

放射線化学バイオ応用理工学特論

放射線と物質の相互作用 (2)

秋吉 優史

様々な放射線の単位

フルエンス fluence, $/\text{m}^2$, J/m^2 など

単位面積を通過する放射線の本数や、エネルギー。

ビーム状に一方向から来る場合だけでなく、ランダムな方向から飛来する場合にも定義され、その場合はベクトル量ではなくスカラー量として加算する。

単位時間あたりのフルエンスをフルエンス率もしくはフラックス (flux) と呼び、 $/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ や $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ などの単位となる。

空間を放射線がどの程度飛び交っているのかを定義した単位であり、実際には別の物理量を測定する必要がある。

加速器では照射したイオンや電子の粒子数を電荷量から求めるため、照射面積に対する電流 (A) として測定する。

様々な放射線の単位

照射線量 exposure, C/kg (旧単位 R)

X線、 γ 線などの高エネルギーの光子によって空気1kgに吸収されたエネルギーによって発生した電荷量。

光子が空気中の原子を電離することによって発生する電荷の量を電離箱で測定することで求められ、空間線量の評価に用いられる。なお、光子のエネルギーが3MeVを超えると、発生した光電子が対象とした領域から出ていく量が無視できなくなり、「吸収したエネルギー」と「発生した電荷量」の関係が崩れるため補正が必要になる。

R(レントゲン)は旧単位で、 $1R=2.58 \times 10^{-4}C/kg$ である。

加速器などで照射を行った照射量を、照射線量と呼ばない様に注意が必要。

様々な放射線の単位

カーマ kerma, Gy

kinetic energy of charged particles released in material の略で、入射光子(もしくは中性子などの非荷電粒子)のエネルギーのうち、単位質量の物質中で光電子などの荷電粒子の運動エネルギーとして吸収された量で、吸収線量の一つ。単位は $\text{J/kg} = \text{Gy}$ 。

吸収される物質によって空気カーマ、組織カーマなど呼称が異なる。また、発生した電子線からの放射損失を差し引いた衝突損失だけを考慮する場合、衝突カーマと呼ぶが、 1MeV 以下の光子では放射損失はほぼ無視できる。

$1\text{C/kg} = 33.97 \text{ Gy}$ (空気カーマ)の関係がある。

荷電粒子の場合に、衝突損失エネルギーを表わす量をシーマ(cema: converted energy per unit mass)と呼ぶ。

吸収線量をよく考えてみる

$$\text{吸収線量 (Gy)} = \frac{\text{吸収された放射線のエネルギー量 (J)}}{\text{物質の質量 (kg)}}$$

分子

荷電粒子の場合はそのまま、光子の場合はエネルギーが光電子(荷電粒子)となりその運動エネルギーが吸収される。高エネルギーでは再び輻射により系から出て行く寄与がある。吸収する物質が空気なのか、水なのか、鉛なのかで異なり、また入射する光子のエネルギーによって異なる。

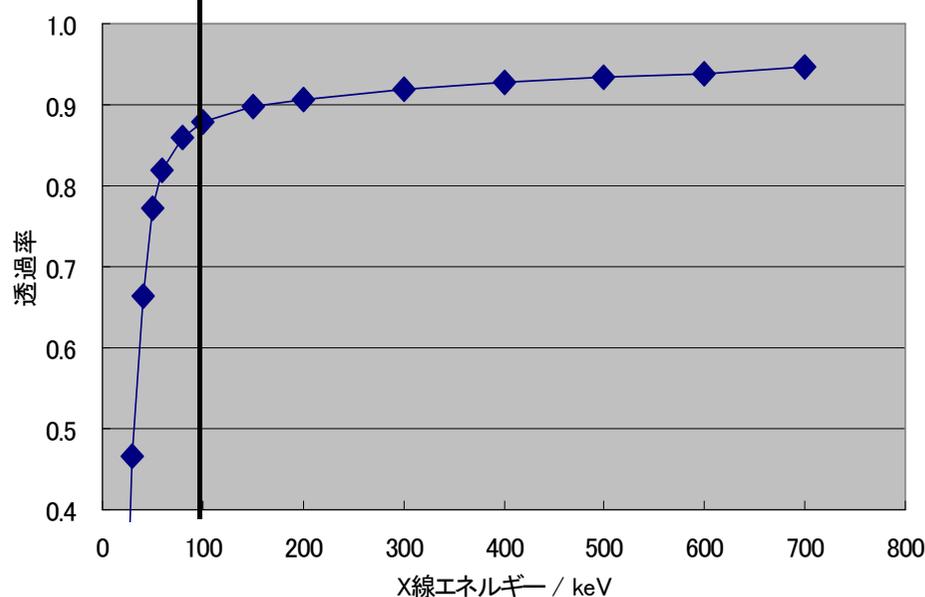
分母

高エネルギーの光子では物質に均等にエネルギーを与えるが、荷電粒子や低エネルギーの光子では不均一なエネルギー付与をする。このとき、「対象物」をどの範囲で取るかによって吸収線量は異なる。等価線量を考える場合は、「臓器全体」で考える。

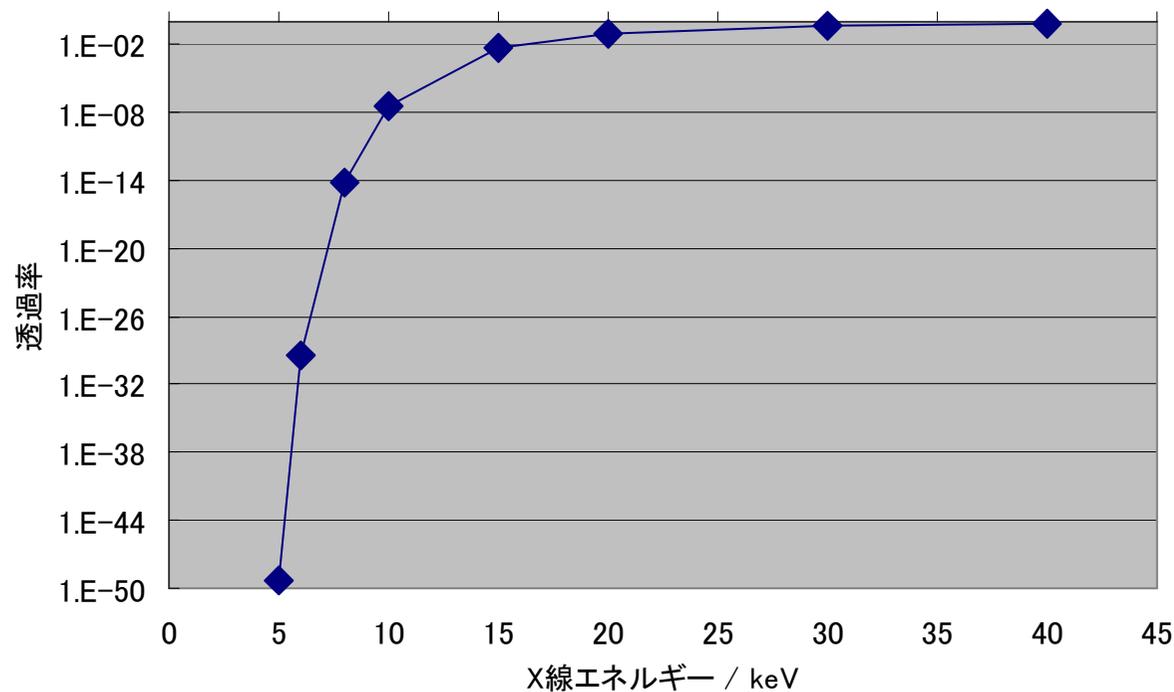
わずかな印加電圧低下での大きな線量の変化

20keV 前後のX線は僅かなエネルギー変動により、クルックス管自体を構成するガラス管の透過率が何桁も変わる。

100keV 以上のエネルギーでは
余り大きく変わらない



30keV と 15keV で約100倍違う。

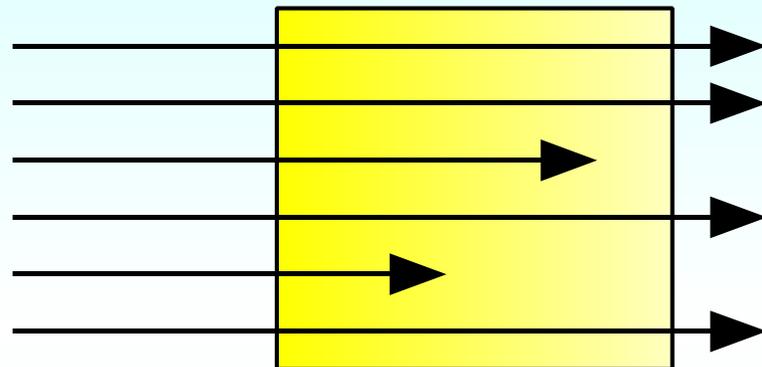


3mmのガラスに対するX線の透過率

エネルギー吸収の違い

強透過性放射線

$$H_p(0.07) \leq 10 H_p(10)$$



整列拡張場

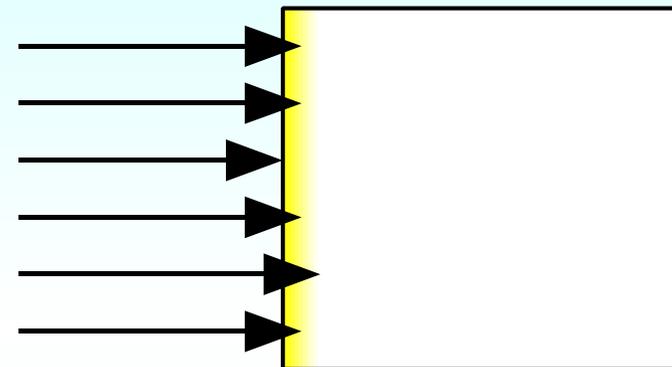
高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

人体の場合、荷電粒子平衡を考慮して深さ1cmでの点での吸収線量(1cm線量当量)が全体を代表する。対象の厚さが大きいと、指数関数的に徐々に線量は下がっていく。

クルックス管からの20keVの低エネルギー엑스線の場合、 $H_p(0.07) = 2 H_p(10)$ 程度であり、弱透過性と言うほどではないが、1cmの深さでの吸収線量は体全体を代表せず、減衰を考慮する必要がある。

弱透過性放射線

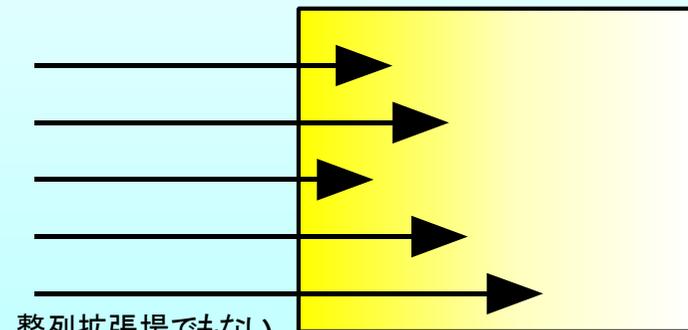
$$H_p(0.07) > 10 H_p(10)$$



整列拡張場

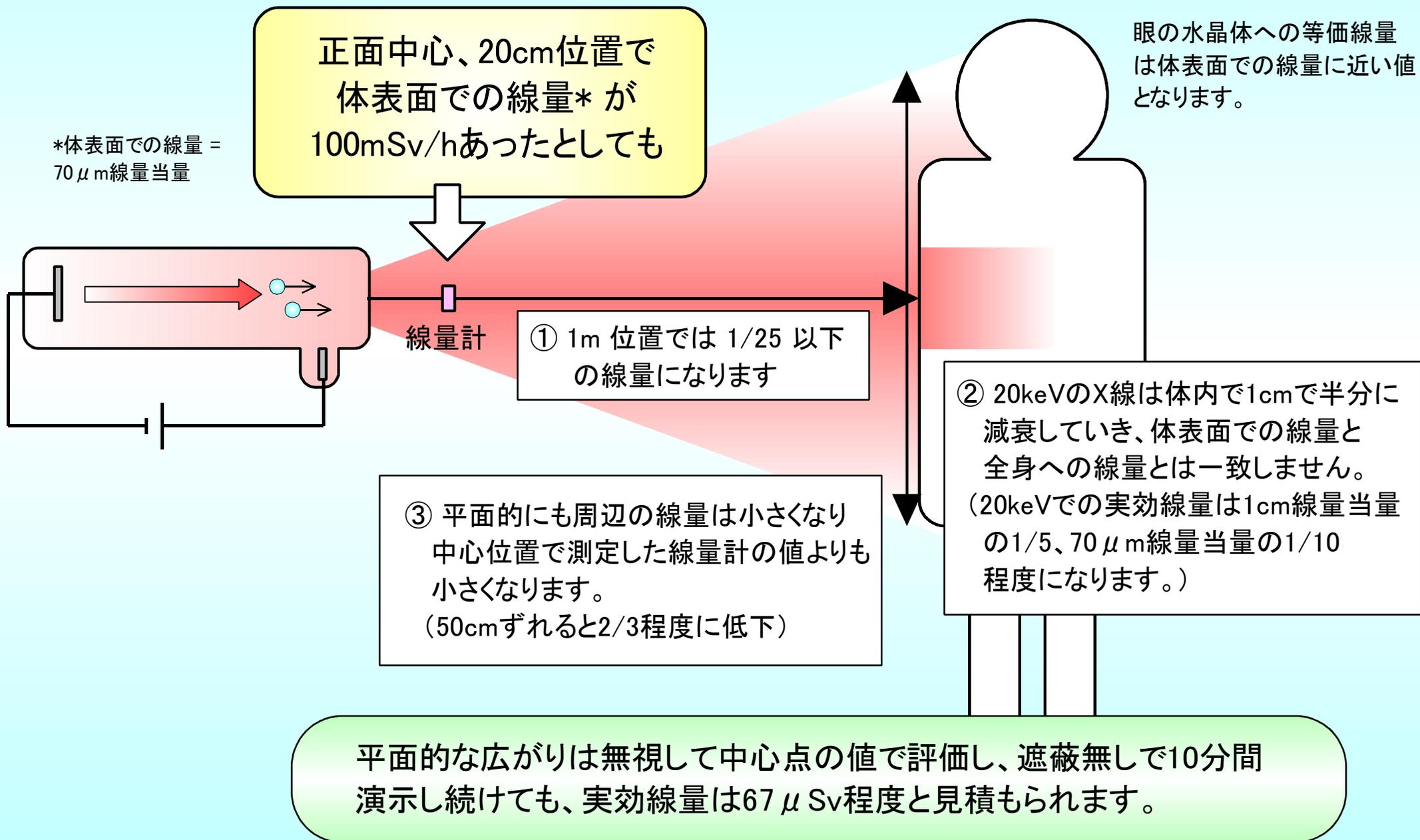
α 線、 β 線などの場合透過力が低く、表面近傍にのみ局所的にエネルギーを与える。

人体の場合、深さ70 μ mでの点での吸収線量(70 μ m線量当量)が皮膚の等価線量を代表する。



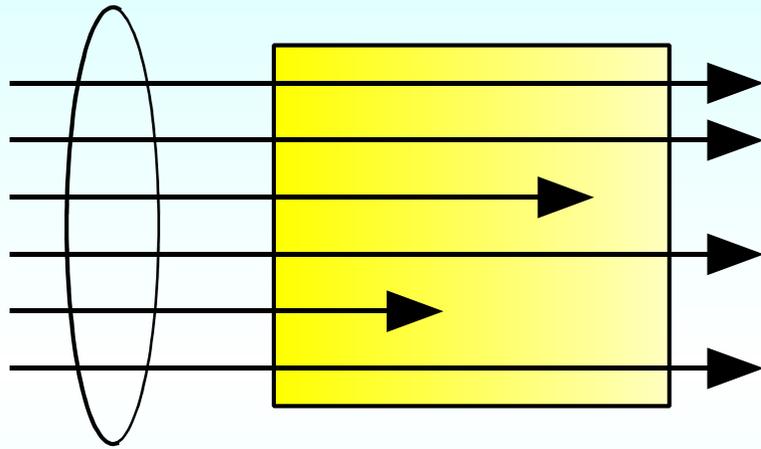
整列拡張場でもない

クルックス管からのX線測定値からの実効線量の評価



「照射量」の意味の違い

強透過性放射線

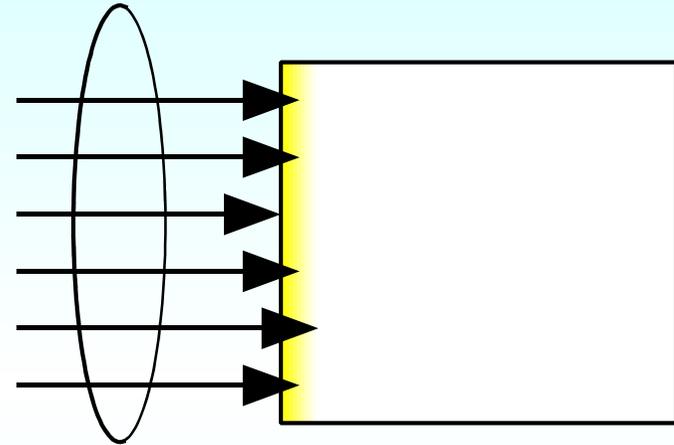


高エネルギーガンマ線などの場合透過力が高く、ほぼ均等にエネルギーを与える。

ほとんどの光子は素通りしていくため、単位面積あたりの入射エネルギー量(エネルギーフルエンス)を求める事は困難で、単位質量あたりに吸収されるエネルギー($J/kg = Gy$)を、物質の側から見た「照射量」として取扱う。

正確には、「吸収線量」。

紫外線



表面ごく近傍(殺菌灯からの UV-C を皮膚に照射して数十 μm 程度のオーダー)で全てのエネルギーが吸収される。

照射する対象によって、また波長(エネルギー)によって大きく透過力が異なり、局所的な微小体積への吸収エネルギーを求める事は困難で、単位面積へのエネルギーフルエンスとしての、 mJ/cm^2 などの量が光源の側から見た「照射量」として用いられる。正確には、「照度(mW/cm^2)・積算光量(mJ/cm^2)」。

被ばく管理に用いられる量(防護量)

等価線量 equivalent dose (Sv)

組織毎の影響評価

放射線加重係数 × 吸収線量(Gy) (組織、臓器で平均)

放射線加重係数: (≠生物学的効果比 RBE、線質係数→空間のある一点)

X線、 γ 線、電子線→1

中性子 → 5~20(エネルギーにより異なる)

α 線、重イオン → 20

実効線量 effective dose (Sv)

全身への影響評価

\sum 組織加重係数 × 等価線量(Sv)

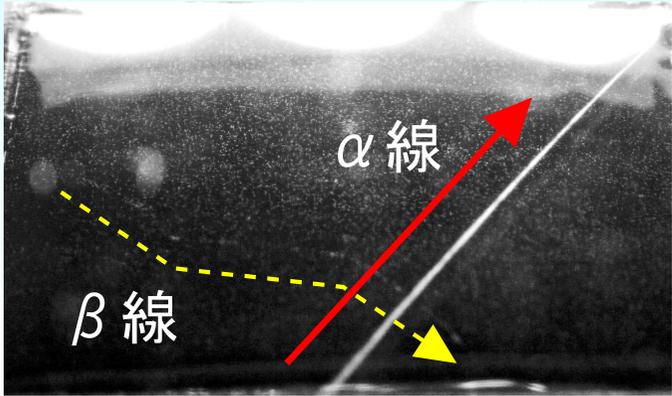
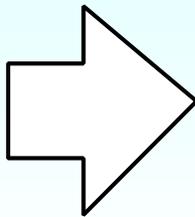
組織ごとの等価線量を
重み付けをして全身で
足し合わせる。

組織加重係数:各組織単体での被ばくの影響を相対評価。
全身の組織を足し併せると1になる。

放射線の種類によって影響が違います

同じエネルギーの放射線を吸収した場合でも、**アルファ線**と、**ベータ線**、**ガンマ線**とでは、**20倍**も影響の大きさが違います。

相互作用の違いを反映



*体重60kgの日本人

体内の放射能

1年間に被ばくする実効線量

カリウム
K-40: 4,000Bq

0.17 ミリシーベルト

β・γ線のみ

ポロニウム
Po-210: 20Bq

0.80 ミリシーベルト

α線を放出

100ベクレル を肺に吸入したときの被ばく線量	
プルトニウム-239	3.2 ミリシーベルト
セシウム-137	1万分の 6.7 ミリシーベルト
トリチウム(H-3)	百万分の 4.1 ミリシーベルト

**同じベクレルの放射能でも
体に与える影響は全く異なります!**

プルトニウム-239: 5.1MeV の α線、半減期 2.4万年、肺や肝臓などに沈着
セシウム-137: 0.51MeV の β線と 662keVの γ線、半減期 30年、カリウムなどとともに体外に排出
トリチウム(H-3): 18.6keV の β線、半減期 12.3年、水と共に体外に排出

この場合は実効線量を表わす

グレイとシーベルトの関係

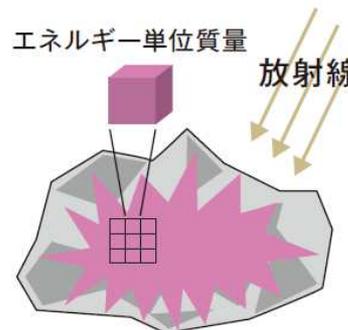
$$\text{シーベルトの値} = \text{グレイの値} \times \text{放射線加重係数}^{\ast 1} \times \text{組織加重係数}^{\ast 2}$$

シーベルトにも色々あることに注意!



シーベルト (Sv)

放射線が人に対して、がんや遺伝性影響のリスクをどれくらい与えるのかを評価するための単位
(1シーベルト=1000ミリシーベルト)



グレイ (Gy)

放射線が物や人に当たったときに、どれくらいのエネルギーを与えたのかを表す単位
1グレイは1キログラムあたり1ジュールのエネルギー吸収があったときの線量

◆放射線加重係数

放射線の種類	放射線加重係数
光子 (ガンマ線、エックス線)	1
電子 (ベータ線)	1
陽子	2
アルファ粒子、核分裂片、重い原子核	20
中性子線	2.5 ~ 20 (エネルギーの連続関数で設定)

※1 放射線の種類による影響の違いを表す

※2 臓器等の組織別の影響の受けやすさを表す

◆組織加重係数

組織・臓器	組織加重係数	組織・臓器	組織加重係数
乳房	0.12	食道	0.04
赤色骨髄	0.12	甲状腺	0.04
結腸	0.12	唾液腺	0.01
肺	0.12	皮膚	0.01
胃	0.12	骨表面	0.01
生殖腺	0.08	脳	0.01
膀胱	0.04	残りの組織・臓器	0.12
肝臓	0.04		

被ばく管理に用いられる量(実用量)

等価線量や実効線量は実際には

直接測定することが出来ない!

(ある放射線場に人間が居た場合の影響を計算で求めた防護のための量)

線量当量 dose equivalent (Sv)

定義: 拡張整列場(どの点を取っても均質な平行ビームの放射線場)の中に置いたICRU球の表面から1cm, 70 μ mの深さの微小体積に於ける吸収線量

→ 1cm線量当量、70 μ m線量当量

線量当量(Sv) = **線質係数** × 吸収線量(Gy) (空間の一点)

線質係数: 放射線の水中における衝突阻止能 = 線エネルギー付与 LTE の関数

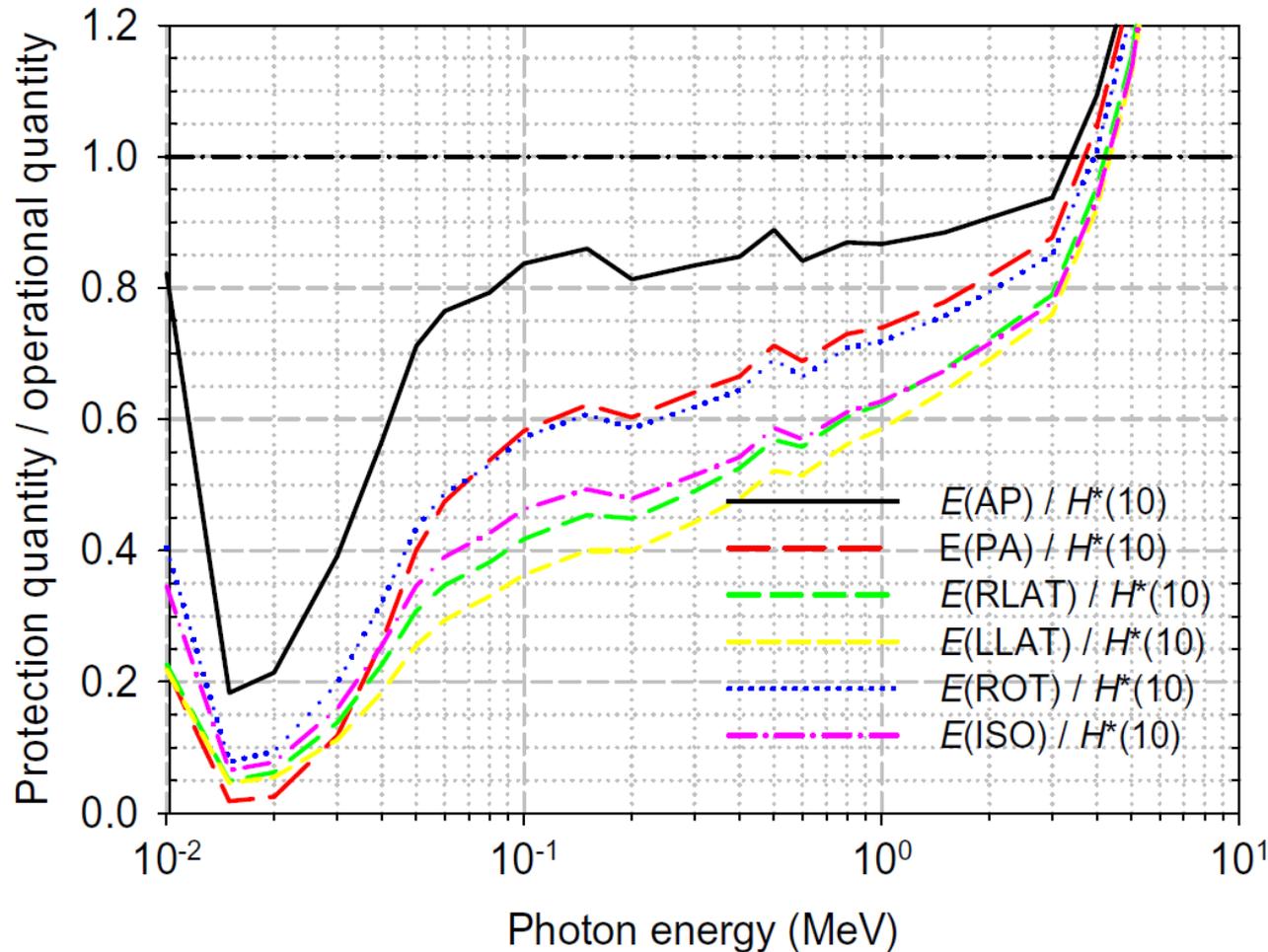
被ばく管理に用いられる量(実用量)

1cm線量当量は全身に対する実効線量を測定によって簡便に求めることが出来るようにした量であり、**1cmの深さでの吸収線量**が、全身どの臓器における吸収線量も**代表するもの**として安全側に評価した量である(吸収による減衰は考慮していない)。Cs-137やCo-60などからの一般的なエネルギーのガンマ線に対しては、良い近似を与える。

70 μ m線量当量は皮膚に対する等価線量を簡便に求めることが出来るようにした量であり、高エネルギーの α 線、 β 線、低エネルギーのX線などの影響を近似できる。近年、水晶体に対する影響を3mm線量当量で評価することに成りつつある。

ガラスバッジなどの個人線量計を人体という散乱体に装着して測定する場合はHp(10), Hp(0.07)などの個人線量当量(Personal dose equivalent)として表わし、周辺に散乱体のない空間の線量をサーベイメーターで測定する場合はH*(10)、H*(0.07)などの周辺線量当量(Ambient dose equivalent)として表わす。さらに弱透過性の放射線に対しては入射方向 Ω が重要であるため方向性線量当量H'(0.07, Ω), H'(3, Ω)として表わす(H'(0.07, 0)はH'(0.07)として表わし、H*(0.07)と同じである)。

防護量と実用量の違い



ICRP Pub116
Fig.5.2

測定に際しては荷電粒子平衡は取られていない。平衡を取ってやれば高エネルギーでも安全側に評価となる。

AP, PA 等は放射線の入射方向に対する人体の向きを表わし、APは正面、PAは背面、RLAT・LLATは右・左側面、ROTは立位で水平回転、ISOは等方からの入射を表わしている。

実効線量 $E / 1\text{cm}$ 線量当量 $H^*(10)$ のエネルギーによる変化。1cm線量当量は20keVでは5倍程度の過大評価となる。100keV-3MeV程度までは変化は小さく、常に若干の過大評価となっている(安全側に評価)。

被ばく管理に用いられる量(外部被ばく)

実効線量率定数 Γ effective dose rate constant,
 $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$

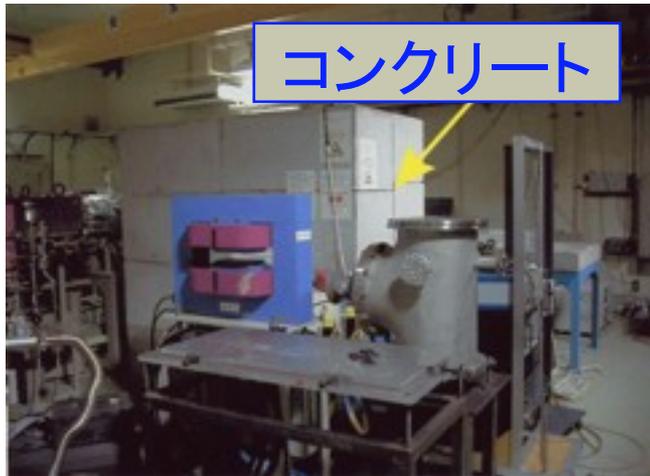
γ 線源 実効線量率定数 Γ ($\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	^{241}Am	^{137}Cs	^{192}Ir	^{226}Ra	^{60}Co
	0.00576	0.0779	0.117	0.217 娘核種を含む	0.305

実効線量率定数が Γ である核種の放射能を Q (MBq)としたとき、距離 r (m) における実効線量率 E ($\mu\text{Sv}/\text{h}$) を以下の様に求められる。

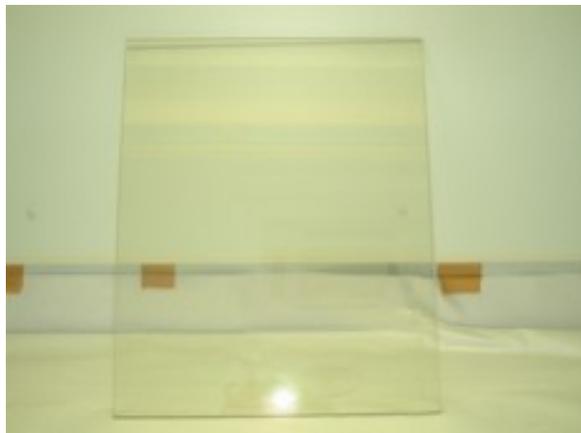
$$\dot{E} = \Gamma \times Q / r^2$$

Γ は、線源が放出する γ 線のエネルギー、本数、放出確率を加味している。
 γ 線のエネルギーと線束が求めれば実効線量率は一義的に求められる。
Bq とは、一秒間の壊変数であり放射線の放出回数ではないことに注意。

RI取扱時の遮蔽



鉛ブロック



鉛ガラス

RIと作業者の間に適切な遮蔽を行い、被曝線量を可能な限り低減する。

→ 作業時間が多少長くかかっても、遮蔽による低減を行った方が有効な場合が多い

→ 事前に作業内容を良く確認して適切な遮蔽体の配置を検討する

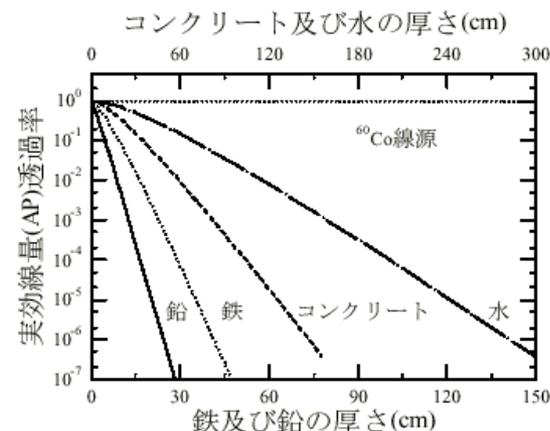
しゃへい計算

○ γ 線・X線 → それぞれの核種に対して実効線量率定数が与えられている。これで求めた実効線量率に、実効線量透過率(effective dose transmission)をかけて求めるが、実効線量透過率は放射線のエネルギー、しゃへい体の原子番号、しゃへい体の厚さによって異なるため、主要な核種ごとに鉛、鉄、コンクリート、水の厚さに対する実効線量透過率のグラフが与えられている。

光電効果などの光子と物質の相互作用はエネルギー、 Z で大きく変化する!

○ α 線 → 考慮する必要なし

○ β 線 → アクリル容器で囲んだ場合に発生する制動放射X線に対する実効線量率定数が与えられており、さらに代表的な β 核種に対してしゃへい体ごとの透過率が数表で与えられている(遮蔽計算実務マニュアルなど)。



γ線・X線の減衰

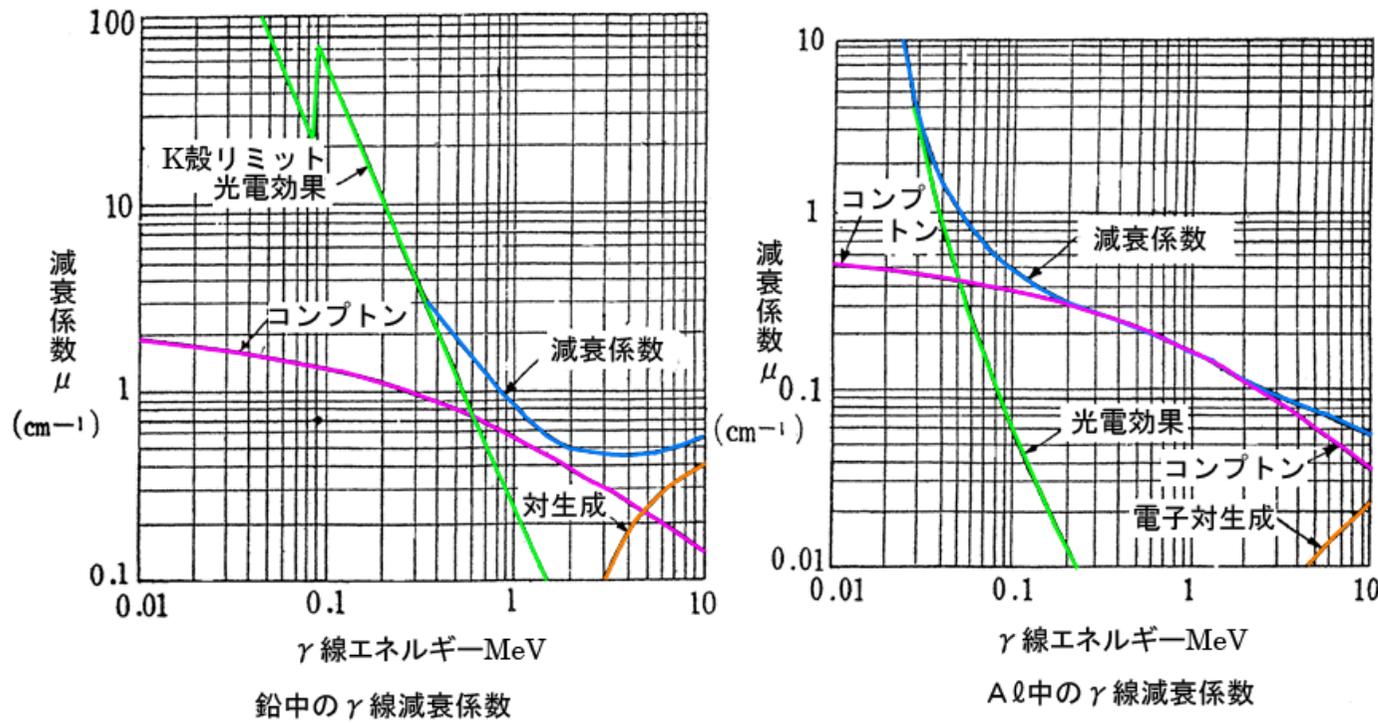


図3 γ線のコンプトン効果

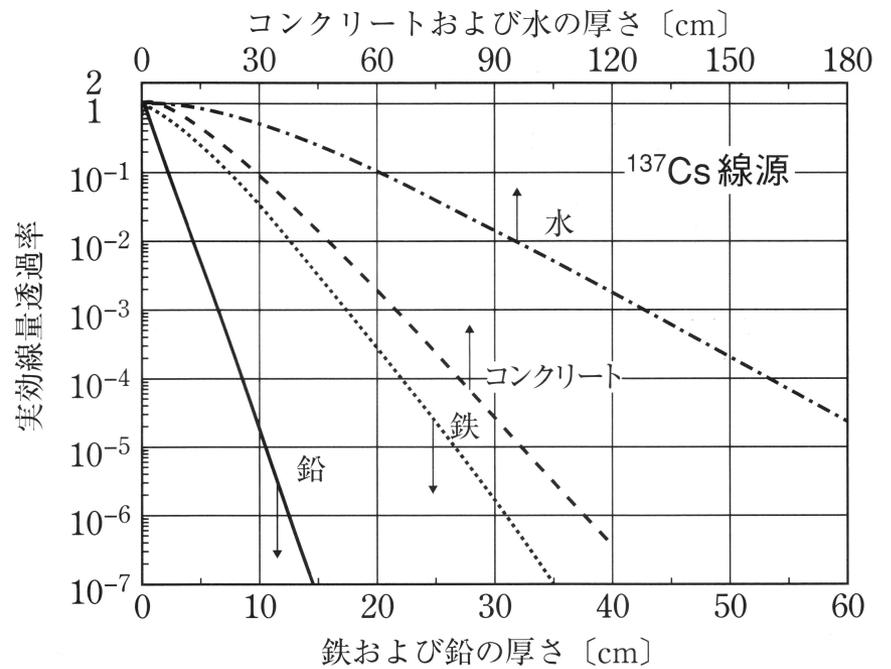
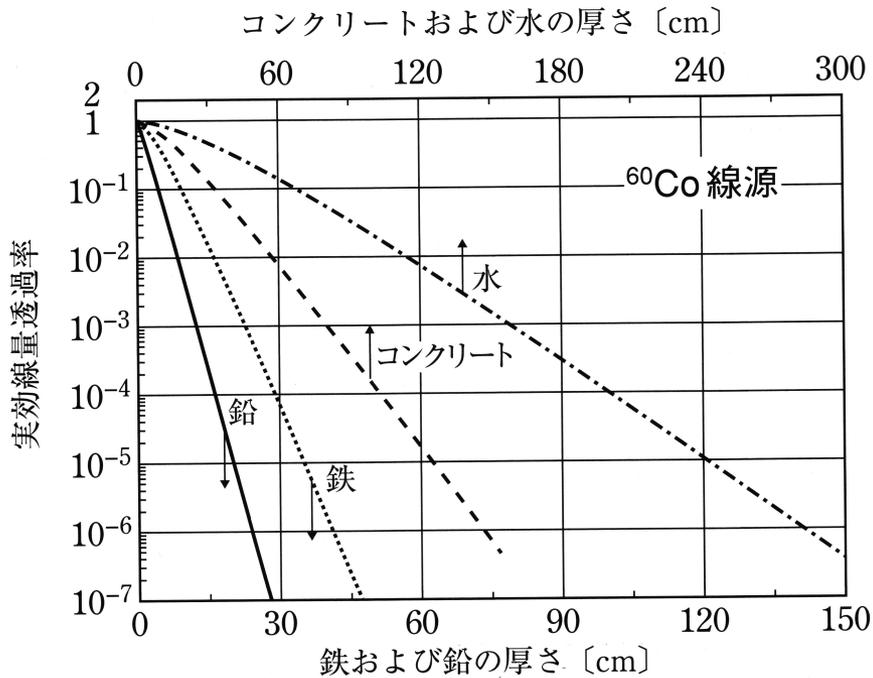
[出典] 三浦 功、菅 浩一、俣野恒夫:「放射線計測学」、裳華房、p.21

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。

代表的な線源の透過率



例題(外部被ばく量の計算)

Q1: 74MBq のCs-137 密封線源を 50cm の距離で2時間、遮蔽無しで取り扱った場合の被ばく線量を評価せよ。また、被ばく線量を1/10に減らすために必要なしゃへい体の厚さと、1cm²あたりの重さを鉛、鉄、コンクリートでそれぞれ求めよ。

(しゃへい体の密度: 鉛 11.4g/cm³, 鉄 7.9g/cm³, コンクリート 2.3g/cm³ で計算せよ)

Q2: 1.6PBq の Co-60 密封線源を3mのプールに沈めて使用する場合、水面での実効線量率を求めよ。

Q3: 鉛でしゃへいを行う場合に、80keV のX線よりも100keV のX線の方が透過率が小さかった。これは何故か。

被ばく管理に用いられる量(内部被ばく)

預託線量 committed dose, Sv

体内に取込んだ放射性物質により内部被曝する場合、取込んでから50年間(子供に対しては70年間)先まで被ばくする線量を時間積分して、取込んだ時点にいっぺんに被ばくしたとして被ばく管理を行う。線量として等価線量を用いると預託等価線量、実効線量を用いると預託実効線量である。

ここで被ばくする線量は、物理的な壊変や生物学的な排泄などにより時間と共に減少していき、簡単に求めることが出来ない。放射する線質、壊変速度や化学的性質から、核種ごとに実効線量係数(Sv/Bq)が求められており、取込んだ放射能から預託実効線量を求めることが出来る。経口及び吸入摂取についてそれぞれ定められている。

被ばく管理に用いられる量(内部被ばく)

ベクレルからシーベルトへの変換

実効線量率定数 effective dose rate constant

外部
被ばく

- ・放出される放射線の種類と、エネルギー
- ・放出確率

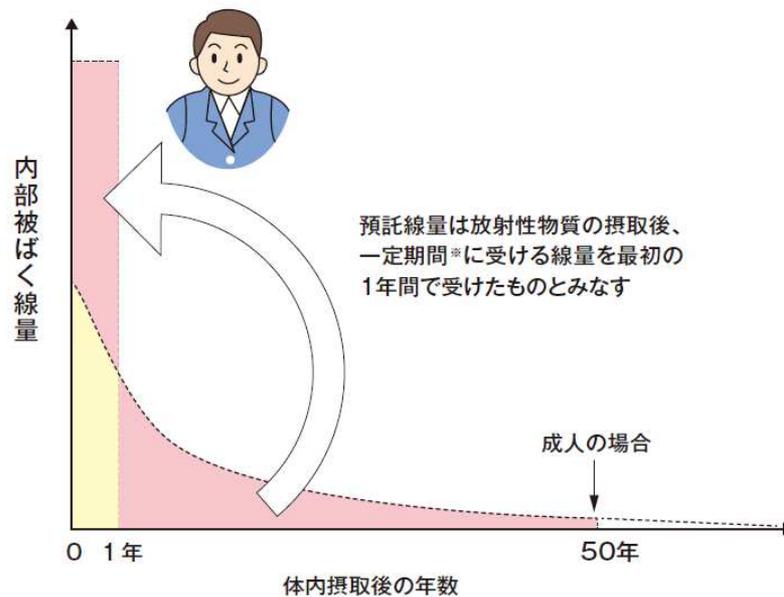
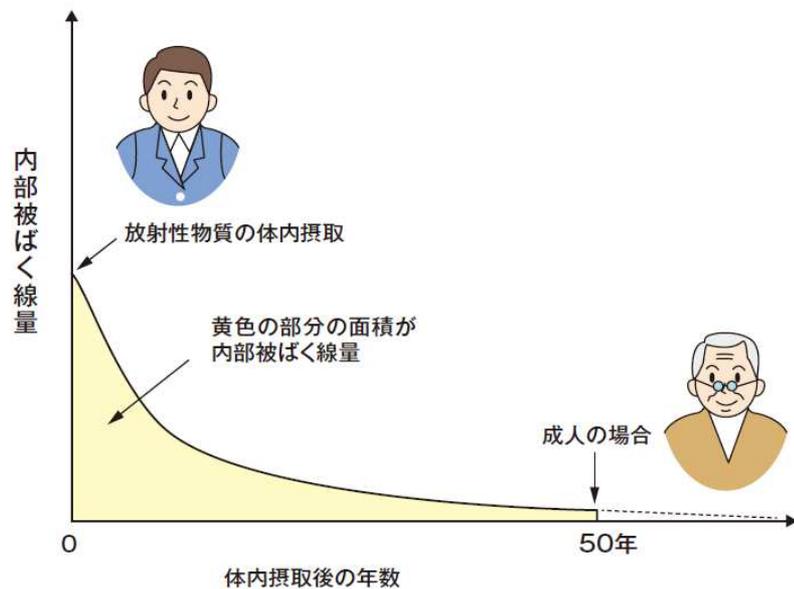
実効線量係数 effective dose coefficient

内部
被ばく

上記二つに加えて、

- ・物理的半減期
- ・生物的半減期
- ・特異臓器集積と組織加重係数

内部被ばくの評価（預託線量の概念図）



※成人:50年間、子供:取り込み時から70歳まで

内部被ばく線量（預託線量）への換算方法

預託線量
(mSv)

=

飲食物摂取量
(kg/日)

×

摂取日数
(日)

×

実効線量係数
(mSv/Bq)

×

放射性核種の濃度
(Bq/kg)

放射性核種	半減期	1Bqを経口または吸入摂取した場合の成人の実効線量係数 (mSv/Bq)	
		経口摂取した場合	吸入摂取した場合
プルトニウム239	2.4万年	2.5×10^{-4}	1.2×10^{-1}
セシウム137	30年	1.3×10^{-5}	3.9×10^{-5}
ヨウ素131	8日	2.2×10^{-5}	7.4×10^{-6}
ストロンチウム90	28.8年	2.8×10^{-5}	1.6×10^{-4}
トリチウム	12.3年	4.2×10^{-11}	2.6×10^{-10}

(注) 市場希釈係数（評価対象者の当該食品摂取量に対する汚染された食品の摂取割合）および調理等による減少補正については1としている
化学形等により複数の値が示されている核種については最も大きい実効線量係数を示す

例題(内部被曝量の評価)

・精米された状態で1kg あたり Cs-137 を 100Bq 含む米を毎日食べた場合、1年間でどれだけ内部被ばくすることになるか計算せよ。

ただし、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計算せよ。Cs-137 の経口での実効線量係数は 1.3×10^{-5} mSv/Bq である。

水中での反応(直接作用と間接作用)

・生体に放射線を当てた場合、そのほとんどは水によって吸収される。吸収された放射線のエネルギーは、**電離**や**励起**といった形で水分子に与えられ、余分なエネルギーをもらった水分子は、**ラジカルを生成**する。



この生成したラジカルが様々な分子と反応することで、生体細胞にダメージを与える。この効果を**間接作用**と呼び、放射線によるエネルギーが標的分子を直接電離・励起する**直接作用**と区別する。

ほ乳類の細胞の場合、X線照射を受けた場合の直接:間接の割合は1:2程度であると言われている。

G値

・ある溶液が放射線のエネルギーを100eV吸収することによって生成される、注目する化学種の原子もしくは分子の数をG値と呼ぶ。

例えば、中性の水にX線を照射すると、100eVのエネルギー吸収ごとにOHラジカルは2.8個形成されるため、G値は2.8であるといえる。

フリッケ線量計では、 Fe^{2+} が酸化されて Fe^{3+} になる際のG値が15.5であることを利用して、分光光度計で $[\text{Fe}^{3+}]$ を測定することで吸収線量を測定することが出来る。

例題(セリウム線量計)

・セリウム線量計は、Ce(IV) が放射線によって Ce(III) に還元されることを利用して吸収線量を求めることができる。

Ce(IV) を含む水溶液 2.0g に γ 線を照射したところ、Ce(III) が 2.8×10^{-4} g 生成した。溶液に吸収された γ 線の吸収線量を求めよ。

ただし、Ce(III) 生成の G値は 2.5 であり、Ce の原子量は 140、アボガドロ数は 6.0×10^{23} 、 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ である。

間接効果への修飾作用

- ・温度効果: 低温で凍結もしくは水分子が動きにくくなると、放射線による影響が少なくなる
- ・希釈効果: 標的分子の濃度が大きくなっても、生成するラジカルの量は変わらないため、相対的に影響が小さくなる。(直接効果では標的分子の濃度で反応率が変わるため相対的な影響は同じ)
- ・保護効果: SH基を持つアミノ酸などは、酸化還元状態を調節してラジカルを取り除く、スカベンジャーとしての働きをする。これにより放射線防護効果を示す。
- ・酸素効果: 逆に酸素濃度が高いと、ラジカルが長寿命化するなどで、放射線による障害が大きくなる。