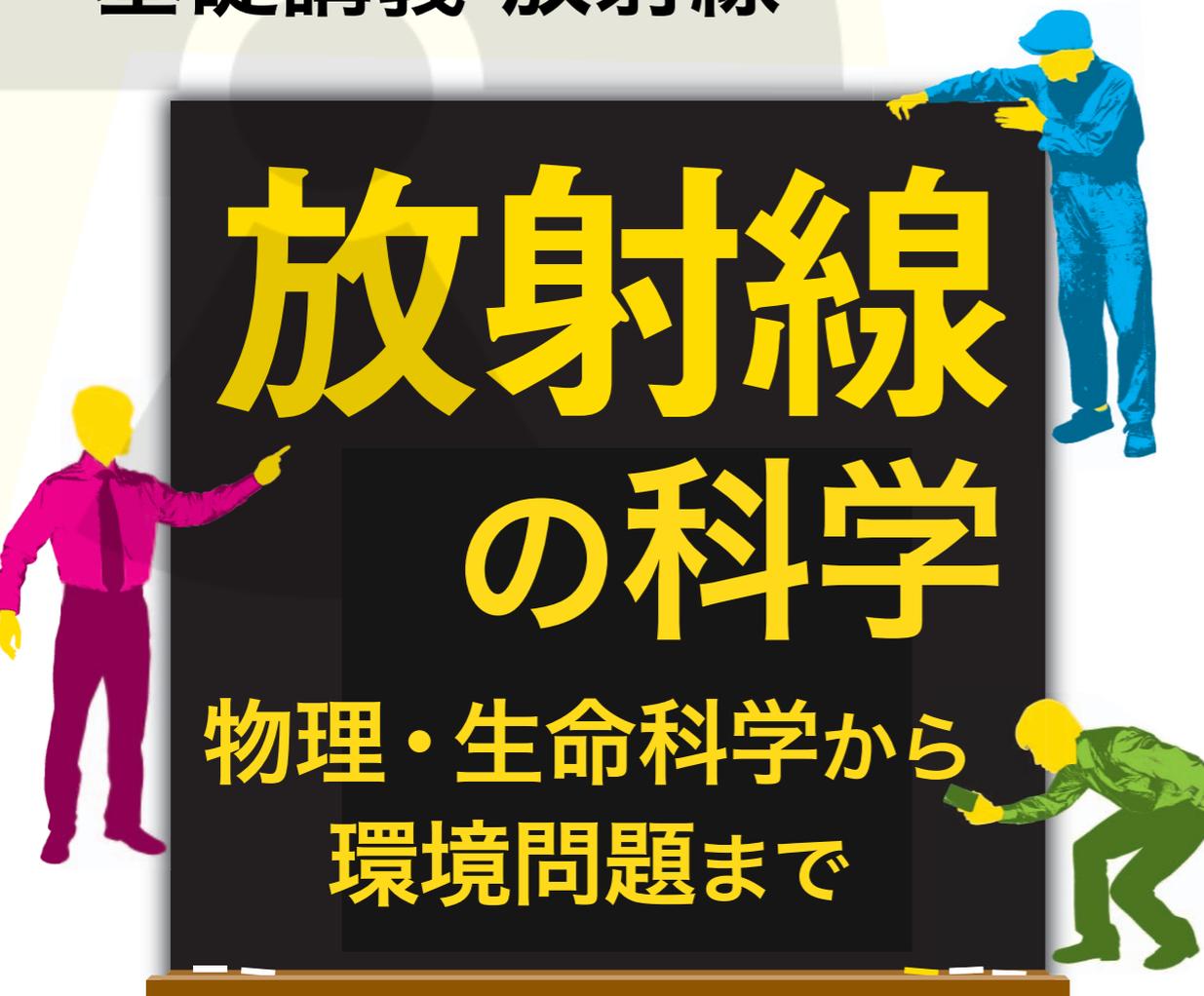


基礎講義 放射線



放射線の科学

物理・生命科学から
環境問題まで

- 放射線入門
- 放射能と放射線の物理学
 - 原子核物理学・放射線物理学
- 環境汚染の放射線計測
 - 放射線計測学
 - 環境放射化学・放射線の安全取扱
- 放射線の人体への影響
 - 放射線の単位・放射線化学
 - 放射線生物学・放射線防護学
 - リスクコミュニケーション

2024 / 8 / 22 (木)

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 大学院理学系研究科

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 —」

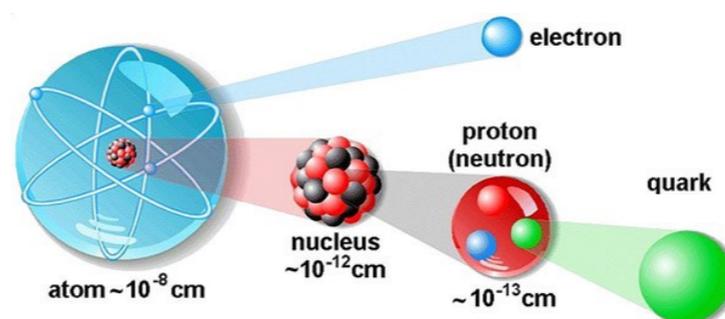
とあわせて、どうぞご活用下さい。 <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp>

2011年度夏学期

自主講義 放射線学

2011年度冬学期

主題科目テーマ講義/学術フロンティア講義



2021年度 Aセメスター

2020年度 Aセメスター

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

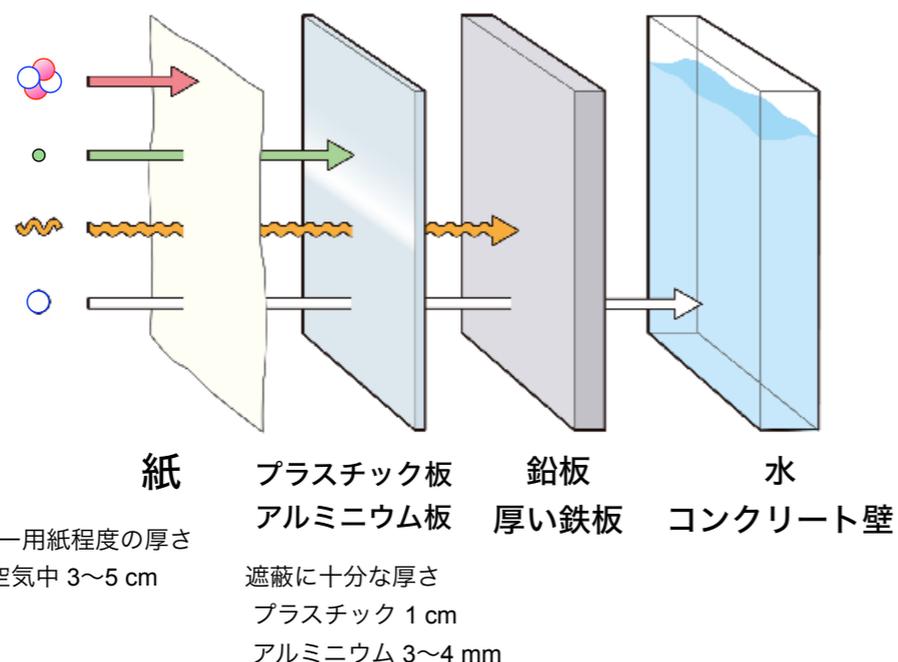
2016年度 Aセメスター

2015年度 Aセメスター

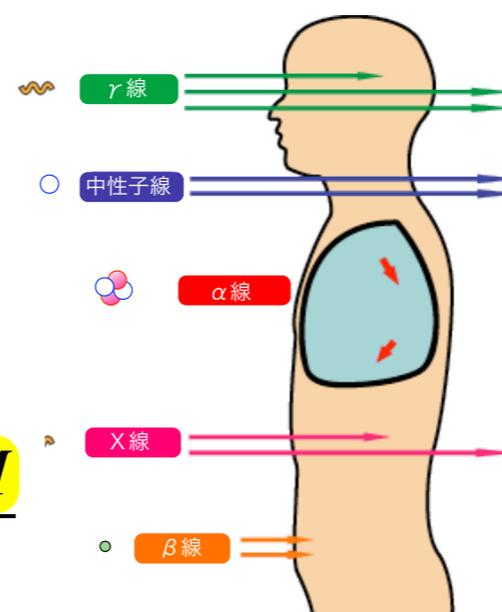
2014年度冬学期

2013年度冬学期

アルファ(α)線
ベータ(β)線
エックス(X)線
ガンマ(γ)線
中性子線



2012年度冬学期



放射線
を
科学的に
理解する

質量阻止能
MeV / (g / cm²)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$



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



飯舘村



対話型講演会 @ 福島県

伊達市・南相馬市・郡山市

2014/8/5-7

チーム
「あいんしゅたいん」

企画：NPO 法人あいんしゅたいん

双葉町



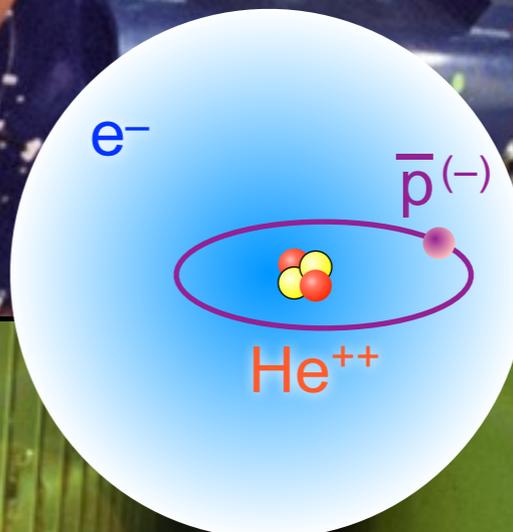
郡山市



南相馬市



伊達市



Antiprotonic Helium ($\bar{p}\text{He}$)



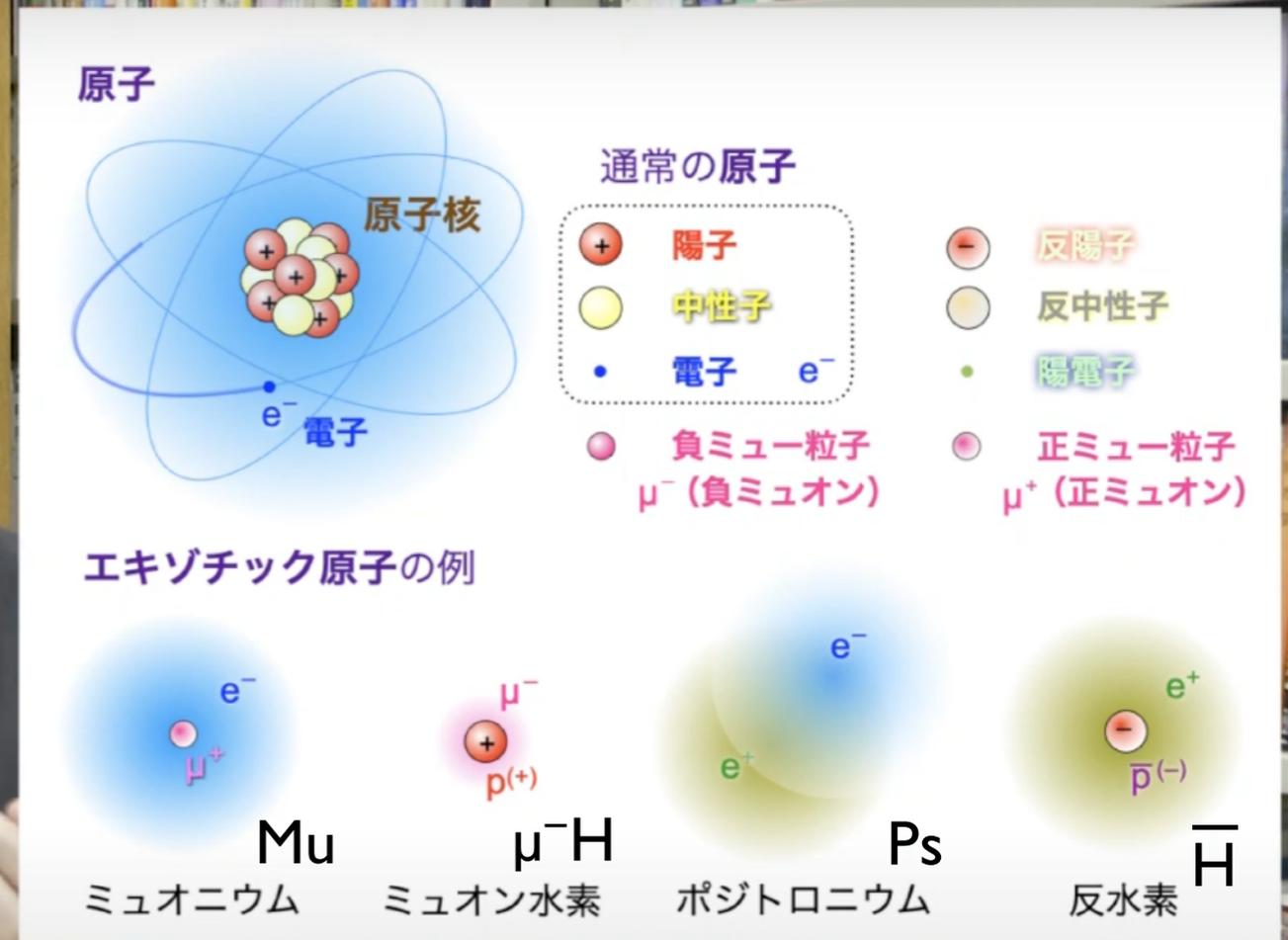
CERN

European Organization for Nuclear Research

Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

東大理学部 YouTube チャンネル

研究室の扉「エキゾチック原子を精密に計測する」鳥居寛之准教授



精密原子分光で
素粒子物理学を検証

講義の理解目標の一例

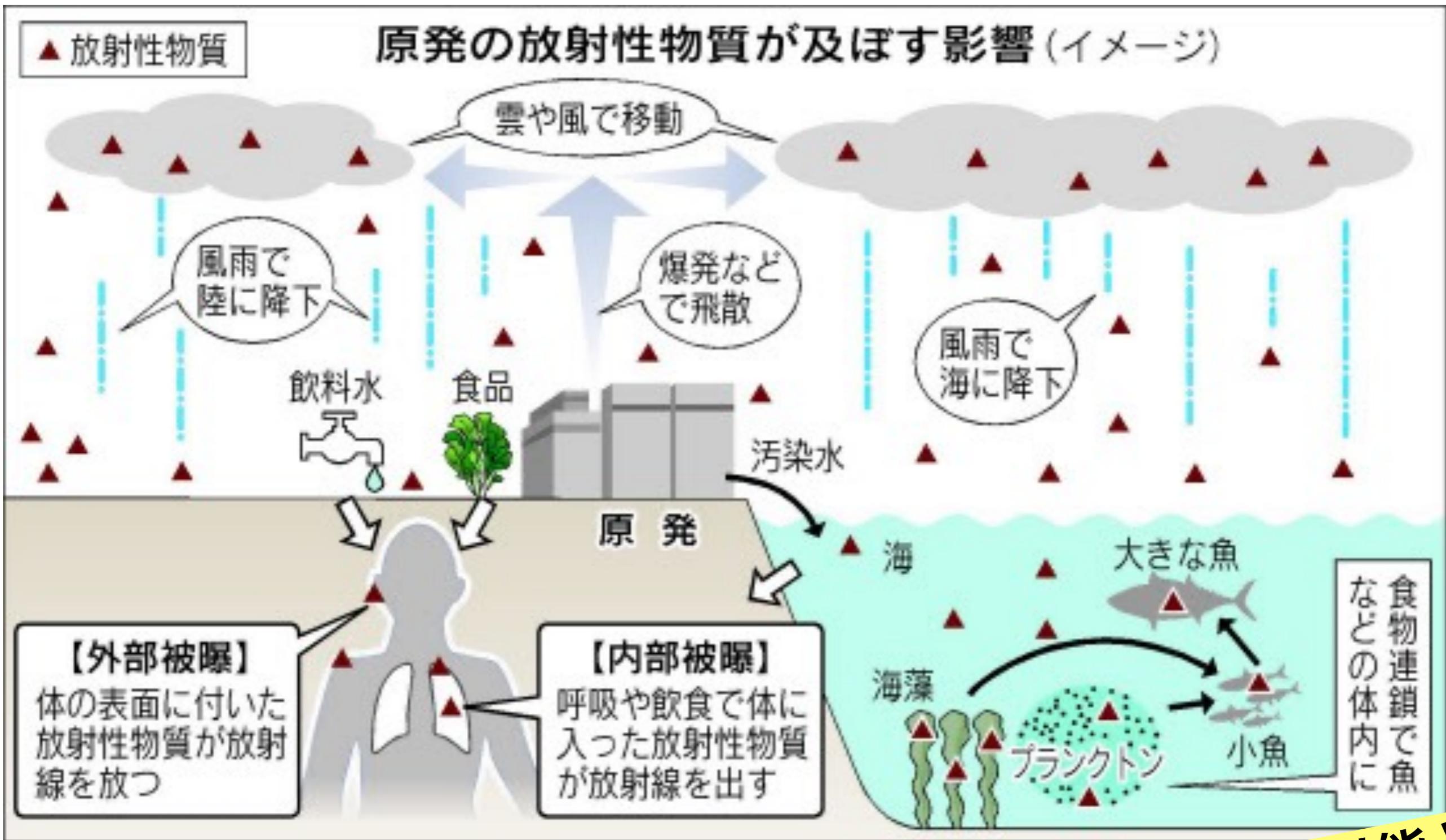
以下のような問いに答えられるように

「放射線が物質に及ぼす作用と人体への影響について、
物理学的、化学的、分子生物学的、医学的観点から
それぞれ論ぜよ。」

「放射線防護の考え方および、研究で放射性同位体を取
り扱うときの注意点について述べよ。」

「環境中の放射性物質が農業や食品衛生に与える影響
について述べよ。ゼロでないリスクをどう伝え、
どう判断すべきか。安全と安心を確保する方策は？」

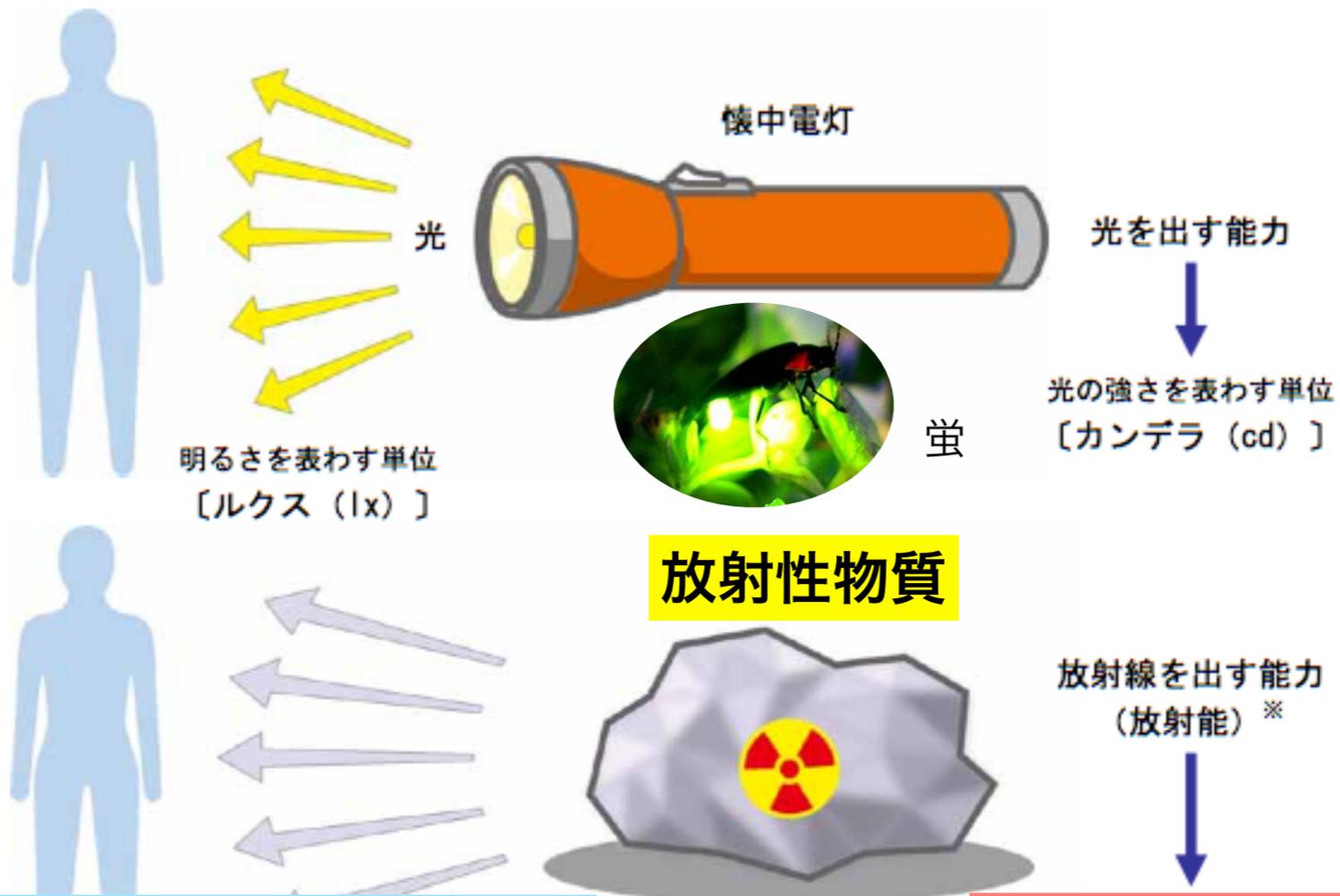
放射線
放射能
放射性物質



放射性物質が関東地方まで飛来。
放射線が直接関東に届いたのではない

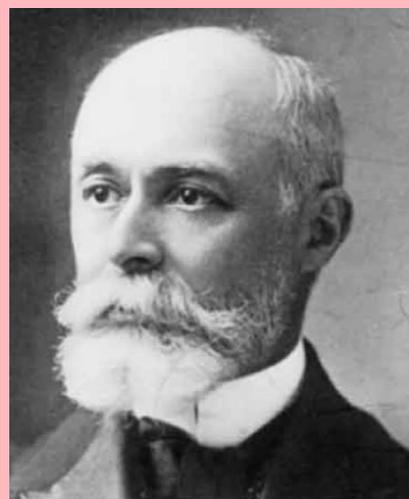
放射性物質、放射能と
放射線を混同しない

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

$$[Bq] \mid Bq = 1 \text{ dps}, [Ci] \mid Ci = 37 \text{ GBq}$$

Becquerel

decay/disintegration
per second

Curie

1 キュリー = 370億ベクレル



自然放射線

身の周りの放射線

mSv (実効線量)



ブラジル・ガラバリの放射線
(年間、大地等から) 10

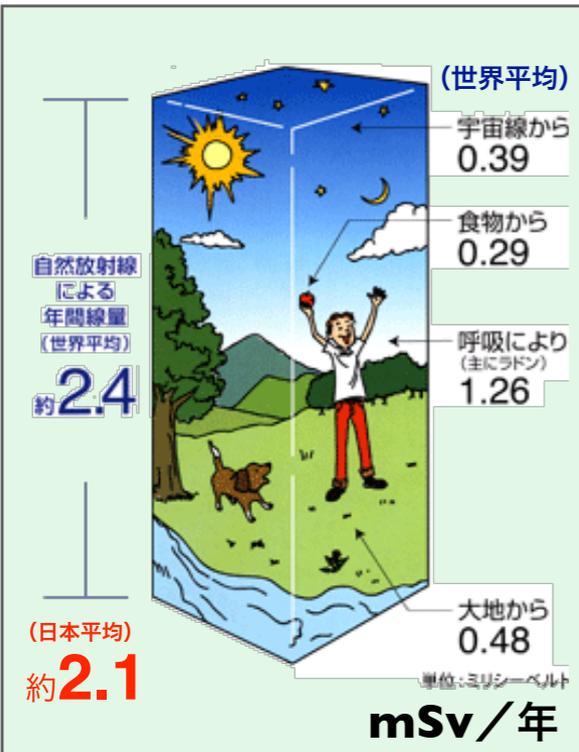
放射線の量
(ミリシーベルト)

10

胸部X線コンピュータ断層
撮影検査(CT スキャン)(1回) ★



6.9



1人あたりの自然放射線(年間)(世界平均) 2.4 ★



2.4

1

一般公衆の線量限度(年間)(医療は除く) 1.0



岐阜 ↔ 神奈川



0.4

胃のX線集団検診(1回) 0.6



国内自然放射線の差(年間)(県別平均値の差の最大) 0.48

東京ーニューヨーク航空機旅行(往復)(高度による宇宙線の増加) 0.2



0.2

0.1

胸のX線集団検診(1回) ★



再処理工場からの放射性物質の放出による評価値(年間) 0.022

0.05



原子力発電所(軽水炉)周辺の線量目標値(年間)(実績ではこの目標値を大幅に下回っています)

クリアランスレベル導出の線量目安値(年間) 0.01

0.01

関西は自然放射線量が高い！

全国の自然放射線量

μGy/時

関東・東北は低い！

大地からの
自然放射線量

御影石
(花崗岩)

温泉地

関東ローム層

《表5》 土壌や岩石中に含まれる天然の放射性物質

| 放射性物質の種類 | 放射能濃度 (ベクレル/kg) | |
|-----------------|-----------------|----------|
| | 一般の土壌・岩石 | 花こう岩 |
| カリウム40 | 100~700 | 500~1600 |
| ウラン238 (娘核種を含む) | 10~50 | 20~200 |
| トリウム232 | 7~50 | 20~200 |

出典：国連放射線影響科学委員会報告（1982）など

mSv/年

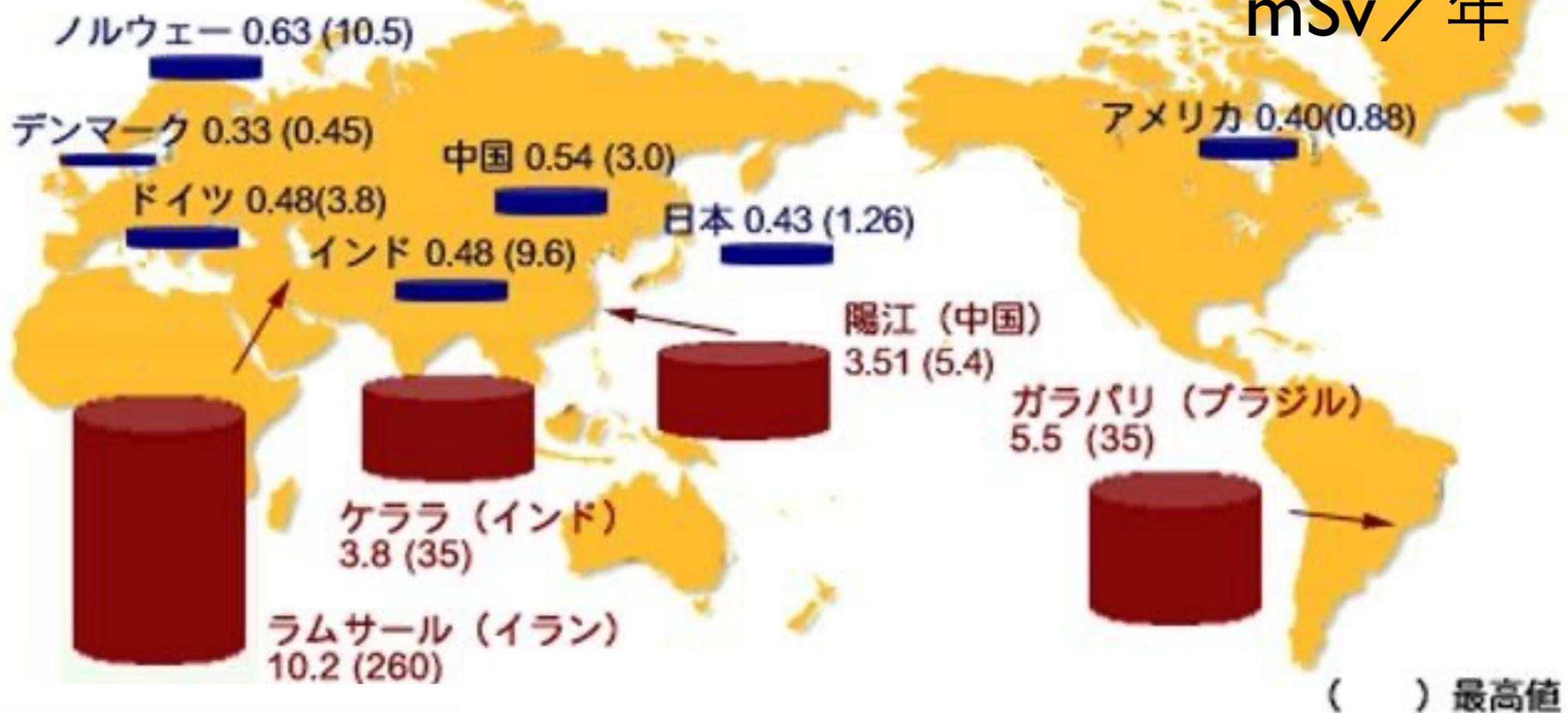
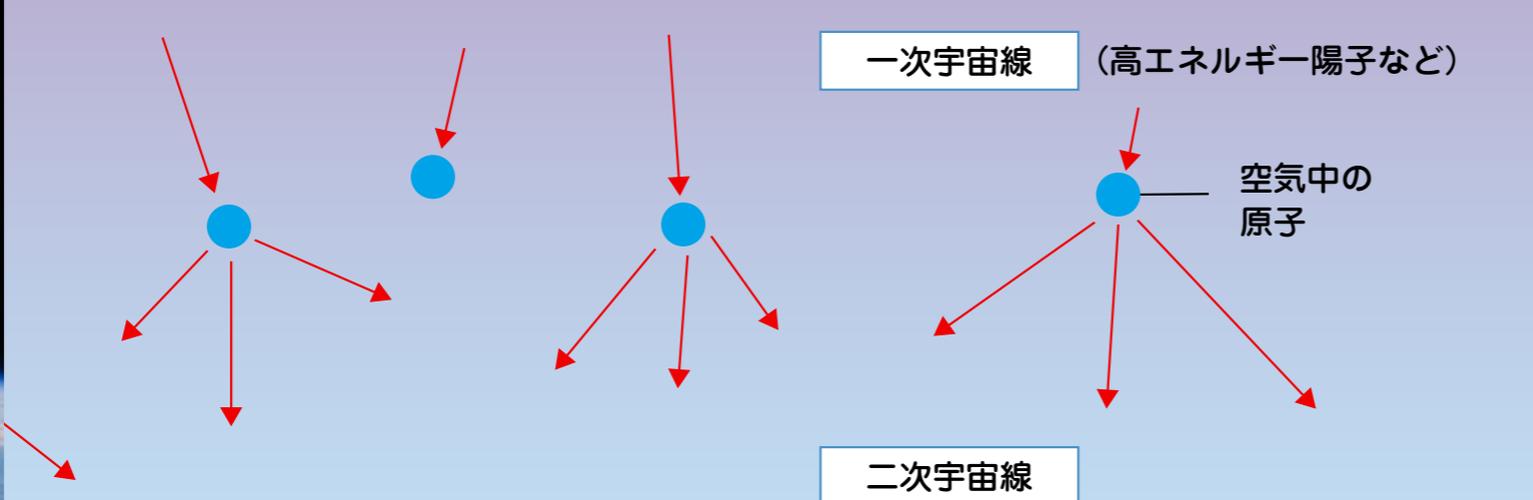


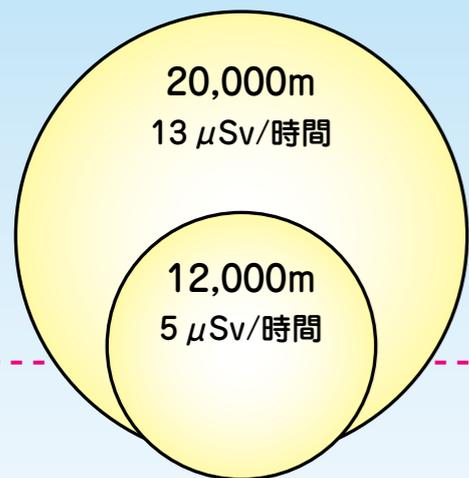
表1 高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較^{7,8)}

| | 高自然放射線地区 | 対照地区 |
|-----------------|-----------|---------|
| 自然放射線量率 (mSv/年) | 5.5 | 2.1 |
| がん死亡率 (10万人・年) | 48.8 | 51.1 |
| 調査人数・年 | 1,008,769 | 995,070 |

図2 陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域



※○の大きさは、放射線を受ける量をあらわしている。



4,000m ○ 0.2 μ Sv/時間

2,000m ○ 0.1 μ Sv/時間

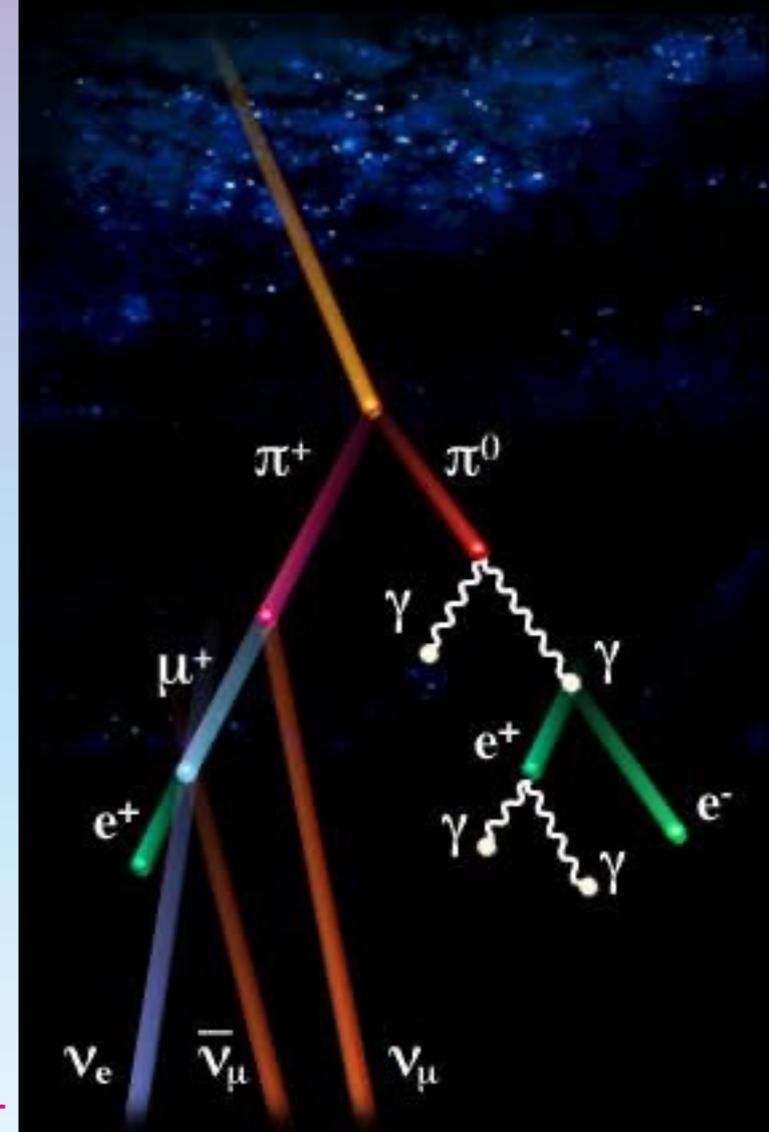
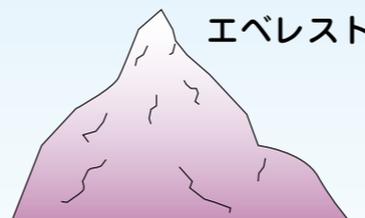
海面 ○ 0.03 μ Sv/時間

μ Sv = マイクロシーベルト

100km

10km

1km



東京~NY 往復
200 μ Sv (max)

《表4》宇宙線による年平均実効線量

| 地域 (高高度地域) | 人口 (百万人) | 高度 (m) | 年実効線量 (μ Sv) | | |
|----------------|-------------|-----------|-------------------|-----|------|
| | | | 電離成分 | 中性子 | 合計 |
| ラパス (ボリビア) | 1.0 | 3900 | 1120 | 900 | 2020 |
| ラサ (中国) | 0.3 | 3600 | 970 | 740 | 1710 |
| キトー (エクアドル) | 11.0 | 2840 | 690 | 440 | 1130 |
| メキシコシティ (メキシコ) | 17.3 | 2240 | 530 | 290 | 820 |
| ナイロビ (ケニア) | 1.2 | 1660 | 410 | 170 | 580 |
| デンバー (米国) | 1.6 | 1610 | 400 | 170 | 570 |
| テヘラン (イラン) | 7.5 | 1180 | 330 | 110 | 440 |
| 海面 | | | 240 | 30 | 270 |
| 世界平均 | | | 300 | 80 | 380 |

出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1993)

体内、食物中の自然放射性物質

出典：旧科学技術庁パンフレット

Bq / kg

Bq (60 kg)

●体内の放射性物質の量

| 放射性物質 | 濃度 (ベクレル/kg) | 全身の放射能 (60キログラムの人のベクレル数) |
|--------------------|-----------------|-----------------------------|
| カリウム 40 | 67 | 4,100 |
| 炭素 14 | 41 | 2,600 |
| ルビジウム 87 | 8.5 | 520 |
| 鉛 210または ポロニウム 210 | 0.074~1.5 | 19 |
| ウラン 238 | — | 1.1 |

日本人は高い値
(魚介類に多く
含まれる)

●食物中のカリウム40の放射能量 (日本)

(単位：ベクレル/kg)



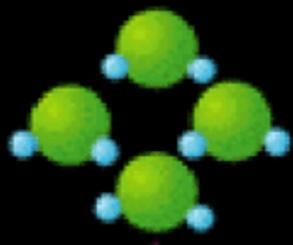
Bq / kg

^{40}K
 同位体比 0.012%
 半減期 13億年

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ (EC γ) 11%
 $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$ (β^-) 89%

毎日カリウム 3 g = ^{40}K を 80 Bq 摂取。同量を排泄。

原子核物理学



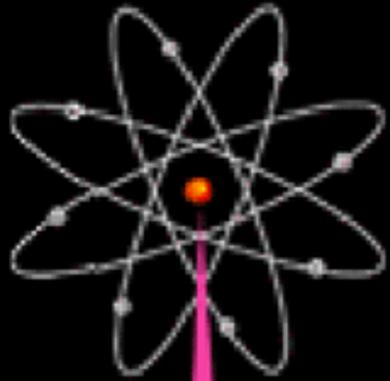
分子
molecule

nm (10^{-9} m) 化学
ナノメートル

eV Chemistry
電子ボルト

原子: atom < atomus < ατομος < a- + témnein + -os
(切ることができない)

原子物理学 Atomic Physics

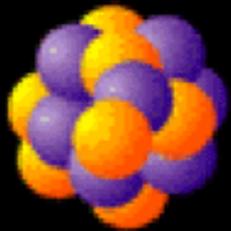


原子
atom

Å (10^{-10} m)
オングストローム Ångström

eV – keV
数電子ボルト～
キロ電子ボルト

錬金術はなぜ失敗したか

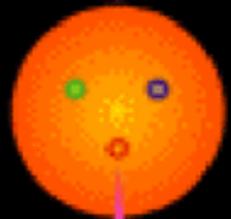


原子核
nucleus

原子核物理学 Nuclear Physics

fm (10^{-15} m)
フェムトメートル

MeV
メガ電子ボルト



陽子
proton

素粒子物理学 Particle Physics

am (10^{-18} m)
アトメートル

GeV
ギガ電子ボルト



クォーク
quark

放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核

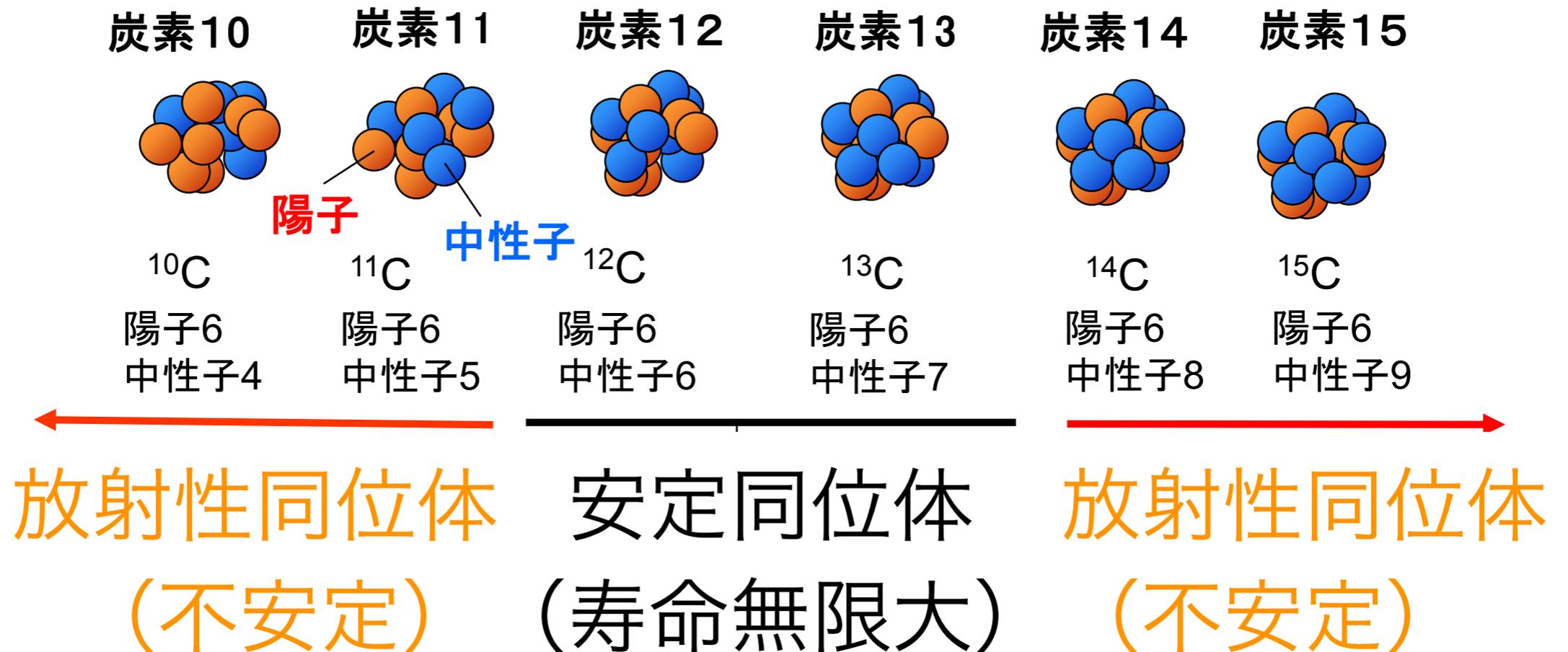
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



陽子数 Z が同じなら化学的には同じ元素
中性子数 N が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例



同位体 (原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ

半減期

19.3秒

20.3分

99%

1%

存在比

5730年

2.4秒

炭素10

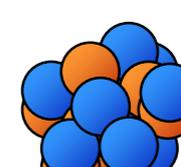
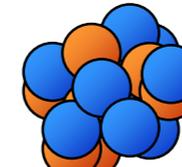
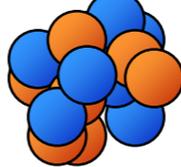
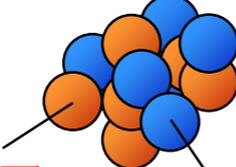
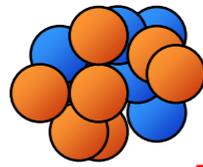
炭素11

炭素12

炭素13

炭素14

炭素15



^{10}C

^{11}C

^{12}C

^{13}C

^{14}C

^{15}C

陽子6
中性子4

陽子6
中性子5

陽子6
中性子6

陽子6
中性子7

陽子6
中性子8

陽子6
中性子9

陽子過剰になると？

(寿命がある： β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある： β^- 壊変)

放射性同位体

半減期

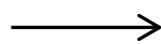
5730 ± 40年



中性子

炭素14

(放射性同位体)



陽子

窒素14

(安定)

+ e^-

電子

(β 線:放射線)

+ $\bar{\nu}_e$

反ニュートリノ

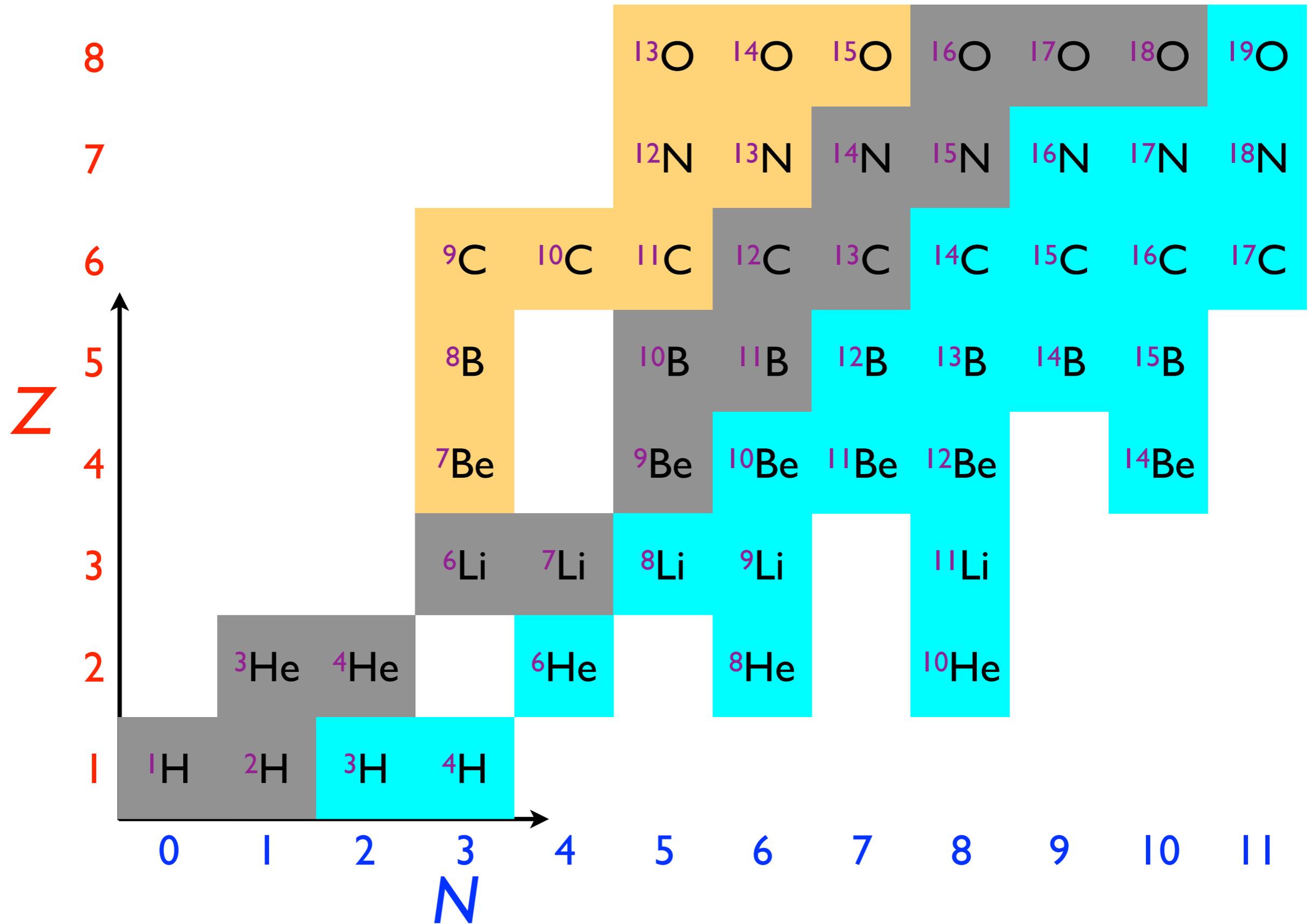
放射性同位体

ベータマイナス壊変 (崩壊)

β^- decay



核图表



核種の数

安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

理論的に予想 10000種

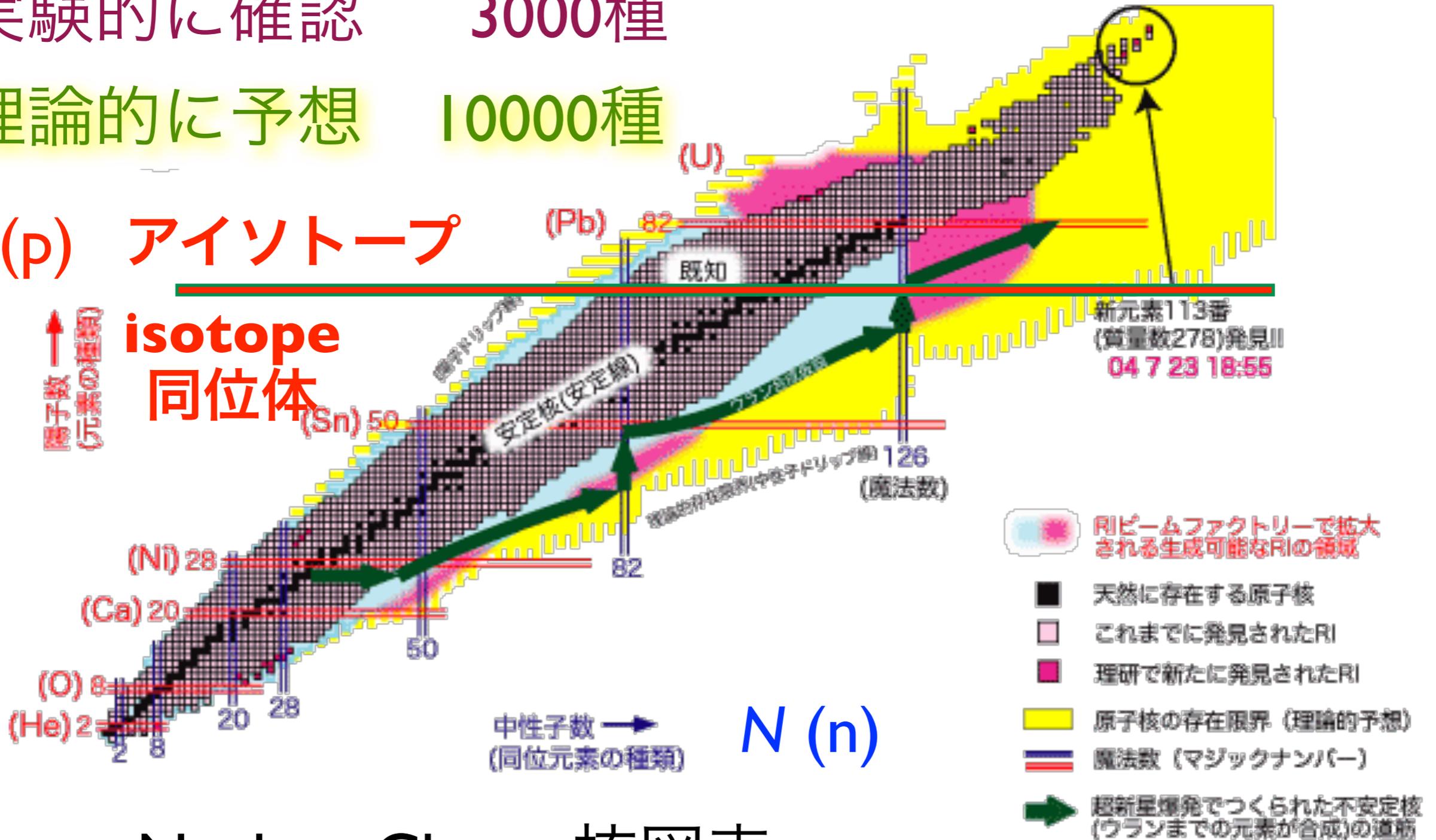
原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p) アイソトープ

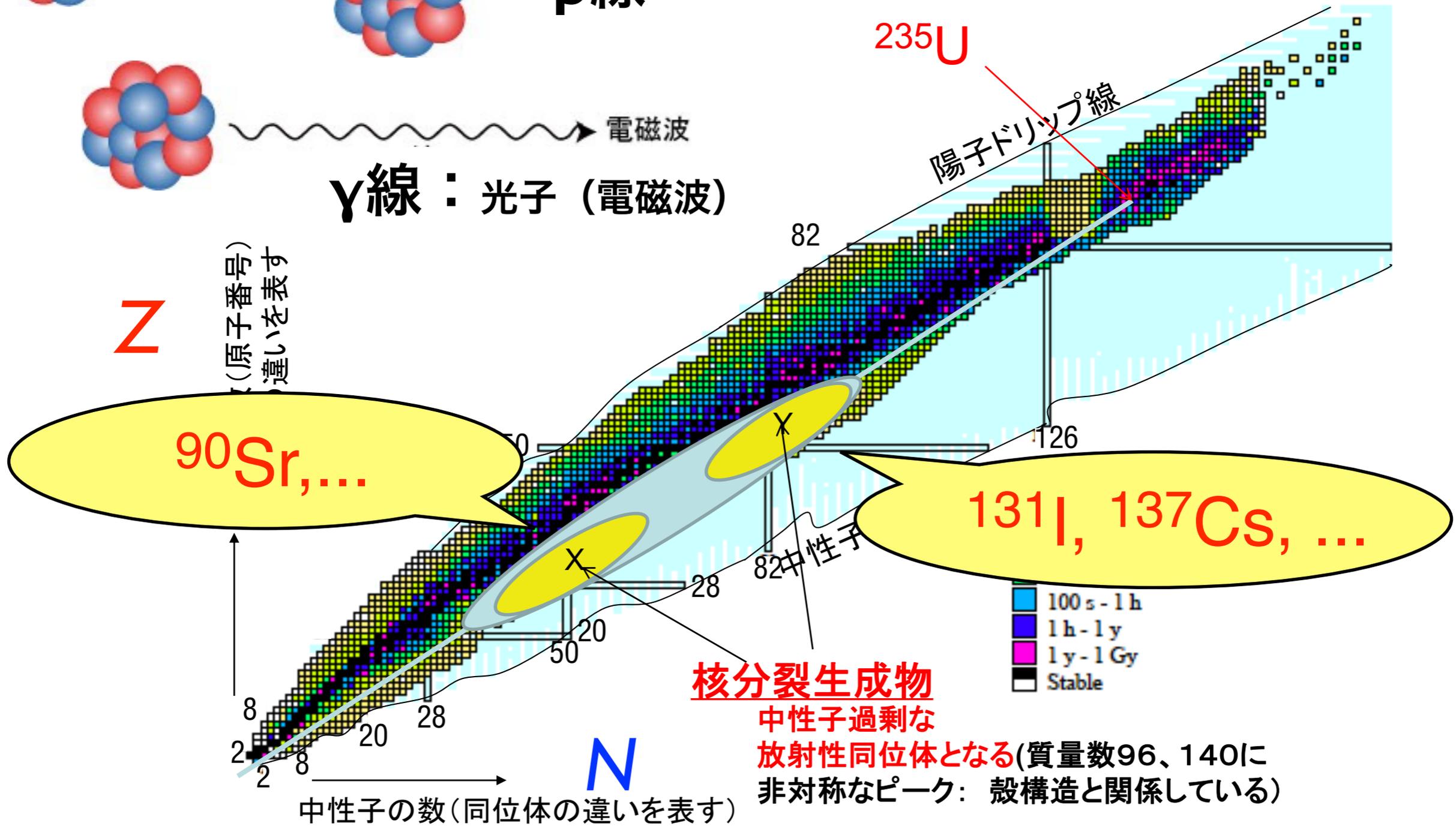
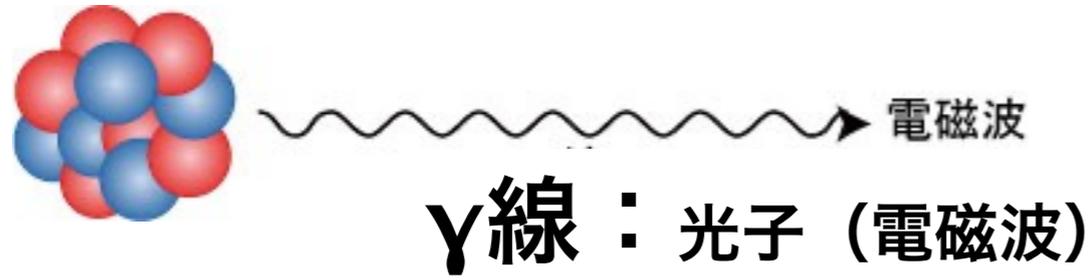
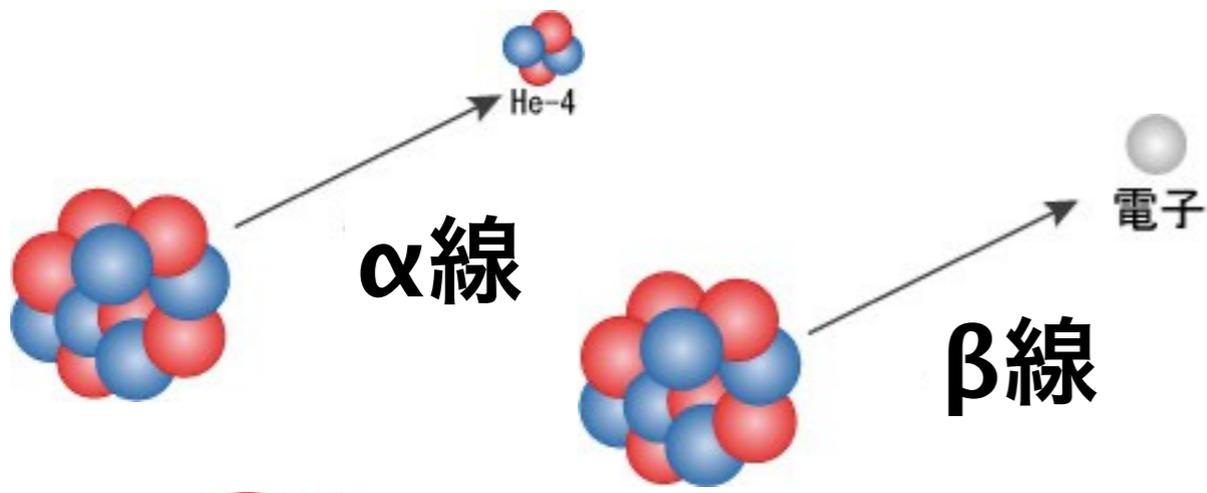
↑
陽子数
(元素の種類)

isotope
同位体



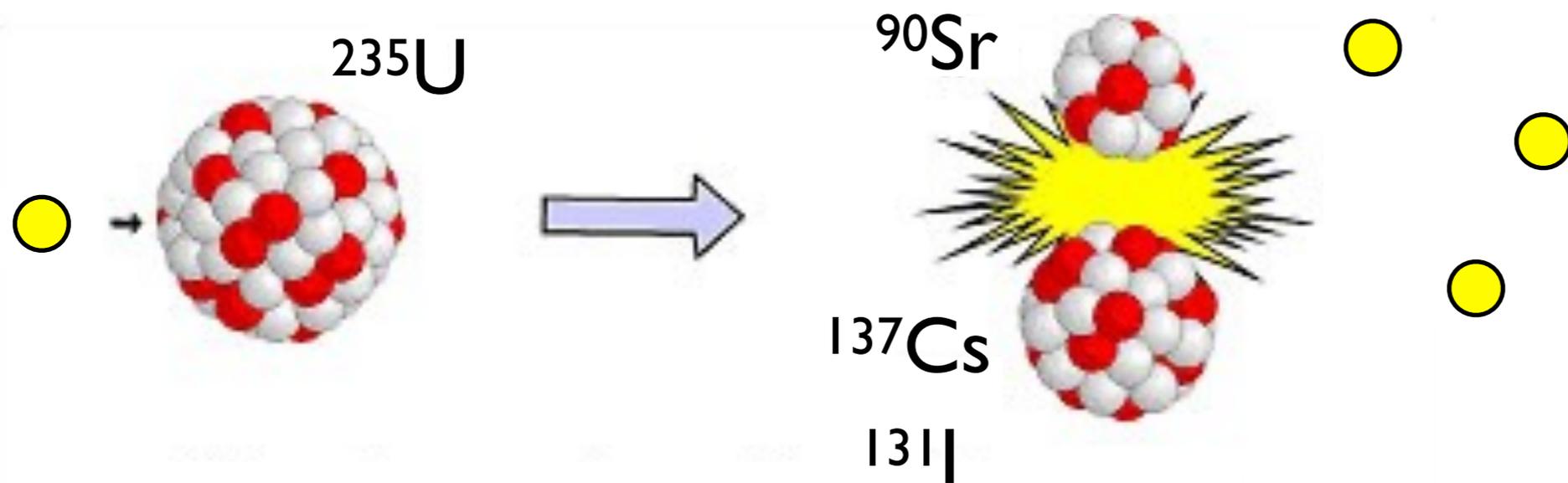
Nuclear Chart 核図表

放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



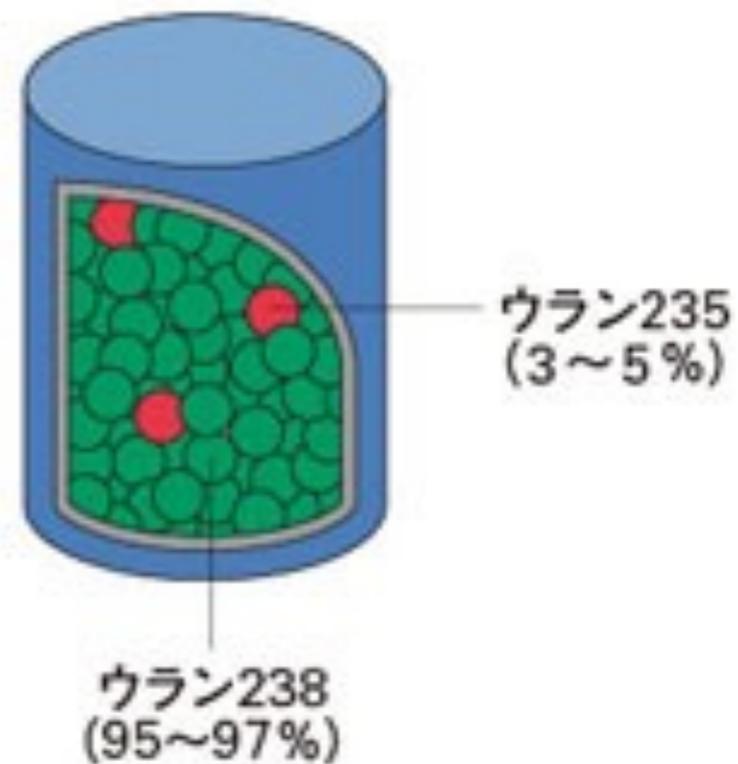
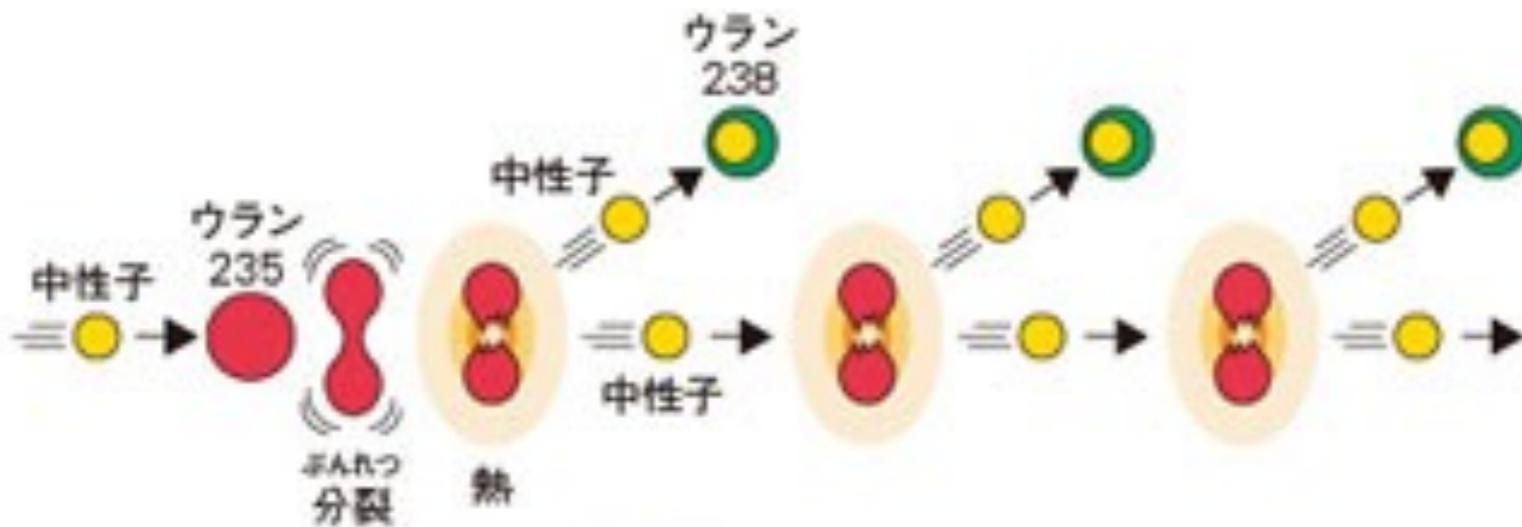
Nuclear Chart 核図表

原子核分裂反応



熱中性子

減速

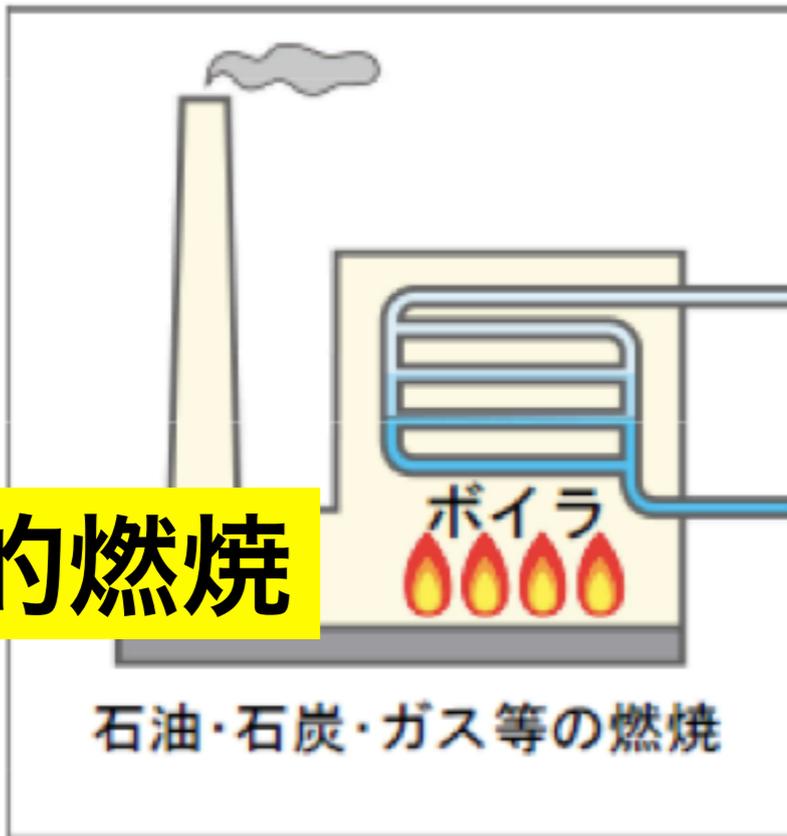


中性子 + ウラン 235 / 238

火力発電と原子力発電の違い

火力

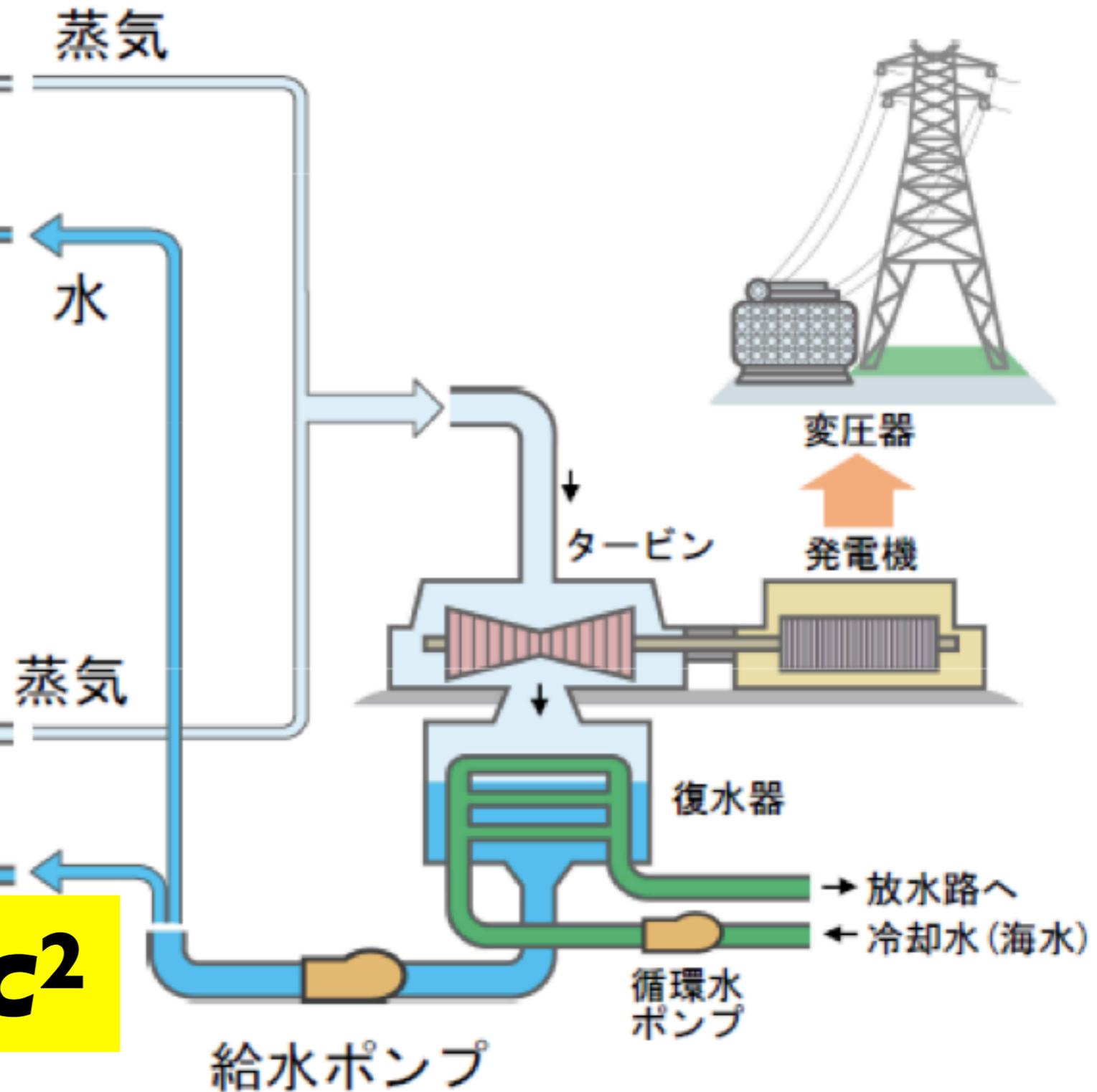
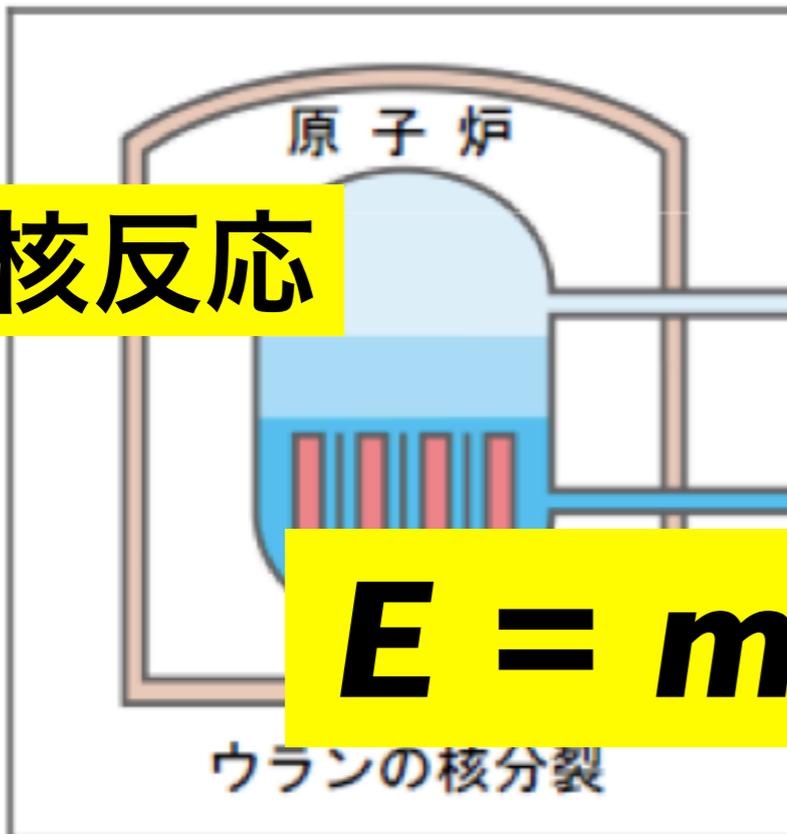
化学的燃焼



原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$



放射線の種類

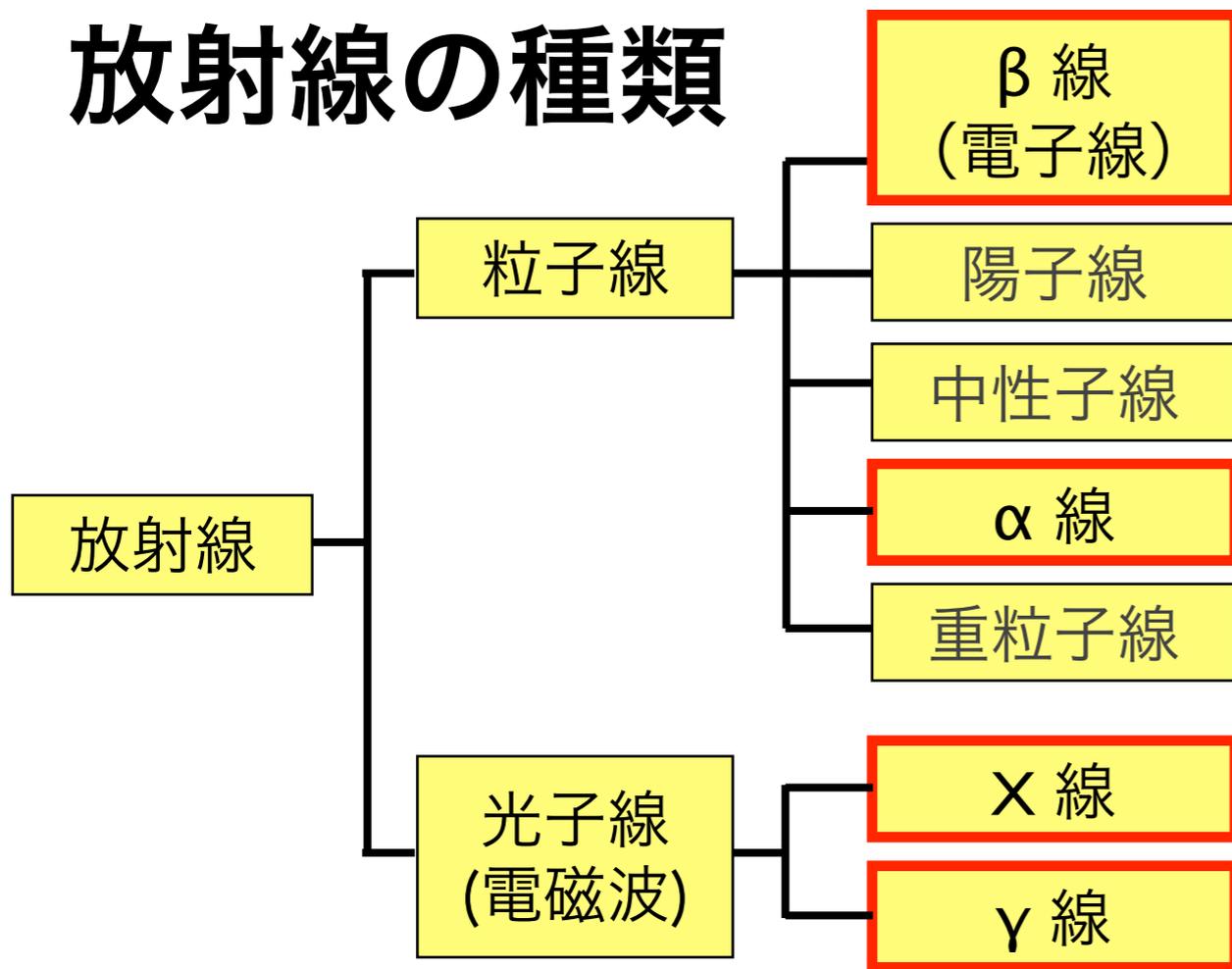
VIDEO

放射線とは

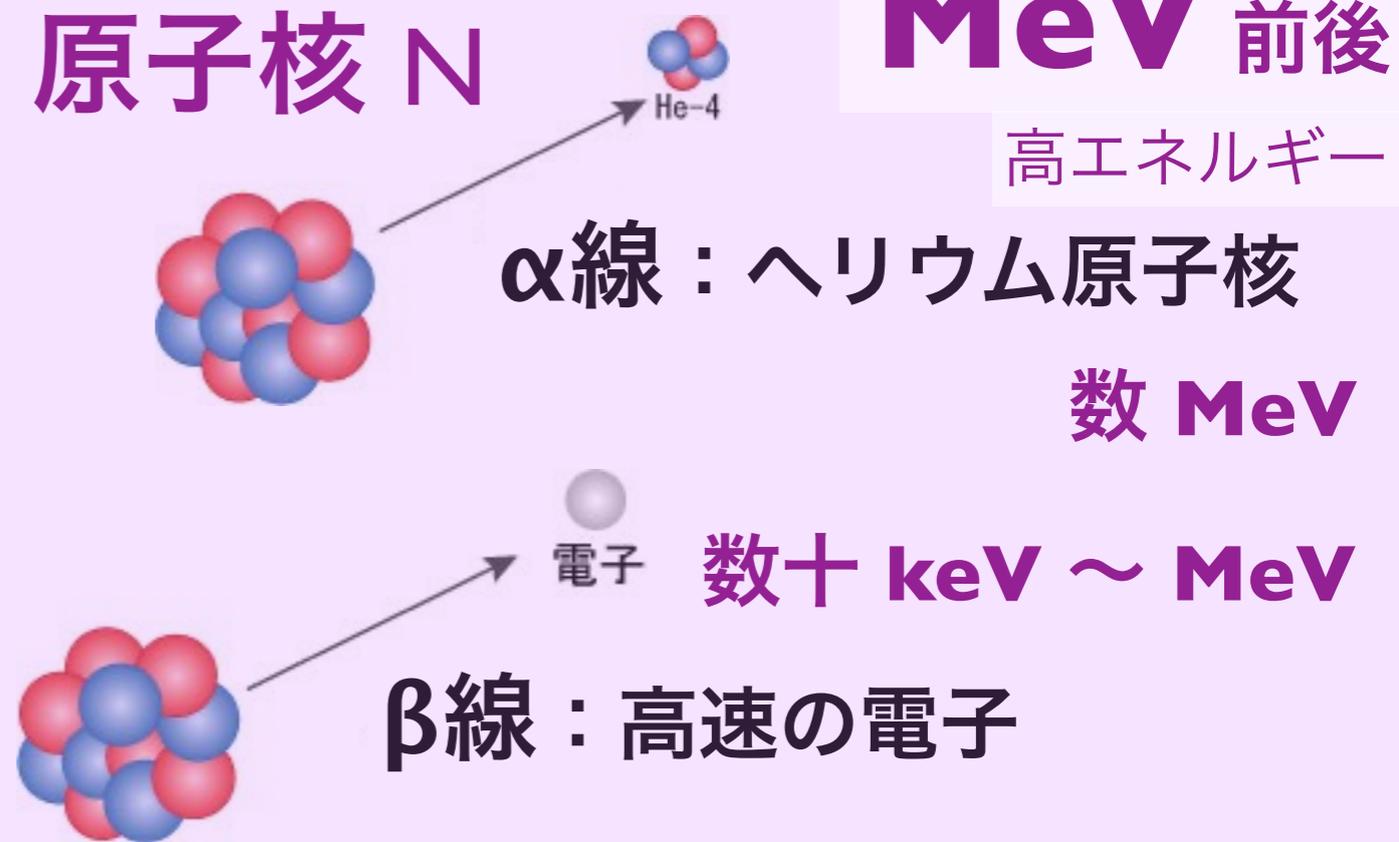
日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

<http://eneco.jaero.or.jp/20110322/>

放射線の種類



原子核 N



α線：ヘリウム原子核

数 MeV

β線：高速の電子

数十 keV ~ MeV

数十 keV ~ MeV



γ線：光子 (電磁波)

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)

放射線の速度は？

➡ 光速の数% ~ 100%



X線：光子 (電磁波)

原子 A 1 ~ 100 keV

制動放射 ~ 数 MeV

α 崩壊 (壊変)

decay

β⁻ 崩壊 (壊変)

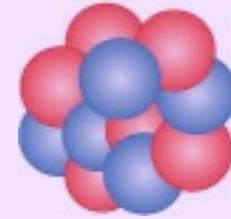
γ 崩壊 (壊変)

(核異性体転移)

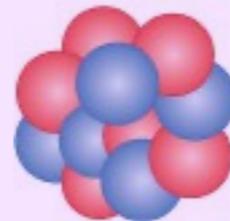
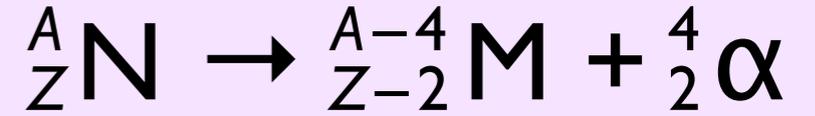
Isomeric Transition (IT)

原子の脱励起 制動放射

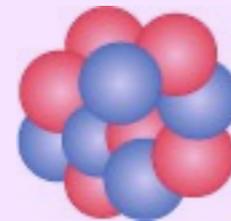
原子核 N



α線



β線



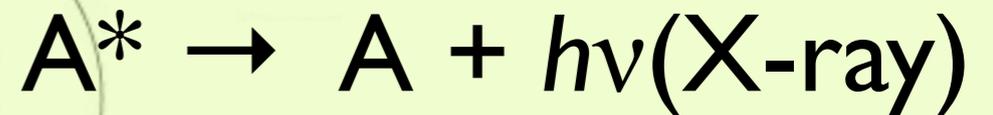
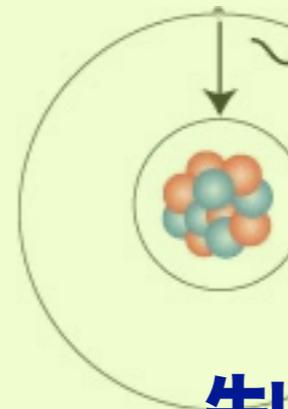
γ線

電磁波



X線

電磁波



原子 A

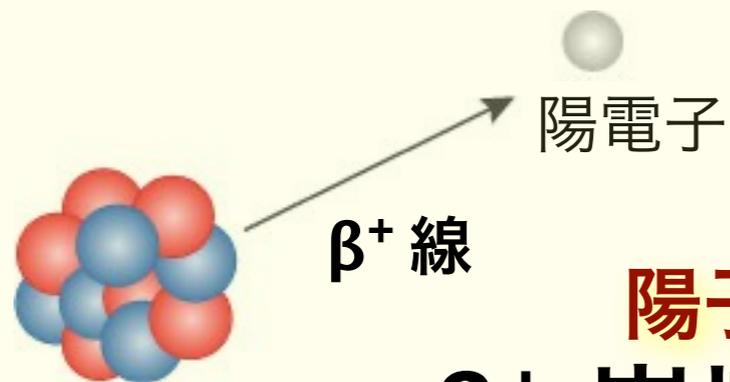
I ~ 100 keV

制動放射

~ 数 MeV

数十 keV ~ MeV

原子核 N

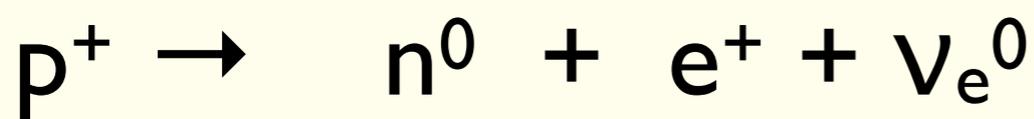


β⁺ 線

陽電子

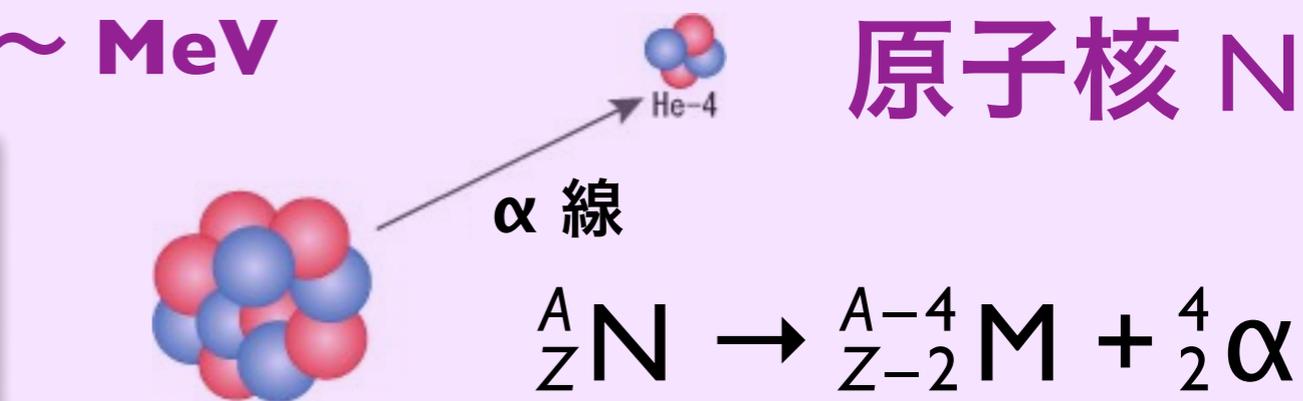
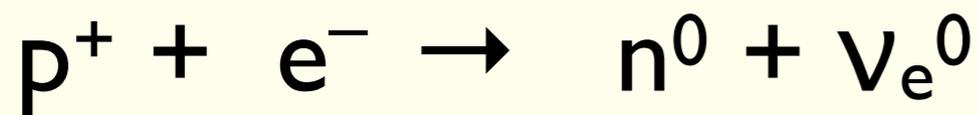
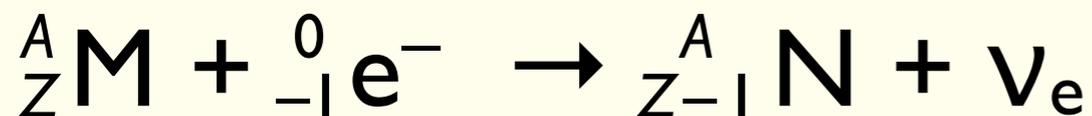
陽子過剩核

β⁺ 崩壊 (壊変)



軌道電子捕獲 (EC)

Electron Capture

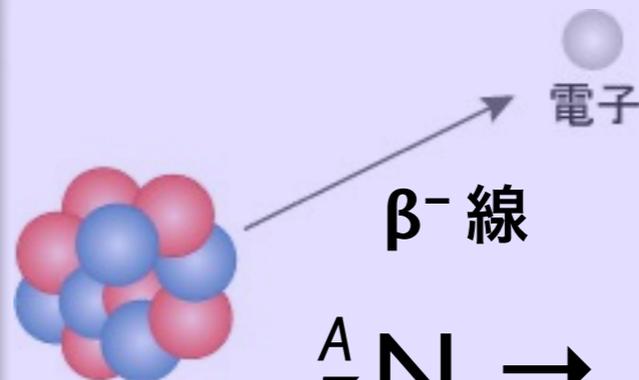


α 線



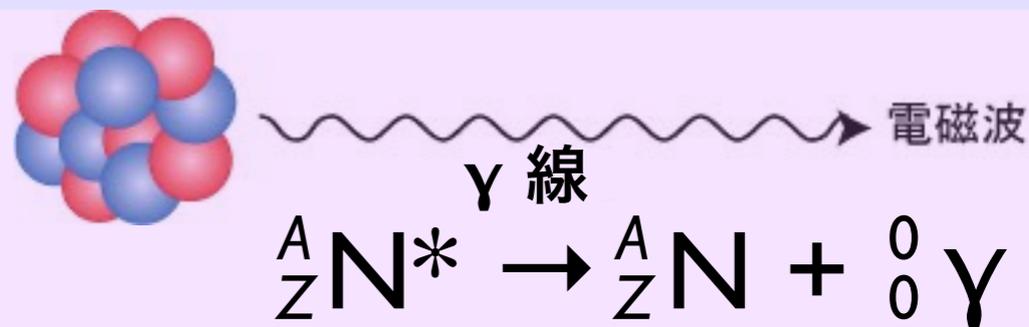
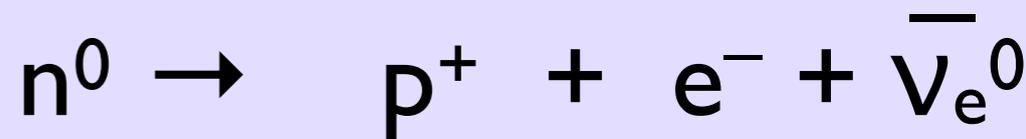
中性子過剩核

β⁻ 崩壊 (壊変)



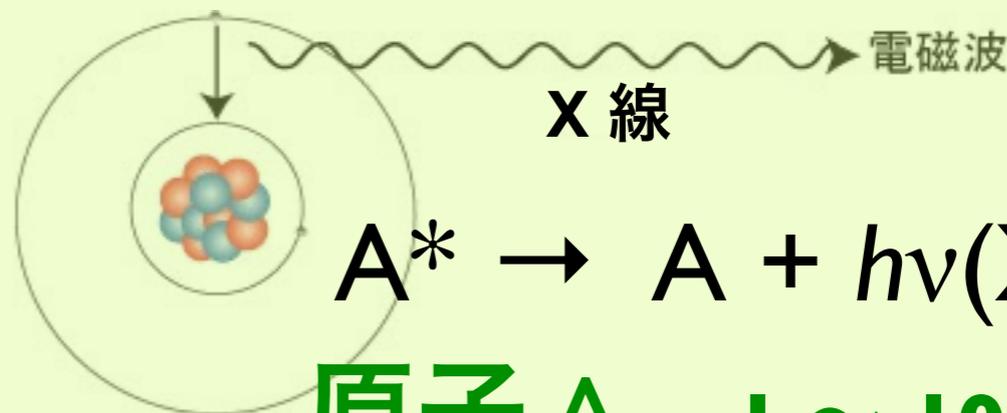
β⁻ 線

電子



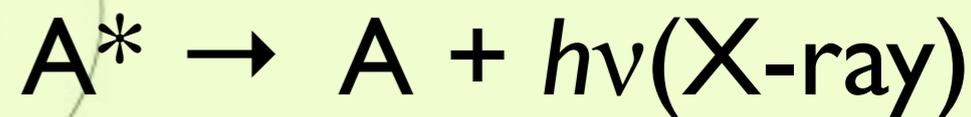
γ 線

電磁波



X 線

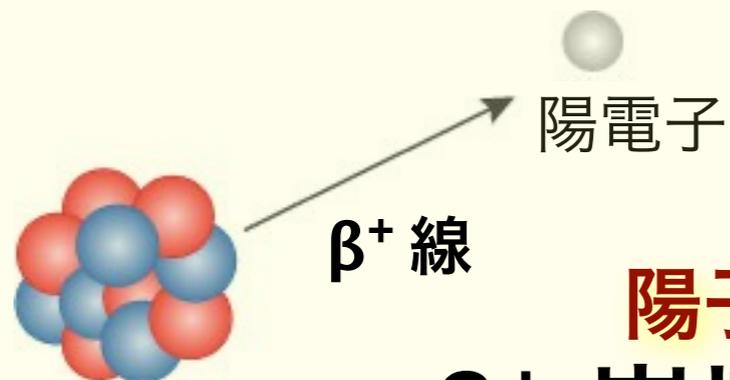
電磁波



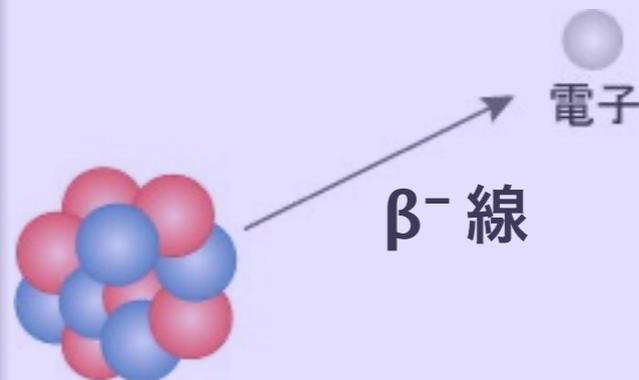
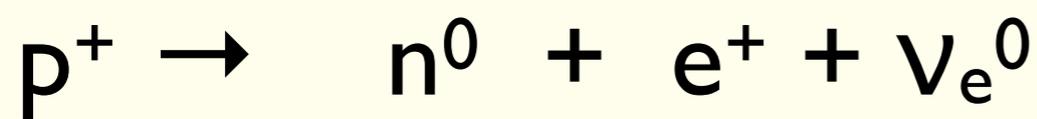
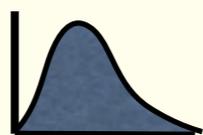
原子 A 1 ~ 100 keV

数十 keV ~ MeV

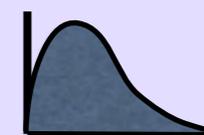
原子核 N



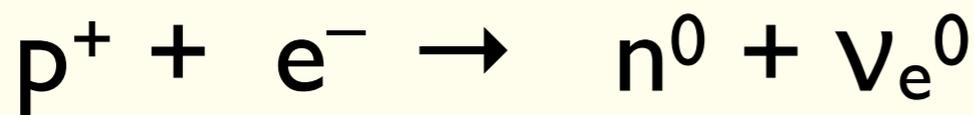
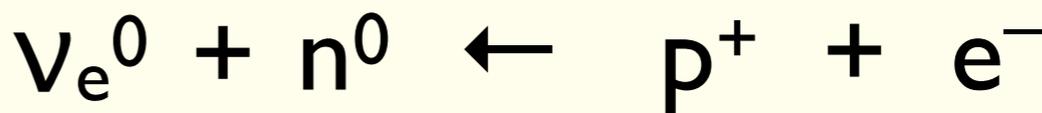
陽子過剩核
 β^+ 崩壊 (壊変)



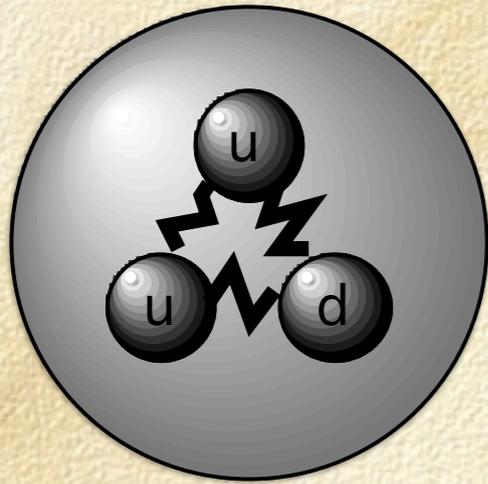
中性子過剩核
 β^- 崩壊 (壊変)



軌道電子捕獲 (EC)
 Electron Capture

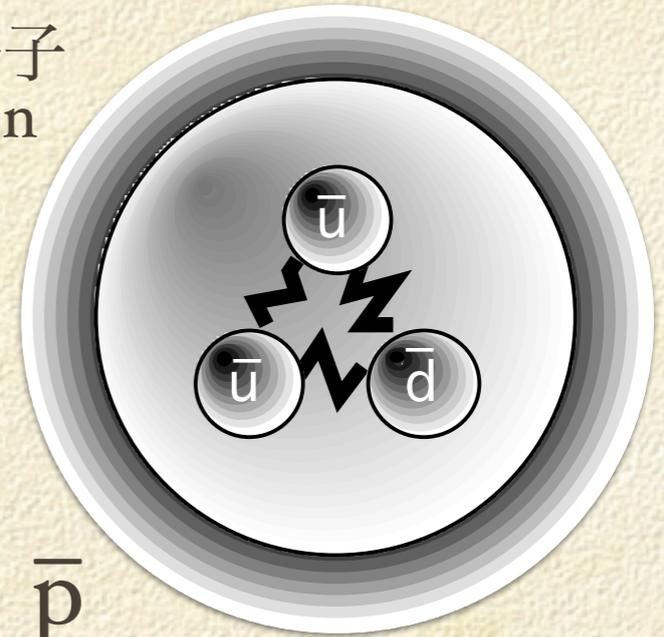


陽子
proton



p

反陽子
antiproton



p̄

粒子 / 反粒子



e⁻



電子 electron

e⁺



陽電子 positron

Paul Dirac
(相對論的量子力学)

陽電子消滅



511 keV の γ 線
反対方向に2本

稀に3本のこともある (ポジトロニウムの3光子消滅)

PET (Positron Emission Tomography)

陽電子断層撮影法

組織の”はたらき”を知る

^{18}F -FDG (fluorodeoxy glucose), $^{15}\text{O}_2$, H_2^{15}O



Radiology : diagnosis
放射線医療 : 診断

e^+



陽電子 positron

電子 electron



e^-

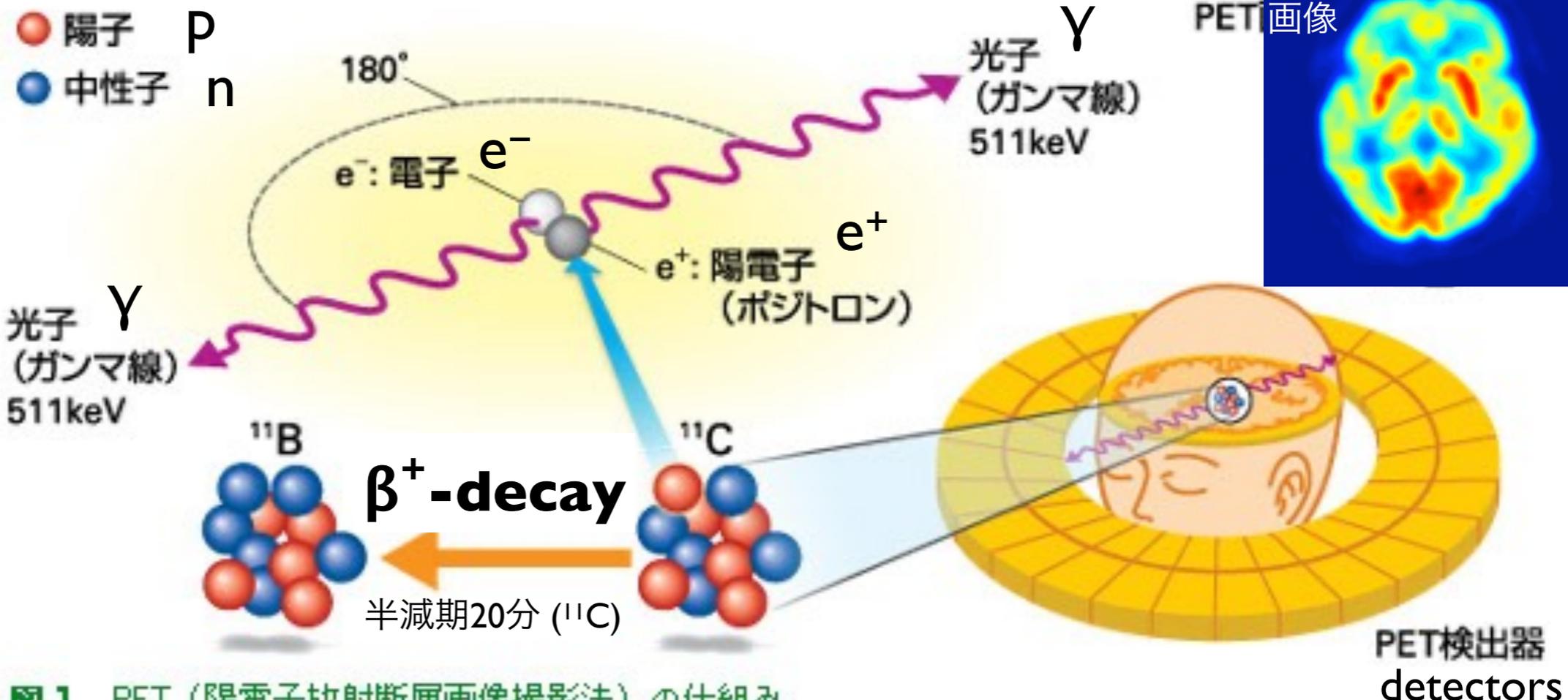
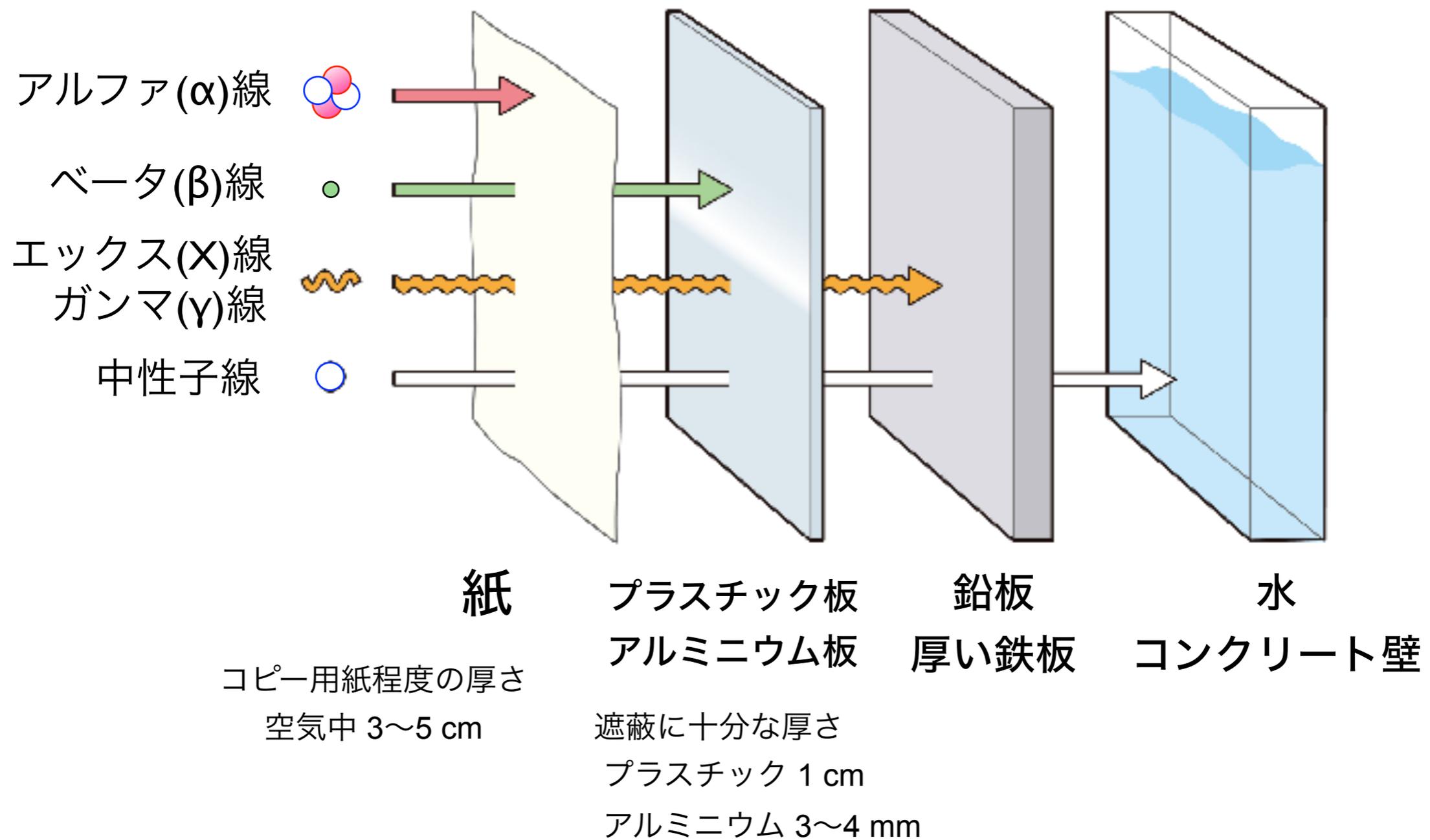


図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

調べたい分子に陽電子を放出する放射性核種を付け、静脈注射によって投与する。例えば、炭素11 (^{11}C) はホウ素11 (^{11}B) に崩壊するとき、陽電子を1個放出する。その陽電子が近くにある電子と衝突し、両方向にガンマ線が放出される。検出器がガンマ線をとらえることで断層画像が得られ、分子がどこに、どれだけ存在しているのかを知ることができる。

^{11}C , ^{13}N ,
 ^{15}O , ^{18}F

放射線の種類と透過力



放射線と物質との相互作用

荷電粒子の減速

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。

● (原子核衝突阻止能は小)

原子・分子

物質

荷電粒子



He-4

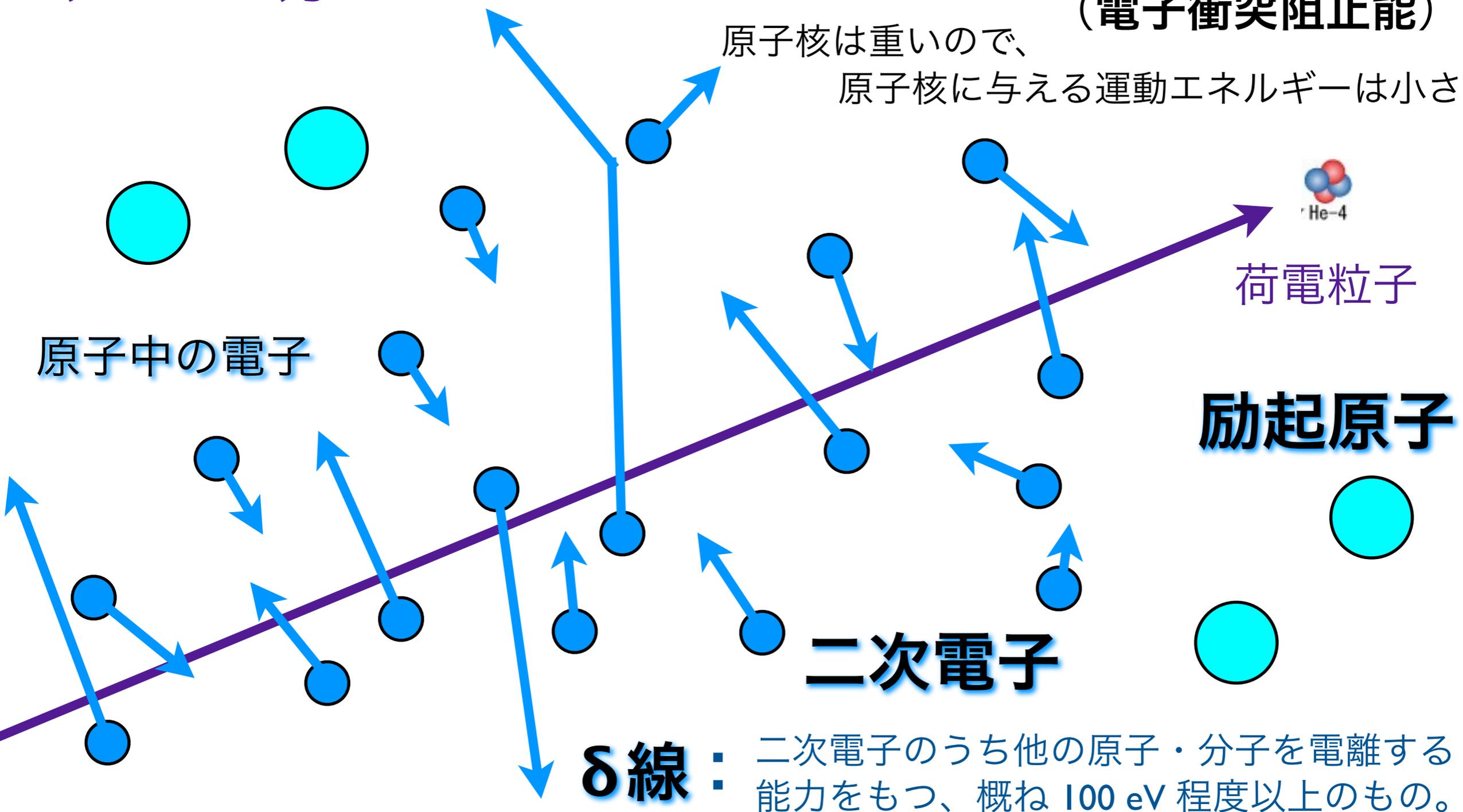
荷電粒子のエネルギー損失過程

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：
クーロン力



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なる。再結合・脱励起によりX線が発生。

励起原子

電子

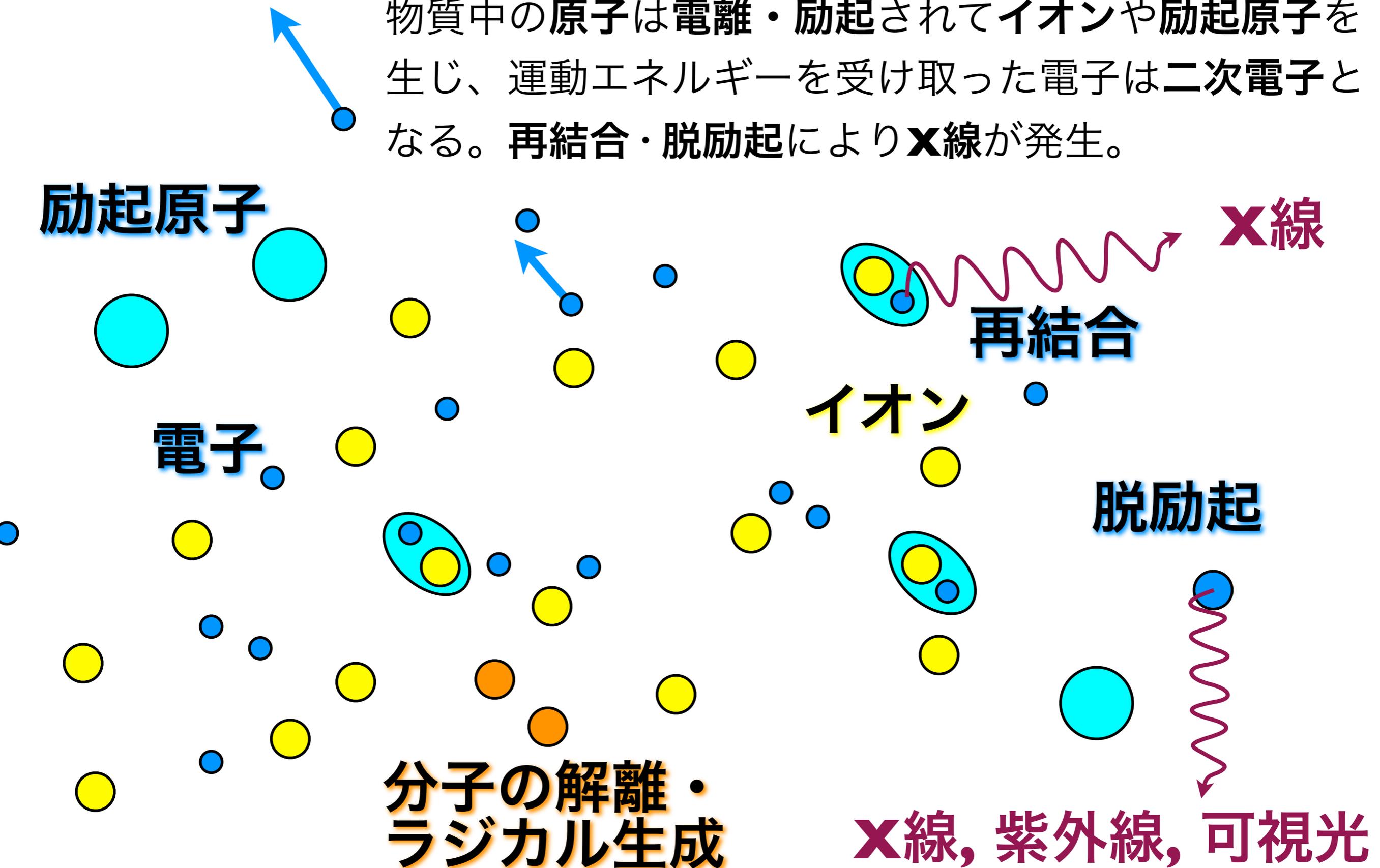
イオン

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



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なる。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

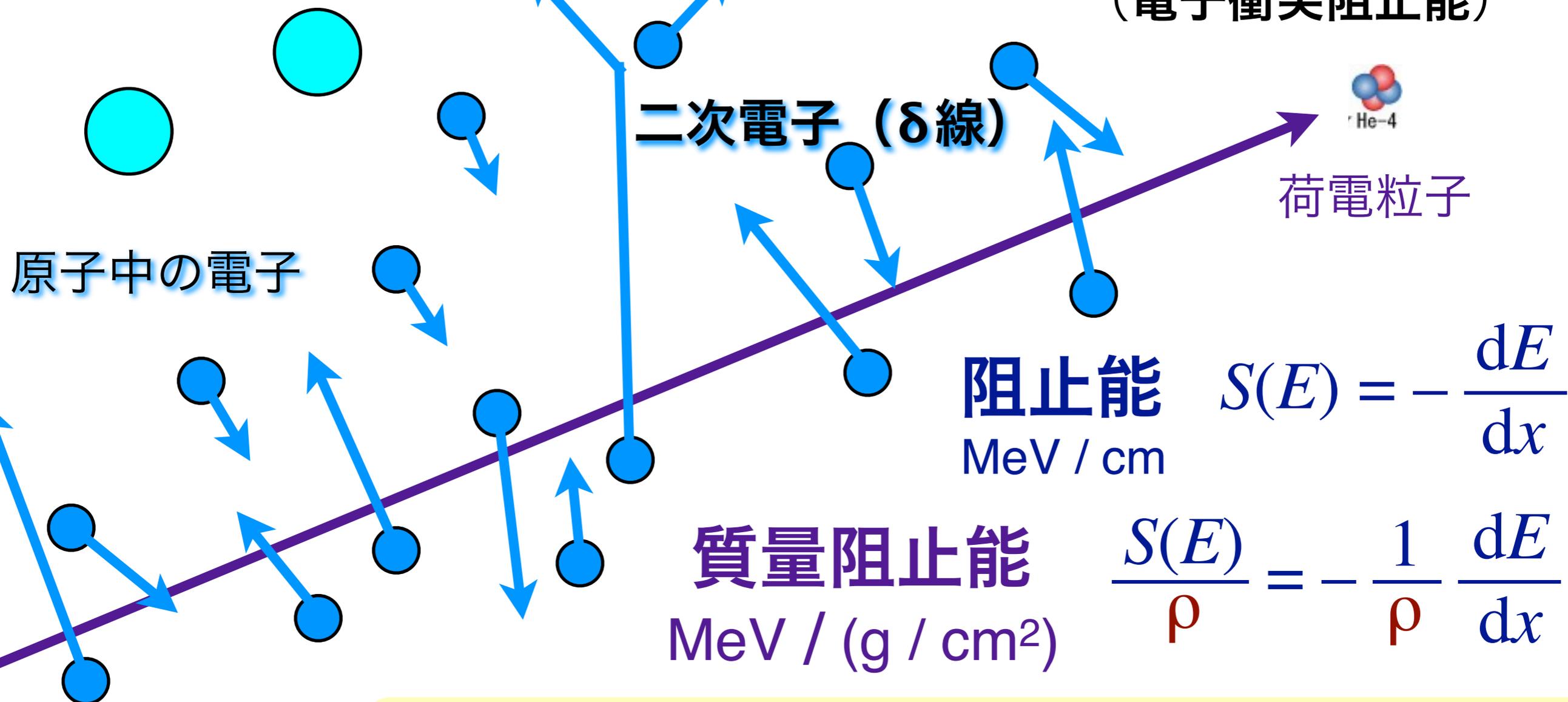
(放射線による原子・分子の蛍光)

荷電粒子に対する物質の阻止能

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)

荷電粒子：
クーロン力

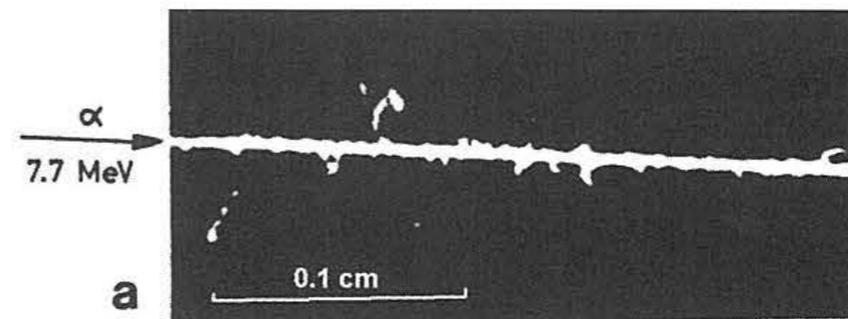


阻止能は散乱する電子の密度に比例する。
質量阻止能は物質の種類にあまりよらない。

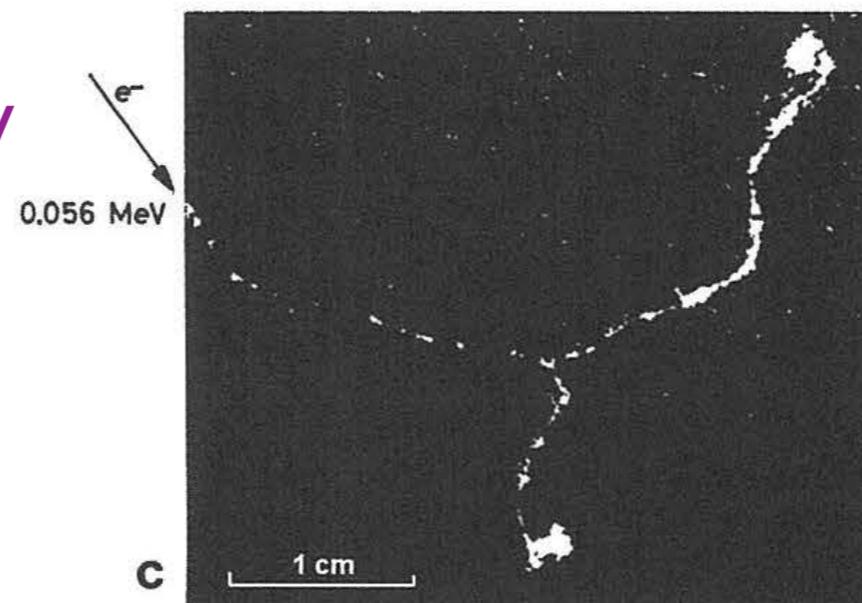
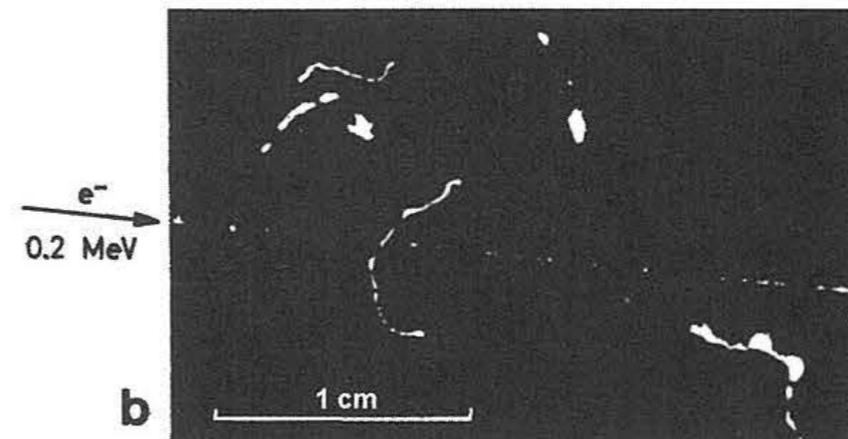
放射線の軌跡

霧箱による観察

α -ray
7.7 MeV



0.2 MeV
 β^- -ray
0.056 MeV



γ -ray
0.047 MeV

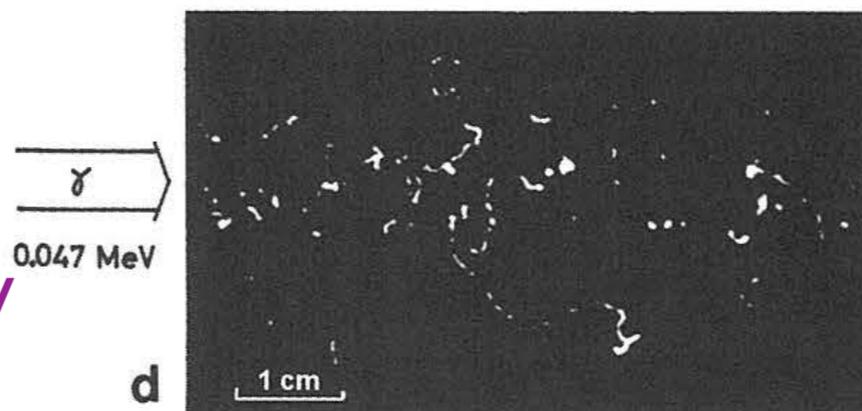


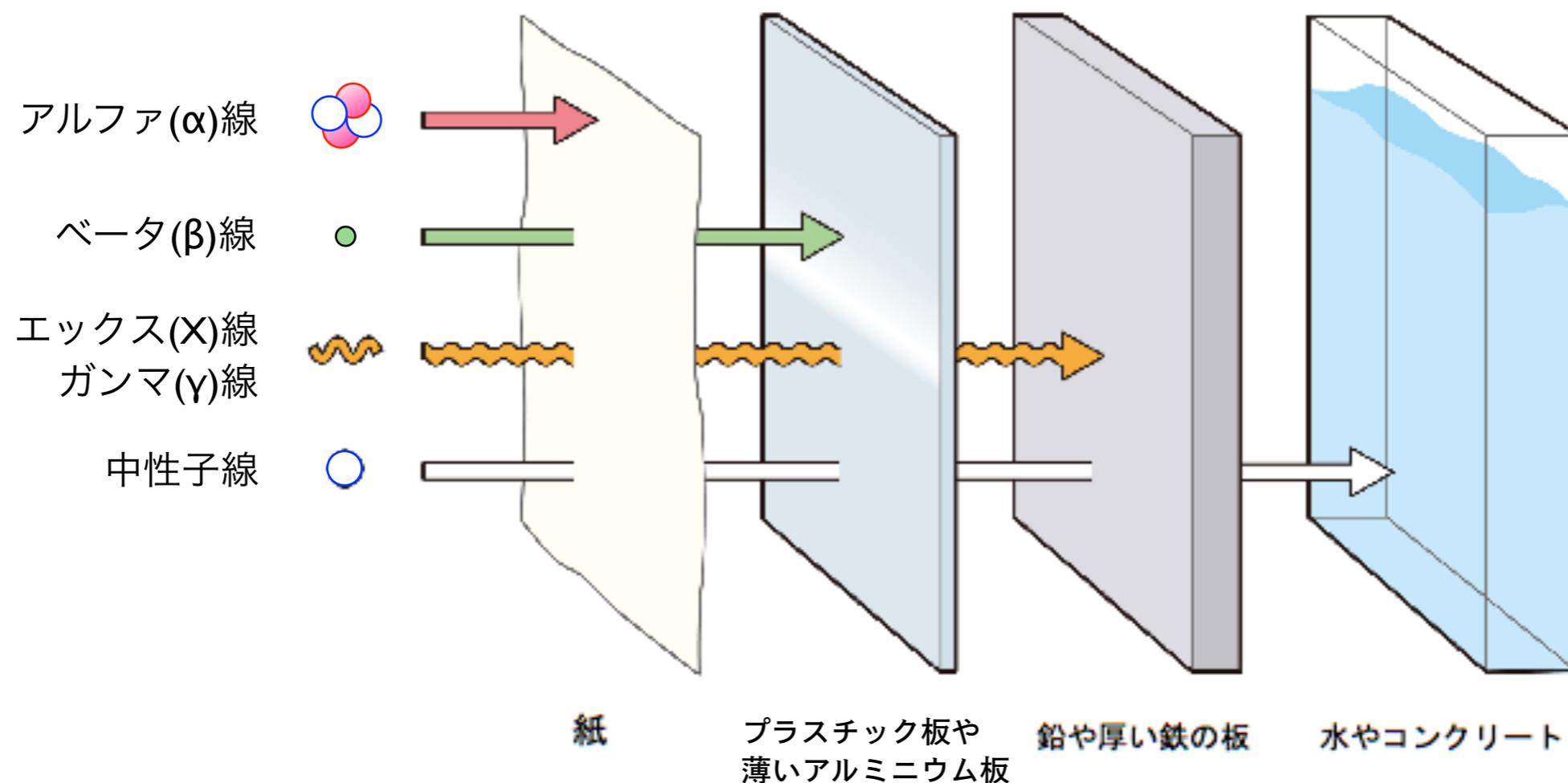
Figure 7.5 Cloud chamber tracks of α , β , (e^-), and γ -rays at 1 bar in air ((a), (b), and (c)) and in methane (d). (From W. Gentner, H. Maier-Leibnitz, and H. Bothe.)

飛程 Range

阻止能の逆数を積分。

相互作用の大きい放射線ほど
遮蔽しやすい。

$$R(E) = \int_E^0 \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle^{-1} dE$$



質量阻止能
MeV / (g / cm²)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{E}$$

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。

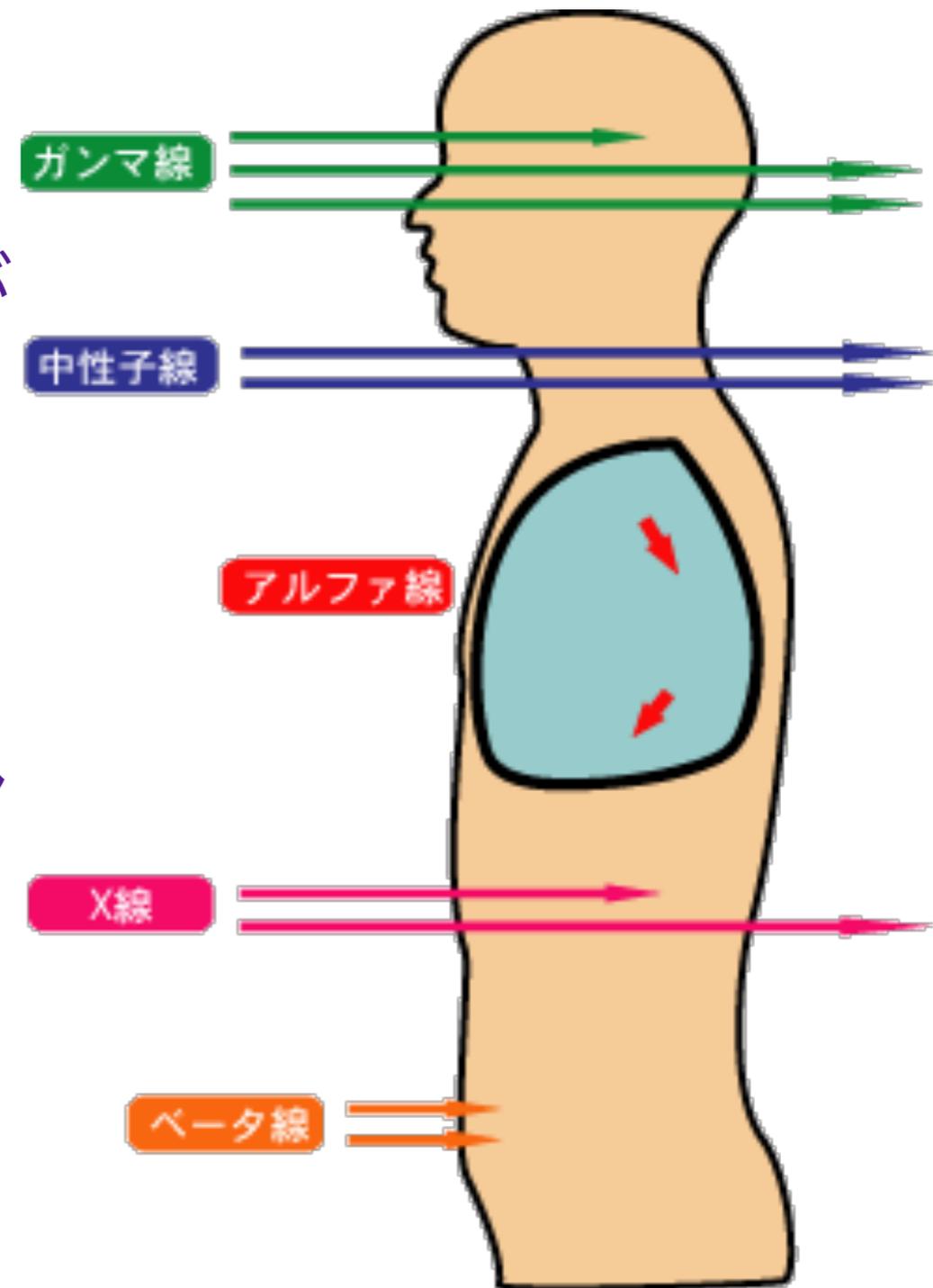


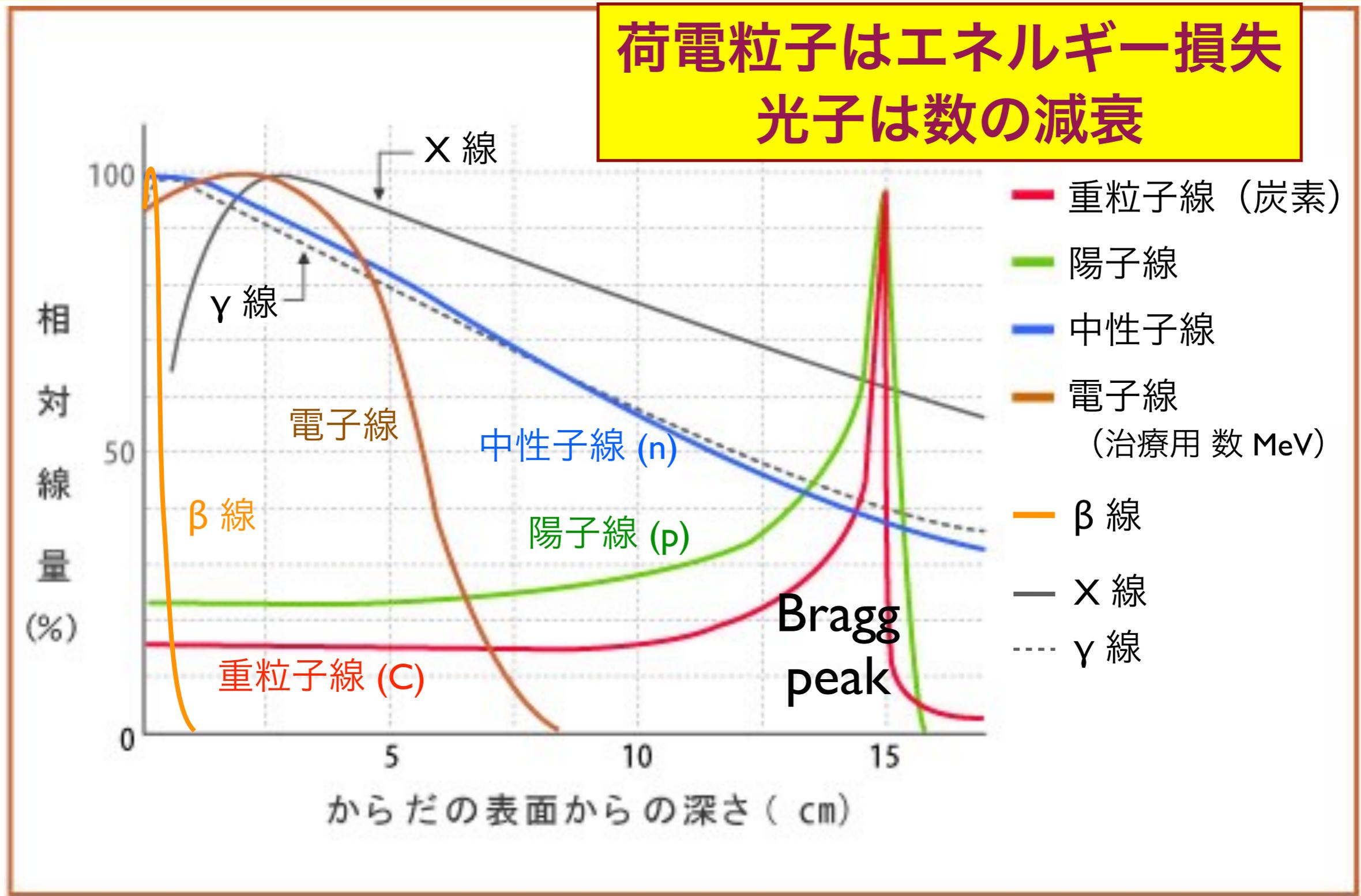
図3 人体を透過する放射線

陽子(p)、 α 、重粒子線は飛程が揃っている。

電子(β)は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

中性子(n)、光子(X, γ)は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

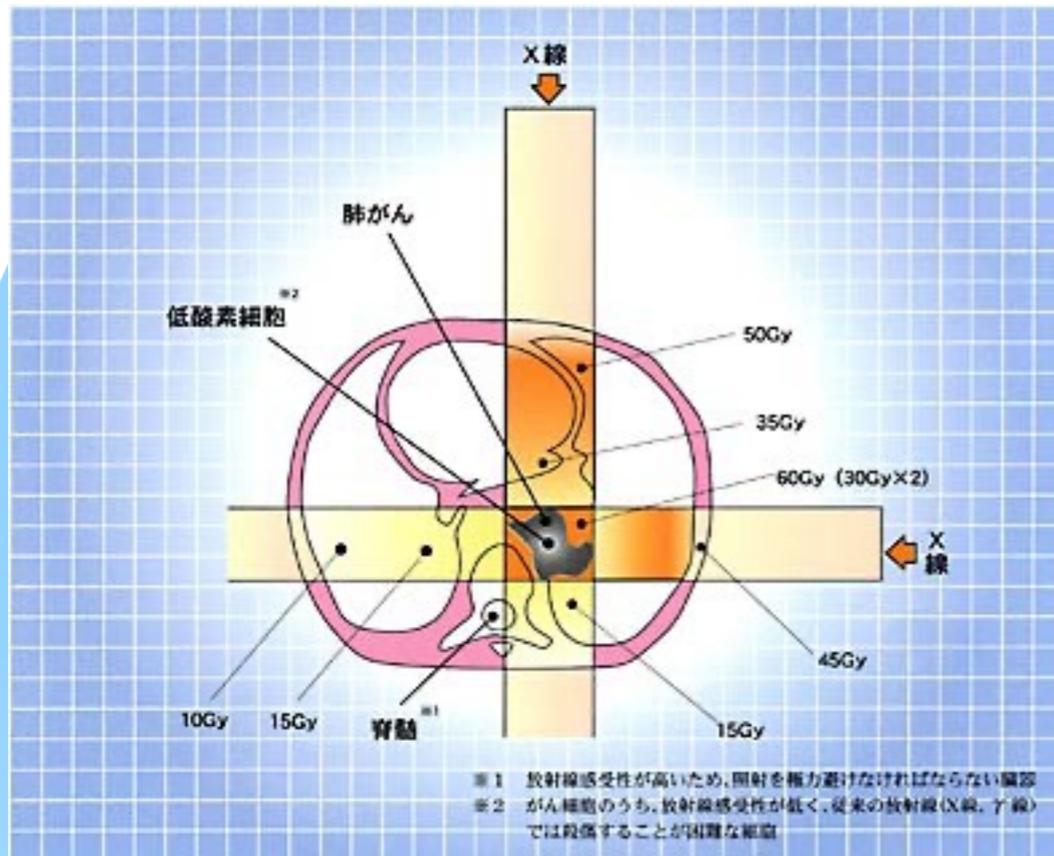
荷電粒子はエネルギー損失 光子は数の減衰



元図：群馬大学重粒子線医学研究センターの旧ホームページより

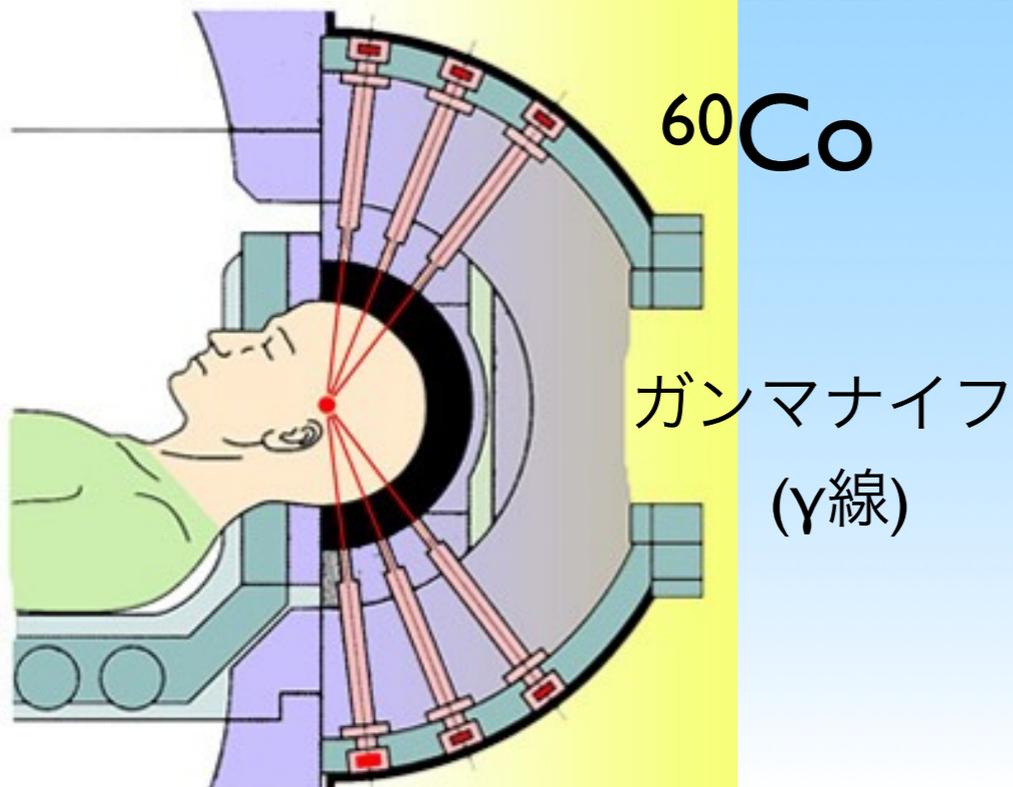
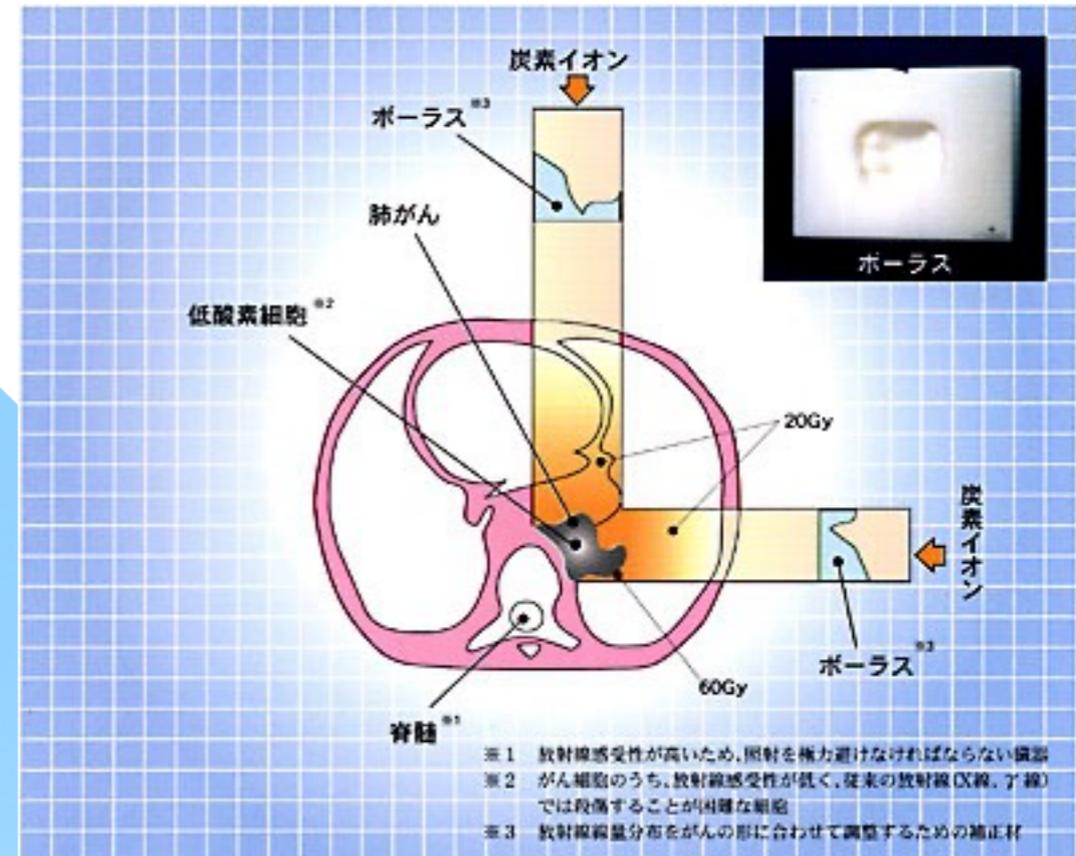
放射線医療：がん治療

X線



数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



サイバーナイフ
(X線)

放射線と物質との相互作用

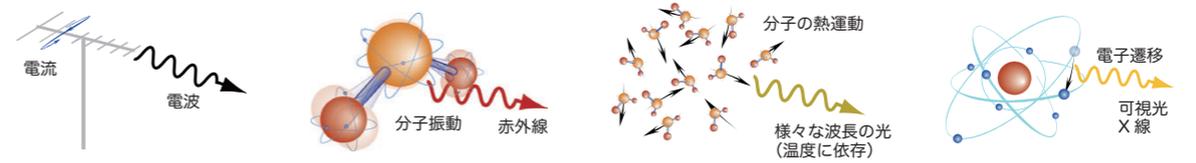
光子の減衰

光マップ THE LIGHT MAP

光は、自然界にいつも存在していて、あらゆる植物や生物、人間の生命と営みを支えています。太陽からの光は、地球上に温度をもたらす、植物の光合成のエネルギーとなります。蛍光灯やランプは私たちの生活を明るく照らします。レーザーは材料を加工したり、手術や治療をします。ラジオやテレビや携帯電話の信号を送る電波、電子レンジで使われるマイクロ波、電気こたつや電熱線で加熱に用いる赤外線、日焼けや殺菌作用がある紫外線、レントゲン写真に用いるX線や、原子崩壊のときに発生するγ線などすべて、光のなかまです。この光マップは、光が自然界や私たちの生活の中でどのようにつくられ、どのように使われているかをまとめたものです。

光の起源

光はどこで生まれるのでしょうか。光子（フォトン）は電子が加速度を持って動くことによって生まれます。アンテナの中で電子が動くと、低い周波数の光である電波が出ます。複数の原子から構成されている分子の中で原子が互いに動く（分子振動）と、原子の中にある電子も一緒に動くので光が生まれます。その光は赤外線です。水や空気の温度が高くなると、水分子が激しく動き回り、電子も共に動くので光が出ます。温度と光の周波数は対応します。分子の振動はランダムですので、熱が発する光（黒体放射）は単色の光ではなく様々な周波数の光が出ます。原子の周りを回る電子が別の軌道に移ると（電子遷移）、光が出ます。これは振動数の高い可視光です。原子の内殻の電子が遷移するとX線が生まれます。

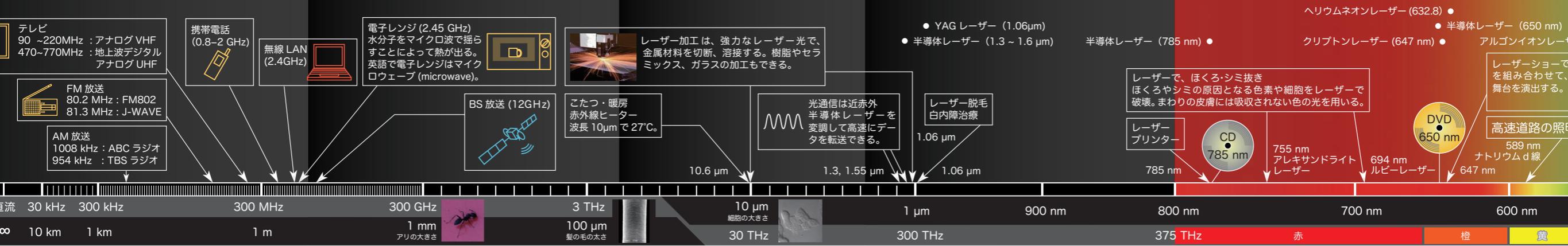


波としての光

光は空間横波です。振動数は1秒間の振動の回数（周波数）です。振動数と距離のかけ算は波長です。振動数や波長に関係なく一定です。

粒としての光

光の強度は光子の密度（振動数）に相当するエネルギーです。ちょうど、電流が明るいか暗いかは光子の密度（振動数）に相当するエネルギー



電波領域（電波も光）

アンテナで送受信

- テレビ: 90~220MHz: アナログ VHF, 470~770MHz: 地上波デジタル アナログ UHF
- 携帯電話 (0.8~2 GHz)
- 無線 LAN (2.4GHz)
- 電子レンジ (2.45 GHz): 水分子をマイクロ波で揺らすことによって熱が出る。英語で電子レンジはマイクロウェーブ (microwave)。
- FM 放送: 80.2 MHz: FM802, 81.3 MHz: J-WAVE
- AM 放送: 1008 kHz: ABC ラジオ, 954 kHz: TBS ラジオ
- BS 放送 (12GHz)

単位換算: 1km = 1000m, 1m = 1000mm, 1mm = 1000μm, 1μm = 1000nm

遠赤外光

低温の黒体放射

電波望遠鏡: 波長約1mmから1cmの電波を検出する望遠鏡。日本では野辺山宇宙電波観測所にある。温度が非常に低い星間ガスなどからの黒体放射を観測する。

黒体放射: 物体はその温度に応じて様々な波長の光を放射する。この現象を黒体放射という。

自由電子レーザー (FEL): 紫外から赤外までの広範囲で波長を自由に選択して強力な光をつくる。高速の自由電子を磁場によって蛇行させて発生したシンクロトロン放射からレーザー光線をつくる。国内では大阪大学、東京理科大学などにある。

中赤外光

分子振動・格子振動、有機分子が見える領域

有機分子の指紋領域: 中赤外は分子の振動単位が豊富。有機分子の「指紋領域」と呼ばれる。

二酸化炭素 (C=O 基): 4.3 μm
水・アルコール (O-H 基): 2.9 μm
メタン (C-H 伸縮): 3.3 μm
トルエン (ベンゼン環): 6.7 μm

二酸化炭素の吸収スペクトル

すばる望遠鏡: ハワイ島にある日本の大型天体望遠鏡。可視光から中赤外光の光を使って宇宙を探る。直径 8.2m の反射鏡は世界最大級。

気象衛星ひまわり: 10 μm 付近 (大気窓): 黒体放射から雲や地表温度を観測する。6~7 μm (水の吸収): 水蒸気の分布を観測する。

近赤外光

物質と相互作用しない、物質が透明な領域 (光通信に使われる)

監視カメラ (ナイトビジョン): 近赤外光を照射し、カメラで検知する。目に見えない波長なので、暗闇でも相手に気付かれない。防犯のほか、軍事用にも用いられる。

センサー・赤外線通信 (IrDA): 自動ドアやトイレ、照明用のセンサーや、テレビやステレオのリモコン、パソコンの通信にも近赤外光が使われる。

血糖値測定、果実糖度計: 糖の分子の振動エネルギーが近赤外に相当する。果実を傷つけずに糖度を簡単に測ることができる。

赤外線温度計/体温計: 赤外線の黒体放射から、非接触で温度を測定します。人の体温で波長約 10μm。

リサイクル識別: 様々なプラスチックの種類を近赤外領域の吸収スペクトルの違いから識別し、リサイクルする。

光 CT: 脳の中の酸素濃度を断面画像として取得する。

白熱灯 (2,500°C) の黒体放射のピークは、1 μm 付近。

サーモグラフィ: 赤外光の強度から温度を測定する。体温分布計測、軍事用に用いられる。

可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

血液の赤色はヘモグロビンの色。動脈は酸素を含んで鮮やかな赤色。静脈では黒っぽい色になる。波長 800 nm で入れかわる吸収率から、近赤外光を使って血中酸素濃度を計測することができる。

紅葉: アントシアン、カロテノイド、クロロフィル。秋になると、葉緑素のクロロフィルが分解されてカロテノイドの黄色に、その後、アントシアンがつくられて赤色に変わる。

3次元ナノ加工は、近赤外パルスレーザーを用いて、レーザー光の波長よりも遙かに小さい 100nm の分解能で立体加工を実現。

細胞手術では、近赤外パルスレーザーを細胞内に集光して、細胞内部を加工、刺激する。

半導体量子ドット: 直径数nmの半導体粒子で蛍光を発する。小さい粒子ほど短い波長で光る。

ルビーの赤は不純物のクロムの色。世界初のレーザーはルビーから出た光。

太陽電池は、電卓、腕時計、街路灯から人工衛星にまで使われる。光のエネルギーでクリーン発電。

発光ダイオードは、発光効率の高光源として、信号機、パイロットランプ、街のイルミネーション、車のヘッドライト、光合成等、多目に使用される。

太陽が黄色に見えるのは、500nm 付近の黒体放射のため。表面温度は約 6,000°C。

ホテルの発光の源はルシフェリン。熱をほとんど出さずに発光する。

白色をつくるには青と赤が必要。テレビの液晶の画素、CRT の蛍光体

色づくのは光の干渉

向から伝わってくる光が重なり合うと、互いにめっけたり弱め合ったりします。シャボン玉や油膜が七色に見えますが、これは膜の表面と裏面反射した光が干渉するからです。立体像である (1971年ノーベル賞) は、光の干渉を使っています。光は**コヒーレント** (可干渉) であるといえます。コヒーレントな光を出す装置です。

七色に光るシャボン玉

クレジットカードのホログラム

空の青色は光の散乱

光が小さな粒子 (分子) に当たると散乱します。波長の短い光は長い波長の光よりよく散乱します。空が青いのも夕焼けが赤いのも光の散乱の効果です。もとの光から色がずれて散乱する光があります。**ラマン散乱**といひ、分子や結晶の振動エネルギーが光子に足し算 (引き算) されるために生じます。この色のずれを計測して、半導体結晶の欠陥や分子の種類を分析する技術があります。

空の色は散乱された青い光

虹の七色は光の屈折

光が空気から水やガラスに入ると、曲がります。この現象を屈折といひます。屈折率は光の波長 (色) によって異なります。万有引力の法則で有名なニュートンはプリズムを使って太陽の光には様々な色が混ざっていることを発見しました。雨上がりの路地に虹が見えるのは空気中の水滴がプリズムとして太陽光を分光するからです。最先端の光科学には、**負の屈折率**の物質 (逆向きに光が曲がる) を人工的に作る研究が進んでいます。

折れたように見えるけど...

プリズムで屈折して色分けされた光

光は回折する

光の進路に障害物を置くと、光は障害物の裏側にも回り込んで伝わっていきます。細い光線をつくらうとして細い穴に光を通して、すぐ広がってしまいます。光の回折を利用して光を選択することができます。細かい周期構造に光を照射すると、それぞれの構造で回折した光が干渉し、角度によって違う色が見えます。CD や DVD の表面が七色に見えるのは、記録ビットの列が回折格子として働くためです。タマシヤやチョウの羽、貝殻も、表面に周期構造があって七色に見えます。このように回折で現れる色のことを**構造色**といひます。

モルフォ蝶と、羽の電子顕微鏡写真

七色に光るCDの表面

光子ロケットは光の放射圧

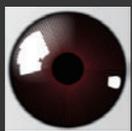
光が物質の境界面で屈折や反射、散乱すると、物質に力がかかります。光の放射圧は、400年前に予言されたといひわれています。天文学者のケプラーは彗星 (ほうき星) の尾がいつも太陽と反対側にのびのびを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。スティブン・チューらは光の放射圧で原子を冷却する技術を発明しノーベル賞を受賞しました。SF小説には放射圧で飛ぶ光子ロケットが出てきます。JAXA やアメリカでは実際にソーラーセイル宇宙船を研究しています。

ハレー彗星

アメリカで光が進む

325 nm)

近視矯正手術、角膜切除には、エネルギーの高い紫外光が使われる。エキシマレーザーを使って角膜を蒸発させ削り取る。サブミクロンの精度で精密に一部の角膜だけを削り角膜の形を変えて屈折矯正する。

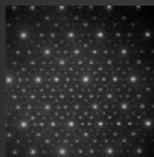


極端紫外光リソグラフィー
極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

水の窓
水の吸収がない波長。水分を多く含む生物試料の観察に使えるX線。



X線回折結晶構造解析
原子の配列による回折を利用し、配列パターンや原子間距離を測る技術。原子間隔に相当する波長のX線を使う。タンパク質分子の立体構造も知ることができる。



XFEL(X線自由電子レーザー)
SPring-8に自由電子レーザーの発振器を建設し、X線の波長域でレーザー光を得る施設。2006年から建設が始まり、2010年に完成を目指している。



紫外光

紫外線洗浄
半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、品質に紫外線を使う。

紫外線殺菌
を与えずに、水、食品、薬品などを殺菌する。



地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

触媒は、紫外光を吸収して、窓ガラスや壁の汚れを分解する。
酸化チタン



真空紫外
200 nm~10 nmの紫外線は大気の中を伝わらない。太陽からの真空紫外線は、地表まで到達しない。微細加工などの応用が期待されている光だが、真空環境が必要。

eV (エレクトロンボルト)
光のエネルギーを表す単位にeVがある。波長1μmの光は1.24eVに相当する。光の波長とエネルギーは反比例し、波長100nmの光は12.4eV、波長1nmでは1.24 keV(1240 eV)と、波長が短いほど高いエネルギーを持つ。

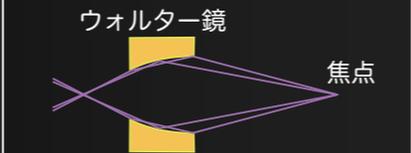
アト秒レーザー
アト秒(atto)は0.000000000000000001秒(0が18個)。そんな一瞬しか光らないパルスレーザー。このレーザーを使えば、電子が止まって見える。100アト秒では光はたった30nmしか進めない。真空紫外線や軟X線の光でつくられる。

軟X線 (極短紫外を含む)

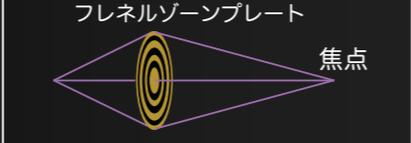
レーザープラズマ光源
高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

軟X線顕微鏡
「水の窓」を使えば、高い空間分解能で生物試料を生きたまま観察できる。軟X線は大気をほとんど伝わらないので、装置を真空中に置く。

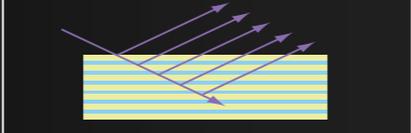
X線のレンズ
軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。



反射には、Mo/SiやCr/Scなどの多層膜が用いられる。



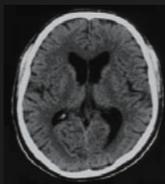
静電気除去
空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

X線

レントゲン写真
からだが見える。X線が透過しにくい骨が影となって映る。胃を見るときはバリウム(造影剤)を飲む。空港の手荷物検査もX線。



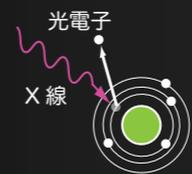
X線CT (コンピュータ断層撮影)
様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



X線天文衛星
X線は大気層で吸収されるため、望遠鏡を搭載した衛星を宇宙まで飛ばして観測する。

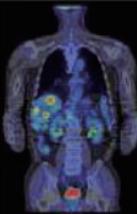


XPS(X線光電子分光)
X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。



γ線

PET (ポジトロン断層法)
放射性分子をマーカーにした新しいがん検診技術。



γ線バースト
太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。



強い放射線
強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療
弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

γ線滅菌
弱いγ線なら医療器具などの滅菌にも使える。じゃがいもの発芽防止にもγ線を照射する。



一家に1枚 光マップ <http://stw.mext.go.jp/>



荷電粒子（ α 線・ β 線など）の減速（エネルギー損失）

荷電粒子は物質中の多数の電子を蹴散らかしつつ
徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

単位距離当たりの**エネルギー損失** $-\left\langle\frac{dE}{dx}\right\rangle$ が重要

光子（X線・ γ 線）の減衰（減弱）

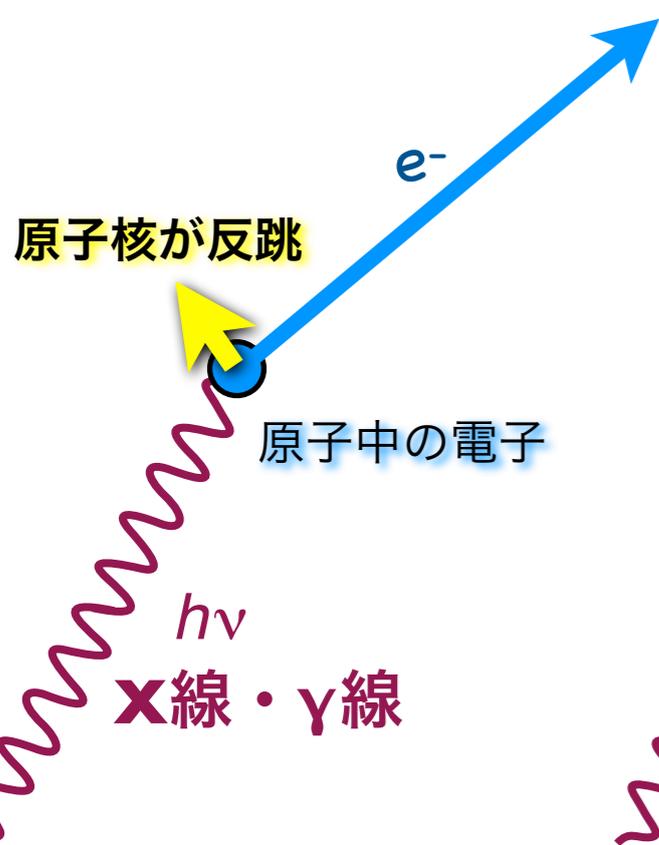
光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず
素通りするものも多い。☞

光子数の指数関数的減少

反応断面積 σ （単位距離当たりの**反応確率**を与える）が重要

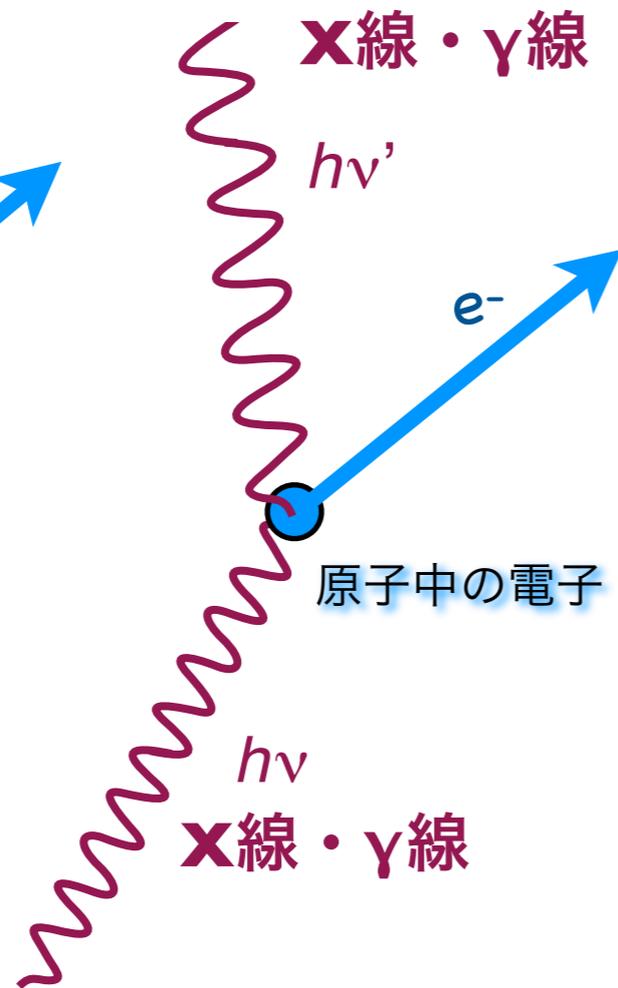
光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

光電効果



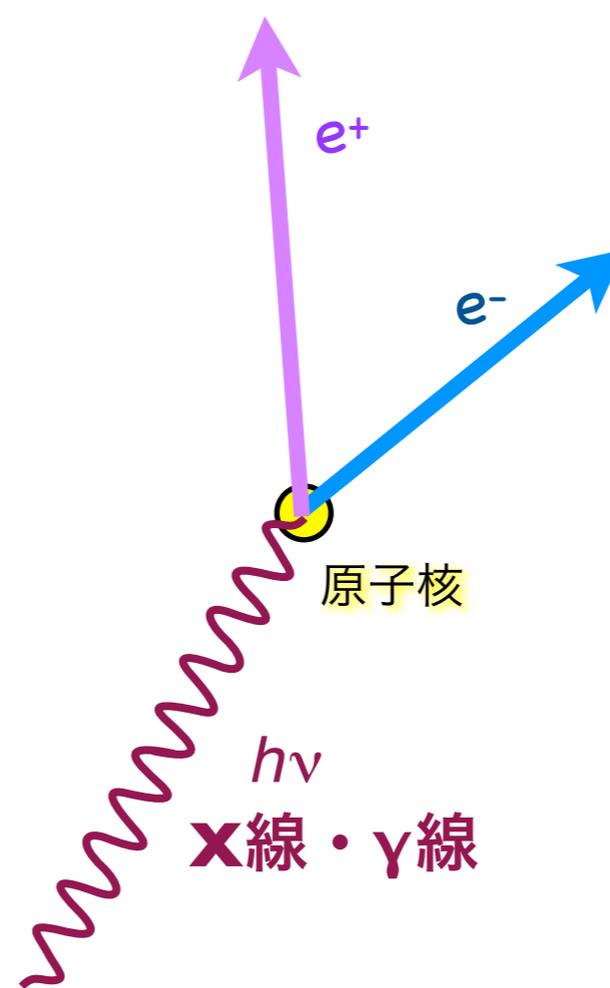
光子が原子中の電子1個をたたき出す。光子は消滅。

コンプトン散乱



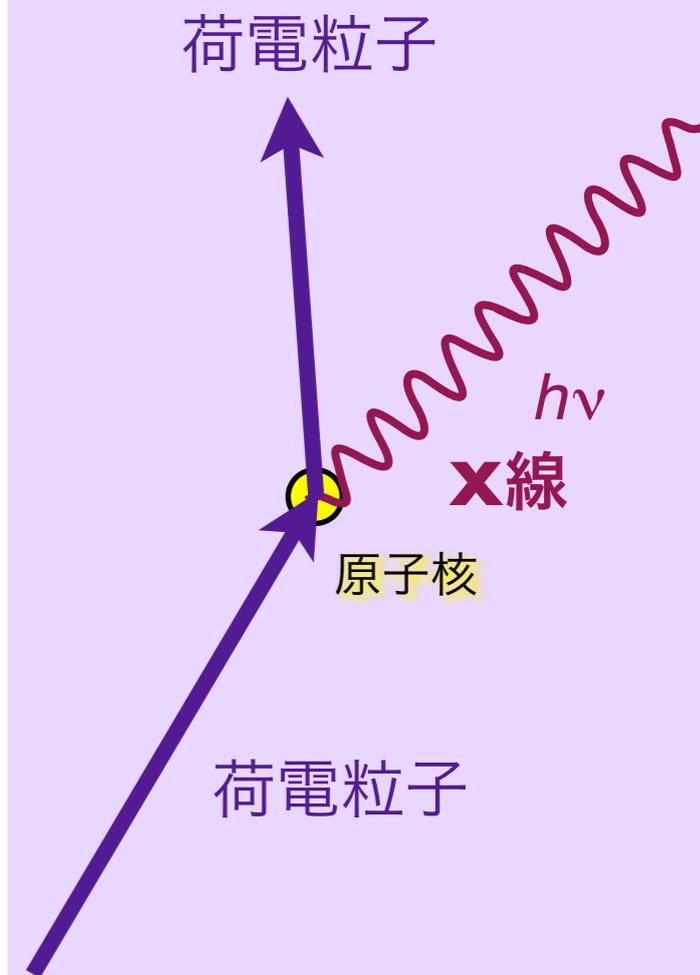
光子が電子1個に散乱され、光子は大きくエネルギーを減じる。

電子対生成



MeV以上の光子が電子・陽電子の対を生成する。

制動放射 (Bremsstrahlung)



荷電粒子が制止したり軌道を曲げられたりするとき光子を放出する。

高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

光子

反応断面積

1 Mb
= $(0.1 \text{ \AA})^2$

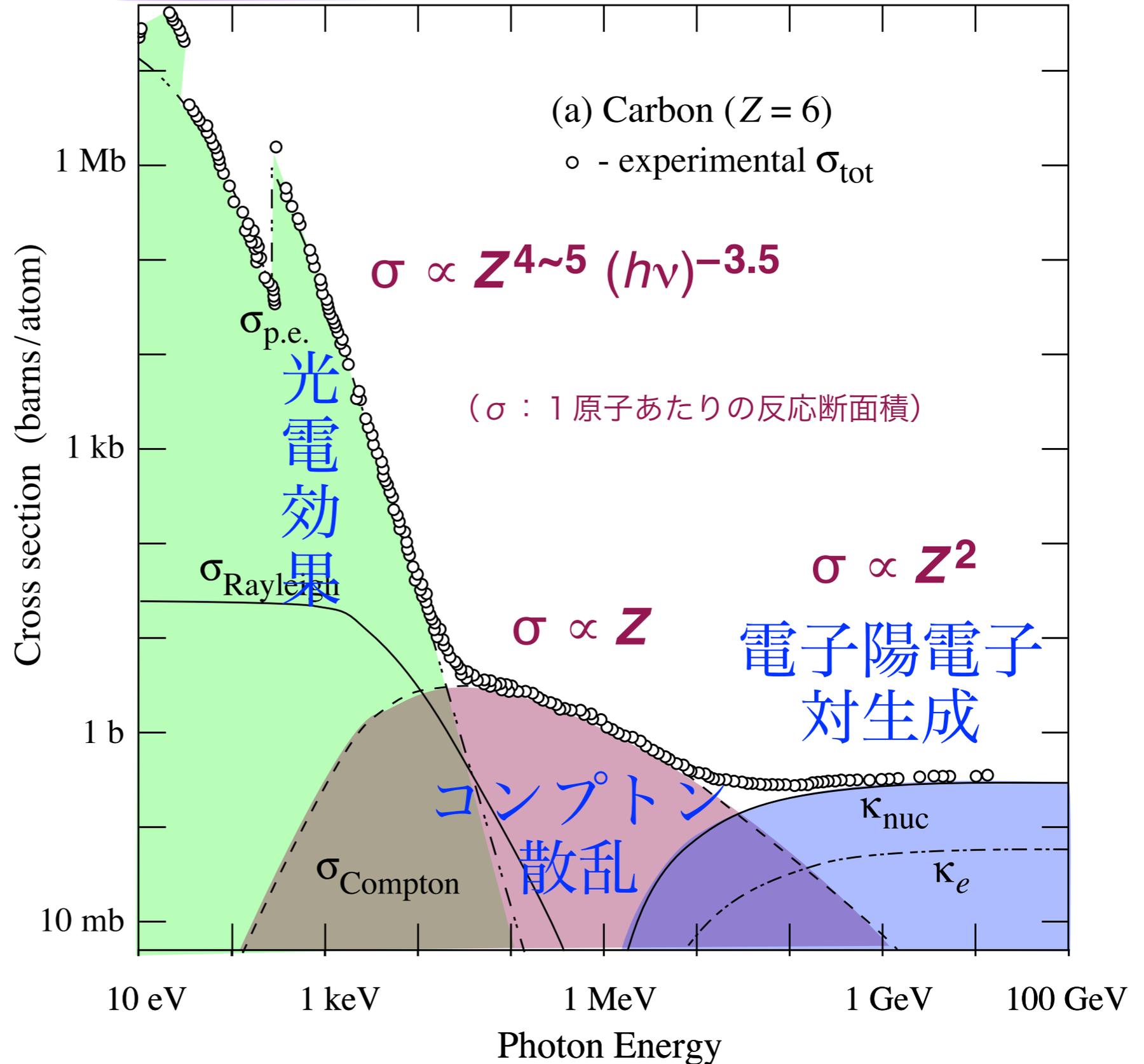
1 Mb

1 kb

1 barn
= 10^{-28} m^2
= $(10 \text{ fm})^2$

1 b

1 mb



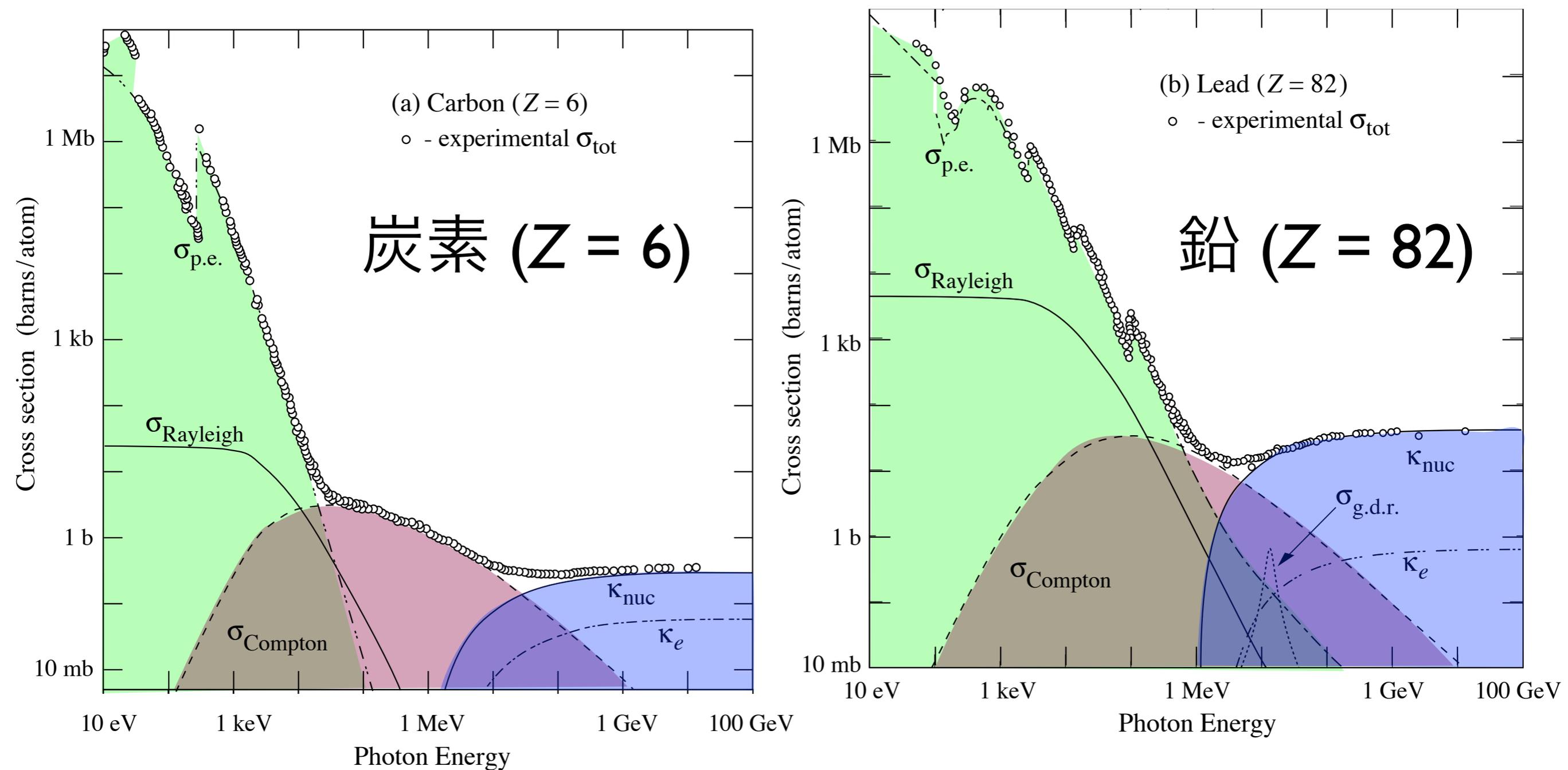
紫外線

X 線

γ

線

光子の反応断面積の物質依存性



光電効果 $\propto Z^{4\sim 5}$

コンプトン散乱 $\propto Z$

電子対生成 $\propto Z^2$

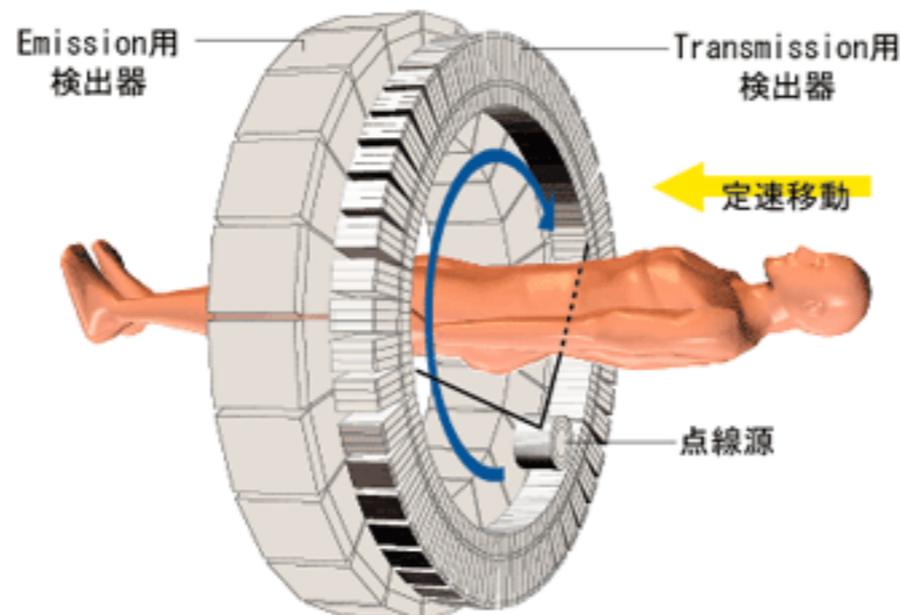
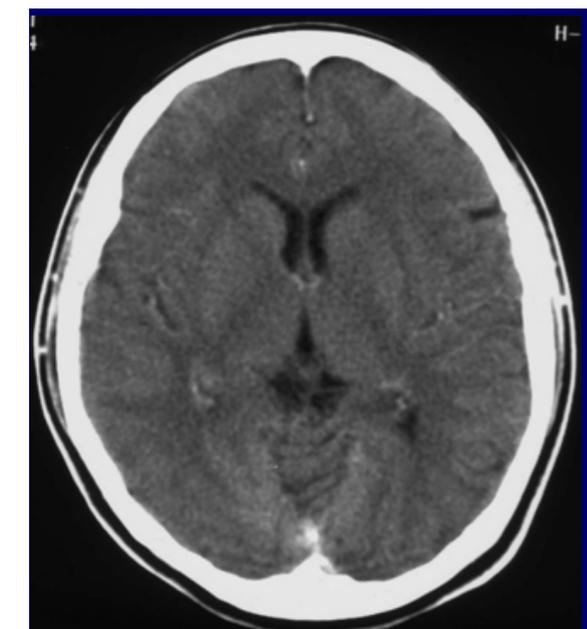
レントゲン(X線)撮影

吸収率の差を利用して撮像する。



(減弱)
造影剤 (I, Ba, Xe) : Z 大 = 減衰係数 大
光電効果やコンプトン散乱の反応断面積は
原子番号 Z が大きい元素ほど顕著に大きい。

X線 CT



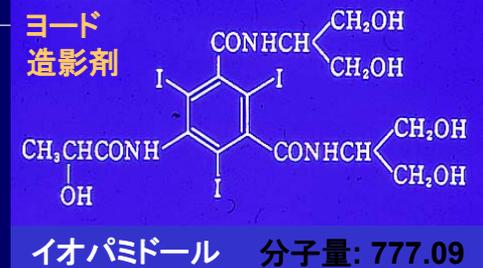
X線検査用造影剤

* 陽性造影剤

| | 元素 | 原子番号 | K吸収端 |
|-----------------|----|------|-----------|
| ・ヨード造影剤: 血管造影用 | I | 53 | 33.16 keV |
| ・硫酸バリウム: 消化管造影用 | Ba | 56 | 37.41 keV |
| ・キセノンガス(脳血流CT) | Xe | 54 | 34.56 keV |

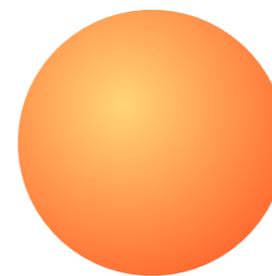
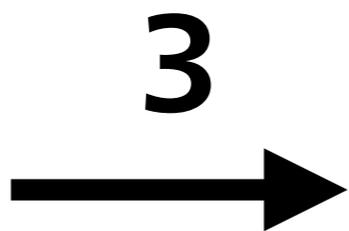
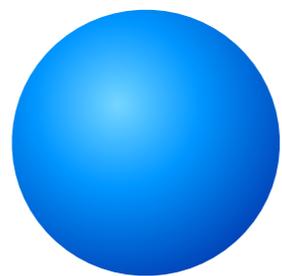
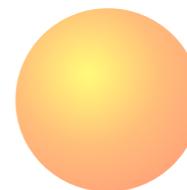
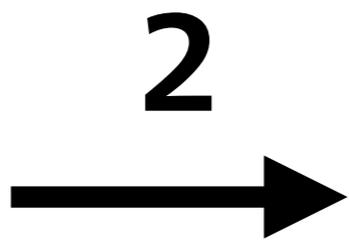
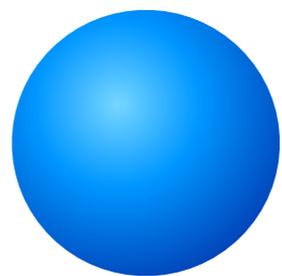
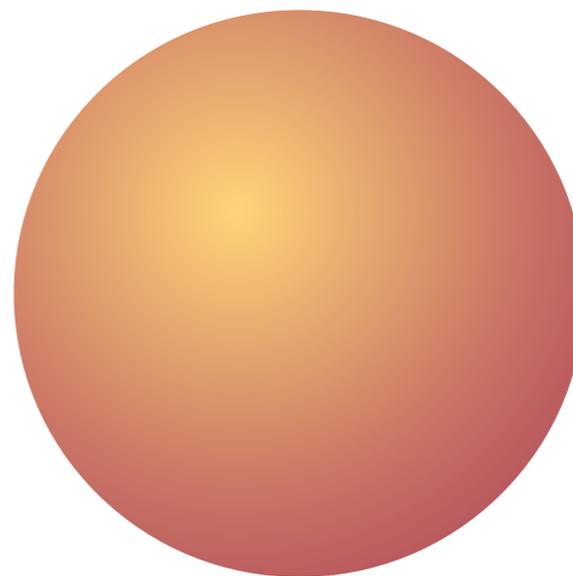
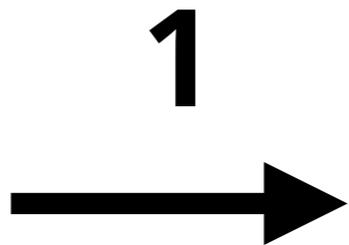
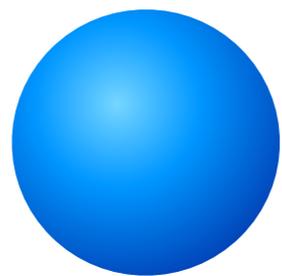
* 陰性造影剤

- ・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...
- ・オリーブ油(膀胱CT)



放射線と物質との相互作用

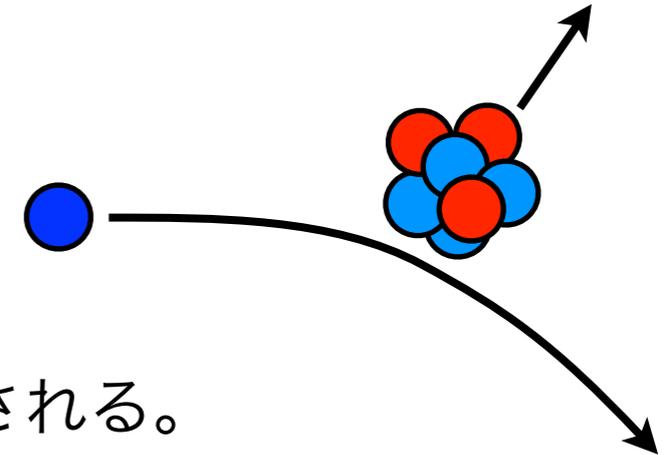
中性子の反応と放射化



中性子の反応と放射化

中性子の弾性散乱

高速中性子は原子核と衝突を繰り返して減速する。
衝突毎にエネルギーを指数関数的に減らす。



中性子は、同じ質量をもつ陽子により最も効率的に減速される。

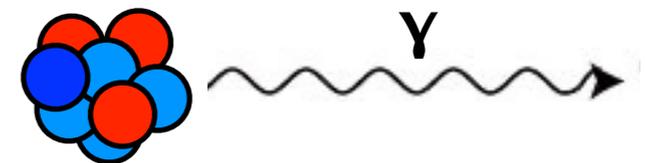
中性子の遮蔽には、水やコンクリートなど、水素原子を含む物質を用いる。

陽子など散乱された原子核が高 LET の荷電粒子として原子・分子をイオン化する。

中性子の吸収と核反応

質量数が1つ大きい原子核を形成したあと、 γ 線などを放出。
放射化の原因となる。

(n, γ) 反応



放射化

(n, γ) 反応

(γ, n) 反応・ (γ, p) 反応

放射性物質でないものが放射線照射によって放射性を帯びること。

中性子や、10 MeV 以上の γ 線による核反応で放射性核種が生じることがある。

通常の放射性核種による β 線や γ 線、原子からの X 線などでは起こらない。

加速器施設や原子炉などの第一種管理区域では放射化に注意が必要。

放射線計測学

空間線量率測定 表面汚染検査



β (γ)

放射線の測定

γ



検出器

気体の電離を利用

電離箱・比例計数管・GM管

シンチレータ + 光電子増倍管

NaI, CsI, plastic scinti., ZnS

半導体検出器

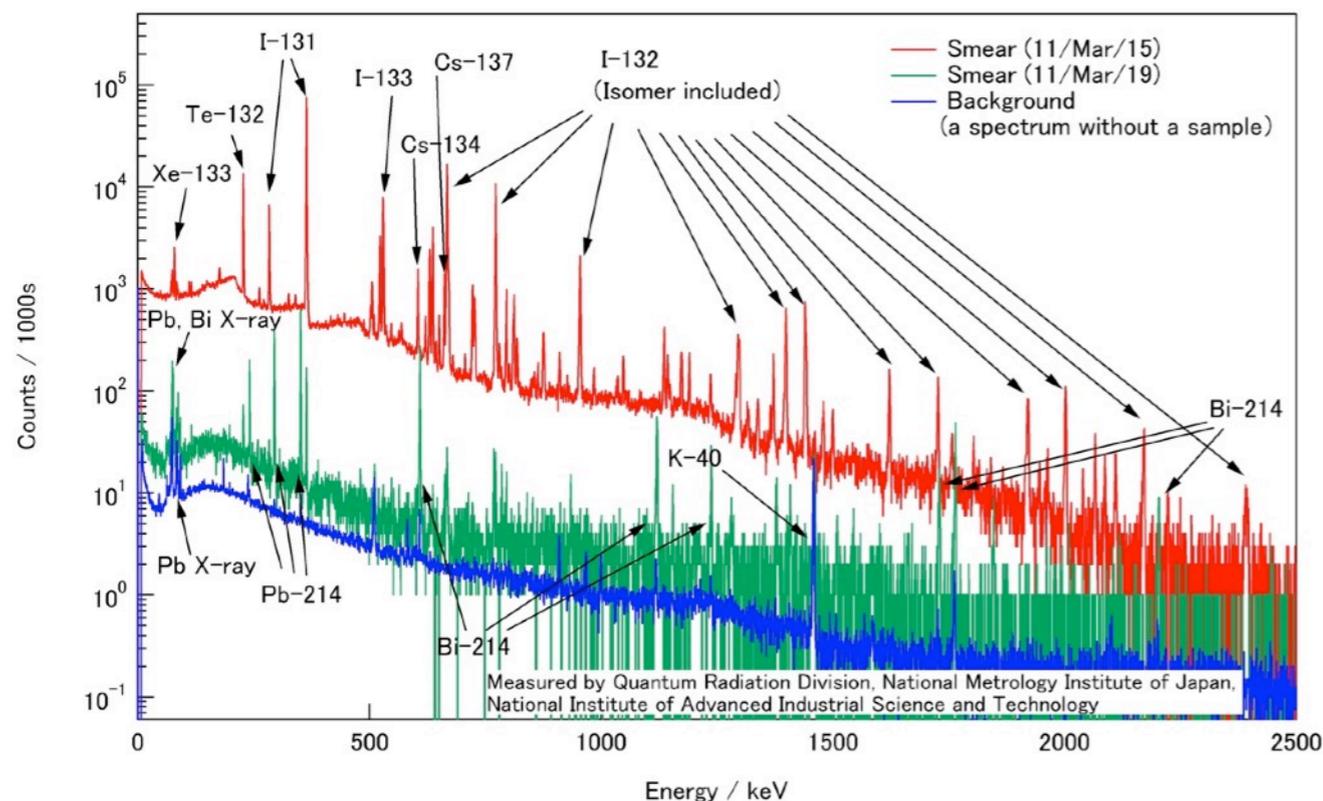
Ge, Si(Li)

計数 (cps = counts per second)

表面汚染検査計 (例: GM サーベイメータ) 空間線量計 (例: NaI(Tl) サーベイメータ)

エネルギー分析 (核種同定)

ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)



食品検査

食品検査用ゲルマニウム検出器



放射線の測定

計数 (cps = counts per second)

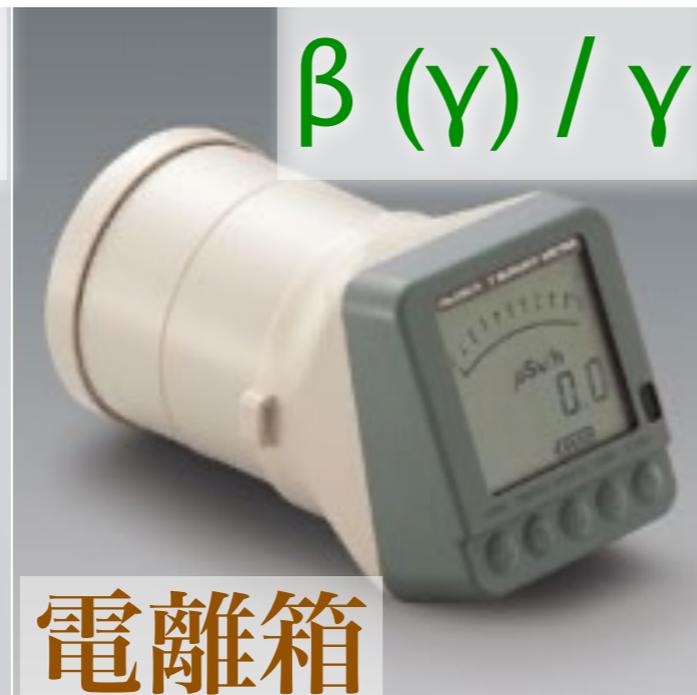
サーベイメータ 【空間線量率測定】

β (γ) / γ



GM管

β (γ) / γ



電離箱

γ



CsI (Tl)



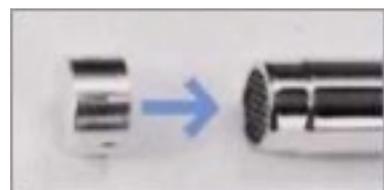
NaI (Tl)

シンチレーション
(放射線照射による物質の蛍光発光)

β (γ)



【表面汚染検査】



気体の電離

γ

β (γ)



GM管

α



ZnS (Ag)



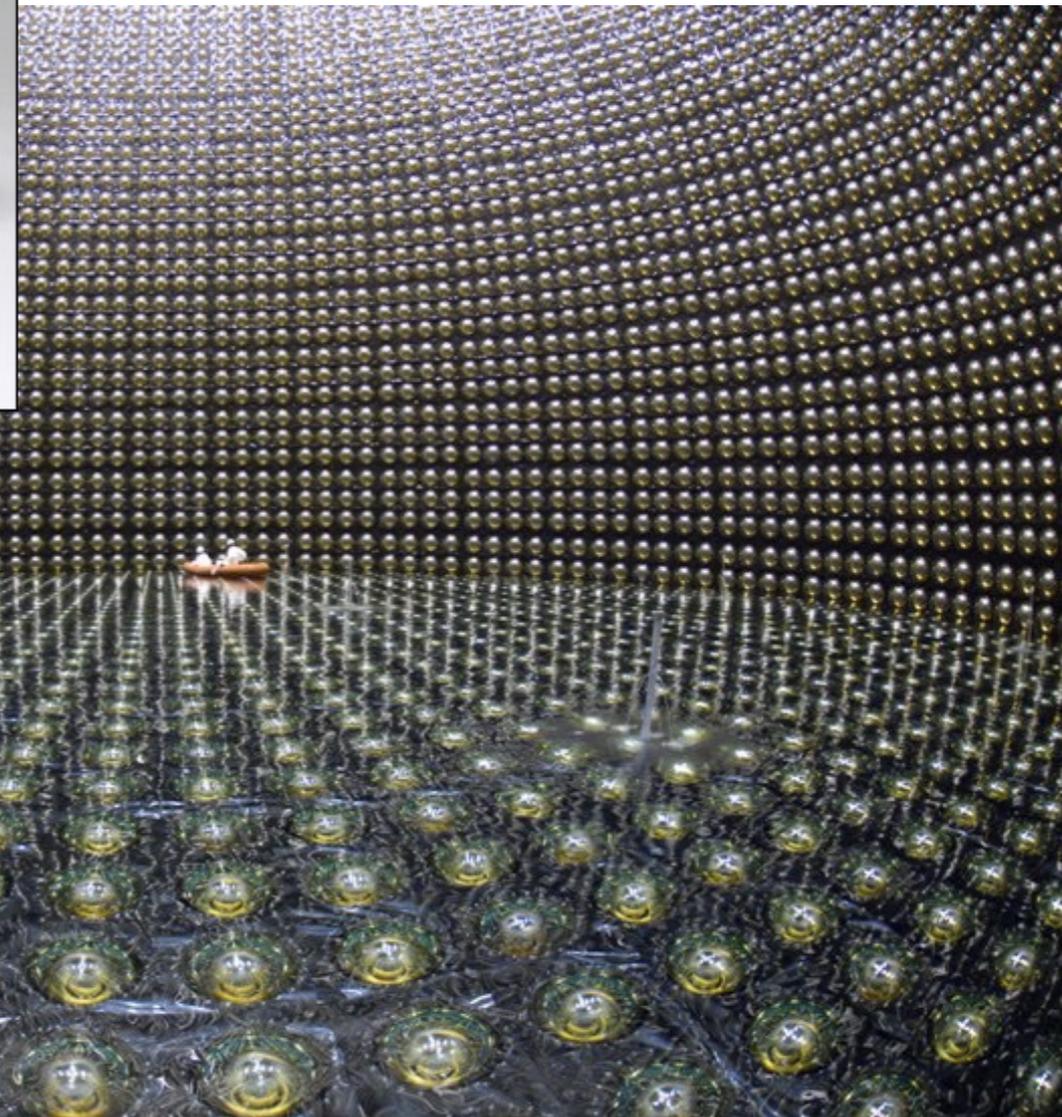
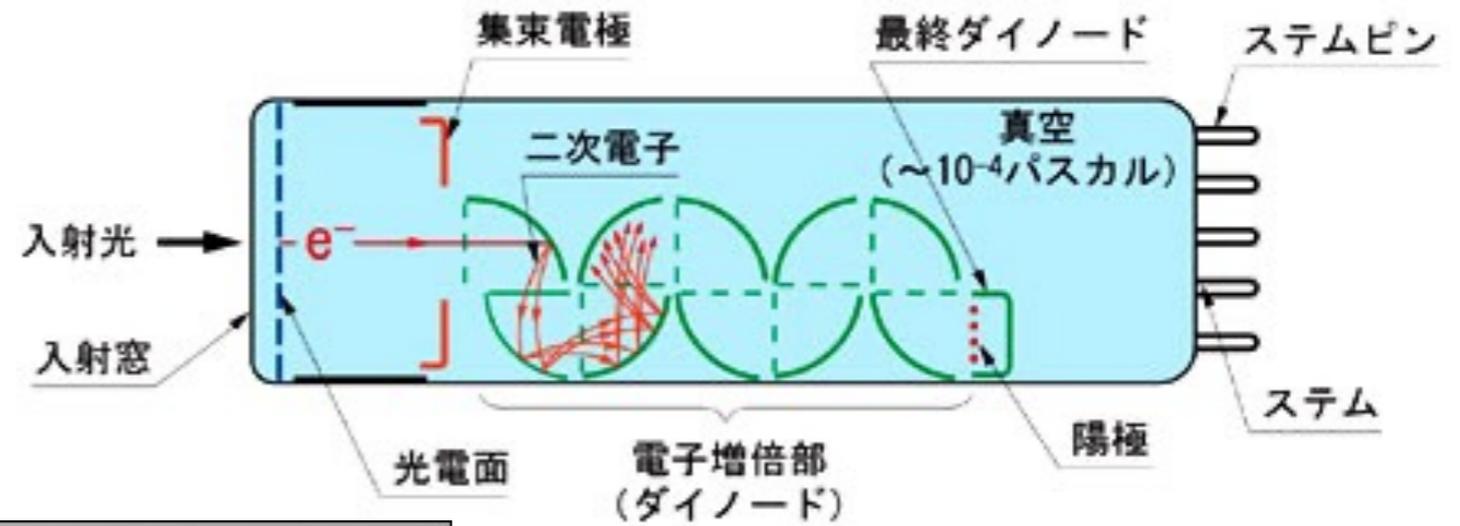
放射線照射による物質の蛍光発光 シンチレータ (Scintillators)

光電子増倍管 (PMT) (Photomultiplier tube)

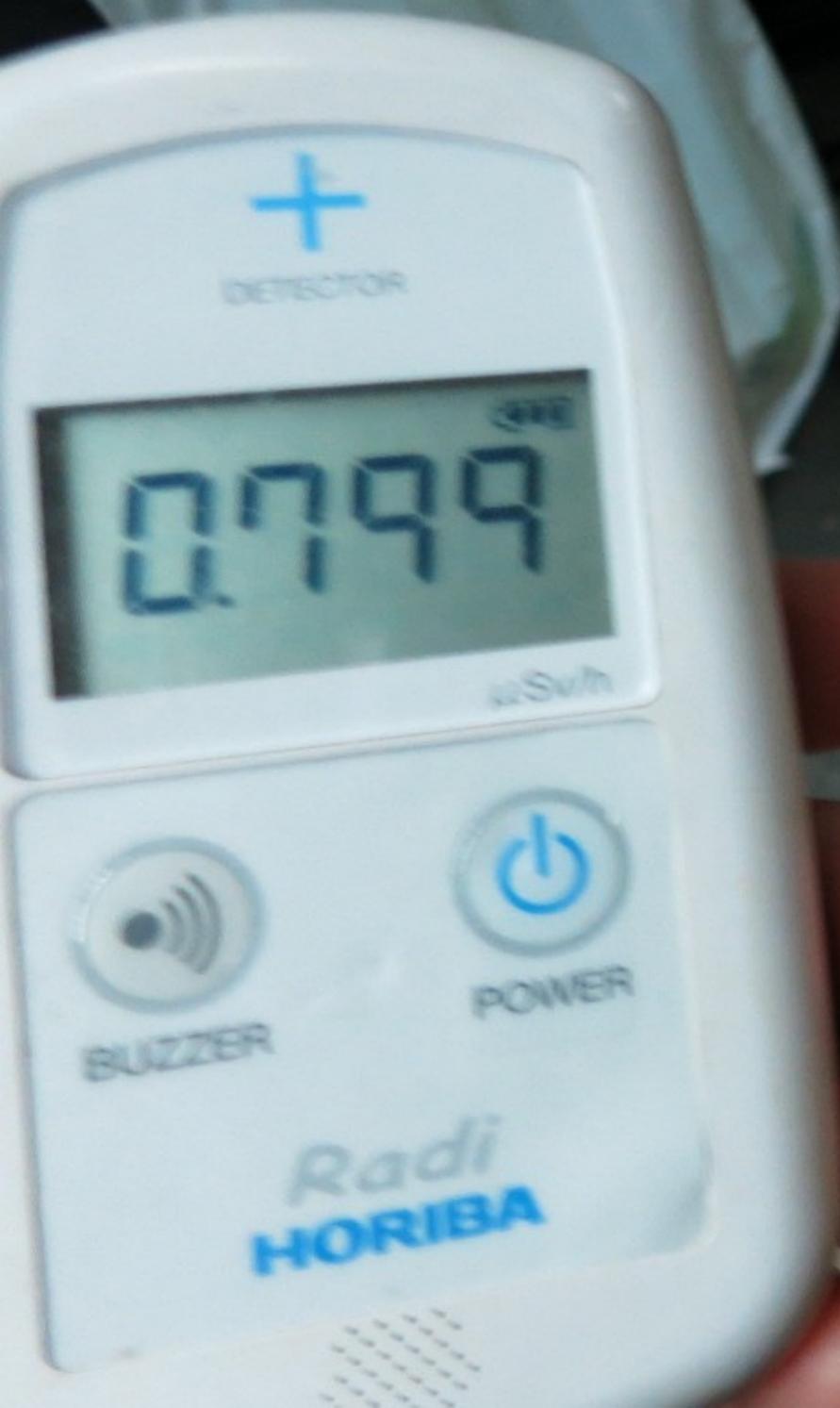
プラスチックシンチレータ



SCIENCEPHOTOLIBRARY

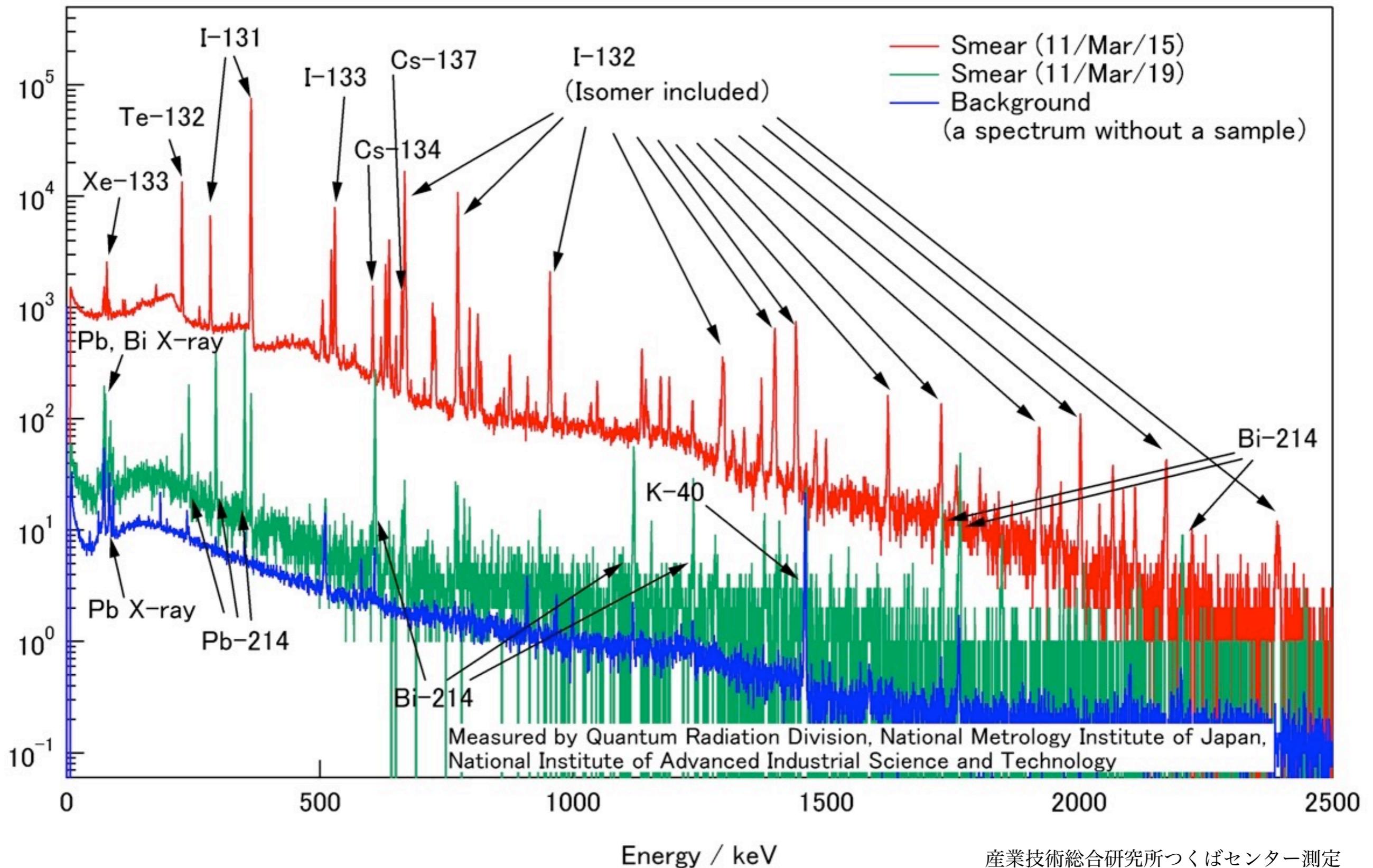


液体シンチレーションカウンタ



エネルギー分析 (核種同定)

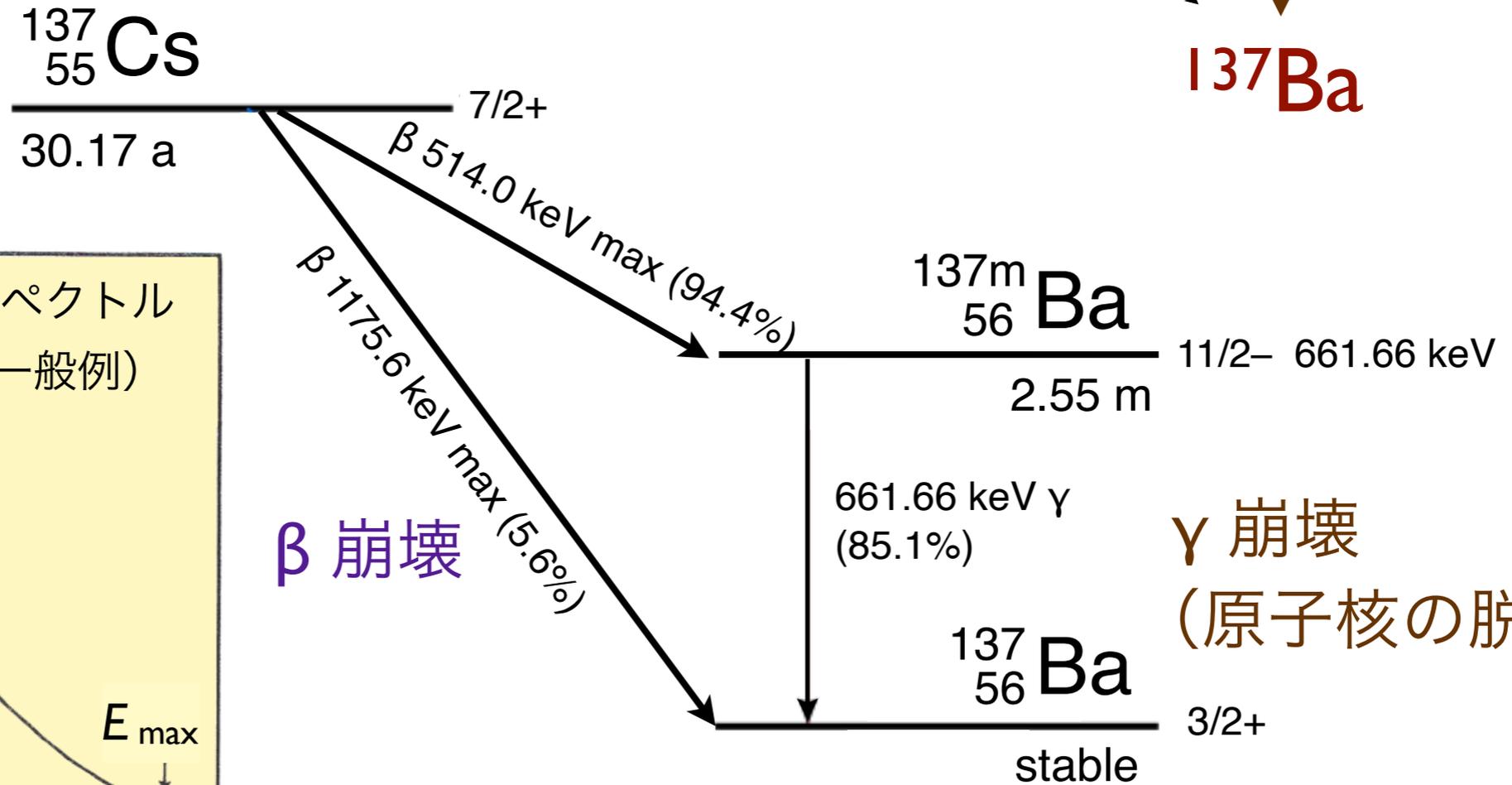
ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)



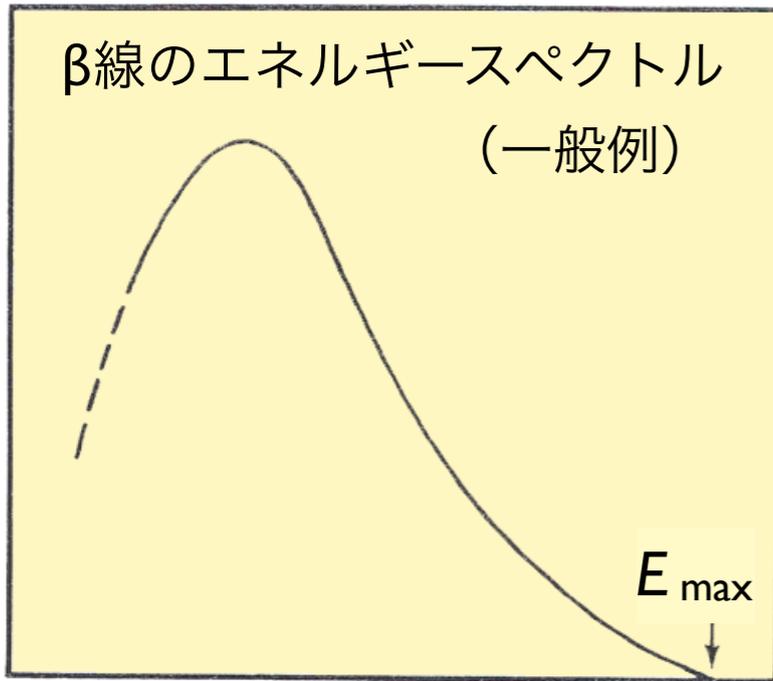


壊変図式

例： ^{137}Cs

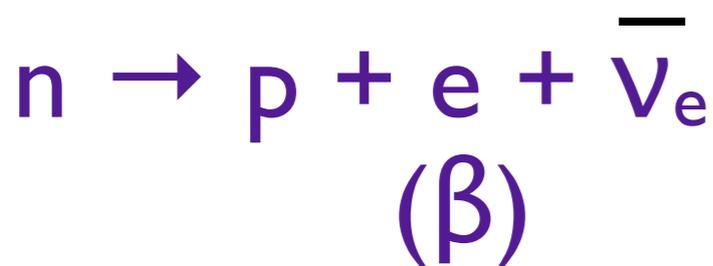


粒子数の分布



エネルギー E_β

β線 (連続スペクトル)



γ線 (線スペクトル=決まったエネルギー)

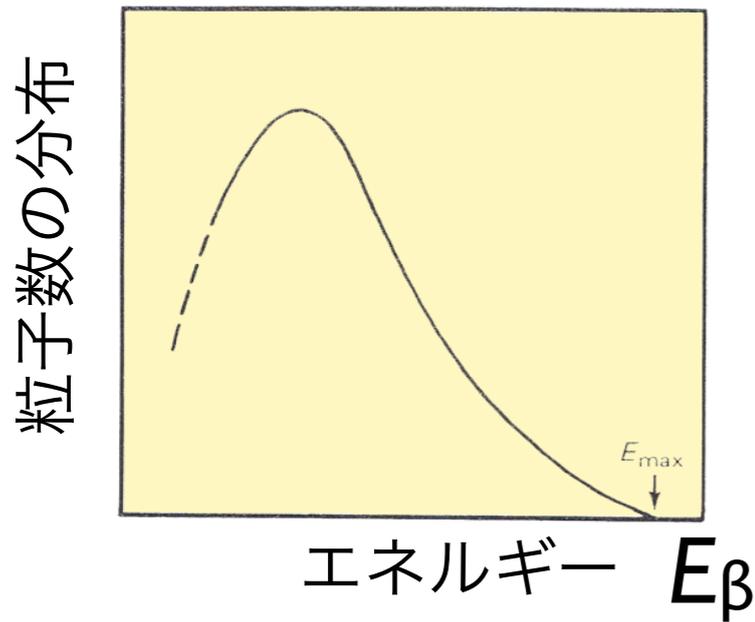
γ線のエネルギーで核種を同定

β崩壊核種の同定 (γ線を出さないもの)

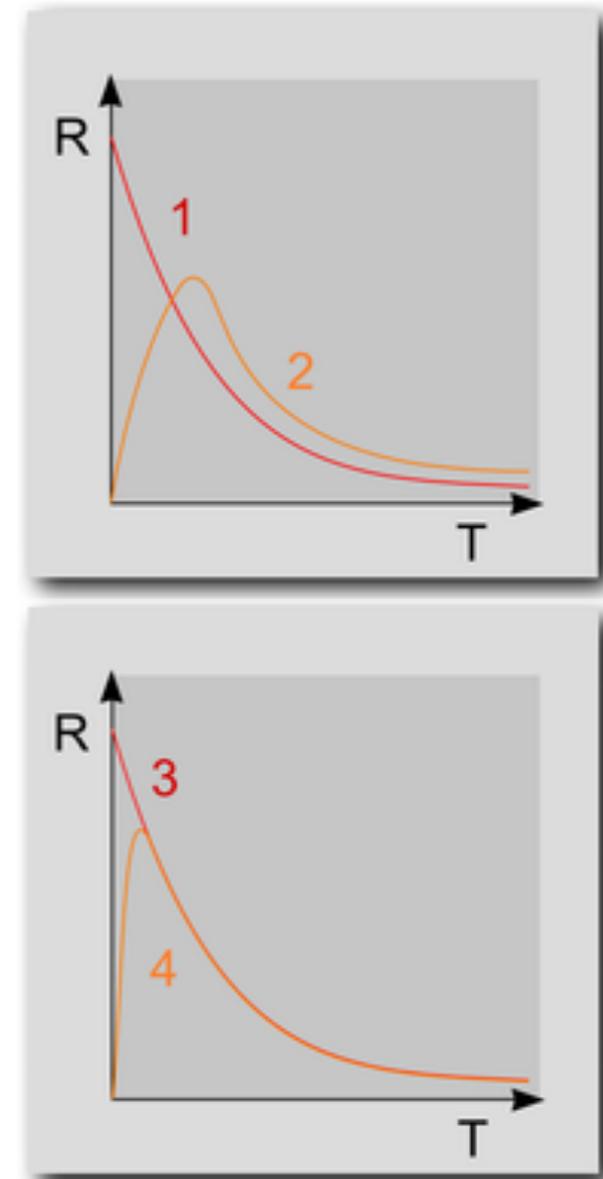
化学分離が必須 「放射化学」

α崩壊核種の同定は もっと大変

例： **$^{89}, ^{90}\text{Sr}$**



アルカリ土類元素 (Ca, Sr, Ba, Ra) を粗分離したあと
Sr 元素だけを残す！ そしてベータ線測定をする。



環境試料の放射化学分析では、試料を環境試料採取法に従って前処理した後、 ^{90}Sr を担体である非放射性ストロンチウムとともにその他の元素と分離する。ついで、放射平衡が成立するまで放置して娘核種であるイットリウム放射性同位体 (^{90}Y) を生成させ、これをSrから分離し、 ^{90}Y の放射能から ^{90}Sr の放射能を求める。全ベータ放射能の測定法を併用すれば ^{89}Sr の放射能も求まる。

含有する金属成分や有機物などに起因する妨害を低減するには、アルカリ土類元素 (Ca, Sr, Ba, Ra) の粗分離を先行して実施することが有効な方策である。分析用試料中の放射性ストロンチウムを含むストロンチウム成分は、通常、発煙硝酸法、イオン交換法、シュウ酸塩法によって、共存するSr以外のアルカリ土類元素から分離される。

Ge半導体検出器による γ 線計測

100 Bq/kg = 10 Bq / 100 g

検出効率は 1% 程度

(立体角・Ge結晶による検出効率)

^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比は 1:1

(福島原発事故当時)

基準値は、測定上はそれぞれの核種で

0.05 cps / 100 g に相当

(20秒に1カウント！)

低バックグラウンド環境での測定が必須

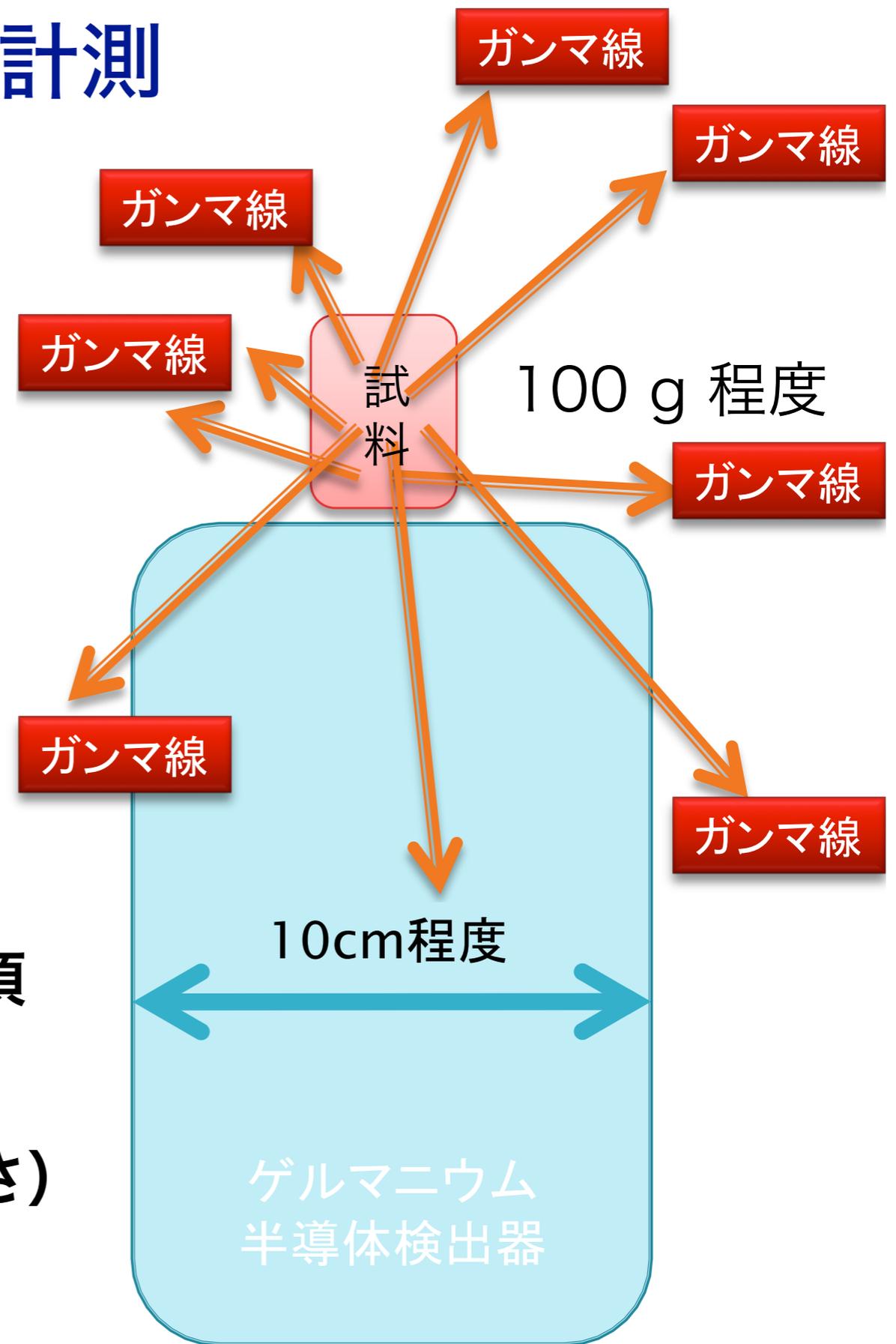
(環境放射線の遮蔽)

長時間の測定が必要 (統計学的不確かさ)

(最低でも1時間以上の測定)

短時間では**検出限界値**が低くできない。

⇒ **N.D.** (Not Detected = **不検出**) \neq 0 Bq (不存在)



10試料の測定結果(詳細)

| No. | 試料 | 採取場所 | ^{134}Cs (Bq/kg) | ^{137}Cs (Bq/kg) |
|-----|--------|------|---------------------------|---------------------------|
| 1 | 畑の土 | 練馬区内 | ND(5.56) | 14.1 ± 2.17 |
| 2 | ジャガイモ | 練馬区内 | $4.58 \pm 0.55(0.23)$ | $7.16 \pm 0.86(2.33)$ |
| 3 | 培養土 | 練馬区内 | $5.95 \pm 1.43(5.82)$ | $9.35 \pm 1.89(6.78)$ |
| 4 | 梅 | 練馬区内 | ND(2σ)(3.98) | ND(2σ)(4.04) |
| 5 | 干し椎茸 | 群馬産 | ND(26.6) | ND(29.4) |
| 6 | 路傍の土 | 練馬区内 | $4110 \pm 20.9(24.6)$ | $6330 \pm 38.7(21.6)$ |
| 7 | 生椎茸 | 富山産 | ND(5.65) | ND(5.73) |
| 8 | カツオ | ? | ND(4.12) | ND(5.32) |
| 9 | 田圃の土 | 練馬区内 | $185 \pm 11.6(37.5)$ | $298 \pm 19.4(33.5)$ |
| 10 | ブルーベリー | 練馬区内 | $1.42 \pm 0.29(1.01)$ | ND(2σ)(1.38) |

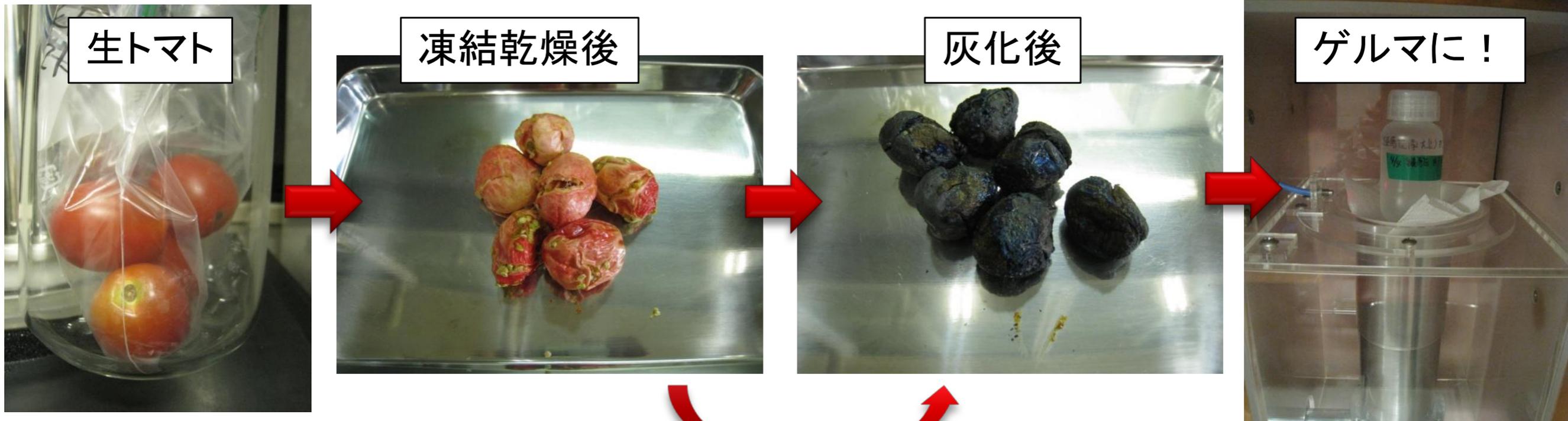
食品に含まれる放射性物質の測り方

- ▶ 食品の放射能は正確に測りにくい！
 - 水っぽい(水は放射線の遮蔽剤)
 - 隙間があったり密度が一定でなかったり
 - ひとつひとつのサンプルには揺らぎがある

なぜ灰にするの？

含まれる放射性物質を濃縮する(焼却炉の灰と同じ理屈)ことで、検出限界値を超えて測りやすくする

食品(トマト)の前処理



飛灰を発生させないように炭状にする

現在の放射性物質の基準値

| 核種 | 基準値(Bq/kg) | |
|--------------------------------------|------------|-----|
| 放射性ヨウ素(^{131}I) | 300 | |
| 放射性セシウム ($^{134+137}\text{Cs}$) | 飲用水 | 10 |
| | 一般食品 | 100 |

福島米の全量全袋検査



基準値 (100 Bq/kg) 超え

0袋 / 949万袋 (2019年)

0袋 / 925万袋 (2018年)

0袋 / 998万袋 (2017年)

0袋 / 1027万袋 (2016年)

0袋 / 1050万袋 (2015年)

2袋 / 1101万袋 (2014年)

28袋 / 1101万袋 (2013年)

71袋 / 1035万袋 (2012年)

線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリッケ線量計 Fricke dosimeter

$\text{Fe}^{2+} + \text{放射線} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$, 吸光度測定

熱ルミネッセンス線量計 TLD: thermoluminescence dosimeter

蛍石などの固体結晶 + 放射線 \rightarrow (加熱) \rightarrow 蛍光

電子・正孔が格子欠陥に捕えられる

蛍光ガラス線量計 glass badge (RPL: radio-photoluminescence)

銀活性リン酸塩ガラス + 放射線 \rightarrow (紫外線) \rightarrow 蛍光

$\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}^0, \text{Ag}^{++}$ 発光中心 color center ができる

ガラス線量計: コバルトガラス \rightarrow 発光中心 (着色)

光刺激ルミネッセンス線量計 OSL: optically stimulated luminescence

ポケット線量計: 電離箱、半導体検出器

フィルムバッジ: 銀塩写真フィルム AgBr



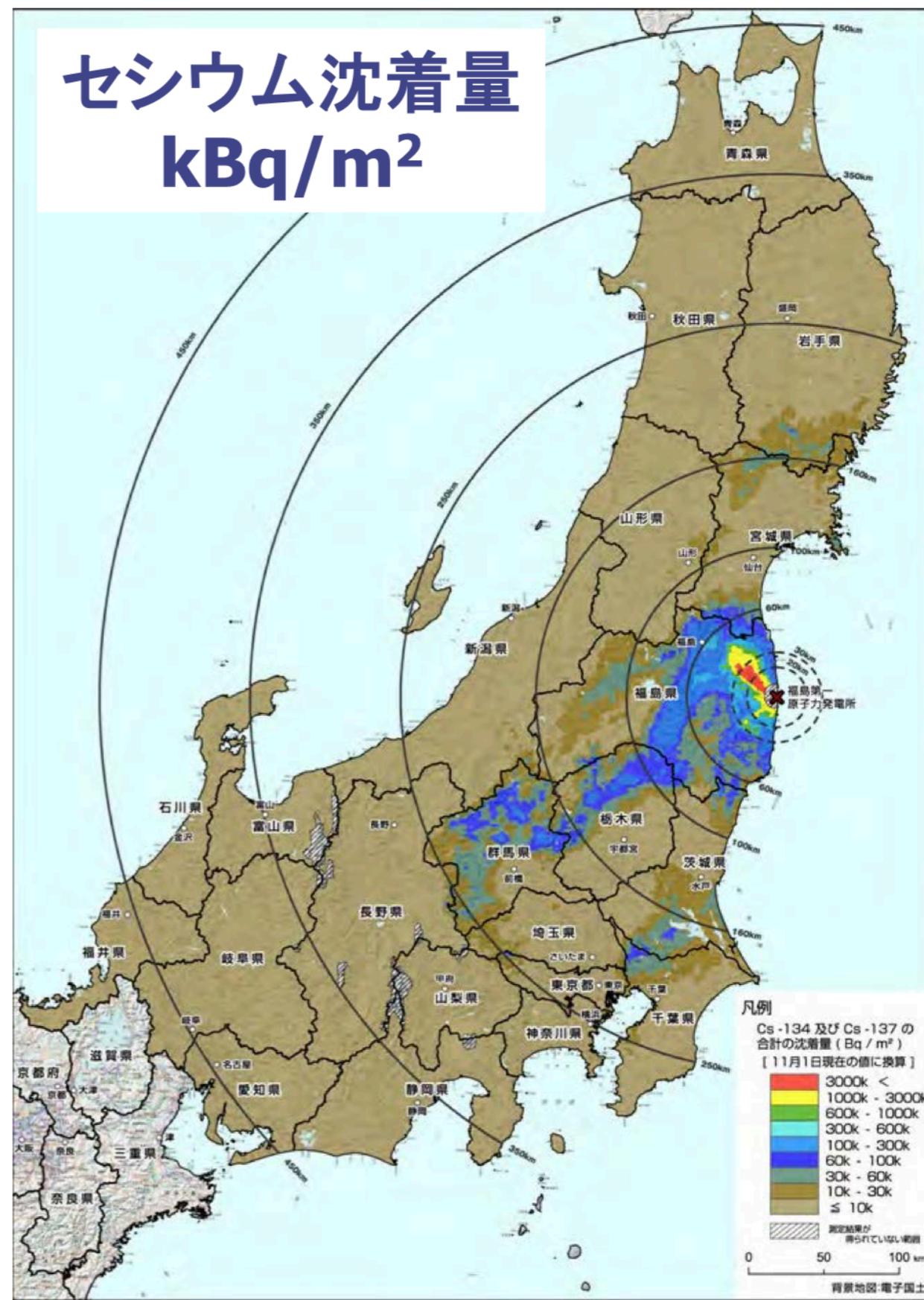
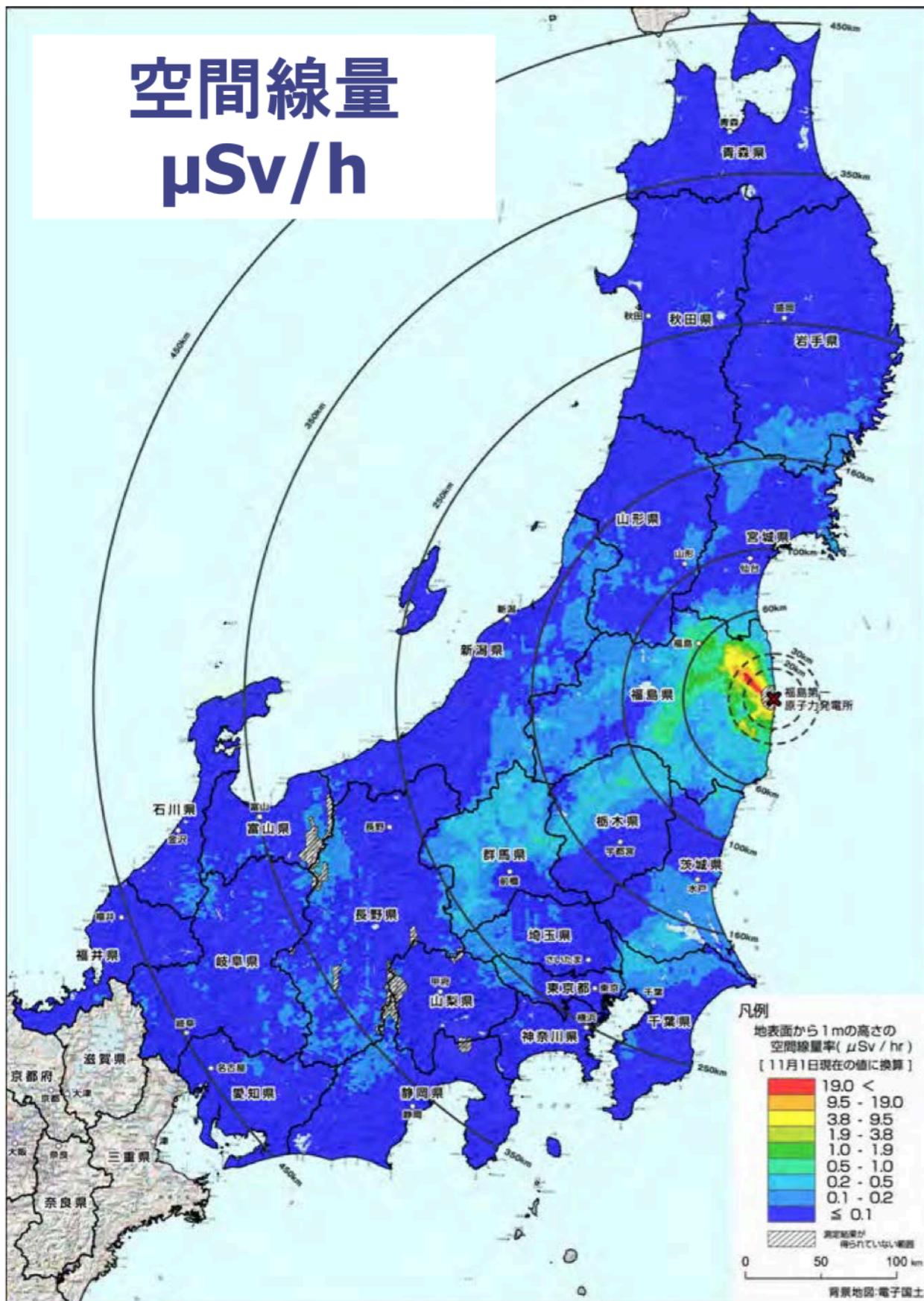
OSL ルクセルバッジ®



環境放射化学

放射線の安全取扱

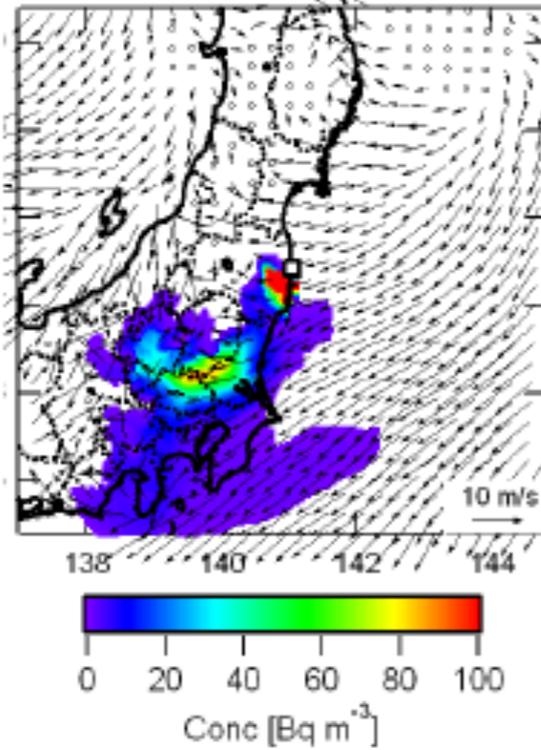
文部科学省の航空機モニタリングによる広域汚染マップ



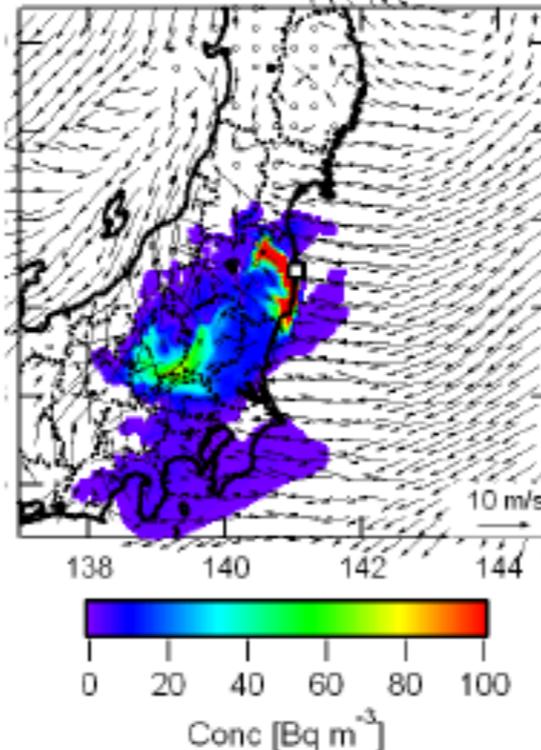
ホットスポットの生成メカニズム

大気濃度

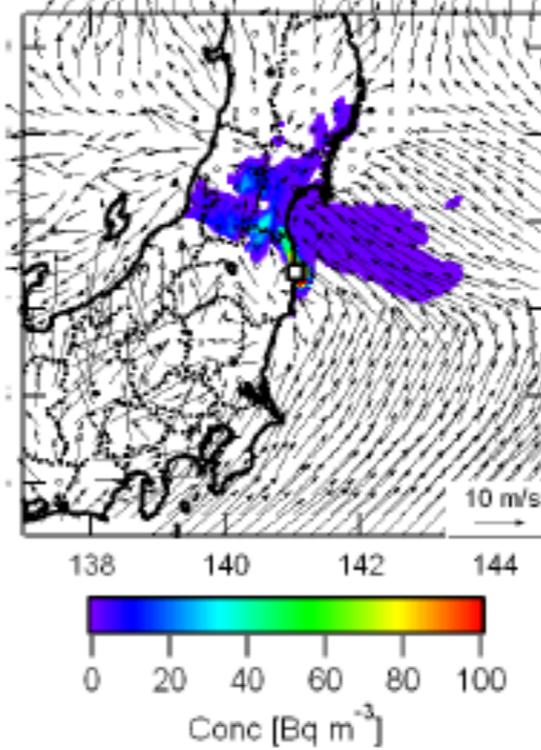
3/15の15時



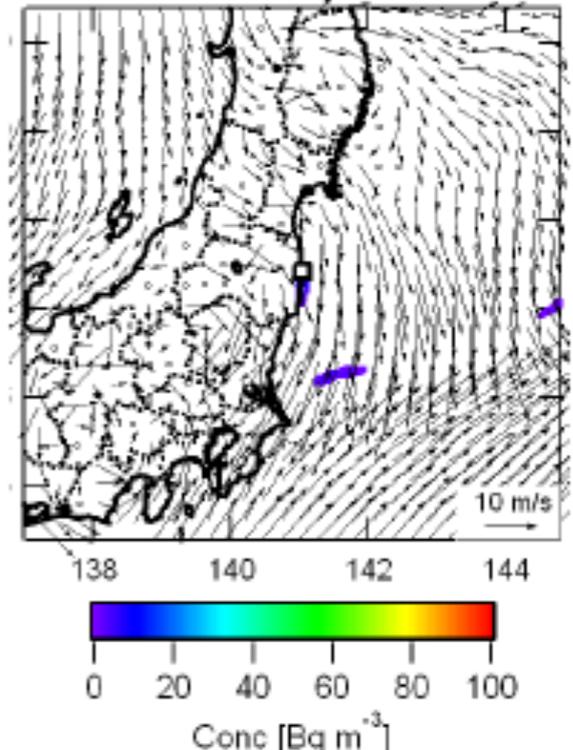
3/15の19時



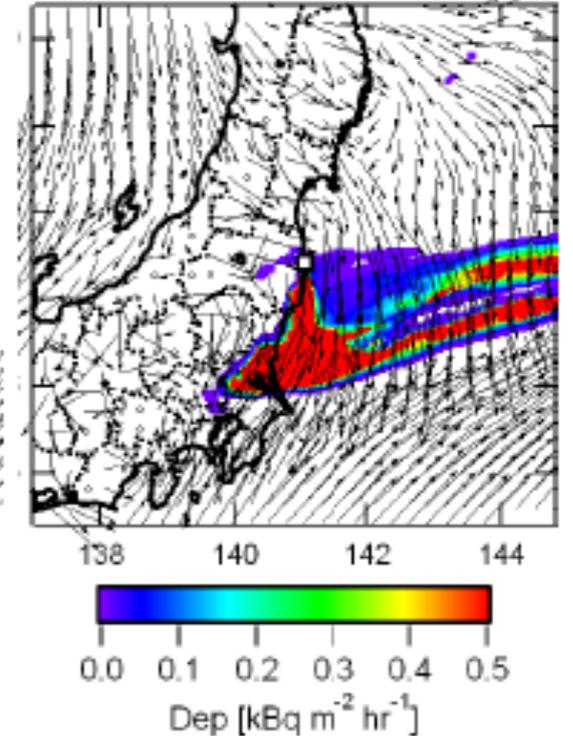
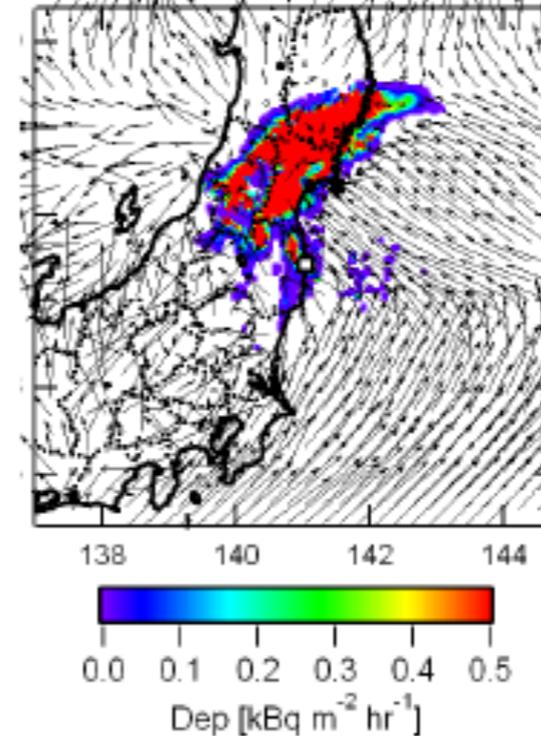
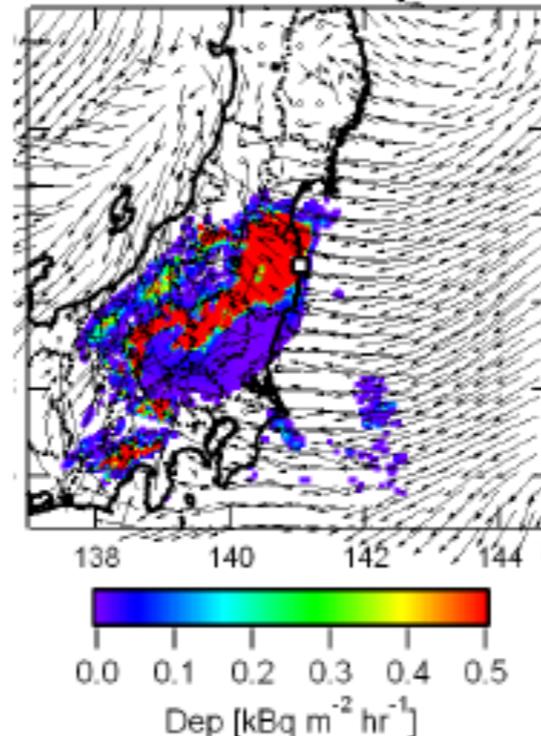
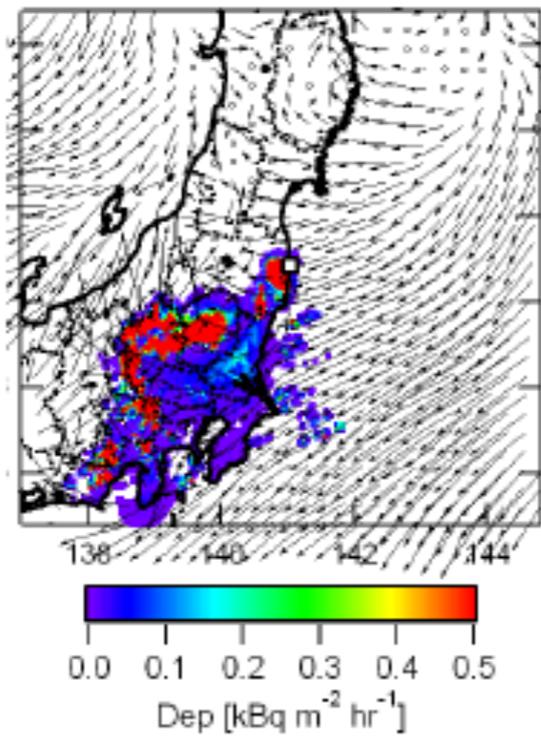
3/20の18時



3/21の8時



降下量



関東への最初の影響

福島 of 深刻な汚染、
北関東の汚染

宮城県北部の稲藁汚染

水道水汚染、千葉北西部
のホットスポット

原発北西方向の汚染と「ホットスポット」



放射線防護服は
何を防ぐ？



早川由紀夫教授(群馬大学)作成、7月26日版



三訂版7月26日(初版4月21日)
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/)
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),
Source: @nnistar
地図製図: 萩原佐知子
背景地図には電子国土ポータル (portal.cyberjapan.jp) の地図を使用しました。

放射線管理区域

管理区域
(使用・貯蔵施設)



許可なくして
立ち入りを禁ず

放射性同位元素
使用室



第 2 種

←開閉→

管理区域 (限域エリア) 用靴履
Shoehorns for Controlled Area
(Maintenance Area)

管理区域 (限域エリア) 用靴履
Shoehorns for Controlled Area
(Maintenance Area)

更衣室
Changing Room

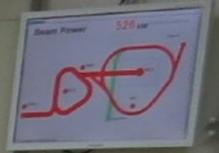
管理区域 (限域エリア) 用靴履
Shoehorns for Controlled Area
(Maintenance Area)



△注意
RPCM の故障の原因になりますので、
靴底にテープ等が付着していない
ことを確認してください。
放射線安全セッション

△注意
RPCM の故障の原因になりますので、
靴底にテープ等が付着していない
ことを確認してください。
放射線安全セッション

静かにお乗りください。
Please step on the foot detector with care.







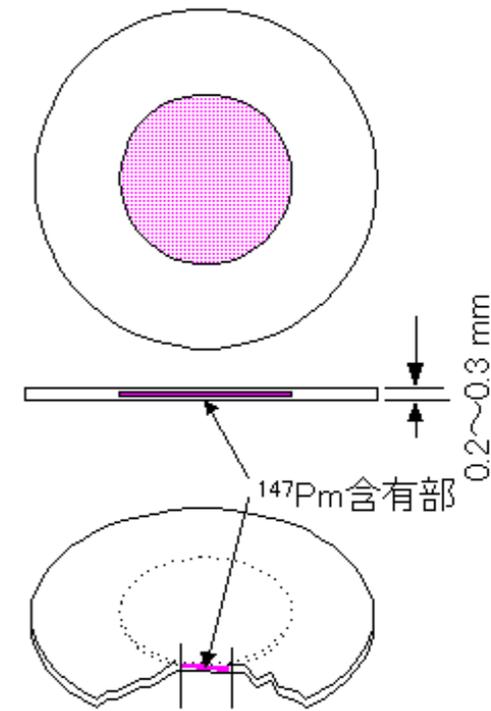
密封小線源



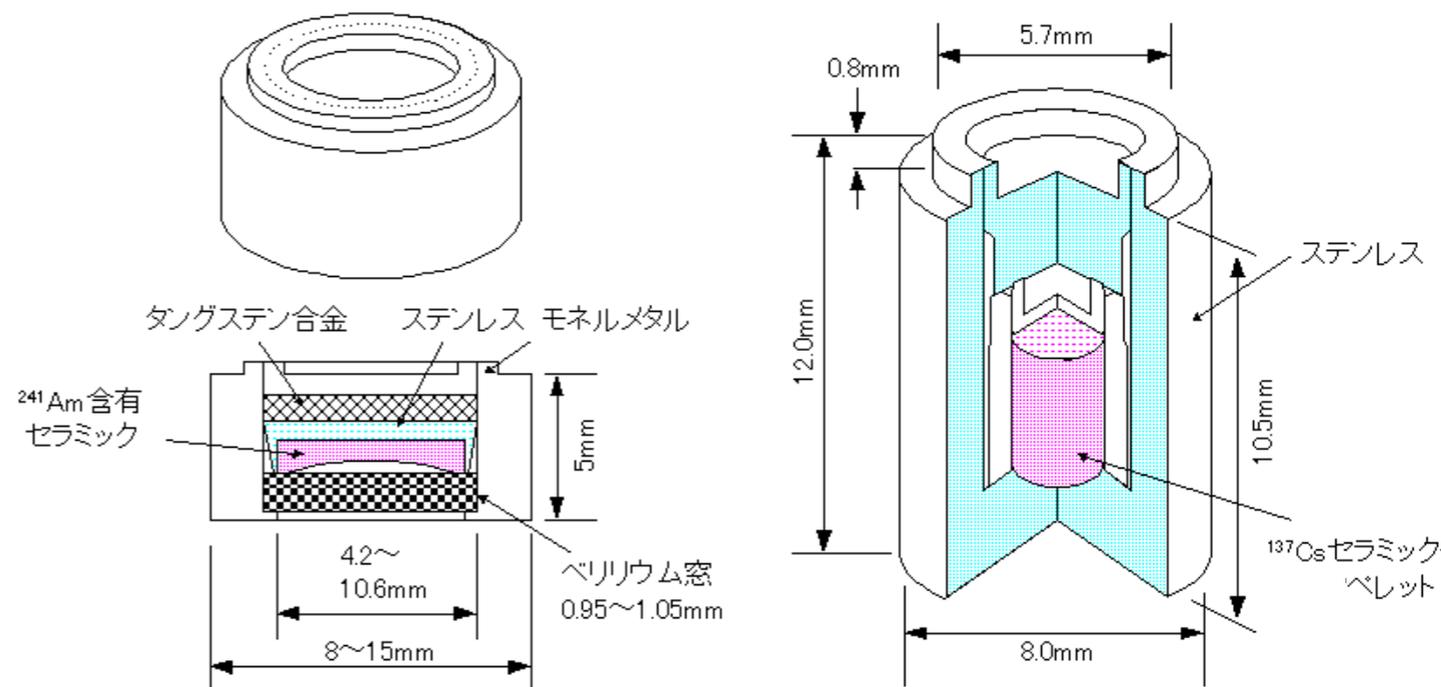
α 線源

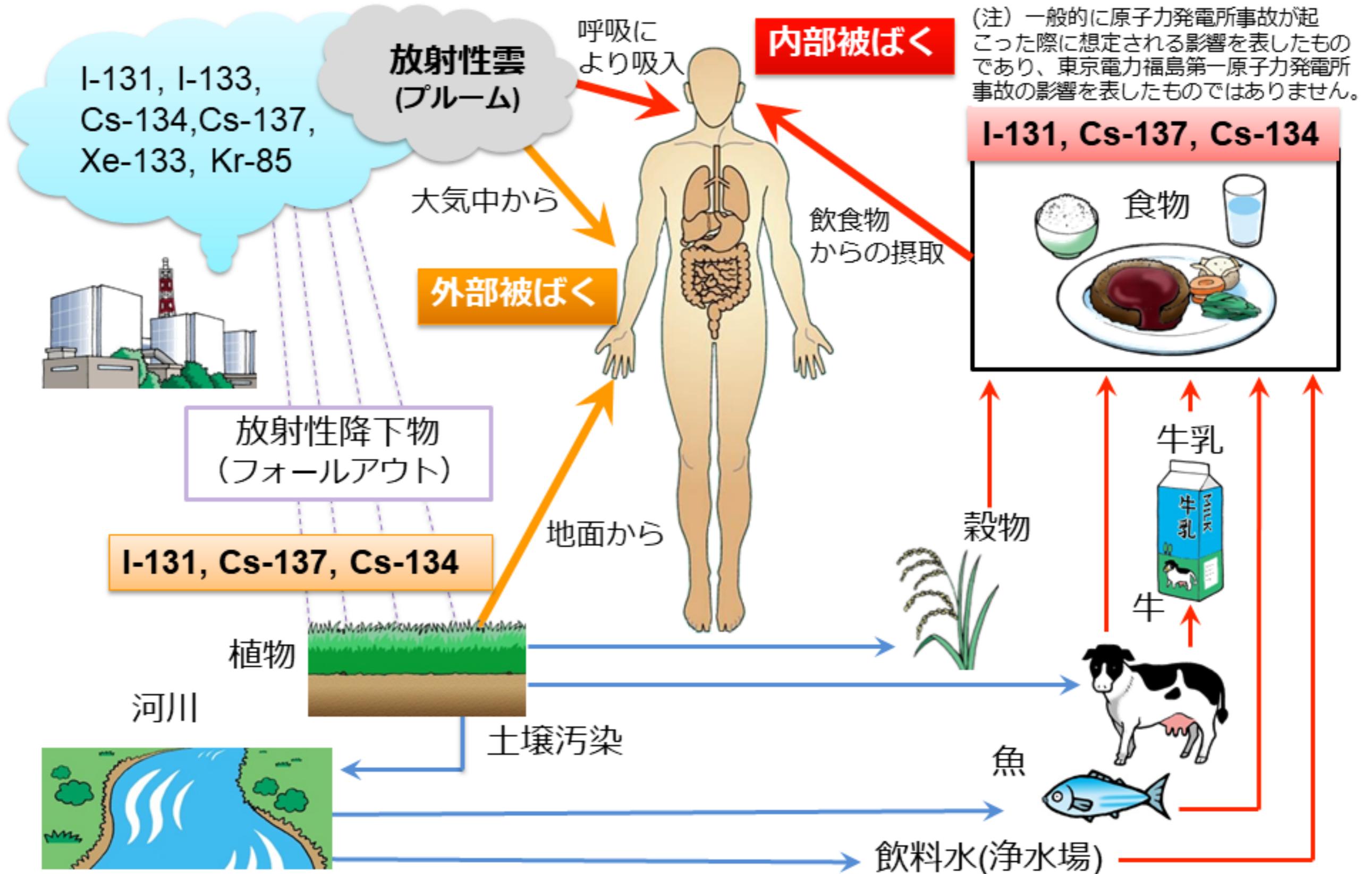


β 線源



γ 線源





(注) 一般的に原子力発電所事故が起こった際に想定される影響を表したものであり、東京電力福島第一原子力発電所事故の影響を表したものではありません。

内部被曝

放射性物質を体内に取り込むことにより、**体の内部から放射線に被曝すること。**

放射性物質を**体内に取り込まない**ことは放射線防護の鉄則。

放射線防護服（ γ 線を遮ることはできない）
放射性物質が皮膚や服に付着し、あるいは
経口摂取してしまうことを防ぐ。



一般に**被曝が継続**するため、**注意が必要**。

- 物理学的半減期
- 生物学的半減期（体内からの排出）

臓器親和性（Cs \Rightarrow 筋肉、I \Rightarrow 甲状腺、Sr \Rightarrow 骨、Pu \Rightarrow 肝臓, ...）
に注意しつつ、**預託線量**を計算して、被曝期間を通じての
トータルの線量が同じであれば、外部被曝とも影響は同じ。

預託線量：体内摂取した放射性物質から出るすべての放射線を、摂取した時点で被曝したと見なして計算をする。Bq から Sv への換算には、物理学的半減期のみならず、排泄機能による生物学的半減期も考慮のうえ、50年間分の積分をする。 ※ 子供や乳幼児は70歳になるまでの期間

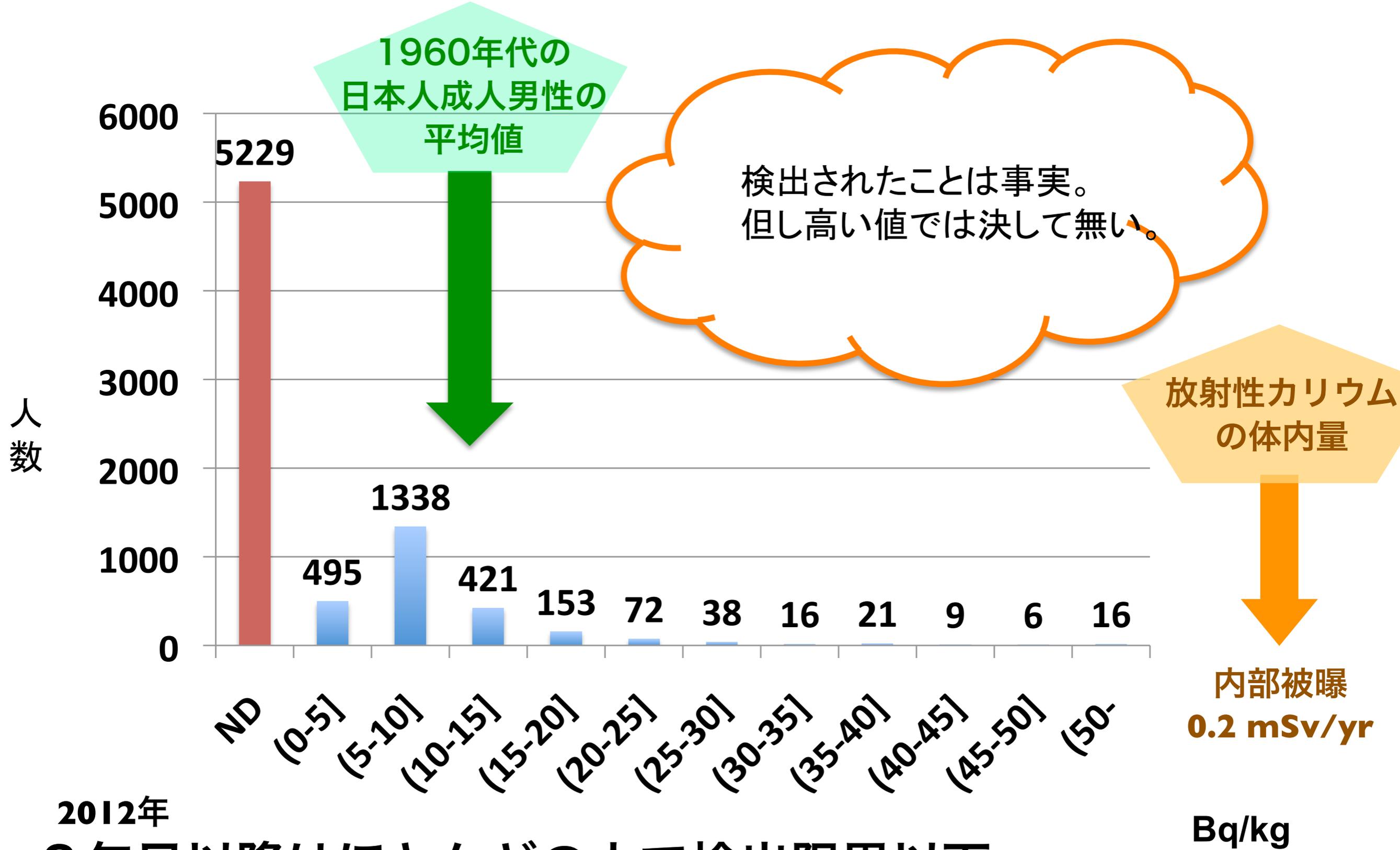
内部被曝の評価

WBC による体内放射能の測定

ホールボディカウンター

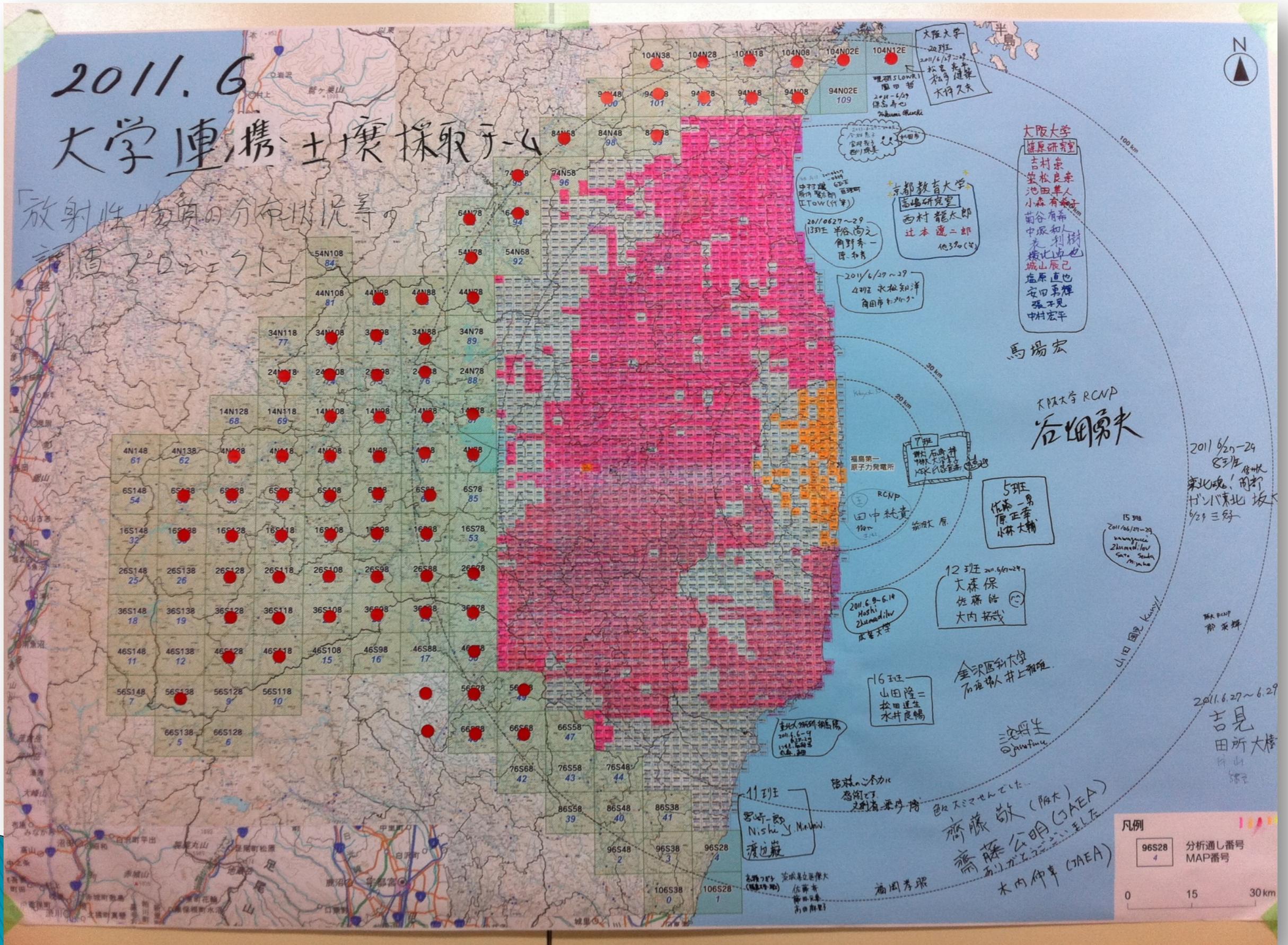


南相馬市立総合病院で計測したセシウム137体内放射能量別被験者数 2011/9/26～2012/3/31施行 (7814人) 高校生以上+成人対象



2012年
2年目以降はほとんどの人で検出限界以下。

文科省主催の土壌採取プロジェクト(2011年6月)



除染

写真：福島大学キャンパスのモデルケース

セシウム元素：土壌表層

土壌の引き剥がし、天地返し

拭き取り、高圧洗浄

吸着剤（ゼオライト・プルシアンブルー・粃殻・稲藁）

除染物の保管
焼却処分

飯舘村



浪江町



大熊町



双葉町



富岡町

中間貯蔵施設の建設地





施設概要

清水・竹中土木・東洋特定建設工事共同企業体

↑東京電力 福島第一原子力発電所



大熊④工区 土壌貯蔵施設



2018年11月2日撮影

トリチウム (^3T) 処理水問題

2023年度に処理水放出開始



max 18.6 keV
(例外的に低エネルギー)

半減期 12.3年

大気圏核実験 (当時) 200 000 000 TBq

自然界に存在 (現在) 1 000 000 TBq

宇宙線による生成 年間 70 000 TBq

世界の原子力施設から放出 年間 20 000 TBq

福島第一原発 蓄積 780 TBq

日本の自然放射線量 2.1 mSv/yr

処理水放出 毎年 22 TBq

^3T 内部被曝線量 推計 0.000008 mSv/yr

懸念されたほど反対の国内世論が起きず

科学的知見・国際機関のお墨付き

ネットでも非科学的な言説を否定する風潮も

漁業関係者への長年の説明

報道などを通じた広報活動

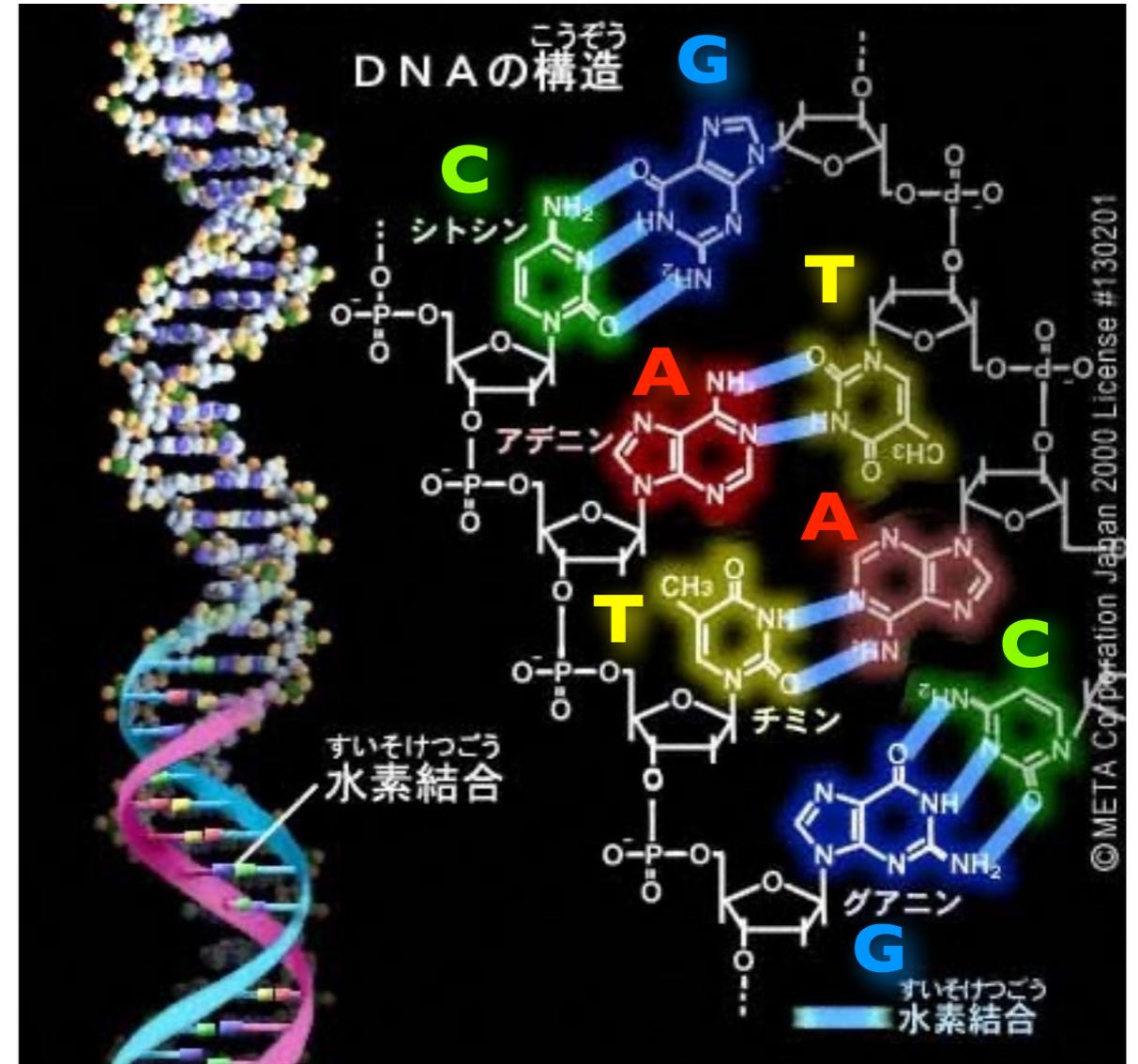
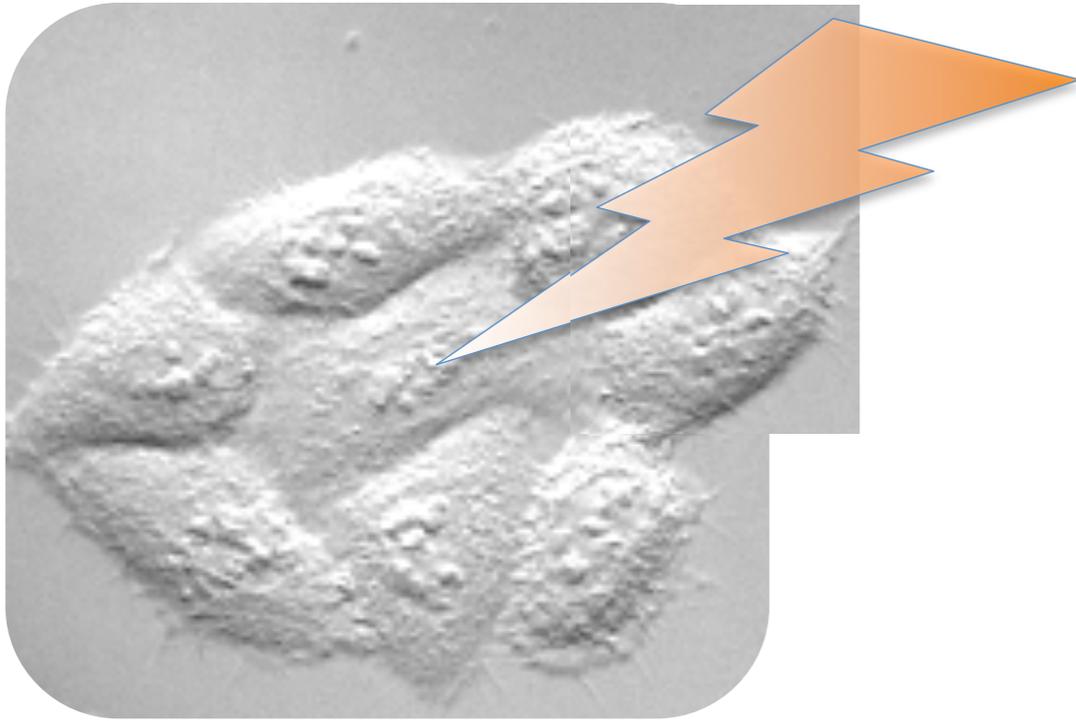
隣国の国際世論にどう対処できるか

放射線化学

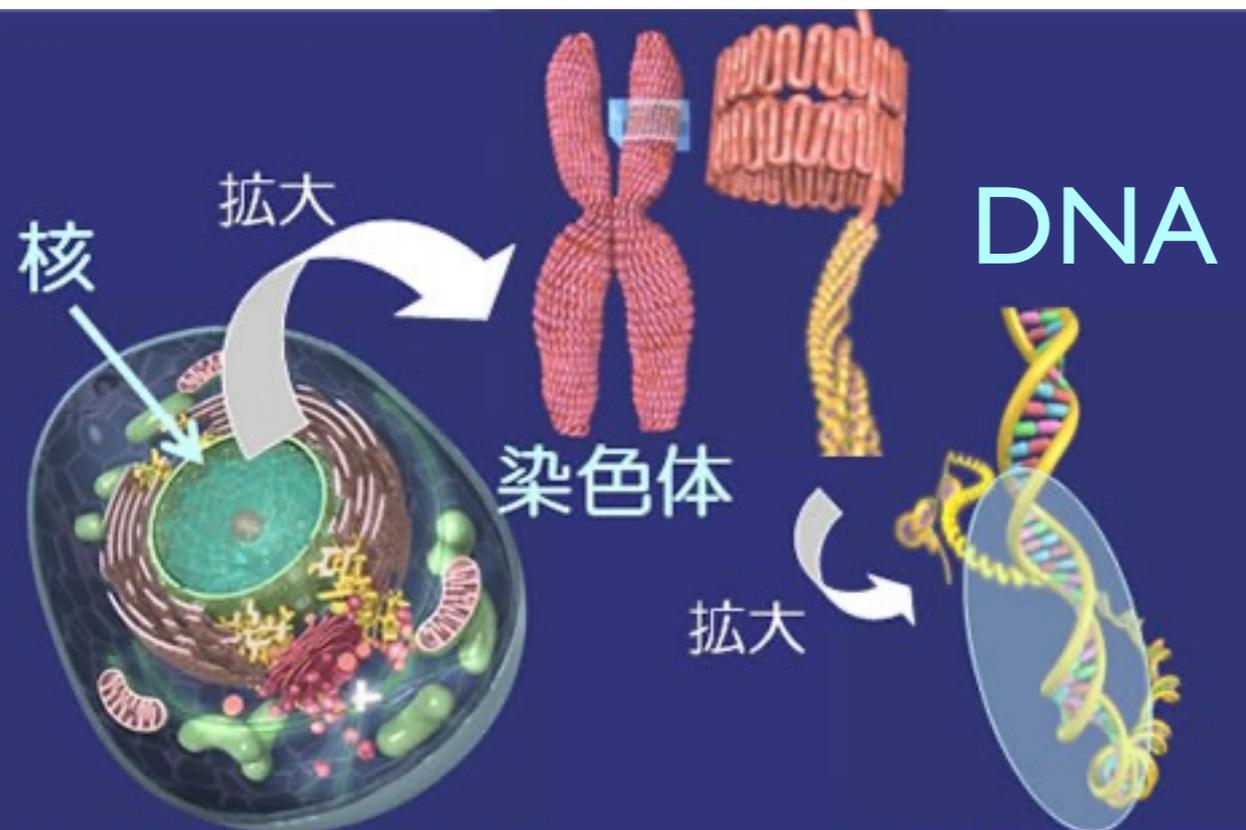
放射線の単位

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/>



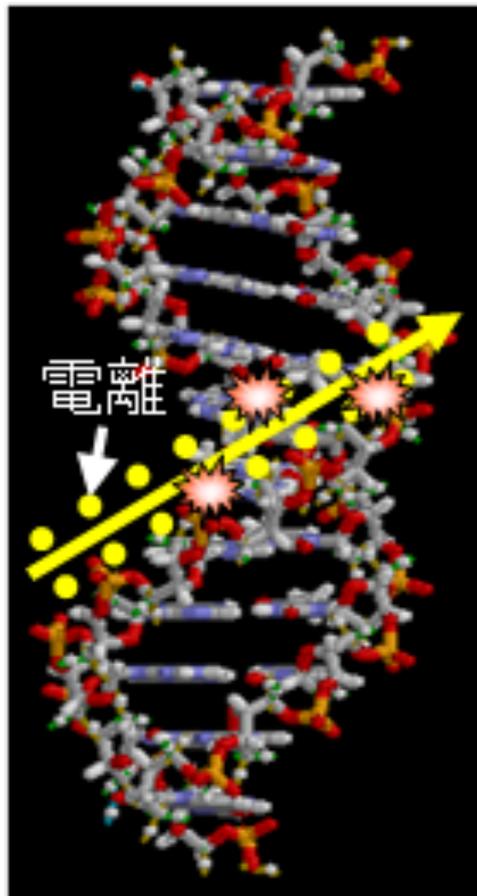
細胞(40兆個)

一部が遺伝子

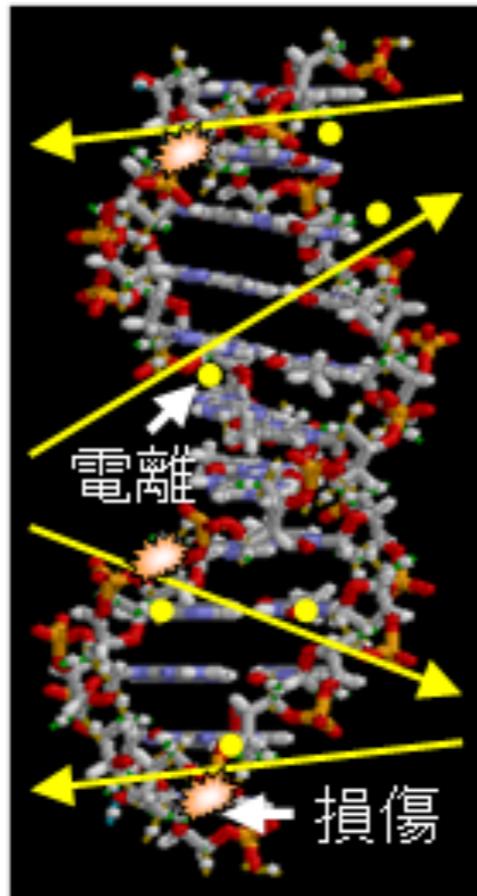
図1 核、染色体、遺伝子

放射線による DNA 損傷

**ラジカル
(活性酸素)**



重イオン



電子

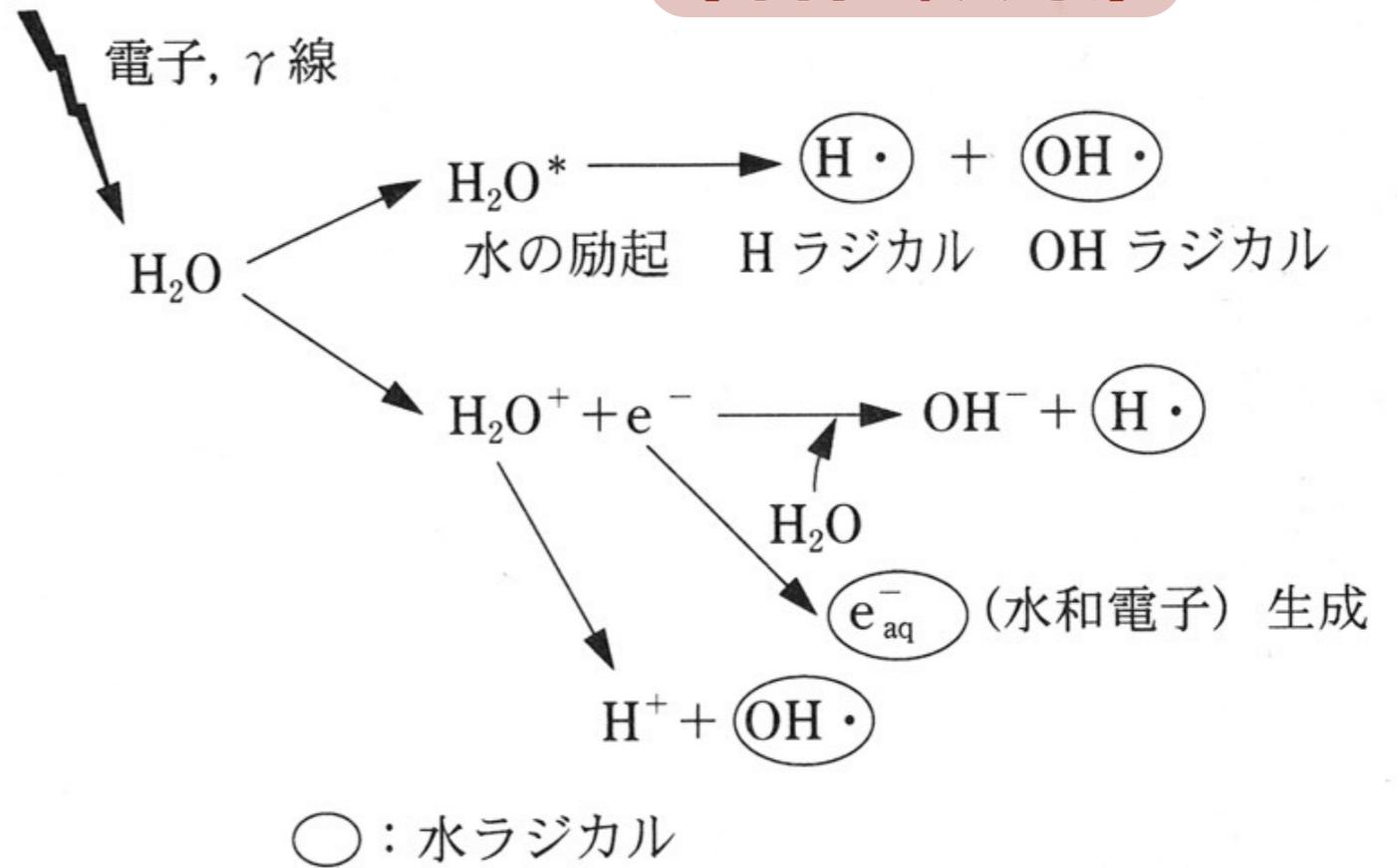


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略
(書籍「図解 放射性同位元素等取扱者必携」オーム社、より引用)

LET : 線エネルギー付与

高 LET 放射線
 α 線, 重粒子線

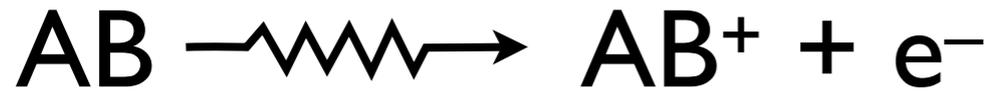
放射線の直接作用 : 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く

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

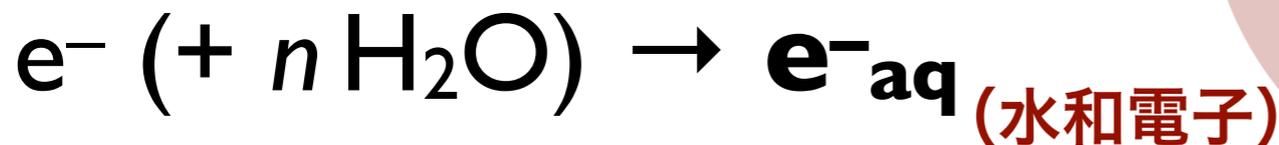
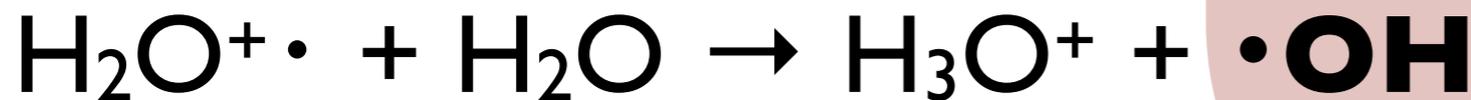
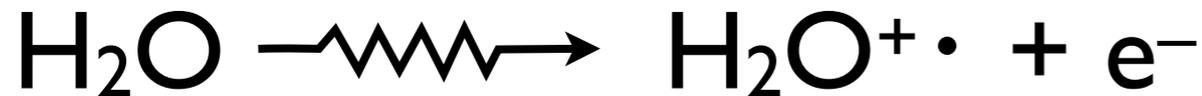


再結合



ラジカル生成

水中での反応



酸素効果



(ヒドロペルオキシラジカル)



(スーパーオキシドアニオン)



(過酸化水素)

(活性酸素)

放射線量の単位

radiation dose

- 人体 物質が吸収したエネルギー (単位質量あたり) **体重**

吸収線量 D [J / kg] = [Gy] **グレイ**

Gray



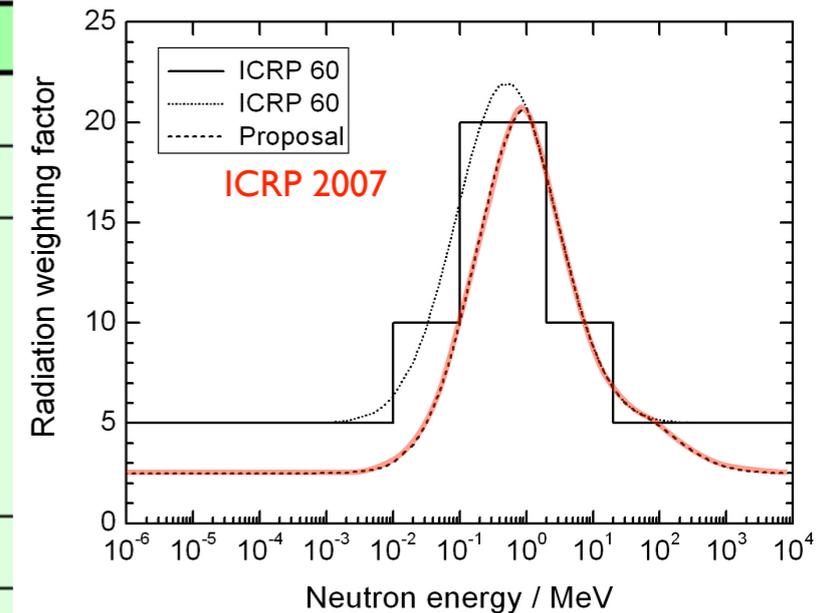
- 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮 **体重**

等価線量 $H_T = W_R \times D$ [Sv] **シーベルト**

sievert

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



放射線生物学

何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

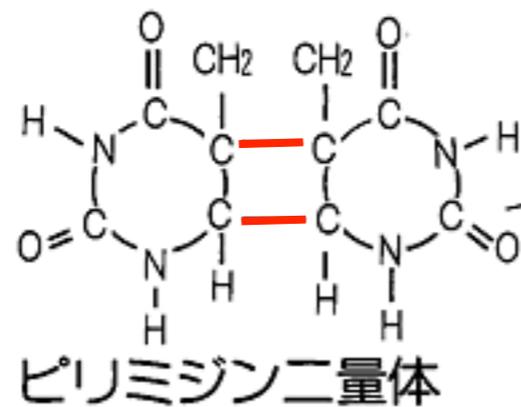
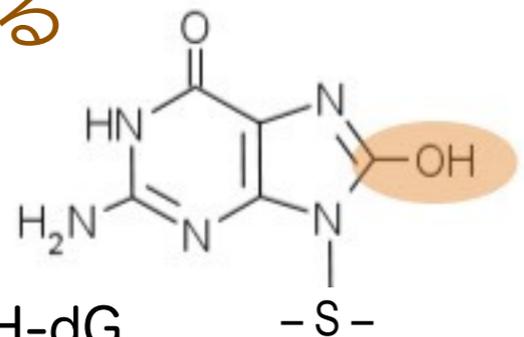
表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較¹⁾

| 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

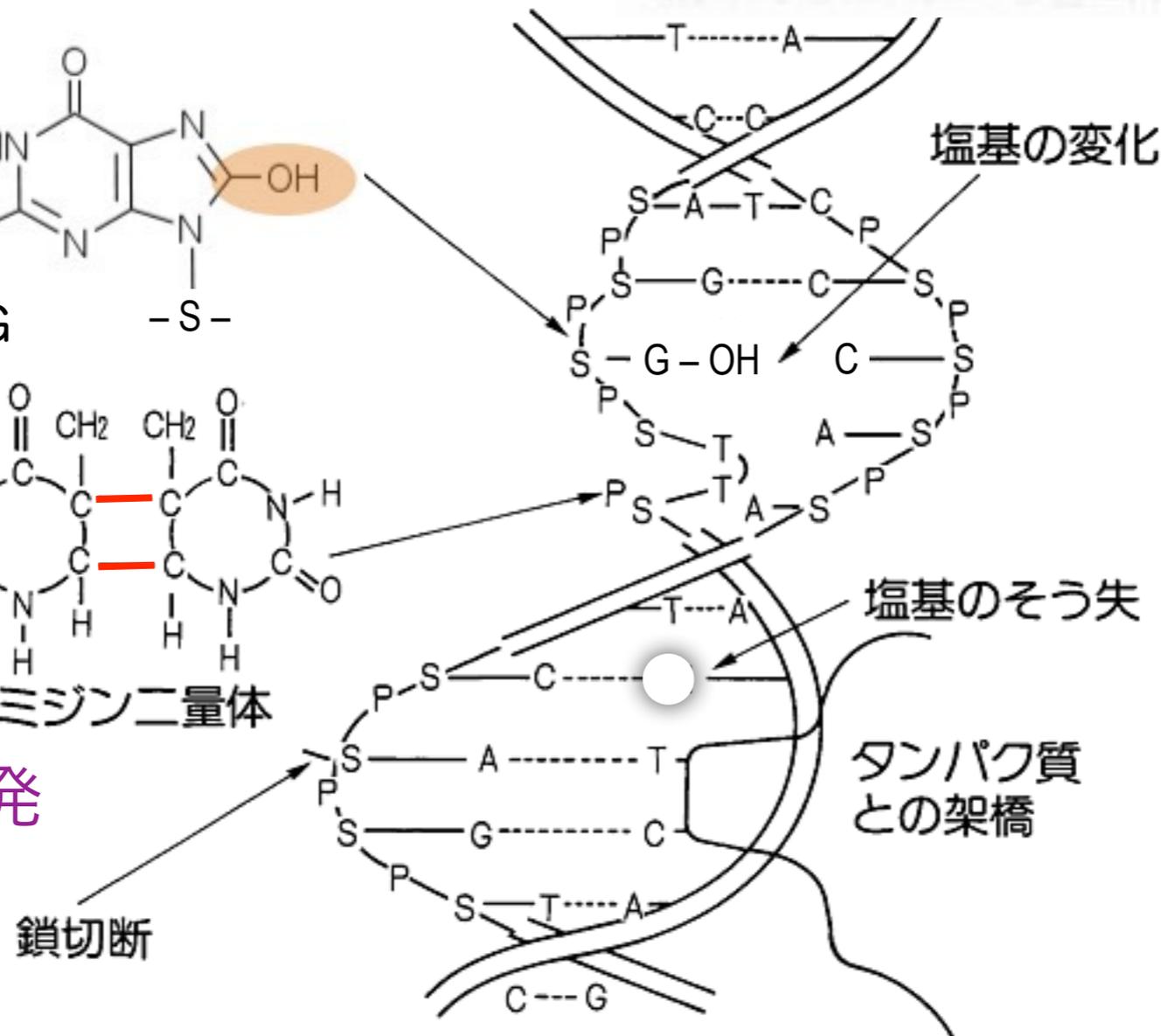
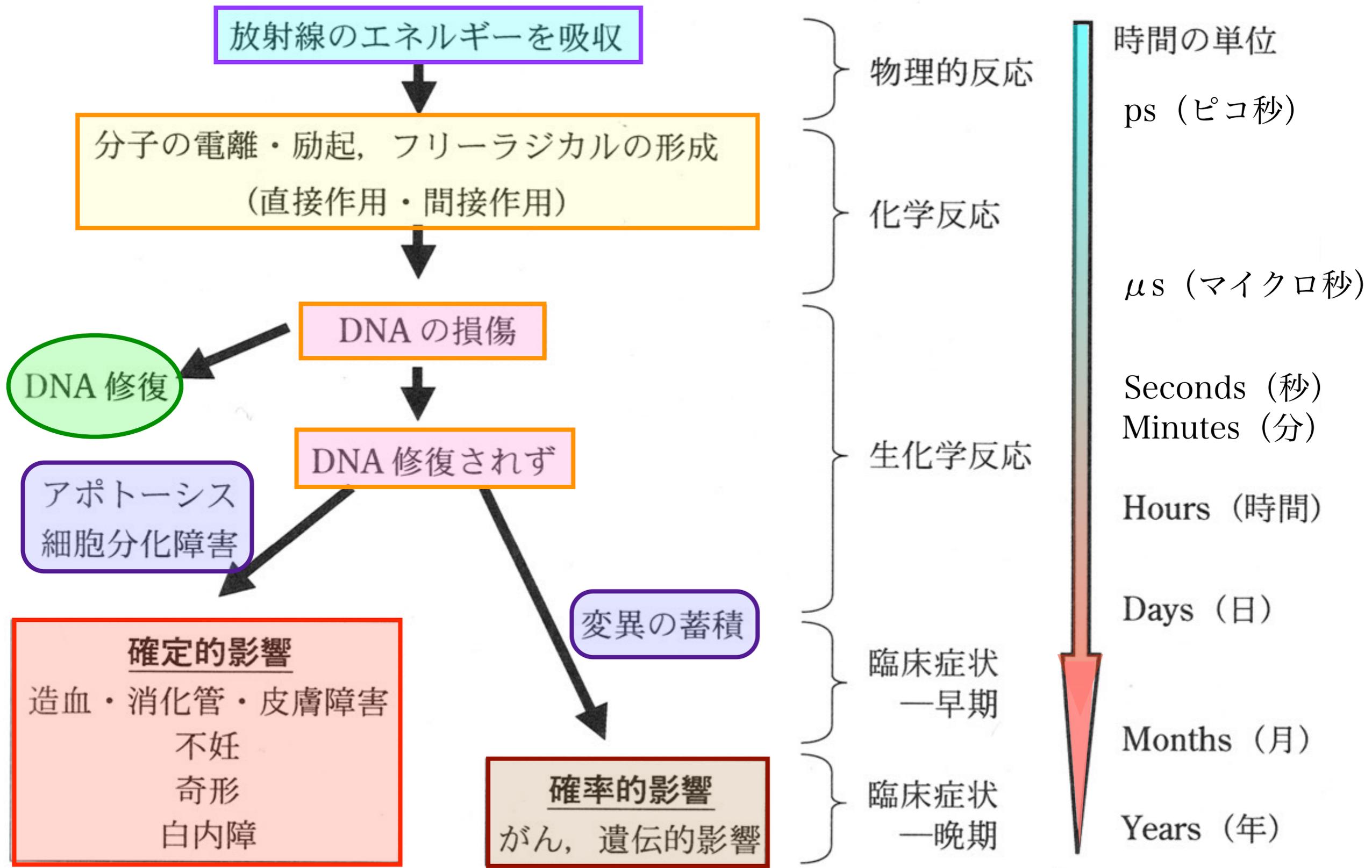


図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

[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。

G-OH のところ、8-OH-dG (8-ヒドロキシデオキシグアノシン) の相手は、C ではなく、A に変わってしまう。8OHdG/dG 指標は、dG → 8OHdG 誘導率を求めることで、間接的にヒドロキシルラジカルの発生量を確認できるため、酸化ストレスマーカーとして注目され、放射線が DNA へ及ぼす間接作用についてのリスク評価に有用だと考えられる。



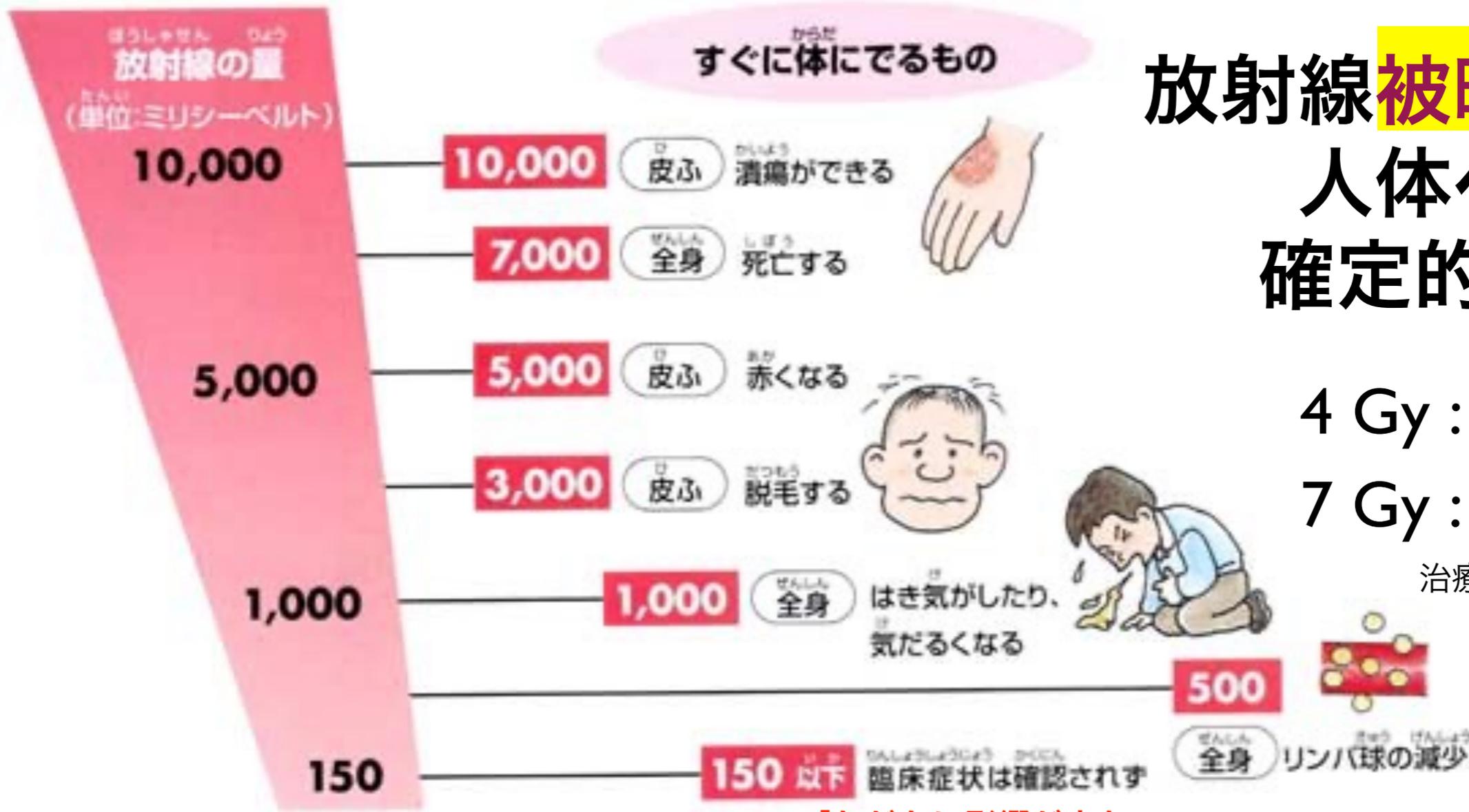
放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

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」

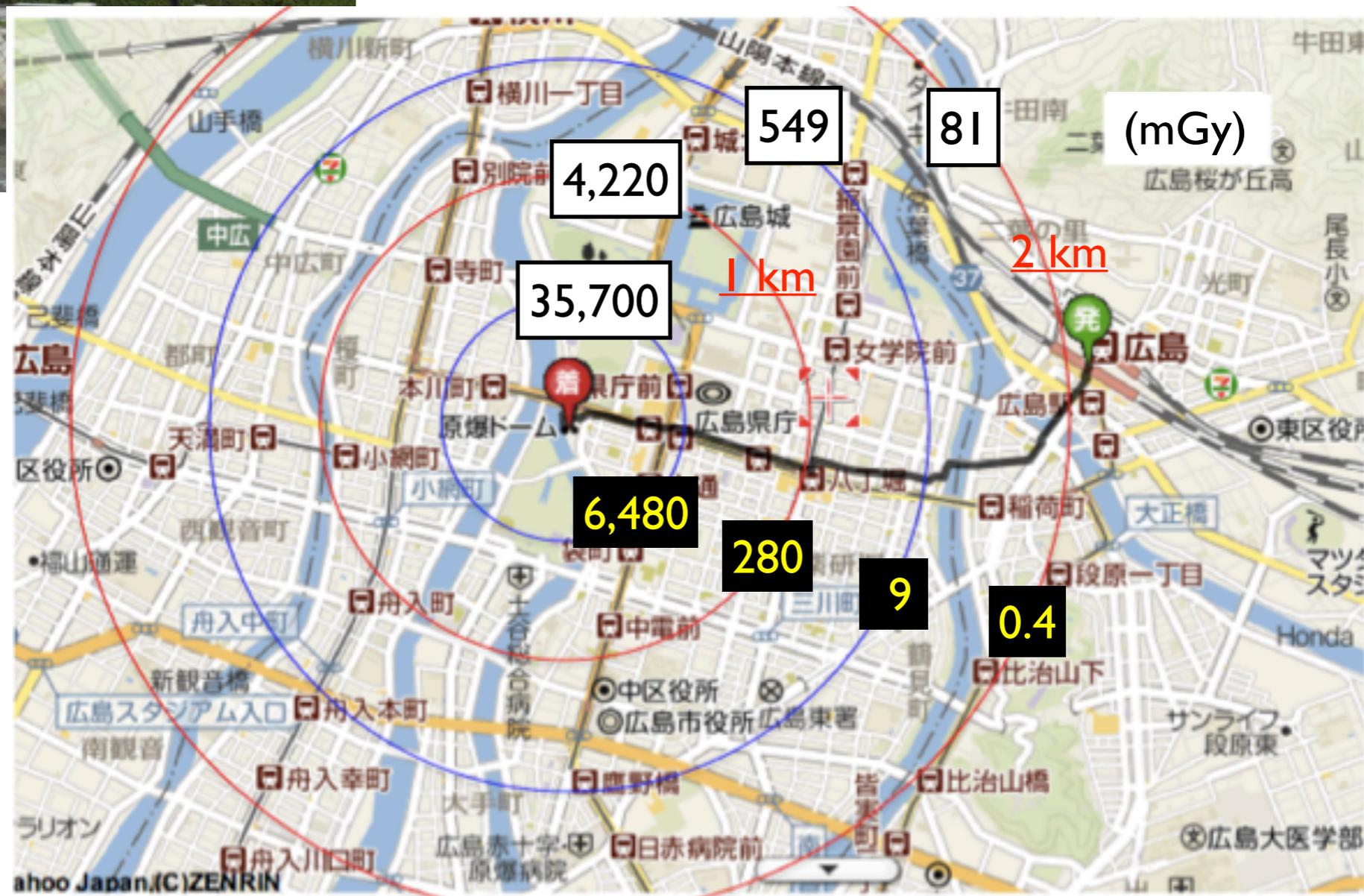
東海村 JCO 事故
チェルノブイリの
消防隊員

| 細胞再生系 | 造血組織 | | | | 腸上皮 | 皮膚 | 精巣 | 水晶体 |
|------------------------------------|-------------------------|----------|-------|--------|----------------|-------------------|------------|--------------------------|
| 幹細胞 芽細胞 機能細胞 老熟細胞 (死滅) | 幹細胞 リンパ球 好中球 赤血球 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 |



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)



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。

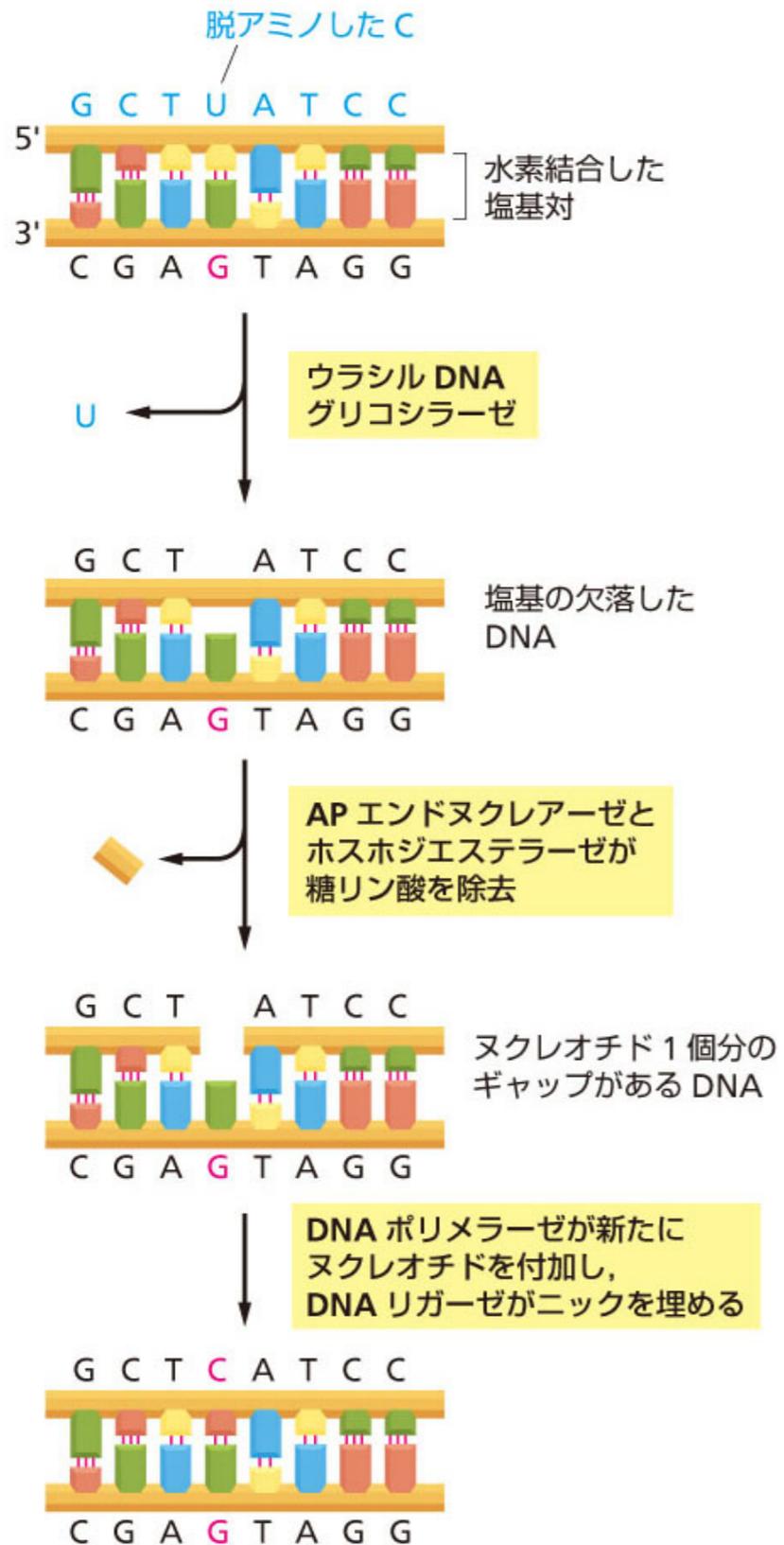
(日本人の死亡者の3人に1人はがんが原因。)

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。

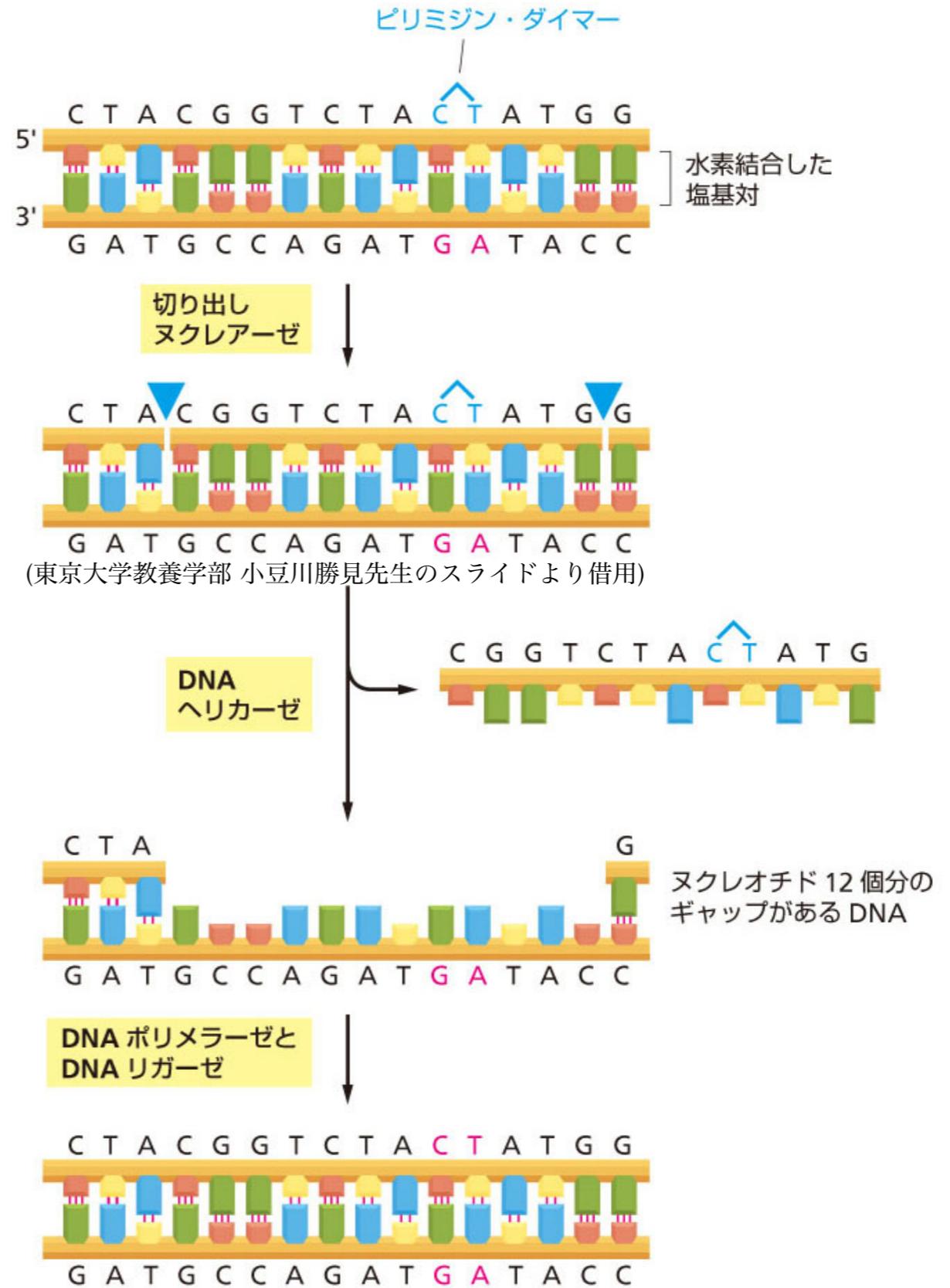
DNA 修復

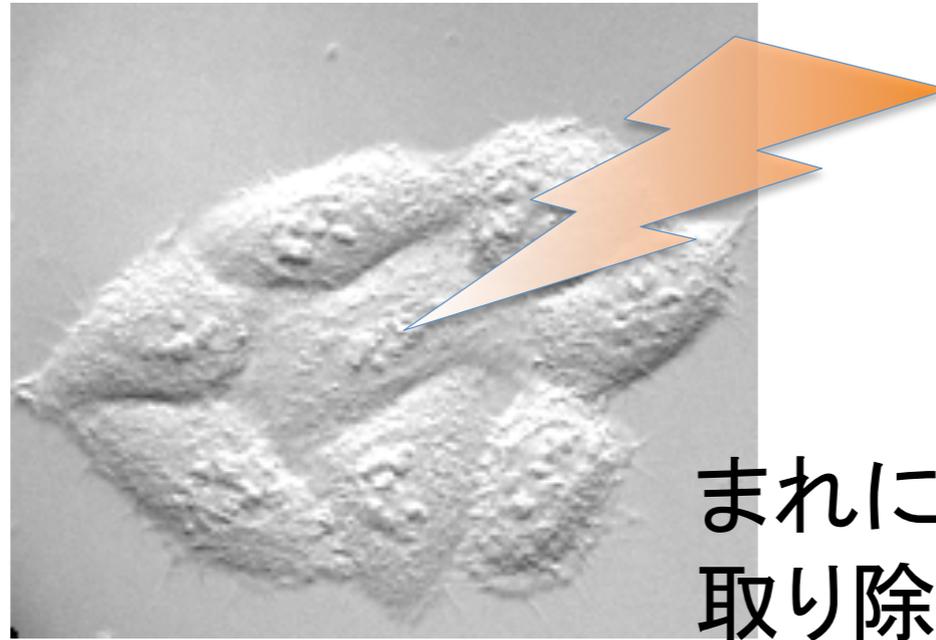
(東京大学教養学部 渡邊雄一郎先生のスライドより借用)

塩基除去修復



(B) ヌクレオチド除去修復

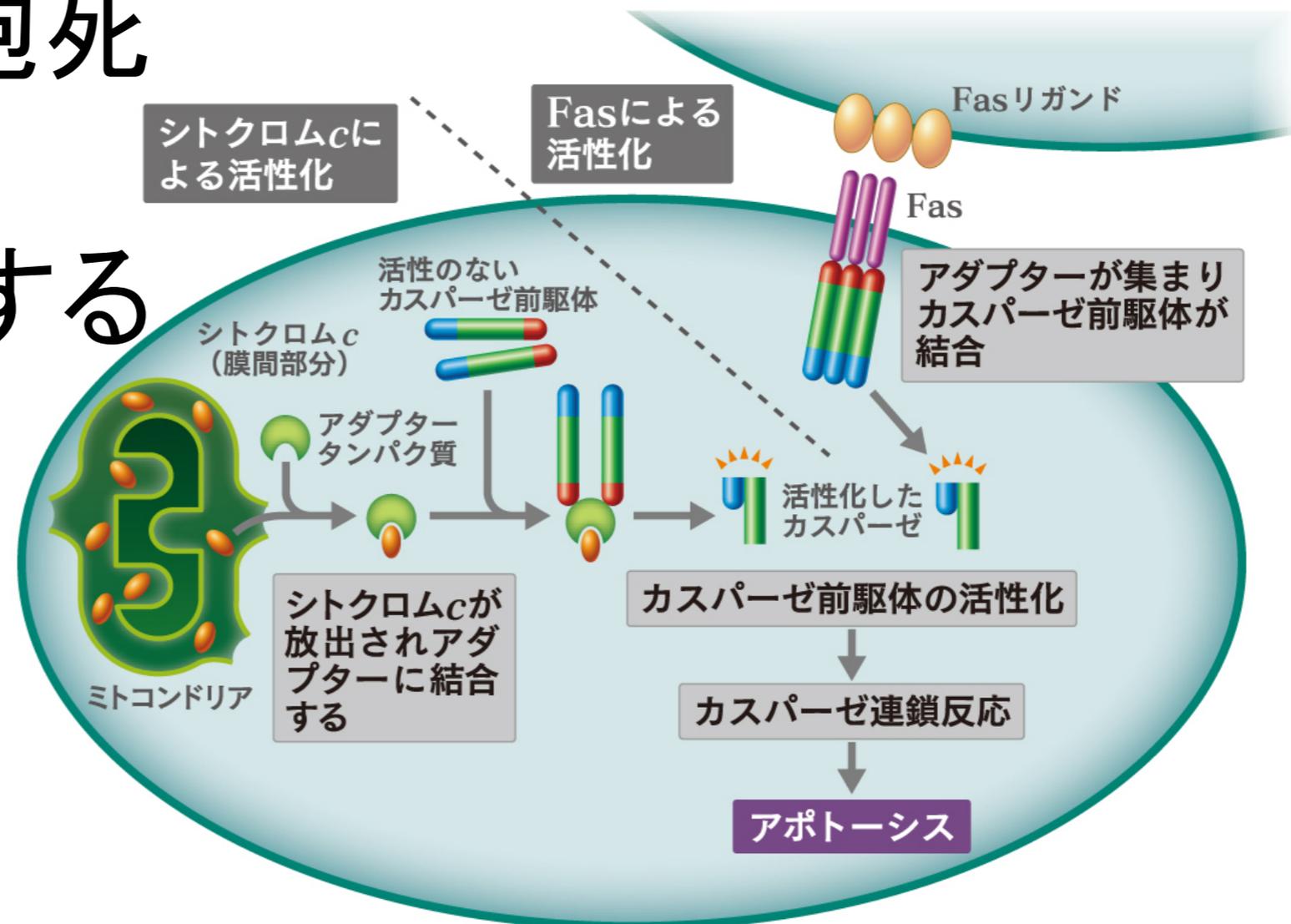


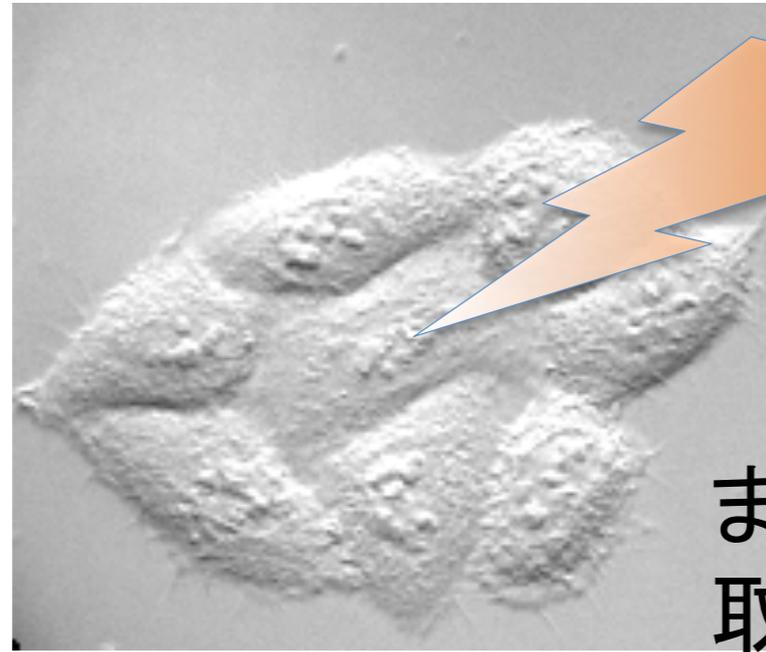


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

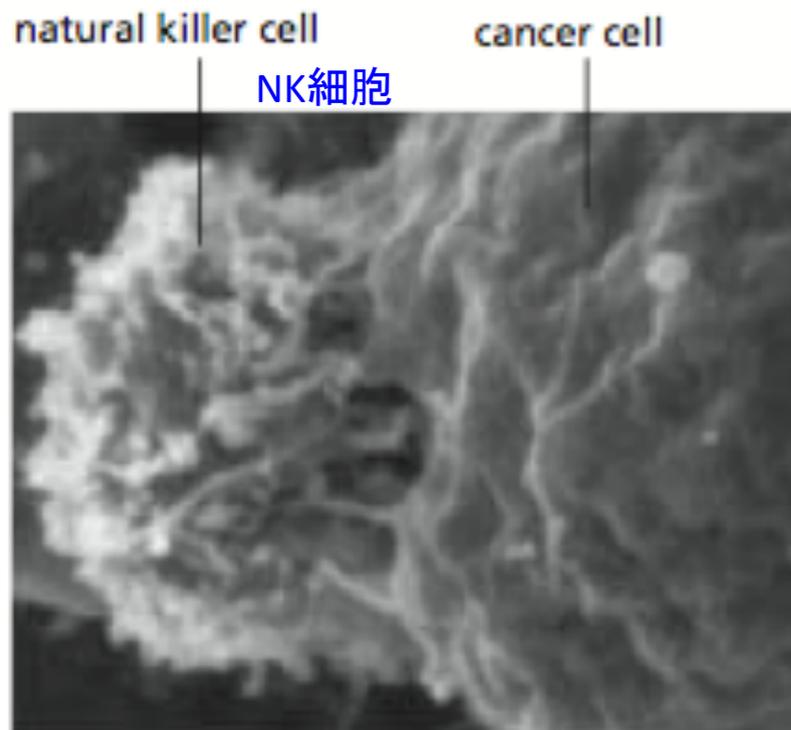
プログラム細胞死

細胞が自爆する





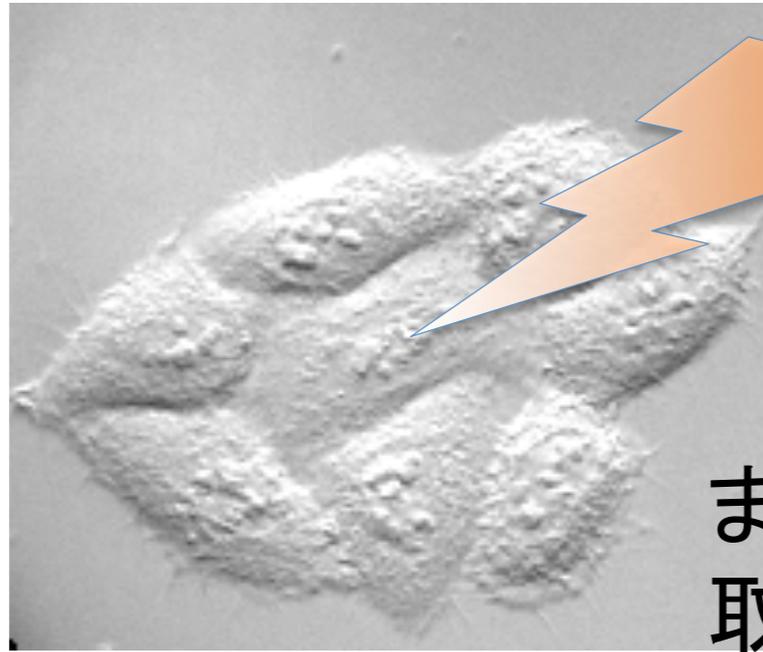
まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう



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

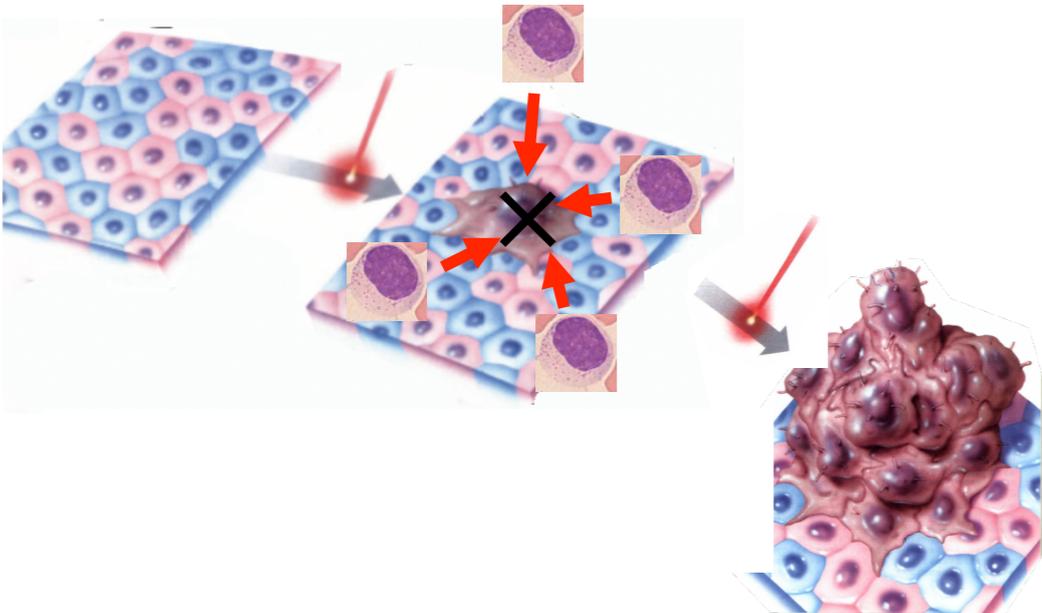


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

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)



良性 / 悪性

がん細胞が残ってしまう

浸潤性

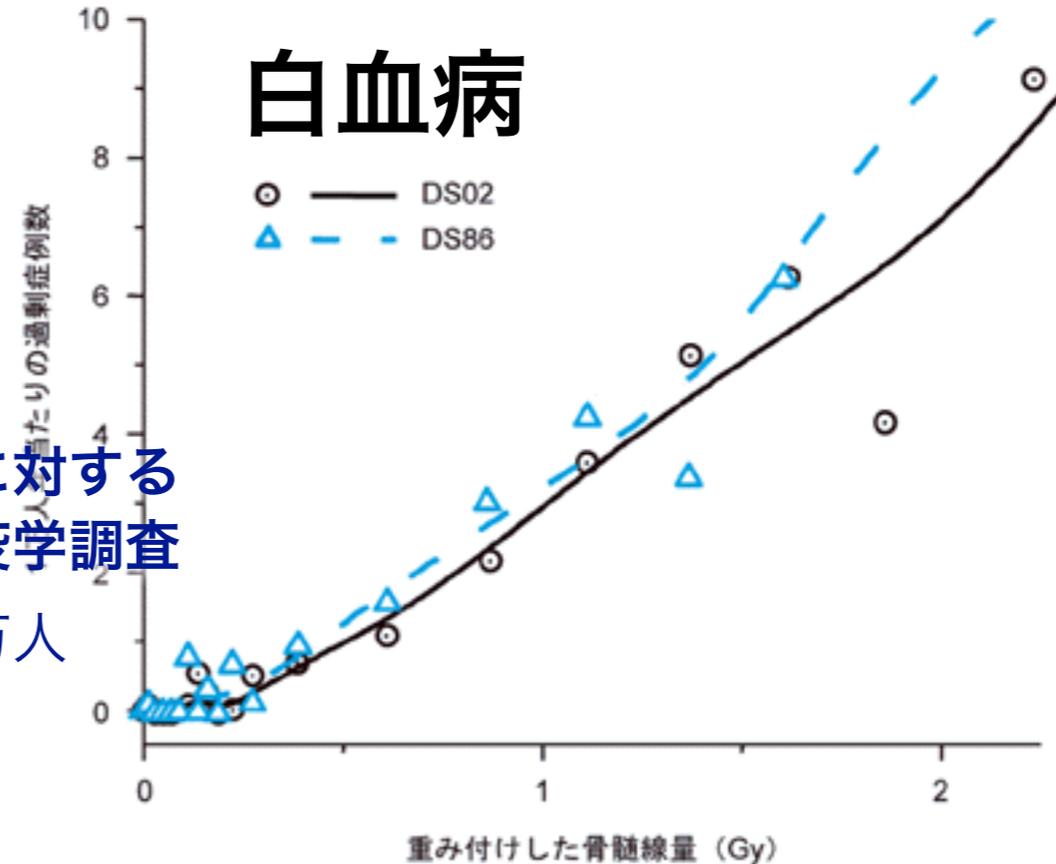
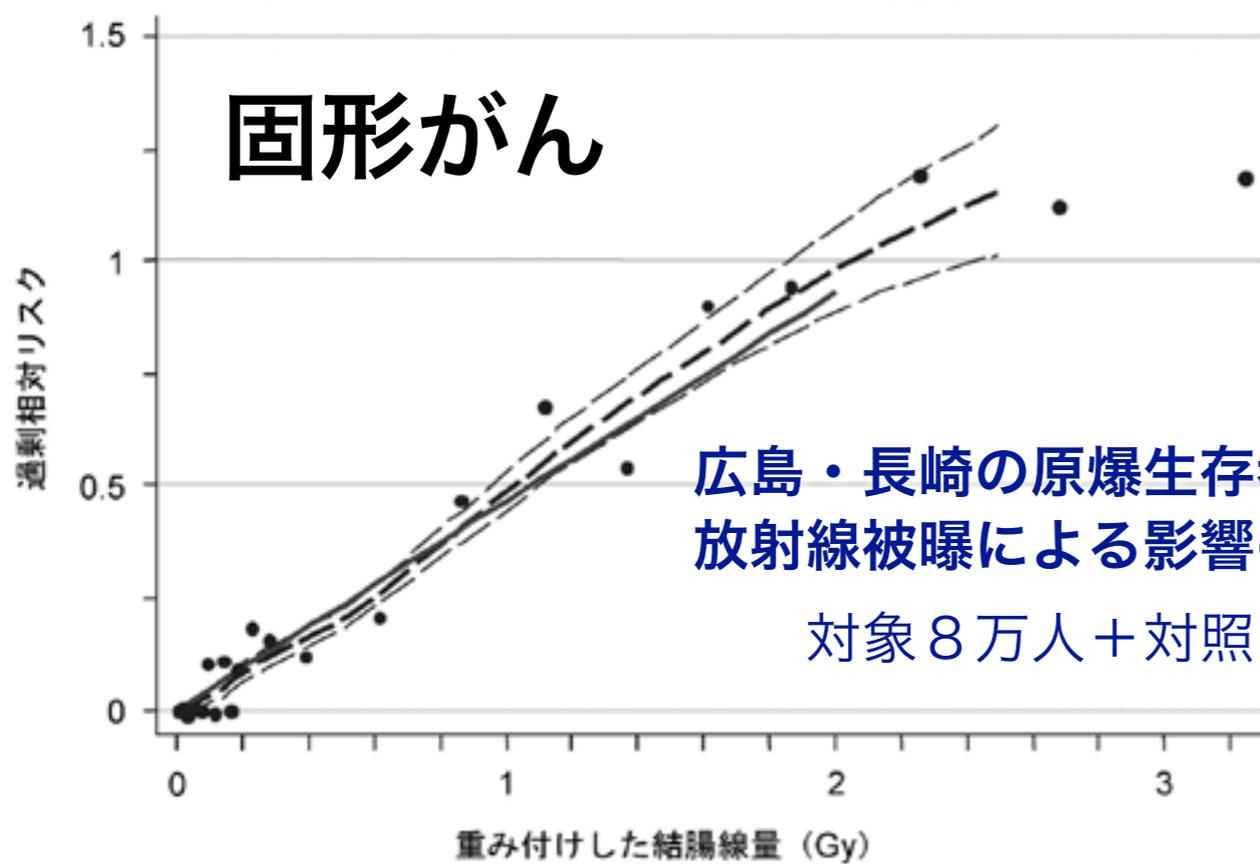


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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

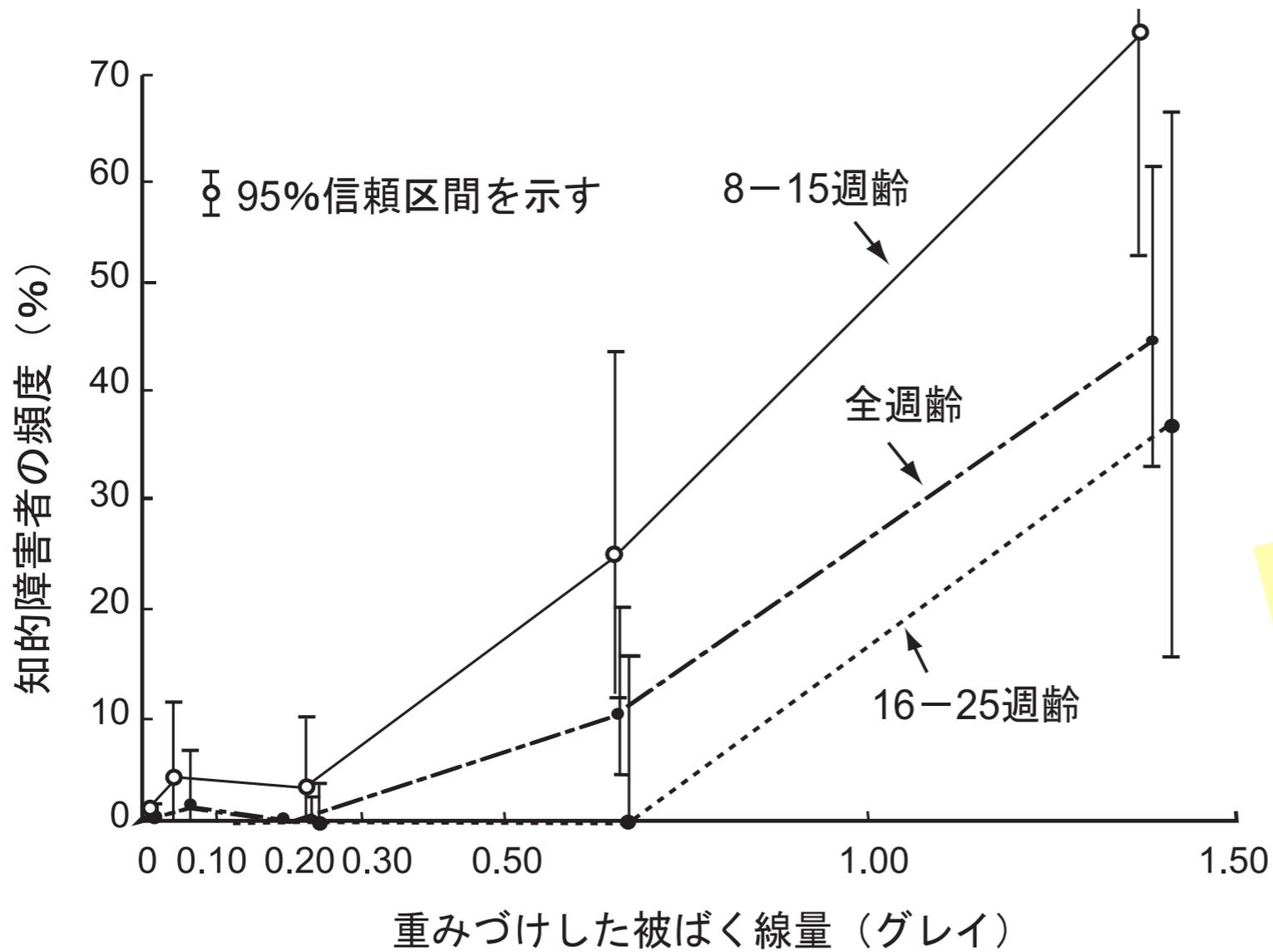
| 重み付けした骨髄線量 (Gy) | 対象者数 | 死亡 | | 寄与率 |
|-----------------|--------|-----|-------|------|
| | | 観察数 | 推定過剰数 | |
| 0.005 - 0.1 | 30,387 | 69 | 4 | 6% |
| 0.1 - 0.2 | 5,841 | 14 | 5 | 36% |
| 0.2 - 0.5 | 6,304 | 27 | 10 | 37% |
| 0.5 - 1.0 | 3,963 | 30 | 19 | 63% |
| 1.0 - 2.0 | 1,972 | 39 | 28 | 72% |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

胎内被爆者における放射線の影響

本人が胎内で被曝



チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な墮胎が数万人以上だったともいわれる。(風評・過度の心配による犠牲)

(財)放射線影響研究所 パンフレット「放射線影響研究所のご案内」

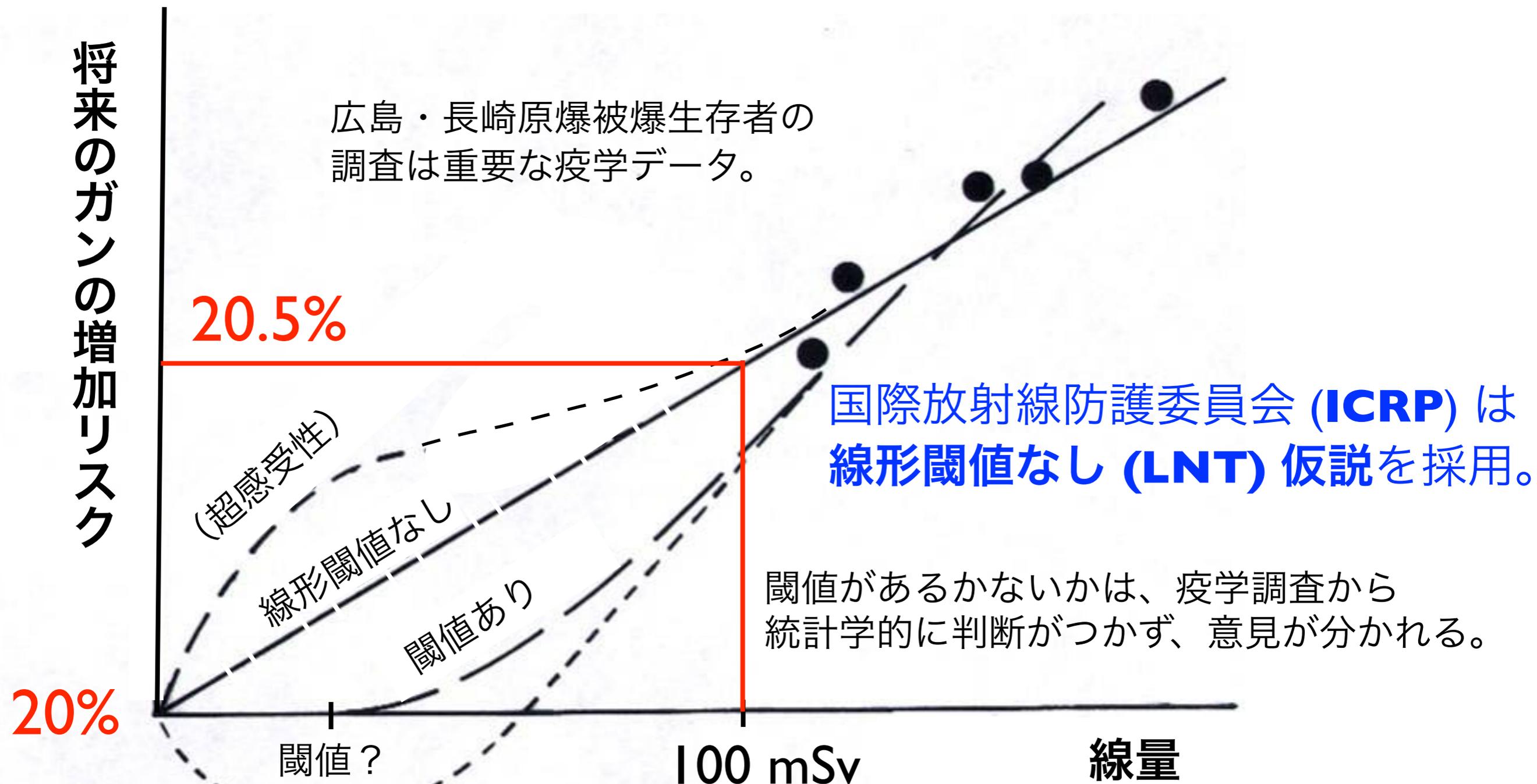
放射線による**遺伝的影響**は認められず

これまでのところ原爆被爆者の子供に臨床的または潜在的な影響を生じたという証拠は得られていない。事実これはマウスを用いた実験からの予測と一致しており、遺伝的变化に関する限り、ヒトは放射線に対してマウス以上に高い感受性を示すわけではないことを示唆している。

親の精子／卵子が被曝

放射線防護学

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)

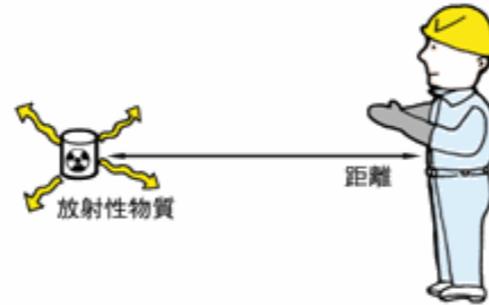
慢性被曝が急性被曝に比べて効果が何分の1になるかの係数

線量・線量率効果係数 **DDREF = 2**

放射線防護

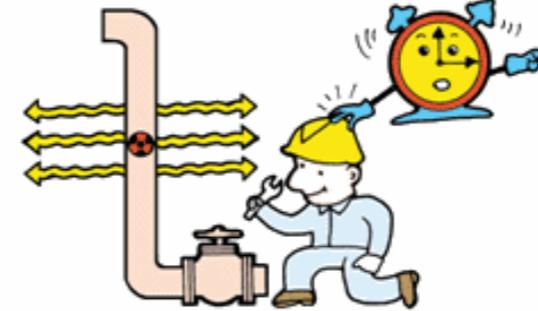
● 距離による防護

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

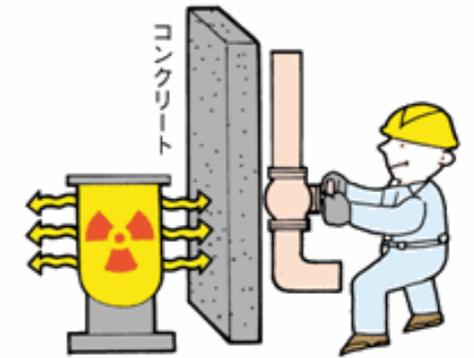


● 時間による防護

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



● 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。

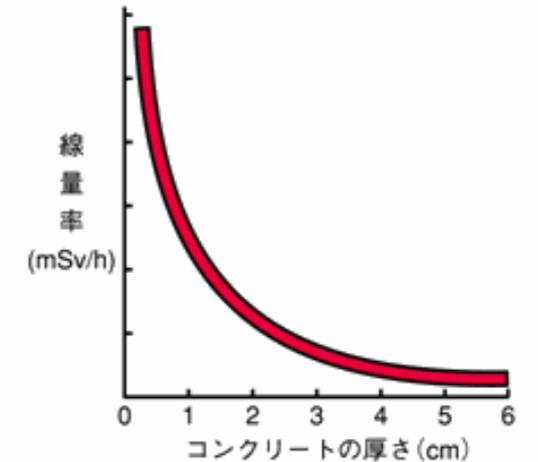
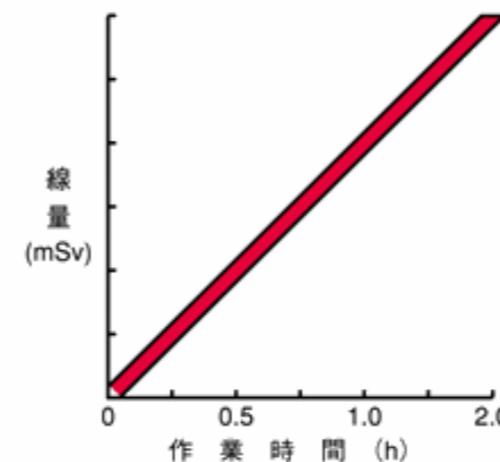
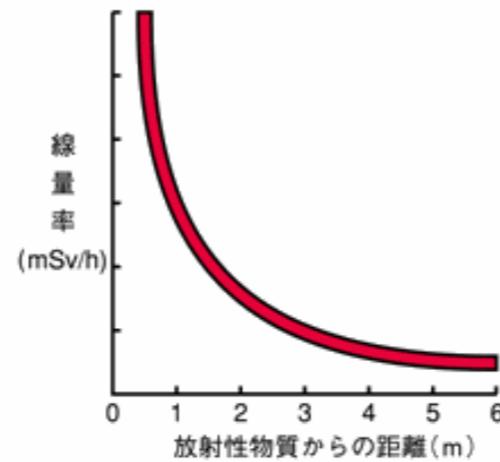


図1 遮へい3原則の図

[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)

放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

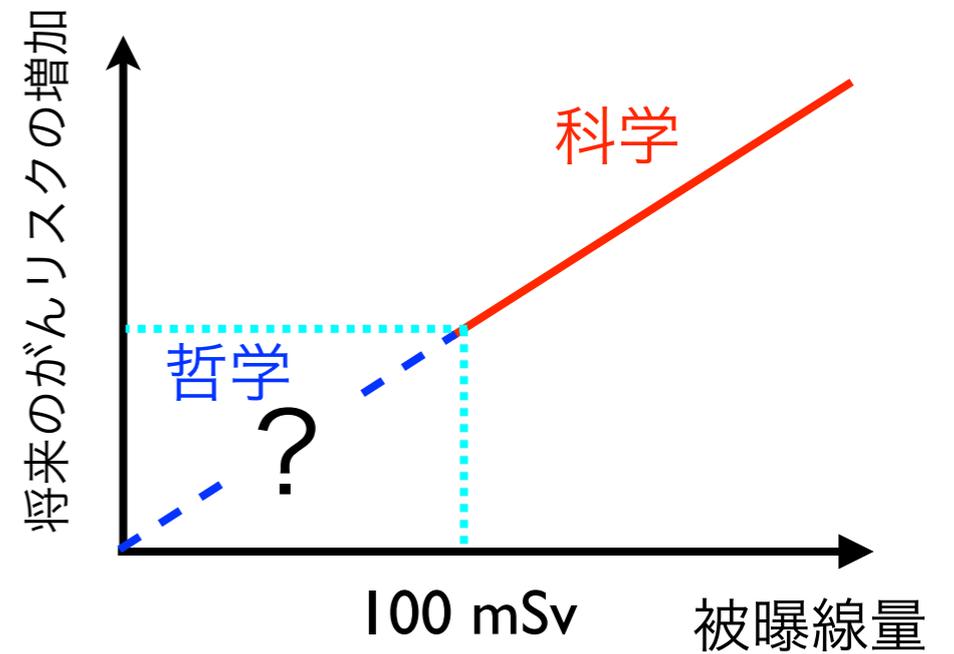
がんの原因が医学的に分かっていない

疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係

線形のリスク
は判断し難い



科学的知見と防護学の哲学の混同

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 (トレードオフ)

福島住民のリスクは？

住み続けるリスク

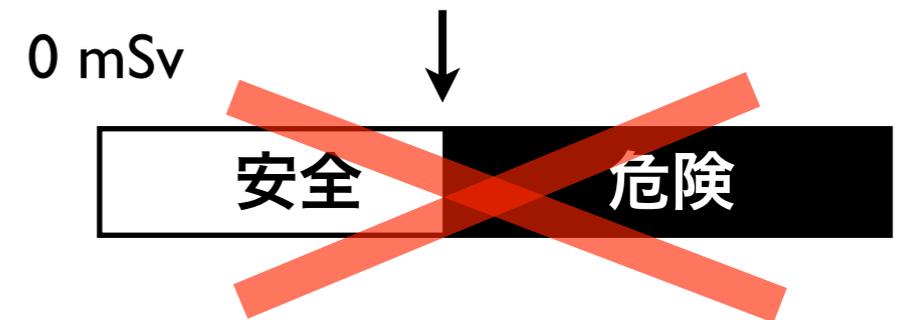
原発作業員のリスクは？

放射線の影響?、日常サービスの低下/欠如

避難生活でのリスク

慣れない土地での生活ストレス、生業・収入の損失

リスクのトレードオフは人それぞれに違う。



リスクは相対的

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、

☞ 東海村 JCO 臨界事故

根拠のない恐れや不安もまた問題。

☞ 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

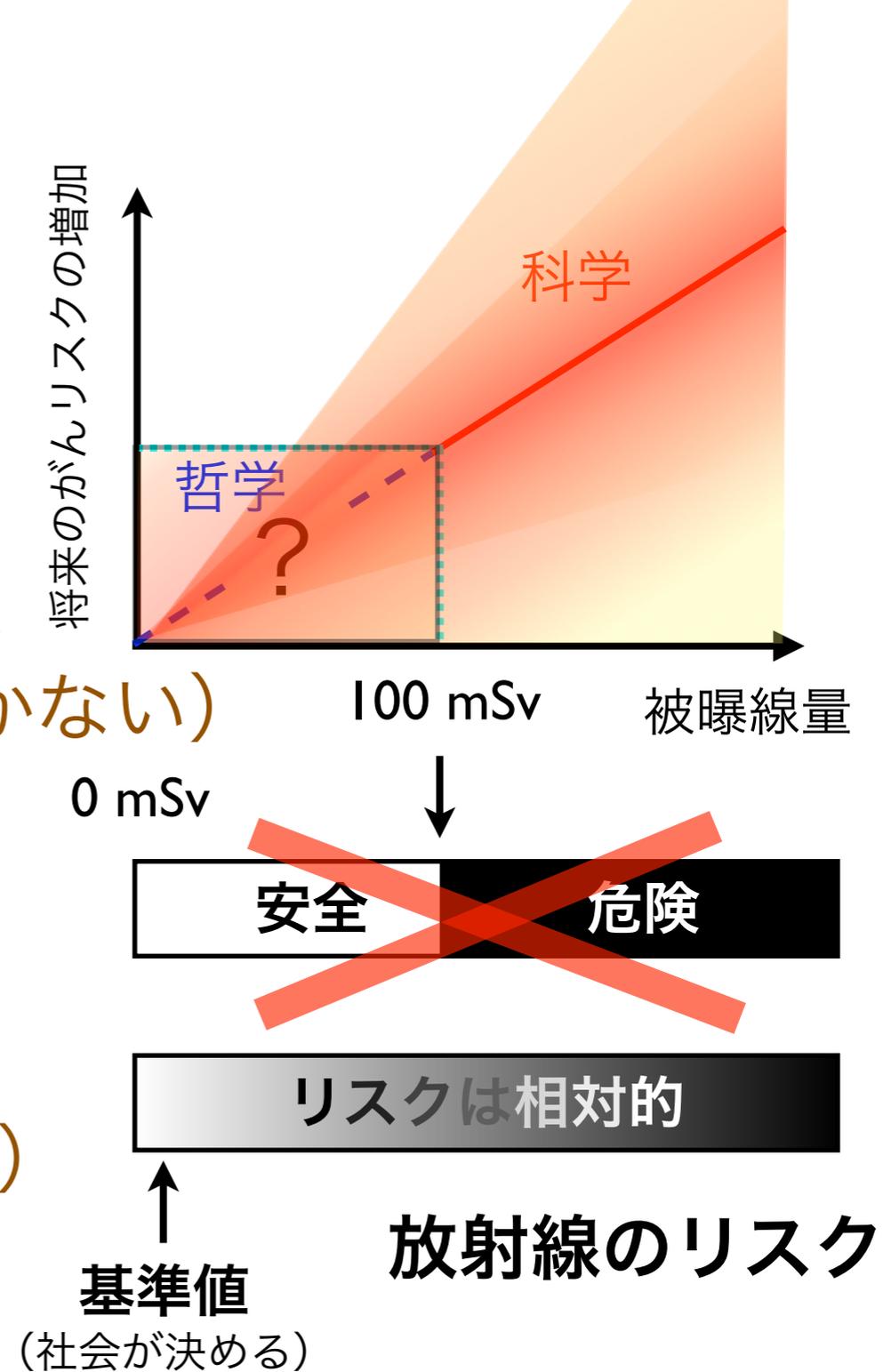
個別の事象との因果関係は分からない

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



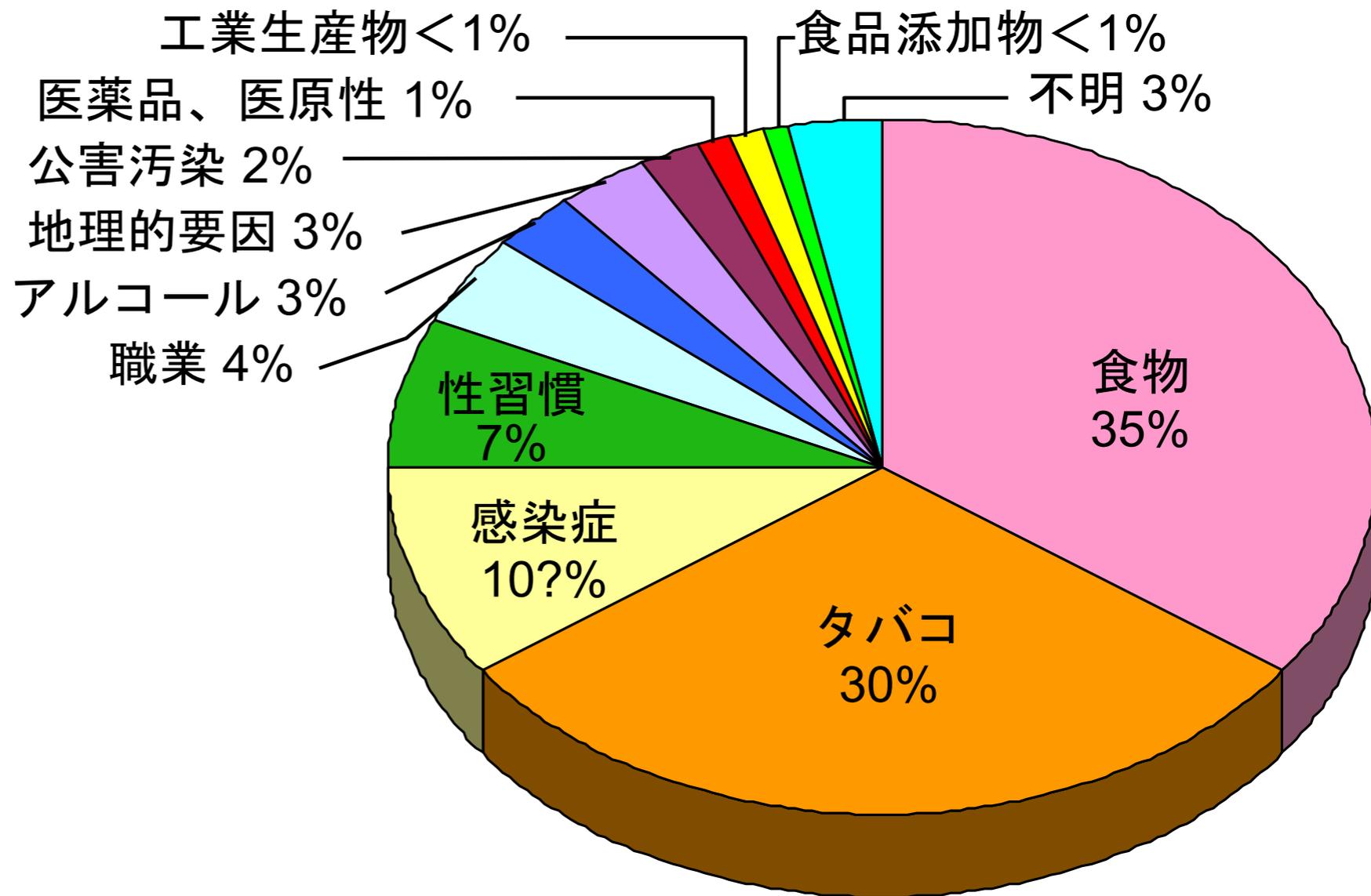
放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

| | |
|----------------------|------------|
| 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 | 1.6倍 |
| 毎日3合以上の飲酒 | 1.6倍 |
| 1000~2000ミリシーベルトを浴びる | 1.8倍 |

※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)

過小評価も過大評価もダメ

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、免疫力低下等に注意



リスクコミュニケーション

SNS (Twitter) での放射線リスク

本研究は

環境省委託事業 H28 原子力災害影響調査等事業 ～ R6 放射線健康管理・不安対策事業
(放射線の健康影響に係る研究調査事業)

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 (H28/29)

3.11 以降の放射線関連情報のtwitterによる拡散研究からSNS時代に即した、(H31-R3)
大規模災害時に科学的事実に基づいた情報をリアルタイムに発信していく方策の研究

3.11 以降Twitter上で交わされた放射線関連情報の解析を基に、住民の深層不安払拭の
ための科学的情報発信サイトの立ち上げとその評価 (R4-R6)

において実施したものです。

主任研究者：宇野賀津子 ((公財) ルイ・パストゥール医学研究センター)

分担研究者：鳥居寛之 (東京大学 大学院理学系研究科)

班員：免疫学、物理学、放射線防護学、
医学、情報科学、リスク学、心理学、
社会学、行政、高校教員

原発事故後の Twitter データの解析
情報拡散 ネットワーク シミュレーション
インフルエンサー インタビュー

Twitter ネットワーク解析

2011/3 ~ 2011/9

100% = 2400万件

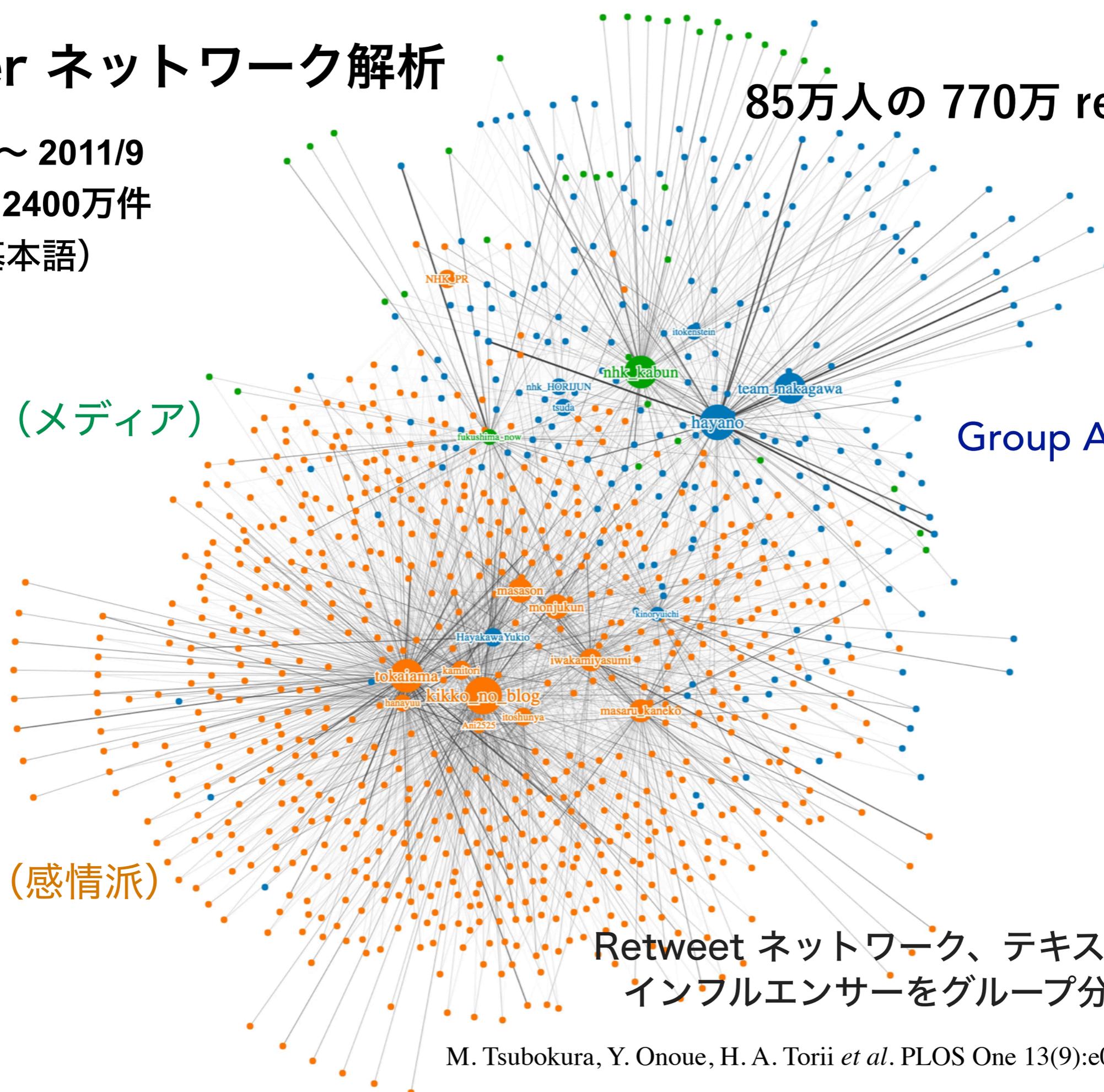
P (基本語)

85万人の 770万 retweets

Group C (メディア)

Group A (科学派)

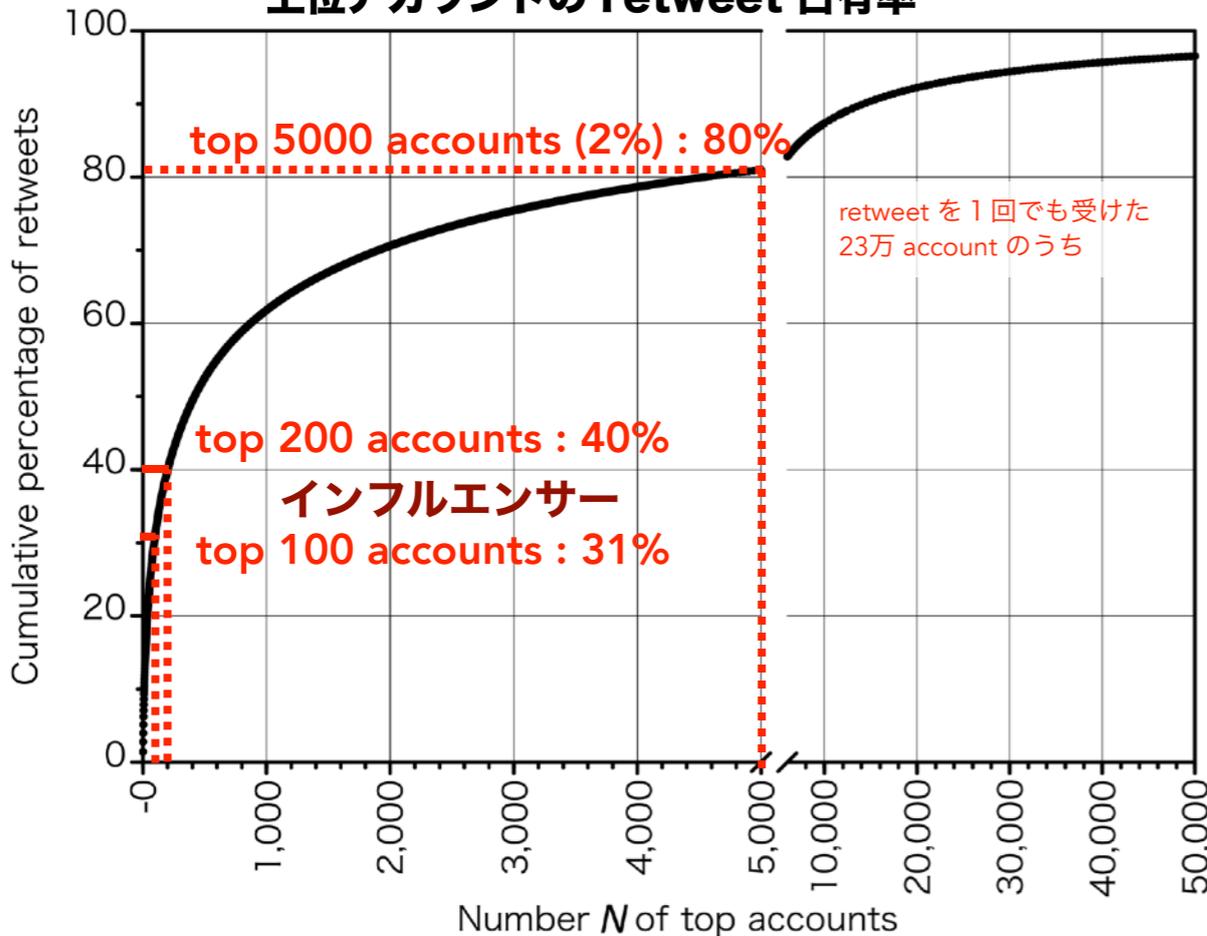
Group B (感情派)



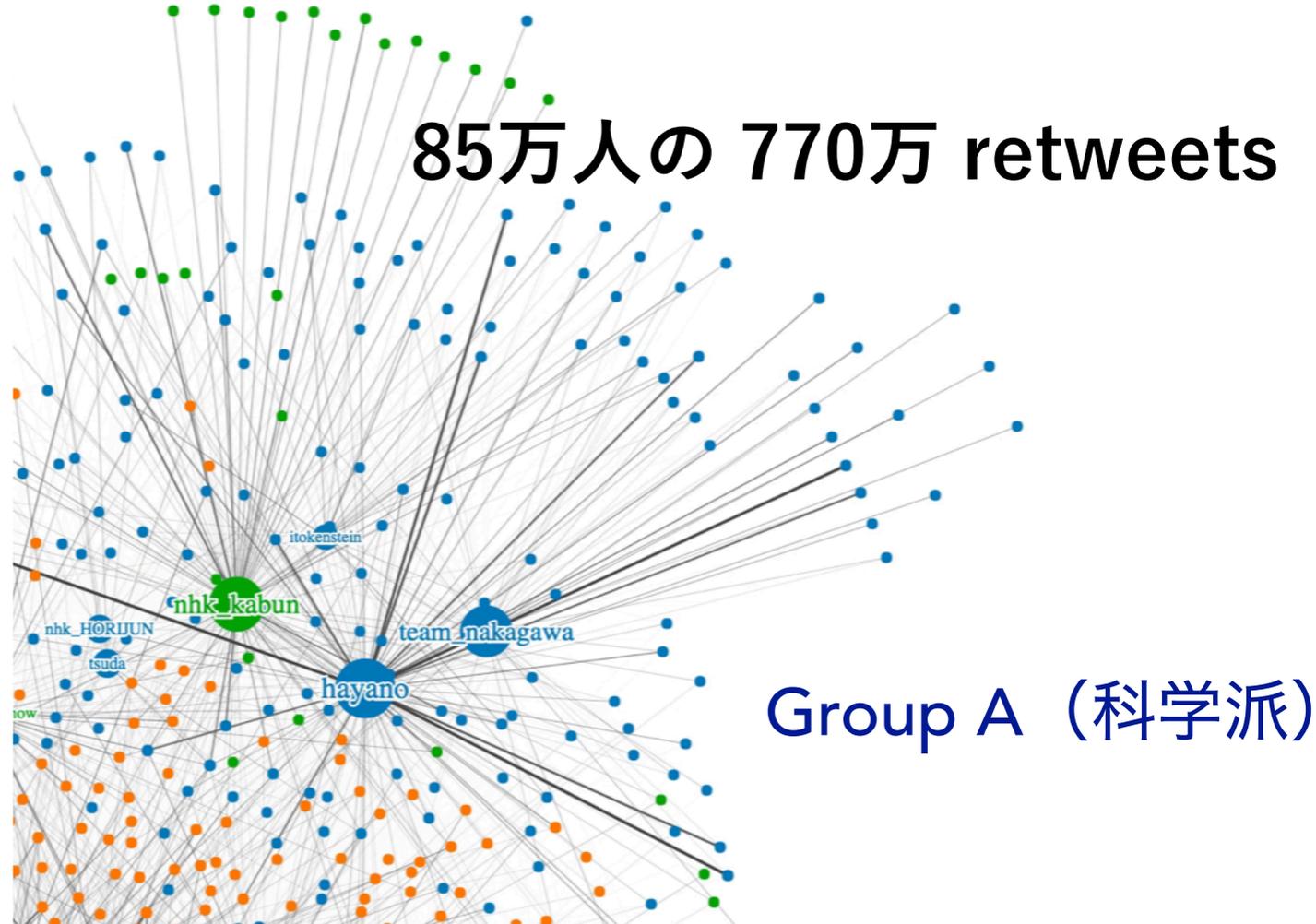
Retweet ネットワーク、テキスト情報から
インフルエンサーをグループ分けした。

M. Tsubokura, Y. Onoue, H. A. Torii *et al.* PLOS One 13(9):e0203594 (2018).

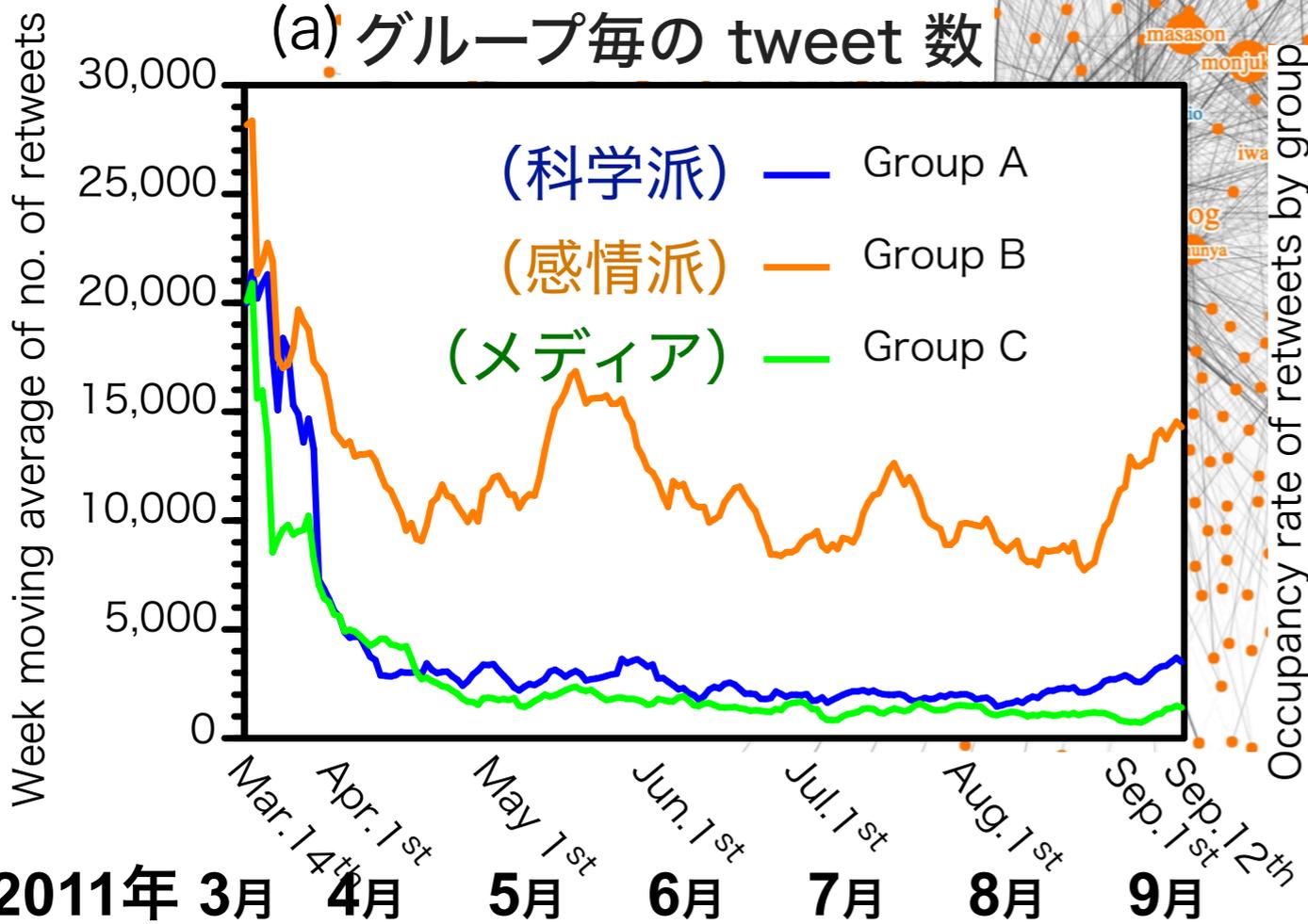
上位アカウントの retweet 占有率



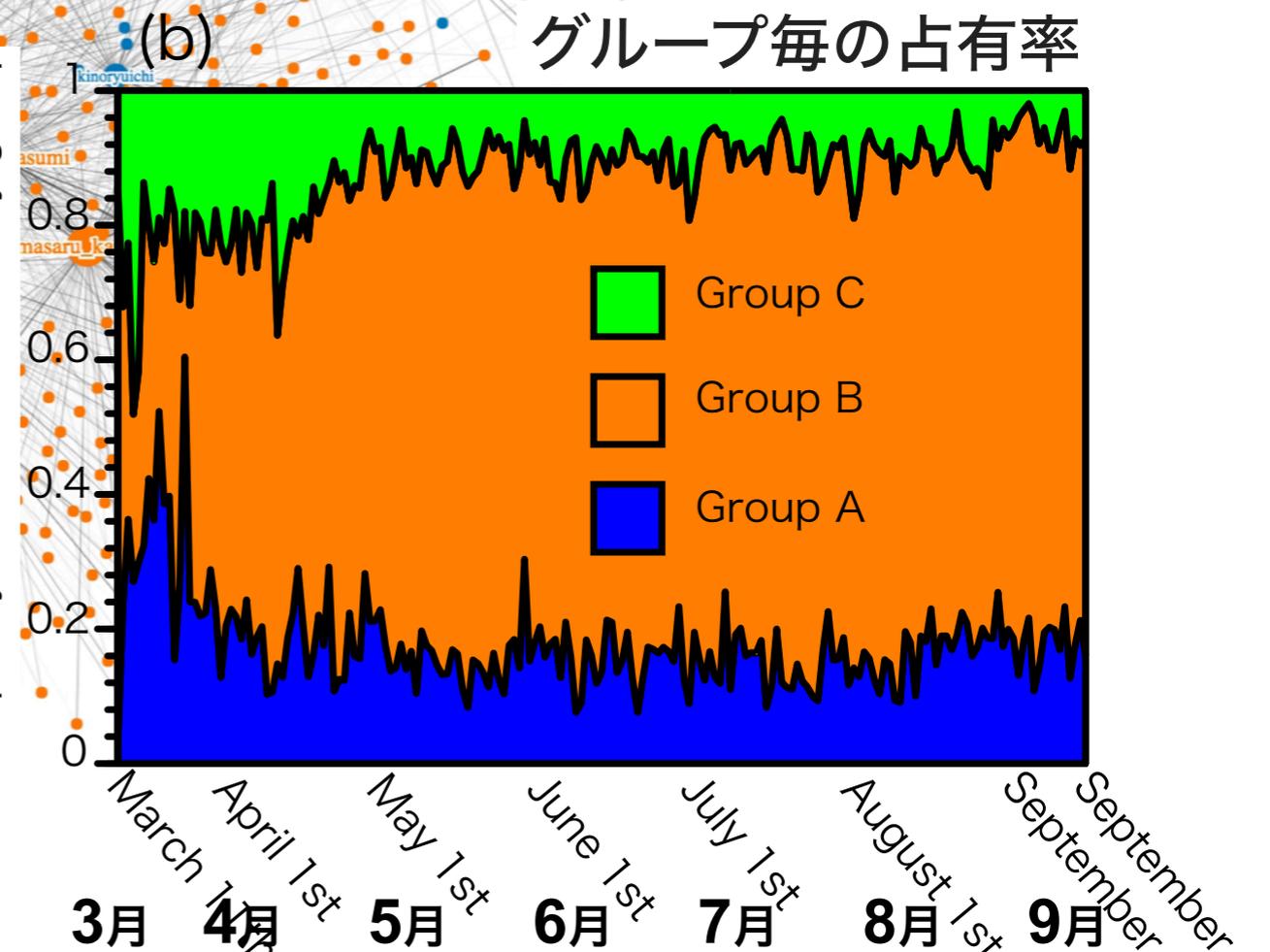
85万人の 770万 retweets



(a) グループ毎の tweet 数

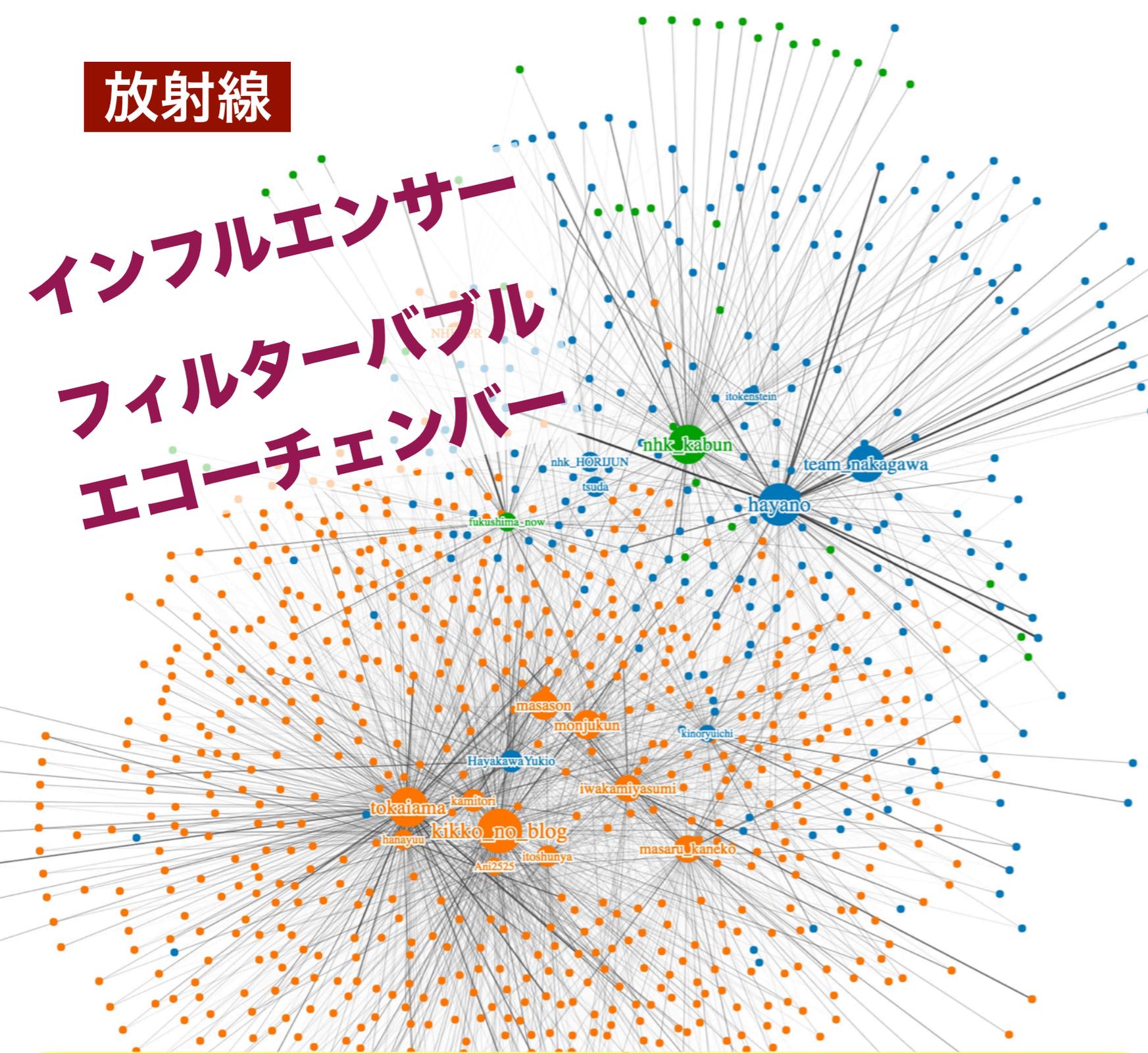


(b) グループ毎の占有率



放射線

インフルエンサー フィルターバブル エコーチェンバー



科学者間の連携・異分野協調を促す仕組み作り
科学者のサポーター・応援者を増やす平時からの準備
科学コミュニケーターの役割（クライシス時にも活躍を）
誤った情報を指摘し、早期に拡散を防ぐ体制

2つに分断されたアカウント群 異なる意見入りづらく



私たちは、情報... 異なる意見入りづらく
私たちが、情報... 異なる意見入りづらく
私たちが、情報... 異なる意見入りづらく

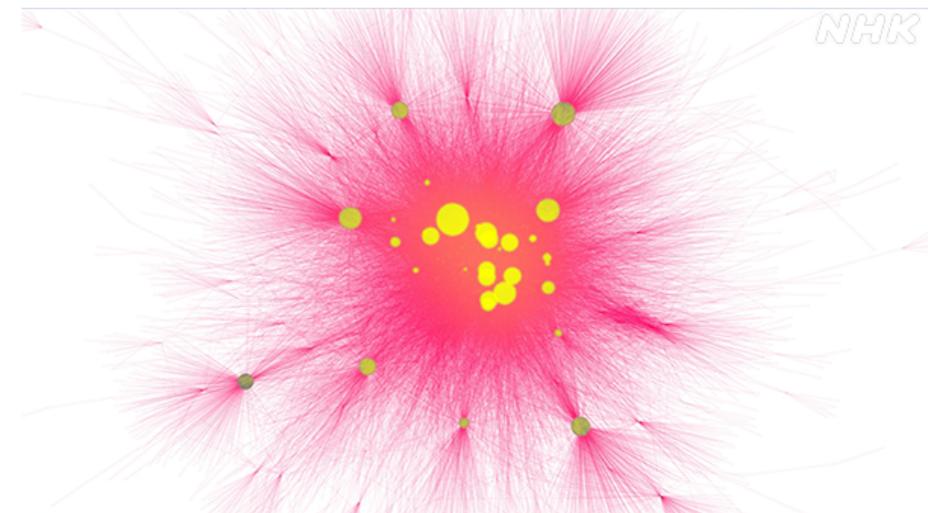
コロナワクチン

赤色のかたまりが、主に「ワクチン接種で不妊になる」という投稿をしている集団で、青色が、「誤った情報だ」と打ち消す投稿をしている集団です。意見が近いアカウントどうして投稿をシェアしあって、2つの色の集団ができあがっています。

「エコーチェンバー」と呼ばれる現象で、自分と同じ意見を持つ人の情報ばかりをネットで共有することで、異なる意見が目に入りにくくなり、分断が生じていることがうかがえます。

”発信源”は少数のアカウント

次に、ワクチンで不妊になるという情報を投稿しているアカウントのみについて、アカウントどうしの関係を詳しく調べました。



放射状に広がっている細い線のなかに、いくつか大きな丸があります。これが特に多くシェアされた情報を発信しているアカウントです。

分析の結果、全体で数万のアカウントのなかで、「上位20の発信者」の投稿だけで、全体の約4割を占めていました。最も多い発信者では2500ものアカウントにシェアされていて、限られた少数の発信者が大きな影響力をもっていることがわかりました。

厚生労働省や各国の研究機関は相次いで否定

伝える構造

ネットワークのシミュレーション

情報拡散モデルの検証

- ★ 情報発信のタイミング
- ★ 発信者の連携度合い
- ★ インフルエンサーのサポーター

リツイートネットワークの構造解析

ネットワーク構造解析

Twitter データの活用

ツイート内容の分析
 ツイート表現の分析

表現分析

科学的情報発信体制の構築

表現構造の分析

- 伝わりやすい表現
- 納得を得やすい表現
- × 反発を招きやすい表現

効果的な表現の選択

科学的情報の発信

SNS による情報発信

情報伝播の検証

- ★ 拡散の効果
- 人々の反応の分析
- 好感・信頼
- × 批判・反発

主任班との連携

web ページによる情報発信

伝える実践

伝わる表現

専門家の意見分布の見える化

統一見解や両論併記の弊害からの脱皮
 科学的正しさの担保・信頼の確保

専門知

SNS社会で 科学者にできること

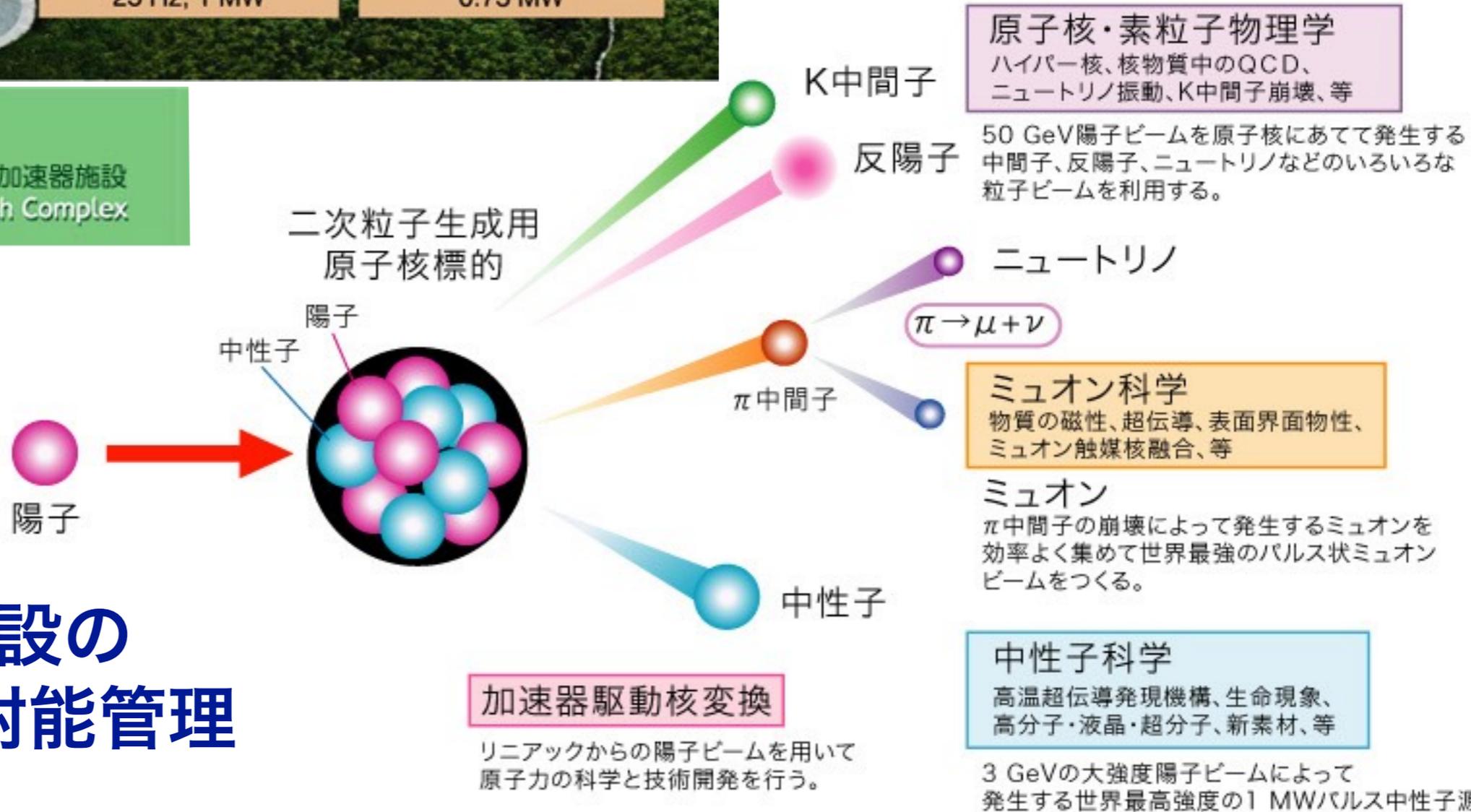
In the SNS Society What Scientists Can Do.

メニュー サイト内検索





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



加速器施設の 放射線・放射能管理

まとめ

放射性物質が放射線を出す能力を放射能という。

放射性物質は放射性同位体を含んだ物質。

核種に応じて壊変の種類や半減期が決まっている。

γ 線のエネルギー測定により核種の同定が可能。

放射線には α 線、 β 線、 γ 線、X線、中性子線などがある。

MeV オーダーの高いエネルギーで物質をイオン化し、化学結合を切断する。

ラジカルが生成され、これが DNA 損傷を引き起こす恐れがある。

放射線の種類による透過力と線エネルギー付与 (LET) の違いに応じて防護。

放射線の種類と目的に応じて測定器を正しく使い分ける。

自然放射線による被ばくは年間 2 mSv 程度ある。

福島放射線量は健康影響が問題になるレベルではない。

人体は DNA 損傷に対する修復機能を備えている。

放射線防護の ALARA の原則。リスクの正しい理解と伝達。

Mahalo no ka ho'olohe 'ana mai.
Grazie per la vostra attenzione.
Gratias ago pro audientia vestra.

Дякую за вашу увагу.

Спасибо за внимание.

Dankon pro via atento.

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。

ニフェーデービル

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A. TORII