

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。

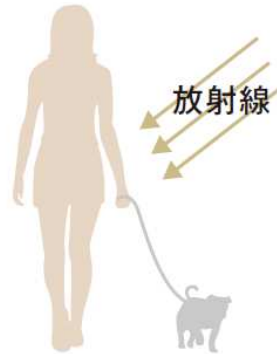
荷電粒子の場合に、衝突損失エネルギーを表わす量をシーマ(cema: converted energy per unit mass)と呼ぶ。

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

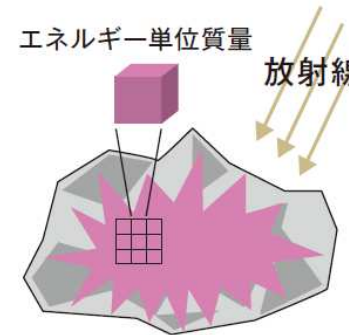
$$\text{シーベルトの値} = \text{グレイの値} \times \text{放射線加重係数}^{\ast 1} \times \text{組織加重係数}^{\ast 2}$$

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)

◆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		

- ※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

被ばく管理に用いられる量(防護量)

等価線量 equivalent dose, Sv

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

組織加重係数 × 等価線量(Sv)

組織加重係数: 全身被ばくの場合を1とし、

各組織単体での被ばくの影響を相対評価

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

周辺線量当量 ambient dose equivalent, Sv

ある放射線場の中に置いたICRU球の深さ 1cm, 70 μ m での
線量当量 → 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(外部被ばく)

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

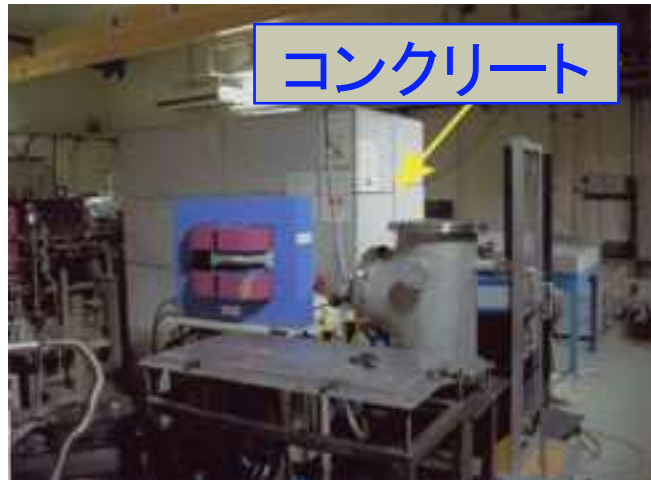
γ 線源 実効線量率定数 Γ ($\mu\text{ Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	^{241}Am	^{137}Cs	^{192}Ir	^{226}Ra	^{60}Co
	0.00576	0.0779	0.117	0.217 娘核種を含む	0.305

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 \dot{E} ($\mu\text{ Sv/h}$) 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ま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

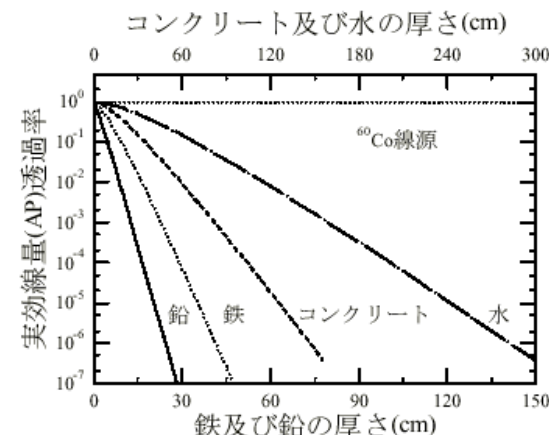
しゃへい計算

○ 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)。



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。

例題(外部被ばく量の計算)

A1:

$$74 \times 0.0779 \times 1 / 0.5^2 \times 2 = 46 \mu \text{ Sv}$$

実効線量透過率1/10に相当するしゃへい体厚さは、グラフから、鉛: 2cm, 鉄: 7.5cm, コンクリート: 30cm程度となる。

1cm²あたりの重さはそれぞれ22.8g, 59.3g, 69g となる。

A2:

$$1.6 \times 10^6 \times 0.305 \times 1/3^2 \times 3 \times 10^{-7} = 0.016 \mu \text{ Sv/h}$$

A3:

鉛のK殻電子を電離するのに必要なエネルギーは88keV程度であり、その前後で透過率が大きく変化するため(K吸収端)

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たん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

- ・放出される放射線の種類と、エネルギー
- ・放出確率

外部
被ばく

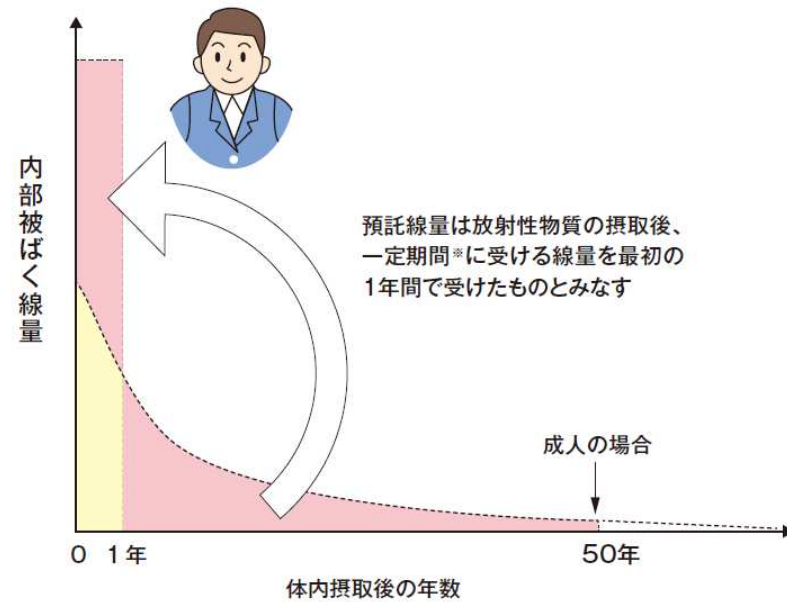
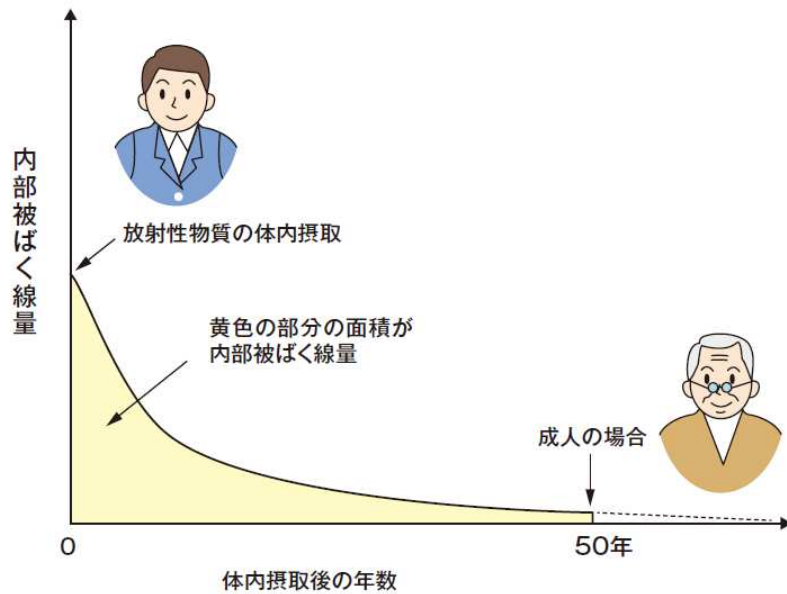
実効線量係数 effective dose coefficient

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

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

$$\text{預託線量 (mSv)} = \text{飲食物摂取量 (kg/日)} \times \text{摂取日数 (日)} \times \text{実効線量係数 (mSv/Bq)} \times \text{放射性核種の濃度 (Bq/kg)}$$

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。

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。

A:

$$0.15\text{kg} \times 3 \times 365 \times 100\text{Bq/kg} \times 1.3 \times 10^{-5} \text{ mSv/Bq} \\ = 0.21\text{mSv}$$

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。

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。

Q: 生成した Ce(III) の原子数 N は、 $N = 2.8 \times 10^{-4} / 140 \times 6 \times 10^{23}$ で求められ、G 値が 2.5 であるから、吸収されたエネルギーは $N / 2.5 \times 100 \text{ eV}$ となる。

吸収線量 [Gy] は物質 1kg あたりの吸収エネルギー [J] であるので、求める吸収線量 D [Gy] は、水溶液量が 2g であることに注意して、

$$D = 2.8 \times 10^{-4} / 140 \times 6.0 \times 10^{23} \times 100 / 2.5 \times 1.6 \times 10^{-19} / 2.0$$

$$\doteq 3.8 \text{ J/g} = 3.8 \times 10^3 \text{ Gy} \text{ となる。}$$

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。