



鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎
著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円+税

- 1章 放射線とは? 《放射線入門》
 - 2章 放射線の性質 《放射線物理学 I》
 - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質
《原子核物理学・原子力工学》
 - 4章 放射線量の評価 《放射線物理学 II》
 - 5章 放射線の測り方 《放射線計測学》
 - 6章 環境中での放射性物質 《環境放射化学》
 - 7章 放射線の細胞への影響 《放射線生物学》
 - 8章 放射線の人体への影響 《放射線医学》
 - 9章 放射性物質と農業 《植物栄養学・土壤肥料学》
 - 10章 放射線の防護と安全 《放射線防護学》
 - 11章 役に立つ放射線 《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会は非常に少ないのが実情です。

本書は東京大学教養学部で行われた講義をもとに、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

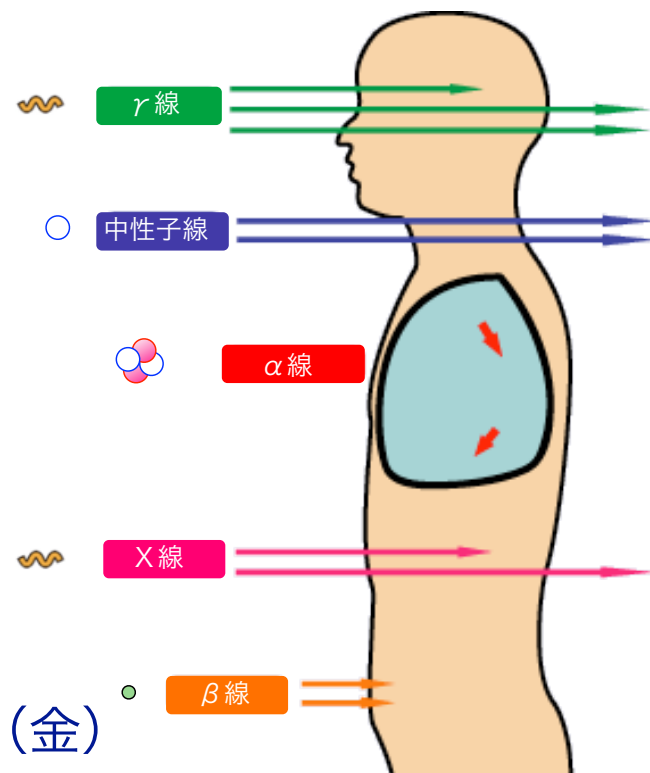
<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

放射線

を
科学的に
理解する

金曜5限
@ Zoom

2020 / 10 / 23 (金)



第5回

放射線生物学

放射線の細胞および生体への影響

渡邊 雄一郎

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

2020年10月23日

放射線生物学 (放射線の細胞および 生体への影響)

学術フロンティア講義「放射線を科学的に理解する」

総合文化研究科 生命環境科学系

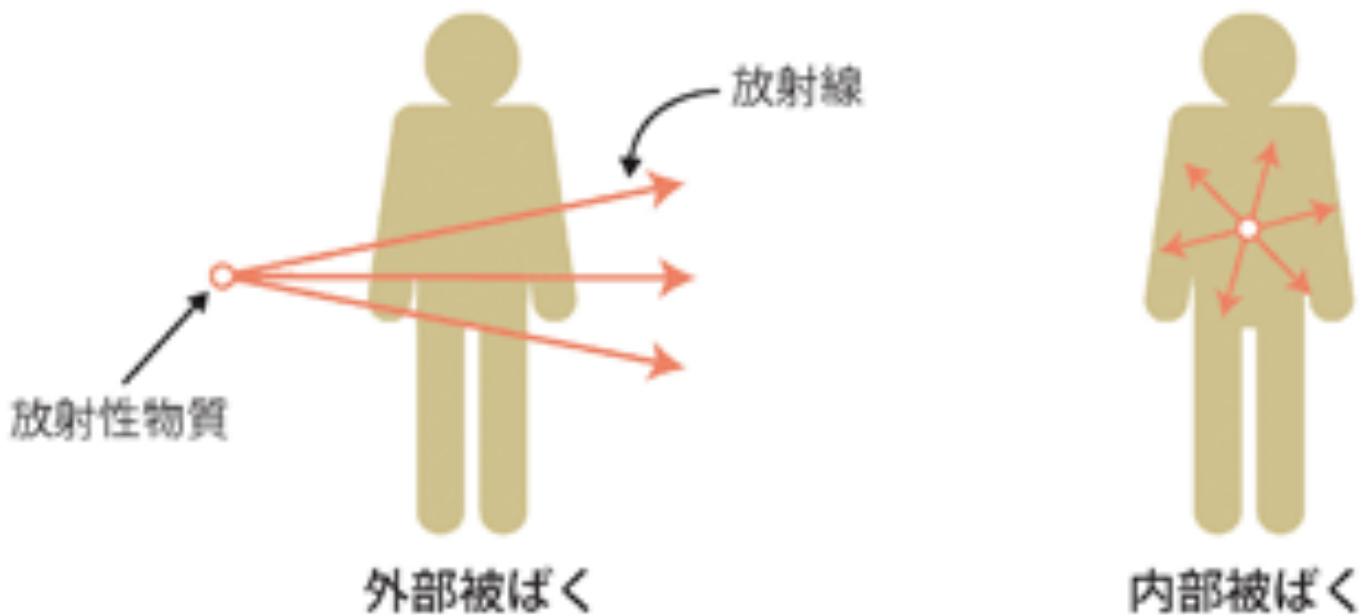
渡邊雄一郎

安全と安心 SECURITY AND SAFETY

正しい認識、健全な生活

被ばく

放射線を受けること



前半のながれ

- 我々が通常の生活で受ける放射線にはどのような由来のものがあるか.
- 内部被曝と外部被曝のちがいは何か. 放射線防護を考える場合の対処の違いは.
- 受けた放射線被曝による影響を、細胞はいかにして抑えているか.
- 食品などに設定された基準値はどのような根拠に基づいて設定されているか.

どのような由来の放射線があるか 放射線量をどう評価するか

地球、宇宙に生きているかぎり、常に
自然放射線を受けている

事故や医療現場からの放射線を
そのレベルと比較しよう

自然界から年間数ミリシーベルトの放射線を浴びている

日本平均

宇宙から	0.30
食物から	0.99
呼吸から	0.48
大地から	0.33

年間 約 2.1 mSV

土壌中ガスのラドン濃度は4,000~40,000ベクレル/m³の範囲にある。このようなガスが混入して大気中のラドン濃度が上昇する。

ある場所の屋内濃度は、その位置、換気の状態、周辺土壌のウラン含有量などによって大きく変動する。年間平均大気中濃度は0.6から30,000ベクレル/m³の間に分布するが、ふつうは10~100ベクレル/m³の範囲に入る。

医療被曝は除外して考えます

日本では、平均濃度が13ベクレル/m³、最大濃度は310ベクレル/m³と報告されている。

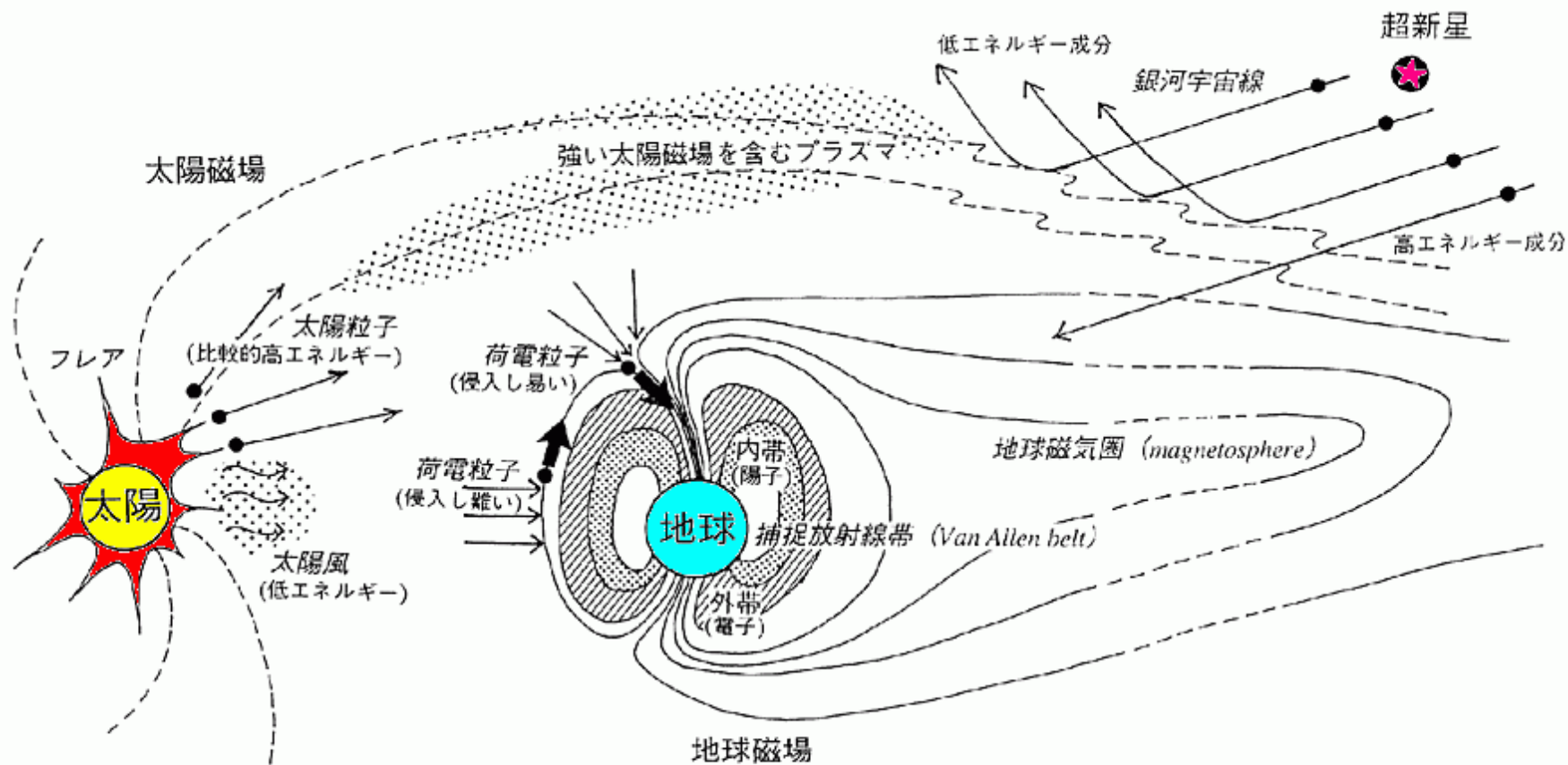
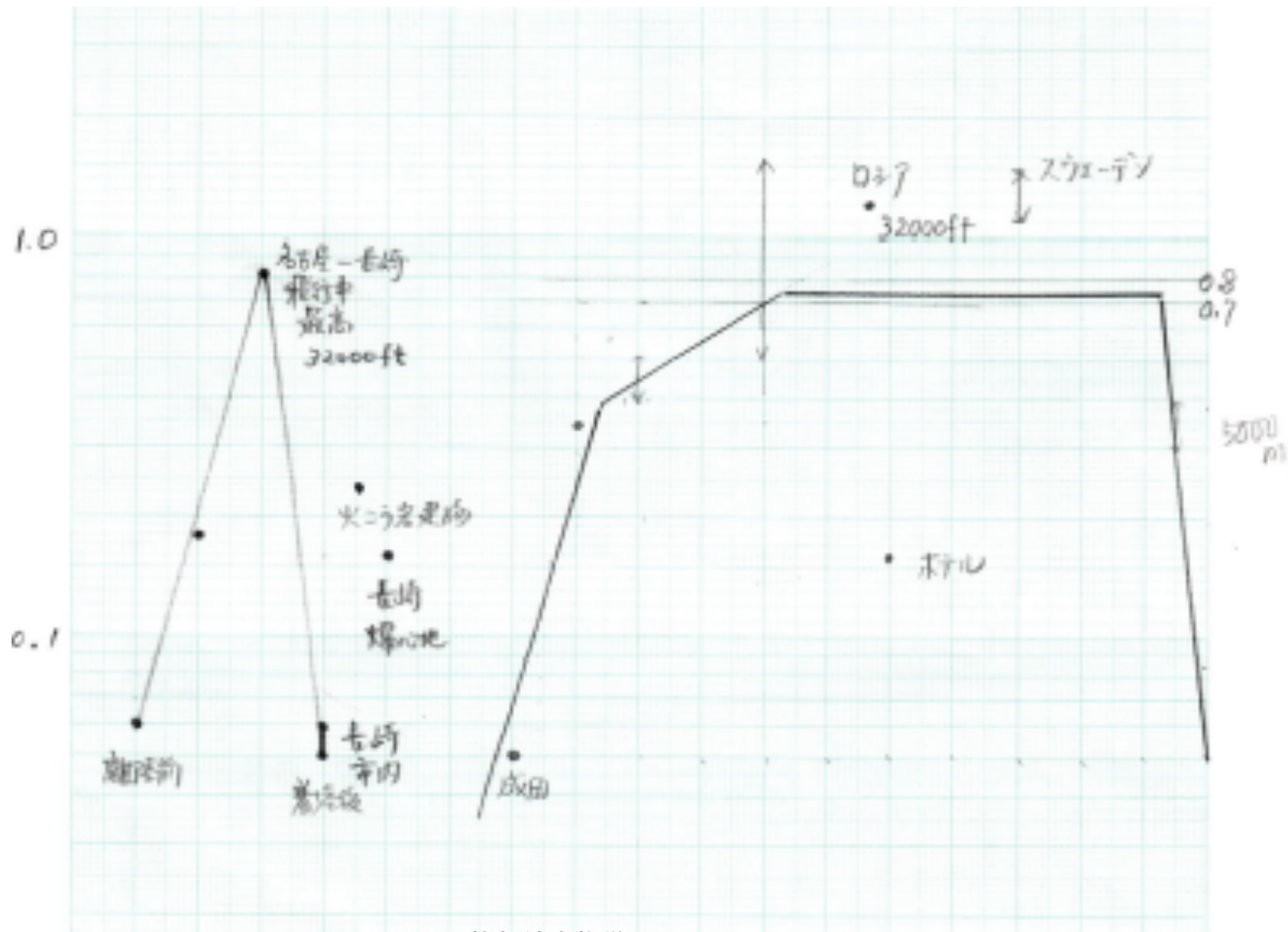


図1 宇宙放射線環境の構造

[出典] 藤高 和信: 宇宙環境の放射線、日本原子力学会誌、35(10)、21(1993)



自然な食品でも もとから ^{40}K などが含まれている

カリウムの3種類の原子(同位体)

	カリウム-39	カリウム-40 (放射性)	カリウム-41
陽子	19	19	19
中性子	20	21	22
質量数	39	40	41
存在比	93.26%	0.01%	6.73%

食品には従来から自然に
ある程度放射能が含まれている
われわれ人体にももともと
4000 Bq / body

環境科学技術研究所(六ヶ所村)

http://www.ies.or.jp/publicity_j/data/s9.pdf

カリウム-40は13億年という長い半減期を持っています。そのため、宇宙の星でつくられ地球に到達した後も、現在まで残っているのです。地中の岩石には、約2%のカリウムが含まれています。その中のカリウム-40から出るガンマ線放射線は物理学の用語は自然放射線の一つです。

表3 わが国における地方別屋内ラドン濃度の
年平均値($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)

地方名	家屋数	ラドン濃度	標準偏差	最大値
北海道・東北	138	16.0	12.9	85
関東	134	12.4	9.5	70
中部	174	14.1	9.4	63
近畿	132	17.1	16.2	143
中国	95	16.7	9.8	55
四国	78	14.4	8.7	61
九州・沖縄	148	17.6	20.4	208
合計	899	15.5	13.5	208

[出典]下道国、山田裕司(編):環境放射能セミナーシリーズ、No.27、
NIRS-M-140、放射線医学総合研究所、p35(2000年11月)

http://www.rist.or.jp/atomica/data/fig_pict.php?Pict_No=08-01-03-12-03

ラドン温泉

世界一の温泉「玉川温泉」

国立公園玉川温泉は秋田県と岩手県の県境に広がる八幡平の外れにあり、標高740メートル、四方が緑の山々に囲まれた閑静で爽やかな地にあります。一方で、この中央の地獄谷では凄まじい勢いで熱湯を湧出する「大噴の湯」があり玉川温泉の源泉になっています。

1日に5000人が訪れる人気温泉で、岩盤浴発祥の地として知られています。それは、玉川温泉から取れるラドン222が難病患者の治療に素晴らしい効果をもたらし、多くの命を救ってきたからだと言われています。



「玉川温泉」の恩恵ラドン222

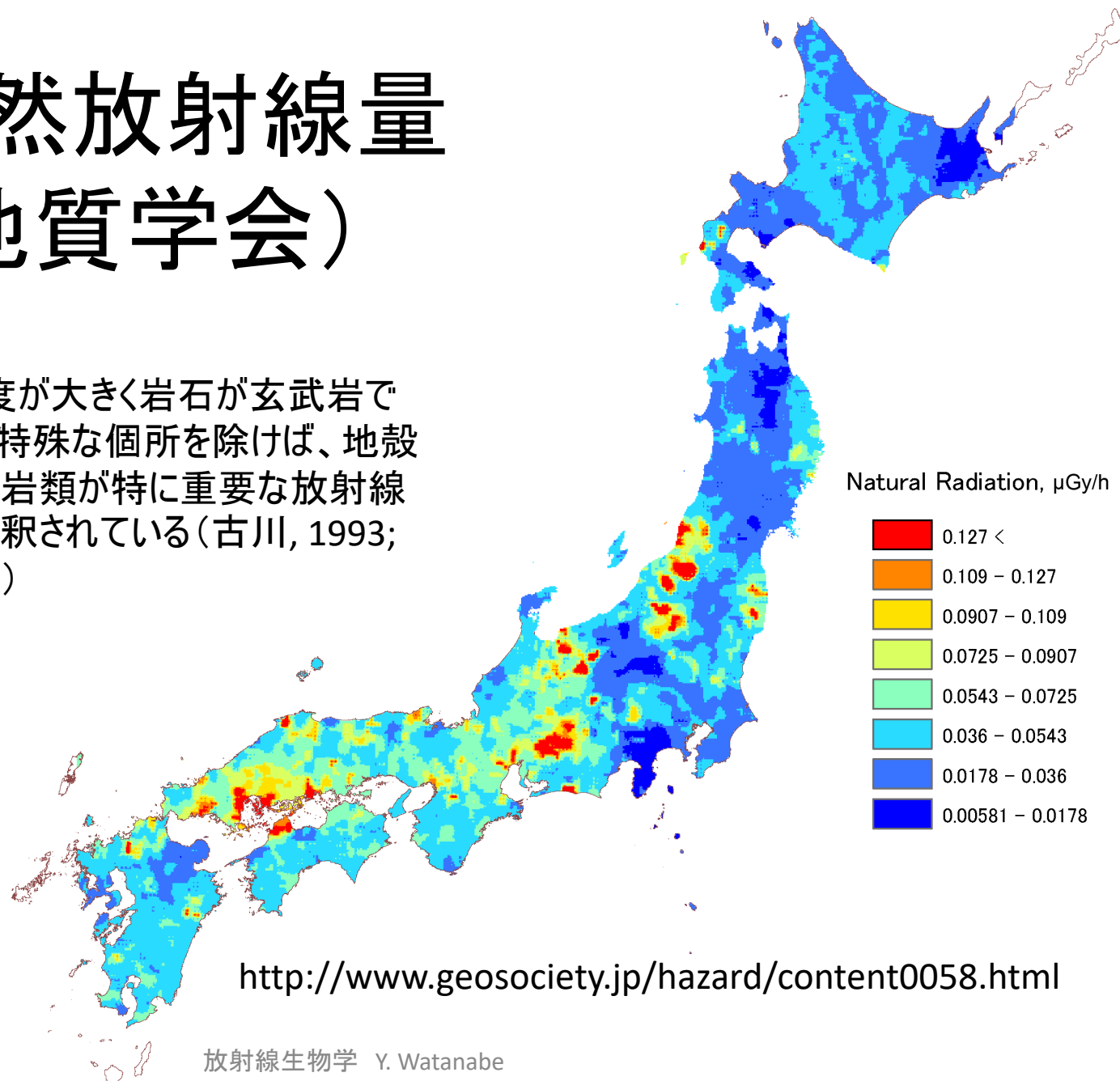
ラドンにはウラン系列のラドン222とトリウム系列のラドン220があり、北投石が放射するラドン222はラドン220に比べて半減期が非常に長いので、微量放射線が身体の奥の細胞にまで届き、細胞を活性化させる電離作用を起こすと考えられます。



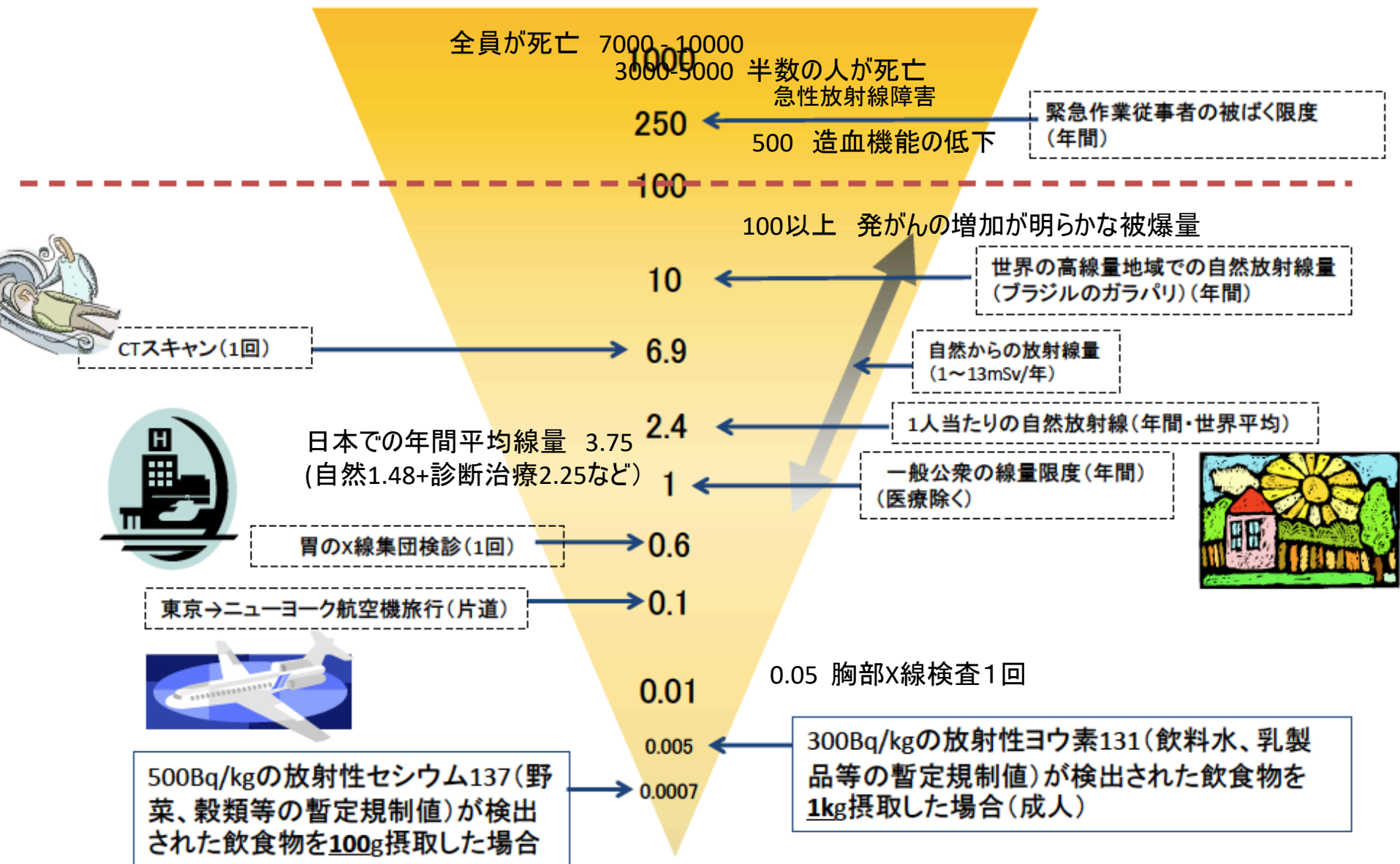
ラドンから出される微量放射線は、局部的に大きなエネルギーを出して、その部分をイオン化する働きがあり、これが身体中に散在する多くの"つぼ"を刺激するために、放射線生物量の放射線でも大きな効果があると考えられています。

日本の自然放射線量 (日本地質学会)

富士山頂のように高度が大きく岩石が玄武岩で放射性成分に乏しい特殊な個所を除けば、地殻物質では広義の花崗岩類が特に重要な放射線源であると、一般に解釈されている(古川, 1993; 湊, 2006; 今井, 2011)



日常生活と放射線(単位:mSv(ミリシーベルト))



胃がん検診 受診者の皆様へ

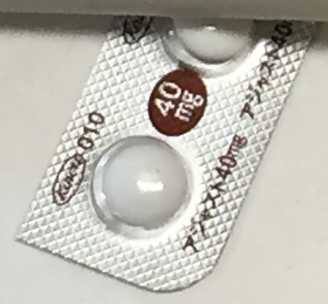
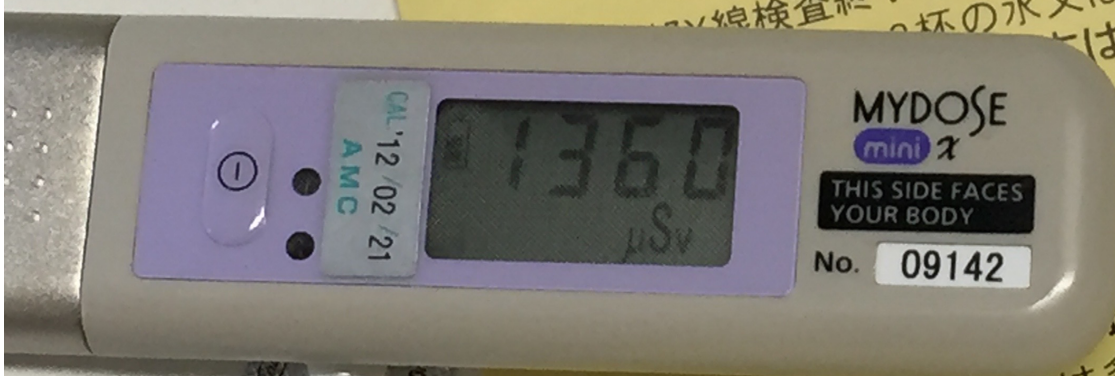
お渡ししたのは緩下剤です。服用前に必ずお読み下さい。
便秘のひどい方は、お申し出下さい。

「服用方法」

- お渡しした緩下剤は、検査のために服用した硫酸バリウム造影剤を速やかに排泄するためのお薬です。
- 検診終了後、お渡ししたお薬の2錠を出来るだけ早い時、1杯の水又はぬるま湯で服用して下さい。
- 排便が排出されない場合は、再度2錠服用して下さい。
- 排便が排出されるまでは、牛乳やアルコールを飲まないで下さい。

「後の注意事項」

- 今日1日はできるだけ多めの水分をとって下さい。
- 食事は通常どおりとって下さい。
- 便意を感じなくても定期的にトイレに行くよう心がけて下さい。
- バリウムが長時間腸内に残っていると、水分だけが吸収され、排便しにくくなります。白い便から色調が通常便の色に戻らない場合は、数日間注意して下さい。
- お薬をそのまま放置した場合は、おそれがある場合は、お申し出下さい。



放射線の透過力・線量計算

- α 線は空気中の飛程が数 cm。
生体では表層の細胞 2-3 個で止まる。
- β 線も外部被曝では皮膚への影響を考える (β 線熱傷)。
- α 線も β 線も内部被曝が問題。全てのエネルギーが短い飛程の間に細胞に与えられる。
- γ 線は多くは相互作用 (光電効果・コンプトン散乱) せず体を素通りし、一部が体内で吸収される。外部被曝でも体内も被曝する。
- X線の場合も吸収されるエネルギーは何割か程度。

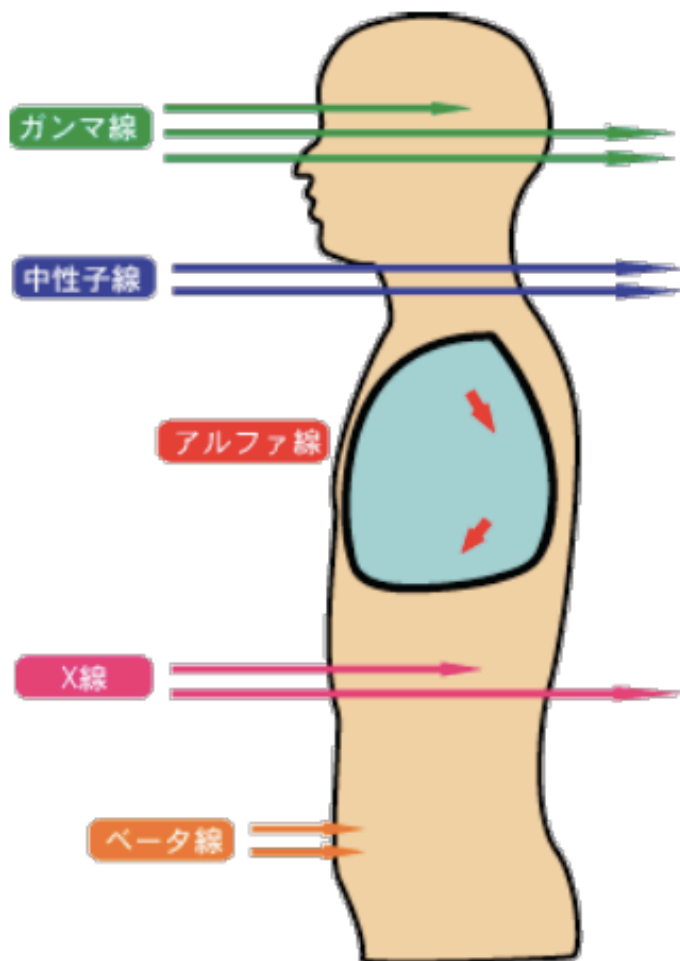
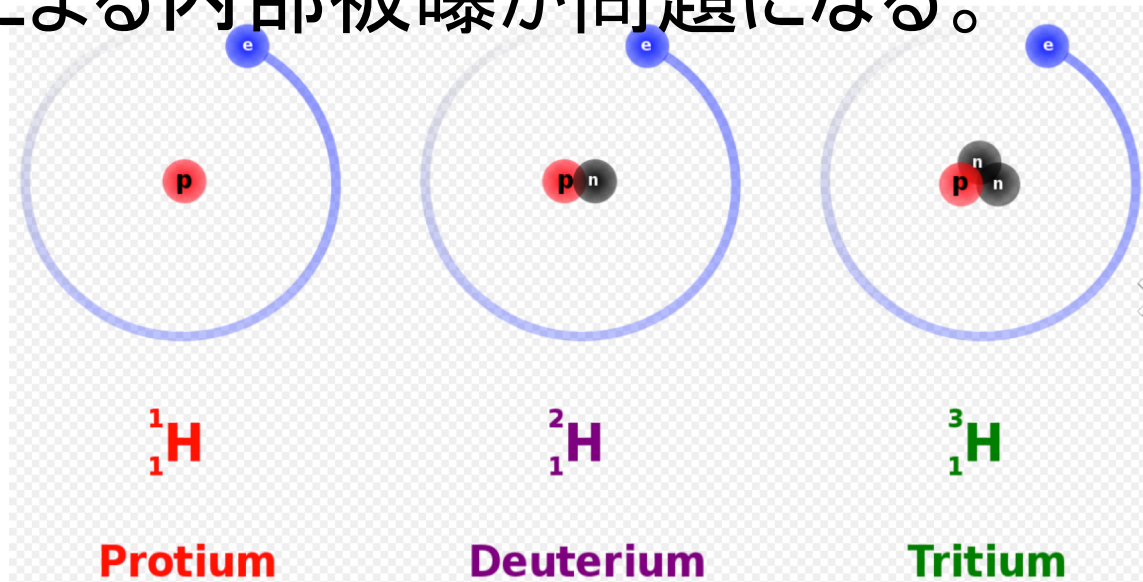


図3 人体を透過する放射線

トリチウム(水素-3、 ^3H)

放出されるベータ線は水中で0.01mmまでしか届かない。>外部被ばくは問題にならない。

体内取り込みによる内部被曝が問題になる。



放射線の測定と単位

- **放射性物質の量(Bq)**
 - 放射性物質の崩壊量(1秒間に崩壊する核数)
- **照射線量(C/kg)、空気カーマ(J/kg=Gy)**
 - 照射された放射線のエネルギー量
- **吸収線量(Gy)**
 - 物質に吸収された放射線のエネルギー量
- **等価線量(Sv)**
 - 放射線の種類による生体への影響を考慮(放射線加重係数)
 - ガンマ線、ベータ等(1倍)、アルファ線(20倍)、中性子線(2~20倍)
 - 各臓器でのリスク評価に用いる
- **実効線量(Sv)**
 - 部分的曝露を受けた場合の臓器の大きさ(確率的影響の発生確率)の影響を考慮(組織加重係数)
 - 放射線防護に用いる

物理化学的な放射線量と 生物学的な影響をつなぐ単位

物質が吸収したエネルギー（単位質量あたり） **放射線量の単位**
radiation dose

吸収線量 D [J / kg] = [Gy] グレイ

Gray

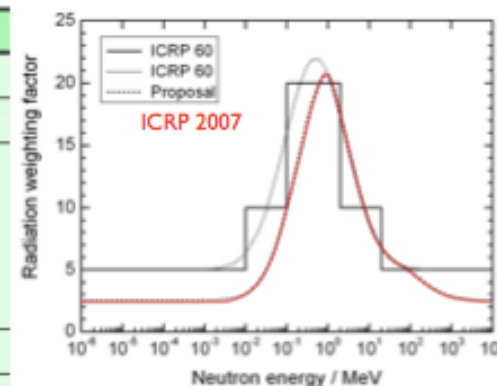


放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

等価線量 $H_T = W_R \times D$ [Sv] シーベルト

放射線加重係数 W_R

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線加重係数 W_R	
光子(X線・γ線); 全てのエネルギー	1	1
電子(β線)およびミュー粒子; 全てのエネルギー	1	1
中性子: 10keV 以下	5	右図を参照
10keV~100keV	10	
100keV~2MeV	20	
2MeV~20 MeV	10	
20MeV以上	5	
反跳陽子以外の陽子: エネルギー 2MeV 以上	5	2 (正負パイオンも)
アルファ粒子(α線)	20	20
核分裂片	20	20
重原子核	20	20



[出典] 日本アイソトープ協会:ICRP Pub 60、国際放射線防護委員会の1990年勧告、丸善、p7(1991)

赤字 ICRP 2007

全身被曝での影響に換算（臓器ごとに組織加重係数 w_T をかけて合算）

実効線量 $E = \sum_T w_T \times H_T$ [Sv] シーベルト

Sievert



実効線量 effective dose $E [J / kg] = [Sv]$

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \times \left(\sum_R w_R \times D_{T,R} \right)$$

組織 T の組織加重係数

組織 T における
等価線量 [Sv]

組織 T における
平均吸収線量 [Gy]

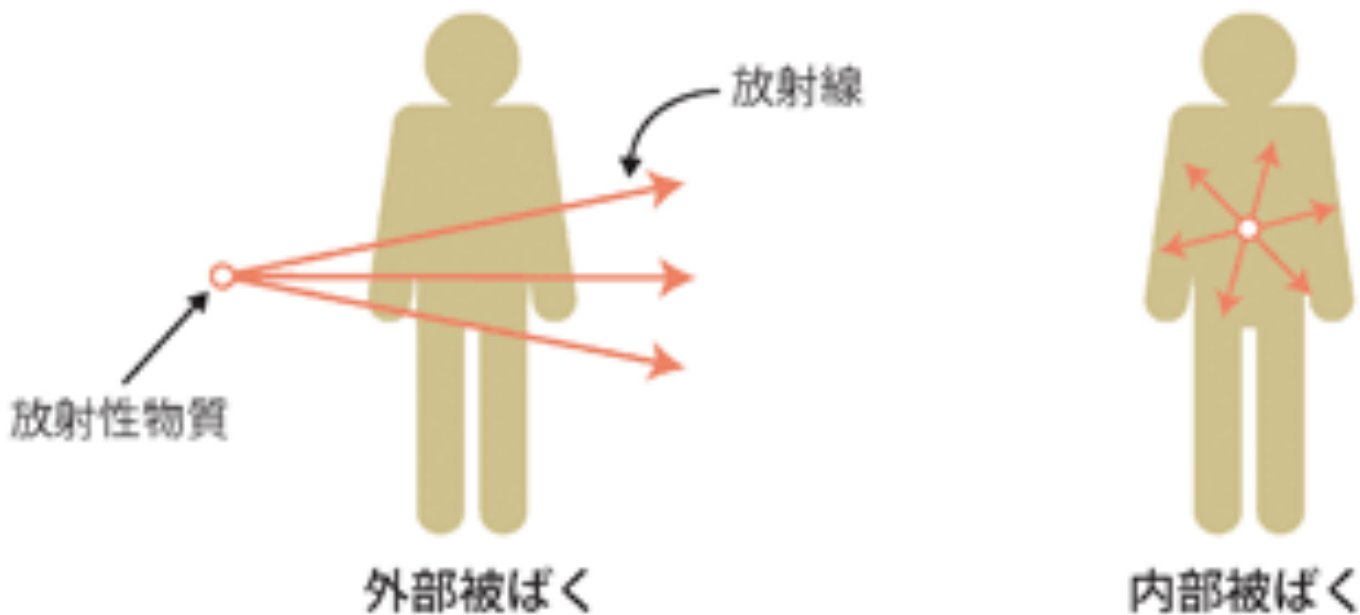
器官・組織	組織加重係数: w_T	
生殖腺	0.20	0.08
骨髄(赤色)	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
膀胱	0.05	0.04
乳房	0.05	0.12
肝臓	0.05	0.04
食道	0.05	0.04
甲状腺	0.05	0.04
皮膚	0.01	0.01
骨表面	0.01	0.01
脳		0.01
唾液腺		0.01
残りの器官・組織 ^{※2}	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

左欄黒字 ICRP 1990

右欄赤字 ICRP 2007

被ばく

放射線を受けること



「原子力・エネルギー図面集 2012」より

放射線防護の方策

〔放射線防護の3原則〕

- (1) 線源と人体の間に遮へいを置く (遮へい体を用いる)
- (2) 線源と人体の間に距離をとる (距離を大きくとる)
- (3) 被ばくする時間を短くする (時間を短くする)

外部被曝からまもるためにこの3原則は実行できるか

内部被曝からまもるためにこの3原則は実行できるか

放射性物質を含んだ食品による影響

物理的な崩壊

新陳代謝による減少

体の中で濃縮、あるいは排出

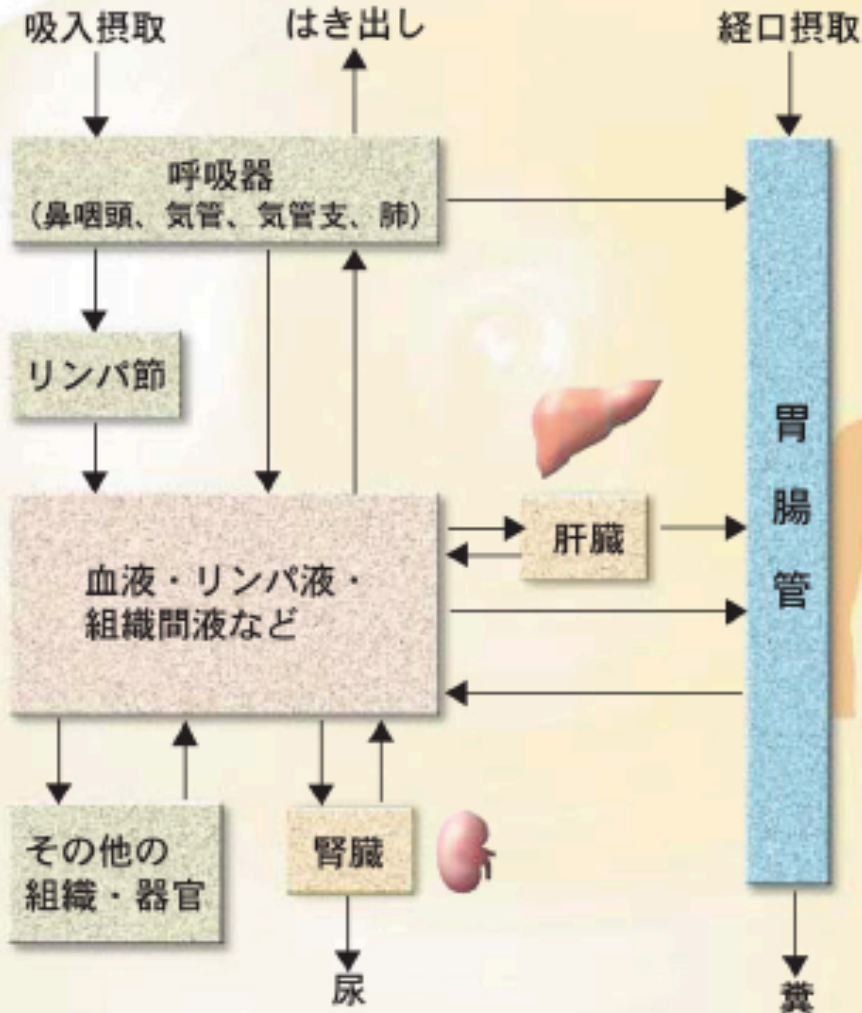
Csは 体内半減期 30 - 110日

蓄積する組織

影響受けやすい受けにくい組織

たとえば ヨウ素は甲状腺

放射性物質の体内での動き



生物学的半減期という
ものがある

原子力百科事典・ATOMICA「内部被ばくの評価」を基に作成

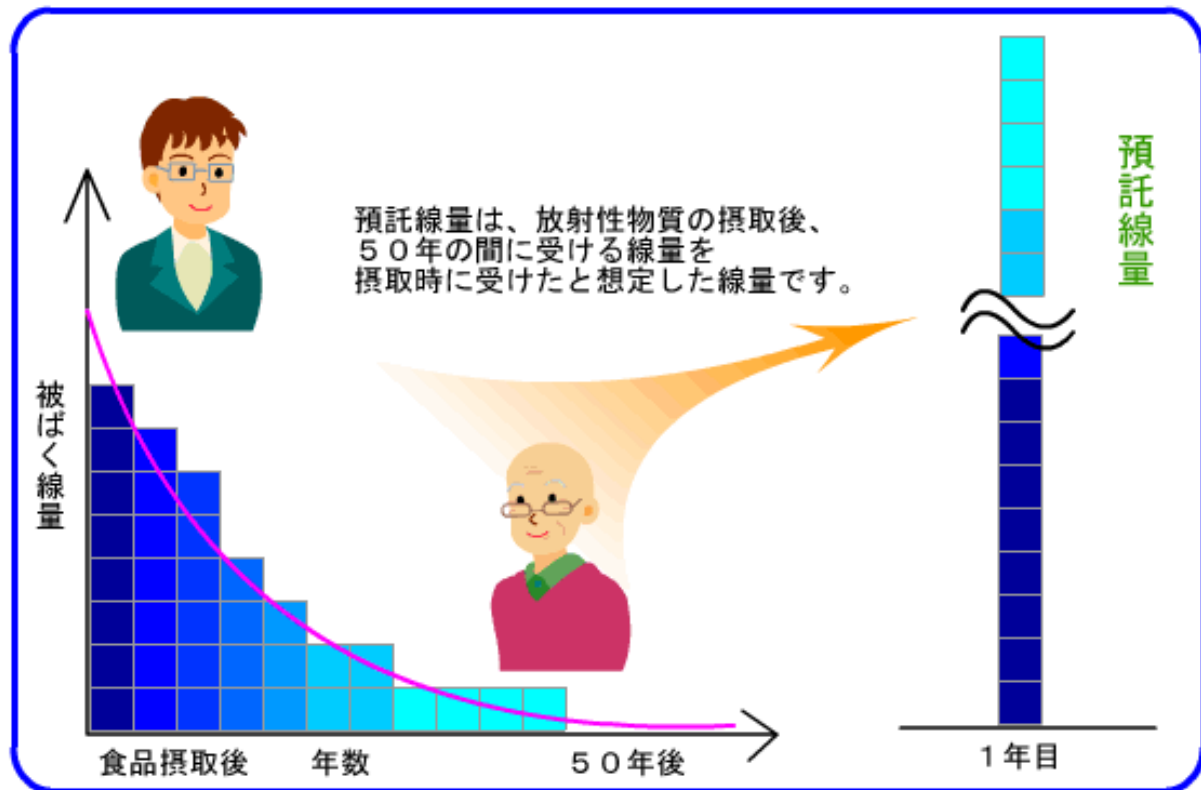
「外部被曝」と「内部被曝」

- 外部被曝
- 内部被曝

教科書 p.67-68参照

- 元素の違い(化学的性格)により吸収されやすい臓器が異なる(ヨウ素→甲状腺、ストロンチウム→骨、セシウム→筋肉・体全体)
- 吸収された組織での等価線量の評価→リスク
- 「預託線量」=吸収された放射性物質による将来すべての曝露量を実効線量として評価
 - 線種、物理学的半減期(^{137}Cs =30年)、生物学的半減期(^{137}Cs =40~90日)・・・
 - ^{137}Cs を100Bq、毎日1年間摂取すると $100\text{Bq} \times 365\text{日} = 36500\text{Bq}$
 - $0.013(^{137}\text{Cs}$ の実効線量係数) $\times 36500 = 470\mu\text{Sv} = 0.47\text{mSV}$

預託線量



体内に摂取された放射性物質は放射能が減衰するとともに、代謝により体内から徐々に排泄される。この間に放出される放射線で組織や臓器が被ばくを受ける。預託線量とは、一般成人に対して摂取後の50年間(子供や乳幼児に対しては摂取時から70歳まで)に受ける量を摂取時に受けたと想定した放射線量。

参考：[原子力百科事典 ATOMICA](http://www.atomin.go.jp/atomica/index.html) <http://www.atomin.go.jp/atomica/index.html>

① 「一般食品」の基準値

まず、年齢や性別などにより10区分に分け、区分ごとに一般食品の摂取量と体格や代謝を考慮した係数を使って限度値を算出しました。その結果から、最も厳しい値（13～18歳の男性：120ベクレル/kg）を下回る**100ベクレル/kg**を全区分の基準としました。これは、**乳幼児をはじめ、すべての世代に配慮した基準**です。

食品からの線量の上限值
1ミリシーベルト/年

★飲料水の線量（約0.1ミリシーベルト）を引く

一般食品に割り当てる
線量を決定

年齢区分	性別	限度値 (ベクレル/kg)
1歳未満	男女	460
1歳～6歳	男	310
	女	320
7歳～12歳	男	190
	女	210
13歳～18歳	男	120
	女	150
19歳以上	男	130
	女	160
妊婦	女	160
	最小値	120

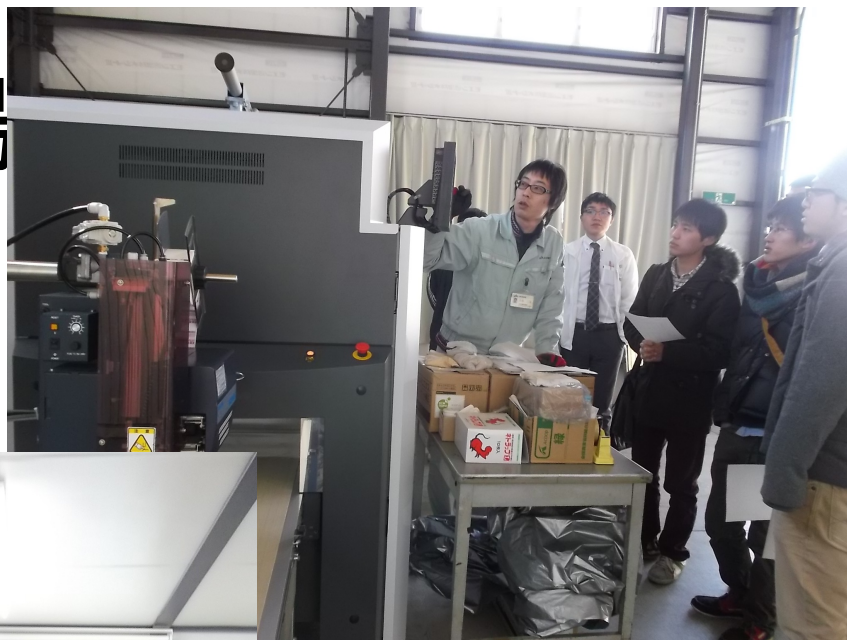
各年齢層等ごとに、通常の食生活を送れば、年間線量の上限值を十分に下回る水準に設定

**100ベクレル/kg
に基準値を設定**

★すべての年齢区分の限度値のうち最も厳しい値（120）を下回る数値に設定

測定現場

漁業組合一鮮魚



2014年3月いわき市

農協一野菜



農協一米



放射線生物学 Y. Watanabe

逆引き事典から探す

キーワードから探す

Google カスタム検索

検索

会見・報道・広報

政策情報

統計情報

申請・お問い合わせ

農林水産省について

ホーム > 組織・政策 > 基本政策 > 東日本大震災に関する情報 > 生産関係 > 農産物に含まれる放射性セシウム濃度の検査結果 (随時更新)

更新日：平成28年11月1日

担当：生産局総務課

農産物に含まれる放射性セシウム濃度の検査結果 (随時更新)

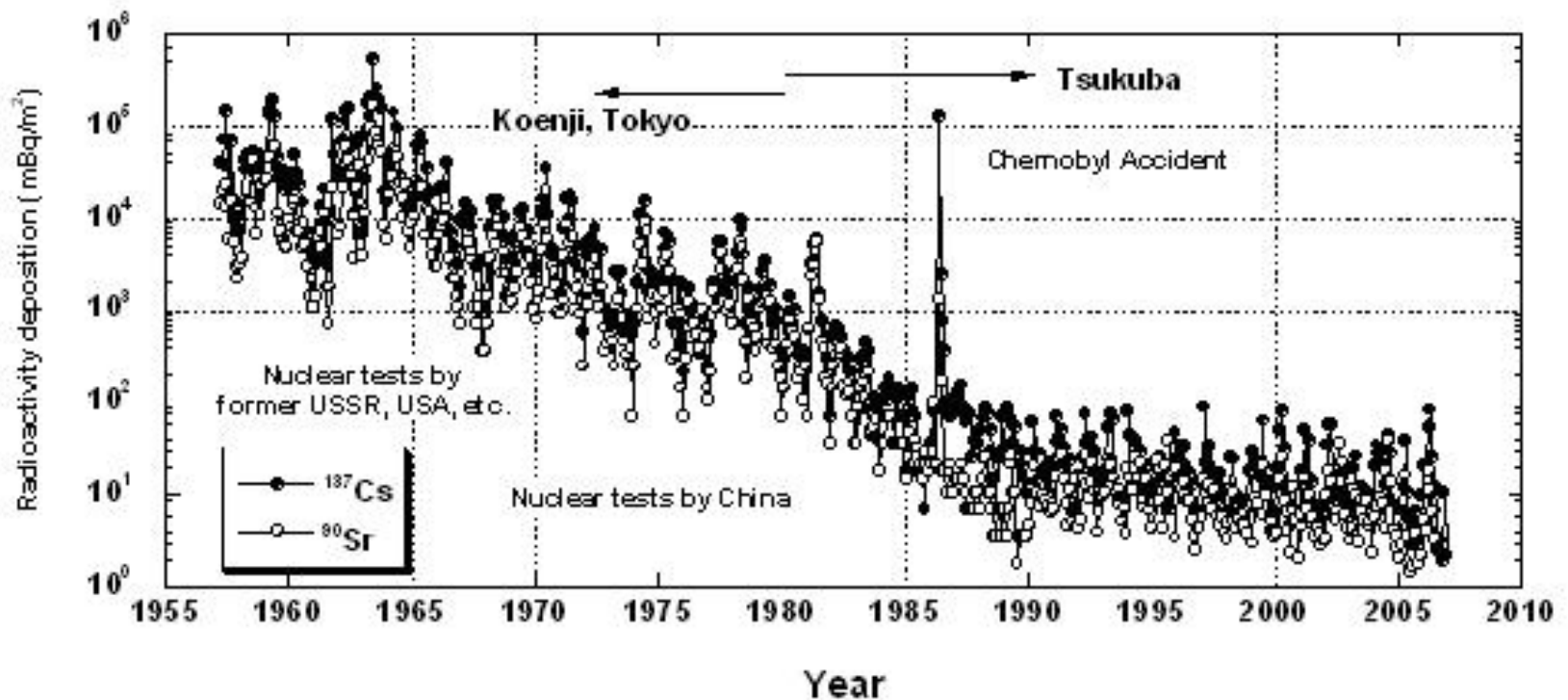
厚生労働省が平成28年10月31日に公表した「食品中の放射性物質検査結果について」の概要

食品中の放射性セシウムの結果について都道府県などが実施している検査の結果については、厚生労働省が週毎にとりまとめ、公表しています。

食品中の放射性物質の検査結果について (第1005報) (東京電力福島原子力発電所事故関連) [外部リンク]

- 検査自治体：小樽市、青森県、岩手県、盛岡市、宮城県、山形県、福島県、茨城県、栃木県、群馬県、埼玉県、さいたま市、千葉市、柏市、東京都、文京区、世田谷区、神奈川県、横浜市、川崎市、新潟県、山梨県、岐阜市、浜松市、名古屋市、豊橋市、滋賀県、京都府、京都市、大阪府、大阪市、豊中市、高槻市、兵庫県、神戸市
- 検査点数：7,122点
- 基準値以下：7,096点
- 基準値超過：26点 (山梨県産野生ショウゲンジ (5)、山梨県産野生アマタケ (1)、山梨県産野生アカモミタケ (1)、宮城県産イノシシ肉 (2)、茨城県産イノシシ肉 (1)、群馬県産ツキノワグマ肉 (5)、福島県産イノシシ肉 (10)、福島県産ヤマドリ肉 (1))

現在の放射能レベルについての考察



単位の違い

マイクロシーベルト と マイクロシーベルト/時



μSv



$\mu\text{Sv} / \text{h}$

積算放射線量

単位時間あたりの放射線量

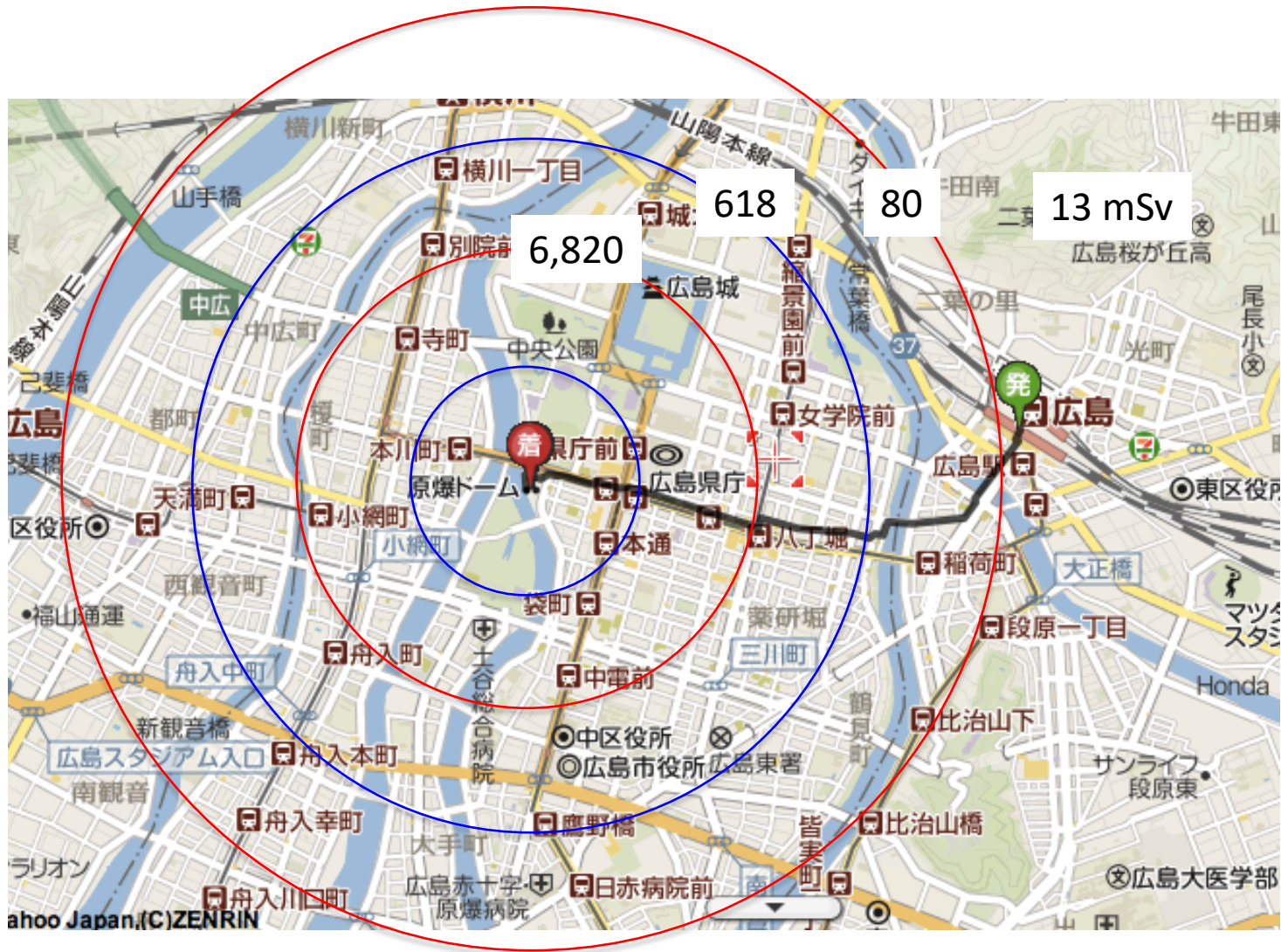
低線量被爆による影響

生活環境、食品による影響を考えるのはこちら

具体的には新聞に出たデータで見てもよい

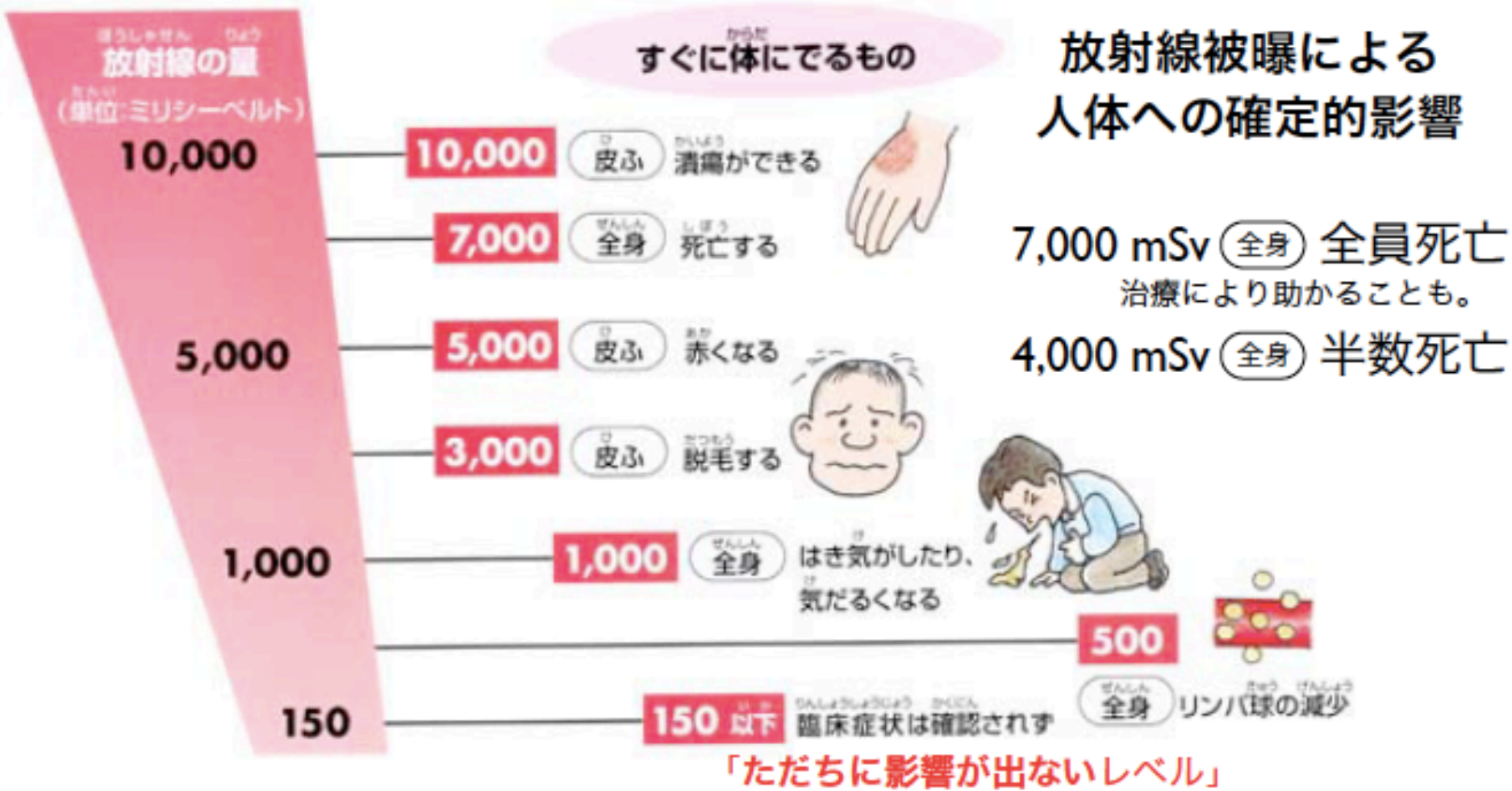
放射線による生物への影響

- 確定的影響(組織反応)
 - 放射線によって細胞や組織が障害される
 - 比較的線量の高いところで生じる(閾値がある)
 - 重症度が線量に比例する
 - 急性: 消化管障害、造血障害、不妊、白内障、など
 - 晩発性: 循環器疾患・白内障など
- 確率的影響
 - 放射線によって細胞のDNAなどに傷が生じる
 - 多くは修復されるが、されなかった場合には、他の発がんメカニズムと合わさって、長期間かかってがんなどが生じる
 - 線量に応じて確率的に生じる(閾値はないとする)
 - 線量と発症後の重症度は関連しない
 - がんと遺伝的影響



確定的影響

自然放射線量をはるかにこえるレンジ



このあとは、確率的影響を考える

確定的影響の具体例

細胞再生系	造血組織	腸上皮	皮膚	精巣	水晶体
<p>幹細胞</p> <p>幹細胞 芽細胞</p> <p>(分裂)</p> <p>機能細胞</p> <p>(老化)</p> <p>老熟細胞</p> <p>(死滅)</p>	<p>幹細胞</p> <p>リンパ球 粒球 好中球 赤血球 球(血小板)</p>	<p>腸上皮</p> <p>腺窩(幹細胞)</p> <p>絨毛</p>	<p>皮膚</p> <p>基底細胞(幹細胞)</p> <p>角質層</p>	<p>精巣</p> <p>幹細胞</p> <p>精子</p>	<p>水晶体</p> <p>上皮(幹細胞)</p> <p>水晶体繊維</p> <p>赤道部</p>
正常な分化過程	4 4 4 4日	2日	2週間	3-4週間	1/2-3年
正常な成熟過程	1 7-10 7 100日	2日		7-8週間	
照射による変化	免疫能力低力	絨毛の短縮と喪失、出血、下痢	紅斑、萎縮、潰瘍	一時的または永久不妊	白内障

放射線による生物への影響

- 確定的影響(組織反応)

- 放射線によって細胞や組織が障害される
- 比較的線量の高いところで生じる(閾値がある)
- 重症度が線量に比例する
- 急性: 消化管障害、造血障害、不妊、白内障、など
- 晩発性: 循環器疾患・白内障など

- 確率的影響

- 放射線によって細胞のDNAなどに傷が生じる
- 多くは修復されるが、されなかった場合には、他の発がんメカニズムと合わさって、長期間かかってがんなどが生じる
- 線量に応じて確率的に生じる(閾値はないとする)
- 線量と発症後の重症度は関連しない
- がんと遺伝的影響

2017年(平成29年)12月14日

◆ 水晶体 被曝限度引き下げ報告

国の放射線審議会は、医師や原子力発電所の作業員らが白内障になるのを抑えるため、目の水晶体の被曝（ひばく）線量限度を引き下げることが妥当とする報告をまとめた。1年あたり150ミリ・シーベルトだった現行の限度を「5年間で計100ミリ・シーベルト、1年あたり50ミリ・シーベルト」と引き下げる内容で、13日の原子力規制委員会定例会合で報告された。

読売新聞

新しい情報をもとに基準の見直しがなされる

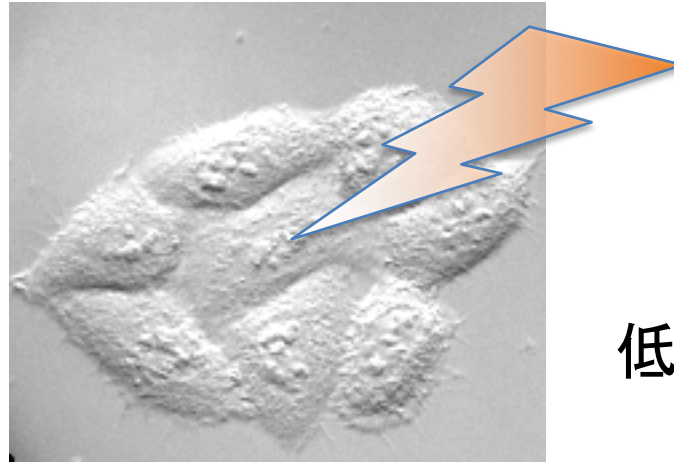
後半のながれ

太古の昔から自然放射線がある中で、
生物は生存、進化してきた。

生物が放射線に対して脆弱な存在であったら、
存続してこなかったと思われる。

生物を構成する細胞には、
被曝による損傷を乗り越えるための機構が
幾重にも備わっている。

確率的影響を考える上で、
放射線が細胞に与える影響を知る必要がある

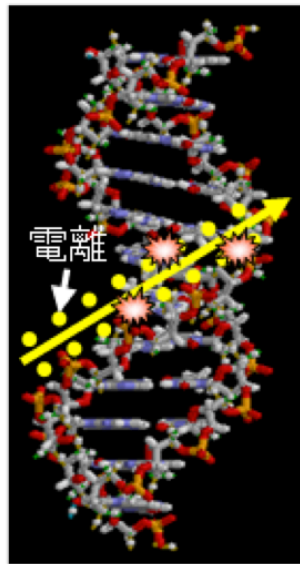


低線量被ばくによる影響

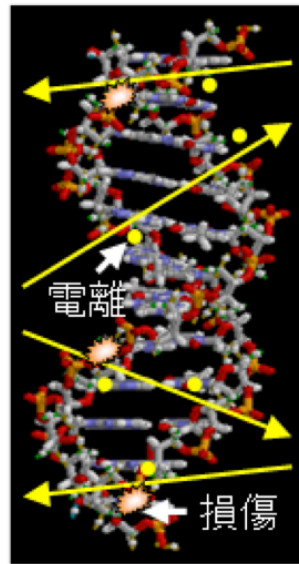
核にヒットしてしまうと、
DNA分子を傷つける

> 修復機能との量的な関係

放射線によるDNA損傷



重イオン



電子

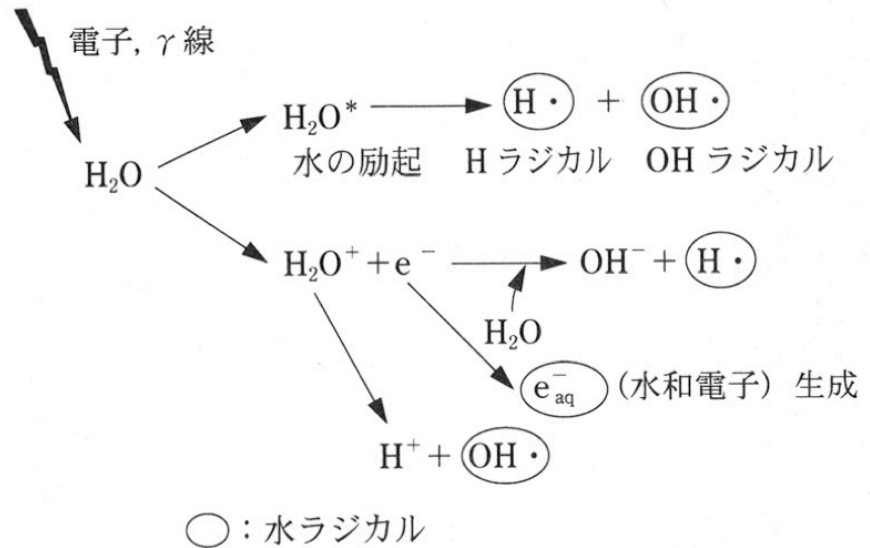


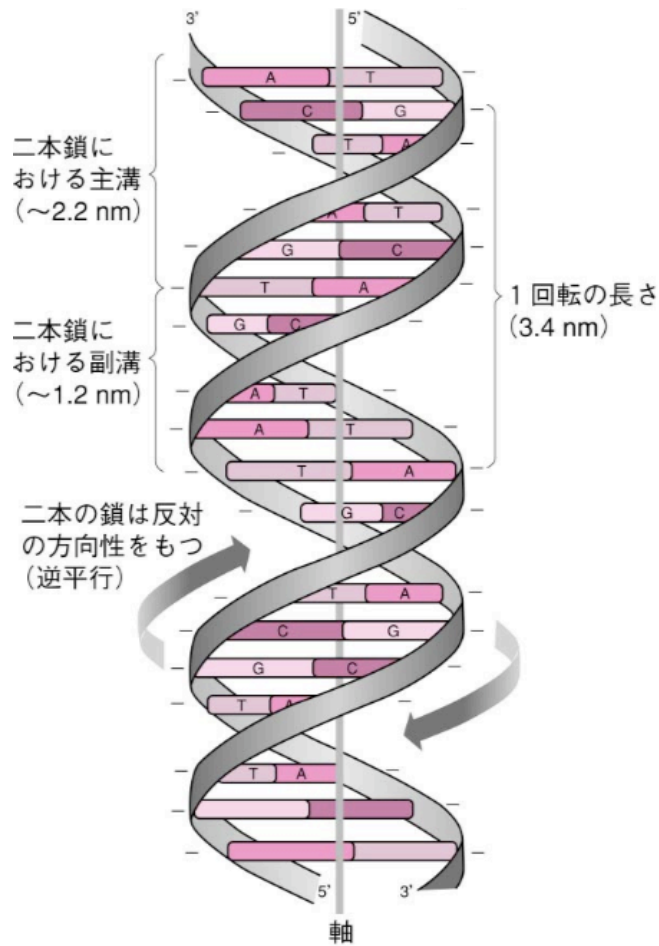
図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

LET : 線エネルギー付与

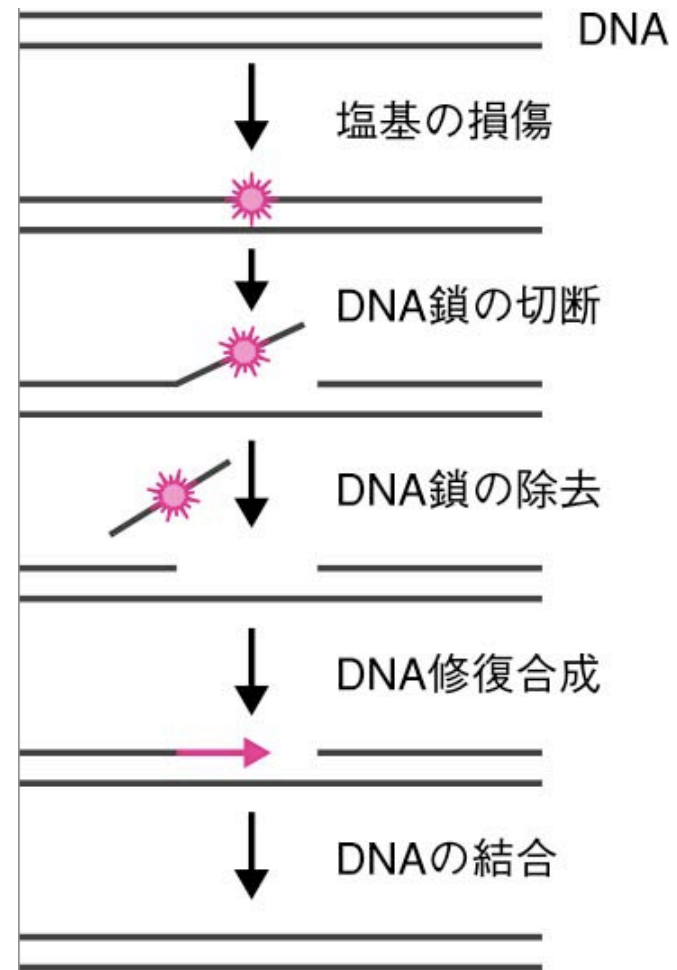
放射線の直接作用 : 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**

と間接作用 : 水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用

放射線によるDNA損傷



リボン型モデル

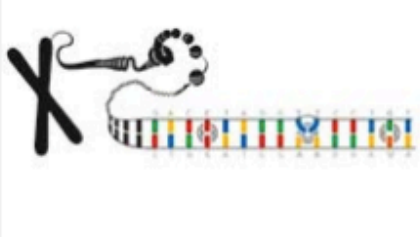


生物にはDNAの損傷を直す機構がある。→不可逆的に全て残るわけではない

DNA repair

– providing chemical stability for life

2015 Chemistry Prize



Ill: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

2015 Nobel Prize in Chemistry

The [Nobel Prize in Chemistry 2015](#) was awarded jointly to [Tomas Lindahl](#), [Paul Modrich](#) and [Aziz Sancar](#) "for mechanistic studies of DNA repair".

[→ Read more](#)



Tomas Lindahl. Photo: Cancer Research UK

I Feel Very Lucky and Privileged"

"I'm not a politician. I'm not used to talk on two phones at the same time." Life is getting busy for Tomas Lindahl, awarded the 2015 Nobel Prize in Chemistry. In this short interview, Tomas Lindahl also talks about his research and early days in Sweden.

[→ Interview and transcript](#)



Paul Modrich. Photo: K. Wolf/AP Images for HHMI

"Shock. Surprise. Excitement"

Paul Modrich was on vacation in his little cabin in the woods in New Hampshire when he got the news through e-mail that he had been awarded the 2015 Nobel Prize in Chemistry. "I'm in the right place at the right time."

[→ Interview and transcript](#)



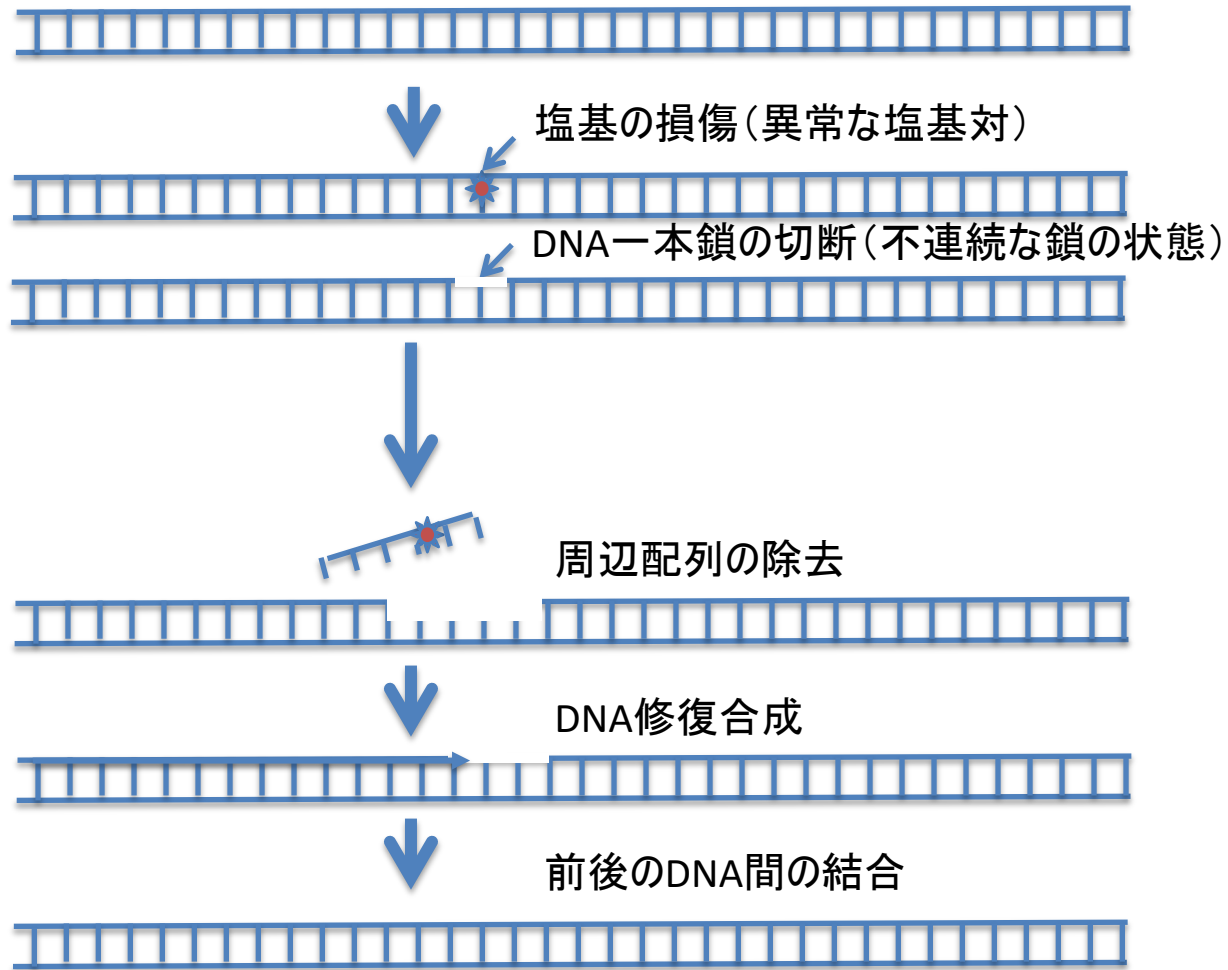
Aziz Sancar. Photo: M. Englund, UNC-School of Medicine

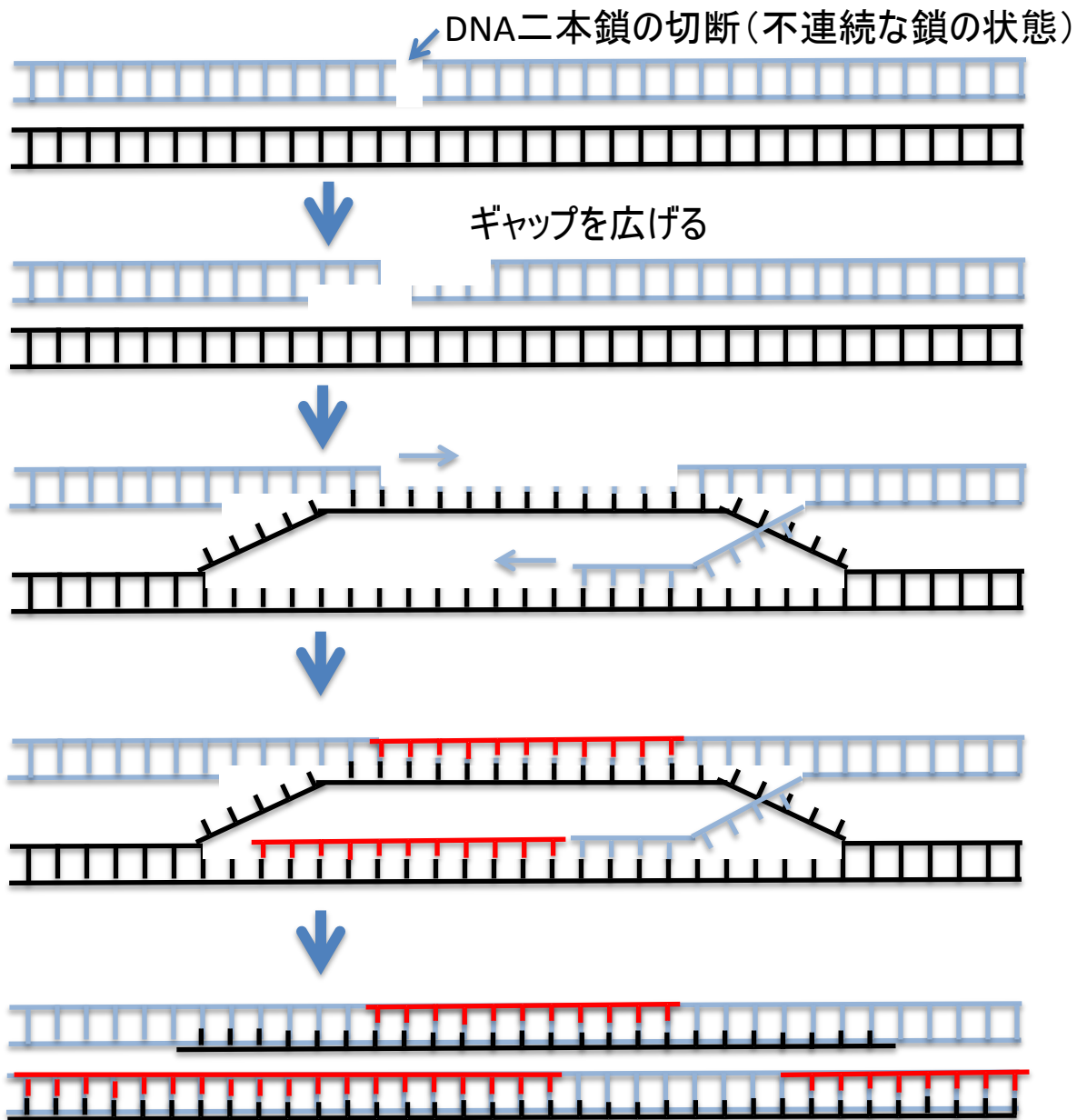
Aziz Sancar: "I'm Honored to Get this Recognition"

"My wife took the call and woke me up". Chemistry Laureate Aziz Sancar on being awarded the Nobel Prize.

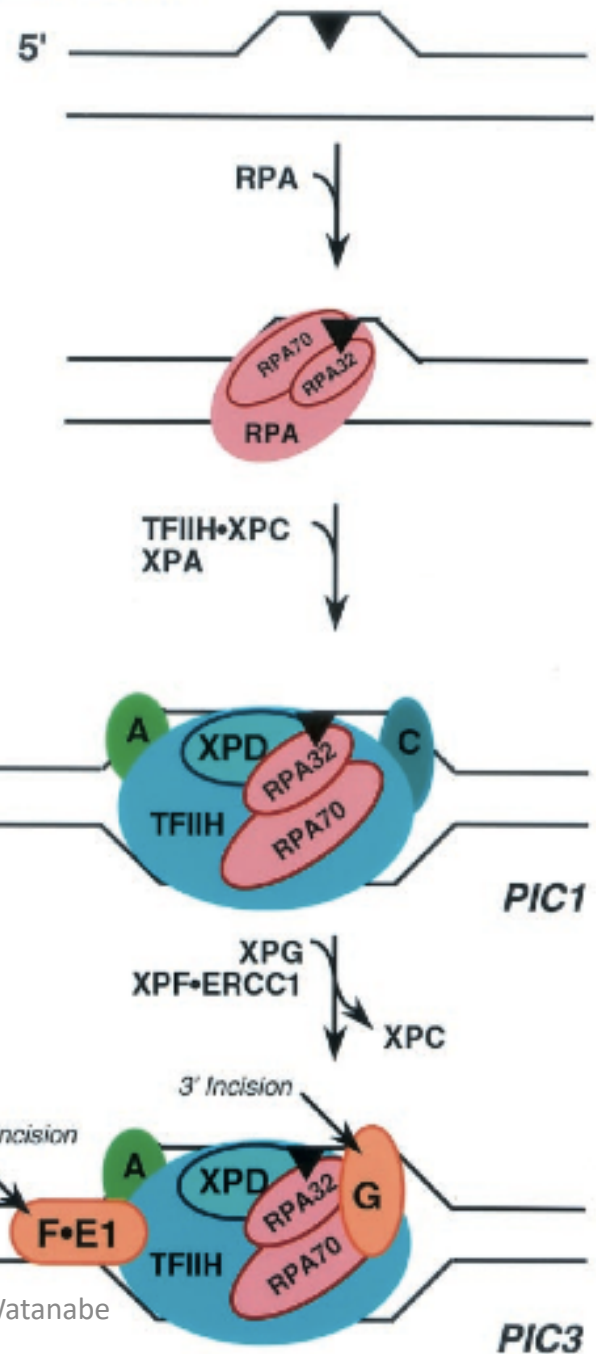
[→ Interview and transcript](#)

DNA二本鎖片側が損傷した場合の修復



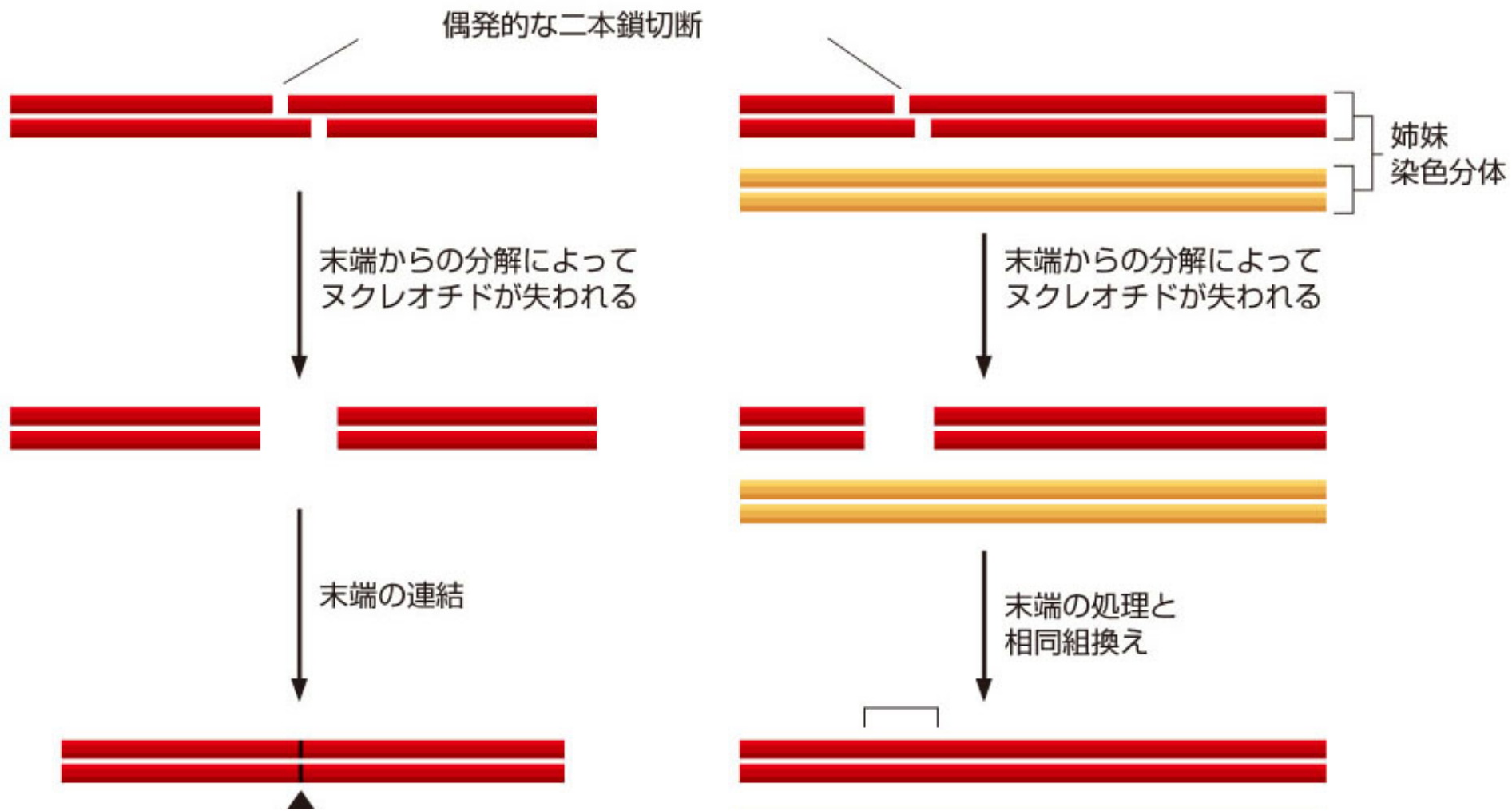


Damaged DNA



詳細があきらかとなっていて、さまざまな因子が関与している。それぞれに名前がつけられている

DNA二本鎖ともに切断した場合の修復

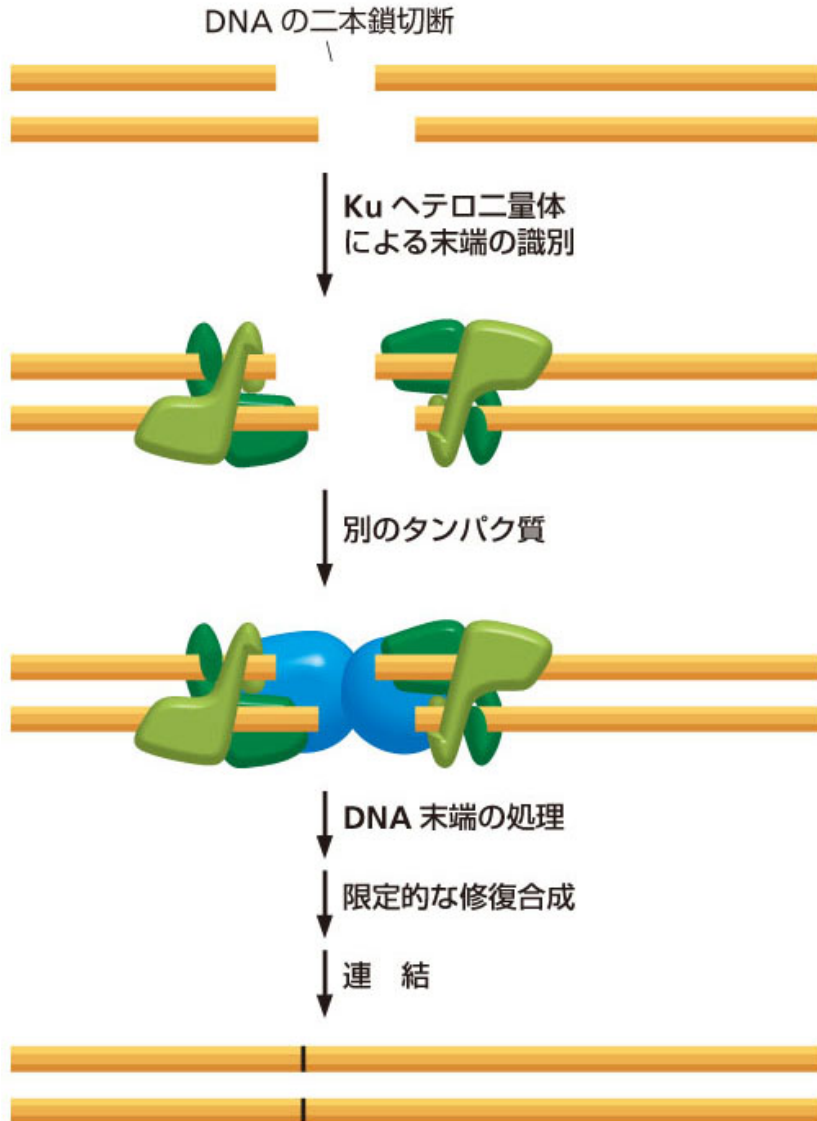


非分裂細胞の場合

分裂細胞の場合

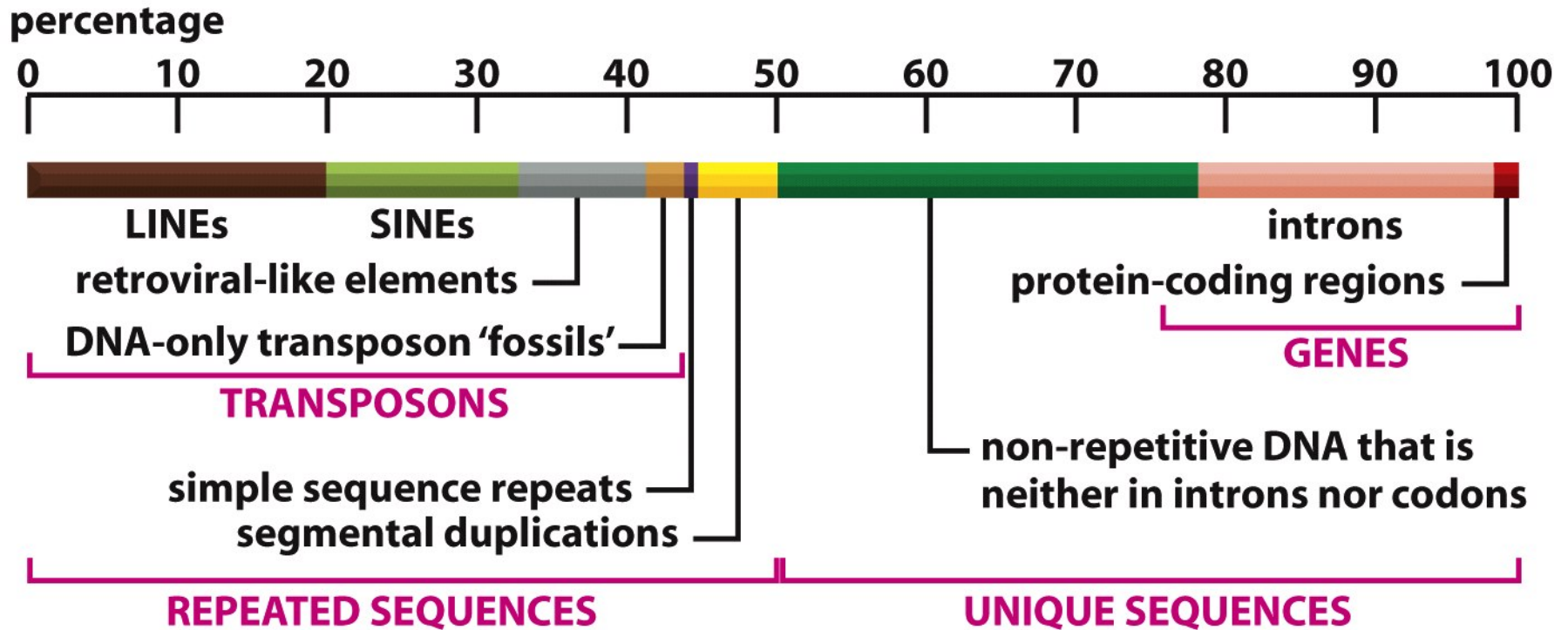
非分裂細胞の場合

致命傷から免れるために
DNA切断面同士結合する。た
だ、端が減ったり増えたりする
可能性はある。



修復された DNA では、普通はヌクレオチドが欠失する

幸運なこと(？)
 われわれヒトの染色体DNA配列上、
 いわゆるタンパク質をコードする部分は2%未満
 遺伝子情報を厳密に保持している部分は少ない



修復も大まかでも許容されることも多いのだろう(か？)

放射線生物学 Y. Watanabe

修復能力がないと 通常環境で普通に生活していてもがんになる

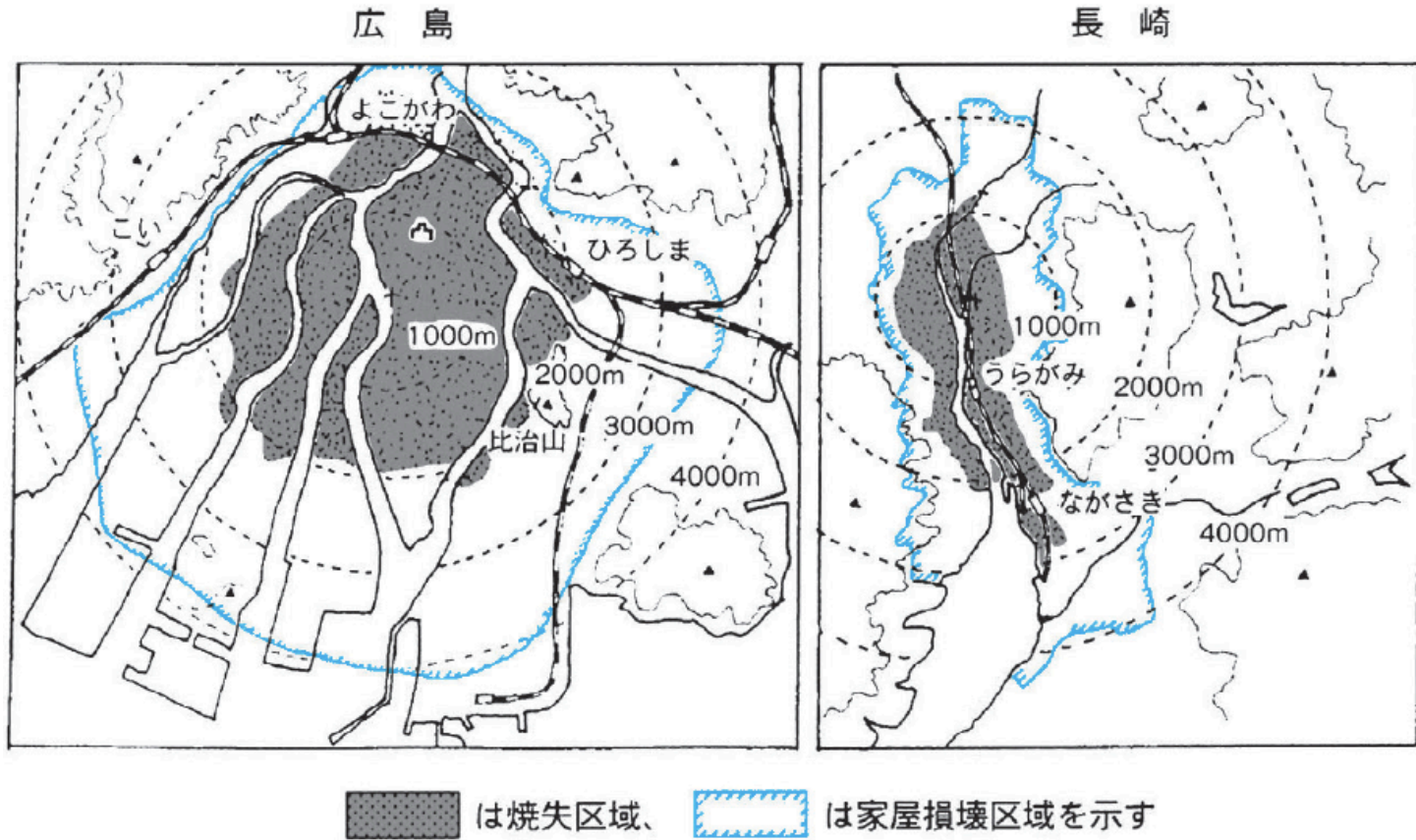
DNA は放射線だけでなく、紫外線でも損傷をうけるが、

その損傷を直す機能を失なった場合の病気が知られている

放射線影響のデータの出どころ



図2. 原爆による焼失区域と家屋損壊区域



「RERFの案内」より

広島爆心中心で生き残った植物もいる

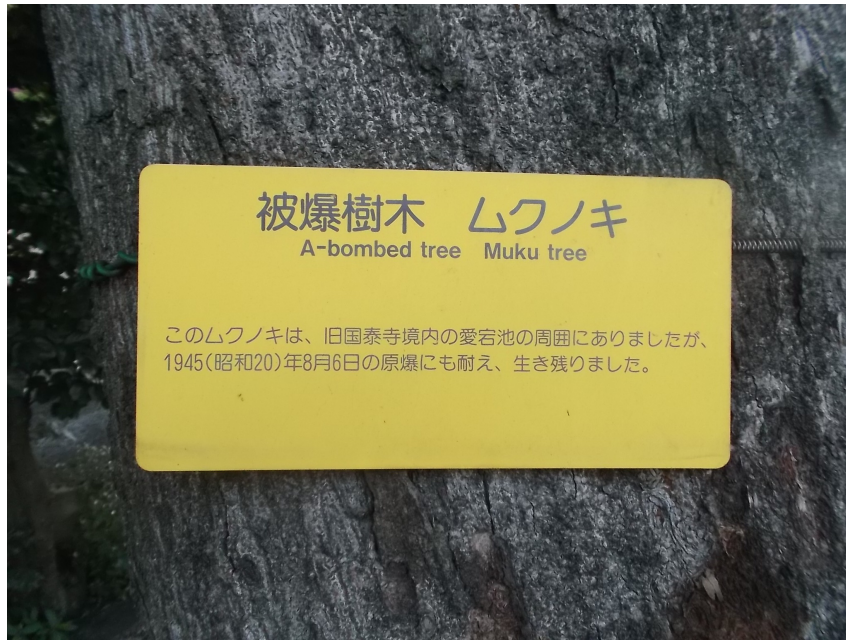
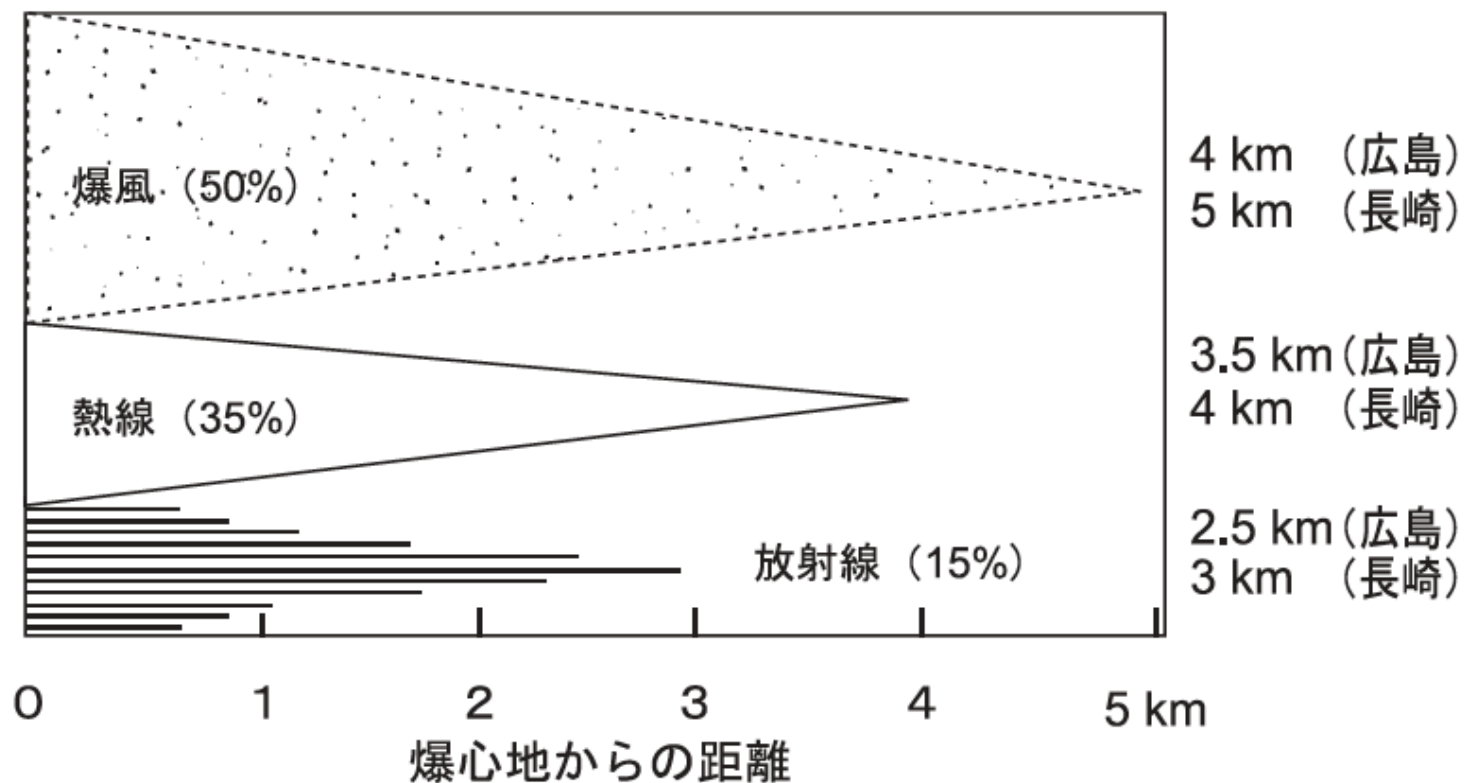


図1. 放出された原爆エネルギーの割合（％）と到達距離



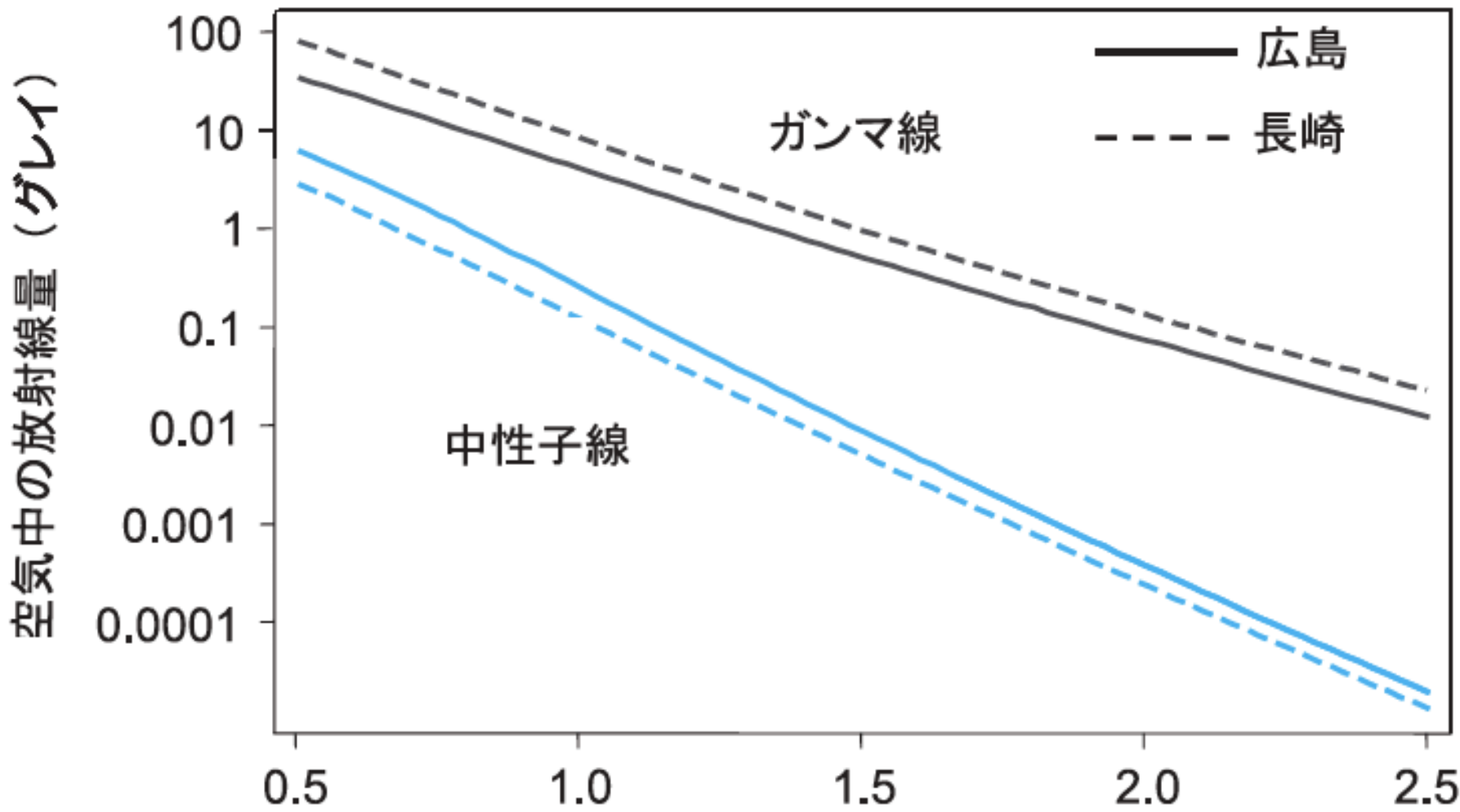
「RERFの案内」より

広島のア子爆弾から放出された放射線

広島の原子爆弾の原料には、ウランが使用されていました。爆弾に詰められていたウラン約50キログラムのうち、わずか1キログラムが核分裂しました。爆発により発生したエネルギーの約15%が放射線でした。放射線は、原子爆弾の核分裂と同時に、瞬間的に放出されました。この放射線を「初期放射線」といいます。また、爆発後、当分の間、地上には大量の「残留放射線」がありました。

残留放射線は人体に強く影響を及ぼしました。その後、残留放射線は急速に減少し、1週間後には約100万分の1になりました。現在では、原子爆弾の爆発により生じた残留放射線が人体に及ぼす影響は全くありません。

図4. 爆心地からの距離と空中線量（遮蔽がない場合）
DS02（2002年線量推定方式）* による



公益財団法人 放射線影響研究所 (放影研 RERF)



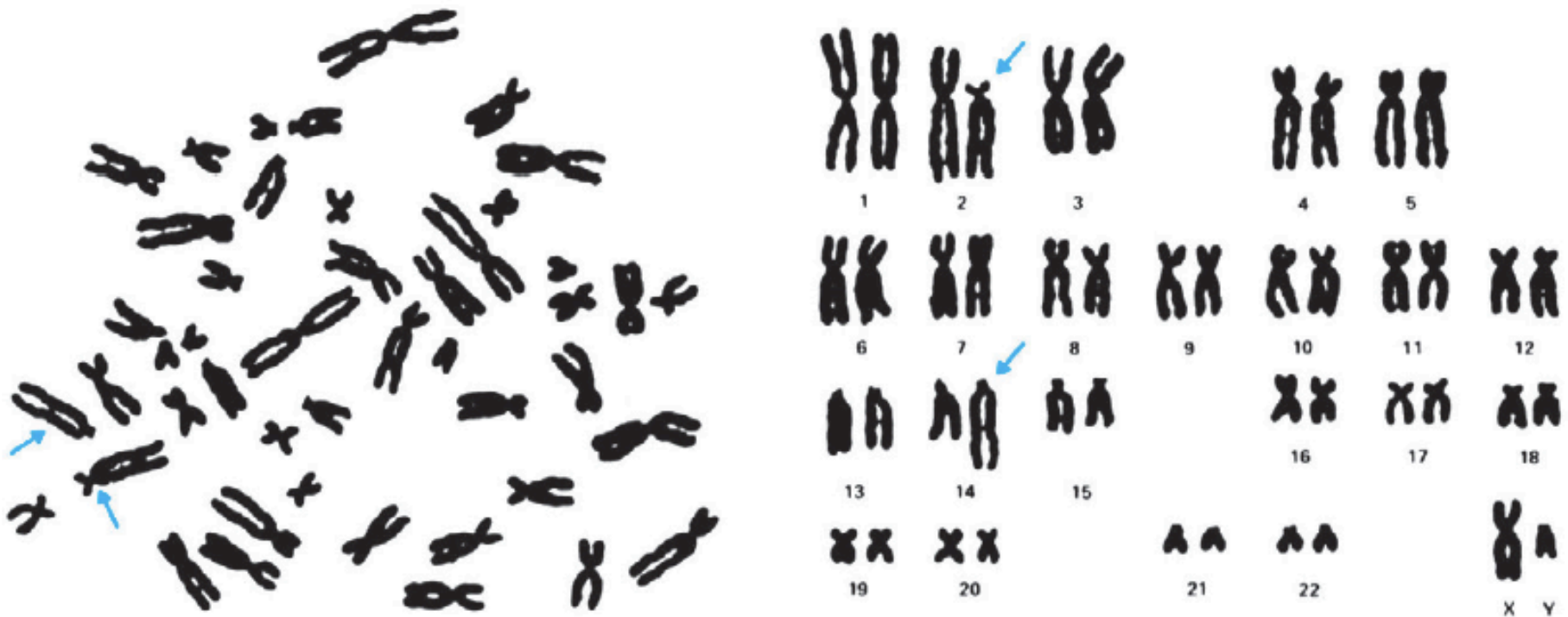
@広島市南区 比治山公園



@長崎市蛭茶屋

染色体異常が起こる場合もある

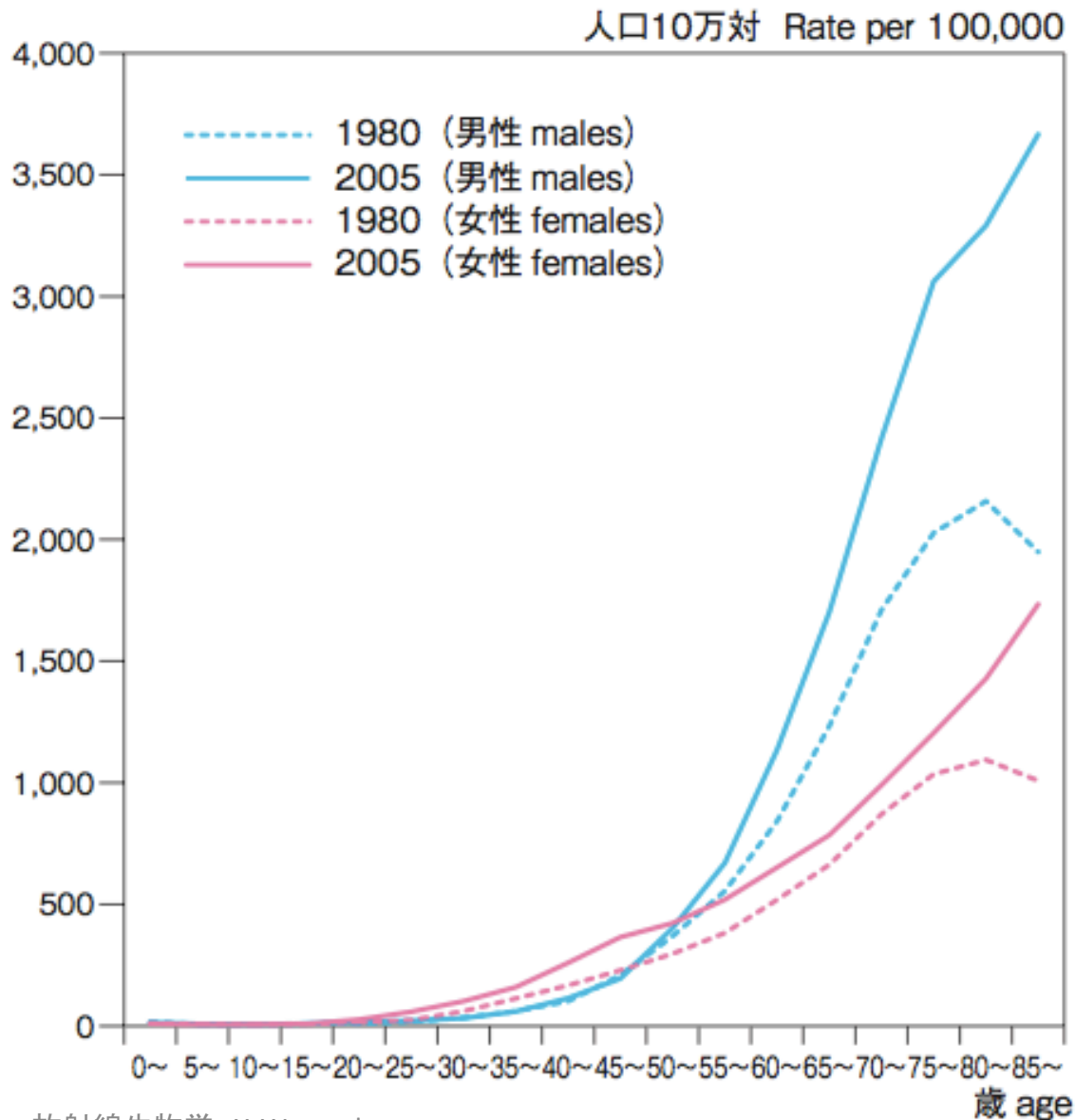
図5. 左は異常（矢印）を持った細胞分裂像。右は同じものを染色体の大きさに従って並べかえたもの。異常染色体は、第2染色体と第14染色体の一部の交換によって生じたことが分かる（矢印）



科学的に判断を
難しくする要素

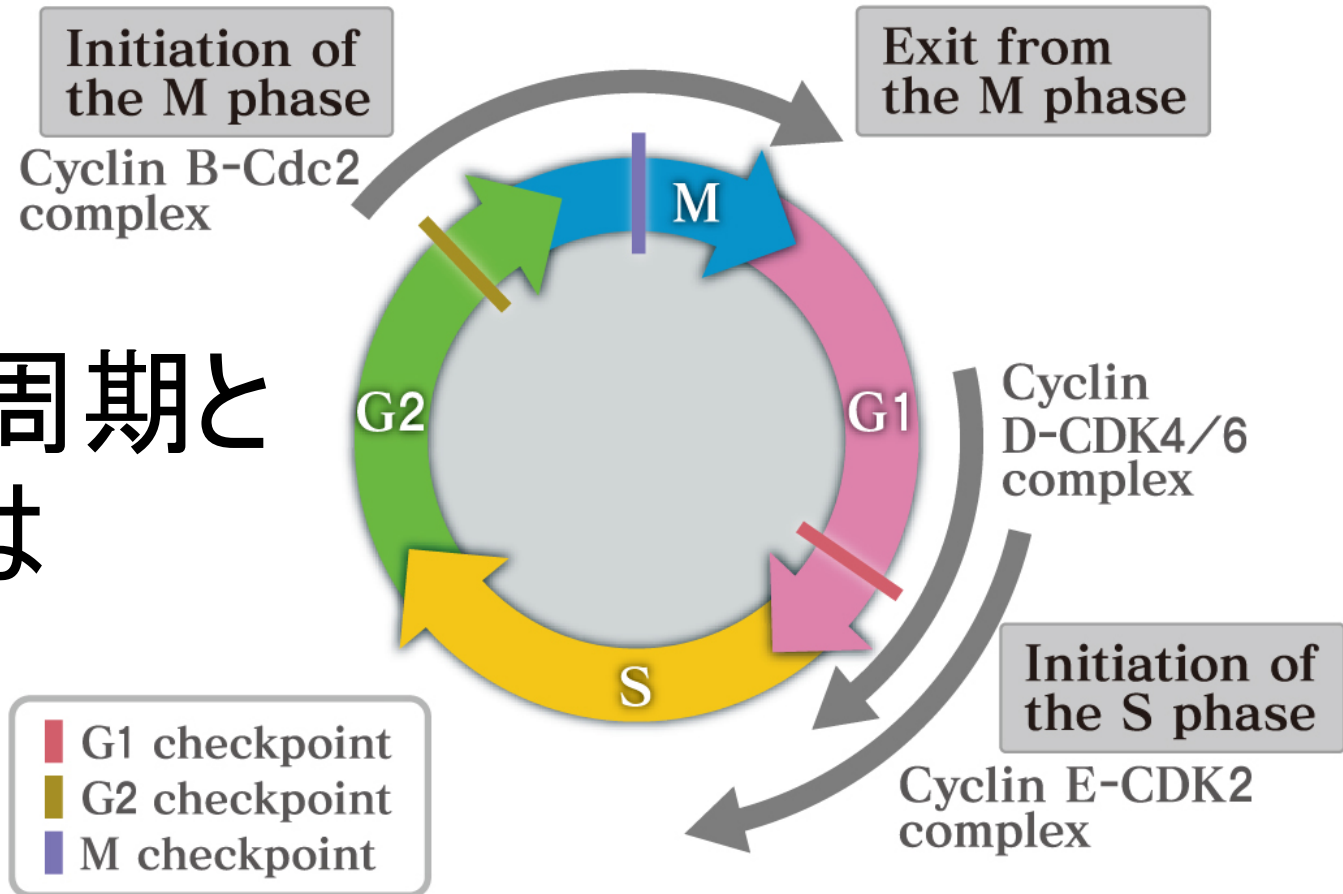
加齢に伴う自然
増の影響と見分
けにくい

(1) 全がん All cancers



正常な分裂準備があって細胞周期が進行する＝
> 異常な過程を多段階でチェックしている

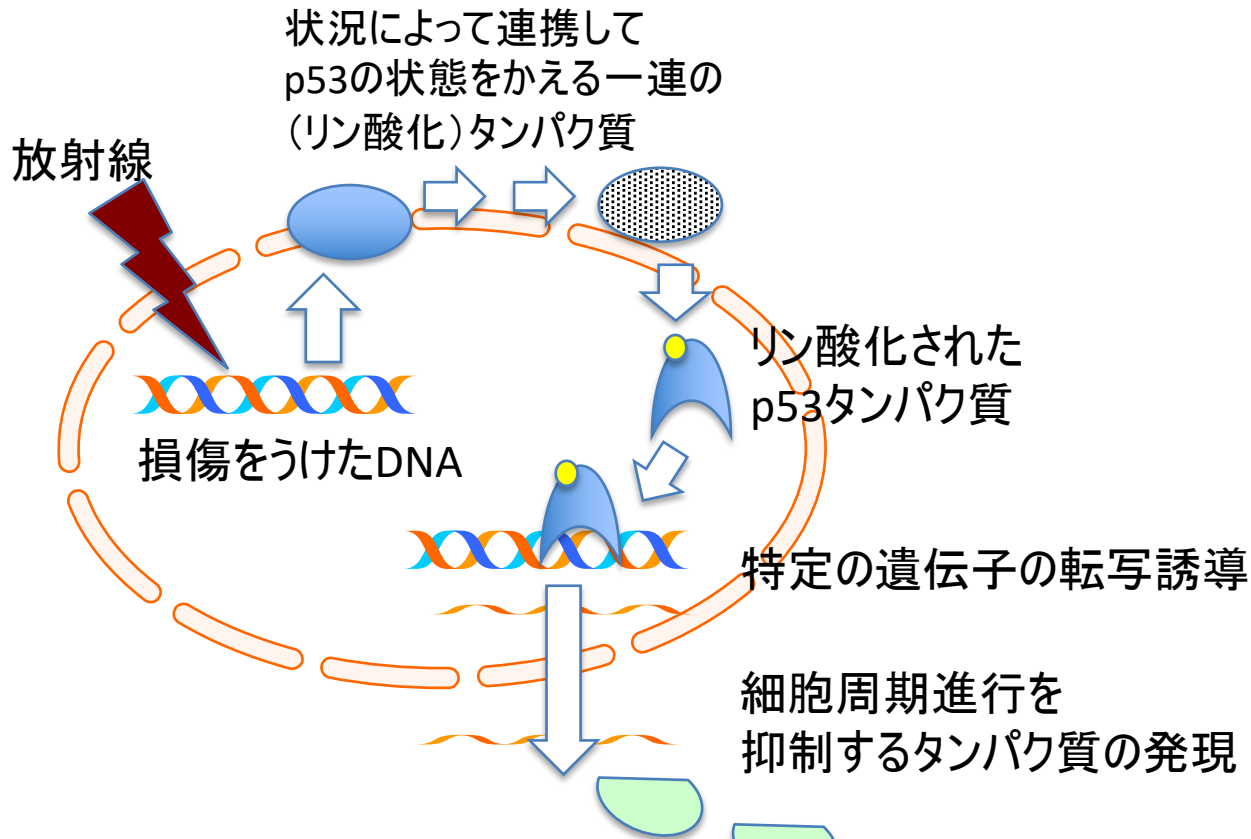
細胞周期と
は



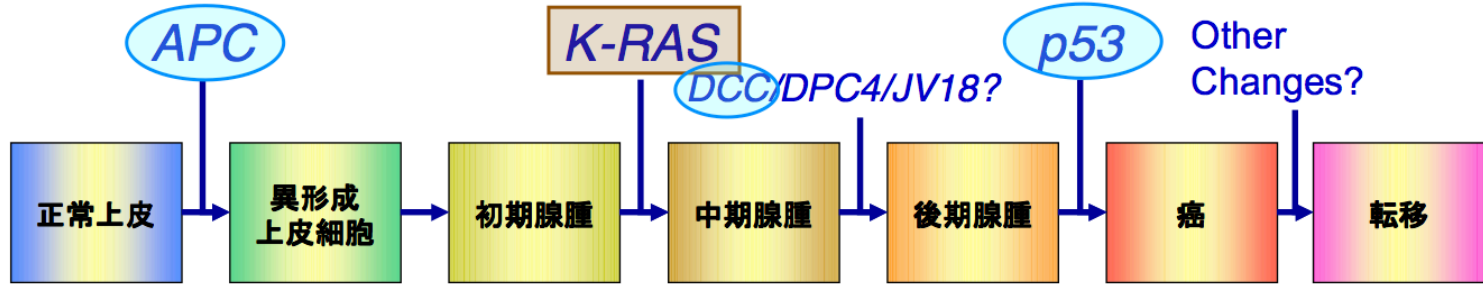
© University of Tokyo

DNA損傷

→p53がみつけ細胞周期の進行を抑制する
→がん細胞の増殖の抑制



癌遺伝子とはどのようなものか？



多段階発がん仮説

がん = 細胞の異常増加

がん遺伝子 がん抑制遺伝子



ゲノム不安定性の誘導

- 放射線による直接電離、および水のイオン化で生じるラジカルはたしかに DNA に損傷を与える（おそらく線量に比例）。なかでも二本鎖切断が特に問題となる（高LETを与える α 線、中性子線は生物学的効果大きい）。
- しかしそもそも DNA 損傷は化学物質など放射線以外の要因によっても、また普段の DNA 複製の際の複製エラーでも生じている。
- ヒトを含む生物の細胞には、DNA 損傷に対する多種多様な修復機能が備わっている。
- それら DNA 修復遺伝子自体が損傷を受けると修復機能が低下するが、DNA 損傷が残ってもすぐガンになるのではなく、細胞がガン化するのは多段階のガン遺伝子（アポトーシス(細胞死)に関与する p53 ガン抑制遺伝子を含む）に次々に突然変異が生じた場合。
- 一方で、DNA 修復遺伝子に異常のある病気の人、通常の人よりはるかにガンにかかりやすい。（色素性乾皮症、運動失調性毛細管拡張症、ナイミーヘン切断症候群など）

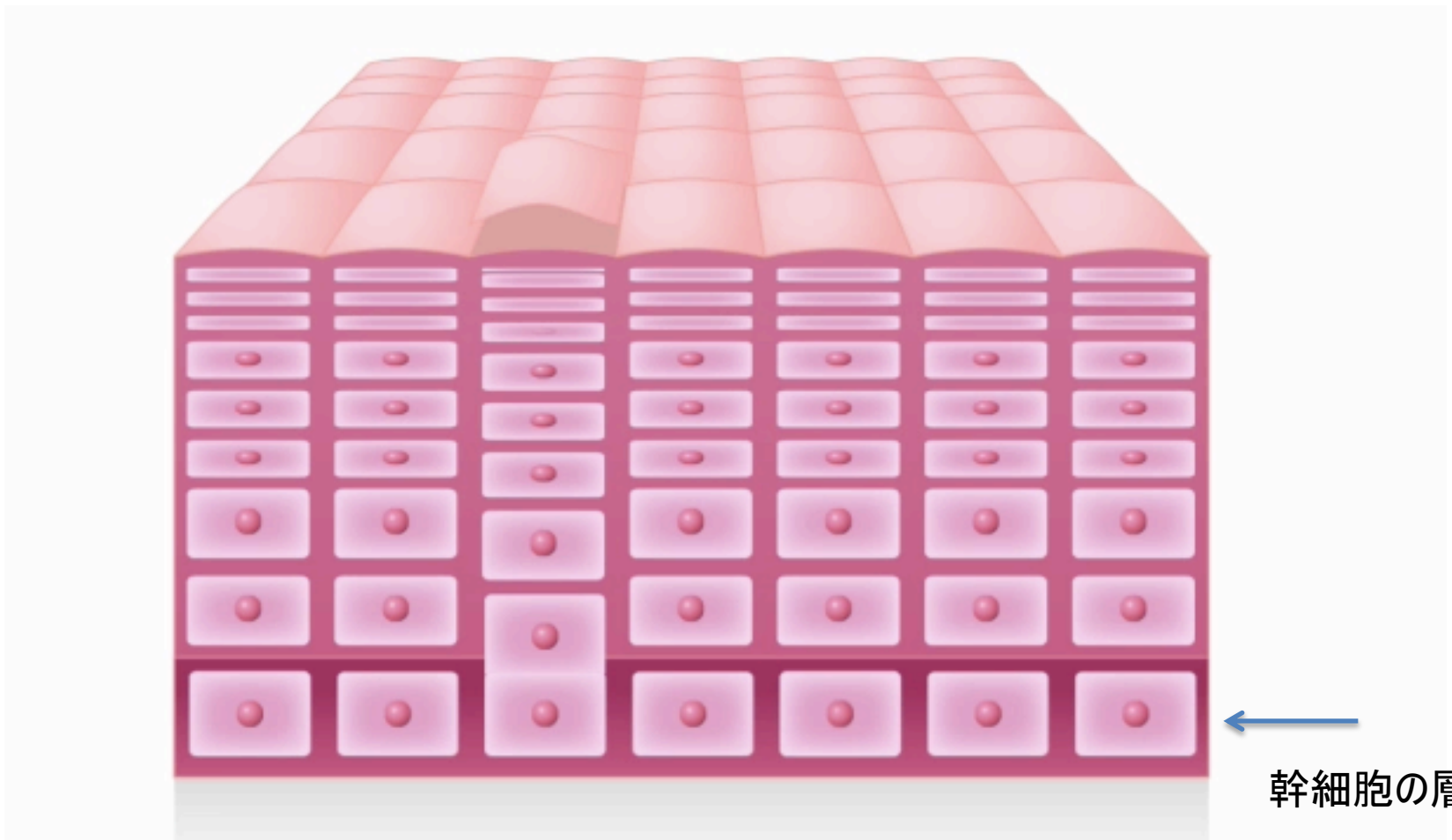
遺伝子の傷がもつ影響

- いわゆる癌が発生する

→ 癌遺伝子が生まれる？
特定の遺伝子の突然変異

p53, RAS などに変化がおこると
がんを抑える機構が弱まる

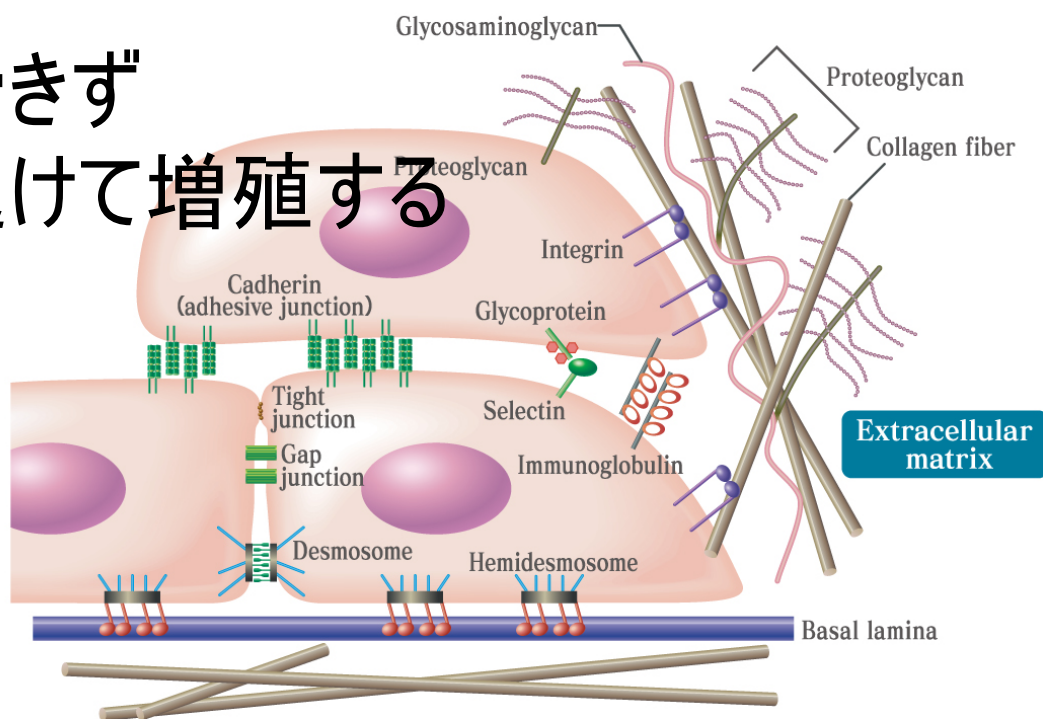
皮膚の幹細胞の様子 深さ70 μ m 程



正常な細胞は
周囲の環境状況を把握、協調して
周囲の組織、器官と仲良く納まっている。



がん細胞は
周囲と協調できず
周囲を押し退けて増殖する



細胞のトランスフォーメーション

ウイルスによってがん化する例の図ですが、放射線がきっかけとなることもある

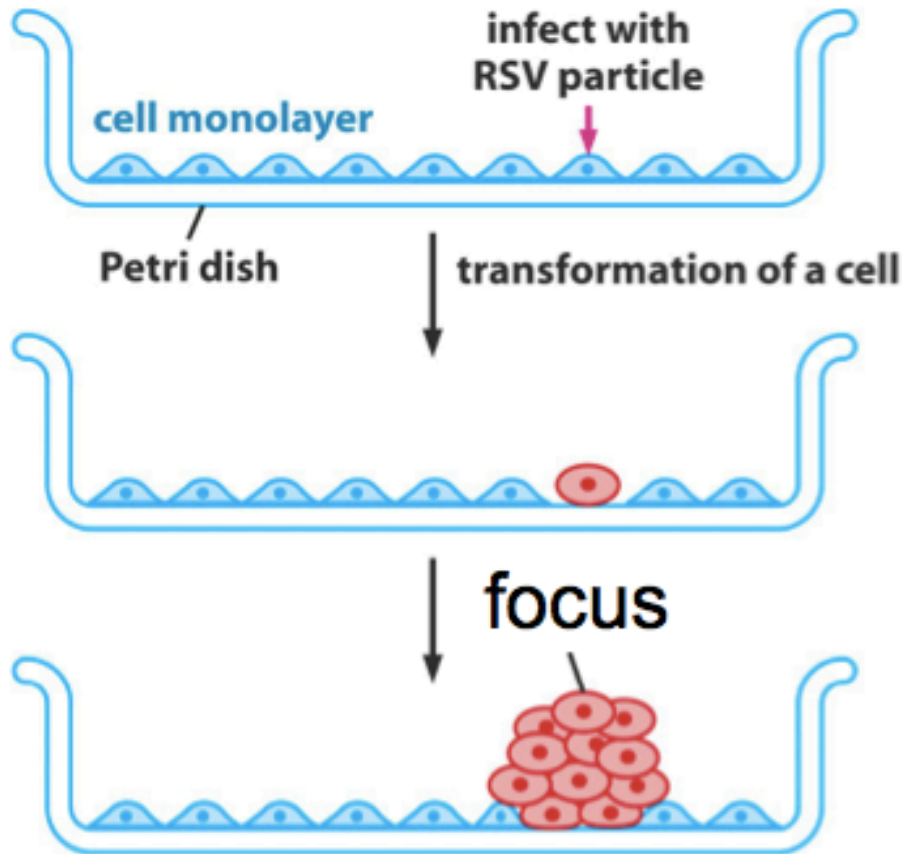
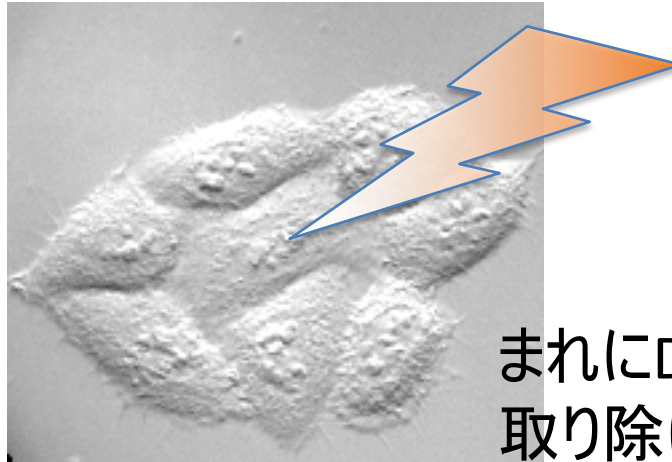


Figure 3-7a The Biology of Cancer (© Garland Science 2007)



Figure 4-3a The Biology of Cancer (© Garland Science 2007)

他の細胞の上にもでも増殖細胞が重なっていく。
癌細胞の特徴。



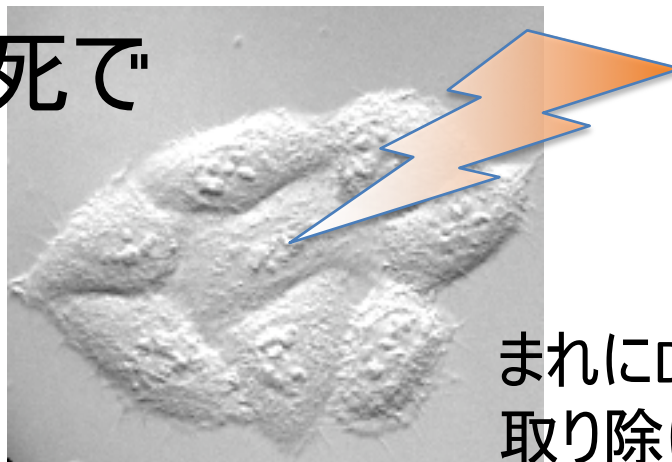
まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう



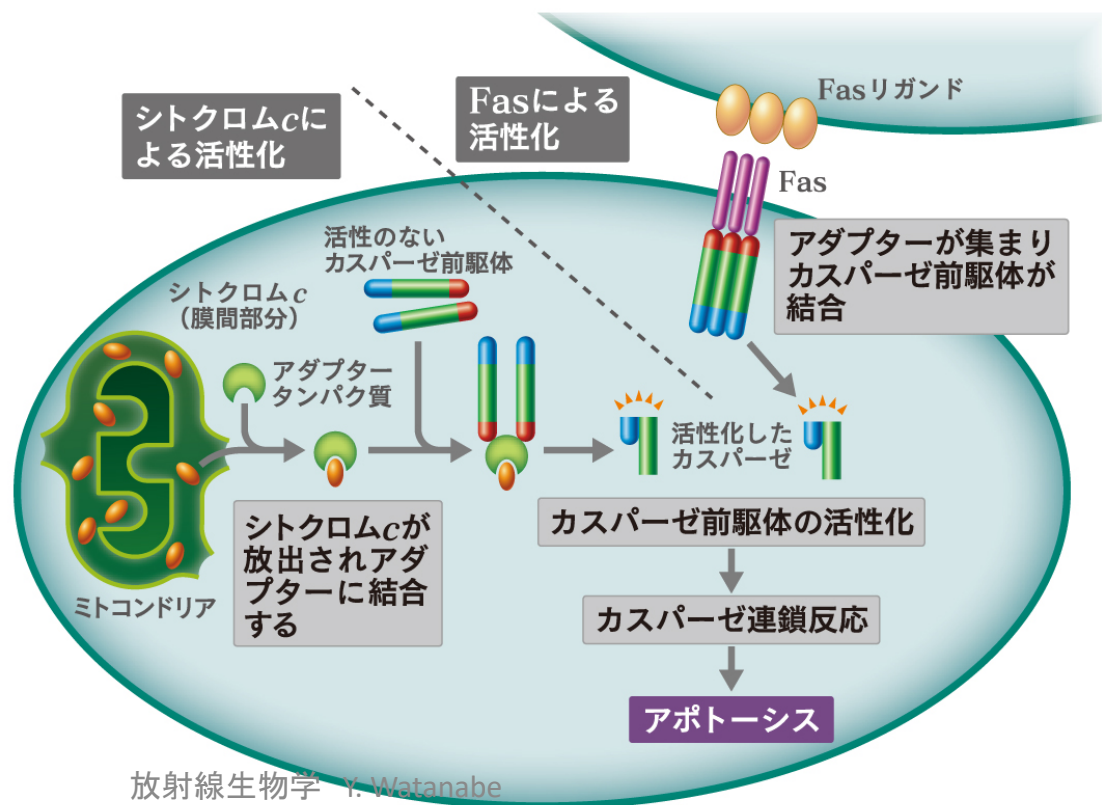
修復の失敗

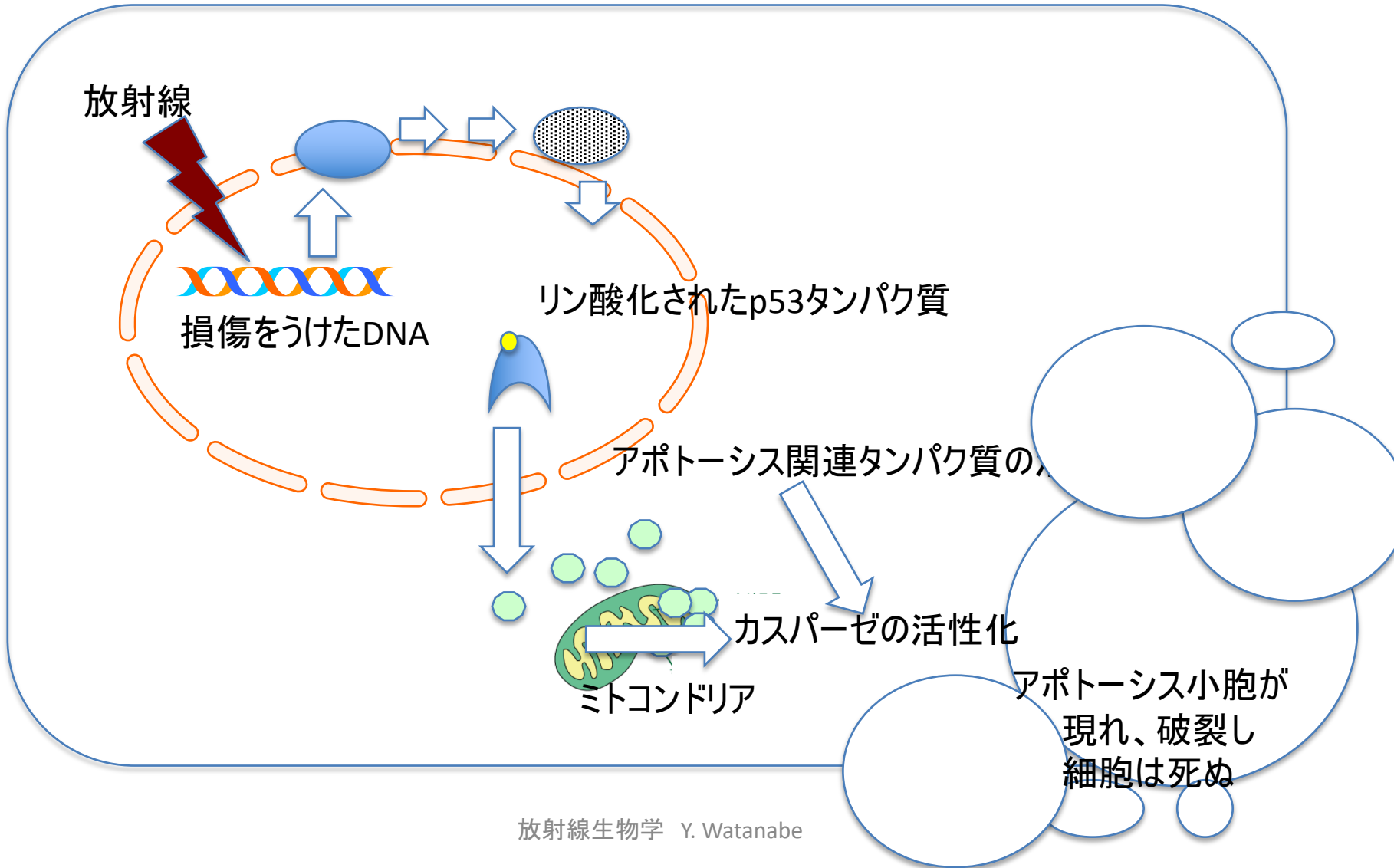
どうなる？

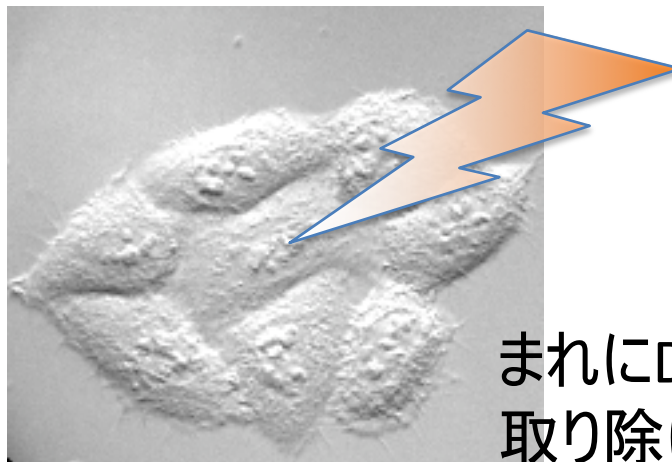
プログラム細胞死で 異常な細胞は 自爆する



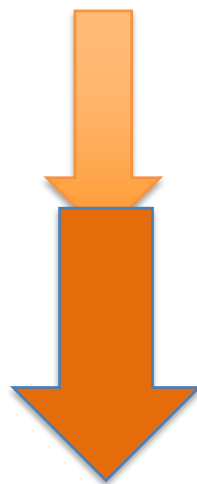
まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう







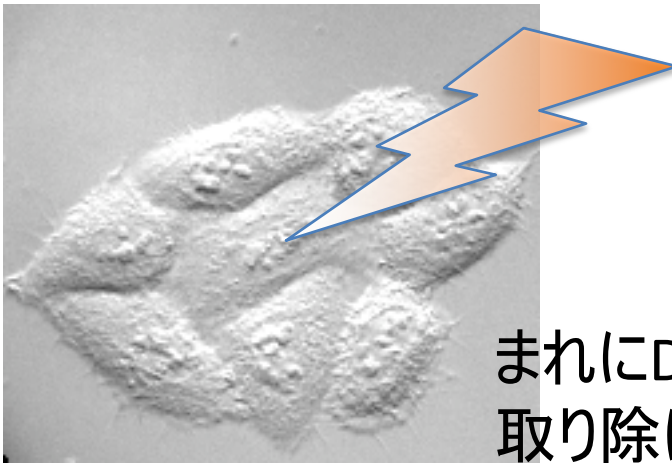
まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう



修復の失敗

細胞死も起こらない場合

どうなる？



まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

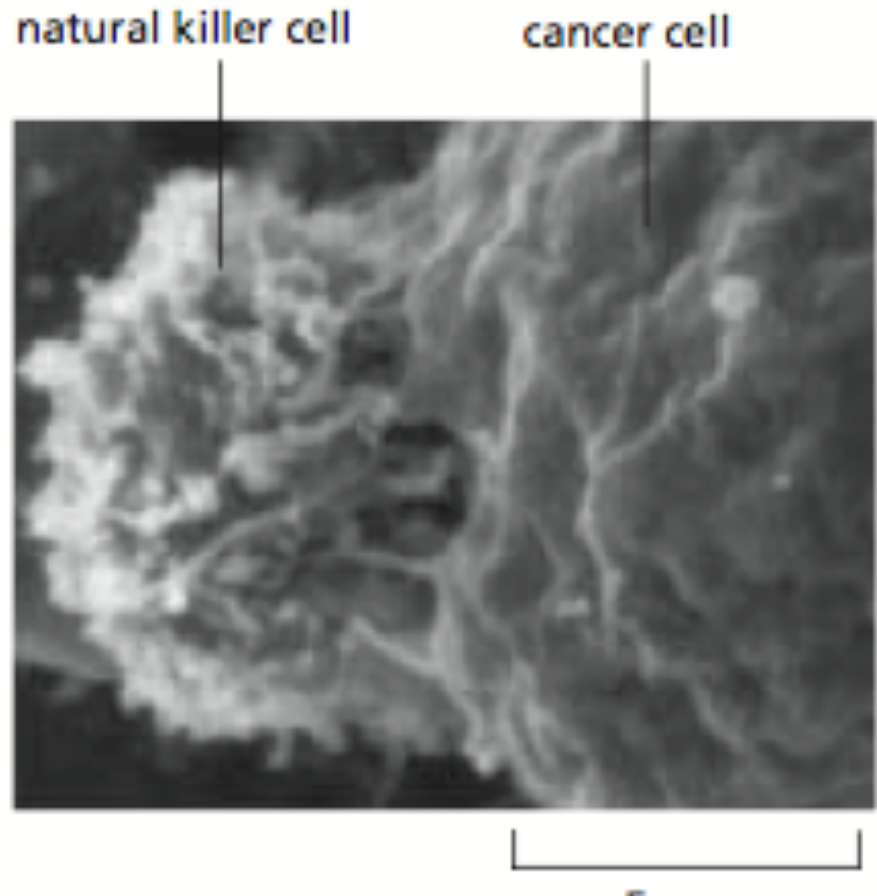
NK細胞

修復の失敗

細胞死も起こらない

自然免疫系に捕えられる

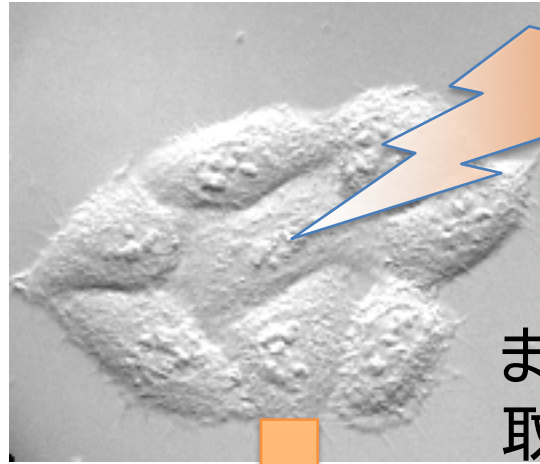
ナチュラルキラー細胞(NK)ががん細胞を攻撃する



The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2018 was awarded jointly to James P. Allison and Tasuku Honjo "for their discovery of cancer therapy by inhibition of negative immune regulation."

放射線障害で脾臓(免疫系組織)に負担が見られる





まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

修復の失敗

細胞死も起こらない

NK細胞も取り逃がした

一生の間にある程度がん細胞が残ってしまう

令和元年度日本人推計死亡数

死因	死亡数
悪性新生物	376 392
心疾患	207 628
老衰	121 868
脳血管疾患	106 506
肺炎	95 498
死亡数	1 381 098

27.3%が 癌で死亡

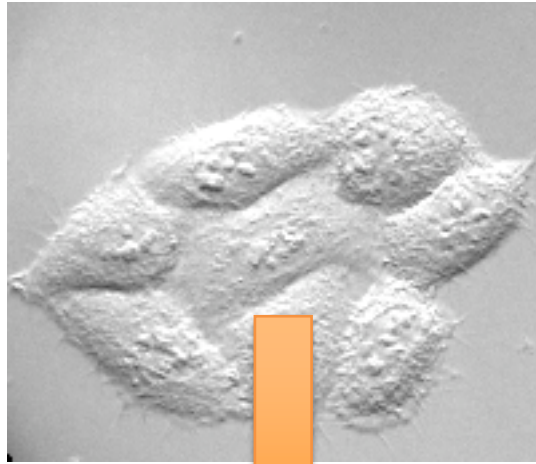
発がん率

いろいろとデータはあるが、一例

+ 0.5 % / 100 mSv

令和元年(2019)人口動態統計の年間推計(厚生労働省)
日本人の死因のうち、癌によるもの (悪性新生物) 27.3 %

この値に上乘せ 27.8 %



修復の失敗

細胞死も起こらない

NK細胞も取り逃がした

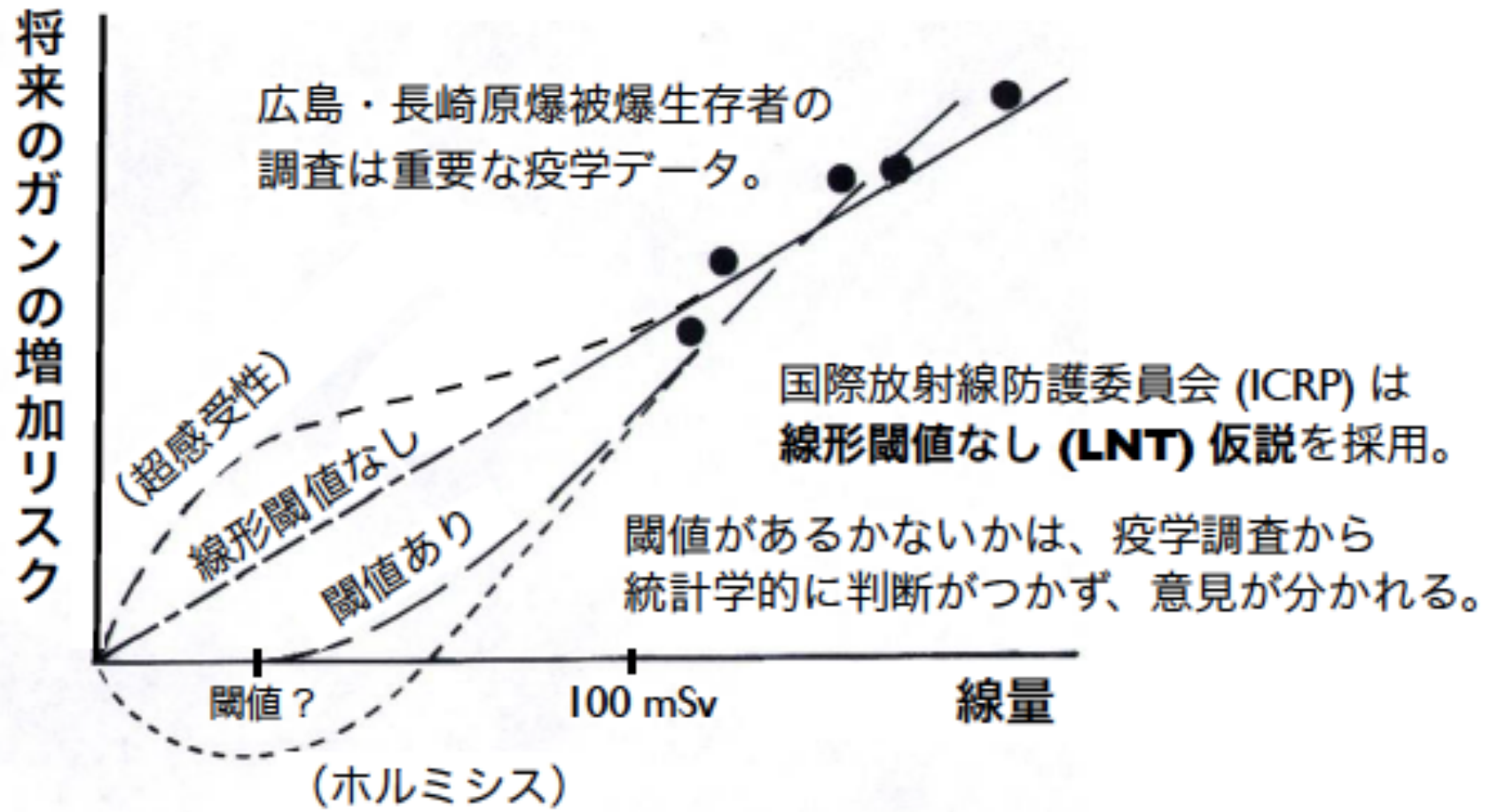
27.3 %

27.8 %

+ 0.5% / 100 mSv

+ 0.5 % / 100 mSv の根拠

低線量におけるリスク評価



線形(比例関係)を想定

出てくる議論の例

線形関係とは限らないのではないのか

超感受性であることは否定されていない

可能性はゼロではない

すぐには影響はでませんというのは
いつかは出るということか

(公)環境科学技術研究所@六ヶ所村

先端分子生物科学研究センター 生物影響研究部

マウスへの広線量率放射線連続照射による寿命、死因等への影響

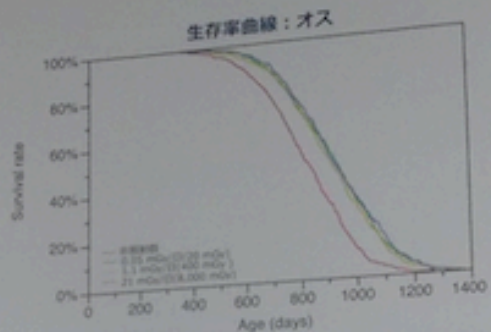
実験動物：SPF B6C3F1 (C57BL/6J x C3H/He) マウス
 照射施設：500G/性別群

照射計画

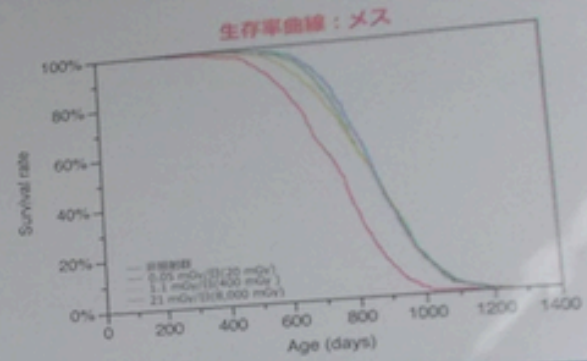


照射群 (6週間(10年相)) 0-5400日連続照射

照射計画
 0.05 mGy/日 x 400日間 = 20mGy
 1.1 mGy/日 x 400日間 = 400mGy
 21 mGy/日 x 400日間 = 8000mGy
 400日間の照射後 死ぬまで飼育



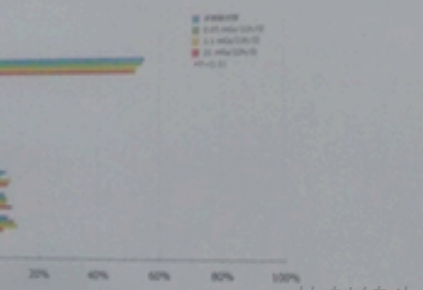
照射群	n	平均寿命	SE	P値
非照射群	498 (2)	912.7	8.2	
0.05 mGy/日 (総線量20 mGy)	495 (5)	905.8	8.3	0.901
1.1 mGy/日 (総線量400 mGy)	500	895.2	8.2	0.143
21 mGy/日 (総線量8000 mGy)	499 (1)	812.0	7.6	0.001



照射群	n	平均寿命	SE	P値
非照射群	500	860.5	6.3	
0.05 mGy/日 (総線量20 mGy)	495 (5)	851.8	6.7	0.694
1.1 mGy/日 (総線量400 mGy)	497 (3)	839.8	7.5	0.035
21 mGy/日 (総線量8000 mGy)	500	740.9	6.8	0.001

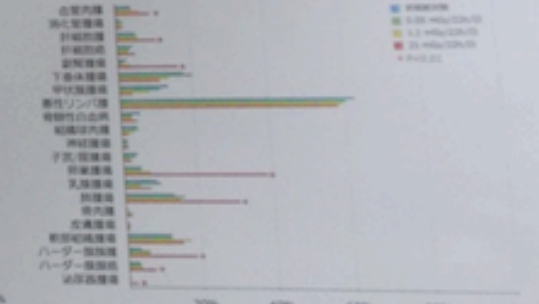
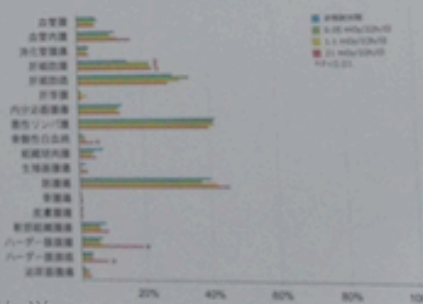
死因：オス

死因：メス



発生腫瘍：オス

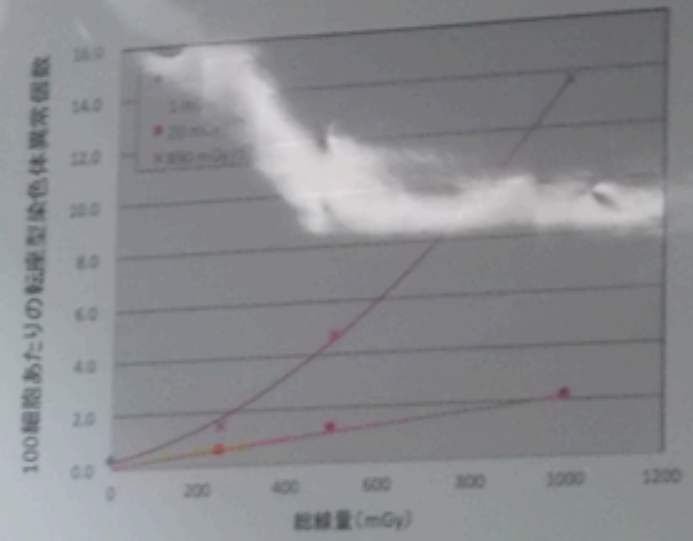
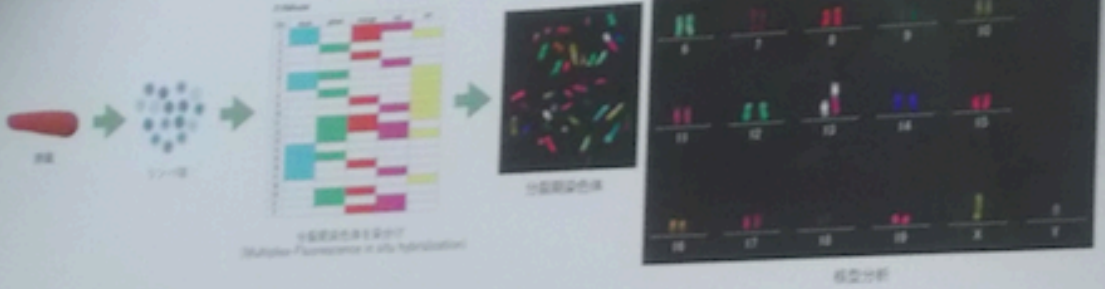
発生腫瘍：メス



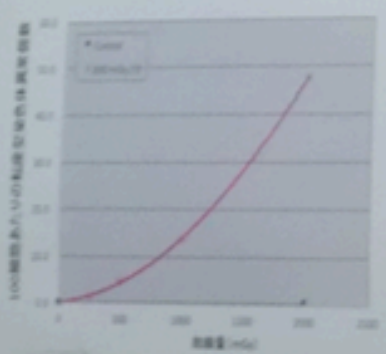
低線量 > 染色体異常

低線量放射線連続照射による染色体異常の誘発

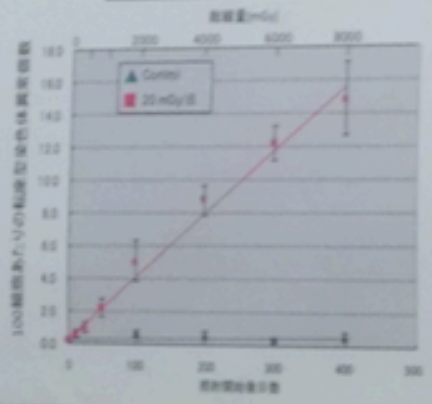
使用動物：SPFメスC3H/HeNマウス
 照射線量率：0.05, 1, 20 mGy/日, 890 mGy/分
 使用動物数：1ポイント7匹
 照射回数：照射開始後125, 200, 250, 300, 400日



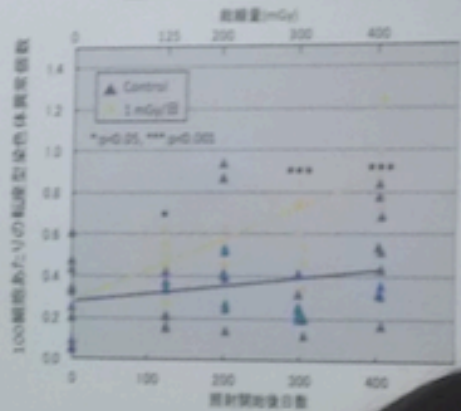
890 mGy/分 (53400000 μGy/時間)



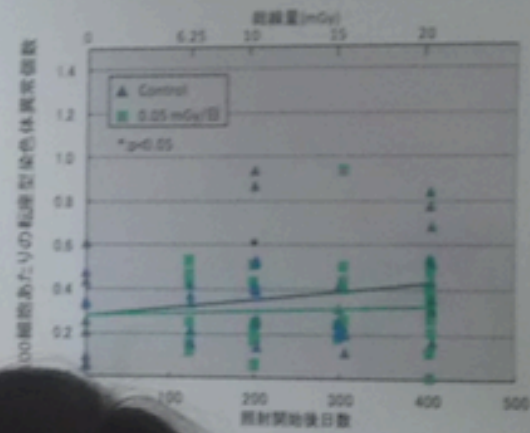
20 mGy/日 (909 μGy/時間)



1 mGy/日 (45.5 μGy/時間)



0.05 mGy/日 (2.27 μGy/時間)



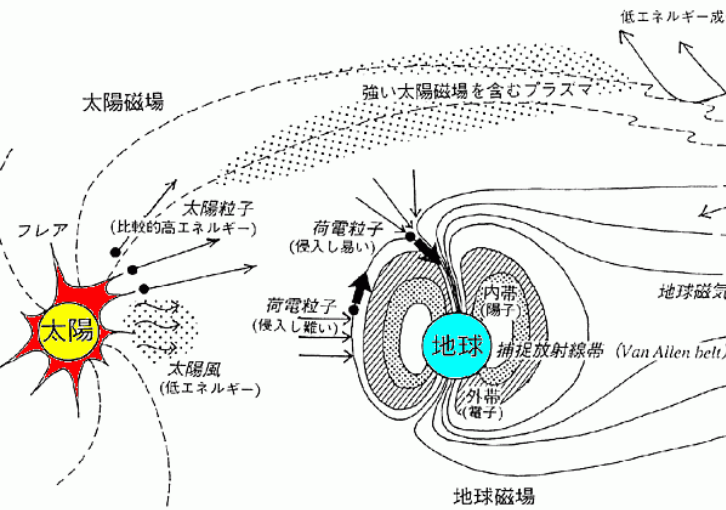


図1 宇宙放射線環境の構造

[出典] 藤高 和信: 宇宙環境の放射線、日本原子力学会誌

OPEN

Apollo Lunar Astronauts Show Higher Cardiovascular Disease Mortality: Possible Deep Space Radiation Effects on the Vascular Endothelium

Michael D. Delp¹, Jacqueline M. Charvat², Charles L. Limoli³, Ruth K. Globus⁴ & Payal Ghosh¹

Received: 09 May 2016

Accepted: 22 June 2016

Published: 28 July 2016

Sci. Rep. 6:29901 (2016)
DOI:10.1038/srep29901

問題定義:
心臓に直接影響を与える
可能性があるか

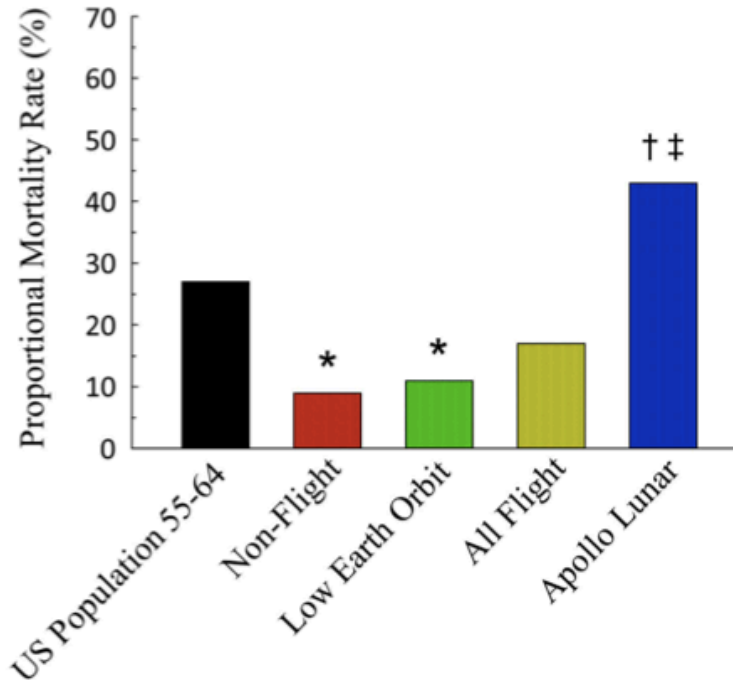


Figure 1. The proportional mortality rate due to cardiovascular disease in the United States among individuals age 55–64 years, non-flight astronauts, astronauts that flew only low Earth orbit missions, all flight astronauts, and Apollo astronauts that flew missions to the Moon. *Significantly different from the

Multi-Level Effects of Low Dose Rate Ionizing Radiation on Southern Toad, *Anaxyrus [Bufo] terrestris*

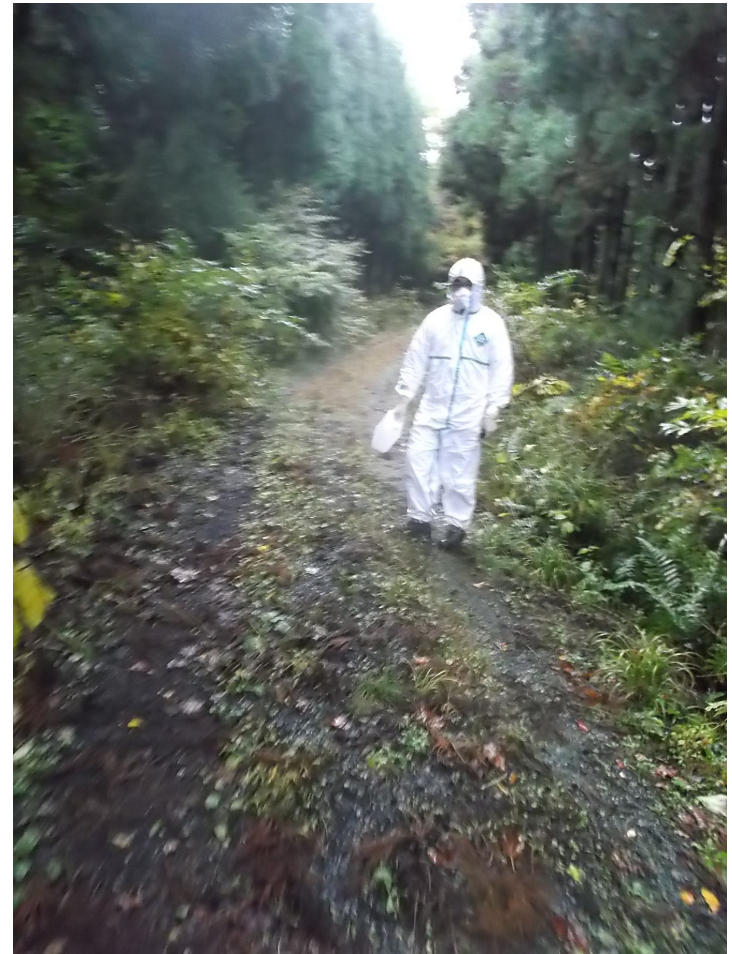
Abstract

Karolina Stark^{1,2*}, David G. Hinton^{2,4}

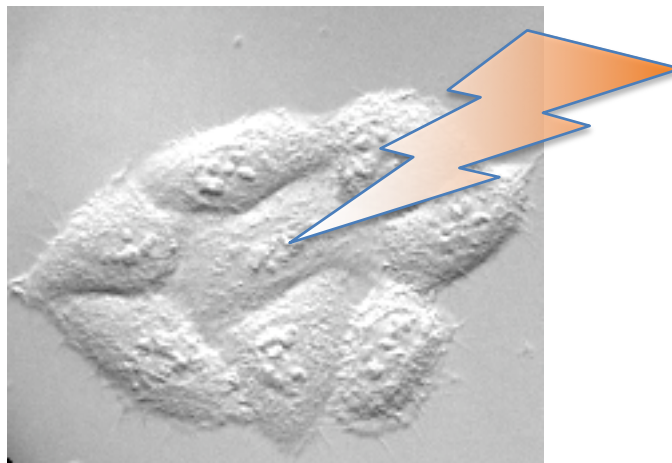
1 Department of Ecology, Environment and Planning, **2** Savannah River Ecology Laboratory, **3** Department of Plant Biology, University of Georgia, **4** Department of Radiation Protection and Nuclear Safety, Georgia Institute of Technology

Despite their potential vulnerability to contaminants from exposure at multiple life stages, amphibians are one of the least studied groups of vertebrates in ecotoxicology, and research on radiation effects in amphibians is scarce. We used multiple endpoints to assess the radiosensitivity of the southern toad (*Anaxyrus [Bufo] terrestris*) during its pre-terrestrial stages of development—embryonic, larval, and metamorphic. Toads were exposed, from several hours after oviposition through metamorphosis (up to 77 days later), to four low dose rates of ¹³⁷Cs at 0.13, 2.4, 21, and 222 mGy d⁻¹, resulting in total doses up to 15.8 Gy. Radiation treatments did not affect hatching success of embryos, larval survival, or the length of the larval period. The individual family variation in hatching success of embryos was larger than the radiation response. In contrast, newly metamorphosed individuals from the higher dose-rate treatments had higher mass and mass/length body indices, a measure which may relate to higher post-metamorphic survival. The increased mass and index at higher dose rates may indicate that the chronic, low dose rate radiation exposures triggered secondary responses. Additionally, the increases in growth were linked to a decrease in DNA damage (as measured by the Comet Assay) in red blood cells at a dose rate of 21 mGy d⁻¹ and a total dose of 1.1 Gy. In conclusion, the complex effects of low dose rates of ionizing radiation may trigger growth and cellular repair mechanisms in amphibian larvae.

F1周辺の視察の後に受けた質問： 居住制限地域に変な植物があらわれていませんか？



人里でのバランスが崩れたために、道
や圃場にそれまで生えることのなかった
植物がでてきてはいた



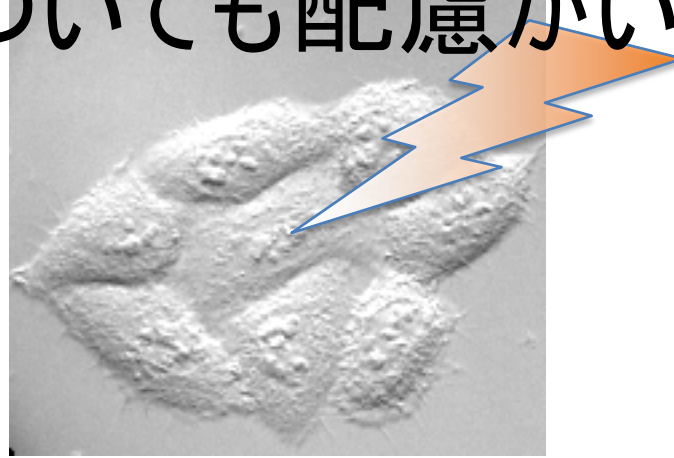
修復の失敗

細胞死も起こらない

NK細胞も取り逃がした

がん細胞が残りにくいようにこうした機能を
高めることを考えることは現実的に重要

生活習慣についても配慮がいるであろう



ストレスの低減
適切な代謝

発がんリスク

たばこ	1.6倍
酒(2-3合/日)	1.4倍
やせすぎ	1.29倍
肥満	1.22倍
運動不足	1.15-1.19倍
高塩分食品	1.11-1.15倍
野菜不足	1.06倍

生物レポート課題1

生命の基本単位である細胞が、放射線を受けた際の影響（複数項目）について簡略に説明してください。それを踏まえて、放射線量によって確定的影響、あるいは確率的影響に分けて影響を考えることに関して、生物学的な根拠を述べてください。