



放射線

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎
著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
 - 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
 - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質
《原子核物理学・原子力工学》
 - 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
 - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
 - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
 - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
 - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
 - 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥料学》
 - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
 - 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会是非常に少ないのが実情です。

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

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

2021年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

放射線

を

科学的に

理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

& @ Zoom



γ 線



中性子線



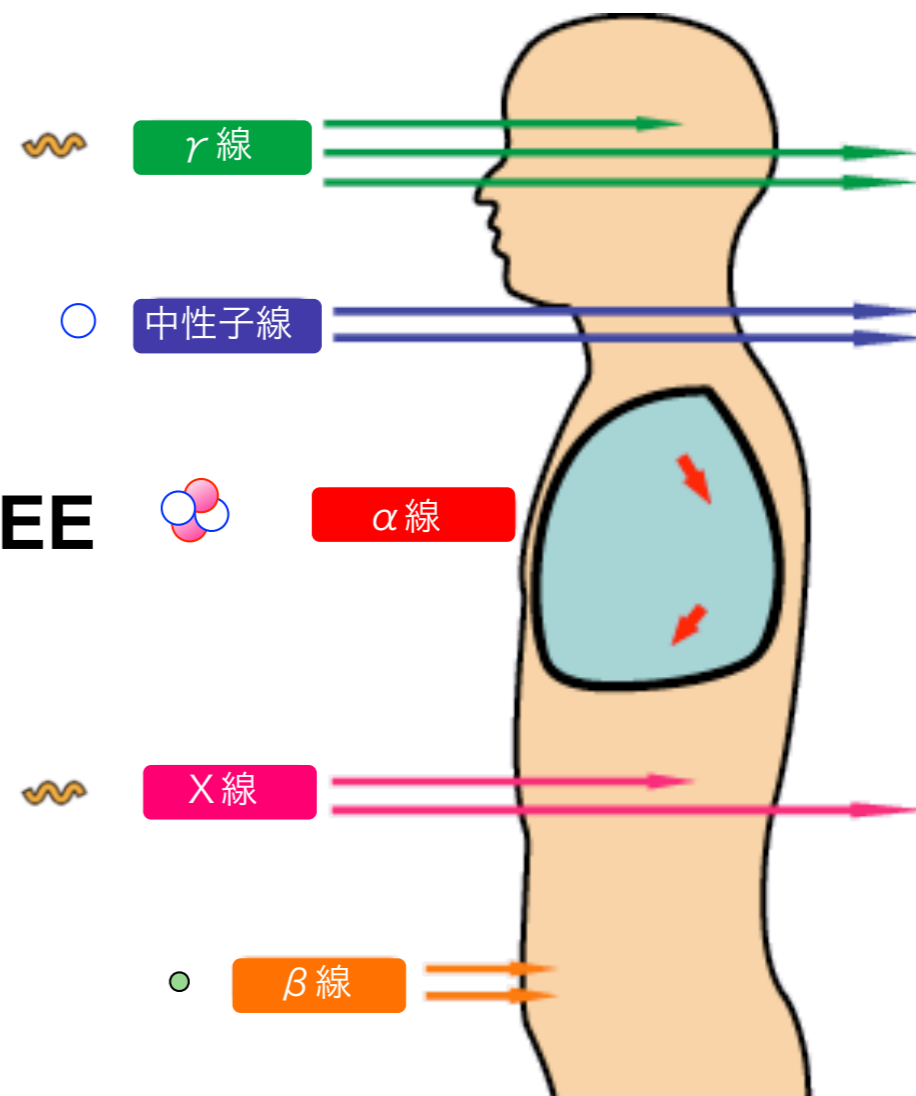
α 線



X線



β 線



担当教員 鳥居 寛之 (粒子線物理学)

理学系研究科

小豆川 勝見 (環境分析化学)

総合文化研究科

渡邊 雄一郎 (生命環境応答学)

総合文化研究科

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

2021年度 Aセメスター 主題科目学術フロンティア講義

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

& @ Zoom

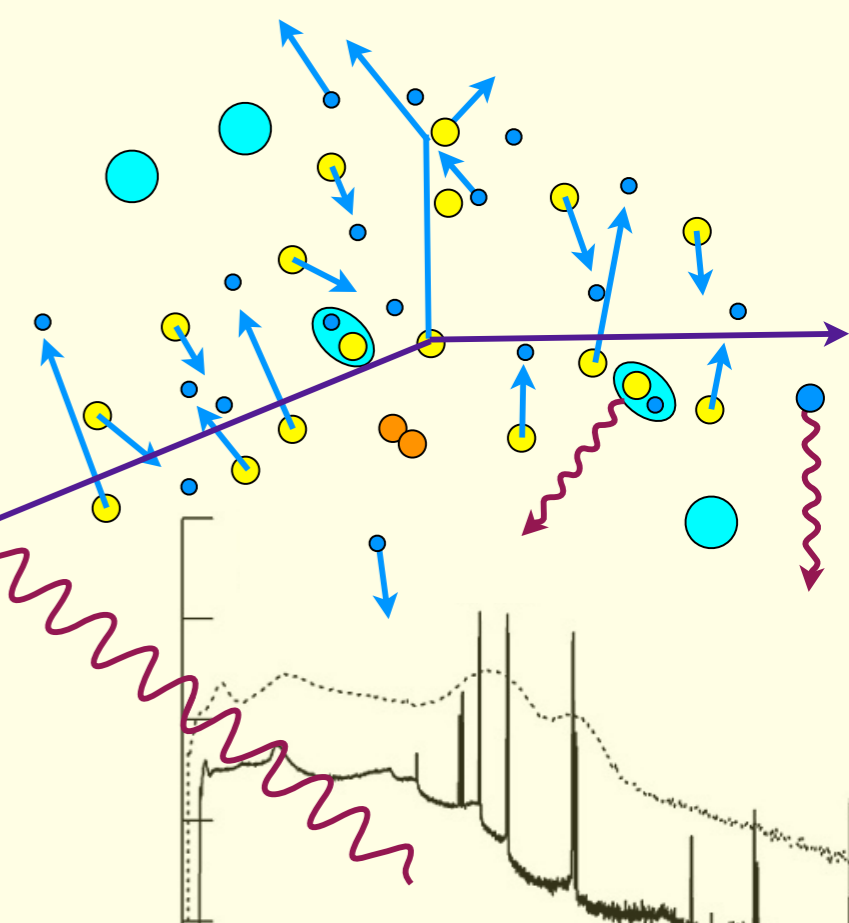
放射線

を

科学的に

理解する

2021 / 1 / 18 (火)



第13回 加速器科学・放射線防護学

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

東京大学理学部

- 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



**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 —」

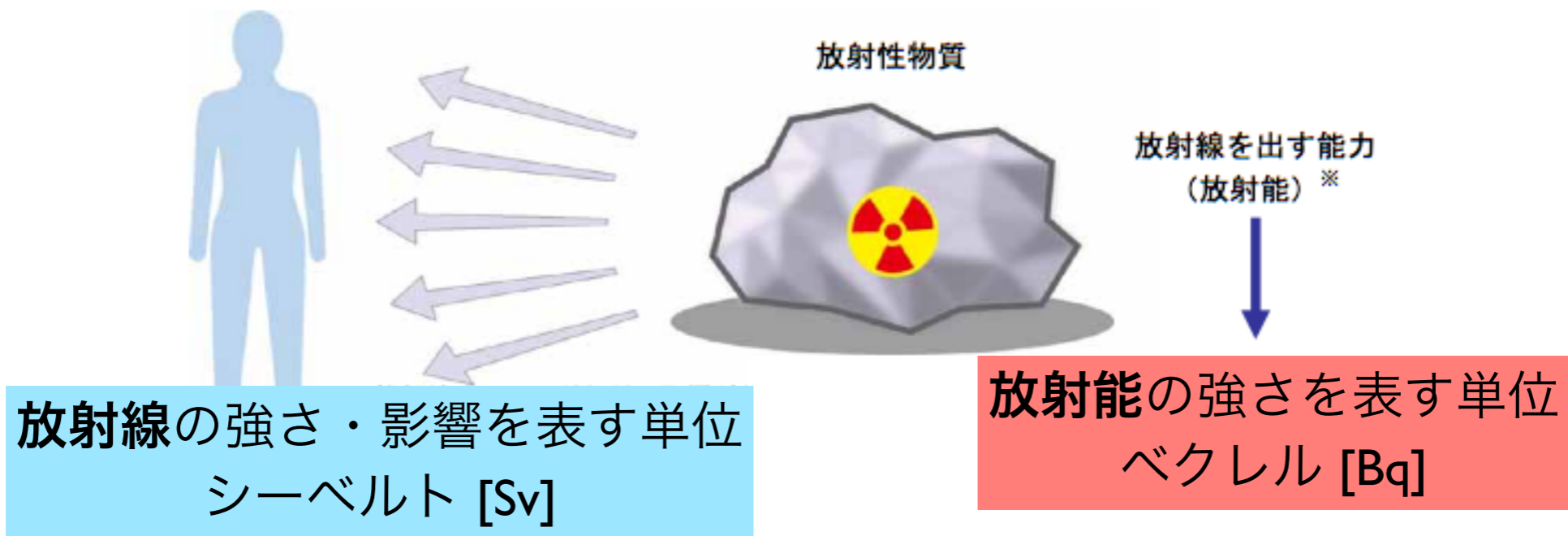
鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円+税

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

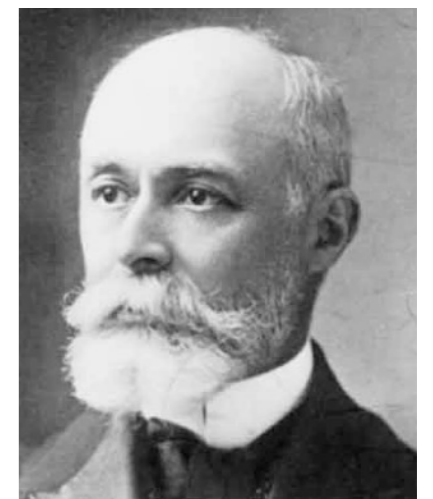
Gray



Sievert



Becquerel



放射線量の単位

radiation dose

人体 物質が吸収したエネルギー (単位質量あたり) **体重**

吸収線量 D [J / kg] = [Gy] **グレイ**

Gray



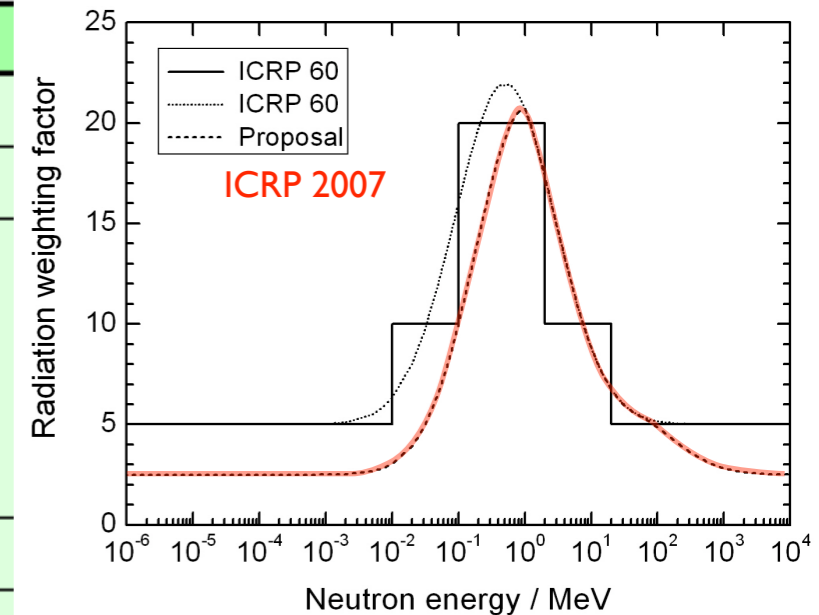
放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

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

sievert

放射線加重係数 W_R

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線加重係数: W_R	
光子(X線・γ線); 全てのエネルギー	1	1
電子(β線)およびミュー粒子; 全てのエネルギー	1	1
中性子; 10keV 以下	5	右図を参照
10keV~100keV	10	
100keV~2MeV	20	
2MeV~20 MeV	10	
20MeV以上	5	
反跳陽子以外の陽子; エネルギー 2MeV 以上	5	2 (正負パイオンも)
アルファ粒子(α線)	20	20
核分裂片	20	20
重原子核	20	20



[出典] 日本アイソトープ協会:ICRP Pub 60、国際放射線防護委員会の1990年勧告、丸善、p7(1991)

赤字 ICRP 2007

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

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

Sievert



内部被曝

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

放射性物質を**体内に取り込まない**ことは放射線防護の鉄則。

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



一般に**被曝が継続**するため、**注意が必要**。

- 物理学的半減期
- 生物学的半減期（体内からの排出）

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

内部被曝の計算例

(^{131}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。

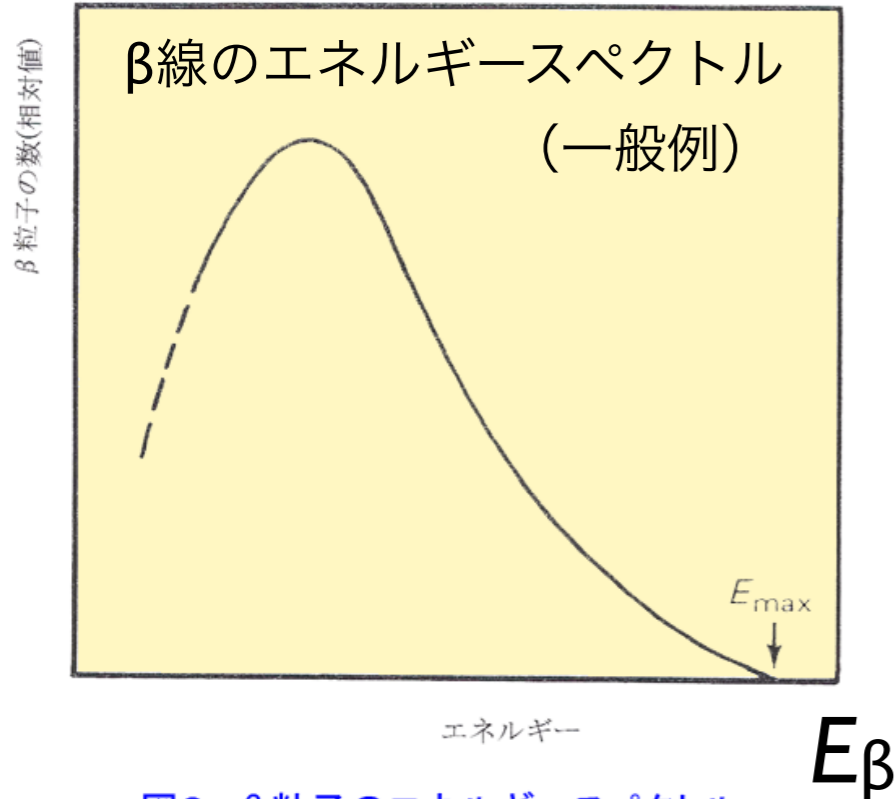
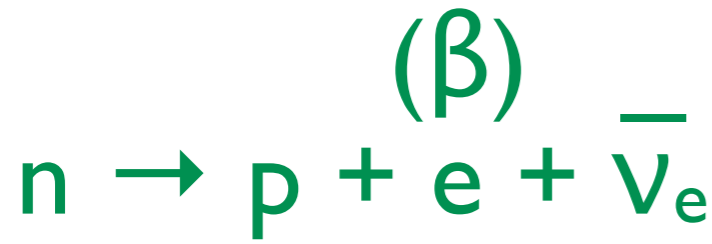
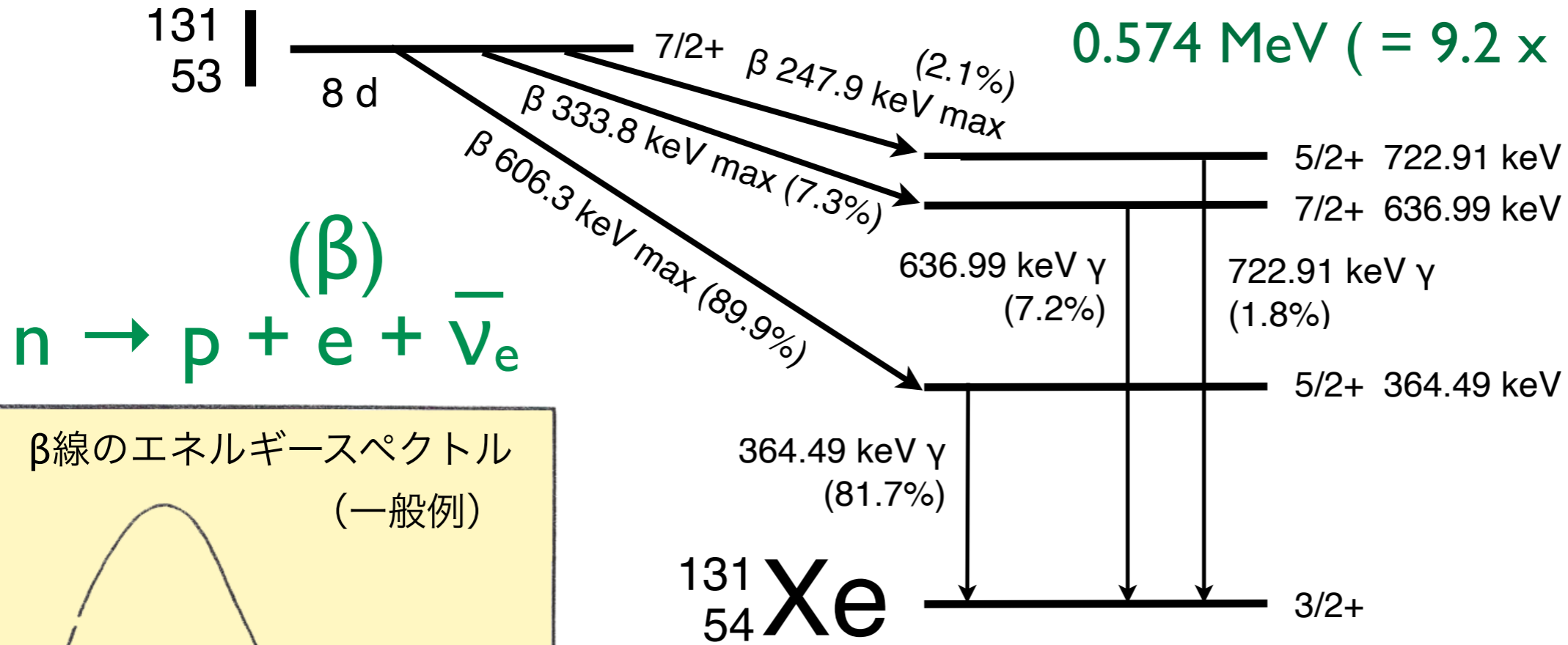
実効線量係数 (成人)

※ 子供や乳幼児は 70歳になるまでの期間

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

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

β線の最大エネルギーの平均値
 0.574 MeV (= 9.2 x 10⁻¹⁴ J)



γ線: 原子核の脱励起

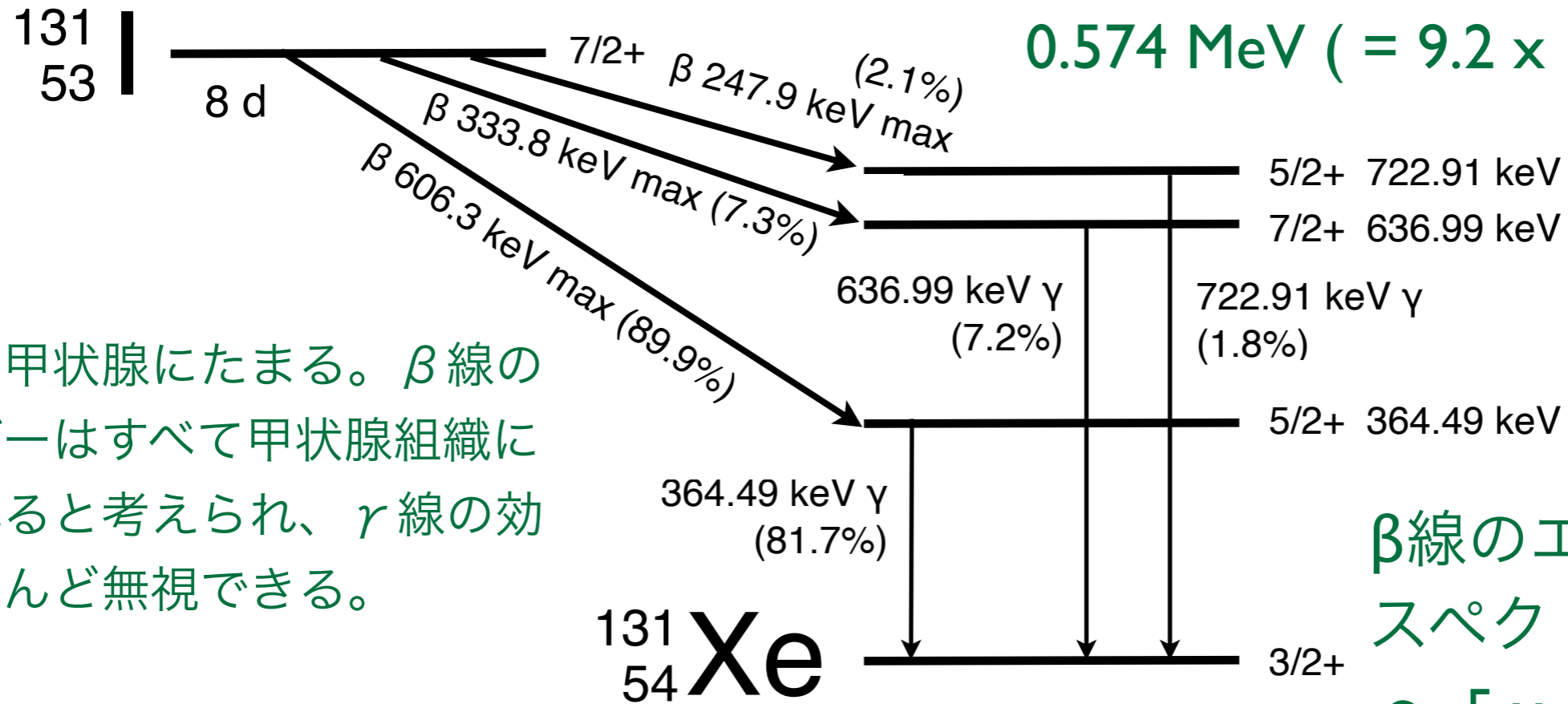


γ線 (定まったエネルギー)

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 (= 9.2×10^{-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。

β線のエネルギー
スペクトルの平均値
~ 5×10^{-14} J

1 Bq あたり $8.04 \text{ d} \times 86400 \text{ s/d} / \ln 2 = 1,000,000$ 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}Cs による空間線量率)

光子 (γ 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 γ ($h\nu = 0.66$ MeV) from ^{137}Cs

x : 距離, L : 半減距離 / 半価層

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

具体例

μ : 線減衰係数 (線減弱係数)

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

μ/ρ : 質量減衰係数 $\mu_{\text{en}}/\rho < \mu/\rho$

$$(\mu/\rho)^{\text{air}} = 0.077 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$$

μ_{en}/ρ : 質量エネルギー吸収係数

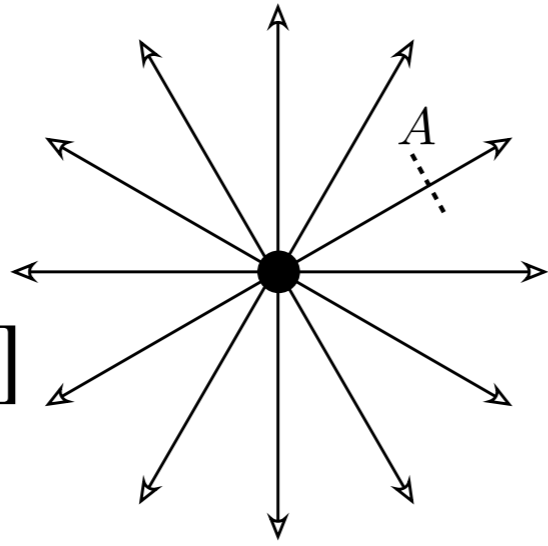
$$(\mu_{\text{en}}/\rho)^{\text{water}} = 0.033 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$$

\dot{H} : 等価線量率 (γ 線では吸収線量率に等しい)

具体例

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

P : 放射能 [Bq]

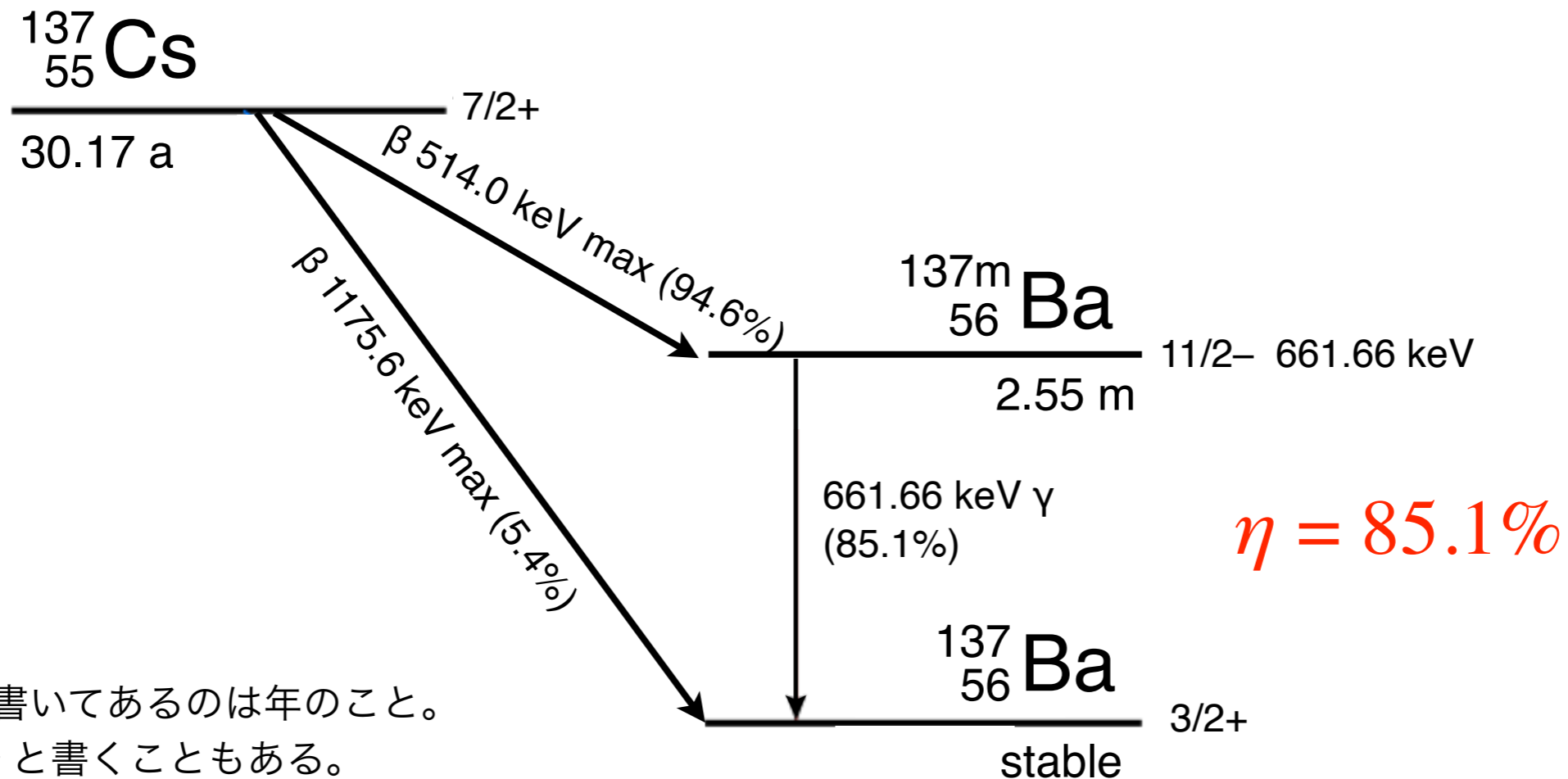


\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

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

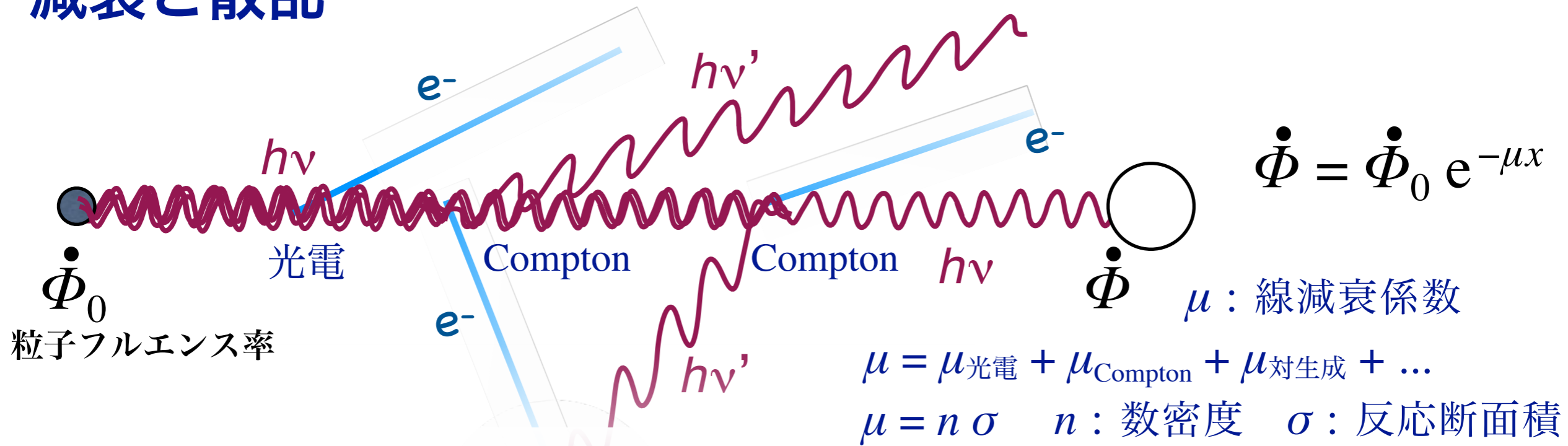
$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu^{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2}$$

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。



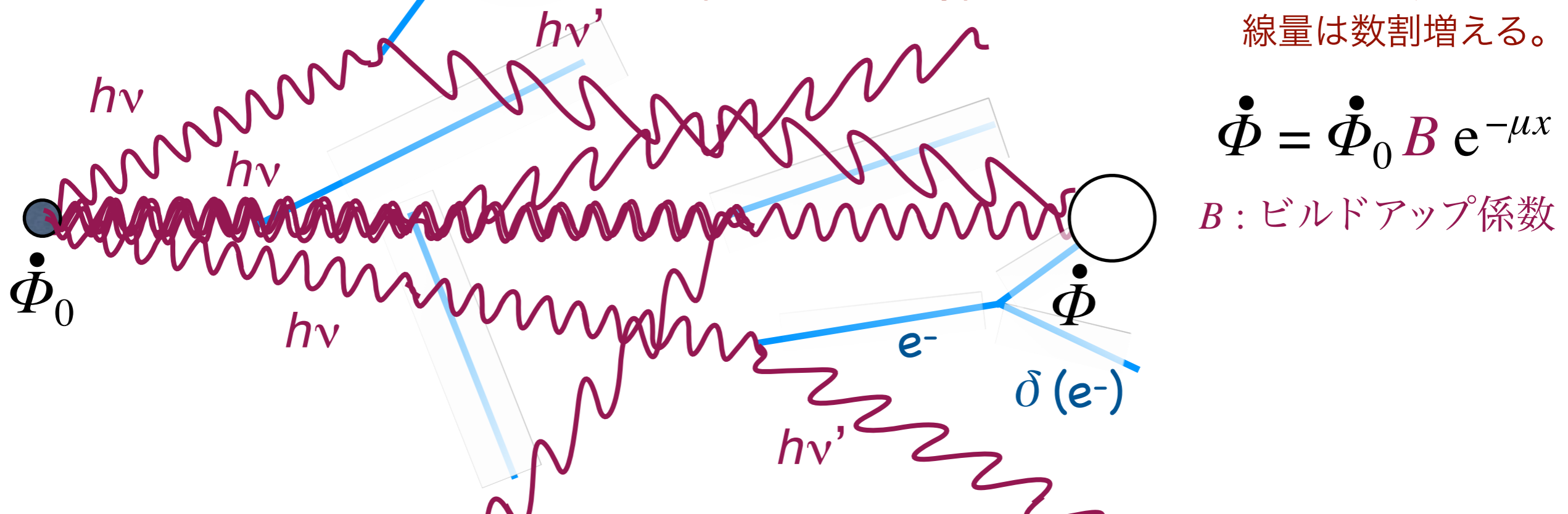
半減期で a と書いてあるのは年のこと。
y とか yr と書くこともある。

減衰と散乱

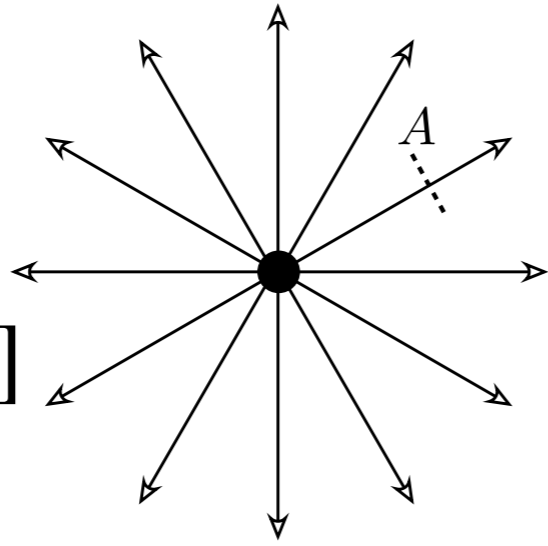


上の式では散乱された γ 線は消えると仮定して計算している。
 実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの γ 線
 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要があり、
 線量は数割増える。

ビルドアップ



P : 放射能 [Bq]



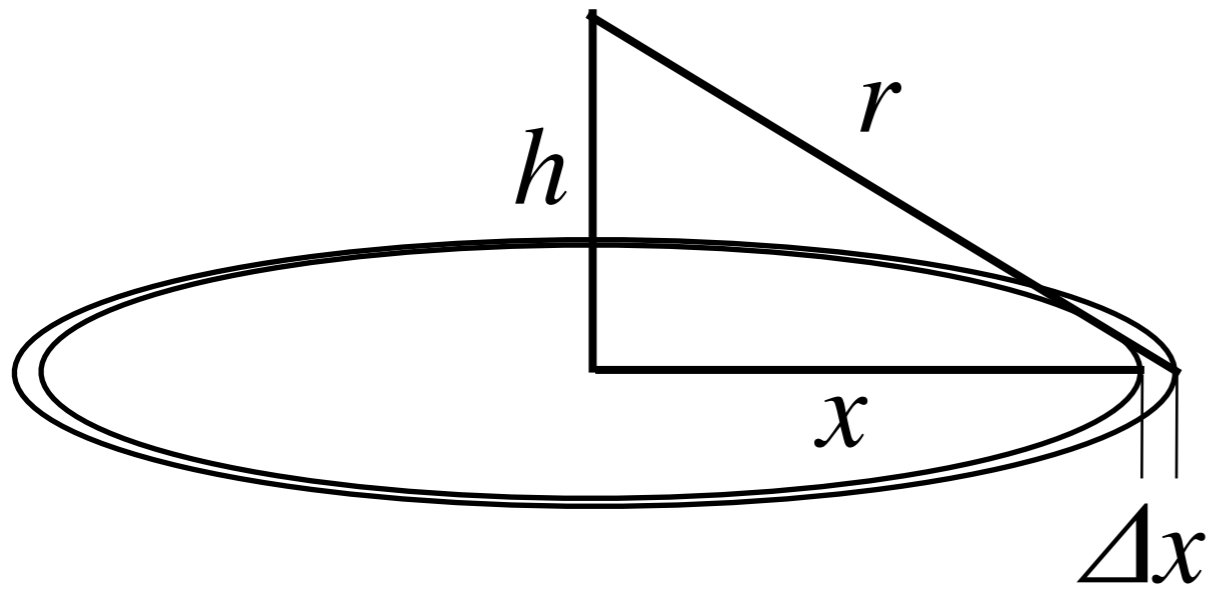
\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

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

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

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 γ 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 γ 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/m²]

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

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

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

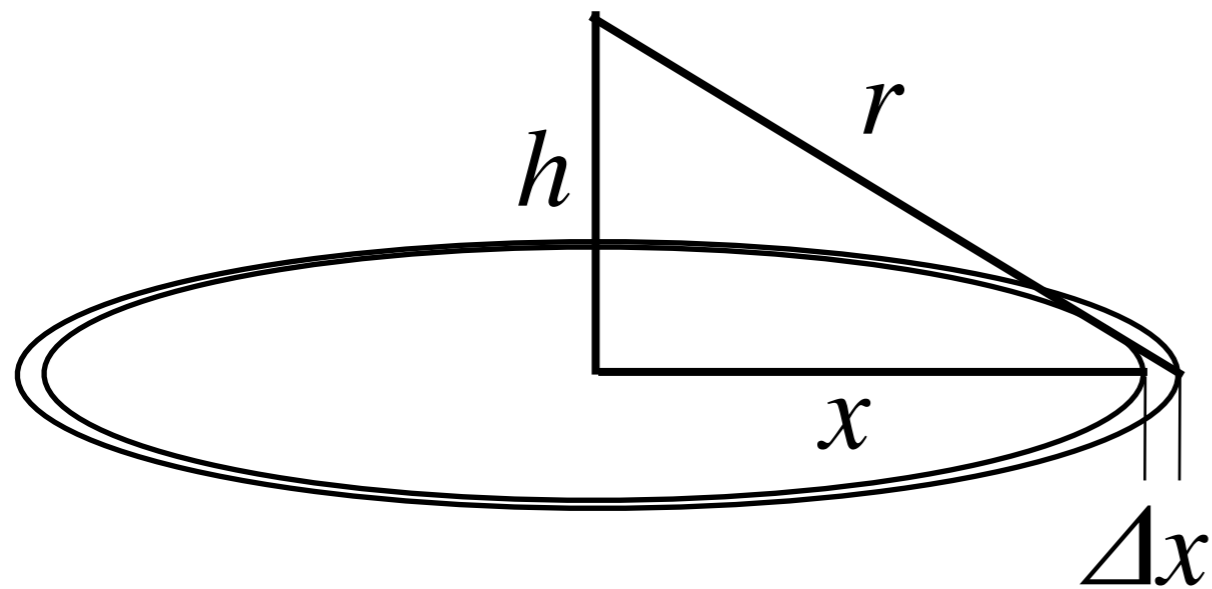
\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

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

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

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

散乱された γ 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 γ 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)。

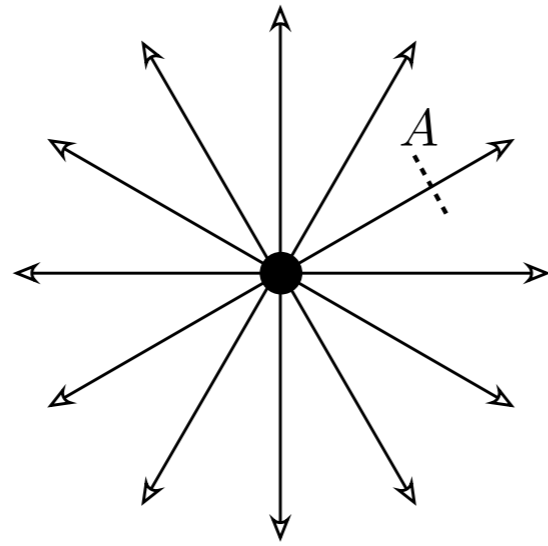


p : 放射能の平面密度 [Bq/m²]

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

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

外部被曝 の線量計算 (γ 線)



$\dot{\Phi}$: 粒子フルエンス率

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

$$\eta = 0.851$$

γ 線の放出率

P : 放射能 [Bq]

$\mu^{\text{air}} = 0.0100 \text{ m}^{-1}$ 空気の線減衰定数

\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

^{137}Cs γ 線は空气中 70 m で半減する。

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

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

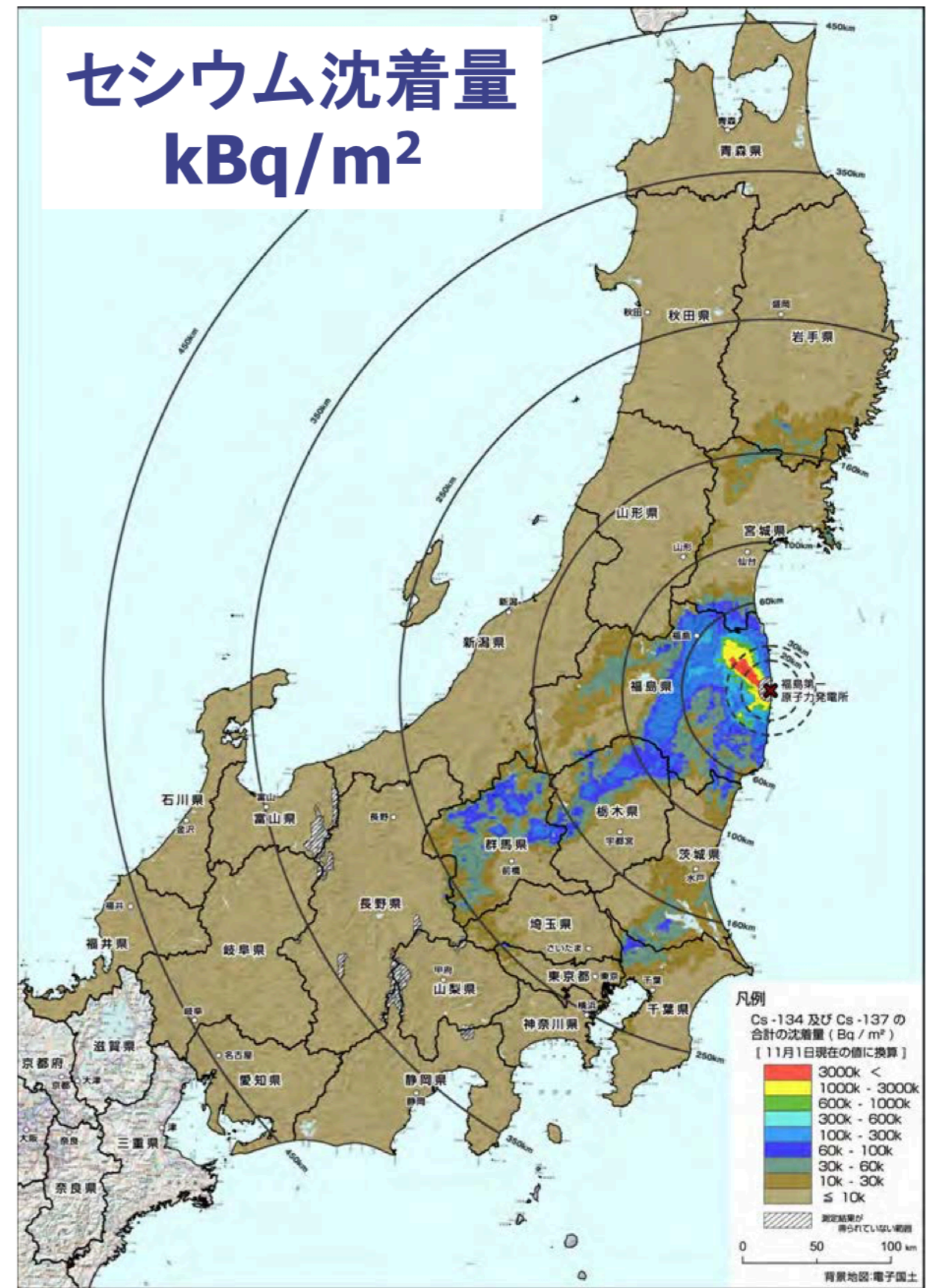
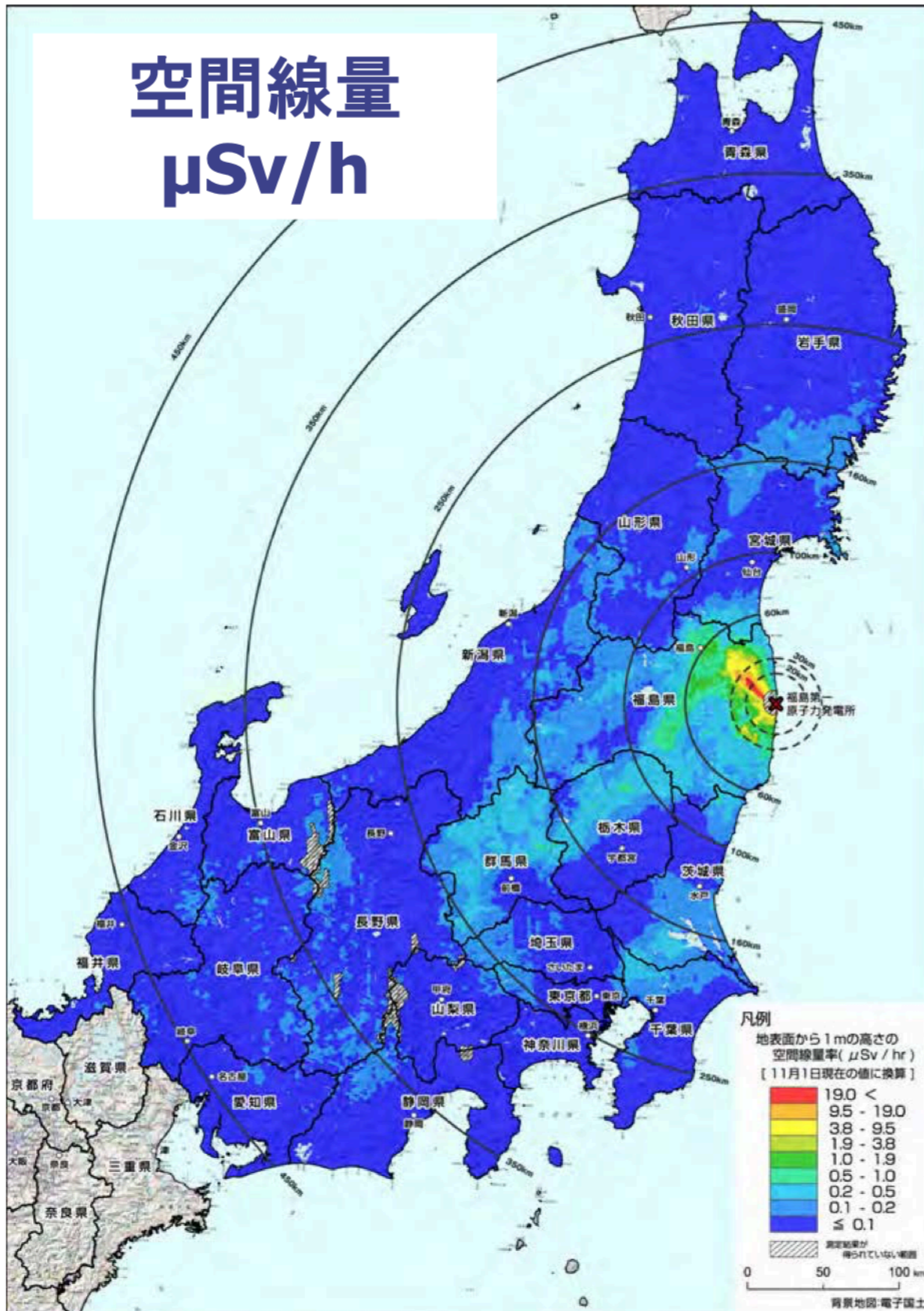
平面が一様に放射性物質で汚染されている場合

^{137}Cs : 2.1 ($\mu\text{Sv/h}$) / (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



放射線化学

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

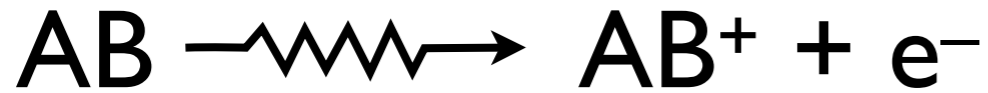
G 値（放射線化学収率）：

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。

放射線が誘起する素反応

(一部抜粋)



電離 (イオン化)



励起

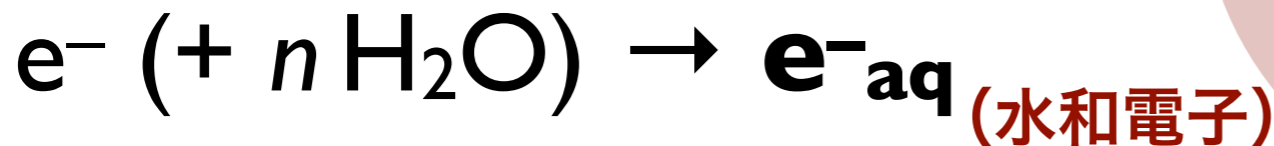
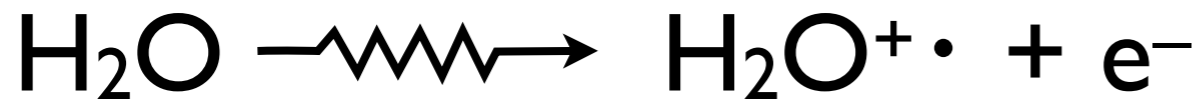


再結合



ラジカル生成

水中での反応



酸素効果



(ヒドロペルオキシラジカル)



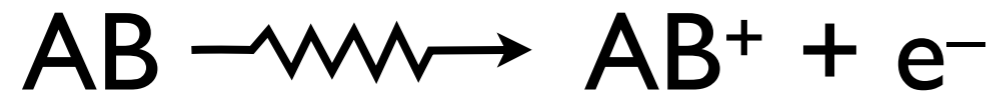
(スーパーオキシドアニオン)



(過酸化水素)

(活性酸素)

放射線が誘起する素反応



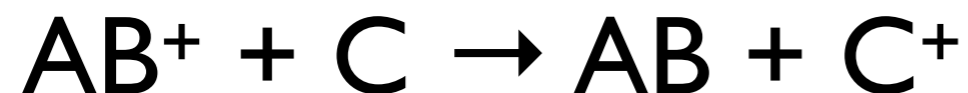
電離（イオン化）



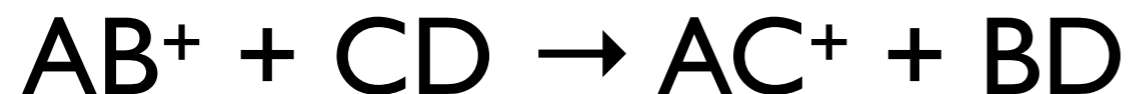
励起



再結合



電荷移動



イオン分子反応



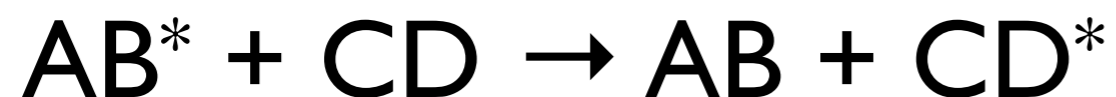
電子捕捉



ラジカル生成



脱励起・蛍光放出

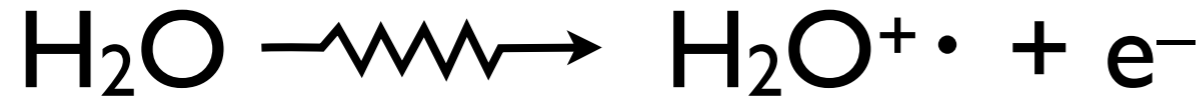


励起移動

水中での反応

γ線照射による
放射線化学収率
(G値)

100 eV あたりに変化・生成する
原子・分子・イオンの数。

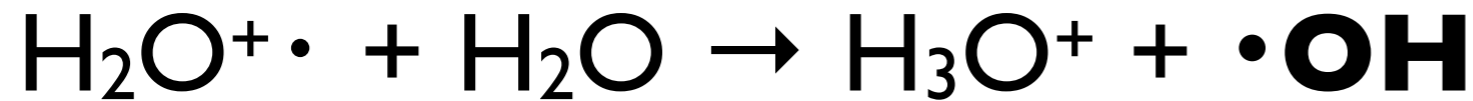


電離 (イオン化)

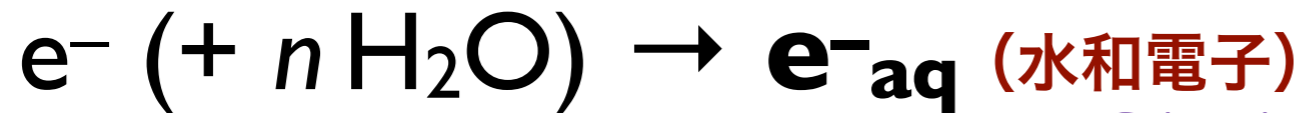


励起

$G(\cdot\text{OH}) = 2.7$
(ヒドロキシルラジカル)



イオン分子反応

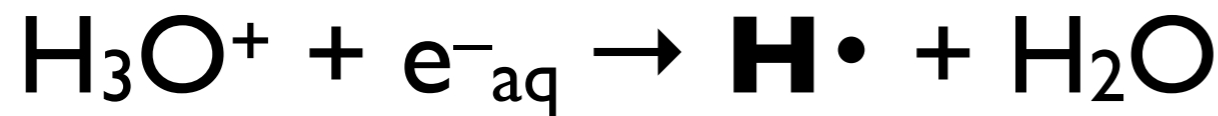


水和電子生成

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



解離 (ラジカル生成)



電子捕捉

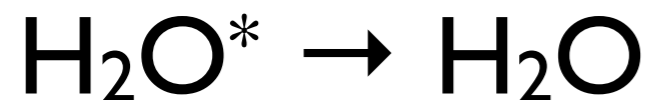
(水素ラジカル) $G(\text{H}\cdot) = 0.55$



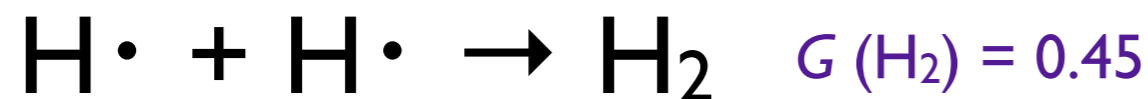
再結合



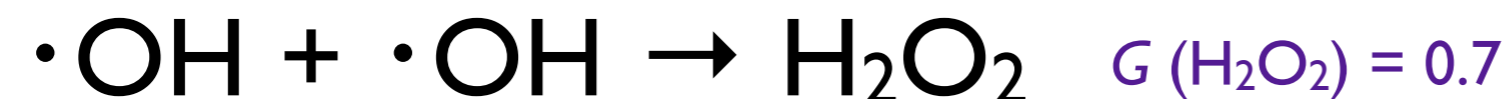
電子捕捉



脱励起



分子生成



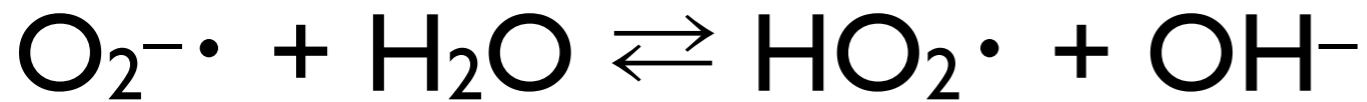
分子生成



分子生成

酸素効果

(活性酸素)



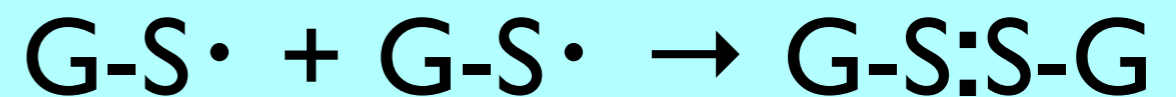
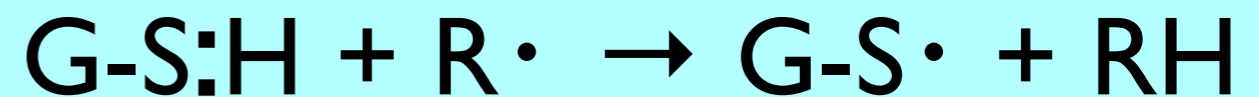
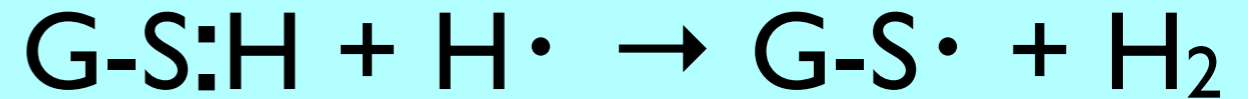
放射線防護剤

(ラジカルスカベンジャー)

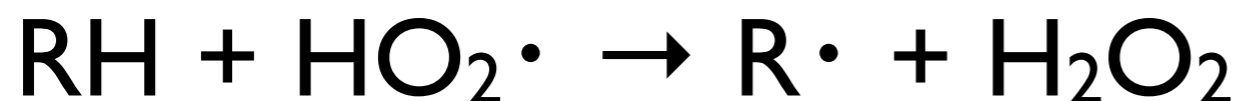
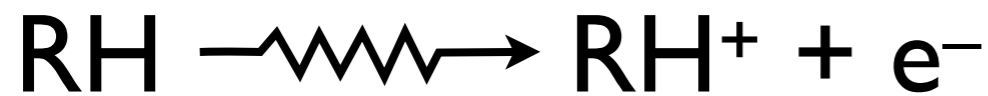
SH基, S-S 結合

例: システイン、システアミン

(グスタチオン)



有機物の放射線化学反応



何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

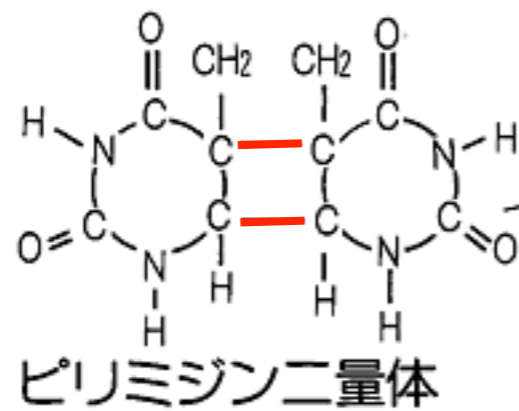
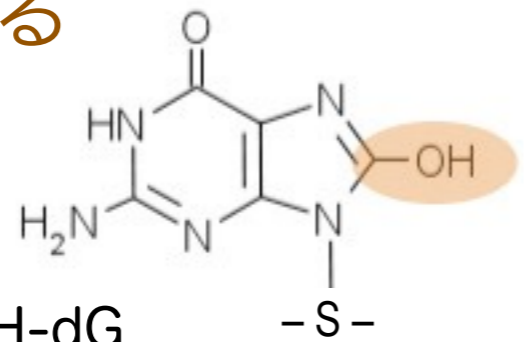
表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較¹⁾

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

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

・OH ラジカルによる酸化

8-OH-dG



ピリミジン二量体

紫外線照射でも頻発

鎖切断

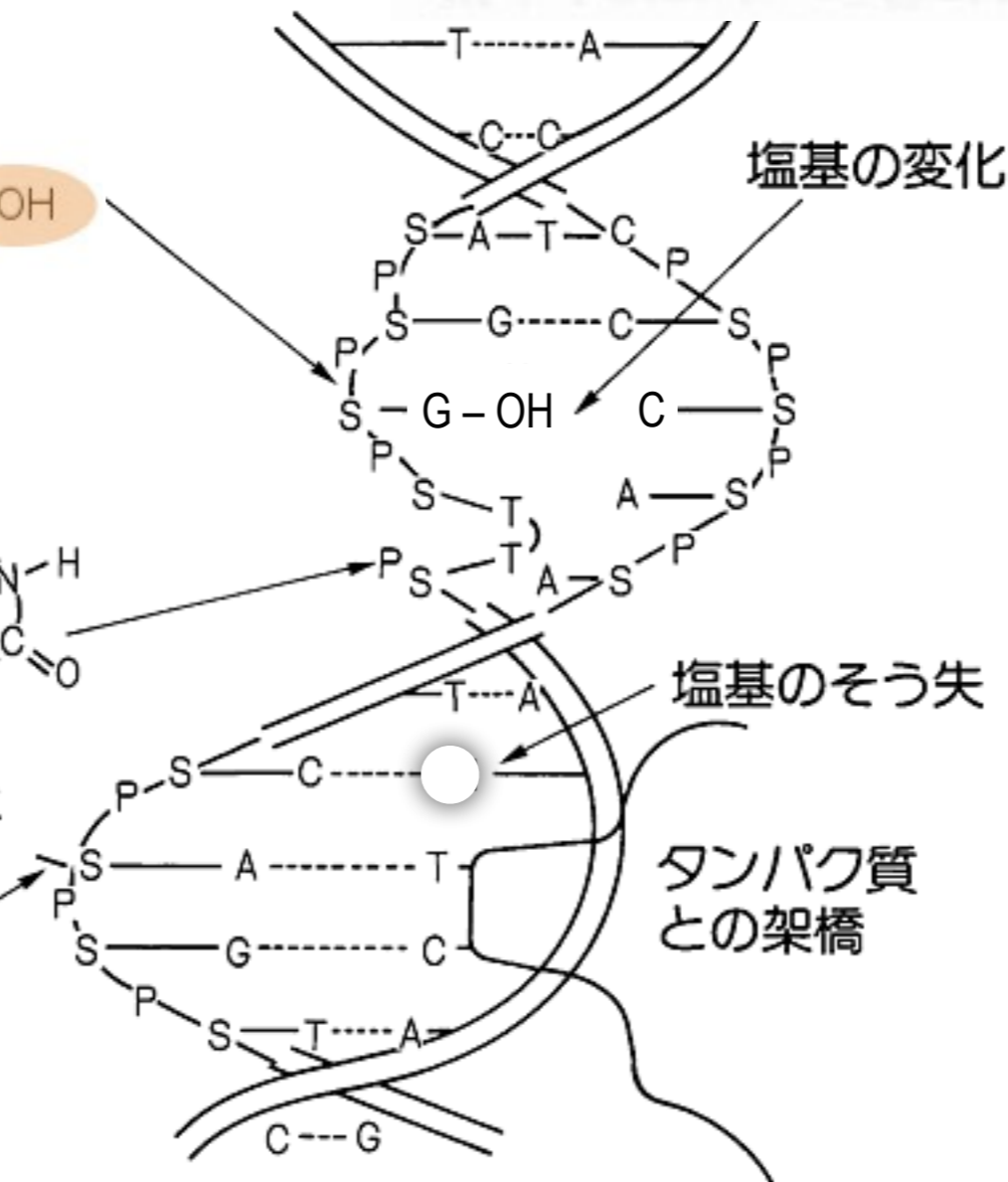


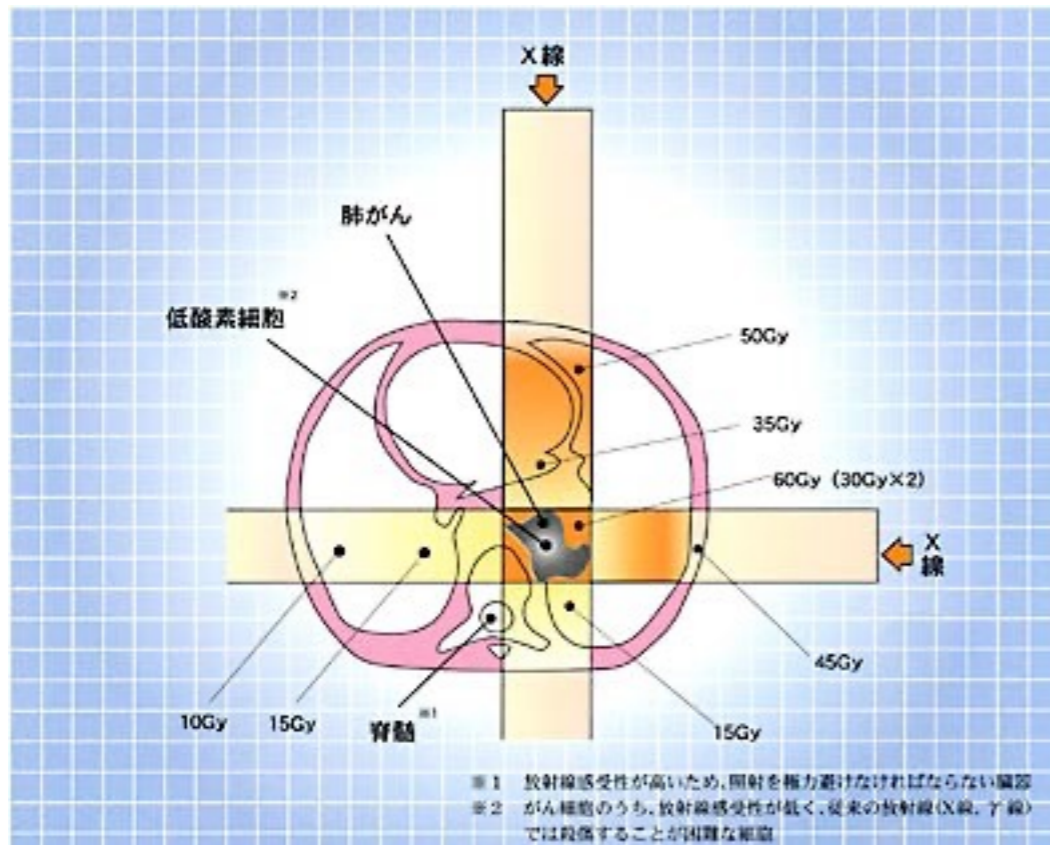
図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

[出典] 江上信雄：生き物と放射線、東京大学出版会、1975

図は一部内容を改変。

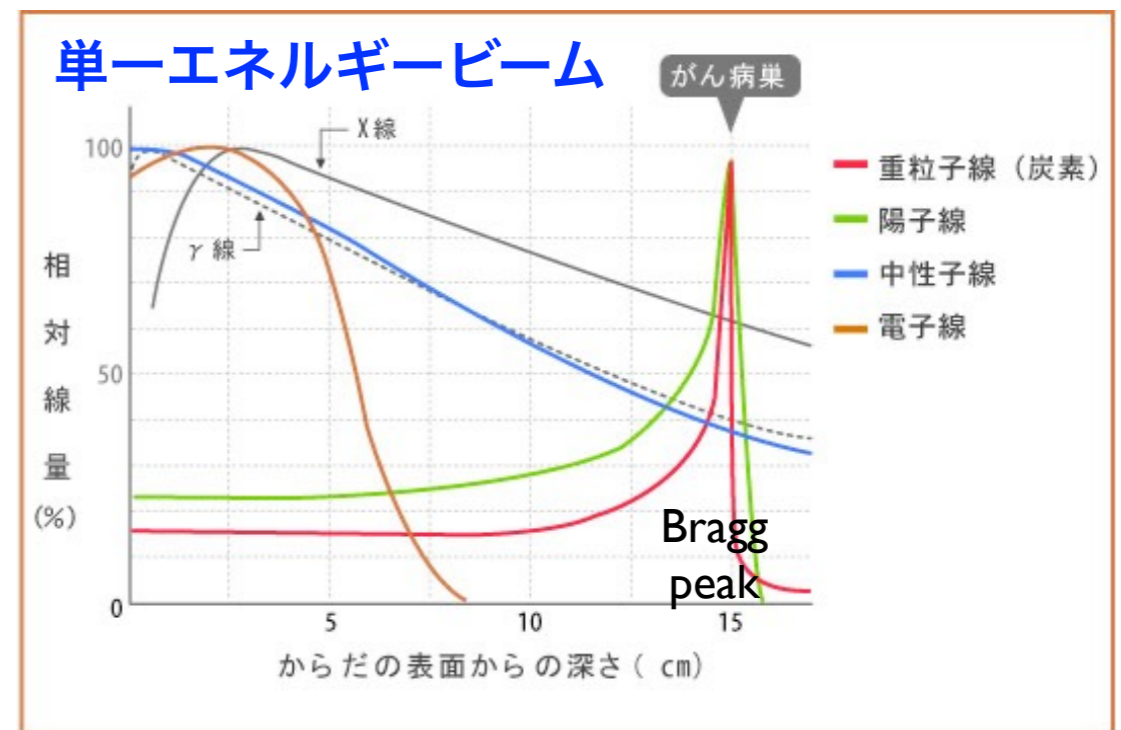
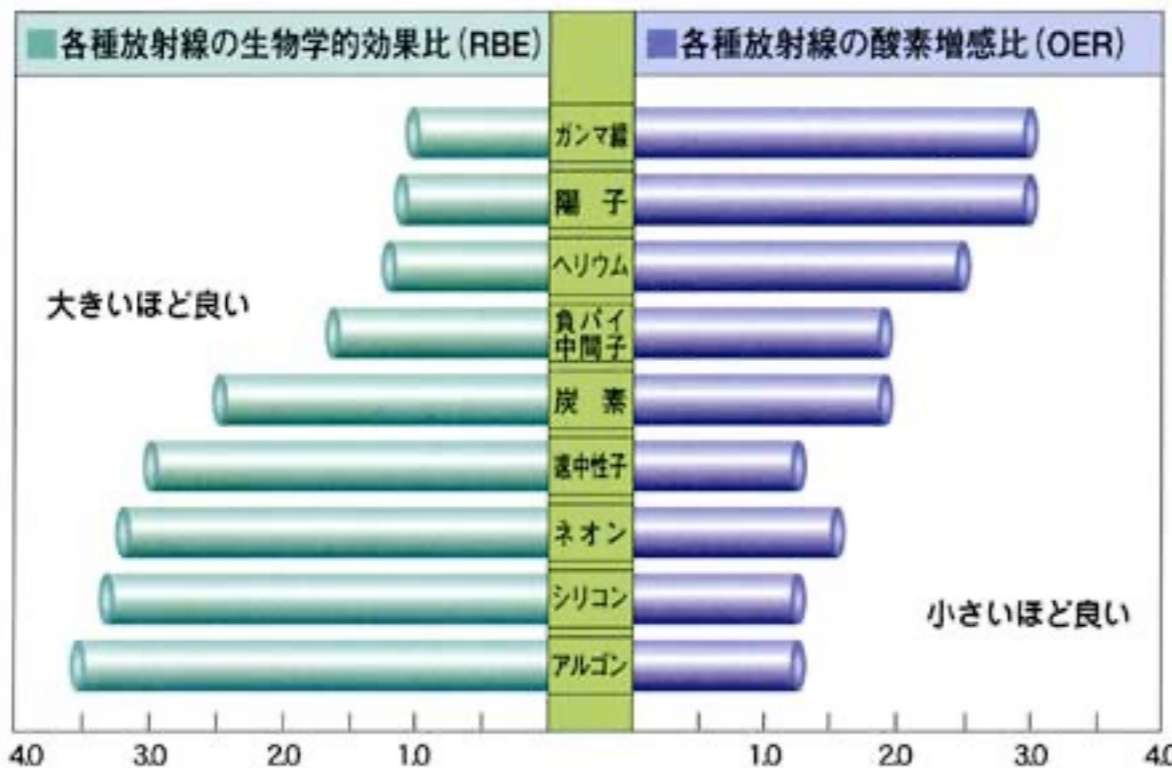
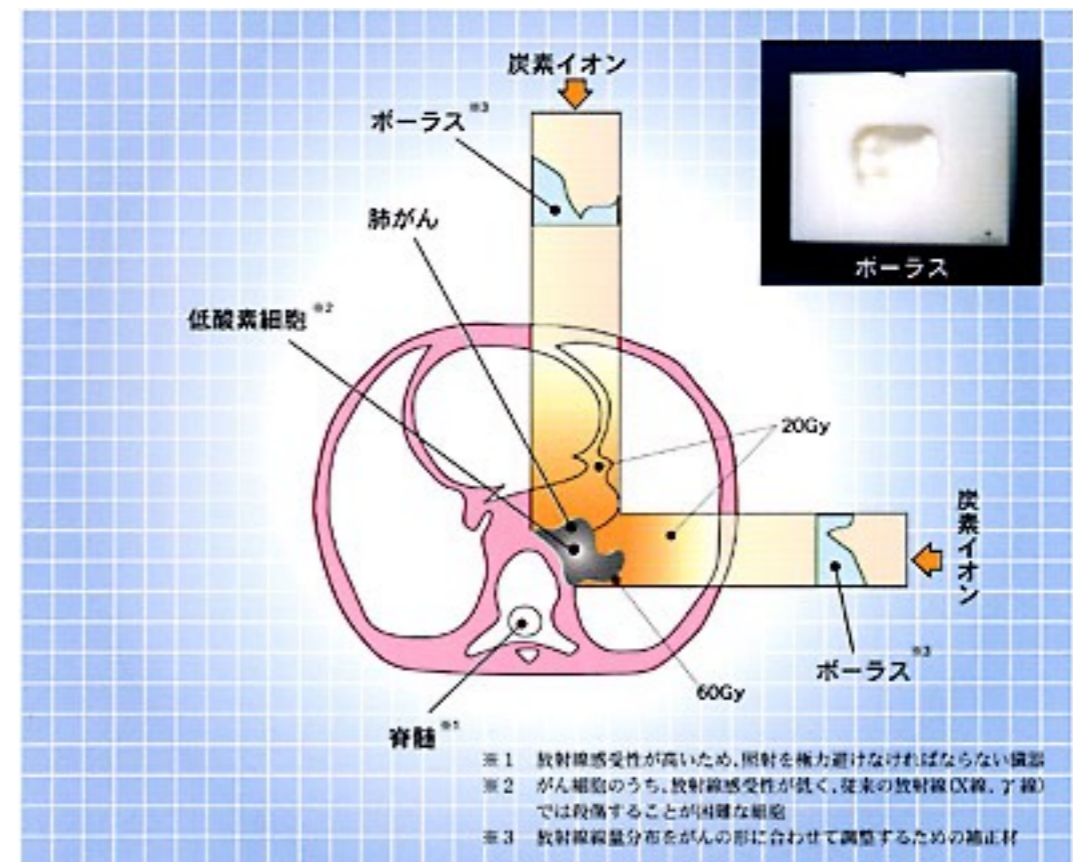
放射線 がん治療

X線



数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



電子線・ガンマ線照射によるグラフト重合

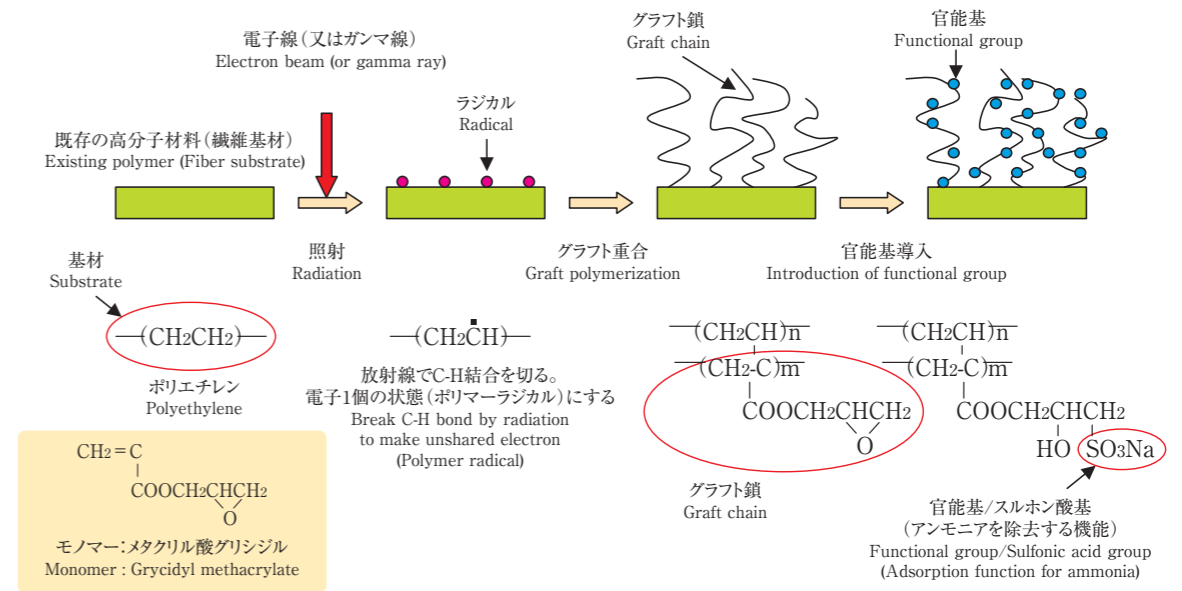
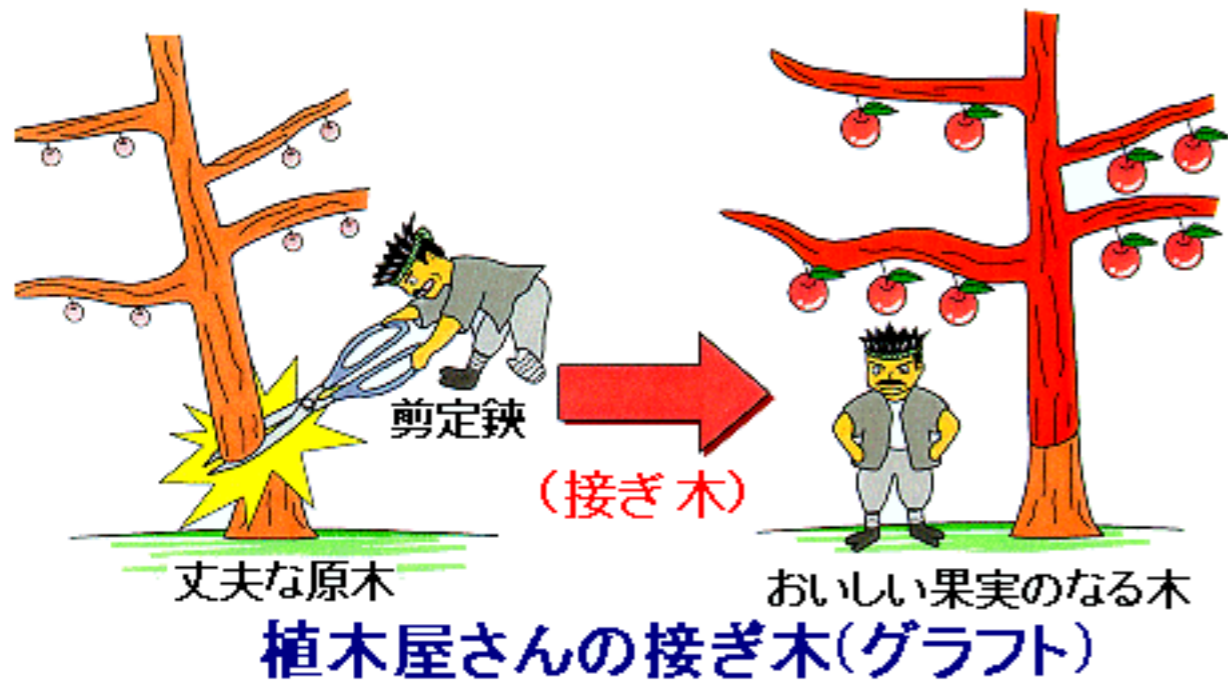


図1 放射線グラフト重合法によるイオン交換体の合成方法
Fig. 1 Reaction scheme of ion exchange material by radiation induced graft polymerization

エバラ時報 No. 216 (2007-7) 藤原邦夫氏論文より引用

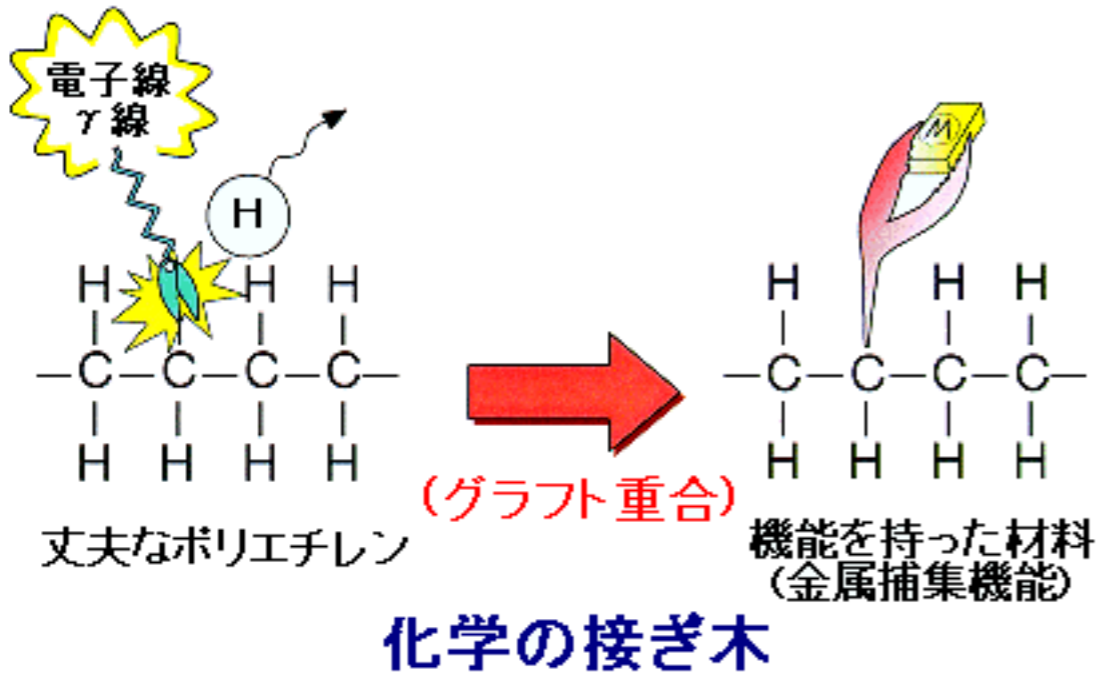


図1 接ぎ木の技術とグラフト重合

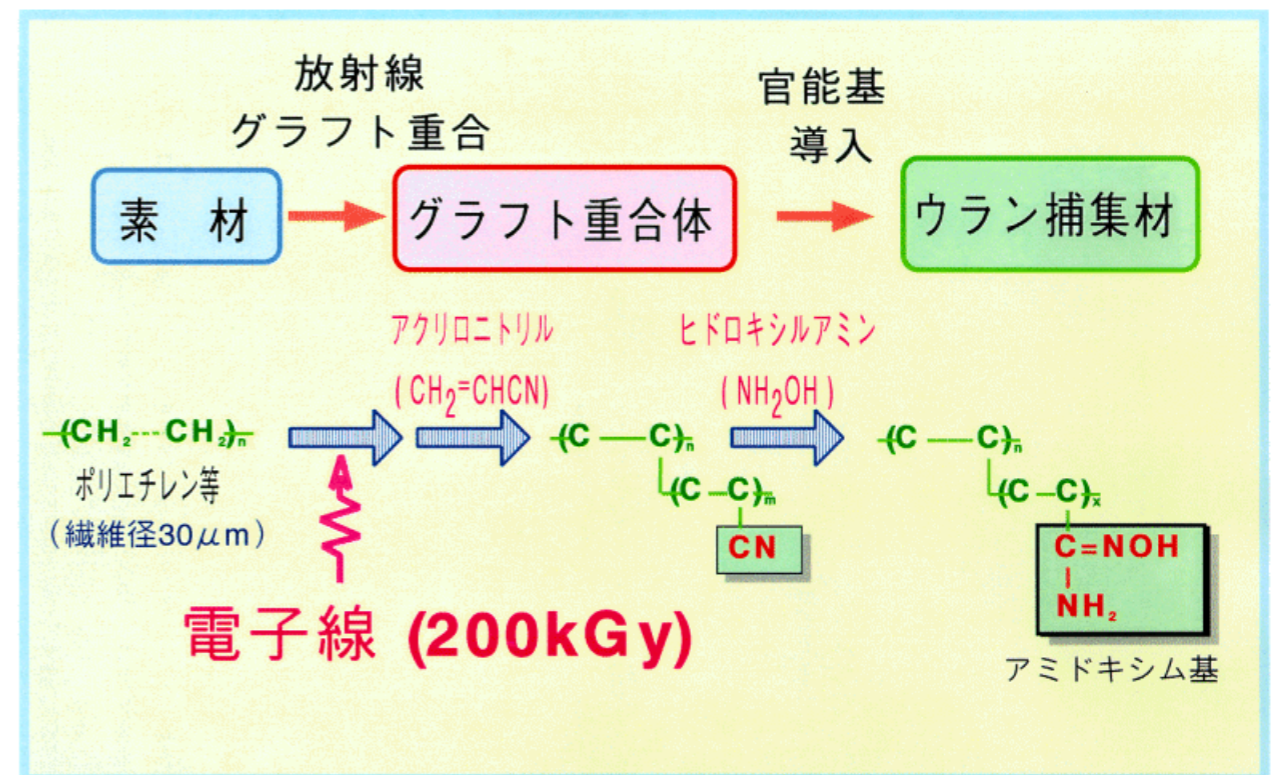


図2 放射線グラフト重合によるウラン捕集材の合成法

工業分野での利用

○ラジアルタイヤ、耐熱電線

ラジアルタイヤは、有機繊維で補強されたゴムで高圧に耐えられる構造になっています。成形器で熱と圧力を加えてタイヤの形にしますが、この時、繊維補強ゴムは大きな変形を受け、補強繊維のずれやはみ出しがおきやすくなります。これを防ぐため、繊維補強ゴムに電子線を照射して強度を上げます。(市場規模:平成15年度1兆円)

また、電線の被覆に使われているゴムやプラスチックはそのまま熱を加えると溶けて流れ落ちます。電子線を照射すると熱を加えても溶けにくくなります。



ラジアルタイヤ、耐熱電線

○半導体

IC(集積回路)の回路のパターンの線は髪の毛の太さの50~100分の1であり、その細工をするためにリソグラフィといった技術が使われる。リソグラフィは版画の技術のようなもので、半導体表面に光や放射線を当てると化学変化する感光剤を塗り、加工したい形状に切り抜いた板(マスク)をのせて放射線を当てて、マスクの型どおりに加工するもの。イオンビームや中性子ビームを利用した不純物導入等も行っています。

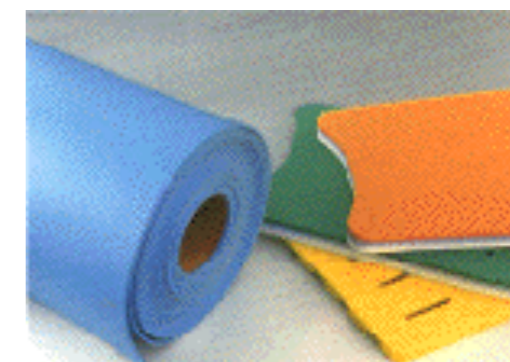
(市場規模:平成15年度6.3兆円)



半導体

○発泡材料(緩衝材料、断熱材料)

お風呂場で使うバスマット、あるいはプールで使うビート板に使用されている発泡ポリエチレンをご存じですか。あの防水性、浮力が高く、ほどよく硬い素材は、ポリエチレンに放射線を照射し、加熱することで内部に細かい気泡をつくりだしたもので、これもいまから20年以上も前に開発された素材です。



発泡ポリエチレン

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。

W. C. Röntgen



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(α)線とベータ(β)線であることが判明)と名づけ、発表しました。

A. H. Becquerel



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。

M. Curie



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(α)線、ベータ(β)線、ガンマ(γ)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。

E. Rutherford



アーネスト・ラザフォード
(1871-1937)



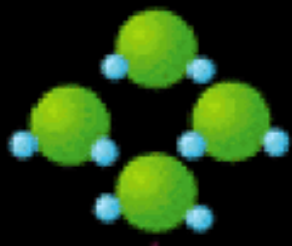
M. Curie & P. Curie



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

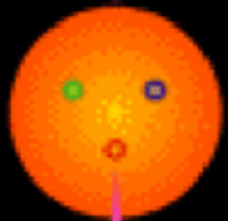


原子核
nucleus

∇
fm (10^{-15} m)
フェムトメートル

原子核物理学 Nuclear Physics

MeV
メガ電子ボルト



陽子
proton

∇
am (10^{-18} m)
アトメートル

素粒子物理学 Particle Physics

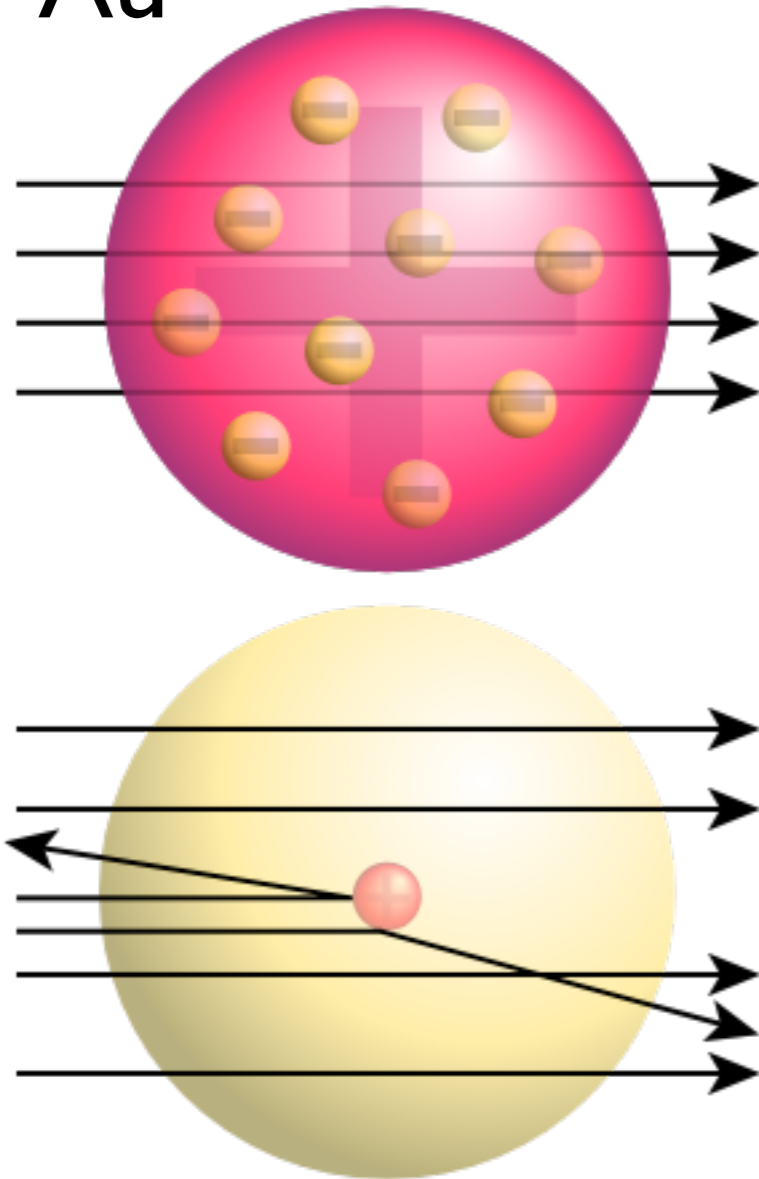
GeV
ギガ電子ボルト



クォーク
quark

ラザフォード散乱

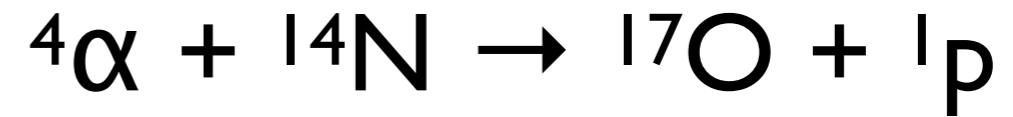
$\alpha + \text{Au}$



ラザフォードの原子模型
(1911)

初の核変換実験

窒素ガス中において、Poからの α 線の到達距離の実験をしていた。(1919)

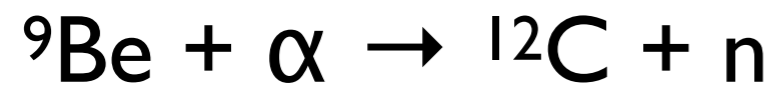


何らかの粒子が40 cm先の蛍光版を光らせた。
(α 線の到達距離は1気圧空気中で数cm程度)



E. Rutherford

中性子の発見



透過力の大きいこの中性放射線は当初高エネルギーの γ 線かとも考えられたが、うまく説明がつかなかった。

水素によく吸収され、陽子を放出する。 F. Joliot & I. Curie (1932)

n の質量は陽子と同程度。中性子。

J. Chadwick (1932)



p と n からなる原子核のモデル。

放射性核種と中性子の人工生成



F. Joliot & I. Curie (1934)



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 1s¹ </div> <div style="font-size: small;"> α A衰变 p Proton emission n Neutron emission SF Spontaneous fission β β衰变 β+ Beta+ decay EC Electron capture □ 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 铈	48 镧	49 铈	50 铈	51 铈	52 铈	53 铈	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 𨭇	105 𨭈	106 𨭉	107 𨭊	108 𨭋	109 𨭌	110 𨭍	111 𨭎	112 𨭏	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

铼

锝

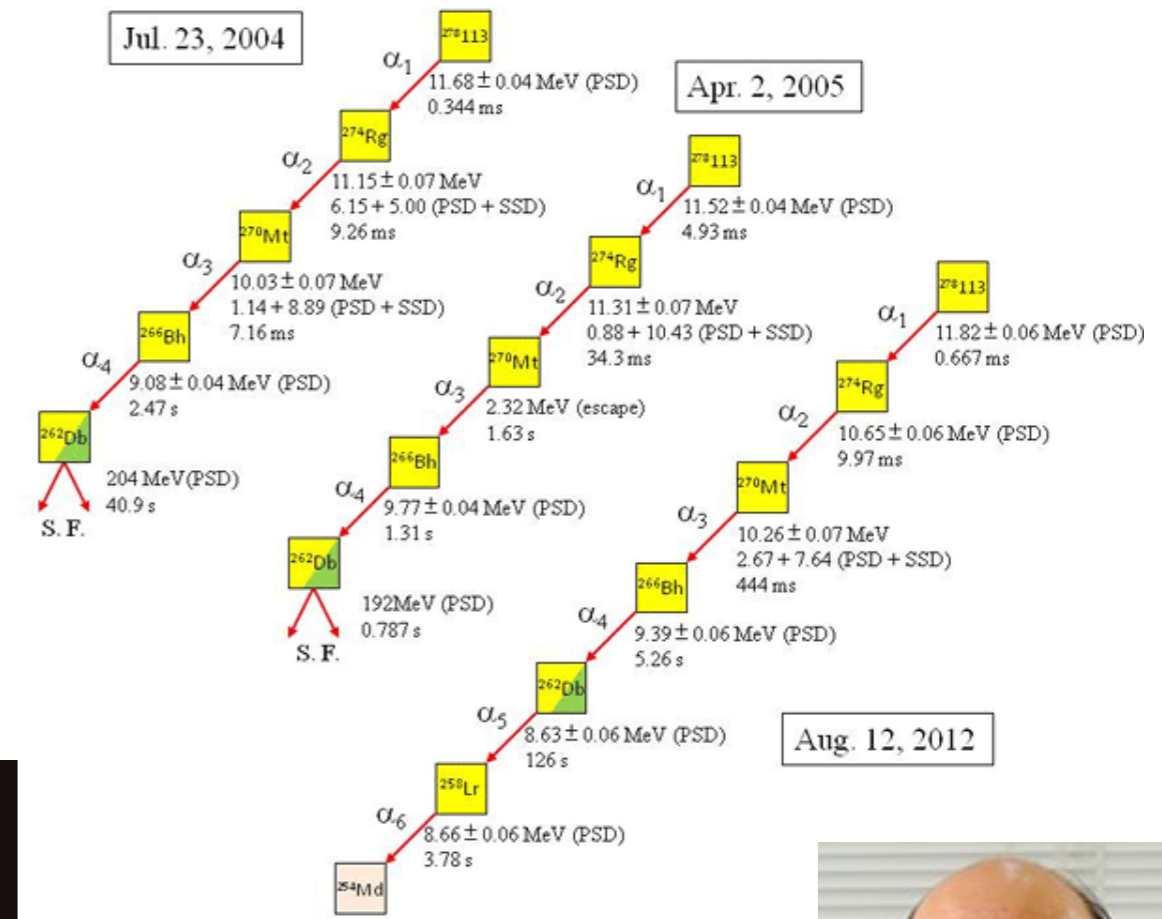
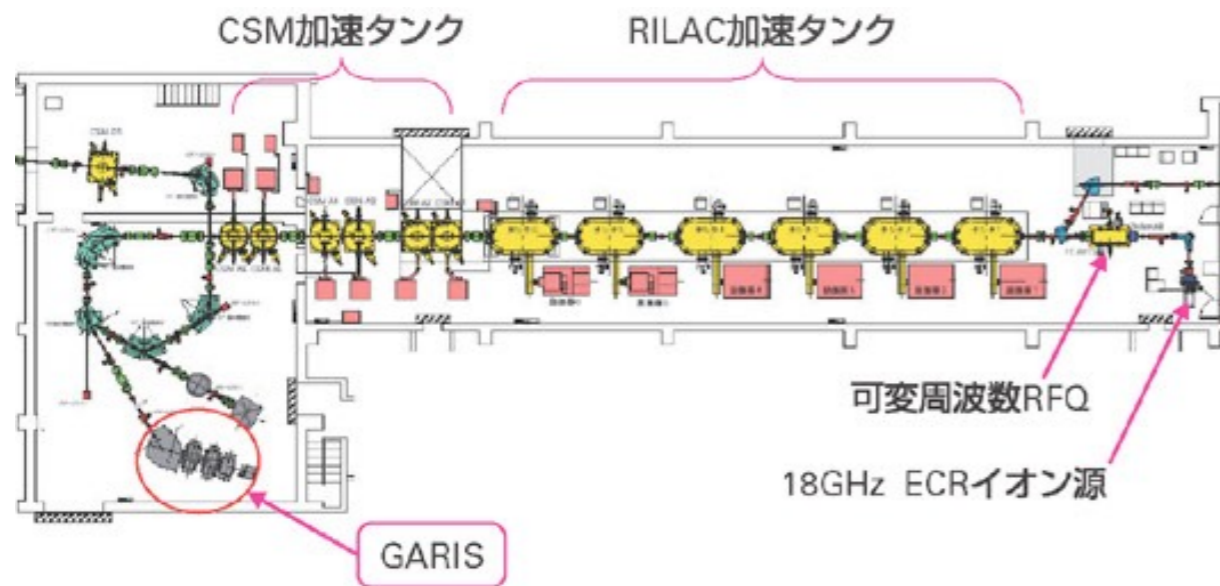
这些原理没有一致稳定的同位素,大量的同位素最长的半衰期

元素周期表 设计版权 © 1997 Michael Dayah. <http://www.dayah.com>
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 钪	92 钪	93 钪	94 钪	95 钪	96 钪	97 钪	98 钪	99 钪	100 钪	101 钪	102 钪	103 钪

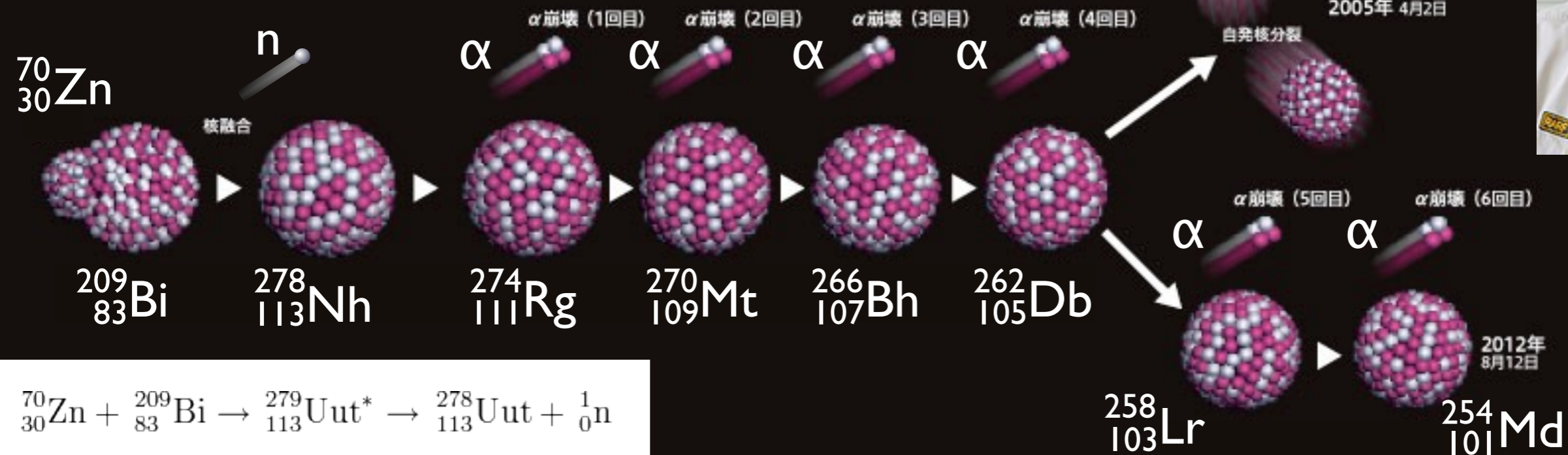
超重元素 $_{113}\text{Nh}$ ニホニウム 生成

2004, 05, 12年、理研 森田浩介氏ら



$^{278}_{113}\text{Nh}$ の合成と崩壊の様子

原子番号30の亜鉛 (^{70}Zn) と原子番号83のビスマス (^{209}Bi) が核融合を起こし、原子番号113の ^{278}Nh が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 (^{278}Nh) は、4回の α 崩壊を繰り返し、原子番号105のドブニウム (^{262}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}Nh は、 ^{262}Db からさらに2回の α 崩壊を繰り返し、原子番号103のローレンシウム (^{258}Lr)、原子番号101のメンデレビウム (^{254}Md) となった。3個の ^{278}Nh 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。



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											4 B 10.811	5 C 12.010	6 N 14.006	7 O 15.999	8 F 18.998	9 Ne 20.180
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 39.948
4 K 39.098	5 Ca 40.078	21 Sc 44.955	22 Ti 47.867	23 V 50.941	24 Cr 51.996						31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80	
5 Rb 85.467	6 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96						49 In 114.81	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.905	54 Xe 131.29	
6 Cs 132.90	7 Ba 137.32	57-71 Lanthanides	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94	74 W 183.84	75 Re 186.20	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.08	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
7 Fr (223)	8 Ra (226)	89-103 Actinides	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Nh (284)	114 Fl (289)	115 Mc (288)	116 Lv (292)	117 Ts (294)	118 Og (294)

113 Nh
Nihonium
铈

116 Lv
Livermorium
鉷

114 Fl
Flerovium
鈇

鎢

砷

氮

米口の共同研究

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

放射性元素の命名 (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：116Lv, 117Ts

84Po, 87Fr, 95Am, 97Bk, 98Cf, 105Db, 108Hs, 110Ds, 113Nh, 115Mc,

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, 114Fl, 118Og

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

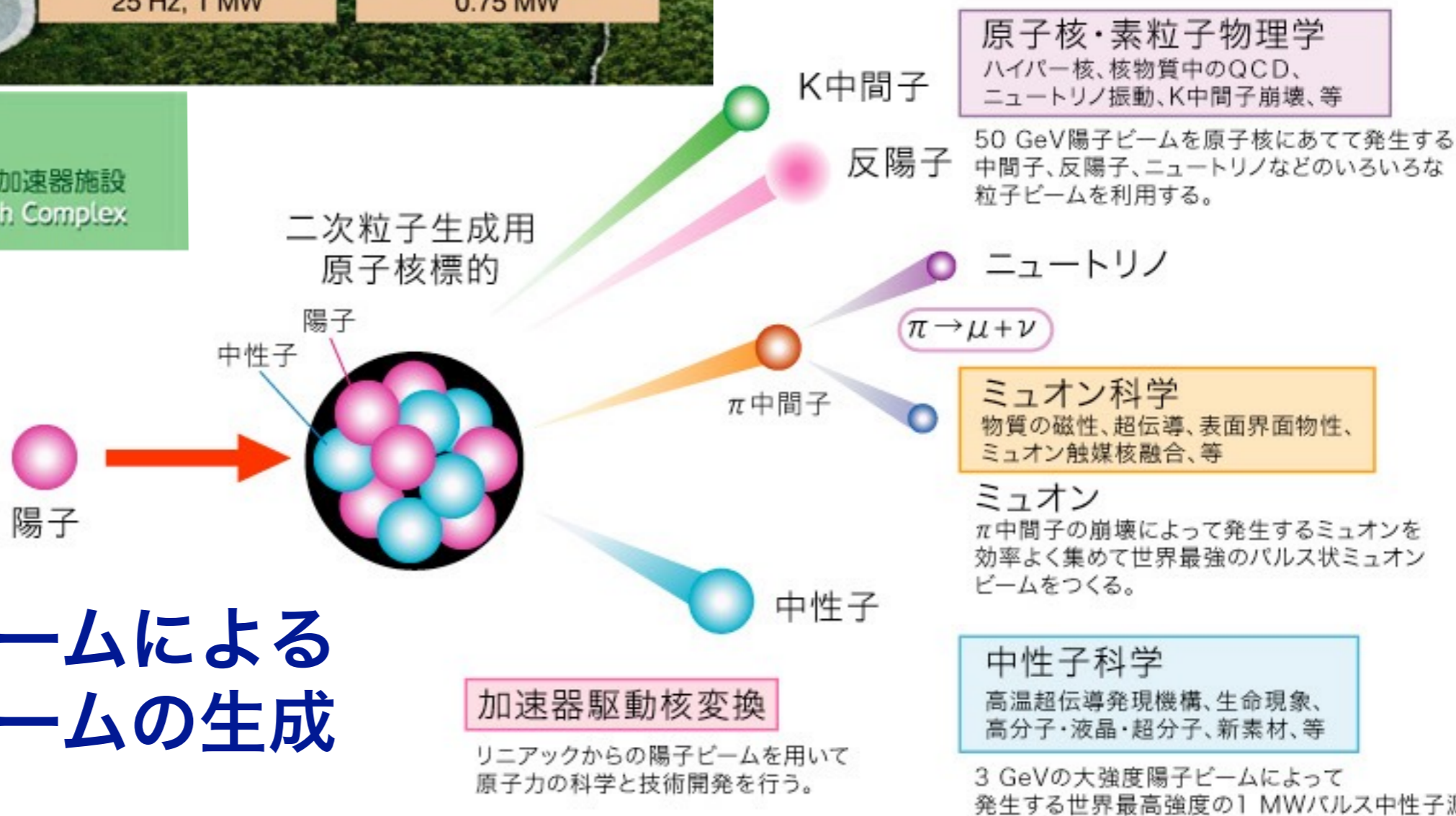
ドイツ重イオン研究所 GSI (Darmstadt)：107, 108Hs, 109, 110Ds, 111, 112

日本 理化学研究所 RIBF：113Nh



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

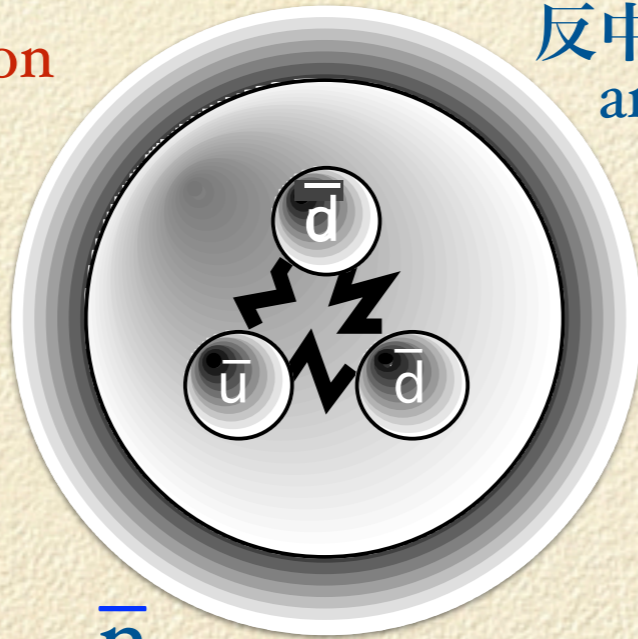
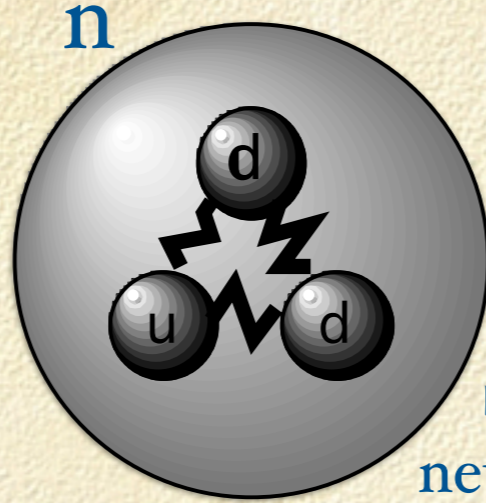
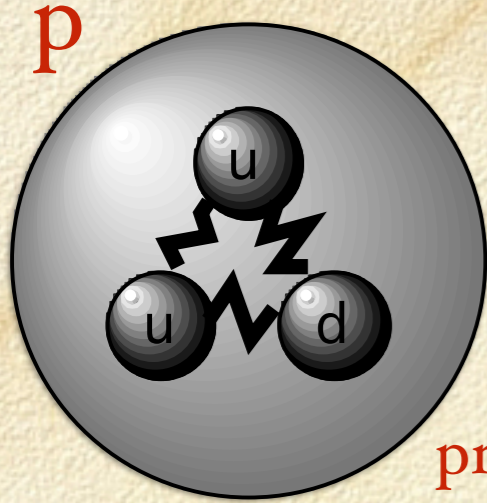
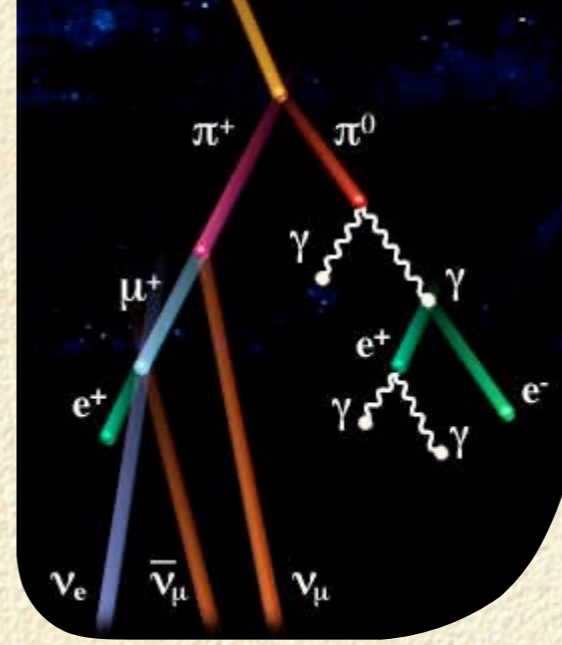
J-PARC 大強度陽子加速器施設
Japan Proton Accelerator Research Complex



大強度陽子ビームによる 多様な粒子ビームの生成

Hadron Baryon

Lepton



正ミュー粒子
muon

陽電子 positron

電子 electron

負ミュー粒子
muon

電子 electron



μ^-

e^-

p

n

\bar{p}

\bar{n}

陽子
proton

中性子
neutron

反陽子
antiproton

反中性子
antineutron

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

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

$106 \text{ MeV}/c^2$

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

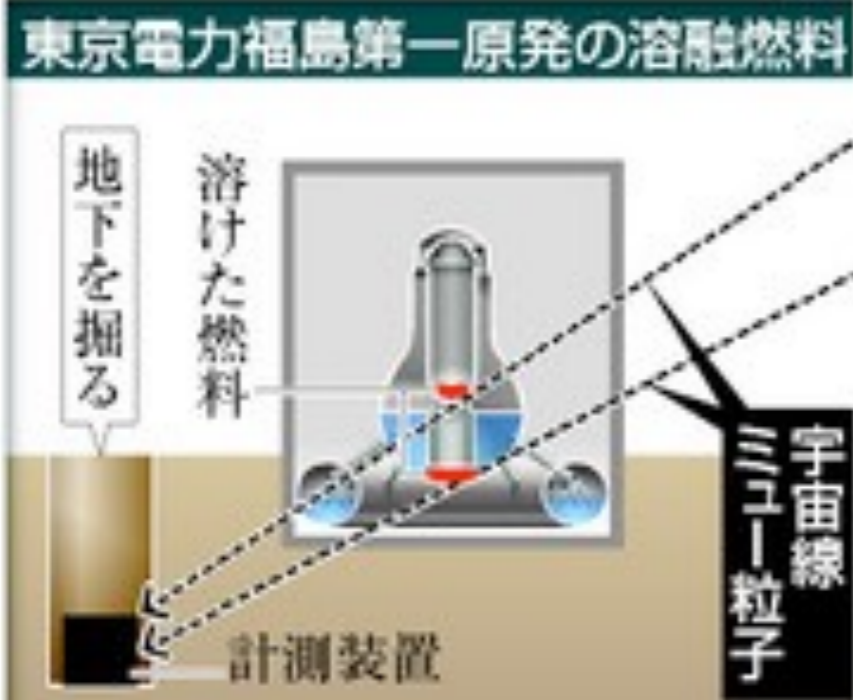
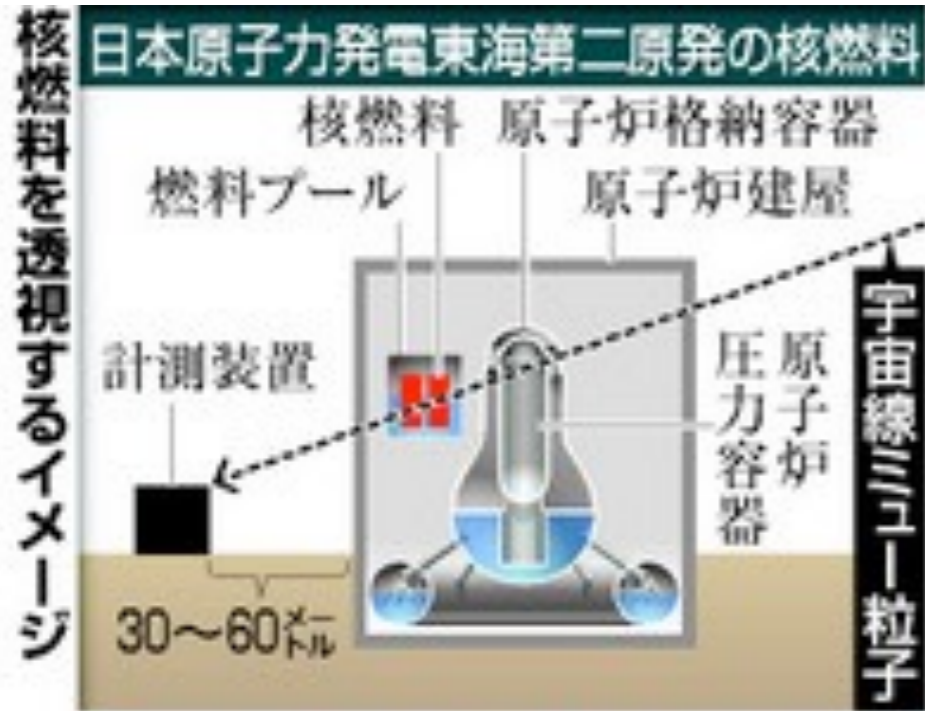
$\tau = \infty$

$\tau = 10 \text{ min}$

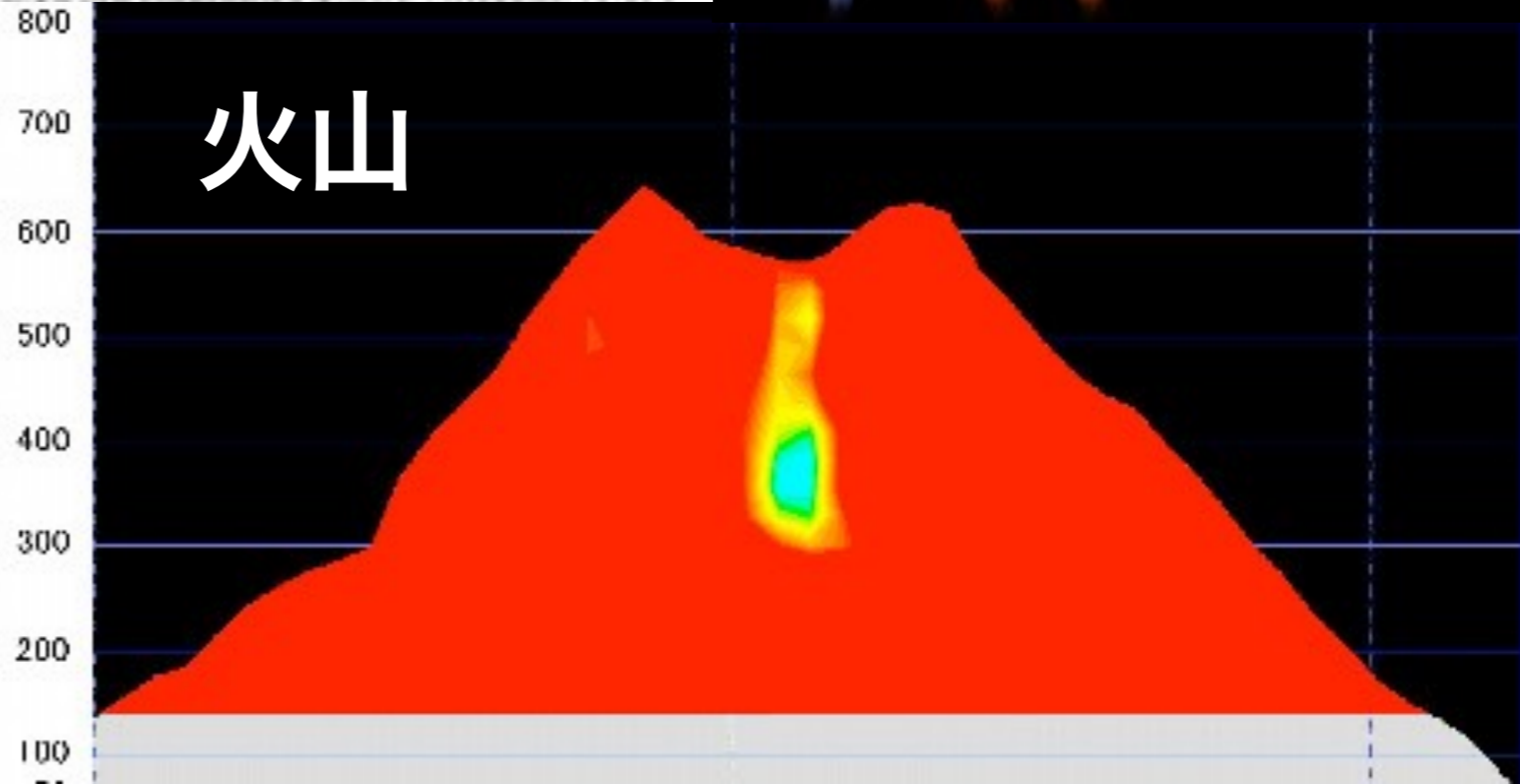
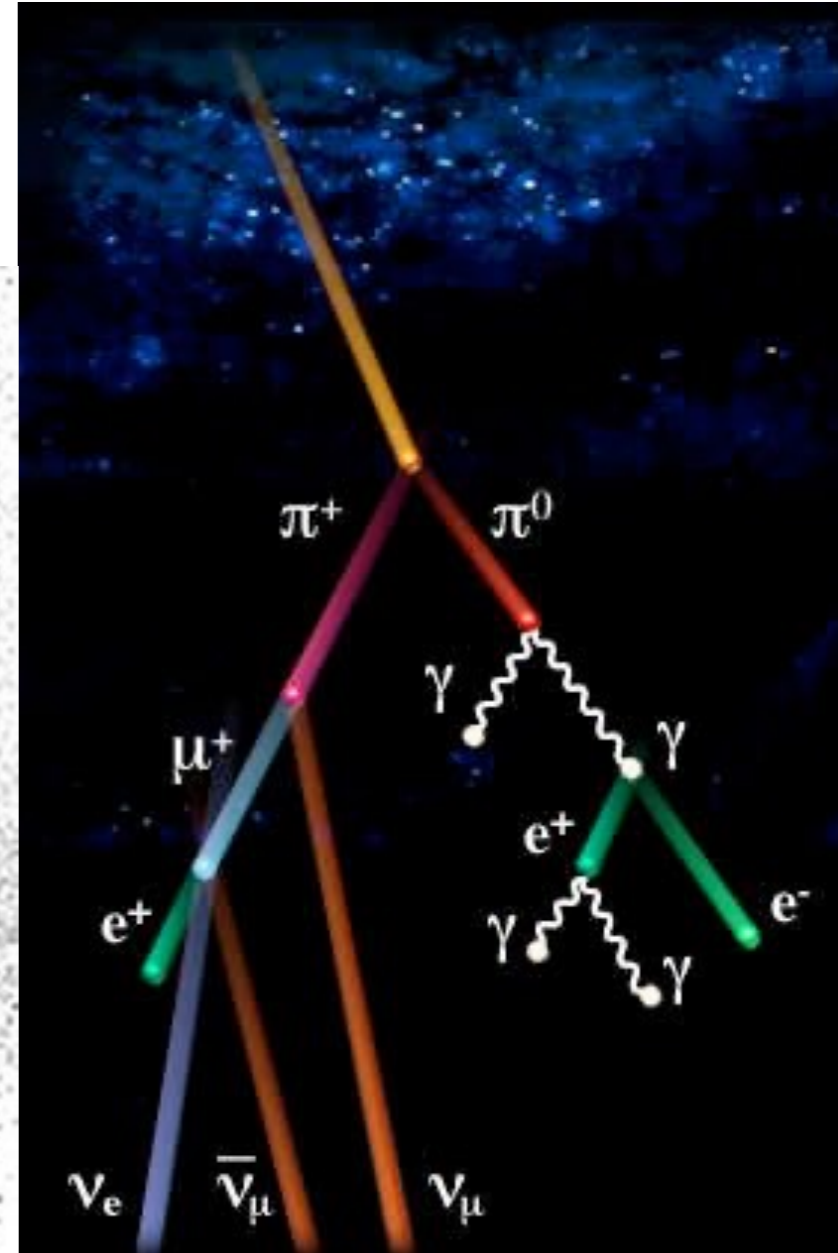
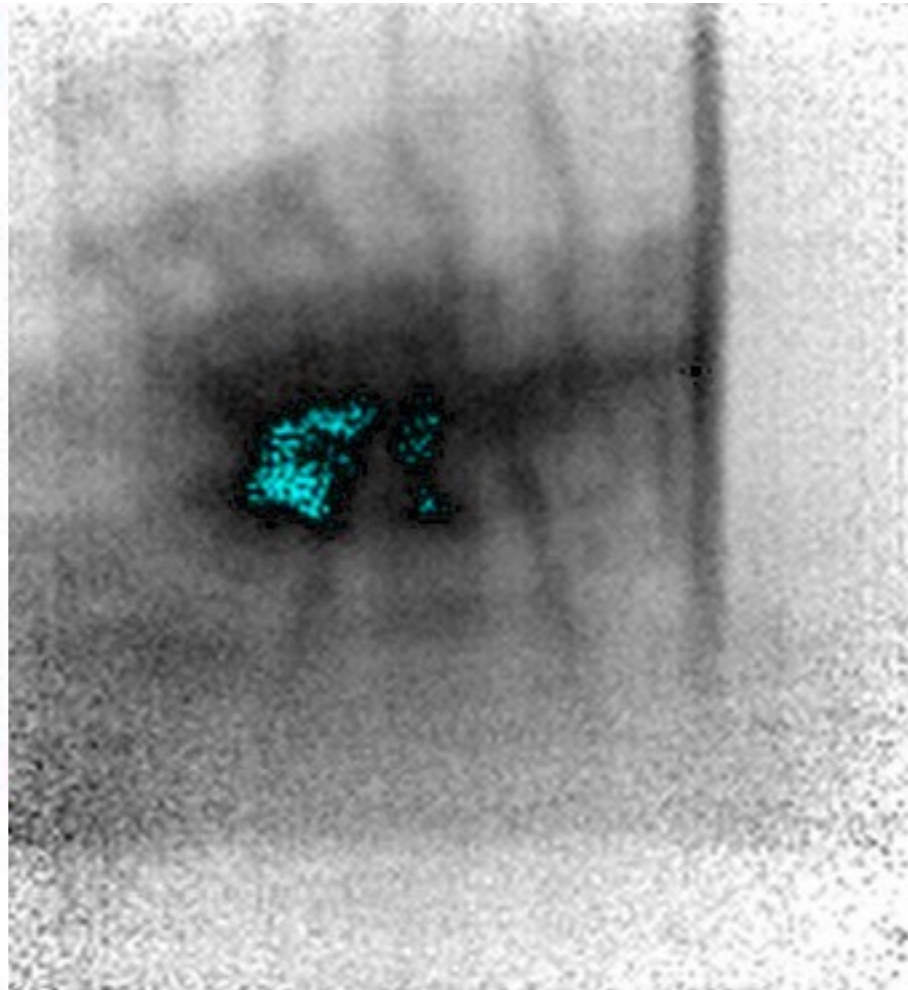
$\tau = 2.2 \mu\text{s}$

$\tau = \infty$

宇宙線（ミュオン）で内部を覗く



2014.1.23 朝日新聞デジタル



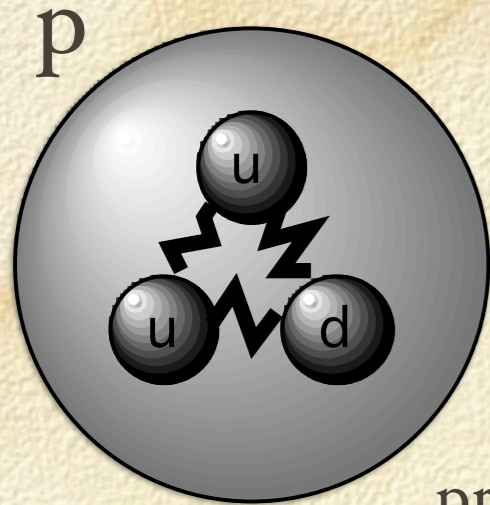
原発の核燃料

Hadron

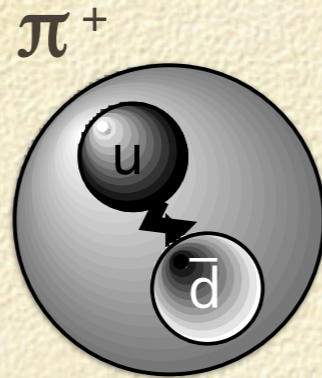
Lepton

Baryon

Meson

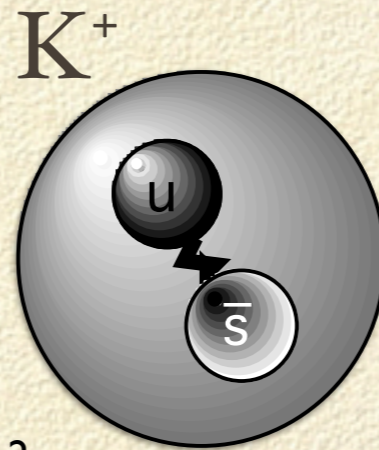


陽子
proton

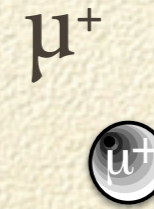
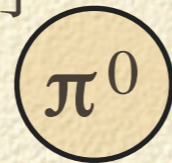


135
MeV/c²

パイ中間子
pion



K 中間子
kaon



ミュー粒子
muon



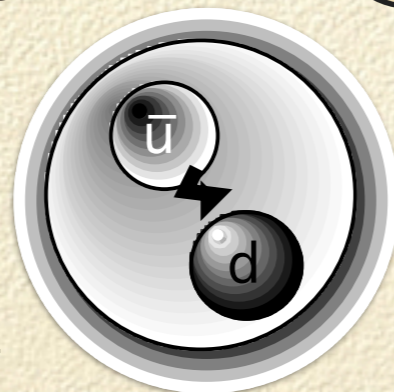
陽電子 positron



938 MeV/c²

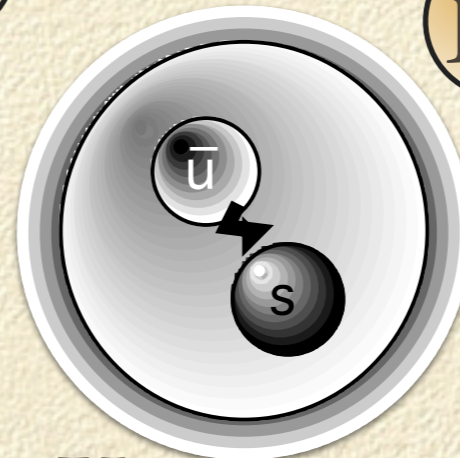
$\tau = \infty$

反陽子
antiproton



140 MeV/c²

$\tau = 26 \text{ ns}$



494 MeV/c²

$\tau = 12 \text{ ns}$



498
MeV/c²



106 MeV/c²

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

電子 electron



e^-

511 keV/c²

$\tau = \infty$

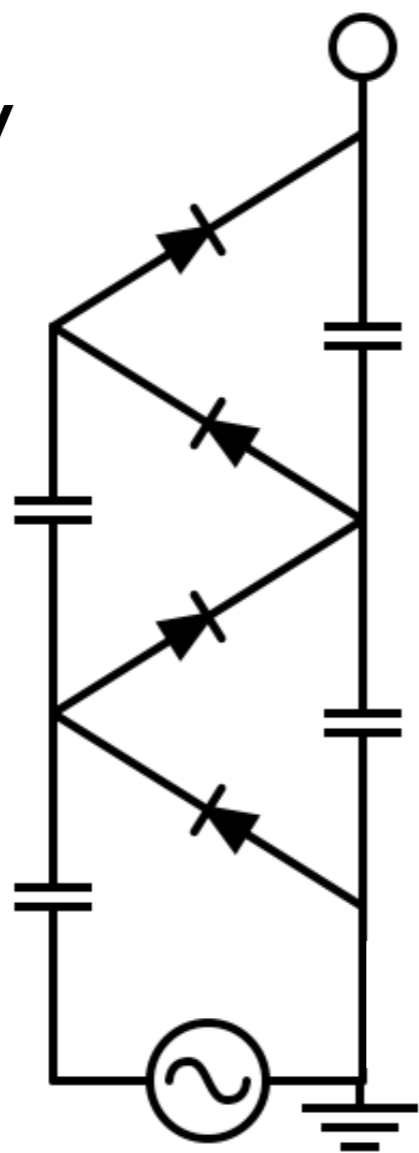
加速器科学

高電圧発生装置

コッククロフト・ワルトン型
Cockcroft-Walton

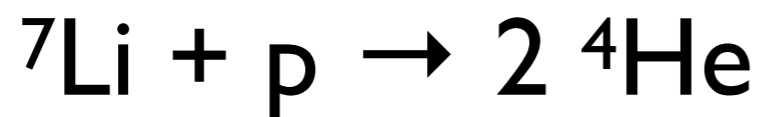
up to 4 MV

静電場



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

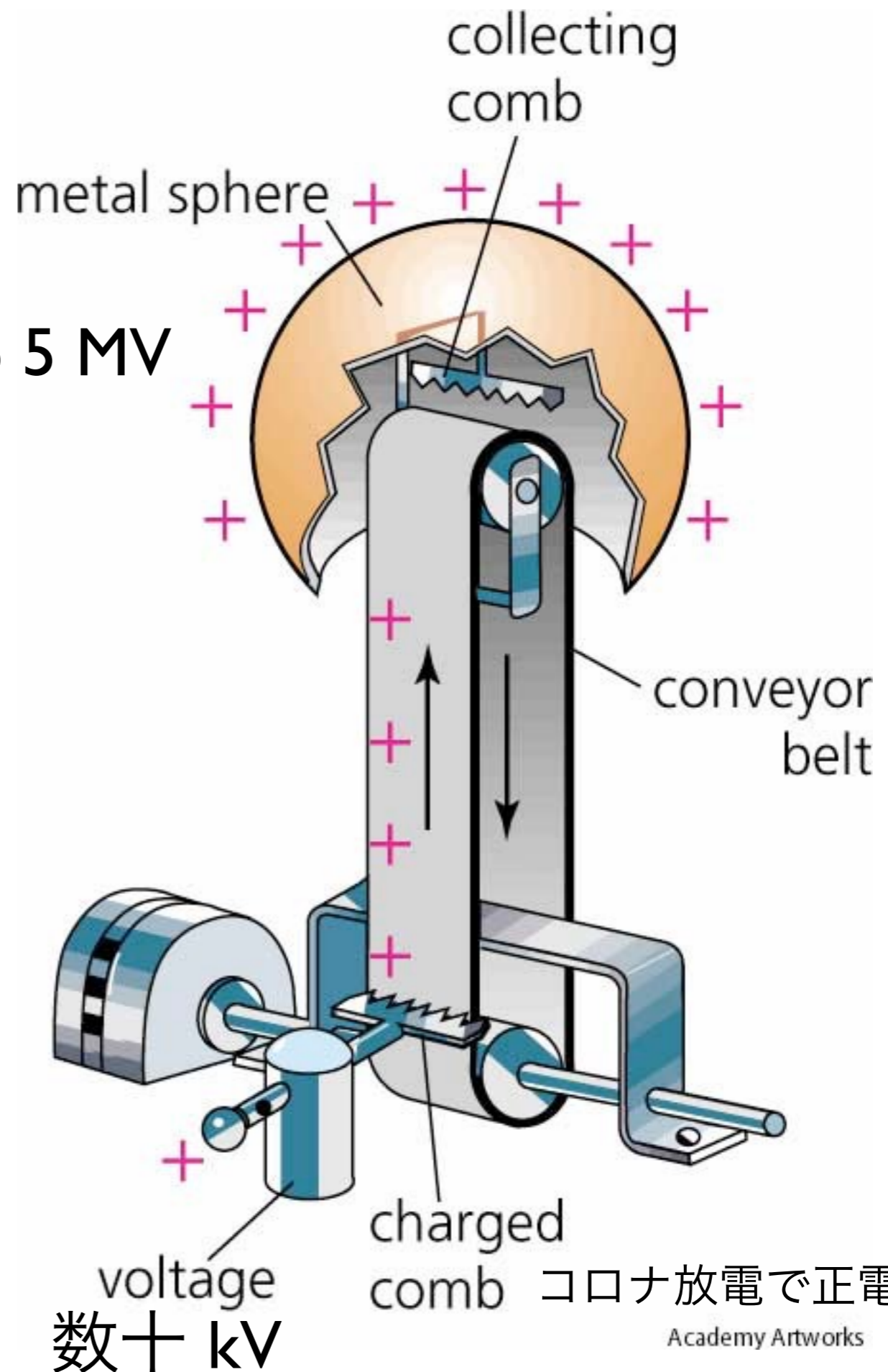
静電場

静電加速器

$$F = q E$$

⇒ タンデム加速器
Tandem accelerator

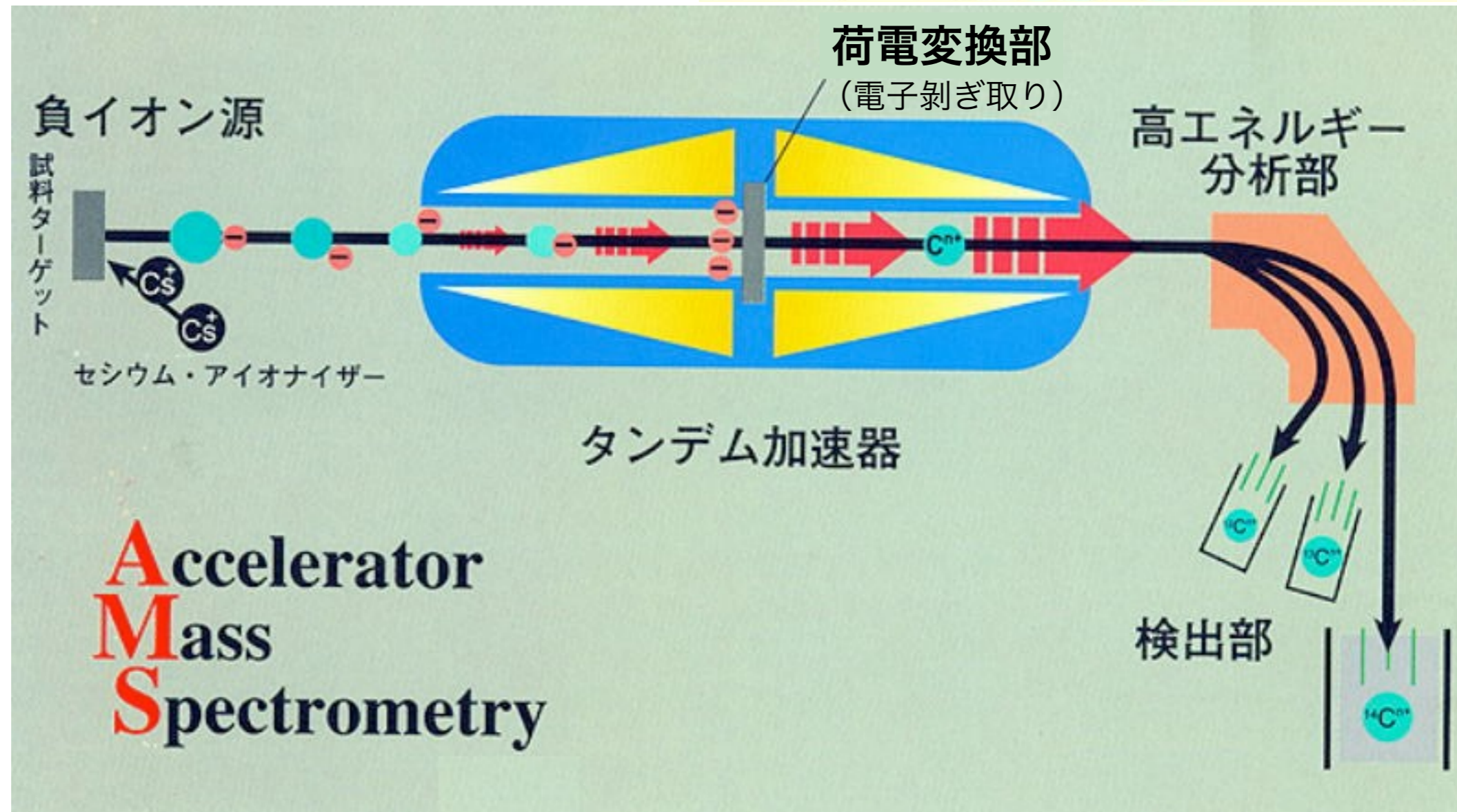
up to 5 MV



コロナ放電で正電荷生成

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

半減期

19.3秒

20.3分

99%

1%

存在比

5730年

2.4秒

炭素10

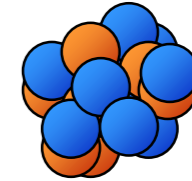
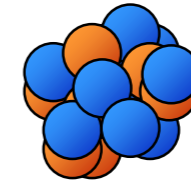
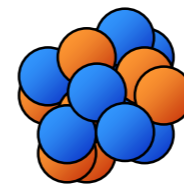
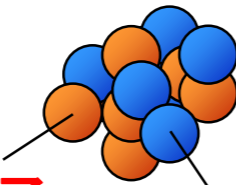
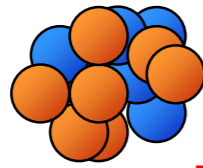
炭素11

炭素12

炭素13

炭素14

炭素15



陽子

中性子

^{10}C

^{11}C

^{12}C

^{13}C

^{14}C

^{15}C

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

中性子4

中性子5

中性子6

中性子7

中性子8

中性子9

陽子過剰になると？

(寿命がある: β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある: β^- 壊変)

放射性同位体

半減期

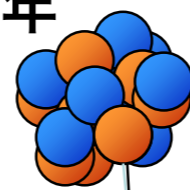
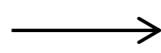
5730 ± 40年



中性子

炭素14

(放射性同位体)



陽子

窒素14

(安定)

+ e^-

電子

(β 線:放射線)

+ $\bar{\nu}_e$

反ニュートリノ

放射性同位体

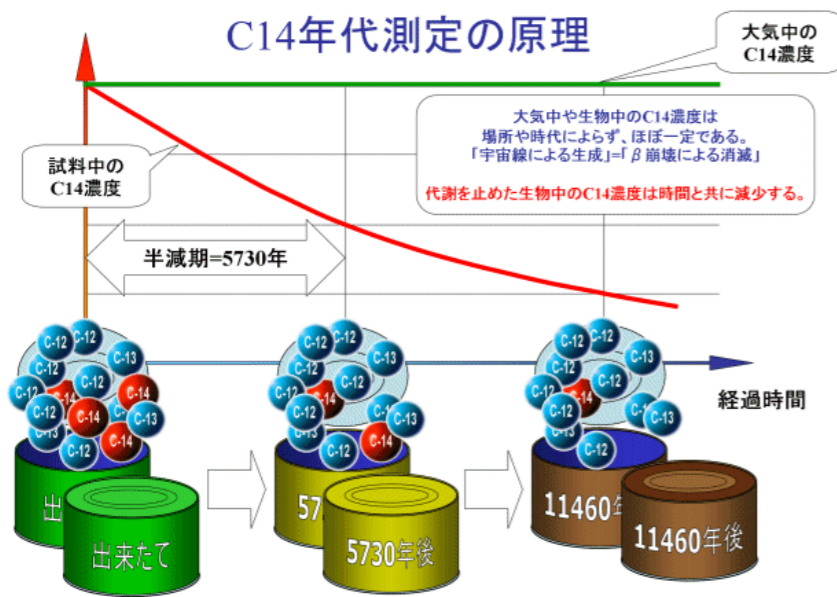
ベータマイナス壊変 (崩壊)

β^- decay



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



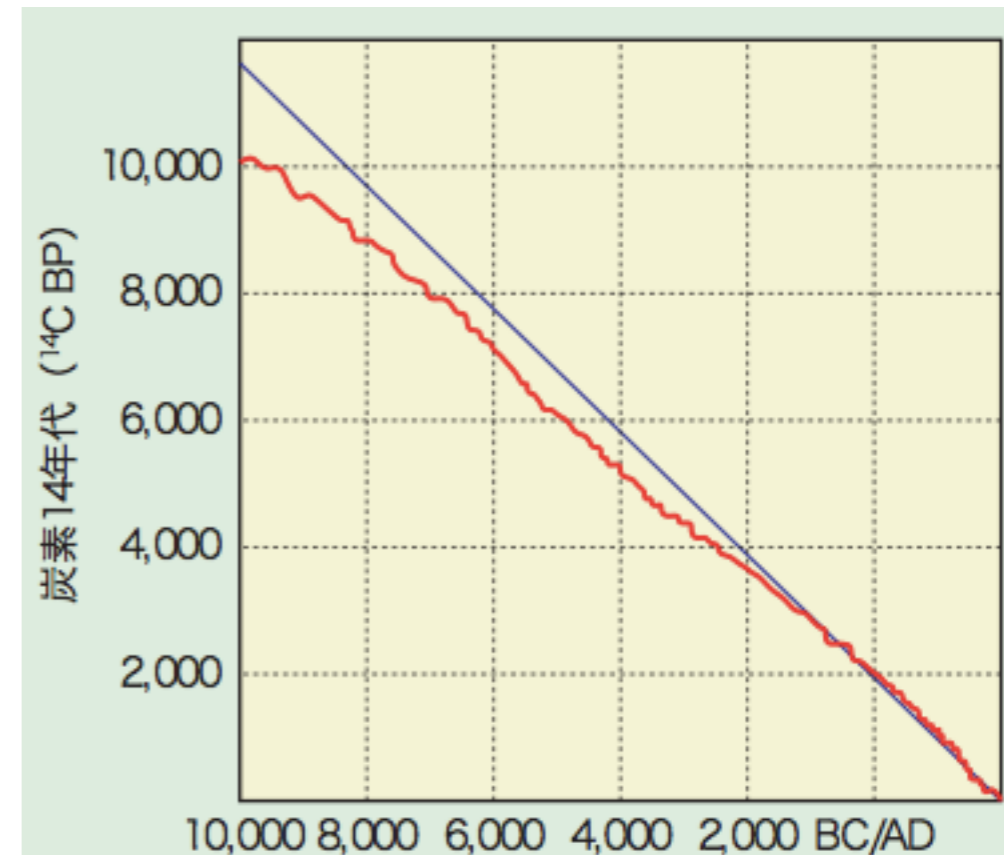
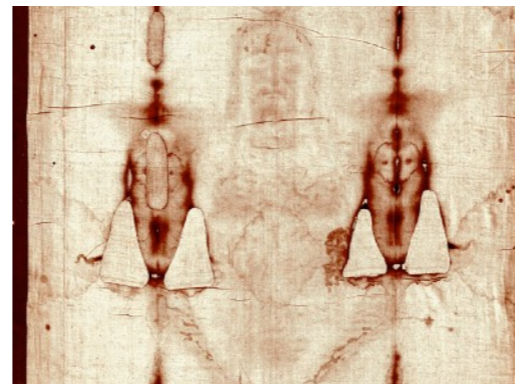
C14の濃度を測れば「代謝を止めてからの時間」が判る！

測定方法		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 - 10,000,000	鉱物
	ウラン・鉛法	10,000 - 10,000,000,000	鉱物
	ルビウム・ストロンチウム法	10,000 - 10,000,000,000	鉱物
	フィッション・トラック法	10,000 - 10,000,000	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 - 10,000	樹木
	氷縞粘土法	100 - 10,000	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}C , $^{40}\text{K}-\text{Ar}$, $\text{U}-\text{Pb}$, $\text{Rb}-\text{Sr}$
- 弥生時代
- 聖骸布 (Torino の聖骸布 (1260-1390 A.D., 95% CL))
- 空気中の ^{14}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)

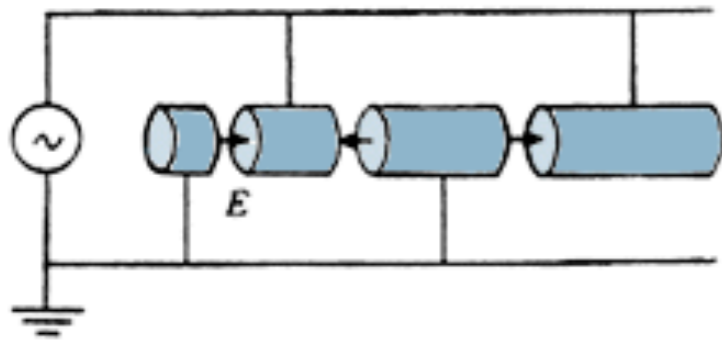


図1 ヴィデレー型リニアック

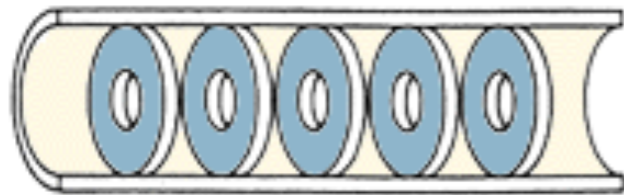


図2 円盤装荷導波管

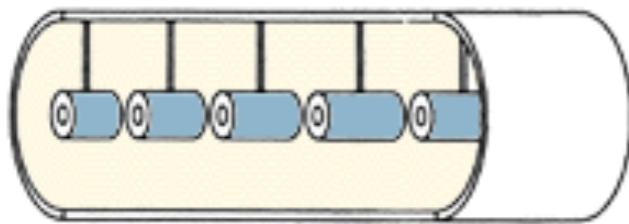
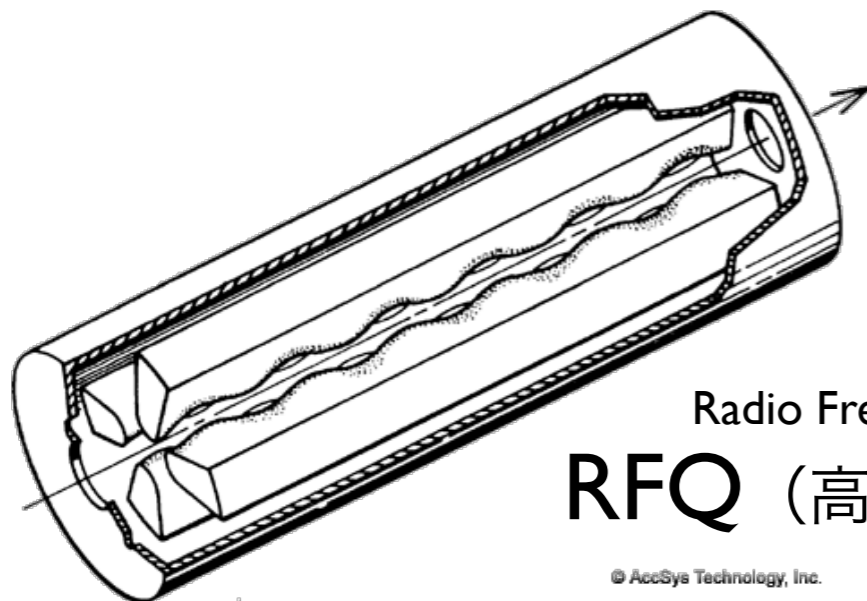


図3 アルバレ型リニアック

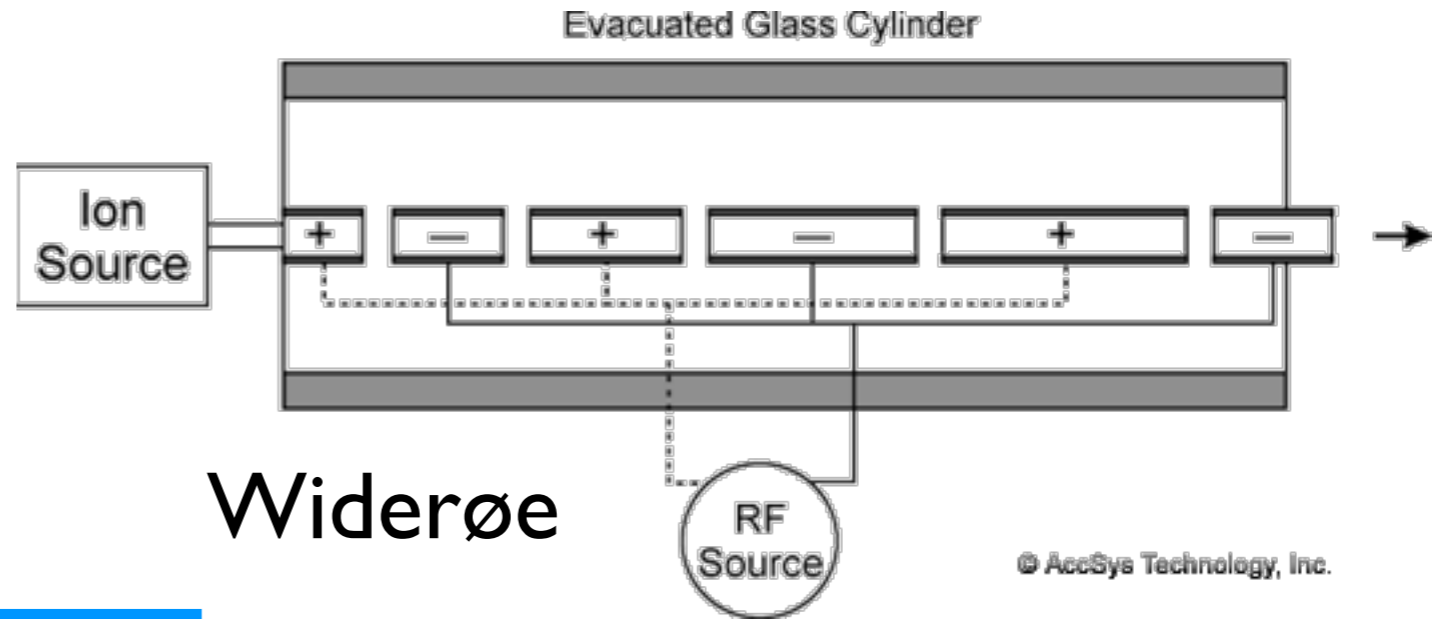
高周波電場

パルスビーム
(ビームバンチ)



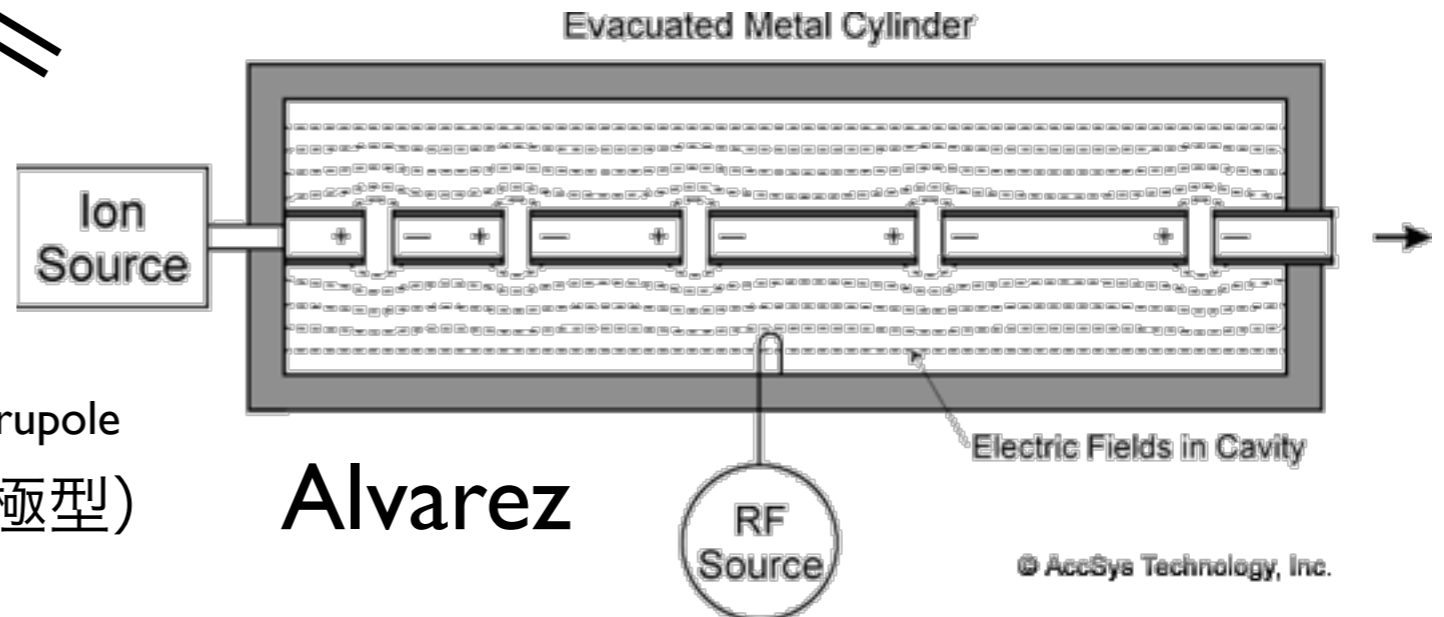
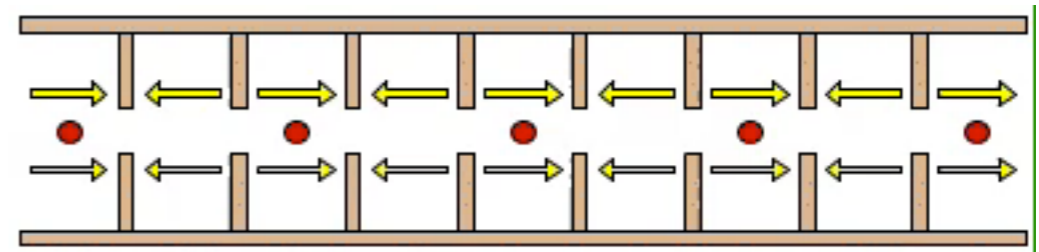
Radio Frequency Quadrupole
RFQ (高周波四重極型)

© AccSys Technology, Inc.



Widerøe

© AccSys Technology, Inc.

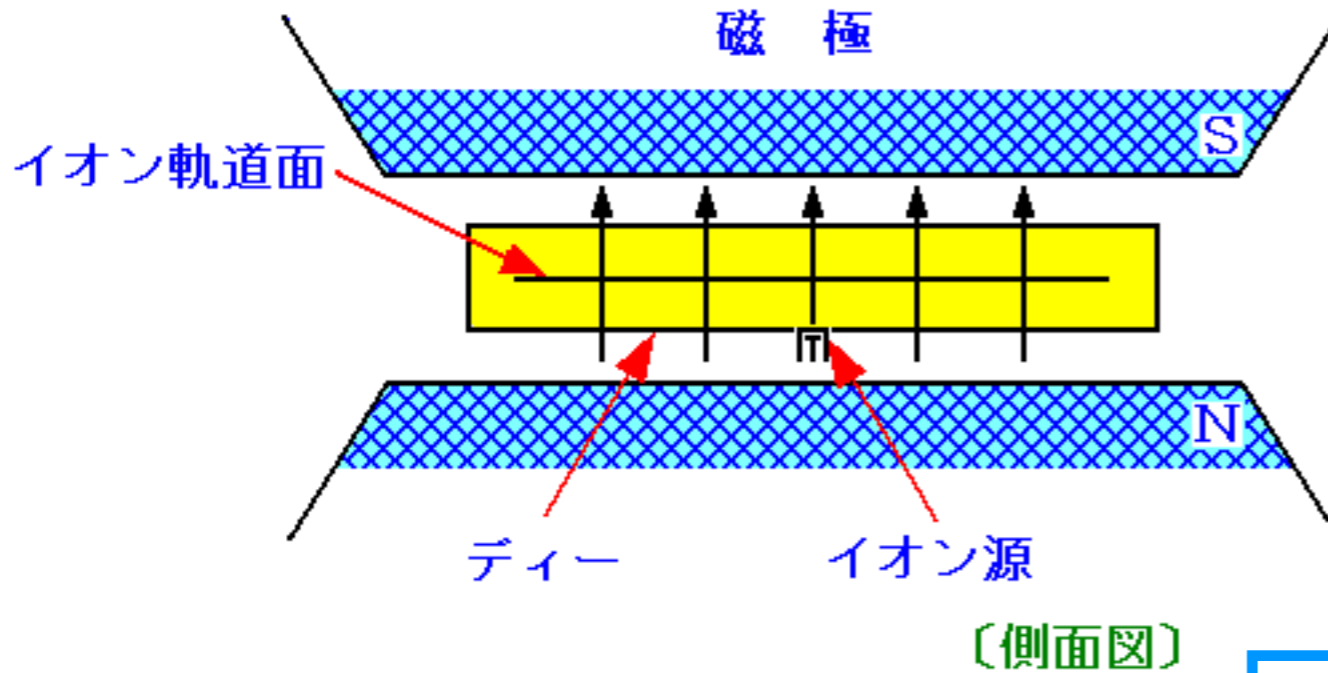


Alvarez

© AccSys Technology, Inc.

サイクロトロン Cyclotron

Lawrence (1929)



高周波電場

垂直磁場 (一定一様)

$$t = \frac{\pi m}{qB}$$

半周の時間
速度に依存しない

【発展】

相対論的領域では周期が遅れる

対処：シンクロサイクロトロン

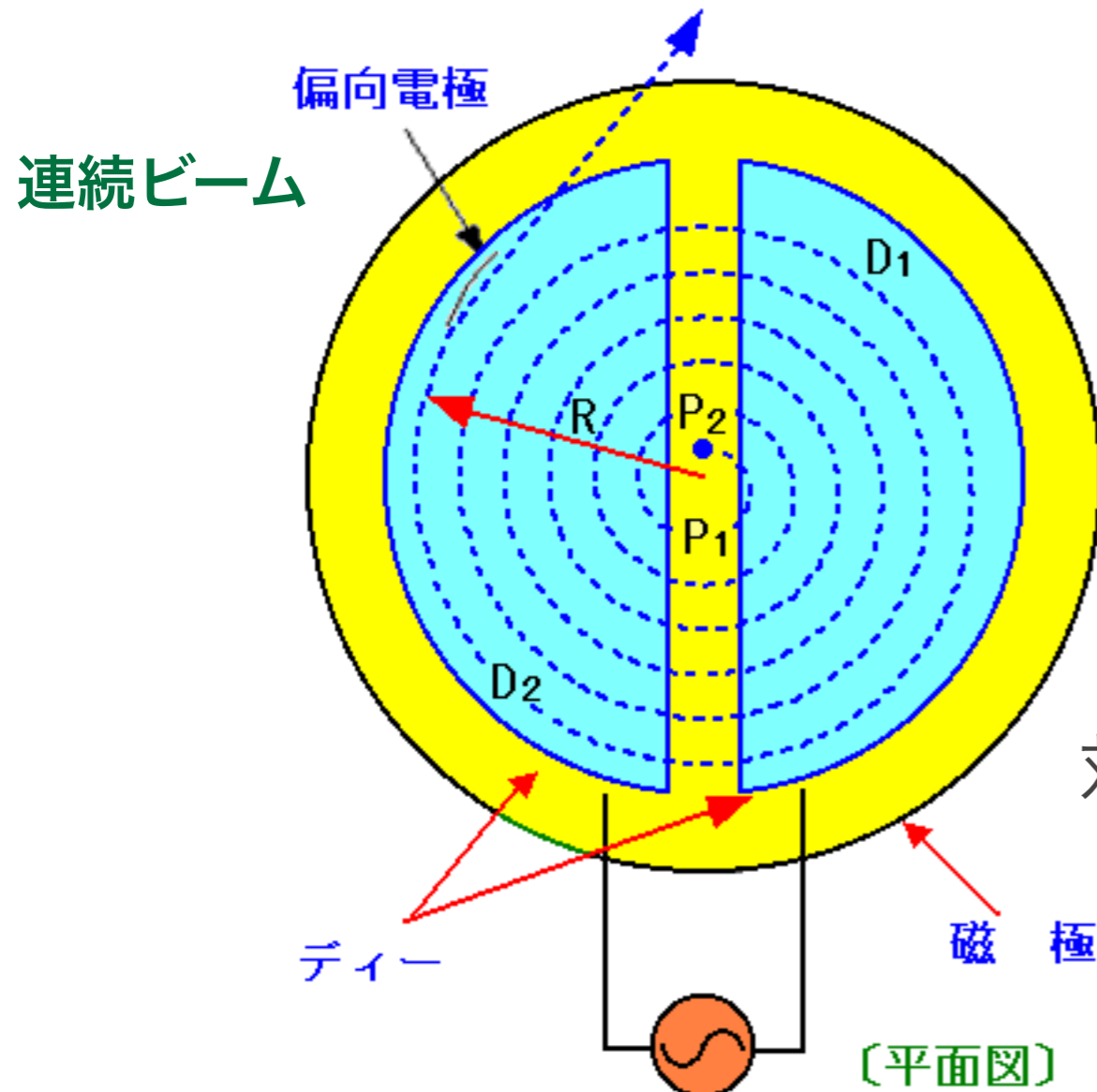
Synchrocyclotron

パルスビーム

AVF サイクロトロン

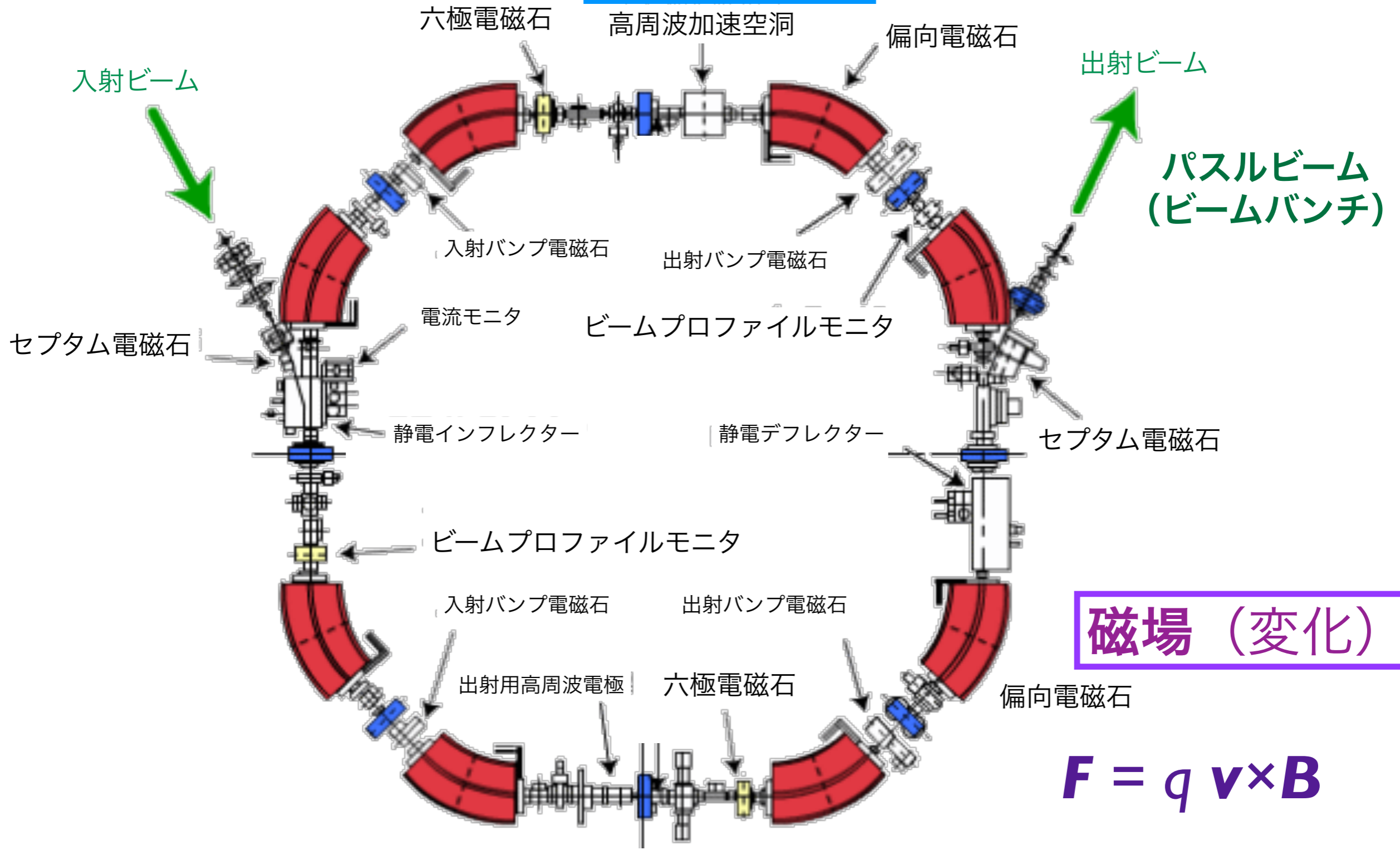
連続ビーム

Azimuthally-varying-field Cyclotron



シンクロトロン Synchrotron

高周波電場



パルスビーム
(ビームバンチ)

磁場 (変化)

$$F = q v \times B$$

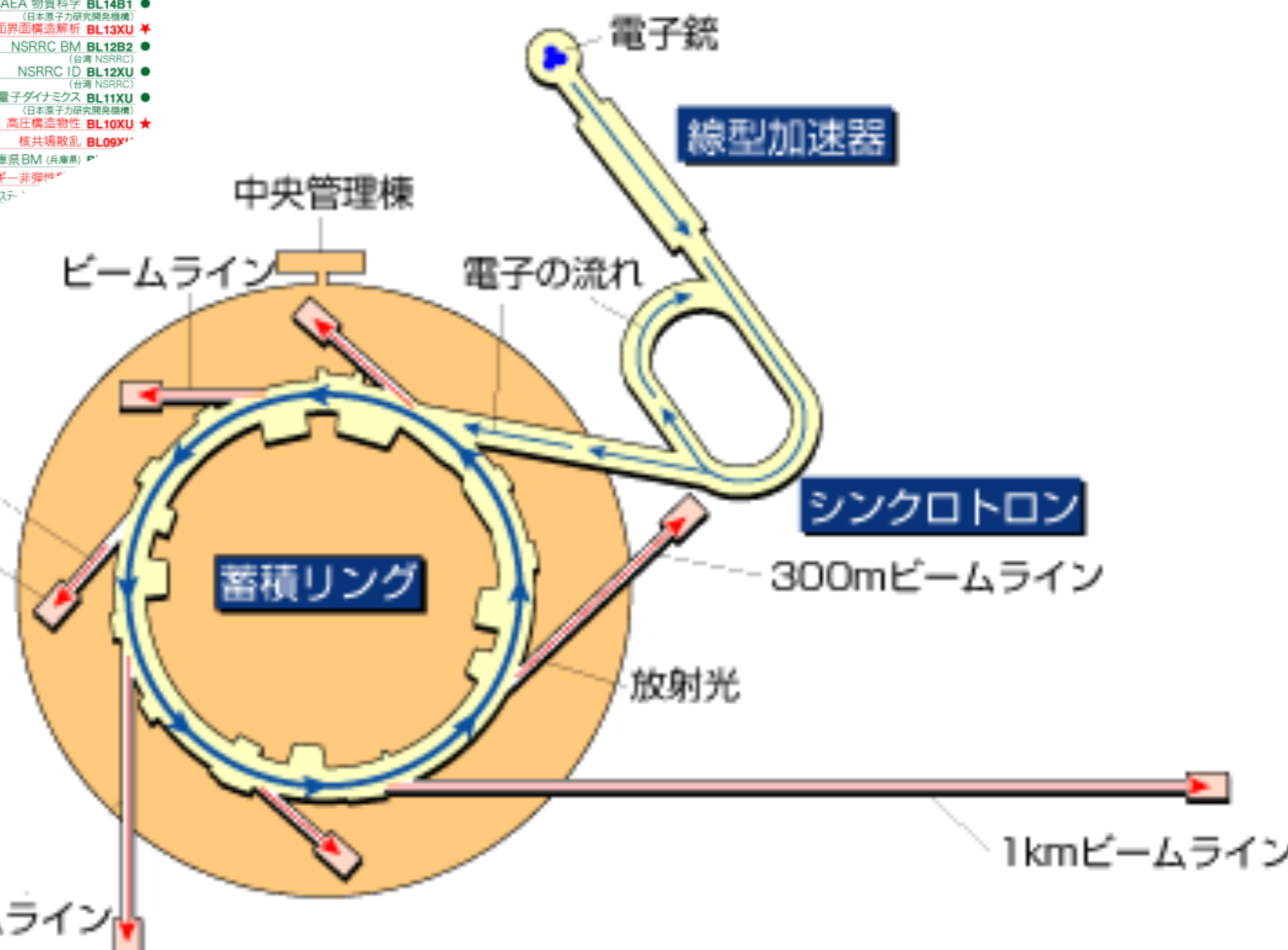
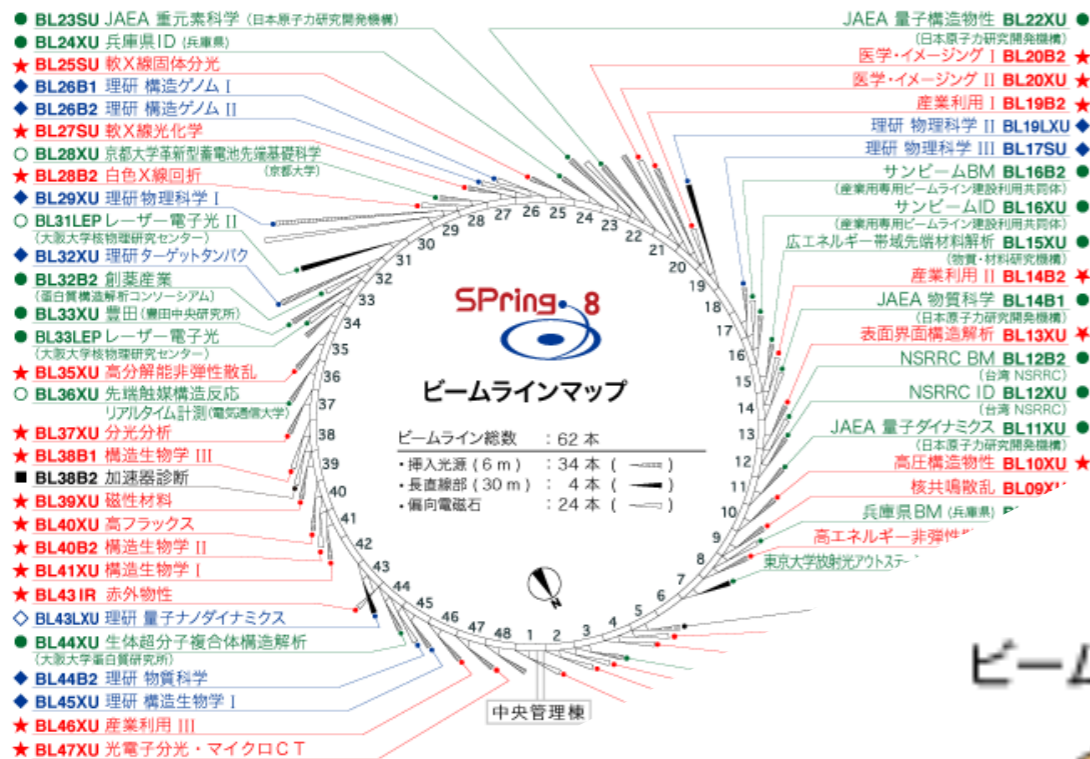
磁場による偏向・収束 (高エネルギー)

SPring-8 (大型放射光施設: 播磨)

8 GeV 電子ビーム ⇒ 放射光 (X線)



制動放射X線



医療用の重イオン加速器（シンクロトロン）



■小型重粒子線がん治療装置

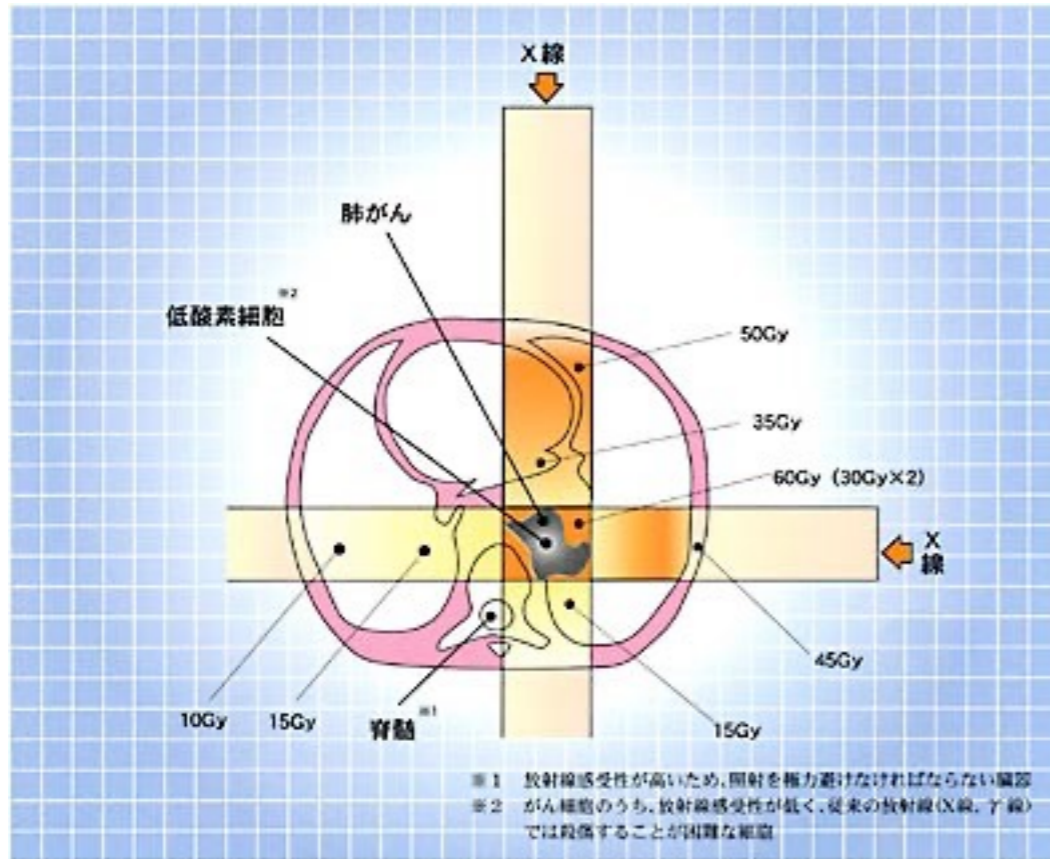
放医研における装置小型化開発研究の成果は、2006(平成18)年度から建設が始まる群馬大学の重粒子線がん治療装置に採用されています。放医研は群馬大学に装置を建設するための技術的な支援を行っています。

放射線医学総合研究所（千葉）



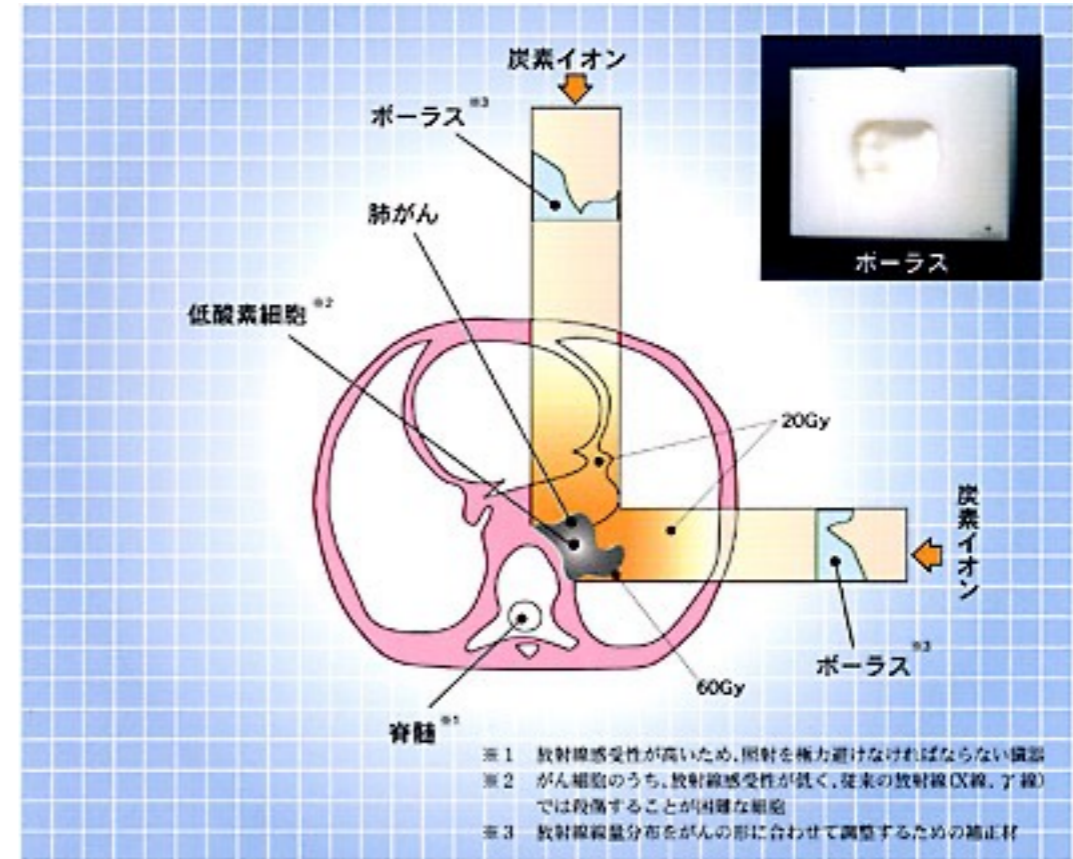
放射線医療：がん治療

X線

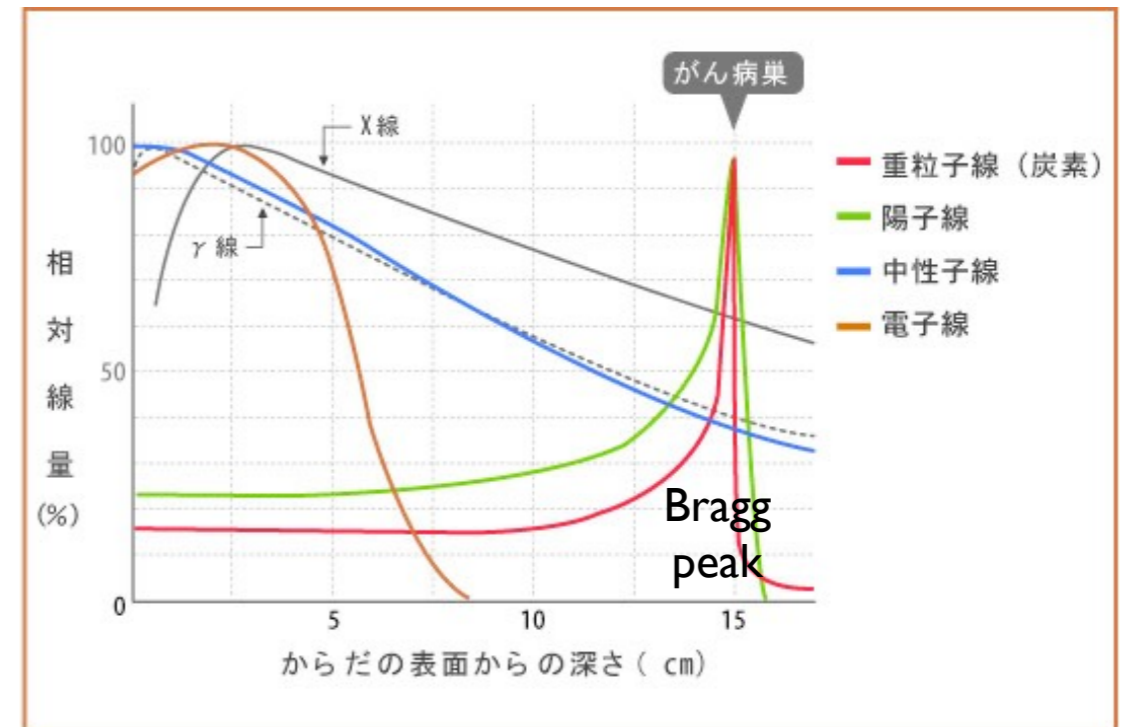


数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)

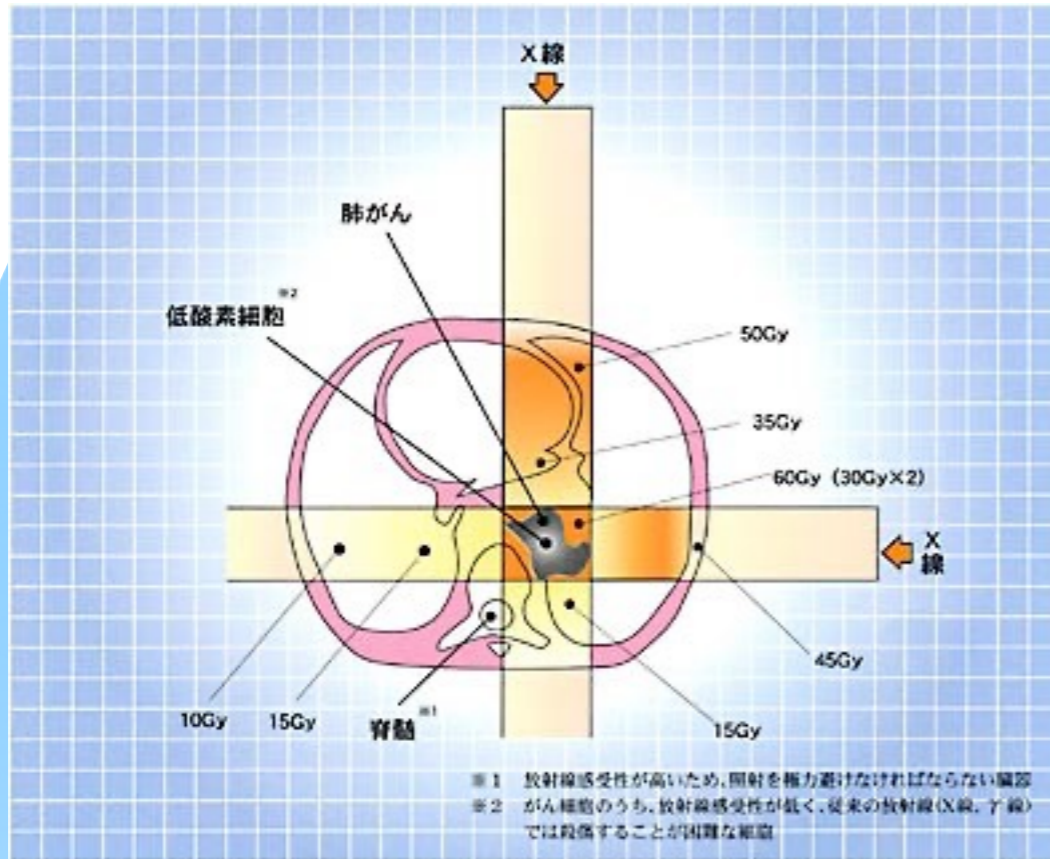


他には：ガンマナイフ、
陽子線、パイ中間子
研究中：反陽子



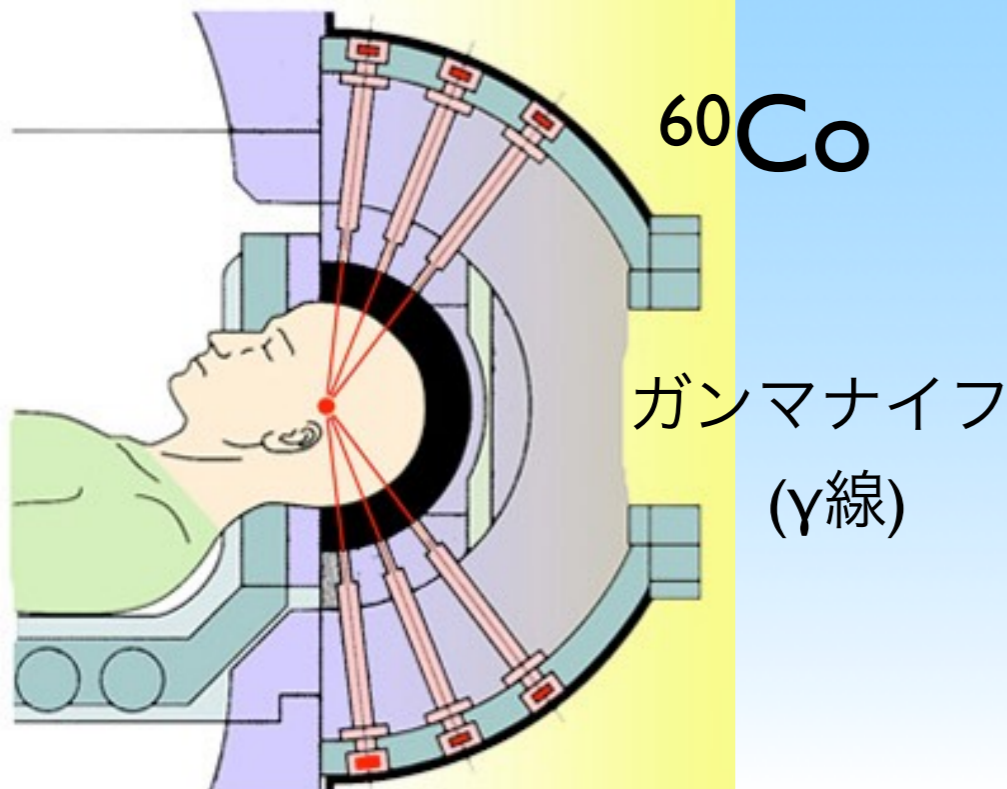
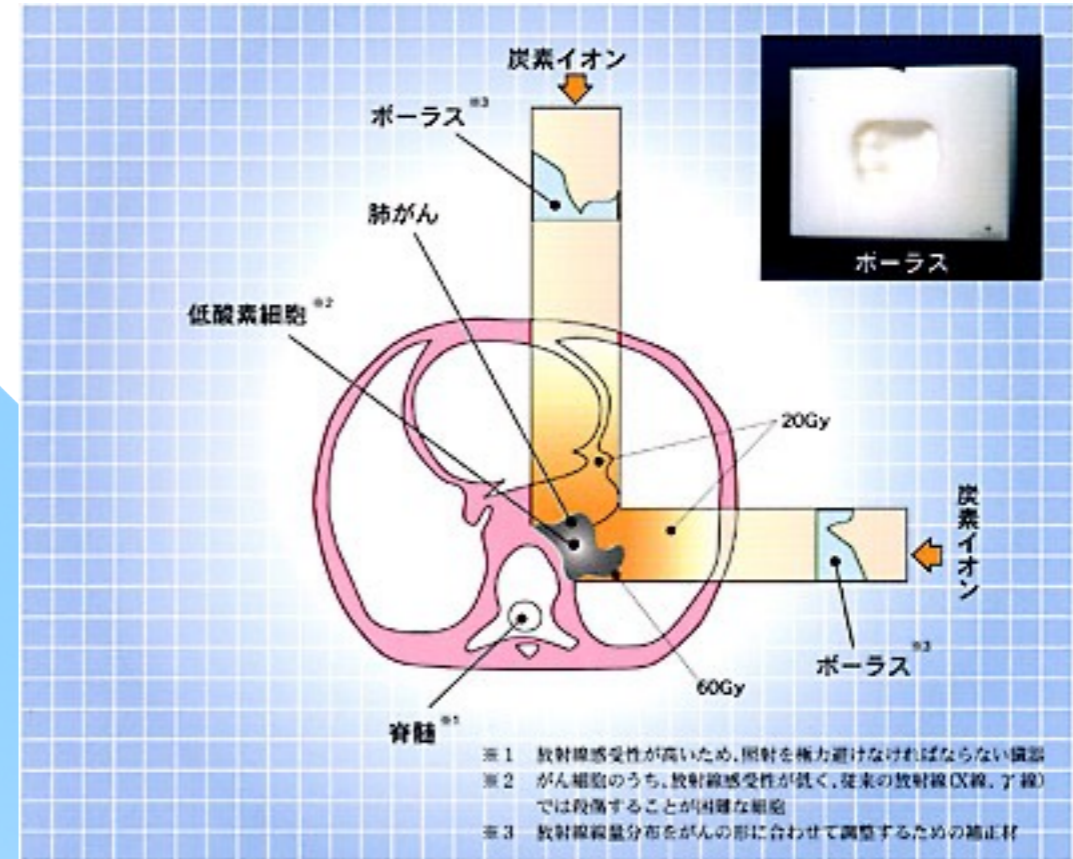
放射線医療：がん治療

X線



数 Gy を複数回

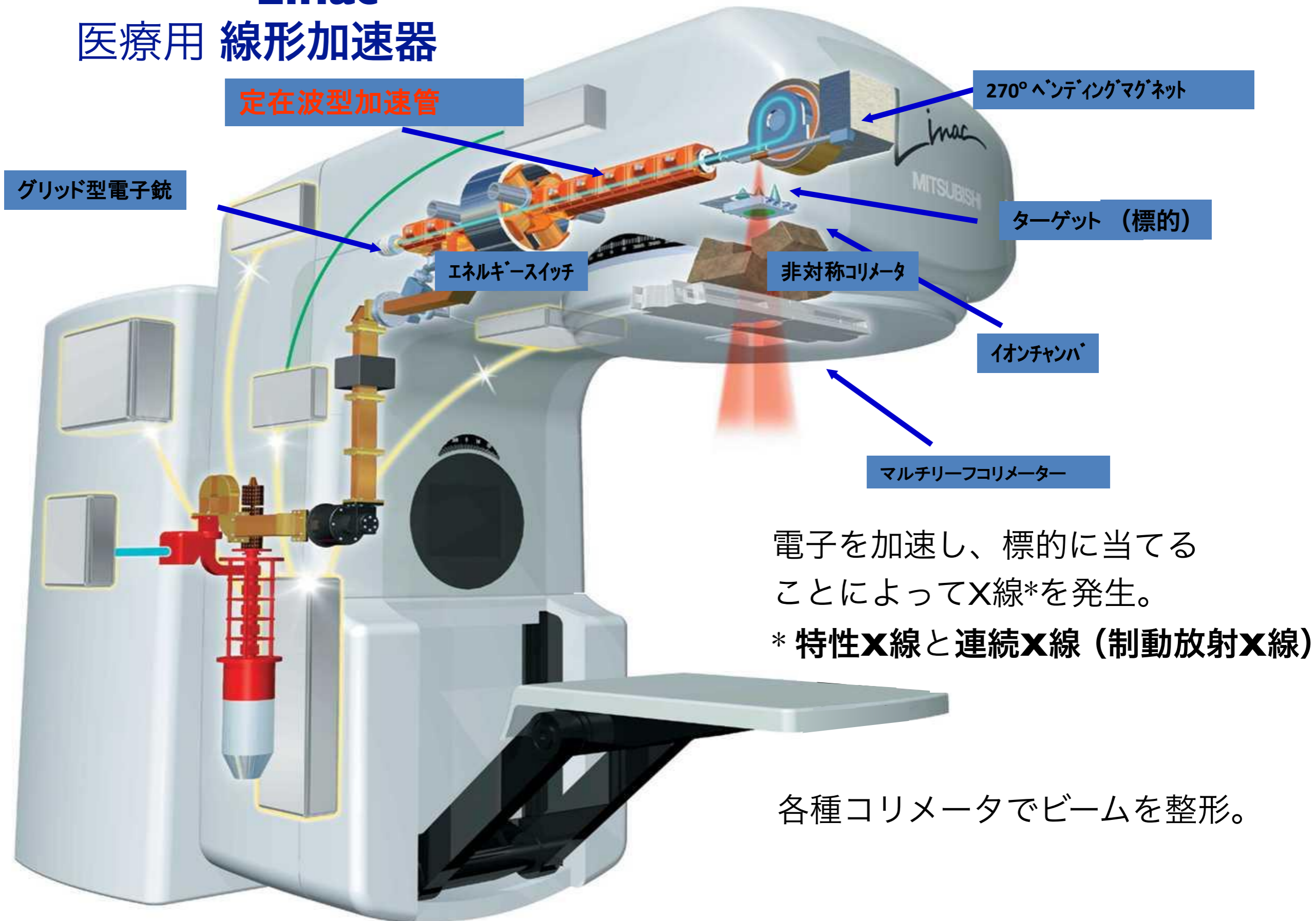
重粒子線 (炭素イオン)



サイバーナイフ
(X線)

Linac

医療用 線形加速器





CERN

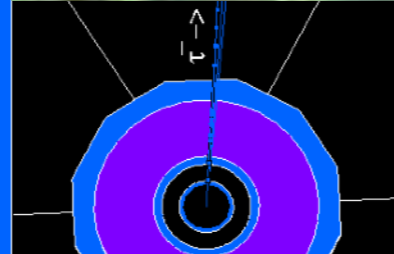
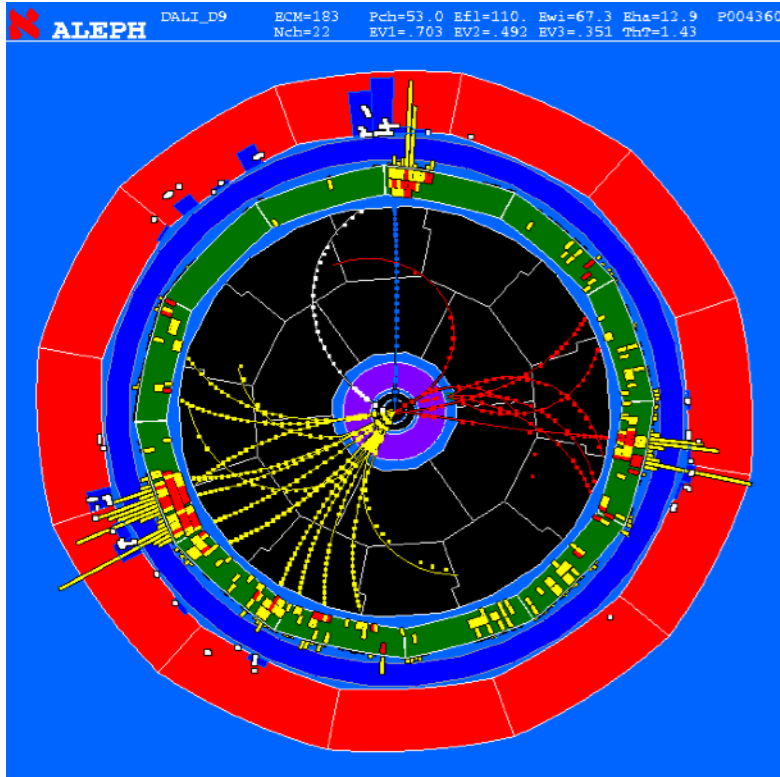
セルン：欧州合同原子核研究機関
European Organization for Nuclear Research
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

Questions:

Why accelerators?

Why so large?

Why circular rings?



素粒子物理学

物質粒子

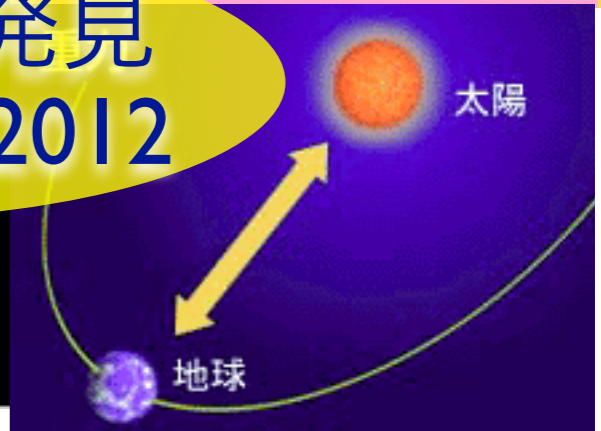
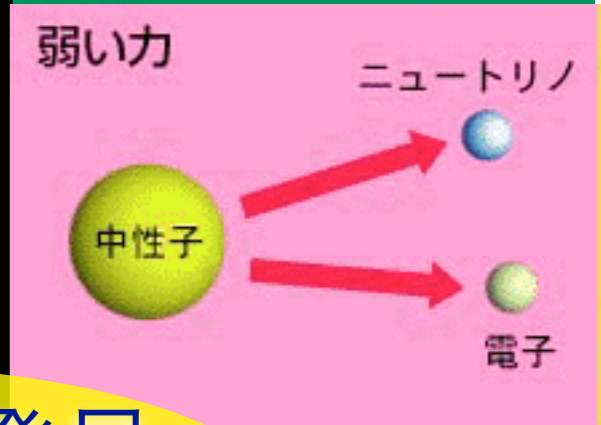
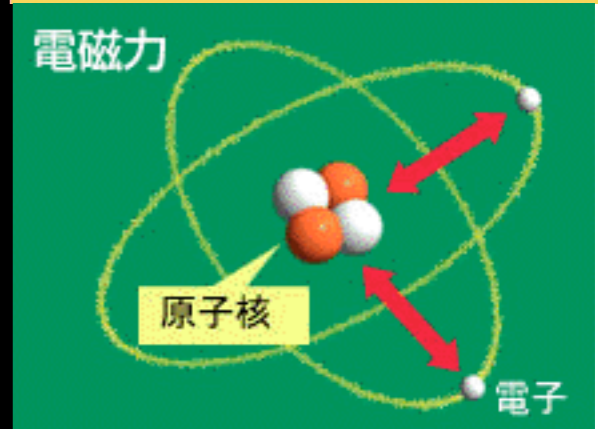
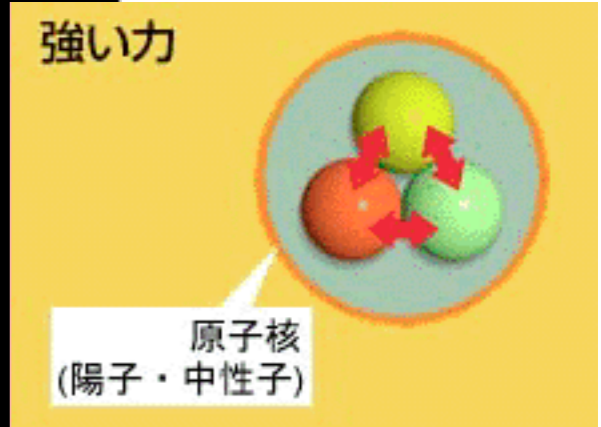
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

top quark 発見
at Fermilab in 1995

強い力
グルーオン g

電磁力
光子 γ

弱い力
W ボゾン W^+ W^- Z ボゾン Z



ヒッグス場に伴う粒子
(~~未発見~~)

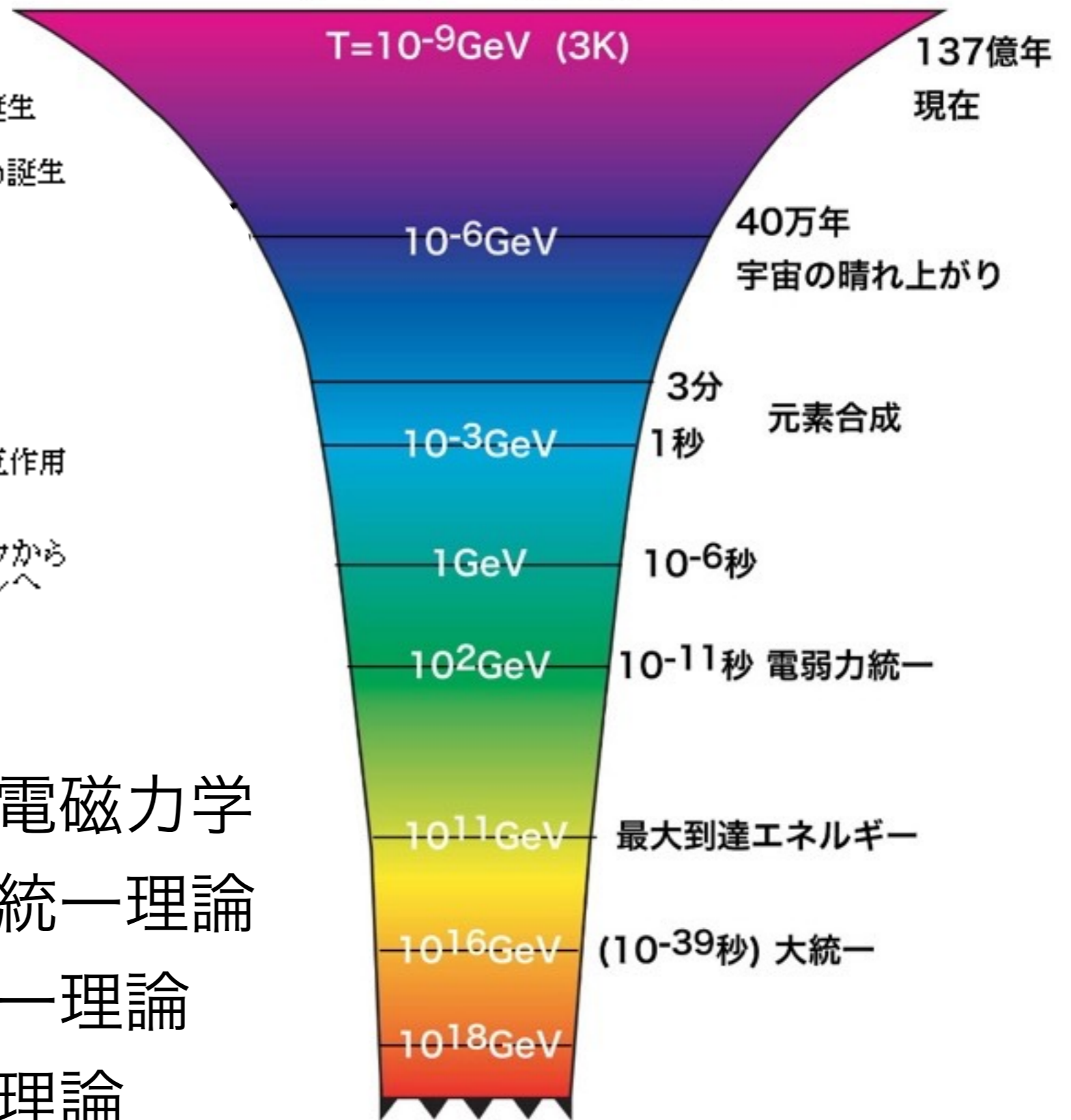
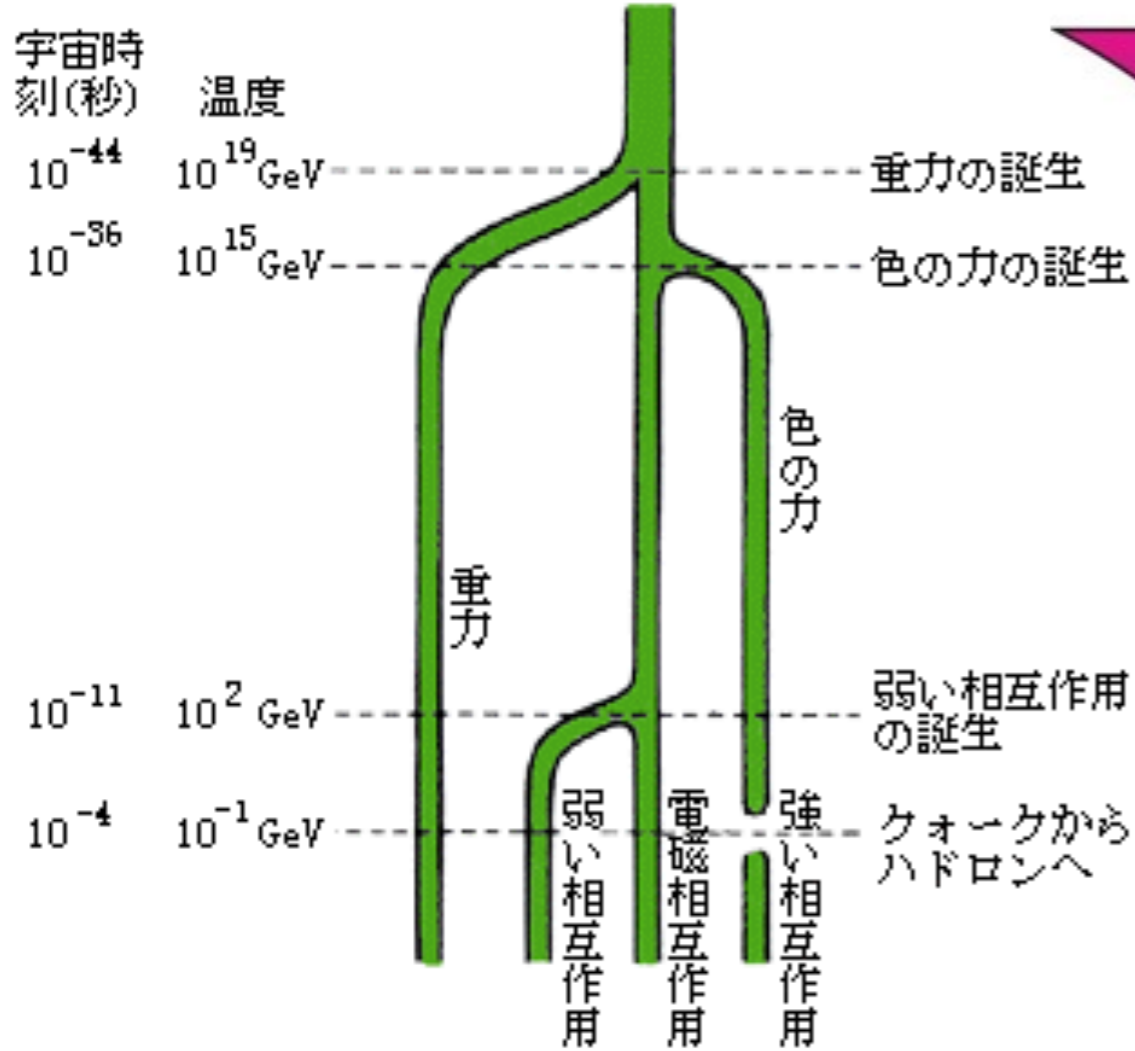
H
ヒッグス粒子

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

質量の起源
Higgs 粒子

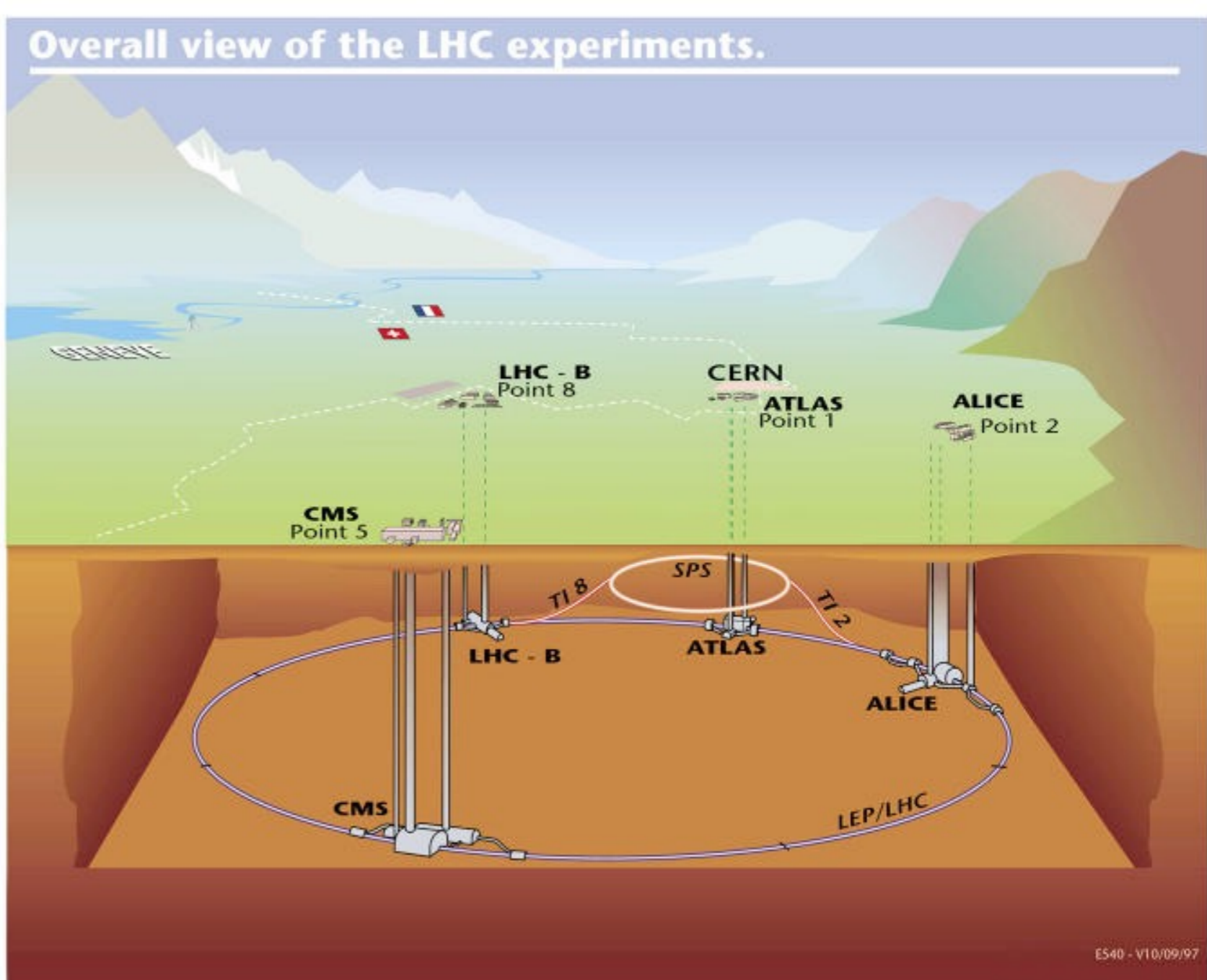
量子電磁力学
電弱統一理論
大統一理論
超弦理論

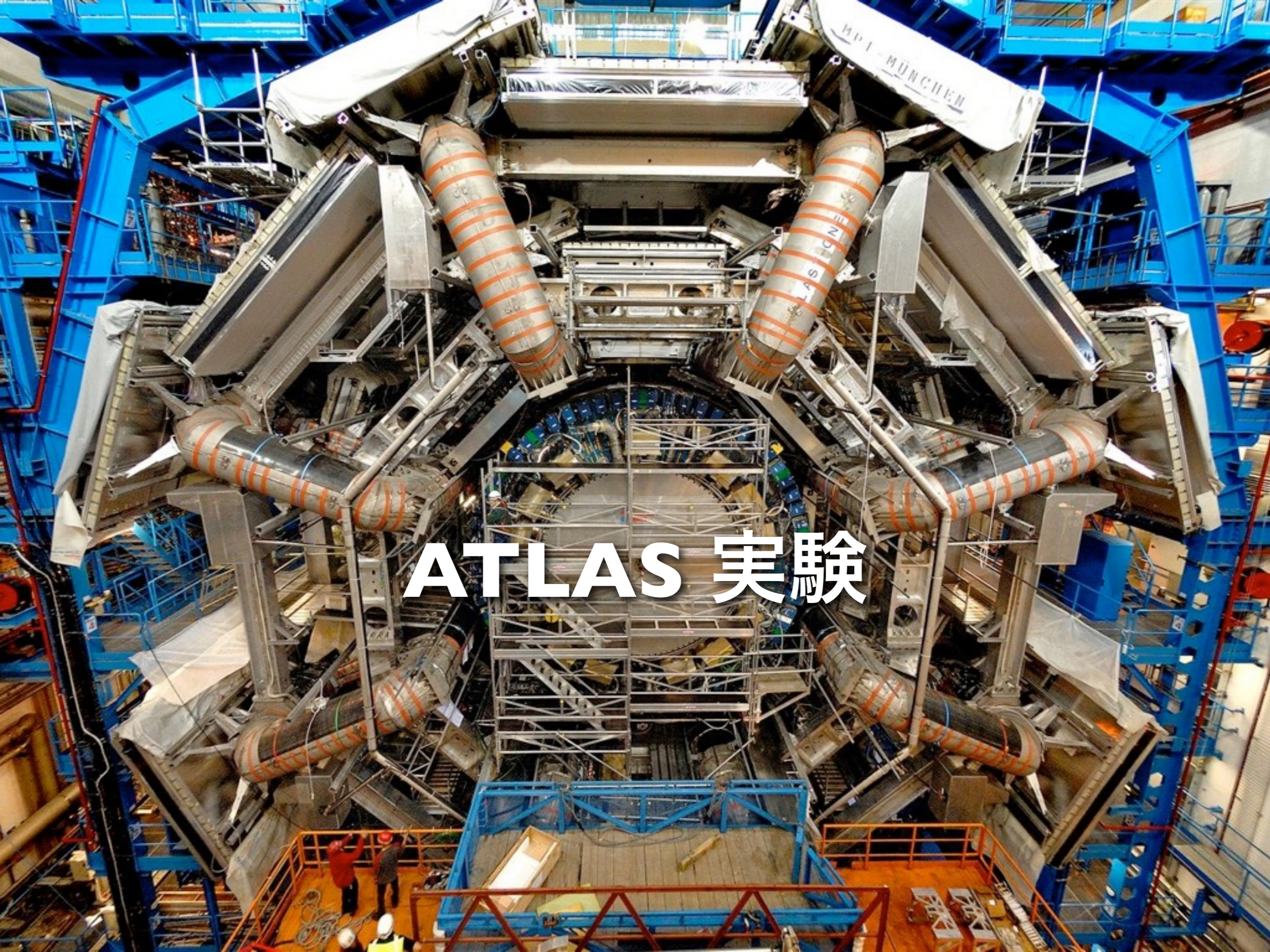


LHC

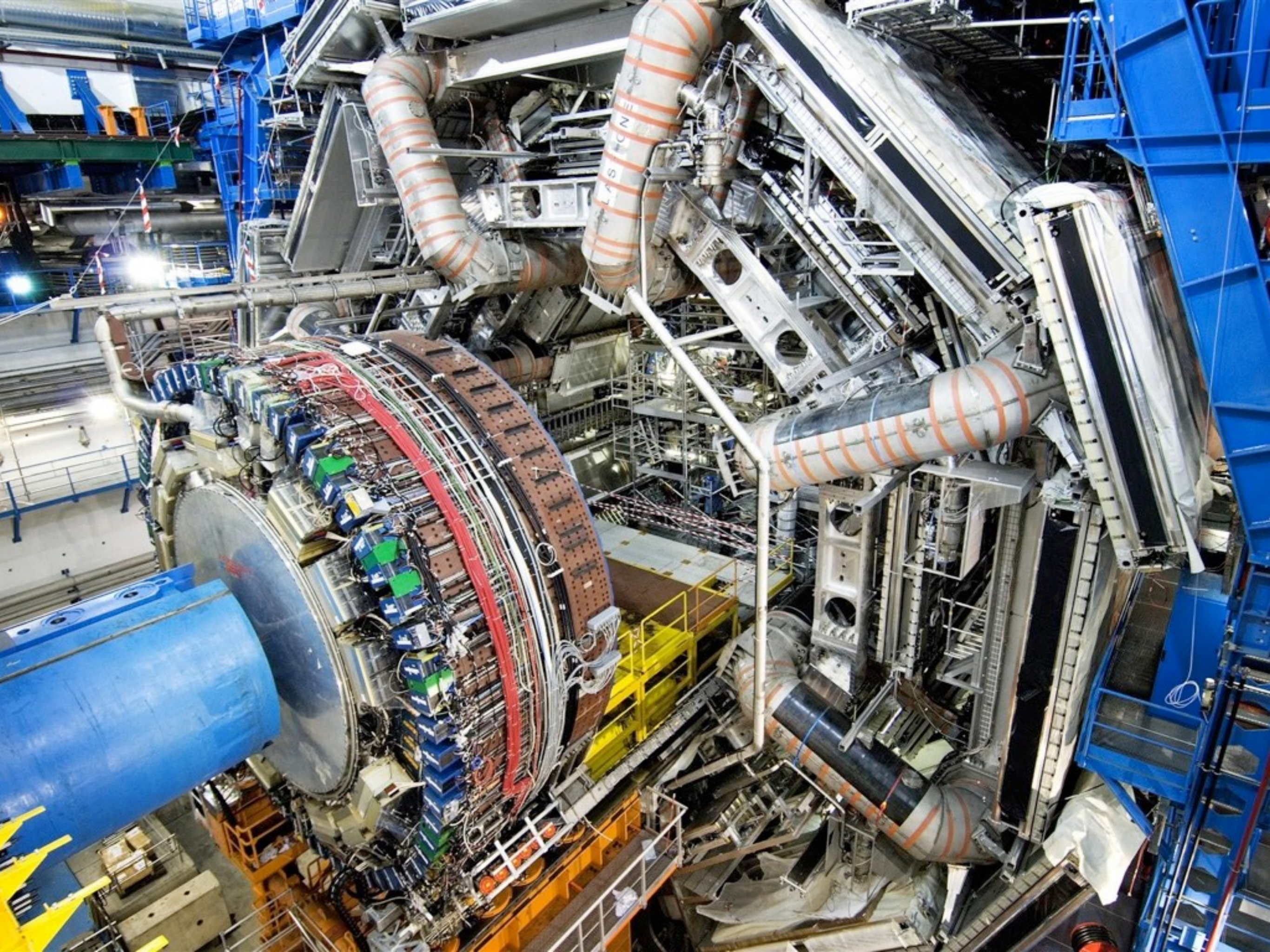
Large Hadron Collider

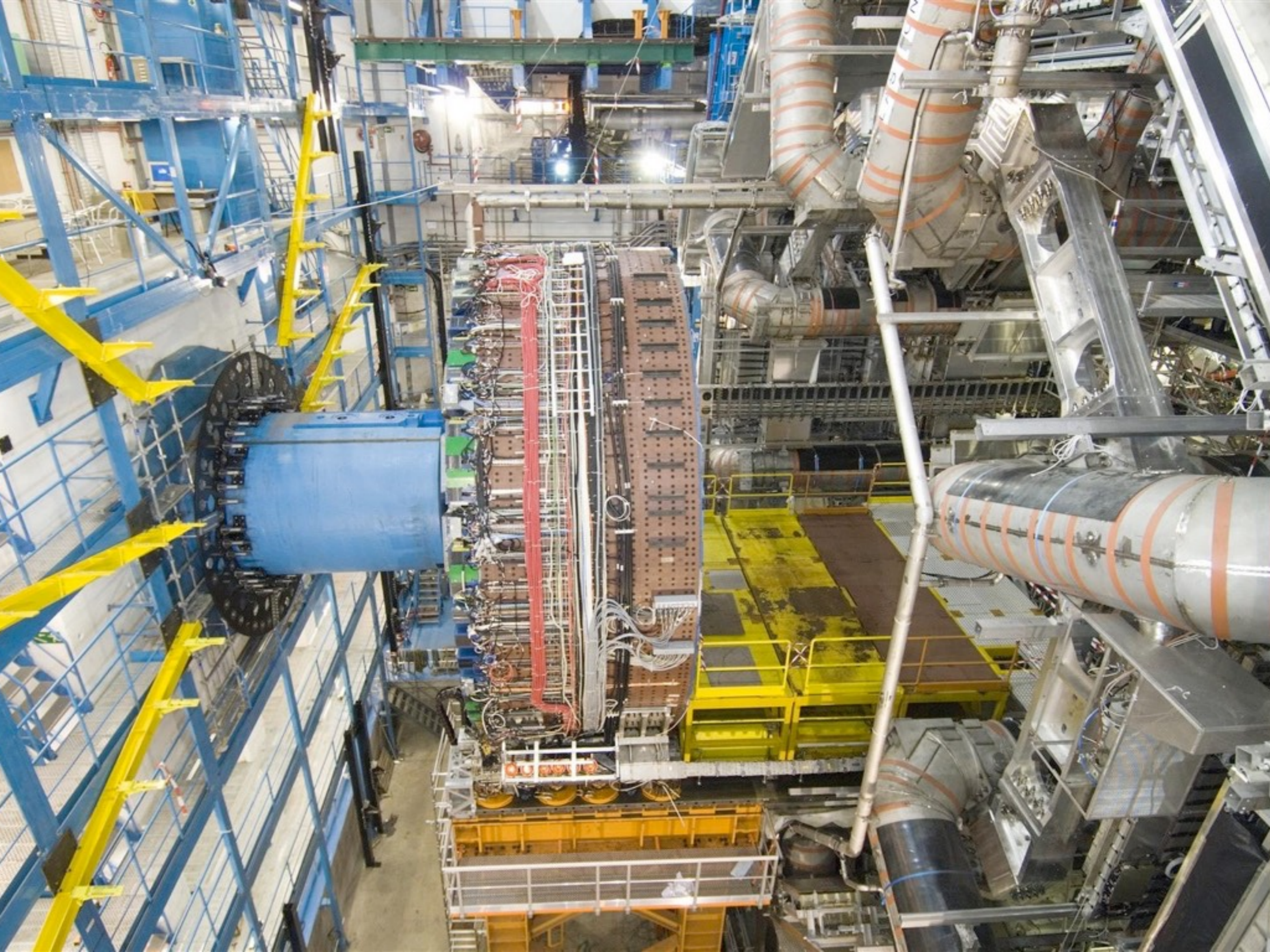
質量の起源 Higgs 粒子






ATLAS 実験



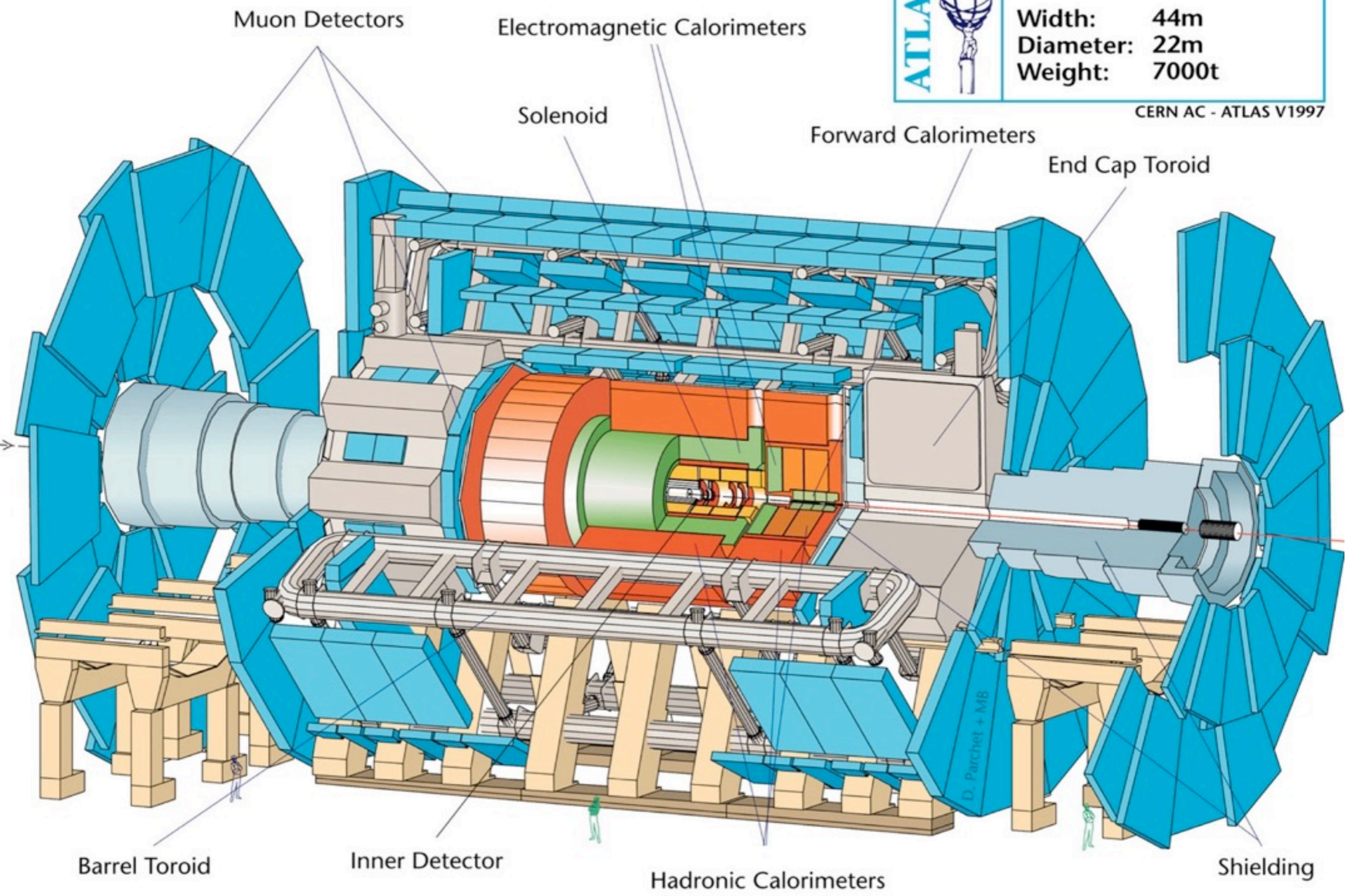


ATLAS 

Detector characteristics

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

CERN AC - ATLAS V1997



Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding

Muon Detectors

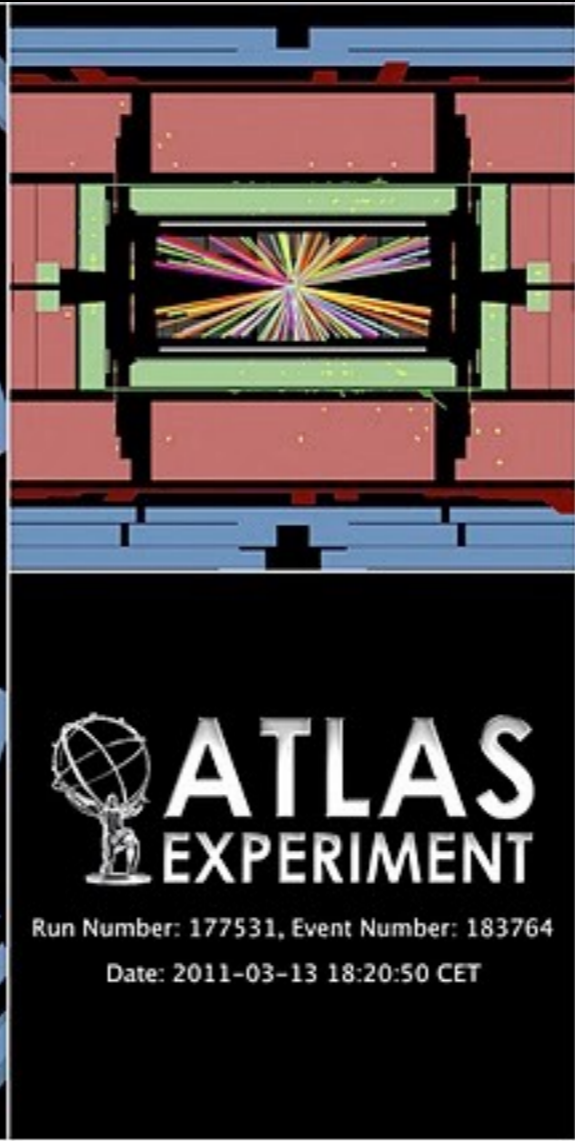
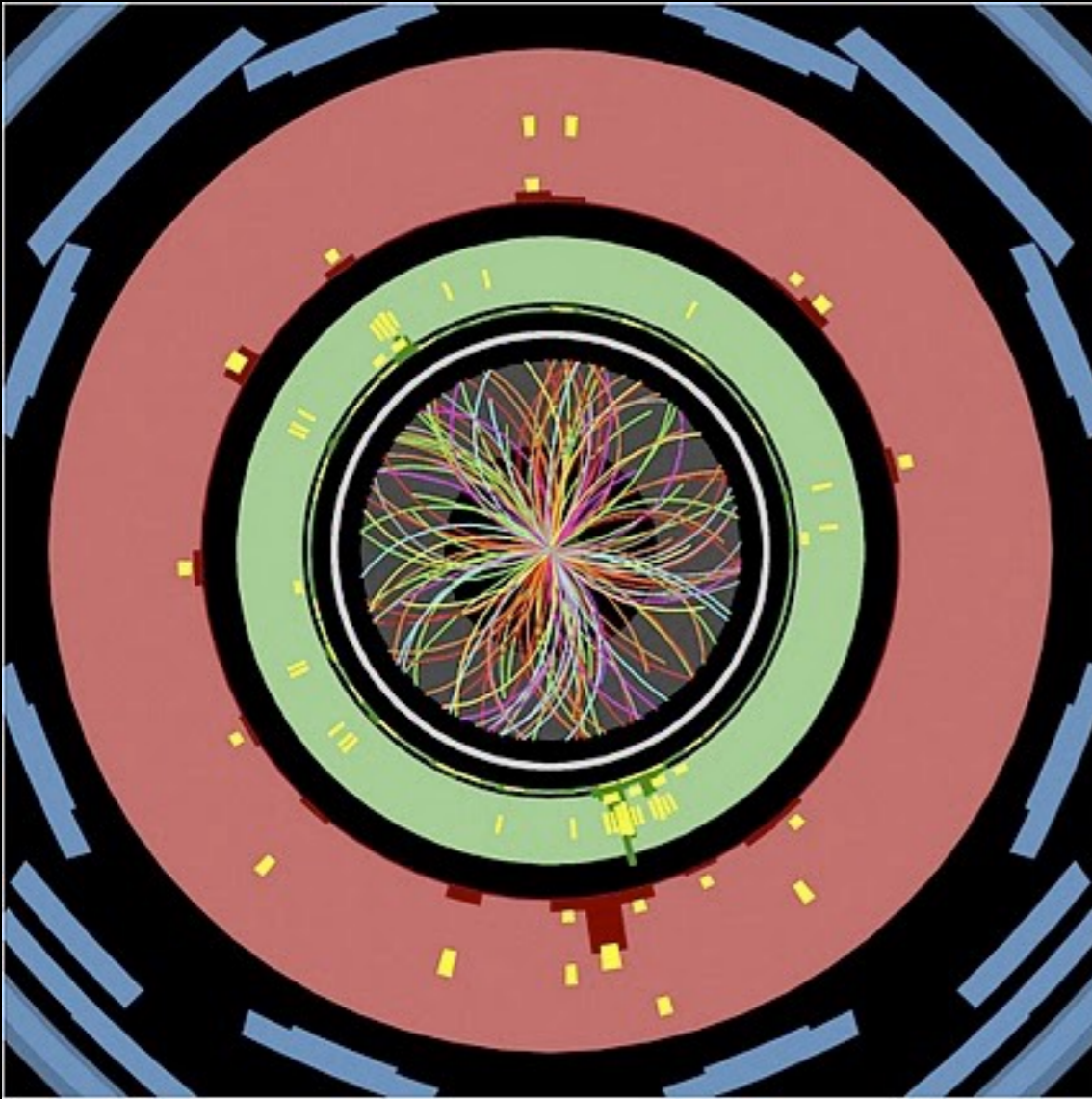
Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid

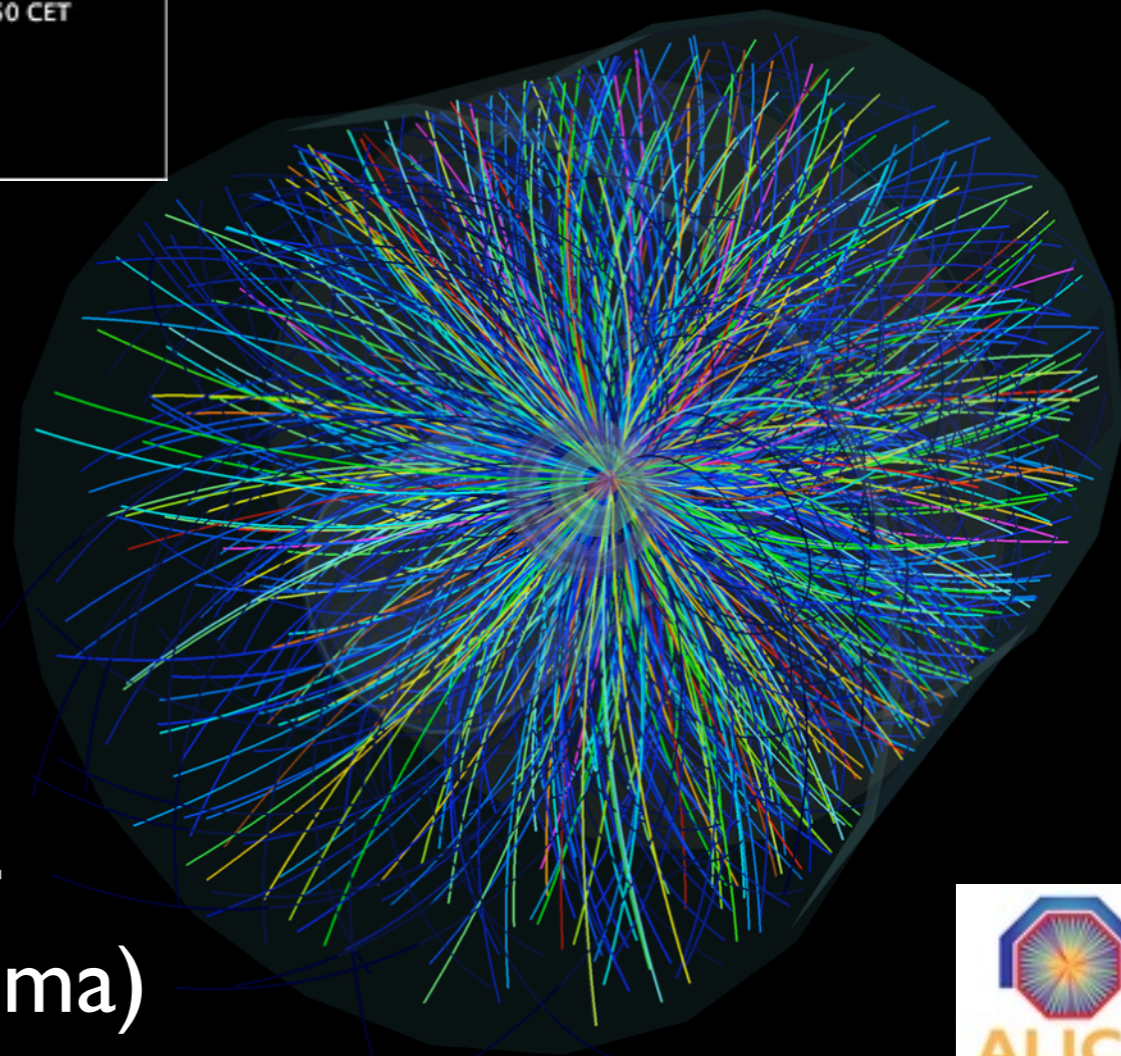
D. Parquet + MB



 **ATLAS**
EXPERIMENT
Run Number: 177531, Event Number: 183764
Date: 2011-03-13 18:20:50 CET

7 TeV + 7 TeV
= 14 TeV

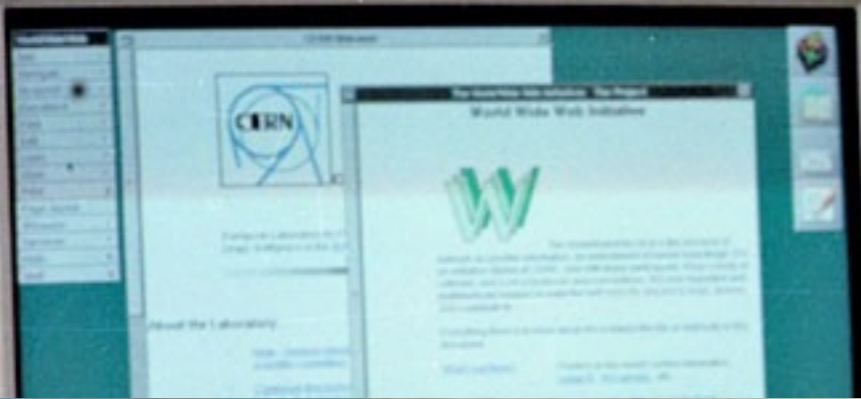
Higgs search



ALICE experiment
QGP (Quark-Gluon Plasma)







Tim Berners-Lee

WorldWideWeb

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

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 by the WWW project, including CERN documents, CERN WWW pages, and the computer network (CERN). (This is the same data on CERN WWW which is also available on CERNVM with the VM FIND command.)

CERN Telephone Book A key word index to the CERN telephone book by function.

Internet 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:

- CERN WWW
- CERN Technology Interest Group) news

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

- WWW on this WorldWideWeb application

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. 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

Map: A map of the CERN site in Geneva, Switzerland, showing various buildings and locations like Paris, Divonne, Gex, Versoix, Meyrin, St-Julien, and Annecy (LAPP). A scale bar indicates 0 to 5 km.



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!

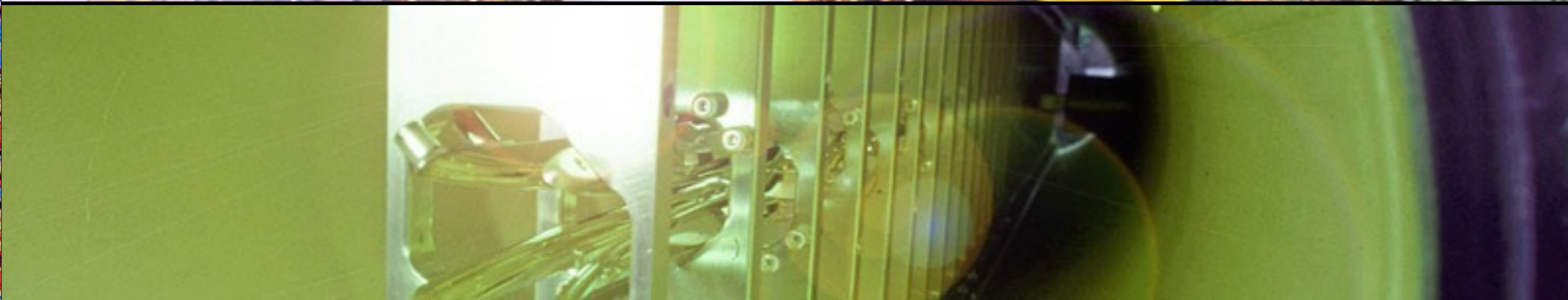
CERN
Antimatter

トム・ハンクス
(ロバート・ラングドン教授)
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 DA VINCI CODE



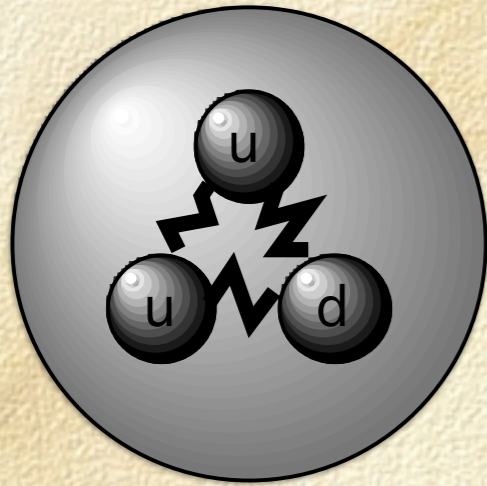


CERN

European Organization for Nuclear Research

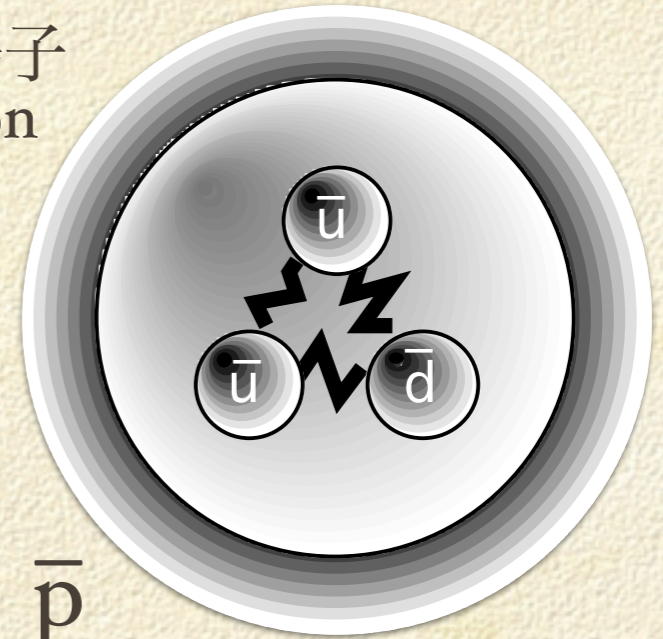
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

陽子
proton



p

反陽子
antiproton



p̄

粒子 / 反粒子



e^-



電子 electron

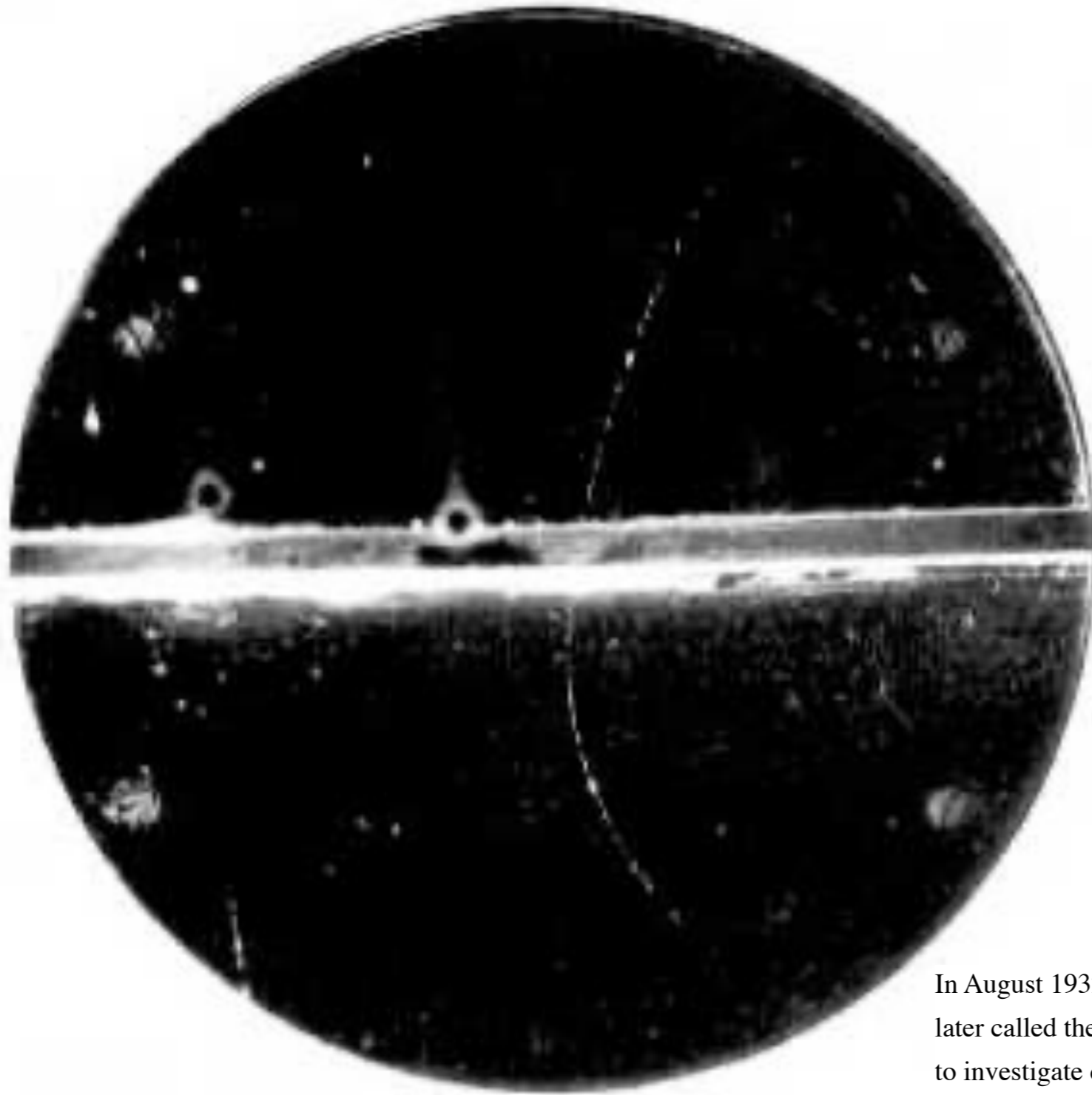
e^+



陽電子 positron

Paul Dirac
(相對論的量子力学)

陽電子の発見

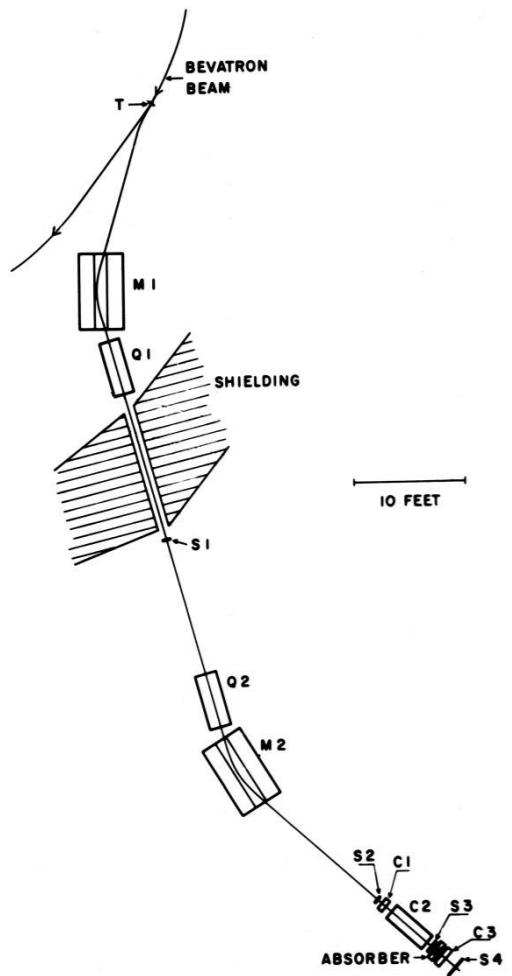


Anderson's first picture of a positron track (Source: C D Anderson)

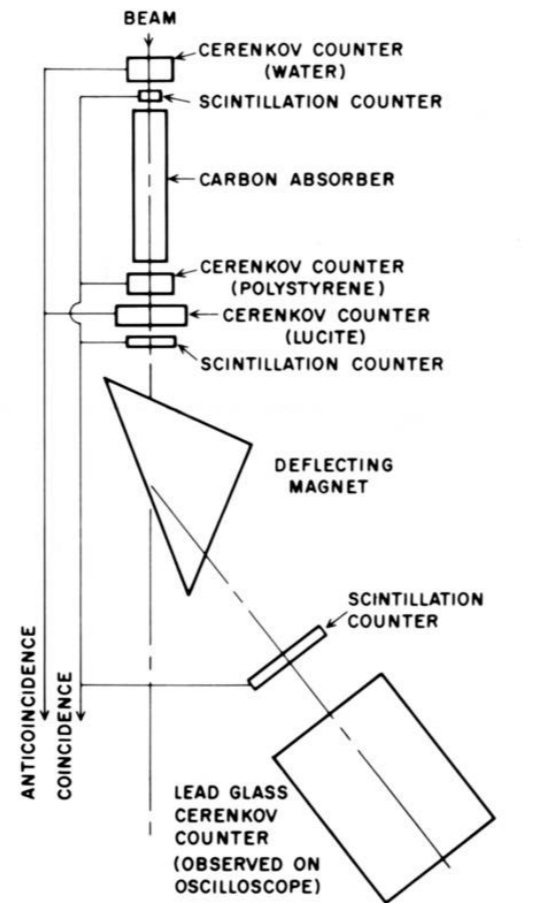
The positron travelled downwards and lost energy as it passed through a lead plate in the middle of the chamber. Its track is curved because there was a magnetic field in the chamber.

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.

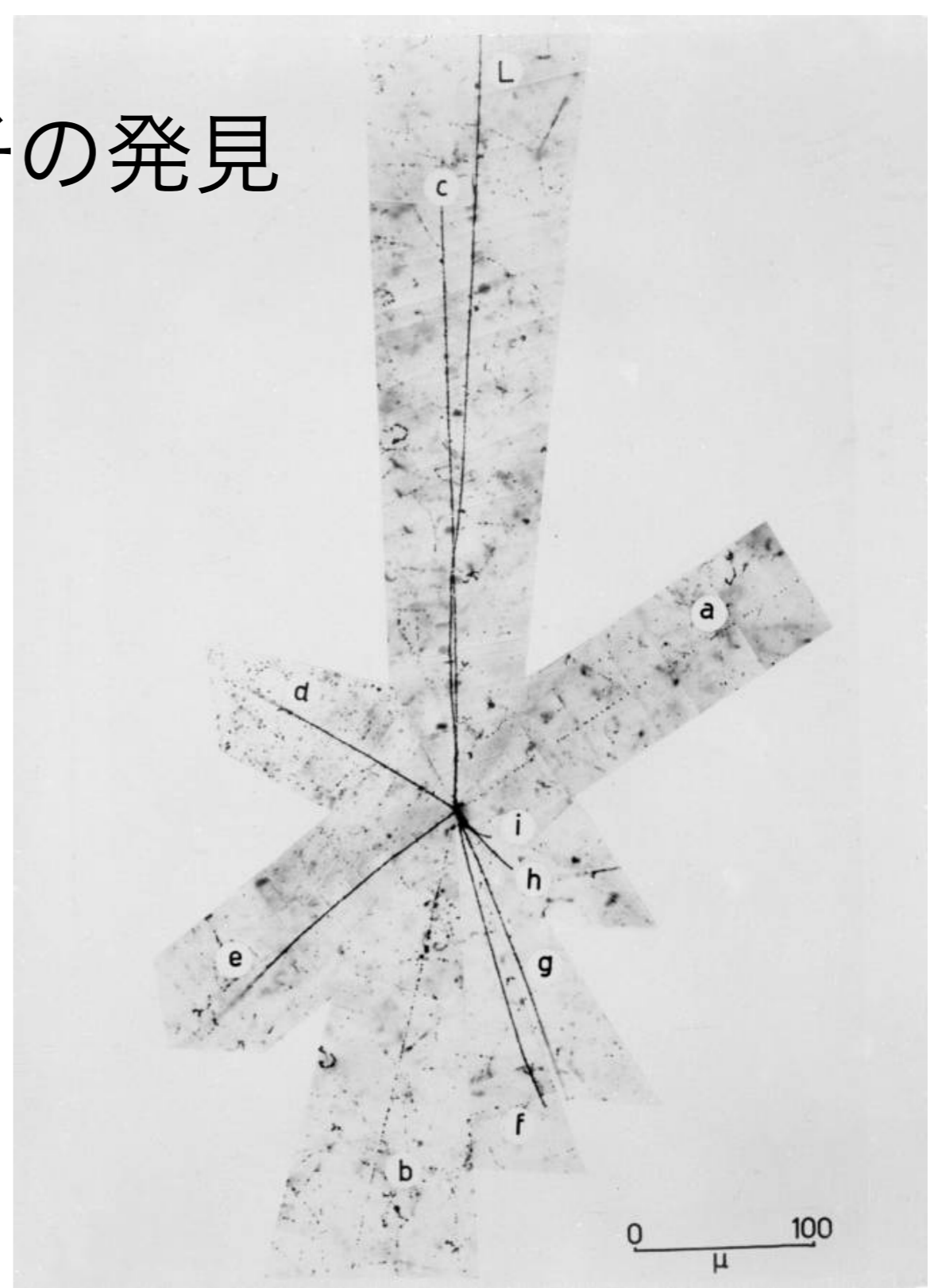
反陽子の発見



XBD 9606-02963



XBD 9606-02964



陽電子消滅



511 keV の γ 線
反対方向に 2 本

稀に 3 本のこともある (ポジトロニウムの 3 光子消滅)

PET (Positron Emission Tomography)

陽電子断層撮影法

組織の”はたらき”を知る

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



放射線医療：診断

e^+



陽電子 positron

電子 electron



e^-

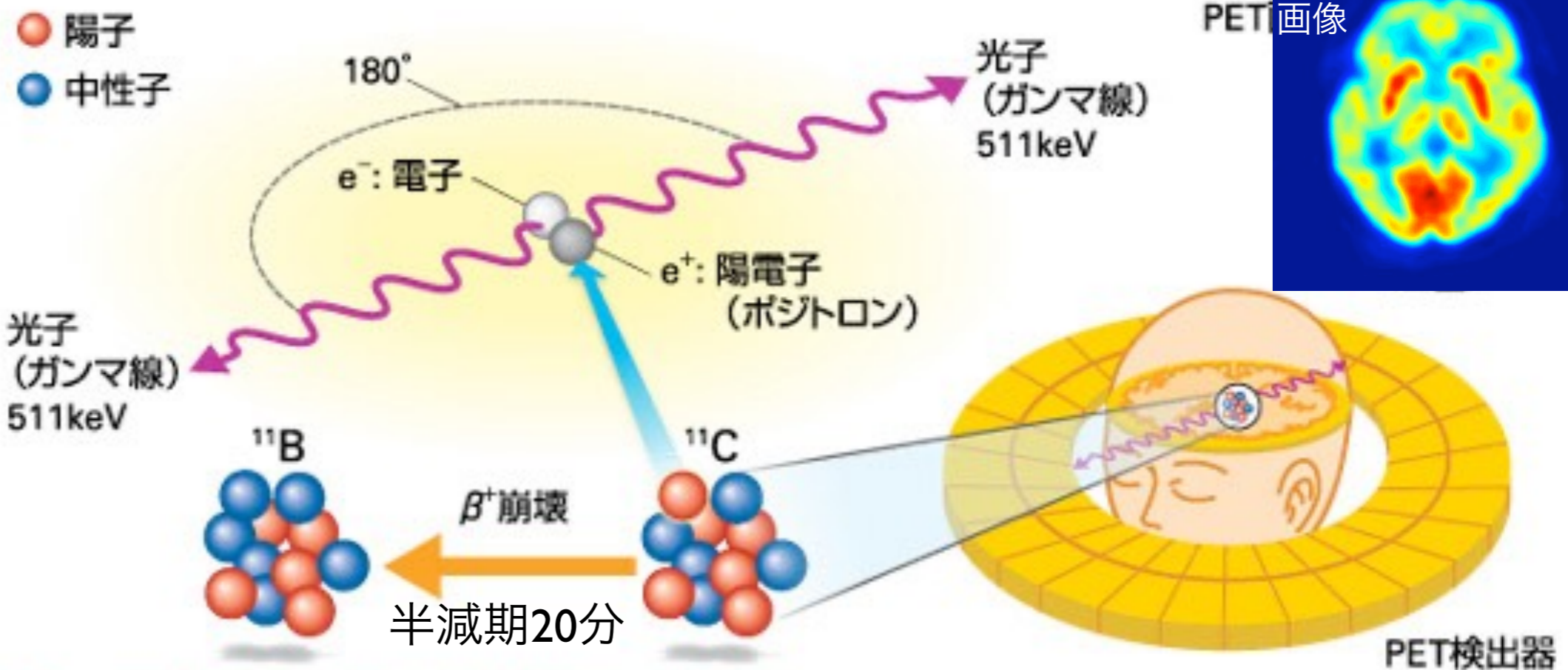


図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

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

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

放射線計測学

(高エネルギー物理学実験用)

空間線量率測定 表面汚染検査



β (γ)

放射線の測定

γ



検出器

気体の電離を利用

電離箱・比例計数管・GM管

シンチレータ + 光電子増倍管

NaI, CsI, plastic scinti., ZnS

半導体検出器

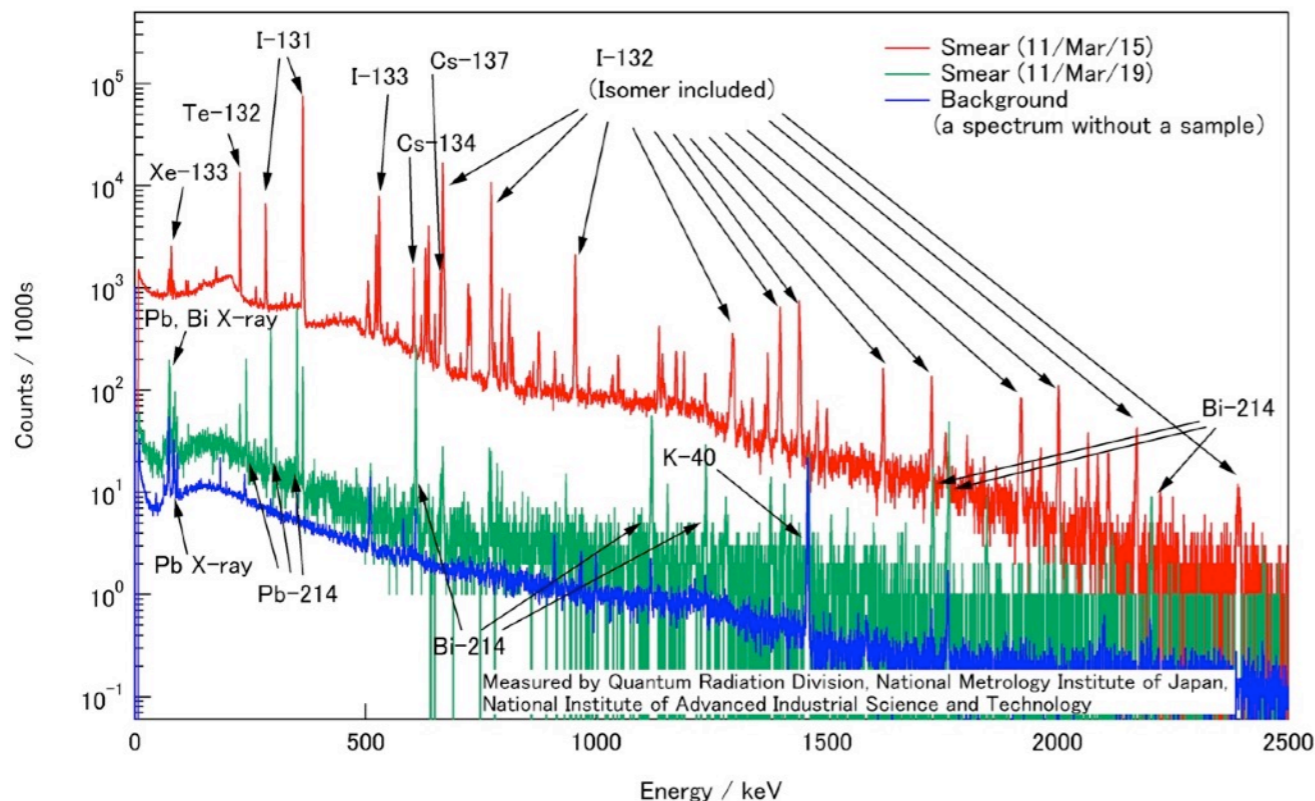
Ge, Si(Li)

計数 (cps = counts per second)

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

エネルギー分析 (核種同定)

ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)



食品検査

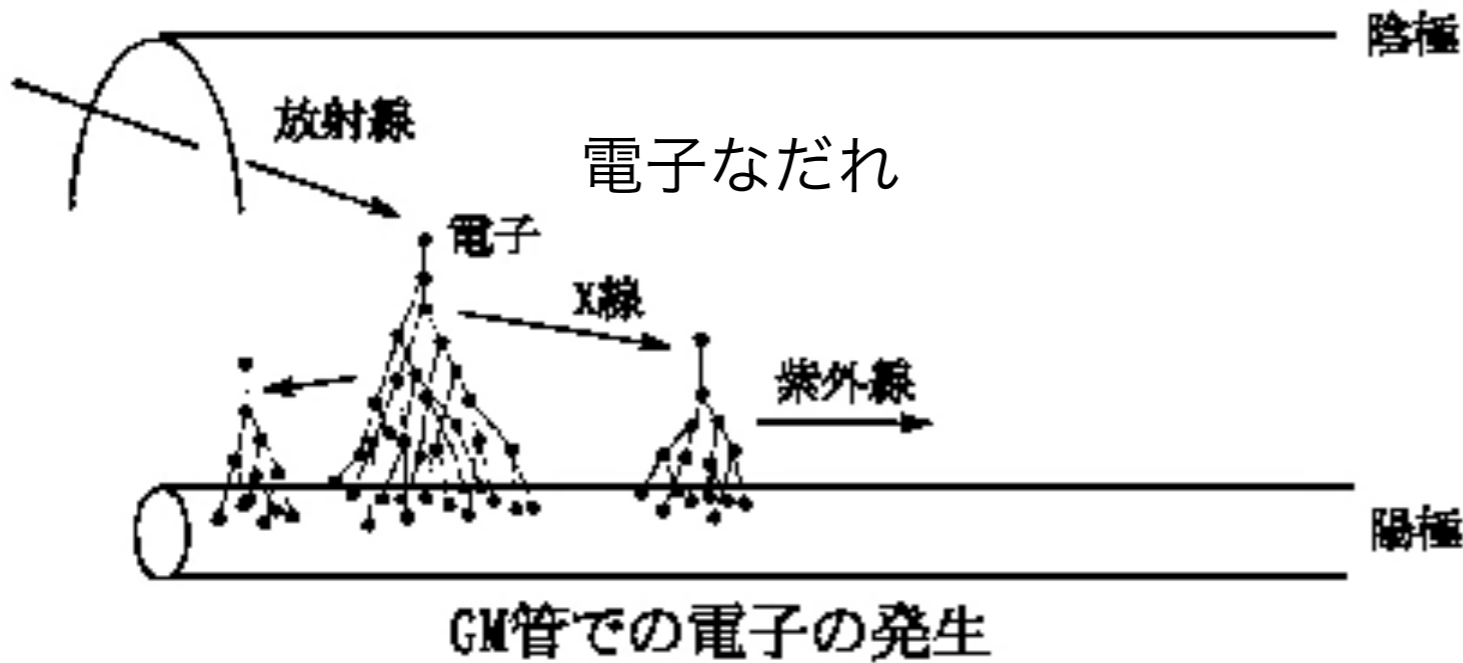
食品検査用ゲルマニウム検出器



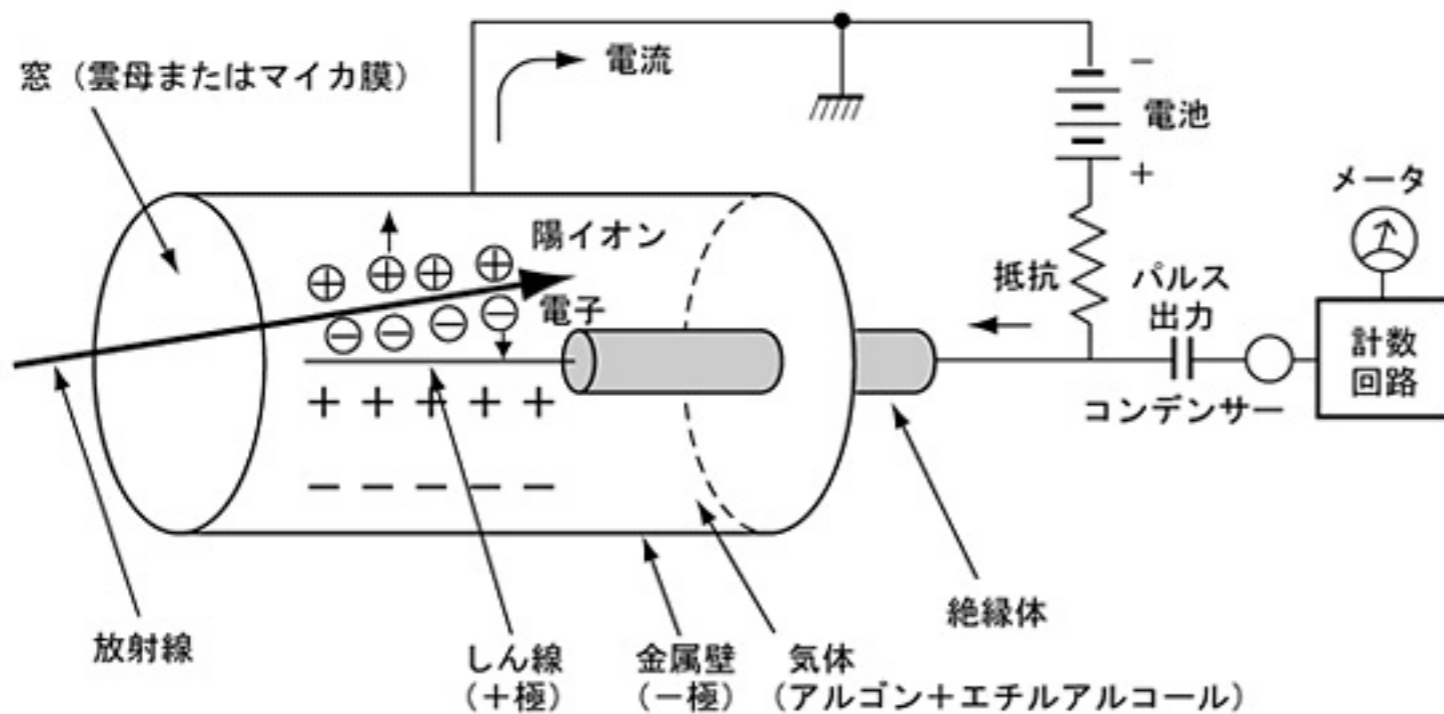
気体の電離を利用する放射線計測

電離箱, 比例計数管, GM管

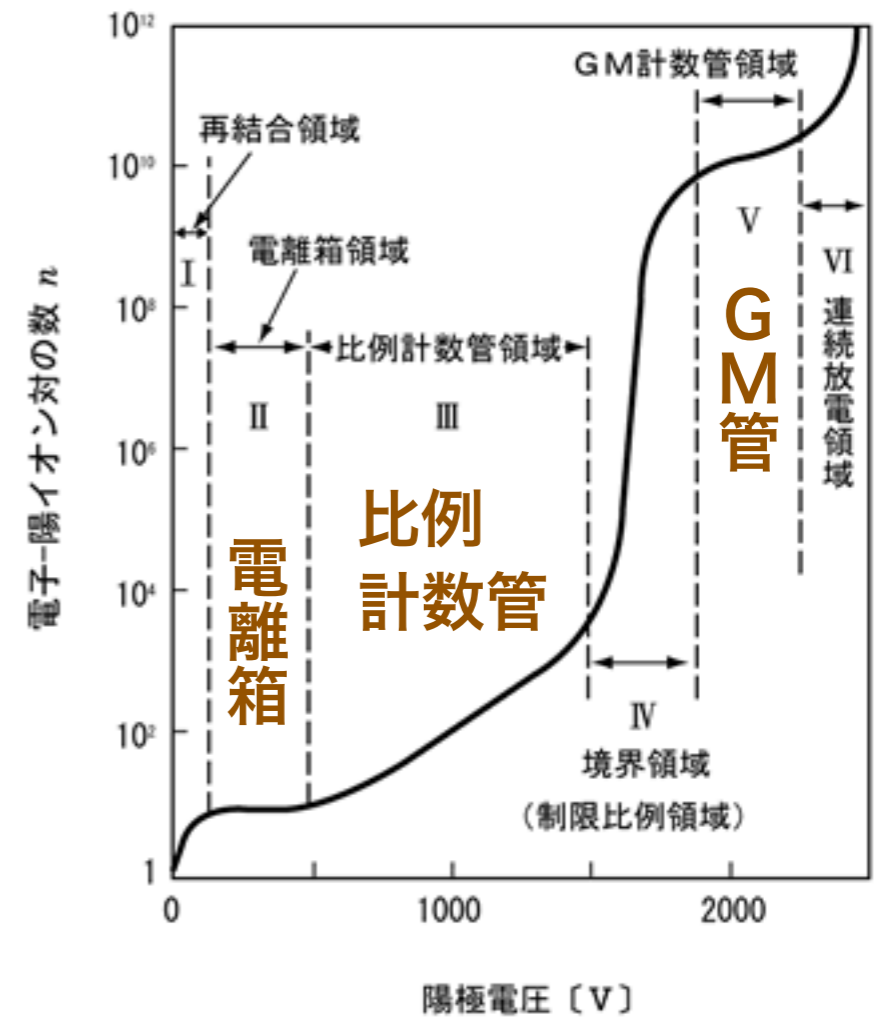
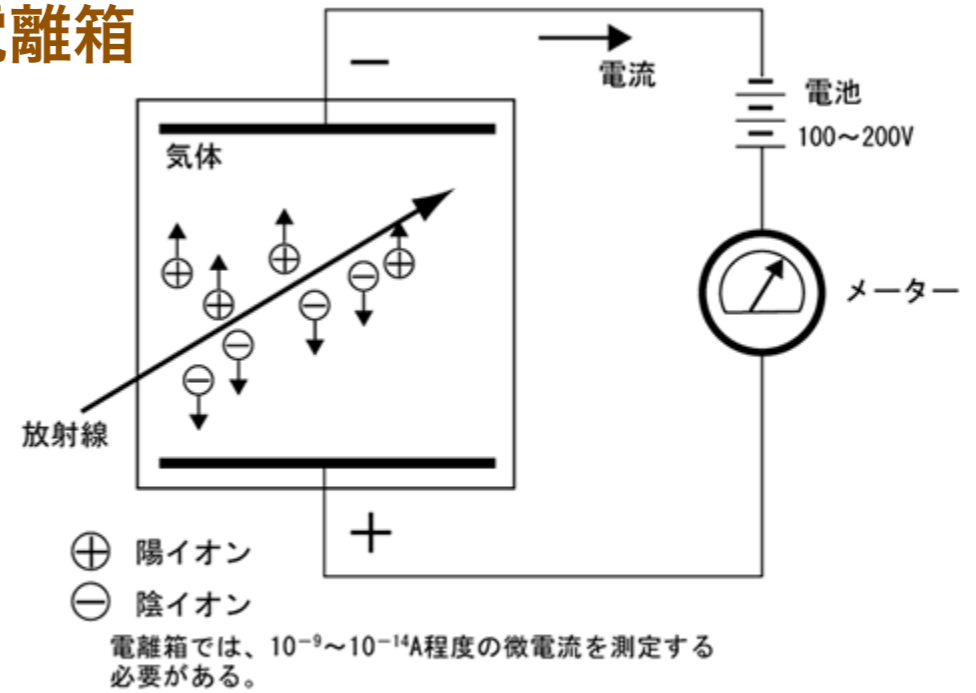
(ガイガー・ミュラー管)



GM管

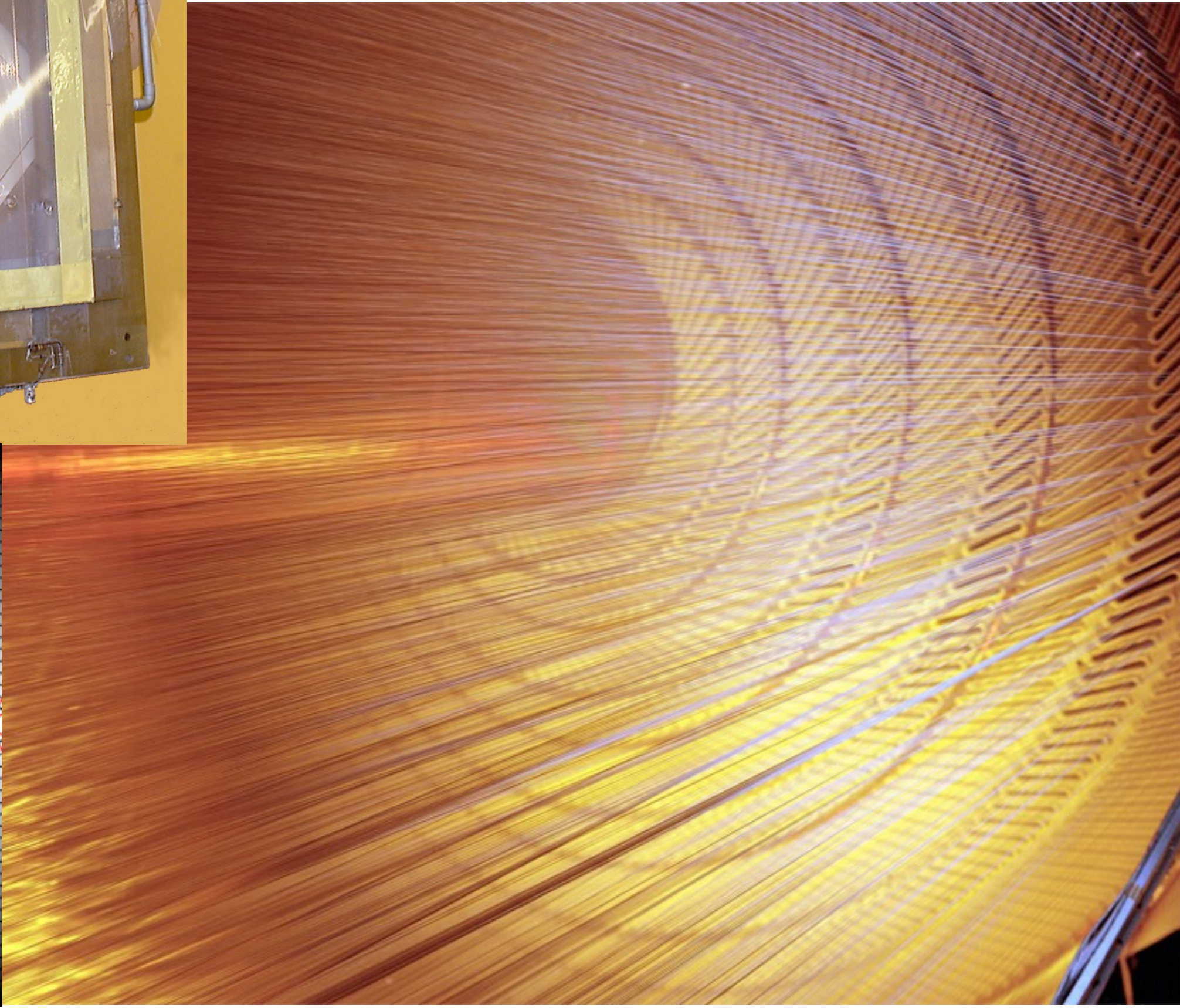
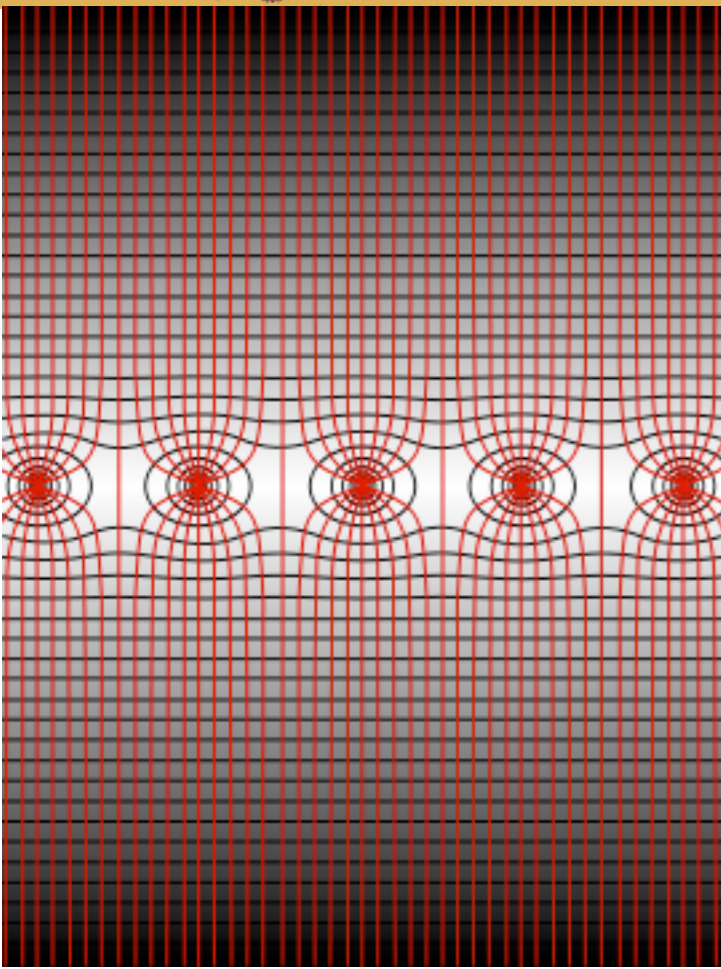
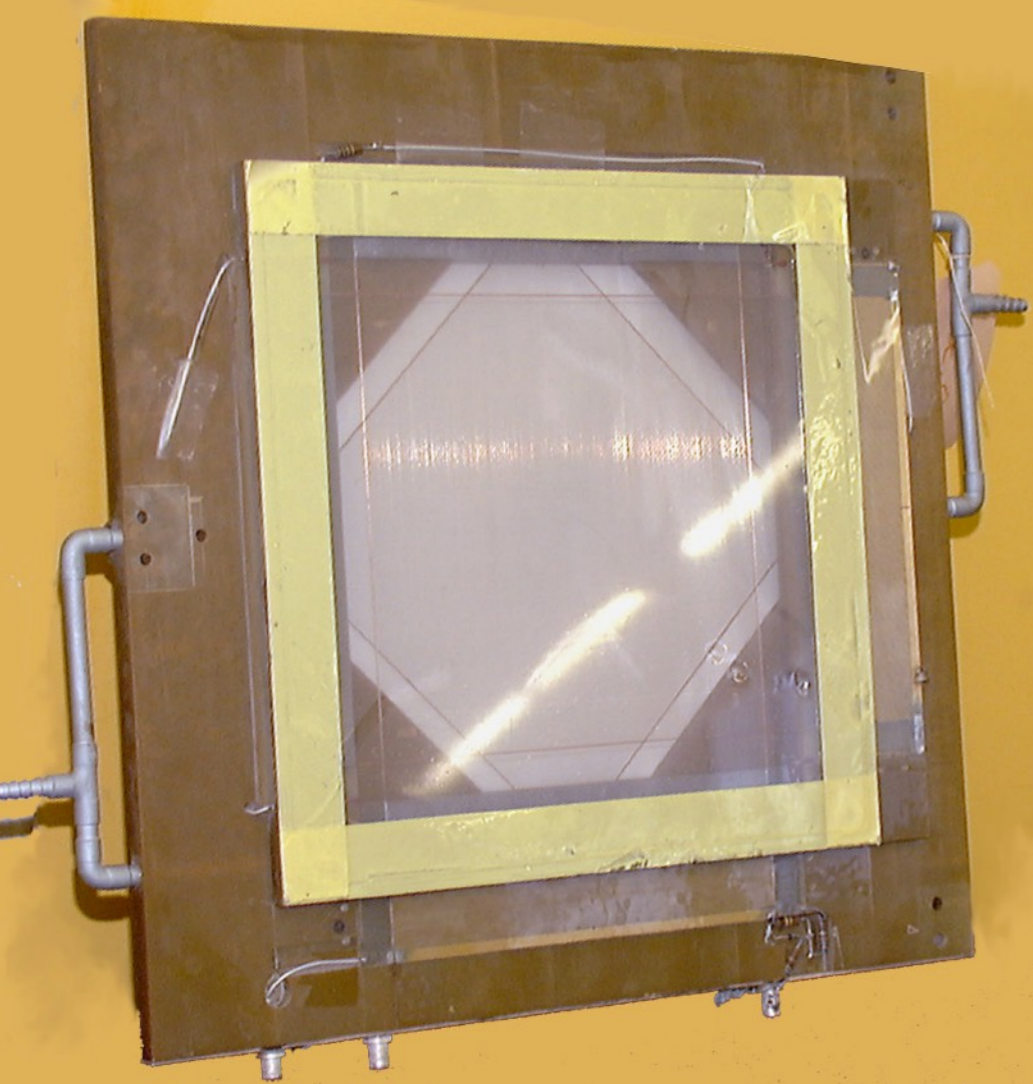


電離箱



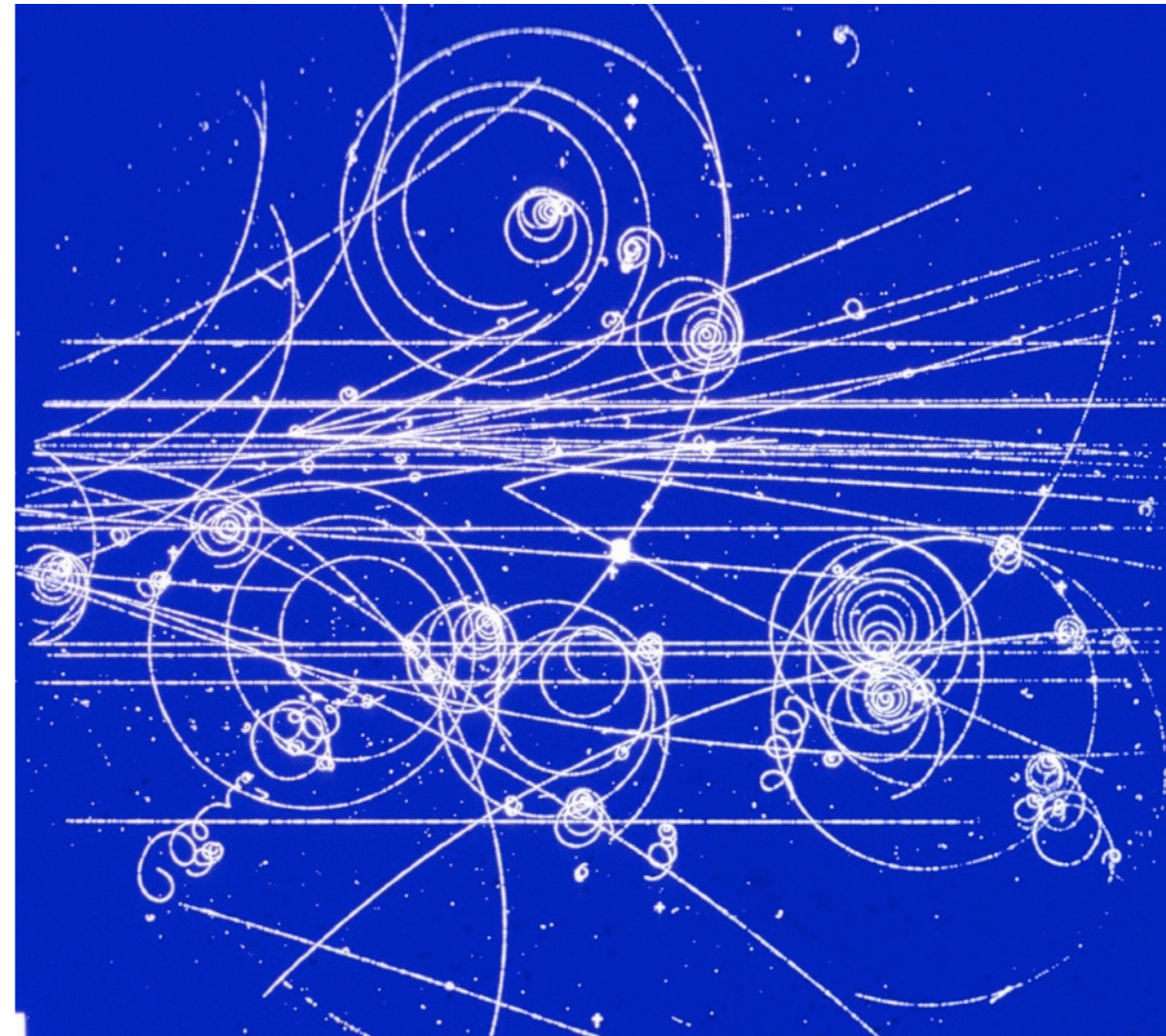
ワイヤーチェンバー MWPC

Multi-wire proportional chamber



泡箱

Bubble chamber



霧箱

Stream chamber



放射線照射による物質の**蛍光発光** 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)
 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ Gd_2SiO_5

ZnS (Ag) (α線)

BaF₂

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

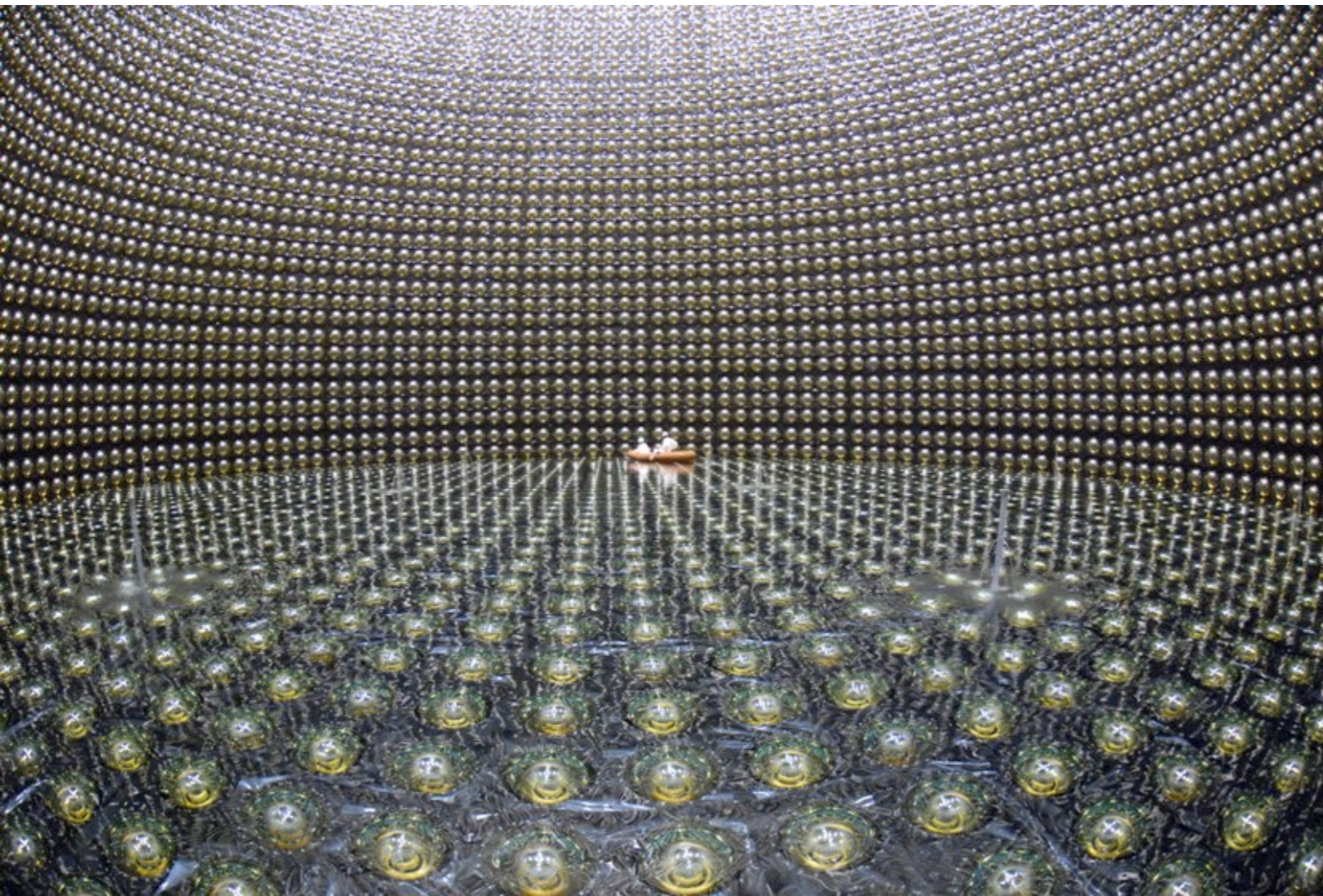
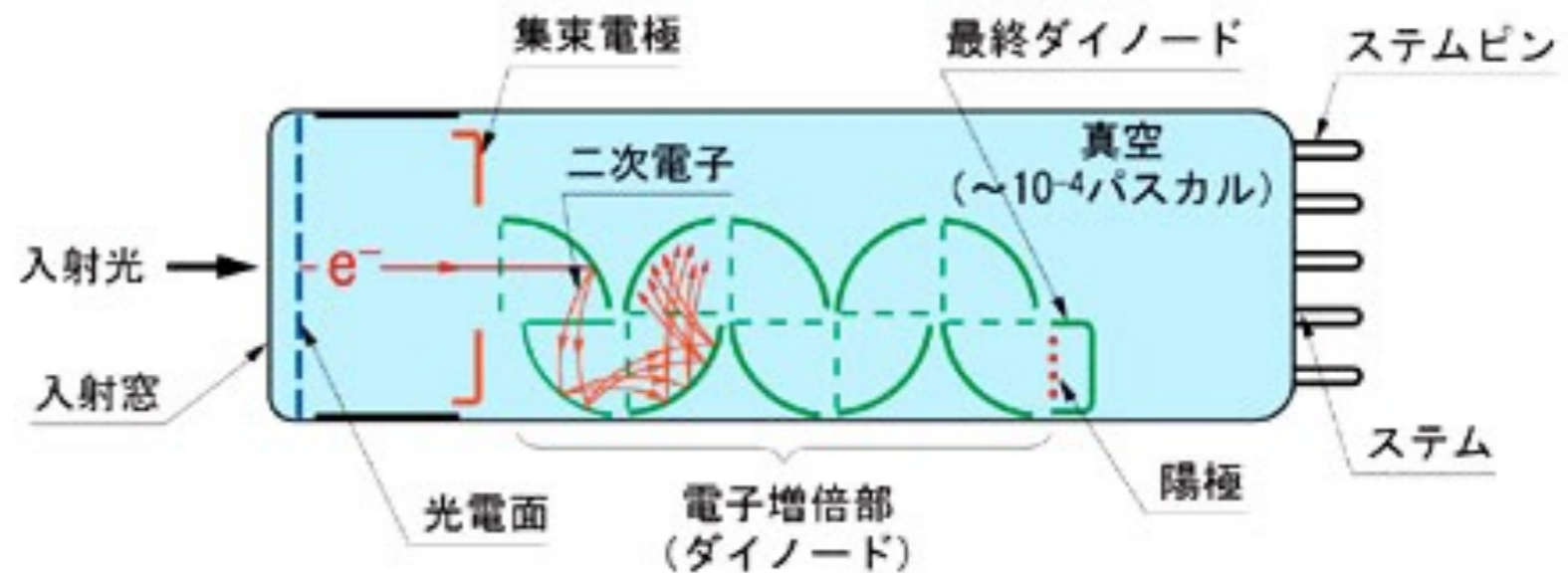
/ トルエン、キシレン

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

光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)

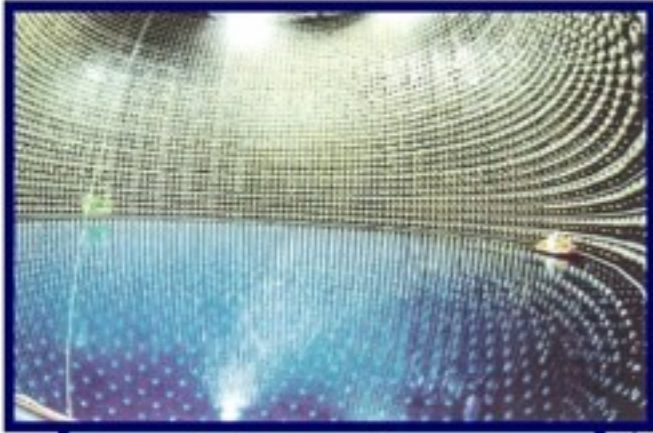


光 \Rightarrow 光電効果 \Rightarrow 電子増幅
 \Rightarrow 電流

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

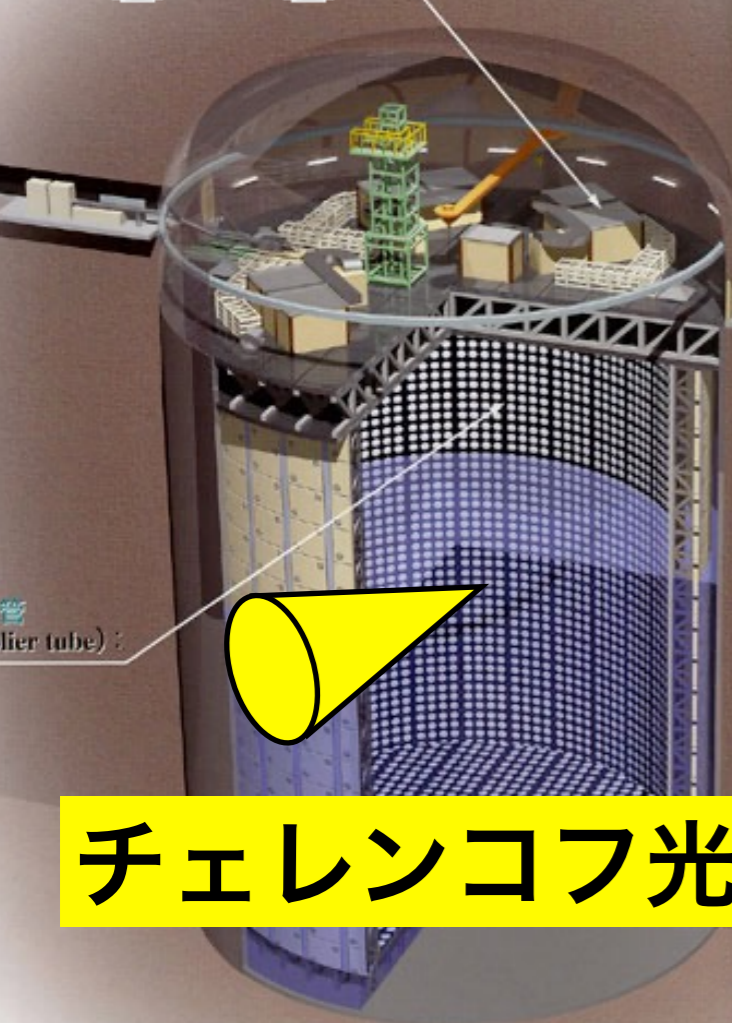
Super-Kamiokande



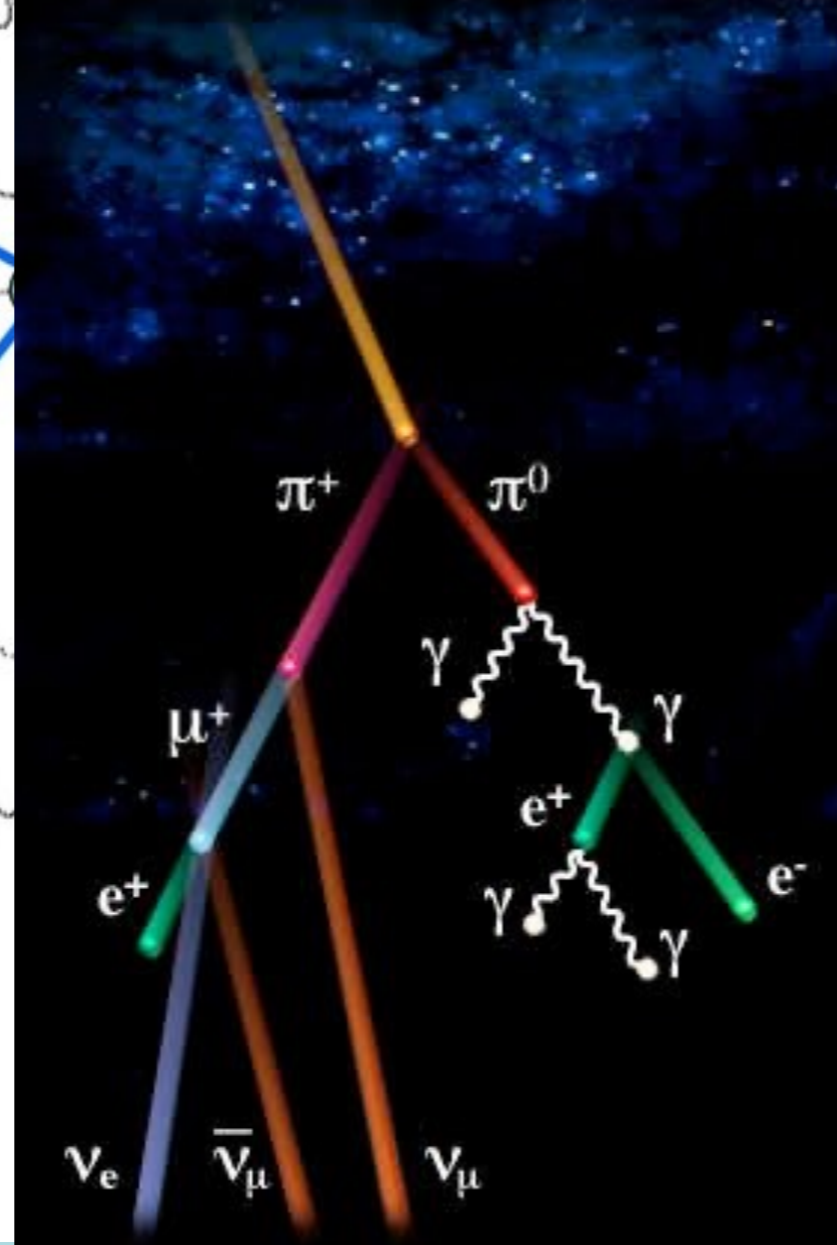
スーパー
カミオカンデ



●エレクトロニクスハット
(Electronics hut):



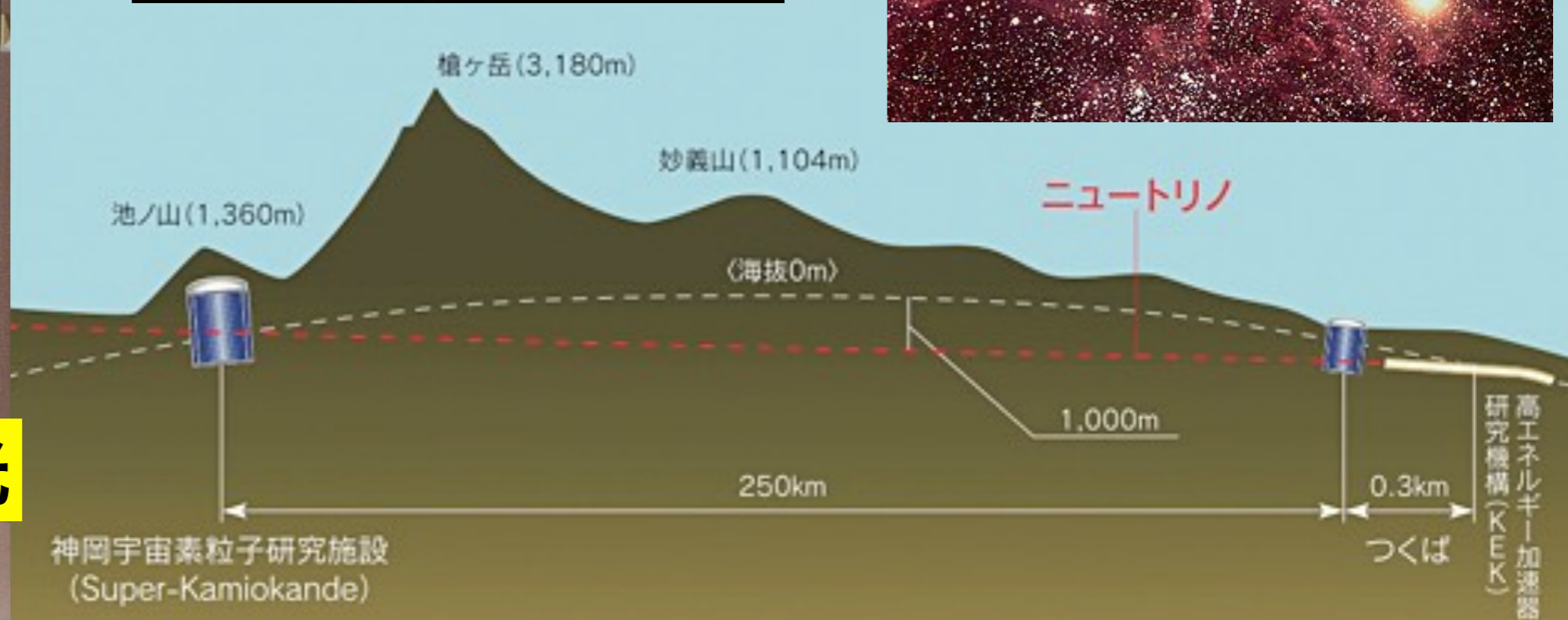
チェレンコフ光



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)

線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリック線量計 Fricke dosimeter

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

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

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

電子・正孔が格子欠陥に捕えられる

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

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

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

ガラス線量計: コバルトガラス \rightarrow 発光中心 (着色)

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

ポケット線量計: 電離箱、半導体検出器

フィルムバッジ: 銀塩写真フィルム AgBr



福島米の全量全袋検査



基準値 (100 Bq/kg) 超え

0袋 / 949万袋 (2019年)

0袋 / 925万袋 (2018年)

0袋 / 998万袋 (2017年)

0袋 / 1027万袋 (2016年)

0袋 / 1050万袋 (2015年)

2袋 / 1101万袋 (2014年)

28袋 / 1101万袋 (2013年)

71袋 / 1035万袋 (2012年)

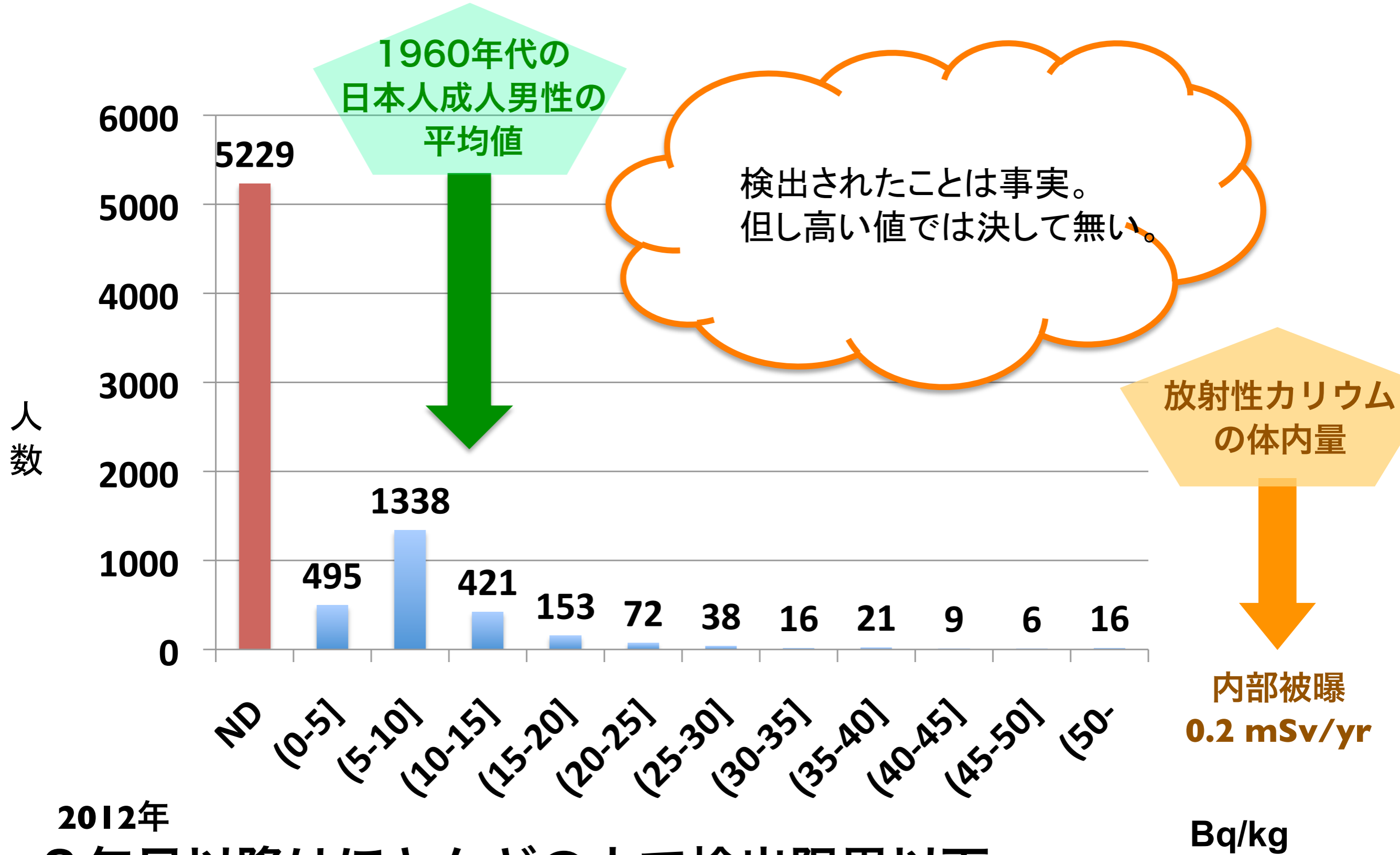
内部被曝の評価

WBC による体内放射能の測定

ホールボディカウンター



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



2012年
2年目以降はほとんどの人で検出限界以下。

内部被曝
0.2 mSv/yr

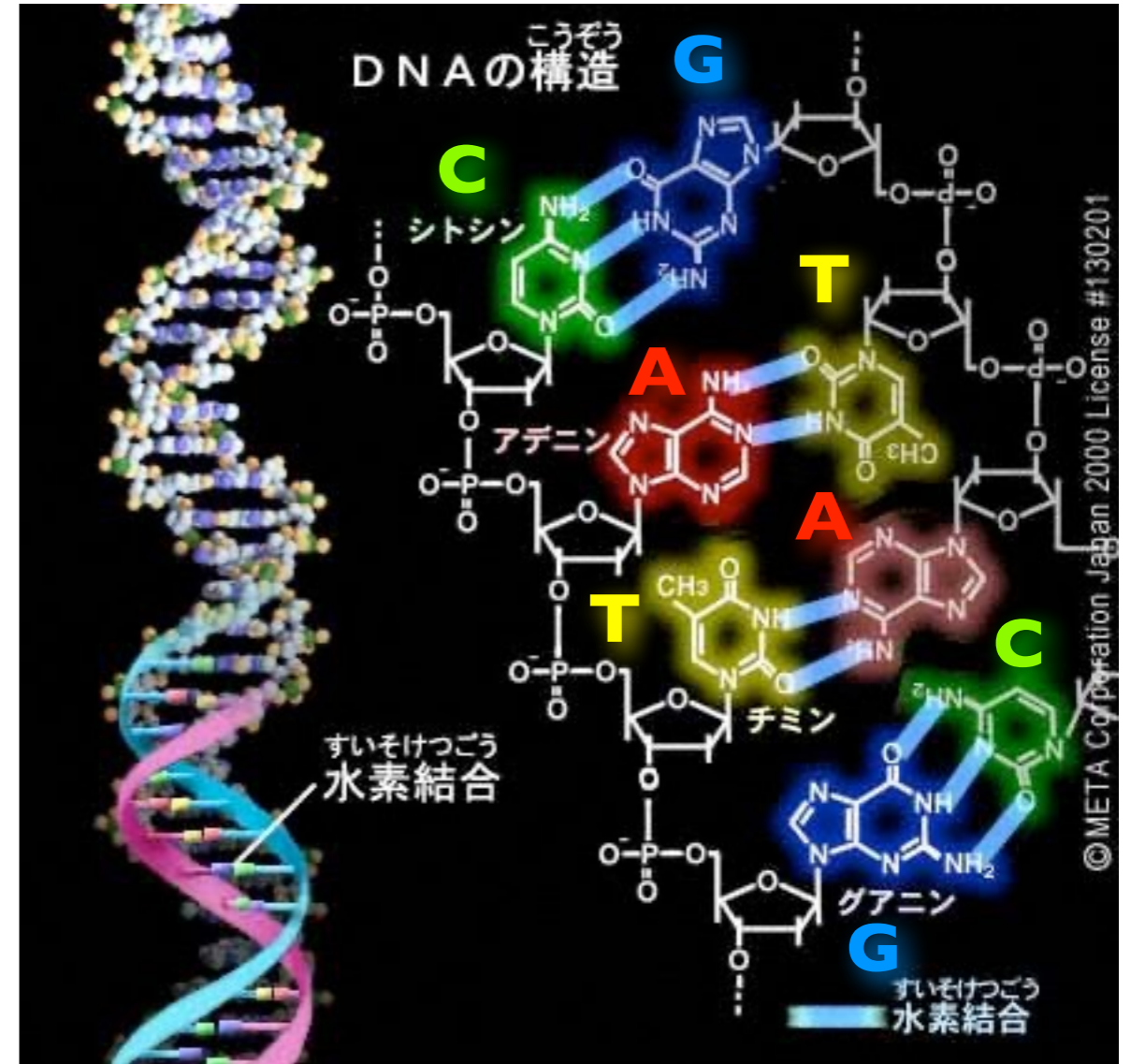
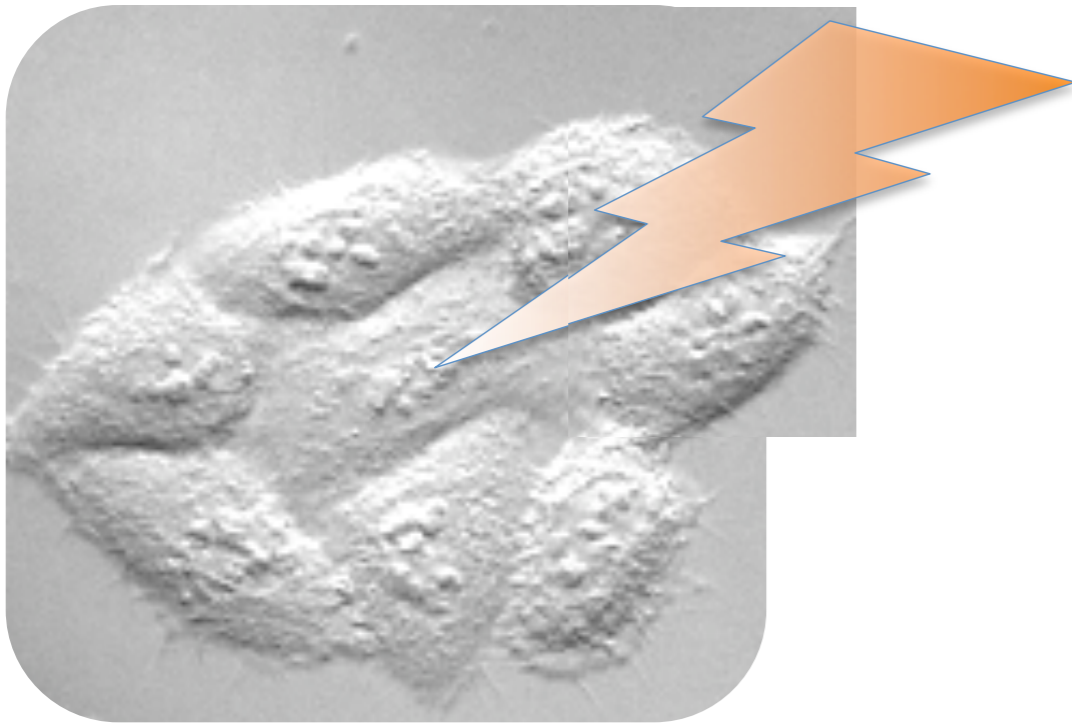
Bq/kg

原発事故の影響

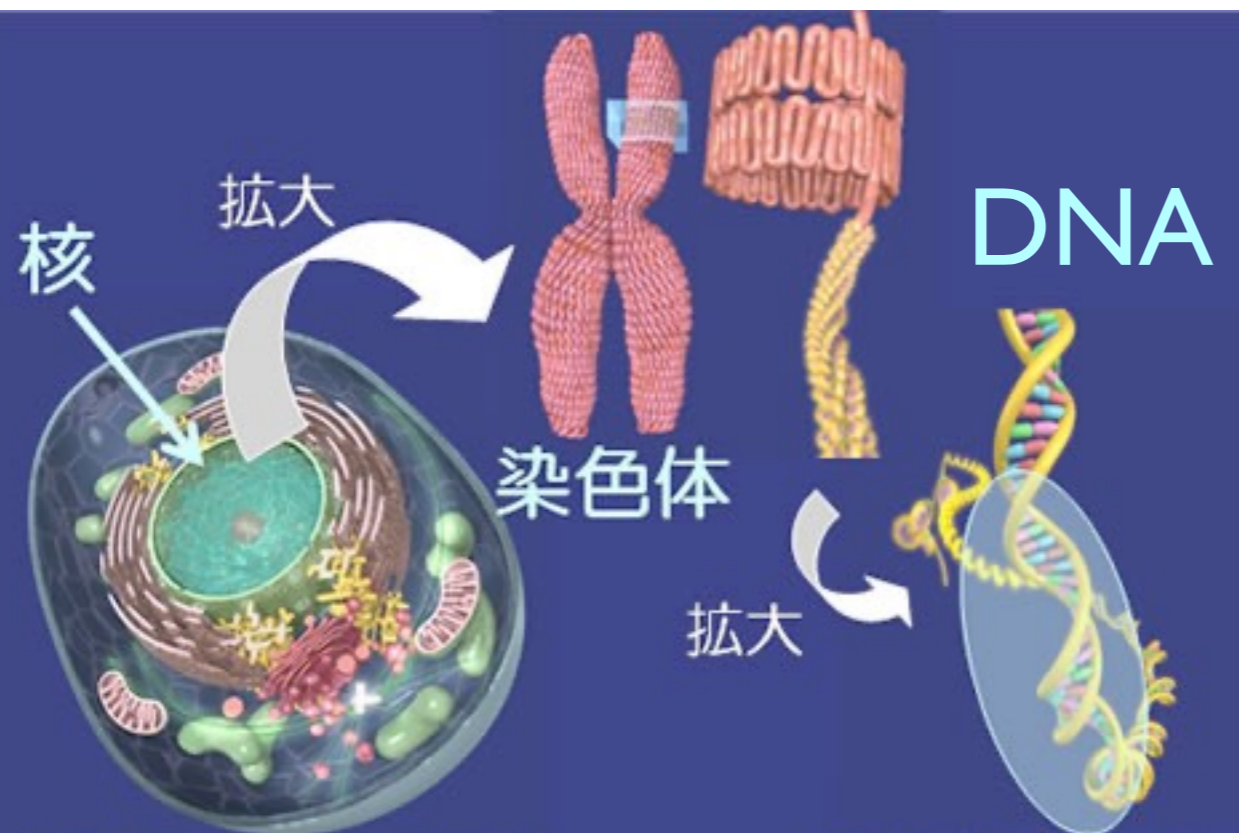
チェルノブイリとの比較

細胞の核に放射線が照射

DNA



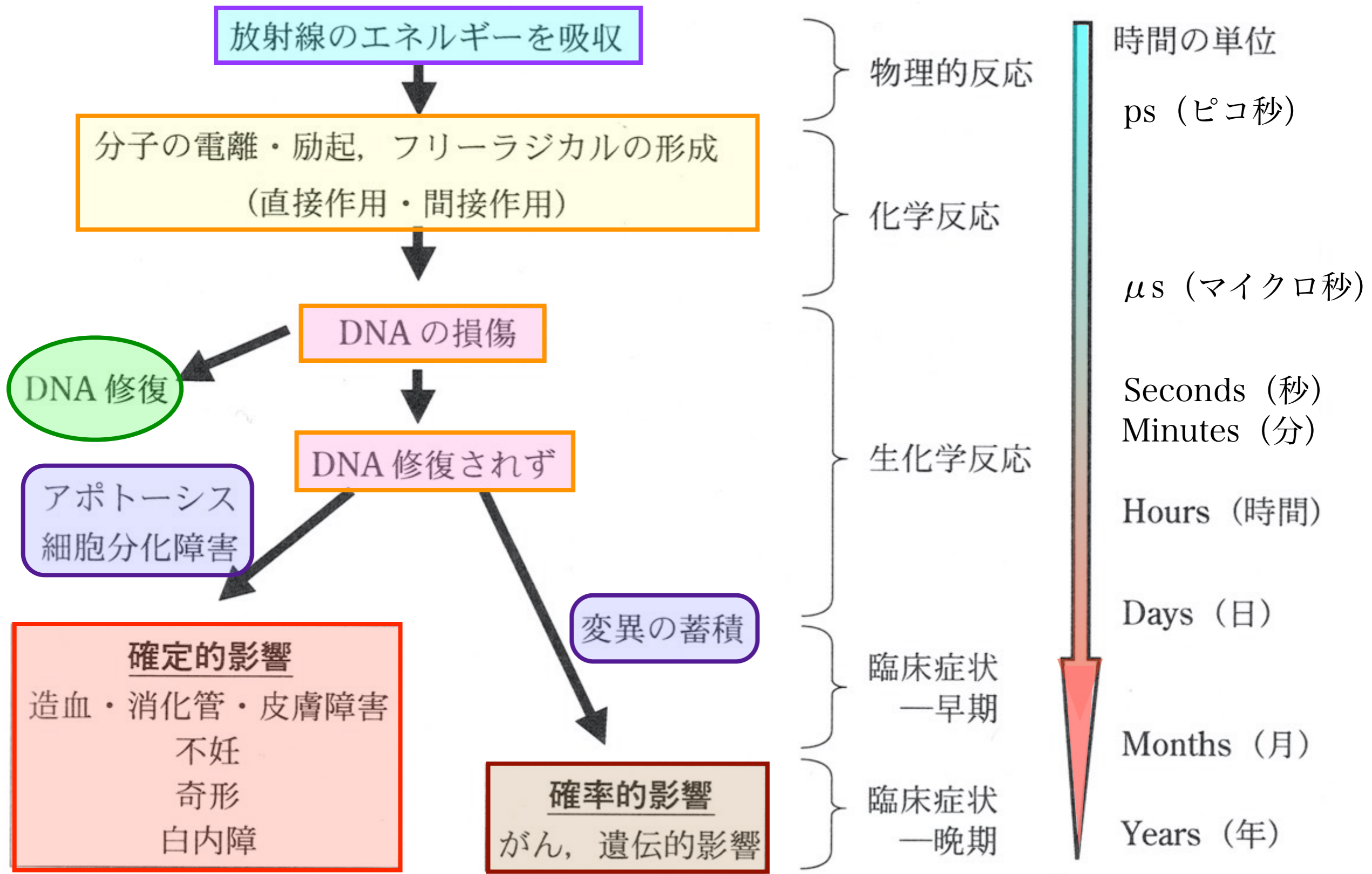
出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 <http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



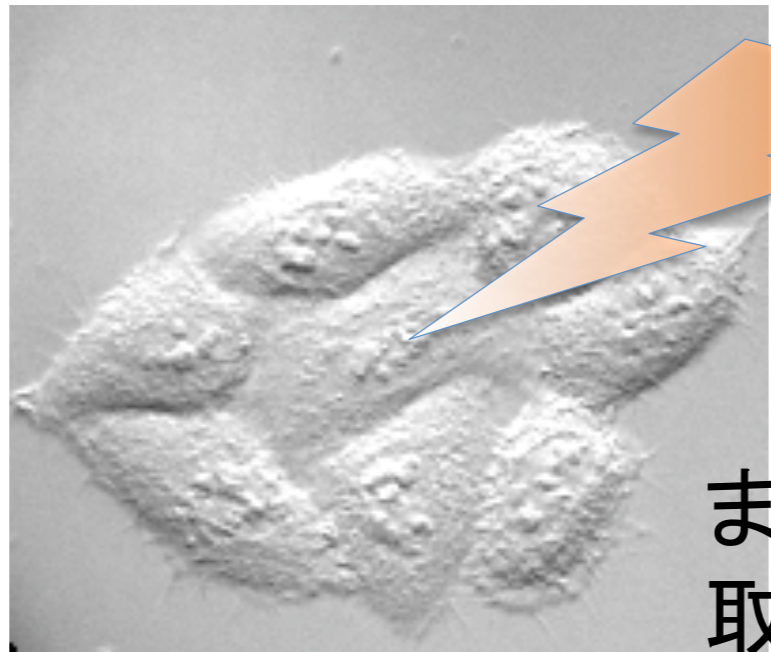
細胞(60兆個)

一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子



放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

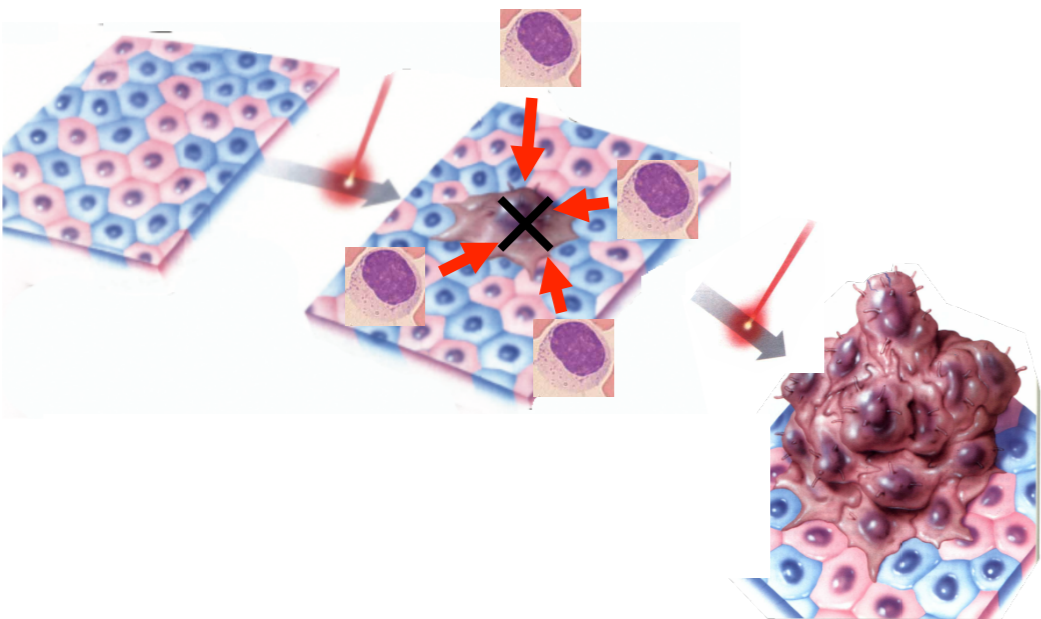


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

修復の失敗

細胞死も起こらない

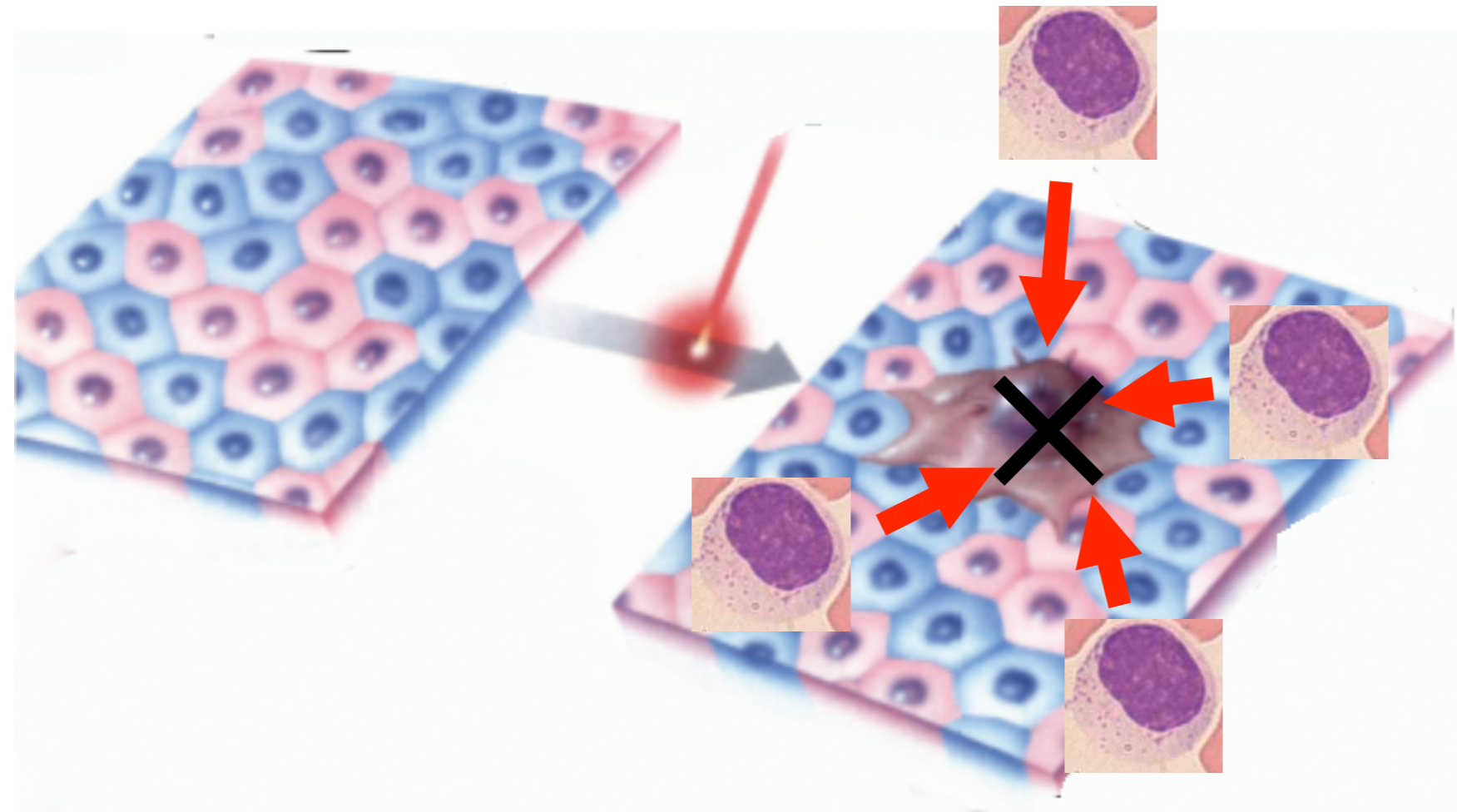
NK細胞も取り逃がした
(自然免疫系)



がん細胞が残ってしまう 良性 / 悪性
浸潤性

がん、とは？

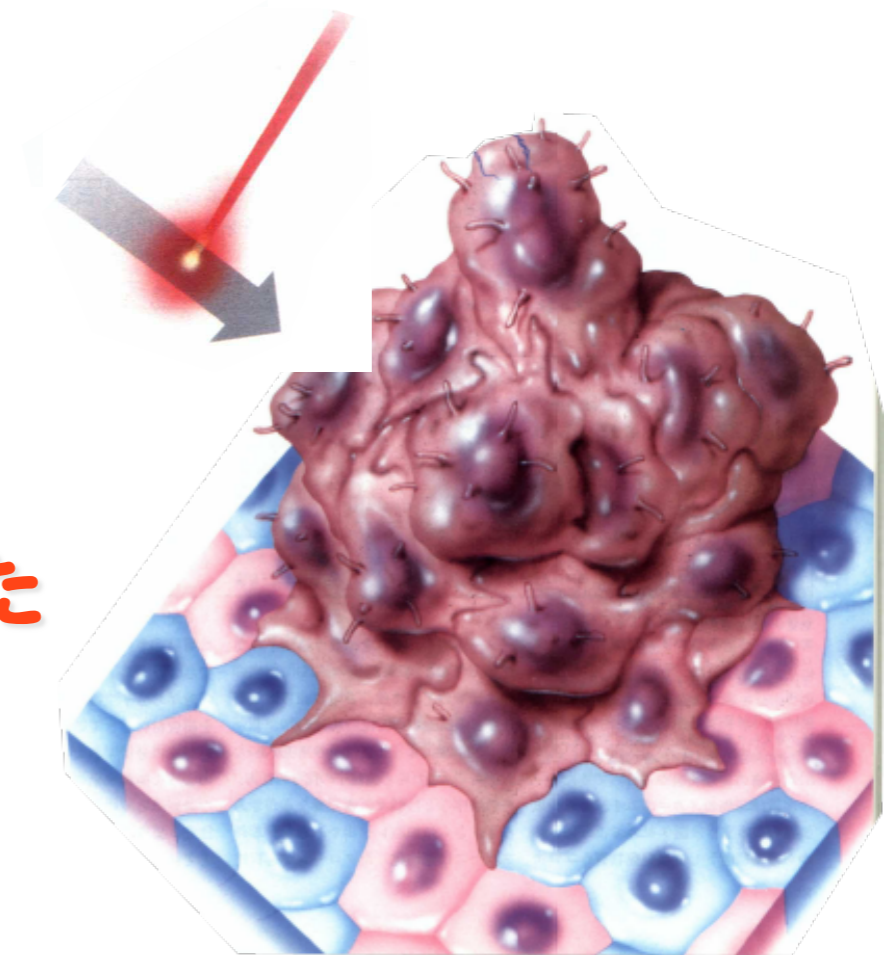
がん細胞は毎日5000個もできている！！



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」



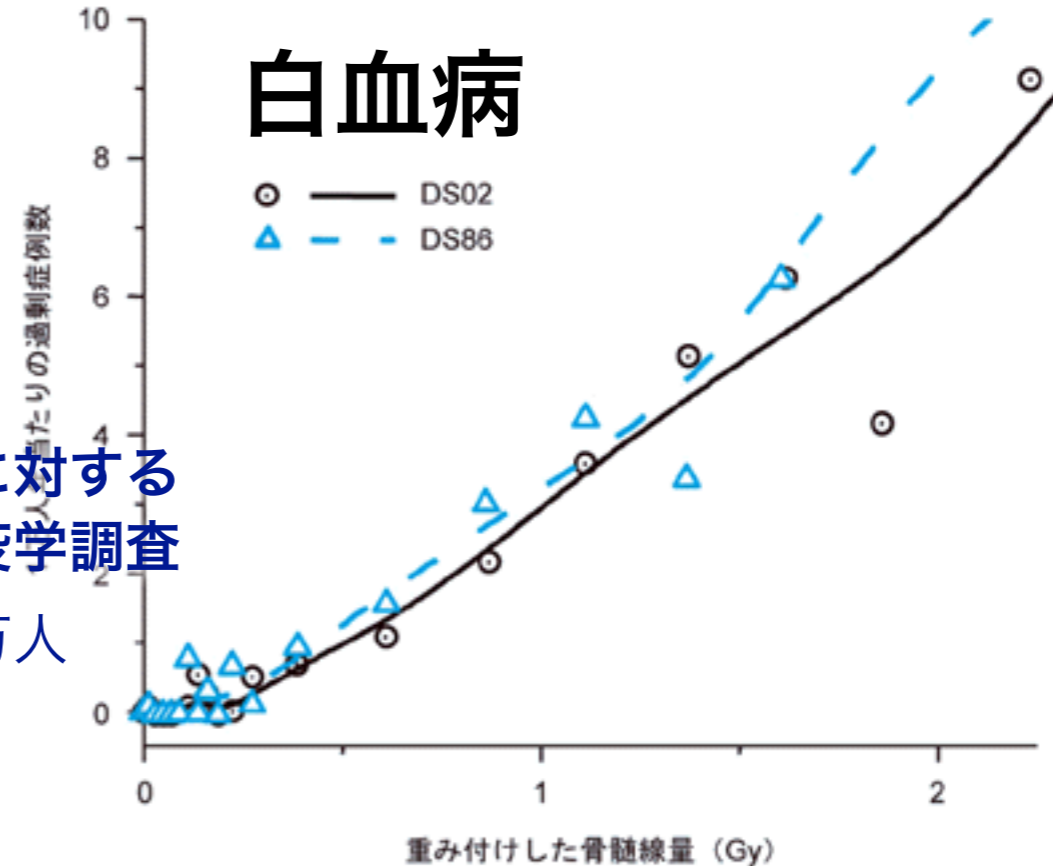
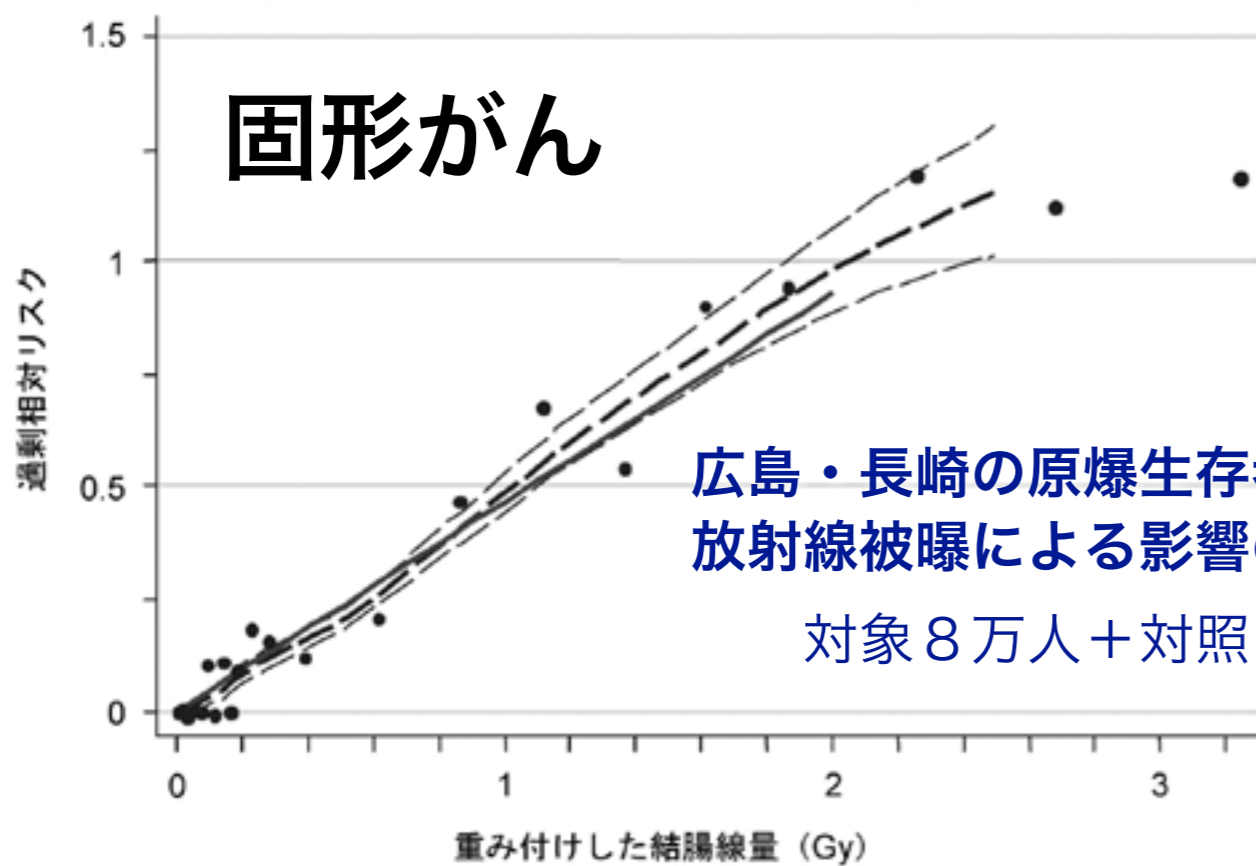


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の方が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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歳の人々の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%

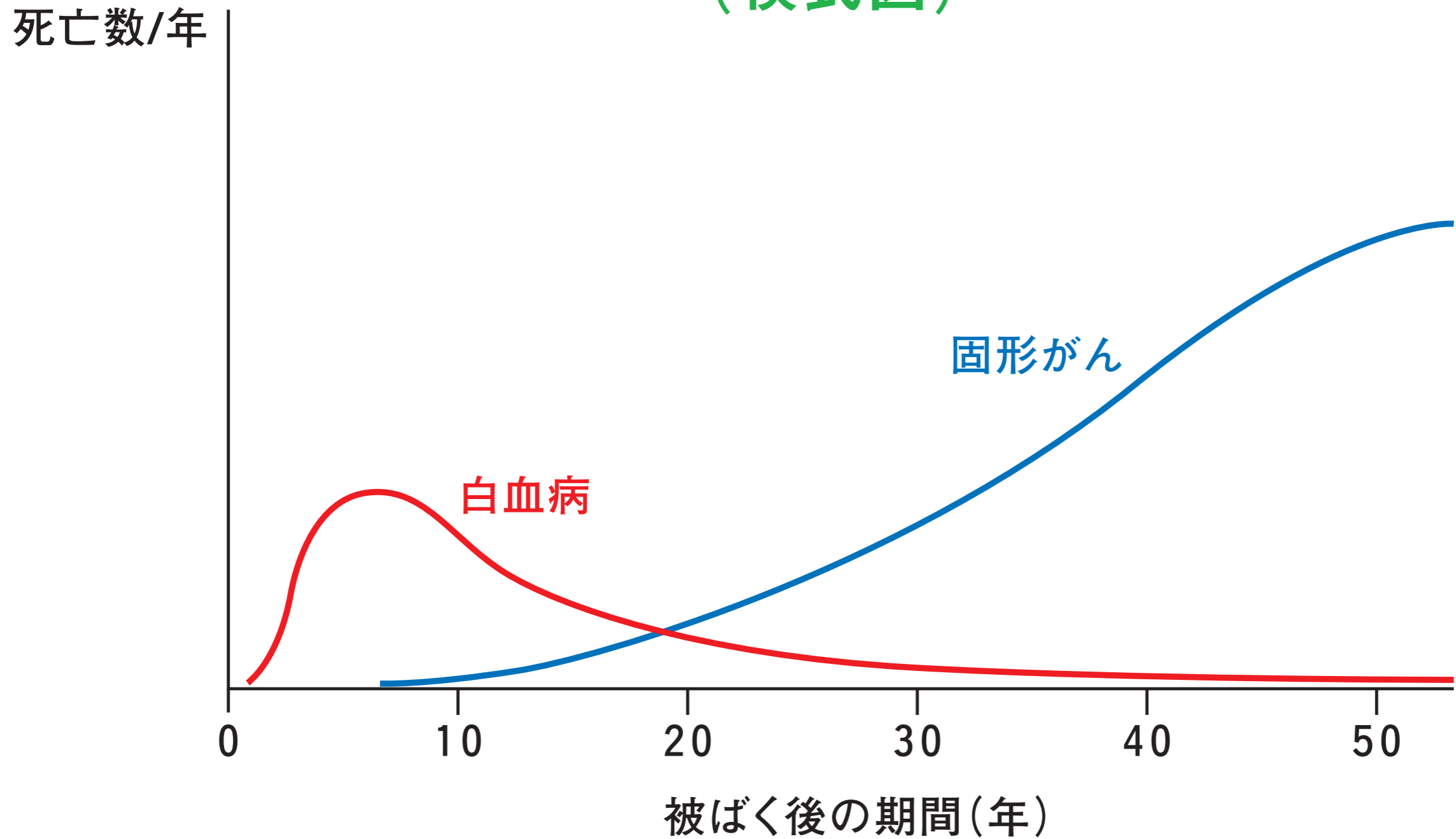
表. LSS集団における白血病による死亡の観察数と推定過剰数、1950-2000年

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

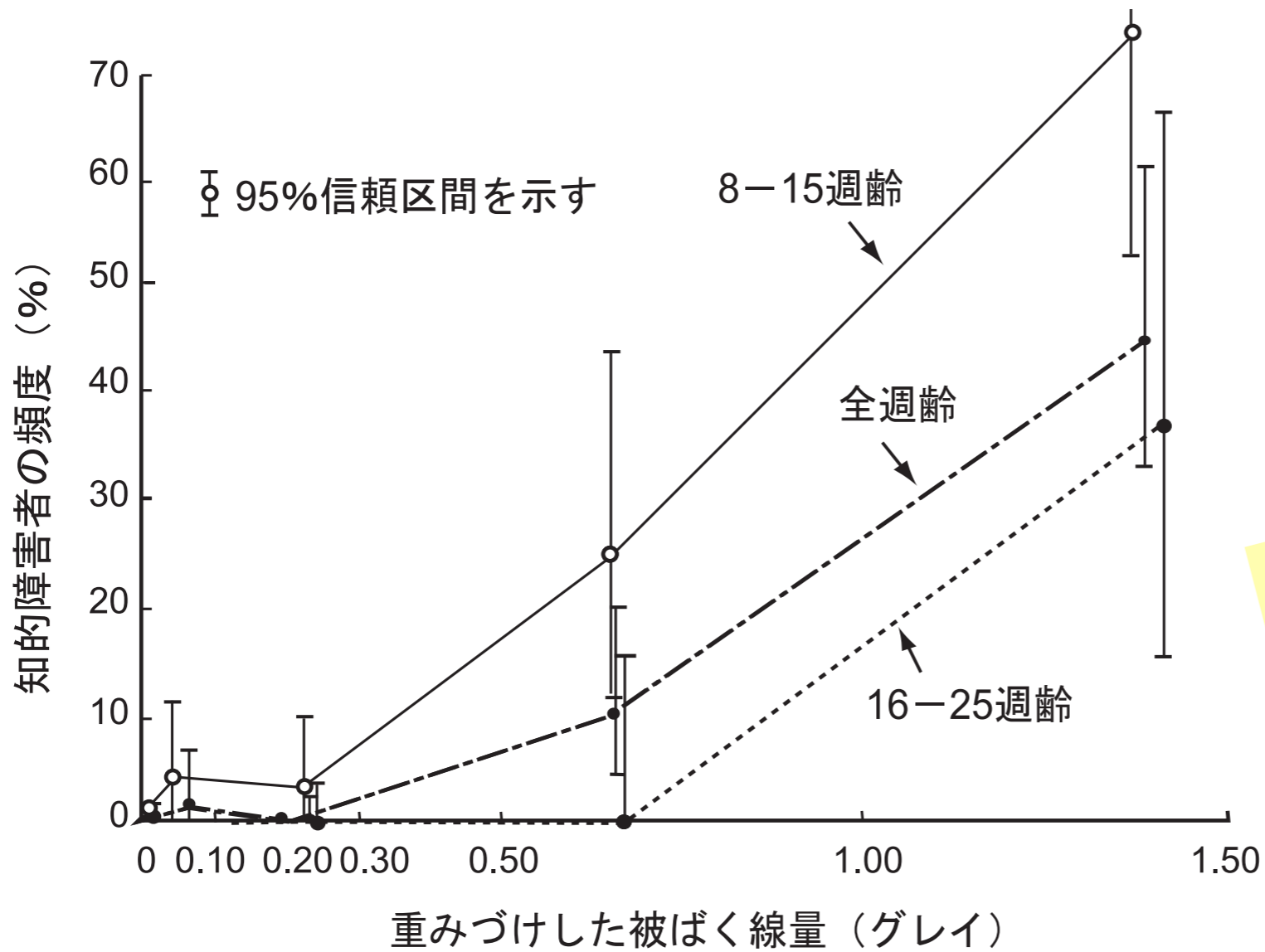
低線量被曝の影響について疫学調査の結果から結論を導きだすのは統計学的に困難。

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

本人が胎内で被曝



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

(財)放射線影響研究所 パンフレット「放射線影響研究所のご案内」

放射線による**遺伝的影響**は認められず

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

親の精子／卵子が被曝

低線量・低線量率の被曝とガン死亡

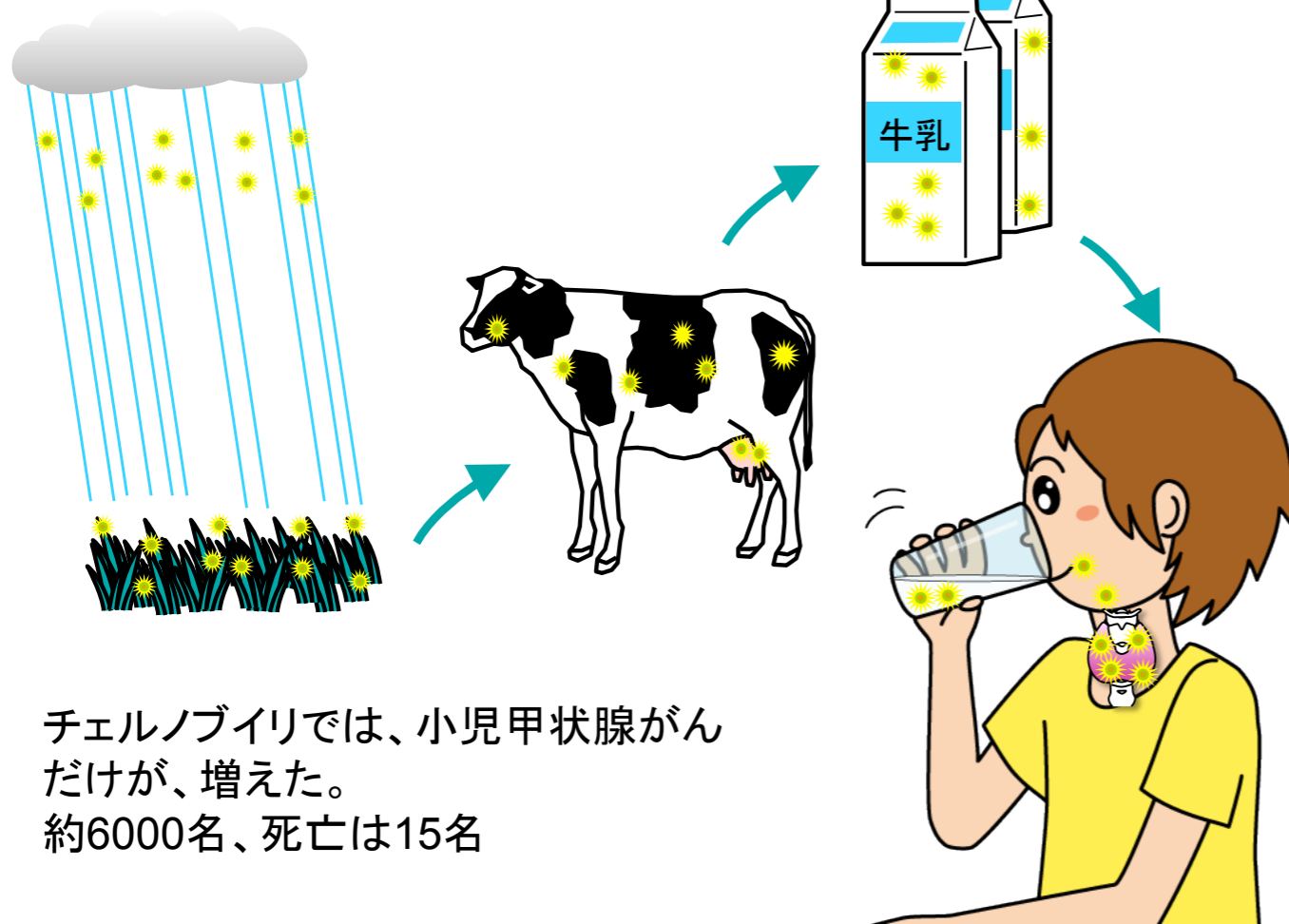


ロシア語
Чернобыль / Чорнобиль



チェルノブイリ原発事故

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



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

一般住民で確認された健康への影響は
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。
(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

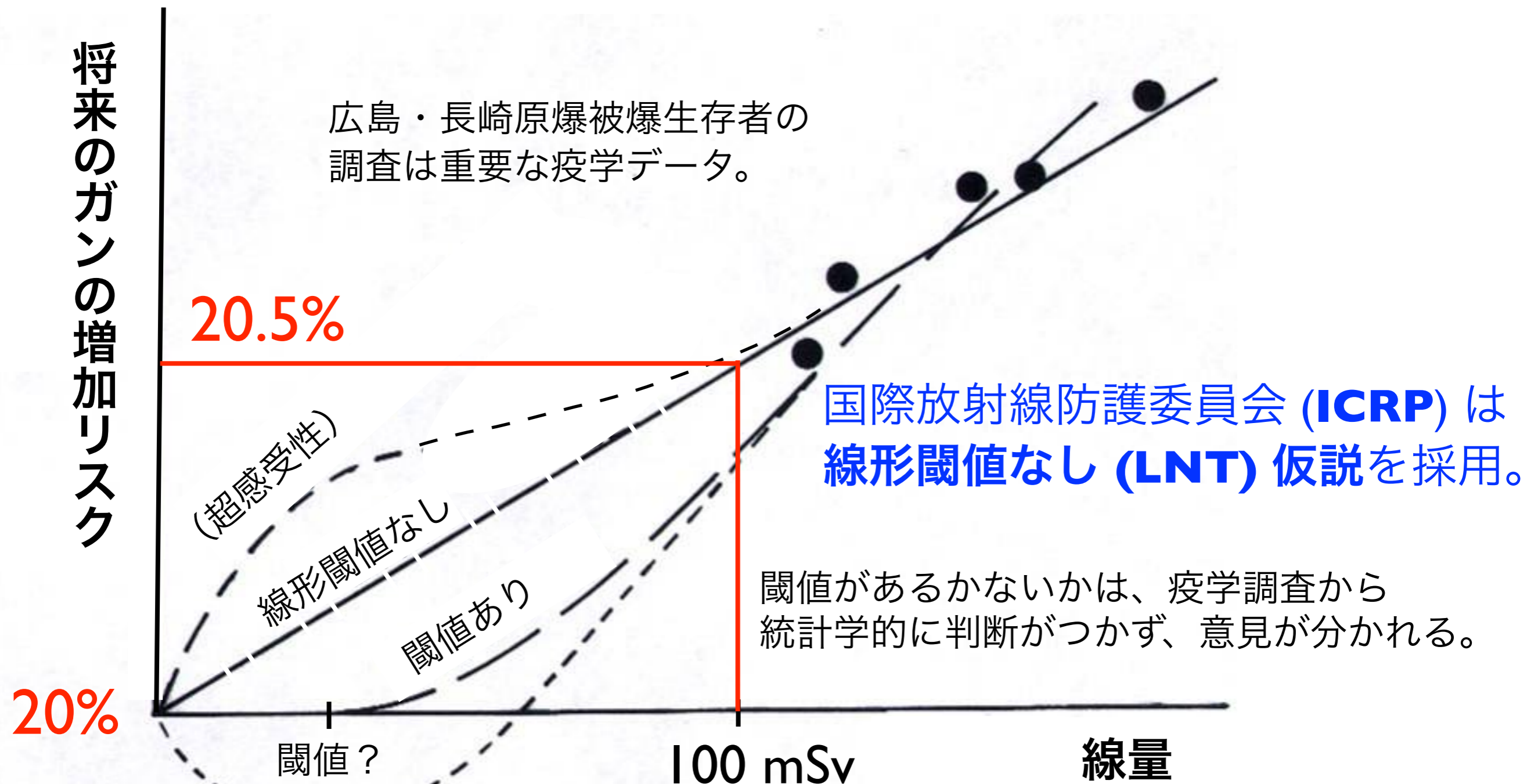
= 2000 mSv !! (10 Gy 以上の被曝も!)
と、ずっと大きいストレスによる失調

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

放射線防護学

低線量におけるリスク評価



日本人の将来のガン死亡リスクは男性が 26%、女性が 16%

(ホルミシス)

慢性被曝が急性被曝に比べて効果が何分の1になるかの係数

線量・線量率効果係数 **DDREF = 2**

コメント

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。

佐渡敏彦ほか「放射線および環境化学物質による発がん: 本当に微量でも危険なのか？」（医療科学社）

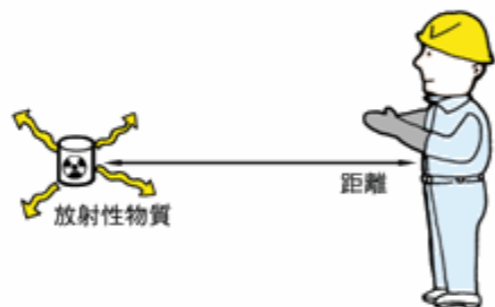
等価線量も実効線量も、放射線防護の目的にのみ使用できる量である。つまり、放射線を利用する計画に伴う将来のリスクを予測評価するための目安であって、すでに受けてしまった放射線曝露から個人が受けるリスク（たとえば、将来がんを誘発する可能性）を評価するために用いるべきではない。

多田順一郎「わかりやすい放射線物理学 改訂2判」オーム社

放射線防護

● 距離による防護

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

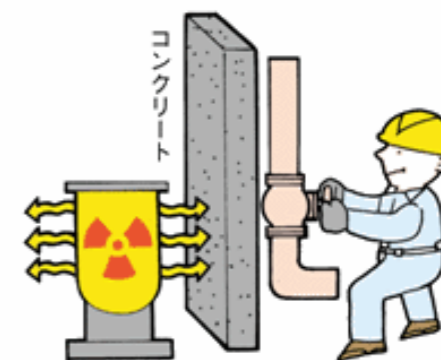


● 時間による防護

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



● 遮蔽による防護



確定的影響は
発症させない。
確率的影響を
できるだけ減らす。

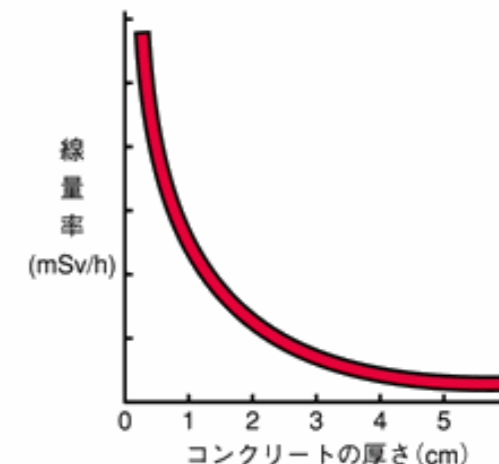
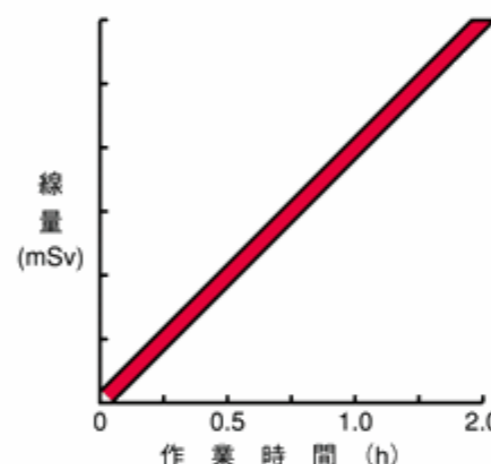
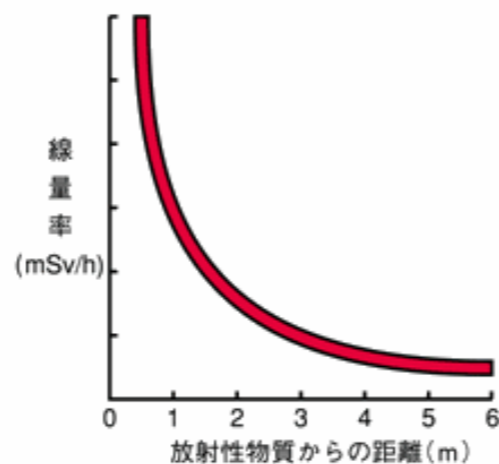


図1 遮へい3原則の図

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

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

(ALARA の原則 = As Low As Reasonably Achievable)

個人被曝の線量限度

線量限度の一覧表（作業者）

職業被曝（作業者 放射線業務従事者）

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

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

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

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

線量限度の一覧表（一般公衆）

公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量	—
水晶体	—
皮膚	—

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

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

2) 1985年のパリ声明で実効線量当量の制限によって不要になった。

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

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

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

国内法令による防護基準

放射線管理区域

管理区域
(使用・貯蔵施設)



許可なくして
立ち入りを禁ず

放射性同位元素
使用室



第 2 種

←開閉→



管理区域 (作業エリア) 用靴履
Shoehouse for Controlled Area
(Maintenance Area)

管理区域 (作業エリア) 用靴履
Shoehouse for Controlled Area
(Maintenance Area)

更衣室
Changing Room

管理区域 (作業エリア) 用靴履
Shoehouse for Controlled Area
(Maintenance Area)



△注意
RPCM の故障の疑いにかりますので
靴底にテープ等が付着していない
ことを確認してください。
放射線安全セクション

△注意
RPCM の故障の疑いにかりますので
靴底にテープ等が付着していない
ことを確認してください。
放射線安全セクション

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





個人被曝の線量限度

線量限度の一覧表（作業者）

職業被曝（作業者 放射線業務従事者）

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

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

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

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

線量限度の一覧表（一般公衆）

公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量	—
水晶体	—
皮膚	—

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

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

2) 1985年のパリ声明で実効線量当量の制限によって不要になった。

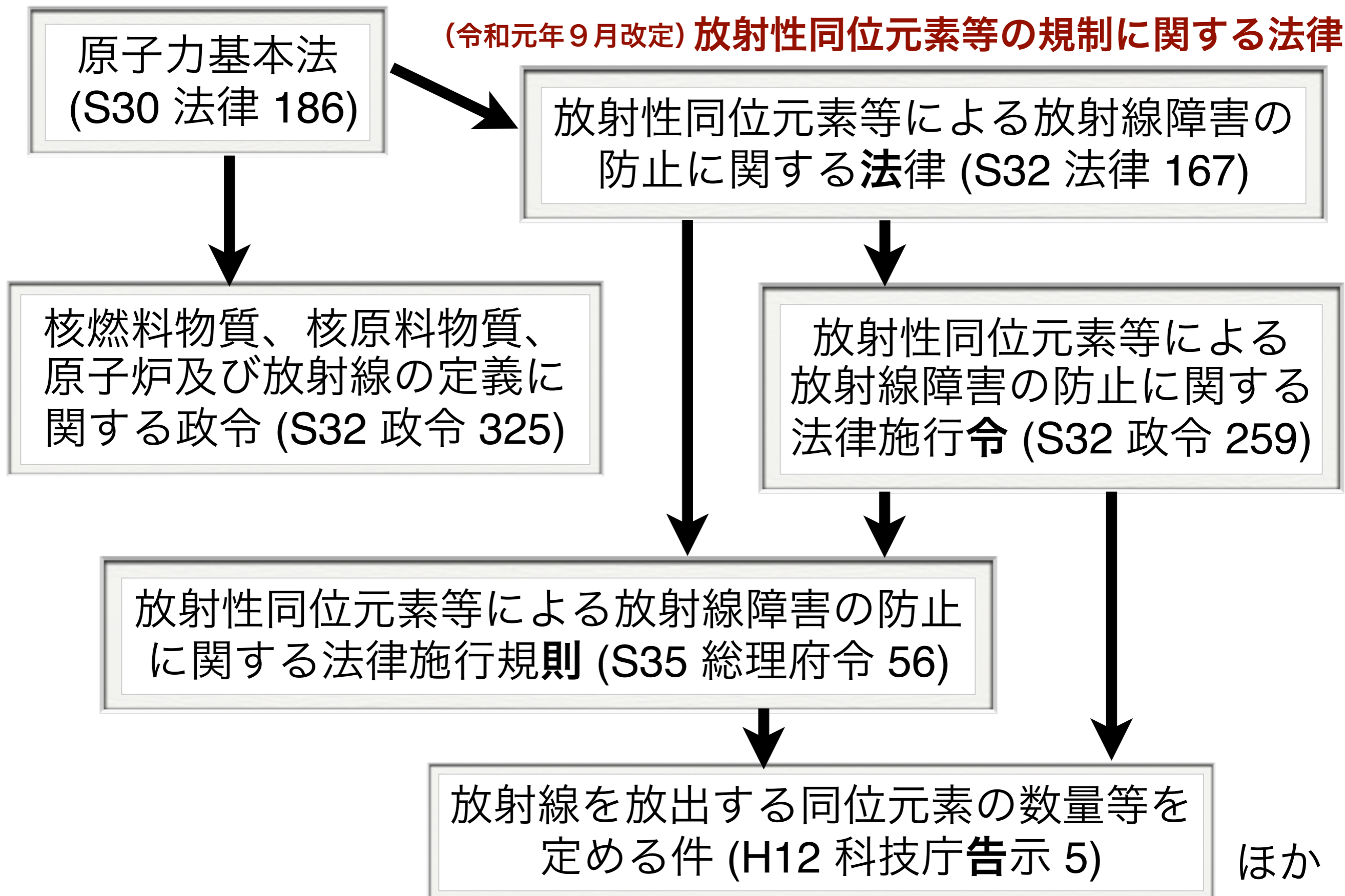
年リスク1万分の1 (毎年被曝の場合、65歳までの最大値) **ICRP 勧告**

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

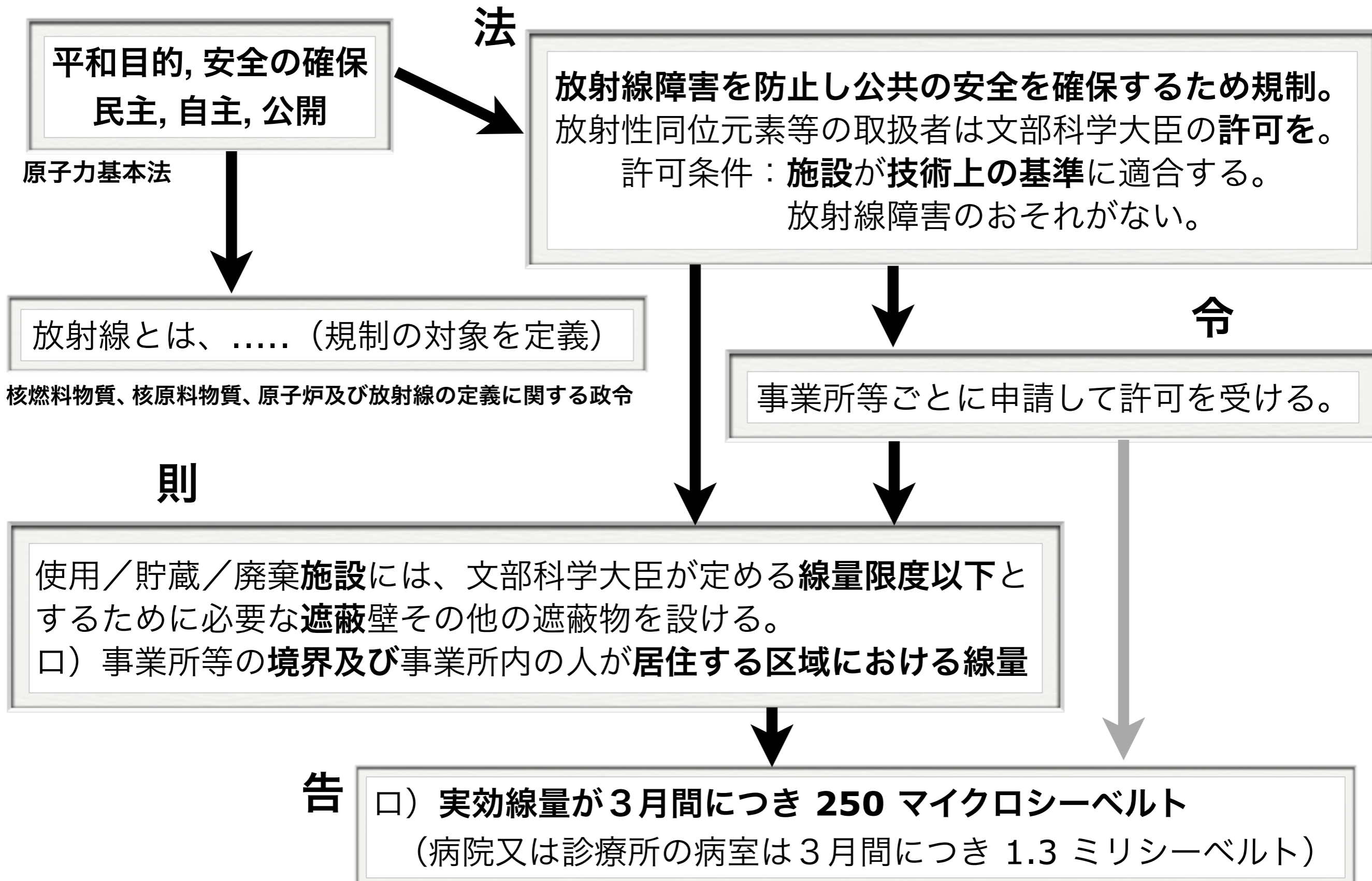
〔「ICRP1990年勧告-その要点と考え方-」、草間朋子編、日刊工業新聞社、50ページ〕

国内法令による防護基準

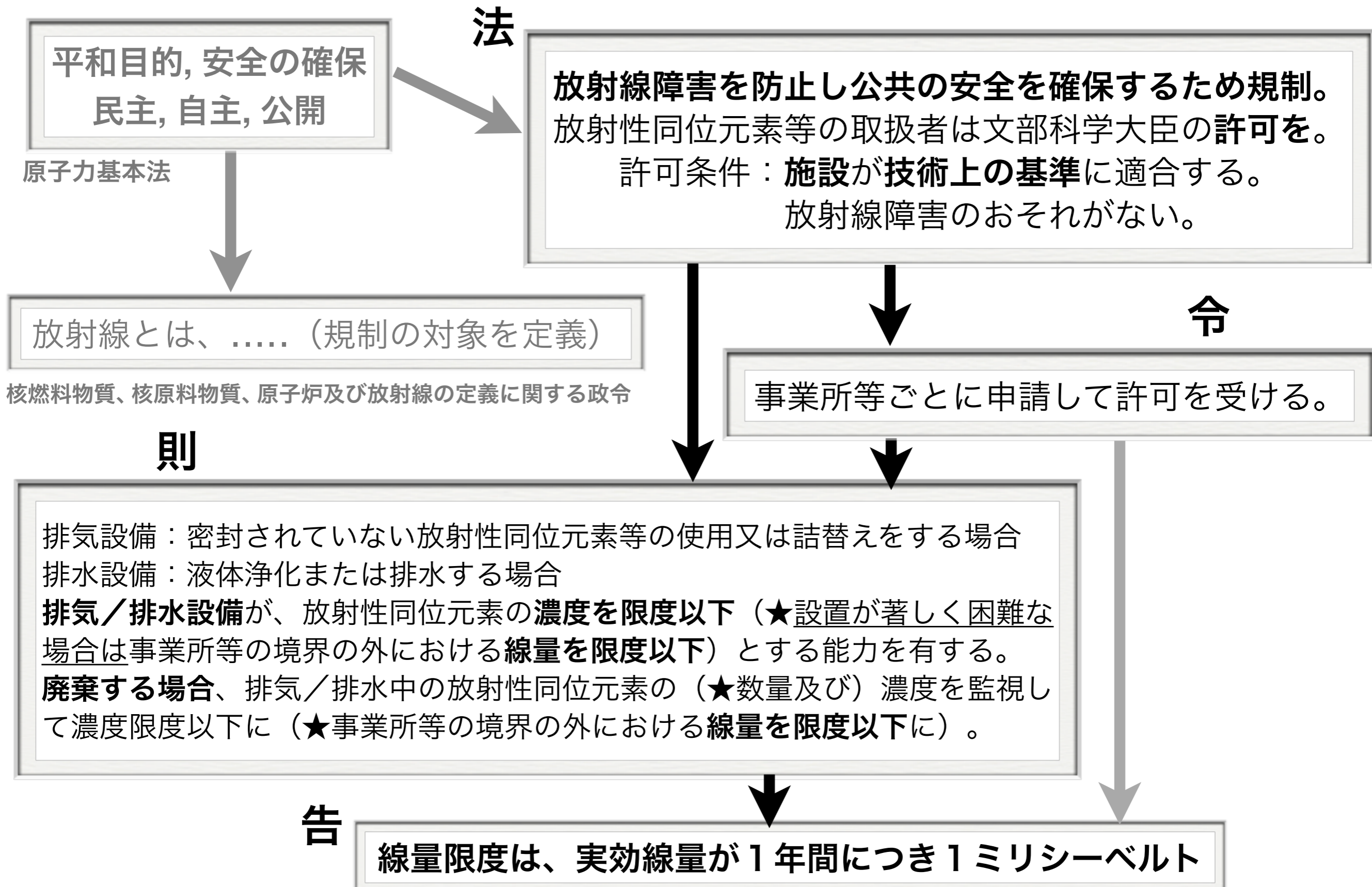
放射性同位元素等による放射線障害防止の法体系



公衆の追加線量限度が 1 mSv である法的根拠 (1)



公衆の追加線量限度が 1 mSv である法的根拠 (2)



放射線管理の法令

- RI (放射性同位元素) ・ α ・ β ・ γ ・ 陽子線 ・ 中性子線 ・ 重粒子線
& 1 MeV以上の電子線 ・ X線
 - 放射性同位元素等の規制に関する法律 (**RI規制法**)
／同施行令／同施行規則
- X線
 - **電離放射線障害防止規則**
☞ 労働安全衛生法／同施行令
- 核原料物質、核燃料物質
 - 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律／同施行令
- 医療および医薬品
 - 医療法施行規則 ☞ 医療法 ・ 同施行令

放射線規制に関する R I 規制法以外の法令・規則

電離放射線障害防止規則 労働安全衛生法・同施行令

事業者は、労働者が電離放射線を受けることをできるだけ少なくするように努めなければならない。

- ◆ 障害防止法に含まれない X 線装置および X 線作業が主な対象。
- ◆ 障害防止法同様、管理区域の明示、放射線業務従事者の被曝限度などを定めているが、一般公衆に関わる規定はなさそうである。

医療法施行規則 医療法・同施行令

- ◆ 医療および医薬品は、放射線障害防止法施行規則の適用外

病院又は診療所の管理者は、放射線取扱施設又はその周辺に適当なしゃへい物を設ける等により、人が**居住する区域及び敷地の境界**における線量を限度以下としなければならない。

-  実効線量が 3 月間につき 250 マイクロシーベルトを超えない

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律・同施行令

-  周辺監視区域外の線量限度は、実効線量について 1 年間に付き 1 ミリシーベルト

国際放射線防護委員会 (ICRP) や国の法令による
放射線**線量限度**は、**自然放射線を除いた追加被曝線量**に
ついてのもので、検診や治療などの**医療被曝も対象外**。

年間1ミリシーベルトは、国が**事業所に求める基準値**
(施設の遮蔽、排気や排水に関して敷地境界で守るべき値)

自然放射線との比較：放射線ゼロの場所は地球上に存在しない
ゼロリスクは存在しない

リスクが十分に小さくなるように**基準値**を決めてある
(**社会的合意**)

安全と危険の境界ではない

Q. 政府が計画的避難地域を指定しましたが、基準になっている20ミリシーベルトの意味について教えてください。

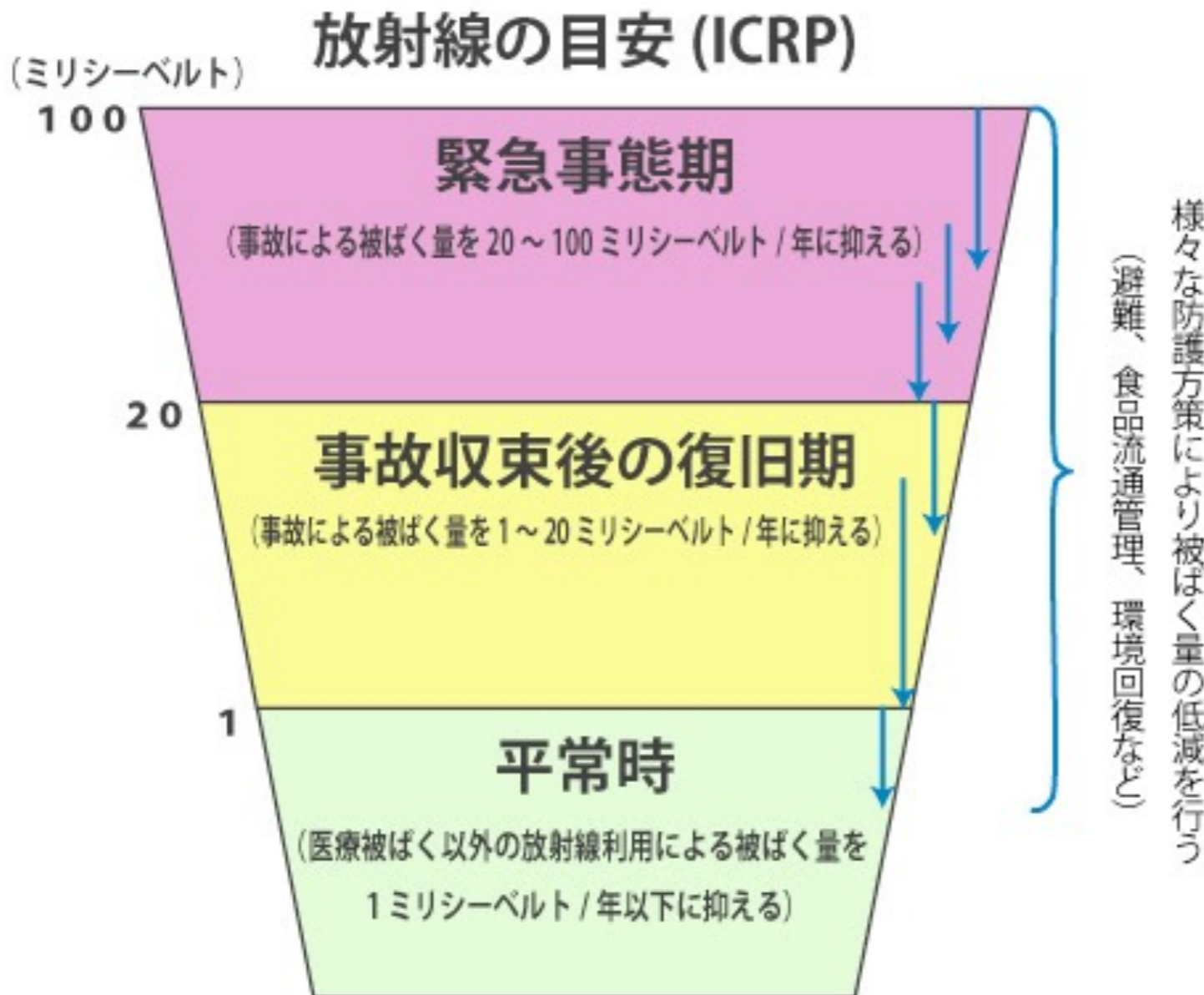
国内法未整備

A. 国際放射線防護委員会(ICRP)は専門家の立場から放射線防護に関する勧告を行う国際学術組織ですが、今回の基準は、このICRPの勧告を基に原子力安全委員会の助言を得て定められたと報道されています。

ICRPの2007年勧告では、非常時の放射線の管理基準は、平常時とは異なる基準を用いることとしています。

また非常時も、緊急事態期と事故収束後の復旧期を分けて、以下のような目安で防護対策を取ることとしています。現在の福島第一原子力発電所の状況は、緊急事態期に当たります。

今回の国の方針は、緊急事態期の被ばくとして定められている20~100ミリシーベルトの下限値にあたるもので、福島原発周辺の方々の被ばくが、事故による被ばくの総量が100ミリシーベルトを超えることがないような対応をしつつ、将来的には年間1ミリシーベルト以下まで戻すための防護策を講ずることを意味していると思われます。



リスクコミュニケーション

放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

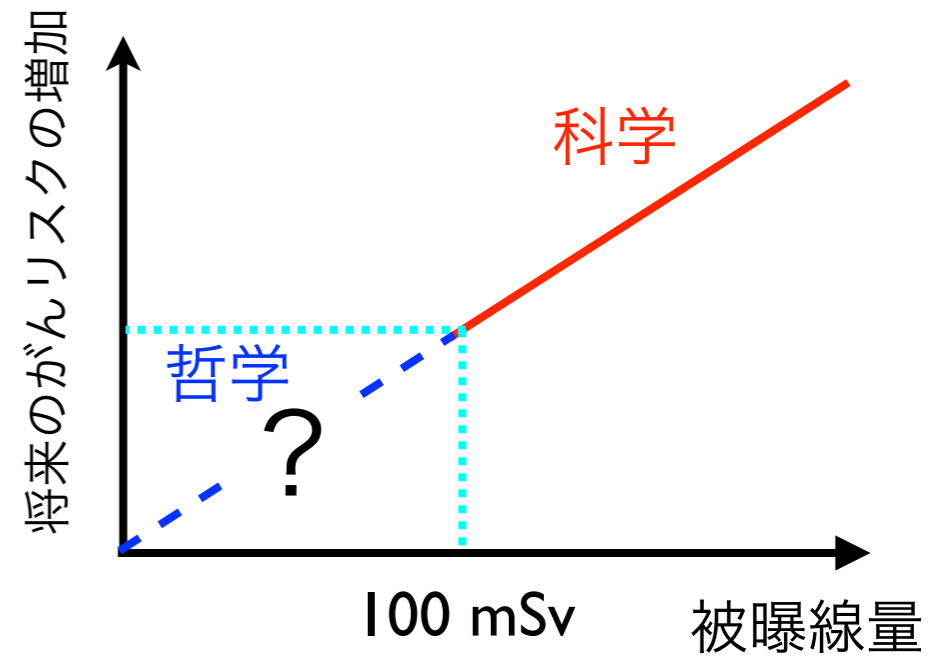
がんの原因が医学的に分かっていない

疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係

線形のリスク
は判断し難い



科学的知見と防護学の哲学の混同

リスクをどこまで許容するか

安全と危険の線引きはできない。

他のリスクとの相対比較 (トレードオフ)

福島住民のリスクは？

住み続けるリスク

原発作業員のリスクは？

放射線の影響?、日常サービスの低下/欠如

避難生活でのリスク

慣れない土地での生活ストレス、生業・収入の損失

リスクのトレードオフは人それぞれに違う。

基準値
(社会が決める)

放射線のリスク

「絶対安全」は世の中に存在しない。相対的なリスク評価の目を養うべき。

正しい情報をどうやって判断するか。

根拠のない過信・安心は問題だが、

☞ 東海村 JCO 臨界事故

根拠のない恐れや不安もまた問題。

☞ パニック、風評、健康被害。

科学的「確率」をどう理解するか。

がんの影響は「確率的」に現れる

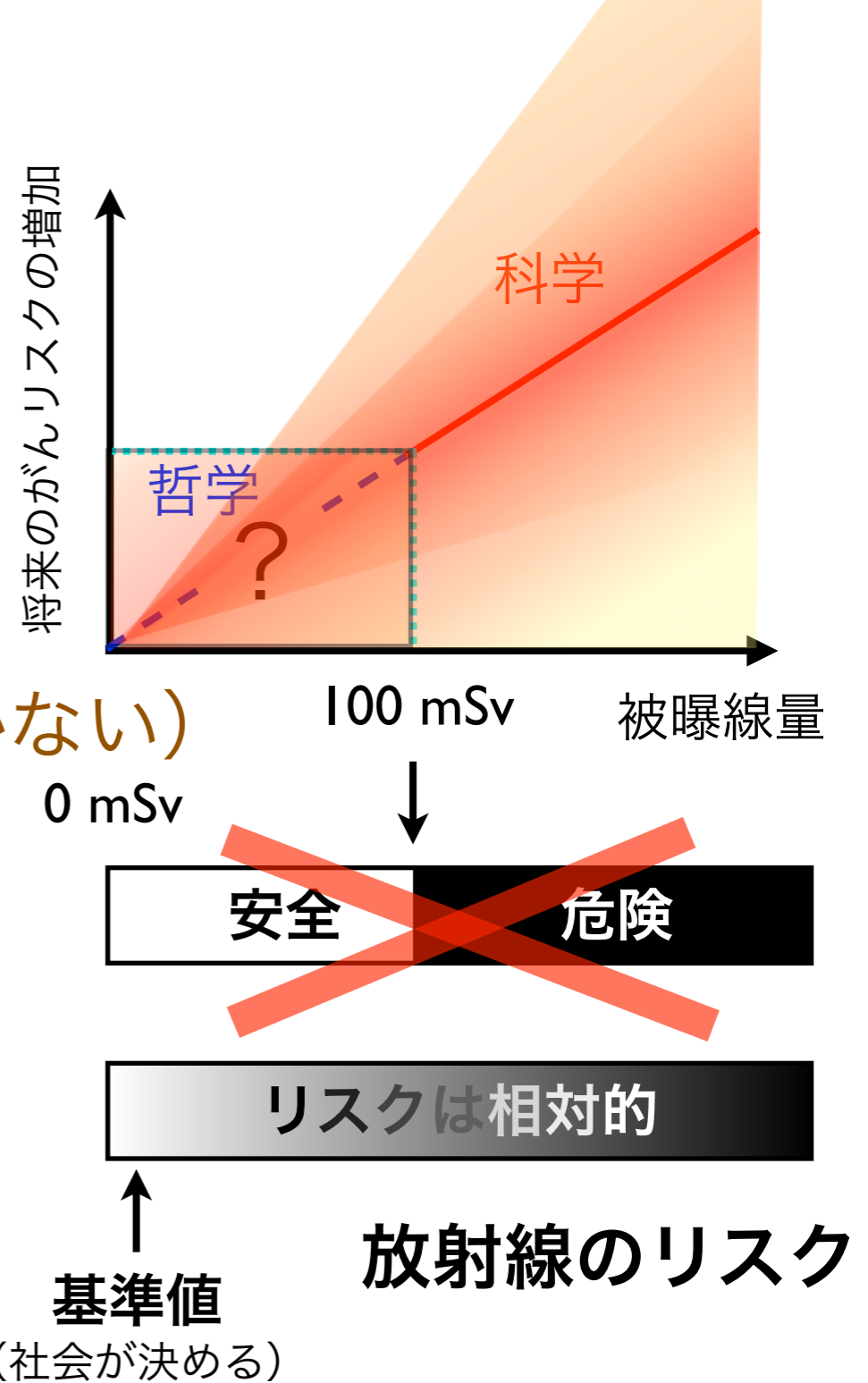
個別の事象との因果関係は分からない

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

その確率さえ不確かさを伴う

トランスサイエンス

科学に問うことはできるが、科学(だけ)では答えることのできない問題群の領域



原発と共存が現実 自ら置かれた環境 どう見極めるか

原発事故における避難などの根拠となったのが国際放射線防護委員会(ICRP)が示す数値だ。副委員長のジャック・ロシャルールさんは3・11後、福島で被災者との対話を続けてきた。チェルノブイリ原発事故後の歩みもよく知るフランス人の目に、福島や日本はどう映ったのか。専門家が語るべきことは。来日した際に東京で聞いた。

「2年半前の初来日から、福島での対話集会は少人数の車座のものも含めると10回以上になります。そうした集会をなぜ続けるのですか。」
「国際会議で来日した際にNPOの人たちと出会い、復興にかかわる様々な関係者が協力する必要があると感じ、福島市や伊達市、いわき市で開いてきました。最初、被災者は政府や東京電力に懐疑的で、不信感も渦巻き、日本人以外の専門家に話を聞きたいという感じでした。『このまま住み続けても大丈夫か』『引越したほうがいいか』という質問で開いてきました。最初、被災者は政府や東京電力に懐疑的で、不信感も渦巻き、日本人以外の専門家に話を聞きたいという感じでした。『このまま住み続けても大丈夫か』『引越したほうがいいか』という質問

国際放射線防護委員会(ICRP)

1928年に前身の組織が生まれた。医療現場でエックス線の利用が広まり始めたころだった。50年にいまの組織に。主委員会と五つの専門委員会構成され、世界約30カ国の専門家が無報酬で参加。運営費は各国にある約20の原子力の研究組織による資金援助が8割、残りは刊行物の収入。日本からは、主委員会のメンバーで震災後に福島に移住した丹羽太貴・京都大学名誉教授ら7人がいる。

国際放射線防護委員会(ICRP)副委員長 ジャック・ロシャルール さん

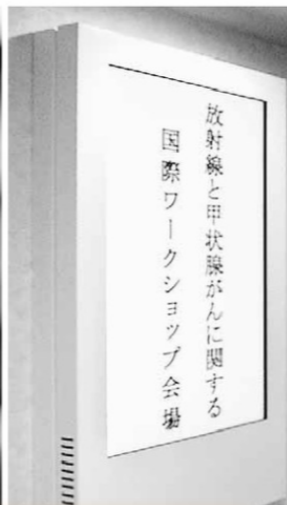
Jacques Lochard 50年生まれ。放射線防護の専門家、経済学者。フランスのNPO、原子力防護評価研究所(CEPN)所長も務める。パリ在住。

「しかし、その答えは人生で何を重視するかという個々の価値観によります。冷たく聞こえたと思います。が、人生相談には乗れませんと断つたうえで、どのように自らを取り巻く環境を見極めるか、ということを放射線防護の経験から伝えました」

「個人的に福島への思い入れも強いようですね。」
「下」と強くこだわる理由が、来日に抑え、生活の質を高めるアドバイスを目的で、そこにどこまでいけばいいかという問いかけを繰り返して、福島市に滞在し、先ず、箱にきれいにたたまれて宿泊先の東京のホテルに戻ってきまし



東京電力福島第一原発=本社機から



「5月中旬に南相馬市の対話集会に出て福島県立医科大学を訪ねます。ムネオさんにも会いたい」
=麻生健撮影

た。残念ながら私のコートではなかったのですが、感動で胸がいっぱいになりました。福島市のレストランに財布を忘れたときも、必死の形相で従業員が追いかけてきました。丁寧で物事がスムーズに進み、清潔で居心地がよく安心感がある。1ミルシーベルト以下にこだわるのは、日本人のそういう気質や日本の文化が根底にあると思えました」

無力感漂う人々に 専門家が持つ情報 沈黙せず伝える

「だがすれば、そうした意識はなかなか変わりません。」
「昨年11月のいわき市の集会はそのままで違った雰囲気でした。以前は立場の違う人に向けた言葉が飛び交っている感じだったのが、『私は』という主語が増え、自身について語る人が多かったのです。『事故直後はマラソンを走っているように感じたけれど、私はもう一度歩けるようになった』、『どこまで放射線防護が必要なのかと考え続け、私がたどりついた答えはどこまで私がそれを求めているかということだった』など、希望や慈愛、ときにユーモアも感じました」

「もちろん、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」

「1つは、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」

「1つは、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」

「1つは、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」

「1つは、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」

「1つは、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミルシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」

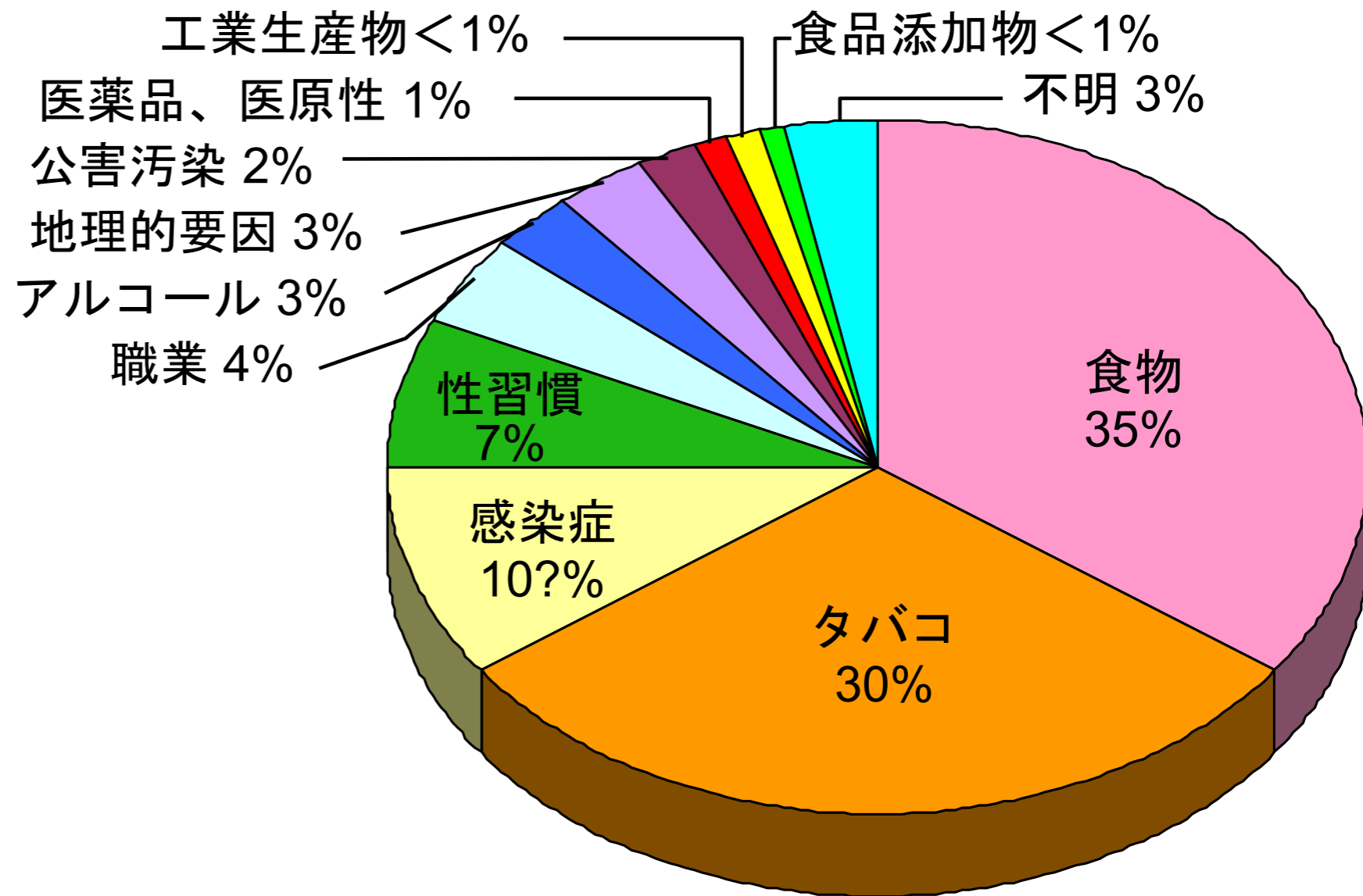
放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

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

※網かけは放射線

(注)相対リスクは、例えば喫煙者と非喫煙者のがんの頻度を比較した数字

ヒトのがんの原因と関連のある因子



(R.Dool and R.Peto, 1981)

表の値は短時間での被曝の場合。

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

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

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

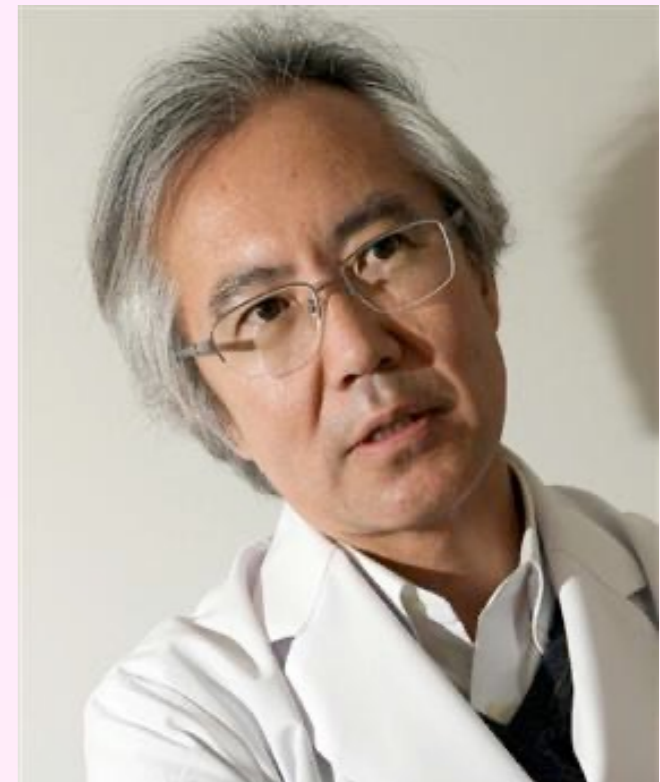
寺田 寅彦 (1935年)

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、賢明とはとれません！被災地の隣、近隣都県の食べ物ばかりです。子供に与える気にはとてもありません。こちらでは今、近隣都県の食べ物を高くても、手間をかけてでも買寄せている現状です。行政に言わ「大丈夫」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。**

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。

事故後の政府・行政や東電のお粗末な対応


ほとんど説明になっていない保安院の会見

参与の涙の辞任会見、文科省と原子力安全委の食い違い

原子力政策の歴史

なぜ東京電力の原発が福島と新潟にあるのか。

原子力村の構造

原発反対運動 v.s. 事故は起きない  安全神話

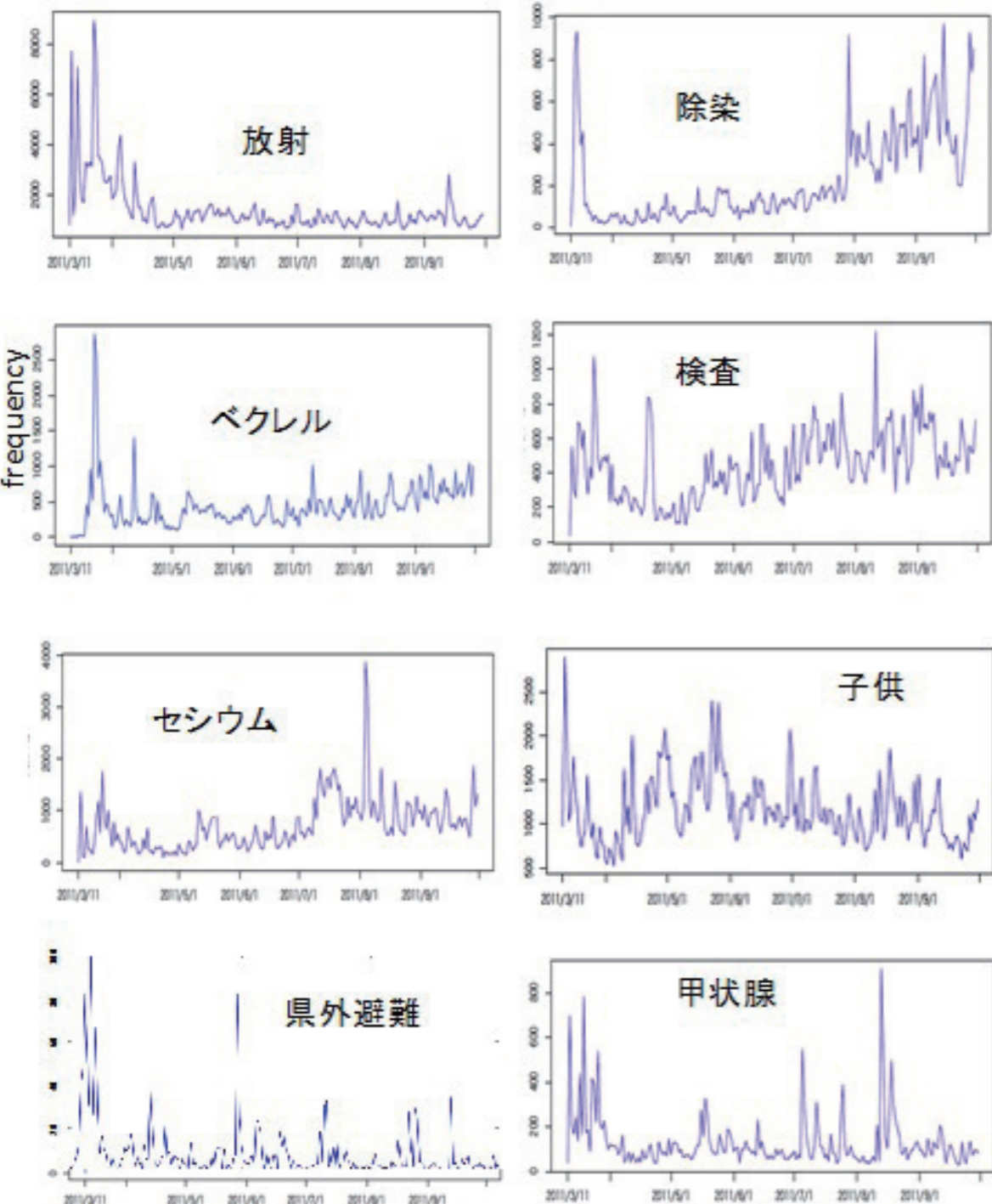
隠蔽体質

SNS (twitter) での放射線リスク

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

3/11 4月 5月 6月 7月 8月 9月

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



原発事故後の twitter データの解析

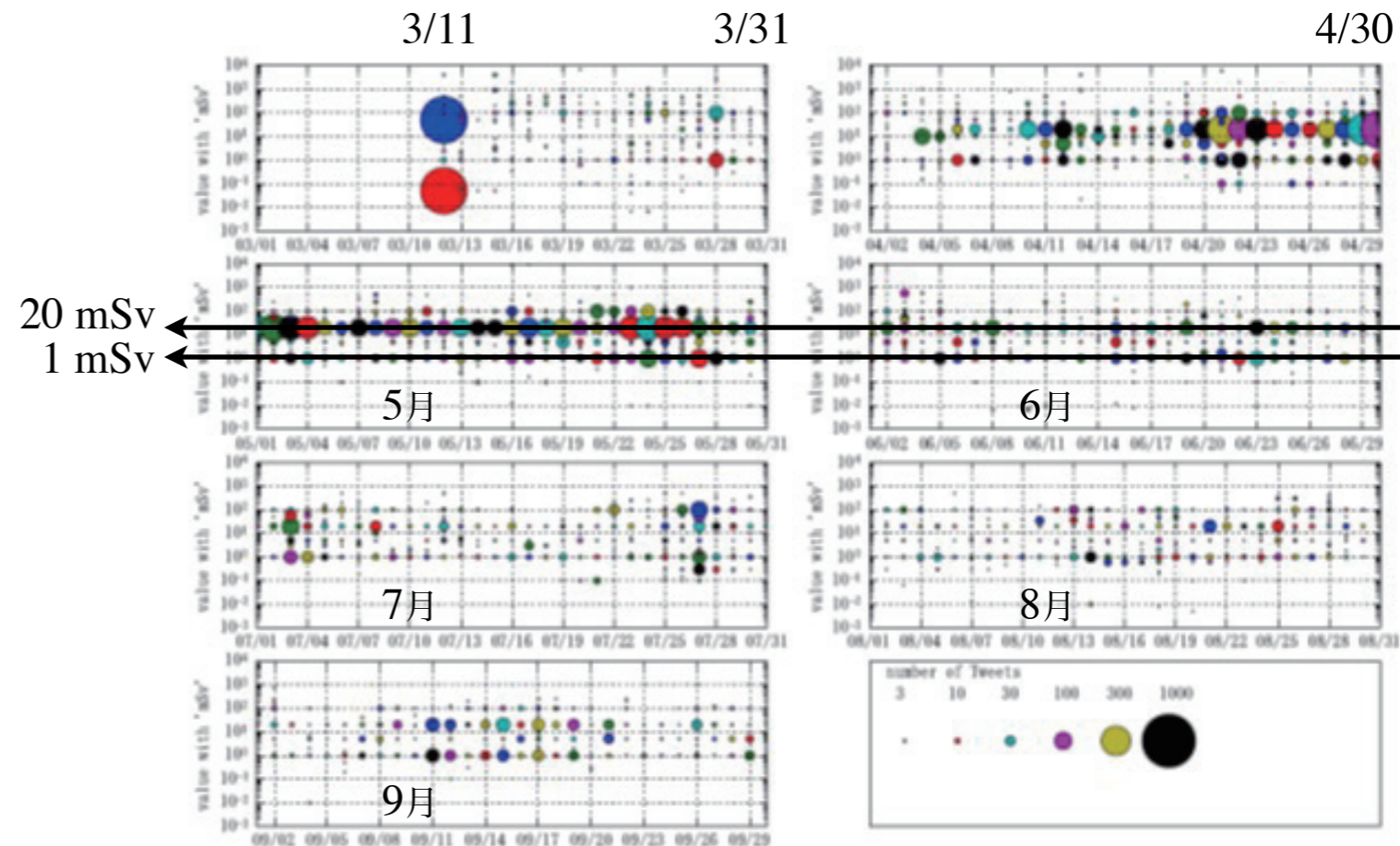


図2 サンプルされた Twitter データ 500 万件のキーワードの推移

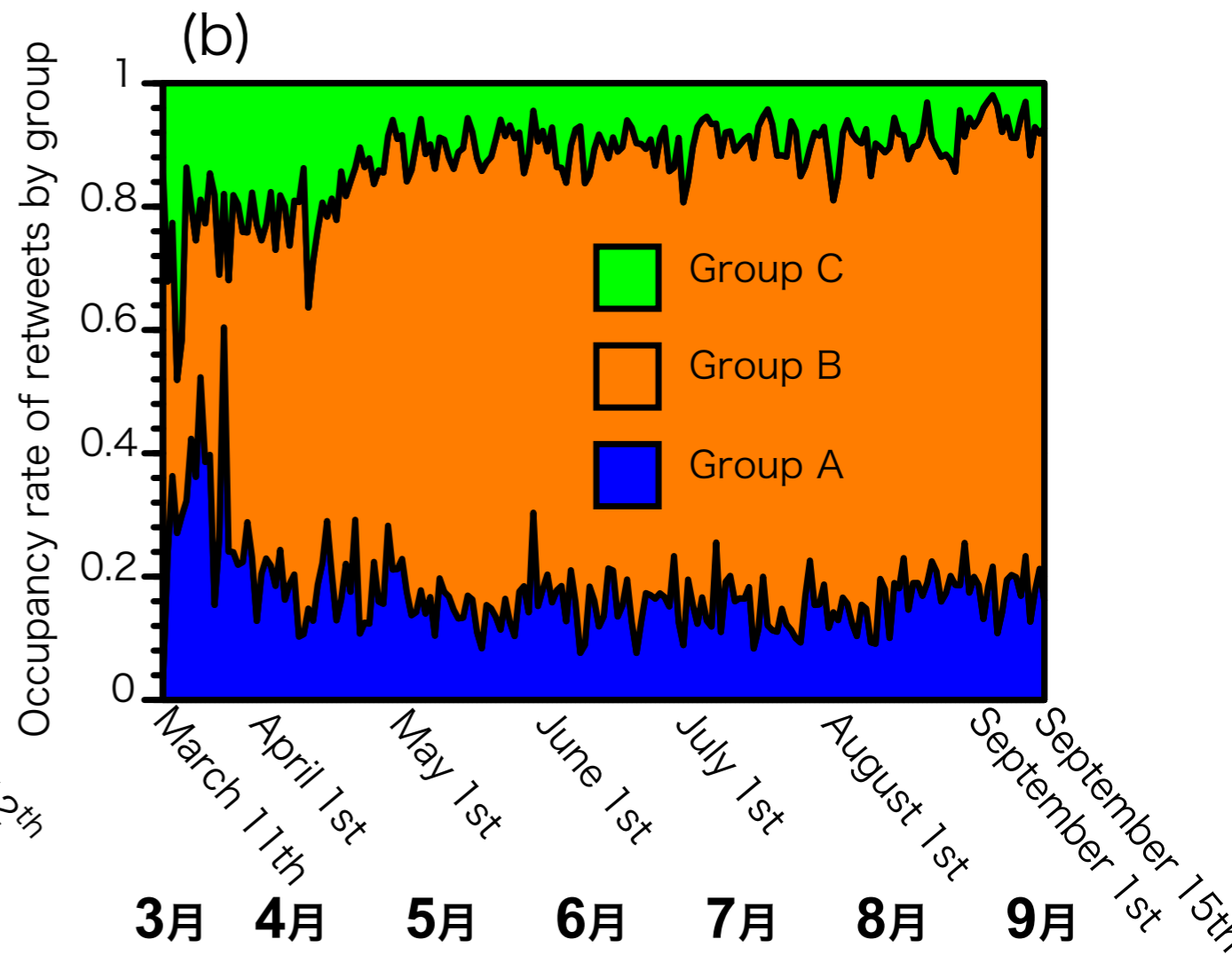
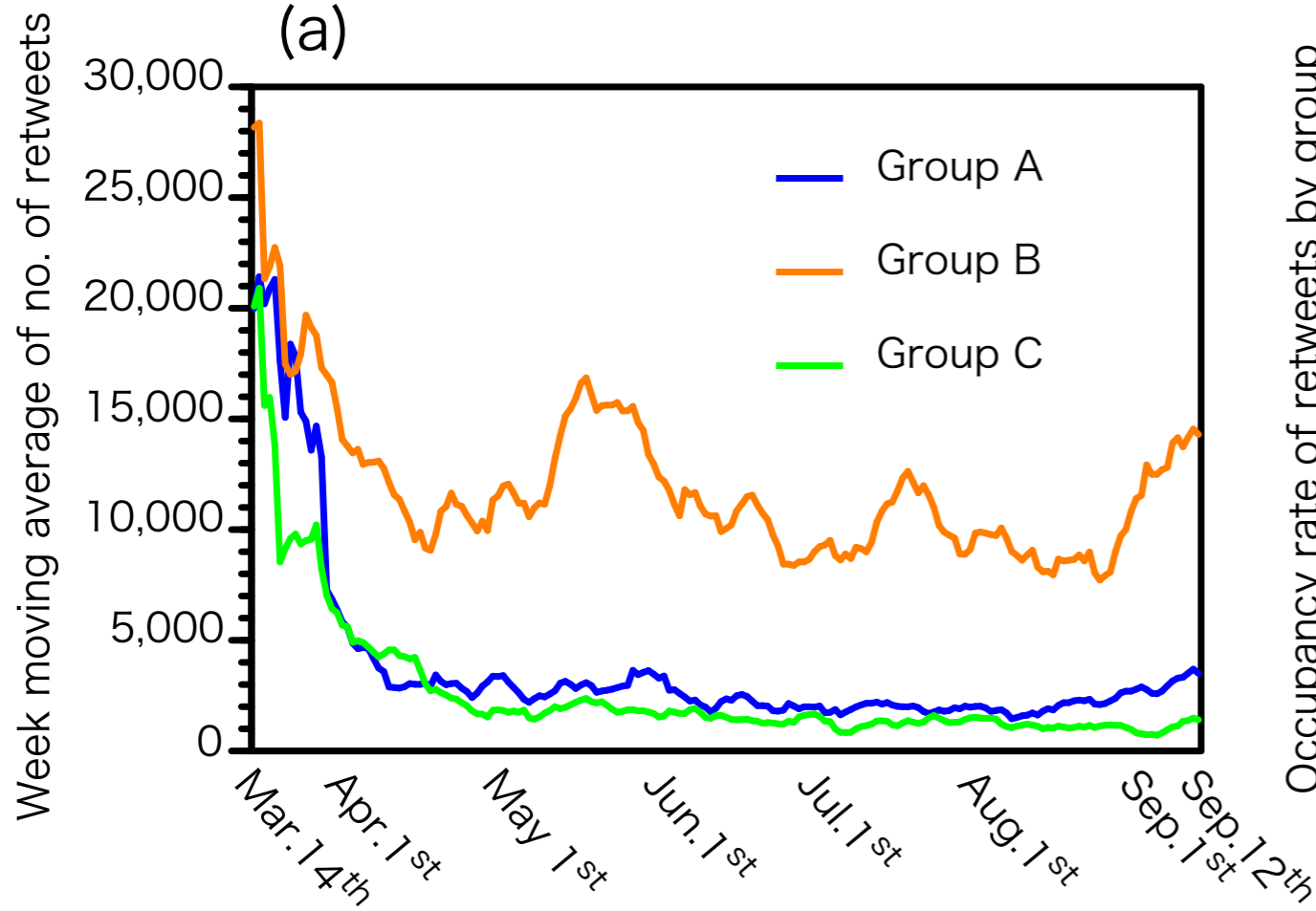
図3 数値と “mSv” が連続して現れる Tweet 数

科学者 vs. 危険派匿名一般人

5866	2011-03-13	【参考】 1974年に中国が 大気圏核実験 を行い、東京に雨とともに放射性物資が降った。学生だった私はガイガーカウンター
		【参考】 1974年に中国が 大気圏核実験 を行い、東京に雨とともに
2946	2011-03-24	放射性物資が降った。学生だった私はガイガーカウンターで人々の
226	2011-03-25	頭髮や衣服などを測定。その数値は、福島 of 病院で被曝された方々
220	2011-03-25	と同程度以上、都民の多くが被曝したはずだが、それによる 健康被
16	2011-03-25	害は現在にいたるまで報告されていない。
		ない国際基準は 3000 Bq/kg です。日本の暫定基準値 300 Bq/kg は、国際基準より10倍厳しい。
1446	2011-03-16	全国各地の放射線レベル。鈴木寛文科副大臣がモニタリング担当で陣頭指揮。都道府県別環境放射能水準調査結果が出るよう
		になりました。すばらしい、 今後はこちらをご覧ください。 http://bit.ly/fByHZk
2703	2011-08-29	あたしは何度でも言う！ 放射能汚染された農作物や水産物を買って食べることは「被災者支援」ではなく「東電支援」だ！ 本
		あたしは何度でも言う！ 放射能汚染された農作物や水産物を買って
209	2011-09-12	食べることは「被災者支援」ではなく「東電支援」だ！ 本来なら東
159	2011-09-09	電が賠償すべき被害を、消費者が自らの健康を犠牲にして身代わり
14	2011-09-13	になるなんて、 こんなバカバカしいことは今すぐやめる！ 子供を甲
136	2011-09-29	状腺ガンにしてまで東電を助けたいのか？
		に、ぜひご覧ください。 わずか5分ほどの映像です。これは原発から100キロも離れたキエフでの現実です→ http://t.co/HQ6fSGS
1057	2011-09-09	「 死の街 」というのは、もともとは英語の「ゴーストタウン」を訳した言葉で「以前はたくさんの方がいたが何かの原因で誰もいなくなってしまった街」という意味。 チェルノブイリ 関連の書籍や映像では数え切れないほど使われてきた表現なのに、なぜ福島第一原発周辺を「死の街」と呼んだら問題なのか？

グループ毎の tweet 数と占有率

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



2011年 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月

3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月 September 1st September 15th

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

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

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

グループ人数 個人実名 / 匿名 属性

twitter ネットワーク解析

2011/3 ~ 2012/9

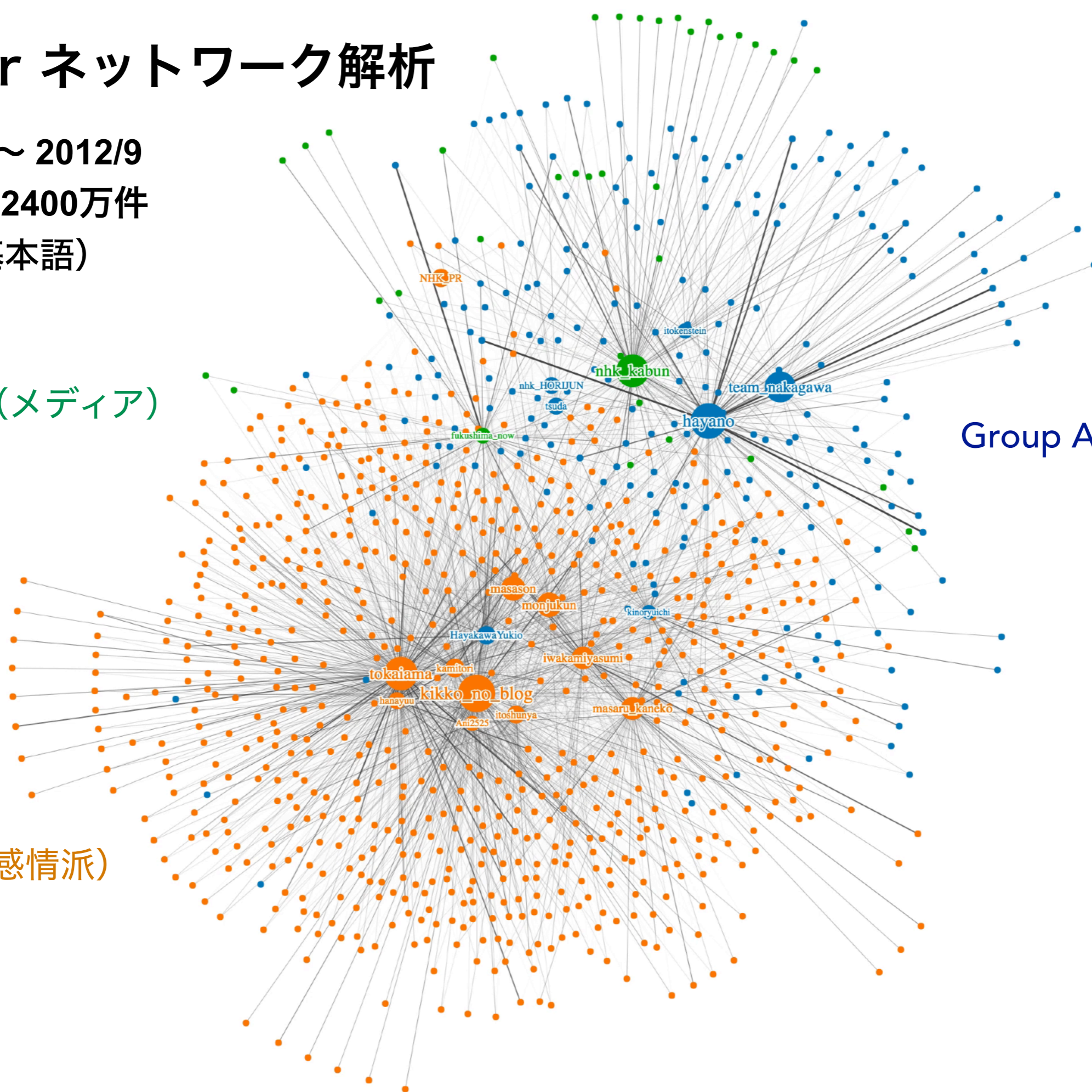
100% = 2400万件

P (基本語)

Group C (メディア)

Group A (科学派)

Group B (感情派)



内部被曝は怖い！という主張

チェルノブイリの「悲惨な例」のイメージ

放射線の安全を説く本は売れない。

小さい子どもを持つ**母親**が特に過敏

安全と安心

信頼と納得、不信と不安と不満

ゼロリスク神話の盲点

定量的判断の必要性

「放射能の検査は大前提」 安全の担保としての基準値

科学者の立場・役割

情報開示・「伝える」ことの重要性

リスクの伝え方

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

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

科学者による踏み越え

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

中立な立場での発言

御用学者？／恐怖の煽動？

イデオロギーの問題（原発推進／反原発、その他の利権？）

新聞報道の問題点

両論併記

「専門家」は適切に選ばれたのか

両極端の意見だけで、実際の科学者の間の意見分布が分からない。

中庸がいちばん把握しづらい。

結論ありき 結論のない記事は書けない。

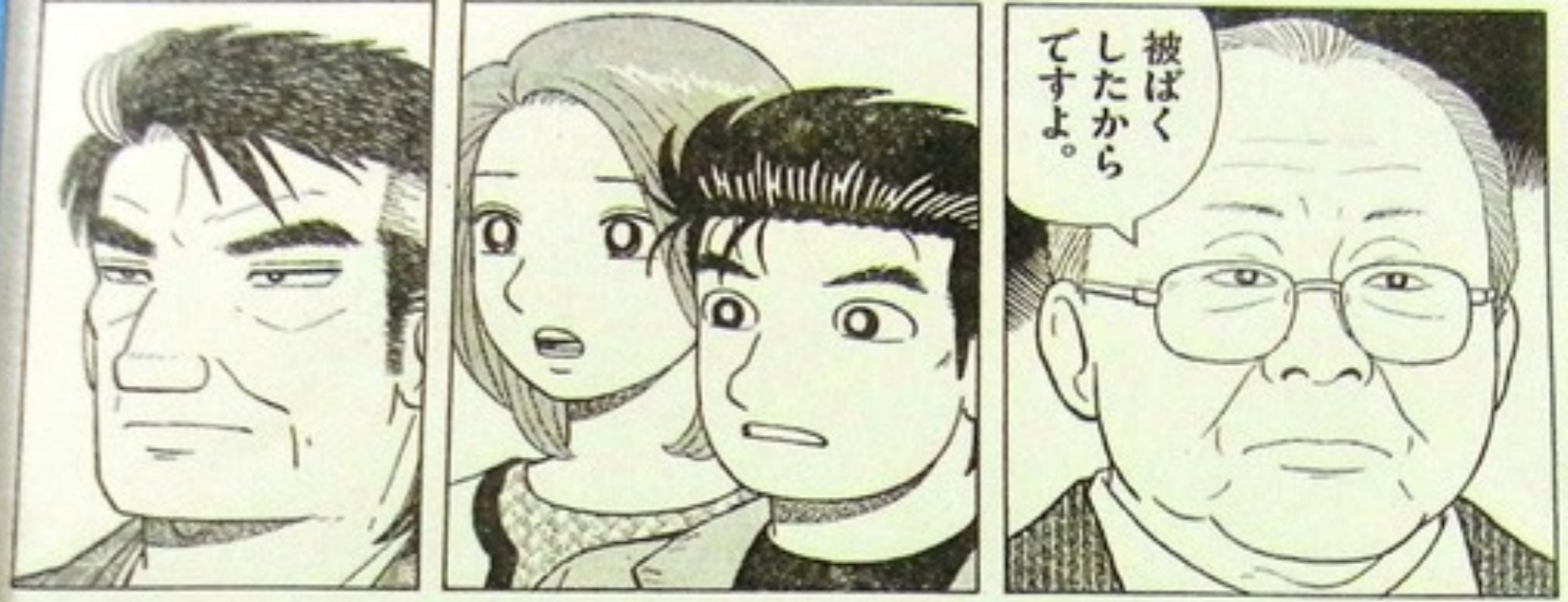
読者自身に判断してもらおうことができない

危険報道・批判報道に偏る

「安全です」は記事にならない
書籍も安全を説くものは売れない

美味しんぼ論争 の功罪

医学研究所所長・松井英介先生が語る福島の実情とは…!!



美味しんぼ



『美味しんぼ』福島の実態編に寄せられたご批判とご意見

弊誌22/23合併号が4月28日に発売されて以降、『美味しんぼ』の内容につきまして、皆様から多くのご批判・ご意見を頂戴しました。福島第一原発の事故は、これからも日本中のすべての人が考え続け、向き合わなければならない問題です。作品内容が提起する問題について、識者や行政の皆様から寄せられたお考えを紹介する、特集記事を掲載させていただきます。頂戴したご意見につきましては、真摯に受け止め、今後の誌面作りに活かしていきたいと思っております。(ビッグコミックスピリッツ編集部)

安齋育郎氏

立命館大学名誉教授
(放射線防護学)

鼻血や倦怠感については、福島のほうでそうした症状を心配している方がいるという話は伝わってきています。そして、それが放射線によるものかの議論がある。ただ、原発事故前の鼻血や倦怠感に関する統計データと今を比べなければ、増えているのかどうかはなんとも言えません。具体的な、そういう比較データは承知していません。

こうした症状は「後付けバイアス」によって出ることが知られています。これは心理学用語で、鼻血が出た、疲れたという症状が出た場合、福島で放射線を浴びたからではないかと考える。今、こんなに疲れているのは、きっと福島に行ったせいだろう、などと考えることはよくあることです。そういうふうにいる方が多く現れることはあり得ると思います。が、これは原発事故によるものだと断じるようなものではないでしょう。

放射線の影響が、人々にどういった影響を与えるのか。それは、4つのカテゴリーに分けて考えるべきでしょう。①身体的影響、②遺伝的影響、③心理的影響、④社会的影響です。

このうち、社会的影響というのは、福島に対する差別や偏見、風評被害もそうですし、避難していた人が、これまでかかっていたお医者さんに通えなくなったり、衛生面の変

小出裕章氏

京都大学原子炉実験所
助教(原子核工学)

今も帰れない地域が存在している、危険が存在するという事実を伝える必要はもろんあります。国や電力会社、大手マスコミがその責任を放棄する、むしろ意図的に伝えないようにしている現状では、そうした活動は大切です。「鼻血」が出ることについては、現在までの科学的な知見では立証できないと思えます。ただし、現在までの科学的な知見では立証できないことであって、可能性がないとは言えません。科学とは、事実の積み重ねによって進んでいくもので、従来は分からなかったことが少しずつ分かってくるものです。もちろん、心因性の「鼻血」は十分にありうると思います

野呂美加氏

NPO法人「チェルノブイリへのかけはし」代表

私達はチェルノブイリの子どもの達を大病を予防するために、日本へ保養に招待する活動をしてきました(福島原発事故以来は休止しています)。

今、日本で行われている被曝対策は広島・長崎のデータに基づいていますが、チェルノブイリの医師達も、福島の実例は使えないと言っています。特に、低線量内部被曝は、核実験などを頻繁に行っていた旧ソ連の科学者もそこまで被害が悪化すると思っていませんでした。適切で大規模な疫学調査をしなければ、鼻

うな状況で、行政の発表に対して不信感を持たないとするれば、そちらが不思議です。何より放射線管理区域にしなければならぬ場所から避難をさせず、住まわせ続けているというのは、そこに住む人々を小さな子どもも含めて棄てるに等しく、犯罪行為です。

崎山比早子氏

医学博士

元東電福島原発事故調査委員会
元放射線医学総合研究所主任研究官

私は臨床医ではないので経験がなく、低線量被曝が鼻血の原因になるのか否かということについてはわかりません。ただ、今の日本では低線量被曝の健康影響に関する議論がおかしくなっているという点については意見を述べたいと思います。

で、原因の特定はできないとしてウクライナの医師達の主張をしりぞけたのです。

ベラルーシでは、年間総被曝量が1ミリシーベルトに満たない汚染地域でも内部被曝を鑑みて、子ども達を国家の事業として保養に出しています。保養させた子ども達の尿検査をすると、体内の放射性物質が著しく減少します。まずは、国民の健康診断をして、数年間は管理をすべきだし、旧ソ連にならって、せめて子ども達を安全な地で保養させたり、安全なものを食べさせたりするべきだと思えます。

日本では鼻血の症状すら口にできない言論封殺の雰囲気ができあがっており、何よりそうした症状を訴える人に対して、医学が背を向けていることが大問題です。

福島県庁

福島県においては、東日本大震災により地震や津波の被害に遭われた方々、東京電力福島第一原子力発電所事故により避難されている方々など、県内外において、今なお多くの県民が避難生活を余儀なくされている状況にあります。

原発事故による県民の健康面への影響に関しては、国、市町村、医療関係機関、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)等の国際機関との連携の下、全ての県民を対象とした県民健康調査、甲状腺検査やホルボディカウスター等により、放射性物質による健康面への影響を早期発見する検査体制を徹底しており、これまでにこれらの検査の実施を通して、原発事故により放出された放射性物質に起因する直接的な健康被害が確認されたと例はありません。

蜂須賀禮子氏

元東電福島原発事故調査委員会
大熊町商工会会長

主人公の山岡さんは6回福島に入り、1回第一原発の中に入ったというのですが、その程度の放射線量で鼻血が出るというのは、これはあり得ない話です。鼻血が出るほど被曝したとなれば、山岡さんは死んでいるはずですが。どのくらいの知識を持って取材にのぞまれたのか、大変疑問を抱きました。

山田真氏

医師

子どもたちを放射能から守る
全国小児科医ネットワーク代表

私は原発事故後、2011年5月頃から福島に入って健康相談会を行ってきました。その頃から、「鼻血が出る。放射能のせいではないか」という話はあちこちから寄せられていました。多くの方が心配していたのは事実です。ただ、子供が鼻血を出すのは日常のことだから、これを放射線の影響と短絡的に考えるわけにはいきません。

大阪府・大阪市

週刊ビッグコミックスピリッツ
『美味しんぼ』に関する
抗議文

平成26年5月9日付で貴社宛に、「平成26年5月12日発売予定週刊ビッグコミックスピリッツ掲載の『美味しんぼ』の内容の一部訂正」について申し入れを行いました。訂正等の対応をいただけなかったため、次のとおり厳重に抗議いたします。

肥田舜太郎氏

医師

私は、原爆投下後の広島で被爆者の治療にあたり、内部被ばくを研究してきた医師として、震災後に日本各地から講演の依頼がありました。そして全国を訪ね歩いたのですが、行く先々でこんな相談を受けたんです。「あまり人には言えないけれど、実はうちの子は鼻血が出て困りました。大丈夫でしょうか」と。鼻血のほか、下痢の症状を訴える人もいました。事故を起こした福島第一原発の放射性物質はアメリカやイギリスにまで拡散したのですから、狭い日本のすみずみまで被害が及んでいてもおかしくありません。

津田敏秀氏

岡山大学教授
(疫学、環境医学)

チェルノブイリでも福島でも鼻血の訴えは多いことが知られています。(雁屋さんが)実際に対面した人が「鼻血を出した」わけですから、それを描くのは問題ないと思います。「低線量放射線との因果関係をデータとして証明しないかぎり、そのような印象に導く表現をすべきではない」という批判が多いとのことですが、「因果関係がある」という証明はあっても、「因果関係がない」という証明はされていません。

双葉町

小学館への抗議文

平成26年4月28日に貴社発行「スピリッツ」の「美味しんぼ」第604話において、前双葉町長の発言を引用する形で、福島県において原因不明の鼻血等の症状がある人が大勢いると受け取られる表現がありました。双葉町は、福島第一原子力発電所の所在町であり、事故直後から全町避難を強いられておりますが、現

青木理氏

ジャーナリスト
ノンフィクション作家

メディアは福島原発事故による被害の問題を扱う時、細心の注意を払わなければいけません。現地に今も暮らしている人がいる以上、住民の不安をいたずらに煽る、または県外の人々の不当な偏見を助長するような表現にならないよう慎重を期すべきです。

矢ヶ崎克馬氏

琉球大学名誉教授
(物性物理学)

放射能の健康への影響については、国際的に二つの潮流に分かれています。一つはICRP(国際放射線防護委員会)やIAEA(国際原子力機関)が主張する、放射能の影響は大したことがないという論調。100ミリシーベルトまで問題はなく、チェルノブイリ事故後の健康被害は甲状腺ガンだけというもの。もう一つは、事実をありのままに見つめ、率直に理解する考え方。こちらは、低線量の健康被害を重大視しています。日本政府は、前者のスタン

遠藤雄幸氏

川内村村長

「鼻血」について、私個人の周りでは、前双葉町長の井戸川克隆氏以外そうした症状を呈している方を見たり聞いたりしたことはありません。

情報に対しさまざまな受けとめ方があることは承知していますが、信頼できる、信用できる情報の発信に努めています。除染後のモニタリン

野口邦和氏

日本大学歯学部准教授
(放射線防護学)

福島県内で被曝の原因とする鼻出血(鼻血)が起こることは絶対にありません。ごく短期間に全身が500〜1000ミリシーベルトを超え

風評と風化

東京では放射線の話題は他人事

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

放射線影響の疫学データをどう解釈すべきか。

そんなことよりもっと大事な健康影響がある。

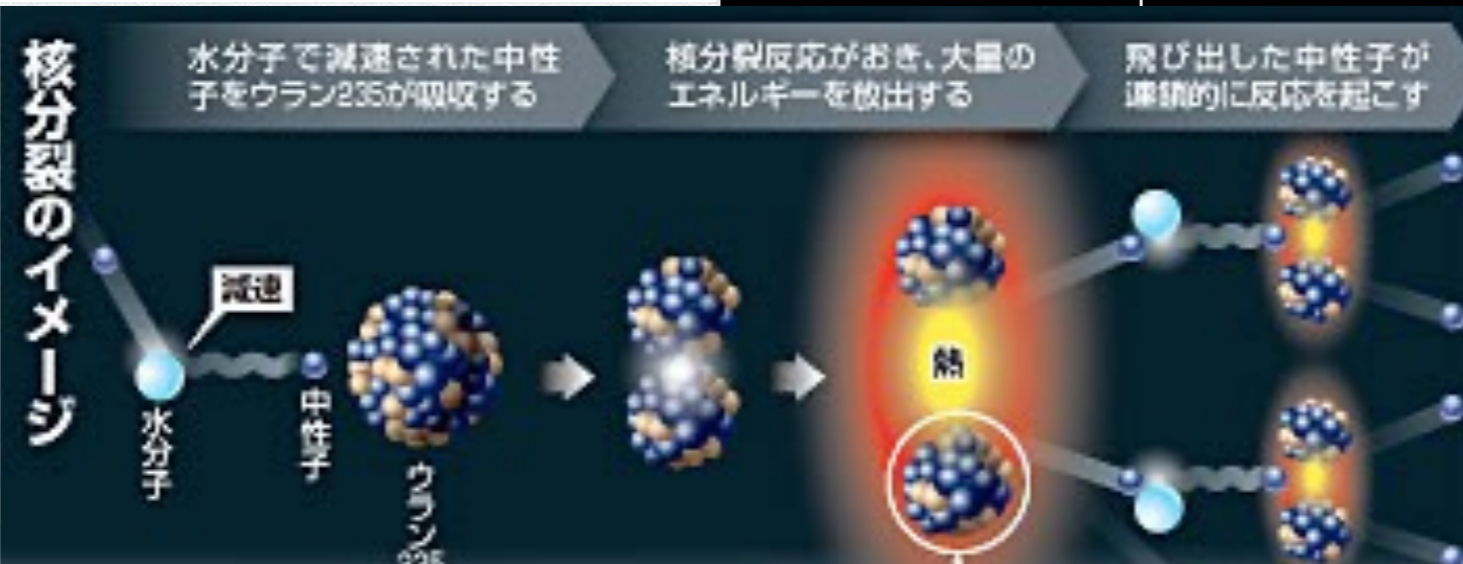
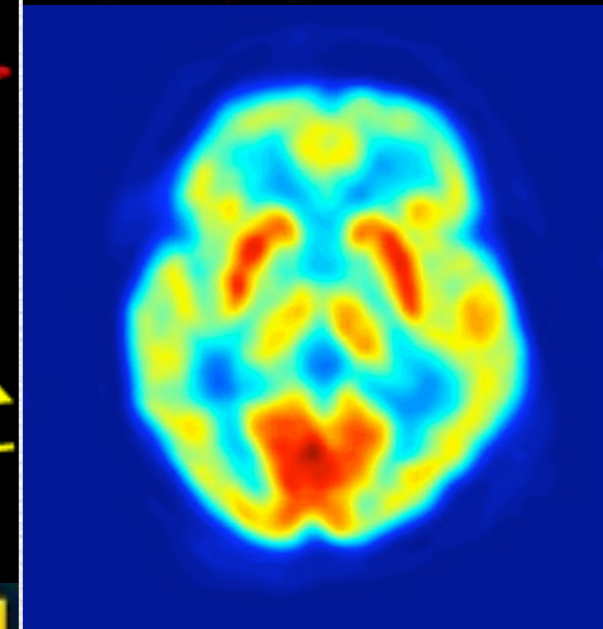
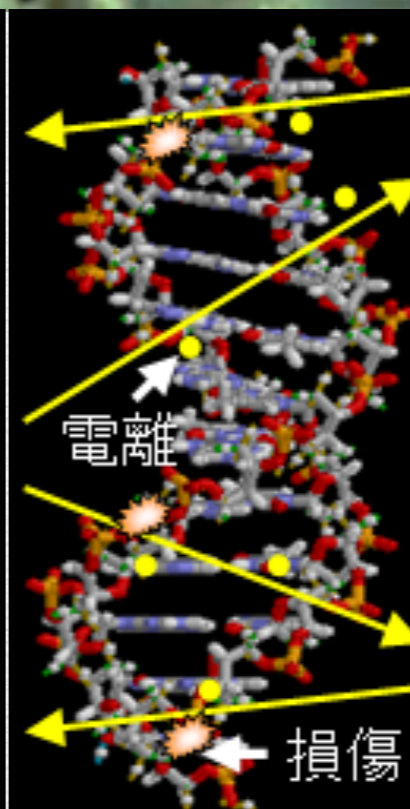
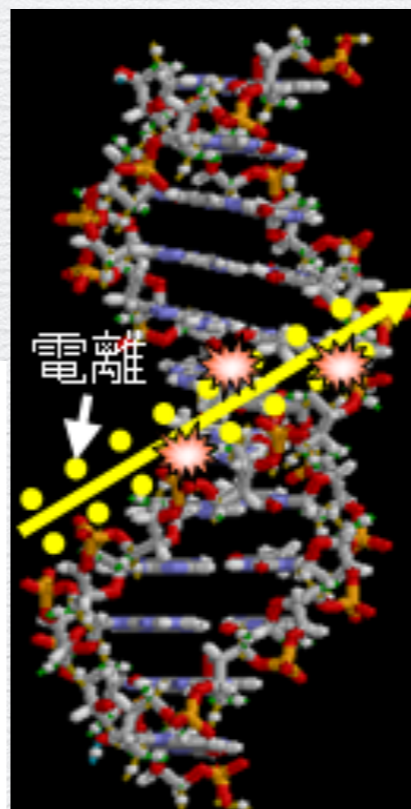
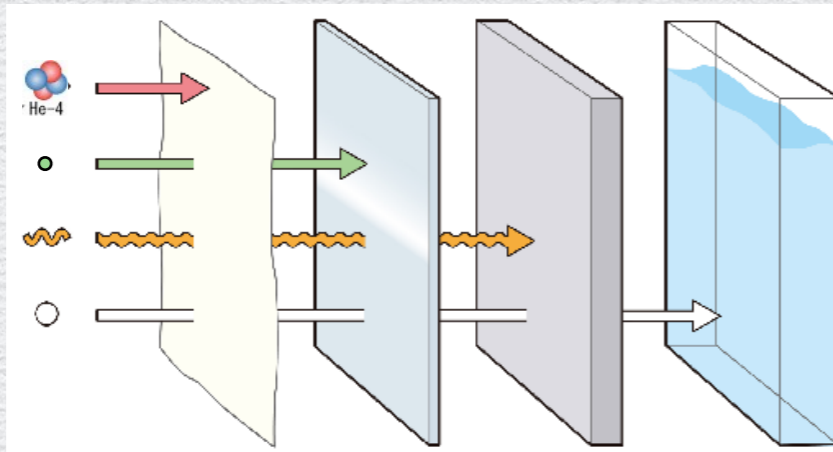
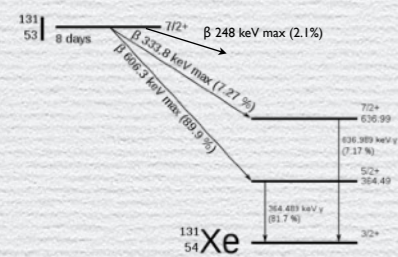
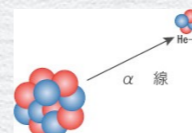
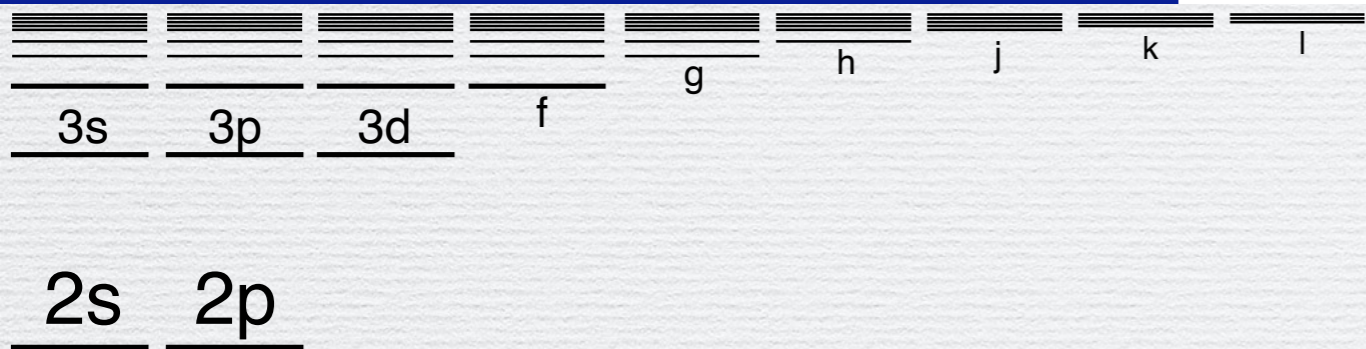
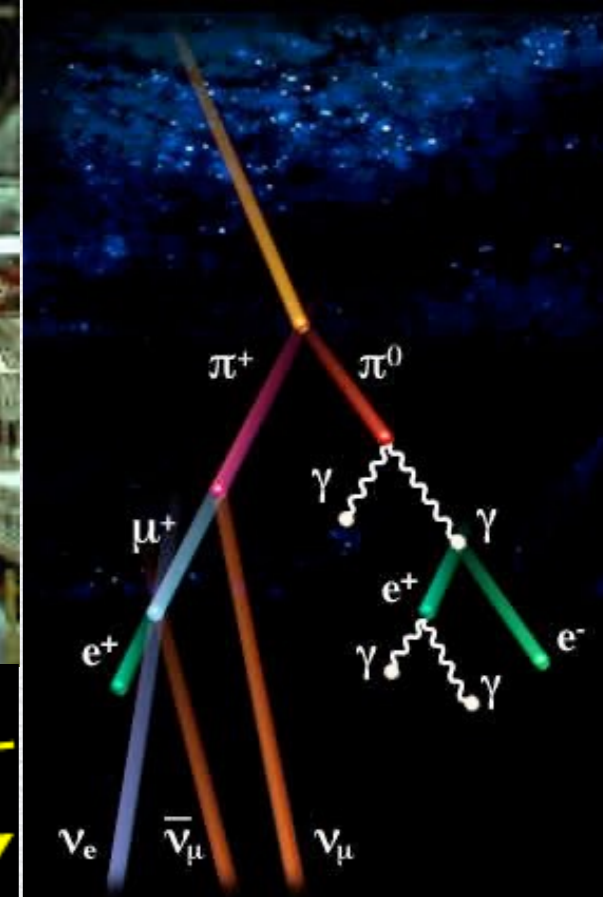
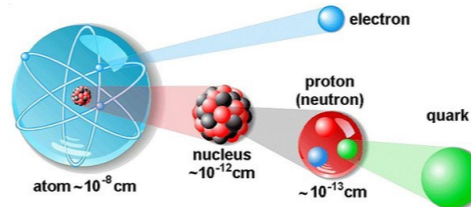
福島では放射線の話題はタブー

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

「南相馬はひとつになれない」

放射線の科学的知識を身につけないまま関心が
風化しつつある。

放射線



放射線を科学的に理解する

- 10/ 8 放射線入門 【鳥居】
- 10/15 放射線物理学 【鳥居】
- 10/22 放射線計測学 【小豆川】
- 10/29 放射線物理・化学 【鳥居】
- 11/ 5 放射線生物学 【渡邊】
- 11/12 環境放射化学 【小豆川】
- 11/19 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 12/ 3 原子核物理学 【鳥居】
- 12/10 原子力工学と原子力事故 【鳥居】
- 12/17 環境放射化学 【小豆川】
- 12/24 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 1/ 7 放射線の利用 【渡邊】
- 1/18* 加速器科学・放射線防護学
・まとめ 【鳥居】

* 印：火曜振替

鳥居 寛之 《理学部》

渡邊 雄一郎

小豆川 勝見

《教養学部》

坪倉 正治 《福島県立医大》

藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師

講義スライド、講義予定

ITC-LMS を参照。または、講義 web page

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

東大教養 放射線 講義



検索

連絡先

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

担当教員：鳥居 寛之

成績評価

合否判定（点数なし） 2単位

出席： チャット窓に、まだの人は
学生証番号&氏名を記入

講義スライド：

専用 web page からダウンロード

レポート： ITC-LMS で提出。

最終回アンケート： ITC-LMS で回答

（授業評価アンケートとは別途）

Fine

完

Fine.

Grazie per la vostra attenzione.

Gratias ago pro audientia vestra.

Спасибо за внимание.

Dankon pro via atento.

Merci de votre attention.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.

Thank you for your attention.

경청해 주셔서 감사합니다.

感謝您的聆聽。

谢谢您的关注。

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A. TORII