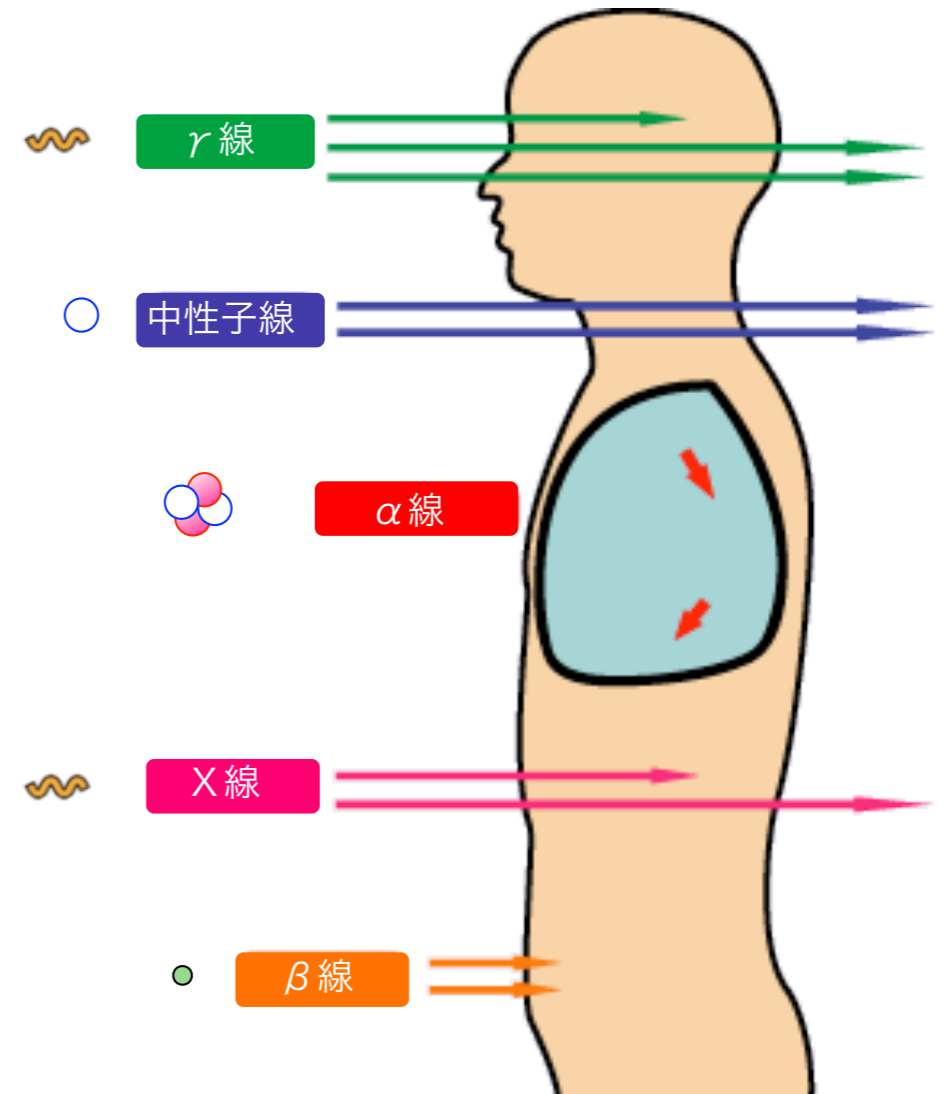


基礎講義 放射線

放射線の科学

物理・生命科学から
環境問題まで



2018 / 8 / 17 (金)

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 大学院理学系研究科

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

2018 / 8 / 17 (金)

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 大学院理学系研究科

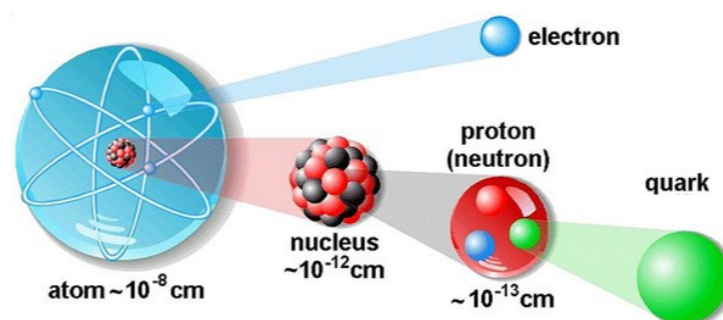
東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

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



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

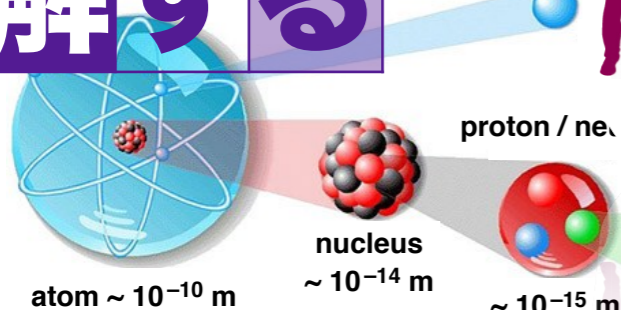
主題科目テーマ講義

2011年度冬学期

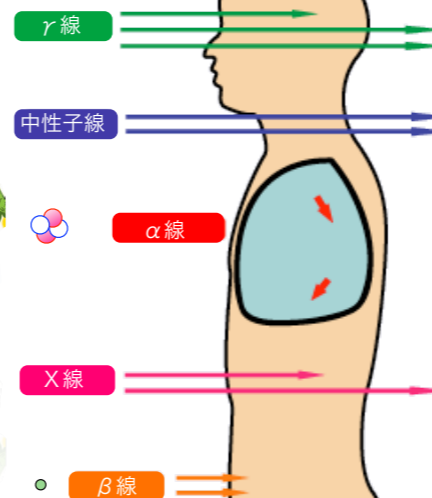
2012年度冬学期

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>

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）、法律

放射線を科学的に理解する

《教養学部》

鳥居 寛之 《物理》*

放射線物理学・原子核物理学

小豆川 勝見 《化学》*

放射線計測学・環境放射化学

渡邊 雄一郎 《生命》*

放射線生物学・放射線の利用



ゲスト講師

中川 恵一 《医学部》

放射線医学

石渡 祐樹 《原子力》

原子力工学

藤原 徹 《農学部》*

植物栄養・土壌肥料学



【2011年度】 * 2011~18

放射線を科学的に理解する

ゲスト講師 【2012年度】

作美 明 《医病院》 12
放射線医療

森口 祐一 《都市工》 12
環境汚染・廃棄物問題

藤垣 裕子 《教養学部》 12
科学技術社会論



【2013年度】

坪倉 正治 《医科研》 13~18
被曝調査・医療支援

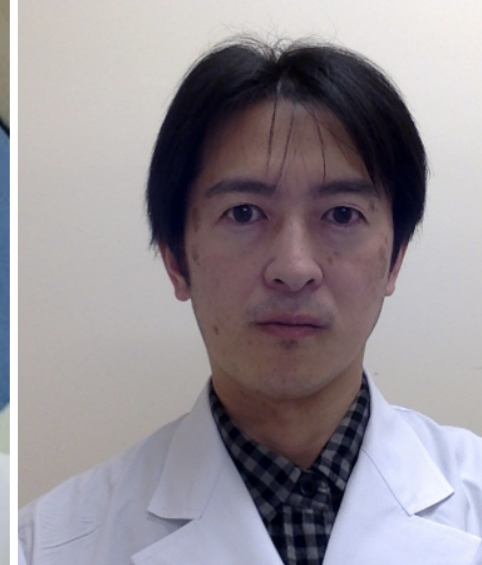
飯本 武志 《環境本部》 13
放射線防護学



小笹 晃太郎 《放影研》 14
放射線影響の疫学

芳賀 昭弘 《医病院》 15~16
放射線医療

太田 岳史 《医病院》 17
【2014年度】
【2015年度】
【2016年度】
【2017年度】





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** : 放射線物理学・素粒子原子物理学 (**Exotic原子**)
- 家庭** : 2児の父 (小6の息子、小2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



双葉町



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



郡山市



南相馬市



伊達市

アンケート

放射線教育の履修経験

小中高／大学／基礎実験

放射線取り扱い経験

放射線の知識度

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？」

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

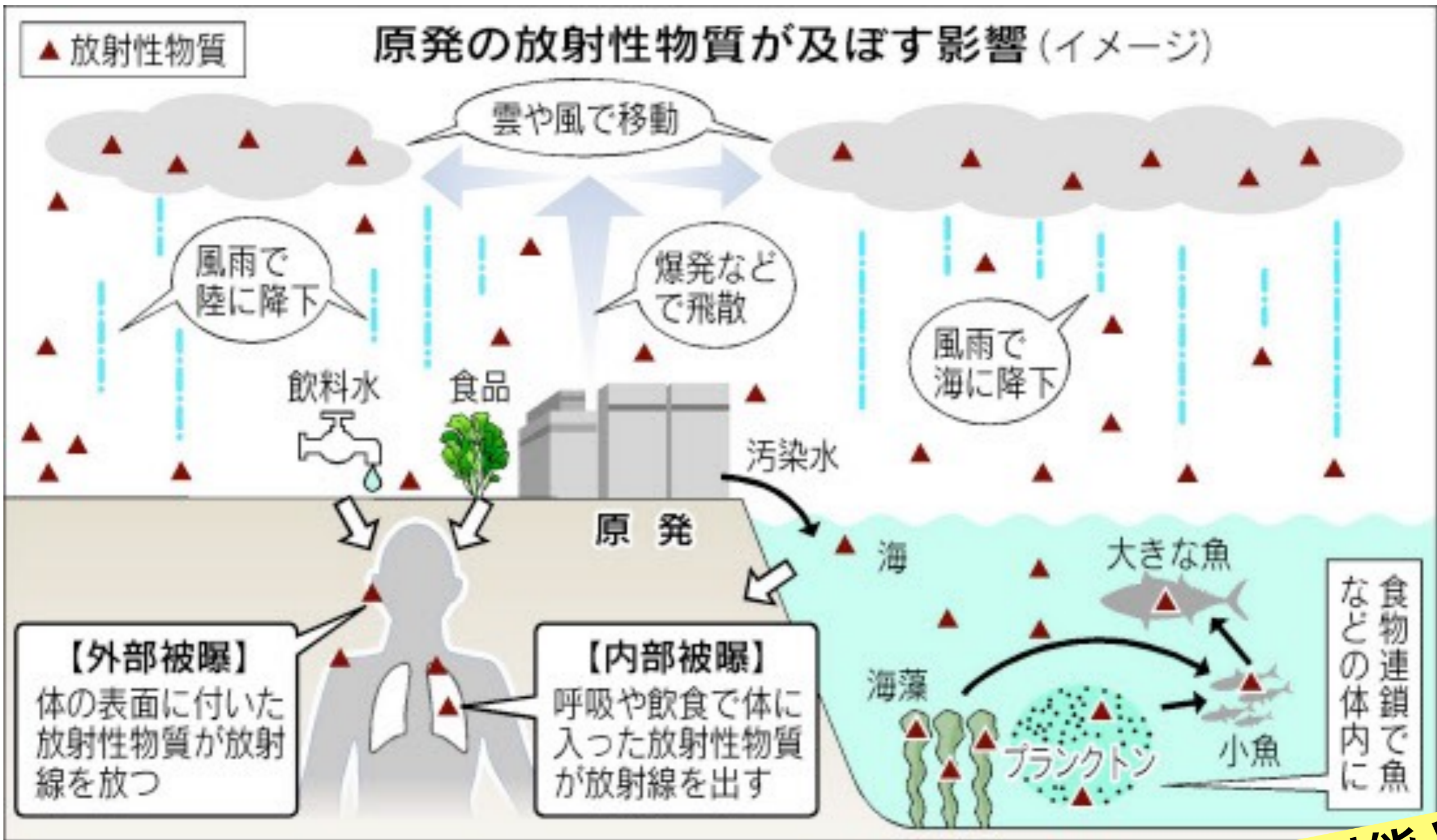
第1話

放射線入門

鳥居 寛之

東京大学 大学院理学系研究科

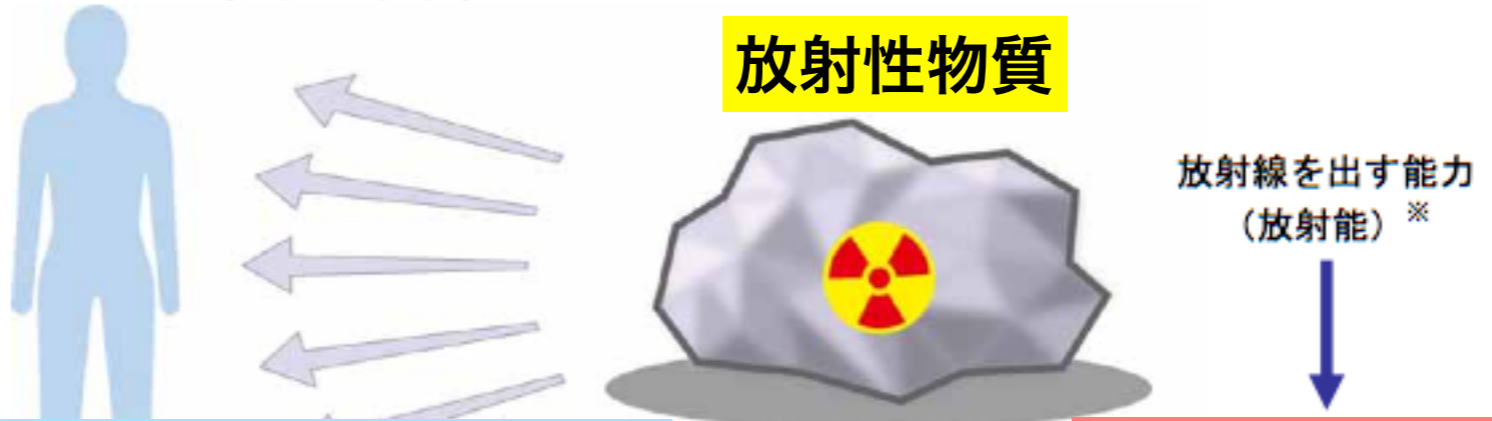
放射線
放射能
放射性物質



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

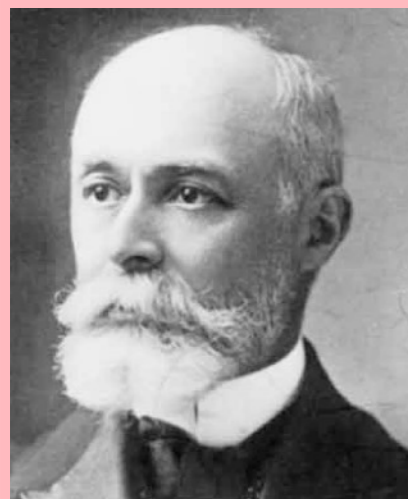
放射性物質、放射能と放射線を混同しない

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

関西は自然放射線量が高い！

mSv/年

全国の自然放射線量

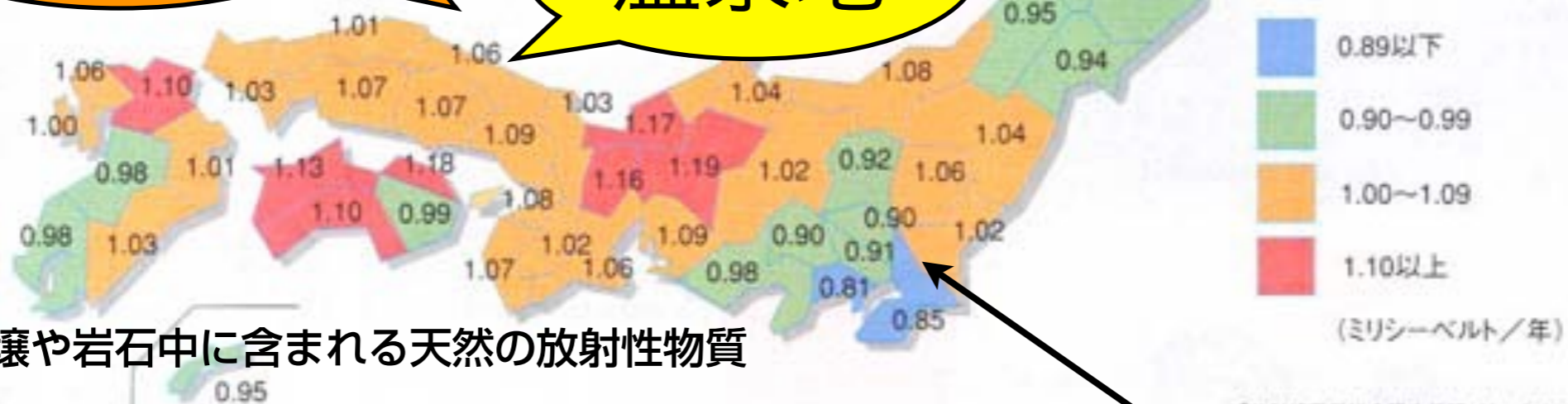
宇宙、大地からの放射線と
食物摂取によって受ける放射線量
(ラドンなどの吸入によるものを除く)

関東・東北は低い！

日本全体
0.99

御影石
(花崗岩)

温泉地



《表5》 土壌や岩石中に含まれる天然の放射性物質

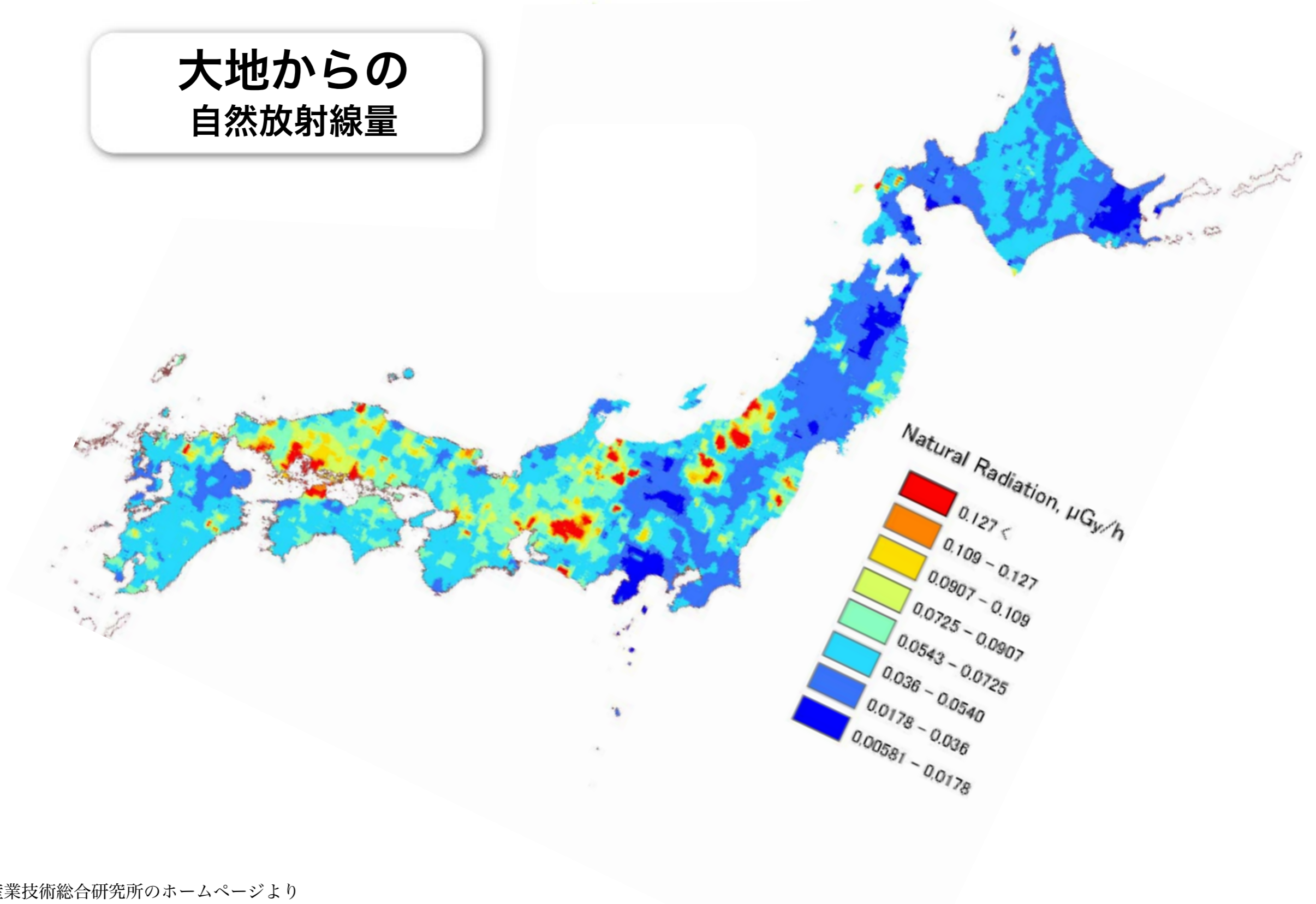
放射性物質の種類	放射能濃度 (ベクレル/kg)	
	一般の土壌・岩石	花こう岩
カリウム40	100~700	500~1600
ウラン238 (娘核種を含む)	10~50	20~200
トリウム232	7~50	20~200

関東ローム層

全国の自然放射線量

$\mu\text{Gy}/\text{時}$

大地からの
自然放射線量



図：産業技術総合研究所のホームページより

mSv/年

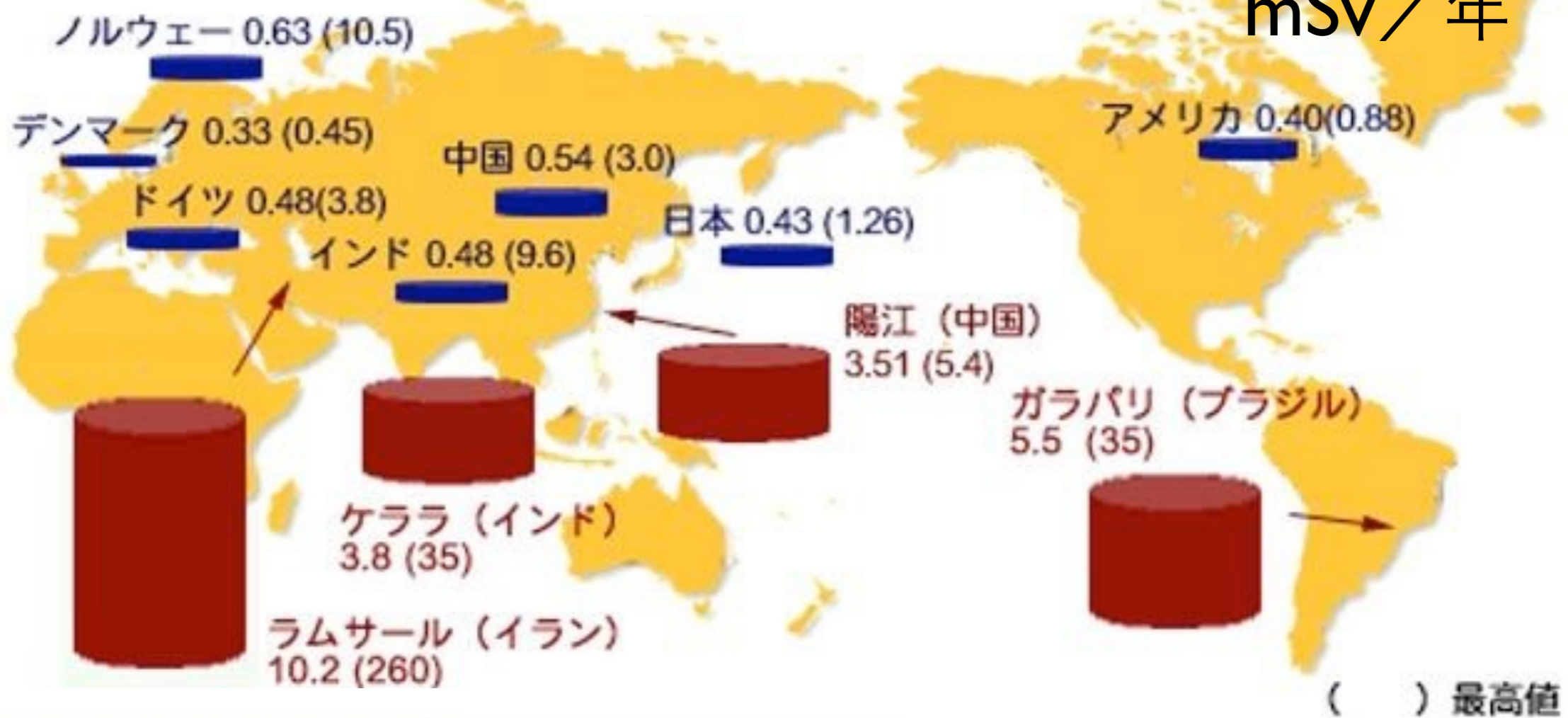
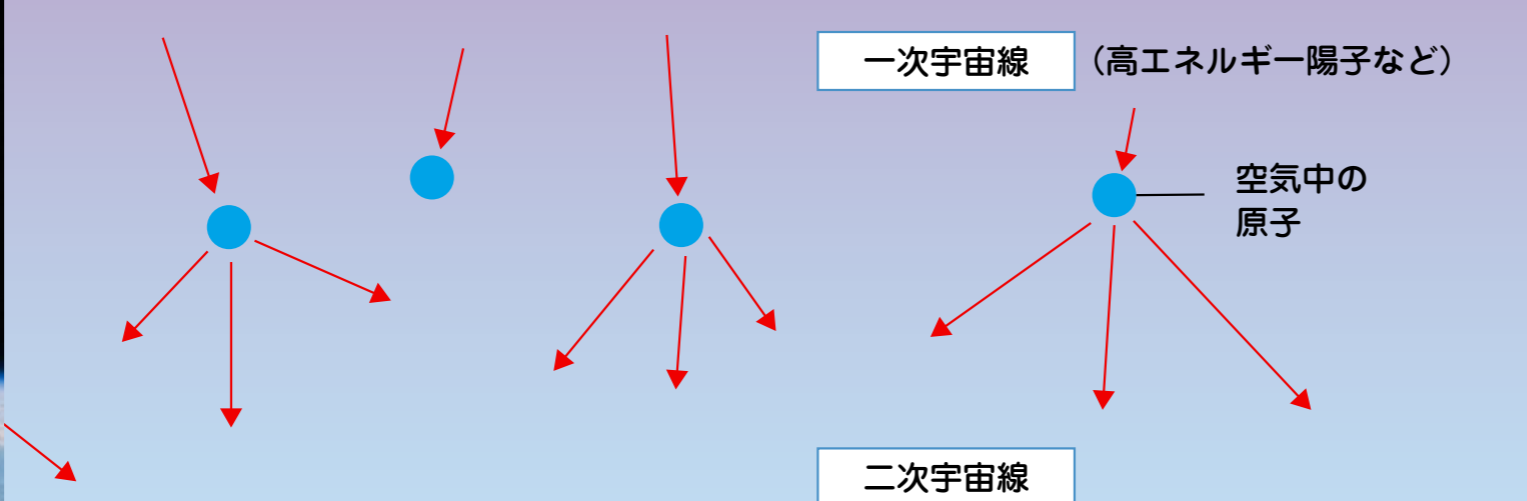


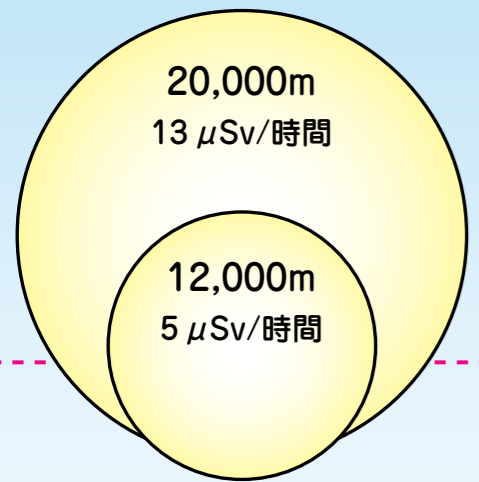
表1 高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較^{7,8)}

	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

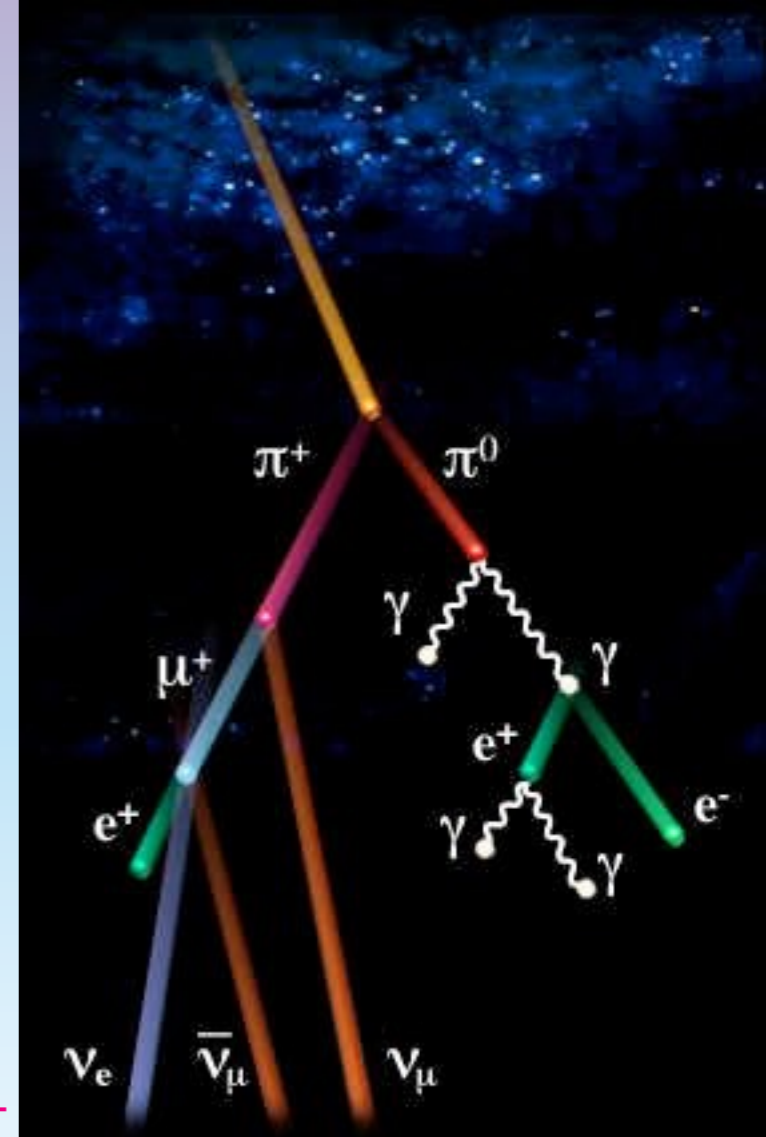
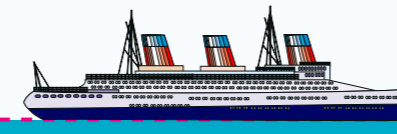
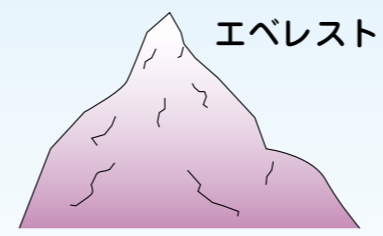
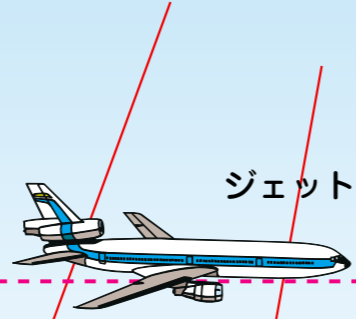
海面 ○ 0.03 μ Sv/時間

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。

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

第2話

放射能と放射線の物理学

鳥居 寛之

東京大学 大学院理学系研究科

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

周期表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1.0079																	2 He 4.0026
2 Li 6.941	3 Be 9.0121											5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne
3 Na 22.989	4 Mg 24.305											13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar
4 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955	22 Ti 47.867	23 V 50.941	24 Cr 51.996						31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr	
5 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96						49 In 114.81	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.905	54 Xe	
6 Cs 132.90	56 Ba 137.32	57-71 Lanthanides	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94	74 W 183.84	75 Re 186.20	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 Actinides	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Nh (284)	114 Fl (289)	115 Mc (288)	116 Lv (292)	117 Ts (293)	118 Og (294)

113 Nh
Nihonium
铈

116 Lv
Livermorium
鉷

114 Fl
Flerovium
鈇

镉

砷

氮

米口の共同研究

ロシア合同原子核研究所の原子核反応研究室創設者 **Georgy Flërov**
米国 Lawrence-Livermore 国立研究所

放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核

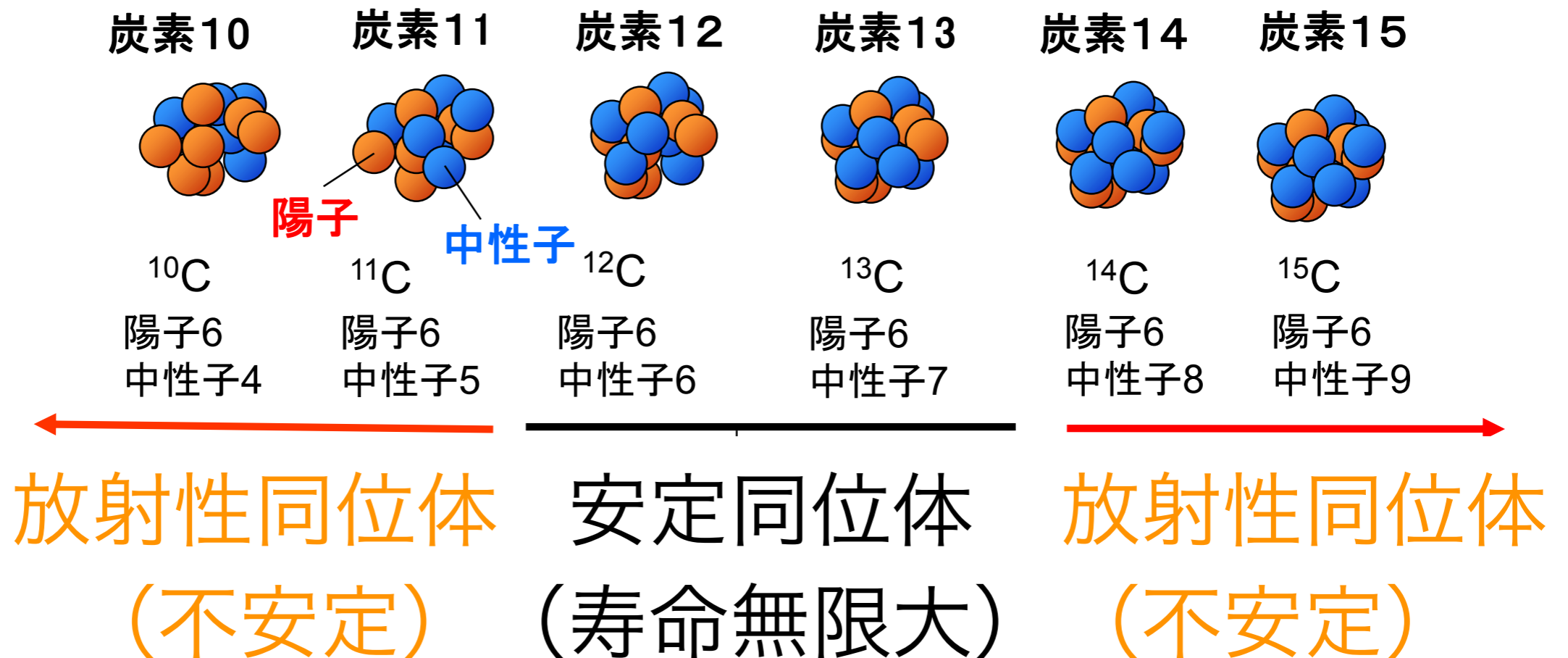
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



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

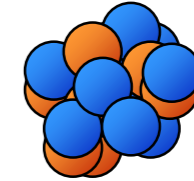
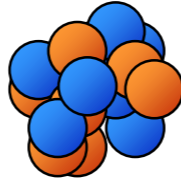
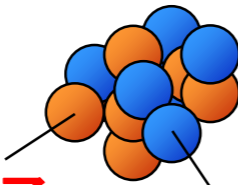
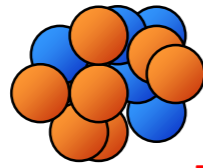
炭素11

炭素12

炭素13

炭素14

炭素15



陽子

中性子

^{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

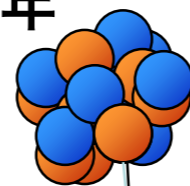
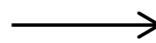
半減期

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

+ $\bar{\nu}_e$

反ニュートリノ

(β 線: 放射線)

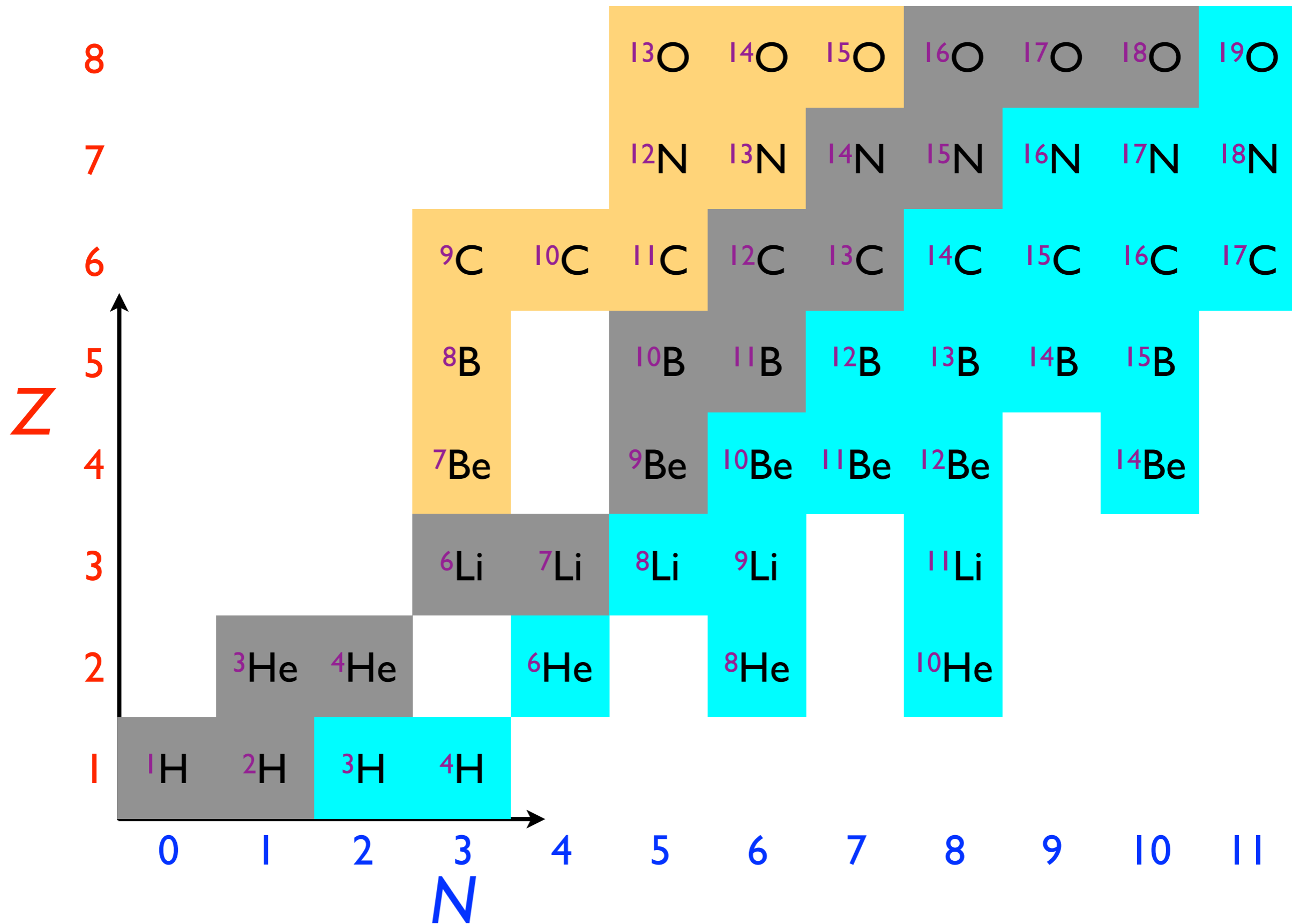
放射性同位体

ベータマイナス壊変 (崩壊)

β^- decay

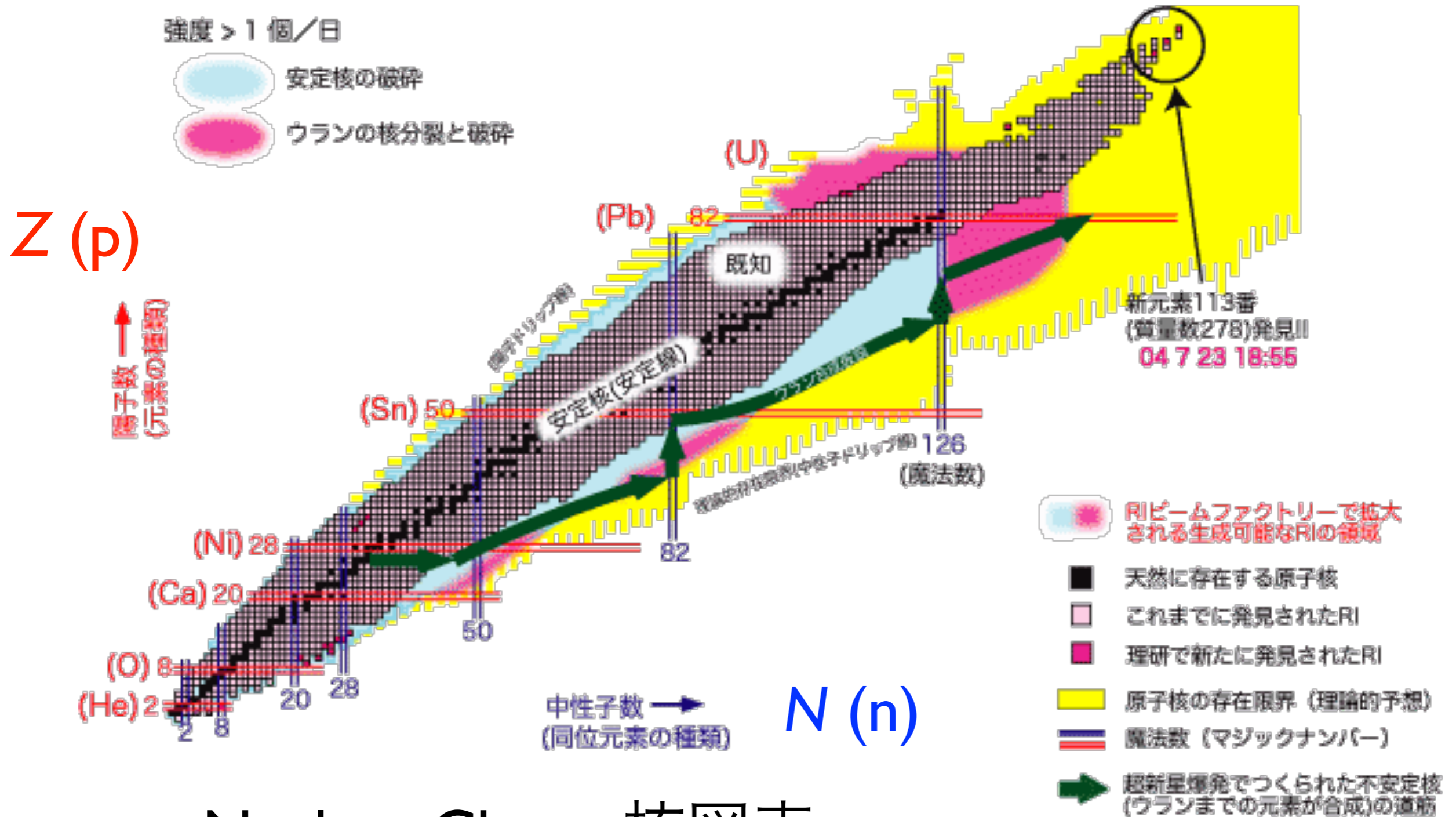


核图表





RIKEN



Nuclear Chart 核図表

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

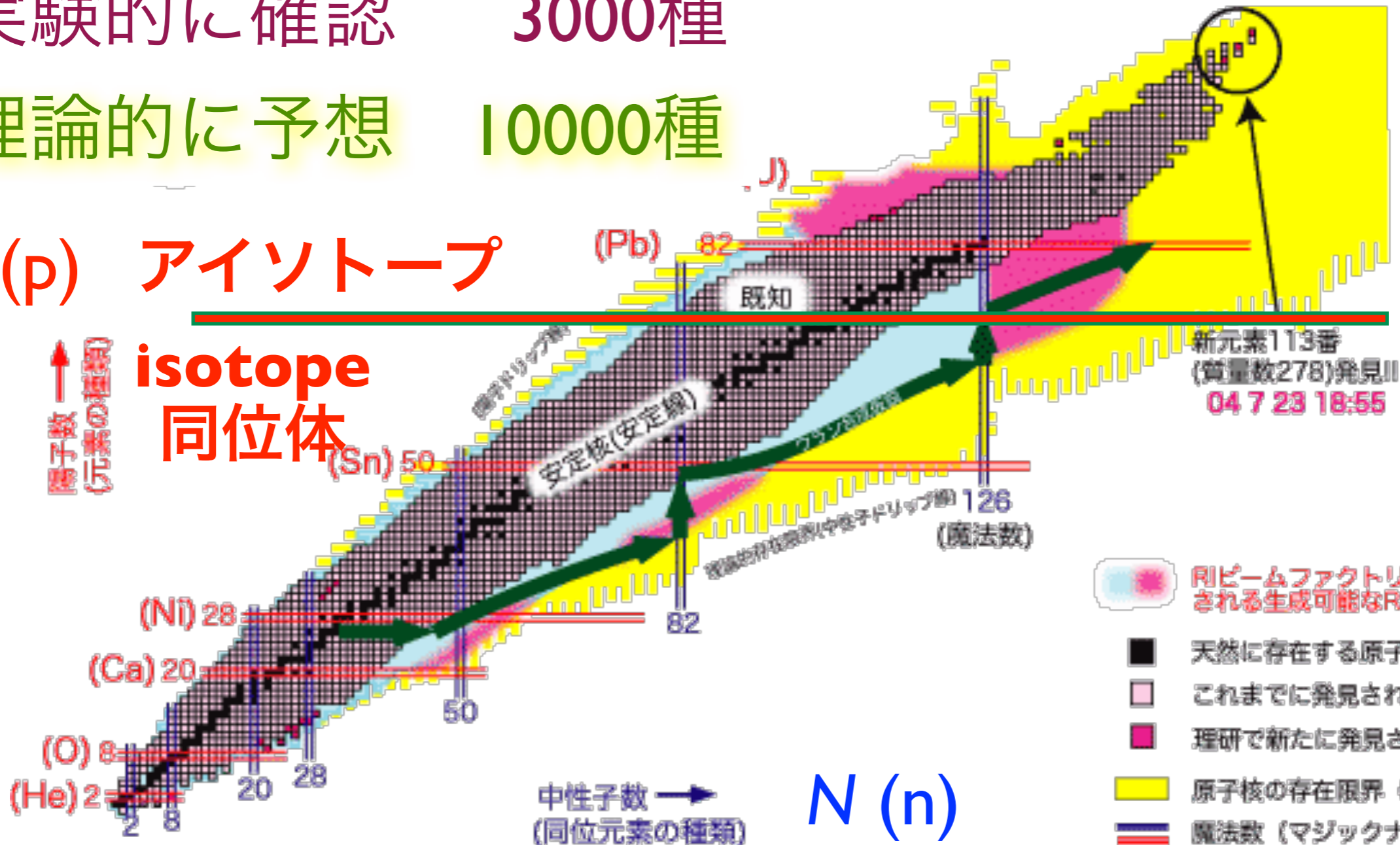
原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p) アイソトープ

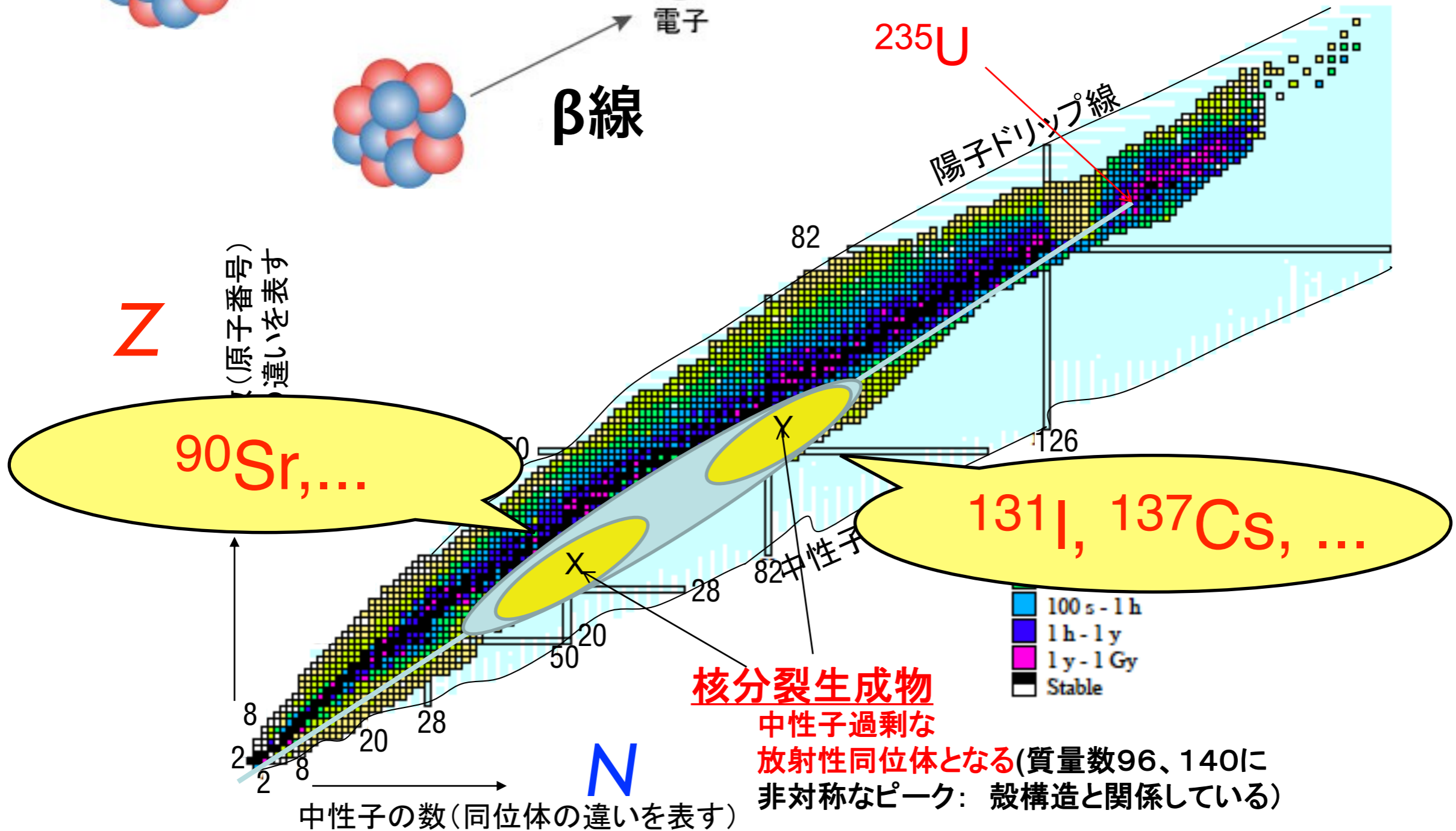
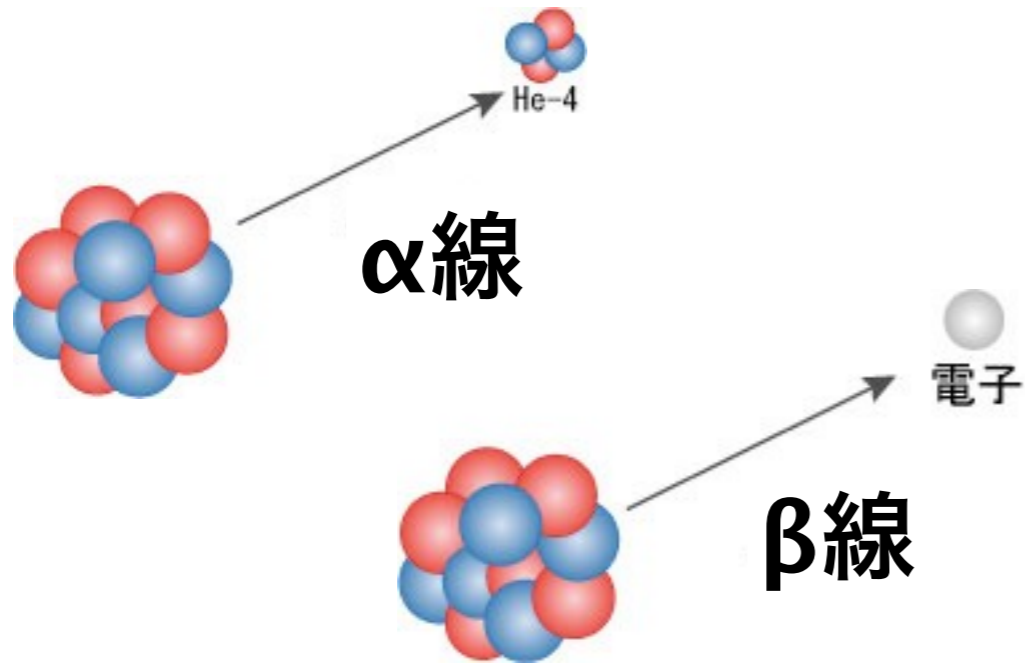
↑ 陽子数
(元素の種類)

isotope
同位体



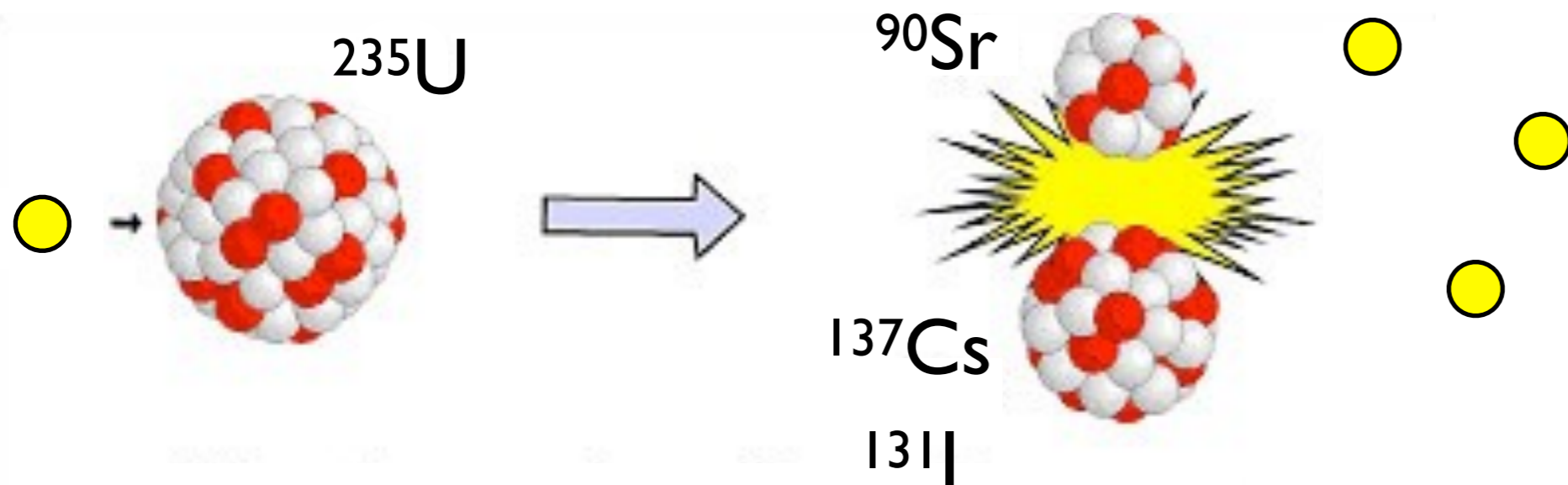
Nuclear Chart 核図表

放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



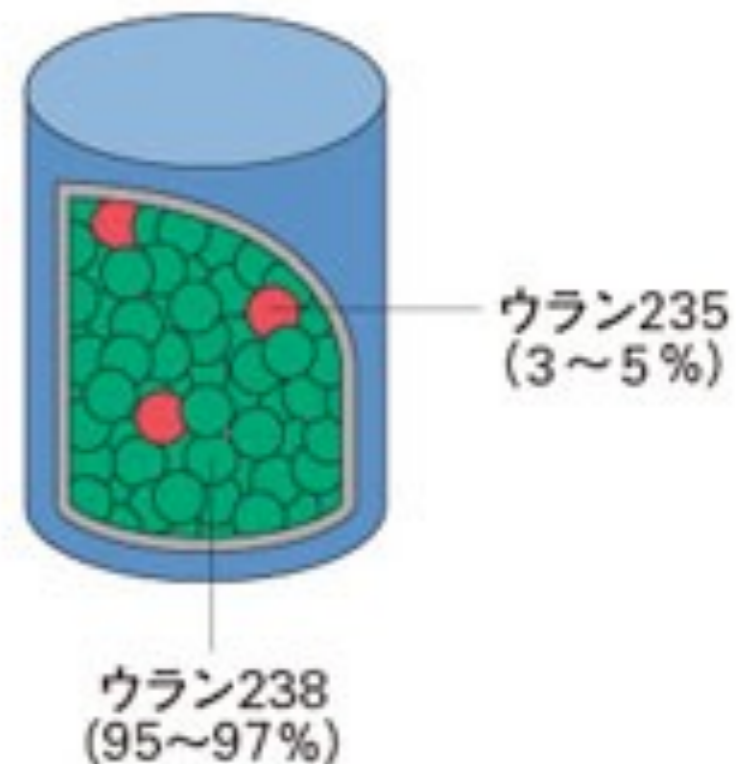
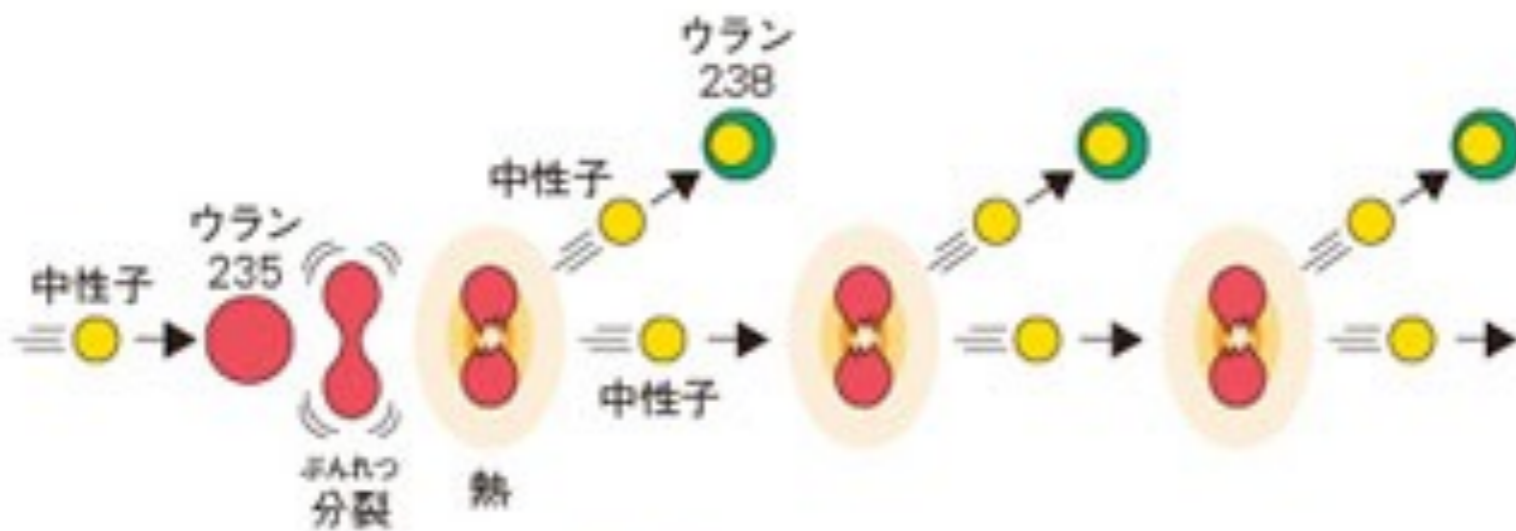
Nuclear Chart 核図表

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

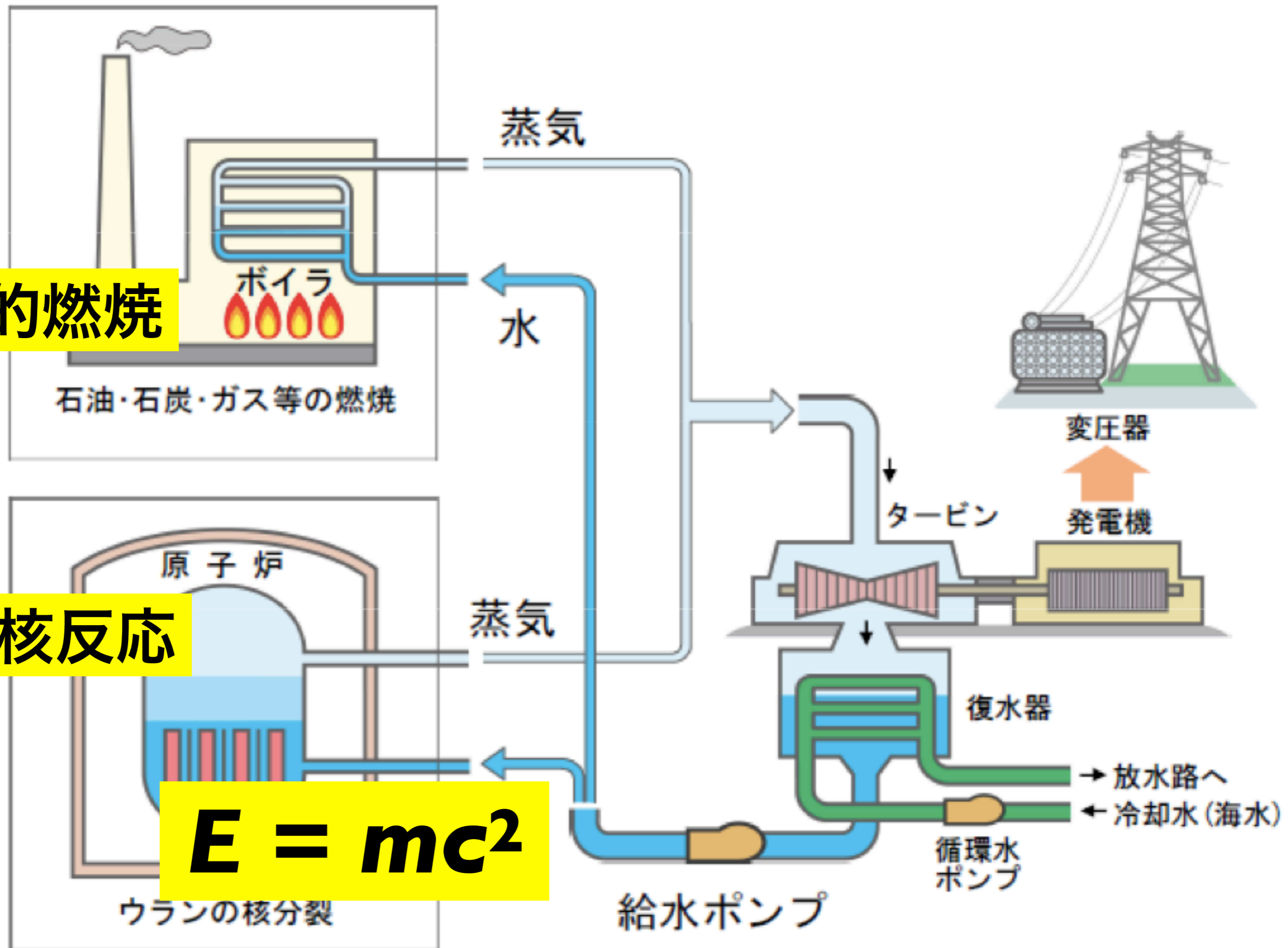
石油・石炭・ガス等の燃焼

原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$

ウランの核分裂



放射線の種類

VIDEO

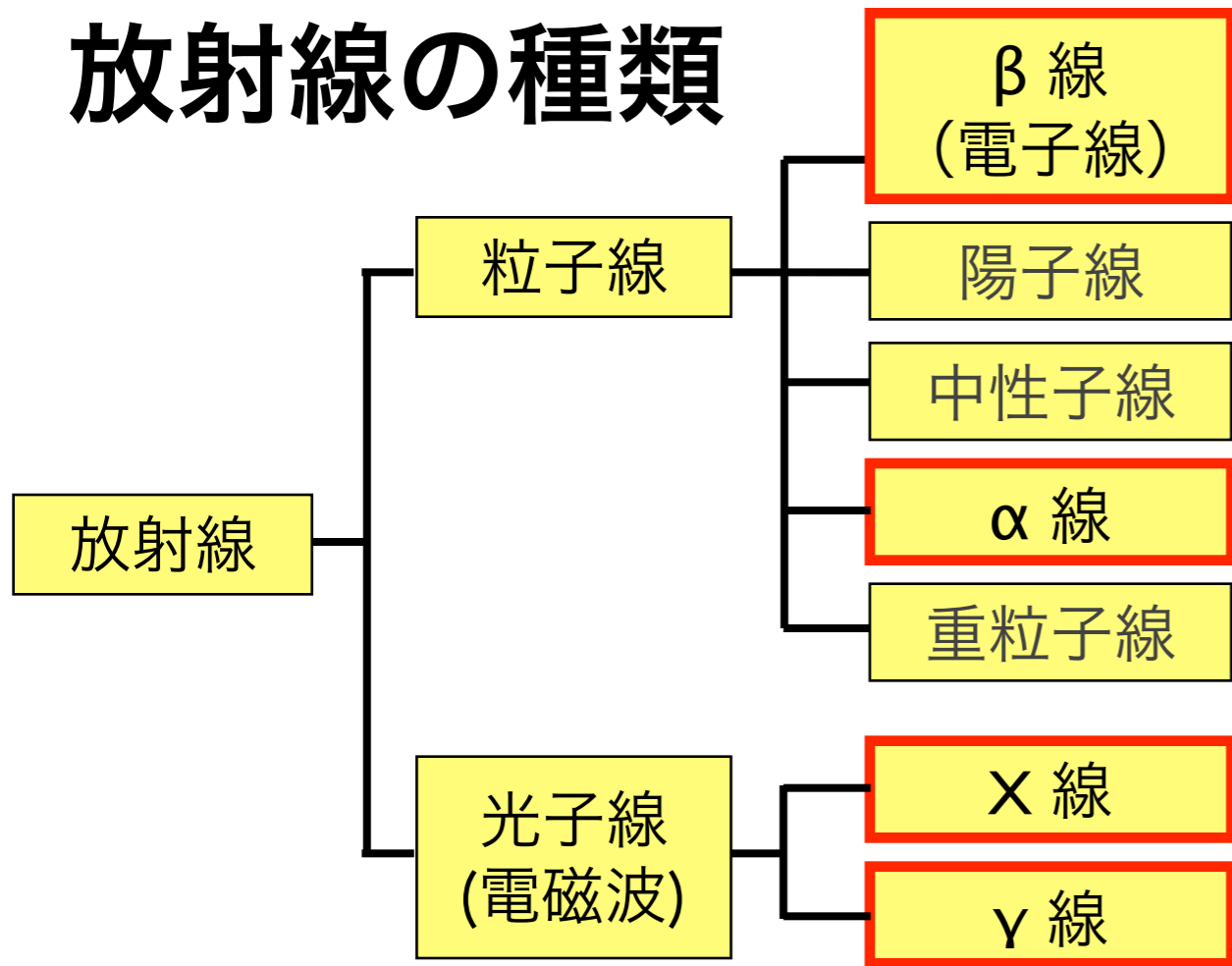
放射線とは

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

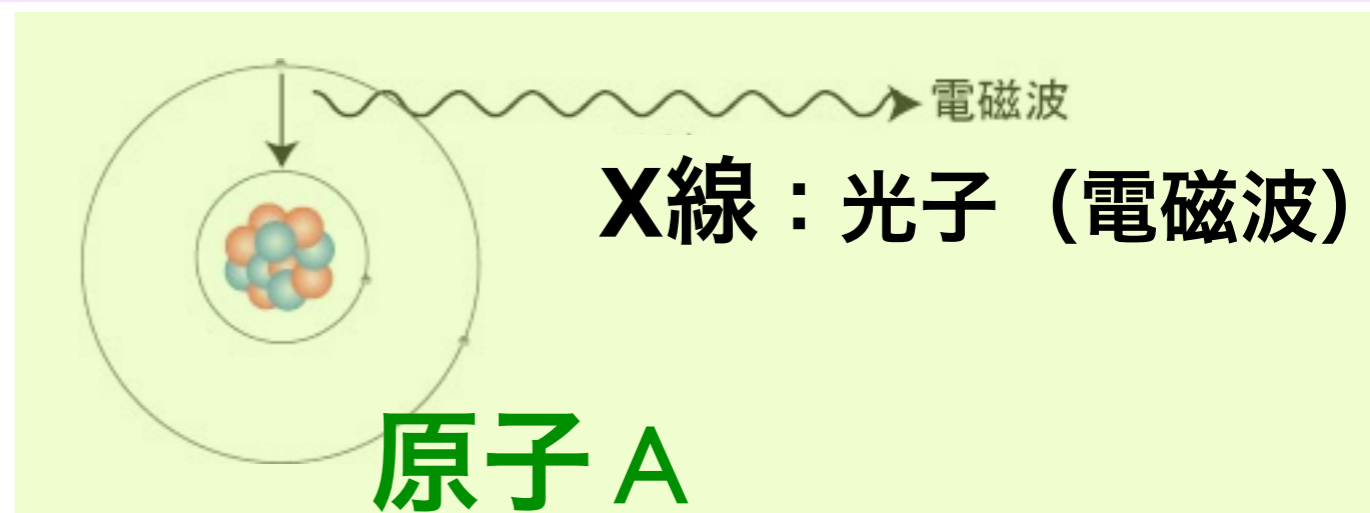
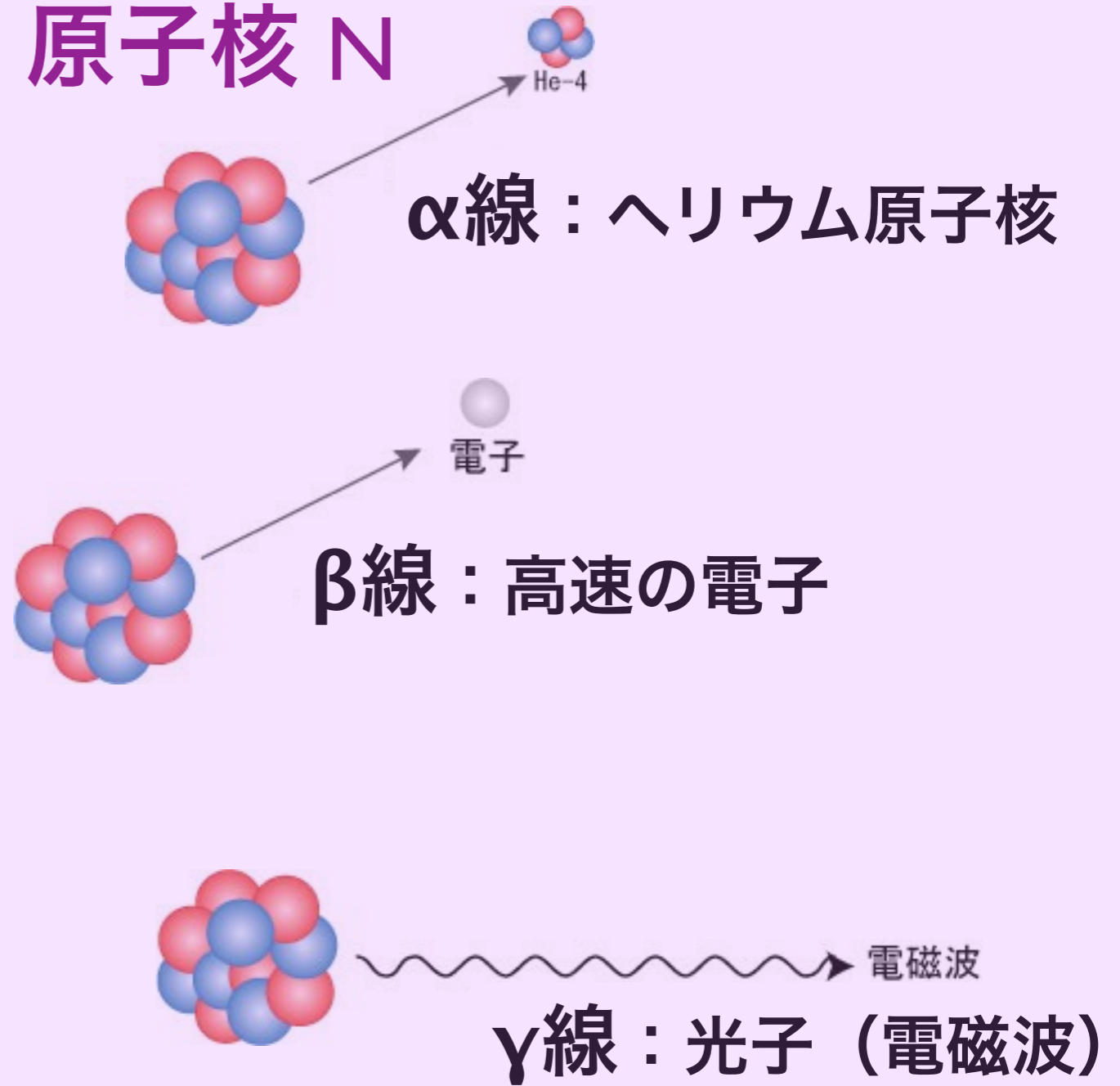
<http://eneco.jaero.or.jp/20110322/>

放射線

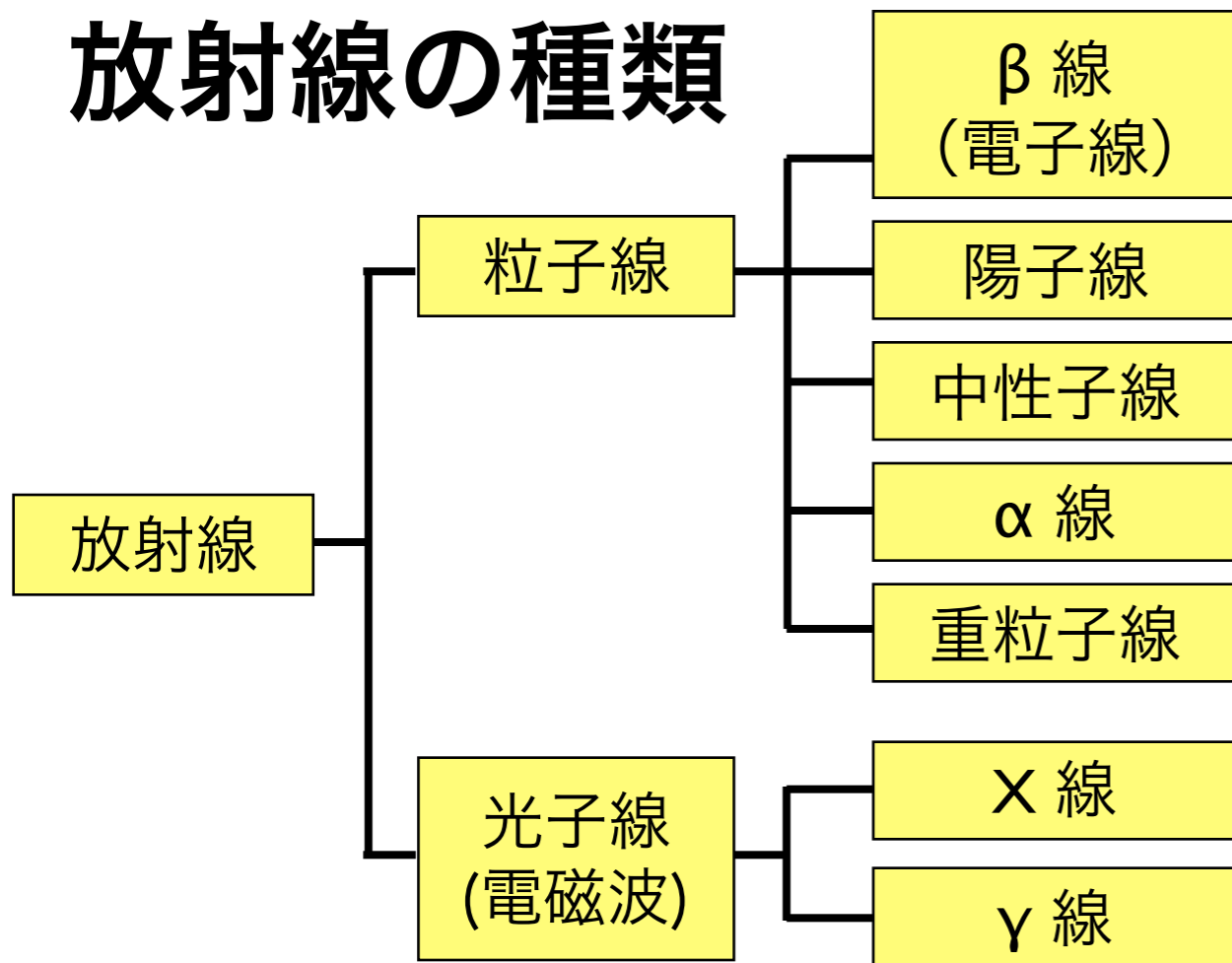
放射線の種類



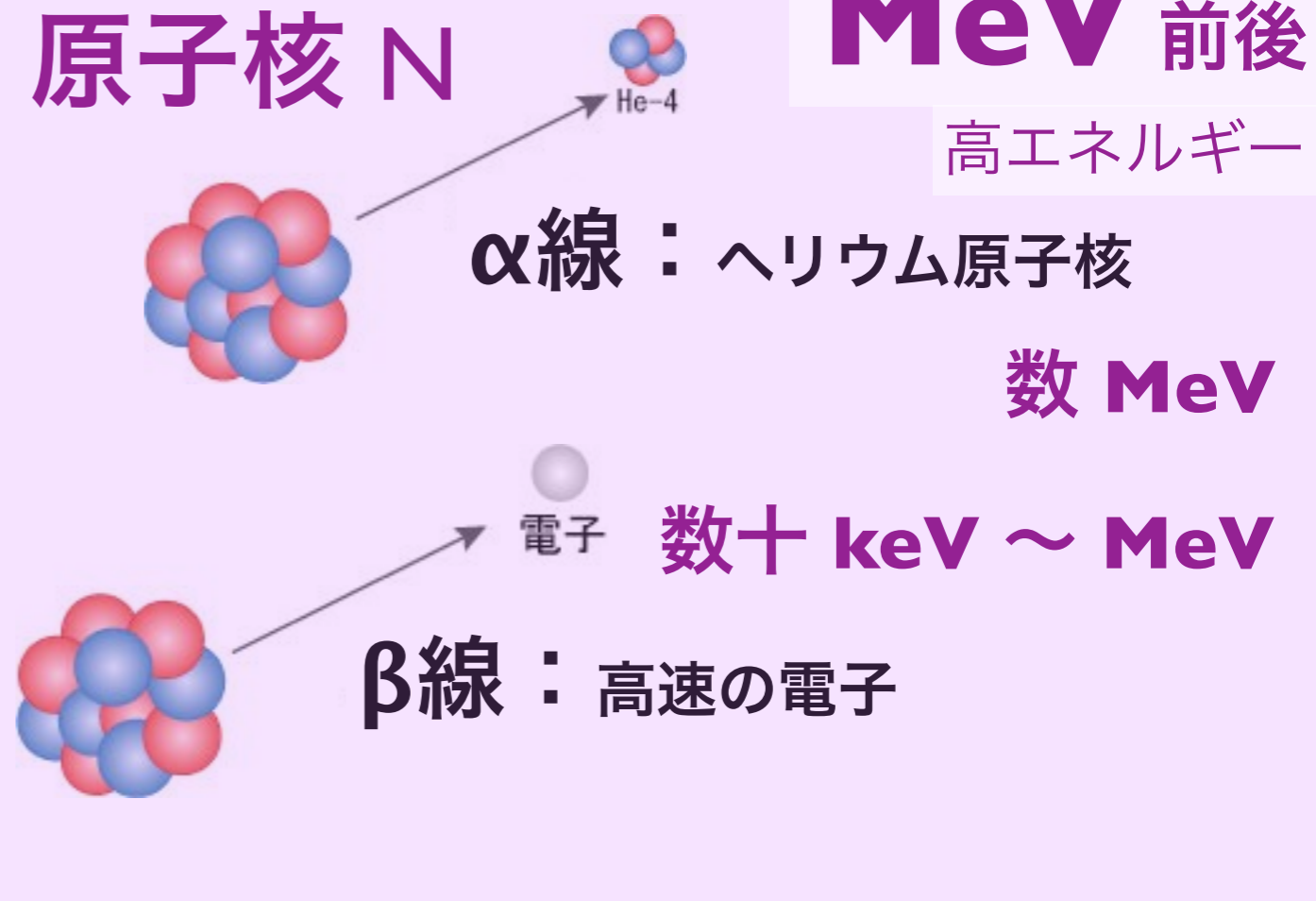
原子核 N



放射線の種類



原子核 N



MeV 前後

高エネルギー

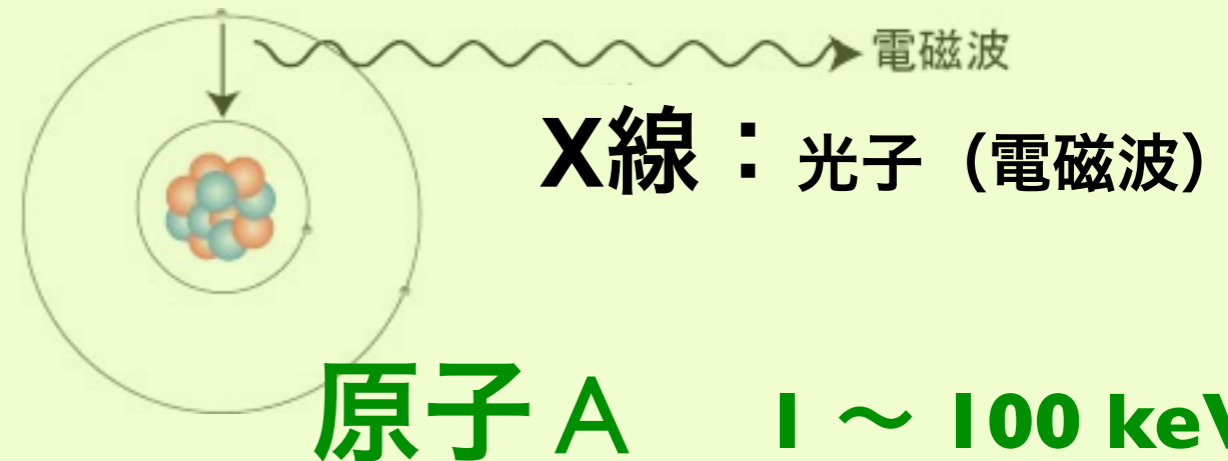
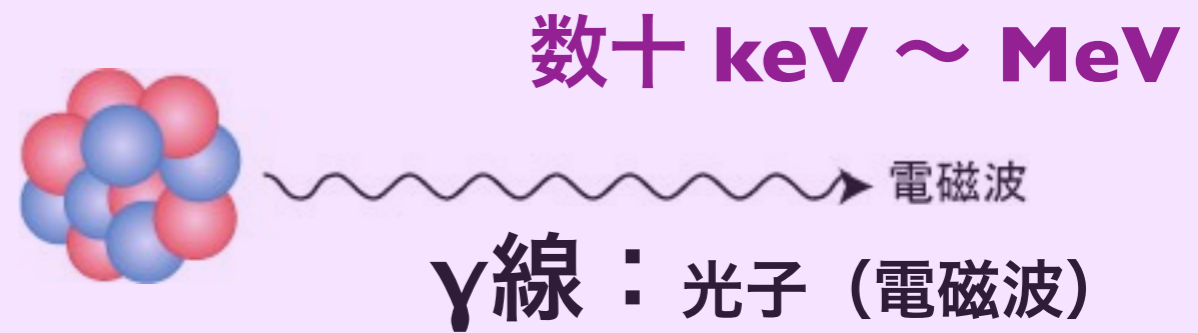
放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

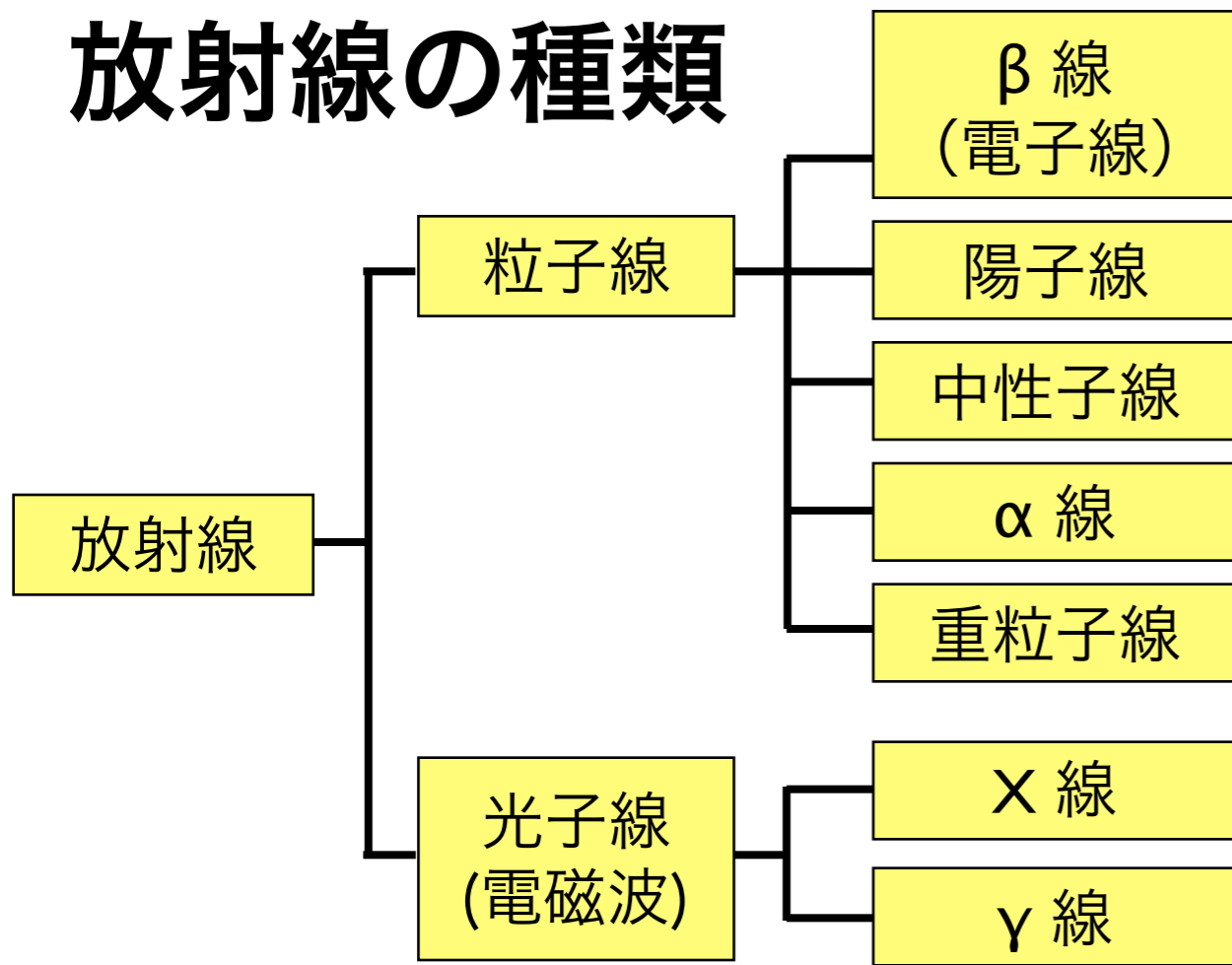
高エネルギー **MeV** 前後

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

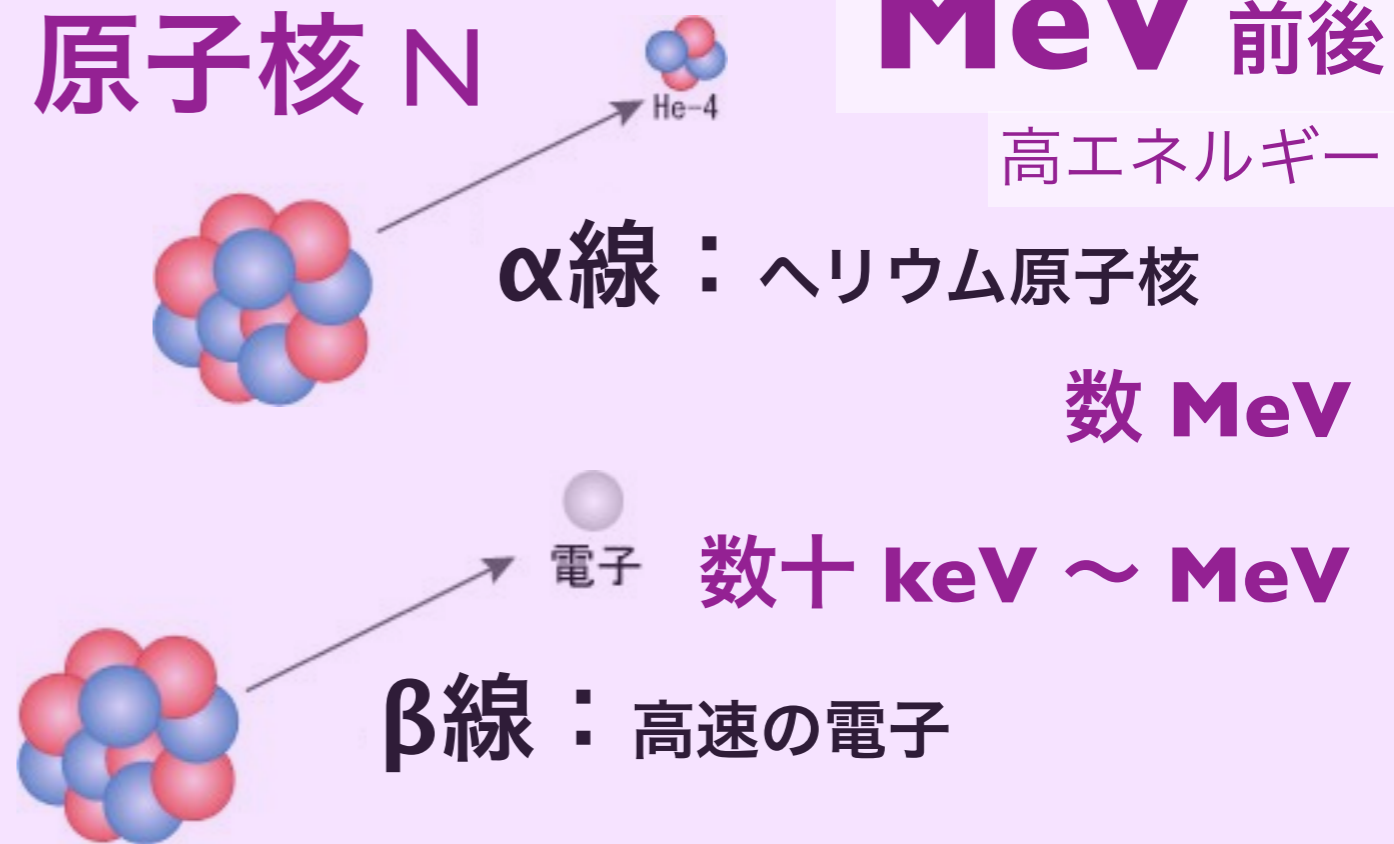
(例：水素原子 1s 基底準位)



放射線の種類



原子核 N



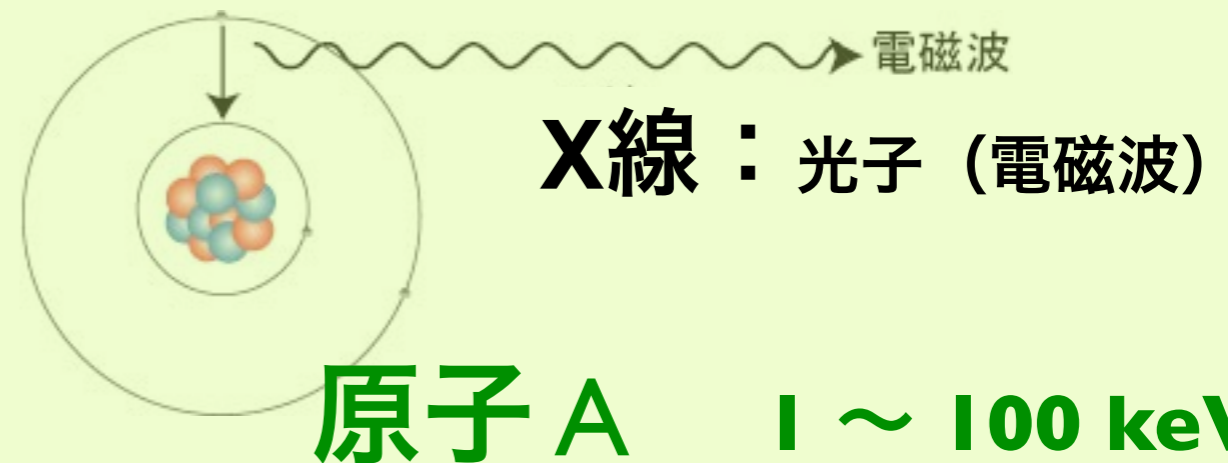
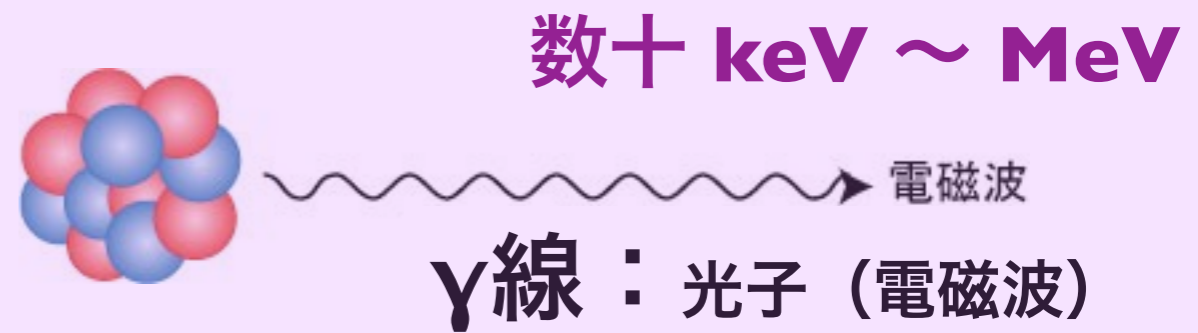
放射線のもつエネルギーは？

☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

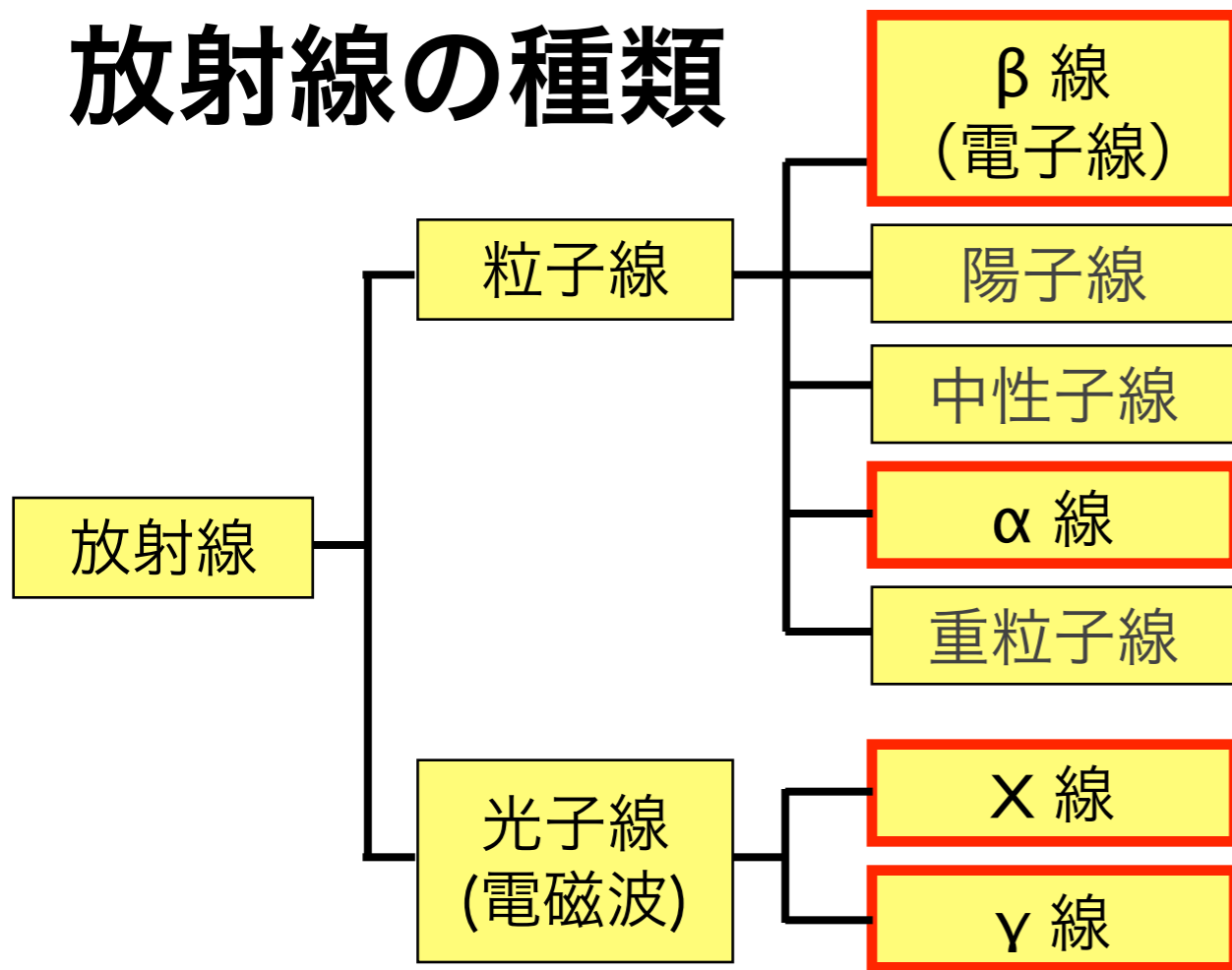
Cf. 原子の束縛エネルギーは？

☞ 最外殻電子で 10 eV 程度
(1 eV = 96 kJ/mol)

10 eV 程度



放射線の種類



原子核 N



MeV 前後

高エネルギー

数十 keV ~ MeV

数十 keV ~ MeV

放射線のもつエネルギーは？

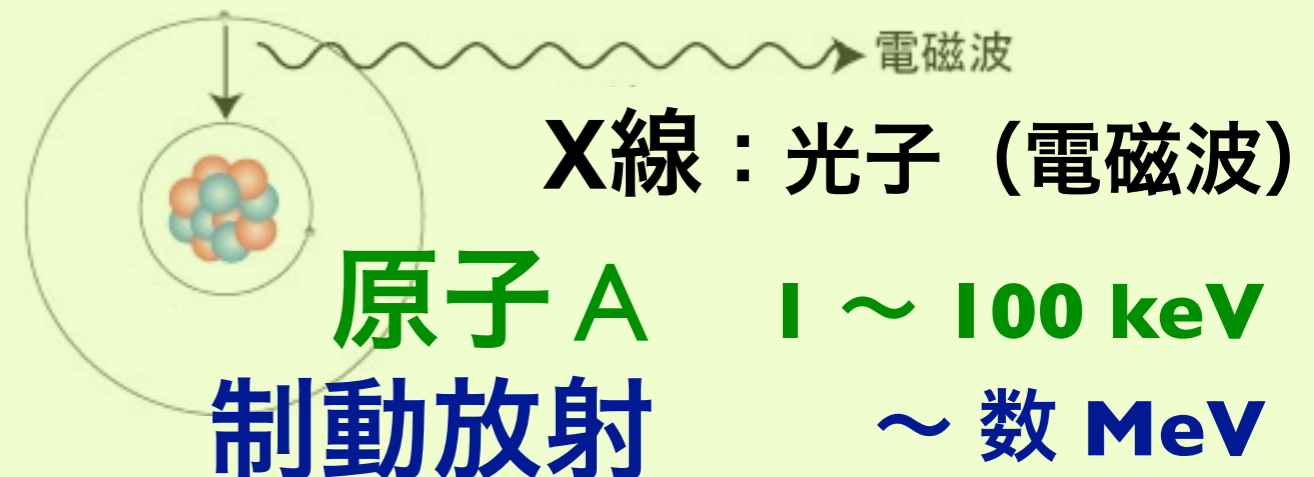
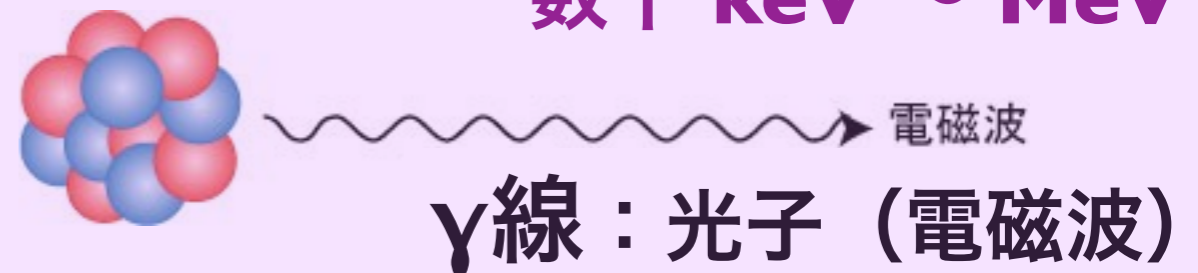
➡ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

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%



α 崩壊 (壊変)

decay

β⁻ 崩壊 (壊変)

γ 崩壊 (壊変) (核異性体転移)

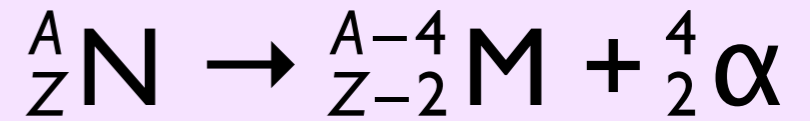
Isomeric Transition (IT)

原子の脱励起 制動放射

原子核 N



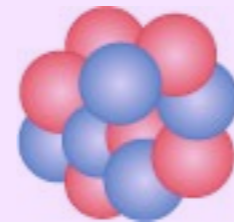
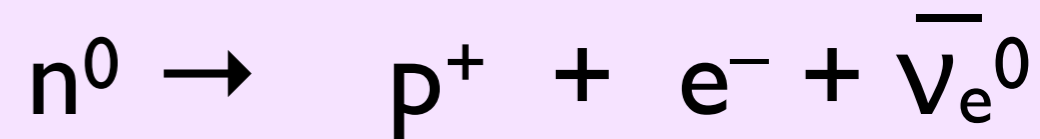
α線



β線

電子

数十 keV ~ MeV

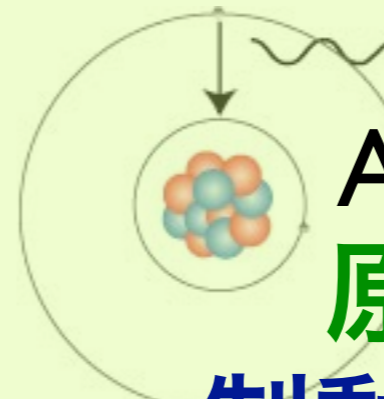


γ線

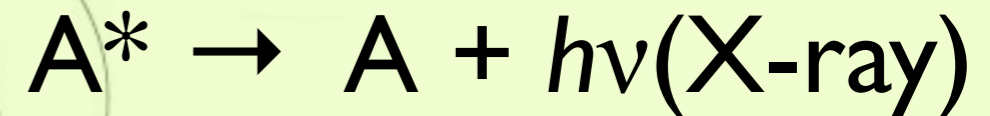
電磁波



X線



電磁波



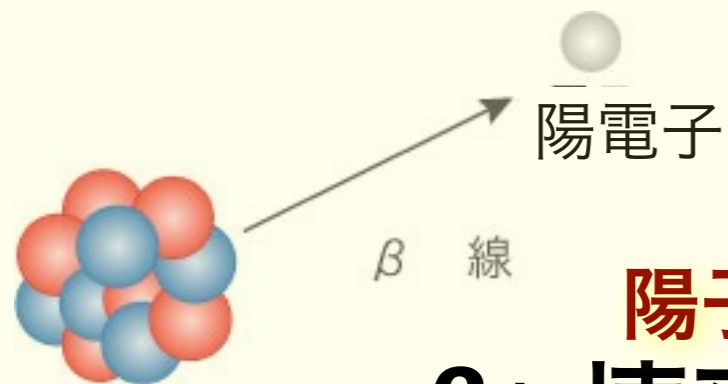
原子 A

I ~ 100 keV

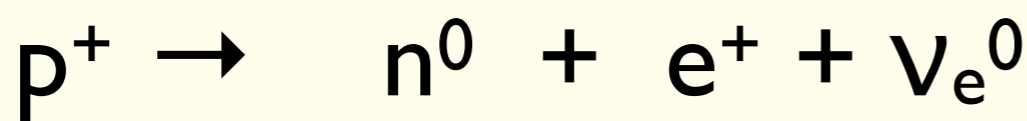
制動放射

~ 数 MeV

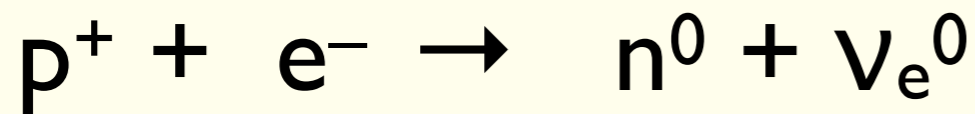
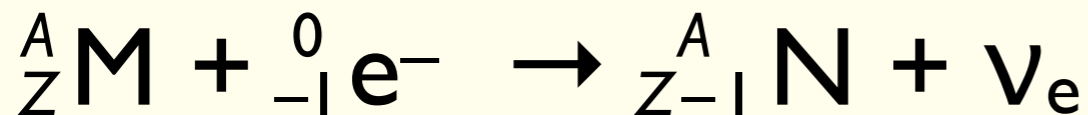
数十 keV ~ MeV



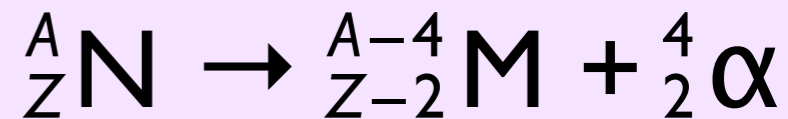
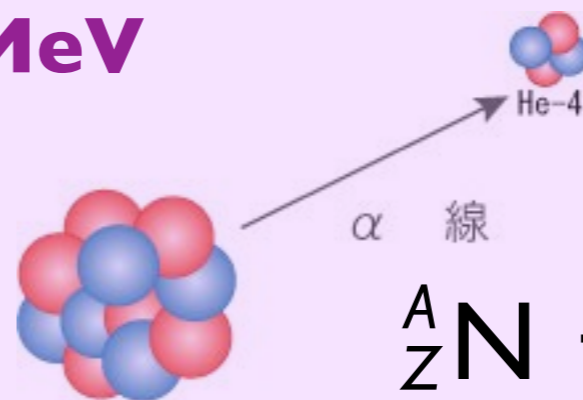
陽子過剩核
β⁺ 壊変 (崩壊)



軌道電子捕獲 (EC)

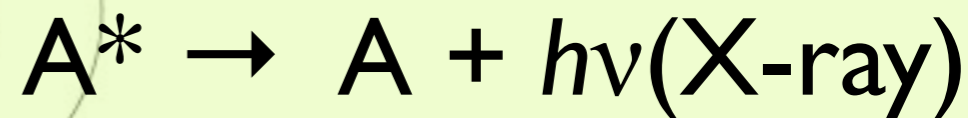
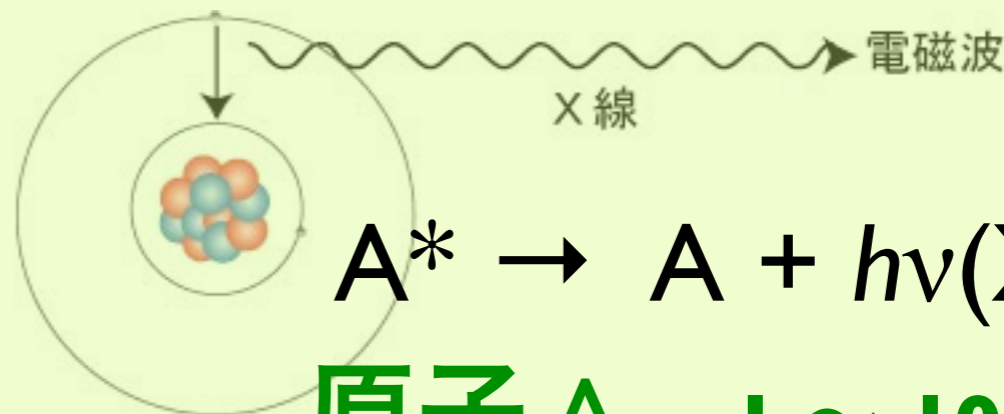
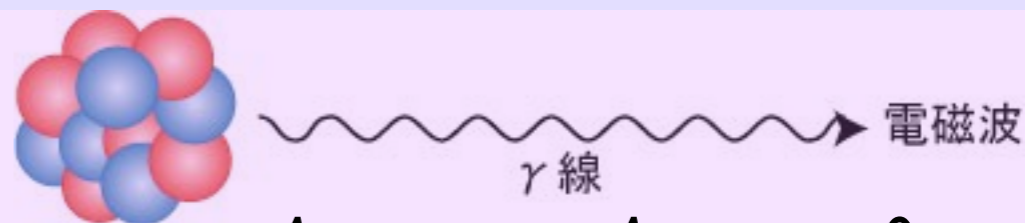
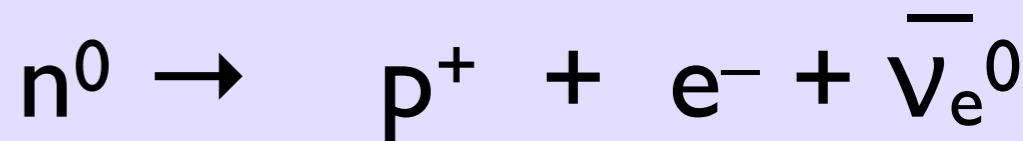
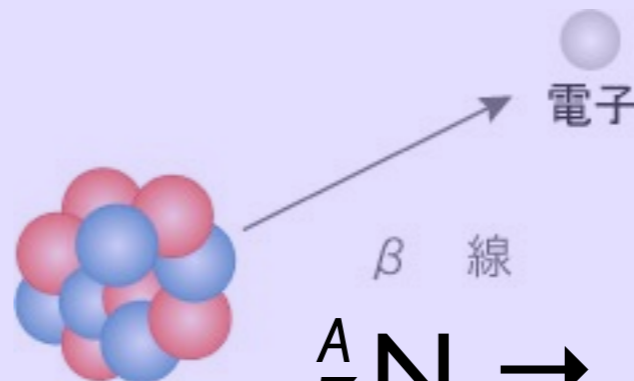


原子核 N



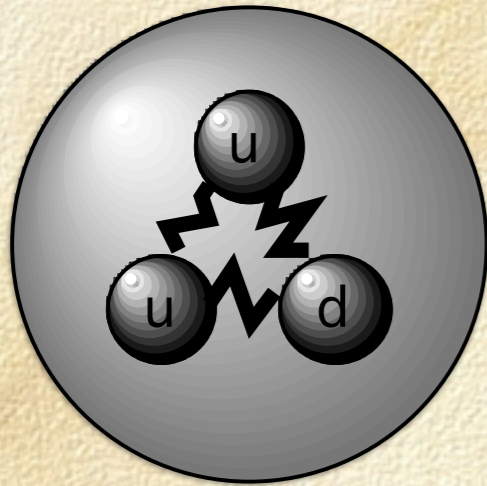
中性子過剩核

β⁻ 壊変 (崩壊)



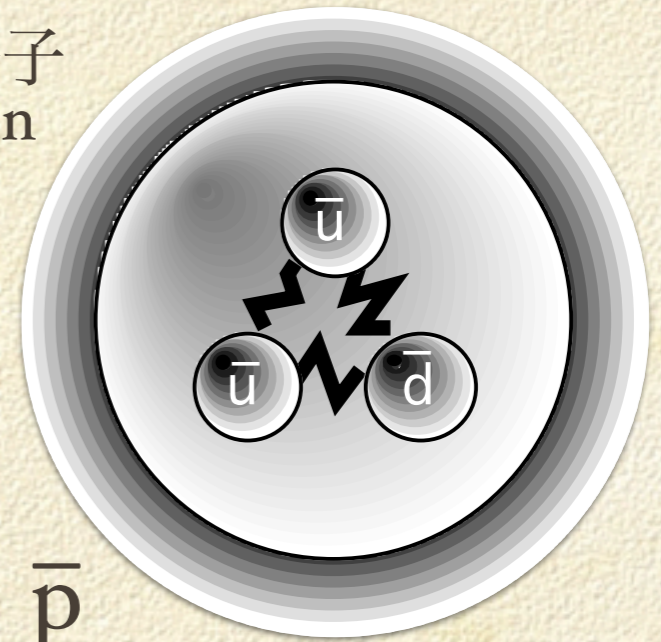
原子 A 1 ~ 100 keV

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



放射線医療：診断

e^+



陽電子 positron

電子 electron



e^-

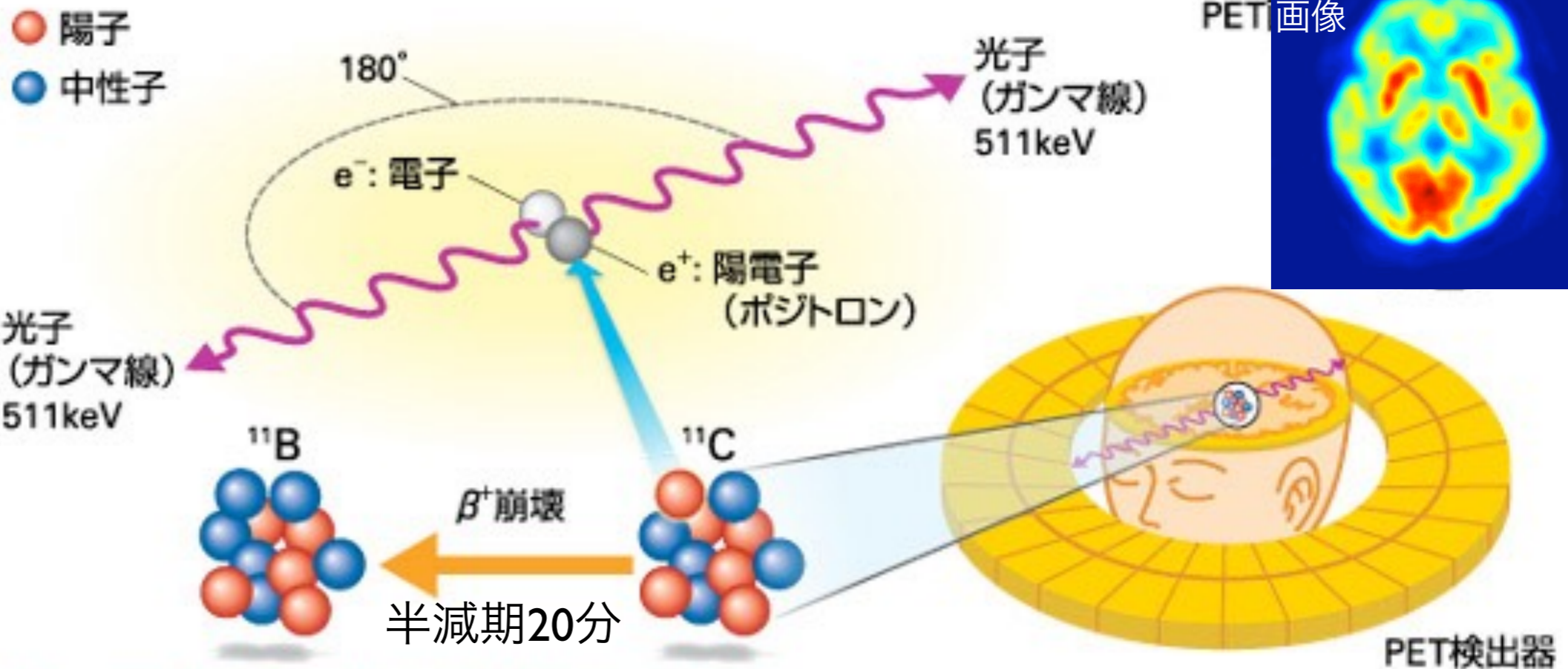
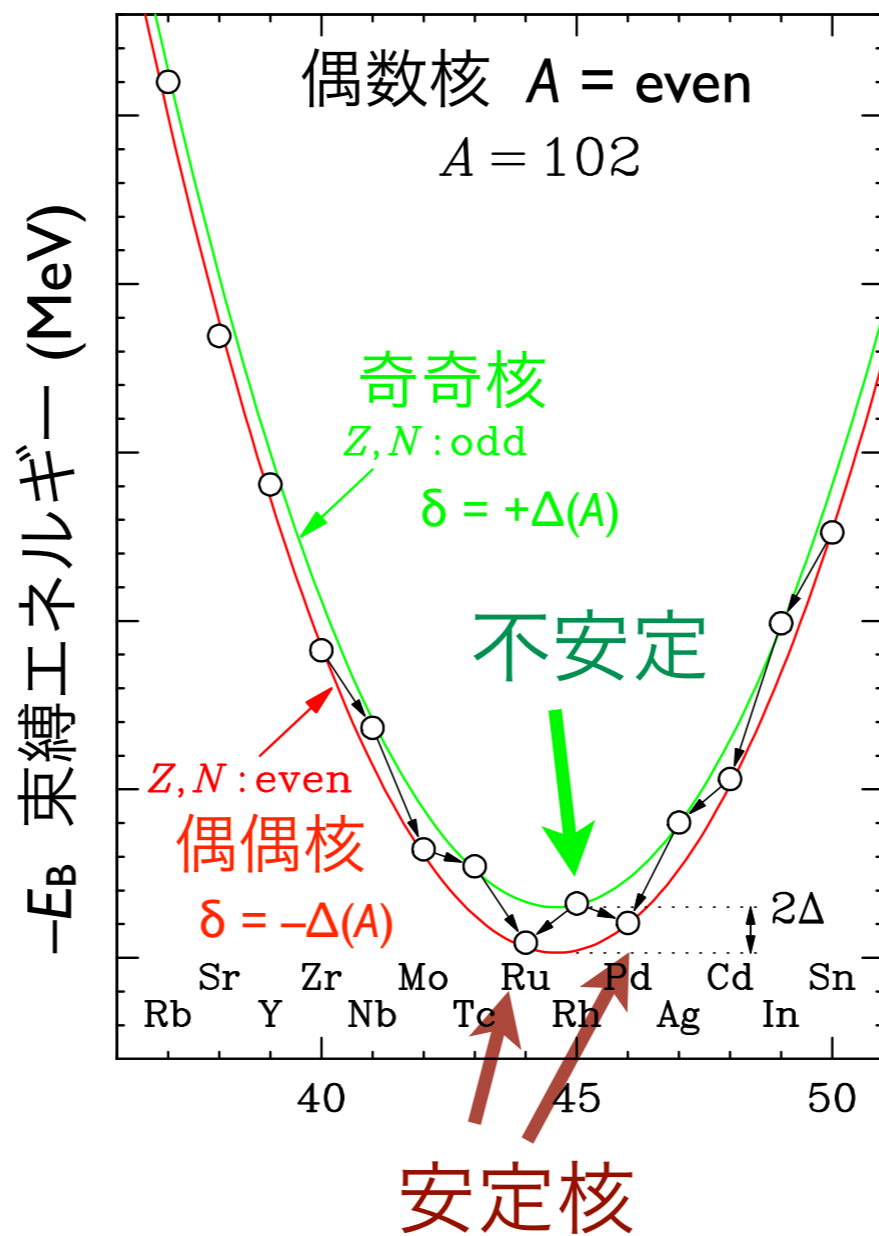
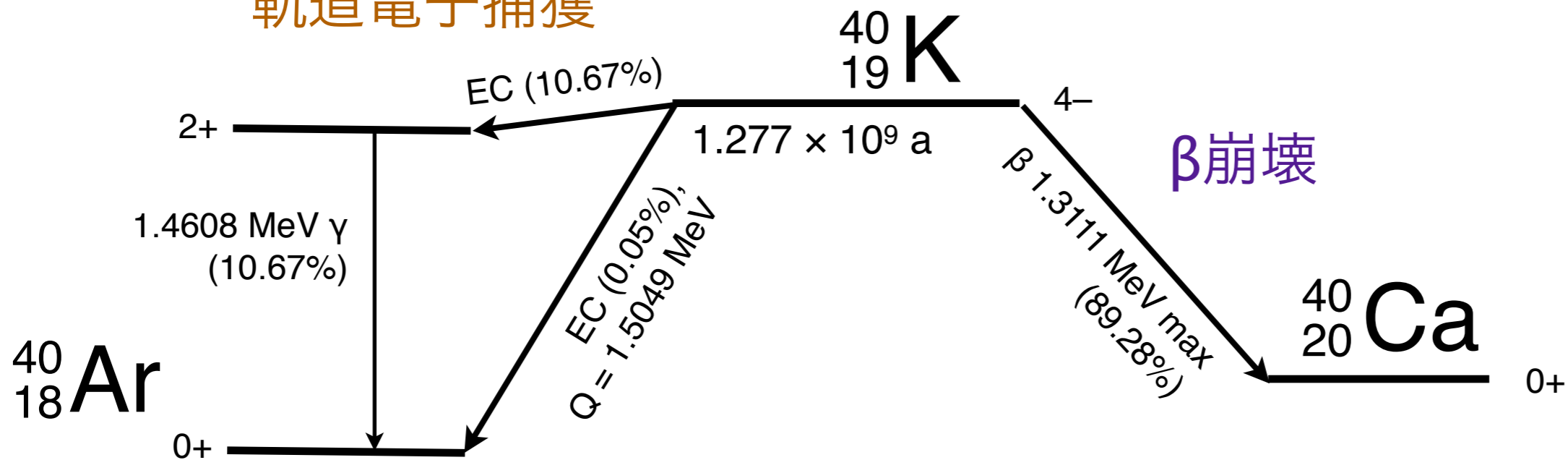


図 1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

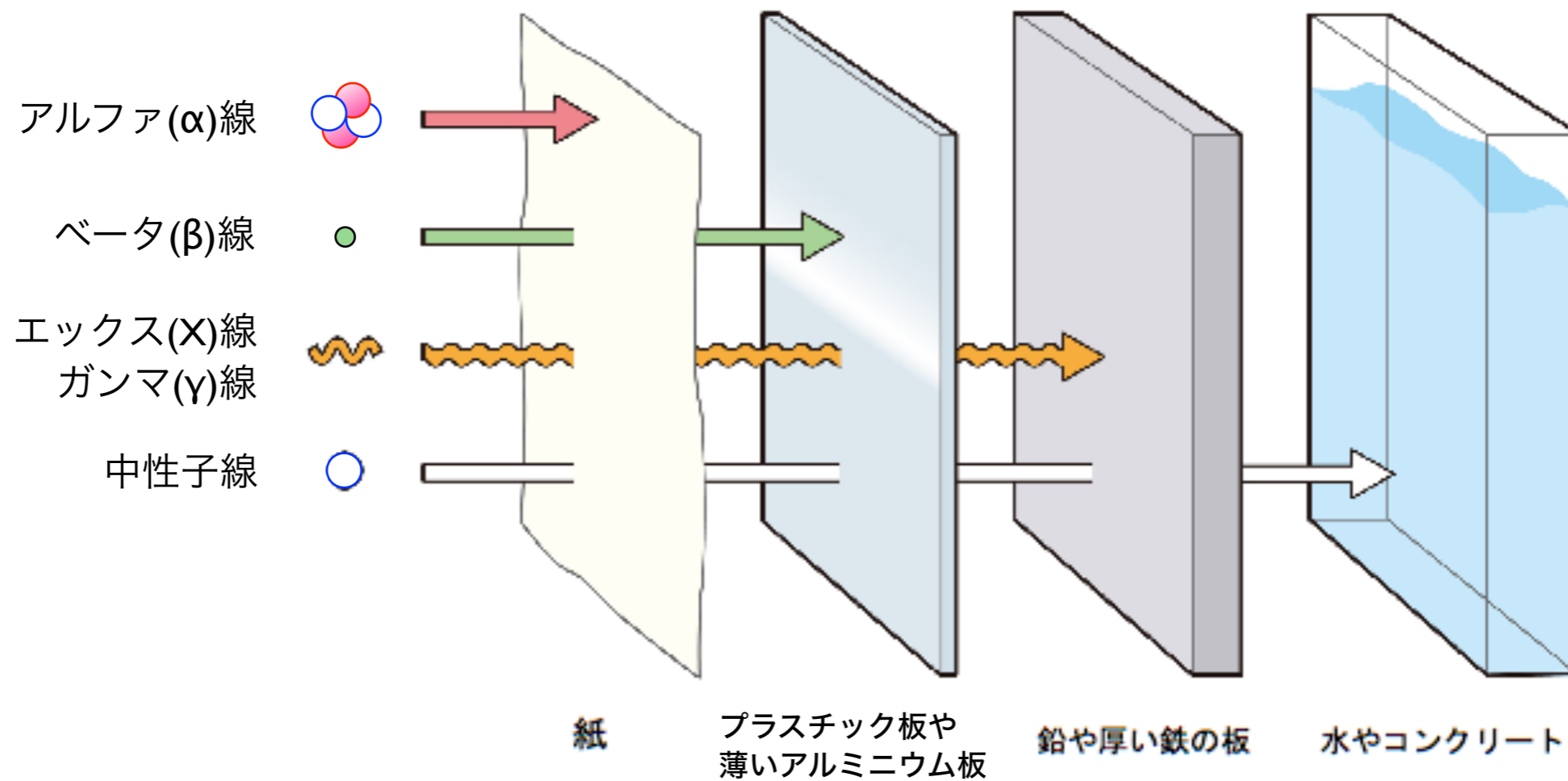
調べたい分子に陽電子を放出する放射性核種を付け、静脈注射によって投与する。例えば、炭素 11 (^{11}C) はホウ素 11 (^{11}B) に崩壊するとき、陽電子を 1 個放出する。その陽電子が近くにある電子と衝突し、両方向にガンマ線が放出される。検出器がガンマ線をとらえることで断層画像が得られ、分子がどこに、どれだけ存在しているのかを知ることができる。

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

軌道電子捕獲



放射線の種類と透過力

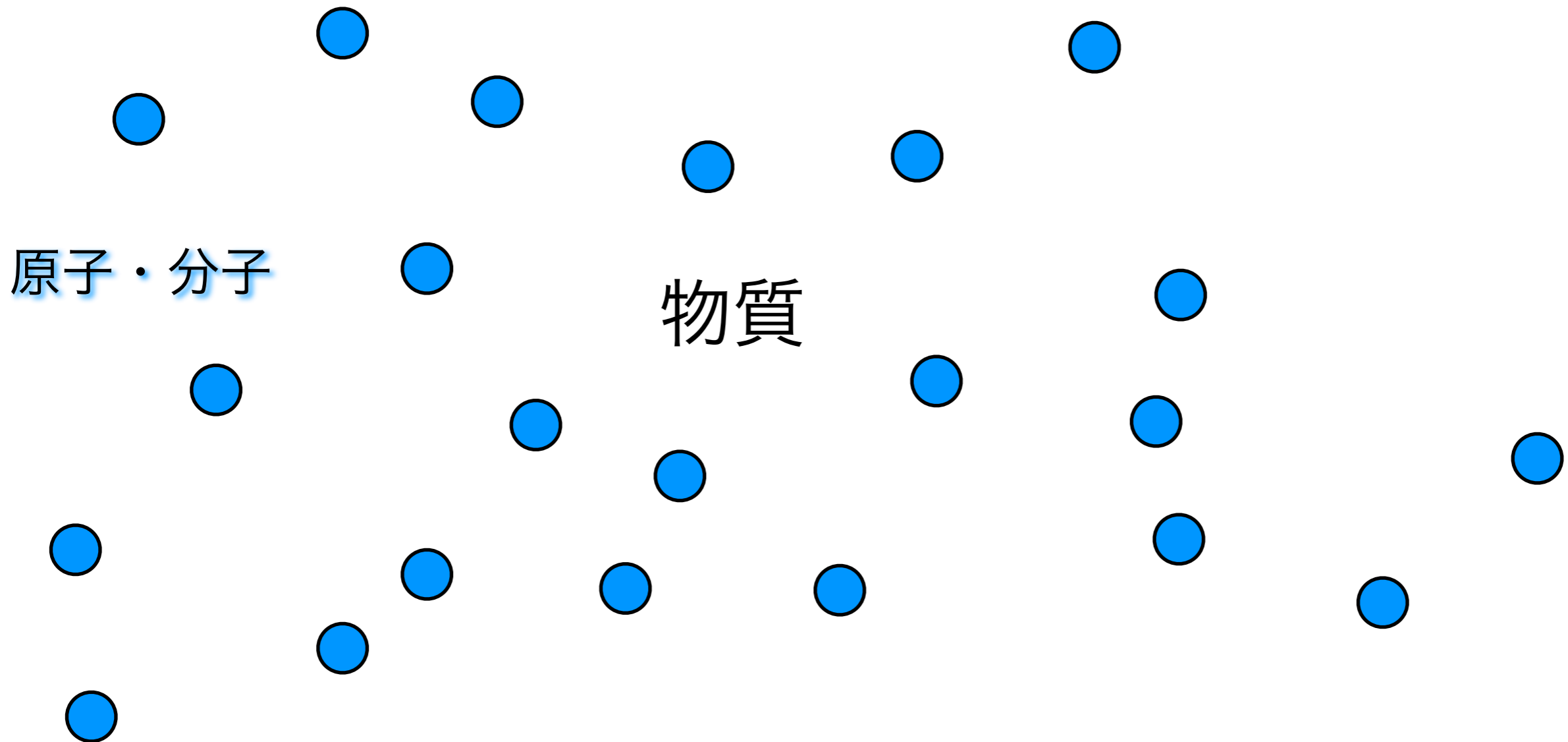


放射線と物質との相互作用

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



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)

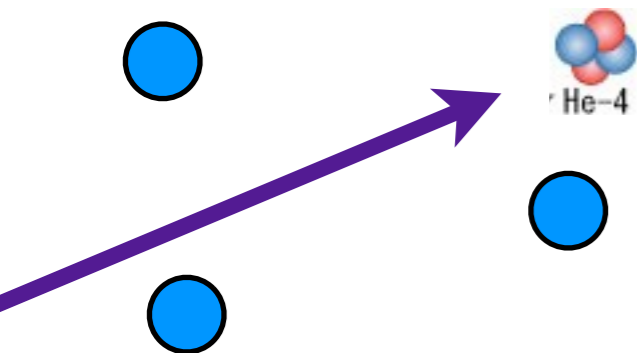
原子核は重いので、原子核に与える運動エネルギーは小さい。

● (電子核衝突阻止能は小)

原子・分子

物質

荷電粒子



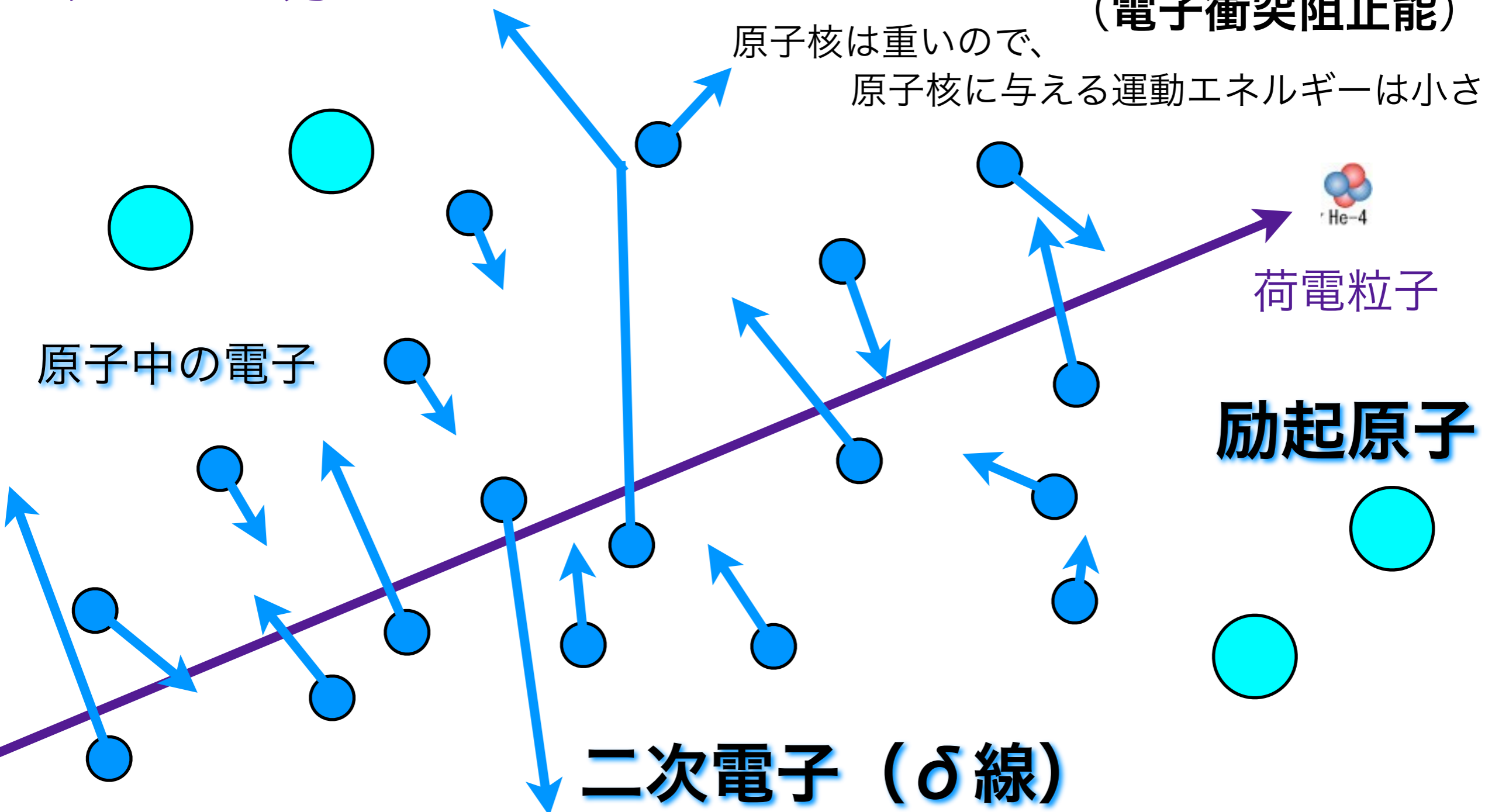
荷電粒子のエネルギー損失過程

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

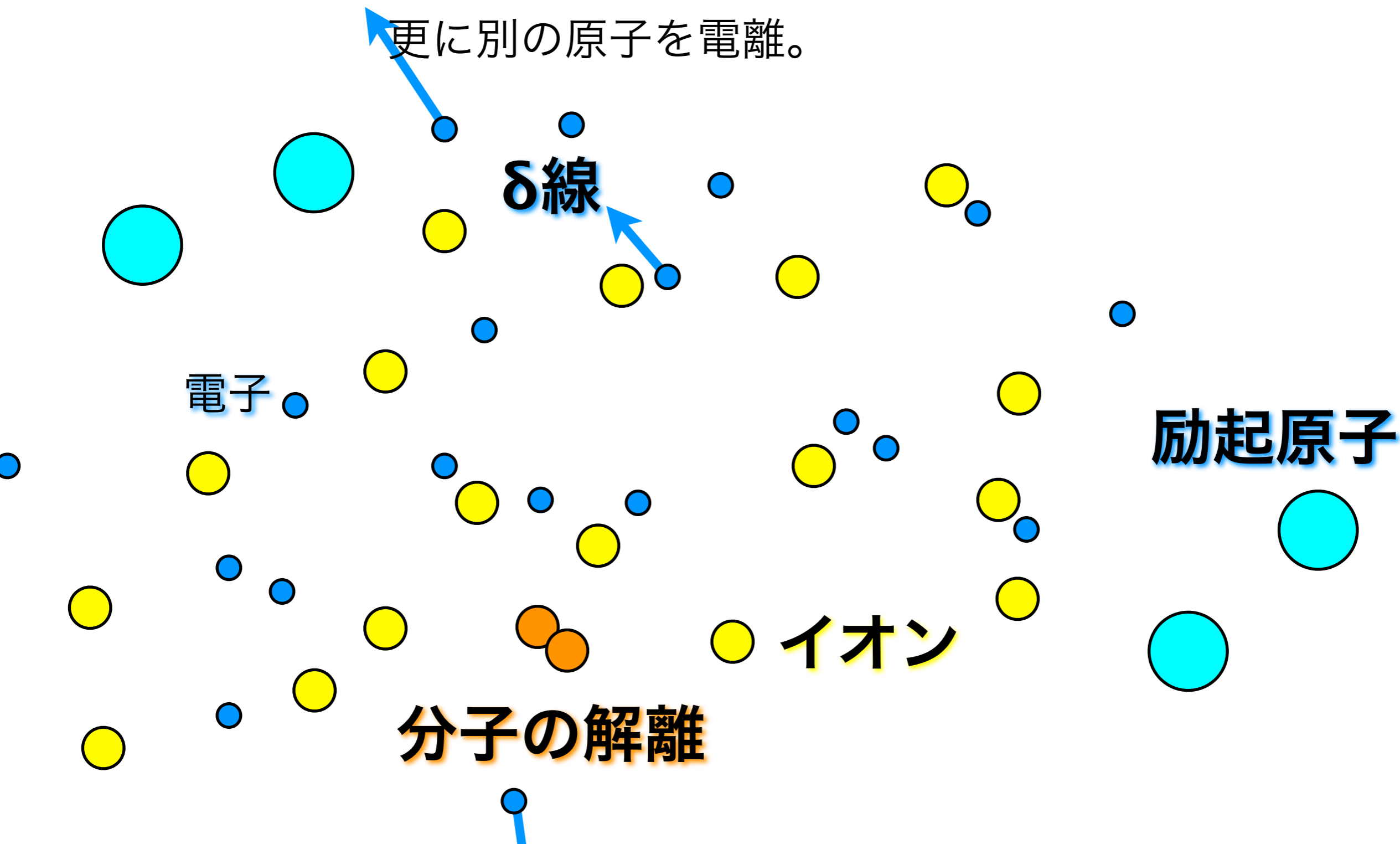
励起原子

二次電子 (δ線)

原子中の電子

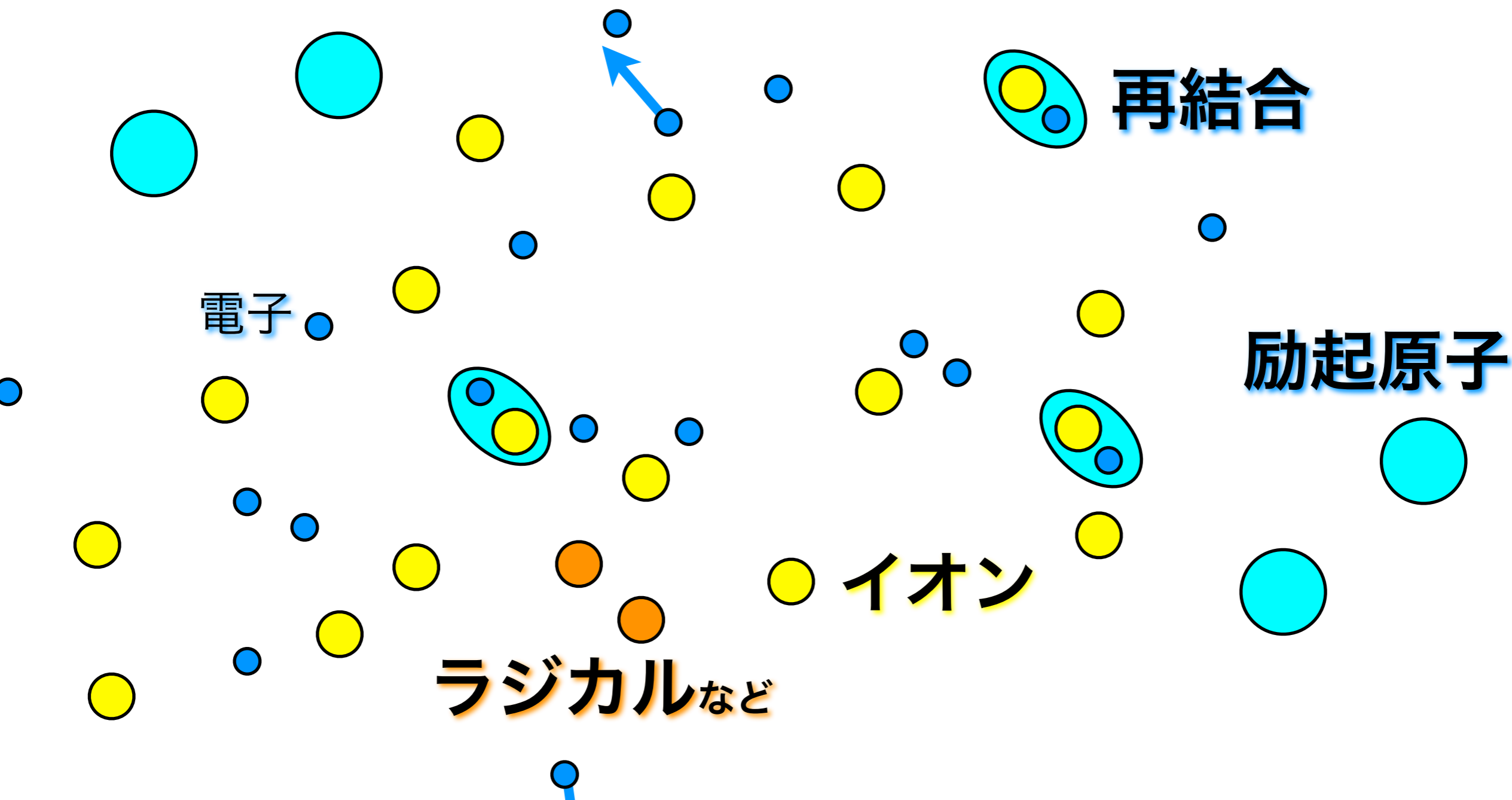
荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

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。



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。また再結合によりX線が発生。



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

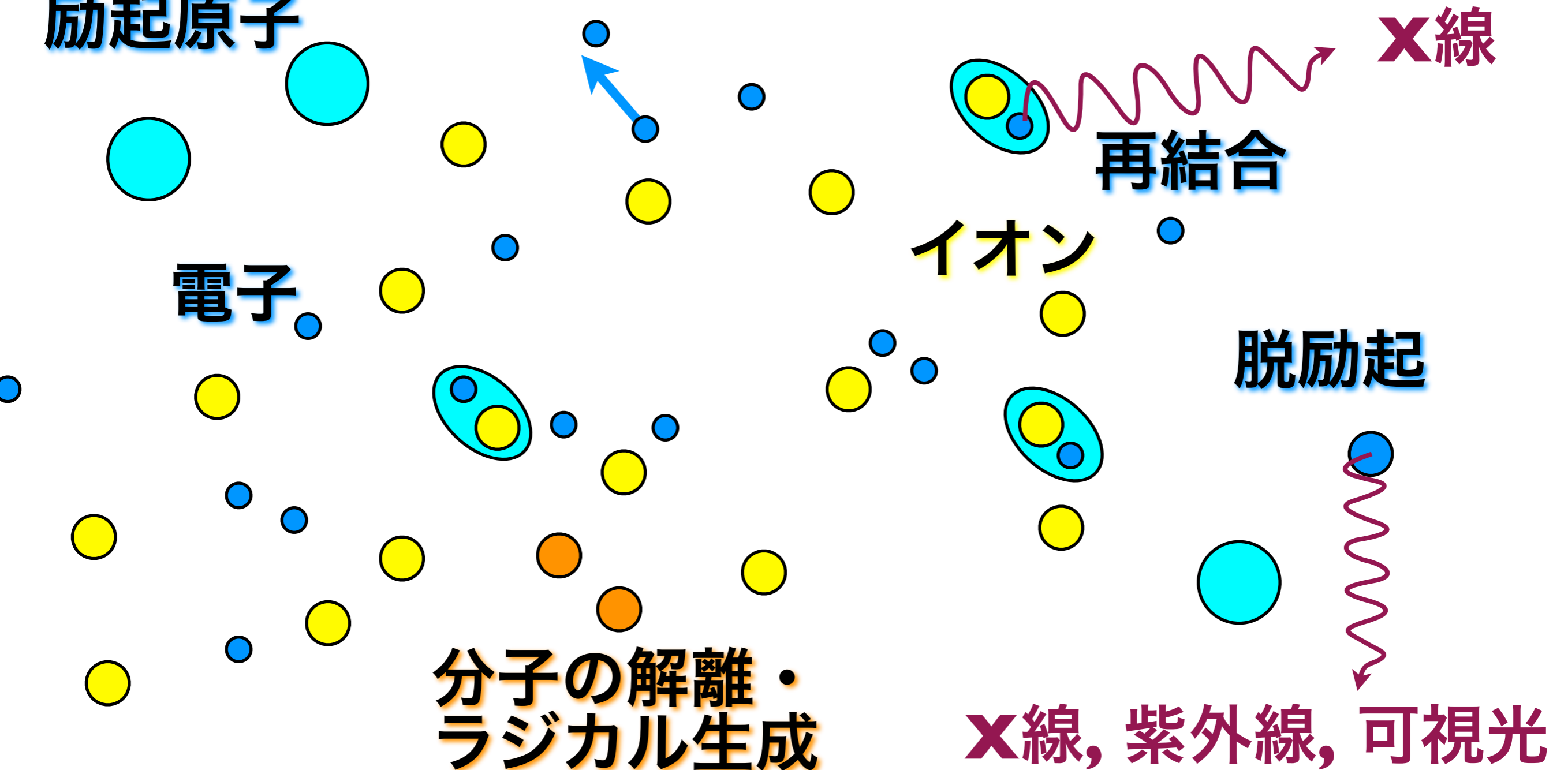
再結合

脱励起

分子の解離・ラジカル生成

X線, 紫外線, 可視光

X線



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

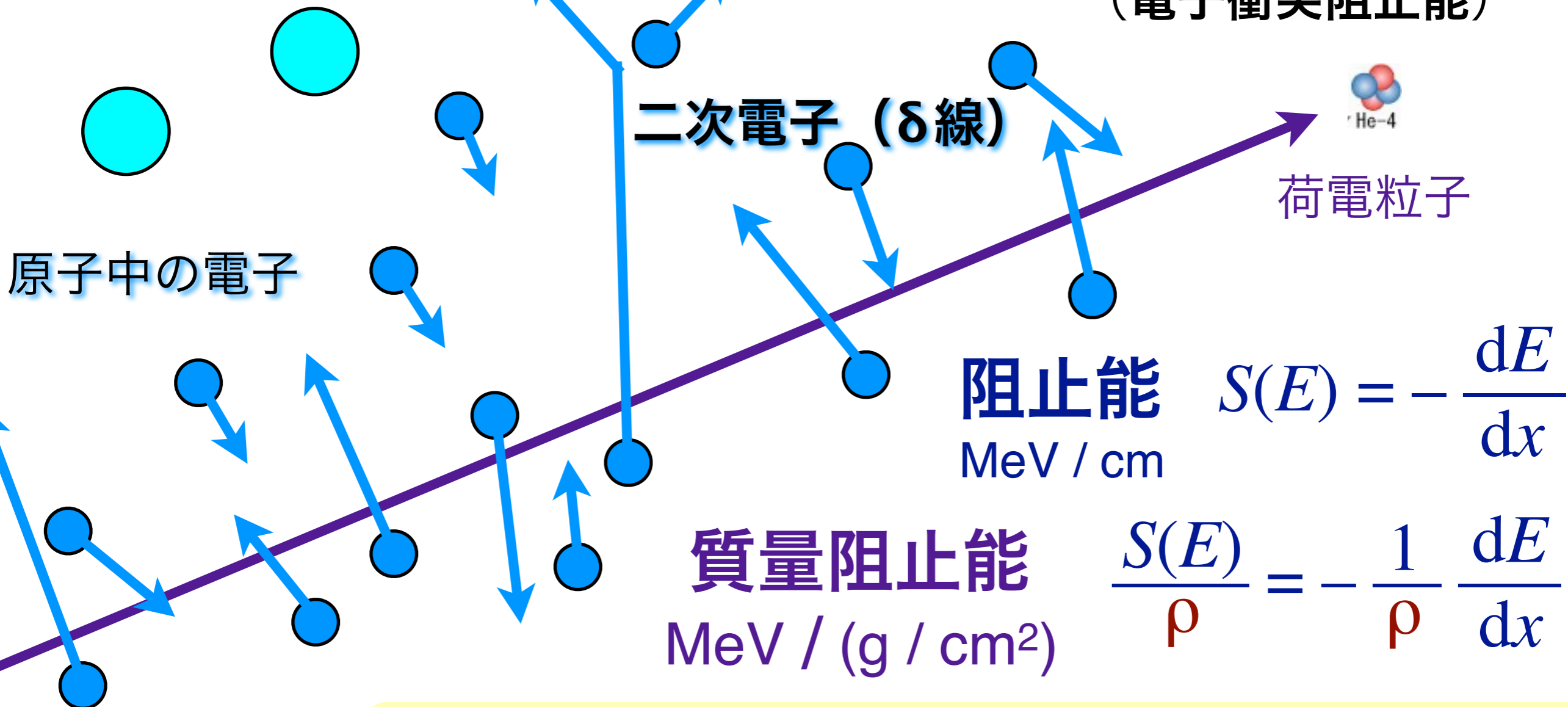
(放射線による原子・分子の蛍光)

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

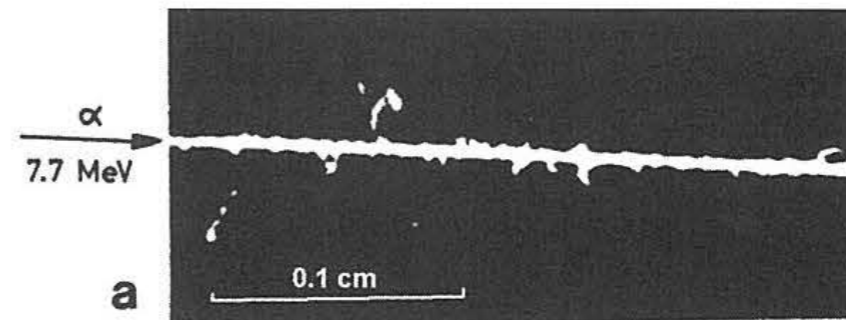


阻止能は散乱する電子の密度に比例する。
質量阻止能は物質の種類にあまりよらない。

放射線の軌跡

霧箱による観察

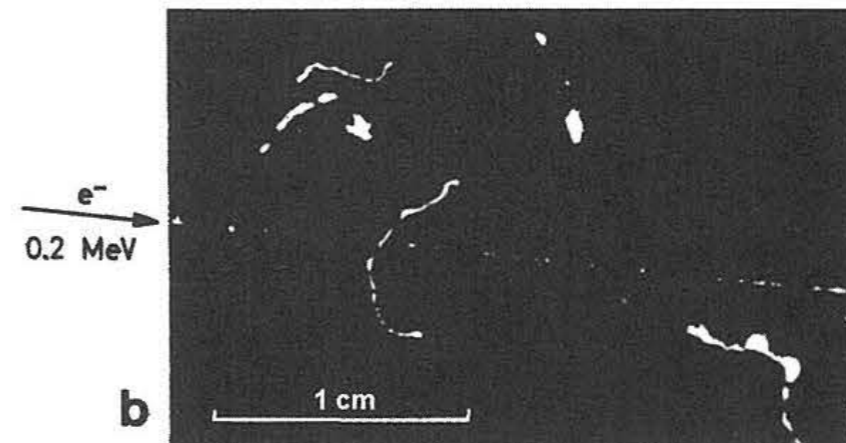
α -ray
7.7 MeV



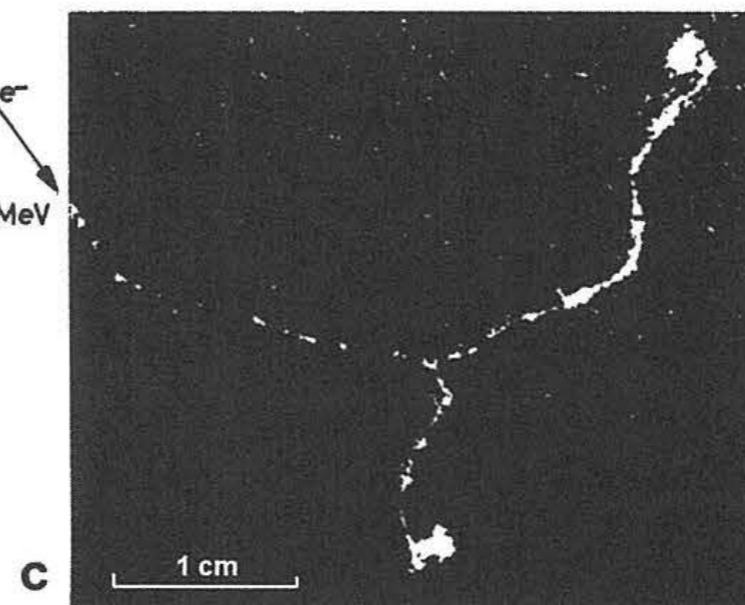
0.2 MeV

β -ray

0.056 MeV



e^-
0.056 MeV



γ -ray
0.047 MeV

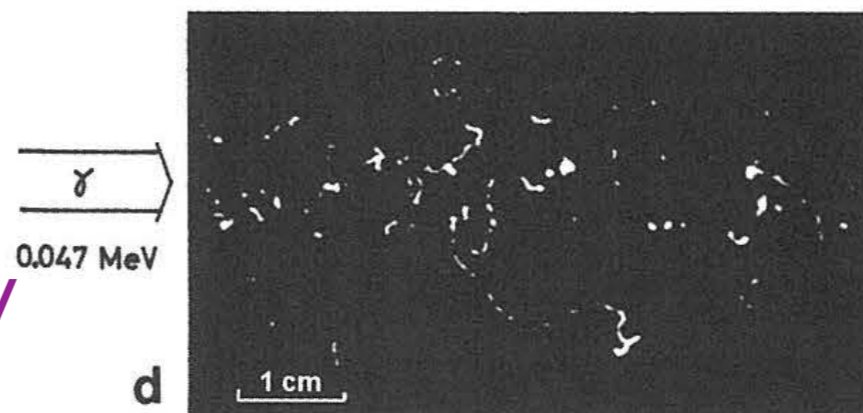


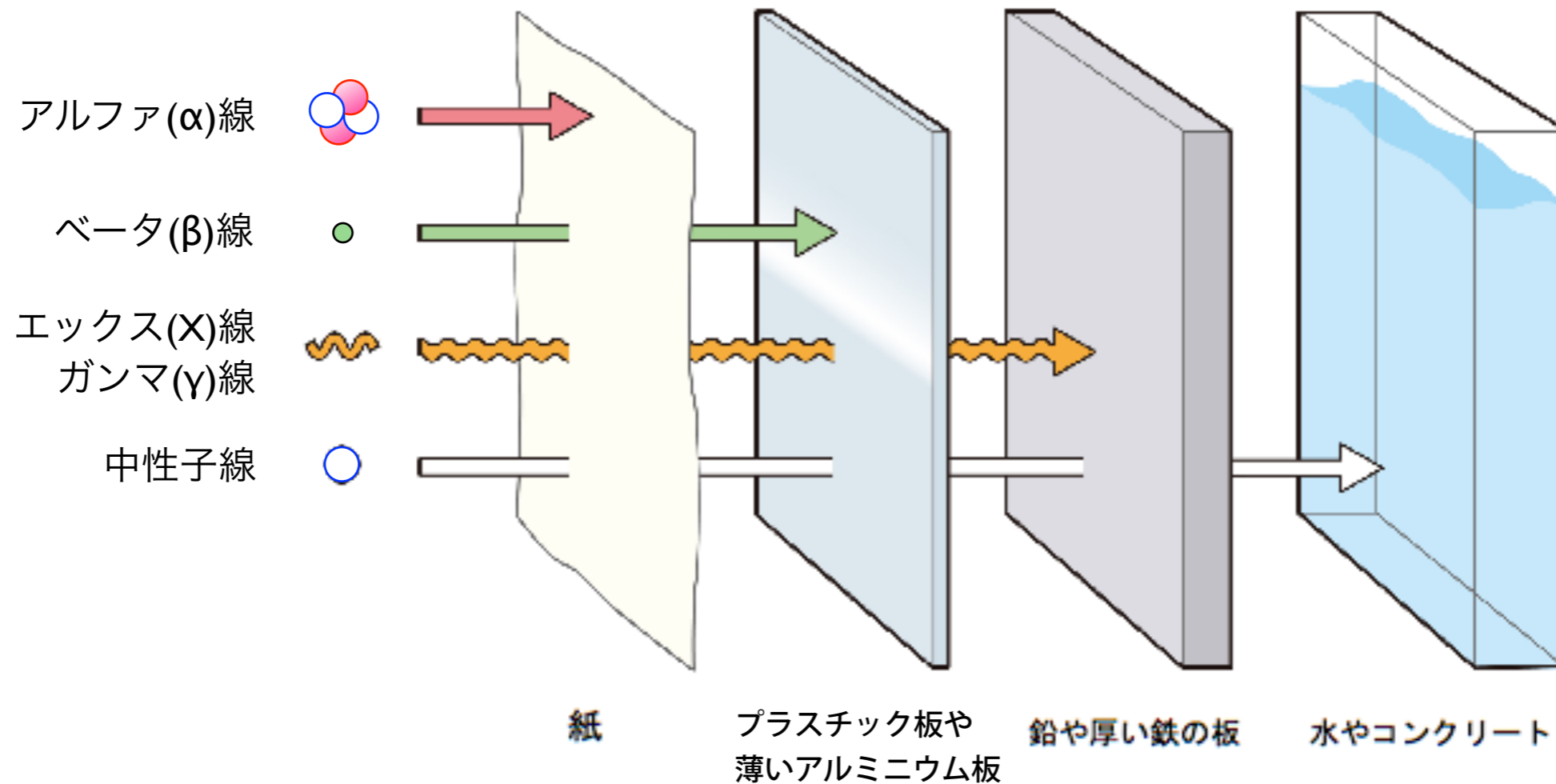
Figure 7.5 Cloud chamber tracks of α , β , (e^-), and γ -rays at 1 bar in air ((a), (b), and (c)) and in methane (d). (From W. Gentner, H. Maier-Leibnitz, and H. Bothe.)

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。

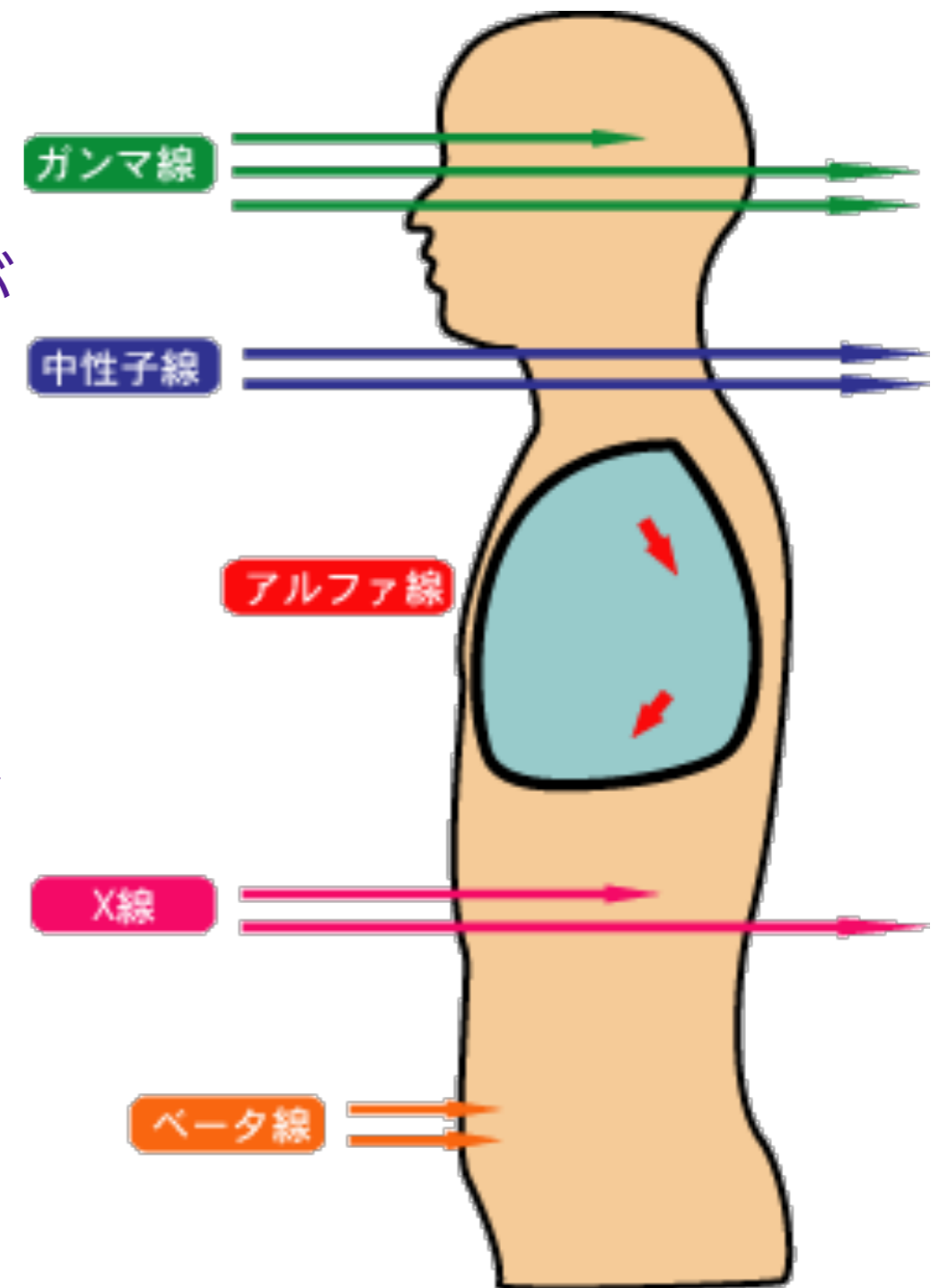


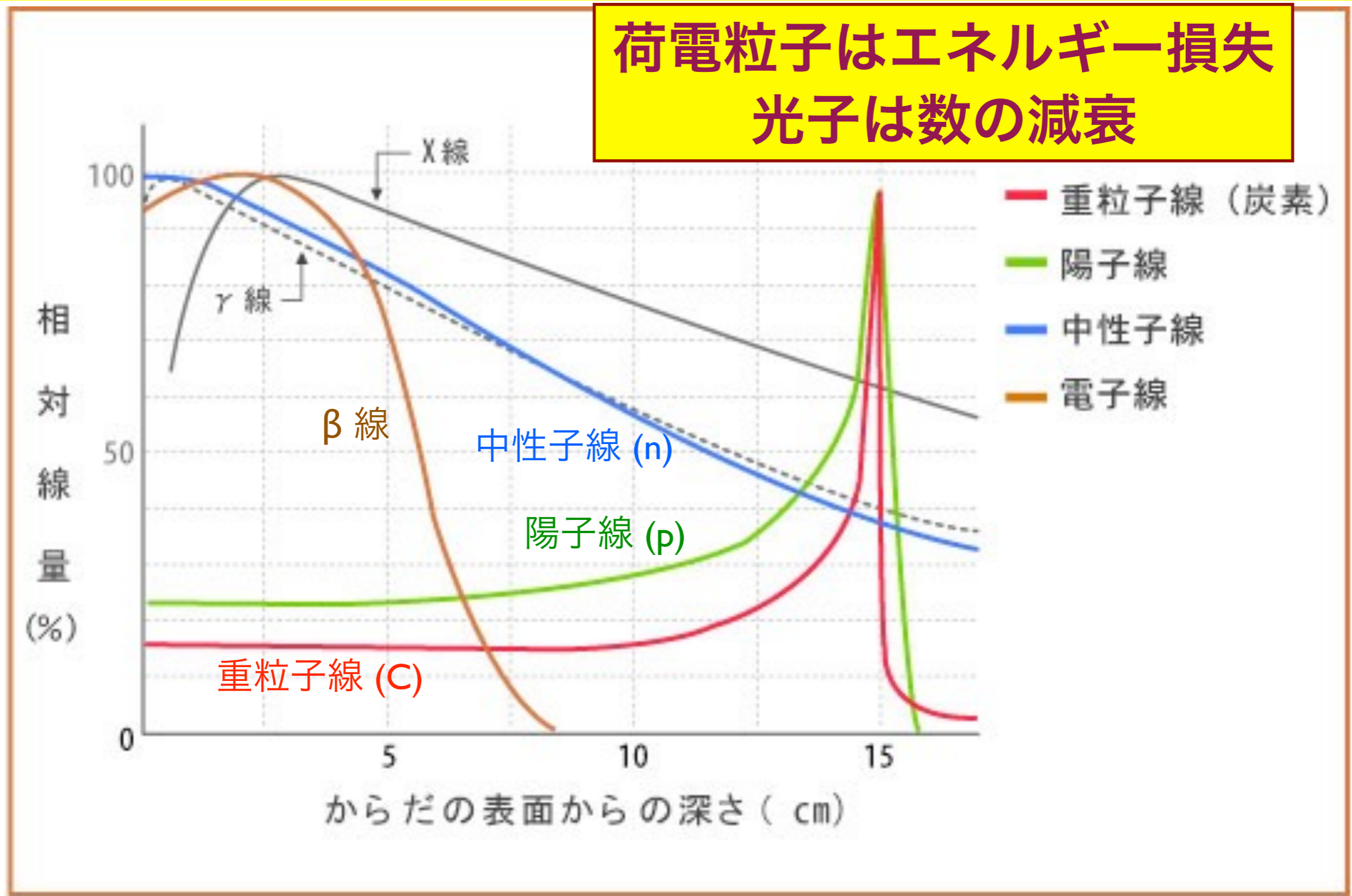
図3 人体を透過する放射線

陽子(p)、 α 、重粒子線は飛程が揃っている。

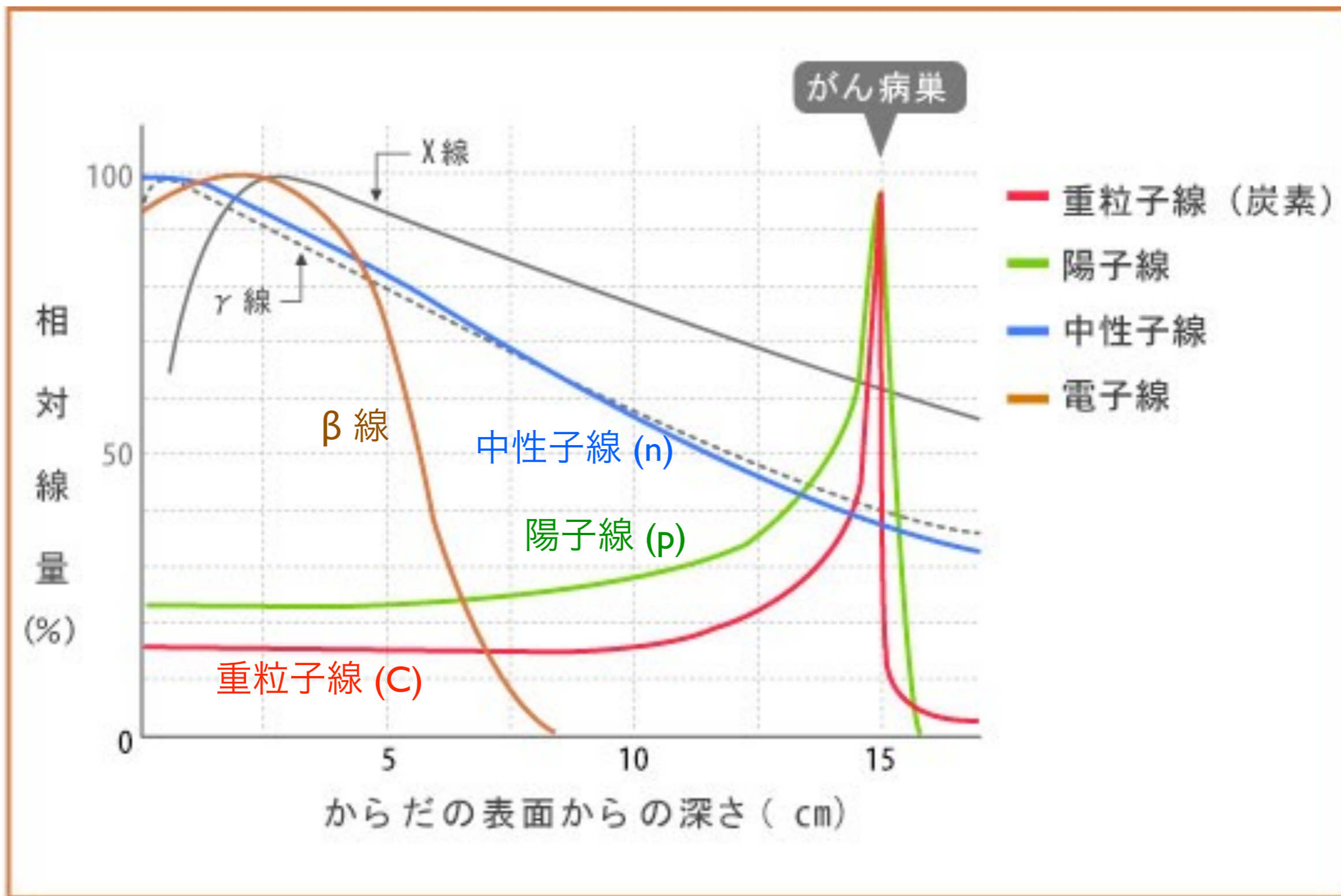
電子(β)は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

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**

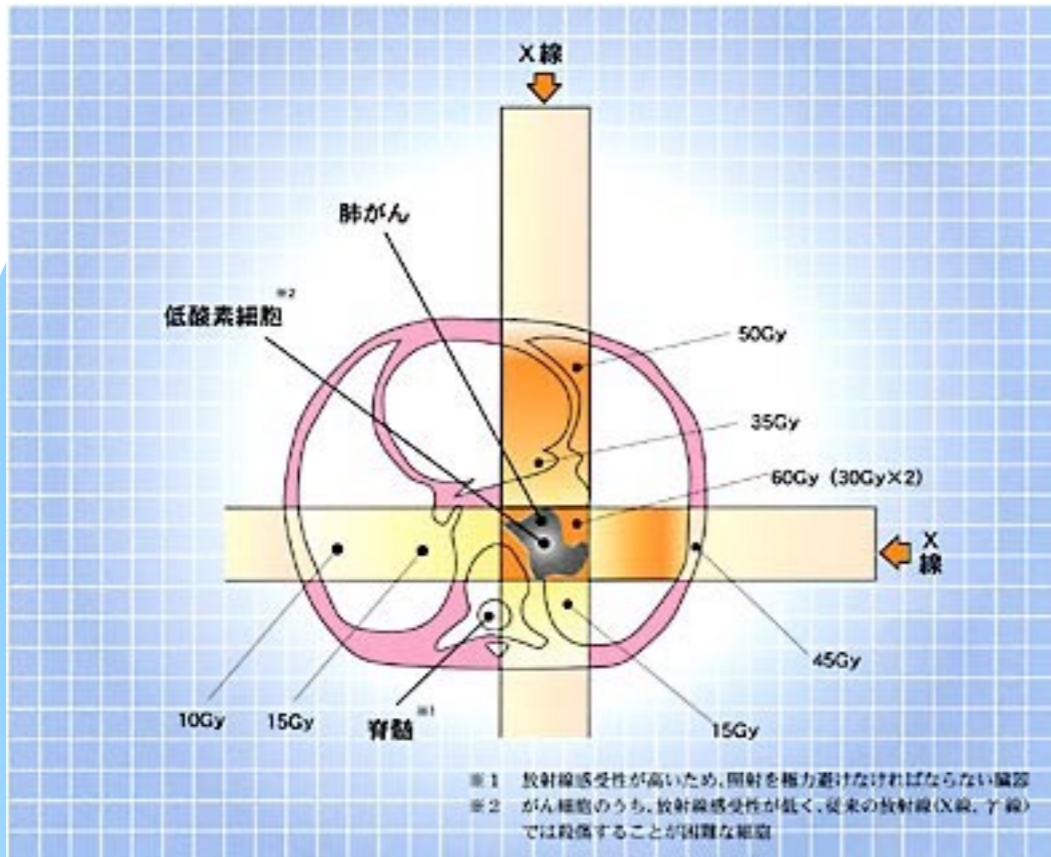


Bragg peak



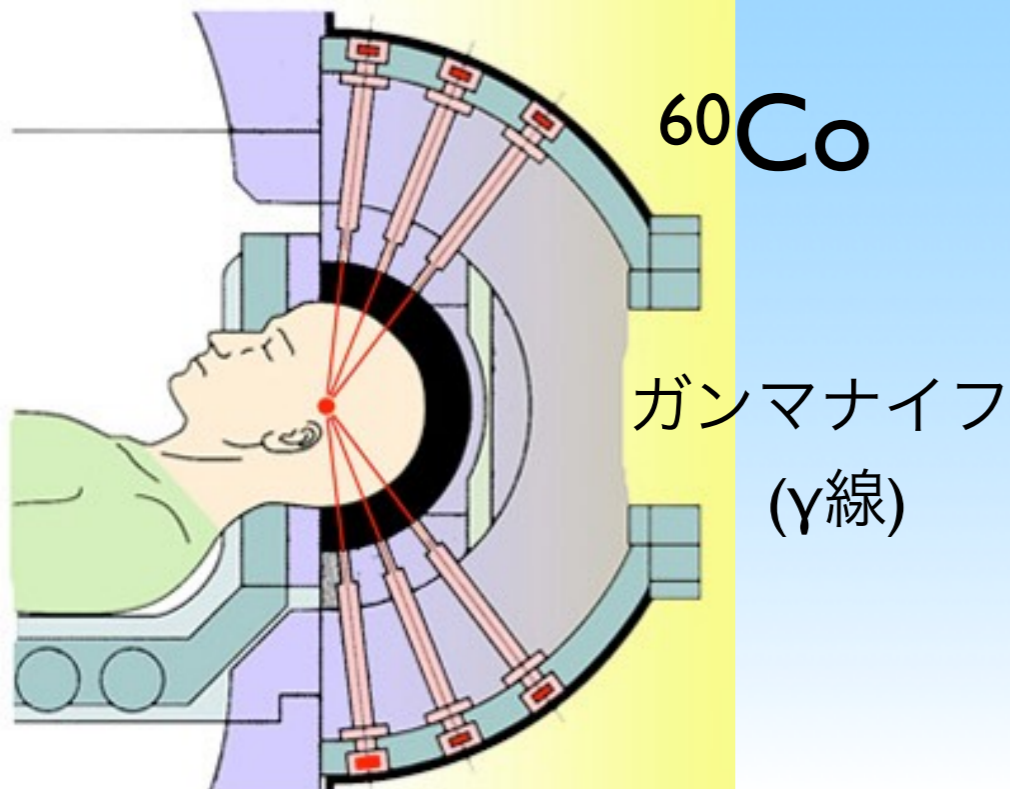
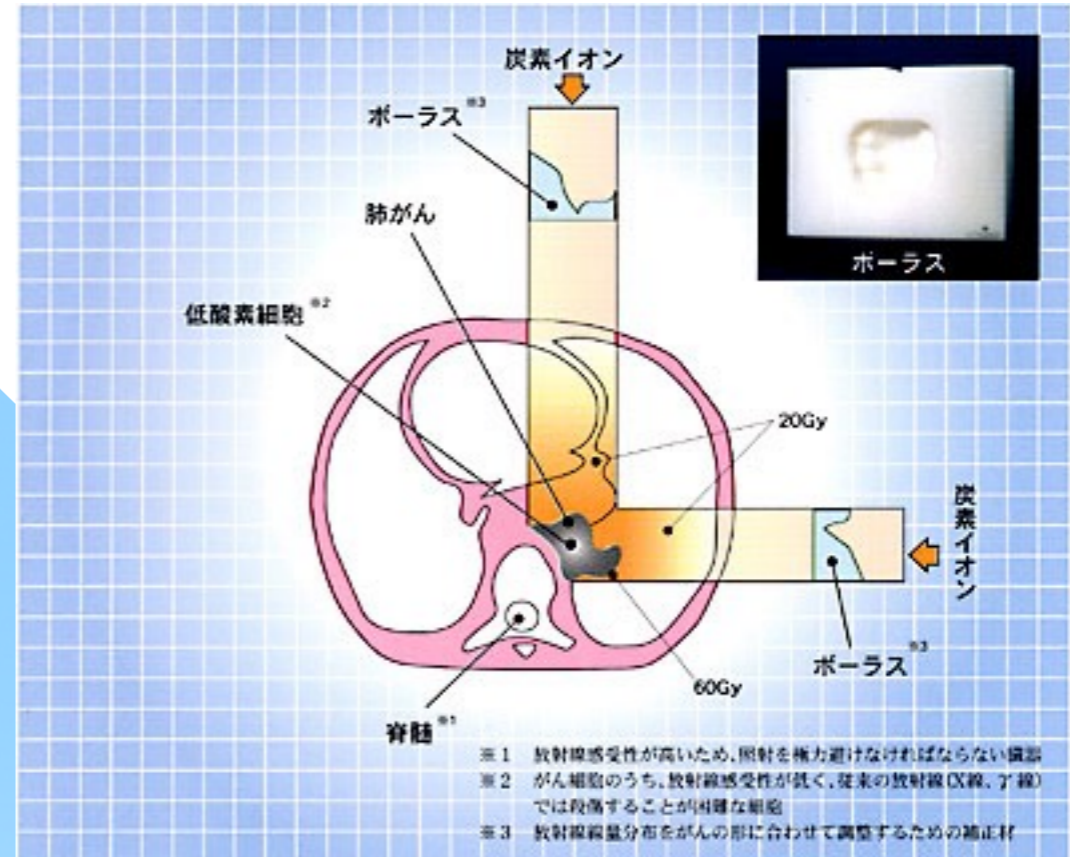
放射線医療：がん治療

X線



数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



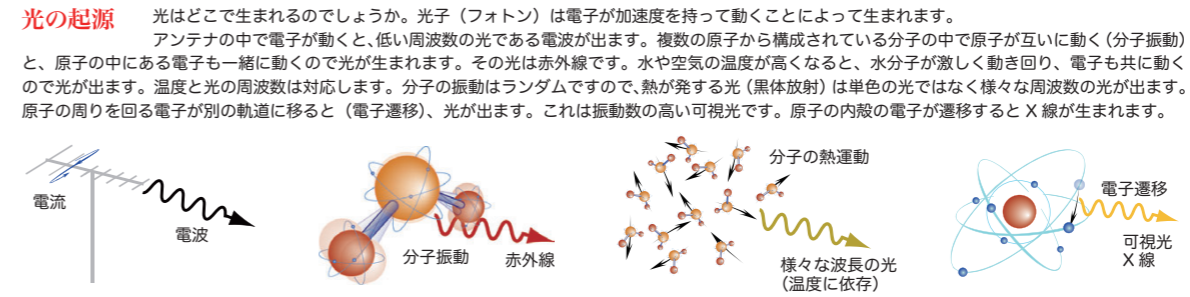
サイバーナイフ
(X線)

放射線と物質との相互作用

光子の減衰

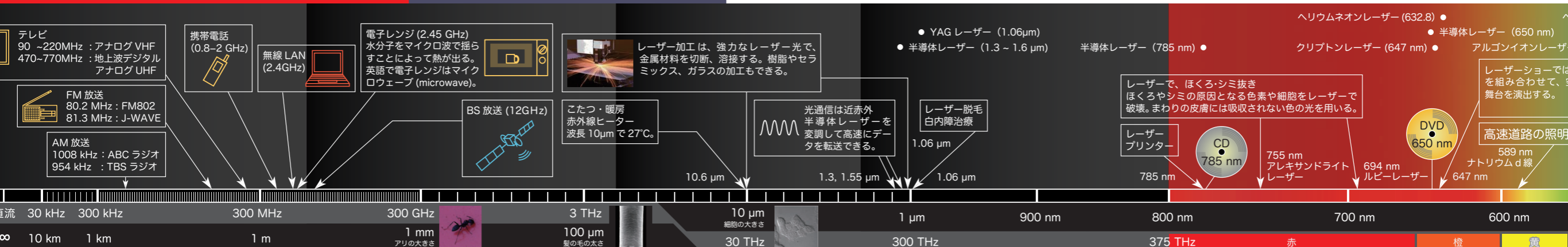
光マップ THE LIGHT MAP

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。



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表されています。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で表されています。



電波領域 (電波も光)

アンテナで送受信

ICカード (電車で乗るのもラクラク。)

MRI (核磁気共鳴) (磁場と電波を使って体の輪切りに見せる。脳梗塞などの早期発見に有効。)

速度取締り (レーダーの原理。)

レーダー (電波を照射して反射波を検出し、飛行機の位置を捕捉したり、降雨や降雪を観測する。ステルス戦闘機は奇抜な外形や電波吸収材料で電波の反射を抑える。)

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。)

ハッブル宇宙望遠鏡は、近赤外光検出で63光年離れた惑星でメタンと水を見つけ、太陽系外で有機物が確認された。宇宙の他の星にも生物がいるかも！

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。)

ハッブル宇宙望遠鏡は、近赤外光検出で63光年離れた惑星でメタンと水を見つけ、太陽系外で有機物が確認された。宇宙の他の星にも生物がいるかも！

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10 μm。)

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 (アントシアニン、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、アントシアニンがつけ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。

可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

花火の色は、金属元素の炎色反応の色。それぞれの元素特有の色を出し燃える。

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

向かって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。もとの光から散らさ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。最先端の光学には、**負の屈折率**の物質(逆方向に光が曲がる)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

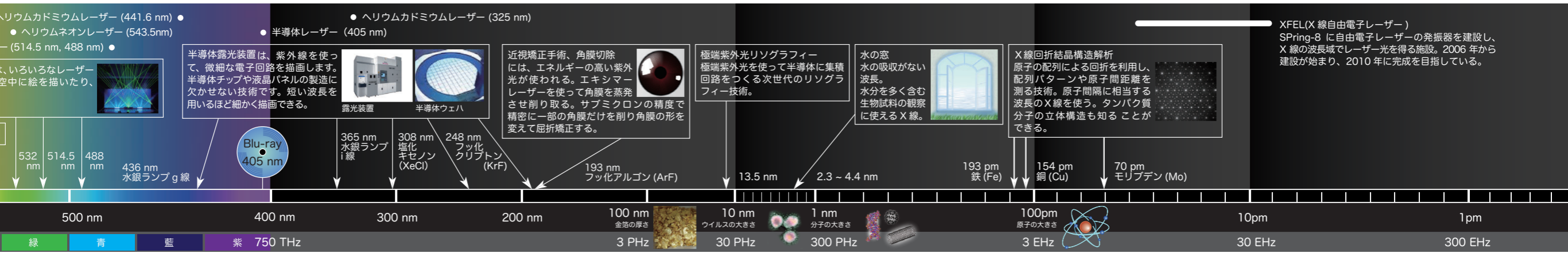
アメリカで光が進む

「波」として伝わります。粗密波（縦波）の音波とは異なり、光は進行方向と直交する方向に電場と磁場が交流して振動する電磁波です。単位は Hz)、波長は 1 回振動する間に真空中を進む距離 (単位は m) 光が一秒間に進む距離、つまり速度を表します。真空中の光の速度は、 3×10^8 m/s となります。

光が非常に弱くなってくると、光が粒々であることが見えてきます。光を光子 (フォトン) といい、光子の粒々がたくさん集まって「電子」の流れの集まりで、水が「水分子」の集まりのように、密度が決まります。光子一つ一つは、光の色、つまり波長 (あるいは周波数) によって決まっています。

光に関連するノーベル賞

- | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-------|--|-------|---|-------|---|
| 1901年 | X線の発見 (W. レントゲン) | 1924年 | X線分光学 (K. M. G. シーグバーン) | 1961年 | γ線の共鳴吸収とメスbauer効果の発見 (R. L. メスbauer) | 1997年 | レーザー冷却法による中性原子の凝縮 (S. チュー、C. コーエンタウジ、W. D. フィリップス) (物理学賞) |
| 1907年 | 干渉計の考案と分光学の研究 (A. マイケルソン) | 1927年 | コンプトン効果の発見 (A. H. コンプトン) | 1964年 | レーザー、レーザー効果の発見 (C. H. タウンズ、N. G. バソフ、A. M. プロホロフ) | 1999年 | フェムト秒化学 (A. H. ズウェイル) (化学賞) |
| 1908年 | 光の干渉を利用した天然色写真 (G. リップマン) | 1930年 | ラマン効果の発見 (C. V. ラマン) | 1964年 | X線回折法による生物物質の分子構造の研究 (D. M. ホジキン) (化学賞) | 2000年 | 高速・光電子技術のための半導体ヘテロ構造の開発 (Z. I. アルフォーロフ、H. クレーマー) |
| 1909年 | 無線通信 (G. マルコーニ、C. F. ブラウン) | 1932年 | 量子力学の創始 (W. K. ハイゼンベルグ) | 1965年 | 量子電磁力学 (朝永振一郎、J. シュウィンガー、R. P. ファインマン) | 2002年 | 宇宙ニュートリノ検出 (R. デービス Jr.、小柴昌俊) |
| 1914年 | 結晶によるX線回折 (M. フォン・ラウエ) | 1936年 | X線、電子線回折による分子構造の研究 (P. J. W. デバイ) (化学賞) | 1966年 | 光ポンピング法による原子の励起 (A. カスレ) | 2002年 | タンパクのレーザーイオン化法 (J. B. フェン、田中耕一) (化学賞) |
| 1915年 | X線結晶解析 (W. H. ブラッグ、W. L. ブラッグ) | 1953年 | 位相差顕微鏡の発明 (F. ツェルニケ) | 1971年 | ホログラフィーの発明 (D. ガボア) | 2003年 | 核磁気共鳴画像化法 (P. ラウターバー、P. マンスフィールド) (生物・医学賞) |
| 1918年 | エネルギー量子説 (M. K. E. L. プランク) | 1954年 | 波動関数の統計的解釈の提唱 (M. ボルン) | 1974年 | 電波天文学における先駆的研究 (M. ライル) | 2005年 | 光コヒーレンスの量子理論 (R. J. グラウバー) |
| 1921年 | 光電効果の法則の発見 (A. アインシュタイン) | 1954年 | 原子核反応とγ線に関する研究 (W. ボーテ) | 1979年 | X線 CT (G. N. ハウンズフィールド、A. M. コーマック) (生物・医学賞) | 2005年 | 光周波数コム技術などレーザー精密分光法の開発 (J. L. ホール、T. W. ヘンシュ) |
| 1923年 | 光電効果の研究 (R. A. ミリカン) | 1958年 | チェレンコフ効果の発見 (P. A. チェレンコフ、I. M. フランク、I. E. タム) | 1981年 | レーザー分光学 (N. ブルームバーク、A. L. ショーロー) | | |
| | | | | 1981年 | 高分解能光電子分光法 (K. M. シーグバーン) | | |



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

目に見えない光、外殻電子遷移エネルギー

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、改質に紫外線を使う。

紫外線殺菌
熱を与えずに、水、食品、医薬品などを殺菌する。

真空紫外
200nm~10nmの紫外線は大気中を伝わらない。太陽からの真空紫外線は、地表まで到達しない。微小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。

オゾン層
地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

光触媒は、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

SPring-8
兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長 1.4 km の蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。

動物の目には2色から4色を見分けるセンサーがあり、それらに入る光のバランスで色を認識する。人間は、550nmの波長を、最も明るく感じる。

昆虫の可視域
ミツバチの可視域は紫外から黄色の光まで。人間には見えない花の様相が見える。

ブラックランプの発する紫外線は目に見えないが、周りの物質を発光させる。

オゾン層

地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

光触媒は、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

SPring-8

兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長 1.4 km の蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。

軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

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。

ウォルター鏡

ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。

フレネルゾーンプレート

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

内殻電子遷移エネルギー

レントゲン写真
からだが見えぬ。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線天文衛星さすく
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

原子核・素粒子の遷移エネルギー

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。

光は横波

水面や金属の表面、照葉樹の葉の表面で反射すると、電場が反射面に垂直な方向に揺れている光がよく反射され、光の揺れる方向に偏りが生じます。これを偏光といいます。

偏光フィルターは、特定の方向に揺れる光だけをカットします。偏光メガネやカメラのフィルターに使われます。テレビやパソコンの液晶ディスプレイは偏光を利用した表示装置です。電圧で液晶分子の向きをそろえ、光の透過を偏光制御します。

光の速度は

真空中で1秒間に30万 km。これは1秒間に地球を7周半回ることができる速さです。月までは1.3秒、太陽までは8.3分かかります。光の速さが1年かかる距離を1光年といいます。太陽から最も近い恒星は4.2光年の距離にあり、銀河系の直径は10光年です。夜空には数多くの星が見えますが、この光は何年も何十年も昔に星を出た光です。真空中の光の速さは、電波も可視光もX線も同じです。また、この速度を超えることは不可能とされています。

しかし、速度を遅くすることはできます。屈折率の高いプラスチックやガラスの中での光の速さは、真空中に比べて1.33分の1、1.5分の1になります。最近、**フォトリソグラフィ**や**プラズマディスプレイ** (金属薄膜) で、速度がとても遅い**スローフォトン**をつくり出す研究が進んでいます。

太陽の七変化

太陽の色は、黄色がかった白色に見えます。太陽の黒体放射で発生した様々な色の光が混ざっているからです。しかし日の出、日の入りの太陽は赤く見えます。陽が傾くと光が大気を通る距離が増え、短波長の光がチリや水滴に散乱されて届かなくなるからです。日没の時、一瞬だけ赤が緑色に見えることがあります。**グリーンフラッシュ**と呼ばれる現象です。太陽が完全に沈んだ瞬間、地球の大気層のプリズム効果で太陽光が屈折し、緑色の光だけが届いて見えます。空気が澄んで地平線や水平線が見える場所であらに見る珍しい現象です。

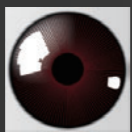
色の見え方

人間は 600 万~1,000 万色を識別できるとされていますが、目の中には、赤、緑、青のセンサーしかありません (犬、猫は2色、鳥は4色)。このセンサーに入る光のバランスで色を認識しています。たとえば、赤と緑の光が同時に目に入ると黄色に、すべての色が混ざると白く見えます。この3色は**光の3原色**といい、テレビ等の発色に使われます。

絵の具やインクは光を吸収して色をつくり出します。赤の絵の具は赤色以外の光を吸収し、赤色の光だけを反射します。シアン (Cyan)、マゼンタ (Magenta)、黄色 (Yellow) の3色 (**色の3原色**) を使えば様々な色をつくることができ、印刷物はこれに黒を組み合わせてつくり出します。

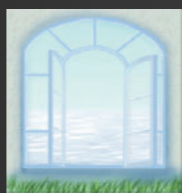
325 nm

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。

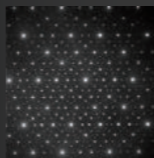


極端紫外光リソグラフィー
極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

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。



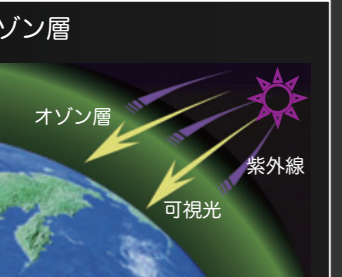
XFEL(X線自由電子レーザー)
SPring-8に自由電子レーザーの発振器を建設し、X線の波長域でレーザー光を得る施設。2006年から建設が始まり、2010年に完成を目指している。



紫外光

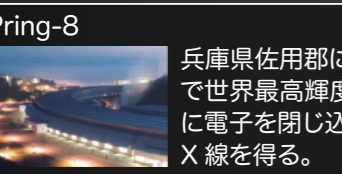
紫外線洗浄
半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、品質に紫外線を使う。

紫外線殺菌
水と食品、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。

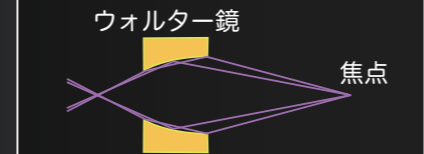
アト秒レーザー
アト秒(atto)は0.000000000000000001秒(0が18個)。そんな一瞬しか光らないパルスレーザー。このレーザーを使えば、電子が止まって見える。100アト秒では光はたった30nmしか進めない。真空紫外線や軟X線の光でつくられる。

軟X線 (極短紫外を含む)

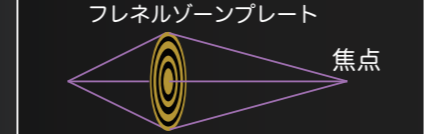
レーザープラズマ光源
高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

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。

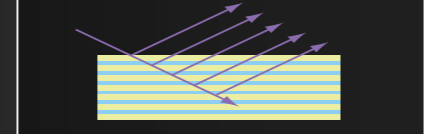
X線のレンズ
軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。



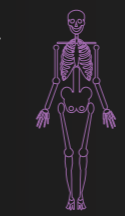
反射には、Mo/SiやCr/Scなどの多層膜が用いられる。



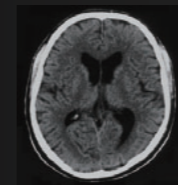
静電気除去
空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

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。



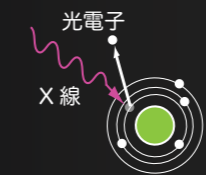
X線CT (コンピュータ断層撮影)
様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



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。

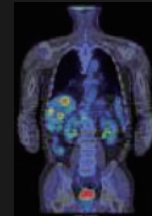


XPS(X線光電子分光)
X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。

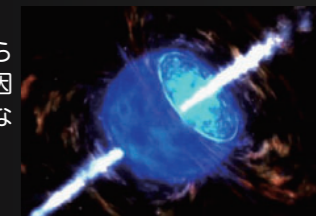


γ線

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)

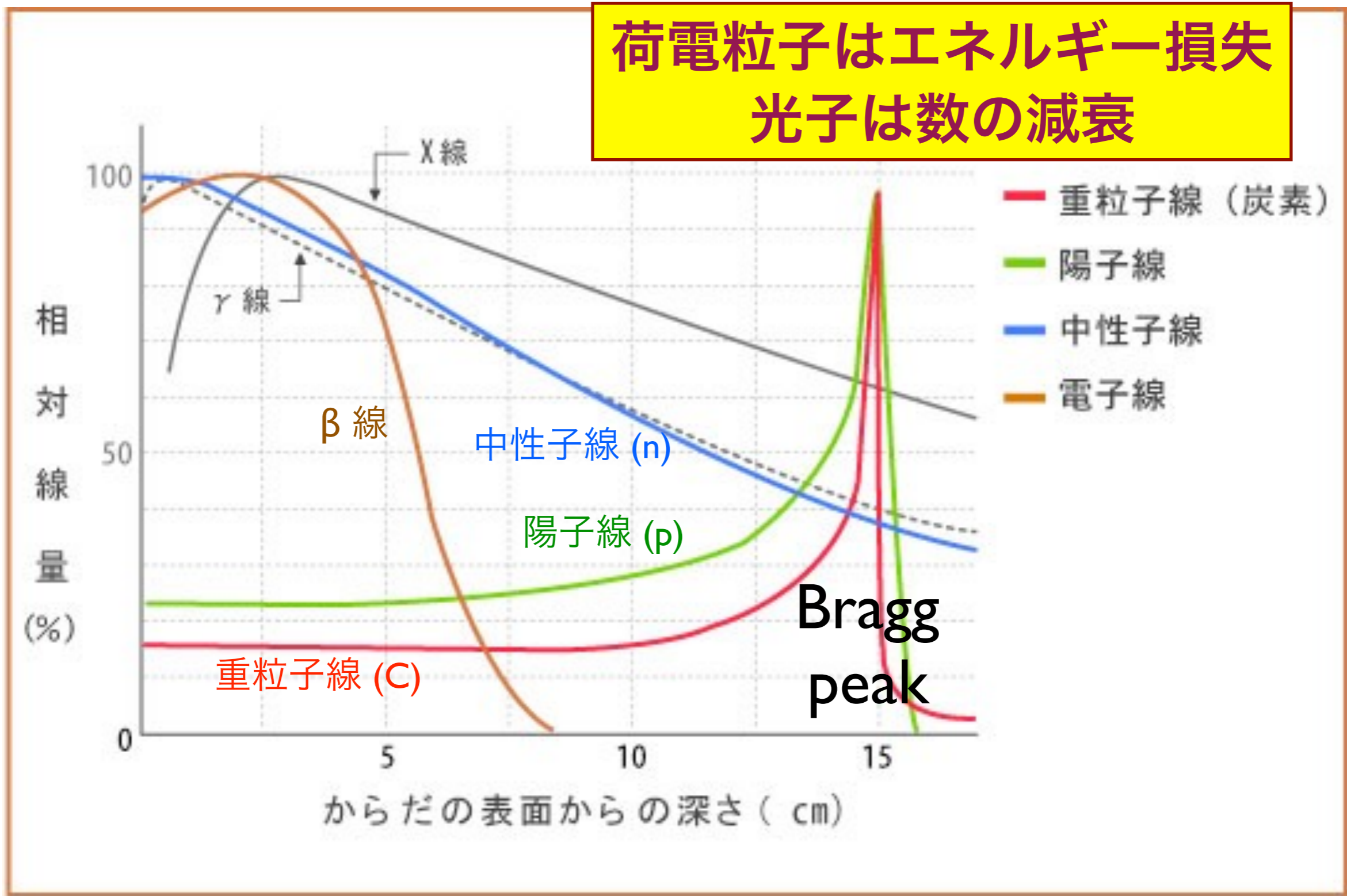
光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず
素通りするものも多い。☞

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

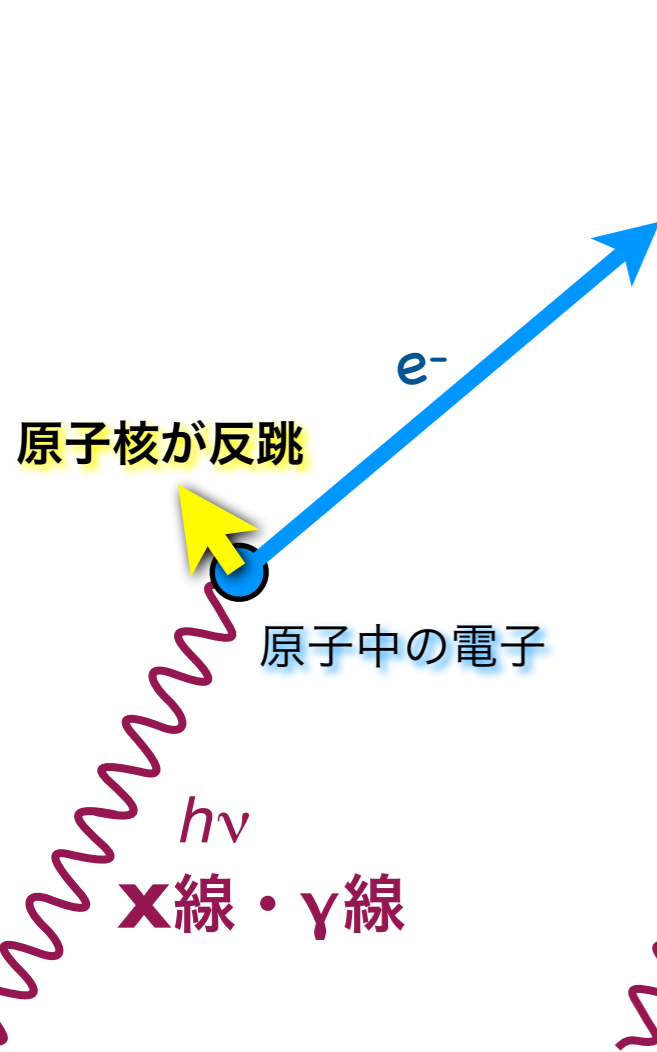
陽子(p)、 α 、重粒子線は飛程が揃っている。
電子(β)は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。
中性子(n)、光子(X, γ)は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失
光子は数の減衰**

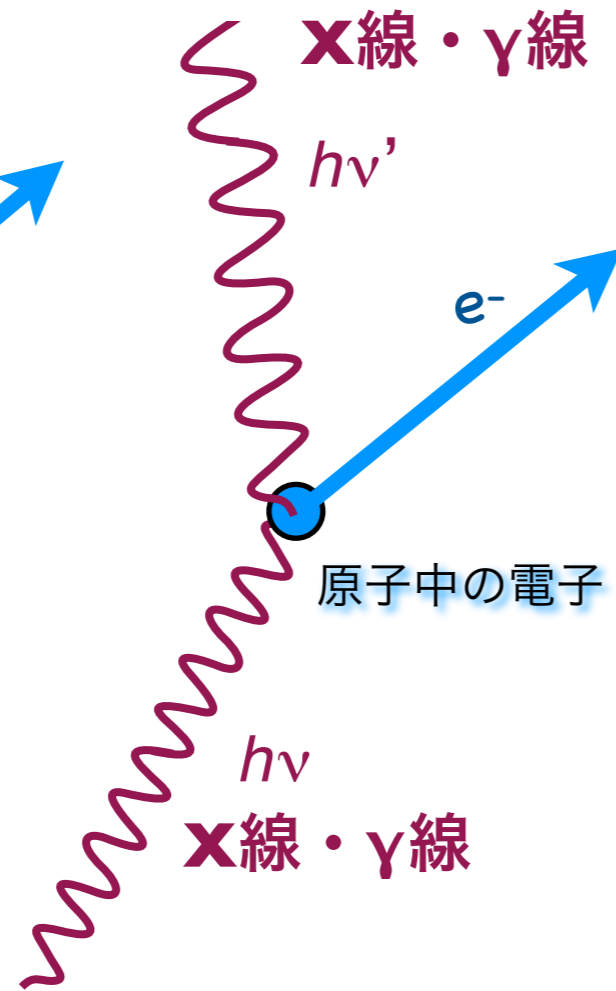


光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

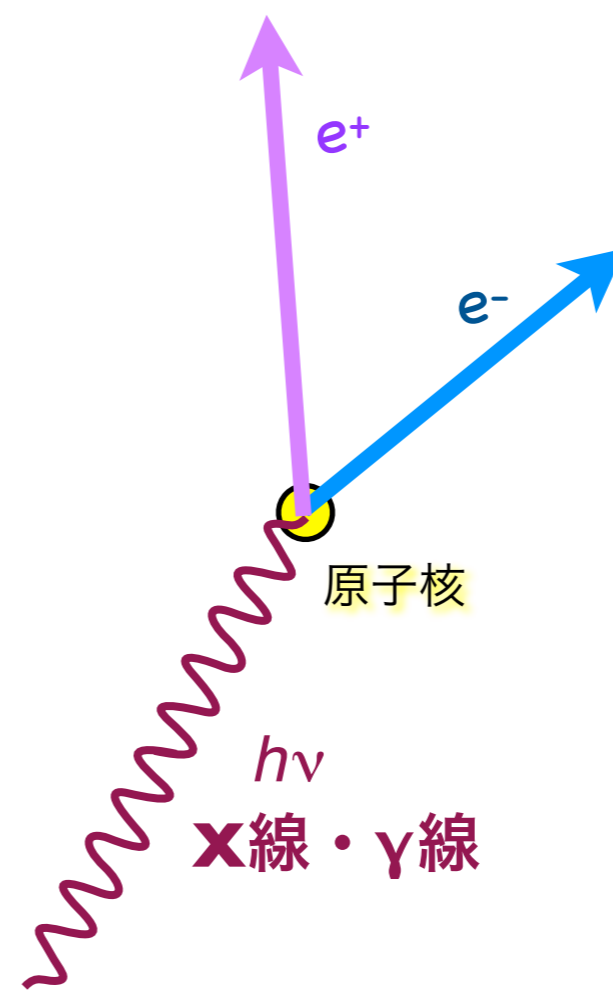
光電効果



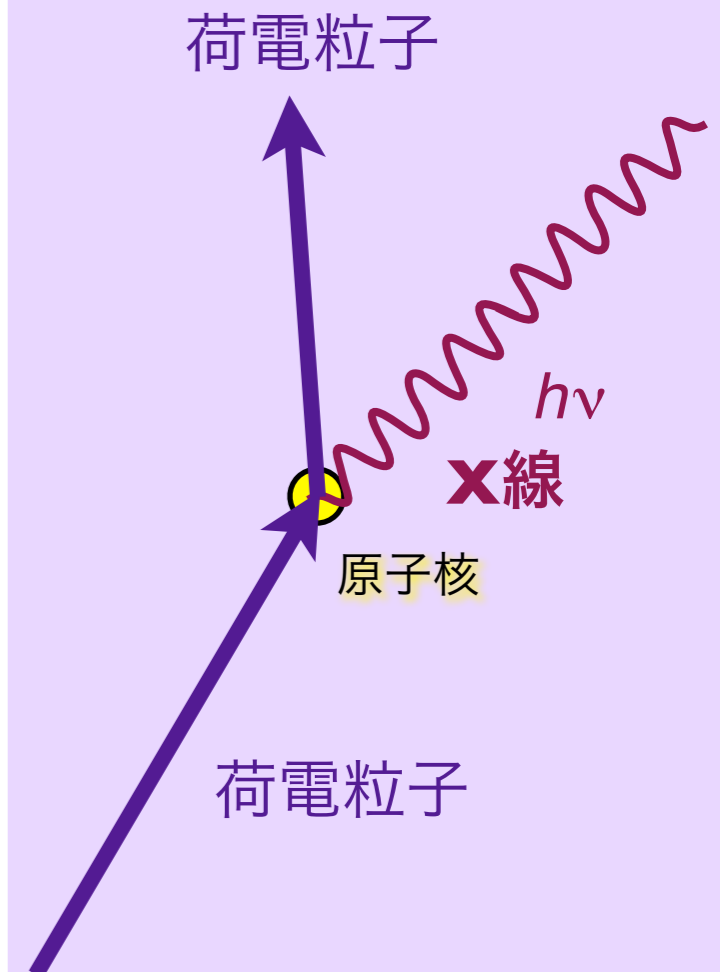
コンプトン散乱



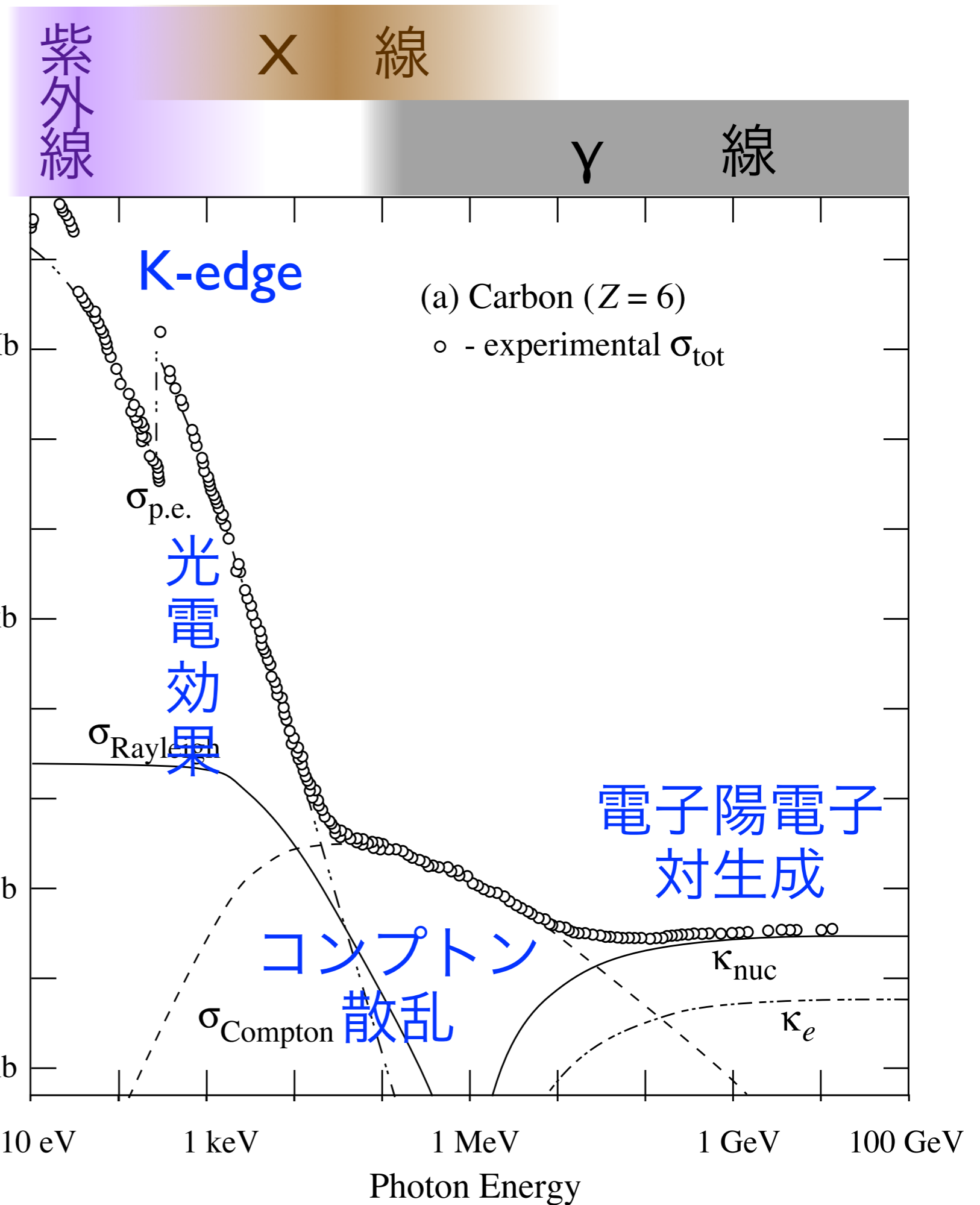
電子対生成



制動放射 (Bremsstrahlung)



光子の 反応断面積



光電効果

紫外線

X線

γ線

線

L-edge
L吸収端

K-edge
K吸収端

(a) Carbon (Z = 6)

○ - experimental σ_{tot}

光電効果

$$T_e = h\nu - I$$

K吸収端、L吸収端

K-edge, L-edge, ...

$$\sigma \propto Z^{4\sim 5} (h\nu)^{-3.5}$$

(σ : 1原子あたりの反応断面積)

X線を鉛で遮蔽

電子陽電子
対生成

光電効果

コンプトン
散乱

原子核が反跳

e^-

原子中の電子

$h\nu$

X線・γ線

Cross section (barns/atom)

1 Mb

1 kb

1 b

10 mb

10 eV

1 keV

1 MeV

1 GeV

100 GeV

Photon Energy

$\sigma_{p.e.}$

$\sigma_{Rayleigh}$

$\sigma_{Compton}$

K_{nuc}

K_e

コンプトン散乱

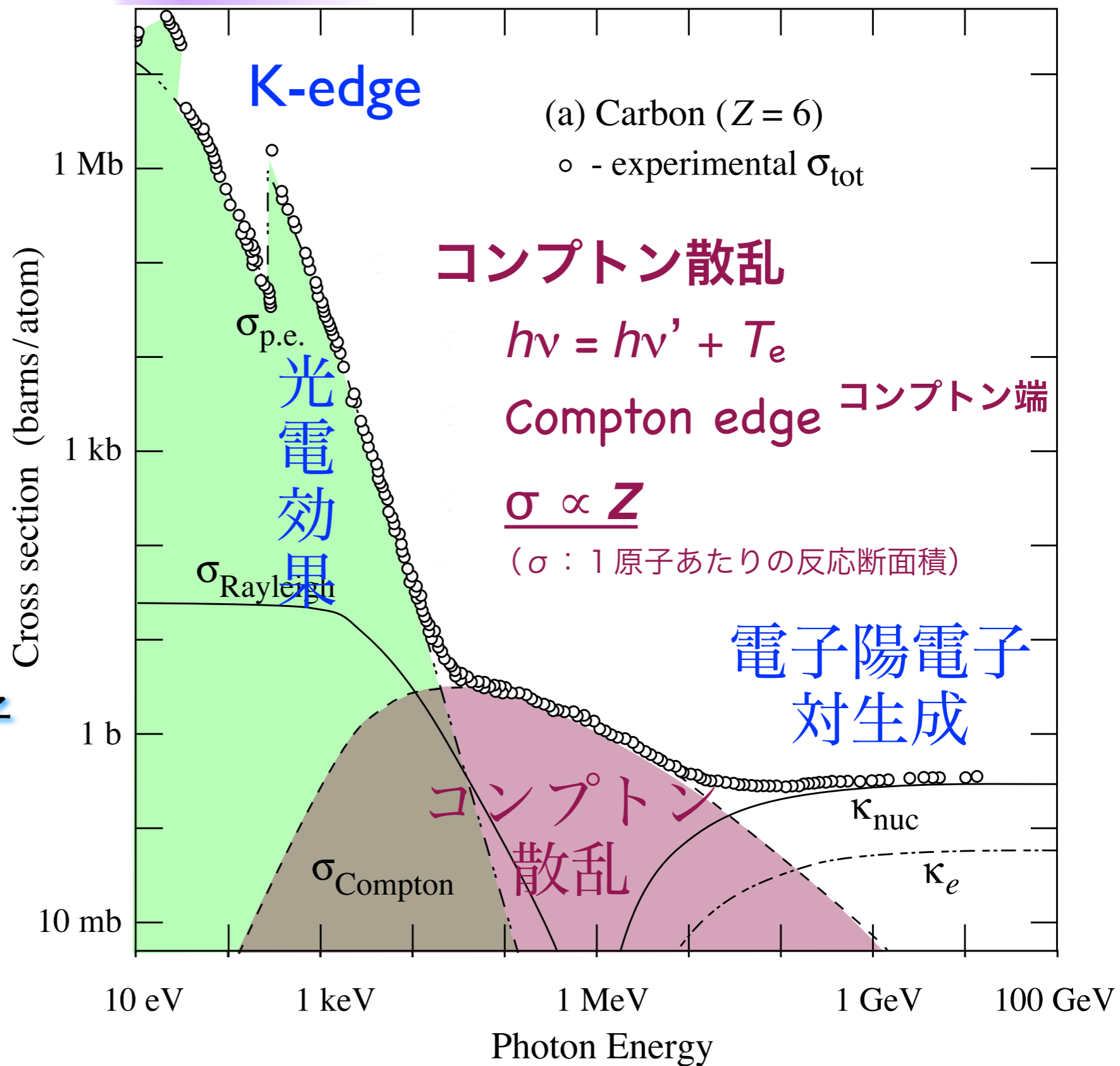
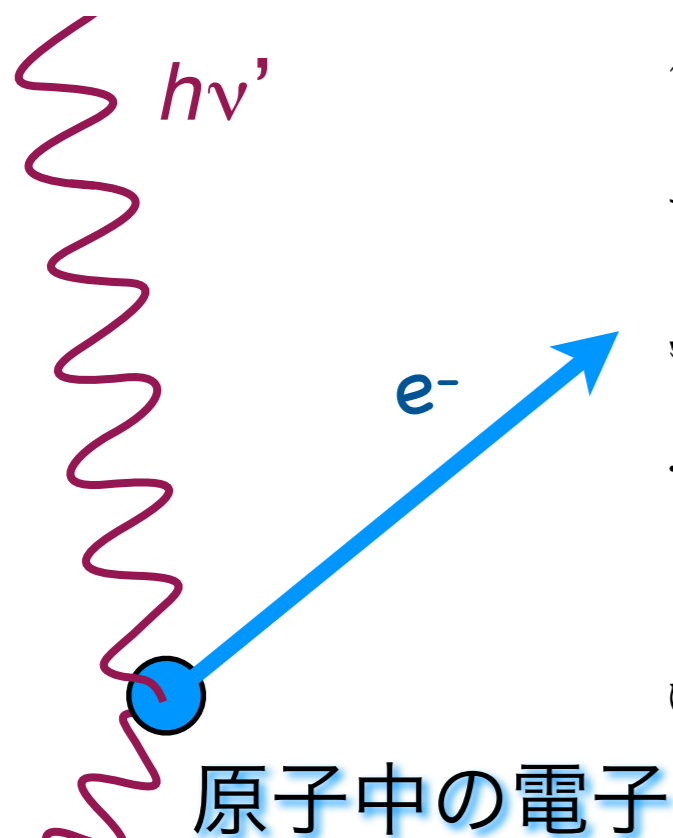
紫外線

X線

γ線

γ線

X線・γ線



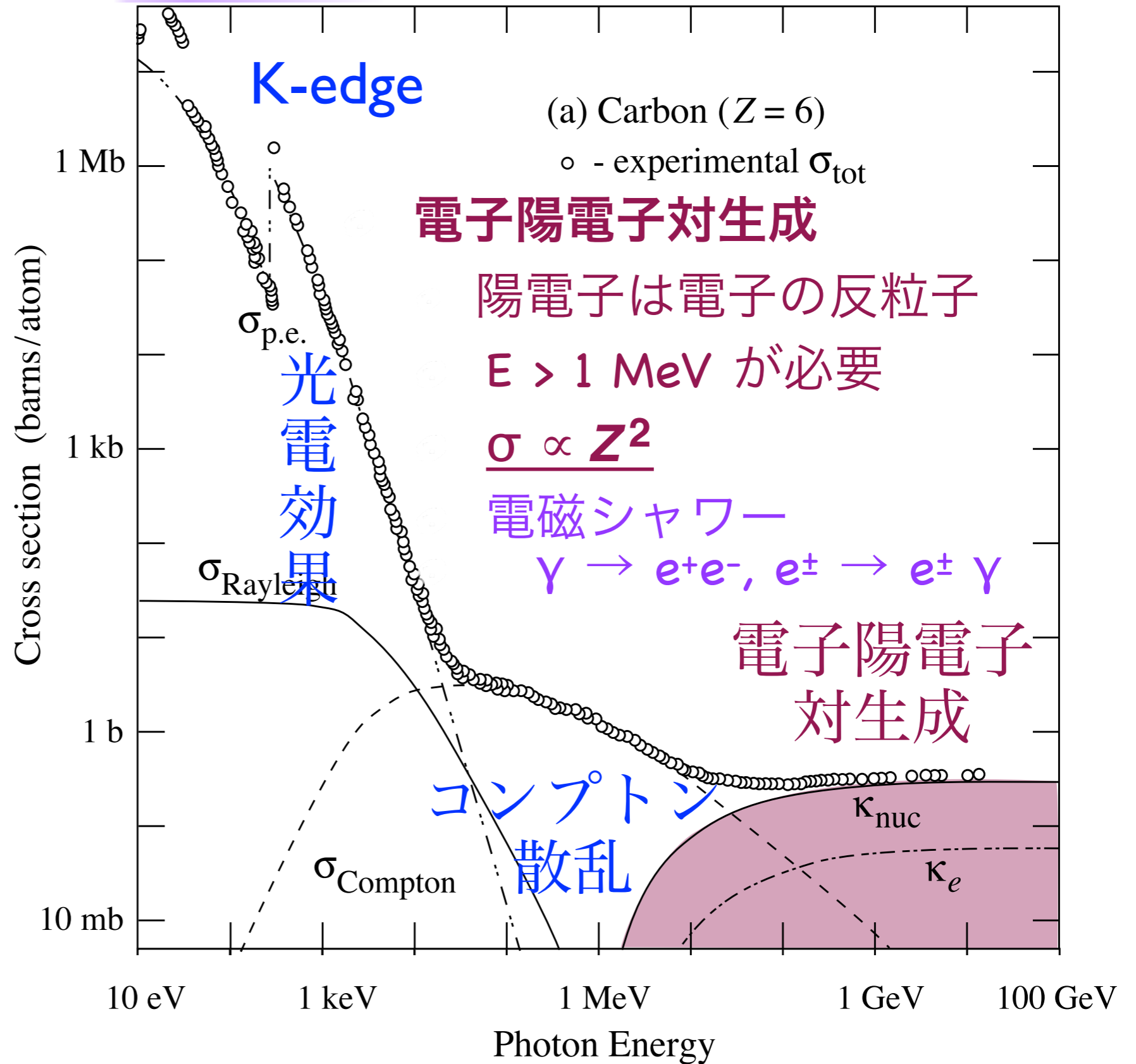
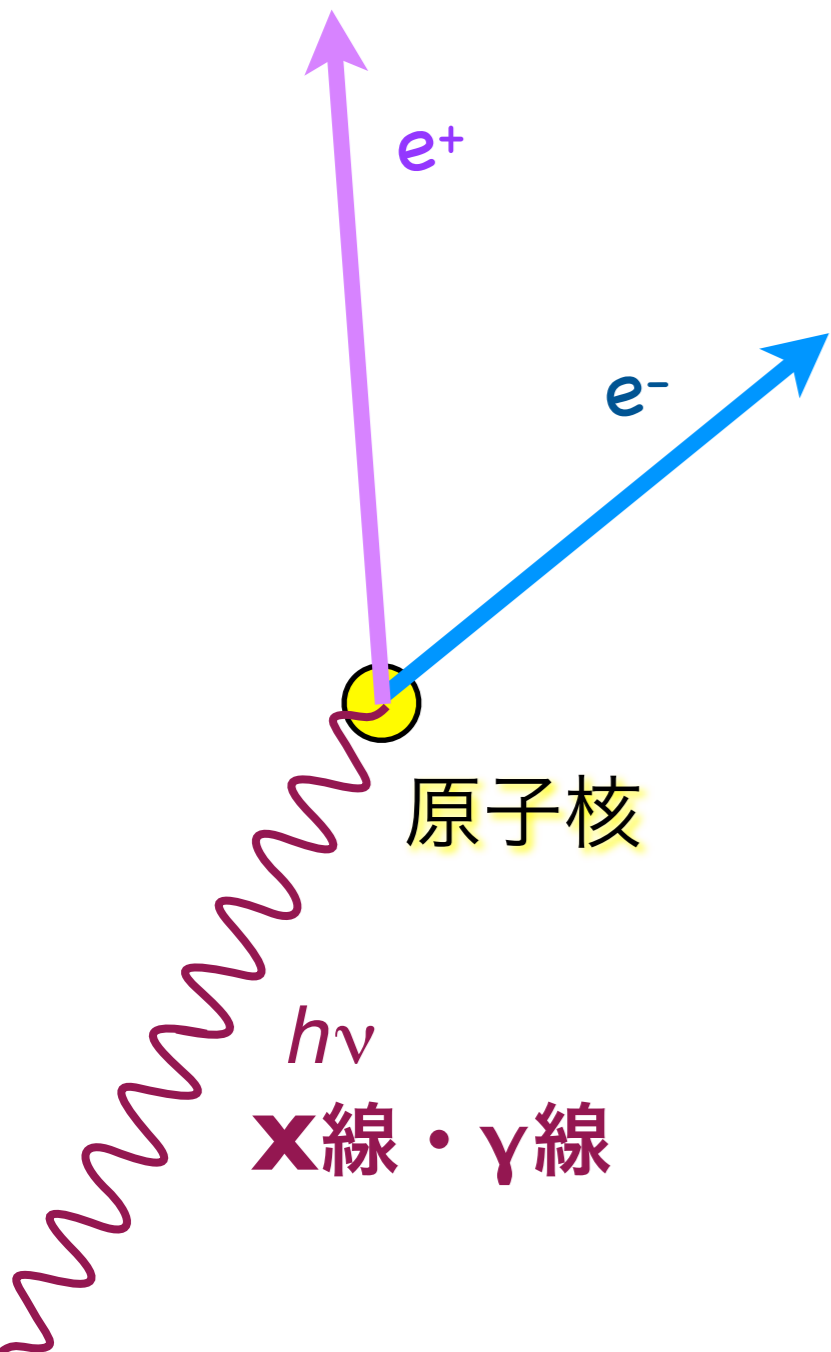
電子対生成

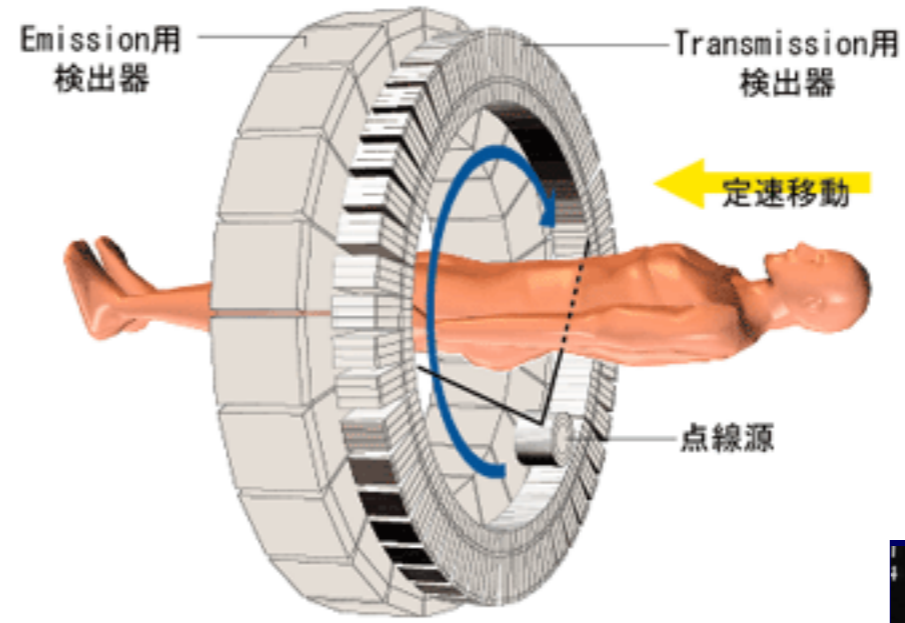
紫外線

X線

γ線

γ線





X線 CT



レントゲン(X線)撮影

吸収率の差を利用して撮像する。

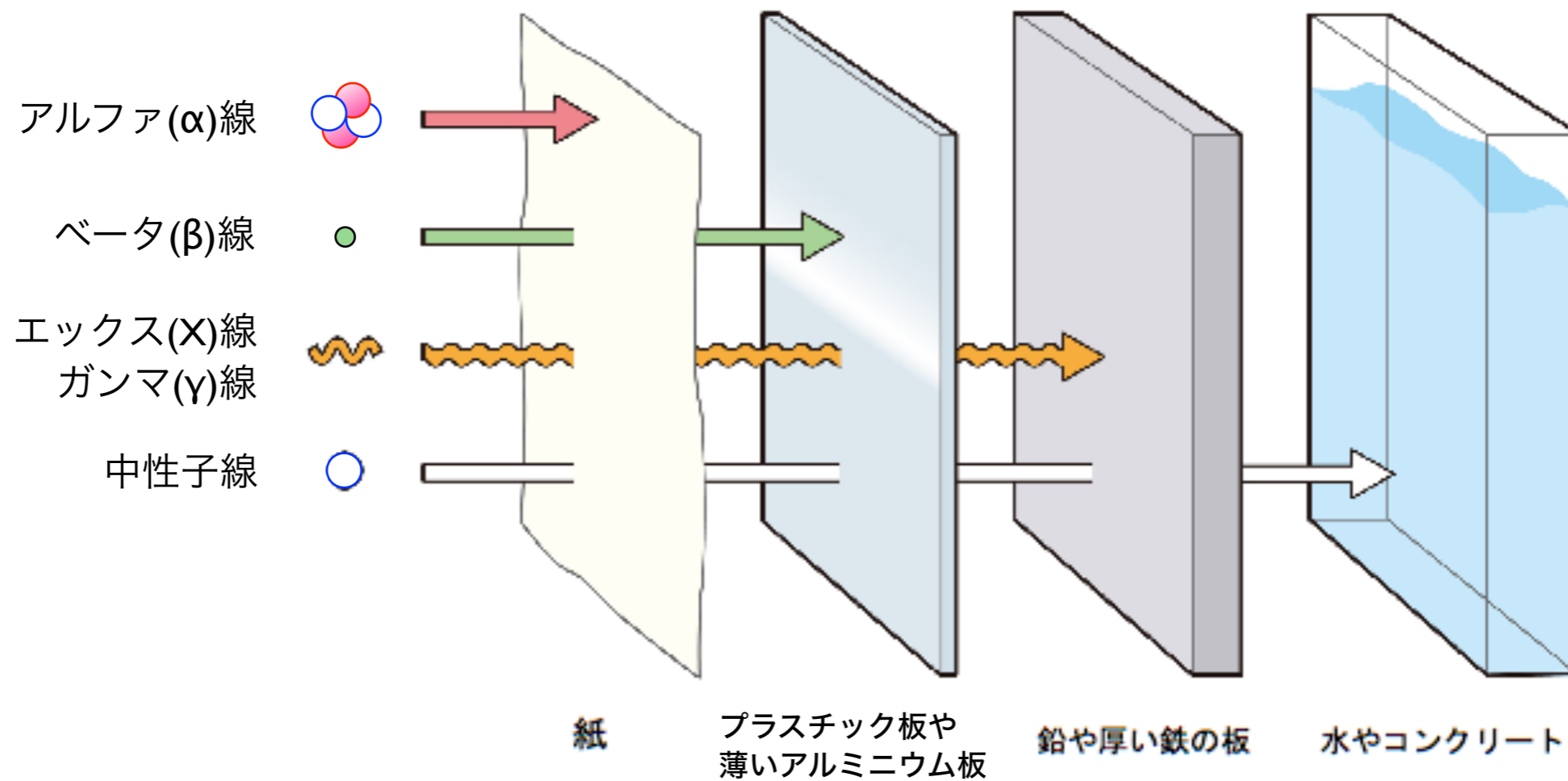
(減弱)

造影剤 (I, Ba, Xe) : Z 大 = 減衰係数 大

原子番号 Z が大きい元素 光電効果 $\propto Z^{4\sim 5}$

コンプトン散乱 $\propto Z$

放射線の種類と透過力



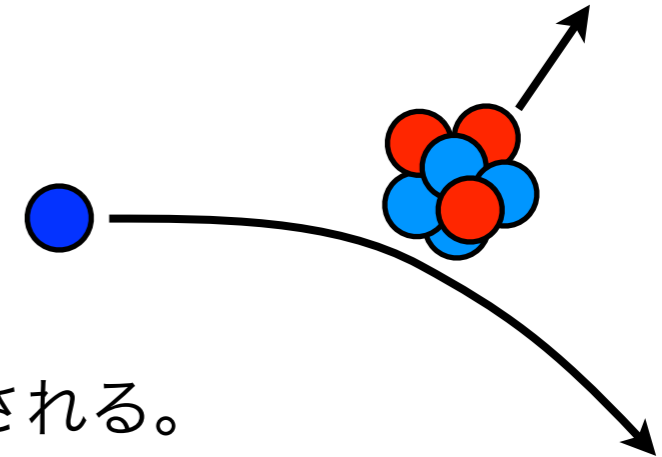
放射線と物質との相互作用

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。

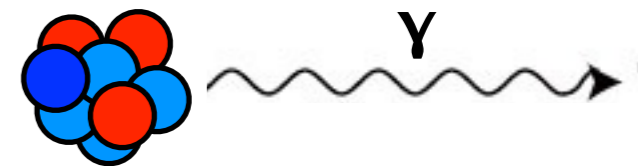
中性子の遮蔽には、水やコンクリートなど、水素原子を含む物質を用いる。

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。

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

第3話

環境汚染の放射線計測

鳥居 寛之

東京大学 大学院理学系研究科

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

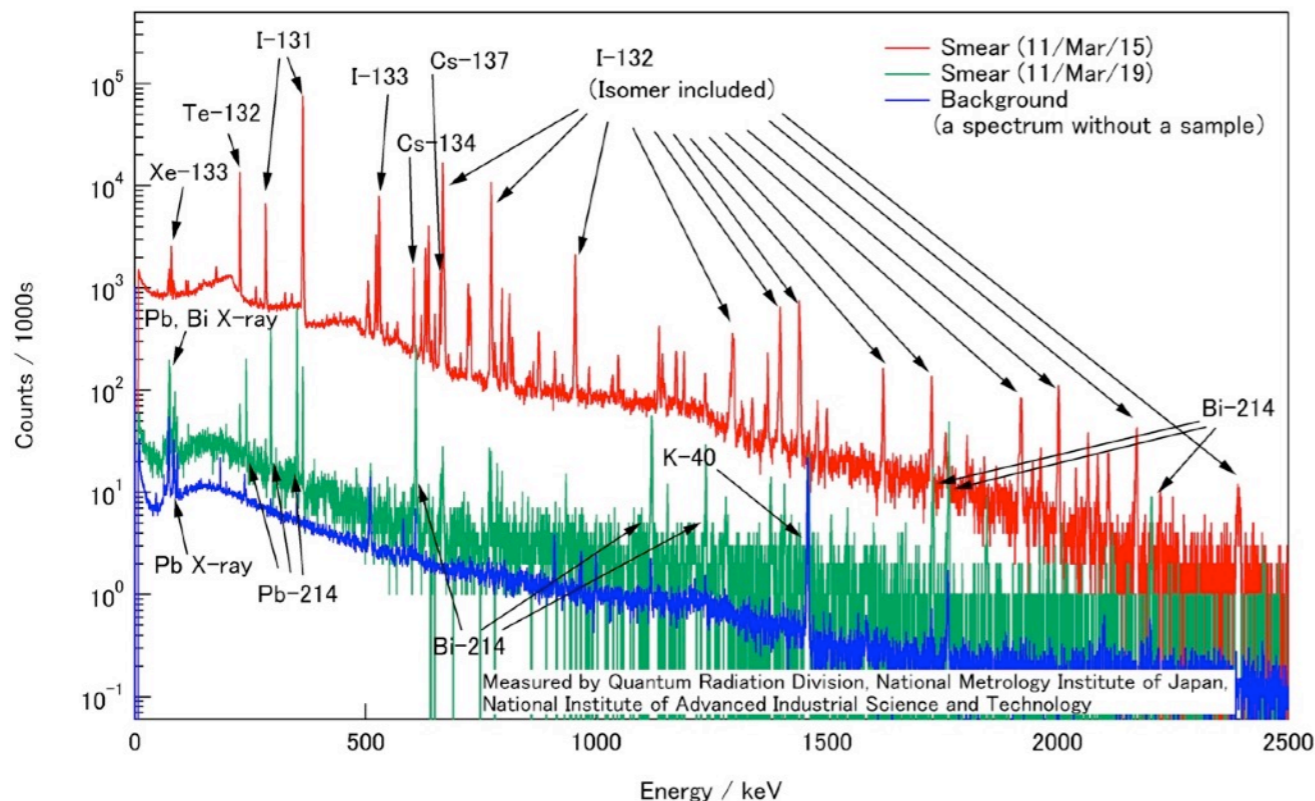
Ge, Si(Li)

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)

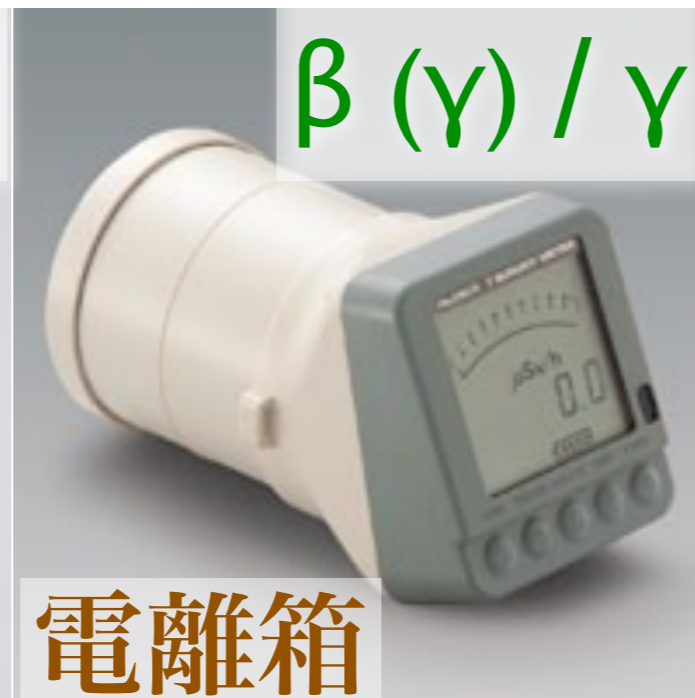
サーベイメータ 【空間線量率測定】

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)

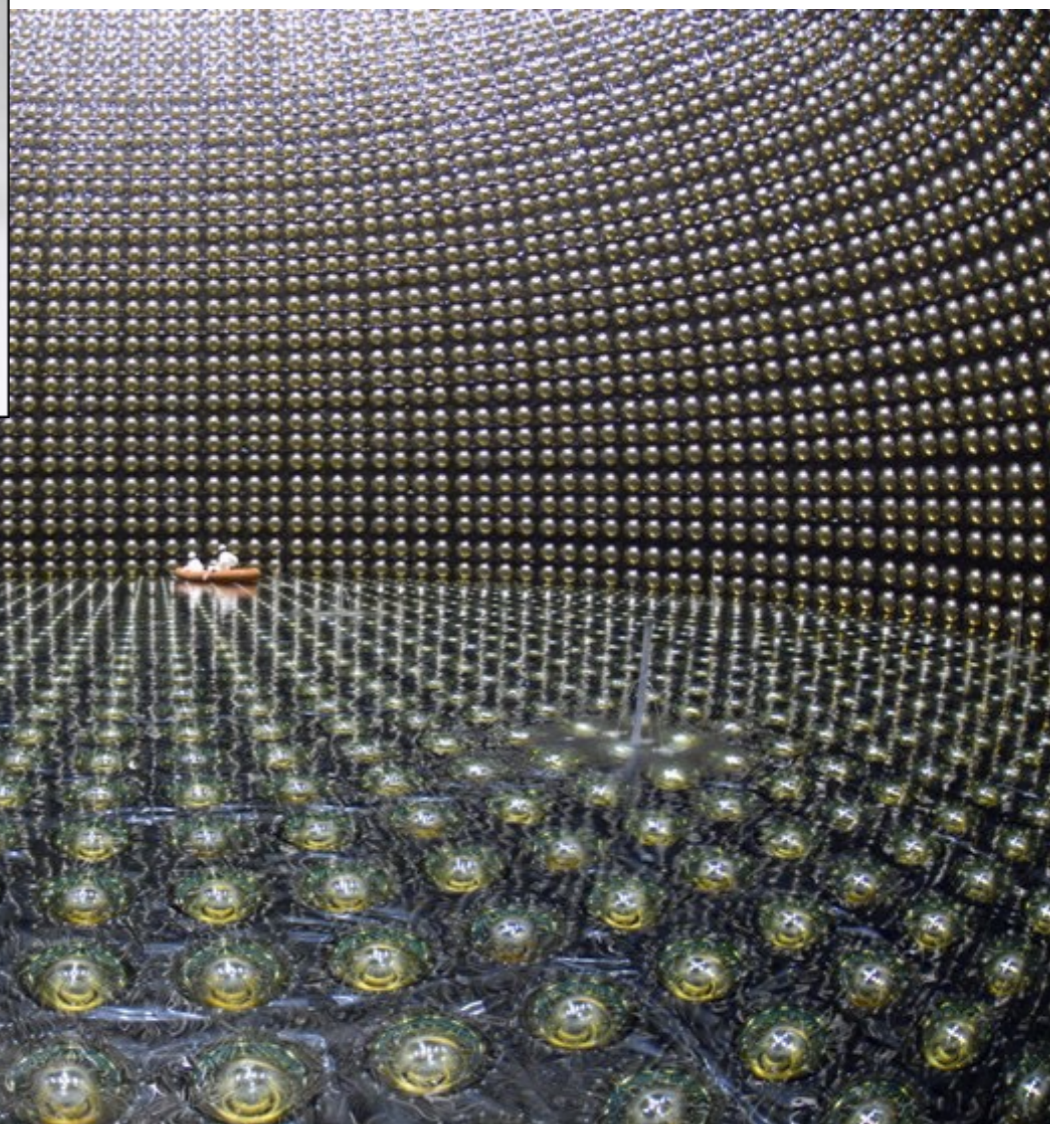
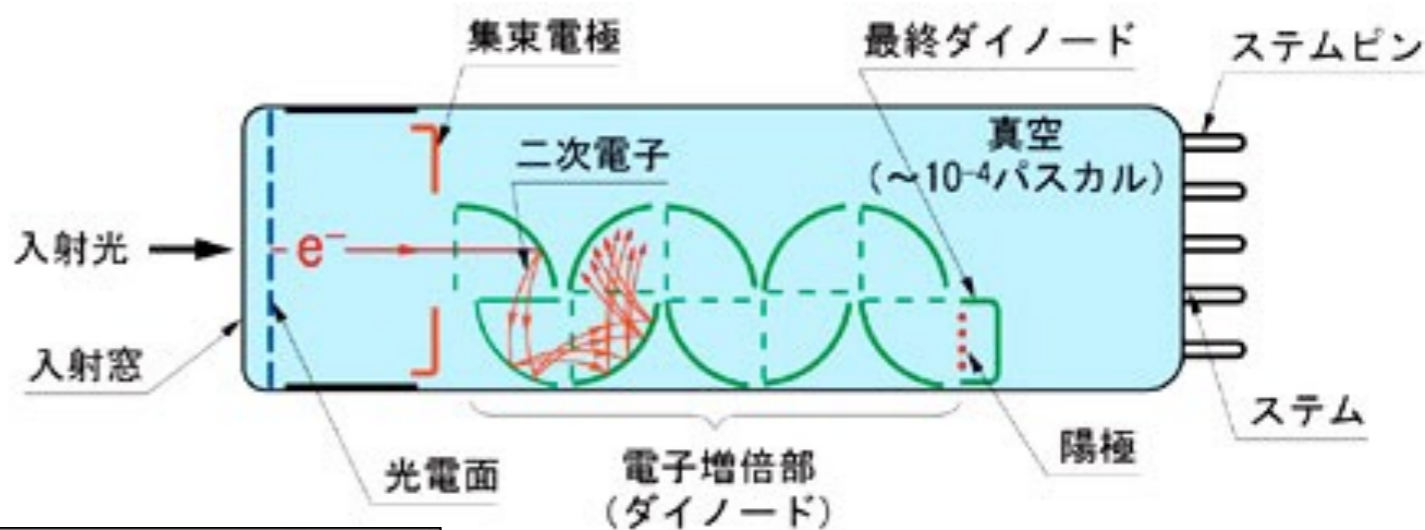
光電子増倍管 (PMT) (Photomultiplier tube)

プラスチックシンチレータ



ライトガイド

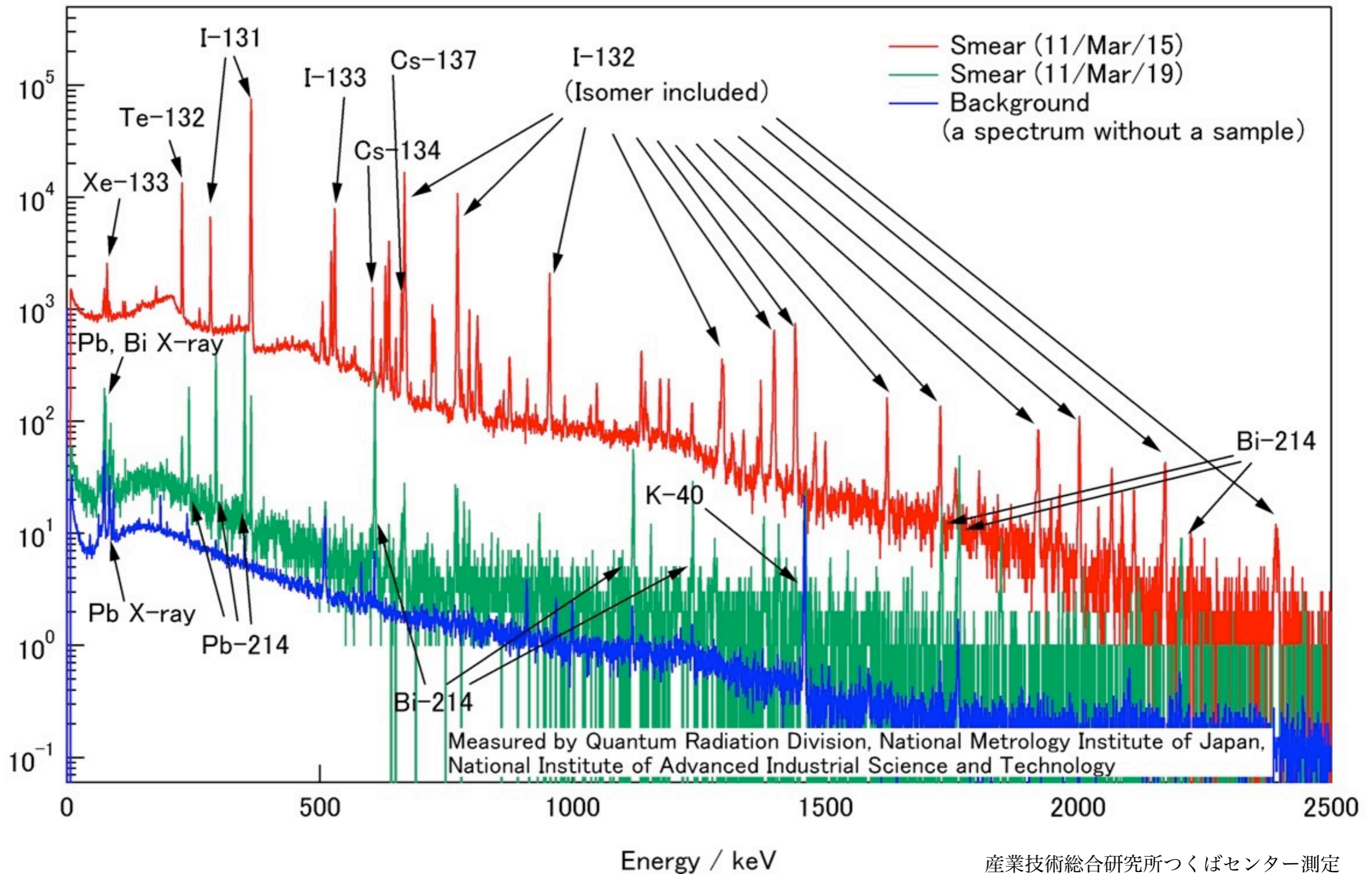
SCIENCEPHOTOLIBRARY



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）

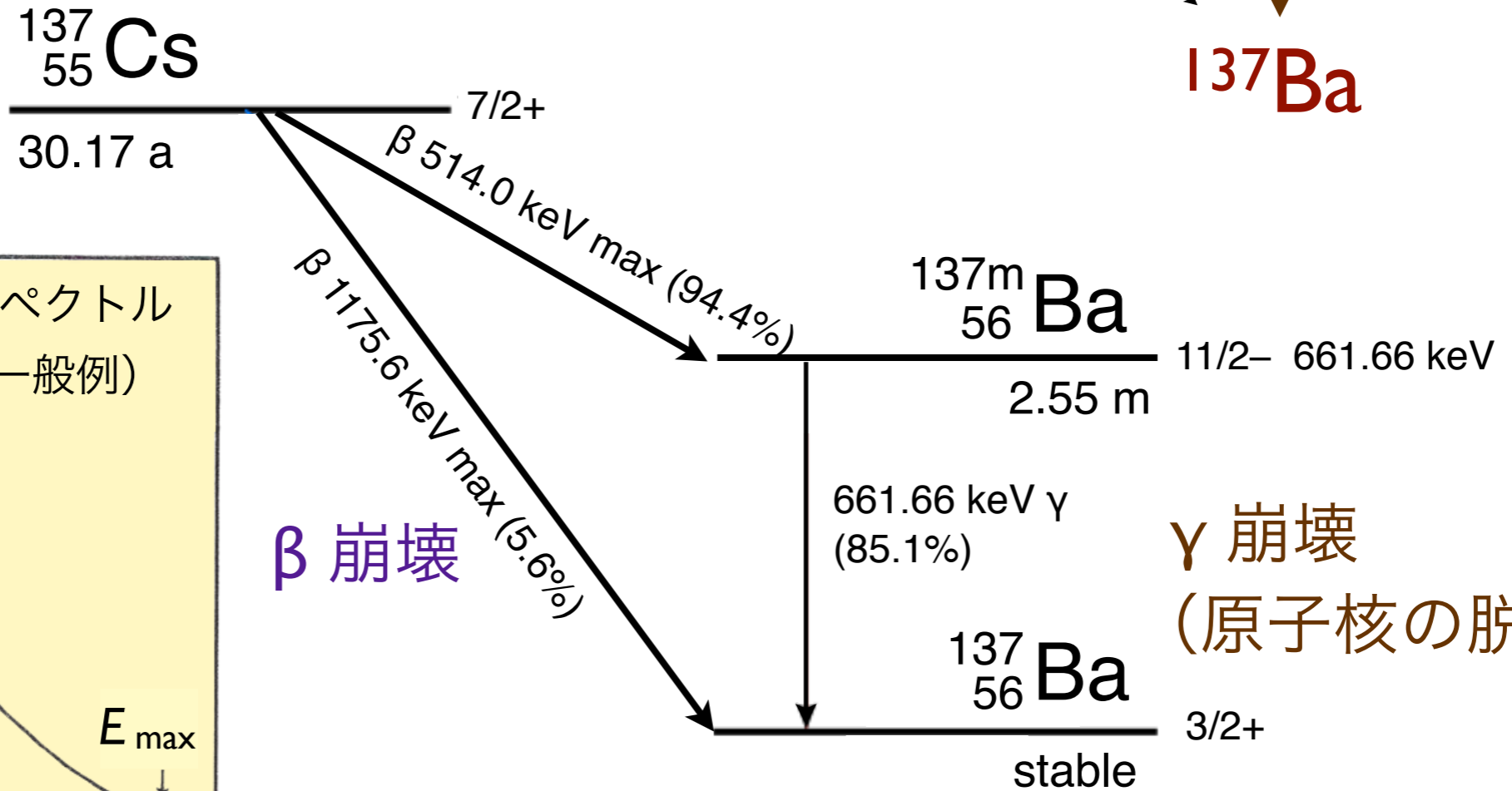
ガンマ線スペクトル（ゲルマニウム検出器）



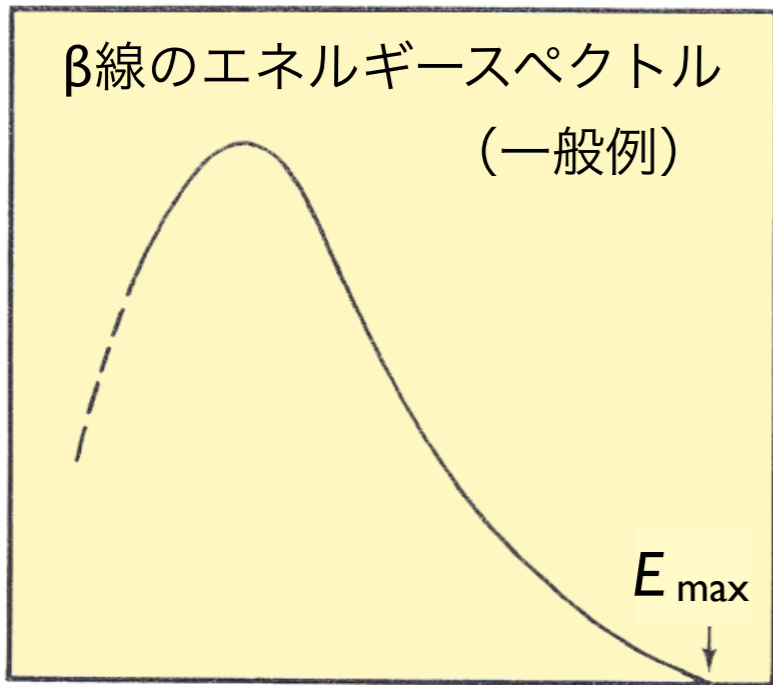


壊変図式

例： ^{137}Cs

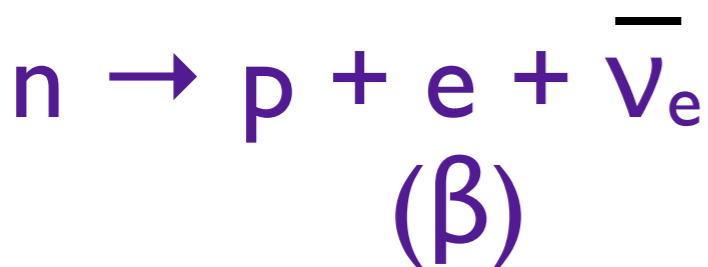


粒子数の分布

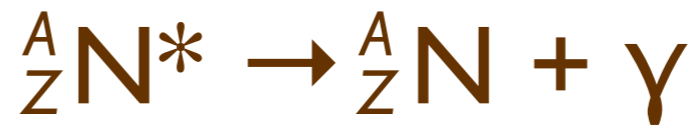


エネルギー E_β

β線 (連続スペクトル)



γ崩壊
(原子核の脱励起)



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

どうやって測っている？ (I)

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

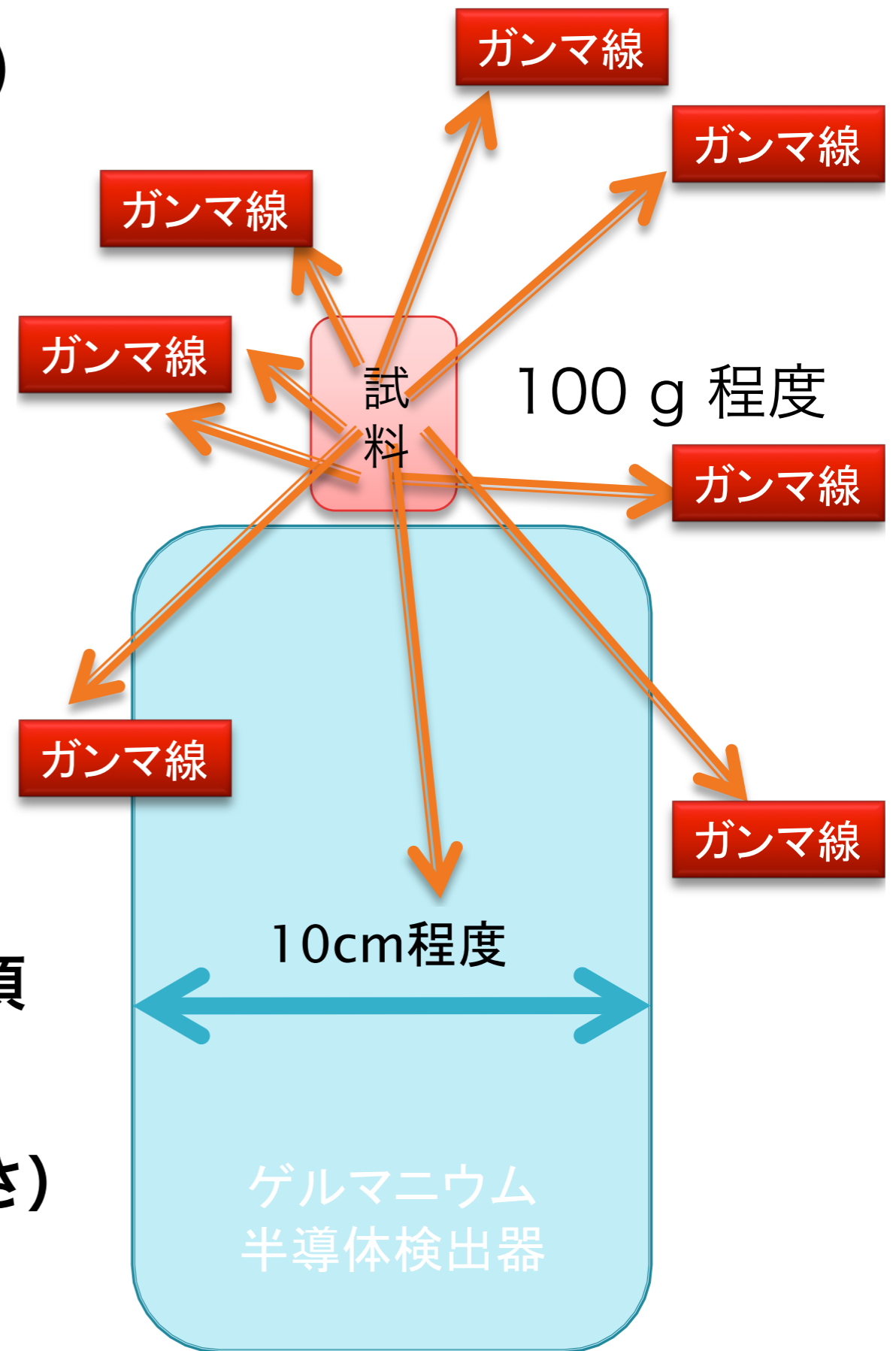
(環境放射線の遮蔽)

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(良くない表記)

No.	試料	採取場所	^{134}Cs (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND	14.1
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58	7.16
3	培養土	練馬区内	5.95	9.35
4	梅	練馬区内	ND	ND
5	干し椎茸	群馬産	ND	ND
6	路傍の土	練馬区内	4110	6330
7	生椎茸	富山産	ND	ND
8	カツオ	?	ND	ND
9	田圃の土	練馬区内	185	298
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42	ND

10試料の測定結果(ちょっと良い)

No.	試料	採取場所	^{134}Cs (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND	14.1±2.17
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58±0.55	7.16±0.86
3	培養土	練馬区内	5.95±1.43	9.35±1.89
4	梅	練馬区内	ND	ND
5	干し椎茸	群馬産	ND	ND
6	路傍の土	練馬区内	4110±20.9	6330±38.7
7	生椎茸	富山産	ND	ND
8	カツオ	?	ND	ND
9	田圃の土	練馬区内	185±11.6	298±19.4
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42±0.29	ND

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±0.55(0.23)	7.16±0.86(2.33)
3	培養土	練馬区内	5.95±1.43(5.82)	9.35±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±20.9(24.6)	6330±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±11.6(37.5)	298±19.4(33.5)
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42±0.29(1.01)	ND(2σ)(1.38)

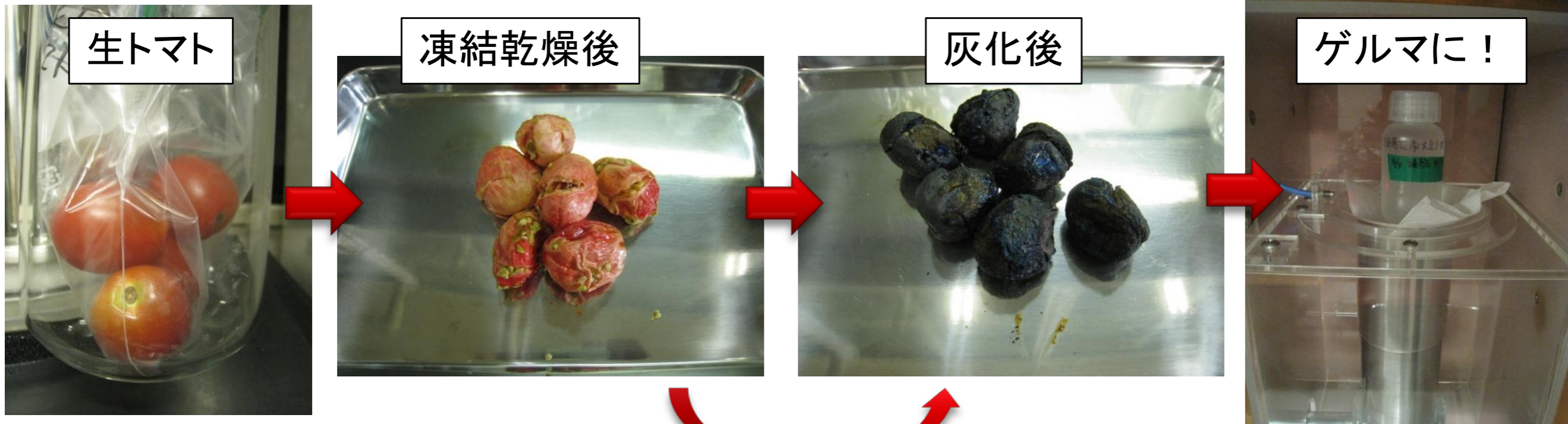
食品に含まれる放射性物質の測り方

- ▶ 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 / 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)

線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリック線量計

熱ルミネッセンス線量計

ガラス線量計



光刺激ルミネッセンス線量計

蛍光ガラス線量計 $Ag^+ \rightarrow Ag^0, Ag^{++}$

ポケット線量計：電離箱、半導体検出器

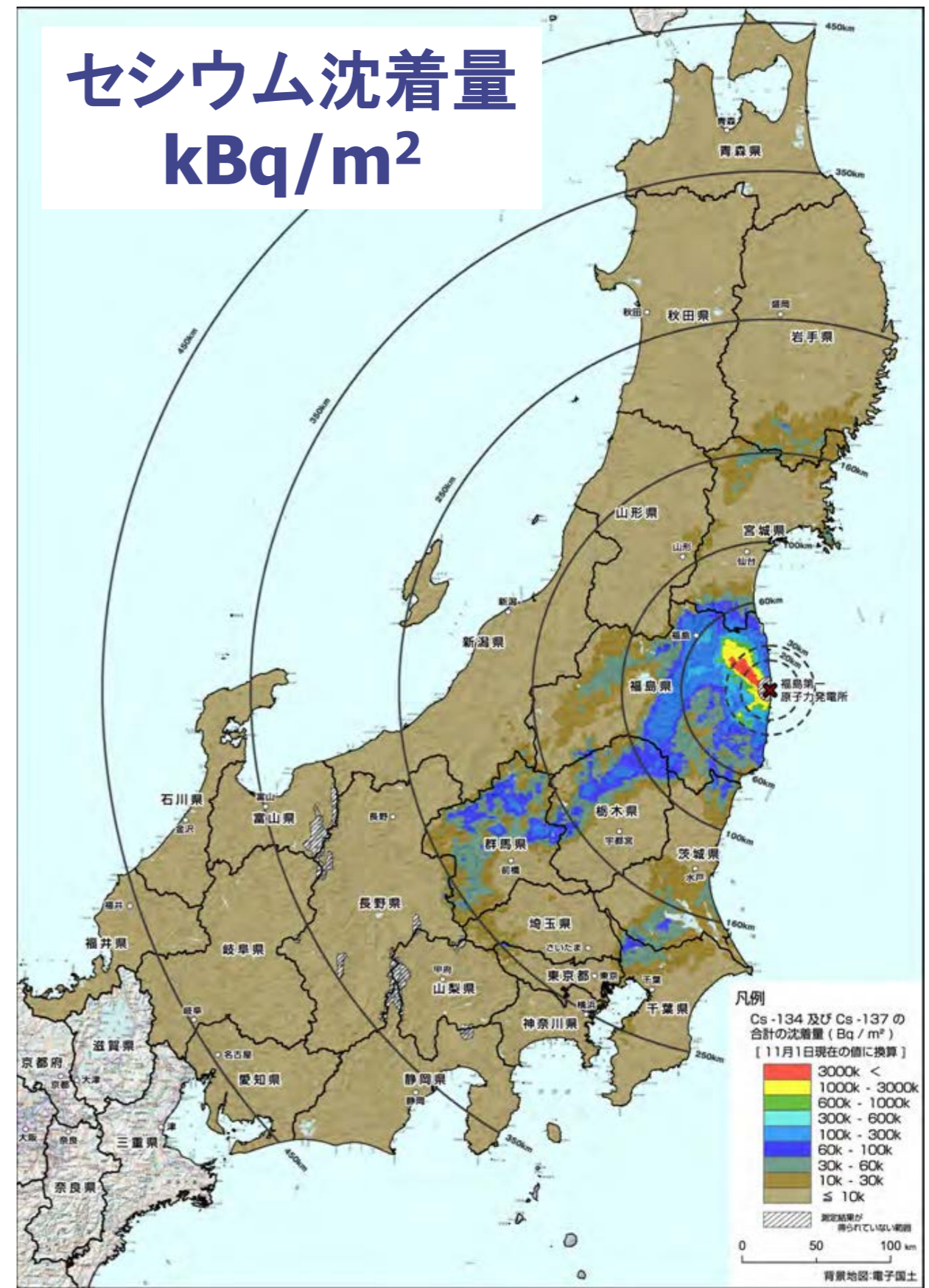
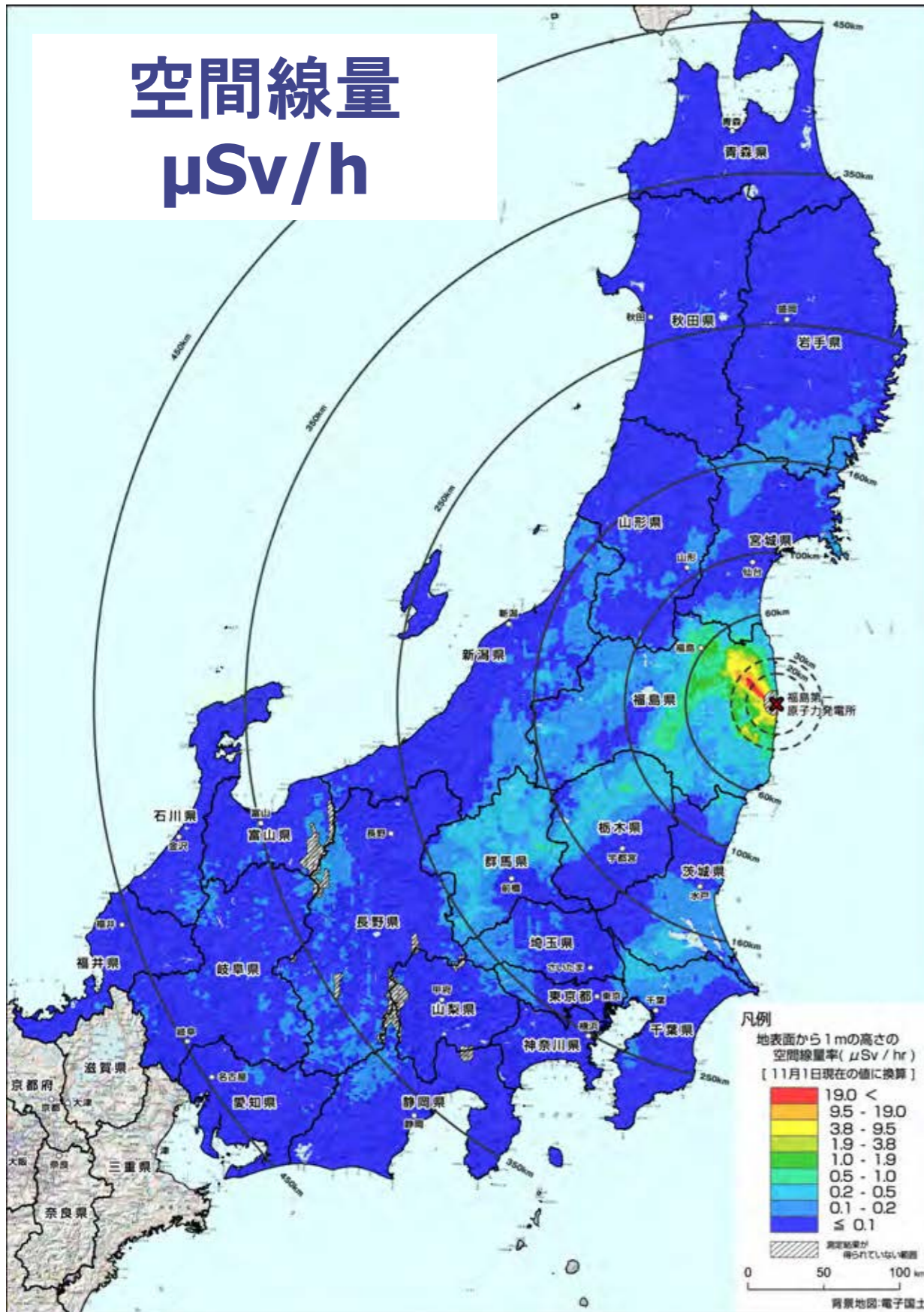
フィルムバッジ：銀塩写真フィルム $AgBr$



環境放射化学

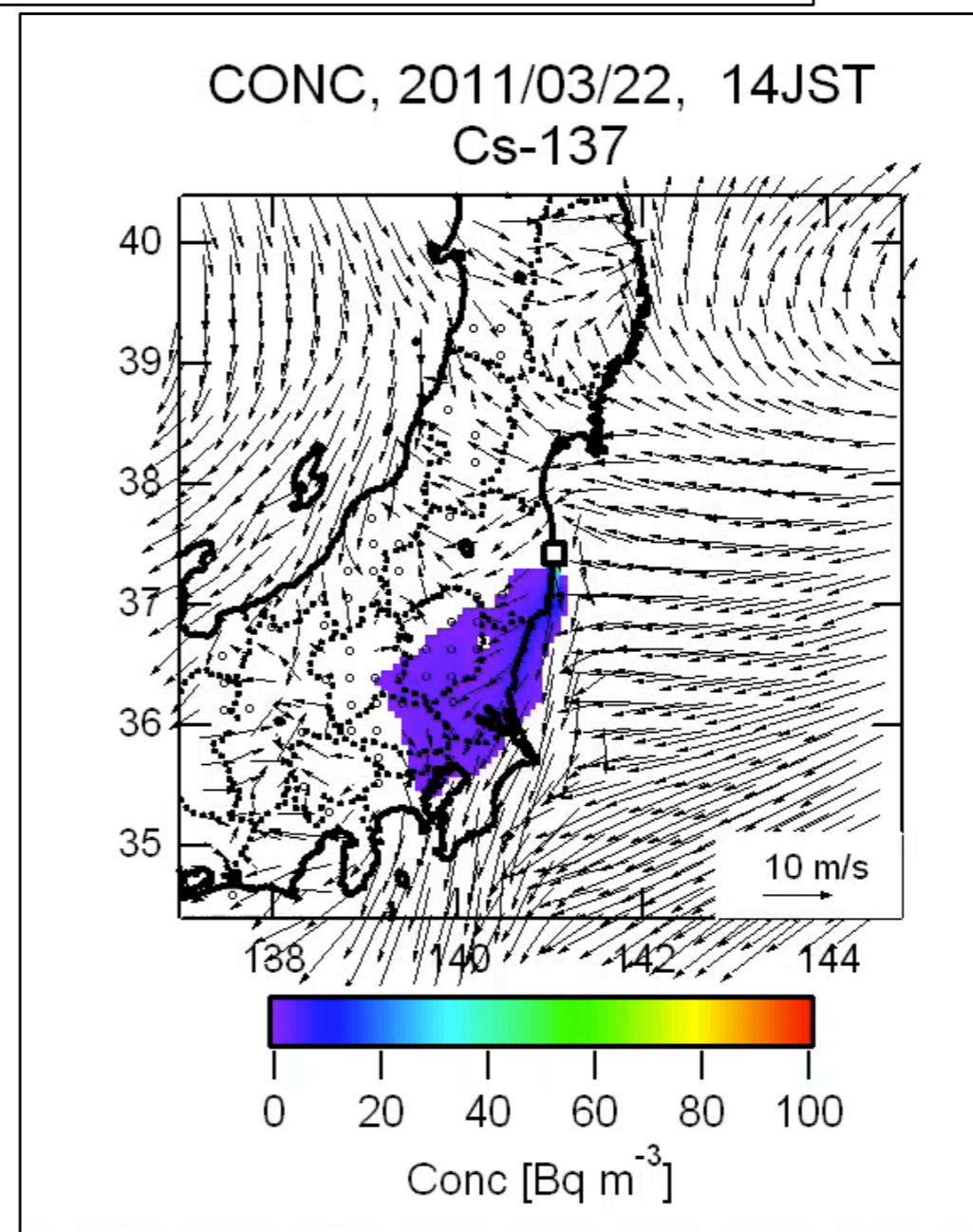
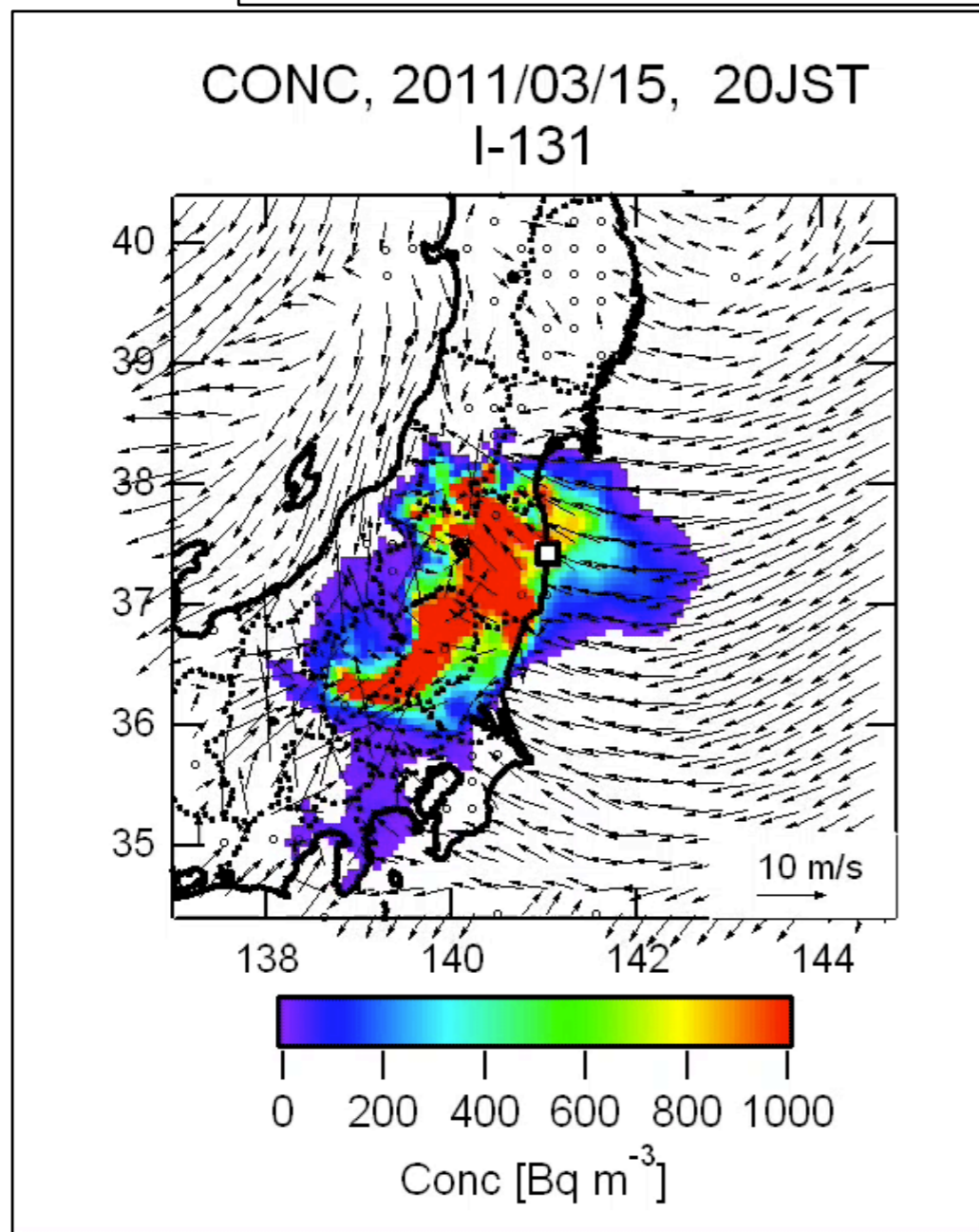
放射線の安全取扱

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



拡散シミュレーションと実際に観測された放射能の差違

2011年8月25日付 国立環境研究所 報道発表資料

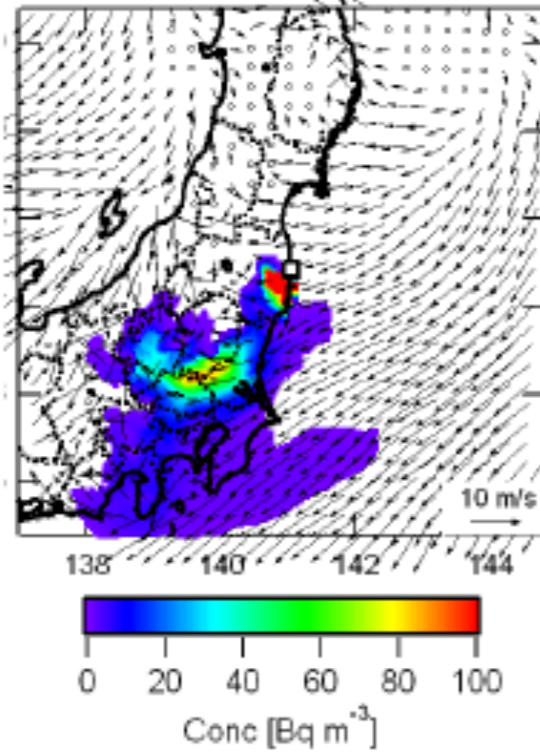


▶ 実測値との差違を議論したい

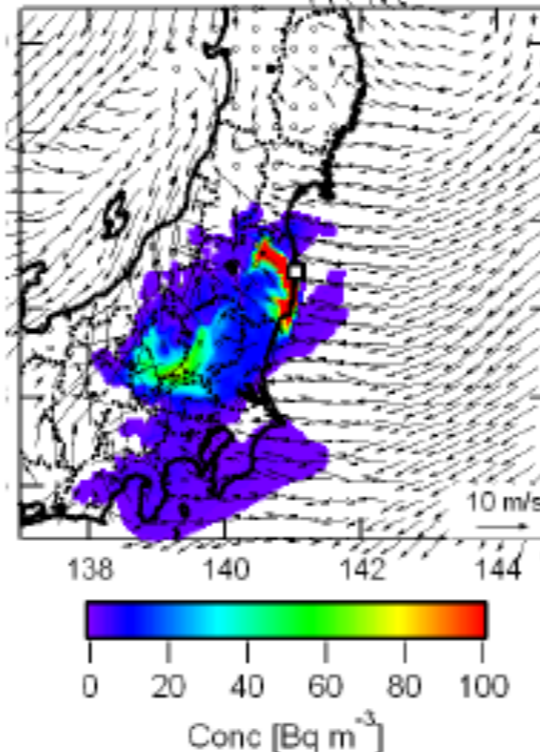
ホットスポットの生成メカニズム

大気濃度

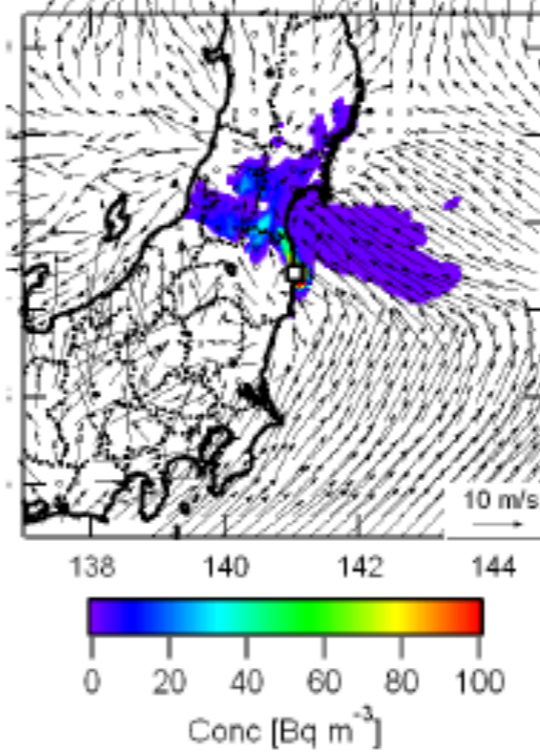
3/15の15時



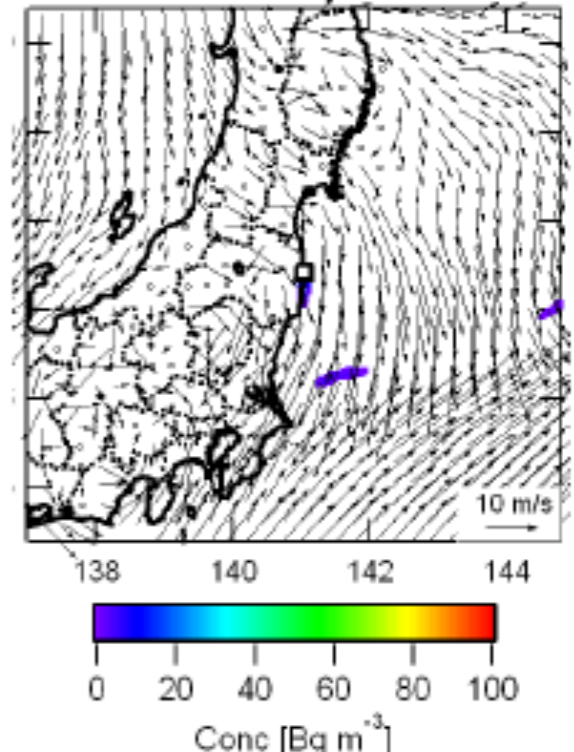
3/15の19時



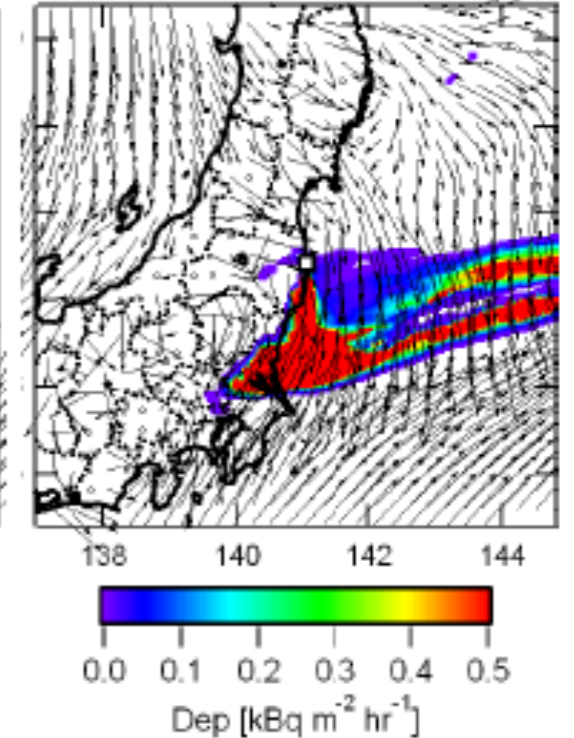
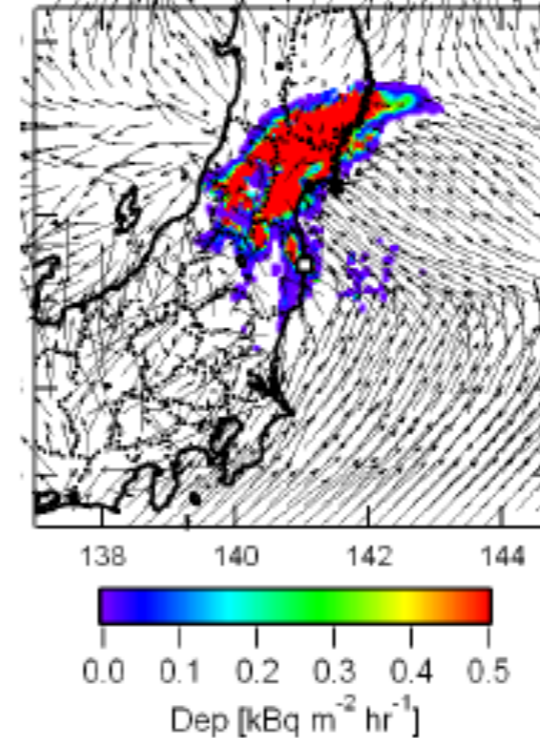
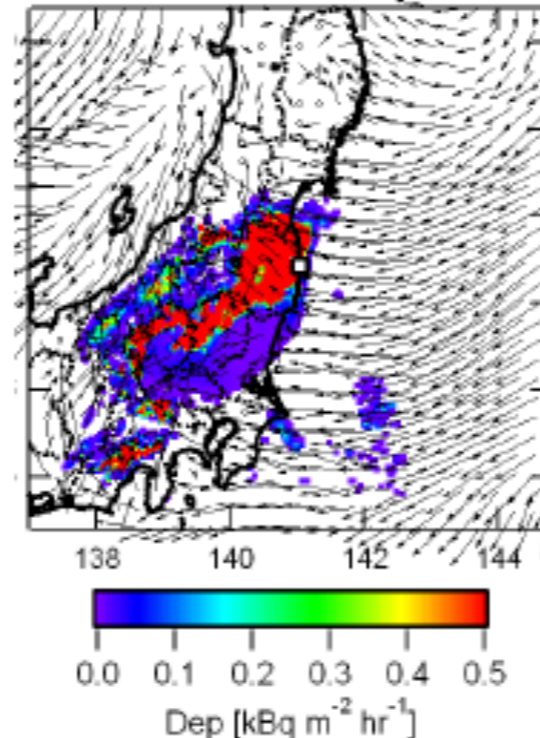
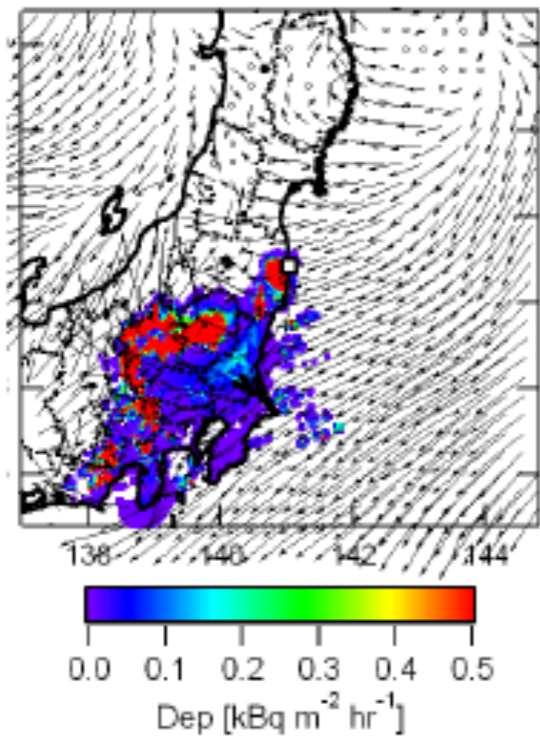
3/20の18時



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」

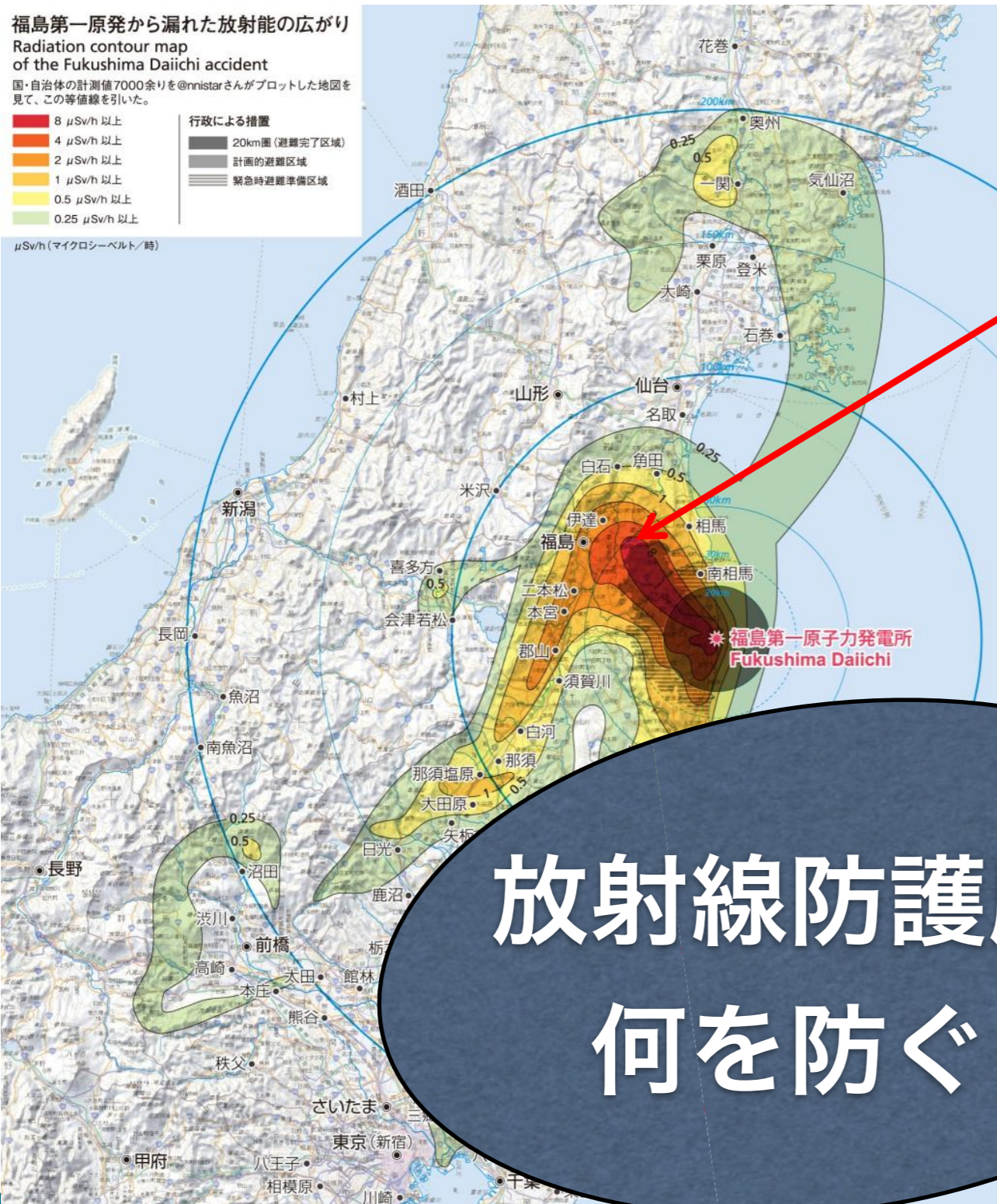
福島第一原発から漏れた放射能の広がり
Radiation contour map
of the Fukushima Daiichi accident

国・自治体の計測値7000余りを@nnistarさんがプロットした地図を見て、この等値線を引いた。

- 8 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 4 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 1 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 0.25 $\mu\text{Sv/h}$ 以上

- 行政による措置
- 20km圏 (避難完了区域)
 - 計画的避難区域
 - 緊急時避難準備区域

$\mu\text{Sv/h}$ (マイクロシーベルト/時)



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。

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
Shoehouse for Controlled Area
(Maintenance Area)

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

更衣室
Changing Room

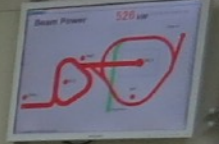
管理区域 (限域エリア) 用靴履
Shoehouse for Controlled Area
(Maintenance Area)



△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。
放射線安全セクション

△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。
放射線安全セクション

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











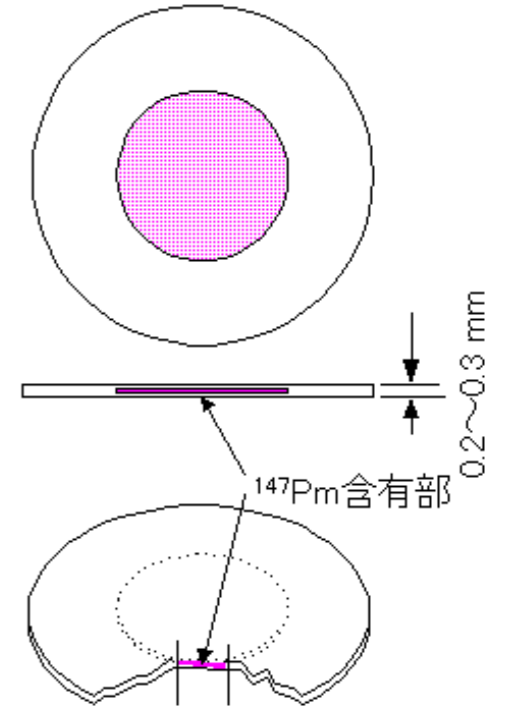
密封小線源



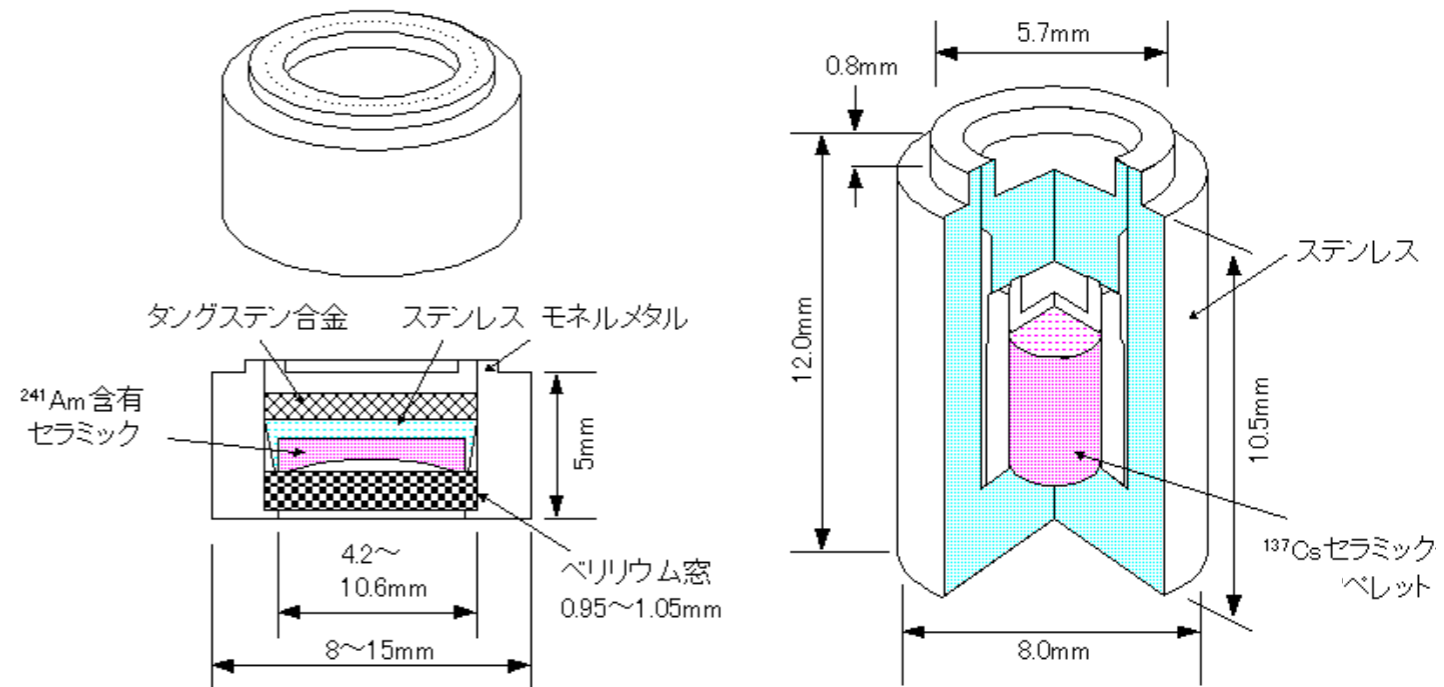
α 線源



β 線源



γ 線源



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 ($\text{Cs} \Rightarrow$ 筋肉、 $\text{I} \Rightarrow$ 甲状腺、 $\text{Sr} \Rightarrow$ 骨、 $\text{Pu} \Rightarrow$ 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。

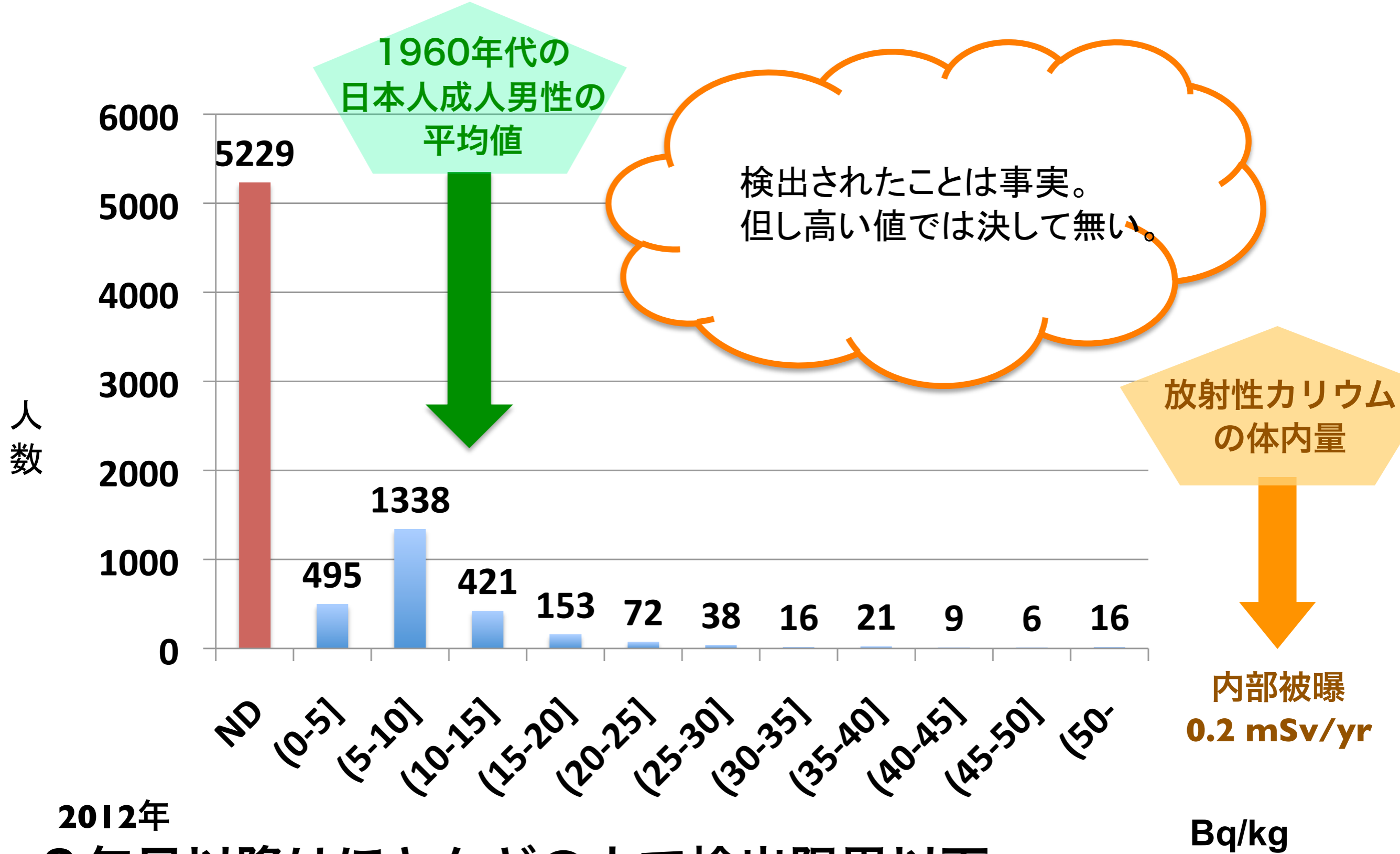
内部被曝の評価

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。

原発周辺で観測された核種

^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , $^{110\text{m}}\text{Ag}$,
 ^{132}Te , ^{132}I , ^{140}Ba , ^{140}La ,
 ^{89}Sr , ^{89}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb ,
 ^{239}Np , ^{59}Fe

Shozugawa et al., 2012

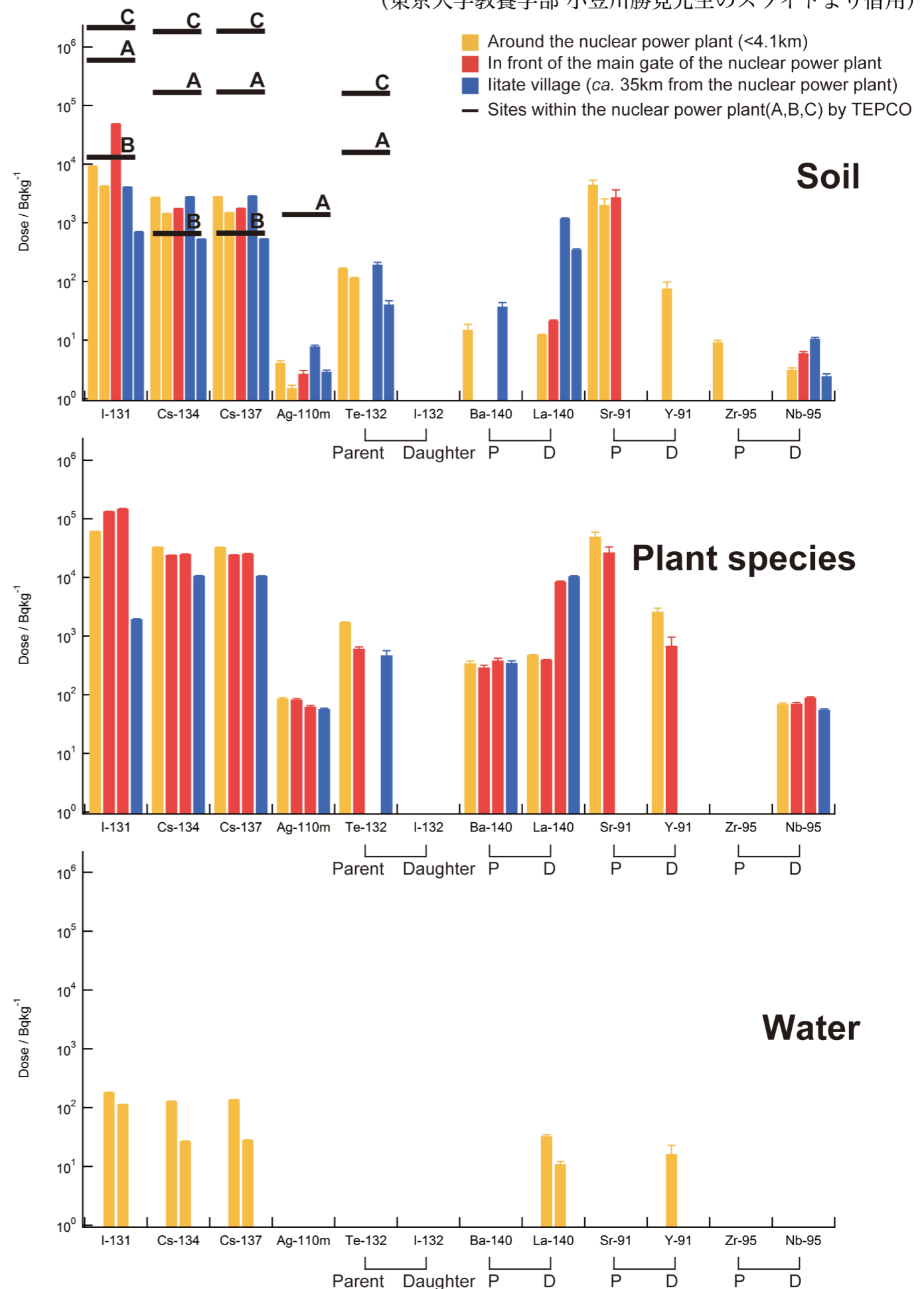
^{125}Sb , $^{127\text{m}}\text{Te}$, $^{129\text{m}}\text{Te}$,
 ^{136}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{54}Mn ,
 ^{58}Co , ^{60}Co , $^{114\text{m}}\text{In}$

小島ら, 2011,2012

^{241}Pu

Zheng et al, 2012

(東京大学教養学部 小豆川勝見先生のスライドより借用)



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・稻藁）

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



相馬野馬追



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

第4話

放射線の人体への影響

鳥居 寛之

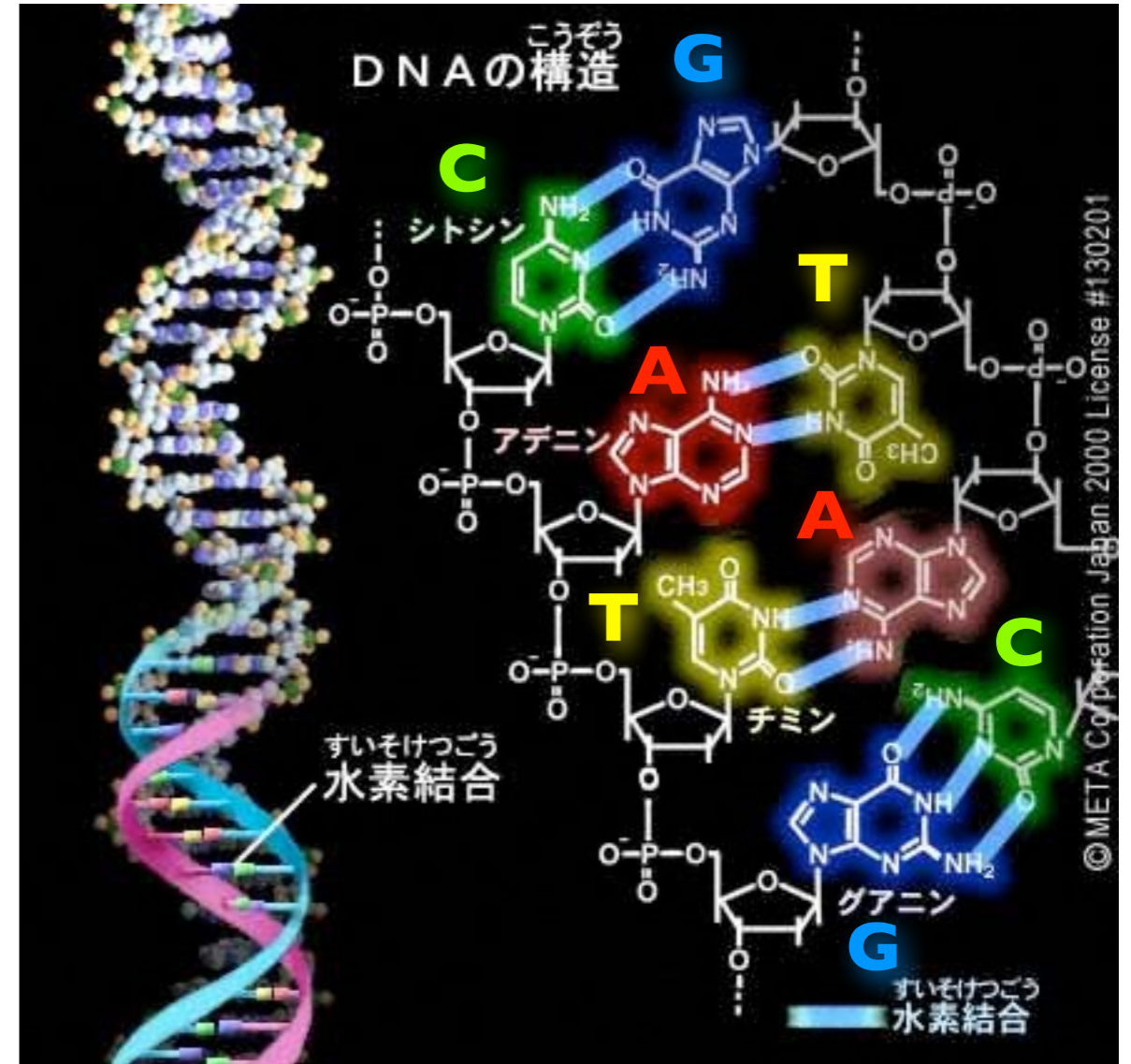
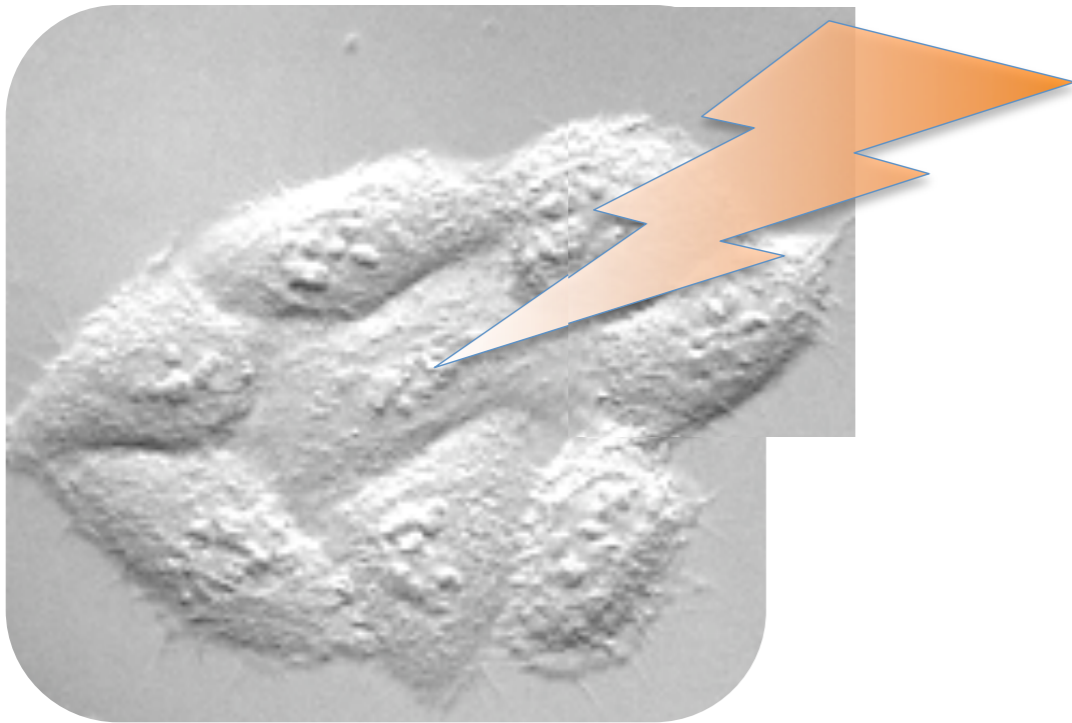
東京大学 大学院理学系研究科

放射線化学

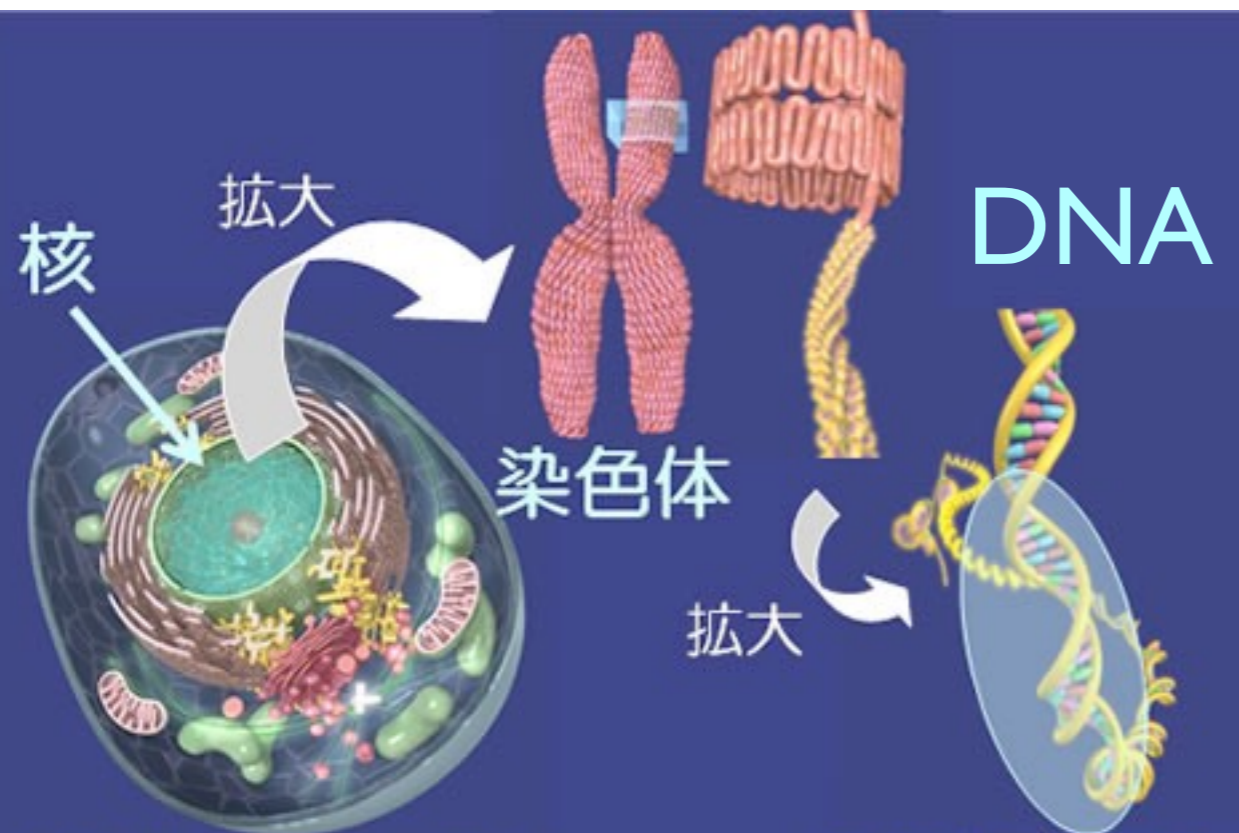
放射線の単位

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/>



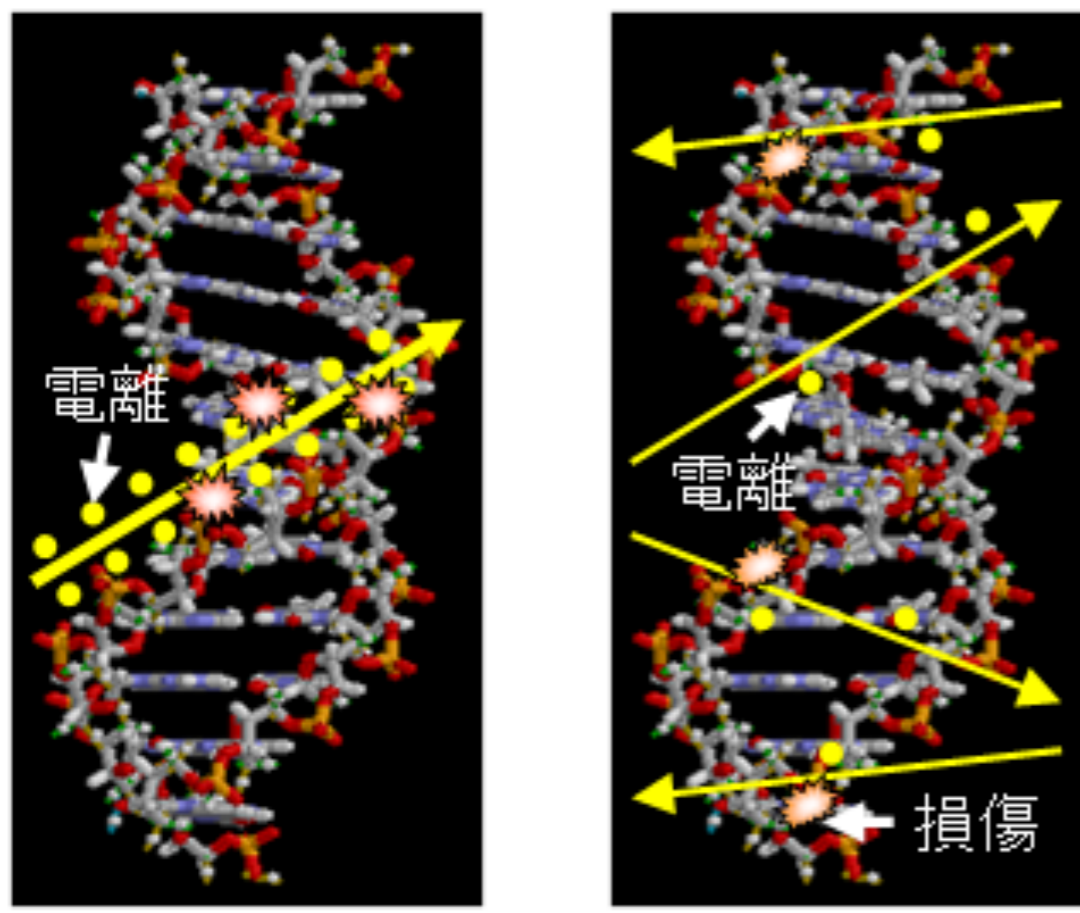
細胞(60兆個)

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

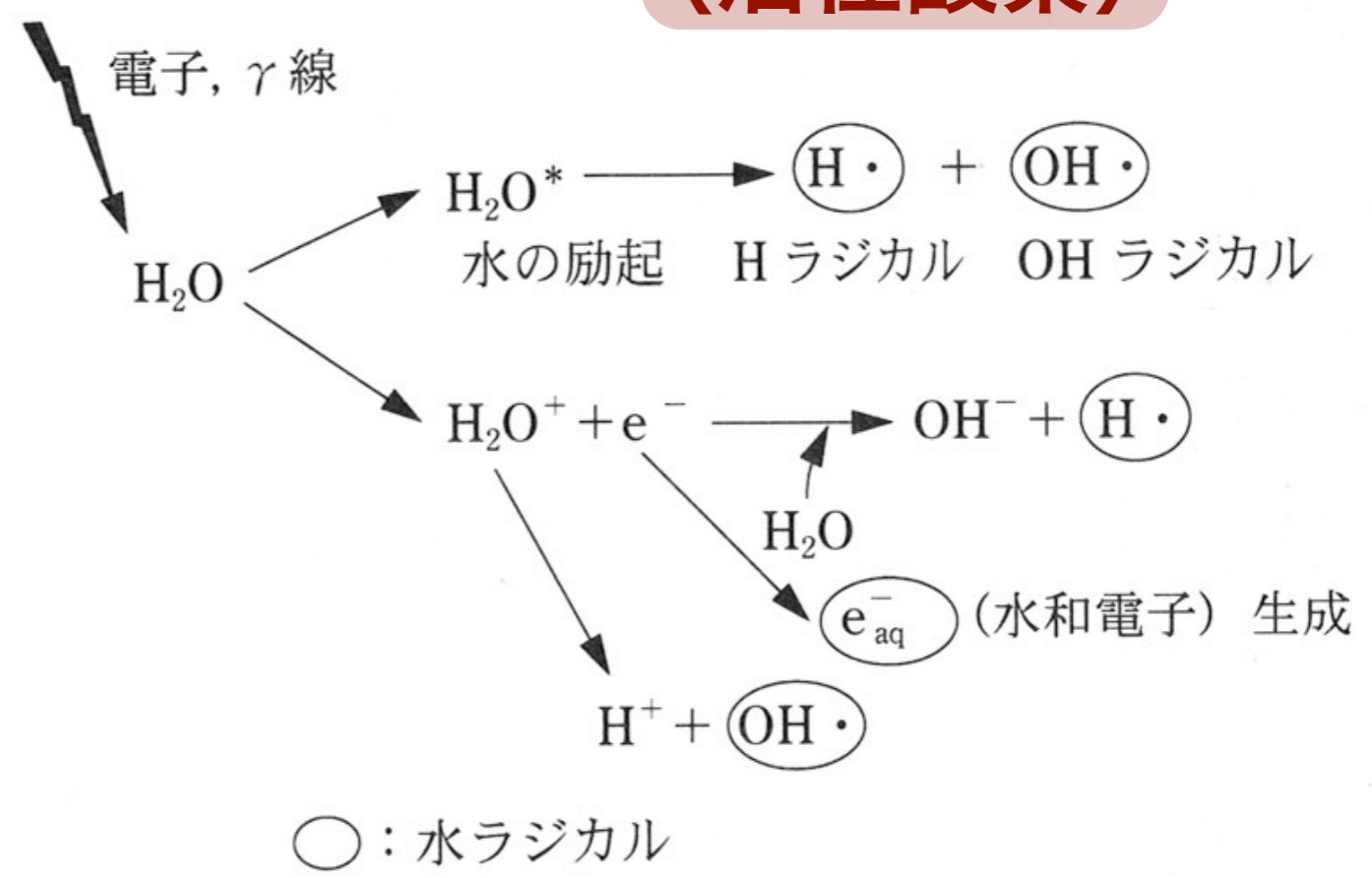


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

LET : 線エネルギー付与

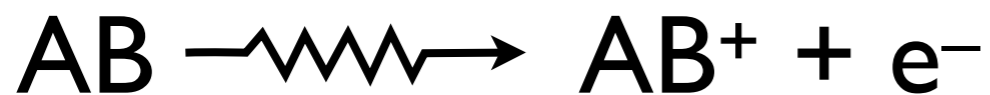
放射線の直接作用 : 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**
 α 線

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

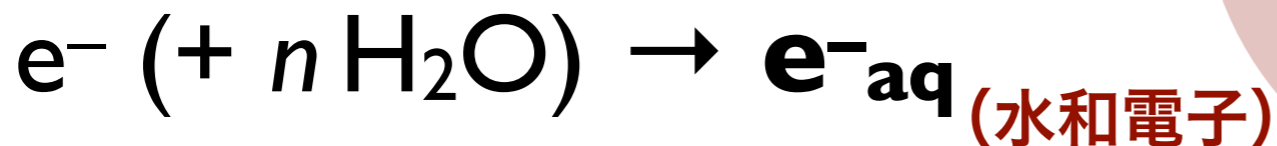
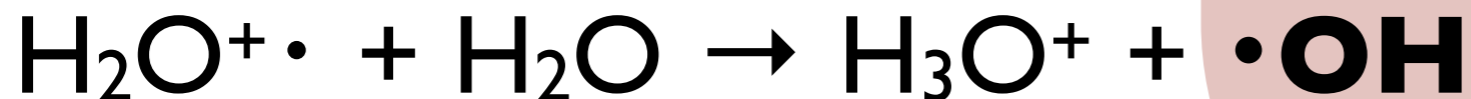
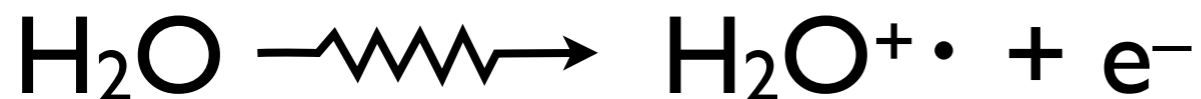


再結合



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)

● 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

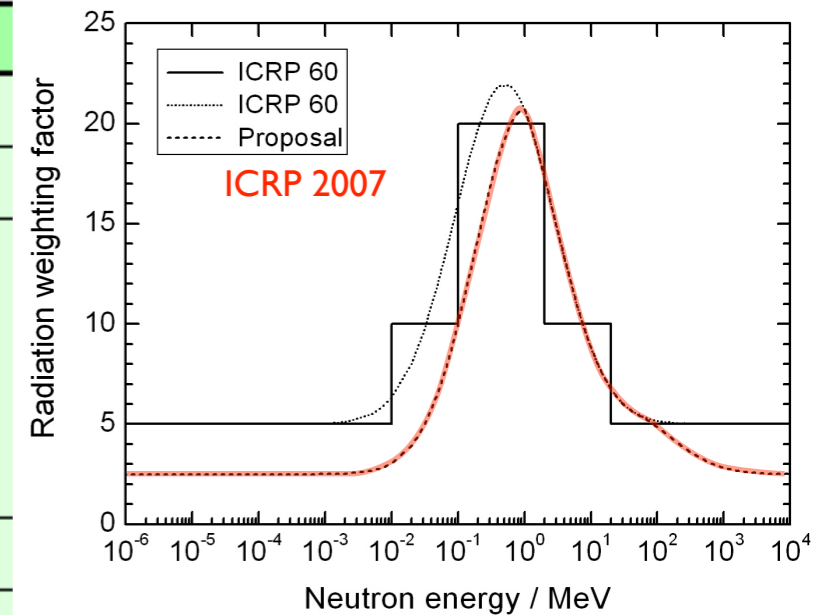


● 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

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



放射線生物学

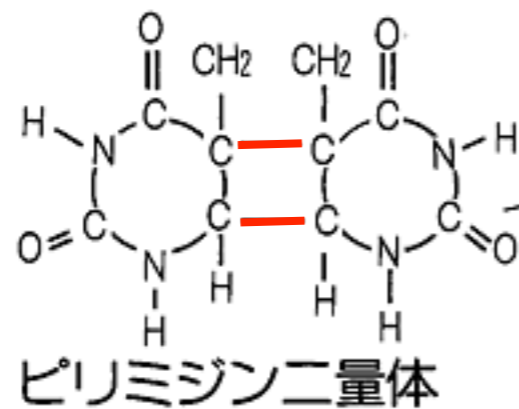
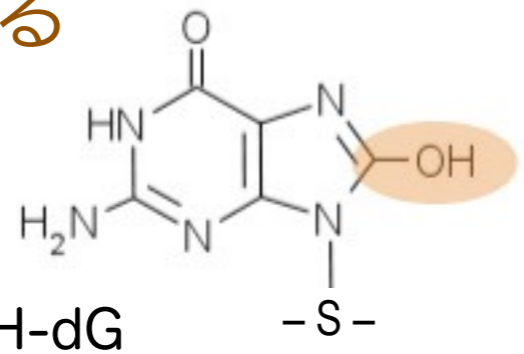
何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

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



紫外線照射でも頻発

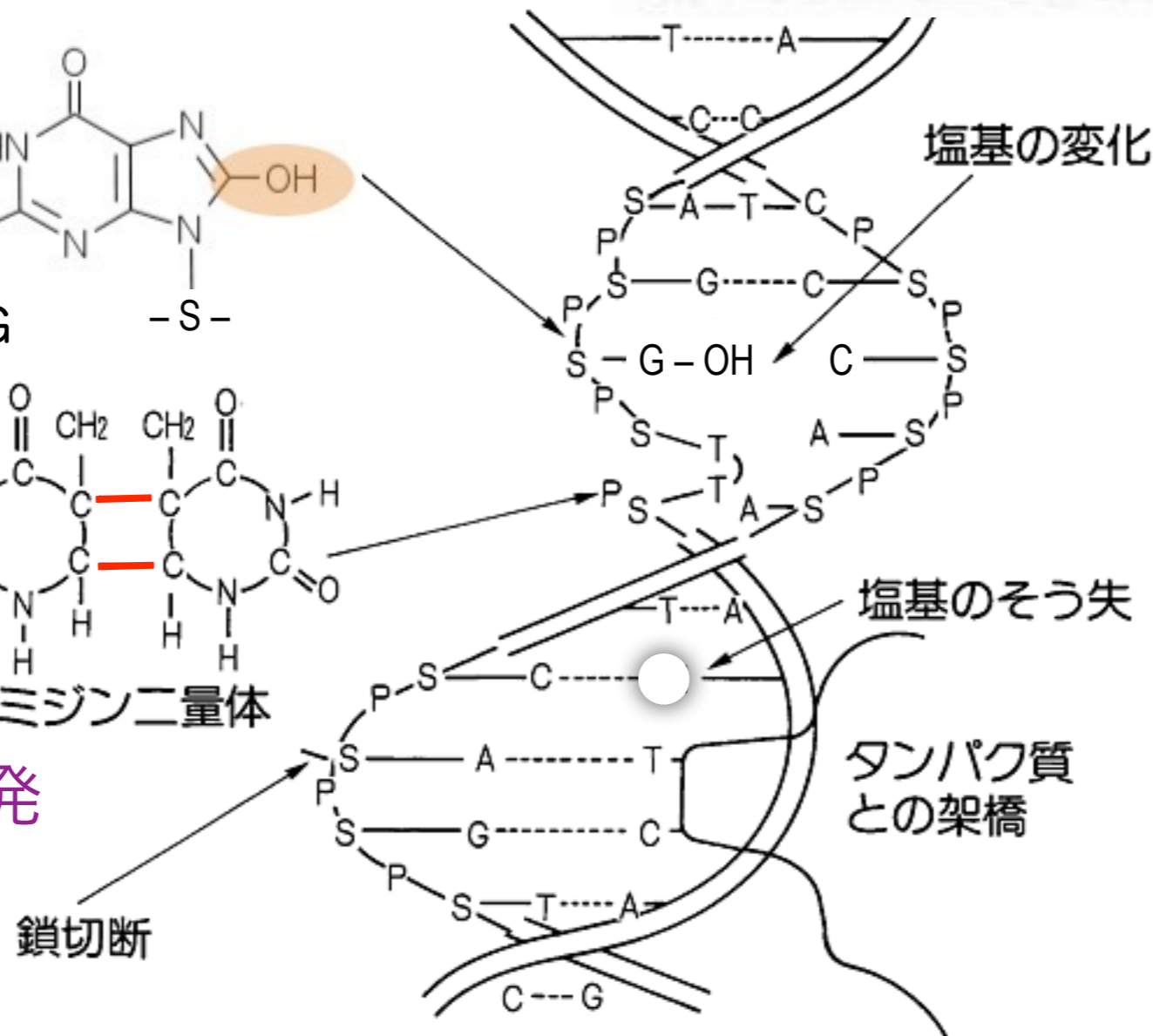
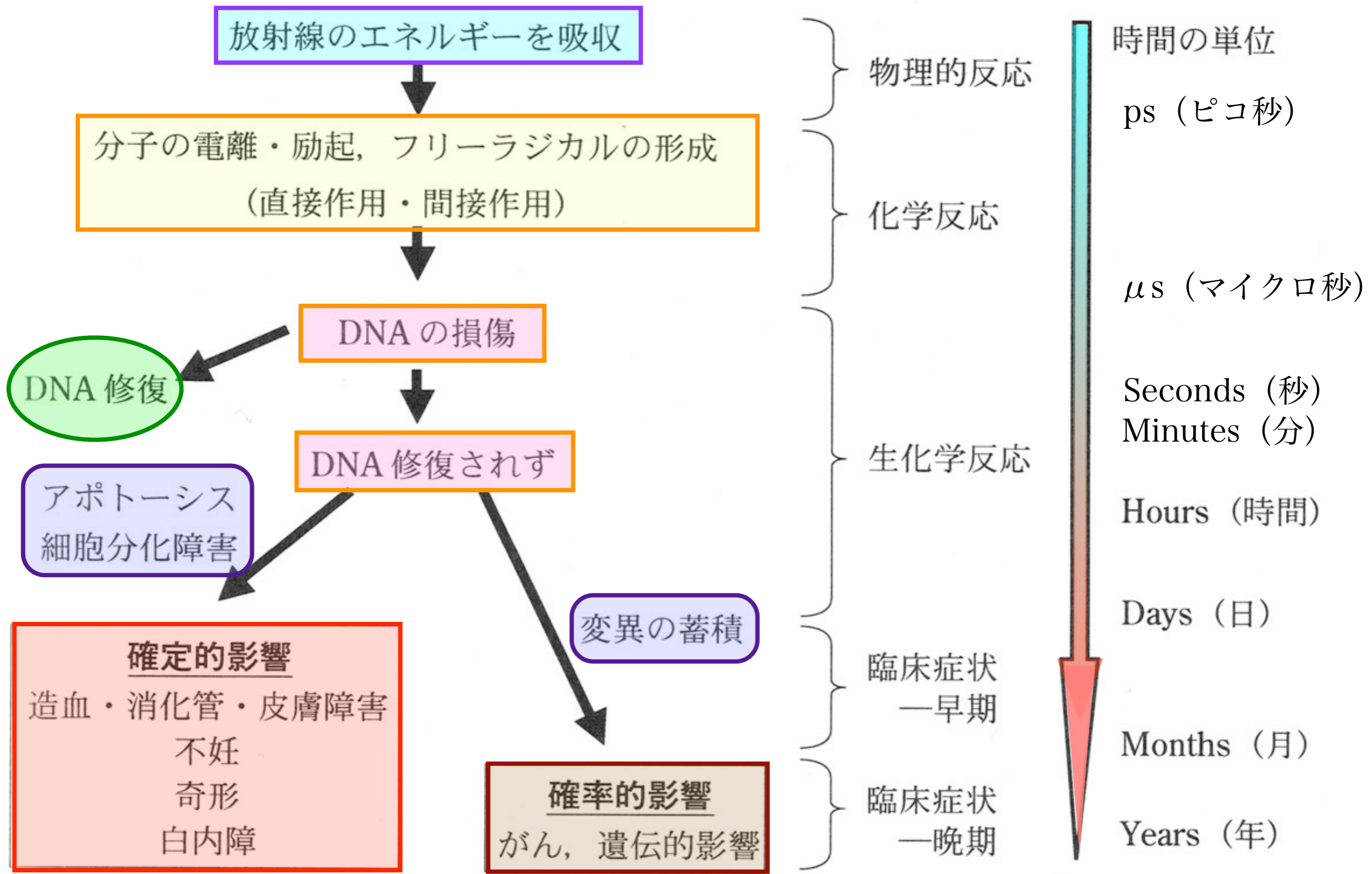


図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

[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。

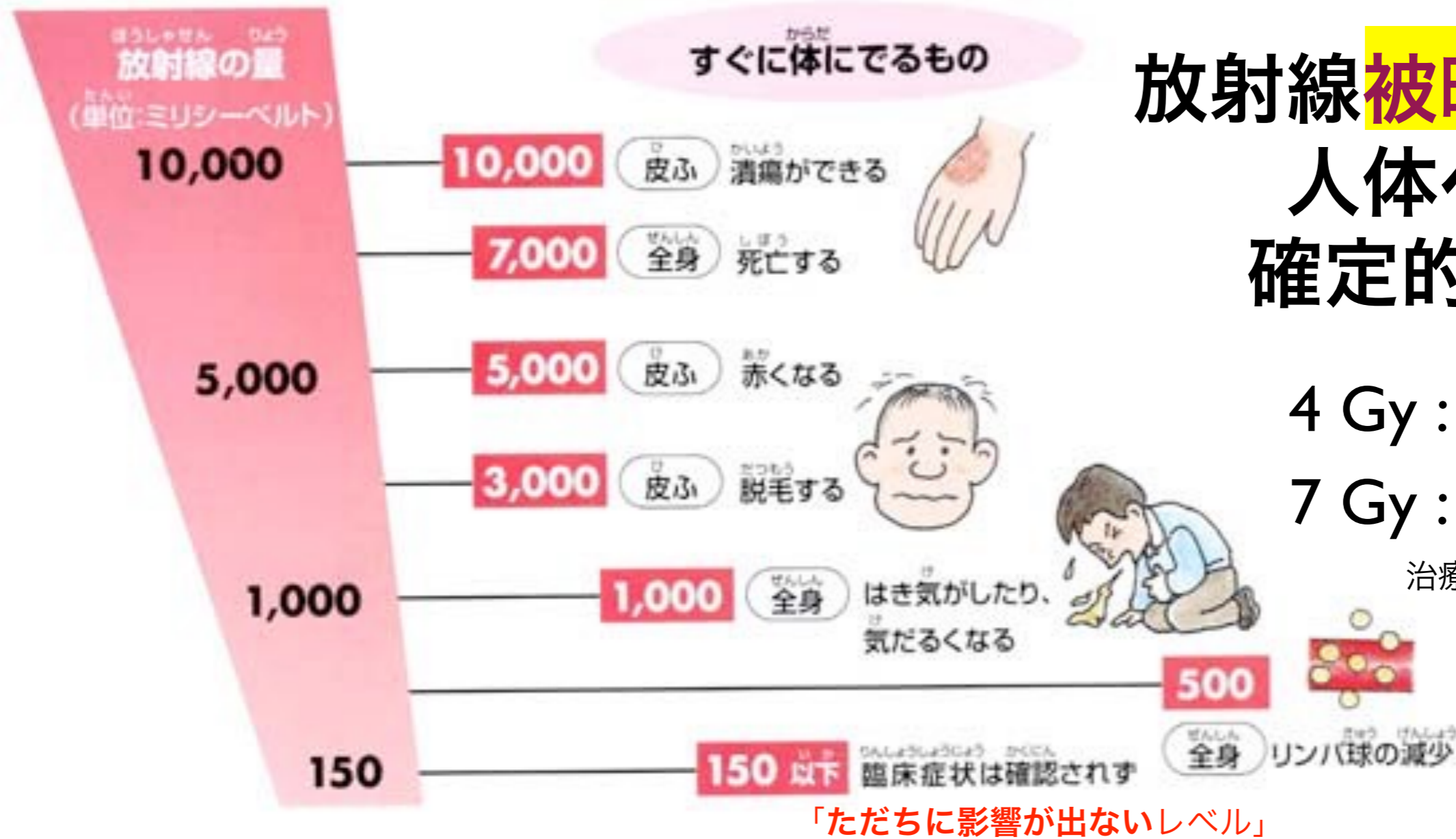


放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

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。



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 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

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				

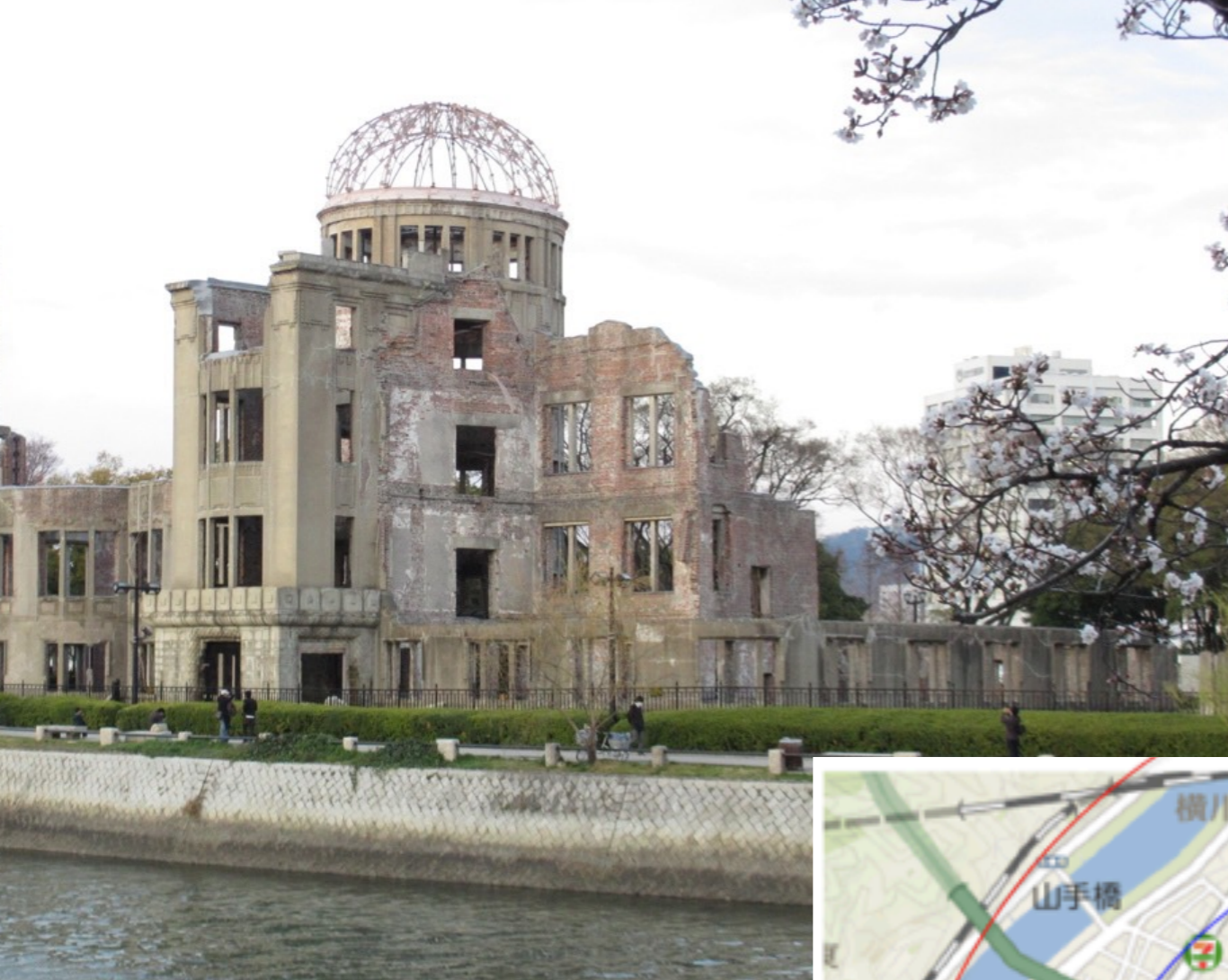
図1 細胞再生系

(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)

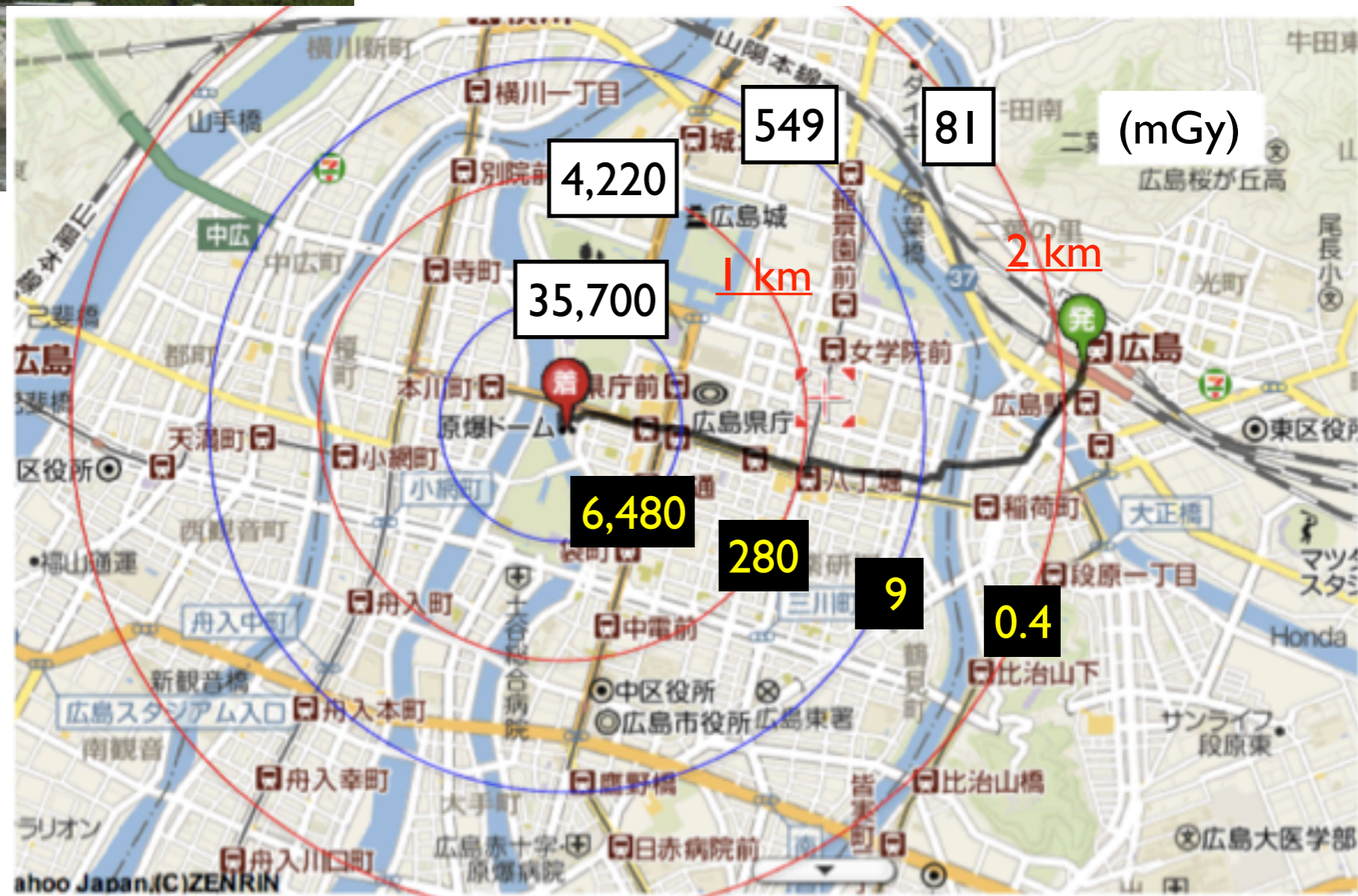
広島 原爆ドーム





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)



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。

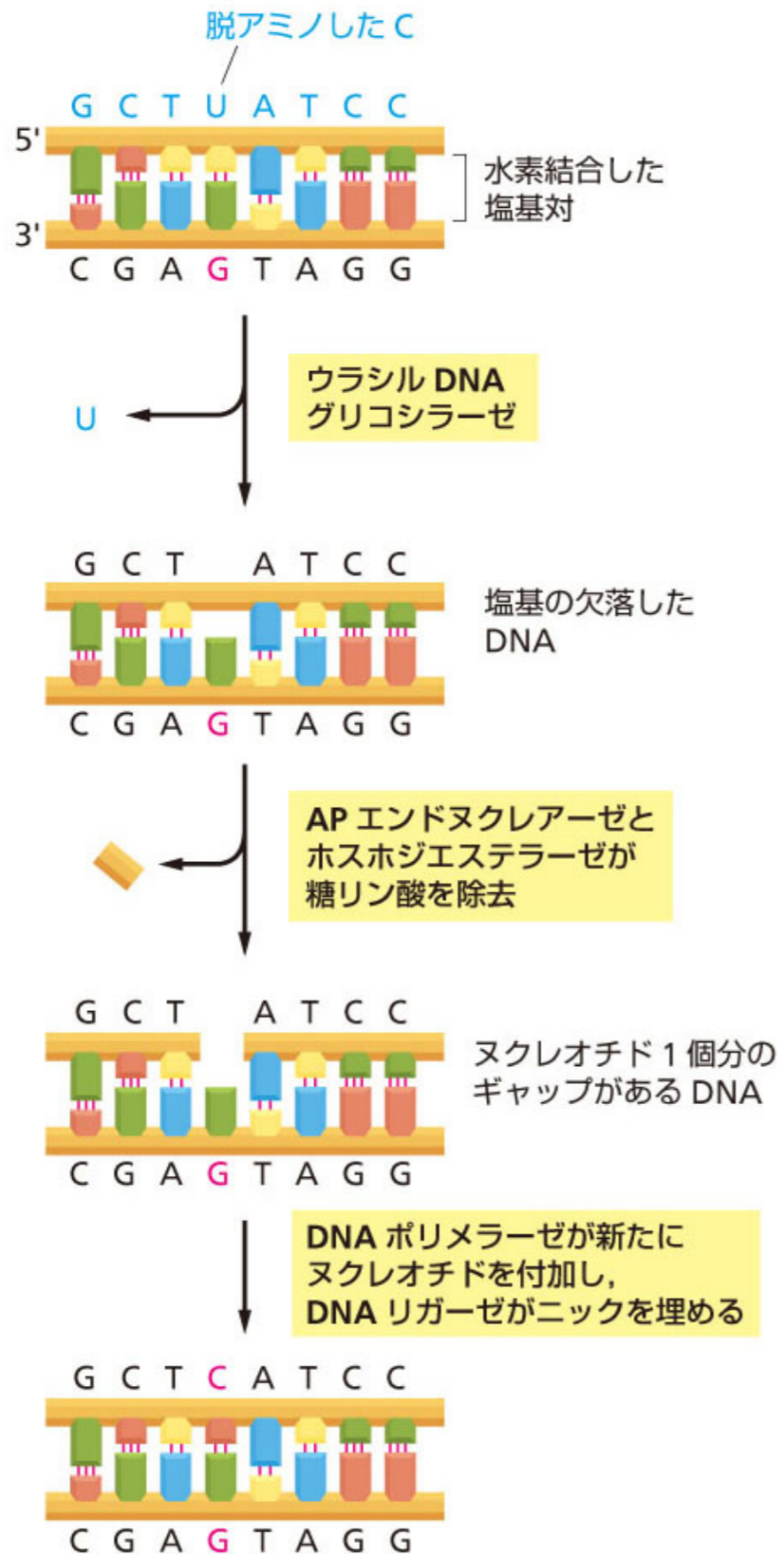
(日本人の3人に1人はがんで死亡する。)

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。

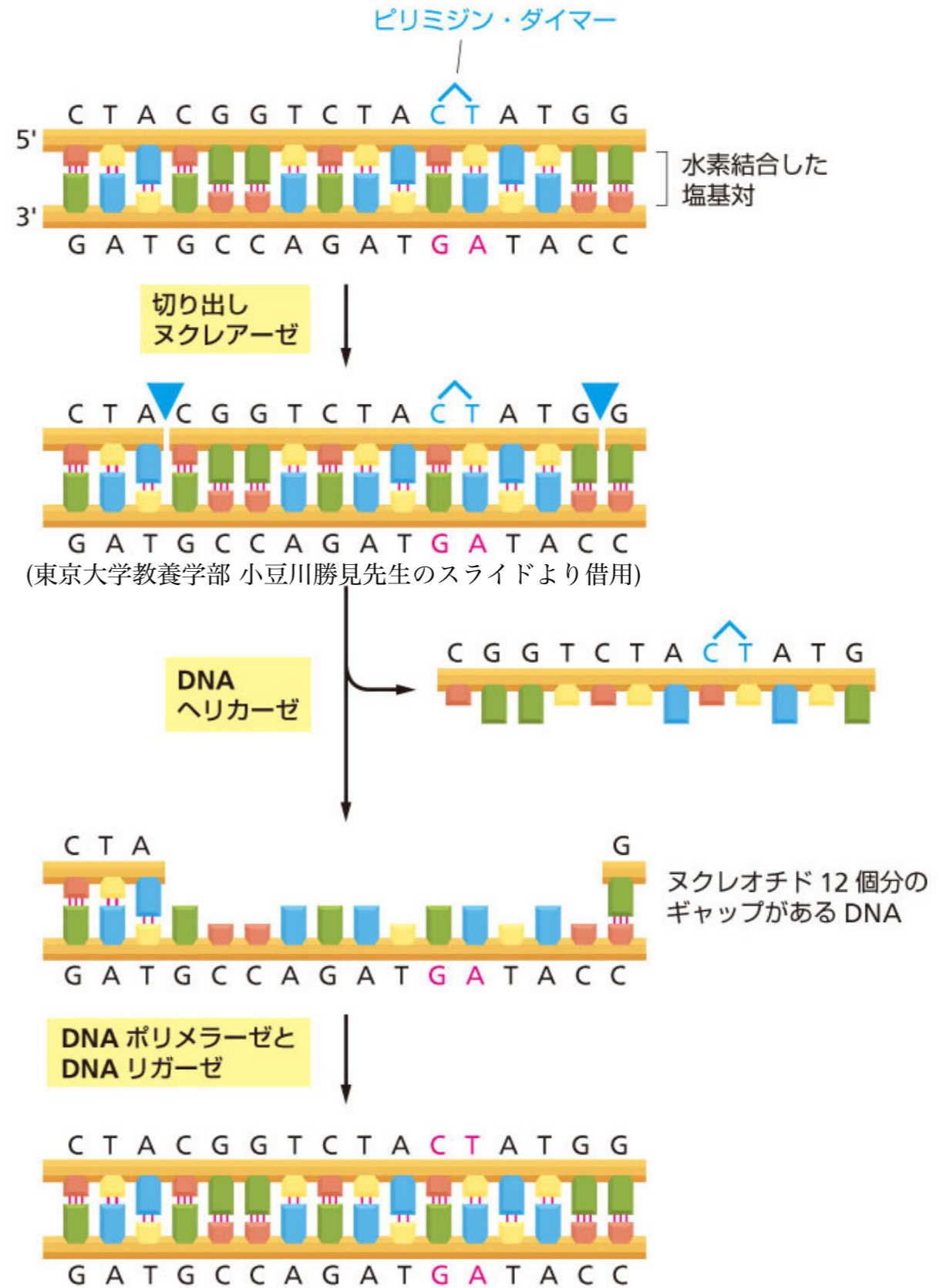
DNA 修復

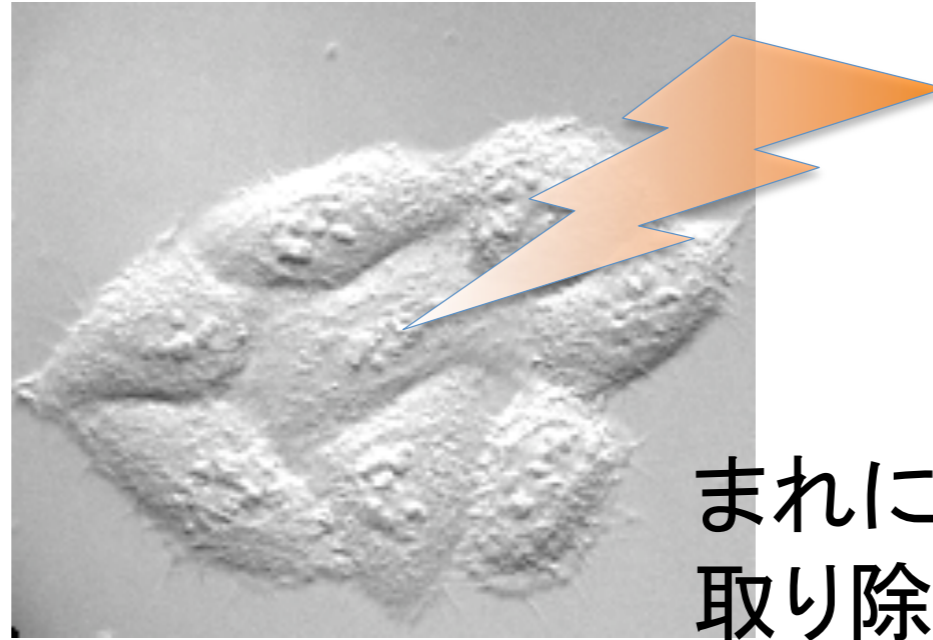
(東京大学教養学部 渡邊雄一郎先生のスライドより借用)

塩基除去修復



(B) ヌクレオチド除去修復

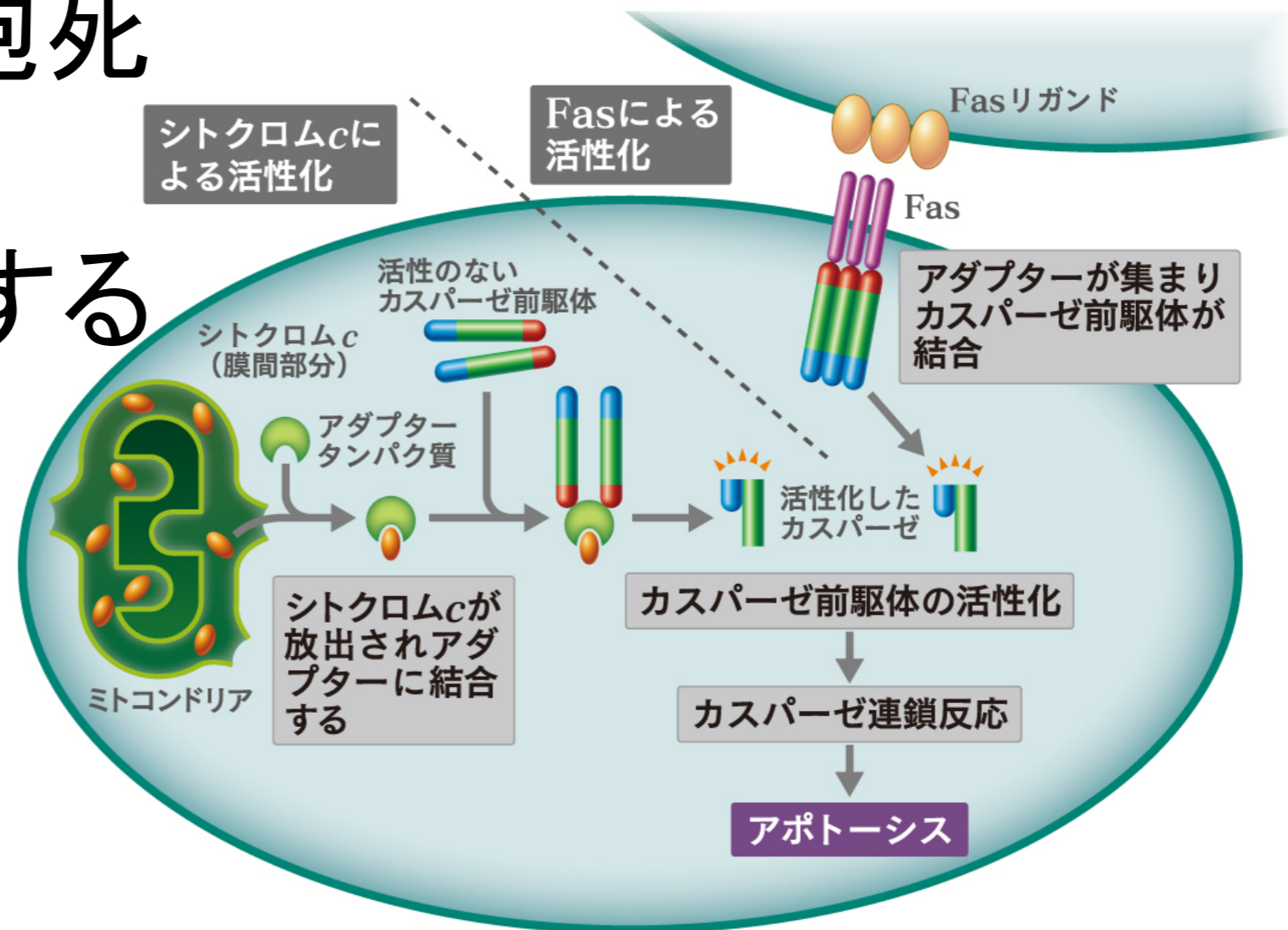


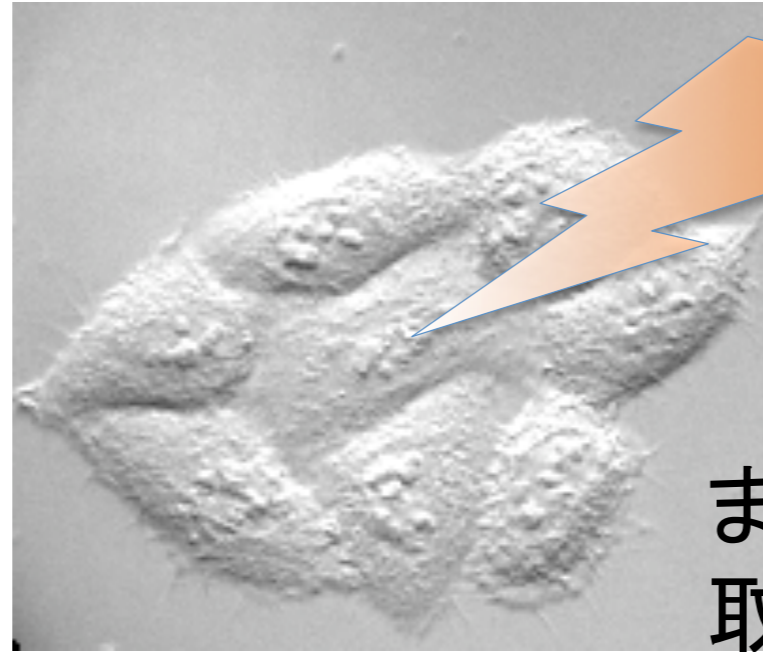


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

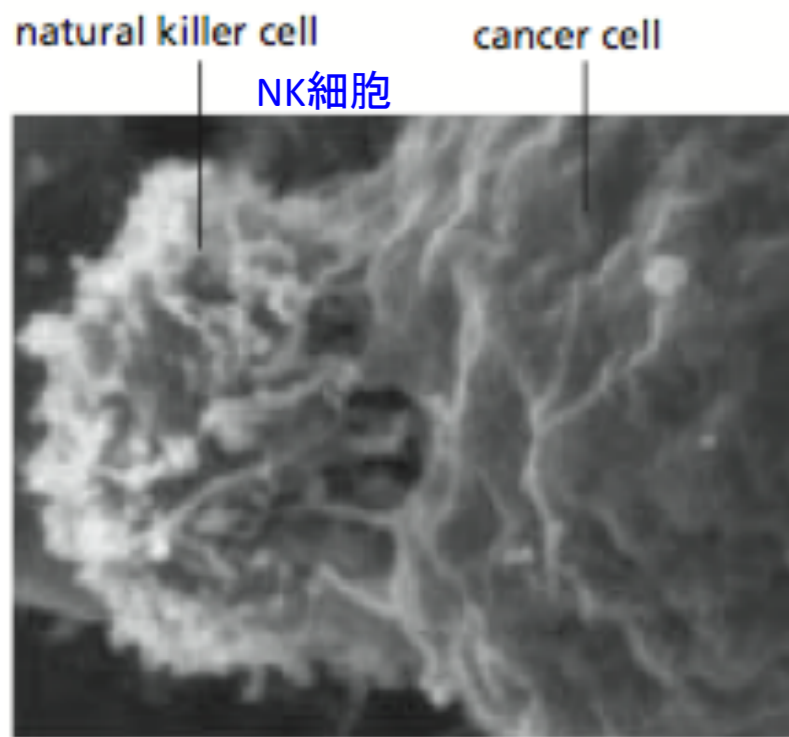
プログラム細胞死

細胞が自爆する





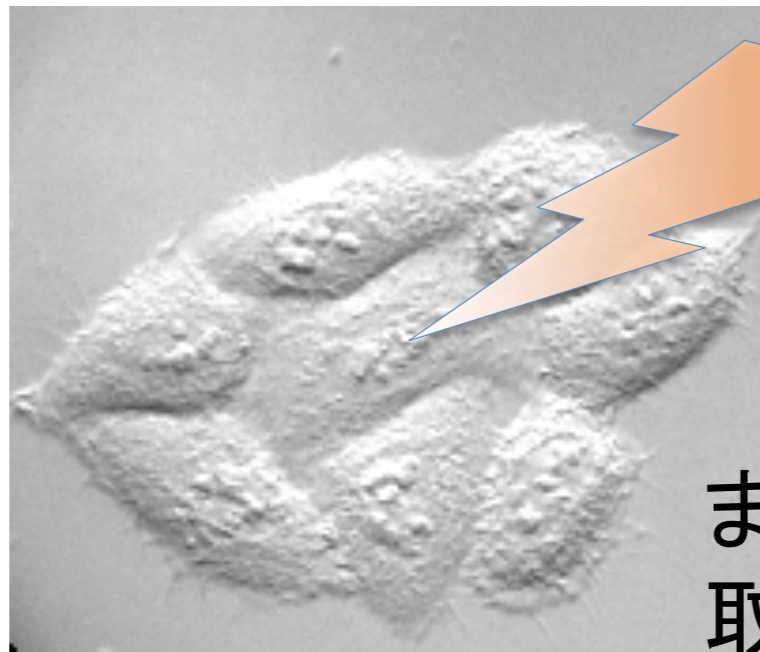
まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう



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

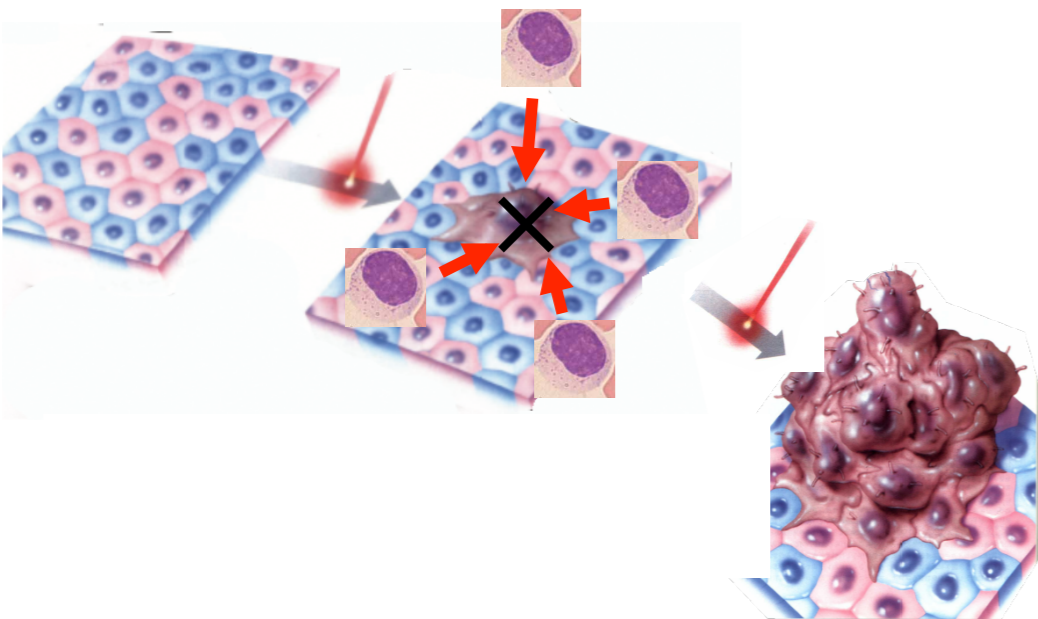


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

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

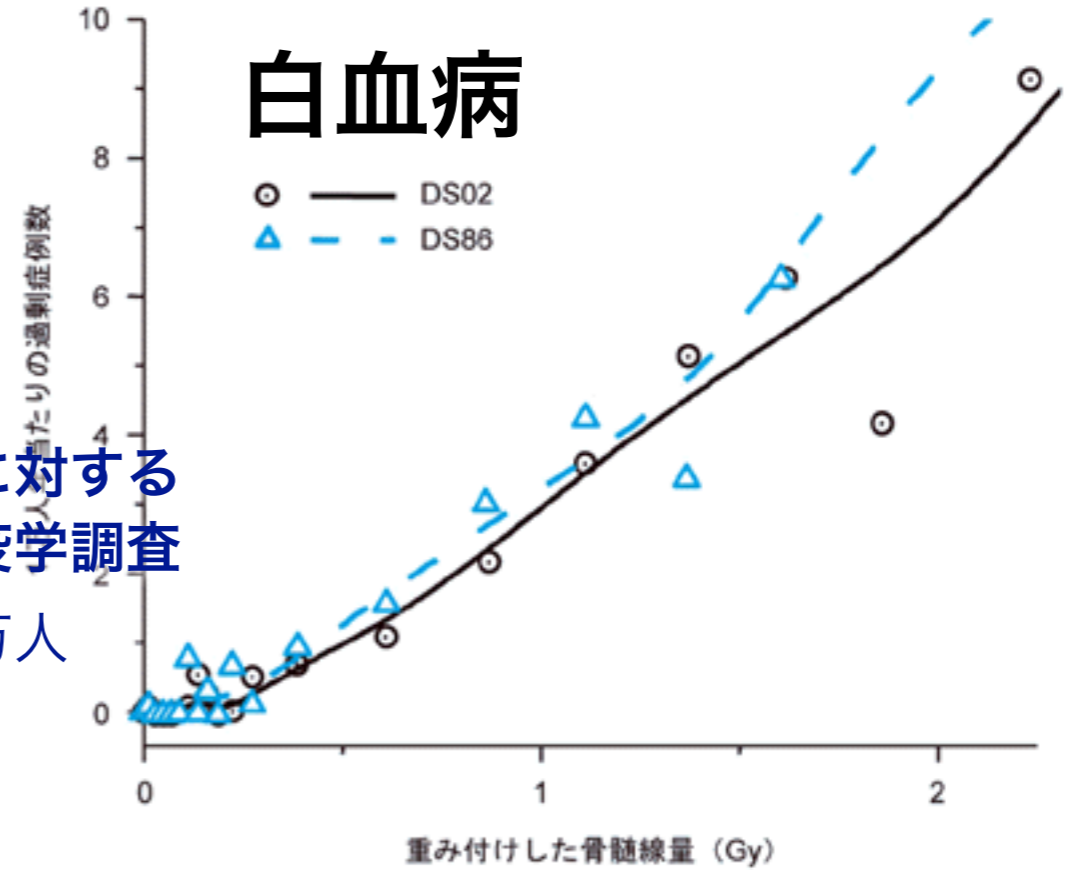
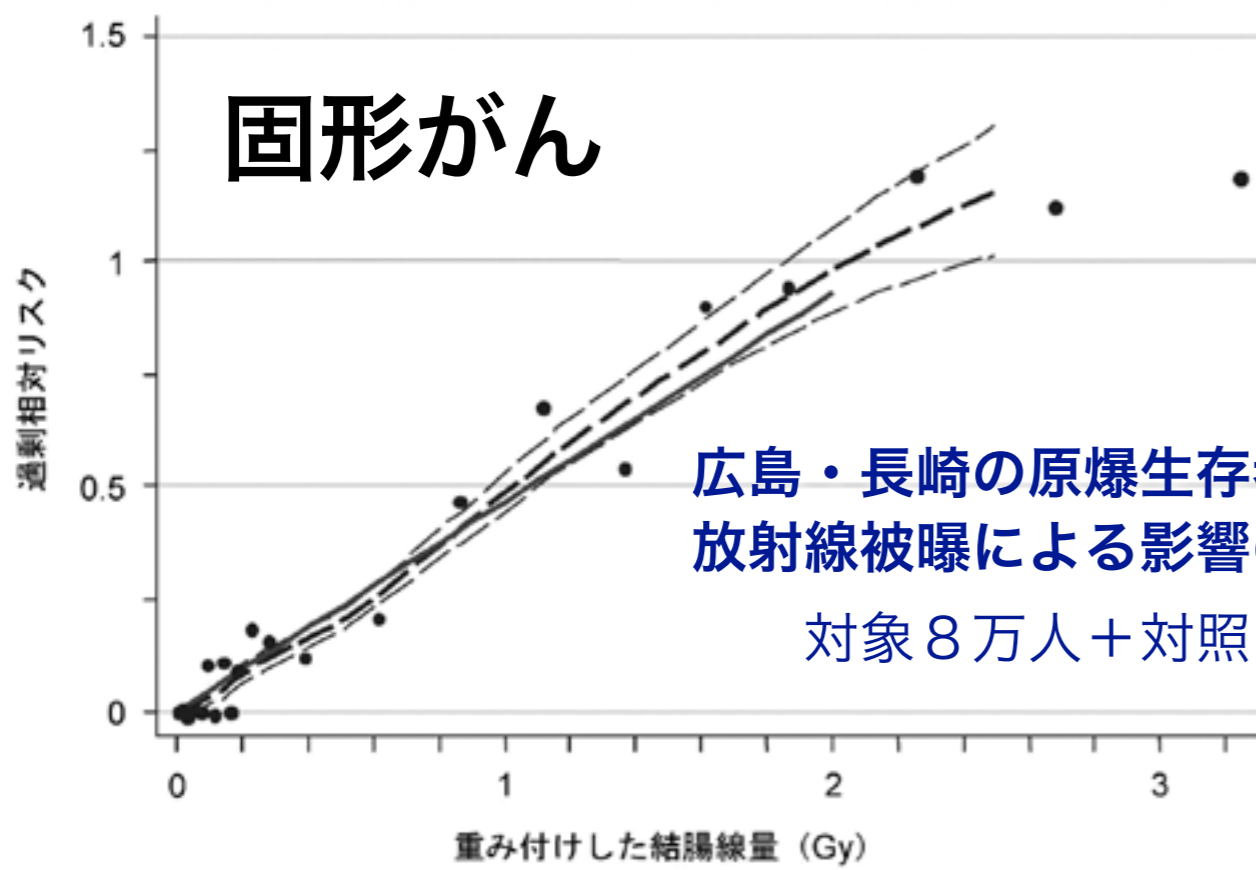


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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

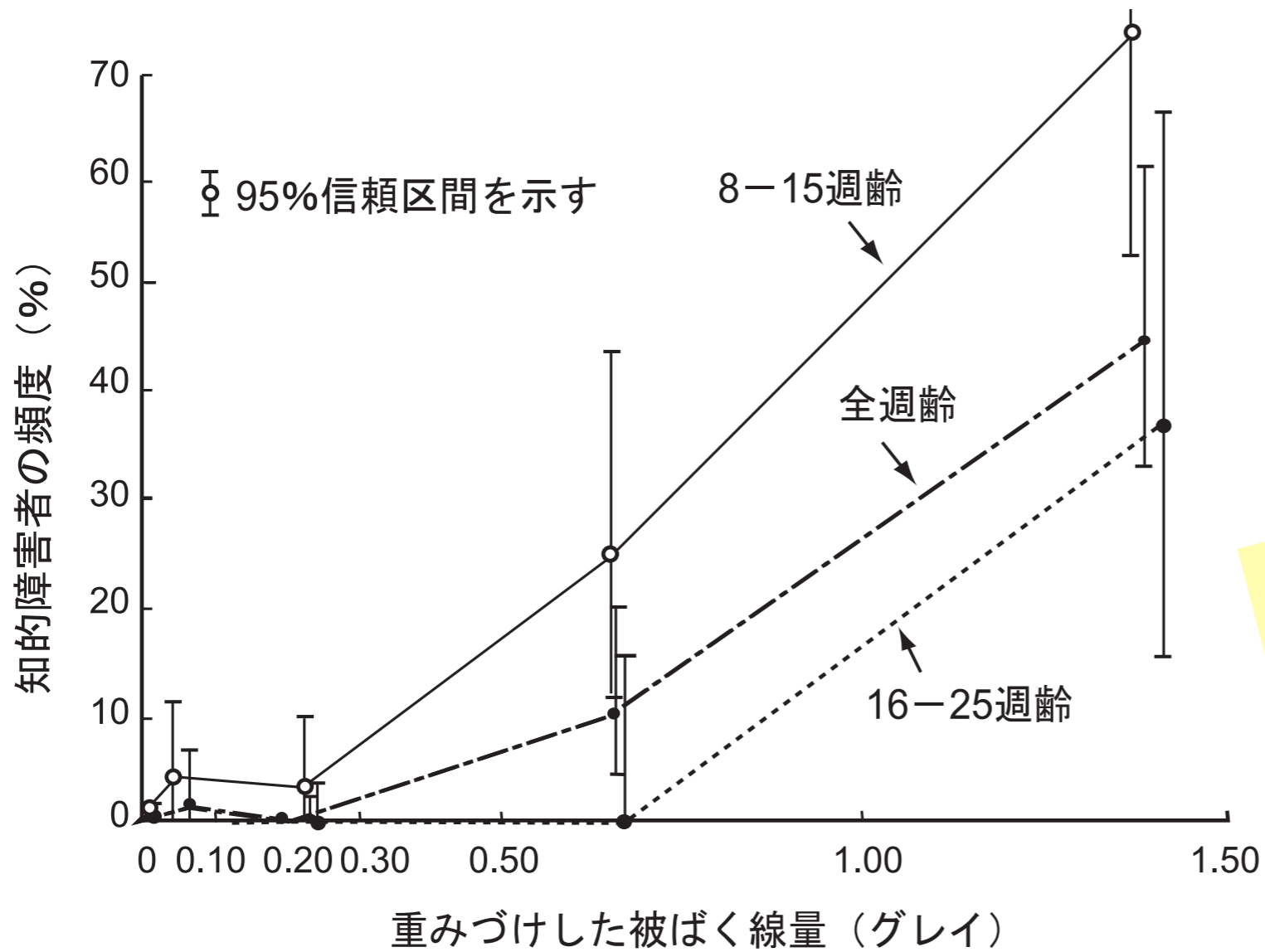
重み付けした骨髄線量 (Gy)	対象者数	死亡		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	30,387	69	4	6%
0.1 - 0.2	5,841	14	5	36%
0.2 - 0.5	6,304	27	10	37%
0.5 - 1.0	3,963	30	19	63%
1.0 - 2.0	1,972	39	28	72%
>2.0	737	25	28	100%
合計	49,204	204	94	46%

(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」

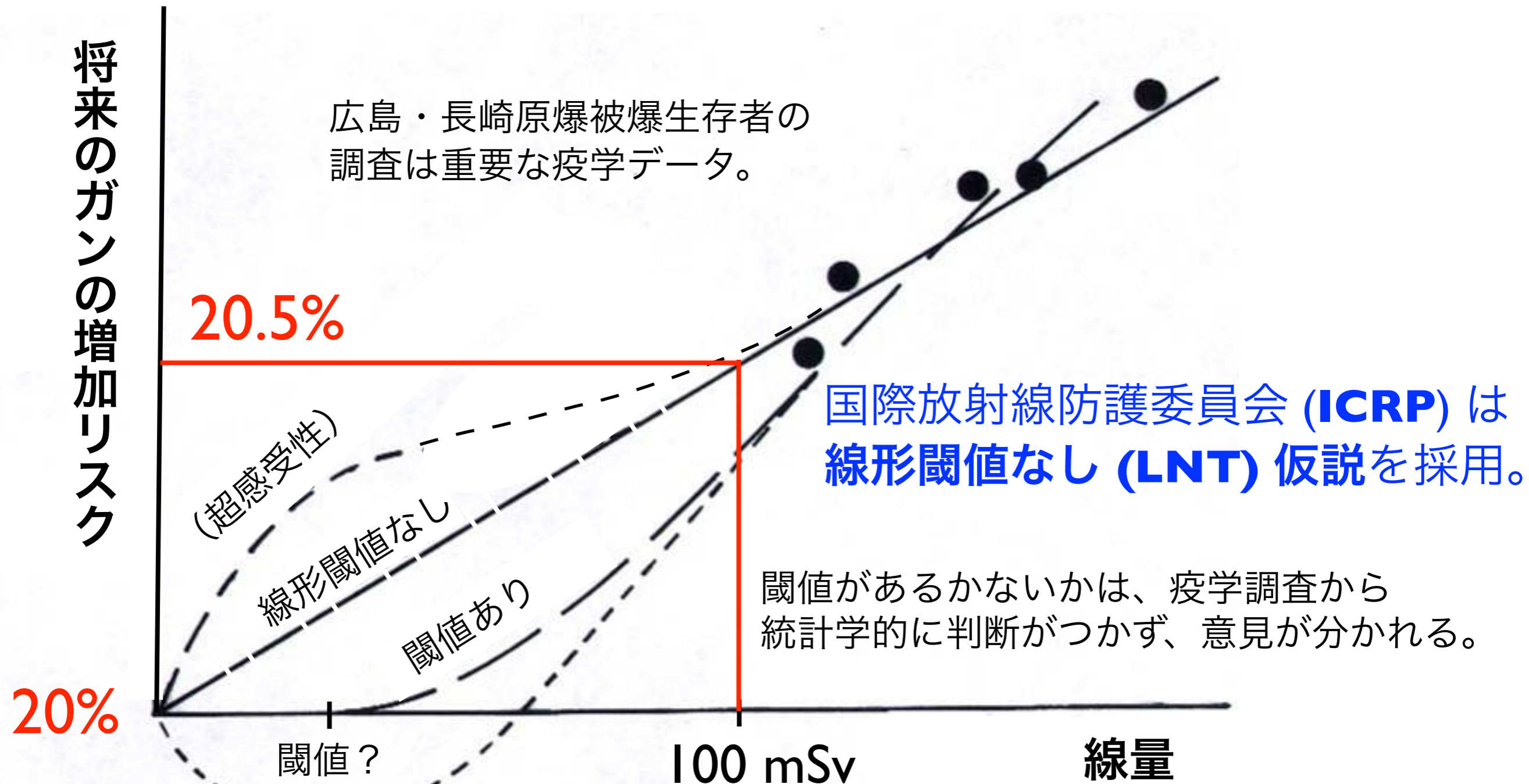
放射線による**遺伝的影響**は認められず

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)

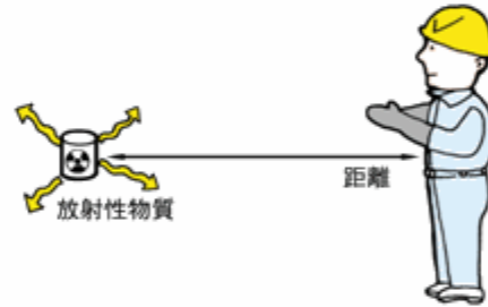
慢性被曝が急性被曝に比べて効果が何分の1になるかの係数

線量・線量率効果係数 **DDREF = 2**

放射線防護

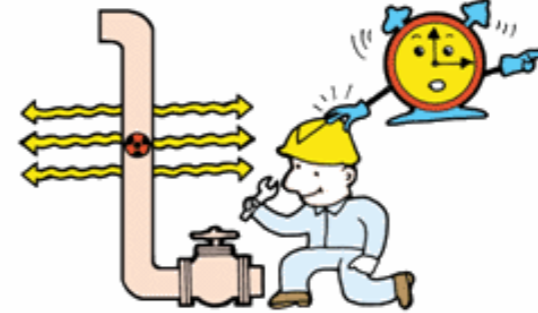
● 距離による防護

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

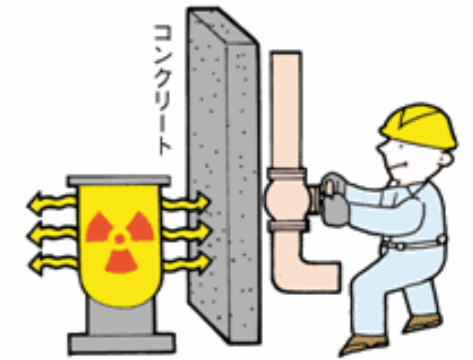


● 時間による防護

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



● 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。

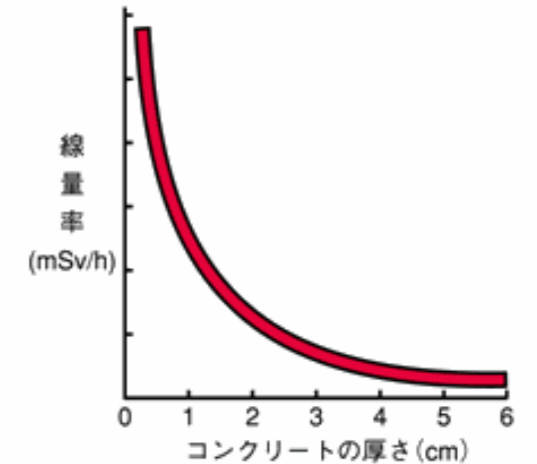
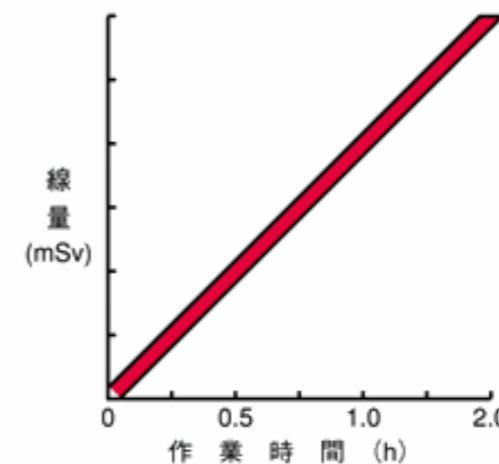
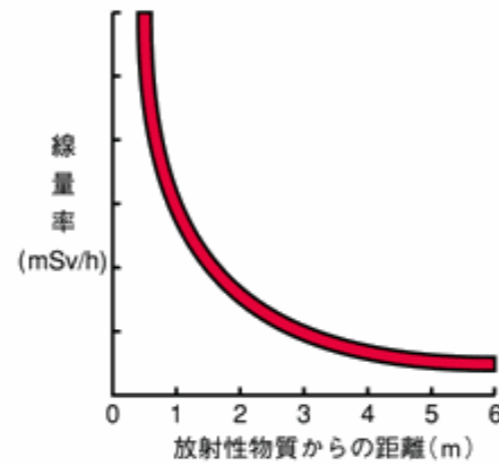


図1 遮へい3原則の図

[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)

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

放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

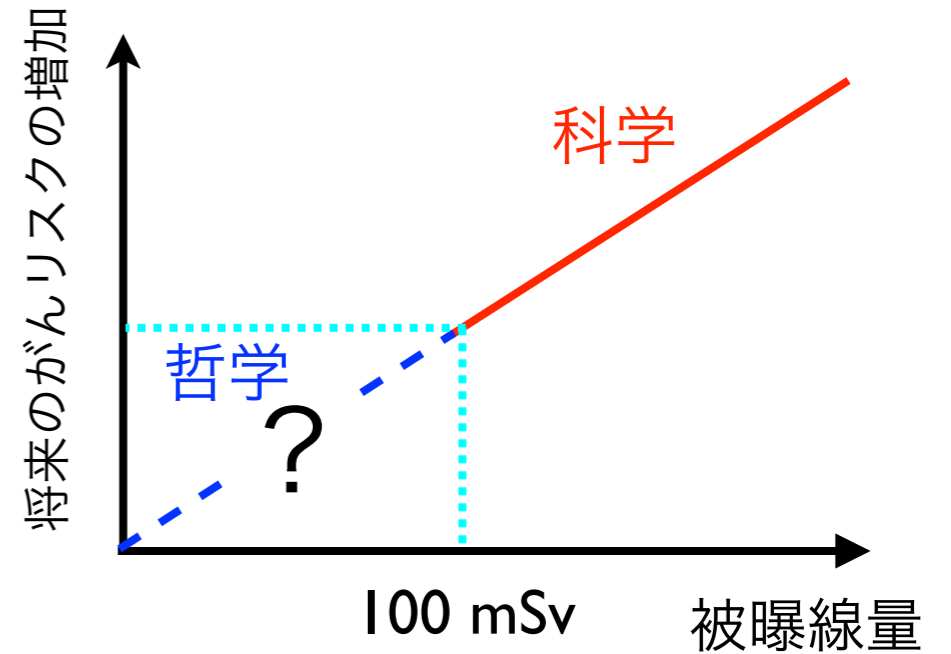
がんの原因が医学的に分かっていない

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 (社会が決める)

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。

風評

風評被害は落ち着きつつあるが、依然として福島土地や産物を避けようとする人も一定数存在。

風化

放射線の科学的知識を身につけないまま関心が風化しつつある。

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

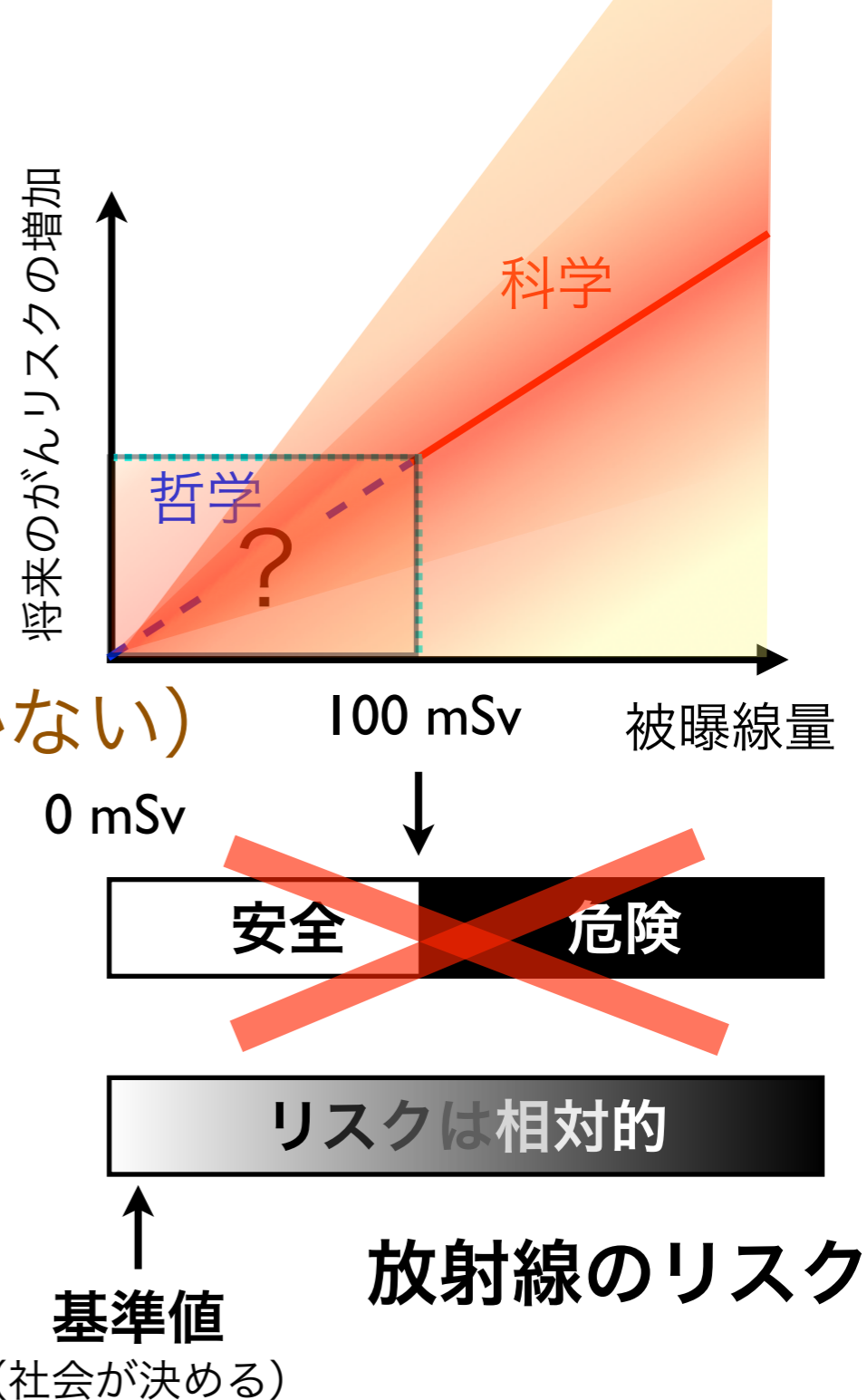
個別の事象との因果関係は分からない

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



低線量・低線量率の被曝とガン死亡

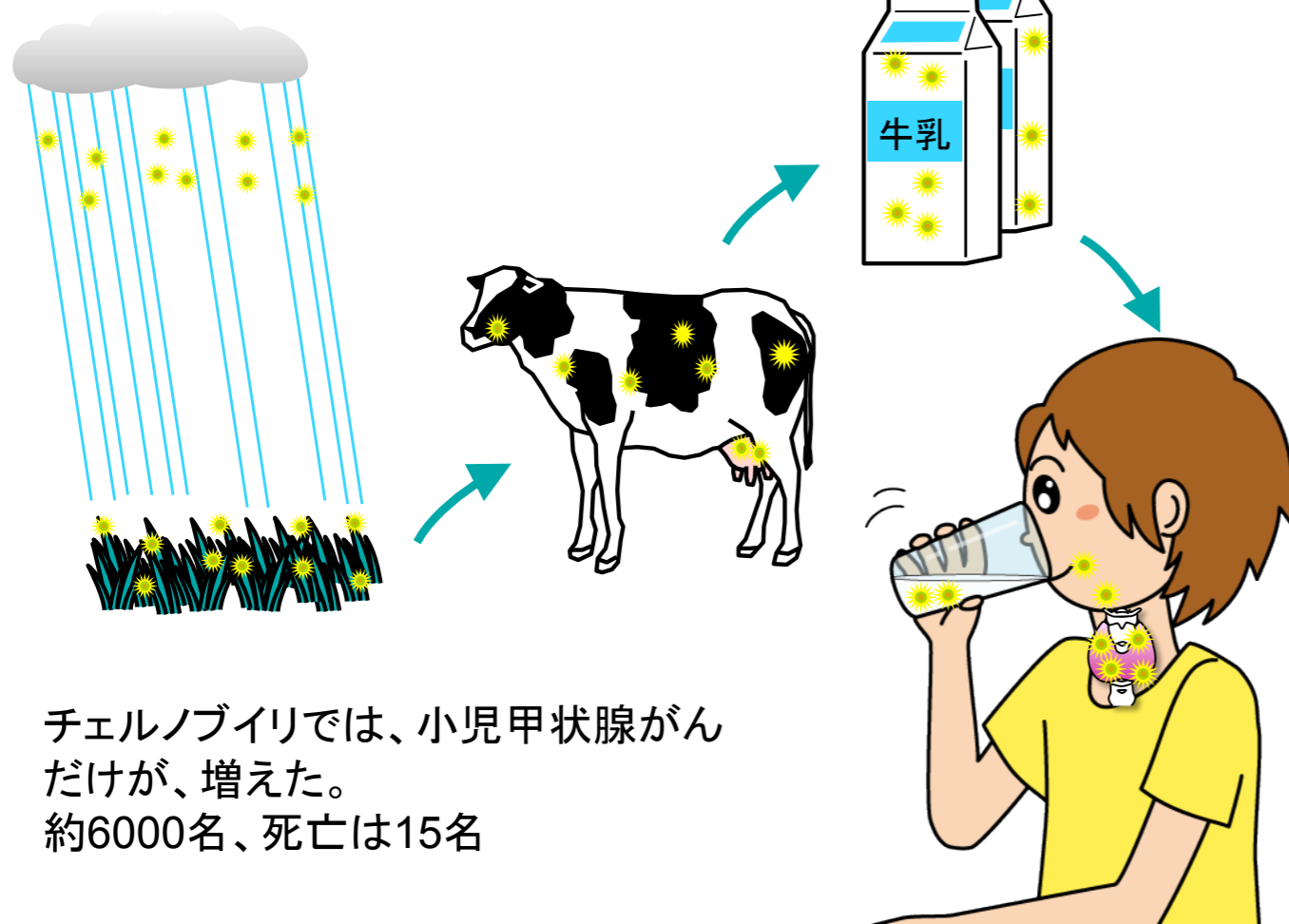


ロシア語
Чернобыль / Чорнобиль



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

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

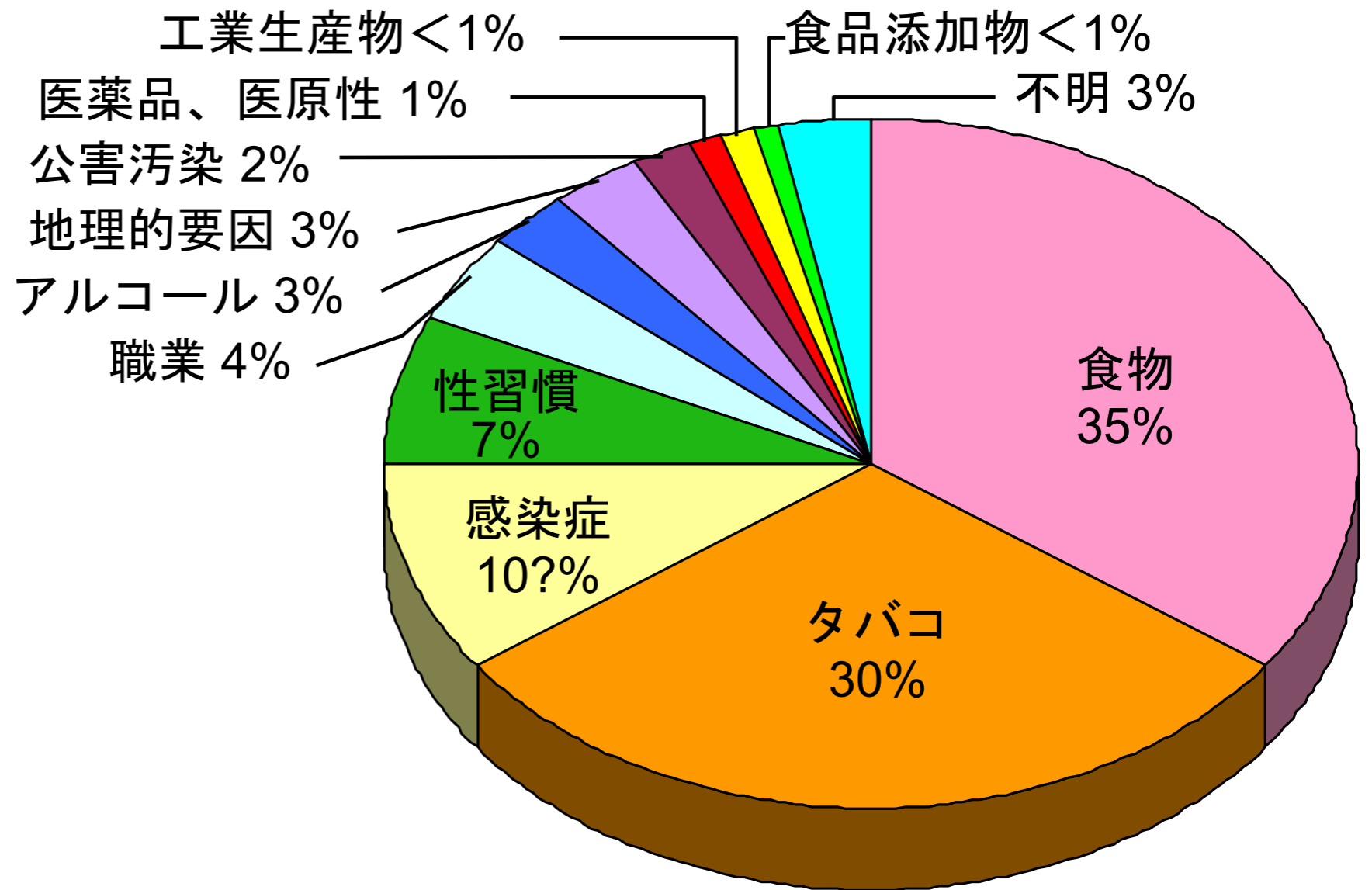
放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

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

リスクコミュニケーション



放射線に対する強い恐怖心をもつ人たちがいる

- 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

震災がれき処理問題

東京大学 × 博報堂 × 時事通信社

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

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？）

新聞報道の問題点

両論併記

「専門家」は適切に選ばれたのか

両極端の意見だけで、実際の科学者の間の意見分布が分からない。

中庸がいちばん把握しづらい。

結論ありき 結論のない記事は書けない。

読者自身に判断してもらおうことができない

危険報道・批判報道に偏る

「安全です」は記事にならない
書籍も安全を説くものは売れない

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

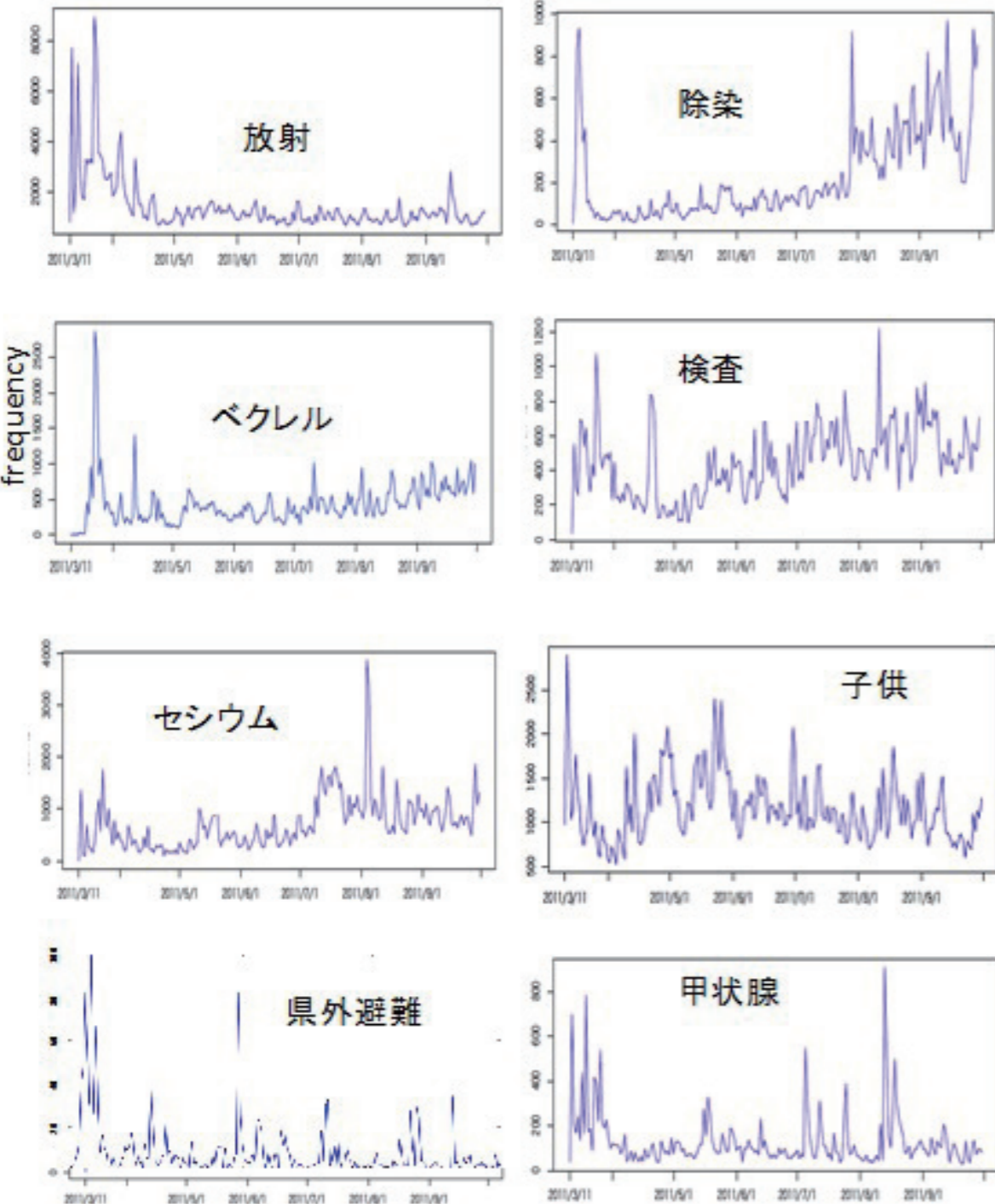


図2 サンプルされた Twitter データ 500 万件のキーワードの推移

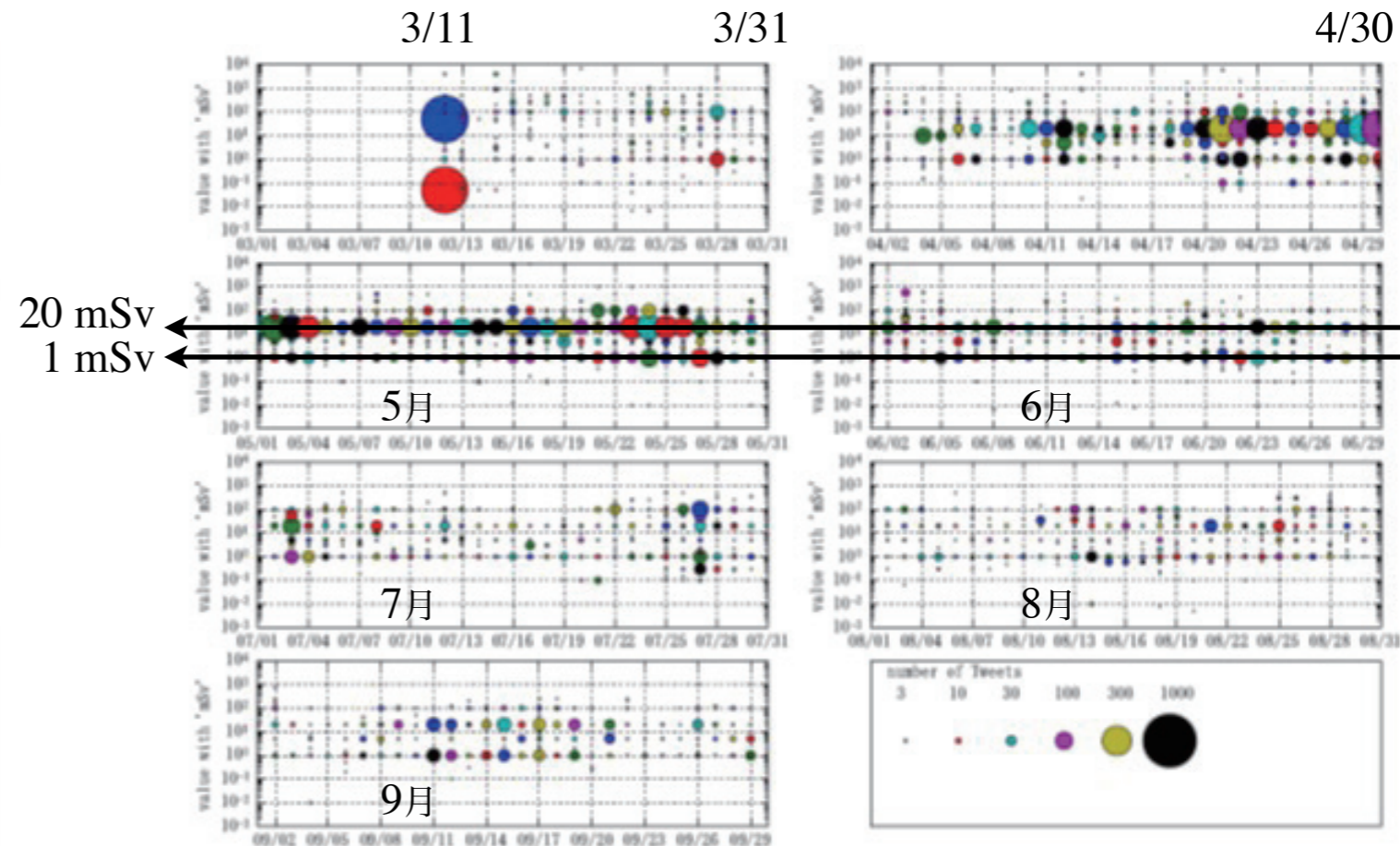


図3 数値と“mSv”が連続して現れる Tweet 数

風評と風化

東京では放射線の話題は他人事

風評被害は落ち着きつつあるが、依然として福島
の土地や産物を避けようとする人も一定数存在。

放射線影響の疫学データをどう解釈すべきか。

そんなことよりもっと大事な健康影響がある。

福島では放射線の話題はタブー

立場や考え方の違い、補償の違い、避難の有無で
家庭や地域が分断されてしまった。

「南相馬はひとつになれない」

放射線の科学的知識を身につけないまま関心が
風化しつつある。



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



加速器駆動核変換
リニアックからの陽子ビームを用いて
原子力の科学と技術開発を行う。

加速器施設の 放射線・放射能管理

3 GeVの大強度陽子ビームによって
発生する世界最高強度の1 MWパルス中性子源。

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

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。

人体は **DNA 損傷** に対する修復機能を備えている。

自然放射線による被ばくは年間 2 mSv 程度ある。

放射線防護の ALARA の原則。リスクの正しい理解と伝達。

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

完

鳥居 寛之

東京大学 大学院理学系研究科