

2017年度 初年次ゼミ（木1）

「放射線」をキーワードとした総合的学習

第2回

放射線と物質の相互作用、生体影響

工学研究科 量子放射線系専攻 /
研究推進機構 放射線研究センター
准教授 秋吉 優史

放射線が身体に入ると何が起こるの？

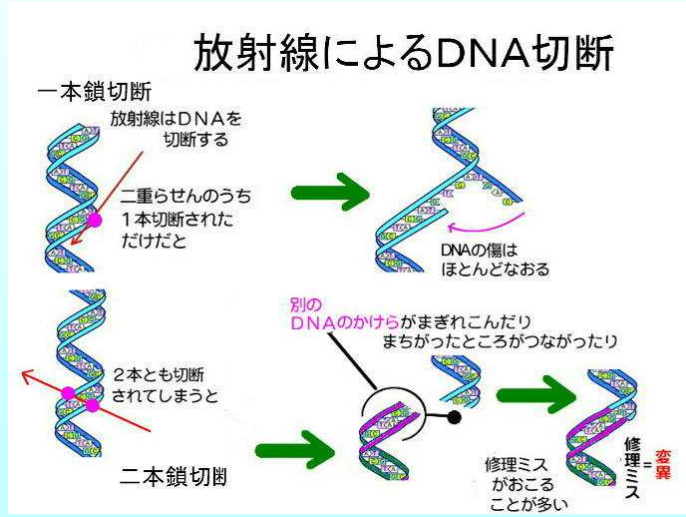
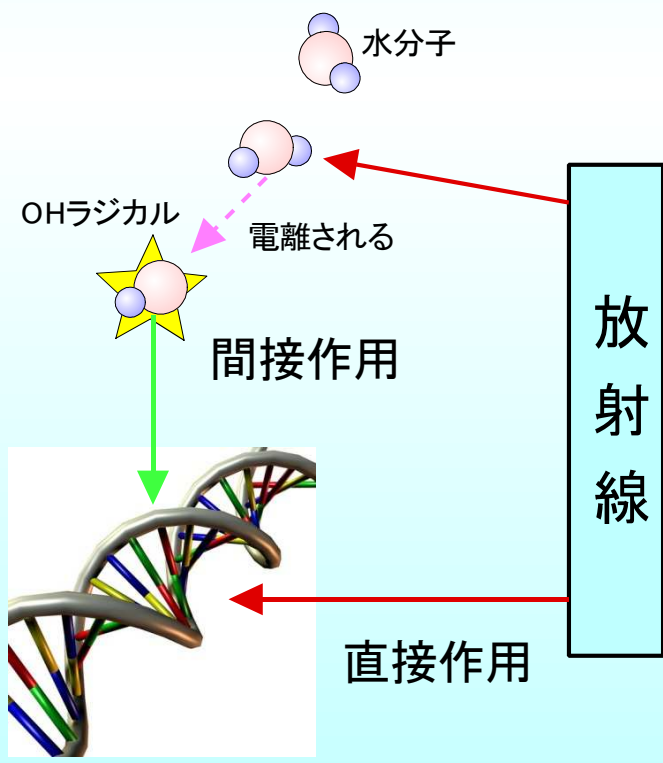
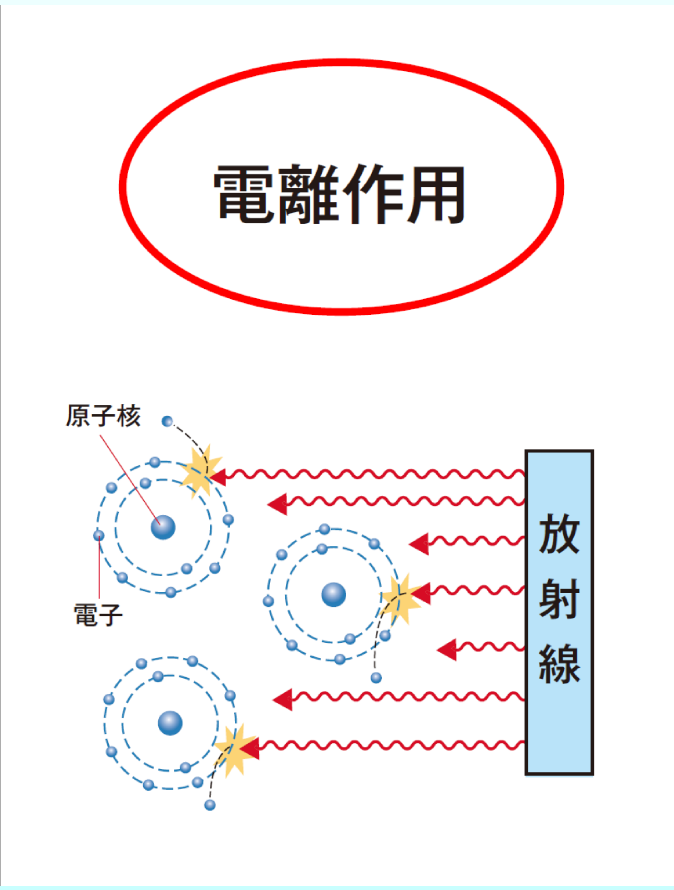
放射線は原子の周りの電子を弾き飛ばしてしまい、結合している手を切ってしまう「電離作用」を起こします。

直接DNAを構成する原子を電離して切断するほかに、水を電離して、活性酸素のような化学的に活性なラジカルを作り出します。このラジカルが、間接的にDNAを切断します。

細胞のDNAは放射線以外にも呼吸により発生する活性酸素などで常に攻撃されています。

細胞は切断されたDNAを修復したり、修復しきれないと自殺してしまったりして、間違った情報が残らないようにしています。

余りにも多くのダメージを受けると、修復しきれずにDNAが変異し、場合によっては発がんの原因となったりします。



放射線と物質の相互作用

イオンビーム (α 線)

質量が電子に比べてはるかに重いため、電子との衝突によりほとんど曲げられず、少しずつエネルギーを失う。相互作用は電荷の二乗に比例、速度の二乗に反比例(エネルギーに反比例)し、ブラッグピークで急激にエネルギーを放出し、原子核の弾き出しを起こす。

電子線 (β 線)

物質中の電子との衝突によって、簡単に方向やエネルギーが変化するため、まっすぐに進まず、広い範囲に広がる。このため、平均的な飛程という物は求めにくく、最大飛程で評価される。重元素に入射すると、原子核周辺の強い電場で急激に曲げられることにより、制動放射X線の発生割合が大きくなる。

γ 線、X線

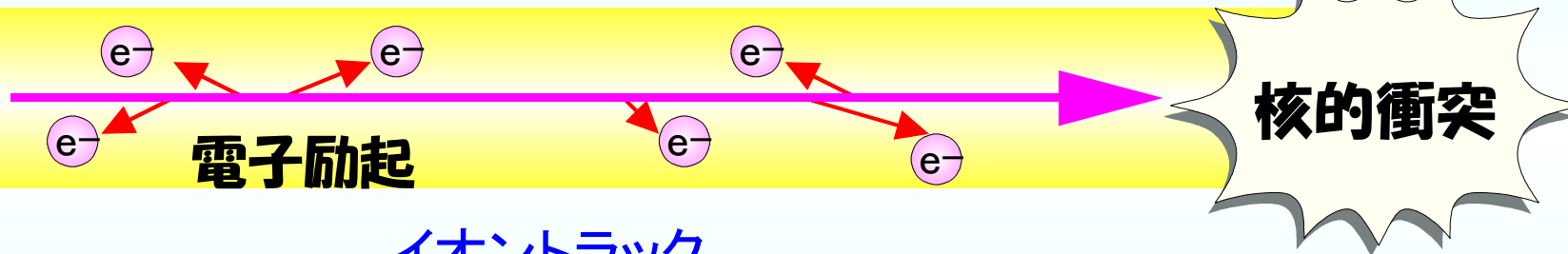
物質を進むにつれて指数関数的に強度が弱くなっていくが、その際の線減弱係数は光子のエネルギーによって関与する素過程の違いが変化するため大きく異なる。数MeVの領域では高エネルギーの方が透過力は高い。光電効果、コンプトン効果により物質中で電子線を生成するため、高エネルギーの光子はごく僅かではあるが原子核の弾き出しも起こす。

イオンビーム(α 線)の場合

物質に入射したイオンビームはそのほとんどのエネルギーを電子励起により徐々に失い、それに伴い阻止能が増加し(粒子の速度の二乗に反比例)、最終的に核的な衝突を起こす。弾性散乱された物質の原子はさらに他の原子をはじき飛ばしカスケードを形成する。

Primary Knock-on Atom (PKA)

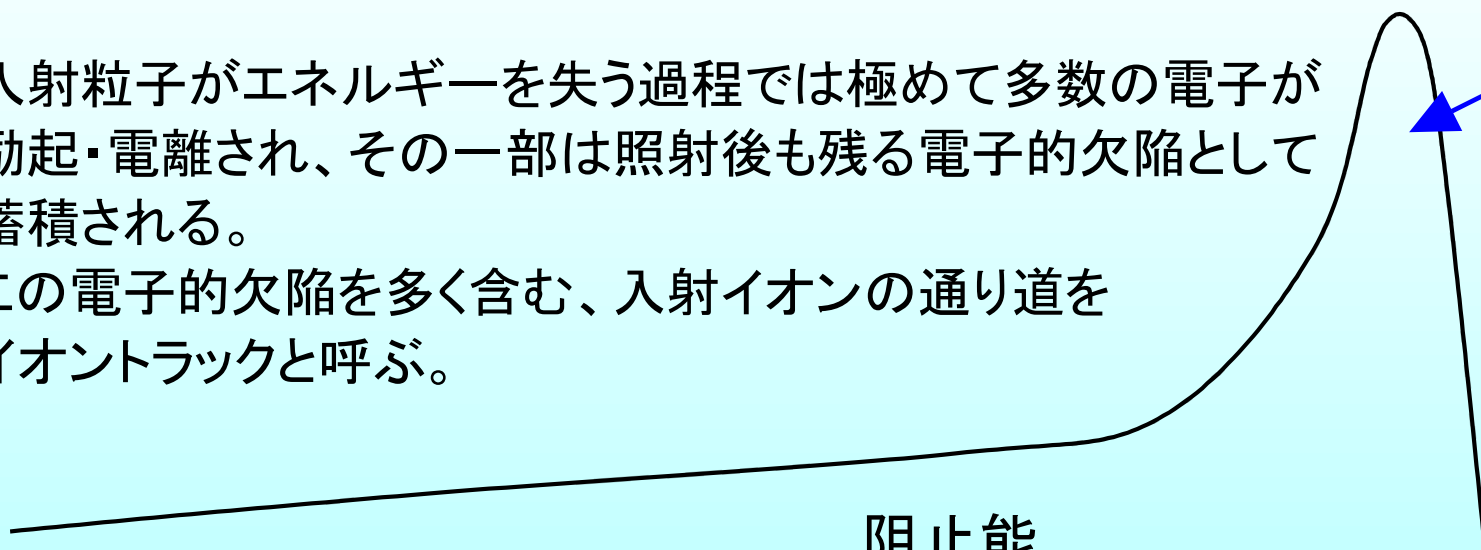
弾性散乱
(弾き出し)



入射粒子がエネルギーを失う過程では極めて多数の電子が励起・電離され、その一部は照射後も残る電子的欠陥として蓄積される。この電子的欠陥を多く含む、入射イオンの通り道をイオントラックと呼ぶ。

阻止能

ブラッグピーク



電子線(β線)とα線の比較

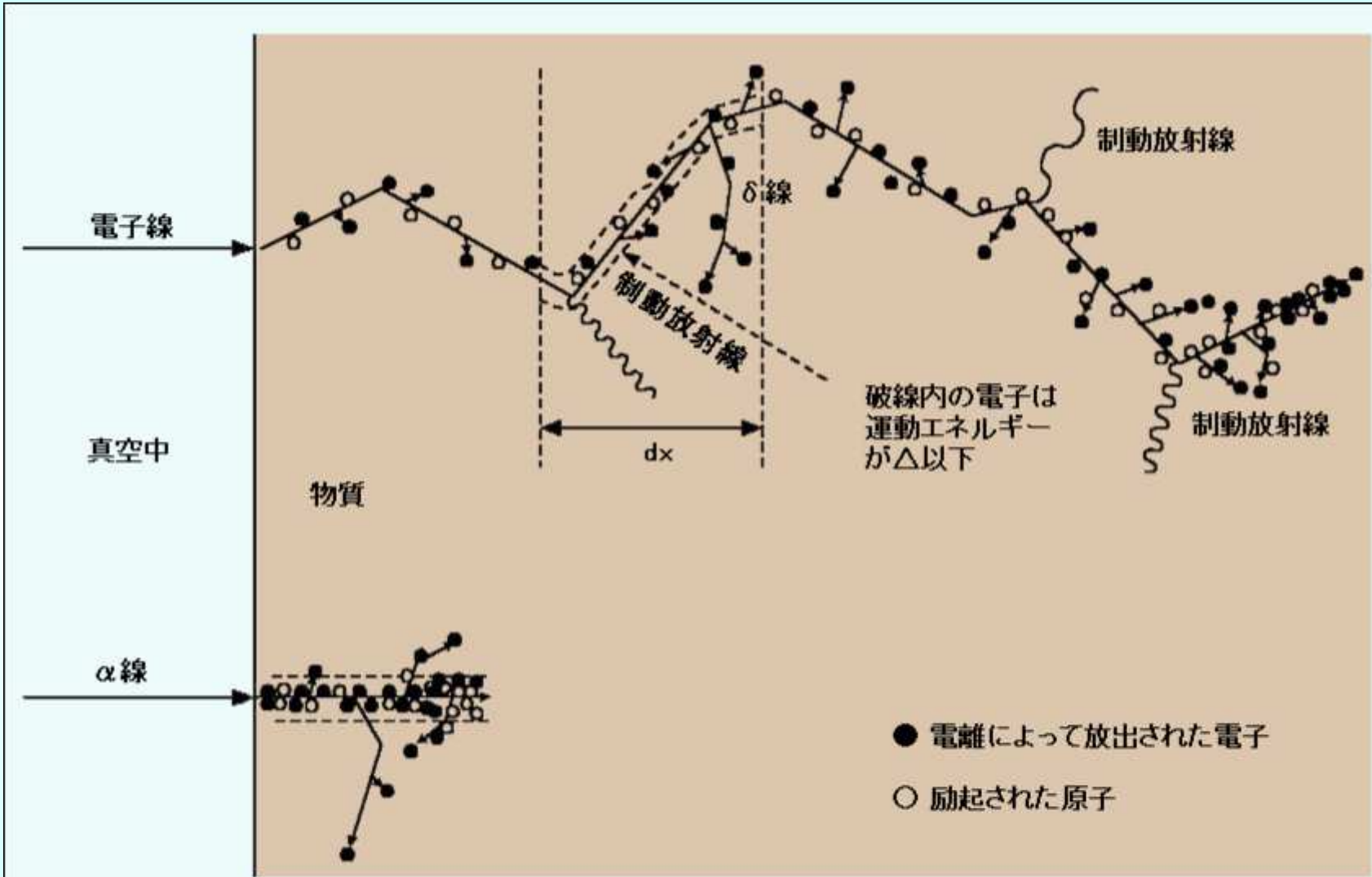


図1 荷電粒子と物質の相互作用

[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54

γ 線・X線と物質の相互作用

レイリー散乱

弾性散乱。入射光のエネルギーが変化しない散乱過程。

光電効果

軌道電子に入射光子のエネルギーを全て与えて、軌道エネルギーを差し引いたエネルギーを持つ高速電子(光電子)を生成する。断面積は入射光子のエネルギーの -3.2 乗に比例する。

コンプトン散乱

軌道電子に入射光子のエネルギーの一部を与えて、高速電子(コンプトン電子)を生成する。散乱後のエネルギーは散乱角に依存し、連続スペクトルとなる。

電子対生成

入射光子のエネルギーが 1.022MeV 以上の場合、原子核近傍のクーロン場中で電子と陽電子の対を生成する。入射光子は全エネルギーを失い消滅し、電子・陽電子の静止質量エネルギーの残りは運動エネルギーとして分配される。

光核反応

高エネルギーの光子が原子核と直接反応し、様々な素粒子が放出される。 $Z=50$ 程度の核種では中性子の結合エネルギーが 10MeV 程度であり、これ以上のエネルギーの光子の入射により (γ, n) 反応を起こして中性子が放出される。

放射線を当てると放射性物質ができるか

普通は、放射線を当てても放射線を出す物質はできない

例外：加速器や原子炉

γ線・X線の減衰

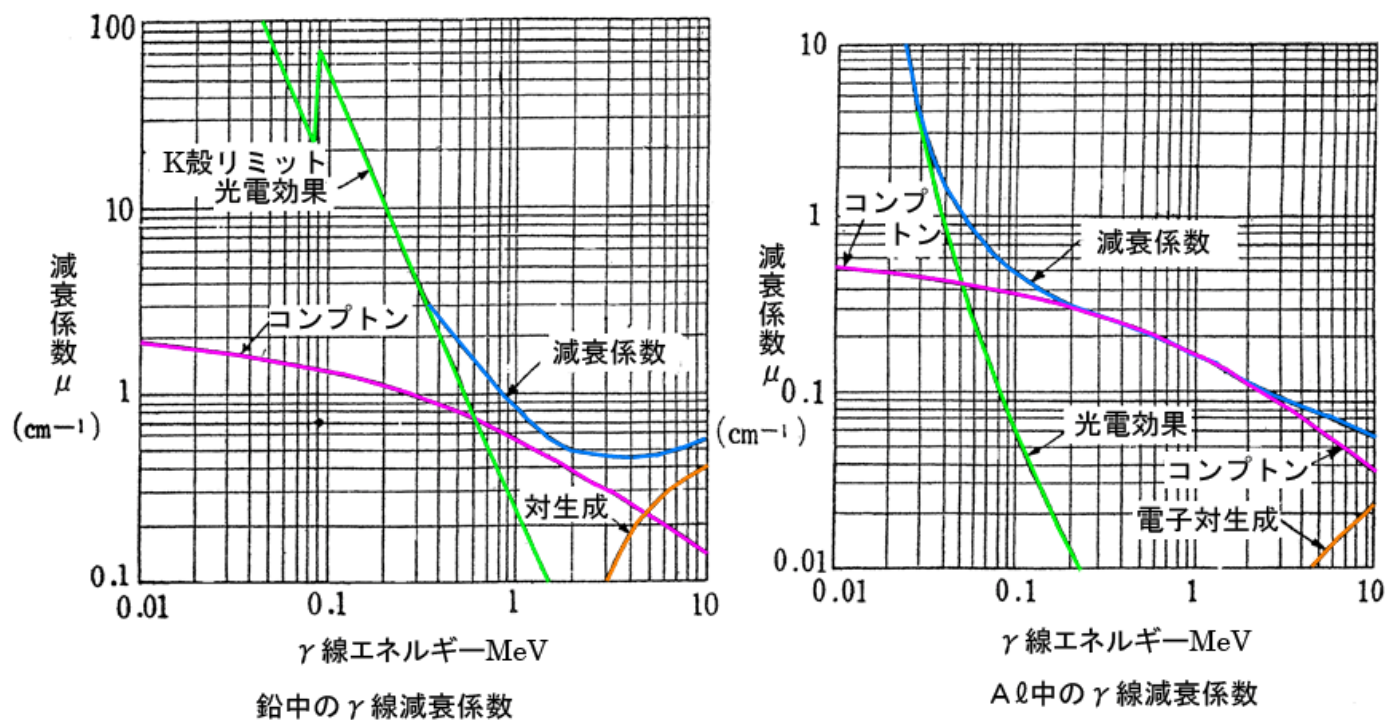
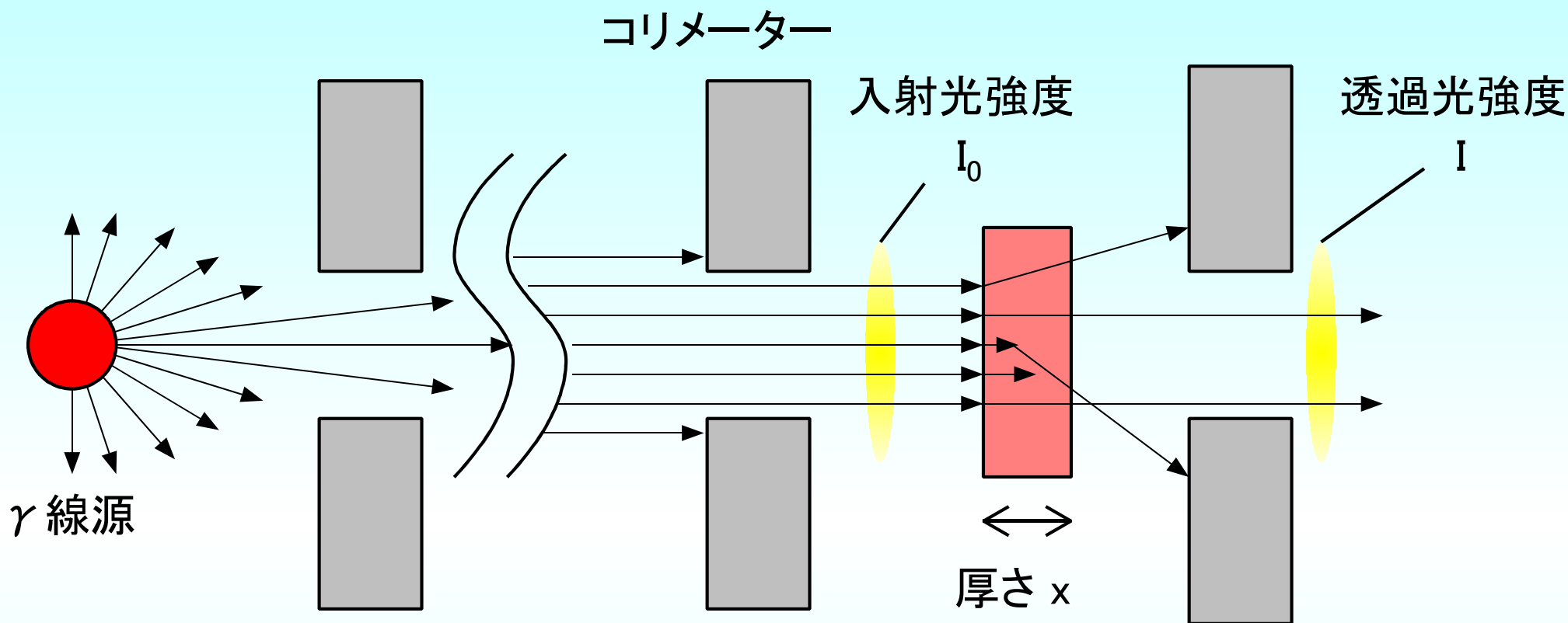


図3 γ線のコンプトン効果

[出典] 三浦 功、菅 浩一、俣野恒夫:「放射線計測学」、裳華房、p.21

ターゲットとなる物質の原子番号 Z の増加と共に、線源弱係数は
 光電効果 $Z^4 \sim 5$ に比例
 コンプトン効果 Z に比例
 電子対生成 $Z(Z+1)$ に比例
 となって Z が大きくなると急激に遮蔽能力が高くなる。

入射光子のエネルギー増加と共に、物質との相互作用を起こす効果が変わっていく。比較的低エネルギーではレイリー散乱、光電効果が主であり、次第にコンプトン散乱が支配的となる。高エネルギーでは電子対生成が主となる。光核反応は12-24MeV 付近で最大断面積となるが μ への寄与は5%程度である。また、低エネルギーではK殻電子やL殻電子の電離エネルギー以上になると光電効果を起こせるがそれ以下では起こせないため、光電効果の効率が不連続に変化する。これをK吸収端、L吸収端と呼ぶ。



単一エネルギーで狭い平行線束 γ 線・X線の減衰は、

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

で表わされる。ここで I , I_0 は光子のフラックスであり、

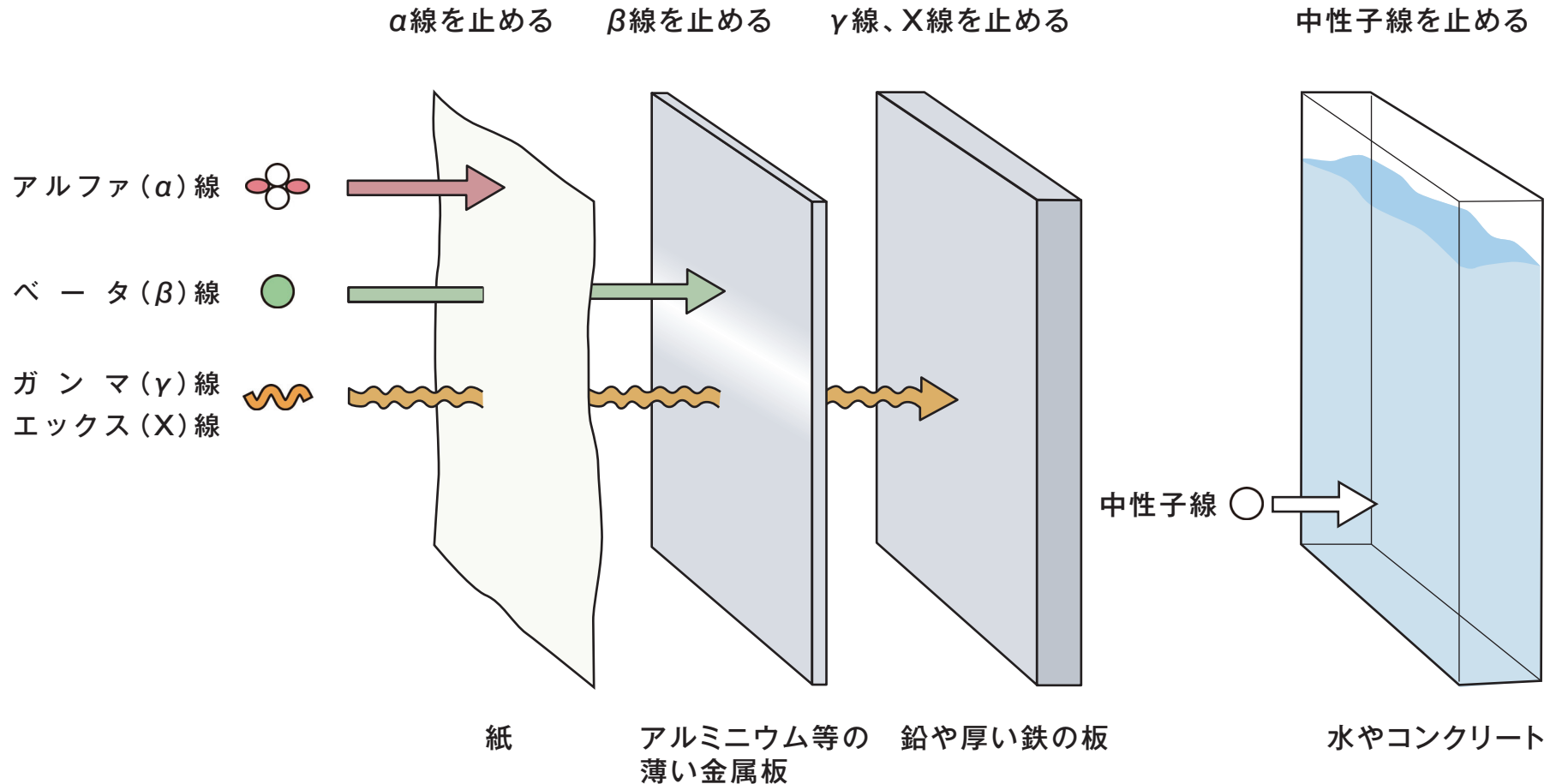
散乱、吸収により試料の厚さ x に伴って指数関数的に減衰していく。

線減弱係数 μ の単位は m^{-1} などで、密度で除した μ_m が様々な物質、

エネルギーに対して与えられている。

放射線の種類と透過力

線は紙一枚で止まってしまうますが、逆に言うと紙一枚の厚さの範囲に持っているエネルギーを全部一気に放出してしまうため、体の中で線を出されるととても影響が大きくなります。

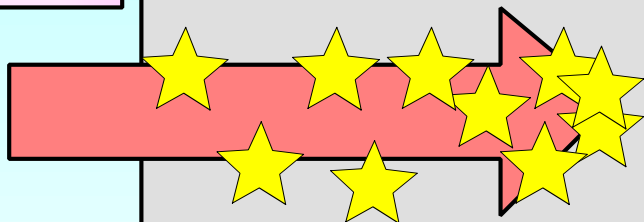


線は水の中(=体の中)を最大で2mm弱進むことが出来、細胞から見ると比較的広い範囲にエネルギーを落としていき、また体の外から来た場合はほとんど皮膚で止まります。

線は透過能力は高く、遠くから飛んできて体の中までやってきますが、逆に体内で放出されてもほとんど素通りしていきます。

α線

水中での最大飛程: 50 μm程

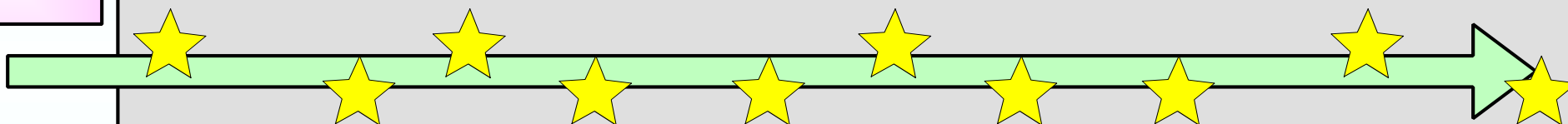


狭い範囲に一気に
エネルギーを放出する

止まる直前は特に沢山エネルギーを落とす

β線

水中での最大飛程: 1cm 程度



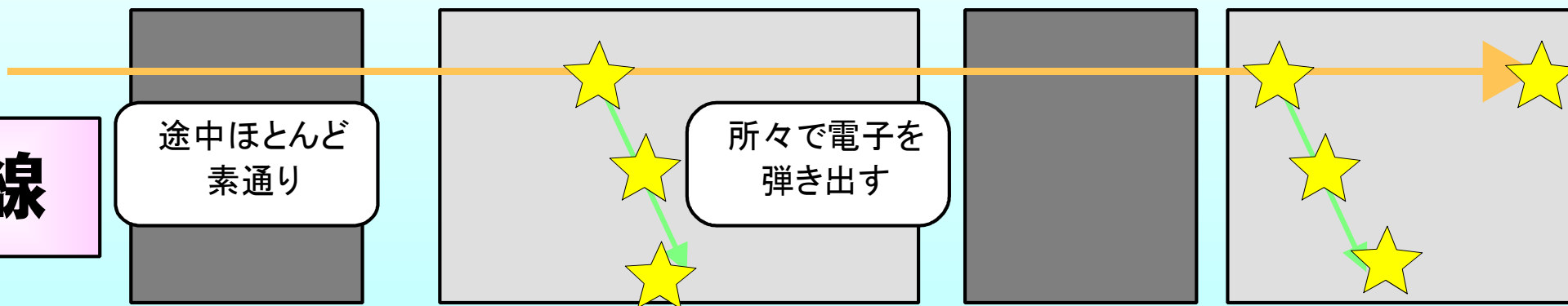
所々にぽつぽつとエネルギーを落とす

実際にはまっすぐ進まず跳ね返されながらジグザグに進む

γ線

途中ほとんど
素通り

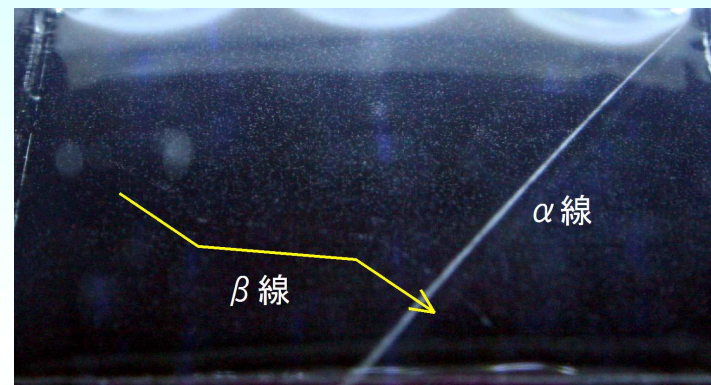
所々で電子を
弾き出す



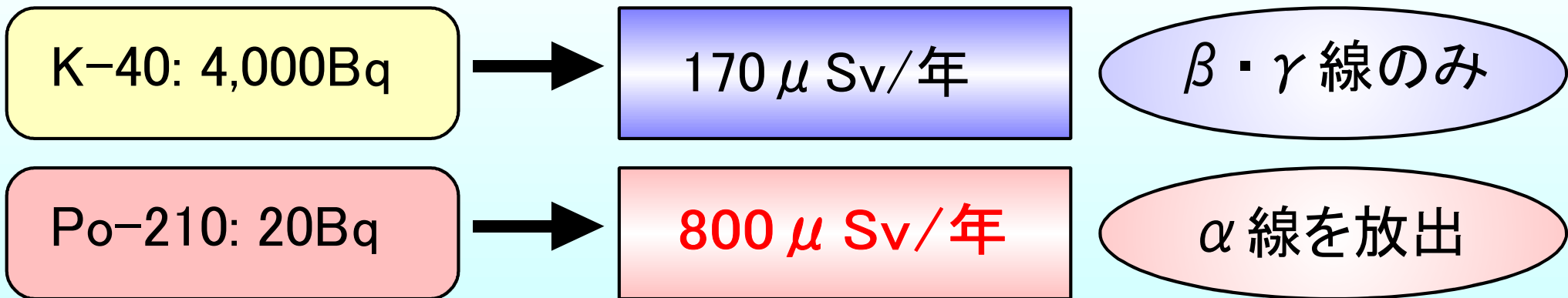
放射線加重係数の説明

実効線量(Sv) = 吸収線量(Gy) × **放射線加重係数** × 組織加重係数
→ **α線: 20, β、γ線: 1**

相互作用の違いを反映



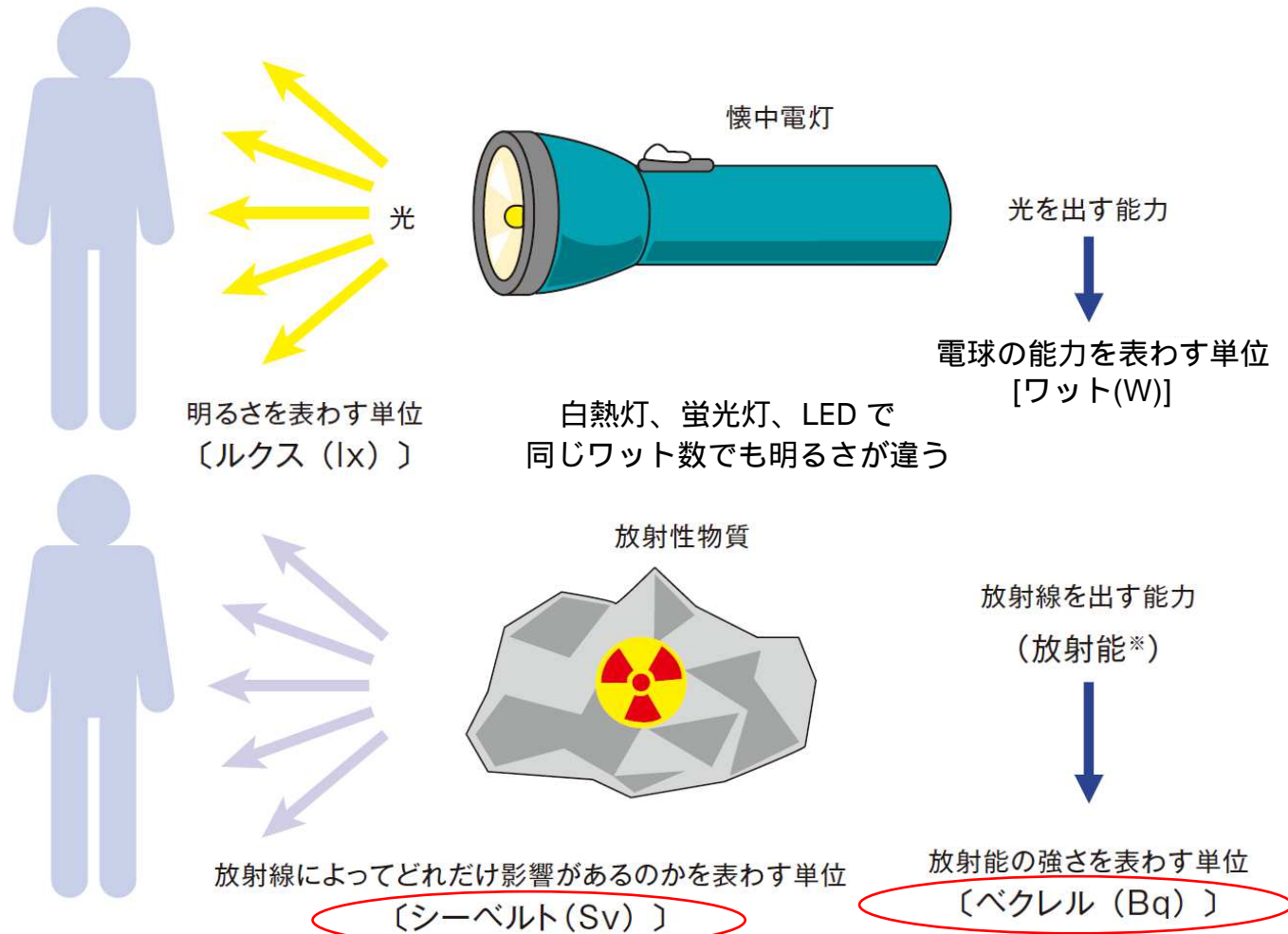
体内の放射能 *体重60kgの日本人 年間に被ばくする実効線量



空気中のラドントロンもα線を放出 → 世界平均で 1.26mSv/年
日本は木造建築が多く比較的被ばく量は少ない → 0.48mSv/年

*そもそもの吸収線量、
組織加重係数
なども異なる

放射能と放射線

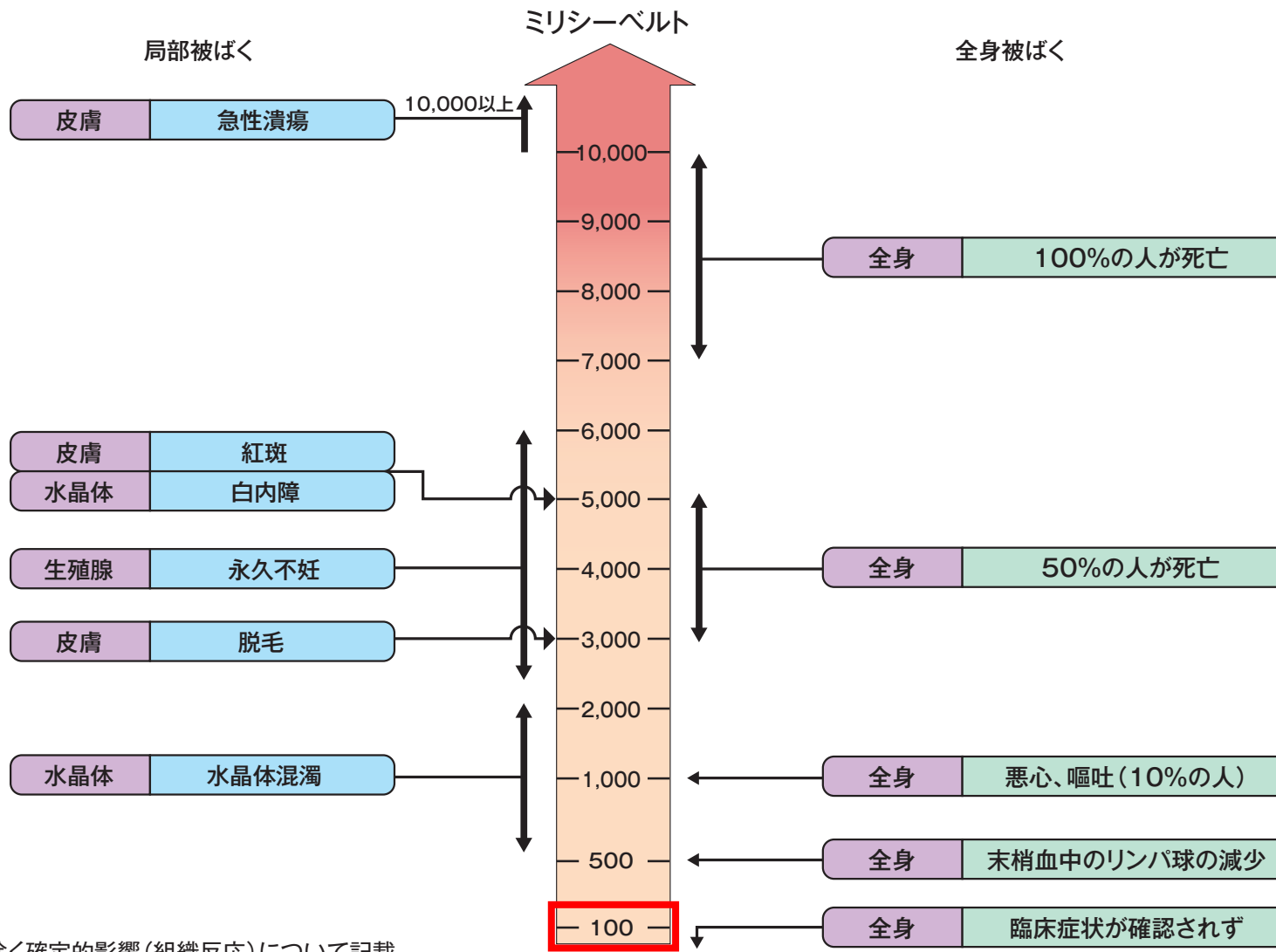


※放射能を持つ物質(放射性物質)のことを指して用いられる場合もある

核種によって同じベクレル数でも
人体に対する影響が違う

放射線を一度に受けたときの症状

凡例 部位 症状



(注1) がんや遺伝性影響を除く確定的影響(組織反応)について記載

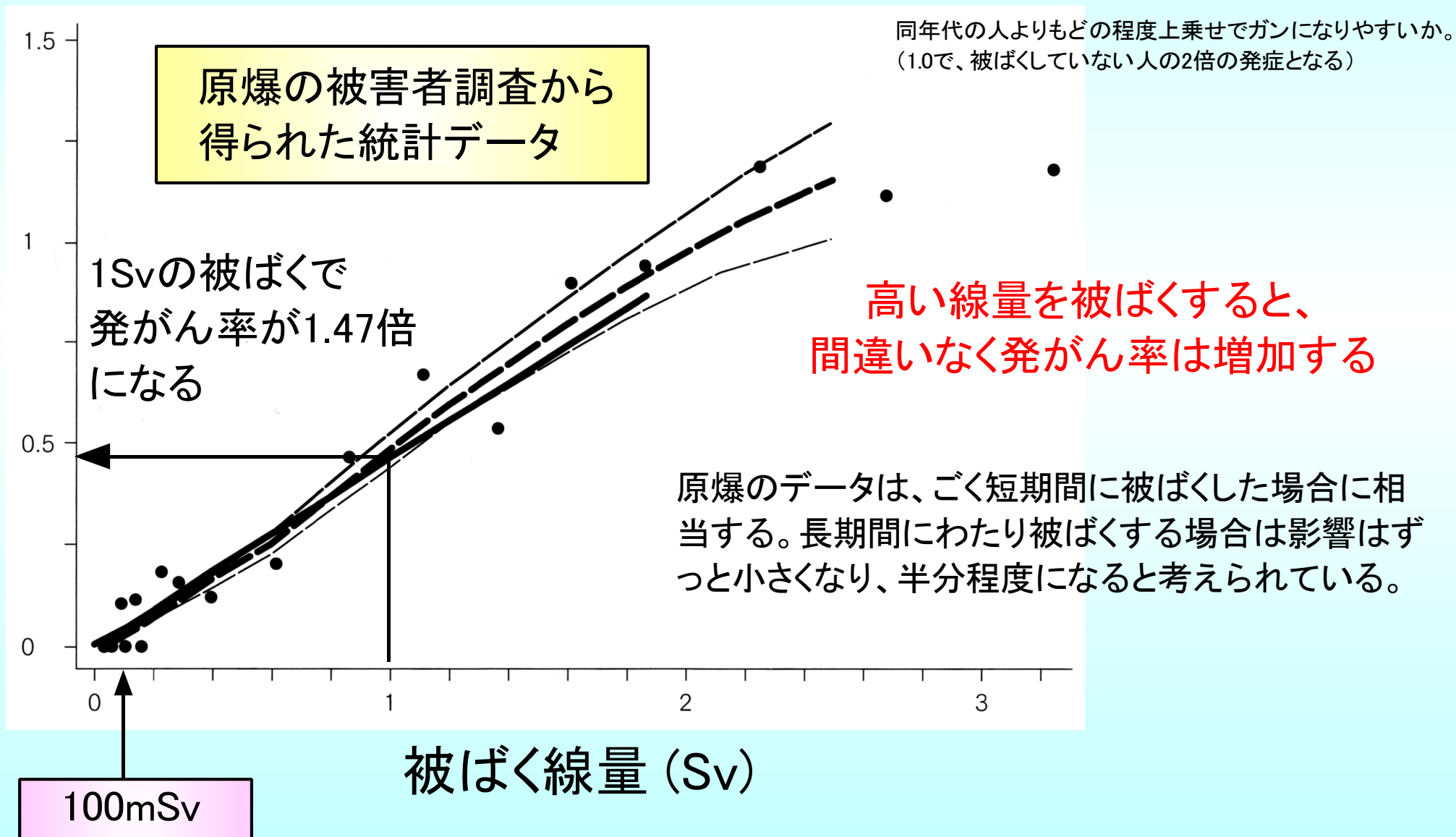
(注2) 一般の人の線量限度1.0 mSv/年、原子力発電所周辺の線量目標0.05 mSv/年

染色体の転座などのミクロな変化は観察されています

発がんへの影響はどのぐらいなの？

30歳の時に被ばくした人が、70歳になったときの過剰相対リスク

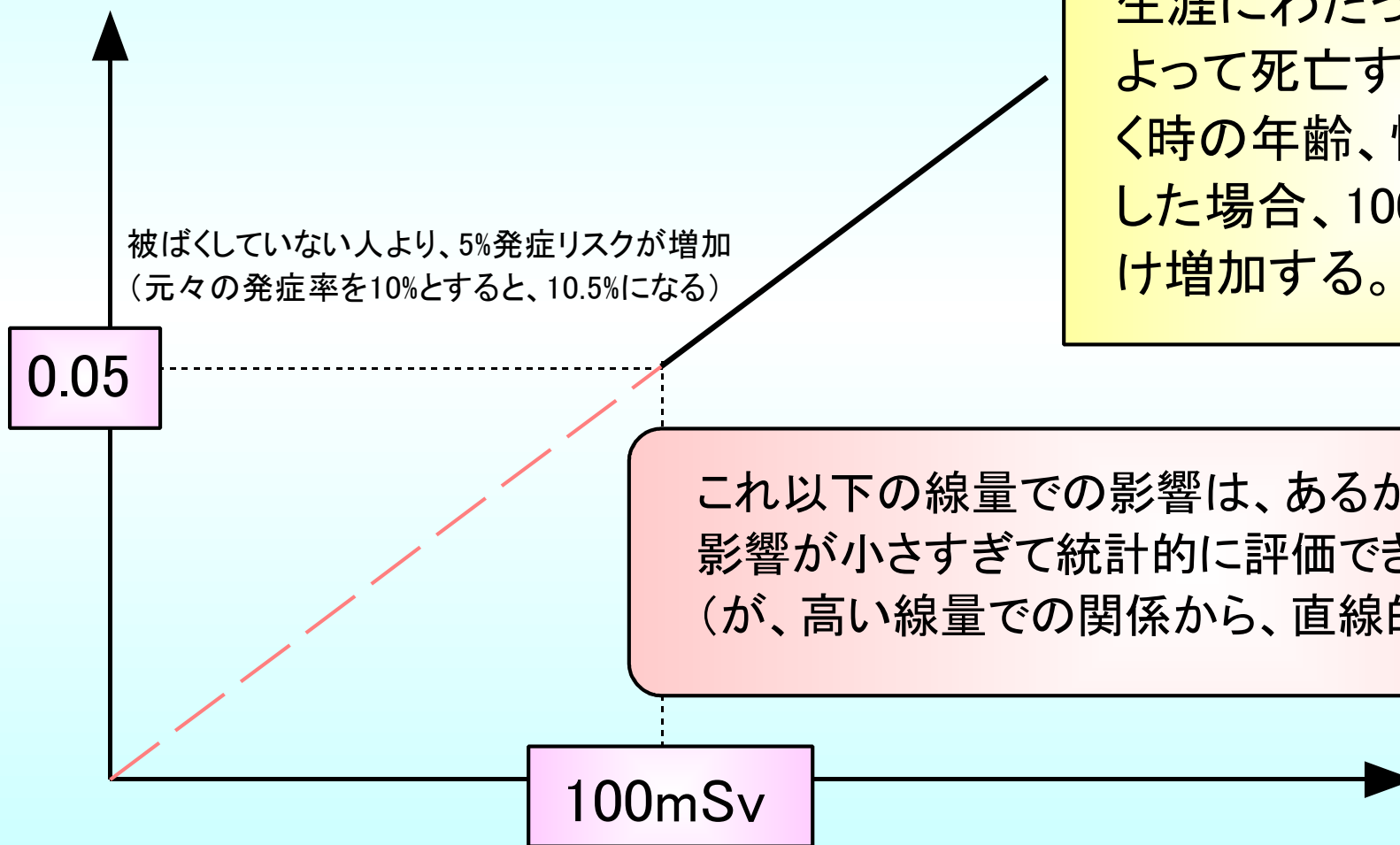
固形ガン発症の過剰相対リスク



低線量放射線の影響はどのぐらいなの？

30歳の時に被ばくした人が、70歳になったときの過剰相対リスク

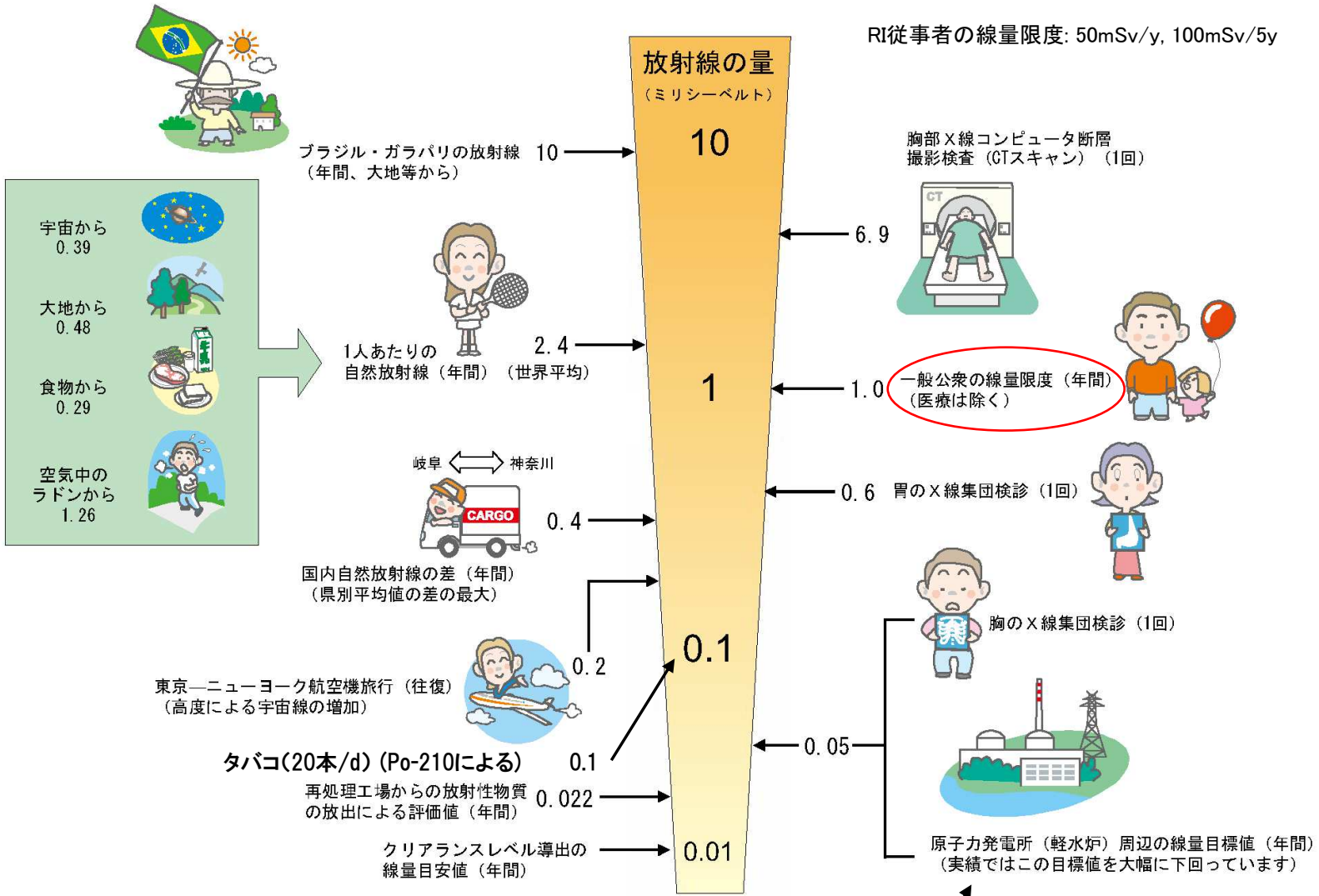
固形ガン発症の過剰相対リスク



生涯にわたってどこかでガンによって死亡するリスクは、被ばく時の年齢、性別などを平均化した場合、100mSvで0.5%だけ増加する。

これ以下の線量での影響は、あるかも知れないが、影響が小さすぎて統計的に評価できない。
(が、高い線量での関係から、直線的だと推定)

日常生活と放射線



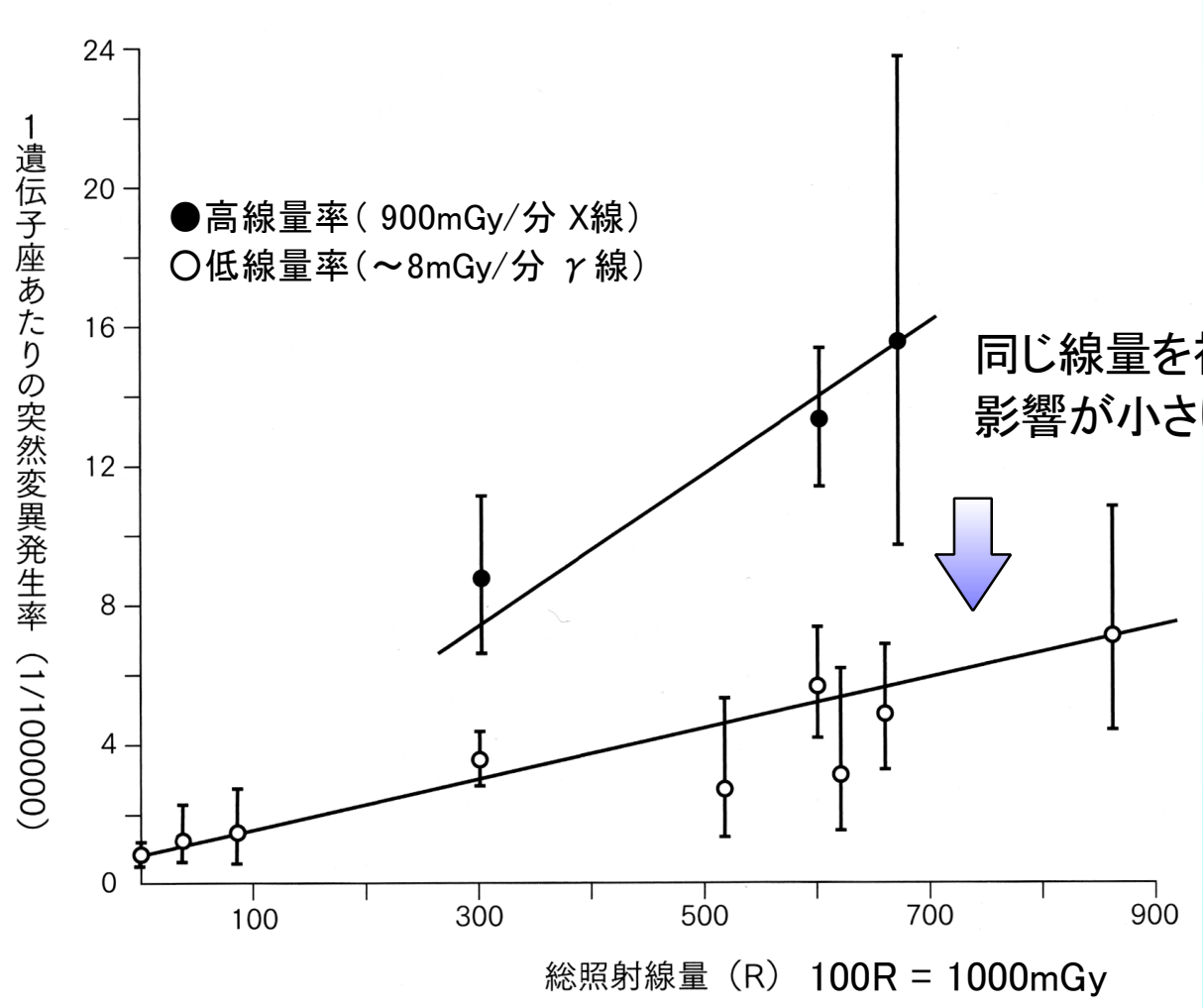
RI従事者の線量限度: 50mSv/y, 100mSv/5y

平常時の値

出典: 資源エネルギー庁「原子力2009」他

長期間の被ばくの方が危険じゃないの？

合計で同じ線量を被ばくするなら、
時間をかけた方が影響は少ない



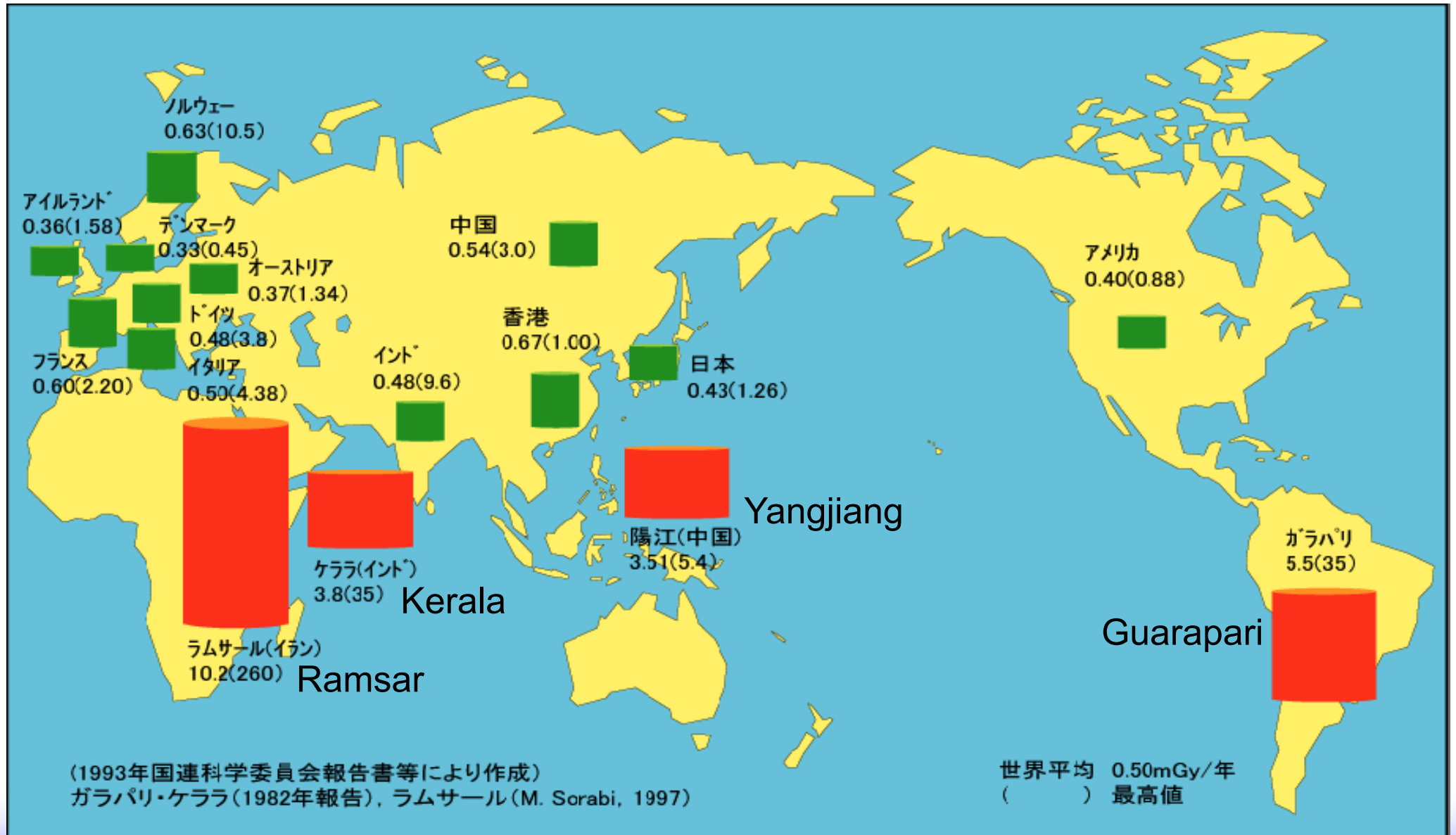
1950年代に行われた、700万匹にも及ぶマウスを用いた、「メガマウスプロジェクト」からのデータ。

同じ線量を被ばくしても、
影響が小さい

細胞にはDNAを修復する力があるが、一気に被ばくすると修復が間に合わない。

放射線必須データ32、創元社、p.20。(メガマウスプロジェクトの論文より引用)

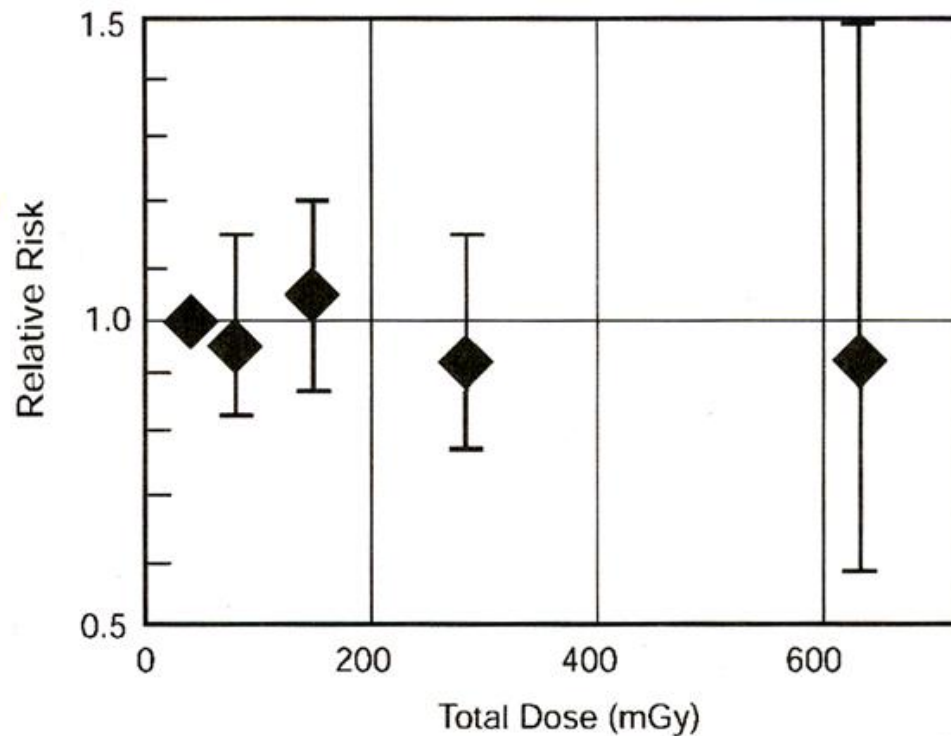
世界の自然放射線



高自然放射線地域でのがん罹患率

インドケララ州高自然放射線地域

全がん(白血病を除く)の相対リスク



推定累積線量

地域住民の発がんリスクは
高くない

トリウムを含む黒い砂浜で暮らす漁民

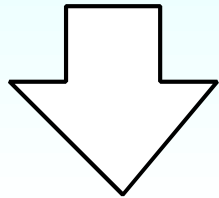


(「世界の大地放射線」放射線照射利用促進協議会)

(Nair, R. R. K. et al., *Health Phys.*, 96, 55-66, 2009)

内部被ばくはずっと体内で放射線を出すから危ないんじゃないの？

内部被ばくによる影響



- ・どんな放射線の種類か (α 、 β 、 γ)
- ・どのぐらいのエネルギーか
- ・物理的な半減期
- ・排出されやすさ (生物学的半減期)
- ・どんな臓器に蓄積されやすいか
- ・蓄積される臓器の感受性

50年間にわたる影響を積算して、
摂取した時点でいっぺんに被ばく
した物として管理する (預託線量)

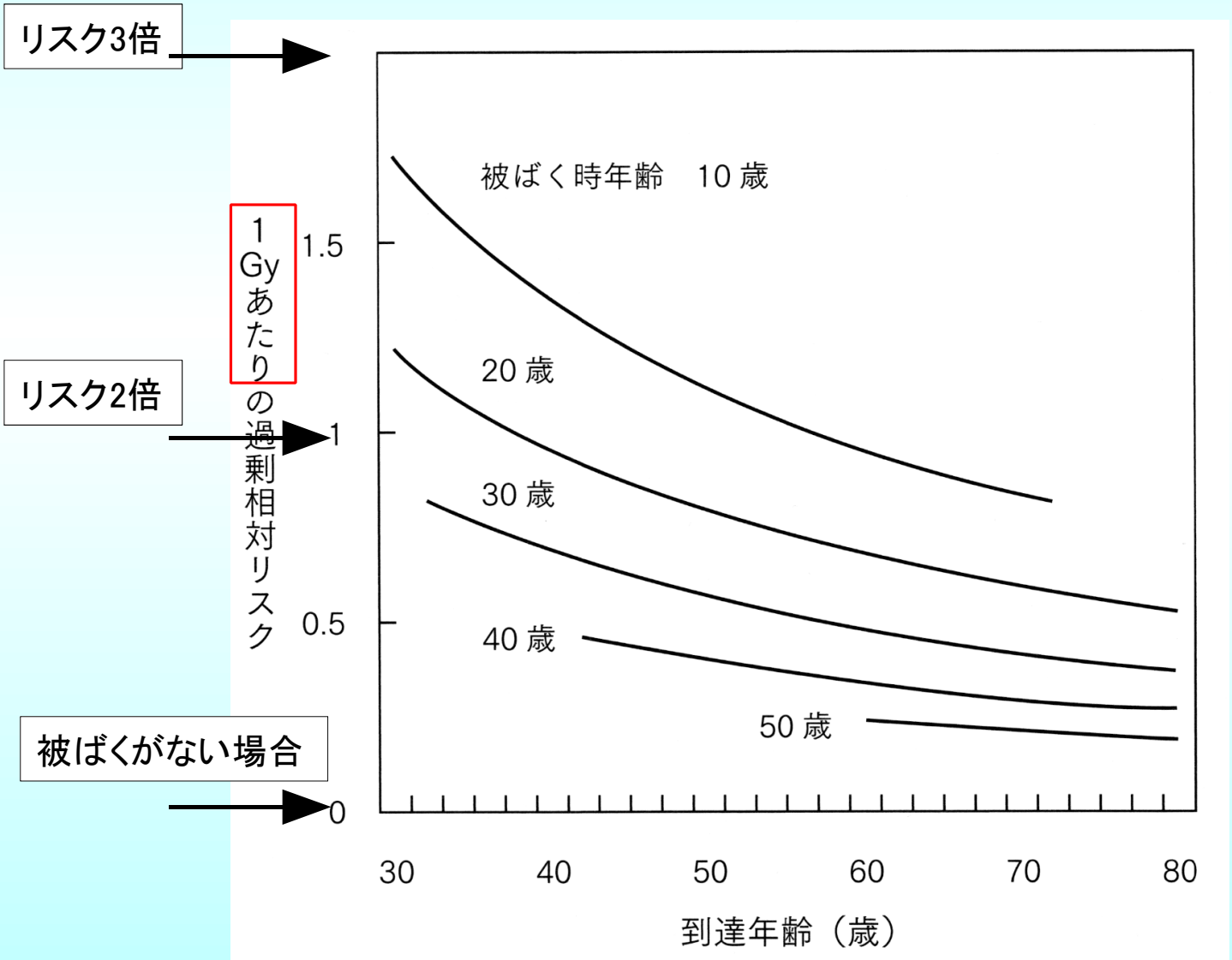
実際には、少しずつ長い期間に被ばくするのと、同じ量をいっぺんに被ばくするのでは、損傷修復のメカニズムがあるため、ゆっくり被ばくした方が影響は小さい。

様々な放射性核種 (Sr-90, Cs-137, Pu-239 など) に対して、1Bq 摂取すると何mSv内部被ばくするかという、実効線量係数が求められている。(Cs-137 では 1.3×10^{-5} mSv/Bq)

精米された状態で1kg あたりCs-137 を100Bq 含む米を、一食あたり1合 (精米で150g、炊きあがりでは330g) 食べるものとし、一日三食、365日毎日食べたとして1年間でどの程度内部被ばくするでしょうか? → 答えは 0.21mSv

子供は被ばくの影響が大きいんじゃないの？

原爆被爆者の被ばく時年齢による
全固形ガンによる死亡リスクの比較 *白血病は除外

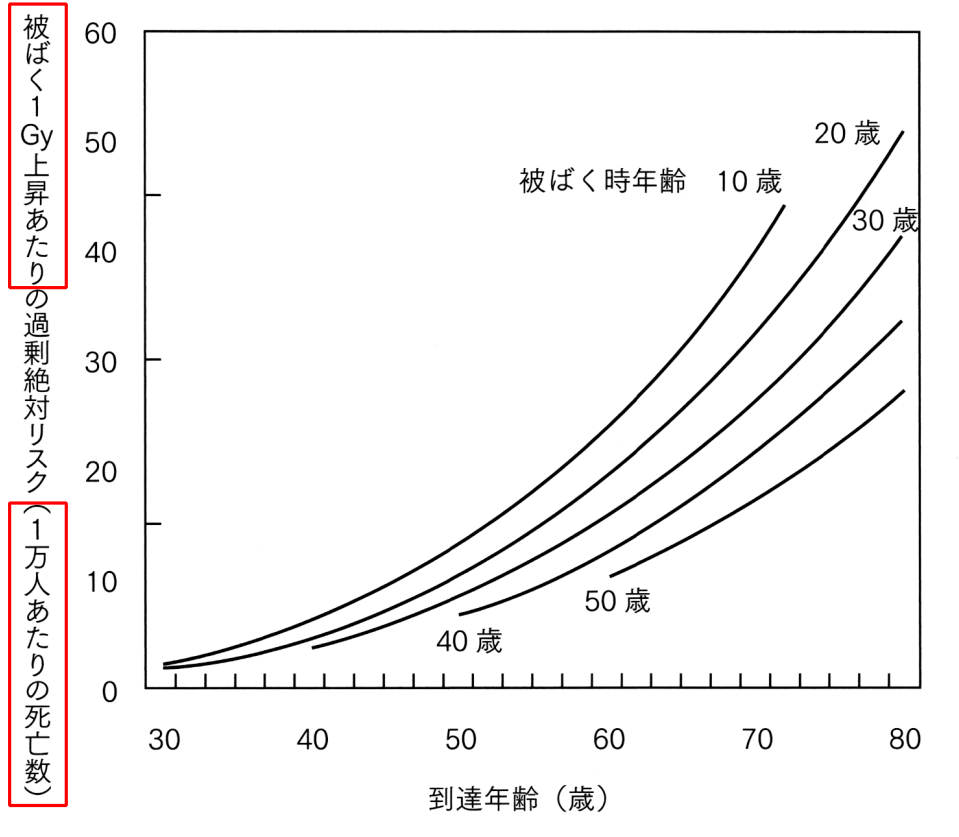


1000mGy 被ばくした場合のガンによる過剰相対死亡リスクを、被ばく時の年齢、およびその後生存していった場合の各年齢で整理したグラフ。

被ばく時に若いほどその後の影響は大きく、また若い時点ほど相対的なリスクは大きい。
ただし、被ばくがない場合のそもそものリスクは年齢が上がるほど大きくなるため、絶対的なリスクは高齢者ほど上昇している。

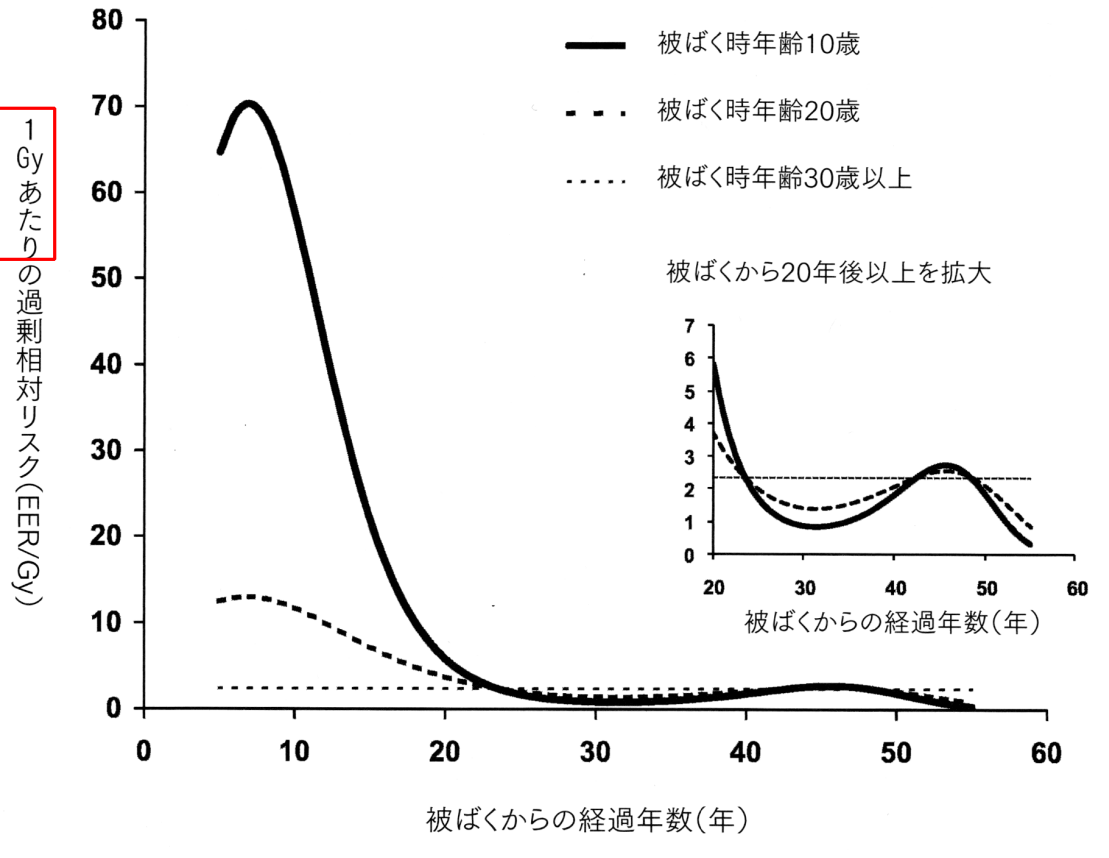
子供は被ばくの影響が大きいんじゃないの？

原爆被爆者の被ばく時年齢による
全固形ガンによる過剰死亡絶対リスクの比較



絶対的な死亡者数は、高齢になってからの方が多い。
ただし、被ばく年齢が低いほどその後も継続的に高い。

白血病の死亡過剰相対リスク



子供が被ばくした場合の白血病による死亡相対リスクは非常に高い。
ただし、そもそも白血病による死亡者は固形ガンの1/40以下で、
20歳程度までの若年時の死亡率は非常に低い(10万人中1人程度)。