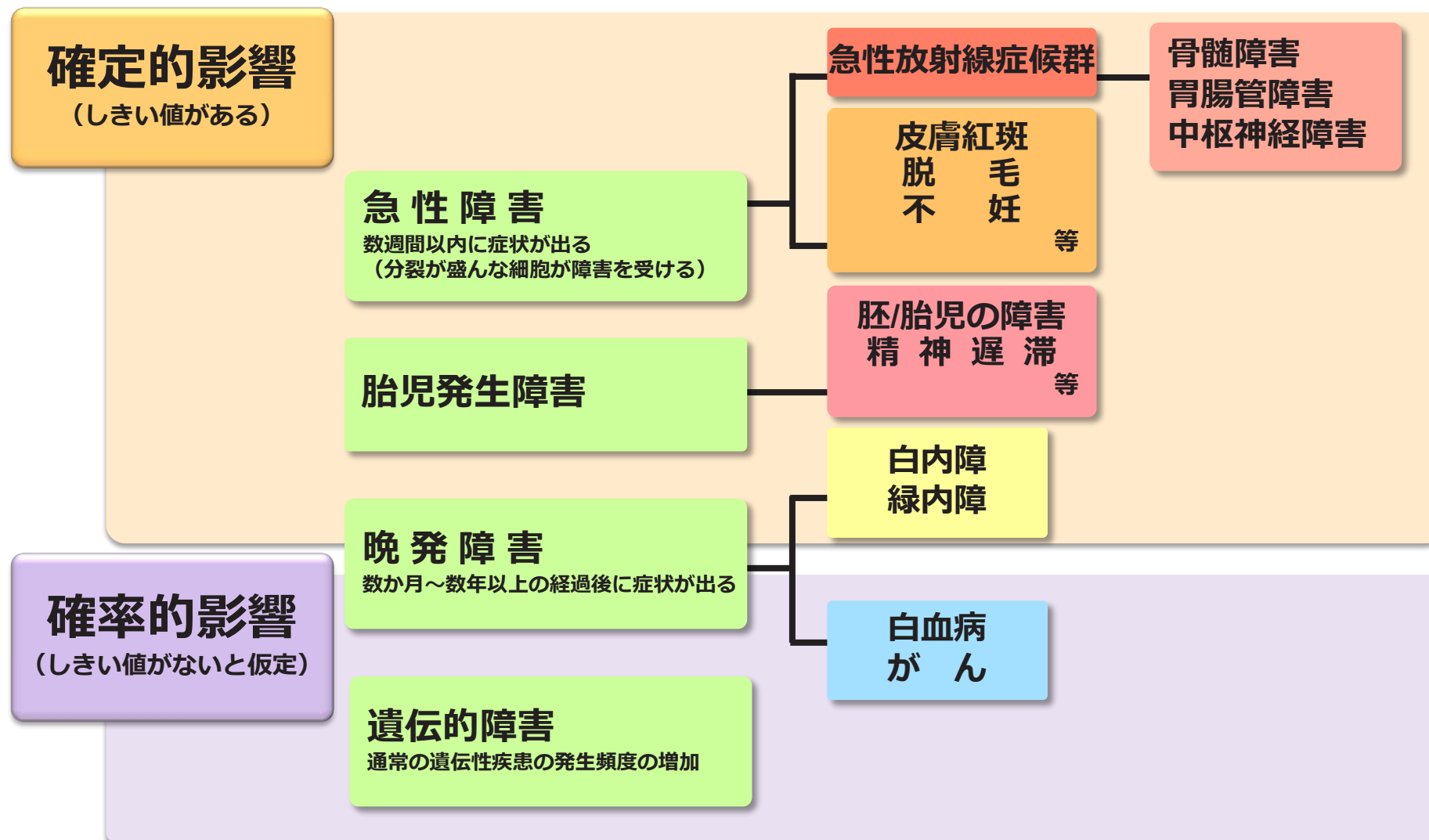


影響の種類

- ▶ 放射線を受けた後にどのような健康影響が生じるか、生じないか、受けた放射線の量、受けた場所（全身、局所）、時間的経過（被ばくの様式）を考慮する



被ばくの形態と影響

高線量被ばく

(大量の放射線を受けた)

低線量被ばく

(少量の放射線を受けた)

急性被ばく

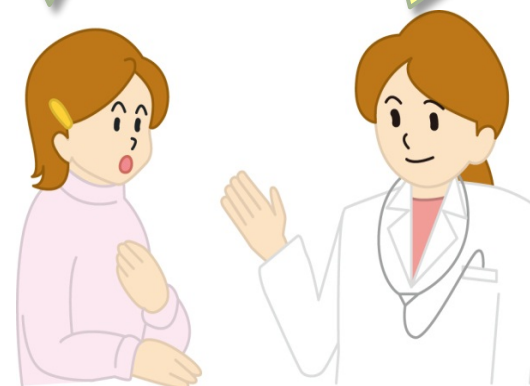
(大量の放射線を短時間に受けた)

慢性被ばく

(少量の放射線を長期間にわたって受けた)

皮膚障害
吐き気
脱毛？

急性障害は
大量の放射線を
短時間に受けると
起こります



放射線影響の分類

		潜伏期間	例	放射線影響の機序
影響の出現	身体的影響	数週間以内 = 急性影響 (早期影響)	急性放射線症候群※1 急性皮膚障害	細胞死/細胞変性 で起こる 確定的影響※2 
		数か月以降 = 晩発影響	胎児の発生・発達異常(奇形)	
			水晶体の混濁	突然変異で起こる 確率的影響 
	遺伝性影響		がん・白血病	
			遺伝性疾患	

※1：主な症状としては、被ばく後数時間以内に認められる嘔吐、数日から数週間にかけて生じる下痢、血液細胞数の減少、出血、脱毛、男性の一過性不妊症等。

※2：一定量以上の被ばくがないと発生しない。

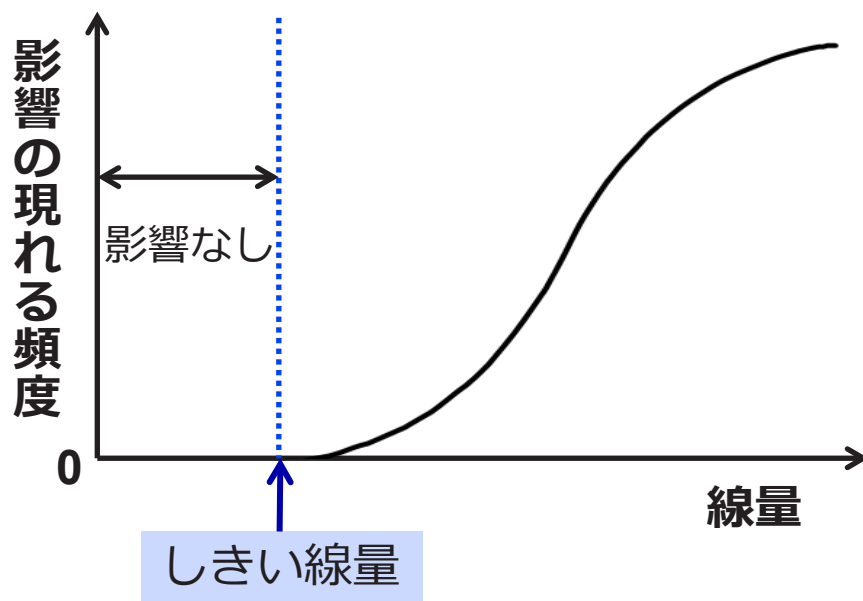
確定的影響と確率的影響

確定的影響

(脱毛・白内障・皮膚障害等)

同じ線量を多数の人が被ばくしたとき、全体の1%の人に症状が現れる線量を「しきい線量」としている。

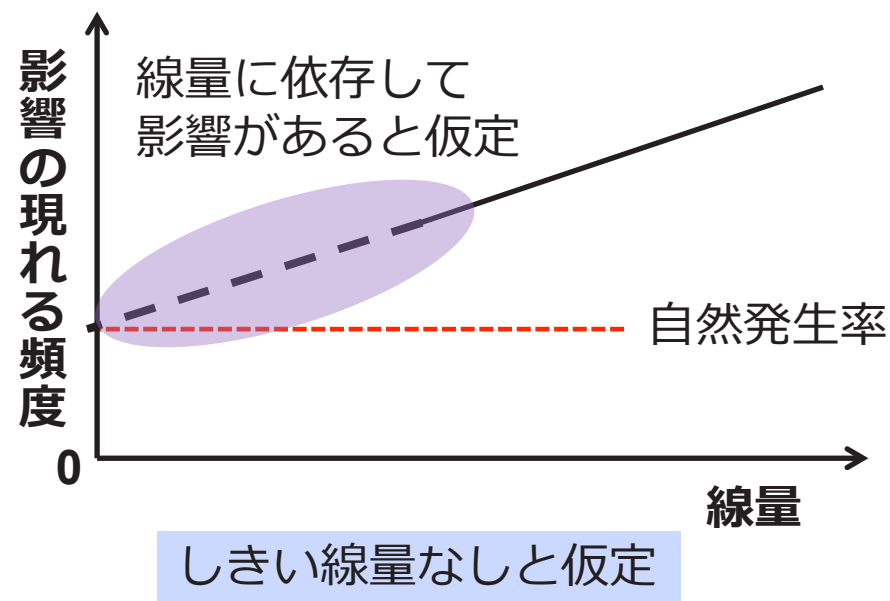
(国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007年勧告)



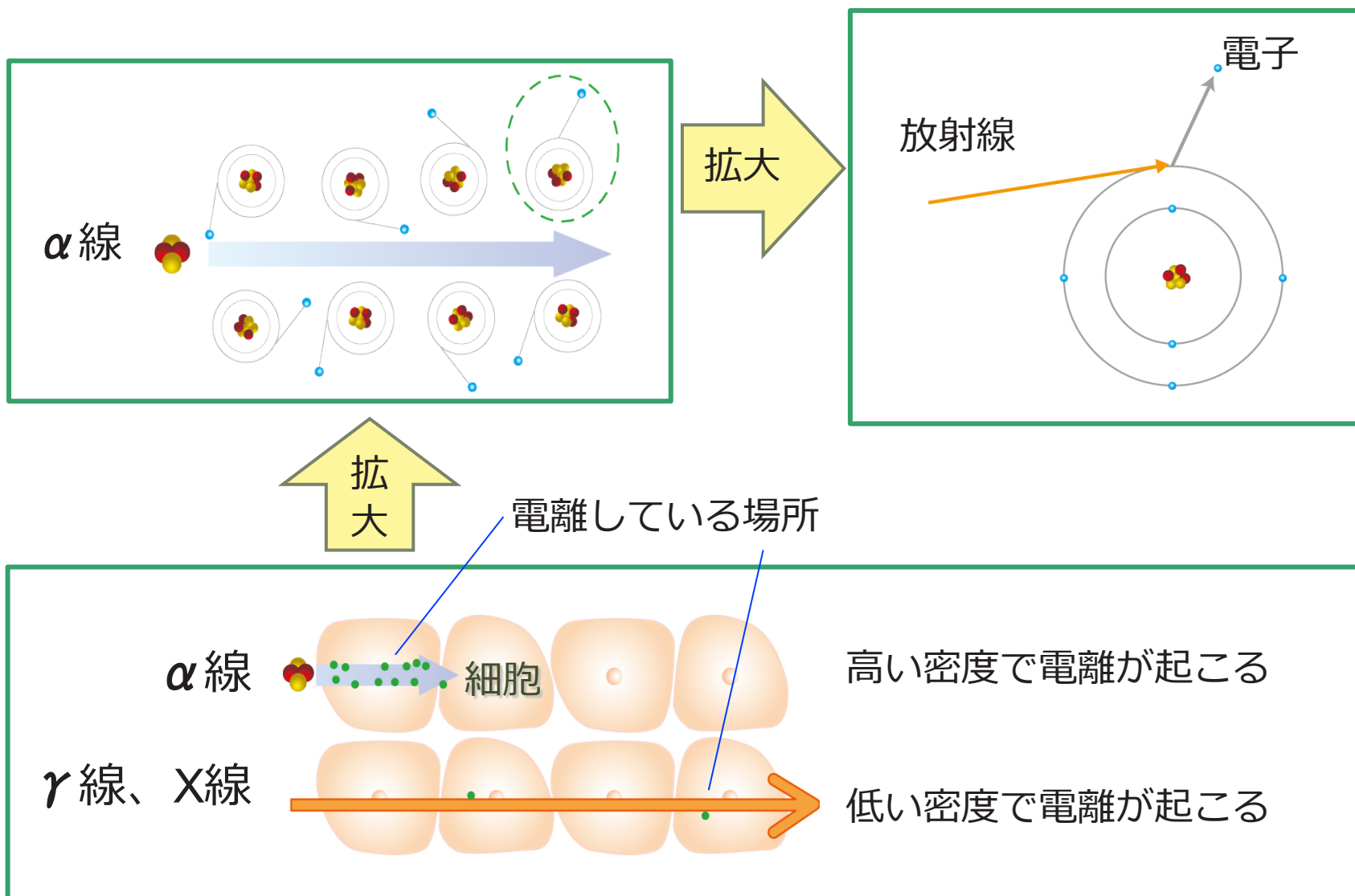
確率的影響

(がん・白血病・遺伝性影響等)

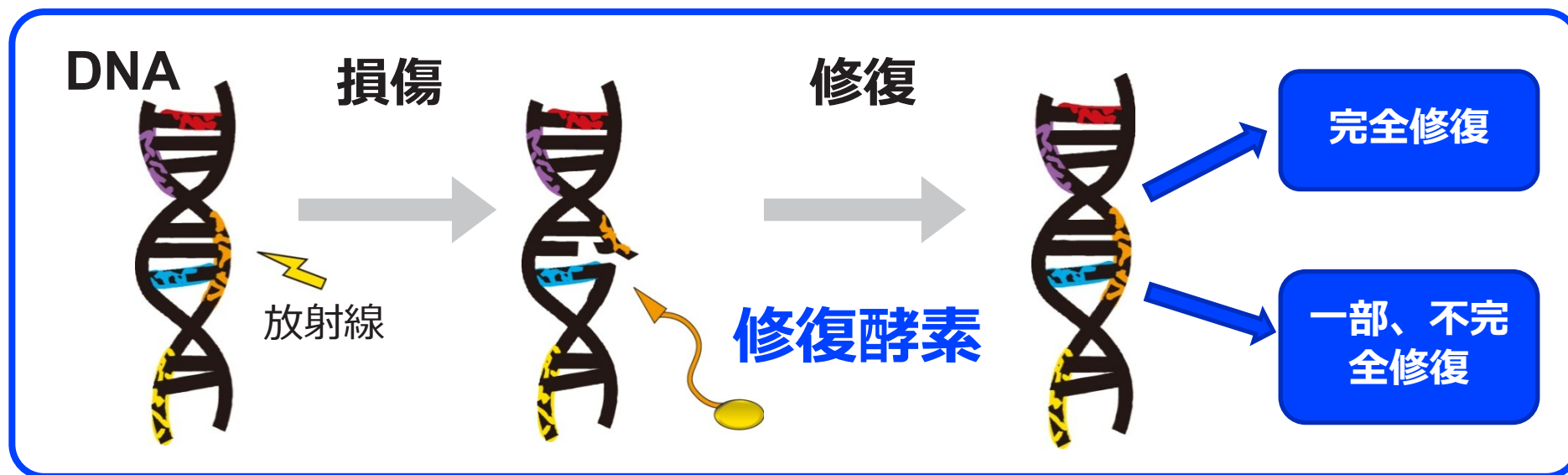
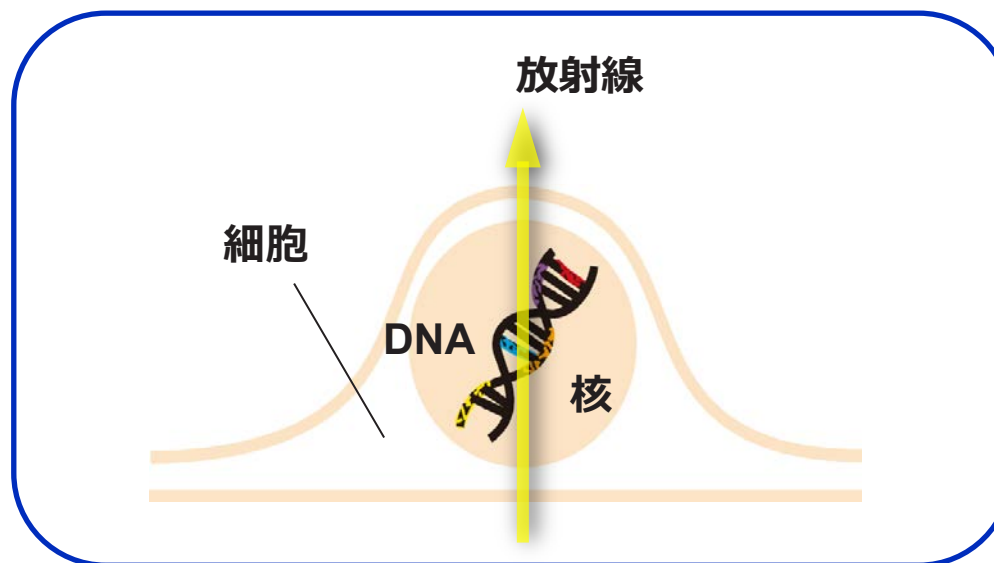
一定の線量以下では、喫煙や飲酒といった他の発がん影響が大きすぎて見えないが、ICRP等ではそれ以下の線量でも影響はあると仮定して、放射線防護の基準を定めることとしている。



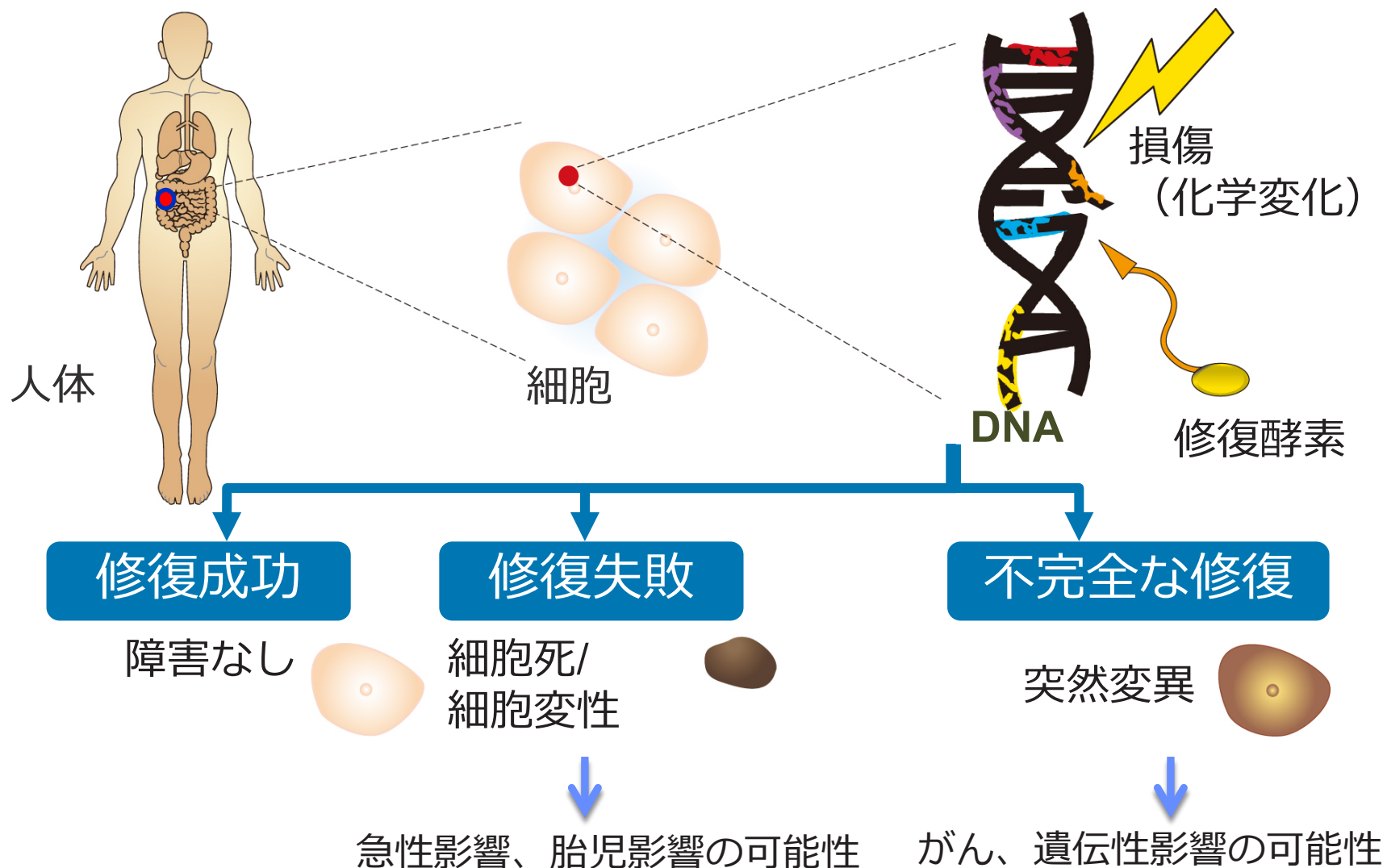
放射線による電離作用



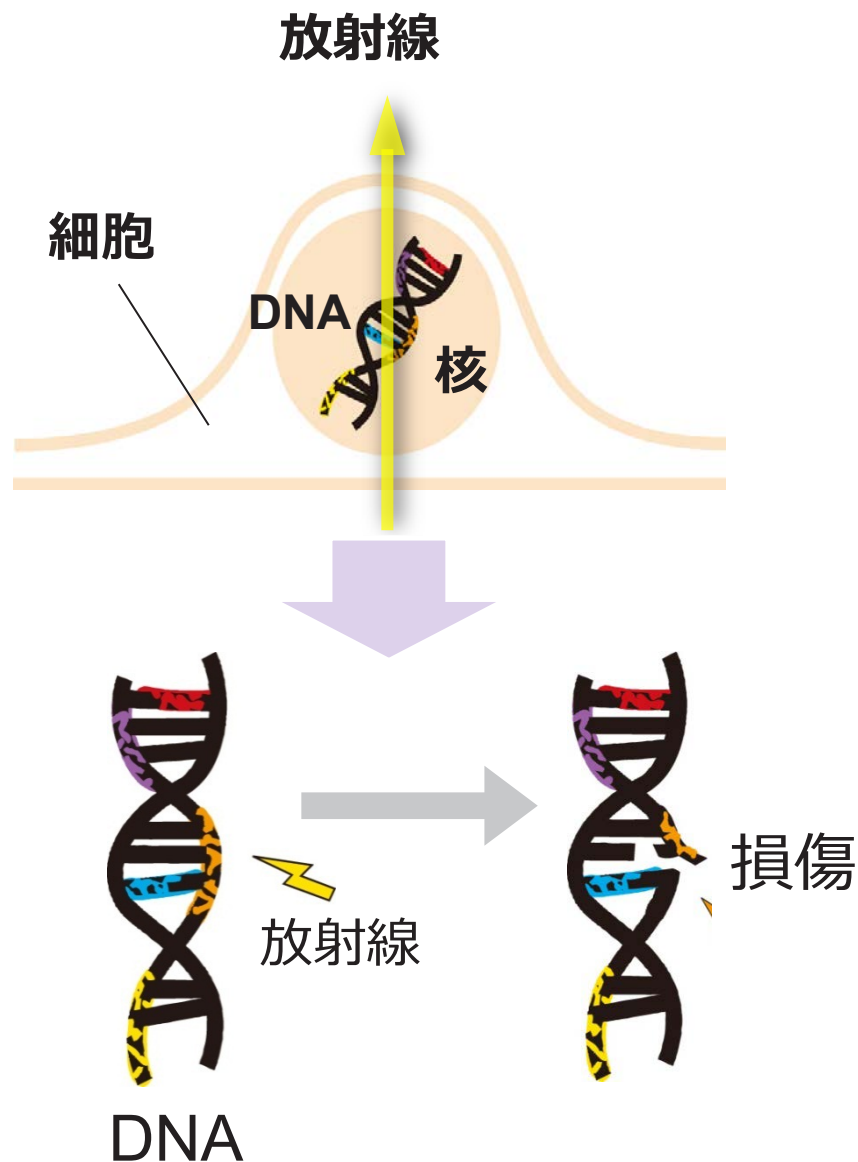
DNAの損傷と修復



DNA→細胞→人体



放射線によるDNAの損傷



**X線 1 ミリグレイ 当たりの損傷
(1細胞当たり)**

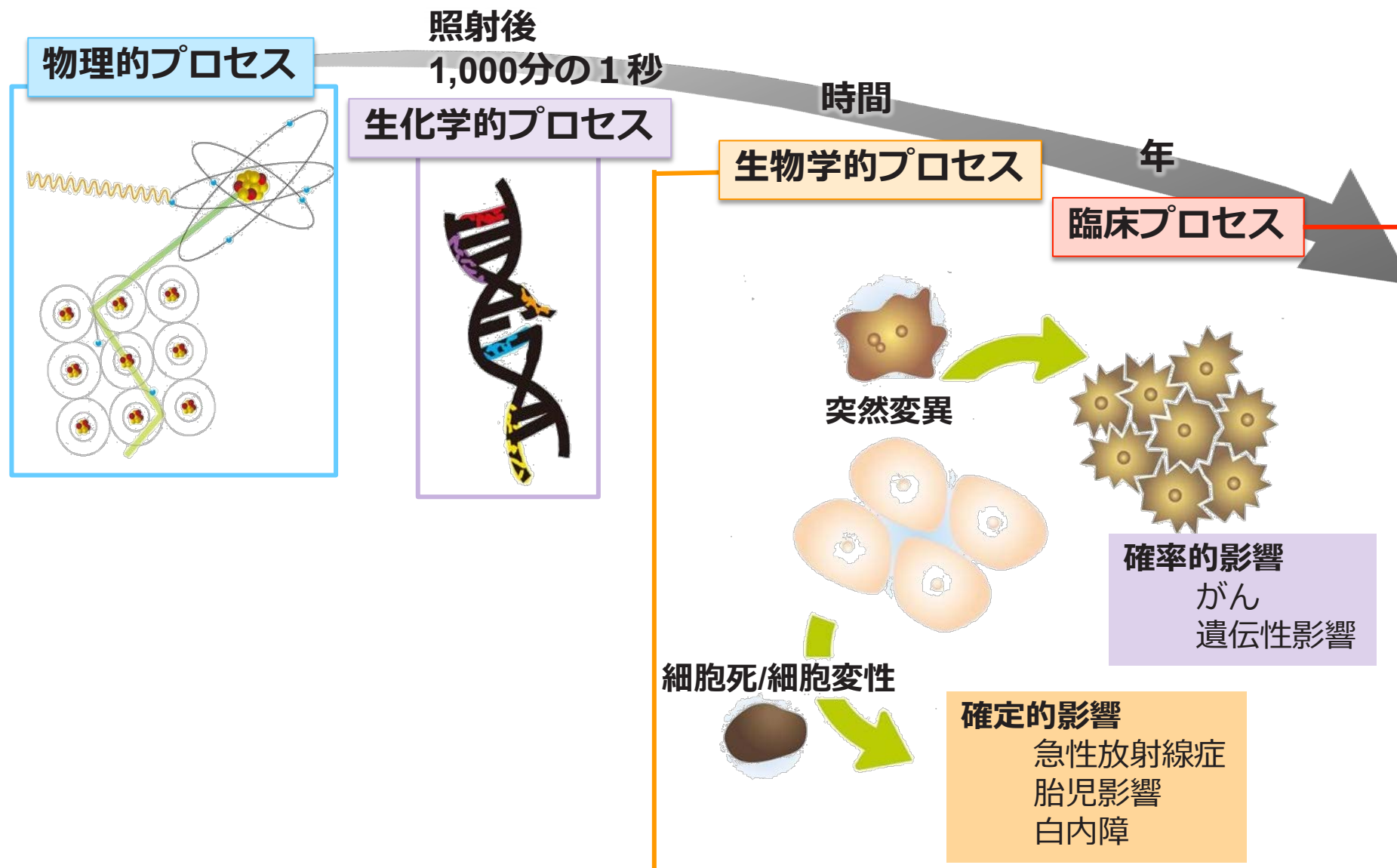
塩基損傷 2.5 箇所

1 本鎖切断 1 箇所

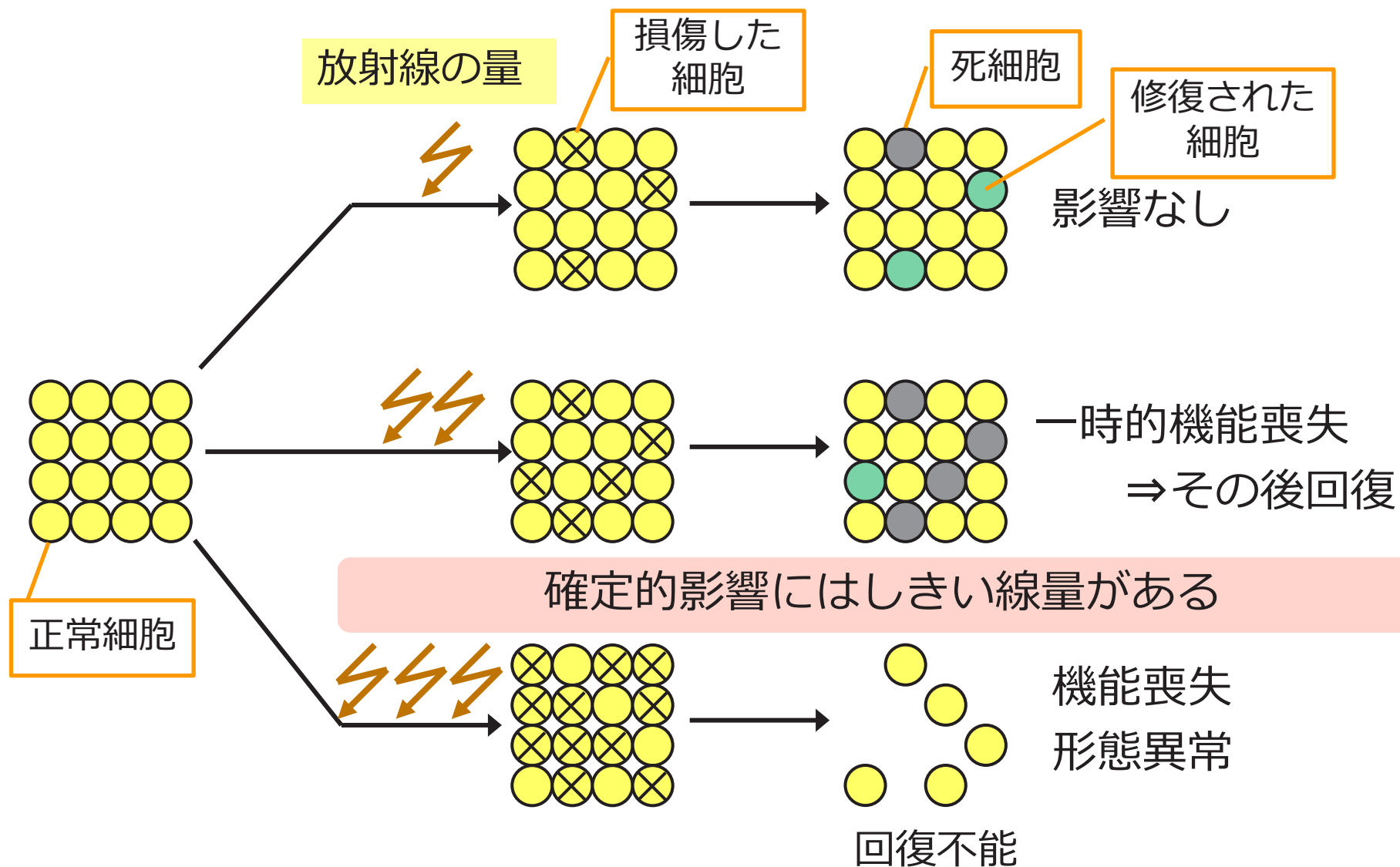
2 本鎖切断 0.04 箇所

Morgan, 米国放射線防護委員会 (NCRP)
年次総会(第44回、2009)

被ばく後の時間経過と影響



確定的影響



臓器・組織の放射線感受性

分裂が盛ん

感受性が高い

造血系：骨髓、リンパ組織（脾臓、胸腺、リンパ節）

生殖器系：精巣、卵巣

消化器系：粘膜、小腸絨毛

表皮、眼：毛嚢、汗腺、皮膚、水晶体

その他：肺、腎臓、肝臓、甲状腺

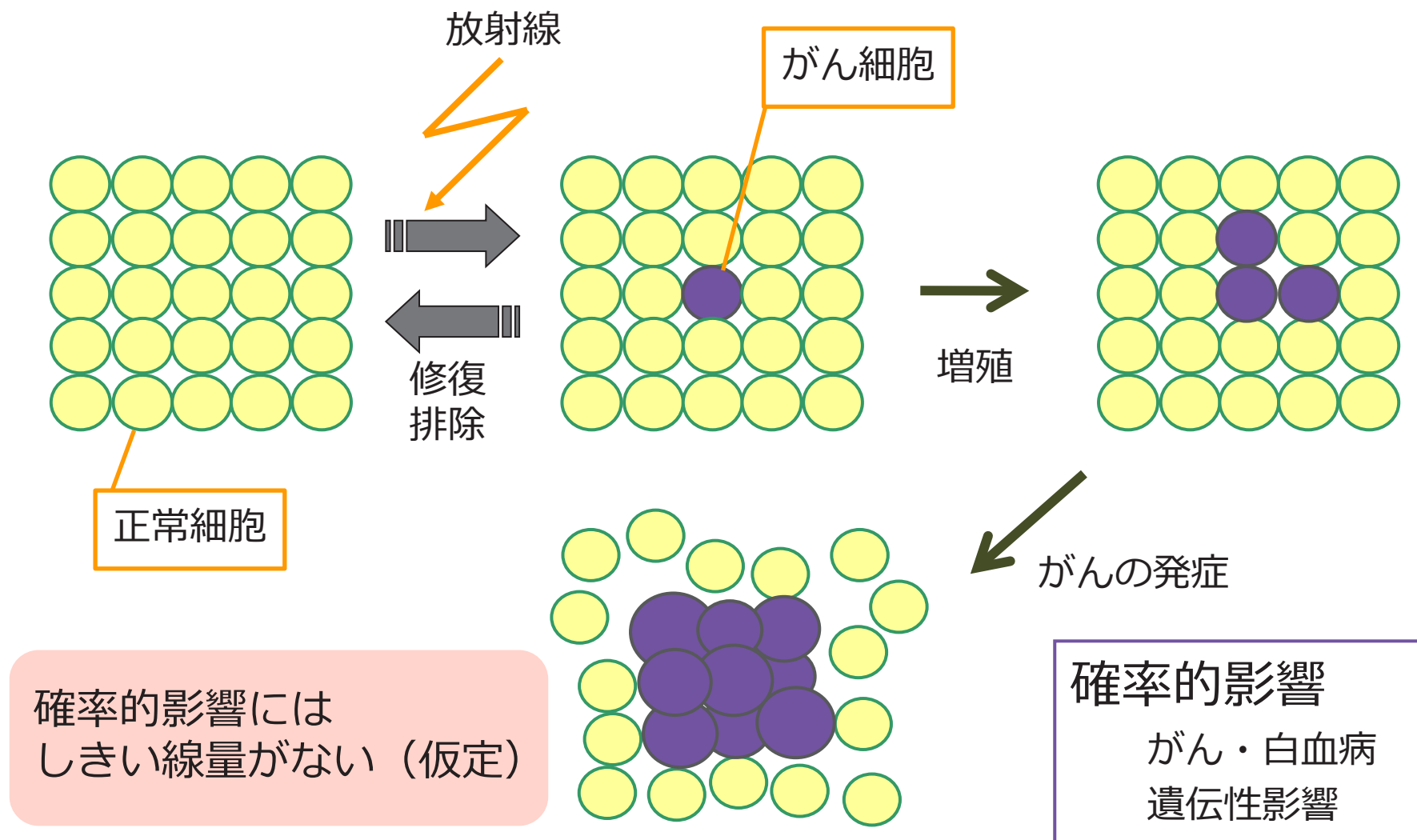
支持系：血管、筋肉、骨

伝達系：神経

分裂しない

感受性が低い

確率的影響



確定的影響

全身被ばくと局所被ばく

全身

下痢

頭痛、発熱

悪心、嘔吐

末梢血中のリンパ球減少

200 1,000

5,000

10,000 (ミリグレイ)

局所

一時的精子数減少

永久不妊 (男女共通)

水晶体混濁

白内障、緑内障

(皮膚) 一時的紅斑

紅斑

潰瘍

(皮膚) 一時的脱毛

永久脱毛

出典：原子力安全委員会健康管理検討委員会報告（平成12年）他より改変

確定的影響

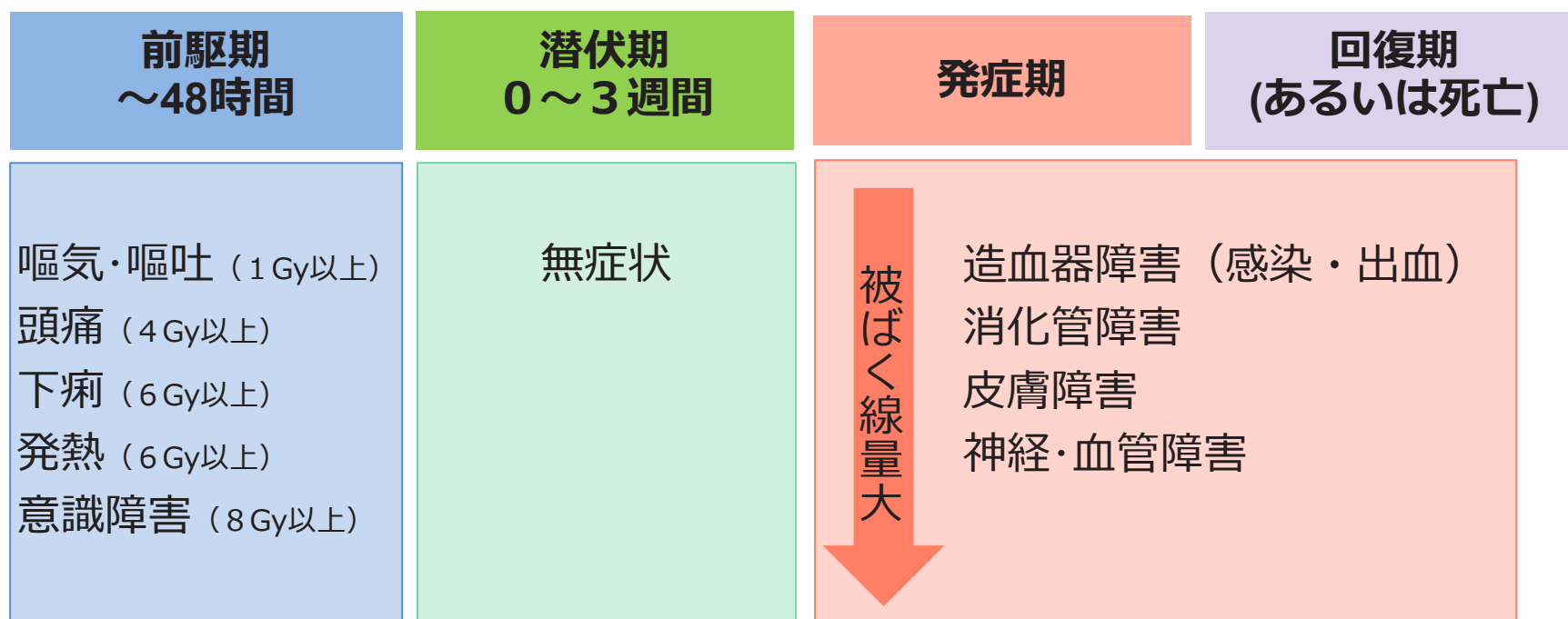
急性放射線症候群

急性放射線症候群の病期

被ばく時



時間経過



※全身に1 グレイ (1000ミリグレイ) 以上の放射線を一度に受けた場合に見られる急性放射線症候群

Gy : グレイ

出典 : (公財) 原子力安全研究協会 緊急被ばく医療研修テキスト「放射線の基礎知識」

様々な影響のしきい値

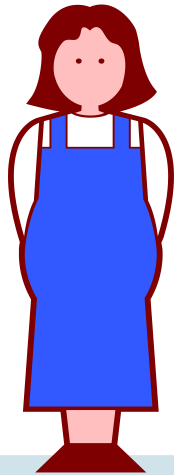
γ （ガンマ）線急性吸収線量のしきい値

障害	臓器／組織	潜伏期	しきい値 (グレイ)※
一時的不妊	精巣	3～9週	約0.1
永久不妊	精巣	3週	約6
	卵巣	1週以内	約3
造血能低下	骨髄	3～7日	約0.5
皮膚発赤	皮膚（広い範囲）	1～4週	3～6以下
皮膚熱傷	皮膚（広い範囲）	2～3週	5～10
一時的脱毛	皮膚	2～3週	約4
白内障（視力低下）	眼	数年	0.5

※臨床的な異常が明らかな症状のしきい線量（1％の人々に影響を生じる線量）

出典：国際放射線防護委員会（ICRP）2007年勧告、国際放射線防護委員会報告書118（2012年）

確定的影響と時期特異性



重要な器官が形成される時期
= 薬の使用に気を付ける時期
= 放射線にも弱い時期



着床前期
受胎0-2週
・ 流産

器官形成期
受胎2-8週
・ 器官形成異常
(奇形)

胎児前期
受胎8-15週
・ 精神発達
遅滞

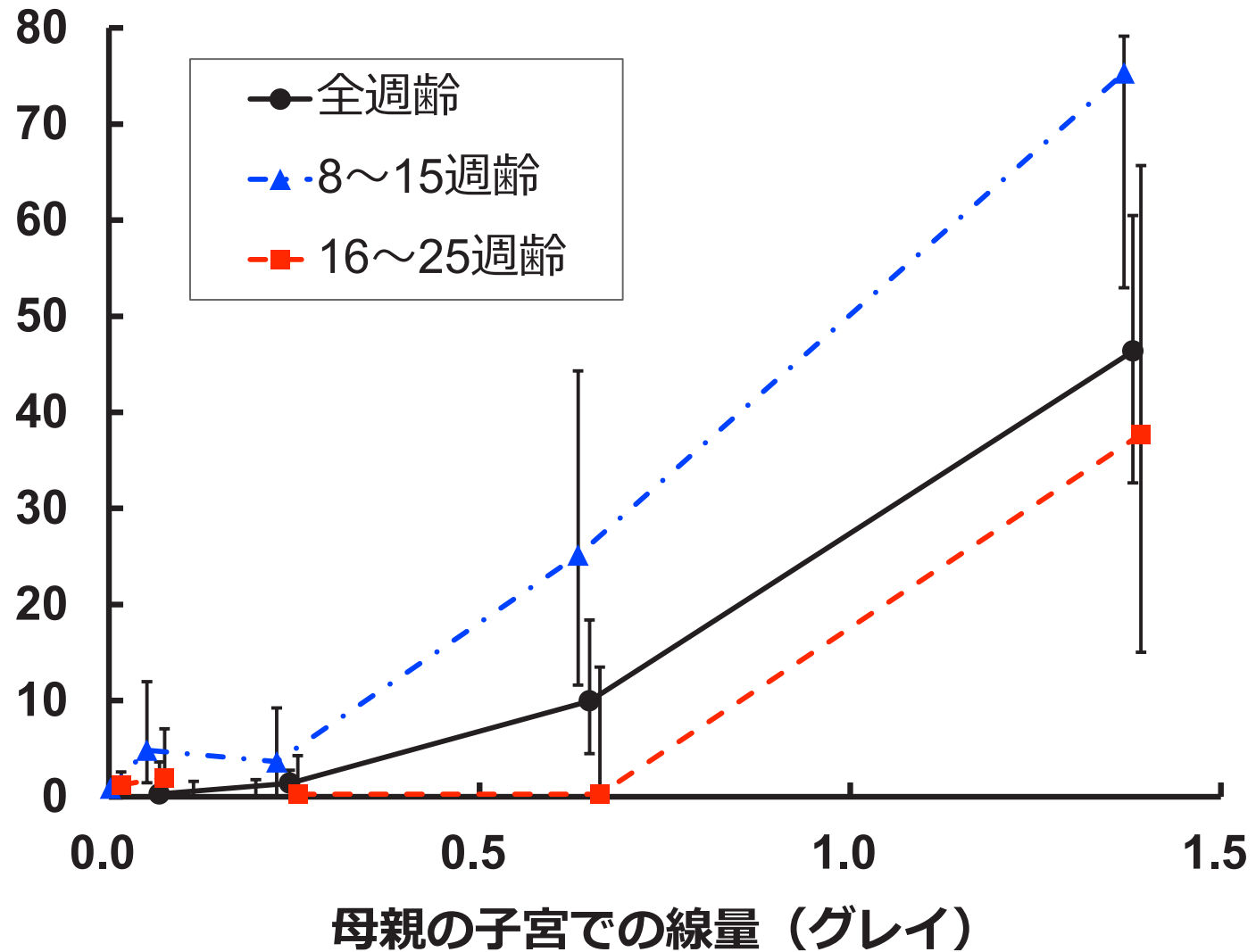
胎児後期
受胎15週
～出産

しきい値は**0.1グレイ** 以上

※一般的に妊娠2週目と呼ばれている時期は、妊娠直後の受胎0週(齡)に相当します。



重度知的障害リスク (%)



出典：放射線影響研究所ウェブサイト「胎内被爆者の身体的・精神的発育と成長」
(<http://www.rerf.or.jp/radefx/uteroexp/physment.html>) より作成

被爆二世における染色体異常



原爆被爆者の子供における安定型染色体異常

異常の起源	染色体異常を持った子供の数 (割合)	
	対照群 (7,976人)	被ばく群 (8,322人) 平均線量は0.6グレイ
両親のどちらかに由来	15 (0.19%)	10 (0.12%)
新たに生じた例	1 (0.01%)	1 (0.01%)
不明 (両親の検査ができなかった)	9 (0.11%)	7 (0.08%)
合 計	25 (0.31%)	18 (0.22%)

出典：放射線影響研究所ウェブサイト「被爆者の子供における染色体異常（1967－1985年の調査）」
(<http://www.rerf.or.jp/radefx/genetics/chromeab.html>)

ヒトでの遺伝性影響のリスク

■ 放射線による生殖腺（生殖細胞）への影響

◎ 遺伝子突然変異

DNAの遺伝情報の変化（点突然変異）

◎ 染色体異常

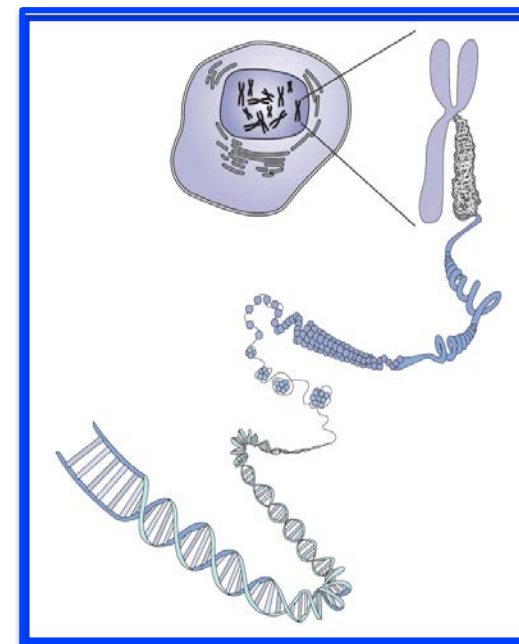
染色体の構造異常

※ヒトでは子孫の遺伝病の増加は証明されていません

■ 遺伝性影響のリスク(子と孫の世代まで)

= 約0.2%/グレイ(1グレイ当たり1,000人中2人)

(国際放射線防護委員会(ICRP) 2007年勧告)



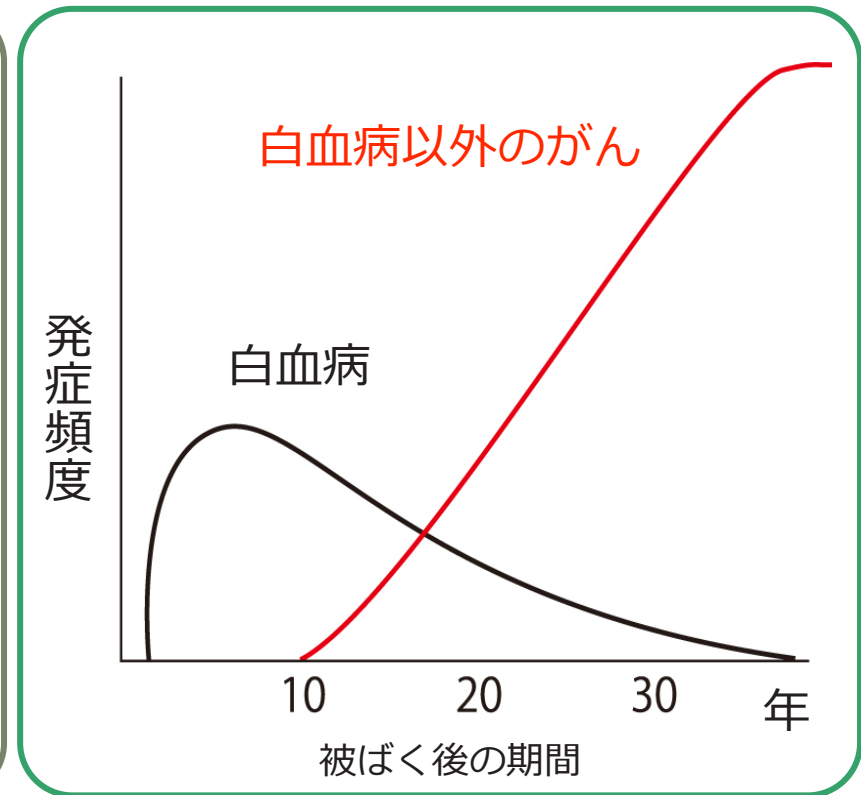
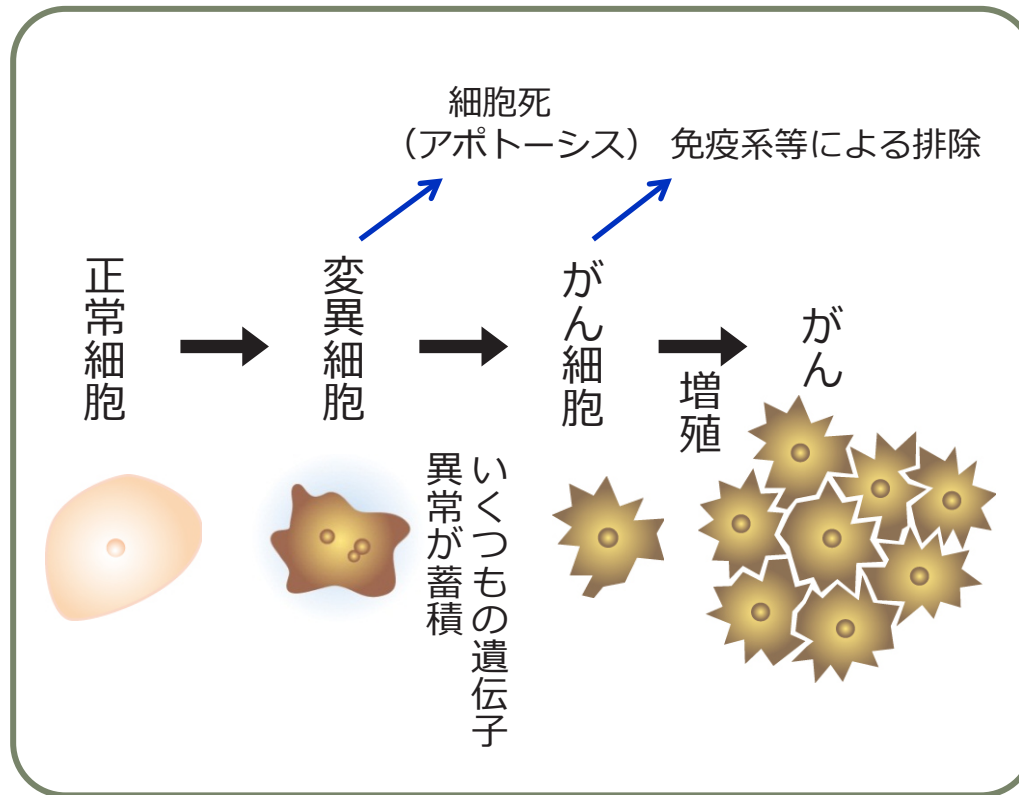
この値は、以下のデータを用いて間接的に推定されている

- ・ ヒト集団での各遺伝性疾患の自然発生頻度
- ・ 遺伝子の平均自然突然変異率（ヒト）、平均放射線誘発突然変異率（マウス）
- ・ マウスの放射線誘発突然変異からヒト誘発遺伝性疾患の潜在的リスクを外挿する補正係数

■ 生殖腺の組織加重係数（国際放射線防護委員会(ICRP)勧告)

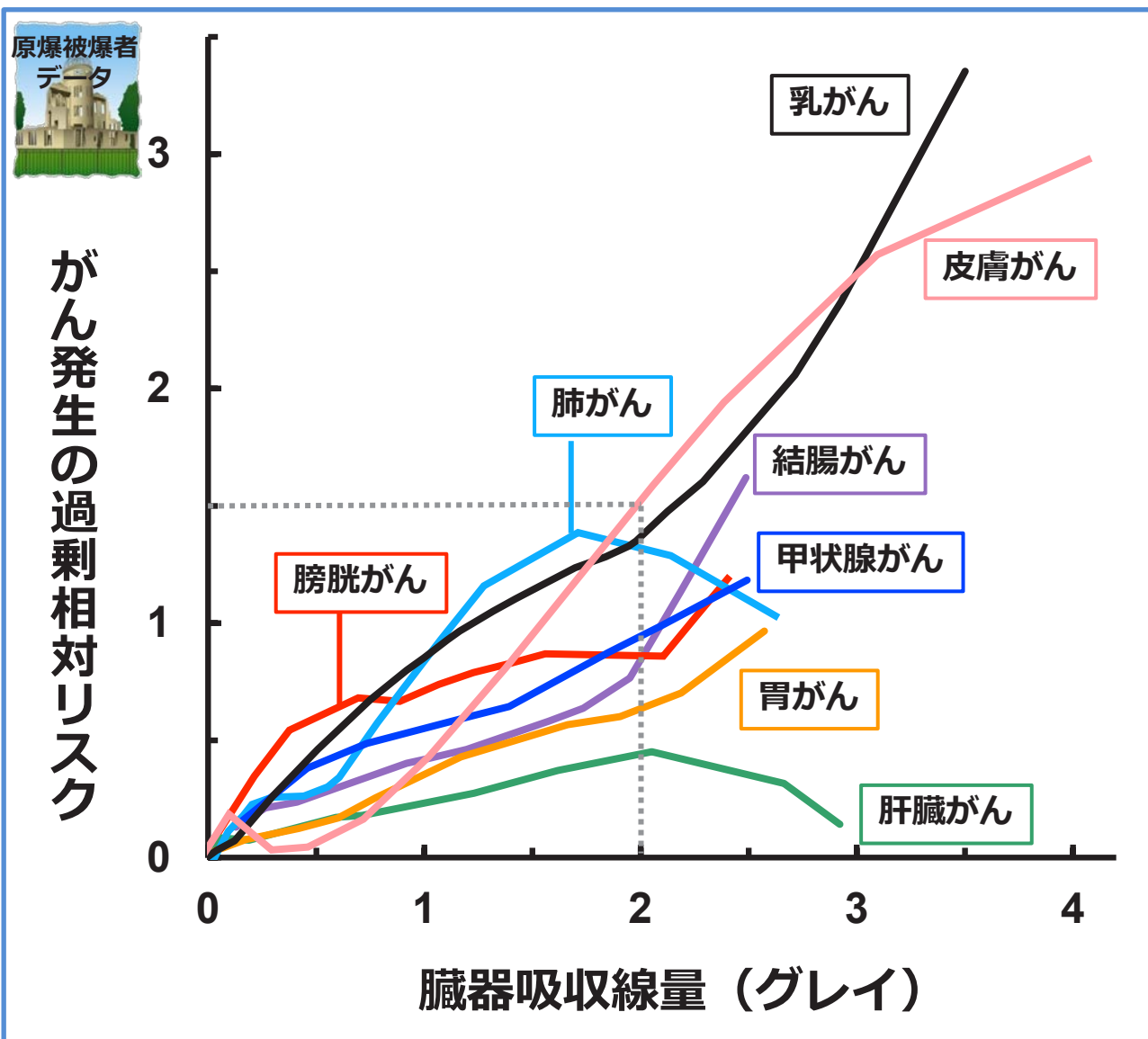
0.25(1977年)→0.20(1990年)→0.08(2007年)

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、いろいろなプロセスが必要
→数年～数十年掛かる

放射線感受性の高い組織・臓器



組織	組織加重係数 w_T ※
骨髄(赤色)、胃、肺、結腸、乳房	0.12
生殖腺	0.08
膀胱、食道、肝臓、甲状腺	0.04
骨表面、脳、唾液腺、皮膚	0.01
残りの組織の合計	0.12

出典：国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007年勧告

※放射線による影響のリスクが大きい臓器・組織ほど大きい値になる。

出典：Preston et al., Radiat Res, 168, 1, 2007より作成

年齢による感受性の差

子供は小さな大人ではない

	ヨウ素131の 預託実効線量係数※1 ($\mu\text{Sv/Bq}$)	ヨウ131を100Bq 摂取したときの 預託実効線量(μSv)	ヨウ131を100Bq 摂取したときの 甲状腺等価線量※2(μSv)
3か月児	0.48	48	1,200
1歳児	0.18	18	450
5歳児	0.10	10	250
大人	0.022	2.2	55

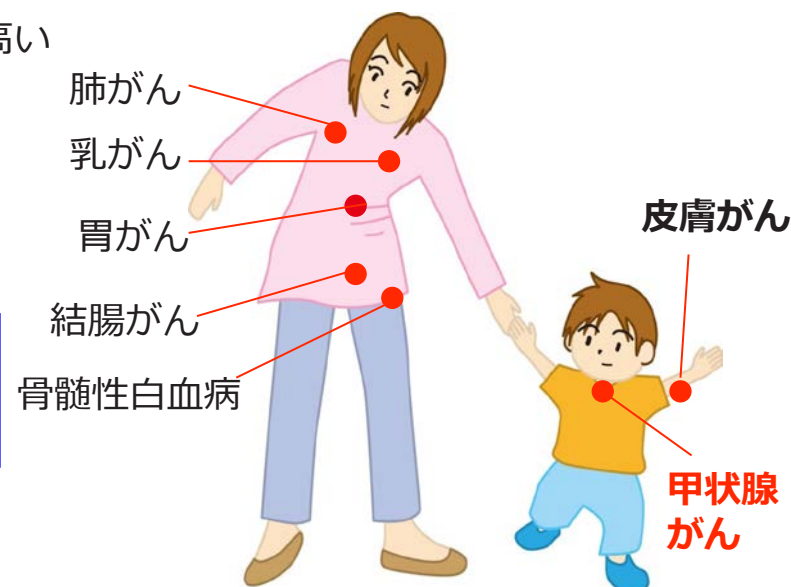
※1：代謝や体格の違いから、子供は預託実効線量係数が高い

※2：甲状腺の組織加重係数は0.04から算出

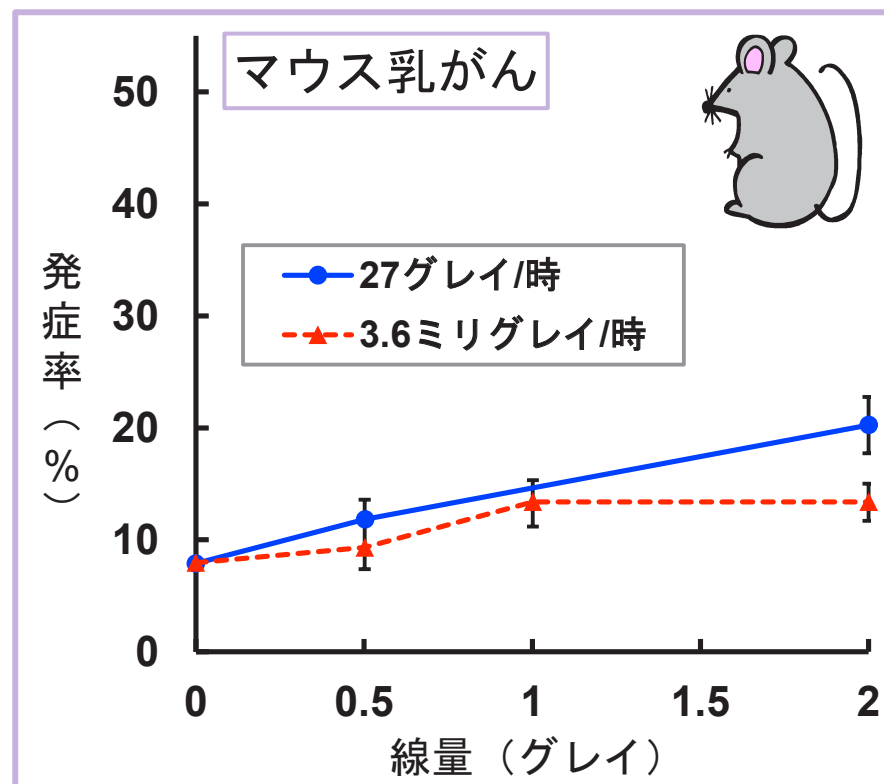
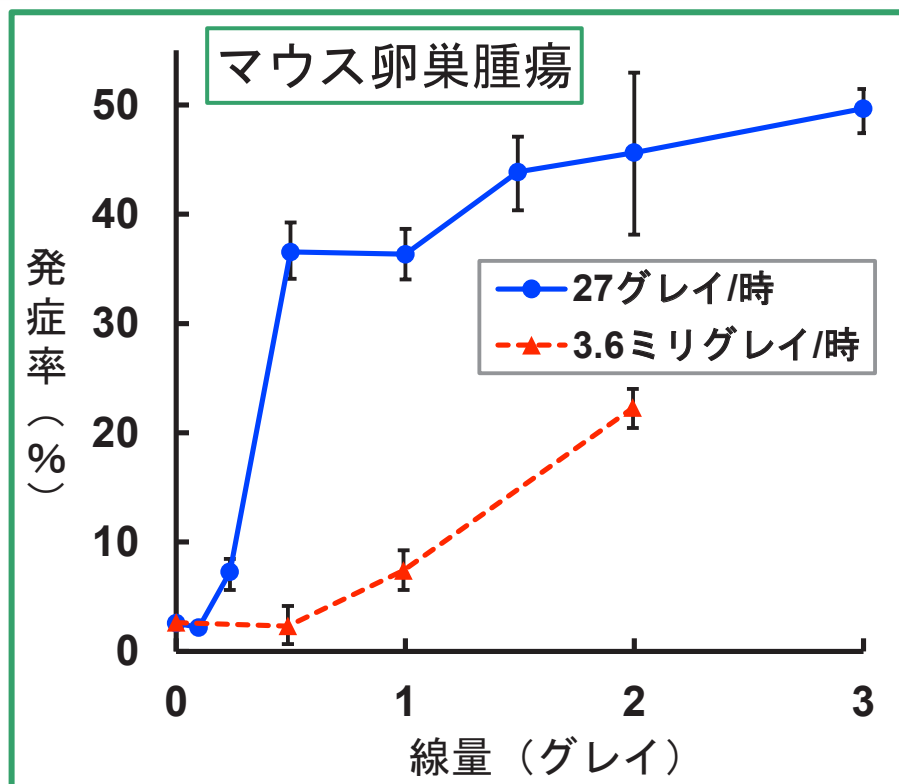
出典：国際放射線防護委員会（ICRP），ICRP Publication 119，
Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60，
2012

子供では大人と比較して、甲状腺
や皮膚のがんリスクが高くなる

$\mu\text{Sv/Bq}$: マイクロシーベルト/ベクレル



低線量率被ばくが発がんへの影響



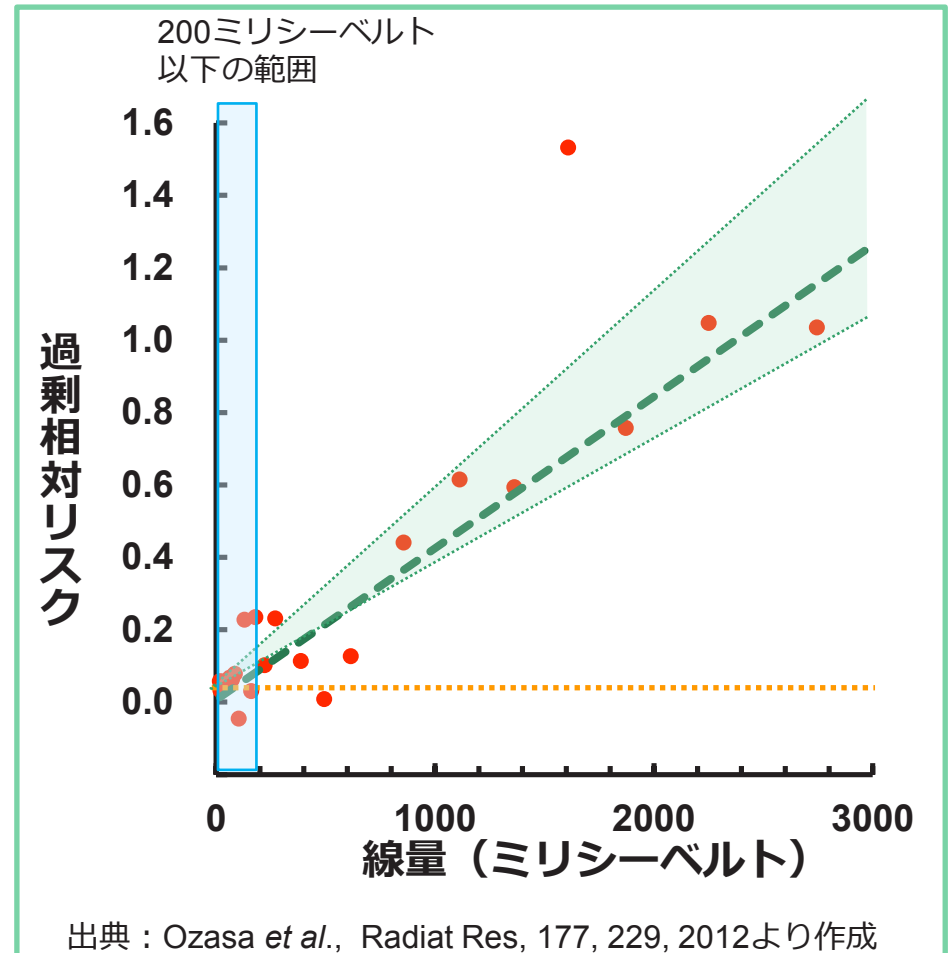
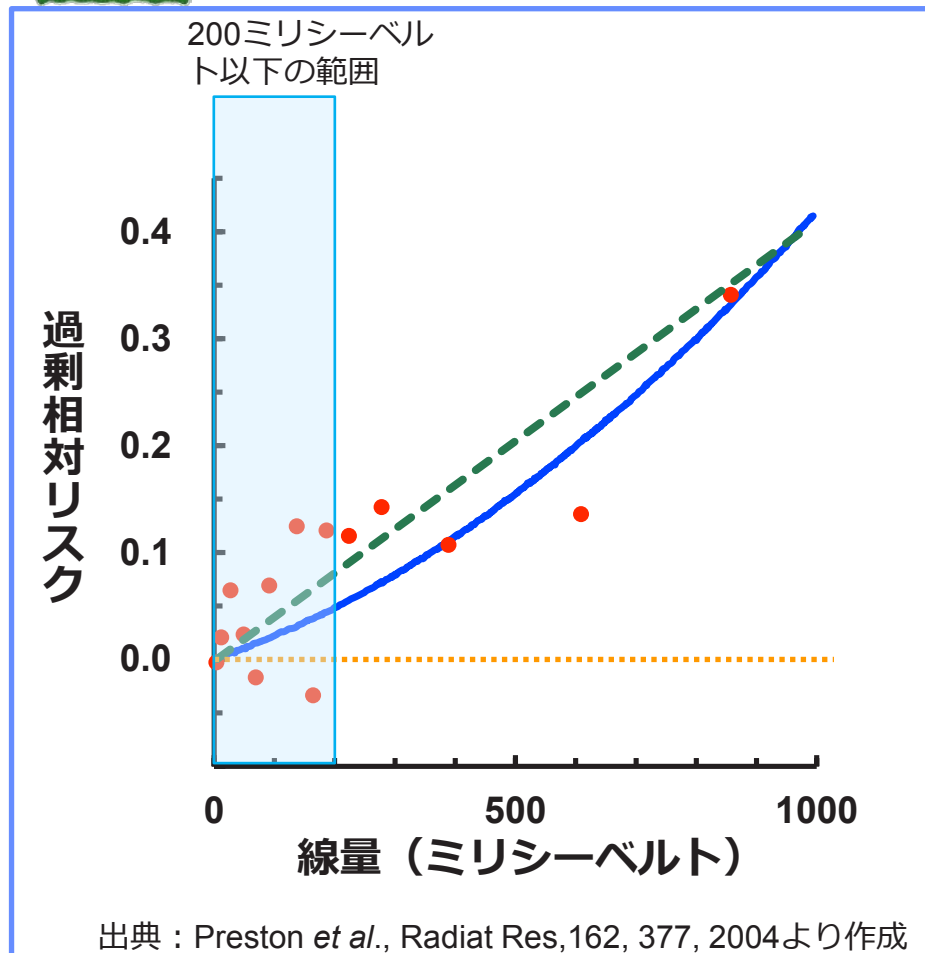
出典：国連科学委員会 (UNSCEAR) 1993

$$\text{低線量・低線量率のリスク} = \frac{\text{高線量・高線量率のリスク}}{\text{線量・線量率効果係数}}$$

機関	線量・線量率効果係数
国連科学委員会(UNSCEAR)1993	3より小さい (1～10)
全米科学アカデミー(NAS)2005	1.5
国際放射線防護委員会(ICRP)1990,2007	2



固形がんによる死亡（原爆被爆者での結果）

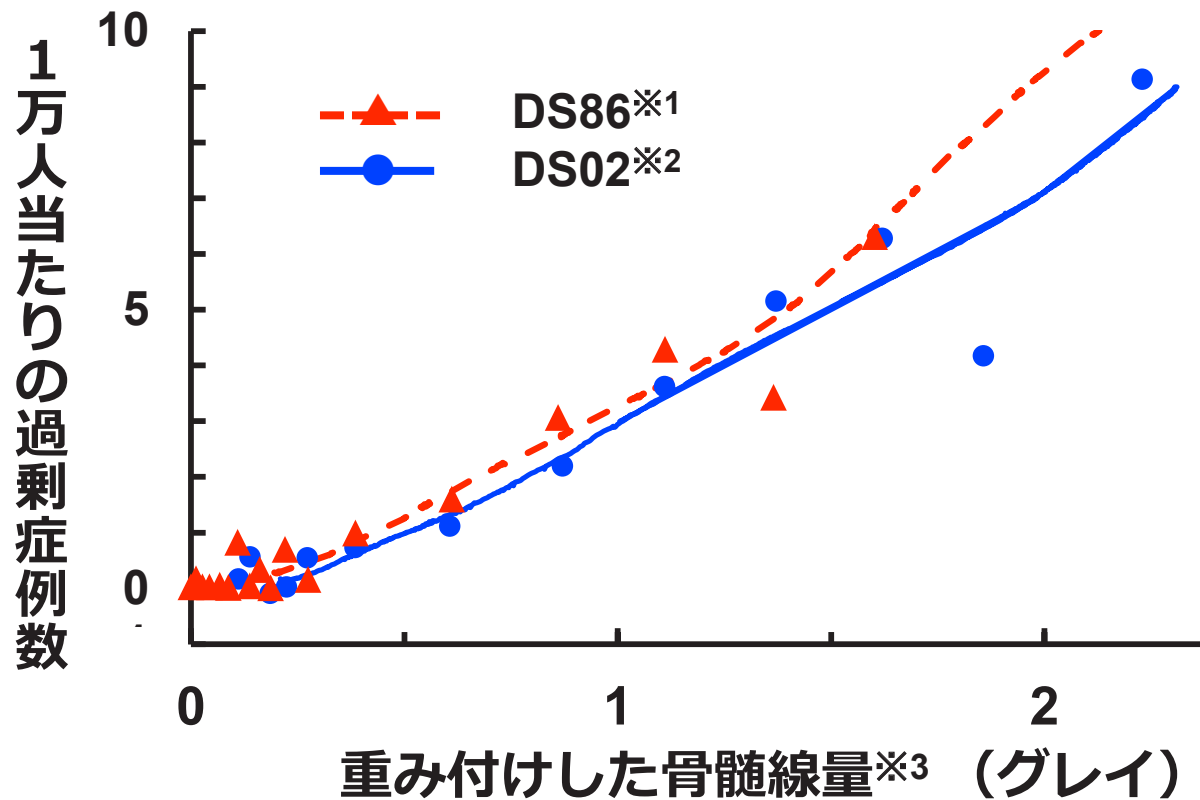


過剰相対リスク：放射線を受けなかった集団に比べ、放射線を受けた集団ではどのくらいがん発生のリスクが増加したかを調べたもの

白血病と線量反応関係



広島・長崎原爆被爆者における白血病の線量反応

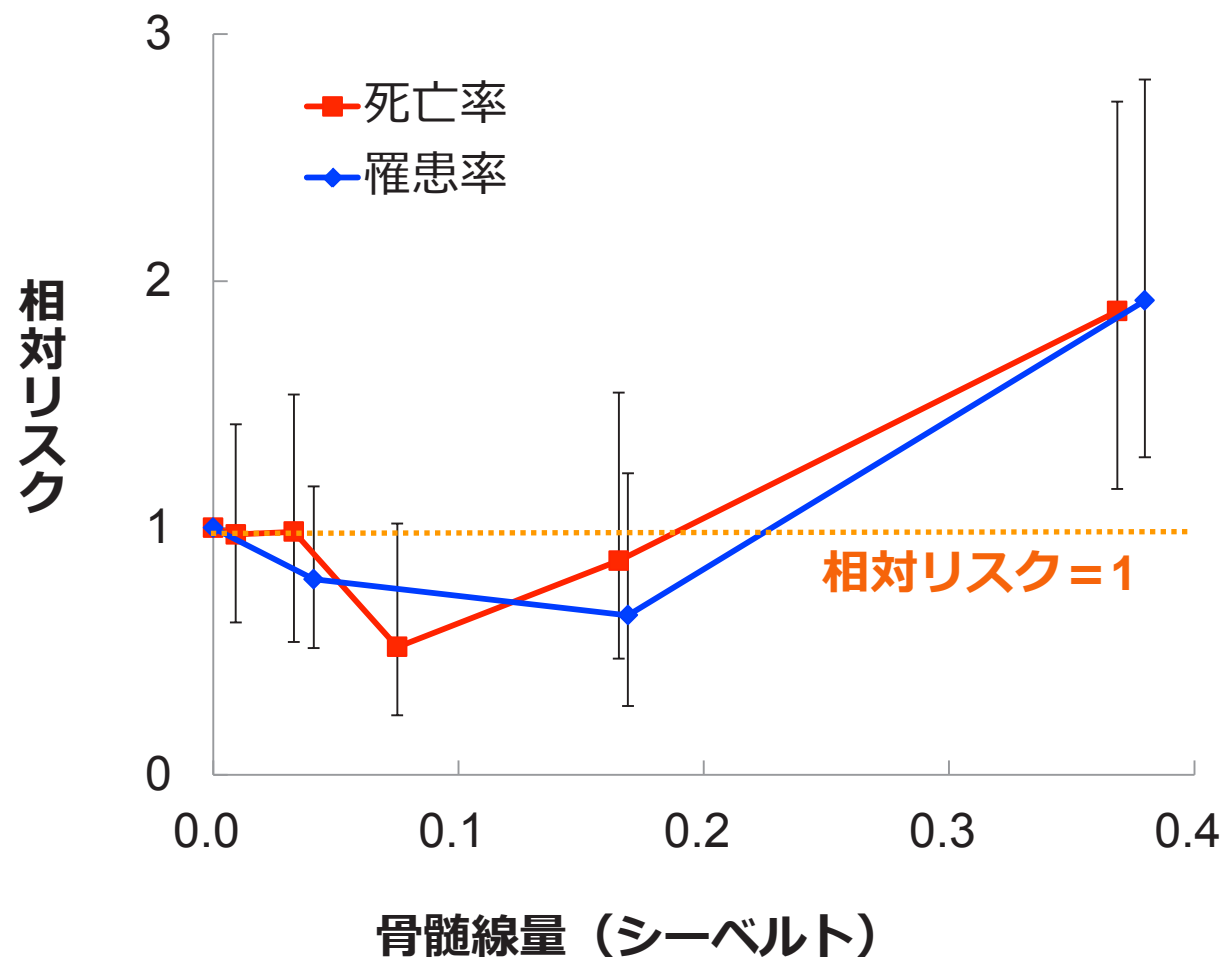


出典：DS02とDS86による白血病のノンパラメトリックな線量反応（1950－2000年）
Preston et al., Radiat Res, 162, 377, 2004より作成

- ※1：（公財）放射線影響研究所が1986年に確立した、原爆被爆者の被ばく線量推定方式
- ※2：DS86に代わり、2002年新しく確立した線量推定方式
- ※3：白血病の場合、重み付けした骨髓線量（中性子線量を10倍したものとγ（ガンマ）線量の和）を使用



原爆被爆者における白血病のリスク



出典：国連科学委員会（UNSCEAR）2006年報告書より作成



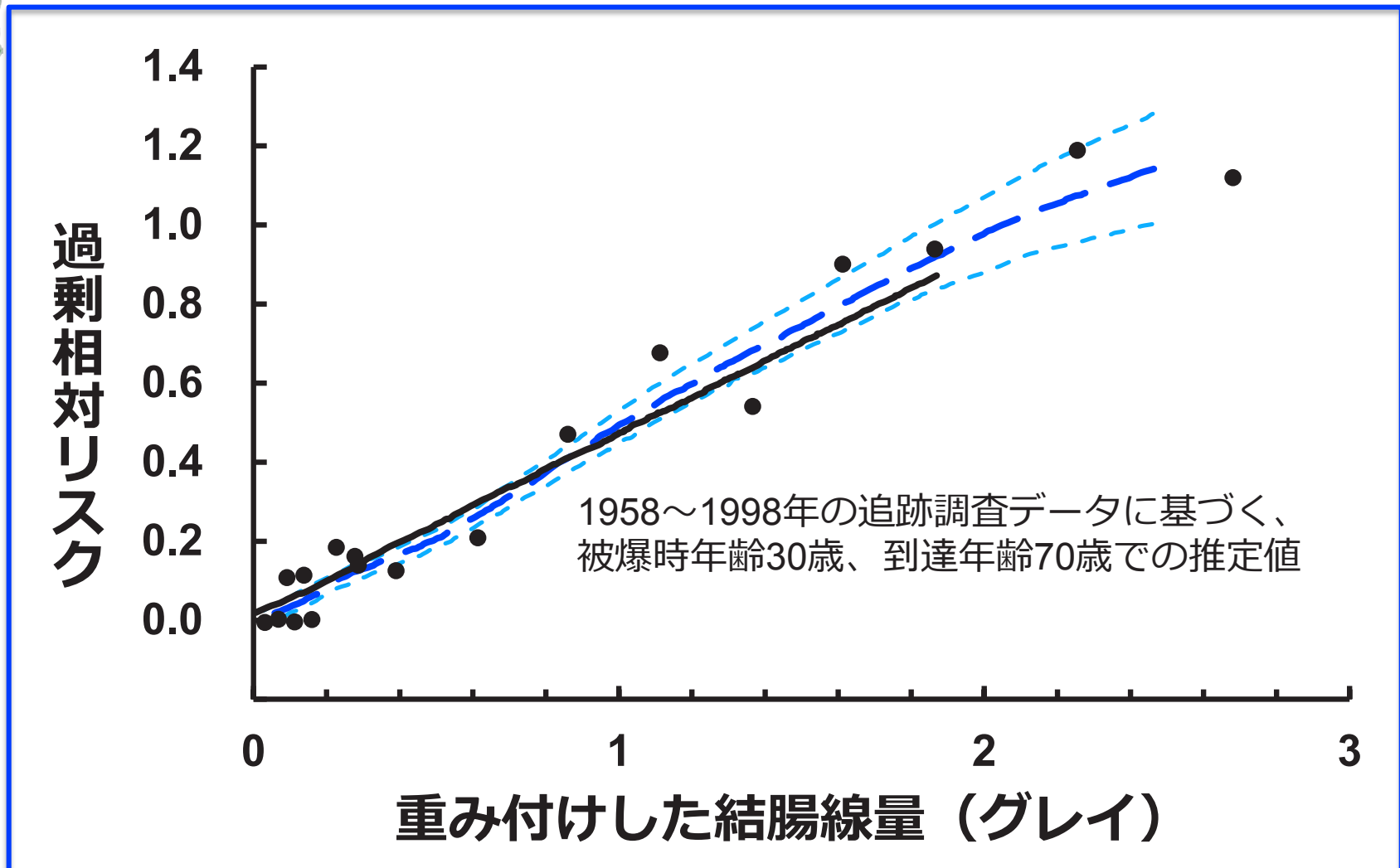
原爆被爆者の被ばく時年齢別相対リスク

		男性(ミリシーベルト)			女性(ミリシーベルト)		
		5～ 500	500～ 1,000	1,000～ 4,000	5～ 500	500～ 1,000	1,000～ 4,000
年 齢	0～9歳	0.96	1.10	3.80	1.12	2.87	4.46
	10～19歳	1.14	1.48	2.07	1.01	1.61	2.91
	20～29歳	0.91	1.57	1.37	1.15	1.32	2.30
	30～39歳	1.00	1.14	1.31	1.14	1.21	1.84
	40～49歳	0.99	1.21	1.20	1.05	1.35	1.56
	50歳以上	1.08	1.17	1.33	1.18	1.68	2.03

出典：Preston *et al.*, Radiat Res, 168,1, 2007



広島・長崎原爆被爆者における固形がんの線量反応



出典：Preston *et al.*, Radiat Res, 168,1, 2007より作成

被ばく年齢ごとの生涯リスク



広島・長崎の原爆生存者の調査結果

100ミリシーベルト (mSv) での急性被ばくによる推定

被ばく時 年齢	性	被ばくがない時の 発がんリスク (A) (%)	被ばくによる 過剰な生涯リスク※ (B) (%)	被ばくがある時 の発がんリスク (A+B) (%)
10歳	男	30	2.1	32.1
	女	20	2.2	22.2
30歳	男	25	0.9	25.9
	女	19	1.1	20.1
50歳	男	20	0.3	20.3
	女	16	0.4	16.4

※被ばくした集団と被ばくしていない集団における生涯の間にがんで死亡する確率の差
10歳の男性が、被ばくしないときにはその後の生涯で**30%**の発がんの可能性があるが、
100mSv被ばくすると、被ばくにより**2.1%**増加し、**32.1%**になると推定される。

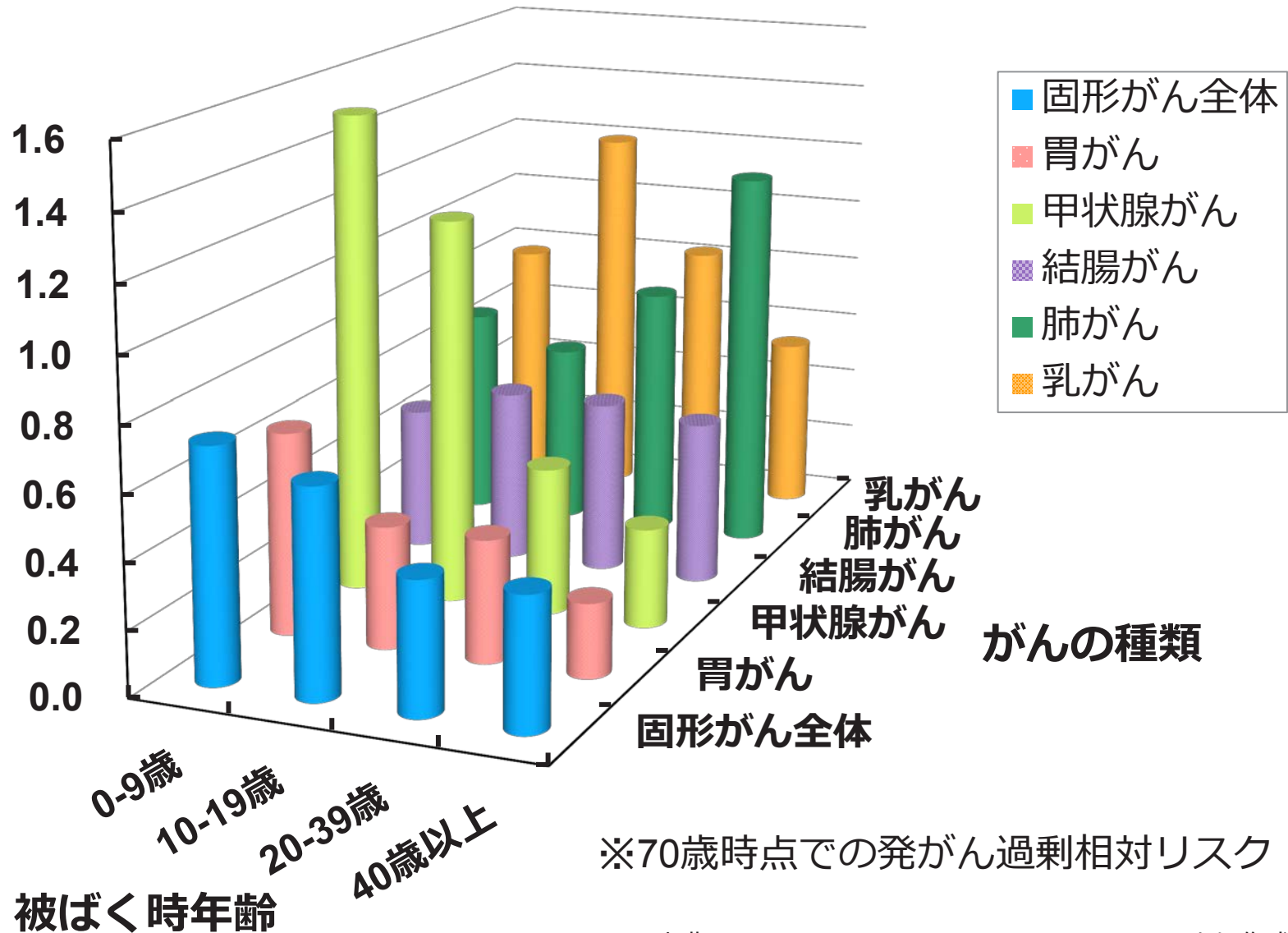
出典：Preston *et al.*, Radiat Res, 160, 381, 2003

被ばく時年齢とがんの種類



過剰相対リスク※
(1グレイ当たり)

被ばく時年齢ごとの発がん過剰相対リスク



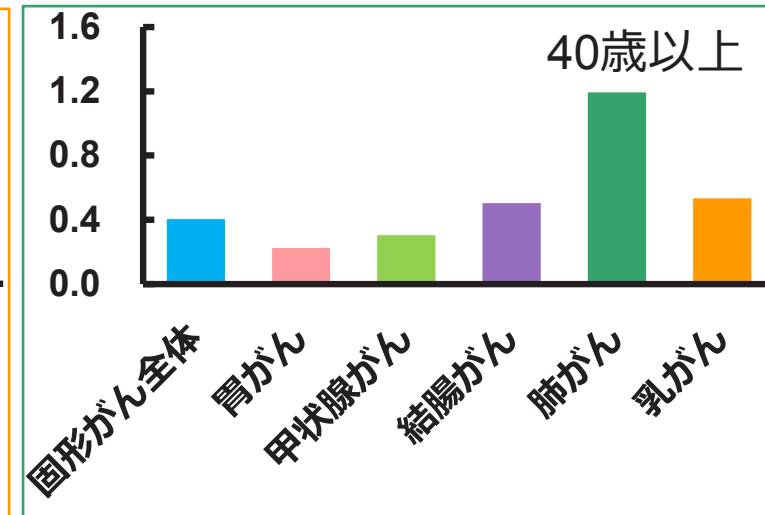
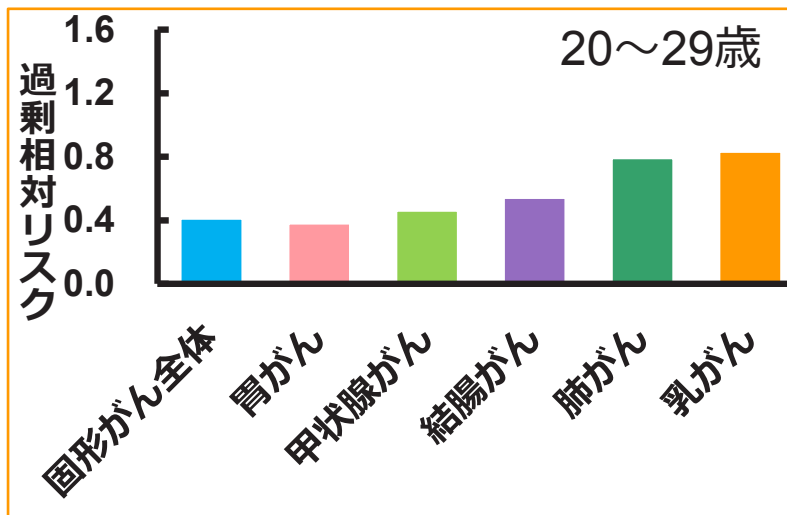
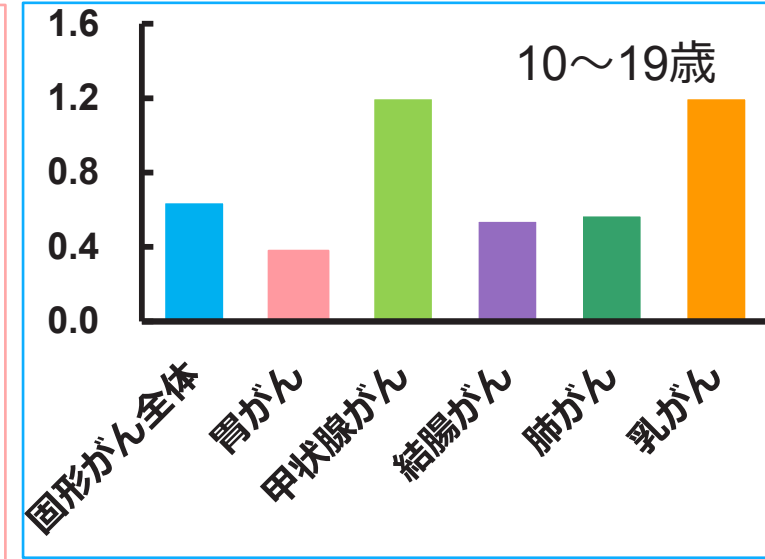
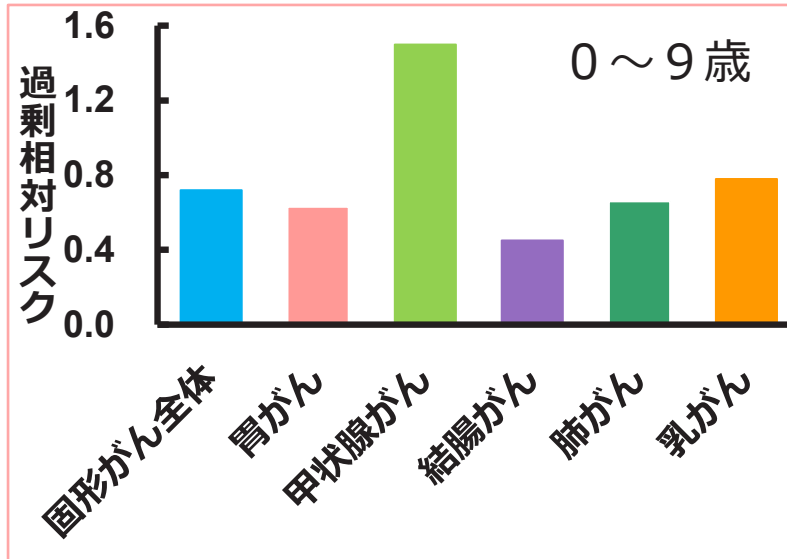
出典：Preston et al., Radiat Res, 168,1, 2007より作成

被ばく時年齢別発がんリスク



被ばく時年齢ごとの発がん過剰相対リスク

※70歳時点での発がん過剰相対リスク（1グレイ当たり）

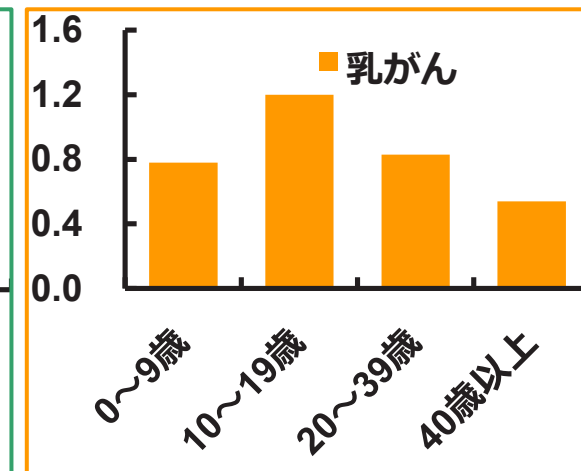
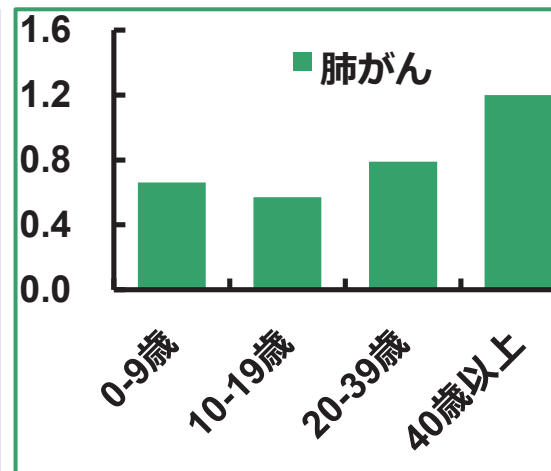
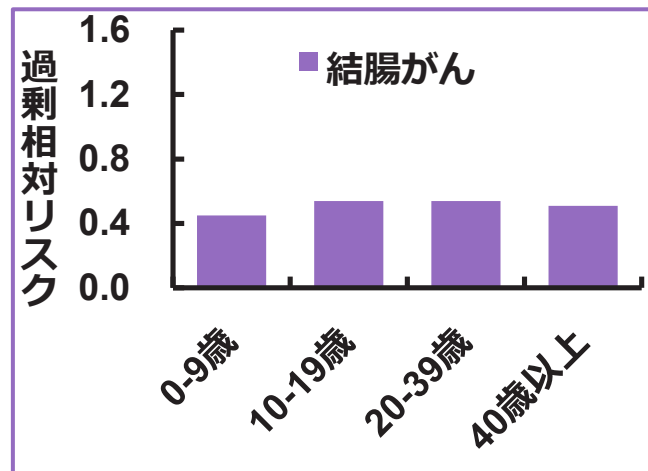
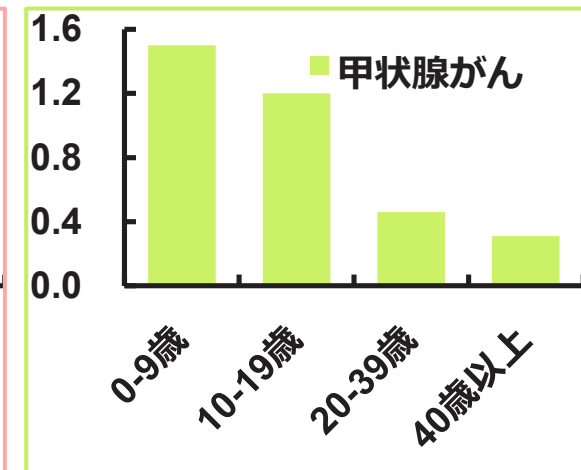
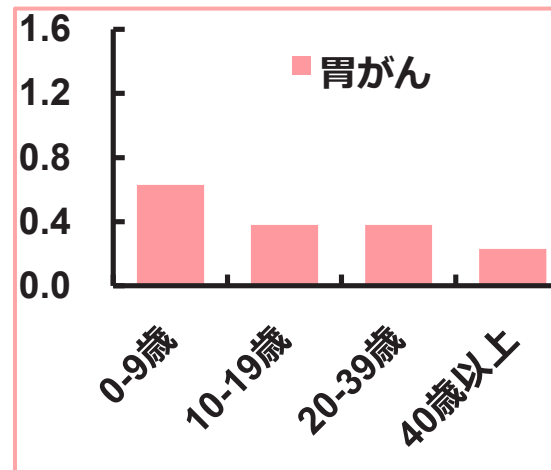
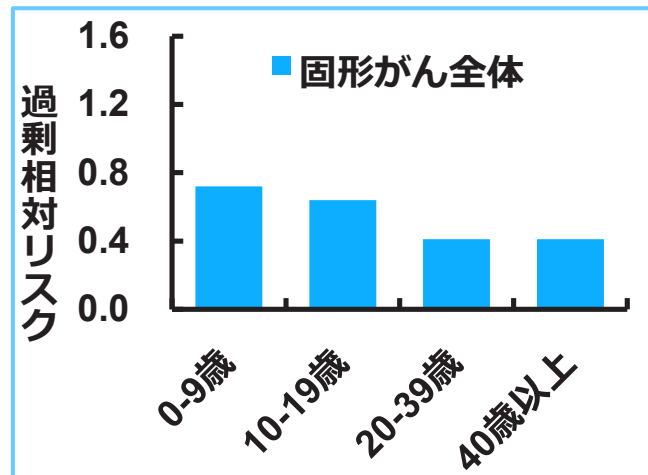


出典：Preston et al., Radiat Res, 168,1, 2007より作成



がんの種類ごとの年齢による発がん過剰相対リスク

※70歳時点での発がん過剰相対リスク（1グレイ当たり）



出典：Preston et al., Radiat Res, 168,1, 2007より作成

急性外部被ばくの発がん

原爆被爆者における甲状腺がんの発症

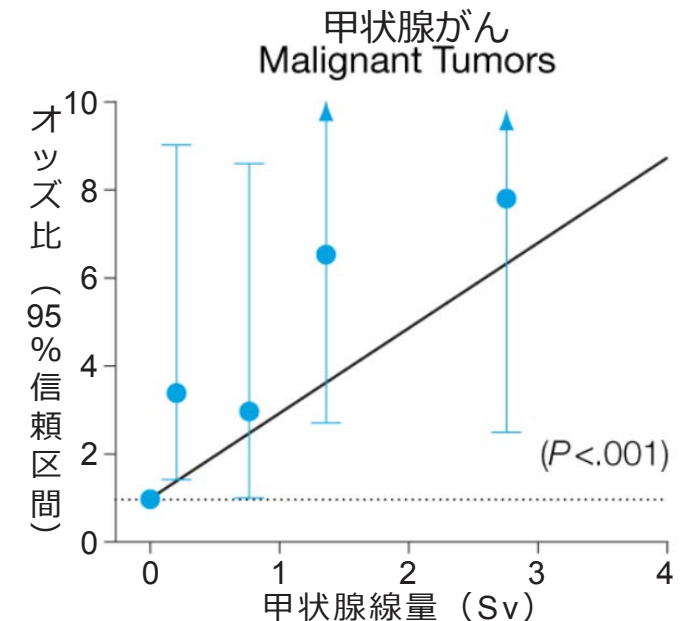


原爆被爆者データ

mSv : ミリシーベルト

甲状腺線量	平均線量 (mSv)	対象 (人)	患者 (人)	オッズ比※ (95%信頼区間)
<5mSv	—	755	33	1
5~100mSv	32	936	36	0.85 (0.52~1.39)
100~500mSv	241	445	22	1.12 (0.64~1.95)
500mSv<	1237	236	15	1.44 (0.75~2.67)

出典 : Hayashi et al., Cancer, 116, 1646, 2010



出典 : (公財) 放射線影響研究所, JAMA 2006;295(9):1011-1022

※オッズ比 : ある事象の起こりやすさを2つの集団で比較したときの、統計学的な尺度。
 オッズ比が1より大きいとき、対象とする事象が起こりやすいことを示します。
 それぞれの集団である事象が起こる確率をp (第1集団)、q (第2集団) としたとき、
 オッズ比は次の式で与えられます。

$$p \text{ のオッズ } \div q \text{ のオッズ } = p / (1 - p) \div q / (1 - q)$$

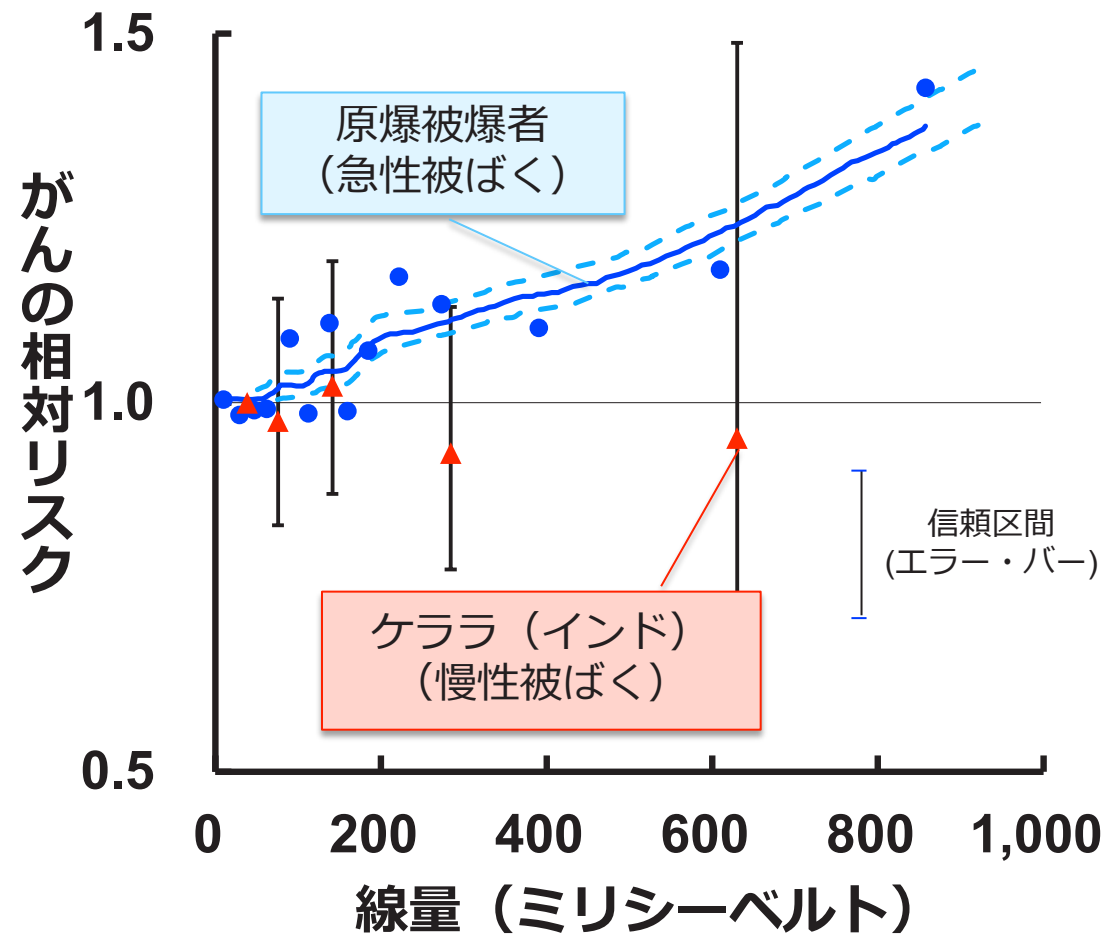
95%信頼区間が1を含んでいなければ、統計学的に有意であるといえます。

インド高自然放射線地域住民の発がん



ケララ（インド）
戸外平均線量 4 mSv/年以上
高い地域では～70mSv/年

mSv：ミリシーベルト



出典：Nair *et al.*, Health Phys 96, 55, 2009;Preston *et al.*, Radiat.Res.168,1, 2007より作成

原発事故由来の
内部被ばくによる発がん

チェルノブイリ原発事故による セシウム137の内部被ばく

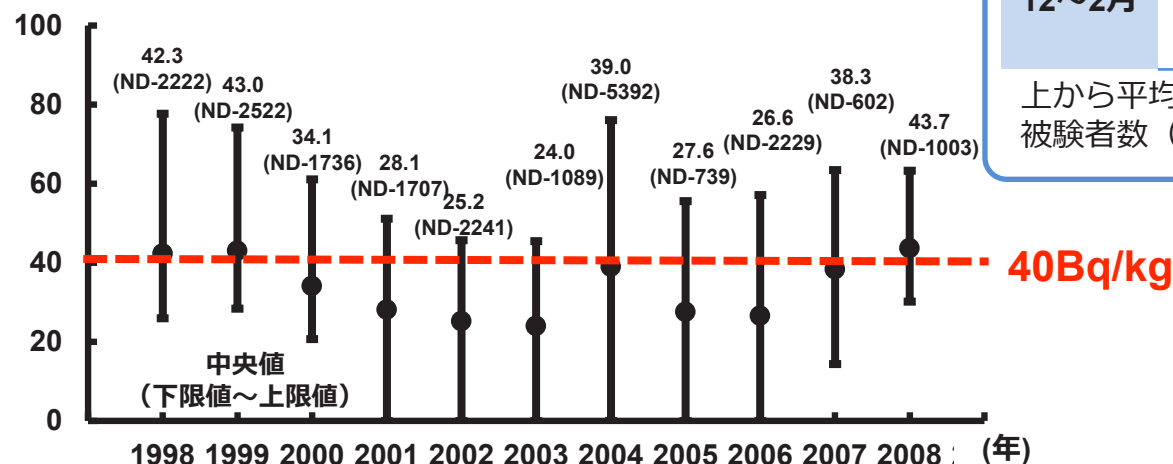


体内のセシウム137濃度の
季節ごとの変化 (Bq/kg) と被験者数

	1998~2001年	2002~2005年	2006~2008年
3~5月	<u>34.6</u> (ND-2154.9) 10,993	<u>27.3</u> (ND-5392.2) 18,722	<u>32.0</u> (ND-1757.1) 9,284
6~8月	<u>71.5</u> (ND-399.0) 265	<u>32.2</u> (ND-393.0) 268	<u>21.2</u> (ND-271.1) 451
9~11月	<u>40.9</u> (ND-2521.7) 9,590	<u>33.5</u> (ND-1089.3) 8,999	<u>44.2</u> (ND-2229.3) 4,080
12~2月	<u>33.5</u> (ND-1735.8) 8,971	<u>20.6</u> (ND-607.0) 6,603	<u>39.8</u> (ND-1454.3) 6,404

上から平均値 (Bq/kg)、(検出下限値~検出上限値)、
被験者数 (人)。NDは検出限界以下。

(Bq/kg) ホールボディ・カウンタで計測された体内セシウム137濃度



ブリヤンスク州では、
1998 ~ 2008年の間、
年間平均40Bq/kgの
内部被ばくを認めた

Bq/kg : ベクレル/キログラム

出典 : Sekitani et al., Radiat Prot Dosimetry, 141, 1, 2010より作成

原発事故由来の
内部被ばくによる発がん

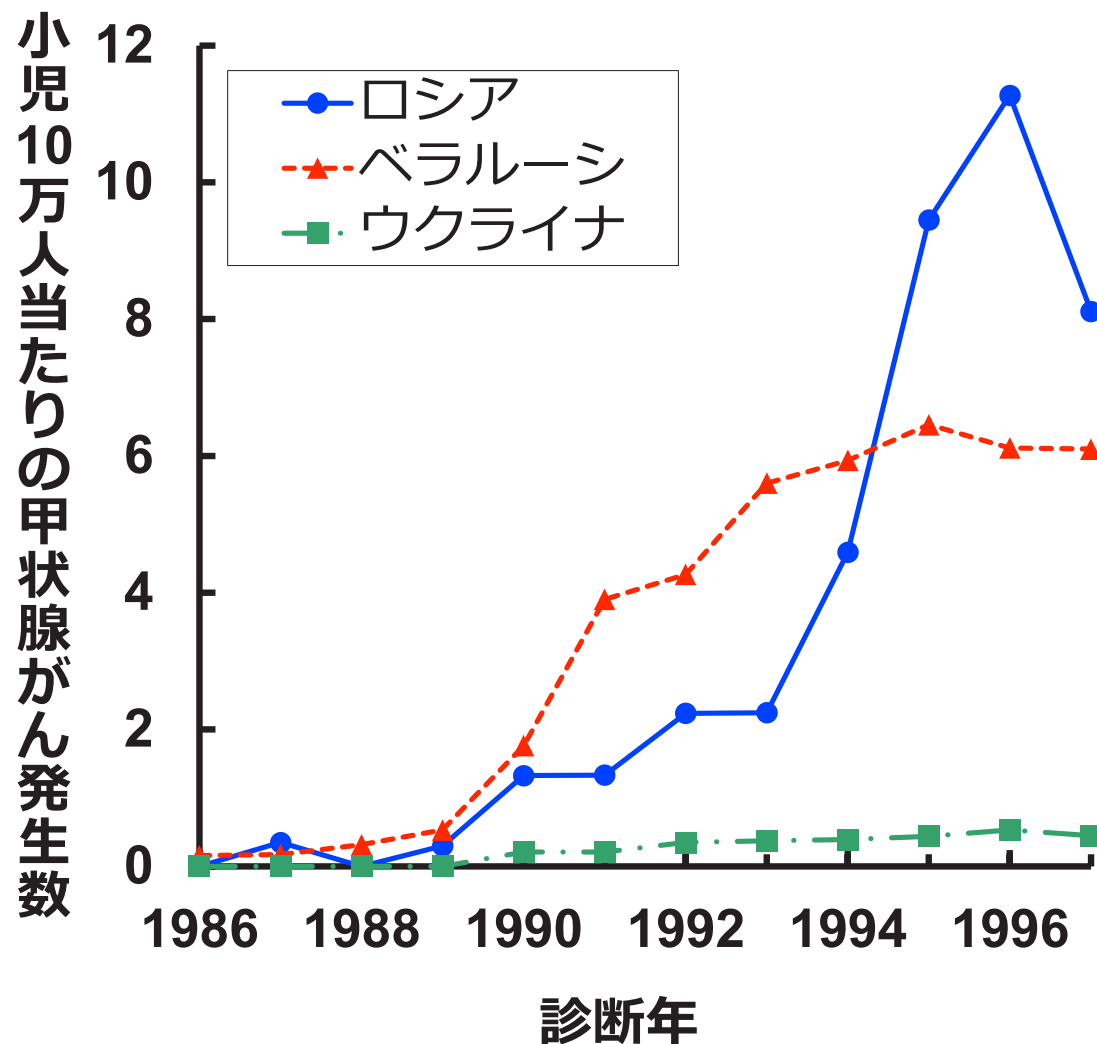
チェルノブイリ原発事故 避難集団の被ばく

国	人数 (千人)	平均実効線量 (mSv)		平均甲状腺 線量 (mGy)
		外部	内部 (甲状腺以外)	
ベラルーシ	25	30	6	1,100
ロシア	0.19	25	10	440
ウクライナ	90	20	10	330
合計	115	22	9	490

mSv : ミリシーベルト mGy : ミリグレイ

出典 : 国連科学委員会 (UNSCEAR) 2008年報告より

小児甲状腺がん（チェルノブイリ原発事故）



ヨウ素は甲状腺ホルモンの材料

事故の4～5年後に
小児甲状腺がんが発生し始め、
10年後には10倍以上に増加

出典：国連科学委員会（UNSCEAR）
2000年報告書より作成

原発事故由来の 内部被ばくによる発がん

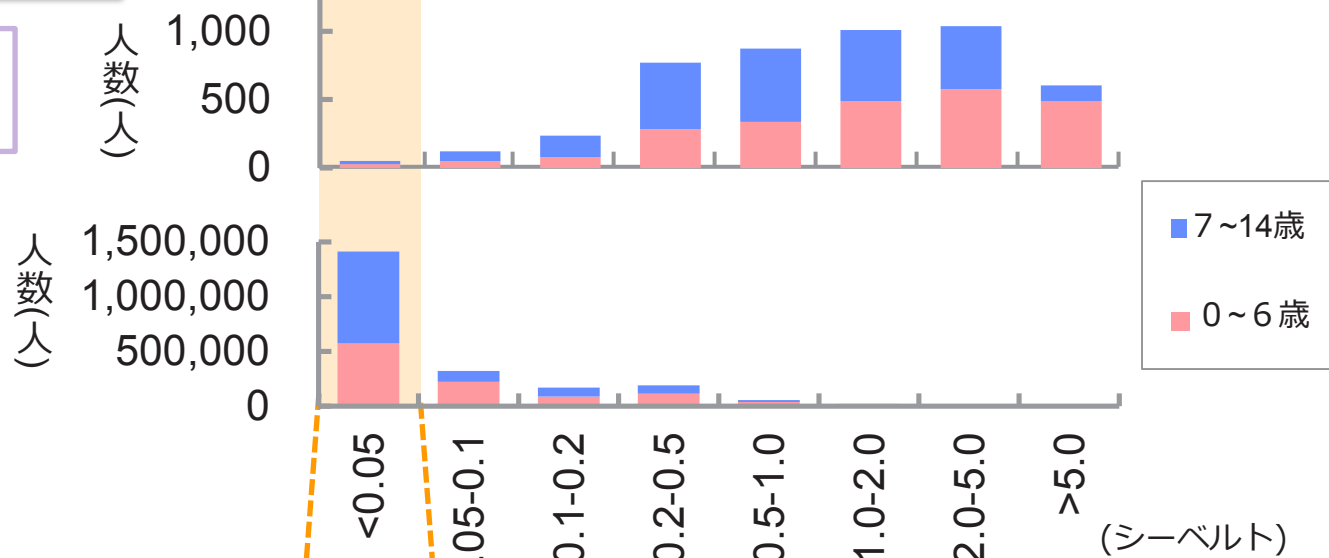
甲状腺線量の比較

小児の甲状腺被ばく線量

チェルノブイリ原発事故

ベラルーシで1986年
に避難した集団

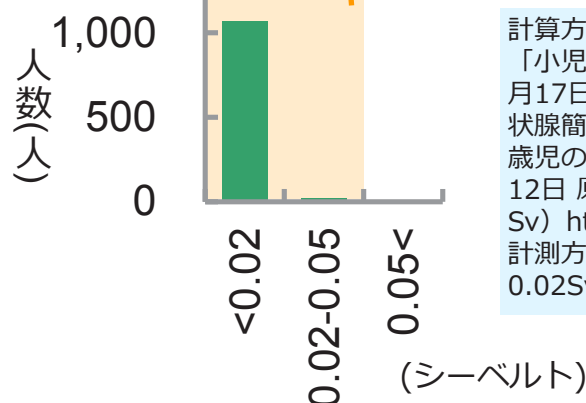
ベラルーシ全体
(避難者を除く)



出典：国連科学委員会（UNSCEAR）報告書2008年報告

東京電力福島第一 原子力発電所事故

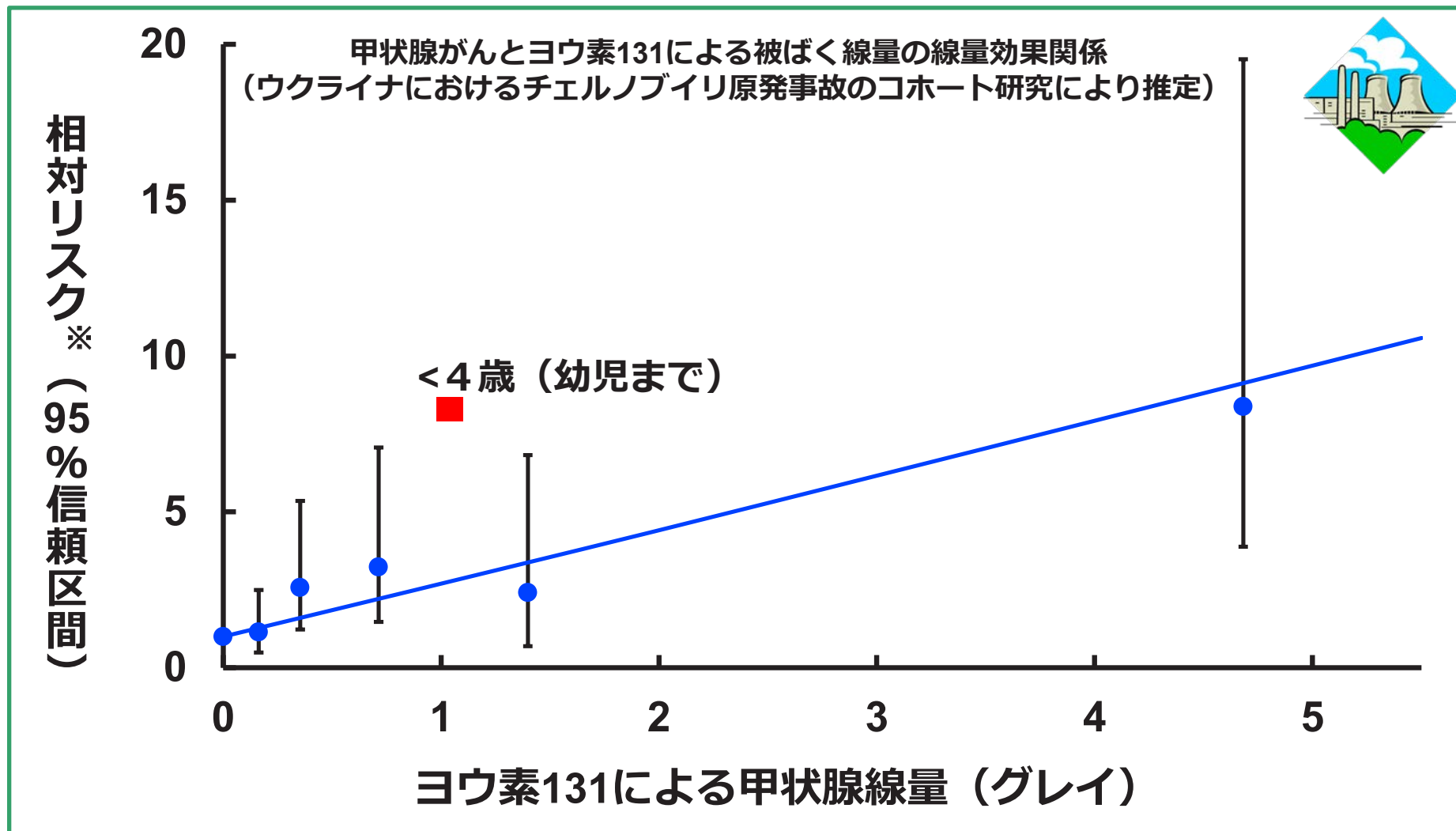
※このデータは、限られた
住民に対して行われた調査
によるものであり、全体を
反映するものではない。



計算方法

「小児甲状腺簡易測定調査結果の概要について」（平成23年8月17日 原子力被災者生活支援チーム医療班）にある「小児甲状腺簡易測定結果」を、「スクリーニングレベル0.2μSv/h（1歳児の甲状腺等価線量として100mSvに相当）」（平成23年5月12日 原子力安全委員会）」を用いて比較のために改編（Gy = Sv）
http://www.kantei.go.jp/saigai/senmonka_g31.html
計測方法や測定地の空間線量率から判断して検出限界は0.02Sv程度

甲状腺がんと線量との関係



出典：Brenner *et al.*, Environ Health Perspect 119, 933, 2011より作成

※相対リスクとは、被ばくしていない人を1としたとき、被ばくした人のがんリスクが何倍になるかを表す値です。

甲状腺がんとヨウ素摂取

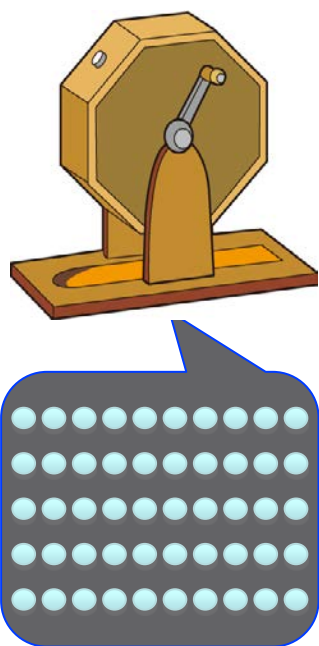
安定ヨウ素剤	1 グレイ（Gy）での相対リスク※ （95%信頼区間）	
	土壌中ヨウ素 濃度が高い地域	土壌中ヨウ素 濃度が低い地域
投与なし	3.5 (1.8-7.0)	10.8 (5.6-20.8)
投与あり	1.1 (0.3-3.6)	3.3 (1.0-10.6)

出典：Cardis *et al.*, JNCI, 97, 724, 2005

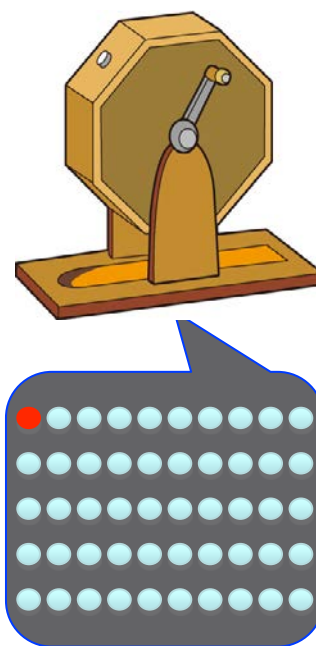
※相対リスクとは、被ばくしていない人を1としたとき、被ばくした人のがんリスクが何倍になるかを表す値です。

確率的影響のリスク

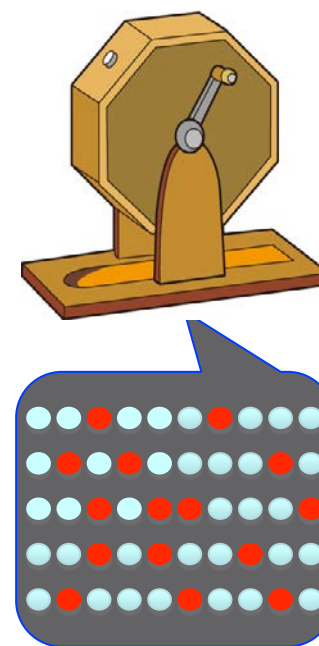
被ばくなし※



少し被ばく



たくさん被ばく



※実際には、放射線被ばくのない日本人集団でも、生涯約50%の人ががんになります。

同じように放射線を浴びても
がんになる人とならない人がいる

相対リスクと寄与リスク

要因	罹 患		計
	あ り	な し	
ばく露群	A	B	A+B
非ばく露群	C	D	C+D

要因ばく露によってその個人が何倍罹患しやすくなるか

$$\text{相対リスク} = \frac{\text{要因ばく露群の罹患リスク}}{\text{要因非ばく露群の罹患リスク}} = \frac{\frac{A}{A+B}}{\frac{C}{C+D}}$$

要因ばく露によってその集団の罹患率がどれだけ増えるのか

$$\begin{aligned} \text{寄与リスク} &= \text{要因ばく露群の罹患リスク} - \text{要因非ばく露群の罹患リスク} \\ &= \frac{A}{A+B} - \frac{C}{C+D} \end{aligned}$$