放射線が人体に及ぼす影響（入門編）

京都大学環境安全保健機構放射線管理部門　准教授
大阪大学核物理研究センター　招へい教員
角山（つのやま）　雄一（ゆういち）



京都大学 環境安全保健機構
Agency for Health, Safety and Environment, Kyoto University

50th ANNIVERSARY RCNP

国際共同利用・共同研究拠点/国際サブアトミック科学研究拠点
大阪大学 核物理研究センター
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

The effects of radiation on the human body



The effects of radiation on the human body

01

分子・細胞
レベルでの
放射線影響

02

高線量放射線
被ばく時に
現れる身体症状

03

低線量率放射線
長期被ばく
に関する知見



The effects of radiation on the human body

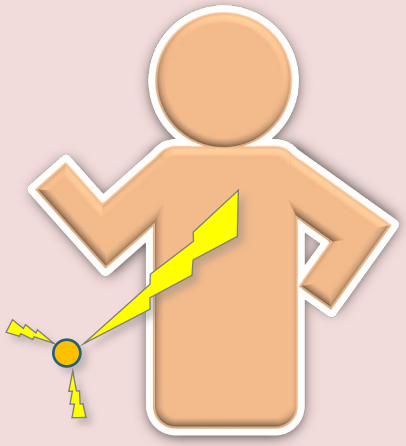
01

分子・細胞レベルでの放射線影響



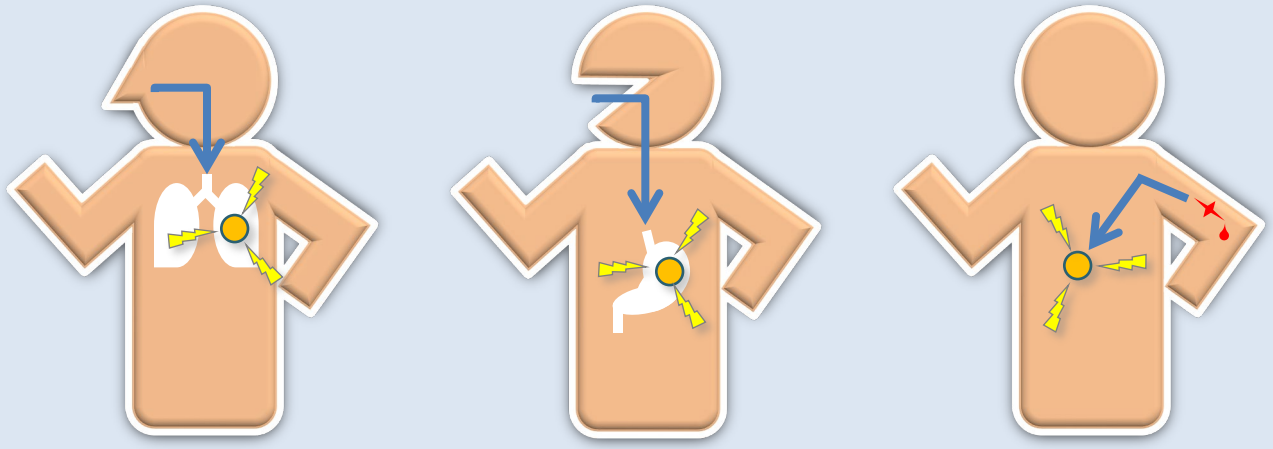
被ばくの経路

外部被ばく



- 放射線源は体外
  放射線が体内へ

内部被ばく



経気道　　経口　　経皮膚

- 体内へ侵入した放射線源由来
  の放射線を被ばく

電離放射線による水分子の電離と励起

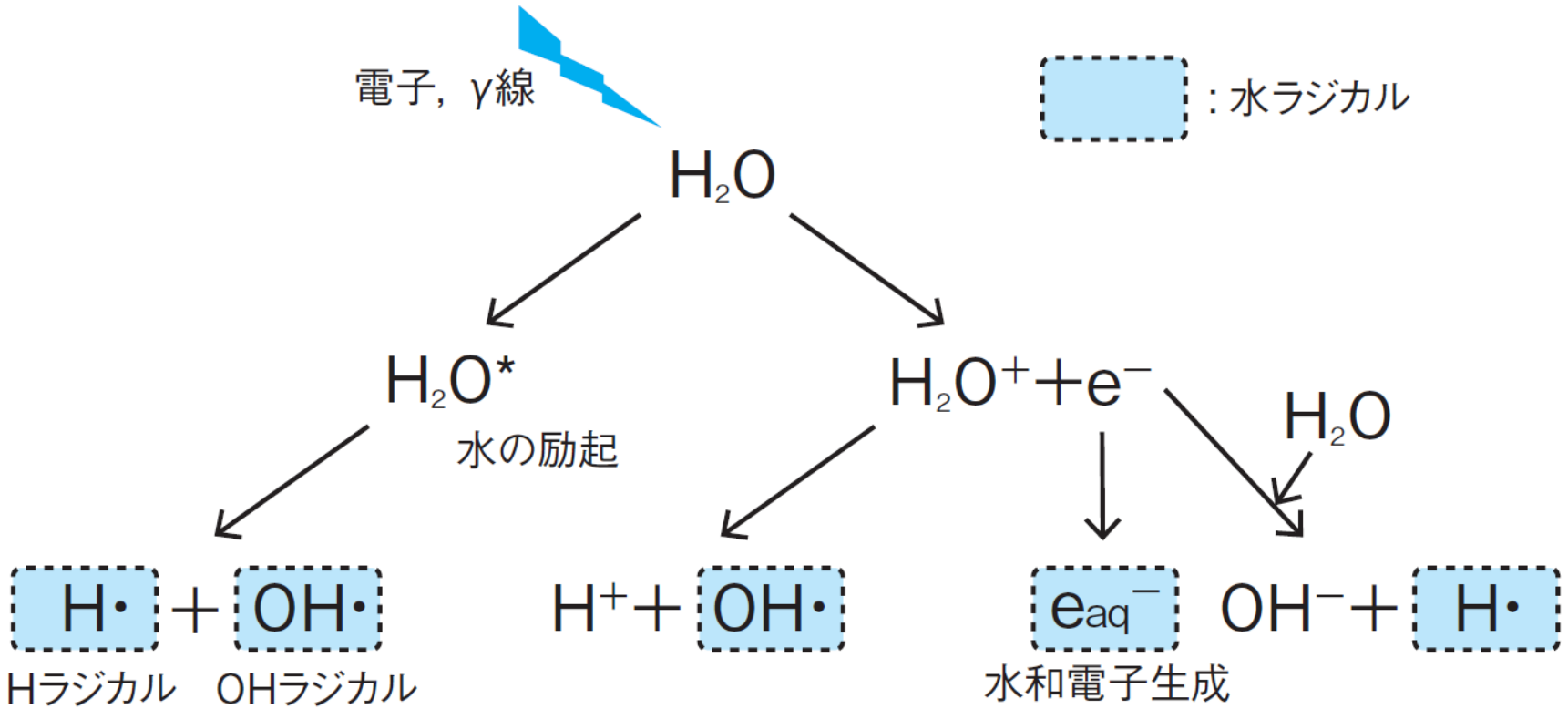
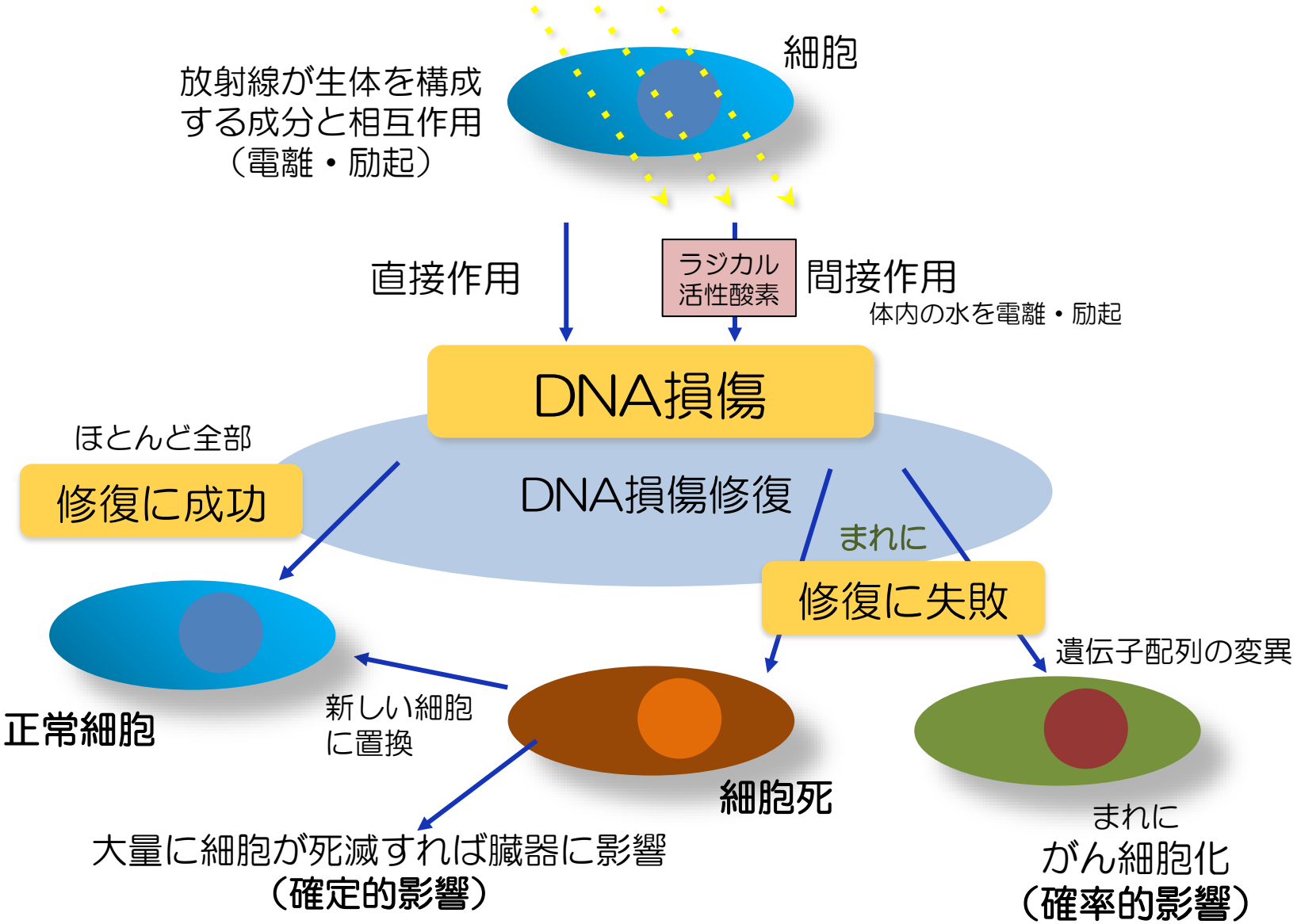


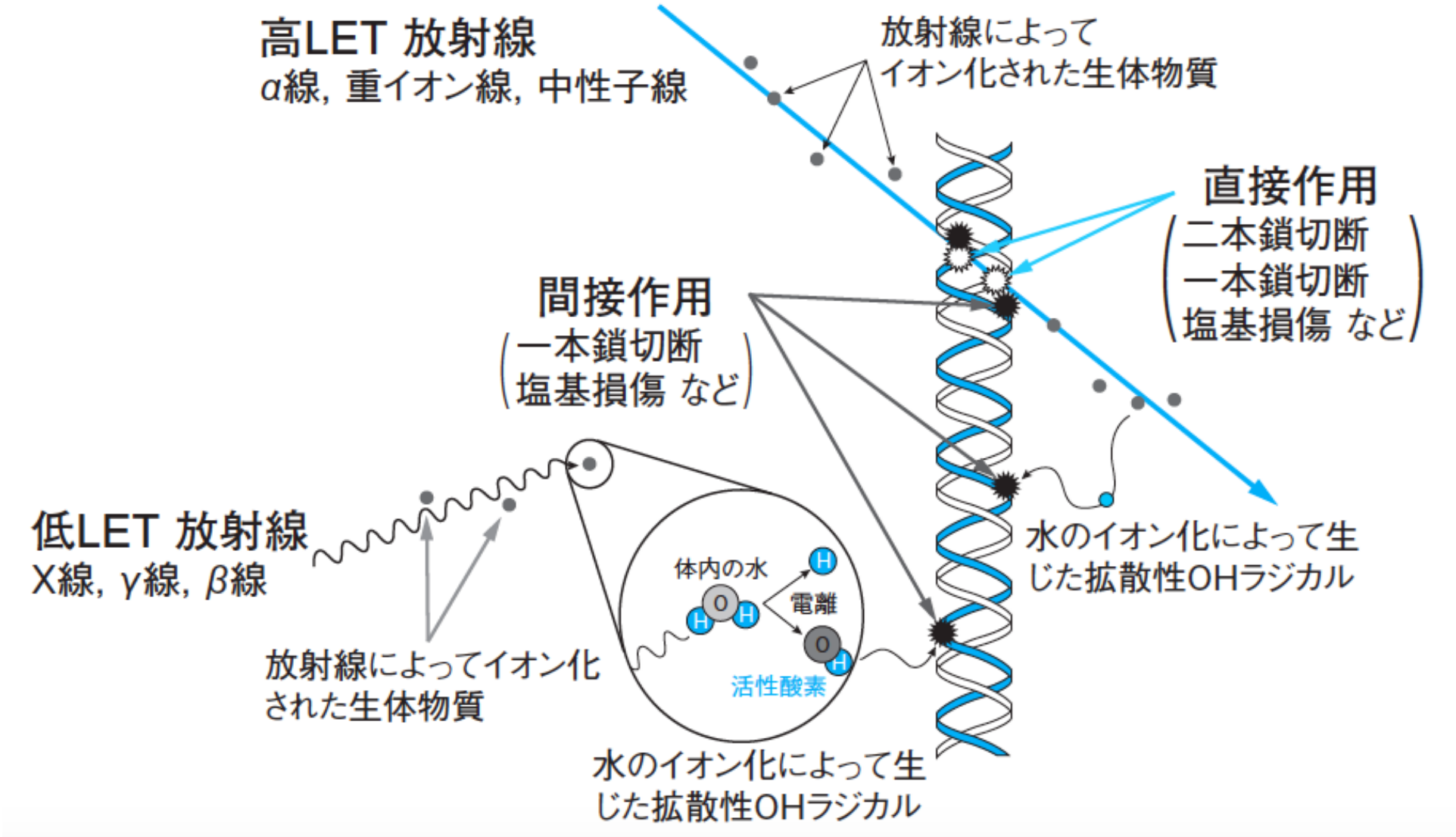
図4.1　電離放射線による水分子の電離と励起

‡出典：改訂版よくわかる 放射線・アイソトープの安全取扱い, p. 68, 図4.1, 日本アイソトープ協会

DNA損傷への細胞レベルでの応答（修復・排除）機構

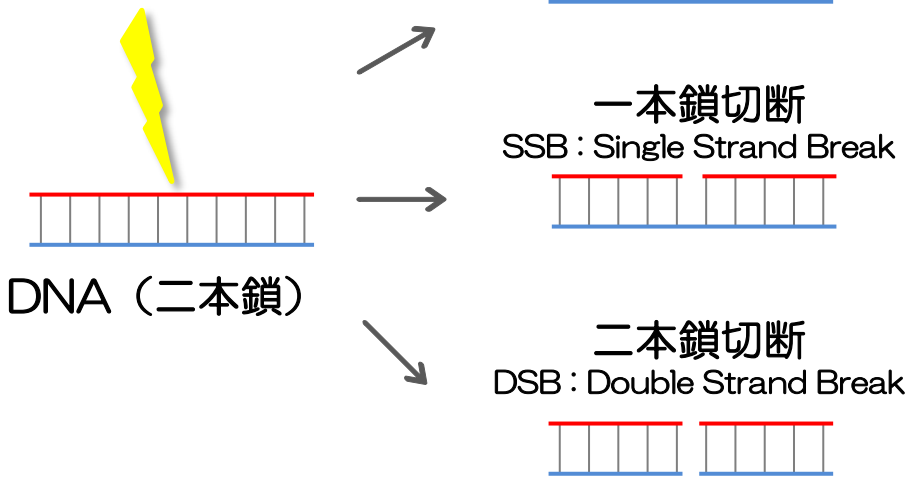


放射線によるＤＮＡの損傷



‡出典：改訂版よくわかる 放射線・アイソトープの安全取扱い，p. 69，図4.2，日本アイソトープ協会

ＤＮＡ損傷の種類と修復の難易度



相補鎖（青側のDNA鎖）が正常なので修復が容易

※架橋には同一鎖内の架橋（intrastrand cross-link）と二本鎖間での架橋（interstrand cross-link）がある。前者のみこの図に該当する。

相補鎖（青側のDNA鎖）が正常なので修復が容易

二本の鎖（赤と青の鎖）が同時に切断されると、
修復時のエラーや染色体異常の原因となることがある。

（参考）

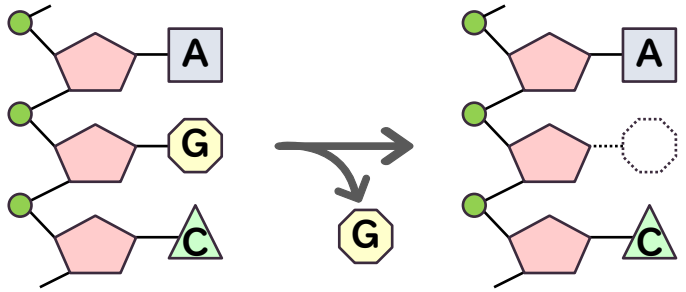
	自然損傷数 （１細胞・１日あたり）	放射線の追加被ばくによる損傷数 （１細胞・γ線1Gyあたり）
塩基損傷	20,000	～3,000
１本鎖切断	50,000	1,000
２本鎖切断	10	40

（注）表の数値は動物実験に基づく推定値で、諸説あり

塩基損傷（Base Damage）や架橋（Cross-link）の例

塩基損傷（Base Damage）

- 脱塩基（脱プリン）反応



- 脱アミノ（酸化的脱アミノ）反応
  … 塩基分子内のアミノ基が外れる

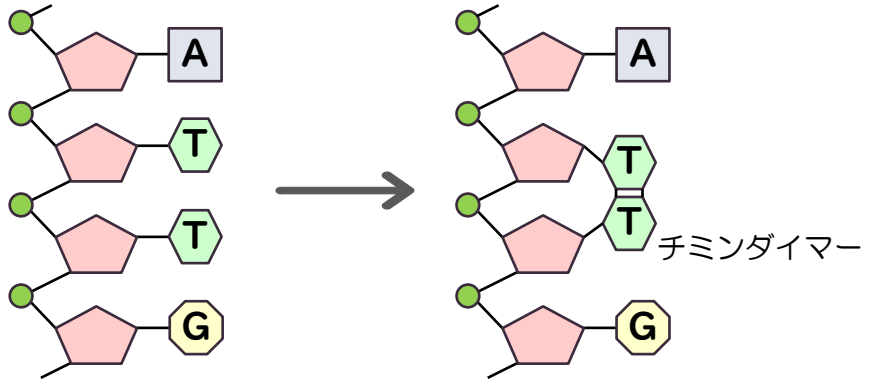
  アデニン（A） → ヒポキサンチン
  グアニン（G） → キサンチン
  シトシン（C） → ウラシル（U）
  ※ チミン（T）はアミノ基なし

- その他
  ヒドロキシルラジカルによる
  グアニン（G） → 8-オキソグアニン

  塩基のメチル化、アルキル化　　など

架橋（Cross-link）§

- ピリミジン二量体（ピリミジン・ダイマー）



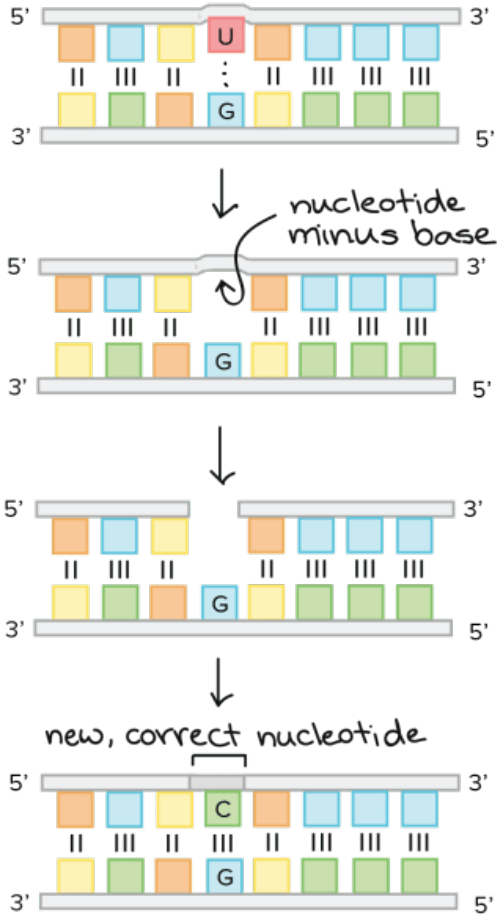
- ピリミジン二量体は、放射線だけでなく、紫外線により発生することが知られている。

※ AとGはプリン塩基、
TとC、Uはピリミジン塩基

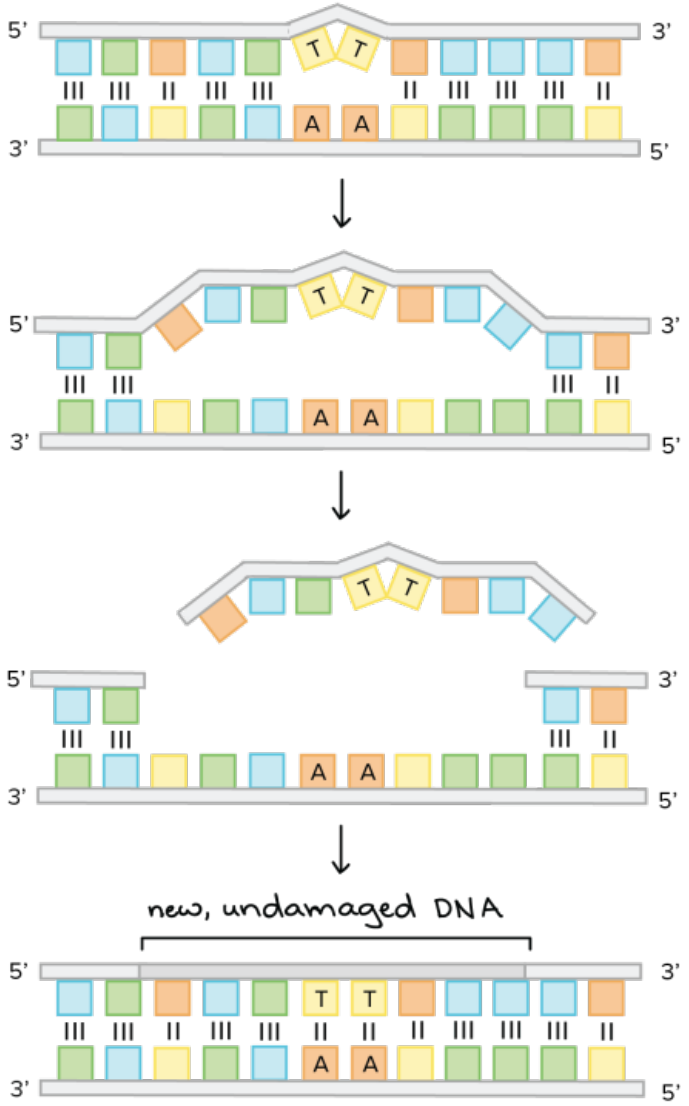
§ この図の例は、同一鎖内で生じた架橋
（intrastrand cross-link）

塩基損傷（Base Damage）や架橋（Cross-link）の修復機構

塩基除去修復
Base excision repair



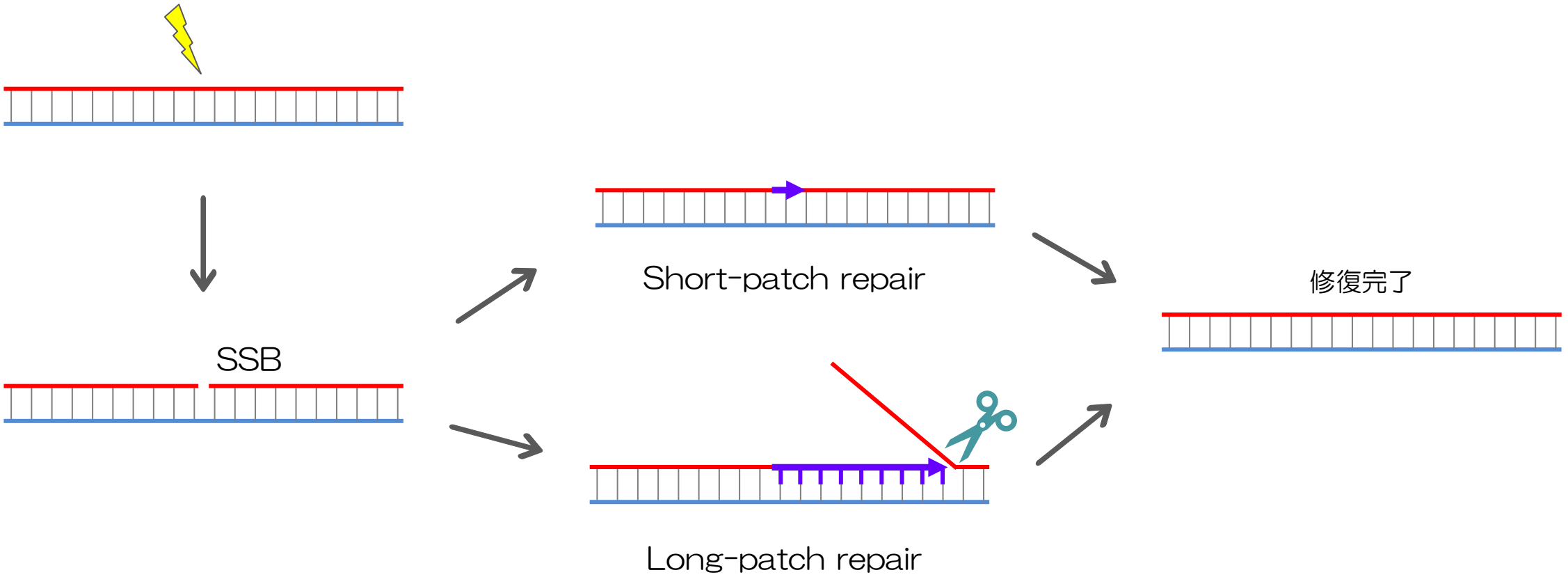
ヌクレオチド除去修復
Nucleotide excision repair



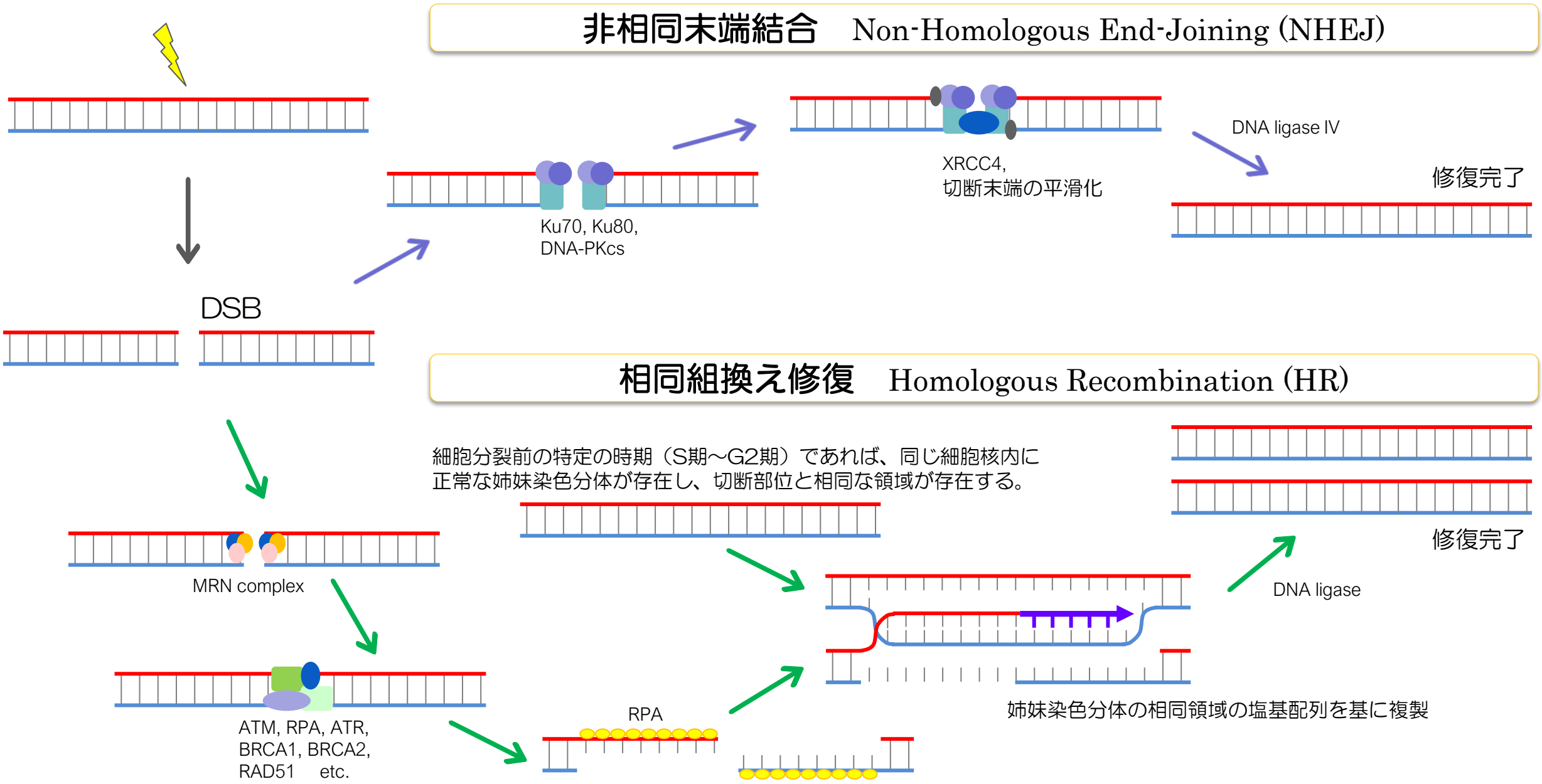
CC BY NC SA

出典：Biology archive, UNIT12 Lesson 3, Khan Academy,
https://www.khanacademy.org/science/biology/dna-as-the-genetic-material/dna-replication/a/dna-proofreading-and-repair

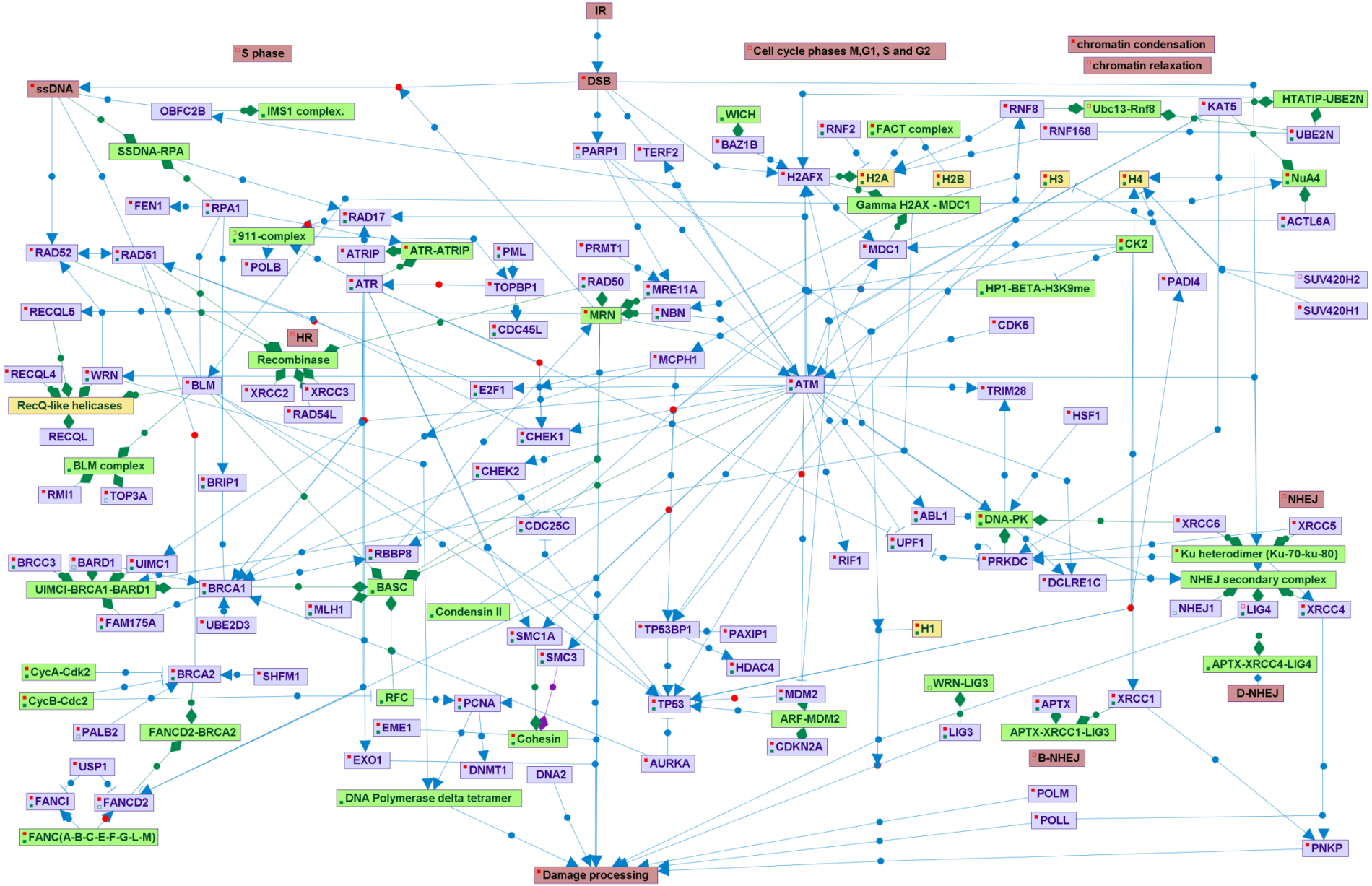
一本鎖切断（SSB：Single Strand Break）の修復機構



二本鎖切断（DSB：Double Strand Break）の修復機構



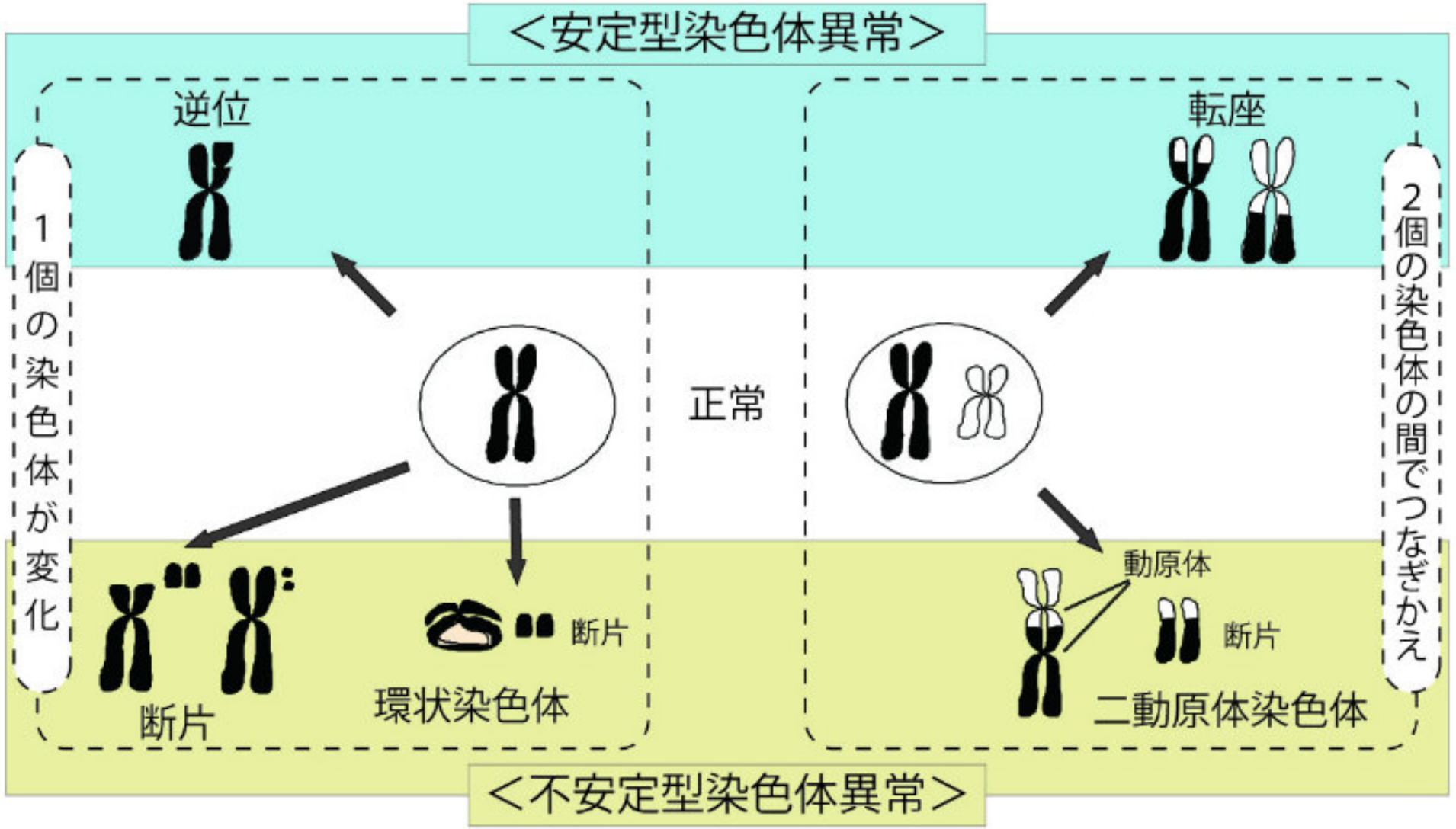
（参考） Intra cellular response to DNA double-strand breaks (DSBs)



‡出典：SPIKE, Response to DSB (spike00004), https://www.cs.tau.ac.il/~spike/

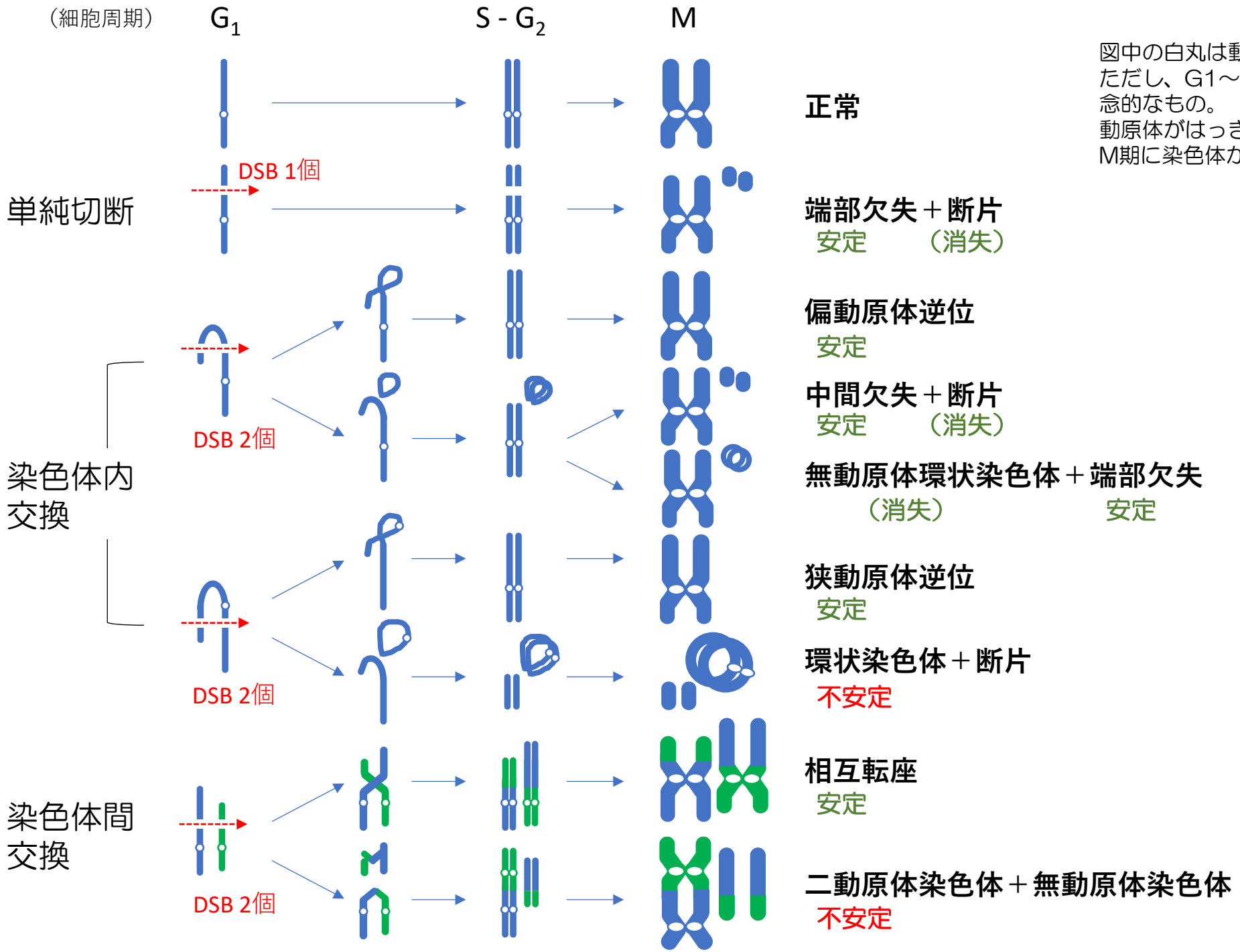
SPIKE Signaling Pathway Integrated Knowledge Engine

染色体の構造異常



‡出典：排出放射性物質影響調査, 環境科学技術研究所, https://www.aomori-hb.jp/dictionary/sa/ahb4_5_3_06

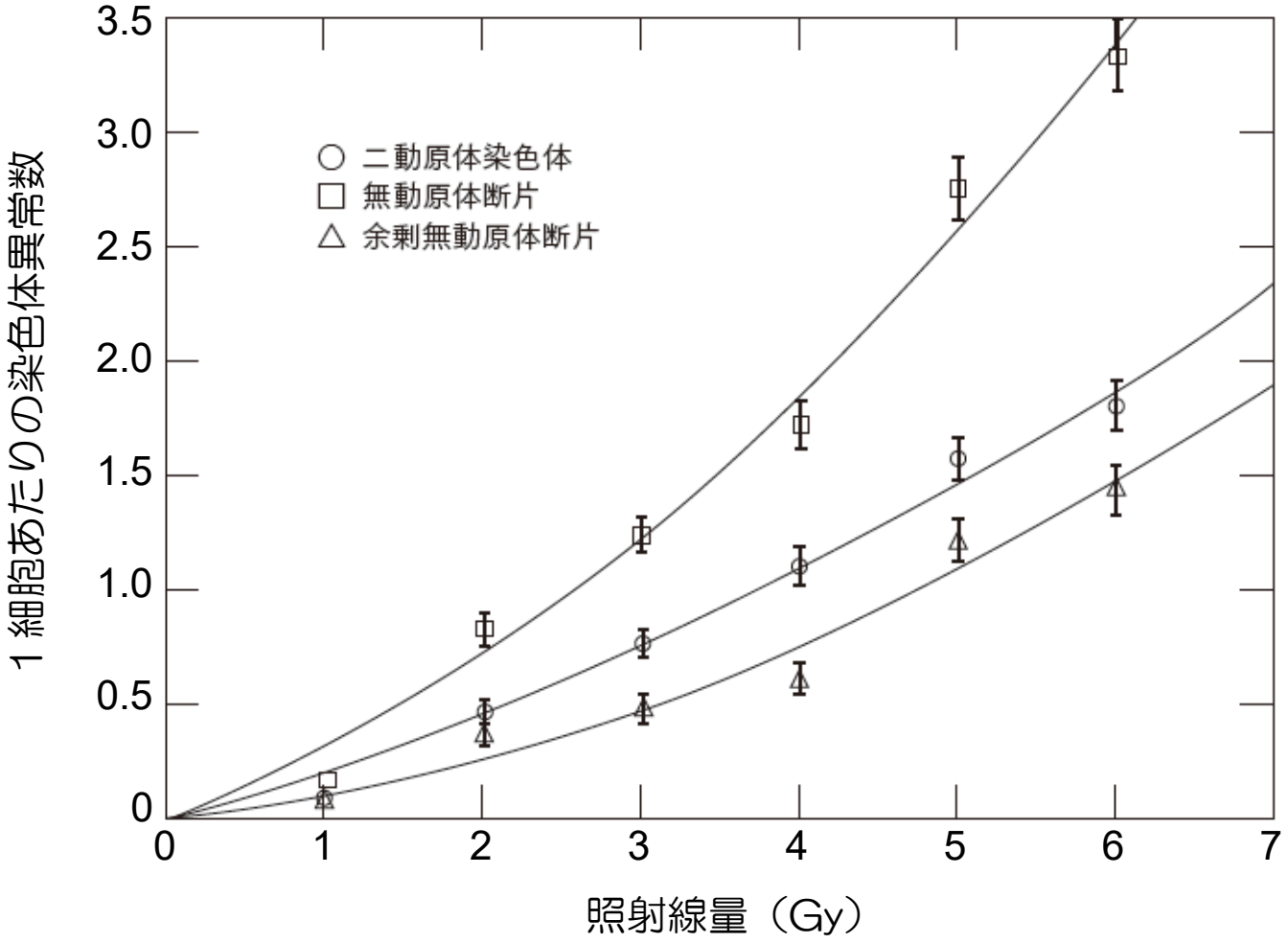
（参考）



図中の白丸は動原体
ただし、G1～G2期の白丸は概念的なもの。
動原体がはっきりと見えるのはM期に染色体が凝集してから。

γ線を照射した血液のリンパ球中における染色体異常の発生頻度とLQモデル

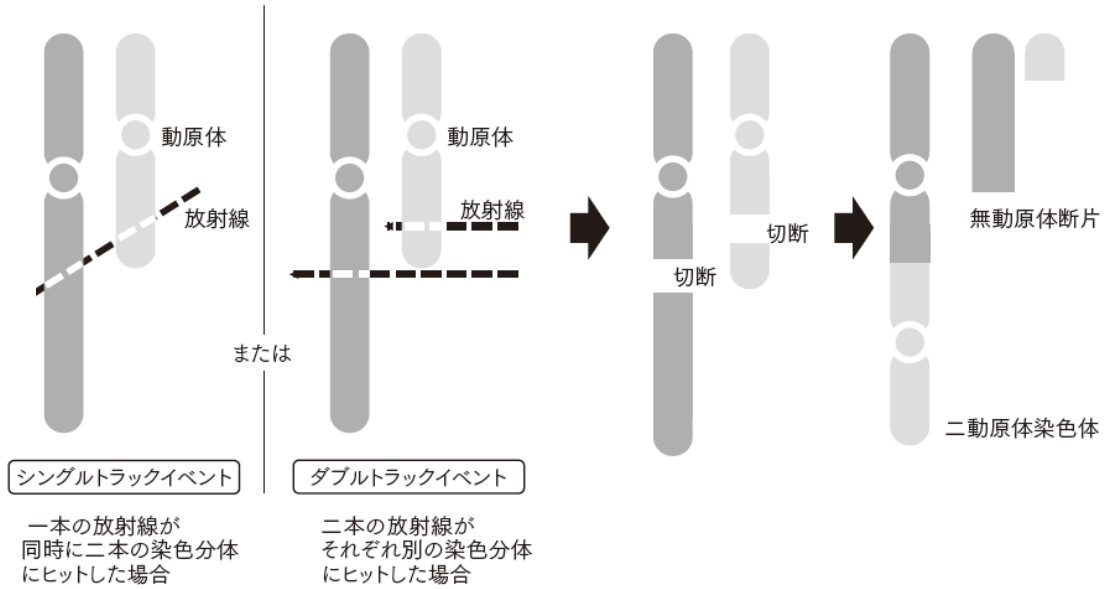
成人男性から採取した血液にγ線を照射し、照射後２時間培養後のリンパ球（血液中の白血球の内、約30%を占める）に出現する染色体異常の数を調べた。



直線-二次曲線モデル
LQモデル（Linear-Quadratic model）

$$Y = \alpha D + \beta D^2$$

Y：放射線影響
D：放射線量
α，β：係数



付図１　二動原体染色体の生成過程

‡出典：田中司朗 他 (2016), 放射線 必須データ32　被ばく影響の根拠, p. 43, p. 45, 創元社

線エネルギー付与（LET： Linear Energy Transfer）

放射線が単位距離を進むあたりに周囲の物質に与えるエネルギー（keV/μm）

生物学的効果比　（RBE： Relative Biological Effectiveness）

基準放射線をX線・γ線として比べる。

$$RBE = \frac{\text{ある効果を得るために必要な基準放射線の量}}{\text{同一の効果を得るために必要な当該放射線の量}}$$

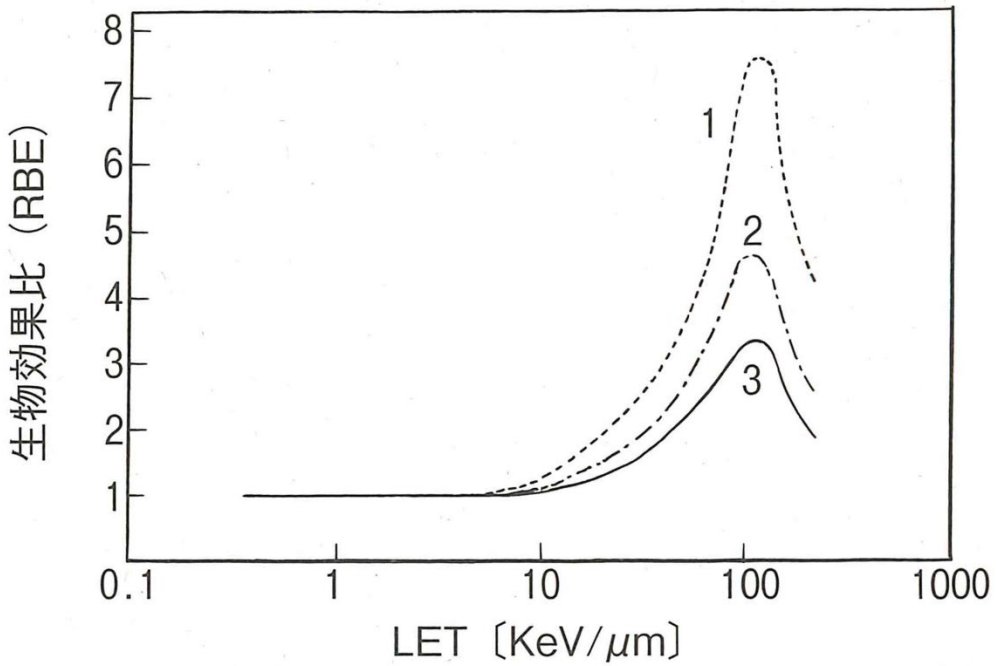


図 10.2　培養細胞に対する致死効果における LET と RBE の関係
曲線 1，2，3 はそれぞれ生存率 $S=0.8(80\%)$，$S=0.1(10\%)$，$S=0.01(1\%)$ のレベルでの RBE。このように，指標のとり方によっても RBE の値が変化することがある。

‡出典：10版 放射線取扱の基礎 第一種放射線取扱主任者試験の要点, 生物学 10 放射線影響（感受性）の修飾要因, p. 70, 図10.2, 日本アイソトープ協会

① 酸素効果

- 酸素濃度（正常組織では飽和）が増大すると、放射線の感受性も高くなる。
- 正常組織に低LET放射線を照射した場合の増感率（感受性の相対比）は、無酸素状態の3倍近くになる（図3.3）。
- 腫瘍内には低酸素状態の細胞が含まれており、正常組織よりも感受性が低い。
- 酸素増感比（OER： Oxygen enhancement ratio）

$$OER = \frac{\text{無酸素状態で一定の効果を生むために必要な放射線量}}{\text{酸素存在下で同じ効果を生むために必要な放射線量}}$$

- LETが高いと、間接作用の寄与が小さく、OERは低下（図3.3）
- LETが100 keV/μmを超えると、OERはほぼ1（酸素効果なし）（図3.4）

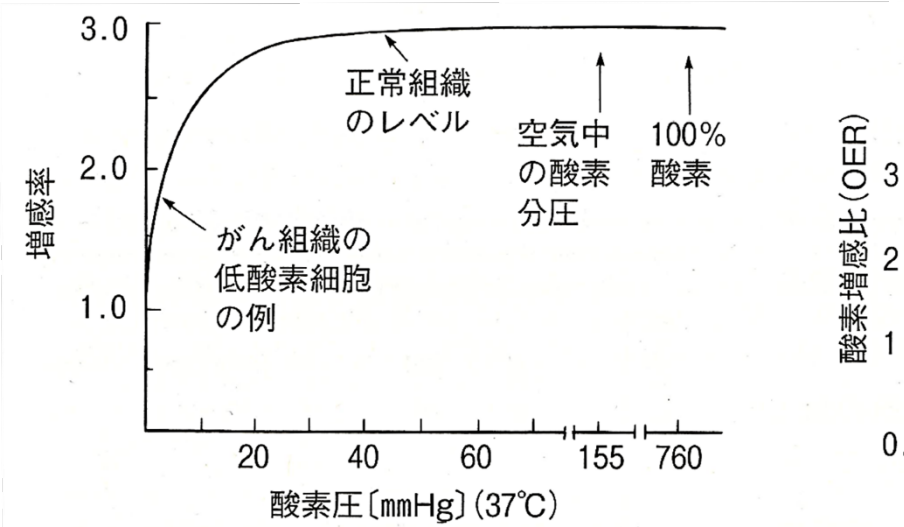


図 3.3 酸素分圧と放射線感受性

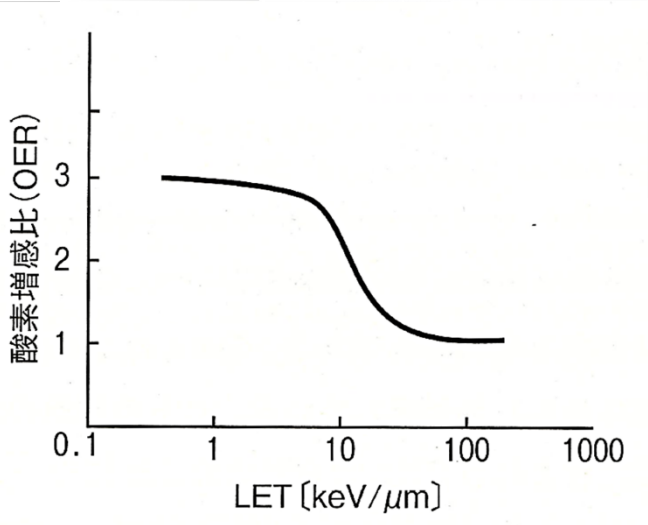
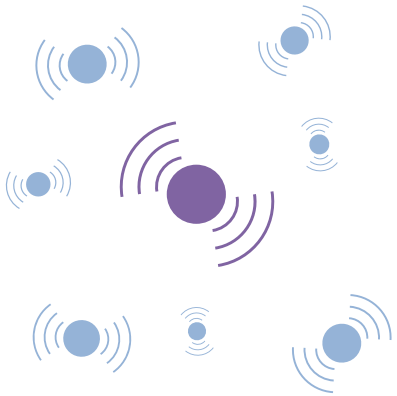


図 3.4 LET と OER の関係

‡出典：10版 放射線取扱の基礎 第一種放射線取扱主任者試験の要点, 生物学 3 放射線の生体高分子に対する影響, p. 9, 図3.3, 図3.4, 日本アイソトープ協会

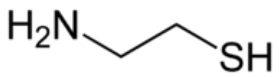


② 温度効果

温度が高いほど間接作用の効果が大きい。
高温度ではラジカルの拡散が促進され、ラジカルによる生体分子の損傷が増加。

③ 希釈効果

溶質の濃度が低いほどラジカルが効果的に溶質に作用する。
例えば、酵素濃度が低いと、その酵素は放射線により不活性化しやすくなる。



$HSCH_2CH_2NH_2$
システアミン

④ 化学防護剤と増感剤

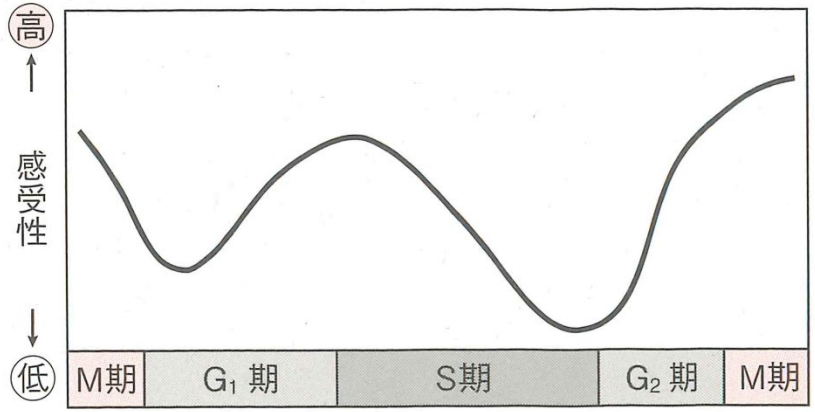
ラジカル捕捉剤（ラジカルスカベンジャー）：
SH基を含むSH-化合物（システイン、システアミン、グルタチオン）の薬剤はラジカルを補足する。事前投与による間接作用の低減が期待できる。

放射線増感剤：
酸素、ハロゲン化合物などは、ラジカルを安定化、あるいはラジカルによる損傷の修復を阻害。がん放射線治療に使用される。

⑤ 線量率効果 … 後述の「低線量率放射線長期被ばくに関する知見」を参照

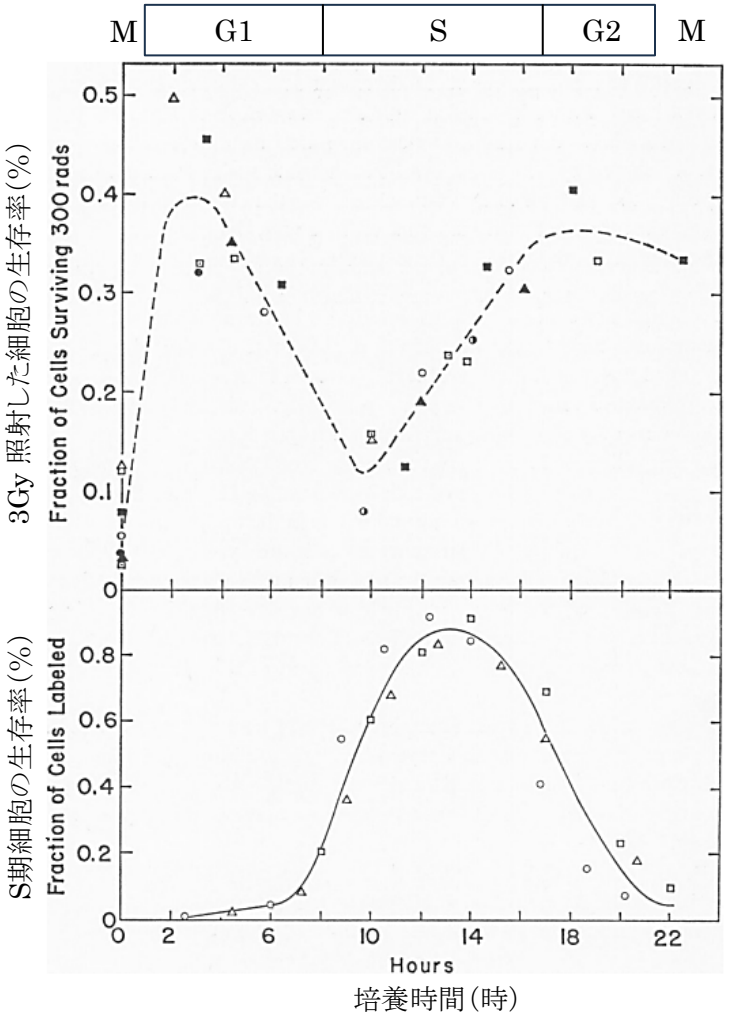
細胞周期と放射線感受性

同調培養細胞への放射線照射実験「M期とS期の初期が放射線感受性が最も高い」



細胞周期の時期（Phase）

‡出典：10版 放射線取扱の基礎 第一種放射線取扱主任者試験の要点，生物学 4 細胞に対する放射線影響, p. 22, 図4.3, 日本アイソトープ協会



培養時間（時）

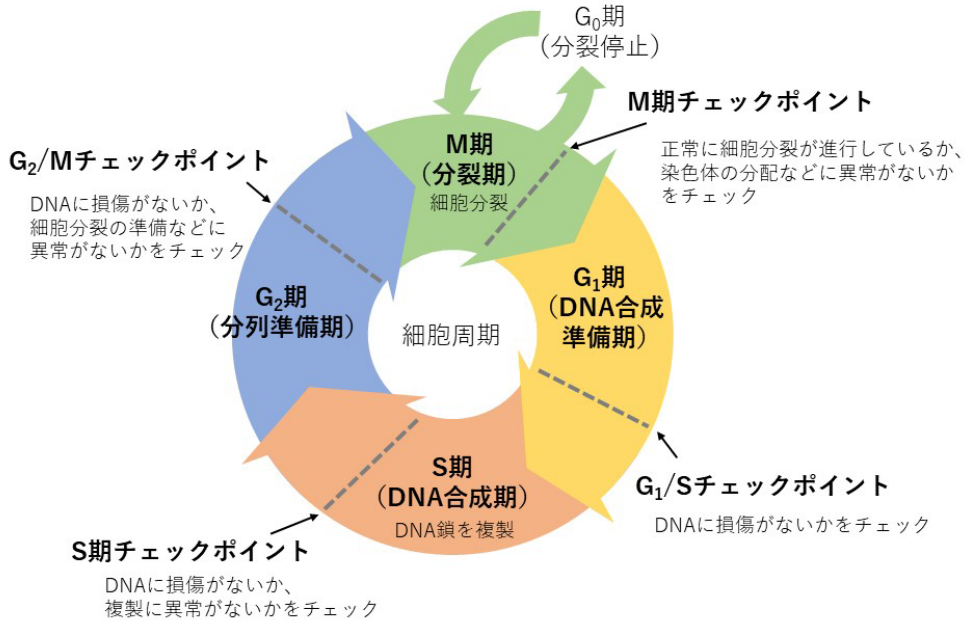
ヒト培養細胞（Hela細胞）同調培養系
3Gy エックス線照射

‡出典：Toyozo Terasima, L.J. Tolmach (1963), Variations in Several Responses of HeLa Cells to X-Irradiation during the Division Cycle, Biophysical Journal, Vol. 3 (1), p. 18, Fig. 4, ELSEVIER, https://doi.org/10.1016/S0006-3495(63)86801-0

細胞周期とチェックポイント

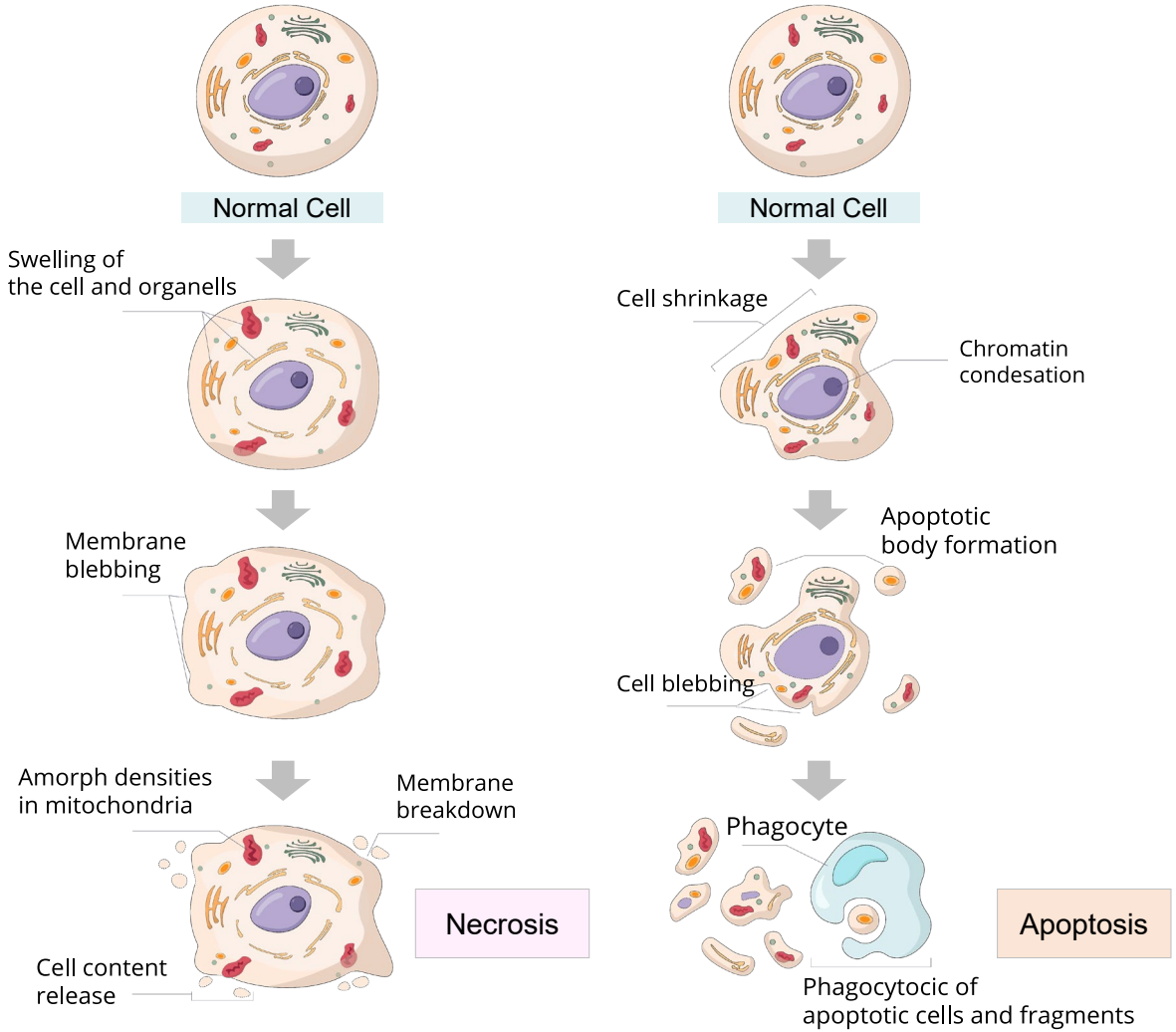
状態	期間	略記	説明
静止/老化	Gap 0	G0	細胞が周期から去った、または分裂を止めている休止期。
間期	Gap 1	G1	Gap1では細胞は大きくなる。G1/Sチェックポイントで次のDNA合成への準備ができているかが確認される。
	合成	S	この期間にDNAの複製が行われる。
	Gap 2	G2	DNA合成から有糸分裂が起こるまでの間、細胞は成長し続ける。G2/Mチェックポイントで次のM期(有糸分裂と細胞質分裂)への準備ができているかが確認される。
細胞分裂	分裂	M	この段階で細胞の成長は停止し、活動エネルギーは分裂に集中される。有糸分裂の途中M期チェックポイントで完全な分裂への準備ができているかが確認される。

細胞周期チェックポイント



チェックポイントで異常が検知されると、
細胞増殖の休止または細胞死が促進される。

高線量の放射線による細胞機能の消失や、
小線量の放射線によるリンパ球の細胞死は間期死。



増殖死（分裂死）
　放射線照射後、細胞は１回ないしは数回分裂し、分裂が止まるが、細胞内の生理活性や代謝能は継続している状態。

間期死
　細胞が分裂することなく不活化して死ぬ。
①　受動的・病理的な細胞死をネクローシス（壊死）、
②　能動的・生理的な細胞死をアポトーシス　という。

画像：Olha Pohrebniak, 1398891745, iStock

The effects of radiation on the human body

01

分子・細胞レベルでの放射線影響



The effects of radiation on the human body

01

分子・細胞
レベルでの
放射線影響

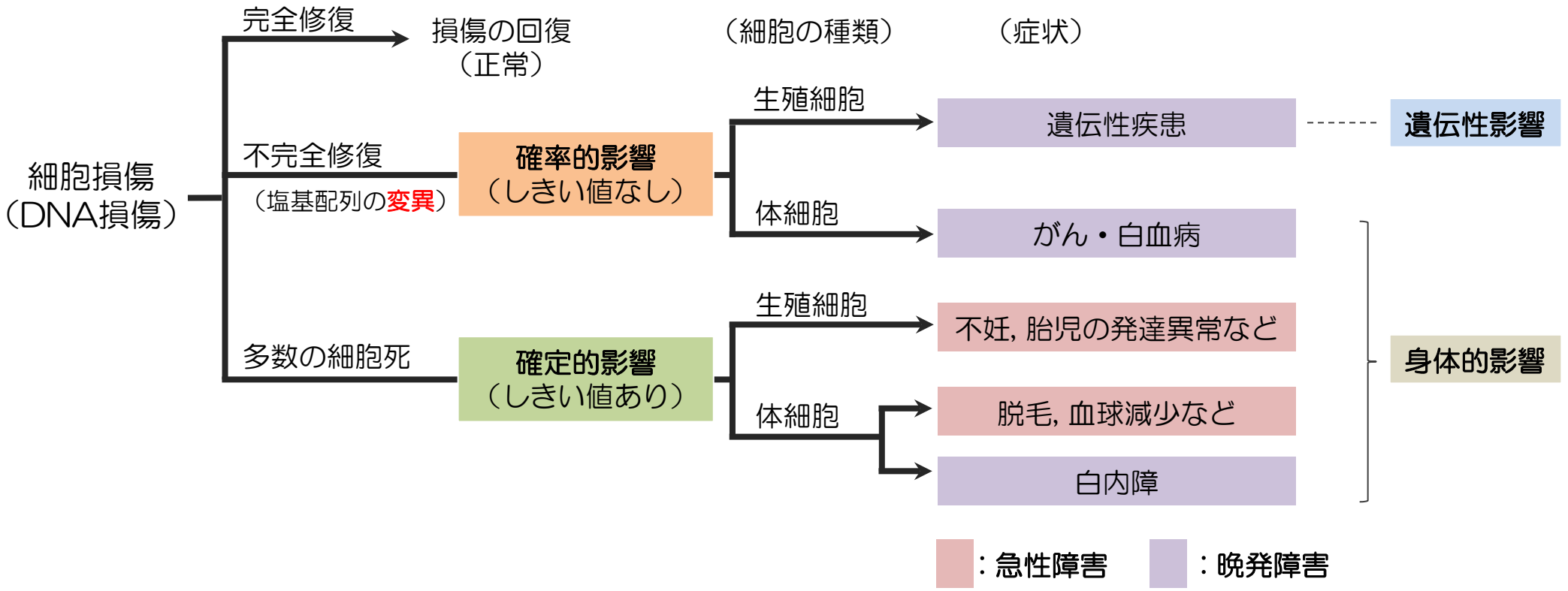
02

高線量放射線
被ばく時に
現れる身体症状



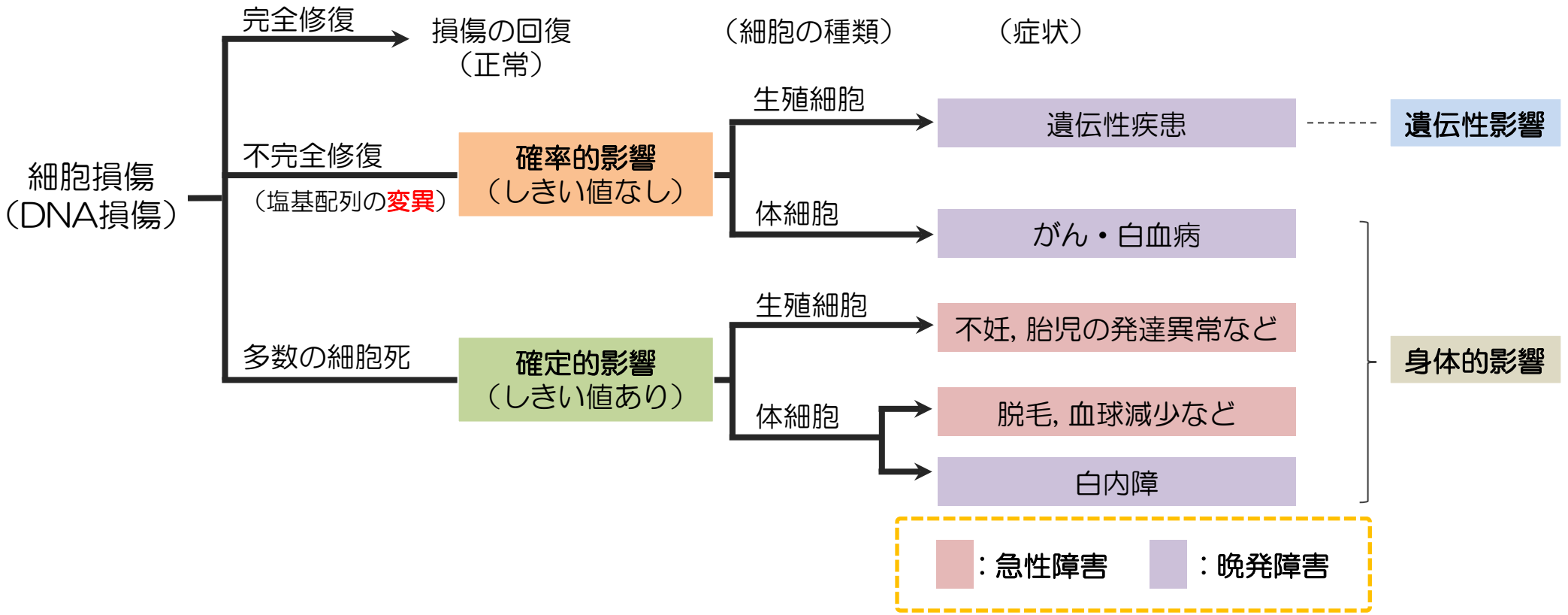
放射線被ばくにより生じ得る症状の分類

① 急性障害・早期反応（Acute effect）／ 晩発障害（Late effect）：数週間以内／数カ月～数年以上後
② 確定的影響（Deterministic effect）／ 確率的影響（Stochastic effect）：しきい値がある／ないと仮定
③ 身体的影響（Somatic effect）／ 遺伝性影響（Hereditary effect）：被ばくした当人／次世代以降



放射線被ばくにより生じ得る症状の分類

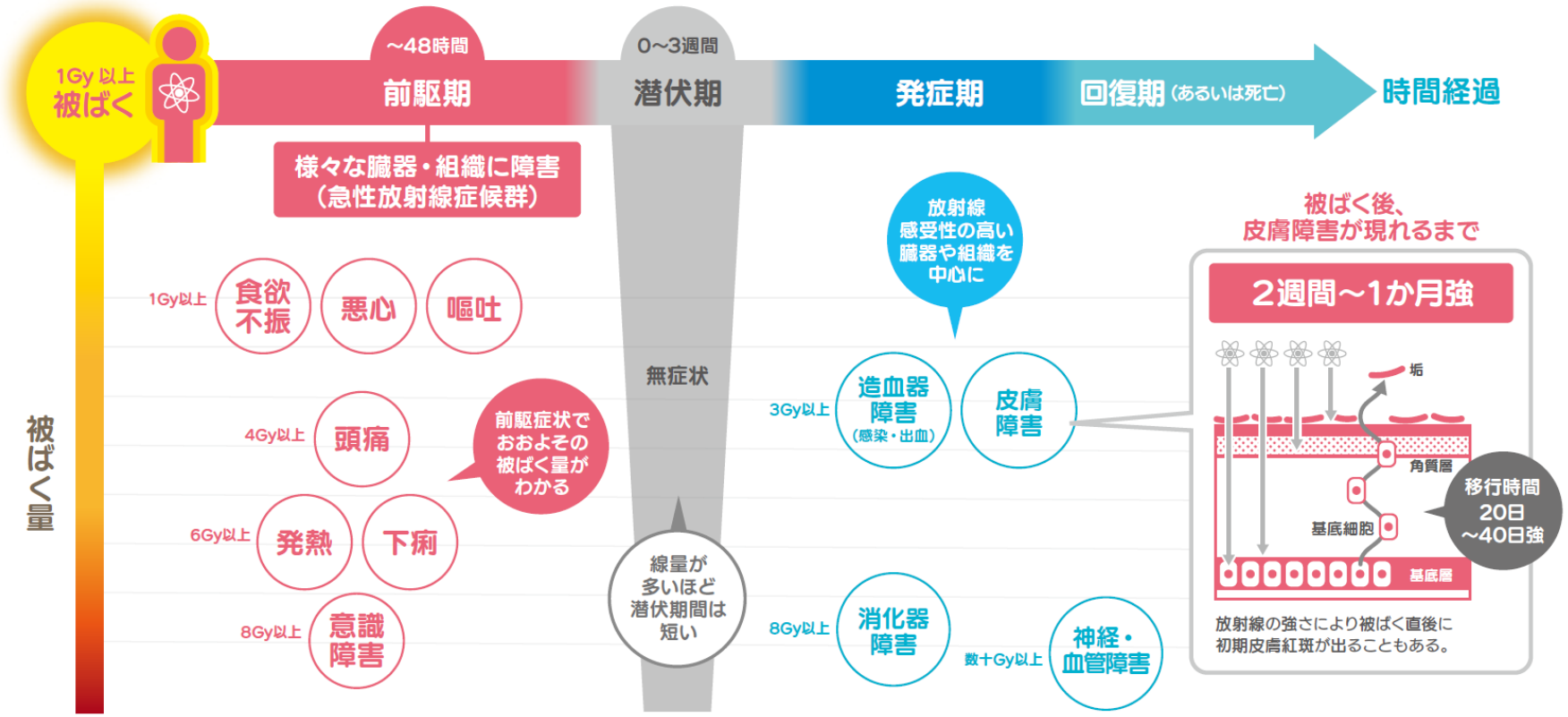
① 急性障害・早期反応（Acute effect）／ 晩発障害（Late effect）：数週間以内／数カ月～数年以上後
② 確定的影響（Deterministic effect）／ 確率的影響（Stochastic effect）：しきい値がある／ないと仮定
③ 身体的影響（Somatic effect）／ 遺伝性影響（Hereditary effect）：被ばくした当人／次世代以降



確定的影響

急性放射線症候群

全身に1グレイ以上の被ばくをした際、様々な臓器・組織に障害が生じ、複雑な臨床経過をたどる一連の臓器障害



Gy：グレイ　1グレイ=1,000 ミリグレイ

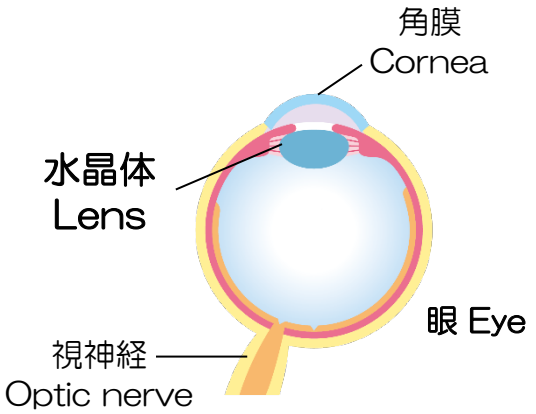
皮膚は大人の体で 1.3 ~ 1.8 ㎡とかなり大きな面積を持つ組織です。また、表皮は、基底層で生まれた基底細胞が徐々に分化を遂げながら表面に押し上げられていき、角質層となり最後は垢となって体表面から離れます。基底層から表層への移行時間は大体 20 日~ 40 日強といわれています※。放射線の影響を受けた角質層から基底層までの細胞は表面に現れるのに2週間から1か月強程度の時間が掛かります。このため、放射線の強さにより被ばく直後に初期皮膚紅斑が出ることもありますが、一般に皮膚障害は、被ばく後2~3週間経ってから現れます（上巻 P25「外部被ばくと皮膚」）。 ※出典：UNSCEAR 1988,「放射線の線源、影響及びリスク」放射線医学研究所監訳、（株）実業広報社、平成2年3月

CC BY

出典：放射線による健康影響等に関するポータルサイト, 画像コンテンツ集（インフォグラフィックス）, 環境省, https://www.env.go.jp/chemi/rhm/portal/pdf/infographic/14.pdf

白内障（Cataracts）

- 潜伏期間　　：数年～数十年
- しきい値　　：0.5 Sv



がん（Cancers）

- 潜伏期間　　：数年～数十年
- しきい値　　：ないものと仮定

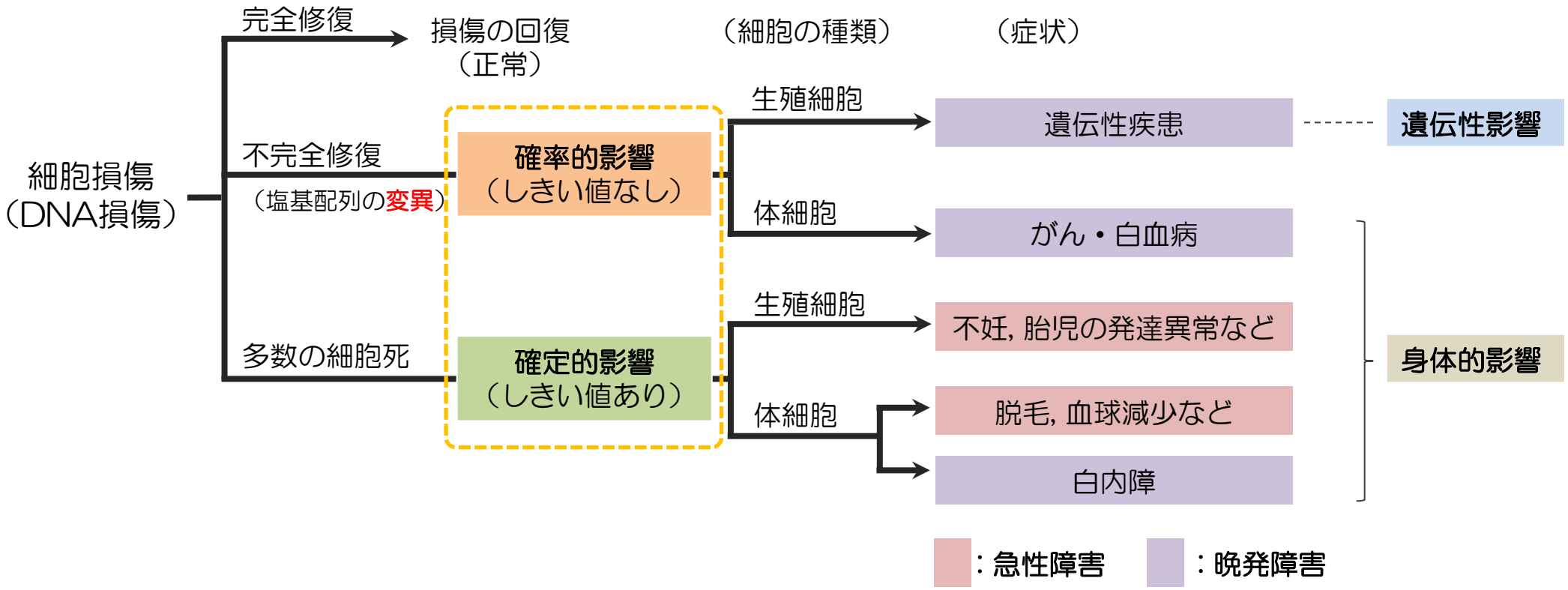
※がん・遺伝性疾患
については後でも述べる
（確率的影響，遺伝性影響）

遺伝性の疾患など（Hereditary diseases）

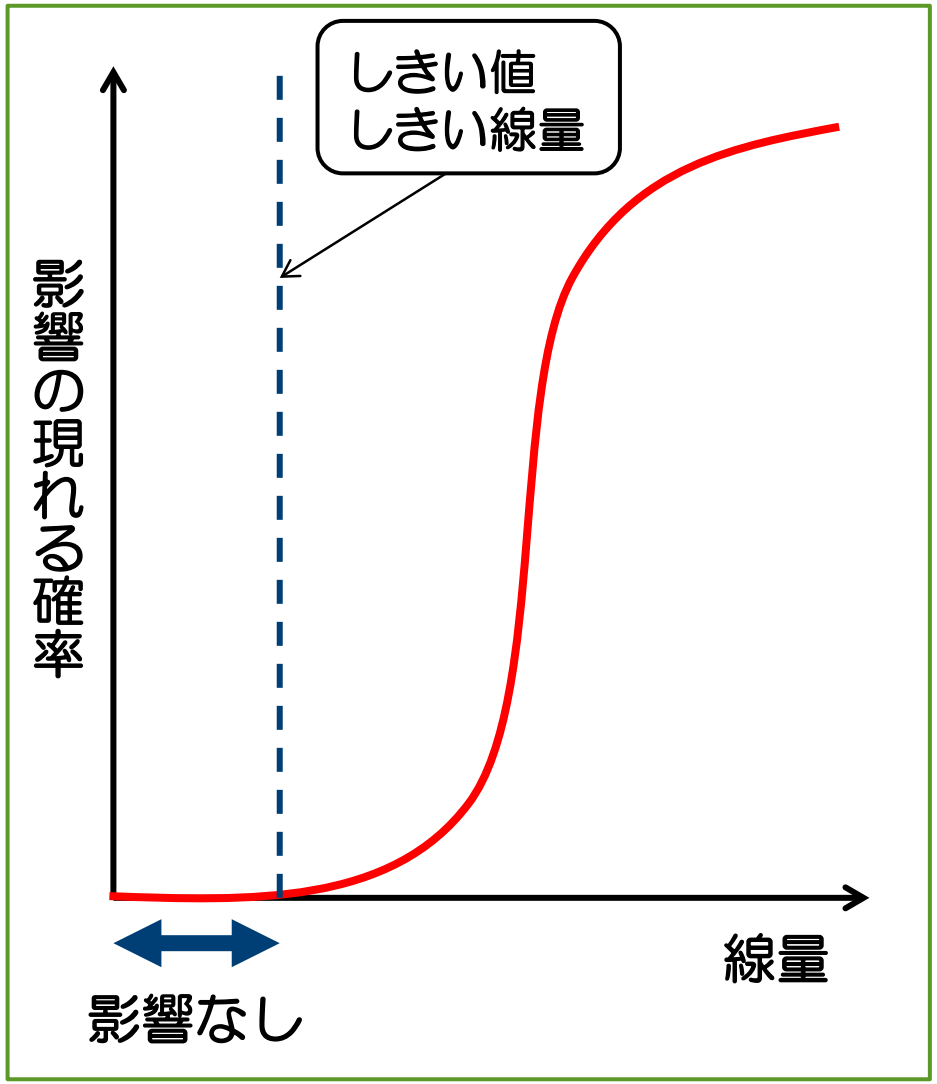
- 放射線被ばくによる遺伝性疾患の発症に関する報告はない
- しきい値　　：ないものと仮定

放射線被ばくにより生じ得る症状の分類

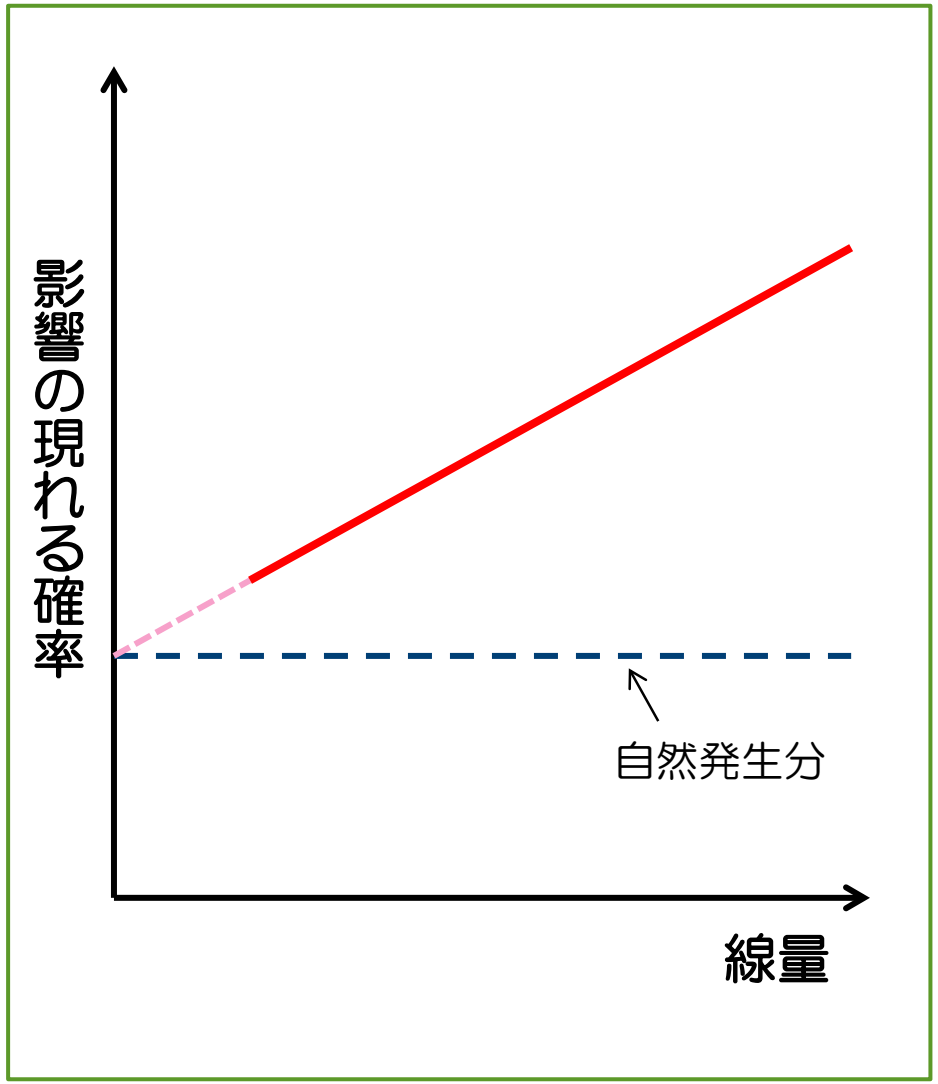
① 急性障害・早期反応（Acute effect）／晩発障害（Late effect）：数週間以内／数カ月～数年以上後
② 確定的影響（Deterministic effect）／確率的影響（Stochastic effect）：しきい値がある／ないと仮定
③ 身体的影響（Somatic effect）／遺伝性影響（Hereditary effect）：被ばくした当人／次世代以降



確定的影響（脱毛・白内障など）



確率的影響（がん・白血病など）



臓器・組織における放射線感受性の違い

ベルゴニー・トリボンドーの法則（**Bergonie-Tribondeau's law**）

① 分裂頻度が高い細胞
② 将来の分裂回数が多い細胞
③ 形態的、機能的に未分化な細胞　は、**放射線感受性が高い**

「幹細胞」が存在する臓器や組織は
放射線感受性が高い
（＝ 放射線に弱い、しきい値が低い）

放射線感受性 Radiosensitivity	臓器・組織 Organs & Tissues	細胞分裂頻度 Cell division frequency
とても高い Very High	リンパ組織、造血組織（骨髄）、生殖器（精巣、卵巣） Lymphatic tissue, hematopoietic tissue (bone marrow), reproductive organs (testes, ovaries)	高い High
高い High	小腸、咽頭口腔、皮膚、毛嚢、皮脂腺、膀胱、食道、水晶体、尿管 Small intestine, pharyngeal mouth, skin, sebaceous glands, bladder, esophagus, crystalloid, urethra	とても高い Very High
中程度 Moderate	唾液腺、軟骨芽細胞、骨組織（骨芽細胞、破骨細胞） Salivary glands, chondrocytes, bone tissue (osteoblasts, osteoclasts)	中程度 Middle
低い Low	神経組織、筋肉組織 Nerve tissue, muscle tissue	ほぼ分裂しない almost no cell division
かなり低い Very Low	軟骨細胞、骨組織（骨細胞）、汗腺、肺、腎臓、肝臓、膵臓、甲状腺、副腎 Chondrocytes, bone tissue (osteocyte), sweat glands, lungs, kidneys, liver, pancreas, thyroid, adrenal gland	低い Low

確定的影響のしきい線量（しきい値）

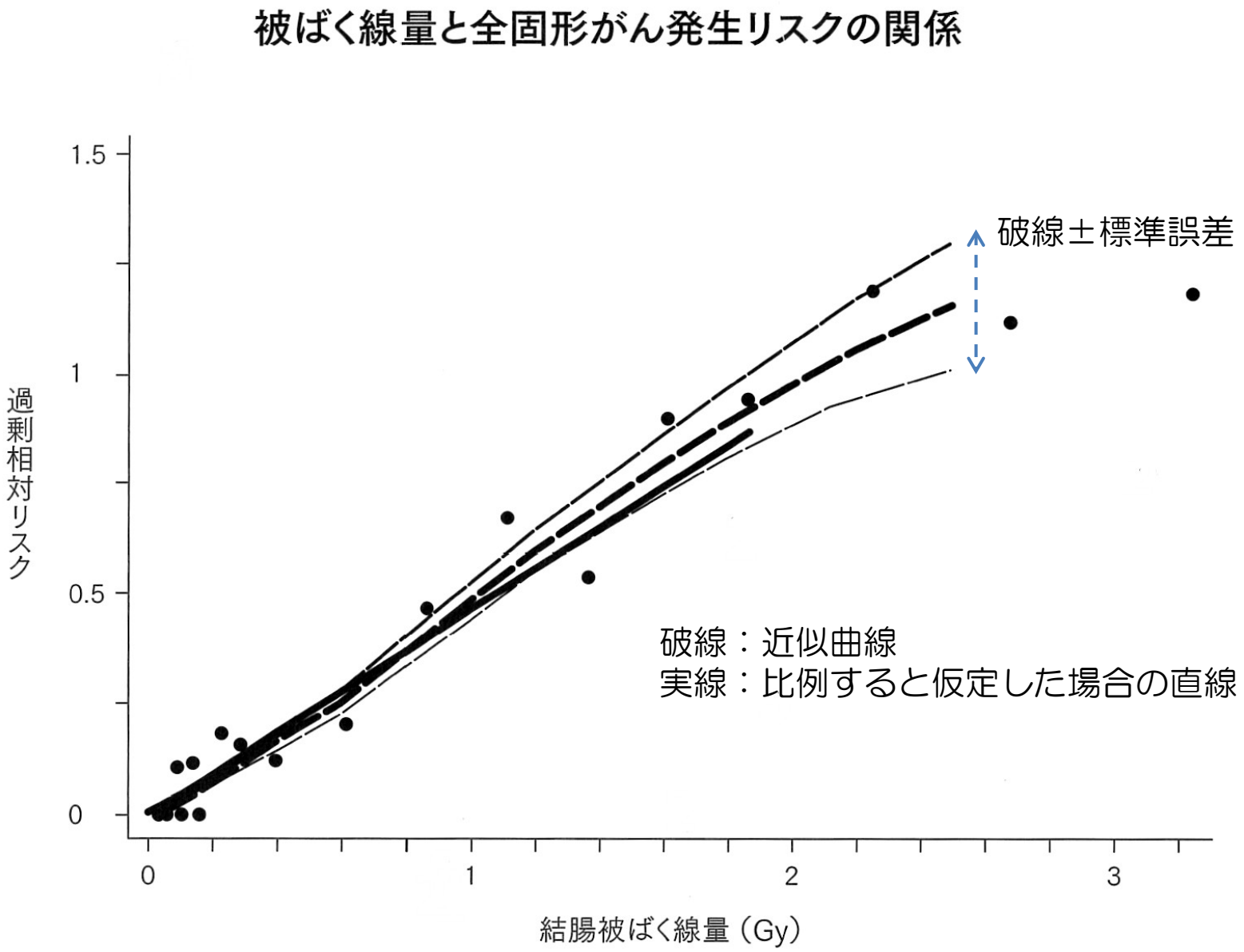
成人の場合

臓器・組織 Organs & Tissues	症状 Symptoms	しきい線量 Threshold dose (Gy)
骨髄 bone marrow	白血球減少 Decrease in White blood cells 赤血球・血小板減少 Decrease in Red blood cells, Platelets	0.5 2 ~ 6
生殖器 reproductive organs	永久不妊 Permanent infertility 男性 Male 女性 Female	 3.5 ~ 6 2.5 ~ 6
眼 eyes	白濁 Cloudiness 白内障 Cataract	0.5 ~ 2 0.5
皮膚 skin	紅斑 Erythema 脱毛 Loss of hair 潰瘍・壊死 Ulcer, Necrosis	3 ~ 10 > 3 > 20

胎児の場合

臓器・組織 Organs & Tissues	症状 Symptoms	しきい線量 Threshold dose (Gy)
着床前期 Early stage of implantation (0 ～ 8 日)	胚死亡 Embryonic death 流産 Miscarriage	> 0.1 (> 100 mGy)
器官形成期 Organogenesis stage (9 ～ 60 日)	身体奇形 Deformity	0.1 ~ 0.2 (100 ~ 200 mGy)
胎児期 Fetal stage (60 ～ 270 日)	精神発達遅滞 Mental retardation 小頭症 Microcephaly	0.12 (120 mGy)

※　胎児は成人よりもしきい値が一桁程度小さい。



‡出典：田中司朗 他 (2016), 放射線 必須データ32　被ばく影響の根拠, p. 82, 創元社

広島長崎原爆被爆者の疫学調査
（寿命調査
LSS： Life Span Study）

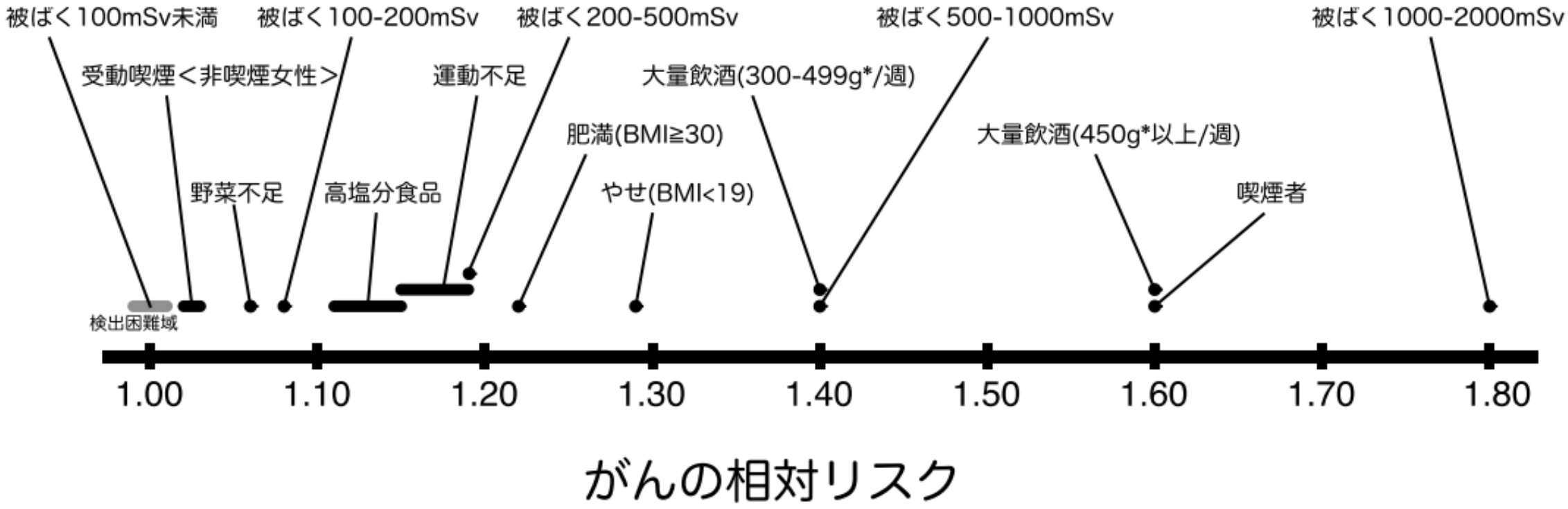
調査対象数：１０５,４２７人
３０歳に被ばくした者が
７０歳になったときの
過剰相対リスク※を調べた。
（造血細胞悪性腫は除く）

しかし、この１０万人規模
の調査を行っても、
100mSv未満
では直線比例的ながんリスクの増
加は確認できなかった。

※　過剰相対リスク　＝　相対リスク － 1

$$= \frac{\text{被ばく集団における発がん率}}{\text{非被ばく集団における発がん率}} - 1$$

（参考）　放射線と生活習慣　がんリスクの比較



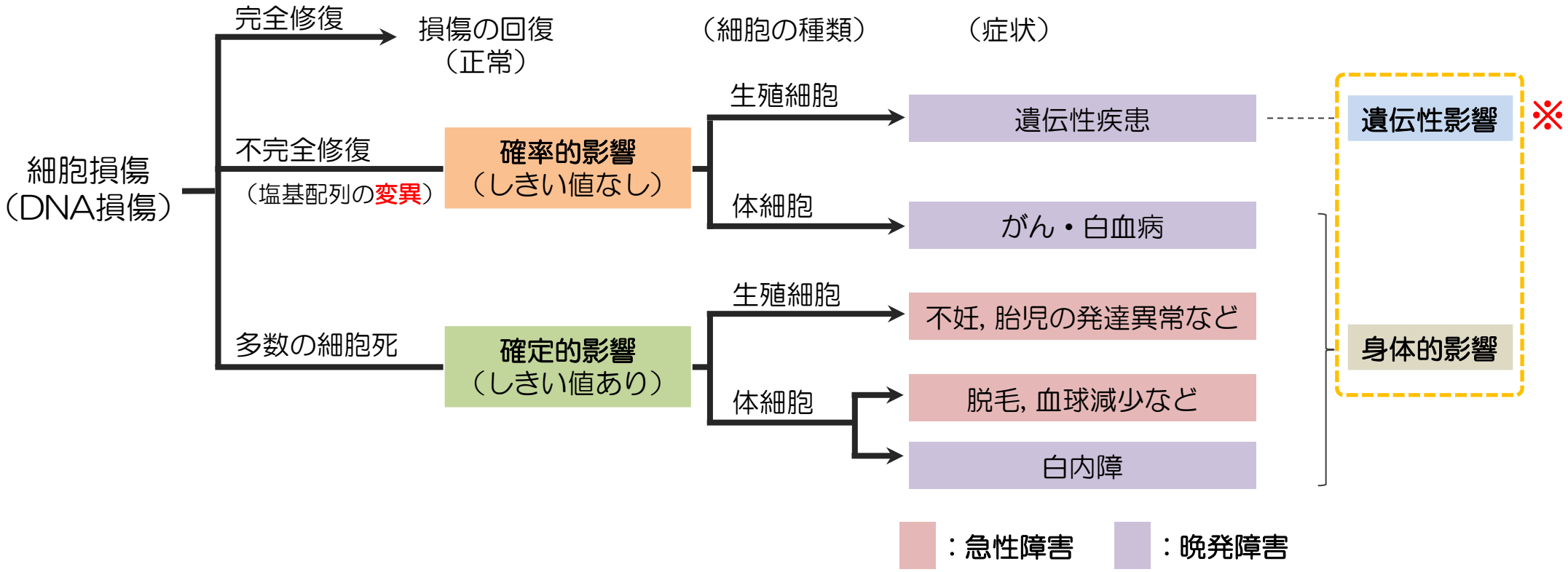
国立研究開発法人国立がん研究センター発表資料（JPHC Study）より引用し改変した。相対リスクとは、因子（被ばくあるいは生活習慣因子）がない場合を１としたときに、それぞれの因子がある場合のがんリスクが何倍になるかを表す値。放射線の発がんリスクは、広島・長崎の被爆者の調査結果（固形がんのデータ）に基づくもの。

*エタノール換算。たとえば日本酒（アルコール度数 15%）の場合、約三合を毎日飲み続けると 450g/週となる。

‡出典：改訂版よくわかる 放射線・アイソトープの安全取扱い, p. 80, 図4.10, 日本アイソトープ協会

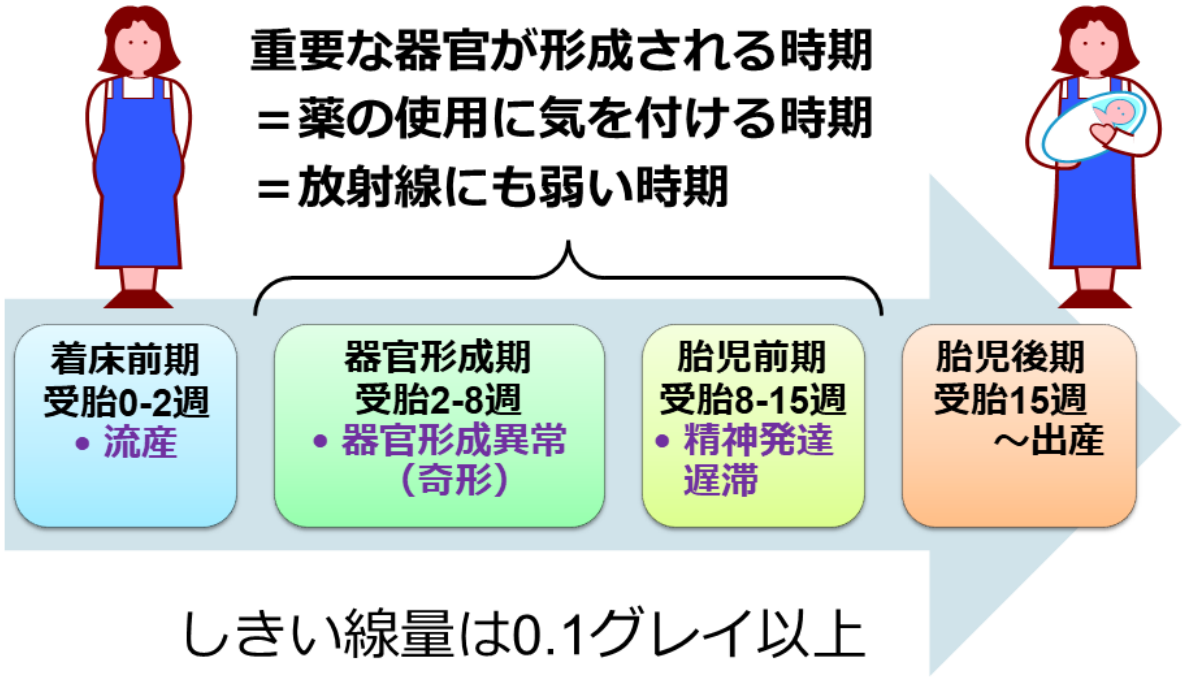
放射線被ばくにより生じ得る症状の分類

① 急性障害・早期反応（Acute effect）／晩発障害（Late effect）：数週間以内／数カ月～数年以上後
② 確定的影響（Deterministic effect）／確率的影響（Stochastic effect）：しきい値がある／ないと仮定
③ 身体的影響（Somatic effect）／遺伝性影響（Hereditary effect）：被ばくした当人／次世代以降



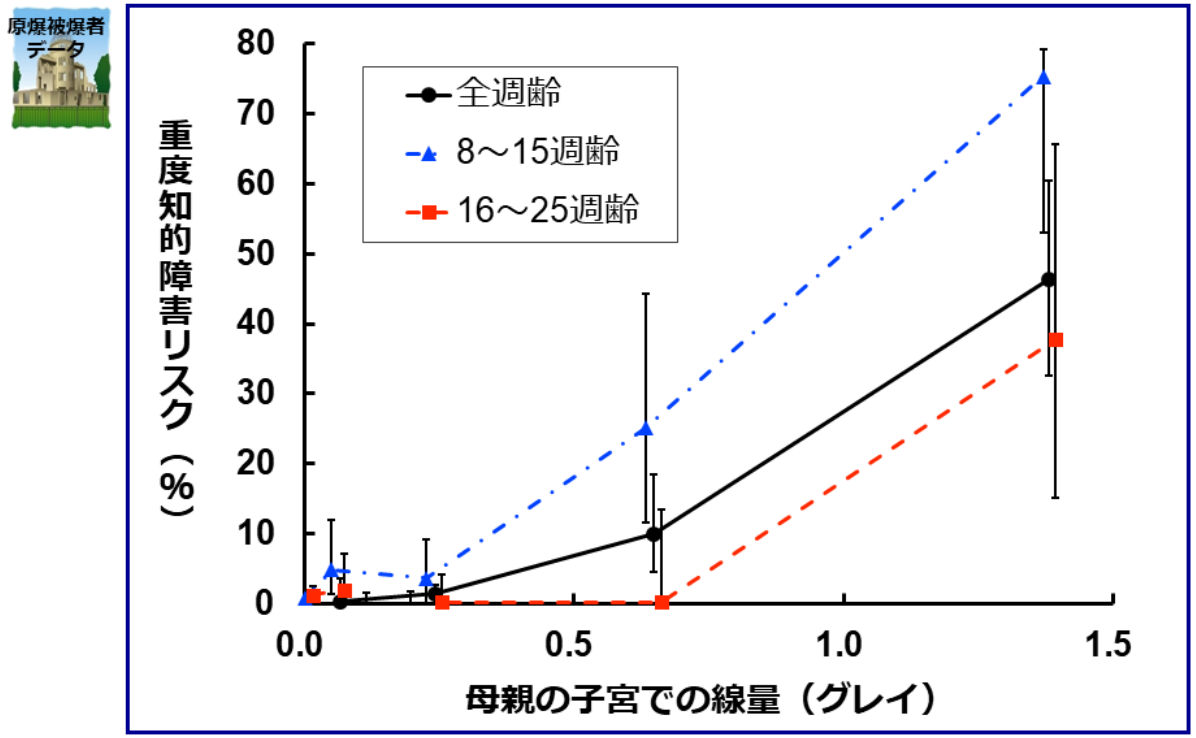
※ 原爆被爆者を対象とした調査も含め、現在のところヒトにおいて遺伝性影響があるとされる報告はない。

胎児への影響　確定的影響（組織反応）と時期特異性



※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(齢)に相当します。

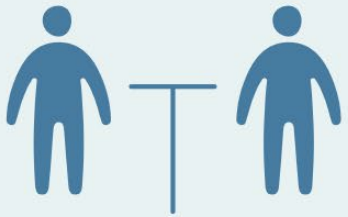
胎児への影響　精神発達遅滞



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」
（ https://www.rerf.or.jp/programs/roadmap/health_effects/uteroexp/physment/ ）より作成

出典：放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和5年度版）, 3.5 胎児への影響, https://www.env.go.jp/chemi/rhm/current/03-05-01.html
https://www.env.go.jp/chemi/rhm/current/03-05-02.html

被爆二世に関する調査結果



原爆で親が
放射線被ばく



被爆二世

親の放射線被ばくによる
子孫への遺伝性影響は確認されていません

染色体異常 に関する調査 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）」	染色体異常の増加なし
20歳までに発症した白血病、遺伝性の可能性のある腫瘍等の死亡 に関する調査 Y. Yoshimoto el al.: *Am J Hum Genet* 46: 1041-1052, 1990.	死亡と親の生殖線量との関連なし
がん罹患率 に関する調査 （1958–1997） S. Izumi et al.: *Br J Cancer* 89: 1709-13, 2003.	腫瘍と親の線量との関連なし
生活習慣病有病率 に関する調査 （2002–2006） S Fujiwara et al.: *Radiat Res* 170: 451-7, 2008.	生活習慣病と親の線量との関連なし

出典：「放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料 令和２年度版」上巻 P108、109、112より作成

作成日：令和４年３月31日

環境省 Ministry of the Environment

出典：放射線による健康影響等に関するポータルサイト，画像コンテンツ集（インフォグラフィックス），環境省，https://www.env.go.jp/chemi/rhm/portal/pdf/infographic/03.pdf

The effects of radiation on the human body

01

分子・細胞
レベルでの
放射線影響

02

高線量放射線
被ばく時に
現れる身体症状



The effects of radiation on the human body

01

分子・細胞
レベルでの
放射線影響

02

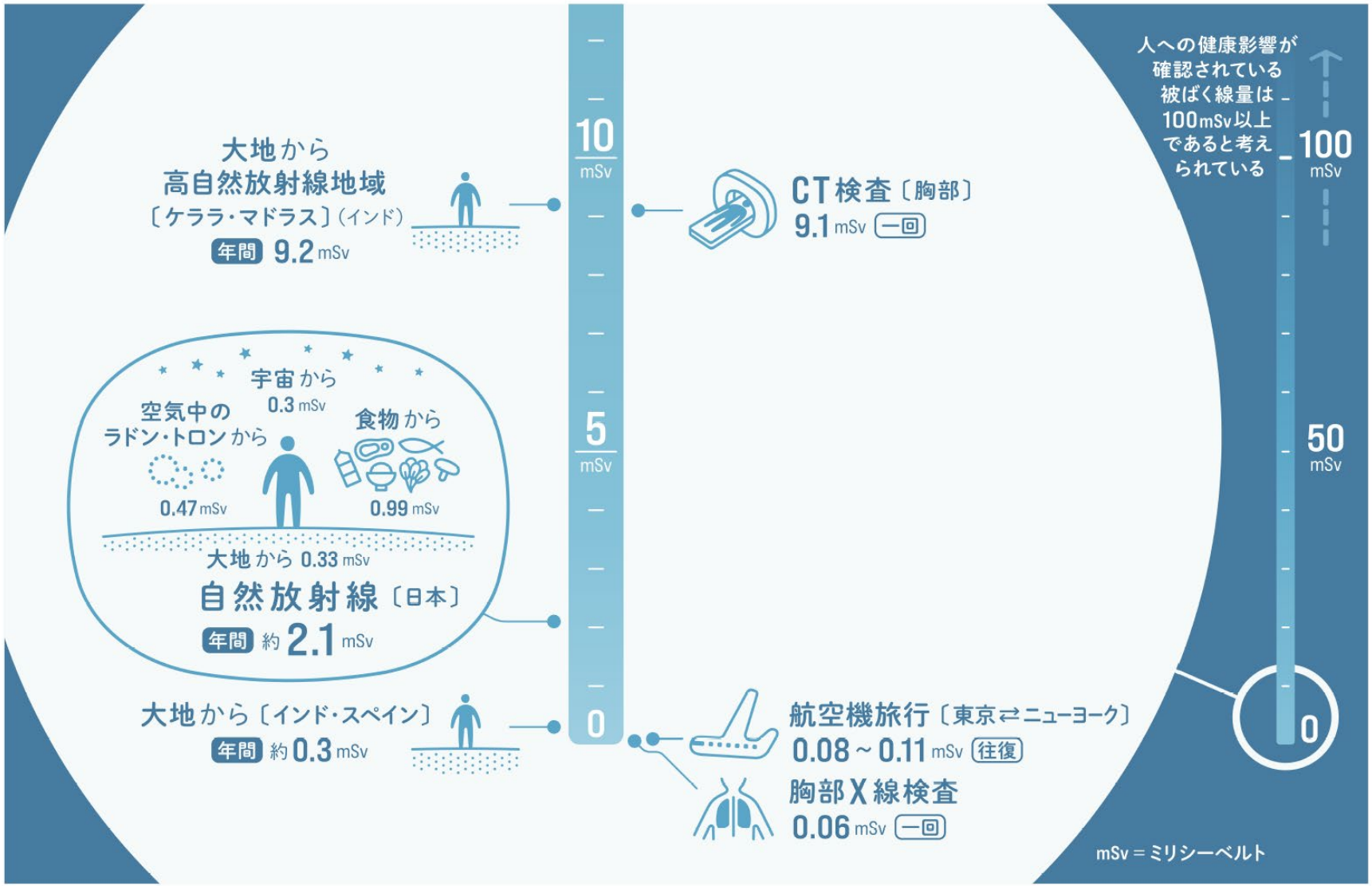
高線量放射線
被ばく時に
現れる身体症状

03

低線量率放射線
長期被ばく
に関する知見



身のまわりに存在する放射線による被ばく線量



出典：原子力安全研究協会「生活環境放射線（国民線量の算定）第３版」（2020年）
原子力安全研究協会「新版 生活環境放射線（国民線量の算定）」（2011年） ｜ 国連科学委員会（UNSCEAR）2008年報告

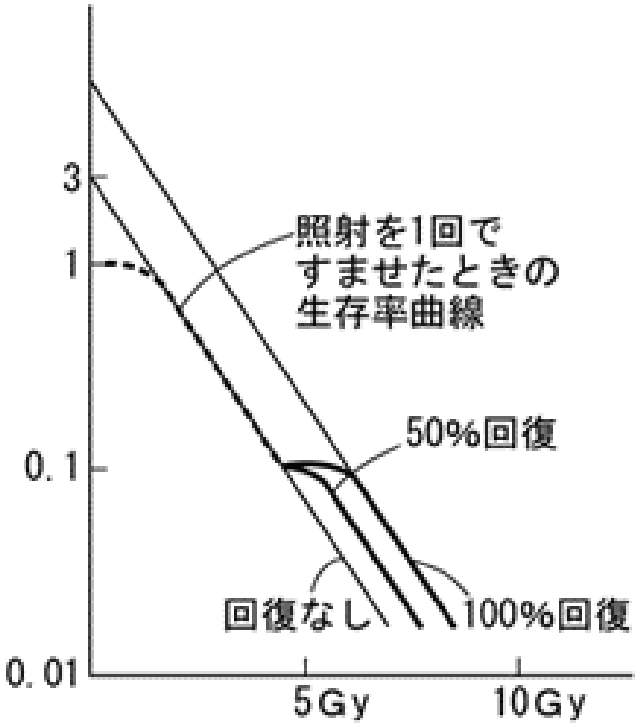
作成日：令和４年３月31日

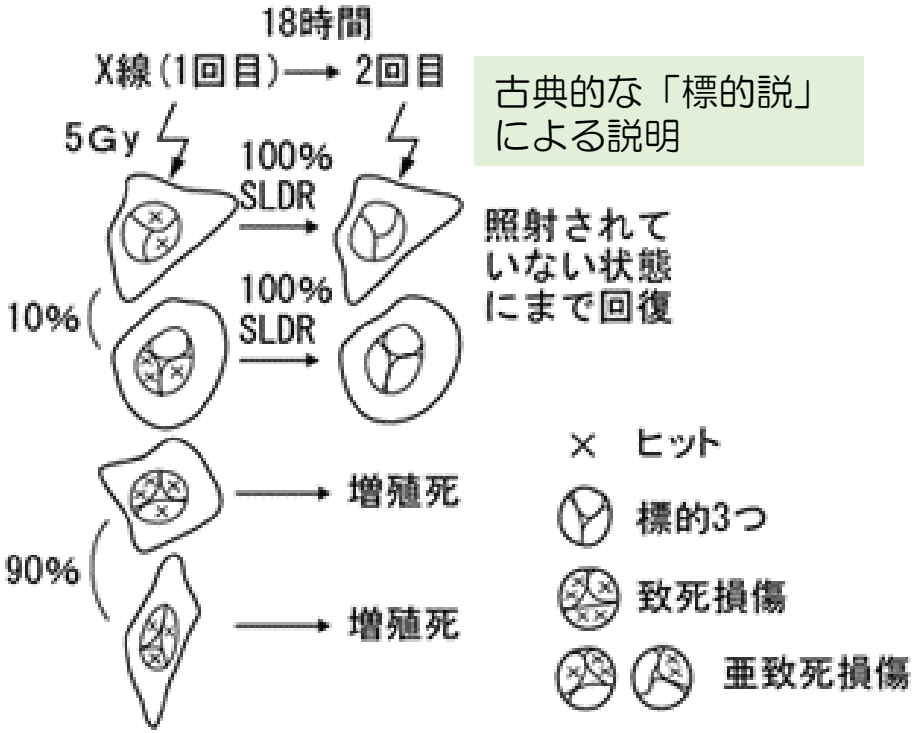
環境省 Ministry of the Environment
出典：放射線による健康影響等に関するポータルサイト，画像コンテンツ集（インフォグラフィックス），環境省，https://www.env.go.jp/chemi/rhm/portal/pdf/infographic/01.pdf

致死損傷	：	放射線照射後に回復ができない損傷
回復性損傷：		放射線照射後に回復可能な損傷（亜致死損傷回復・潜在的致死損傷回復）

亜致死損傷回復（SLD回復, SLDR）Sub Lethal Damageからの回復（Elkind 回復）

- 同じ線量を数回に分けて照射すると、細胞生残率が増加する。
- 低い線量の低LET放射線を照射した場合、致死効果が現れにくい。
- 高LET放射線の照射では、SLD回復がほとんど見られない。
- G2期からM期は感受性が高く（グラフの肩小、SLD回復小）、S期後半は感受性が低い（肩大）。





古典的な「標的説」による説明

※　SLD回復とは別に、照射後の細胞培養環境の影響による潜在的致死損傷回復（PLD回復, PLDR：Potentially Lethal Damageからの回復）と言われる現象があることも知られている。

日本獣医師会
放射線診療技術研修支援システム

‡出典：日本獣医師会放射線診療技術研修支援システム, http://www.020329.com/x-ray/bougo/contents/chapter3/3-1-ref15.html

遺伝性影響の線量率効果に関する動物実験

緩照射 Chronic exposure

~ 0.009R/min
(~0.08mGy/min)



~ 0.001R/min
(~0.009mGy/min)

＊2



＊1

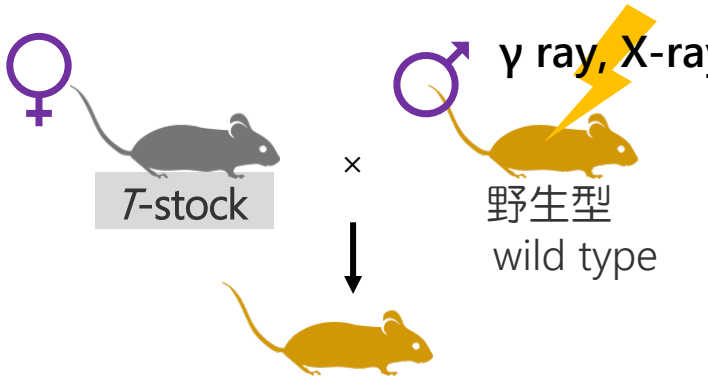
急照射
Acute exposure



＊2

マウスの雄（精原細胞）にX線やγ線を照射し、
7つの遺伝子座における変異発生率を調査した。

特定座位試験　SLT: Specific Locus Test



ヘテロ接合型 Heterozygous

T-stockの7つの遺伝子座の変異は劣性（潜性）なので、ヘテロだと表現型には現れない。

T-stock mouse： 7 loci are recessive homo

Coat color:
- *a* (nonagouti, chromosome 2),
- *b* (brown, chromosome 4),
- c^{ch} (chinchilla at albino, chromosome 7),
- *d* (dilute, chromosome 9),
- *p* (pink-eyed dilution, chromosome 7),
- *s* (piebald-spotting, chromosome 14);

Ear morphology:
- *se* (short-ear, chromosome 9).

＊1 出典：Oak Ridge National Laboratory, https://www.flickr.com/photos/oakridgelab/42739870011

＊2 ‡出典：Liane B. Russell (2013), The Mouse House: A brief history of the ORNL mouse-genetics program, 1947–2009, Mutation Research/Reviews in Mutation Research, Vol. 753 (2), pp. 71-72, Fig. 2 and Fig.3, ELSEVIER, https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2013.08.003

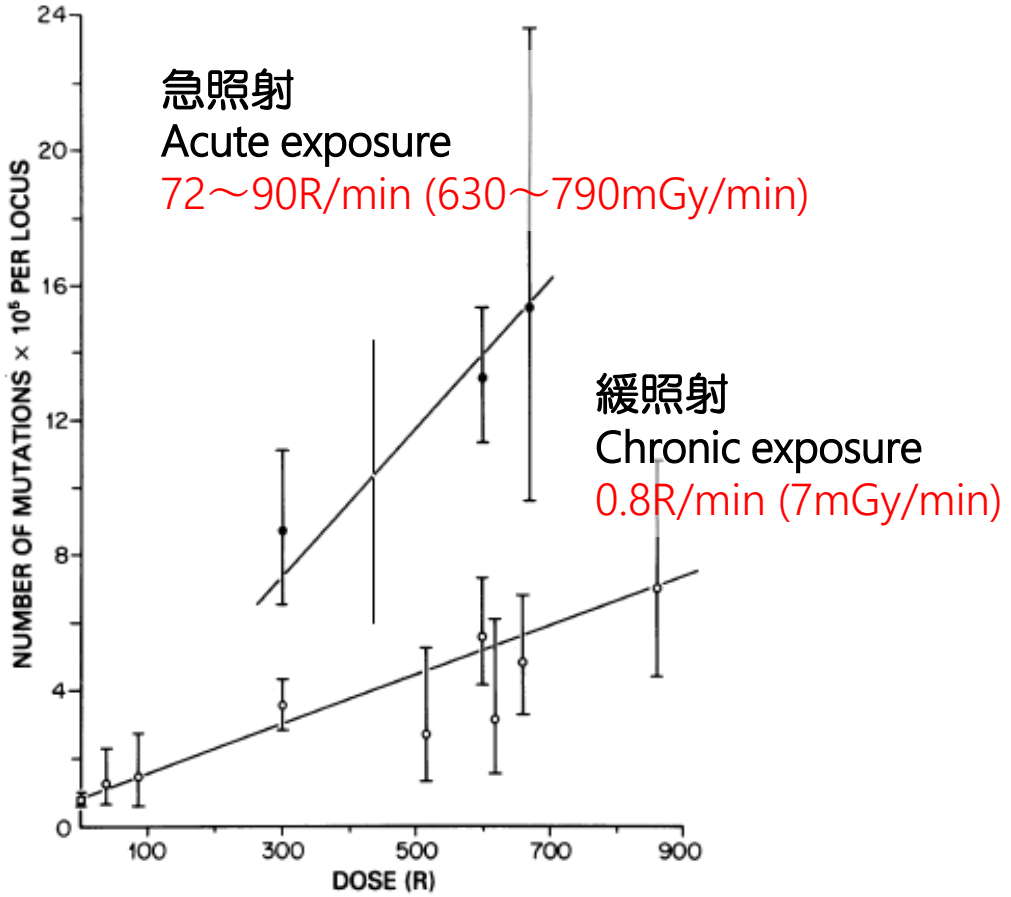
【 線量率効果（Dose-rate effect）】

同じ線量の放射線を一度に受けるよりも、少しずつ分けて、
あるいは少量を連続して受ける方が影響が少ない。

Table 1. Specific-locus mutation rate data obtained in A_s spermatogonia under chronic and acute irradiation conditions by use of the seven-locus test stock

Category	Source of radiation	Exposure, R	Dose rate, R/min	Mutations, no.	Offspring, no.	Frequency*	Ref.
Control				28	531,500	0.75	3
				11	157,421	1.00	4
				0	38,448	0	6
Chronic	^{60}Co	37.5	0.001	7	79,364	1.26	4
	^{137}Cs	86	0.001	6	59,810	1.43	3
	^{137}Cs	300	0.0007	11	48,358	3.25	2
	^{137}Cs	300	0.001	15	49,569	4.32	3
	^{137}Cs	300	0.009	10	58,457	2.44	3
	^{137}Cs	300	0.005	24	84,831	4.04	2
	^{137}Cs	516	0.009	5	26,325	2.71	3
	^{137}Cs	600	0.001	22	53,380	5.89	3†
	^{137}Cs	600	0.8	10	28,059	5.09	7
	^{60}Co	618	0.008	5	22,682	3.15	4
	^{60}Co	671 rem	0.005	20	58,795	4.86	4
	^{137}Cs	861	0.009	12	24,281	7.06	3
Acute	X-ray	300	90	40	65,548	8.72	3
	X-ray	600	90	111	119,326	13.29	3
	X-ray	670	72	12	11,138	15.39	4

* Mutations × 10^5 per locus.
† And new data.



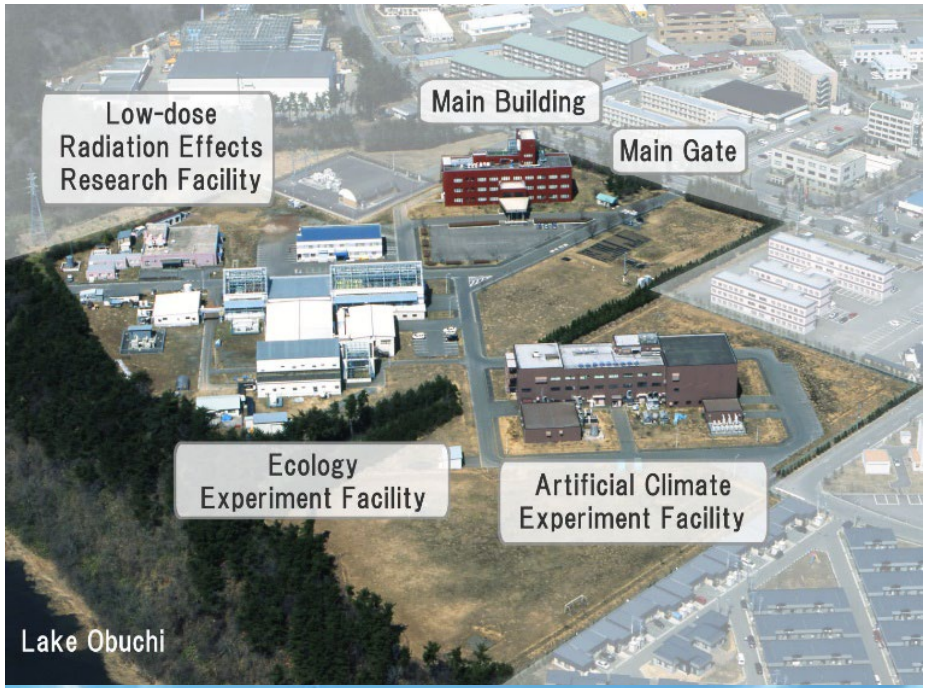
雄マウス（野生型）にX線またはγ線を照射した後で、非照射の雌マウス（T-stock）と交配させ、その後誕生した約151万7000匹の仔マウスについて、7つの遺伝子座における突然変異の出現頻度を調べた（何れかの遺伝子座に放射線による変異が入った場合、劣性（潜性）ホモ個体が誕生し、異常が表現型として現れる。）

‡ 出典：W. L. Russell, E. M. Kelly (1981), Mutation frequencies in male mice and the estimation of genetic hazards of radiation in men., Proc Natl Acad Sci U S A. 1982 Jan;79(2):542–544, pp. 542-543, Fig. 1 and Table 1, PNAS, https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.79.2.542

低線量率放射線 長期連続照射実験（マウス）

Institute for Environmental Sciences

公益財団法人　環境科学技術研究所





低線量生物影響実験棟
Low-Dose Radiation Effects Research Facility　(LERF)

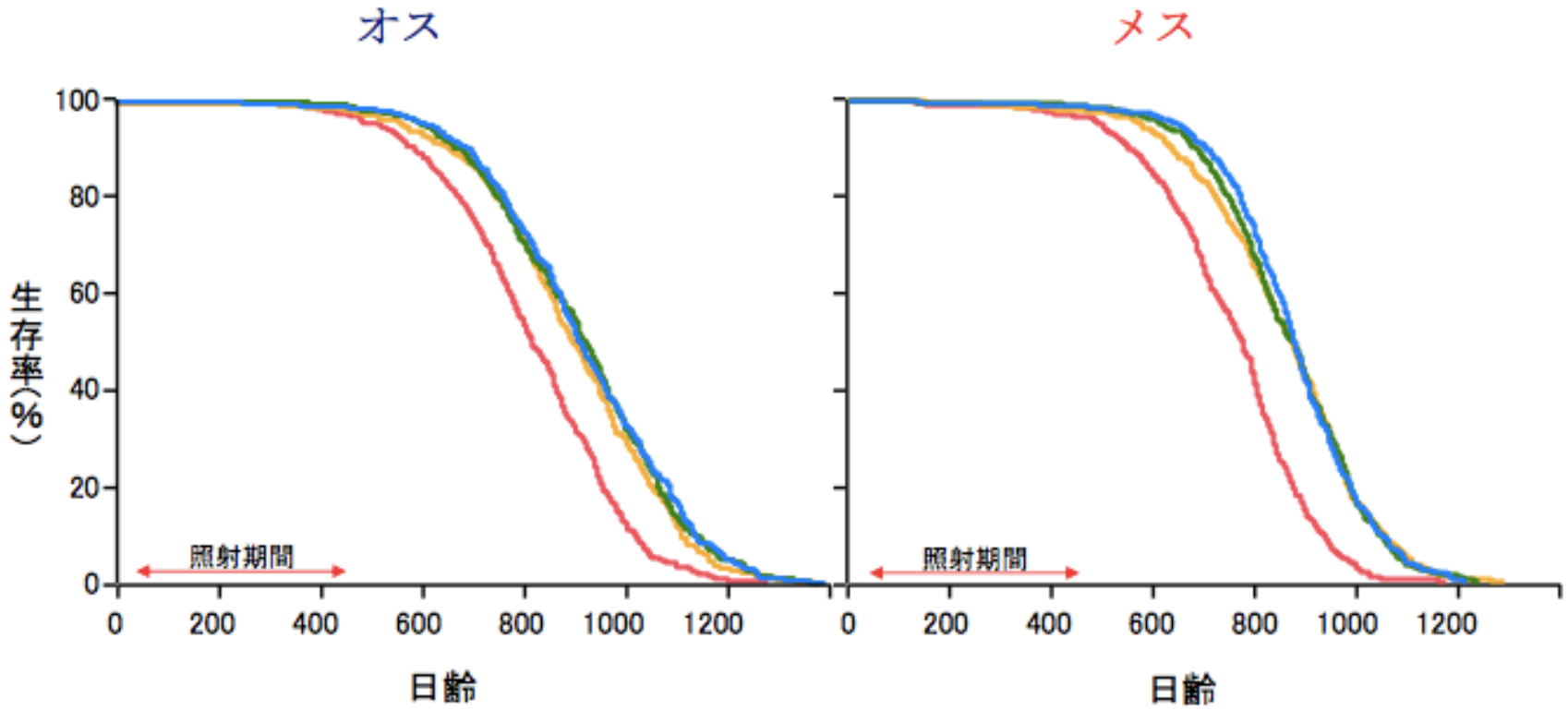


‡出典：環境科学技術研究所, https://www.ies.or.jp/profile_e/profile104.html, https://www.ies.or.jp/project_j/index.html, https://www.ies.or.jp/project_j/project01a.html, https://www.aomori-hb.jp/introduction/ahb4_2_3

特殊な飼育室の中心にγ線源（Cs-137）が設置されており、最大1,080匹のマウスに3種類の異なる線量率（0.05, 1, 20 mGy/日）でγ線を連続照射することができる。
尚、1mGy/日は国際宇宙ステーションISSで宇宙飛行士が一日あたりに被ばくする宇宙放射線の量に相当する。

線量率とガンによる寿命短縮との関係（マウス長期照射実験）

青：　非照射　自然放射線 （＜0.1 μSv/h）のみ
緑：　0.05 mGy/日（約 2.1 μSv/h）自然放射線 の約　20倍の線量率（総照射線量：　20mGy）
橙：　1.0　mGy/日（約40 μSv/h）　自然放射線 の約　460倍の線量率（総照射線量：　400mGy）
赤：20.0　mGy/日（約833 μSv/h）自然放射線 の約 9,250倍の線量率（総照射線量：8,000mGy）

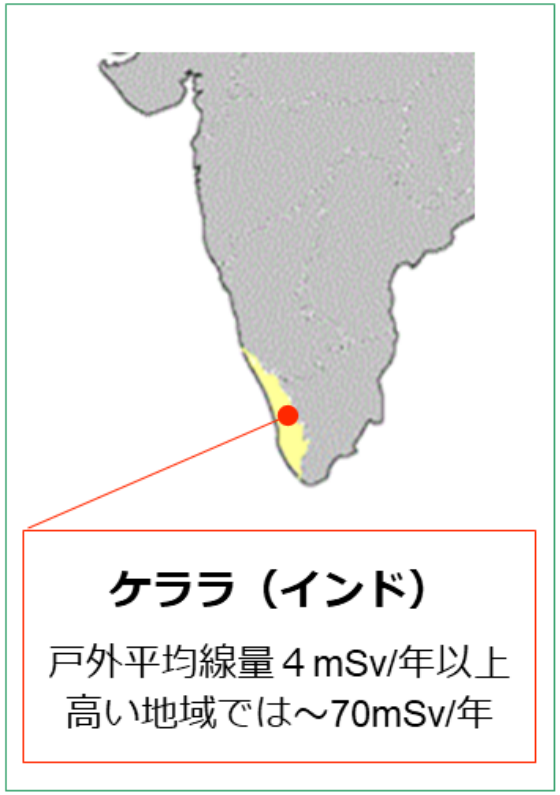


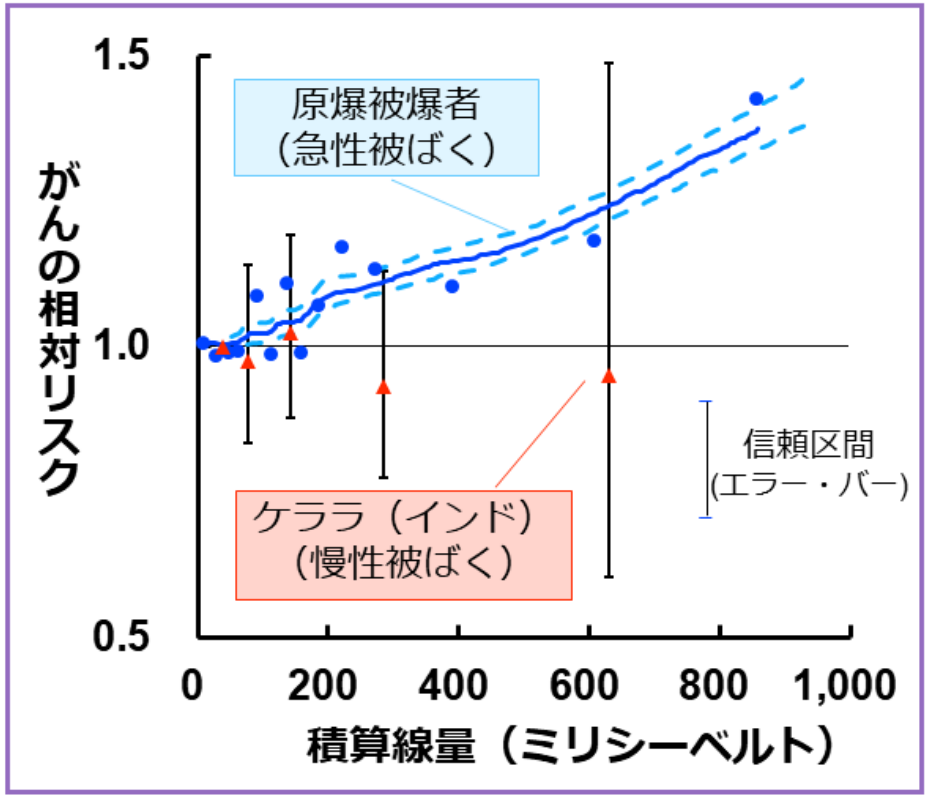
‡出典：Tanaka, S. et al. (2003), No Lengthening of Life Span in Mice Continuously Exposed to Gamma Rays at Very Low Dose Rates, Radiation Research, 160(3) : 376-379, p. 378, Fig. 1, PMID: 12926996, 10.1667/RR3042

慢性被ばくの発がん

低線量率長期被ばくの影響

インド高自然放射線地域住民の発がん





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

原爆被爆者のデータと、ケララ（インド）の高自然放射線地域住民の発がんリスクを比較したところ、ケララでは積算線量が数百ミリシーベルトになってもがんの相対リスク（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した値）の増加が見られなかった。
ただし、信頼区間（グラフ上のエラーバー）の幅が非常に大きいため、更なる検証が必要。

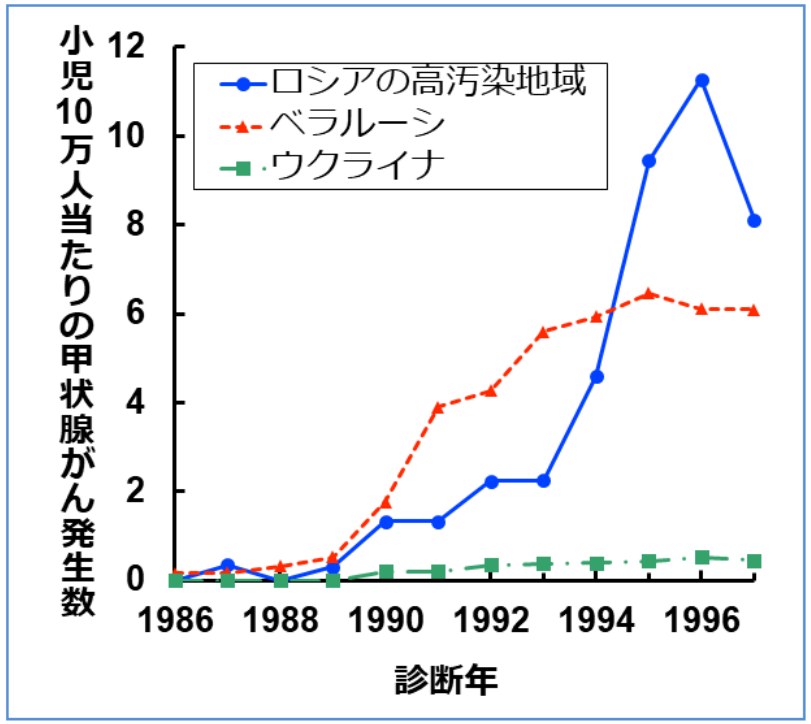
出典：放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和5年度版）, 3.7 がん・白血病, https://www.env.go.jp/chemi/rhm/current/03-07-12.html

チョルノービリ原発事故後に小児で見られた甲状腺がん

甲状腺に関する基礎的情報 甲状腺被ばく

小児甲状腺がんの発症時期 －チョルノービリ原発事故－

小児甲状腺がん（チョルノービリ原発事故）





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

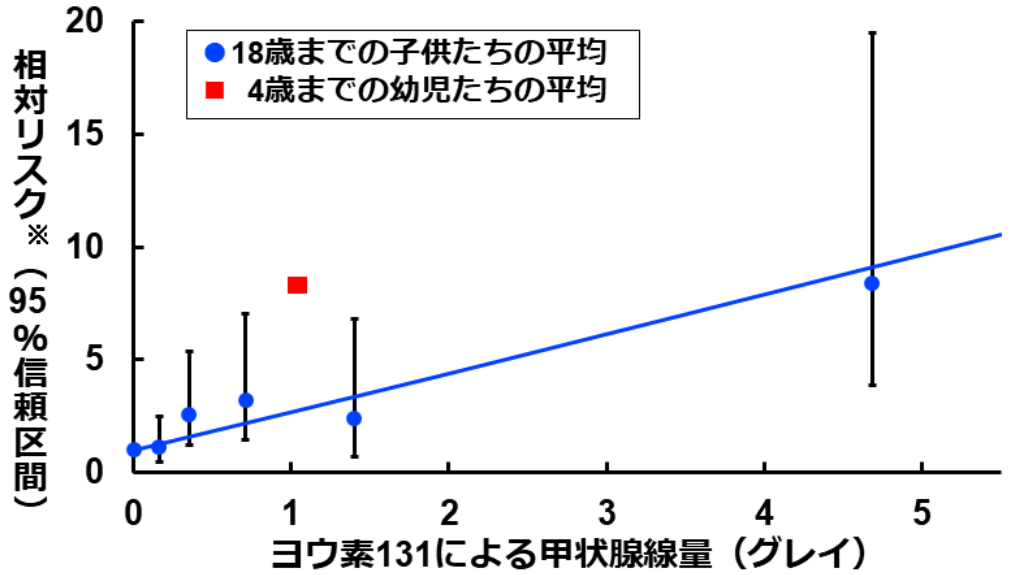
出典：国連科学委員会（UNSCEAR）
2000年報告書より作成

チョルノービリ原発事故では、爆発によって放射性ヨウ素（I-131）が大量に放出され、地上に降り注いだ。これを吸入したり、汚染した野菜や牛乳、肉を食べた子供たちの中で、小児甲状腺がんが発生。特に、牛乳に含まれていたヨウ素131による内部被ばくに由来するところが大きかったといわれている。
ベラルーシやウクライナでは、事故後４～５年ごろから小児甲状腺がんが発生し始め、 15才未満の甲状腺がん罹患率は、1986～1990年の５年間に比べ、1991～1994年は５～10倍に増加した。

甲状腺に関する基礎的情報

甲状腺がんと線量との関係 －チョルノービリ原発事故－

甲状腺がんとヨウ素131による被ばく線量の線量効果関係
（ウクライナにおけるチョルノービリ原発事故のコホート研究により推定）



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。

この図は、チョルノービリ原発事故による子供たちの内部被ばく線量と甲状腺がんのリスクの関係を示している。甲状腺が１Gyの放射線を受けると、甲状腺がんになる可能性が約３倍になるという結果だった。この３倍という数値は18歳までの子供たちの平均であり、幼児（＜４歳）の場合には、これよりもリスクが高いという結果だった（図の■）。

出典：放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和5年度版）, 3.7 がん・白血病, https://www.env.go.jp/chemi/rhm/current/03-07-26.html
https://www.env.go.jp/chemi/rhm/current/03-07-23.html

甲状腺に関する基礎的情報
甲状腺被ばく

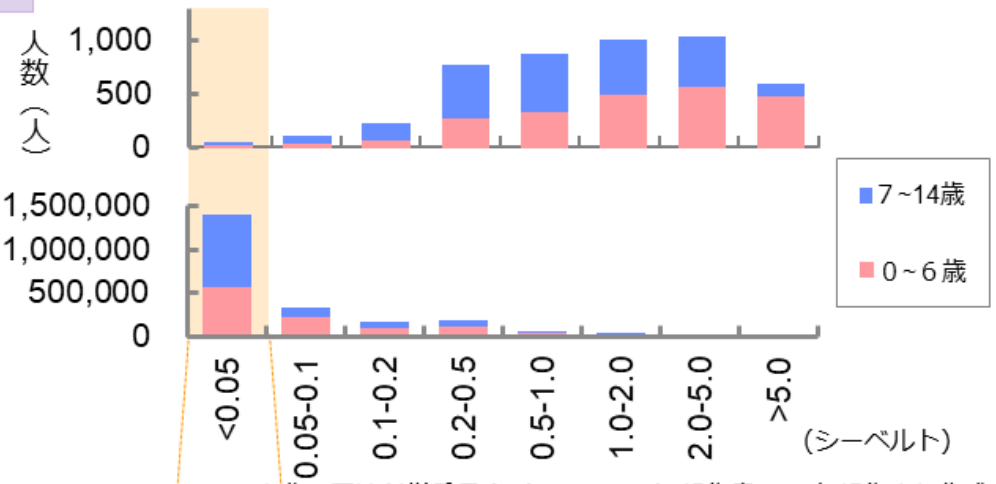
チョルノービリ原子力発電所事故と東京電力福島第一原子力発電所事故との比較（甲状腺線量）

小児の甲状腺被ばく線量

チョルノービリ原発事故

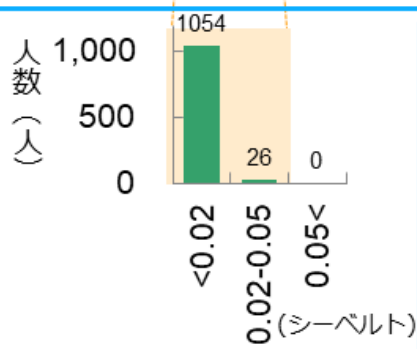
ベラルーシで1986年に避難した集団

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年報告より作成

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」（2011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）」（2011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）。
出典：原子力災害専門家グループ「福島県産の食品の安全性について」

※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。

東京電力福島第一原子力発電所事故で、子供たちの甲状腺が放射性ヨウ素によりどのくらいの被ばくをしたのか、正確に評価することは大変困難だが、事故後約２週間の時点で行われた小児甲状腺被ばく線量のスクリーニング調査の結果を用いると、おおよその推定ができる。このスクリーニング調査は、甲状腺線量が高いと予想された川俣、いわき、飯舘の15歳以下の1,080人の子供たちに対し、サーベイメータを用いて行われた。
その結果、原子力安全委員会（当時）が設定したスクリーニングレベルを超える子供はいないこと、検査を受けた子供全員の甲状腺被ばく線量が50ミリシーベルト以下であることが分かった。
国連科学委員会（UNSCEAR）によるチョルノービリ原発事故での甲状腺被ばく線量に関する解析では、50mSv以下の線量域は最も小さい線量域として扱われている。小児甲状腺がんの発生の増加が見られたベラルーシでの小児甲状腺被ばく線量は、特に避難した集団で0.2~5、あるいは5Sv以上といった値が示されており、福島県で調査された甲状腺被ばく線量より二桁も大きい値となっている。

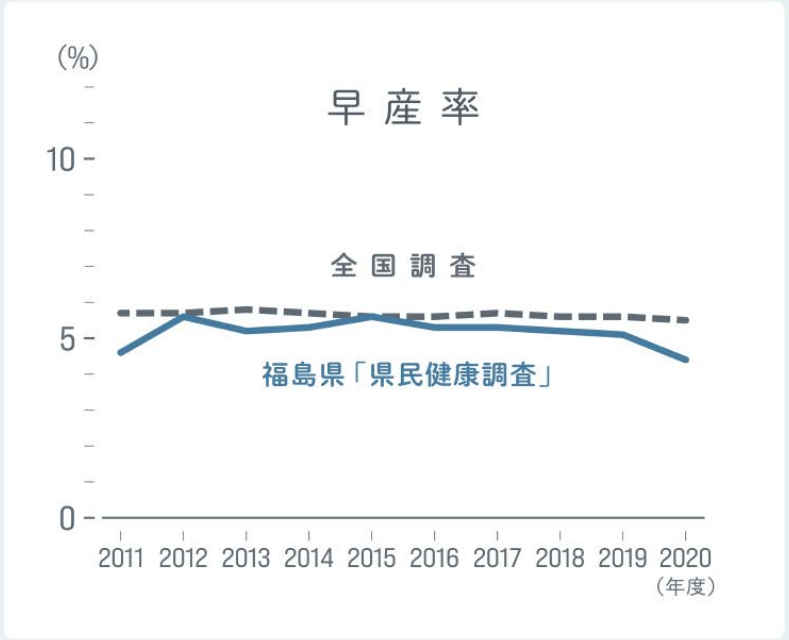
専門家会議（東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う住民の健康管理のあり方に関する専門家会議）の中間取りまとめ（2024年12月）では、福島県県民健康調査での甲状腺の先行検査で発見された甲状腺がんは、「原発事故由来のものであることを積極的に示唆する根拠が現時点では認められない。」と評価している。

出典：放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料（令和5年度版），3.7 がん・白血病，https://www.env.go.jp/chemi/rhm/current/03-07-27.html

福島県「県民健康調査」 妊産婦に関する調査

妊娠結果について
（早産の割合、先天奇形・先天異常の発生率）

2011年度から2020年度調査の結果 では **全国調査や一般的な水準** との差は各年度ともほとんどない





先天奇形・先天異常の発生率を
福島県内の地域別に見ても同様に差はない

全国調査…人口動態統計における年単位の割合　早産…妊娠22週から36週までの出産　｜　＊産婦人科診療ガイドライン産科編2020より
出典：第44回福島県「県民健康調査」検討委員会 資料3-5「妊産婦に関する調査」10年結果まとめ（https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/510061.pdf）より作成　作成日：令和５年３月31日

環境省 Ministry of the Environment
出典：放射線による健康影響等に関するポータルサイト，画像コンテンツ集（インフォグラフィックス），環境省，https://www.env.go.jp/chemi/rhm/portal/pdf/infographic/06.pdf

