



# 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は非常に少ないのが実情です。

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

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

# 2013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

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE

K303教室

2014 / 1 / 27 (月)



$\gamma$ 線



中性子線



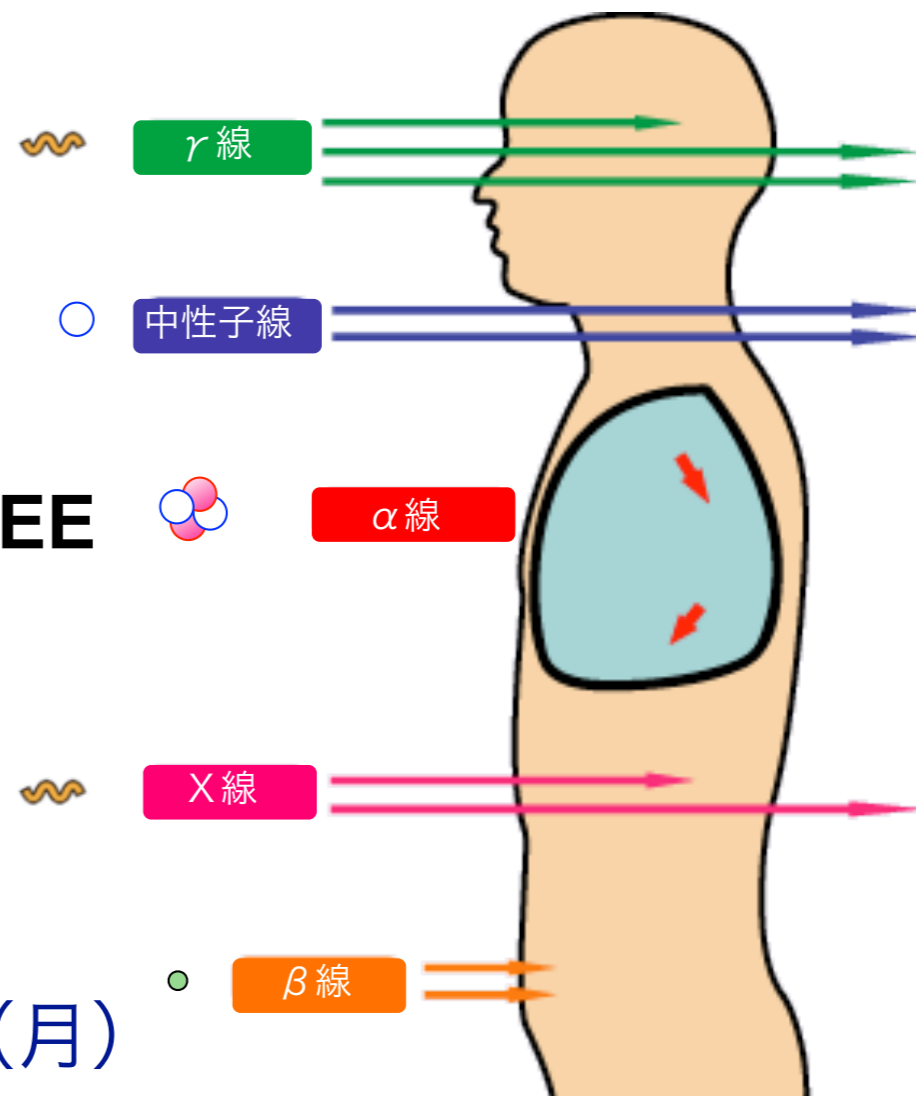
$\alpha$ 線



X線



$\beta$ 線



第13回

## 加速器科学・まとめ

人工の放射線、線量評価とリスクコミュニケーション

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 放射線を科学的に理解する

- 10/11 放射線入門 【鳥居】
- 10/18 放射線物理学 【鳥居】
- 10/25 放射線計測学 【小豆川】
- 11/ 1 放射線物理・化学 【鳥居】
- 11/ 8 放射線生物学 【渡邊】
- 11/15 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 11/29 原子核物理学・原子力工学 【鳥居】
- 12/ 6 環境放射化学 【小豆川】
- 12/13 環境放射化学 【小豆川】
- 12/20 放射線防護学 【飯本】
- 1/10 植物栄養・肥料学 【藤原】
- 1/24 放射線の利用 【渡邊】
- 1/27 加速器科学・まとめ 【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

坪倉 正治 《医科学研究所》

飯本 武志 《環境安全本部》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師

- 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・土壌肥料学》
  - 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

## 準教科書



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

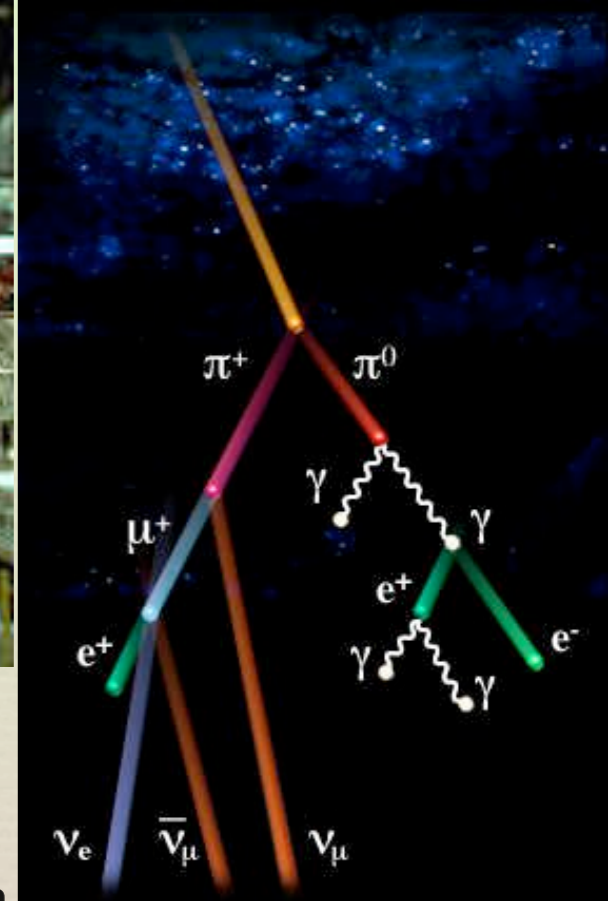
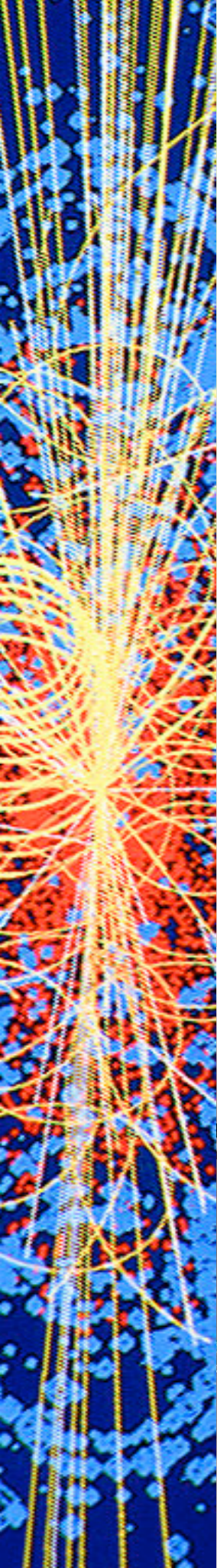
— 基礎からわかる東大教養の講義 —」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

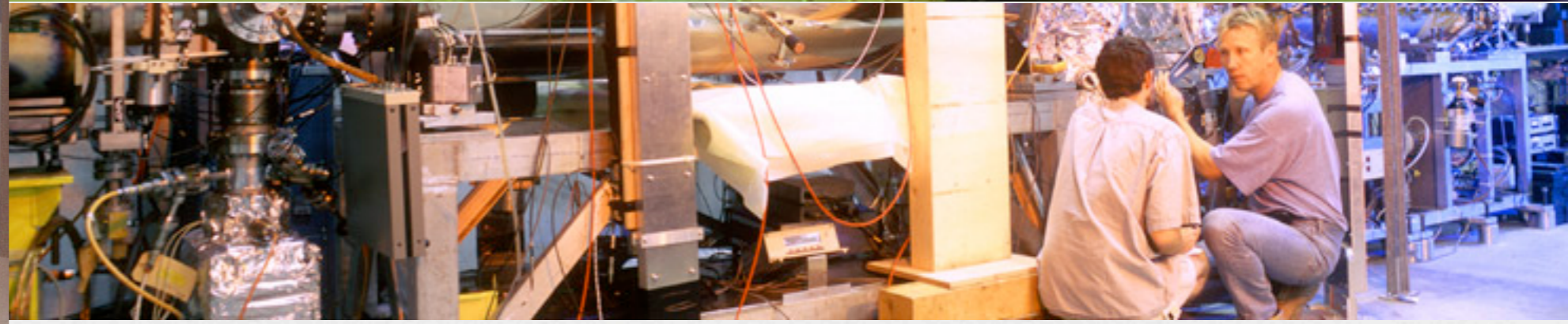
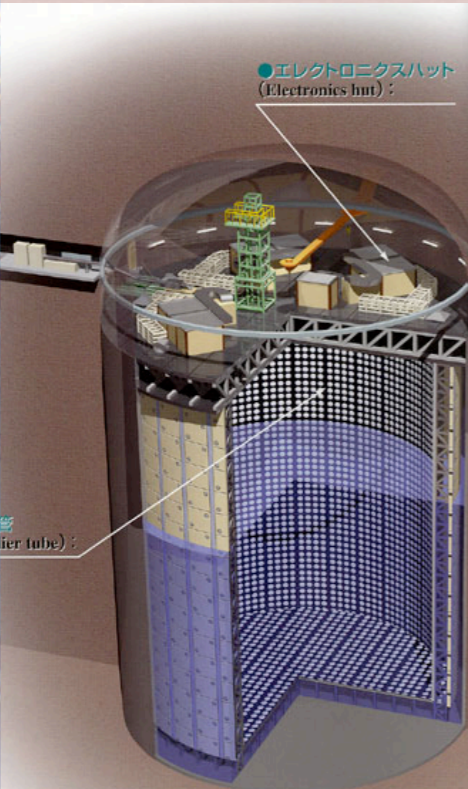
丸善出版

本体 2500円＋税

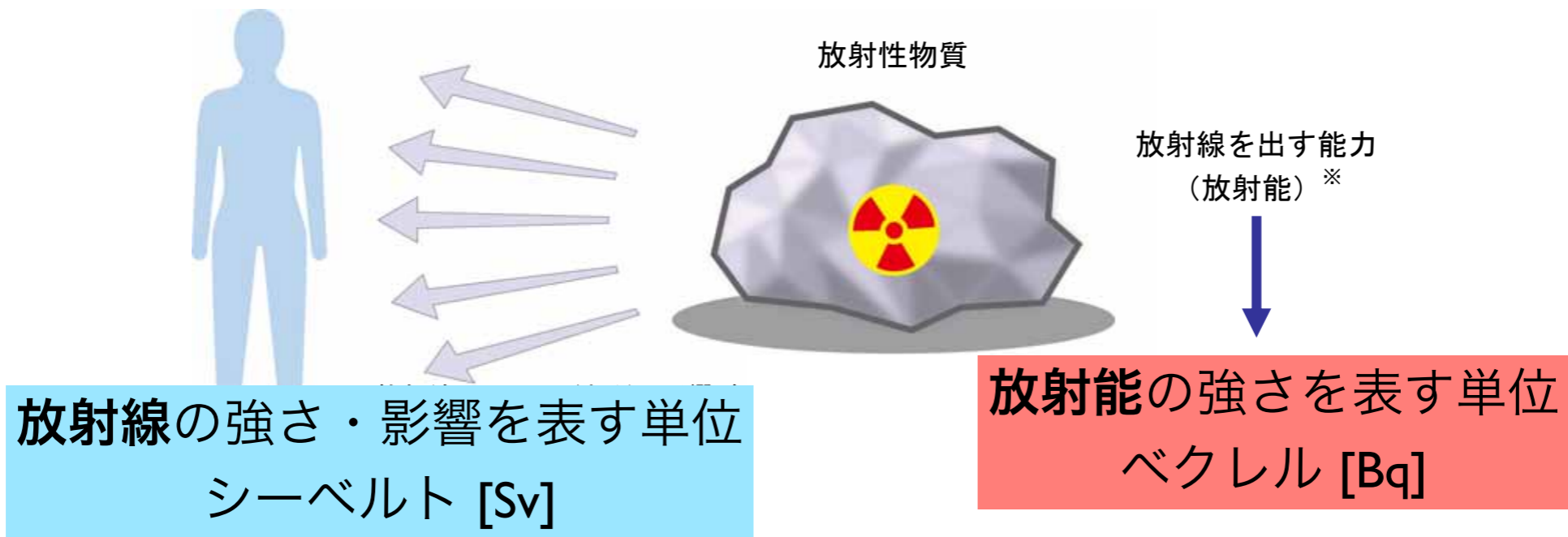


## 第13回 (1/27)

- 線量評価
- 加速器科学・高エネルギー物理学
- リスクコミュニケーション



# 線量評価



## 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

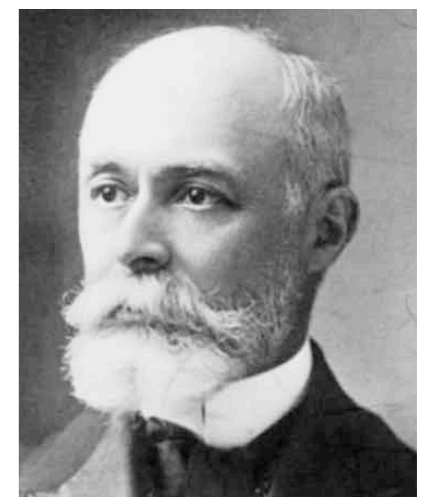
Gray



Sievert



Becquerel



# 放射線量の単位

- 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

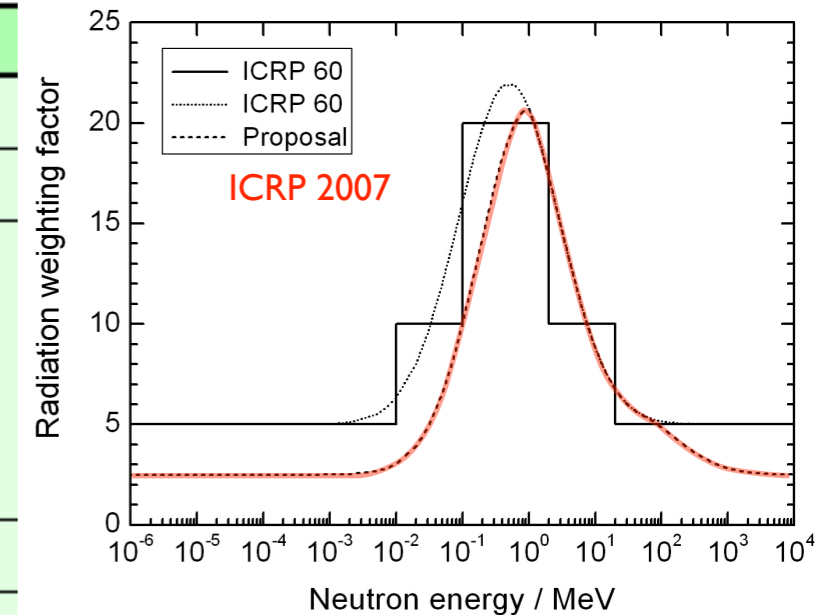


- 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

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

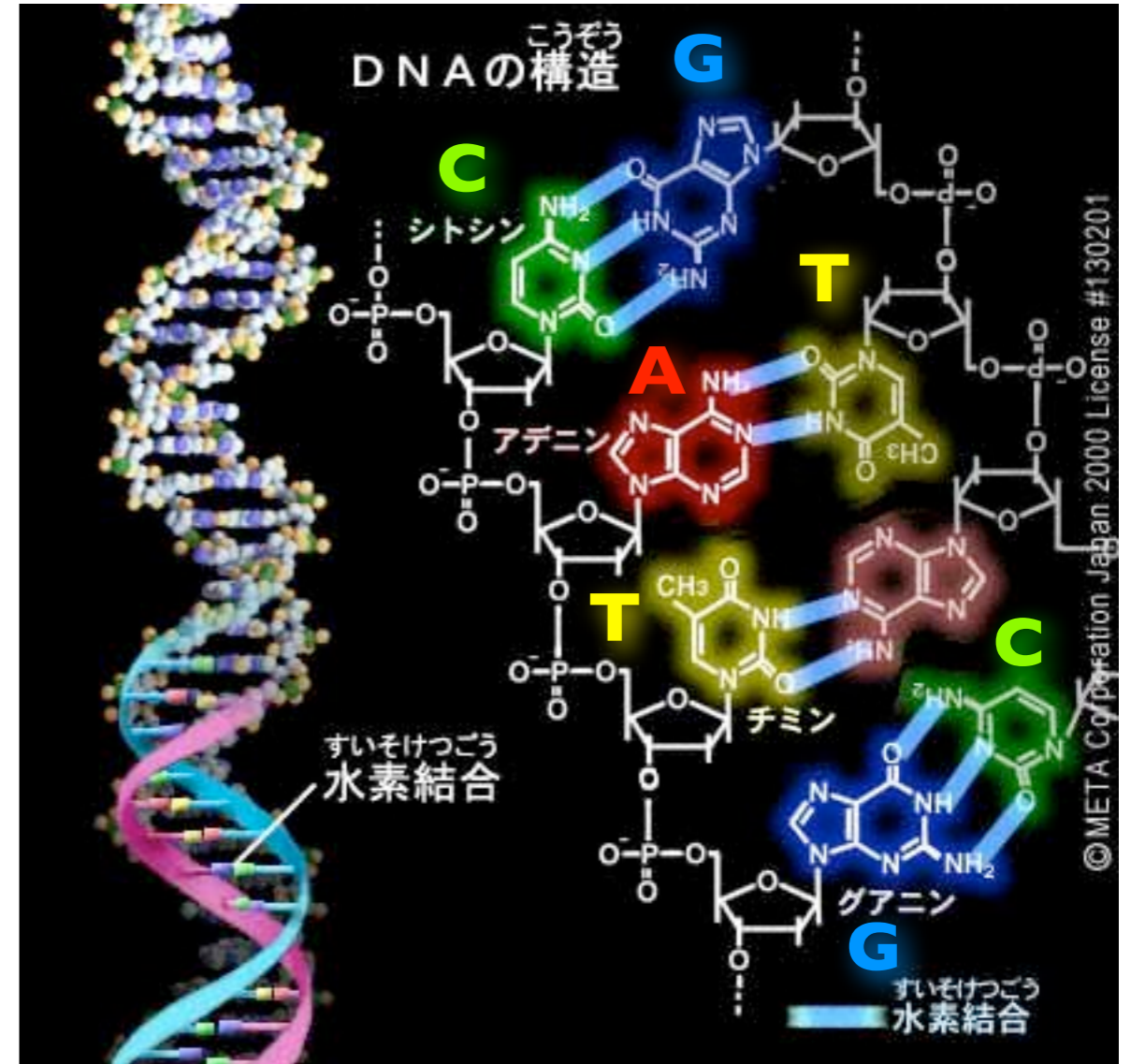
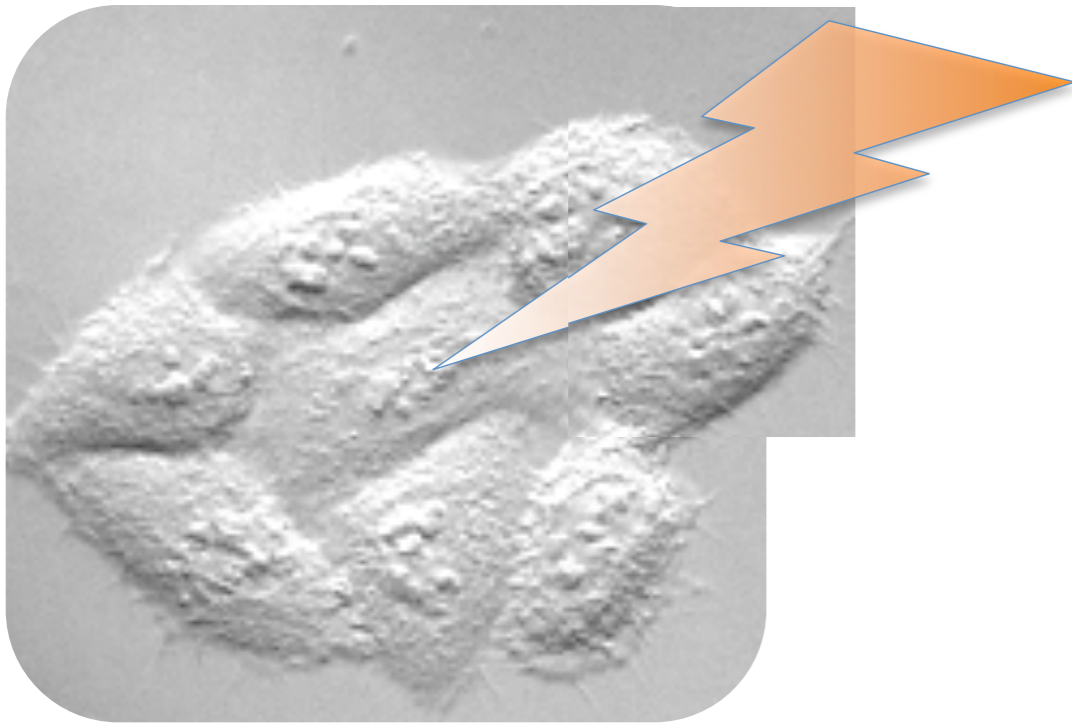
Sievert



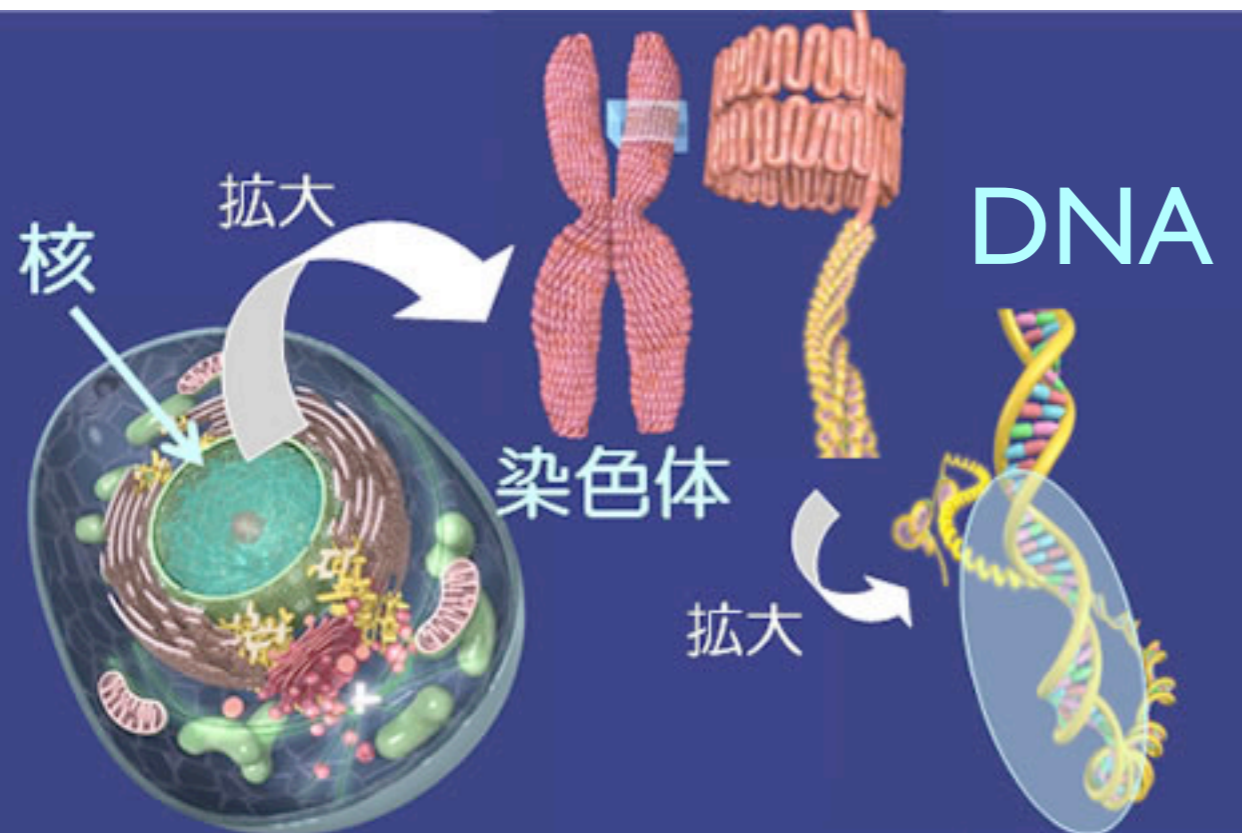


# 細胞の核に放射線が照射

## DNA



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

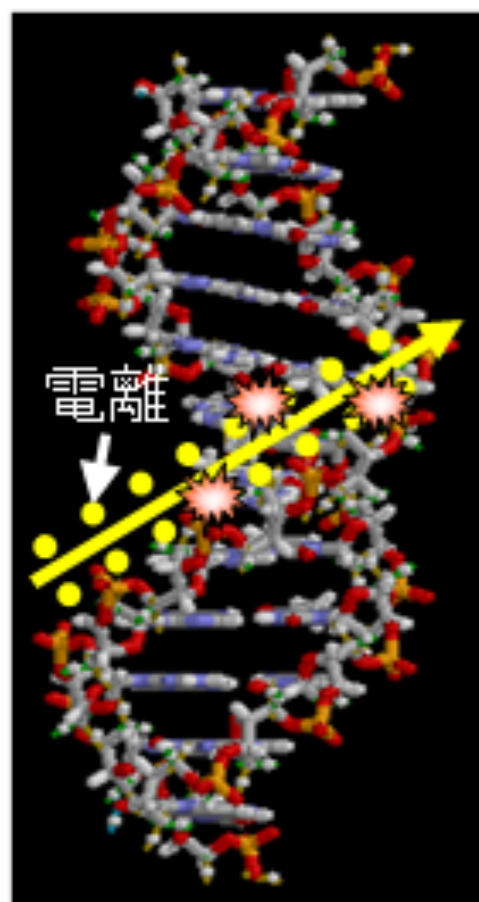


細胞(60兆個)

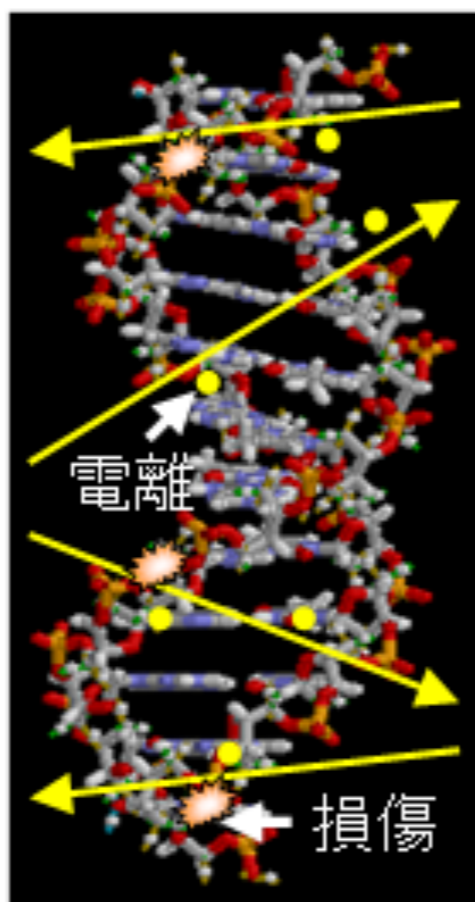
一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子

# 放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

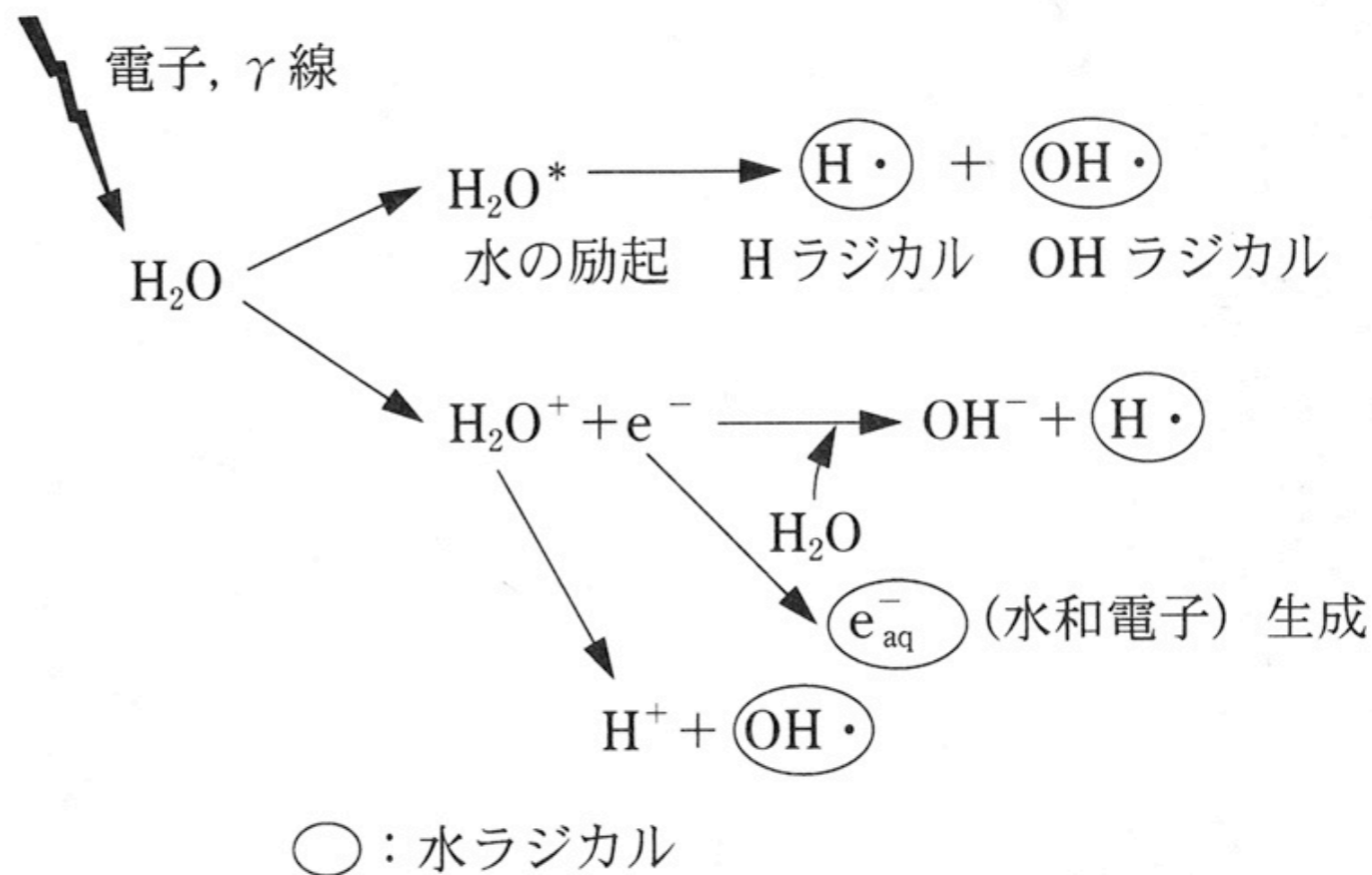


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

## 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

# 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

# 内部被曝の計算例

( $^{131}\text{I}$  による甲状腺預託線量)

# 内部被曝

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

放射性物質を**体内に取り込まない**ことは放射線防護の鉄則。

**放射線防護服**（ $\gamma$ 線を遮ることはできない）

放射性物質が皮膚や服に付着し、あるいは経口摂取してしまうことを防ぐ。



一般に**被曝が継続**するため、**注意が必要**。

- 物理学的半減期
- 生物学的半減期（体内からの排出）

**預託線量**を計算して、被曝期間を通じてのトータルの線量が同じであれば、外部被曝とも影響は同じ。

# 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

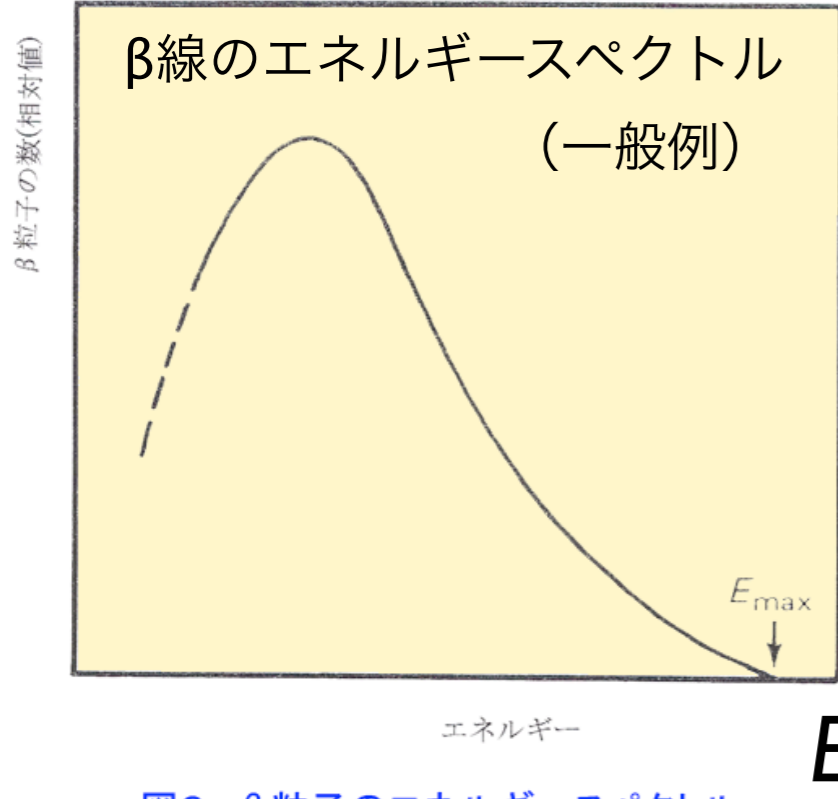
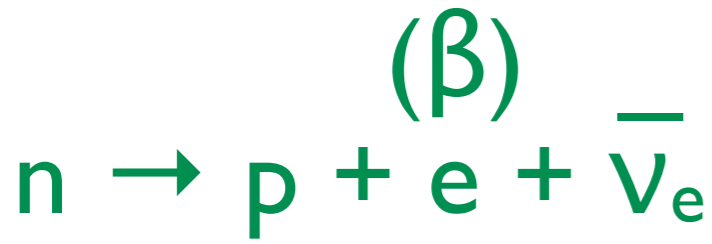
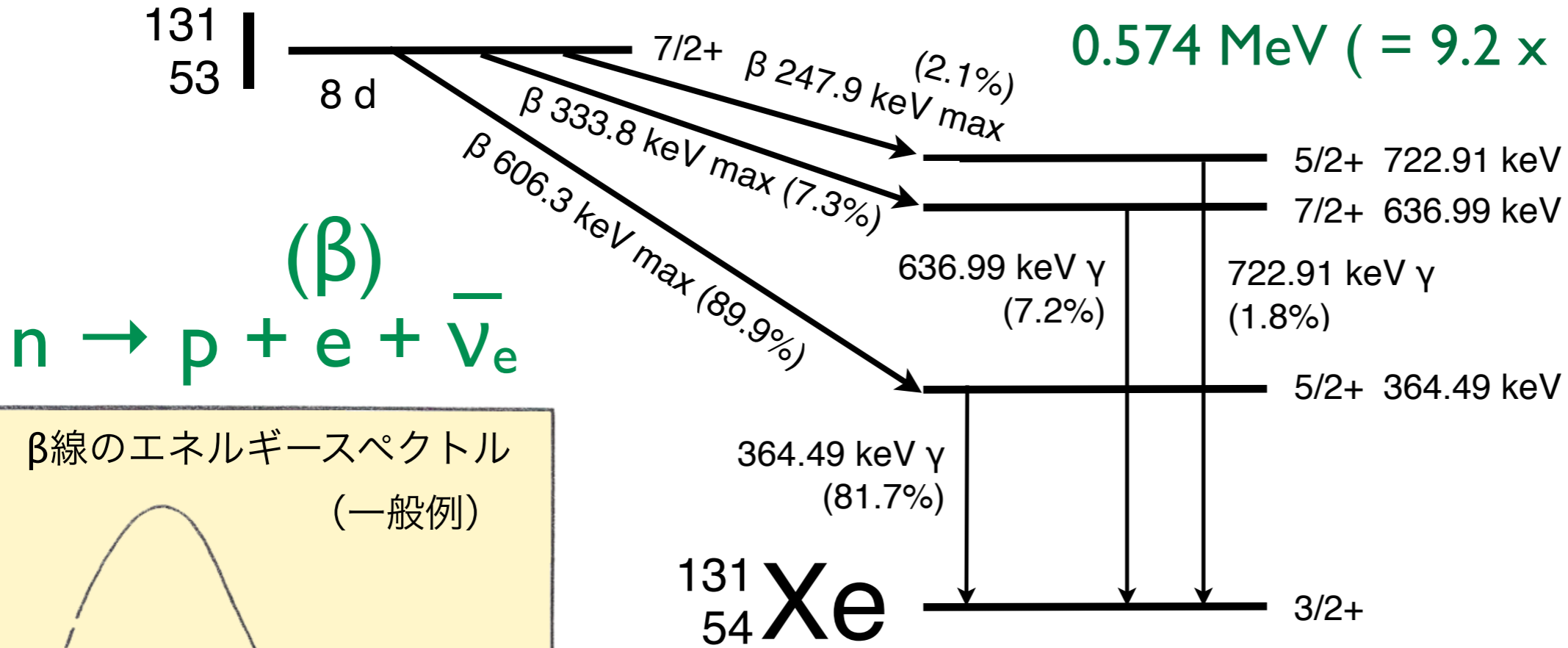
体内摂取した放射性物質から出るすべての放射線を、摂取した時点で被曝したと見なして計算をする。Bq から Sv への換算には、物理学的半減期のみならず排泄機能による生物学的半減期も考慮のうえ、50年間分の積分をする。

実効線量係数 (成人)

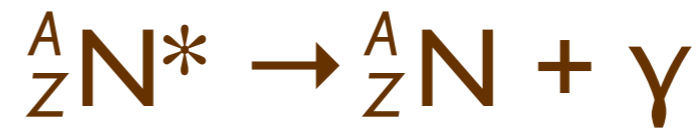
核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)
C-14	5730年	$5.8 \times 10^{-10}$	$5.8 \times 10^{-9}$
P-32	14.3日	$2.4 \times 10^{-9}$	$3.4 \times 10^{-9}$
K-40	12.8億年	$6.2 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$
I-131	8.04日	$2.2 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-9}$
Sr-90	29.1年	$2.8 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$
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	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-8}$

β線の最大エネルギーの平均値  
 0.574 MeV (= 9.2 x 10<sup>-14</sup> J)



γ線：原子核の脱励起

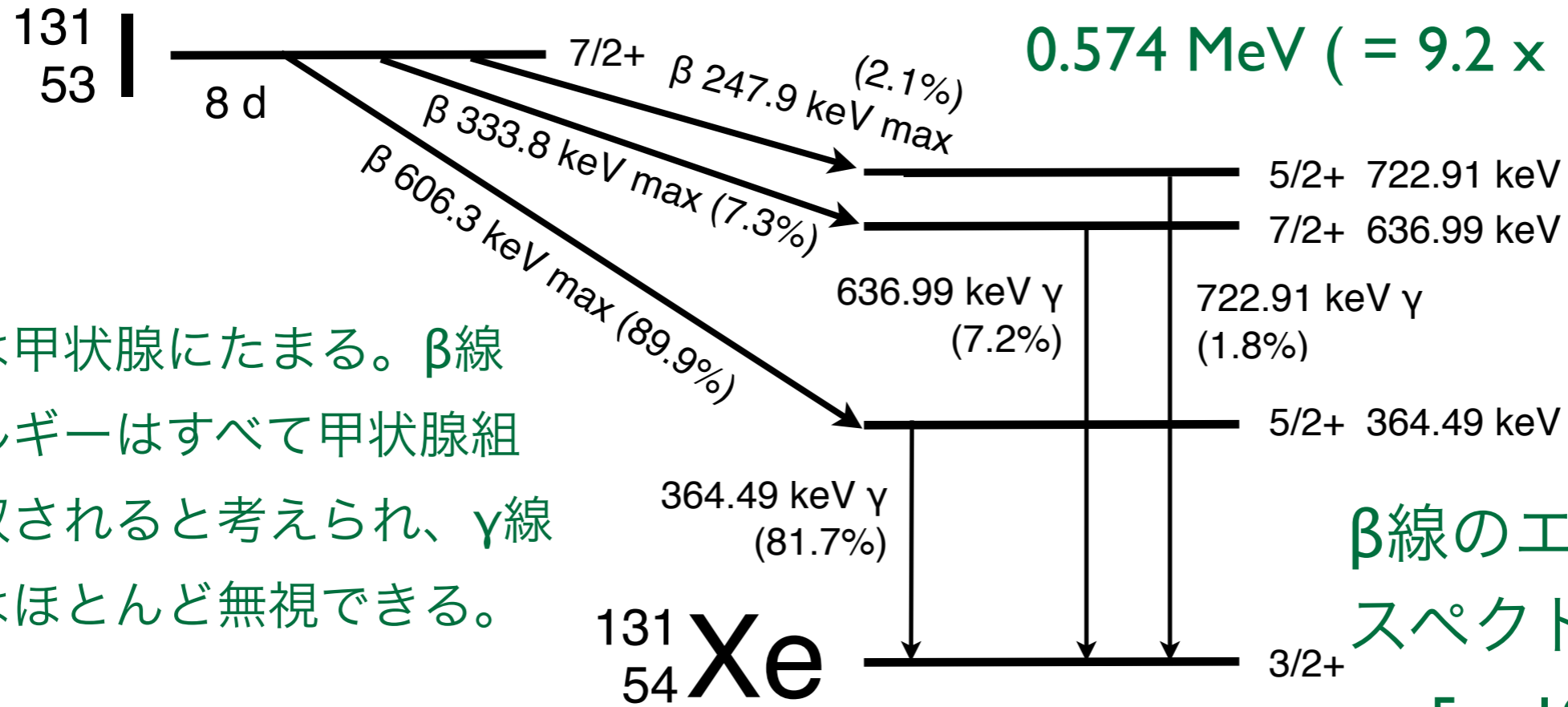


γ線 (定まったエネルギー)

図2 β粒子のエネルギースペクトル  
 [出典]石川友清(編):初級放射線、通商産業研究社、p.37

β線 (連続スペクトル)  
 エネルギーの平均値 ~ 0.3 MeV

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  $5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq} \times 0.2 / 0.02 \text{ kg} = 0.5 \mu\text{Sv/Bq}$

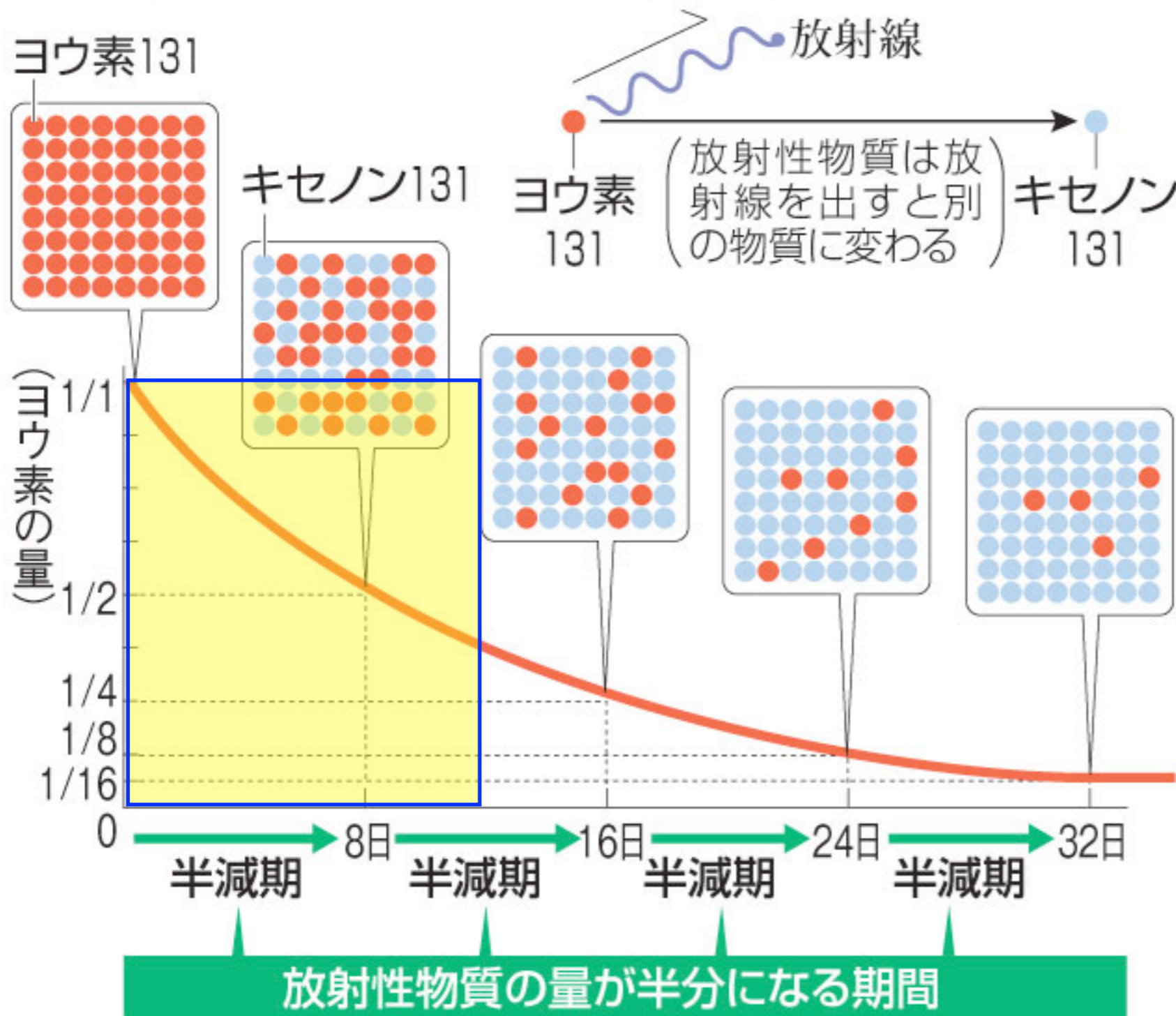
甲状腺は組織加重係数が 0.04 なので、全身被曝量としての実効線量は

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



(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。


# 内部被曝

臓器親和性 (Cs, I, Sr, Pu, ...)

生物学的半減期

**WBC** (遮蔽・周辺の高いバックグラウンド)

給食検査／陰膳検査

毎日 1 Bq の放射性セシウムを摂取し続けたときの  
体内残留量は？   $1 \text{ Bq/d} \times 100 \text{ d} / \ln 2 = 140 \text{ Bq}$

カリウムの場合は？   $90 \text{ Bq/d} \times 30 \text{ d} / \ln 2 = 4000 \text{ Bq}$

Cs-134+137 (全身内部被曝)

I-131 (甲状腺初期内部被曝)

# 外部被曝の計算例

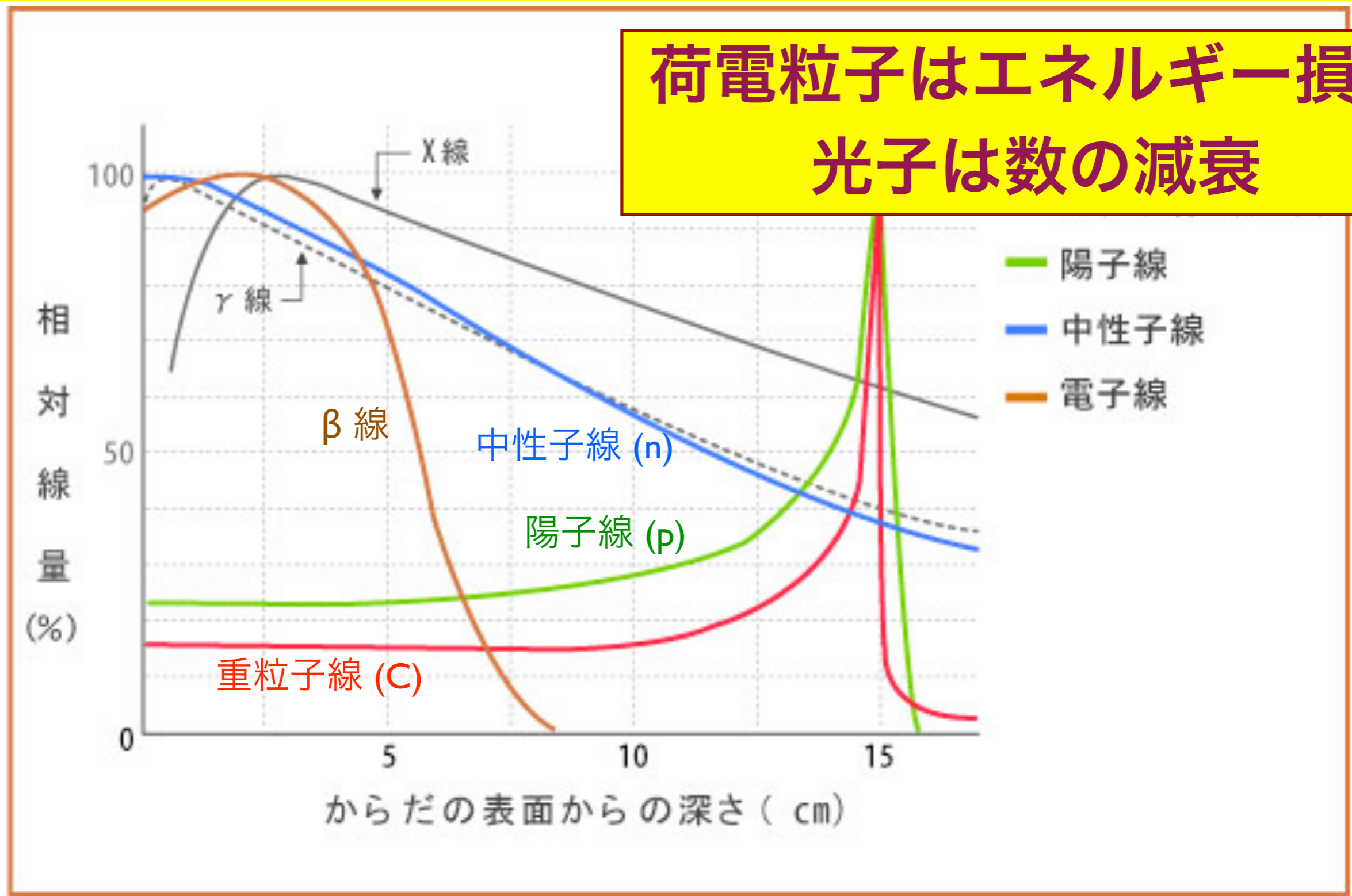
( $^{137}\text{Cs}$  による空間線量率)

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**



# 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

$$L^{\text{air}} = 69.2 \text{ m}$$

$\mu$  : 線減衰係数

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

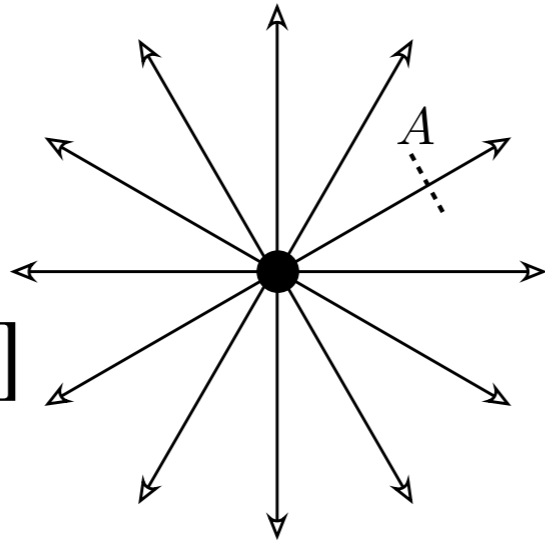
$\mu/\rho$  : 質量減衰係数  $\mu_{\text{en}}/\rho < \mu/\rho$   $(\mu/\rho)^{\text{air}} = 0.077 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$

$\mu_{\text{en}}/\rho$  : 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)

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

$P$  : 放射能 [Bq]

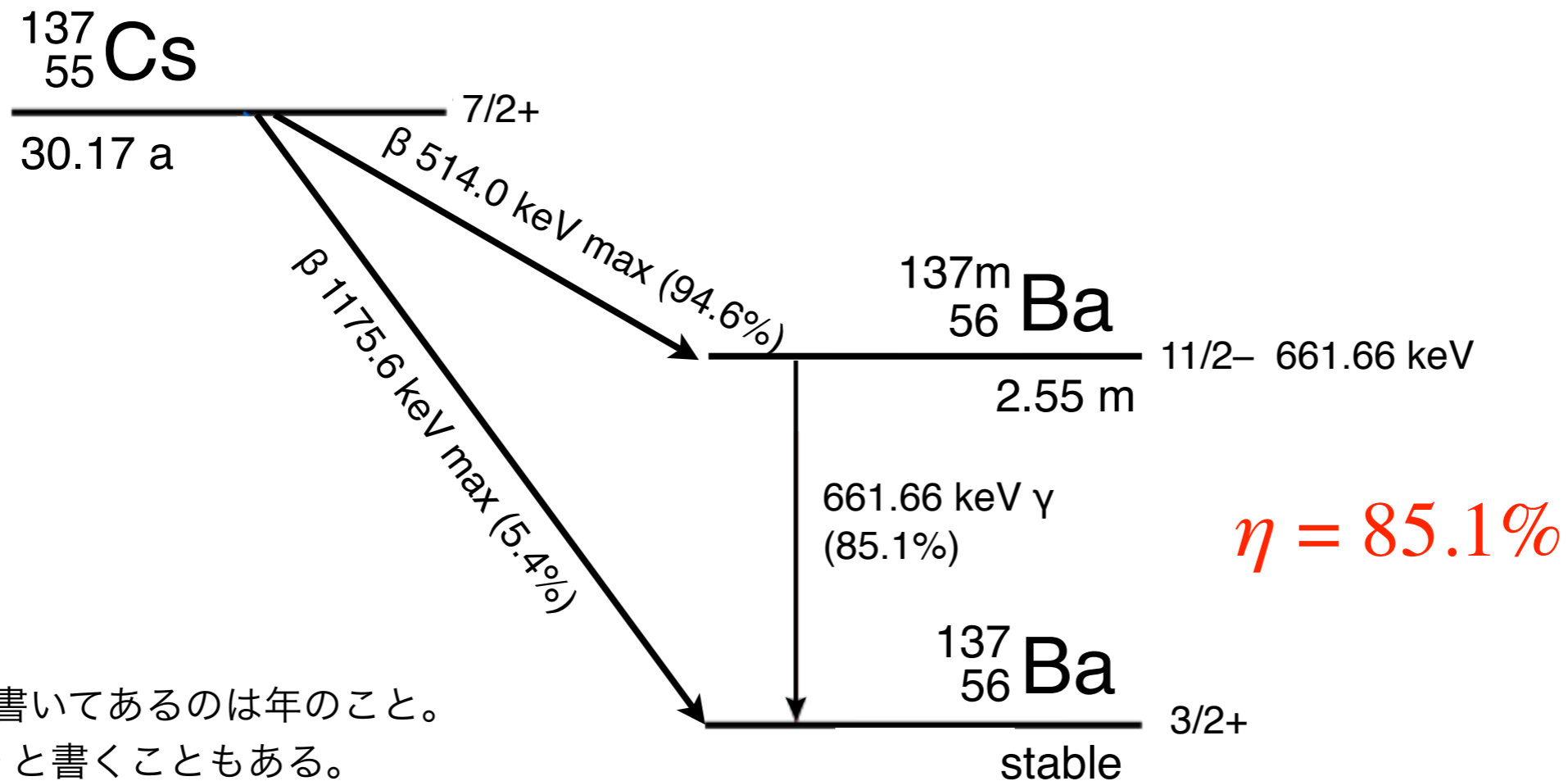


$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

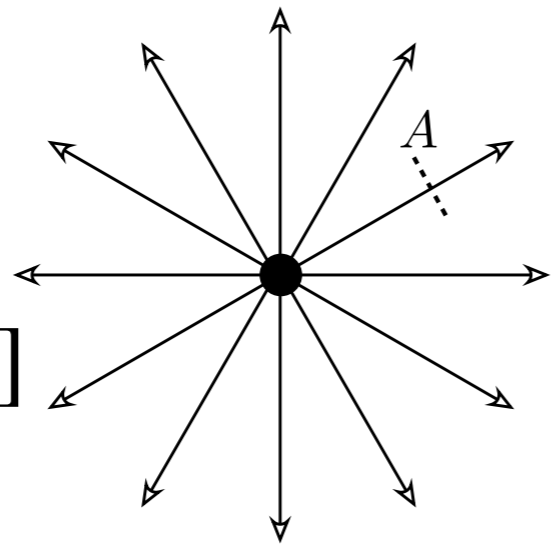
$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}$$

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

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。



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。



$P$  : 放射能 [Bq]

$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

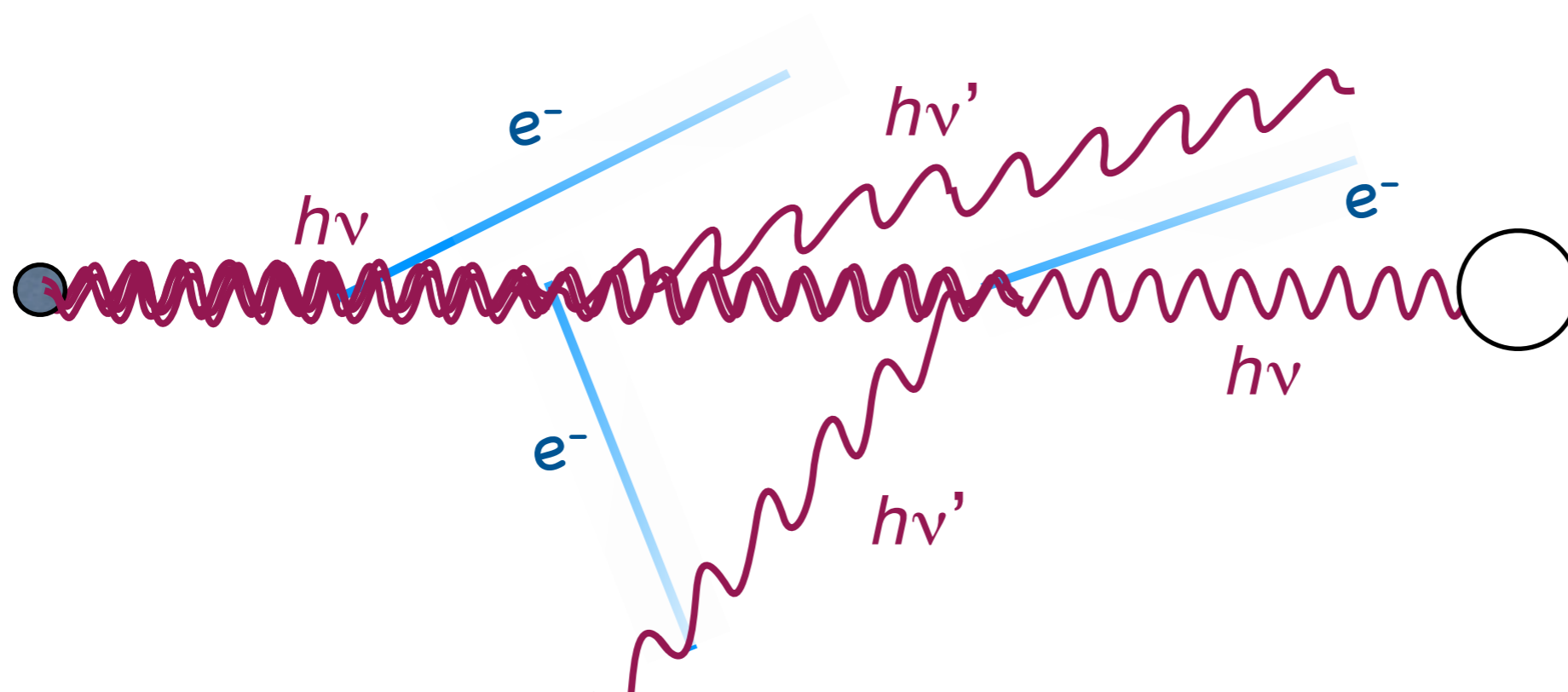
$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi} \quad \eta : \text{放出率}$$

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

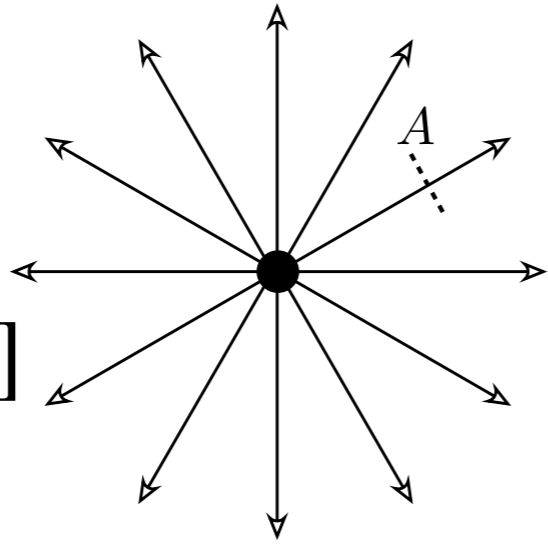
$\mu$  : 線減衰係数

$$\mu = \mu_{\text{光電}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{対生成}} + \dots$$

$$\mu = n \sigma \quad n : \text{数密度} \quad \sigma : \text{反応断面積}$$



$P$  : 放射能 [Bq]

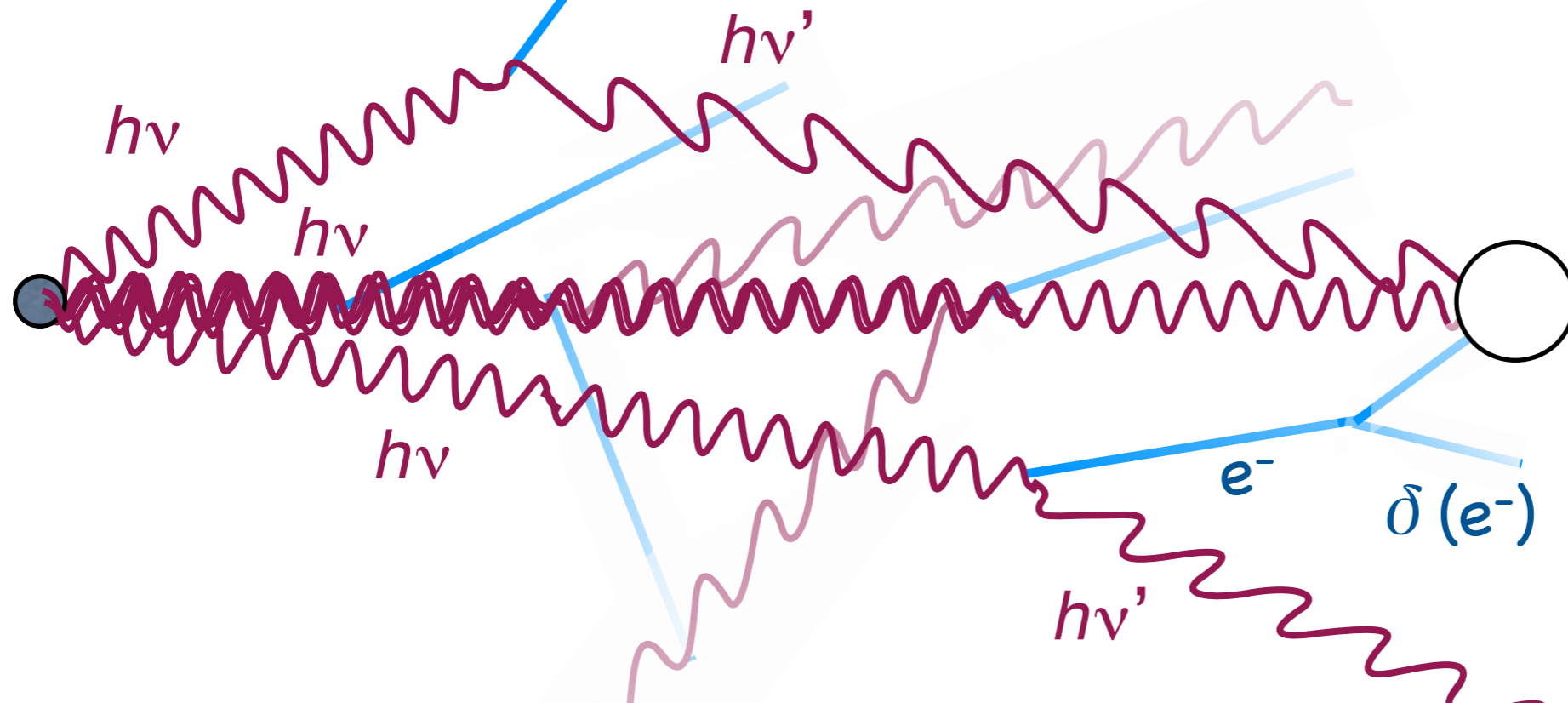


$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi} \quad \eta : \text{放出率}$$

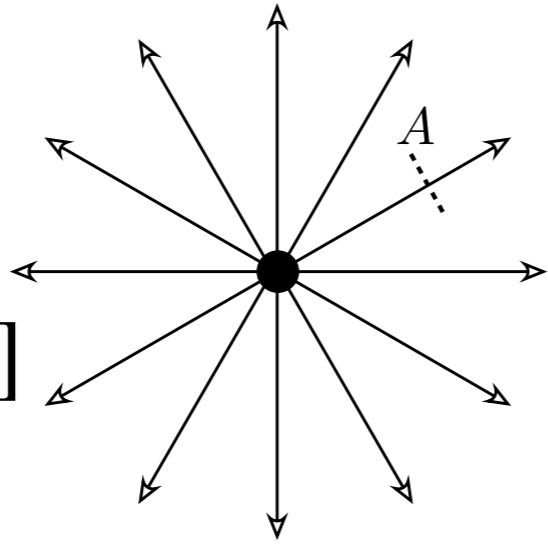
$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu^{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2}$$

上の式では散乱された  $\gamma$ 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り、  
線量は数割増える。





$P$  : 放射能 [Bq]



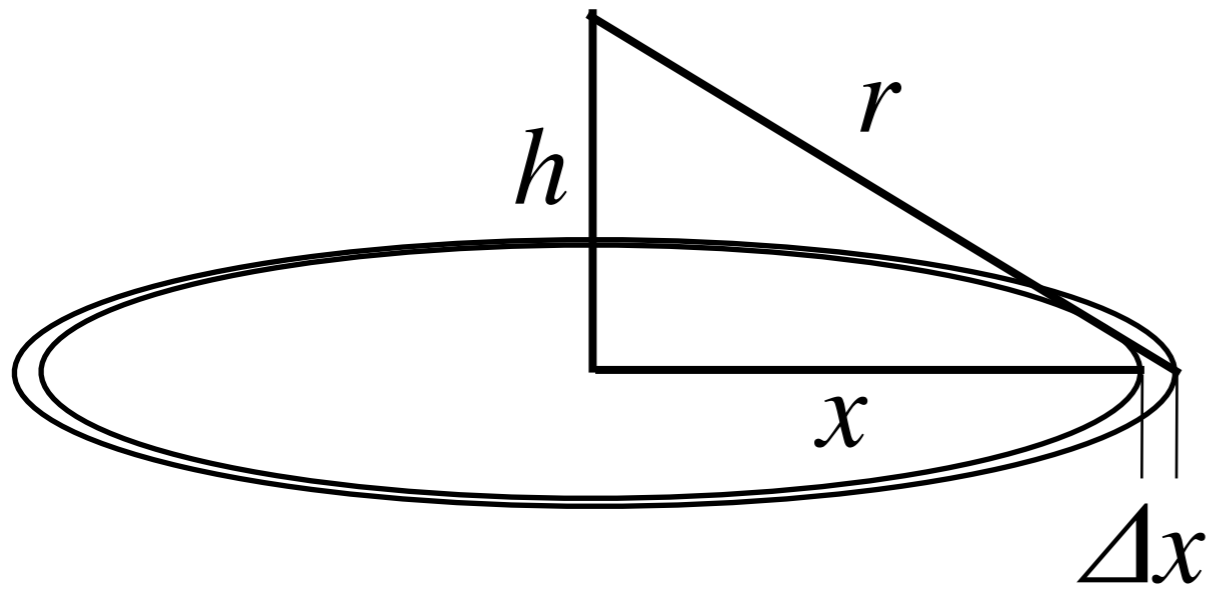
$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

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

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

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>]

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

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

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

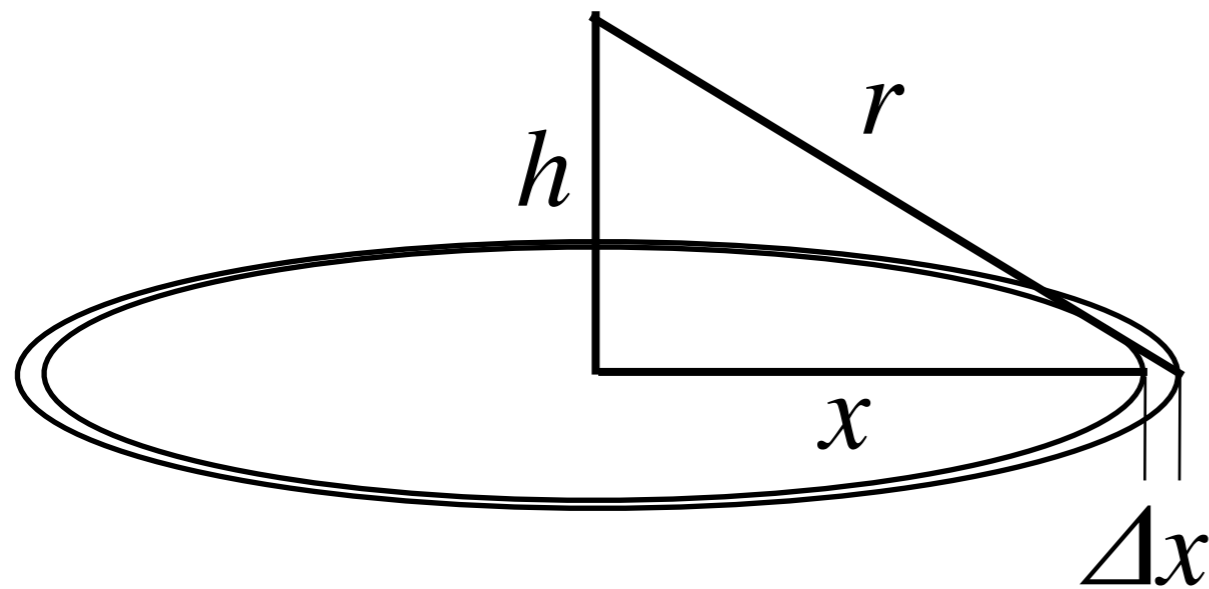
$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

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

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

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

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)。



$p$  : 放射能の平面密度 [Bq/m<sup>2</sup>]

$$\begin{aligned} \dot{\Phi} &= \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu^{\text{air}} r} \eta p}{4\pi r^2} 2\pi x dx \\ &= \frac{\eta p}{2} \int_h^{\infty} \frac{e^{-\mu^{\text{air}} r}}{r} dr \end{aligned} \quad \eta = 0.851$$

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

$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

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

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

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

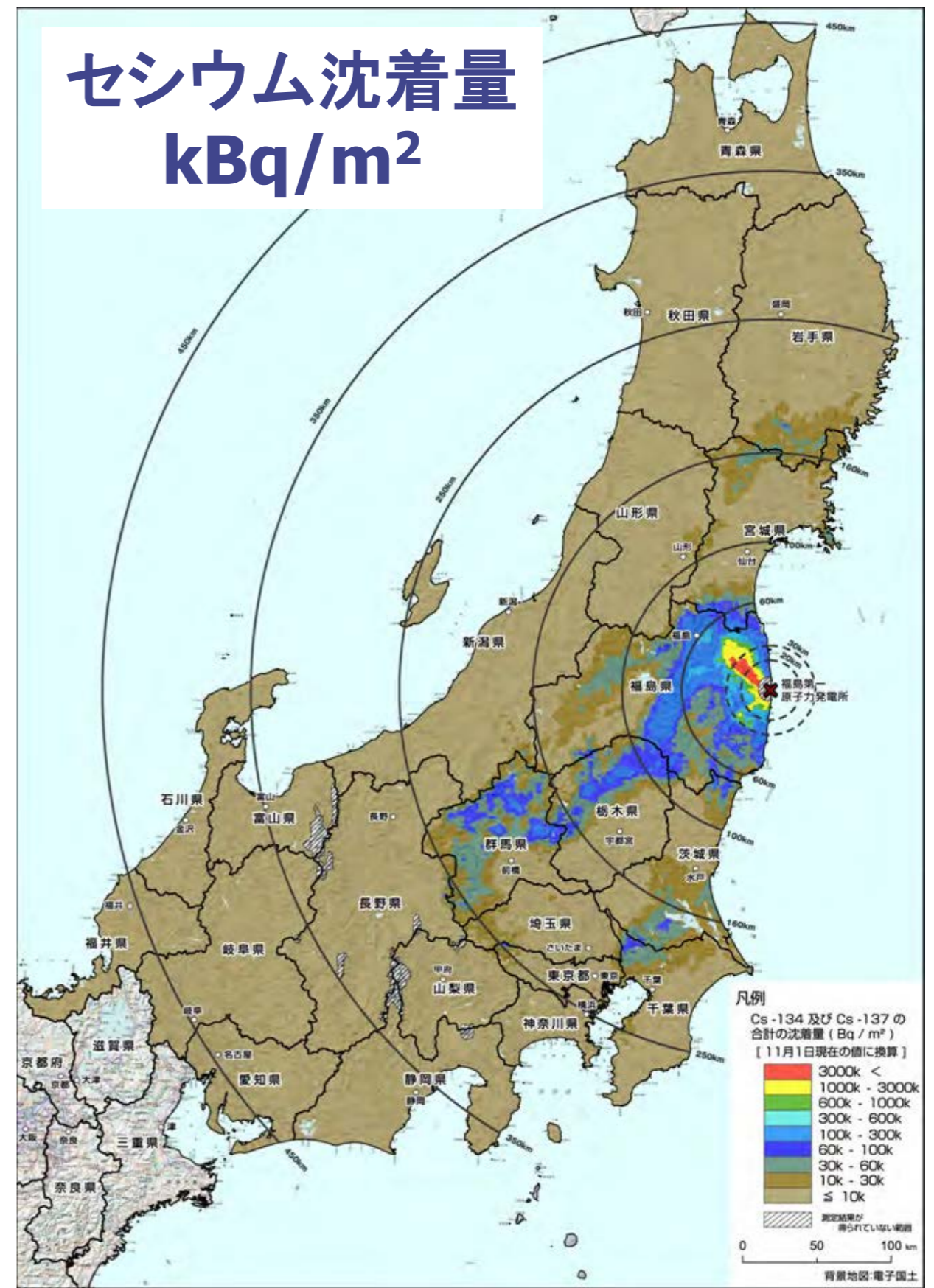
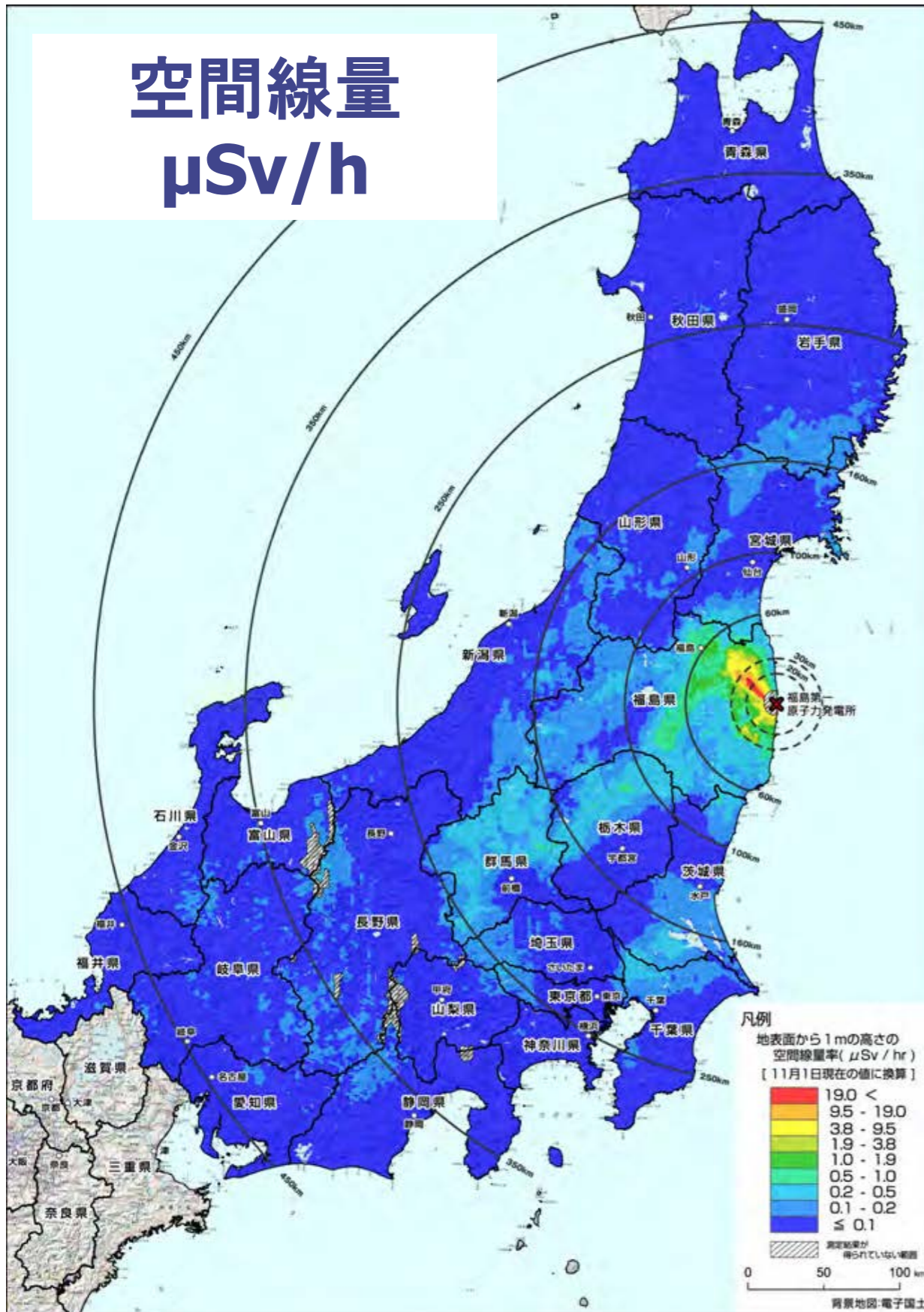
散乱された $\gamma$ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの $\gamma$ 線(ビルドアップ束)による効果を加味する必要がある(50%くらい増える)。

**$^{137}\text{Cs}$  : 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



# 高エネルギー物理学

人工の放射線

～ 原子核物理学から素粒子物理学へ ～

## ■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。



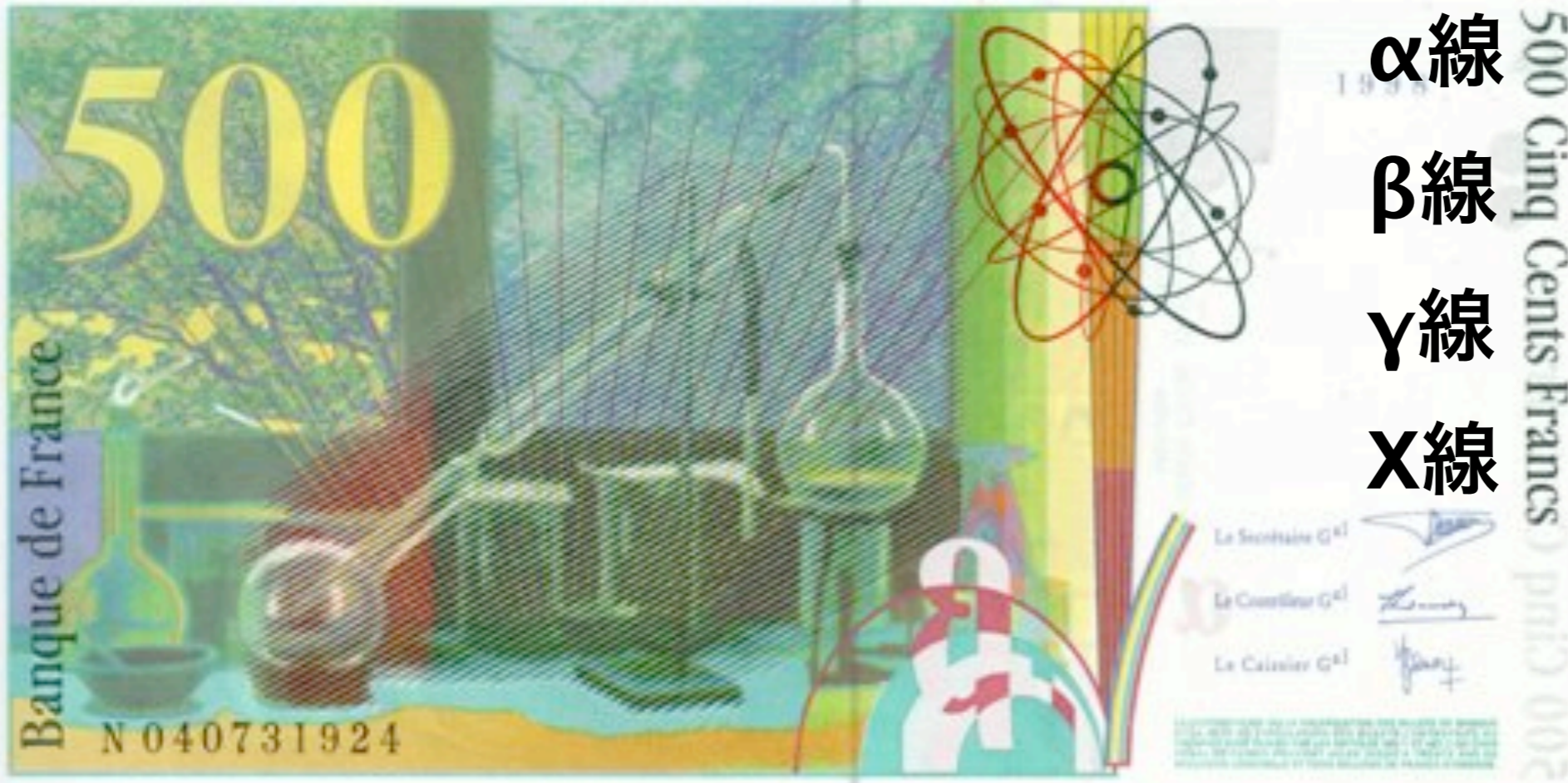
アーネスト・ラザフォード  
(1871-1937)



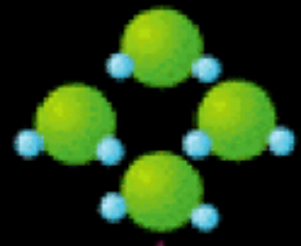
# M. Curie & P. Curie



Billet de 500 Francs Français en circulation: 1993–1999



- α線   ヘリウム原子核
- β線   高速の電子
- γ線   光子（電磁波）
- X線   光子（電磁波）



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

∇  
Å ( $10^{-10}$  m)  
オングストローム

原子物理学 Atomic Physics  
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

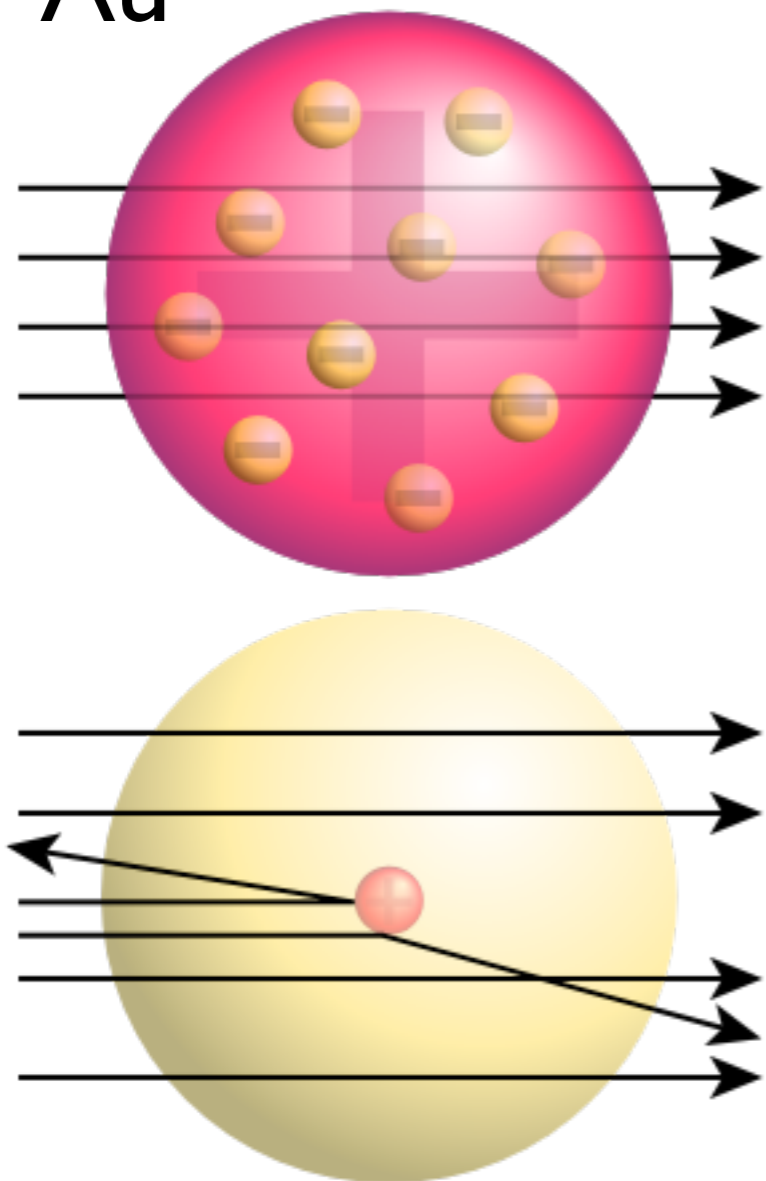


クォーク  
quark



# ラザフォード散乱

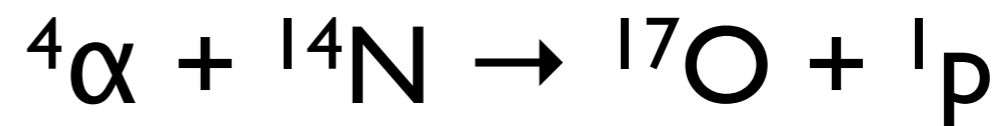
$\alpha + \text{Au}$



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

# Nuclear Science

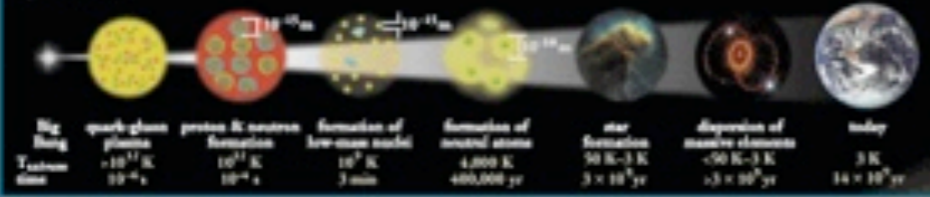
**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly cooled? What is the origin of the nuclei found on Earth?"

**Legend**

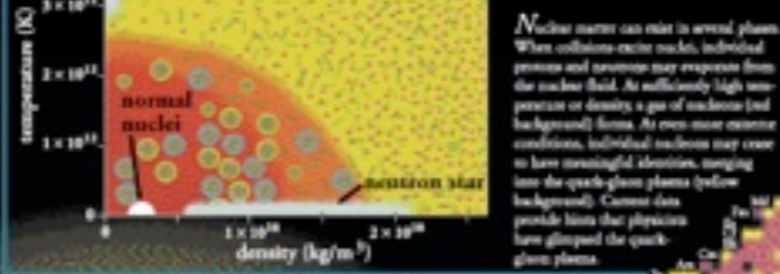
- electron ( $e^-$ )
- quark
- photon ( $\gamma$ )
- proton ( $p^+$ )
- positron ( $e^+$ )
- gluon field
- neutrino ( $\nu$ )
- gluon
- antineutrino ( $\bar{\nu}$ )
- photon ( $\gamma$ )
- Neutron =  $A - Z$
- Atomic Number =  $Z$
- Mass Number =  $A$

## Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about  $10^{-35}$  second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe,  $T_{universe}$ , cooled to about  $10^9$  K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding stars (supernovae) from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.



## Phases of Nuclear Matter



## Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei for from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclides. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with  $Z \leq 112$ .



## Radioactivity

**Alpha Decay**  
 $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}$

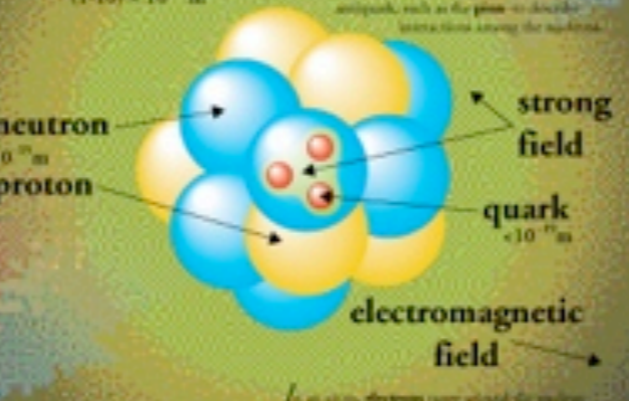
**Beta Minus Decay**  
 $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$

**Beta Plus Decay**  
 $^{11}_6\text{C} \rightarrow ^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu_e$

**Gamma Decay**  
 $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a  $^4_2\text{He}$  nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino for a proton and neutrino or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the name for the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

## The Nucleus



## Nuclear Energy

**Fission**  
 $^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow ^{141}_{54}\text{Xe} + ^{92}_{38}\text{Sr} + 2n$

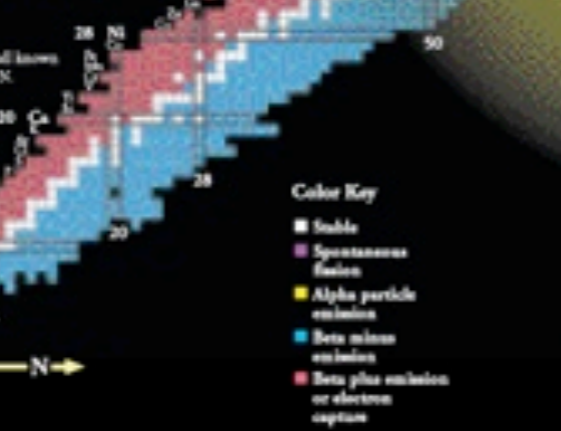
**Fusion**  
 $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + n$

Nuclear reactions release energy when the total mass of the products is less than the sum of the masses of the initial nuclei. The "lost mass" appears as kinetic energy of the products ( $E = mc^2$ ). In fusion, a massive nucleus splits into two major fragments that usually eject one or more neutrons. In fusion, low mass nuclei combine to form a more massive nucleus plus one or more ejected particles—neutrons, protons, photons, or alpha particles.

In the early stages of nuclear evolution, our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of nuclear evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of reactions that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that reactions must have a mass greater than zero.

## Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z, and neutron number, N. Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers (2, 8, 2, 8, 20, 28, 50, 82 and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major shell gaps and show regions of greater nuclear binding energy.



## Applications

**Radioactive Dating**  
 Recently occurring radioactive isotopes such as  $^{14}\text{C}$  are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of willow found at the site, scientists determined that the bridge was built nearly 4,000 years ago.

**Smoke Detectors**  
 Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter  $^{241}\text{Am}$  to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

**Nuclear Medicine**  
 Radioactive isotopes, such as  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{131}\text{I}$ , and  $^{18}\text{F}$ , are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Positron emission tomography (PET) uses  $^{18}\text{F}$  and is used in Positron Emission Tomography (PET) to generate images of brain activity.

**Space Exploration**  
 Exposure and alpha particles to identify chemical elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactors are used in many ways from electrical power generation to an entertainment.

**Nuclear Reactors**  
 Nuclear reactors are the basis of  $^{235}\text{U}$  or  $^{239}\text{Pu}$  nuclei to produce electric power. Reactors and other nuclear applications generate radioactive waste. Disposal of the waste is a subject of current research.

**Magnetic Resonance Imaging**  
 Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes use of atomic transitions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. This technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org

# 核種の数

安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

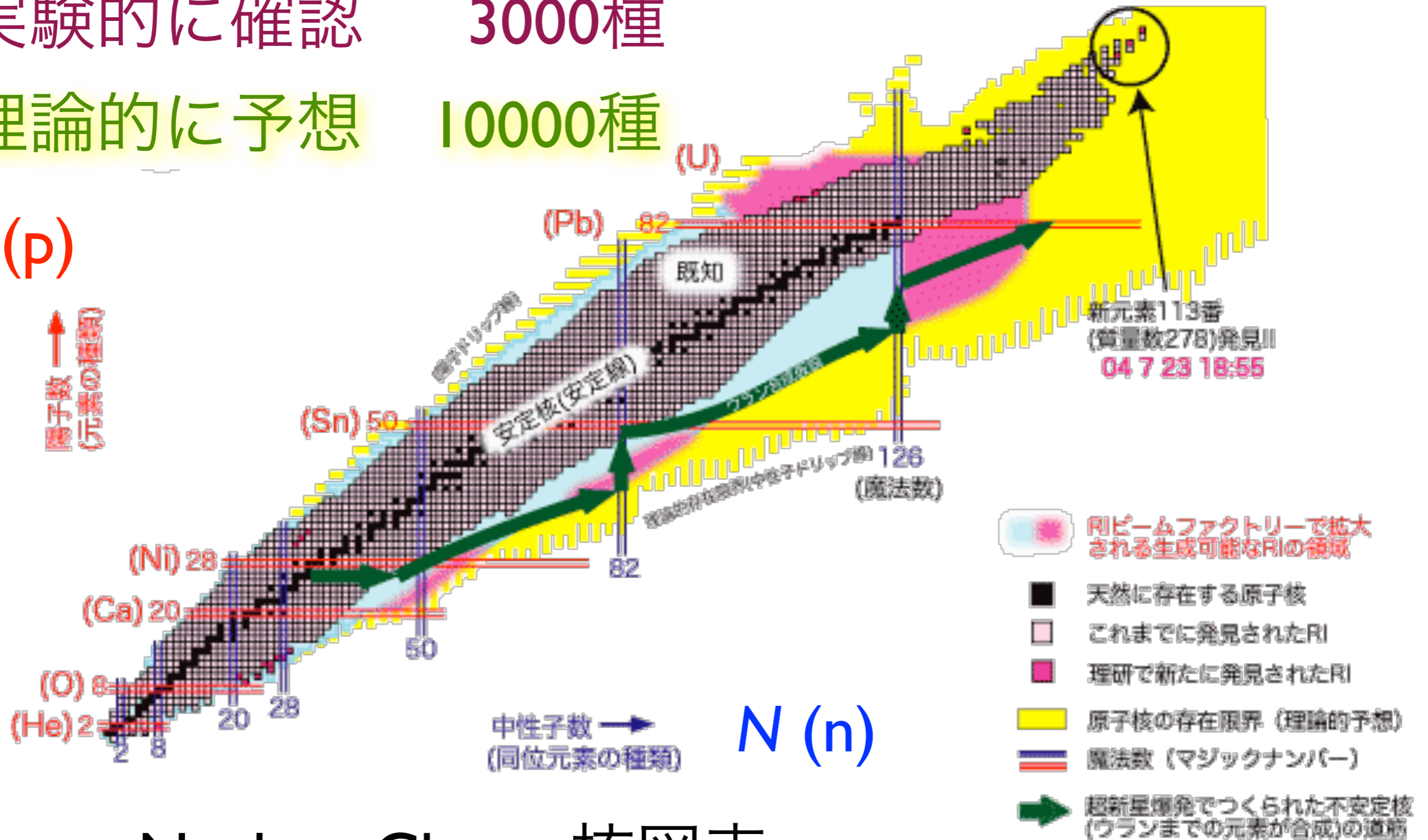
理論的に予想 10000種

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

Z (p)

↑ 陽子数  
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

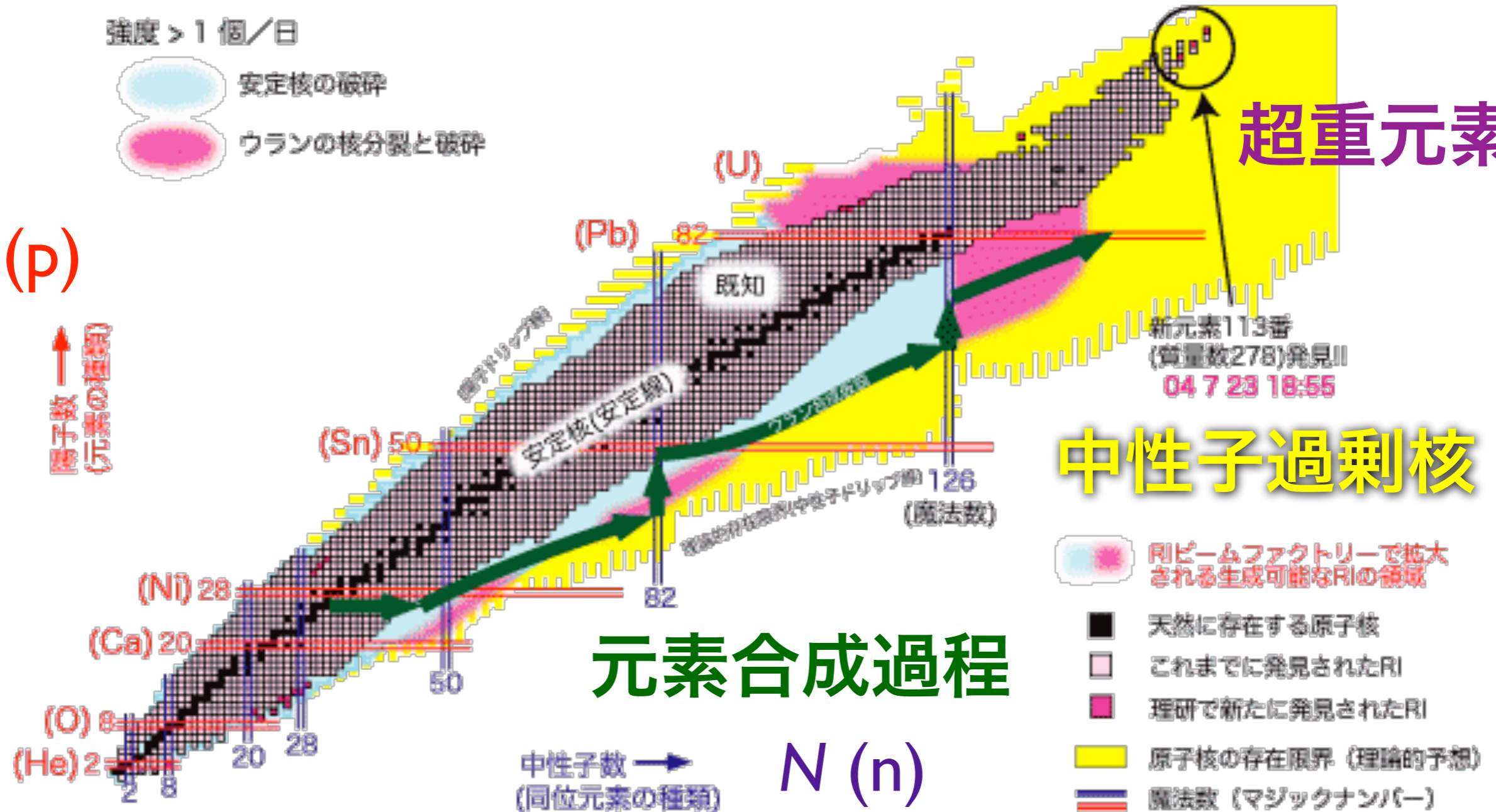


RIKEN

強度 > 1 個/日  
 安定核の破砕  
 ウランの核分裂と破砕

Z (p)

↑ 陽子数 (元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

# 元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 氢	Atomic Sym																2 氦
2	3 锂	4 铍	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;">                     1 氢 Hydrogen 1.00794 1s<sup>1</sup> </div> <div> <span style="border: 1px solid orange; padding: 2px;">α</span> A衰变  <span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">p</span> Proton emission  <span style="border: 1px solid green; padding: 2px;">n</span> Neutron emission  <span style="border: 1px dashed gray; padding: 2px;">SF</span> Spontaneous fission                 </div> <div> <span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">β</span> β衰变  <span style="border: 1px solid purple; padding: 2px;">β+</span> Beta+ decay  <span style="border: 1px dashed purple; padding: 2px;">EC</span> Electron capture  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">□</span> Stable                 </div> </div>															10 氖
3	11 钠	12 镁	Selected All															18 氩
4	19 钾	20 钙	21 钪	22 钛	23 钒	24 铬	25 锰	26 铁	27 钴	28 镍	29 铜	30 锌	31 镓	32 锗	33 砷	34 硒	35 溴	36 氪
5	37 铷	38 锶	39 钇	40 锆	41 铌	42 钼	43 锝	44 钨	45 铼	46 钨	47 铟	48 锡	49 铊	50 铅	51 铟	52 碲	53 碘	54 氙
6	55 铯	56 钡	57-71 镧系	72 铪	73 钽	74 钨	75 铼	76 钨	77 铱	78 铂	79 金	80 汞	81 铊	82 铅	83 铋	84 钋	85 砹	86 氡
7	87 钫	88 镭	89-103 锕系	104 𨭎	105 𨭏	106 𨭐	107 𨭑	108 𨭒	109 𨭓	110 𨭔	111 𨭕	112 𨭖	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

铼

镅

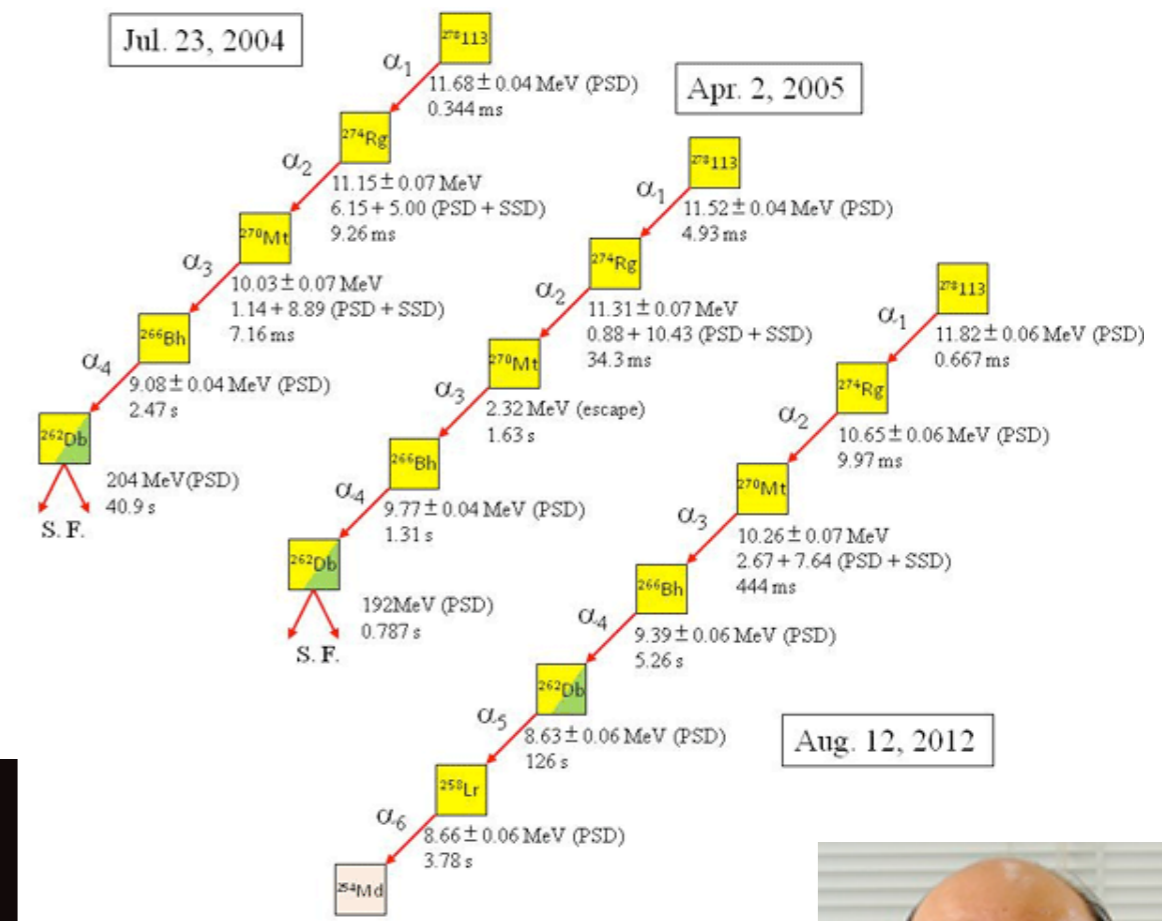
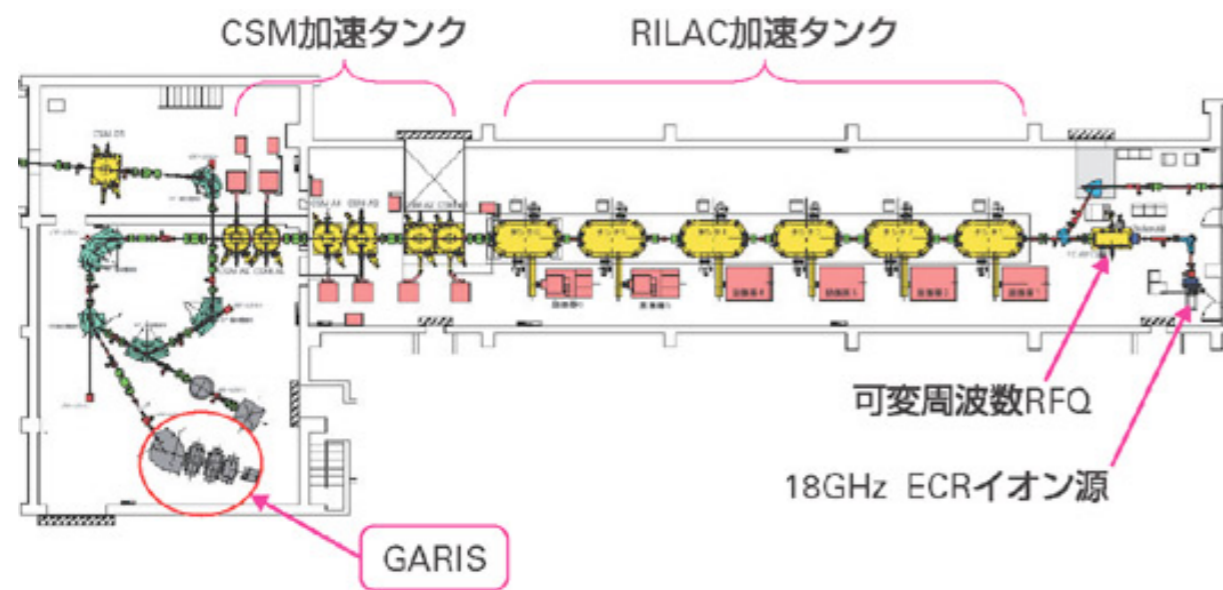
这些原理没有一致稳定的同位素,大量的同位素最长的半衰期

元素周期表 设计版权 © 1997 Michael Dayah. <http://www.dayah.com/> d: May 30, 2008

57 镧	58 铈	59 镨	60 钕	61 钐	62 铈	63 铈	64 钆	65 铈	66 铈	67 铈	68 铈	69 铈	70 铈	71 镱
89 锶	90 钪	91 钇	92 铈	93 镧	94 铈	95 铈	96 铈	97 铈	98 铈	99 铈	100 铈	101 铈	102 铈	103 铈

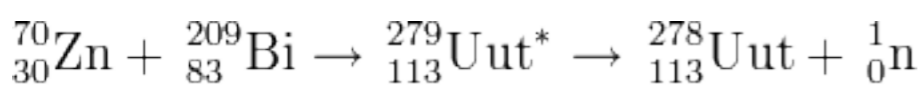
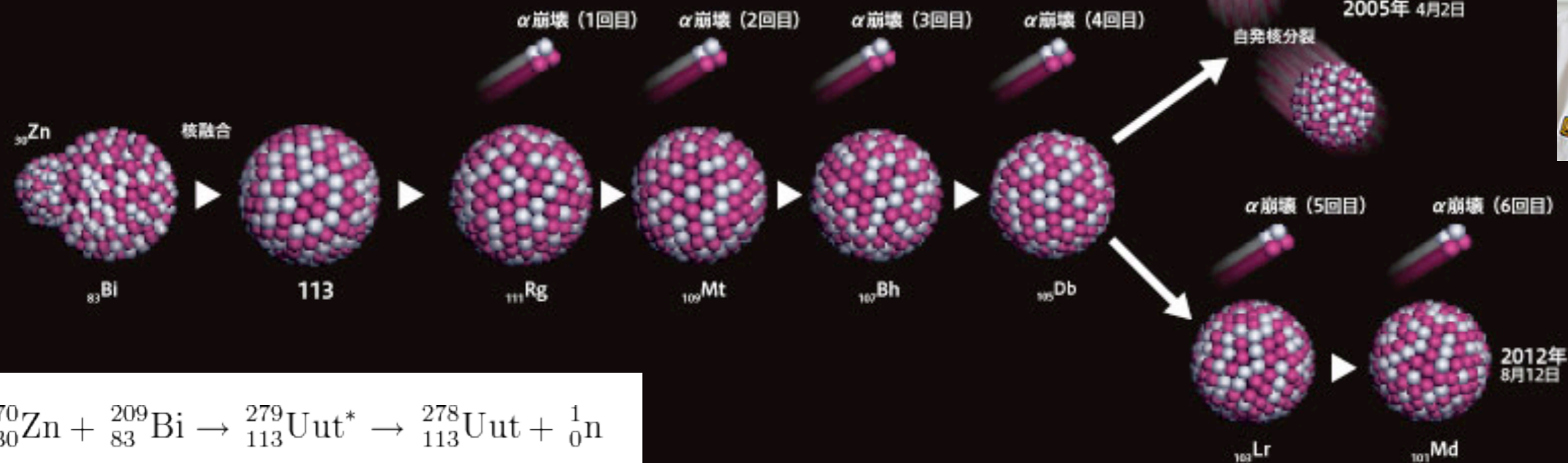
# 超重元素 $_{113}\text{Uut}$ (ジャポニウム Jp ?) 生成

2004, 05, 12年、理研 森田浩介氏ら



## $^{278}_{113}\text{Uut}$ 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 $^{279}\text{Uut}^*$ が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 ( $^{278}\text{Uut}$ ) 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 $^{278}\text{Uut}$ 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 $^{278}\text{Uut}$ 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 H 1.0079																	2 He 4.0026
2 Li 6.941	3 Be 9.0121											5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne
3 Na 22.989	4 Mg 24.305											13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl 35.453	18 Ar
4 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955	22 Ti 47.867	23 V 50.941	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80
5 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc 98.906	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.42	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.757	52 Te 127.60	53 I 126.905	54 Xe 131.29
6 Cs 132.905	56 Ba 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.222	78 Pt 195.084	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.384	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (208.9824)	85 At (208.9824)	86 Rn (222)
7 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 Actinides	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus (294)	118 Uuo (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 La 138.90	58 Ce 140.11	59 Pr 140.90	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93
89 Ac (227)	90 Th 232.03	91 Pa 231.03	92 U 238.02	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)

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

フリューロフ

# 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)

性質：43Tc, 85At, 88Ra, 89Ac, 91Pa

黒字は鉱物の分離・生成により発見したもの。

神話：61Pm, 90Th, 92U, 93Np, 94Pu

発見地や発見者の国名：

84Po, 87Fr, 95Am, 97Bk, 98Cf, 105Db, 108Hs, 110Ds

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

## 発見した加速器施設

米国 California大 Berkeley校ほか、シーボーグら：

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

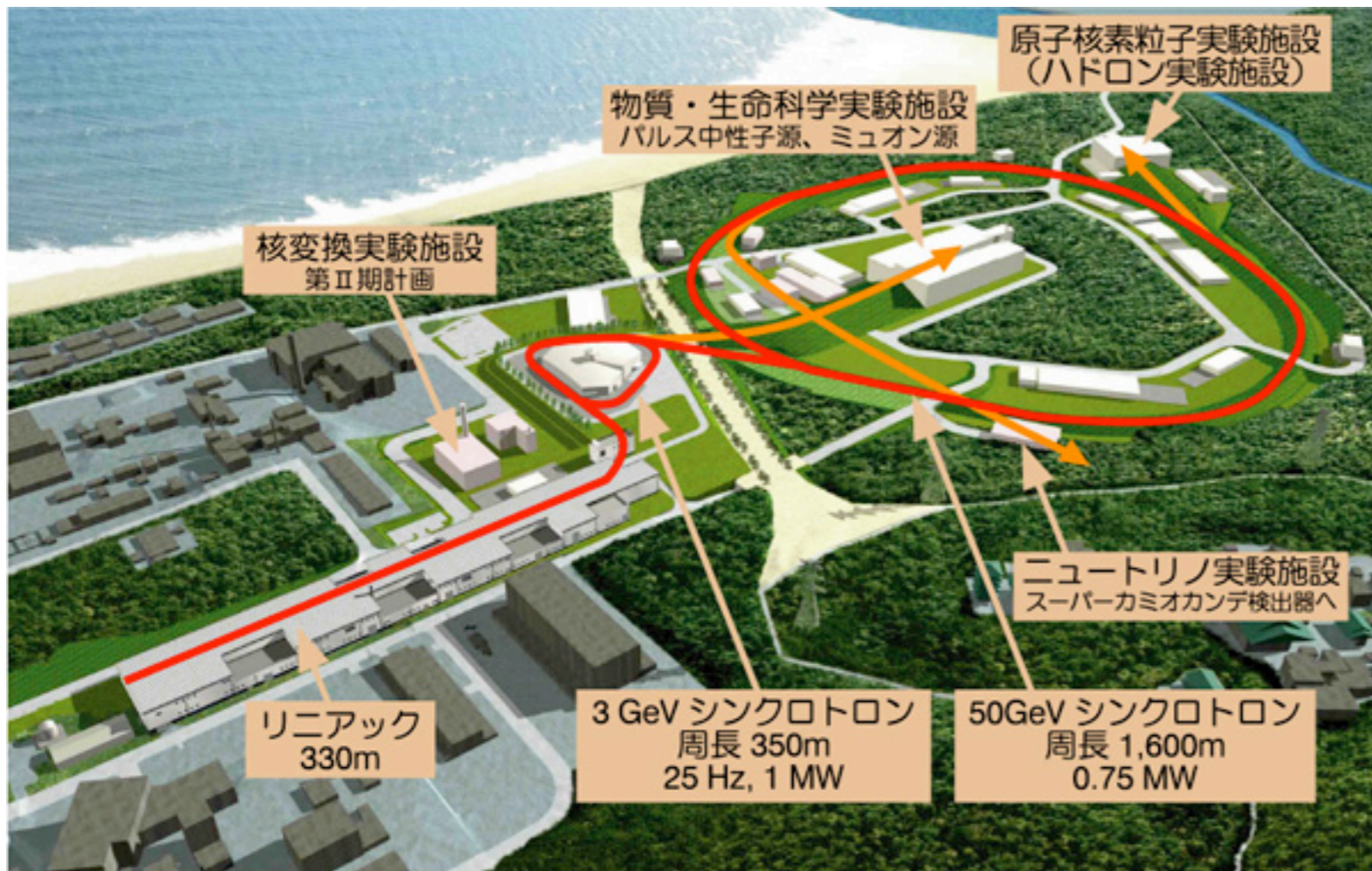
ロシア合同原子核研究所 (Дубна = Dubna): (102), 104, 105Db, 106, (107), (113)–118

ドイツ重イオン研究所 GSI (Darmstadt)：107, 108Hs, 109, 110Ds, 111, 112



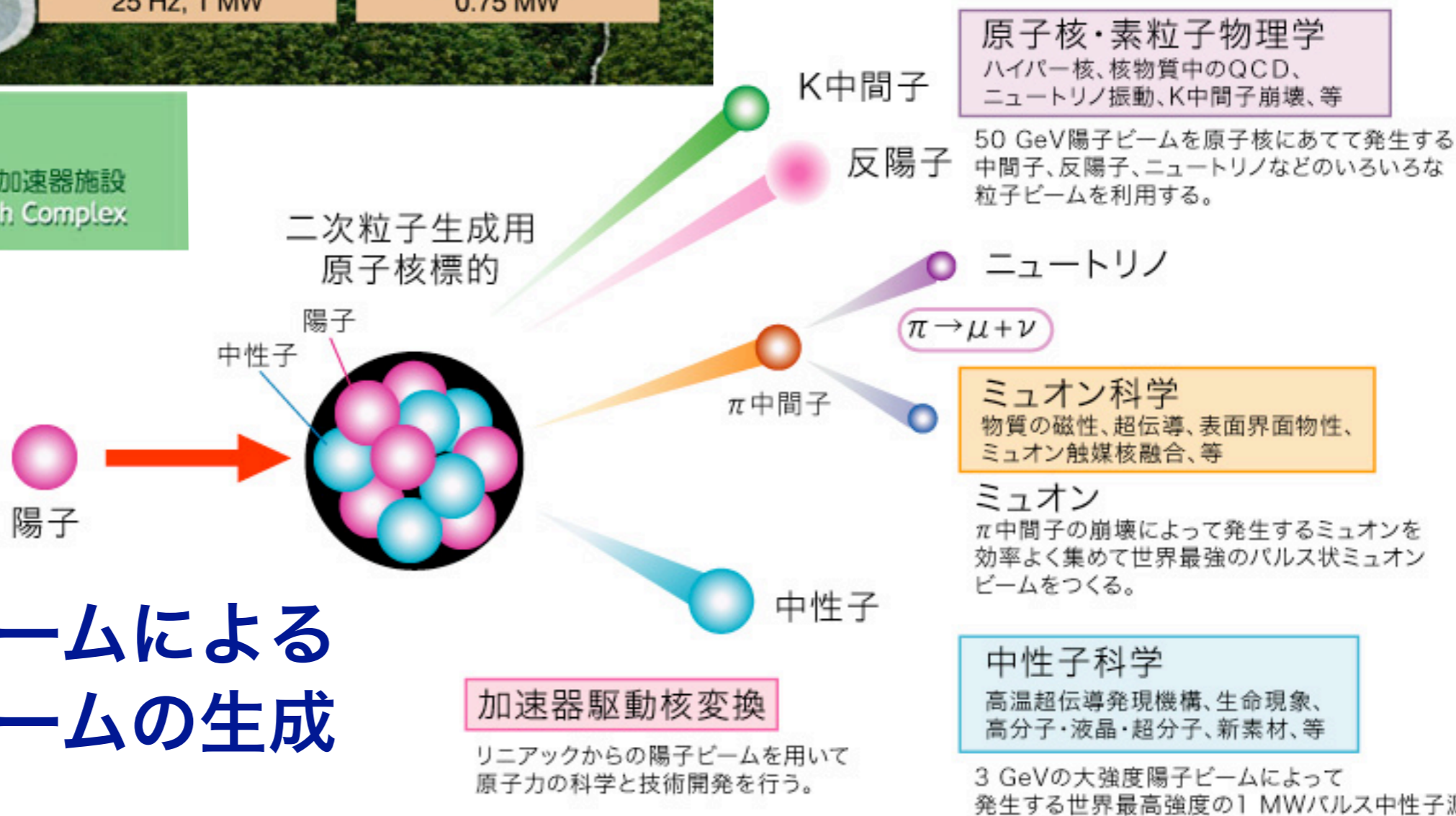
# 核変換処理は可能か

- **放射性物質の除染**とは、放射性物質を洗い流して移動させること。
- 放射性物質（核種）を減らすことは化学反応ではできないので、**物理学的半減期**を待たなくてはならない。
- **放射性核種を核変換**して非放射性核種に変えることは可能か。
  - 👉 多種多様な核種に対し、うまく非放射性核種に変えるように選択的に反応を起こさせるのは困難。
- 核燃料については、放射性核種を**群分離**し、**原子炉**や**加速器**で**中性子**や**陽子**などを照射して**核分裂**や**核破砕反応**を起こし、安定核種や短寿命核種に変えることを研究中（**分離変換技術**）。
- 環境中の放射性物質を原子炉や加速器施設に運んで**原子核反応**を起こさせるのはまず不可能。（原理的にもコスト的にも）
  - しかも、圧倒的多数の非放射性核種を**放射化**させてしまう。



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



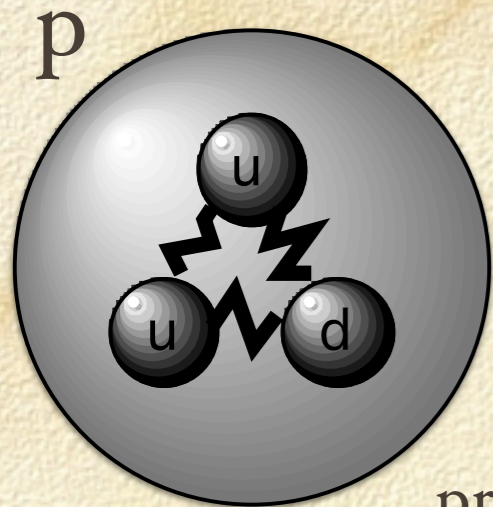
# 大強度陽子ビームによる 多様な粒子ビームの生成

# Hadron

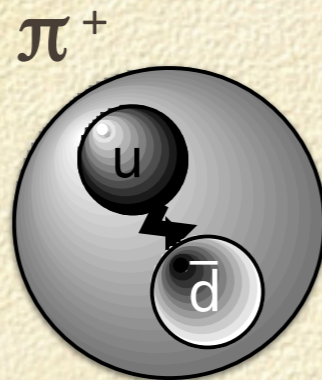
# Lepton

## Baryon

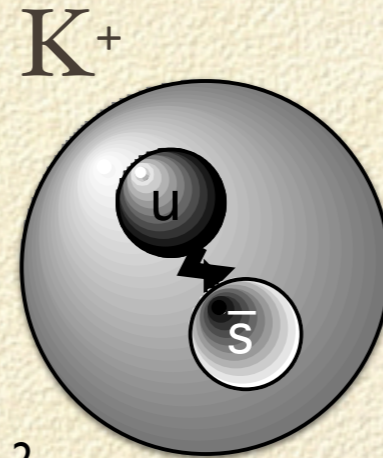
## Meson



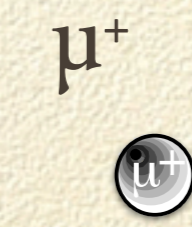
$n$   
陽子  
proton



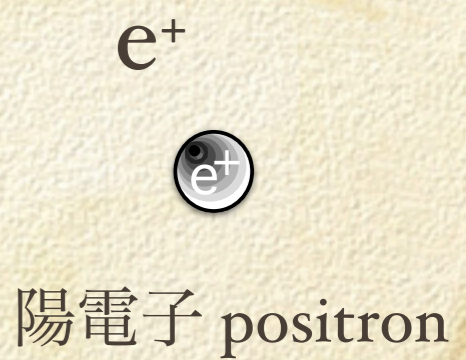
135  
MeV/c<sup>2</sup>  
パイ中間子  
pion



K 中間子  
kaon

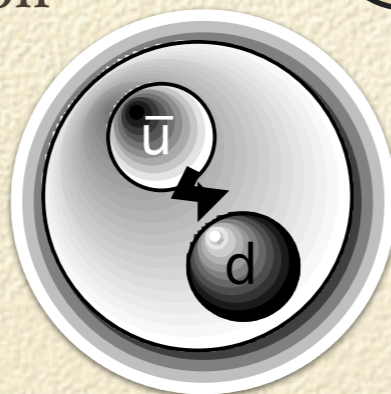


ミュー粒子  
muon

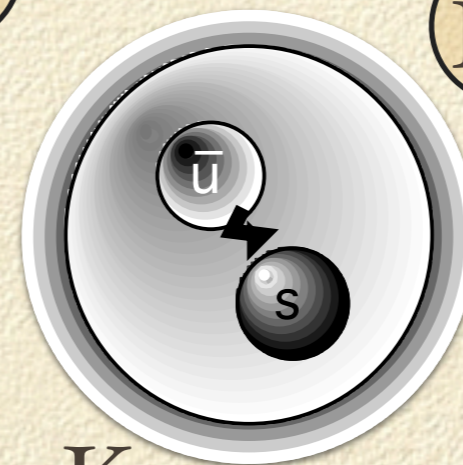


反陽子  
antiproton

$\bar{n}$   
940  
MeV/c<sup>2</sup>



140 MeV/c<sup>2</sup>  
 $\tau = 26$  ns



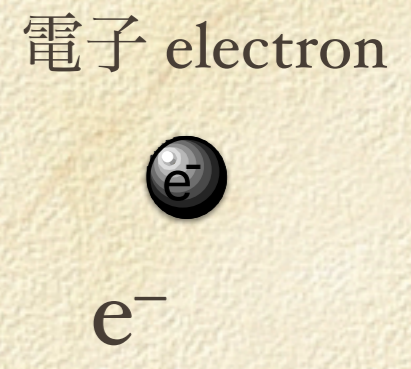
494 MeV/c<sup>2</sup>  
 $\tau = 12$  ns



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

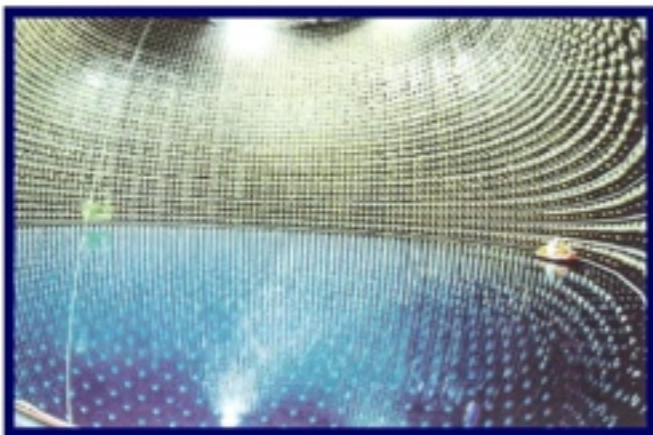


106 MeV/c<sup>2</sup>  
 $\tau = 2.2$  μs



511 keV/c<sup>2</sup>  
 $\tau = \infty$

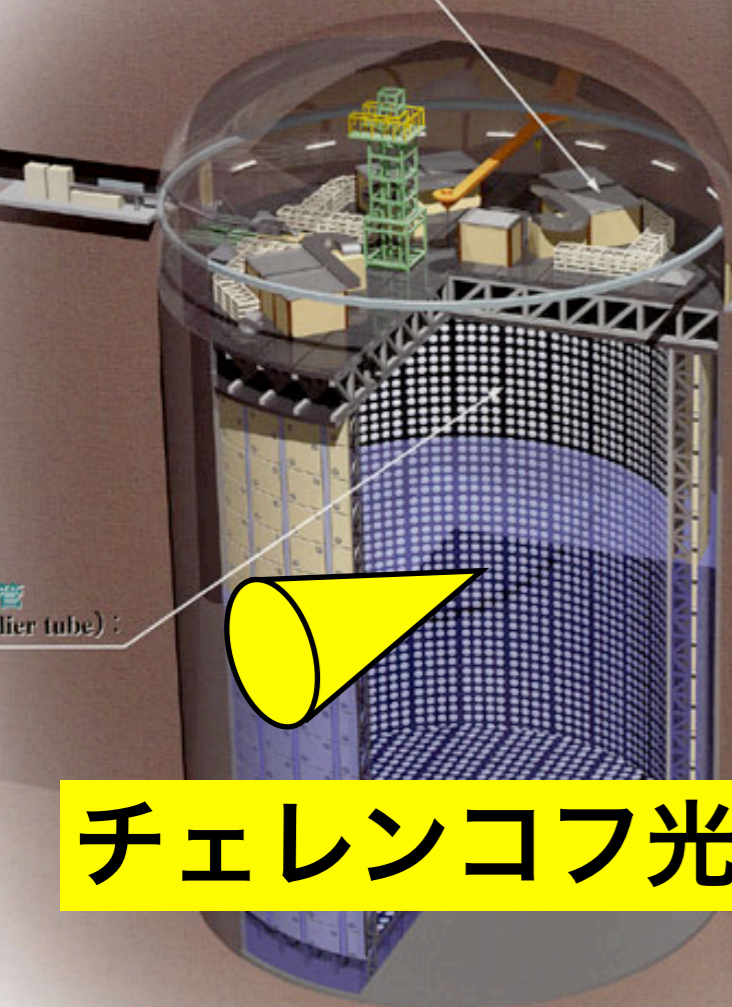
# Super-Kamiokande



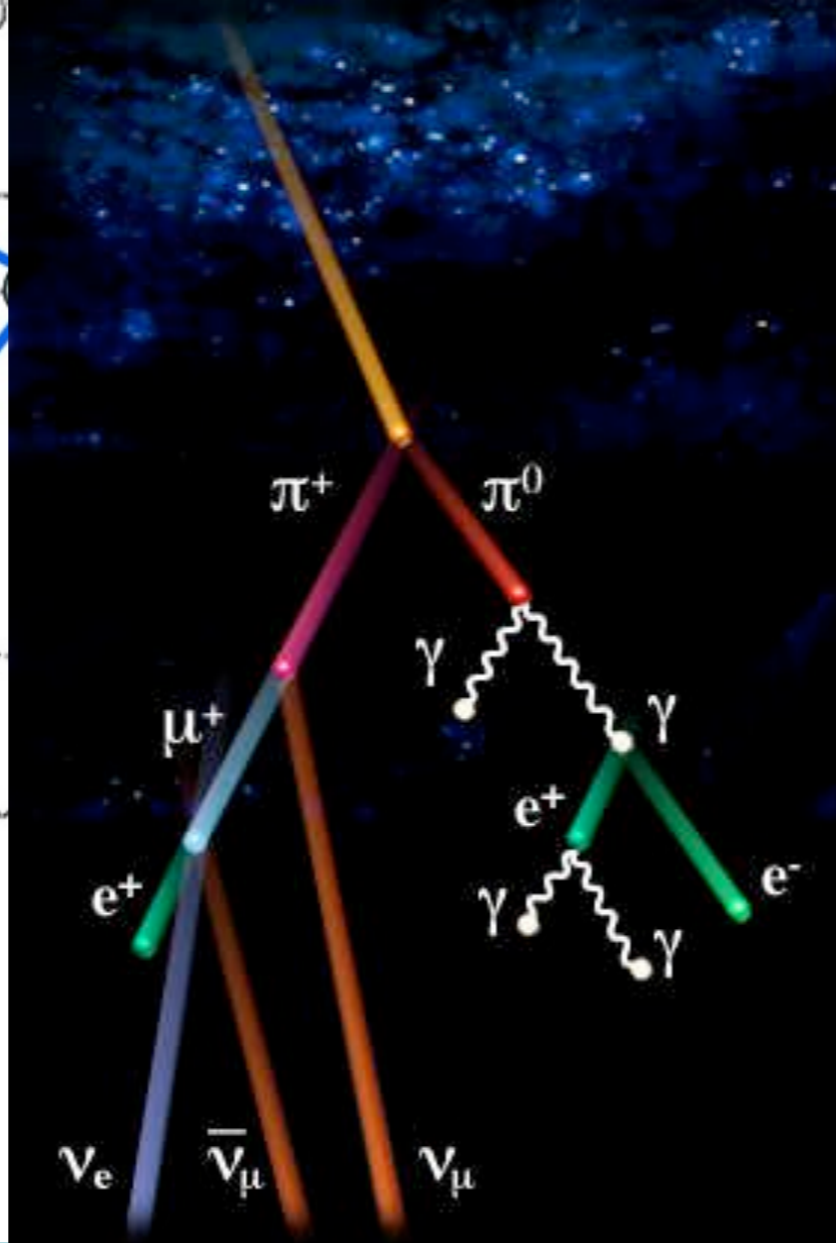
スーパー  
カミオカンデ



●エレクトロニクスハット  
(Electronics hut):



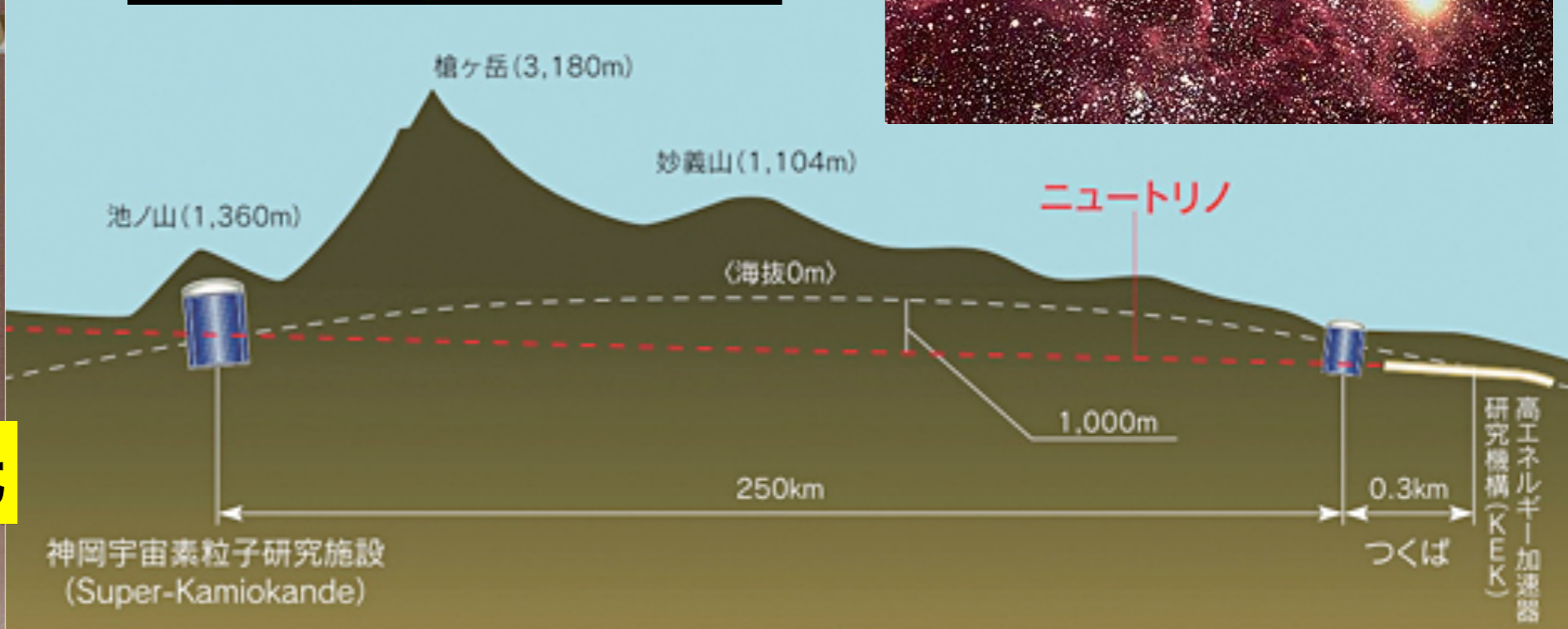
チェレンコフ光



# Neutrino beam



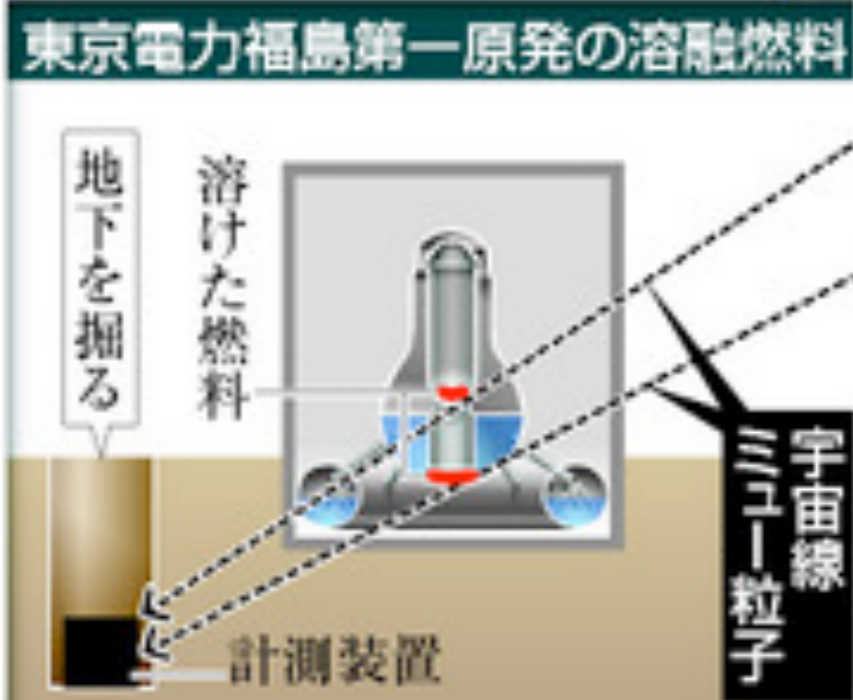
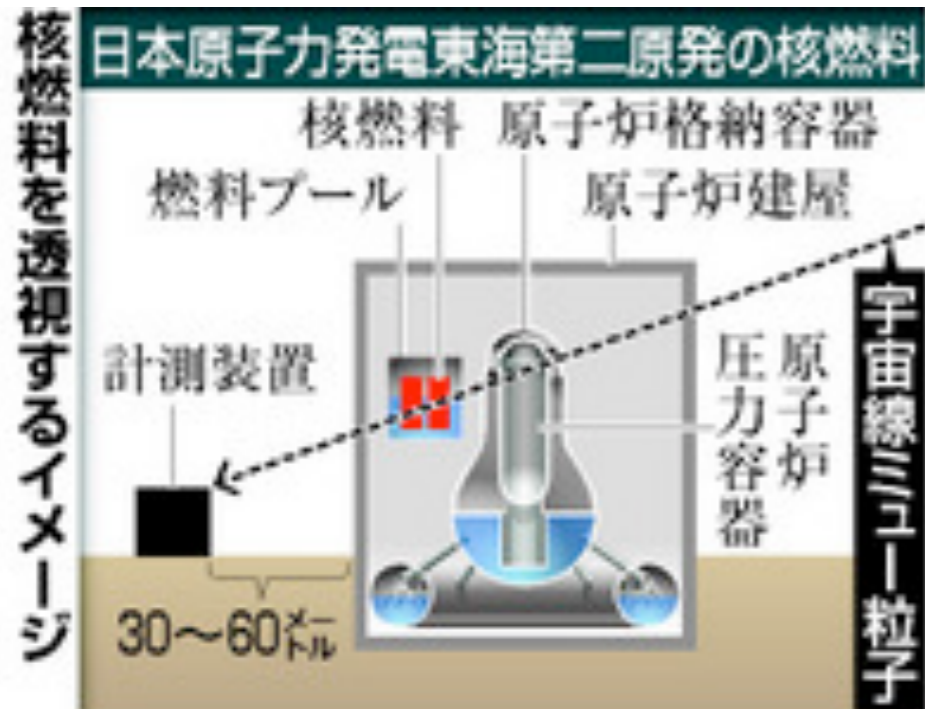
大強度陽子加速器  
ニュートリノビーム



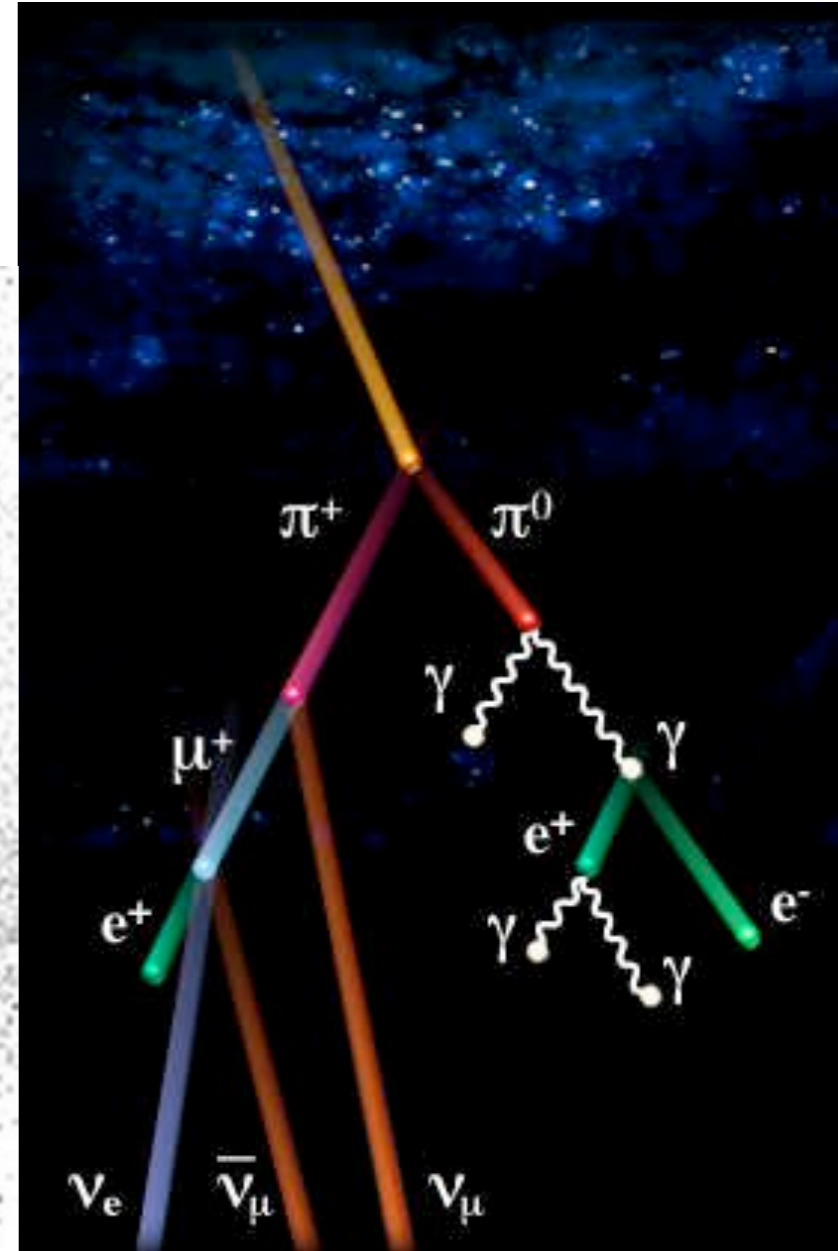
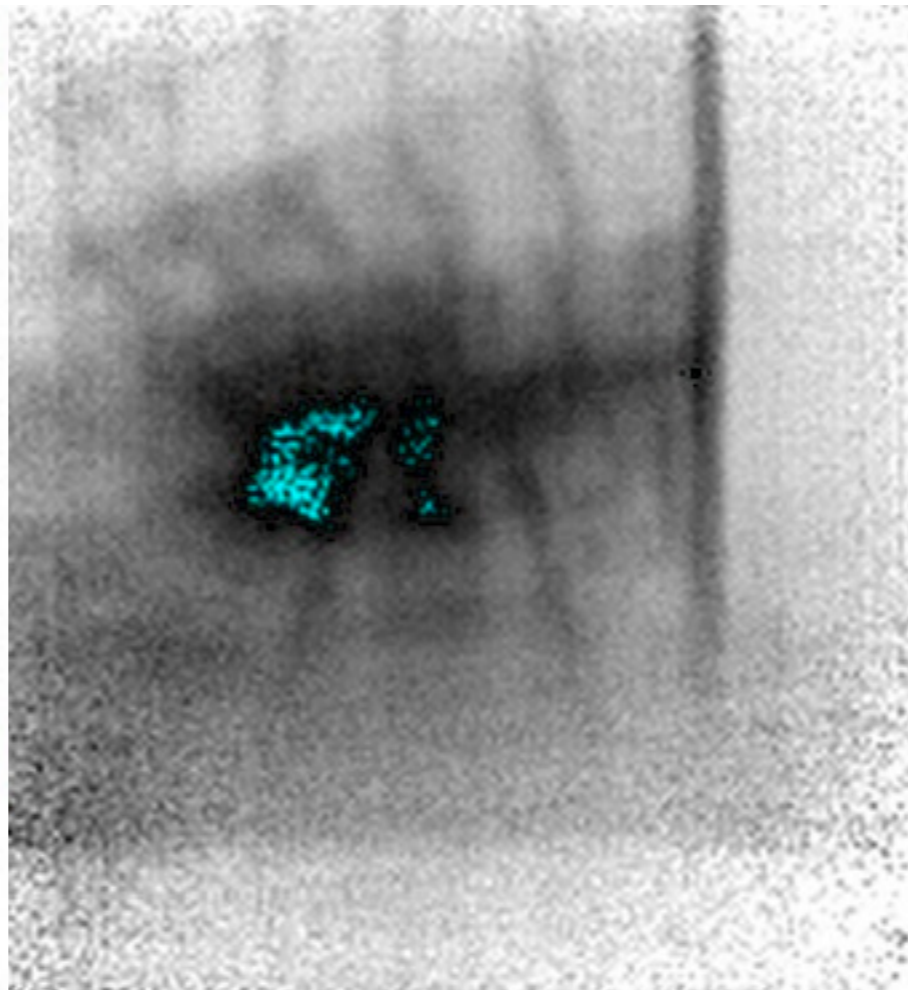
神岡宇宙素粒子研究施設  
(Super-Kamiokande)

高エネルギー加速器  
研究機構(KEK)

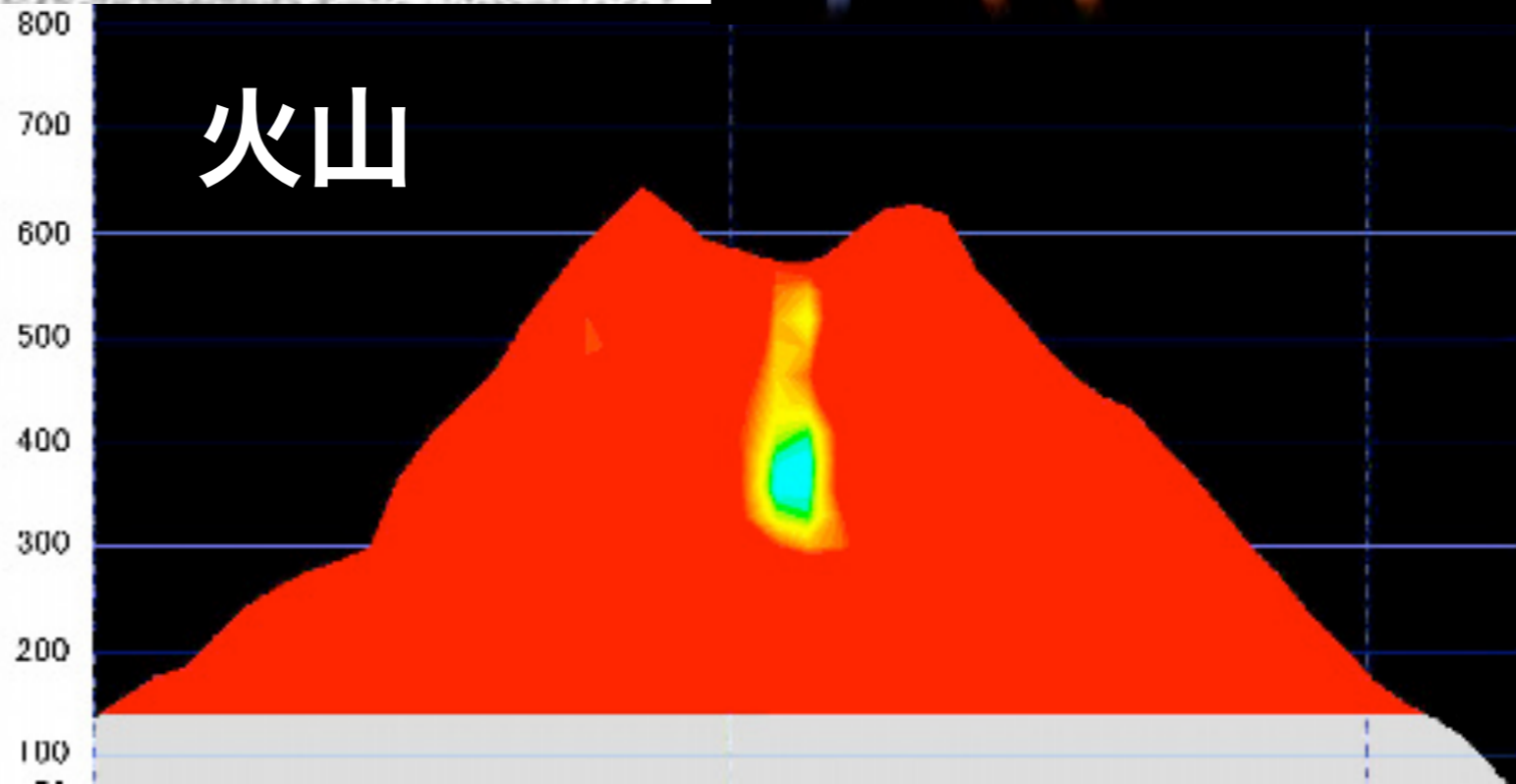
# 宇宙線（ミュオン）で内部を覗く



2014.1.23 朝日新聞デジタル



## 原発の核燃料

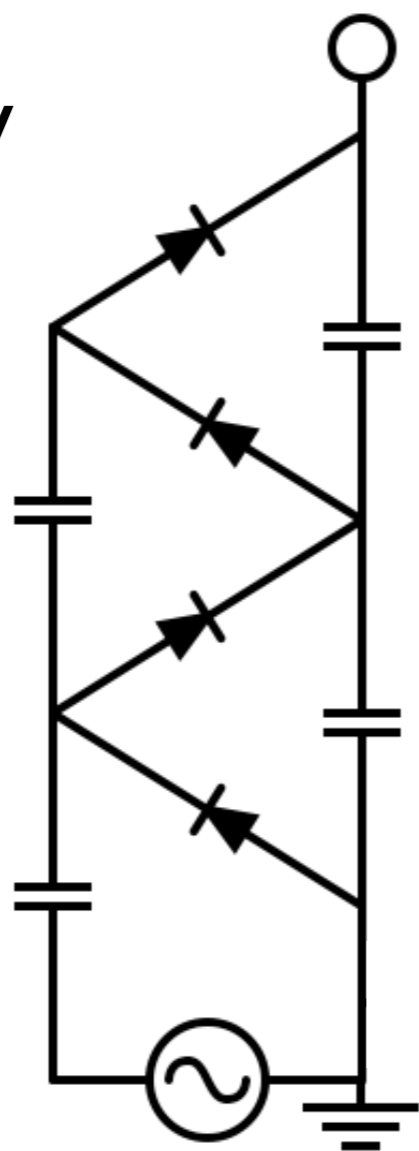


# 加速器科学

# 高電圧発生装置

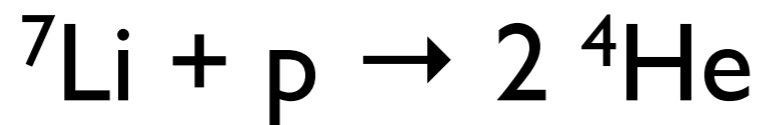
コッククロフト・ワルトン型  
Cockcroft-Walton

up to 4 MV



静電加速器

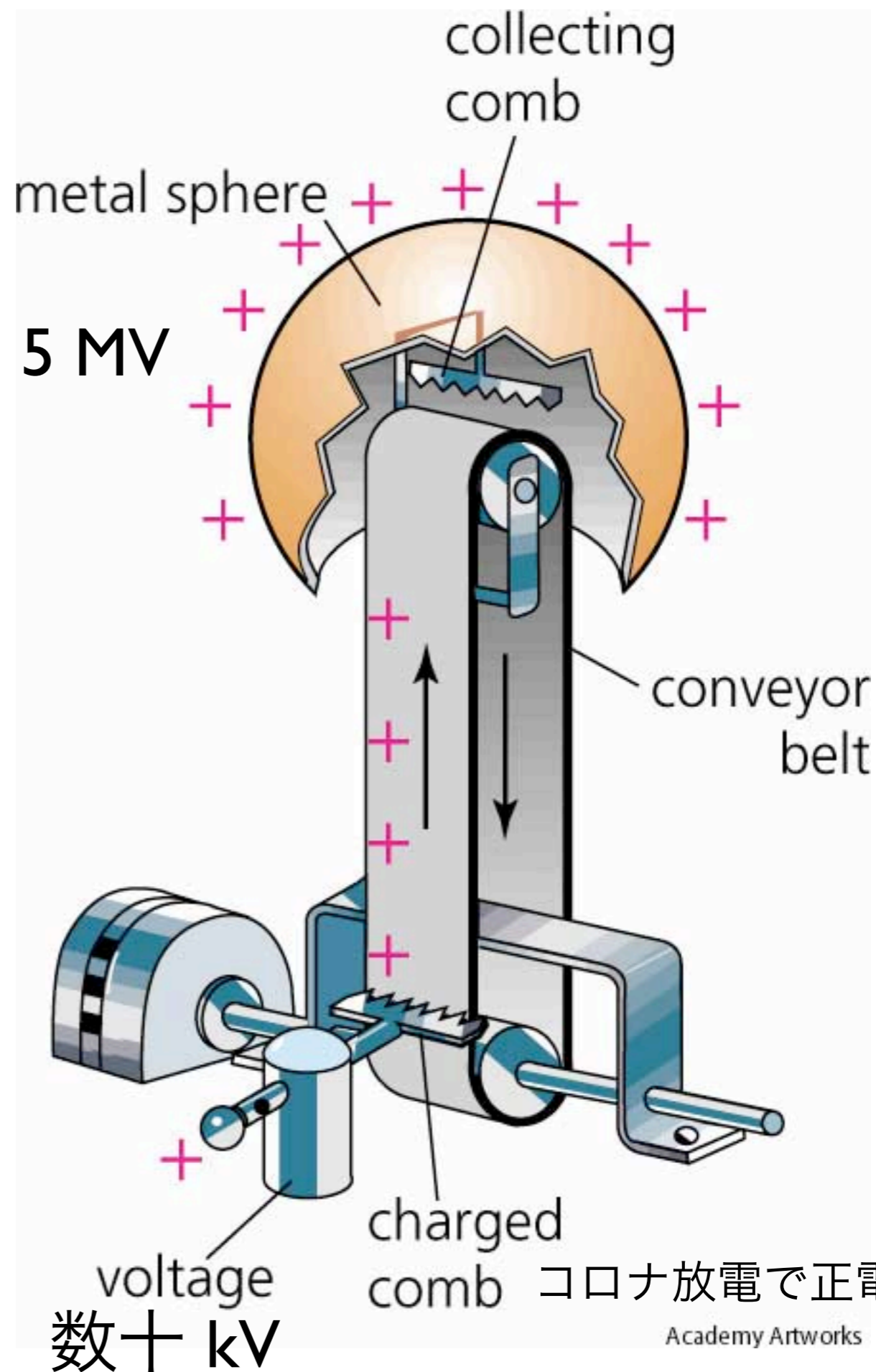
600 keV p



# 高電圧発生装置

ヴァンデグラフ型  
Van de Graaf

up to 5 MV



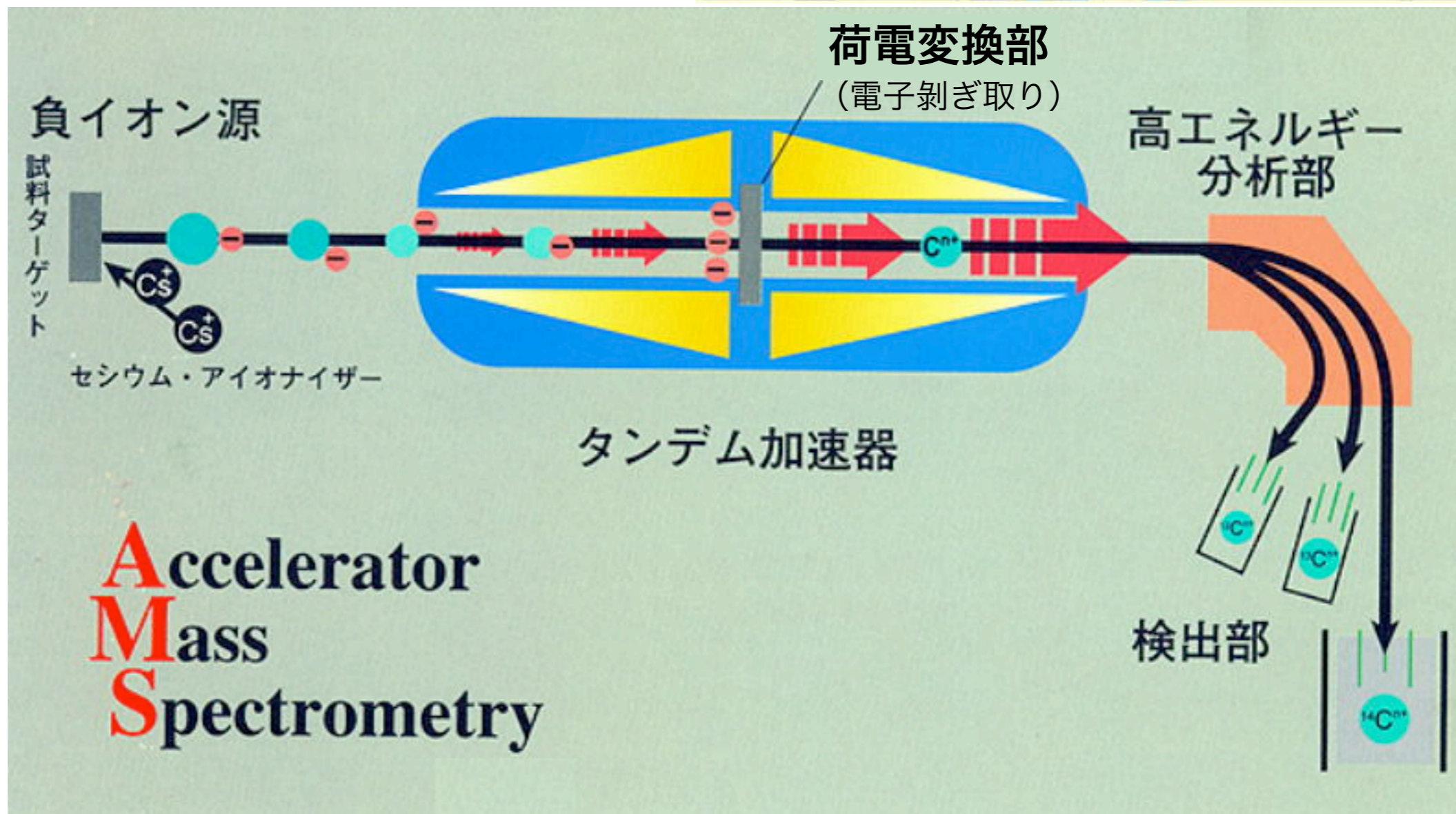
静電加速器  $F = qE$

⇒ タンデム加速器  
Tandem accelerator



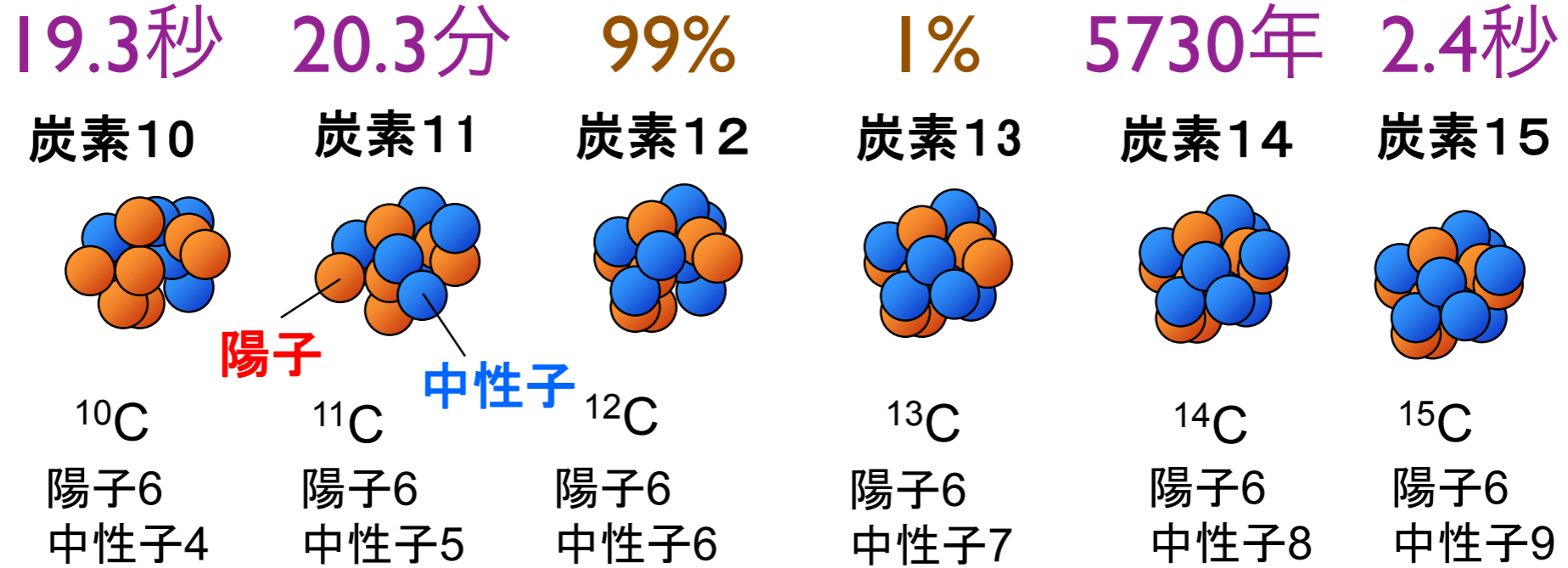
# 加速器質量分析

## AMS (Accelerator Mass Spectrometry)



# 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



陽子過剰になると？

(寿命がある： $\beta^+$ 壊変、電子捕獲(EC))

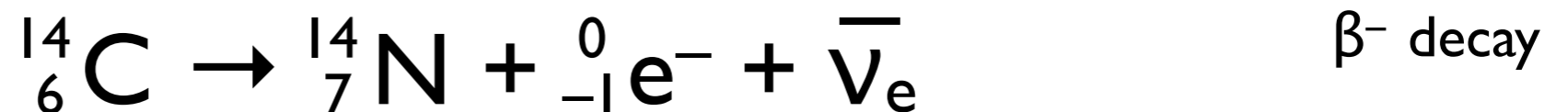
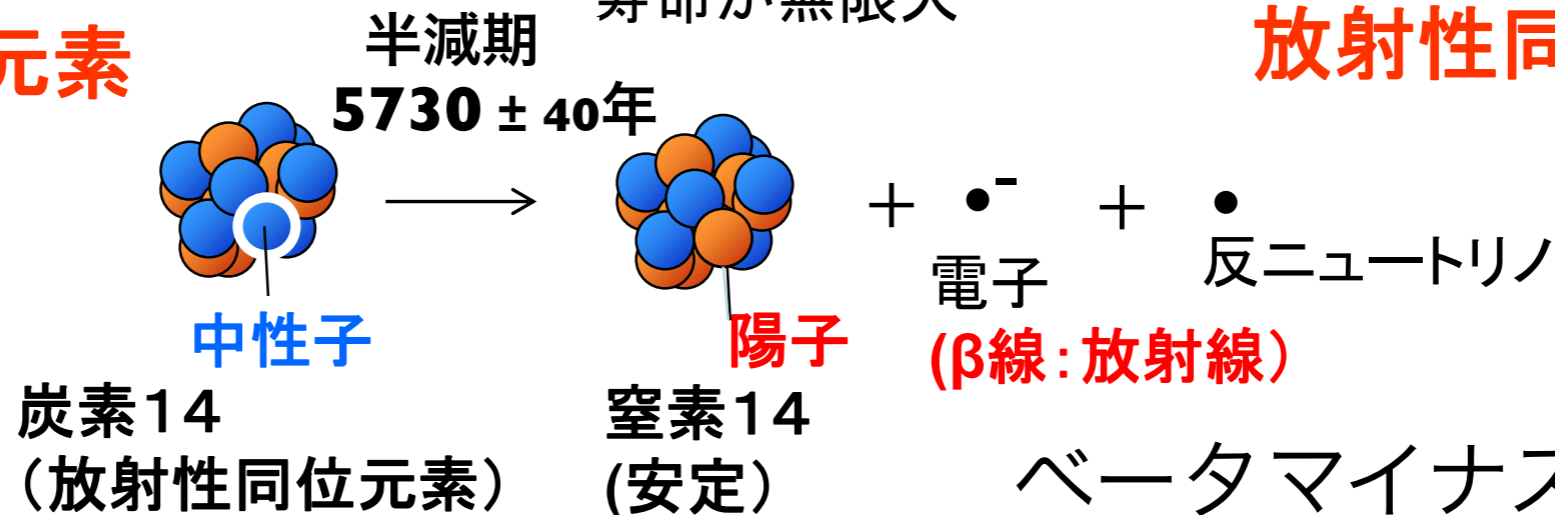
天然に存在=**安定同位体**  
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある： $\beta^-$ 壊変)

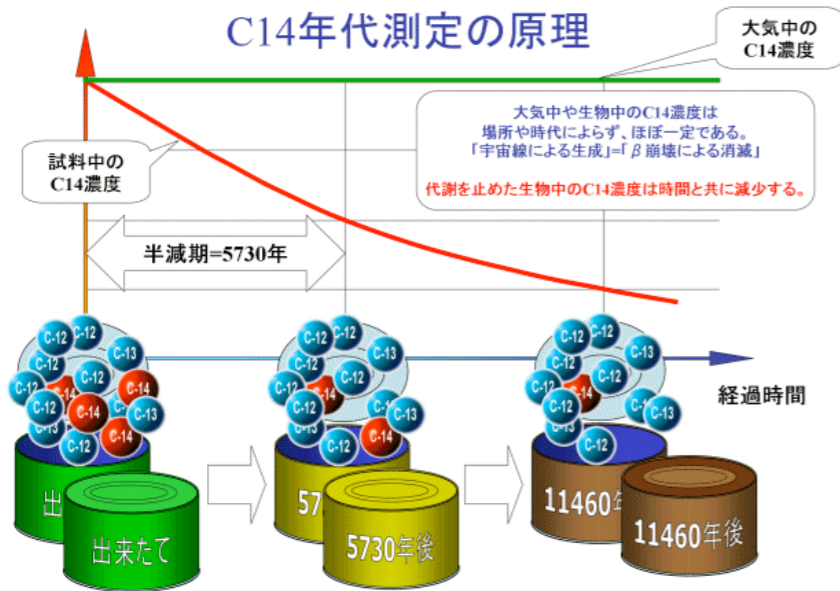
## 放射性同位元素

## 放射性同位元素



# 放射線年代測定

100年 1000年 1万年 10万年 100万年 1000万年 1億年 10億年



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		主要対象
放射性同位元素を使う方法	炭素14年代測定法	動植物・貝殻・水など
	カリウム・アルゴン法	鉱物
	ウラン・鉛法	鉱物
	ルビウム・ストロンチウム法	鉱物
	フィッション・トラック法	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	鉱物・天然ガラス
	光ルミネッセンス法	鉱物
	電子スピン共鳴法	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	貝殻・甲羅・重炭酸塩
	黒曜石水和層法	天然ガラス
	考古(古)地磁気法	岩石・磁性鉱物
	火山灰層序法	火山灰
	年輪年代法	樹木
	氷縞粘土法	湖底堆積物(粘土)

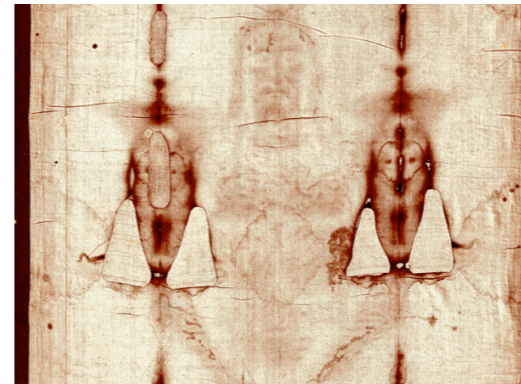
<<図 2-1>> 主な年代測定法による測定可能な年代の範囲

出典:ATOMICA他より作成

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

- 弥生時代

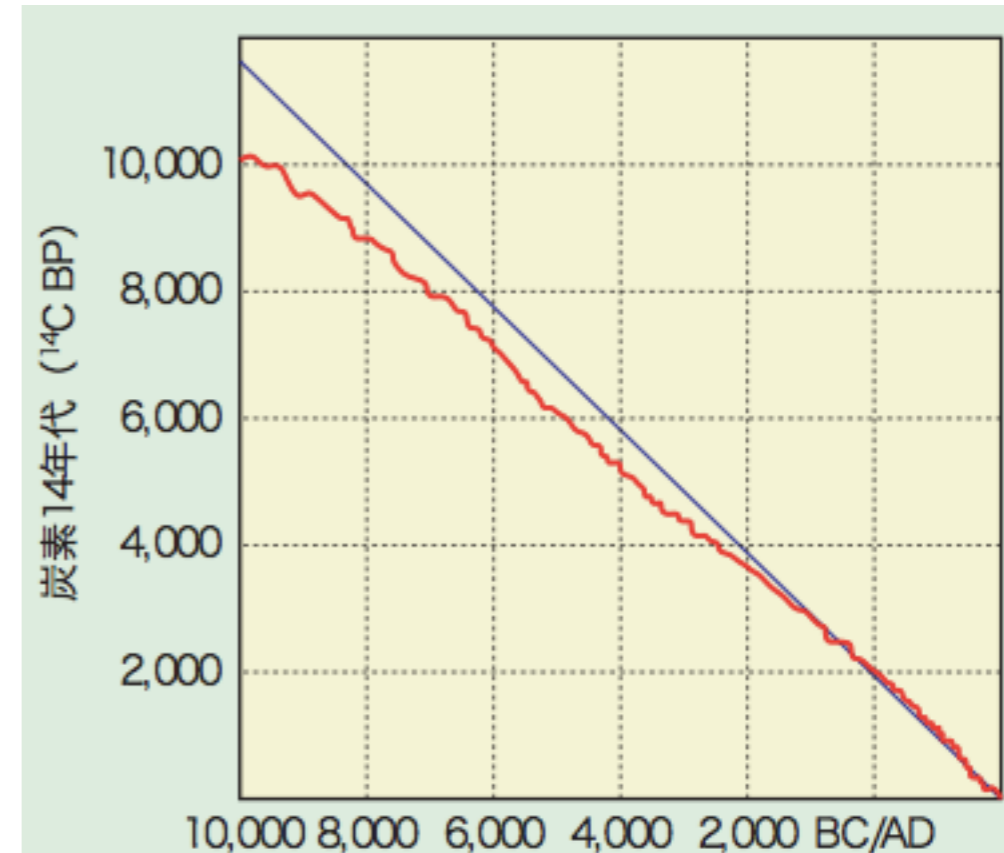
- 聖骸布 (Torino の聖骸布 (1260-1390 A.D., 95% CL))



- 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校正

- 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校正曲線(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

# リニアック (線形加速器)

# Linac (Linear accelerator)

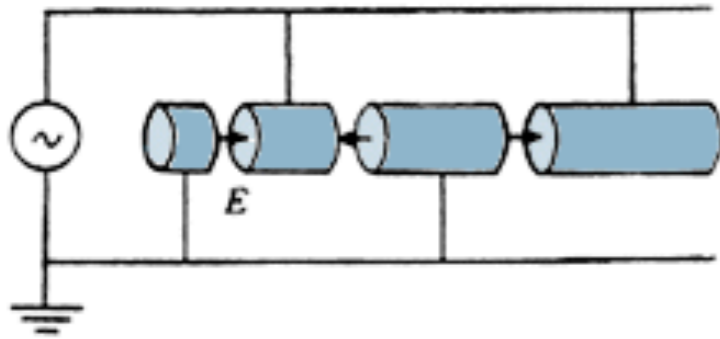


図1 ヴィデレー型リニアック

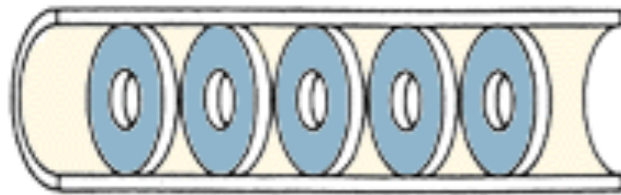


図2 円盤装荷導波管

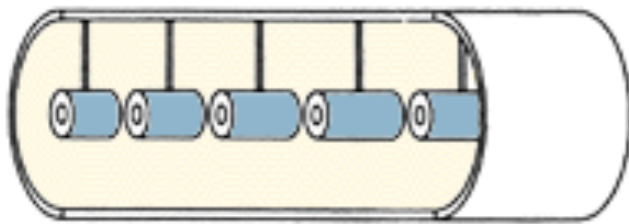
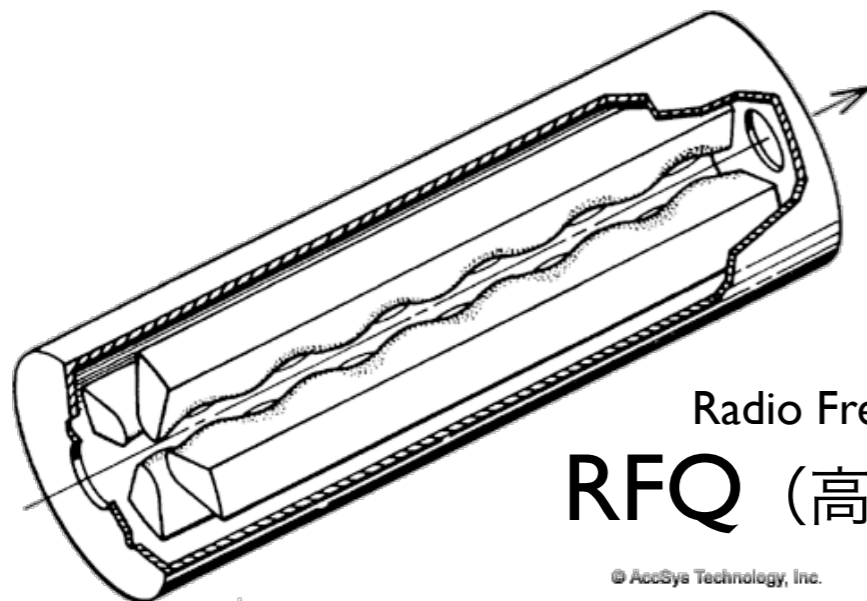
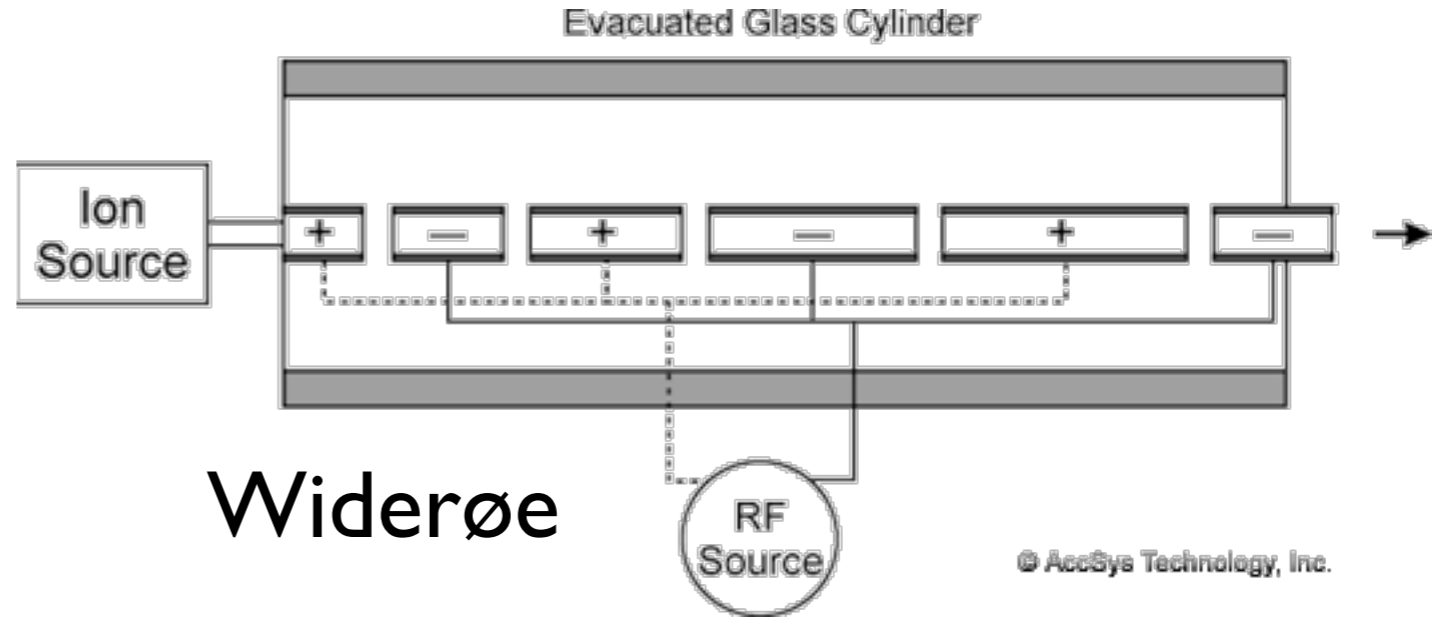


図3 アルバレ型リニアック



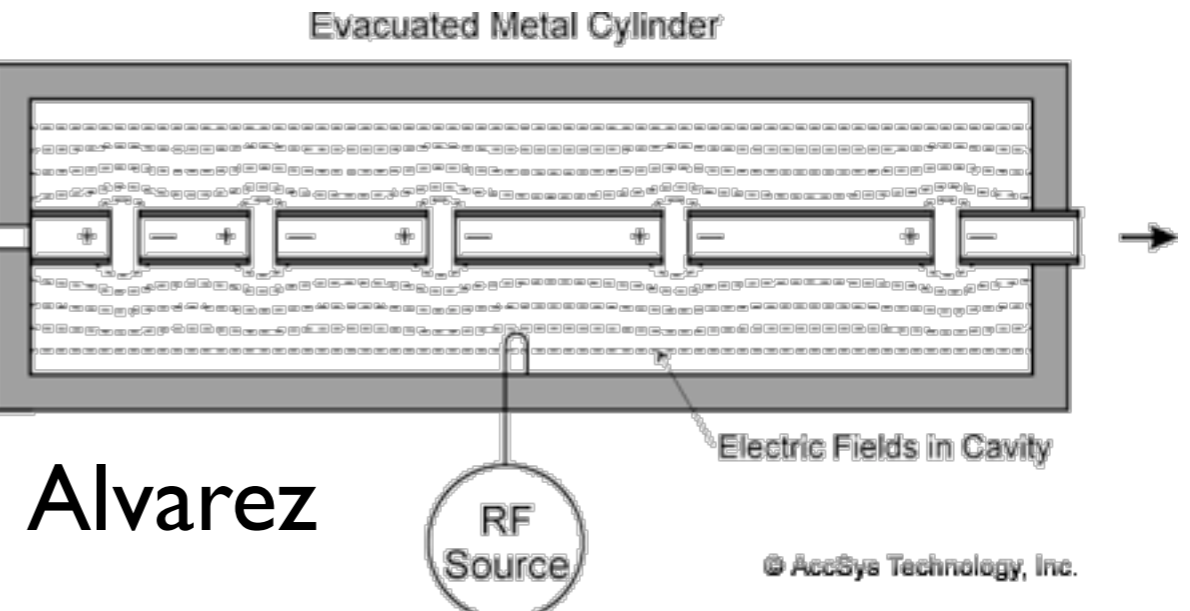
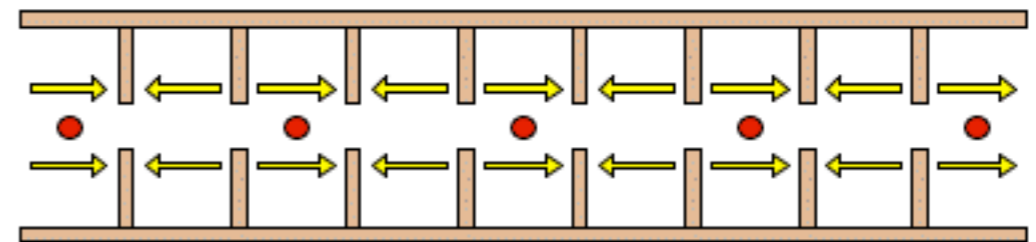
Radio Frequency Quadrupole  
**RFQ** (高周波四重極型)

© AccSys Technology, Inc.



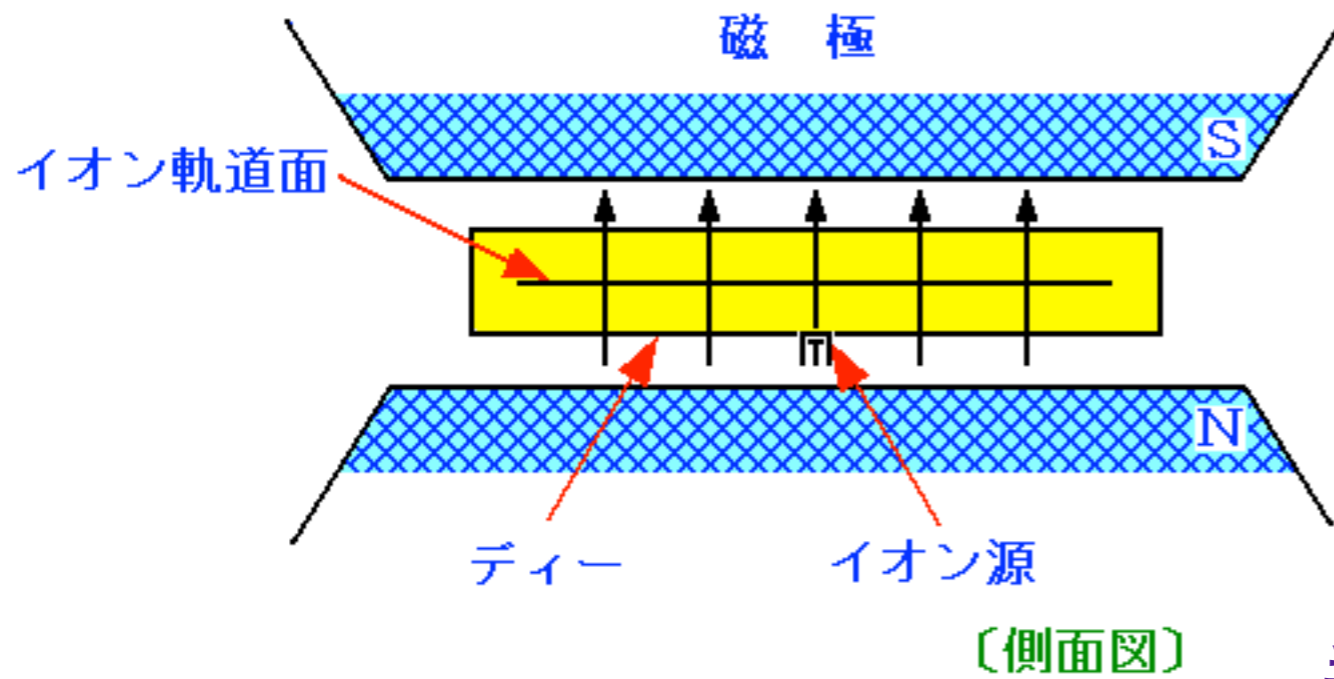
**Widerøe**

© AccSys Technology, Inc.



**Alvarez**

© AccSys Technology, Inc.



# サイクロトロン

Cyclotron

Lawrence (1929)



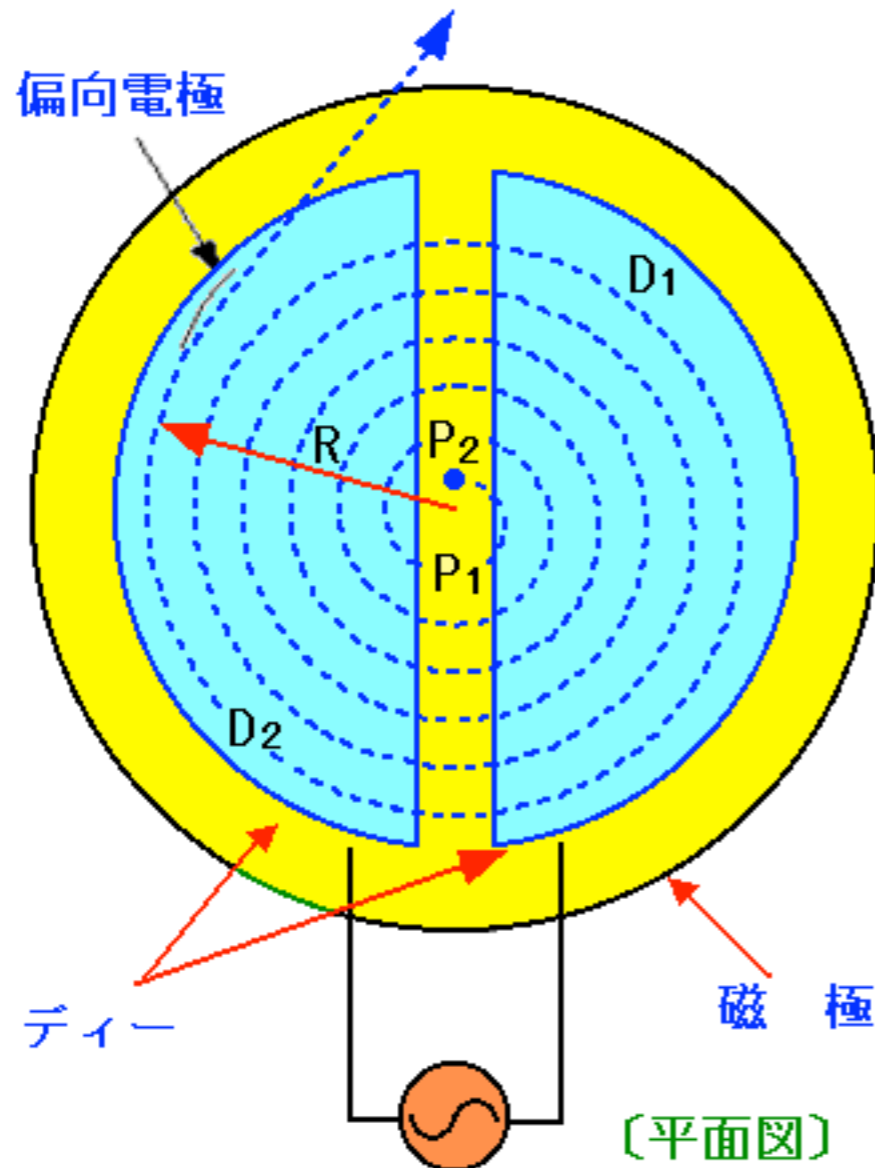
垂直磁場

$$t = \pi m / B q$$

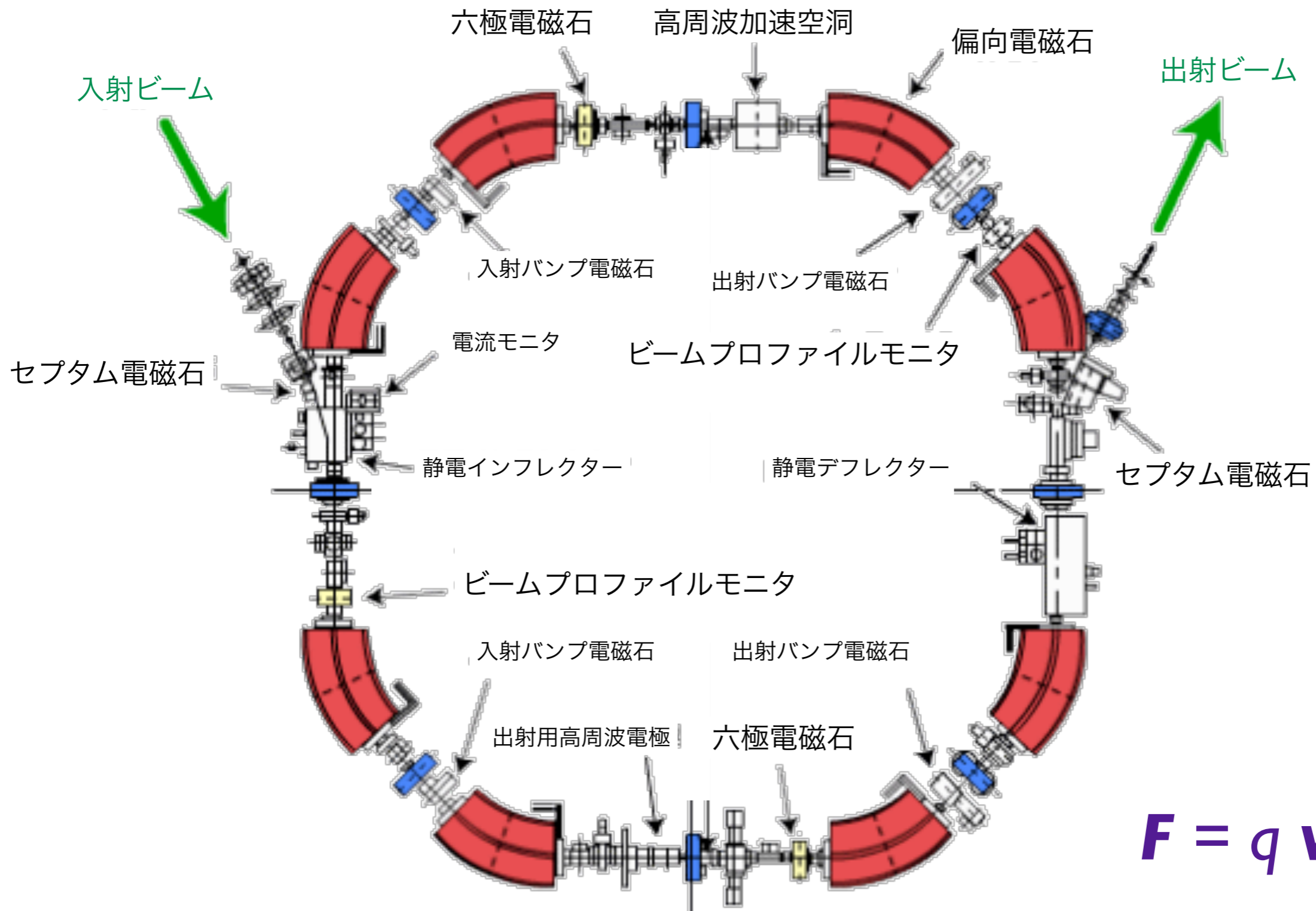
相対論的領域では周期が遅れる

シンクロサイクロトロン  
Synchrocyclotron

AVF サイクロトロン  
Azimuthally-varying-field  
Cyclotron



# シンクロトロン Synchrotron

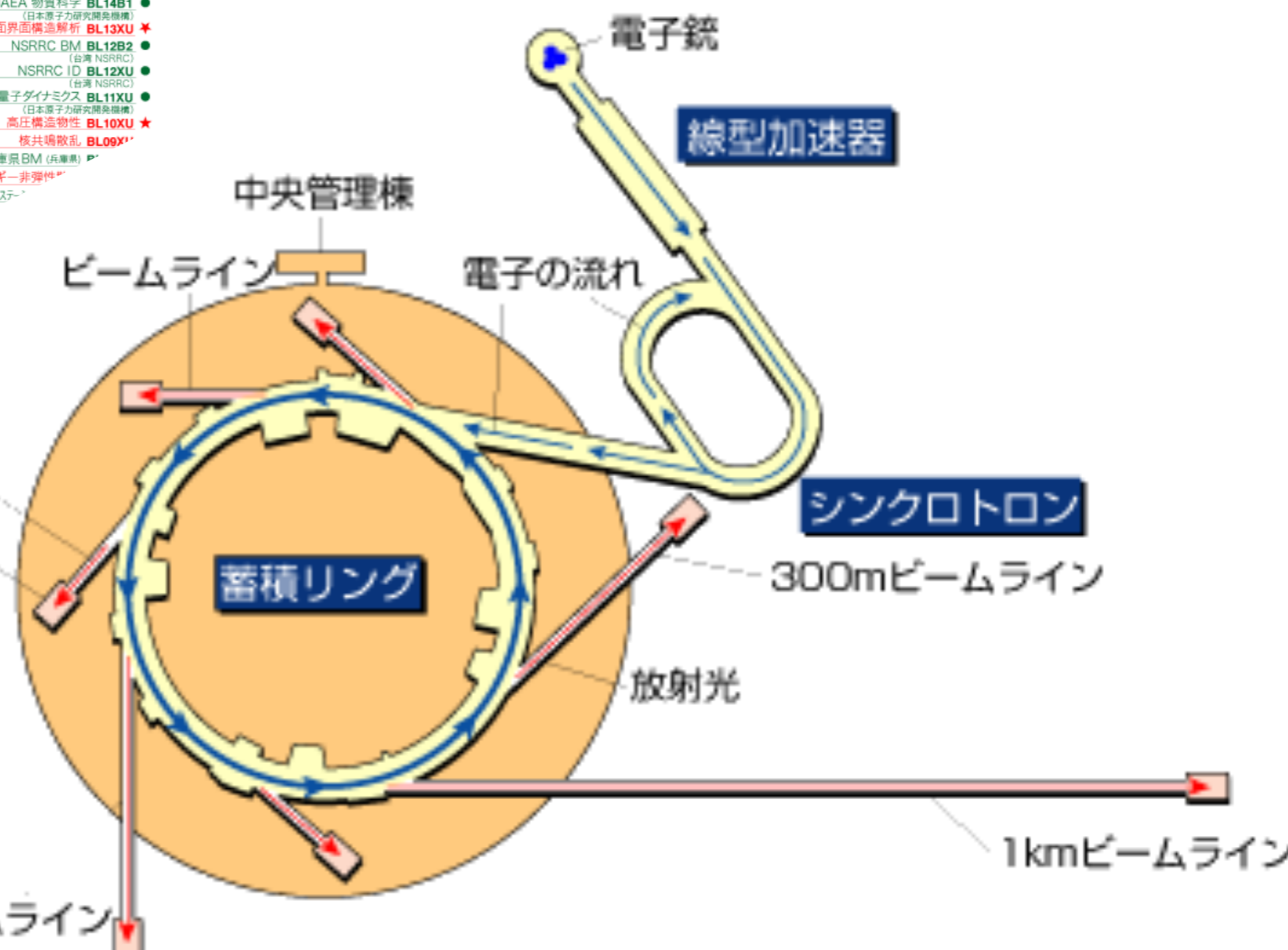
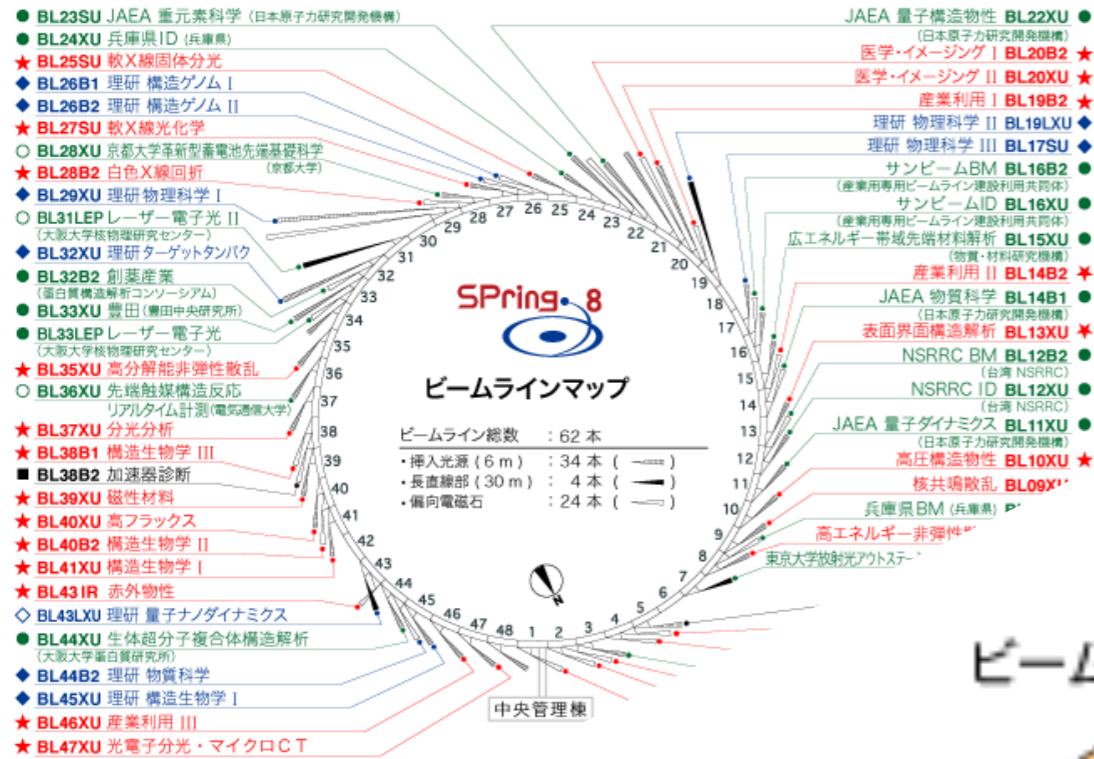


$$F = q v \times B$$

磁場による偏向・収束 (高エネルギー)

# SPring-8 (大型放射光施設: 播磨)

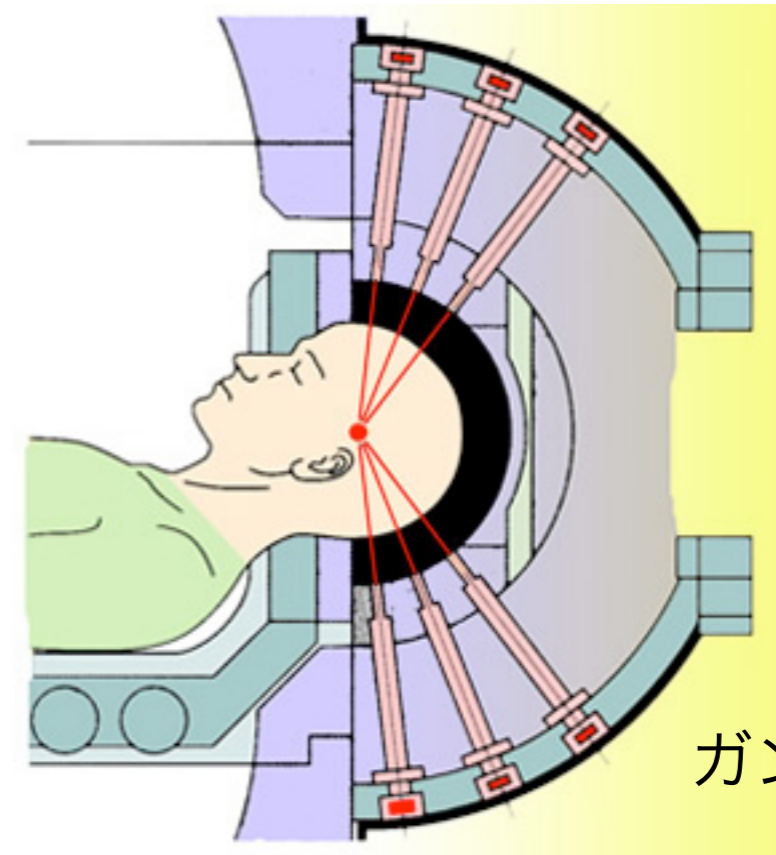
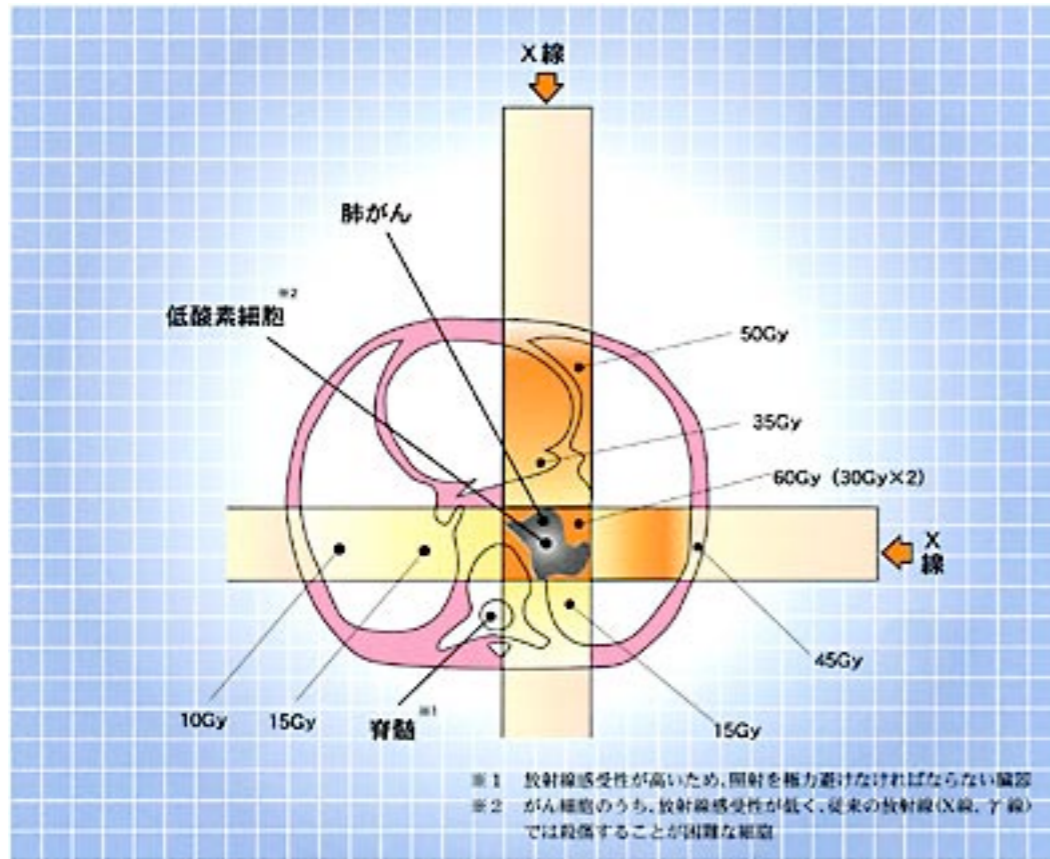
8 GeV 電子ビーム ⇒ 放射光 (X線, γ線)



# 医療に使われる線形加速器

数 Gy を数十回

## X線



$^{60}\text{Co}$

ガンマナイフ

電子線を加速してぶつけ、  
制動X線および特性X線を  
発生させる。

サイバーナイフ

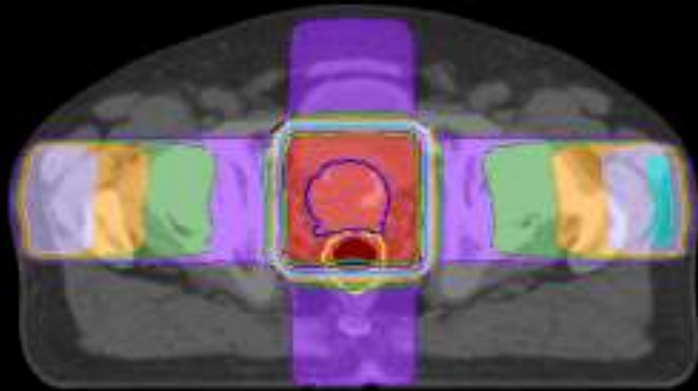


写真提供: (独)放射線医学総合研究所



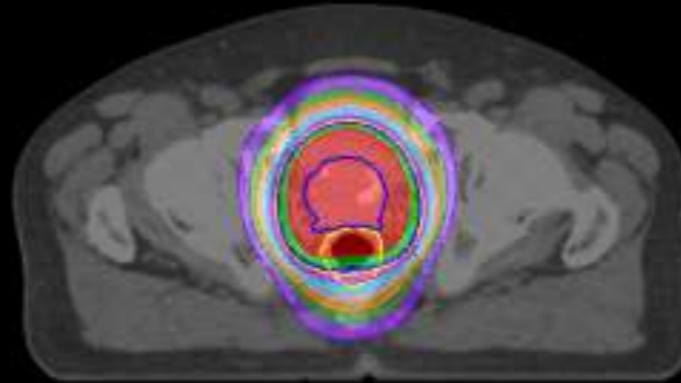
# 前立腺がんの例

前後左右4門照射



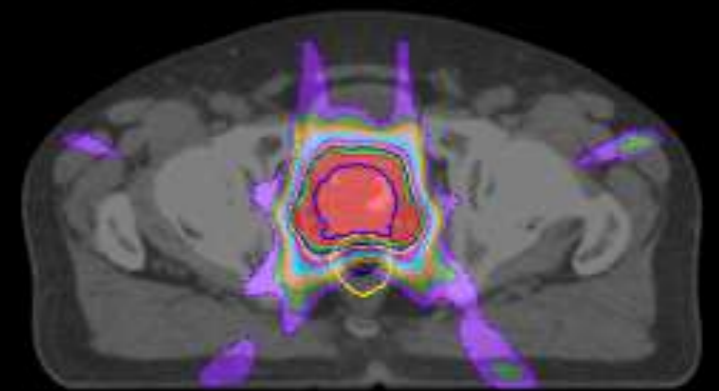
- 前立腺の他に、膀胱や直腸が高線量域に含まれる
- 70Gyが限界（難治性の晩期粘膜障害の発現を許容範囲に抑えるためには、実際には60～66Gy程度が限界となる）

3次元原体照射



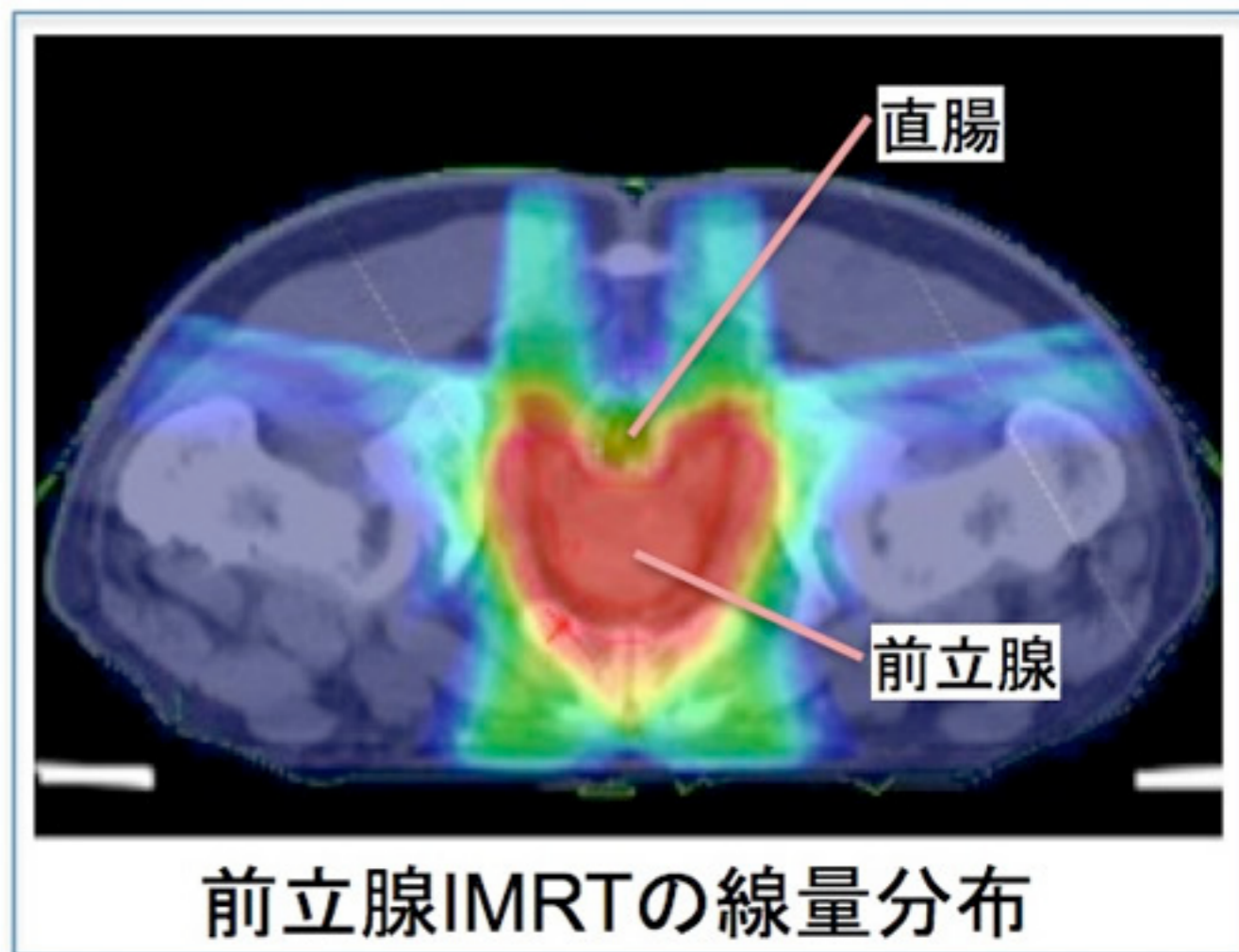
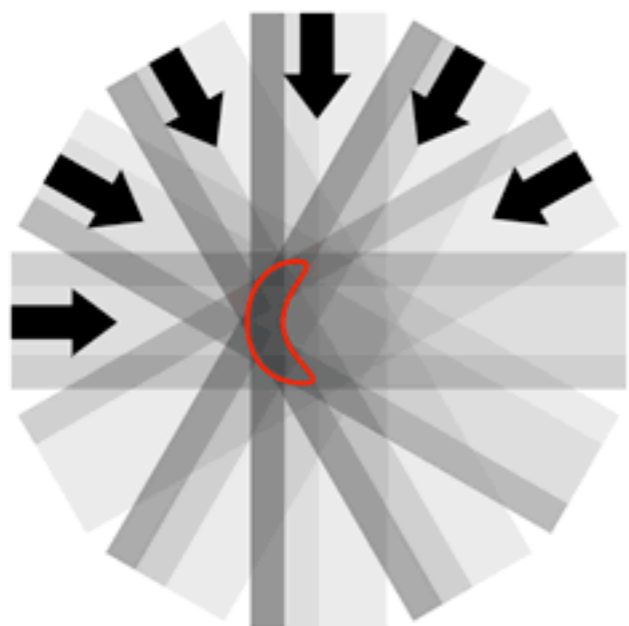
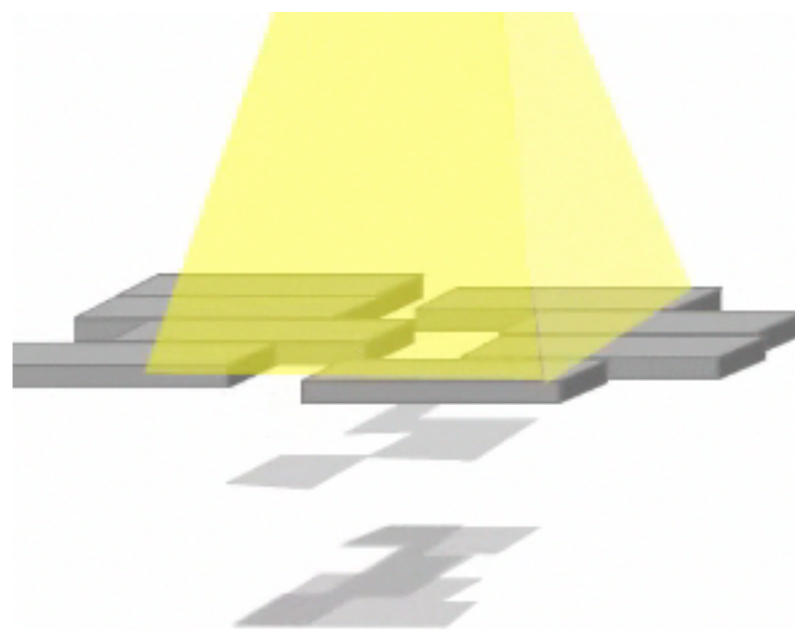
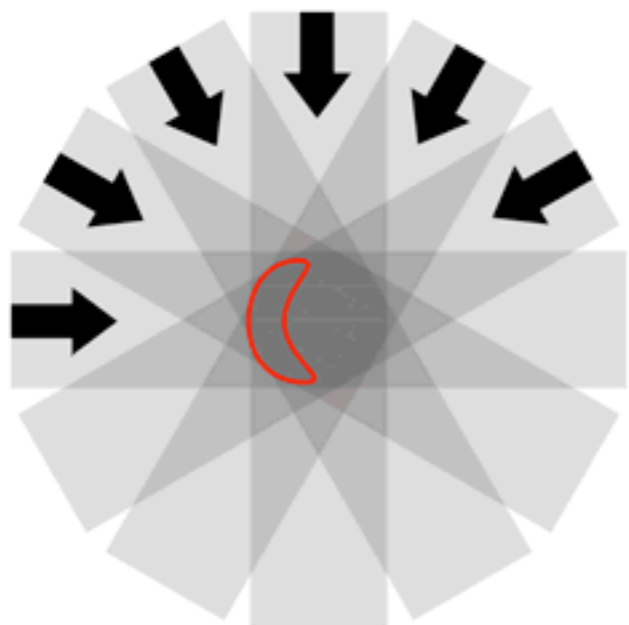
- 前立腺に線量が集中し、膀胱や直腸への線量が低く抑えられる
- 70Gy以上の投与が可能であるが、線量の集中に限界があり、線量増加に伴う副作用の増加が懸念される

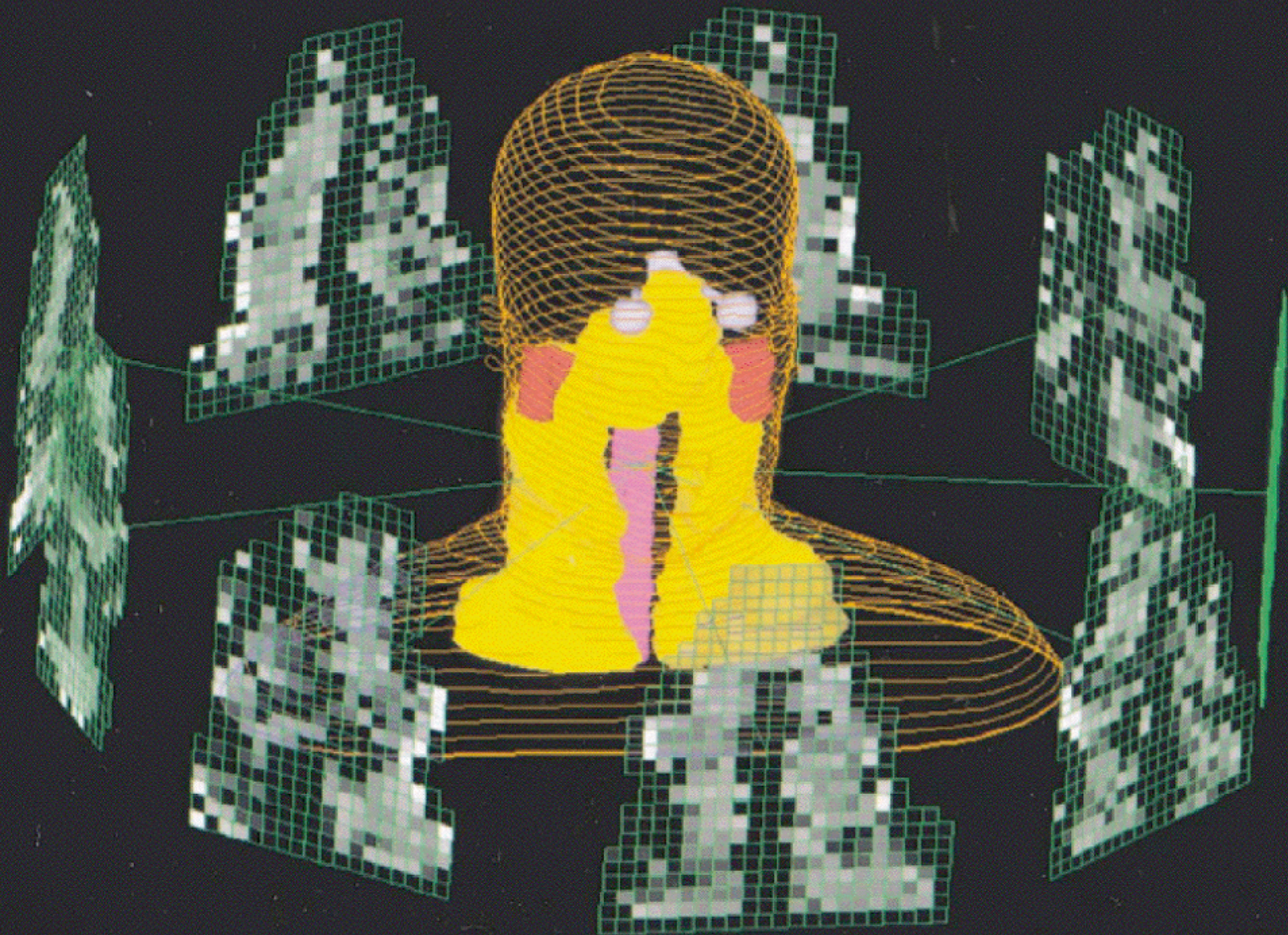
強度変調放射線治療



- 前立腺への集中性がさらに強化
- IGRTを併用することで、3次元原体照射を超える高線量を安全に投与することが可能

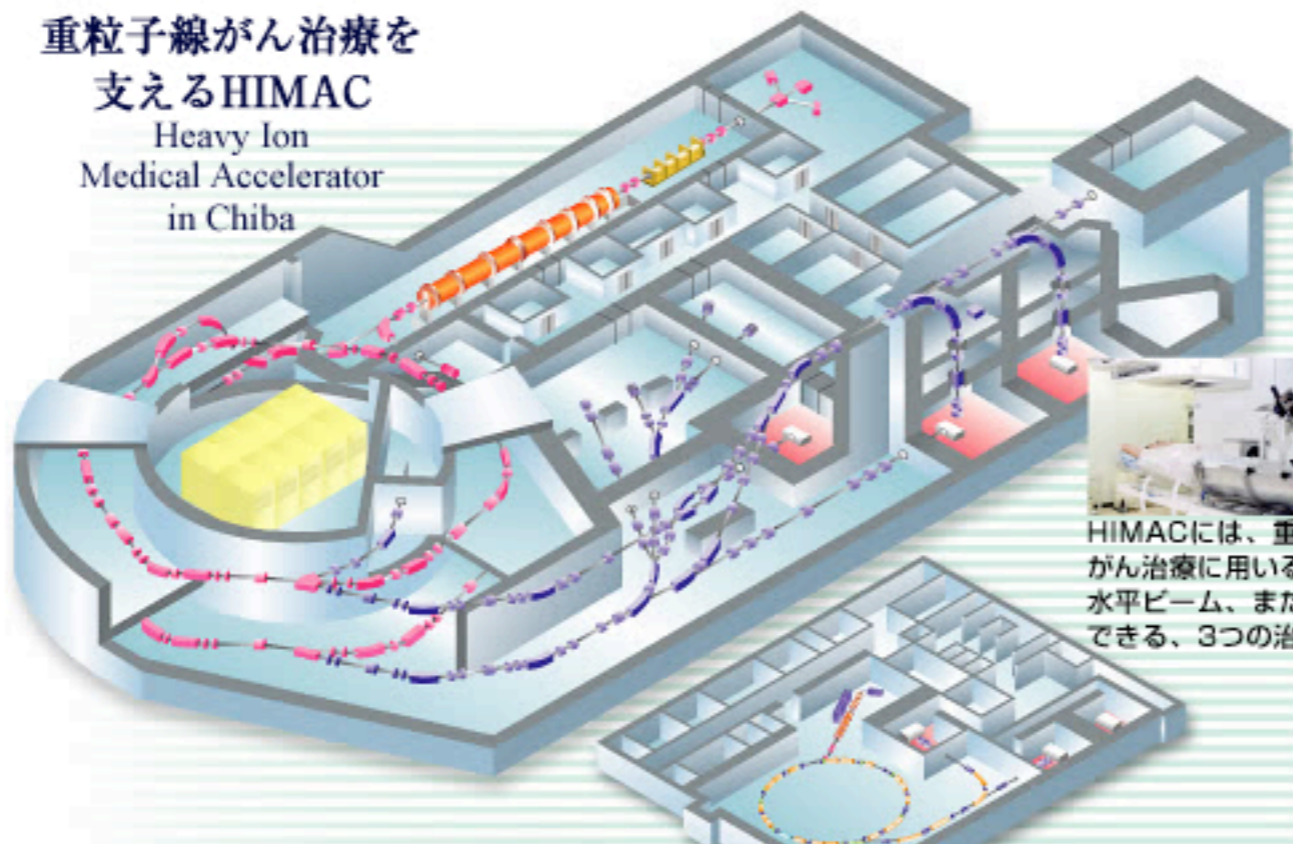
外照射法の進歩を背景に、前立腺癌に対する線量増加効果が積極的に検討されている。





# 医療用の重イオン加速器（シンクロトロン）

重粒子線がん治療を  
支えるHIMAC  
Heavy Ion  
Medical Accelerator  
in Chiba



HIMACには、重粒子線を効率的にがん治療に用いるため垂直ビーム、水平ビーム、またはその両方を照射できる、3つの治療照射室があります。

## ■小型重粒子線がん治療装置

放医研における装置小型化開発研究の成果は、2006(平成18)年度から建設が開始される群馬大学の重粒子線がん治療装置に採用されています。放医研は群馬大学に装置を建設するための技術的な支援を行っています。

# 放射線医学総合研究所（千葉）

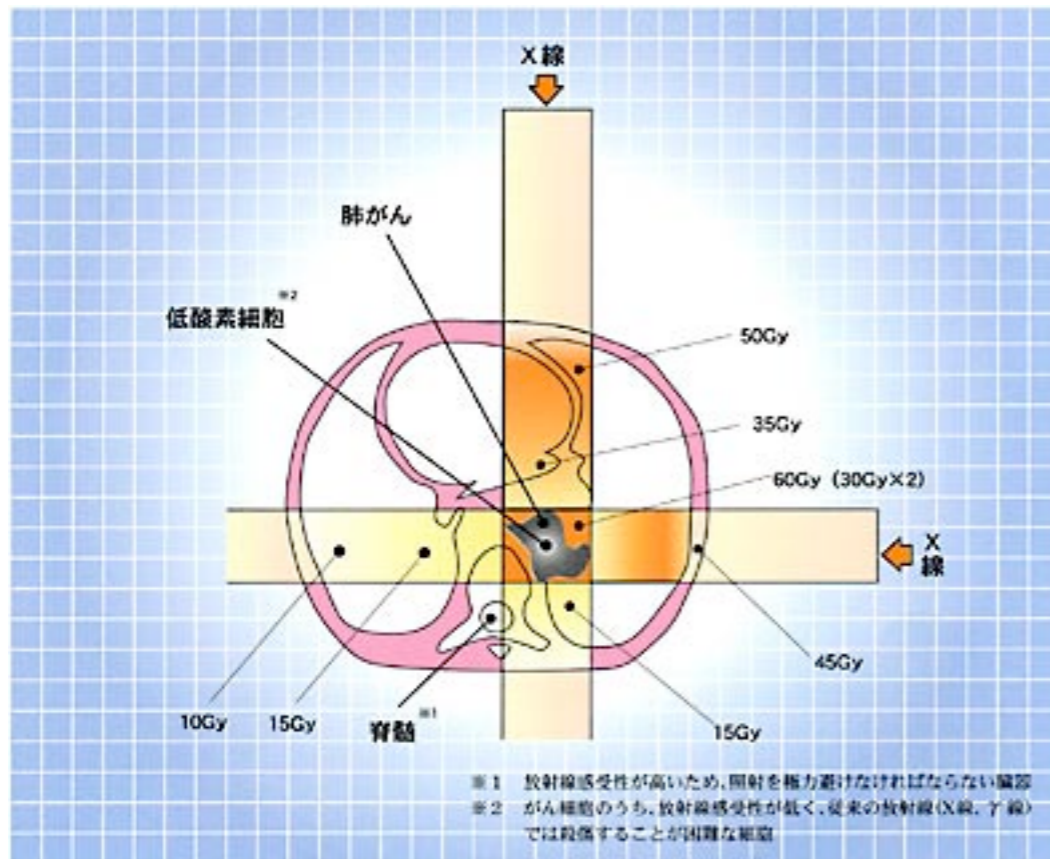


写真提供：(独)放射線医学総合研究所

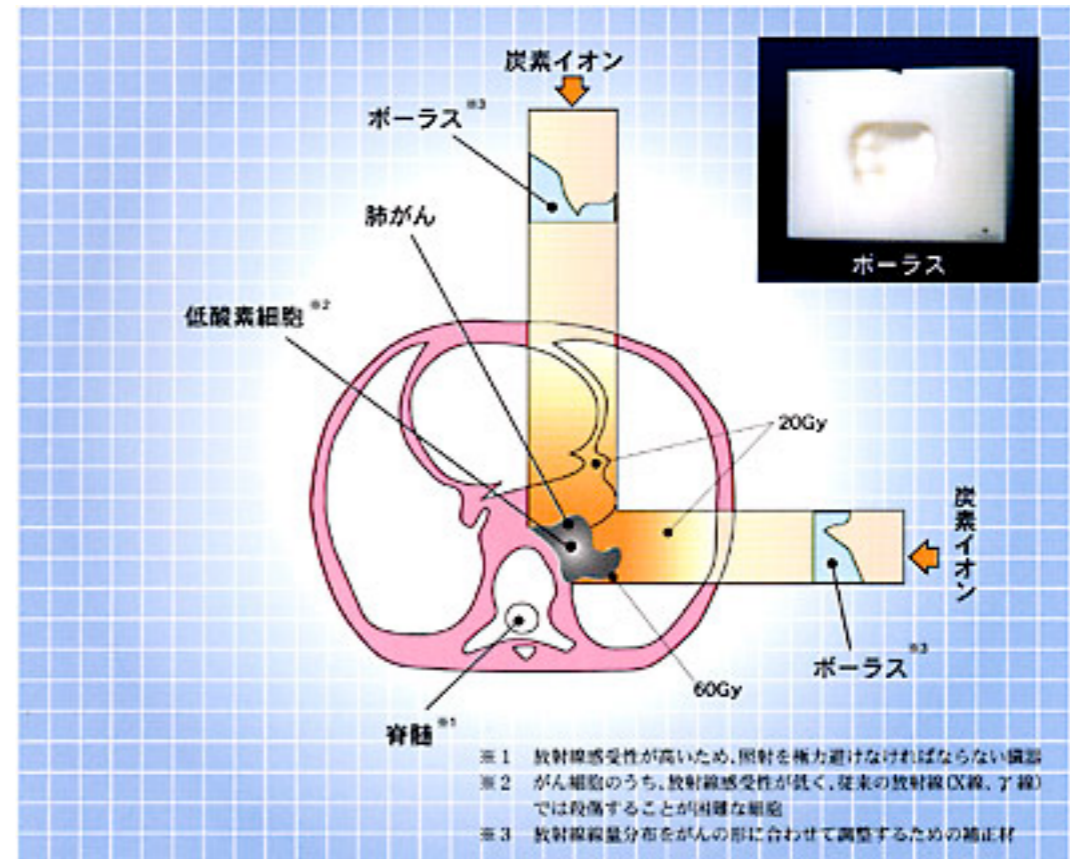
# 放射線医療：がん治療

# 数 Gy を複数回

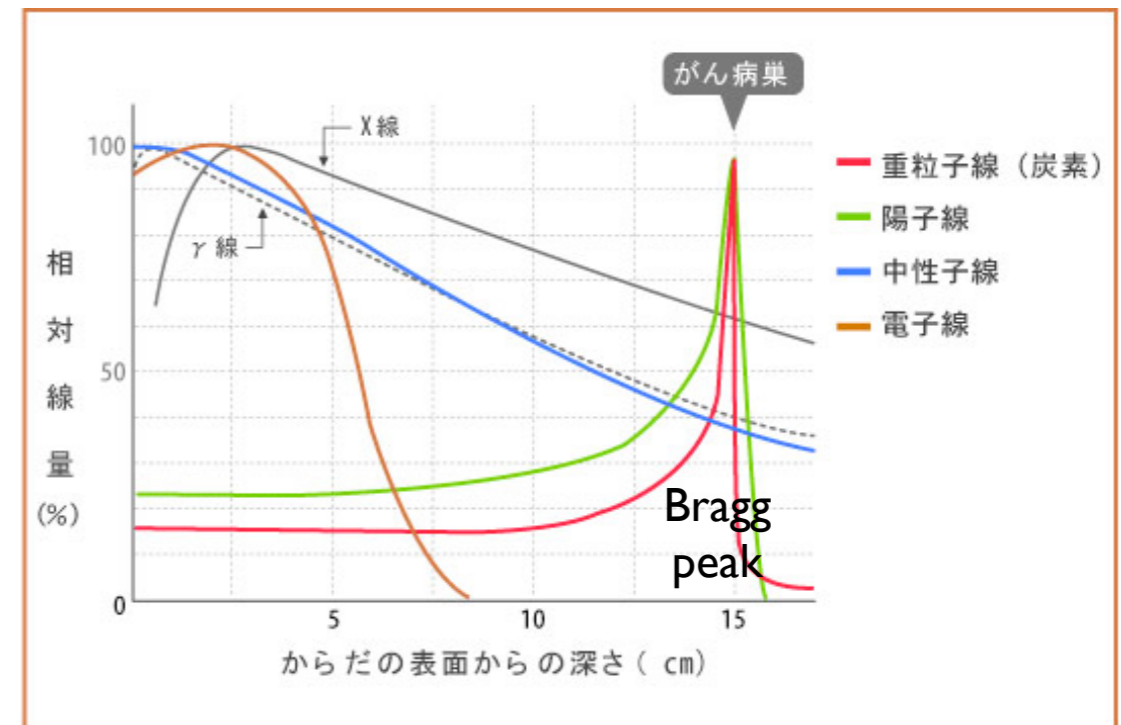
## X線



## 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





# CERN

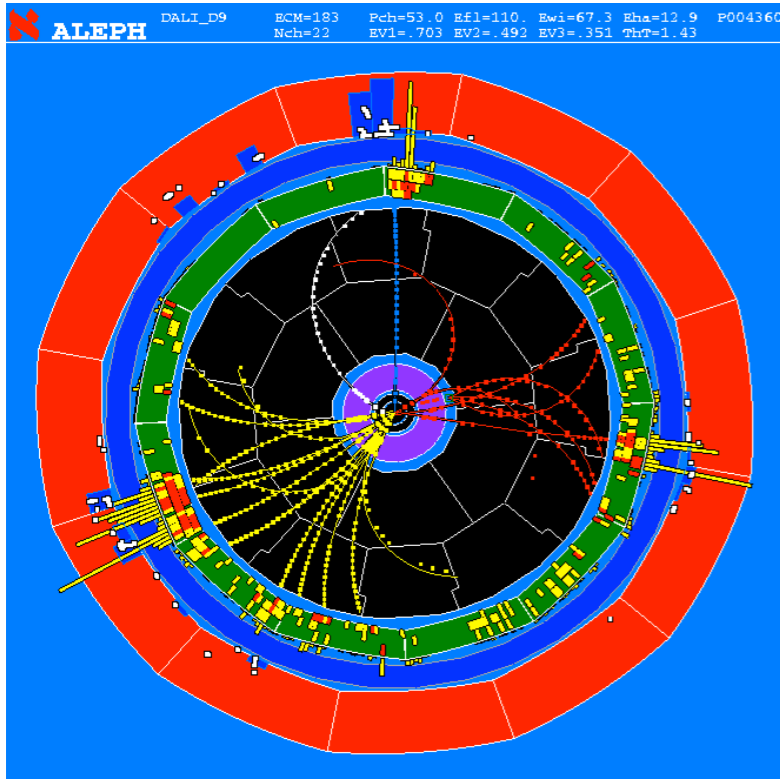
セルン：欧州合同原子核研究機関  
European Organization for Nuclear Research  
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

## Questions:

*Why accelerators?*

*Why so large?*

*Why circular rings?*



# 素粒子物理学

# 物質粒子

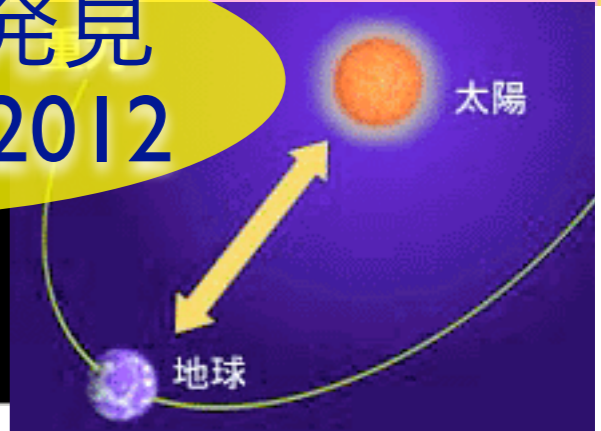
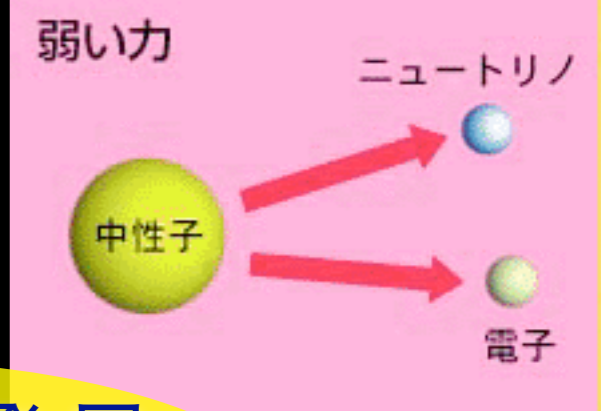
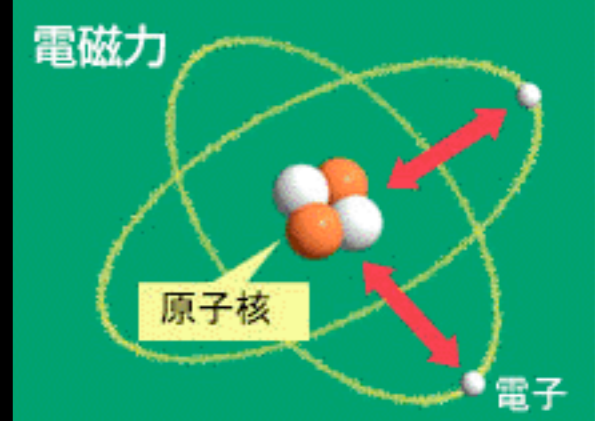
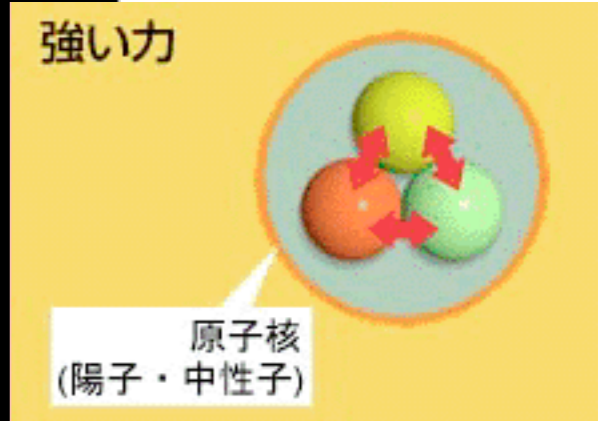
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

top quark 発見  
at Fermilab in 1995

**強い力**  
  
 グルーオン

**電磁力**  
  
 光子

**弱い力**  
  
 W ボゾン Z ボゾン



ヒッグス場に伴う粒子  
(~~未発見~~)

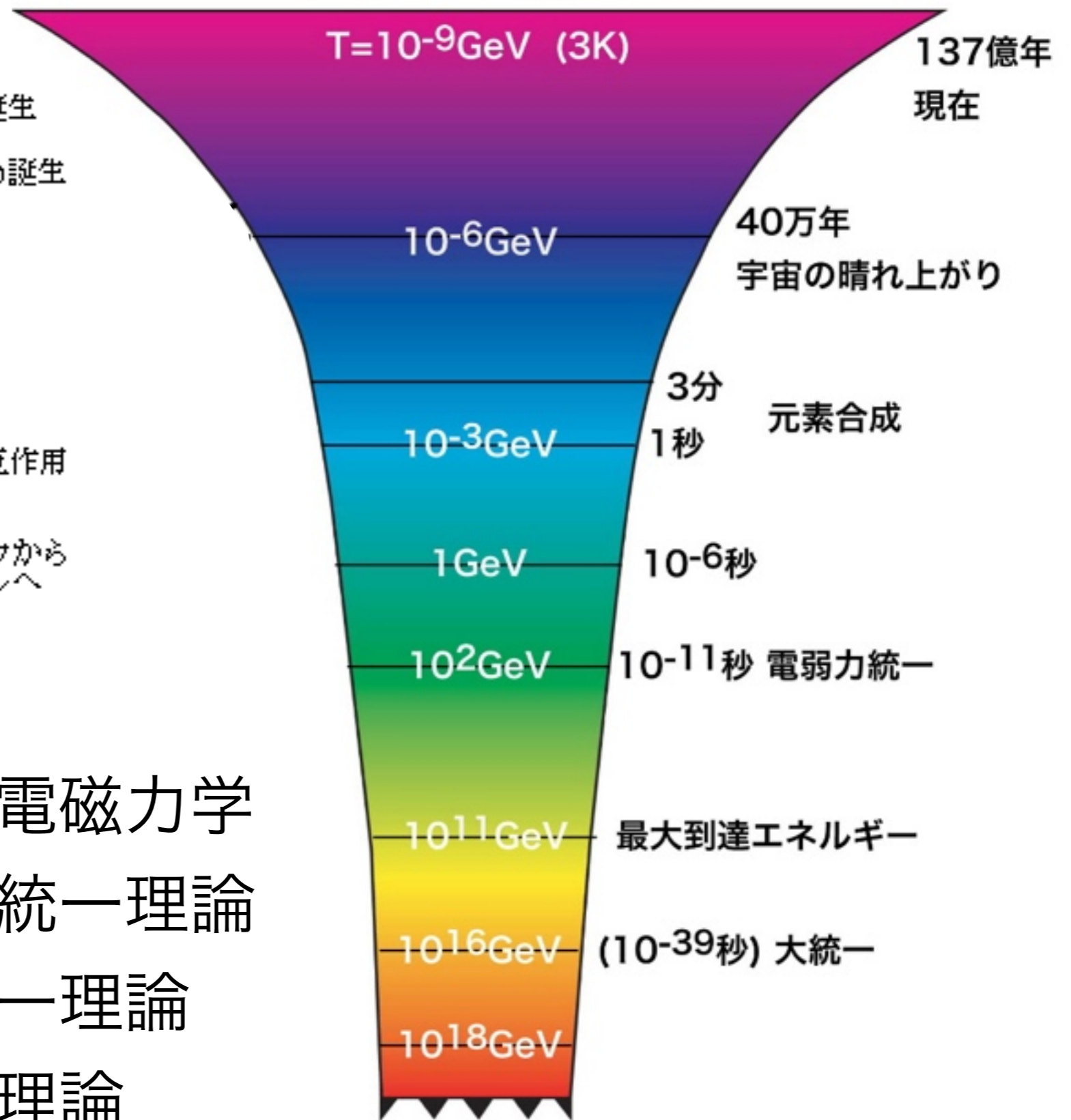
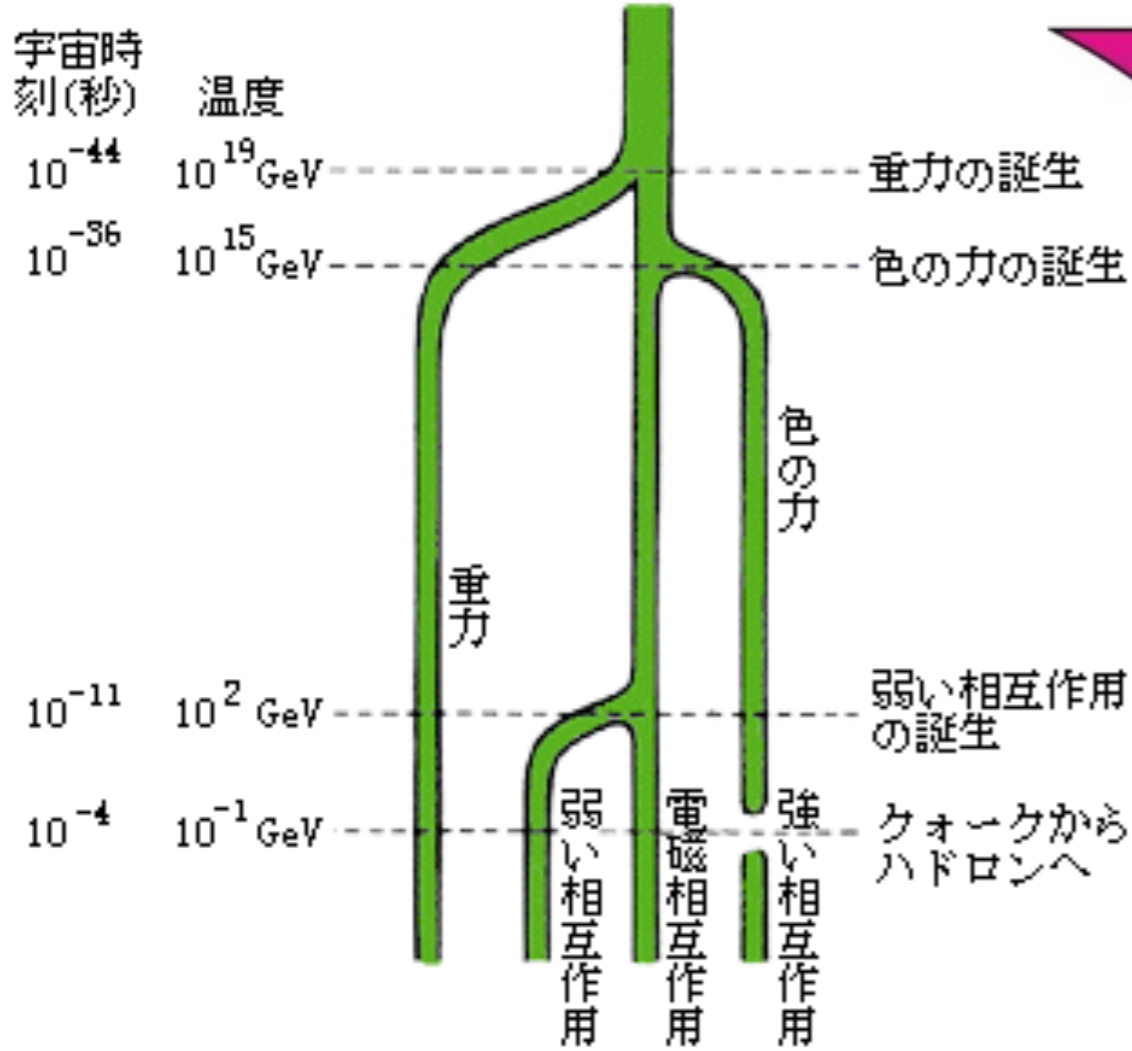
  
ヒッグス粒子

Higgs 粒子 発見  
at CERN in 2012



# 宇宙と素粒子

相互作用の進化図



標準理論

量子電磁力学  
電弱統一理論  
大統一理論  
超弦理論

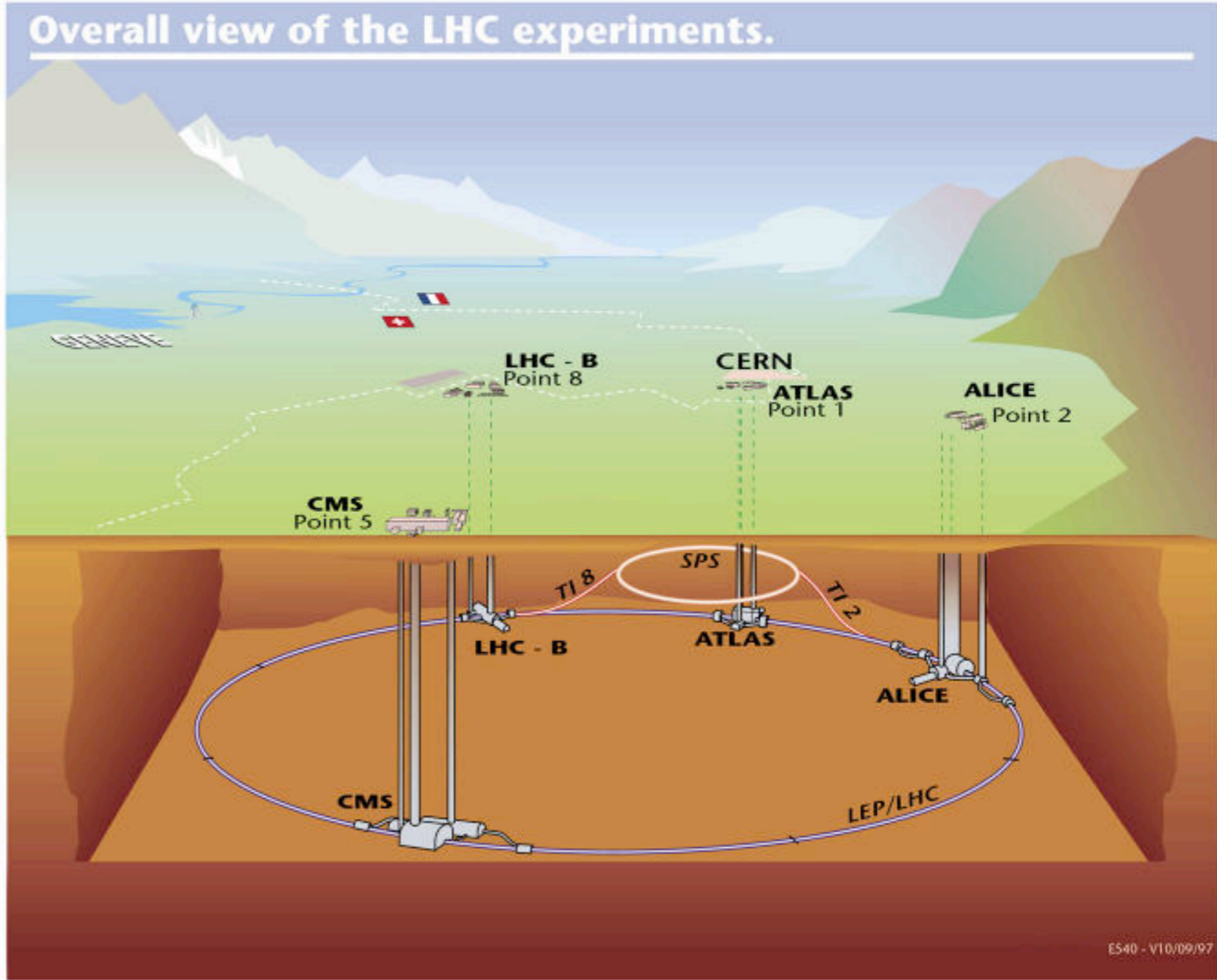
質量の起源  
Higgs 粒子

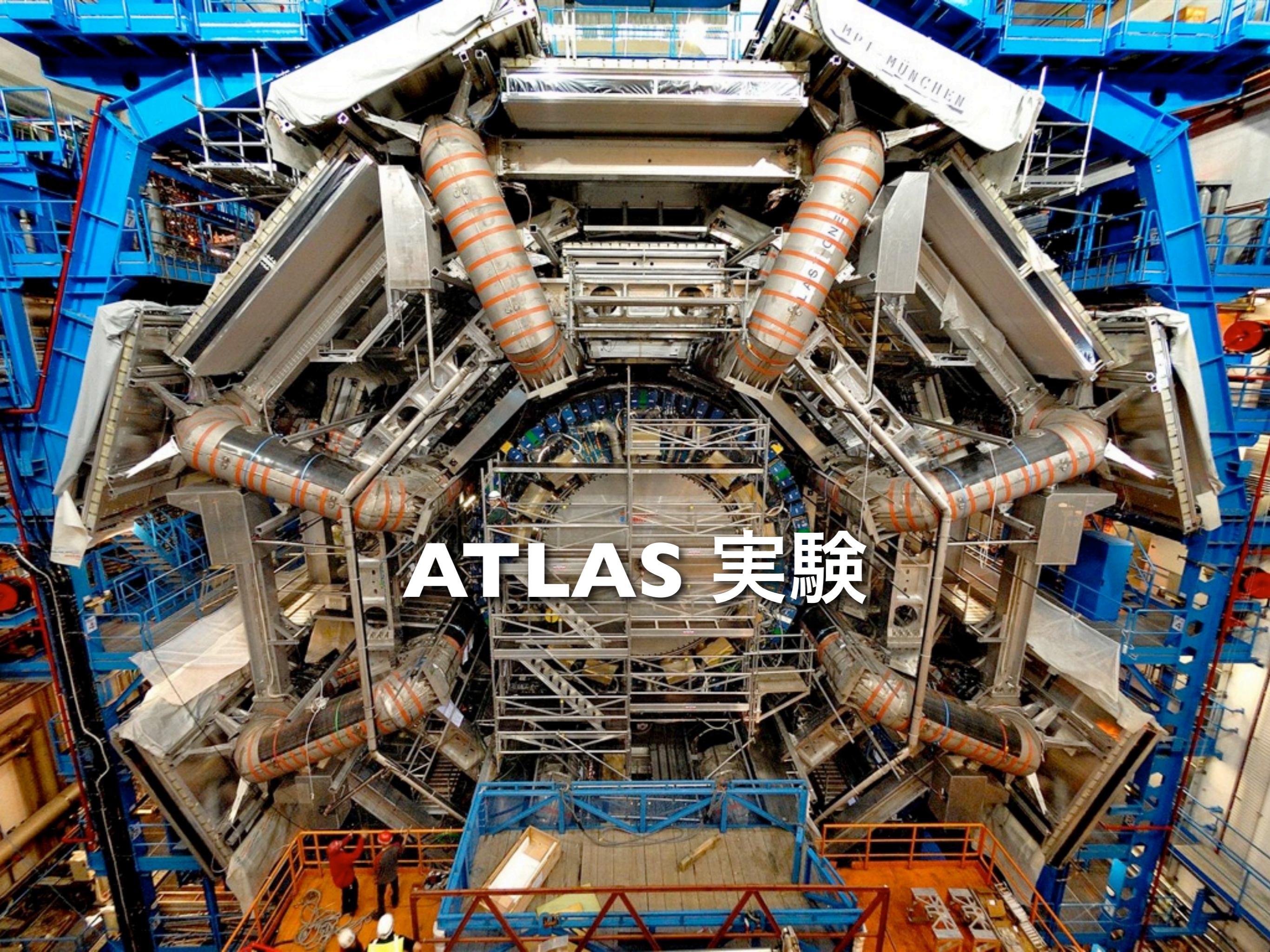


# LHC

## Large Hadron Collider

### 質量の起源 Higgs 粒子





# ATLAS 実験



### Detector characteristics

Width: 44m  
Diameter: 22m  
Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997

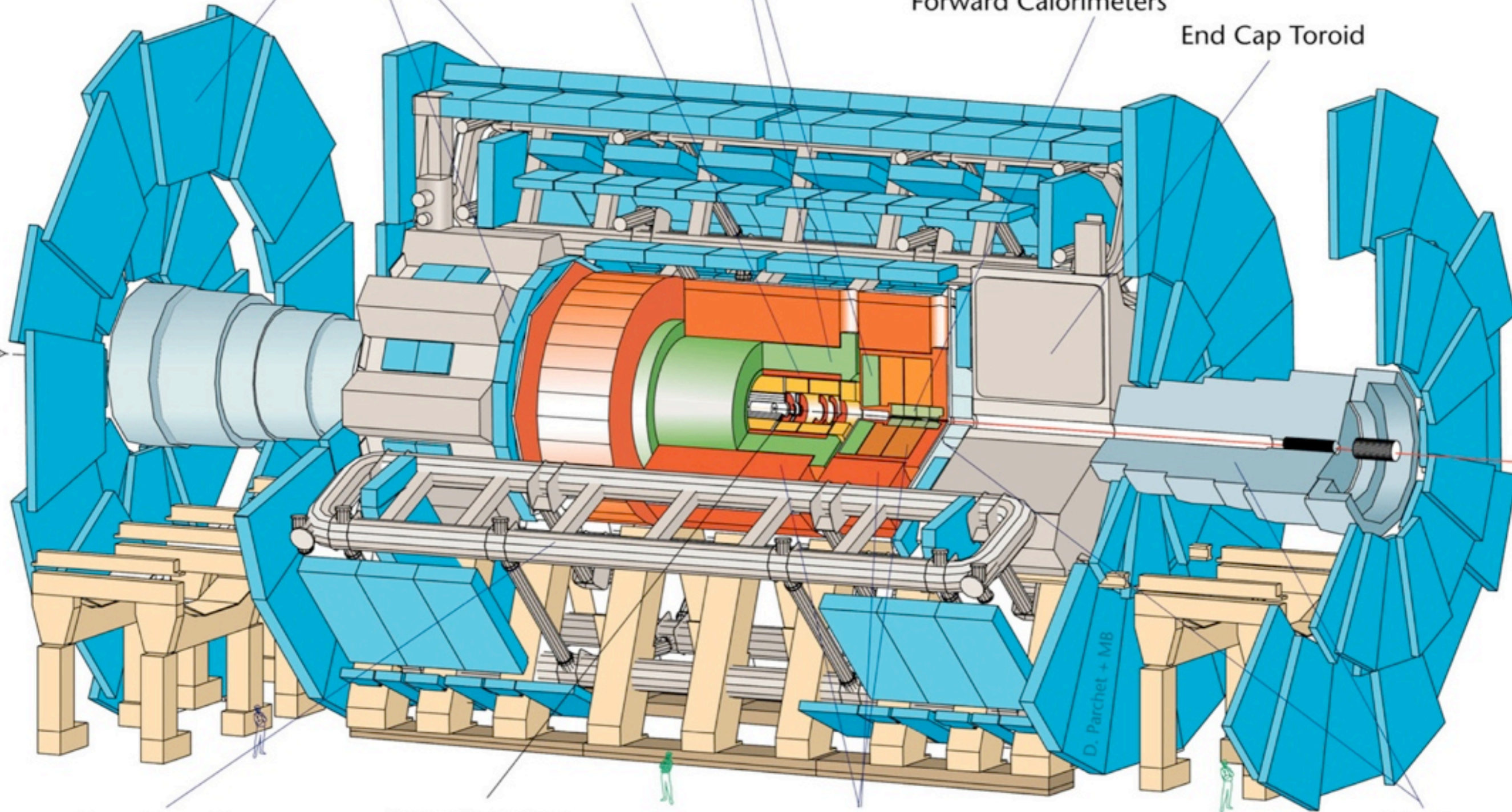
Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid



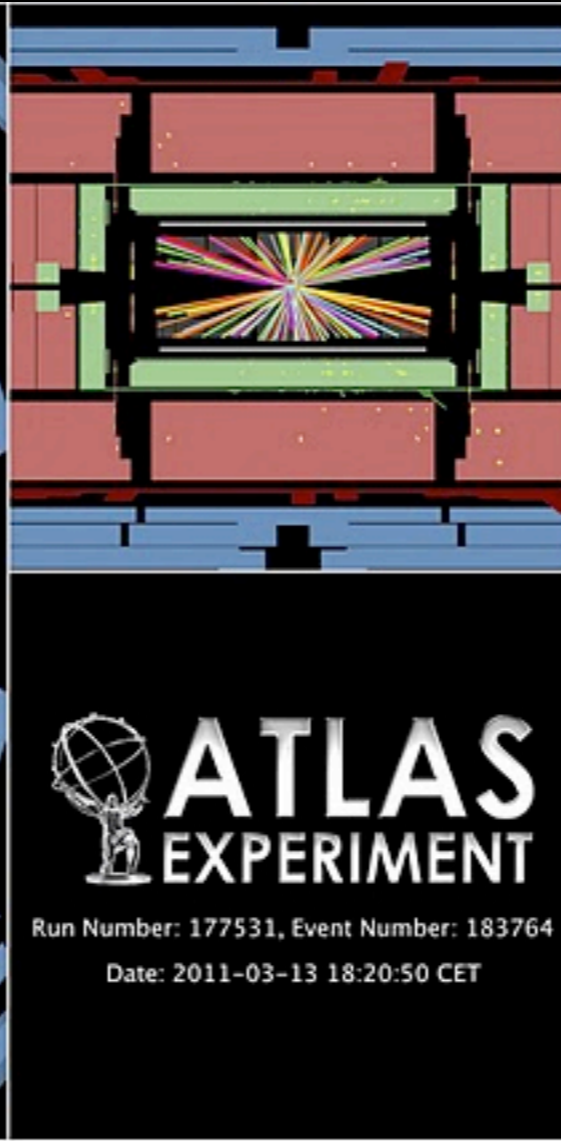
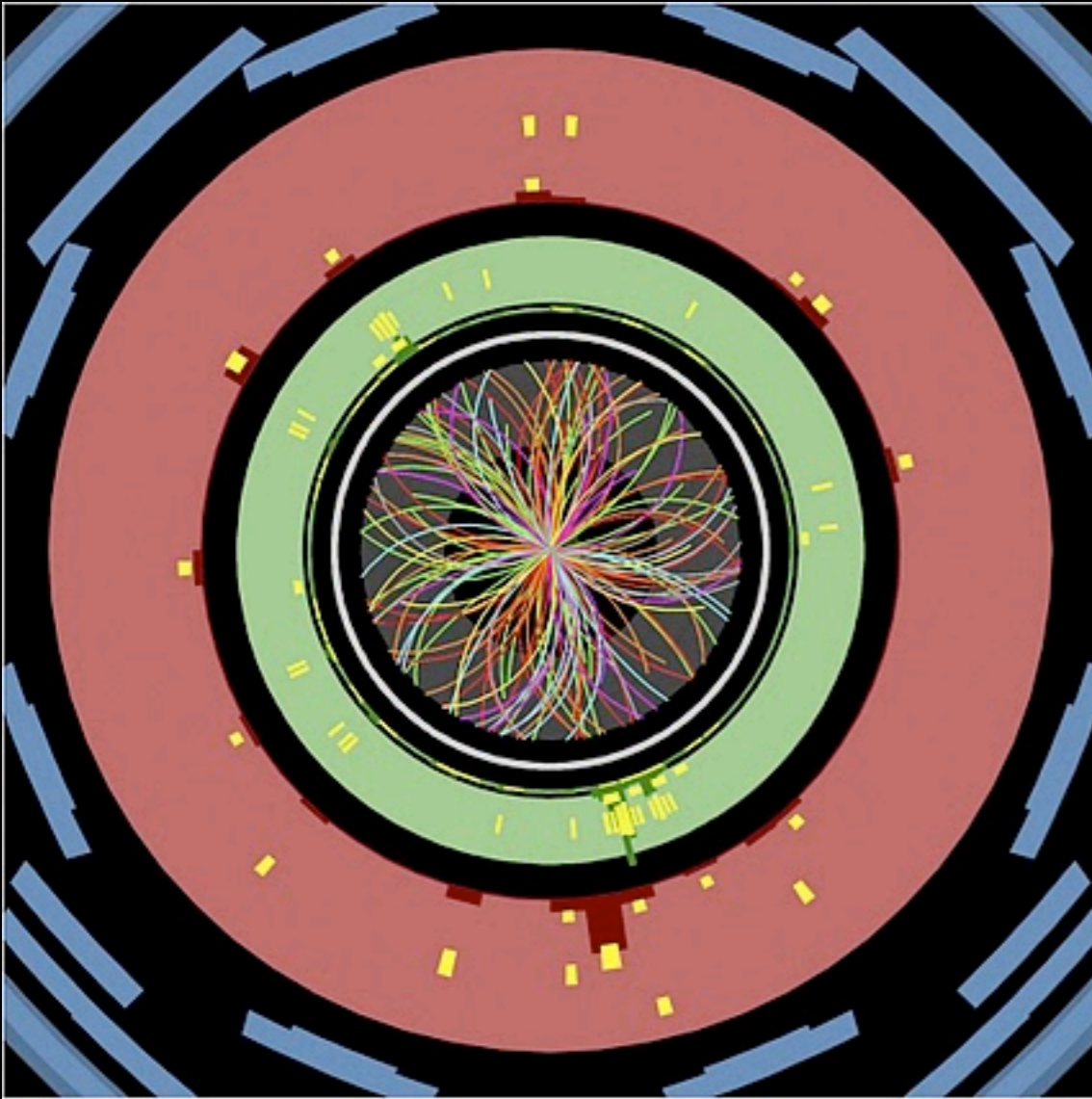
Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding

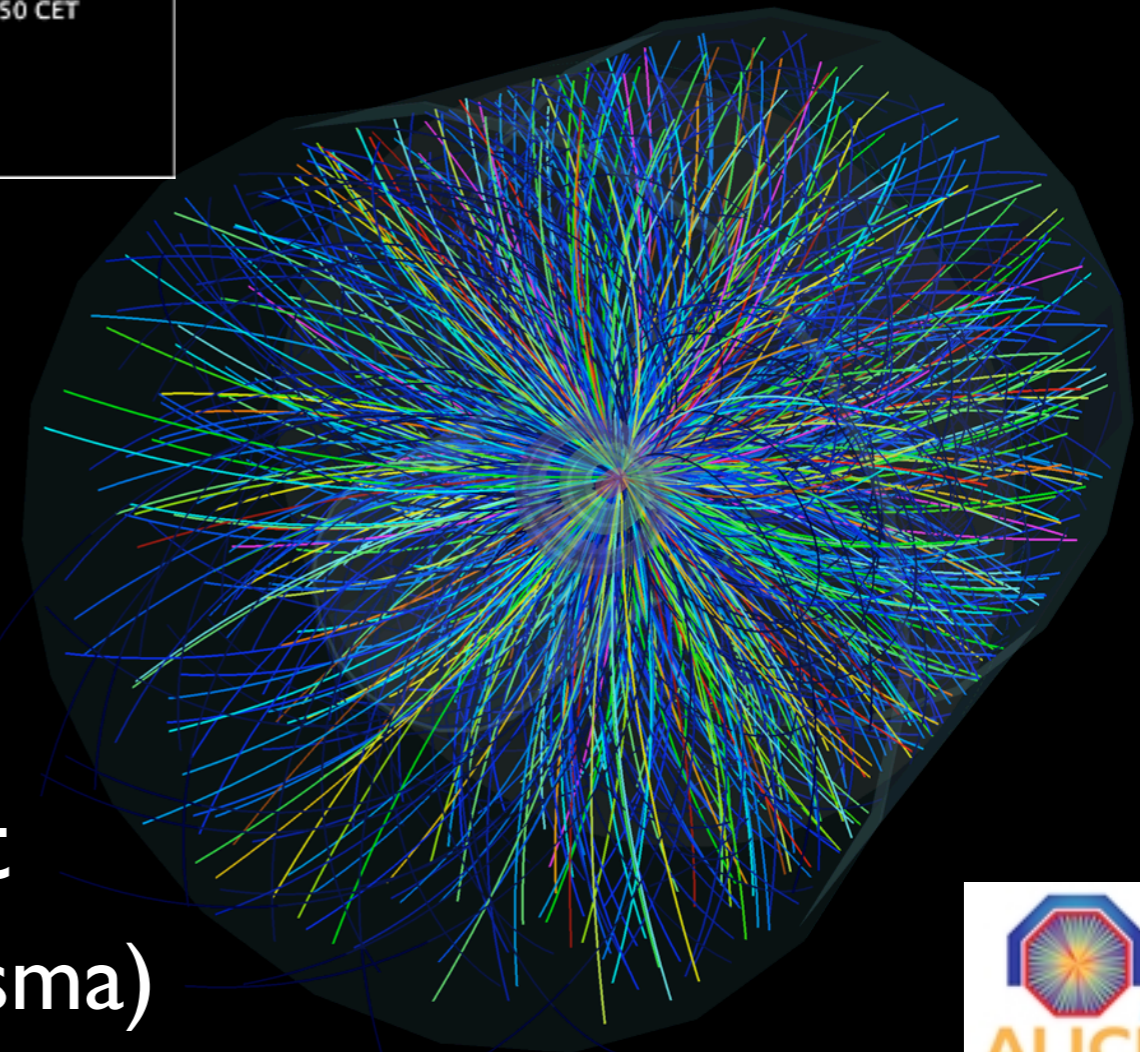
D. Parquet + MB



$3.5 \text{ TeV} + 3.5 \text{ TeV}$   
 $= 7 \text{ TeV}$

目標： $7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$

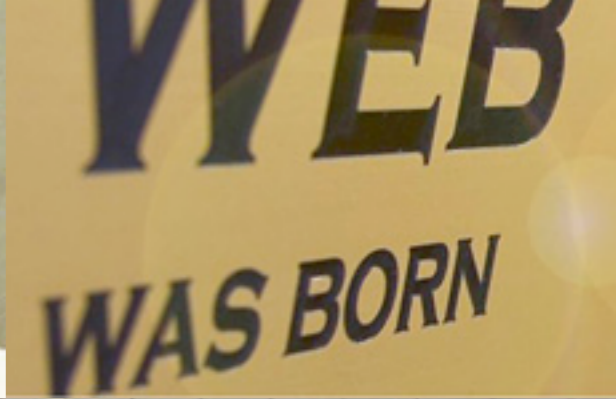
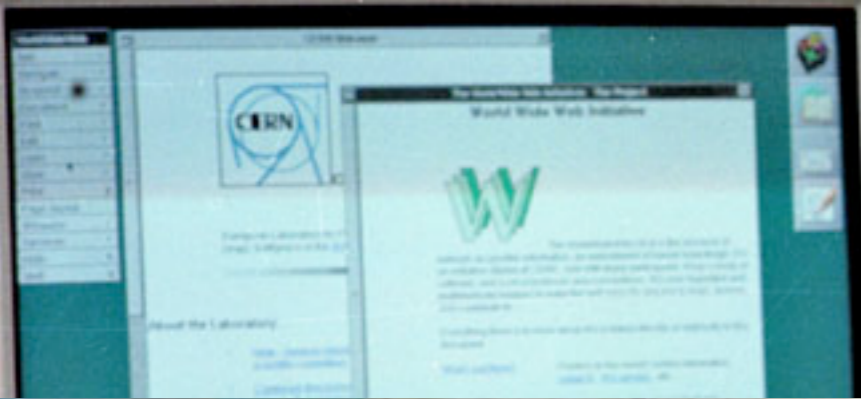
Higgs search



ALICE experiment  
QGP (Quark-Gluon Plasma)







Tim Berners-Lee

**WorldWideWeb**

- Info
- Navigate
- Document
- Edit
- Find
- Links
- Style
- Print...
- Page layout...
- Windows
- Services
- Hide
- Quit

File View

Welcome to the Universe of HyperText

**Home**

Access to this information is provided as part of the WorldWideWeb project. The WWW project does not take responsibility for the accuracy of information provided by others.

**How to proceed** <http://info.cern.ch/>

References to other information are represented like this. Double-click on it to jump to related information.

**General CERN Information sources**

Now choose an area in which you would like to start browsing. The system currently has access to three sources of information. With the indexes, you should use the keyword search option.

CERN Information A general keyword index to the information available on the WWW. It includes CERN's WWW pages and the computer network (CERN). (This is the same data on CERN's WWW which is also available on CERNVM with the VM FIND command.)

Telephone Directory A keyword index to the CERN telephone book by location.

News You can access the internet news scheme (See information for new users). News articles are distributed typically CERN-wide or worldwide, and have a finite lifetime.

Other information of general interest at CERN include:

- WWW
- WorldWideWeb Technology Interest Group news.

For more information on this machine, see also the following topics:

- WWW on this WorldWideWeb application

**Info**

**HyperMedia Browser** Version 1.0

An exercise in global information availability by Tim Berners-Lee

© 1990,91, CERN. Distribution restricted: ask for terms. BEST VERSION ONLY

Text: Text which is not constrained to be linear.  
Media: Information which is not constrained linear... or to be text.

This is the first version of the NextStep WorldWideWeb application with the libWWW library. Bug reports to [www-bug@info.cern.ch](mailto:www-bug@info.cern.ch). Check the list of known bugs in the web too.

This was the original prototype for the World-Wide Web. Many browsers for other platforms now exist. Read the web for details.

You should configure the newsreader code in this application to know where your local news (NNTP) server is. Type in a terminal window

NEXT

PREF

0 5 km

Anney (LAPP)

WWW





# スイス連邦



# スイスの言語

フランス

ドイツ  
GERMANY

Geographical distribution of the languages of Switzerland (2000)

-  German
-  French
-  Italian
-  Romansh
-  bilingual areas and cities\*

\* Areas with changing majorities, traditionally strong minorities of other official languages (over 30%) and officially bilingual communities.

Officially bilingual are the cantons of  
- Berne / Bern (German majority)  
- Fribourg / Freiburg (French majority)  
- Valais / Wallis (French majority)

Officially trilingual is the canton of  
- Graubünden / Grigioni / Grischun (German majority)

De facto bilingual are the cantons of  
- Jura (French majority)  
- Ticino (Italian majority)



Guten Tag !

Grüß Gott !

オーストリア  
AUSTRIA

Grüezi !

Bun di !

Bonjour !

フランス  
FRANCE

Buongiorno.

イタリア  
ITALY



『ダ・ヴィンチ・コード』から3年——新たな歴史の謎が暴かれる。

反物質科学

待望の映画化!  
『ダ・ヴィンチ・コード』  
シリーズ第2弾!

CERN  
Antimatter

トム・ハンクス  
(ロバート・ラングドン教授)  
ロバート・ラングドン 監修  
天使と悪魔  
ANGELS & DEMONS

大ヒット上映中!

A RON HOWARD FILM  
ANGELS & DEMONS  
FROM THE AUTHOR OF THE DAVINCI CODE



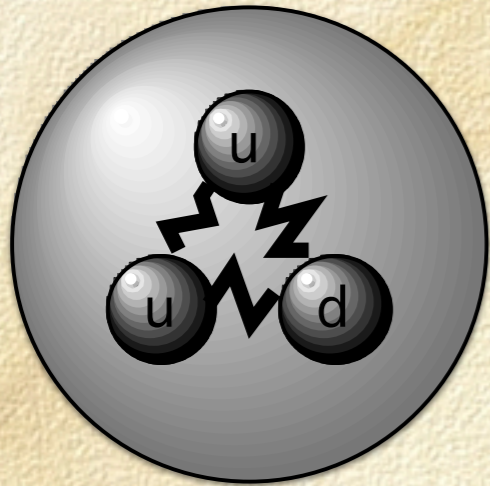


**CERN**

European Organization for Nuclear Research

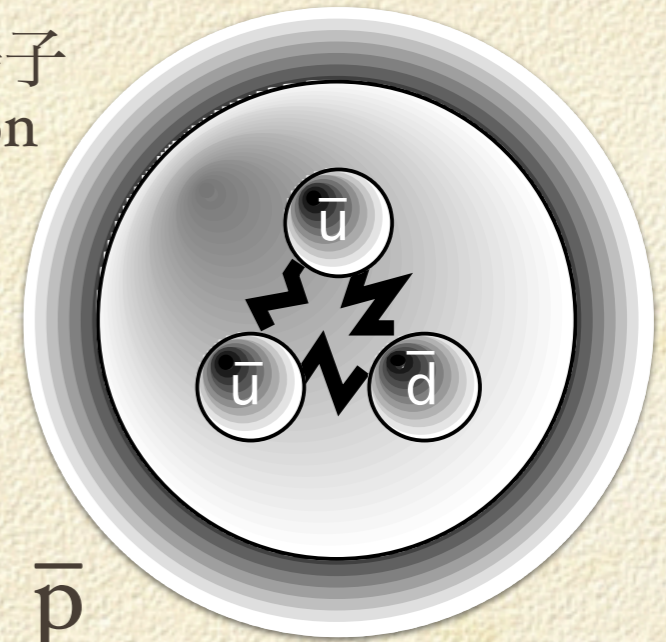
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

陽子  
proton



p

反陽子  
antiproton



p̄

# 粒子 / 反粒子



$e^-$



電子 electron

$e^+$



陽電子 positron

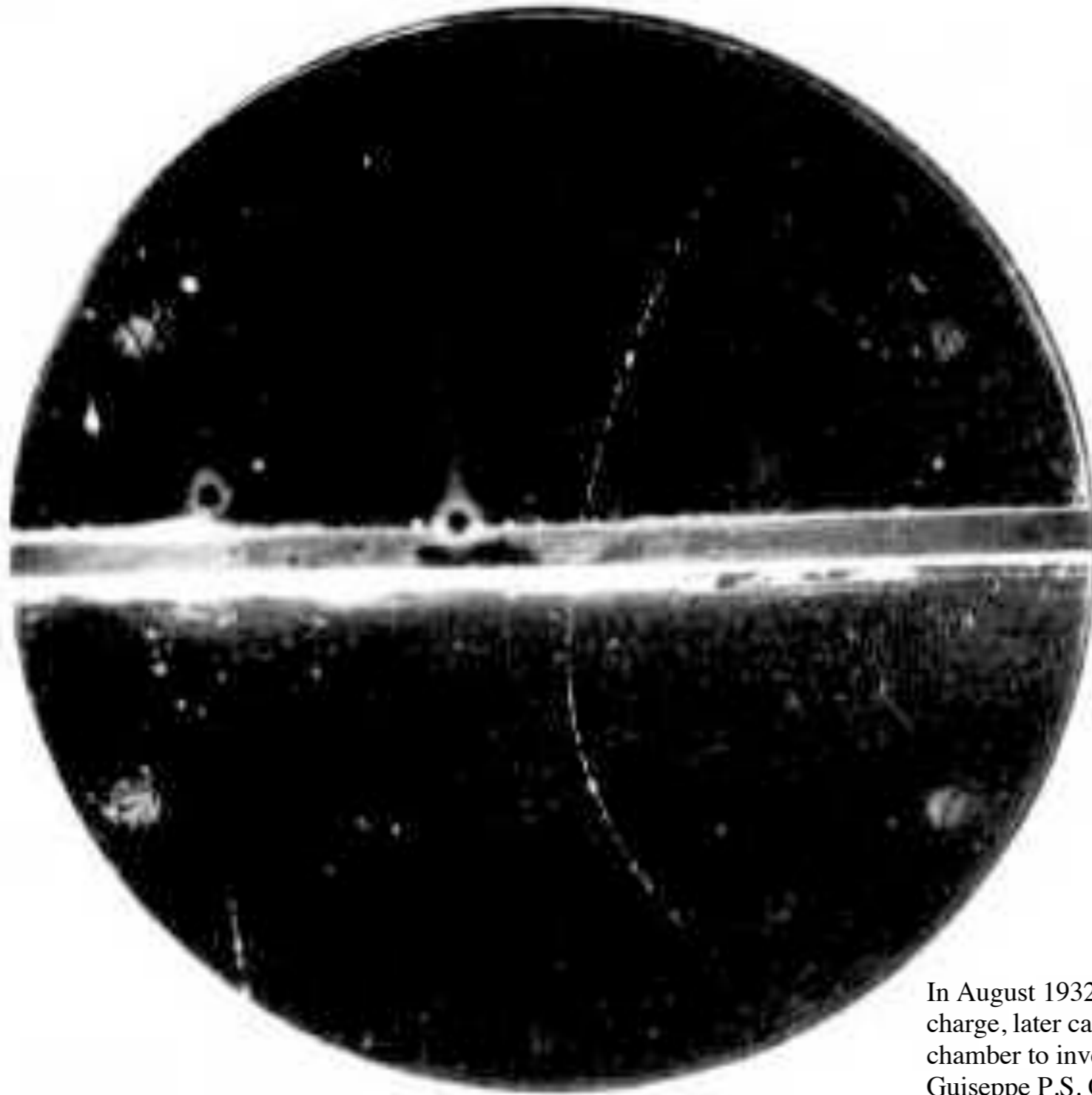
**Paul Dirac**  
(相對論的量子力學)

# 陽電子の発見



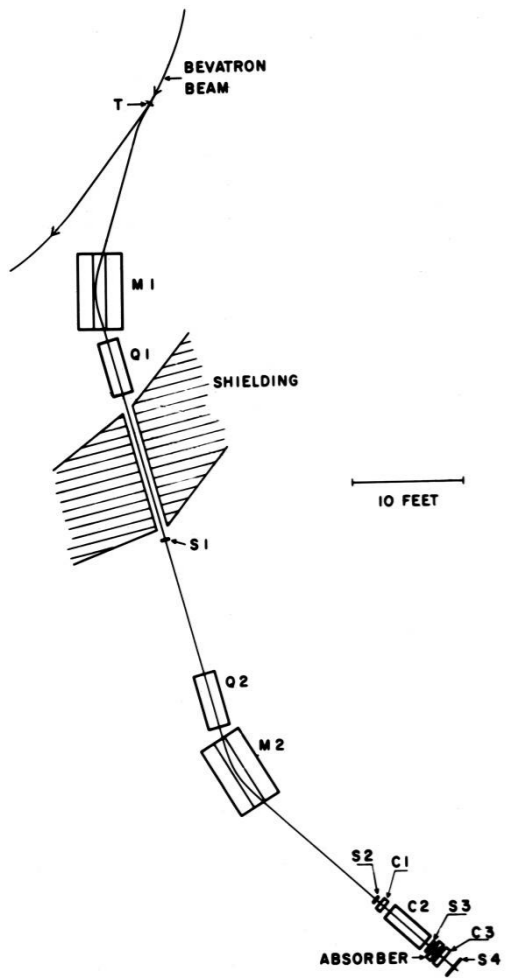
*Anderson's first picture of a positron track (Source: C D Anderson)*

The positron travelled downwards and lost energy as it passed through a lead plate in the middle of the chamber. Its track is curved because there was a magnetic field in the chamber.

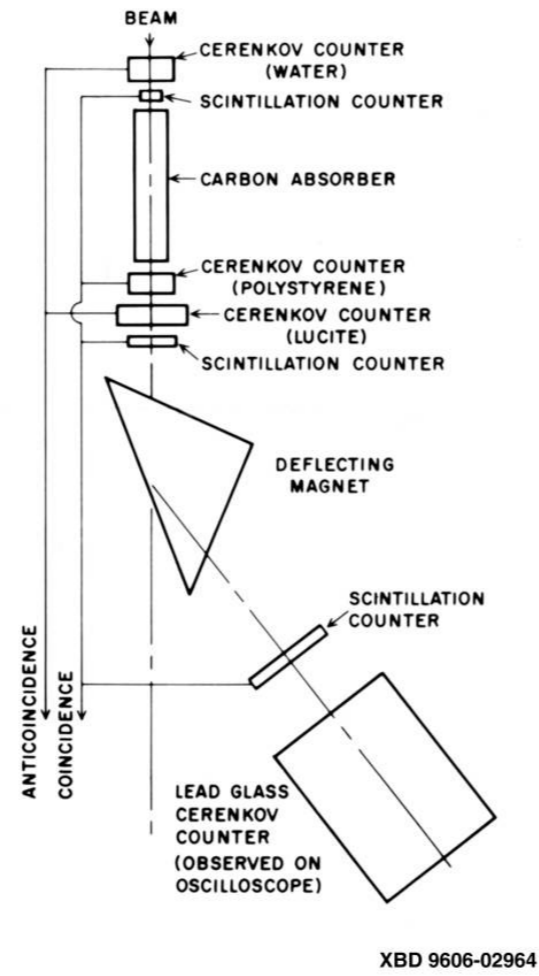


In August 1932, Carl D. Anderson found evidence for an electron with a positive charge, later called the positron. Anderson discovered the positron while using a cloud chamber to investigate cosmic rays. This work was continued by Patrick Blackett and Giuseppe P.S. Occhialini who showed that a positron was produced together with an electron, in line with an earlier theory of Paul Dirac's. According to this theory, a positron was a hole in a sea of ordinary electrons. The positron was the antimatter equivalent to the electron.

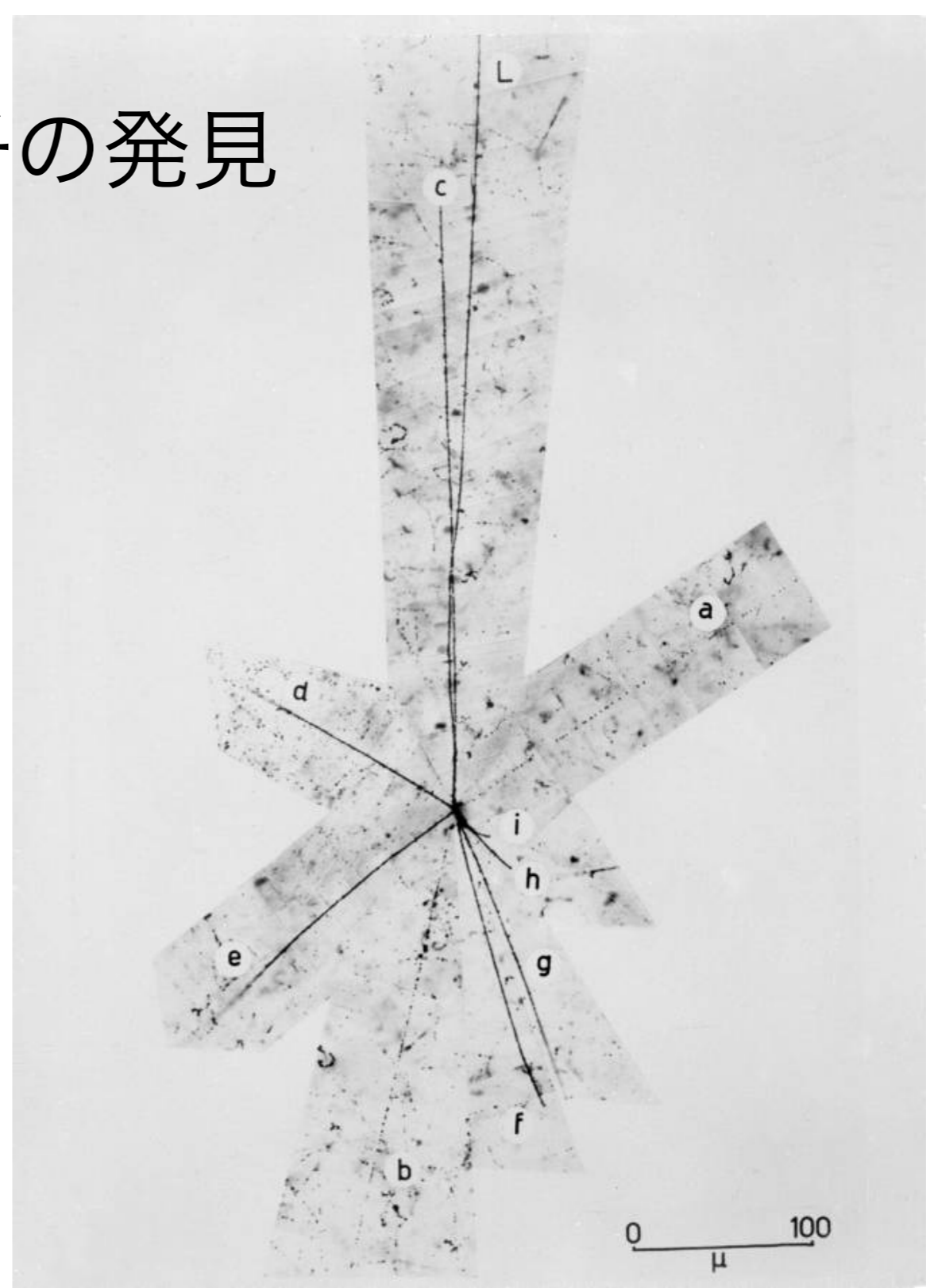
# 反陽子の発見



XBD 9606-02963



XBD 9606-02964



# 放射線計測学

(高エネルギー物理学実験用)



# 空間線量測定

# 放射線の測定

# 試料測定



$\beta$  ( $\gamma$ )



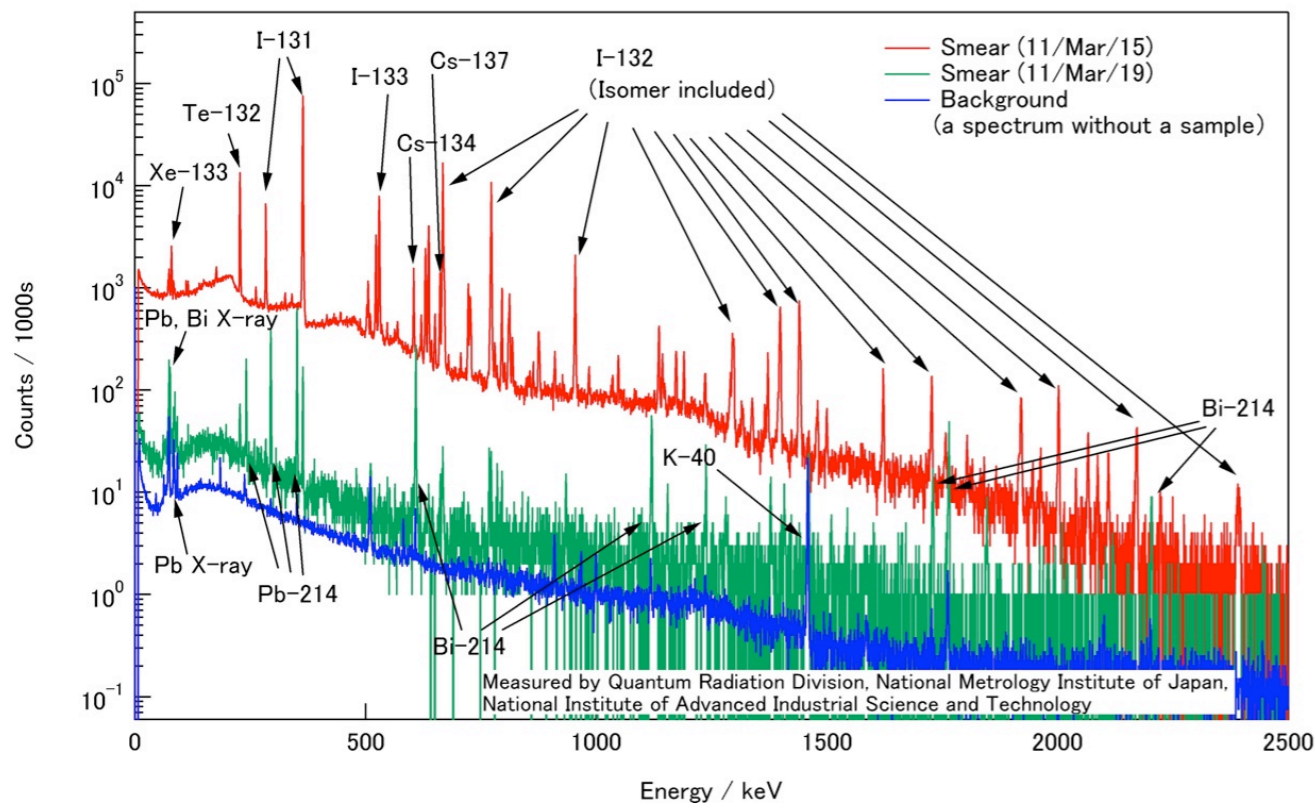
$\gamma$

**計数 (cps = counts per second)**

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

# エネルギー分析 (核種同定)

ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)



$\gamma$  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



# 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】

$\beta$  ( $\gamma$ ) /  $\gamma$



GM管

$\beta$  ( $\gamma$ ) /  $\gamma$



電離箱

$\gamma$



CsI (Tl)

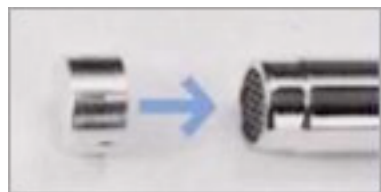


NaI (Tl)



$\beta$  ( $\gamma$ )

【表面汚染検査】



$\gamma$

$\beta$  ( $\gamma$ )



GM管

$\alpha$



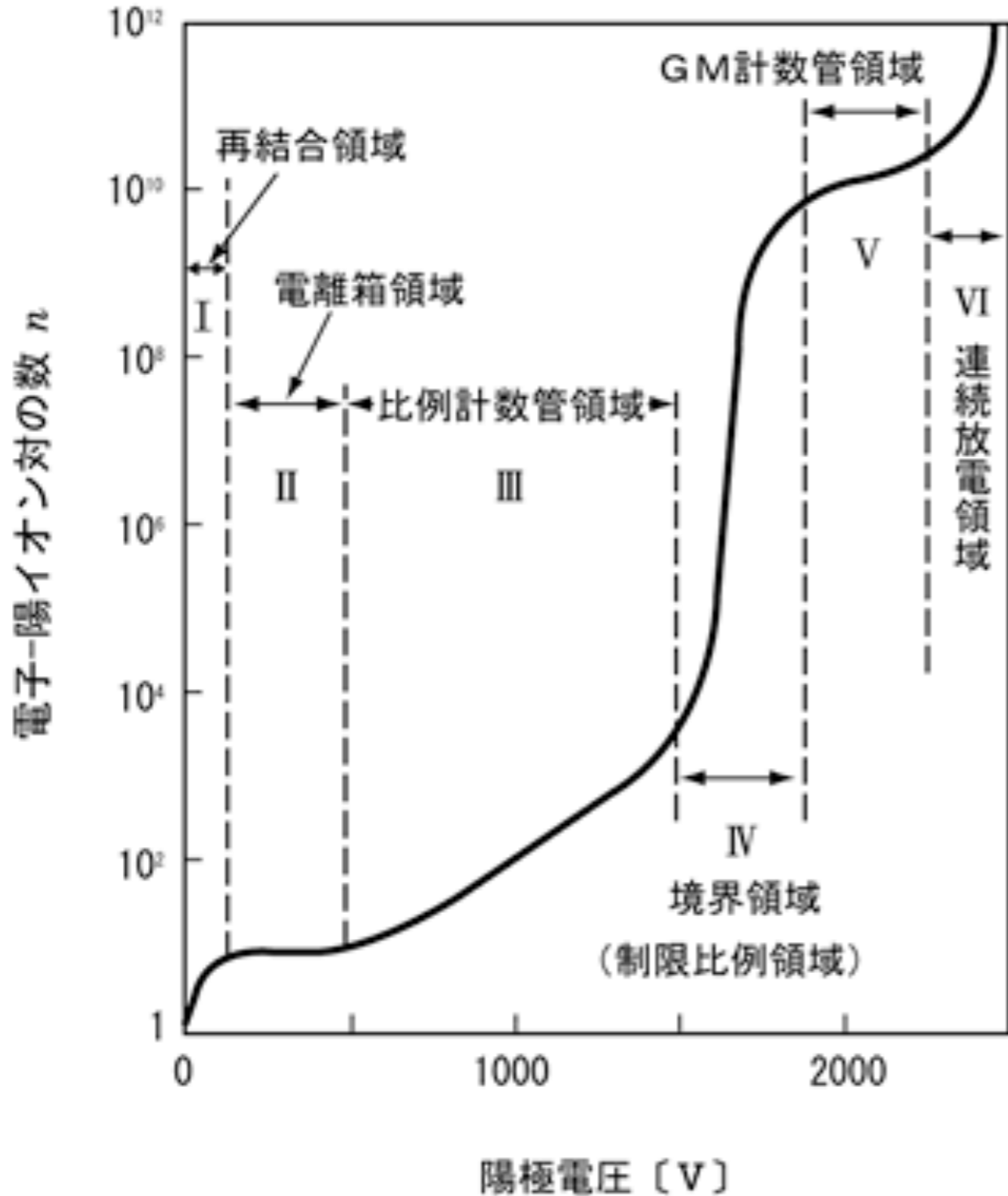
ZnS (Ag)



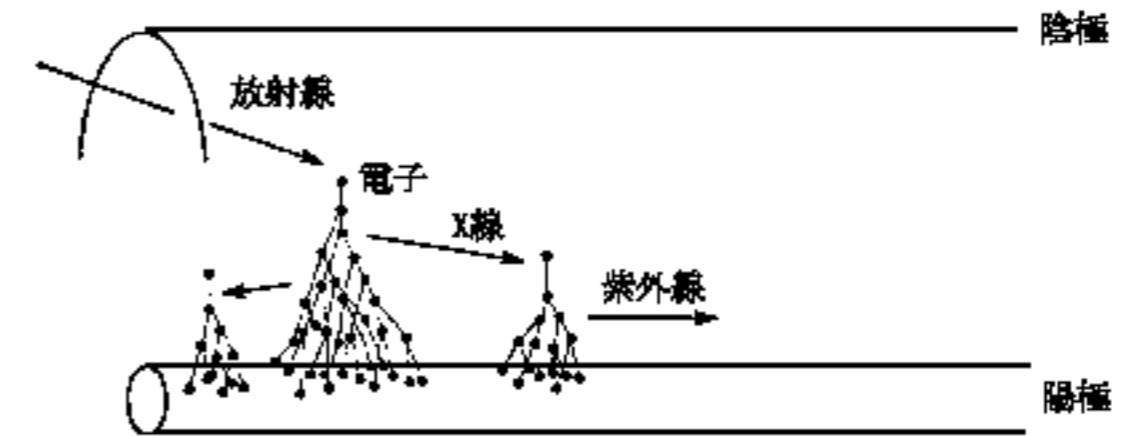
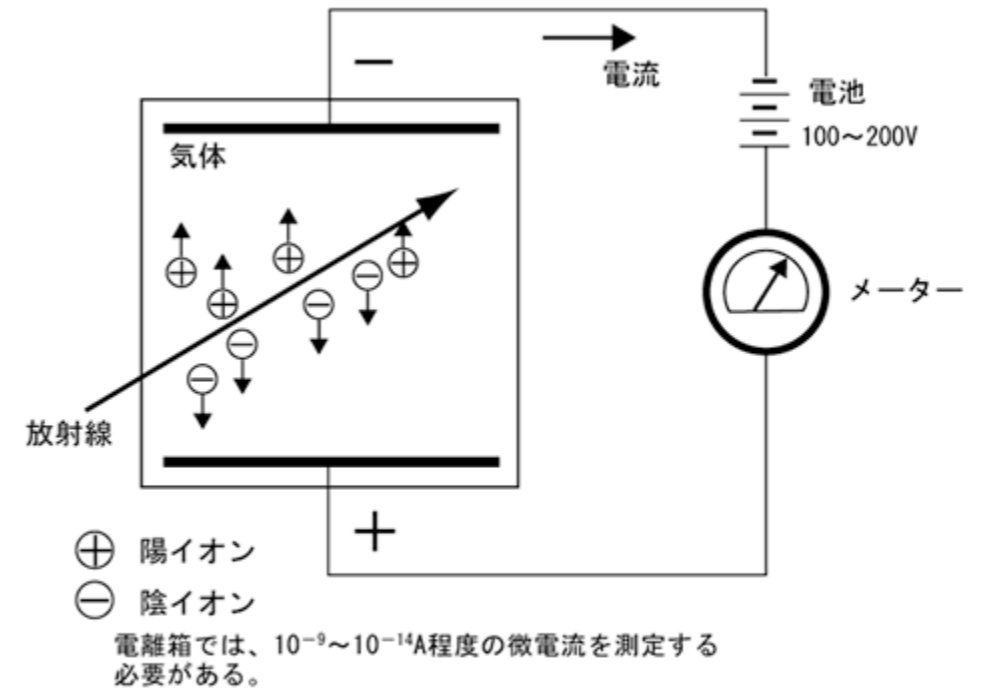
# 気体の電離を利用する放射線計測

## 電離箱, 比例計数管, GM管

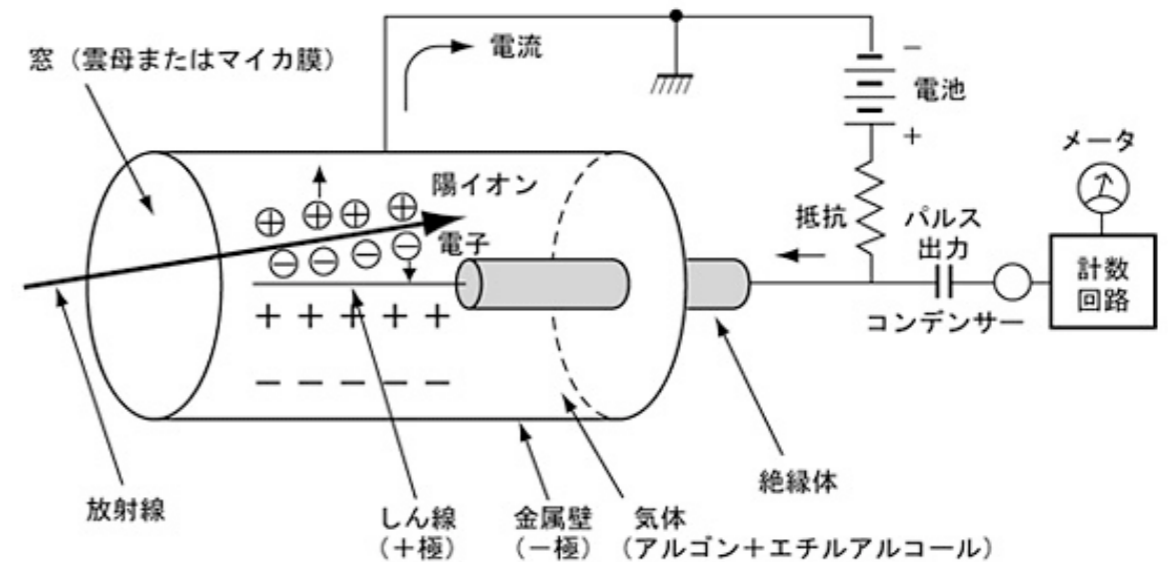
(ガイガー・ミュラー管)



### 電離箱



### GM管

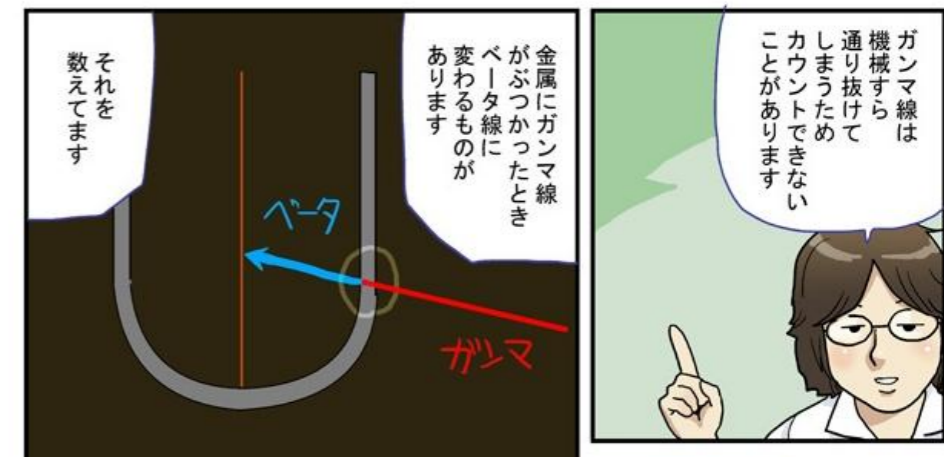
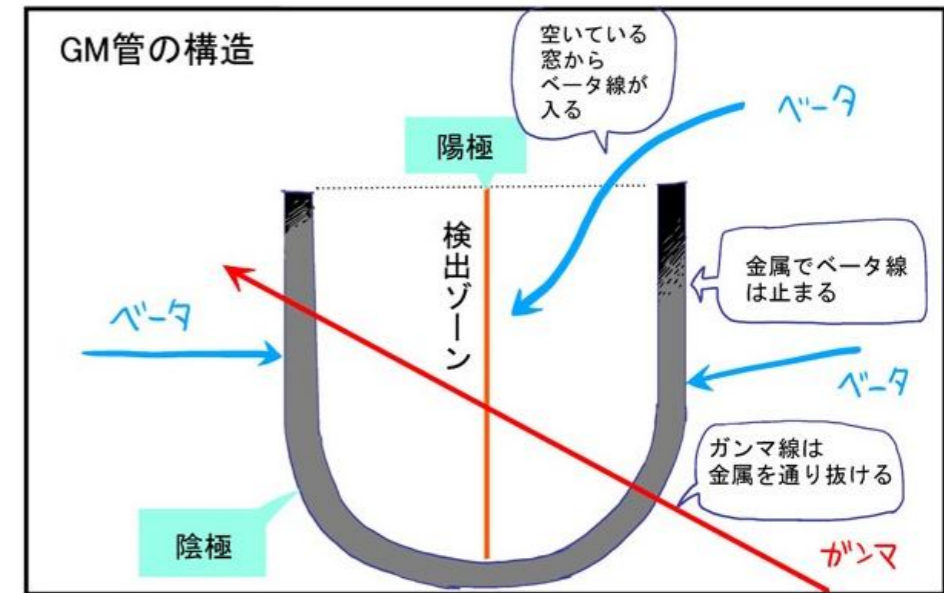


# レポート総評

- 被曝（被ばく） ≠ 被爆

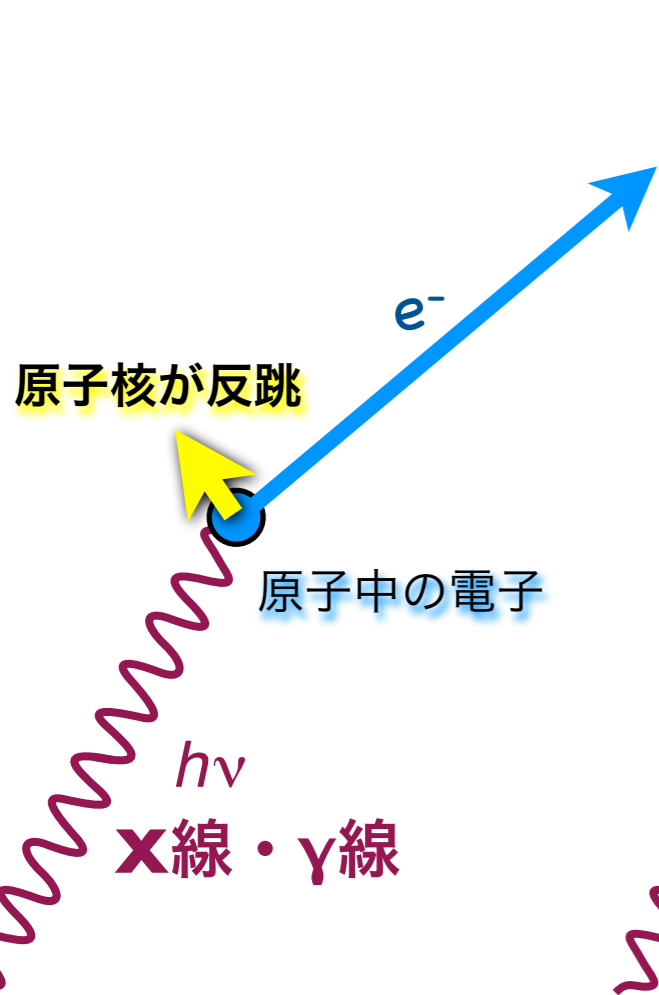
## GM管の検出効率

- $\beta$ 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。

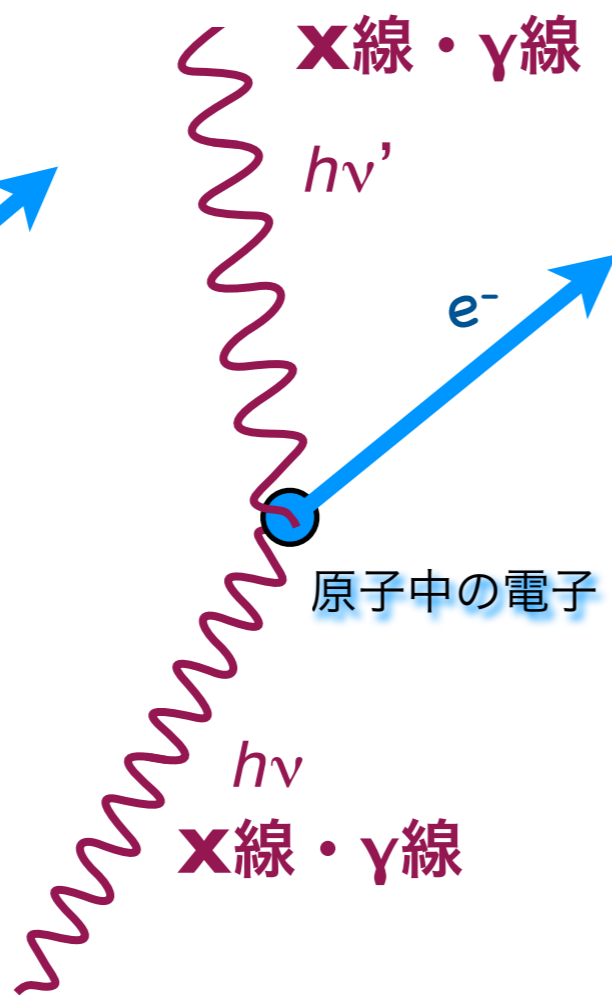


# 光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

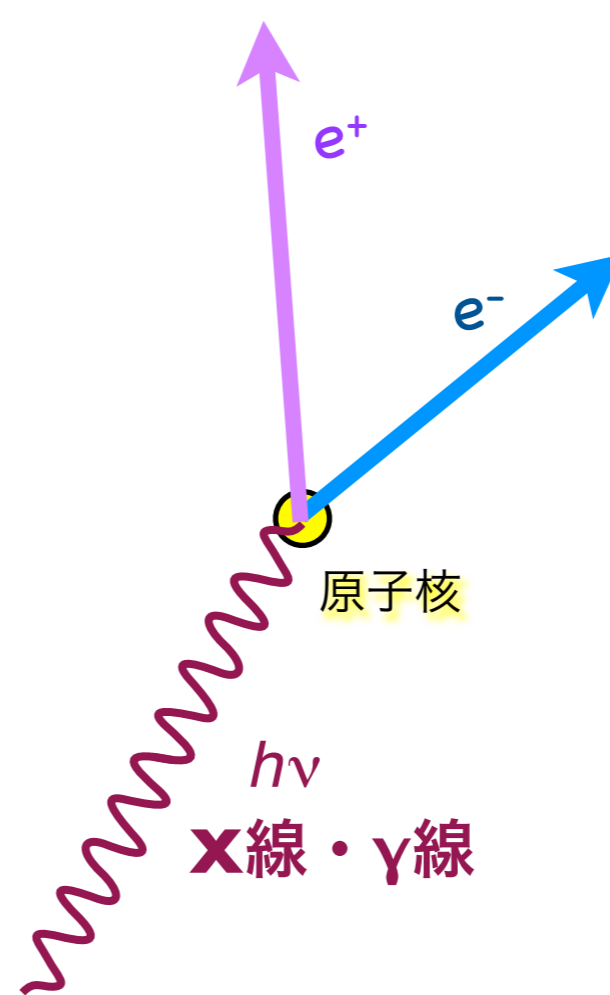
## 光電効果



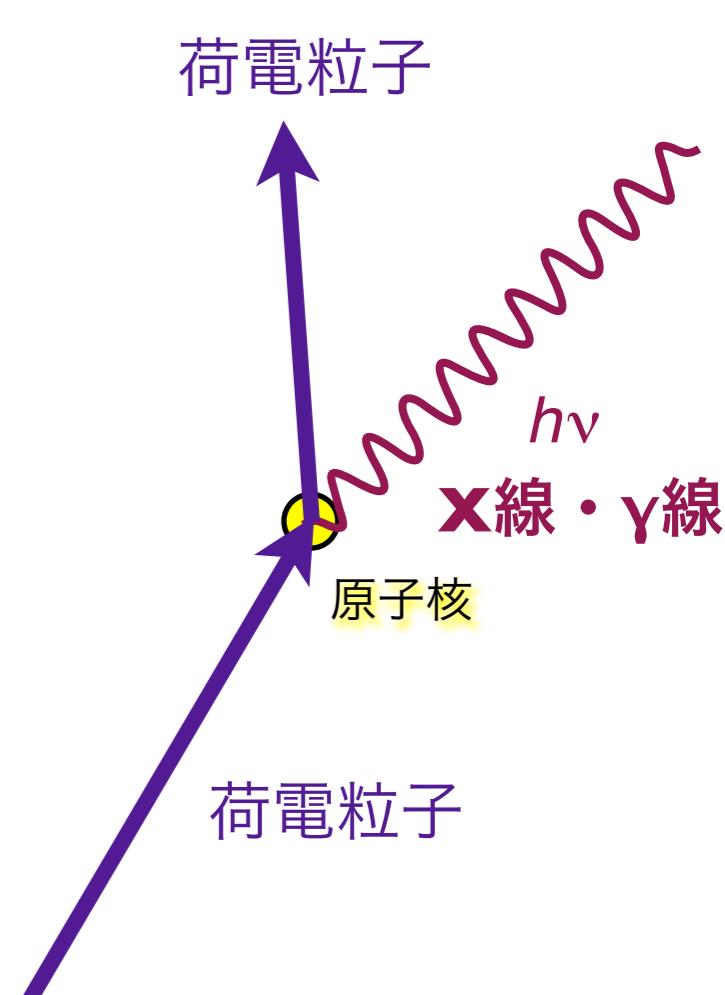
## コンプトン散乱



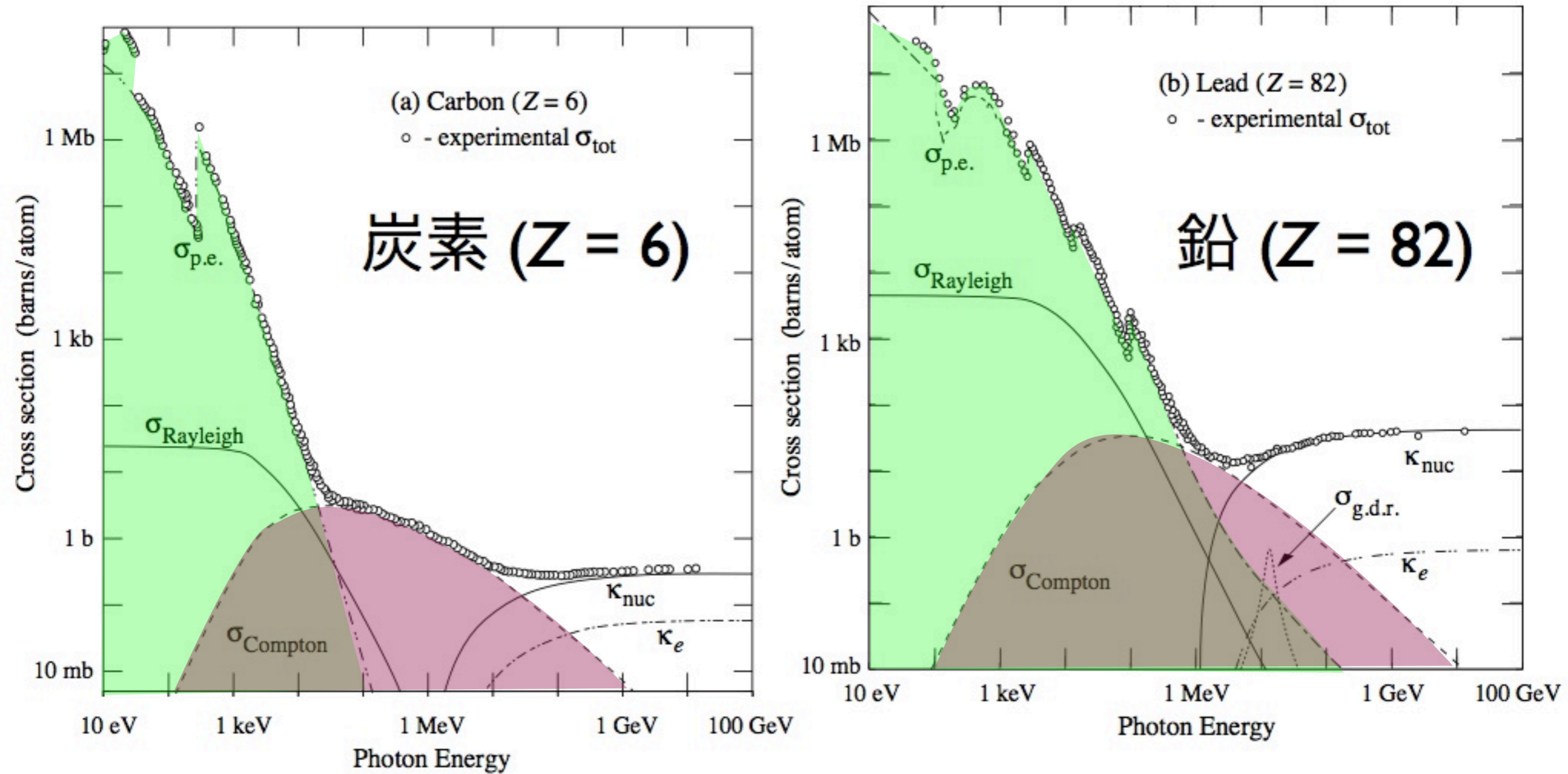
## 電子対生成



## 制動放射



# 光子の反応断面積の物質依存性



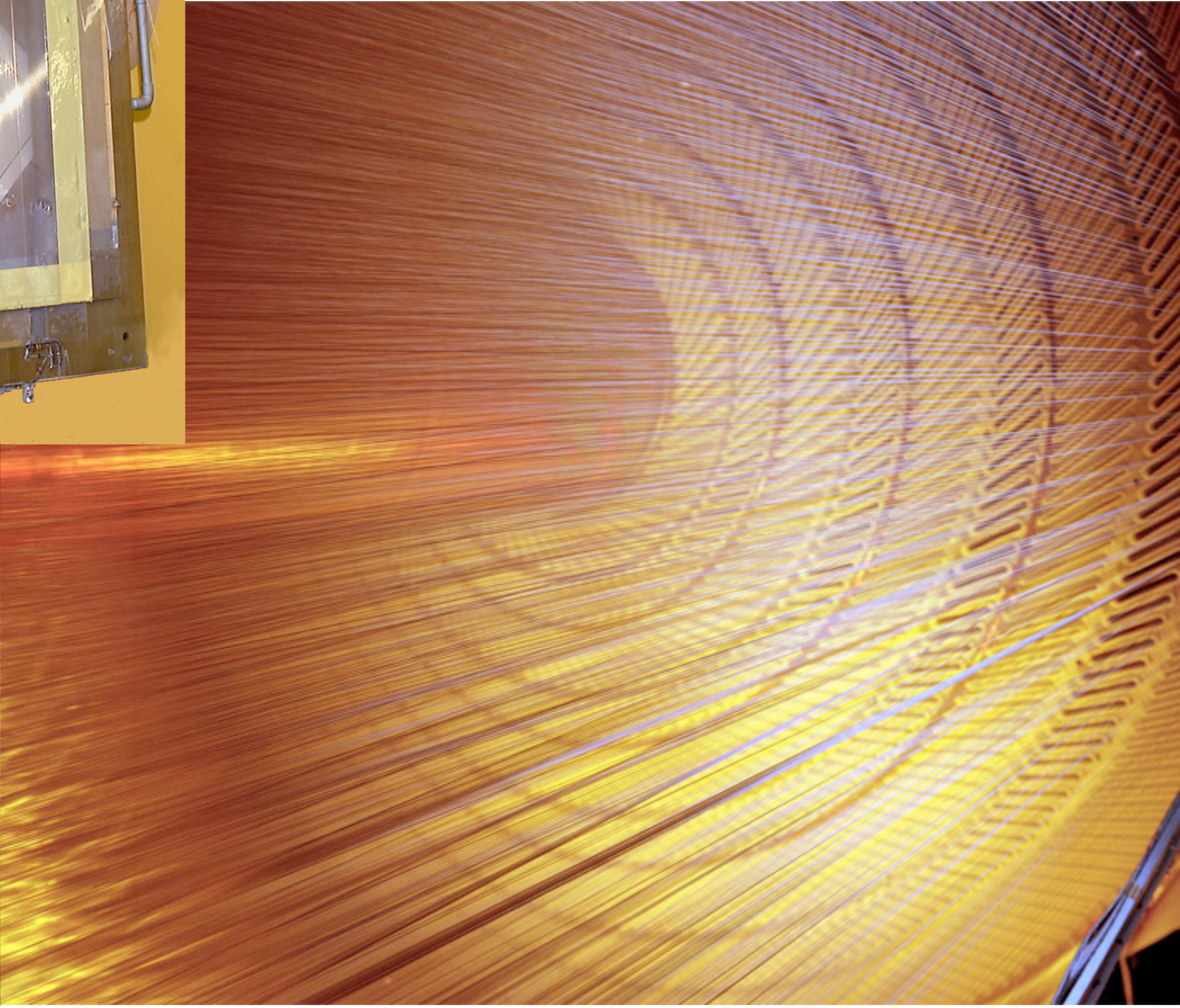
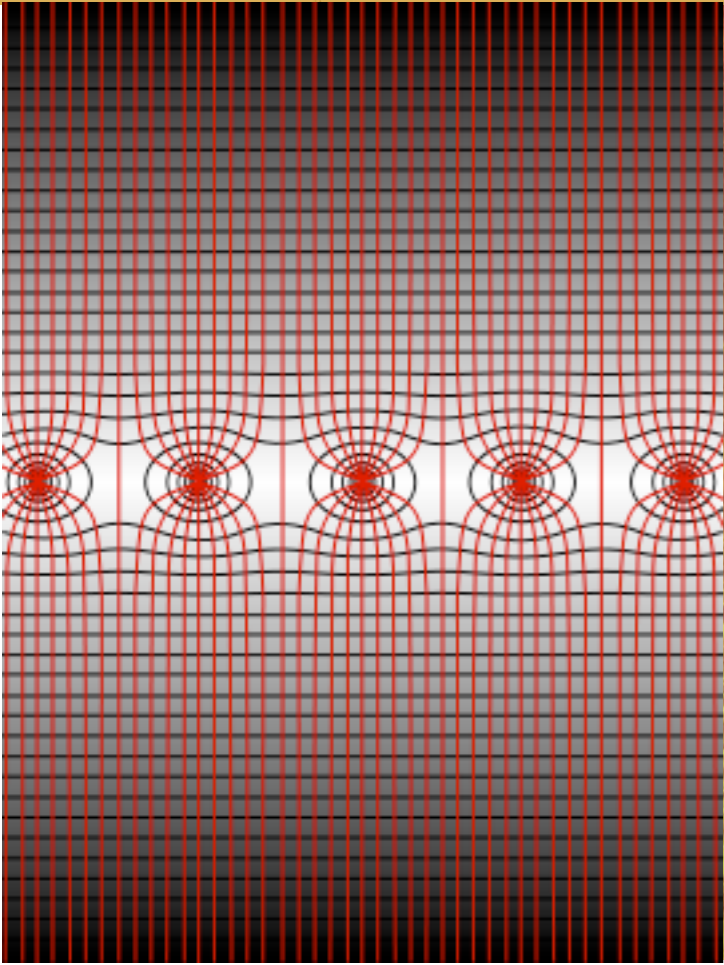
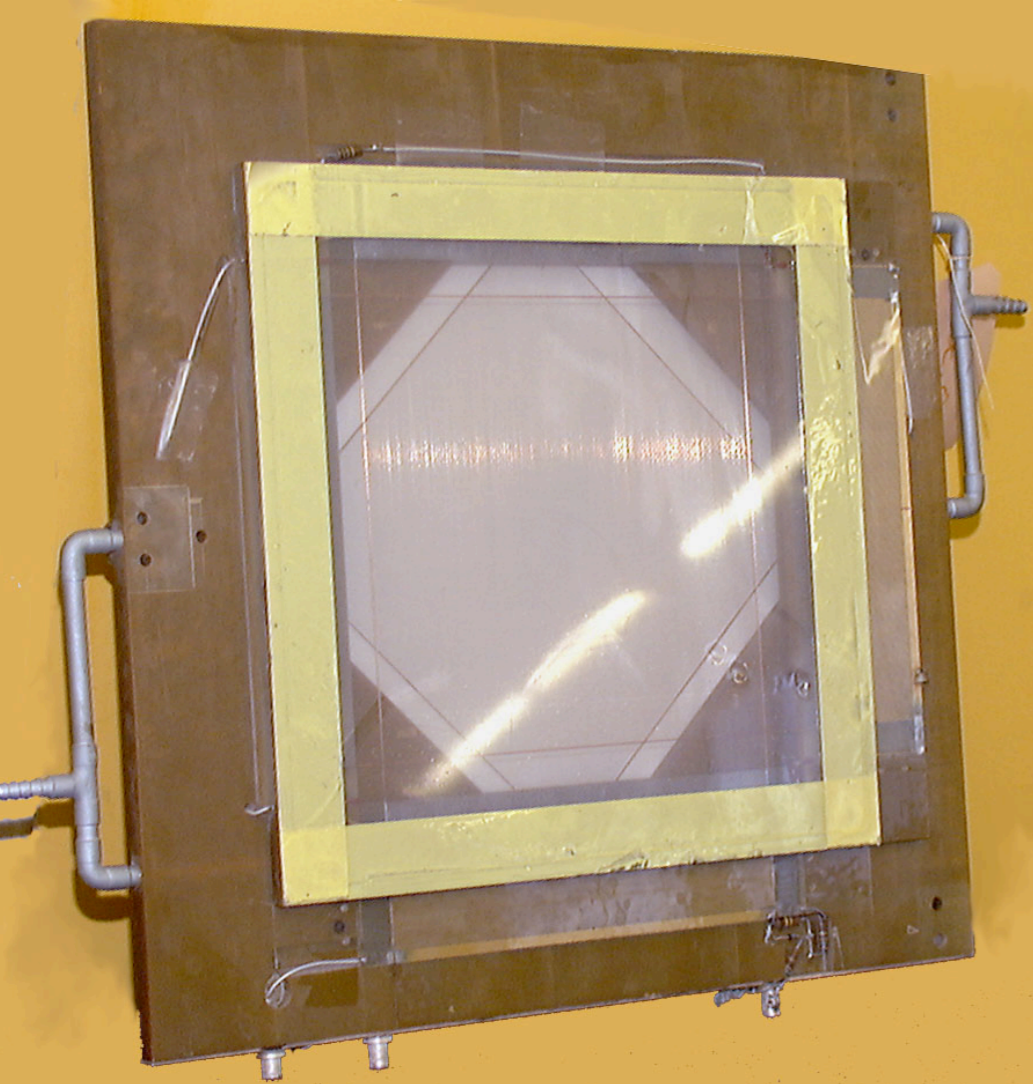
光電効果  $\propto Z^{4\sim 5}$

コンプトン散乱  $\propto Z$

制動放射  $\propto Z^2$

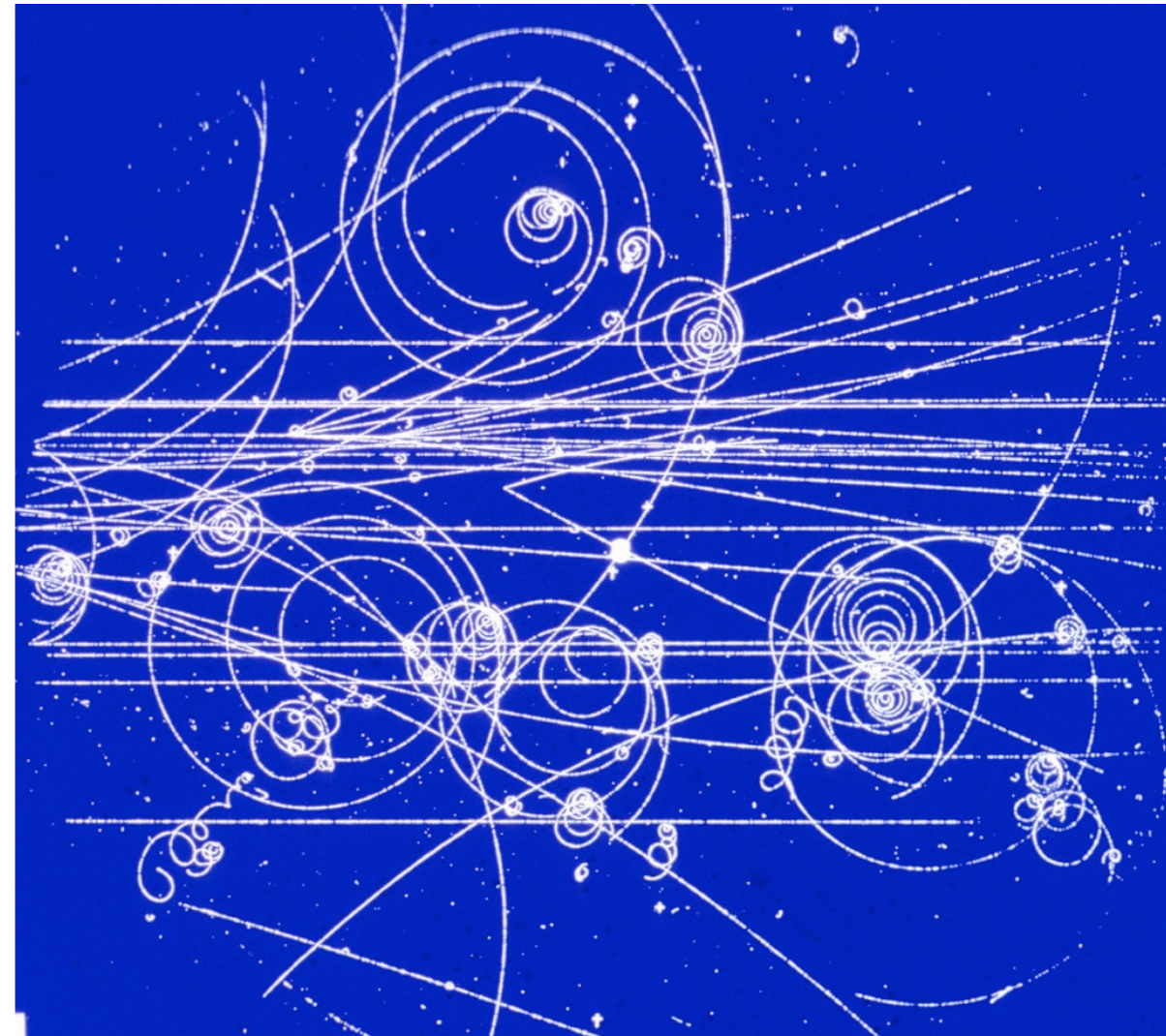
# ワイヤーチェンバー MWPC

Multi-wire proportional chamber



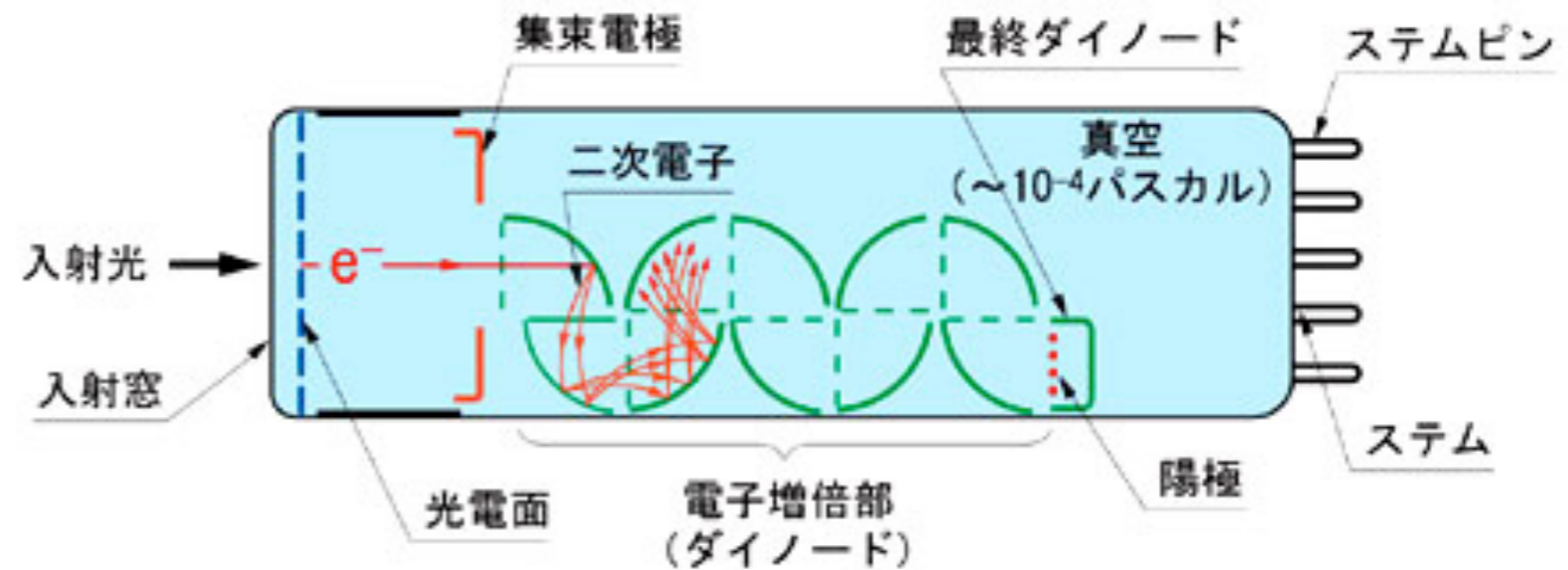
# 泡箱

Bubble chamber





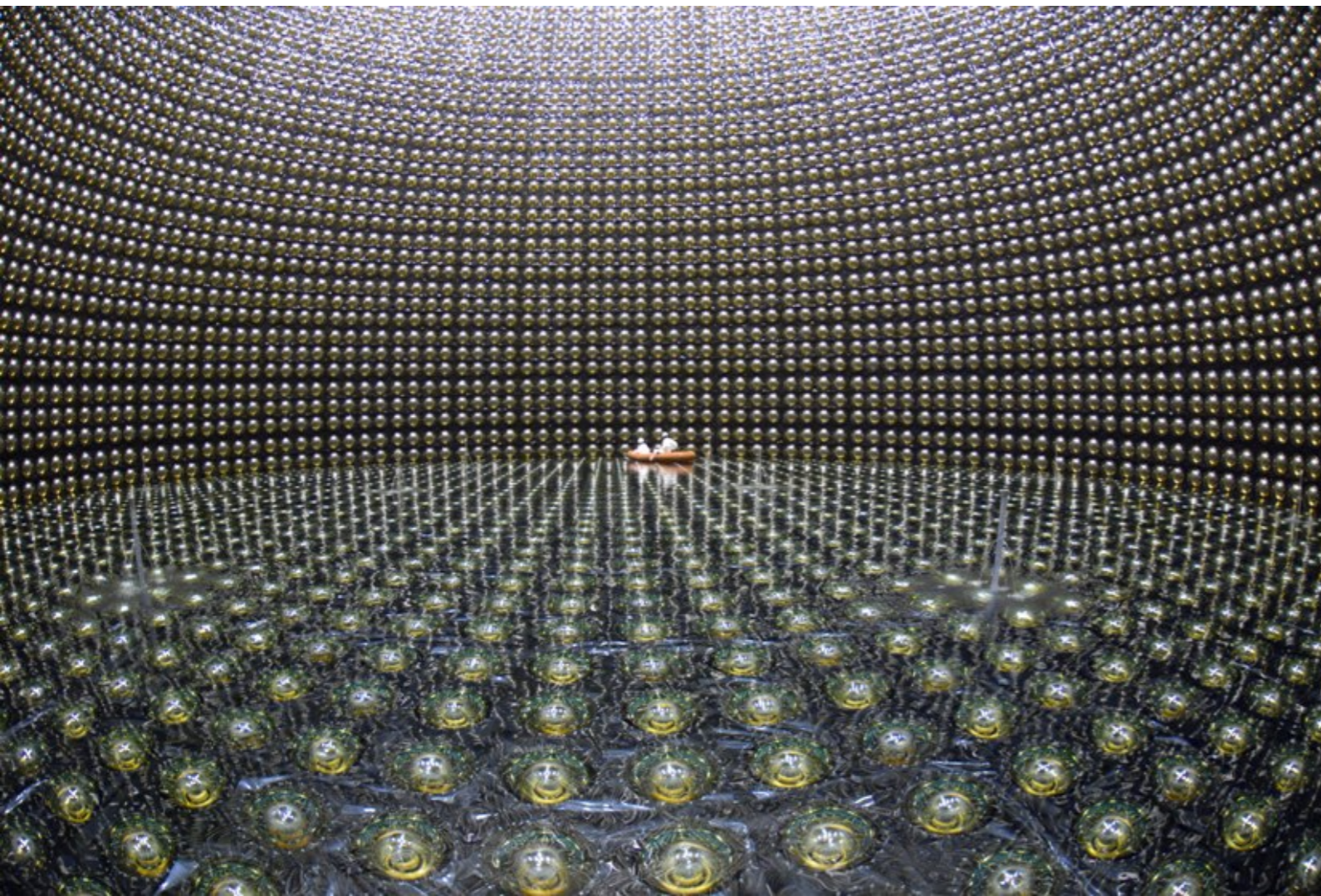
# 光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



光  $\Rightarrow$  光電効果  $\Rightarrow$  電子増幅  
 $\Rightarrow$  電流

シンチレータとの組み合わせ  
Scintillator

放射線  $\Rightarrow$  分子の励起  $\Rightarrow$  蛍光  
光  $\Rightarrow$  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, ZnS, BaF<sub>2</sub>,  
BGO, GSO など (γ線、X線)  
Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>    Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>

有機 : プラスチックシンチレータ (電子線)  
例 : PPO, POPOP / ポリスチレン (荷電粒子)

: 液体シンチレータ

例 : p-テルフェニル / トルエン



ゲルマニウム検出器 (Ge detector)

# 半導体検出器 (Semiconductor detectors)



例 : Si(Li) 検出器、Ge 検出器 (高エネルギー分解能) (γ線)

放射線 ⇒ 電離 ⇒ 電子正孔対 ⇒ 電荷測定

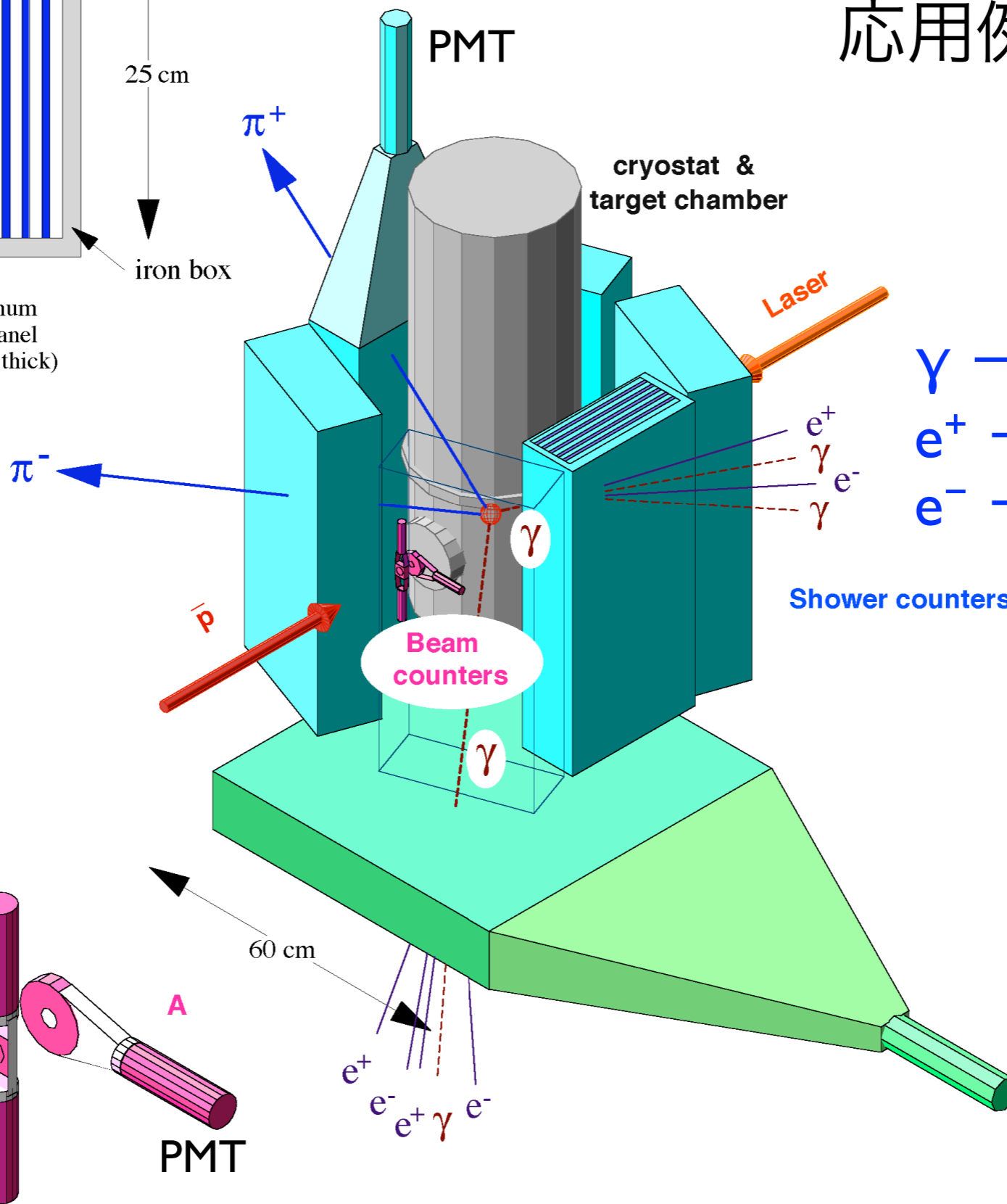
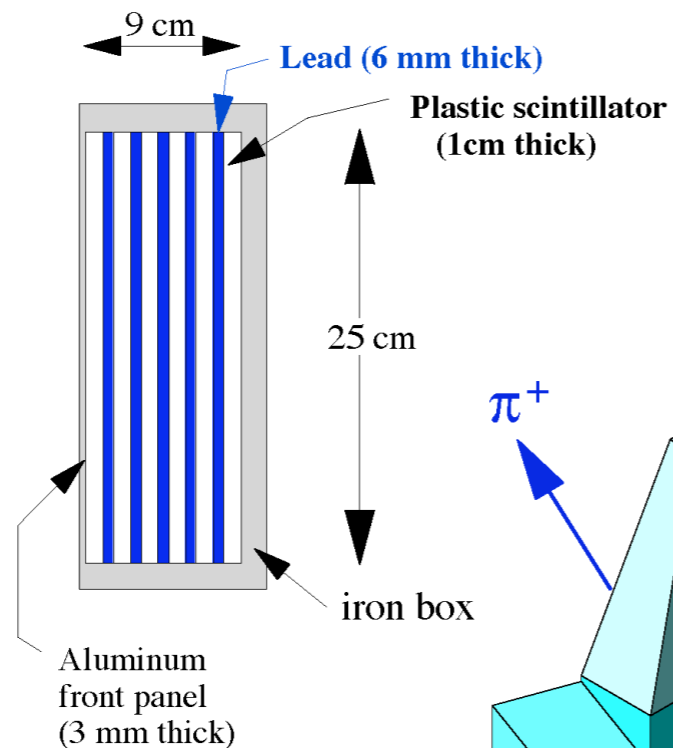
電気パルス : タイミング : 粒子透過時刻

: パルス高 : エネルギー

# シンチレーションカウンター

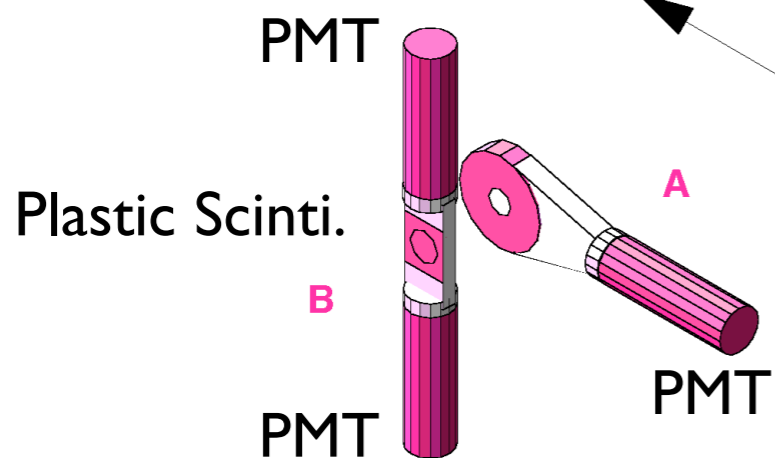
## 応用例

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



# 線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリック線量計

熱ルミネッセンス線量計

ガラス線量計



光刺激ルミネッセンス線量計

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

ポケット線量計：電離箱、半導体検出器

フィルムバッジ：銀塩写真フィルム  $AgBr$

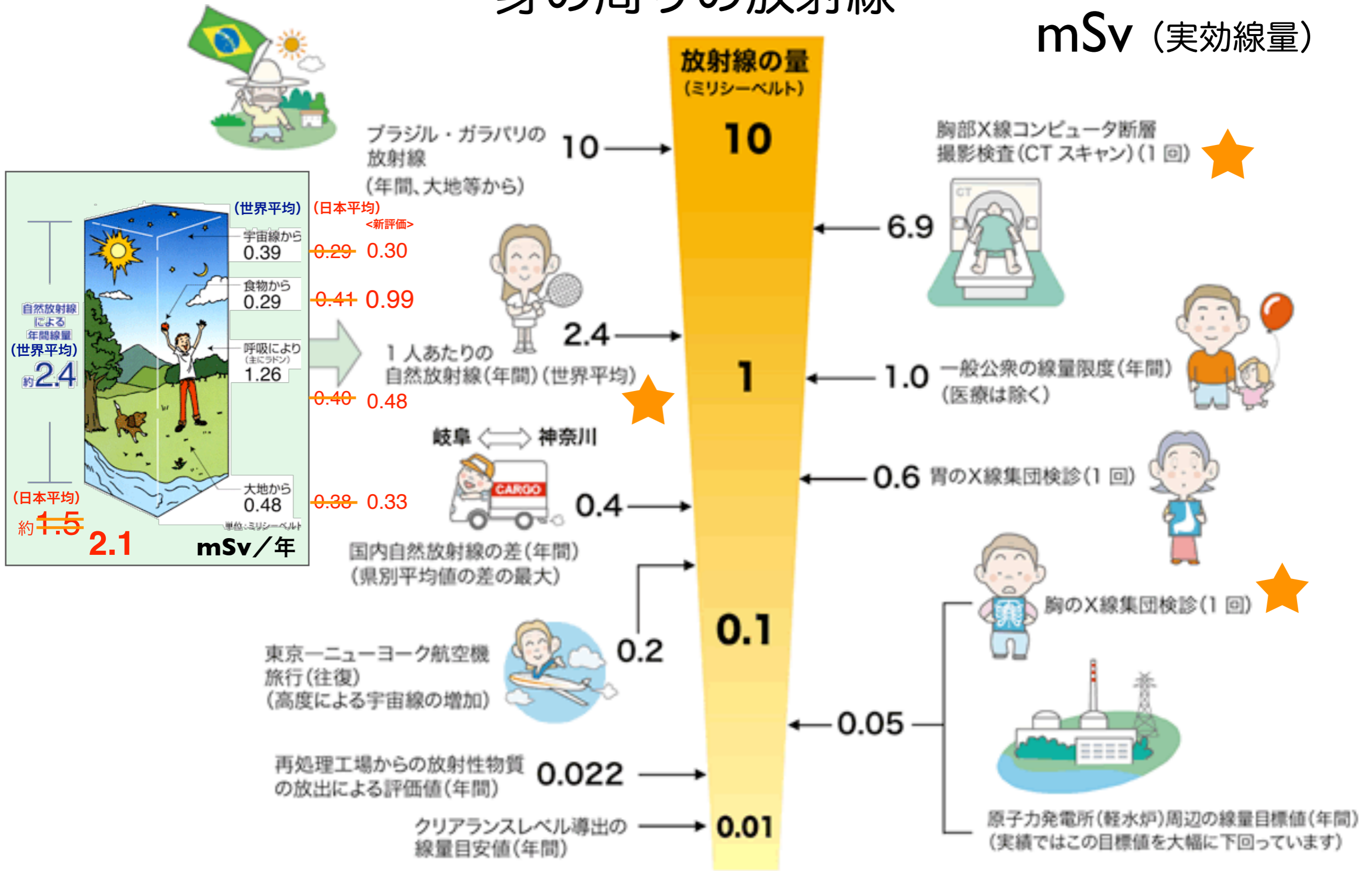


# 放射線の生物学的影響

## 疫学的調査

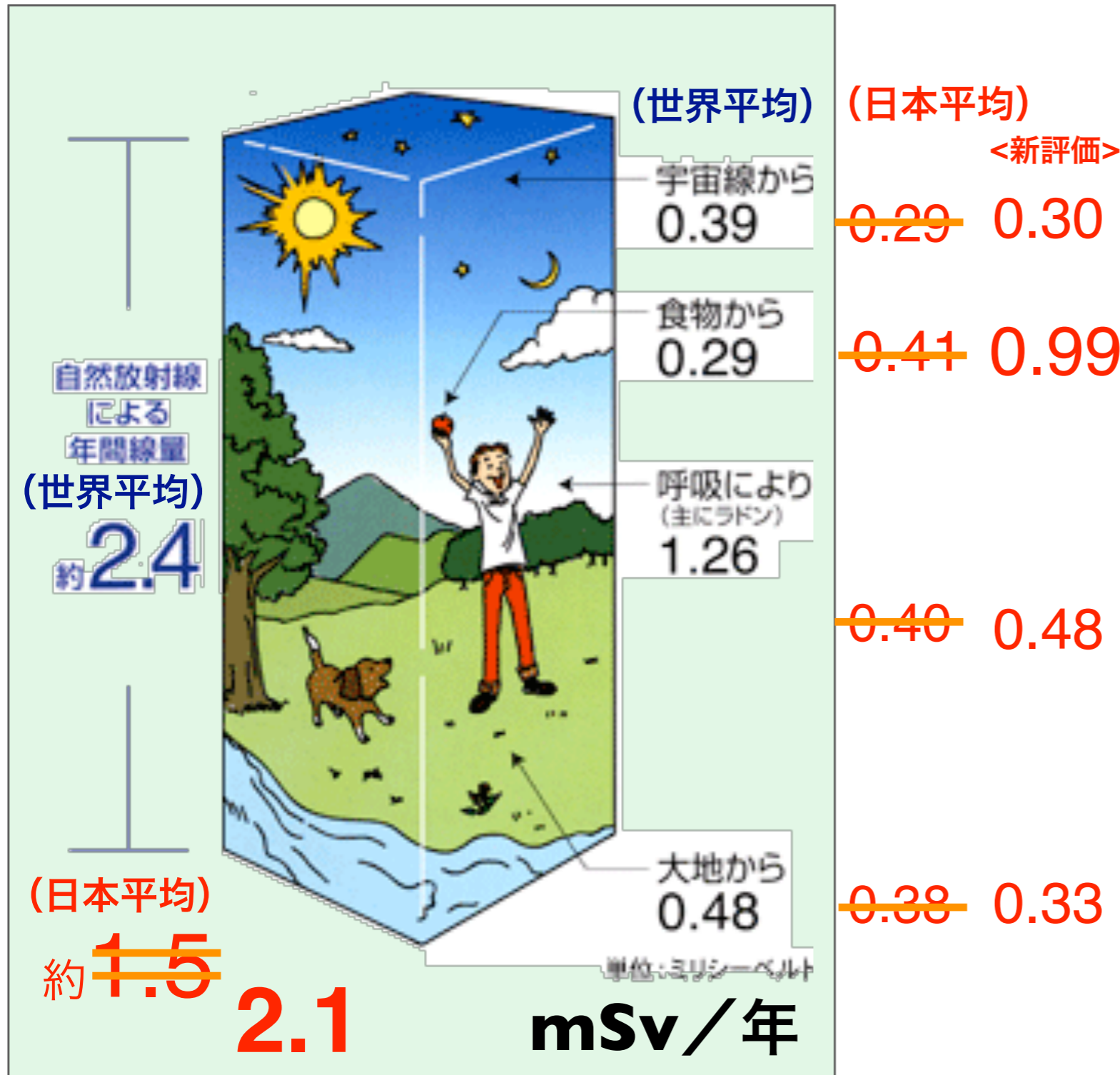
# 身の周りの放射線

mSv (実効線量)

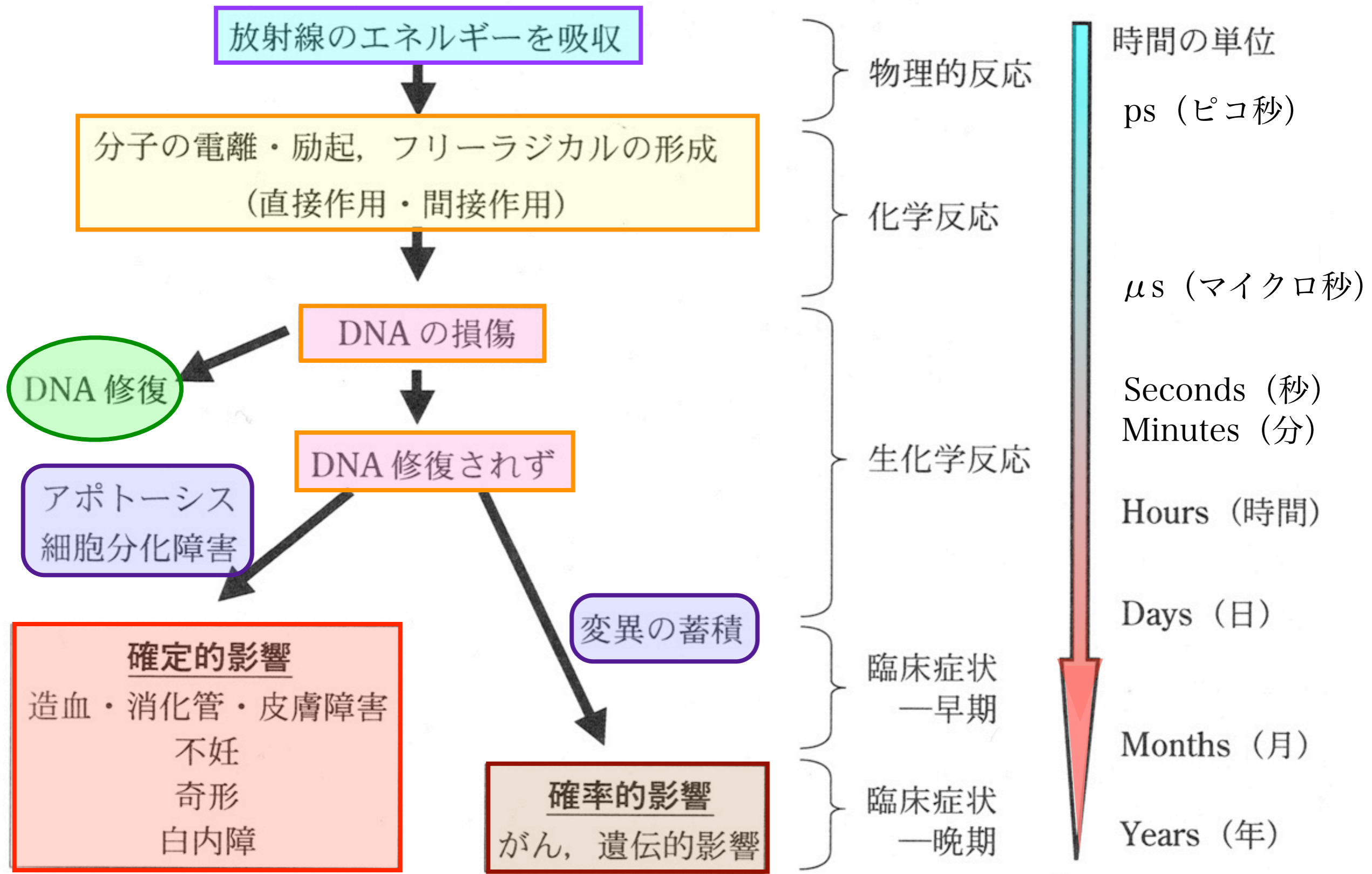


# 身の周りの放射線

mSv (実効線量)



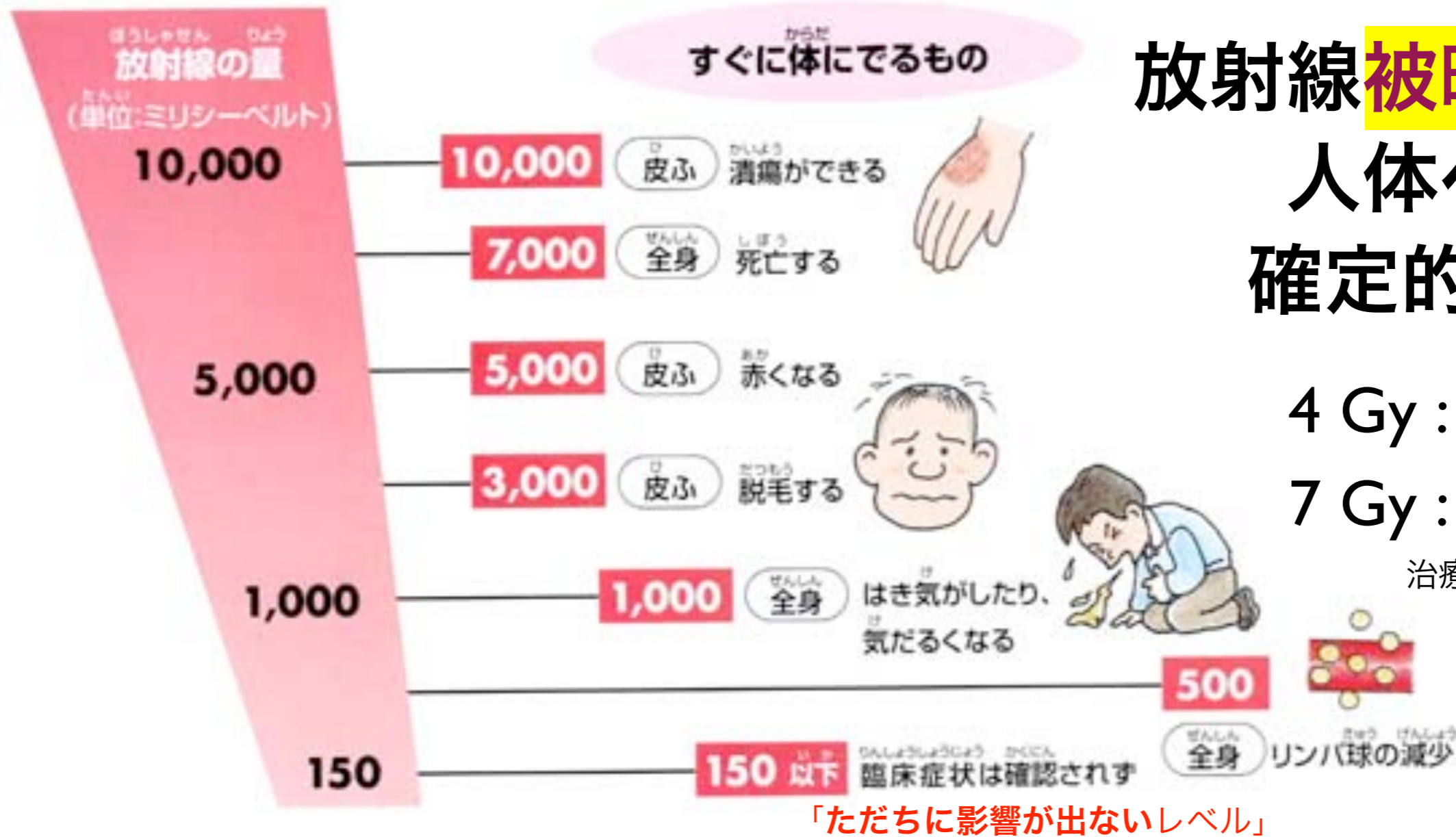
日本人の食す魚介類に  $^{210}\text{Po}$  や  $^{210}\text{Pb}$  が多く含まれ、それによる $\alpha$ 線内部被曝の評価値を従来より上方修正。



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。

## 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

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。**

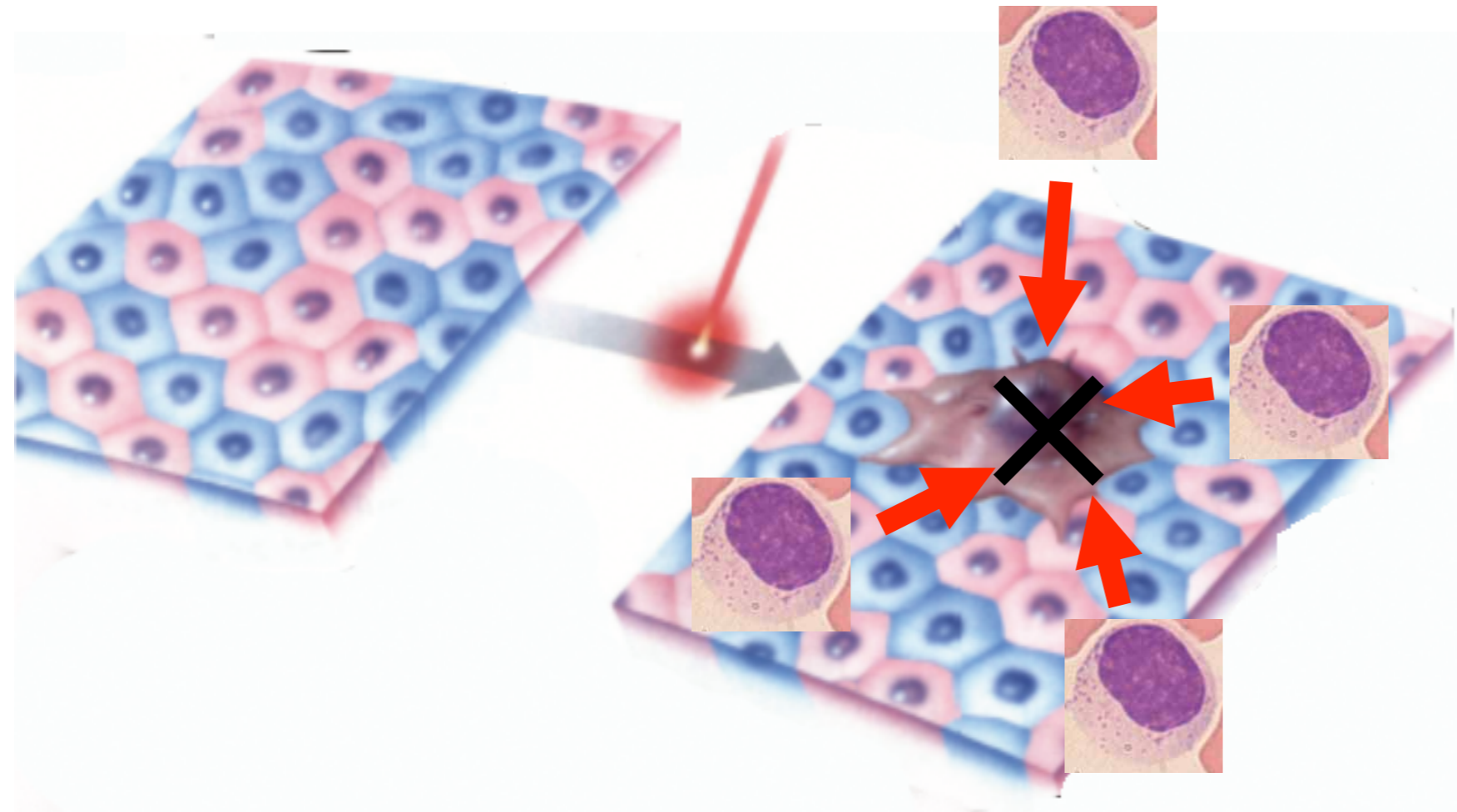
しかしそもそも、放射線を浴びなくても確率はゼロではない。

(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。

# がん、とは？

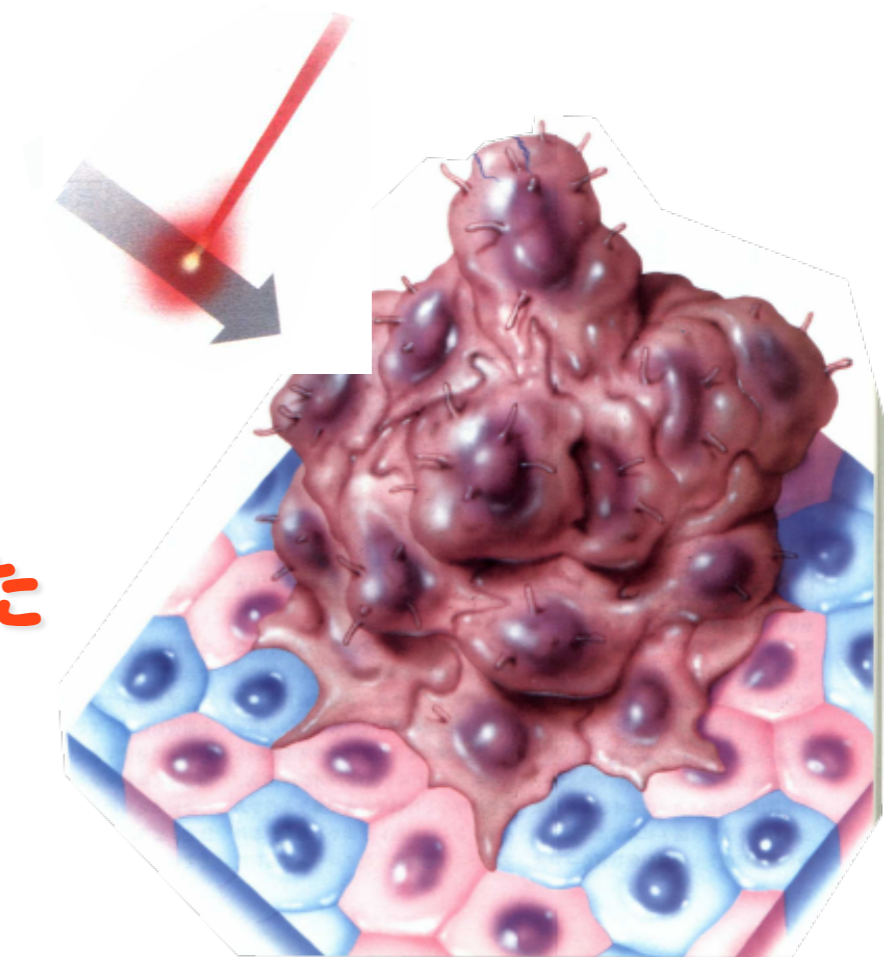
がん細胞は毎日5000個もできている！！



リンパ球が、できたてのがん細胞を殺す

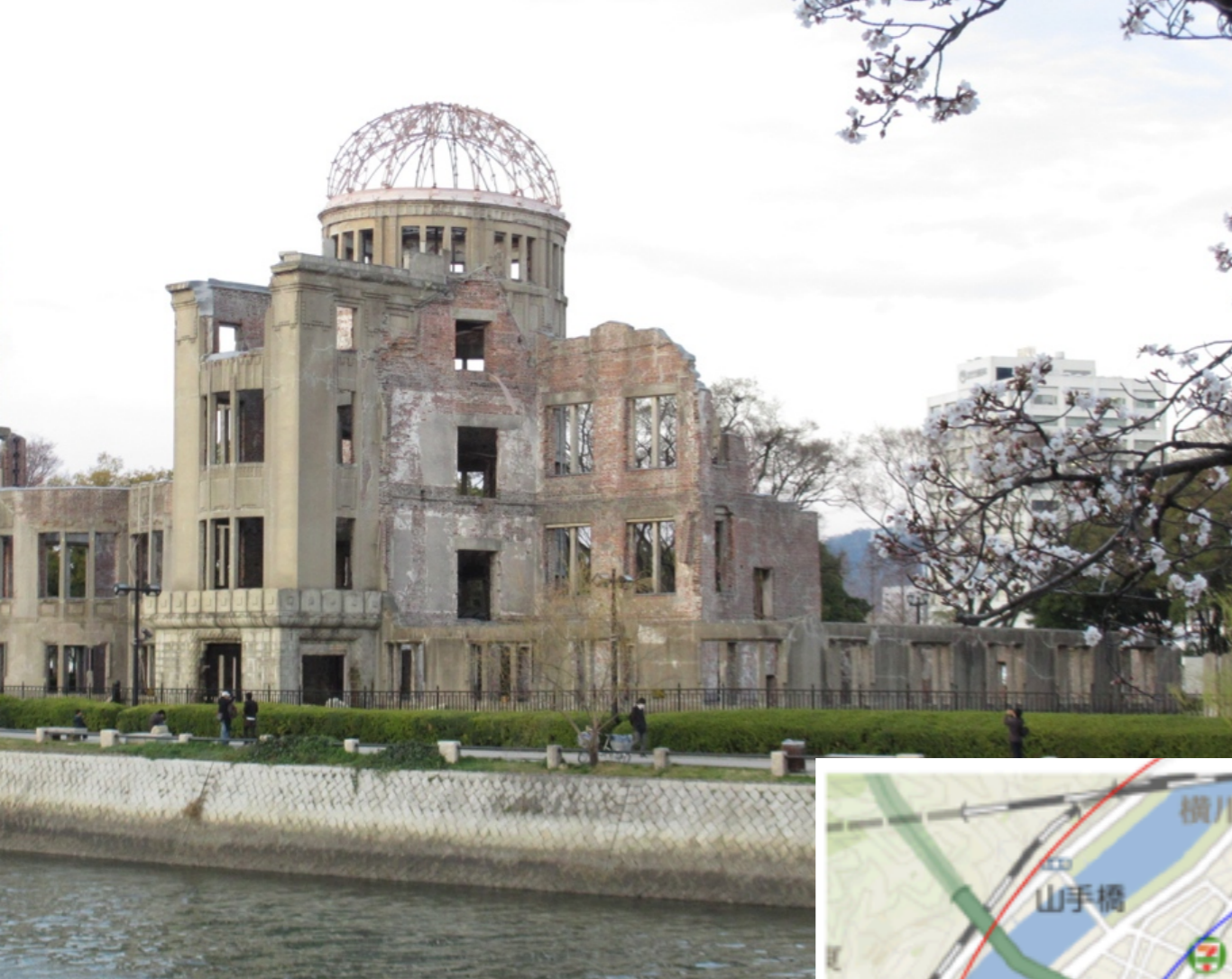
免疫の攻撃をかいくぐった  
ものが「がん」

がん、とは一種の「老化」



# 広島 原爆ドーム





# 広島 原爆ドーム

γ線による推定被曝線量

中性子線による

(mGy)



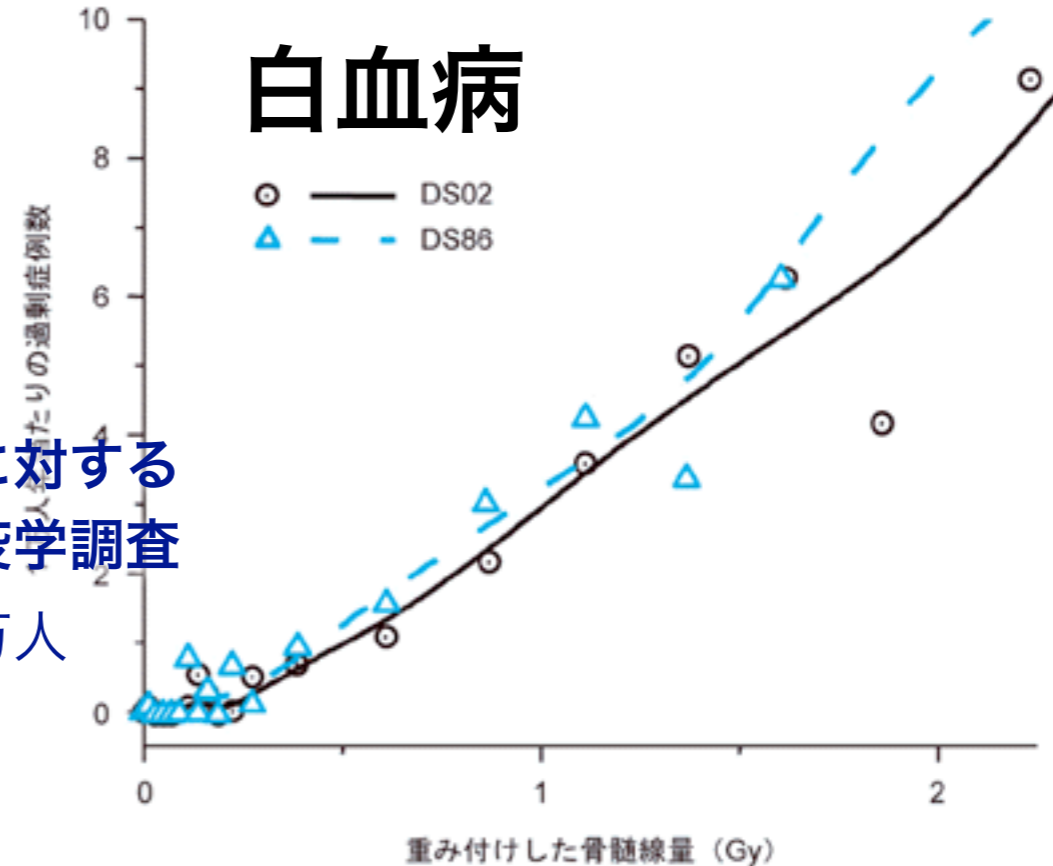
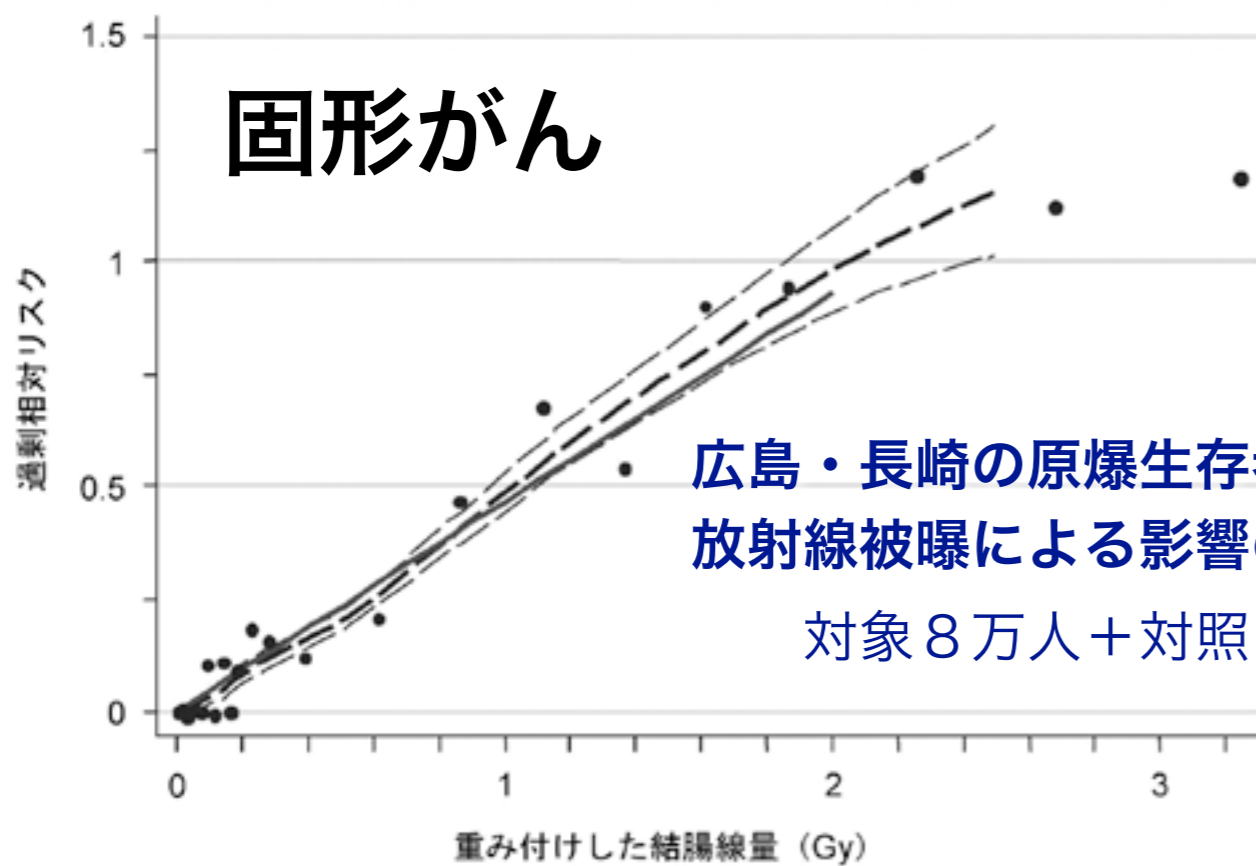


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被曝時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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。被曝時年齢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%

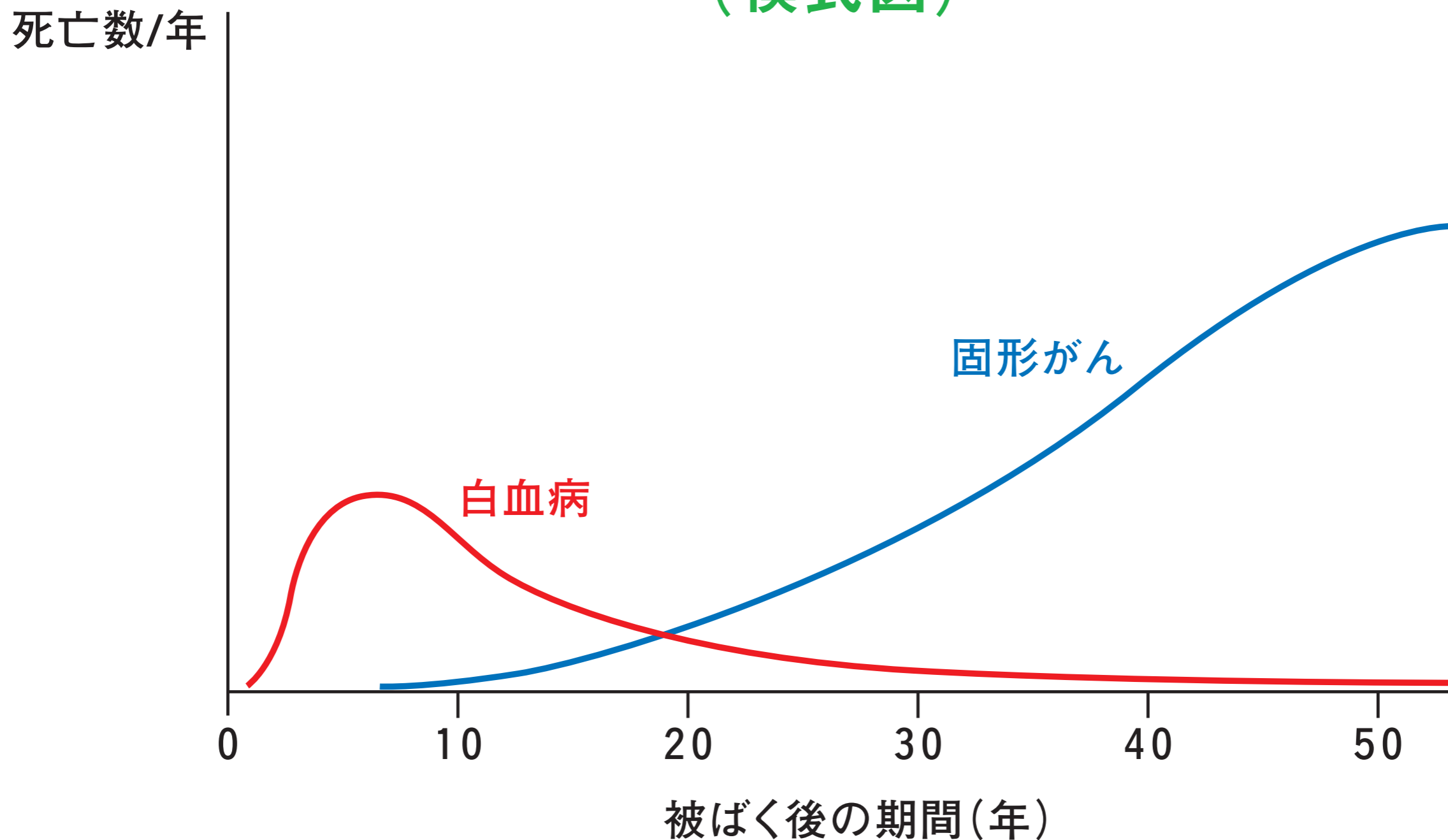
表. LSS集団における白血病による死亡の観察数と推定過剰数、1950-2000年

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%

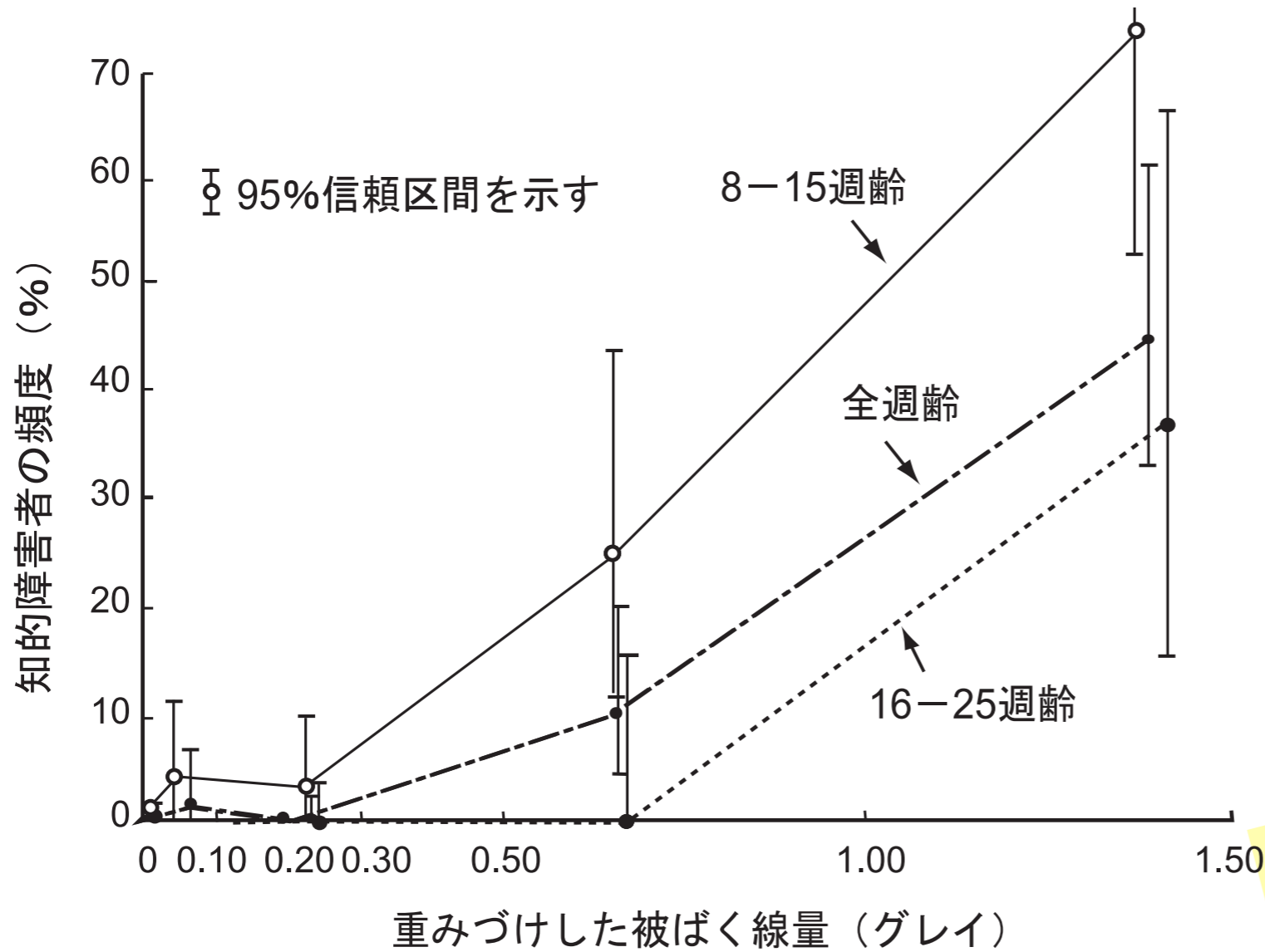
(財) 放射線影響研究所 データ

**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。**

# 原爆放射線に関連する死亡数の時間的経過 (模式図)



# 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」

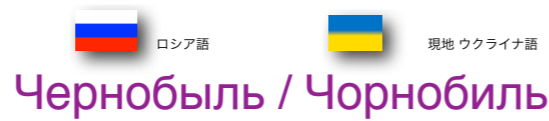
チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な堕胎が数万人以上だったともいわれる。(風評・過度の心配による犠牲)

## 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)

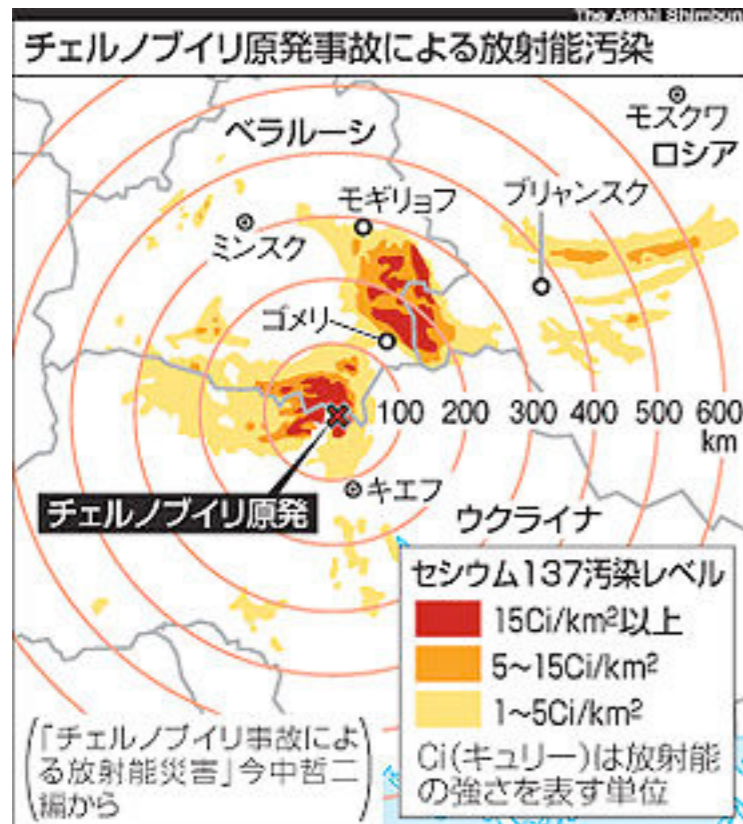
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

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

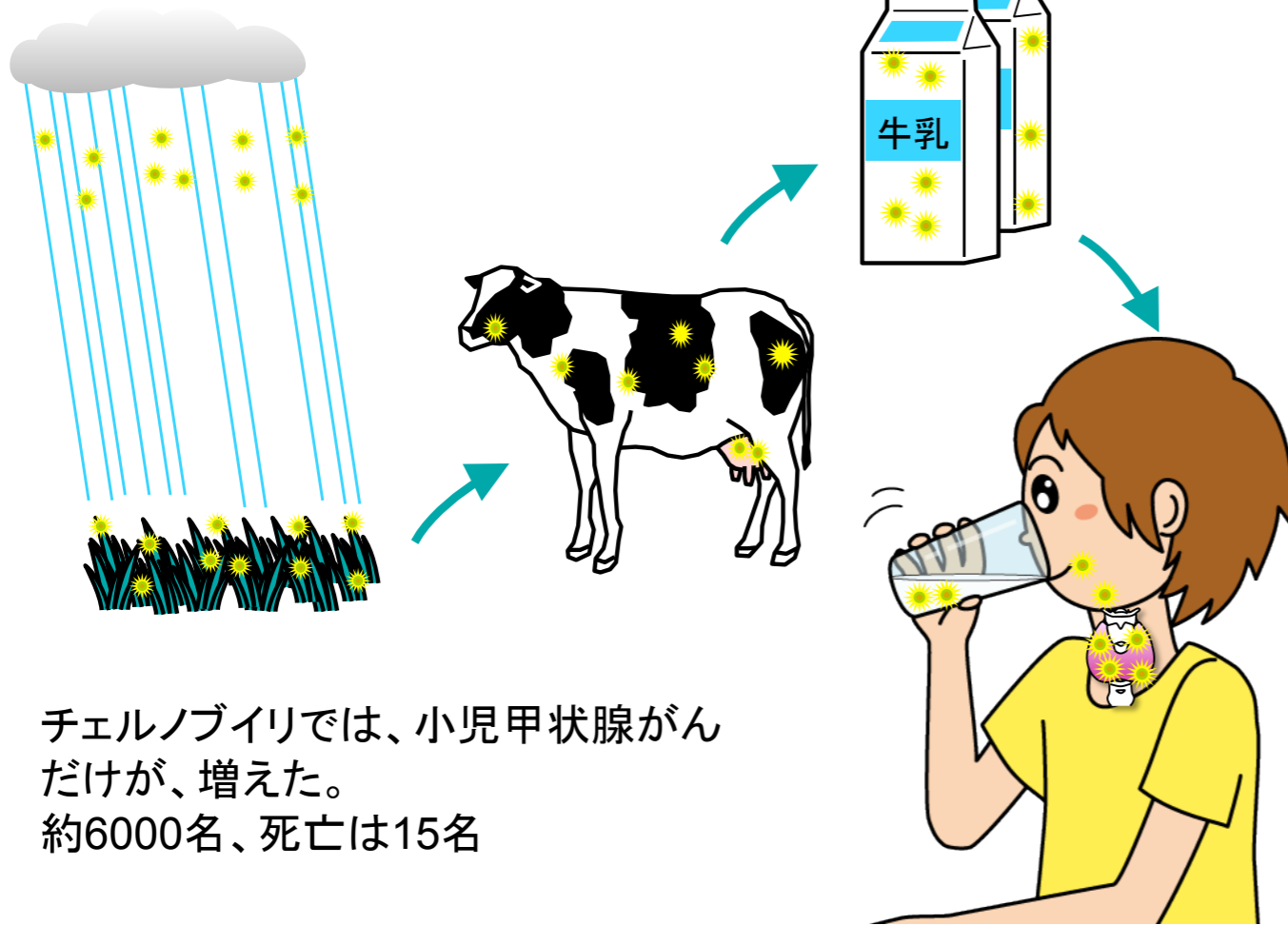


ロシア語  
Чернобыль / Чорнобиль



## 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  
こどもの甲状腺がんの増加のみ。  
(地産地消の牛乳による摂取が問題)

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

甲状腺平均被曝量 **2 Gy**

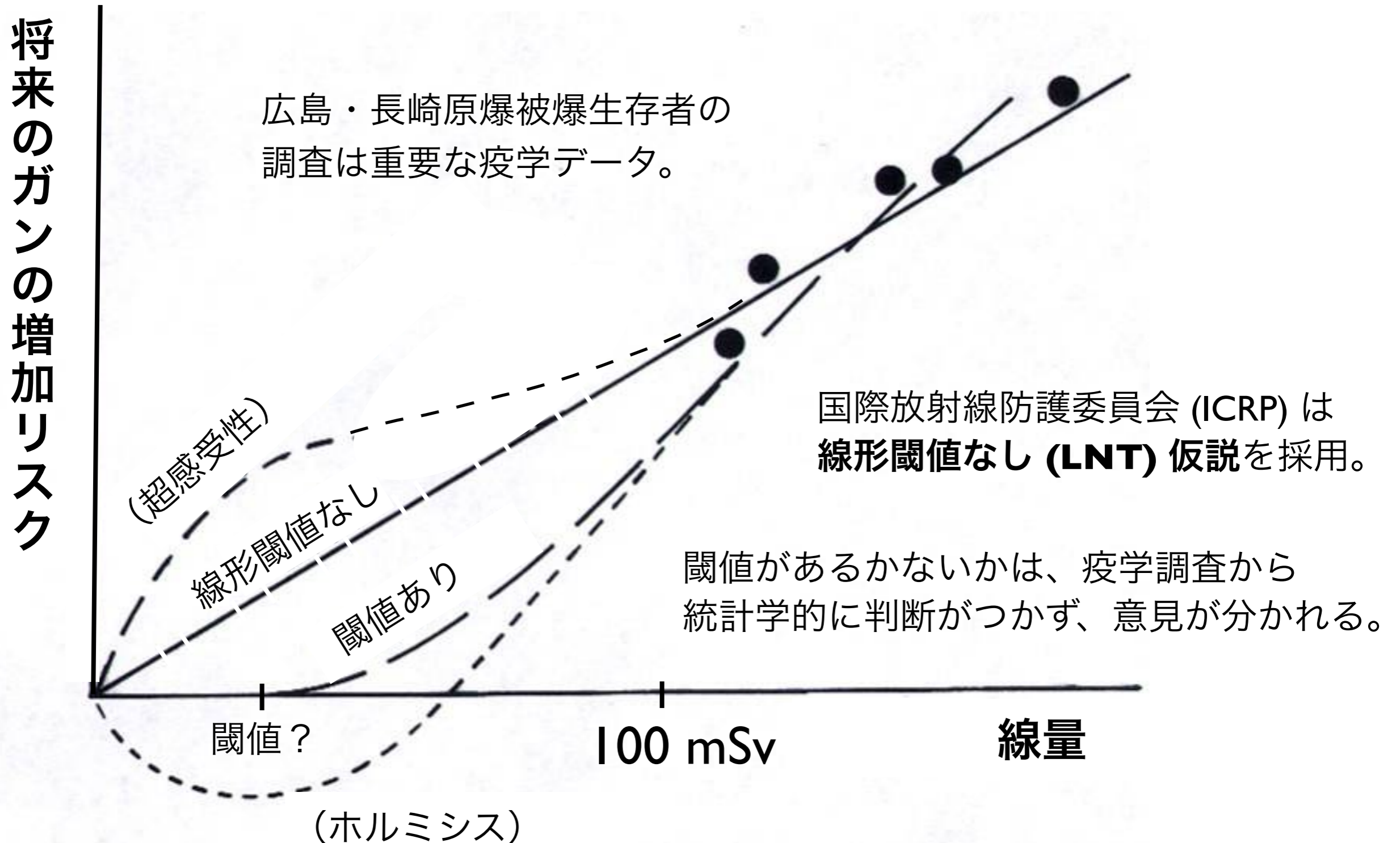
= **2000 mSv !!** (10 Gy 以上の被曝も!)  
と、ずっと大きいストレスによる失調

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

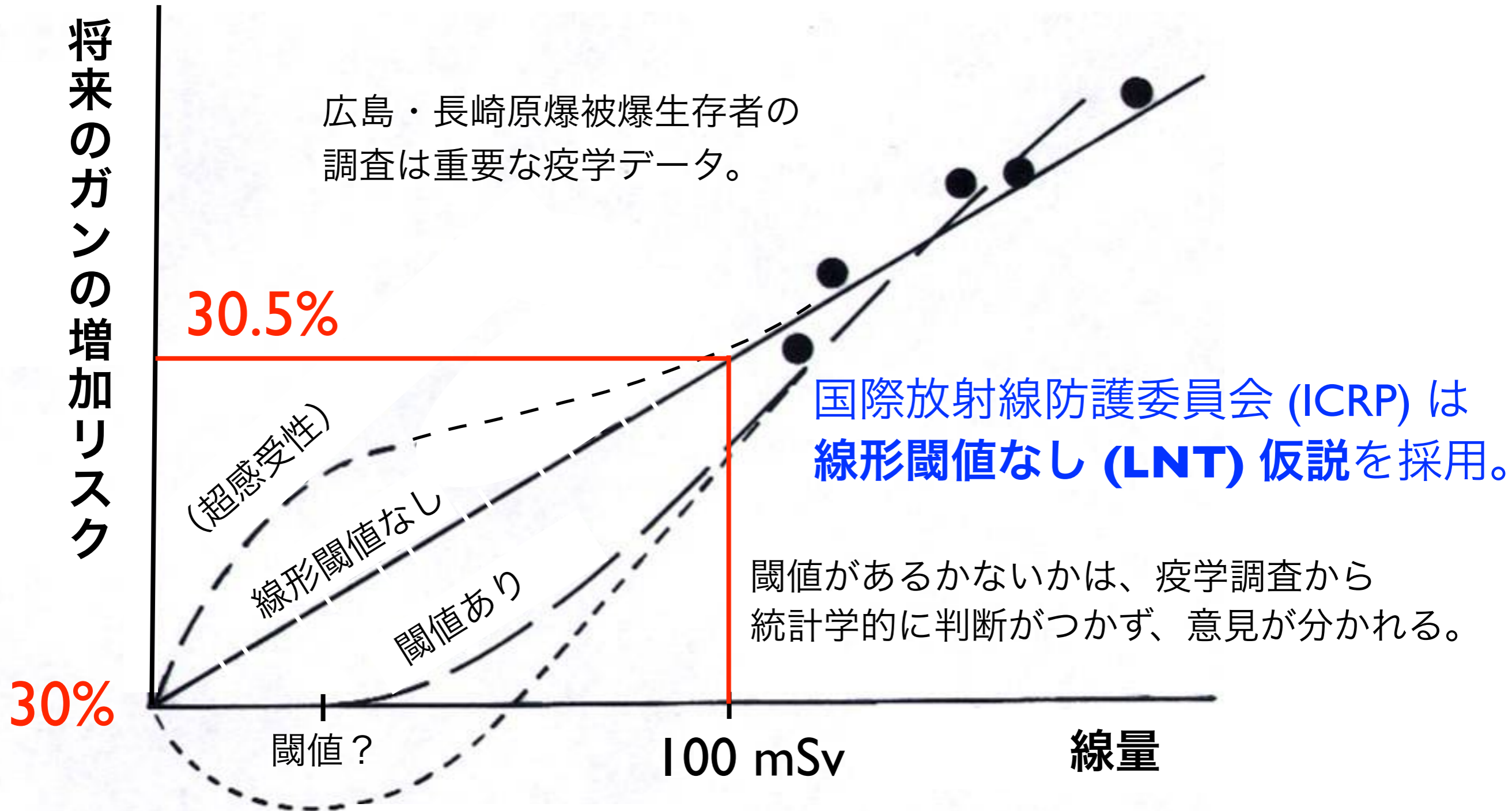
震災・事故による喪失感は共通

# 放射線のリスク評価と リスクコミュニケーション

# 低線量におけるリスク評価



# 低線量におけるリスク評価



(ホルミシス)

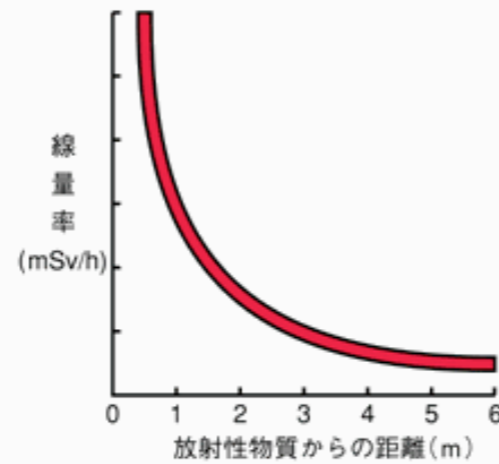
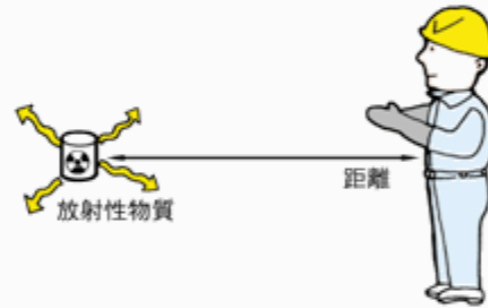
慢性被曝が急性被曝に比べて効果が何分の1になるかの係数

線量・線量率効果係数 **DDREF = 2**

# 放射線防護

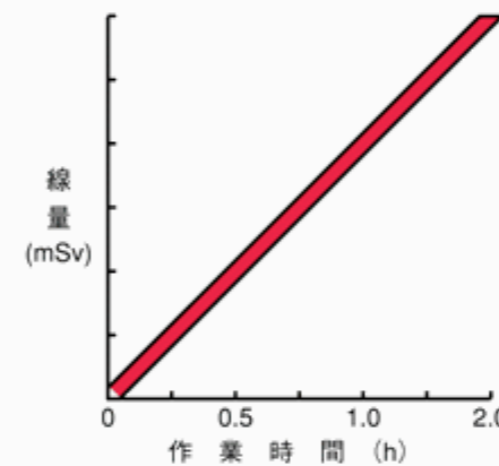
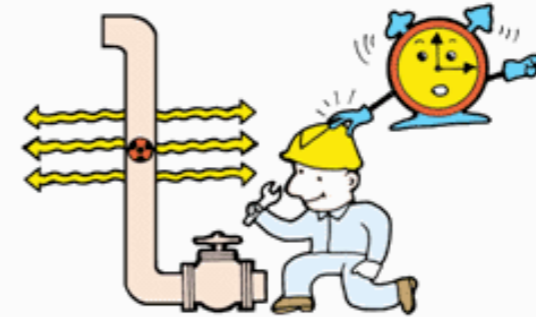
## ● 距離による防護

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



## ● 時間による防護

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



## ● 遮へいによる防護

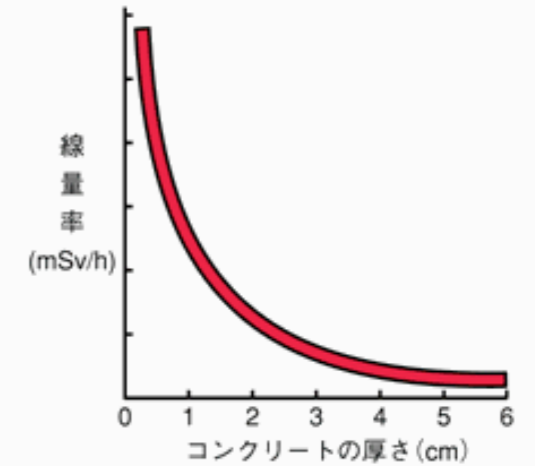
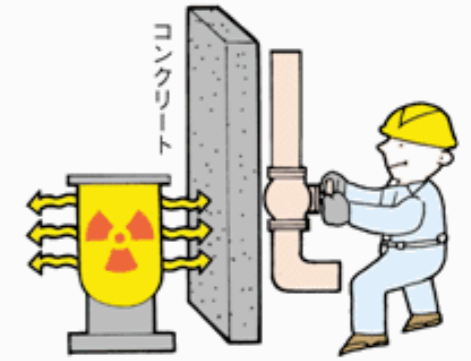


図1 遮へい3原則の図

[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)**

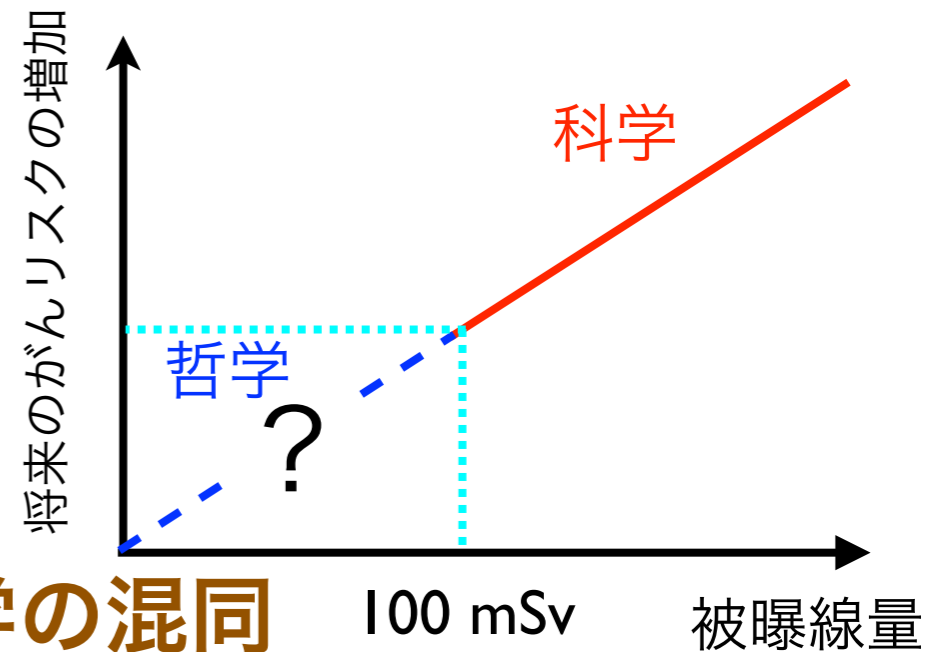
# 放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

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

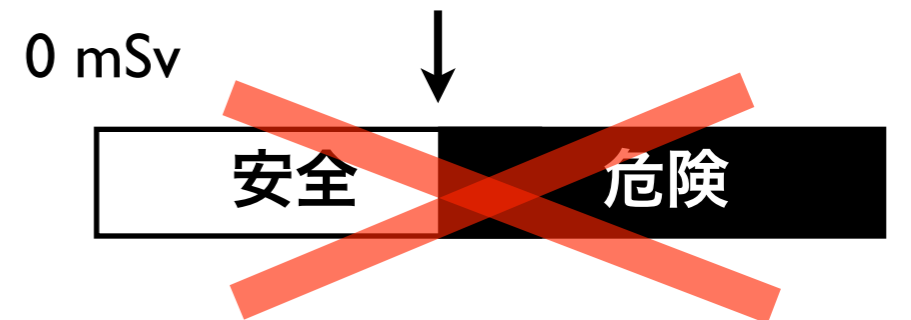


科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

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。

# 放射線の影響に対して異なった意見があるのはなぜか

福島住民のリスクは？

住み続けるリスク

放射線の影響？

日常サービスの低下／欠如

避難生活でのリスク

慣れない土地での生活ストレス

生業・収入の損失

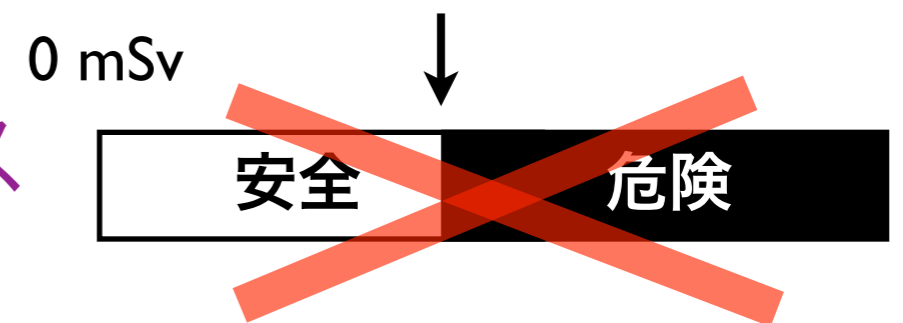
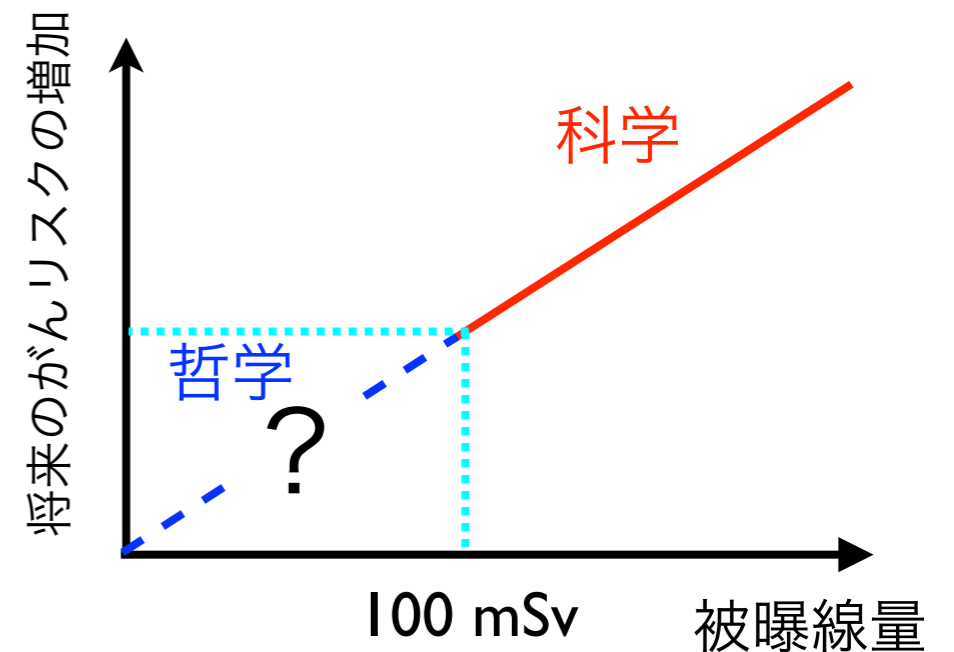
年齢、家族構成、職業

リスクのトレードオフは

人それぞれに違う。

どう判断すべきか、自分で考えるしかない。

原発作業員のリスクは？



リスクは相対的

基準値  
(社会が決める)

放射線のリスク



# 科学的「確率」をどう理解するか。

がんの影響は「確率的」に現れる

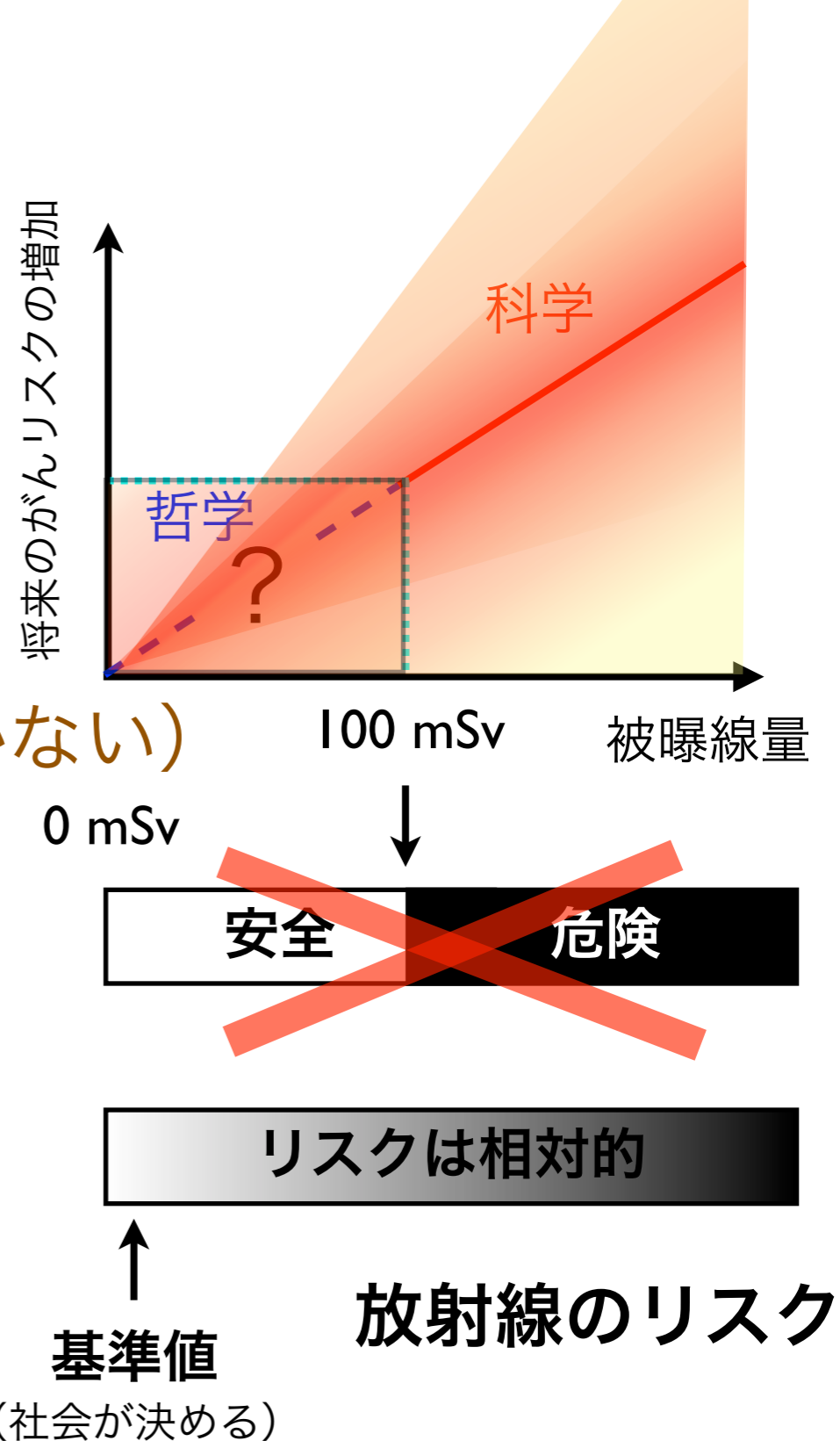
個別の事象との因果関係は分からない

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

その確率さえ不確かさを伴う

トランスサイエンス

科学に問うことはできるが、科学(だけ)では答えることのできない問題群の領域



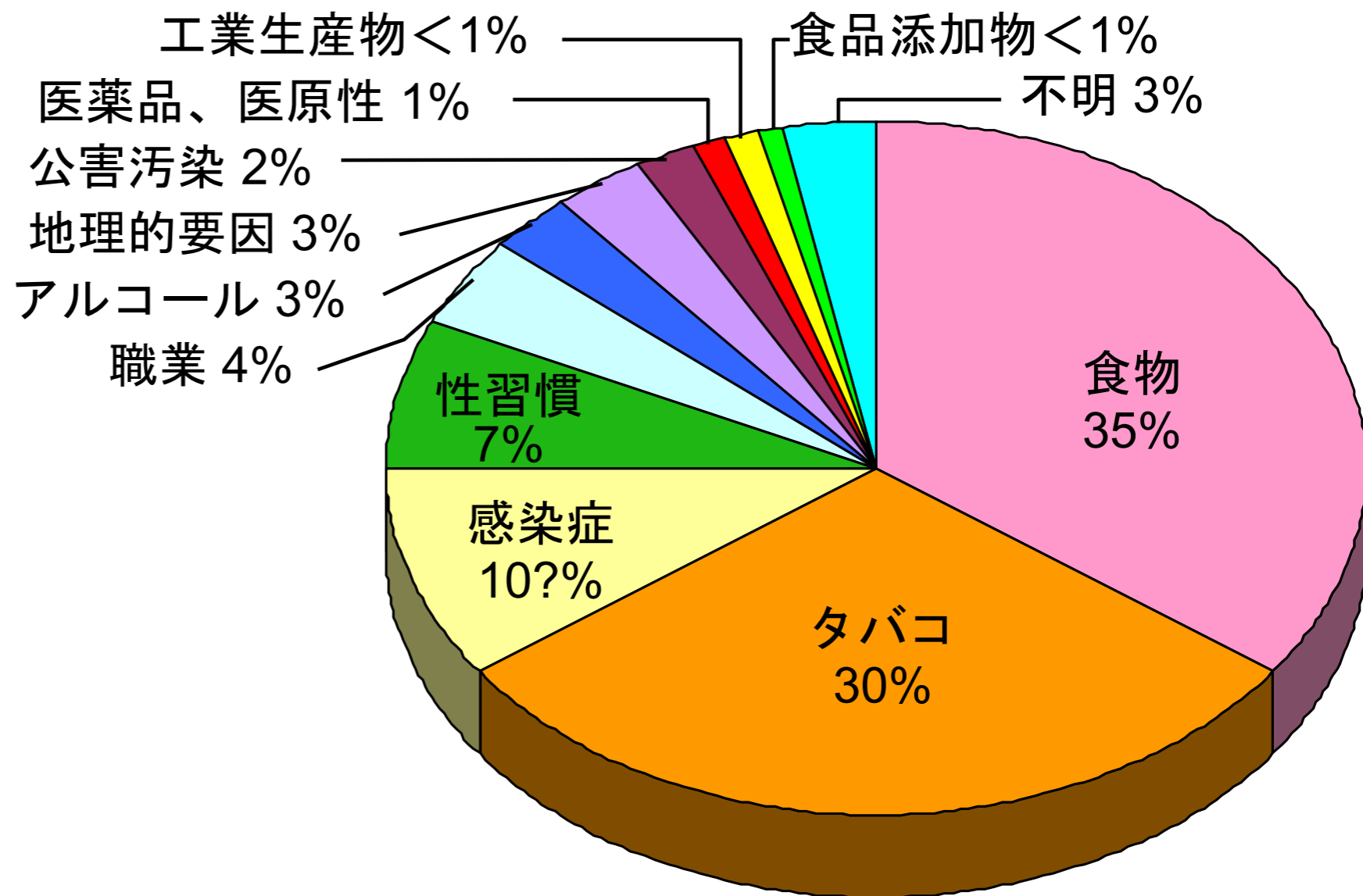
## 放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

受動喫煙の女性	1.02~1.03倍
野菜不足	1.06倍
100~200ミリシーベルトを浴びる	1.08倍
塩分の取りすぎ	1.11~1.15倍
200~500ミリシーベルトを浴びる	1.16倍
運動不足	1.15~1.19倍
肥満	1.22倍
1000~2000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
2000ミリシーベルト以上浴びる	
喫煙	
毎日3合以上の飲酒	

※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。

(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。)

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

「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**



# 震災がれき処理問題

東京大学 × 博報堂 × 時事通信社

# 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。**

「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願っています。**

大反対です！今回の瓦礫受け入れは、賢明とはとても思えません！

被災地の隣、**茨城県からの頼みの綱は、九州なのです。**こちらでは今、近隣都県の食べ物ばかりです。子供に食べさせる気にはとてもなりません。**九州の物を高くても、手間をかけてでも取り寄せている現状です。**

この期に及んで、**行政の言う「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)

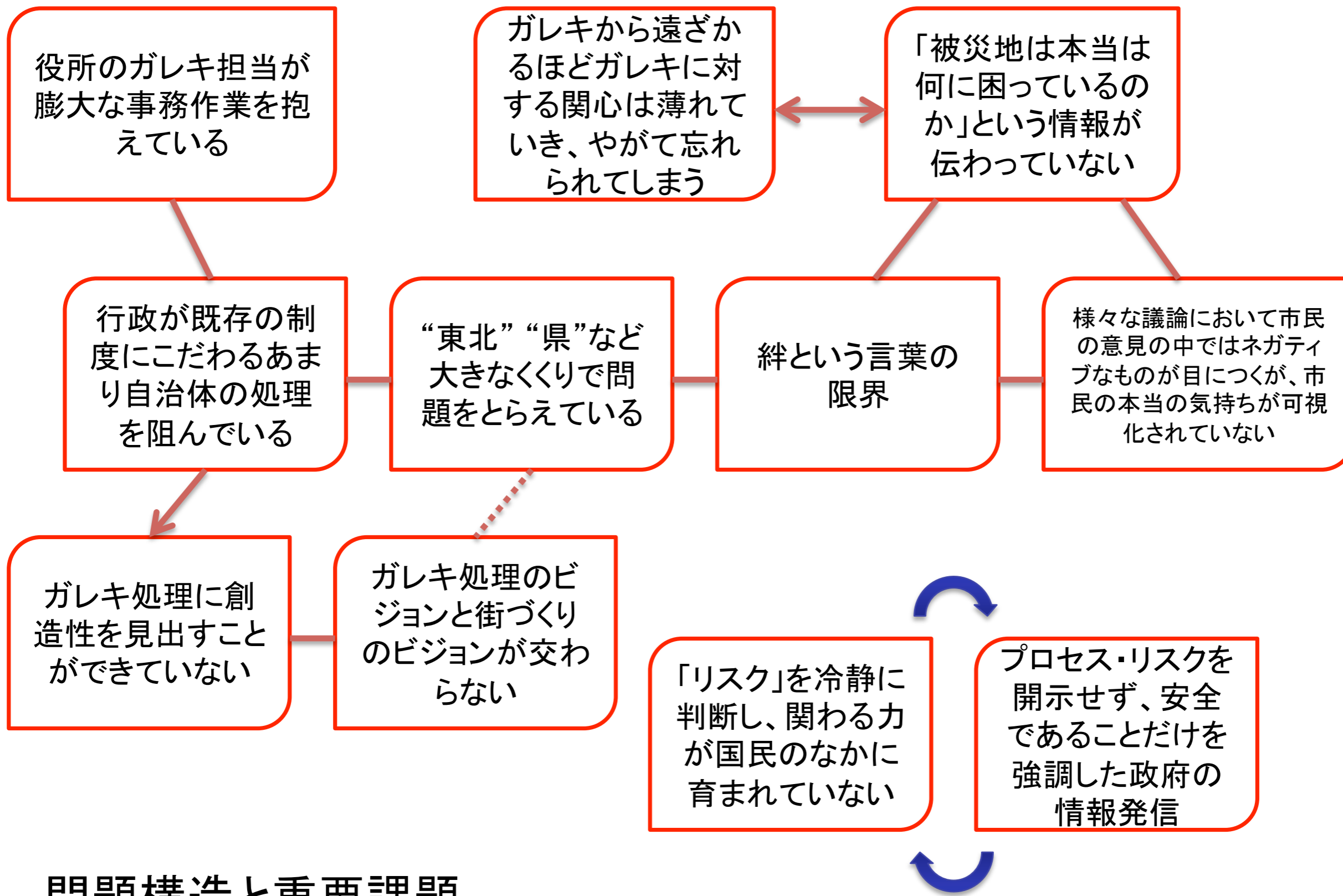
まったく汚染されていない瓦礫などありません。

「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？瓦礫を受け入れた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べきです。

大反対です！今回の瓦礫受け入れは、被災地の隣、福島県内の食べ物ばかりです。放射線レベルを高くても、手間をかけてでも、この期に及んで「安全」を、一般国民の何人が心から信じますか？

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

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のです。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いう思いは、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。**

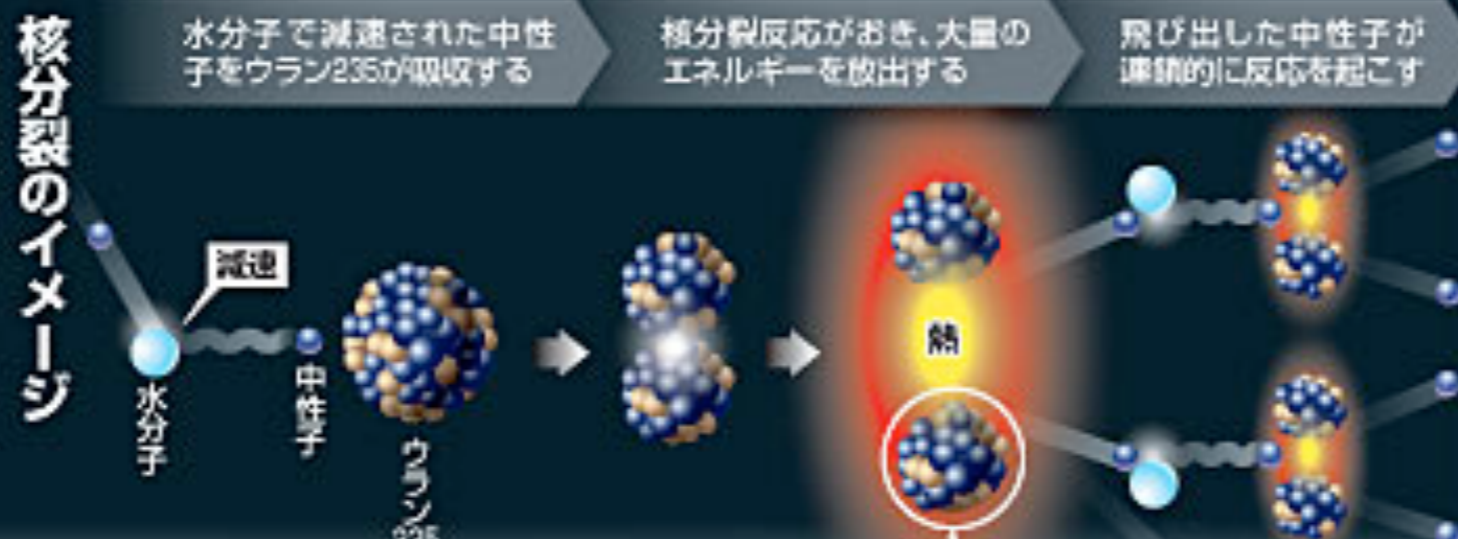
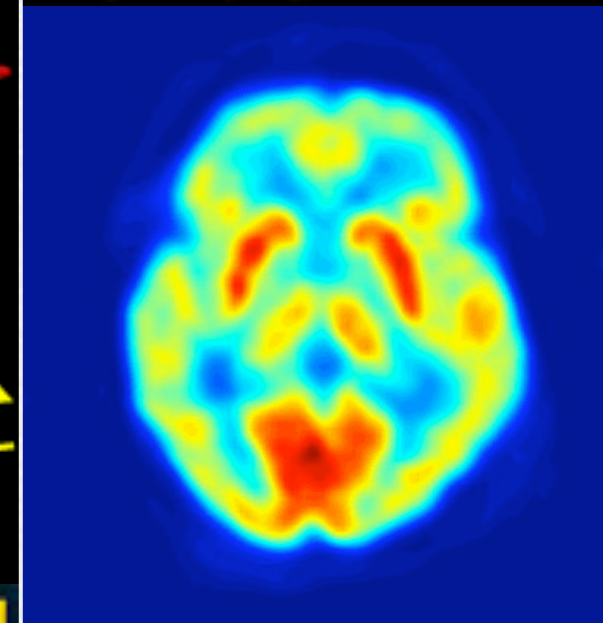
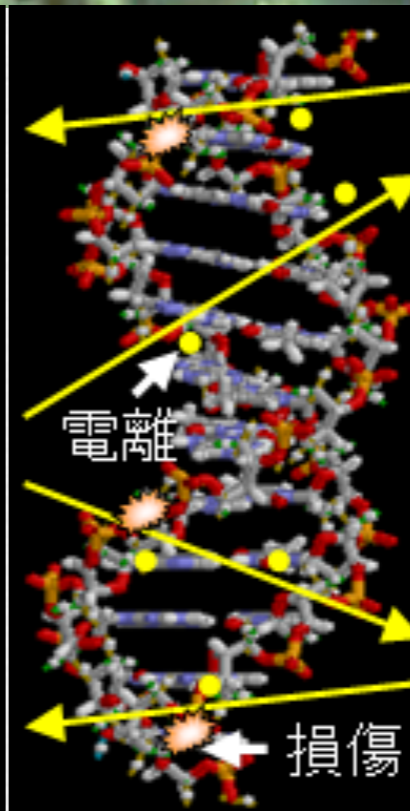
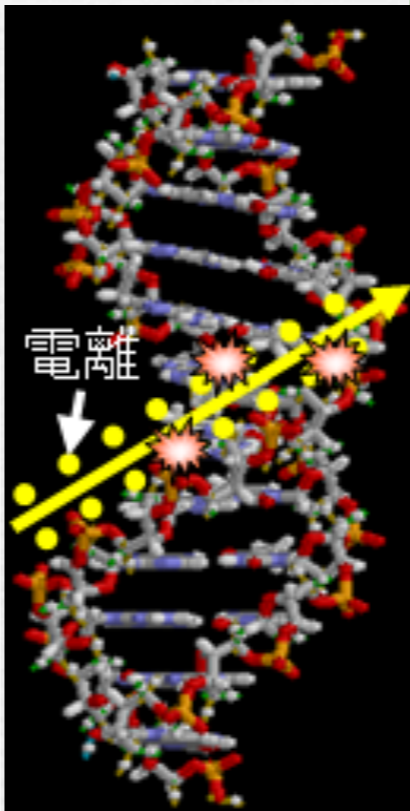
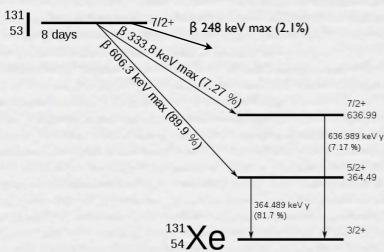
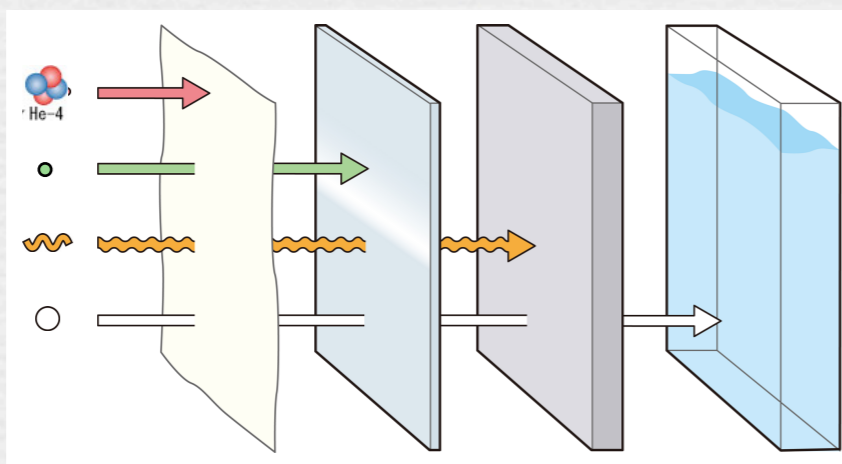
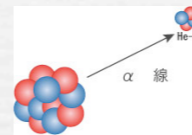
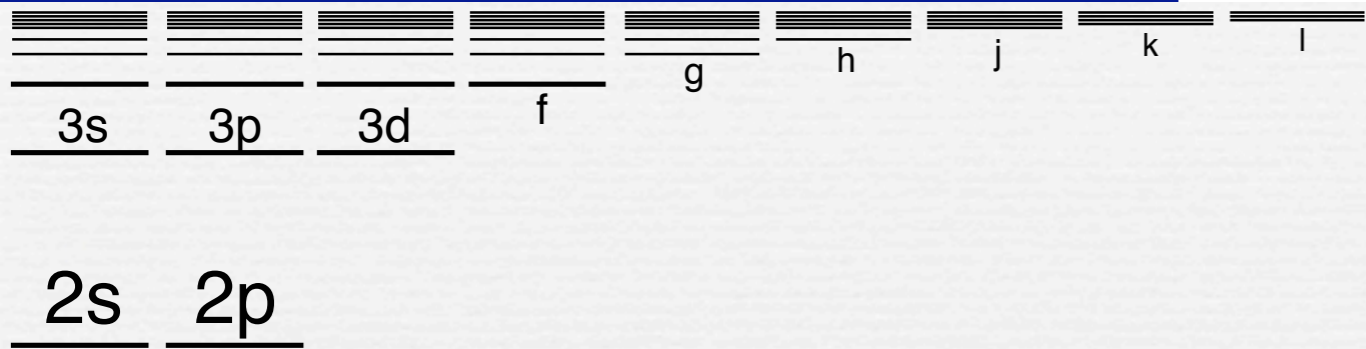
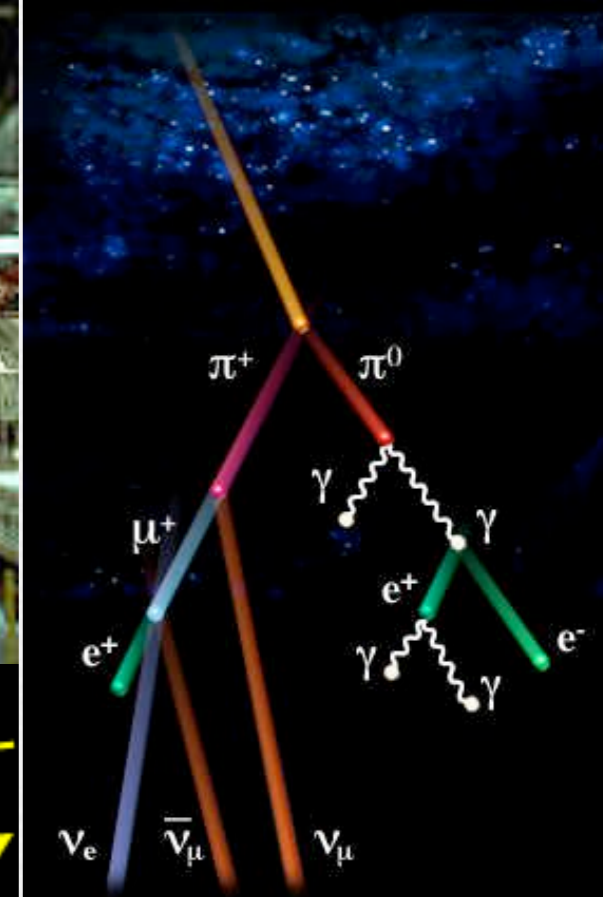
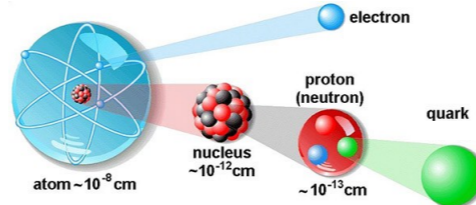


## 問題構造と重要課題





# 放射線



# 放射線を科学的に理解する

- 10/11 放射線入門 【鳥居】
- 10/18 放射線物理学 【鳥居】
- 10/25 放射線計測学 【小豆川】
- 11/ 1 放射線物理・化学 【鳥居】
- 11/ 8 放射線生物学 【渡邊】
- 11/15 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 11/29 原子核物理学・原子力工学 【鳥居】
- 12/ 6 環境放射化学 【小豆川】
- 12/13 環境放射化学 【小豆川】
- 12/20 放射線防護学 【飯本】
- 1/10 植物栄養・肥料学 【藤原】
- 1/24 放射線の利用 【渡邊】
- 1/27 加速器科学・まとめ 【鳥居】

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

坪倉 正治 《医科学研究所》

飯本 武志 《環境安全本部》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師

# 講義スライド

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

東大教養 放射線 テーマ講義



検索

## 連絡先

[torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp](mailto:torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp)

担当教員：鳥居 寛之

# 講義アンケート

# レポート返却

鳥居・小豆川担当分のみ

Fine

完

Fine.

Grazie per vostra attenzione.

Merci de 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