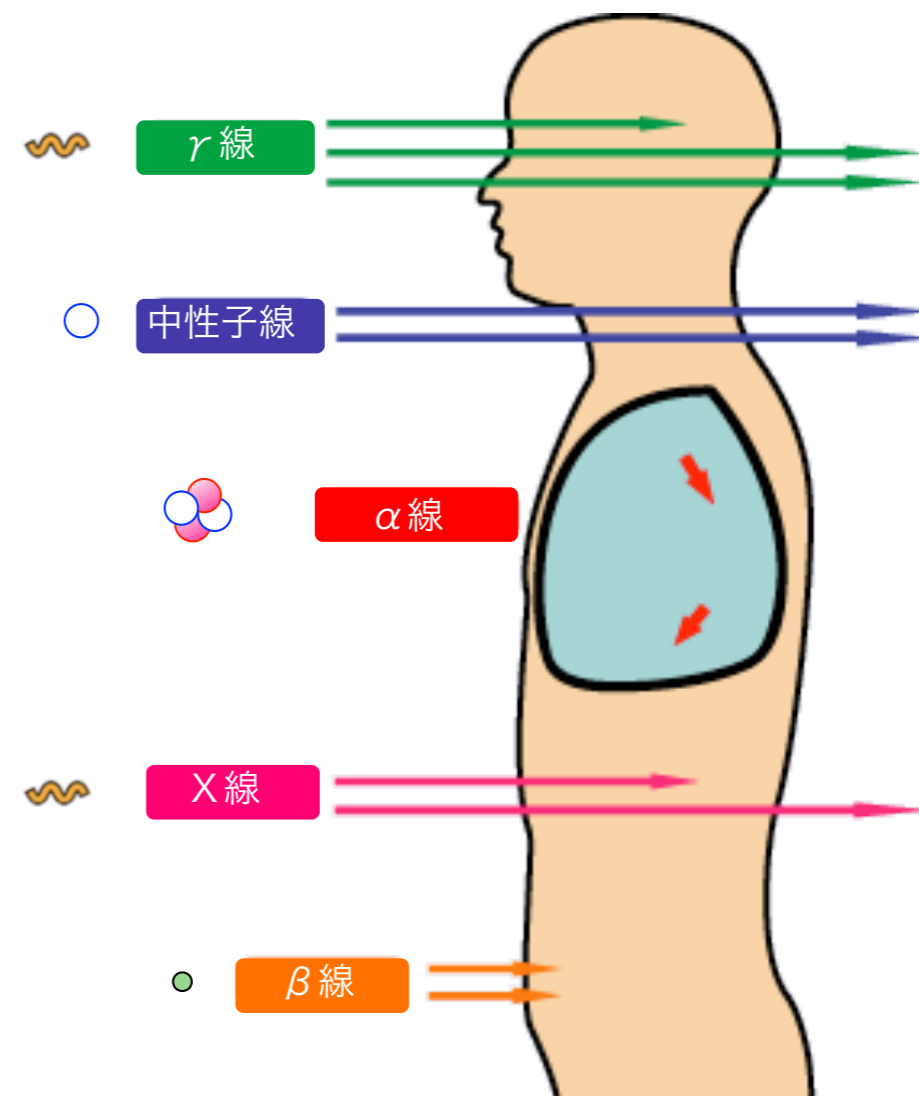


## 放射線 と 放射能



全7話

2013 / 3 / 30・31 (土・日)

@ 首都大学

## 鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 第20回 原子衝突セミナー 講義A



# 放射線

と

# 放射能

- 放射線入門・原子物理学
- 放射線物理学・放射線化学
- 放射線計測学・環境放射化学
- 原子核物理学・原子力工学
- 放射線の単位・線量計算
- 放射線生物学・防護学・医療
- 放射線の利用・加速器科学

第1話

## 放射線入門・原子物理学

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

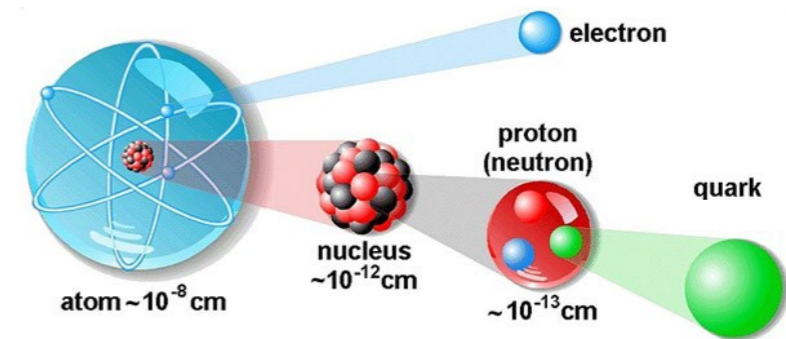
# 東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

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

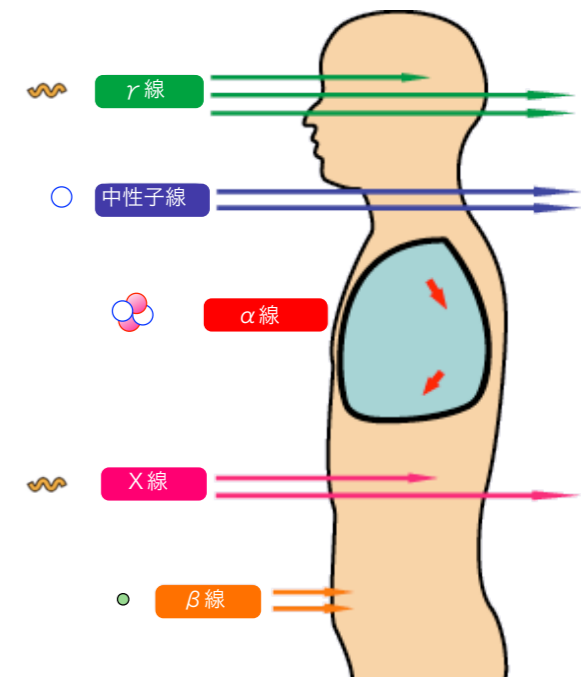
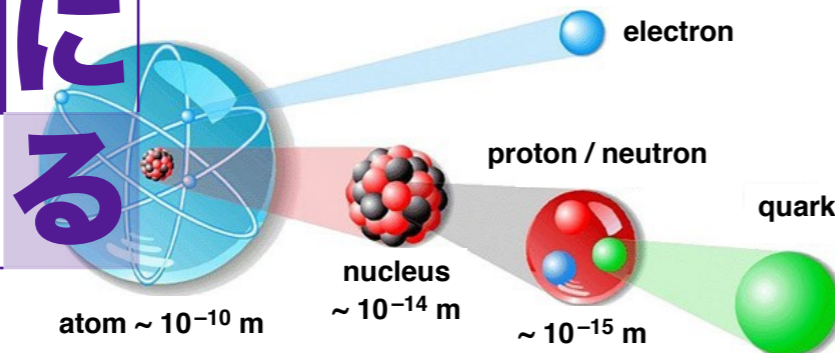
自主講義  
放射線学



2011年度冬学期  
主題科目テーマ講義

2012年度冬学期  
主題科目テーマ講義

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。

# 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
  - 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、法律

# 自己紹介

研究：Exotic原子・反水素の合成・分光実験

## 放射線講義・講演会

専門：粒子線物理学・素粒子原子物理学

2011/4：東大広域科学専攻にて教員・院生向けに講演・討論会

2011/春夏：東大教養にて1、2年生向けに自主講義「放射線学」

2011/6：オープンラボで大学・高校生・一般向けシンポジウム

2011/秋冬：主題科目テーマ講義「放射線を科学的に理解する」

(生命科学、環境放射化学、放射線医学らの専門家とタイアップ)

2011/11：高校生のための特別講座「放射線の科学」福島高校にも配信

2011/11：福島市で講演「放射線と正しく向き合うために」

子どもの親や保育士向け

ほか：東京都三鷹市、立川市で講演

2012/3：東京大学 × 博報堂 × 時事通信社 (特別協力：環境省)

「3.11のガレキを考える」プロジェクト 細野環境大臣に提言

2012/秋冬：主題科目テーマ講義「放射線を科学的に理解する」

# 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  
すべきだろうか。安全と安心を確保する方策は？」

# 放射線・放射能・放射性物質

## 「放射能うつる」といじめ＝福島から避難の小学生に一千葉

2011年4月15日11時6分

福島第1原発事故を受け、福島県から千葉県船橋市に避難した小学生の「**放射線がうつる**」といじめられたという訴えが市教育委員会で明らかになった。市教委は同日までに、避難者の不安な気持ちや言葉遣いに注意し、思いやりを持って被災者の児童生徒に接するよう指導を求める通達を市立小中学校に出した。

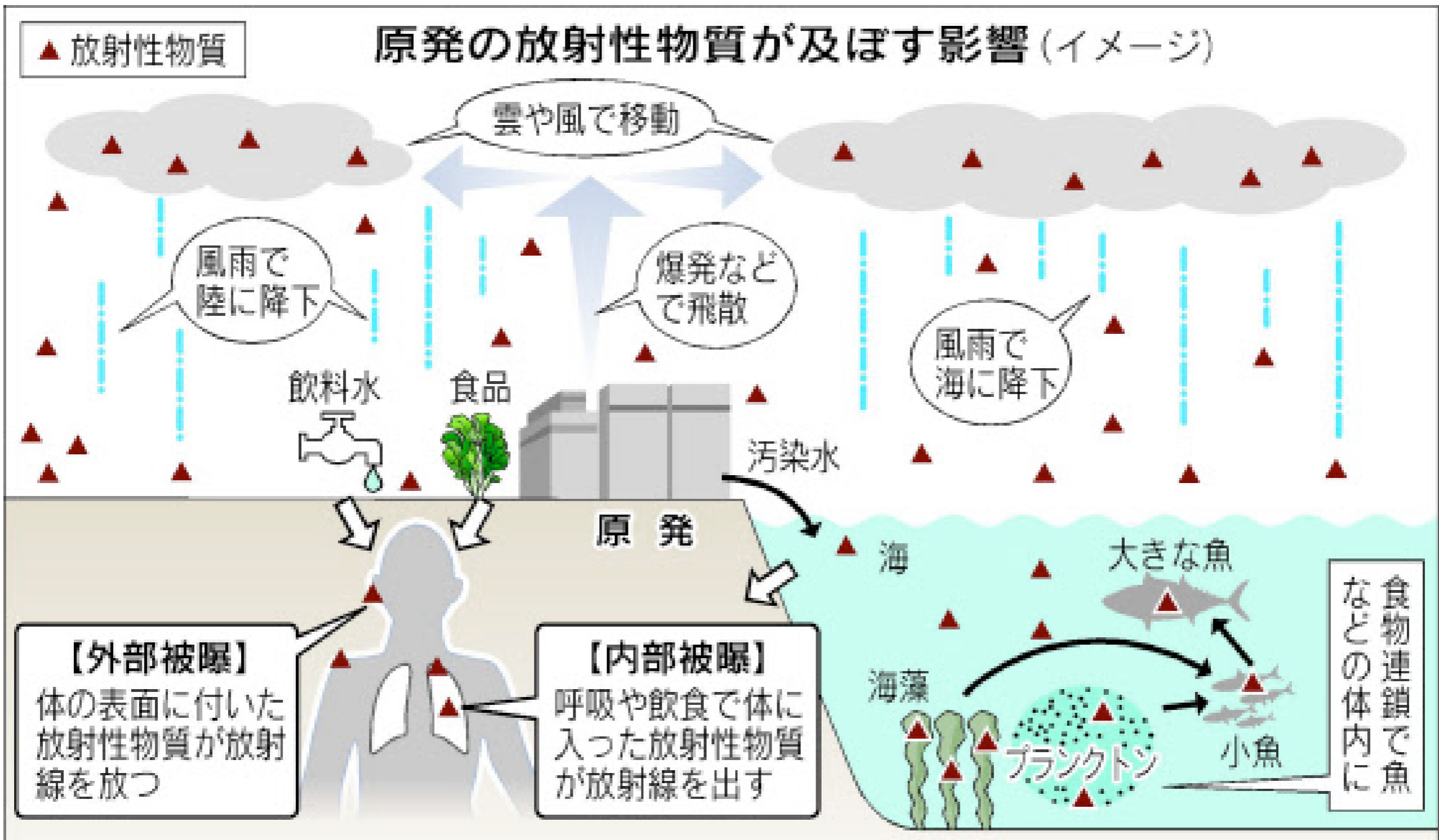
市教委によると、福島県南相馬市から避難した小学生の兄弟が、地元の子どもに「どこから来たの」と話しかけられた。兄弟が「福島」と答えると地元の子どもは「**放射線がうつる**」と言い、数人が一斉に逃げ出したという。

放射線はうつらない

放射能と放射線を混同しない

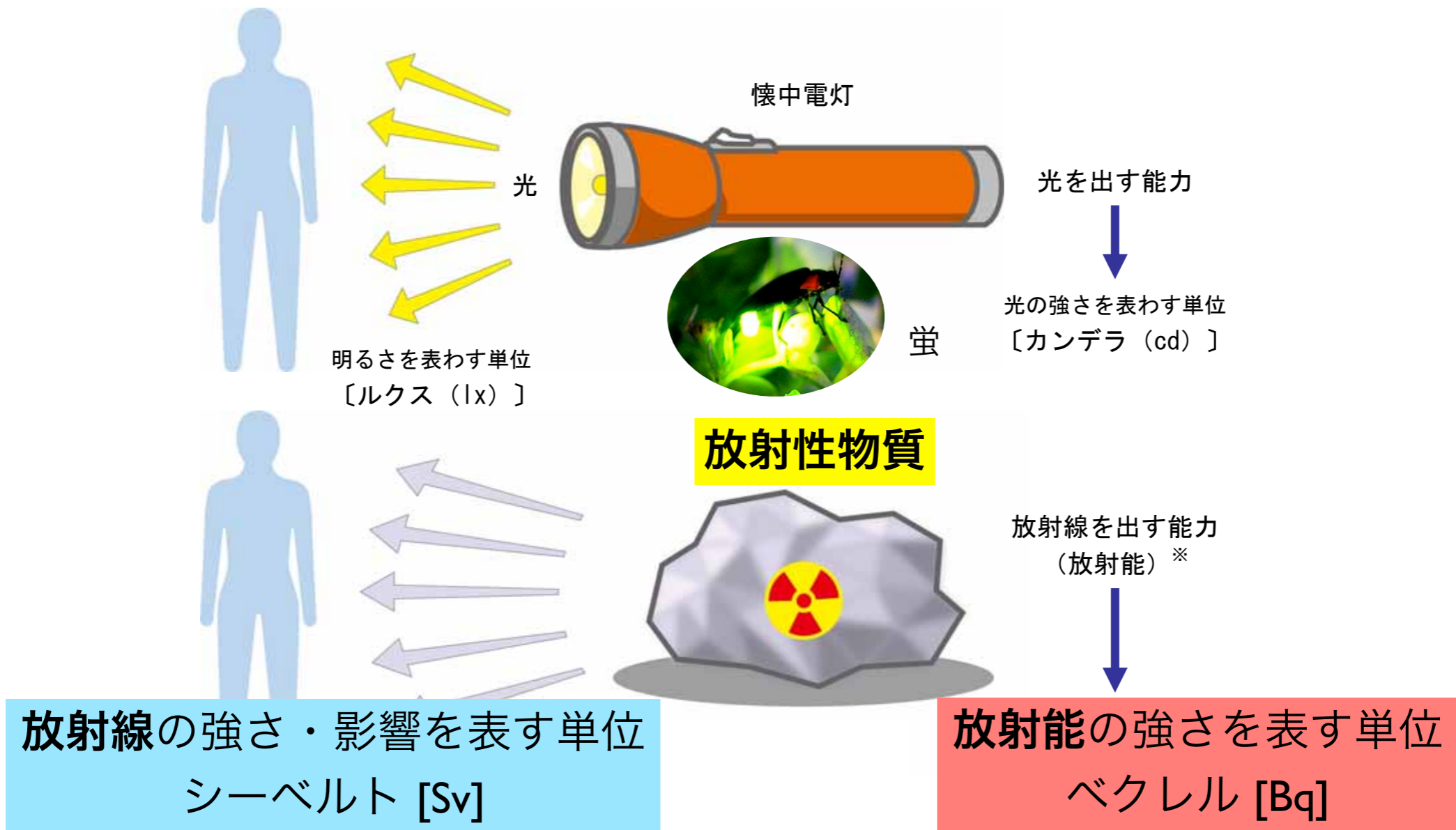
放射線に対する正しい知識をもって  
「正しく怖がる」ことが必要。





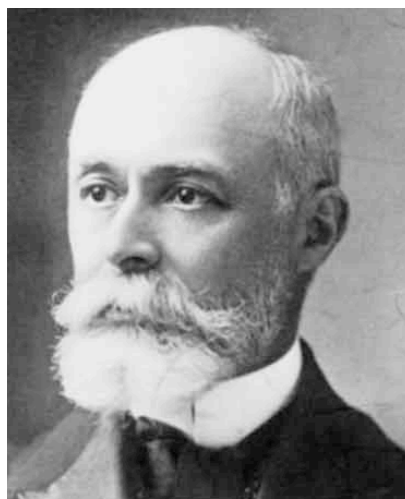
放射性物質が一部東京まで飛来。  
放射線が直接東京に届いたのではない。

# 放射能と放射線



6-1

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」



## 放射能 (radioactivity) の単位

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

**Becquerel**

decay/disintegration  
per second

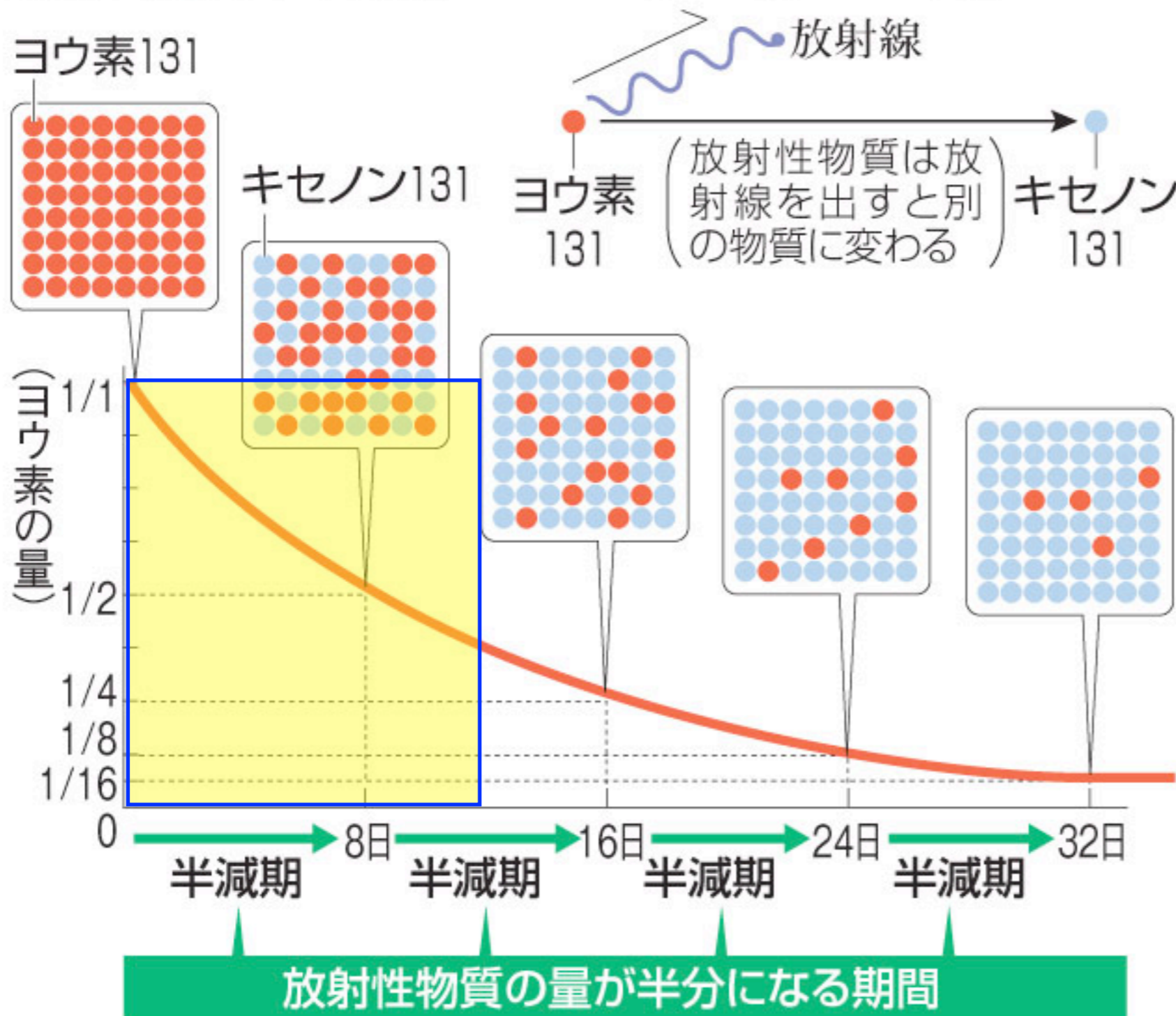
**Curie**

1 キュリー = 370億ベクレル



(ヨウ素換算63万テラベクレル, <http://bit.ly/fRxmkt> これを放射性ヨウ素131の質量に焼き直すと, およそ1) 100トン 2) 100 キログラム 3) 100 グラム 4) 100ミリグラム, ?)

### 放射性物質の半減期のしくみ(ヨウ素131の例)



注：ヨウ素等価換算は、環境や人への影響を勘案して係数を決めている。ヨウ素以外の核種の質量を計算するには適していない。ヨウ素131については、15万テラベクレルの放出と言われているので、その質量は上の問いに対する計算値の4分の1となる。また、半減期の長いセシウム137などでは、同じベクレル数でも、モル数も質量もヨウ素に比べてずっと大きくなる。



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

# 放射線量 (radiation dose) の単位

Gray

吸収線量 absorbed dose  $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量 equivalent dose  $H_T [J / kg] = [Sv]$

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

Sievert



## 放射線量率 (dose rate) の単位

単位時間あたりの放射線量

$[Gy/h], [Sv/h], \text{etc....}$

放射線量率の時間積分が（積算）放射線量になる。

# 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)

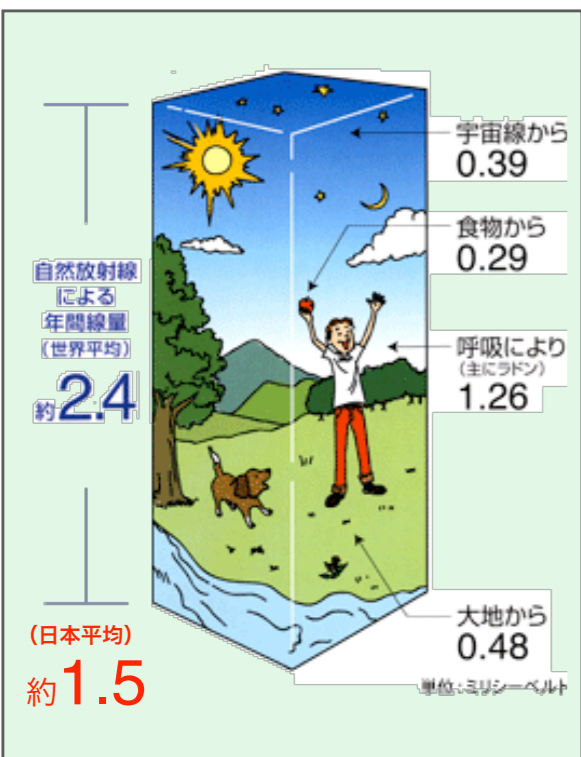
10

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

(日本平均)



1人あたりの自然放射線(年間)(世界平均) 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

国内自然放射線の差(年間)(県別平均値の差の最大) 0.38

胃のX線集団検診(1回) 0.6



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



0.1

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

# 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

出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1982) など

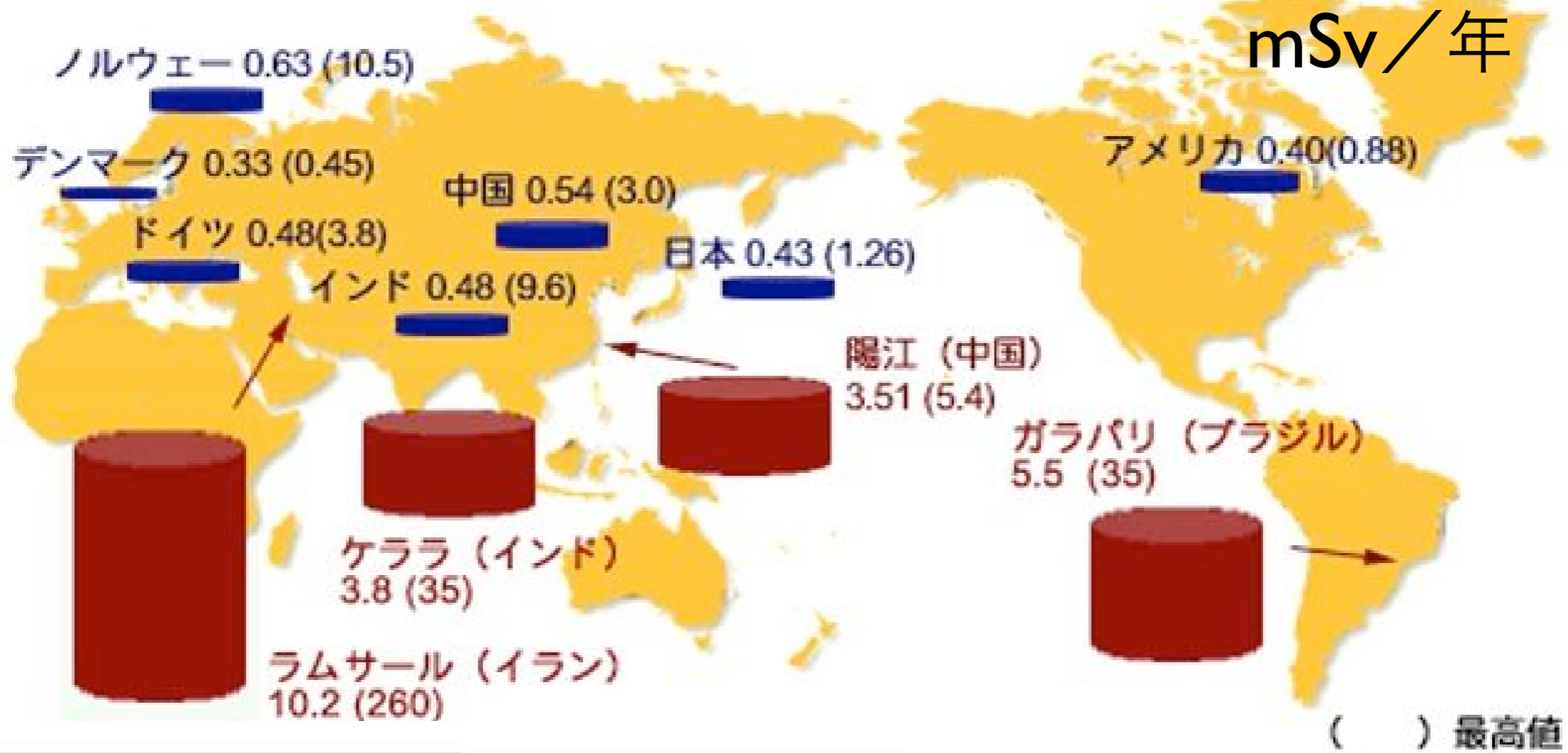


表1 高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較<sup>7,8)</sup>

	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	51.6
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



一次宇宙線 (高エネルギー陽子など)

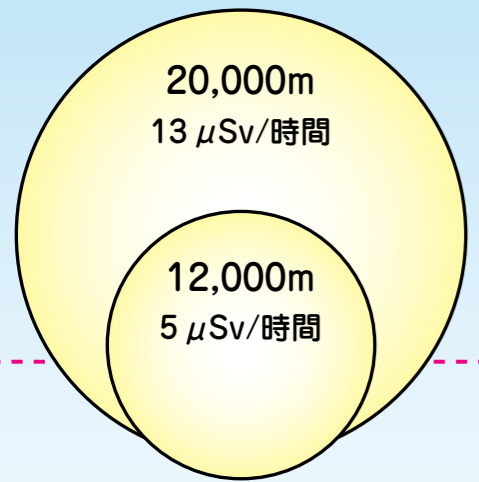
空気中の原子

二次宇宙線

三重水素、ベリリウム7、ベリリウム10、ナトリウム22、ナトリウム24などの宇宙線生成核種が生じる  
(一次宇宙線のエネルギーが比較的低い場合)

中性子、陽子、 $\pi$ 中間子、K中間子などの放射性物質が生じる  
(一次宇宙線のエネルギーが高い場合)

※○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 μSv/時間

2,000m ○ 0.1 μSv/時間

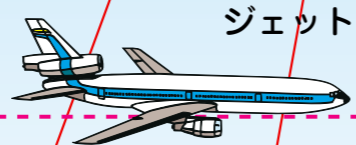
海面 ○ 0.03 μSv/時間

μSv = マイクロシーベルト

100km

10km

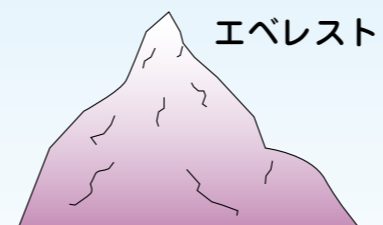
1km



ジェット旅客機



(超音速旅客機) コンコルド



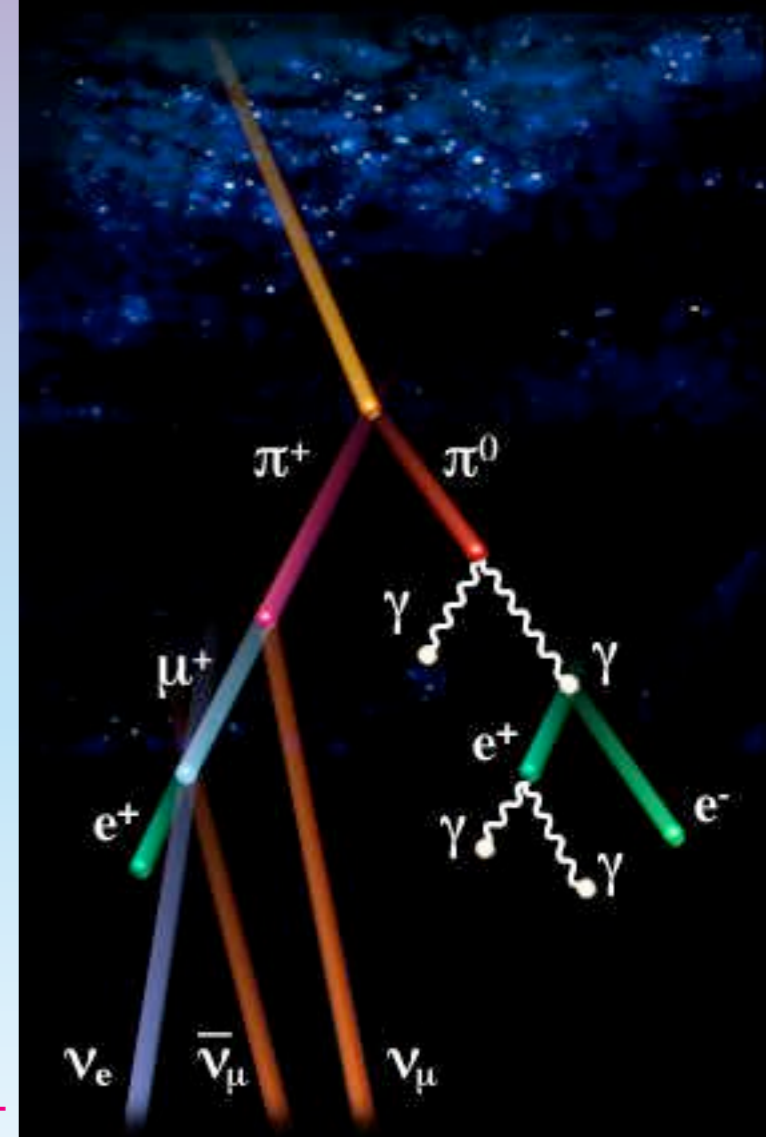
エベレスト

《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 (μSv)		
			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)

東京～NY 往復  
200 μSv (max)



# 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

●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

$^{40}\text{K}$   
 同位体比 0.012%  
 半減期 13億年

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} (\text{EC}\gamma) \quad 11\%$   
 $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} (\beta^-) \quad 89\%$

毎日カリウム 3 g =  $^{40}\text{K}$  を 80 Bq 摂取。同量を排泄。

# 原子物理学・単位系

連続状態 continuum

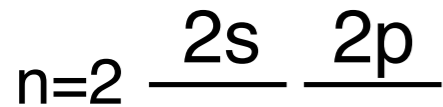


原子のエネルギー準位

束縛状態 bound states

離散的エネルギー準位 discrete energy levels

覚えにくい

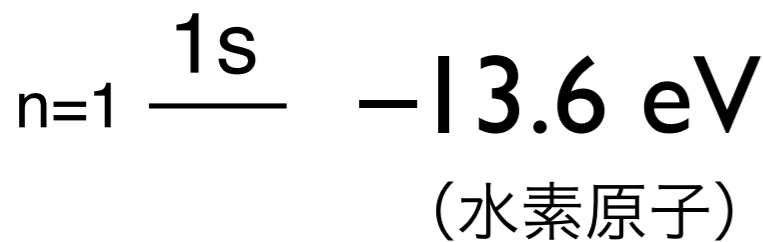


$$-E_B = -\frac{2\pi^2 k_0^2 m_e e^4}{h^2} \frac{Z^2}{n^2} = -\frac{m_e e^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} \frac{Z^2}{n^2}$$

$$-E_B = -hc R_\infty \frac{Z^2}{n^2} \quad R_\infty : \text{リュードベリ定数}$$

$$\hbar \equiv \frac{h}{2\pi}, \quad \alpha \equiv \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137} \quad h : \text{プランク定数}$$

$\alpha$  : 微細構造定数  
(無次元量)



$$E_B(\text{H}) = \frac{M}{M+m} E_B$$

$$-E_B = -\frac{1}{2} m_e c^2 \alpha^2 \frac{Z^2}{n^2}$$

$Z$  大  $\rightarrow E_B = h\nu$  大 : X線

$$v_e = c \alpha \frac{Z}{n}$$

**超微細構造定数**  $\alpha = e^2 / 4\pi\epsilon_0 \hbar c \approx 1 / 137$  [無次元]

**エネルギーと長さの積**  $\hbar c \approx 197 \text{ MeV fm} = 197 \text{ eV nm}$

例：波長 600 nm のレーザー光のエネルギー  $= h\nu = 2\pi\hbar c / \lambda \approx 2 \text{ eV}$

**電子ボルト**  $\text{eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} = 96.5 \text{ kJ/mol}$

**原子単位系 (atomic units: a.u.)**

$$\hbar = e = m_e = 4\pi\epsilon_0 = 1$$

長さの単位  $a_0$  時間の単位  $t_0$  速さの単位  $v_0$  エネルギーの単位  $E_h$

$$a_0 = \hbar / m_e c \alpha = \hbar / m_e v_0 = \alpha / 4\pi R_\infty = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m} \Rightarrow 1 \text{ a.u.}$$

$$t_0 = a_0 / v_0 = \hbar / m_e c^2 \alpha^2 = \hbar / E_h = 2.42 \times 10^{-17} \text{ s} \Rightarrow 1 \text{ a.u.}$$

$$v_0 = c \alpha = 2.19 \times 10^6 \text{ m/s} \Rightarrow 1 \text{ a.u.}$$

$$E_h = m_e c^2 \alpha^2 = e^2 / 4\pi\epsilon_0 a_0 = R_\infty h c = 27.2 \text{ eV} \Rightarrow 1 \text{ a.u.}$$

$$\text{水素原子基底状態の束縛エネルギー } E_B(\text{H}) = R h c = 13.6 \text{ eV} \Rightarrow 1/2 \text{ a.u.}$$

# 自然単位系 (natural units)

$$\hbar = c = m_e = 1 \quad (\text{量子電磁気学})$$

$$\epsilon_0 = 1 \text{ (Heaviside-Lorentz) あるいは } 4\pi\epsilon_0 = 1 \text{ (Gaussian)}$$

長さの単位  $\lambda_C$  時間の単位  $t$  速さの単位  $c$  エネルギーの単位  $m_e c^2$

$$\lambda_C = \hbar / m_e c = a_0 \alpha = 3.86 \times 10^{-13} \text{ m} \Rightarrow 1$$

$$t = \lambda_C / c = \hbar / m_e c^2 = 1.29 \times 10^{-21} \text{ s} \Rightarrow 1$$

$$c = 3.00 \times 10^8 \text{ m/s} \Rightarrow 1$$

$$m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV} \Rightarrow 1$$

$$\text{または、 } \hbar = c = m_\pi = 1 \quad (\text{核力の中間子論})$$

$$\text{または、 } \hbar = c = 1 \quad (\text{MeV か GeV のみの単位系}) \quad \boxed{\hbar c \approx 197 \text{ MeV fm}}$$

エネルギーの単位  $E$  [MeV] 質量の単位  $m \Rightarrow mc^2$  [MeV]

長さの単位  $L$  [MeV<sup>-1</sup>] 時間の単位  $T$  [MeV<sup>-1</sup>] 速さの単位  $c$  [1]

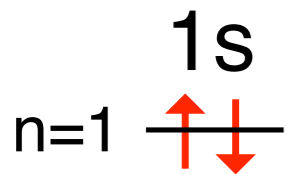
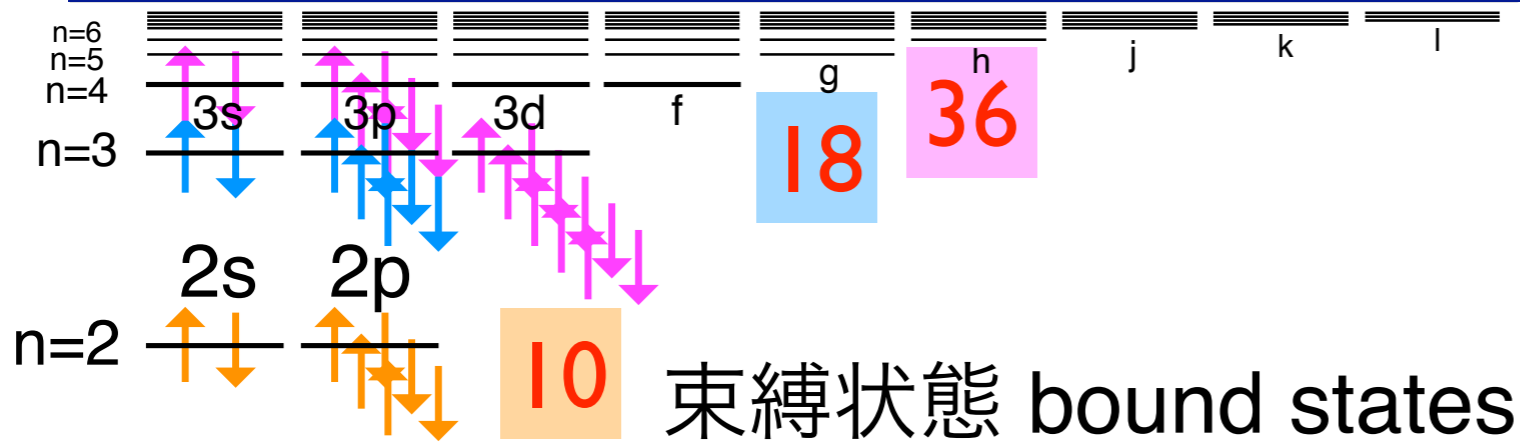
$$L = \hbar / mc \Rightarrow 1 / mc^2, \quad 1 \text{ MeV}^{-1} = \hbar c / \text{MeV} = 197 \text{ fm}$$

$$T = \hbar / mc^2 \Rightarrow 1 / mc^2, \quad 1 \text{ MeV}^{-1} = (\hbar c / \text{MeV}) / c = 6.58 \times 10^{-22} \text{ s}$$

$$c = L / T \Rightarrow 1 \text{ [MeV}^0\text{]}$$

# 原子のエネルギー準位

連続状態 continuum



2

魔法数  
magic number

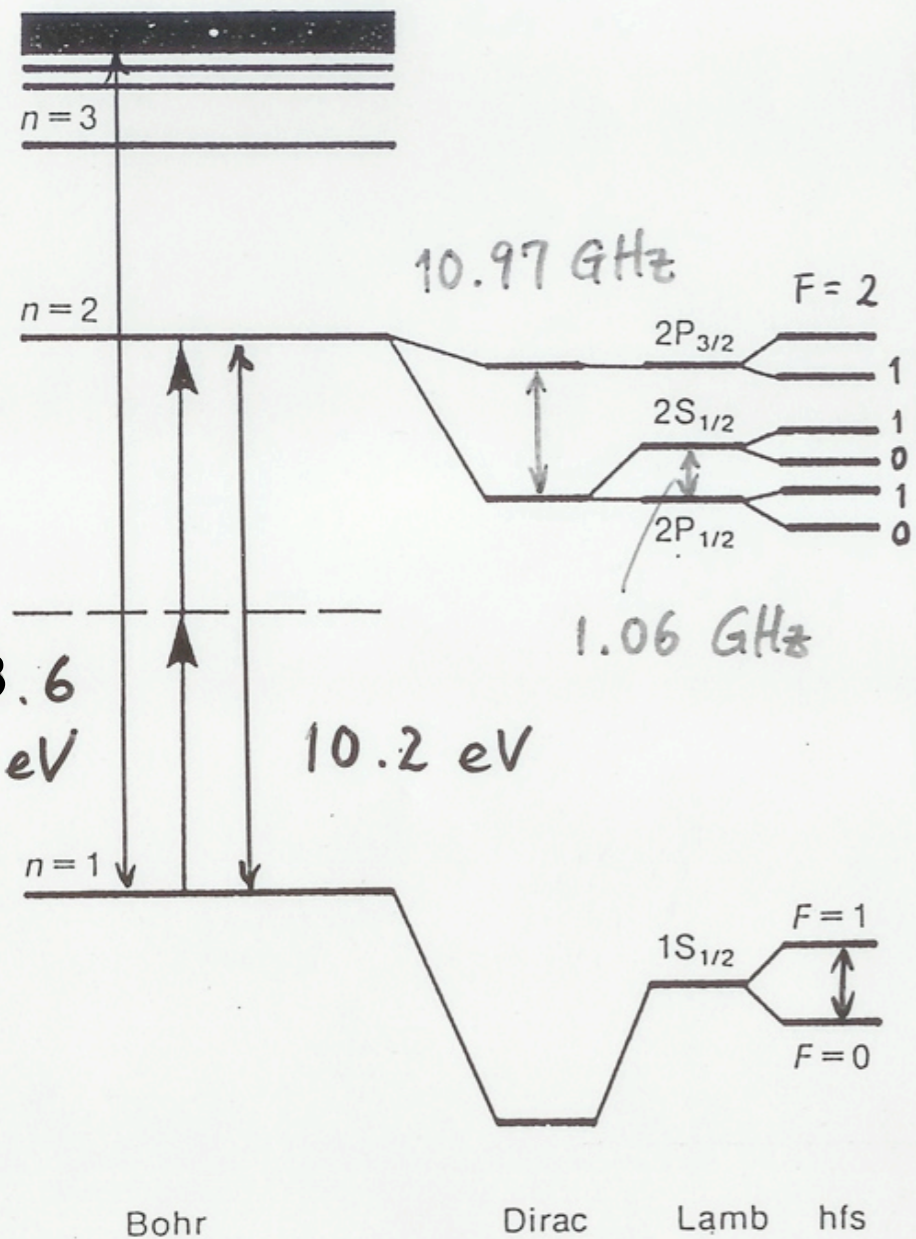
閉殻  
closed shell

魔法数	電子配置	元素
2	$1s^2$	He
10	$1s^2 2s^2 2p^6$	Ne
18	$[Ne] 3s^2 3p^6$	Ar
36	$[Ar] 4s^2 3d^{10} 4p^6$	Kr
54	$[Kr] 5s^2 4d^{10} 5p^6$	Xe
86	$[Xe] 6s^2 4f^{14} 5d^{10} 6p^6$	Rn

貴ガス

水素原子  
氢原子

HYDROGEN



$$\frac{97492}{\text{cm}^{-1}}$$

$$\frac{82259.279}{\text{cm}^{-1}}$$

$$\frac{82258.949}{\text{cm}^{-1}}$$

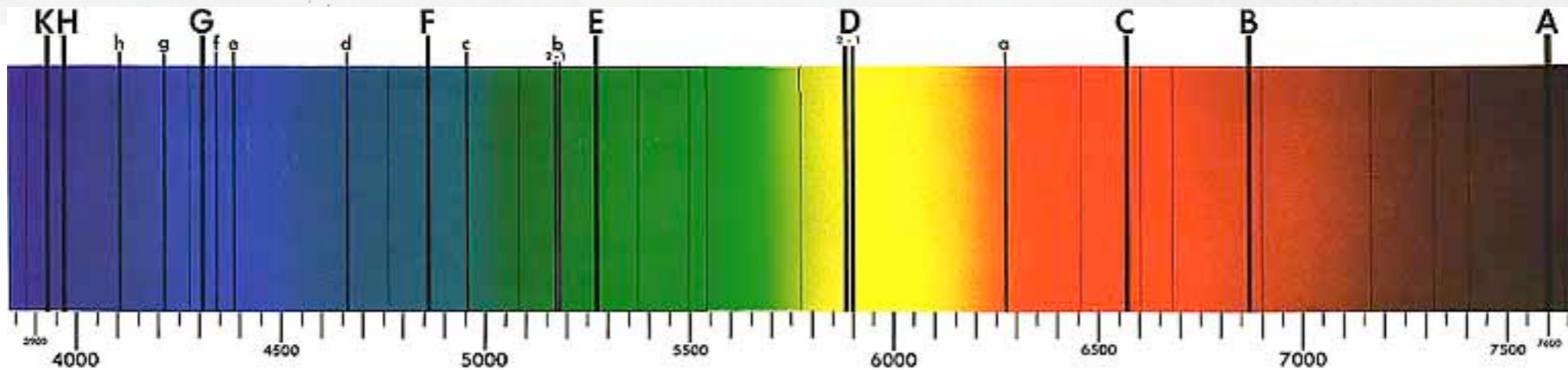
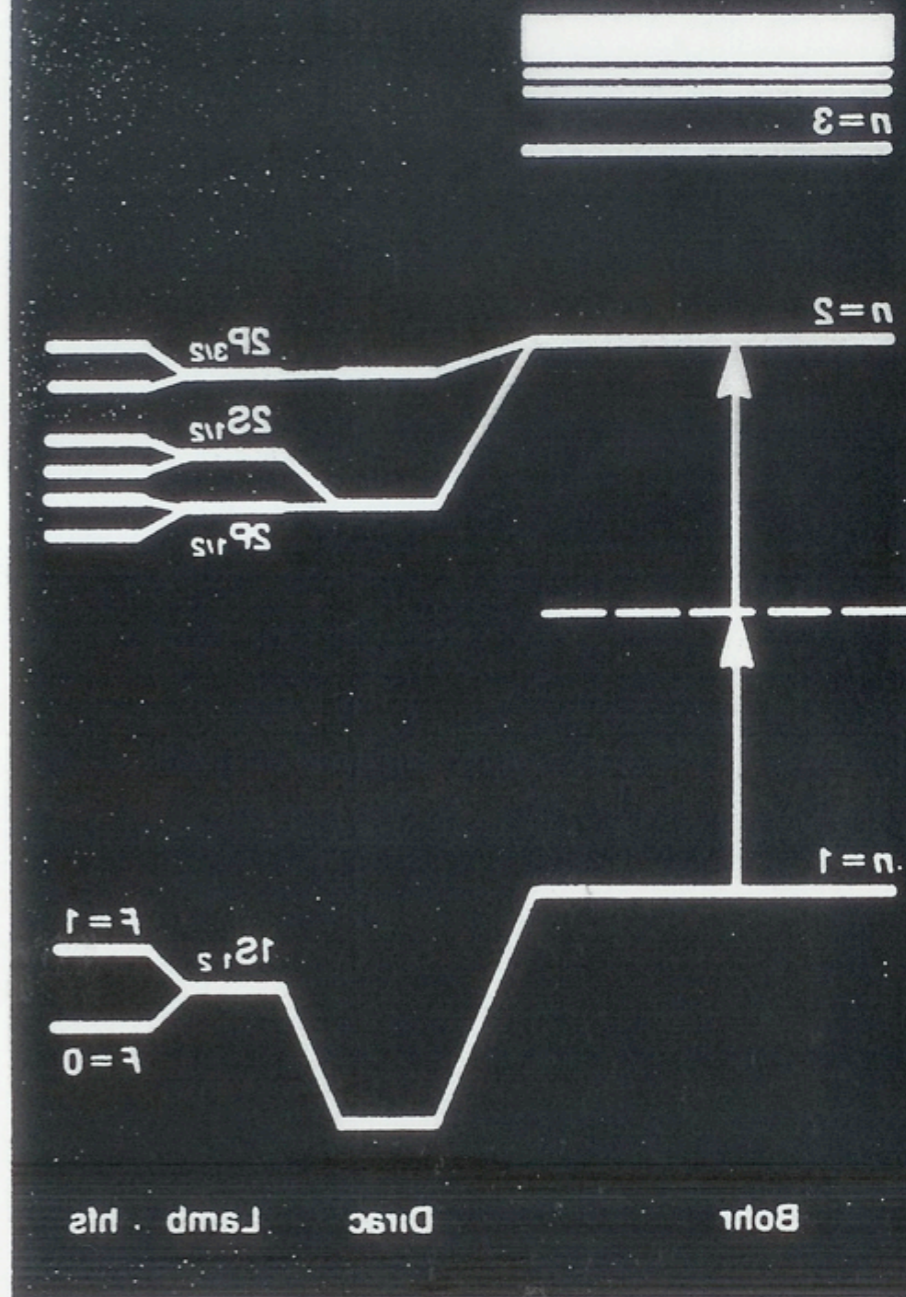
$$\frac{82258.913}{\text{cm}^{-1}}$$

$\updownarrow$  24 MHz  
 $\updownarrow$  178 MHz  
 $\updownarrow$  59 MHz

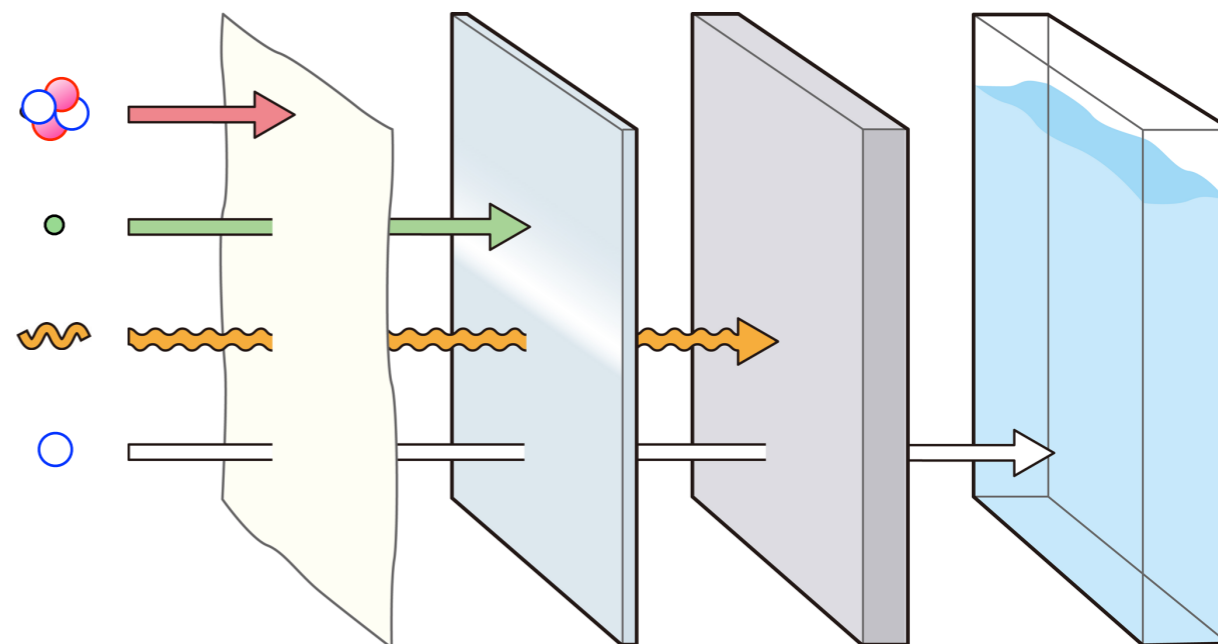
1.42 GHz

0.000

АНТИДРОГЕН



# 放射線 と 放射能



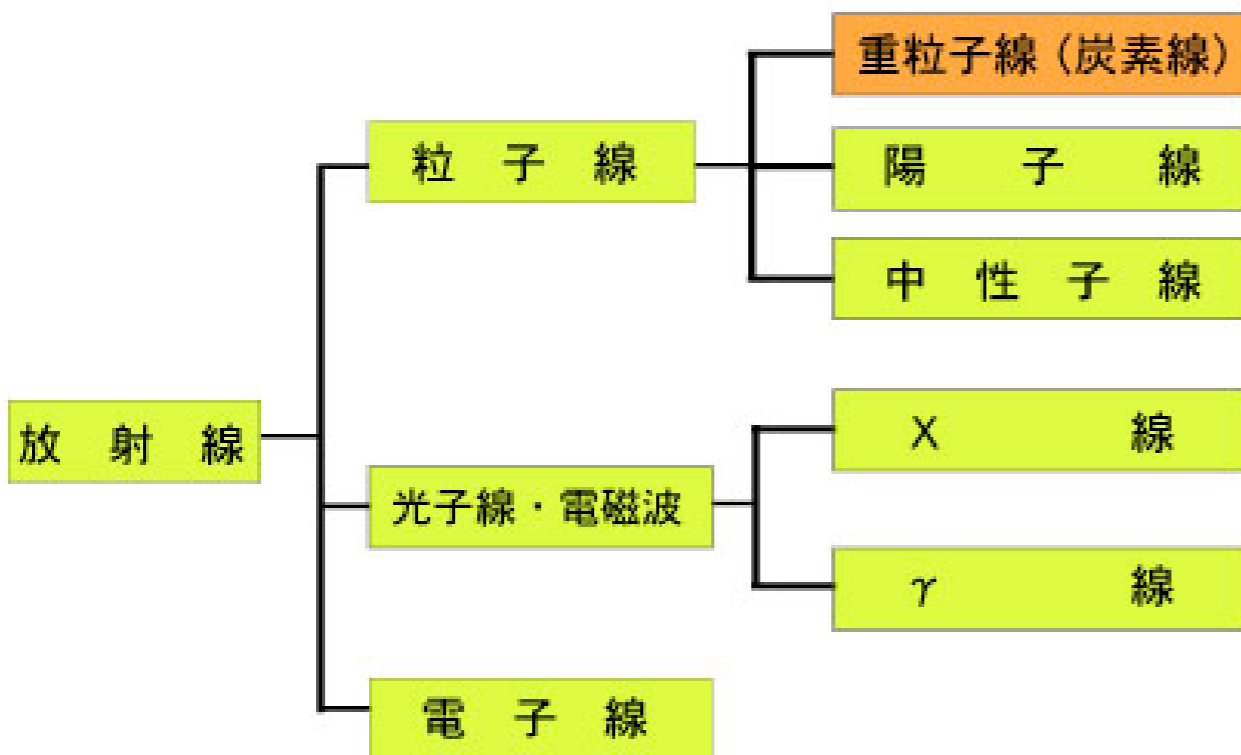
## 第2話

# 放射線物理学・放射線化学

放射線の種類・放射線と物質との相互作用  
荷電粒子の減速・光子の減衰



# 放射線の種類

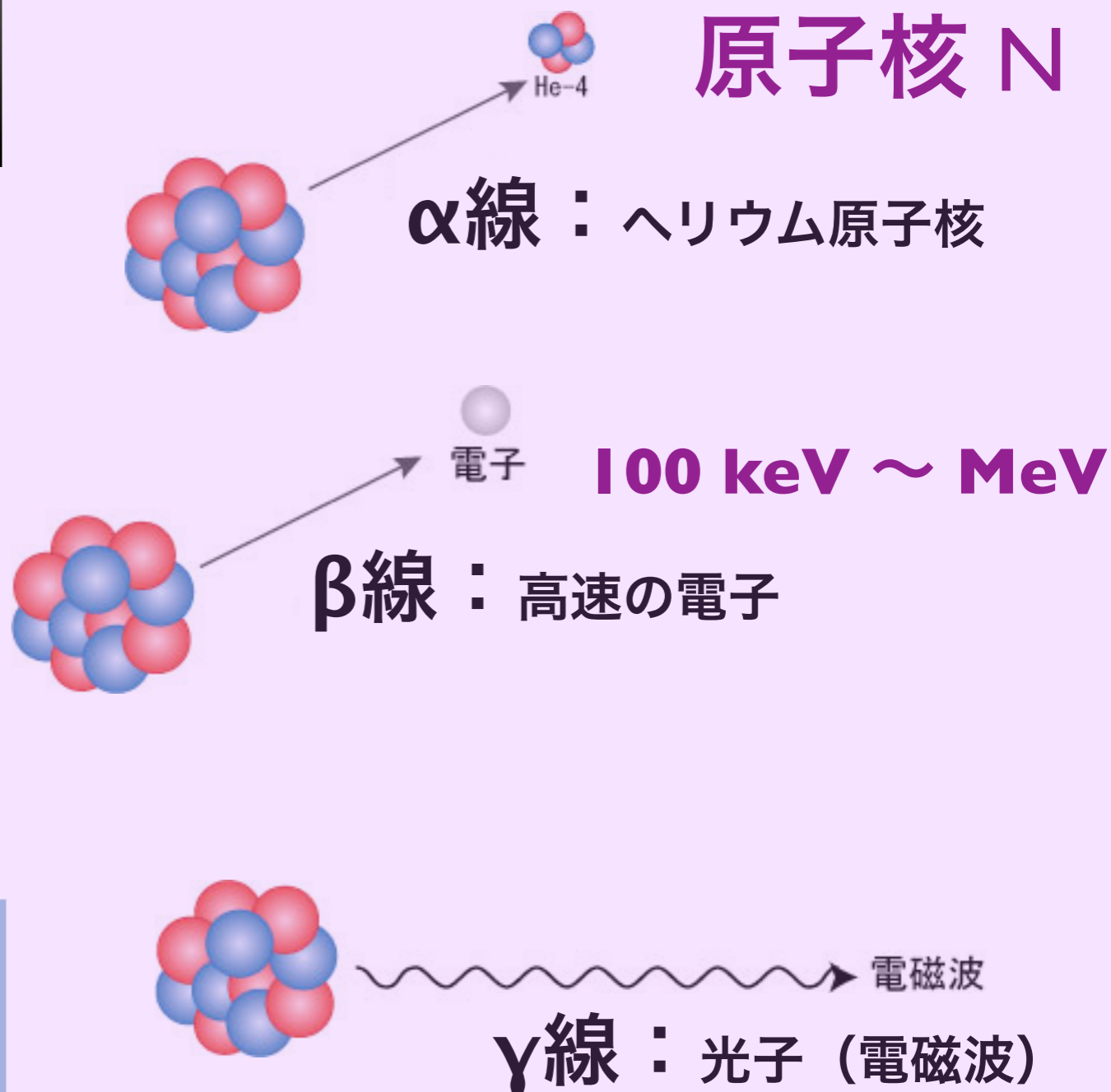


放射線のもつエネルギーは？

☞ **100 keV ~ MeV** ( $\alpha, \beta, \gamma$ )

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

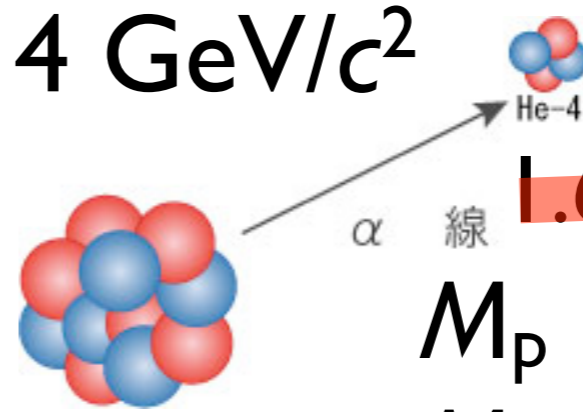
☞ 最外殻電子で **10 eV** 程度  
(1 eV = 96 kJ/mol)



# 放射線の速度

- X線・γ線は光なので、光速。
  - $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$
- α線は光速の数パーセント。  
(ニュートン力学で計算)
- β線は運動エネルギー 0.7 MeV 以上なら光速の 90% 以上。
  - 相対性理論により計算する。
  - ニュートン力学で計算すると光速を超えるが、間違い。

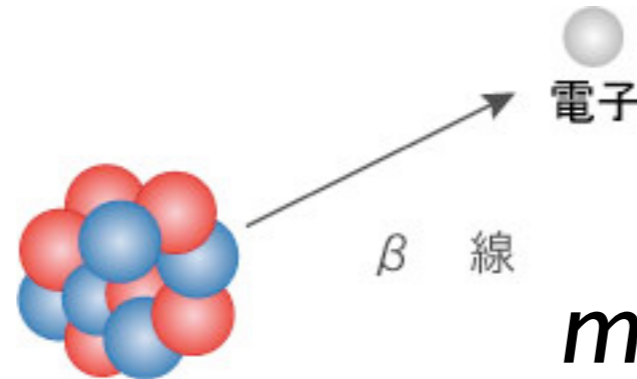
$$M_\alpha \approx 4 \text{ GeV}/c^2$$



~~$$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$$~~

$$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$$



~~$$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$~~

$$m_e = 511 \text{ keV}/c^2$$

$$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

$$E = mc^2 \gamma = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\beta = v/c$$

$$T = E - mc^2$$

$$\approx \frac{1}{2} mv^2 \quad (v \ll c)$$

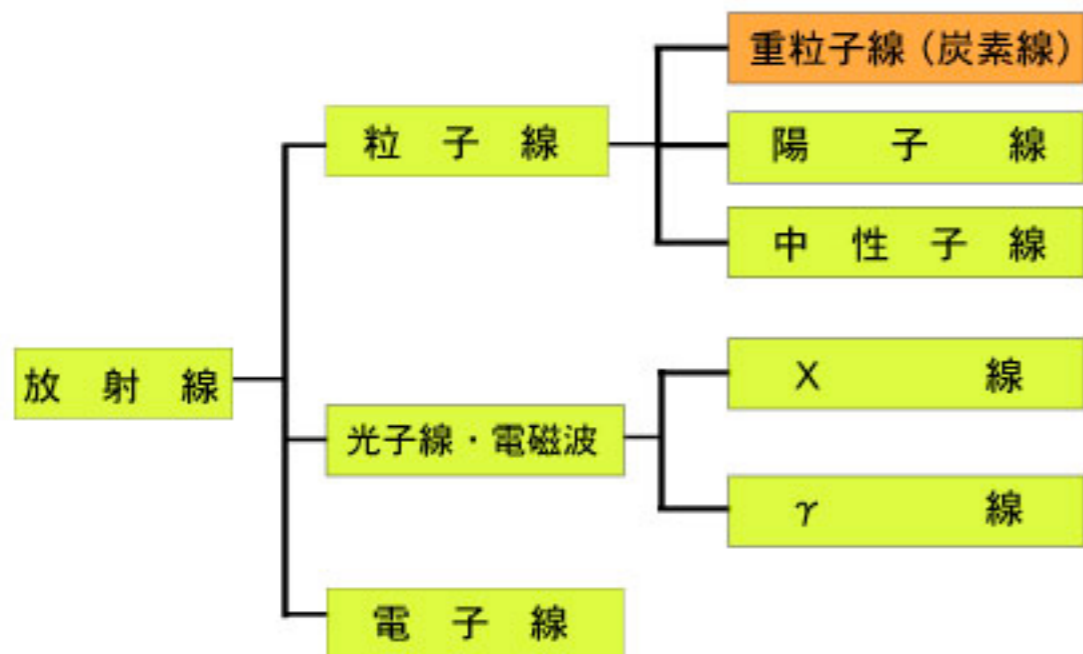
放射線のもつエネルギーは？

👉 **100 keV ~ MeV** for α/β/γ

**Cf.** 原子の束縛エネルギーは？

**荷電粒子の質量は？**

放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)



原子核 N

**α 線**

$${}^A_Z N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} M + {}^4_2 \alpha$$

**β 線**

$${}^A_Z N \rightarrow {}^A_{Z+1} M + {}^0_{-1} \beta + \bar{\nu}_e$$

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e^0$$

**γ 線**

$${}^A_Z N^* \rightarrow {}^A_Z N + {}^0_0 \gamma$$

電磁波

放射線のもつエネルギーは？

👉 **100 keV ~ MeV** for 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

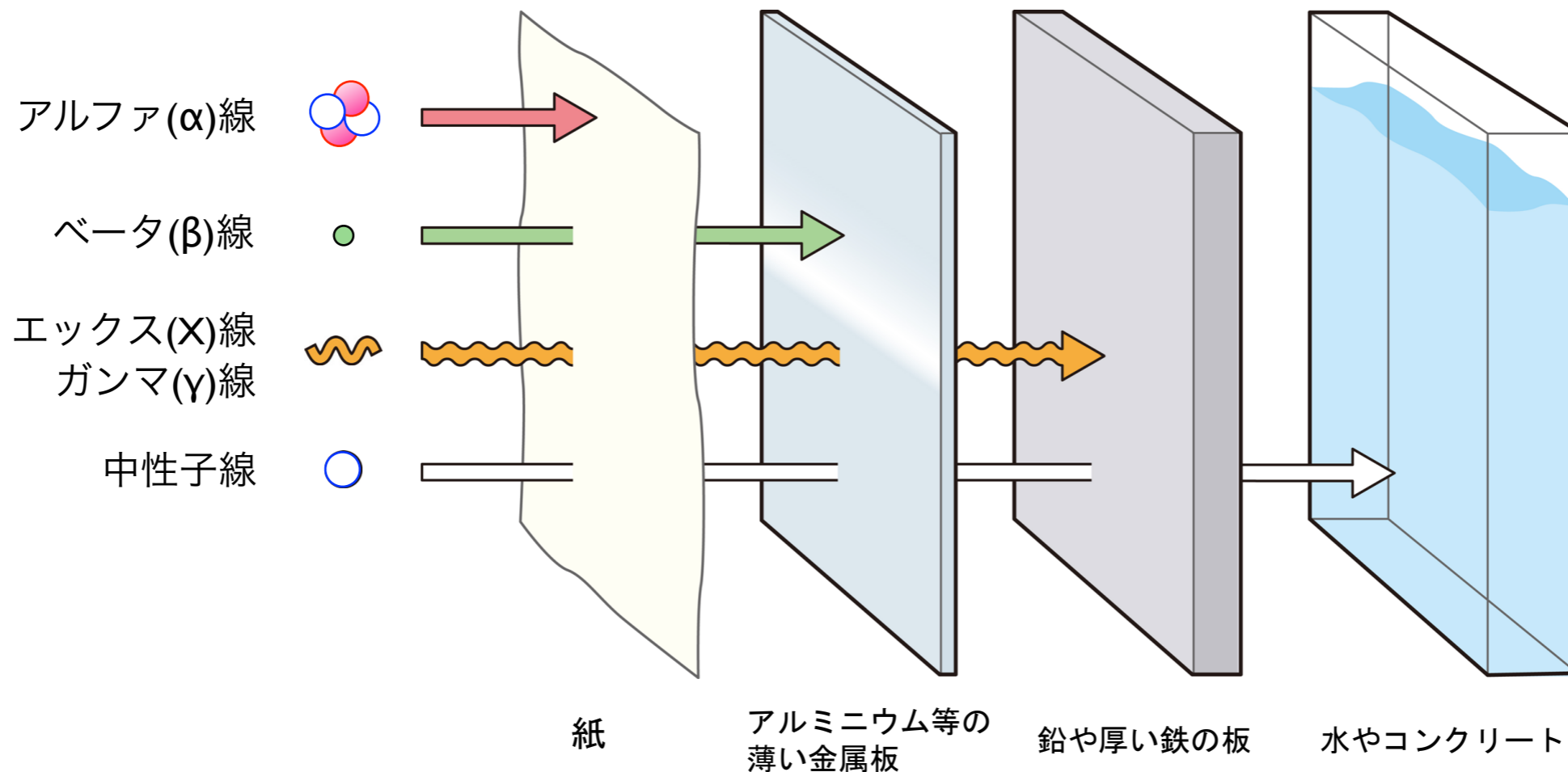
荷電粒子の質量は？

$$A^* \rightarrow A + h\nu(\text{X-ray})$$

**原子 A** **10 ~ 100 keV**

電磁波

# 放射線の種類と透過力



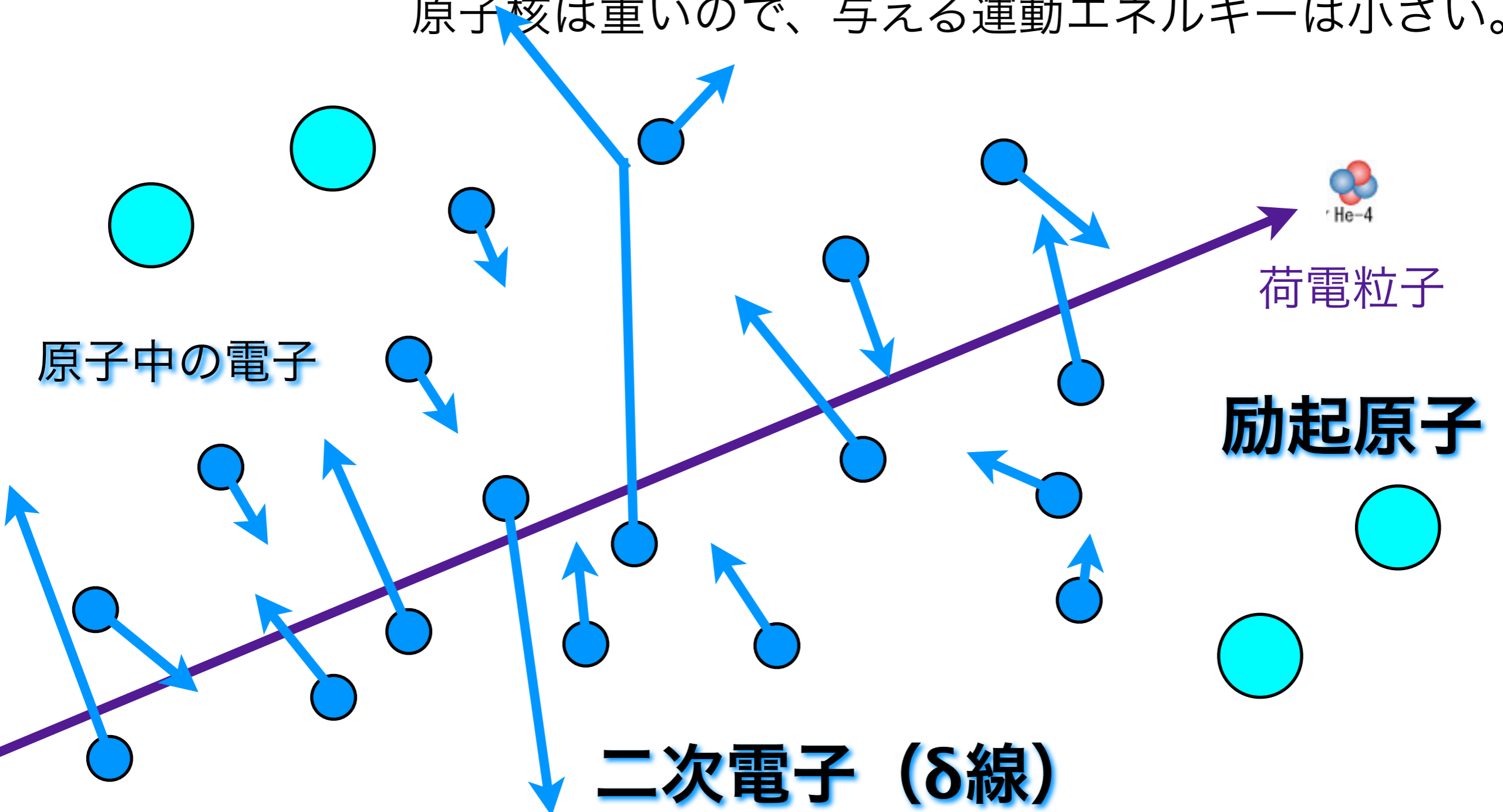
## 放射線と物質との相互作用

### 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・励起して電子に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、与える運動エネルギーは小さい。



# 荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

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

励起原子

電子

イオン

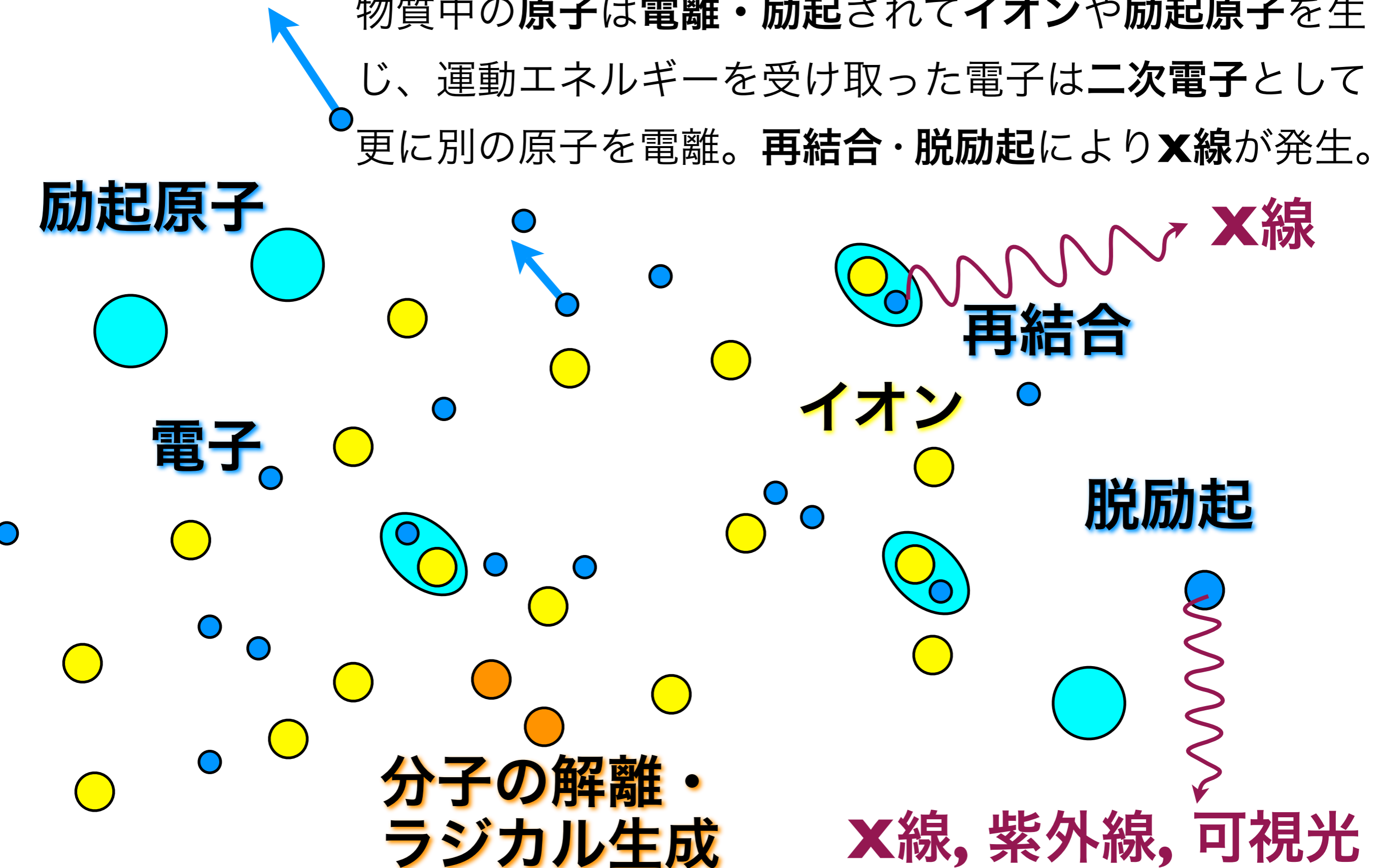
分子の解離・  
ラジカル生成

再結合

脱励起

X線

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

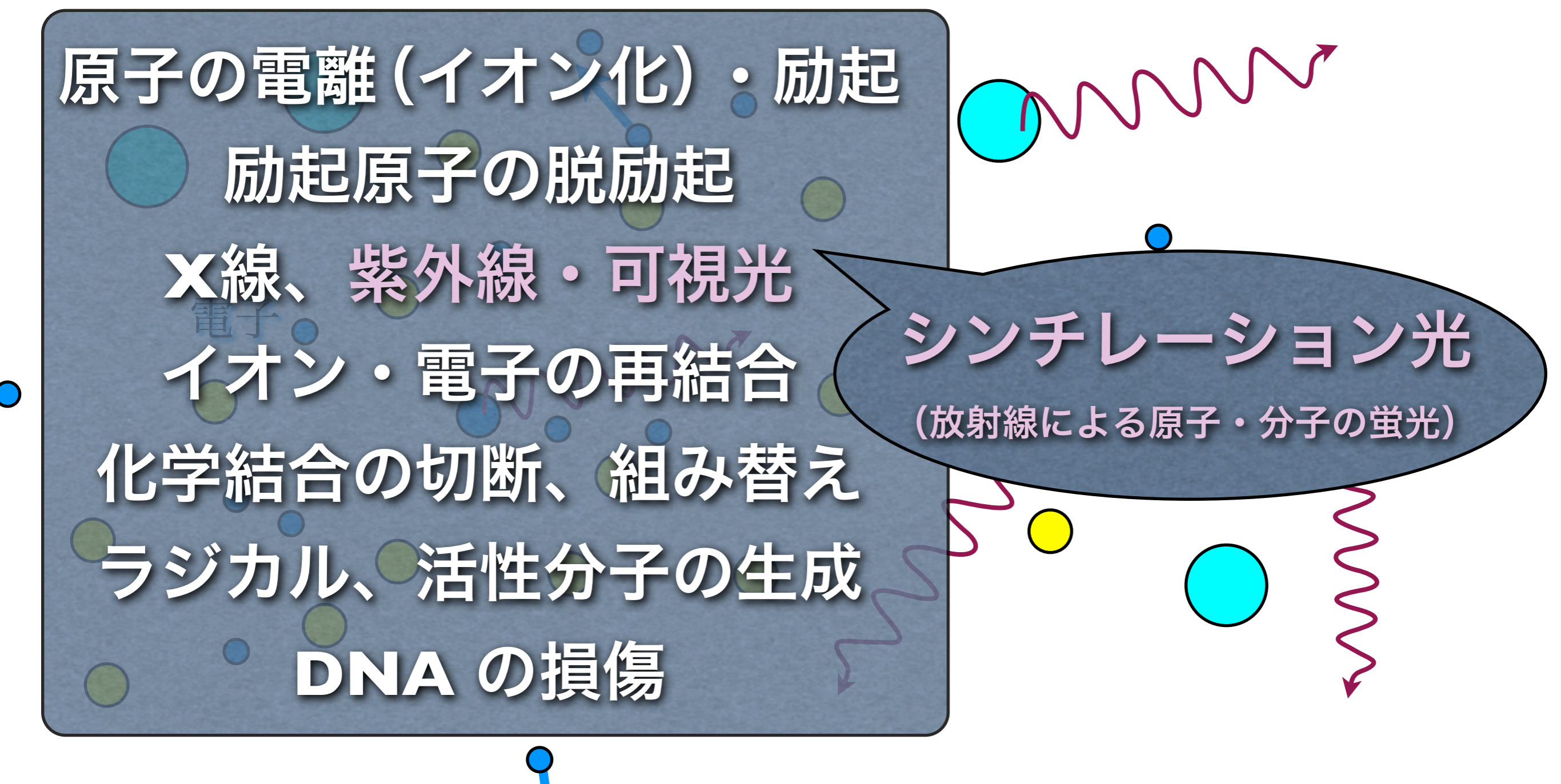
化学結合の切断、組み替え

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)



$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

## 荷電粒子

### 阻止能

(エネルギー損失) Stopping power (Energy loss)

荷電粒子：クーロン力

**エネルギー損失**

物質中の原子を電離・励起して電子に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、与える運動エネルギーは小さい。

● **重い粒子**：陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線 /  $\pi$ 中間子 /  $\mu$ 粒子

1個の電子に与えるエネルギーは微小。多数個の電子との散乱により減速される。運動量変化も小さいので軌道はほぼ直線。

● **軽い粒子**：電子(e<sup>-</sup>)・陽電子(e<sup>+</sup>)

1回の散乱で失うエネルギーが大きい。ジグザグの軌道も。大きな運動エネルギーをもつ二次電子を生成しうる。

エネルギーが高く、電離能力をもつ二次粒子（大抵は二次電子）のことを  $\delta$  線 と呼ぶことがある。



単位長あたりの電離（電子・イオン対）数 = **比電離**

**阻止能 ÷ 比電離 = W 値**

W 値：1つの電離を生じるに要する平均エネルギー。

荷電粒子の種類やエネルギーによらない。

イオン化エネルギーより大きな値となる（励起による損失があるため）

物質によらず **W ≈ 30 eV** 程度。

## 放射線化学

G 値（放射線化学収率）：

放射線のエネルギーを物質が吸収することで 100 eV あたりに  
変化または生成する原子・分子・イオンの数。

通常はたかだか 10 だが、連鎖反応では巨大になることも。

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

荷電粒子の**阻止能** (**エネルギー損失**)

Stopping power

Energy Loss

(**線エネルギー付与**)

Linear Energy Transfer : LET

**Bohr の計算**

ただし式の単位系を国際単位系 SI に直した。

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = \frac{z^2 e^4}{4\pi \epsilon_0^2 m_e v^2} n_e \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}}$$

黒板にて導出

$$n_e = Z n_a = \rho N_A Z / A$$

**Bethe-Bloch の式**

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho$$

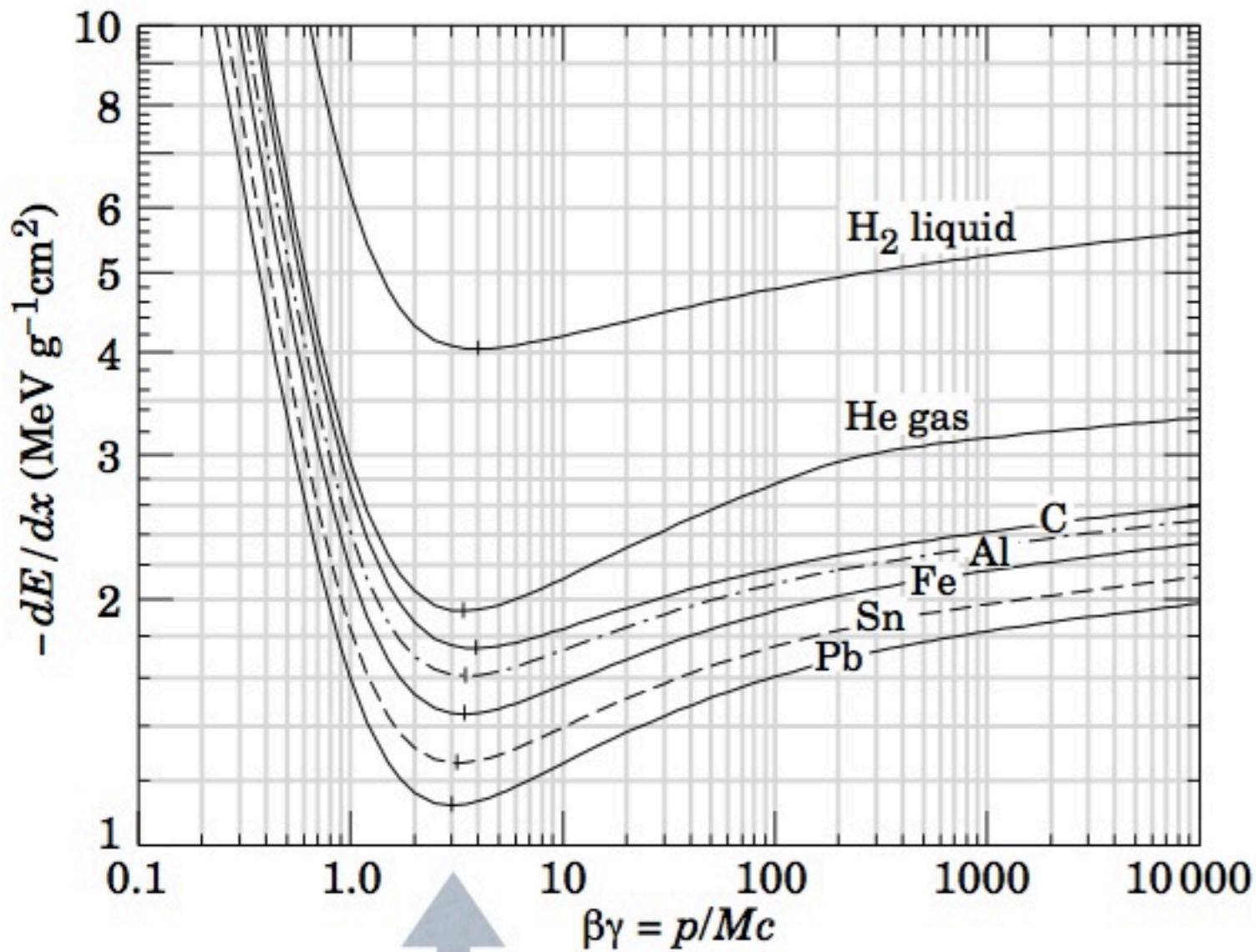
水素以外はほぼ  $Z/A \approx 1/2$

物質の種類にさほど依らない

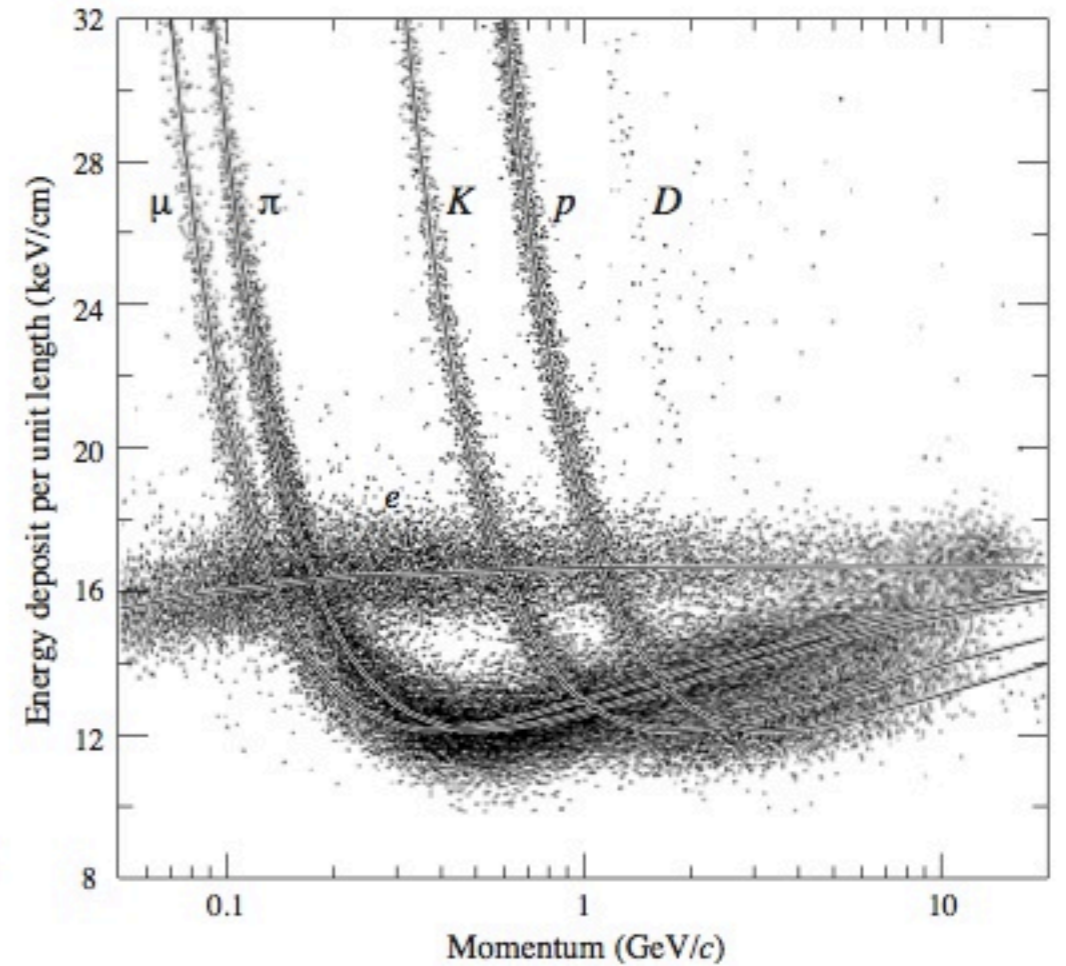
質量阻止能

MeV / (g / cm<sup>2</sup>)

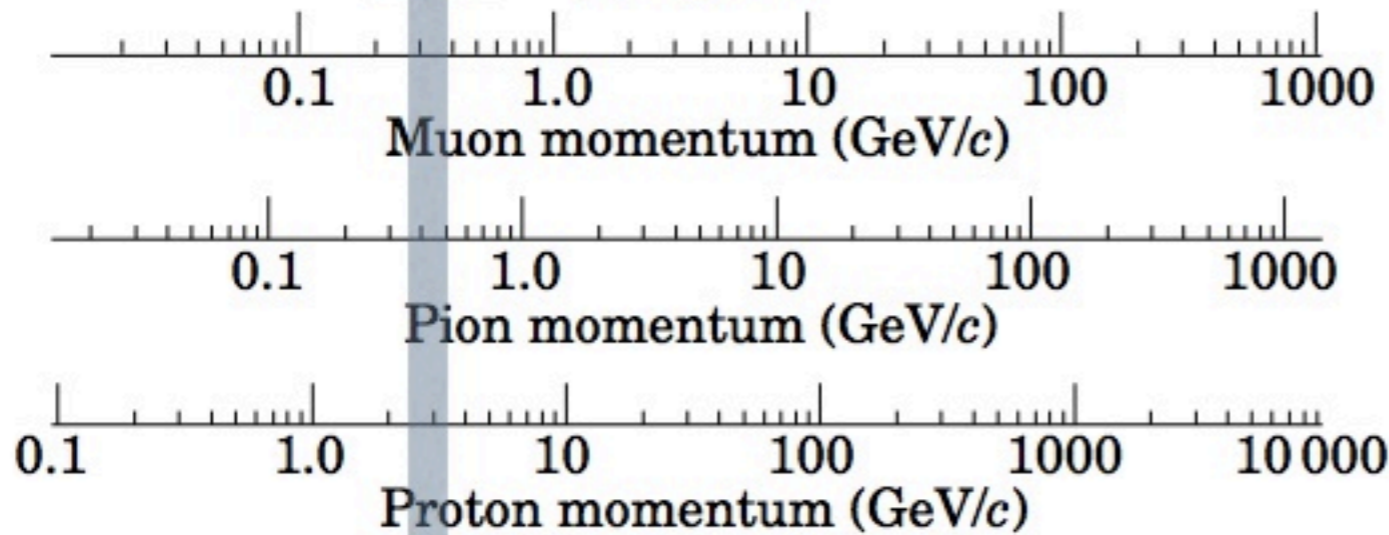
$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$



# 粒子識別



(8.5 atm Ar-CH<sub>4</sub> 80:20)

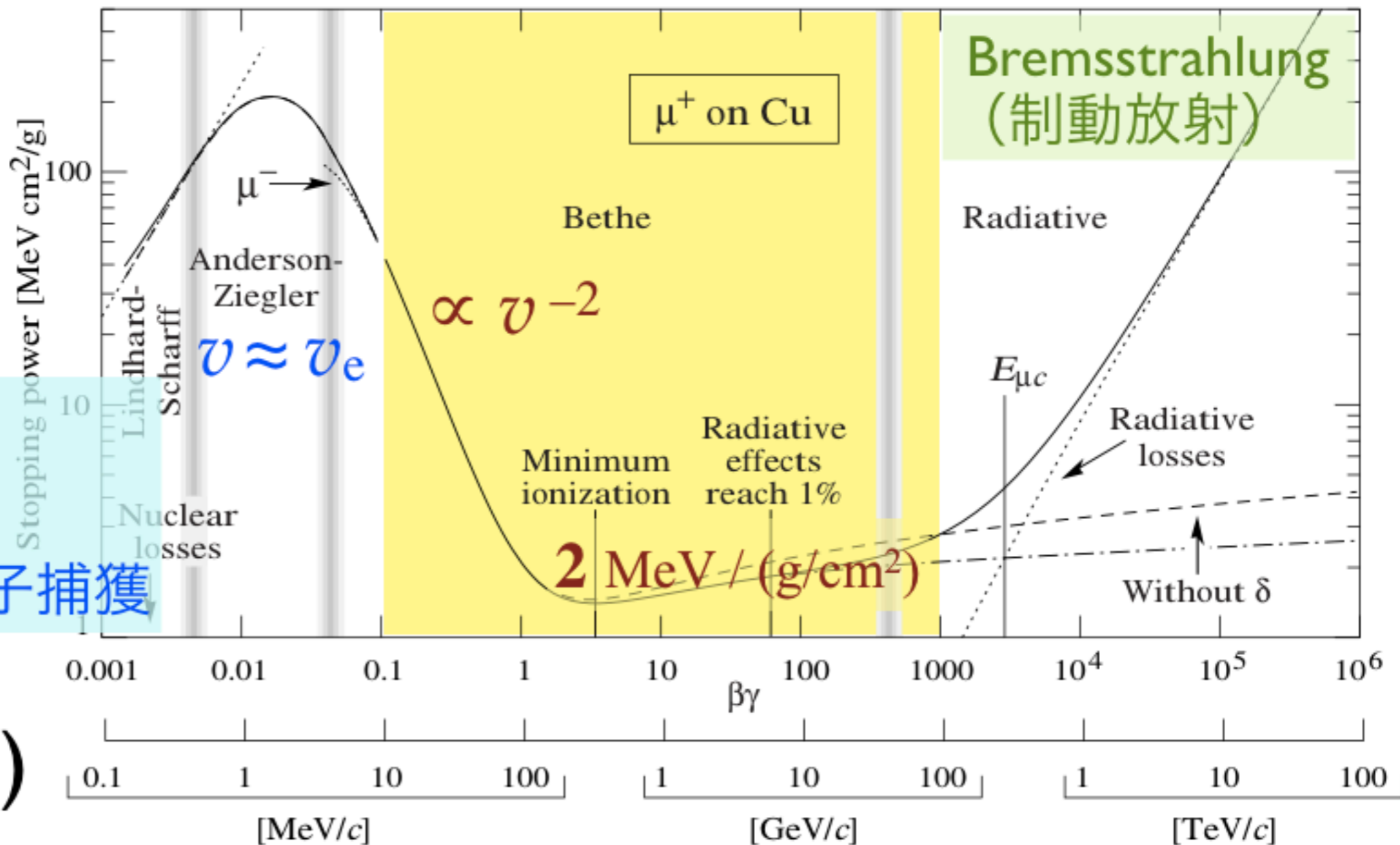


minimum ionizing  $\approx 2 \text{ MeV} / (g/cm^2)$

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

高エネルギー物理学業界では  $\rho$  を書かない (x について、 $\rho$  を含んだ次元だと見なす) ことが多い。前のスライドではそう表記。

- 非断熱的
- Barkas 効果
- イオンは電子捕獲



(線エネルギー付与)  
keV / μm

27.2.2. Stopping power at intermediate energies :

The mean rate of energy loss by moderately relativistic charged heavy particles,  $M_1/\delta x$ , is well-described by the "Bethe" equation,

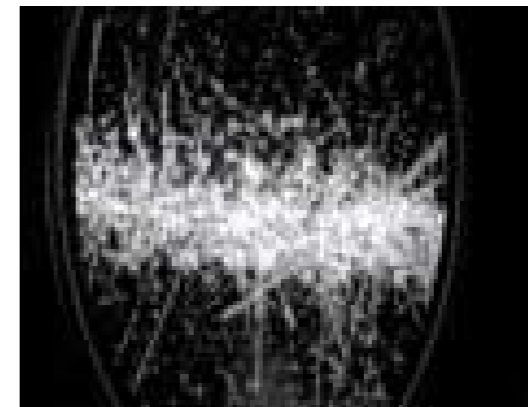
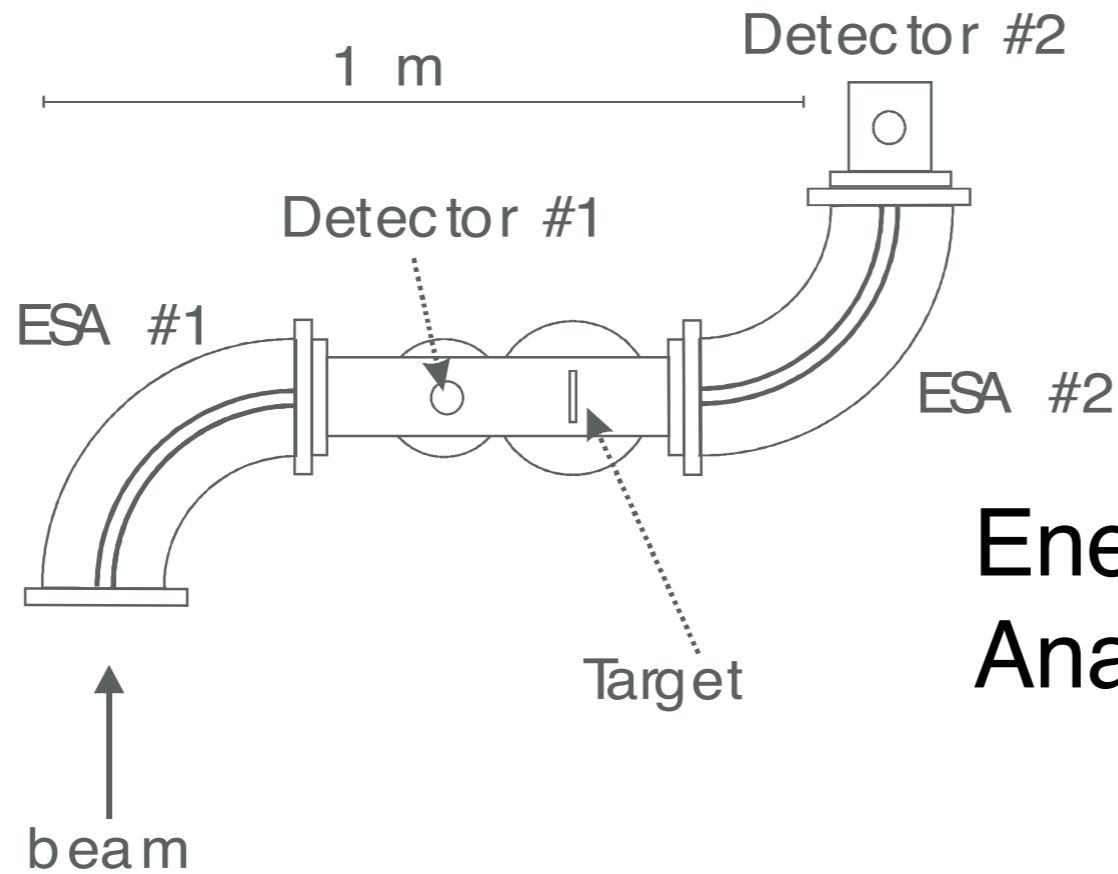
$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]. \quad (27.3)$$

質量阻止能  
MeV / (g / cm²)

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

# dE/dx measurements

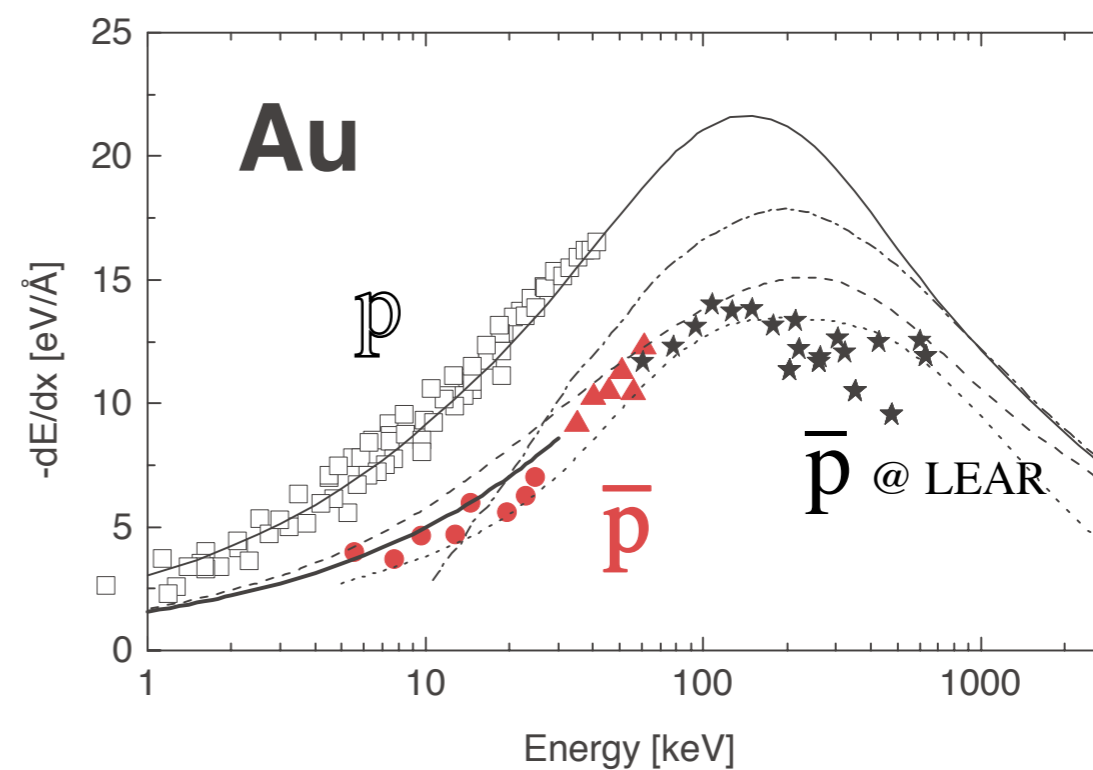
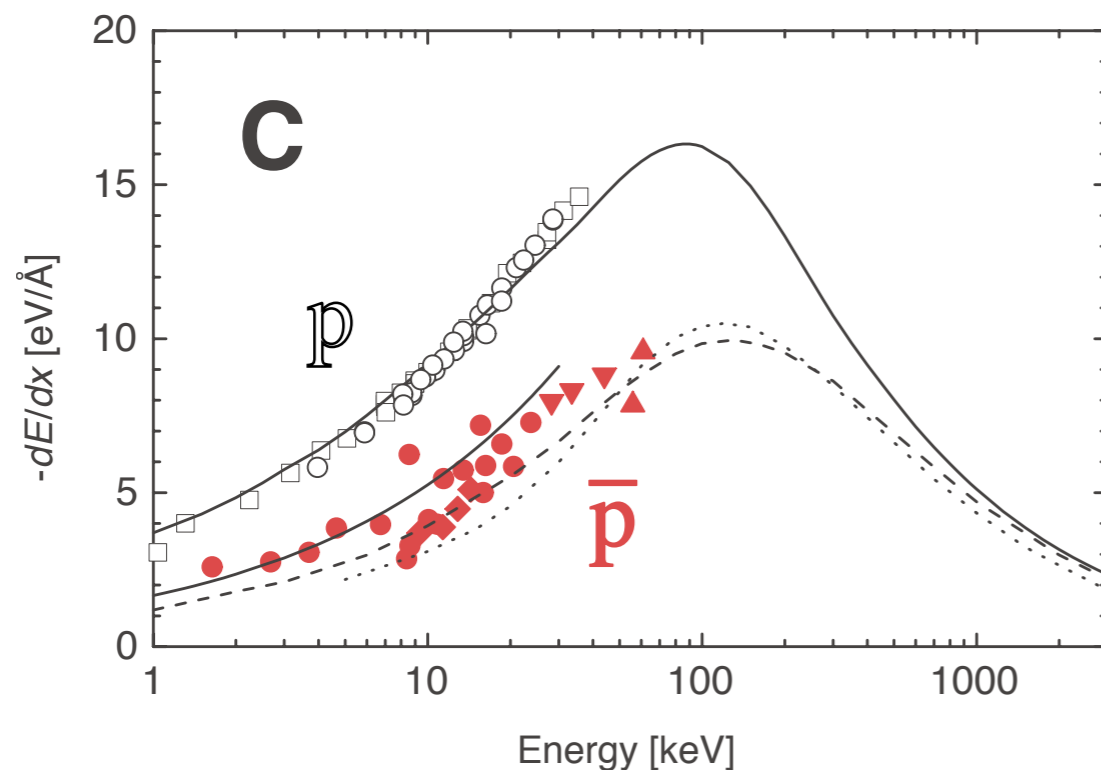
Energy Selection



Phosphorized Channel-plate + Camera

Energy Analysis

Barkas 効果 :  $p / \bar{p}$



# 阻止能（エネルギー損失、線エネルギー付与）

Stopping power

Energy Loss

Linear Energy Transfer : LET

陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線 : 高 LET 放射線

中性子線(n) : 物質中の陽子を叩いて弾き出すので、  
高い LET を与える。

電子( $\beta$ )線 : 低 LET 放射線

光子(X線,  $\gamma$ 線) : 物質中の電子を弾き出す。

あるいは高エネルギーでは電子陽電子対を生成する。  
低い LET。

物質の種類にさほど依らない

$$\begin{array}{l} \text{質量阻止能} \\ \text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2) \end{array} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

# 飛程

Range

阻止能の逆数を積分。

陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線：短い飛程。

外部被曝に対して、遮蔽は容易。

中性子線(n)：電子と相互作用しないので遠くまで飛ぶ。

陽子を叩き出せば一気に減速するが、核子同士なので反応断面積が小さい（反応確率が小さい）。

短い飛程。水素原子を含む物質で遮蔽。

電子( $\beta$ )線：p,  $\alpha$ , 重粒子線に比べて長めの飛程。

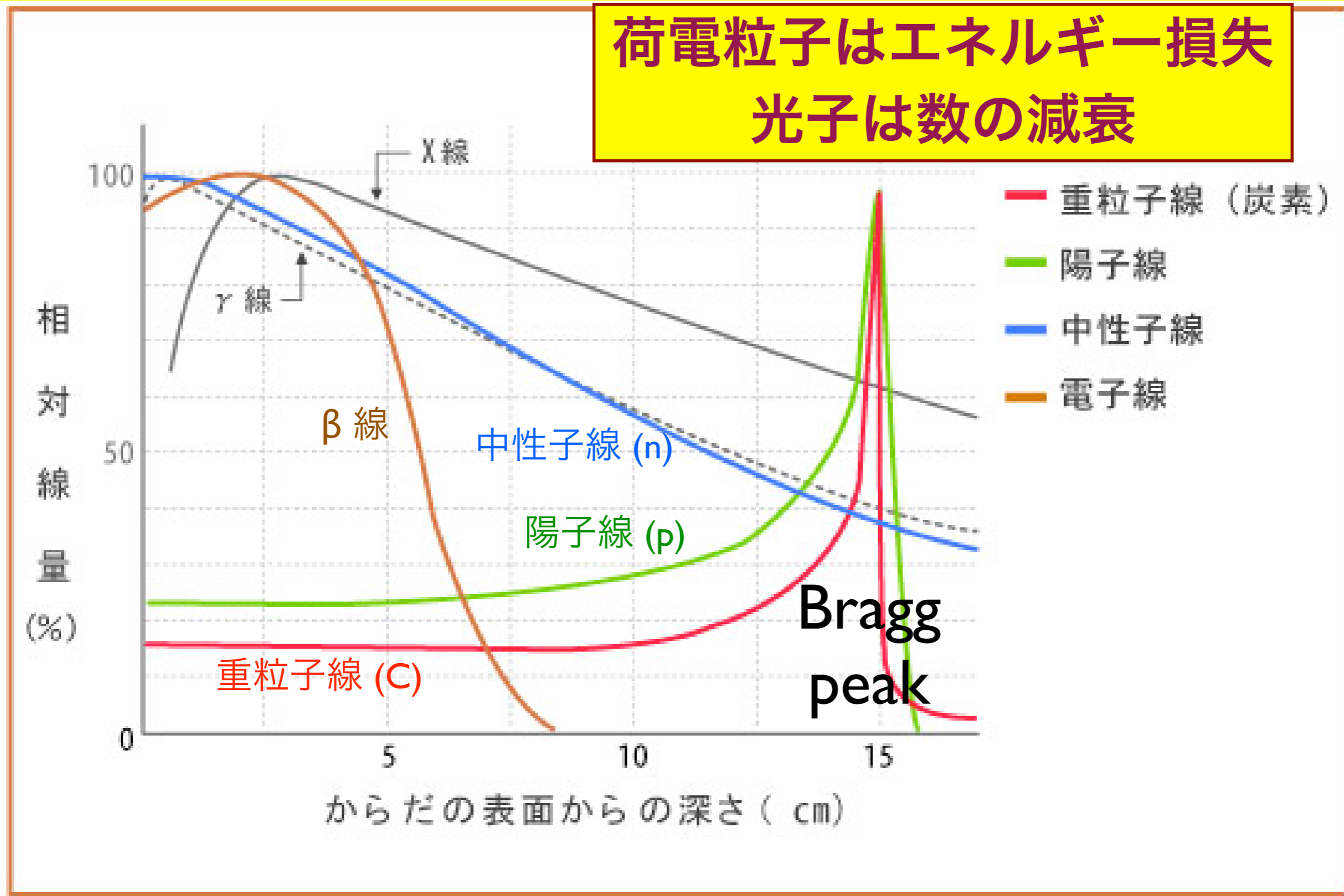
軽いので散乱されやすい（相手も電子）。

物質の種類にさほど依らない

$$\begin{array}{l} \text{質量阻止能} \\ \text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2) \end{array} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

陽子(p)、 $\alpha$ 、重粒子線は飛程が揃っている。  
電子( $\beta$ )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, $\gamma$ )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**

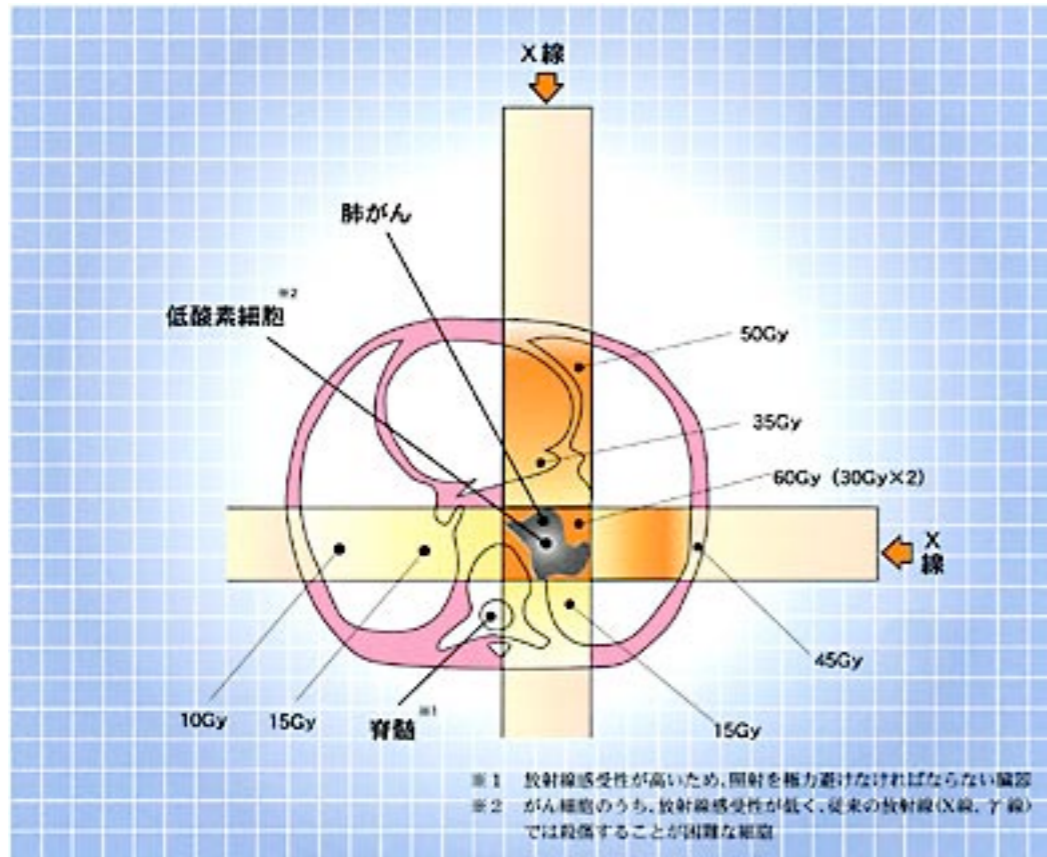




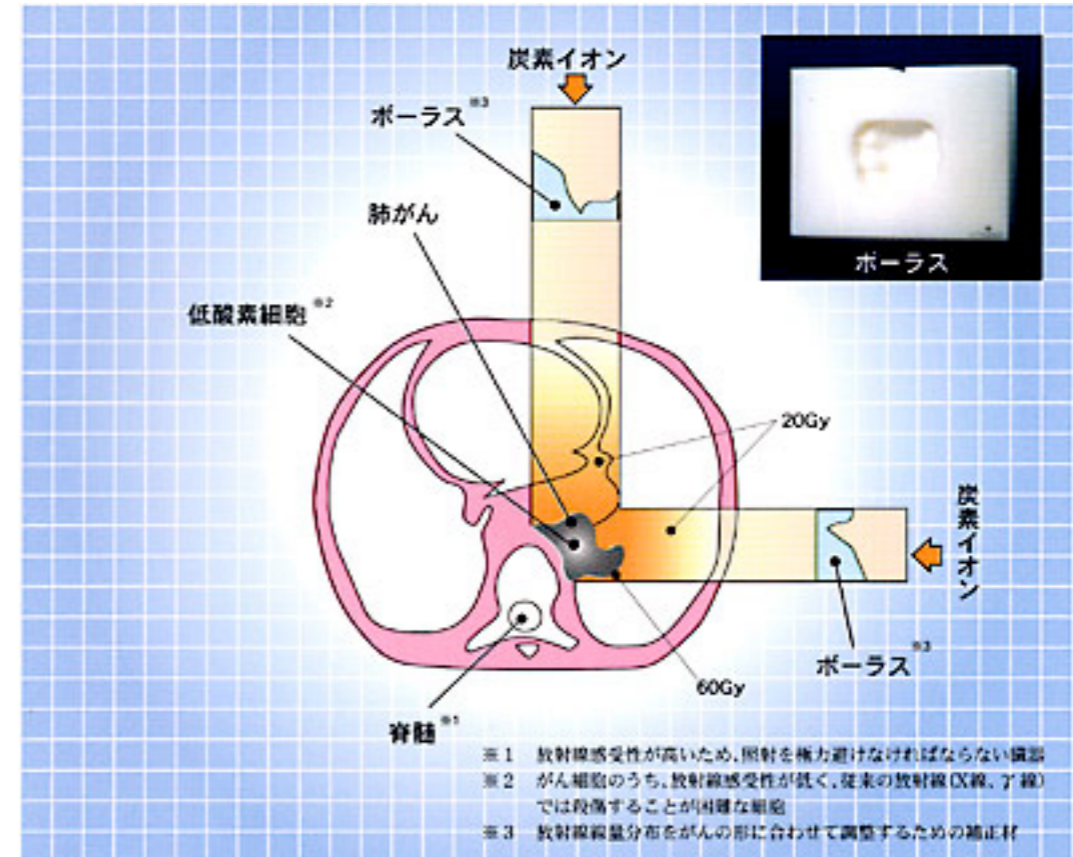
# 放射線医療：がん治療

# 数 Gy を複数回

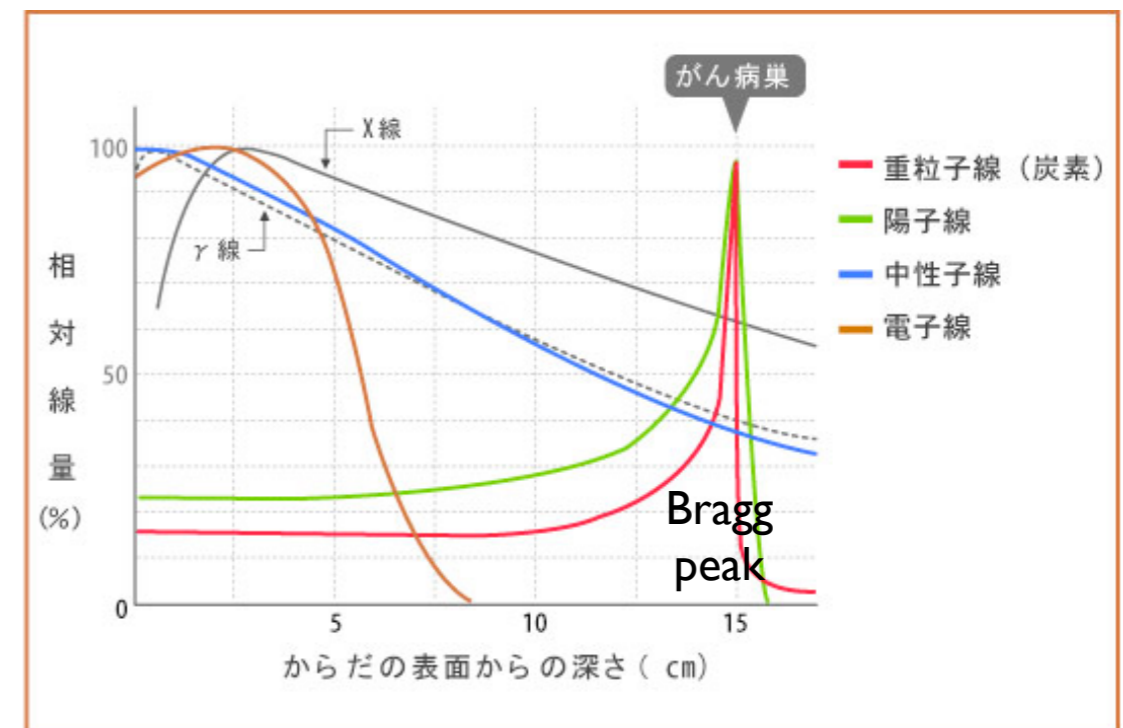
## X線



## 重粒子線 (炭素イオン)

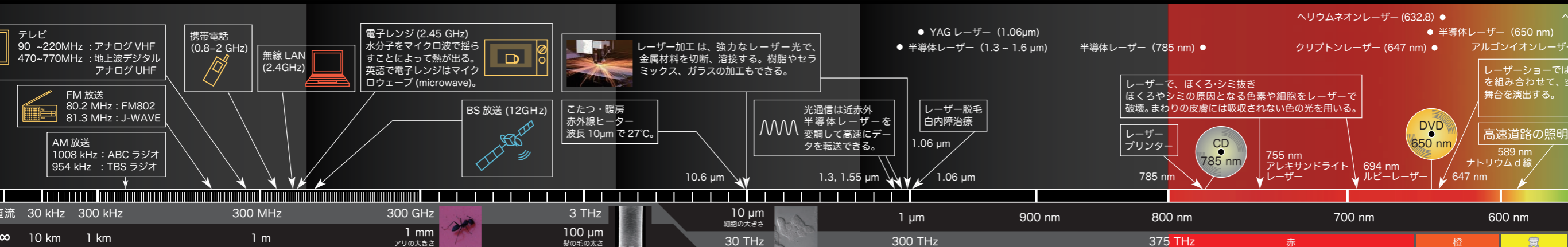


他には：ガンマナイフ、  
陽子線、パイ中間子  
研究中：反陽子



# 放射線と物質との相互作用

## 光子の減衰



### 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)
- このた・暖房赤外線ヒーター: 波長 10μm で 27°C。
- 光通信は近赤外半導体レーザーを変調して高速にデータを転送できる。
- レーザー加工: 強力なレーザー光で、金属材料を切断、溶接する。樹脂やセラミックス、ガラスの加工もできる。
- YAG レーザー (1.06μm)
- 半導体レーザー (1.3~1.6 μm)
- 半導体レーザー (785 nm)
- ヘリウムネオンレーザー (632.8)
- 半導体レーザー (650 nm)
- クリプトンレーザー (647 nm)
- アルゴンイオンレーザー
- レーザーショーでは、レーザー光を組み合わせて、舞台を演出する。
- 高速道路の照明: 589 nm ナトリウム d 線
- 785 nm レーザープリンター
- 785 nm CD
- 755 nm アレキサンドライトレーザー
- 694 nm ルビーレーザー
- 647 nm

30 kHz, 300 kHz, 300 MHz, 300 GHz, 3 THz, 10 μm, 1 μm, 900 nm, 800 nm, 700 nm, 600 nm

10 km, 1 km, 1 m, 100 μm, 30 THz, 300 THz, 375 THz

赤, 橙, 黄

### 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います。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。

光が小さい粒子 (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。もとの光が色かざれて散乱する光があります。ラマン散乱といい、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。

虹の七色は光の屈折

光が小さい粒子 (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。もとの光が色かざれて散乱する光があります。ラマン散乱といい、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。

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います。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。

光が小さい粒子 (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。もとの光が色かざれて散乱する光があります。ラマン散乱といい、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。

### 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！

### 空の青色は光の散乱

光が小さい粒子 (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。もとの光が色かざれて散乱する光があります。ラマン散乱といい、分子や結晶のプリズムで屈折して色分けされた光

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います。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。

光が小さい粒子 (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。もとの光が色かざれて散乱する光があります。ラマン散乱といい、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。

### 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。

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。

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、軍用に用いられる。

### 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います。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。

光が小さい粒子 (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。もとの光が色かざれて散乱する光があります。ラマン散乱といい、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。

### 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、暗間でも相手に気付かれない。防犯のほか、軍事にも用いられる。

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。

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。

光 CT: 脳の中の酸素濃度を断層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。

さそり座のアンタレス (3,500°C) の黒体放射は 800 nm 付近、赤く見える。

### 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。細い穴を通して、そ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。タマムシやチョウの羽、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います。

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るのを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。スティーブン・チューらは光の放射圧で原子を冷却する技術を開発しノーベル賞を受賞しました。SF 小説には放射圧で飛ばす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。

### 可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移

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。

発光ダイオードは、発光効率の高光源として、信号機、ハイロケット、街のイルミネーションや街頭ビジョン車のヘッドライトの光合成等、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。

ホタ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。

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。

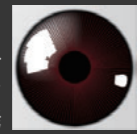
白色をつくるには青と赤が必要。テレビの液晶の画素、CRT の蛍光体

### 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るのを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。スティーブン・チューらは光の放射圧で原子を冷却する技術を開発しノーベル賞を受賞しました。SF 小説には放射圧で飛ばす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。

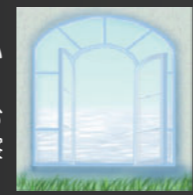
325 nm)

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。

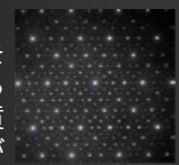


極端紫外光リソグラフィー 極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

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

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、質に紫外線を使う。

紫外線殺菌 水、食品、薬品などを殺菌する。

オゾン層 紫外線 可視光

酸化チタン 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。

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1.4km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。

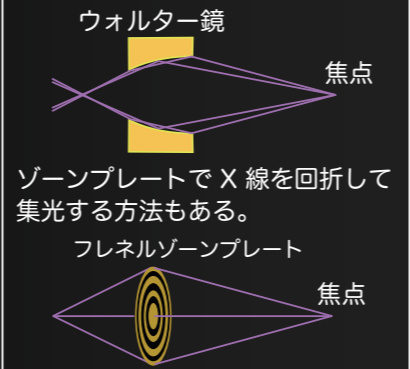
### 軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

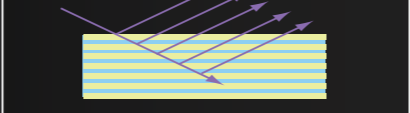
レーザープラズマ光源 高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

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。



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。

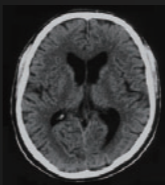
### X線

内殻電子遷移エネルギー

レントゲン写真 からだが透けて見える。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。



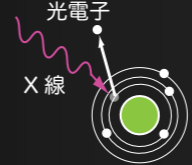
X線CT (コンピュータ断層撮影) 様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



X線天文衛星すざく 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。



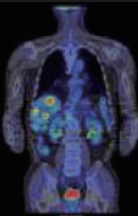
XPS(X線光電子分光) X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。



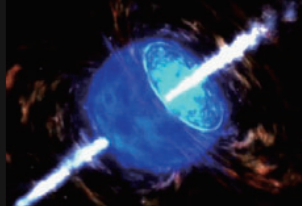
### γ線

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。



## 荷電粒子（ $\alpha$ 線・ $\beta$ 線など）の減速（エネルギー損失）

荷電粒子は物質中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・ $\gamma$ 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  $\sigma$** （単位距離当たりの**反応確率**を与える）が重要

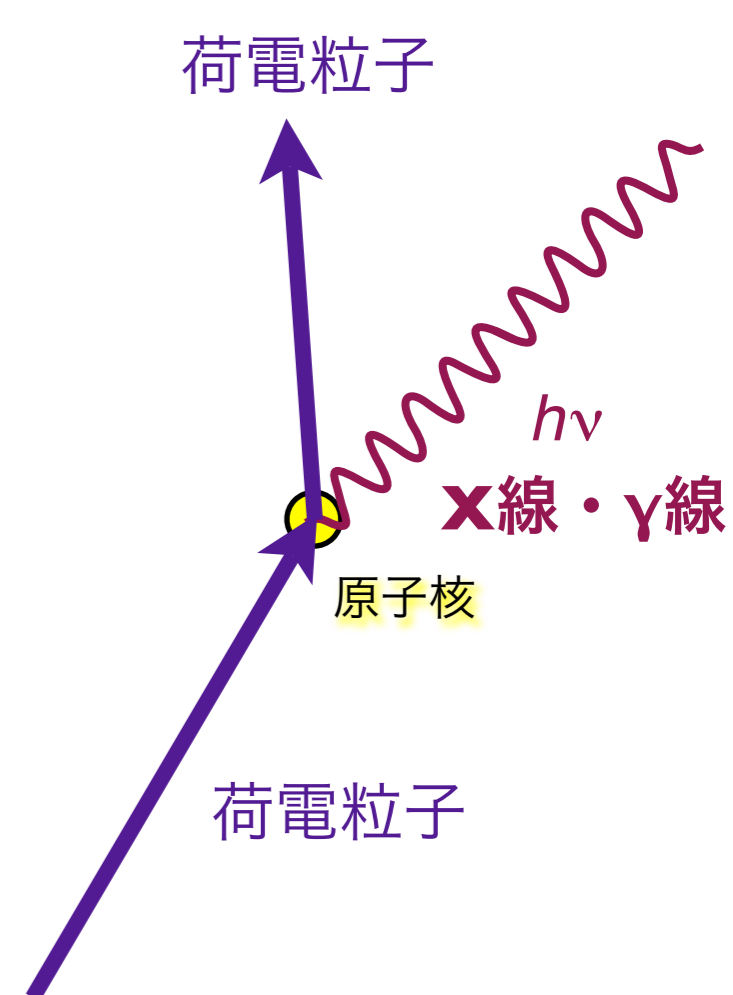
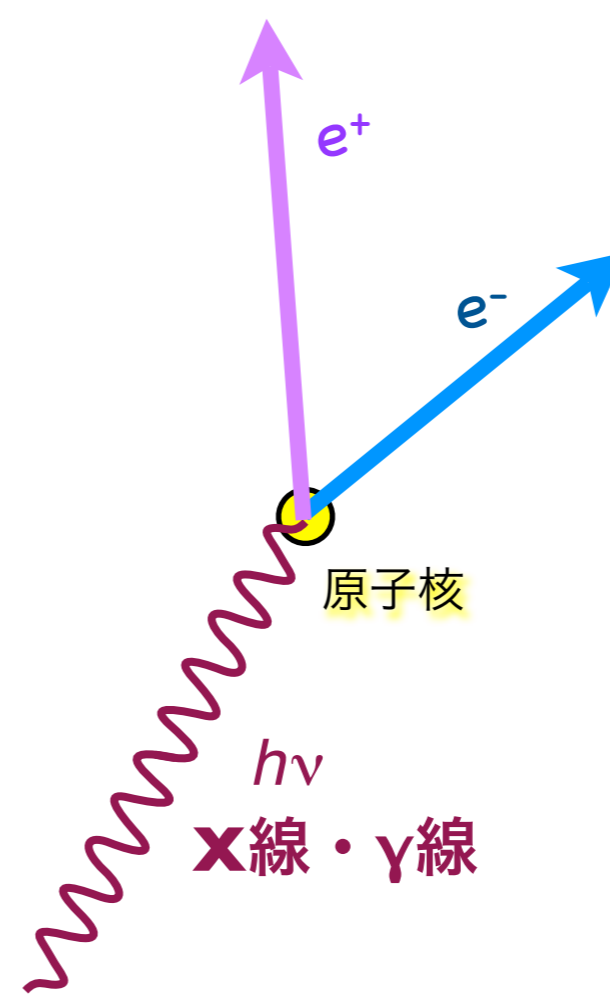
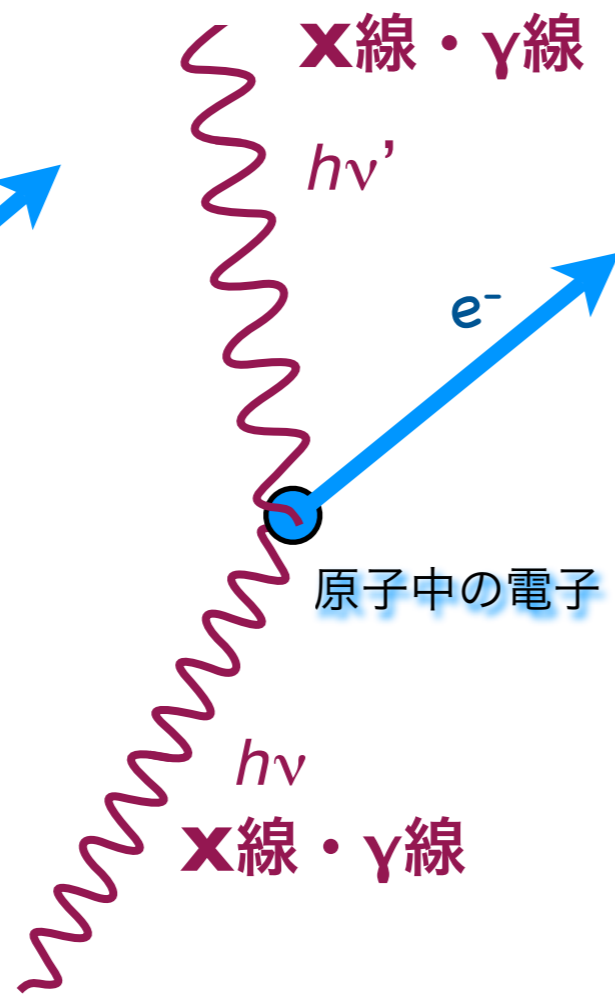
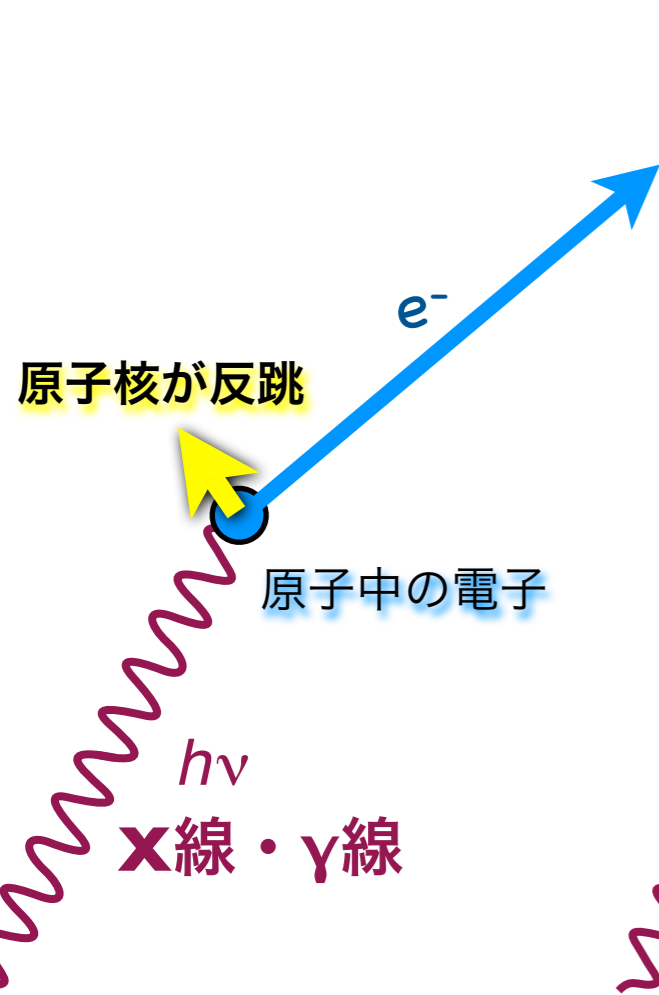
# 光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

## 光電効果

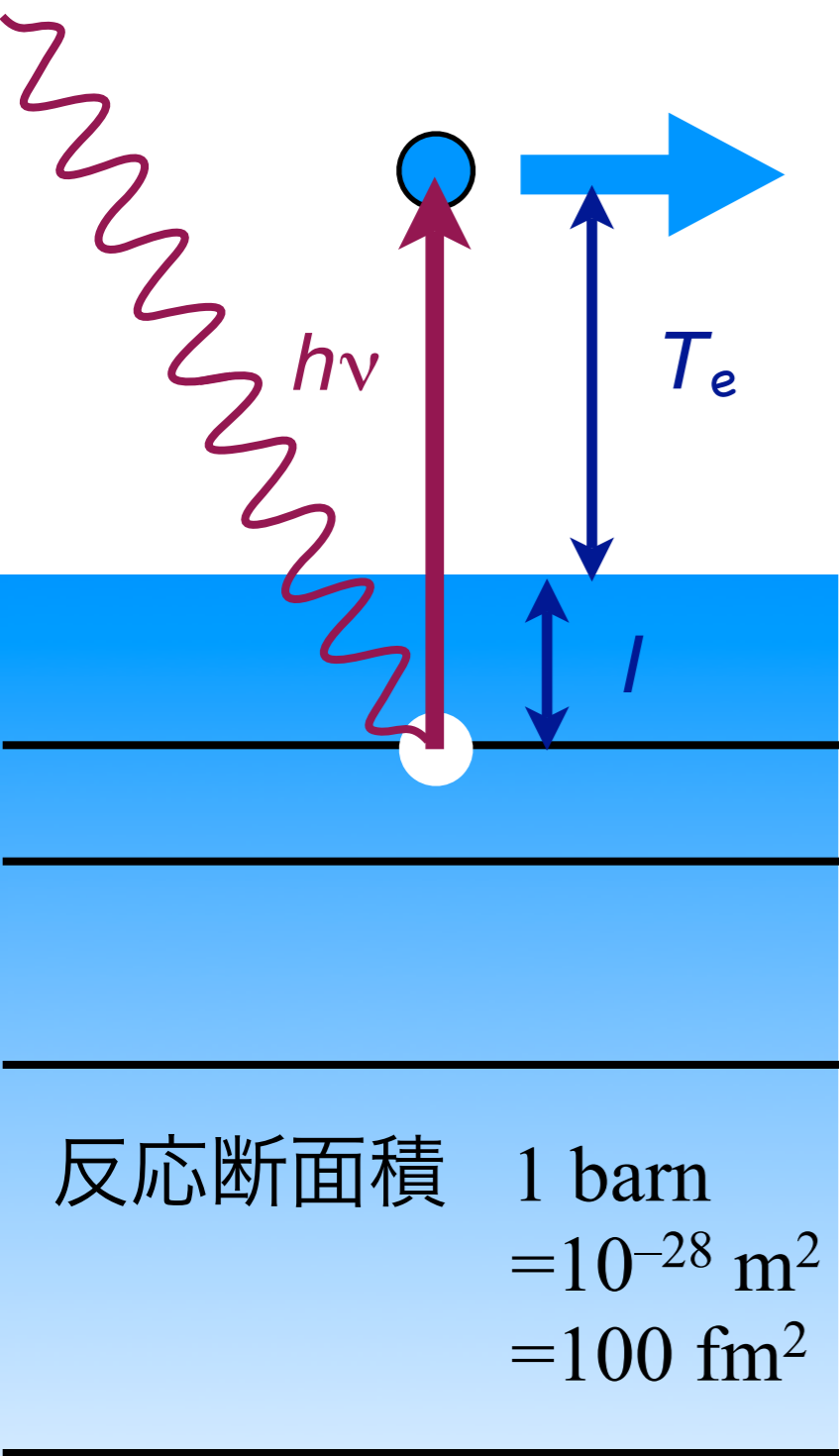
## コンプトン散乱

## 電子対生成

## 制動放射



# 光電効果



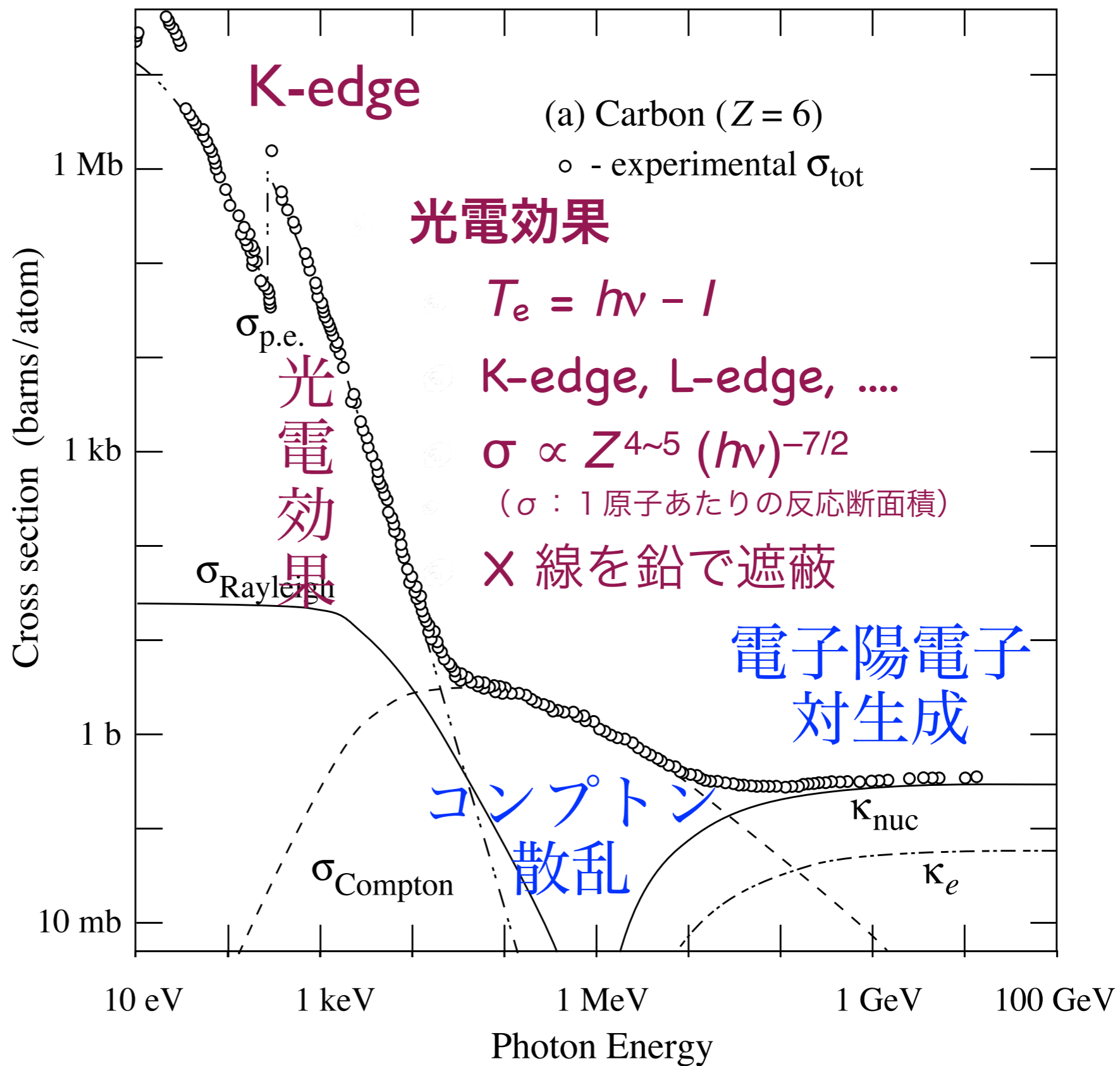
紫外線

X線

線

γ線

線



# コンプトン散乱

紫外線

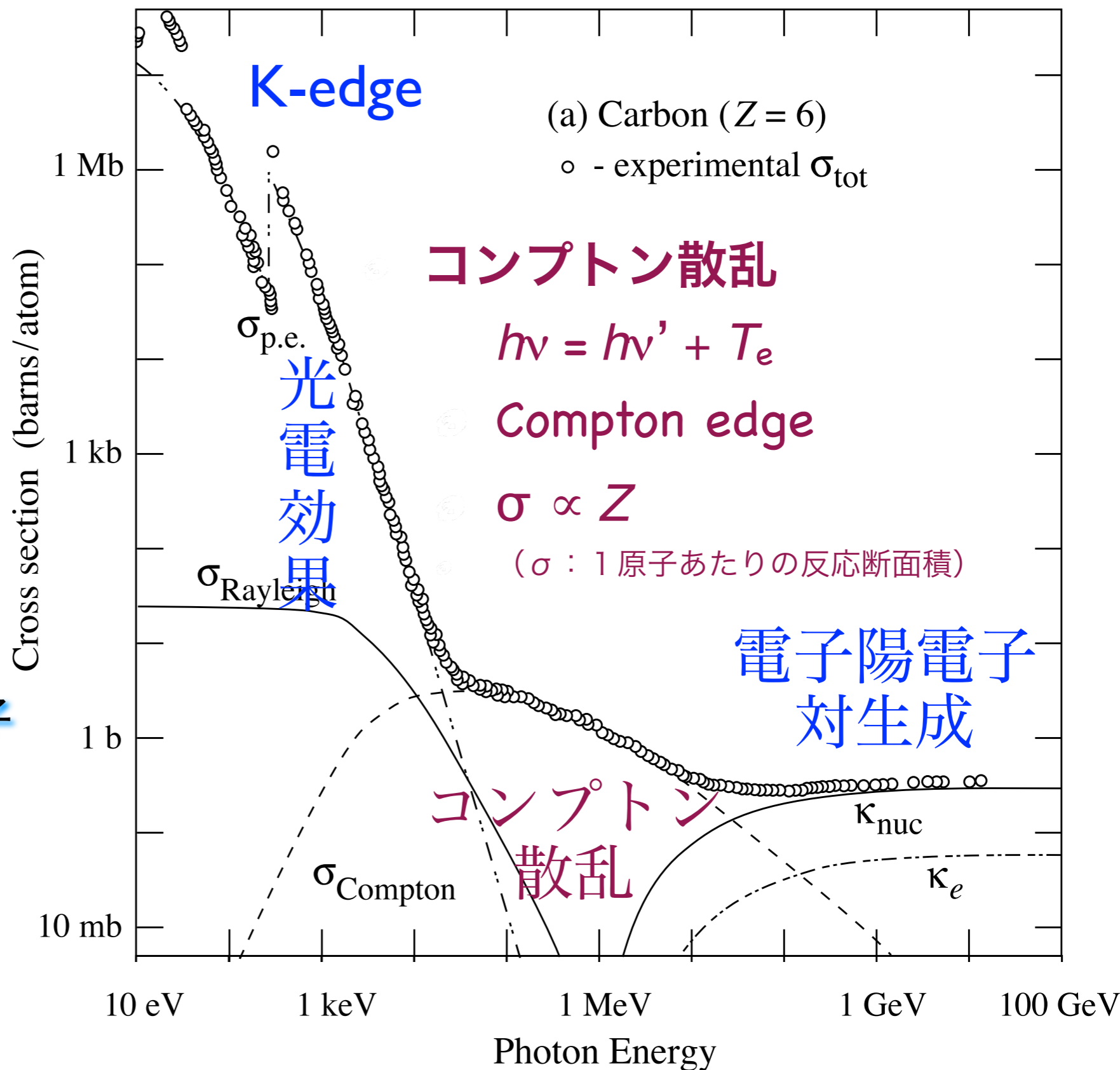
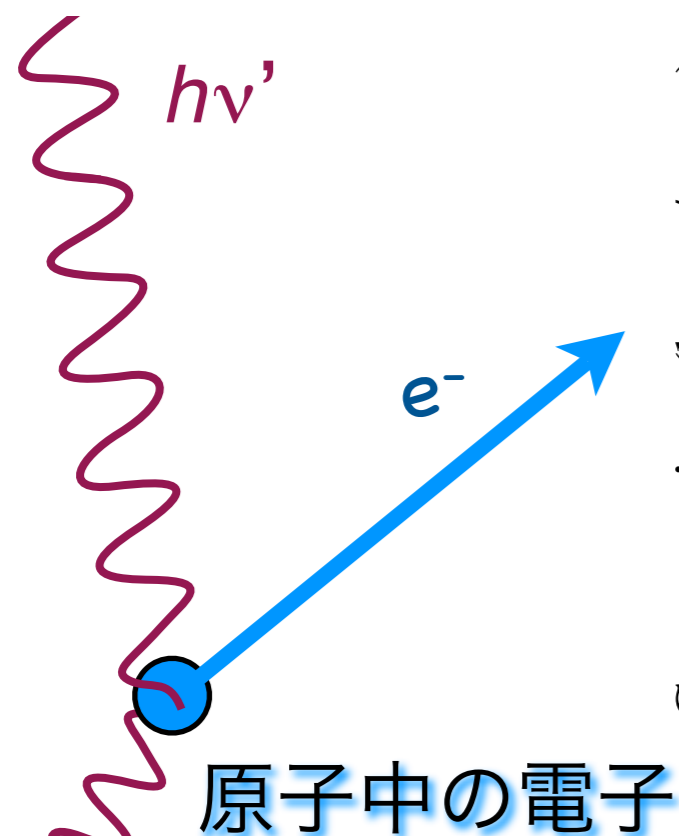
X線

線

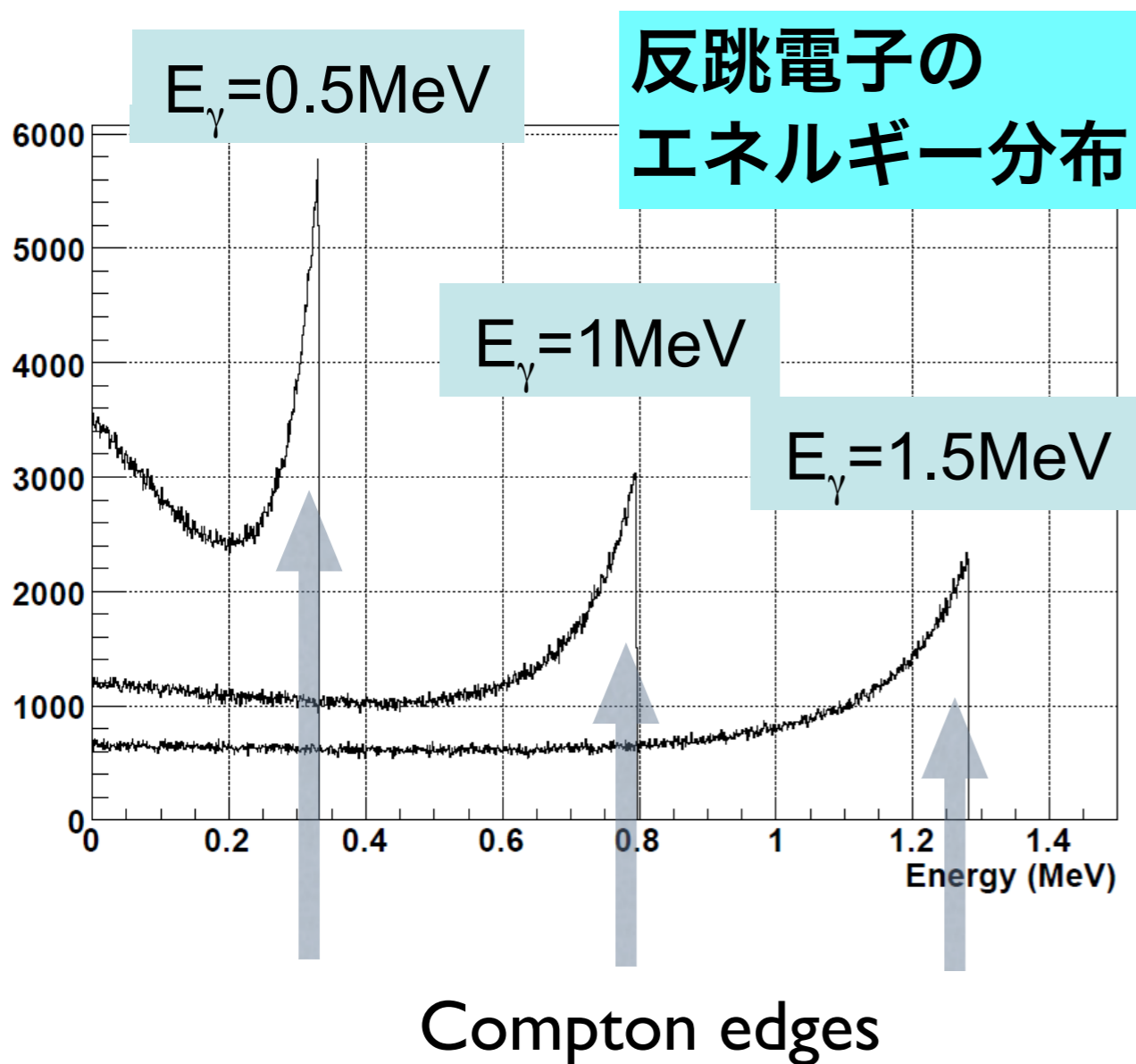
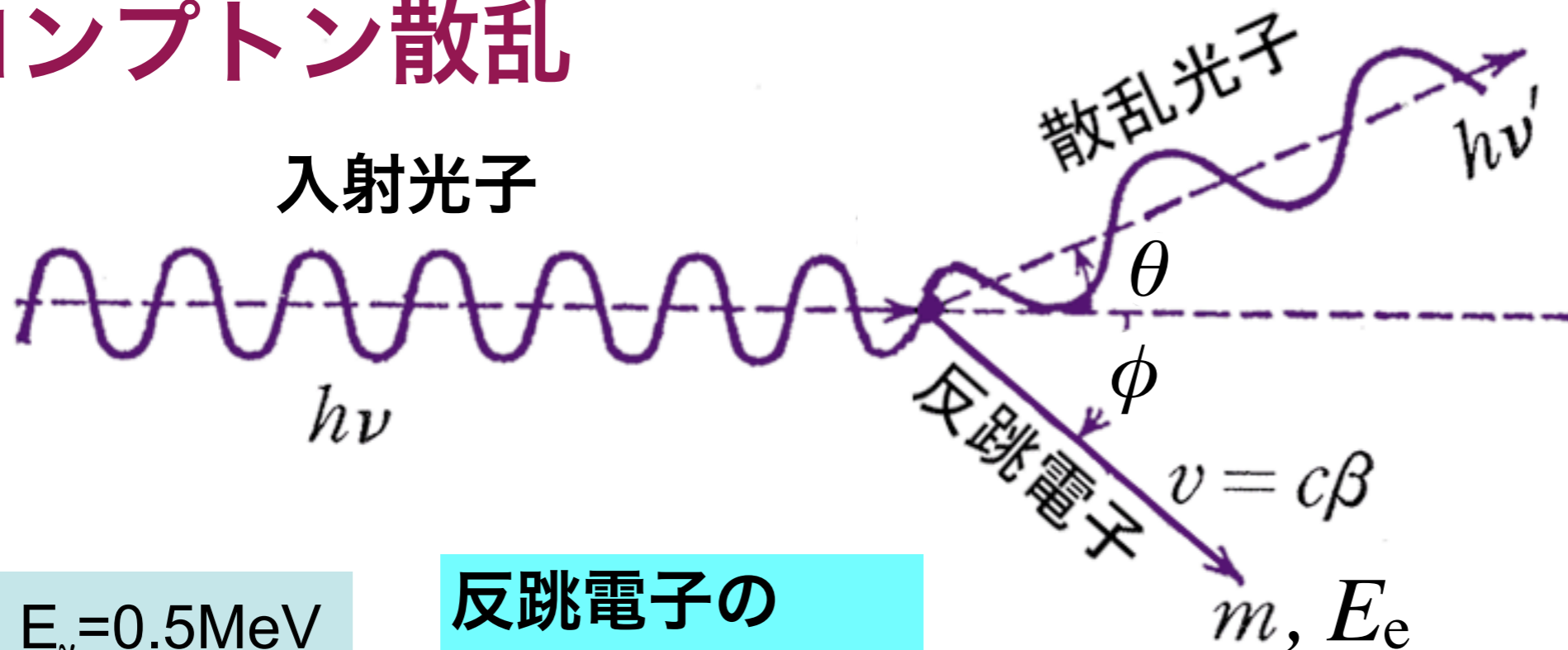
γ線

線

X線・γ線



# コンプトン散乱



$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

$$E_\gamma = h\nu$$

$$E_e = h\nu - h\nu'$$



# 電子対生成

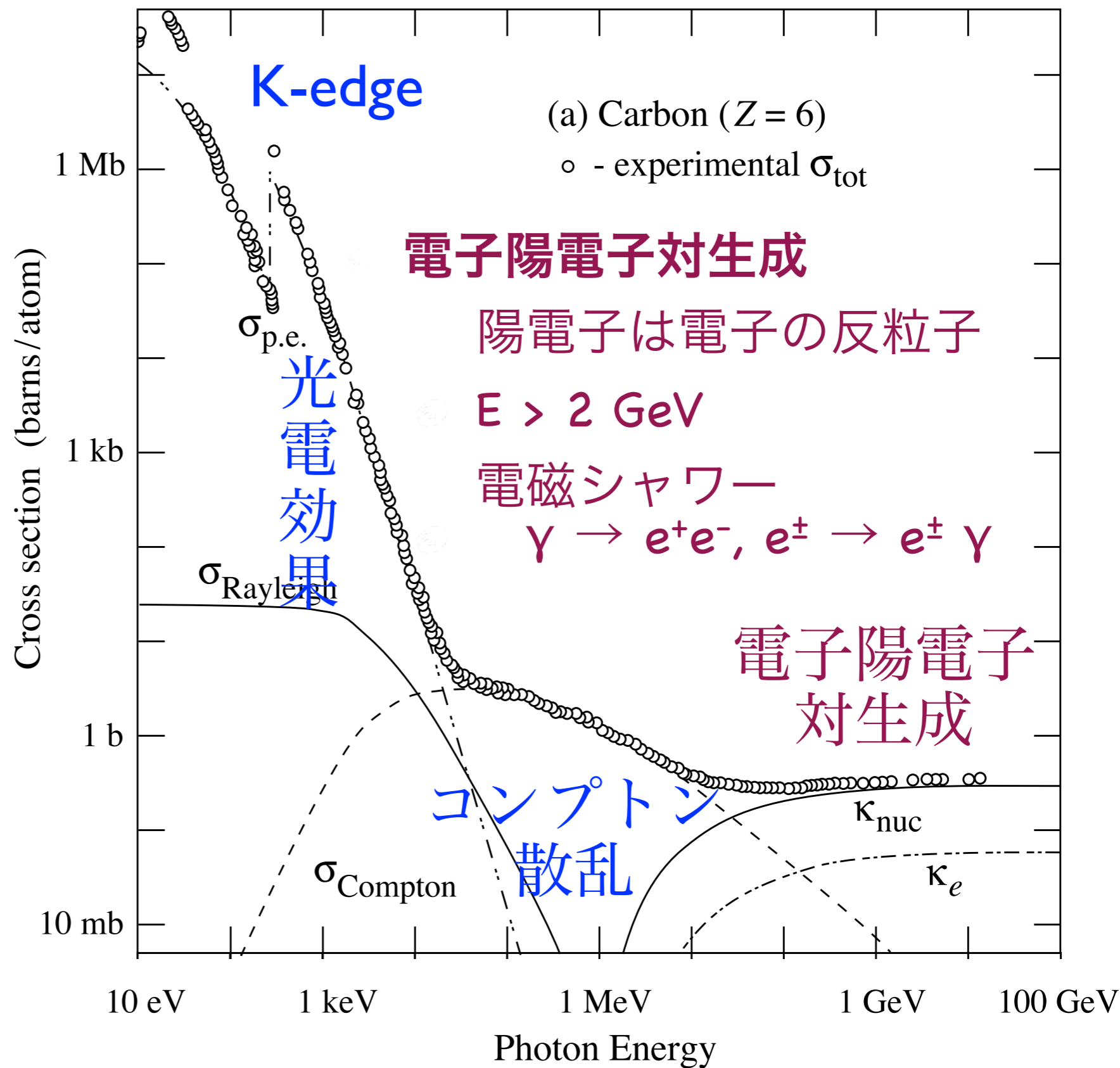
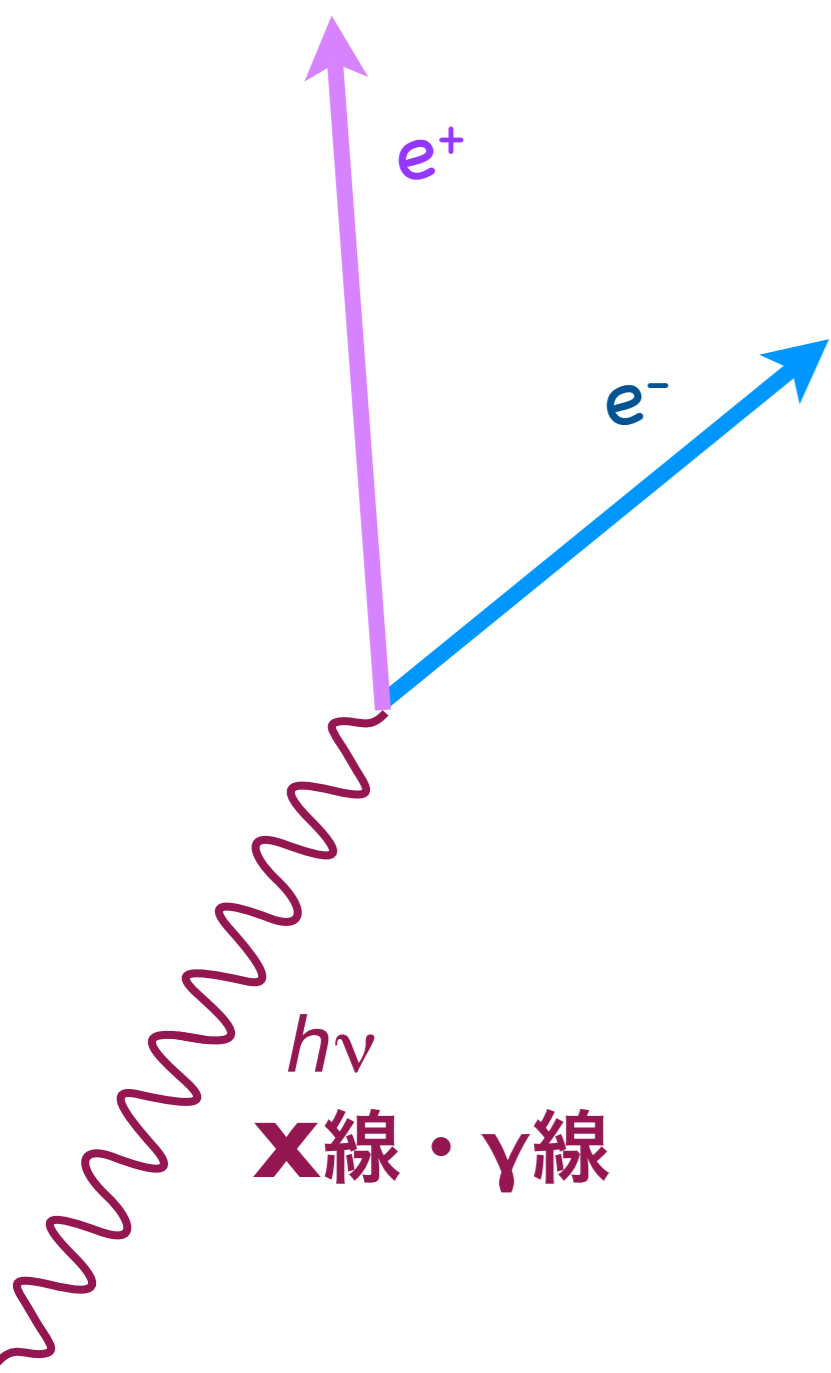
紫外線

X線

線

γ線

線



# 制動放射 (Bremsstrahlung)

紫外線

X線

γ線

線

荷電粒子

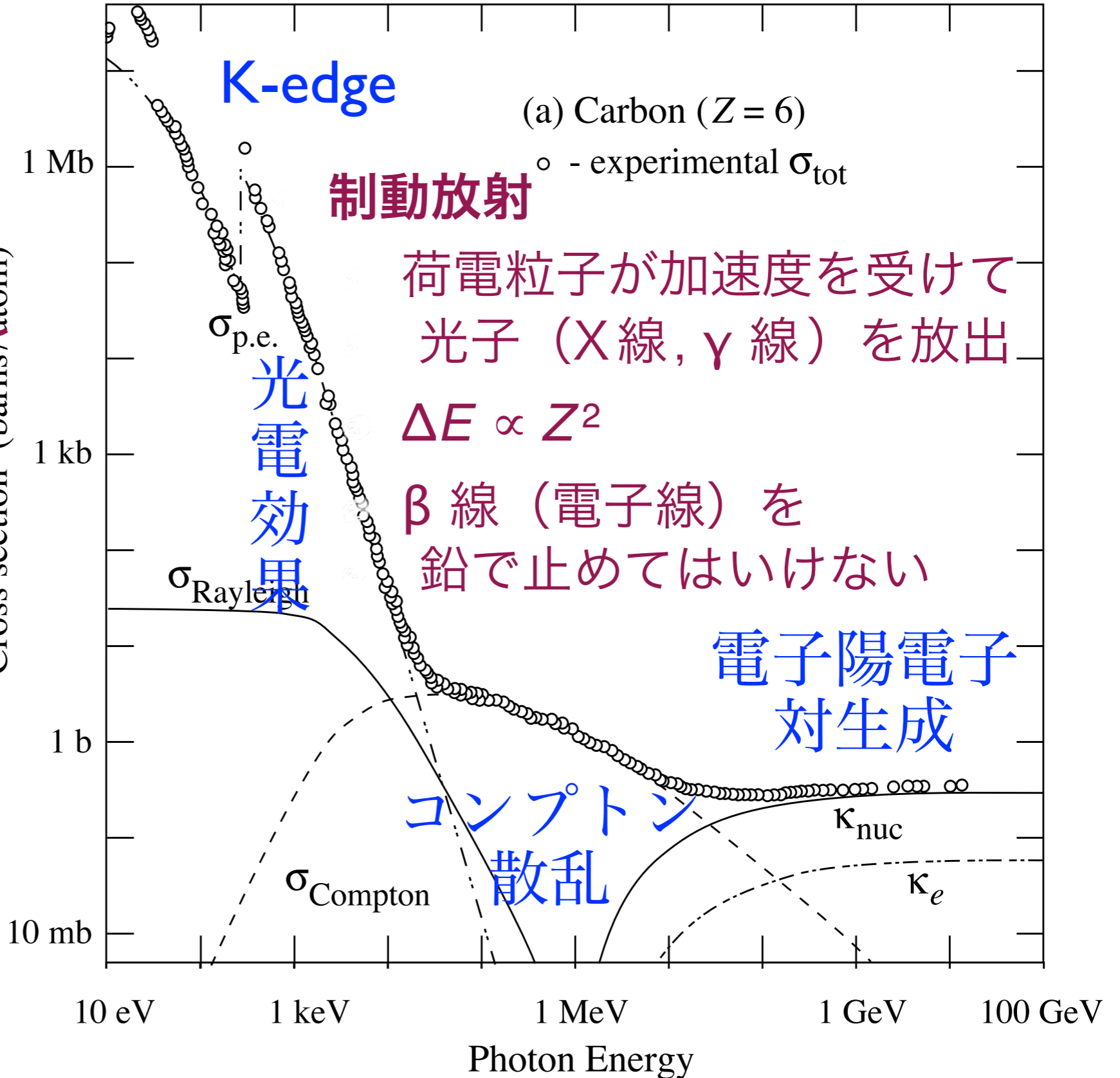


原子核

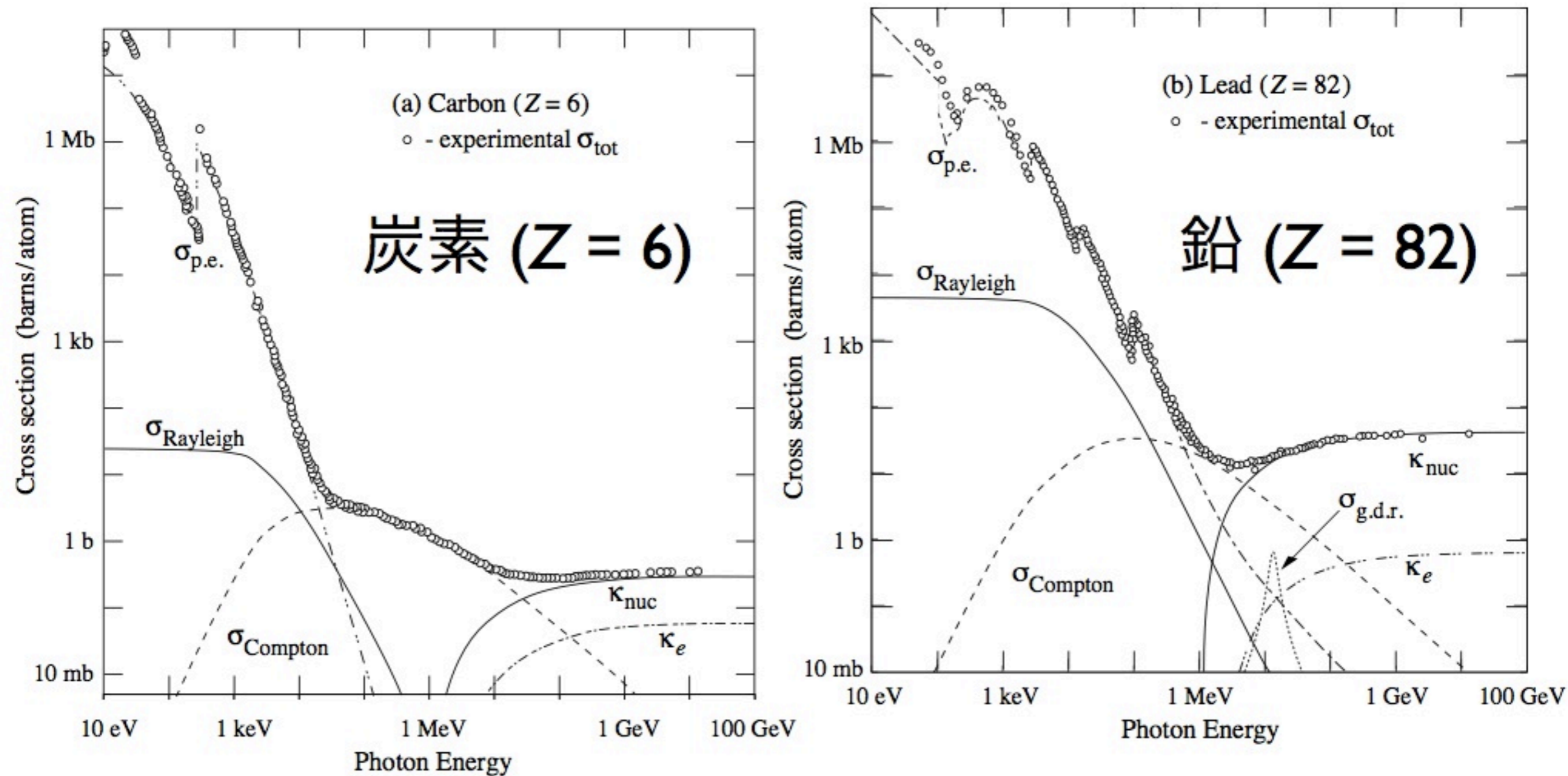
荷電粒子

X線・γ線

Cross section (barns/atom)



# 光子の反応断面積の物質依存性



**Figure 30.15:** Photon total cross sections as a function of energy in carbon and lead, showing the contributions of different processes [48]:

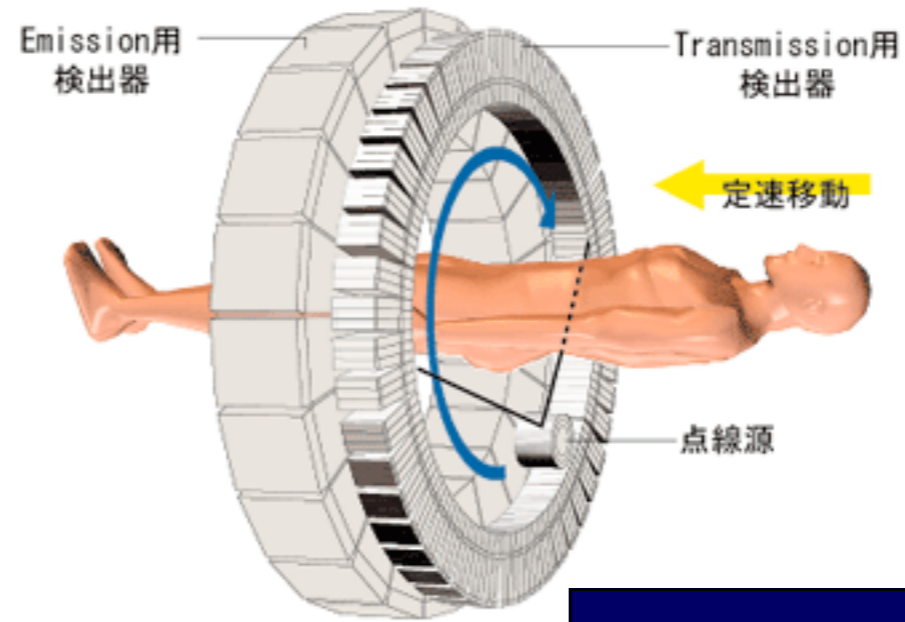
- $\sigma_{\text{p.e.}}$  = Atomic photoelectric effect (electron ejection, photon absorption)
- $\sigma_{\text{Rayleigh}}$  = Rayleigh (coherent) scattering—atom neither ionized nor excited
- $\sigma_{\text{Compton}}$  = Incoherent scattering (Compton scattering off an electron)
- $\kappa_{\text{nuc}}$  = Pair production, nuclear field
- $\kappa_e$  = Pair production, electron field
- $\sigma_{\text{g.d.r.}}$  = Photonuclear interactions, most notably the Giant Dipole Resonance [49]. In these interactions, the target nucleus is broken up.

Original figures through the courtesy of John H. Hubbell (NIST).

## 胸部単純X線撮影

### 胸部正面像

- ・立位
- ・吸気呼吸停止
- ・管電圧120kVp程度
- ・撮影時間～50ミリ秒
- ・X線投影：背→腹

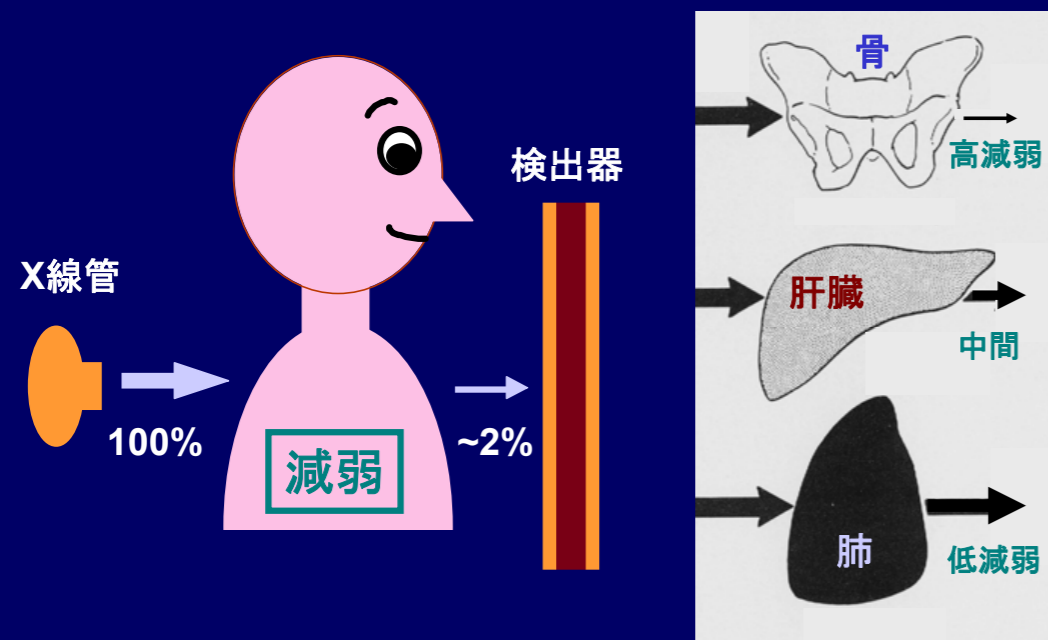
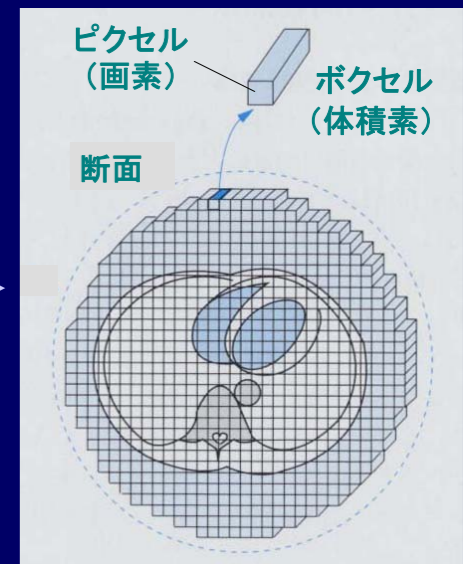
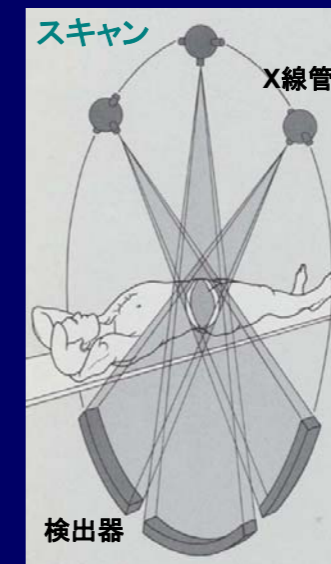


# X線 CT

# レントゲン(X線)撮影

国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

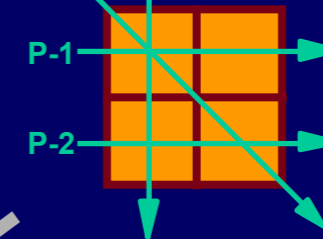
## X線コンピュータ断層撮影法:CT



### 未知の線減弱係数

$\mu_1$	$\mu_2$
$\mu_3$	$\mu_4$

### X線投影



### 連立方程式

- P-1;  $\mu_1 + \mu_2 = 8$
- P-2;  $\mu_3 + \mu_4 = 9$
- P-3;  $\mu_1 + \mu_3 = 6$
- P-4;  $\mu_1 + \mu_4 = 5$

### 解答

1	7
5	4

## 逆問題

# X線検査用造影剤

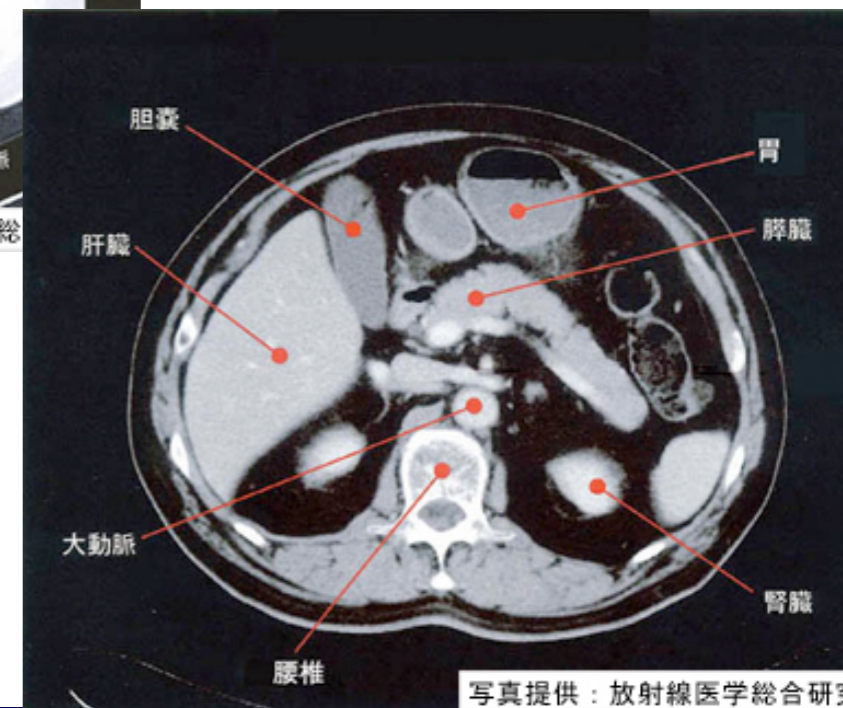
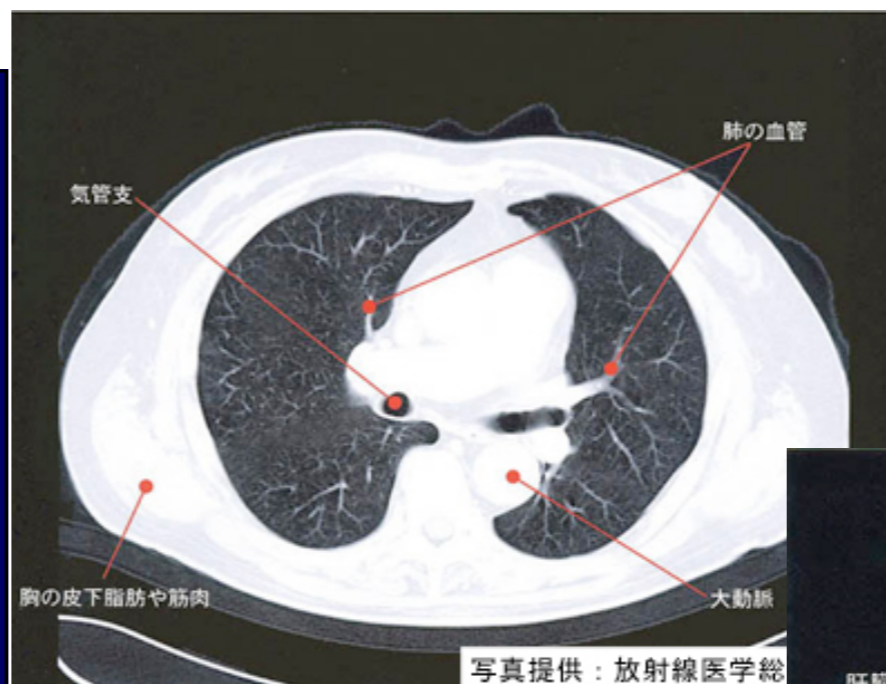
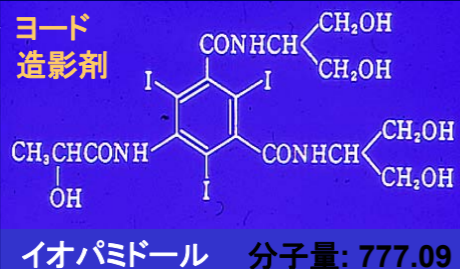
## \* 陽性造影剤

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)

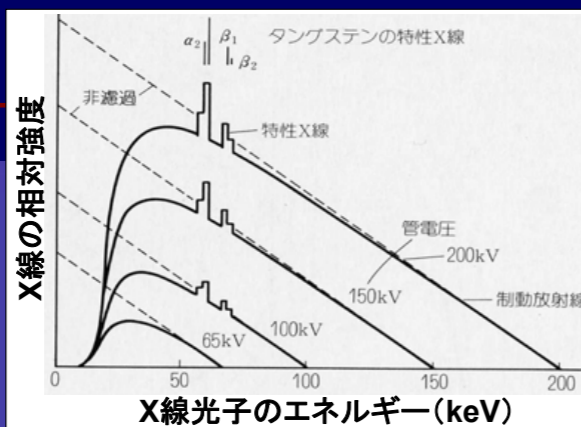
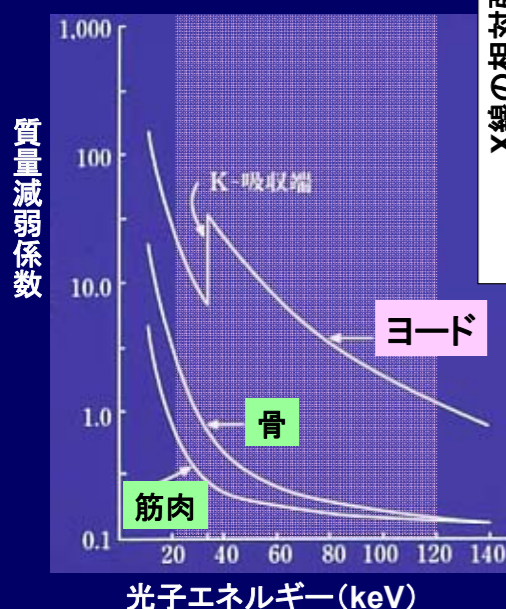


(減弱)

# 造影剤 (I, Ba, Xe) : Z 大 = 減衰係数 大

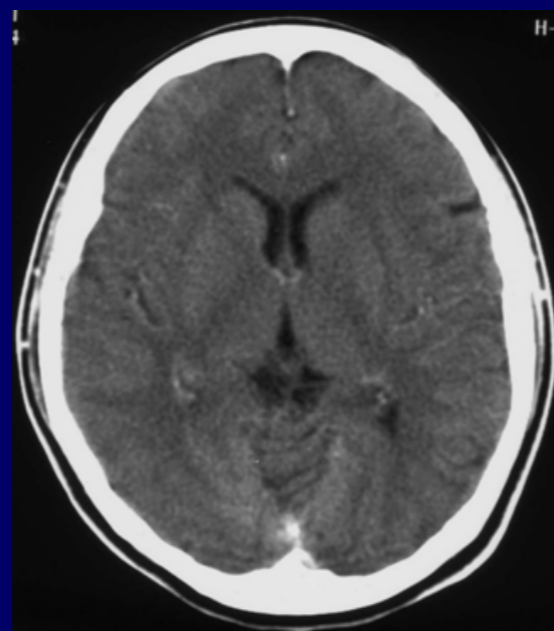
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

## X線の発生と減弱

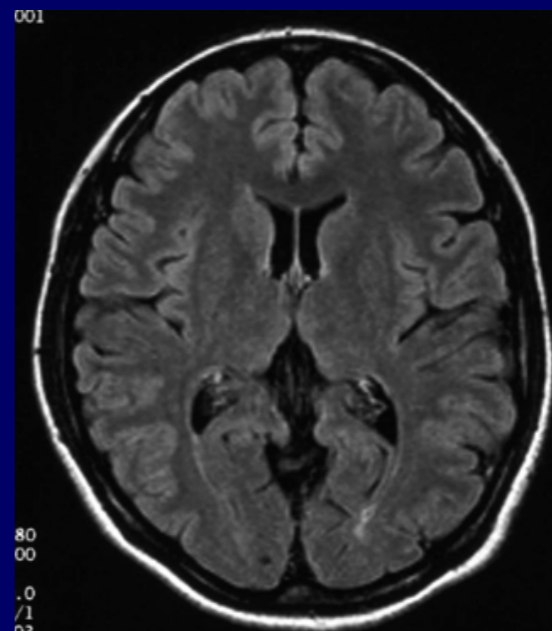


- \* 光電効果: 光電吸収
- ・元素のK吸収端 (keV): H 0.0136, C 0.283, O 0.531
- \* コンプトン散乱: 非弾性散乱

X線コンピュータ断層撮影法  
X-Ray CT:  
Computed Tomography



磁気共鳴画像診断法  
MRI: Magnetic  
Resonance Imaging



# 放射線化学

## 放射線が誘起する素反応



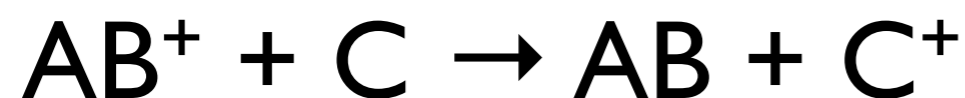
電離（イオン化）



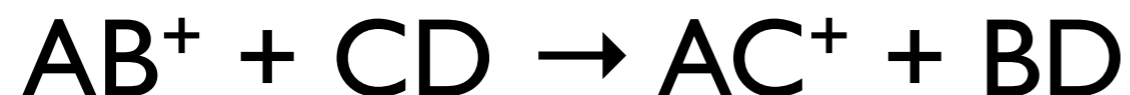
励起



再結合



電荷移動



イオン分子反応



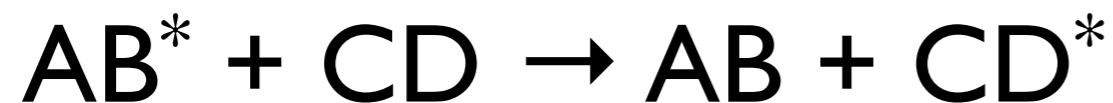
電子捕捉



ラジカル生成

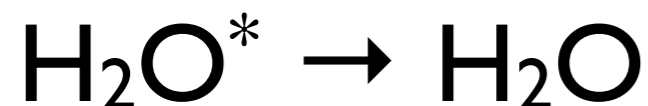
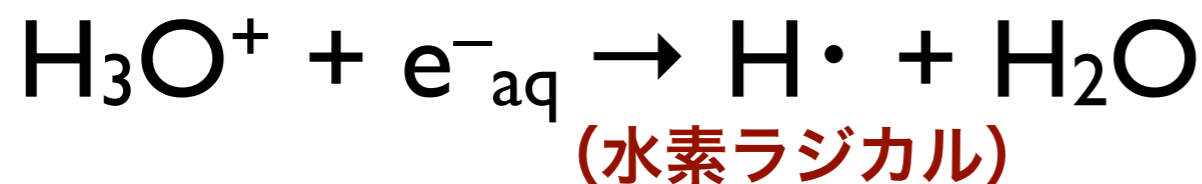
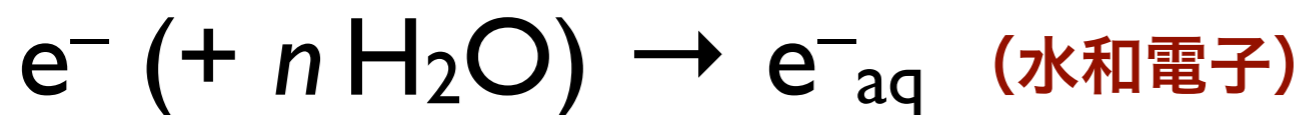
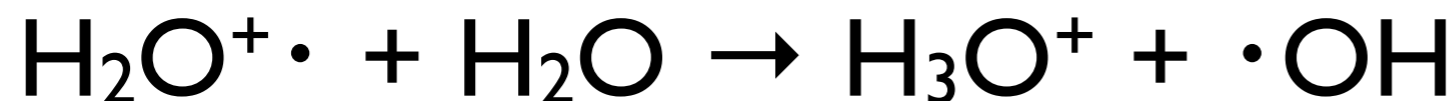
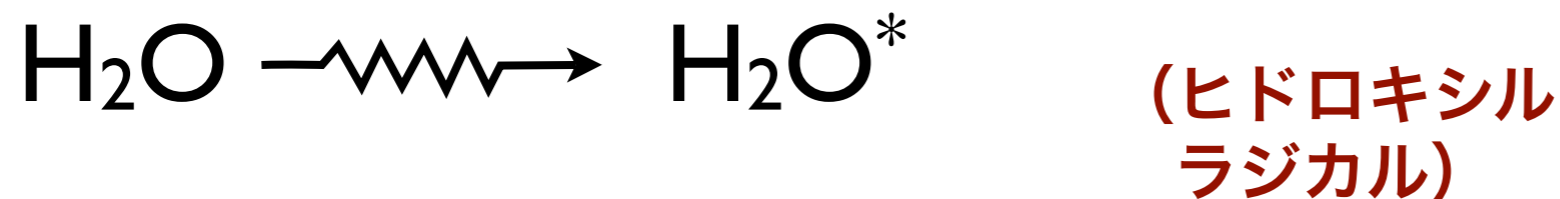


脱励起・蛍光放出



励起移動

# 水中での反応



$$G(\cdot\text{OH}) = 2.7$$

$$G(\text{e}^-_{\text{aq}}) = 2.65$$

$$G(\text{H}\cdot) = 0.55$$

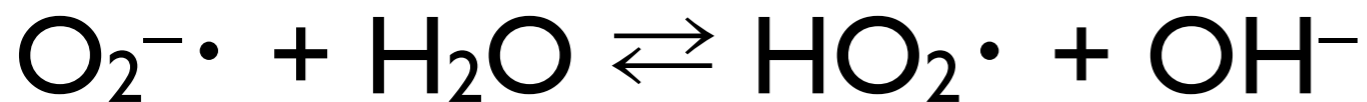
$$G(\text{H}_2) = 0.45$$

$$G(\text{H}_2\text{O}_2) = 0.7$$

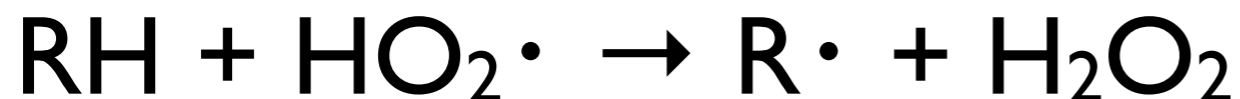
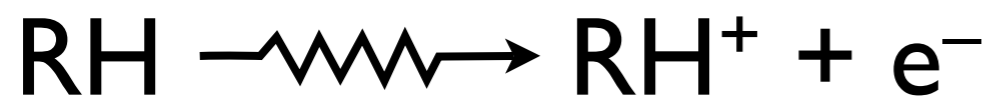
γ線照射による  
放射線化学収率  
(G値)

# 酸素効果

(活性酸素)



# 有機物の放射線化学反応



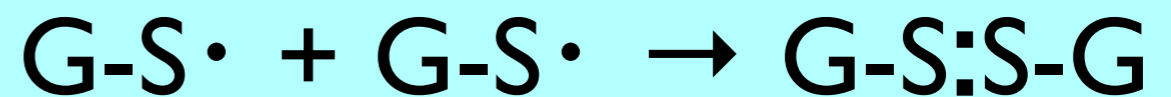
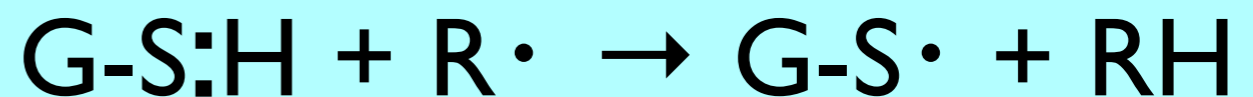
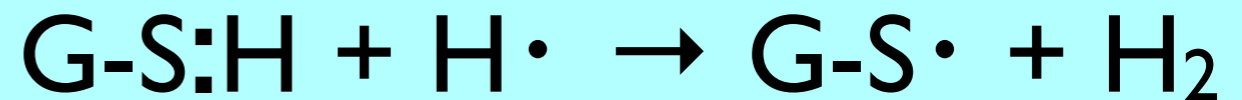
## 放射線防護剤

(ラジカルスカベンジャー)

SH基, S-S 結合

例: システイン、システアミン

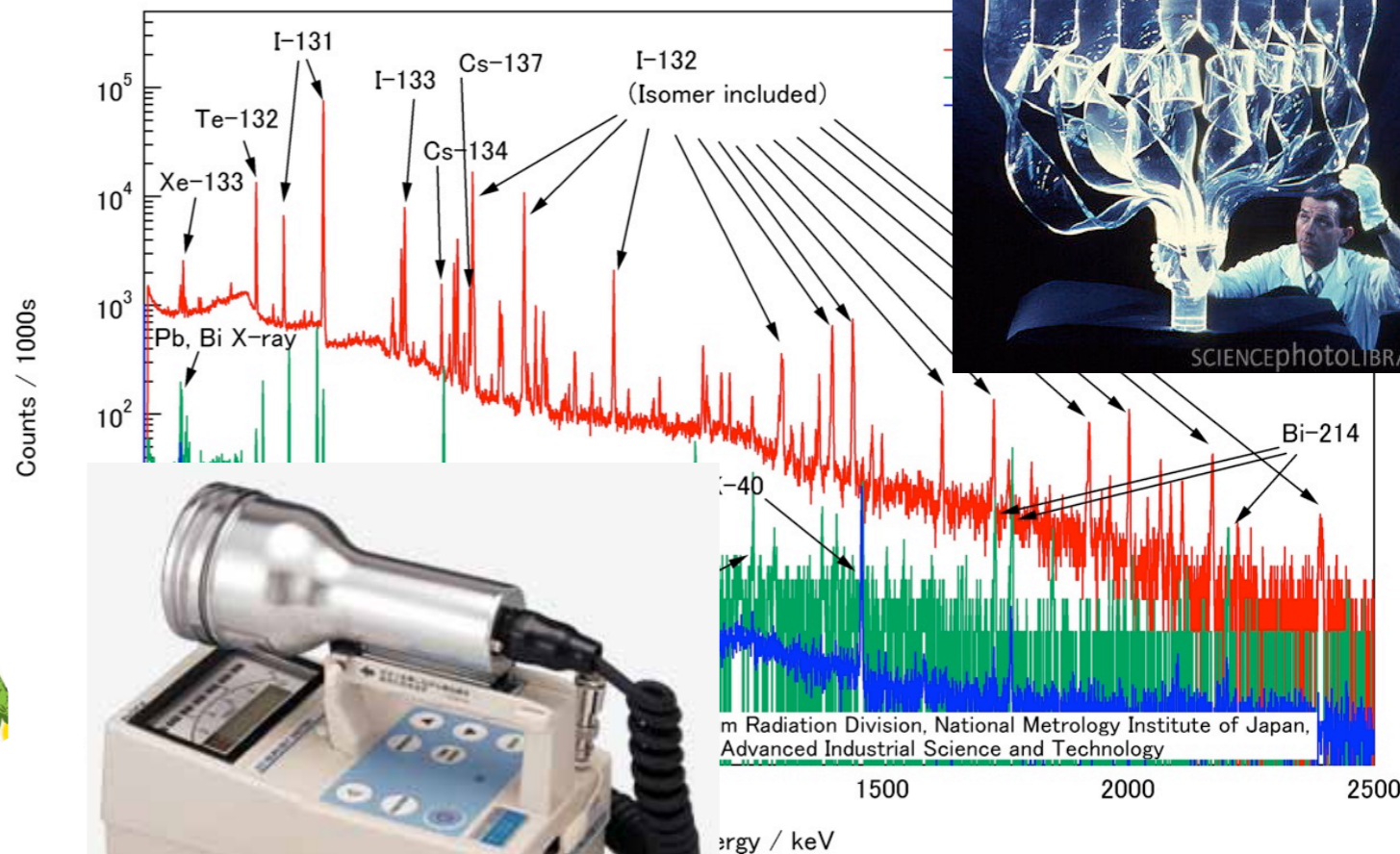
(グスタチオン)







# 放射線 と 放射能



第3話

## 放射線計測学・環境放射化学

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 放射線計測学

## 様々な放射線測定器

電離箱, 比例計数管, GM管

気体の電離を利用

ワイヤーチェンバー

シンチレータ + 光電子増倍管

蛍光作用

**NaI, CsI, プラスチックシンチレータ, ZnS**

半導体検出器 **Ge, Si(Li)**

計数 / エネルギー分析 (核種同定)

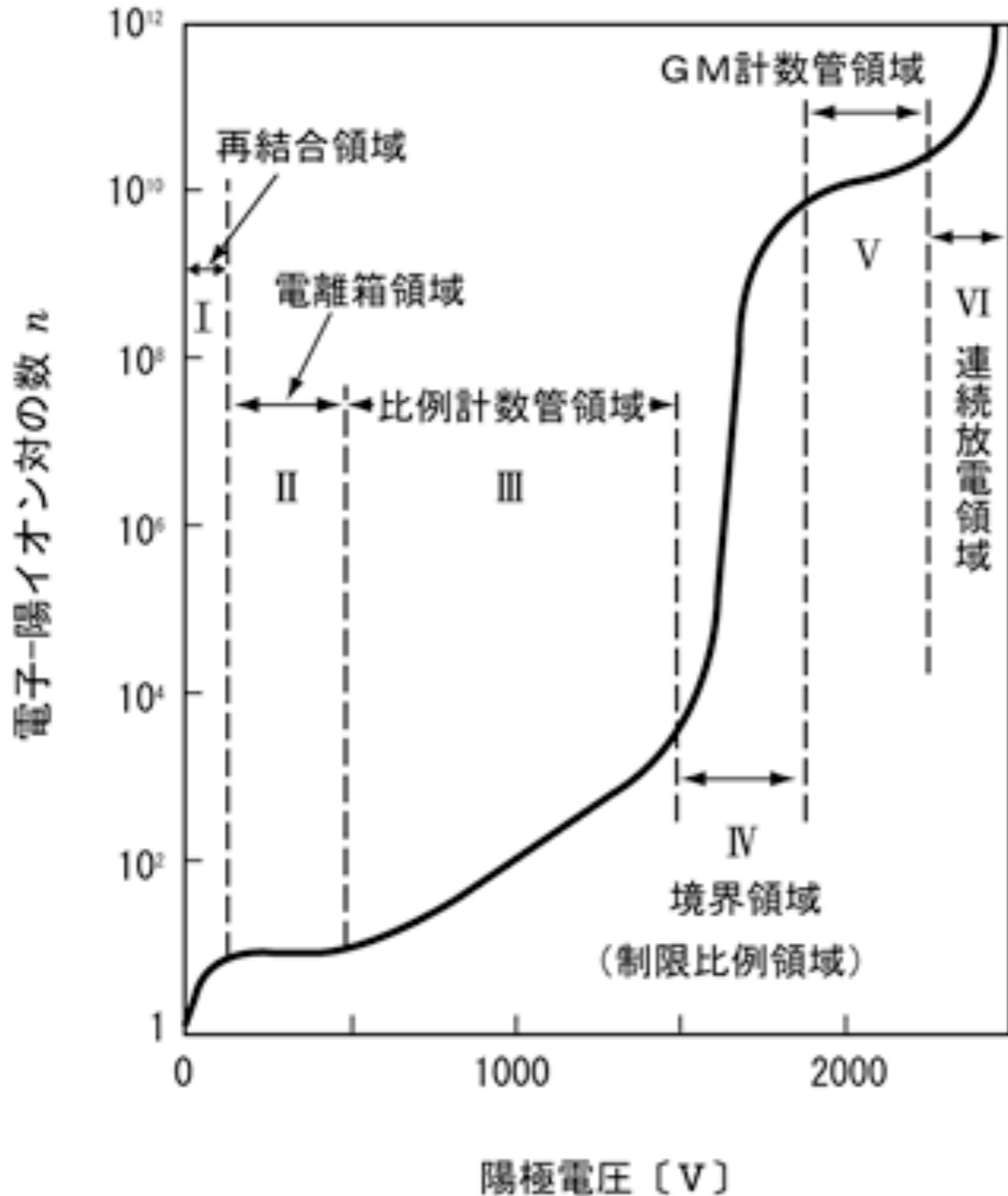
サーベイメータ (空間線量率・表面濃度)

/ 食品検査

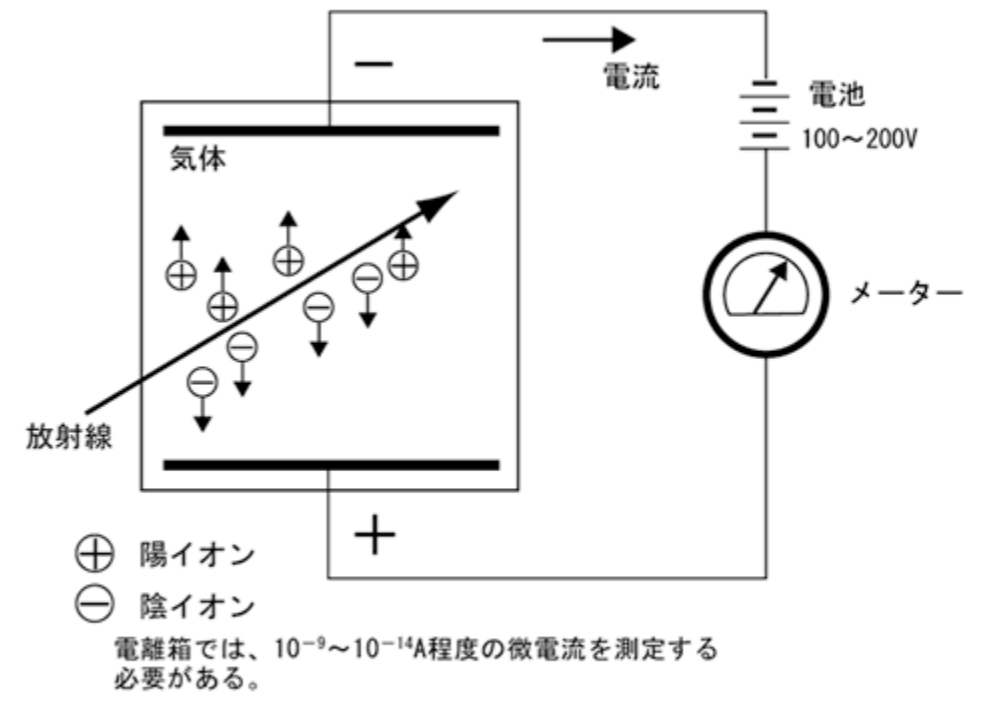
# 気体の電離を利用する放射線計測

## 電離箱, 比例計数管, GM管

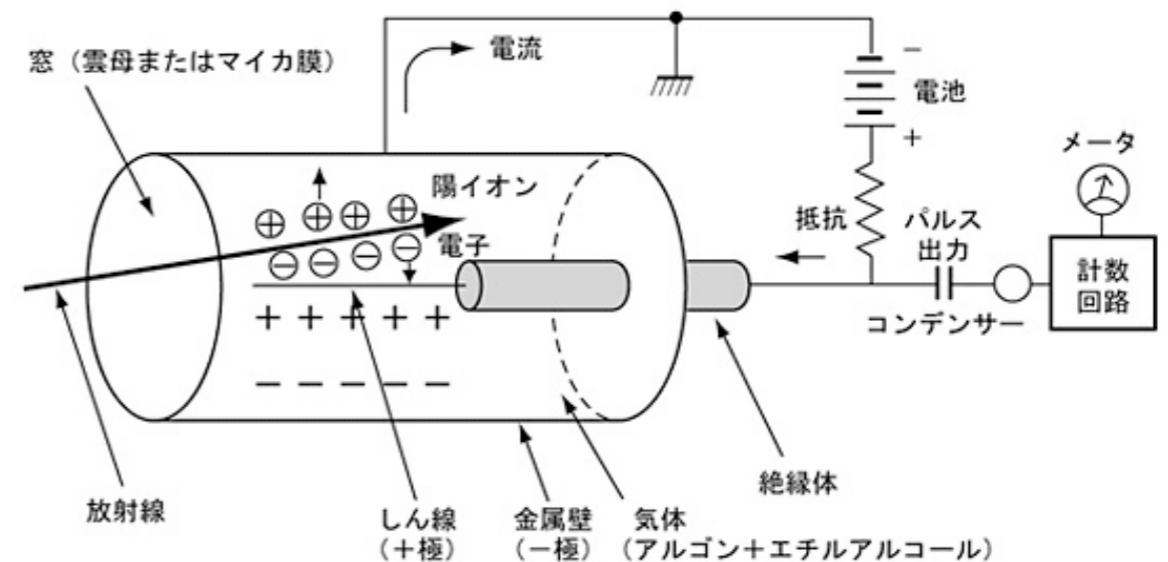
(ガイガー・ミュラー管)



### 電離箱

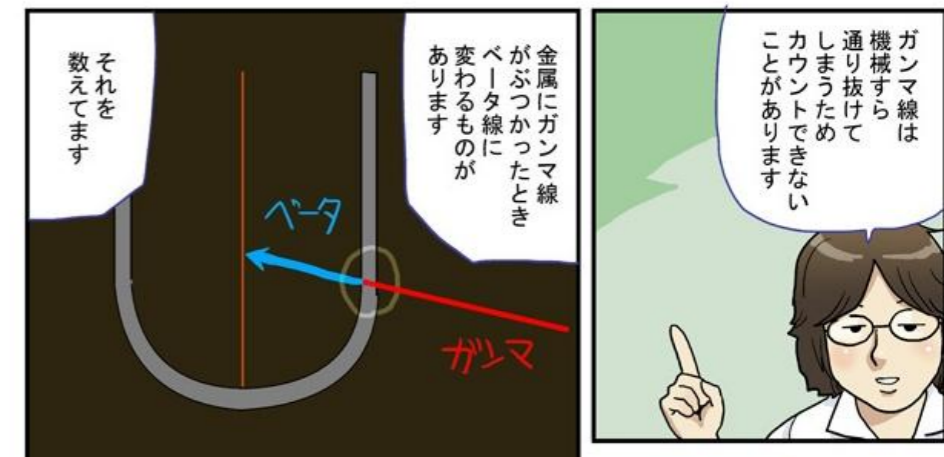
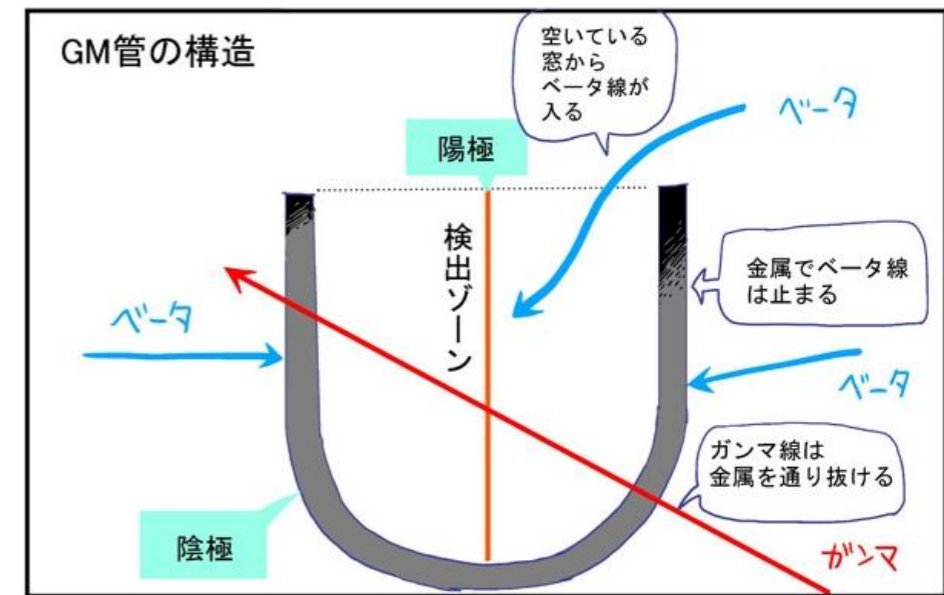


### GM管



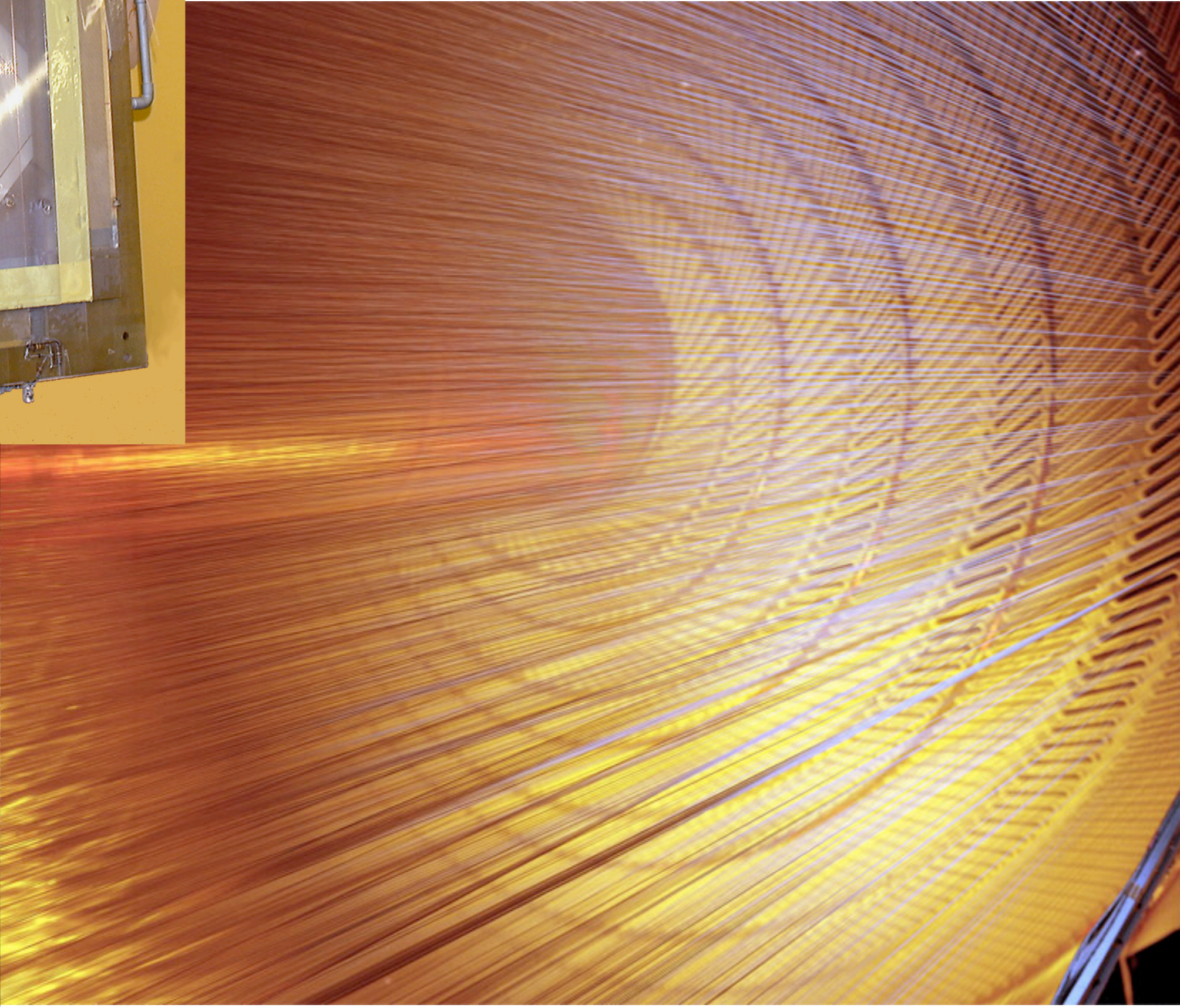
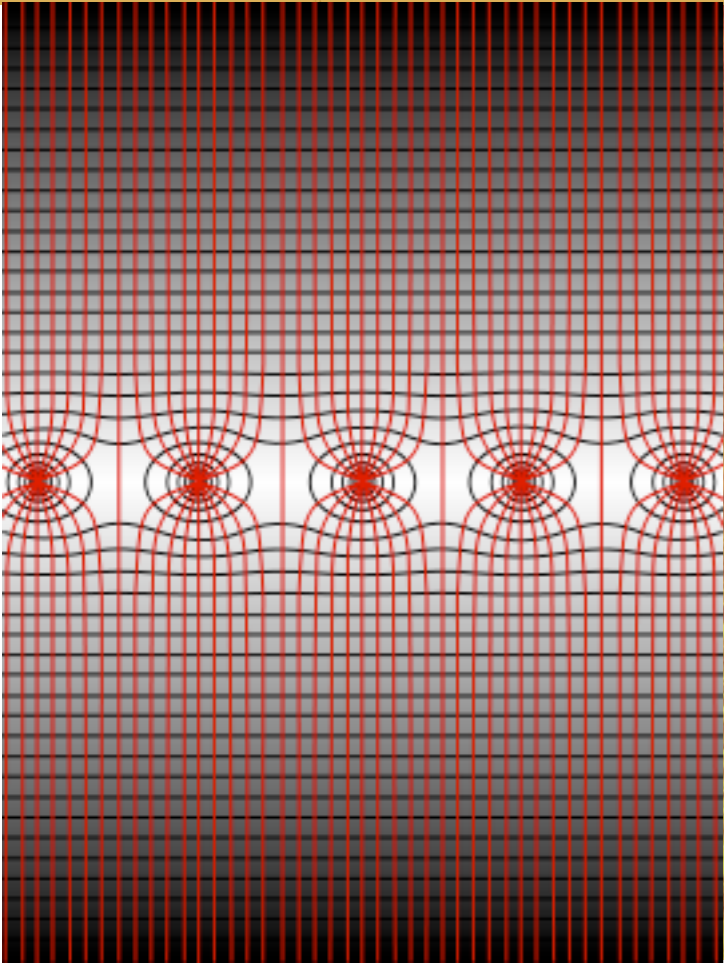
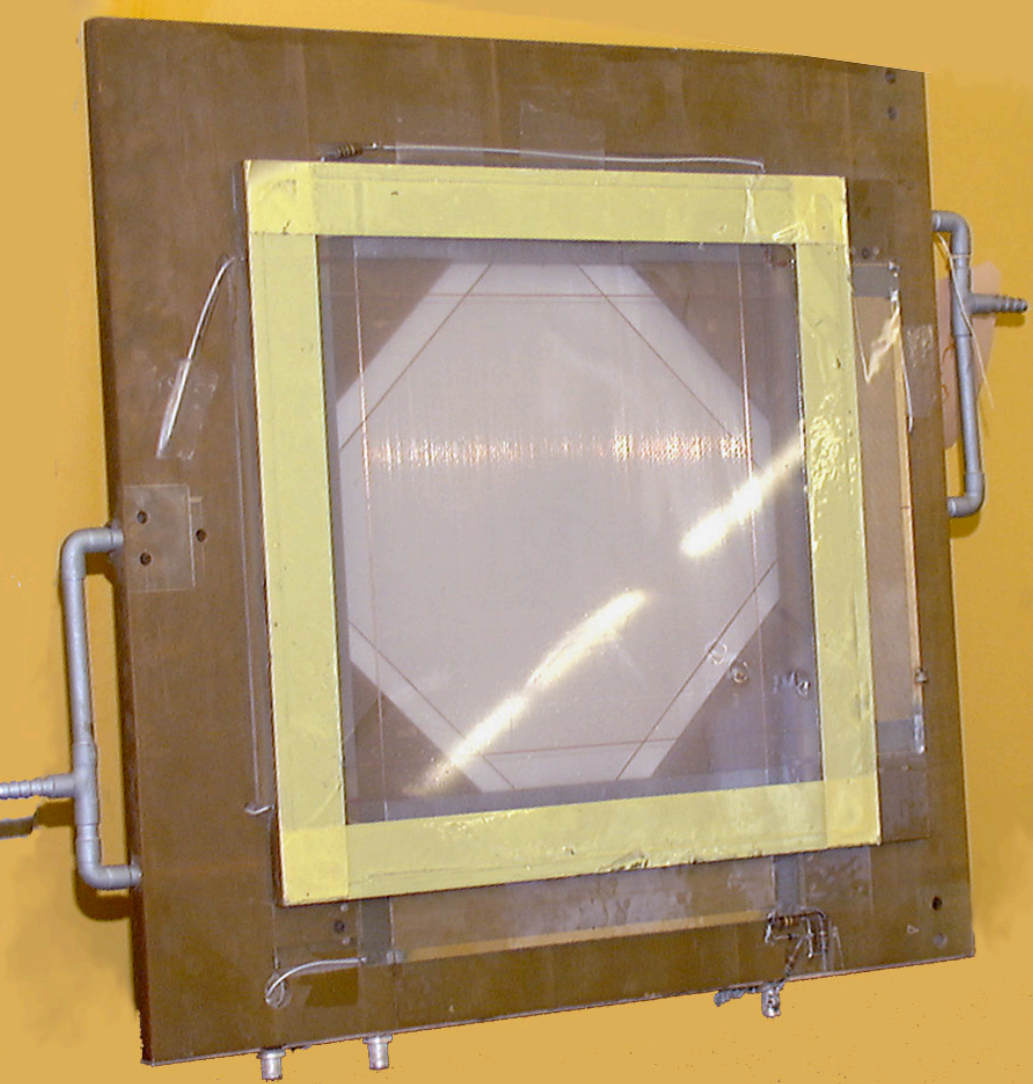
## GM管の検出効率

- $\beta$ 線は高効率で検出
  - $\gamma$ 線はガス中での反応確率は小さい
    - 窓膜や筒側面の金属で $\beta$ 線に変換
    - $\alpha$ 線は入り口の窓膜を通れない
      - 雲母 (mica) でも 10–20  $\mu\text{m}$  程度で止まる。
      - それより薄い膜なら透過できるが、空気中で2–3 cm の飛程しかないので、いずれ正確な測定は期待できない。
- ☞ 真空チェンバー中 (GM管の中) に $\alpha$ 線源を入れて測定する必要がある。



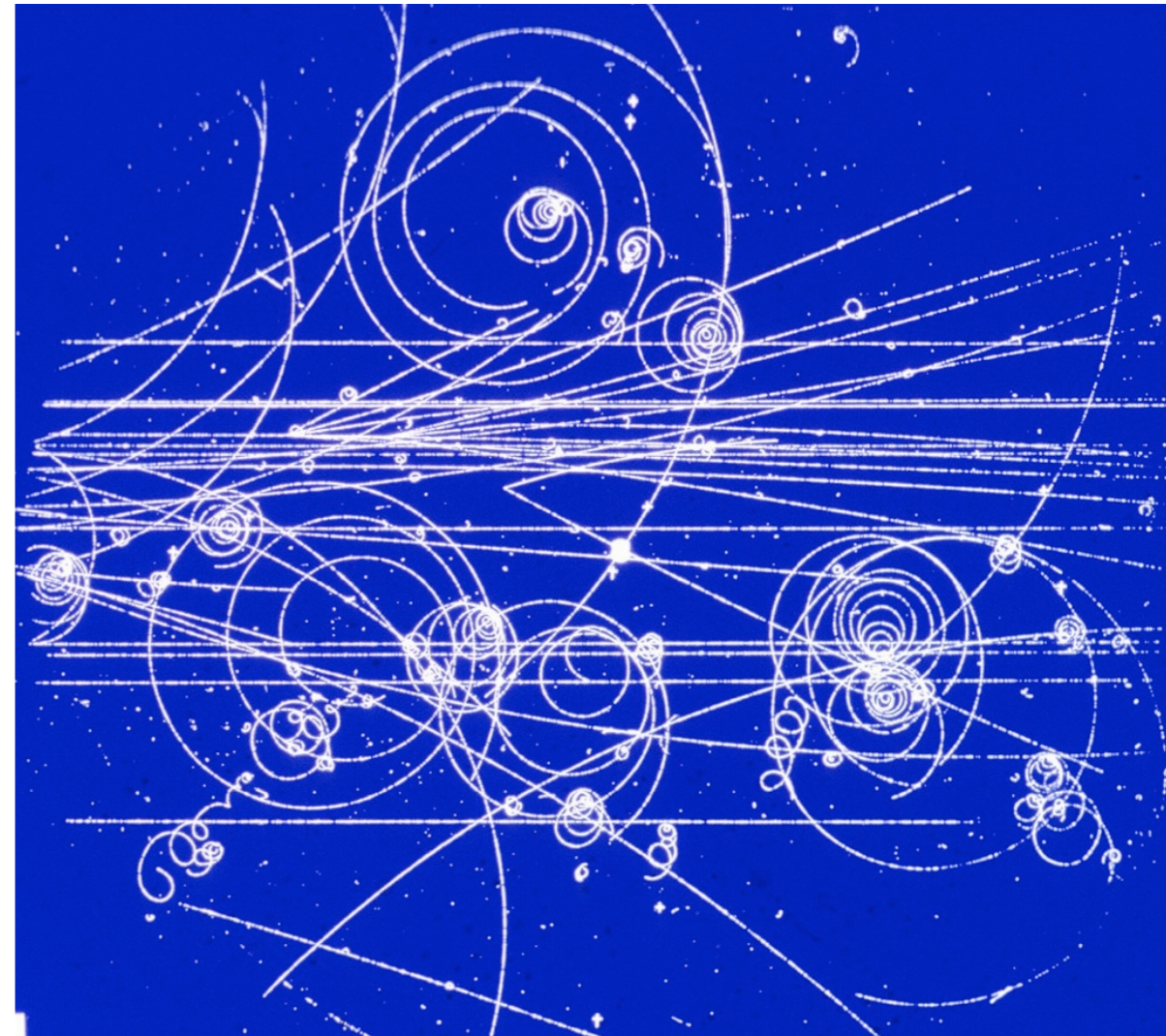
# ワイヤーチェンバー MWPC

Multi-wire proportional chamber

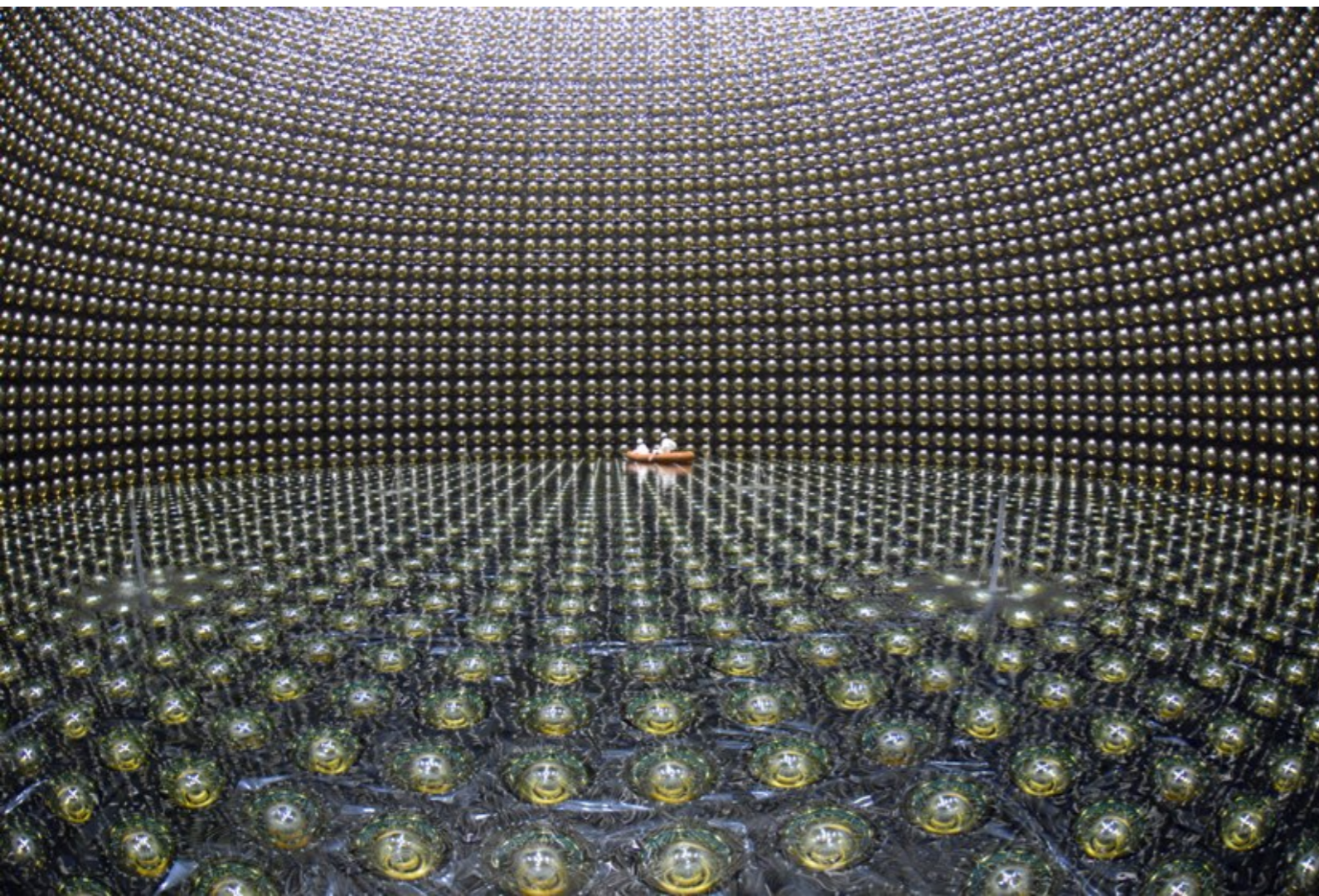
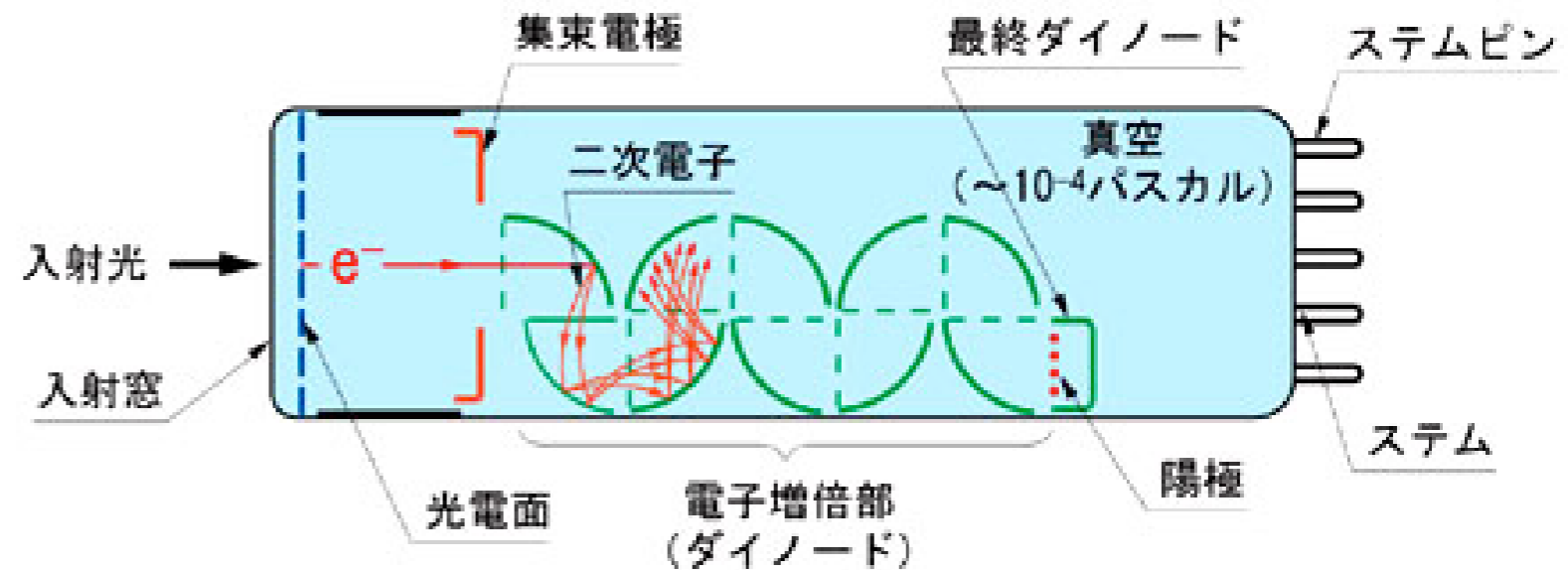


# 泡箱

Bubble chamber



# 光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



光 ⇒ 光電効果 ⇒ 電子増幅  
⇒ 電流

シンチレータとの組み合わせ  
Scintillator

放射線 ⇒ 分子の励起 ⇒ 蛍光  
光 ⇒ 光電子増倍管

# シンチレータ (Scintillators)

プラスチックシンチレータ  
およびライトガイド

無機 : NaI (Tl), CsI (Tl) (γ線、X線)

BGO, GSO など (γ線、X線)  
 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$   $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$

ZnS (Ag) (α線)

BaF<sub>2</sub>

有機 : プラスチックシンチレータ (電子線)  
(荷電粒子)

例 : PPO, POPOP / ポリスチレン

: 液体シンチレータ (β線)

例 : p-テルフェニル

/ トルエン、キシレン

電気パルス : タイミング : 粒子透過時刻  
: パルス高 : エネルギー



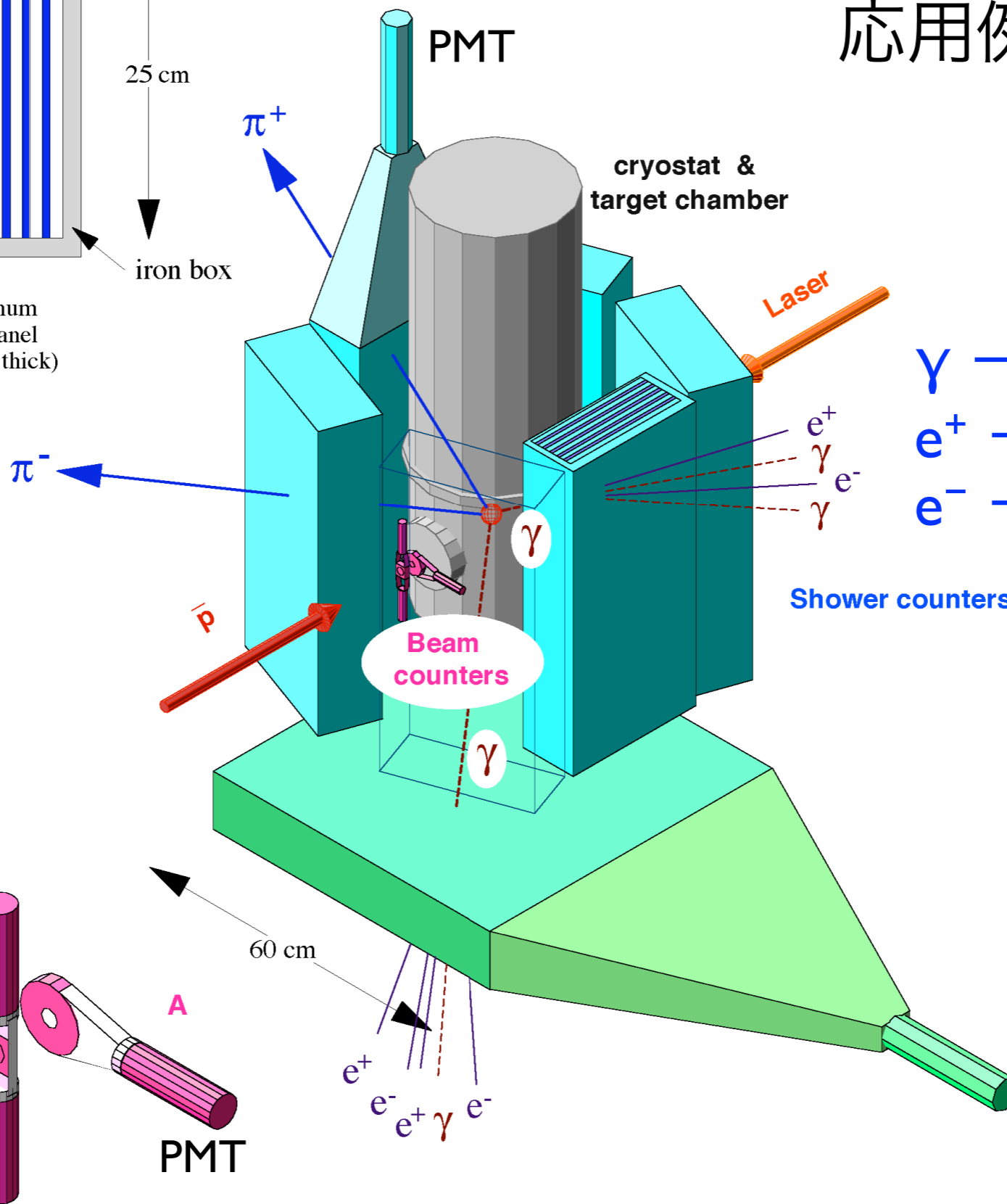
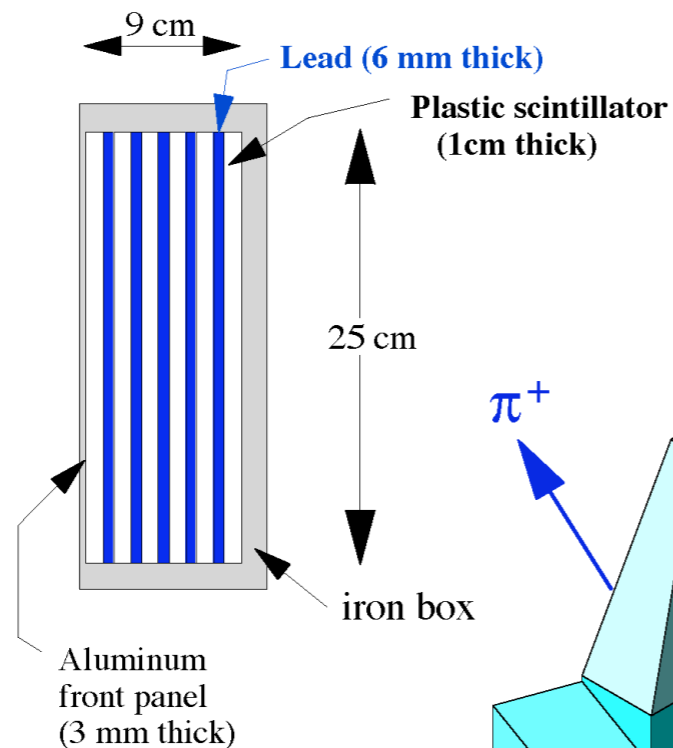
液体シンチレーションカウンタ



# シンチレーションカウンター

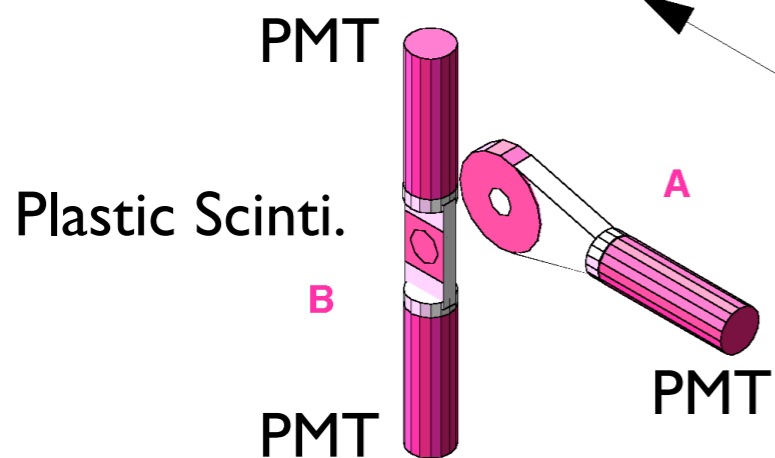
## 応用例

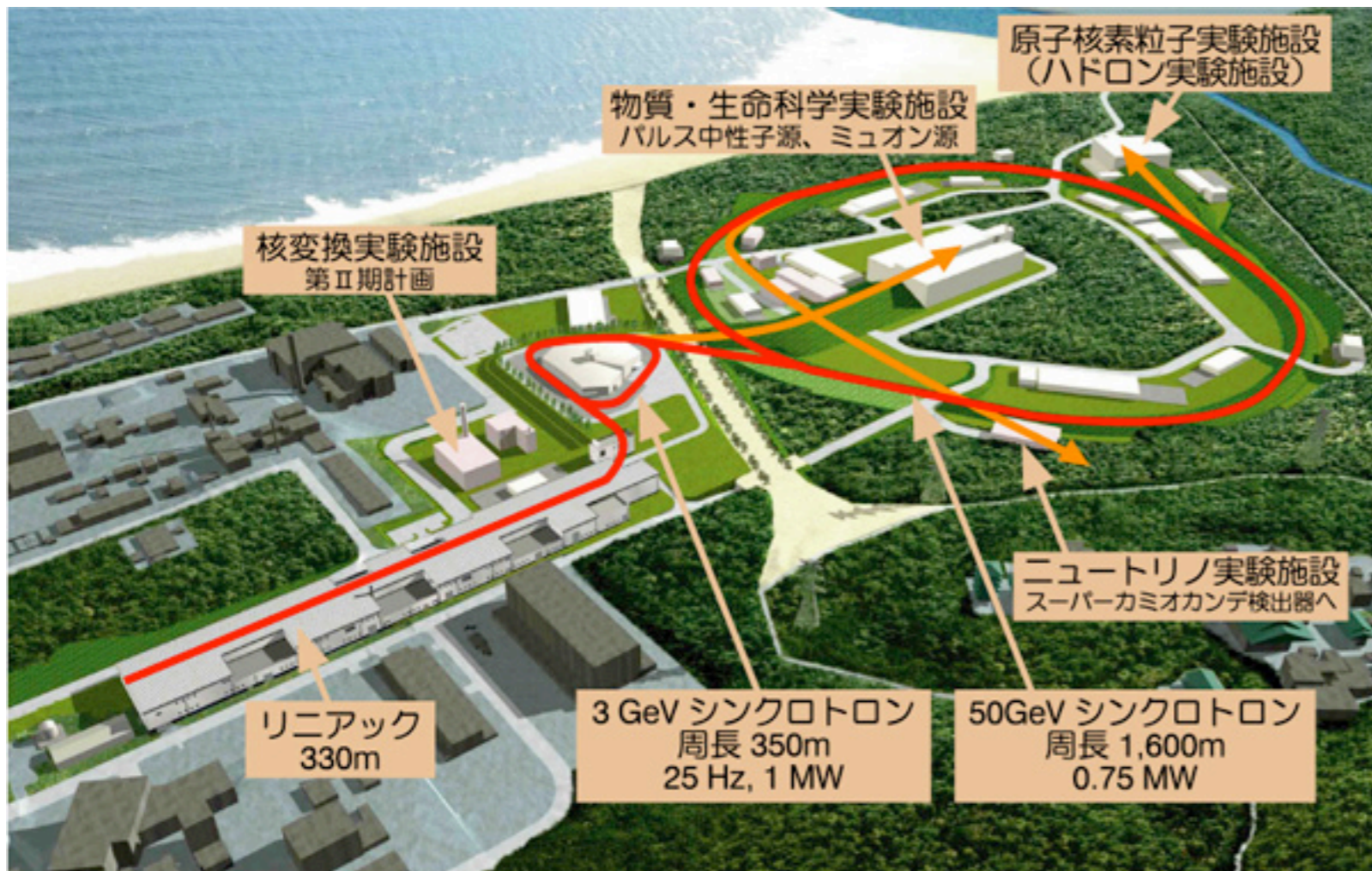
鉛：Z大  
電子対生成  
 $\gamma \rightarrow e^+ e^-$



$\gamma \rightarrow e^+ e^-$  (電子対生成)  
 $e^+ \rightarrow e^+ \gamma$  (制動放射)  
 $e^- \rightarrow e^- \gamma$  (制動放射)

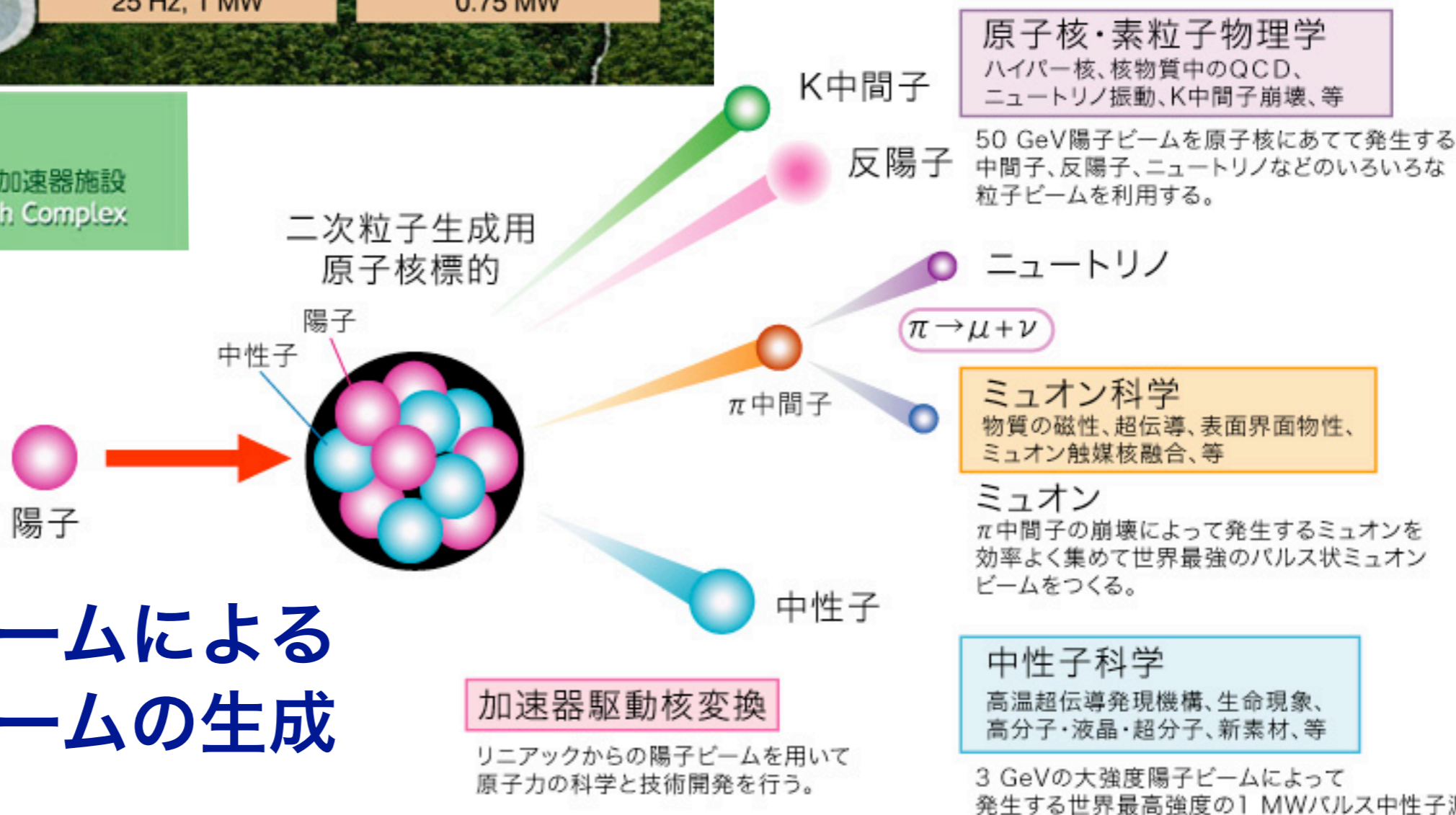
電磁シャワー





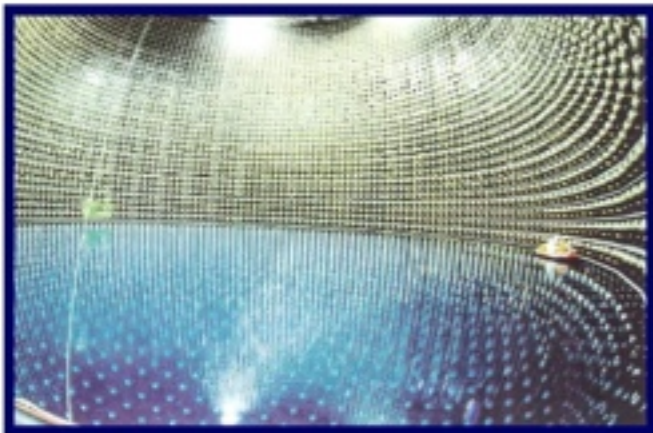
独立行政法人 日本原子力研究開発機構  
Japan Atomic Energy Agency

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



# 大強度陽子ビームによる 多様な粒子ビームの生成

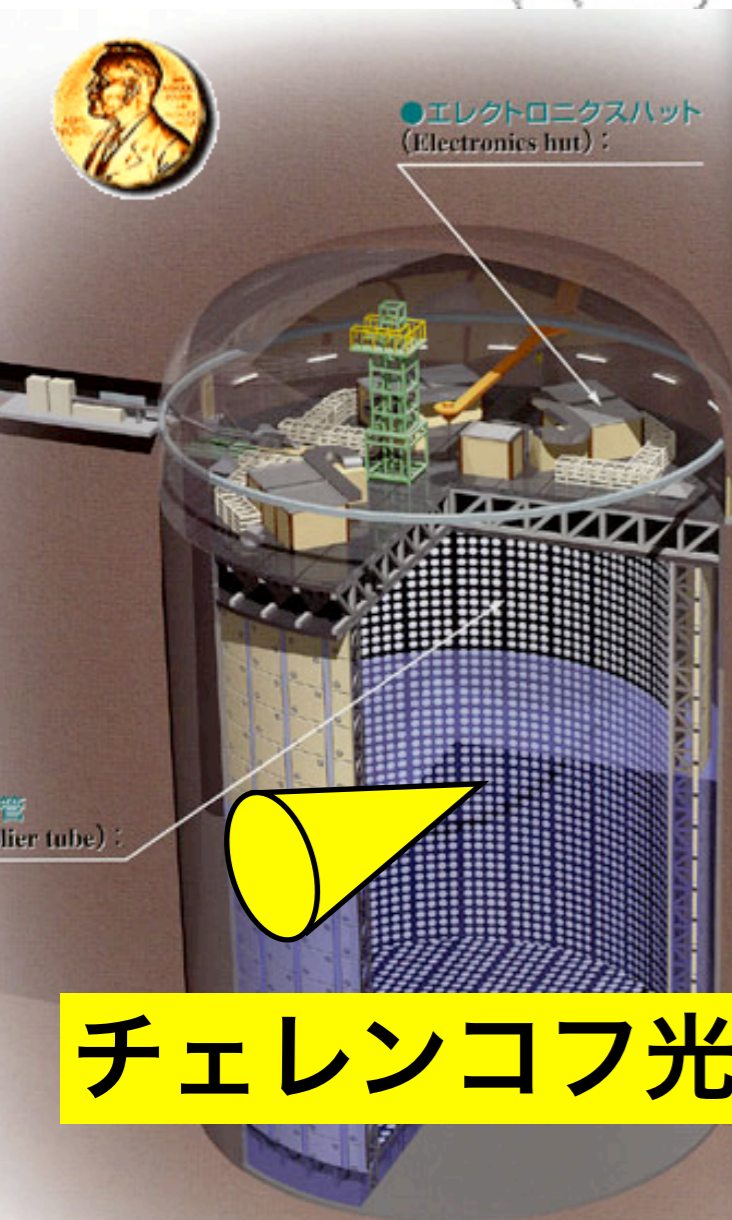
# Super-Kamiokande



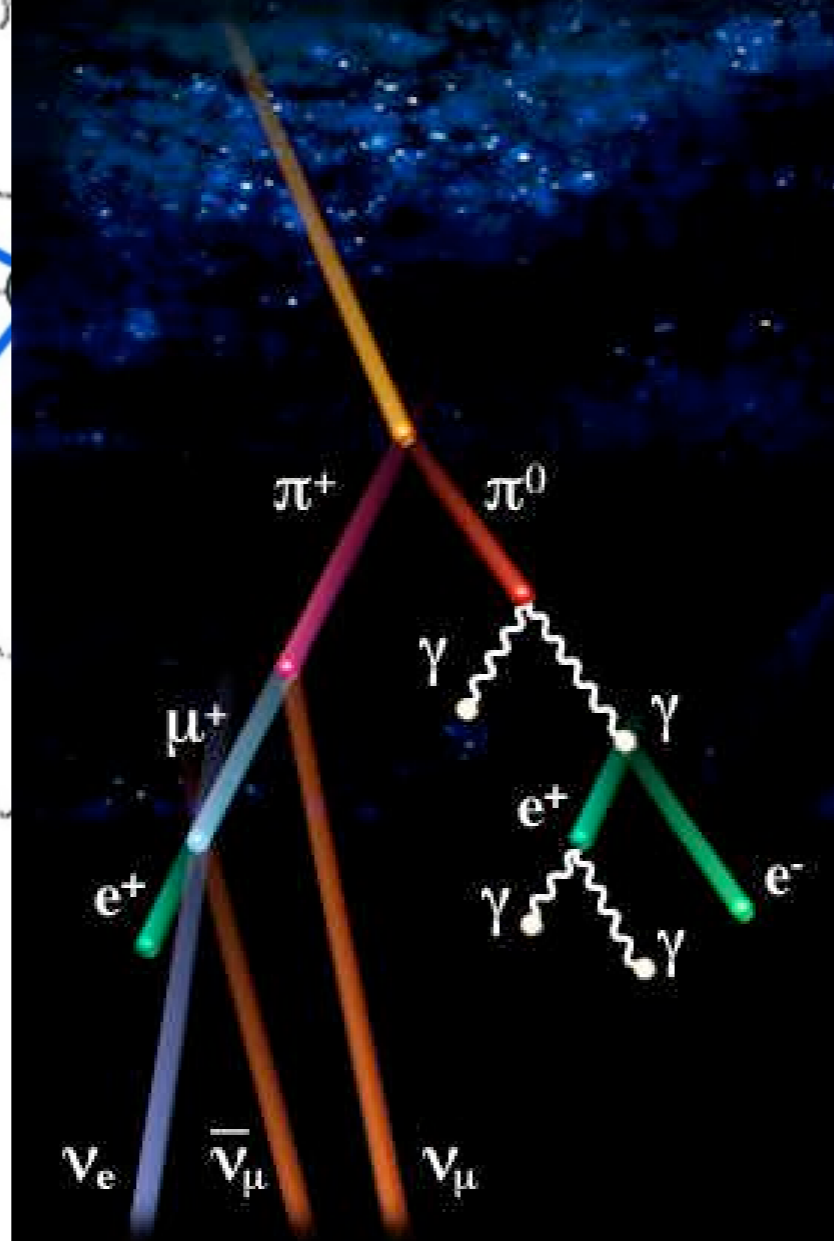
スーパー  
カミオカンデ



●エレクトロニクスハット  
(Electronics hut):



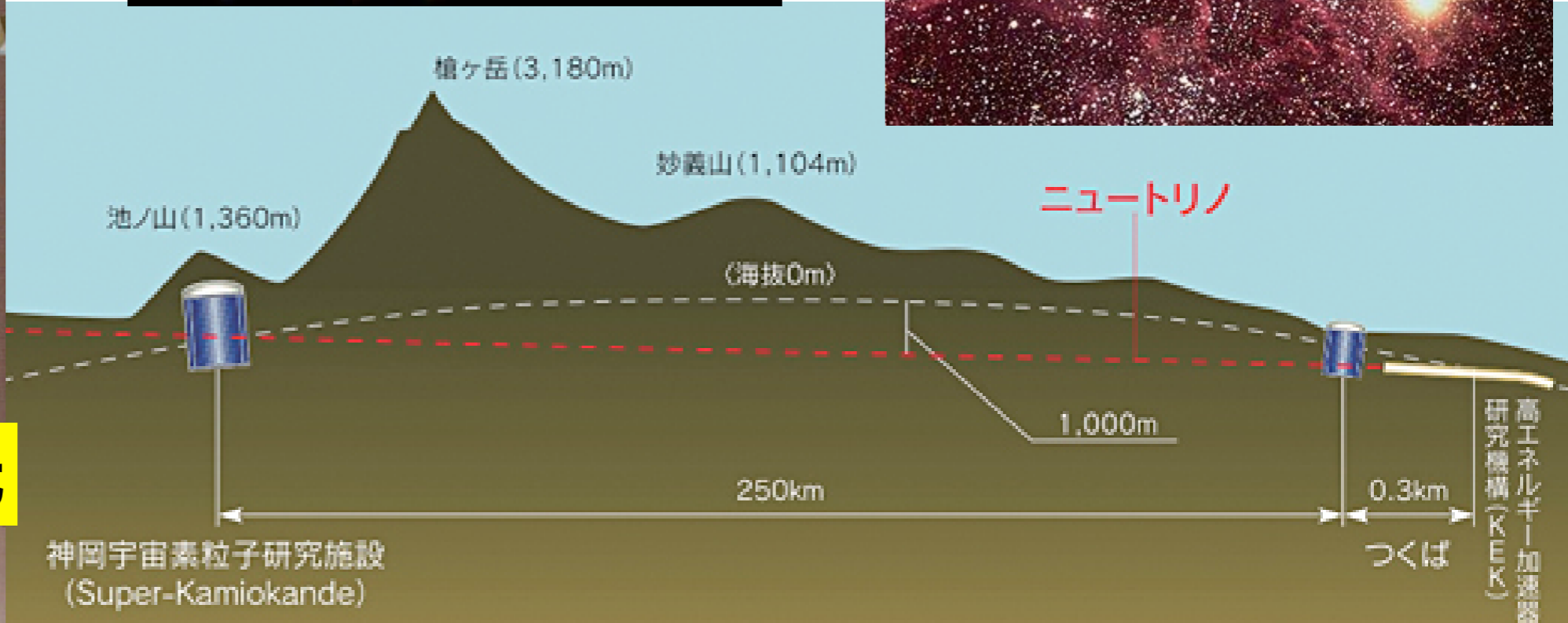
チェレンコフ光



# Neutrino beam

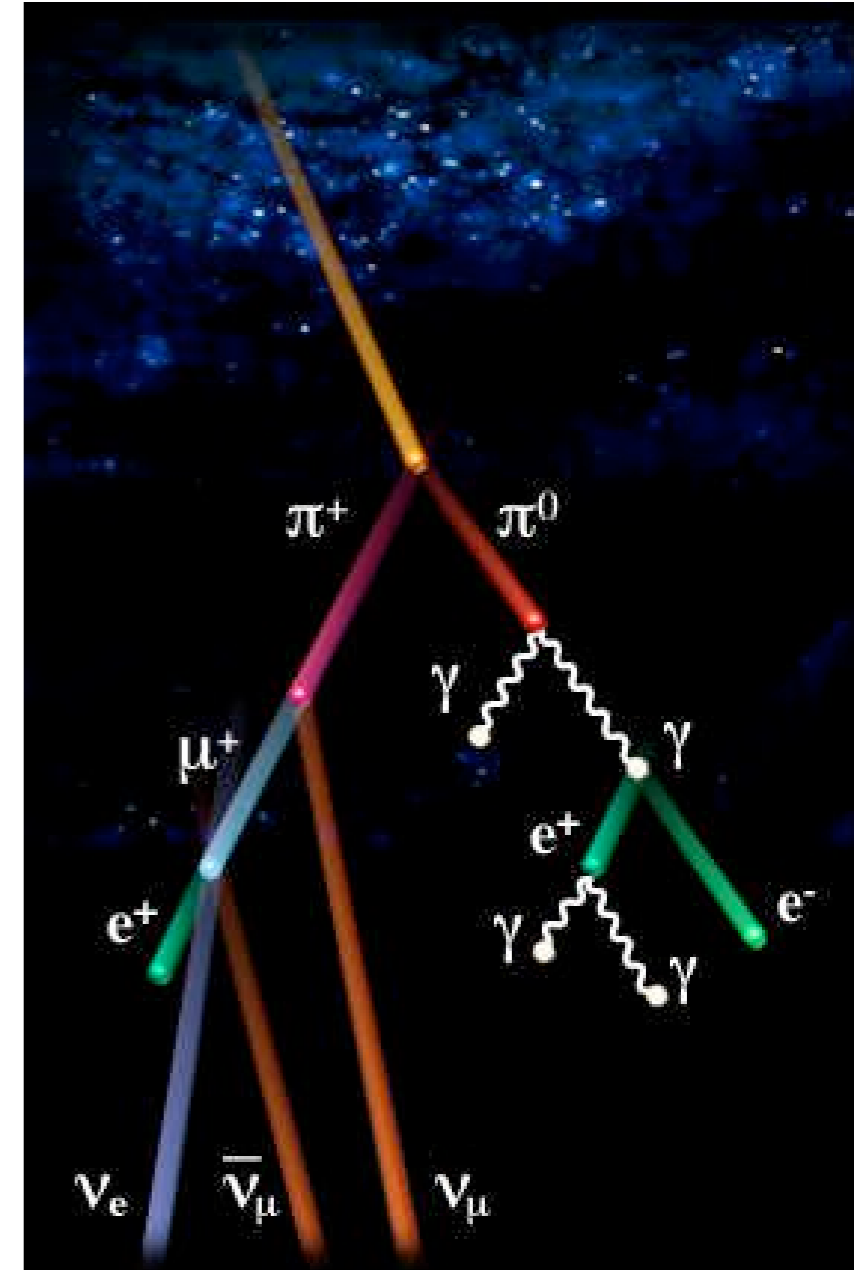
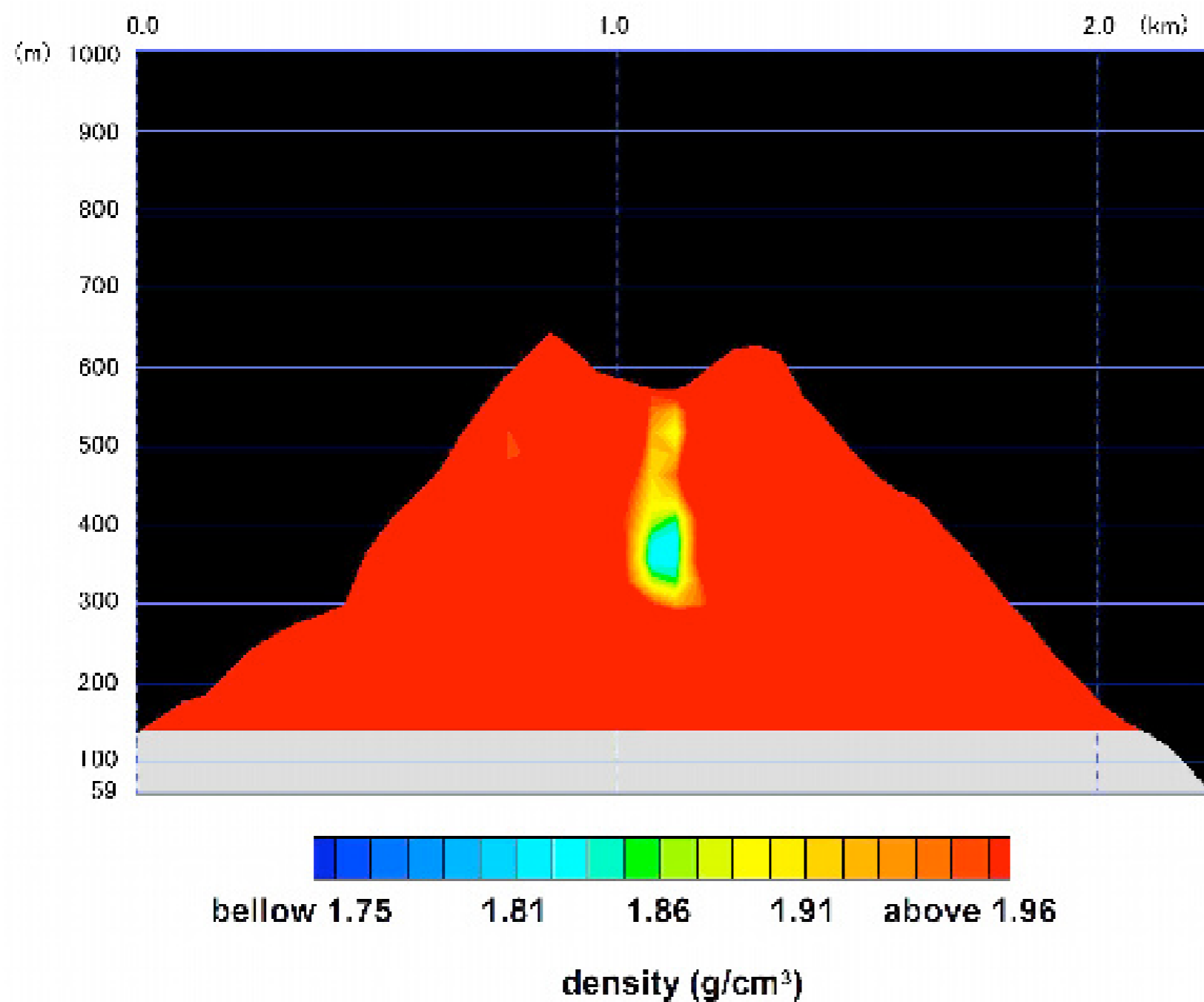


大強度陽子加速器  
ニュートリノビーム



神岡宇宙素粒子研究施設  
(Super-Kamiokande)

# 宇宙線（ミュオン）で火山を覗く

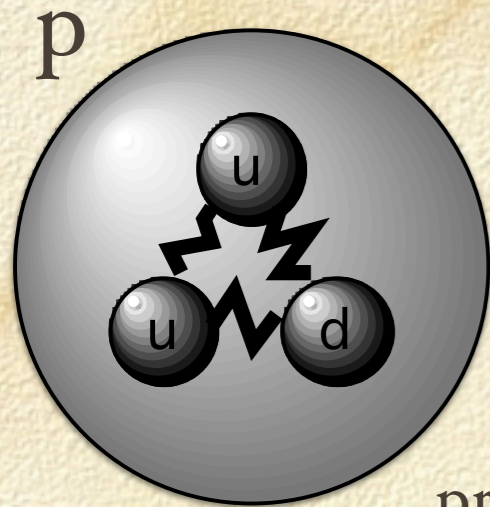


# Hadron

# Lepton

## Baryon

## Meson



陽子  
proton

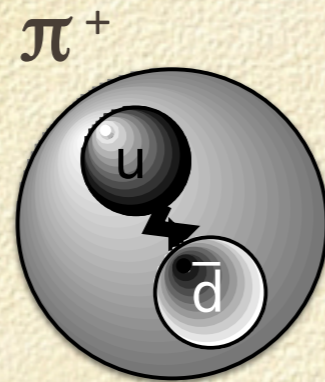


反陽子  
antiproton



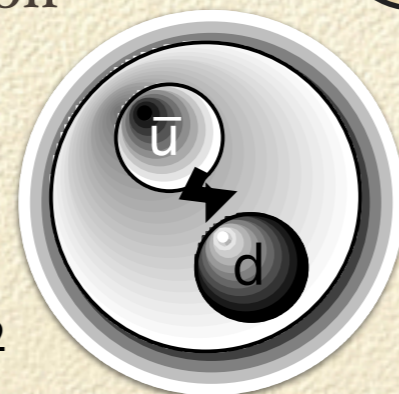
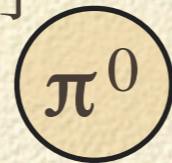
938 MeV/c<sup>2</sup>

$\tau = \infty$



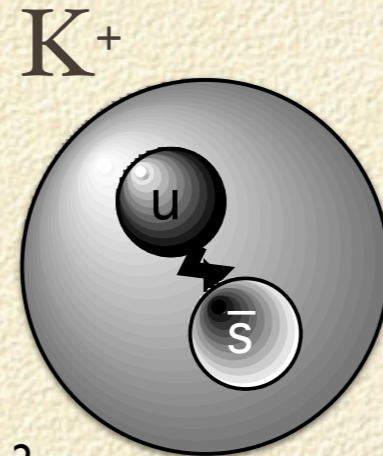
パイ中間子  
pion

135 MeV/c<sup>2</sup>



140 MeV/c<sup>2</sup>

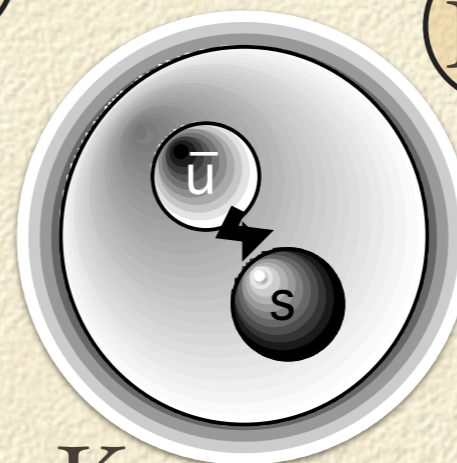
$\tau = 26 \text{ ns}$



K 中間子  
kaon

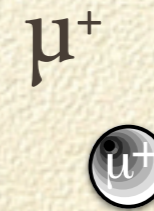


498 MeV/c<sup>2</sup>



494 MeV/c<sup>2</sup>

$\tau = 12 \text{ ns}$



ミュー粒子  
muon



106 MeV/c<sup>2</sup>

$\tau = 2.2 \mu\text{s}$



陽電子 positron



電子 electron

511 keV/c<sup>2</sup>

$\tau = \infty$

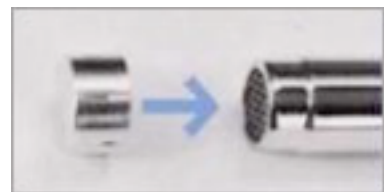
# 放射線の測定

計数 (cps = counts per second)

サーベイメータ 【空間線量率測定】



$\beta (\gamma)$  【表面汚染検査】



$\gamma$



# 放射線の測定

## 半導体検出器

(Semiconductor detectors)

例：Si(Li) 検出器 (X線)

Ge 検出器 (高エネルギー分解能)  
( $\gamma$ 線・X線)

放射線  $\Rightarrow$  電離

$\Rightarrow$  電子正孔対  $\Rightarrow$  電荷測定

電気パルス：パルス高：エネルギー

**エネルギー分析 (核種同定)**

## 試料測定

$\gamma$  ゲルマニウム検出器 (Ge detector)

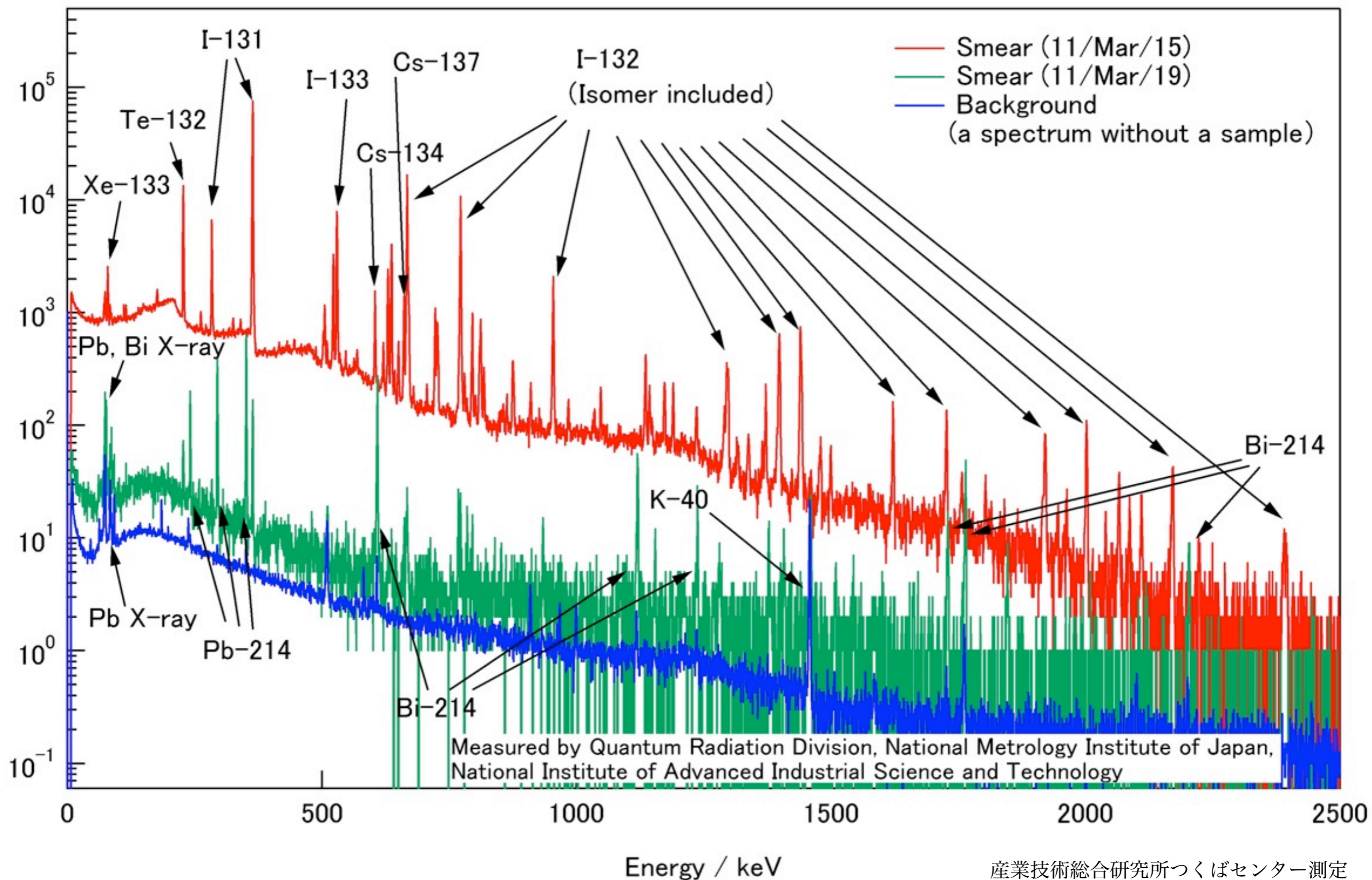


食品検査用ゲルマニウム検出器



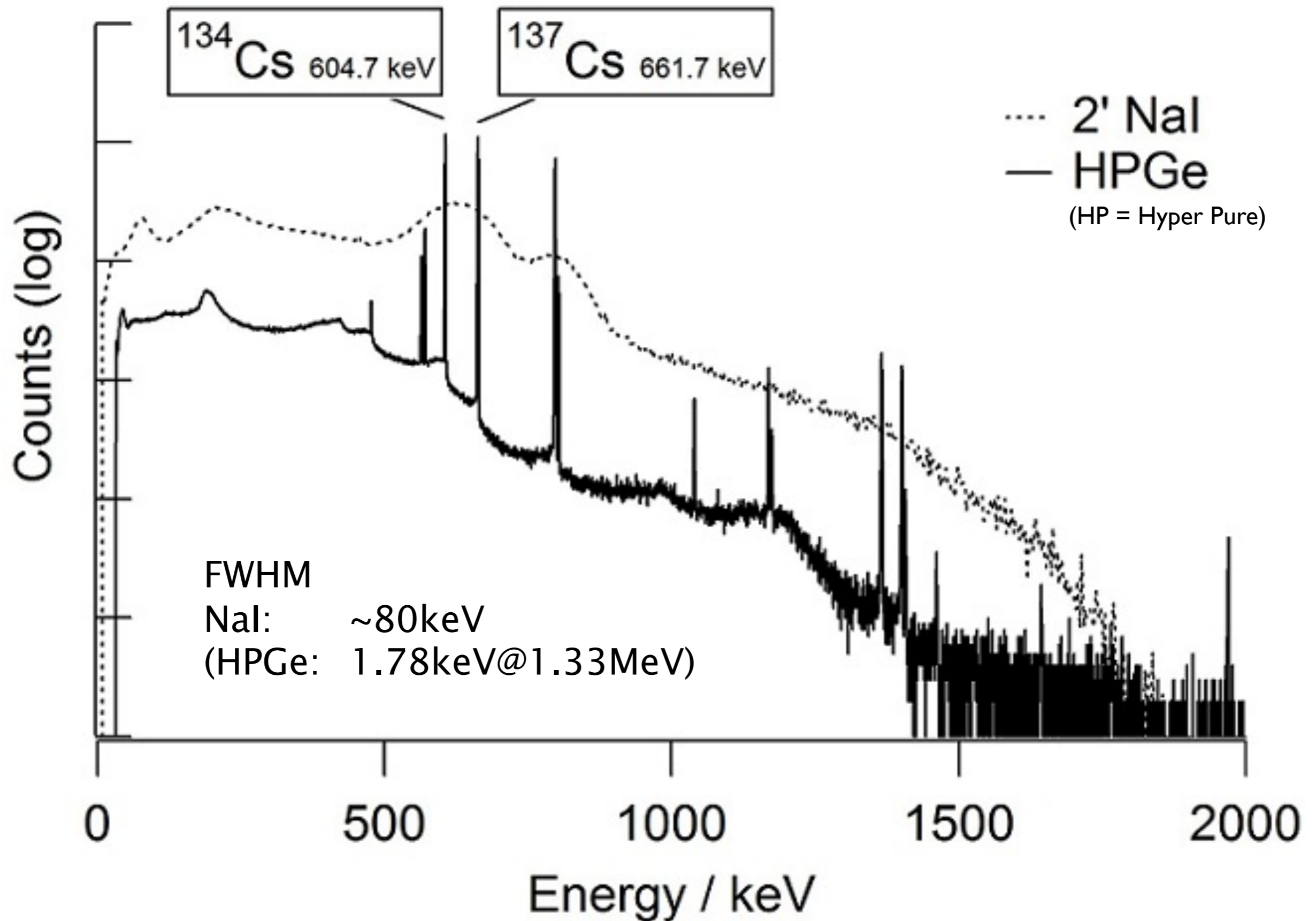
# エネルギー分析 (核種同定)

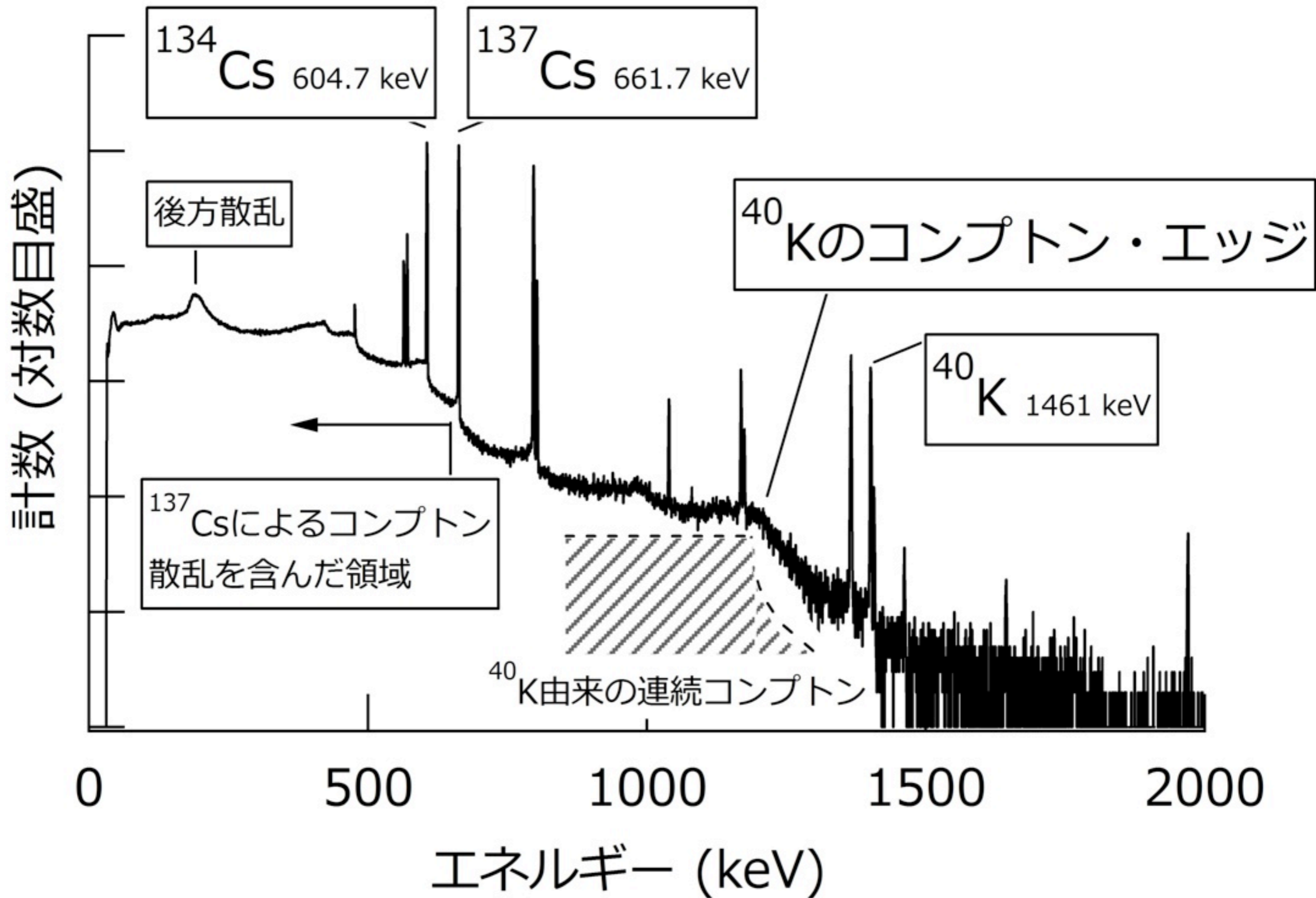
## ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)





# γ線スペクトルの比較(NaIカウンターvsGe半導体検出器)





# 食品中の放射性物質の基準値

## ■放射性セシウムの基準

2012/1/20 朝日新聞

暫定基準		新基準案	
野菜類	500 Bq	一般食品 (野菜類、穀類、 肉・卵・魚・ その他)	100 Bq
穀類	500 Bq		
肉・卵・魚・その他	500 Bq		
飲料水	200 Bq	飲料水	10 Bq
牛乳・乳製品	200 Bq	牛乳	50 Bq
		乳児用食品	50 Bq

(1kgあたり)

100 ベクレルの放射性セシウムは何グラムか。

(そもそも、福島第一原発から環境中に放出された放射性物質は全部でどのくらいの量か。)

放射線はどうやって測るのか。検出限界以下 (N.D.) とは？

(検出限界値を限りなく下げるより、スクリーニングで多量汚染のものを確実に避けることが重要)

The Asahi Shimbun

一般食品の新基準値の出し方  
mSvはミリシーベルト。Bqはベクレル

食品からの被曝線量の限度

1mSv/年

飲料水分

0.1mSv/年

一般食品に割り当てる分

0.9mSv/年

食品に含まれるセシウムが1kgあたり何Bqまでなら0.9mSvを超えないか？

食べる量、種類などをもとに年代別に計算

年齢区分	性別	限度値 (Bq/kg)
1歳未満	男女平均	460
1~6歳	男	310
	女	320
7~12歳	男	190
	女	210
13~18歳	男	<b>120</b>
	女	150
19歳以上	男	130
	女	160
妊婦		160

最も厳しい

さらに切り下げ

新基準値

100 Bq/kg

# 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)

$^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  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**

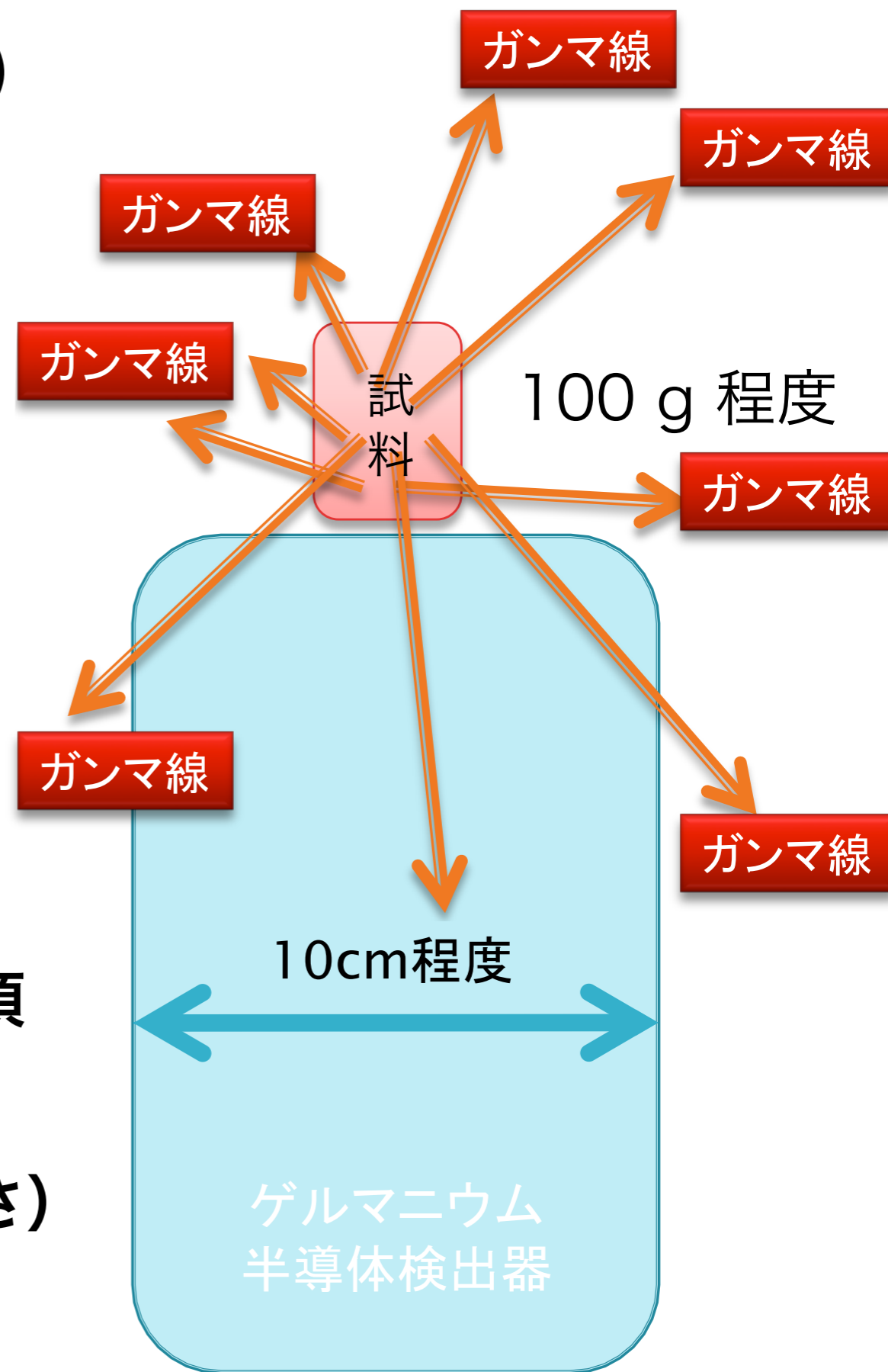
(環境放射線の遮蔽)

**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	$^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}$ (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)

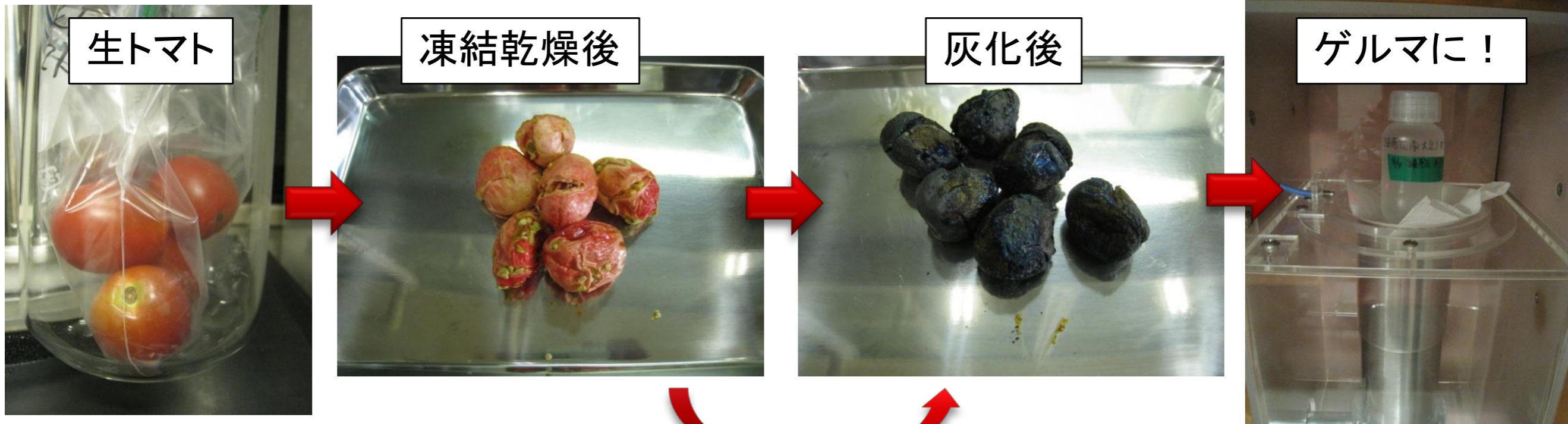
# 食品に含まれる放射性物質の測り方

- ▶ 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

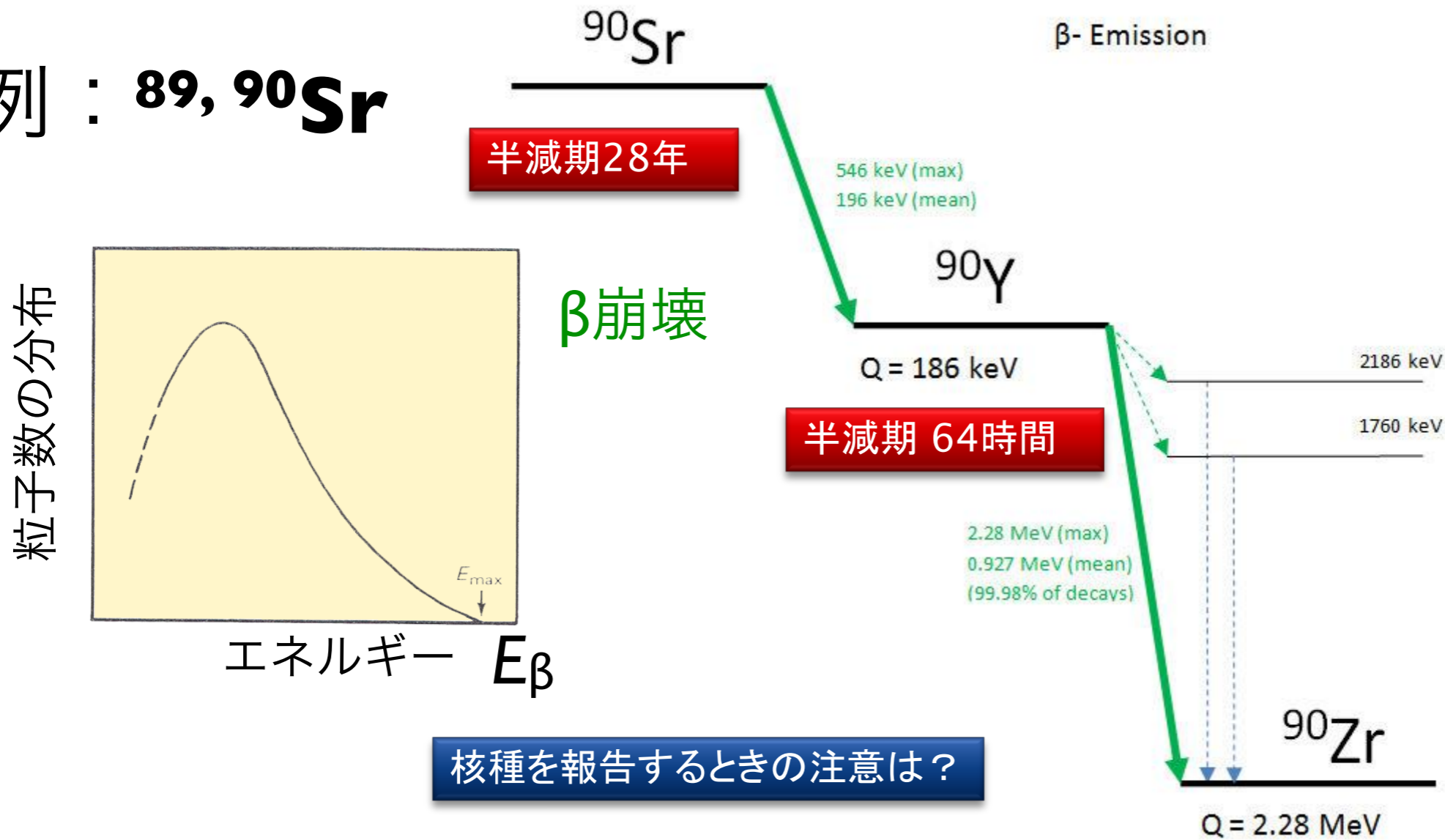
## 現在の放射性物質の基準値

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

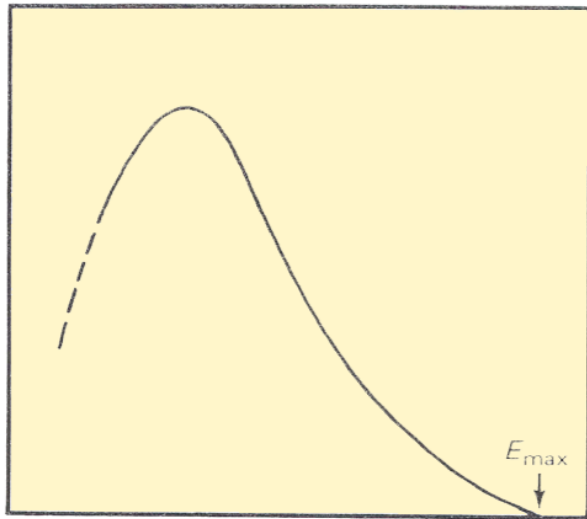
# β崩壊核種の同定 (γ線を出さないもの)

化学分離が必須

例： **$^{89}, ^{90}\text{Sr}$**

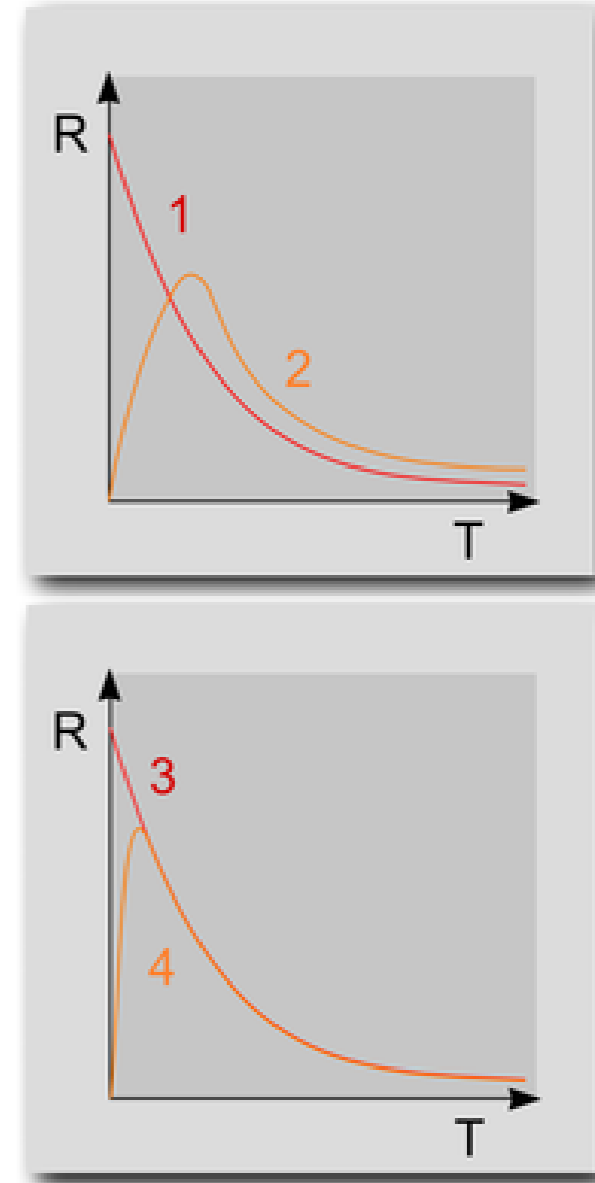


粒子数の分布



エネルギー  $E_\beta$

核種を報告するときの注意は？



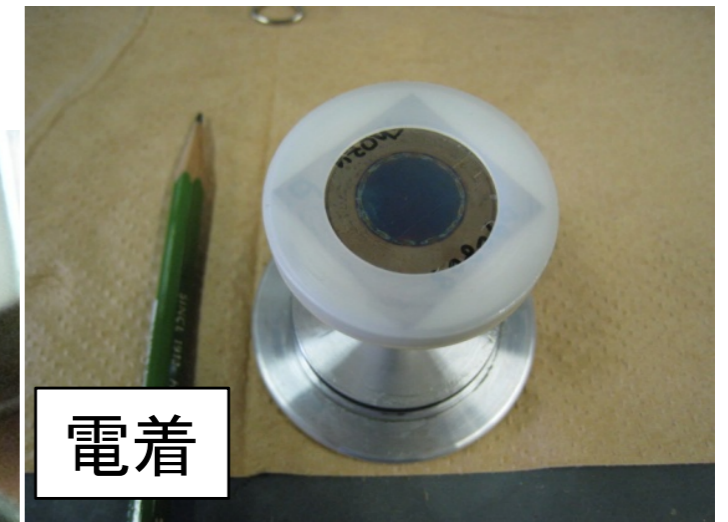
α崩壊核種の同定 ➡ アルファスペクトロメトリ

例： **$^{238}, ^{239}, ^{241}\text{Pu}$**

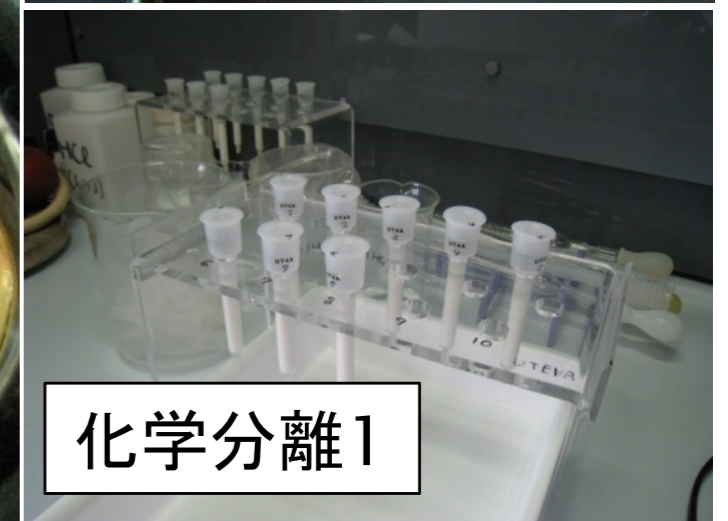
# アルファ線の測定装置

U, Th, Pu, Am, Cm...はこれ！

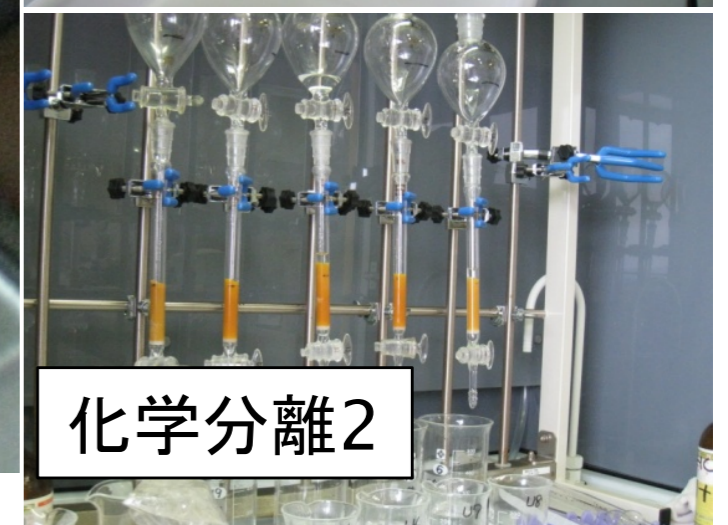
## ▶ アルファスペクトロメトリ



電着



化学分離1



化学分離2

分析はものすごく大変。

ターゲット元素を化学分離 → 精製 → 電着(線源を作る) →  $\alpha$ 線計測



# 線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリック線量計 Fricke dosimeter



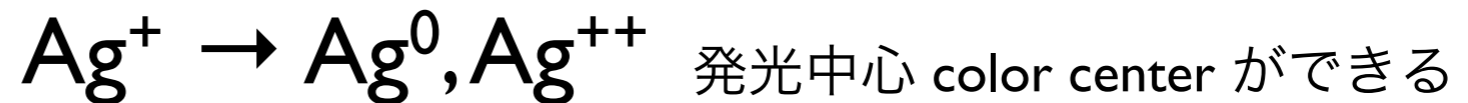
熱ルミネッセンス線量計 TLD: thermoluminescence dosimeter

蛍石などの固体結晶 + 放射線 → (加熱) → 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 → (紫外線) → 蛍光



ガラス線量計: コバルトガラス → 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



# 環境放射化学

## 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

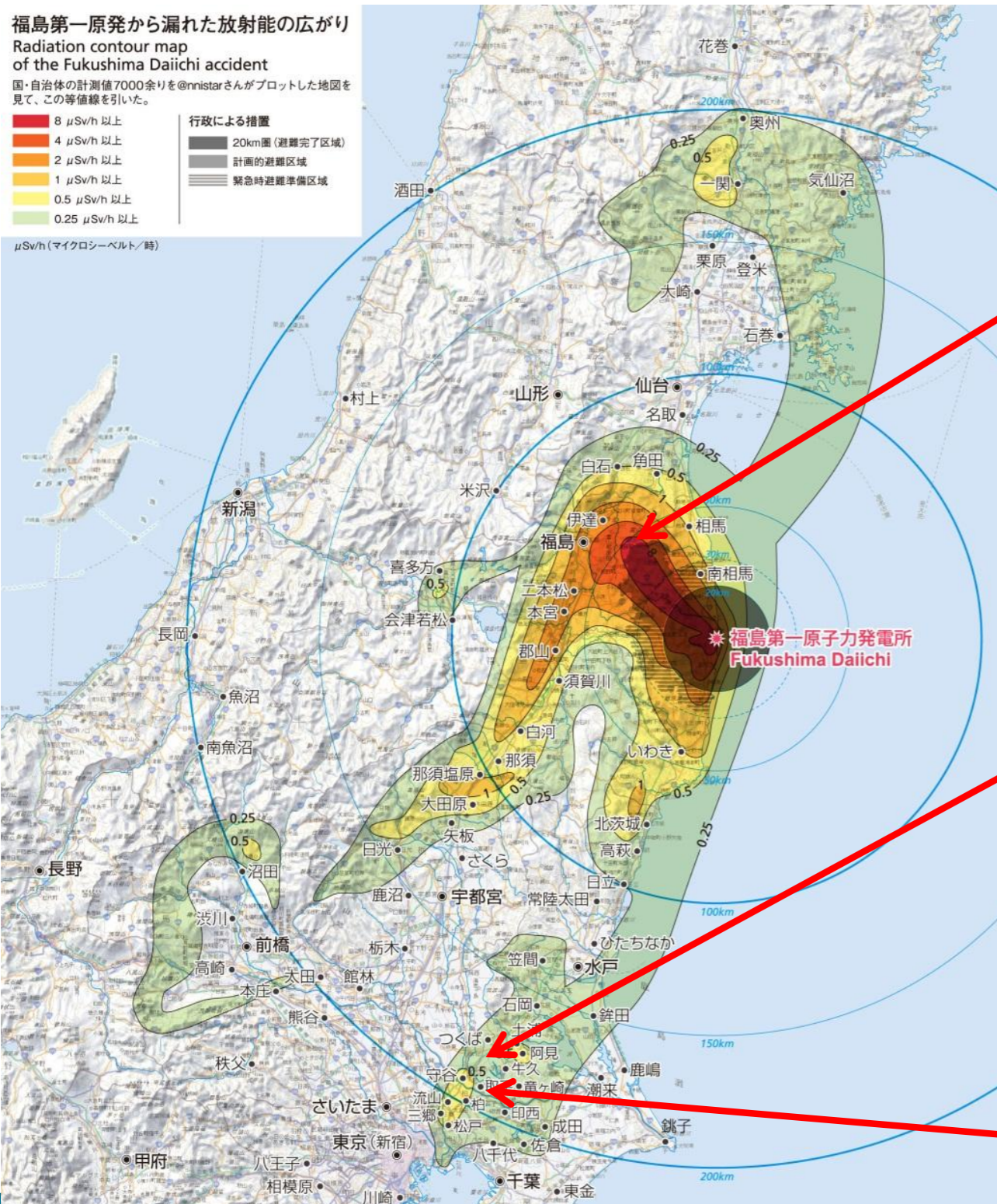
国・自治体の計測値7000余りを@nnistarさんがプロットした地図を見て、この等値線を引いた。

- 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)



早川由紀夫教授(群馬大学)作成、7月26日版

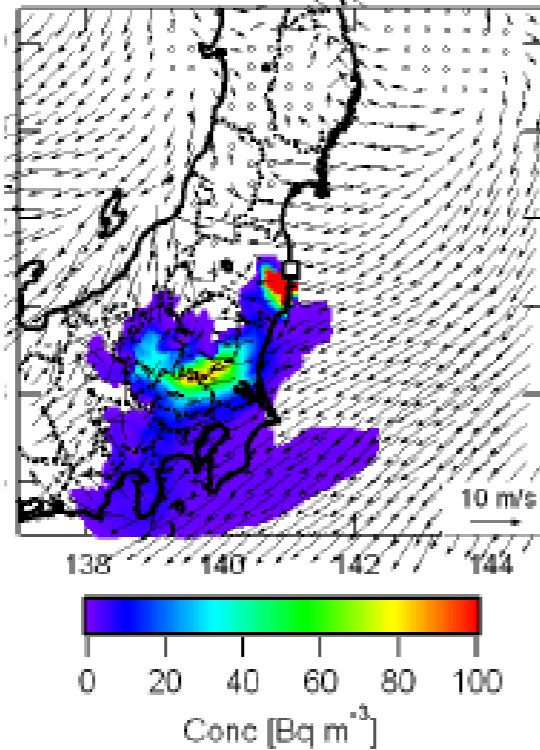
三訂版7月26日(初版4月21日)  
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/  
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)  
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),  
Source: @nnistar  
地図製図: 萩原佐知子  
背景地図には電子国土ポータル(portal.cyberjapan.jp)の地図を使用しました。



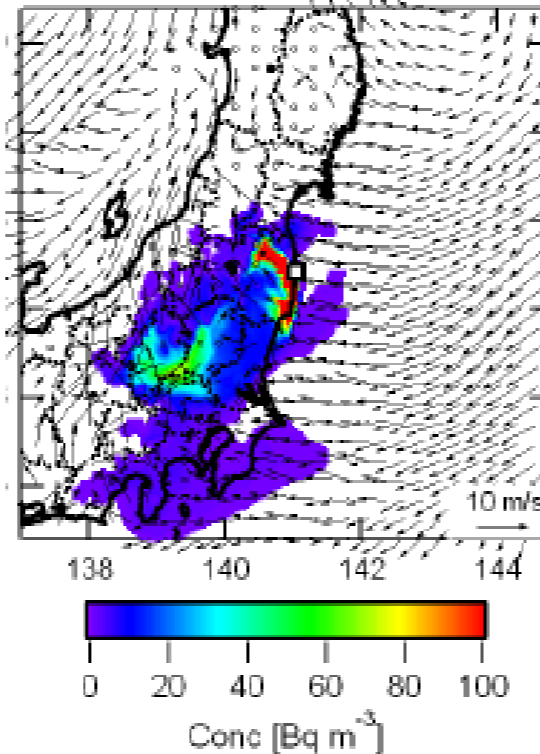
# ホットスポットの生成メカニズム

大気濃度

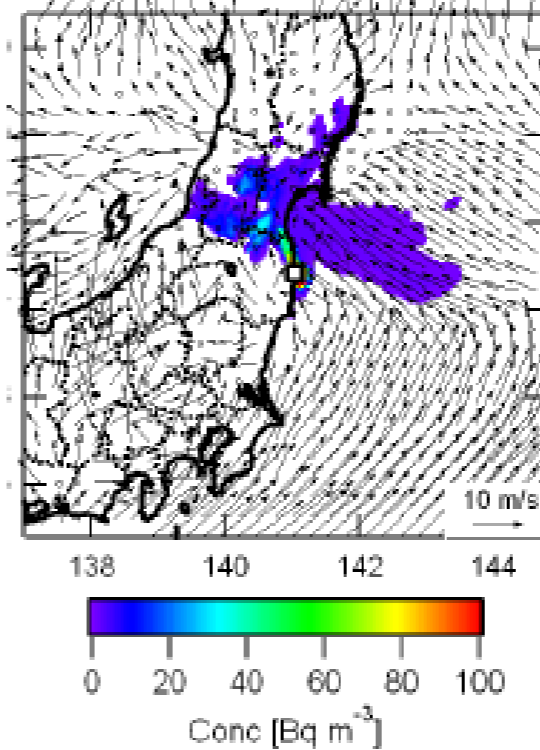
3/15の15時



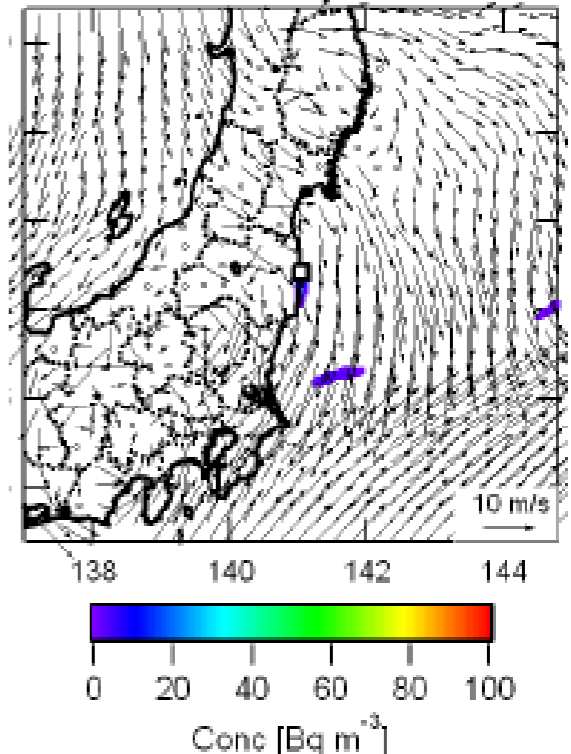
3/15の19時



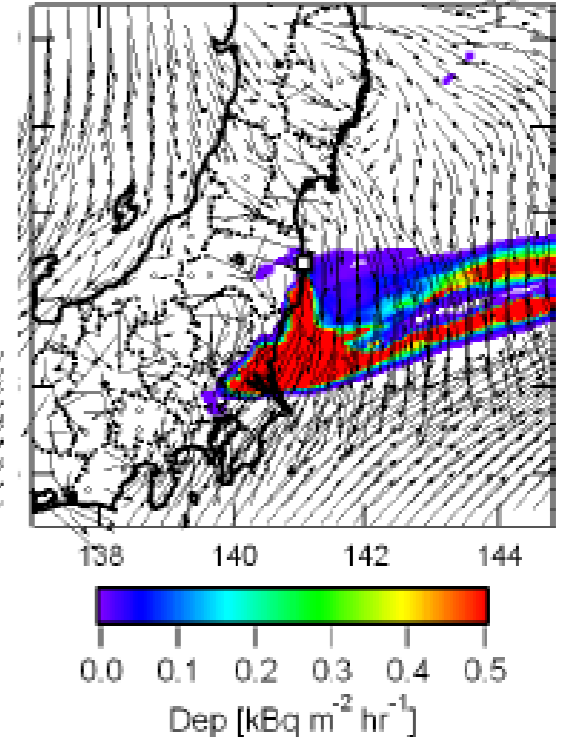
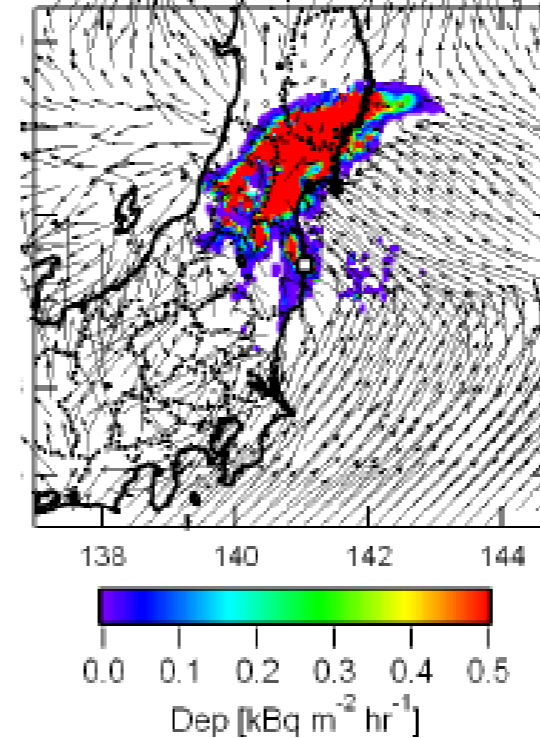
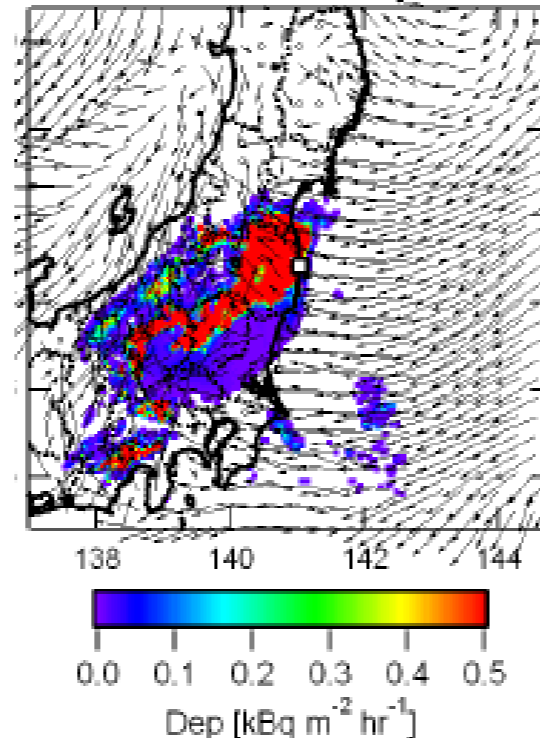
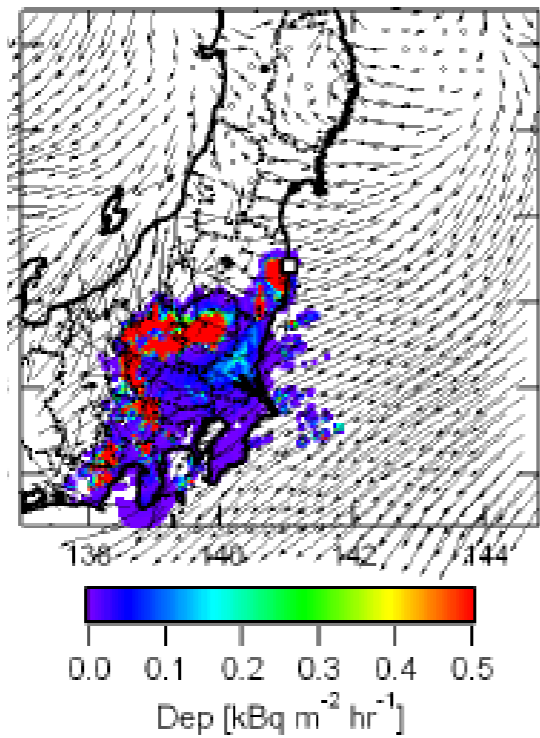
3/20の18時



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

# 原発周辺で観測された核種

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

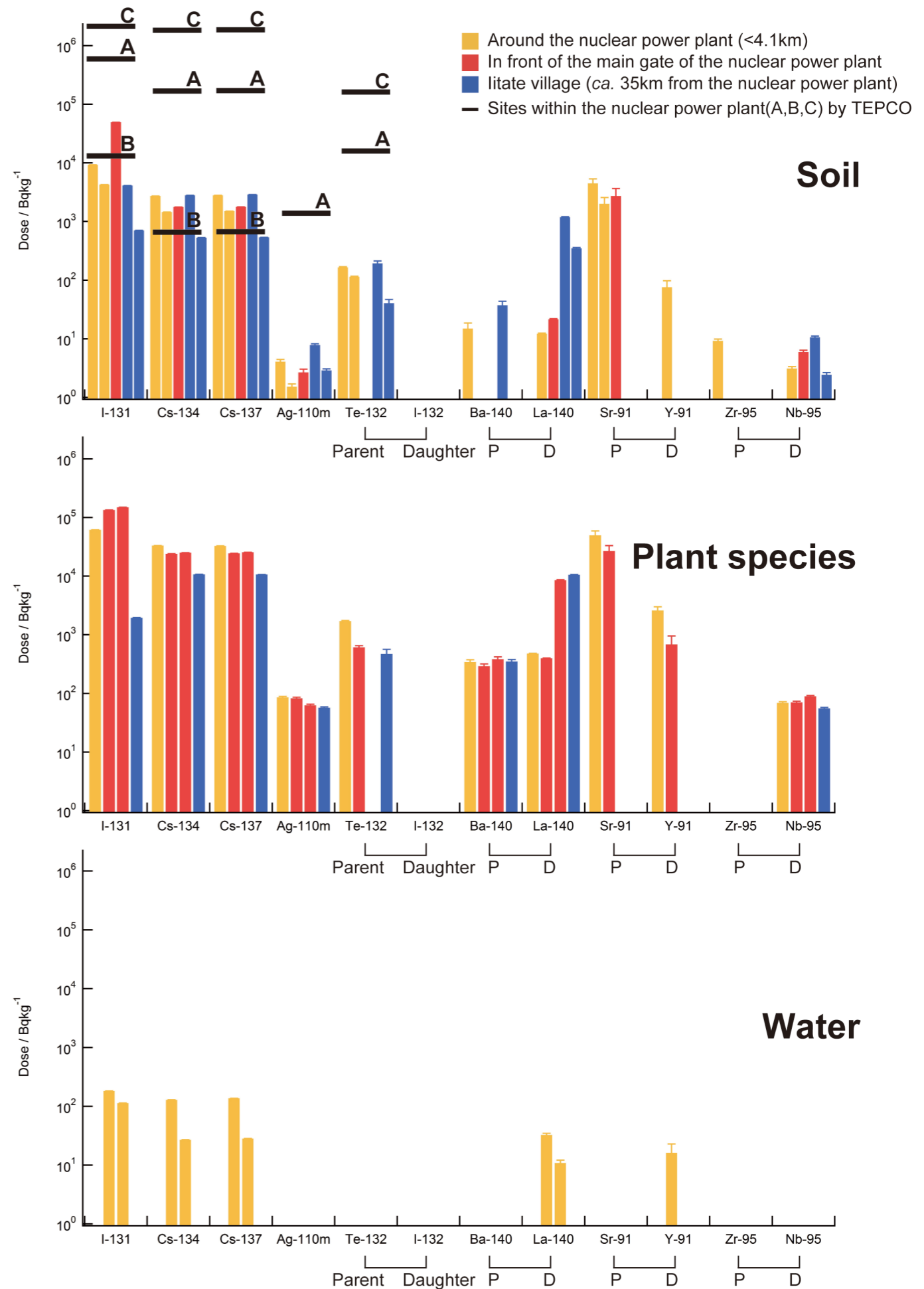
Shozugawa et al., 2012

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

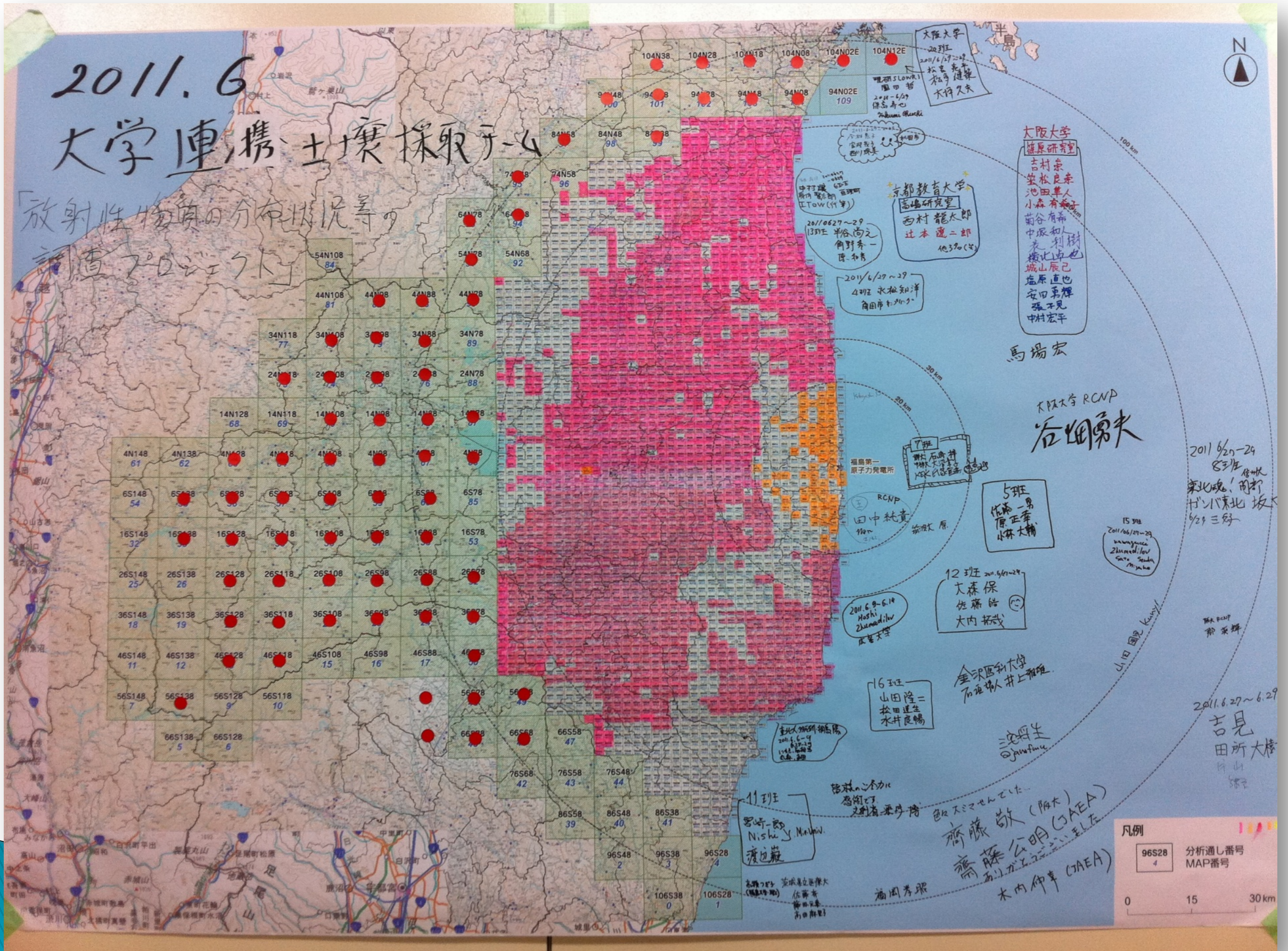
小島ら, 2011,2012

$^{241}\text{Pu}$

Zheng et al, 2012



# 文科省主催の土壌採取プロジェクト(2011年6月)

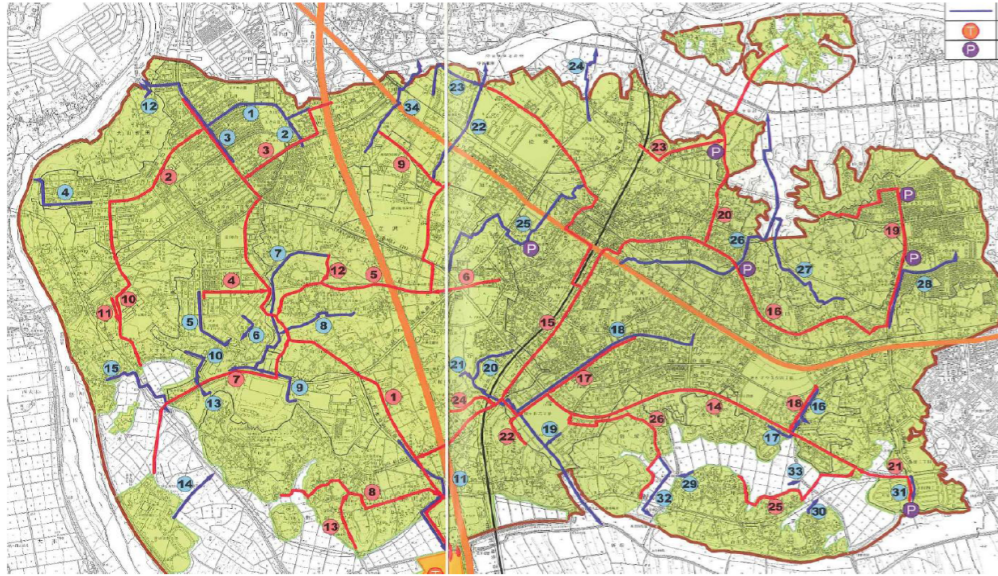


# 濃縮の顕著な例-茨城県守谷市

# 放射性物質の都市濃縮

## 守谷市雨水・下水幹線

市役所作成のパンフレットから転載



都市部に降った雨水は地下雨水幹線を通じて周辺部の河川・遊水池・水路に放出される。  
【北守谷雨水幹線】  
青色1, 2, 3, 12: 新守谷-鬼怒川ルート、5, 6: 北守谷野球場ルート  
【南守谷雨水幹線】  
青色26: 守谷郵便局ルート、27: 愛宕中学校ルートの合流先、16, 17: 南守谷野球場ルート、18-21: 松ヶ丘ルート

## 公園は雨天時の調整池として活用



## 雨天時



## 住宅地からの雨水の処理



プロムナード水路  
全長1.2km  
(地上部のみ)

プロムナード水路に雨水を排出する地域  
面積約1.9km<sup>2</sup>

城址公園  
水路下流に位置

## ホットスポット・ホットエリアの形成

これまでに測定してきた守谷市内の地点 (東大教養: 放射化学: 小豆川氏) 市役所周辺(大柏)・プロムナード水路・城址公園・愛宕中裏手・郵便局・松ヶ丘・五反田川・みずき野・けやき台公園など...

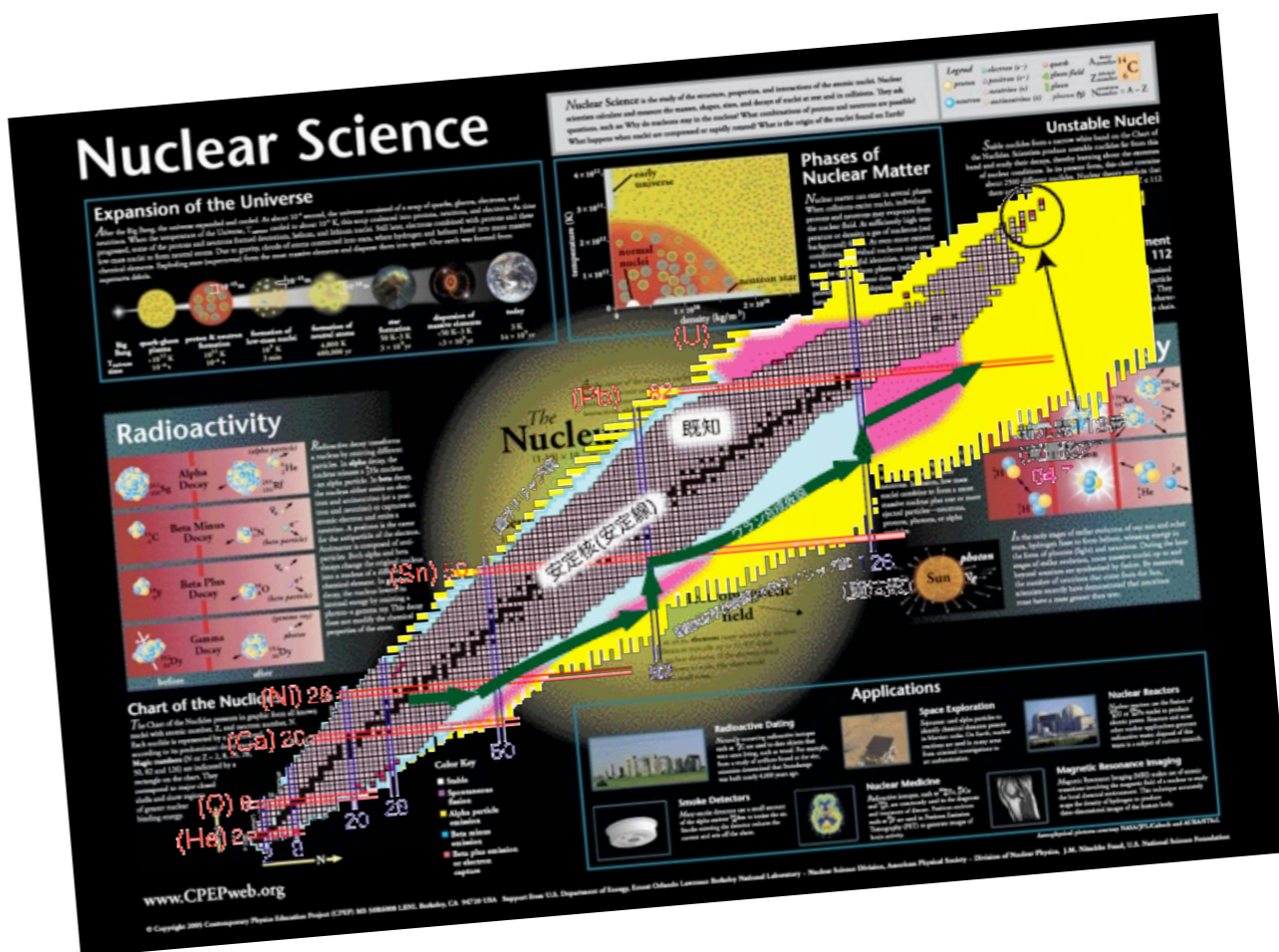
# 2012年度冬学期 主題科目テーマ講義

# 放射線

を

科学的に

理解する



## 第4話

# 原子核物理学・原子力工学

原子核と放射能、核崩壊・核分裂、原子力発電の原理

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 原子核物理学

原子 = atom

molecule < mole + -cule  
(小さな塊)

ラテン語

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

古典ギリシャ語

anatomy < ana- + témnein

tomography < tomo- + -graphy

tom-, -tome, -tomy = to cut

-graphy = writing, drawing



# Periodic Table of Elements

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																					
1	1 H 1 1.00794	<table border="0"> <tr> <td>Atomic Name</td> <td>Hydrogen-3</td> <td><b>α</b> Alpha decay</td> <td><b>β</b> Beta decay</td> <td>Selected</td> <td>All</td> </tr> <tr> <td>Mass</td> <td>3.01604927767</td> <td><b>p</b> Proton emission</td> <td><b>β+</b> Beta+ decay</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>Binding Energy</td> <td>2.827266</td> <td><b>n</b> Neutron emission</td> <td><b>EC</b> Electron capture</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Abundance</td> <td>0%</td> <td><b>SF</b> Spontaneous fission</td> <td>Stable</td> <td>9</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Half-Life</td> <td>12.32 y</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Decay Width</td> <td>1.174e-30</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>																	Atomic Name	Hydrogen-3	<b>α</b> Alpha decay	<b>β</b> Beta decay	Selected	All	Mass	3.01604927767	<b>p</b> Proton emission	<b>β+</b> Beta+ decay	5	6	Binding Energy	2.827266	<b>n</b> Neutron emission	<b>EC</b> Electron capture	7	8	Abundance	0%	<b>SF</b> Spontaneous fission	Stable	9	10	Half-Life	12.32 y					Decay Width	1.174e-30					2 He 2
Atomic Name	Hydrogen-3	<b>α</b> Alpha decay	<b>β</b> Beta decay	Selected	All																																																		
Mass	3.01604927767	<b>p</b> Proton emission	<b>β+</b> Beta+ decay	5	6																																																		
Binding Energy	2.827266	<b>n</b> Neutron emission	<b>EC</b> Electron capture	7	8																																																		
Abundance	0%	<b>SF</b> Spontaneous fission	Stable	9	10																																																		
Half-Life	12.32 y																																																						
Decay Width	1.174e-30																																																						
2	3 Li 2 6.941	4 Be 2 9.012182	5 B 2 10.811	6 C 3 12.0107	7 N 3 14.00643	8 O 3 15.99903	9 F 2 18.998403	10 Ne 3 20.1797	11 Na 2 22.989769	12 Mg 3 24.3047	13 Al 2 26.981538	14 Si 4 28.08558	15 P 3 30.973762	16 S 5 32.065	17 Cl 3 35.453	18 Ar 7 39.948																																							
3	19 K 3 39.0983	20 Ca 9 40.078	21 Sc 5 (44.955912)	22 Ti 6 47.88	23 V 4 50.9415	24 Cr 5 51.9961	25 Mn 4 54.938044	26 Fe 7 55.845	27 Co 5 58.933195	28 Ni 8 58.6934	29 Cu 2 63.546	30 Zn 7 65.38	31 Ga 2 69.723	32 Ge 7 72.630	33 As 3 74.9216	34 Se 9 78.96	35 Br 2 79.904	36 Kr 9 83.80																																					
4	37 Rb 5 85.4678	38 Sr 9 87.62	39 Y 5 (88.905848)	40 Zr 8 91.224	41 Nb 5 92.90638	42 Mo 9 95.94	43 Tc 5 (98.90625)	44 Ru 10 101.07	45 Rh 5 102.9055	46 Pd 9 106.36	47 Ag 6 107.8682	48 Cd 11 112.411	49 In 2 114.818	50 Sn 11 118.710	51 Sb 3 121.757	52 Te 11 127.603	53 I 3 126.905	54 Xe 13 131.29																																					
5	55 Cs 4 132.90545	56 Ba 8 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 8 178.49	73 Ta 7 180.94788	74 W 7 183.84	75 Re 2 186.207	76 Os 11 190.23	77 Ir 7 192.222	78 Pt 9 195.084	79 Au 5 196.96657	80 Hg 11 200.59	81 Tl 3 204.3833	82 Pb 6 207.2	83 Bi 3 208.9804	84 Po 3 (209)	85 At 1 (210)	86 Rn 2 (222)																																					
6	87 Fr 3 (223)	88 Ra 4 (226)	89-103 Actinides	104 Rf 1 (261)	105 Db 1 (262)	106 Sg 1 (263)	107 Bh 2 (264)	108 Hs 2 (265)	109 Mt 1 (266)	110 Ds 1 (271)	111 Rg 1 (272)	112 Cn 1 (285)	113 Uut 1 (286)	114 Fl 1 (289)	115 Uup 1 (288)	116 Lv 1 (293)	117 Uus 1 (294)	118 Uuo 1 (294)																																					

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Periodic Table Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

57 La 3	58 Ce 8	59 Pr 3	60 Nd 7	61 Pm 3	62 Sm 8	63 Eu 4	64 Gd 7	65 Tb 3	66 Dy 8	67 Ho 5	68 Er 11	69 Tm 5	70 Yb 11	71 Lu 4
89 Ac 3	90 Th 6	91 Pa 6	92 U 6	93 Np 3	94 Pu 6	95 Am 3	96 Cm 8	97 Bk 5	98 Cf 7	99 Es 4	100 Fm 4	101 Md 3	102 No 3	103 Lr 1

# 放射性物質とは

放射性核種  
= 放射性同位体  
= 不安定原子核

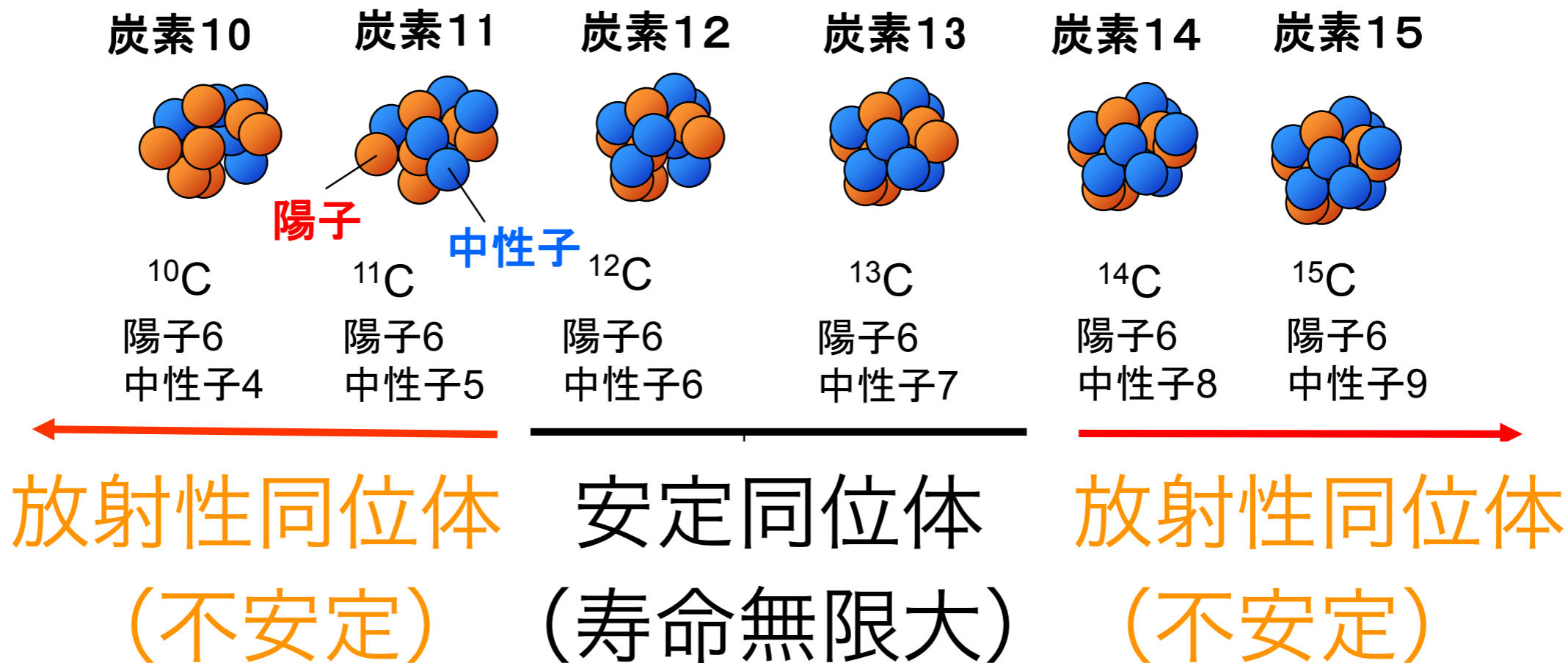
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



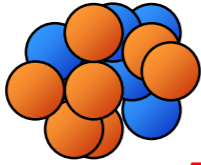
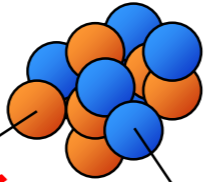
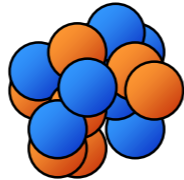

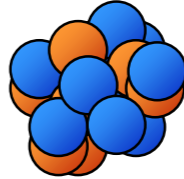
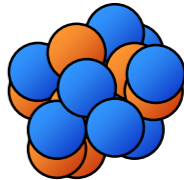
陽子数  $Z$  が同じなら化学的には同じ元素  
中性子数  $N$  が違う原子核が多種存在する

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

19.3秒	20.3分	99%	1%	5730年	2.4秒
炭素10	炭素11	炭素12	炭素13	炭素14	炭素15
					
$^{10}\text{C}$	$^{11}\text{C}$	$^{12}\text{C}$	$^{13}\text{C}$	$^{14}\text{C}$	$^{15}\text{C}$
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： $\beta^+$ 壊変、電子捕獲(EC))

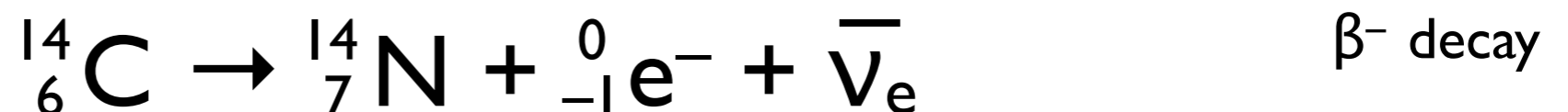
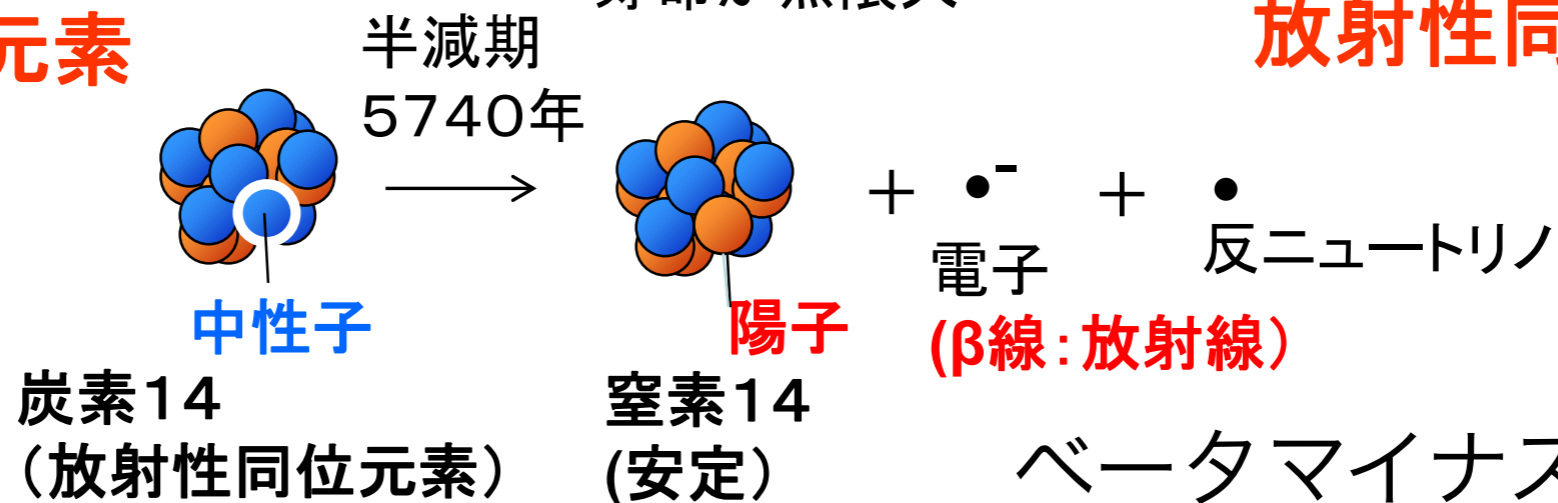
天然に存在=**安定同位体**  
寿命が無限大

中性子過剰になると？

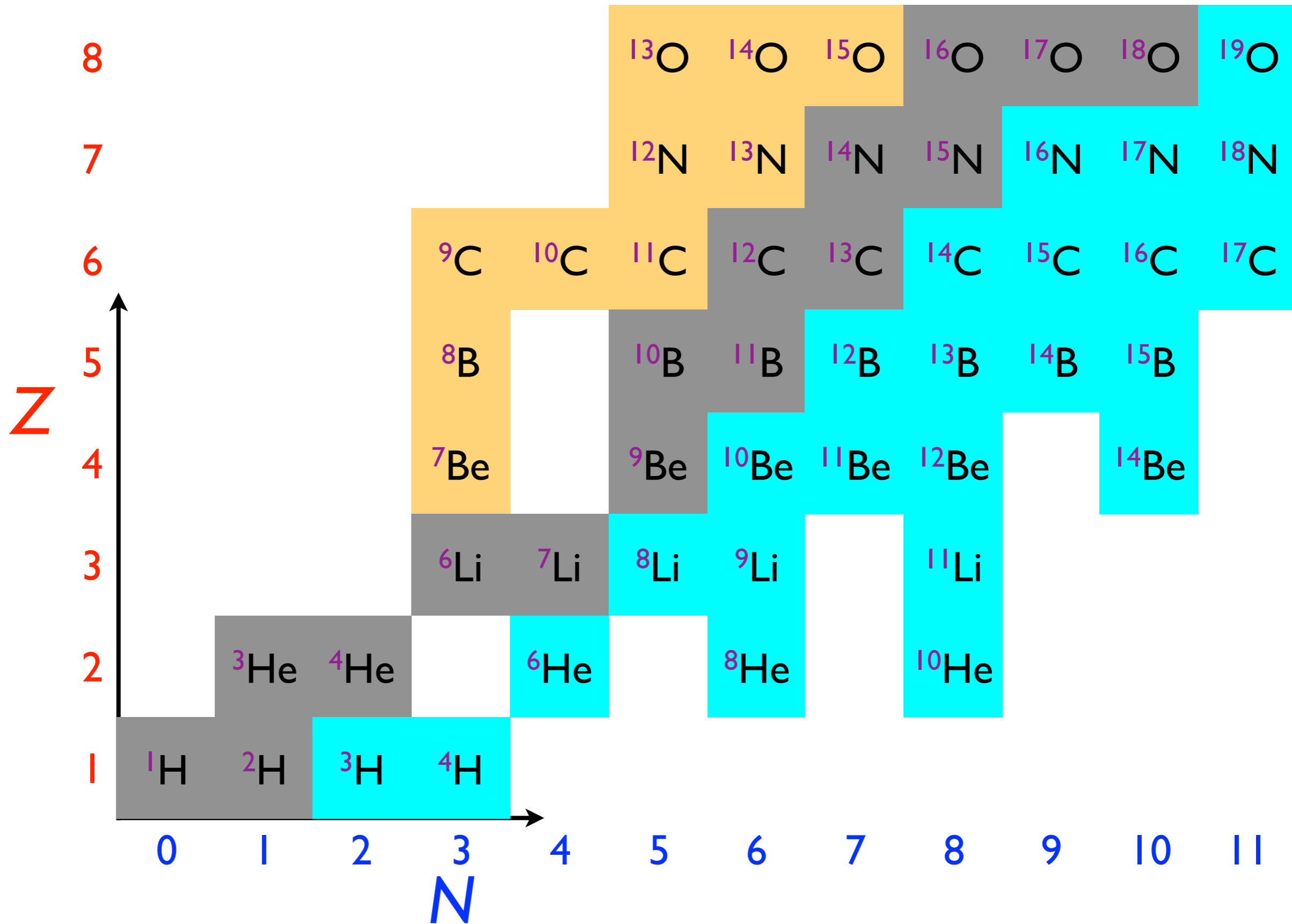
(寿命がある： $\beta^-$ 壊変)

## 放射性同位元素

## 放射性同位元素



# 核图表



# 核種の数

安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

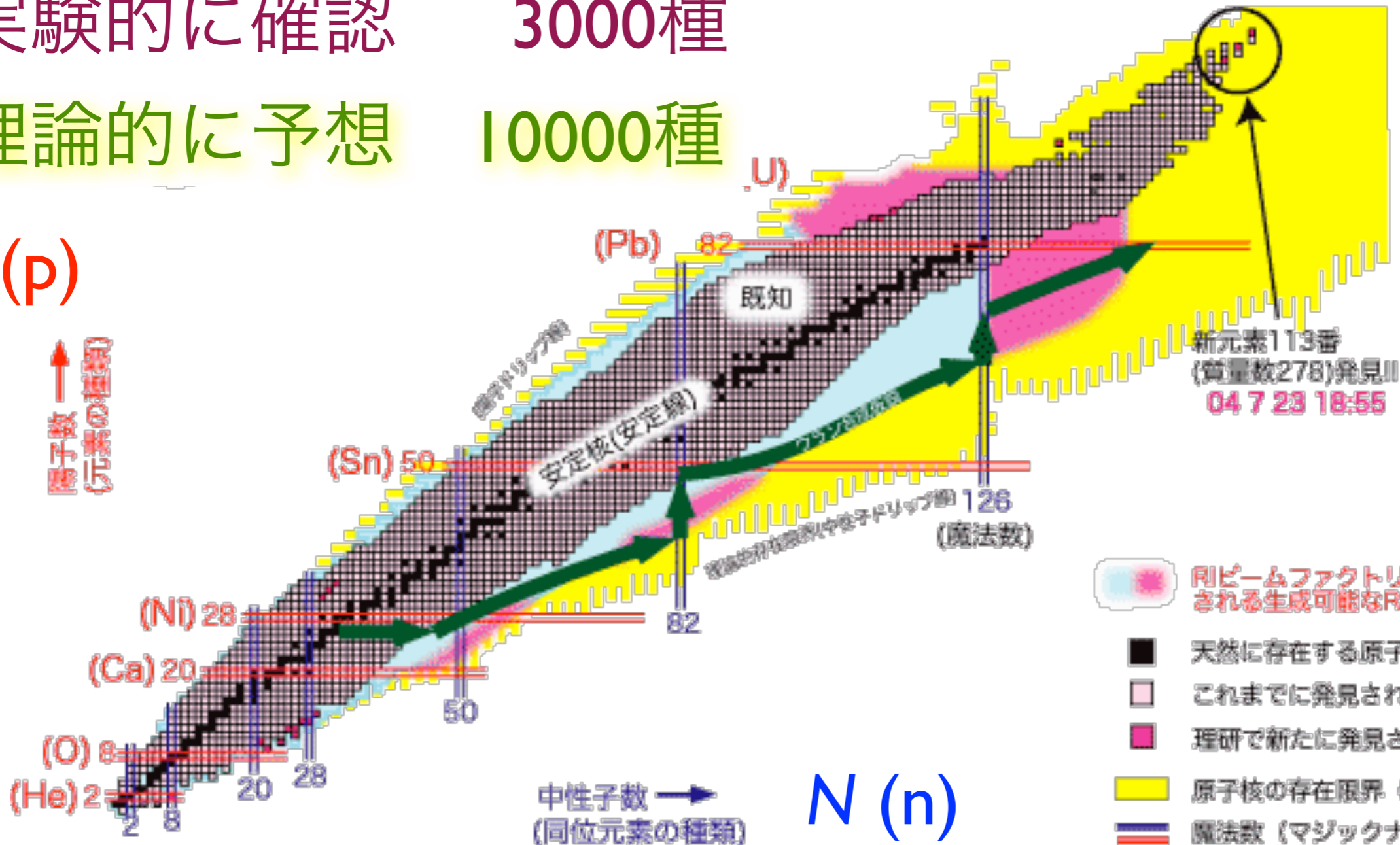
理論的に予想 10000種

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

Z (p)

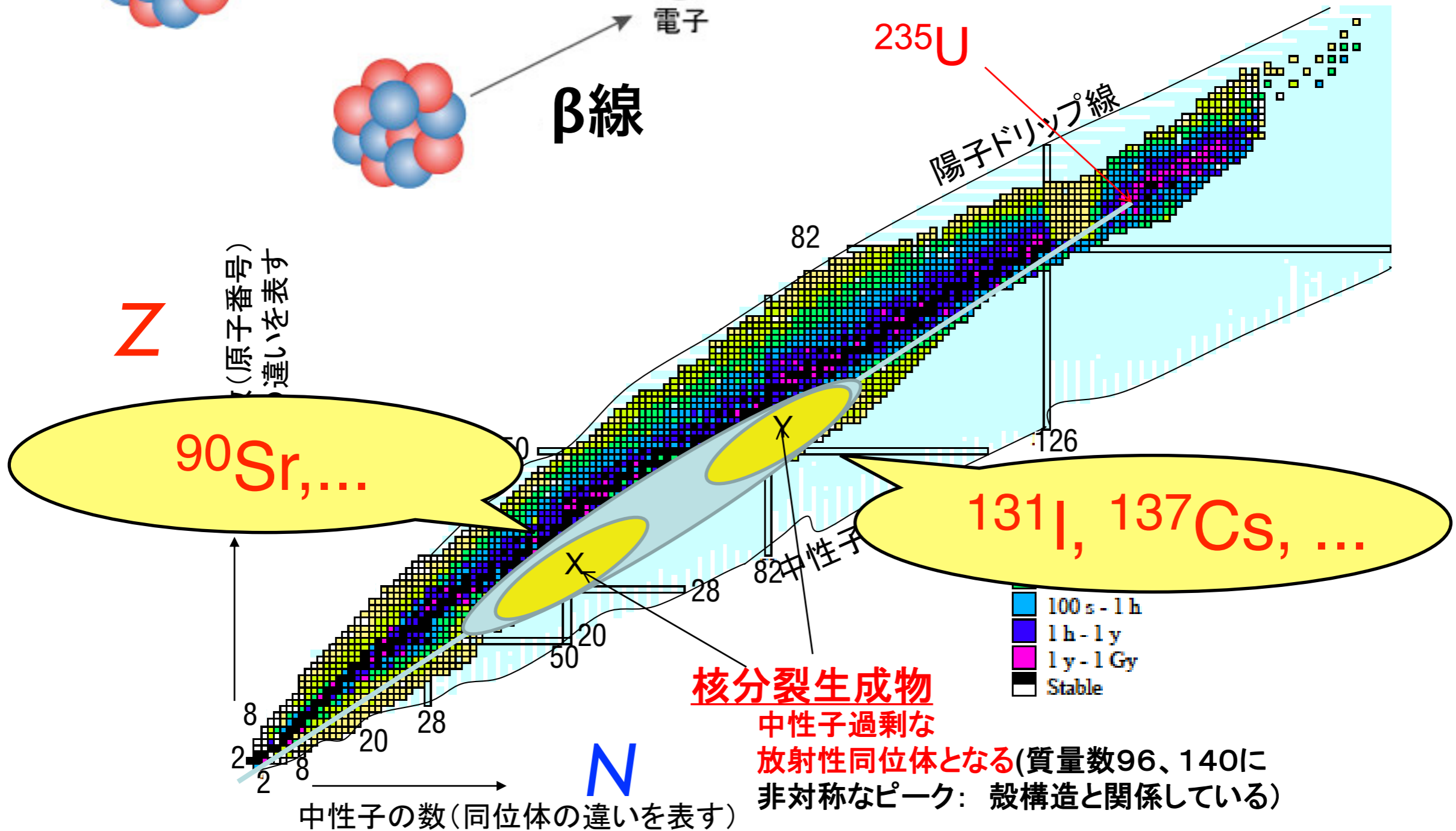
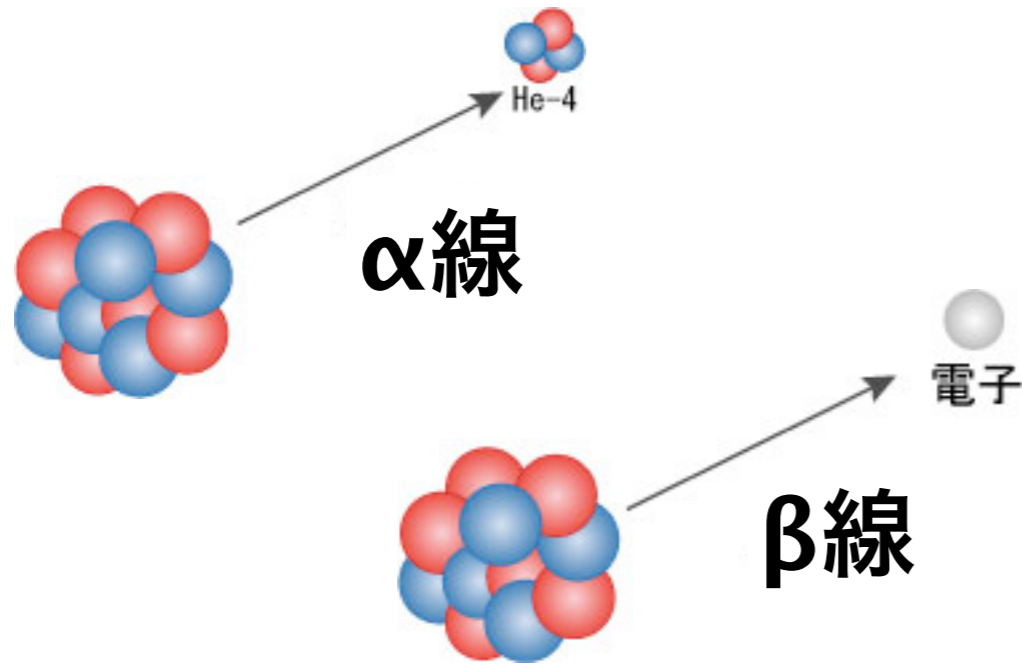
↑ 原子数  
陽子の種類  
(元素の種類)



- 円ビームファクトリーで拡大される生成可能なRIの領域
- 天然に存在する原子核
- これまでに発見されたRI
- 理研で新たに発見されたRI
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- 超新星爆発でつくられた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋

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

# 関連する核種の分類

isotope	同位体	$Z$	${}^A_Z N_N$	${}^{A'}_Z N_{N'}$	${}^{A''}_Z N_{N''}$
isotone	同調体 (同中性子体)	$N$	${}^A_Z N_N$	${}^{A'}_{Z'} N_N$	${}^{A''}_{Z''} N_N$
isobar	同重体	$A$	${}^A_Z N_N$	${}^A_{Z'} N_{N'}$	${}^A_{Z''} N_{N''}$
mirror nuclei	鏡映核, 鏡像核	$A, Z \leftrightarrow N$	${}^A_Z N_N$	${}^A_{Z'} N_{N'}$	$Z' = N$ $N' = Z$
isodiapher	同余体	$N - Z$	${}^A_Z N_N$	${}^{A-2x}_{Z-x} N_{N-x}$	
isomer	核異性体	$Z, N$	${}^A_Z N_N$	${}^{Am_1}_Z N_N^{(*)}$	${}^{Am_2}_Z N_N^{(*)}$

# 原子核物理学

Nuclear Physics

$\beta$  崩壊  
isobar  
同重体

isotone  
同調体

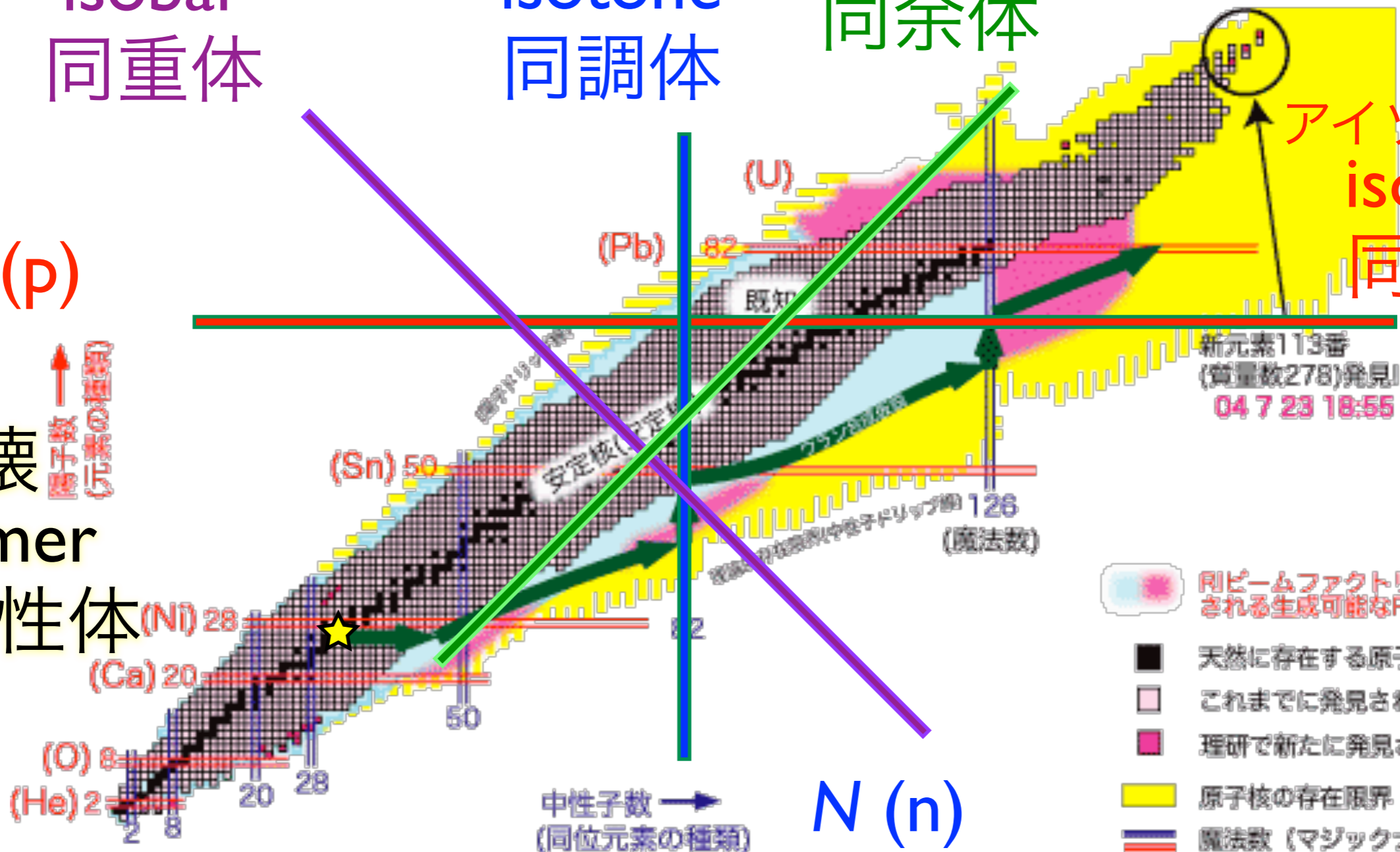
$\alpha$  崩壊  
isodiapher  
同余体

アイソトープ  
isotope  
同位体

$Z (p)$

$\gamma$  崩壊  
isomer  
核異性体

↑ 原子種 (種類)  
↑ 原子種 (種類)



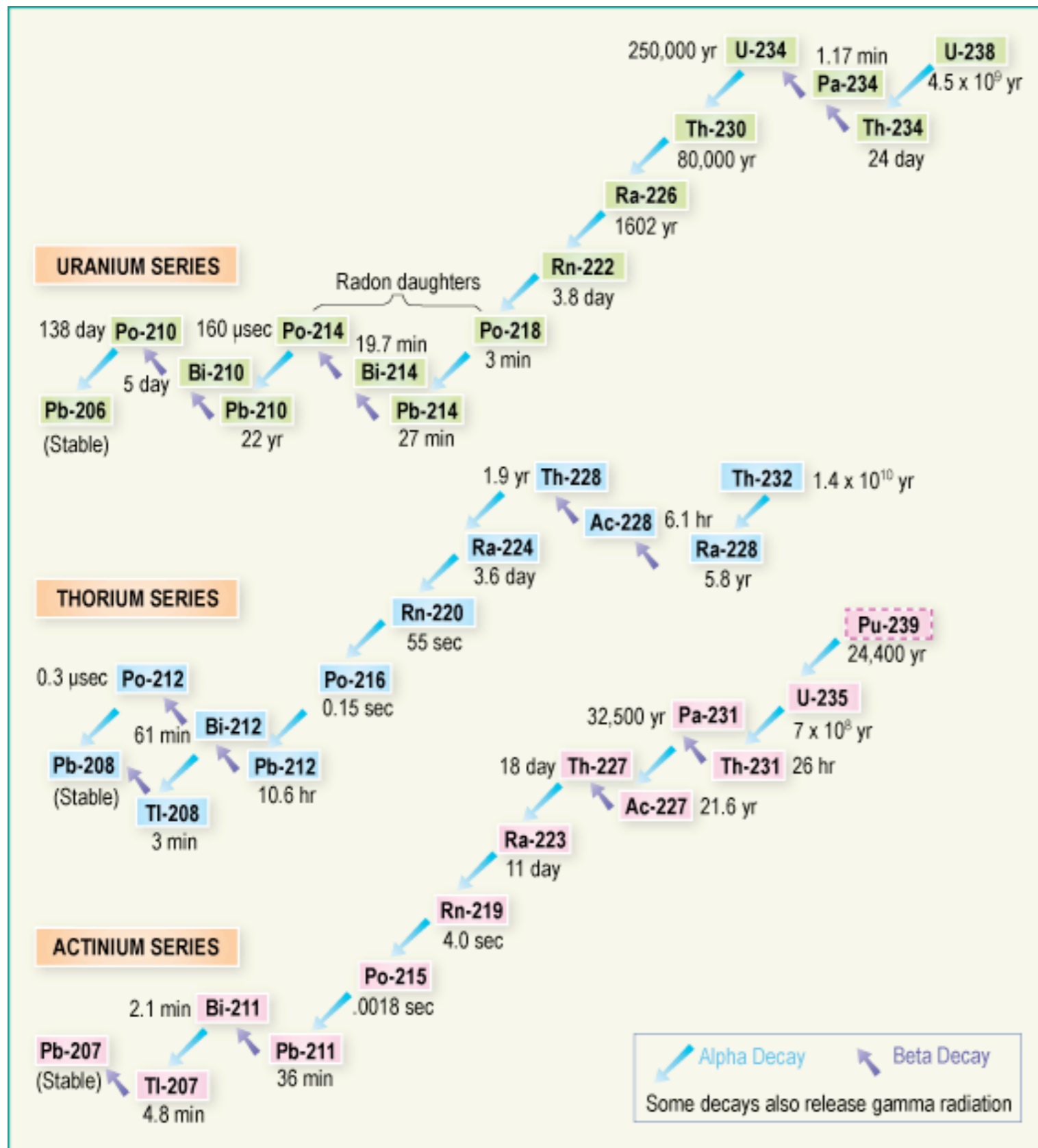
中性子数 →  
(同位元素の種類)

$N (n)$

- RIビームファクトリーで拡大される生成可能なRIの領域
- 天然に存在する原子核
- これまでに発見されたRI
- 理研で新たに発見されたRI
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- 超新星爆発でつくられた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋

Nuclear Chart 核図表

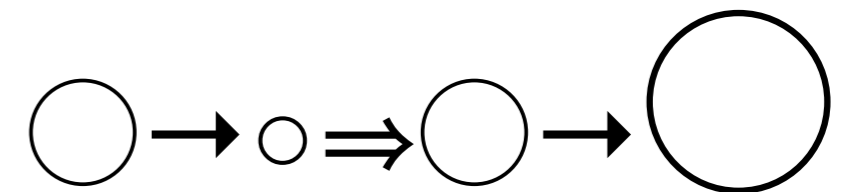




# 壊変 (崩壊) 系列

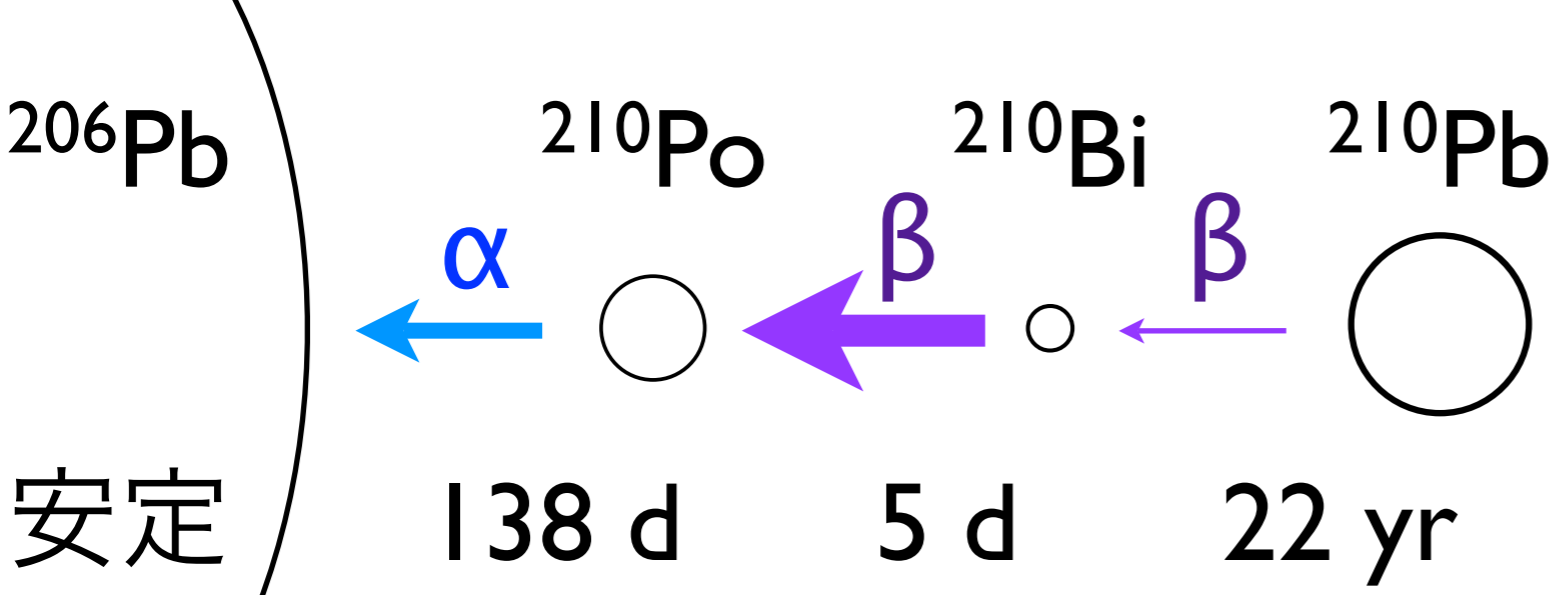
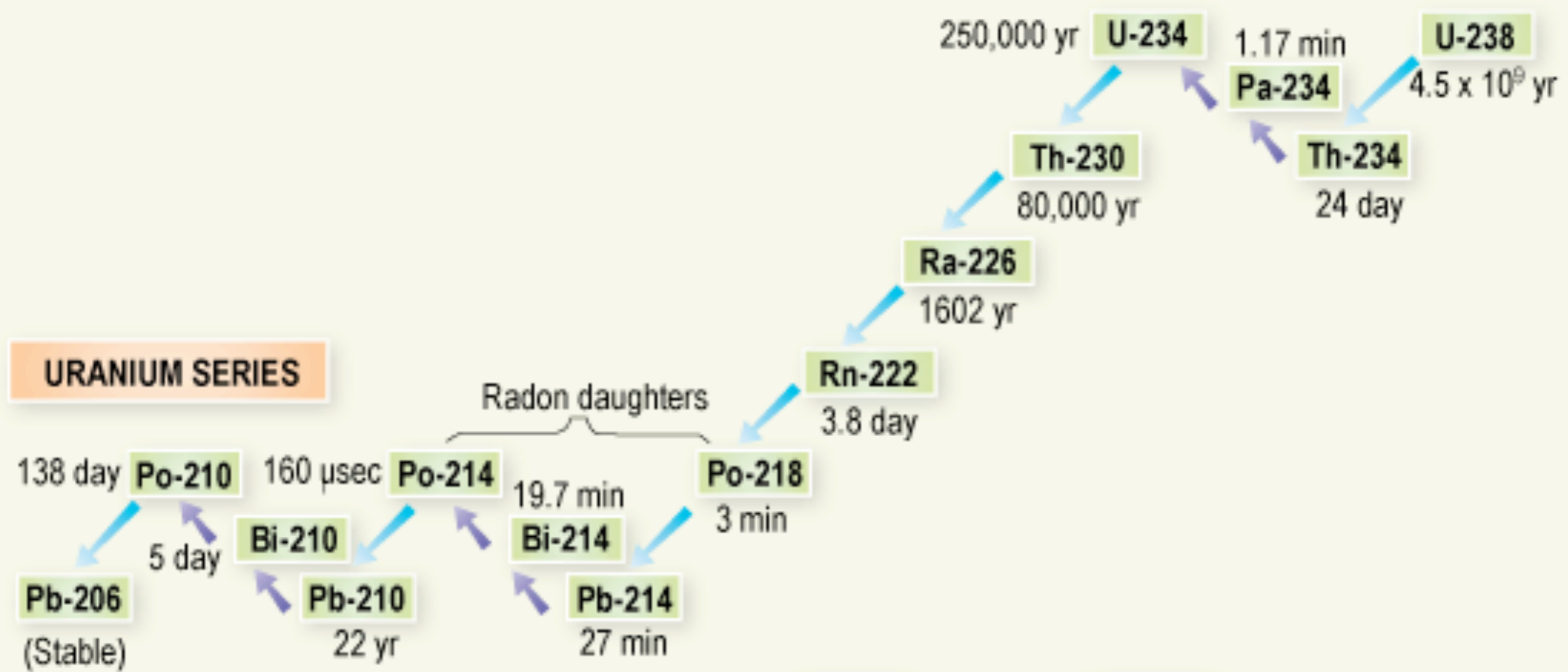
- (4n) トリウム系列
- (4n+1) ネプツニウム系列
- (4n+2) ウラン系列
- (4n+3) アクチニウム系列

# 放射平衡



# 壊変 (崩壊) 系列

## (4n+2) ウラン系列



放射平衡

# 壊変 (崩壊) 系列

# (4n+2) ウラン系列

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \lambda_2 N_2 - \lambda_3 N_3$$

$$\frac{dN_4}{dt} = \dots\dots\dots$$

$\lambda = 1/\tau$        $\lambda$ : 崩壊レート、 $\tau$ : 寿命  
 半減期の1.44倍

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} \{e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}\} + N_{20} e^{-\lambda_2 t}$$

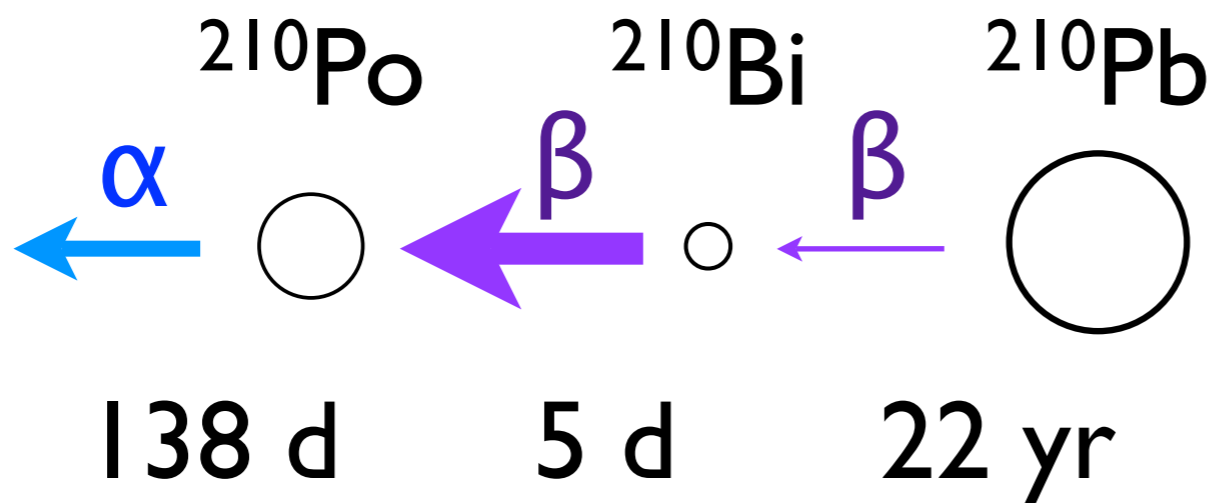
$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

**過渡平衡**  
 ( $\lambda_1 < \lambda_2$ ,  $t$  が十分長い)

$$N_2 \approx \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1$$

**永続平衡**  
 ( $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ,  $\tau_1$  がとても長い)

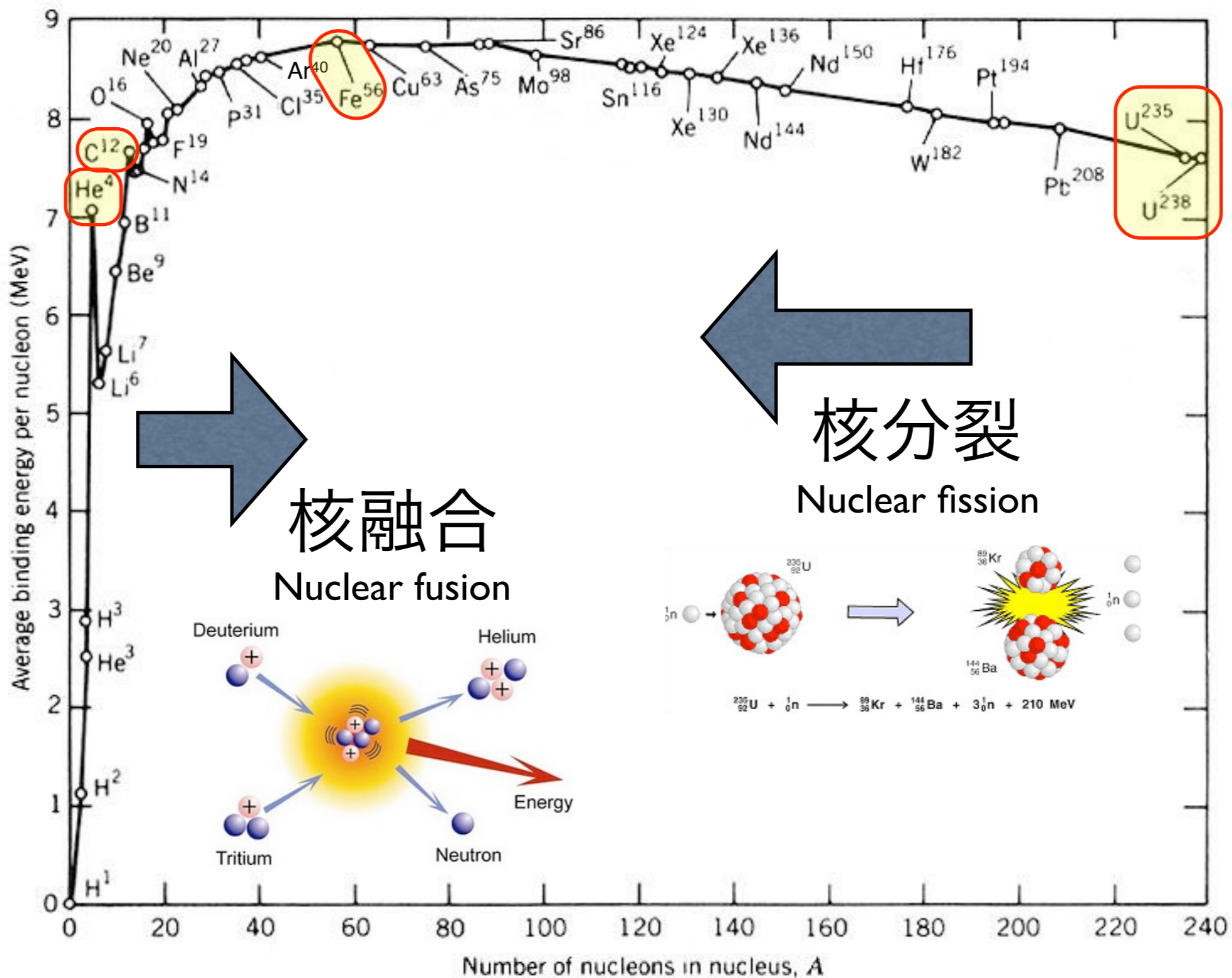
$^{206}\text{Pb}$   
 安定



**放射平衡**

# 最も安定な原子核は？

核子あたりの結合エネルギー (MeV)



# Weizsäcker-Bethe の (半経験的) 質量公式

$$M_{\text{nucl}}(Z, N) = Z M_p + N M_n - E_B / c^2 \quad \text{液滴モデル}$$

$$M_{\text{atom}}(Z, N) = Z M_H + N M_n - E_B / c^2 \quad (\text{電子の束縛エネルギーは無視})$$

$$E_B / c^2 = \Delta M \quad (\text{質量欠損})$$

$$E_B(Z, N) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c Z^2 / A^{1/3} - \frac{a_a}{4} (N - Z)^2 / A - \delta$$

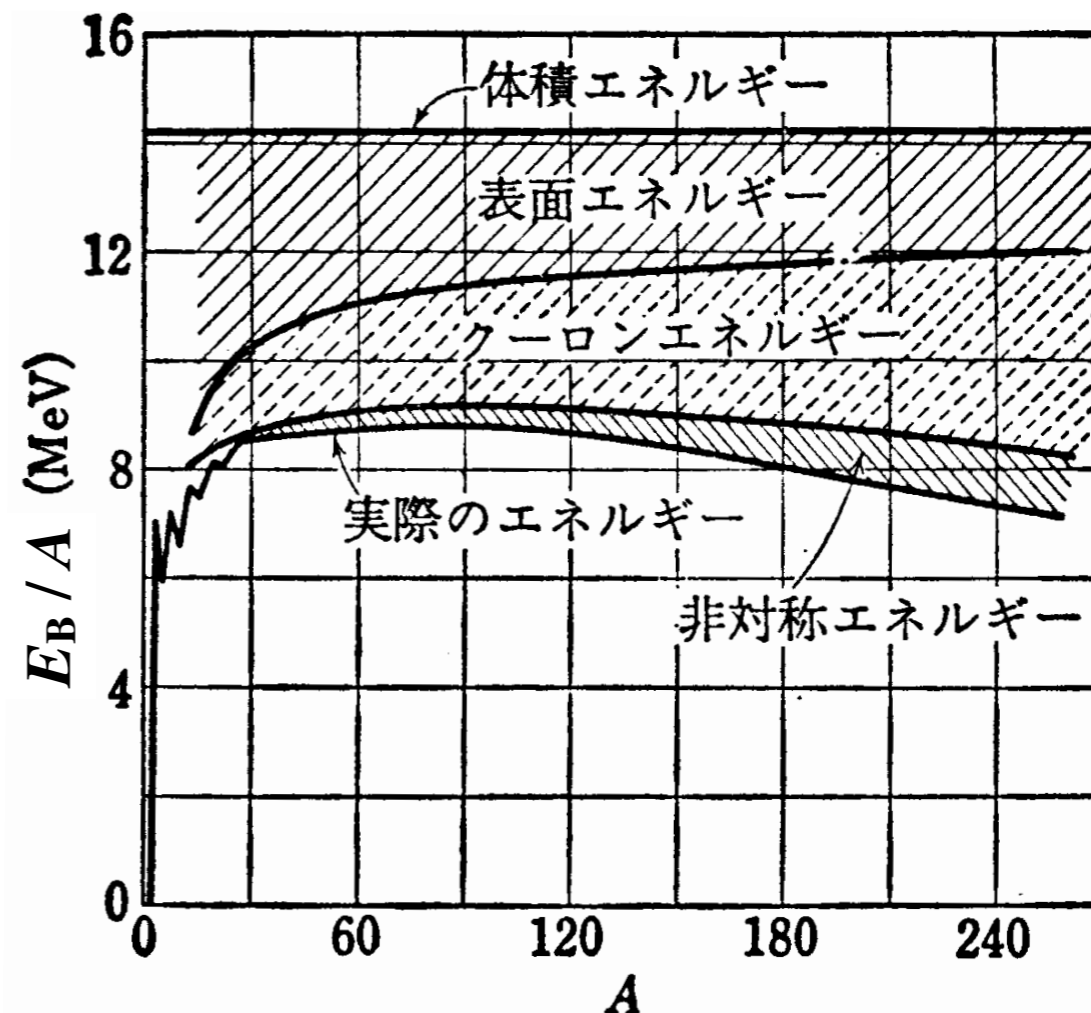
体積エネルギー

クーロンエネルギー

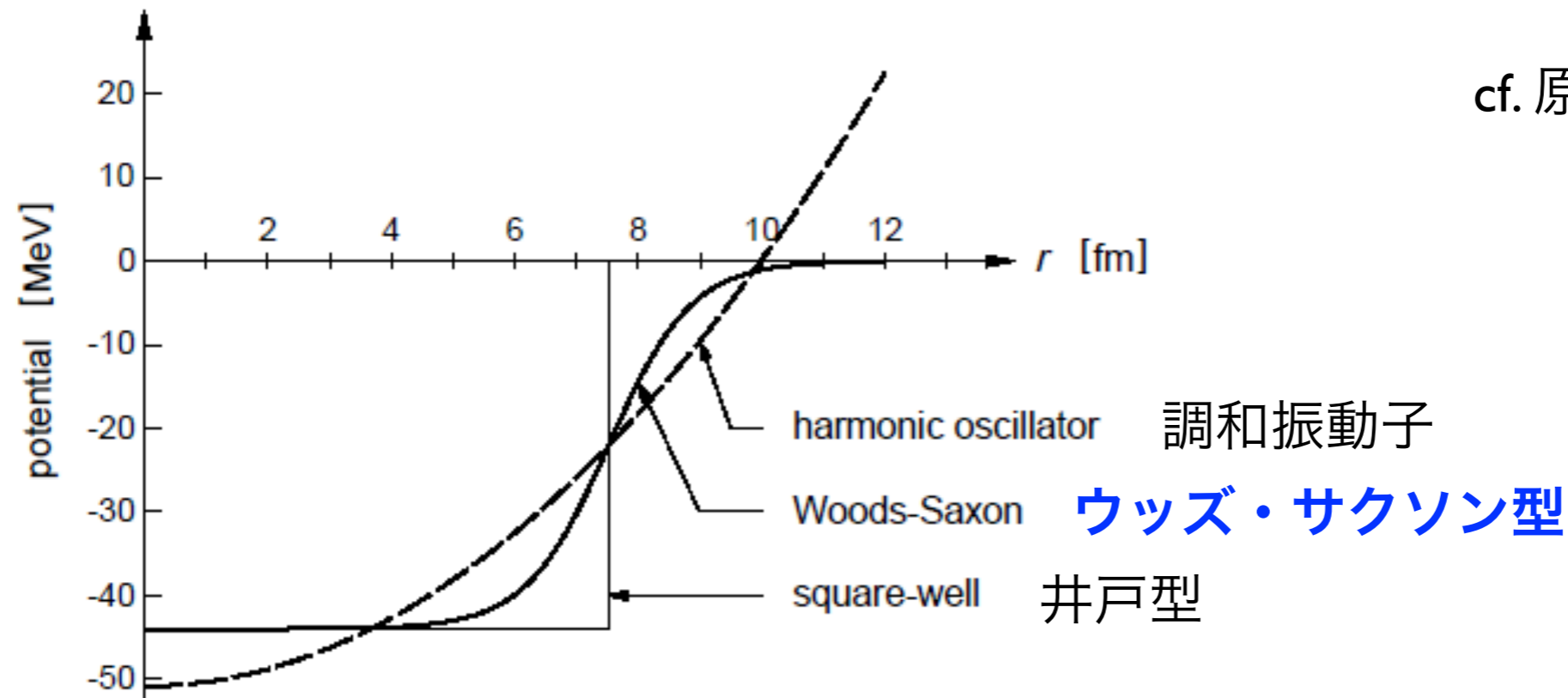
対称エネルギー

対エネルギー

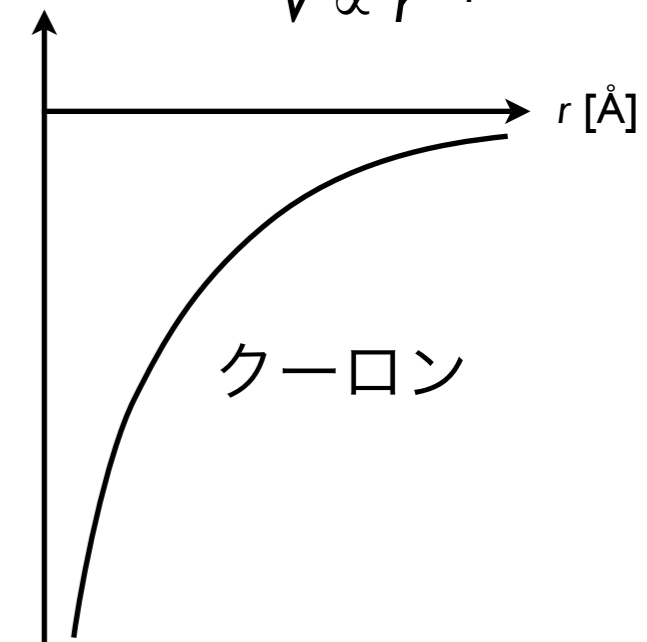
表面エネルギー



# 原子核のポテンシャル



cf. 原子のポテンシャルは  
 $V \propto r^{-1}$



原子核の大きさは  $r = 1.2 A^{1/3}$  fm ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ )

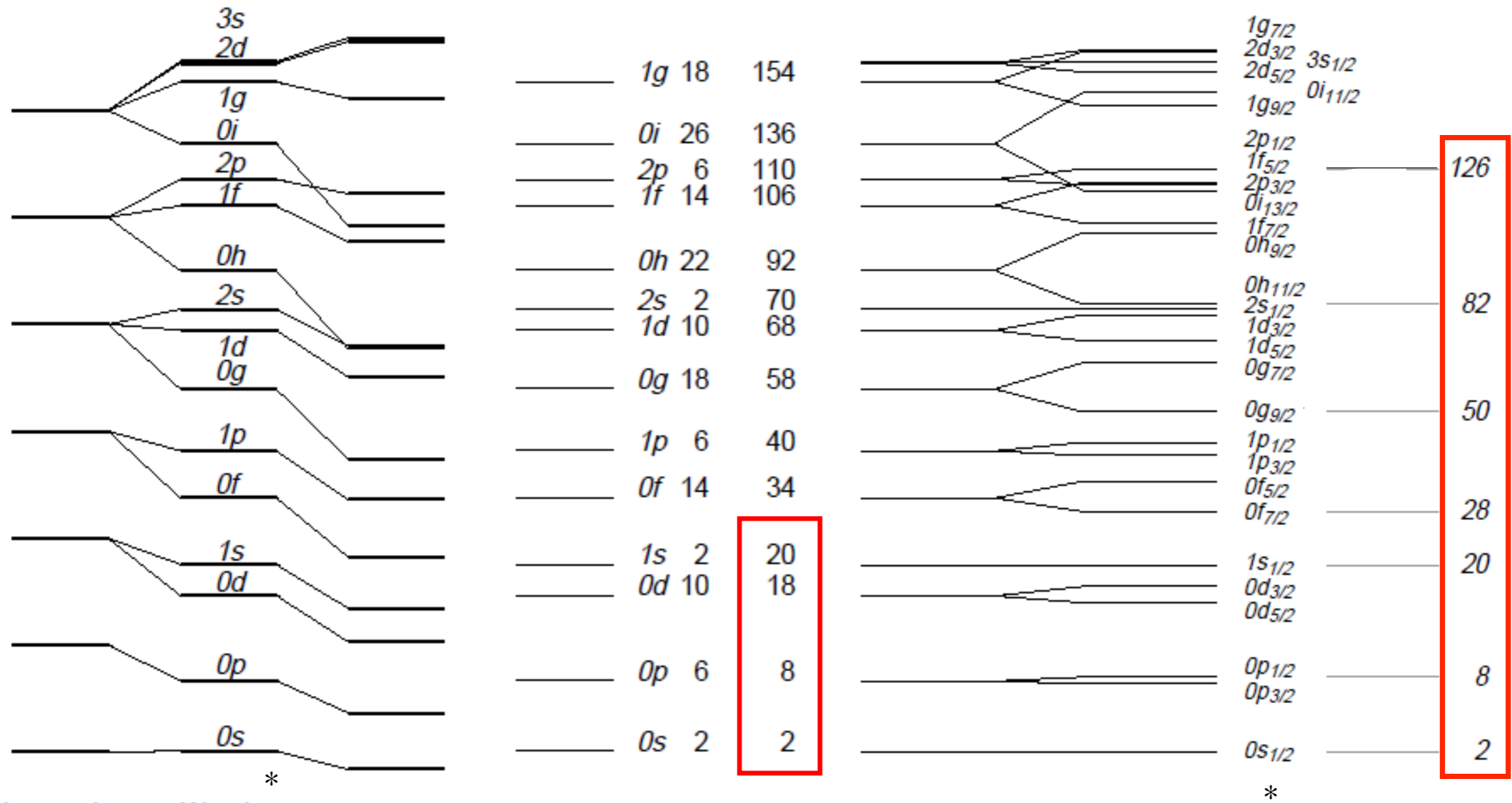
原子核は密度一定 (密度の飽和性)

核力 = 「強い相互作用」 “**Strong Interaction**”

力の到達距離は核子のサイズ

$\beta$ 壊変: 「弱い相互作用」 “**Weak Interaction**”

# 原子核構造の殻模型 Shell model



**魔法数**  
magic number

+ スピン軌道結合

(実際の原子核では準位の順番が少し異なる)

調和振動子 ウッズ・サクソン型  
井戸型

ウッズ・サクソン型ポテンシャル

(\*) 主量子数はこの図より1つ大きく取る場合の方が一般的

# 原子と原子核の準位構造の比較

- ポテンシャルが違うので、1p, 2f (0p, 1f と名付ける流儀もある) といった、原子では存在しない準位が原子核にはある。

● 原子            s p d f g h j k l .....

● 角運動量    0 1 2 3 4 5 6 7 8 .....

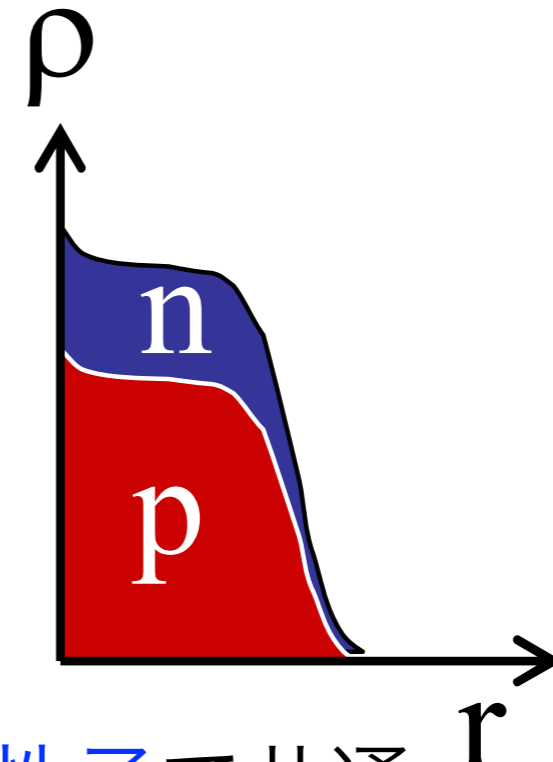
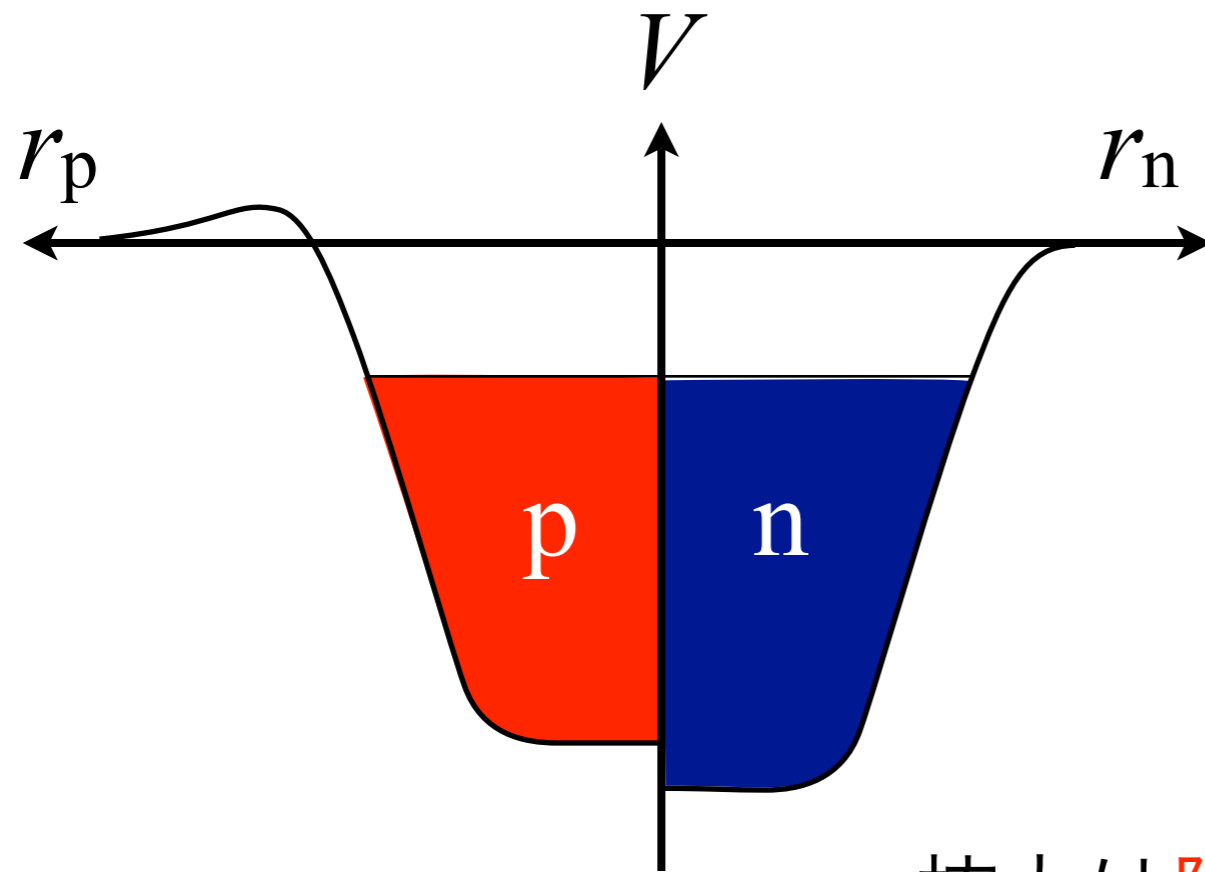
● 原子核        s p d f g h i j k .....

- 原子核ではスピン軌道結合 ( $j = l + s$ ) が大きい。
- 原子核では  $j$  が大きい準位の方がエネルギーが低くなる。  
(原子の場合と逆)



# 原子核のポテンシャル

# 密度分布



核力は陽子と中性子で共通

陽子のポテンシャルは

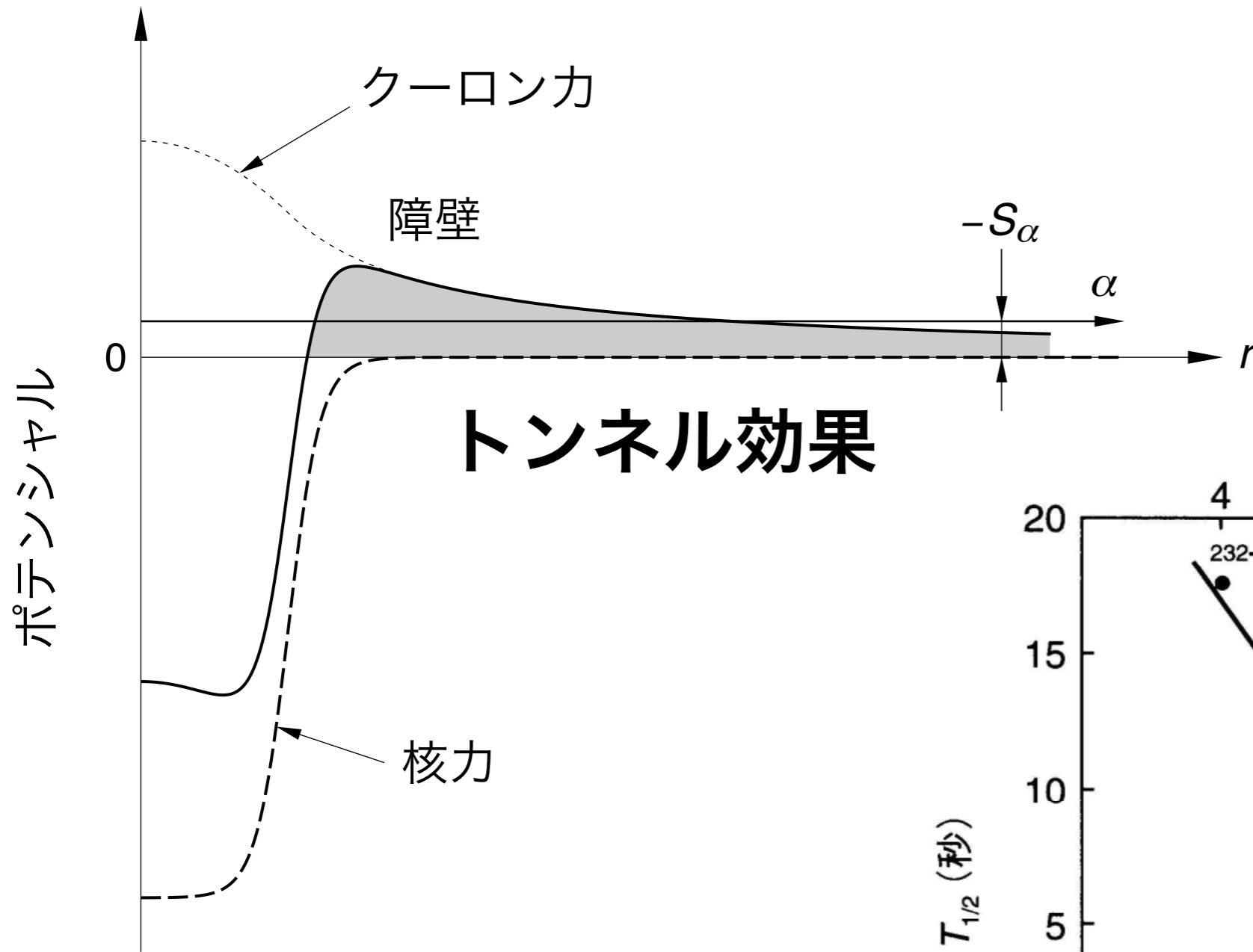
クーロン反発により上昇。  $\propto Z^2 / A^{1/3}$

(特に重い原子核で) 中性子の方が数多く入る。

陽子数も中性子数も魔法数となる (二重閉殻、double magic)

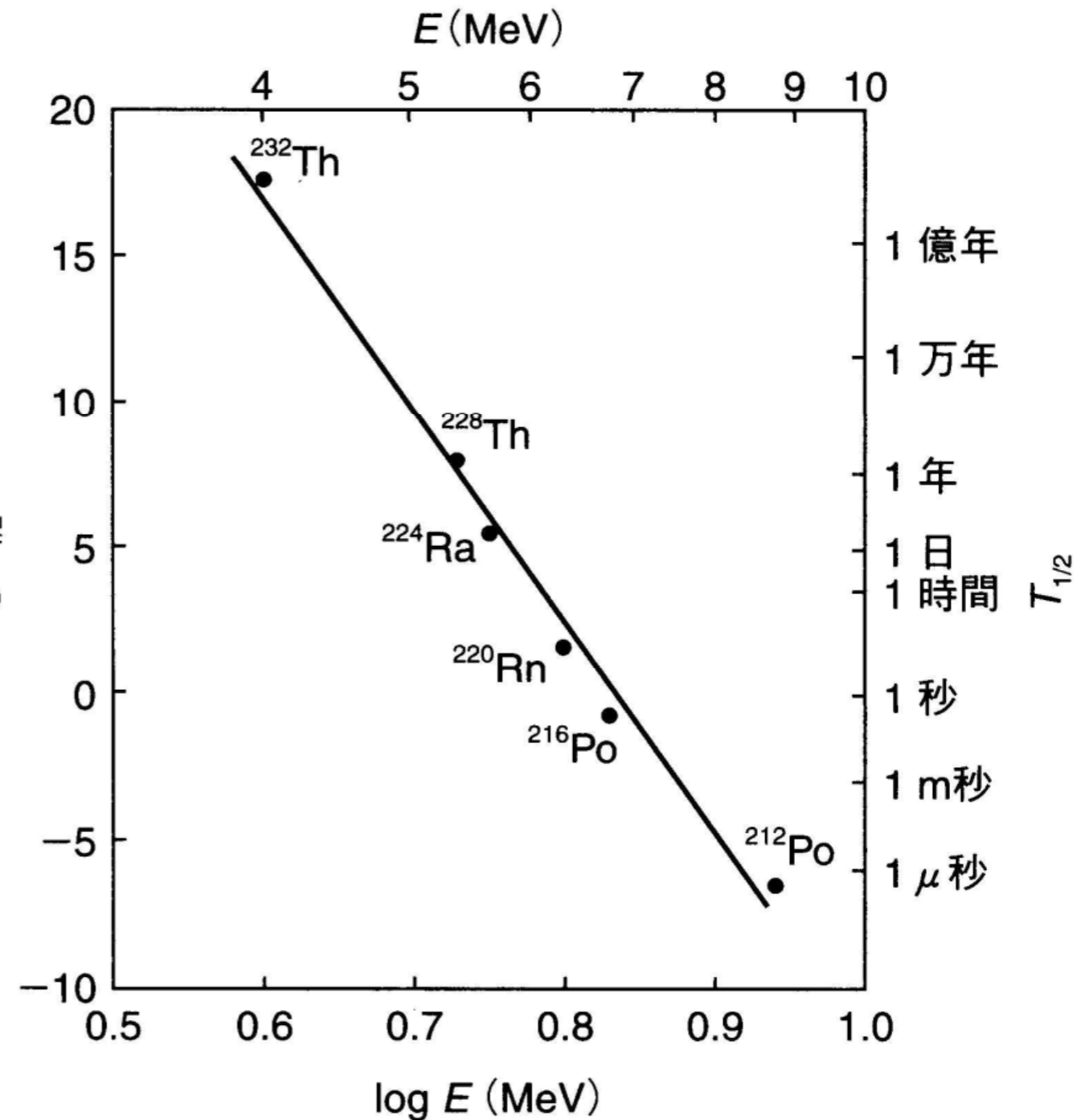
原子核は特に安定。 e.g.  ${}^4_2\text{He}_2$   ${}^{16}_8\text{O}_8$   ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$   ${}^{48}_{20}\text{Ca}_{28}$   ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$

# α 壊変 (崩壊)

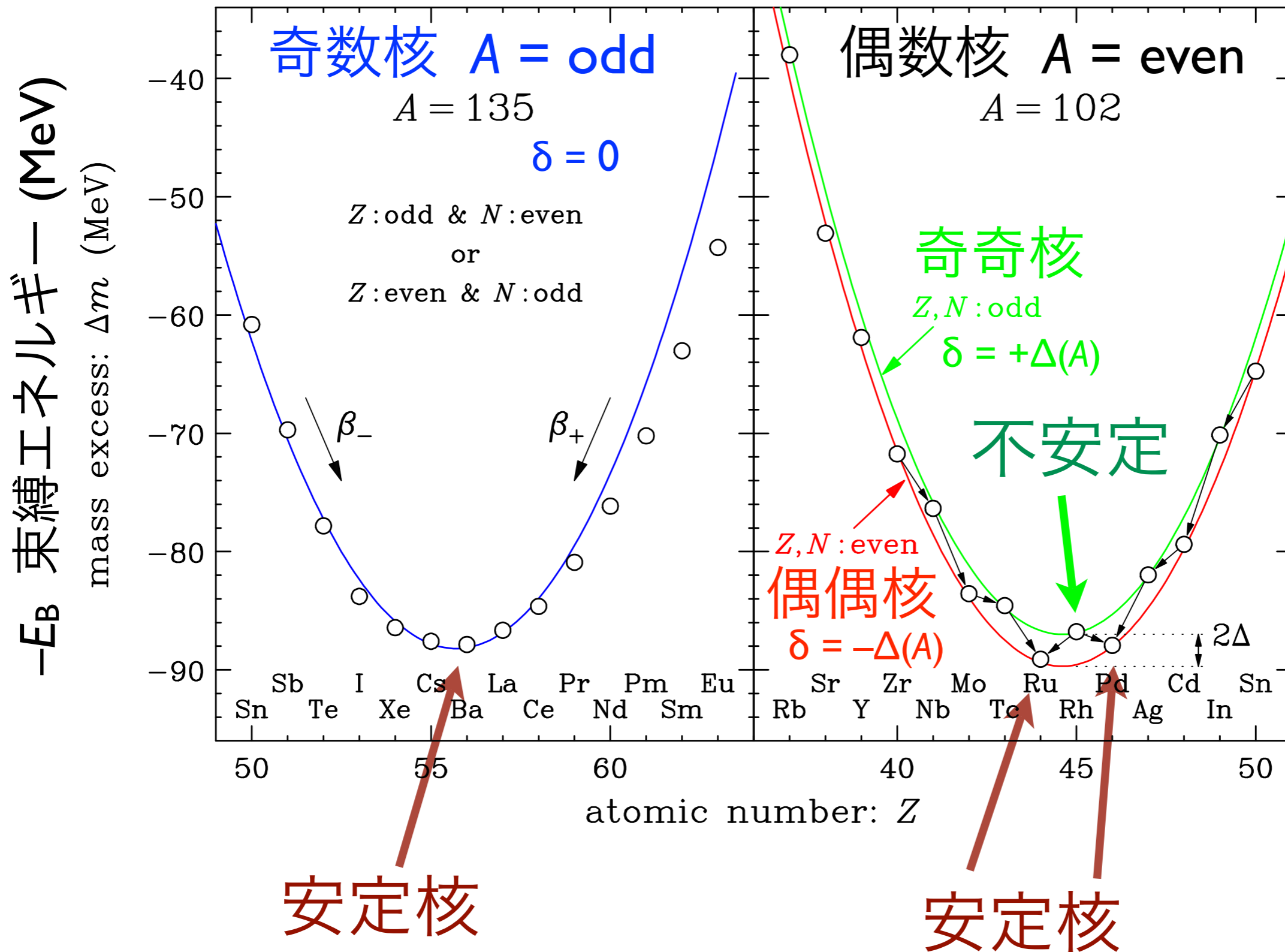


## Geiger-Nuttall law Gamow's theory

$^{232}\text{Th}$  の壊変に伴って生じる  $\alpha$  放出核種の半減期  $T_{1/2}$  と  $\alpha$  線の最大エネルギー  $E$  の関係。縦軸、横軸とも二つの表示単位で示されている

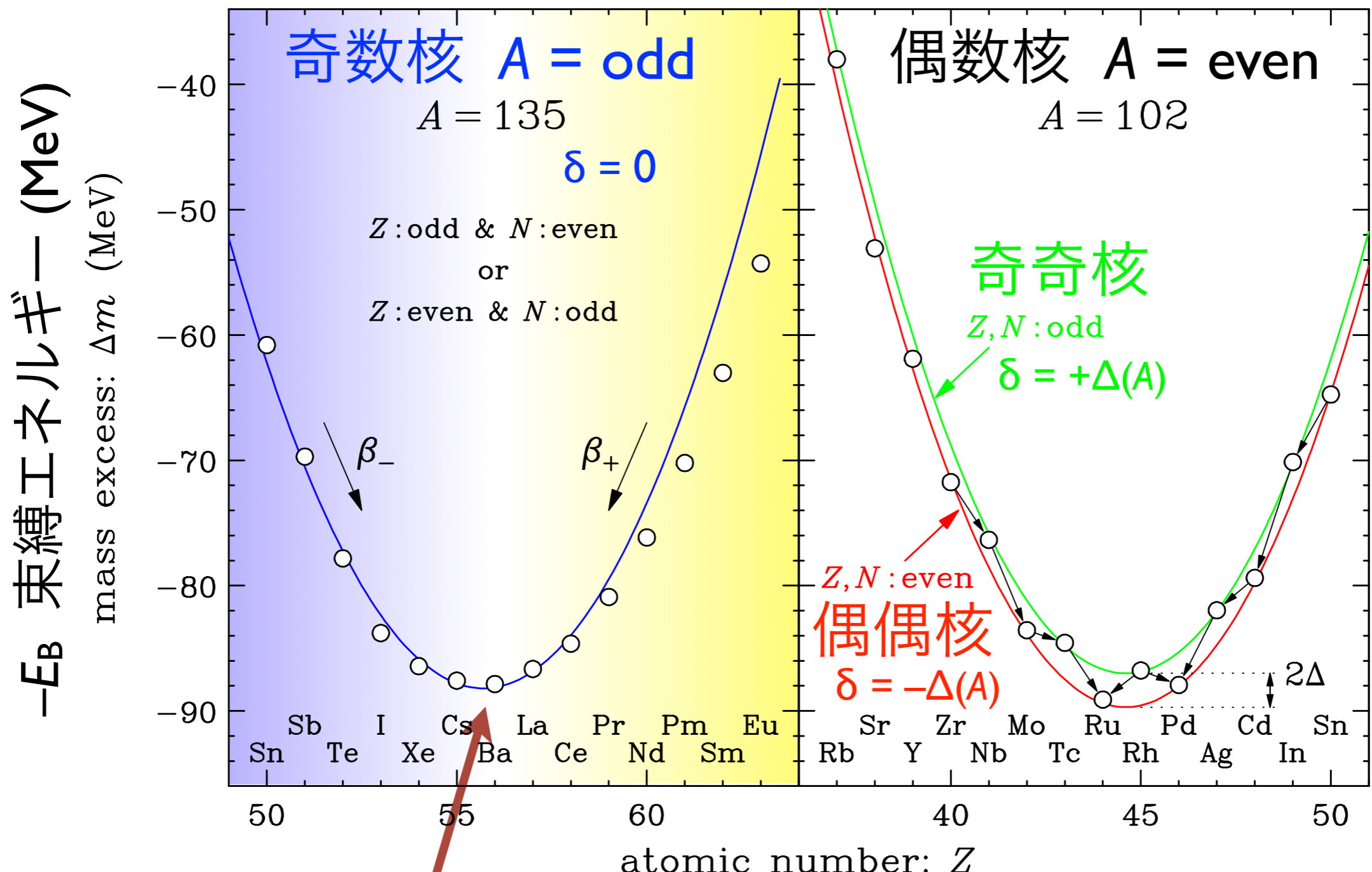


# 原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

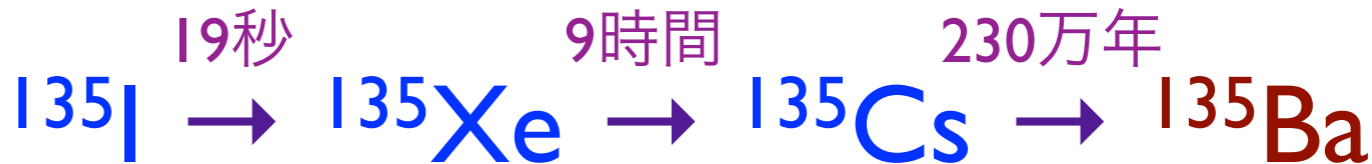


安定核の 60% は偶偶核。安定な奇奇核は 4 つのみ。  ${}^2_1\text{H}_1$   ${}^6_3\text{Li}_3$   ${}^{10}_5\text{Be}_5$   ${}^{14}_7\text{N}_7$

# 原子核束縛エネルギーの偶奇依存性

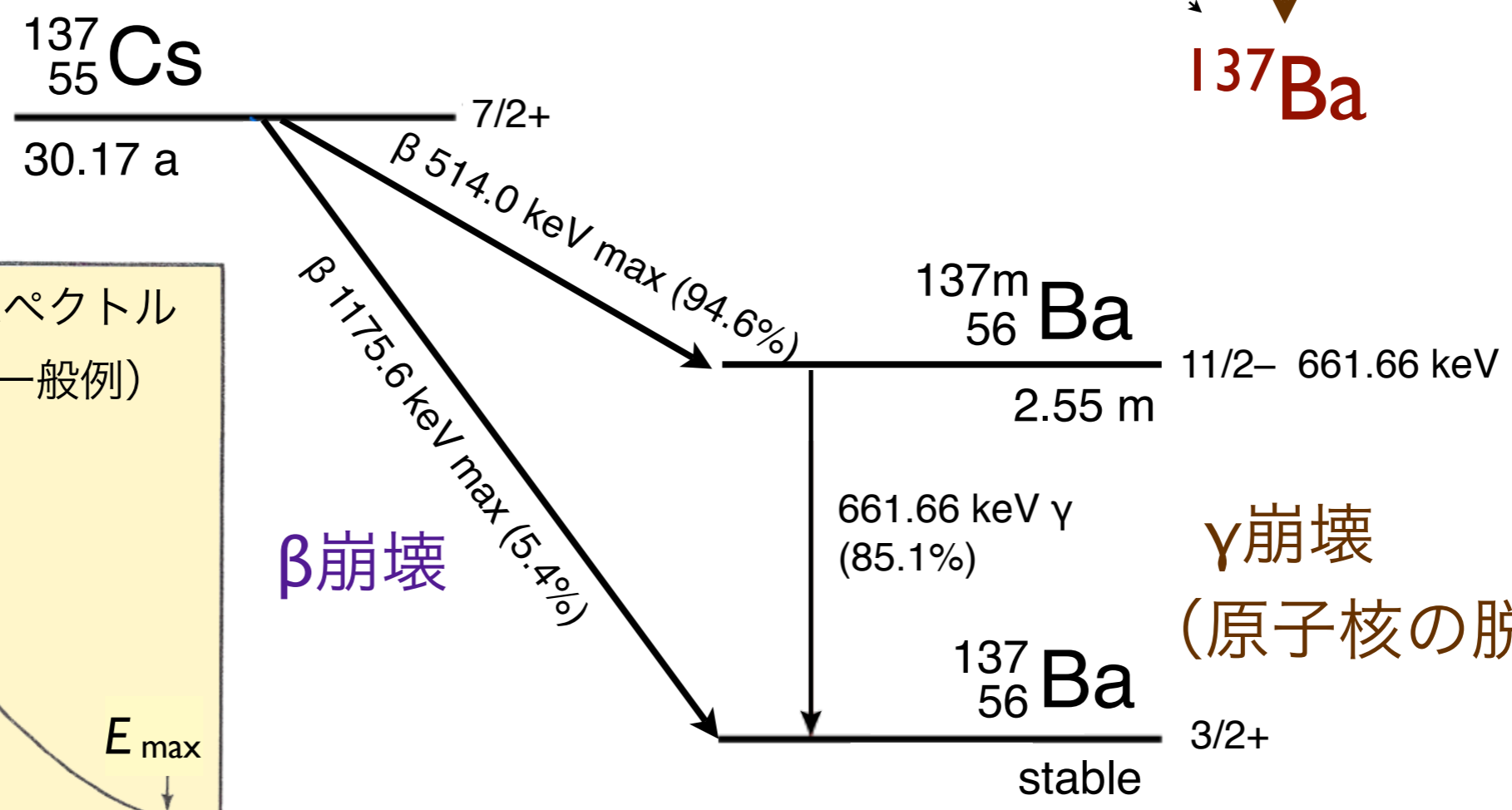


安定核



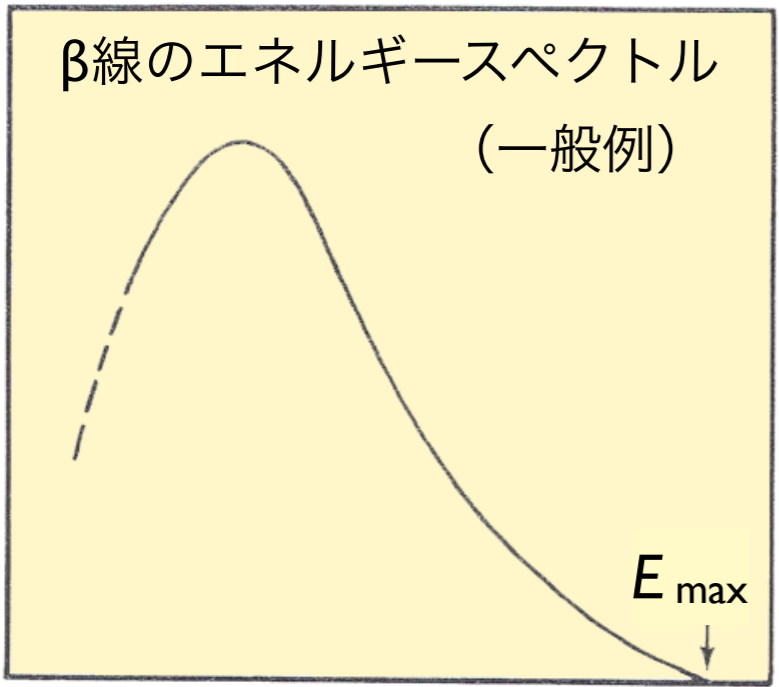
原子炉内では  $^{135}\text{Xe} + n \rightarrow ^{136}\text{Xe}$  (中性子捕獲反応)

中性子過剰核は  $\beta^-$  壊変 (崩壊) を繰り返しながら 安定核までたどり着く。



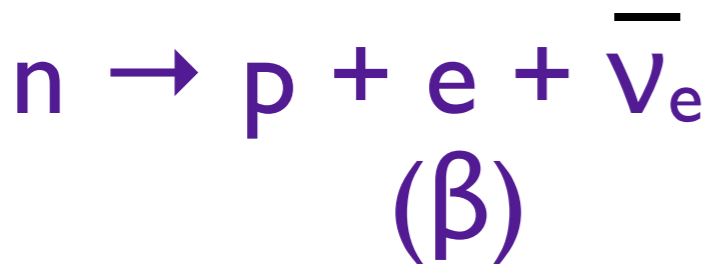
$\gamma$ 崩壊  
(原子核の脱励起)

粒子数の分布

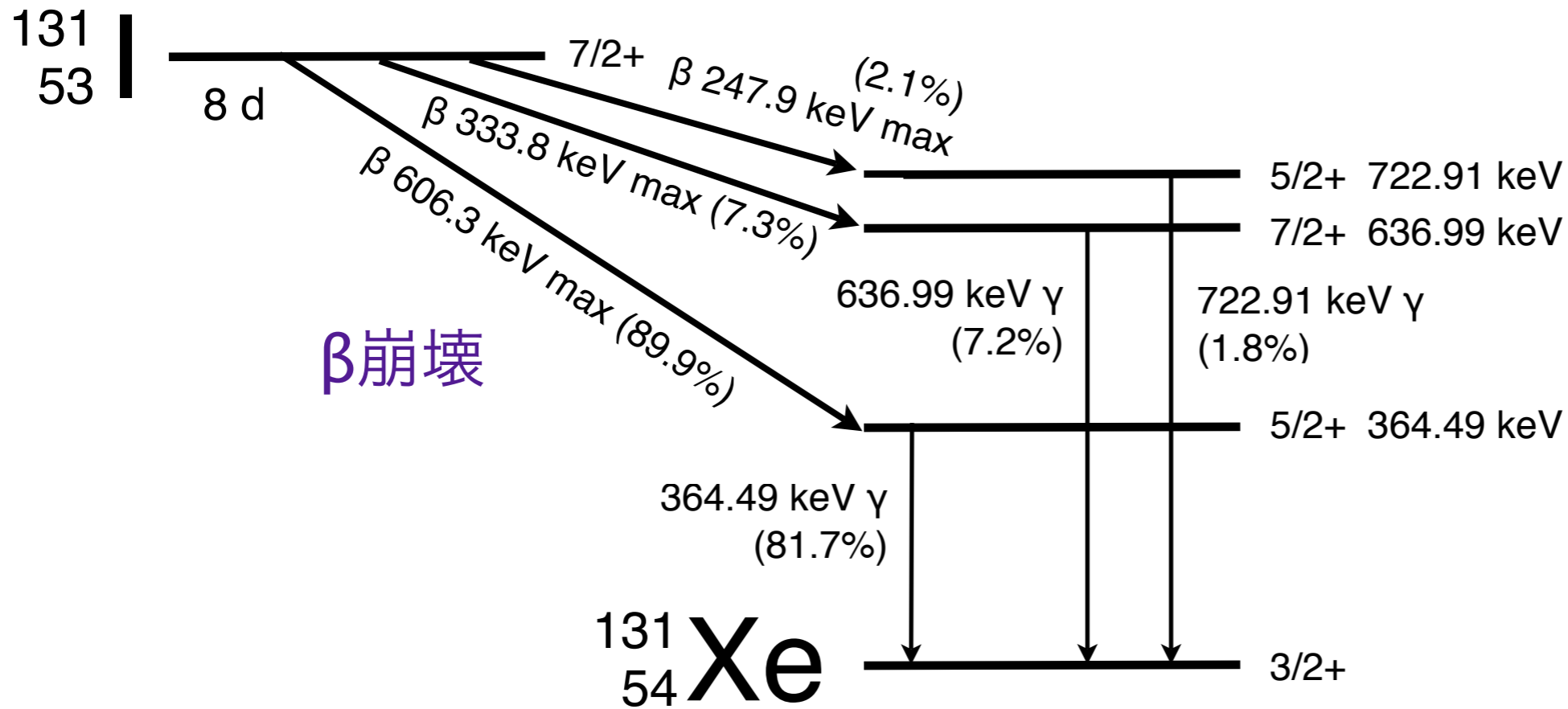
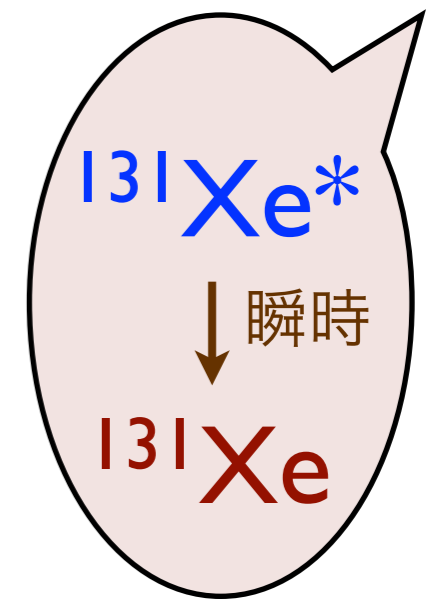
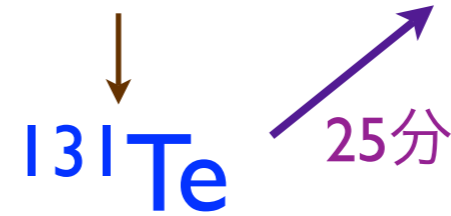


エネルギー  $E_{\beta}$

$\beta$ 線 (連続スペクトル)



$\gamma$ 線 (定まったエネルギー)



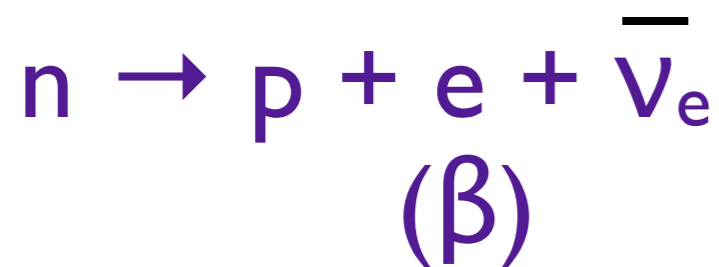
β崩壊

γ線：原子核の脱励起

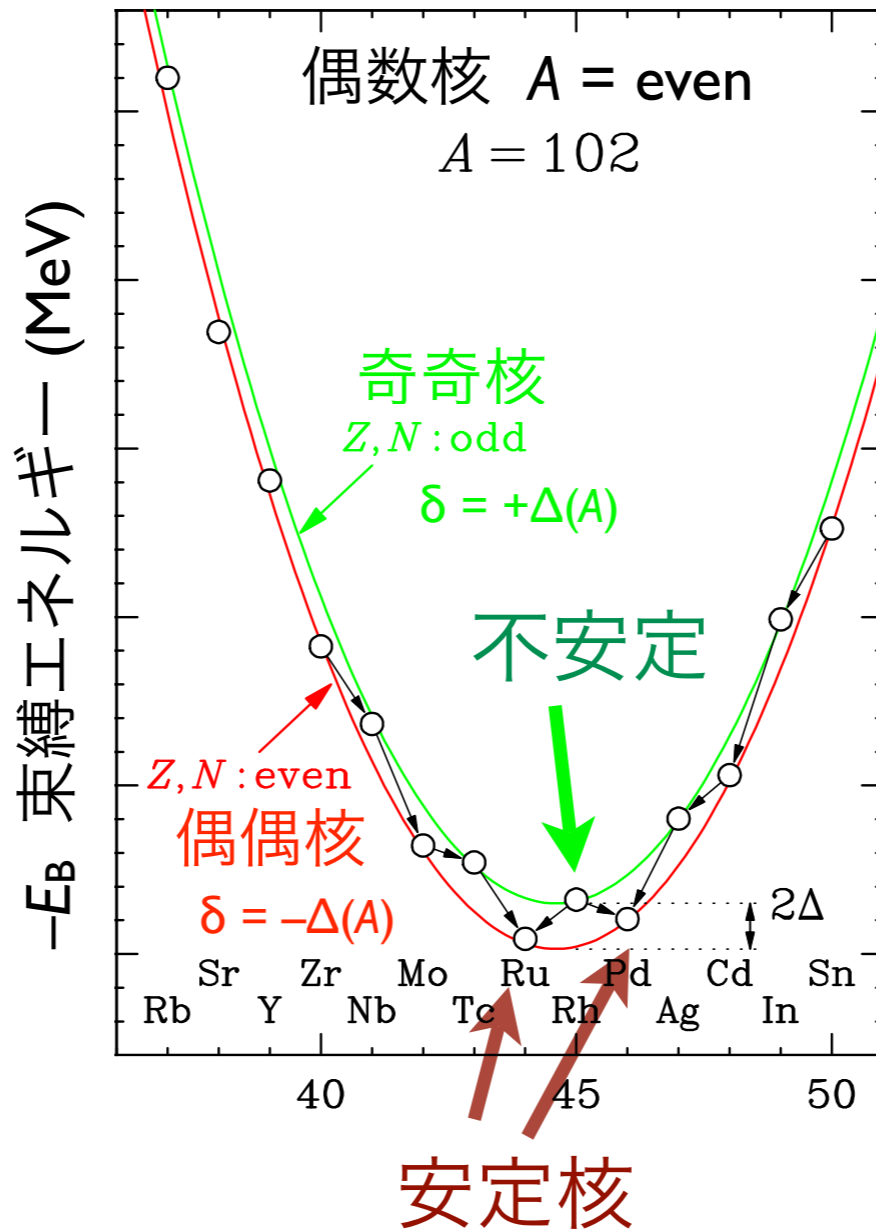
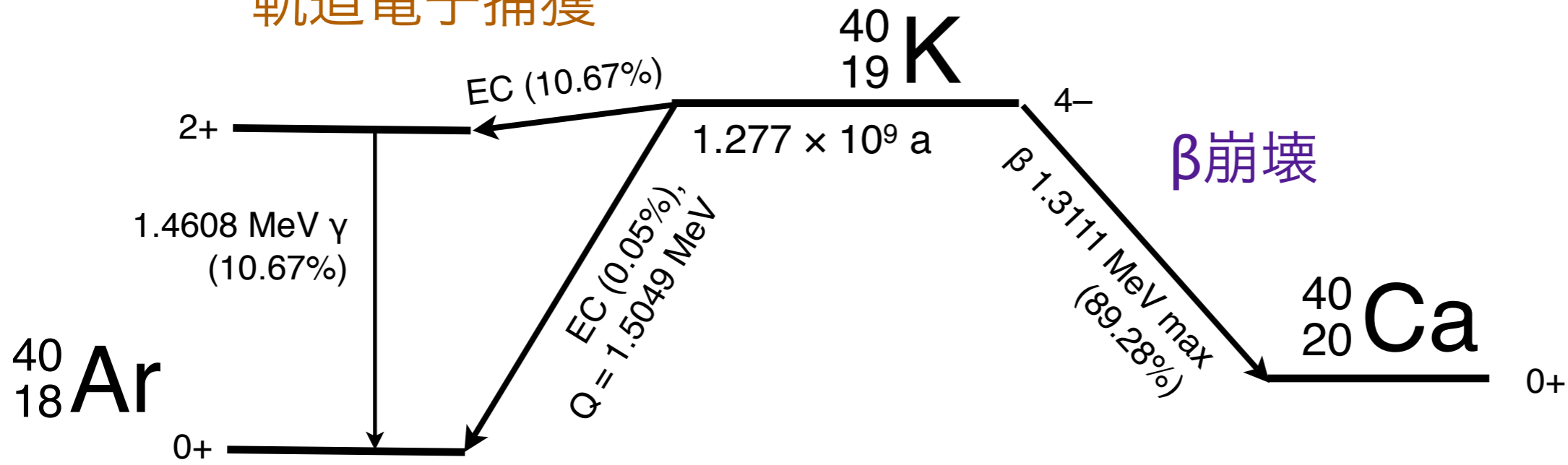


γ線（定まったエネルギー）

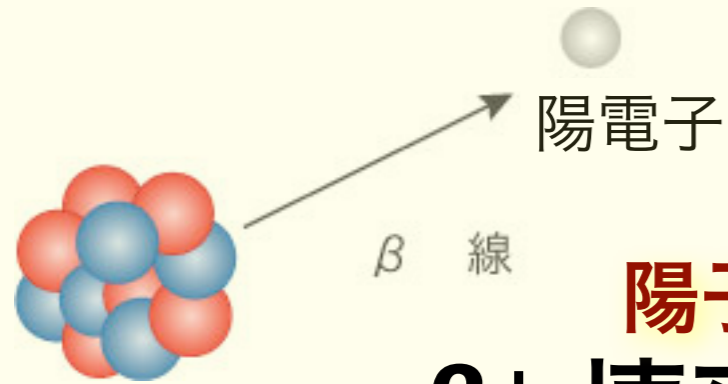
β線（連続スペクトル）



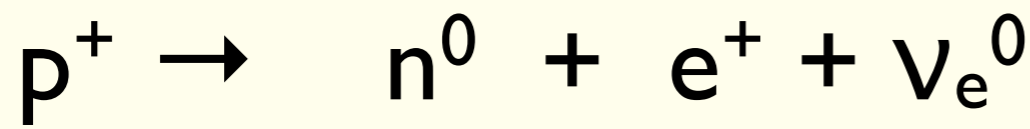
# 軌道電子捕獲



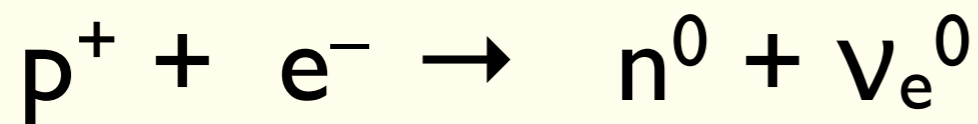
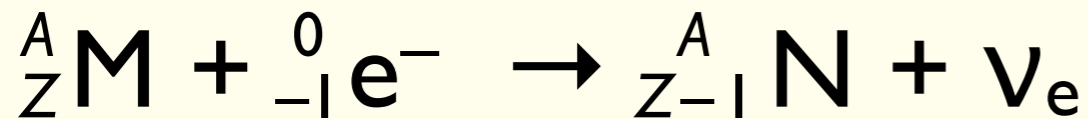
100 keV ~ MeV



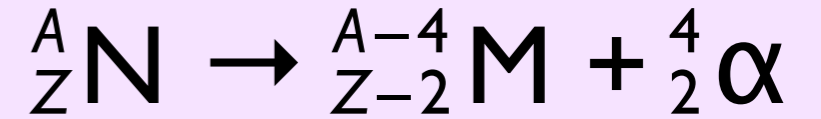
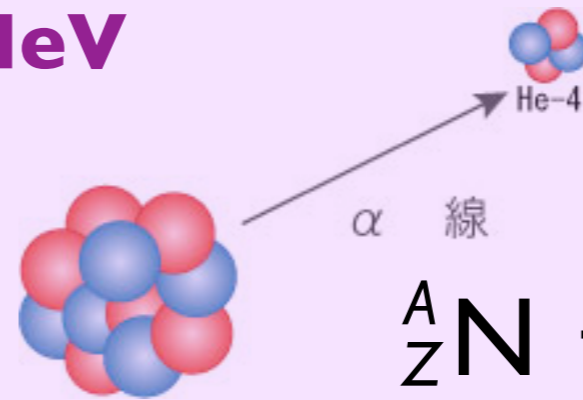
陽子過剩核  
 **$\beta^+$  壞變 (崩壞)**



**軌道電子捕獲 (EC)**

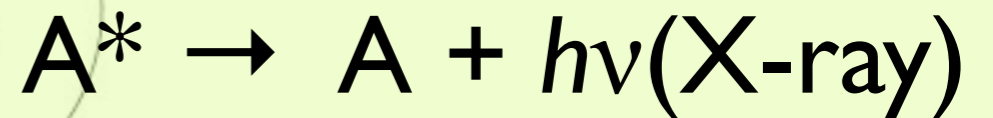
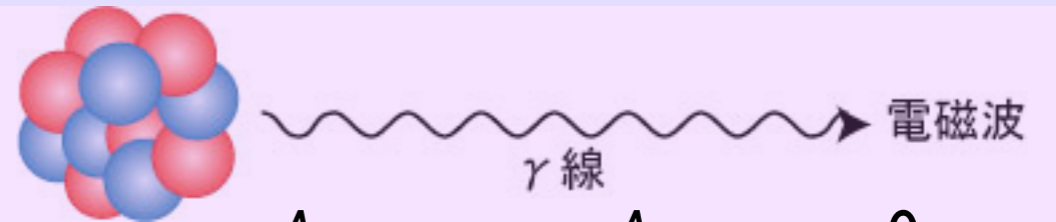
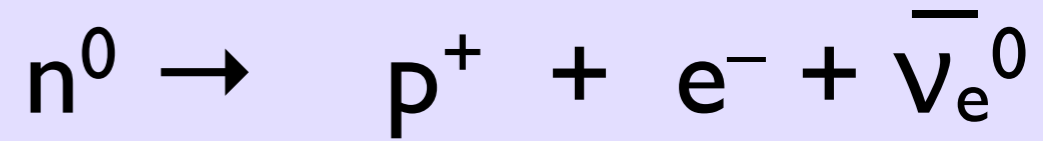
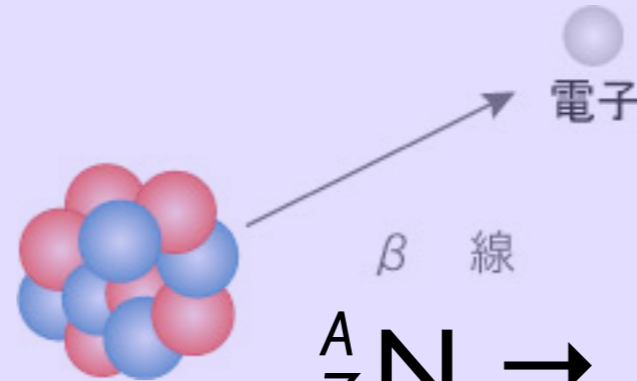


原子核 N



中性子過剩核

**$\beta^-$  壞變 (崩壞)**

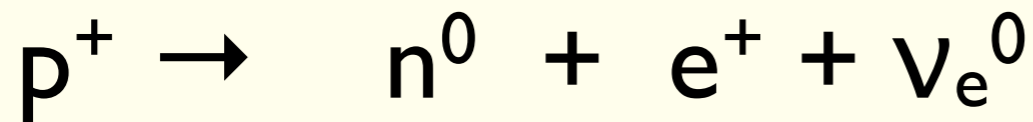


原子 A 10 ~ 100 keV

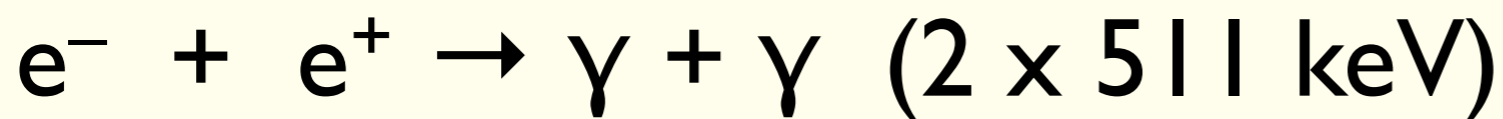


連続スペクトル  
(エネルギー分布)

# β<sup>+</sup> 壊変 (崩壊)

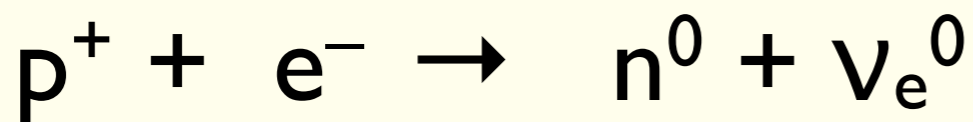
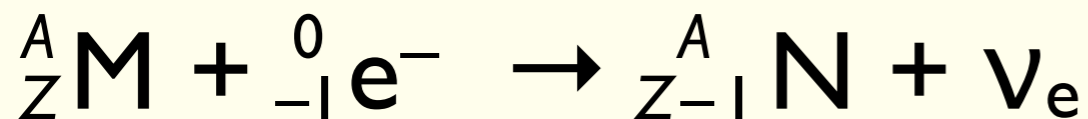


# 陽電子消滅

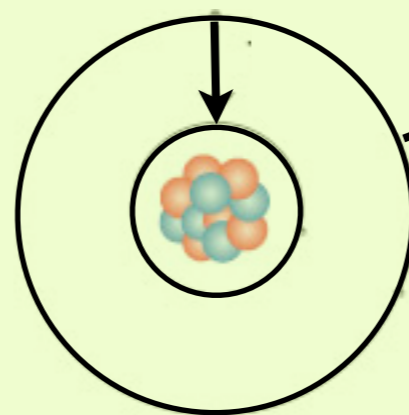
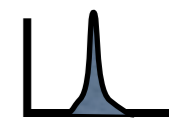
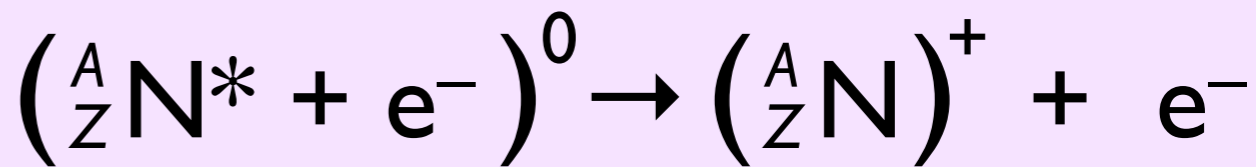
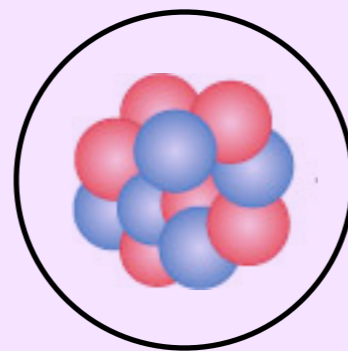


線スペクトル  
(定まったエネルギー)

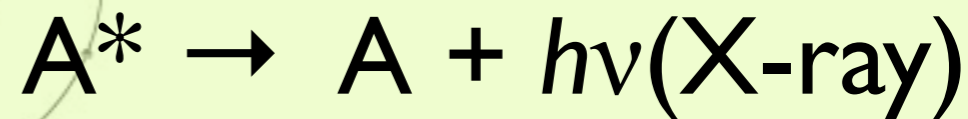
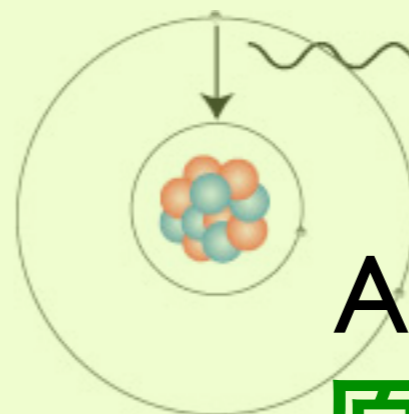
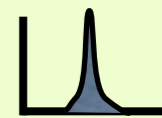
# 軌道電子捕獲 (EC)



# 内部転換 (IC)



**Auger 電子**

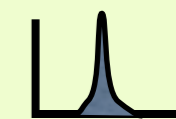


**原子 A 10 ~ 100 keV**

電磁波

X線

**特性X線**



# PET (Positron Emission Tomography) 陽電子断層撮影法


組織の”はたらき”を知る

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




放射線医療：診断

$e^+$

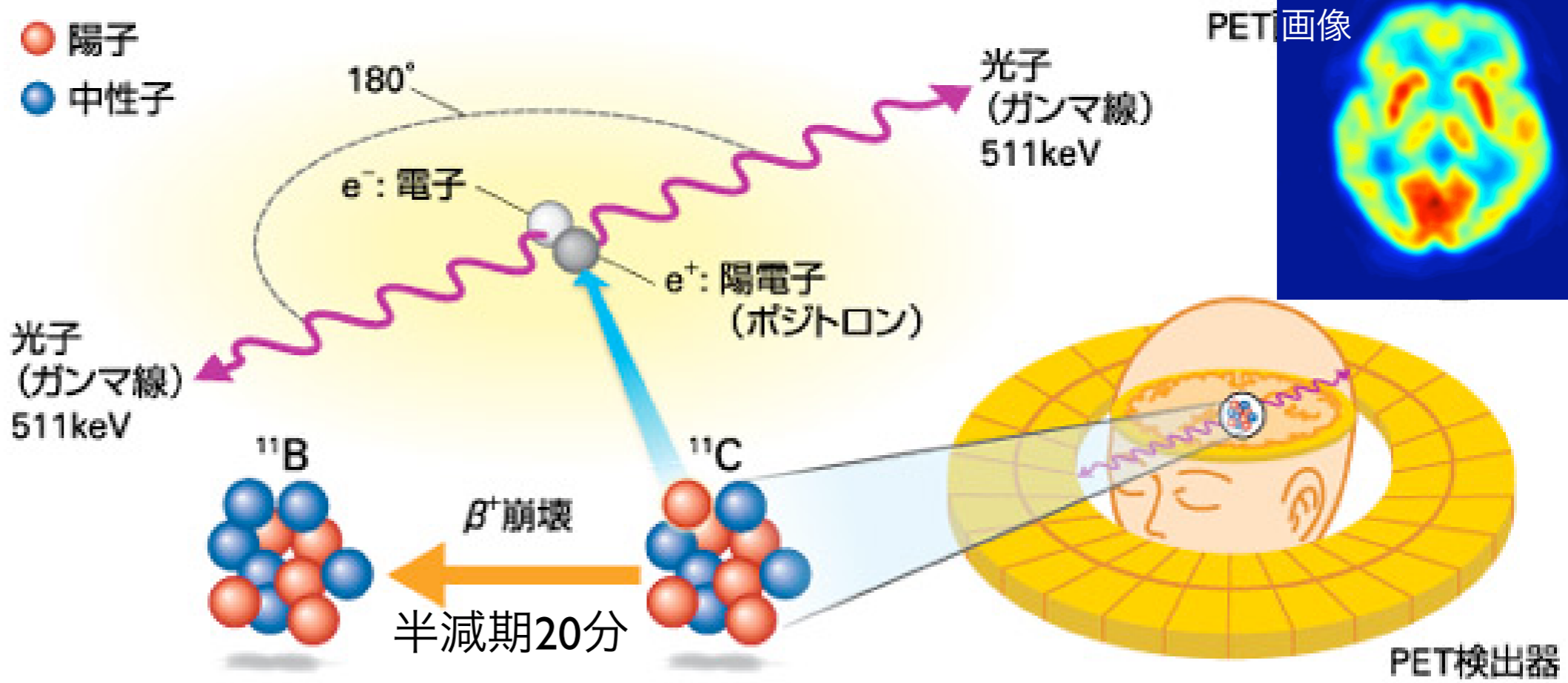


陽電子 positron

電子 electron



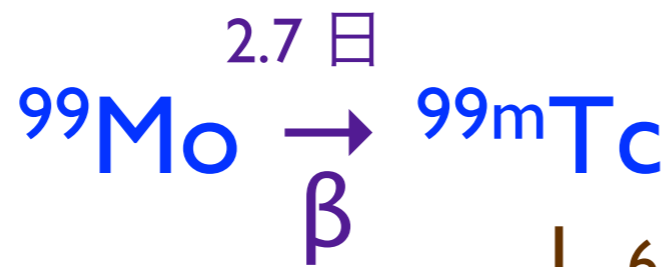
$e^-$



**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 ( $^{11}\text{C}$ ) はホウ素 11 ( $^{11}\text{B}$ ) 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。

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

海外の研究用原子炉  
で生成・空輸



核医学検査  
(投与)



幻のニッポニウム (小川正孝)

安定同位体が存在しない元素

テクネチウム  ${}_{43}\text{Tc}$

プロメチウム  ${}_{61}\text{Tc}$

ビスマス  ${}_{83}\text{Bi}$  以上の原子番号の元素

安定同位体が 1 つだけの元素

${}_{9}^{19}\text{F}$   ${}_{11}^{23}\text{Na}$   ${}_{59}^{27}\text{Co}$   ${}_{53}^{127}\text{I}$

${}_{55}^{133}\text{Cs}$   ${}_{79}^{197}\text{Au}$  など 26 元素

安定同位体が多数

112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 124  ${}_{50}\text{Sn}$

## ■エックス線を発見



1895年、ドイツの物理学者レントゲンは、真空放電の実験中に黒いボール紙で覆われた放電管の電極からボール紙を通り抜け、目に見えないが写真乾板を感光させ、蛍光物質を光らせる性質を持った線を発見しました。この正体の分からないものを「ナゾの」という意味でx(エックス)線と名づけました。



ヴィルヘルム・レントゲン  
(1845-1923)

## ■エックス線を発見

1896年、フランスの物理学者ベクレルは、写真乾板の上に薄い銅の十字架を置き、その上にウラン化合物の結晶を乗せて机の引き出しにしまってしまいました。後で乾板を現像すると、十字架の形がはっきりと写っていました。ウラン原子そのものに光を出す性質があると気づいた彼は、この線をベクレル線(後にアルファ( $\alpha$ )線とベータ( $\beta$ )線であることが判明)と名づけ、発表しました。



アンリ・ベクレル  
(1852-1908)

## ■放射性元素を発見

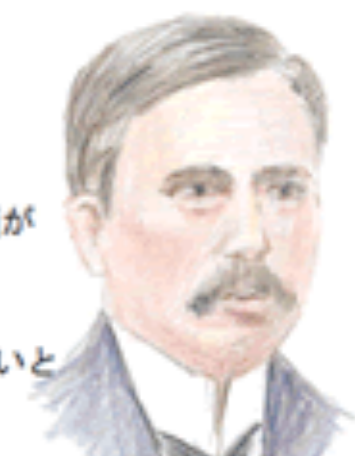
ベクレルの研究に刺激を受けたキュリー夫人は、夫のピエールとともにウランの性質を調べました。1898年にはウラン化合物の400倍もの感光作用を持つ新元素・ポロニウムを発見。この名前は、夫人の祖国であるポーランドにちなんでつけられた。彼女は、「放射線」「放射能」の名づけ親でもあります。



マリー・キュリー  
(1867-1934)

## ■放射性元素を発見

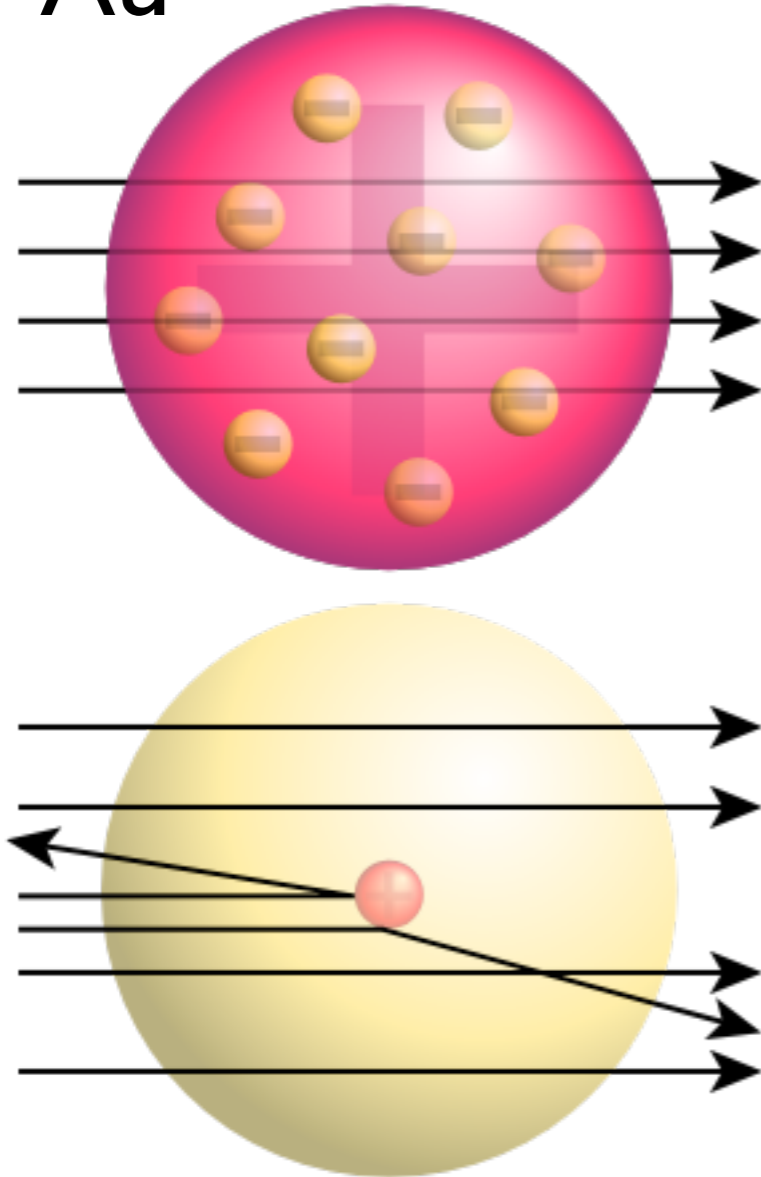
イギリスの物理学者ラザフォードは、1903年に放射性物質のラジウムを使った実験で、原子の種類が変わるときに3種類の放射線が出ることを知り、それぞれにアルファ( $\alpha$ )線、ベータ( $\beta$ )線、ガンマ( $\gamma$ )線と名づけました。原子は変わらないと信じられていた当時、この発見は大きな波紋を投げかけました。



アーネスト・ラザフォード  
(1871-1937)

# ラザフォード散乱

$\alpha + \text{Au}$



ラザフォードの原子模型

# 初の核変換実験

窒素ガス中において、Po からの  $\alpha$ 線の到達距離の実験をしていた。



何らかの粒子が 40 cm 先の蛍光版を光らせた。  
( $\alpha$ 線の到達距離は 1 気圧空气中で数 cm 程度)



E. Rutherford



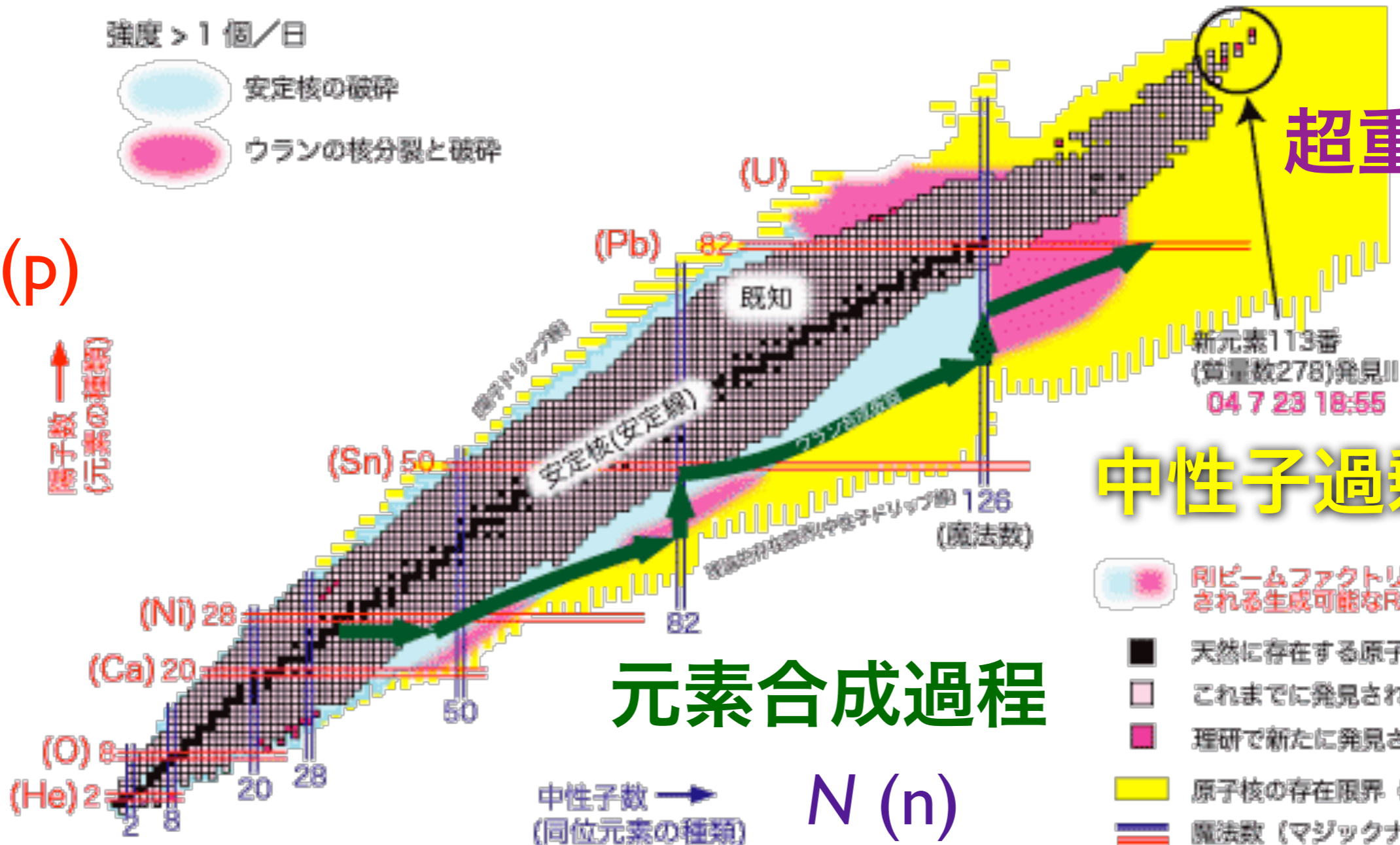
RIKEN

強度 > 1 個/日

- 安定核の破砕
- ウランの核分裂と破砕

Z (p)

↑ 原子種 (元素の種類)

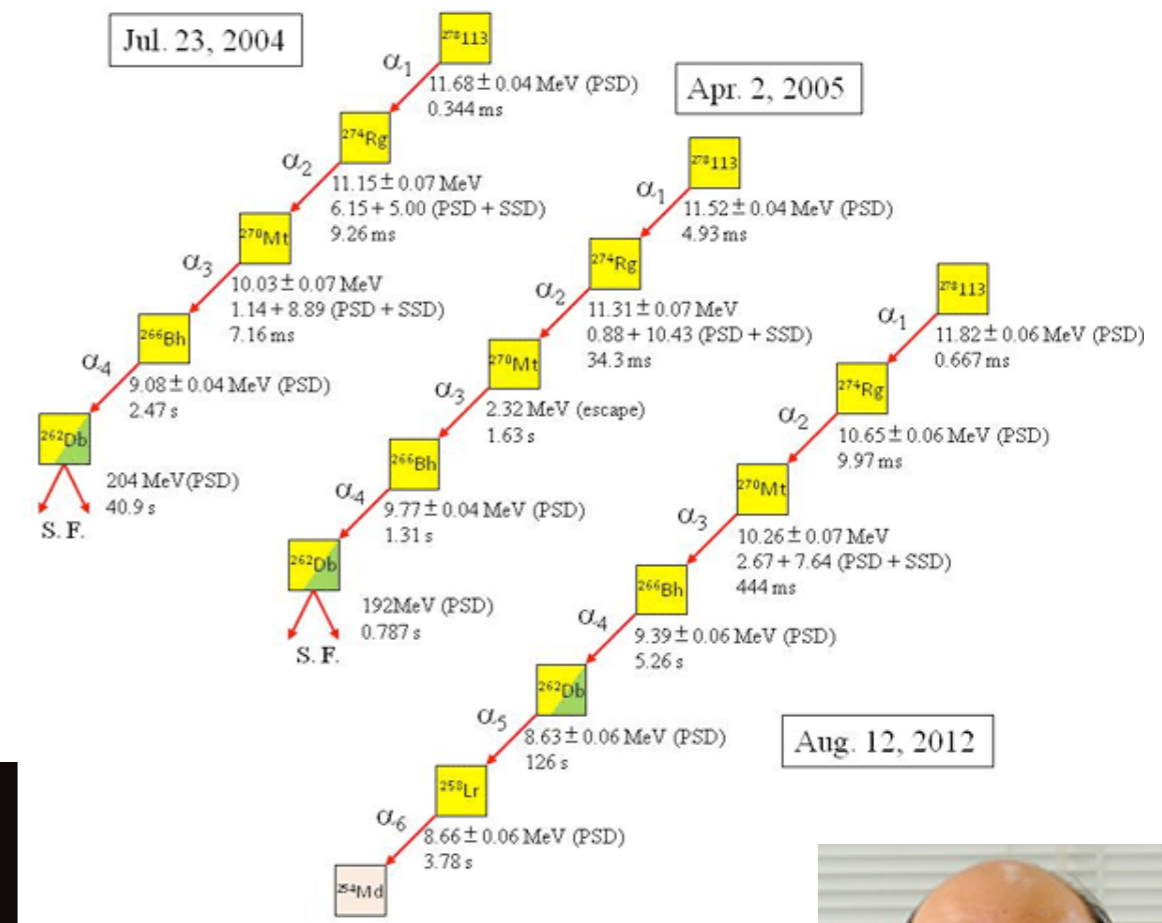
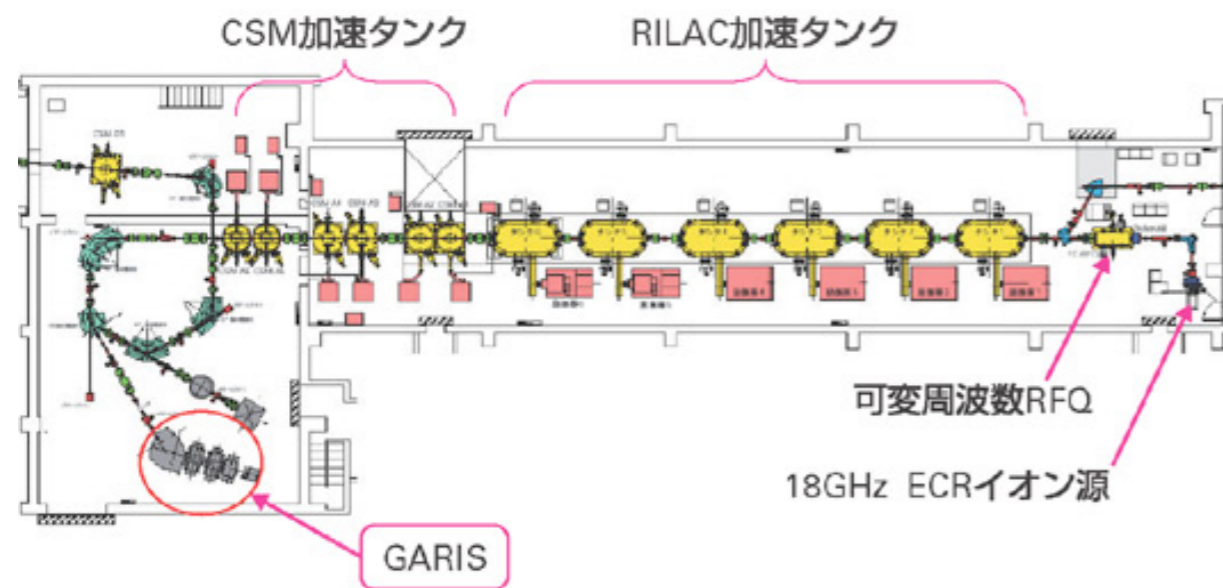


- RIビームファクトリーで拡大される生成可能なRIの領域
- 天然に存在する原子核
- これまでに発見されたRI
- 理研で新たに発見されたRI
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- 超新星爆発でつくられた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋

Nuclear Chart 核図表

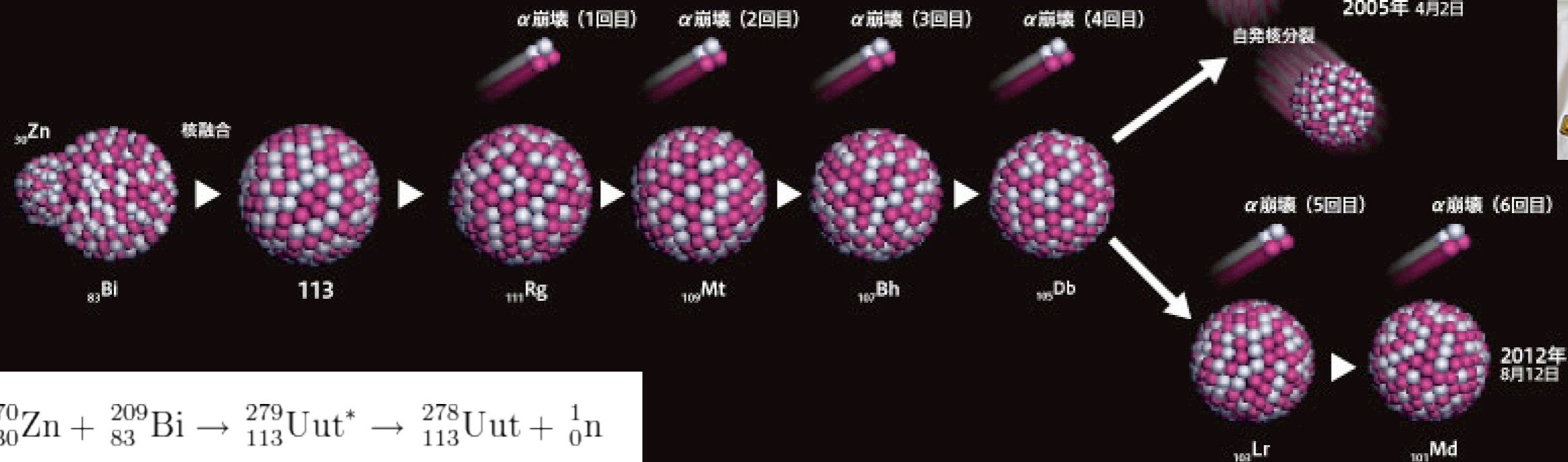
# 超重元素 $_{113}\text{Uut}$ (ジャポニウム Jp ?) 生成

2004, 05, 12年、理研 森田浩介氏ら



## $^{278}\text{113}$ の合成と崩壊の様子

原子番号30の亜鉛 ( $^{70}\text{Zn}$ ) と原子番号83のビスマス ( $^{209}\text{Bi}$ ) が核融合を起こし、原子番号113の $^{278}\text{113}$ が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 ( $^{278}\text{113}$ ) は、4回の $\alpha$ 崩壊を繰り返し、原子番号105のドブニウム ( $^{262}\text{Db}$ ) は自発核分裂を起こして2個の原子核となった。2012年に合成した $^{278}\text{113}$ は、 $^{262}\text{Db}$ からさらに2回の $\alpha$ 崩壊を繰り返し、原子番号103のローレンシウム ( $^{258}\text{Lr}$ )、原子番号101のメンデレビウム ( $^{254}\text{Md}$ ) となった。3個の $^{278}\text{113}$ の崩壊の様子から、113番元素の平均寿命は2ミリ秒であることが分かった。



# 113 Uut (ジャポニウム Jp ??) 生成 2004年 理研 森田浩介氏ら

## 周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 <b>H</b> 1.0079	Atomic Sym Mass																2 2 <b>He</b> 4.0026
2	3 3 <b>Li</b> 6.941	4 4 <b>Be</b> 9.0121	C 固体 Hg 液体 H 気体 Rf Unknown										5 5 <b>B</b> 10.811	6 6 <b>C</b> 12.010	7 7 <b>N</b> 14.006	8 8 <b>O</b> 15.999	9 9 <b>F</b> 18.998	10 10 <b>Ne</b> 20.180
3	11 11 <b>Na</b> 22.989	12 12 <b>Mg</b> 24.305	金属 アルカリ金属 アルカリ土類金属 ランタノイド 希ガス										13 13 <b>Al</b> 26.981	14 14 <b>Si</b> 28.085	15 15 <b>P</b> 30.973	16 16 <b>S</b> 32.065	17 17 <b>Cl</b> 35.453	18 18 <b>Ar</b> 39.948
4	19 19 <b>K</b> 39.098	20 20 <b>Ca</b> 40.078	21 21 <b>Sc</b> 44.955	22 22 <b>Ti</b> 47.867	23 23 <b>V</b> 50.941	24 24 <b>Cr</b> 51.996	25 25 <b>Mn</b> 54.938	26 26 <b>Fe</b> 55.845	27 27 <b>Co</b> 58.933	28 28 <b>Ni</b> 58.693	29 29 <b>Cu</b> 63.546	30 30 <b>Zn</b> 65.38	31 31 <b>Ga</b> 69.723	32 32 <b>Ge</b> 72.64	33 33 <b>As</b> 74.921	34 34 <b>Se</b> 78.96	35 35 <b>Br</b> 79.904	36 36 <b>Kr</b> 83.80
5	37 37 <b>Rb</b> 85.467	38 38 <b>Sr</b> 87.62	39 39 <b>Y</b> 88.905	40 40 <b>Zr</b> 91.224	41 41 <b>Nb</b> 92.906	42 42 <b>Mo</b> 95.96	43 43 <b>Tc</b> (98)	44 44 <b>Ru</b> 101.07	45 45 <b>Rh</b> 102.91	46 46 <b>Pd</b> 106.42	47 47 <b>Ag</b> 107.87	48 48 <b>Cd</b> 112.41	49 49 <b>In</b> 114.81	50 50 <b>Sn</b> 118.71	51 51 <b>Sb</b> 121.76	52 52 <b>Te</b> 127.60	53 53 <b>I</b> 126.90	54 54 <b>Xe</b> 131.29
6	55 55 <b>Cs</b> 132.90	56 56 <b>Ba</b> 137.32	57-71 57-71 <b>La-Lu</b>	72 72 <b>Hf</b> 178.49	73 73 <b>Ta</b> 180.94	74 74 <b>W</b> 183.84	75 75 <b>Re</b> 186.20	76 76 <b>Os</b> 190.23	77 77 <b>Ir</b> 192.22	78 78 <b>Pt</b> 195.08	79 79 <b>Au</b> 196.96	80 80 <b>Hg</b> 200.59	81 81 <b>Tl</b> 204.38	82 82 <b>Pb</b> 207.2	83 83 <b>Bi</b> 208.98	84 84 <b>Po</b> (209)	85 85 <b>At</b> (210)	86 86 <b>Rn</b> (222)
7	87 87 <b>Fr</b> (223)	88 88 <b>Ra</b> (226)	89-103 89-103 <b>Ac-Lr</b>	104 104 <b>Rf</b> (261)	105 105 <b>Db</b> (262)	106 106 <b>Sg</b> (266)	107 107 <b>Bh</b> (264)	108 108 <b>Hs</b> (277)	109 109 <b>Mt</b> (268)	110 110 <b>Ds</b> (271)	111 111 <b>Rg</b> (272)	112 112 <b>Cn</b> (285)	113 113 <b>Uut</b> (284)	114 114 <b>Uuq</b> (289)	115 115 <b>Uup</b> (288)	116 116 <b>Uuh</b> (292)	117 117 <b>Uus</b> (294)	118 118 <b>Uuo</b> (294)

113 Jp ??  
Japonium ??

116 Lv  
Livermorium

114 Fl  
Flerovium

超重元素  
For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope is in parentheses.

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com>

57 57 <b>La</b> 138.90	58 58 <b>Ce</b> 140.11	59 59 <b>Pr</b> 140.90	60 60 <b>Nd</b> 144.24	61 61 <b>Pm</b> (145)	62 62 <b>Sm</b> 150.36	63 63 <b>Eu</b> 151.96	64 64 <b>Gd</b> 157.25	65 65 <b>Tb</b> 158.92	66 66 <b>Dy</b> 162.50	67 67 <b>Ho</b> 164.93	
89 89 <b>Ac</b> (227)	90 90 <b>Th</b> 232.03	91 91 <b>Pa</b> 231.03	92 92 <b>U</b> 238.02	93 93 <b>Np</b> (237)	94 94 <b>Pu</b> (244)	95 95 <b>Am</b> (243)	96 96 <b>Cm</b> (247)	97 97 <b>Bk</b> (247)	98 98 <b>Cf</b> (251)	99 99 <b>Es</b> (252)	100 100 <b>Fm</b> (257)

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



# 放射性元素の命名 (赤字は加速器・緑字は原子炉・青字は水爆で生成したものの)

性質 :  $_{43}\text{Tc}$ ,  $_{85}\text{At}$ ,  $_{88}\text{Ra}$ ,  $_{89}\text{Ac}$ ,  $_{91}\text{Pa}$

神話 :  $_{61}\text{Pm}$ ,  $_{90}\text{Th}$ ,  $_{92}\text{U}$ ,  $_{93}\text{Np}$ ,  $_{94}\text{Pu}$

発見地や発見者の国名 :

$_{84}\text{Po}$ ,  $_{87}\text{Fr}$ ,  $_{95}\text{Am}$ ,  $_{97}\text{Bk}$ ,  $_{98}\text{Cf}$ ,  $_{105}\text{Db}$ ,  $_{108}\text{Hs}$ ,  $_{110}\text{Ds}$

偉大な科学者名 (発見者でない) :  $_{96}\text{Cm}$ ,  $_{99}\text{Es}$ ,  $_{100}\text{Fm}$ ,  $_{101}\text{Md}$ ,  
 $_{102}\text{No}$ ,  $_{103}\text{Lr}$ ,  $_{104}\text{Rf}$ ,  $_{106}\text{Sg}$ ,  $_{107}\text{Bh}$ ,  $_{109}\text{Mt}$ ,  $_{111}\text{Rg}$ ,  $_{112}\text{Cn}$

## 発見した加速器施設

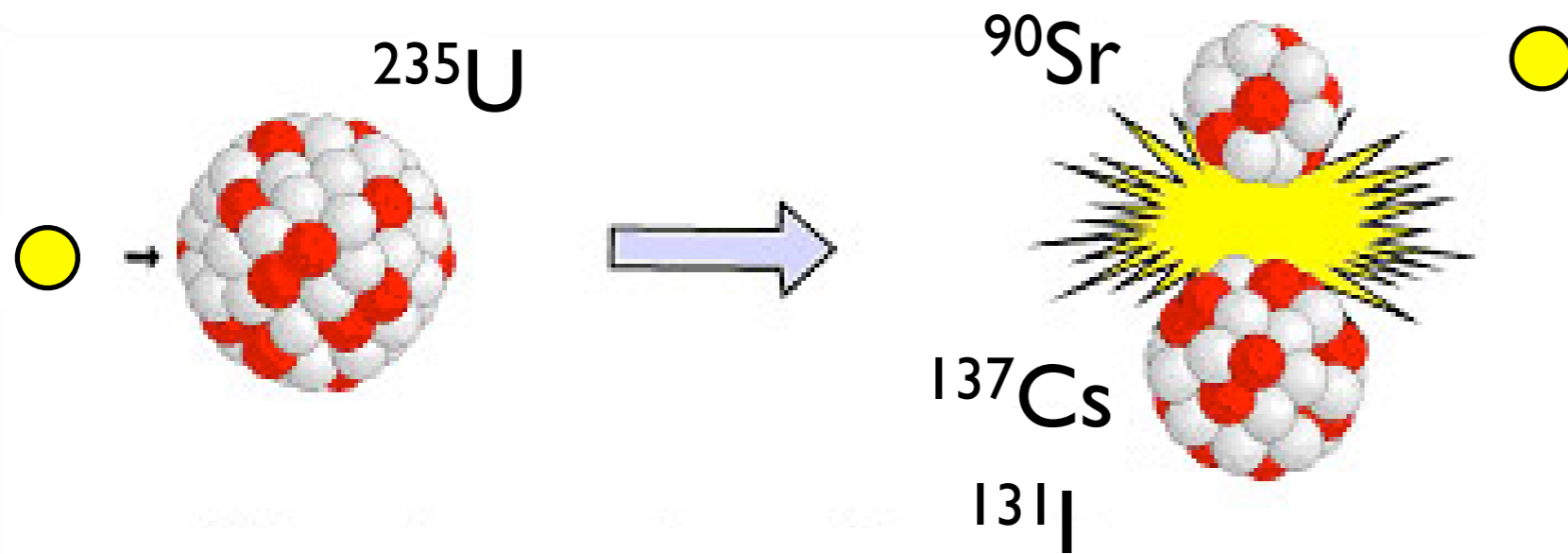
米国 California大 Berkeley校ほか、シーボーグら :

$_{93}\text{Np}$ ,  $_{94}\text{Pu}$ ,  $_{95}\text{Am}$ ,  $_{96}\text{Cm}$ ,  $_{97}\text{Bk}$ ,  $_{98}\text{Cf}$ ,  $_{99}\text{Es}$ ,  $_{100}\text{Fm}$ ,  $_{101}\text{Md}$ ,  $_{102}$ ,  $_{103}\text{Lr}$ ,  $_{104}$ ,  $_{105}$ ,  $_{106}$

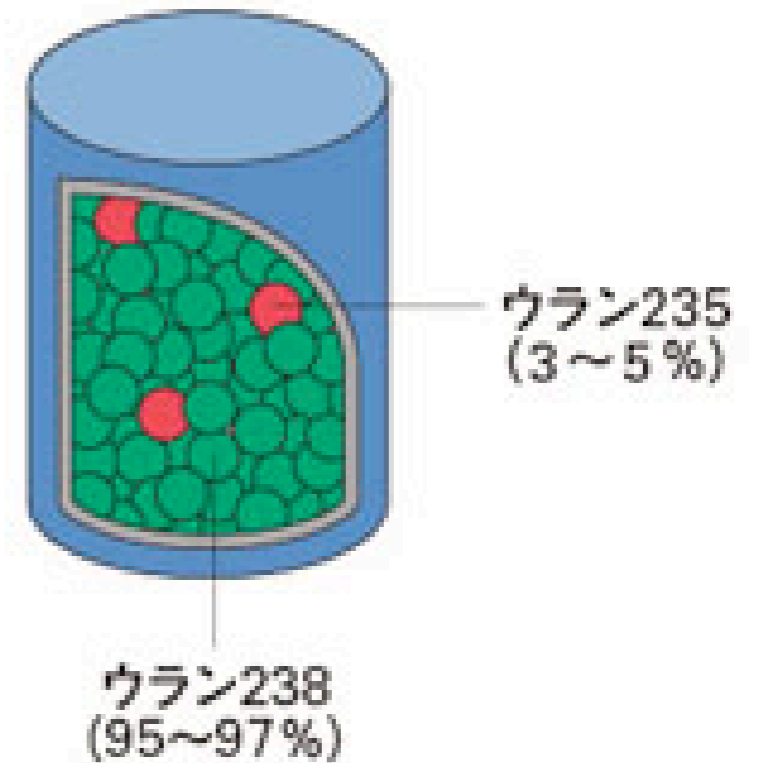
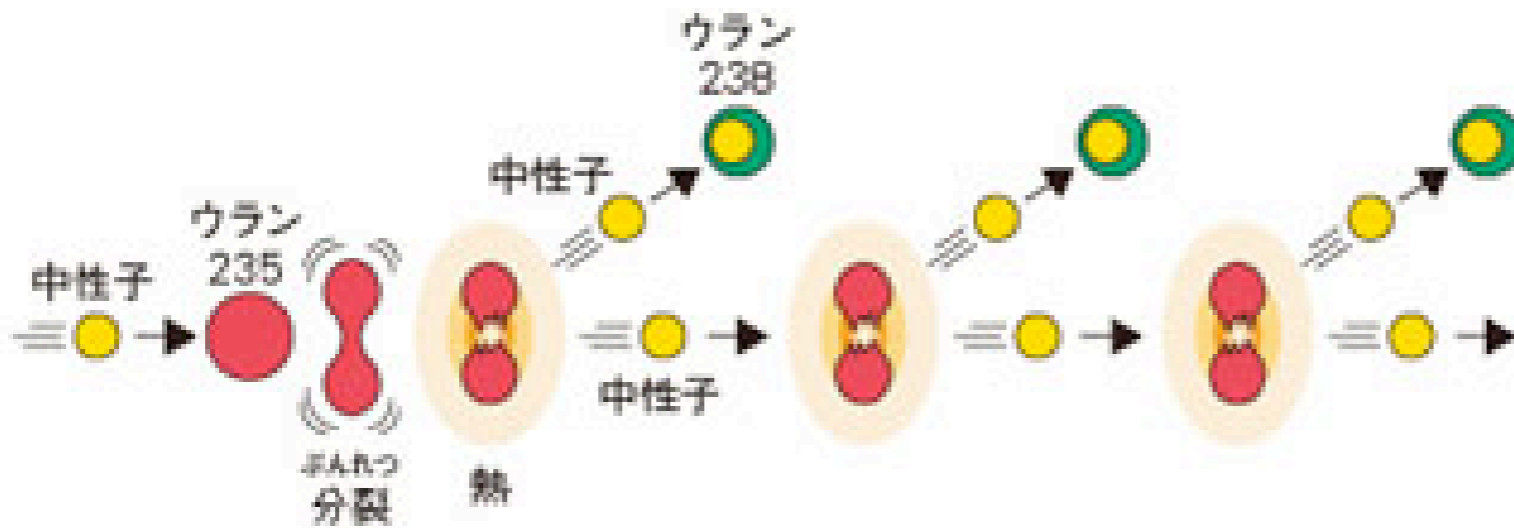
ロシア合同原子核研究所 (Дубна = Dubna):  $_{102}$ ,  $_{104}$ ,  $_{105}\text{Db}$ ,  $_{106}$ ,  $_{107}$ ,  $_{113}$ – $_{118}$

ドイツ重イオン研究所 GSI (Darmstadt) :  $_{107}$ ,  $_{108}\text{Hs}$ ,  $_{109}$ ,  $_{110}\text{Ds}$ ,  $_{111}$ ,  $_{112}$

# 原子力工学



## 原子核分裂反応



中性子 + ウラン **235** / **238**

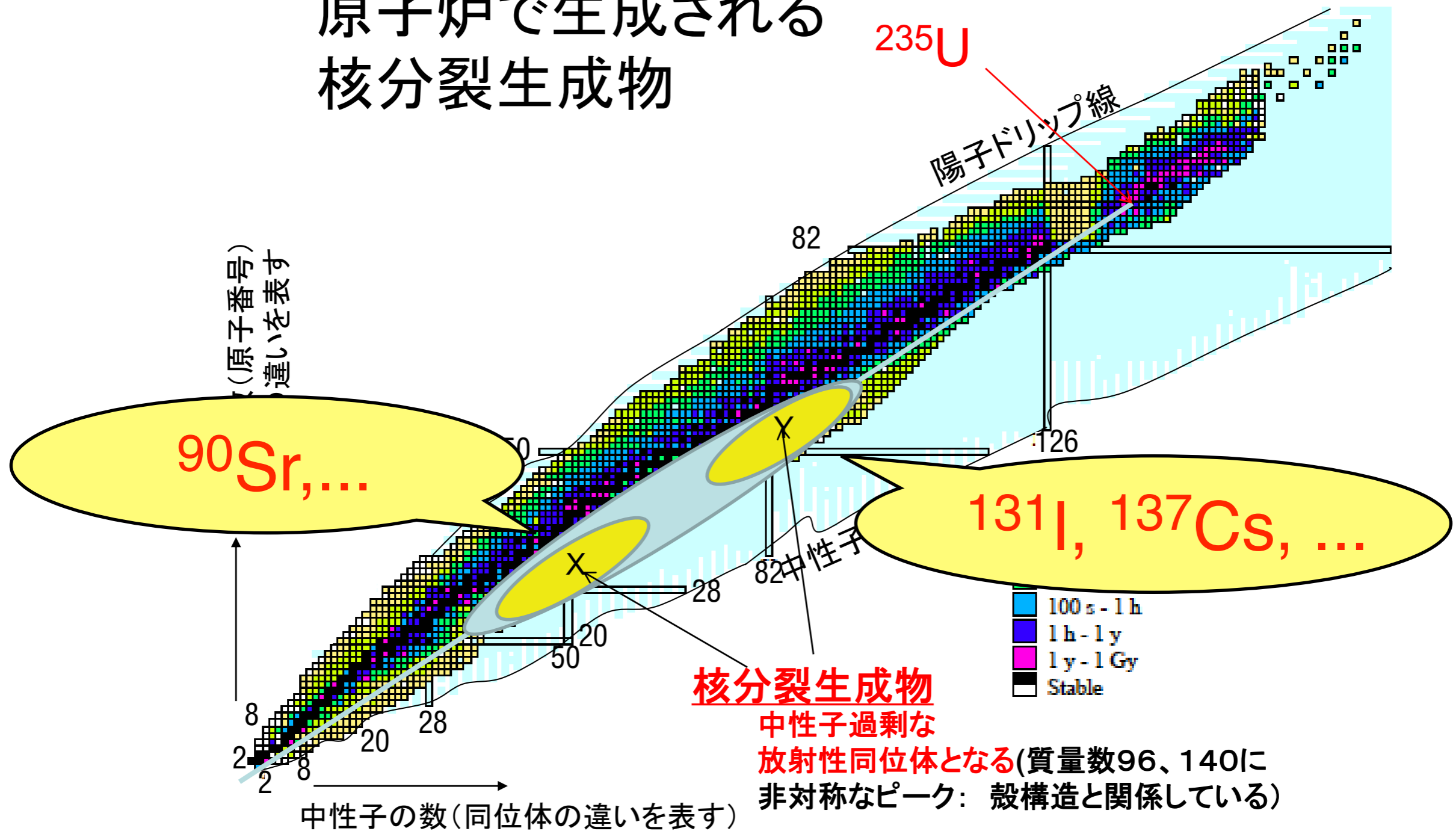
# 核分裂

Nuclear fission

# 原子核物理学

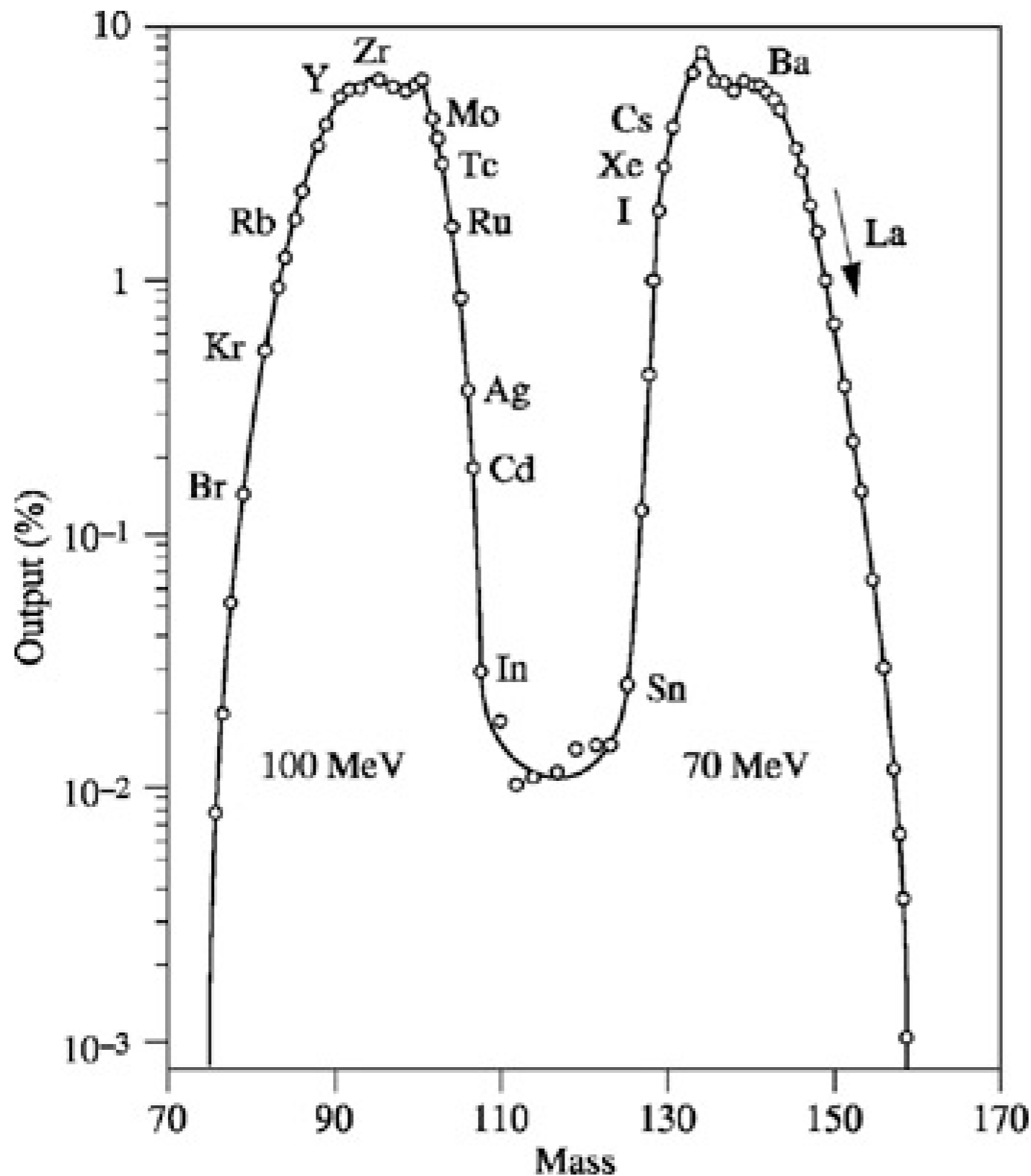
Nuclear Physics

原子炉で生成される  
核分裂生成物



Nuclear Chart 核図表

生成率 [%] (対数目盛り)



# 核分裂生成物

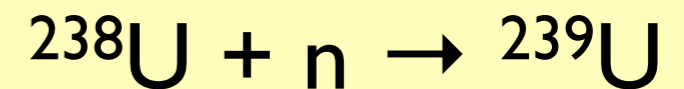
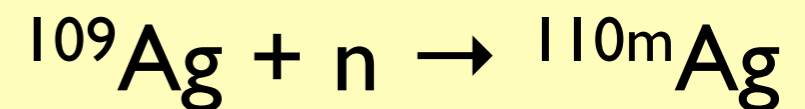
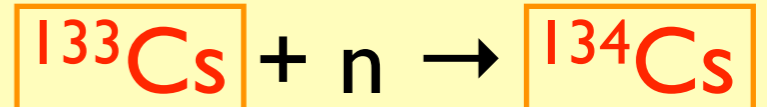
fission products

非対称分裂

## 放射化生成物

activation products

中性子捕獲反応

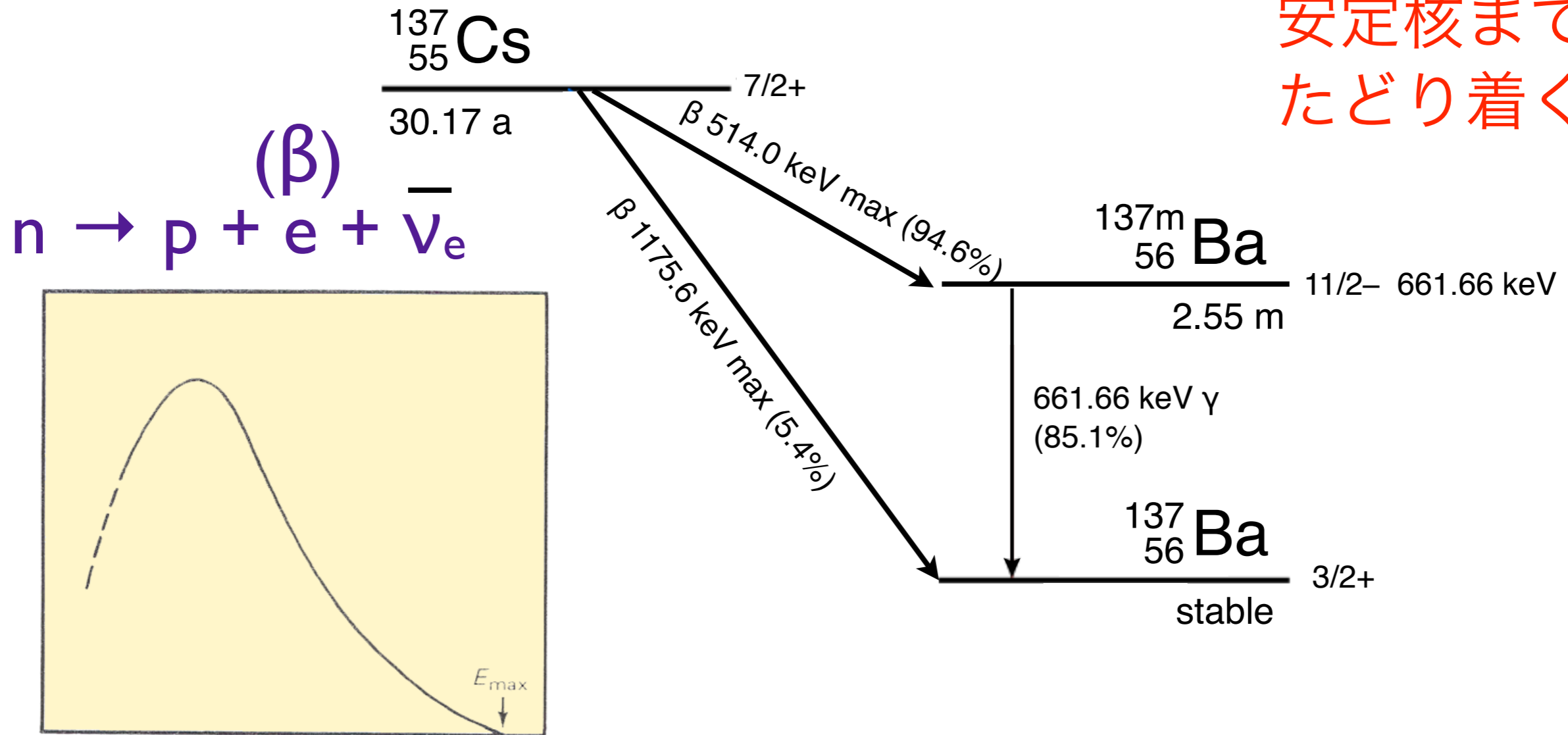


半減期が数日～数十年のものが特に問題。揮発性・水溶性のものほどより遠くまで運ばれる。稀ガスはあまり気にしないでいい(雲散霧消)。

核分裂生成物  $^{131}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{135}\text{Xe}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ....

# 中性子過剰核は $\beta$ 壊変 (崩壊) を繰り返しながら

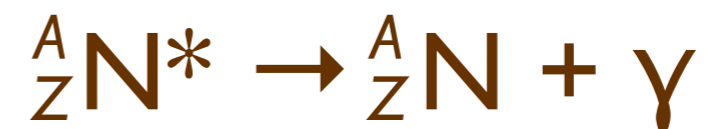
安定核まで  
たどり着く。



$\beta$ 線の連続スペクトルから  
核種の同定をするのは無理。

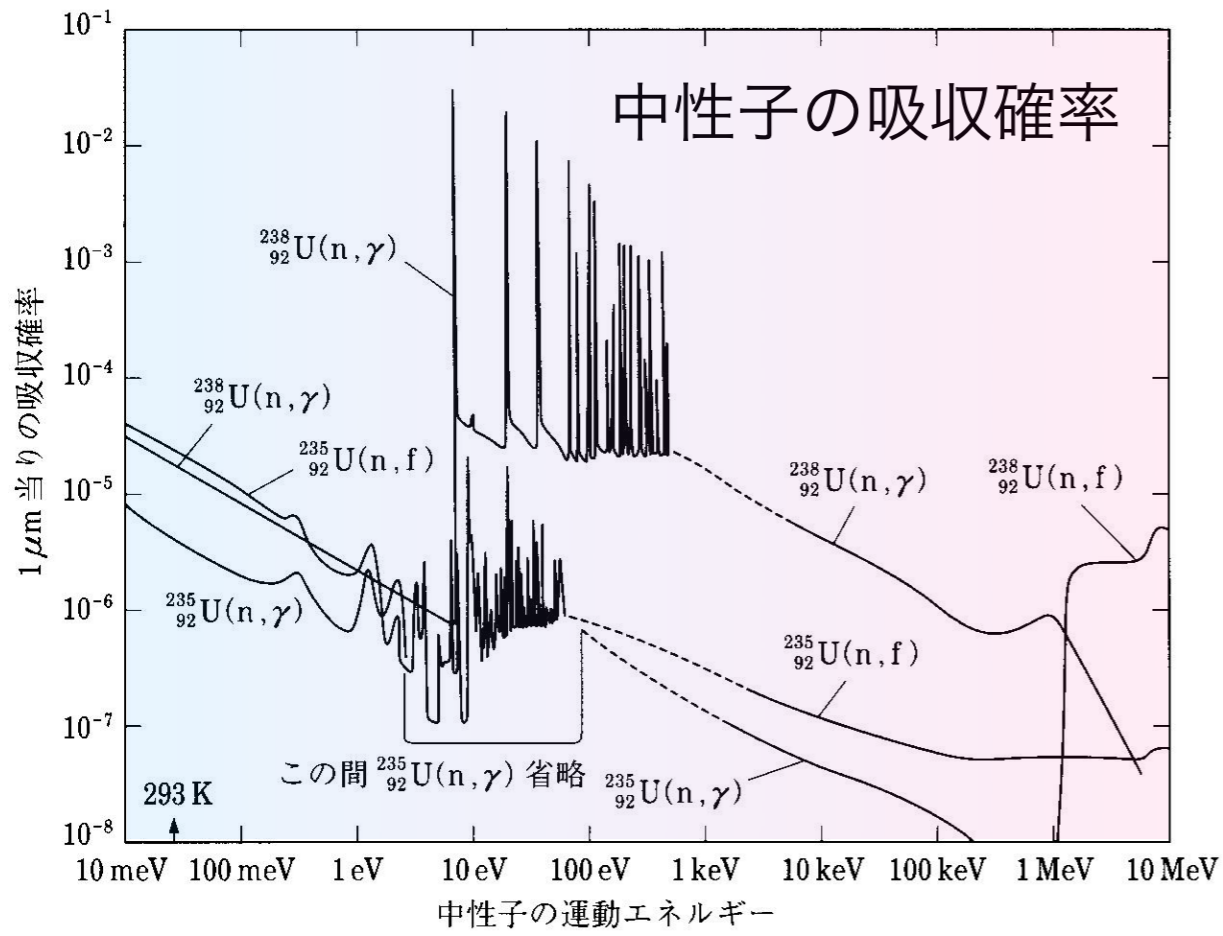
例： $^{90}\text{Sr}$  ( $\gamma$ 線を出さない)

$\gamma$ 線：原子核の脱励起



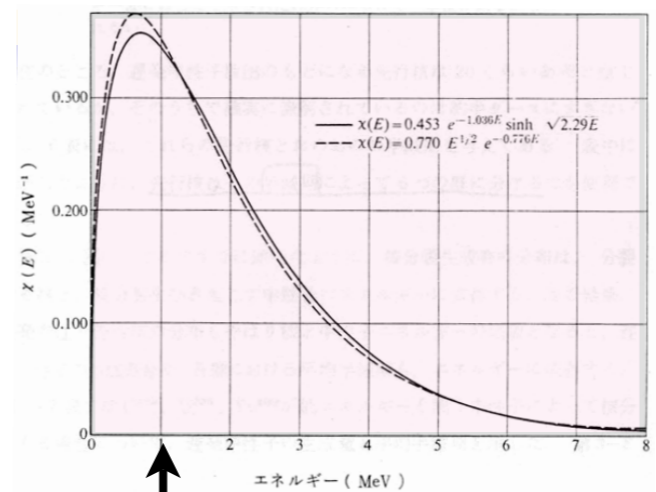
$\gamma$ 線 (定まったエネルギー)

$\gamma$ 線のスペクトル分析により核種の同定に役立つ。



$E_n < 1 \text{ eV}$  では  
 $\sigma[{}^{235}\text{U}(n, f)] \propto \frac{1}{v_n}$   
 ... 中性子が原子核内を  
 ゆっくり通り過ぎると反  
 応が起きやすい

### 即発中性子の エネルギースペクトル

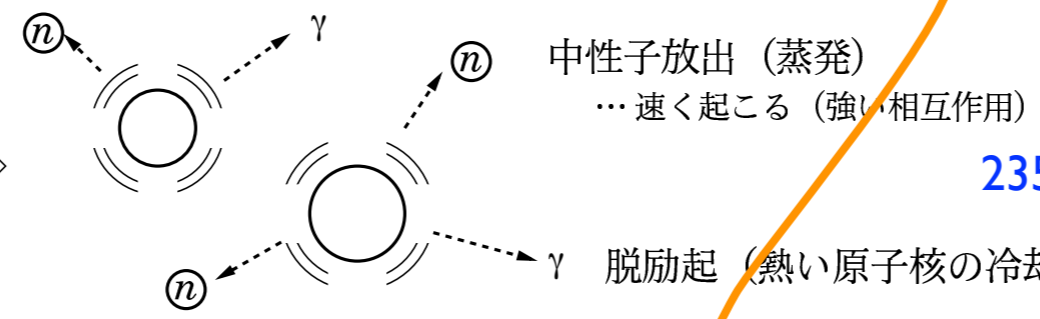
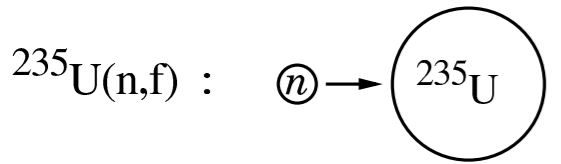


減速

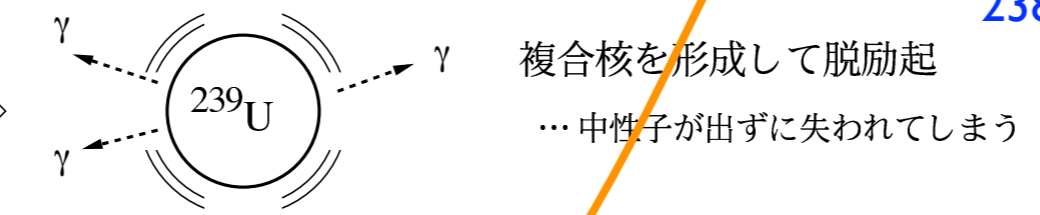
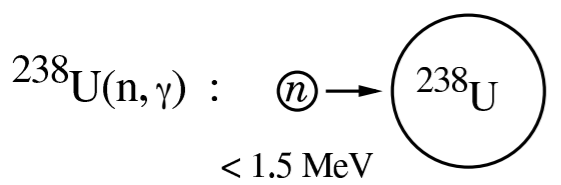
loss



熱中性子

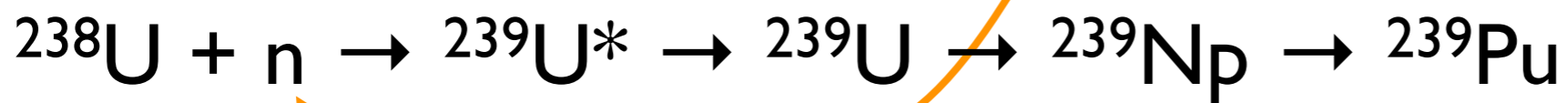


${}^{235}\text{U}$ : 0.72%, 半減期 7.03億年



${}^{238}\text{U}$ : 99.3%, 半減期 44.6億年

${}^{235}\text{U}$  濃縮燃料を使う



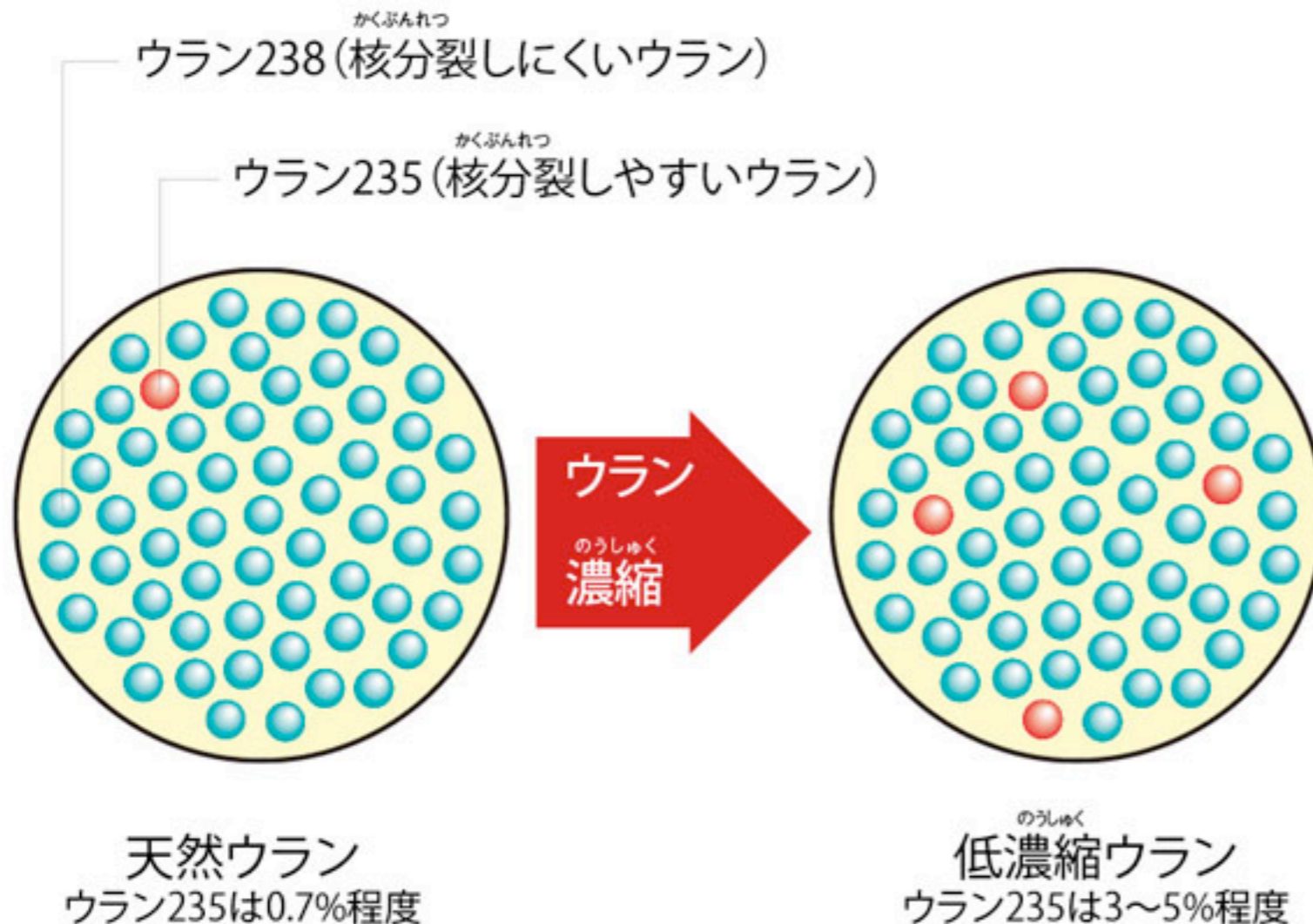
(loss)

(大阪大学 故岡村弘之先生の講義資料より借用・改変)

# 《 ウランの濃縮 のうしゆく 》

天然のウラン鉱石にはウラン238が99.3%とウラン235が0.7%の割合でふくまれています。  
天然ウランのままでは、原子力発電所で使う燃料としてウラン235の割合が低すぎるので、これを3~5%程度になるよう濃度のうどを高めまのうしゆくす。これを「ウランの濃縮」といいます。

## 天然ウランと低濃縮ウランのちがい のうしゆく



## 同位体分離技術

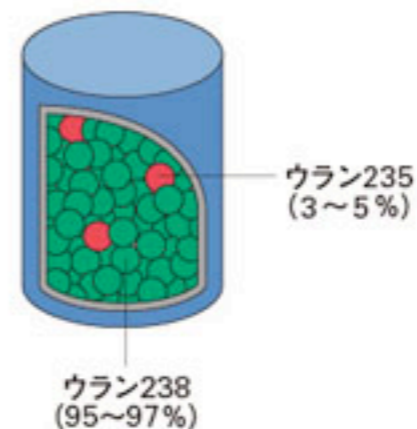
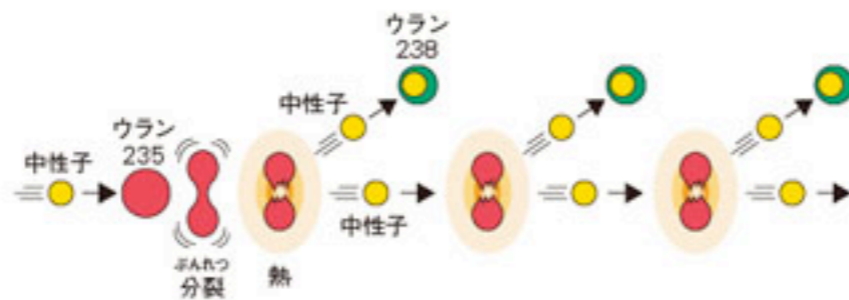
- ☀ ガス拡散法
  - ☀ 遠心分離
  - ☀ レーザー法
  - ☀ ノズル法、
  - ☀ 化学法 (イオン交換法)
- UF<sub>6</sub> (気体)

(原子力教育支援情報提供サイト「あとみん」より図表を借用。)

出所: チャレンジ! 原子力ワールド (以下のページも。)

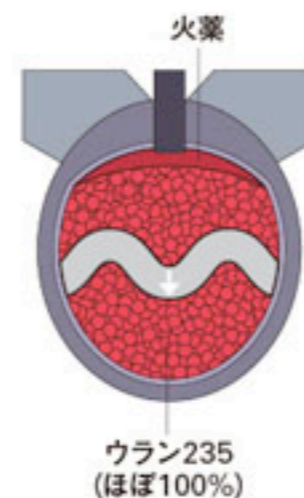
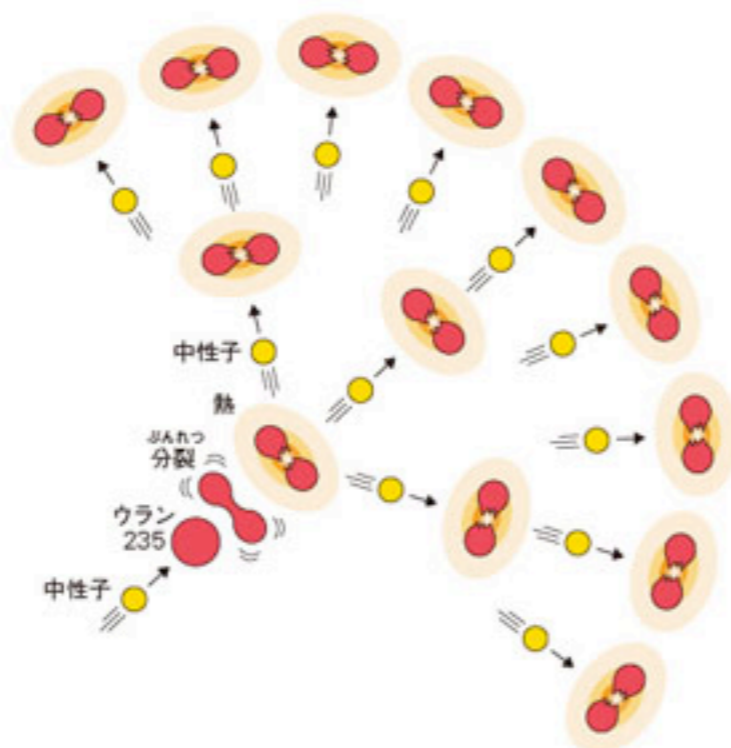
# 《 原子力発電と原子爆弾の違い 》

原子力発電の場合



連鎖反応  
臨界

ばくだん  
原子爆弾の場合



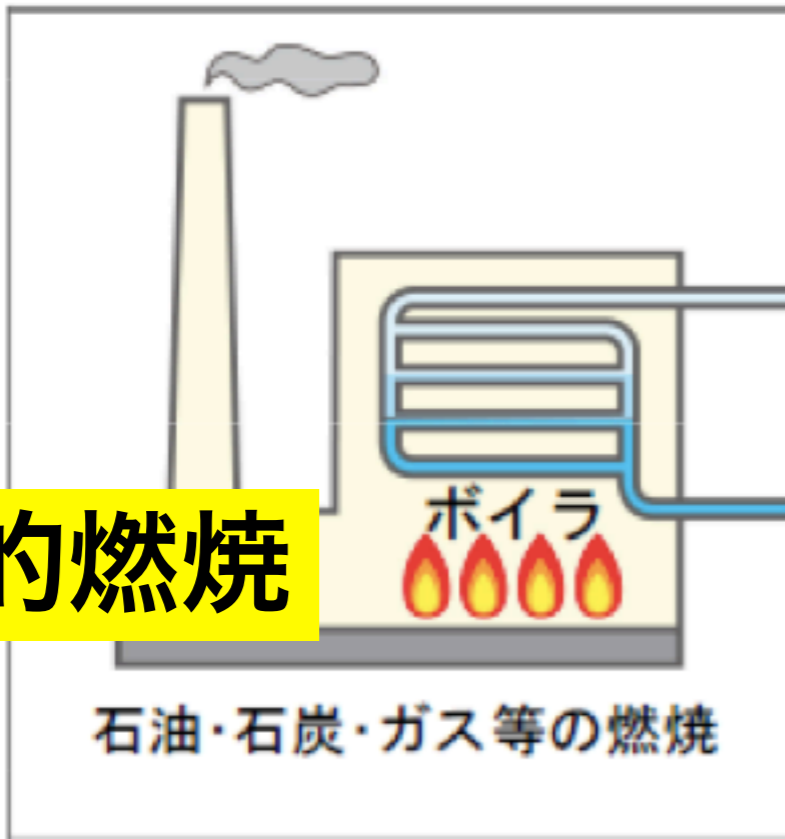
ちがう点	原子力発電	原子爆弾
ウラン235の割合	3~5%	ほぼ100%
かくふんれつ核分裂のしかた	ウランを少しずつ核分裂させます。	いっしゆん一瞬のうちにほとんどのウランを核分裂させます。
調節のしかた	せいぎよ制御機能を持ち、安定した核分裂連鎖反応となるように調節します。	かくふんれつへいさ核分裂連鎖反応を制御する装置がありません。



# 火力発電と原子力発電の違い

火力

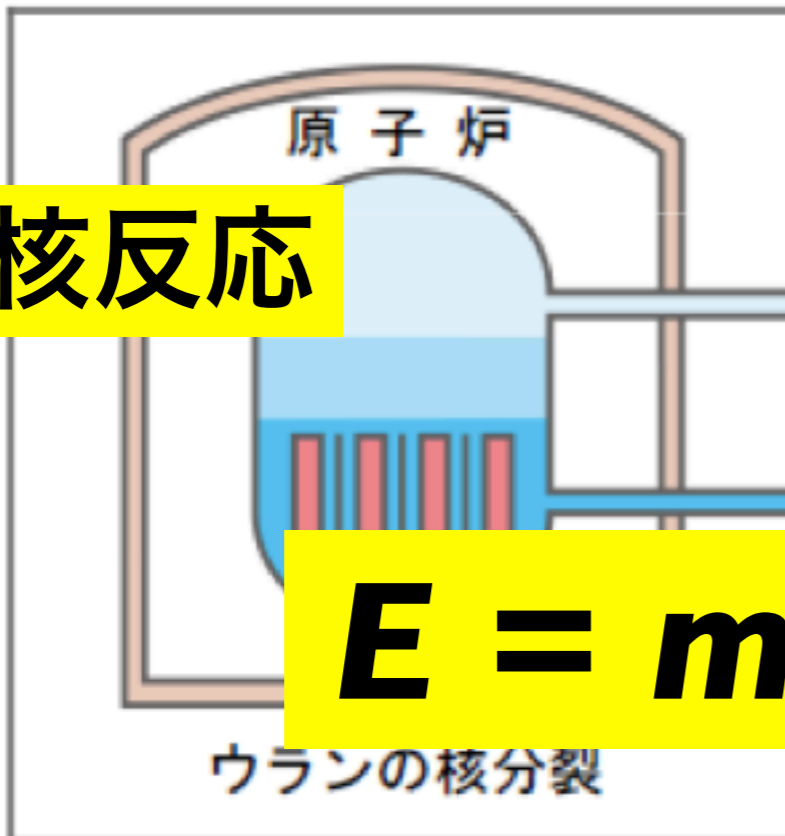
化学的燃焼



石油・石炭・ガス等の燃焼

原子核反応

原子力



ウランの核分裂

$$E = mc^2$$

蒸気

水

蒸気

給水ポンプ

タービン

復水器

循環水ポンプ

変圧器

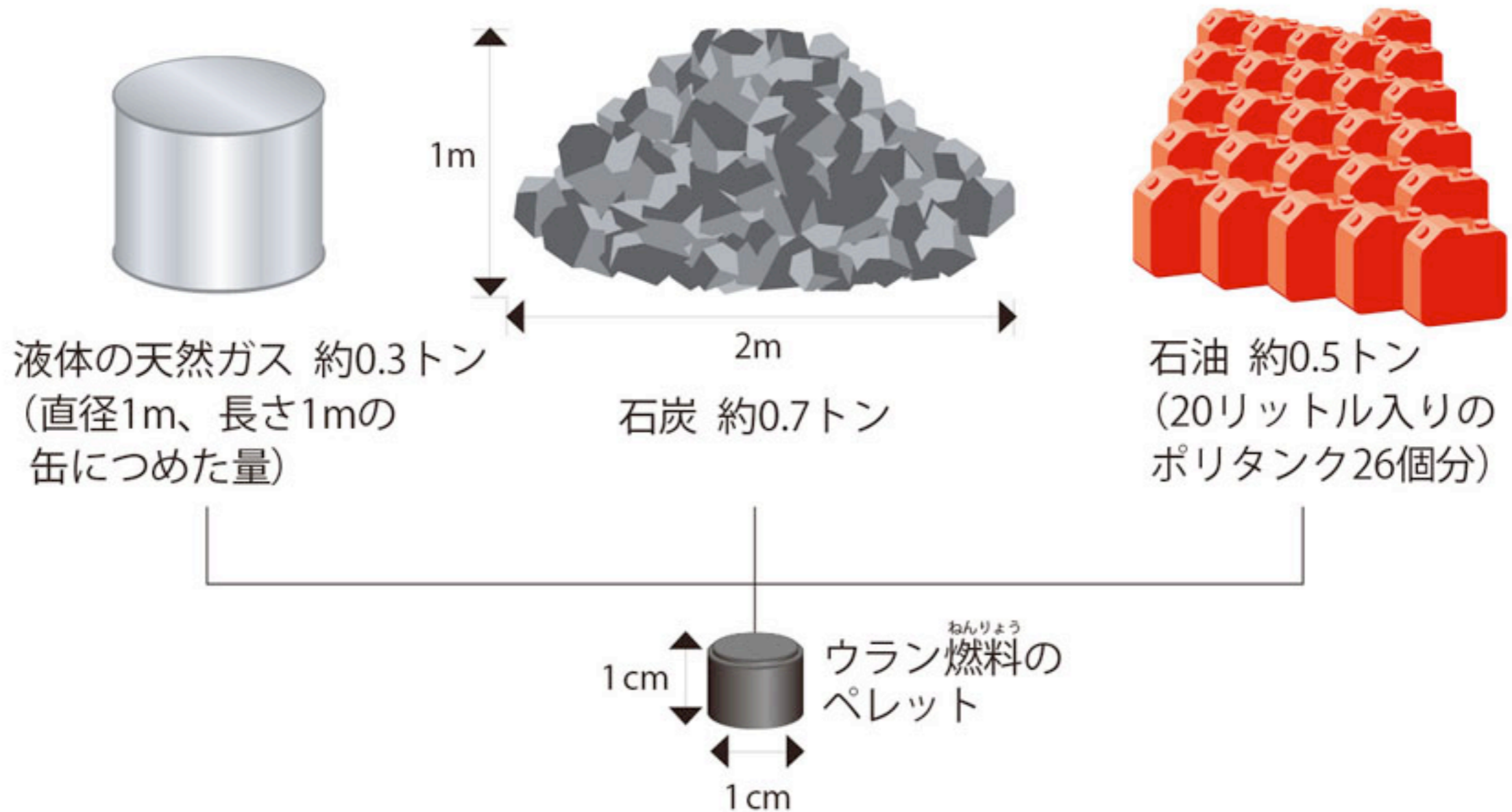
発電機

→ 放水路へ

← 冷却水(海水)



# 《 エネルギー源の比較(原子力発電と火力発電) 》



液体の天然ガス 約0.3トン  
(直径1m、長さ1mの  
缶につめた量)

1m

2m

石炭 約0.7トン

石油 約0.5トン  
(20リットル入りの  
ポリタンク26個分)

1cm

ウラン<sup>ねんりょう</sup>燃料の  
ペレット

1cm

原子力発電のエネルギー源であるウラン燃料は、直径1cm、高さ1cmのペレットに焼き固めて使います。このペレット1個で一般の家庭で使う8~9か月分の電力(2,600kWh)を発電できます。これは天然ガスで約0.3トン、石炭で約0.7トン、石油で約0.5トンを燃やして発電できる電力量に相当します。

原子炉	燃料	減速材*	冷却材*
軽水炉	濃縮ウラン	軽水 (H <sub>2</sub> O)	軽水 (H <sub>2</sub> O)
重水炉	天然ウラン 微濃縮ウラン プルトニウム	重水 (D <sub>2</sub> O)	軽水 (H <sub>2</sub> O) 重水 (D <sub>2</sub> O)
黒鉛炉	濃縮ウラン	黒鉛 (グラファイト)	軽水 (H <sub>2</sub> O)
ガス炉	天然ウラン 濃縮ウラン トリウム	黒鉛 (グラファイト)	二酸化炭素 ヘリウム

運転の制御：熱中性子を吸収する元素

制御棒\* (炭化ホウ素、カドミウム合金)、ホウ酸水



(\*) 放射化しにくい物質

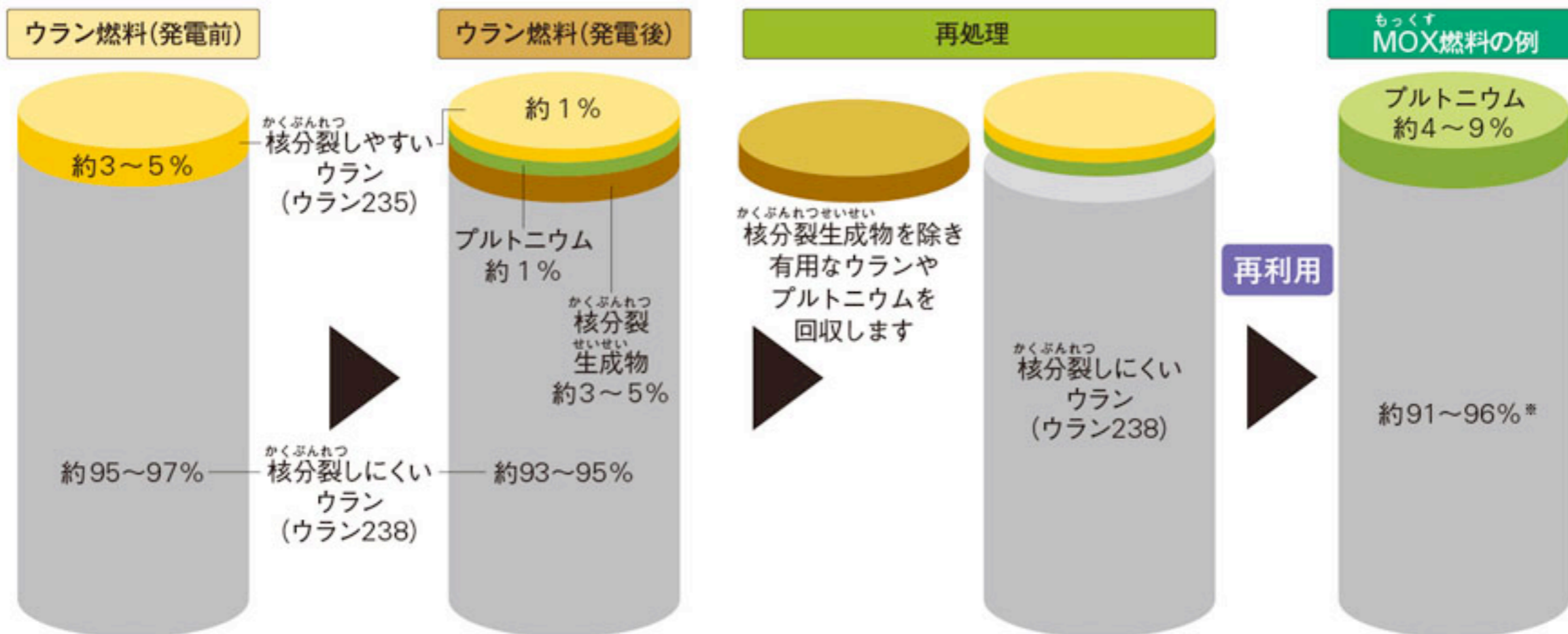
原子炉	原子炉施設
軽水炉	日本の原子力発電所（沸騰水型／加圧水型）
重水炉	新型転換炉の原型炉「ふげん」 カナダの原子力発電所 CANDU
黒鉛炉	チェルノブイリ原発（РБМК (RBMK) 型）
ガス炉	日本初の実用原子炉「東海発電所」 発電のほかにも化学工業など

運転の制御：熱中性子を吸収する元素

制御棒（炭化ホウ素、カドミウム合金）、ホウ酸水

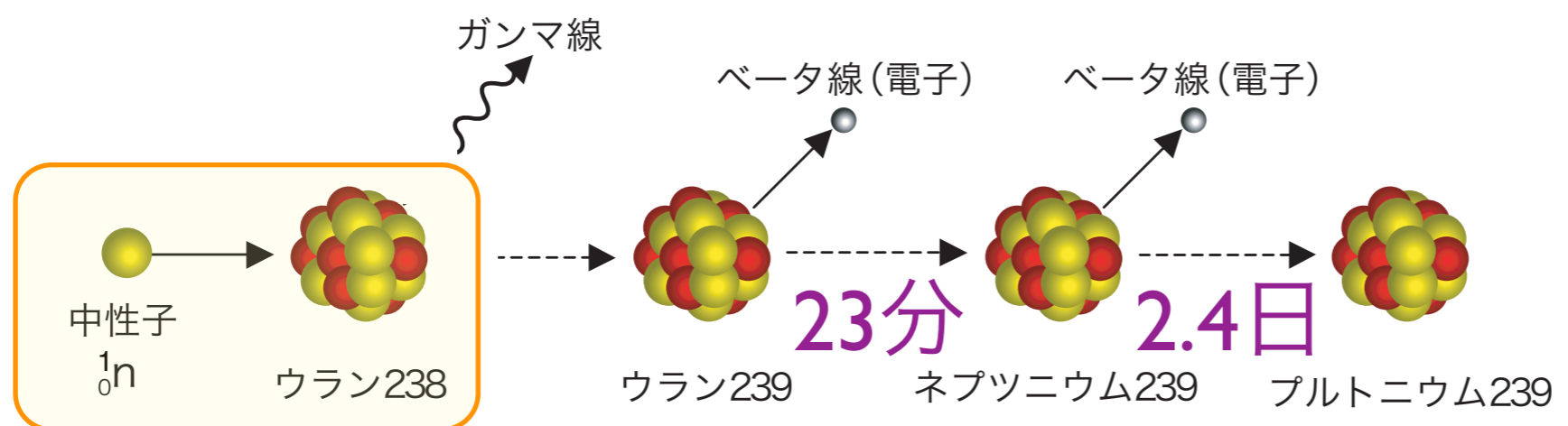


# 《 ウラン燃料とMOX燃料 》



**かくぶんれつ 核分裂生成物** 非常に高いレベルの放射線を発生する元素がふくまれています。

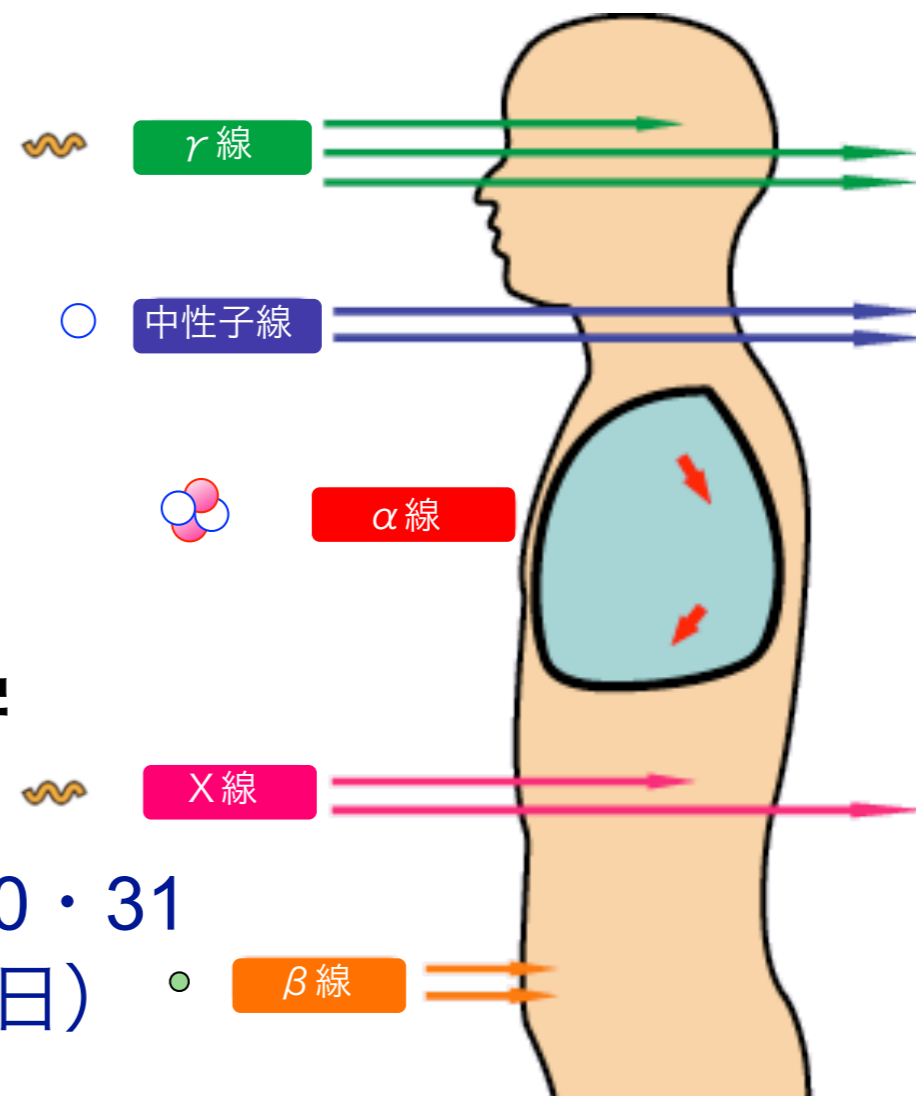
**もっくす MOX燃料** プルトニウムとウランの酸化物を混ぜて作った混合酸化物燃料です(※わずかにウラン235をふくみます)。



## 放射線 と 放射能

@ 首都大学

2013 / 3 / 30・31  
(土・日)



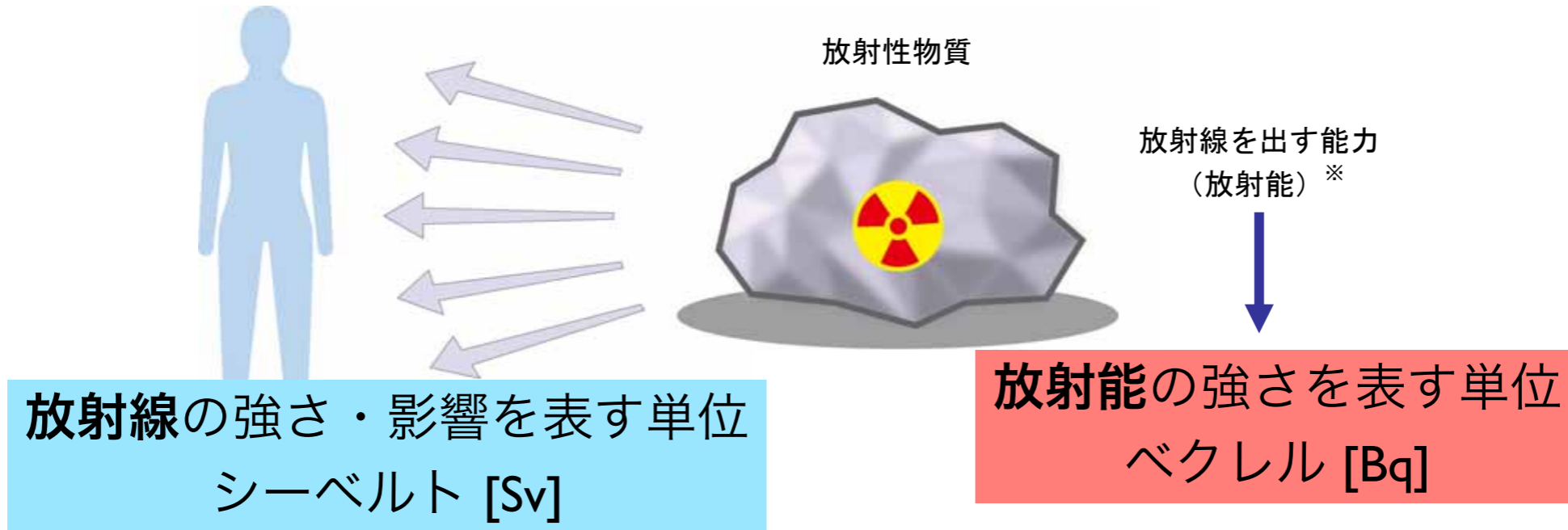
第5話

## 放射線の単位・線量計算

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 放射線の単位



## 放射線量の単位

グレイ

吸収線量  $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量  $H_T [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

実効線量  $E [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

## 放射能の単位

放射能の強さ [Bq]

ベクレル

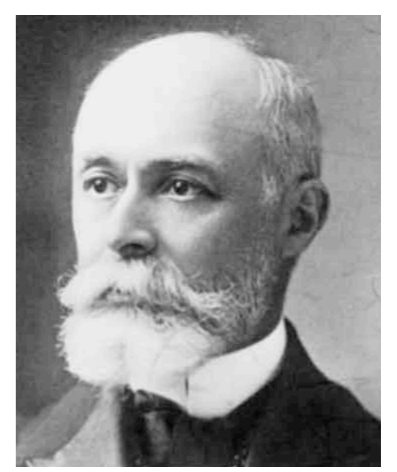
Gray



Sievert



Becquerel



# 放射線量の単位

放射場には

多様なエネルギーの

多種放射線（光子、粒子線）が

様々な方向を向いて飛び交い、

それぞれの強度で存在している。

これをひとつの物理量で表すのは

一筋縄ではいかない。

様々な放射線量の単位が存在する。



# 放射線量の単位



Röntgen



Gray

## 放射計測量 radiometric quantity

粒子フルエンス fluence  $\Phi$  [ $\text{cm}^{-2}$ ]

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

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

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

シーマ cema (Charged particle Energy imparted to MAtter) 荷電粒子線  $C$  [ $\text{J} / \text{kg}$ ] = [ $\text{Gy}$ ]

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

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

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

# 放射線量の単位

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

吸収線量 absorbed dose  $D [J / kg] = [Gy]$  Gray  
[erg / g] = [ram] | Gy = 100 ram

放射線防護のための線量 **protection quantity**

等価線量 equivalent dose  $H_T [J / kg] = [Sv]$  Sievert

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

[erg / g] = [rem] | Sv = 100 rem

係数

生物学的効果比 RBE (Relative Biological Effectiveness) 放射線生物学の観測量

線質係数  $Q$  放射線防護のための取り決め

放射線加重係数  $w_R$  放射線防護のための取り決め



# 放射線量の単位

radiation dose

- 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

Gray

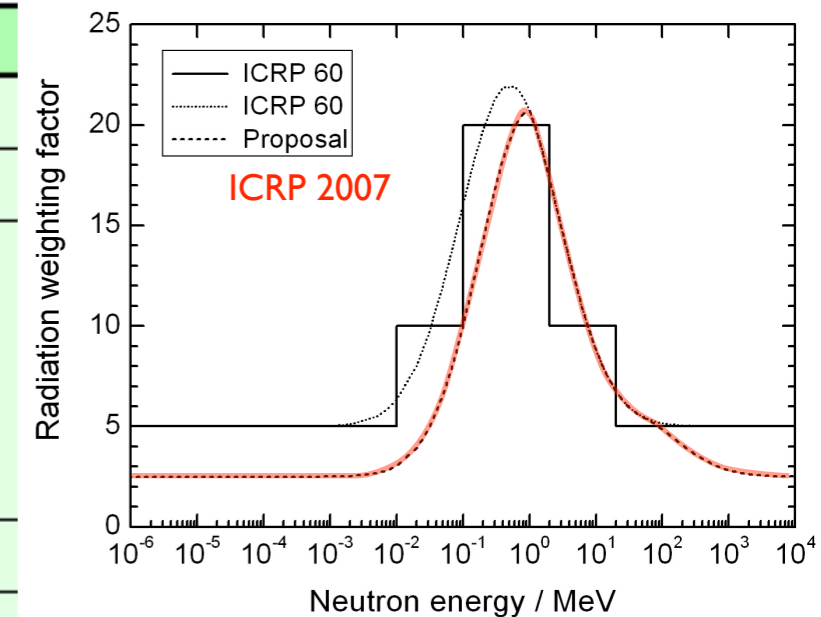


- 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

等価線量  $H_T [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

## 放射線加重係数

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（臓器ごとに加重係数をかけて合算）

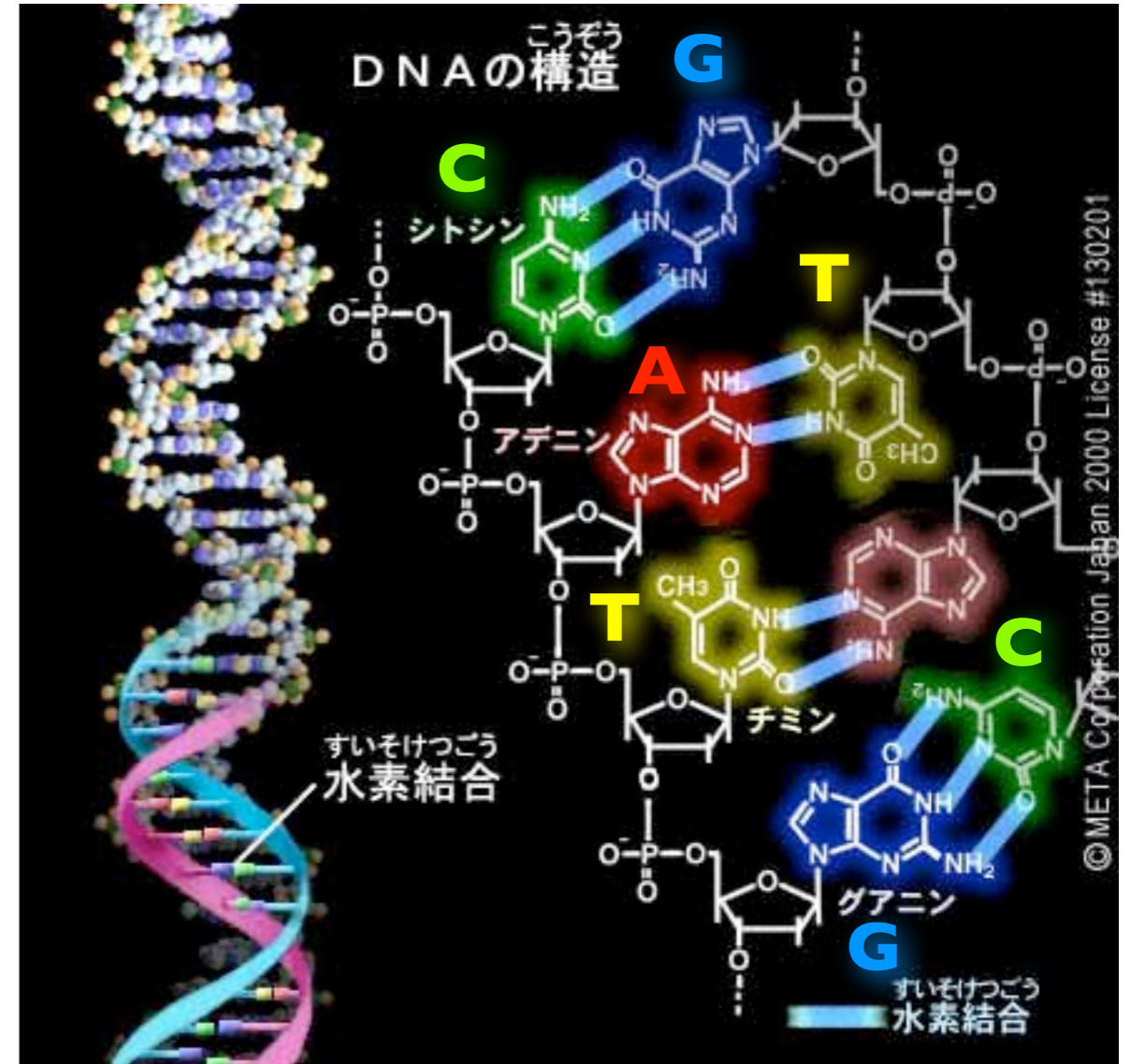
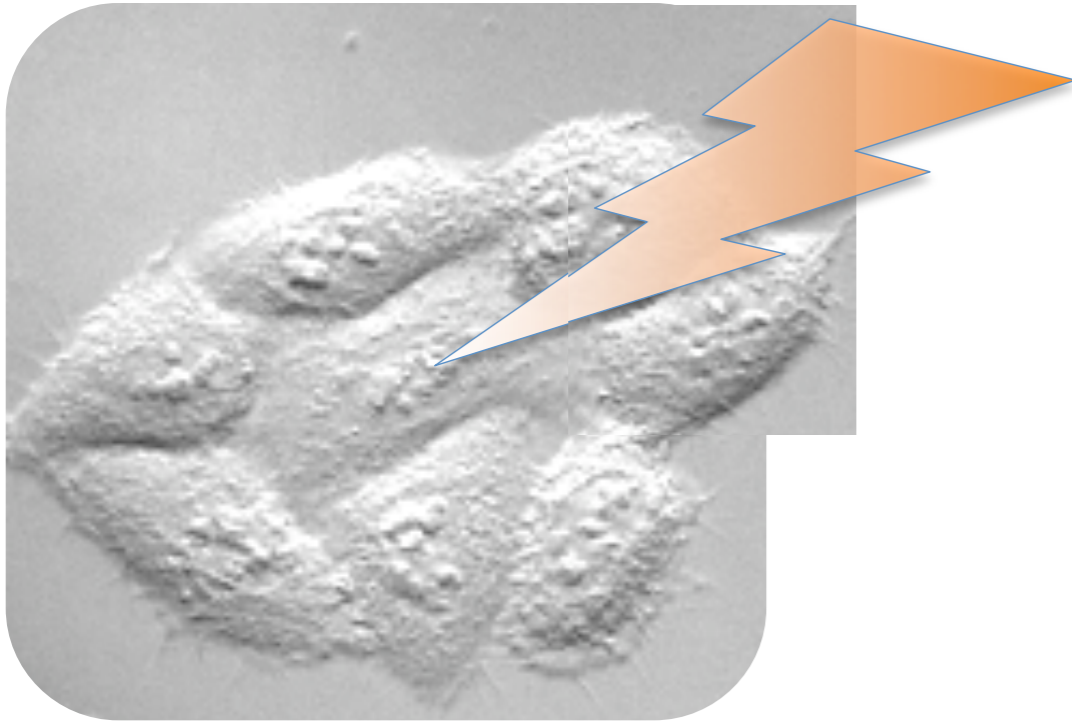
実効線量  $E [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

Sievert



# 細胞の核に放射線が照射

## DNA



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

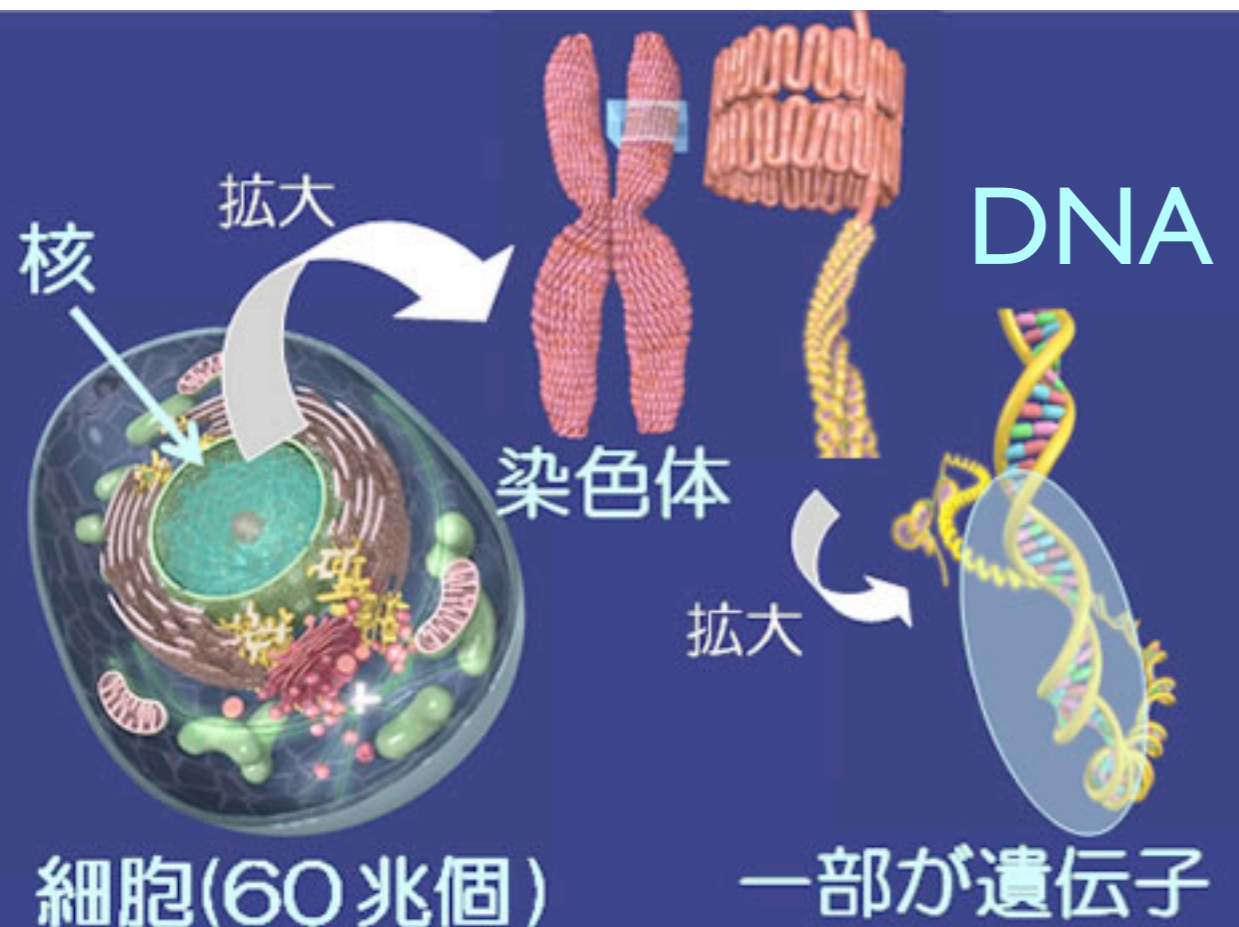
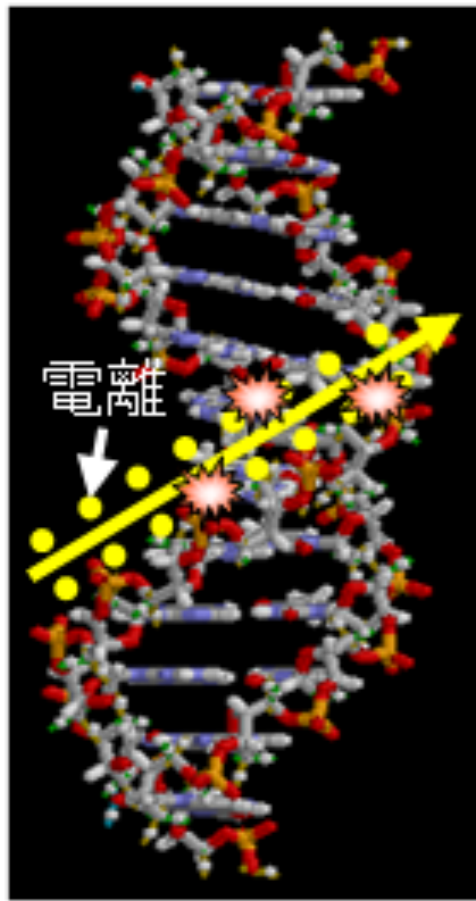
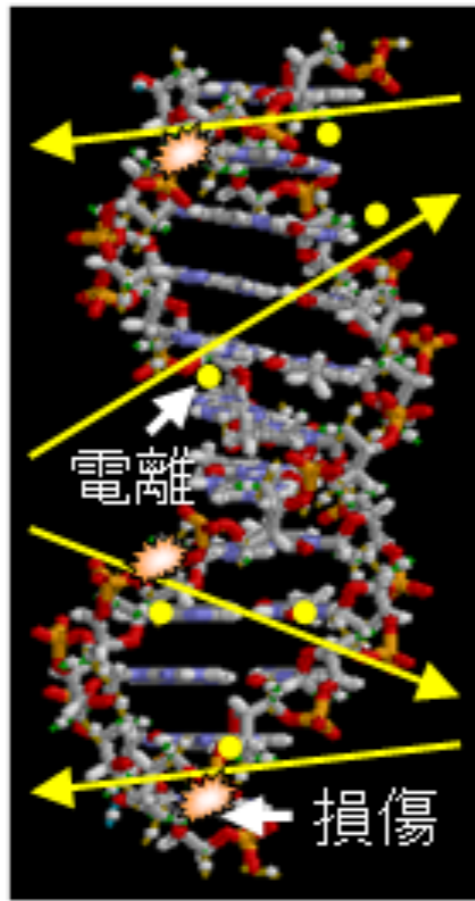


図1 核、染色体、遺伝子

# 放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

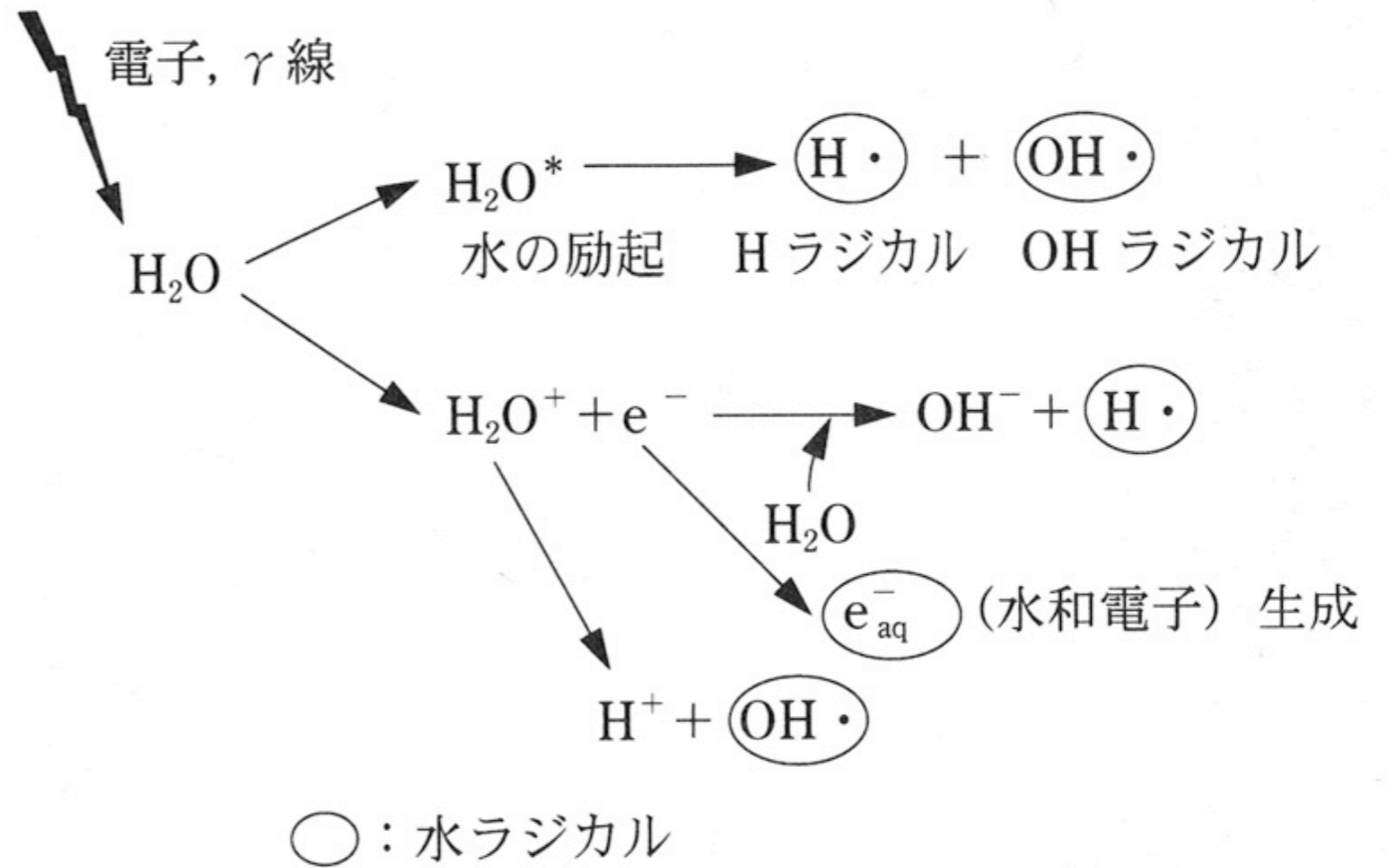


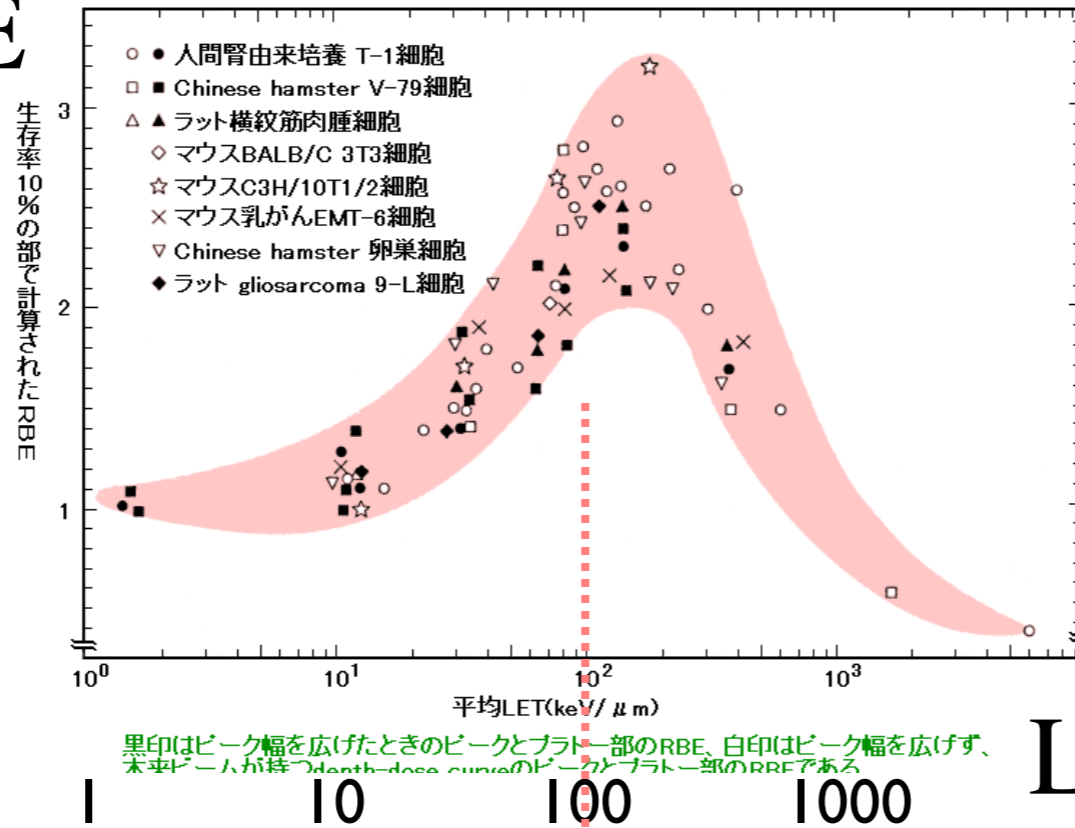
図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

## 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**  
 $\alpha$ 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**  
 $\beta$ 線,  $\gamma$ 線

# RBE



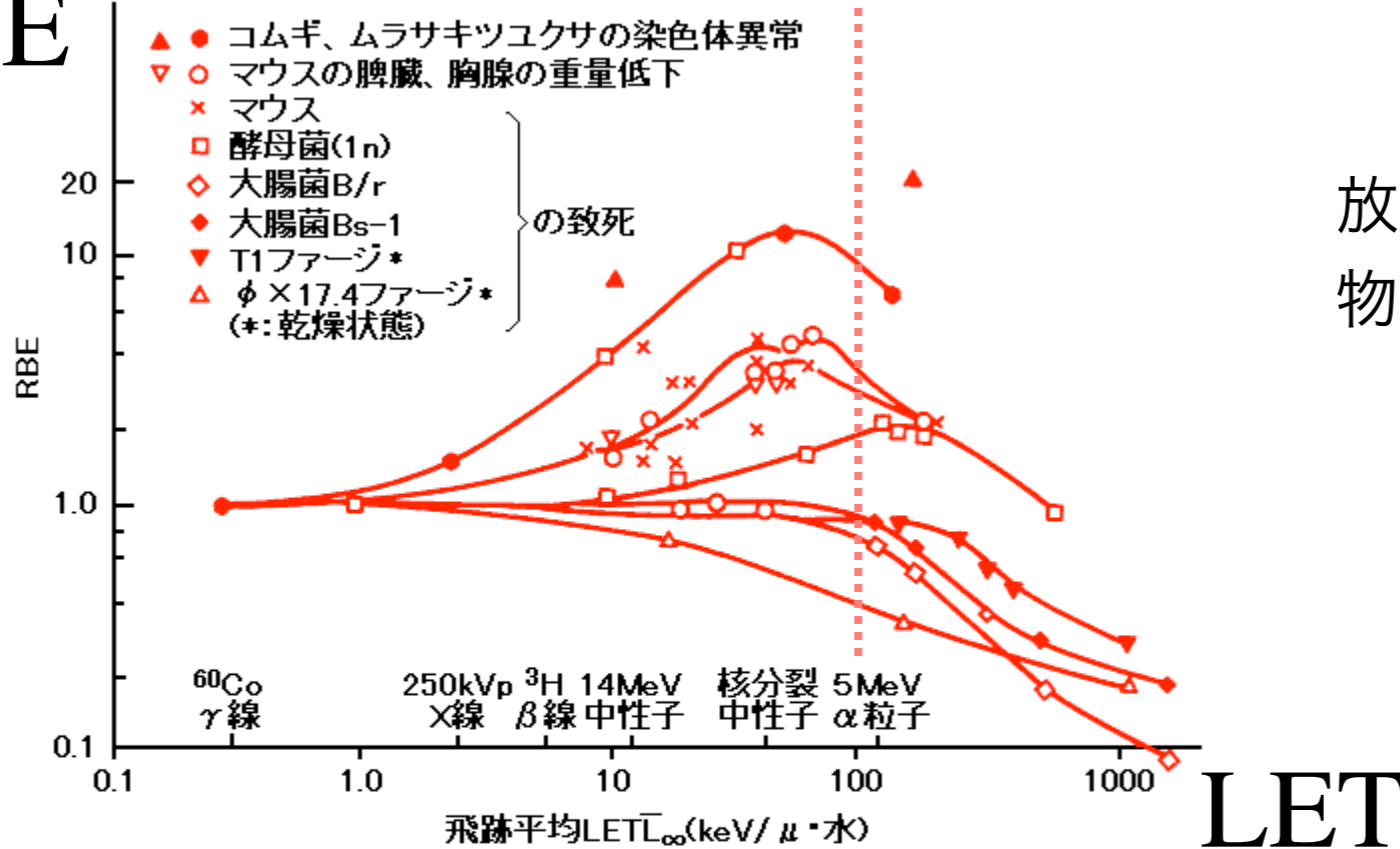
# 生物学的効果比 RBE

(Relative Biological Effectiveness)

LET (線エネルギー付与)  
keV/μm

放射線の軌跡上の単位長さ当たり  
物質に与えられるエネルギー

# RBE



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

図2 体細胞的効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係

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

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

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

組織  $T$  の組織加重係数

組織  $T$  における  
等価線量 [Sv]

組織  $T$  における  
平均吸収線量 [Gy]

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

左欄黒字 ICRP 1990

右欄赤字 ICRP 2007

# 線量計算

## 放射線の透過力・線量計算

- $\alpha$ 線は表層の細胞 2-3 個で止まる。
- $\beta$ 線も外部被曝では皮膚への影響を考える。
- $\alpha$ 線も $\beta$ 線も内部被曝が問題。全てのエネルギーが短い飛程の間に細胞に与えられる。
- $\gamma$ 線は多くのは相互作用（光電効果・コンプトン散乱）せず体を素通りし、体内で吸収されるエネルギーは全体の一部（外部・内部被曝）。
- X線の場合も吸収されるエネルギーは何割か程度。

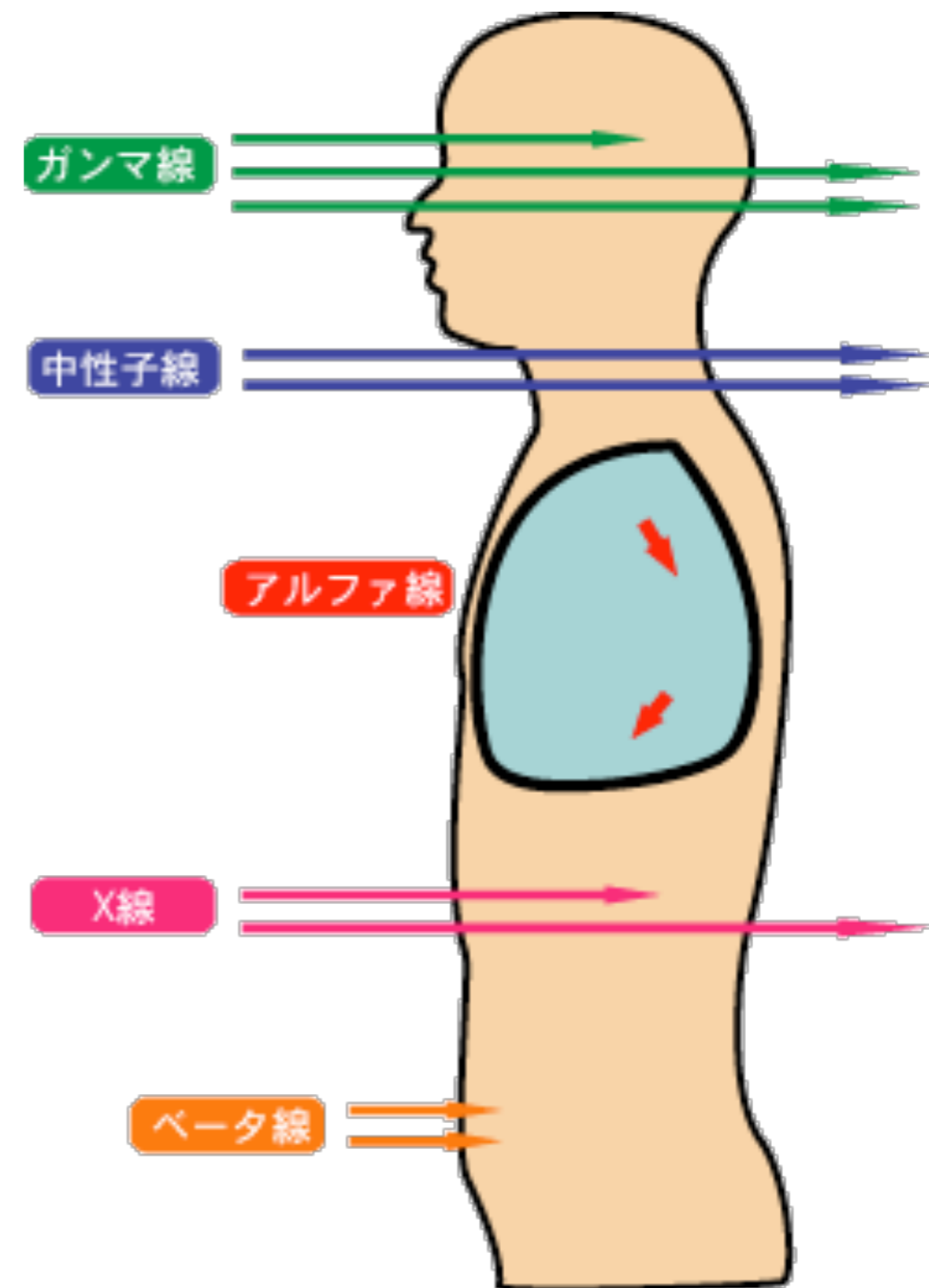


図3 人体を透過する放射線



# 内部被曝の計算例

(<sup>131</sup>I による甲状腺預託線量)

放射線防護のための線量 **protection quantity**

預託線量 committed dose (内部被曝) [Sv]

預託等価線量

預託実効線量

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。

実効線量係数 (成人)

核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)
C-14	5730年	$5.8 \times 10^{-10}$	$5.8 \times 10^{-9}$
P-32	14.3日	$2.4 \times 10^{-9}$	$3.4 \times 10^{-9}$
K-40	12.8億年	$6.2 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$
I-131	8.04日	$2.2 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-9}$
Sr-90	29.1年	$2.8 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$
Cs-137	30.0年	$1.3 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$

経口摂取	乳児 (3ヶ月)	幼児 (1歳)	子供 (2-7歳)	成人
I-131	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-8}$

# 放射線防護のための線量 protection quantity

## 預託線量 committed dose 放射性核種の吸収率、体内分布、

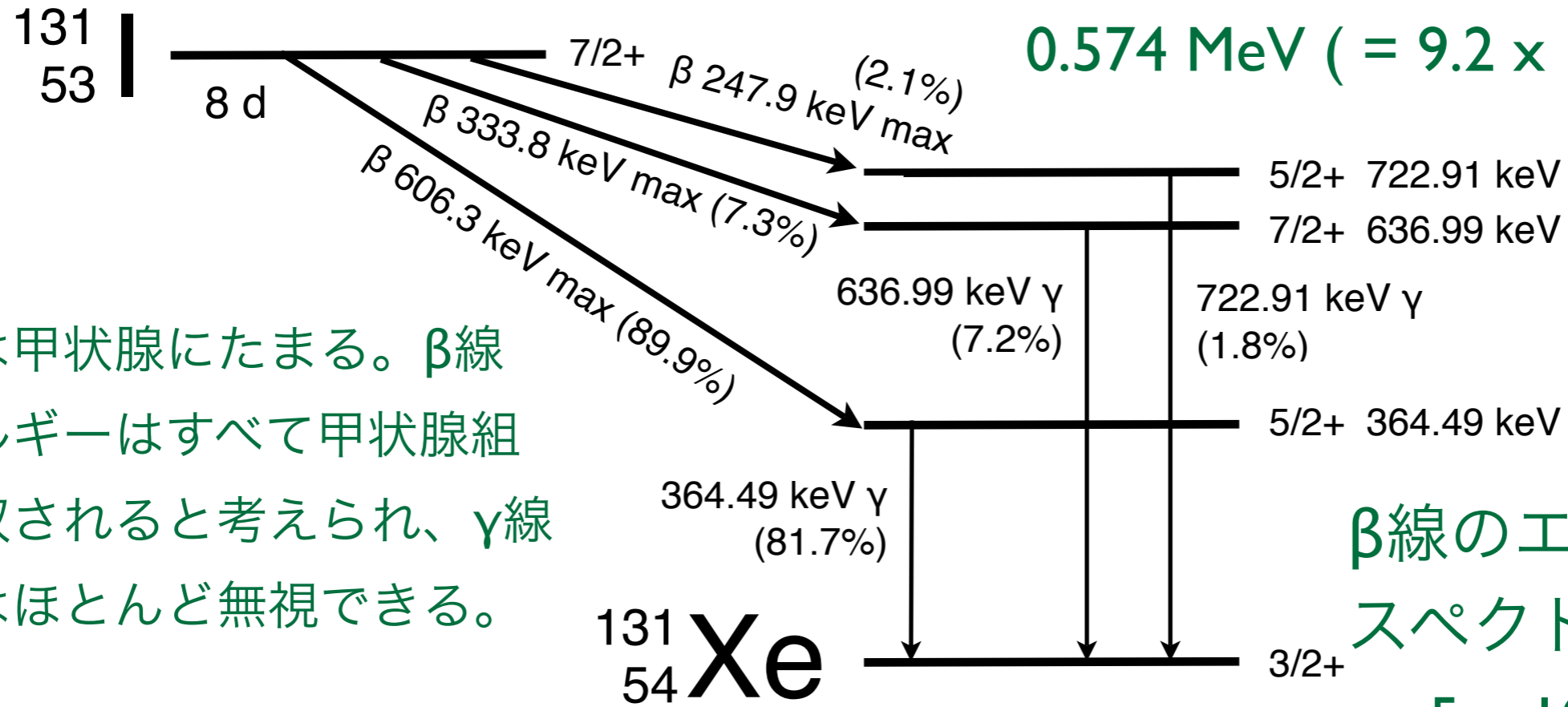
この係数には、体による放射性核種の吸収率、体内分布、  
 排泄による生物学的半減期、放出される放射線(α/β/γ)の  
 エネルギーの違い、臓器ごとのエネルギー付与などの計算  
 係数が含まれている。Bq から Sv へ  
 の換算は、物理学的半減期のみならず排泄機能による生  
 物学的半減期も考慮のうえ、50年間分の積分をする。

核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)
C-14	5730年	$5.8 \times 10^{-10}$	
P-32	14.3日	$2.4 \times 10^{-9}$	$3.4 \times 10^{-9}$
K-40	12.8億年	$6.2 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$
I-131	8.04日	$2.2 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-9}$
Sr-90	29.1年	$2.8 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$
Cs-137	30.0年	$1.3 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$

新たに食べた場合の係数。  
 既に体内に存在する K-40 からの  
 内部被曝の計算に使うと間違ふ。

経口摂取	乳児 (3ヶ月)	幼児 (1歳)	子供 (2-7歳)	成人
I-131	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-8}$

β線の最大エネルギーの平均値  
0.574 MeV (=  $9.2 \times 10^{-14}$  J)



β線のエネルギー  
スペクトルの平均値  
~  $5 \times 10^{-14}$  J

ヨウ素は甲状腺にたまる。β線のエネルギーはすべて甲状腺組織に吸収されると考えられ、γ線の効果はほとんど無視できる。

1 Bq あたり  $8.04 \text{ d} \times 86400 \text{ s/d} / \ln 2 = 1,000,000 \text{ decays}$

$5 \times 10^{-14} \text{ J} \times 1,000,000 / \text{Bq} = 5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq}$       γ線はほとんど無視できる。

成人の場合

成人の場合

これらのうち 20% が甲状腺に取り込まれる (残りは排泄) と見積もると、20 g の甲状腺の

吸収線量 = 等価線量は  $5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq} \times 0.2 / 0.02 \text{ kg} = 0.5 \mu\text{Sv/Bq}$

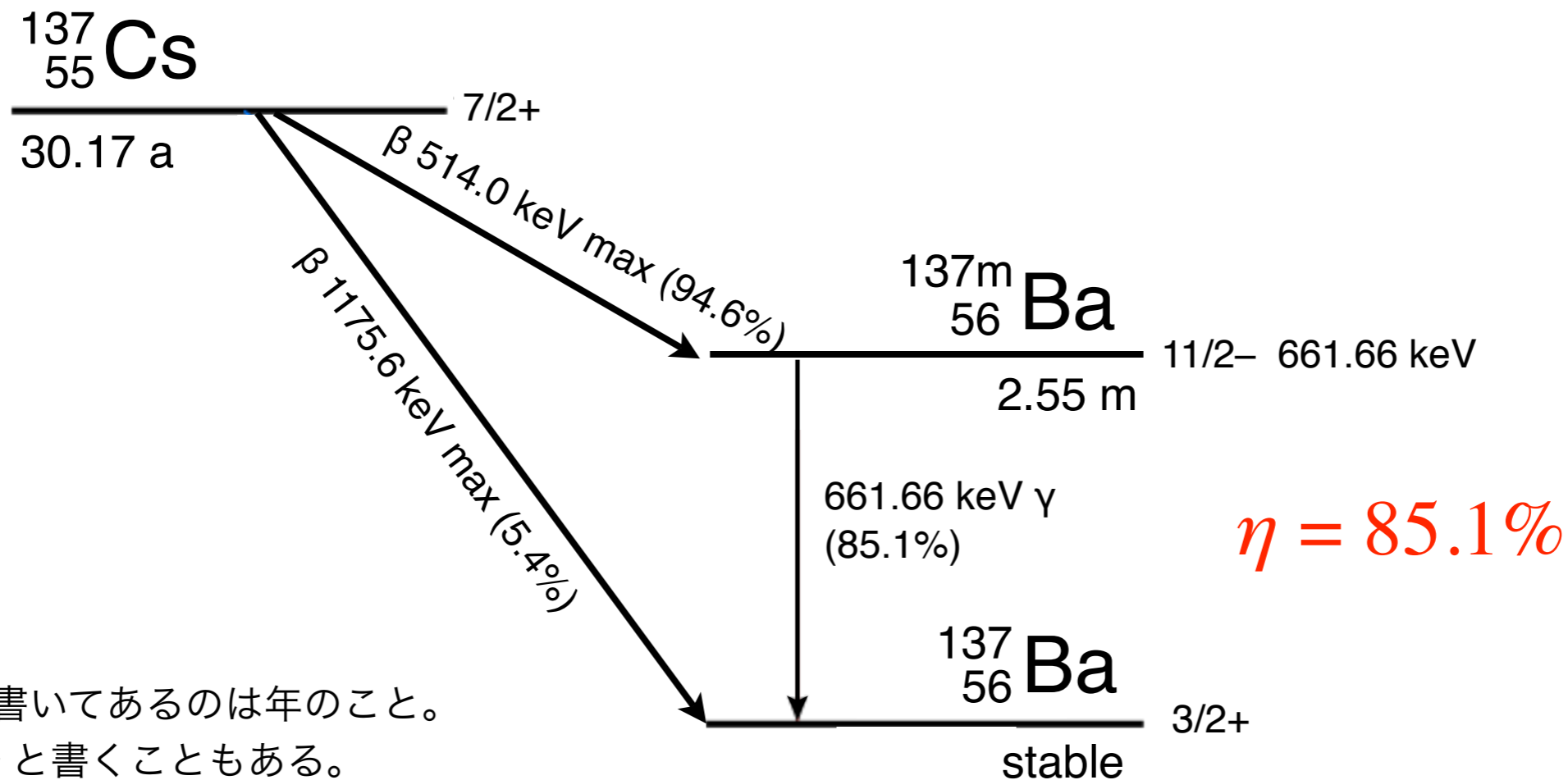
甲状腺は組織加重係数が 0.04 なので、全身被曝量としての実効線量は

$0.5 \times 0.04 = 0.020 \mu\text{Sv/Bq}$ 。表の値  $2.2 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$  とほぼ一致。

# 外部被曝の計算例

( $^{137}\text{Cs}$  による空間線量率)

荷電粒子はエネルギー損失  
光子は数の減衰



半減期で a と書いてあるのは年のこと。  
y とか yr と書くこともある。

# 光子 ( $\gamma$ 線) の物質中での減衰と吸収

## 光子数の減衰

光電効果・コンプトン散乱などは確率的に起こる

$$\frac{d\dot{\Phi}(x)}{dx} = -\mu \dot{\Phi}(x)$$

$$\dot{\Phi}(x) = \dot{\Phi}(0) e^{-\mu x}$$

$$\dot{\Phi}(L) = \dot{\Phi}(0) / 2$$

$$L = \ln 2 / \mu$$

$\ln x$  は自然対数  
 $\log_e x$  のこと。

$\dot{\Phi}$  : 粒子フルエンス率

for  $\gamma$  ( $h\nu = 0.66$  MeV) from  $^{137}\text{Cs}$

$x$  : 距離,  $L$  : 半減距離

$$L_{\text{air}} = 69.2 \text{ m}$$

$\mu$  : 線減衰定数

$$\mu_{\text{air}} = 0.0100 \text{ m}^{-1}$$

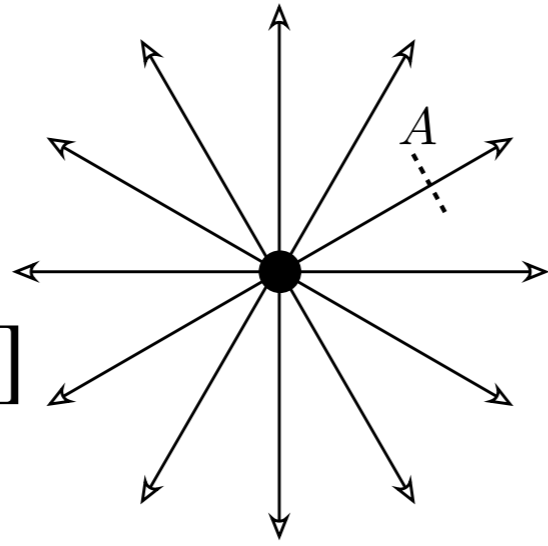
$\mu/\rho$  : 質量減衰係数  $\mu_{\text{en}}/\rho < \mu/\rho$   $(\mu/\rho)_{\text{air}} = 0.077 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$

$\mu_{\text{en}}/\rho$  : 質量エネルギー吸収係数  $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}} = 0.033 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$

$\dot{H}$  : 等価線量率 ( $\gamma$ 線では吸収線量率に等しい)

$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}, \quad h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

$P$  : 放射能 [Bq]



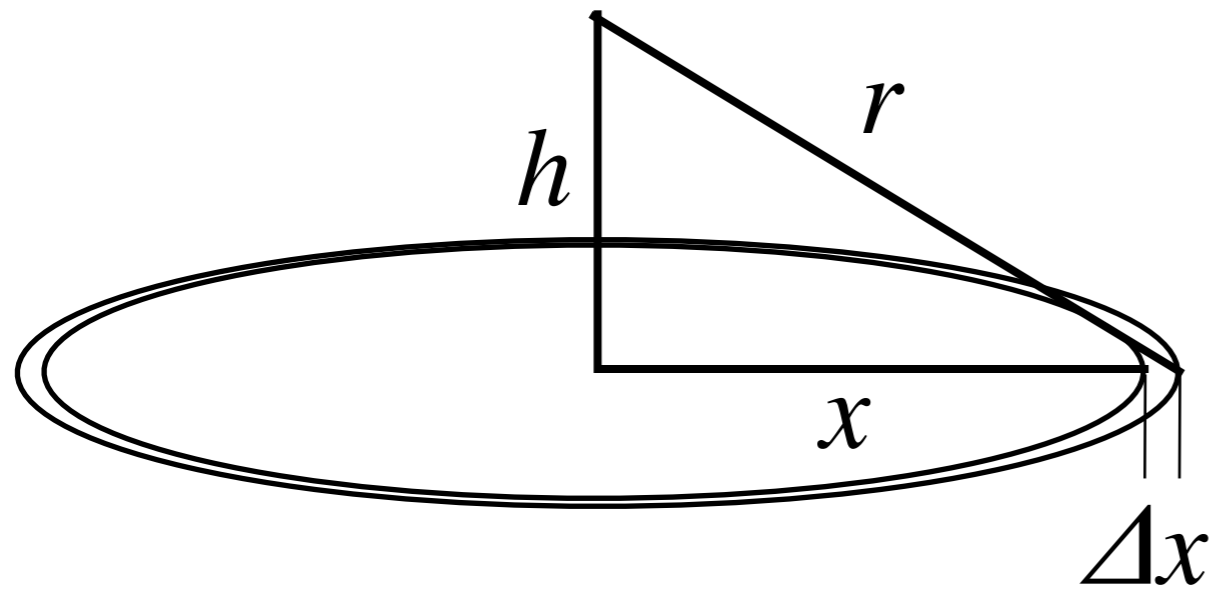
$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}$$

$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2}$$

図 5: 中央に放射線源があり、全方向に均等にガンマ線を出している。距離  $r$  離れた場所での微小面  $A$  を通過する流束を考えると、その場所での吸収線量率がわかる。

散乱された $\gamma$ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの $\gamma$ 線 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要がある (50%くらい増える)。



$p$  : 放射能の平面密度 [Bq/m<sup>2</sup>]

$$\dot{\Phi} = \int_0^\infty \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta p}{4\pi r^2} 2\pi x \, dx$$

$$= \frac{\eta p}{2} \int_h^\infty \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r}}{r} \, dr$$

$$\dot{\Phi} \approx \frac{\eta p}{2} \int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} \, dx$$

$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H}/\dot{\Phi} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

$$\int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} dx = \frac{1}{2} \ln (x^2 + h^2) \Big|_{x=0}^{L_{\text{air}}} = \frac{1}{2} \ln [ (L_{\text{air}}/h)^2 + 1 ]$$

$$L_{\text{air}} = 69.2 \text{ m} \quad h = 1 \text{ m}$$

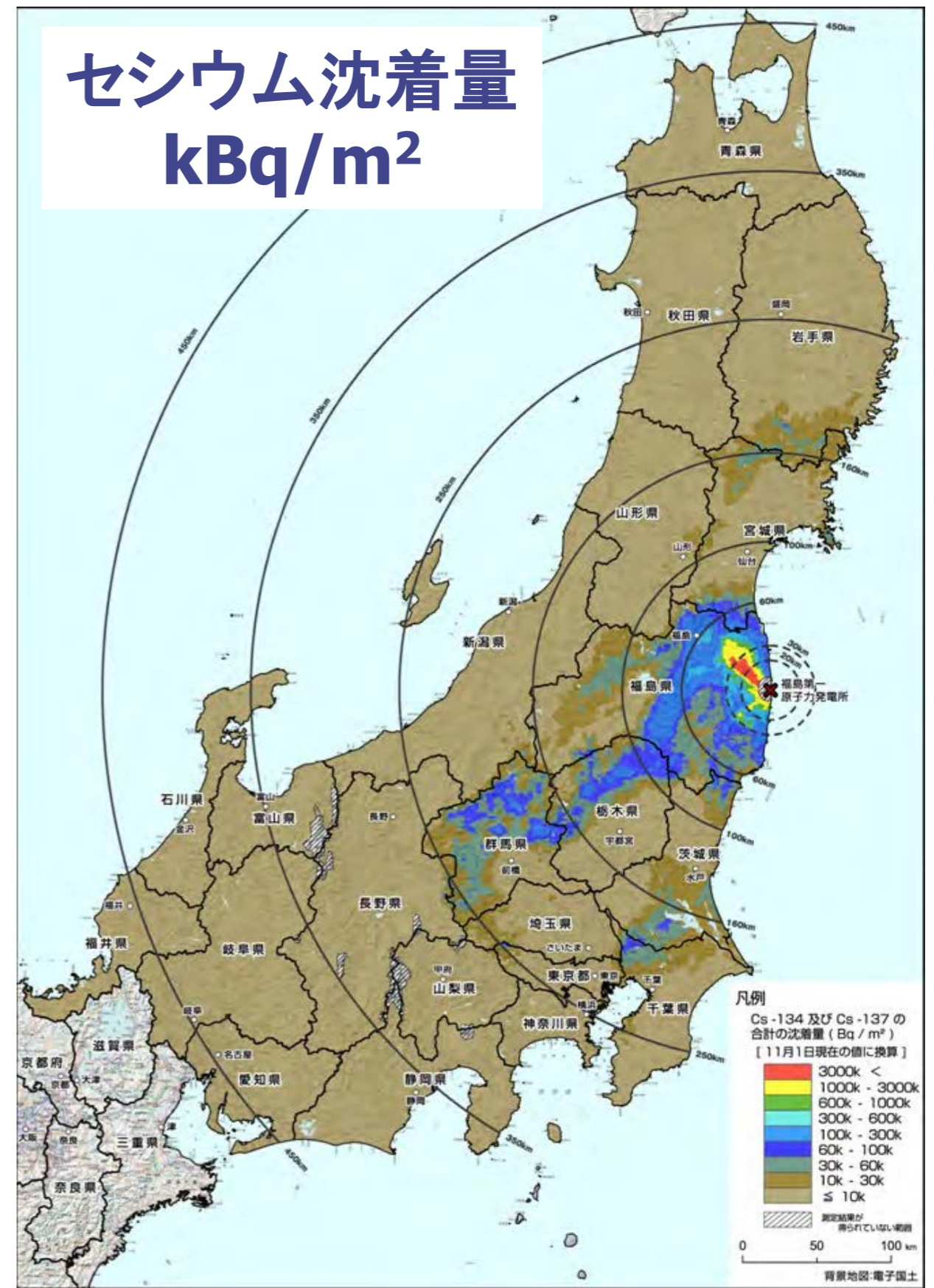
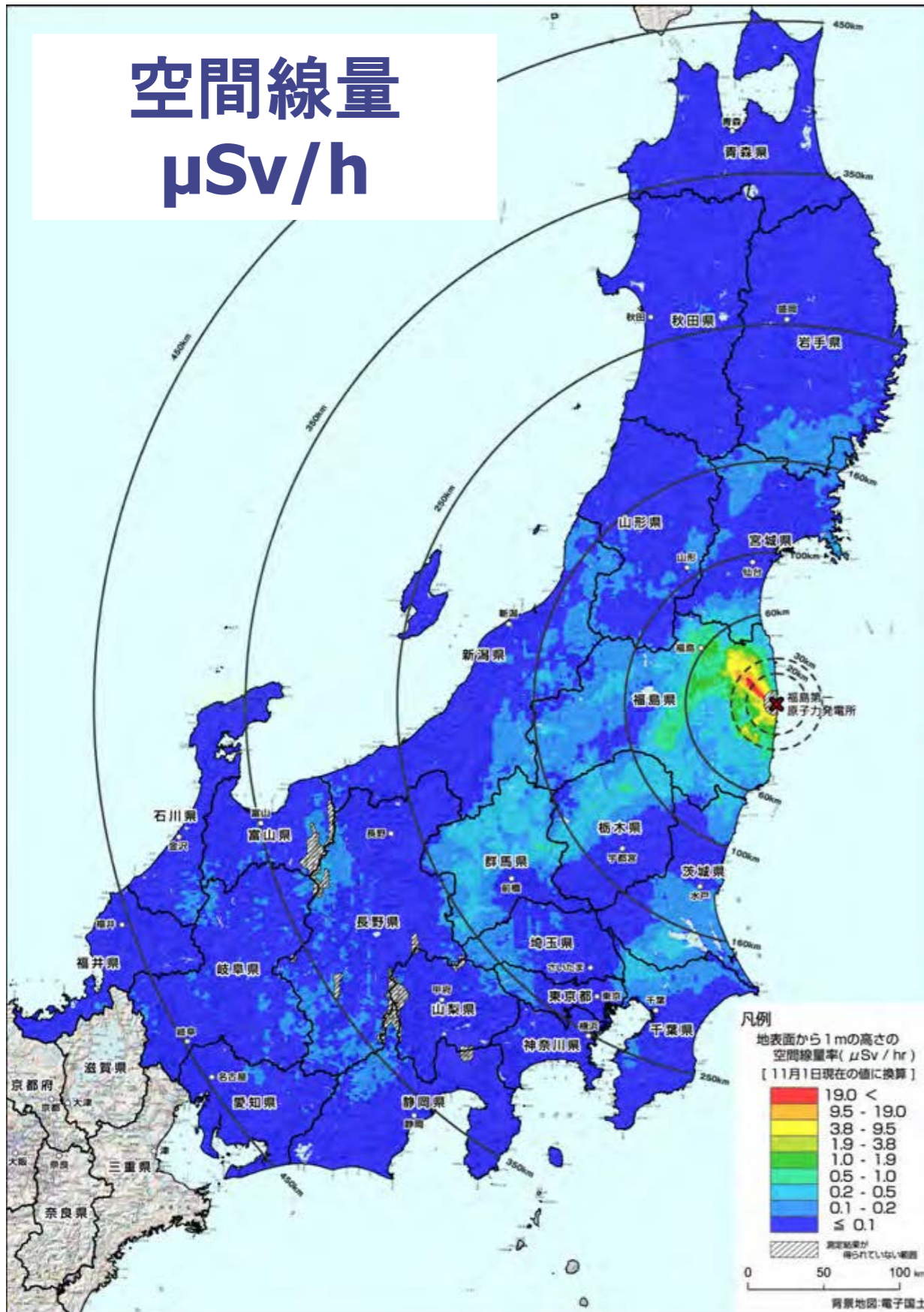
散乱された $\gamma$ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの $\gamma$ 線 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要がある (50%くらい増える)。

**$^{137}\text{Cs}$  : 2.1 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) / ( $\text{MBq/m}^2$ ) .... IAEA による値**

**高さ 1 m でも 50 cm でもさして違くない**

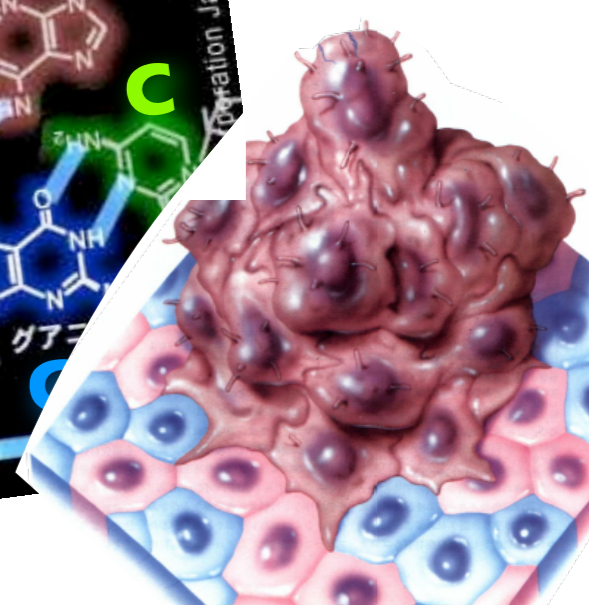
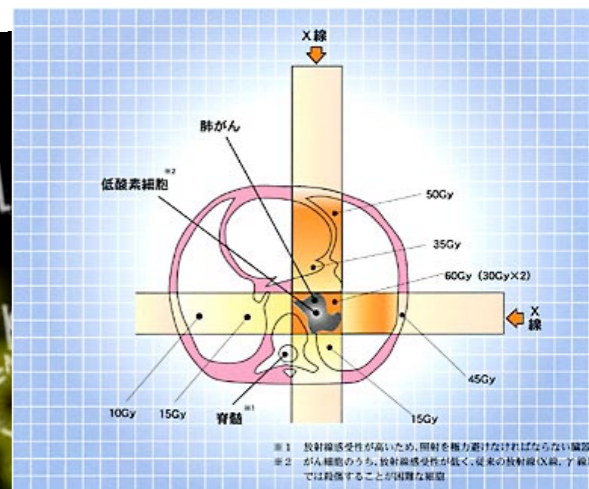
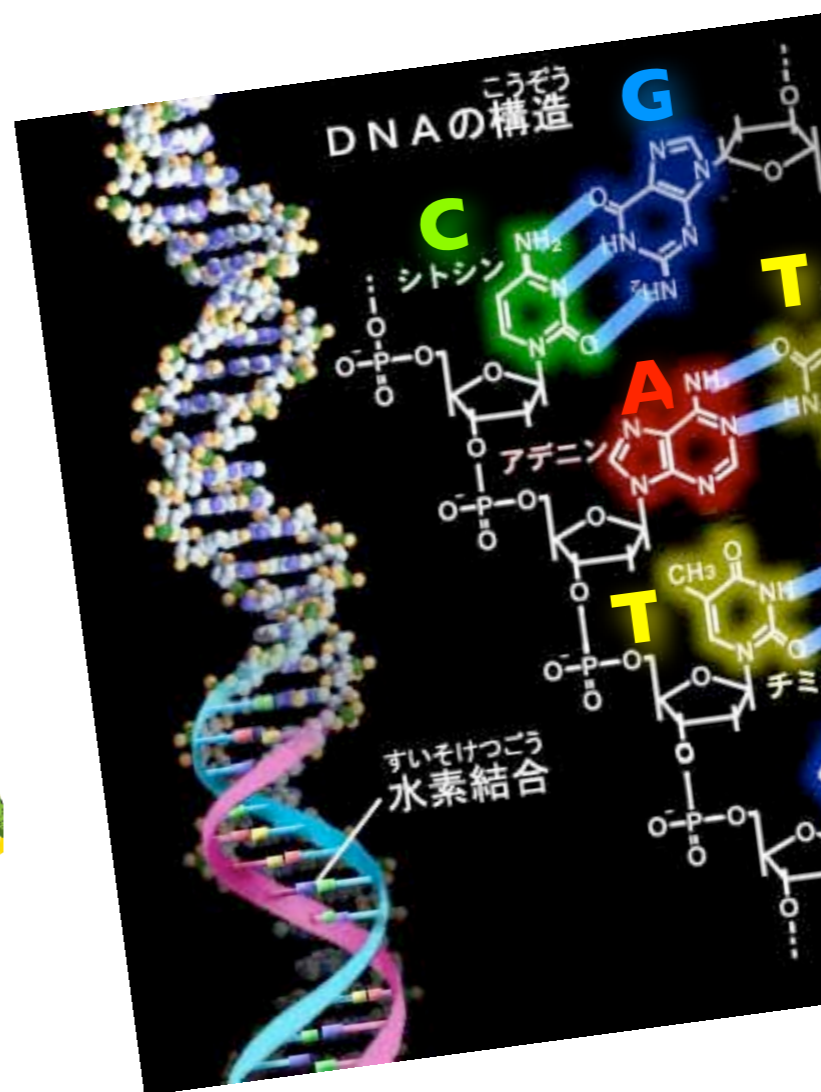
**遮るものがない平地の場合、半径 10 m だけ除染しても線量は半分も減らない。半径 100 m からの寄与が効く。**

# 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





# 放射線 と 放射能



## 第6話 放射線生物学・防護学・医療

鳥居 寛之

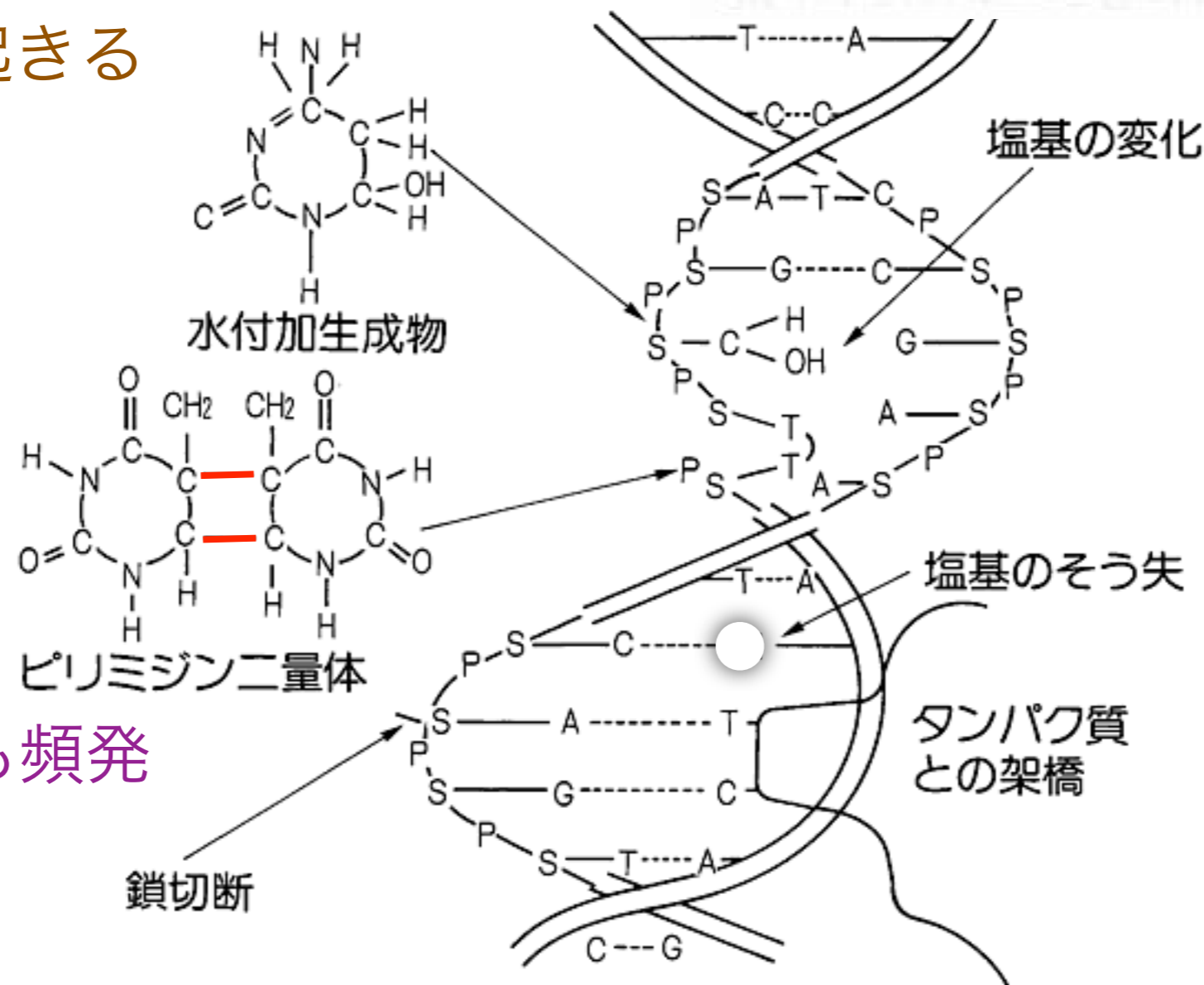
東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

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<sup>7)</sup>

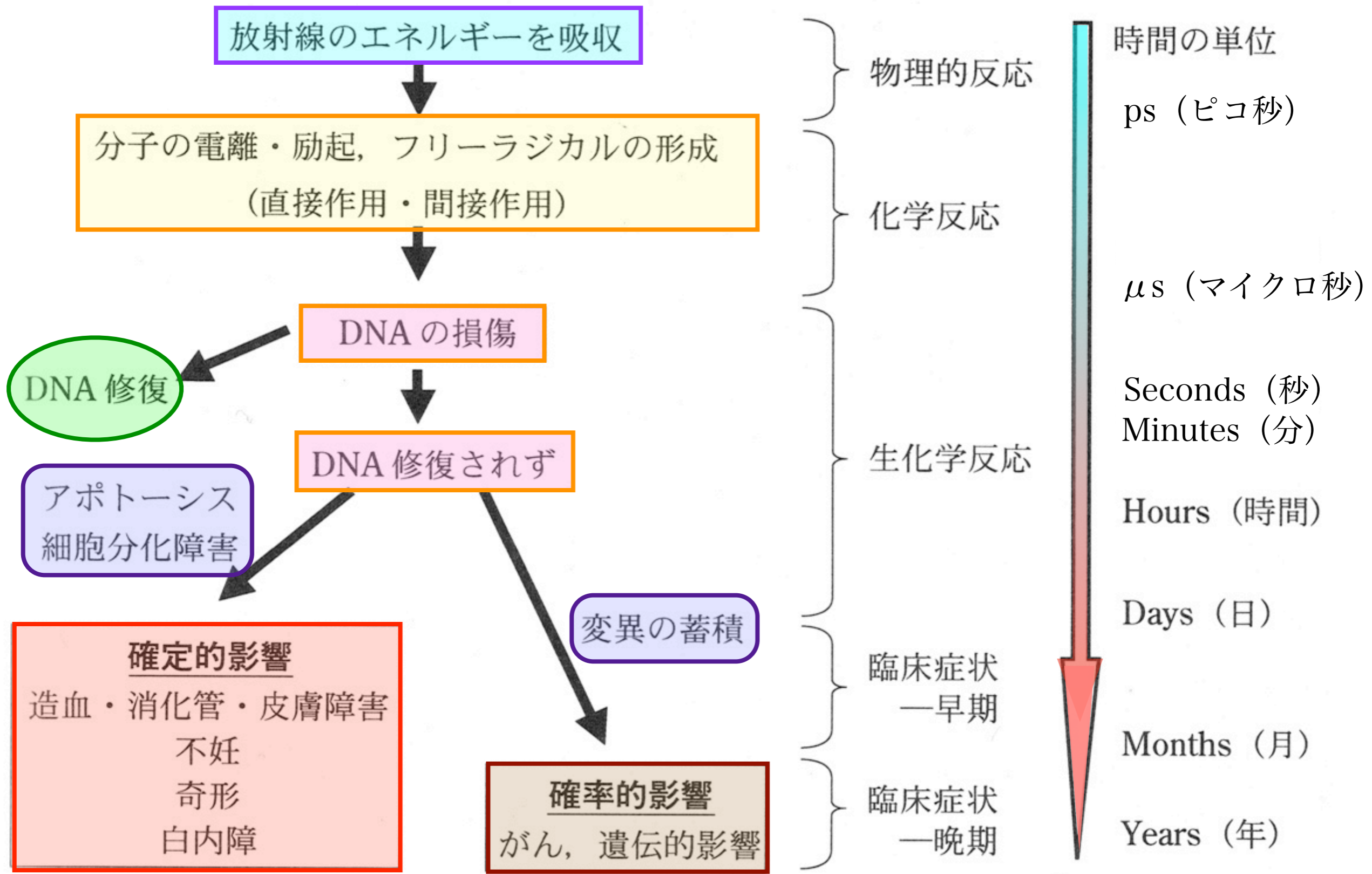
傷の種類	自然の傷(/細胞/日)	X線誘発の傷(/細胞/1 Sv)
塩基損傷	20,000	300
1本鎖切断	50,000	1,000
2本鎖切断	50(推定 <sup>2,19)</sup> )	40



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



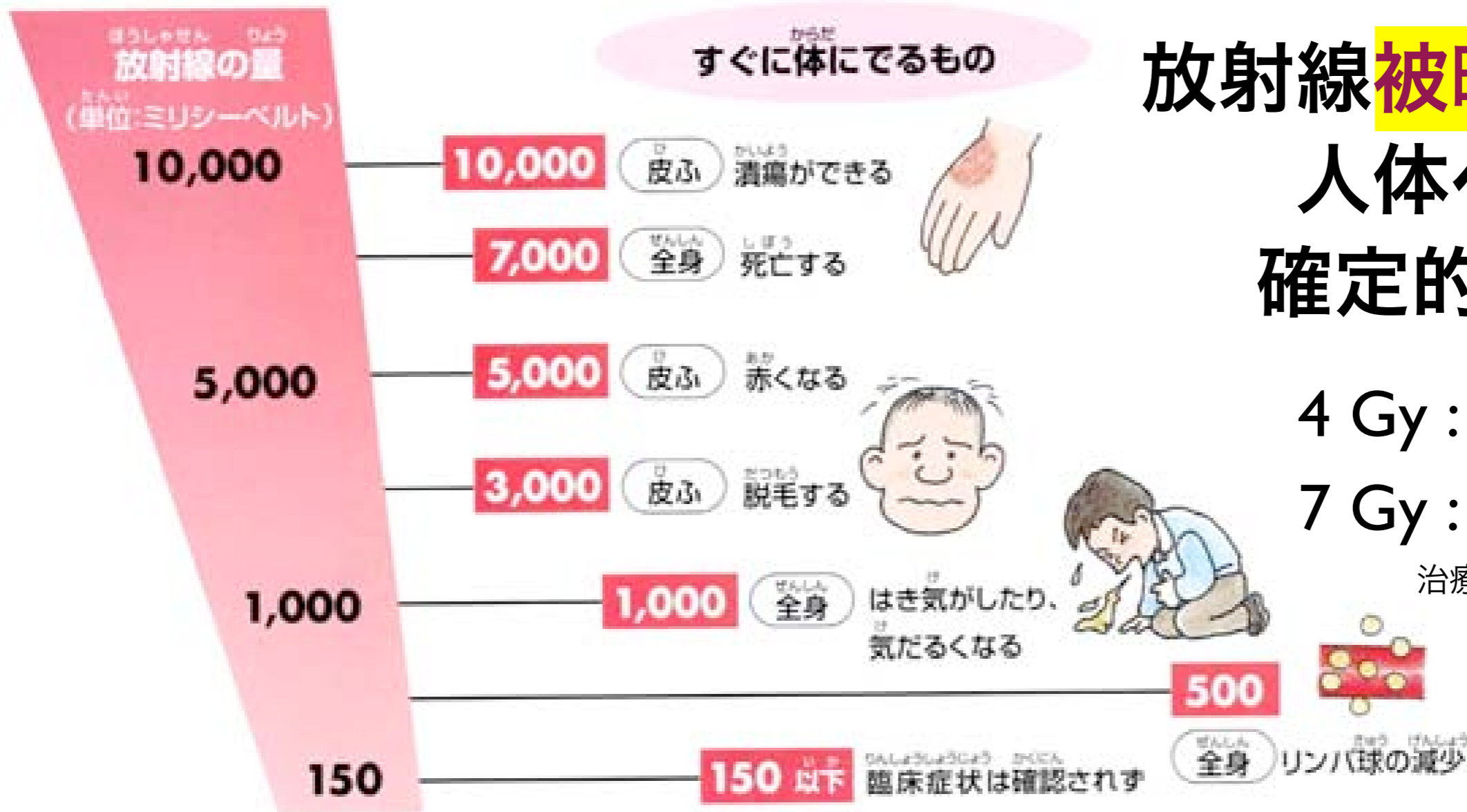
放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

# 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」

## 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	2週間	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)

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。

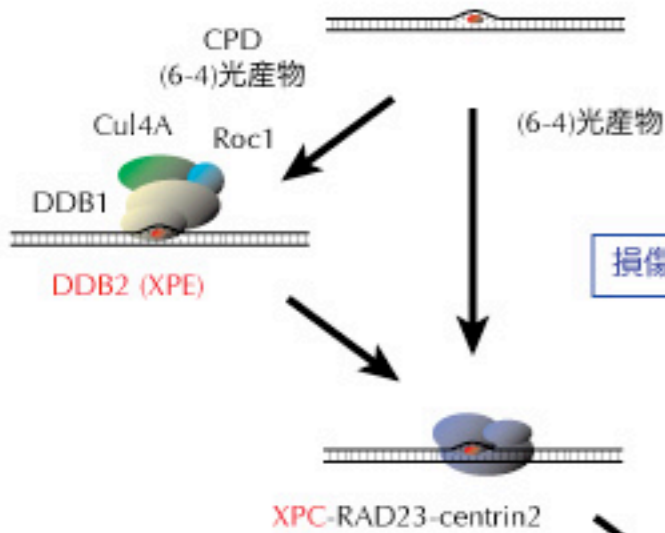
**リスクの確率。**

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。

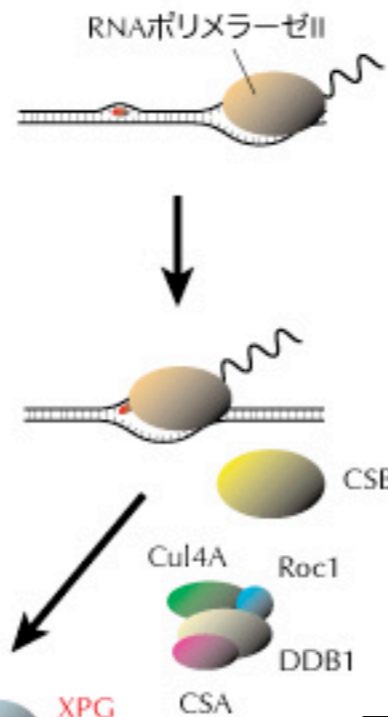
(日本人の3人に1人はがんで死亡する。)

**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。

## ゲノム全体を対象とする修復 (GGR)



## 転写と共役した修復 (TCR)

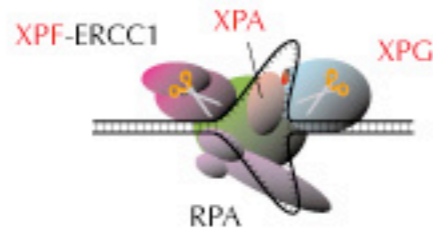


損傷の認識

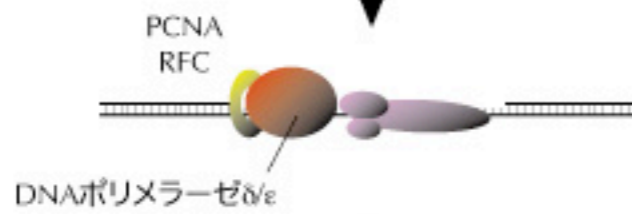
TFIIHによるDNA二重鎖の巻き戻し

TFIIH (XPB, XPD, TTDA)

損傷両側における一本鎖切断



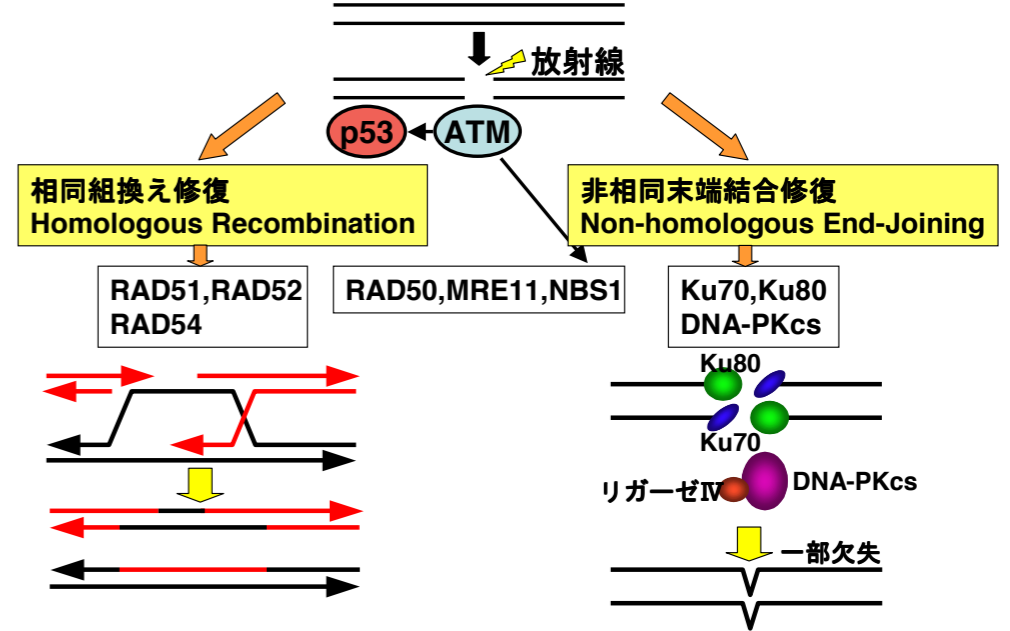
DNA修復合成



DNAリガーゼI

DNA鎖の再連結

## DNA二本鎖切断の修復経路



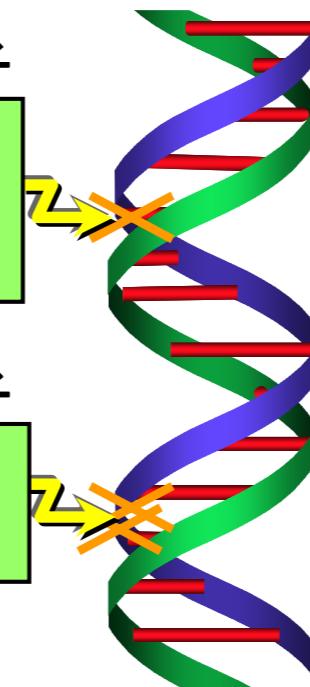
## ゲノムのキズを修復するシステム

外因性  
障害因子

化学物質  
紫外線  
放射線  
その他

内因性  
障害因子

活性酸素  
代謝産物  
その他



ゲノム修復装置

除去修復\*  
相同組み換え修復  
ミスマッチ修復  
末端結合修復  
損傷乗り越え修復  
その他

正しい修復

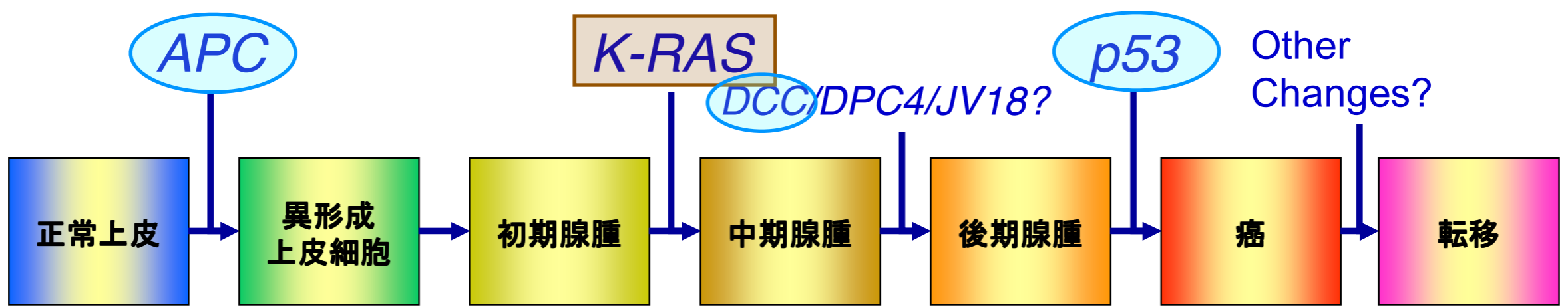
誤修復

突然変異

がん

アポトーシス

(\*) { 塩基除去修復  
ヌクレオチド除去修復



## 多段階発がん仮説

がん = 細胞の異常増加

がん遺伝子

がん抑制遺伝子

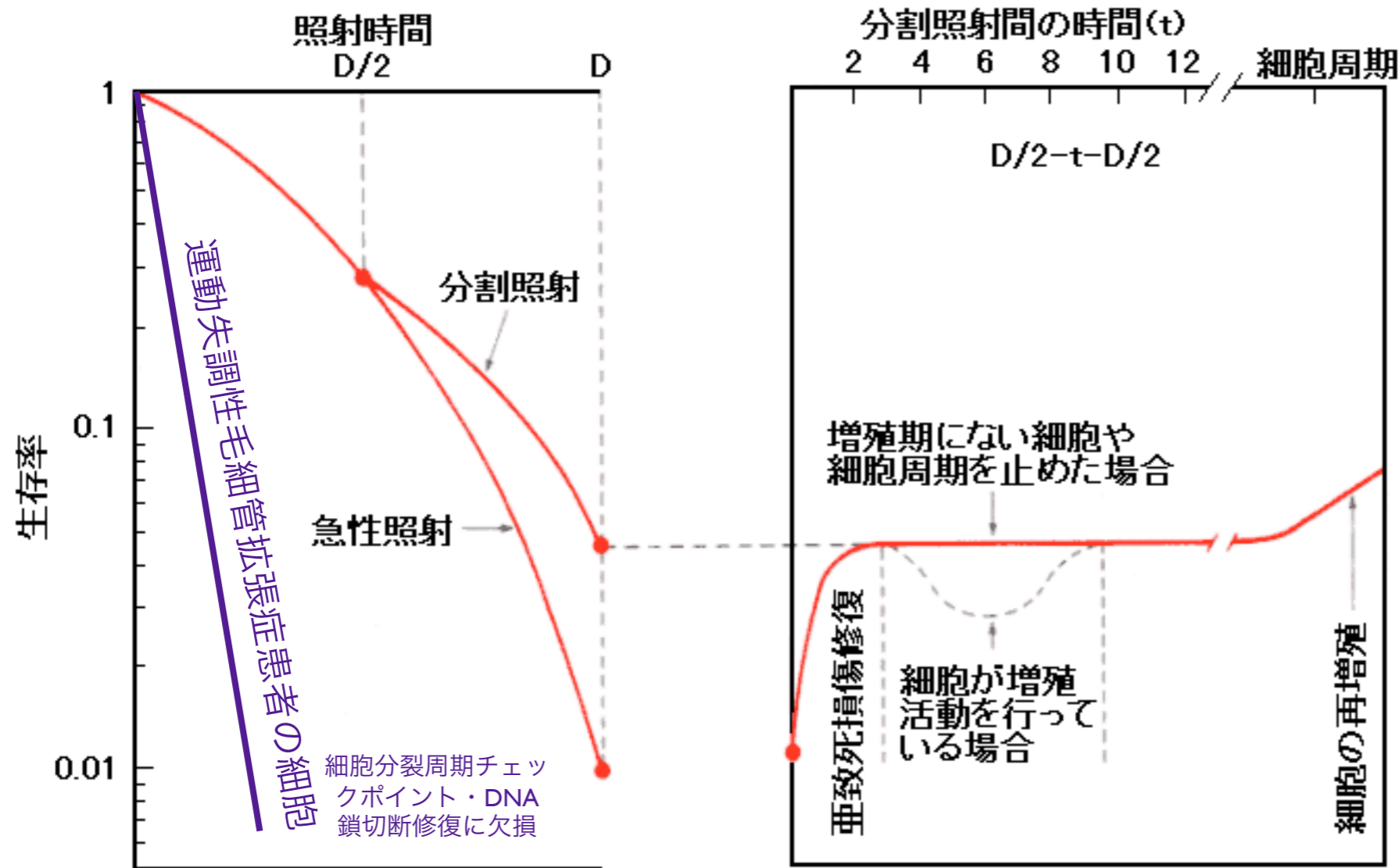
ミスマッチ  
修復の欠陥

ゲノム不安定性の誘導

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



# SLD (亜致死損傷) 回復 Sublethal Damage Recovery



数時間の中に  
損傷からの回復  
(DNA修復) が  
行われている。

低LET放射線では  
細胞周期によっても  
感受性が違う。  
(分裂期末とDNA合成期が弱い)

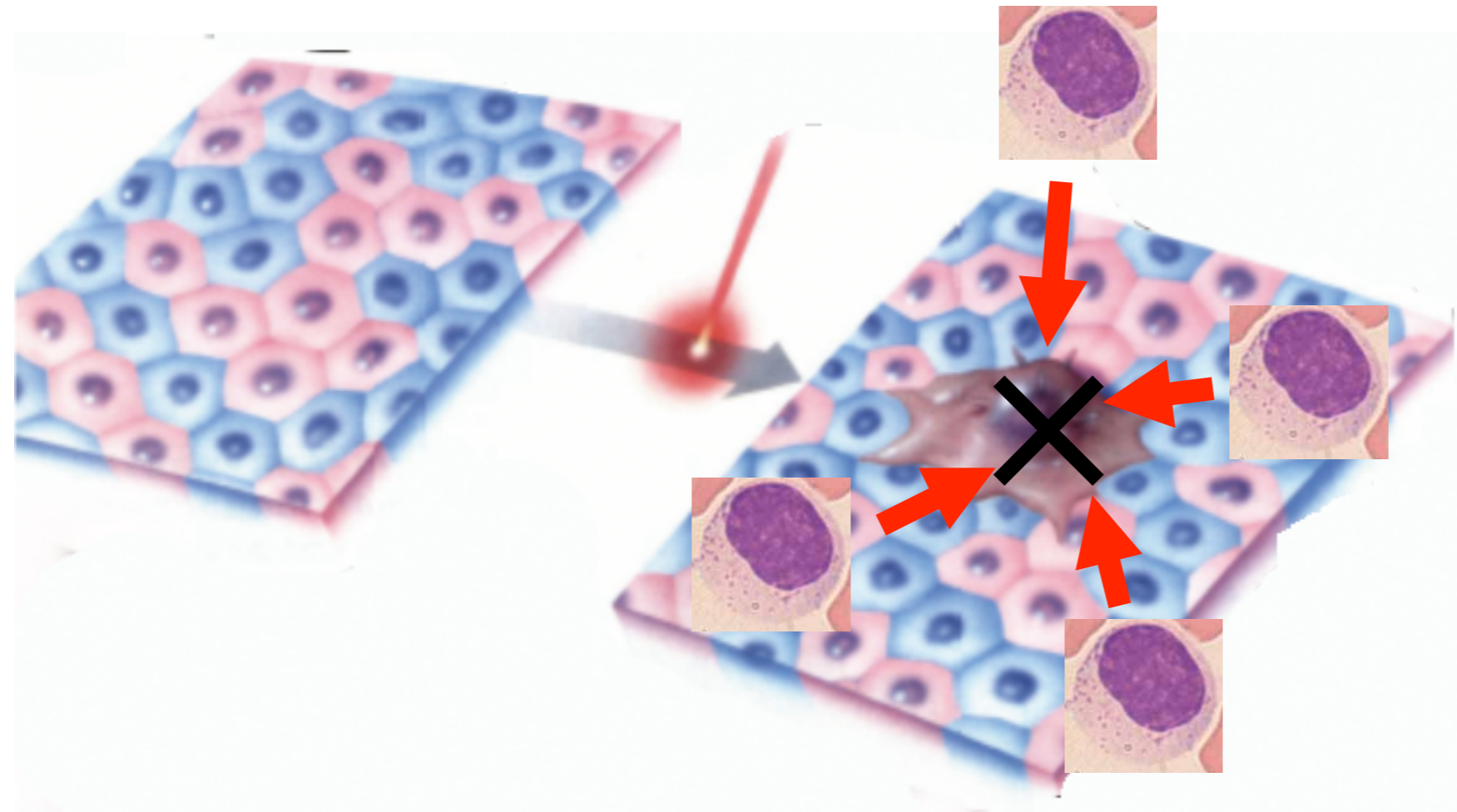
がん細胞は頻繁に増殖を続けているので、放射線に対する感受性が高い。DNA修復機能も弱い。低酸素状態のがん細胞は放射線抵抗性。正常細胞への影響を抑えつつがん細胞を殺すには、複数回照射が有効。

細胞が放射線照射を受けると細胞分裂の周期を止めて（分裂遅延）DNA修復を待つしくみも備えている。

DNA修復に異常がある場合は細胞生存率が著しく低下する。

# がん、とは？

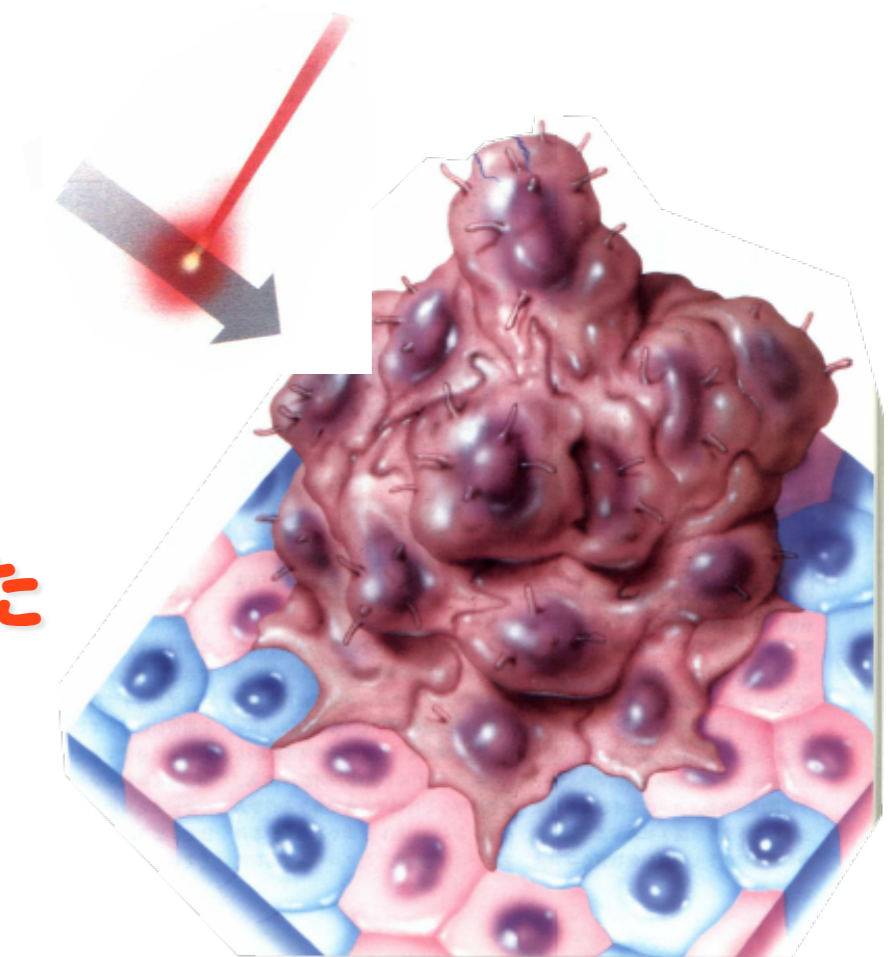
がん細胞は毎日5000個もできている！！



リンパ球が、できたてのがん細胞を殺す

免疫の攻撃をかいくぐった  
ものが「がん」

がん、とは一種の「老化」



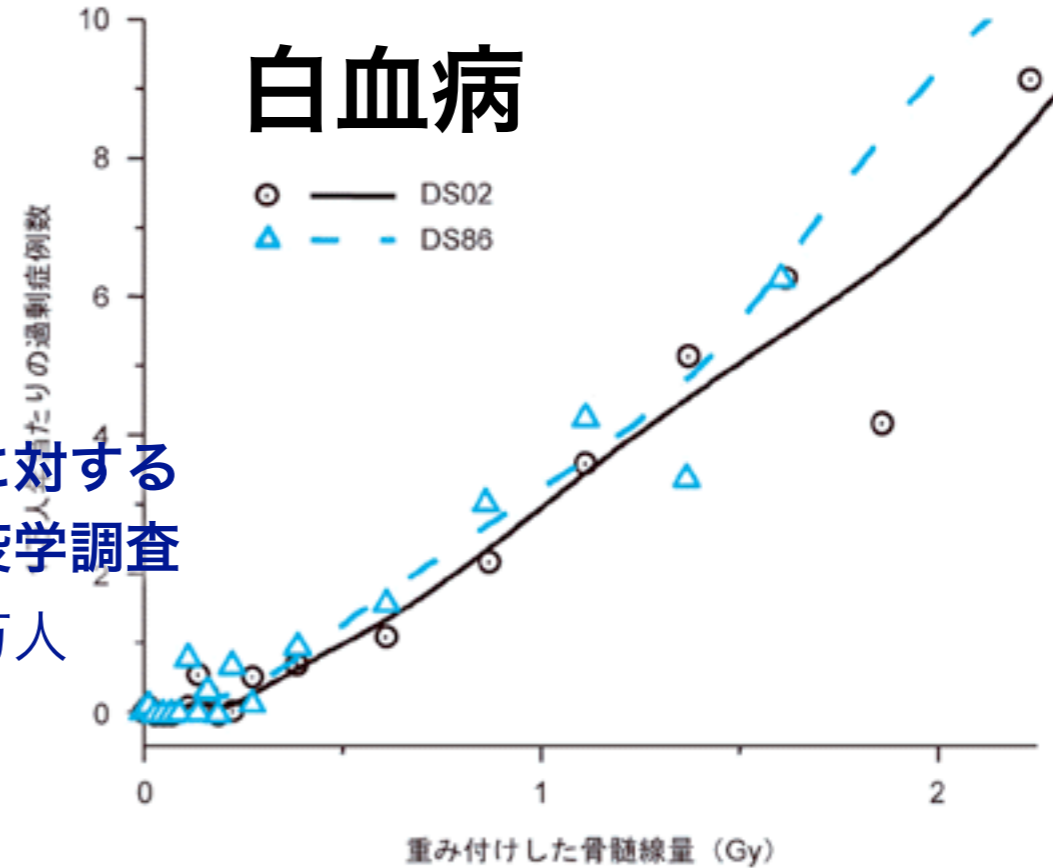
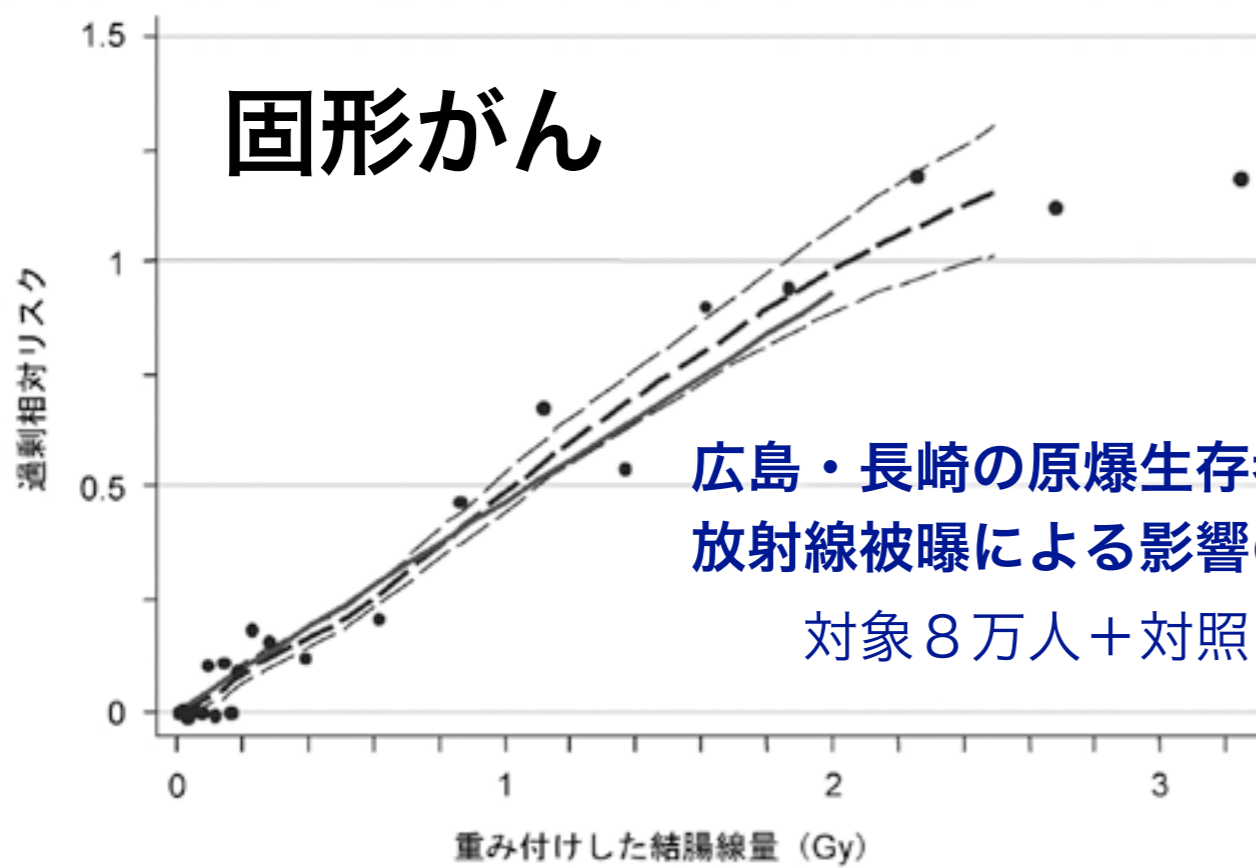


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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%

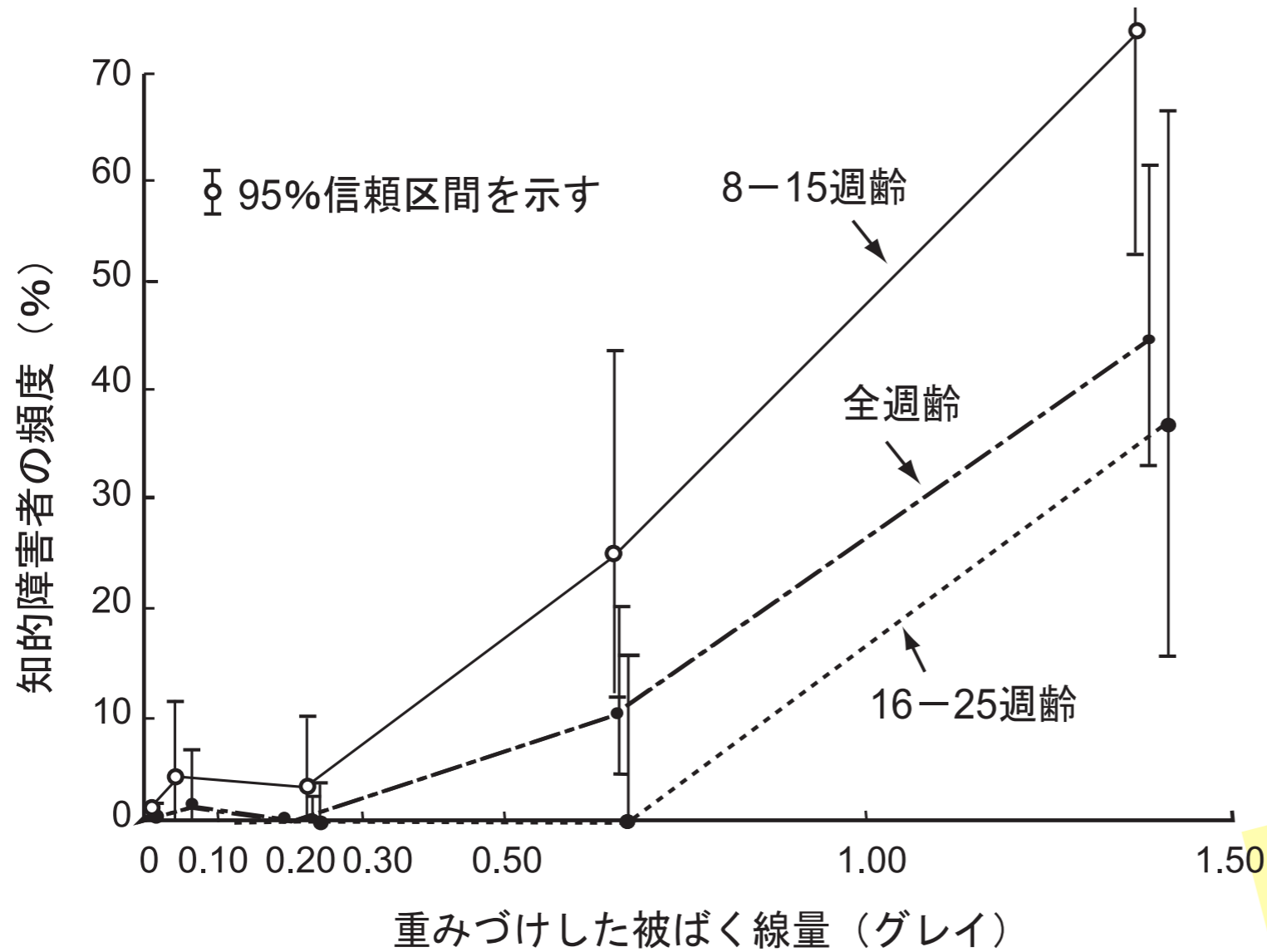
表. LSS集団における白血病による死亡の観察数と推定過剰数、1950-2000年

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



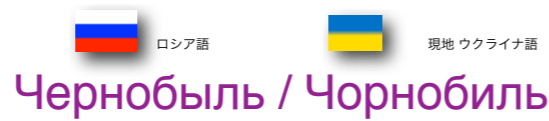
(財)放射線影響研究所 パンフレット「放射線影響研究所のご案内」

チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な堕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)

## 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。

# 低線量・低線量率の被曝とガン死亡



## チェルノブイリ原発事故

チェルノブイリ原発  
黒鉛炉  
格納容器なし  
1週間燃え続けた

福島第一原発  
沸騰水型軽水炉  
格納容器あり  
水素爆発・汚染水流出

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

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

事故処理に当たった軍人ら“リクビダートル”  
60万人が数百 mSv 被曝

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

(最大で 750 mSv の被曝)

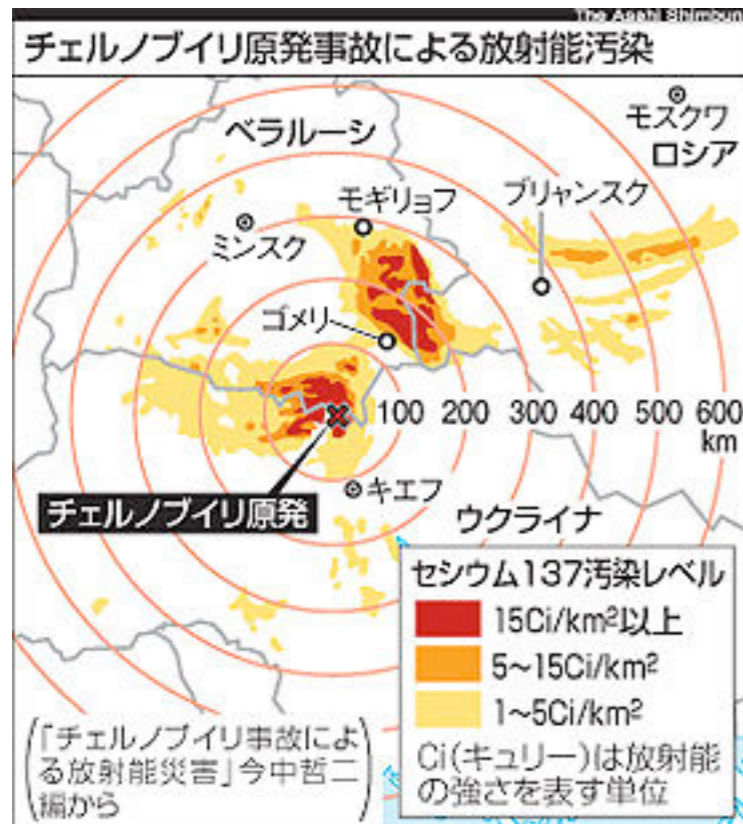
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

一般住民で確認された健康への影響は  
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。

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

甲状腺平均被曝量 2 Gy !!

と、ずっと大きいストレスによる失調



# 低線量・低線量率の被曝とガン死亡

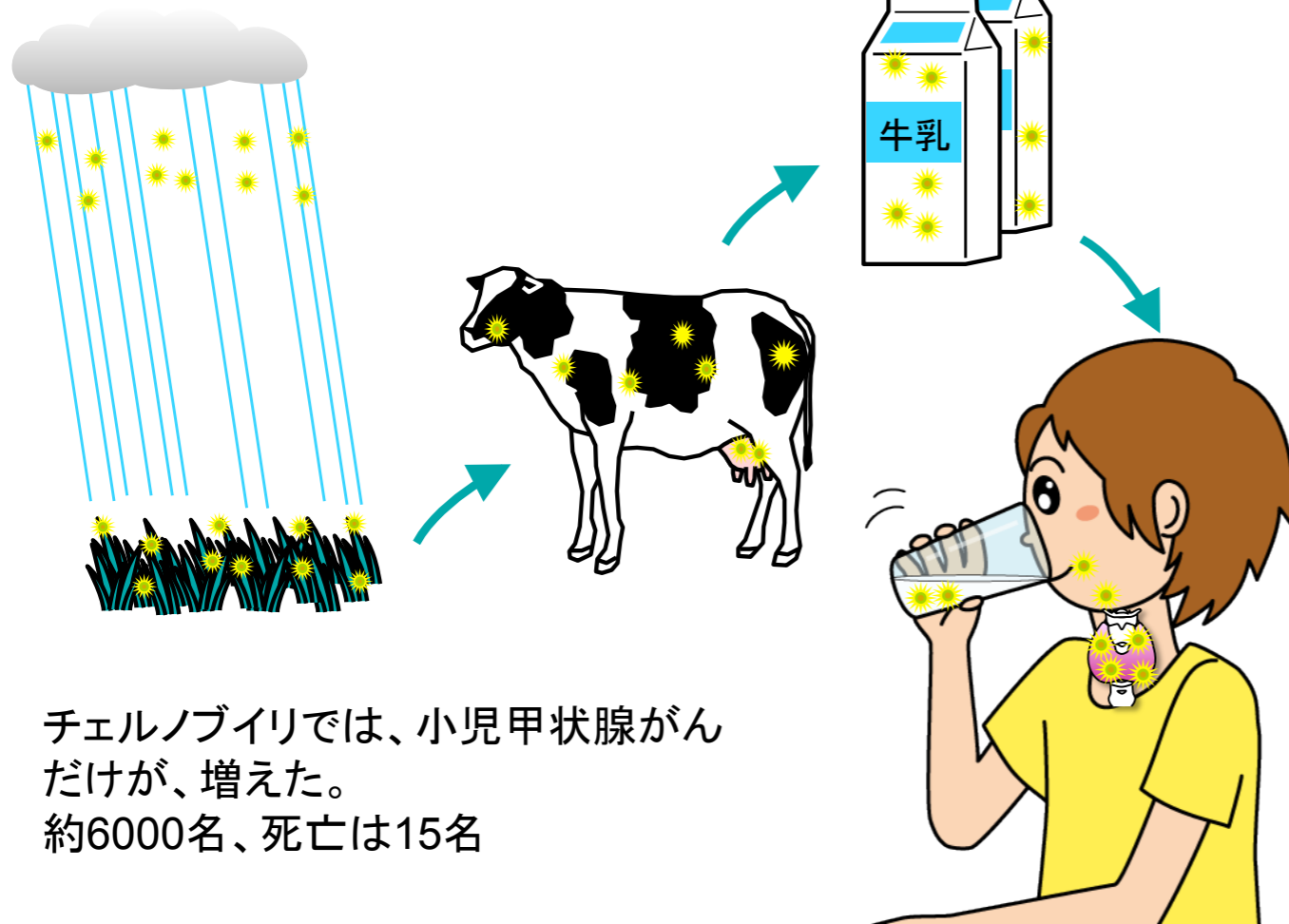


ロシア語  
Чернобыль / Чорнобиль



## チェルノブイリ原発事故

$^{131}\text{I}$  (ヨウ素 $^{131}\text{I}$ ) 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  
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。  
(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)

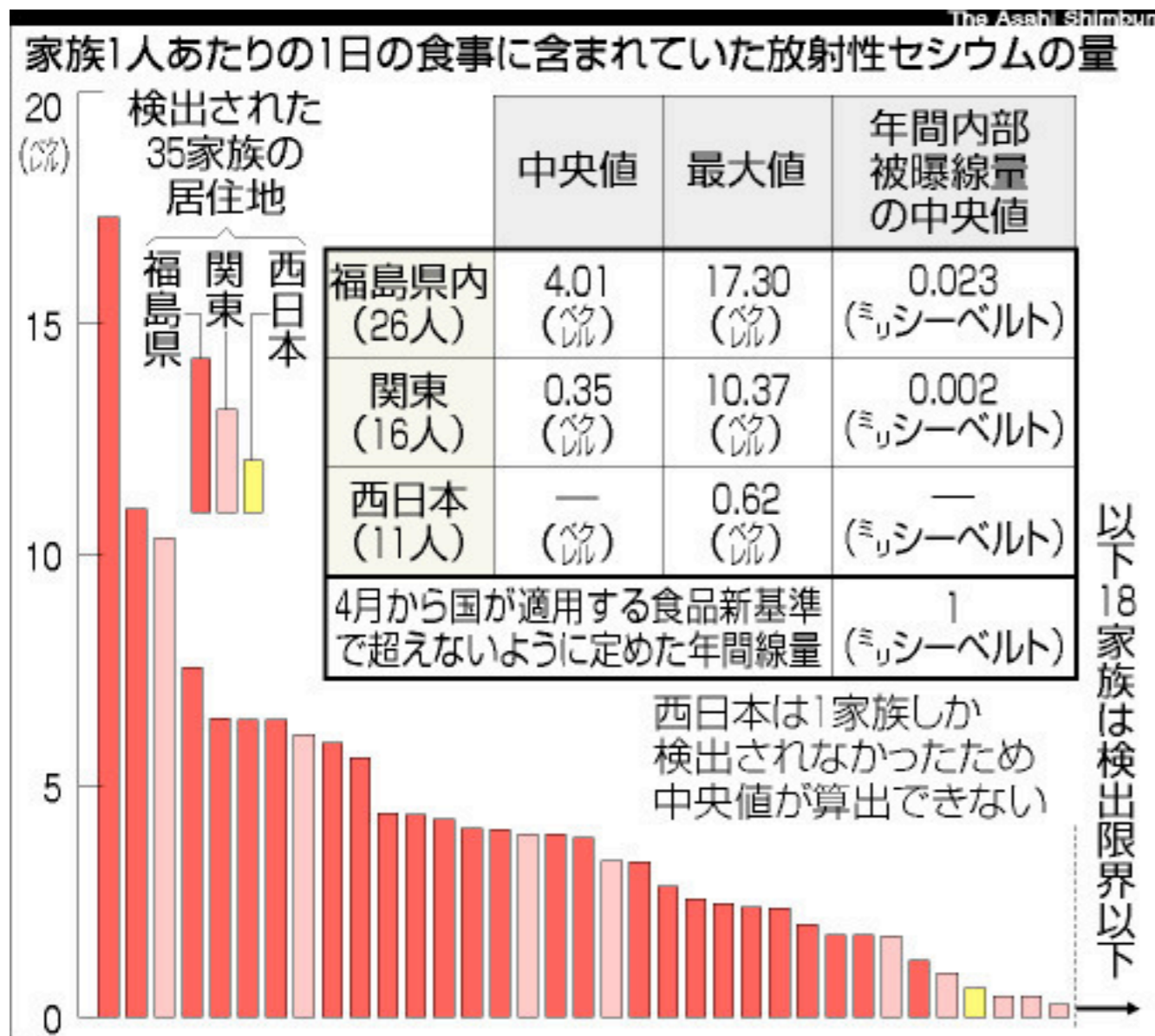
甲状腺平均被曝量 **2 Gy**

= **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

# セシウムによる内部被曝について



2012/1/18 朝日新聞：京都大医学研究科 小泉昭夫教授らの調査

最近の調査結果をみれば、ひとまず安心。

自然の内部被曝に比べ一割以下  
(いろいろ批判されてきたが)  
食品規制が奏効しているようだ。

## ■放射性セシウムの基準

暫定基準		新基準案	
野菜類	500%	一般食品 (野菜類、穀類、肉・卵・魚・その他)	100%
穀類	500%		
肉・卵・魚・その他	500%		
飲料水	200%	飲料水	10%
牛乳・乳製品	200%	牛乳	50%
		乳児用食品	50%

(1kgあたり)

事故前から体内に存在する放射性物質による自然放射線の内部被曝量 (体重 60 kg の人)

カリウム40、炭素14などあわせて 7200 ベクレル：0.3 ミリシーベルト／年間

うち、カリウム40 が 4100 ベクレル：0.2 ミリシーベルト／年間

# 放射線のリスク評価と防護

## 低線量におけるリスク評価

将来のガンの増加リスク

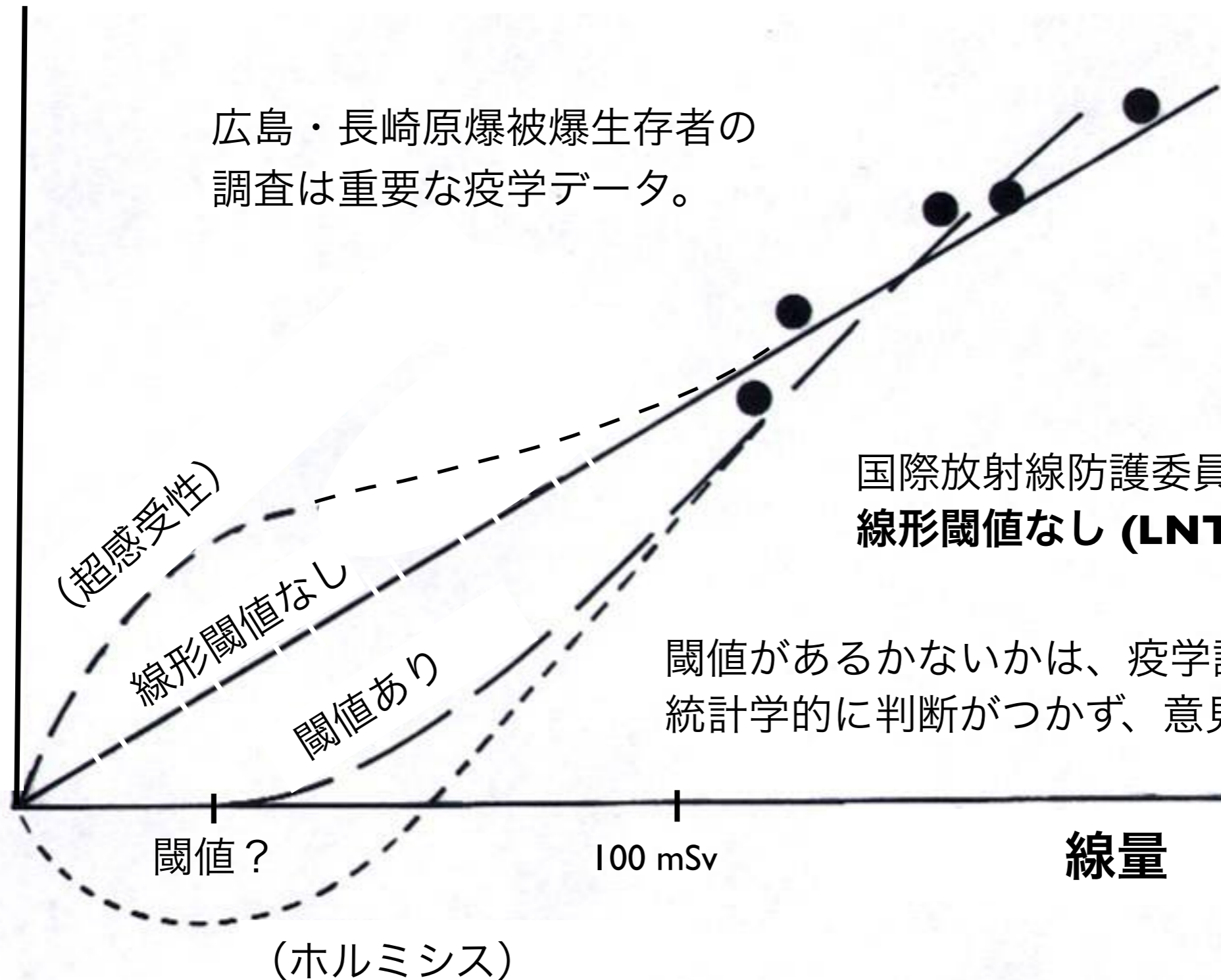




表2 低線量、低線量率放射線被ばくに伴うがん死亡の生涯リスク(ICRP1990)

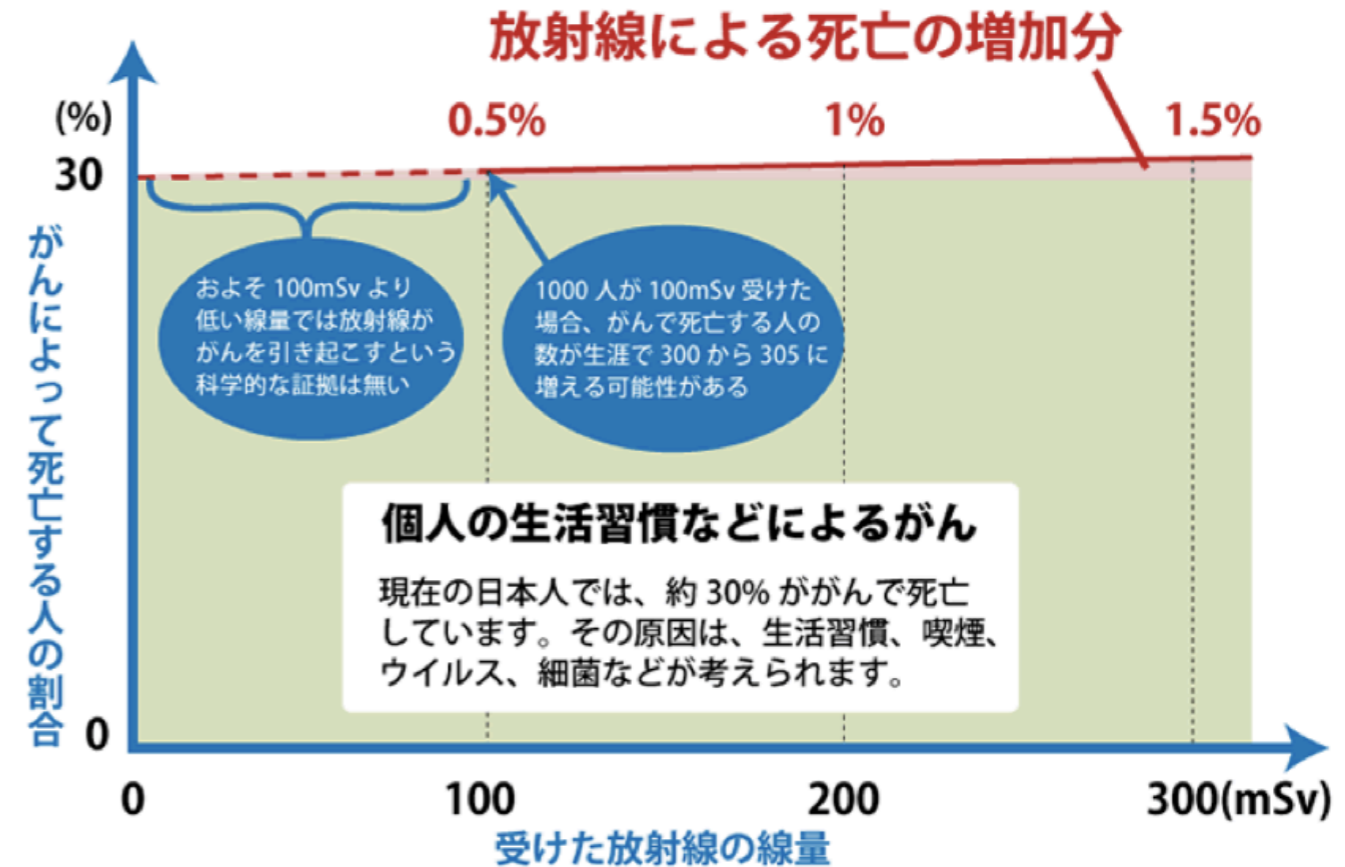
(10,000人当り、全年齢平均、1Sv当り過剰死亡数)

	ICRP 1977年勧告	ICRP 1990年勧告
赤色骨髄	20	50
骨表面	5	5
膀胱		30
乳房	25	20
結腸		85
肝臓		15
肺	20	85
食道		30
卵巣		10
皮膚		2
胃		110
甲状腺	5	8
その他	50	50
合計	125	500

[出典](社)日本アイソトープ協会:国際放射線防護委員会の1990年勧告(1991年11月)、p.157

# 低線量・低線量率の被曝

## 放射線によるがん・白血病の増加



国際放射線防護委員会

## ICRP 1990 の勧告値

100 mSv の被曝で人口あたり 0.5% の増加 (LNT仮説)

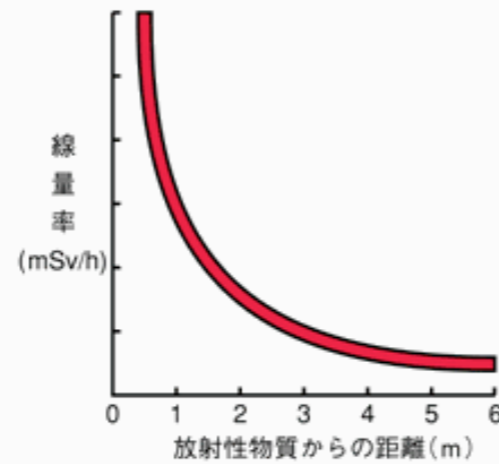
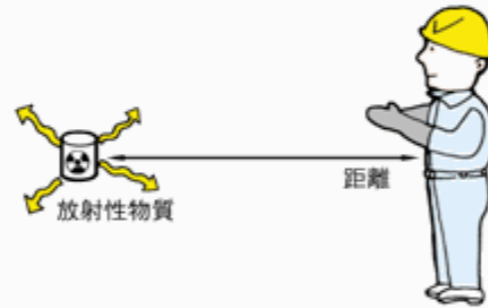
喫煙によるリスクより遥かに小さい。

**LNT (線形閾値なし) 仮説はあくまでも**放射線あるいは環境化学物質に対する基準の策定に必要な防護の具体的数値を算出するための**仮説**として提出されたもので、メカニズムの面からは必ずしも支持されるわけではない。

# 放射線防護

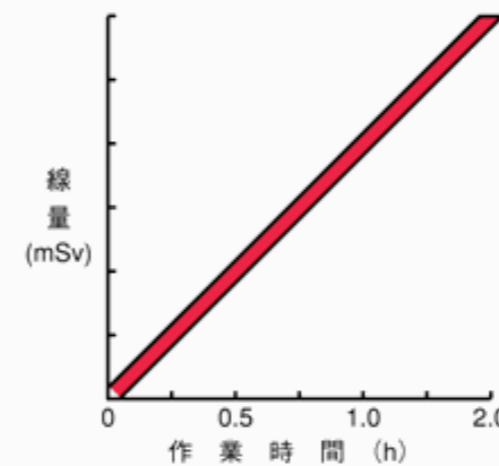
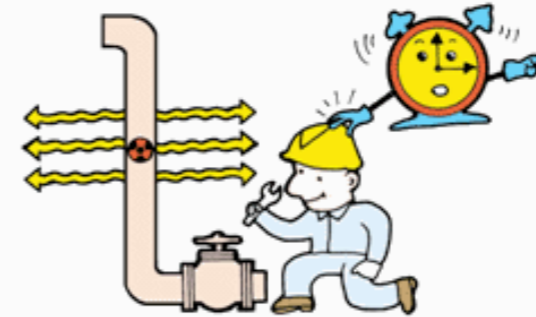
## ● 距離による防護

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



## ● 時間による防護

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



## ● 遮へいによる防護

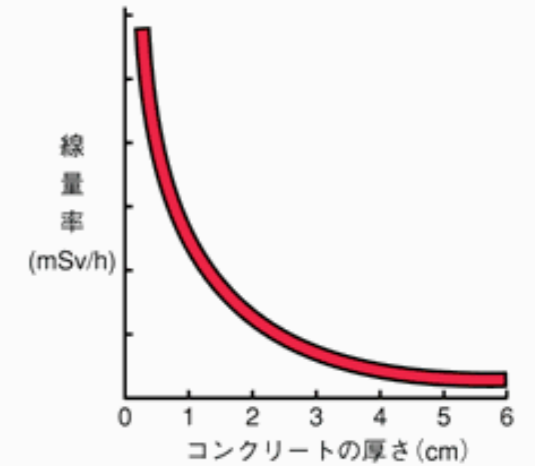
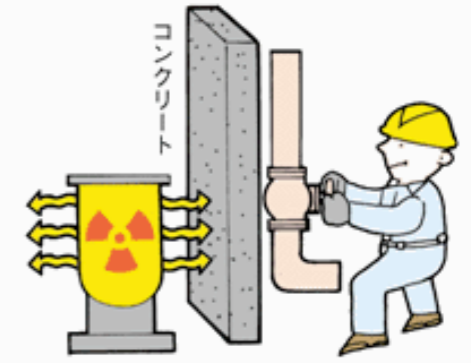


図1 遮へい3原則の図

[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
等価線量	
水晶体	150 mSv / 年
皮膚	500 mSv / 年
妊娠中の女子の 腹部表面	2 mSv / 年

	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 <sup>2)</sup>
皮膚等価線量	500mSv/年 <sup>1)</sup>	500mSv/年
手・足の等価線量	500mSv/年	500mSv/年 <sup>3)</sup>
その他の組織	—	500mSv/年

1) 被ばく部位に関係なく、深さ7 mg/cm<sup>2</sup>、面積1 cm<sup>2</sup>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 <sup>1)</sup> , 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 <sup>3)</sup>	50 mSv/年
その他の組織	—	50 mSv/年 <sup>2)</sup>

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

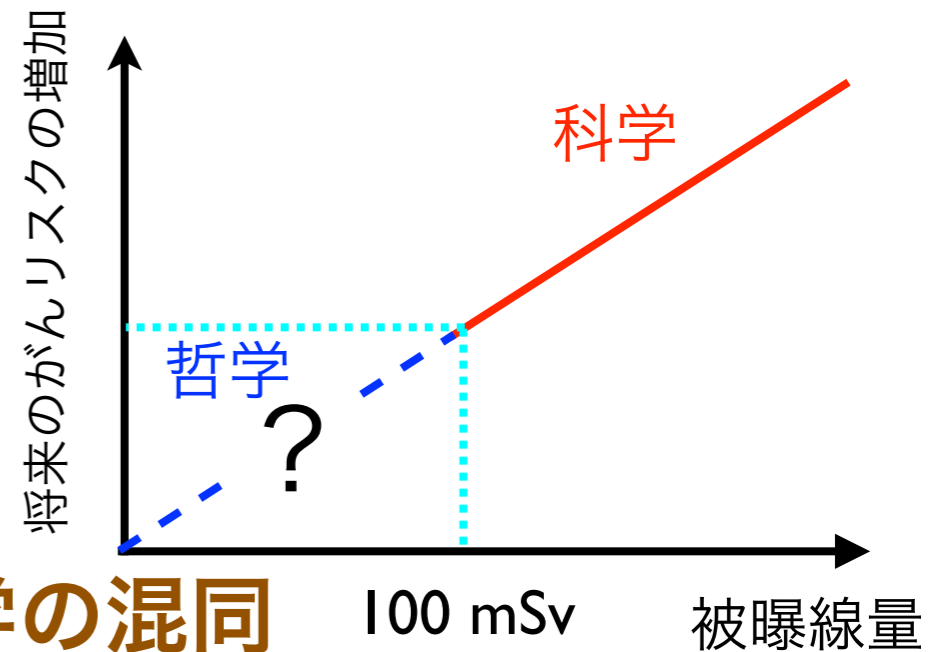
# 放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

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    スクリーニング効果・別の要因

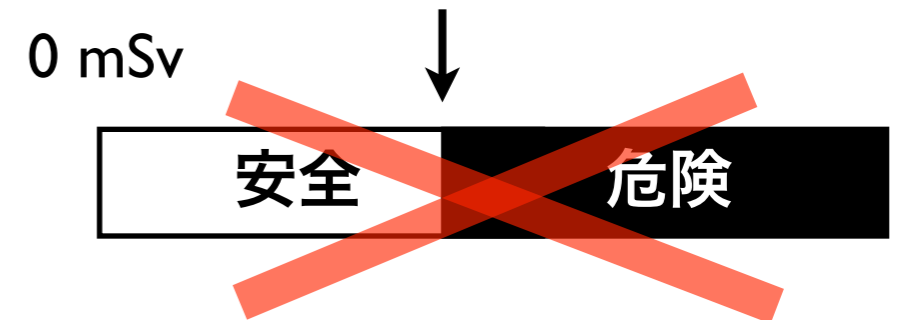


科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

リスクをどこまで許容するか

安全と危険の線引きはできない。

他のリスクとの相対比較



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、  
根拠のない恐れや不安もまた問題。

☞ JCO の事故

☞ パニック、風評、健康被害。

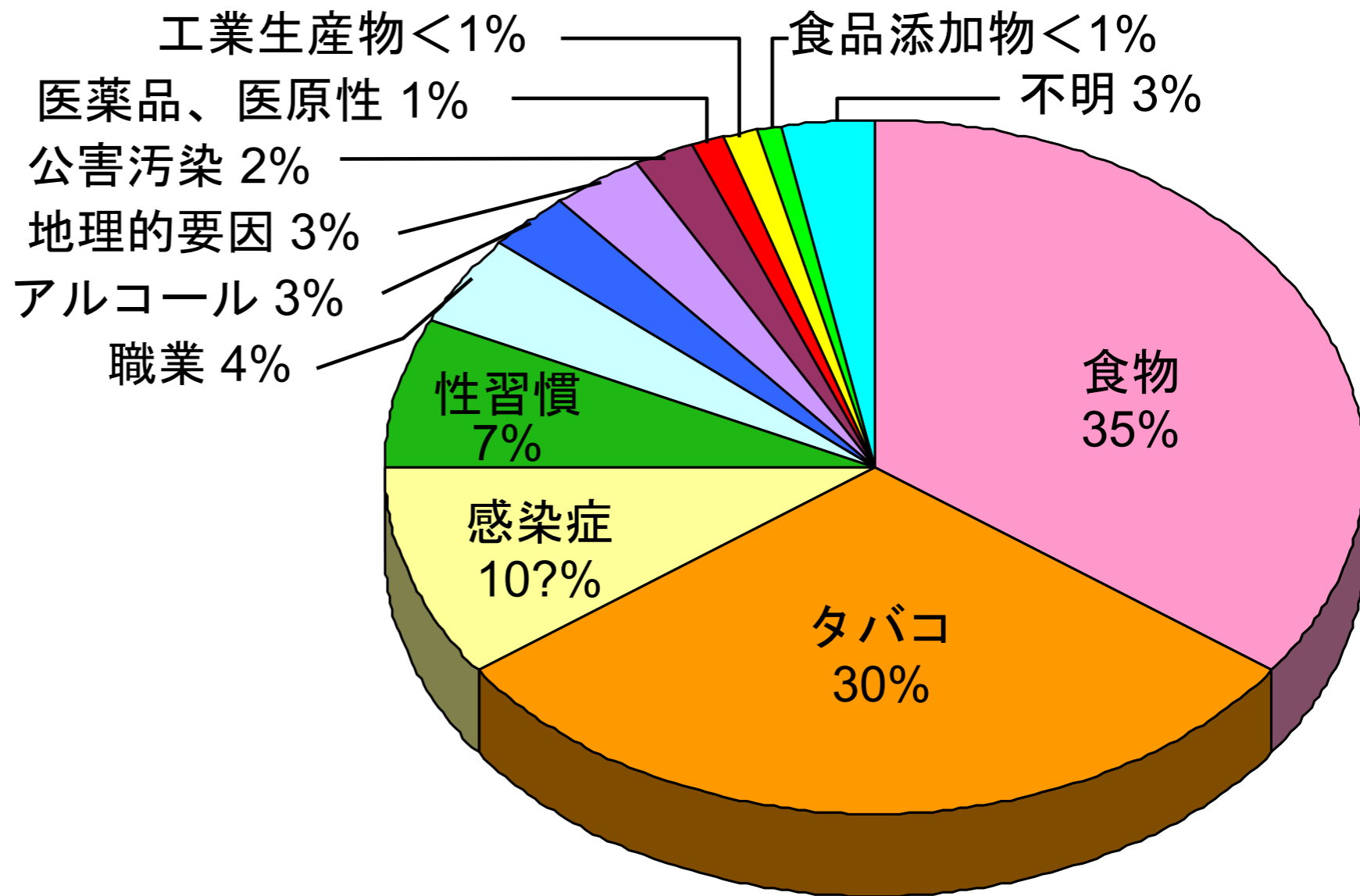
## 放射線と生活習慣の 発がんの相対リスク比較

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)

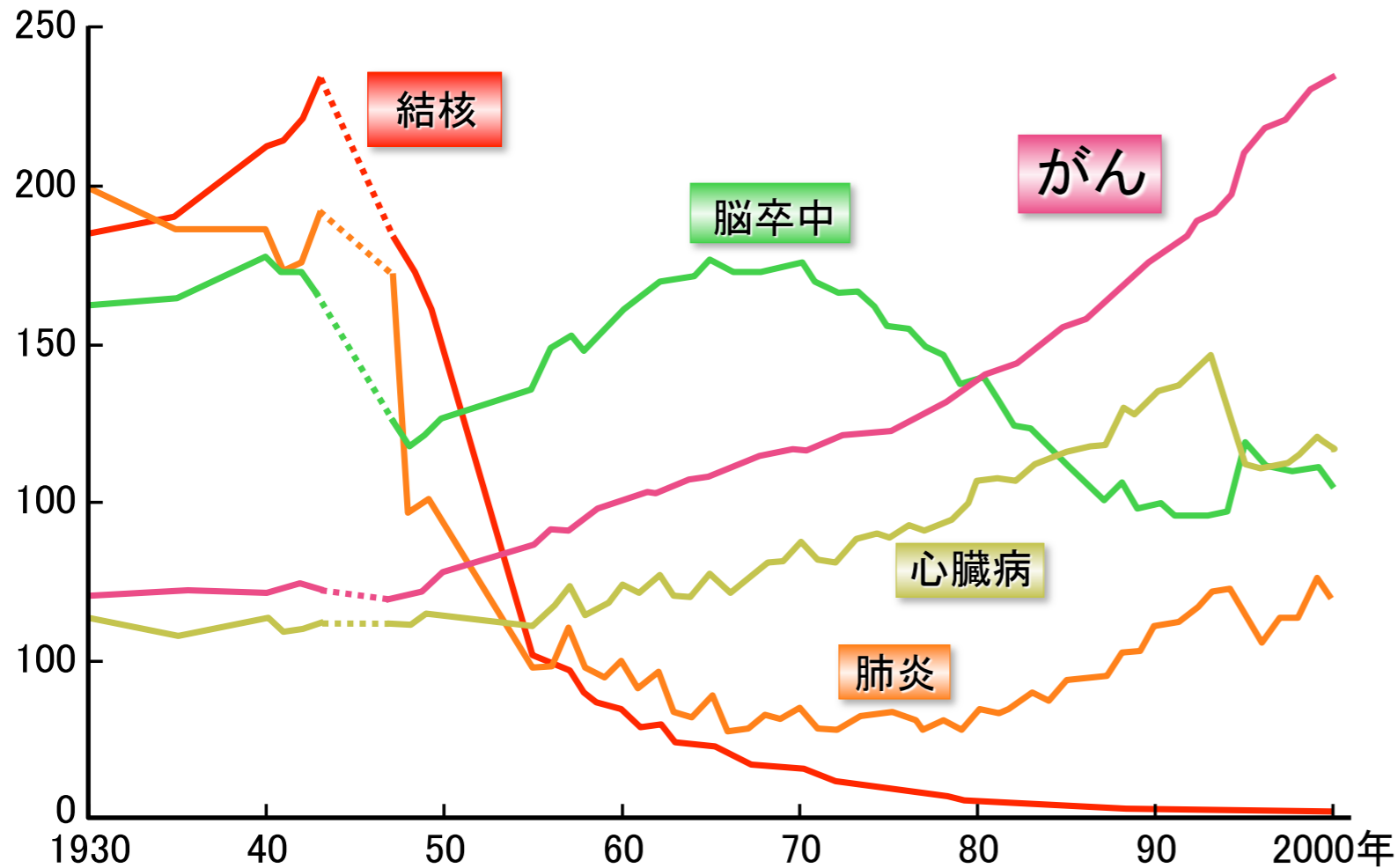
表の値は短時間での被曝の場合。

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。)

日本人の2人に1人が、がんになり、3人に1人が、がんで死んでいる

東大医学部附属病院  
中川 恵一 先生



がんで死なないためには、

👉 **がんにならないのが一番**  
**+ なくても、早期発見で完治させる**

**早期発見 = がん検診**

(症状に気づいてからでは遅い)

**がんにならない生活習慣**

- タバコは吸わない
- 酒はひかえめ (赤くなる人は特に)
- 肉と塩分はひかえめ
- 野菜を十分に
- 運動

「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

# 放射線に対する強い恐怖心をもっている人たちがいる

あるウェブページのコメント欄より (2011/11~12)

まったく汚染されていない瓦礫などありません。 **震災がれき処理問題**

「私たちにできることは、被災地の苦しみ、痛み、悲しみを分かち合う、寄り添うことだ」とおっしゃっていますが、瓦礫受け入れによって、その苦しみや痛み、悲しみを市民に与えることになるとは思われないのでしょうか？瓦礫を受け入れることによってもたらされる影響を熟考され、適切な判断をされることを望みます。

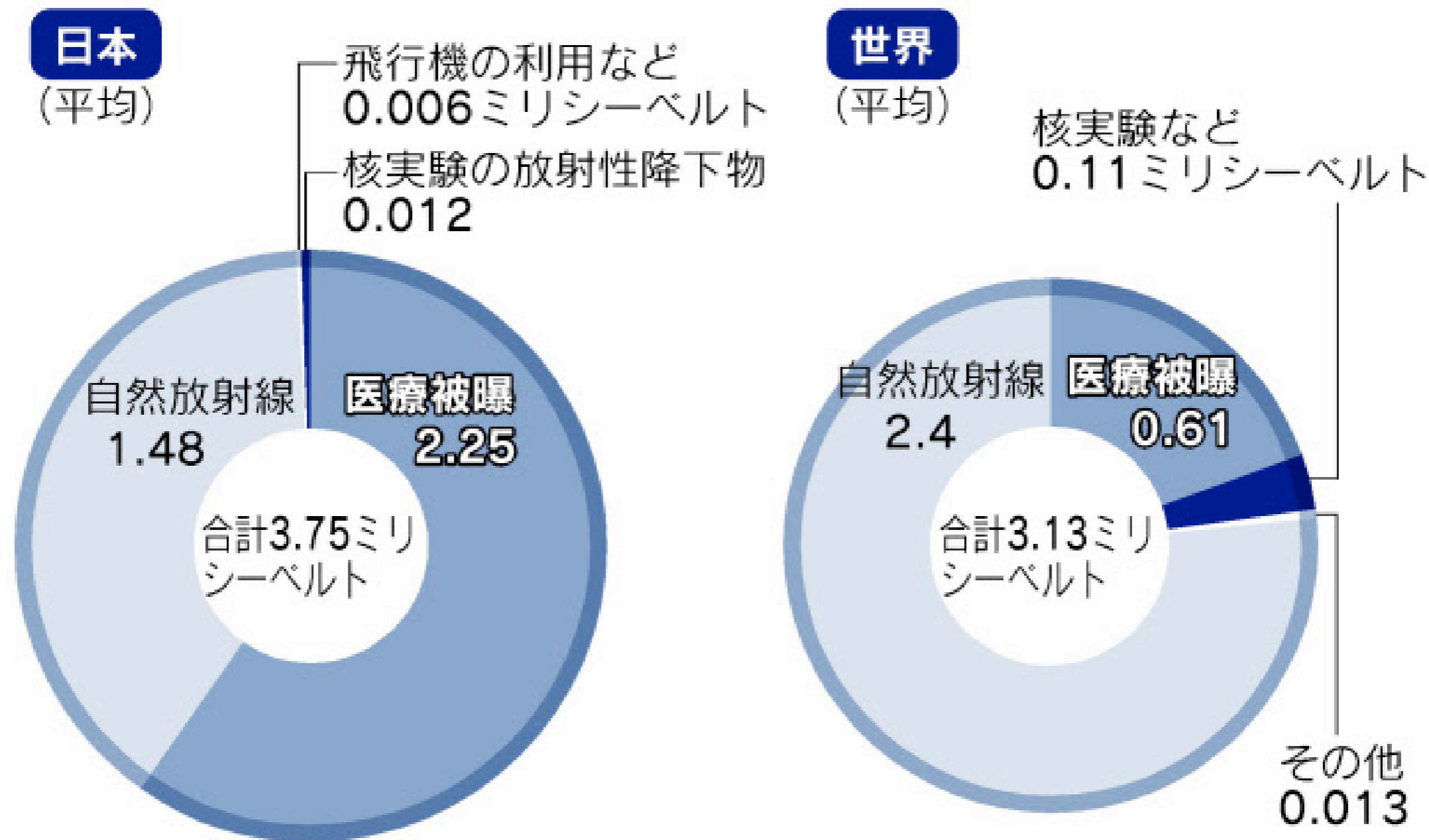
大反対です！今回の瓦礫受け入れは、**放射線に関する科学的知識の欠如、被災地の隣、科学者の社会への情報発信の失敗、物ばかりです。子供に与える気にはとてもありません！**  
**行政に対する不信感、が問題。**  
この期に及んで「大丈夫」を、一般国民の何人が心から信じますか？

市長さんの今回の決定に不安を感じます。皆さんが仰る通り、正直風評被害が一番怖い  
です。私の大事な故郷が悪く言われるのは耐えられません。被災地の方を少しでも助け  
たいとゆう思いは、私も溢れそうなくらいあります。本当に今回の件を遂行されたいの  
なら**反対する市民、日本国民をどうか納得させて下さい。**



# 放射線治療

## 1人が1年間に浴びる放射線量

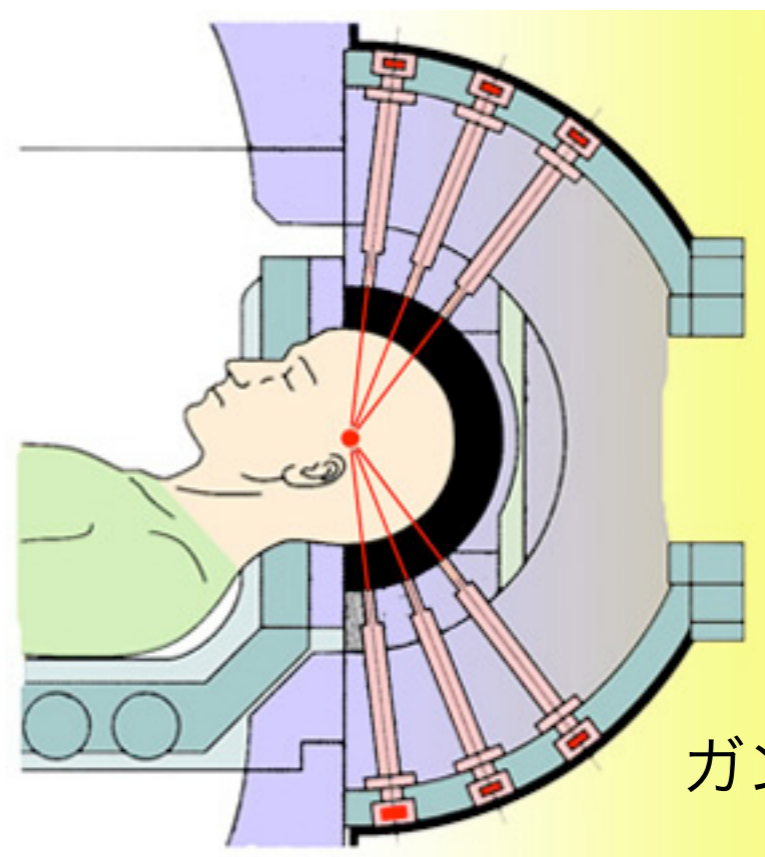
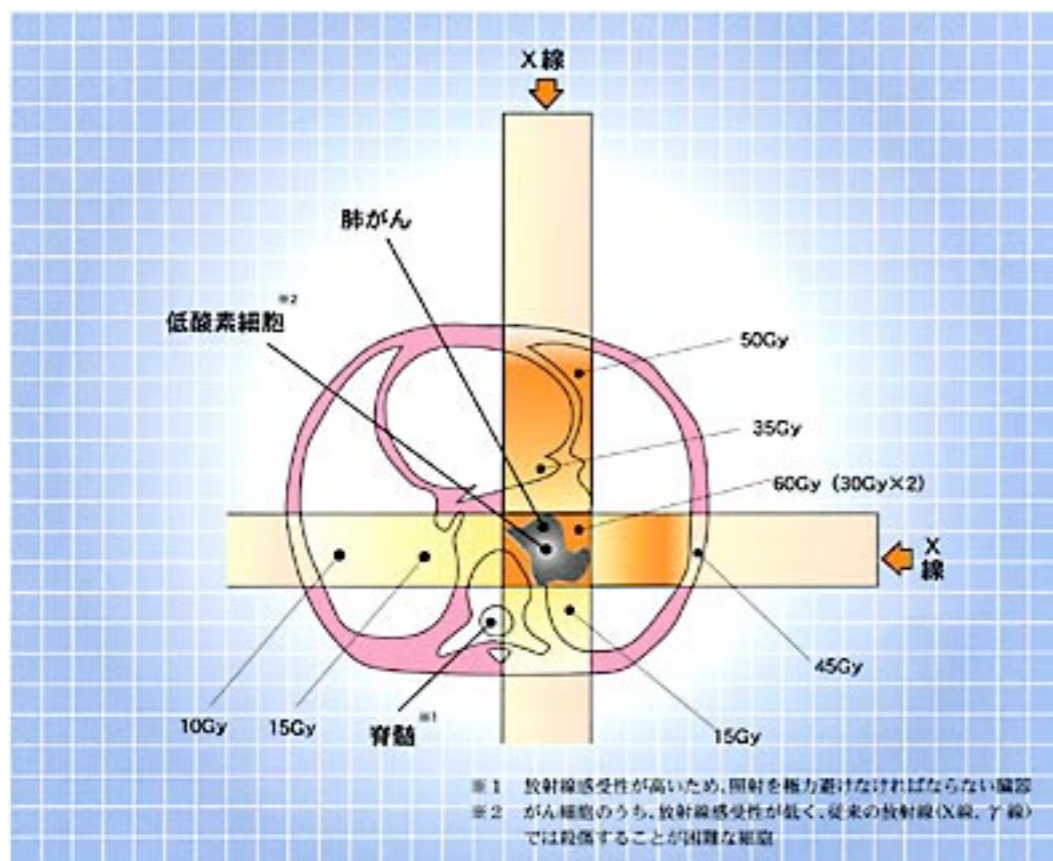


(注) ICRPが定める一般人が浴びてもさしつかえないとする限度1ミリシーベルトは医療被曝と自然放射線は除く。「原子力・エネルギー図面集 2011年版より」

# 放射線 がん治療

数 Gy を数十回

## X線 外部照射



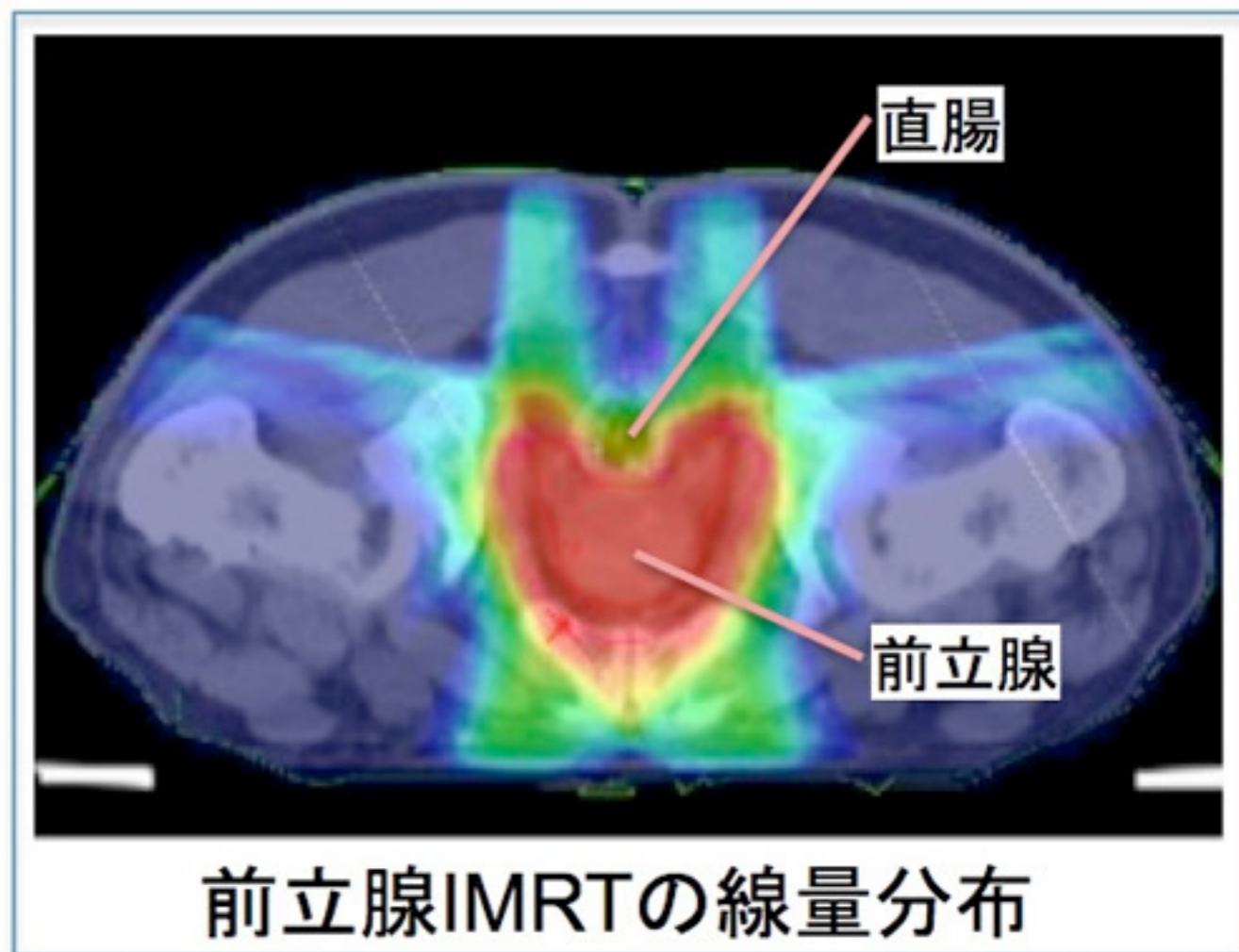
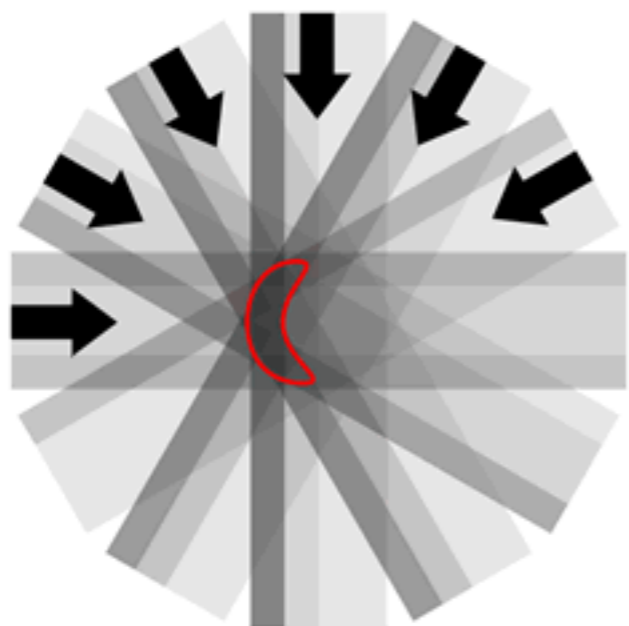
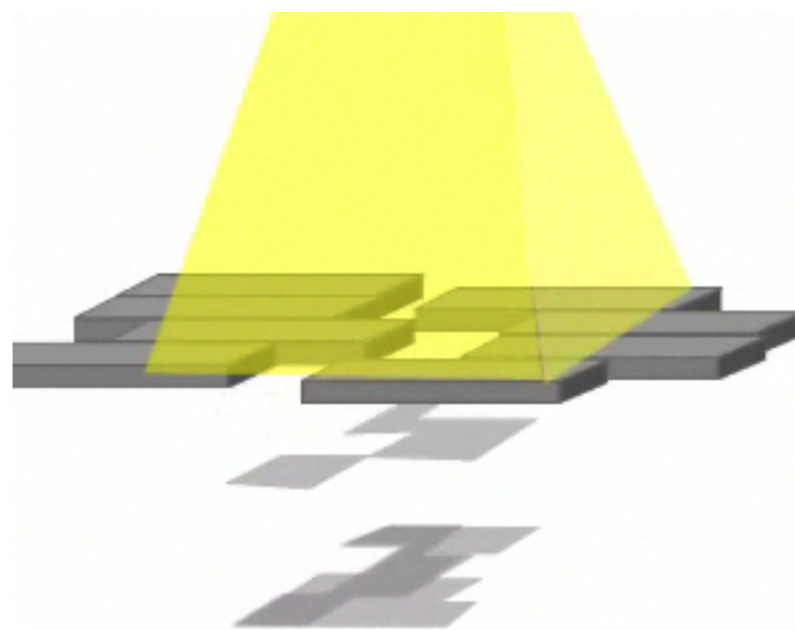
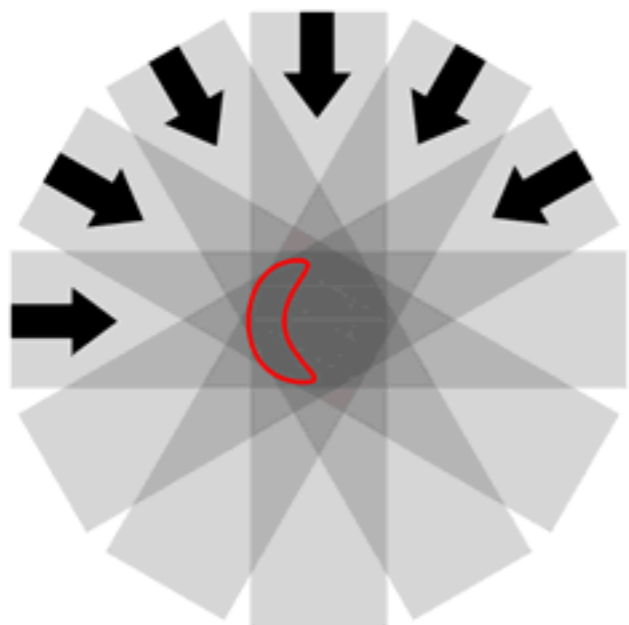
ガンマナイフ

医療技術：ガンマナイフ (γ線)  
サイバーナイフ (X線)



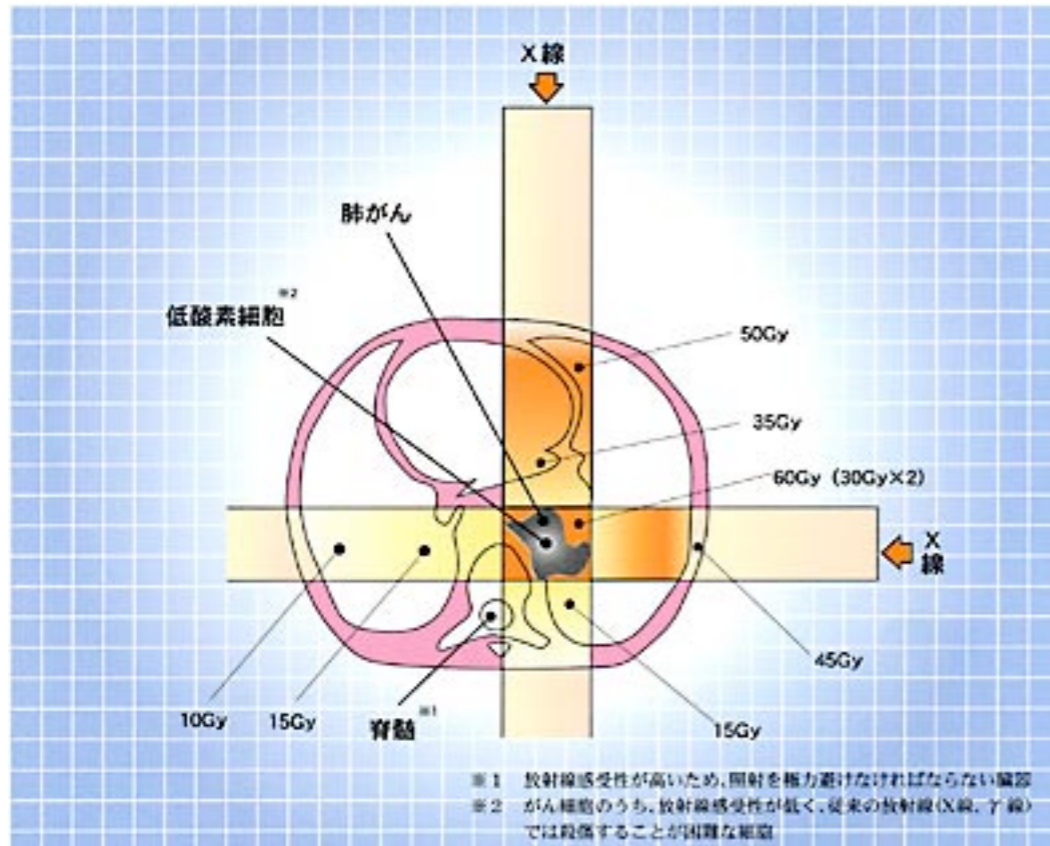
サイバーナイフ

写真提供：(独)放射線医学総合研究所



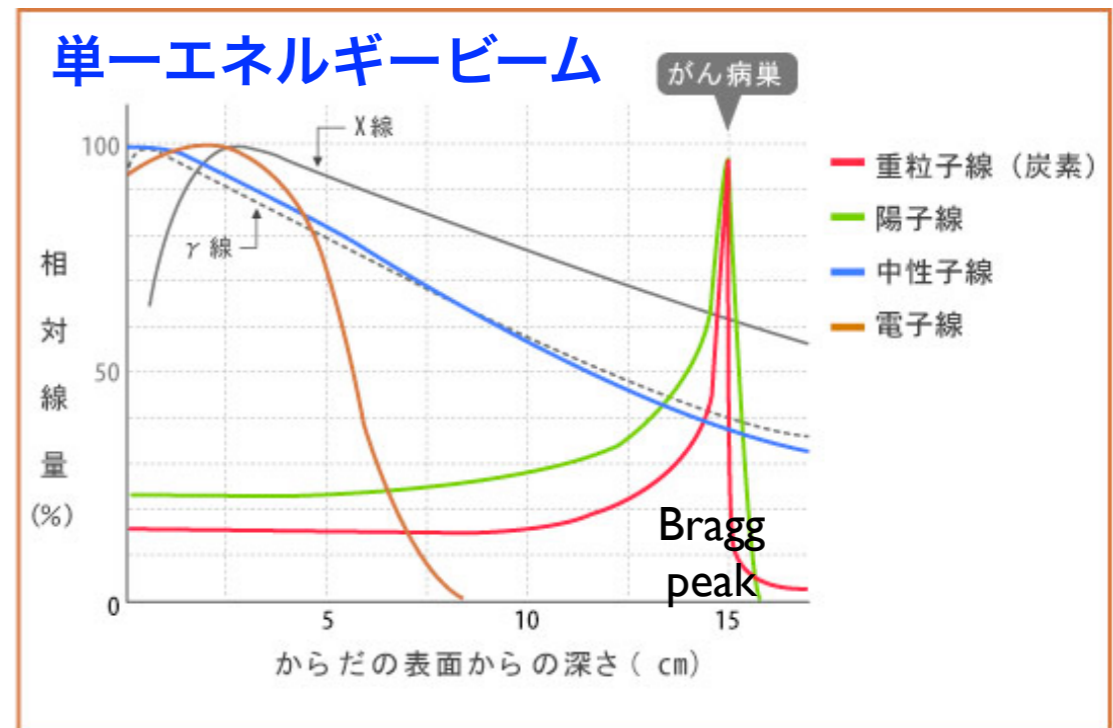
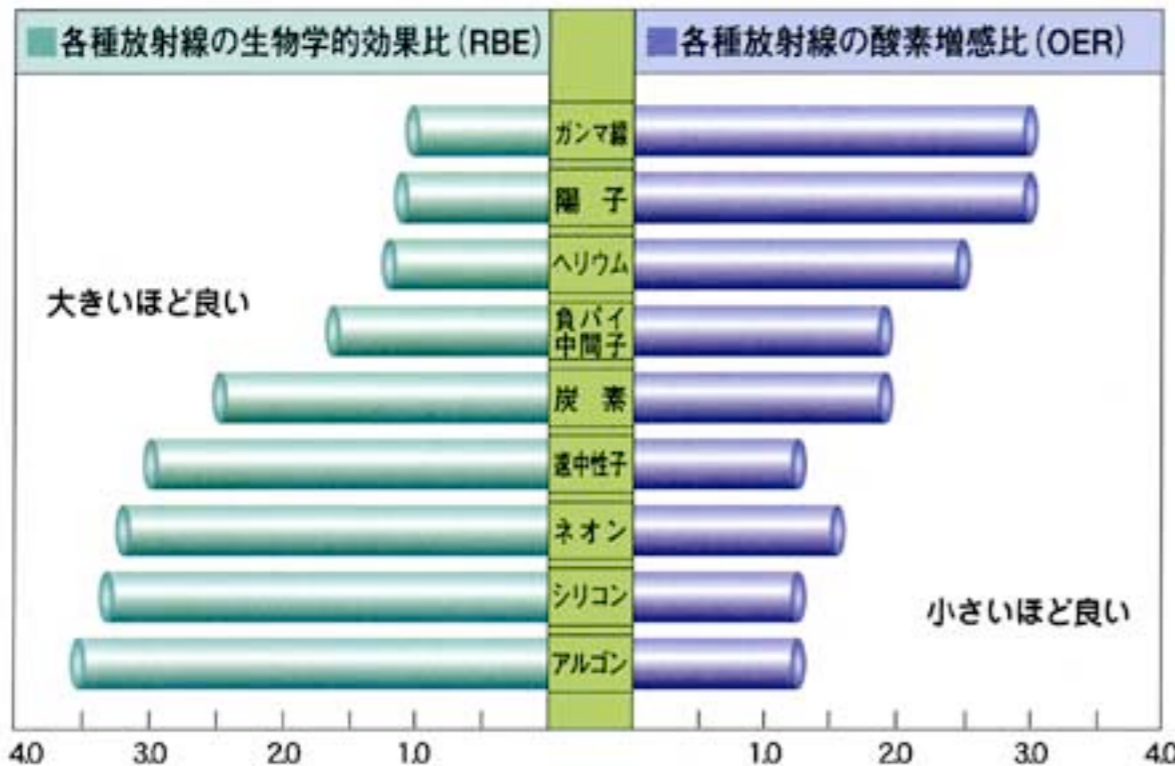
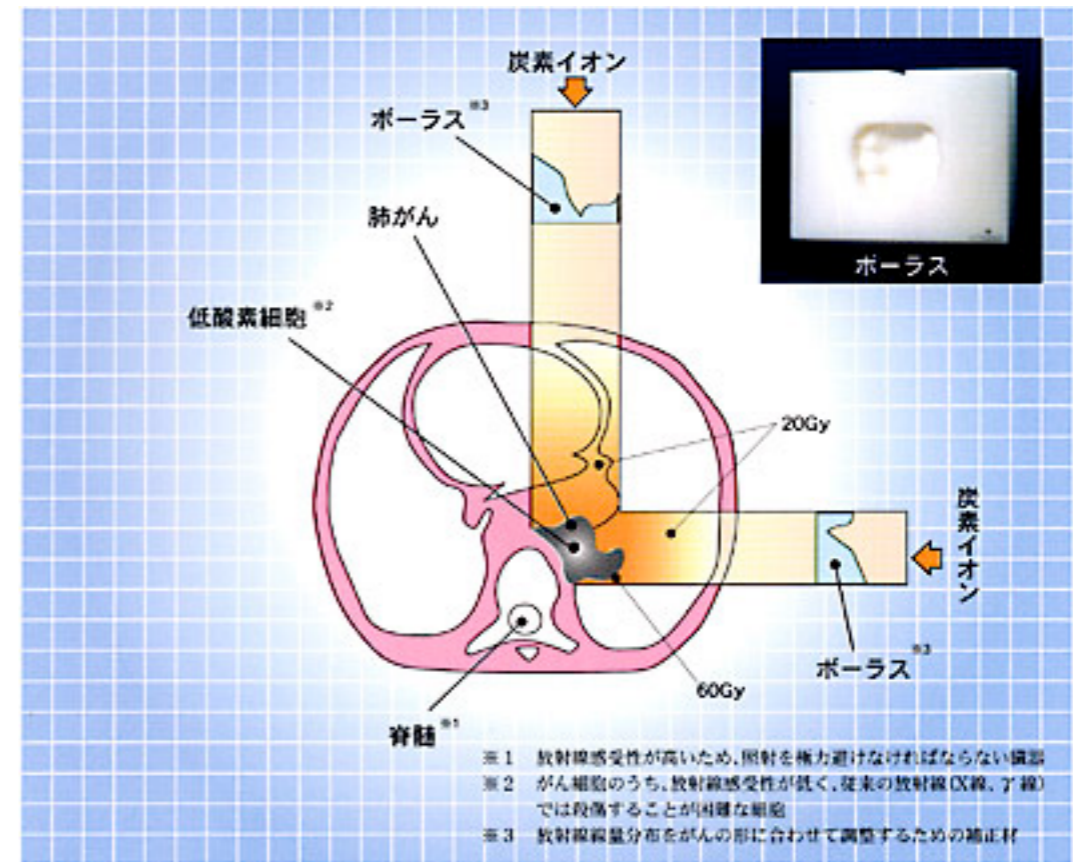
# 放射線 がん治療

## X線



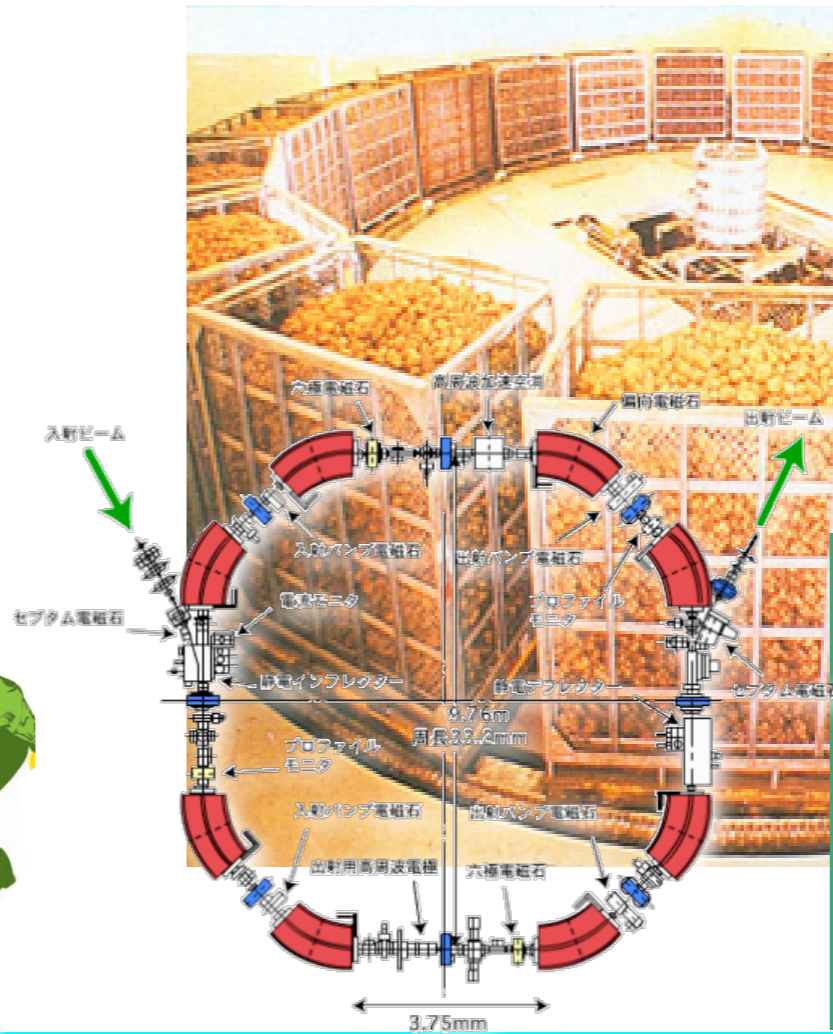
# 数 Gy を複数回

## 重粒子線 (炭素イオン)





# 放射線 と 放射能



第7話

## 放射線の利用・加速器科学

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

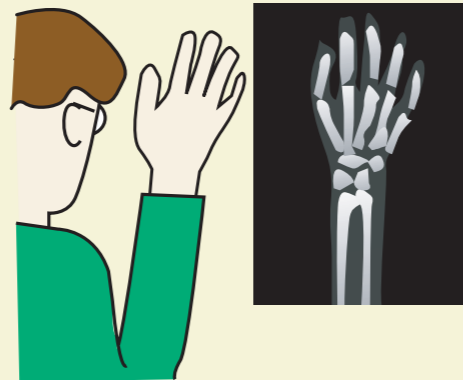
# ●●●さまざまな放射線の利用●●●

## 1. はじめに

### 放射線の代表的な作用

**感光作用** 例：レントゲン写真

◎写真のフィルムを感光（黒く）させる性質



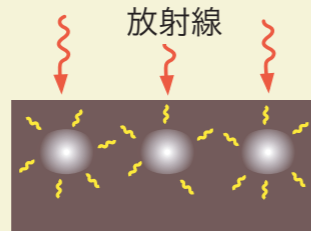
**透過作用** 例：エックス線検査  
非破壊検査

◎物質を透過する性質



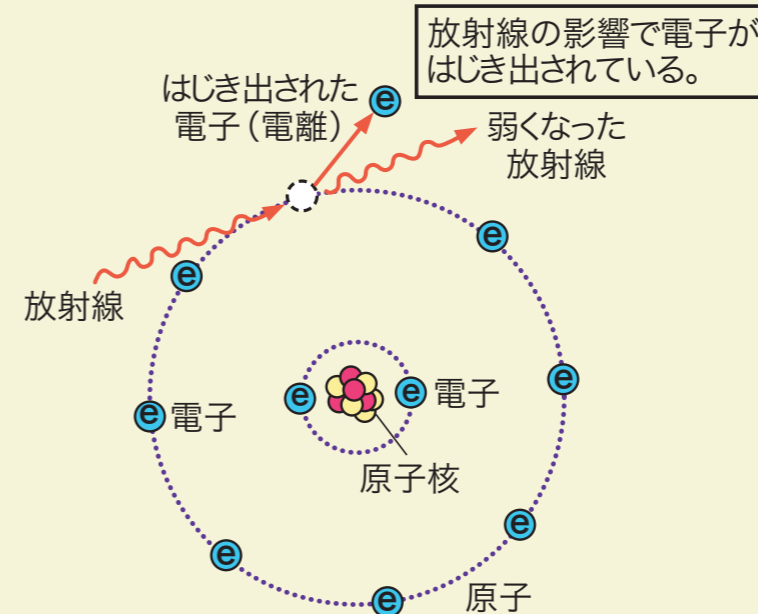
**蛍光作用** 例：放射性アイストープ入り  
夜光時計

◎蛍光物質に当たるとその物質から蛍光を発生させる性質

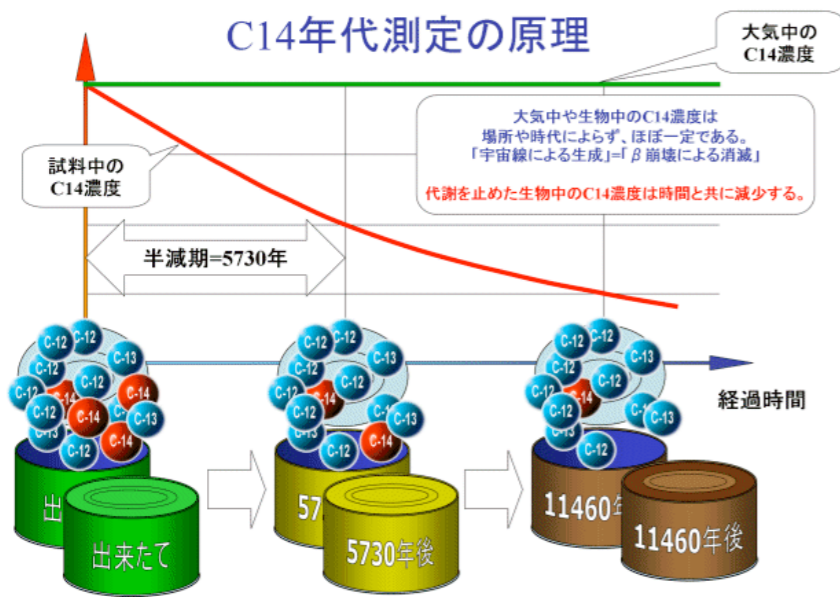


**電離作用** 例：品種改良  
放射線治療

◎物質を透過する時、その物質を作っている原子や分子にエネルギーを与えて、原子や分子から電子を分離させる性質



# 放射線年代測定



C14の濃度を測れば「代謝を止めてからの時間」が判る！

測定方法		100年 1000年 1万年 10万年 100万年 1000万年 1億年 10億年	主要対象
放射性同位元素を使う方法	炭素14年代測定法	0 - 50,000	動植物・貝殻・水など
	カリウム・アルゴン法	10,000 - 100,000	鉱物
	ウラン・鉛法	100,000 - 10,000,000	鉱物
	ルビウム・ストロンチウム法	100,000 - 10,000,000	鉱物
	フィッション・トラック法	100 - 100,000	鉱物・天然ガラス
放射線の照射量を測定する方法	熱ルミネッセンス法	100 - 100,000	鉱物・天然ガラス
	光ルミネッセンス法	100 - 100,000	鉱物
	電子スピン共鳴法	100 - 100,000	鉱物・貝殻・サンゴなど
放射線を使わないその他の方法	ラセミ化法	100 - 100,000	貝殻・甲羅・重炭酸塩
	黒曜石水和層法	100 - 100,000	天然ガラス
	考古(古)地磁気法	100 - 100,000	岩石・磁性鉱物
	火山灰層序法	100 - 100,000	火山灰
	年輪年代法	100 - 100,000	樹木
	氷縞粘土法	100 - 100,000	湖底堆積物(粘土)

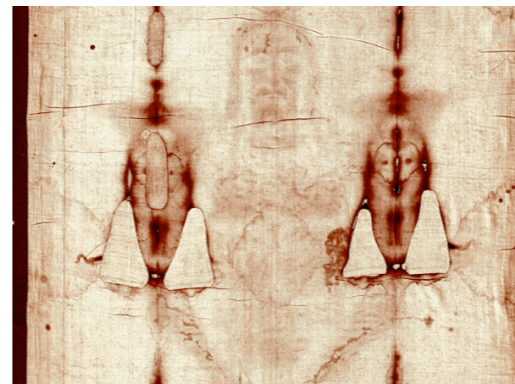
<<図 2-1>> 主な年代測定法による測定可能な年代の範囲

出典:ATOMICA他より作成

- $^{14}\text{C}$ ,  $^{40}\text{K}$ -Ar, U-Pb, Rb-Sr

- 弥生時代

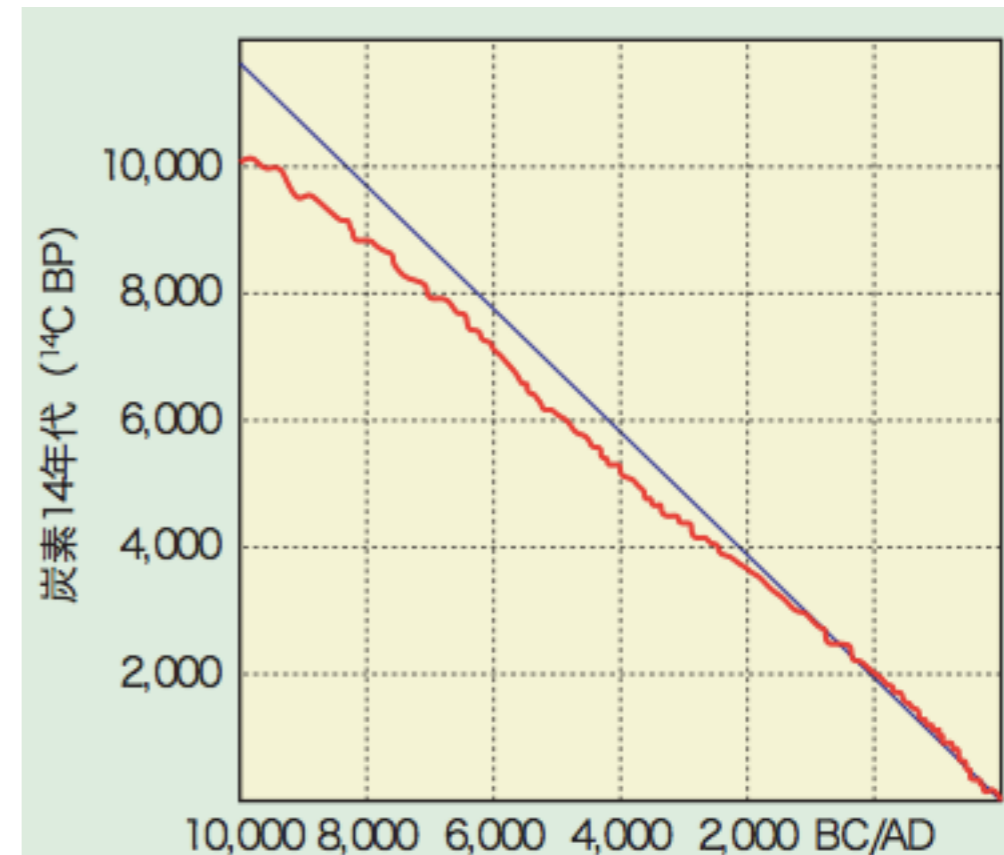
- 聖骸布 (Torino の聖骸布 (1260-1390 A.D., 95% CL))



- 空気中の  $^{14}\text{C}$  の比率はほぼ一定

- 微小な変動は年輪中の炭素データで較正

- 地層、火山灰、年輪データと比較

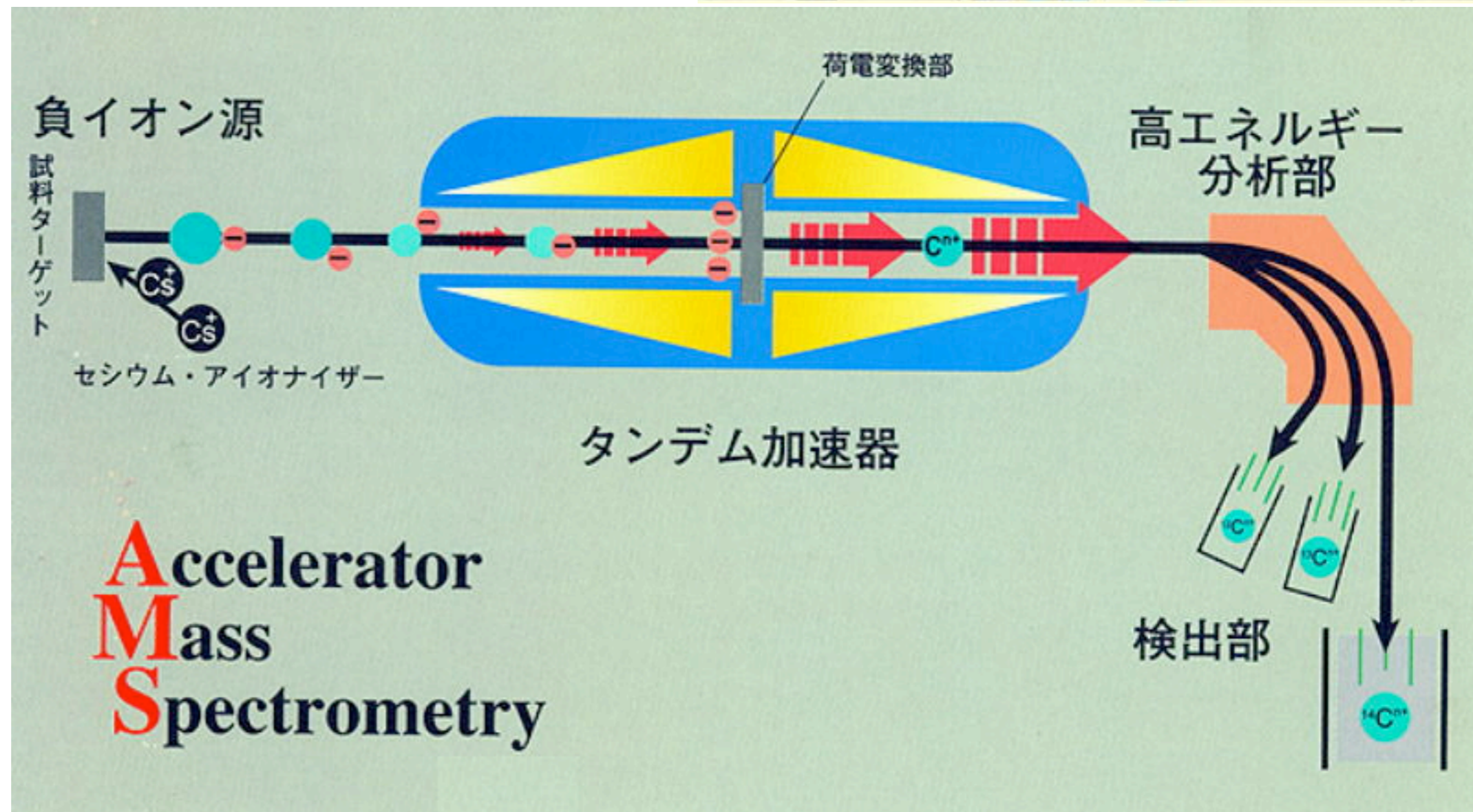


炭素14年代と年輪年代との較正曲線(赤線)(時代が古くなるほど両者がずれることと大気中の炭素14濃度が変動することによる細かな動きが分かる)

出典:国立歴史民俗博物館

# 加速器質量分析

## AMS (Accelerator Mass Spectrometry)





# 粒子加速器 (Accelerators)

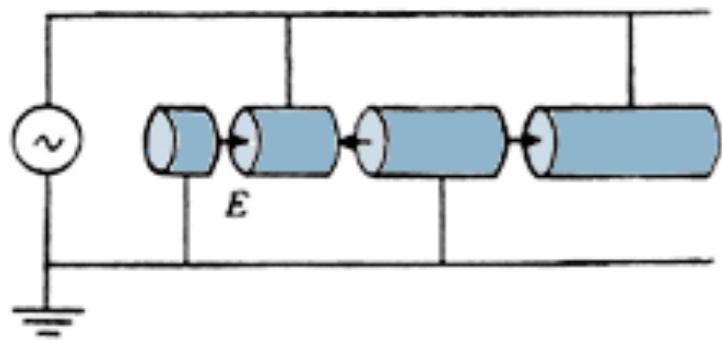


図1 ヴィデレー型リニアック

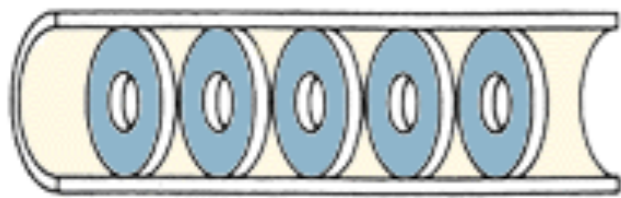
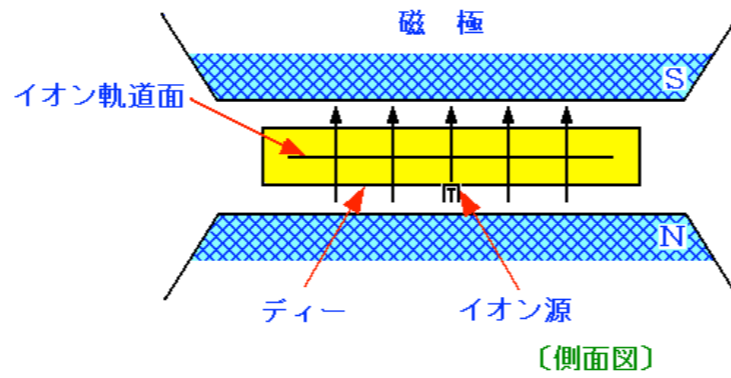
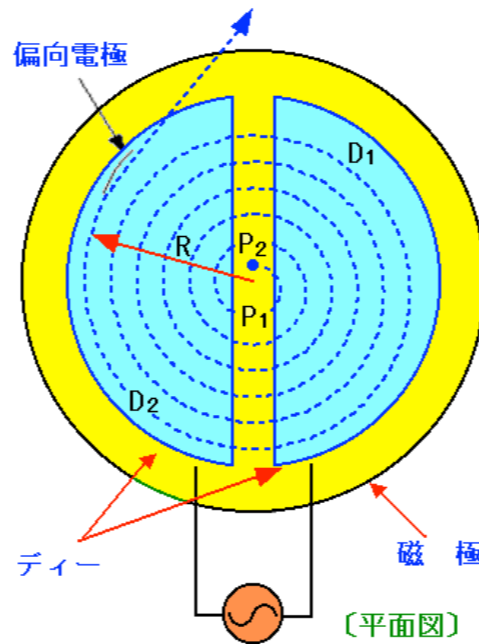


図2 円盤装荷導波管



〔側面図〕



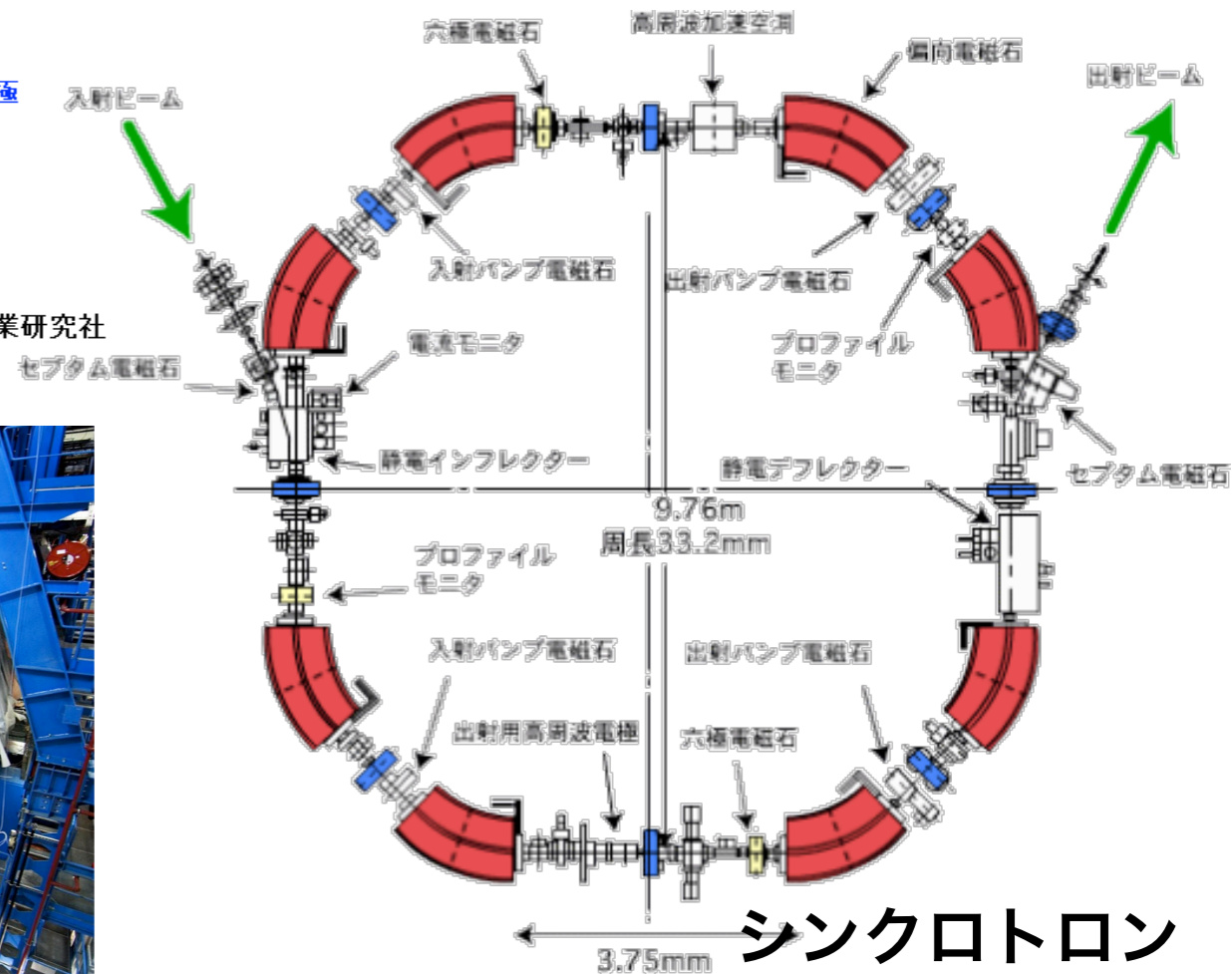
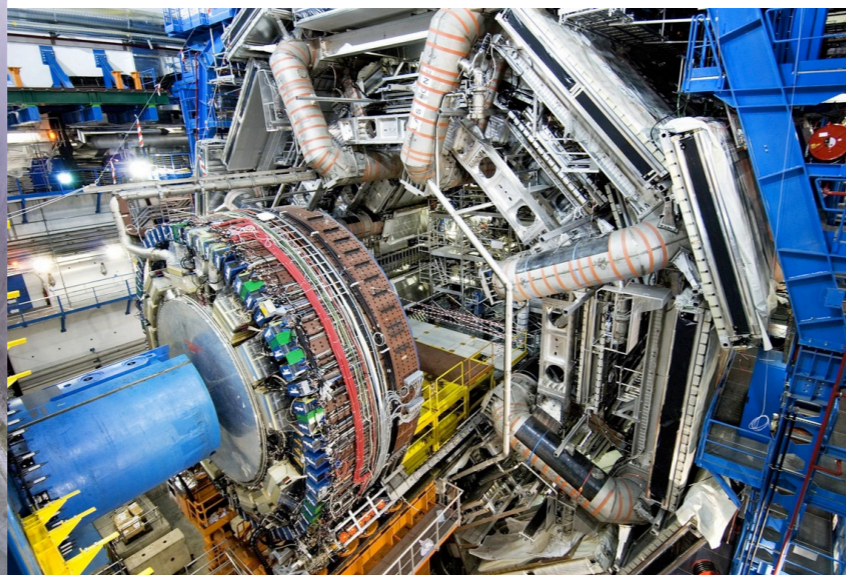
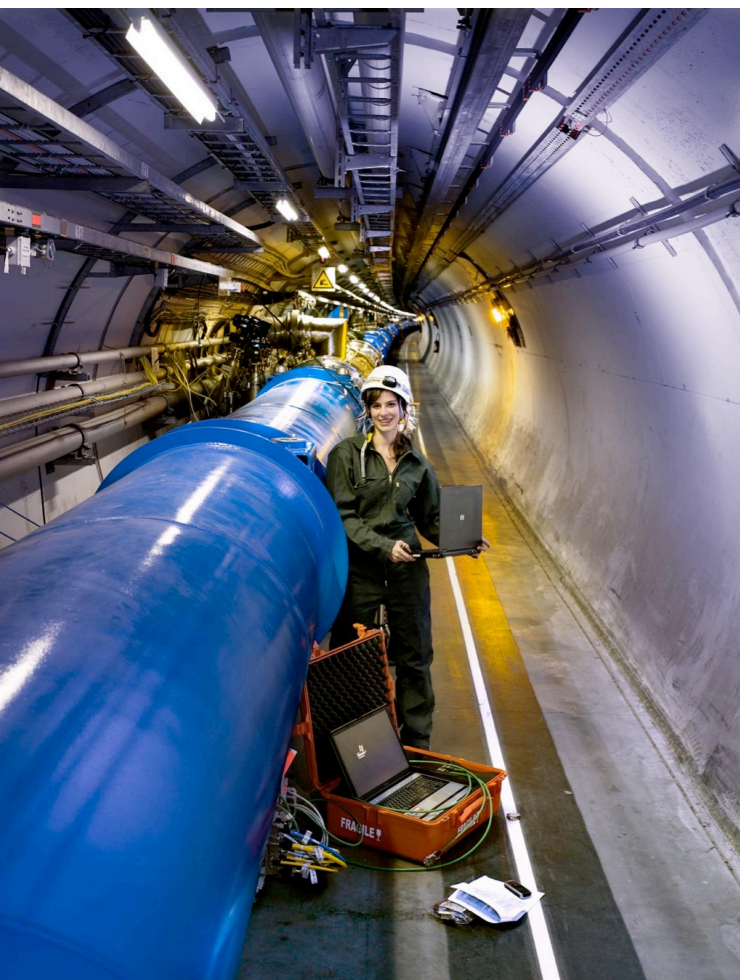
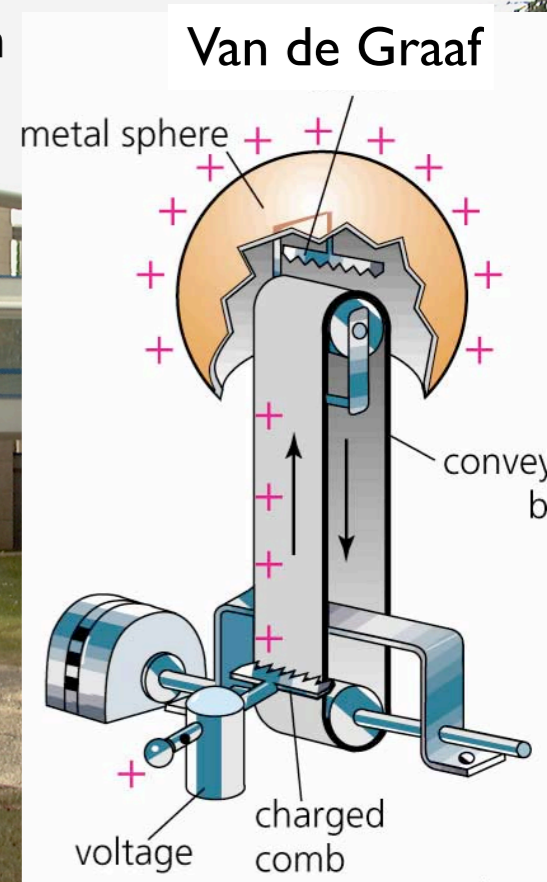
〔平面図〕

図5 サイクロトロン

[出典] 石川 友清 (編) : 放射線概論、通商産業研究社 (1991年4月)、p. 64



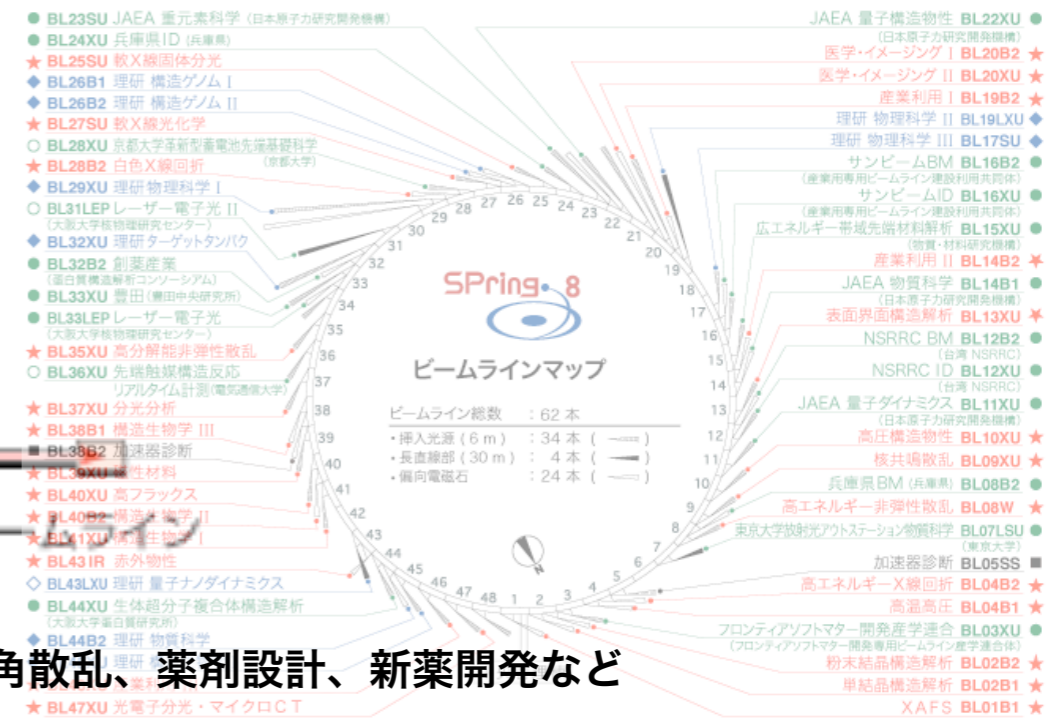
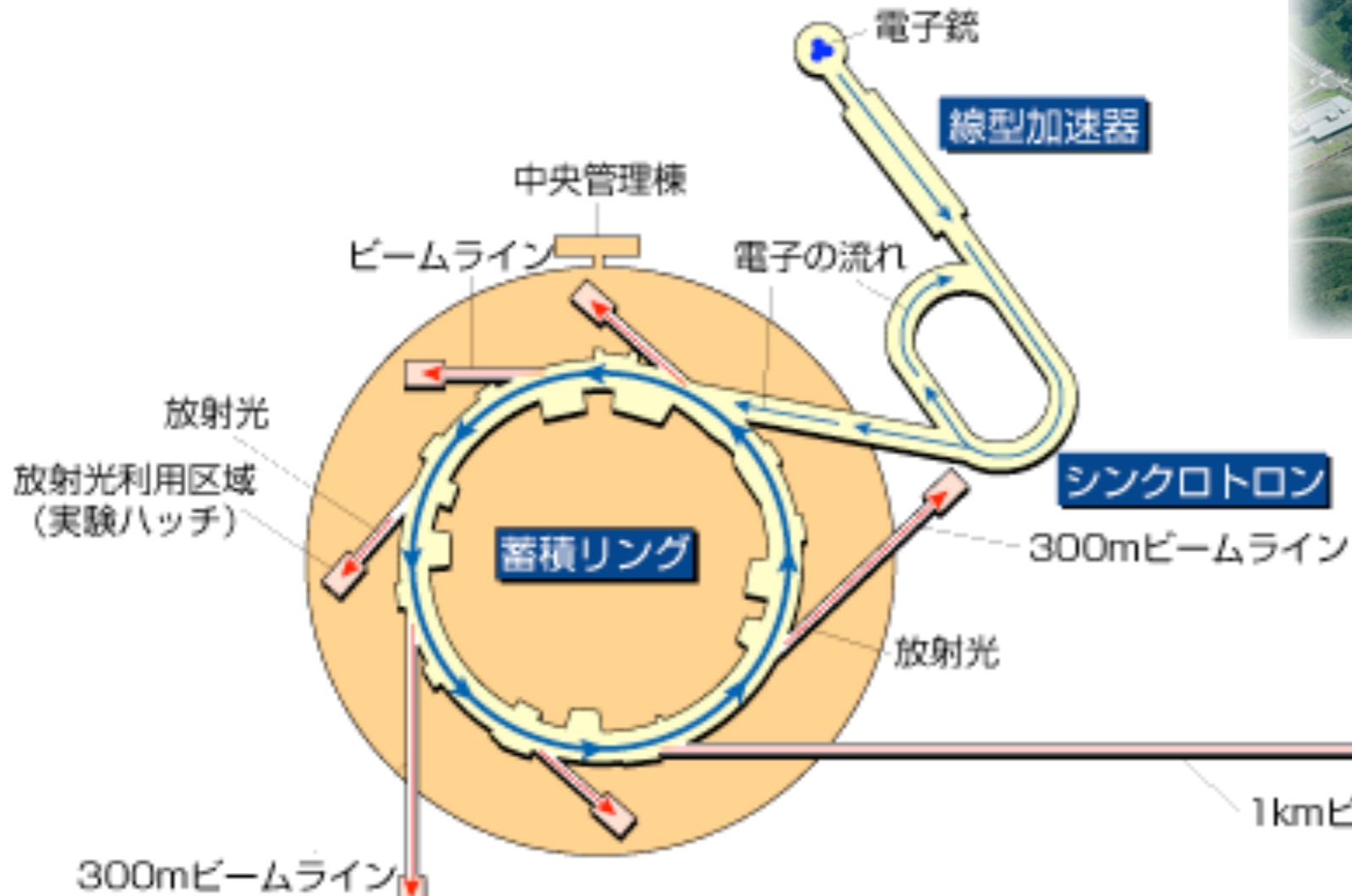
高電圧発生装置・静電加速器



シンクロトロン

# SPring-8 (大型放射光施設：播磨)

8 GeV 電子ビーム ⇒ 放射光 (X線, γ線)



- 生命科学への利用：タンパク質巨大分子の3次元構造解析、非結晶生体材料の小角散乱、薬剤設計、新薬開発など
- 物質科学への利用：先端材料の原子・電子の構造、極端条件下の材料物性、産業材料の評価、新物質創製と材料改質など
- 化学への利用：触媒反応の動的挙動、表面のX線光化学過程、原子・分子分光、超微量元素分析及び化学状態、考古学的研究など
- 地球科学への利用：地球深部物質の構造と状態、極限環境下の物性、隕石・宇宙塵の構造など
- 環境科学への利用：生体試料中の環境汚染微量元素の分析、環境浄化用触媒の分析など
- 医学への利用：微小血管造影法による腫瘍血管の観察、トモグラフィ、屈折コントラスト映像法による呼吸器系疾患の観察など
- 産業への利用：半導体用新酸化物材料の評価、高性能電池材料の局所構造解析、ナノ材料の評価、微量元素分析、材料の断面観察、材料の歪み分布解析など
- 核物理への利用：レーザー電子光（逆コンプトン散乱）による中間子の生成・クォーク核物理など

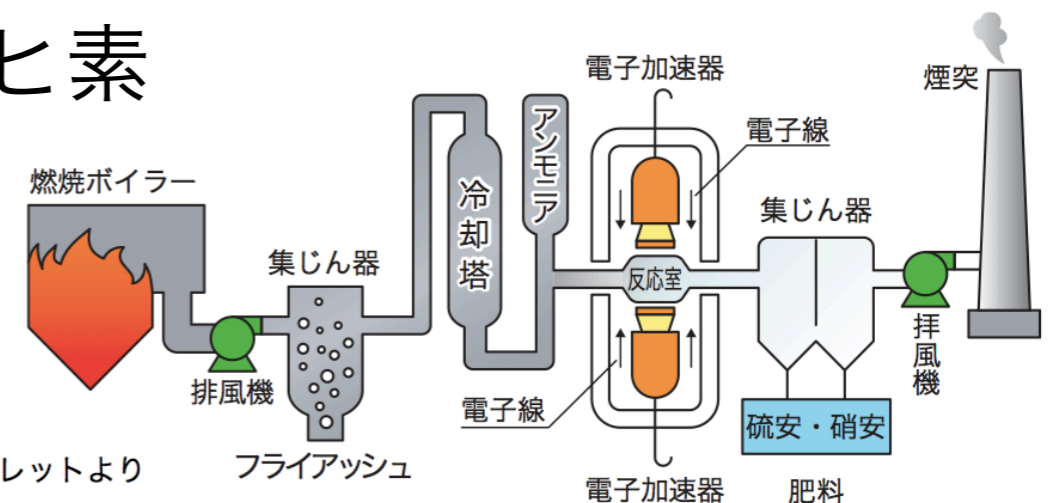
# 放射線による検査・分析など

- \* X線検査
  - \* 空港での手荷物検査
  - \* 非破壊検査
    - \* 装置の溶接部分のひび割れ検査 ( $\gamma$ 線も)
    - \* 文化財 (土偶・仏像・絵画) の単純X線/CT撮影
- \* 厚さ計・密度計 ( $\beta$ 線,  $\gamma$ 線)
- \* 元素分析
  - \* 蛍光X線分析
    - \* e.g. 源氏物語絵巻の顔料分析
  - \* 放射光の利用 e.g. SPring-8 放射光施設
    - \* e.g. 和歌山毒物カレー事件の亜ヒ素
- \* 電子線で排煙中のダイオキシン、  
NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> を分解



火力発電所排煙の電子ビーム処理

出典: 日本原子力文化振興財団パンフレットより



# 農業分野での利用

## \* ジャガイモの発芽防止

$^{60}\text{Co}$   $\gamma$  (1.17 MeV / 1.33 MeV), 50–150 Gy

- ◆ 動物飼育実験などで急性毒性、慢性毒性、発がん性、変異原性、遺伝毒性、催奇形性は見出されておらず、**健康に有害な影響を及ぼすような食品成分の変化は生じない。**
- ◆ 食品照射に用いるCo-60の $\gamma$ 線、10 MeV以下の電子線、5 MeV以下のX線のエネルギーは核反応のしきい値以下であり、適正な照射条件では**誘導放射能は生成されない。**  
= **放射化はおこらない。**
- ◆ 生き残った微生物によるリスクは他の殺菌法と同じであり、照射で病原性や毒性が増大することはない。

化学薬剤を使うより安全

日本では食品照射はジャガイモのみ許可

## \* 放射線育種 (品種改良) $\gamma$ 線、イオンビーム

花卉 ・ ゴールド二十世紀ナシ (黒斑病耐性)



# ＊害虫駆除（不妊虫放飼法）

$^{60}\text{Co}$   $\gamma$  (1.17 MeV / 1.33 MeV), 70 Gy

さなぎに照射してオスを不妊化。

- ◆ ウリミ蠅（沖縄：ゴーヤ）  
延べ 624億匹放飼！
- ◆ ツェツェ蠅（タンザニア：眠り病、ナガナ病）  
IAEA（ウィーン）で照射。

## ❖ 照射線量

発芽防止	50 – 150 Gy	ジャガイモ・タマネギ
殺虫・寄生虫防除	100 – 500 Gy	穀類・豚肉・果実
殺菌（食中毒防止）	3 000 – 10 000 Gy	冷凍魚介類・鶏肉・香辛料・乾燥野菜
滅菌消毒	10 000 – 30 000 Gy	ハム、無菌動物飼料、医療器具



# 電子線・ガンマ線照射によるグラフト重合

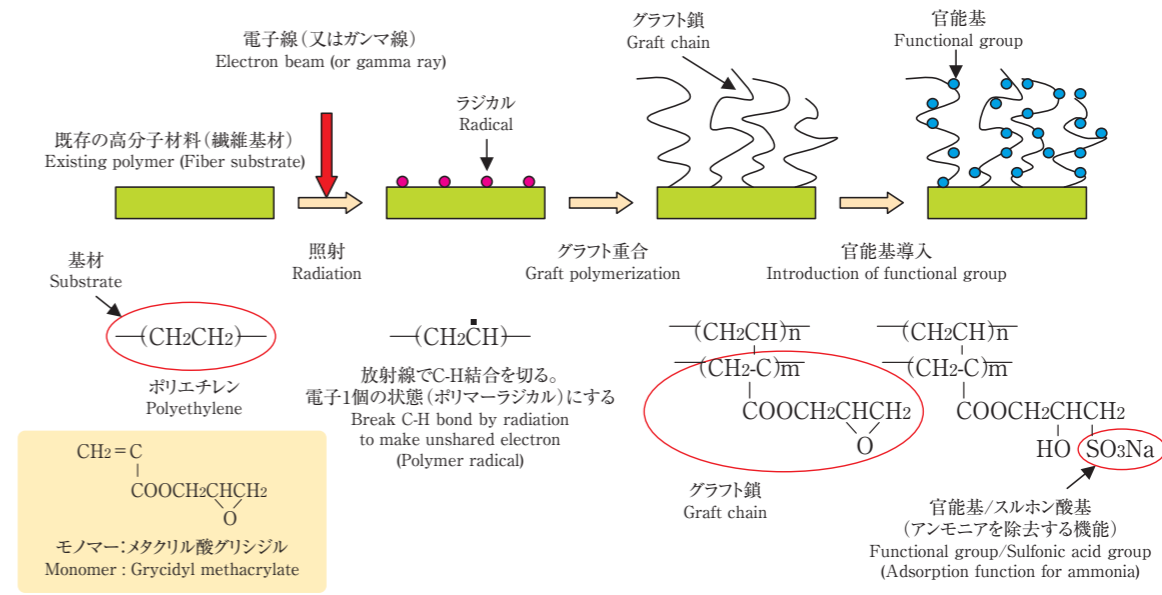
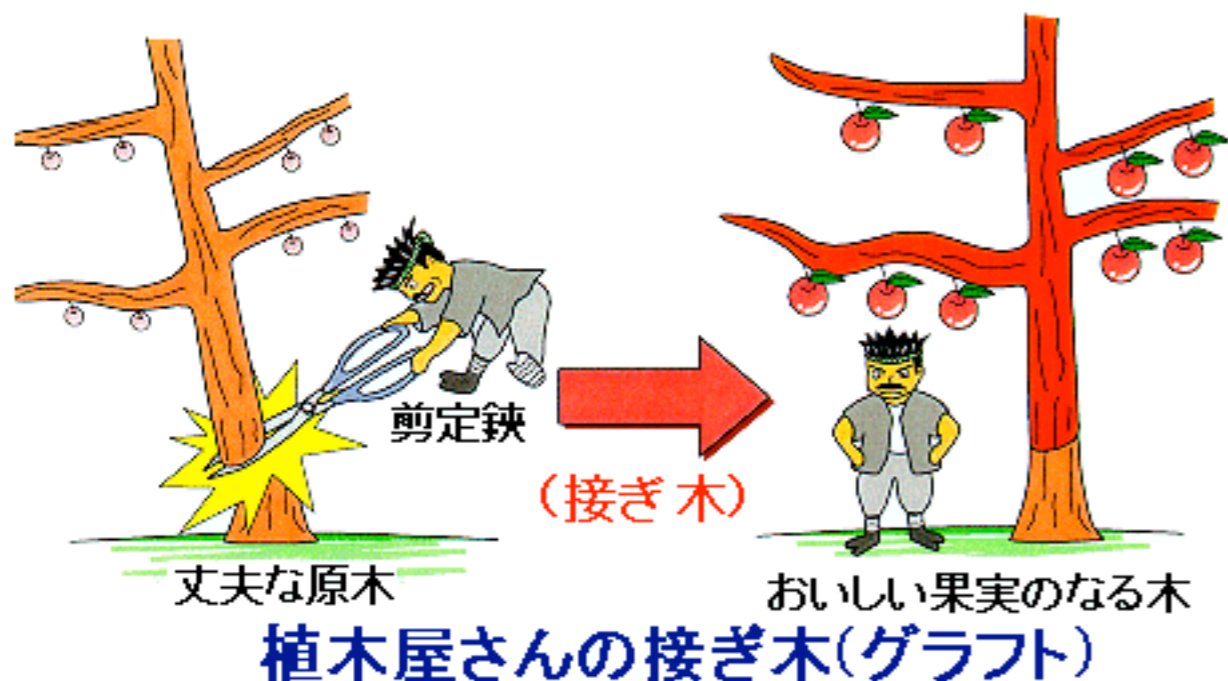


図1 放射線グラフト重合法によるイオン交換体の合成方法  
Fig. 1 Reaction scheme of ion exchange material by radiation induced graft polymerization

エバラ時報 No. 216 (2007-7) 藤原邦夫氏論文より引用

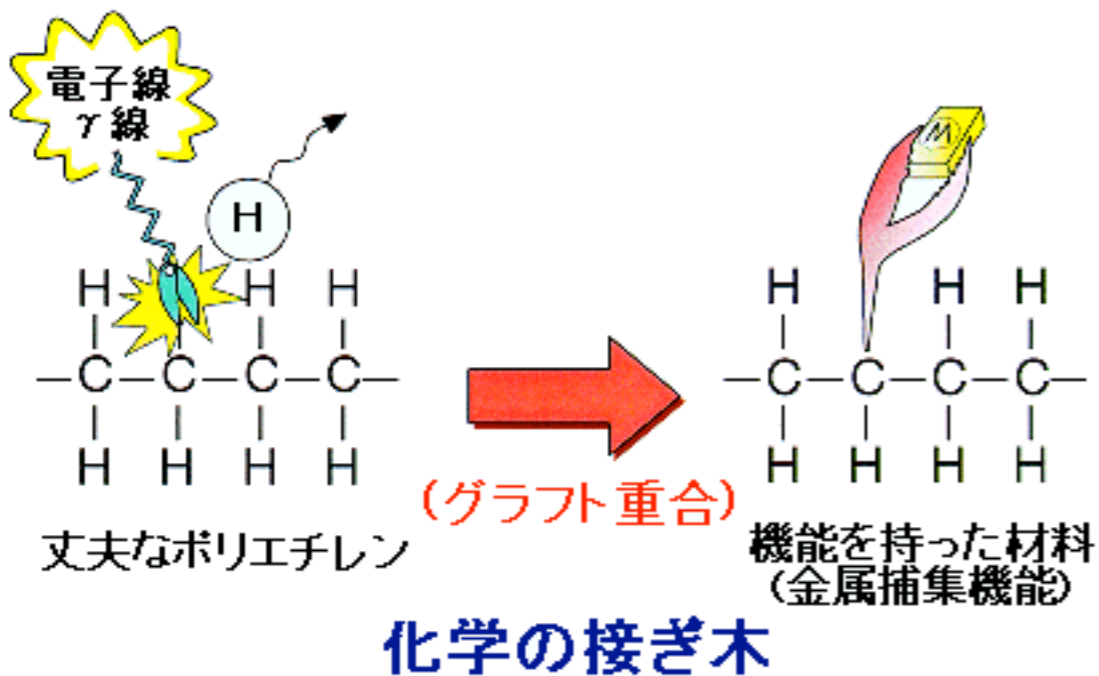


図1 接ぎ木の技術とグラフト重合

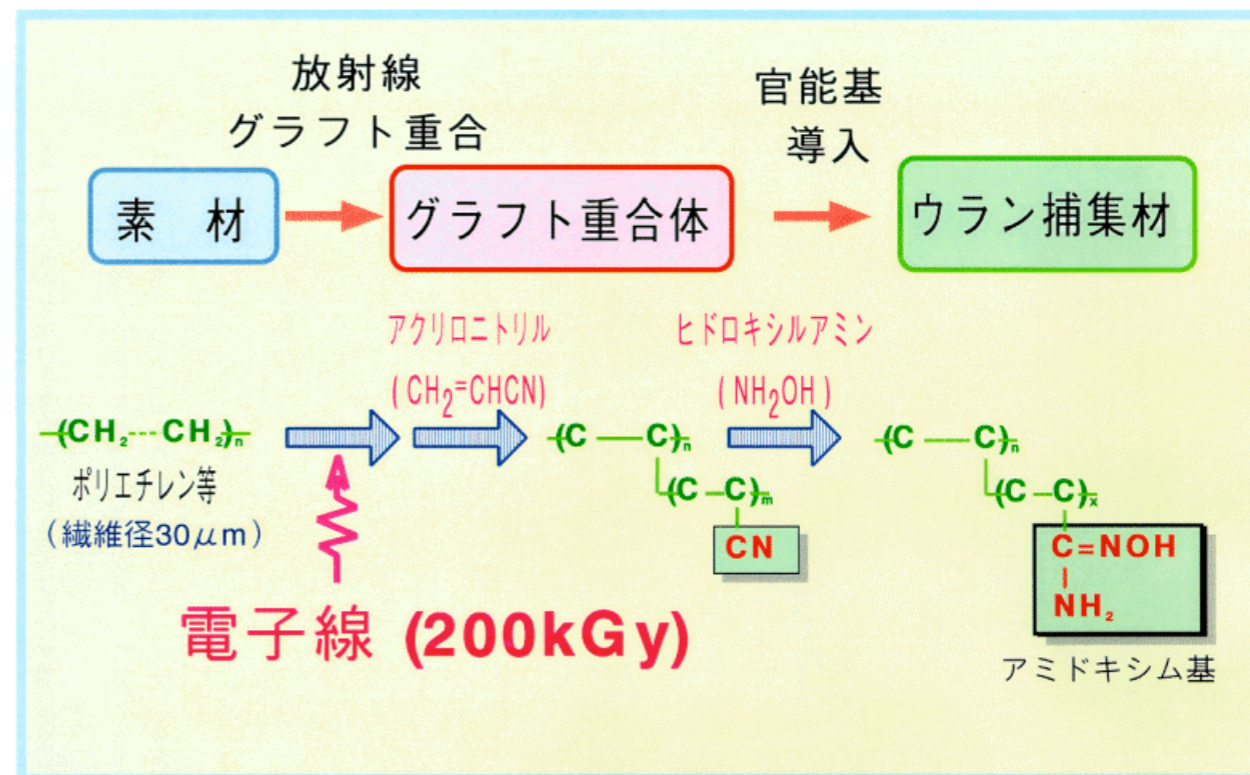
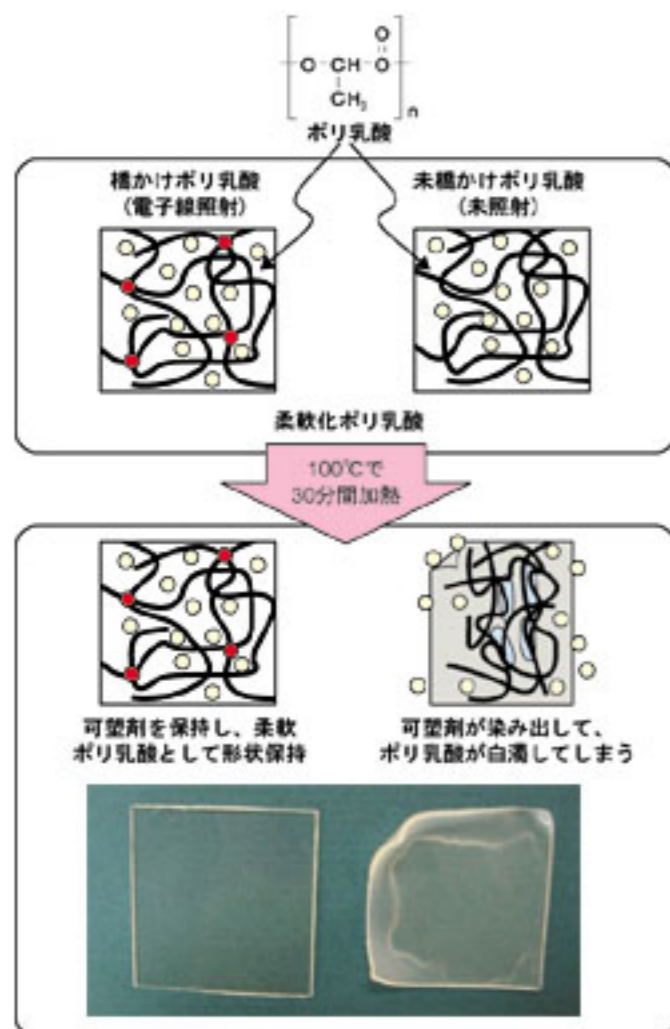


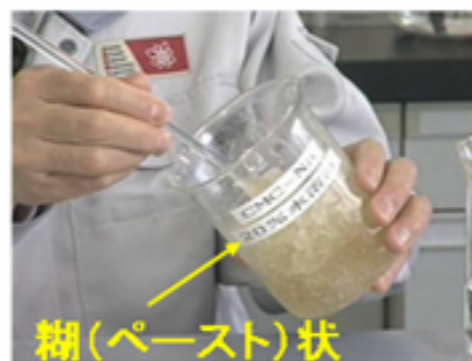
図2 放射線グラフト重合によるウラン捕集材の合成法

# 放射線橋かけ反応

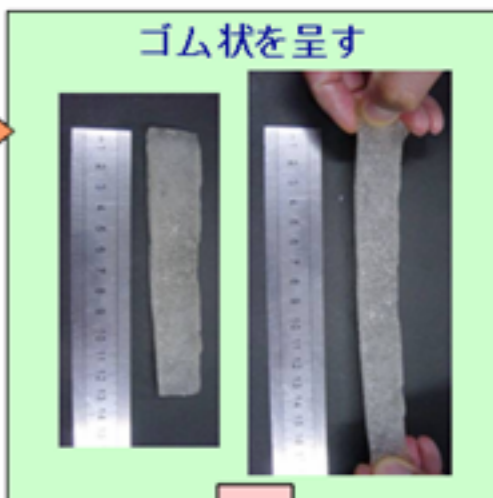
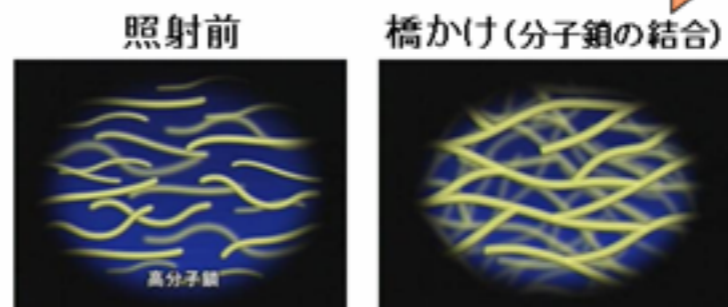
## セルロースゲルの製法と性質



▲放射線橋かけ軟質ポリ乳酸の耐熱性



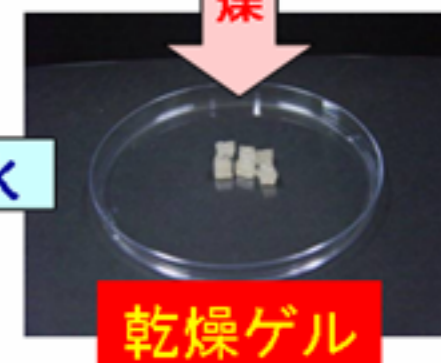
電子線、γ線照射



乾燥



吸水



模擬牛糞尿 (1%KCl+1.5%Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>)

7日間形状保持

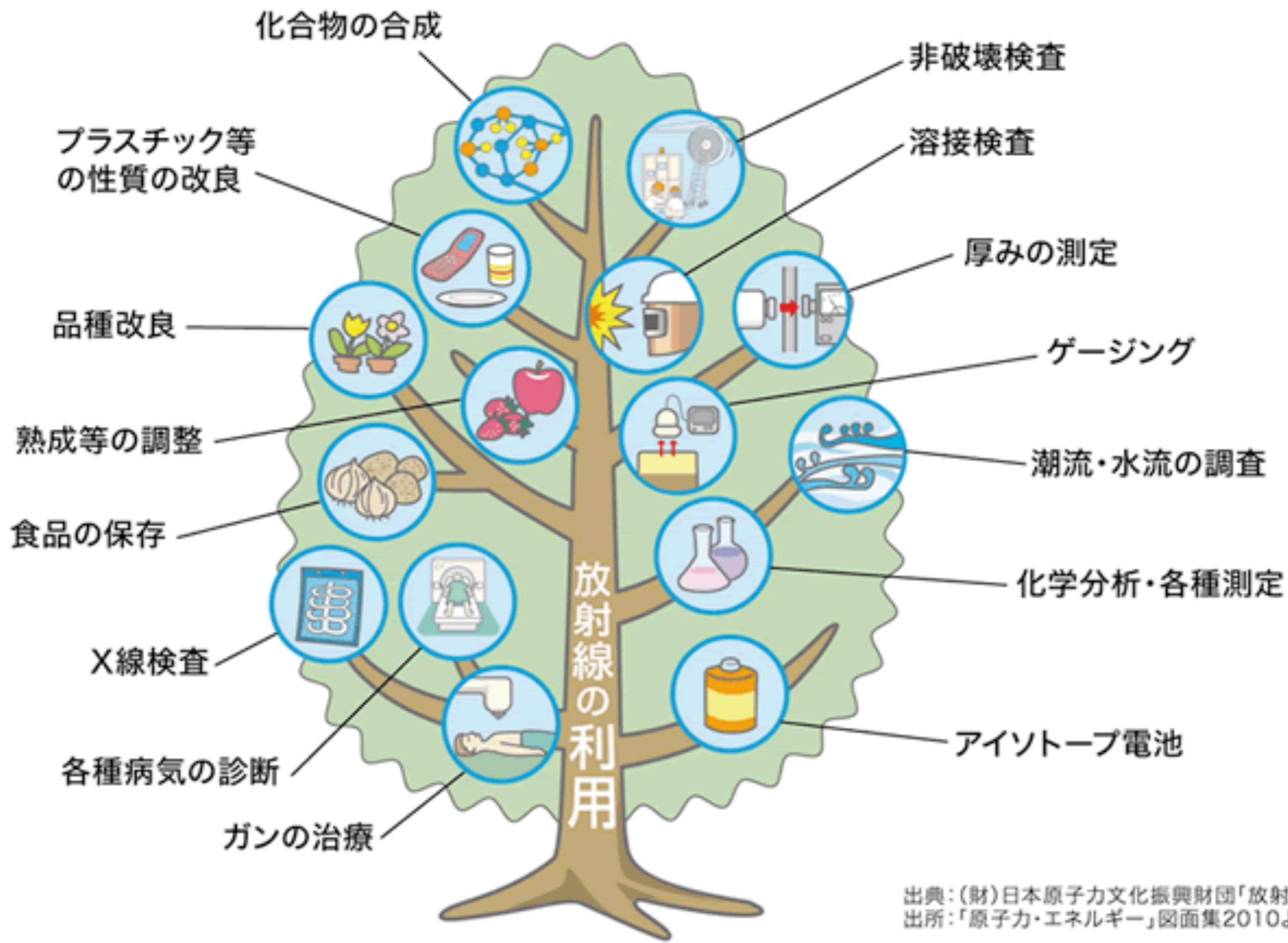
### ゲルの特長

- 資源循環型
  - ・ 天然由来の材料
  - ・ 土壤中で分解
- 乾燥ゲル1gの吸水量(g)
  - ・ 純水 : 360
  - ・ 人工尿 : 94
  - ・ 模擬牛糞尿 : 79

### カルボキシメチルセルロース(CMC)の特徴



- CMCは天然セルロースを原料として得られる水溶性高分子です。
- CMSは人体に無害で、緩やかな生分解性を有す、環境にやさしい素材です。
- CMCは食品、医薬品、化粧品から、繊維産業、窯業、建設業などの分野まで幅広く利用されています。



出典：(財)日本原子力文化振興財団「放射線のはなし」  
 出所：「原子力・エネルギー」図面集2010より



Fine.

Grazie per vostra attenzione.

Merci pour votre attention.

Thank you for your attention.

Спасибо за внимание.

경청해 주셔서 감사합니다.

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A.TORII