

放射線の人体への影響

あいちシンクロトロン光センター

内 容

- 放射線によるDNAの損傷と放射線障害
- 被ばく線量の評価方法

放射線によるDNAの損傷と障害

放射線によるDNAの損傷

□ 放射線の直接作用と間接作用

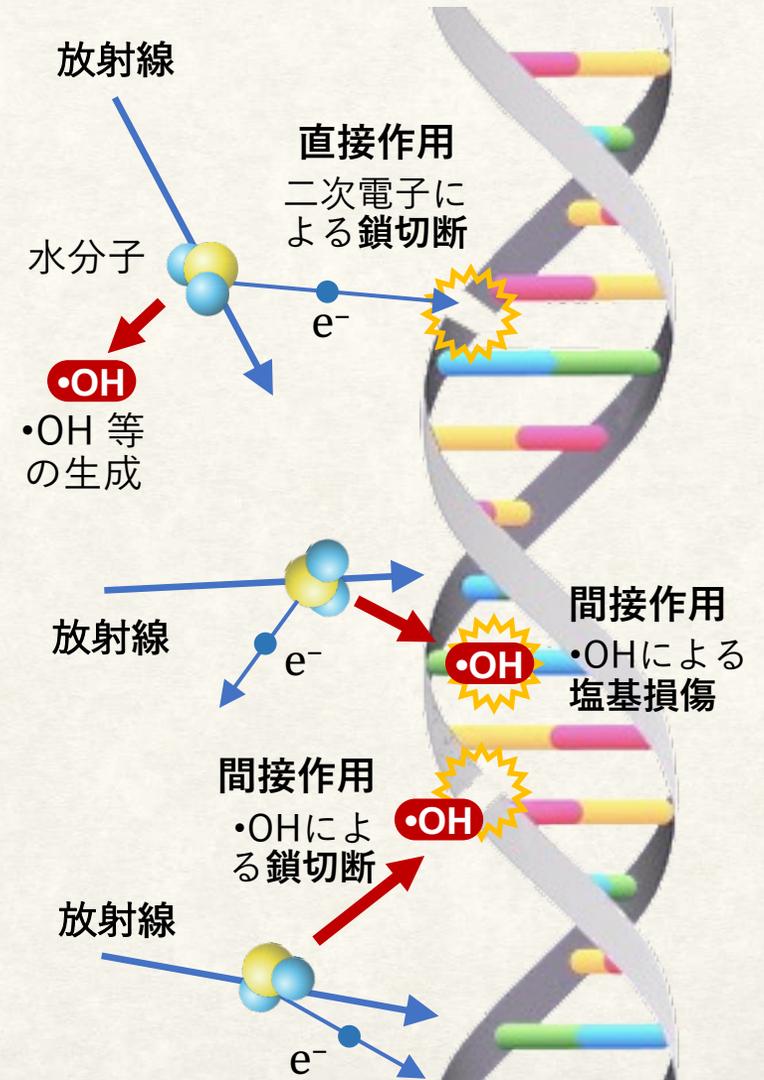
■ 直接作用

- 放射線が水分子等を電離して生じた**二次電子**，あるいは**放射線そのもの**が，DNAの鎖あるいは塩基を**電離・励起**し損傷する。

■ 間接作用

- 水分子が放射線により電離・励起され，その結果**水酸基ラジカル $\cdot\text{OH}$** や水素ラジカル $\cdot\text{H}$ 等が生成される。これらがさらに他の水分子や酸素分子と反応して新たに**活性酸素***を生成する。
- これらの活性な分子，特に**水酸基ラジカル $\cdot\text{OH}$** がDNAの鎖あるいは塩基を電離・励起し損傷する。

* 水酸基ラジカル $\cdot\text{OH}$ ，過酸化水素 H_2O_2 ，スーパーオキシド $\cdot\text{O}_2^-$ など。



DNA損傷と修復

□ 放射線の種類とDNA損傷

* e: 電荷素量, u: 原子質量単位

	電荷 [e*]	質量 [u*]	電離性	優勢な作用
X線・γ線	0	0	弱	間接作用
電子 (β線)	-1	1/1840	中	
陽子	+1	1	強	エネルギーに依存
α粒子	+2	4	強+	直接作用
炭素イオン	+6	12	強++	

□ DNA損傷の分類と修復の難易度

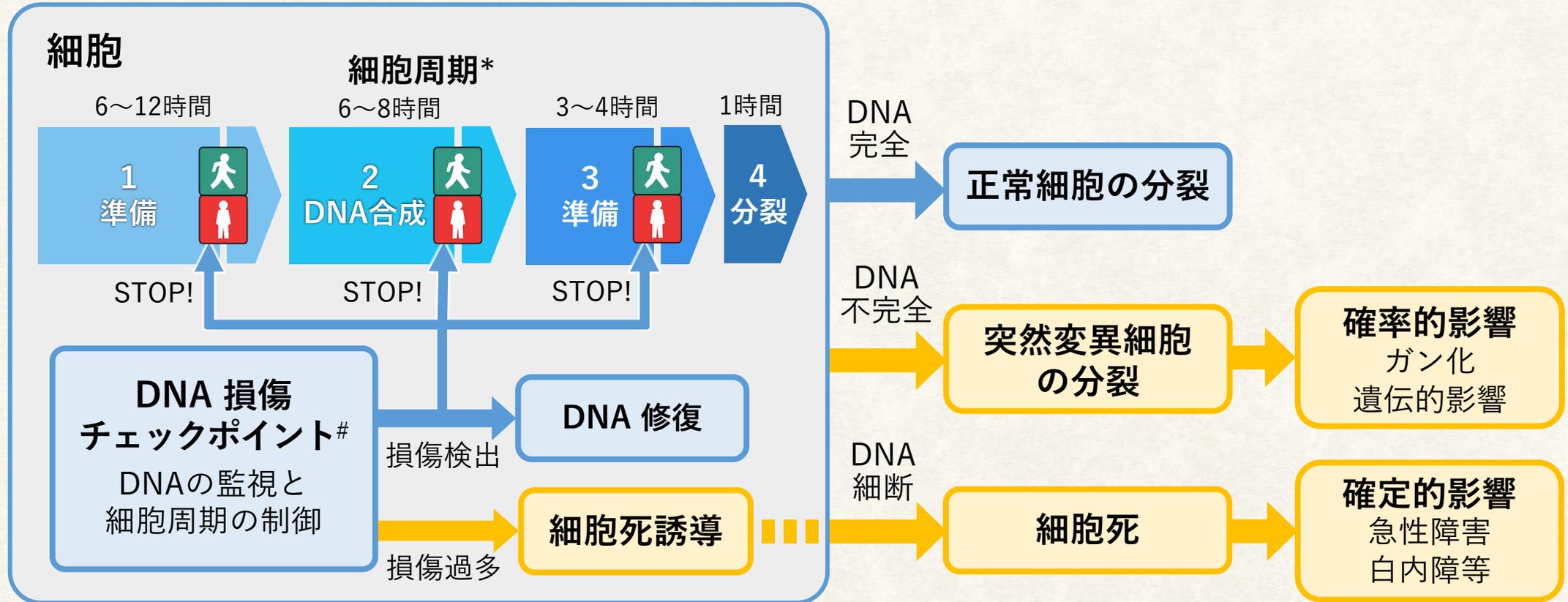
- 2本鎖切断の修復は困難であり, 身体への影響の面で一番重要である.

損傷の種類	線量当りの損傷発生数	損傷修復の難易度
塩基損傷	約3000箇所 /Gy*	ほぼ完全
1本鎖切断	約1000箇所 /Gy	ほぼ完全
2本鎖切断	約40箇所 /Gy	困難であり誤った修復あり

* 吸収線量: 単位体積の組織が吸収した放射線のエネルギー [Gy (J/kg)]

DNA修復と障害の発生

□ 細胞がDNA修復を待って分裂を行うしくみ



* 細胞周期とは、新たな細胞が分裂により誕生し、再び分裂を終えるまでの4期の過程。

細胞周期の各過程は、細胞の状態を監視するチェックポイントを持つが、DNAの監視は第3期まで。

参考文献

泉 雅子. 日本物理学会誌. 2013, Vol. 68, No. 3, p.141.

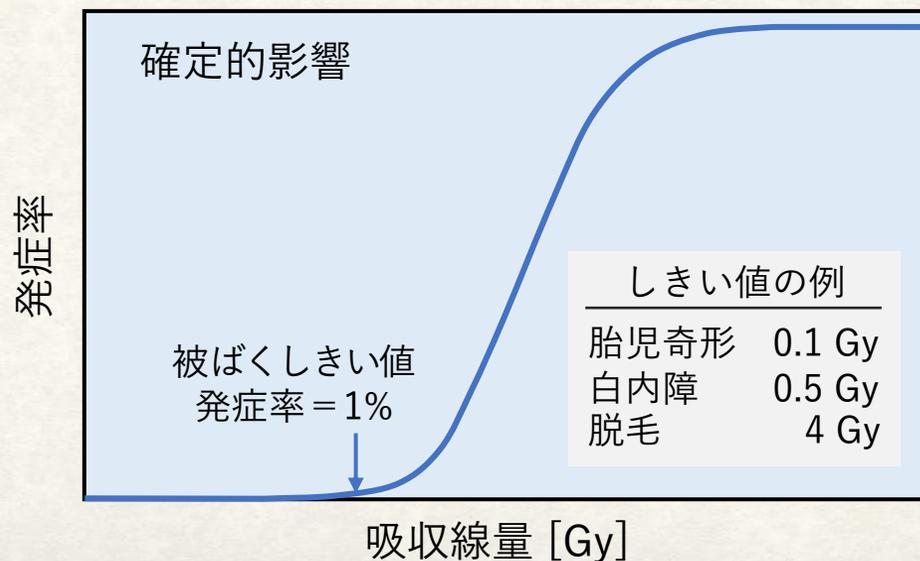
吉田清嗣. 生化学. 2008, Vol. 80, No.7, p.619.

確定的影響と確率的影響

放射線の影響は、放射線防護の立場から確定的影響と確率的影響に分けられる

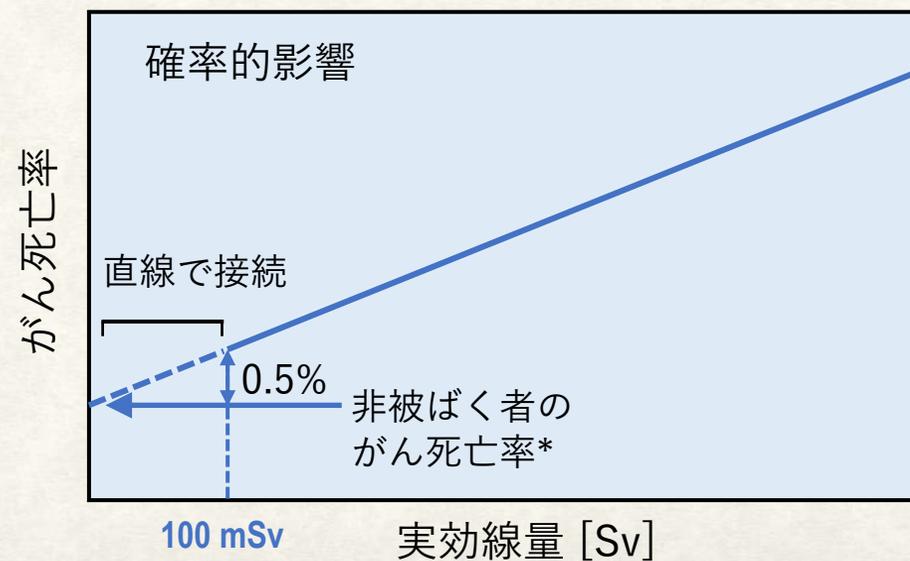
□ 確定的影響

- 放射線障害が出ないぎりぎりの線量，すなわち「しきい値」が存在する。
- しきい値を超えると，障害の程度が線量に依存して増加する。
- ICRPは，しきい値を発症率 1% の線量としている。しきい値は障害により様々。



□ 確率的影響

- 発がんと遺伝的影響が該当する。
- 原爆被ばく者の調査では，100 mSvの被ばくでがん死亡率が0.5%上昇し，一方 100 mSv未満での有意ながん発生は認められていない。
- ICRPは，低線量でも図のような比例関係 (LNTモデル) が成り立つと考える。



放射線の影響と症状

□ 放射線による人体への影響とDNA損傷の関係

影響の分類	潜伏期間	症状例	放射線による原因
身体的影響	数週間以内 (早期影響)	急性放射線症候群 急性皮膚障害	細胞死により起こる (確定的影響)
	数ヶ月以降 (晩発影響)	胎児の発生・発達 異常	
		水晶体の混濁	
		がん・白血病	突然変異により起こる (確率的影響)
遺伝的影響	遺伝性疾患		

放射線被ばく時の障害例

障害	臓器 / 組織	潜伏期	被ばく期間別の吸収線量しきい値*		
			急性 [Gy]	分割/遷延 [Gy] [†]	長年 [Gy/年]
一時的不妊	精巣	3 ~ 9 週	約 0.1	–	0.4
永久不妊	精巣	3 週	約 6	< 6	2
	卵巣	1 週以内	約 3	6	> 0.2
造血能低下	骨髄	3 ~ 7 日	約 0.5	約10 – 14	> 0.4
白内障	眼	20年以上	約 0.5 [#]	約 0.5 [#]	約 0.5/期間 [#]
皮膚熱傷	皮膚 (広範囲)	2 ~ 3 週	5 ~ 10	35	–
一時的脱毛	皮膚	2 ~ 3 週	約 4	–	–
急性肺炎	肺	1 ~ 3ヶ月	6 ~ 7	18	–
腎不全	腎臓	1 年以上	7 ~ 8	18	–

* 吸収線量：単位体積の組織が吸収した放射線のエネルギー [Gy (J/kg)]

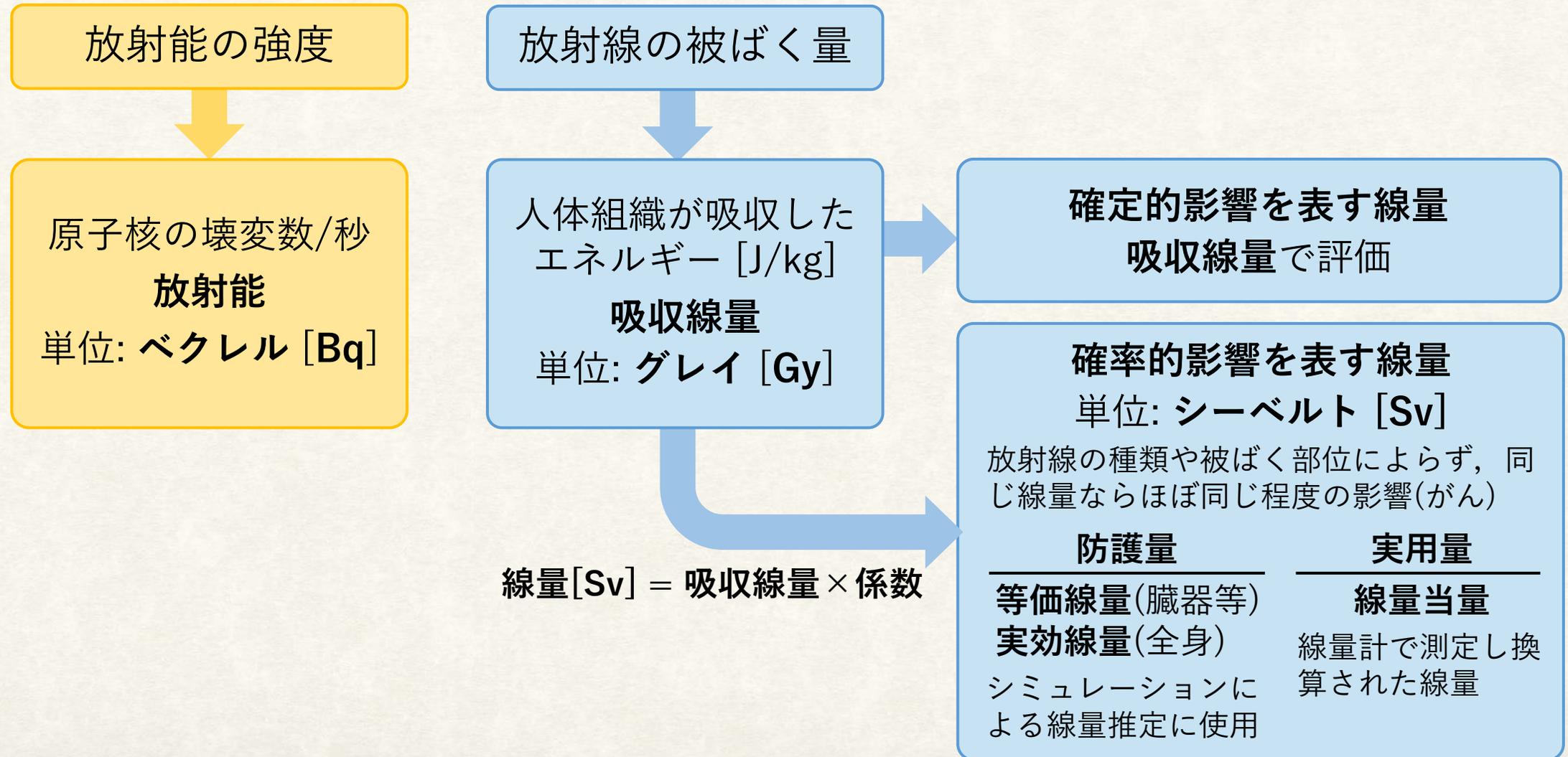
しきい値：発症率1%の被ばく線量

[†]がん放射線治療による被ばく等を想定

[#] いずれの値も大きな不確定性有り

被ばく線量の評価方法と測定

放射能と放射線被ばく量を表す量



等価線量と実効線量

実際には人体各部の吸収線量を同時測定できないため、等価線量と実効線量は計算上の線量である。

等価線量 [Sv]

確率的影響について、放射線の線質(種類やエネルギー)を考慮した、**組織・臓器の被ばく線量**

等価線量 $H = \text{臓器平均吸収線量} \times \text{放射線加重係数}$

実効線量 [Sv]

不均一被ばくでも、組織・臓器ごとの放射線感受性や質量等を考慮した係数を導入することにより、計算上はほぼ同じ影響をもたらす、**確率的影響についての全身均一な被ばく線量**

実効線量 $E = \Sigma(\text{等価線量} \times \text{組織加重係数}^*)$

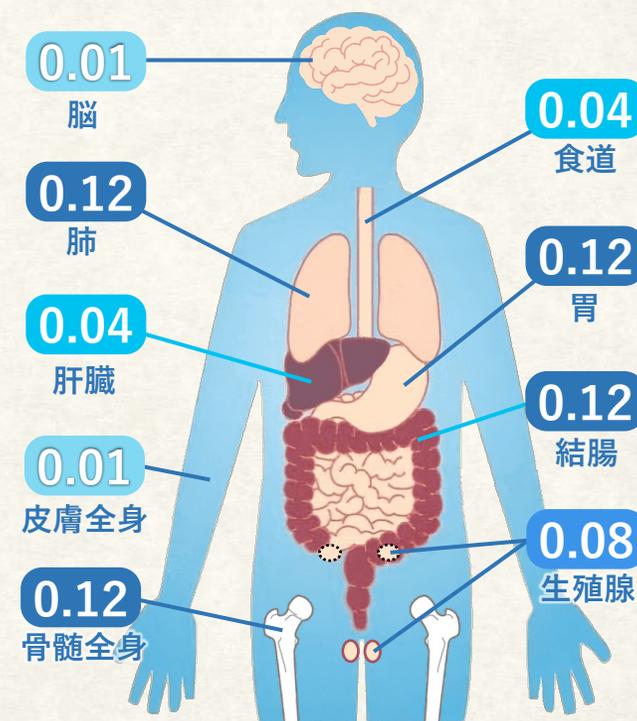
法令等に記載されている被ばく線量は、特に断りがない限り、基本的にこの実効線量である。

* 組織加重係数は合計が1になるよう規格化されている

放射線加重係数

放射線の種類による確率的影響の違い

X線・γ線	1
電子・β線	1
ミュー粒子	1
陽子	2
α粒子	20
重粒子	2.5 - 21
中性子	エネルギーの関数



組織加重係数の例

臓器による確率的影響の感受性・質量の違い

被ばくした場合の線量の推定例

臓器組織の等価線量 $H = \text{吸収線量} \times \text{放射線加重係数}$

実効線量 $E = \sum_{\text{全身}} (\text{等価線量 } H \times \text{組織加重係数})$

全身に均等に γ 線を被ばくした場合

条件：推定吸収線量 = 1 mGy

人体各部の等価線量 H

放射線荷重係数 = 1 (γ 線)

$$H = 1 \text{ mGy} \times 1 = 1 \text{ mSv}$$

実効線量 E

$$\begin{aligned} E &= \text{等価線量 } H \times \sum(\text{組織加重係数})^* \\ &= 1 \text{ mGy} \times 1 = \mathbf{1 \text{ mSv}} \end{aligned}$$

* $\sum(\text{組織加重係数}) = 1$

頭部に γ 線を被ばくした場合

条件：推定平均吸収線量 = 1 mGy

頭部内各部位の等価線量 H

放射線荷重係数 = 1 (γ 線)

$$H = 1 \text{ mGy} \times 1 = 1 \text{ mSv}$$

実効線量 E

$$\begin{aligned} E &= 1 \text{ mSv} \times 0.04 \text{ (甲状腺)} \\ &+ 1 \text{ mSv} \times 0.01 \text{ (脳)} \\ &+ 1 \text{ mSv} \times 0.01 \text{ (唾液腺)} \\ &+ 1 \text{ mSv} \times 0.12 \times 0.1 \text{ (骨髄10\%分)} \\ &+ 1 \text{ mSv} \times 0.01 \times 0.15 \text{ (皮膚15\%分)} \\ &= \mathbf{0.07 \text{ mSv}} \end{aligned}$$

線量当量

線量当量は測定できる線量として提案され、**個人線量当量**と**周辺線量当量**が良く使用される。

個人線量当量 [Sv]

人体各部の線量は直接測定できないため、体表の線量測定値を換算し、実効線量等のやや大きめの近似値を得る。

線量当量 H [Sv] = 体表での線量 × 換算係数

換算係数：ICRU*がシミュレーションにより定める

実際は、ICRUが定める人体を模擬した平板ファントム(右図)の深さ d mmにおける線量当量 $H d$ mm を適用する。

$H 1\text{cm}$: 深さ1cm (実効線量に相当)

$H 3\text{mm}$: 深さ3mm (水晶体の等価線量に相当)

$H 70\mu\text{m}$: 深さ70 μm (皮膚の等価線量に相当)

周辺線量当量 [Sv]

環境放射線監視装置やサーベイメータ等が測定する線量値。ICRUが指定する人体を模擬した球体ファントム(右図)の測定点における線量当量を適用。

* ICRU :国際放射線単位測定委員会

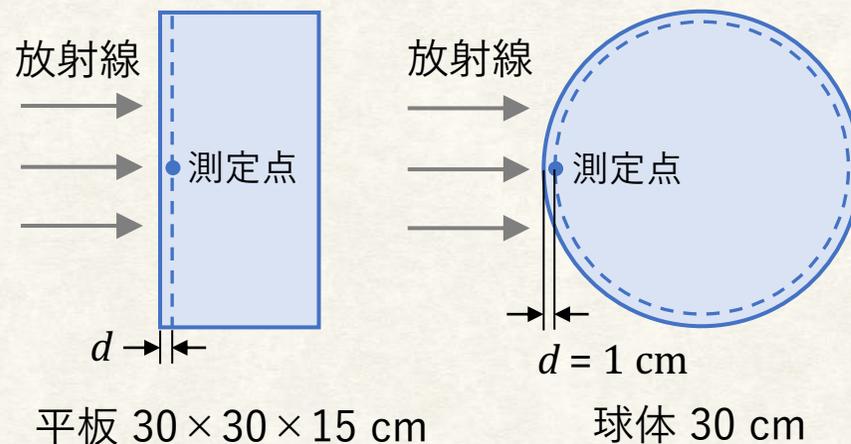


体幹用



手指用

個人線量計の例



ICRUのファントム
材質：組織等価物質