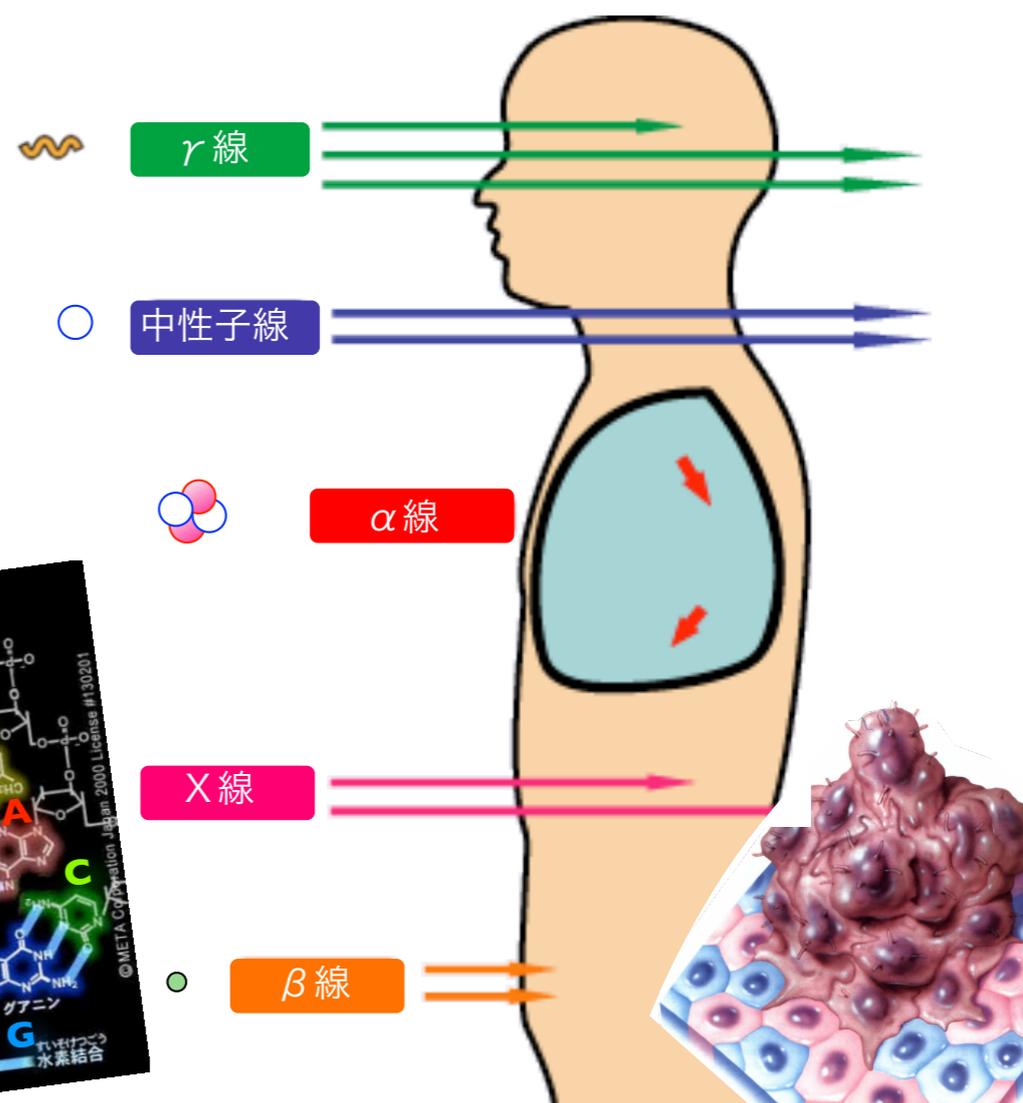
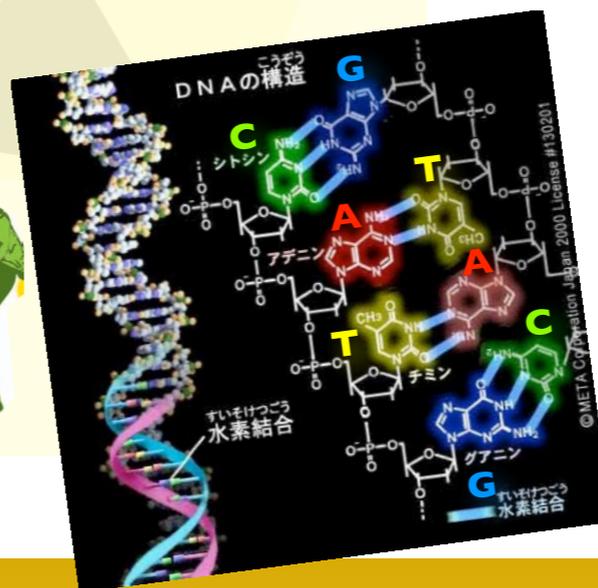
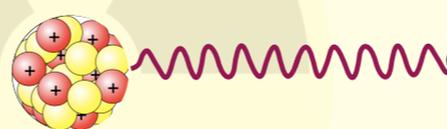


J-PARC 2019

放射線取扱者再教育講習

～ 物理屋から見た放射線生物学・医学・防護学 ～

放射線の 線量と 人体影響 のリスク



2019 / 9 / 3 (火)

原子力科学研究所 大講堂

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 大学院理学系研究科



CERN

European Organization for Nuclear Research

Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

自己紹介

- 大学** : 平成元年 東京大学理科1類入学
平成5年 理学部物理学科卒業
- 大学院** : 平成10年 東京大学大学院理学系研究科 博士 (物理学)
- 職歴** : 東京大学 教養学部・大学院総合文化研究科 助教
: 東京大学 大学院理学系研究科 准教授
- 研究** : **CERN** 研究所で**反陽子原子・反水素合成の衝突・分光実験**
J-PARC (東海村) で**ミュオニウム原子の分光実験**
- 専門** : 放射線科学・素粒子原子物理学 (Exotic原子)
- 家庭** : 2児の父 (中1の息子、小3の娘) 東京在住

放射線関連

- 講義・講演** : 各地で放射線の講義や講演会
- 資格** : **第1種放射線取扱主任者 (東京大学理学部放射線取扱主任者)**
- 委員会** : 東大安全環境本部 放射線安全教育WG
放射線取扱者全学一括講習会資料検討TG メンバー
日本学術振興会 先導的研究開発委員会
「放射線の影響とクライシスコミュニケーション」 委員

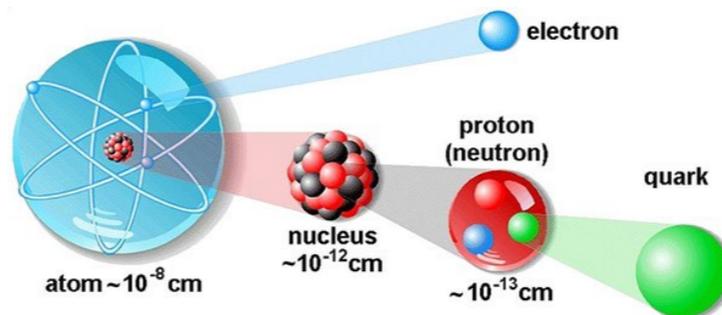
東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

書籍「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 —」

とあわせて、どうぞご利用下さい。 <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp>

2011年度夏学期

自主講義 放射線学



2019年度 Aセメスター

2018年度 Aセメスター

2017年度 Aセメスター

2016年度 Aセメスター

2015年度 Aセメスター

2014年度冬学期

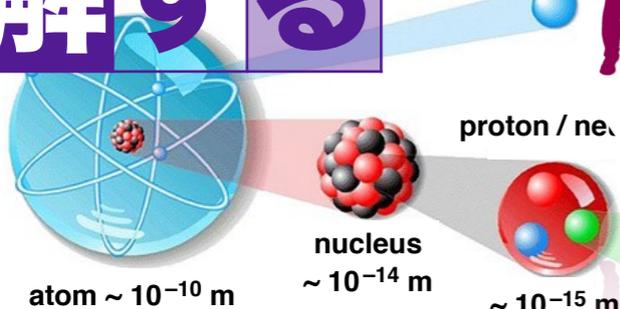
主題科目テーマ講義

2011年度冬学期

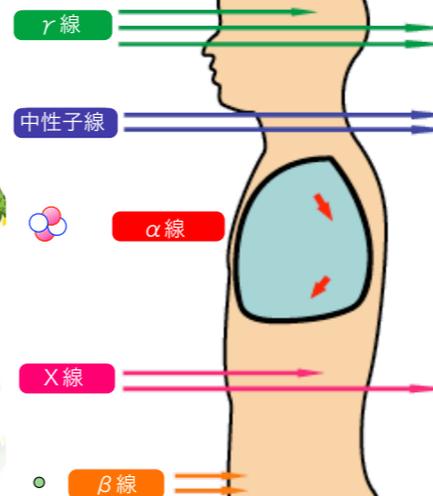
2012年度冬学期

2013年度冬学期

放射線を科学的に理解する



放射線を科学的に理解する



放射線を科学的に理解する



放射線

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是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>

講義スライド、講義予定

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

東大教養 放射線 講義



検索

連絡先

torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

担当教員：鳥居 寛之

放射線を科学的に理解する

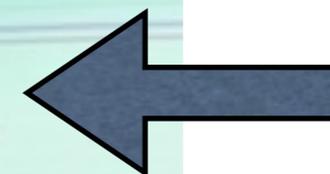
- 放射線の影響についての様々な意見が乱立している
- 放射線に関する学問は多岐にわたり、一人の専門家でまかないきれない。
 - 原子力工学、原子核物理学
 - 放射線物理学、放射線計測学、放射線化学、放射化学
 - 放射線生物学、放射線医学
 - 環境学、気象学、海洋科学、植物学・土壌学（農学）
 - 食品衛生学
 - 放射線防護学（安全管理学）
 - リスク学、リスクコミュニケーション
 - 社会学（社会科学技術論、社会心理学）、法律

参加したセミナーリスト

2011～12年度分

- 理化学研究所原子物理セミナー「低線量放射線の生体への影響」2011年6月6日
- 日本物理学会主催「物理学者から見た原子力利用とエネルギー問題」，立教大学，2011年6月10日.
- 日本学術会議緊急講演会「放射線を正しく恐れる」2011年7月1日
- 東大病院講演「チェルノブイリから福島を学ぶ」2011年10月28日
- 日本アイソトープ協会勉強会「ICRPを読み解く—第2回—」，學士會館，2012年2月13日
- 東京大学大学院 理工農医 4 研究科合同公開講座「放射線を知る」，2012年2月19日
- 東京大学，博報堂，時事通信社，特別協力：環境省，「災害廃棄物処理を考えるプロジェクト」2012年3月
- 文部科学省「東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果」に関するシンポジウム，2012年3月13日
- 日本物理学会第67回年次大会シンポジウム，領域1「放射線が生体に与える影響—原子分子から生物まで—」，関西学院大学，2012年3月24日
- 日本物理学会第67回年次大会シンポジウム，物理と社会「福島原発事故から1年：これまでとこれから」・「科学者の役割とは何か：不確実性の中での科学と社会」・「福島原発事故と物理学者の社会的責任」，関西学院大学，2012年3月.
- 東京大学教養学部 学術俯瞰講義「リスクと社会」，2012年4月～7月
- 京都大学 基研主導研究会2012「原子力・生物学と物理」2012年8月8日～10日，プレ・コンファレンス 8月7日
- アルスタウンミーティング「福島原発事故の反省と「科学と社会」の在り方について」
(共催：東北大学GCOE「物質階層を紡ぐ科学フロンティアの新展開」)，東北大学，2012年8月24日
- 日本学術会議主催学術フォーラム「リスクを科学するフォーラム」2012年8月31日
- 日本学術会議主催学術フォーラム「原発事故調査で明らかになったこと—学術の役割と課題—」2012年9月1日
- 東京大学医科学研究所「現場からの医療改革推進協議会 第7回シンポジウム」2012年11月10・11日
- 日本学術会議主催学術フォーラム「東日本大震災がもたらした食料問題を考える」2012年11月21日
- 日本物理学会第68回年次大会シンポジウム，物理と社会「医学における物理学の貢献」，広島大学，2013年3月28日

質疑応答 2 時間



双方向通信

高校生のための
金曜特別講座

2011/11/11 & 18

主催：東京大学教養学部附属 教養教育高度化機構

全国約20の高校に同時双方向配信

延べ 1000人以上が受講

東大オープンコースウェア (OCW)
にて動画配信を準備中



講義 1 時間



飯舘村



対話型講演会 @ 福島県

伊達市・南相馬市・郡山市

チーム
「あいんしゅたいん」

2014/8/5-7

企画：NPO 法人あいんしゅたいん

双葉町



郡山市



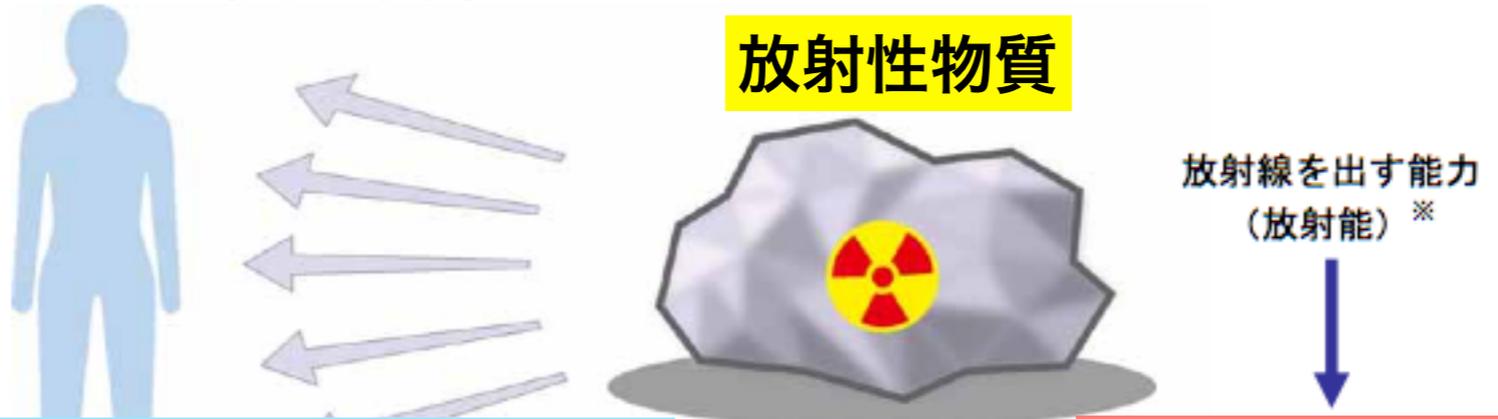
南相馬市



伊達市

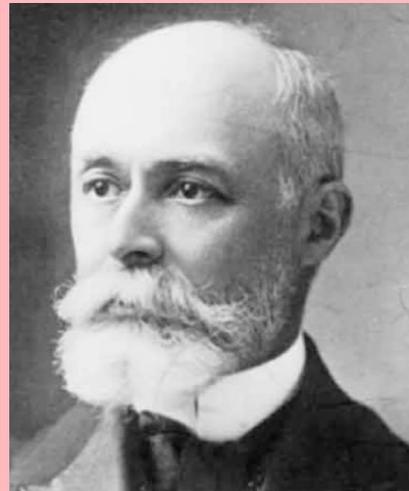
放射線物理学

放射能と放射線



放射線の強さ・影響を表す単位
シーベルト [Sv]

放射能の強さを表す単位
ベクレル [Bq]



放射能 (radioactivity) の単位

[Bq] | Bq = 1 dps, [Ci] | Ci = 37 GBq

Becquerel

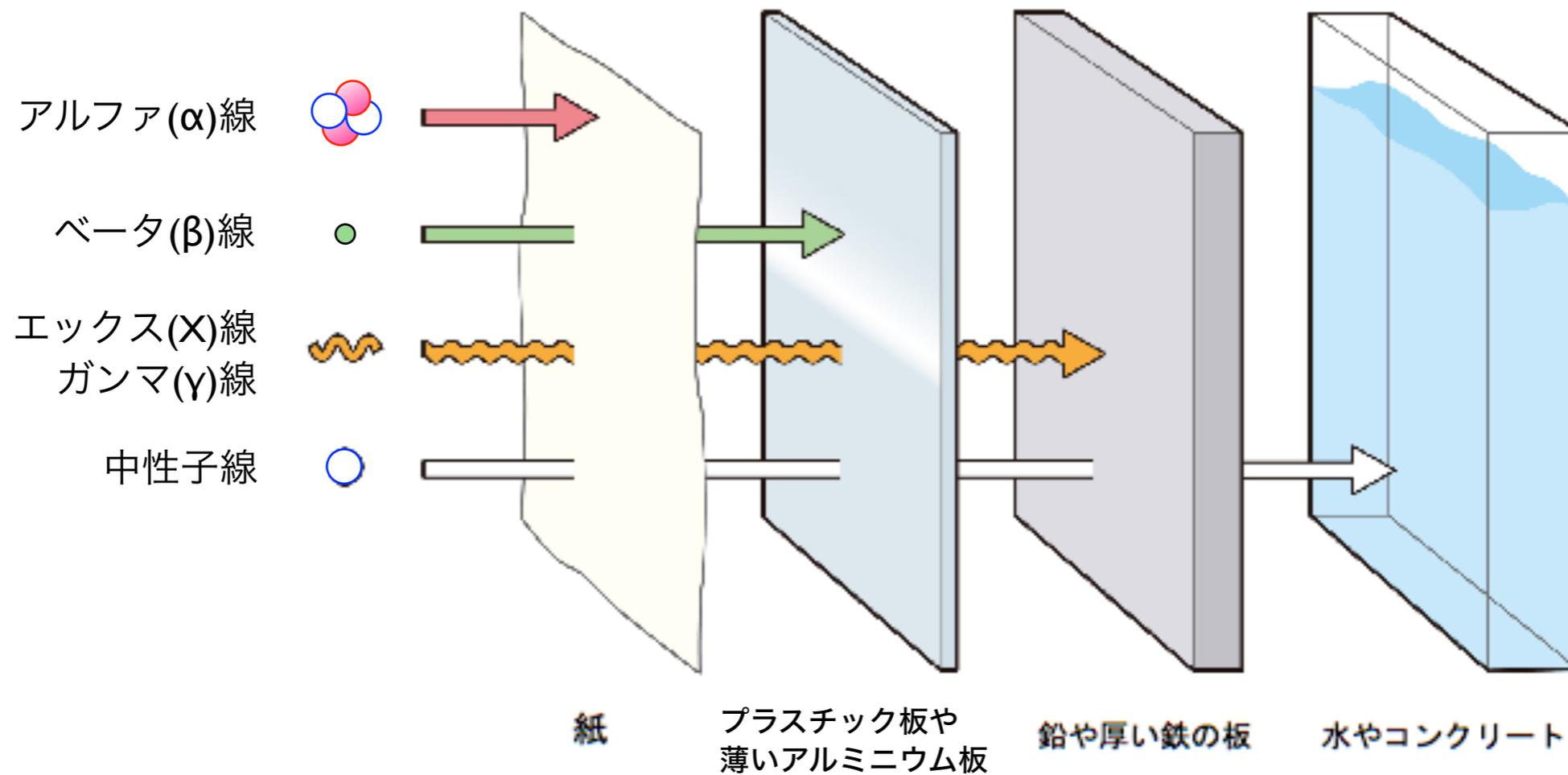
decay/disintegration per second

Curie

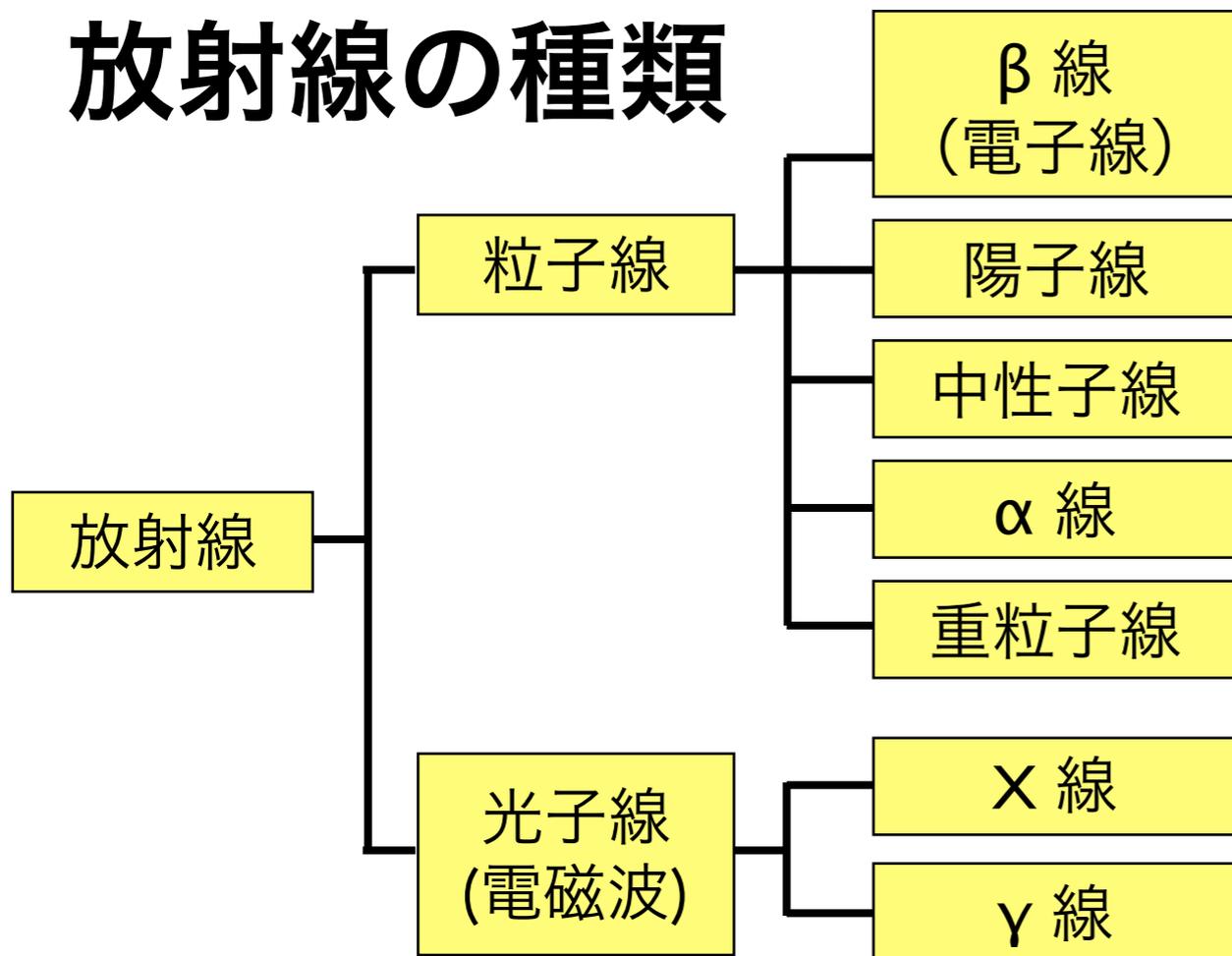
1 キュリー = 370億ベクレル



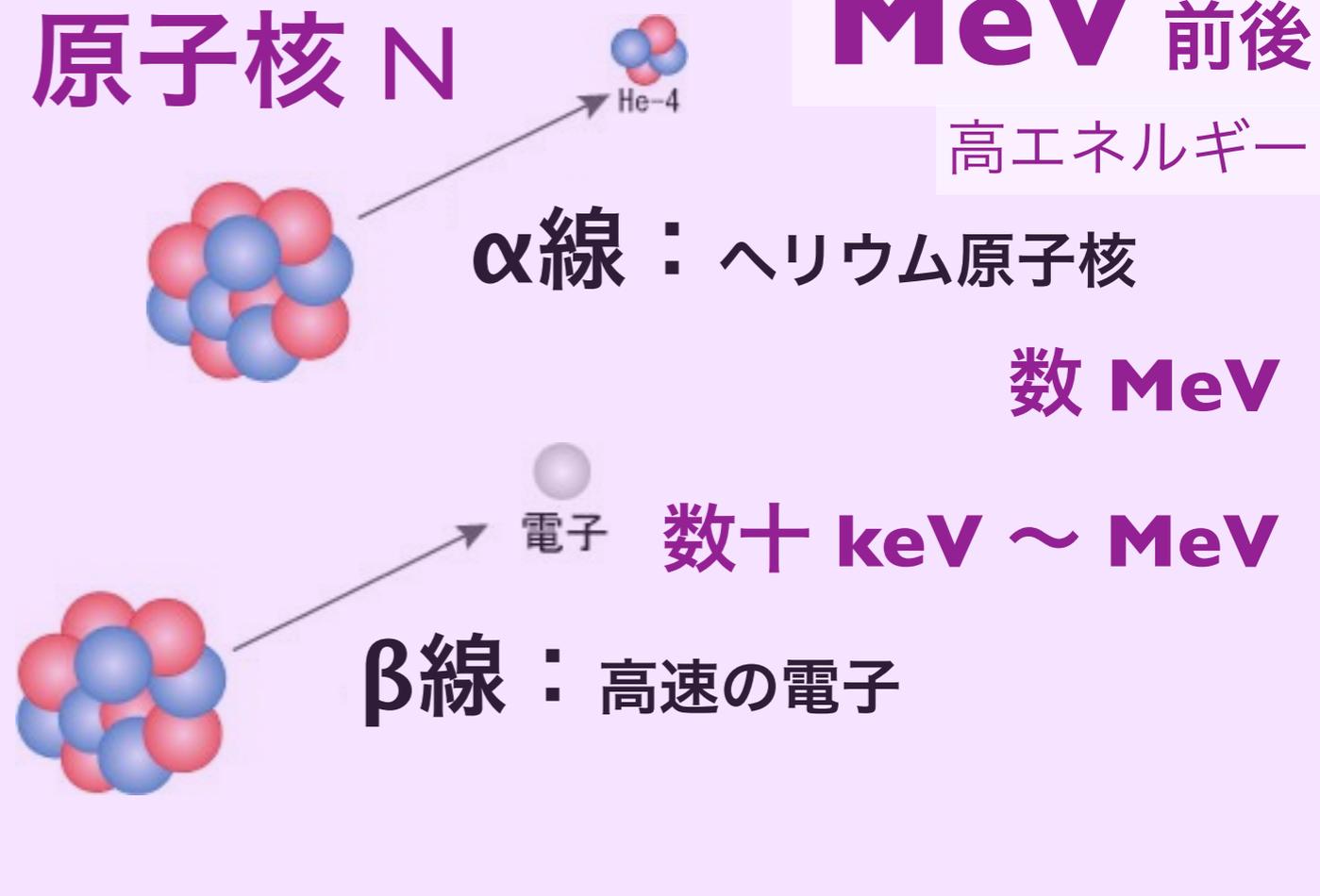
放射線の種類と透過力



放射線の種類



原子核 N



放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

☞ 最外殻電子で 10 eV 程度
(1 eV = 96 kJ/mol)

10 eV 程度



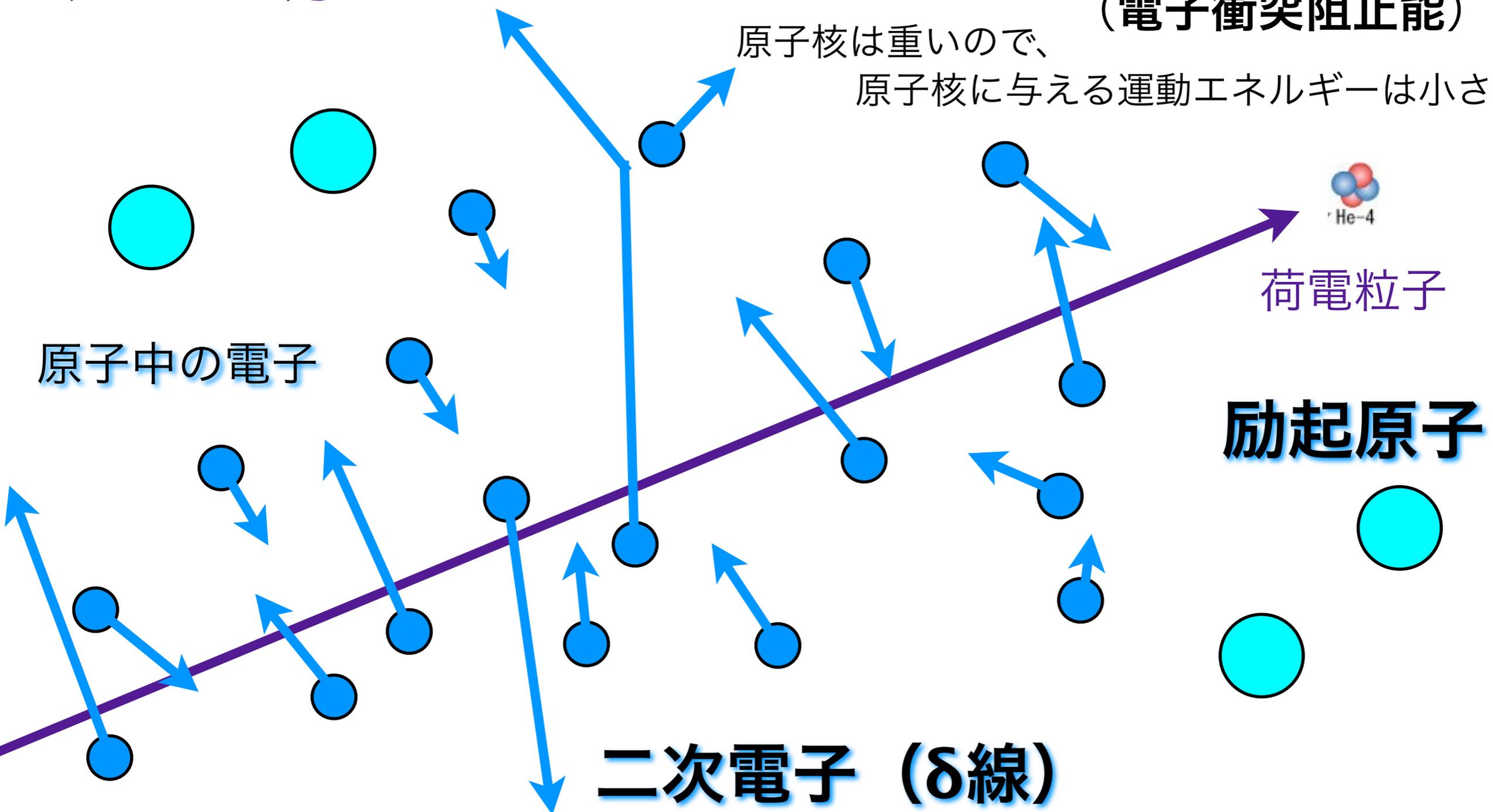
荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：
クーロン力

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される。

(電子衝突阻止能)

原子核は重いので、
原子核に与える運動エネルギーは小さい。



荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

励起原子

電子

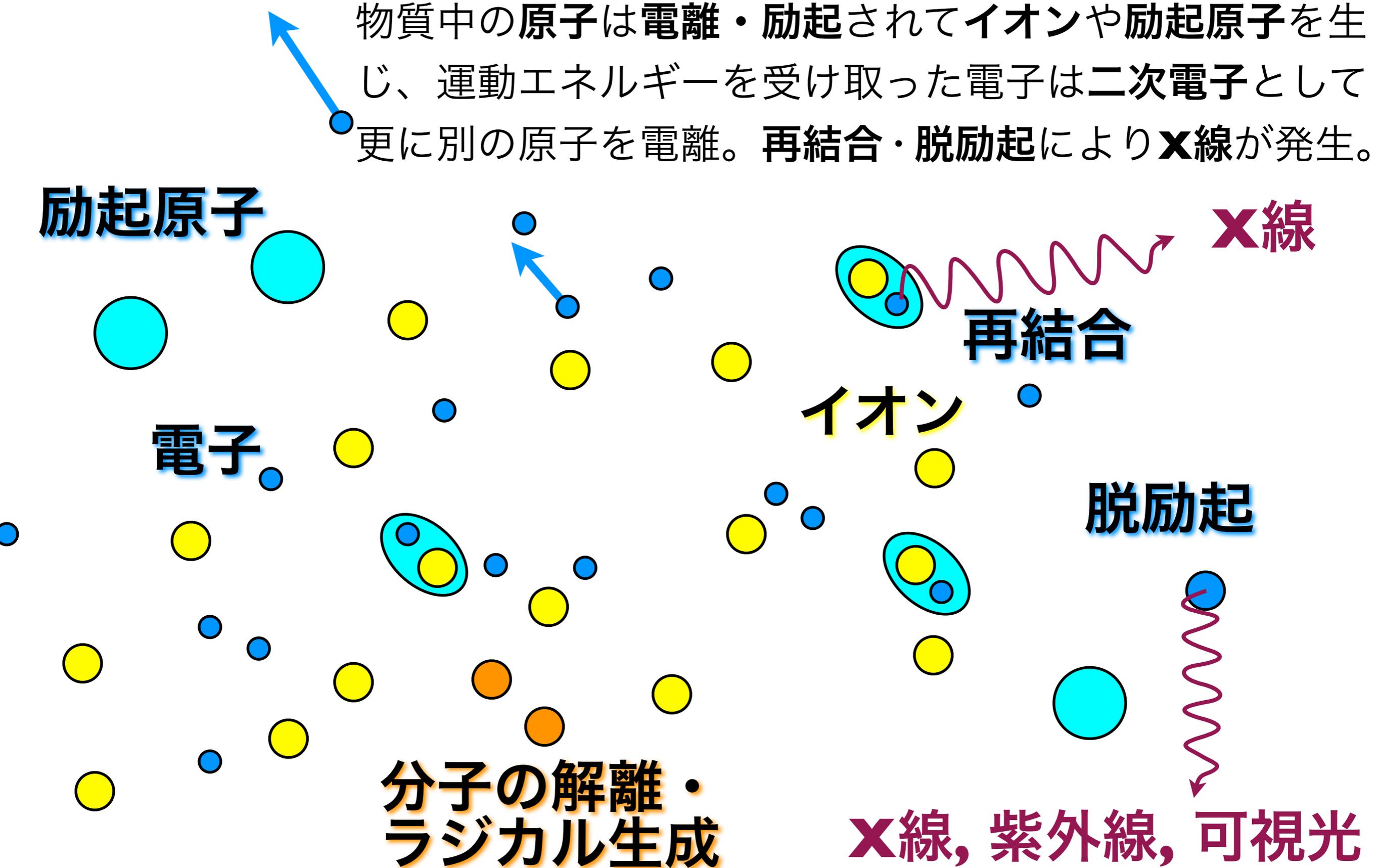
イオン

再結合

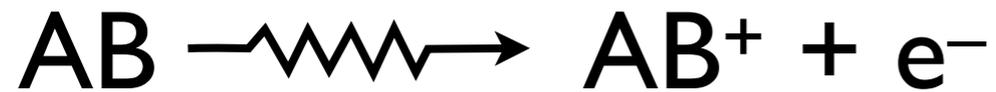
脱励起

分子の解離・ラジカル生成

X線, 紫外線, 可視光



放射線が誘起する素反応 (一部抜粋)



電離 (イオン化)



励起



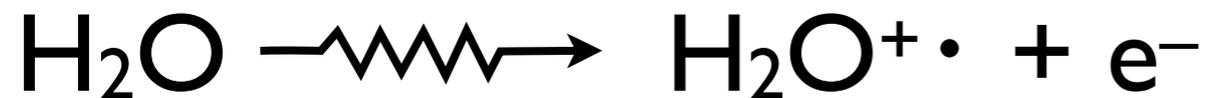
再結合



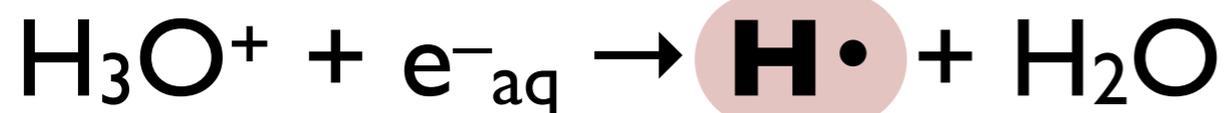
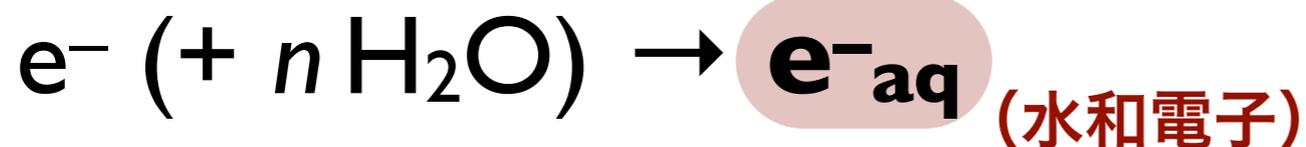
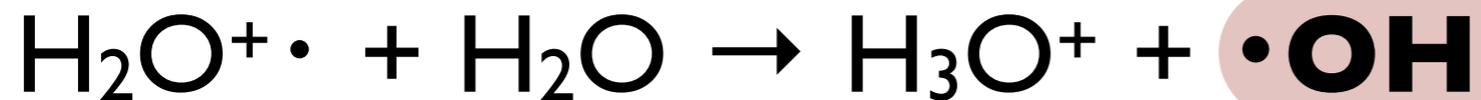
ラジカル生成

水中での反応

放射線化学



(ヒドロキシル
ラジカル)



(水素ラジカル)

分子の解離・
ラジカル生成

荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

原子の電離（イオン化）・励起

励起原子の脱励起

X線、紫外線・可視光

イオン・電子の再結合

化学結合の切断、組み替え

ラジカル、活性分子の生成

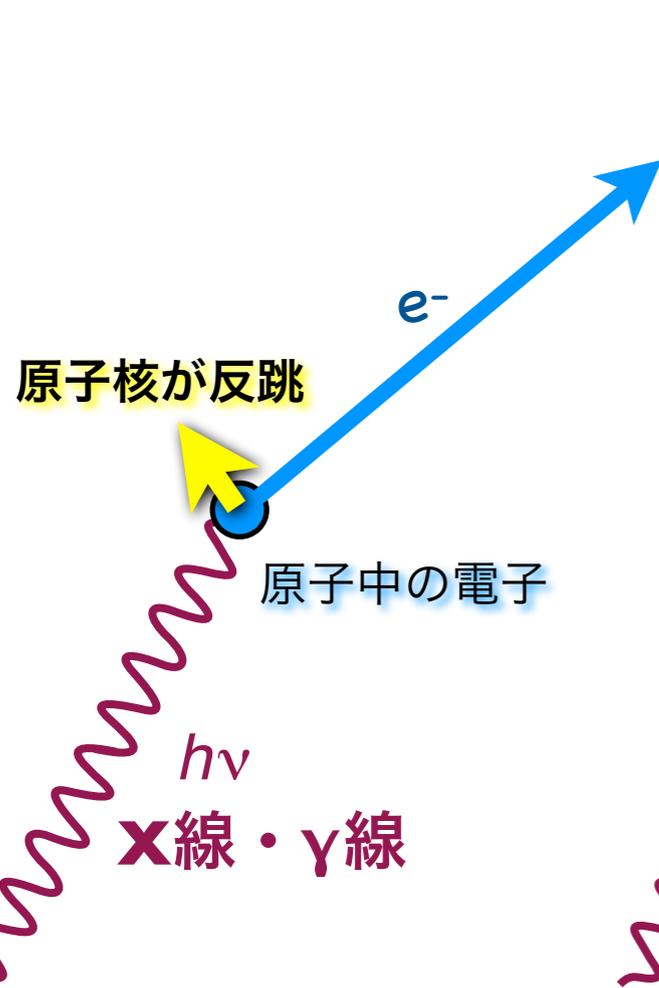
DNA の損傷

シンチレーション光

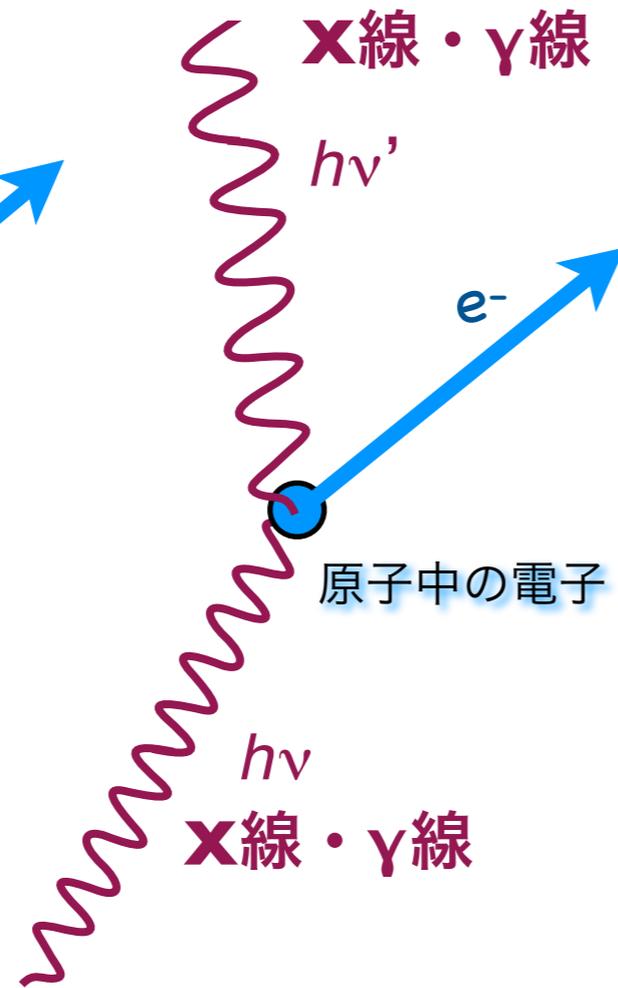
(放射線による原子・分子の蛍光)

光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

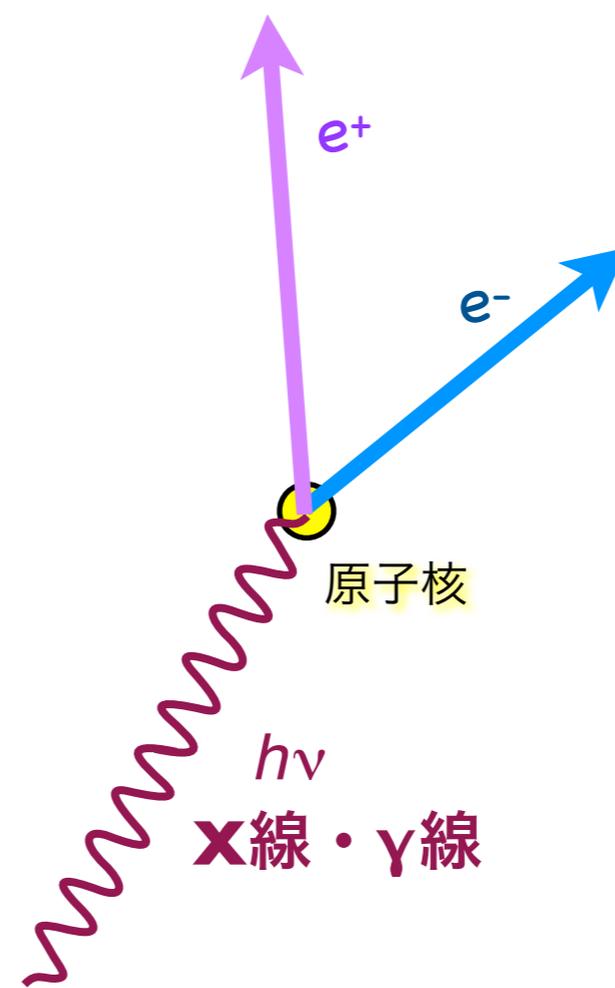
光電効果



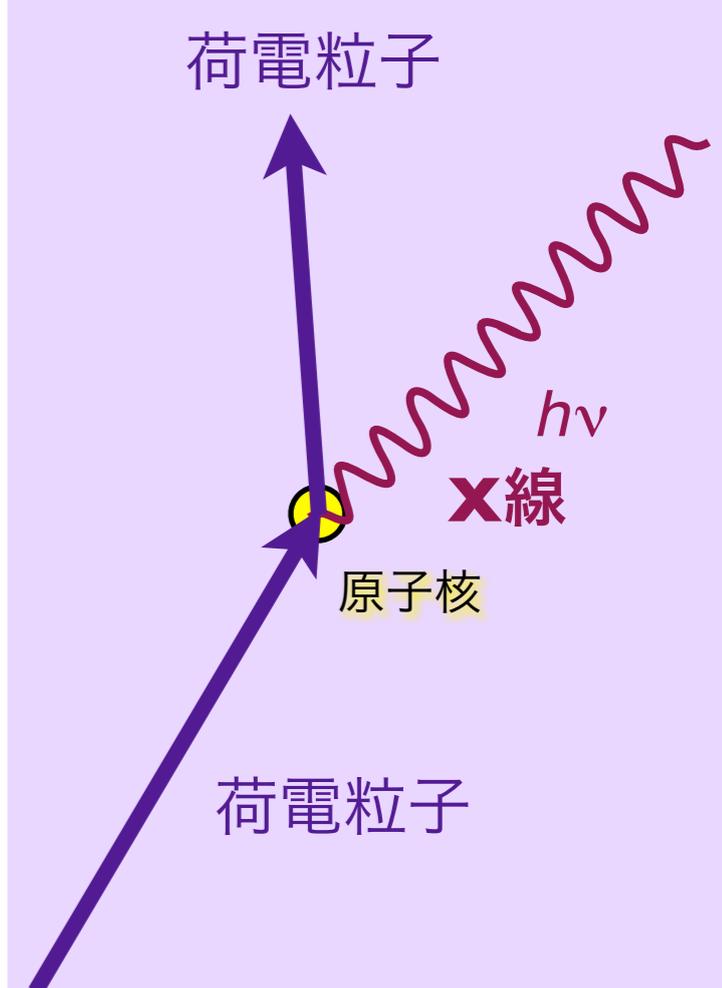
コンプトン散乱



電子対生成



制動放射 (Bremsstrahlung)



放射線の種類と被ばく

- α 線は空気中の飛程が数 cm。
生体では**表層**の細胞で止まる。
内部被ばくが問題。全てのエネルギーが短い飛程の間に細胞に与えられる。
- β 線は外部被ばくでは**皮膚**への影響を考える。**内部被ばくも問題**。
- 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。**外部被ばくでも体内も被ばくする**。
- **X線**は高エネルギーの場合は γ 線と同様。数十 keV 程度以下の場合は**皮膚**への影響が問題。

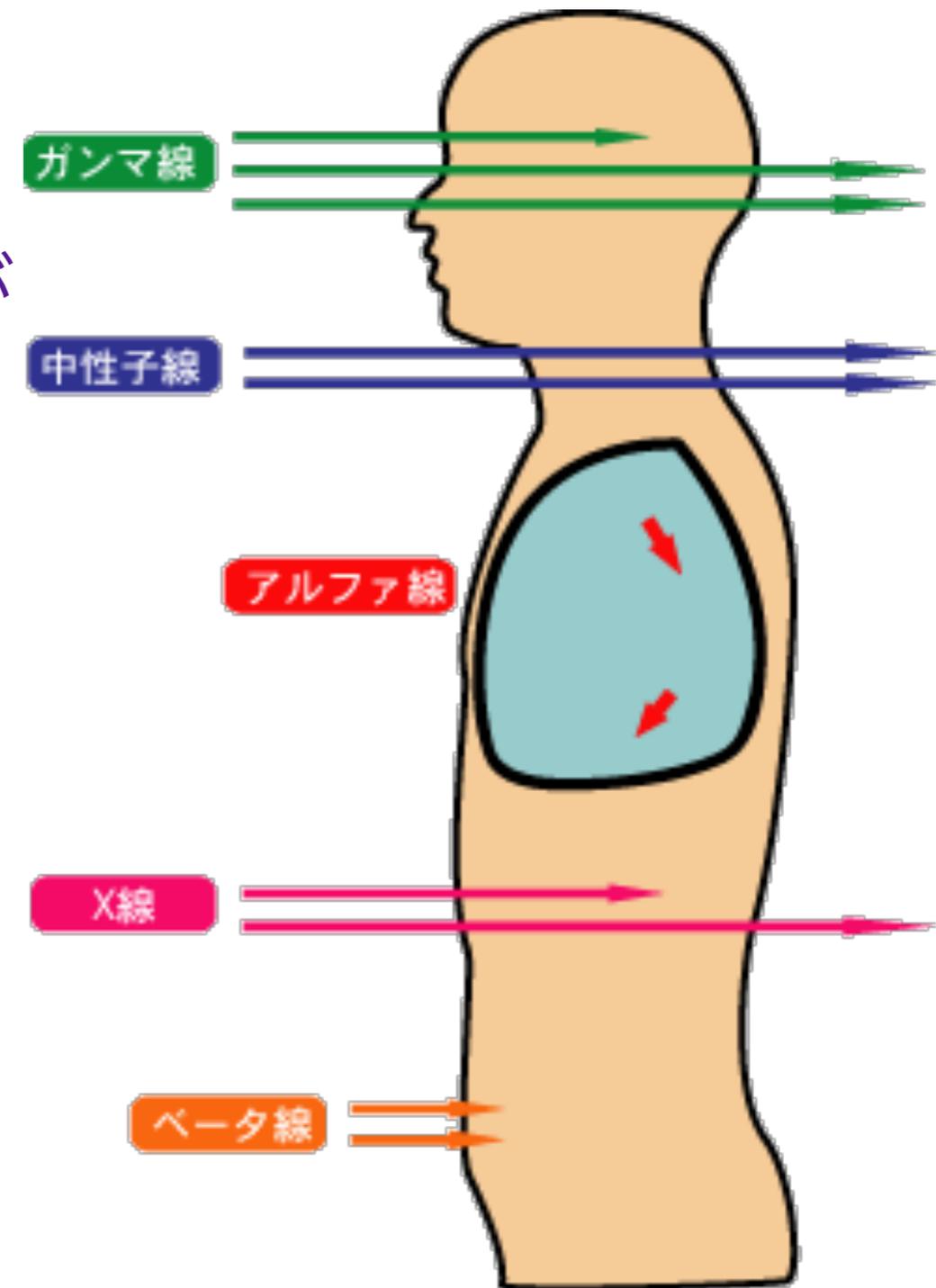


図3 人体を透過する放射線

放射線の単位

放射線量の単位

放射場には

多様なエネルギーの

多種放射線（光子、粒子線）が

様々な方向を向いて飛び交い、

それぞれの強度で存在している。

これをひとつの物理量で表すのは

一筋縄ではいかない。

様々な放射線量の単位が存在する。

放射線量の単位



Röntgen



Gray

放射計測量 **radiometric quantity**

粒子フルエンス fluence Φ [cm^{-2}]

エネルギーフルエンス energy fluence Ψ [MeV cm^{-2}]

線量計測量 **dosimetric quantity** : エネルギー変換

カーマ **kerma** (Kinetic Energy Released in MAterial / MAtter) 非荷電粒子線 K [J / kg] = [**Gy**]

シーマ **cema** (Charged particle Energy imparted to MAtter) 荷電粒子線 C [J / kg] = [**Gy**]

照射線量 空気のみ 光子 (X線・ γ 線) X [C/kg], [R] | $\text{R} \approx 2.58 \times 10^{-4} \text{ C}/\text{kg}$ ^{röntgen}

線量計測量 **dosimetric quantity** : エネルギー付与

吸収線量 D [J / kg] = [**Gy**], [erg / g] = [ram] | $\text{Gy} = 100 \text{ ram}$
_{gray}

● 物質が吸収したエネルギー（単位質量あたり）

吸収線量 D [J / kg] = [Gy] グレイ

放射線量の単位

radiation dose

Gray

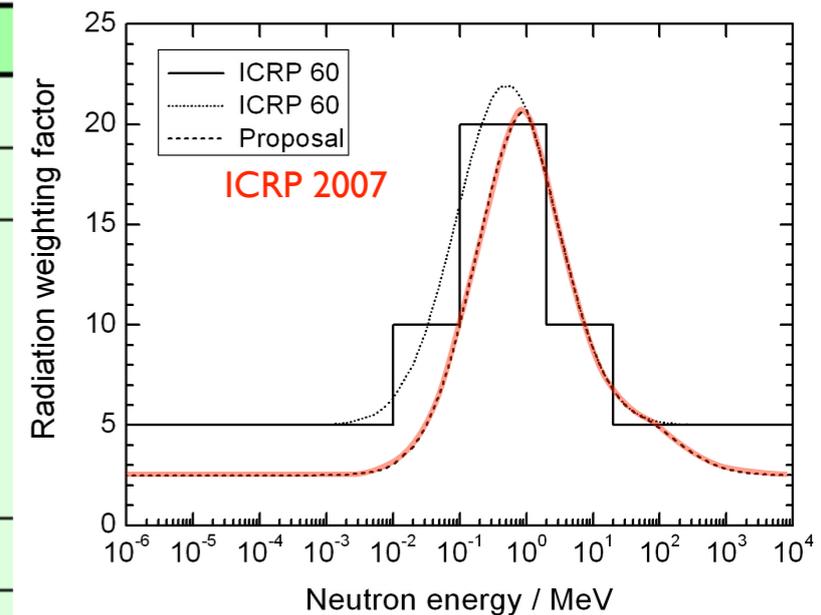


● 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

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

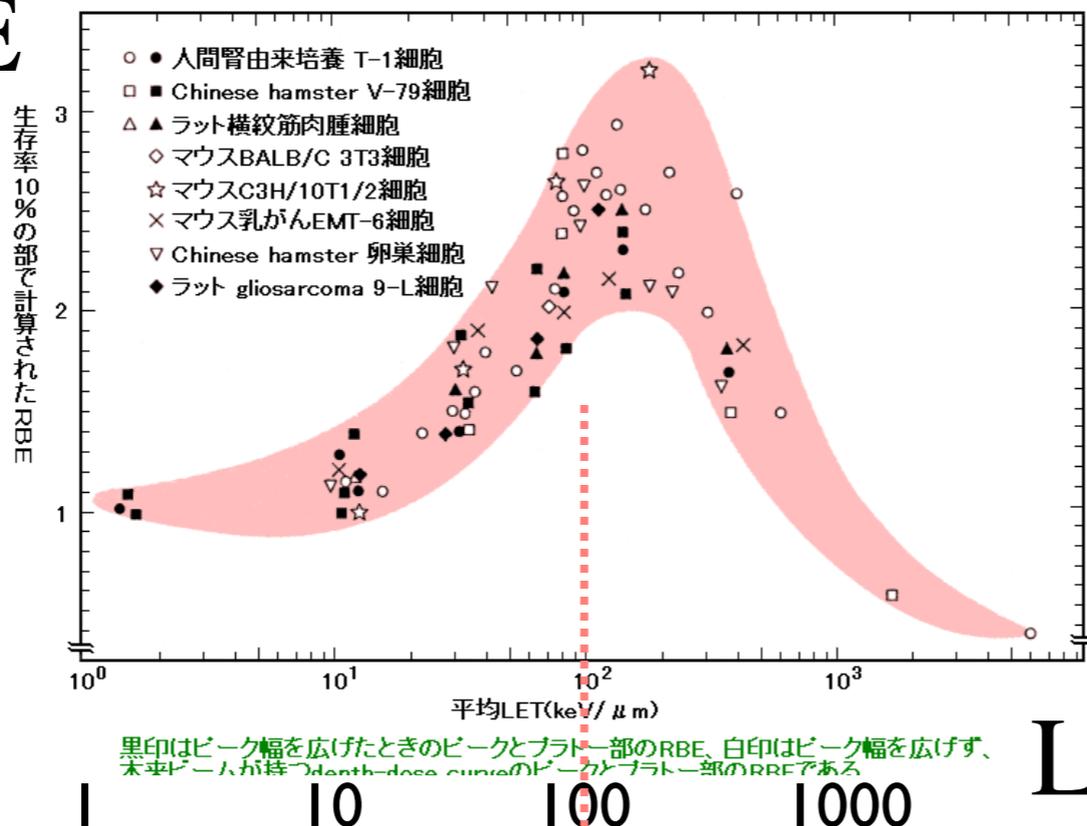
● 全身被曝での影響に換算（臓器ごとに組織加重係数 w_T をかけて合算）

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

Sievert



RBE



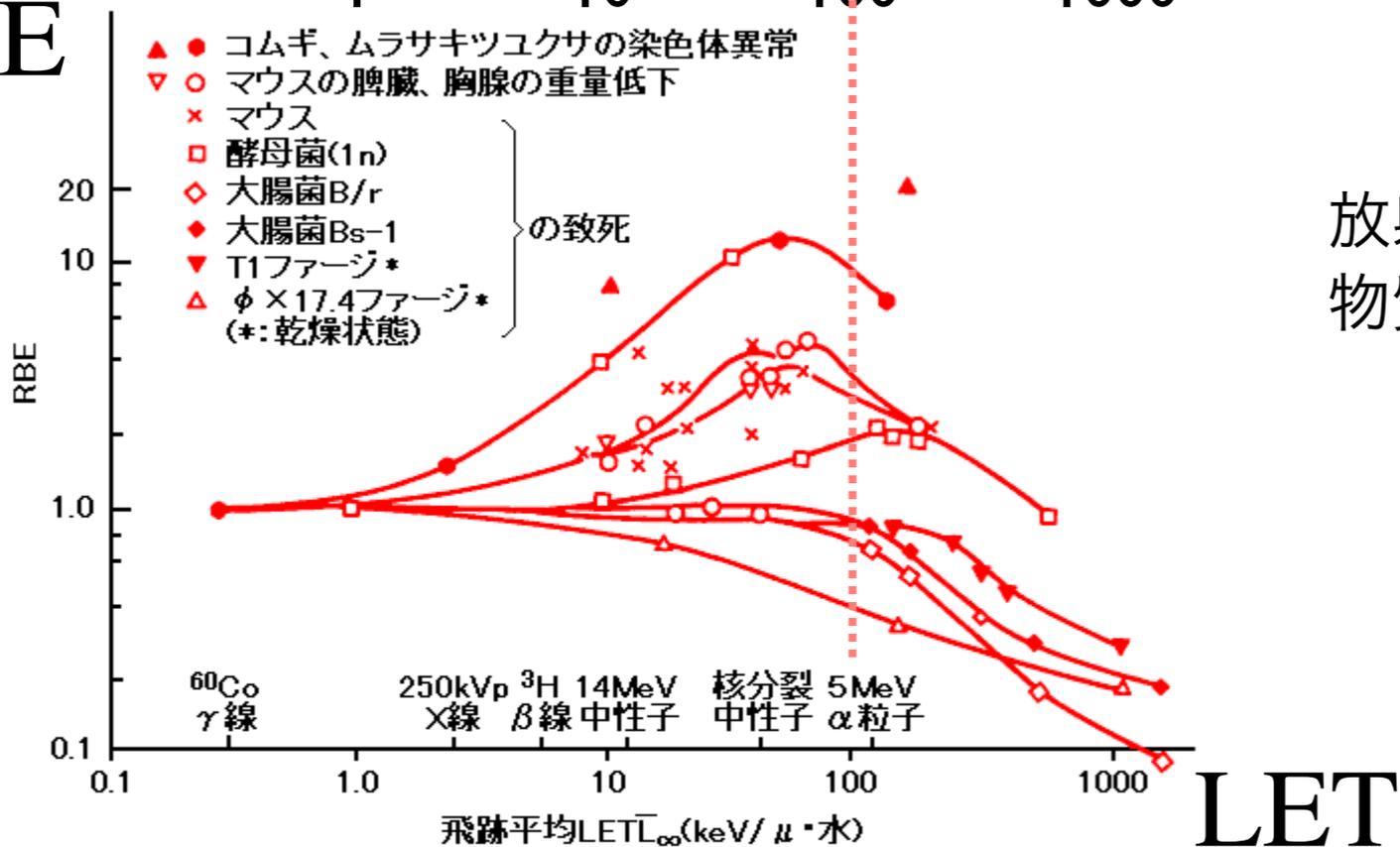
生物学的効果比 RBE

(Relative Biological Effectiveness)

LET (線エネルギー付与)
keV/μm

放射線の軌跡上の単位長さ当たり
物質に与えられるエネルギー

RBE



様々な生物反応(マウスの臓器の重量低下や致死、高等植物の染色体異常等)において、
いずれも約80keV/μm付近のLET値をもつ放射線が最大のRBE値を示す。

図2 体細胞的効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係

[出典]近藤 宗平:分子放射線生物学、東京大学出版会(1972年)、p.174

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

放射線生物学

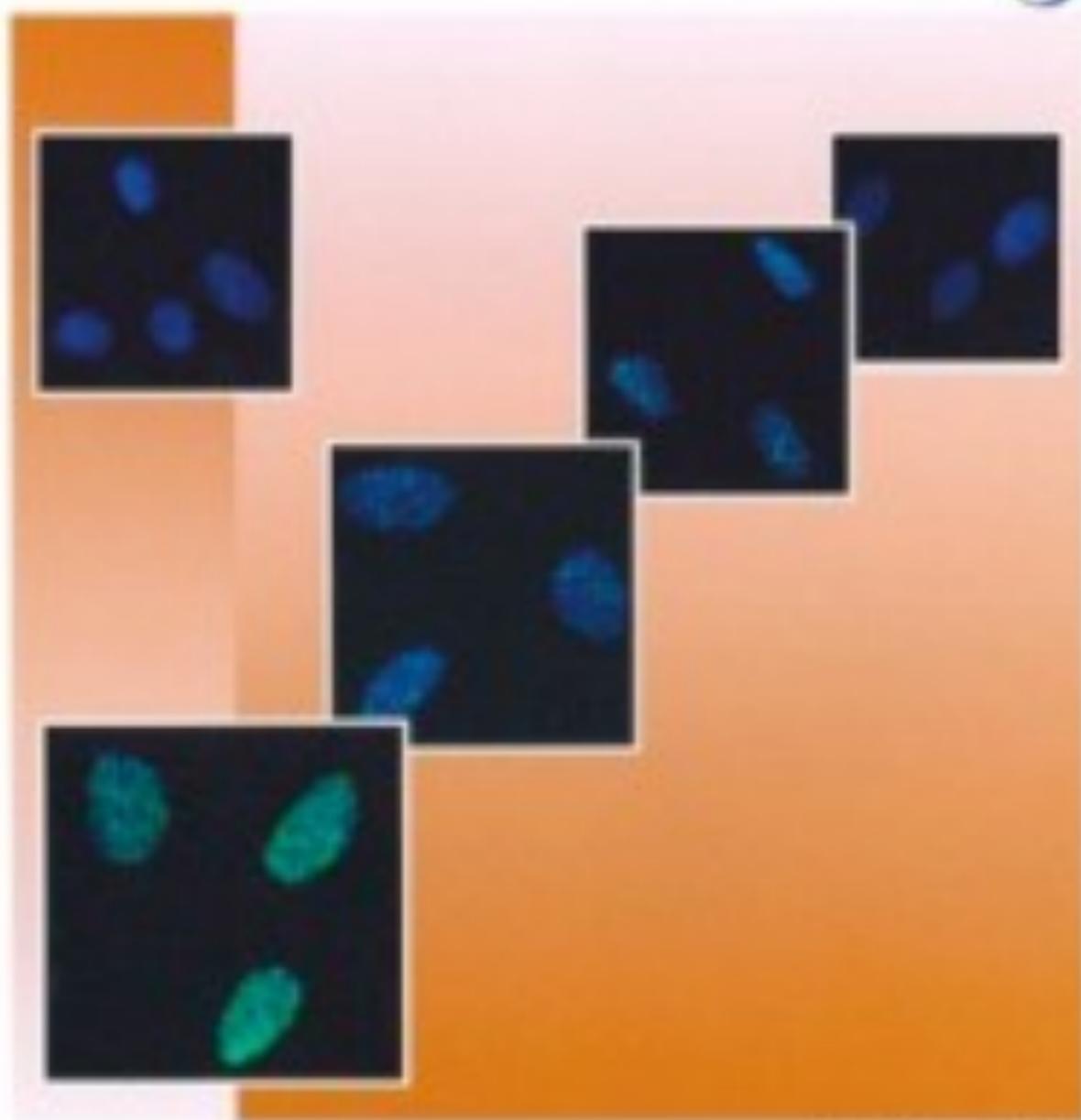
放射線の細胞への影響・人体への影響

日本物理学会誌

- 放射線と人体への影響
- スケーラビリティと実用性

BUTSURI
JOURNAL OF THE PHYSICAL SOCIETY OF JAPAN
2013 VOL. 68 NO. 3

3



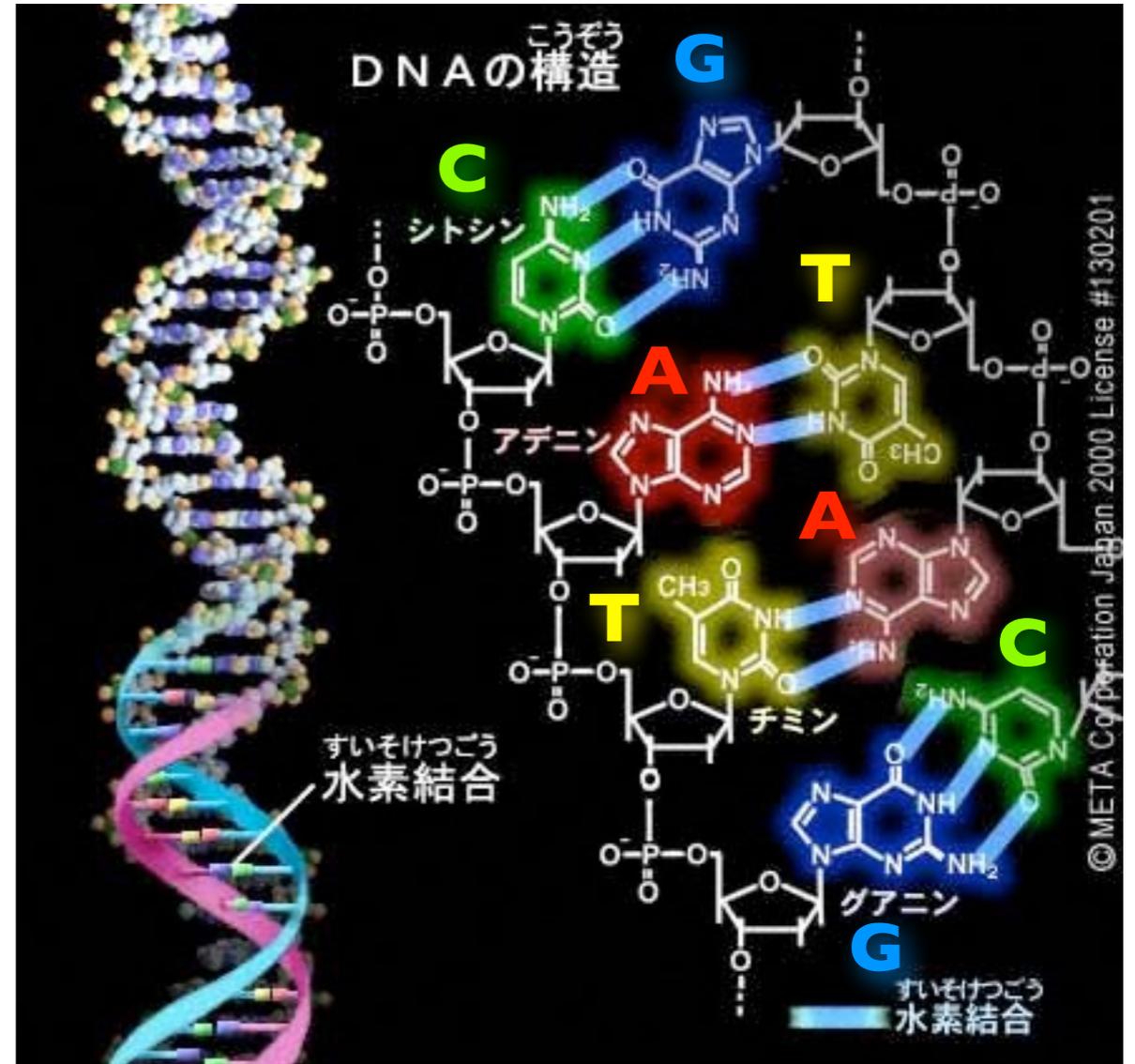
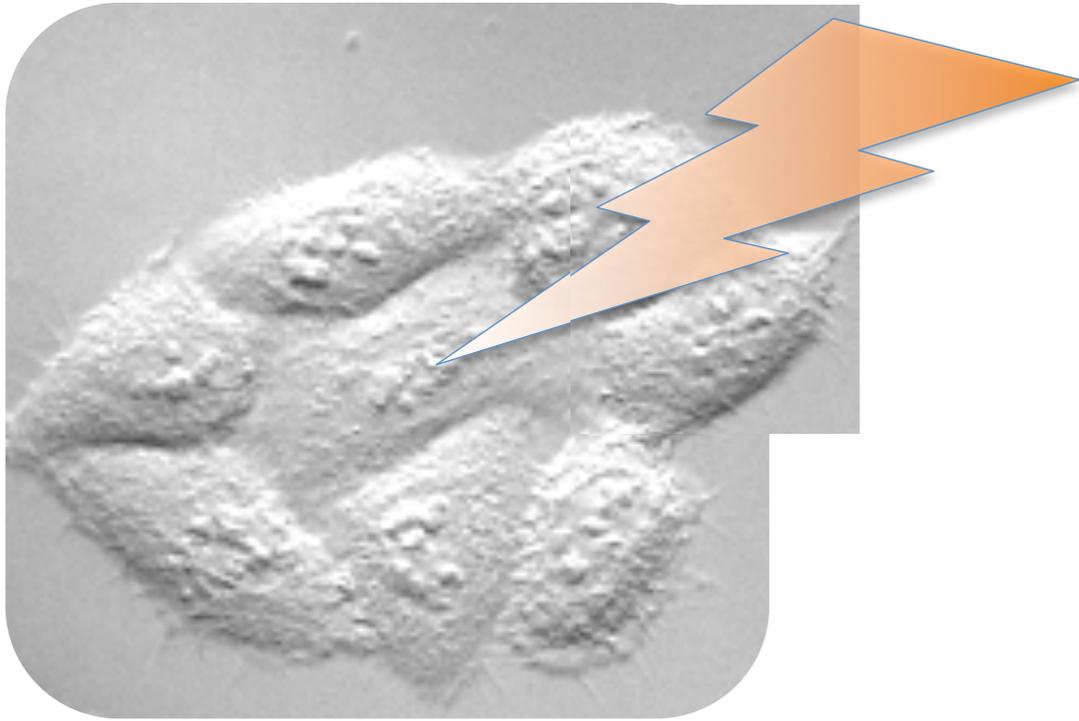
<http://www.jppt.org/>

放射線の人体への影響

泉 雅子

細胞の核に放射線が照射

DNA



出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 <http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>

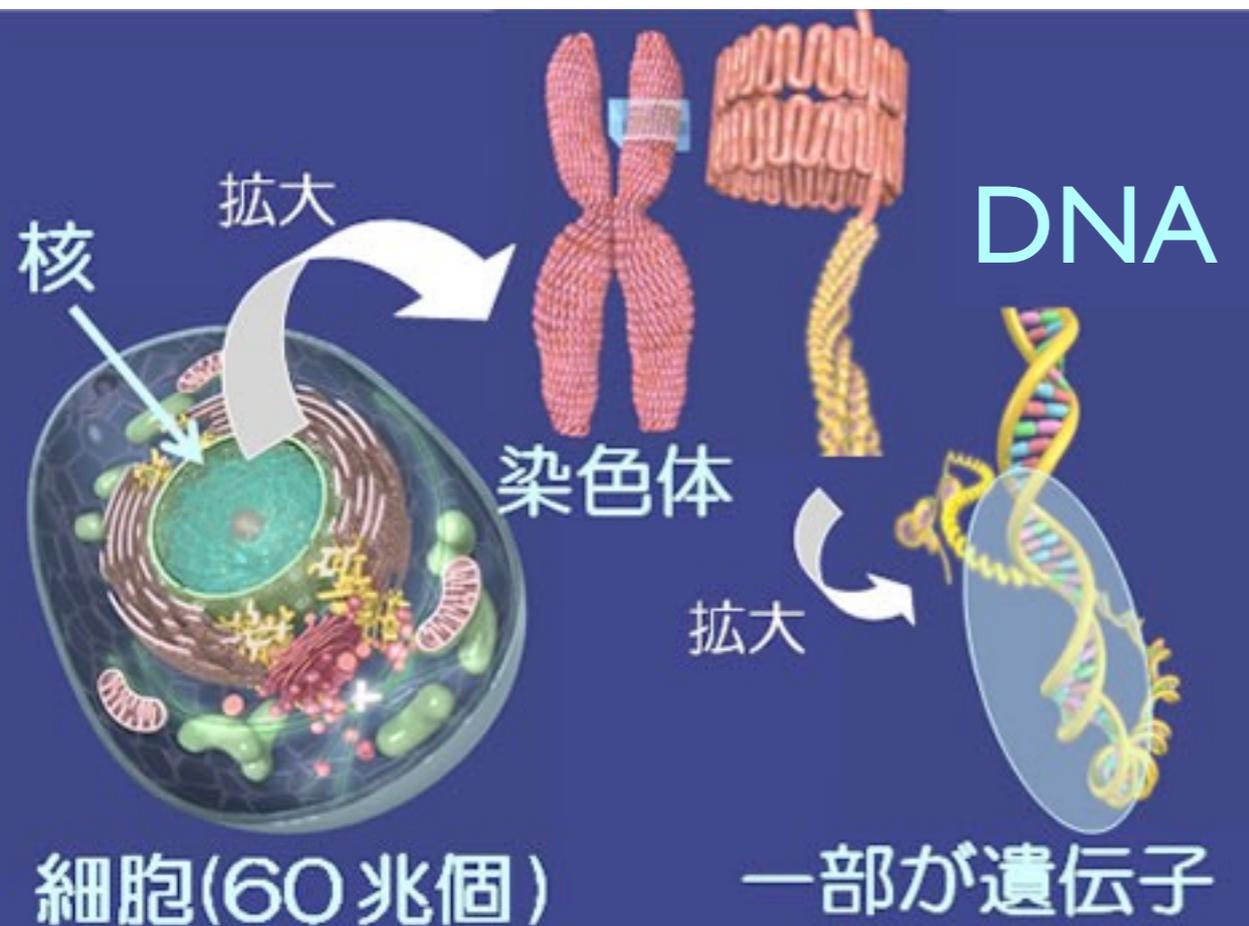
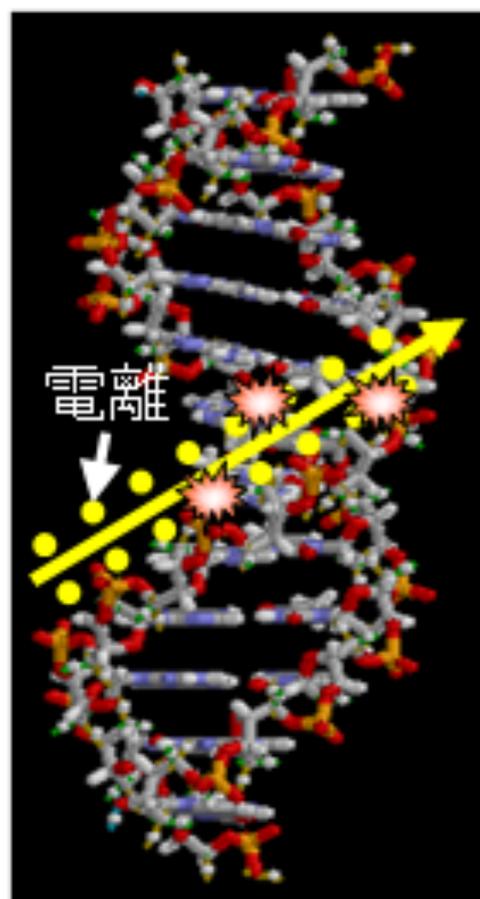


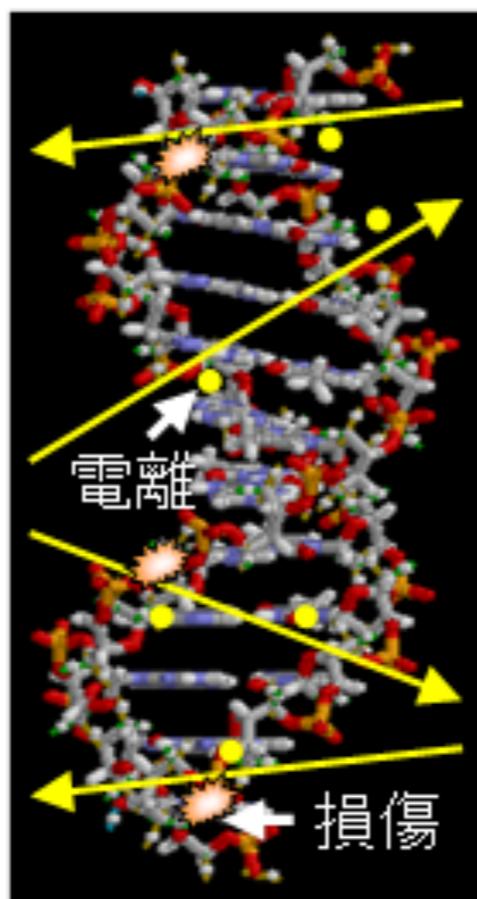
図1 核、染色体、遺伝子

放射線による DNA 損傷

**ラジカル
(活性酸素)**



重イオン



電子

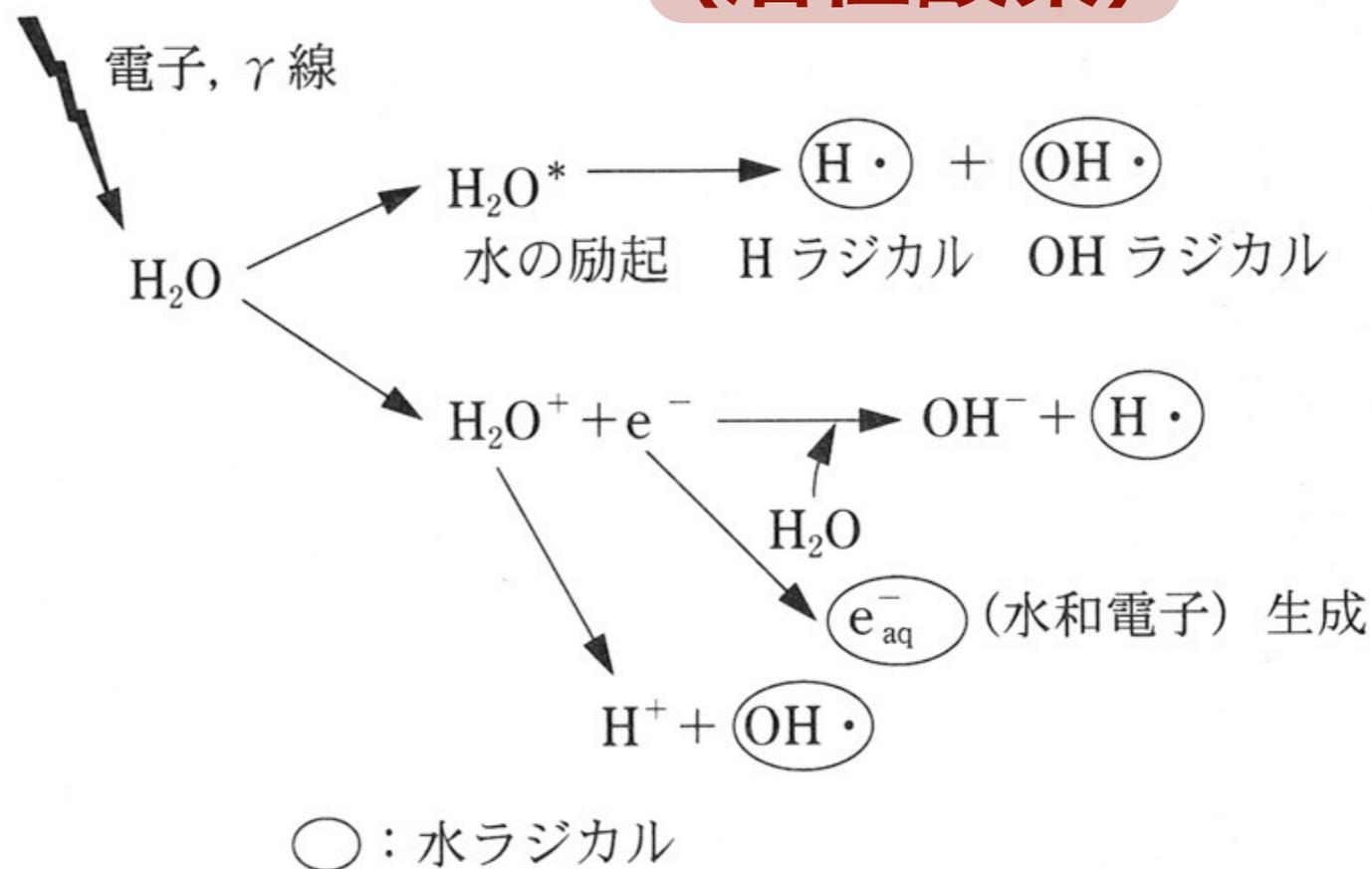


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略
(書籍「図解 放射性同位元素等取扱者必携」オーム社、より引用)

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
 α 線, 重粒子線

と間接作用 : 水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用

低 LET 放射線

β 線, γ 線

放射線が誘起する素反応 (一部抜粋)



電離 (イオン化)



励起

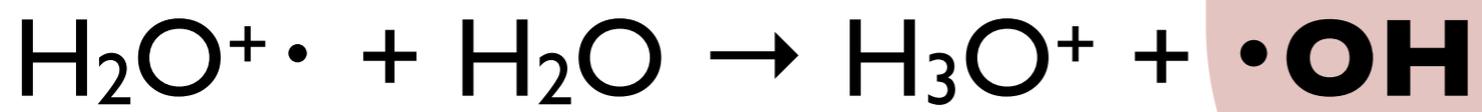


再結合

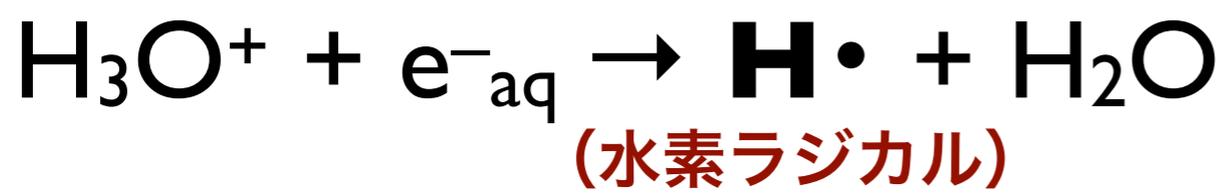
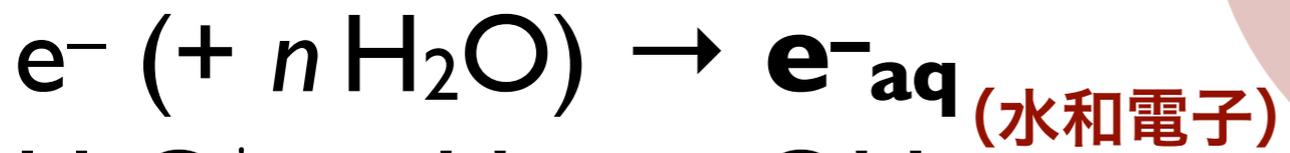


ラジカル生成

水中での反応



(ヒドロキシルラジカル)



酸素効果



(ヒドロペルオキシルラジカル)



(スーパーオキシドアニオン)



(過酸化水素)

(活性酸素)

何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

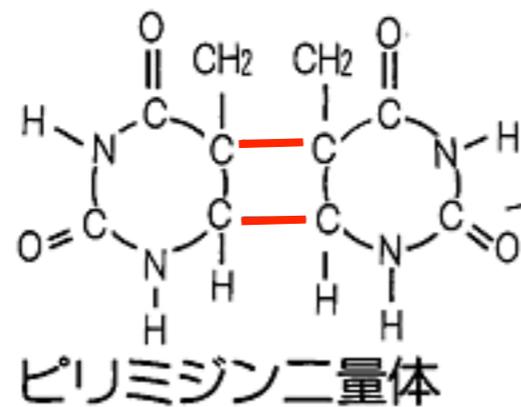
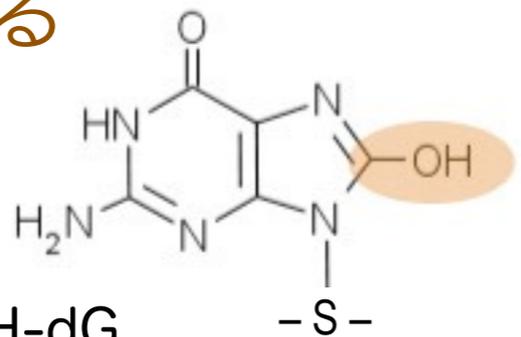
表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較⁷⁾

傷の種類	自然の傷(/細胞/日)	X線誘発の傷(/細胞/1 Sv)
塩基損傷	20,000	300
1本鎖切断	50,000	1,000
2本鎖切断	50(推定 ^{2,19)})	40

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

・OH ラジカルによる酸化

8-OH-dG



ピリミジン二量体

紫外線照射でも頻発

鎖切断

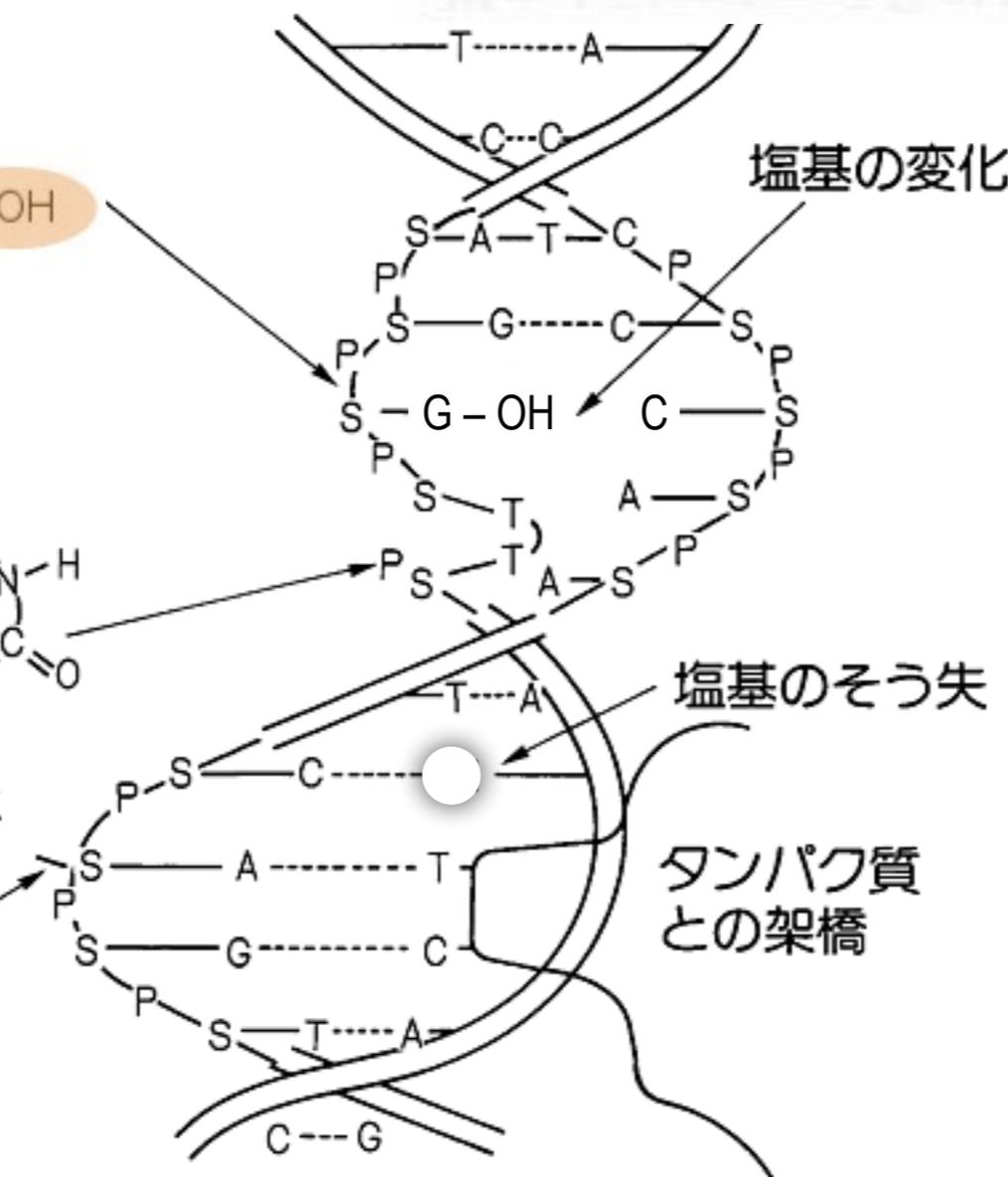
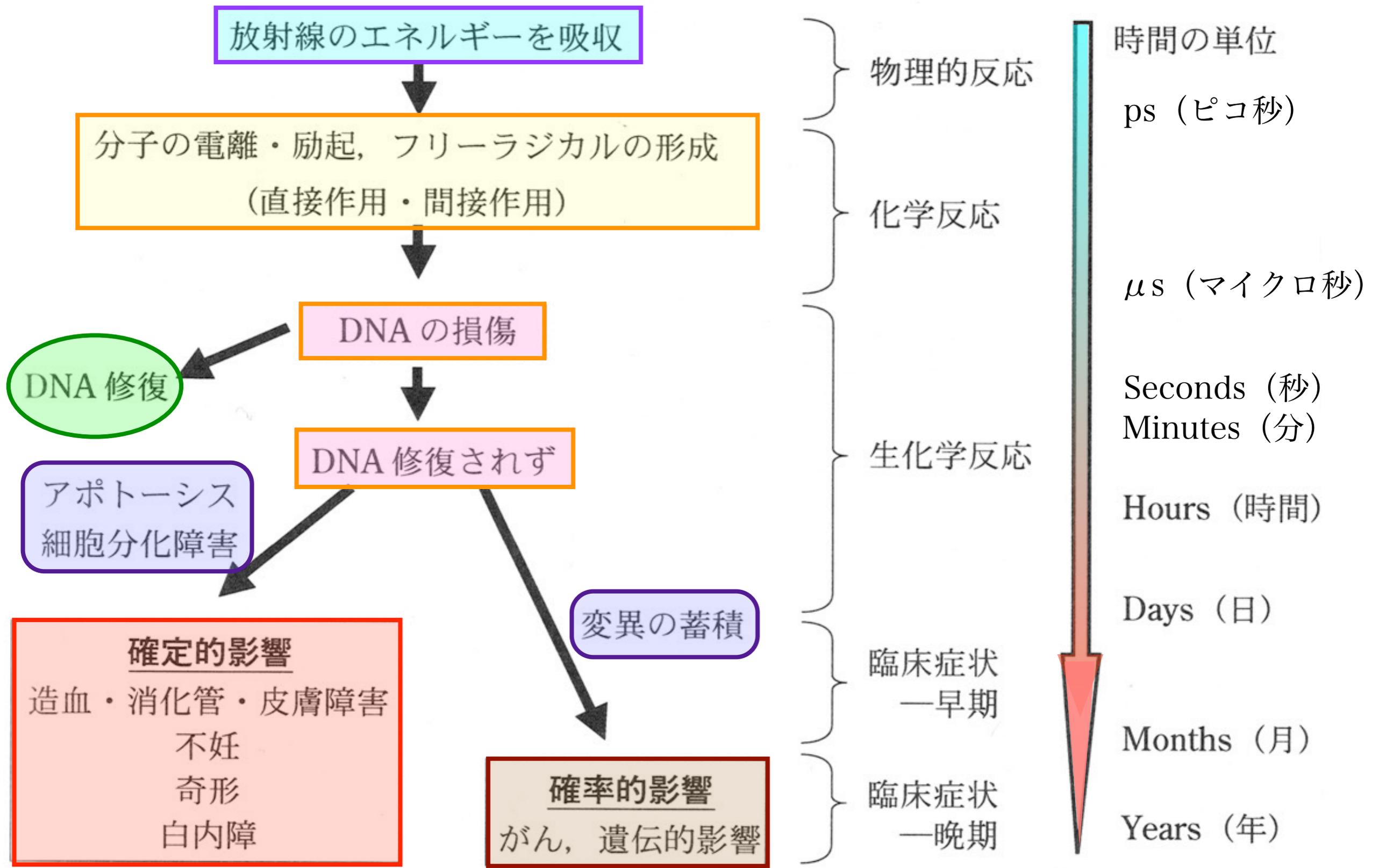


図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

[出典] 江上信雄：生き物と放射線、東京大学出版会、1975

図は一部内容を改変。



放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

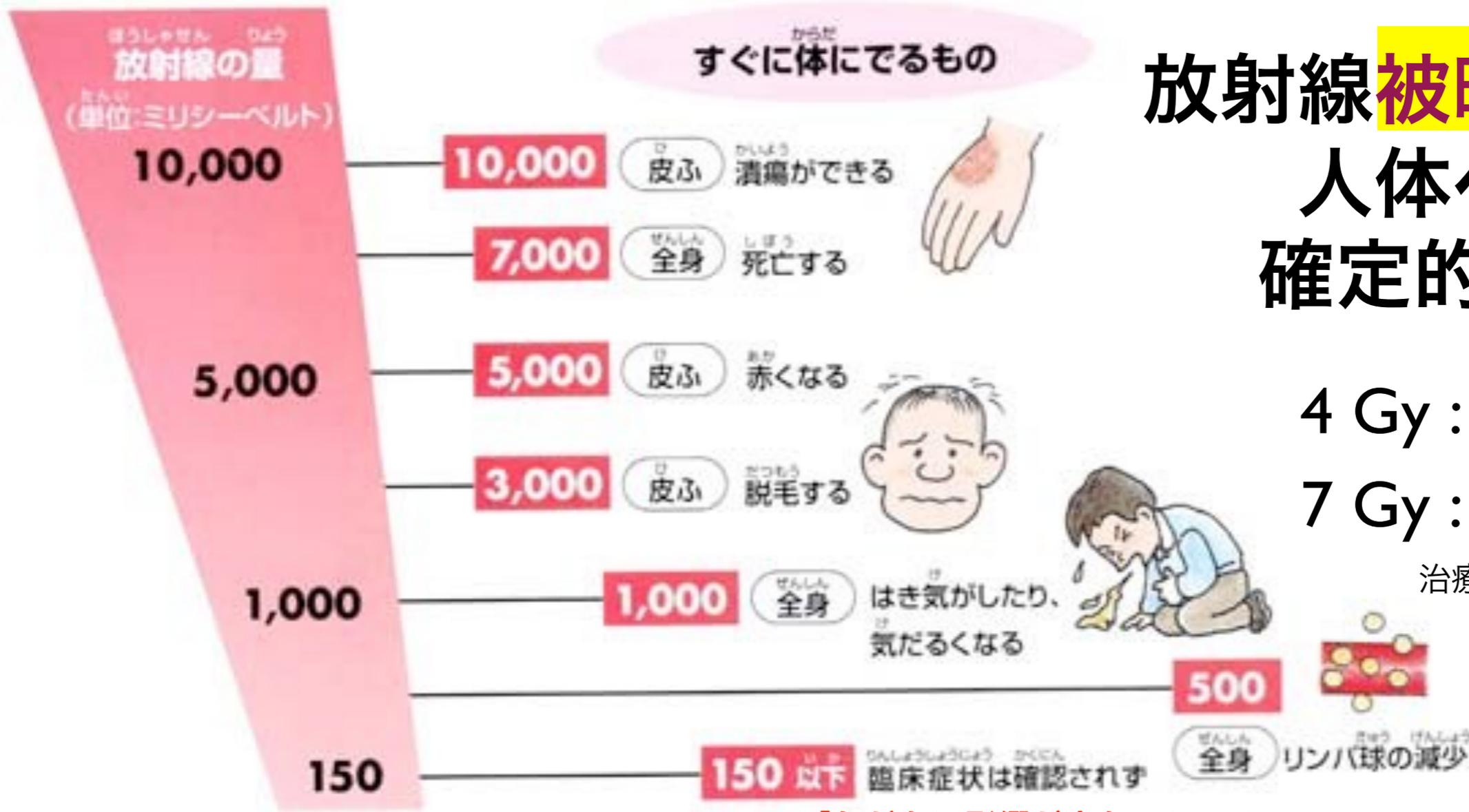
(書籍「図解 放射性同位元素等取扱者必携」オーム社、より引用、彩色)

放射線被曝による 人体への 確定的影響

4 Gy : 半数死亡
7 Gy : 全員死亡

治療により助かることも。

すぐに体にできるもの



「ただちに影響が出ないレベル」

東海村 JCO 事故
チェルノブイリの
消防隊員

細胞再生系	造血組織	腸上皮	皮膚	精巣	水晶体			
幹細胞 幹細胞 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)	幹細胞 リンパ球 好中球 赤血球 球(血小板)	腺窩(幹細胞) 絨毛	基底細胞(幹細胞) 角質層	幹細胞 精子	上皮(幹細胞) 水晶体繊維 赤道部			
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	血液凝固時間延長	食作用低力	酸素輸送低力	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

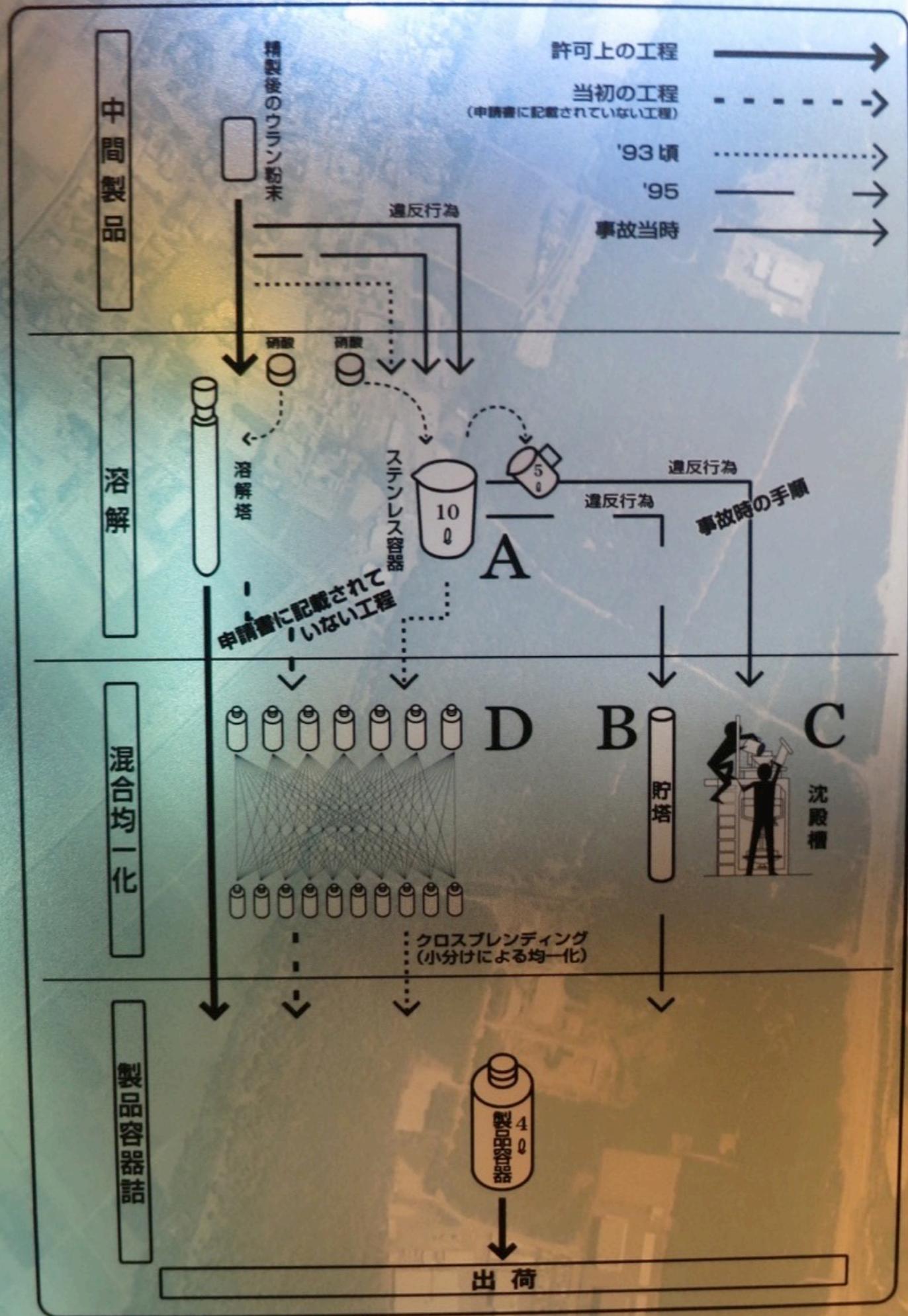
JCO 臨界事故

The JCO Criticality Accident

この事故は、株式会社ジェー・シー・オー (JCO) 東海事業所のウラン転換試験棟で発生した。当時、この建物では高速実験炉「常陽」の燃料原料となる濃縮度18.8%のウランを硝酸に溶かし、均一にする作業が行われていた。

この作業に使用すべきでない沈殿槽と呼ばれる設備に、制限量を大幅に上回るウラン溶液を投入した結果、内部でウランがひとりりで核分裂し始めた。このような事態を「臨界事故」とよぶ。

その結果、核分裂連鎖反応による放射線（中性子線およびガンマ線）が敷地外にまで放出され、このような状態が約20時間にわたって継続した。事故の最初の瞬間には激しい核分裂が起こったため、沈殿槽を使って作業していた2名の方が亡くなるといういたましい結果となった。



J-PARC
情報コーナー

Informational display board featuring various diagrams, charts, and text, likely related to the J-PARC facility. The board includes a large diagram of a particle accelerator or detector system, smaller circular diagrams, and blocks of Japanese text. A yellow horizontal bar is visible at the bottom of the board.

A large industrial machine, possibly a sedimentation tank or a specialized reactor, mounted on a light blue metal frame. The central tank is labeled "沈澱槽B" (Sedimentation Tank B). To the left of the machine is a light blue metal ladder with yellow steps and a yellow handrail. The machine is connected to a network of stainless steel pipes and valves. A control panel with a red emergency stop button is visible on the left side of the frame.

A control panel with a black screen displaying Japanese text and English instructions. The text on the screen reads: "J-CO 操作手順" (J-CO Operation Procedure), "スタートボタンを押してください" (Please press the START button), and "Please press the ENGLISH button". Below the screen is a control panel with several buttons, including a green button, an orange button, and a white button.

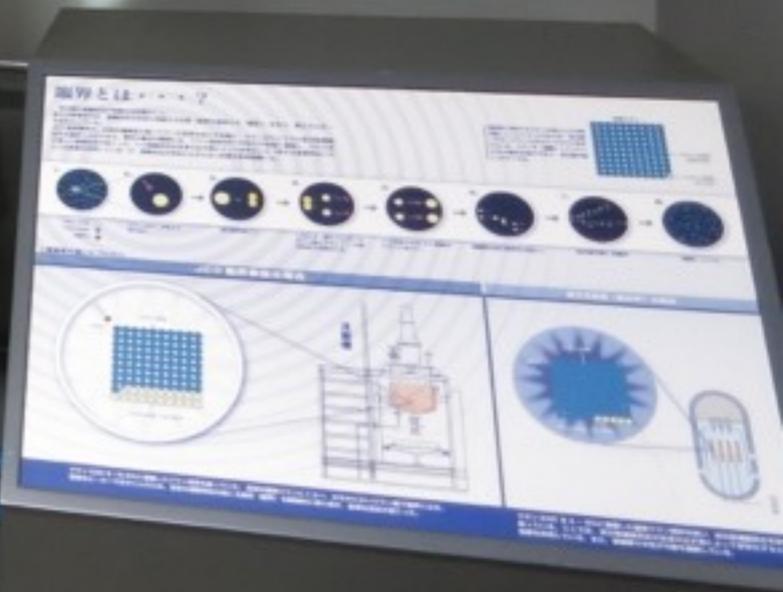
A control panel with a screen displaying a diagram of a particle detector or accelerator component. The screen shows a cross-sectional view of a detector with various internal structures. Below the screen are several buttons and a small display area.

A safety railing with a silver metal handrail and a black plastic railing. In front of the railing are three black plastic stools with white metal frames, arranged in a row. The floor is green.



沈澱槽B

ウラン溶液をステンレス製ビーカーと
漏斗を使い、手作業で投入していった。



放射線被曝の確定的影響

線量閾値あり

細胞再生系	造血組織	腸上皮	皮膚	精巣	水晶体
<p>幹細胞 幹細胞 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)</p>	<p>幹細胞 リンパ球 粒球 好中性球 赤血球 球(血小板)</p>	<p>腺窩(幹細胞) 絨毛</p>	<p>基底細胞(幹細胞) 角質層</p>	<p>幹細胞 精子</p>	<p>上皮(幹細胞) 水晶体繊維 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
	血液凝固時間延長				
	食作用低力				
	酸素輸送低力				

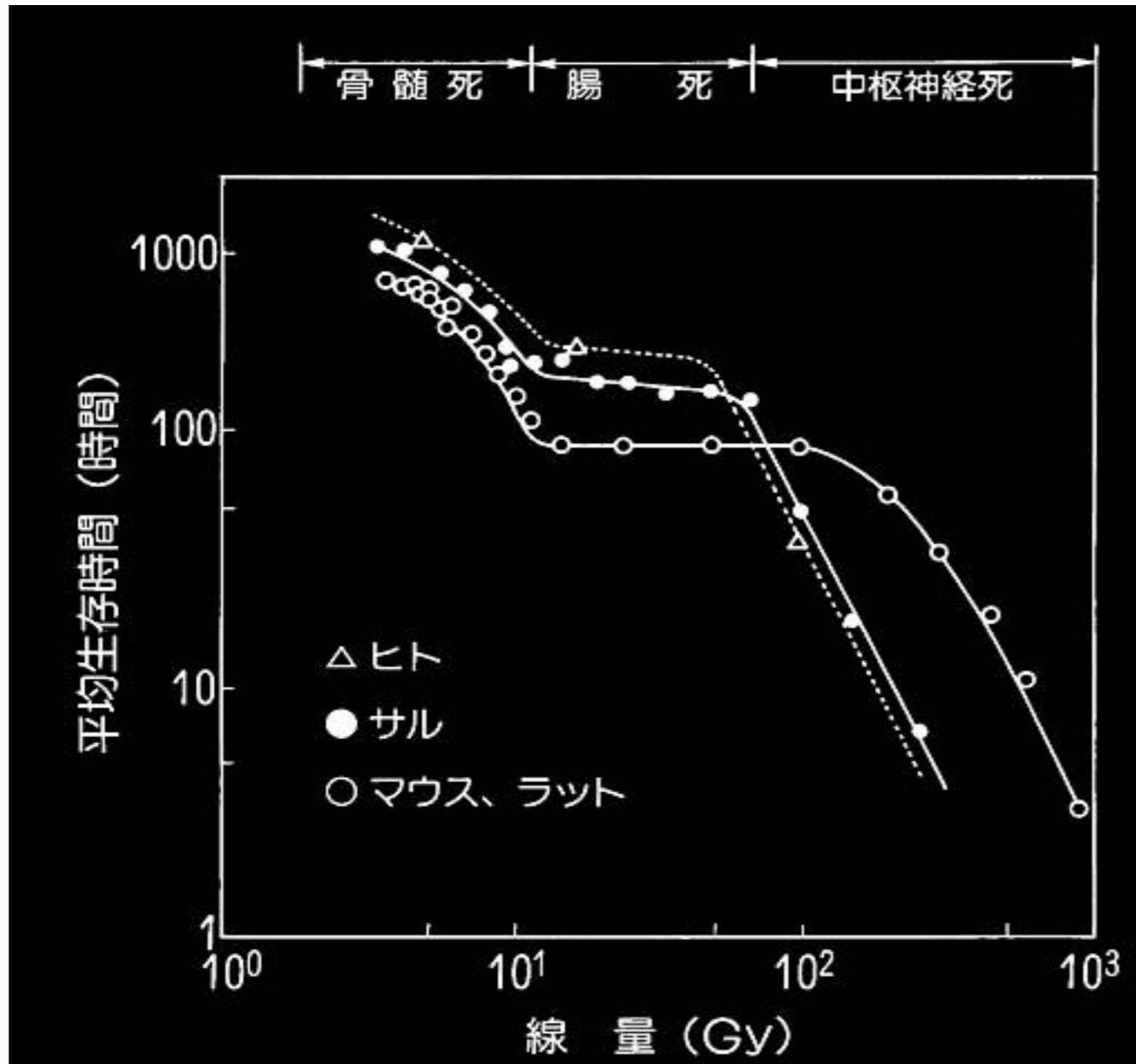
図1 細胞再生系

(造血組織、腸上皮、皮膚、精巣、水晶体の分化、成熟過程による変化)

[出典]吉井義一:放射線生物学概論[第2版](1922)

急性放射線障害

全身被曝による死亡



骨髓死 4 Gy

腸管死 10 Gy

中枢神経死 20 - 100 Gy以上

東海村 JCO 事故

チェルノブイリの消防隊員

原爆

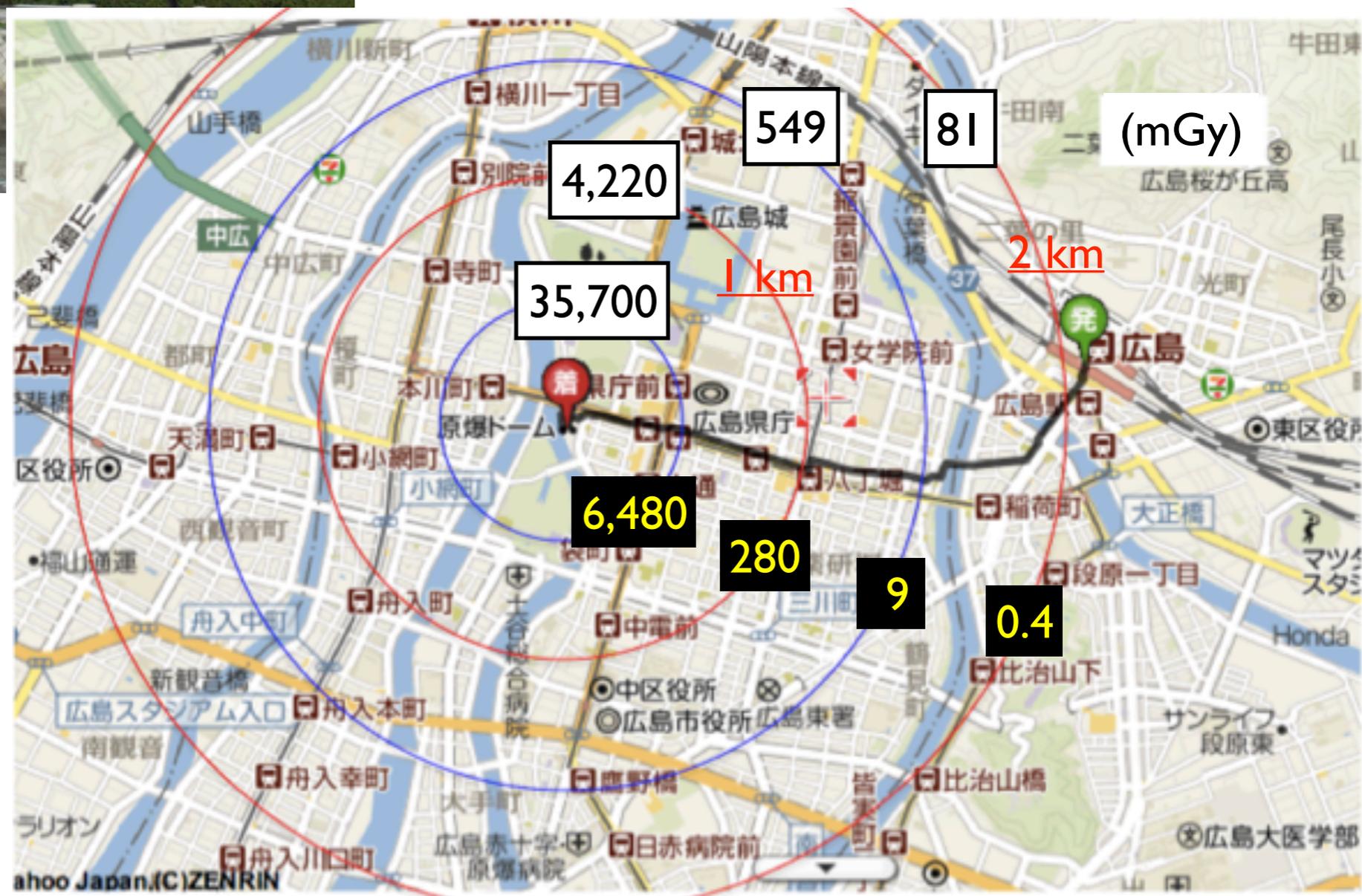
広島 原爆ドーム





広島 原爆ドーム

γ 線による 推定被曝線量
中性子線による (mGy)



確定的影響の閾値

組織及び影響	しきい値 (1回照射、ミリシーベルト)
骨髄(造血能低下)	500
悪心・嘔吐	1000
精巣 一時的な不妊(精子の一時的減少) 永久不妊	150 3500—6000
卵巣 不妊	2500—6000
水晶体 検知可能な白濁 視力障害(白内障)	500—2000 5000
胎児 奇形 重度精神発達遅滞	100 120—200

菅原、青山、丹羽、放射線基礎医学、
第11版 (金芳堂) より引用

放射線の健康影響

確定的影響

放射線によって細胞や組織が障害される

線量の高いところで生じる（**閾値がある**）

重篤度が線量に依存する

急性：消化管障害、造血障害、不妊（生殖細胞）など

晩発性：白内障

確率的影響

放射線によって細胞の DNA に損傷が生じる

ほとんどは修復されるが、修復できなかった場合、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が生じる可能性がある。

線量に応じて確率が増す（**閾値はないとする**）

線量と発症後の重篤度とは関連しない

晩発性：**がん**と、遺伝的影響（生殖細胞）の可能性

低線量被曝では確定的影響は起きない。

「ただちに影響が出ないレベル」

確率的影響(の可能性)が議論の対象となる。

❖ **がん**

❖ **遺伝的影響の有無**

あくまで確率でしか議論できない。

リスクの確率。

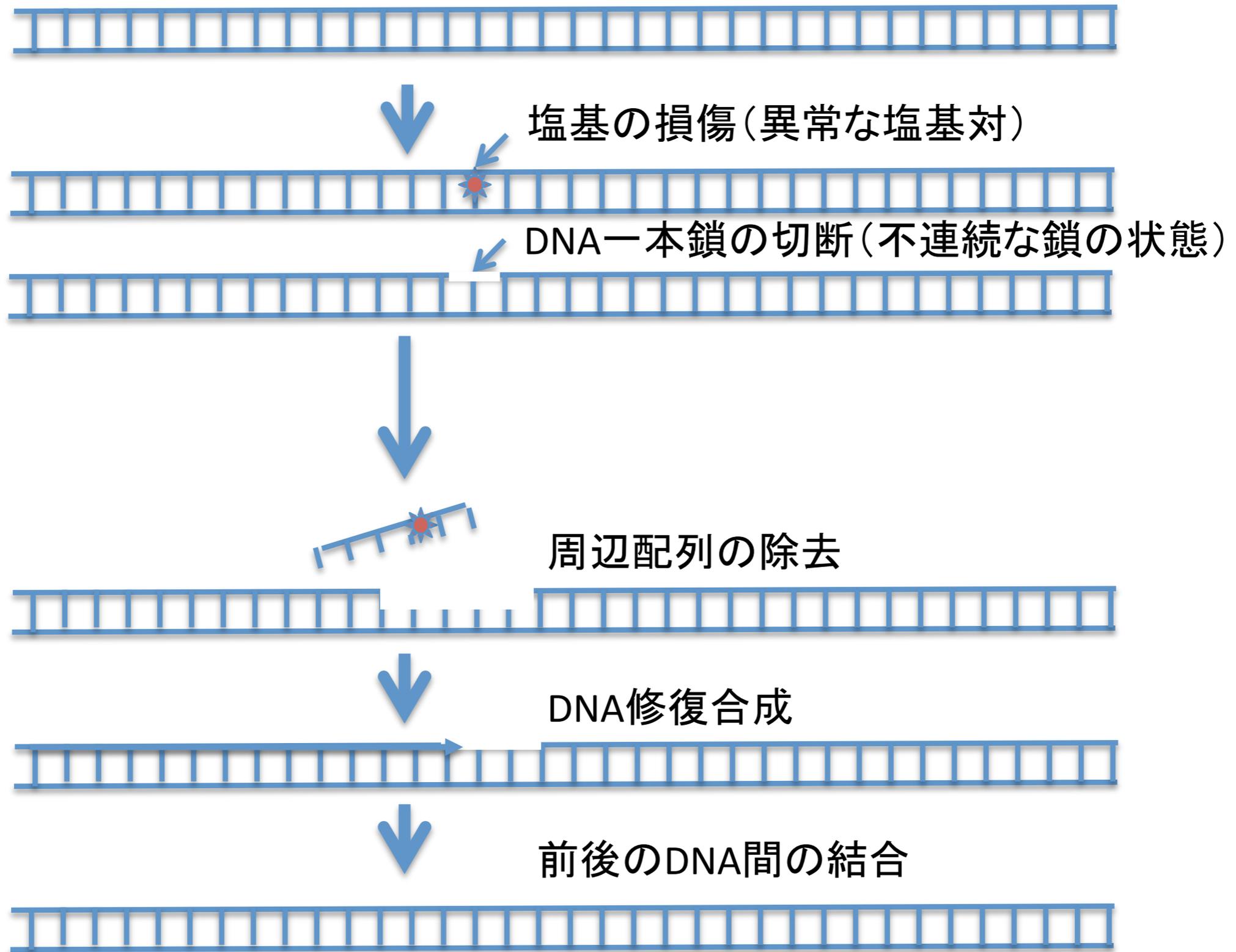
しかしそもそも、放射線を浴びなくても確率はゼロではない。

(日本人の死亡者の3人に1人はがんが原因。)

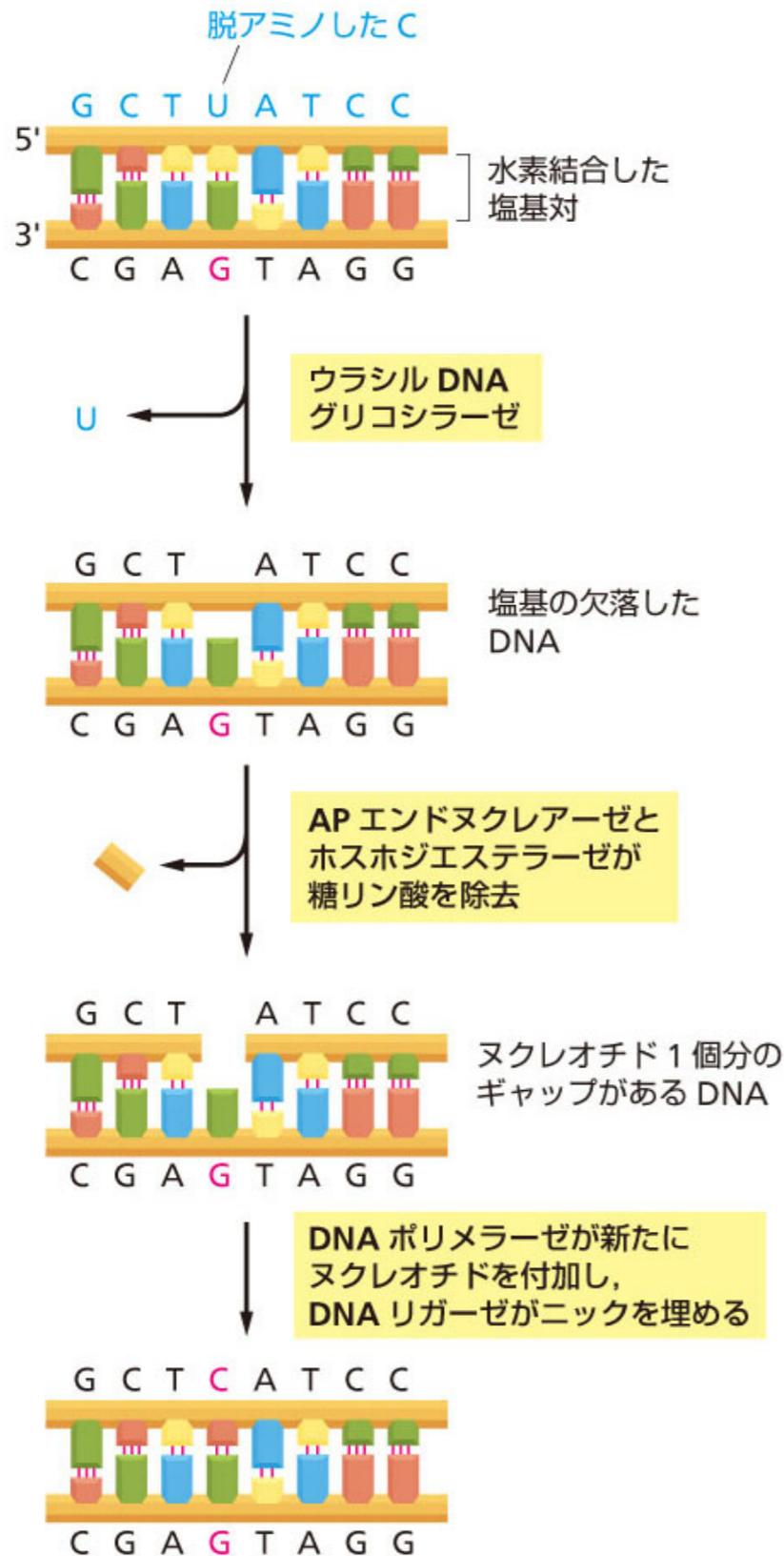
疫学調査の結果から結論を導きだすのは**統計学的**に困難。

DNA 修復

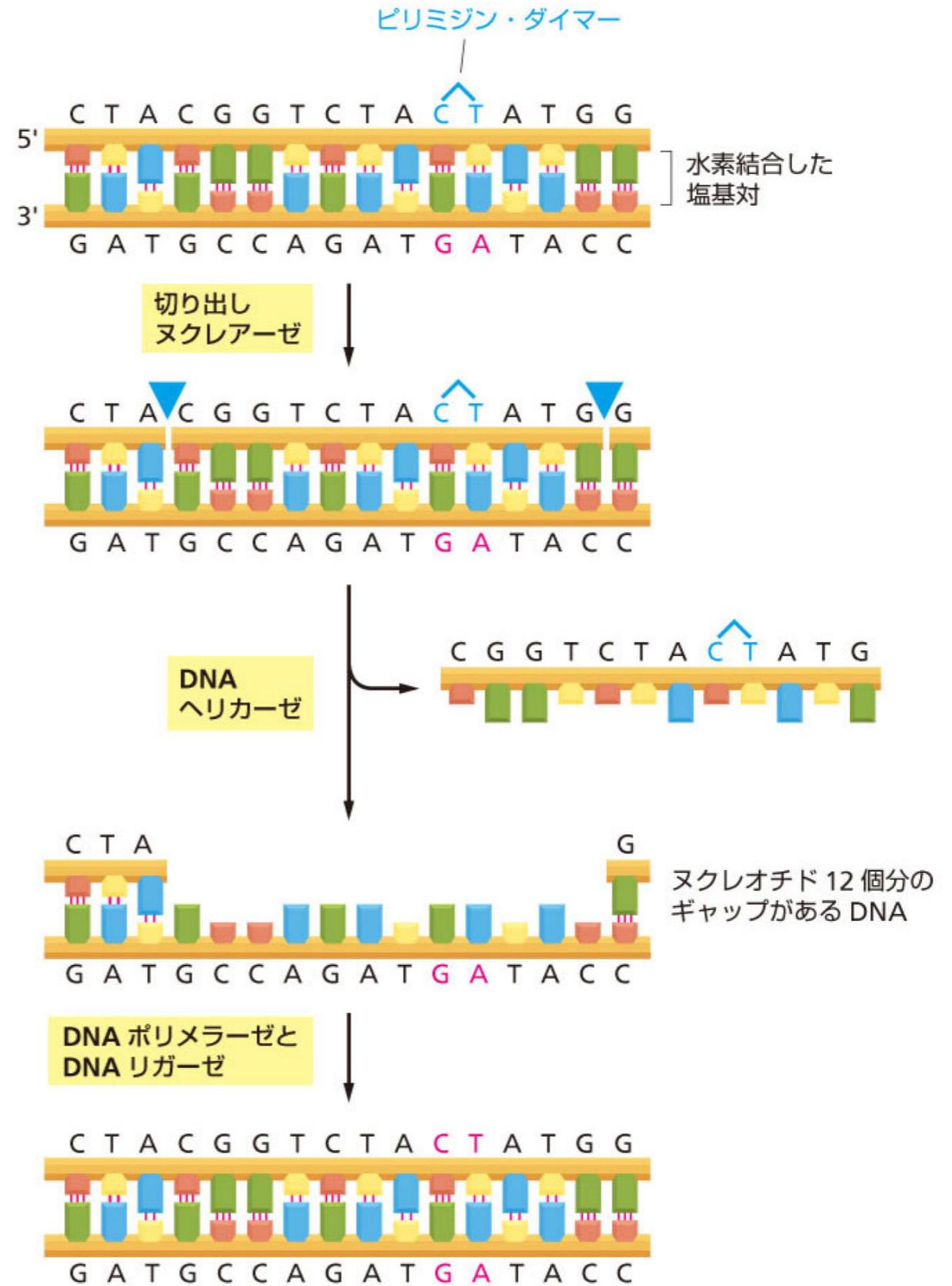
ヌクレオチド除去修復



塩基除去修復

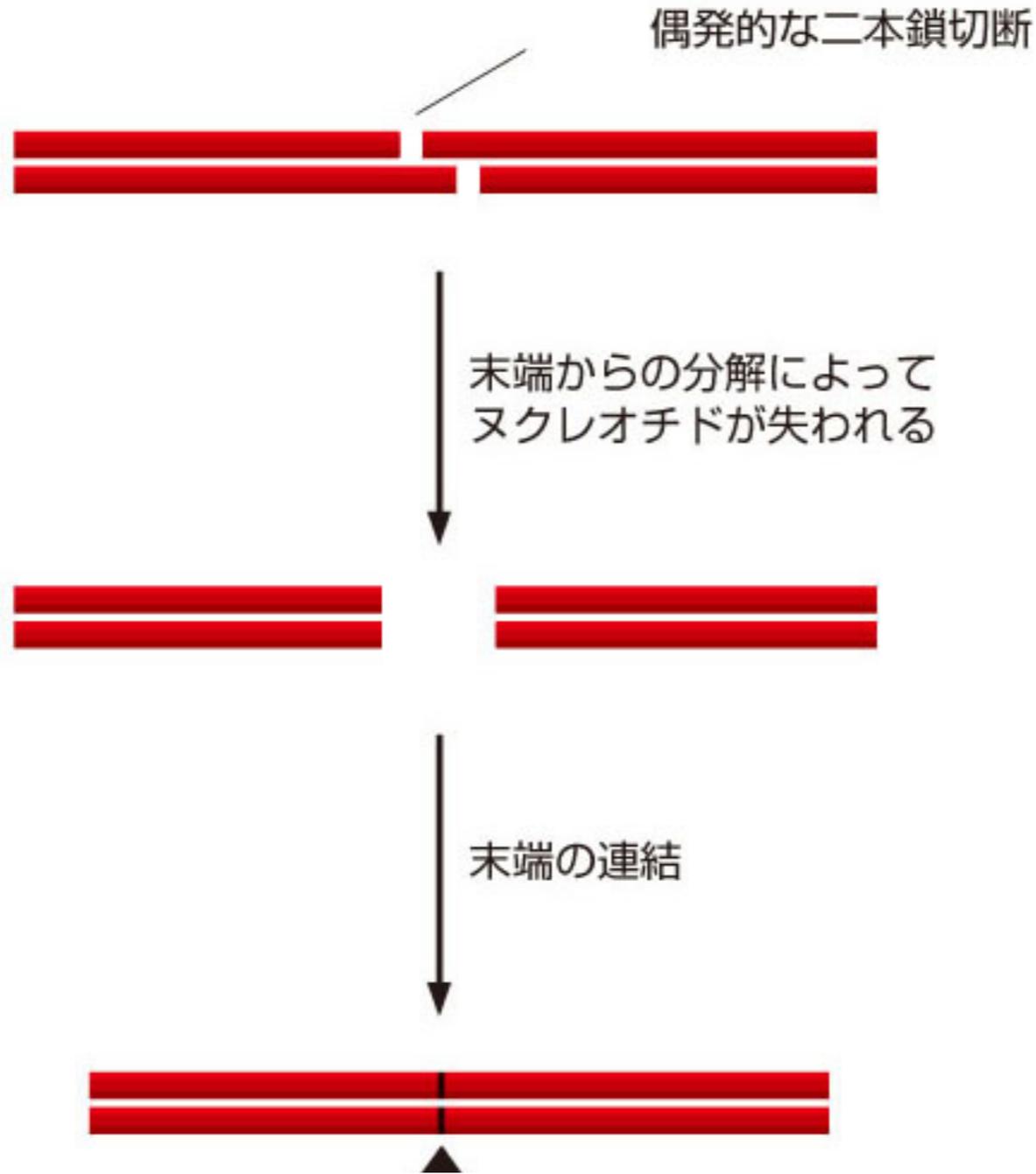


(B) ヌクレオチド除去修復



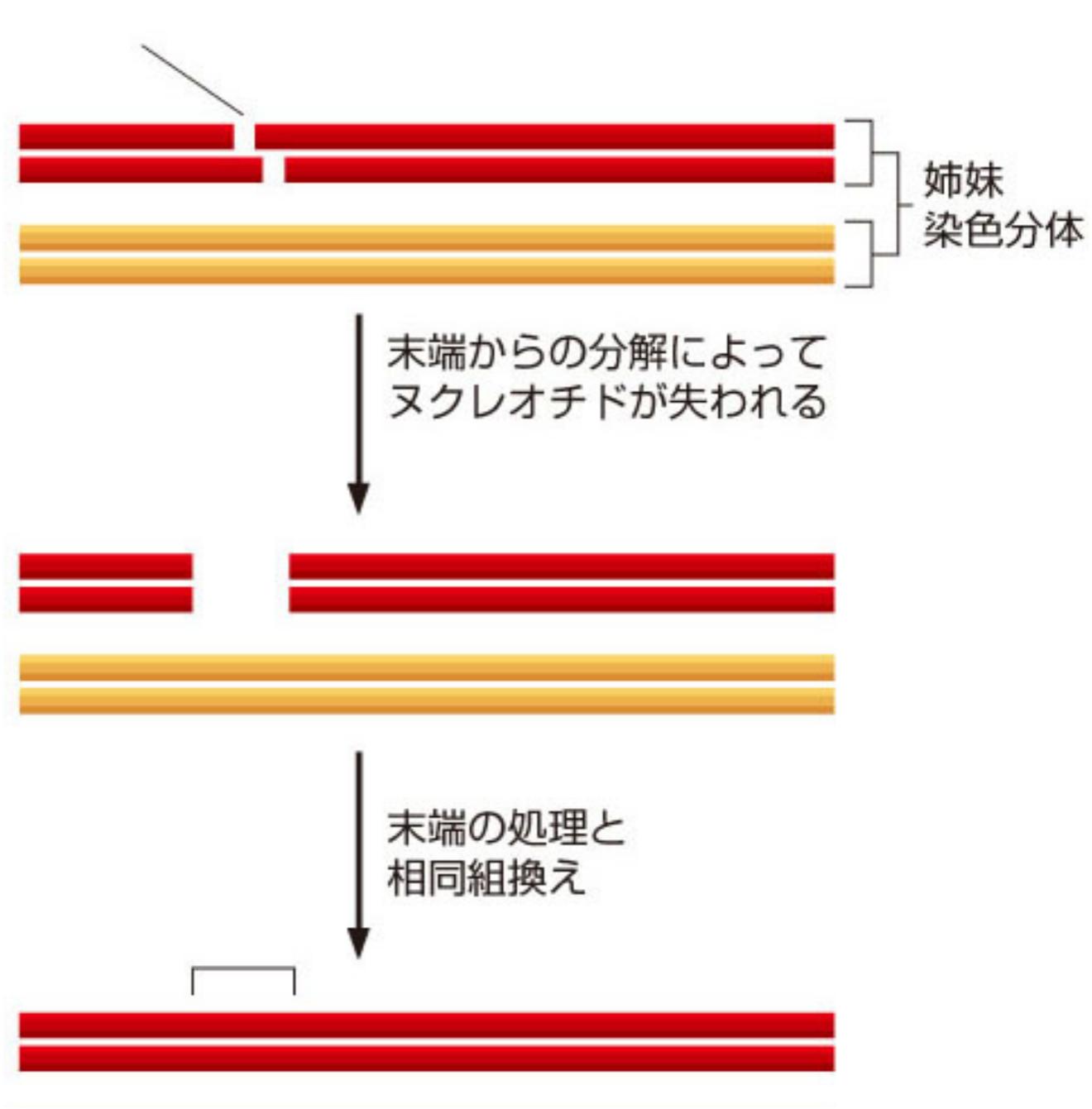
DNA二本鎖同時切断の場合の修復

非相同末端結合修復



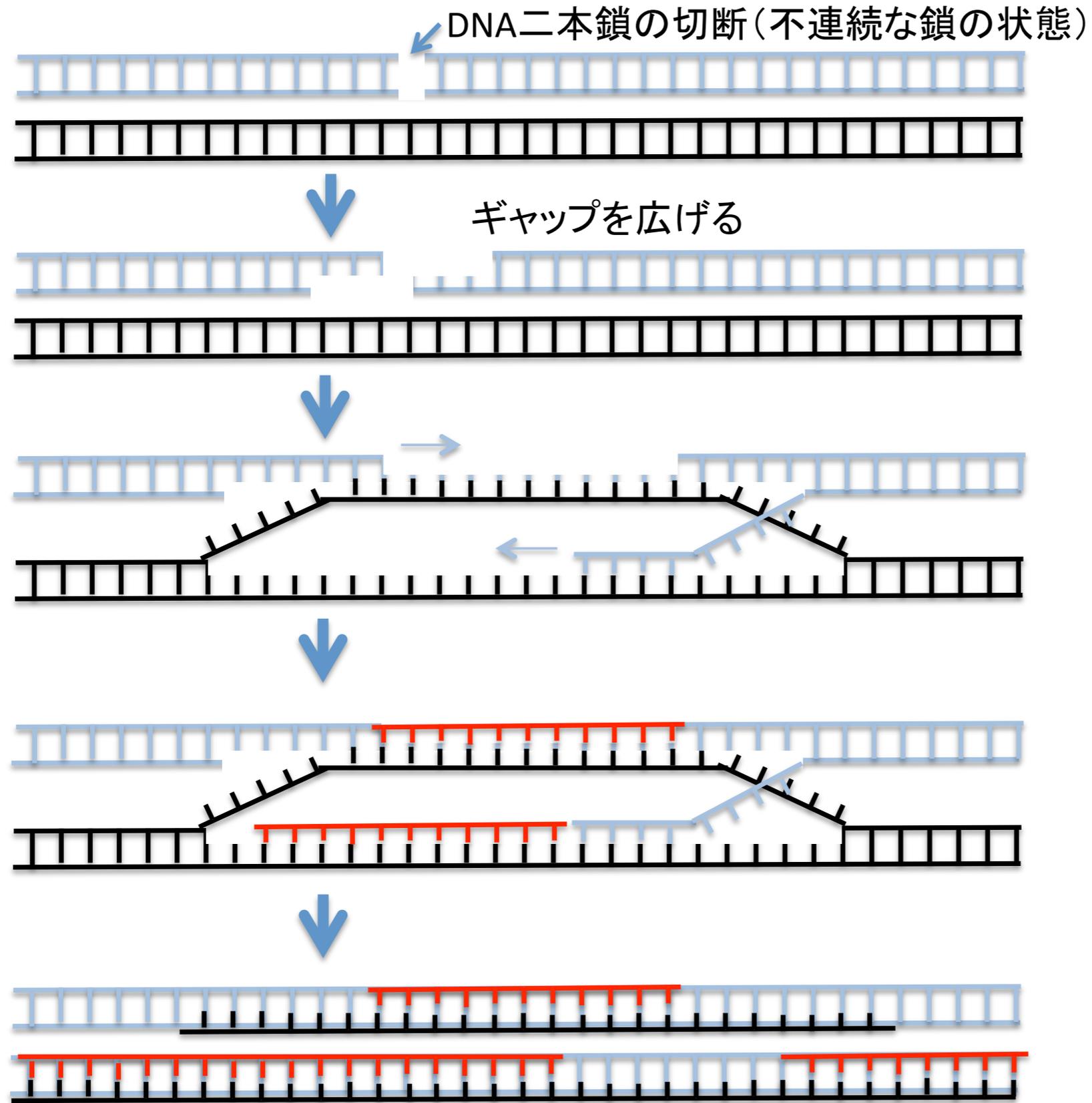
非分裂細胞の場合

相同組み換え修復



分裂細胞の場合

相同組み換え修復



分裂細胞の場合

The Nobel Prize in Chemistry 2015

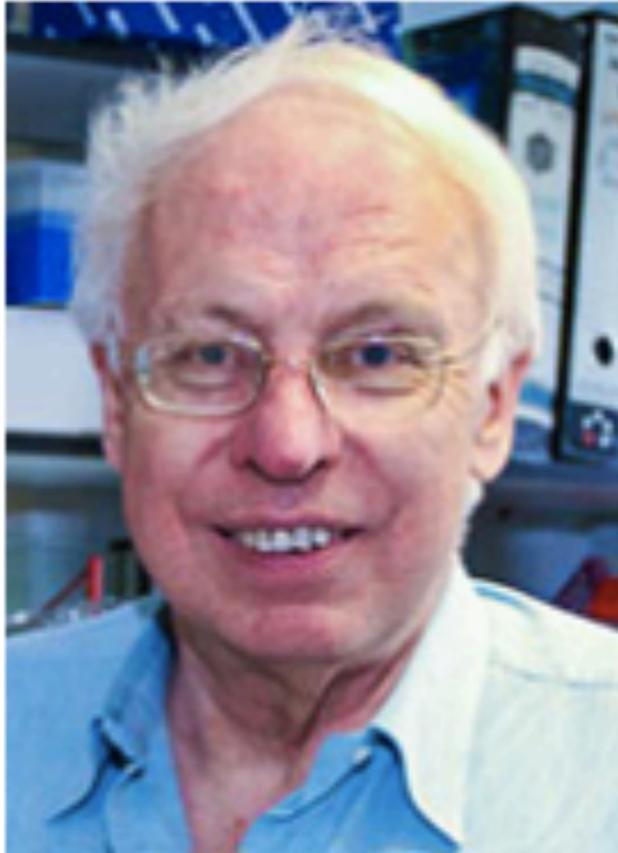


Photo: Cancer Research UK

Tomas Lindahl

Prize share: 1/3



Photo: K. Wolf/AP Images for HHMI

Paul Modrich

Prize share: 1/3



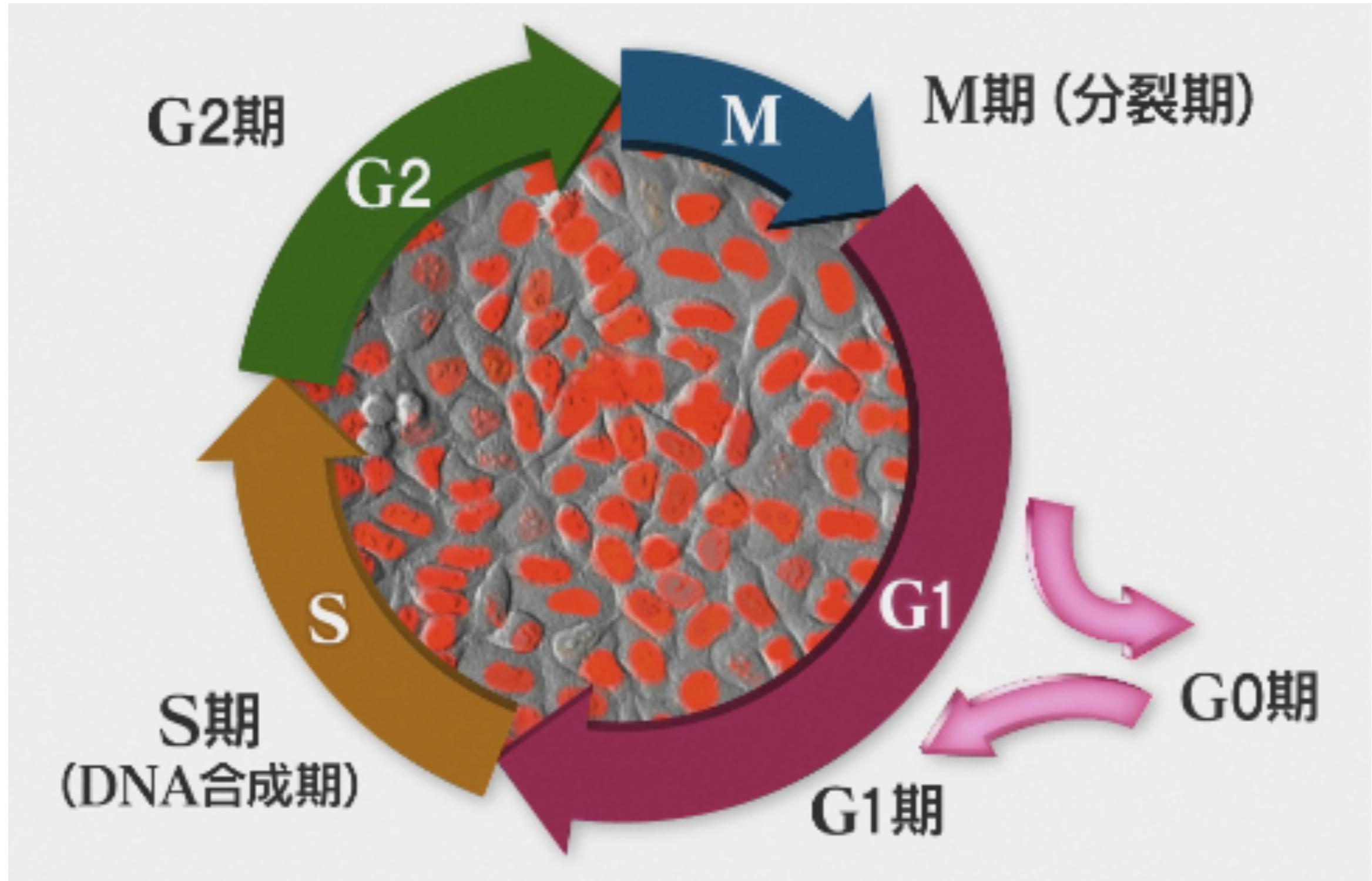
Photo: M. Englund, UNC-School of Medicine

Aziz Sancar

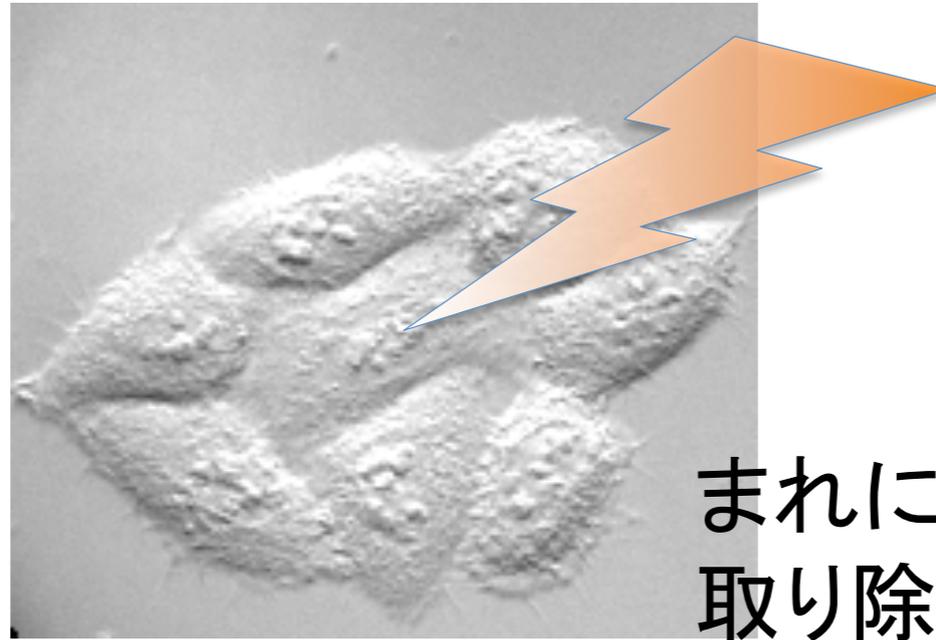
Prize share: 1/3

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

細胞周期と放射線感受性



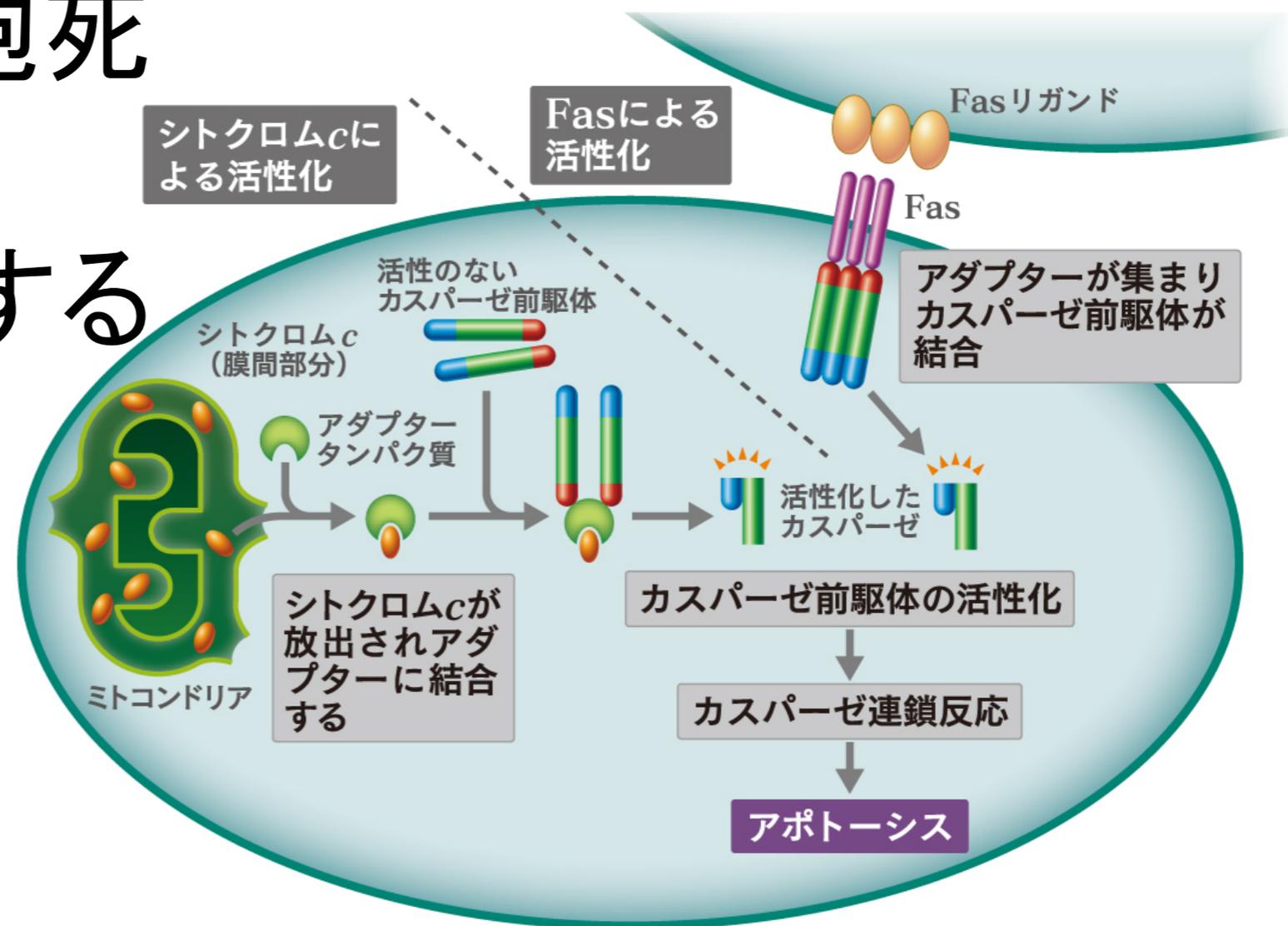
チェックポイント機構

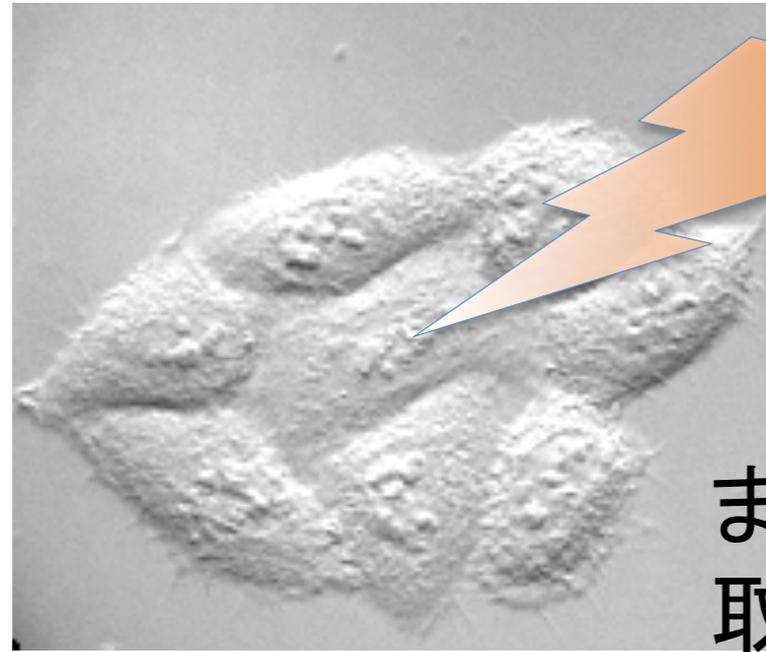


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

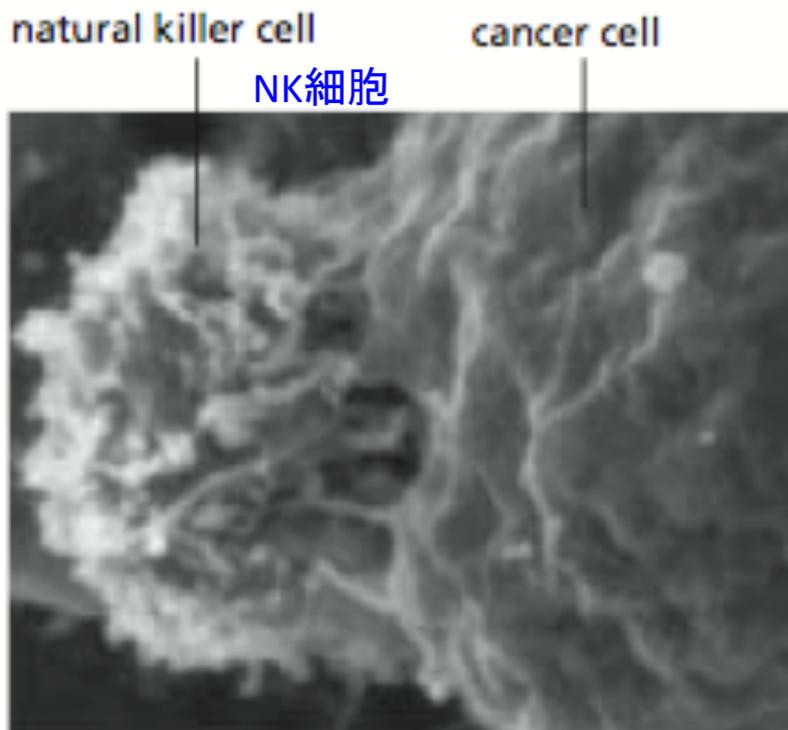
プログラム細胞死

細胞が自爆する





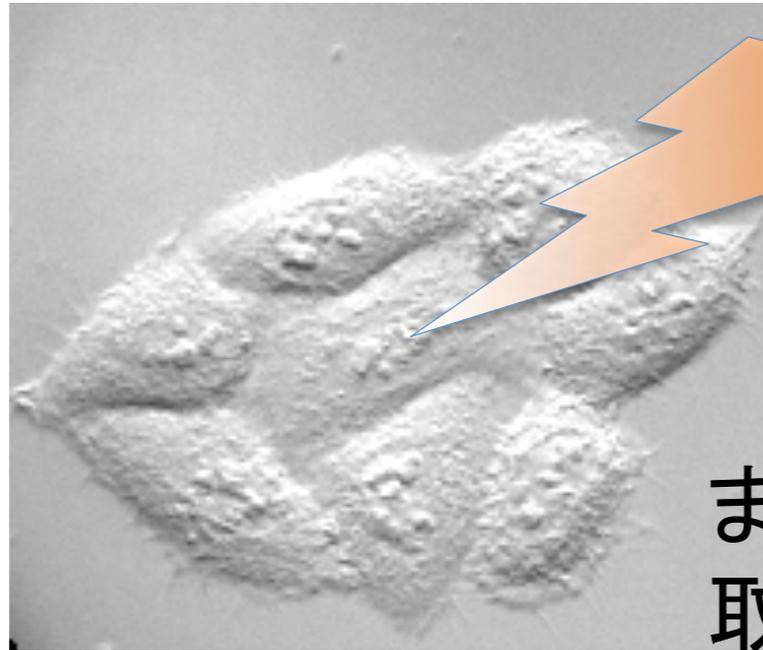
まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう



修復の失敗

細胞死も起こらない

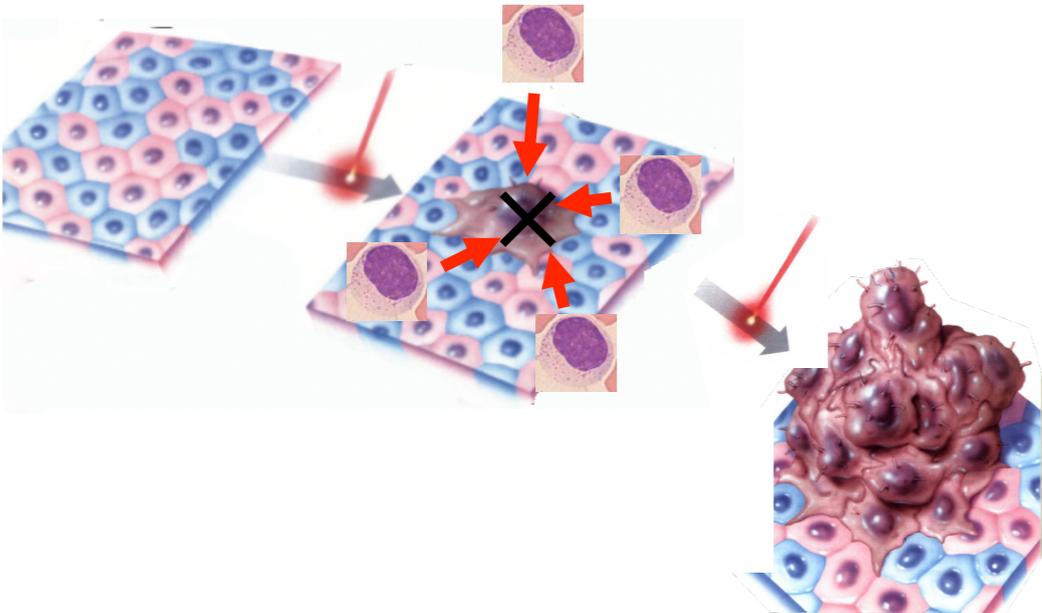
自然免疫系にとらえられる



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
(自然免疫系)

benign malignant
良性 / 悪性

がん細胞が残ってしまう

浸潤性

放射線医学

疫学的調査

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

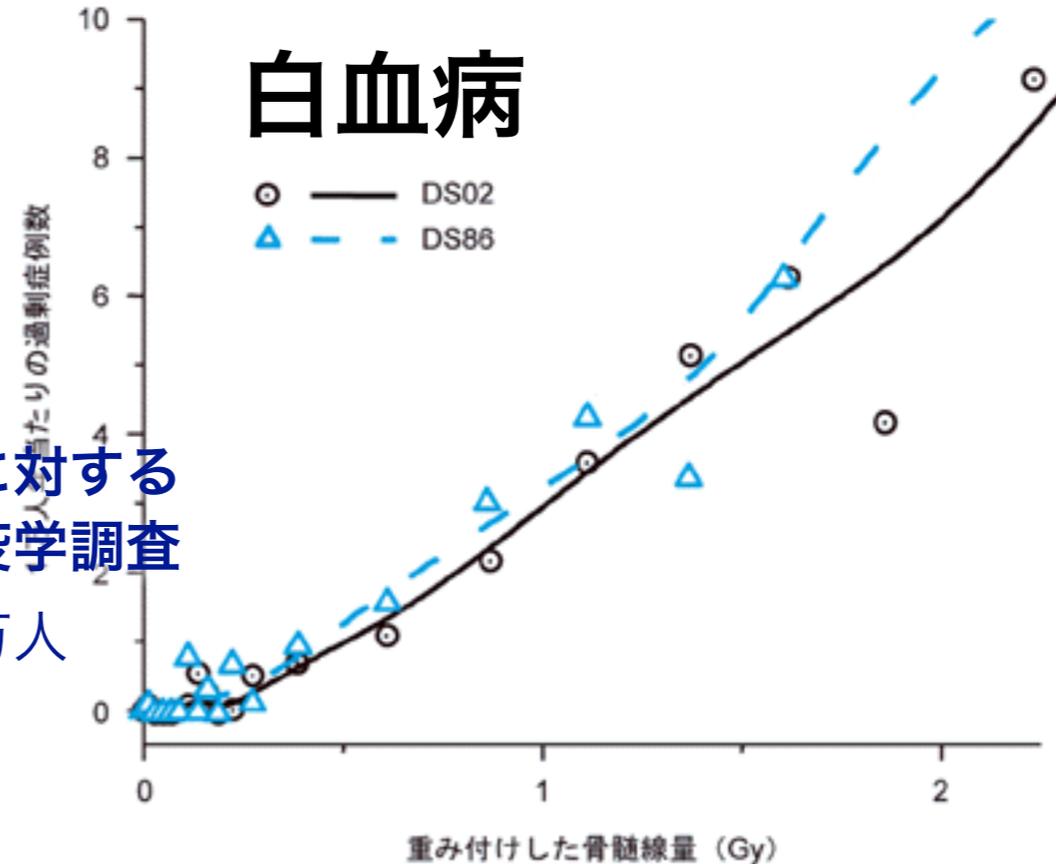
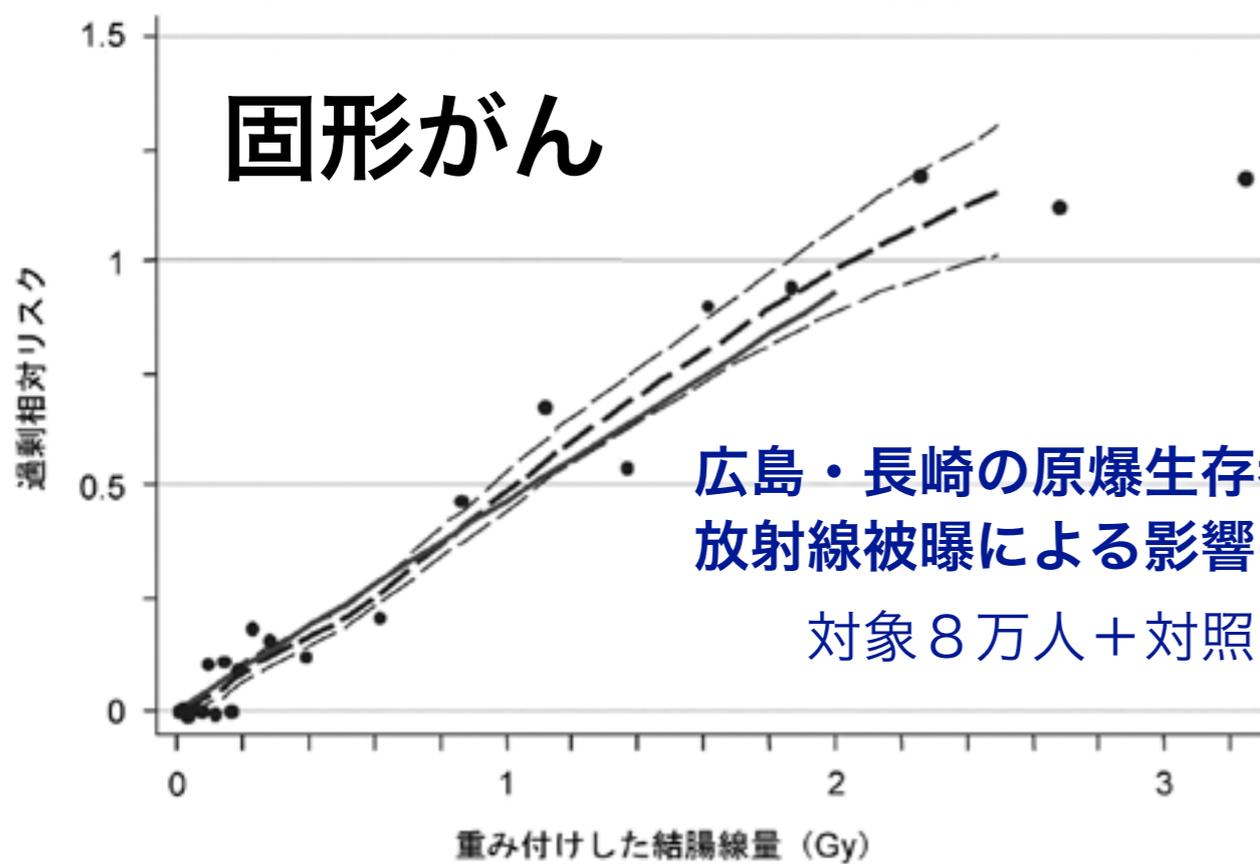


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

図. 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。被爆時年齢20-39歳の人の1970年における男女平均リスク。

表. LSS集団における固形がん発生のリスク (線量別)、1958-1998年

重み付けした結腸線量 (Gy)	対象者数	がん		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	27,789	4,406	81	1.8%
0.1 - 0.2	5,527	946	75	7.6%
0.2 - 0.5	5,935	1,144	179	15.7%
0.5 - 1.0	3,173	688	206	29.5%
1.0 - 2.0	1,647	460	196	44.2%
>2.0	564	185	111	61.0%
合計	44,635	7,851	848	10.7%

表. LSS集団における白血病による死亡の観察数と推定過剰数、1950-2000年

重み付けした骨髄線量 (Gy)	対象者数	死亡		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	30,387	69	4	6%
0.1 - 0.2	5,841	14	5	36%
0.2 - 0.5	6,304	27	10	37%
0.5 - 1.0	3,963	30	19	63%
1.0 - 2.0	1,972	39	28	72%
>2.0	737	25	28	100%
合計	49,204	204	94	46%

(財) 放射線影響研究所 データ

低線量被曝の影響について疫学調査の結果から結論を導きだすのは統計学的に困難。

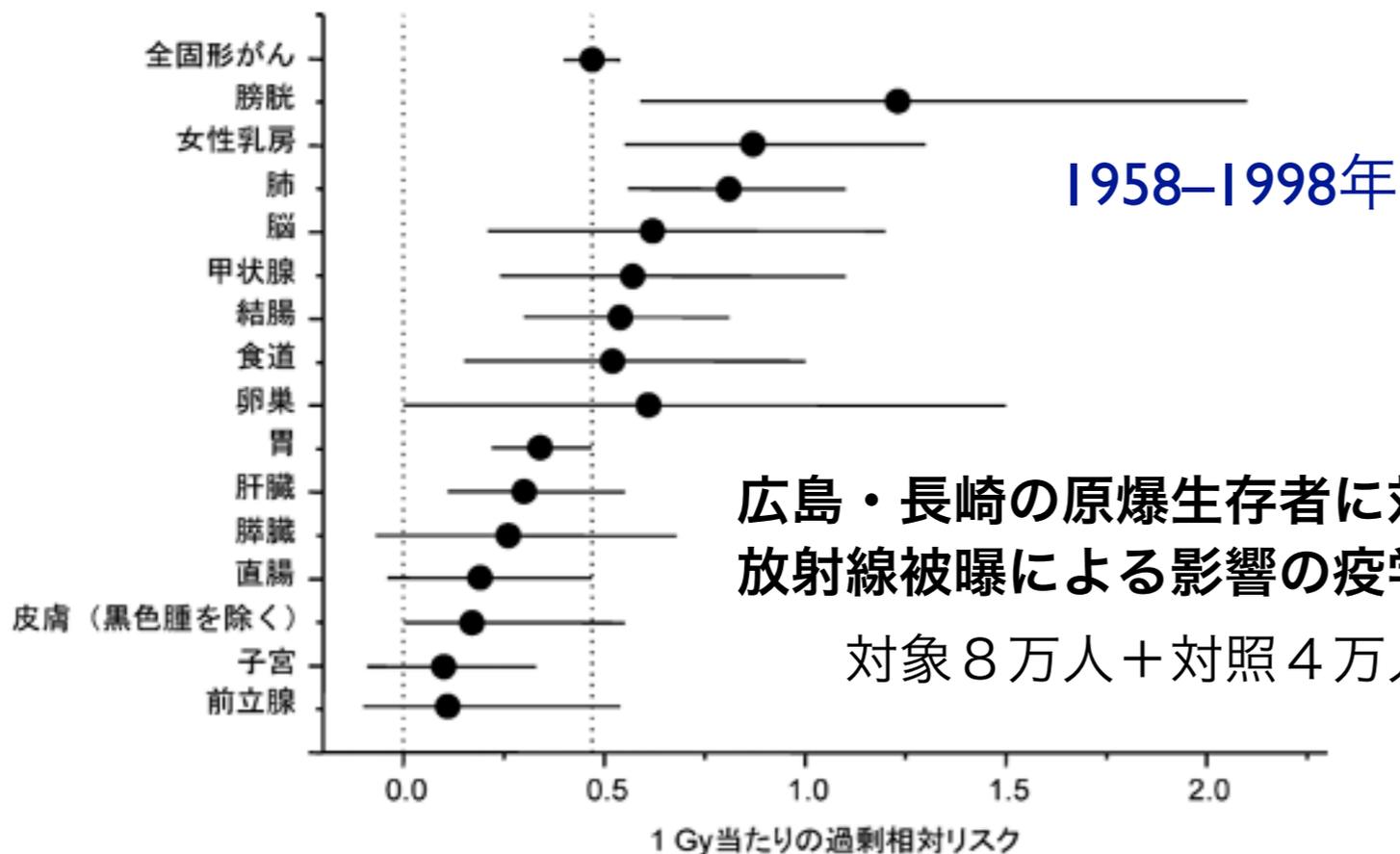
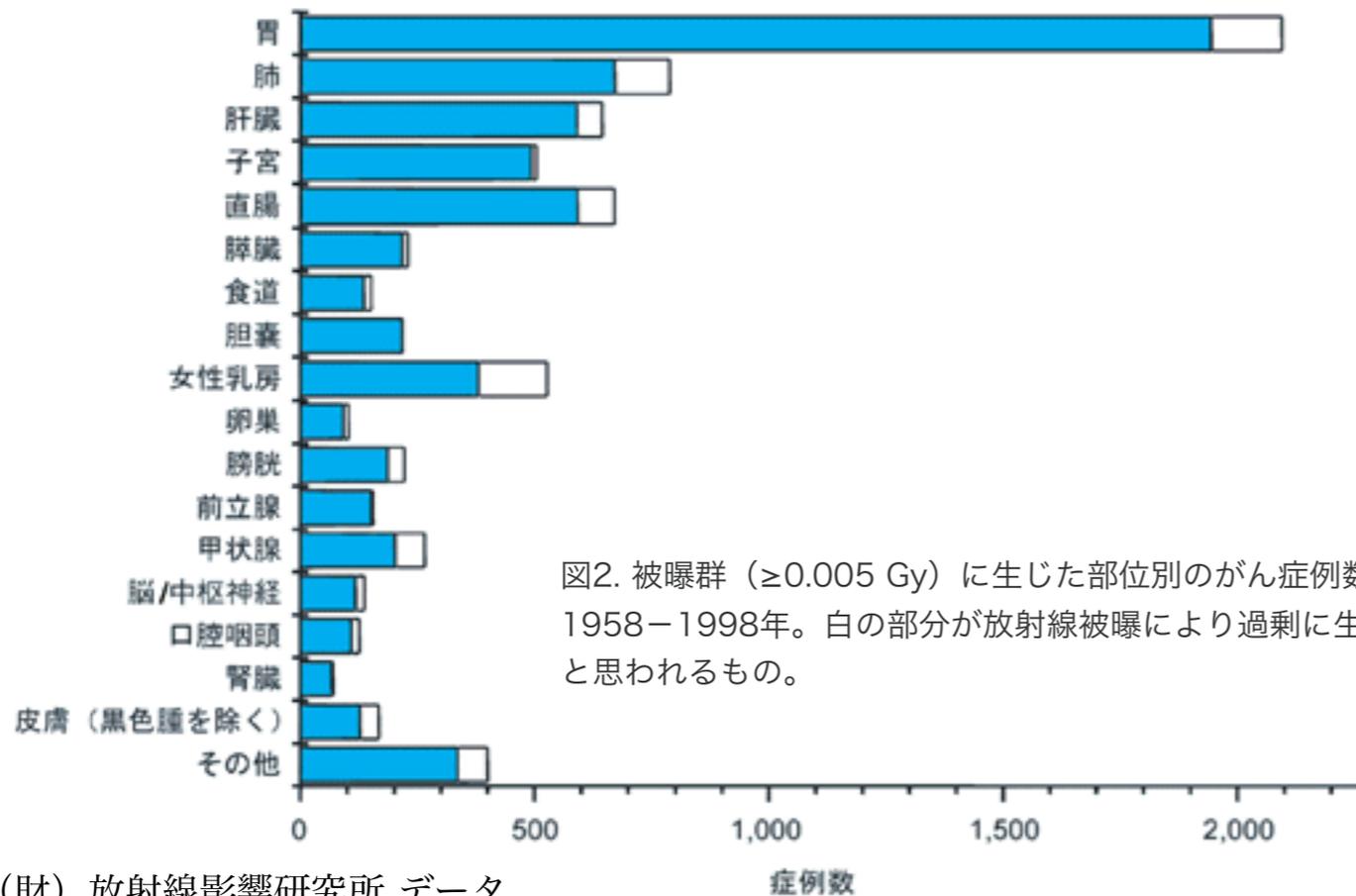
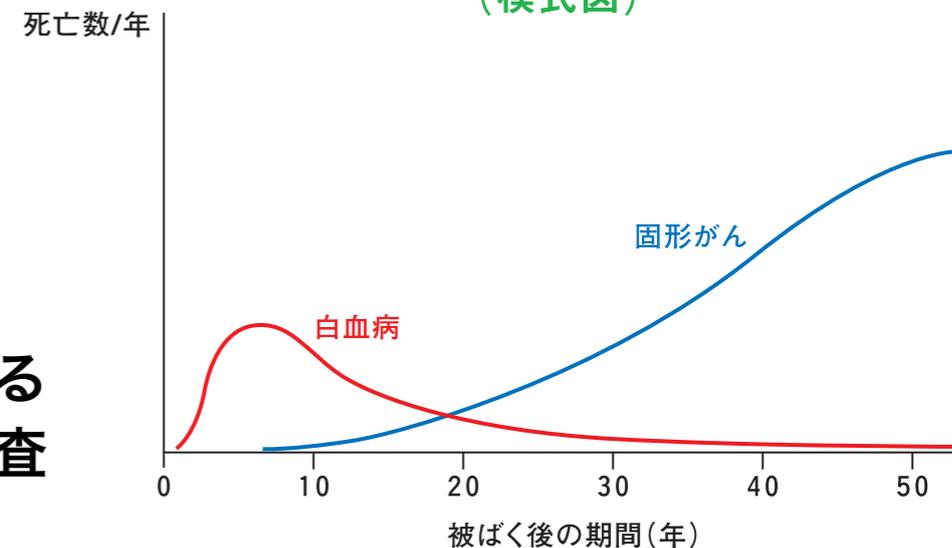


図1. LSS集団における被曝時年齢30歳（男女平均）の人が、70歳に達した時の1 Gy 当たりの部位別がん発生率の過剰相対リスク。横線は90%信頼区間を示す。

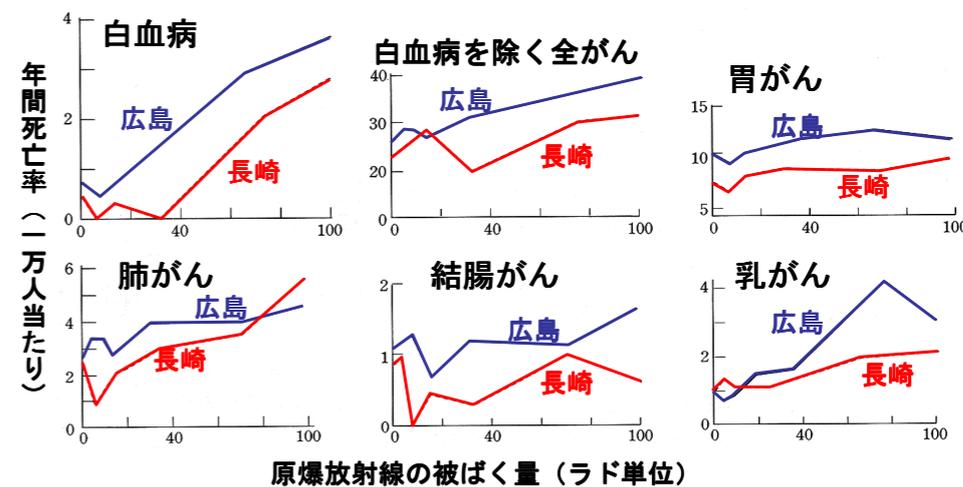


(財)放射線影響研究所 データ

原爆放射線に関連する死亡数の時間的経過 (模式図)

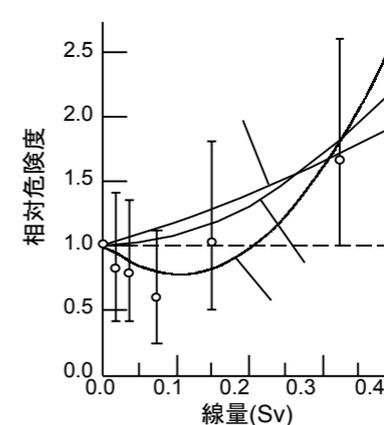


5種類のがん死亡率 (1950-1986間の平均値) と低レベル原爆放射線被ばく量の関係

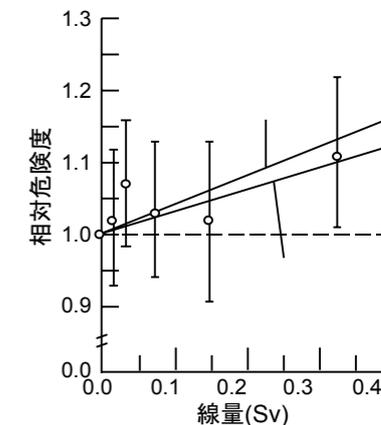


清水由紀子ほか (1987)

白血病

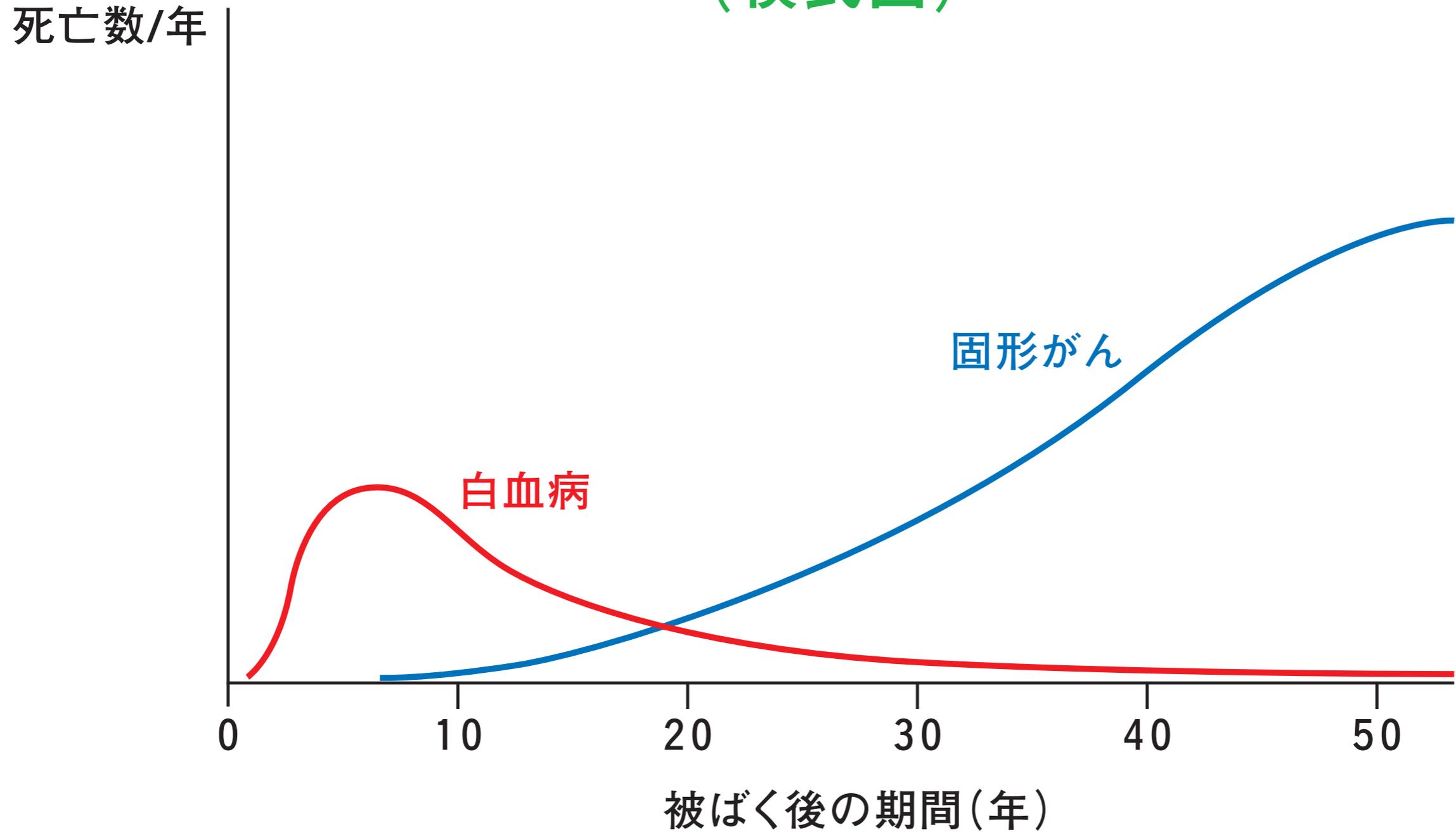


白血病以外の全がん



Shimizu, Y., et al.: RERF Update RERF News 1992.

原爆放射線に関連する死亡数の時間的経過 (模式図)



低線量・低線量率の被曝とガン死亡



チェルノブイリ原発事故

チェルノブイリ原発
黒鉛炉
格納容器なし
1週間燃え続けた

福島第一原発
沸騰水型軽水炉
格納容器あり
水素爆発・汚染水流出

^{131}I (ヨウ素131) **total 200京ベクレル !!**

初期消火に当たった原発作業員・消防隊員が
致死・亜致死量の被曝。28人死亡。

事故処理に当たった軍人ら“リクビダートル”
60万人が数百 mSv 被曝

3 km にあるプリピャチ市民は翌日に強制避難
半径 10 km 圏内の避難が1週間遅れた。

(最大で 750 mSv の被曝)

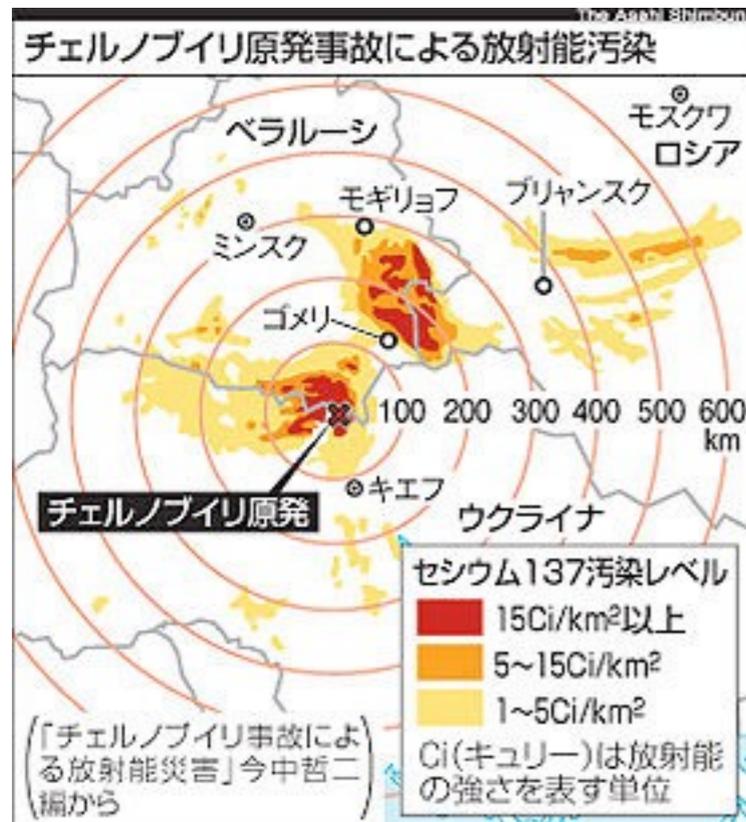
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

一般住民で確認された健康への影響は
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人
(患者数 5000人、死亡 15人)

甲状腺平均被曝量 2 Gy !!

と、ずっと大きいストレスによる失調



低線量・低線量率の被曝とガン死亡

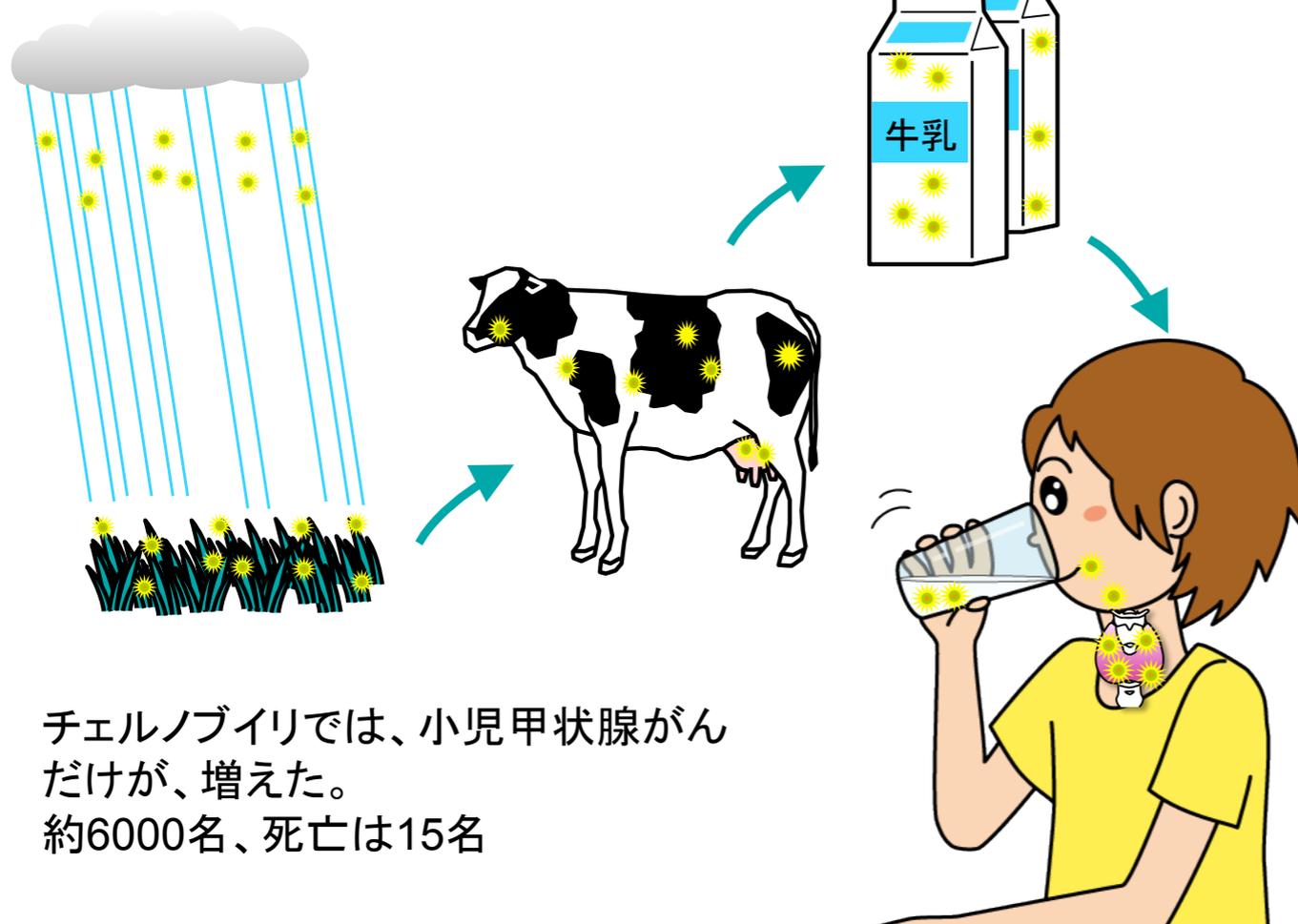


ロシア語
Чернобыль / Чорнобиль



チェルノブイリ原発事故

^{131}I (ヨウ素 ^{131}I) total 200京ベクレル !!



チェルノブイリでは、小児甲状腺がんだけが、増えた。
約6000名、死亡は15名

図は、東京大学医学部附属病院放射線科
中川恵一先生のスライドより借用

一般住民で確認された健康への影響は
こどもの甲状腺がんの増加のみ。
(地産地消の牛乳による摂取が問題)

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人
(患者数 5000人、死亡 15人)

甲状腺平均被曝量 **2 Gy**

= **2000 mSv !!** (10 Gy 以上の被曝も!)
と、ずっと大きいストレスによる失調

いわき市、飯舘村のこどもの甲状腺被曝調査
最大で **35 mSv** の被曝 (甲状腺等価線量)

震災・事故による喪失感は共通

福島米の全量全袋検査



基準値 (100 Bq/kg) 超え

0袋 / 1025万袋 (2016年)

0袋 / 1050万袋 (2015年)

2袋 / 1077万袋 (2014年)

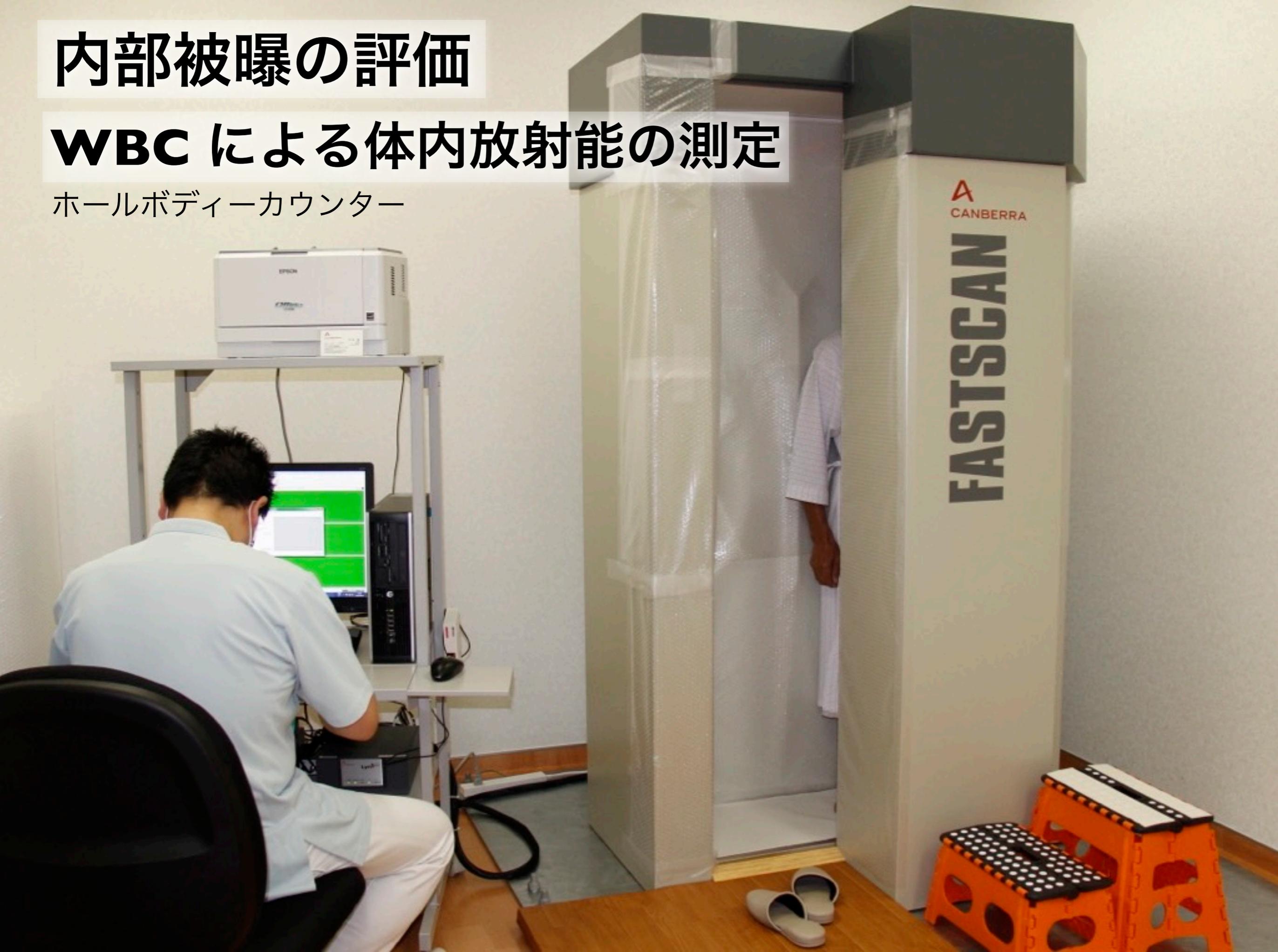
28袋 / 1100万袋 (2013年)

71袋 / 1034万袋 (2012年)

内部被曝の評価

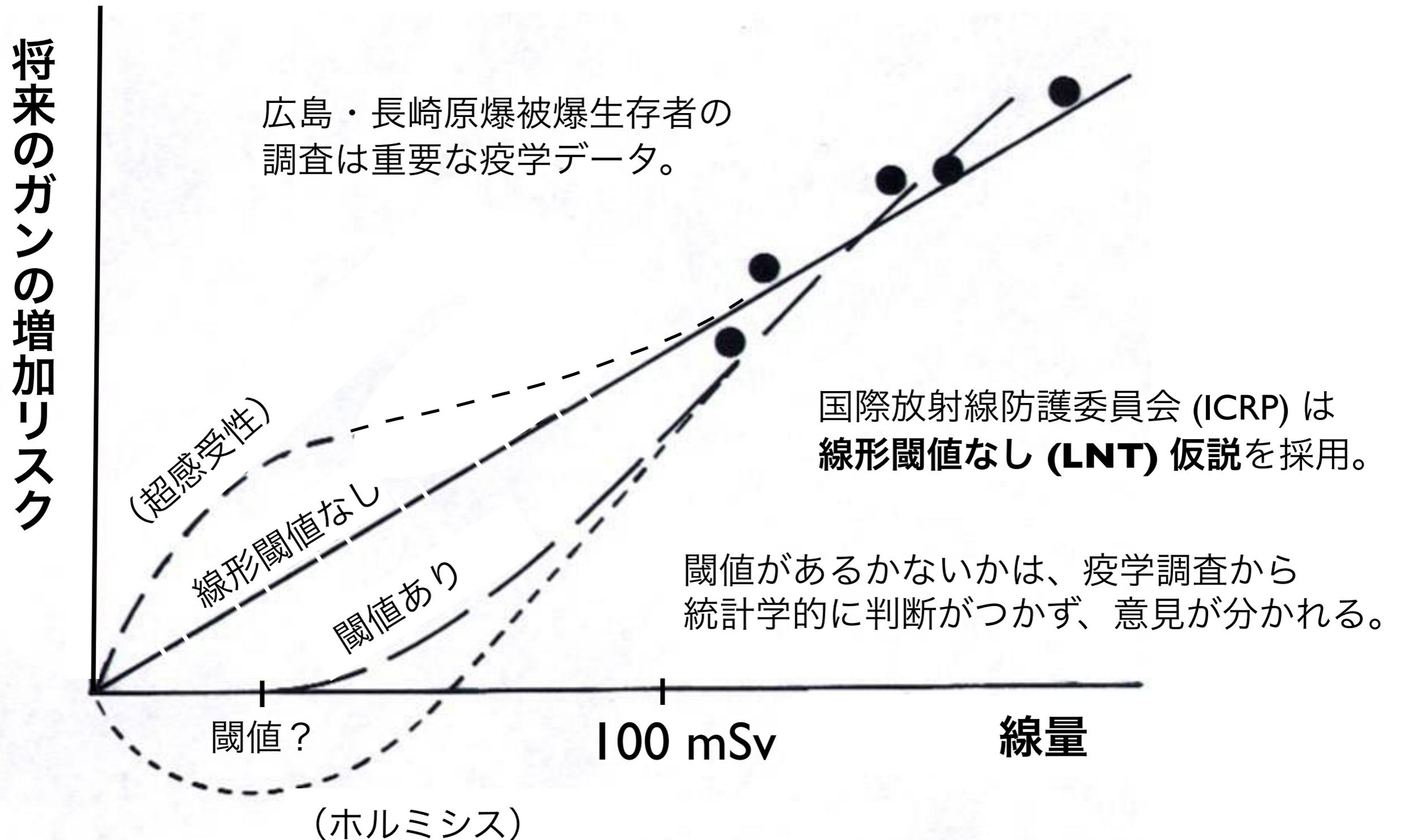
WBC による体内放射能の測定

ホールボディカウンター

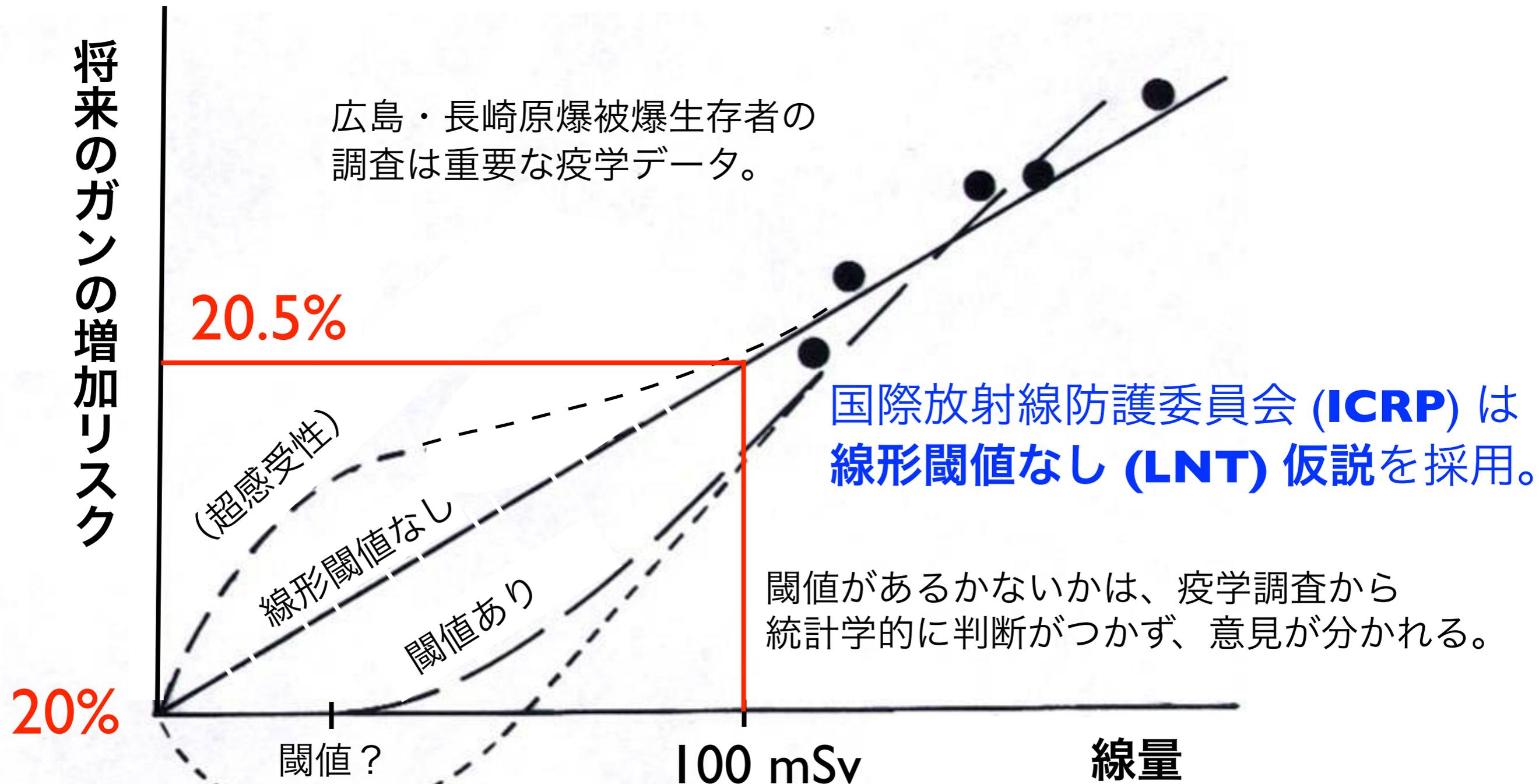


放射線防護学

低線量におけるリスク評価



低線量におけるリスク評価



日本人の将来のガン死亡リスクは男性が 26%、女性が 16%

(ホルミシス)

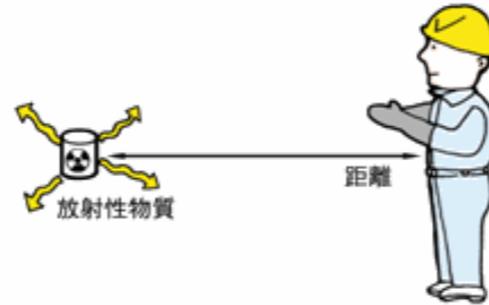
慢性被曝が急性被曝に比べて効果が何分の1になるかの係数

線量・線量率効果係数 **DDREF = 2**

放射線防護

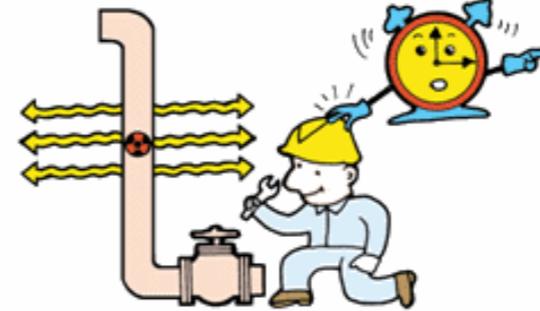
● 距離による防護

$$[\text{線量率}] = [\text{距離}]^2 \text{に反比例}$$

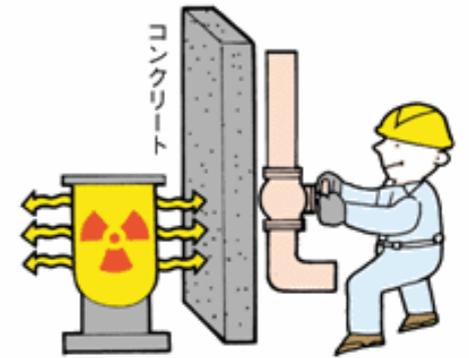


● 時間による防護

$$[\text{線量}] = [\text{作業場所の線量率}] \times [\text{作業時間}]$$



● 遮蔽による防護



確定的影響は
発症させない。
確率的影響を
できるだけ減らす。

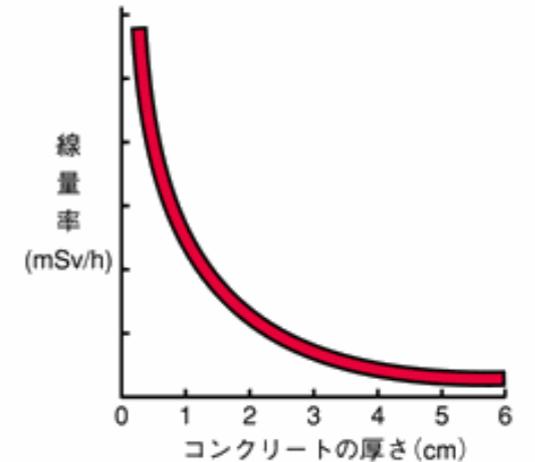
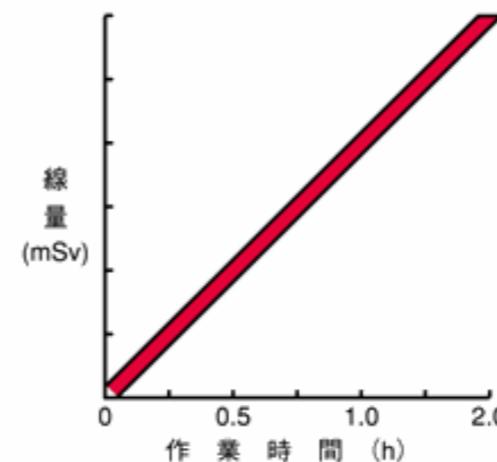
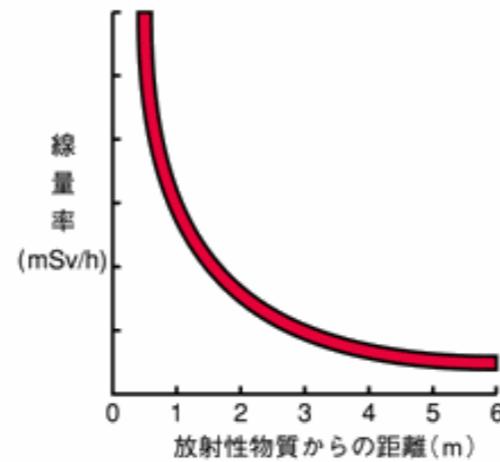


図1 遮へい3原則の図

[出典] 電気事業連合会:「原子力・エネルギー」図面集2003-2004、p.130

防護の最適化：個人線量、被曝人数、潜在的被曝の可能性のすべてを、経済的および社会的要因を考慮に入れたうえで、合理的に達成できる限り低く保つべきである。

(ALARA の原則 = As Low As Reasonably Achievable)

個人被曝の線量限度

線量限度の一覧表（作業者）

職業被曝（作業者 放射線業務従事者）

実効線量	100 mSv / 5年 かつ 50 mSv / 年
女子 妊娠中の女子	5 mSv / 3月 内部被曝について 1 mSv / 期間中
等価線量	150 mSv / 年
水晶体	500 mSv / 年
皮膚	2 mSv / 期間中
妊娠中の女子の 腹部表面	

	1990勧告	1977勧告
実効線量	20mSv/年（5年平均）	50mSv/年
水晶体等価線量	150mSv/年	150mSv/年 ²⁾
皮膚等価線量	500mSv/年 ¹⁾	500mSv/年
手・足の等価線量	500mSv/年	500mSv/年 ³⁾
その他の組織	—	500mSv/年

1) 被ばく部位に関係なく、深さ7 mg/cm²、面積1 cm²の皮膚についての平均線量に適用される。

年リスク千分の1 (18歳から65歳までの就業期間の被曝の場合で、65歳までのリスクの最大値)

線量限度の一覧表（一般公衆）

公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量	—
水晶体	—
皮膚	—

	1990 勧告	1977 勧告
実効線量	1 mSv/年	5 mSv/年 ¹⁾ , 1 mSv/年（生涯の平均）
水晶体等価線量	15 mSv/年	50 mSv/年
皮膚等価線量	50 mSv/年 ³⁾	50 mSv/年
その他の組織	—	50 mSv/年 ²⁾

1) 1985年のパリ声明で主たる限度を1年につき1 mSvとして、補助的な限度を5 mSv/年とした。

2) 1985年のパリ声明で実効線量当量の制限によって不要になった。

年リスク1万分の1 (毎年被曝の場合、65歳までの最大値) **ICRP 勧告**

〔出典〕（1990年ICRP新勧告と1977年ICRP勧告における線量限度値対照表）

〔「ICRP1990年勧告-その要点と考え方-」、草間朋子編、日刊工業新聞社、50ページ〕

国内法令による防護基準

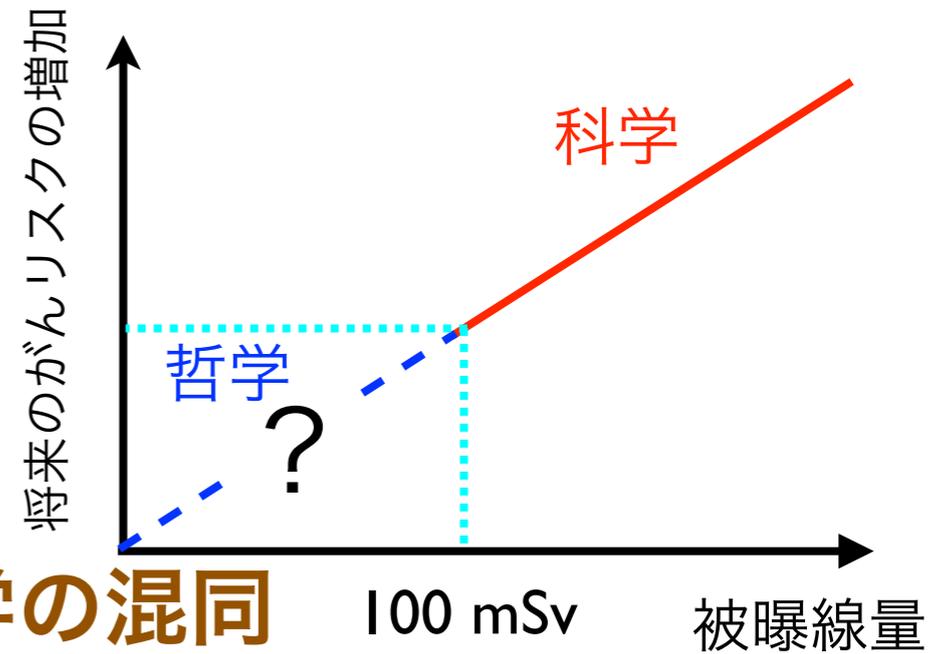
リスクコミュニケーション

放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

がんの原因が医学的に分かっていない
疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係 スクリーニング効果・別の要因



科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

リスクをどこまで許容するか

安全と危険の線引きはできない。

他のリスクとの相対比較

0 mSv



基準値

(社会が決める)

放射線のリスク

「絶対安全」は世の中に存在しない。
相対的なリスク評価の目を養うべき。

正しい情報をどうやって判断するか。

根拠のない過信・安心は問題だが、
根拠のない恐れや不安もまた問題。

☞ JCO の事故

☞ パニック、風評、健康被害。

放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

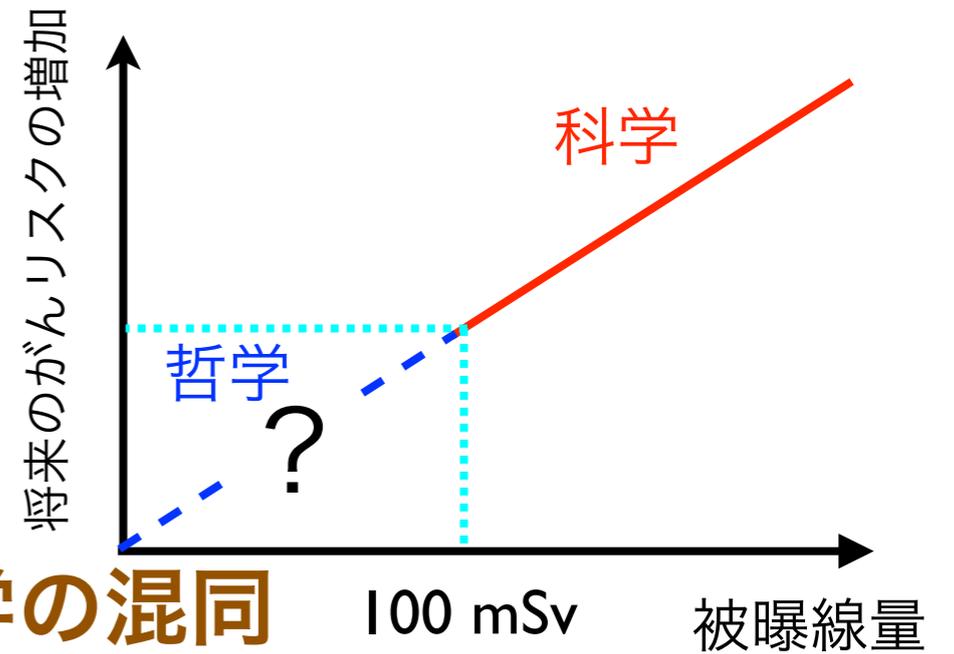
がんの原因が医学的に分かっていない

疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係 スクリーニング効果・別の要因

線形のリスク
は判断し難い



科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

リスクをどこまで許容するか

安全と危険の線引きはできない。

他のリスクとの相対比較

0 mSv



基準値

(社会が決める)

放射線のリスク

「絶対安全」は世の中に存在しない。
相対的なリスク評価の目を養うべき。

正しい情報をどうやって判断するか。

根拠のない過信・安心は問題だが、
根拠のない恐れや不安もまた問題。

👉 JCO の事故

👉 パニック、風評、健康被害。

科学的「確率」をどう理解するか。

がんの影響は「確率的」に現れる

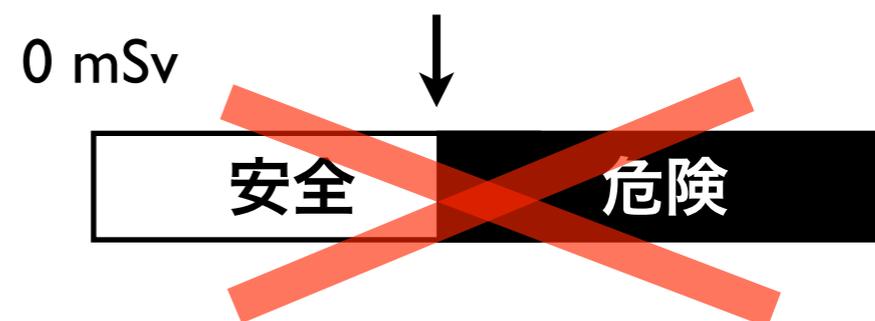
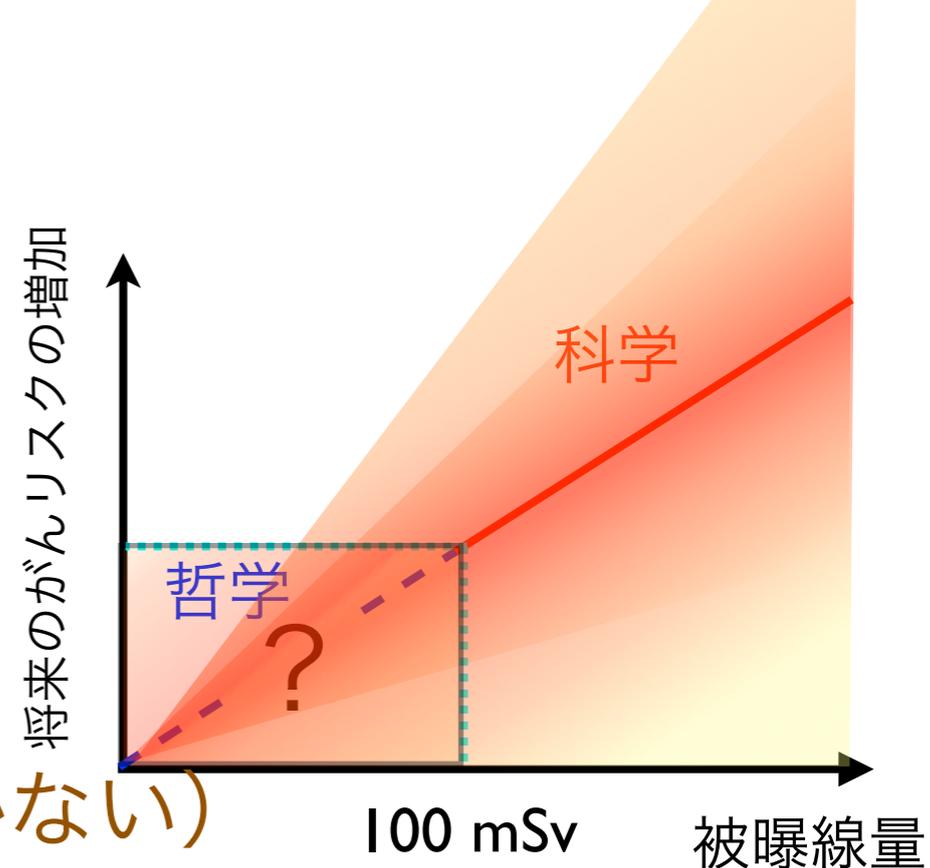
個別の事象との因果関係は分からない

放射線によるがんは特徴がないのが特徴
(ほかの要因によるがんと全く区別がつかない)

その確率さえ不確かさを伴う

トランスサイエンス

科学に問うことはできるが、科学(だけ)では答えることのできない問題群の領域



リスクは相対的

基準値
(社会が決める)

放射線のリスク

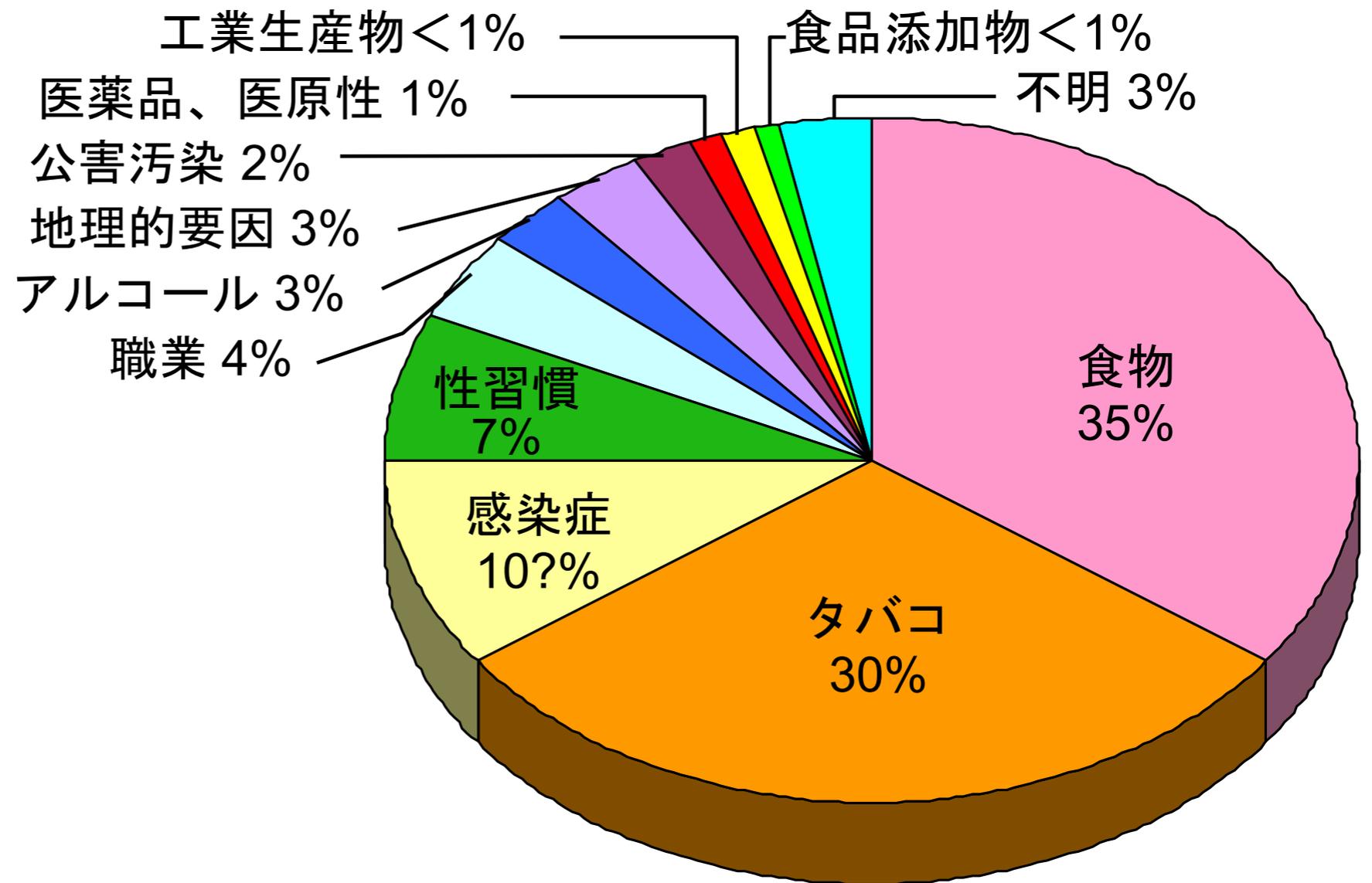
放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

受動喫煙の女性	1.02~1.03倍
野菜不足	1.06倍
100~200ミリシーベルトを浴びる	1.08倍
塩分の取りすぎ	1.11~1.15倍
運動不足	1.15~1.19倍
200~500ミリシーベルトを浴びる	1.19倍
肥満	1.22倍
500~1000ミリシーベルトを浴びる	1.4倍
毎日2合以上の飲酒	1.6倍
喫煙	
毎日3合以上の飲酒	1.8倍
1000~2000ミリシーベルトを浴びる	

※網かけは放射線

(注)相対リスクは、例えば喫煙者と非喫煙者のがんの頻度を比較した数字

ヒトのがんの原因と関連のある因子



(R.Dool and R.Peto, 1981)

表の値は短時間での被曝の場合。

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

(低線量率では損傷の修復のためリスクはより小さい。どれだけ小さいかは議論のあるところで、結論は出ていない。ICRPは係数1/2を採用。)

「ものをこわがらな過ぎたり、こわがり過ぎたり
するのはやさしいが、**正当にこわがる**ことは
なかなかむづかしい**ことだと思われた。**」

寺田 寅彦 (1935年)

被曝を

怖れすぎても、怖れなさすぎても

健康被害が出る。

(東大病院 放射線科 中川恵一先生)



病は気から = 精神失調、免疫力低下などに注意

内部被曝は怖い！という主張

チェルノブイリの「悲惨な例」のイメージ

放射線の安全を説く本は売れない。

安全と安心

小さい子どもを持つ**母親**が特に過敏

信頼と納得、不信と不安と不満

ゼロリスク神話の盲点

定量的判断の必要性

「放射能の検査は大前提」

安全の担保としての基準値

放射線に関する科学的知識の欠如、
科学者の社会への情報発信の失敗、
行政に対する不信感、が問題。

科学者の立場・役割

情報開示・「伝える」ことの重要性

リスクの伝え方

リスクを誇大に喧伝するのは正義か
リスクの適切な評価が不可欠。
過小評価も過大評価もダメ。

危険(hazard)が起きたら誰が責任をとるのか
起きなかったらそれでめでたしですむのか

科学者による踏み越え

誰が何の「専門家」なのかの見極め
科学的合意点と論争点との峻別
科学的事実と個人の価値判断の区別

中立な立場での発言

御用学者？／恐怖の煽動？

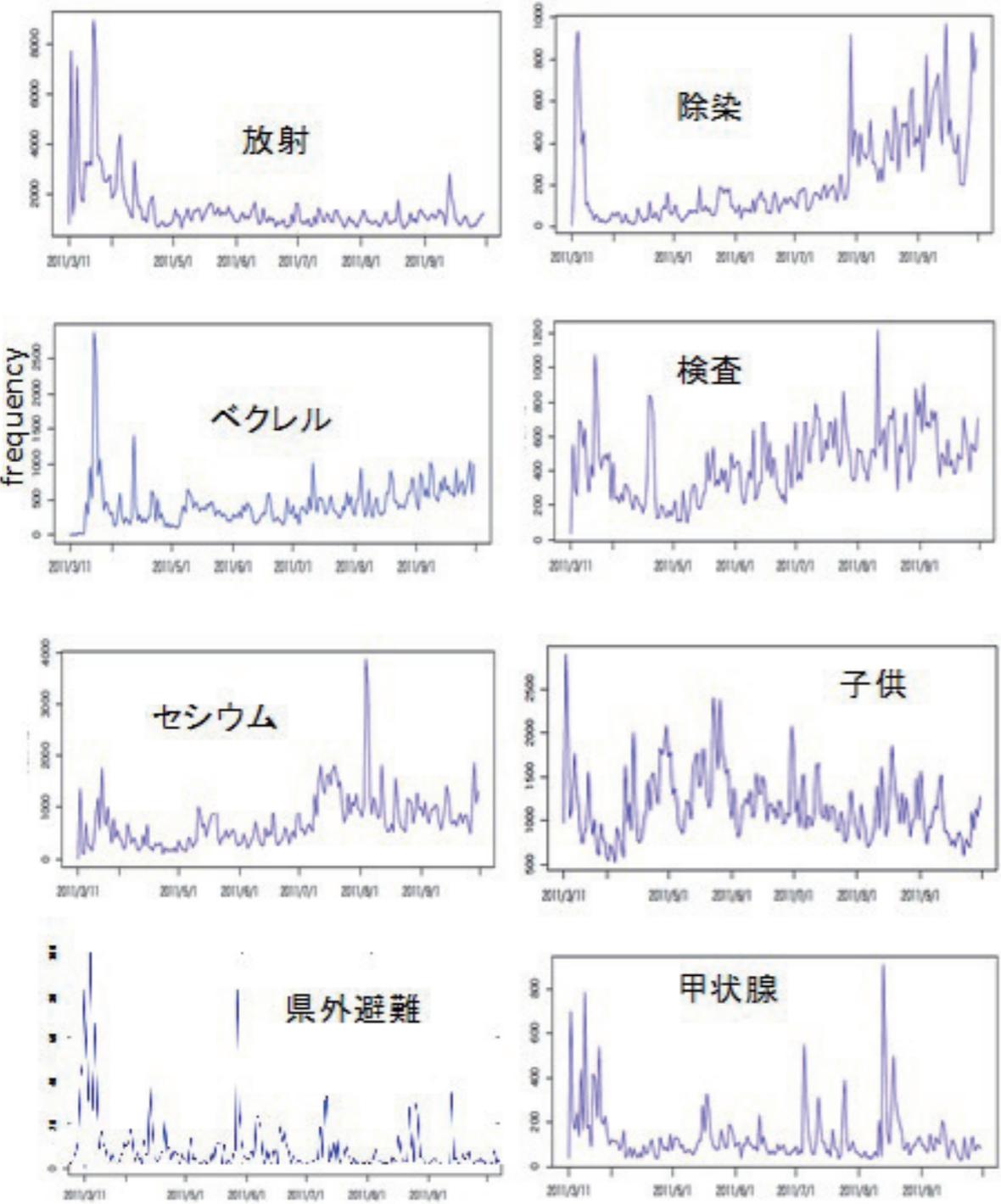
イデオロギーの問題（原発推進／反原発、その他の利権？）

SNS (twitter) での放射線リスク

「ビッグデータ解析による 3.11 以降の放射線に関する科学者の情報発信とその波及効果の検証：クライシス時に有効な科学者の情報発信法の開発を目指して」

3/11 4月 5月 6月 7月 8月 9月

環境省補助金 宇野賀津子・鳥居寛之
原子力災害影響調査等事業
(放射線の健康影響に係る研究調査事業)



原発事故後の twitter データの解析

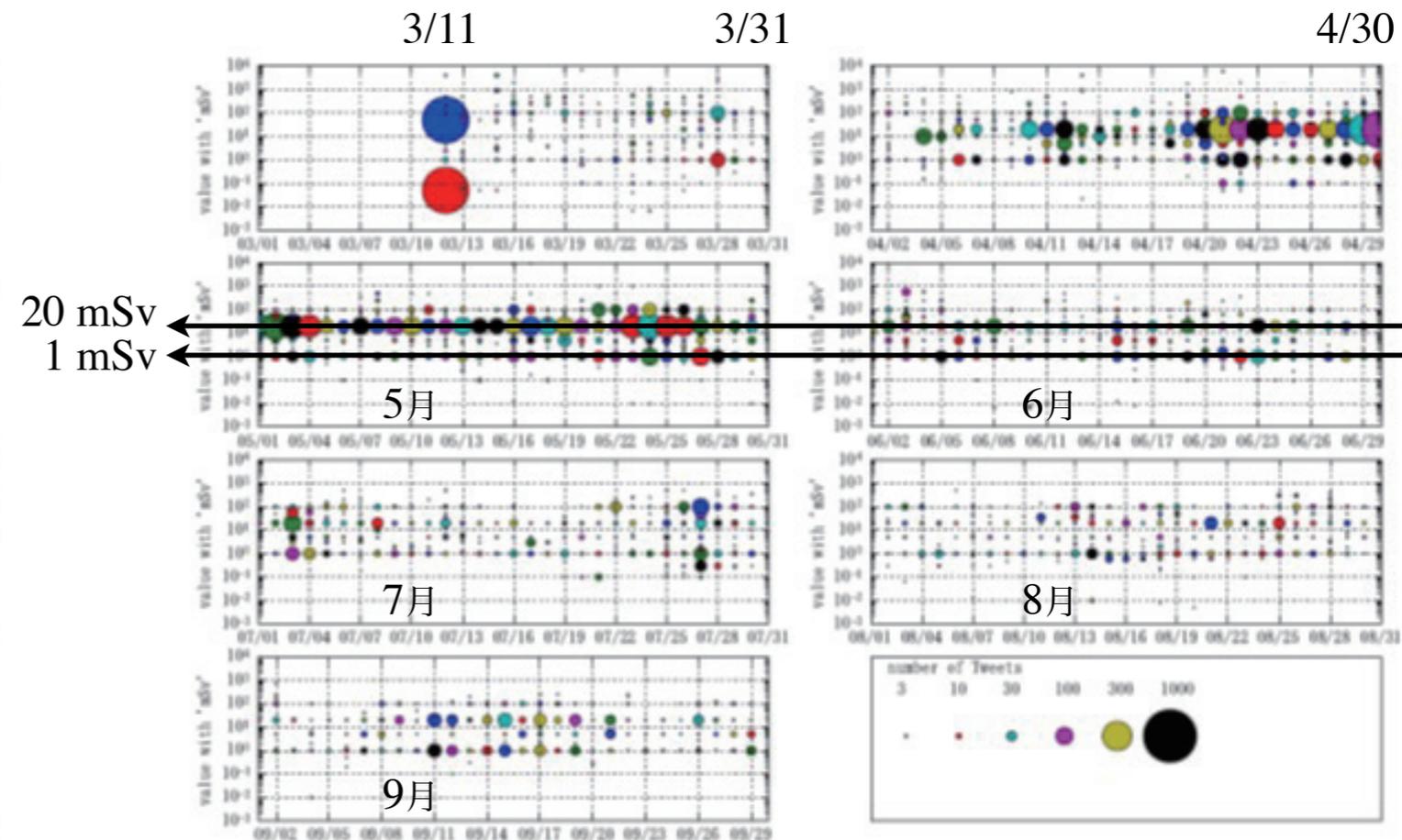
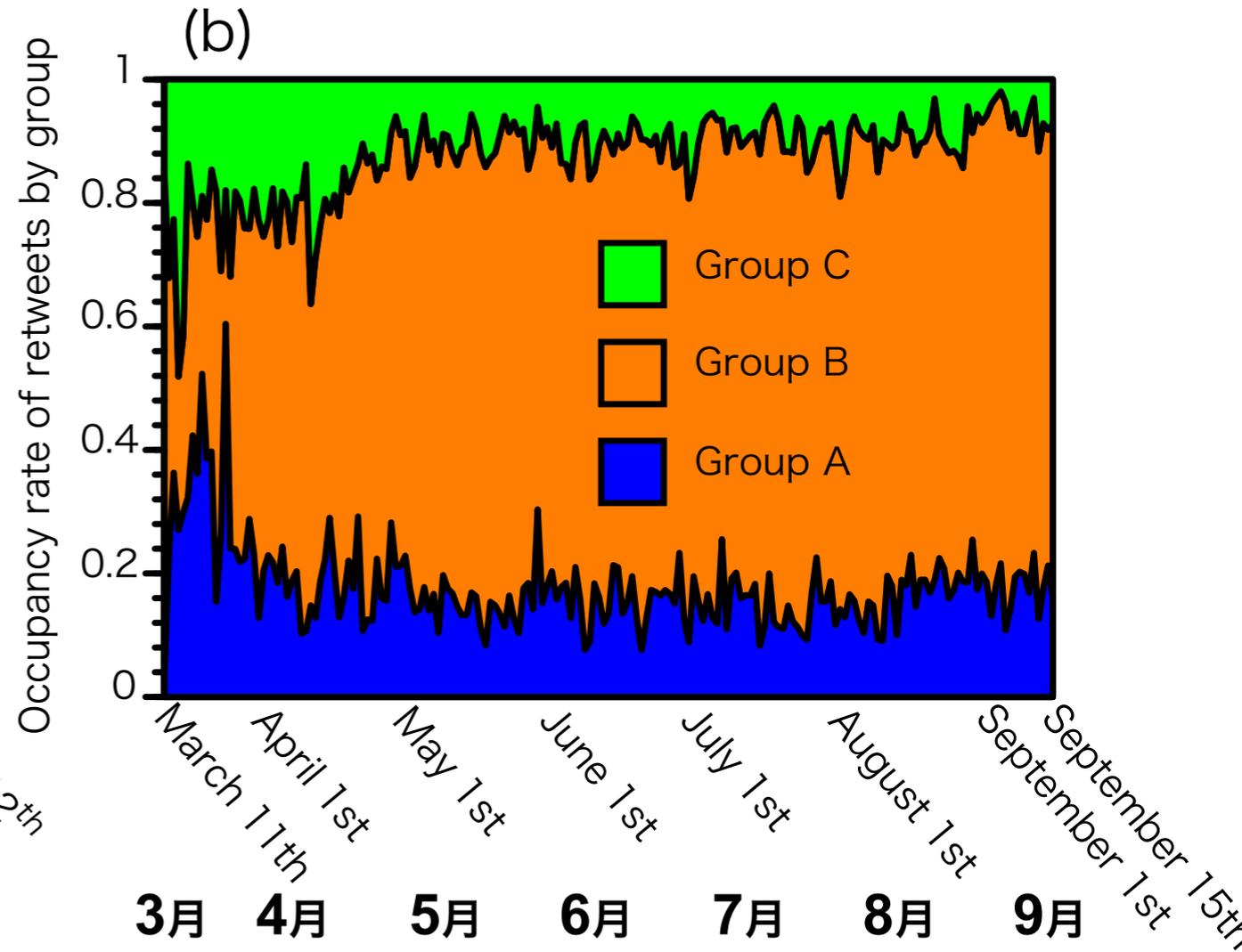
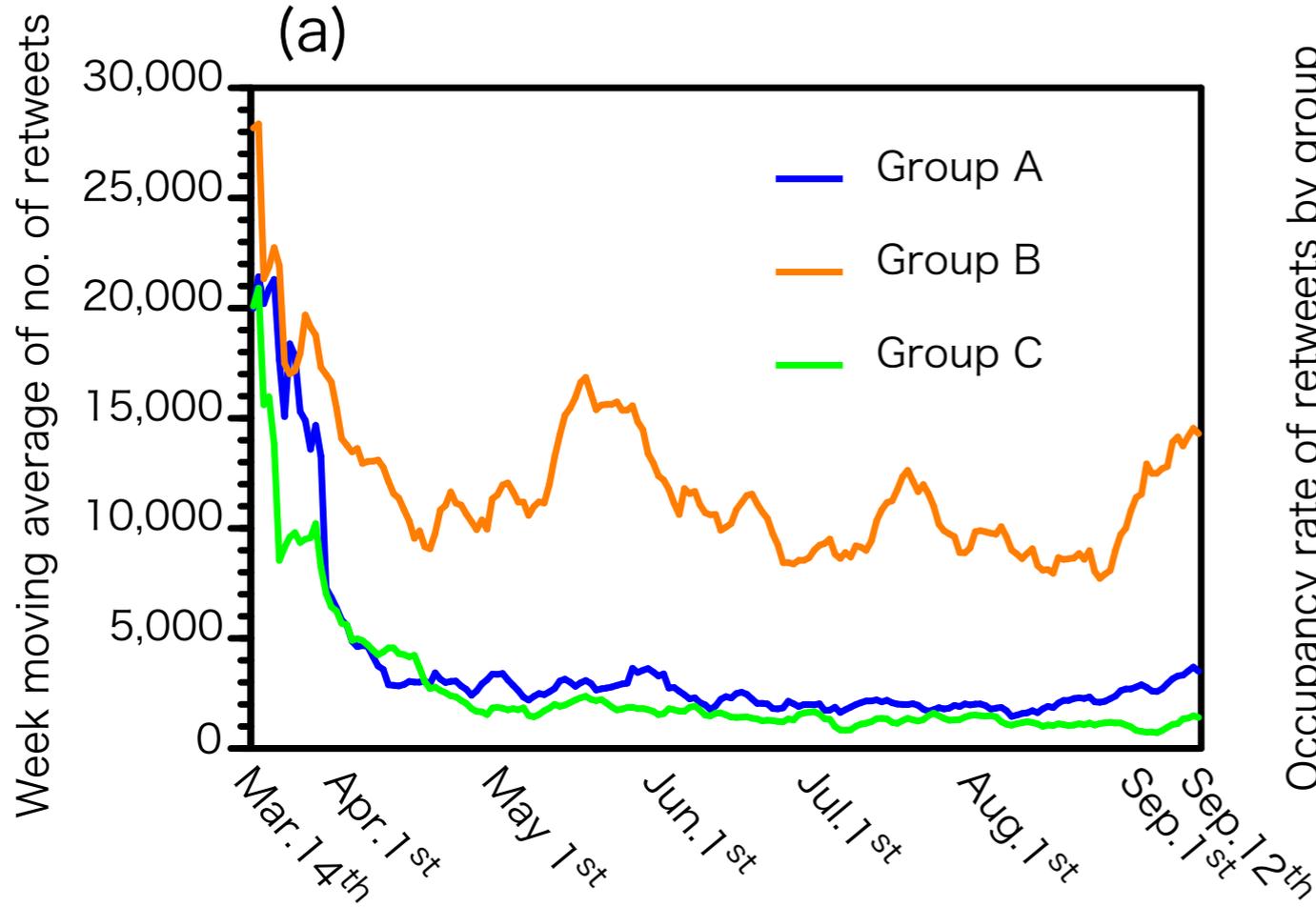


図2 サンプルされた Twitter データ 500 万件のキーワードの推移

図3 数値と “mSv” が連続して現れる Tweet 数

グループ毎の tweet 数と占有率

Retweet ネットワーク、テキスト情報からインフルエンサーをグループ分けした。



2011年 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月

3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月

Group A (科学派) 14 : 個人実名 / 匿名 10 / 3. 学者 4 ジャーナリスト 2 官僚 1

Group B (感情派) 67 : 個人実名 / 匿名 42 / 21. 学者 5 実業家 4 ジャーナリスト 8 政治家 9

Group C (メディア) 13 : 個人実名 / 匿名 1 / 0. 報道機関 12

グループ人数

個人実名 / 匿名

属性

Twitter use in scientific communication
M. Tsubokura, Y. Onoue, H. A. Torii *et al.*,
PLoS ONE 13(9): e0203594.

twitter ネットワーク解析

2011/3 ~ 2012/9

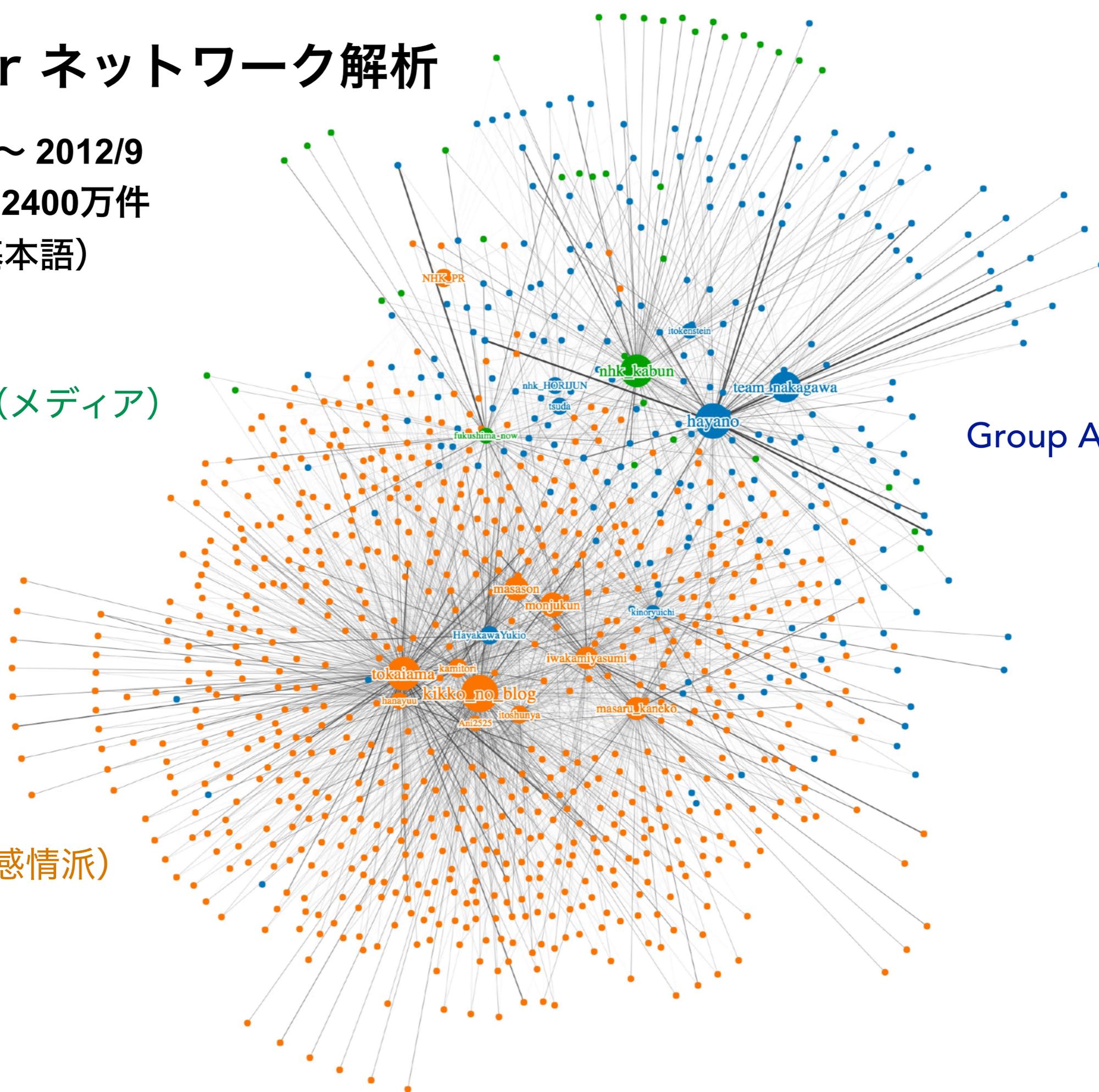
100% = 2400万件

P (基本語)

Group C (メディア)

Group A (科学派)

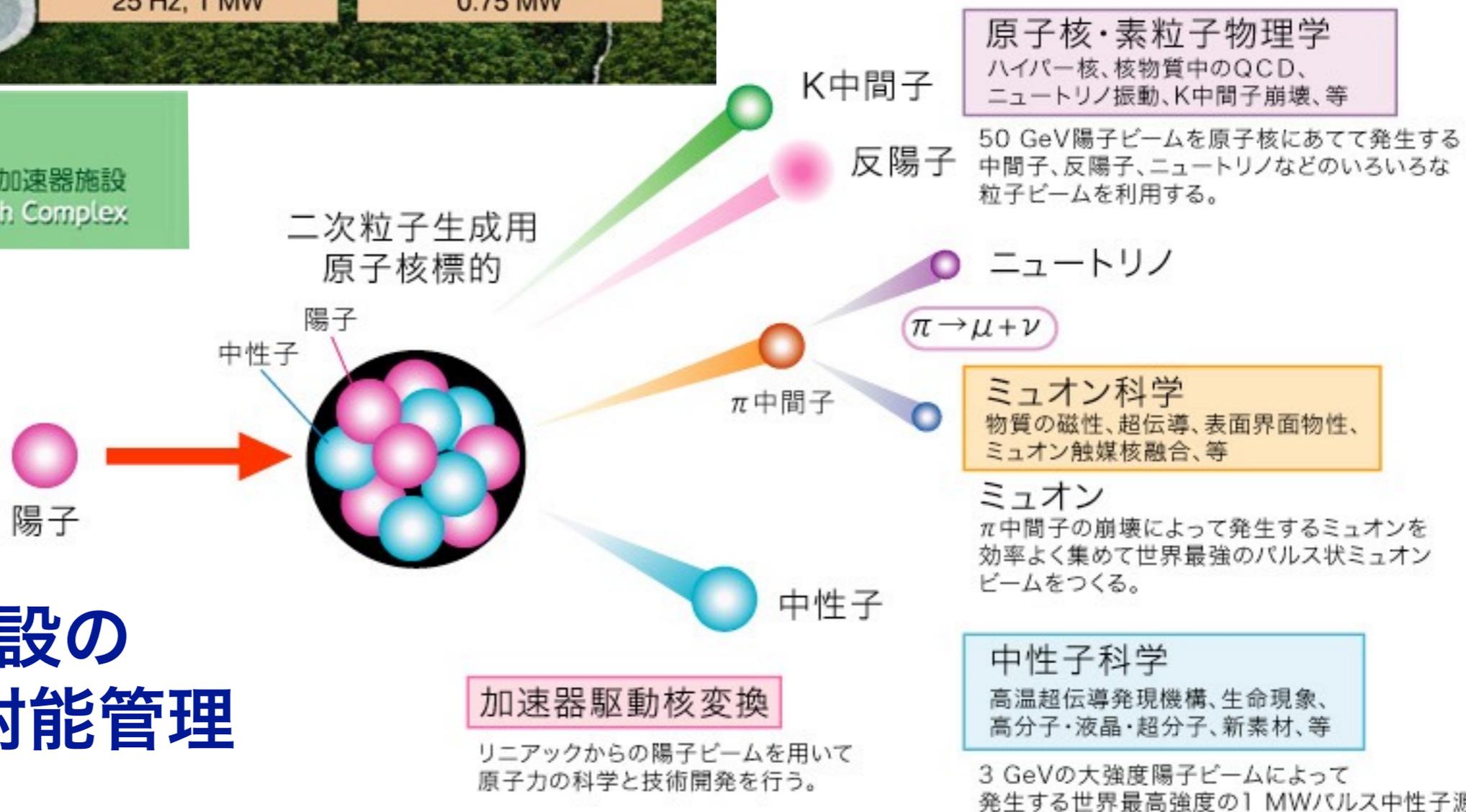
Group B (感情派)





独立行政法人 日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency

J-PARC 大強度陽子加速器施設
Japan Proton Accelerator Research Complex



加速器施設の 放射線・放射能管理

Fine.

Grazie per la vostra attenzione.

Gratias ago pro audientia vestra.

Спасибо за внимание.

Merci de votre attention.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Thank you for your attention.

경청해 주셔서 감사합니다.

感謝您的聆聽。

谢谢您的关注。

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A. TORII