

放射線量を読み解き 人体への健康影響を理解する

山内 基弘

長崎大学・原爆後障害医療研究所
放射線生物・防護学分野

放射線被ばく後に起こる人体影響

骨髄

消化管

神経

皮膚・目

生殖細胞・胎児

白血球減少

吐き気

頭痛

脱毛

不妊

赤血球減少

嘔吐

発熱

皮膚の紅斑

流産

血小板減少

下痢

意識障害

皮膚の壊死

胎児奇形

白内障

精神発達
遅延

がん

白血病

放射線被ばく後の人体影響の分類法

急性影響 VS 晩発影響

確定的影響 VS 確率的影響

放射線被ばく後の人体影響の分類法

急性影響 VS 晩発影響

確定的影響 VS 確率的影響

急性放射線症候群

(Acute Radiation Syndrome; ARS)

1 Gy以上の急性全身被ばく後、数時間～数ヶ月以内に発生するさまざまな症状の総称

骨髄
皮膚
口腔粘膜
消化管
中枢神経
心臓血管

などに障害が起こる

放射線被ばく後に起こる人体影響

骨髄

消化管

神経

皮膚・目

白血球減少

吐き気

頭痛

脱毛

赤血球減少

嘔吐

発熱

皮膚の紅斑

血小板減少

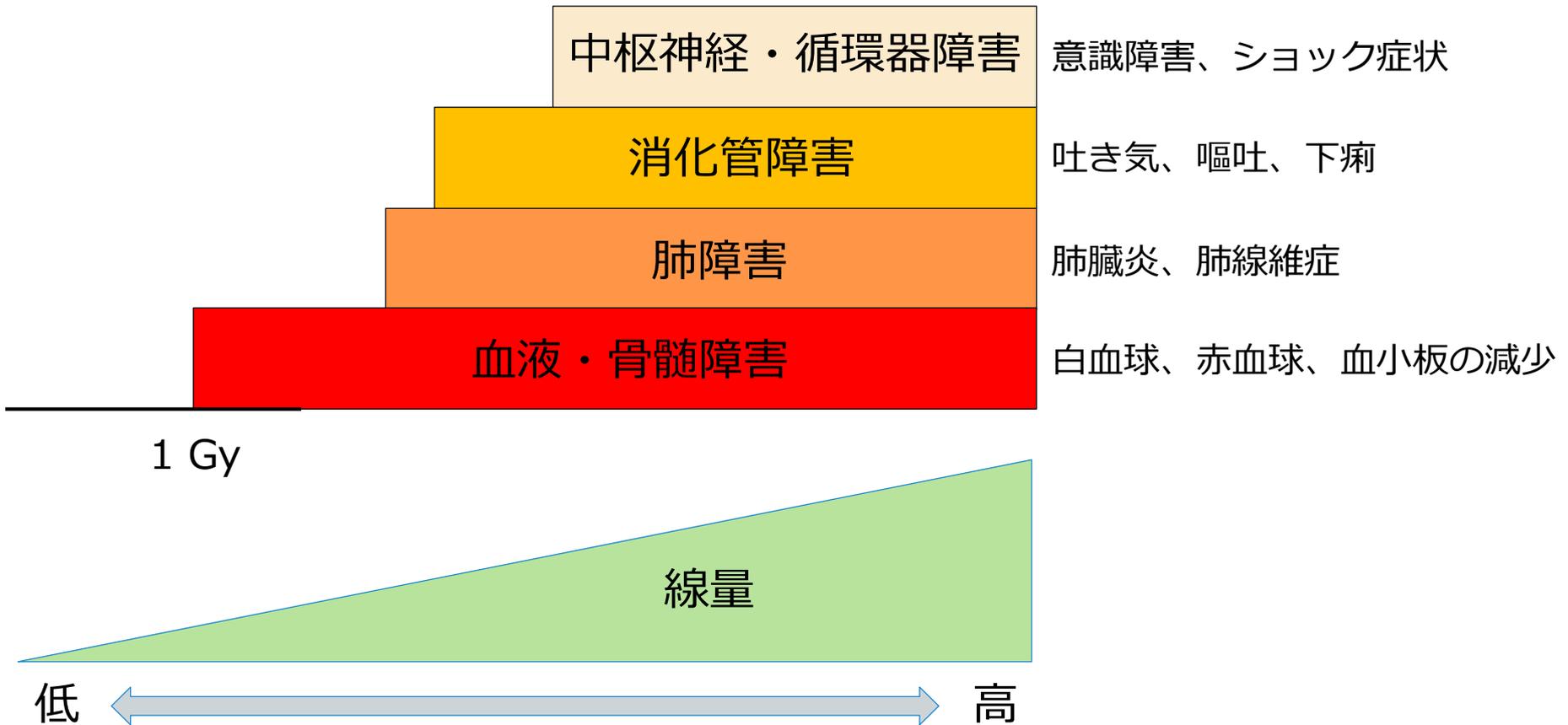
下痢

意識障害

皮膚の壊死

急性放射線症候群

急性放射線症候群 (ARS) の障害



急性放射線症候群の病期

被ばく時



時間経過



前駆期
～48時間

嘔気・嘔吐 (1 Gy以上)
頭痛 (4 Gy以上)
下痢 (6 Gy以上)
発熱 (6 Gy以上)
意識障害 (8 Gy以上)

潜伏期
0～3週間

無症状

発症期

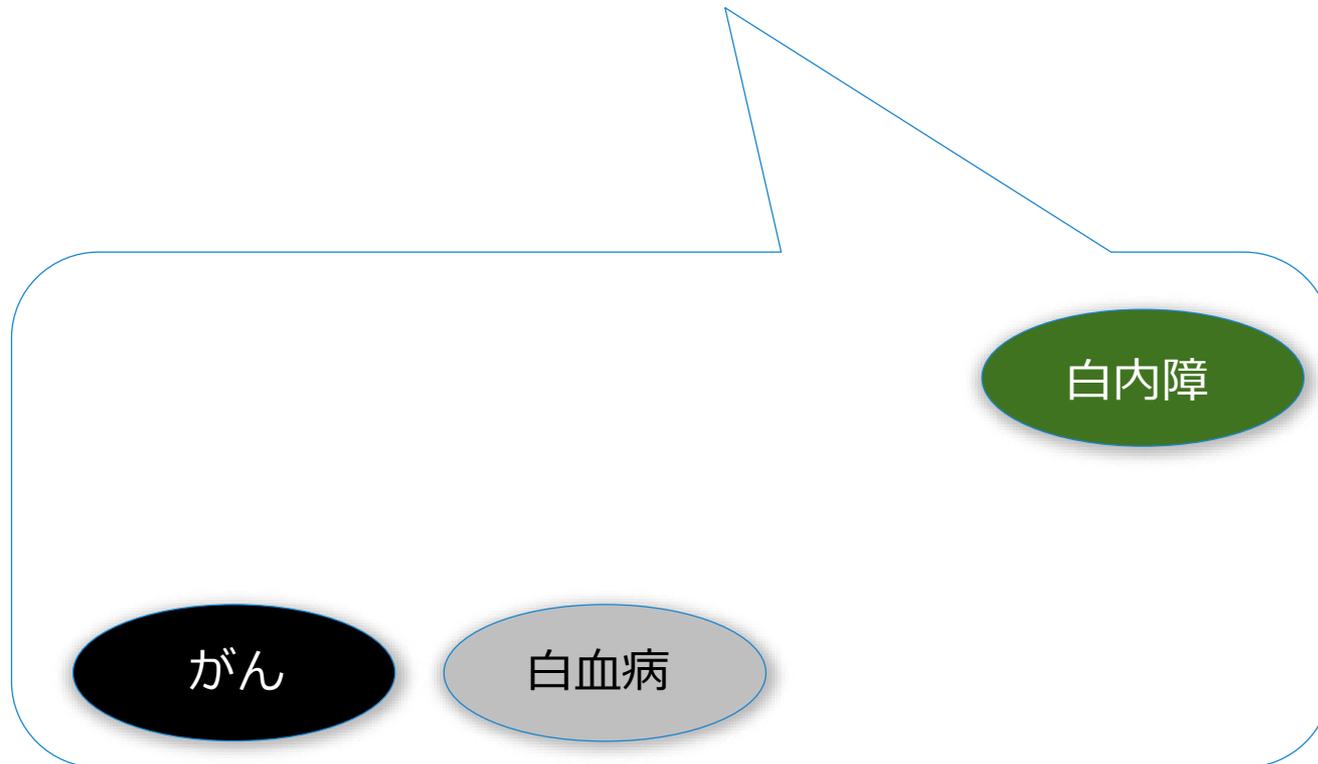
被ばく線量大

造血器障害 (感染・出血)
消化管障害
皮膚障害
神経・血管障害

回復期
(あるいは死亡)

晩発影響

(被ばく後数年経ってから出る影響)



放射線被ばく後の人体影響の分類法

急性影響 vs 晩発影響

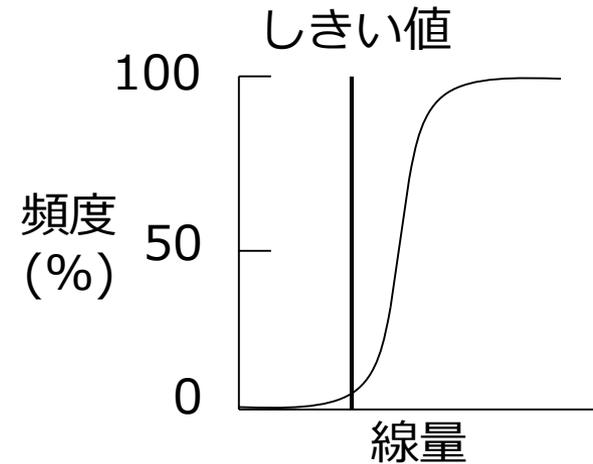
確定的影響 vs 確率的影響

確定的影響／確率的影響

- 放射線防護の観点からの区分 -

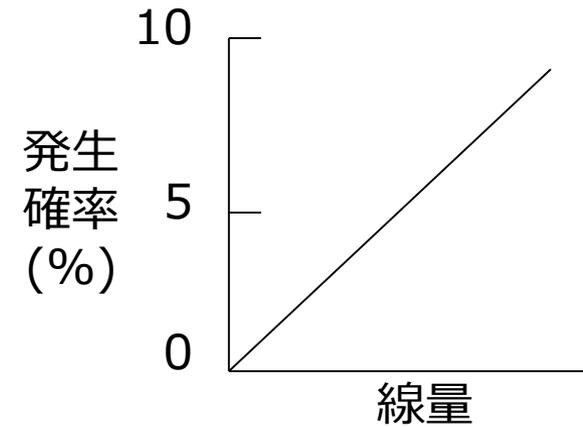
□ 確定的影響

- しきい値を越えて被ばくした場合に現れる



□ 確率的影響

- しきい値が存在せず、線量の増加とともに影響の発生確率が増加する
- がん
- 遺伝的影響



確定的影響

骨髓

消化管

神経

皮膚・目

生殖細胞・胎児

白血球減少

吐き気

頭痛

脱毛

不妊

赤血球減少

嘔吐

発熱

皮膚の紅斑

流産

血小板減少

下痢

意識障害

皮膚の壊死

胎児奇形

白内障

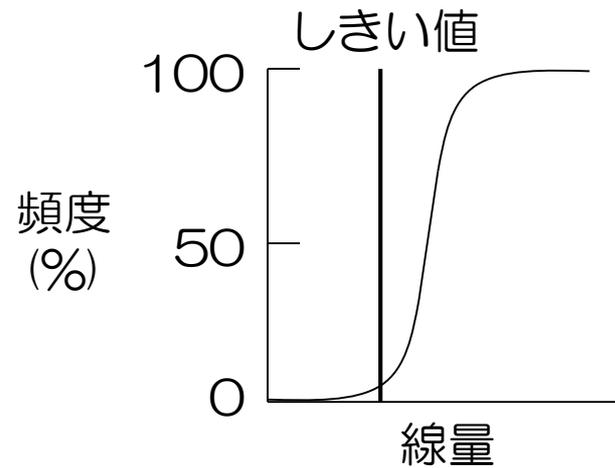
精神発達
遅延

がん

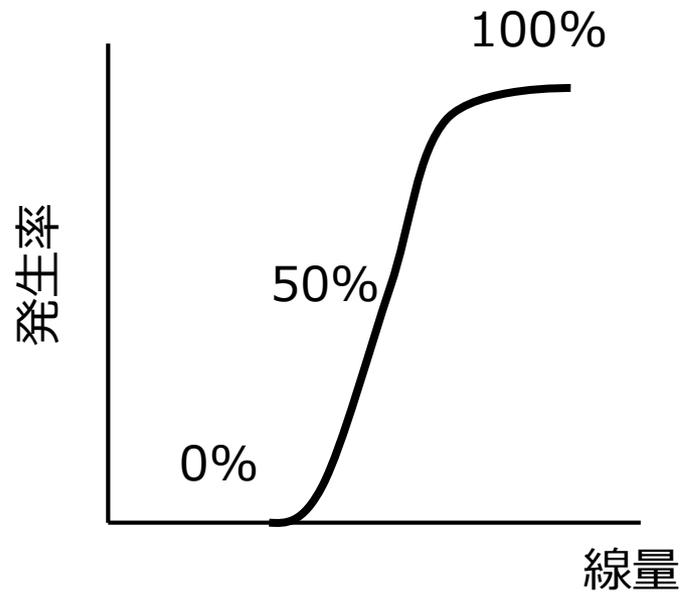
白血病

確率的影響

確定的影響 (組織反応)



確定的影響の「しきい値」



しきい値を超えて被ばくすると被ばく線量の増加とともに障害の発生確率も重篤度も上昇する。

しきい値の単位

Gy
(グレイ)

吸収線量

人体が放射線から受けるエネルギー

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

確定的影響としきい線量

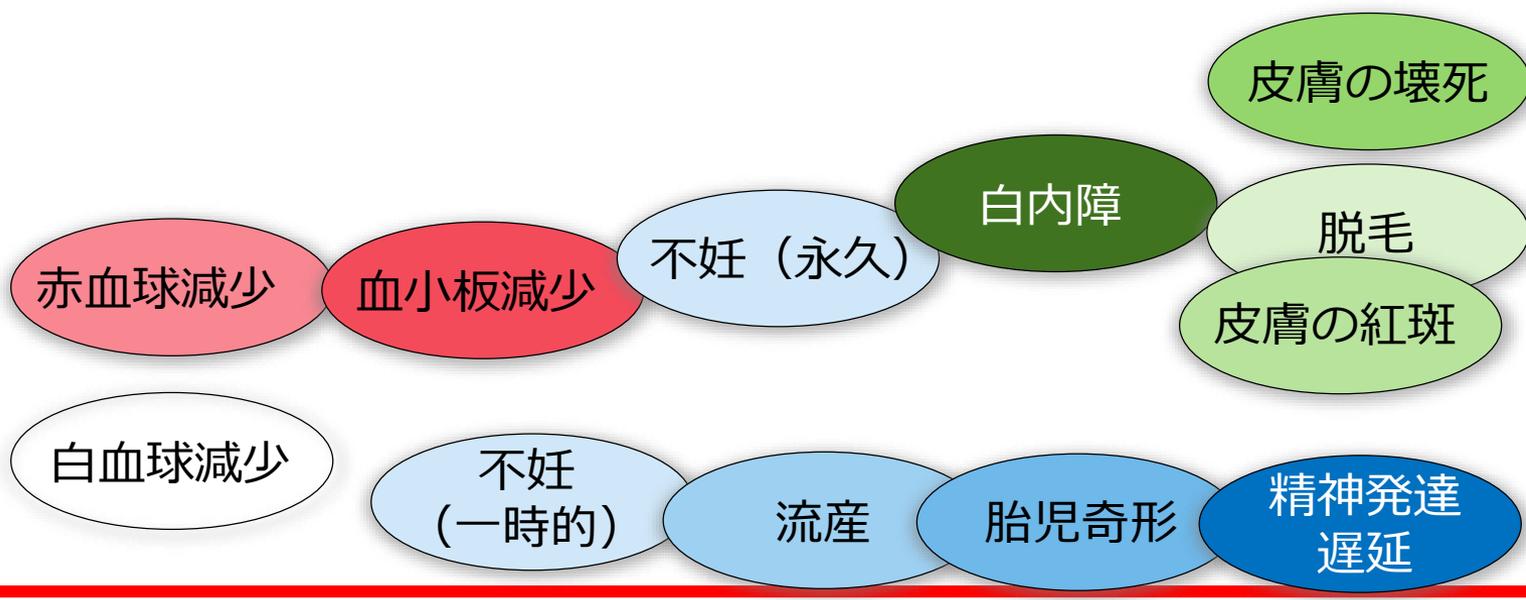
標的組織	症状		しきい線量 (Gy)
骨髓	白血球減少		0.5
	赤血球減少		2 - 6
	血小板減少		2 - 6
不妊	男性	一時的な不妊	0.15
		永久不妊	3.5 - 6
	女性	一時的な不妊	0.65 - 1.5
		永久不妊	2.5 - 7
眼	水晶体混濁		0.5 - 2
	白内障		5

確定的影響としきい線量

標的組織	症状	しきい線量 (Gy)
胎児	胚死亡 流産	0.1
	奇形	0.1
	精神発達遅延	0.12 - 0.2
皮膚	一時的紅斑	2
	一時的脱毛	3
	壊死	18

しきい値 (Gy、対数表示)

100
10
1
0.1
0.01
0.001
0.0001



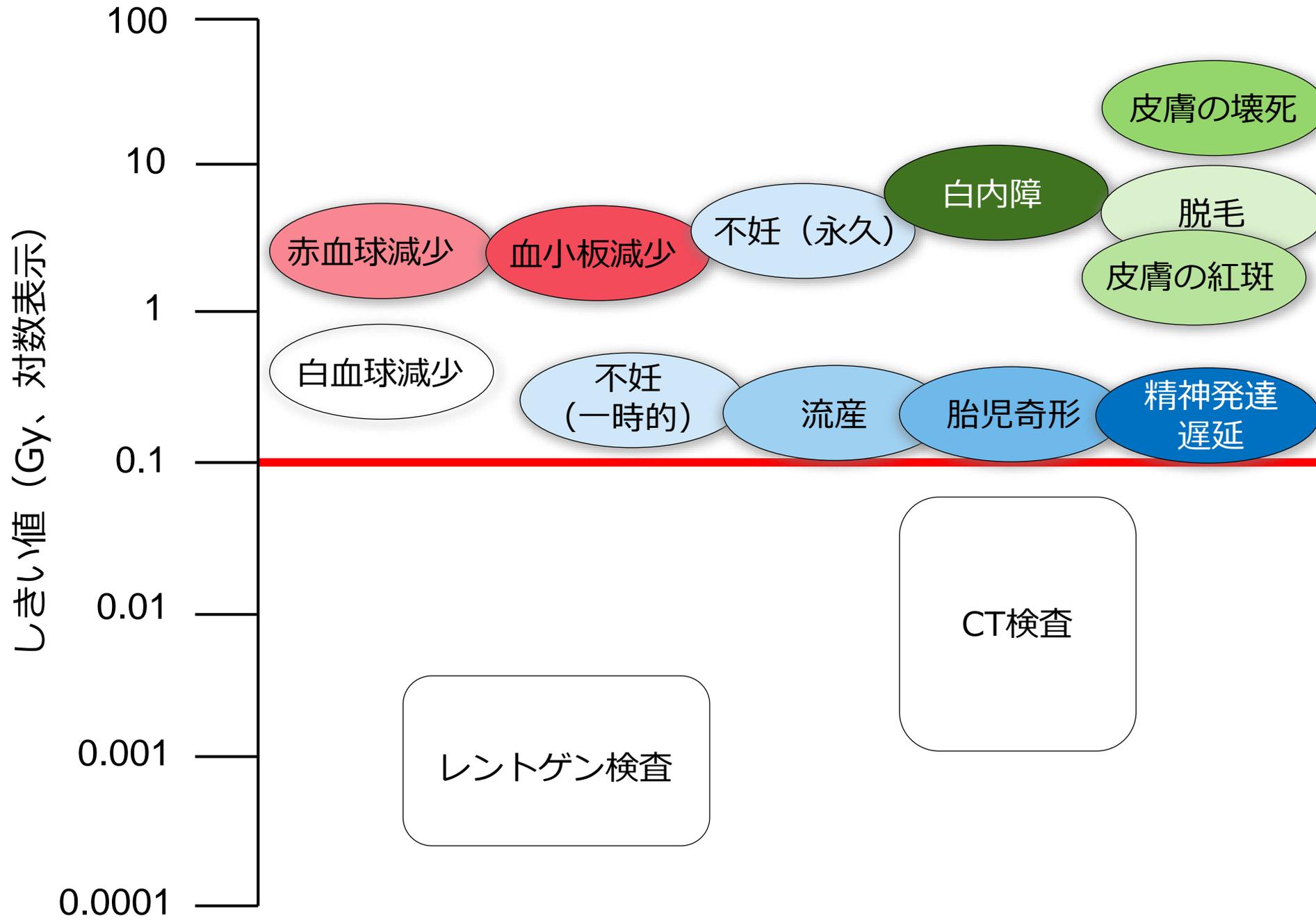
X線検査の臓器・組織の被ばく線量

検査法	最大線量 (mGy)	組織
胸部単純X線	0.15	乳腺
頭部単純X線	0.4	甲状腺
マンモグラフィ	1.3 – 1.5	乳腺
頭部CT	2.7	骨髄
上部消化管造影	4.76 – 5.32	肺
腹部CT	8.0	卵巣
	5.6	骨髄
注腸造影	16.0	卵巣
	8.2	骨髄
胸部CT	21.0	乳腺
骨盤CT	23.0	卵巣
	5.6	骨髄

X線検査やCT検査における胎児被ばく線量

検査	平均線量 (mG y)	最大線量 (mG y)
腹部単純	1.4	4.2
胸部単純	<0.01	<0.01
尿路造影・腰椎	1.7	10.0
骨盤	1.1	4.0

検査	平均線量 (mG y)	最大線量 (mG y)
上部消化管	1.1	5.8
注腸	6.8	24.0
胸部C T	0.06	1.0
腹部C T	8.0	49.0
骨盤C T	25.0	80.0



確率的影響

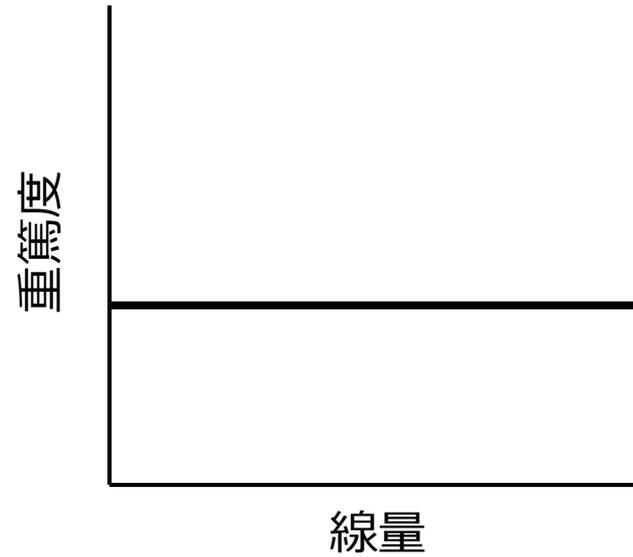
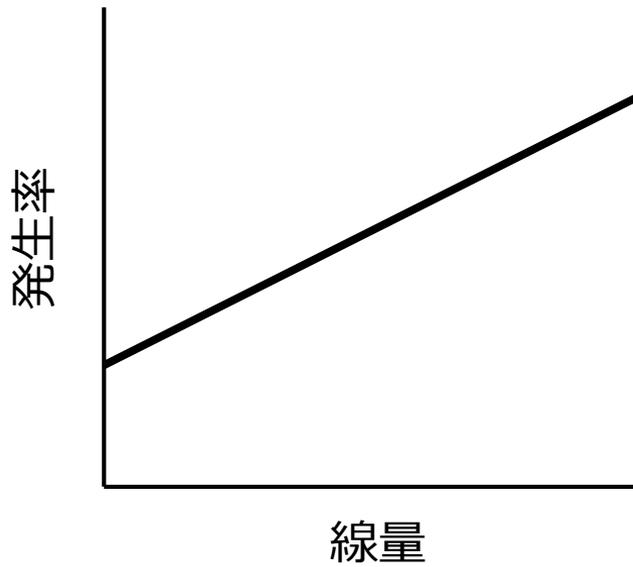
しきい値が存在せず、線量の増加とともに影響の発生確率が増加する。

がん

白血病

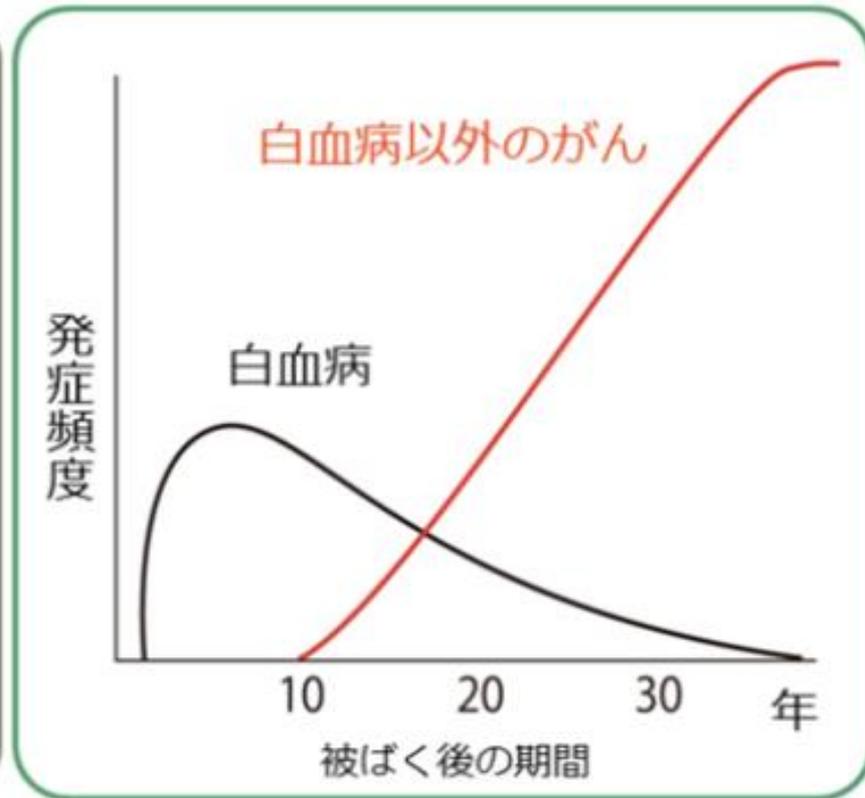
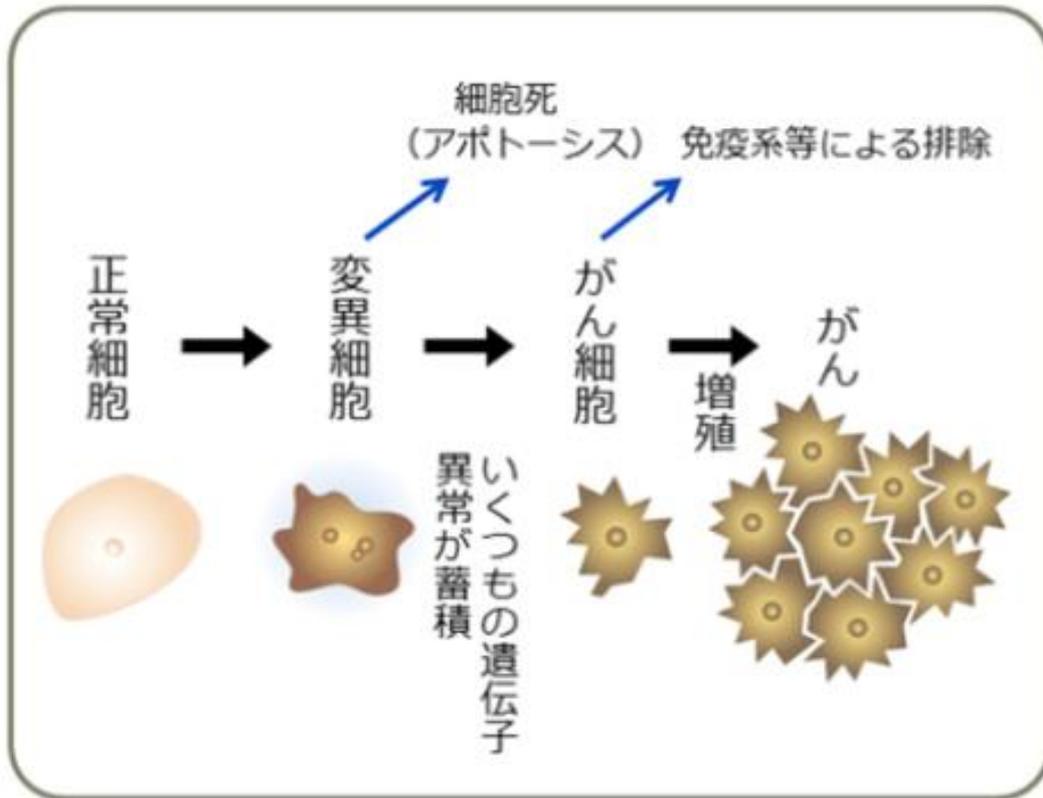
遺伝的影響

確率的影響



線量に依存して発生率は上昇するが、重篤度は変わらない。

発がんの仕組み



- 放射線はがんを起こす様々なきっかけの一つ。
- 変異細胞ががんになるまでには、色々なプロセスが必要
→数年～数十年かかる。

確率的影響の大きさを示す単位

Sv

(シーベルト)

Svで表される線量

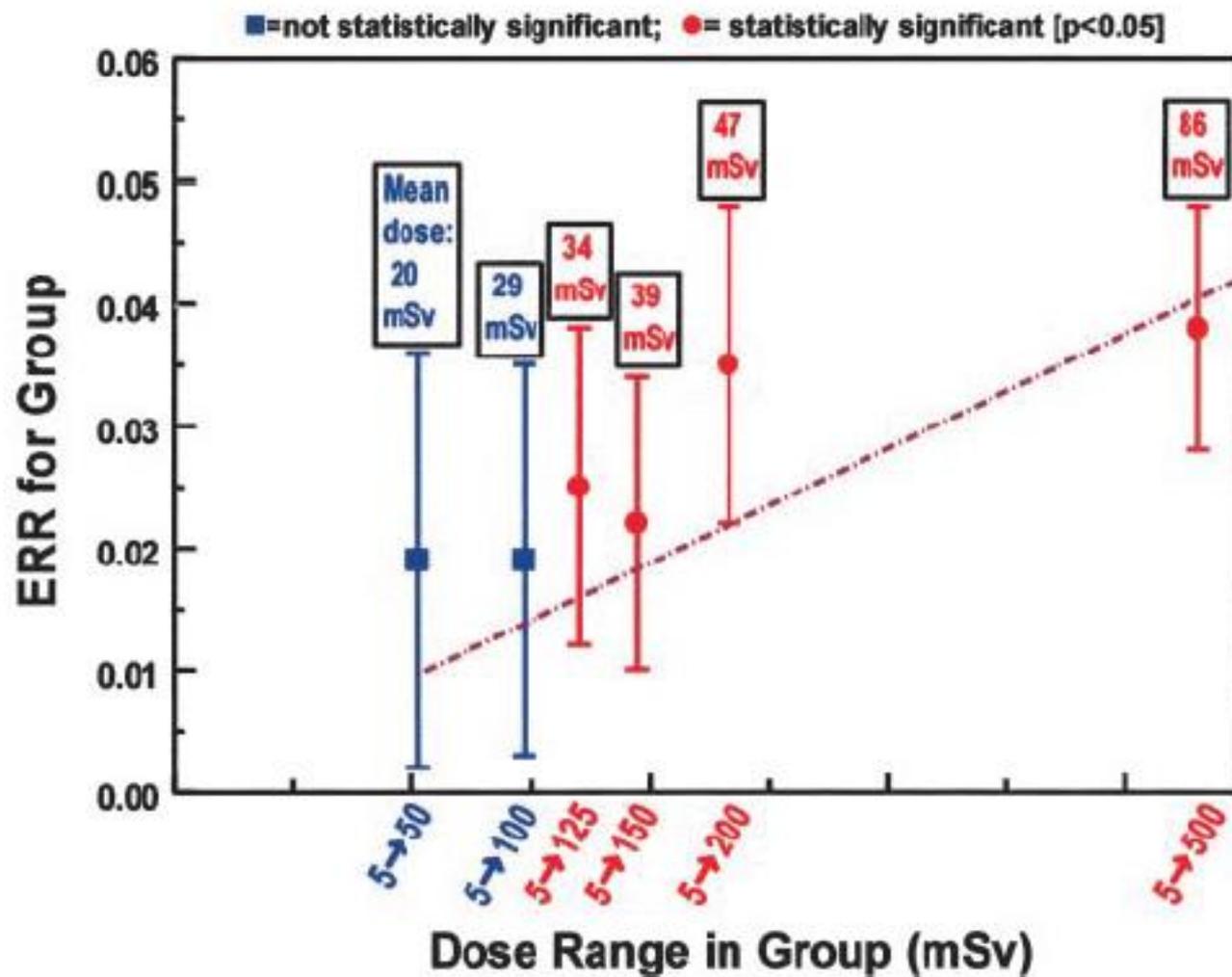
等価線量：被ばくによる各組織・臓器への確率的影響の大きさ

実効線量：被ばくによる体全体への確率的影響の大きさ

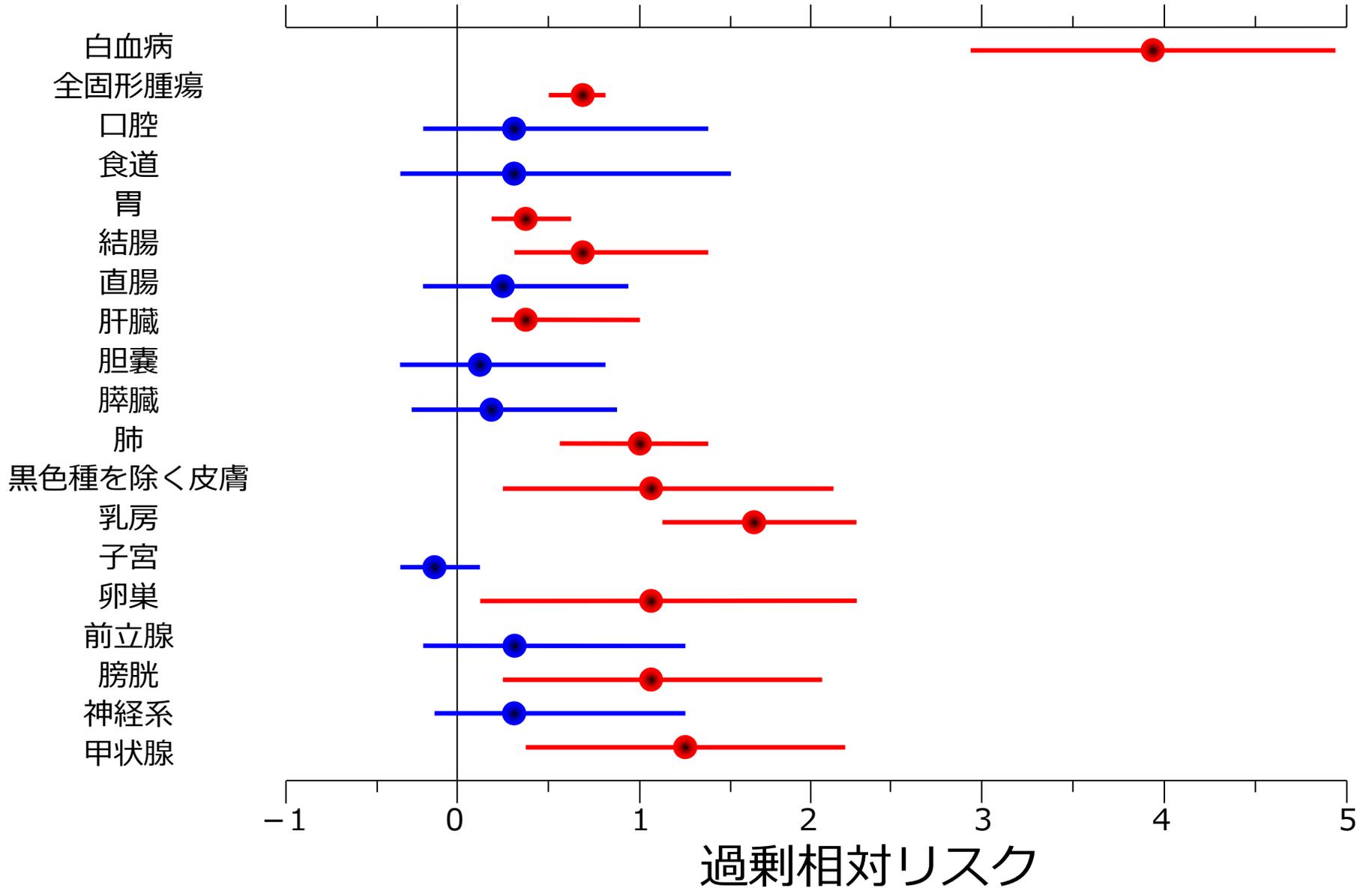


直接測定はできない。計算によって求める。

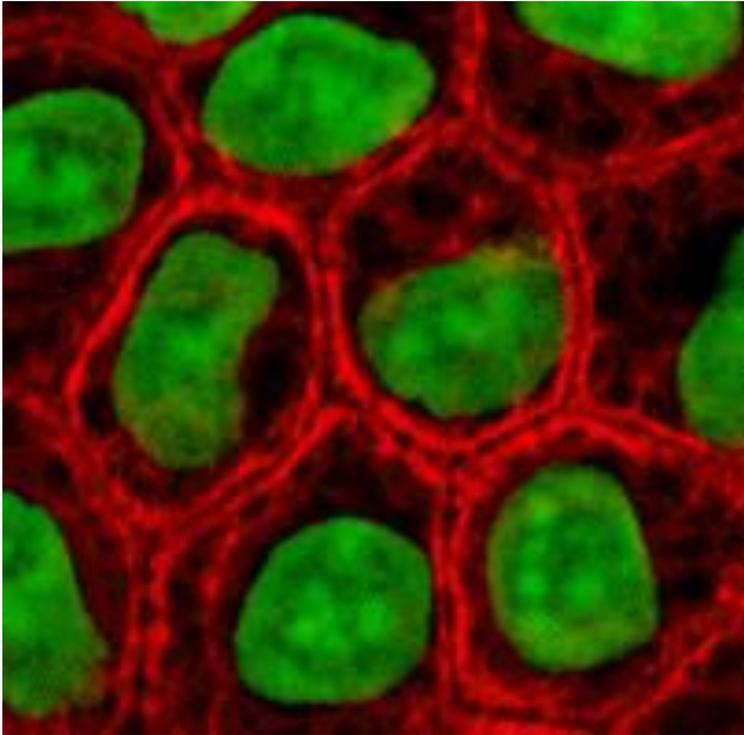
原爆被ばく者の固形がんによる死亡リスクと被ばく線量の関係



原爆被ばく者にみられる発がん (1 Svあたり)

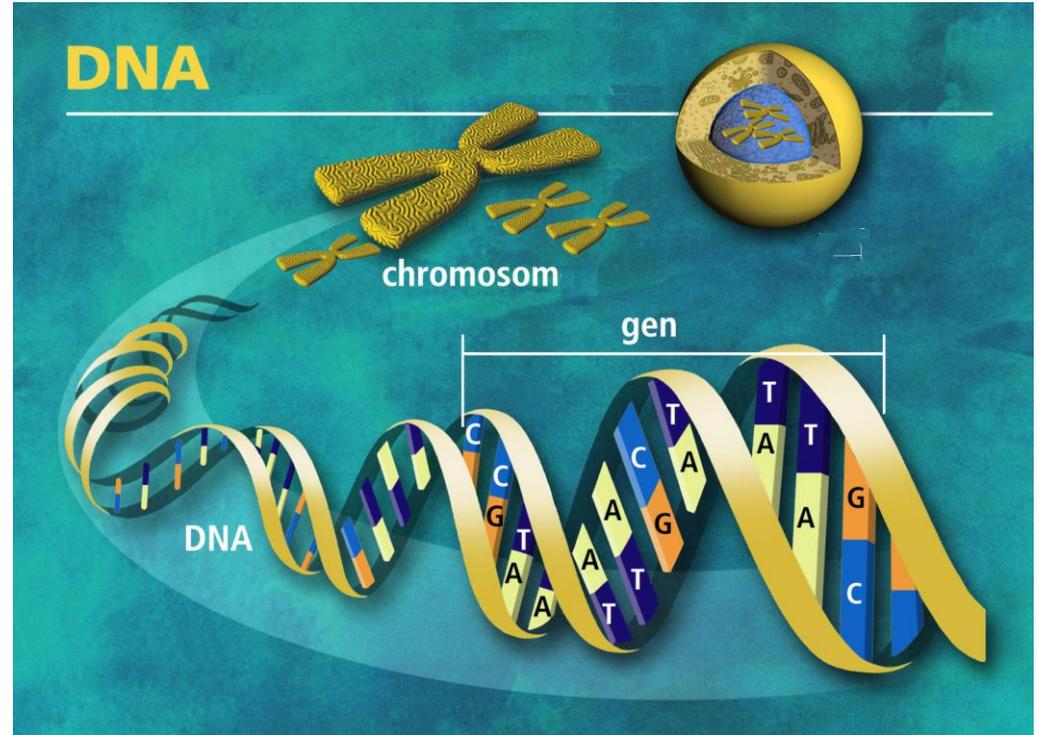


放射線の標的



細胞

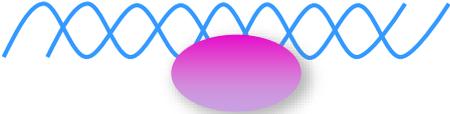
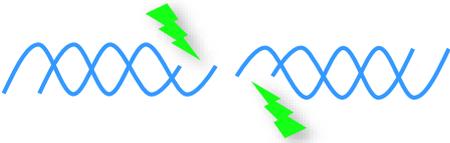
60兆個/人体



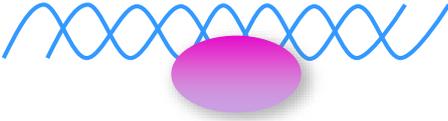
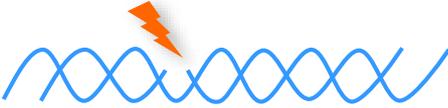
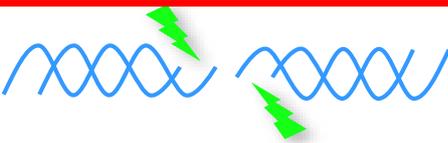
DNA

30億ヌクレオチド/細胞

放射線照射により生成するDNA損傷

DNA損傷		1 Gy ガンマ線照射 で生じる数／細胞	修復機構 の有無
DNA塩基の化学的変化		3000	あり
DNAと蛋白質の架橋		150	あり
DNAの一本鎖切断		1000	あり
DNAの二本鎖切断		40	あり

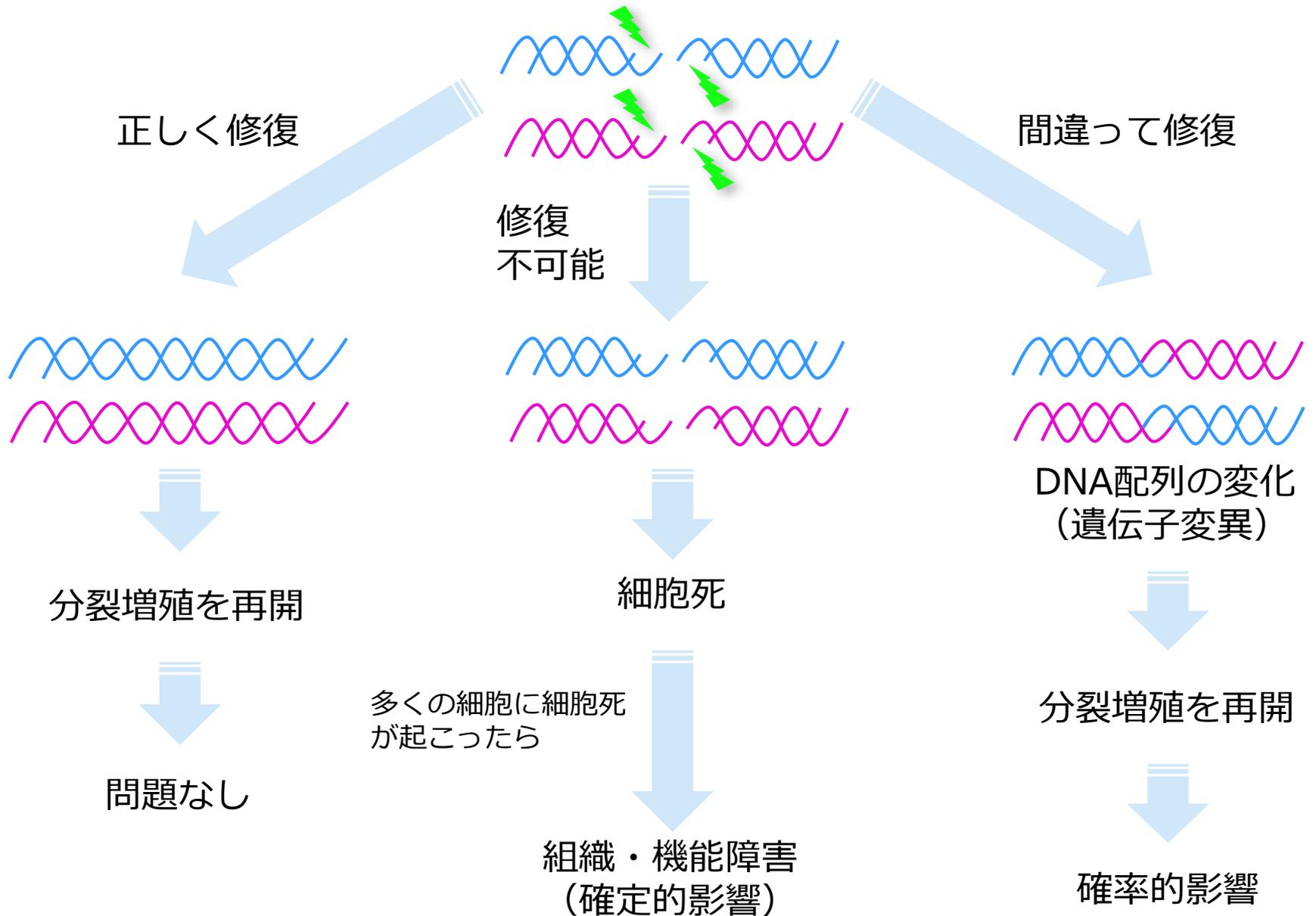
放射線照射により生成するDNA損傷

DNA損傷		1 Gy ガンマ線照射 で生じる数／細胞	修復機構 の有無
DNA塩基の化学的変化		3000	あり
DNAと蛋白質の架橋		150	あり
DNAの一本鎖切断		1000	あり
DNAの二本鎖切断		40	あり



DNA二本鎖切断は他のDNA損傷と比べ、生成する数は少ないが、修復が困難。放射線照射後の染色体異常や細胞死の主な原因。

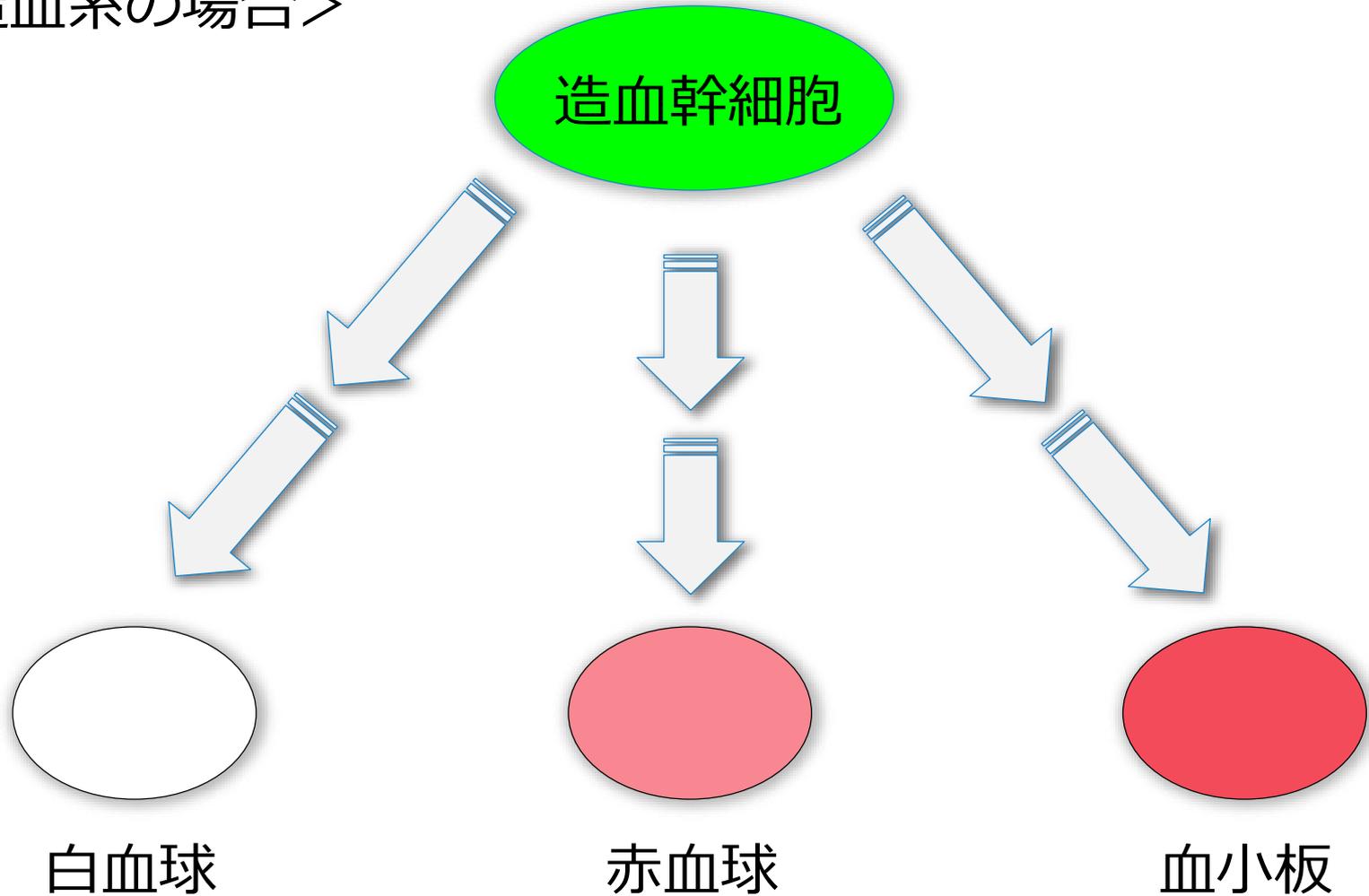
放射線照射でDNA二本鎖切断ができた細胞のその後



幹細胞

- 組織や臓器、血液をつくりだす細胞 -

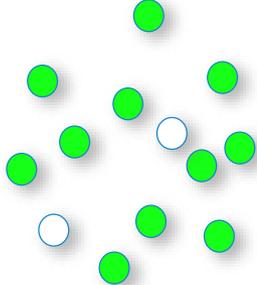
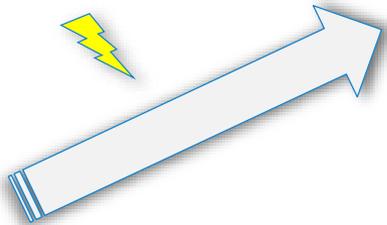
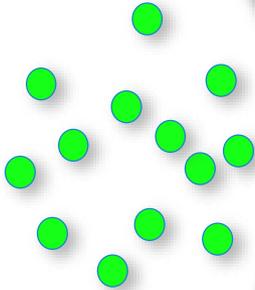
<造血系の場合>



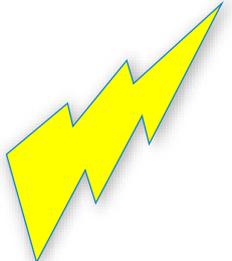
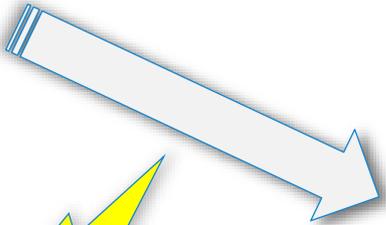
少数の造血幹細胞が死ぬ

しきい線量未満の被ばく

● 造血幹細胞

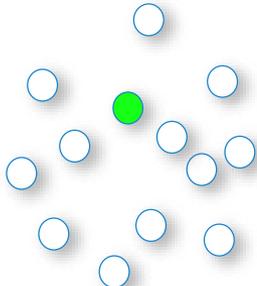


影響なし



しきい値を大きく上回る線量の被ばく

多数の造血幹細胞が死ぬ



白血球減少
赤血球減少
血小板減少

遺傳的影響

原爆被ばく者2世に20歳までに生じた 悪性腫瘍の症例数

	両親の合計線量*	
	0.01Gy 未満	0.01Gy 以上
調査子供数	40689	26885
悪性腫瘍内訳		
白血病	17	14
遺伝性の可能性がある腫瘍	10	8
その他の腫瘍	21	13
悪性腫瘍総数	48	35

遺伝性の可能性がある腫瘍：網膜芽細胞腫、ウィルムス腫瘍、神経芽細胞腫、骨肉腫など

その他の腫瘍：皮膚がん、胃がん、線維肉腫、悪性リンパ腫、脳腫瘍など

*DS86

原爆被ばく者2世に20歳までに生じた 悪性腫瘍の症例数

	両親の合計線量*	
	0.01Gy 未満	0.01Gy 以上
調査子供数	40689	26885
悪性腫瘍内訳		
白血病	17	14
遺伝性の可能性がある腫瘍	10	8
その他の腫瘍	21	13
悪性腫瘍総数	48 0.12%	35 0.13%

遺伝性の可能性がある腫瘍：網膜芽細胞腫、ウィルムス腫瘍、神経芽細胞腫、骨肉腫など

その他の腫瘍：皮膚がん、胃がん、線維肉腫、悪性リンパ腫、脳腫瘍など

*DS86



両親の被ばく線量に伴う発がんリスクの増加は認められなかった。

原爆被ばく2世における 多因子疾患（生活習慣病）有病率

父親被ばく線量(Gy)*	オッズ比(95%信頼区間)			p 値
	0.005 未満	0.005~0.500	0.500 以上	
調査人数	7415	2515	864	
多因子疾患				
高血圧	1	0.96 (0.85~1.09)	0.94(0.78~1.13)	0.71
高コレステロール血症	1	0.99 (0.89~1.11)	0.86 (0.73~1.02)	0.21
糖尿病	1	0.89 (0.72~1.10)	0.86 (0.61~1.21)	0.43
狭心症	1	0.76 (0.42~1.38)	0.58 (0.18~1.86)	0.47
心筋梗塞	1	1.23 (0.60~2.52)	0.46 (0.07~3.04)	0.57
脳卒中	1	1.37 (0.80~2.33)	0.95 (0.35~2.64)	0.51
6 疾患合計	1	0.97 (0.90~1.05)	0.88 (0.78~0.99)	0.12

母親被ばく線量(Gy)*	オッズ比(95%信頼区間)			p 値
	0.005 未満	0.005~0.500	0.500 以上	
調査人数	6028	3694	1058	
多因子疾患				
高血圧	1	0.96 (0.87~1.07)	1.08 (0.92~1.28)	0.40
高コレステロール血症	1	1.08 (0.98~1.18)	1.02 (0.89~1.18)	0.28
糖尿病	1	1.04 (0.88~1.24)	1.05 (0.79~1.39)	0.86
狭心症	1	1.13 (0.72~1.78)	1.22 (0.58~2.59)	0.79
心筋梗塞	1	0.94 (0.50~1.79)	0.63 (0.16~2.51)	0.80
脳卒中	1	0.93 (0.58~1.51)	0.64 (0.23~1.78)	0.69
6 疾患合計	1	1.03 (0.96~1.10)	1.04 (0.94~1.16)	0.58

2世受診者総数11951人(父親被ばく線量不明1157人、母親被ばく線量不明1171人はそれぞれオッズ計算から除外)

* DS02

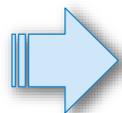
原爆被ばく2世における 多因子疾患（生活習慣病）有病率

父親被ばく線量(Gy)*	オッズ比(95%信頼区間)			p 値
	0.005 未満	0.005~0.500	0.500 以上	
調査人数	7415	2515	864	
多因子疾患				
高血圧	1	0.96 (0.85~1.09)	0.94(0.78~1.13)	0.71
高コレステロール血症	1	0.99 (0.89~1.11)	0.86 (0.73~1.02)	0.21
糖尿病	1	0.89 (0.72~1.10)	0.86 (0.61~1.21)	0.43
狭心症	1	0.76 (0.42~1.38)	0.58 (0.18~1.86)	0.47
心筋梗塞	1	1.23 (0.60~2.52)	0.46 (0.07~3.04)	0.57
脳卒中	1	1.37 (0.80~2.33)	0.95 (0.35~2.64)	0.51
6 疾患合計	1	0.97 (0.90~1.05)	0.88 (0.78~0.99)	0.12

母親被ばく線量(Gy)*	オッズ比(95%信頼区間)			p 値
	0.005 未満	0.005~0.500	0.500 以上	
調査人数	6028	3694	1058	
多因子疾患				
高血圧	1	0.96 (0.87~1.07)	1.08 (0.92~1.28)	0.40
高コレステロール血症	1	1.08 (0.98~1.18)	1.02 (0.89~1.18)	0.28
糖尿病	1	1.04 (0.88~1.24)	1.05 (0.79~1.39)	0.86
狭心症	1	1.13 (0.72~1.78)	1.22 (0.58~2.59)	0.79
心筋梗塞	1	0.94 (0.50~1.79)	0.63 (0.16~2.51)	0.80
脳卒中	1	0.93 (0.58~1.51)	0.64 (0.23~1.78)	0.69
6 疾患合計	1	1.03 (0.96~1.10)	1.04 (0.94~1.16)	0.58

2世受診者総数11951人(父親被ばく線量不明1157人、母親被ばく線量不明1171人はそれぞれオッズ計算から除外)

* DS02

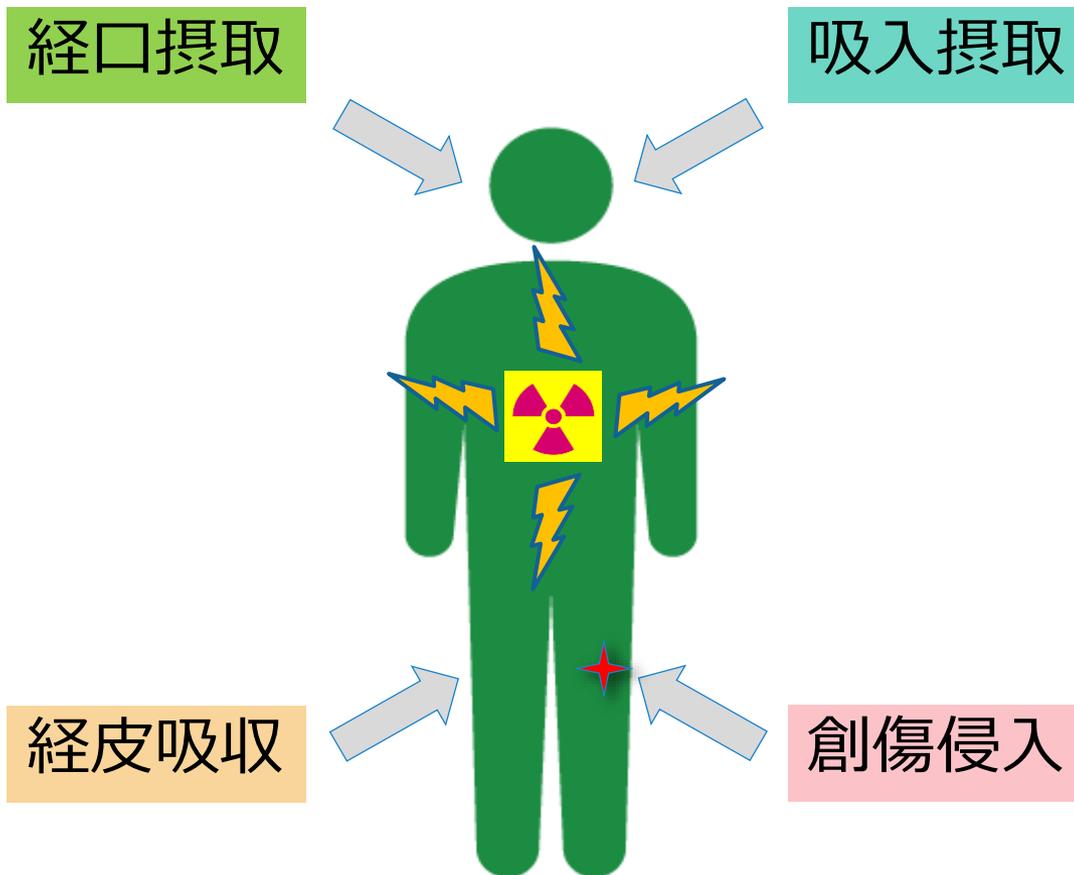


いずれの疾患も親の被ばくによる影響は見られなかった。

内部被ばく

内部被ばく

-体内に入った放射性物質からの被ばく-



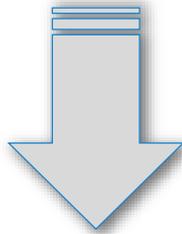
内部被ばくで考えなければならないこと

どんなRIがどのくらい
の量入ったのか？

何歳の人体に入
ったのか？

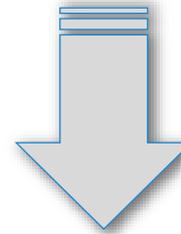
内部被ばくで考えなければならないこと

どんなRIがどのくらいの量入ったのか？



RIによって
放出する放射線
蓄積する臓器・組織
体からの排出速度
が違うため。

何歳の人体に入
ったのか？



年齢によって
体からの排出速度
が違うため。

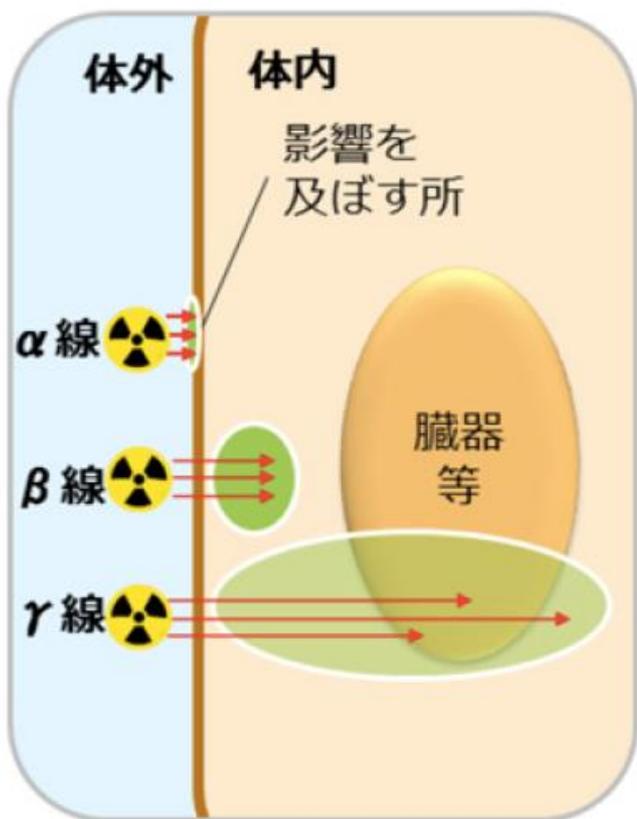
原発事故などで環境中に放出される可能性がある放射性同位元素 とそれが放出する放射線

放射性同位元素	放出する放射線
Cs-134 (セシウム134)	β線、γ線
Cs-137 (セシウム137)	β線、γ線
I-131 (ヨウ素131)	β線、γ線
Sr-90 (ストロンチウム90)	β線
Pu-239 (プルトニウム239)	α線

RIが放出する放射線の種類によって影響の大きさが異なる

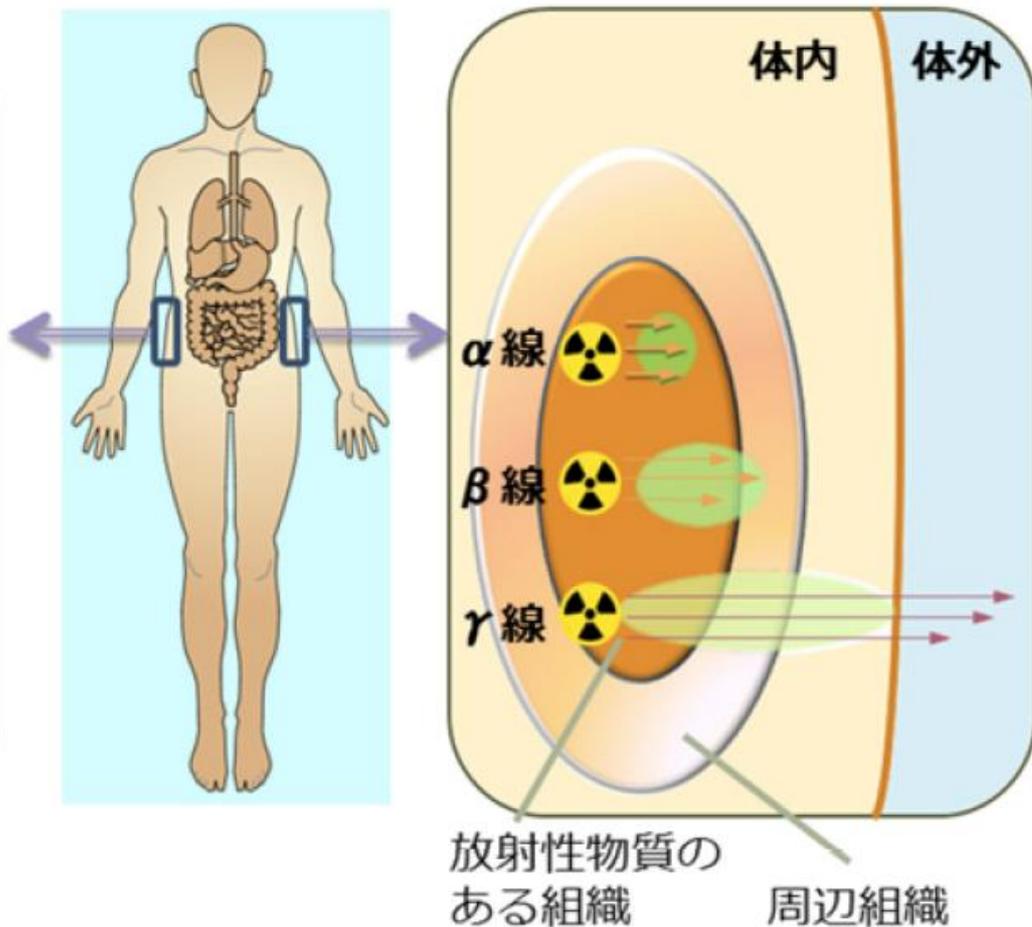
外部被ばく

放射性物質が体外にある場合



内部被ばく

放射性物質が体内にある場合



RIの種類によって体内動態が異なる

放射性同位元素	蓄積する臓器・組織
Cs-134 (セシウム134)	全身
Cs-137 (セシウム137)	全身
I-131 (ヨウ素131)	甲状腺
Sr-90 (ストロンチウム90)	骨
Pu-239 (プルトニウム239)	肝臓、骨

RIに関するいろいろな半減期

物理学的半減期：壊変により半分になる時間

生物学的半減期：排泄により半分になる時間

実効半減期：物理学的半減期と生物学的半減期を考えあわせ
体内のRI量が摂取量の半分になる時間

RIに関するいろいろな半減期

物理学的半減期：壊変により半分になる時間

生物学的半減期：排泄により半分になる時間

実効半減期：物理学的半減期と生物学的半減期を考えあわせ
体内のRI量が摂取量の半分になる時間

実効半減期

生物学的半減期と物理学的半減期の両方により
体内のRIの量が半分になるまでの時間

$$\frac{1}{\text{実効半減期}} = \frac{1}{\text{物理学的半減期}} + \frac{1}{\text{生物学的半減期}}$$

RIの実効半減期

放射性同位元素 (RI)	実効半減期
Cs-134 (セシウム134)	64-88日
Cs-137 (セシウム137)	70-99日
I-131 (ヨウ素131)	7日
Sr-90 (ストロンチウム90)	18年
Pu-239 (プルトニウム239)	20年

放射性同位元素 (RI) の量の単位

Bq
(ベクレル)

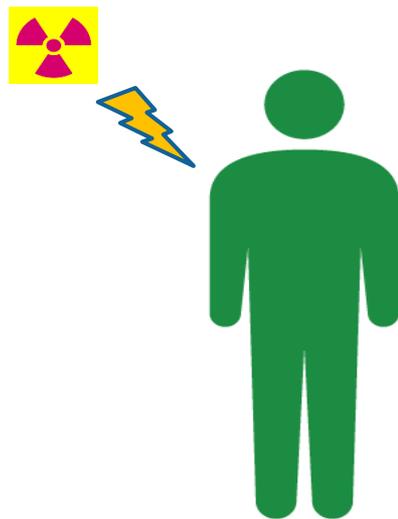


体の中に入ったRIの量もこのBqで表す。

Sv = 人体影響の単位

外部被ばく

体の外からの被ばく



内部被ばく

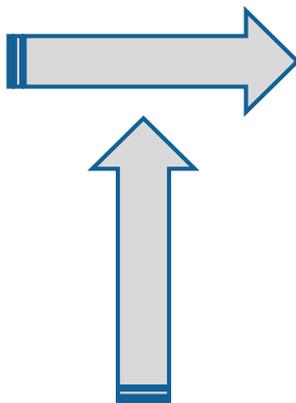
体内に摂取・吸入・吸収した
放射性物質からの被ばく



同じSvであれば、外部被ばくでも内部被ばくでも影響は同じ。

ベクレル (Bq)

どのくらいの量のRIが
体内に入ったか？



預託実効線量 (Sv)

その量のRIが人体にどのくらいの
影響を与えるか？

預託実効線量係数
($\mu\text{Sv}/\text{Bq}$)

放射性同位元素の種類ごと、
摂取経路（経口、吸入など）ごと、
年齢区分ごとに
細かく設定されている。

預託実効線量係数（ $\mu\text{Sv}/\text{Bq}$ ）（経口摂取の場合）

	ヨウ素 131	セシウム 134	セシウム 137	ストロンチウム 90	プルトニウム 239
3か月児	0.18	0.026	0.021	0.23	4.2
1歳児	0.18	0.016	0.012	0.073	0.42
5歳児	0.10	0.013	0.0096	0.047	0.33
10歳児	0.052	0.014	0.01	0.06	0.27
15歳児	0.034	0.019	0.013	0.08	0.24
成人	0.022	0.019	0.013	0.028	0.25

例えばあなたが10,000 BqのCs-137を含む食べ物を
食べたら、どのくらい内部被ばくするか？

成人の経口摂取のCs-137の預託実効線量係数は
0.013 $\mu\text{Sv}/\text{Bq}$ なので、

$$10,000 \text{ (Bq)} \times 0.013 \text{ (}\mu\text{Sv/Bq)} = 130 \text{ }\mu\text{Sv}$$

がんによる死亡リスクが上がる実効線量（急性被ばく）
=100 mSv以上