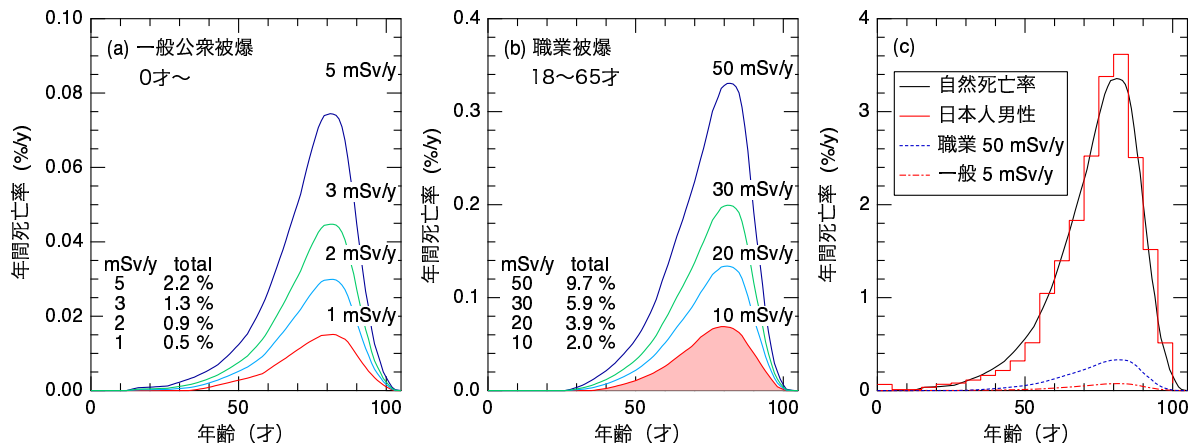


図 3: (a) 一般公衆が年間 1 mSv, 2 mSv, 3 mSv, 5 mSv の被曝を 0 才から続けた場合の、被曝を原因とする年齢別年間死亡率の推定曲線 [12]. total はすべての年齢で合計した死亡率. ここでの死亡率とは、被曝以外のすべての原因も含む全死者数に対する割合のこと. (b) 放射線作業従事者が職業被曝として年間 10 mSv, 20 mSv, 30 mSv, 50 mSv の被曝を 18 才から 65 才まで続けた場合の、被曝を原因とする年齢別年間死亡率の推定曲線. total はすべての年齢で合計した死亡率 (たとえば 10 mSv/y については、赤で塗りつぶしてある部分の面積). 表 6 の総死亡確率がこれに相当すると思われる. (c) 自然死亡率として表示されているのは、50 mSv/y の職業被曝の曲線を定数倍して総面積が 100% になるようにしたもの. これに平成 20 年度の日本人男性の年齢別年間死亡率 [5] を重ねるとほぼぴったり重なるので、自然死亡率はおよそこのような形状をしていると見て間違いはなさそうだ. 比較のため 50 mSv/y の職業被曝と 5 mSv/y の一般被曝の曲線を示してある.

しなければならない. 表 5, 表 6 や図 3 をじっと眺めてそれを決めるわけである. どう考えてもこれには明確な根拠などつけようがない. なるべく多くの人々が納得できるような数値^{*33)}, という決め方になると思う. 現在は次のように設定されている^{*34)}.

職業被曝 生涯 1 Sv として年間 20 mSv を目安とし、基準値としては 5 年間で 100 mSv を超えないこと、その間いかなる年も 50 mSv を超えないこと.

公衆被曝 年間 1 mSv 以下.

ここで考えておきたいのは、このような基準を設ける意味だ. これらの基準は、あくまで事故がなく、物事が安全に執り行われているときに、このような数値になっていないかどうか常時チェックを怠らないようにしましょう、という意味だと思う. 基準値を超えた、あるいは基準値を超えそうなデータがでたときには原因を突きとめて対策を講じ、原因を取り除きましょう、という精神の表れだと思う. 事故が起こってしまった後、被曝をしてしまった後、安全かどうかを判断する基準ではないと思う^{*35)}.

*33) 納得できないという人もあって当然だと思う. それでも現代社会で生活する人であれば、多かれ少なかれ何らかのメリットを受けているのも事実だろう. ここから先は政治問題・社会問題の領域になるので、ここでは立ち入らない.

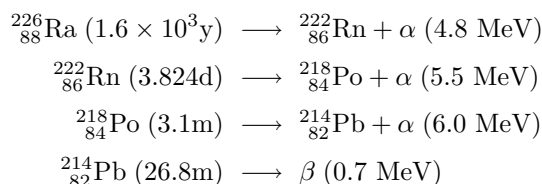
*34) 合計で 100 mSv 以下の低線量被曝の影響については、統計精度が低すぎて、あるともないとも言い切れない面がある. 放射線以外の影響と区別できるほどの証拠がないのだ. 「がんを引き起こす科学的な証拠はない」という表現がなされることが多い. 物理の実験でも信号が極めて微弱な場合、ゼロなのかゼロでないのかという議論に陥ることがあるが、はっきりゼロでないことを示すデータが得られていないかぎり、ほとんどの場合が不毛な議論になる. 人によってこだわる人もいれば、無意味だと考えて無視する人もいる. 放射線の場合だと、がんになったとしても、その原因が放射線被曝なのか、肉食中心などの食生活によるものか、残留農薬や食品添加物によるものか、公害によるものか、はっきりした科学的データの裏付けを持って証明することは恐らく無理だろうということ. 中川先生の本によれば、がんは長生き病であって、年を重ねるほどがんの発生確率は増えるのだそうだ. 現在の日本人の平均寿命だと、約 2 人に 1 人ががんになるという. 農薬や食品添加物にしても、使うことで農作業の効率が上がったり食中毒の危険性が下がったりというメリットがあり、一方で発がんなど様々な健康被害のデメリットがあり、それらを比較した上で、このレベル以下なら発病の統計レベルが十分に低いから問題ないでしょうという基準値を設定して使っているわけである. ないに越したことはない点では余計な放射線被曝と同じだと思う.

*35) 道路の制限速度のようなものか. 制限速度以下だから絶対安全とも言い切れないし、制限速度を超えたから直ちに危険というものでもない. また、事故が起こってしまったら、制限速度を守っていたかいなかったかを議論するより、まずすべきは事故の処理である.

4.5 自然放射線

世界平均で年間約 2.4 mSv の自然被曝がある (表 7)。最も大きいのは地球の岩石中に含まれるウランの崩壊系列にあるラドンからの放射線被曝である。ラドンは希ガス元素であり、大気中に存在し、呼吸を通じて常に一定量が体内に取り込まれている。

ラドン 222: ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ 希ガス元素。融点 -71°C 、沸点 -61.8°C 、 0°C 、1 気圧での密度は $9.73 \text{ g/l}^3 = 9.73 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ 。半減期 3.8235 日の α 放射体 (5.49 MeV)。天然に存在するウラン-238 系列に属し、 ${}^{222}\text{Rn}$ は ${}^{226}\text{Ra}$ の娘核種。 ${}^{222}\text{Rn}$ の娘核種は ${}^{218}\text{Po}$ (α , 3.05 min)。 0°C 、1 気圧の水に対する溶解度は $0.53 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 = 5.16 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ で、鉱泉、温泉、地下水などに溶けている。次のような崩壊系列に従う。



【例 7】 仮に ${}^{222}\text{Rn}$ が常時体内に 50 Bq 存在するとしよう。崩壊すると ${}^{218}\text{Po}$ になり、半減期 3.1 分で直ちに崩壊して ${}^{214}\text{Pb}$ になる。この 2 段階で放出される α 線は 5.5 MeV と 6.0 MeV なので、合わせて 11.5 MeV である。従って、1 秒間に体内で吸収されるエネルギーは、

$$(11.5 \times 10^6 [\text{eV}]) \times (1.6 \times 10^{-19} [\text{J/eV}]) \times 50 [1/\text{s}] = 9.2 \times 10^{-11} \text{ J/s}$$

である。1 年間に換算すると、

$$(9.2 \times 10^{-11}) \times 3600 \times 24 \times 365 = 2.9 \times 10^{-3} \text{ J/y}$$

である。このエネルギーが体重 60 kg に均等に分布したと仮定すれば、単位質量あたりの吸収エネルギー、すなわち吸収線量 D は、1 年間で、

$$D = (2.9 \times 10^{-3} [\text{J/y}]) \div 60 [\text{kg}] = 4.8 \times 10^{-5} \text{ Gy/y}$$

となる。 α 線の場合、放射線荷重係数 Q が 20 なので、20 倍して実効線量に換算すると

$$H = 20 \times 4.8 \times 10^{-5} = 9.6 \times 10^{-4} \text{ Sv/y} = 0.96 \text{ mSv/y}$$

となる^{*36)}。 ${}^{214}\text{Pb}$ からの β 線は平均エネルギーが $0.7 \div 3 = 0.23 \text{ MeV}$ と低く、放射線荷重係数も $Q = 1$ なので、影響は 0.96 mSv の 1/1000 程度となり、無視してよい。

全身ではなく、肺ですべてのエネルギーが吸収されたとすると、肺 1 個が 1 kg、2 個で 2 kg と仮定して、1 年間での吸収線量 D は、

$$D = (2.9 \times 10^{-3} [\text{J/y}]) \div 2 [\text{kg}] = 1.45 \times 10^{-3} \text{ Gy/y}$$

となる。20 倍して肺の等価線量に換算すると、

$$H_{\text{肺}} = 20 \times 1.45 \times 10^{-3} = 0.029 \text{ Sv/y} = 29 \text{ mSv/y}$$

肺に対する組織荷重係数 0.12 (表 3) をかけて実効線量に換算すると、

$$H = 0.12 \times 29 = 3.5 \text{ mSv/y}$$

となる^{*37)}。

^{*36)}表 7 の ${}^{222}\text{Rn}$ からの被曝はこういうことなのだろうか。

^{*37)}ほとんど肺にあると考えればこちらが正しいのか。すると、50 Bq というのは大きすぎて、15 Bq くらいでちょうど年間実効線量が 1 mSv になる。

表 7: 自然放射線による年間実効線量の世界平均 (推定値) [1]

線源	年間実効線量 (μSv)		
	体外被曝	体内被曝	合計
宇宙線	355		355
宇宙線生成核種		15	15
$^{40}_{19}\text{K}$	150	180	330
$^{87}_{37}\text{Rb}$		6	6
〔 ^{238}U 系列〕			
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th}$		5	
$^{230}\text{Th} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$		7	
$^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{222}\text{Rn}$	100	7	
$^{222}\text{Rn} \rightarrow \dots \rightarrow ^{210}\text{Pb}$		1100	
$^{210}\text{Pb} \rightarrow \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$		120	1340
〔 ^{232}Th 系列〕			
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra}$		3	
$^{228}\text{Ra} \rightarrow ^{224}\text{Ra} \rightarrow ^{220}\text{Rn}$	160	13	
$^{220}\text{Rn} \rightarrow \dots \rightarrow ^{208}\text{Pb}$		160	340
計	800	1600	2400

5 食品に対する基準値の由来

われわれが口にする水や食品の中にも ^{40}K をはじめとする様々な放射性元素が微量ながら含まれている。ふだんは気にする必要もないが、放射性物質による食品汚染が疑われる場合などは、どの程度の汚染なのかを調べ、健康に影響があるレベルなのかどうかの判断を下さなければならない状況になる。そのためにいわゆる**基準値**なるものが存在し、判断のめやすとされているようであるが、その数値はどのようにして導かれたのだろうか。

5.1 放射性物質を含む食品摂取による内部被曝： ^{137}Cs を例にして

ある日、放射性物質を含む食品を食べたとする。それによる内部被曝の等価線量または実効線量を計算し、その後 50 年間にわたっての影響を考えたい。ただし、放射能は (2) 式で表される物理法則に厳密に従って減衰していく。この減衰の半減期を**物理的半減期**と呼び、 T_p と表そう。また、体内に取り込まれた元素は永久に体内にとどまるわけではなく、代謝作用により、ある程度の時間がたつと体外に排出されていく。この減衰の実際の様子は元素ごとに異なり、決して単純な指数関数に従うものではないが、ここでは簡単のため単一の半減期 T_b をもつ指数関数で表されるものと仮定し、これを**生物的半減期**と呼ぶことにする^{*38)}。

5.1.1 汚染食品を 1 回摂取した後 50 年間での実効線量：預託線量

生物的半減期を考慮しない場合 エネルギー E の放射線を出す I_0 Bq の放射性物質を時刻 $t = 0$ に摂取したとする。まずは、放射性物質の排出はなく永久に体内にとどまり、かつ放射線のエネルギーはすべて体内で一様に吸収されると仮定する。時刻 t における体内での放射能、すなわち単位時間あたりの崩壊数 $I(t)$ は

$$I(t) = I_0 e^{-t \log 2 / T_p} \quad (8)$$

^{*38)}このような単純な仮定をするのも、本稿の目的が計算の仕組みを理解することにあるためである。

で表され、時間経過とともに半減期 T_p で減衰していく (図 2)。このとき、時刻 $t = 0$ から $t = t_1$ までのあいだに人体で吸収されるエネルギー $D(t_1)$ は、 $I(t)$ に放射線のエネルギーをかけて、時刻 $t = 0$ から t_1 まで積分することで得られる^{*39)}。

$$\begin{aligned} D(t_1) &= E \int_0^{t_1} I_0 e^{-t \log 2 / T_p} dt \\ &= EI_0 \frac{T_p}{\log 2} (1 - e^{-t_1 \log 2 / T_p}) \end{aligned} \quad (9)$$

$t_1 = 0$ であれば当然のことながら $D(0) = 0$ であり、 $t_1 \rightarrow \infty$ のとき、 $D(\infty) = EI_0 T_p / \log 2$ となる。

$t_1 = 50$ y とし^{*40)}、このエネルギーが質量 m kg の組織 T で均等に吸収されたとき、

$$H_{50} = \frac{D(50y) \text{ [J]}}{m \text{ [kg]}} \text{ Sv} \quad (10)$$

は組織 T に対する 50 年間積算等価線量を表し、組織 T に対する**預託等価線量**という。ここで、J/kg=Gy をそのまま Sv にしてあるが、 β 線と γ 線の場合は $Q = 1$ なのでそれでよい。 m が全身の体重で、 $D(50y)$ が全身で均等に吸収されたとき、 H_{50} は 50 年間積算実効線量を表し、**預託実効線量**という。

^{137}Cs の場合 表 1 より、 ^{137}Cs は最大値 0.514 MeV と 1.176 MeV の β 線をそれぞれ 94.4% と 5.6% の割合で放出し、前者はその後 85.1% の割合で 0.662 MeV の γ 線を放出する^{*41)}。 β 線の平均エネルギーは最大値の約 1/3 と考えてよいので、

$$(0.514 \times 0.944 + 1.176 \times 0.056) \div 3 = 0.183 \text{ MeV}$$

γ 線のエネルギーは

$$0.662 \times 0.851 = 0.563 \text{ MeV}$$

合計して $E = 0.183 + 0.563 = 0.746$ MeV である。従って、 $I_0 = 1$ Bq のとき、

$$EI_0 = (0.746 \times 10^6 \text{ [eV]}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ [J/eV]}) \times 1 \text{ [1/s]} = 1.2 \times 10^{-13} \text{ J/s}$$

$T_p = 30.04$ y, $t_1 = 50$ y を (9) に代入すると、 $\log 2 = 0.69$ より、

$$D(50y) = (1.2 \times 10^{-13} \text{ [J/s]}) \times \frac{30.04 \times 365 \times 24 \times 3600 \text{ [s]}}{0.69} \times (1 - e^{-50 \times 0.69 / 30.04}) = 1.1 \times 10^{-4} \text{ J}$$

これが体重 60 kg に均等に分布したとすると、50 年間での実効線量、すなわち**預託線量**は^{*42)}、

$$H_{50} = \frac{1.1 \times 10^{-4} \text{ [J]}}{60 \text{ [kg]}} = 1.9 \times 10^{-6} \text{ J/kg} = 1.9 \times 10^{-3} \text{ mSv}$$

このように、放射性物質を体内に 1 回だけ摂取したとき、その後 50 年間の積算線量 H_{50} がいくらになるかを考えるのである。 $I_0 = 1$ Bq の放射能を摂取したときの H_{50} が K mSv であるとき、 K は体内被曝の長期的影響を考慮するためのベクレルからシーベルトへの換算係数だとみなすことができる。上の例だと $K = 1.9 \times 10^{-3}$ である。 $I_0 = 1000$ Bq とすると、 $H_{50} = 1.9$ mSv である。ただし、ここでは代謝による体外排出が考慮されていないので、実際はもっと小さくなる。それを次に示す。

生物的半減期を考慮する場合 次は代謝による体外排出の効果を考慮することにしよう。物理的減衰と違って、代謝作用による減衰は、体内に長くどまるものやすぐに排出されるものが混在しており、本当は複雑な時間変化を示すはずである。しかし、ここでは簡単のため、物理的減衰と同様に単一の指数関数で表され

^{*39)} 積分するとは、要するに時々刻々のエネルギーを時刻 $t = 0$ から t_1 までの間足し合わせるということだ。

^{*40)} y は年, d は日, h は時間, m は分を表す。以下、時間の単位に注意。年と日とを混同してかけたり割ったりしてはいけない。

^{*41)} 85.1% というのは ^{137}Cs に対する割合。 β 崩壊後の $^{137\text{m}}\text{Ba}$ からみると 90.1%。 $0.944 \times 0.901 = 0.851$ 。

^{*42)} ここでは正確には**預託実効線量**と呼ぶべきであるが、単に線量とだけ書かれていて、特定の組織に対する等価線量なのか全身に対する実効線量なのかを自分で判断しなければならないことが多い。どちらの意味で使われているのか常に注意しておくことが大事。

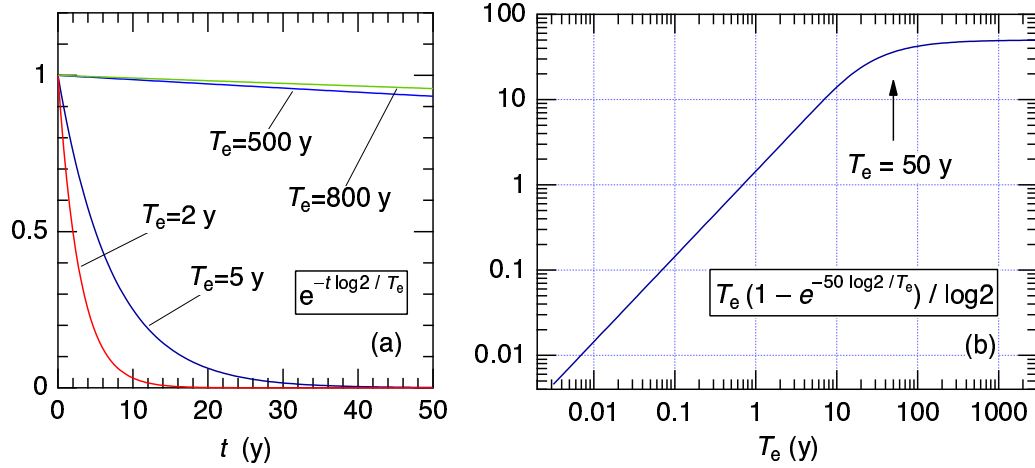


図 4: (a) 式 (13) で $EI_0 = 1$ としたときの被積分関数 $\exp(-t \log 2 / T_e)$ の t 依存性を様々な有効半減期 T_e について表したもの. $t = 0$ から 50 y までの積分値 (面積) が $D(50y)$ になる. (b) $EI_0 = 1$ としたときの $D(50y)$ の T_e 依存性. $T_e \ll 50$ y のときは T_e に比例し, $T_e \gg 50$ y になると一定値に近づくことがわかる.

るものとし, その半減期を T_b として扱うことにする. このとき, 物理的減衰に加えて体外排出による減衰の効果も加わるので, (8) は

$$\begin{aligned}
 I(t) &= I_0 e^{-t \log 2 / T_p} e^{-t \log 2 / T_b} \\
 &= I_0 e^{-t \log 2 (1/T_p + 1/T_b)} \\
 &= I_0 e^{-t \log 2 / T_e}
 \end{aligned} \tag{11}$$

となる. ここで,

$$\frac{1}{T_e} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b} \tag{12}$$

であり, T_e を有効半減期とよぶ. T_e は T_p と T_b のうちの短いほうで決まってくる. 式 (9) は, T_p を T_e に置き換えればよく,

$$\begin{aligned}
 D(t_1) &= E \int_0^{t_1} I_0 e^{-t \log 2 / T_e} dt \\
 &= EI_0 \frac{T_e}{\log 2} (1 - e^{-t_1 \log 2 / T_e})
 \end{aligned} \tag{13}$$

となる. 図 4(b) に $D(50y)$ が T_e によってどのように変化するかを表した図を示す. $T_e \ll 50$ y のうちは $(1 - \exp \dots) \simeq 1$ であり, $D(50y) \simeq EI_0 T_e / \log 2$ は T_e に比例して大きくなる. なぜそうなるかは図 4(a) の $T_e = 2$ y と 5 y の曲線による面積の違いを見ればわかるであろう. $T_e \ll 50$ y のうちは摂取された放射能が 50 年経過する前にすべて崩壊または排出によってなくなる. また, T_e の $\log 10 / \log 2 = 3.322$ 倍の時間が経過すると 9 割の被爆が完了することも確認しておきたいポイントである.

$T_e \gg 50$ y になると $(1 - \exp \dots) \simeq 50 \log 2 / T_e$ となり, 一定値 $D(50y) \simeq 50 EI_0$ に近づく. これも図 4(a) の $T_e = 500$ y と 800 y の曲線による面積がほとんど変わらないことからわかるであろう. ただし, 人間の寿命よりずっと長い T_e は考える意味がなくなってくる.

^{137}Cs の場合 ^{137}Cs の生物的半減期として, $T_b = 70$ 日を採用してみよう. すると, 有効半減期は,

$$T_e = \frac{1}{\frac{1}{30.04 \times 365 [\text{d}]} + \frac{1}{70 [\text{d}]}} = 69.6 \text{ d}$$

である。生物的半減期のほうが圧倒的に短いので有効半減期はほとんど生物的半減期で決まってくるのである。以下、上の計算と同様にして、 $I_0 = 1 \text{ Bq}$, $T_e = 69.6 \text{ d}$, $t_1 = 50 \text{ y}$ を (13) に代入すると、 $\log 2 = 0.69$ より、

$$D(50\text{y}) = (1.2 \times 10^{-13} \text{ [J/s]}) \times \frac{69.6 \times 24 \times 3600 \text{ [s]}}{0.69} \times (1 - e^{-50 \times 365 \times 0.69 / 69.6}) = 1.0 \times 10^{-6} \text{ J}$$

今の場合、有効半減期 69.6 日が積分期間 50 年に比べて圧倒的に短いため、 $e^{-50 \times 365 \times 0.69 / 69.6} \simeq 0$ である^{*43)}。このエネルギーが体重 60 kg に均等に分布したとすると、50 年間での実効線量 (預託実効線量) は、

$$H_{50} = \frac{1.0 \times 10^{-6} \text{ [J]}}{60 \text{ [kg]}} = 1.7 \times 10^{-8} \text{ J/kg} = 1.7 \times 10^{-5} \text{ mSv}$$

となる^{*44)}。生物的半減期を考えることで ^{137}Cs の預託線量はずつと減った。換算係数も $K = 1.7 \times 10^{-5} \text{ mSv/Bq}$ に修正される。 $I_0 = 1000 \text{ Bq}$ の食品を 1 回摂取したとすると、それによる 50 年間の体内被曝の影響は $H_{50} = 0.017 \text{ mSv}$ だという計算になる^{*45)}。

ICRP から提出され、現在よく用いられている ^{137}Cs の換算係数は、成人に対して $1.3 \times 10^{-5} \text{ mSv/Bq}$ であるから、およその数値としてはほぼ合っている。換算係数は、原理的にはこのようにして導かれているのだと考えてよかろう。もちろん、実際に用いられている換算係数はここで説明したような簡単なモデルではなく、もっと現実の姿を現すようなモデルに基づいたシミュレーションによって導かれている。乳児、幼児、少年、青年、成人による体重、代謝、体の成分の違い、体内に取り込まれた全量のうち何%が血液中に取り込まれ、何日間循環し、そのうち何%が体内に取り込まれて平均何日間体内のどの部分に蓄積されるか、取り込まれずにすぐに排出されるのは何%か、といったことを細かく設定したシミュレーションが行われている。その結果、代謝作用による減衰の効果も単一の指数関数ではなく、複数の半減期を重ね合わせた multi-exponential function で表されていたりする^{*46)}。

5.1.2 放射能を含む食品を 1 年間食べ続けた場合の 50 年間実効線量

さて、次は $t = 0$ での初期放射能が単位重量あたり $I_0 \text{ Bq/kg}$ である食物を毎日 $M \text{ kg/d}$ ずつ t_2 日間にわたって食べ続けた場合を考えよう^{*47)}。その間、時刻 t における単位重量あたりの放射能 $I(t)$ は

$$I(t) = I_0 e^{-t \log 2 / T_p} \quad (14)$$

に従って変化する^{*48)}。このとき、時刻 t (t 日目) での摂取に対する預託線量 $H_{50}(t)$ は、摂取した放射能 $MI(t)$ に変換係数 K をかけて、

$$H_{50}(t) = KMI(t) = KMI_0 e^{-t \log 2 / T_p} \quad (15)$$

^{*43)} 50 年経過した時点ではすべての被曝が完了したと見てよい。

^{*44)} 正確には $1.743 \times 10^{-5} \text{ mSv}$ で、 $t_1 = 1 \text{ y}$ として計算すると $1.696 \times 10^{-5} \text{ mSv}$ となる。 $t_1 = 50 \text{ y}$ でも $t_1 = 1 \text{ y}$ でもほとんど変わらない。これは $T_e = 69.6 \text{ d}$ が 365 d よりずっと短いため、 365 d の時点で 97% の被曝が完了していることを意味している。 T_e の時点で半分が完了し、 $3.322T_e (= 231 \text{ 日})$ の時点で 9 割の被曝が完了する。

^{*45)} これを素直に受け止めれば、全く無視できるレベルだと言ってよい。

^{*46)} 式 (11) が、たとえば $I(t) = I_0 e^{-t \log 2 / T_p} (a_1 e^{-t \log 2 / T_{b1}} + a_2 e^{-t \log 2 / T_{b2}} + a_3 e^{-t \log 2 / T_{b3}})$ のように表されるようなもの。 $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ になっていて、3 種類のプロセスによる生物的半減期の効果が重ね合わされている。

^{*47)} I_0 の単位がさつきと変わって Bq/kg になっていることに注意。実際の基準値で食品中の放射能を表す単位はふつう Bq/kg である。 t_2 には 1 年間 = 365 日を代入する。

^{*48)} この $I(t)$ は食べる前の放射能。 $t = 0$ での放射能 I_0 が物理的半減期に従って減衰し、時刻 t で $I(t)$ の放射能をもつものを時刻 t に食べる、というモデル設定である。 $t = 0$ の初日に 365 日間で食べる食料が既に準備されていて、それが初期放射能 $I_0 \text{ Bq/kg}$ を含んでいるというのである。毎日 $I_0 \text{ Bq/kg}$ の食料が新しく用意されてそれを食べるのではない。

と書ける。これを $t = 0$ から t_2 までの間足し合わせた総預託線量は^{*49)},

$$\begin{aligned} H_{50}^{t_2} &= \int_0^{t_2} H_{50}(t) dt \\ &= \int_0^{t_2} K M I_0 e^{-t \log 2 / T_p} dt \\ &= K M I_0 \frac{T_p}{\log 2} (1 - e^{-t_2 \log 2 / T_p}) \end{aligned} \quad (16)$$

となる。摂取期間 t_2 が物理的半減期 T_p よりずっと短い、すなわち $t_2 \ll T_p$ であるとき、 $(1 - e^{-t_2 \log 2 / T_p}) \approx t_2 \log 2 / T_p$ と近似できて、

$$H_{50}^{t_2} \approx K M I_0 t_2 \quad (17)$$

としてよい。

$t_2 = 365$ d とし、 ^{137}Cs について、先に求めた預託実効線量への換算係数 $K = 1.7 \times 10^{-5}$ mSv/Bq, $T_p = 30.04$ y, そして、試しに $I_0 = 1000$ Bq/kg, $M = 1$ kg/d を代入してみると^{*50)},

$$\begin{aligned} H_{50}^{1y} &= (1.7 \times 10^{-5} \text{ [mSv/Bq]}) \times 1 \text{ [kg/d]} \times 1000 \text{ [Bq/kg]} \times \frac{30.04 \times 365 \text{ [d]}}{0.69} \times (1 - e^{-1 \times 0.69 / 30.04}) \\ &= 6.1 \text{ mSv} \end{aligned}$$

自然放射線からの被曝3年分くらいだ。

5.2 基準値

5.2.1 基本式

1年間摂取し続けた場合の総預託線量 H_{50}^{1y} に対して基準値 H_{lim} を設定しよう。 H_{50}^{1y} が H_{lim} 以下であるためには I_0 はいくら以下でなければならないかという問題だ。それは、(16) より、

$$I_0 < \frac{H_{\text{lim}} \log 2}{K M T_p (1 - e^{-t_2 \log 2 / T_p})} \quad (18)$$

である。ここで、 $t_2 = 1$ y である。

【例 8】 ^{137}Cs のみで汚染された食品があり、それを毎日 1 kg ずつ 1 年間食べ続けるとする。食品は既に 365 日分が既に用意されていて、初日の時点で、そのすべてが一様に 1 kg あたり何 Bq かの ^{137}Cs を含んでいる^{*51)}。この内部被曝による 50 年間での総実効線量（預託実効線量）を 5 mSv 以下に抑えるためには、最初の放射能は何 Bq 以下でなければならないか。ただし、 ^{137}Cs に対する預託実効線量への変換係数を $K = 1.7 \times 10^{-5}$ mSv/Bq とせよ。

(18) より、

$$\begin{aligned} I_0 &< \frac{5 \text{ [mSv]} \times 0.69}{(1.7 \times 10^{-5} \text{ [mSv/Bq]}) \times 1 \text{ [kg/d]} \times (30.04 \times 365 \text{ [d]}) \times (1 - e^{-1 \times 0.69 / 30.04})} \\ &= 800 \text{ Bq} \end{aligned}$$

ただし、この計算はあくまで計算方法の説明のための計算であって、結果は実用に用いるべきものではない。まず、換算係数 K が、放射線が体重 60 kg の人に均等に吸収され、かつ生物代謝作用による排出も単

^{*49)} H_{50} が実効線量の意味で使われているときは預託実効線量であるし、組織ごとの等価線量の意味で使われているときは預託等価線量である。実効か等価かは常に注意すること。換算係数 K の段階で既に使い分けがなされている。

^{*50)} 365 日 \ll 30.04 年なので近似式が成り立ち、(16) で計算しても (17) で計算してもほとんど同じ結果になる。

^{*51)} これが式 (16) のモデル設定である。

純に半減期 70 日の指数関数で表されると仮定して計算されたものであり、現実的ではない。また、実際の食品は ^{137}Cs のみで汚染されているわけではなく、他の放射性核種も含まれているはずである。実際の基準値を決めるための被曝量のシミュレーションはこのようなことをできる限り勘案して行われている。それを次に見てみよう。

5.2.2 実際の基準値

原子力発電所の事故で放射性物質が環境中に放出された場合を想定した実際の基準値がどのようにして導かれているかは文献 [3] にある。ここでは、セシウムとヨウ素の基準値について考え方を追い、計算結果を再現してみよう。

およそ次のような考えで計算がなされている。

- (1) 原子炉内に存在する放射性元素は、 $^{89,90}\text{Sr}$, ^{132}Te , $^{131-135}\text{I}$, $^{134,137}\text{Cs}$, $^{141,144}\text{Ce}$ など実に様々な核分裂生成物、およびウラン、プルトニウムなど、その数は百種類以上ある。
- (2) 百種類以上あるすべての核種について個別に基準値を設けることは現実的ではない^{*52)}。そこで、放出量が多いと予想される核種で、飲食物への移行、人体に対する影響にとって重要である核種を選んで基準値を設けることにする。その核種とは、ヨウ素群^{*53)}、ストロンチウム・セシウム群^{*54)}、ウラン・プルトニウムおよび超ウラン元素の α 核種^{*55)} である。
- (3) 核分裂生成物は原子炉運転時の存在比のまま放出されると仮定する。ただし、環境への放出後の各元素の挙動はそれぞれ異なっているので、原子炉内の存在比のまま食品中に混入するというのではない^{*56)}。例えば、ヨウ素群の場合、検出調査の対象となる代表核種は ^{131}I であり、ある食品から ^{131}I が検出されれば、挙動が似ている ^{132}Te , $^{132-135}\text{I}$ も運転時の存在比でその食品中に存在していると仮定するのである。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の組み合わせ、 ^{89}Sr と ^{90}Sr の組み合わせも同様である。
- (4) 各核種に対する経口摂取線量係数^{*57)}を成人、幼児、乳児の 3 つに分類して評価し、それを用いる。ヨウ素については甲状腺等価線量を用い、それ以外については実効線量を用いる^{*58)}。
- (5) 飲食物を飲料水、牛乳・乳製品、野菜類、穀類、肉・卵・魚介類・その他の 5 つのカテゴリーに分類し、それぞれについて、成人、幼児、乳児が 1 日に何 kg 摂取するかを仮定。

以上の設定に基づいて計算を行う。以下、Sr (ストロンチウム), Cs (セシウム), Te (テルル), I (ヨウ素) について計算を追ってみよう。

燃焼度と放射性核種存在比 原子炉にセットされた燃料物質で核分裂反応がどれだけ進んだかを表す数値を燃焼度という^{*59)}。ふつう、燃料棒交換までの燃焼度は 40,000~50,000 MWd/t であるらしい [21]。図 5

^{*52)} 検出しやすい核種 (放射線の信号をはっきりそれと同定しやすい) と、検出しにくい核種とがある。

^{*53)} ^{132}Te および $^{131-135}\text{I}$ 。事故の初期段階において最も多量の放出が考えられる。実際そうだった。

^{*54)} $^{89,90}\text{Sr}$ と $^{134,137}\text{Cs}$ 。セシウムは植物に葉面吸収されて取り込まれやすい。ストロンチウムも、植物の葉面からは吸収されにくい。土壌からの移行はセシウムと同程度か場合によっては 1 桁大きい。いずれも飲食物からの被曝経路に関して重要な核種である。

^{*55)} ^{241}Am , $^{242-244}\text{Cm}$ のこと。ウランより重たい (原子番号の大きい) 元素を超ウラン元素という。

^{*56)} ウランやプルトニウムは放出されても重いので敷地内にとどまり、広く環境中にばらまかれる確率は低いと言われている。が、実際のところどうなのだろうか。質量数で比べてみると、ストロンチウムが 89-90、ヨウ素が 131-135、セシウムが 134-137 で、ウランが 235-238、プルトニウムが 238-242 なので、水道水や農作物で検出が報告されているヨウ素やセシウムと比べても重さは 2 倍から 3 倍である。ヨウ素やセシウムが風に乗って数十 km 広がるとすると、ウランやプルトニウムはどれくらい飛ぶのだろうか。実測調査がないと何とも言えない。

^{*57)} 1 Bq 摂取したときに 50 年間実効線量、つまり預託実効線量、が何 mSv になるか。係数 K のこと。

^{*58)} 式は同じだが、等価と実効で意味が違うので注意すること。甲状腺等価線量を実効線量にするときは荷重係数 0.05 をかける。

^{*59)} たとえば、燃料 1 ton あたり 30 MW の出力で 1000 日間運転すると、燃焼度は 30,000 MWd/ton となる。実際の発電用原子炉を想定すると、100 ton の燃料で 300 万 kW=3000 MW の出力を出しているときの 1 ton あたりの出力が 30 MW/ton である。核分裂なので火がついて燃えているわけではないが、燃焼という言葉を使うようだ。

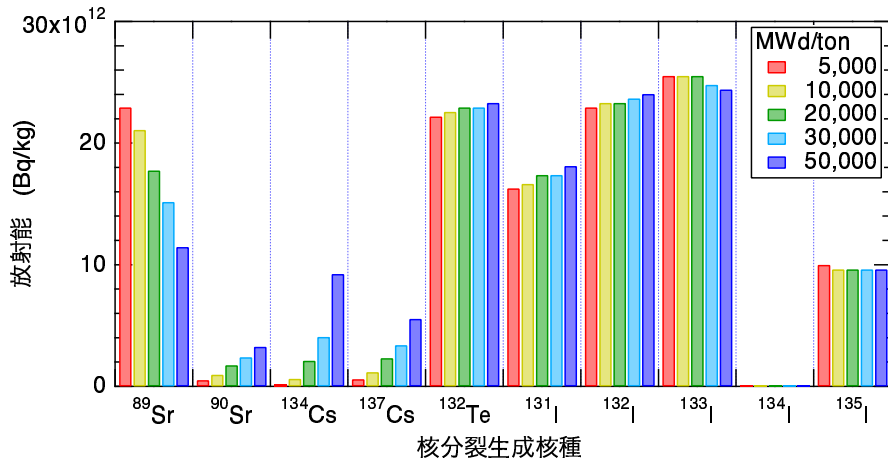


図 5: 原子炉停止後 0.5 日の時点における原子炉内の放射性核種の存在量 [3]. 本稿で紹介する核種のみ, 5 段階の燃焼度について示す.

表 8: ヨウ素群およびストロンチウム・セシウム群について仮定する放射能の割合. 燃焼度 30,000 MWd/ton で原子炉停止後 0.5 日に対する値を使用.

核種	半減期 (d)	原子炉内放射能 (Bq/kg)	代表核種放射能に対する割合 f_i
^{132}Te	3.25	2.29×10^{13}	1.3191
^{131}I	8.04	1.74×10^{13}	1.0000
^{132}I	0.0958	2.37×10^{13}	1.3617
^{133}I	0.8666	2.48×10^{13}	1.4255
^{134}I	0.0365	1.07×10^{10}	0.0006
^{135}I	0.2754	9.62×10^{12}	0.5532
^{89}Sr	50.5	1.52×10^{13}	0.28732
^{90}Sr	10629	2.41×10^{12}	0.04554
^{134}Cs	752.6	4.07×10^{12}	0.54455
^{137}Cs	10950	3.40×10^{12}	0.45545

にいくつかの核分裂生成核種についての燃焼度と存在量の関係を示す [3]^{*60)}. ヨウ素群とストロンチウム・セシウム群については, 燃焼度 30,000 MWd/ton の値を基準値の計算に用いることにする.

表 8 に燃焼度 30,000 MWd/ton でのヨウ素群およびストロンチウム・セシウム群の原子炉内放射能を示す. この状態で環境中に放出され, 飲料水や食品に移行していくと仮定する. ただし, ヨウ素群とストロンチウム・セシウム群では放出後の挙動が異なるので, それぞれ別に考える.

- ヨウ素群については ^{131}I を代表核種とし, ^{131}I の放射能を 1 とするとき, その他 ^{132}Te および $^{132-135}\text{I}$ の放射能は, 表 8 の原子炉内放射能の比率のとおりであると仮定する. その割合を第 4 列に示し, これを核種 i の放射能割合という意味で f_i と書く. たとえば, 飲料水や食品中から ^{131}I が 100 Bq/kg 検出されたとき, ^{132}Te は 131.91 Bq/kg 存在するはずだということだ.
- ストロンチウム・セシウム群については, $^{134,137}\text{Cs}$ を代表核種とし, ^{134}Cs と ^{137}Cs を足した比率が 1 になるようにする. $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ の放射能濃度比を 0.1 と仮定した^{*61)}. また, ^{89}Sr と ^{90}Sr の比率は原

^{*60)} ^{89}Sr が燃焼とともに減っていくのはなぜか, よくわからない.

^{*61)} 根拠として挙げられているのは次の 2 点. (1) 1988 年国連科学委員会報告書によれば, チェルノブイリ原発事故の際, 地表空気中の $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 濃度比は, ソ連内およびギリシャ等比較的近い距離で約 0.1 で, 日本およびヨーロッパ等その他の地域ではそれよ

表 9: 基準値の計算に用いられる経口摂取線量係数 K (mSv/Bq)

核種	成人	幼児	乳児
^{132}Te (甲状腺等価線量)	2.9×10^{-5}	1.6×10^{-4}	6.2×10^{-4}
^{131}I (甲状腺等価線量)	4.3×10^{-4}	2.1×10^{-3}	3.7×10^{-3}
^{132}I (甲状腺等価線量)	3.4×10^{-6}	1.9×10^{-5}	4.0×10^{-5}
^{133}I (甲状腺等価線量)	8.3×10^{-5}	4.6×10^{-4}	9.8×10^{-4}
^{134}I (甲状腺等価線量)	5.5×10^{-7}	3.1×10^{-6}	6.5×10^{-6}
^{135}I (甲状腺等価線量)	1.6×10^{-5}	8.9×10^{-5}	1.9×10^{-4}
^{89}Sr (実効線量)	2.6×10^{-6}	8.9×10^{-6}	3.6×10^{-5}
^{90}Sr (実効線量)	2.8×10^{-5}	4.7×10^{-5}	2.3×10^{-4}
^{134}Cs (実効線量)	1.9×10^{-5}	1.3×10^{-5}	2.6×10^{-5}
^{137}Cs (実効線量)	1.4×10^{-5}	9.7×10^{-6}	2.1×10^{-5}

表 10: 飲食物カテゴリーと摂取量. 単位は kg/d または l/d.

(ヨウ素群以外)				(ヨウ素群)			
飲食物カテゴリー	成人	幼児	乳児	飲食物カテゴリー	成人	幼児	乳児
飲料水	1.65	1.0	0.71	飲料水	1.65	1.0	0.71
牛乳・乳製品	0.2	0.5	0.6	牛乳・乳製品	0.2	0.5	0.6
野菜類	0.6	0.25	0.105	野菜類	0.4	0.17	0.07
穀類	0.3	0.11	0.055				
肉, 卵, 魚介類, その他	0.5	0.105	0.05				

子炉内放射能のとおりであるとする. その割合を第 4 列に示す. 実際の食品検査で検出対象とするのは ^{134}Cs と ^{137}Cs であって, $^{89,90}\text{Sr}$ の検出は行わないが, たとえば $^{134,137}\text{Cs}$ が 100 Bq/kg 検出されたとき^{*62)}, その食品中には ^{89}Sr が 28.7 Bq/kg, ^{90}Sr が 4.5 Bq/kg 含まれていると考えるのである.

経口摂取線量係数 時刻 $t = 0$ において 1 Bq の放射能を 1 回だけ食べて口から摂取したとき, その後 50 年間で内部被曝による実効線量 H_{50} が K mSv であるとする. この数値 K を経口摂取線量係数とよび, 単位は mSv/Bq である. この数値がどのようにして導かれているかは §5.1 で説明した. ただし, その説明は計算の原理を簡潔に示すためのものであって, 実用にはモデルが単純すぎる. 実用にはもっときちんとしたモデルに基づいたシミュレーションによる数値を用いなければならない. ICRP から数値が発表されている. 文献 [3] で使われている数値を表 9 にまとめた.

飲食物の分類と摂取量 次は, 式 (16) で毎日 M kg ずつ摂取するとしたときの M を決めなければならない. これが表 10 に示されている [3]. これも実際の調査に基づいて決められた数値である.

基準値 最後に, H_{50}^{1y} の上限値 H_{lim} (mSv) を設定すれば, 各飲食物カテゴリーについての基準値 I_0 が (18) から求められる. 上限値 H_{lim} は次のように設定されている^{*63)}.

り低かった. (2) ウィンズケール事故 (1957 年) の場合, 放出された $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ 空気中濃度比は約 0.005 であった. 乳児に対する ^{90}Sr の経口摂取線量係数 (1 Bq 摂取したときに 50 年間実効線量が何 mSv になるか) が ^{137}Cs のそれより一桁大きいため, 大きい値をとったほうが安全側であることから, 比率 0.1 を採用した.

*62) ^{134}Cs と ^{137}Cs 合わせて, という意味でしょう. 実際の調査で $^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs} = 54 : 46$ にならなかった場合はどうするのでしょうか. なるようにうまく補正するのでしょうか. とりあえず今はそうなると仮定して計算を進めます.

*63) この設定も被曝限度の設定と同様, 明確な根拠などつけようがないもので, 多くの人が相談して「だいたいこれくらいにしておきましょう」という数値を, かなり安全側に立って, 合意の上で設定したものだと思う.

- ストロンチウム・セシウム群については実効線量の上限を $H_{lim} = 5 \text{ mSv}$ とし、5つのカテゴリーの飲食物に 1 mSv ずつ割り当てる*64).
- ヨウ素群については甲状腺等価線量の上限を $H_{lim} = 50 \text{ mSv}$ の $2/3$ 、つまり $H_{lim} = 33.3 \text{ mSv}$ を表10の飲食物に適用し、3つのカテゴリーの飲食物に等しく割り当てる。つまり、一つのカテゴリーあたり 11.1 mSv である*65)。

これで式(18)から基準値 I_0 が計算できる。ただし、表8に示されているように、飲食物には複数の放射性核種が含まれているので、(16)は次のように修正される。

$$H_{50}^{1y} = MI_0 \sum_i f_i K_i \frac{T_p^{(i)}}{\log 2} (1 - e^{-365 \log 2 / T_p^{(i)}}) \quad (19)$$

M はその飲食物の1日あたりの摂取量 (kg/d)、 I_0 は時刻 $t = 0$ における代表核種の食品 1 kg あたりの放射能 (Bq/kg)、 $T_p^{(i)}$ は核種 i の物理的半減期 (d)、 f_i は代表核種の放射能を1としたときの核種 i の放射能の比率で表8に示されているとおりとする。従って、(18)も修正され、次のようになる。

$$I_0 < \frac{H_{lim} \log 2}{M \sum_i f_i K_i T_p^{(i)} (1 - e^{-365 \log 2 / T_p^{(i)}})} \quad (20)$$

たとえば、成人の飲料水に対する $^{134,137}\text{Cs}$ の基準値は、

$$\begin{aligned} \frac{\sum_i f_i K_i T_p^{(i)} (1 - e^{-365 \log 2 / T_p^{(i)}})}{\log 2} &= 0.28732 \times (2.6 \times 10^{-6}) \frac{50.5}{\log 2} (1 - e^{-365 \log 2 / 50.5}) \\ &\quad + 0.04554 \times (2.8 \times 10^{-5}) \frac{10629}{\log 2} (1 - e^{-365 \log 2 / 10629}) \\ &\quad + 0.54455 \times (1.9 \times 10^{-5}) \frac{752.6}{\log 2} (1 - e^{-365 \log 2 / 752.6}) \\ &\quad + 0.45545 \times (1.4 \times 10^{-5}) \frac{10950}{\log 2} (1 - e^{-365 \log 2 / 10950}) \\ &= 5.41 \times 10^{-5} + 4.60 \times 10^{-4} + 3.21 \times 10^{-3} + 2.30 \times 10^{-3} \\ &= 0.00602 \text{ d} \cdot \text{mSv/Bq} \end{aligned}$$

であるから、 $H_{lim} = 1 \text{ mSv}$ 、 $M = 1.65 \text{ kg/d}$ とすると、

$$I_0 < \frac{1 \text{ [mSv]}}{1.65 \text{ [kg/d]} \times 0.00602 \text{ [d} \cdot \text{mSv/Bq]}} = 100.7 \text{ Bq/kg}$$

となる。さらに、実際には、例えば収穫・出荷制限地域で生産されるはずの食品のみを住民はとるのではなく、他地域から流通してきた食品もかなりとると考えられ、住民が実際に摂取するかもしれない放射性核種の量は減少するはずである。特にセシウムのような半減期の長い核種にはこれが当てはまる、ということで、実際の摂取には希釈係数 0.5 をかけてよいと考えて、上限の I_0 は 100.7 を 0.5 で割って

$$I_0 < 100.7 \div 0.5 = 201 \text{ Bq/kg}$$

としている。ヨウ素については希釈効果は考慮しない。

このようにして計算された結果を表11にまとめる。各カテゴリーに対し、成人、幼児、乳児の3グループについて得られた数値のうち最も小さいものを取り、さらにその端数を切り捨てて小さくしたものが現在暫定基準値として使われている数値である [15]。

*64) Sr は Ca と同族、Cs は K と同族で全身が被曝対象と考え、実効線量を考える。

*65) 50 mSv というのは等価線量であることに注意。§4.3で説明したように、これを実効線量にすると $50 \times 0.05 = 2.5 \text{ mSv}$ である。さらに $2/3$ にするというのは、残り $1/3$ は表に採り上げられていない穀類、肉、卵、魚介類、その他に配分されると考えてか、等価線量を用いるのは、ヨウ素は主に甲状腺 (質量 $10 \sim 20 \text{ g}$) に集まりやすいと考えてのこと。

表 11: 飲食物カテゴリー別の基準値

$^{134,137}\text{Cs}$ の放射能濃度による基準値 (単位: Bq/kg)				
飲食物カテゴリー	成人	幼児	乳児	基準値
飲料水	201	421	228	200
牛乳・乳製品	1661	843	270	200
野菜類	554	1686	1540	500
穀類	1107	3831	2940	500
肉, 卵, 魚介類, その他	664	4014	3235	500

^{131}I の放射能濃度による基準値 (単位: Bq/kg)				
飲食物カテゴリー	成人	幼児	乳児	基準値
飲料水	1266	424	322	300
牛乳・乳製品	10444	848	381	300
野菜類	5222	2495	3270	2000

モデル設定について (個人的感想) このモデルの基本は式 (16) の考え方にある。それと実際に放射能を含んだ食品が市場に流通して消費者の口に入る過程とはかなり違うだろうと思う。計算のモデルでは時刻 $t=0$ に食品への汚染が起こり、その後は物理的な放射能減衰があるだけで、汚染の濃度が増えたり減ったりという新しい出来事は何も起こらないと仮定されている。そこは、計算結果から何らかの判断を下そうとするとき、十分意識しておかないといけないポイントだろう。もちろん濃縮作用の効果など取り込んだ計算もやればできるのだろうが、新たな仮定が入って計算が複雑になり、複雑な計算の結果は解釈も難しくなり、結局どうしたらいいのか判断できないという結果になってしまいかねない。今のモデルは、計算結果と現実との乖離が十分あり得るとはいえ、単純なモデルであるだけに解釈が容易であるという利点があり、実用的には適しているかもしれない。

それから、時刻 $t=0$ とは実際はいつのことだと考えればよいのだろうか。事故が起こったときか、食品の検査が行われて放射能濃度の数値 (Bq/kg) がわかったときか^{*66)}。後者であれば、表 8 の比率 f_i もずいぶん違ったものになるのではないか。特に、半減期の短いヨウ素群は大きく変わるだろう。セシウムは半減期が長いので、それほど変わらないかもしれない。また、希釈効果をつけてあるところを気持ち悪く思う人もあるかもしれない。一方で、表 10 で設定されている摂取量はずいぶん多めにとってある気もする。希釈効果を入れないとすれば、現在の暫定基準値は被曝線量の上限が倍の 10 mSv/50 年で設定されたものだと考えればよい。それでも危険性が科学的に立証できないほど小さい領域に十分収まっている。

5.2.3 注意点: mSv/年とはどういう意味か

基準値の元となる被曝線量の上限値 H_{lim} が $^{134,137}\text{Cs}$ については実効線量で 5 mSv、 ^{131}I については甲状腺等価線量で 50 mSv の 2/3 とされている。このことについて、新聞・雑誌の解説記事をはじめとして、5 mSv/年とか 50 mSv/年といった書き方をしているものがある^{*67)}。このように書くと、 $^{134,137}\text{Cs}$ の場合で年間 5 mSv の実効線量であるかのような印象を与えかねない^{*68)}。しかし、内部被曝についてのこれまでの計算を振り返ってみると、そういう意味ではないはずだ。その後 50 年間での実効線量という意味である。では、なぜ「/年」と書いてあるのだろうか。「1 年間摂取し続けた場合にその後 50 年間で受ける総線

*66) たぶんこちらだろう。

*67) 例えばニュートン 7 月号 (2011), p. 38-39 の表。

*68) ふつうはそう受け取るだろう。自然被曝のように時間変化しない一定の被曝がある場合はこのような年間...mSv という書き方でいい。しかし、今の場合、一度摂取したら崩壊が排出で減らない限りずっと体内にあり、しかもその線量は時間で刻々と変化していて、1 年が過ぎても被曝は続くわけだから、年間いくらと区切った表現はちょっと違和感がある。

量」の1年間の意味で使っているのだろうか^{*69)}。最高権威である食品安全委員会から事故直後に出されたとりまとめ [13] でもこの表記が見られる^{*70)}。さらには、7月に提出された文書 [14] でも同様な表記が見られる^{*71)}。

50年を1年とみなしても実質的に同じ 一つの可能性としては、実質的に年間実効線量と解釈するのと大差ないからというのがある。図6と図7にその様子を表す図を示す^{*72)}。§5.1.2で扱った計算モデル(摂取する放射能が日々物理的半減期に従って減衰するモデル)で、摂取された放射能が体内でどのように減衰していくかを表したのが図6である。1年間毎日摂取するのであるが、代表として4種類の摂取日に対する変化のみ示してある。¹³⁷Csの場合は T_p が非常に長いので、摂取前の食品に含まれる放射能はこの時間スケールではほとんど変化しない。摂取後の減衰は有効半減期(ほとんど生物的半減期)による減衰である。一方、¹³¹Iでは、 T_p が短いので、摂取前の食品に含まれる放射能そのものが時間とともに減衰し、60日目ともなれば食品自体にほとんど放射能が残っていない状況になる。

図6のように毎日摂取される放射能による日々の実効線量が図7(a)である^{*73)}。最初のうち線量が増えていくのは、初日の放射能が残っているところへ2日目の摂取、3日目の摂取が次々と行われて追加されるためである。¹³¹Iの場合は、物理半減期 T_p を過ぎる頃から、摂取される放射能そのものが減ってきて追加が行われなくなり、体内にたまった放射能は減衰していく。90日目ともなれば体内にはほとんど放射能がない状態になる。一方、¹³⁷Csでは、 T_p が非常に長いので、日々摂取される放射能にほとんど時間変化はない(図6(a))。そのため最初のうちは一定の割合で体内の放射能が増えていく。有効半減期(ほとんど生物的半減期)である約70日が過ぎる頃から、排出される放射能と新たに摂取される放射能のつり合いが保たれるようになってくる。360日目(≈ $5T_e$)くらいまでくるとほぼ一定値になっており、つり合いの状態になっていることを示している。365日目で摂取をやめると、その後は有効半減期で減衰していくのみである。

図7(a)を時間で積分して合計の実効線量が日々増加していく様子を示したのが、図7(b)である。¹³¹Iの場合、約90日目あたりで体内の放射能がなくなることに対応して、それ以後は合計線量も増加しない。1年間摂取しても、すべての被曝は最初の90日で終わるのである。以後、合計線量はこのままずっと(50年後も)0.26 mSvなので、50年間での実効線量(預託線量)は0.26 mSvである^{*74)}。¹³⁷Csでは、図7(a)からわかるように、365日目以後も体内に残っている放射能による被曝が続く。ほとんどが体外に排出されて体内の放射能がなくなり、合計線量に変化しなくなるのは720日を過ぎる頃である。このときの合計線量6.2 mSvは以後ずっと(50年後も)6.2 mSvであり、50年間での実効線量(預託線量)は6.2 mSvである^{*75)}。また、365日の時点での合計線量は4.6 mSvであり、6.2 mSvの約75%である。残り25%の被曝は摂取期間後に再び360日(≈ $5T_e$)くらいかけて起こるのだ。

以上のことから、¹³¹Iの場合は実質的に50年間での実効線量を1年間での実効線量と見なしても全く違いはないことになる^{*76)}。¹³⁷Csの場合は上で見たように少し誤差がでてくるが、それでも25%である。この計算モデルと現実との乖離による誤差はそれ以上に大きいだろうから、この程度の誤差はほとんど気にしないでいいレベルだと思ってい。

^{*69)} ちよつと使い方がおかしいのではないだろうか。たぶんそれはないだろう。

^{*70)} p. 16以降に多く見られる。文献[3]を元にしてははずなので、50年間預託線量のことを言っているはずだ。少なくともp. 16の表4のタイトルに、「最初の1年間で与えられる予測預託線量当量(mSv)」と書かれているので、これは定義通りの H_{50}^{1y} のことを意味しているように思う。しかし、その他の文章で年間…mSvとか…mSv/年などと書いてある。どういことか。

^{*71)} p. 99にある表V-4のUからの年間線量mSv/年。p. 101の説明文を読むと、この数値を出すのに[3]でも使われている経口摂取線量係数を使っているのだから、明らかに計 4.75×10^{-4} mSvという数値は1年間摂取し続けた場合の50年間預託線量であって、1年間あたりの実効線量ではないだろう。

^{*72)} ただし、ここでは理解を簡単にするため、生物代謝作用による減衰は単一の指数関数で表されるものと仮定している。

^{*73)} 計算方法は§5.1と同じである。放射線のエネルギー(J/s)を計算し、¹³⁷Csの場合は体重60 kgで割っている。¹³¹Iの場合は、95%は直ちに排出されて被曝には寄与せず、5%が質量10 gの甲状腺に吸収されて生物半減期100日で排出されると仮定している。そうすることで、表9の係数 4.3×10^{-4} mSv/Bqがだいたい再現される。ただし、これはあくまで実効的に表9の結果を再現させて、結果的に見た目がそれらしい等価線量になるようにするためのごまかしであって、そうだと主張するものではない。¹³⁷Csの場合はこういう意図的な操作をしなくてもだいたい表9の数値に近くなることは§5.1で見た。

^{*74)} 次の小節で示す数値と一致している。

^{*75)} §5.1で求めた H_{50}^{1y} と一致している。

^{*76)} T_0 が減衰しないと考えるモデルでも、365日目で摂取終了後、数十日ですべての被曝が完了するので、実質的に1年間での被曝とみなしてよい。

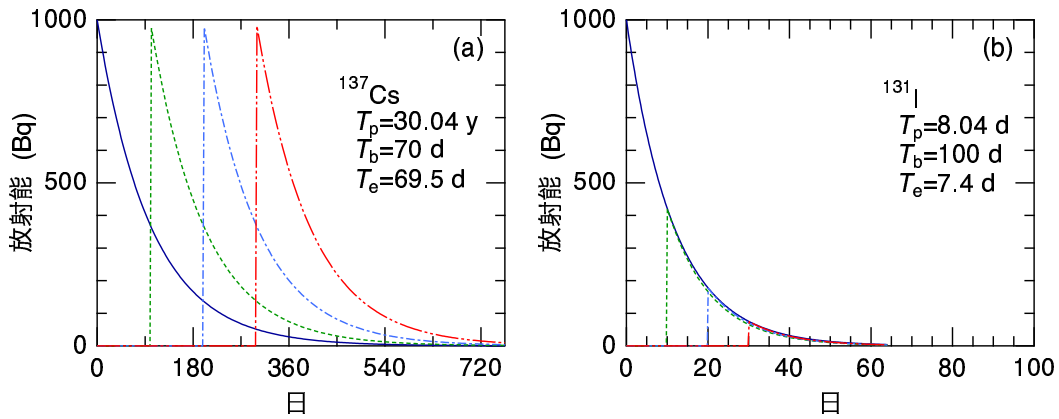


図 6: (a) ^{137}Cs について、 $T_p = 30.04 \text{ y}$, $T_b = 70 \text{ d}$, $I_0 = 1000 \text{ Bq}$ と仮定したときに、 $t_0 = 0$ 日目、100 日目、200 日目、300 日目に摂取された放射能の体内での減衰の様子。摂取前の放射能は $I_0 e^{-t \log 2 / T_p}$ で減衰、 $t = t_0$ に摂取後の体内での放射能は $I_0 e^{-(t-t_0) \log 2 / T_e}$ で減衰する。(b) 同様に ^{131}I について、 $T_p = 8.04 \text{ d}$, $T_b = 100 \text{ d}$ と仮定したもの。

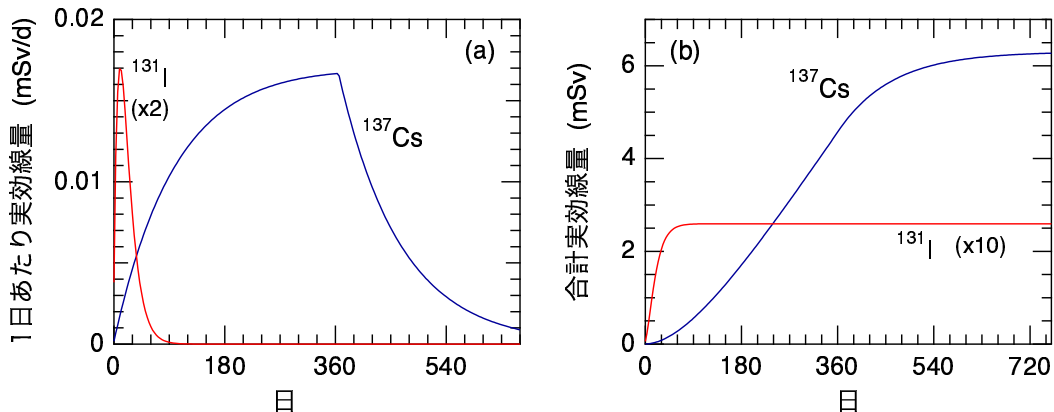


図 7: (a) 図 6 のように毎日体内に取り込まれていった放射能による 1 日あたりの被曝量を実効線量に直したものの。 ^{131}I は数値を 2 倍してある。摂取は 365 日で終了し、それ以後は体内の残留放射能による被曝を表す。(b) (a) を積分した合計の実効線量が日々増加していく様子。50 年後での数値が預託実効線量である。 ^{131}I は数値を 10 倍してある。

預託線量の意味 ネットでいろいろ調べていたら、どうもこれらしいという説明に出会った [11]。それによると、**預託線量とは摂取後 50 年間に受ける線量を最初の 1 年間で受けたときの線量であるらしい**。預託とは、50 年分を最初の 1 年に**預託する**という意味だったのだ。そういう意味で 50 年間で $\dots \text{mSv}$ というのを年間 $\dots \text{mSv}$ とか $\dots \text{mSv/年}$ と記述していたのだ。図 7(a) の ^{137}Cs でいうと、365 日以後の被曝を 365 日以前に起こるものとして預託するのである。深く考えると意味はややこしいが、上で述べたように実質的に 50 年間の被曝量のうちほとんどは摂取期間の 1 年目で起こるので、年間 $\dots \text{mSv}$ という表記でも実質的に違いはなさそうだ。この表記でいいのかもしれない。

しかし、有効半減期が数年間になるような核種の場合^{*77}、図 7(a) の ^{137}Cs の曲線をもっと直線的にしたような形になる。およそ T_e 程度の時間スケールで曲がってくるので、 T_e が長くなるほど曲がり方が小さくなるためだ。その場合、預託線量のうち本当に最初の 1 年で起こる被曝は半分くらいになる。まあ、50 年分を 1 年目に被曝すると考えて預託しておけば安全側の評価になることは間違いはないが、逆に厳しすぎる評価になって現実的でない議論になる可能性はないだろうか。

^{*77}骨に吸収されやすい Sr などとはそうかもしれない。詳しくは [14] を参照。個別の核種についてのかかなり詳しい説明がある。

5.2.4 I_0 が毎日一定の場合

§5.1.2 での仮定は $t = 0$ の初日に I_0 Bq/kg で汚染されていた食料が 365 日分あって、それを毎日 M kg ずつ食べる、というものであった。口に入る前の放射能は日々(14)に従って減衰していくのである。そうではなく、毎日 I_0 Bq/kg の放射能を含む食品を M kg ずつ 365 日食べる、という仮定だったらどうなるだろうか*78)。日々の減衰を考えないことになるので、式(14)は

$$I(t) = I_0 \quad (21)$$

となり、従って、式(16)は、

$$H_{50}^{t_2} = \int_0^{t_2} KMI_0 dt = KMI_0 t_2 \quad (22)$$

となる。日々の摂取に対する 50 年間預託線量 KMI_0 に日数 t_2 をかけたものということだ。新聞等の解説でよく見られる数値にはこれが多い*79)。

【例 9】 [6] の「放射線被ばく早見図」にある、 ^{131}I についての次の数値はこれで計算されたものである。

- 300 Bq/L の水を 1 日 2L, 1 ヶ月間飲み続けると 0.4mSv :

表 9 より、成人に対する経口摂取線量係数 (^{131}I を 1 Bq 摂取したときの 50 年間での甲状腺等価線量) は 4.3×10^{-4} mSv/Bq。毎日 $2 \times 300 = 600$ Bq ずつ 30 日間摂取するので、50 年間での等価線量は、

$$H_{50}^{30\text{d}}_{\text{甲状腺}} = (4.3 \times 10^{-4} \text{ [mSv/Bq]}) \times 600 \text{ [Bq/d]} \times 30 \text{ [d]} = 7.74 \text{ mSv}$$

甲状腺に対する組織荷重係数 0.05 (表 3) をかけて実効線量にすると、

$$H_{50}^{30\text{d}} = 7.74 \times 0.05 = 0.387 \text{ mSv}$$

- 2,000 Bq/kg のほうれん草を 1 日 50g, 1 ヶ月間食べ続けると 0.07 mSv :

毎日 $0.05 \times 2000 = 100$ Bq ずつ 30 日間摂取するので、50 年間での等価線量は、

$$H_{50}^{30\text{d}}_{\text{甲状腺}} = (4.3 \times 10^{-4} \text{ [mSv/Bq]}) \times 100 \text{ [Bq/d]} \times 30 \text{ [d]} = 1.29 \text{ mSv}$$

甲状腺に対する組織荷重係数 0.05 (表 3) をかけて実効線量にすると、

$$H_{50}^{30\text{d}} = 1.29 \times 0.05 = 0.0645 \text{ mSv}$$

放射線量が式(14)のように減衰するモデルと、ここでの仮定のように減衰しないモデルでの 1 年間摂取に対する 50 年間預託線量 $H_{50}^{1\text{y}}$ の違いは、ヨウ素のように物理的半減期 T_p が短い元素で大きくなる*80)。上の水の例で比較してみよう。

時間に依存せず、一定値 1000 Bq/L の ^{131}I を含む水を 1 日 1L (= 1000 Bq/d で一定)、1 年間飲み続けると、預託実効線量は

$$H_{50}^{1\text{y}} = 0.05 \times (4.3 \times 10^{-4} \text{ [mSv/Bq]}) \times 1000 \text{ [Bq/d]} \times 365 \text{ [d]} = 7.8 \text{ mSv.}$$

一方、 ^{131}I を含む 365 日分の水があつて初日に 1000 Bq/L だったとし、それを 1 日 1L ずつ 1 年間摂取し、その間放射能は式(14)に従って減衰していると仮定すると、預託実効線量は、式(16)より、

$$\begin{aligned} H_{50}^{1\text{y}} &= 0.05 \times (4.3 \times 10^{-4} \text{ [mSv/Bq]}) \times 1000 \text{ [Bq/d]} \times \frac{8.04 \text{ [d]}}{0.69} \times (1 - e^{-365 \times 0.69/8.04}) \\ &= 0.25 \text{ mSv} \end{aligned}$$

となり*81)、7.8 mSv よりずっと小さくなる。状況を適切に把握して判断する必要がある。

*78) 食品への汚染がある瞬間に 1 回だけ単発的に起こるのではなく、継続的に起こり、食品内の放射能が常にある一定値に保たれて、消費者である我々はそれを毎日購入して食べるというモデルだ。

*79) ただし、「50 年間で」というところが正しく説明されているかどうかには注意したい。 $t_2 = 365$ 日として計算して、「年間… mSv」と書いてあるものは、50 年間での線量という意味と混同してしまっているように思うのだが。ただ、実質的にはほとんど同じ。

*80) セシウムのように物理的半減期が 1 年よりずっと長いものは近似式(17)が成り立つので両モデルの違いはほとんどない。

*81) 図 7(b) と一致している。

6 おわりに：個人的感想

現在の暫定基準値は、セシウムやヨウ素による汚染食品ばかりを1年間フルに食べ続けることでその後50年間（実質的には摂取期間と同じ1年間）に5 mSv程度の線量増加があり得るといったレベルの設定だ。モデルと実際との乖離により、実際には倍の被曝になったとしても10 mSvである。5年食べ続けても50 mSvである。100 mSv以下の低線量被曝の影響は小さすぎてわからないという状況を考えると、基準値程度の放射能汚染であれば、あまり目くじら立てて言い立てるほどのこともないような気がする。もちろん汚染はないに越したことはない。年間自然被曝量が2.4 mSvあり、しかもその約半分は体内に取り込まれたラドンからの α 線、および ^{40}K からの β 線と γ 線による内部被曝であることと比べて考えると、これは許容範囲であろう。ただし、汚染が数年でかなり低下すればの話である。そのまま10年20年と同レベルで続くと考えれば話は別だ。

米の収穫がそろそろだ。幸いにして最初の検査では検出されなかったが、今後の検査で数値がでる可能性は十分にある。でたらどうするのか。

安全か危険かという議論になると、これは結論のでない泥沼に陥ってしまうように思う。物性物理の研究の世界でも、確固たる実験的証拠が出ていないときに、データの実に微妙で何とも言えないところをあれこれ議論して、Aモデルが正しいかBモデルが正しいかという論争に陥ることがあるが^{*82)}、やっているうちに空しい気持ちになってくるものだ。といっても、物理の研究なら何の害もないのでいいが、食品の場合は結果の意味が違うので物理の問題と同じようには扱えないだろう。

被災地から離れた都市部に住み、電気を使い、産地で生産された農作物を食べて生活するだけの人にとって、安全か危険かというのは、この問題についての議論の方向としては少しずれているのではないだろうか。もちろん10万 Bq 検出されたというような、明らかに危険な領域は別である。そうでない限り、これは道義的な問題であるように思う。安全が確認できない限り流通させるべきではないとか、セシウム137が検出されたので…を中止するとか、そういった考えは何かを考え忘れている。利益のみを受け取り、その裏でどんなおかしいことが起きているか、そのことについて見て見ぬふりをしたり、無知・無関心でいたりして、自分が放棄してきた責任を見ていないのではないか^{*83)}。

参考文献

- [1] アイソトープ手帳，日本アイソトープ協会，第10版（2001）。
- [2] 放射線概論－第1種放射線試験受験用テキスト－，石川友清編，第4版（1999）。
- [3] 須賀新一，市川龍資，保健物理 **35**，449（2000）。
- [4] P. N. Treha, J. D. French, and M. Goodrich, Phys. Rev. **131**, 2625（1963）。
- [5] 日本統計年鑑，2-26 年齢別死亡数及び死亡率，<http://www.stat.go.jp/data/nenkan/02.htm>
- [6] 放射線医学総合研究所からのお知らせページ，<http://www.nirs.go.jp/information/info2.php>
- [7] team Nakagawa のブログ，<http://Tnakagawa.exblog.jp/>
- [8] 岸本充生氏のコラム，<http://www.aist-riss.jp/main/modules/column/atsuo-kishimoto010.html>
- [9] 田崎晴明氏のコラム，<http://www.gakushuin.ac.jp/~881791/d/>
- [10] 内部被ばくに関する線量換算係数，http://www.remnet.jp/lecture/b05_01/4_1.html

^{*82)}安全モデルと危険モデルということか。

^{*83)}主権は国民にある。選挙権を持つ人ならその年数に応じて現状に対する責任があると思う。

- [11] 「預託実効線量とは」, http://search.kankyo-hoshano.go.jp/food2/servlet/food2_in
- [12] Annals of the ICRP (ICRP60), Vol. 21, Issues 1-3, 163 (1991).
- [13] 食品安全委員会のまとめ, http://www.fsc.go.jp/sonota/emerg/emerg_torimatome_20110329.pdf
- [14] 食品安全委員会, 評価書(案)「食品中に含まれる放射性物質」, (2011).
http://www.fsc.go.jp/sonota/emerg/radio_hyoka.html
- [15] 「食品中の放射性ヨウ素、放射性セシウムの基準値の根拠について」, 日本生協連.
http://jccu.coop/food-safety/qa/pdf/qa03_03.03.pdf
- [16] 「食品における放射性物質の暫定規制値の考え方」, 日本放射線影響学会,
<http://www.soc.nii.ac.jp/jrr/gimon/gakai1.pdf>
- [17] 「暮らしの中の放射線」, 高エネルギー加速器研究機構, <http://rcwww.kek.jp/kurasi/index.html>
- [18] 鳥居寛之, 「自主講義 放射線学」, <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>
- [19] 柴田徳思, 「放射線量の読み方と的確な対処法」, <http://www.kogakuinuniv-ext.jp/news/42.html>
- [20] 「放射線学入門」, 産業医科大学, <http://www.uoeh-u.ac.jp/kouza/hosyaeis/hibakuguide.pdf>
- [21] 原子力ハンドブック, 原子力ハンドブック編集委員会, オーム社 (2007).
- [22] 「放射線診療への不安にお答えします」, 国立保健医療科学院生活環境部.
http://trustrad.sixcore.jp/category/faq_m