



# 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>

# 2015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



$\gamma$ 線



中性子線



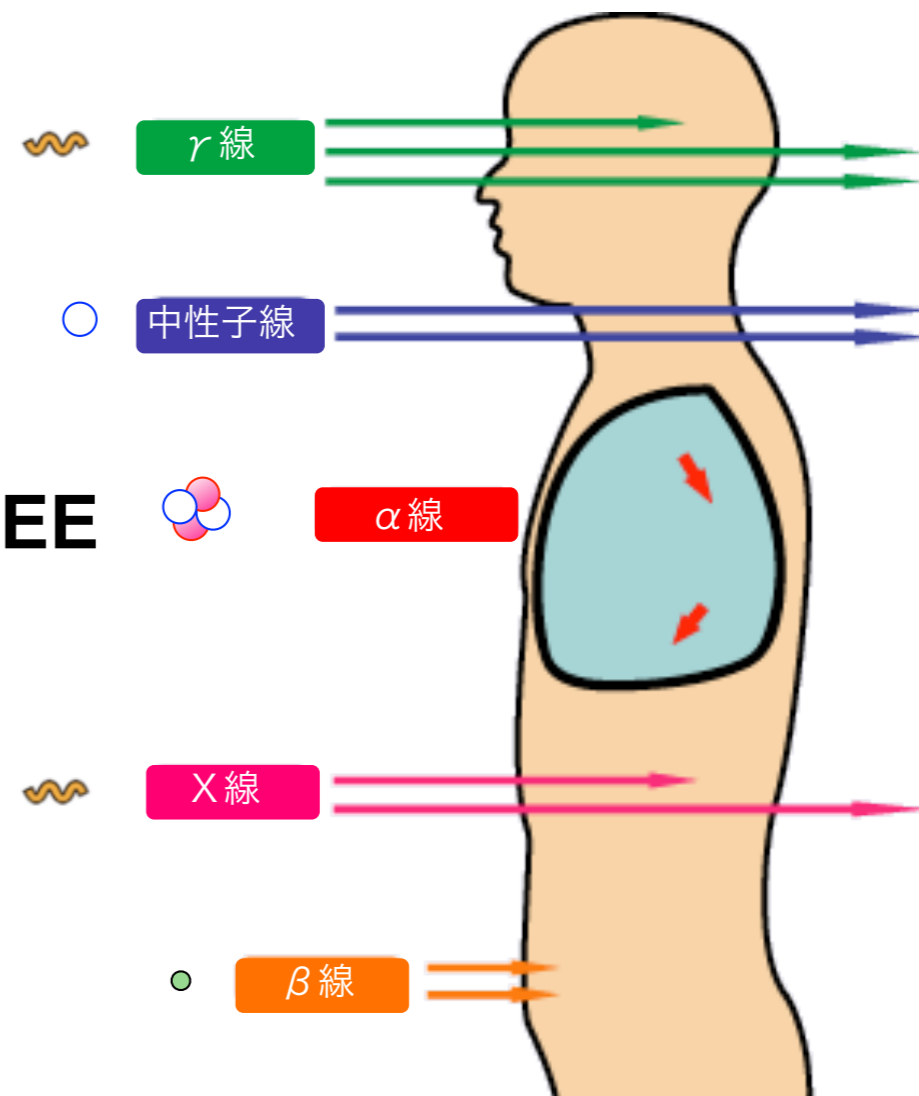
$\alpha$ 線



X線



$\beta$ 線



担当教員 鳥居 寛之 (粒子線物理学)

小豆川 勝見 (環境分析化学)

渡邊 雄一郎 (生命環境応答学)

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

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE  
(West)

K303教室

2015 / 12 / 11 (金)



$\gamma$ 線



中性子線



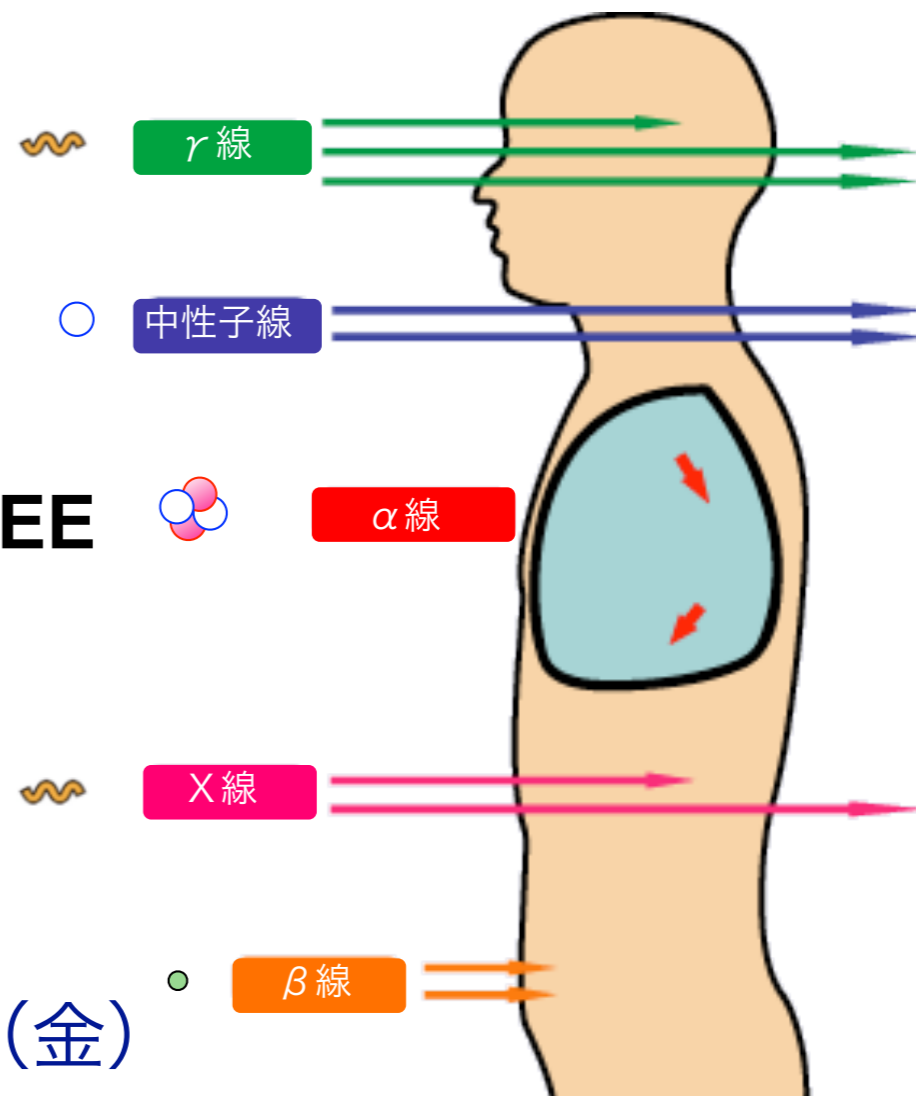
$\alpha$ 線



X線



$\beta$ 線



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 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

- 9/18 放射線入門 【鳥居】
- 9/25 放射線物理学 【鳥居】
- 10/ 2 放射線計測学 【小豆川】
- 10/ 9 放射線物理・化学 【鳥居】
- 10/16 放射線生物学 【渡邊】
- 10/23 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 10/30 原子核物理学・原子力工学 【鳥居】
- 11/ 6 環境放射化学 【小豆川】
- 11/13 環境放射化学 【小豆川】
- 11/24 放射線医療 【芳賀】
- 11/27 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 12/ 4 放射線の利用 【渡邊】
- 12/11 加速器科学・放射線防護学 【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》

芳賀 昭弘 《医学部附属病院放射線科》

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



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

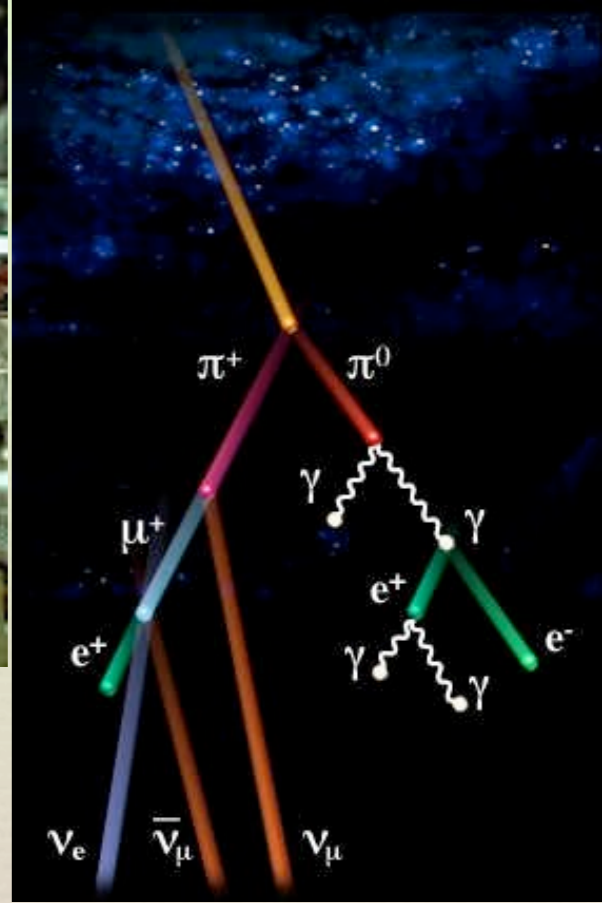
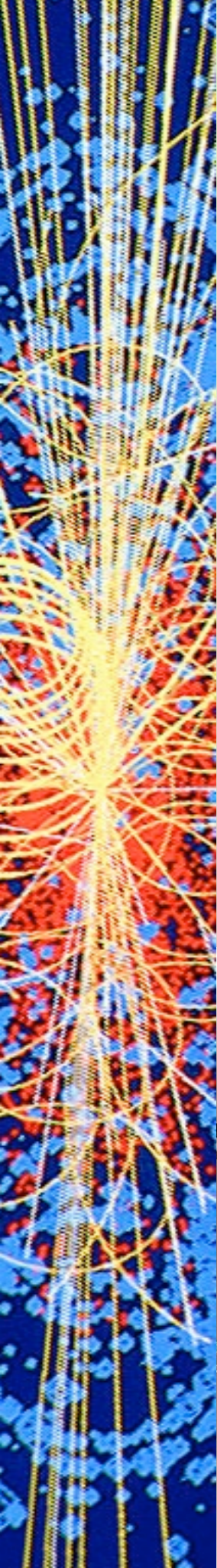
— 基礎からわかる東大教養の講義 —」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

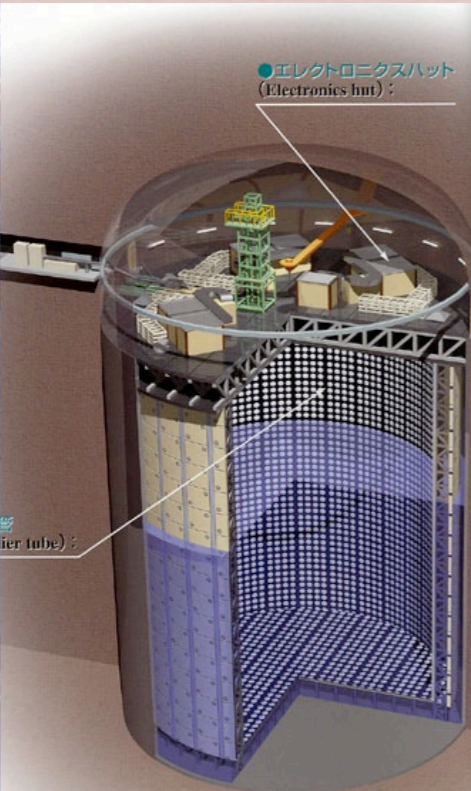
丸善出版

本体 2500円+税

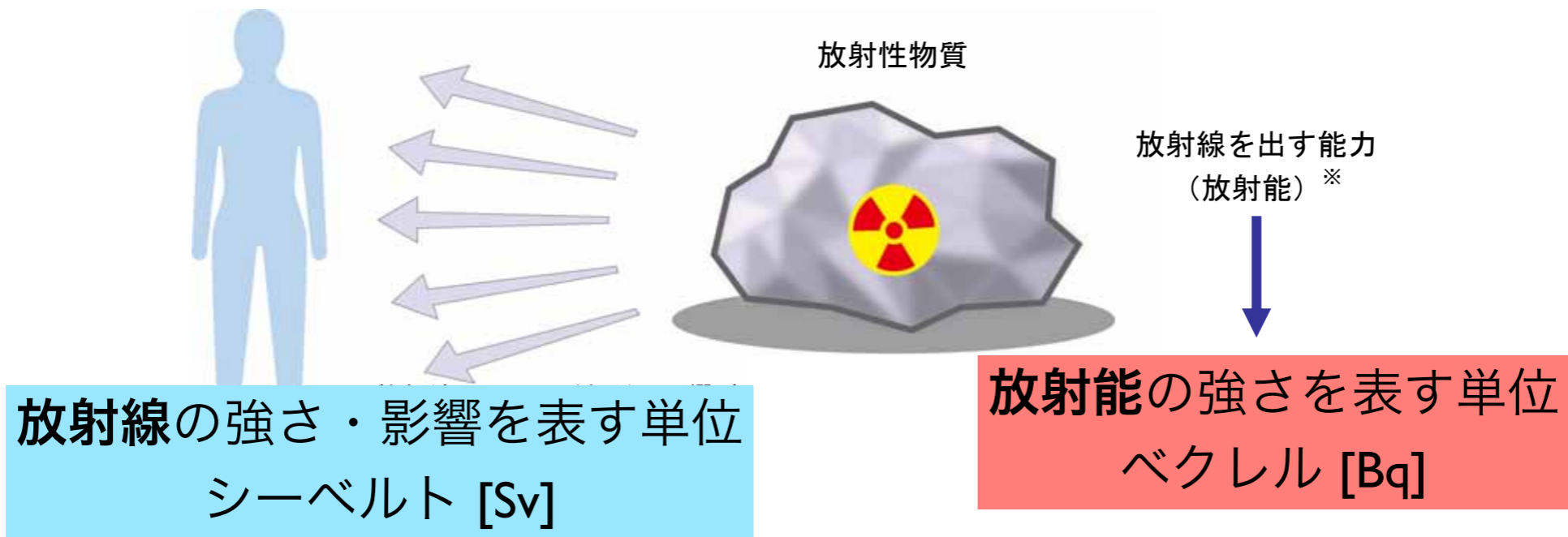


## 第13回 (12/11)

- 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

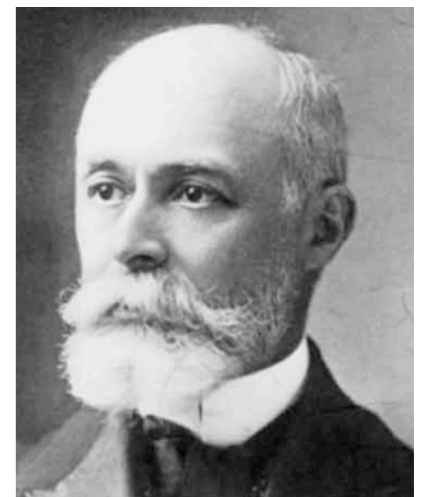
Gray



Sievert



Becquerel





# 放射線量の単位

radiation dose

- 物質が吸収したエネルギー（単位質量あたり）

吸収線量  $D$  [J / kg] = [Gy] グレイ

Gray

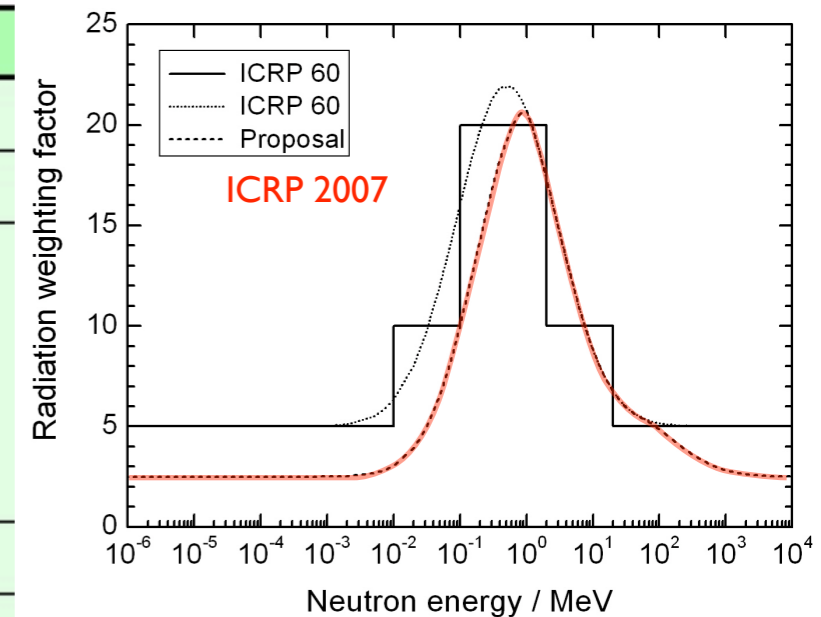


- 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

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

放射線加重係数  $W_R$

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



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

赤字 ICRP 2007

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

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

Sievert



# 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。




# 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)

# 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。

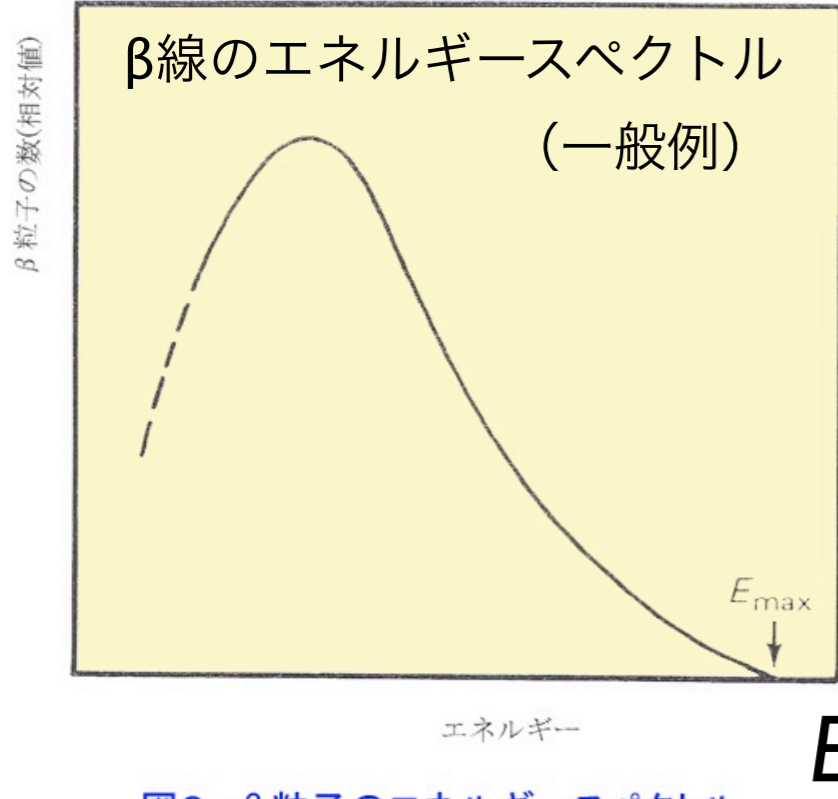
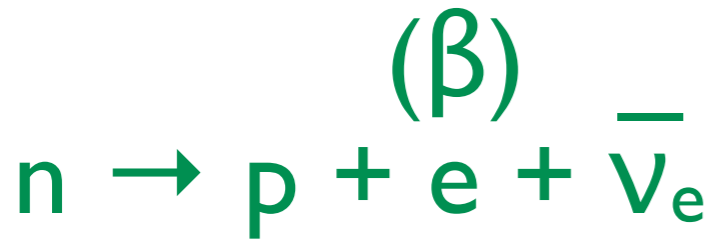
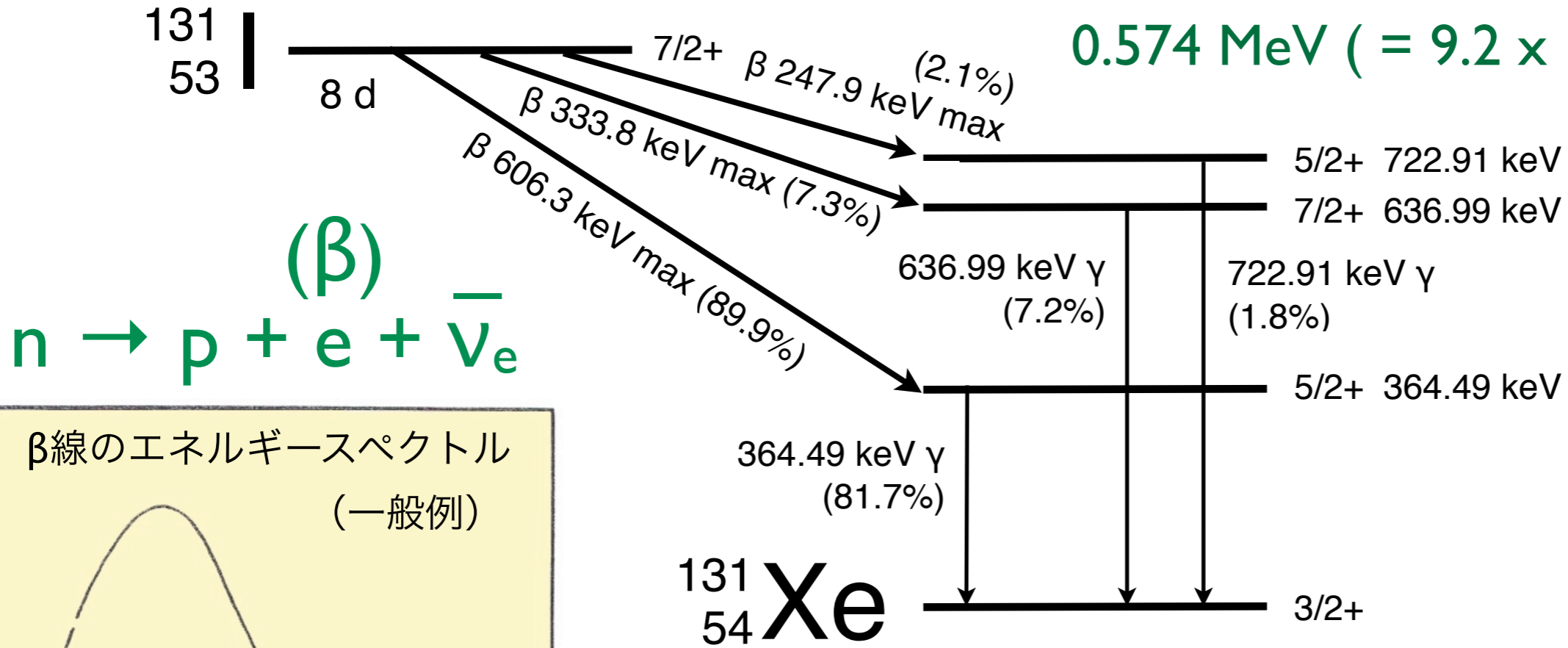
### 実効線量係数 (成人)

※ 子供や乳幼児は 70歳になるまでの期間

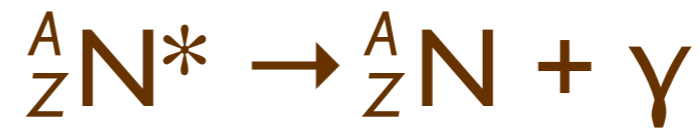
核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)
C-14	5730年	$5.8 \times 10^{-10}$	$5.8 \times 10^{-9}$
P-32	14.3日	$2.4 \times 10^{-9}$	$3.4 \times 10^{-9}$
K-40	12.8億年	$6.2 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$
I-131	8.04日	$2.2 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-9}$
Sr-90	29.1年	$2.8 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$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

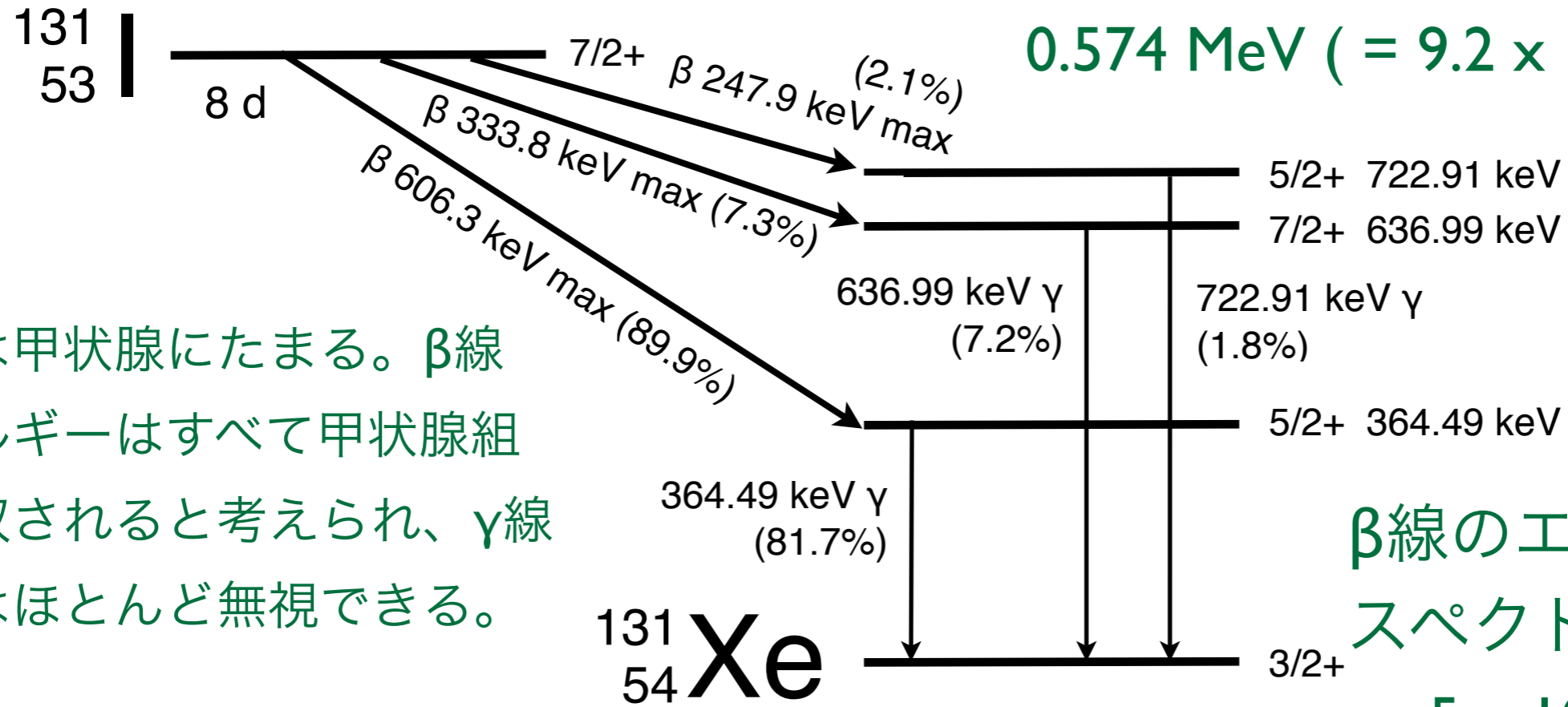


γ線 (定まったエネルギー)

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

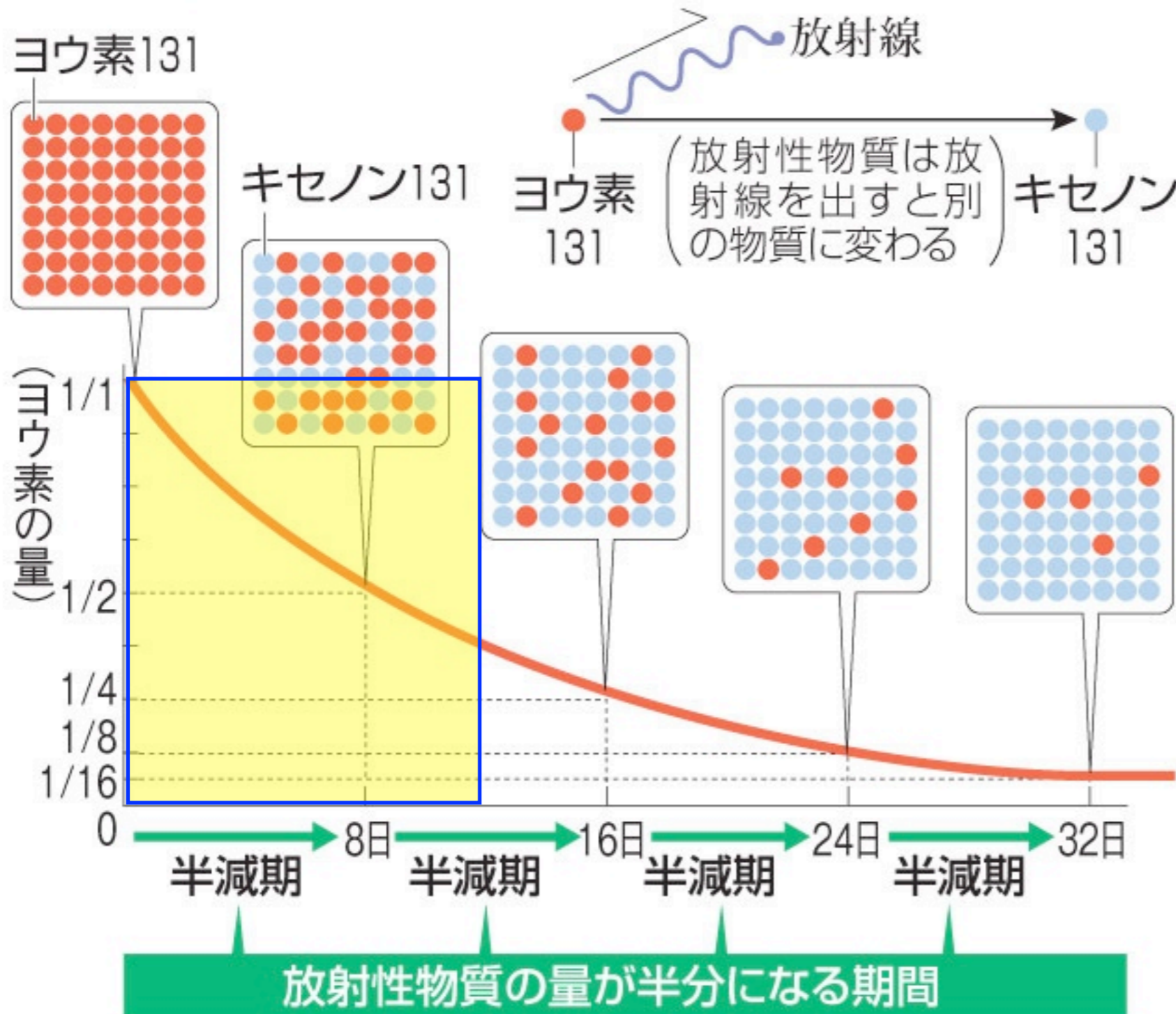
吸収線量 = 等価線量は  $5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq} \times 0.2 / 0.02 \text{ kg} = 0.5 \mu\text{Sv/Bq}$

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)



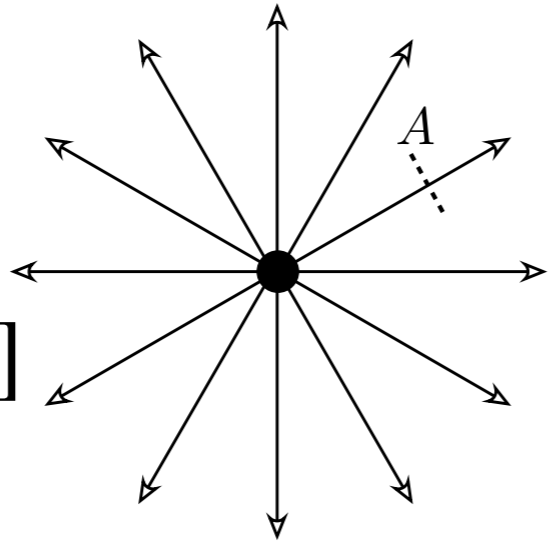
注：ヨウ素等価換算は、環境や人への影響を勘案して係数を決めている。ヨウ素以外の核種の質量を計算するには適していない。ヨウ素131については、15万テラベクレルの放出と言われているので、その質量は上の問いに対する計算値の4分の1となる。また、半減期の長いセシウム137などでは、同じベクレル数でも、モル数も質量もヨウ素に比べてずっと大きくなる。



# 外部被曝の計算例

( $^{137}\text{Cs}$  による空間線量率)

$P$  : 放射能 [Bq]

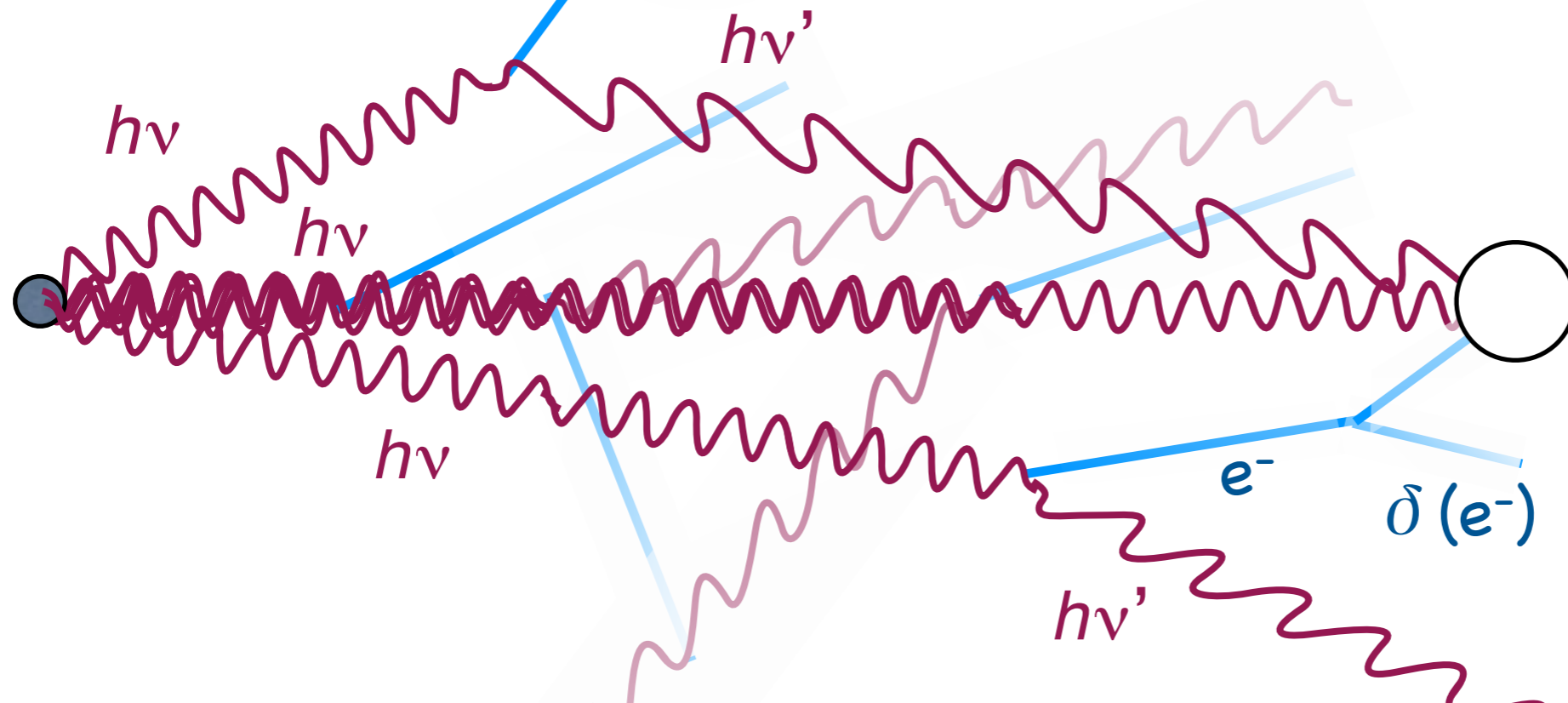


$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

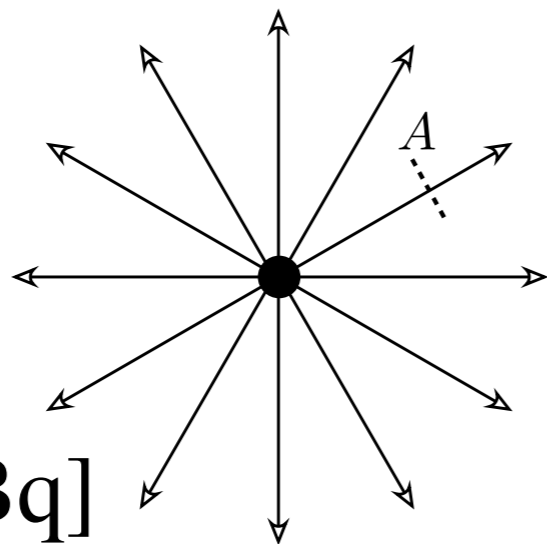
$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi} \quad \eta : \text{放出率}$$

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

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。



# 点線源



$\dot{\Phi}$  : 粒子フルエンス率

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

$$\eta = 0.851$$

$\gamma$ 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]

$^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線は空气中 70 m で半減する。

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

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

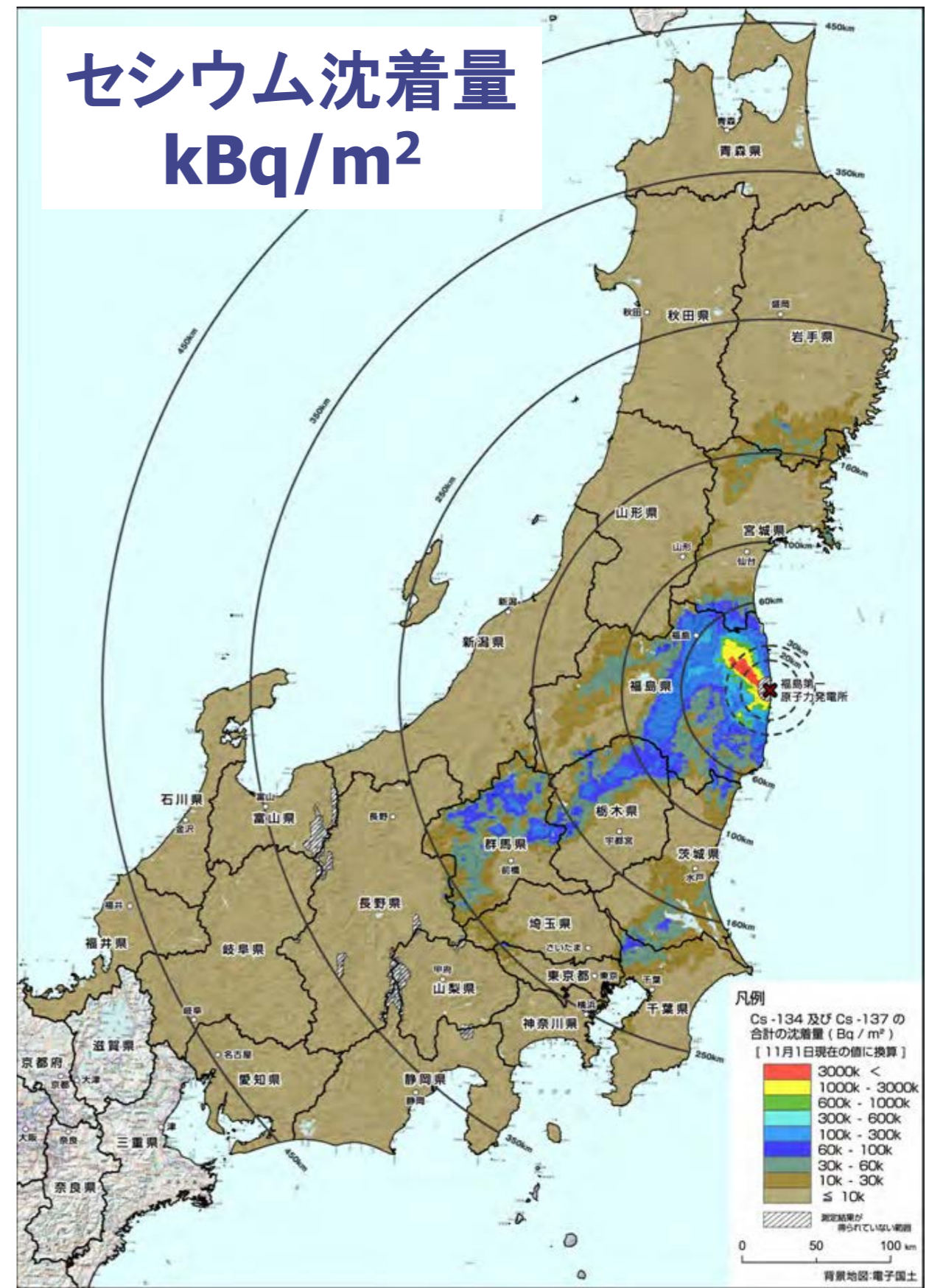
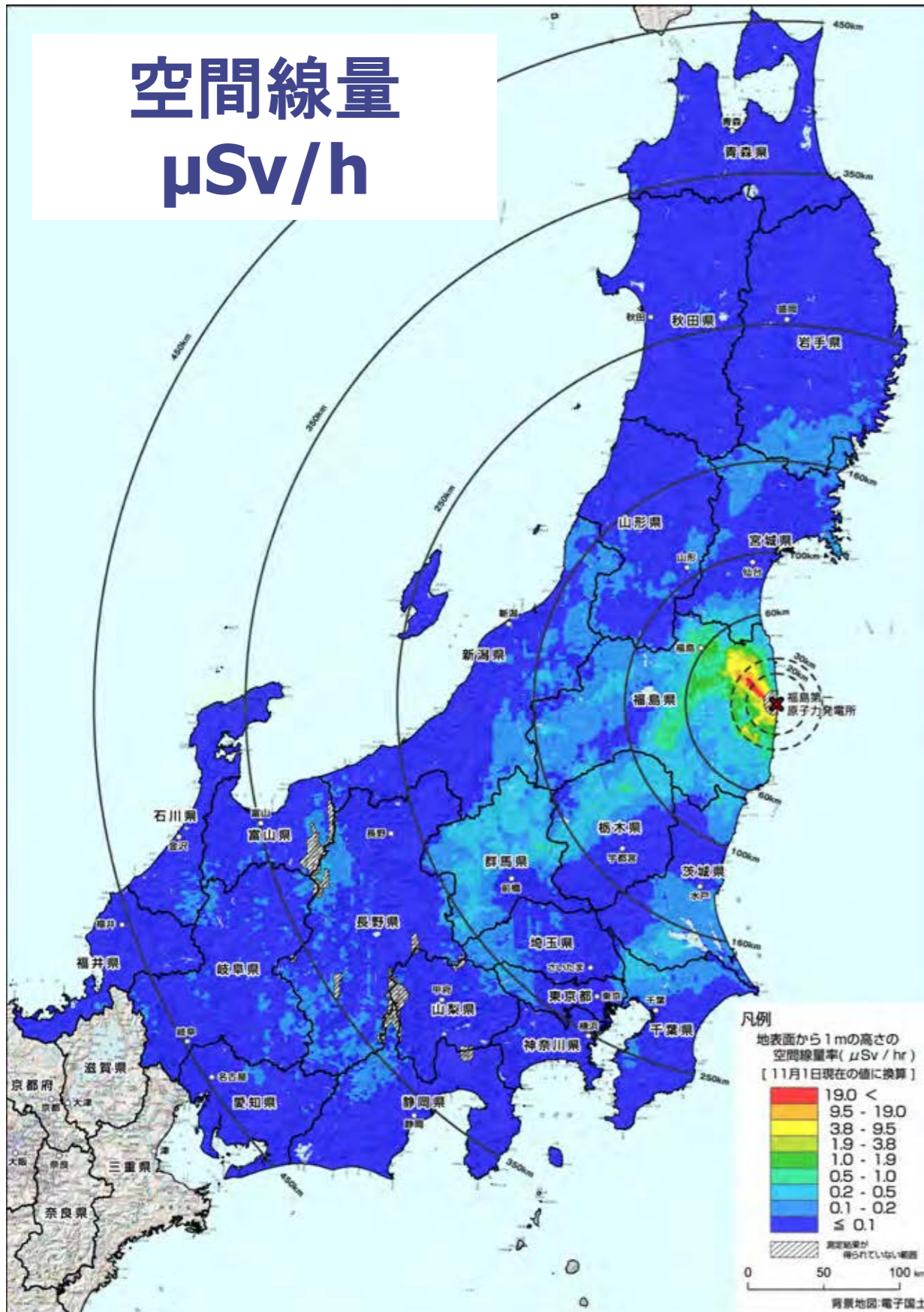
## 平面が一様に放射性物質で汚染されている場合

$^{137}\text{Cs}$  :  $2.1 (\mu\text{Sv/h}) / (\text{MBq/m}^2)$  .... 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。

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。

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( $\alpha$ )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。

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



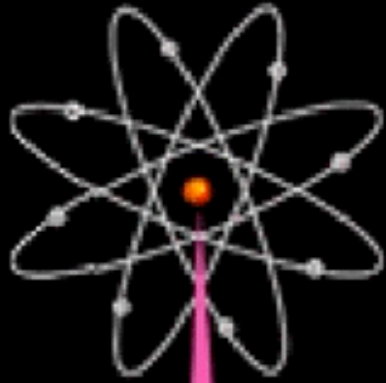
- α線   ヘリウム原子核
- β線   高速の電子
- γ線   光子（電磁波）
- X線   光子（電磁波）



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

∨ 原子物理学  
Å ( $10^{-10}$  m)  
オングストローム

∧ 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

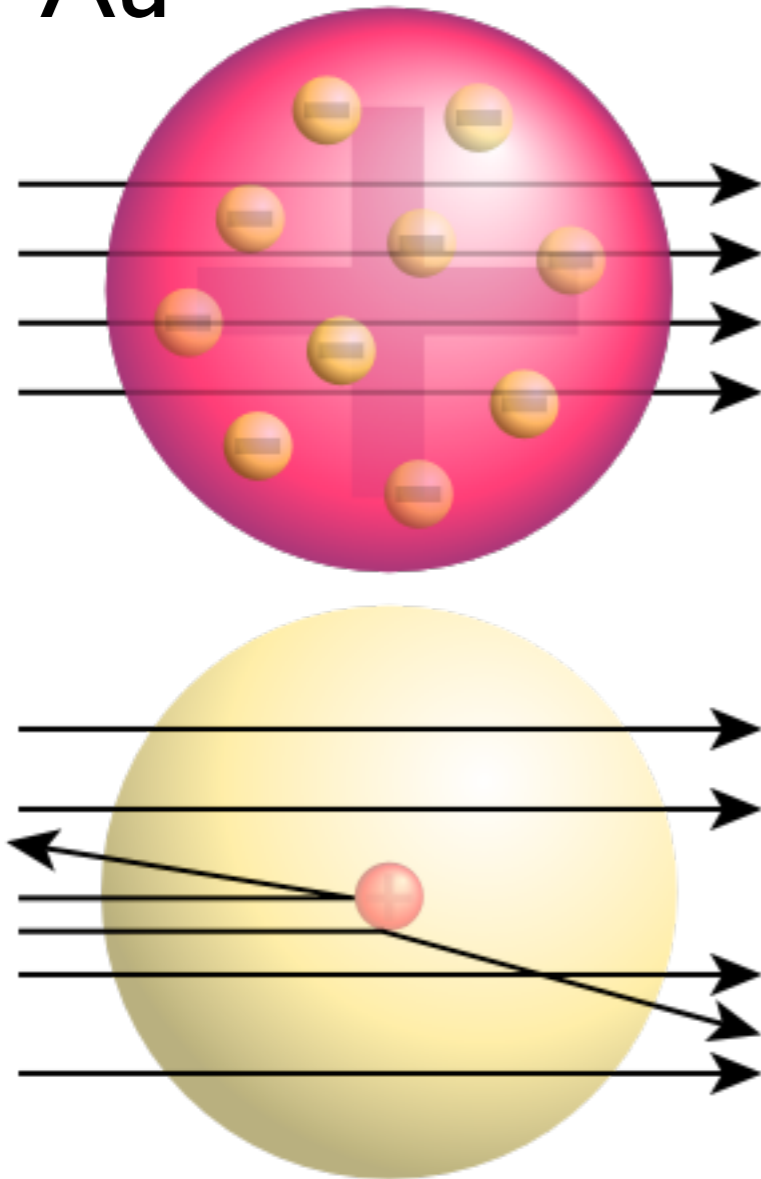


クォーク  
quark



# ラザフォード散乱

$\alpha + \text{Au}$



ラザフォードの原子模型  
(1911)

# 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。(1919)

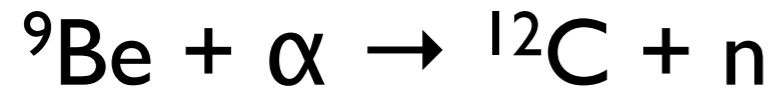


何らかの粒子が 40 cm 先の蛍光版を光らせた。  
( $\alpha$ 線の到達距離は 1 気圧空气中で数 cm 程度)



E. Rutherford

# 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  $\gamma$  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)



# Nuclear Science

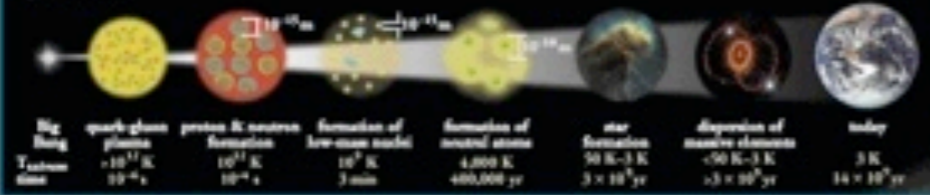
**Nuclear Science** is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus?" "What combinations 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**

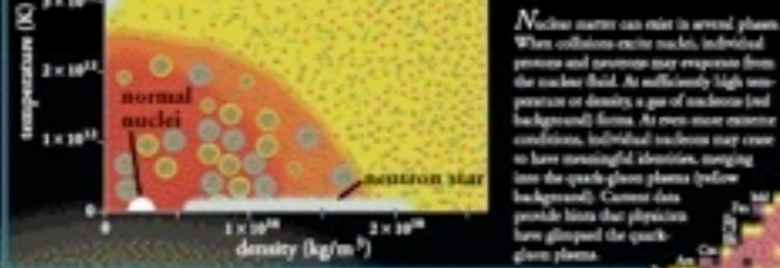
- electron ( $e^-$ )
- positron ( $e^+$ )
- neutrino ( $\nu$ )
- antineutrino ( $\bar{\nu}$ )
- quark
- gluon field
- gluon
- photon ( $\gamma$ )
- photon ( $\gamma$ )
- Nucleon:  $A - Z$
- Atomic Number:  $Z$
- Mass Number:  $A$

## Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about  $10^{-42}$  second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe,  $T_{univ}$ , 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

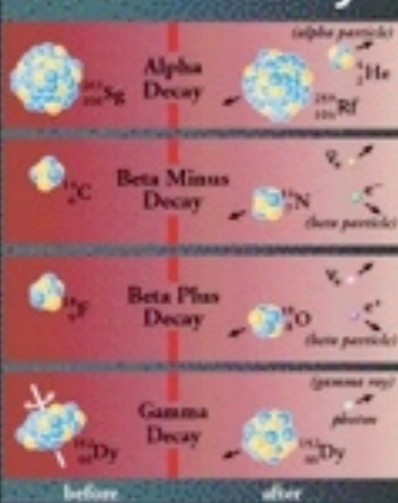


## Unstable Nuclei

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  $Z \leq 112$ .

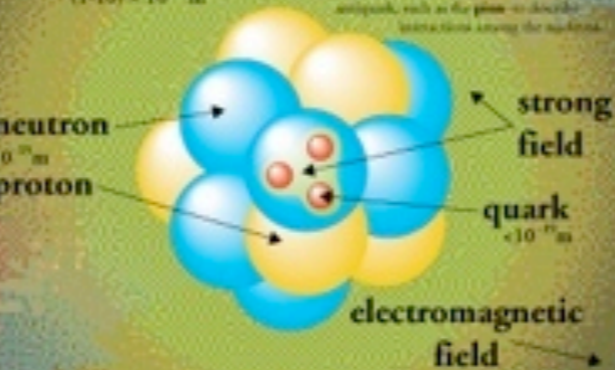
Scientists first synthesized Element 112 in a particle accelerator experiment. They identified it by observing its characteristic alpha particle decay chain.

## Radioactivity



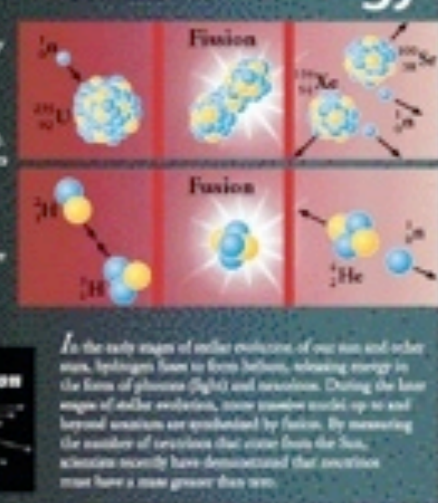
Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a  $^4_2\text{He}$  nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino (for a positron and neutrino) or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is 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



In an alpha emission event, the nucleus at distance roughly up to  $10^{-12}$  m from the nucleus dissolves. If the alpha cloud were allowed to exist, the alpha would form a small star.

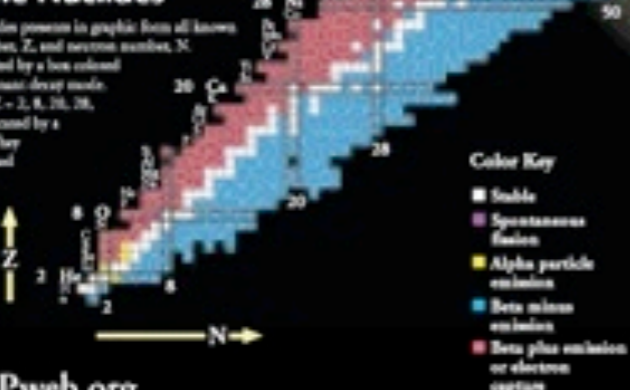
## Nuclear Energy



In the early stages of nuclear evolution, of 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 iron.

## 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 ( $2, 8, 20, 28, 50, 82$  and  $126$ ) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major closed shells and show regions of greater nuclear binding energy.



## Applications

- Radioactive Dating:** Naturally 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 artifacts found at the site, scientists determined that the landscape 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 illness. Positron emission tomography (PET) uses  $^{18}\text{F}$  and is used in Positron Emission Tomography (PET) to generate images of brain activity.
- Space Exploration:** Uranium and alpha particles in identical chemical elements present in Martian rocks. On Earth, nuclear reactions are used to study some form, mineral compositions or an environment.
- Nuclear Reactors:** Nuclear reactions 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 this 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

# Nuclear Science

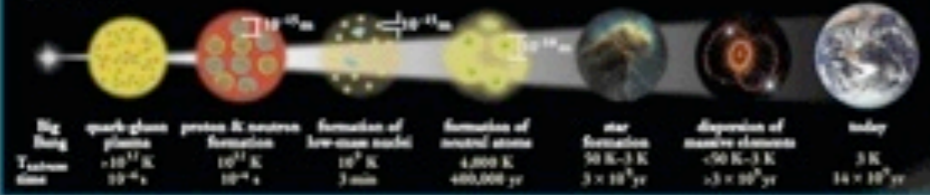
Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as "Why do nucleons stay in the nucleus? What combinations of 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**

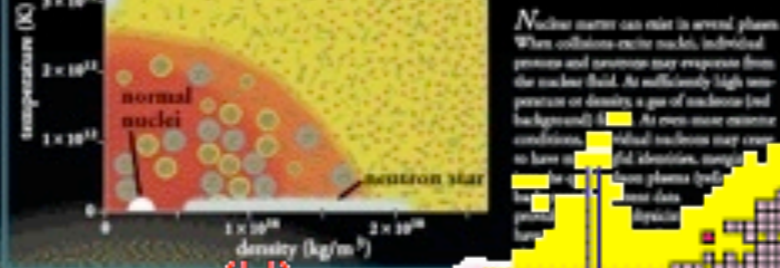
- electron ( $e^-$ )
- positron ( $e^+$ )
- neutrino ( $\nu$ )
- antineutrino ( $\bar{\nu}$ )
- quark
- gluon field
- gluon
- photon ( $\gamma$ )
- Neutron =  $A - Z$

## 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,  $T_{univ}$ , 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.

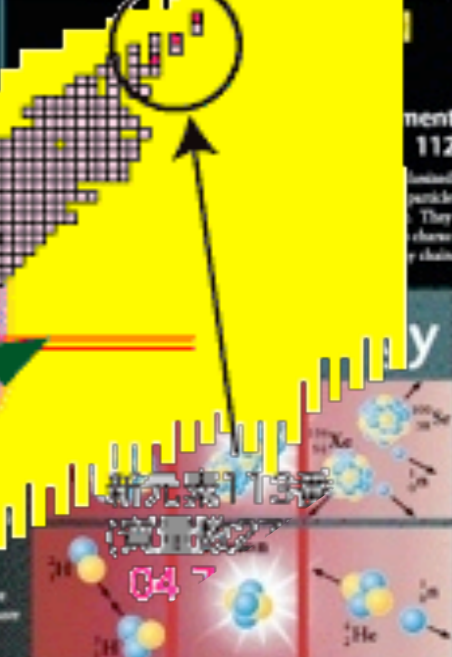


## Phases of Nuclear Matter



## 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 nuclei. Nuclear theory predicts that there are about 5000 more.



## Radioactivity

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

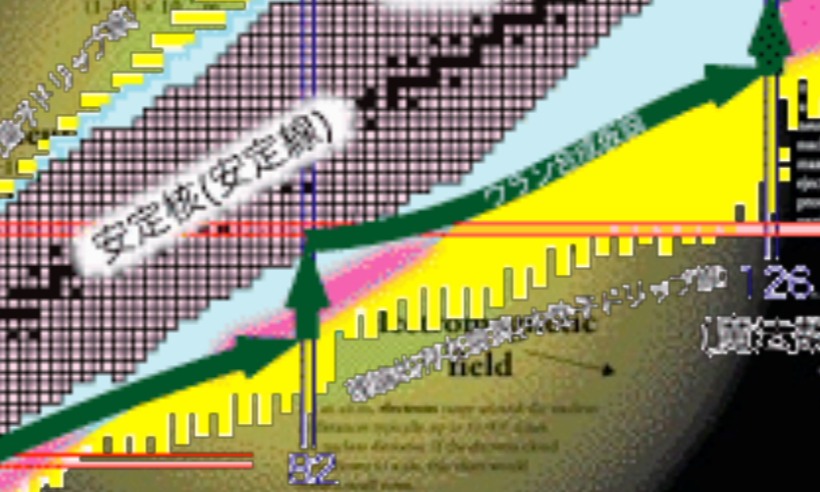
**Beta Minus Decay**  
 $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$

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

**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 an antineutrino (for a proton) or a positron and a neutrino (for a neutron). 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 loses its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

## The Nuclides



## 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 nucleus is represented by a square according to its predominant decay mode. Magic numbers (2 or Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82 and 126) are indicated by a triangle on the chart. They correspond to major shell shells and show regions of greater nuclear binding energy.

**Color Key**

- Stable
- Spontaneous fission
- Alpha particle emission
- Beta minus emission
- Beta plus emission or electron capture

## Applications

- Radioactive Dating:** Nearly every radioactive isotope such as  $^{14}\text{C}$  is used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of willows 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  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , and  $^{131}\text{I}$ , are commonly used in the diagnosis and treatment of disease. Positive electron emitters such as  $^{18}\text{F}$  are used in Positron Emission Tomography (PET) to generate images of brain activity.
- Space Exploration:** Uranium and alpha particles in specially designed detectors power the Mars rovers. On Earth, nuclear reactors are used to supply some long-term electrical power to an astronaut.
- Nuclear Reactors:** Nuclear reactors are the basis of  $^{60}\text{Co}$  or  $^{137}\text{Cs}$  used to produce electron beams. 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) makes 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

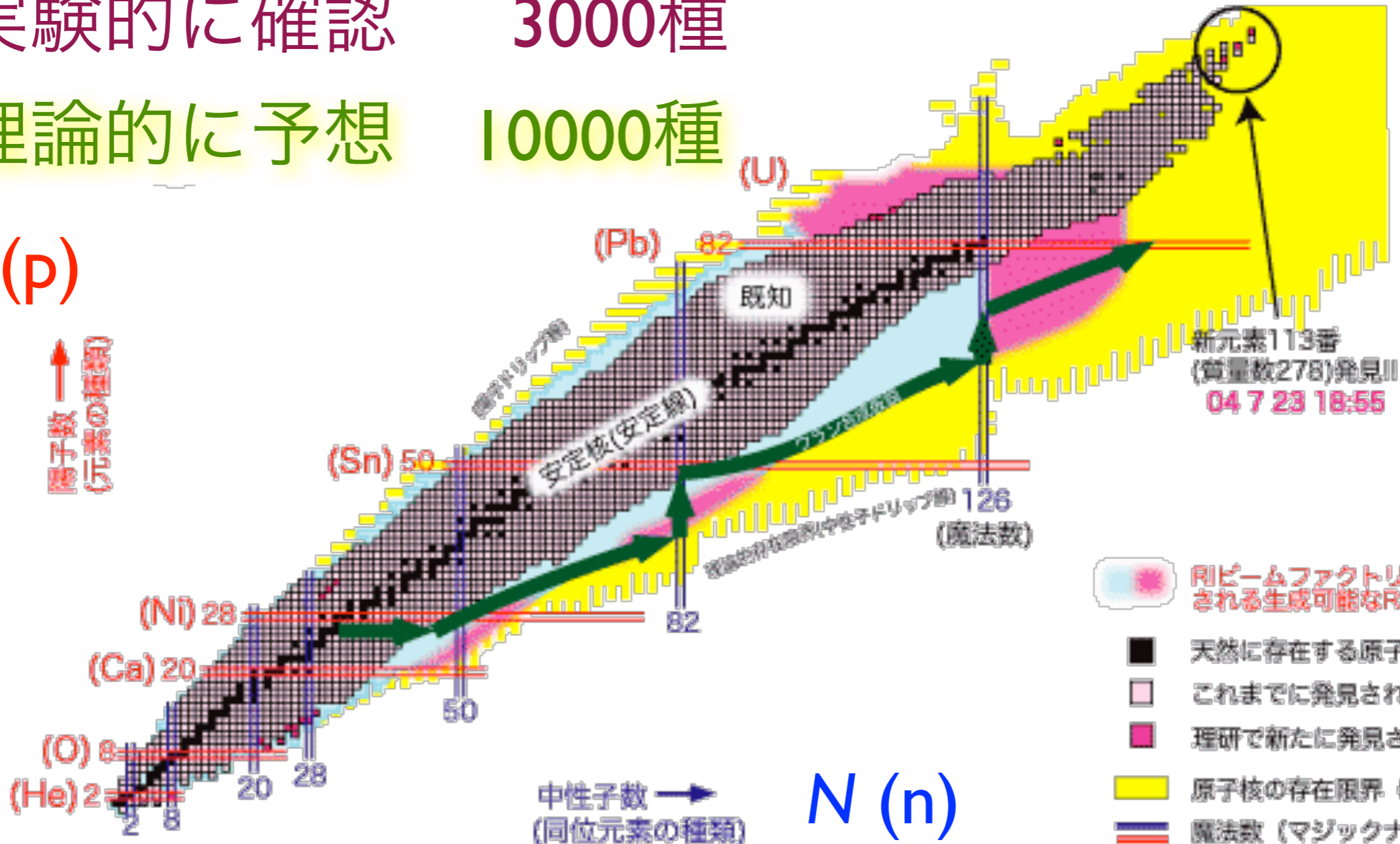
10000種

# 原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p)

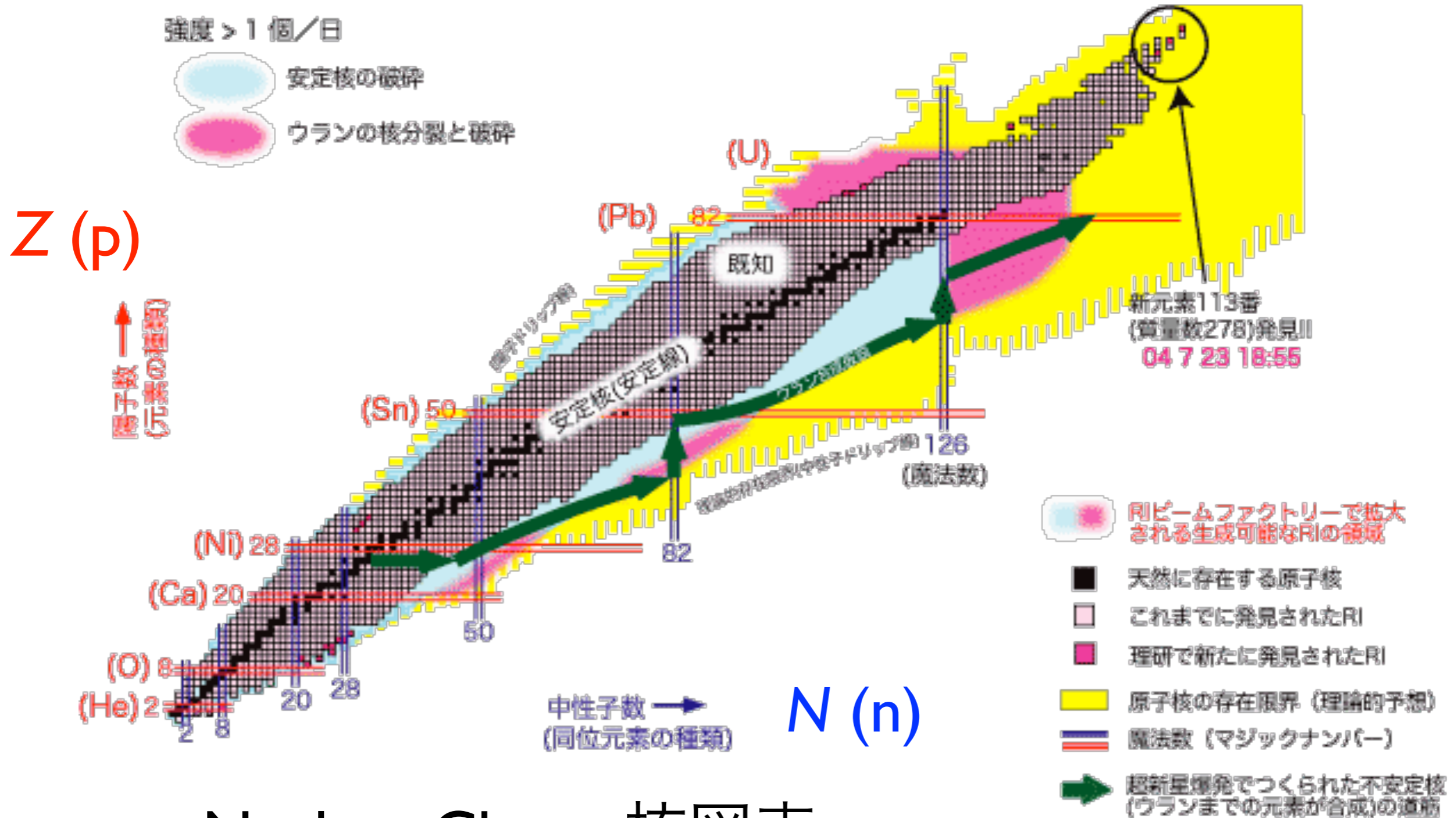
↑ 陽子数  
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表



# RIKEN



## Nuclear Chart 核図表



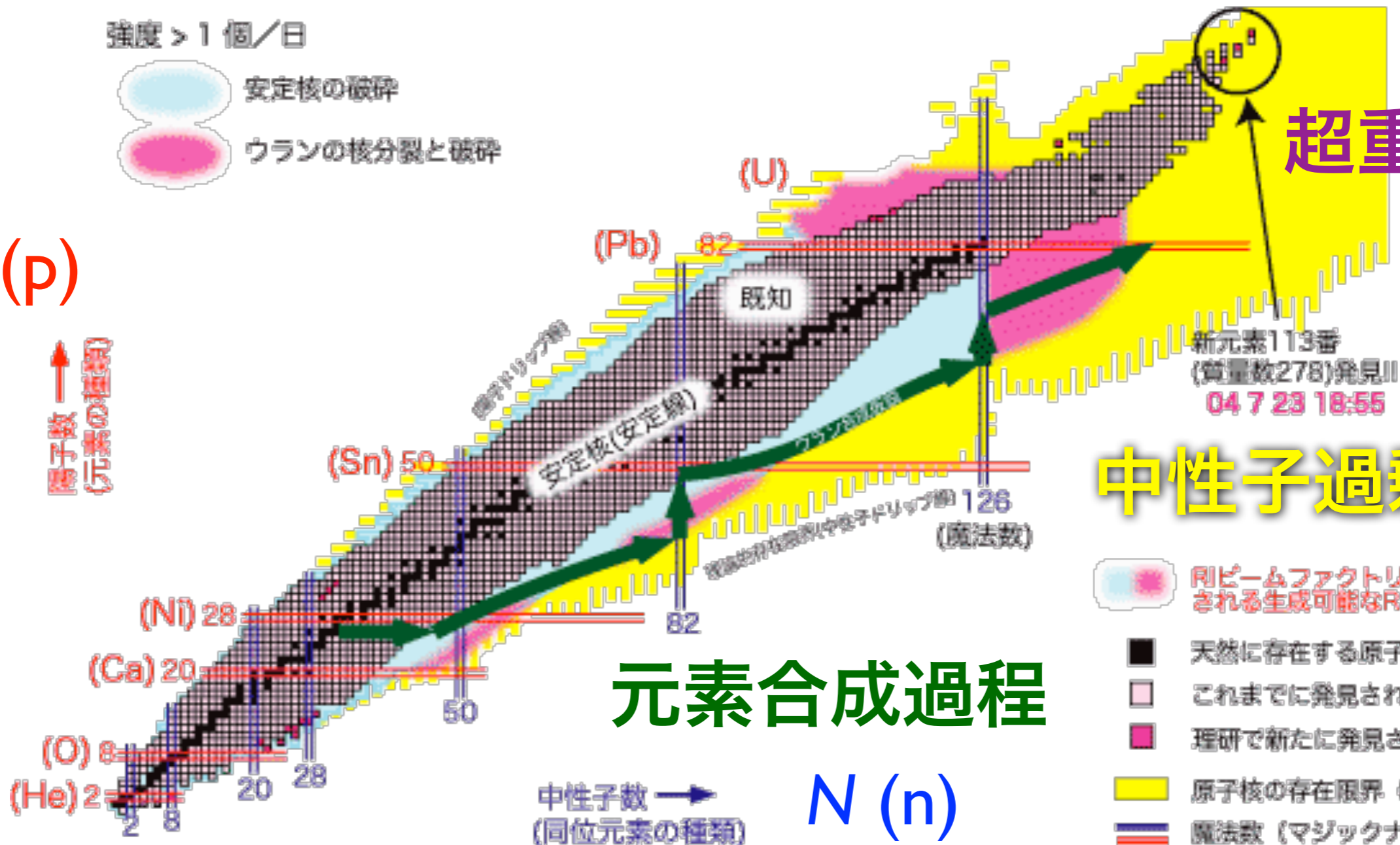
RIKEN

強度 > 1 個/日

- 安定核の破砕
- ウランの核分裂と破砕

Z (p)

↑ 原子序数 (元素の種類)



新元素113番  
(質量数278)発見!!  
04 7 23 18:55

中性子過剰核

元素合成過程

中性子数 → N (n)  
(同位元素の種類)

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

Nuclear Chart 核図表

# 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 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 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

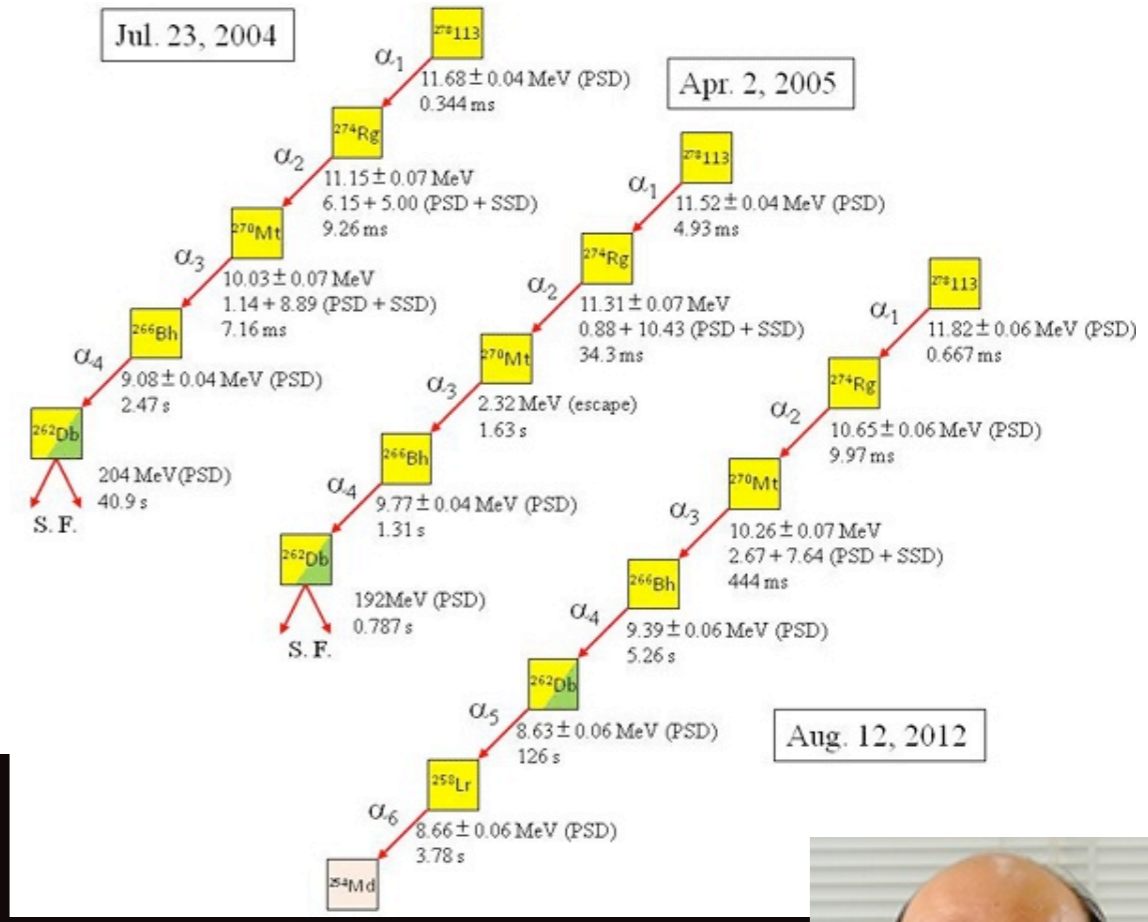
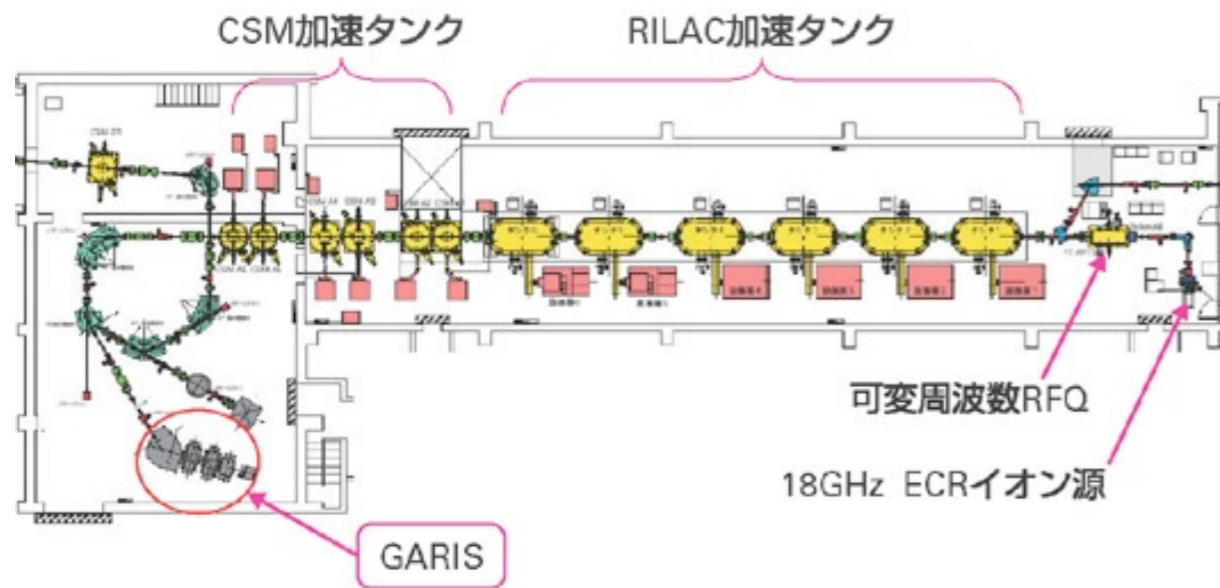
元素周期表 设计版权 © 1997 Michael Dayah. <http://www.dayah.com/> d: May 30, 2008

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 钇	91 铈	92 铈	93 铈	94 铈	95 铈	96 铈	97 铈	98 铈	99 铈	100 铈	101 铈	102 铈	103 铈



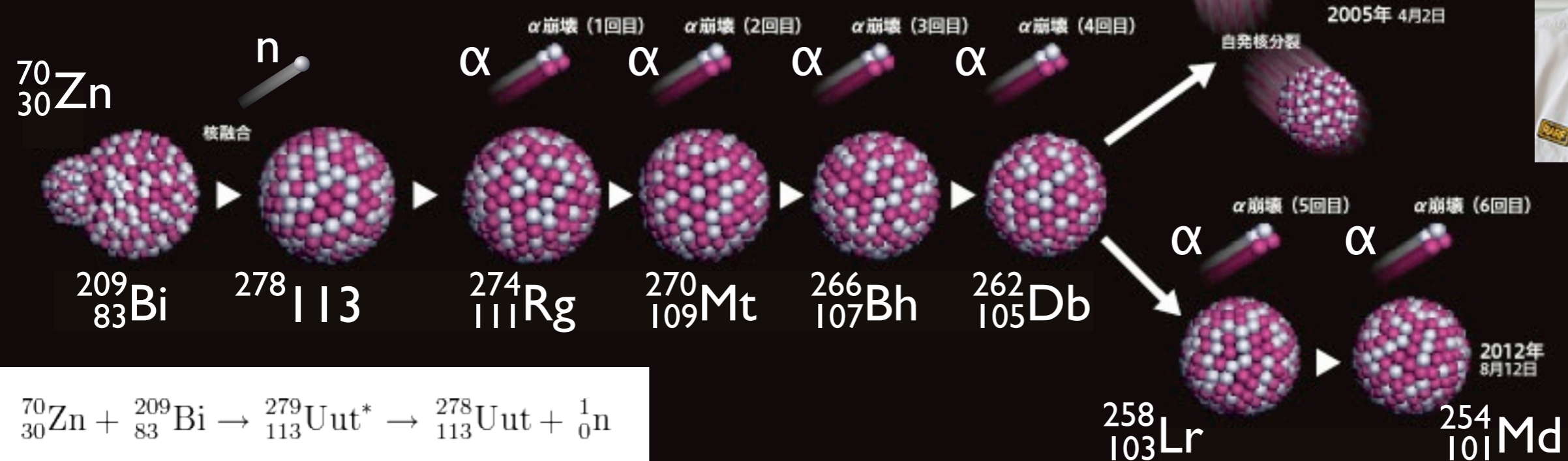
# 超重元素 $_{113}\text{Uut}$ (ジャポニウム Jp ?) 生成

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 $^{278}_{113}\text{Uut}$ が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 ( $^{278}_{113}\text{Uut}$ ) は、4回の $\alpha$ 崩壊を繰り返し、原子番号105のドブニウム ( $^{262}_{105}\text{Db}$ ) 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 $^{278}_{113}\text{Uut}$ 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 ( $^{258}_{103}\text{Lr}$ )、原子番号101のメンデレビウム ( $^{254}_{101}\text{Md}$ ) となった。3個の $^{278}_{113}\text{Uut}$ 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。

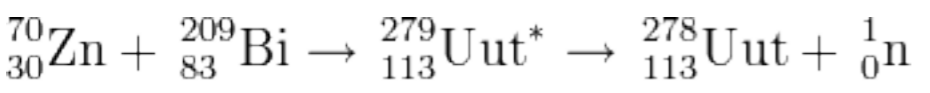


## 自発核分裂

2004年 7月23日  
2005年 4月2日



2012年  
8月12日



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

## 周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1.0079	Atomic Sym Mass																2 He 4.0026
2	3 Li 6.941	4 Be 9.0121	C 固体 Hg 液体 H 気体 Rf Unknown										5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne
3	11 Na 22.989	12 Mg 24.305	金属										13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl	18 Ar
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	ランタノイド					31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	非金属					49 In 114.81	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I	54 Xe	
6	55 Cs 132.90	56 Ba 137.32	57-71	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At	86 Rn
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus	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)	100 Fm (257)

米口の共同研究

ロシア合同原子核研究所の原子核反応研究室創設者 Geogry **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

# 放射化 **activation**

放射性物質でないものが放射線照射によって放射性を帯びること。

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

**加速器施設**や**原子炉施設**では問題になるので、しっかりとした管理が必要。

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

## 中性子

(n, $\gamma$ ) 反応が中心

## 放射化分析

放射化させて放出される  $\gamma$  線や特性 X 線の  
観測により元素分析できる。

**$\gamma$ 線** (> 10 MeV)

( $\gamma$ ,n) 反応 (**光核反応**) が中心

# 農業分野での利用

## \* ジャガイモの発芽防止

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

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

化学薬剤を使うより安全

日本では食品照射はジャガイモのみ許可

## \* 放射線育種 (品種改良) $\gamma$ 線、イオンビーム

花卉 ・ ゴールド二十世紀ナシ (黒斑病耐性)



# ＊害虫駆除（不妊虫放飼法）

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

さなぎに照射してオスを不妊化。

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

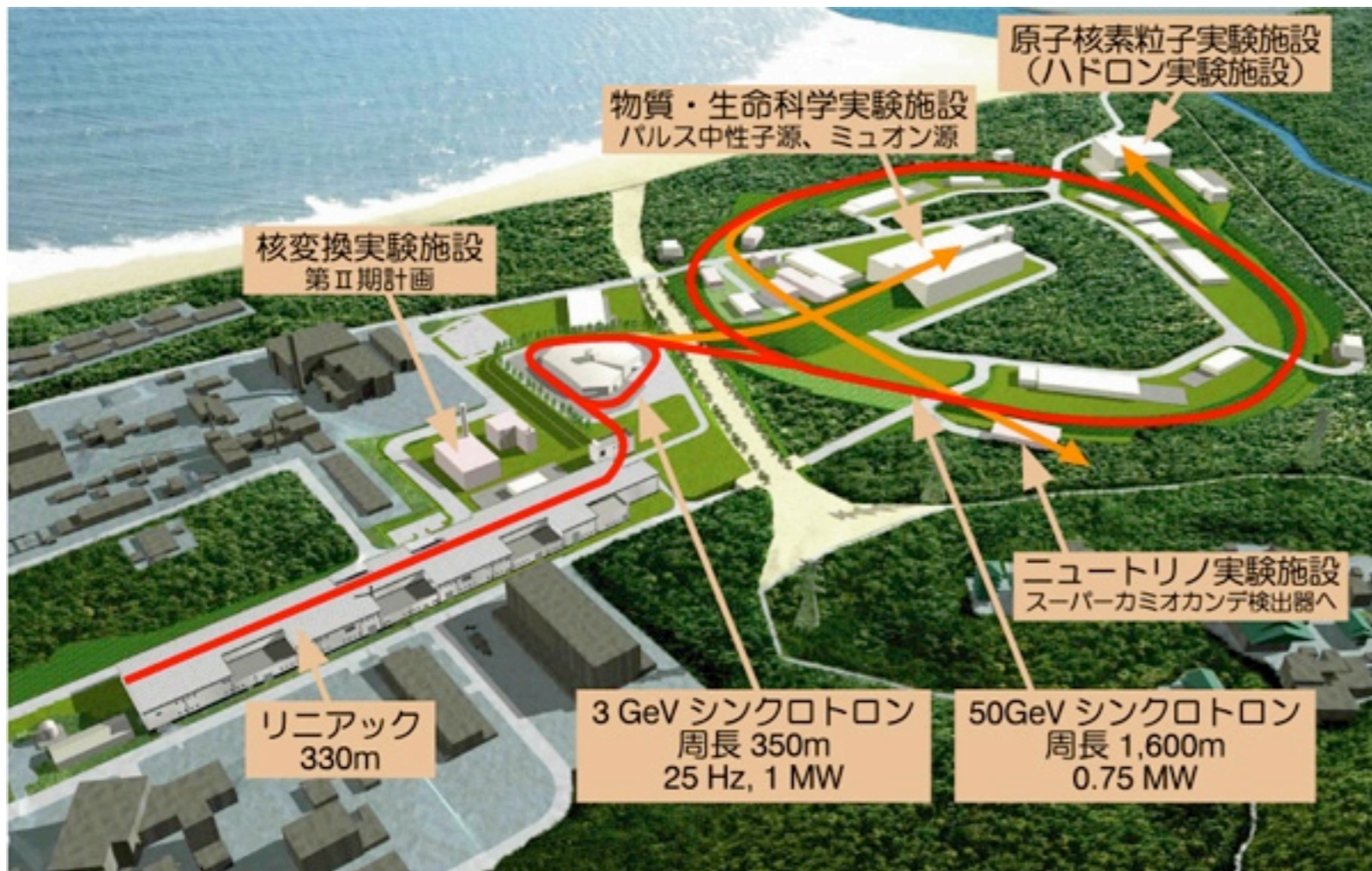
## ❖ 照射線量

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



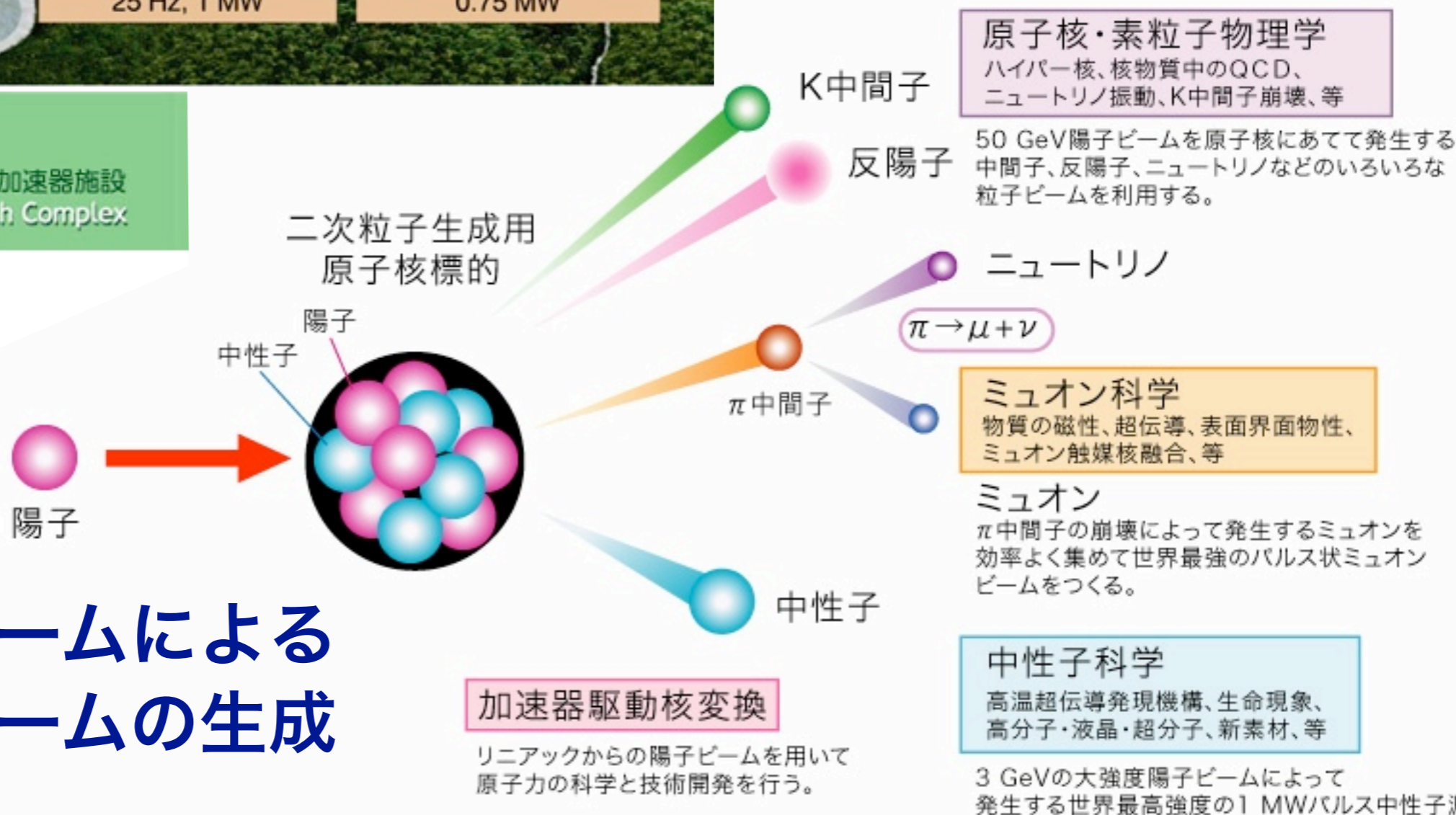
# 核変換処理は可能か

- **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。
  - 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**）。
  - 中性子による  $(n, \gamma)$  や  $(n, 2n)$  反応を利用。
  - 高レベル放射性廃棄物のマイナーアクチノイド（プルトニウム以外の超ウランウラン元素）について、高速増殖炉の核燃料サイクルの中で処理する方法や、加速器駆動(ADS) 未臨界炉や専焼高速炉による階層処理が考えられている。
- 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

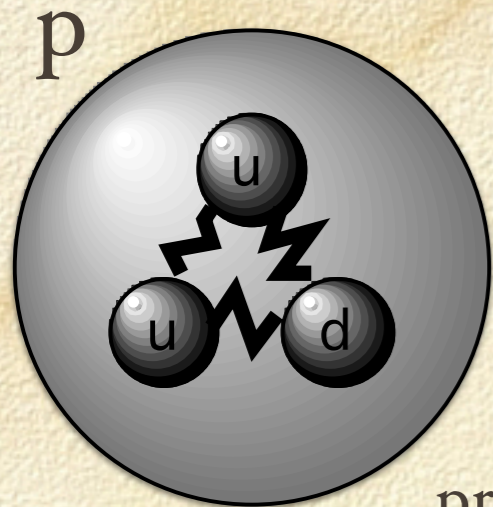


# Hadron

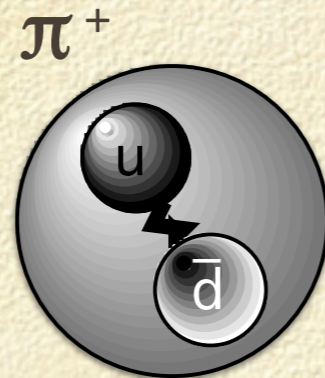
# Lepton

## Baryon

## Meson

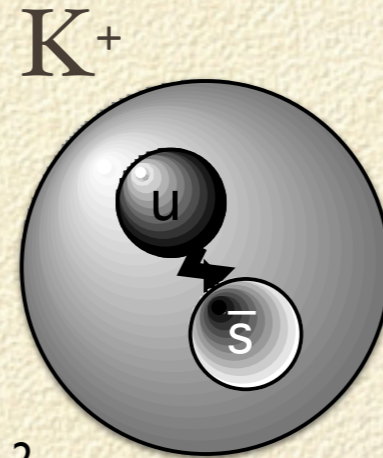
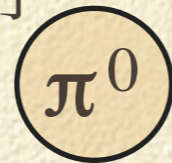


陽子  
proton



パイ中間子  
pion

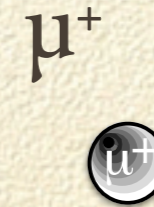
135  
MeV/c<sup>2</sup>



K 中間子  
kaon



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



ミュー粒子  
muon

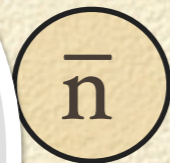


陽電子 positron

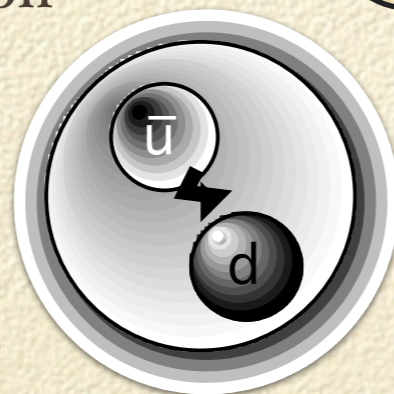


938 MeV/c<sup>2</sup>

$\tau = \infty$



940  
MeV/c<sup>2</sup>



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

$\tau = 26$  ns



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

$\tau = 12$  ns



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

$\tau = 2.2$   $\mu$ s

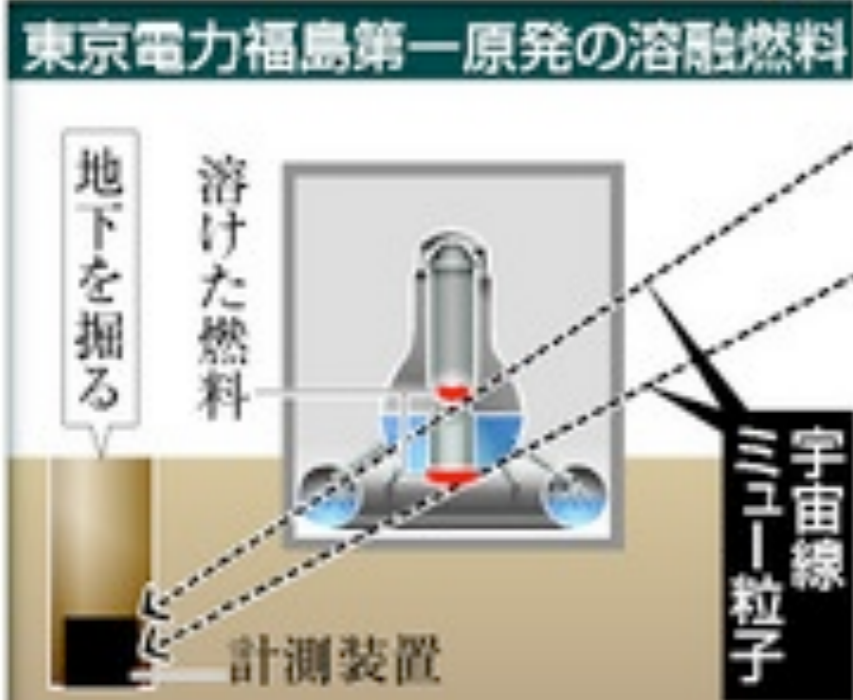
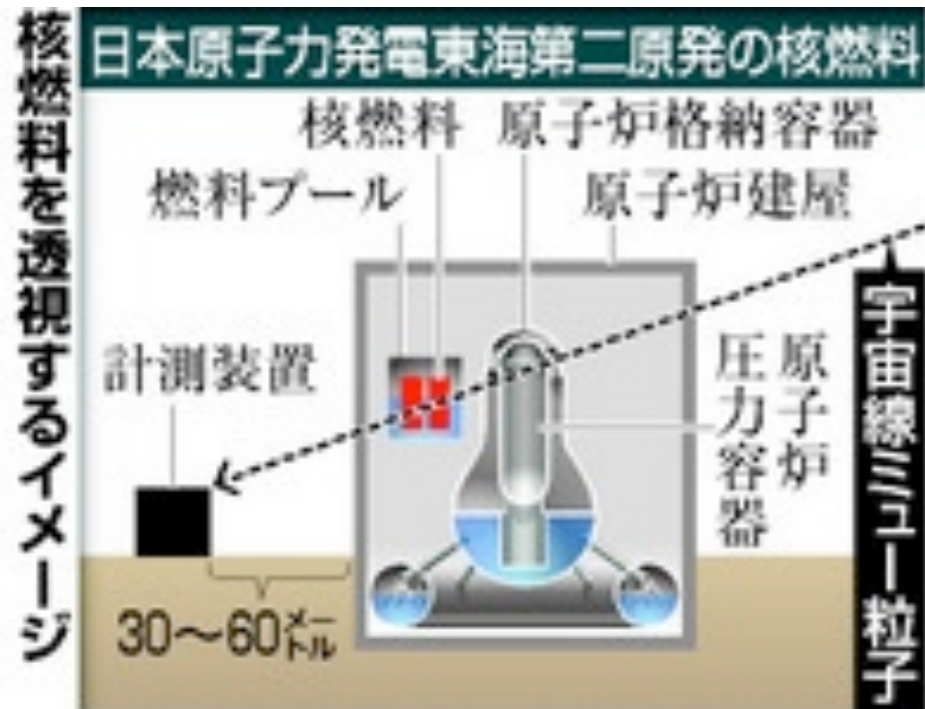


電子 electron

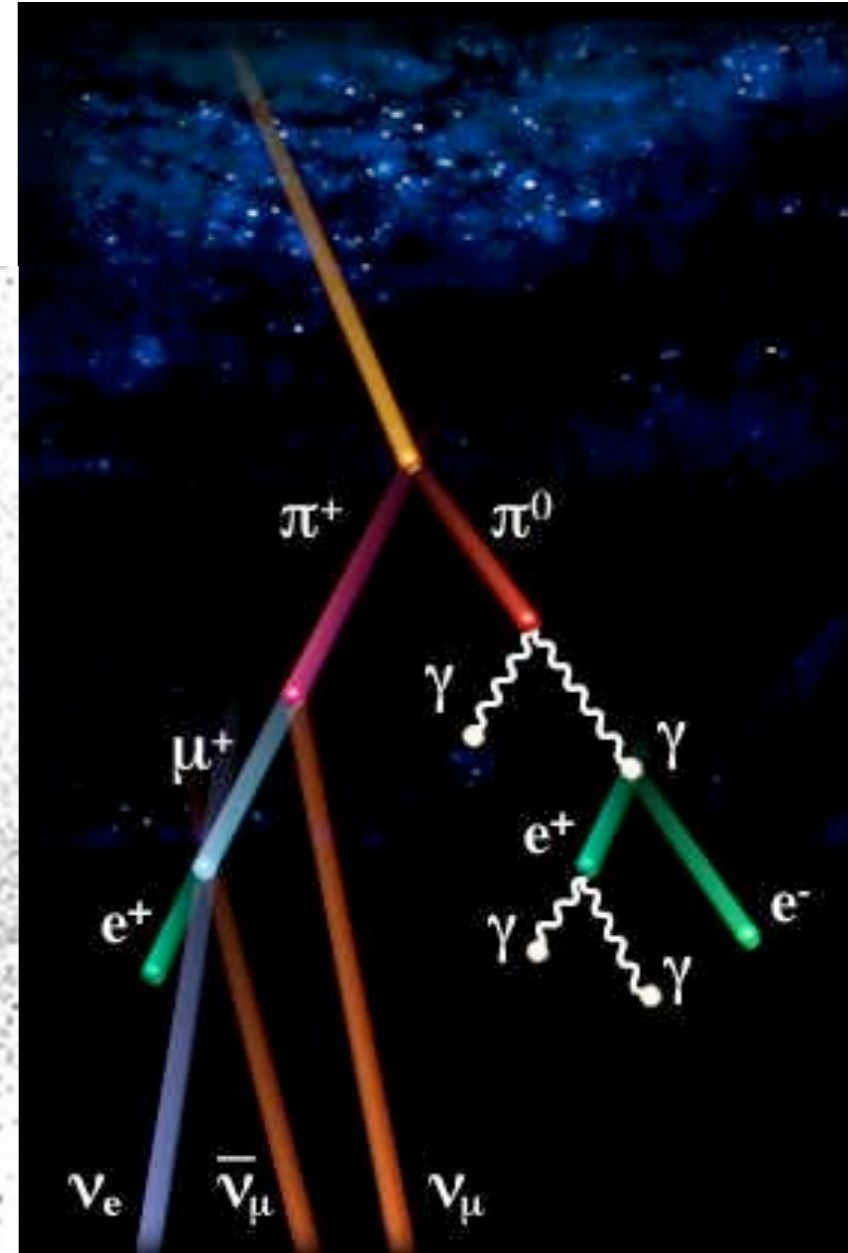
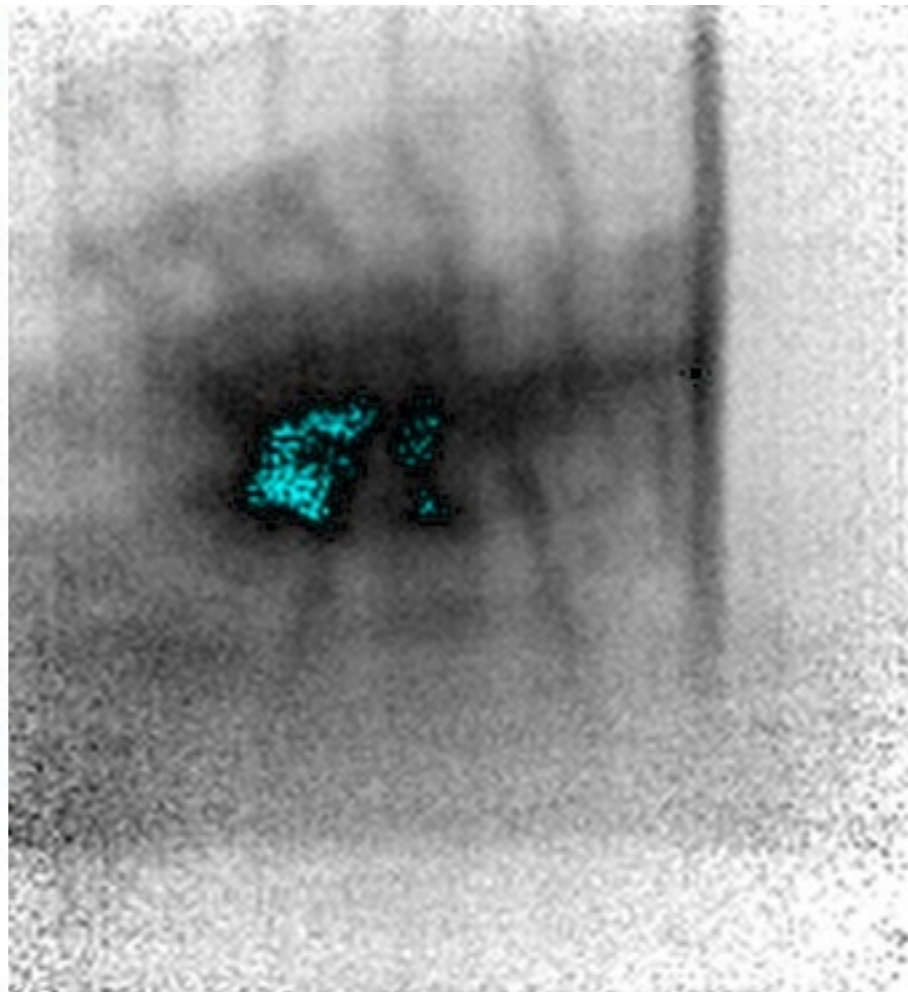
511 keV/c<sup>2</sup>

$\tau = \infty$

# 宇宙線（ミュオン）で内部を覗く



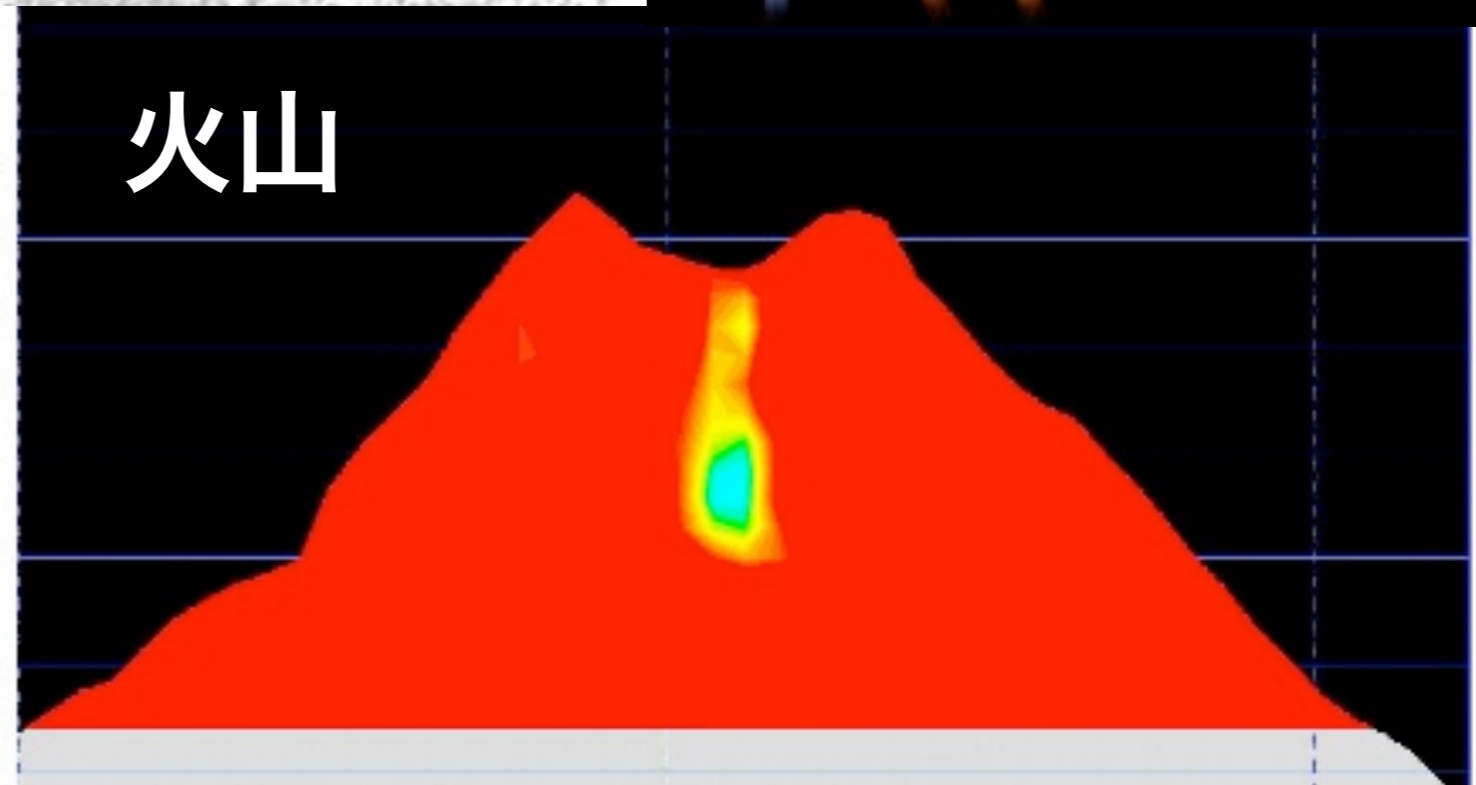
2014.1.23 朝日新聞デジタル



## 原発の核燃料

800  
700  
600  
500  
400  
300  
200  
100

## 火山

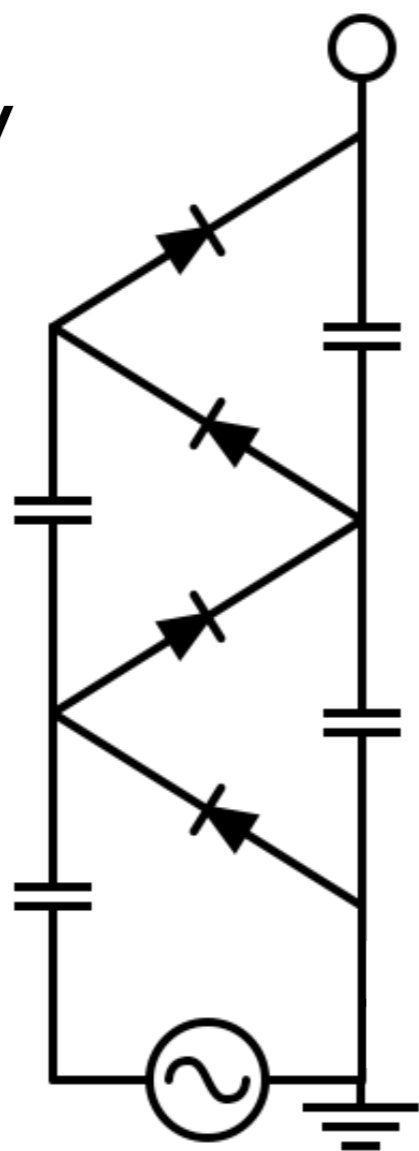


# 加速器科学

# 高電圧発生装置

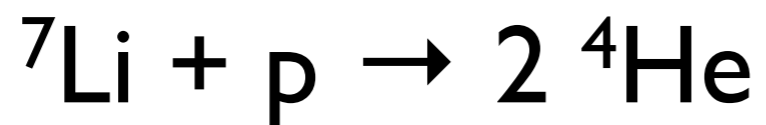
コッククロフト・ワルトン型  
Cockcroft-Walton

up to 4 MV



静電加速器

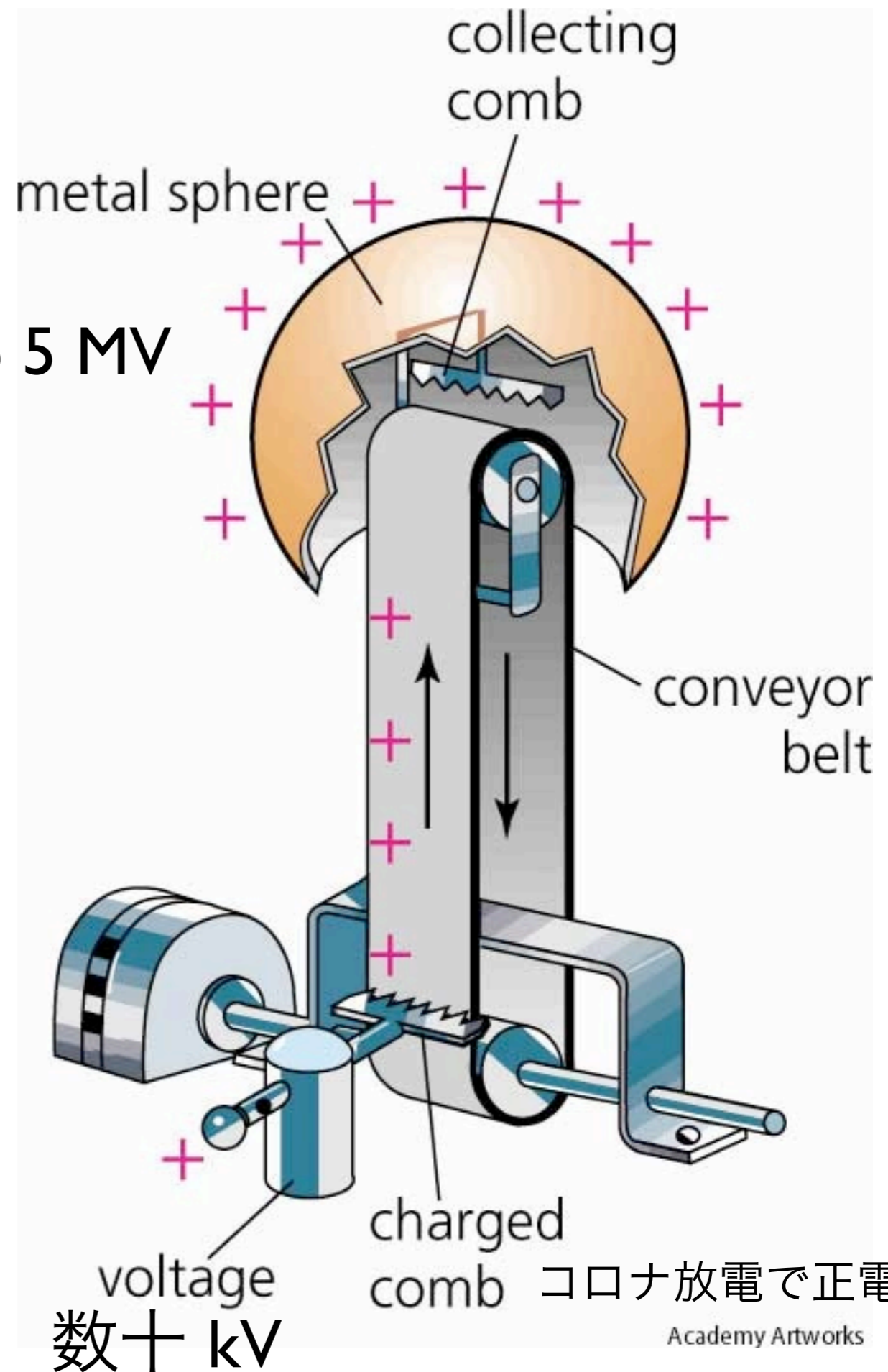
600 keV p



# 高電圧発生装置

ヴァンデグラフ型  
Van de Graaf

up to 5 MV

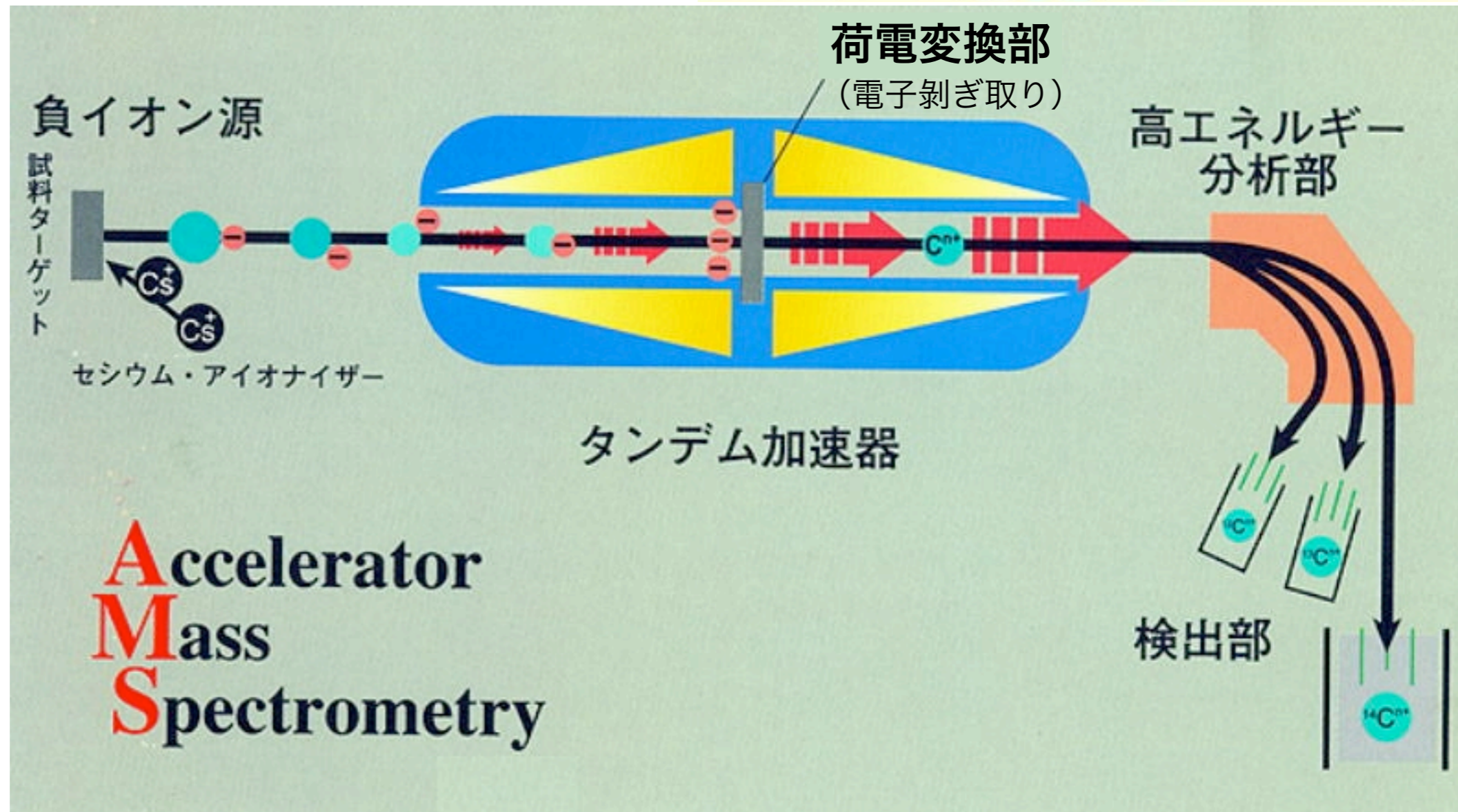


静電加速器  $F = qE$

⇒ 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

半減期

19.3秒

20.3分

99%

1%

存在比

5730年

2.4秒

炭素10

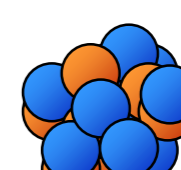
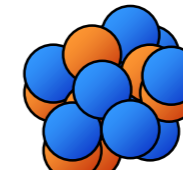
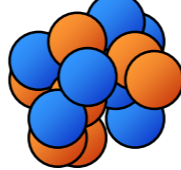
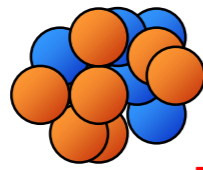
炭素11

炭素12

炭素13

炭素14

炭素15



$^{10}\text{C}$

$^{11}\text{C}$

$^{12}\text{C}$

$^{13}\text{C}$

$^{14}\text{C}$

$^{15}\text{C}$

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:  $\beta^+$ 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

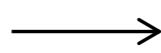
5730 ± 40年



中性子

炭素14

(放射性同位体)



陽子

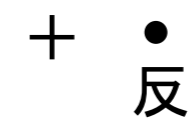
窒素14

(安定)



電子

( $\beta$ 線:放射線)



反ニュートリノ

**放射性同位体**

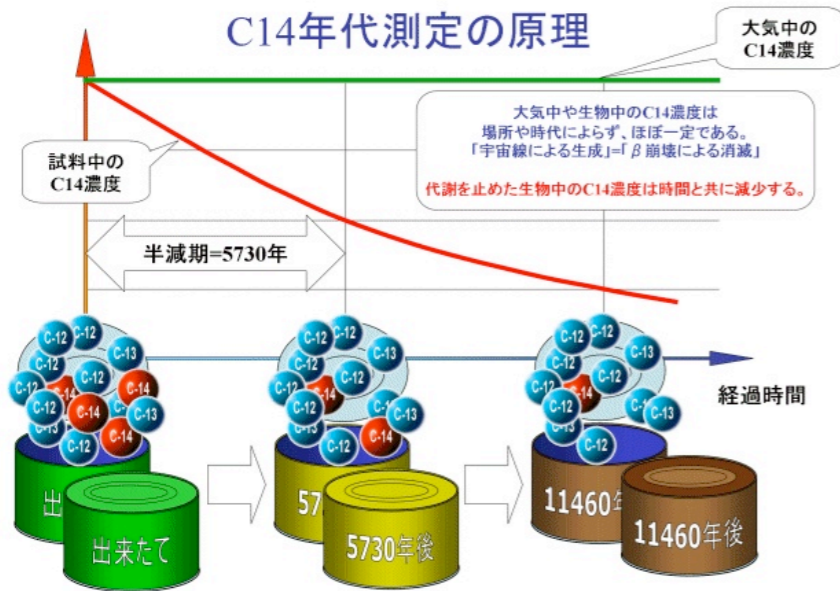
ベータマイナス壊変(崩壊)



$\beta^-$  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		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)

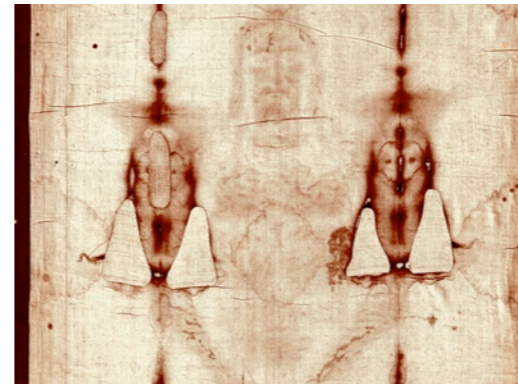
<<図2-1>> 主な年代測定法による測定可能な年代の範囲

出典:ATOMICA他より作成

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

- 弥生時代

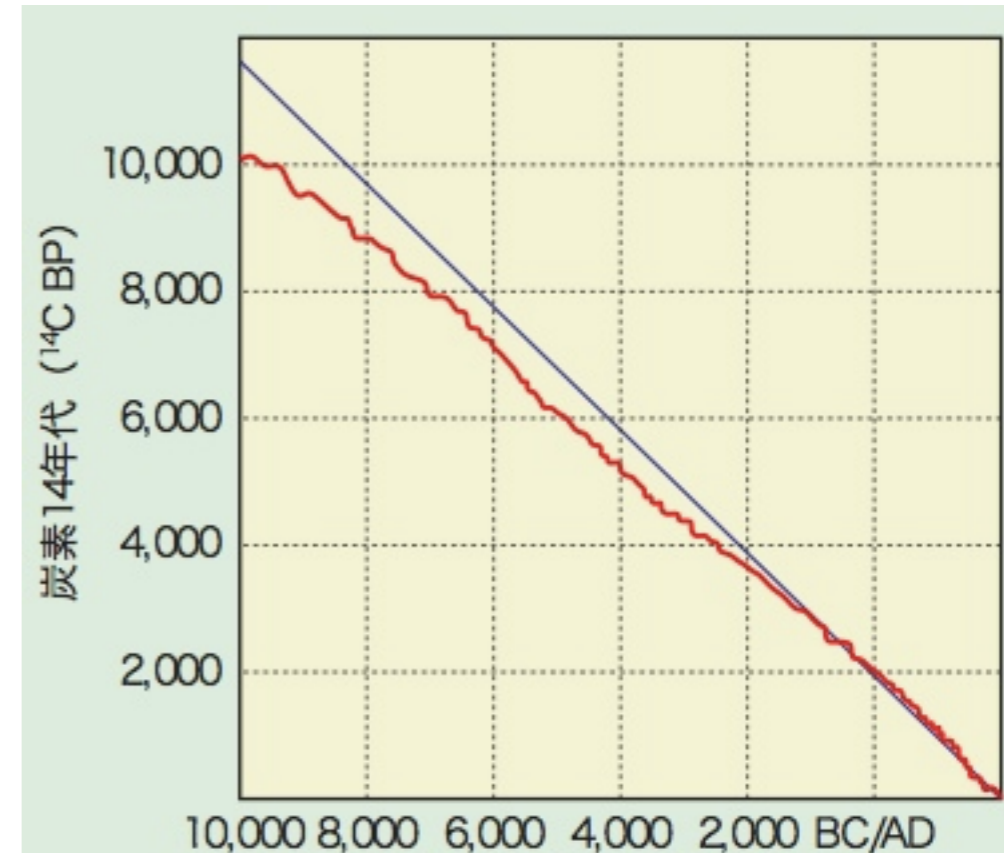
- 聖骸布 (Torino の聖骸布 (1260-1390 A.D., 95% CL))



- 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較正

- 地層、火山灰、年輪データと比較



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

出典: 国立歴史民俗博物館



# リニアック (線形加速器)

# Linac (Linear accelerator)

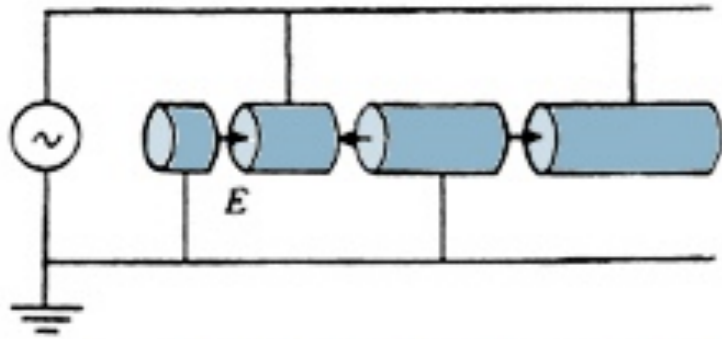


図1 ヴィデレー型リニアック

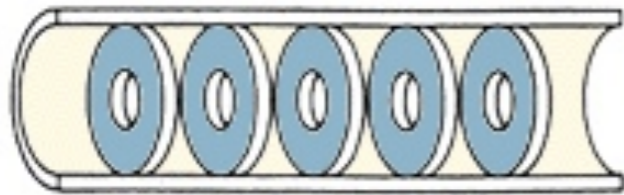


図2 円盤装荷導波管

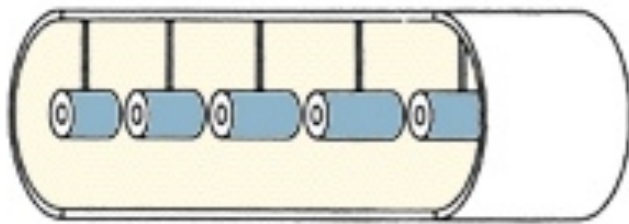
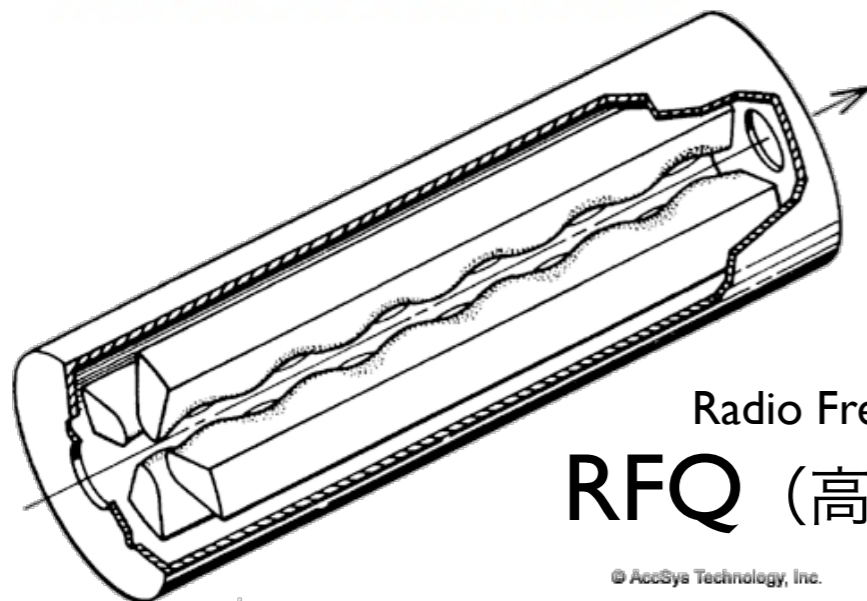
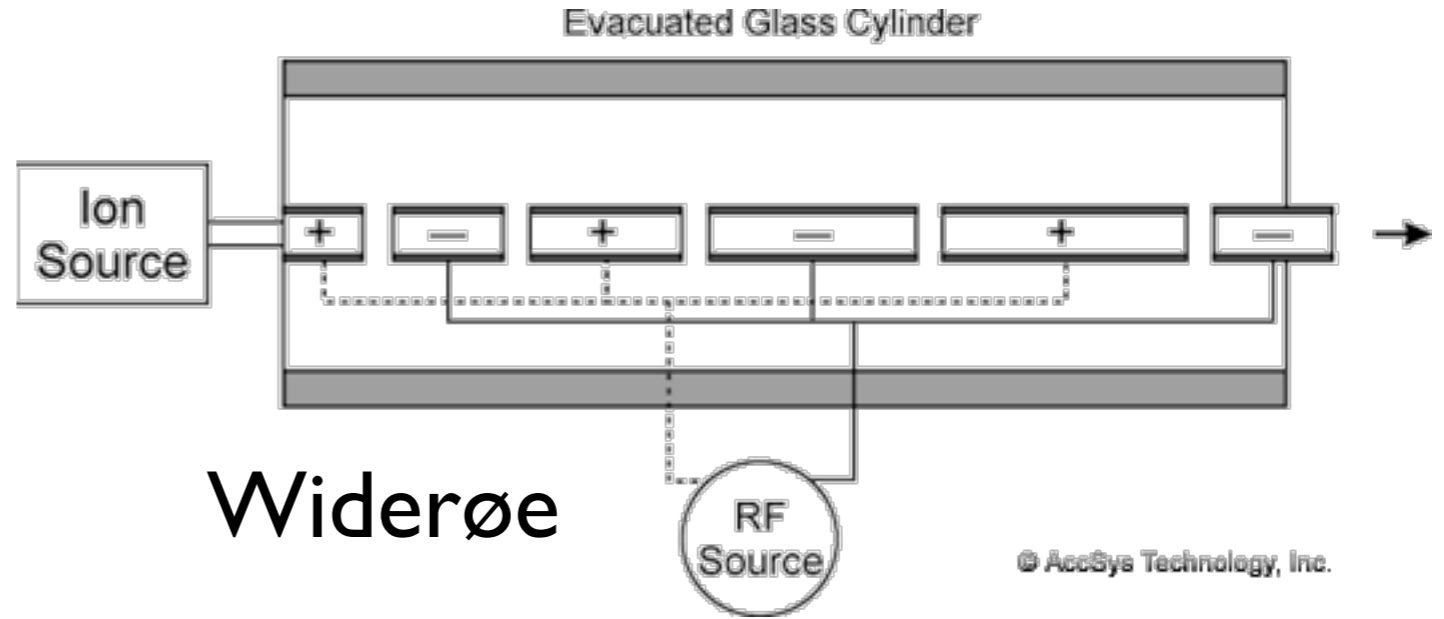


図3 アルバレ型リニアック



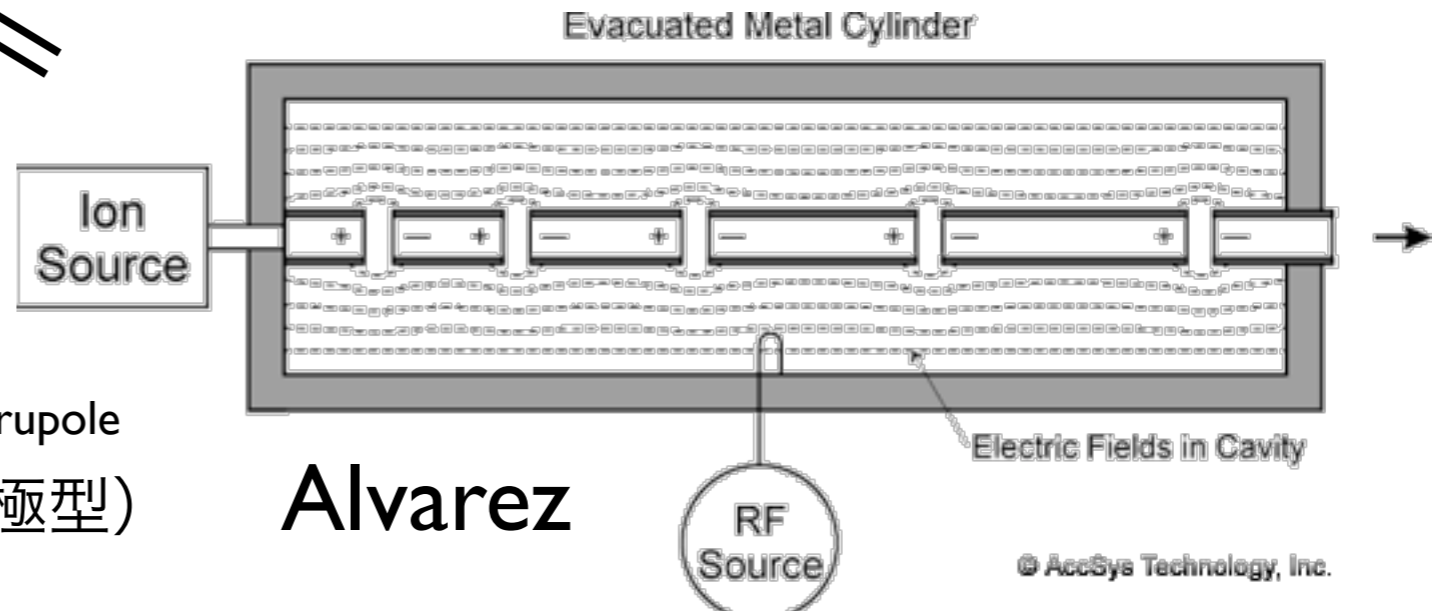
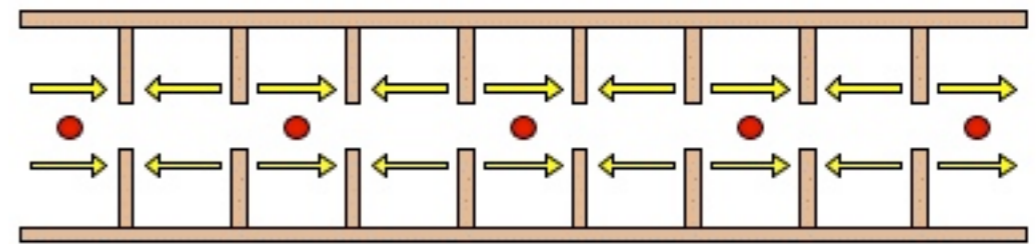
Radio Frequency Quadrupole  
**RFQ** (高周波四重極型)

© AccSys Technology, Inc.



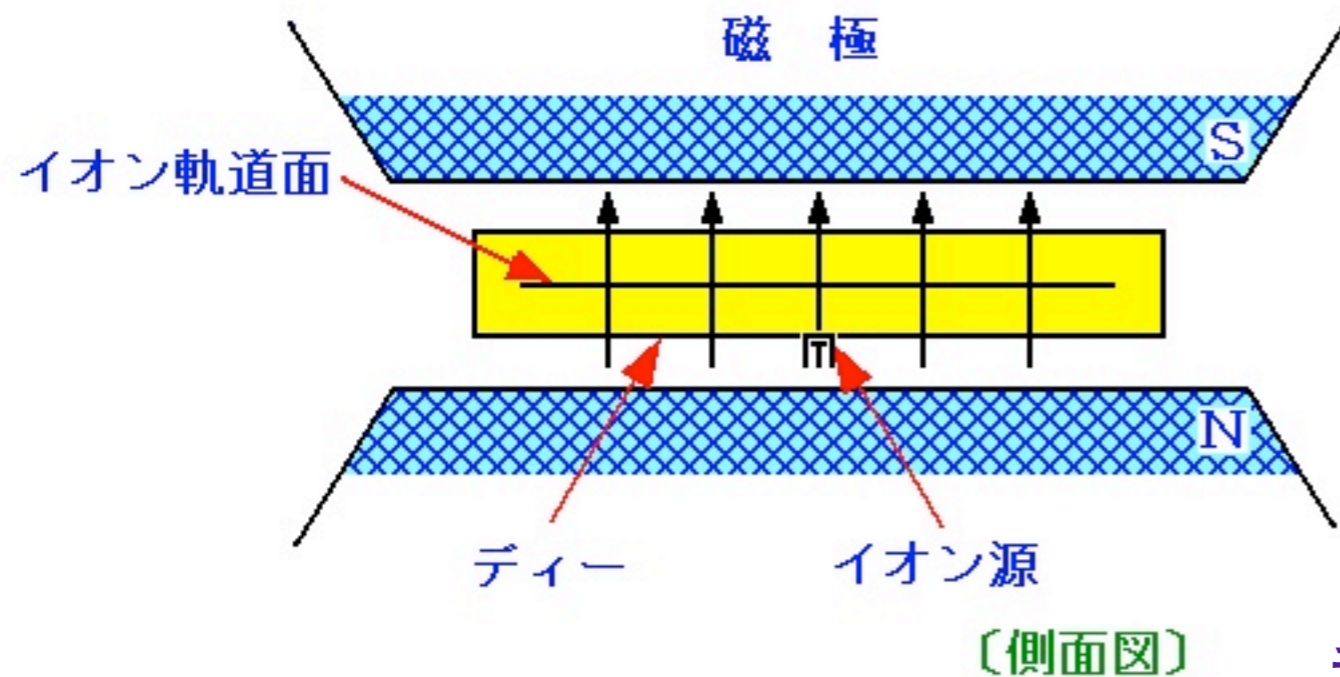
**Widerøe**

© AccSys Technology, Inc.



**Alvarez**

© AccSys Technology, Inc.



# サイクロトロン

Cyclotron

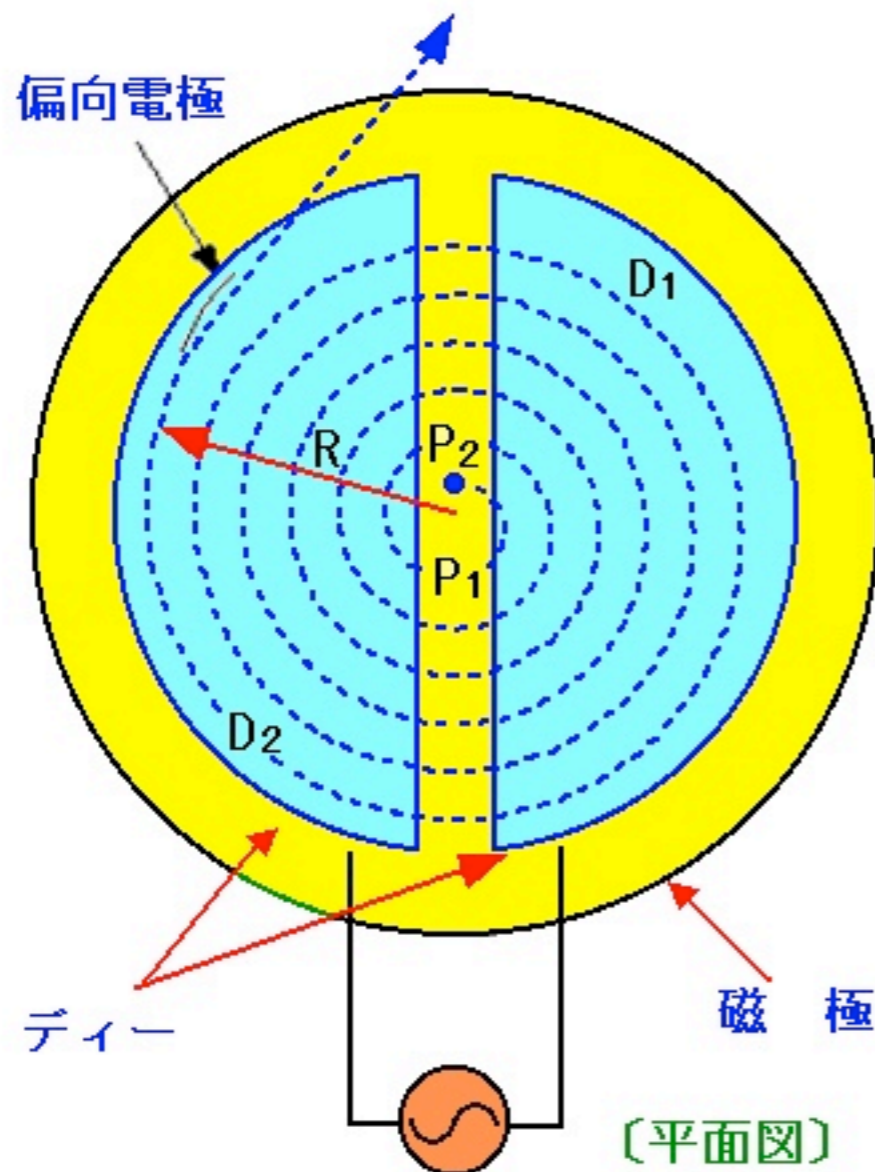
Lawrence (1929)



垂直磁場

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

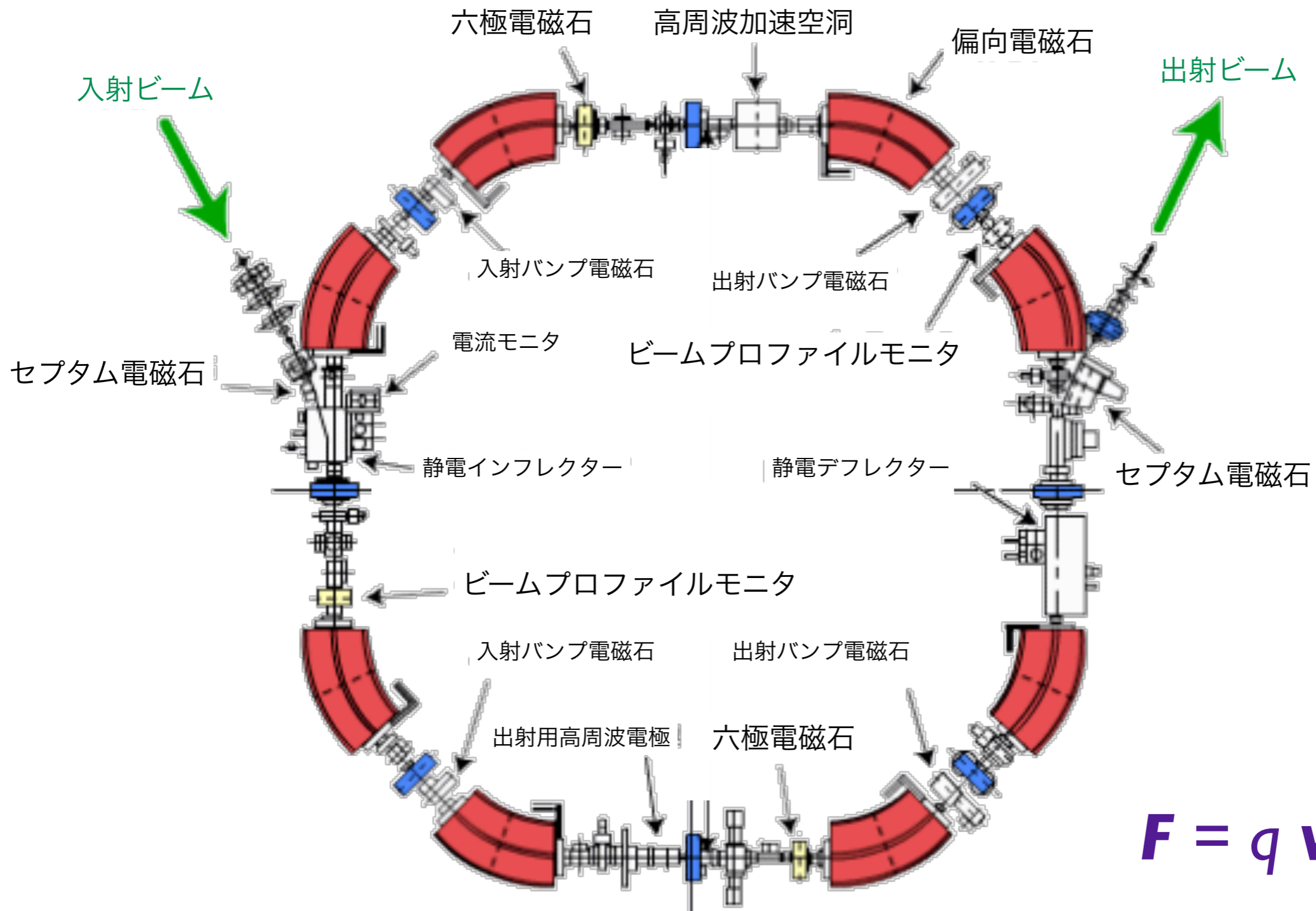
相対論的領域では周期が遅れる



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

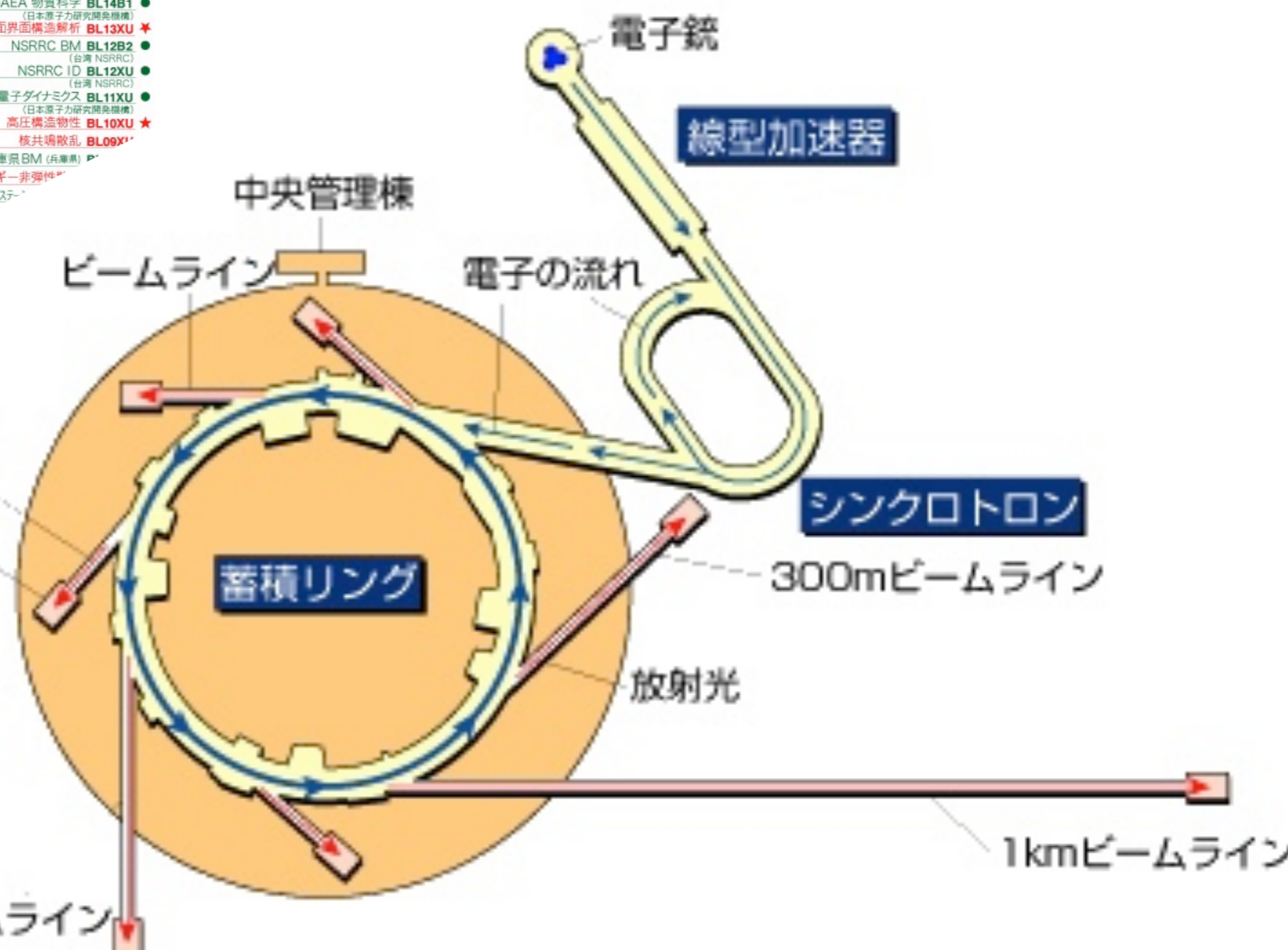


$$F = q v \times B$$

磁場による偏向・収束 (高エネルギー)

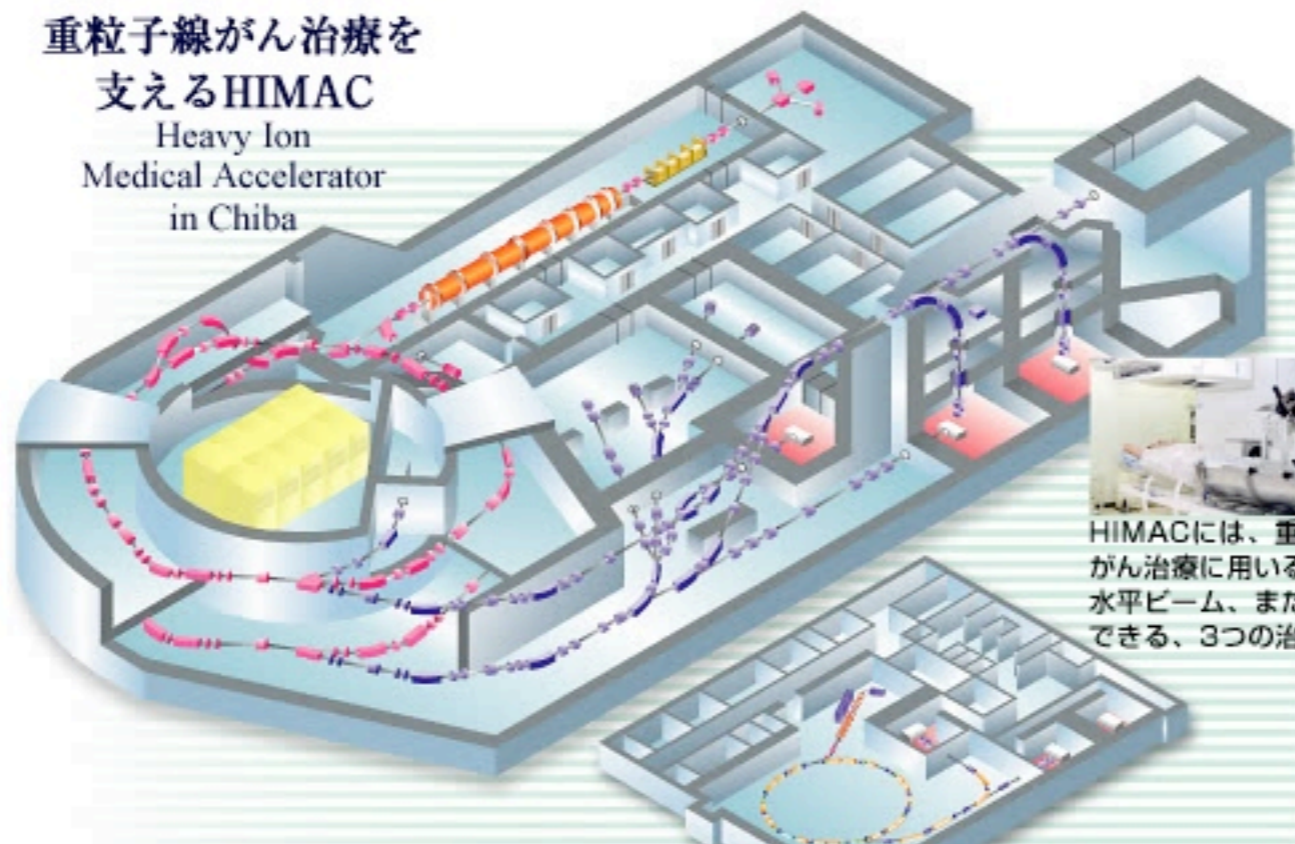
# SPring-8 (大型放射光施設: 播磨)

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）

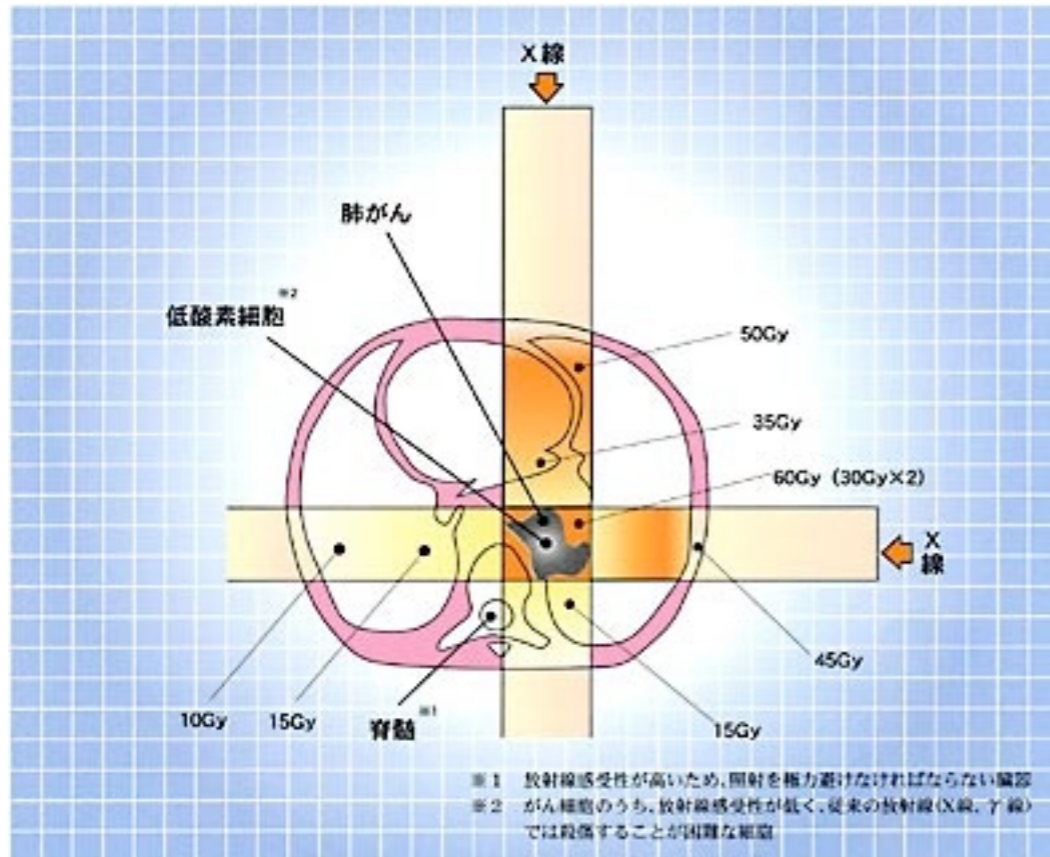


写真提供：(独)放射線医学総合研究所

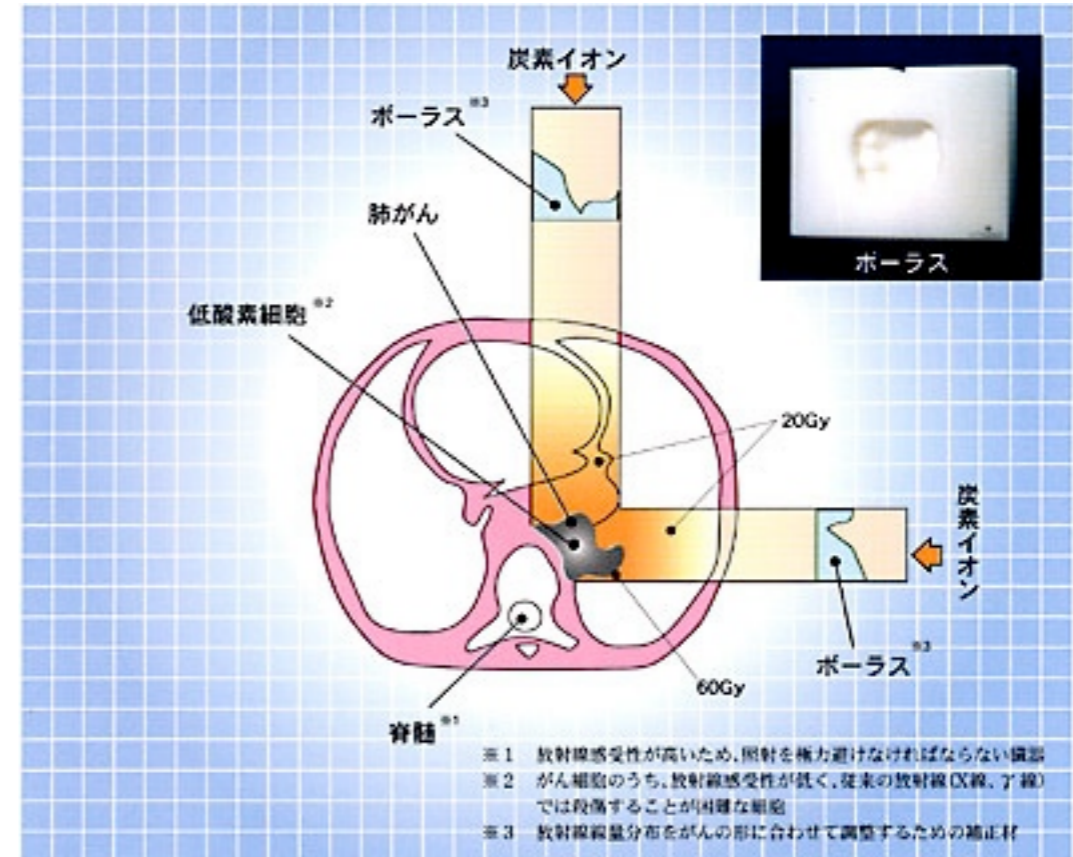
# 放射線医療：がん治療

# 数 Gy を複数回

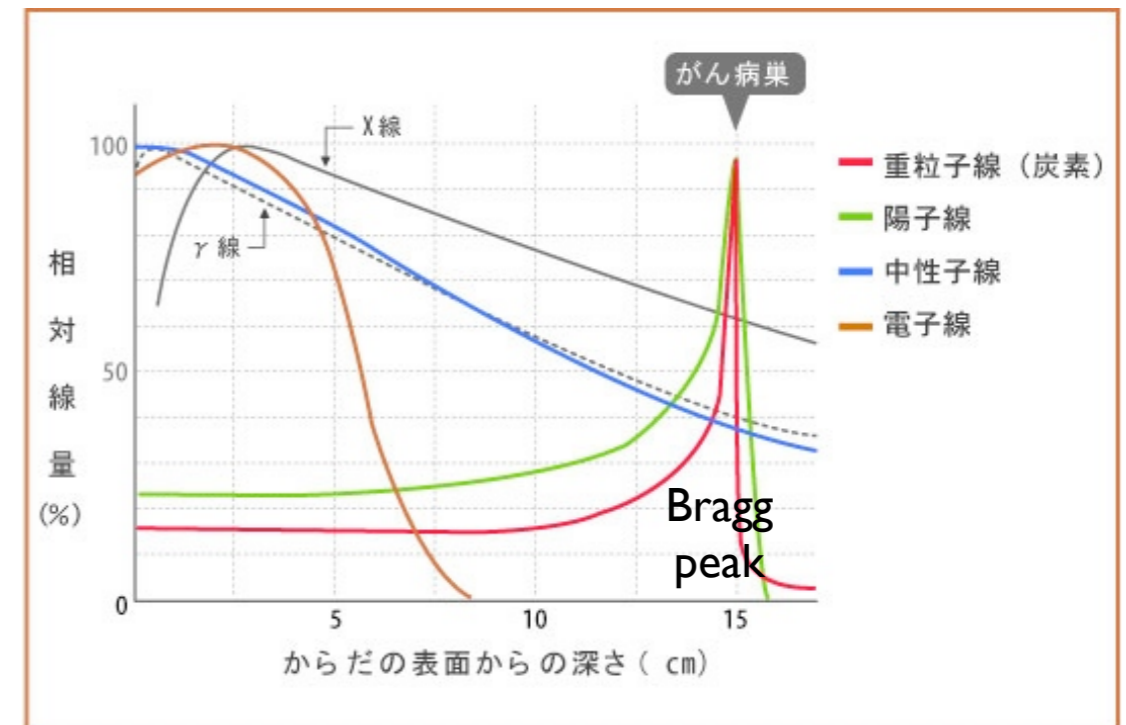
## X線



## 重粒子線 (炭素イオン)

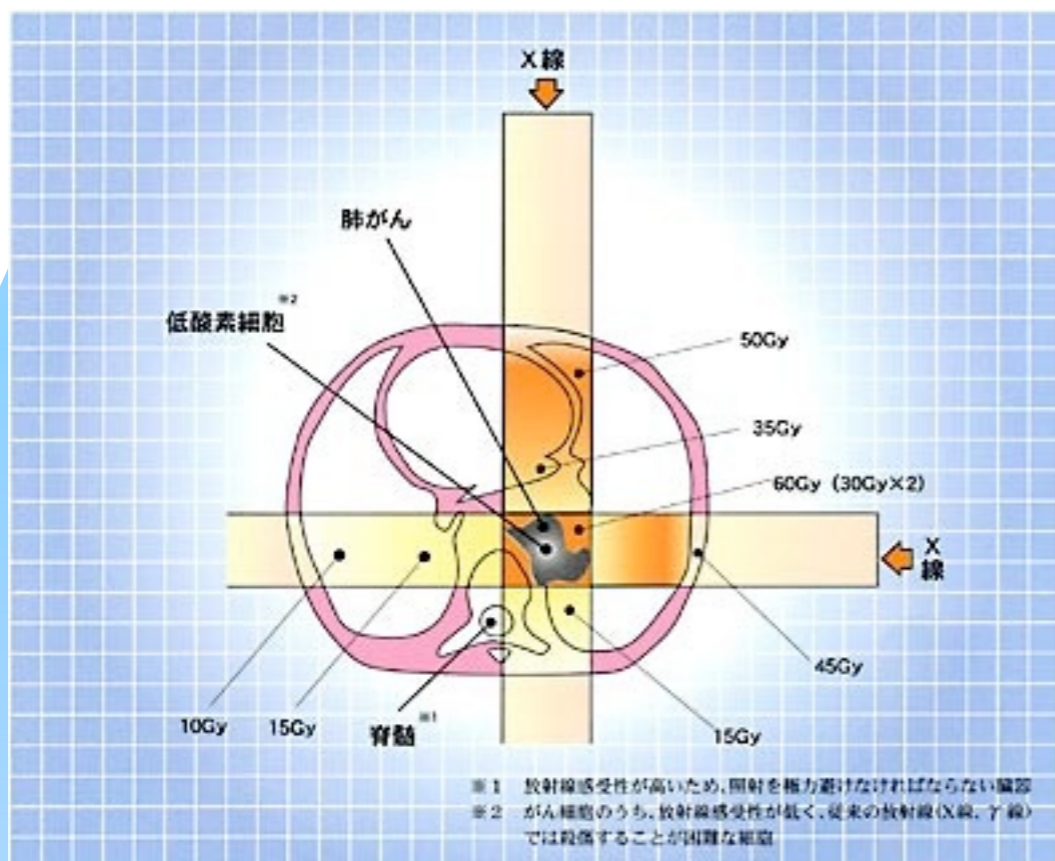


他には：ガンマナイフ、  
陽子線、パイ中間子  
研究中：反陽子



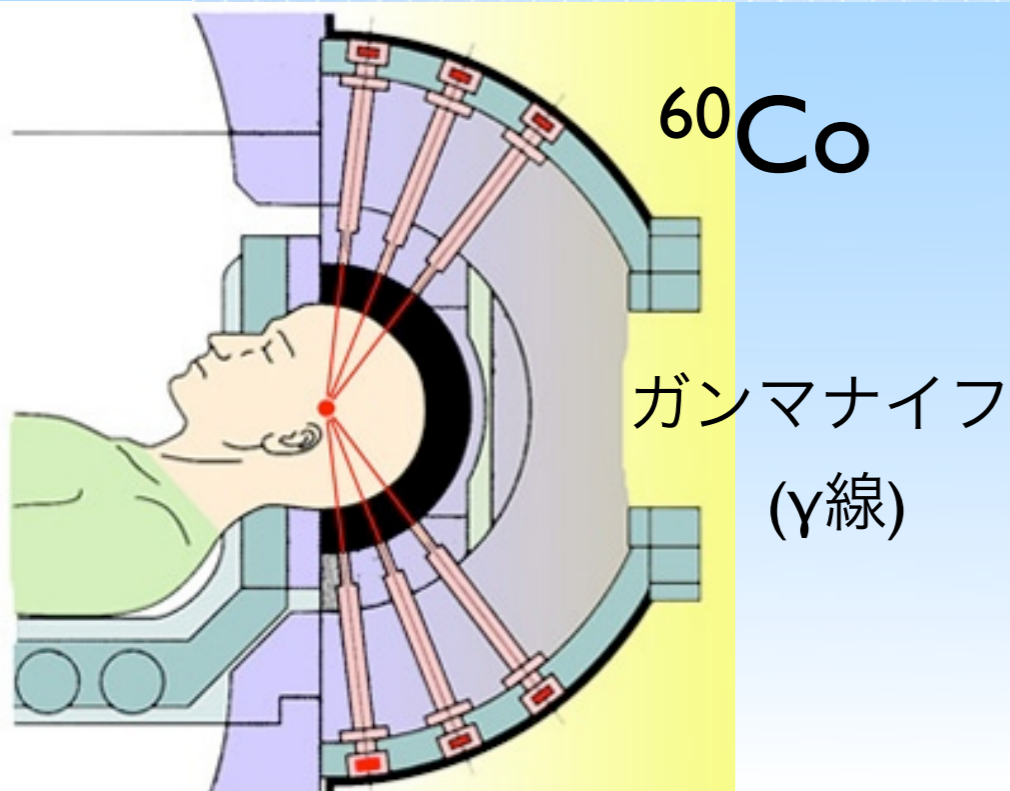
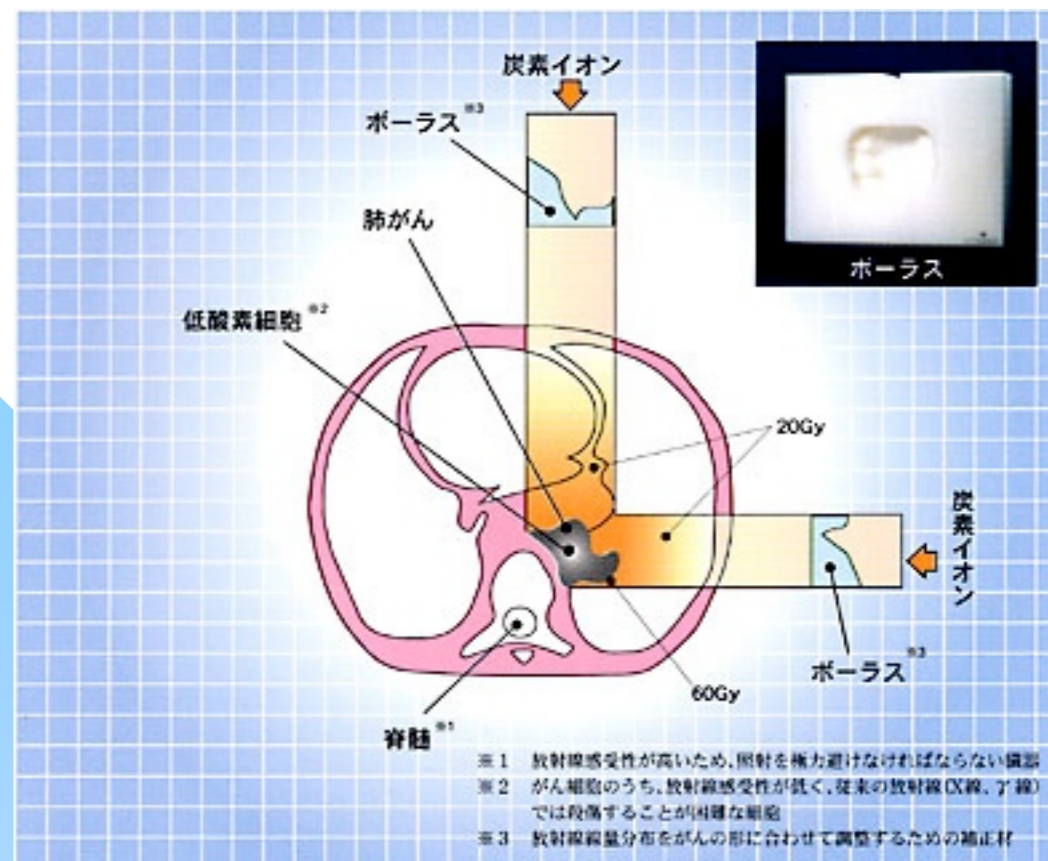
# 放射線医療：がん治療

## X線



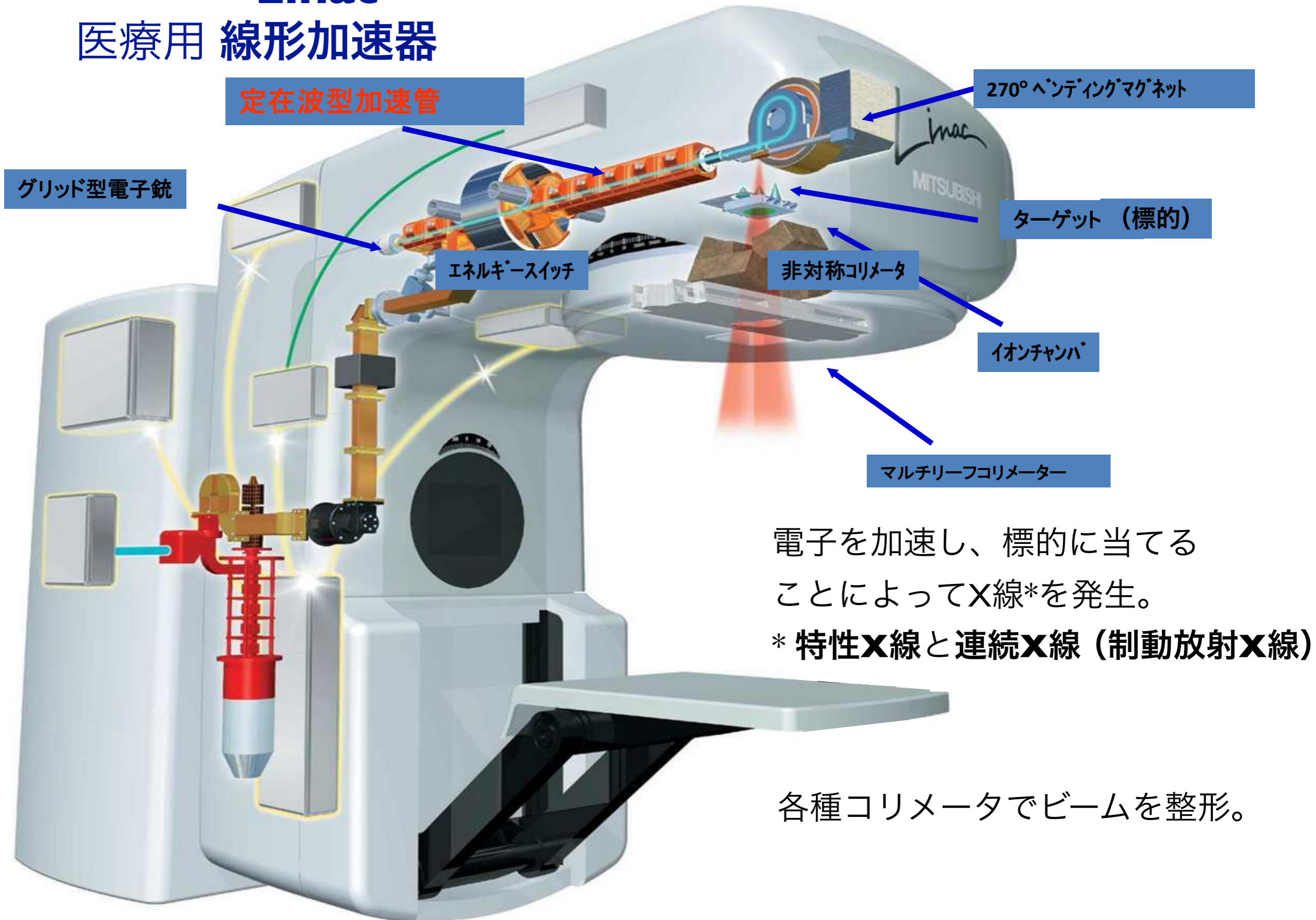
# 数 Gy を複数回

## 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

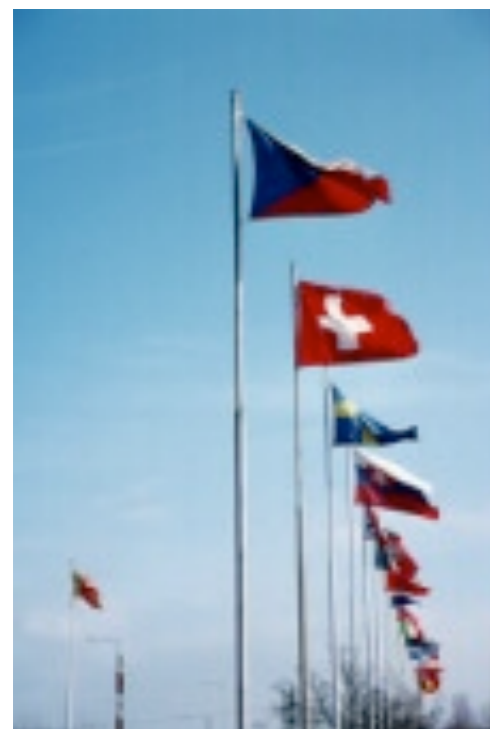






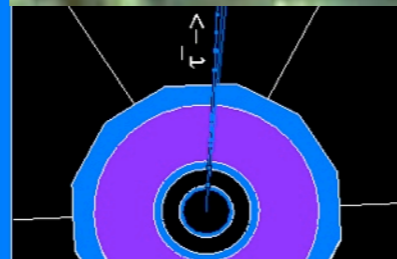
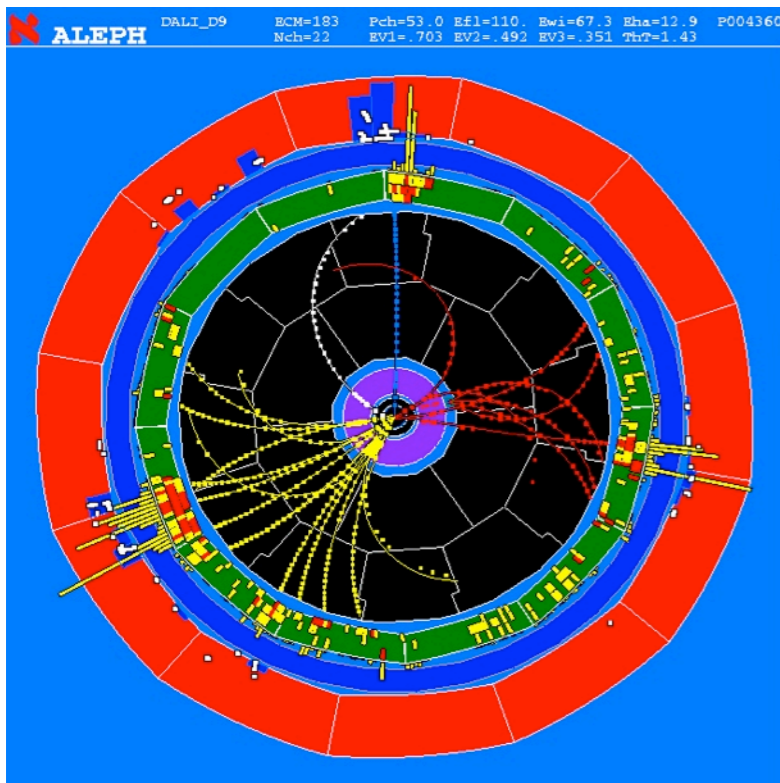
# CERN

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

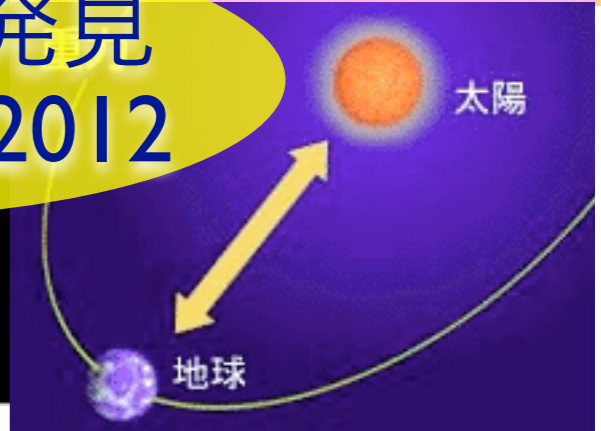
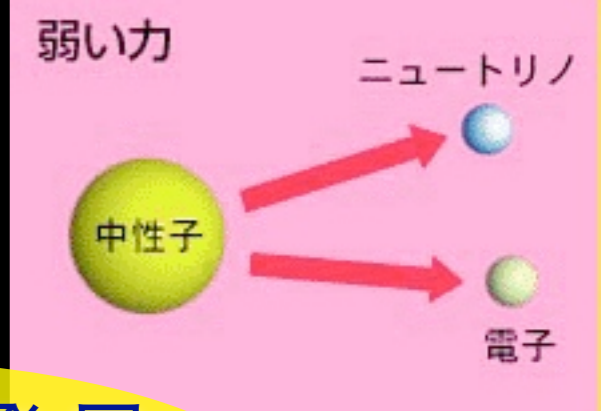
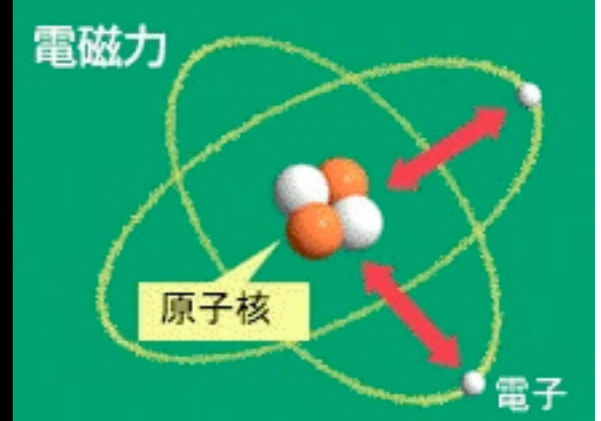
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

top quark 発見  
at Fermilab in 1995

**強い力**  
  
 グルーオン

**電磁力**  
  
 光子

**弱い力**  
  
 W ボゾン Z ボゾン



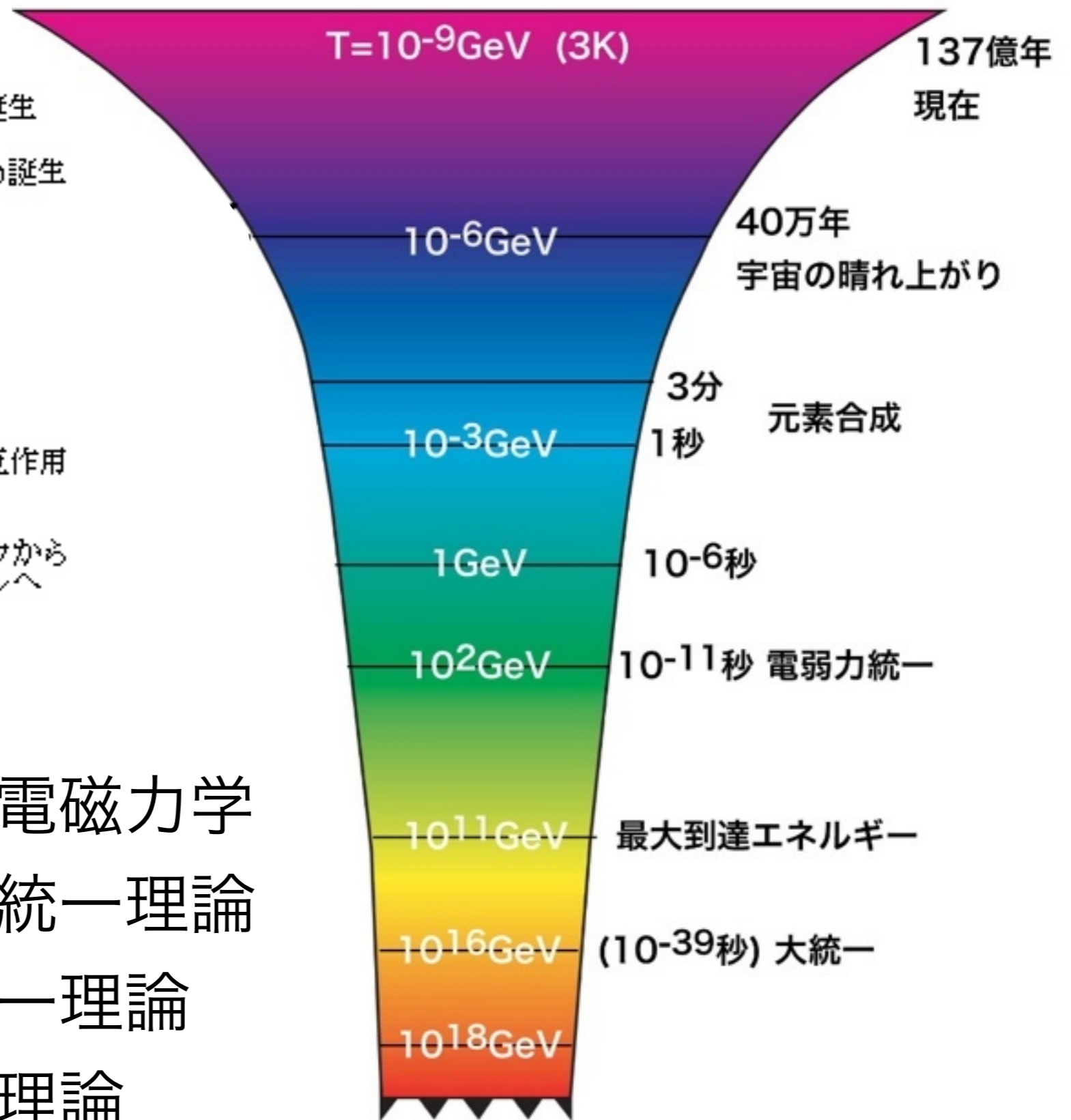
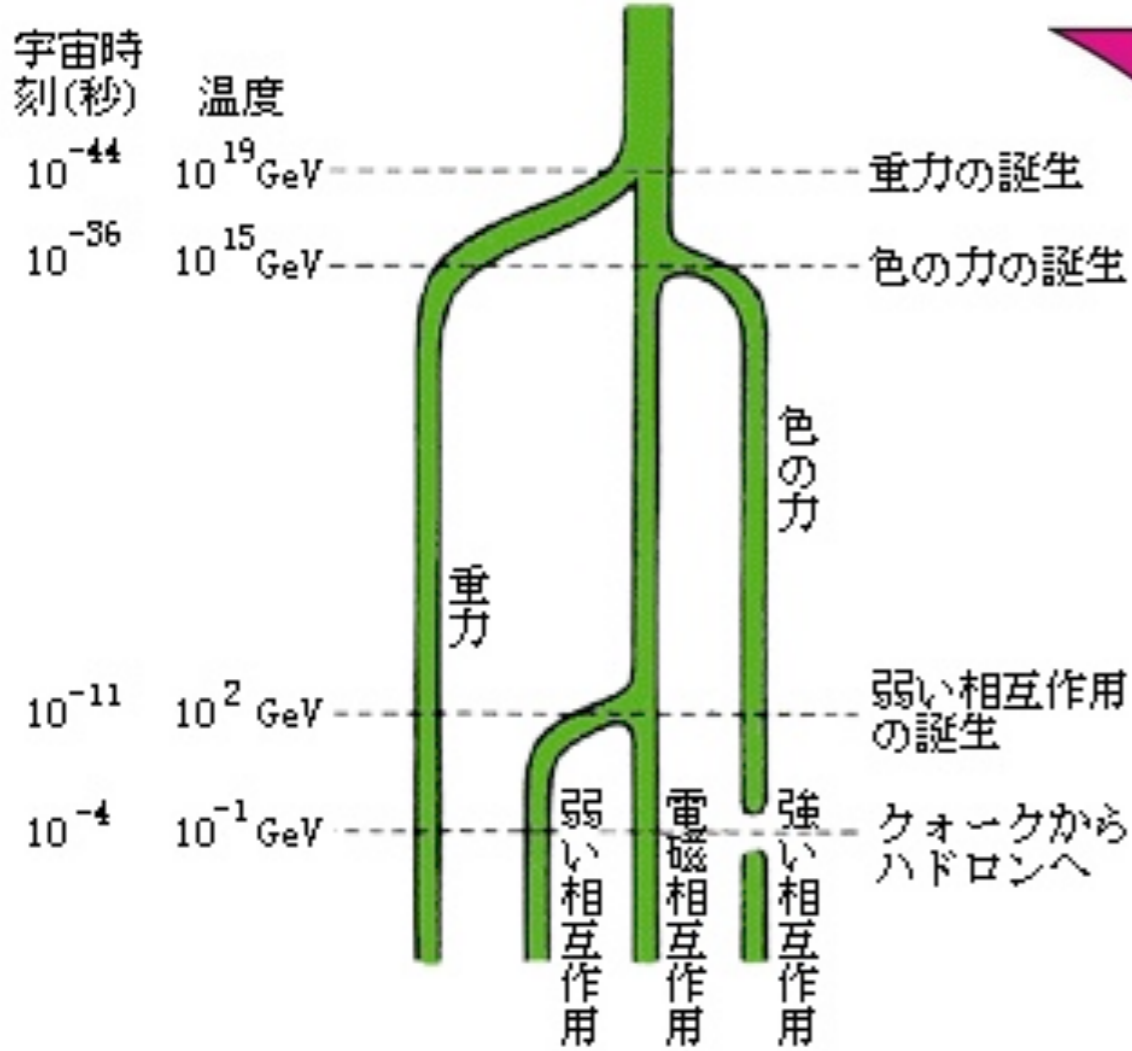
ヒッグス場に伴う粒子  
(~~未発見~~)

  
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

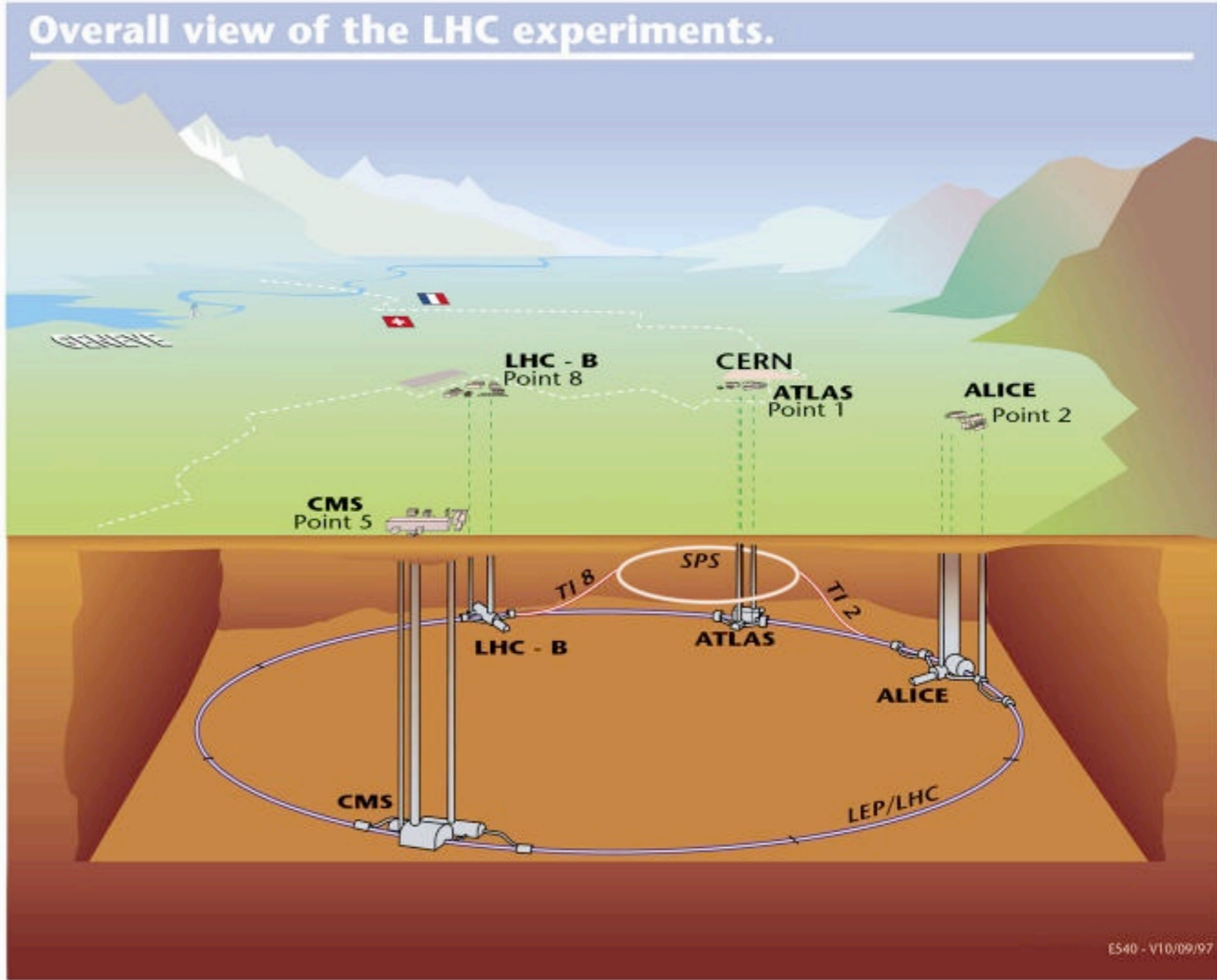
質量の起源  
Higgs 粒子

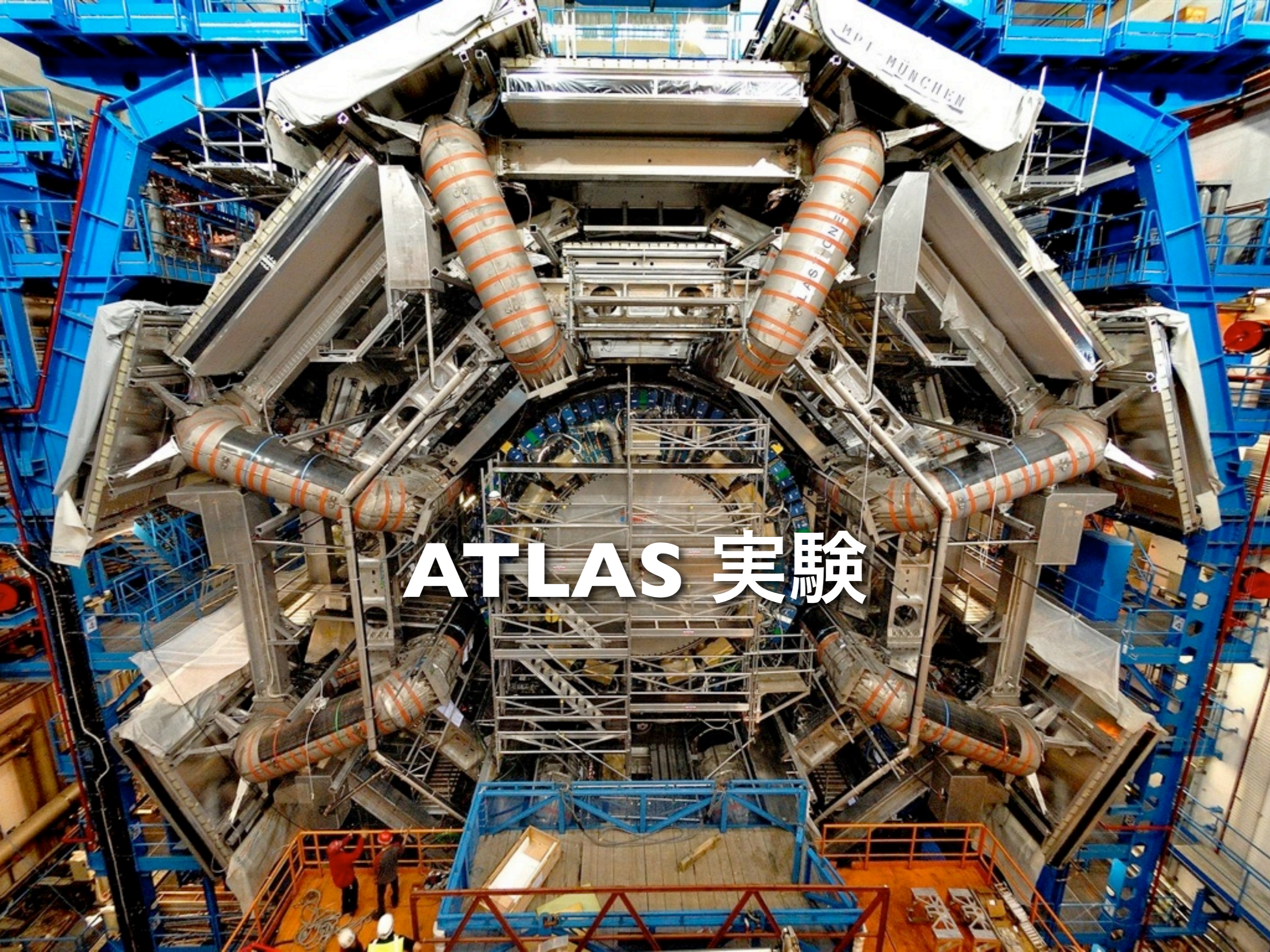


# LHC

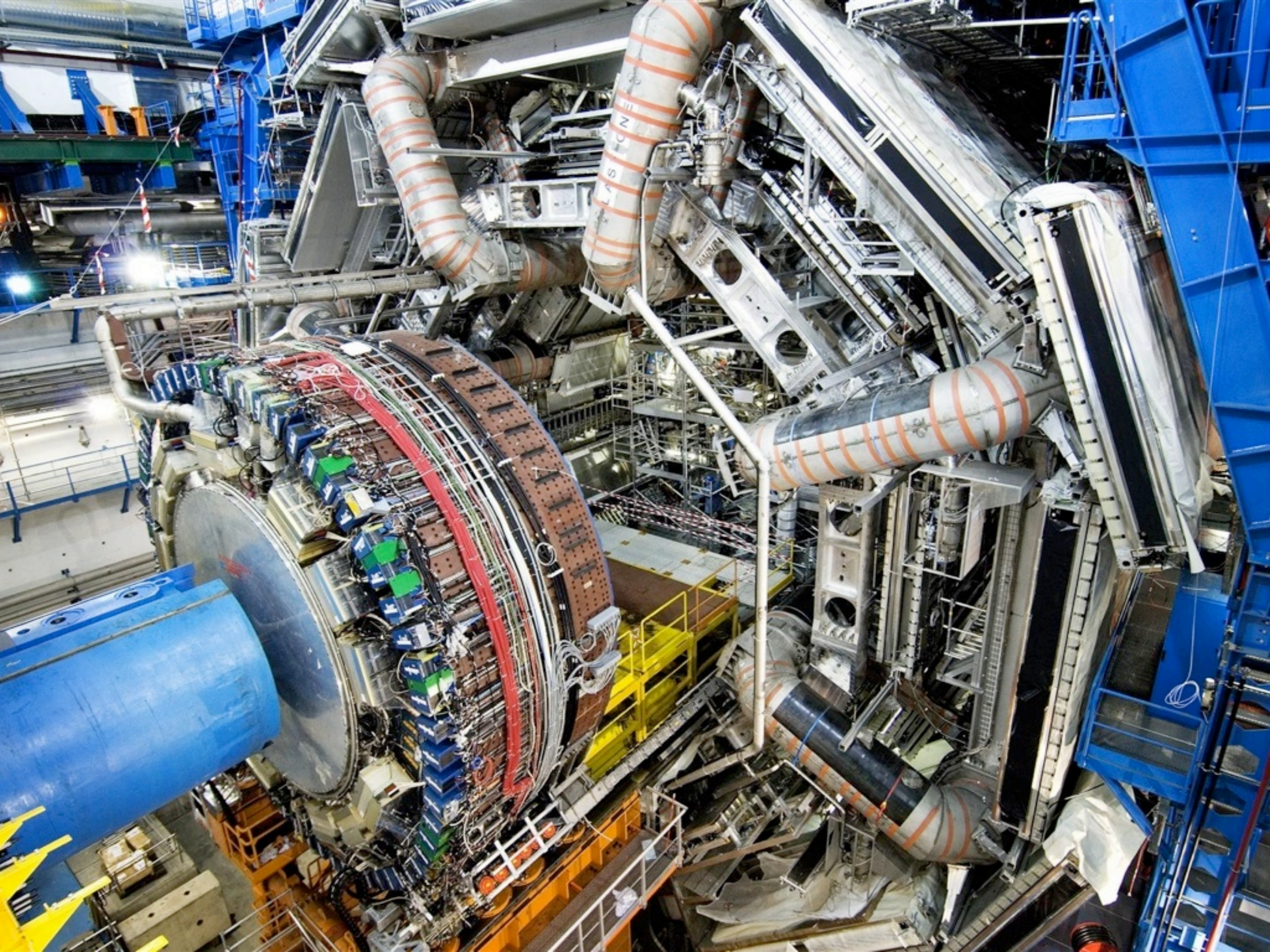
## Large Hadron Collider

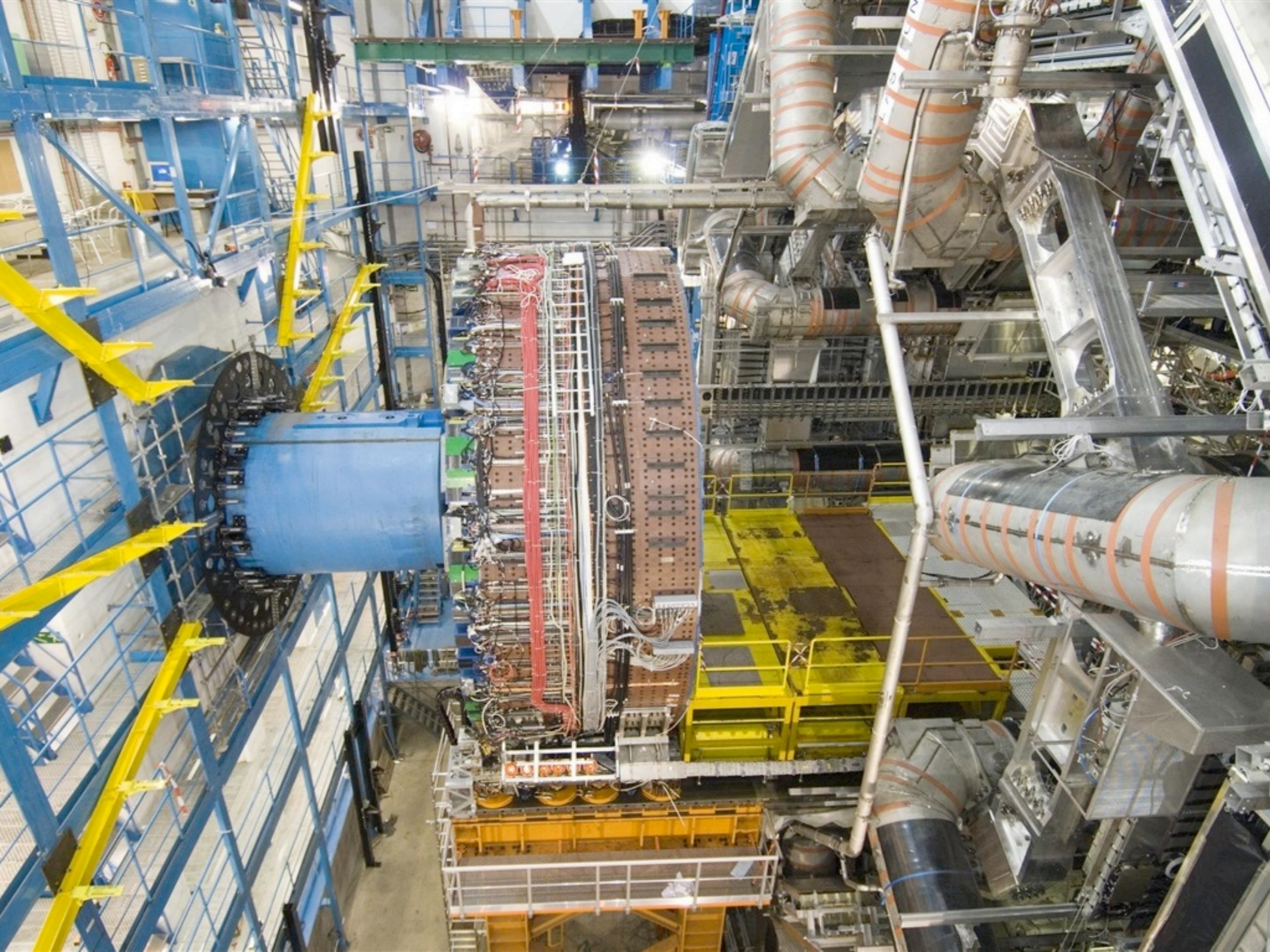
### 質量の起源 Higgs 粒子





# ATLAS 実験









### Detector characteristics

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

CERN AC - ATLAS V1997

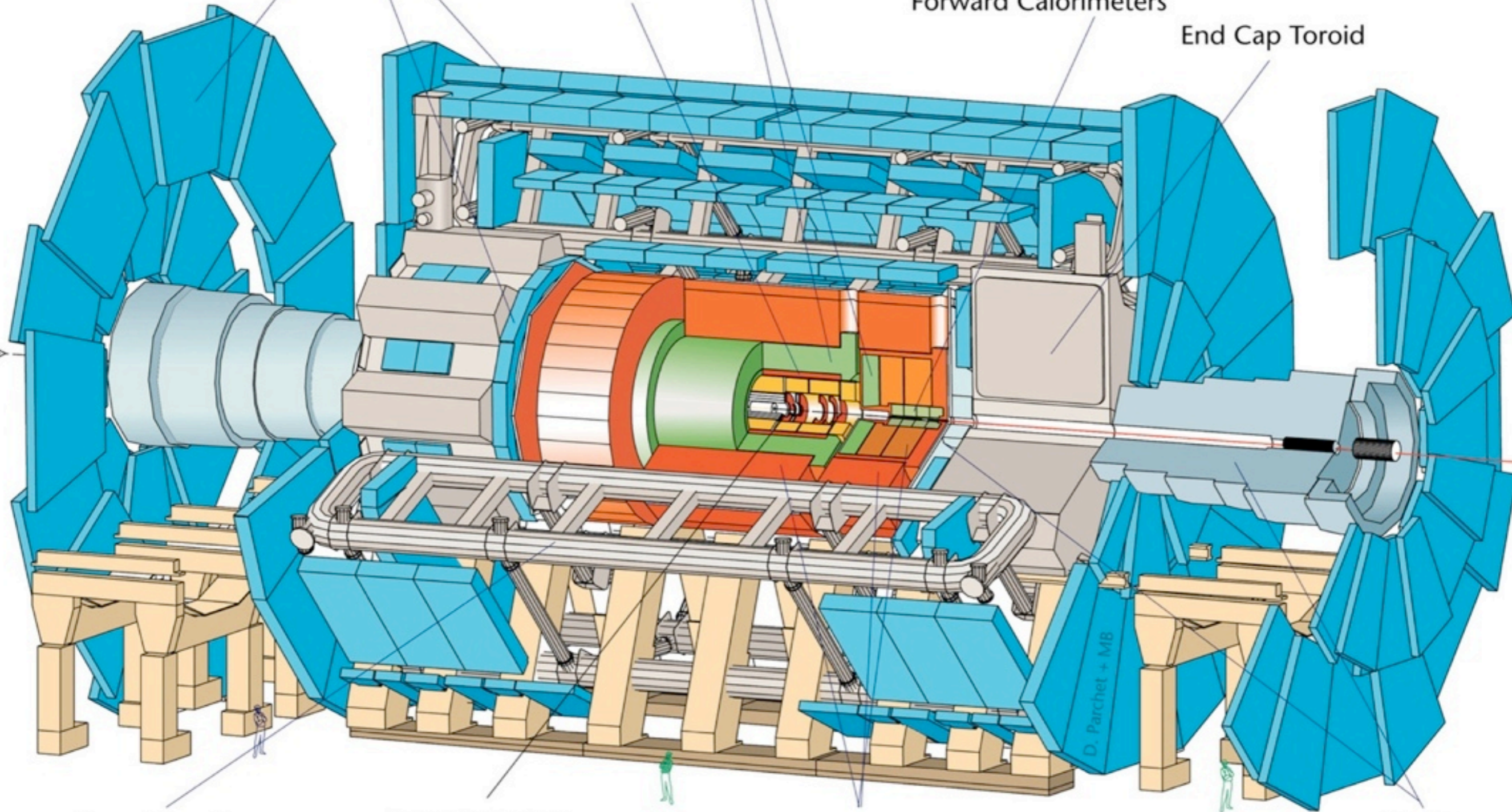
Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid



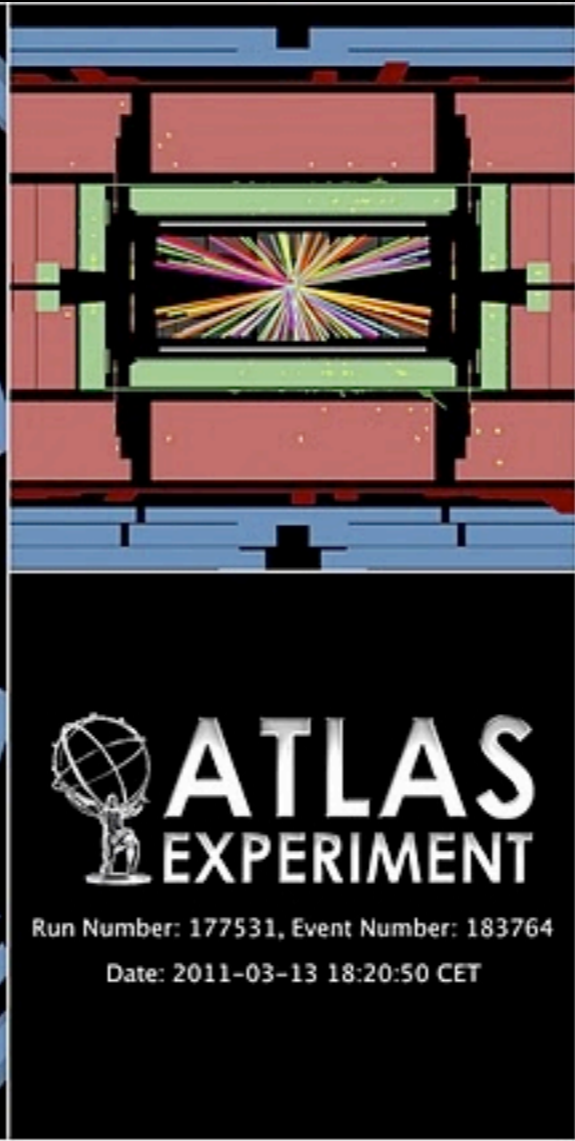
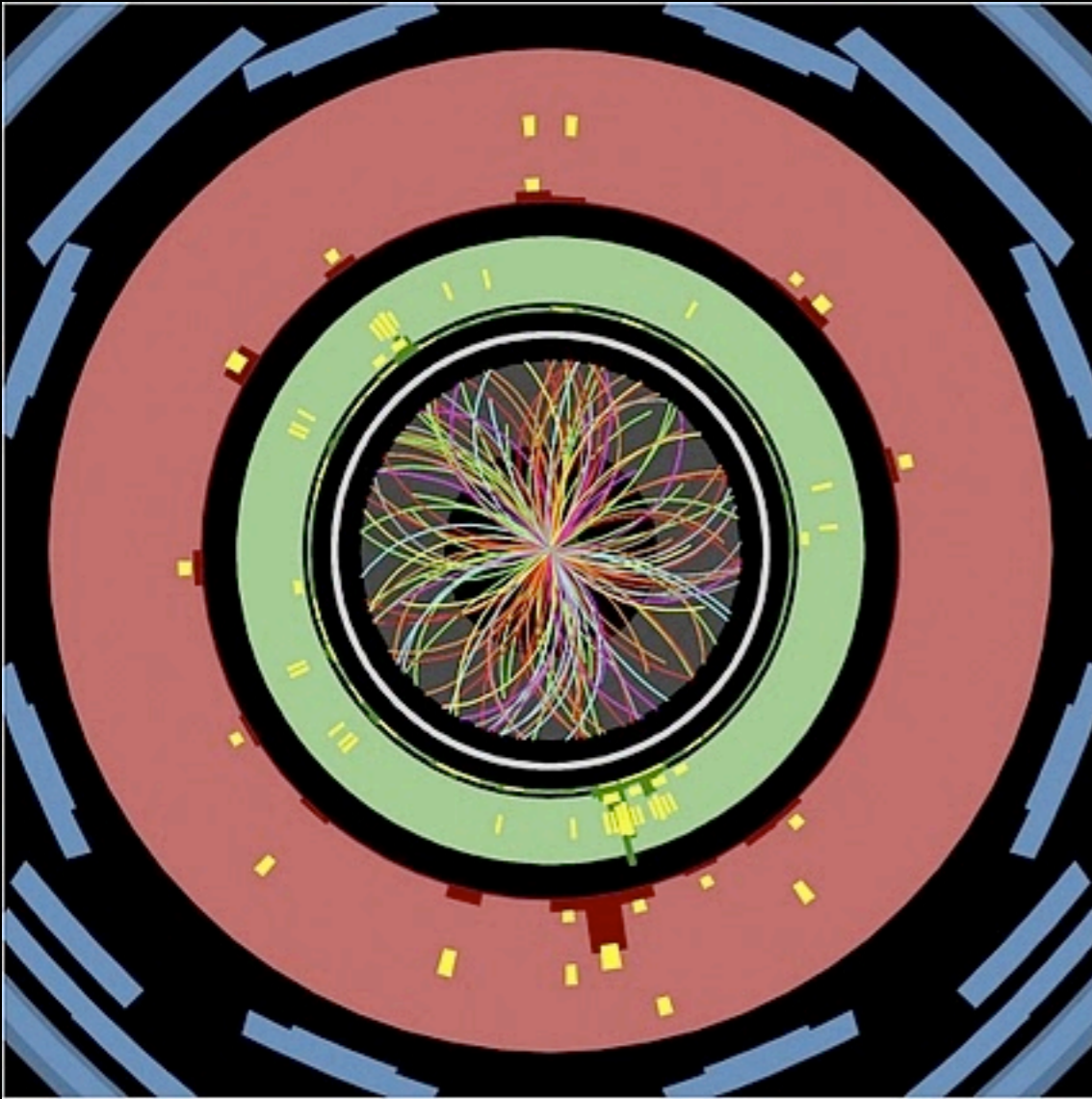
Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding

D. Parquet + MB

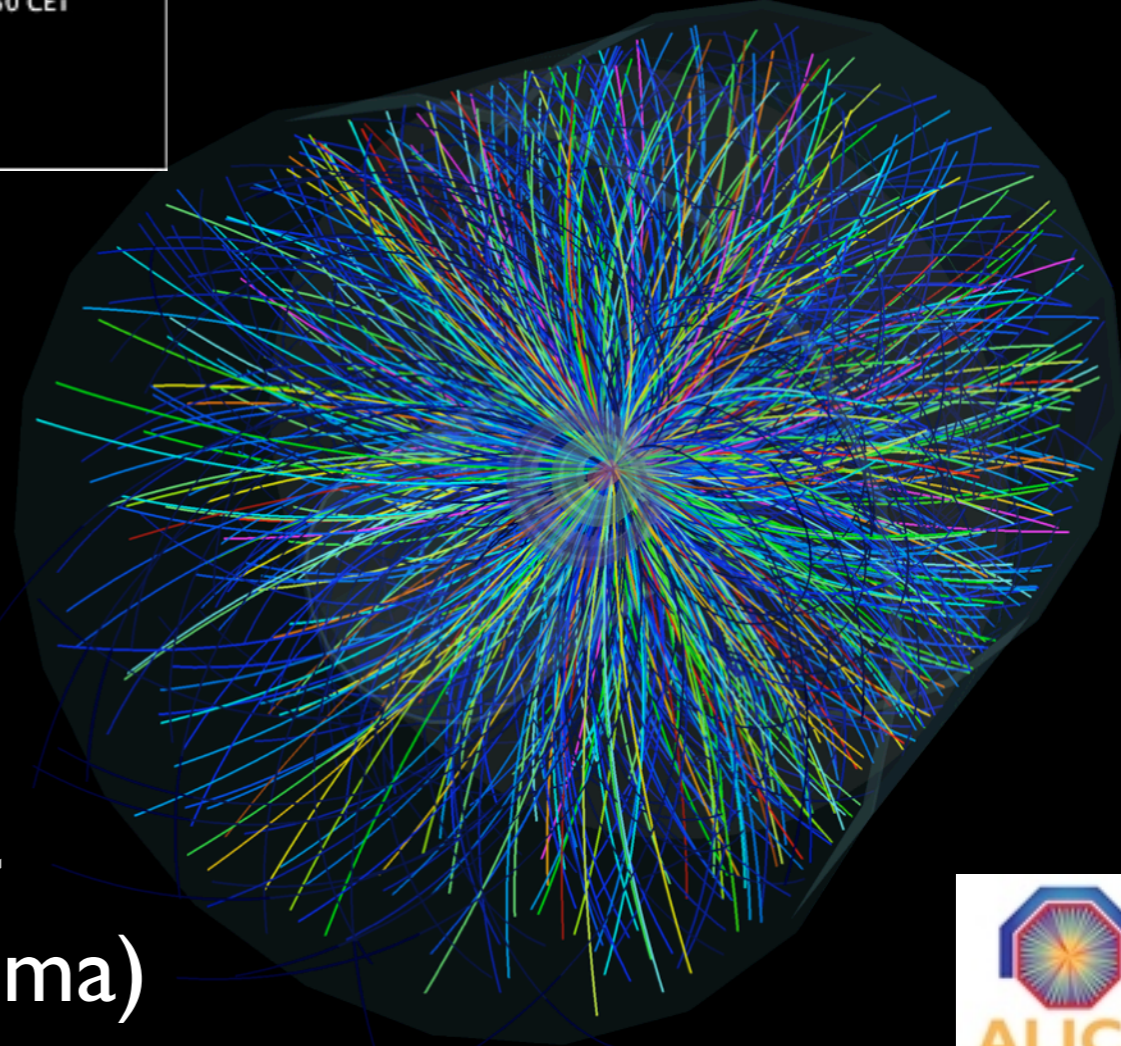


 **ATLAS**  
EXPERIMENT  
Run Number: 177531, Event Number: 183764  
Date: 2011-03-13 18:20:50 CET

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

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

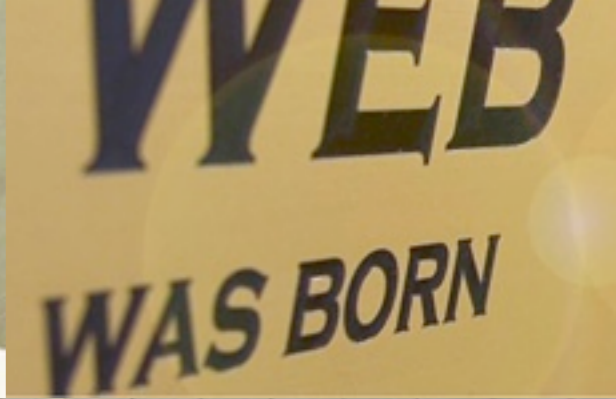
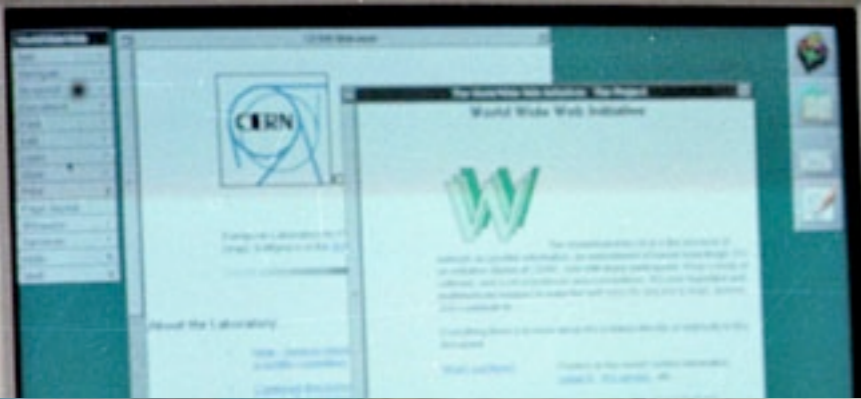
Higgs search



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 if you know

CERN Information A general keyword index to the information available on the WWW. Includes 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

New Page A keyword index to the CERN telephone book by function.

Info 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.

may be of general interest at CERN include

WWW

Core Technology Interest Group) news.

machine, see also the following topics:

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

Paris

Divonne

Gex

FRANCOIS

ALEPH

LEP

SPS

DELPHI

CERN

Meyrin

Annecy

GENEVA

SWITZERLAND

FRAN

Annemasse

St-Julien

La Plaine

0 5 km

Anney (LAPP)

NextStep

PREF

Recycling symbol



# 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 !

Bonjour !

フランス  
FRANCE

Buongiorno.

イタリア  
ITALY

Bun di !



『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



ダ・ヴィンチを元と闇がほみ込む



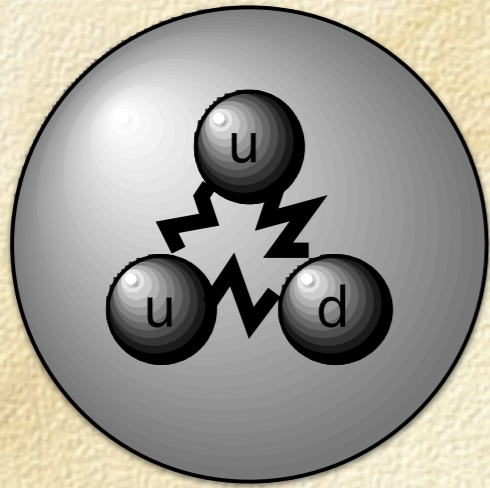


**CERN**

European Organization for Nuclear Research

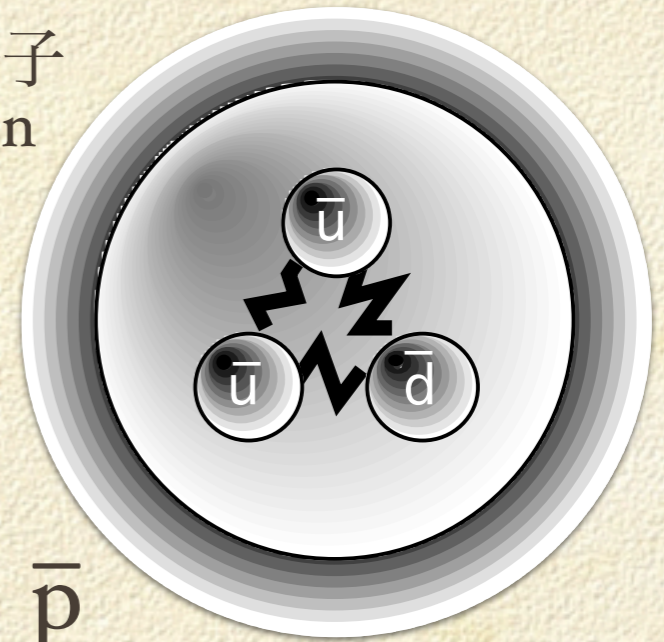
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

陽子  
proton



p

反陽子  
antiproton



p̄

# 粒子 / 反粒子



$e^-$



電子 electron

$e^+$



陽電子 positron

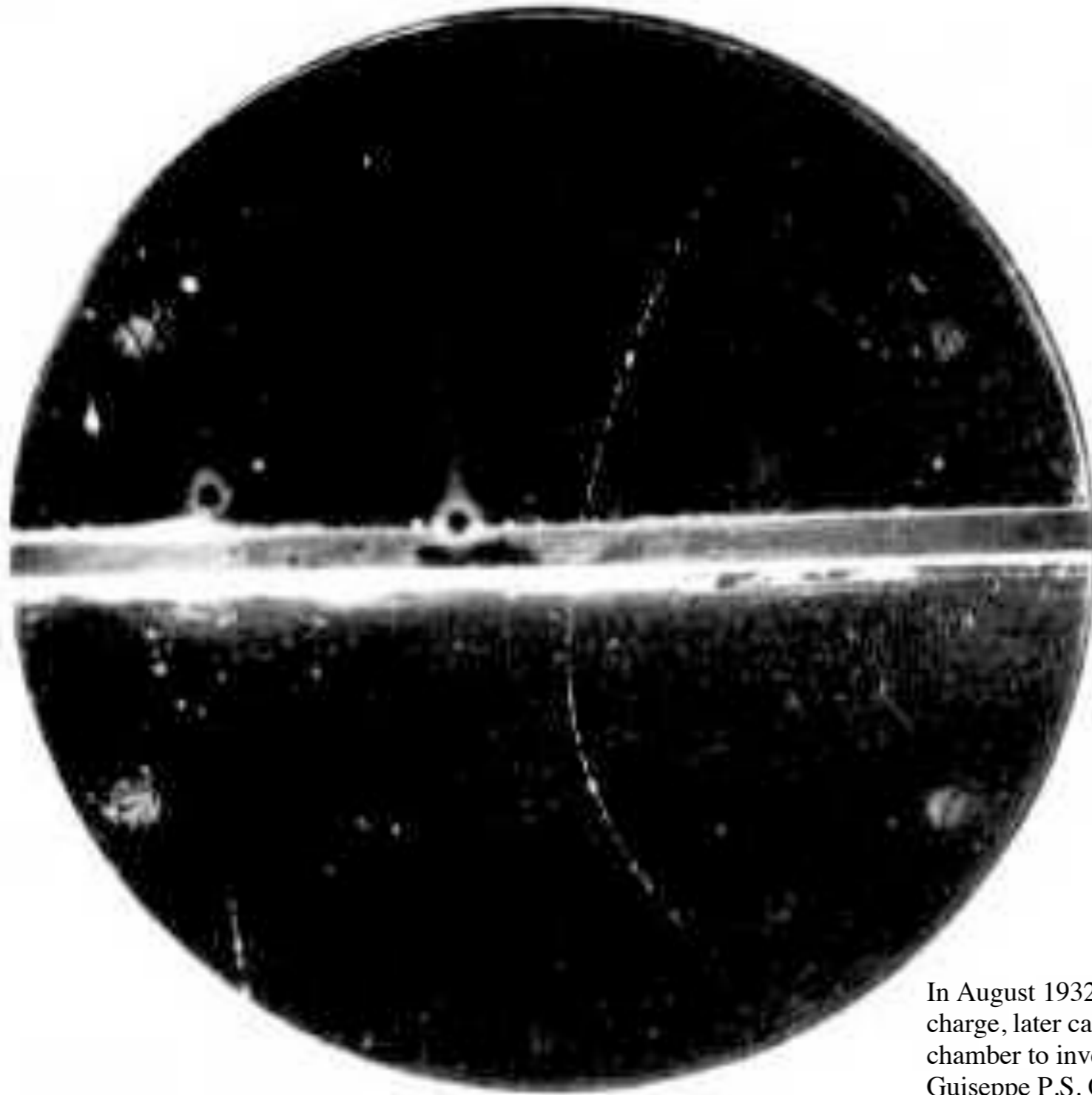
**Paul Dirac**  
(相對論的量子力學)

# 陽電子の発見



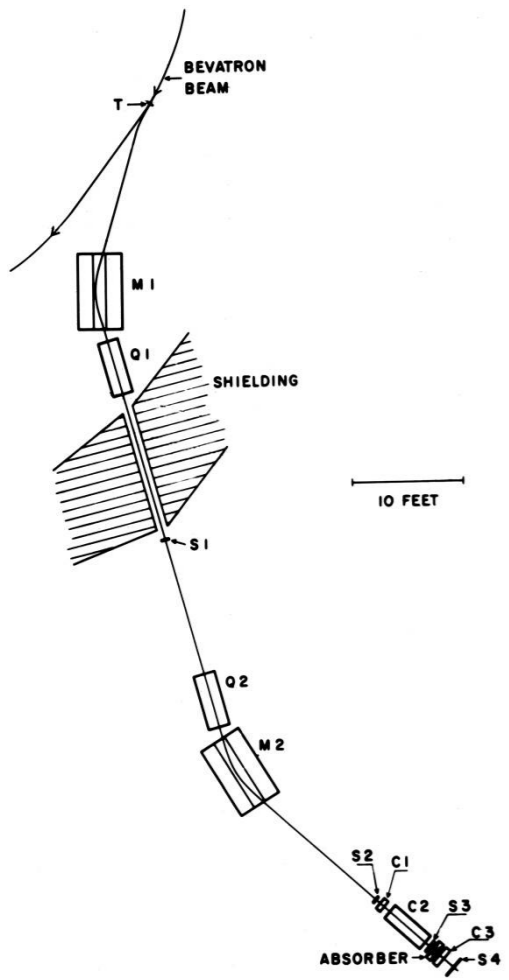
*Anderson's first picture of a positron track (Source: C D Anderson)*

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.

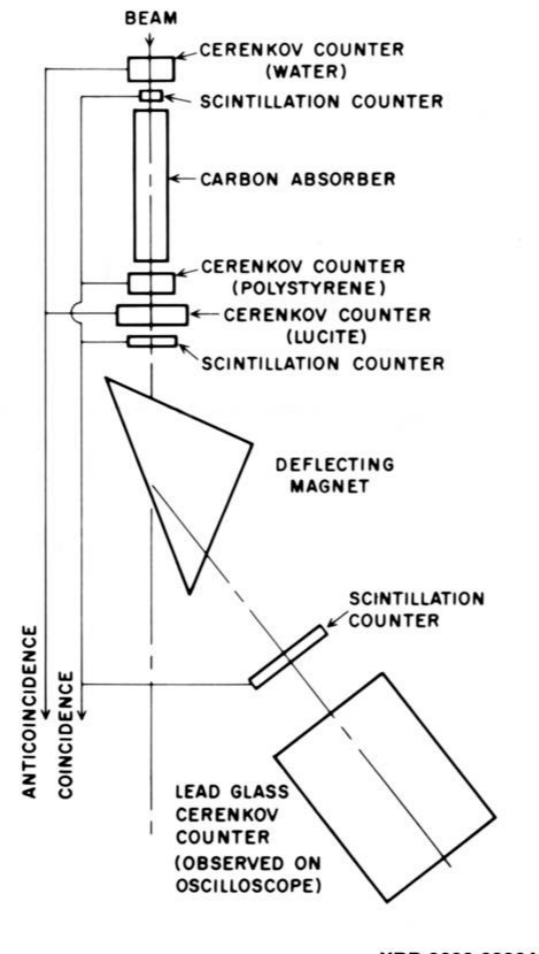


In August 1932, Carl D. Anderson found evidence for an electron with a positive charge, later called the positron. Anderson discovered the positron while using a cloud chamber to investigate cosmic rays. This work was continued by Patrick Blackett and Giuseppe P.S. Occhialini who showed that a positron 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.

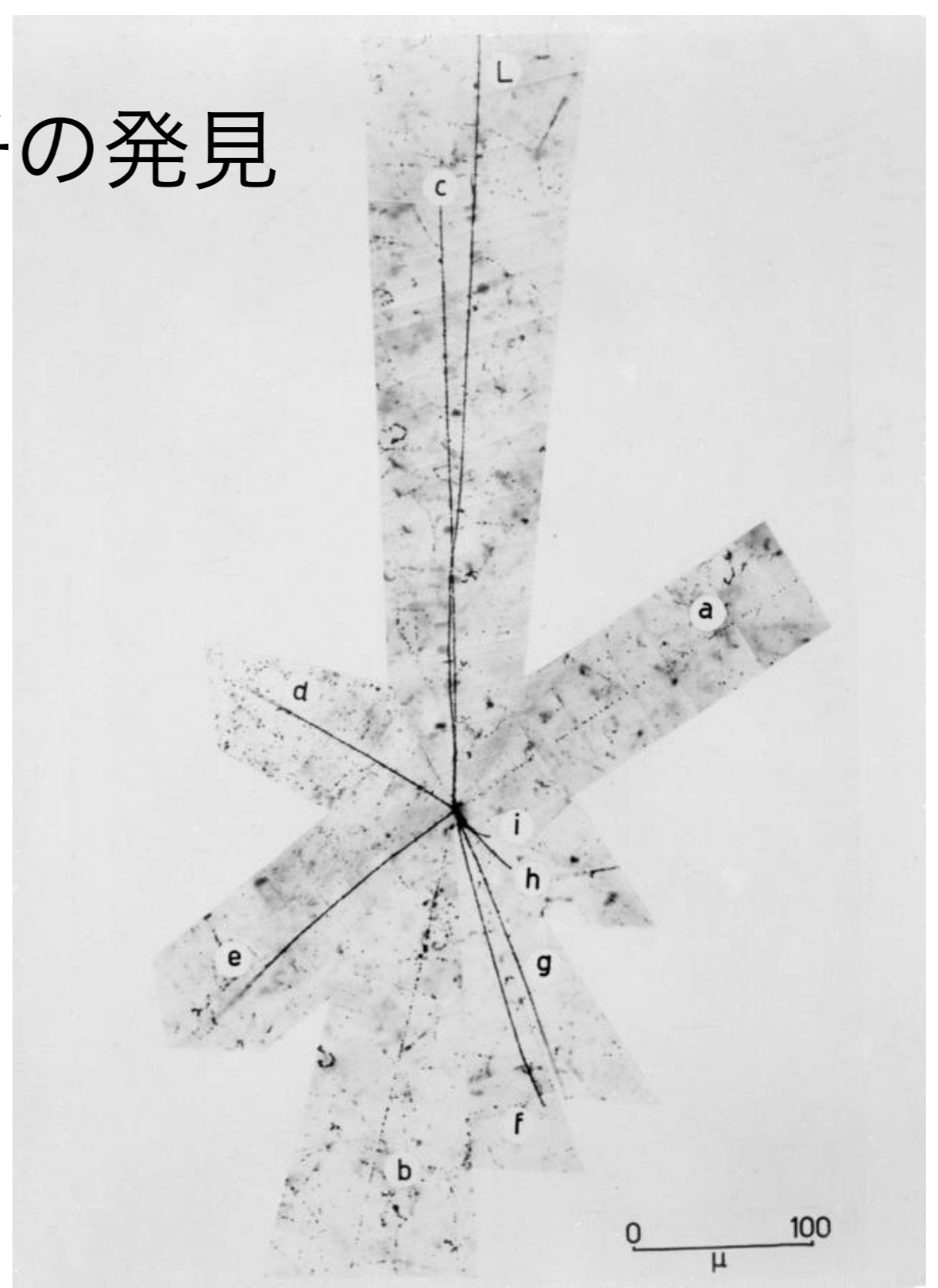
# 反陽子の発見



XBD 9606-02963



XBD 9606-02964



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

組織の”はたらき”を知る

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



放射線医療：診断

$e^+$



陽電子 positron

電子 electron



$e^-$

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

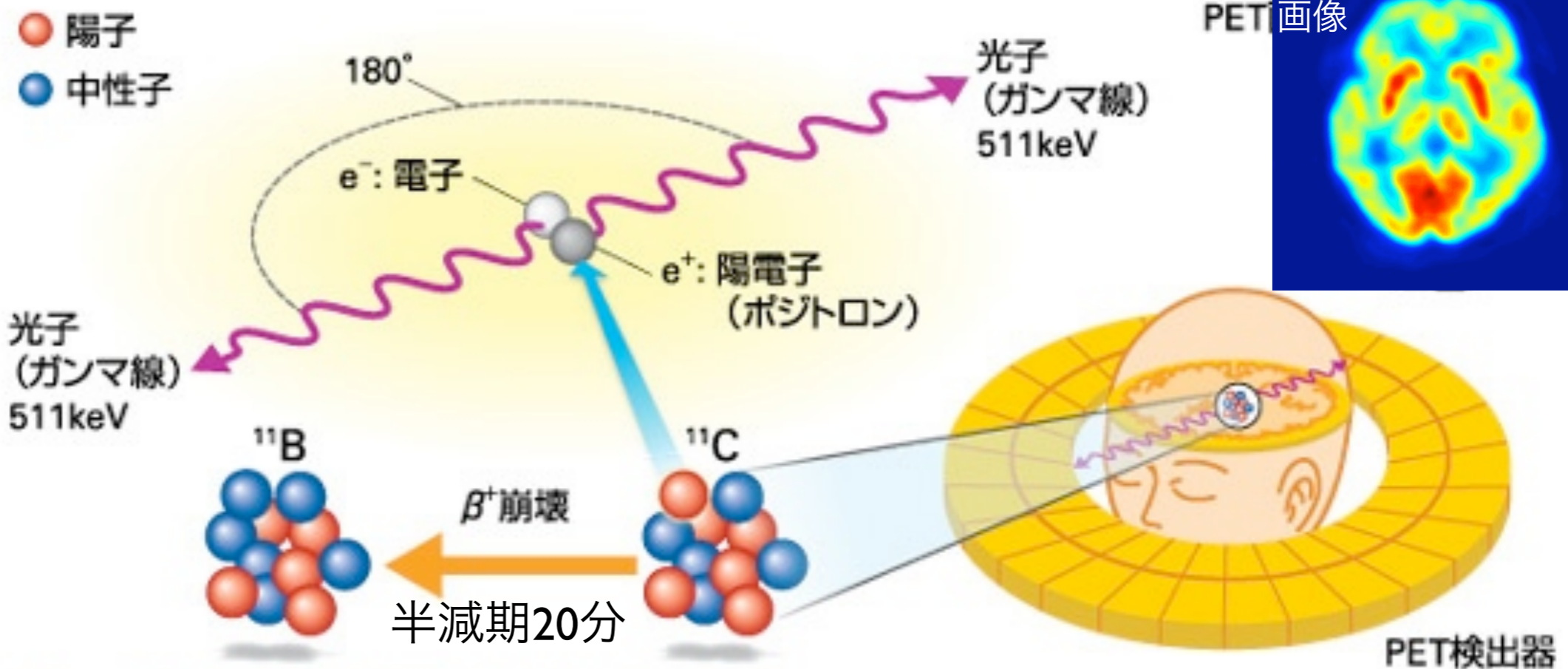


図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

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

# 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



$\beta$  ( $\gamma$ )



$\gamma$

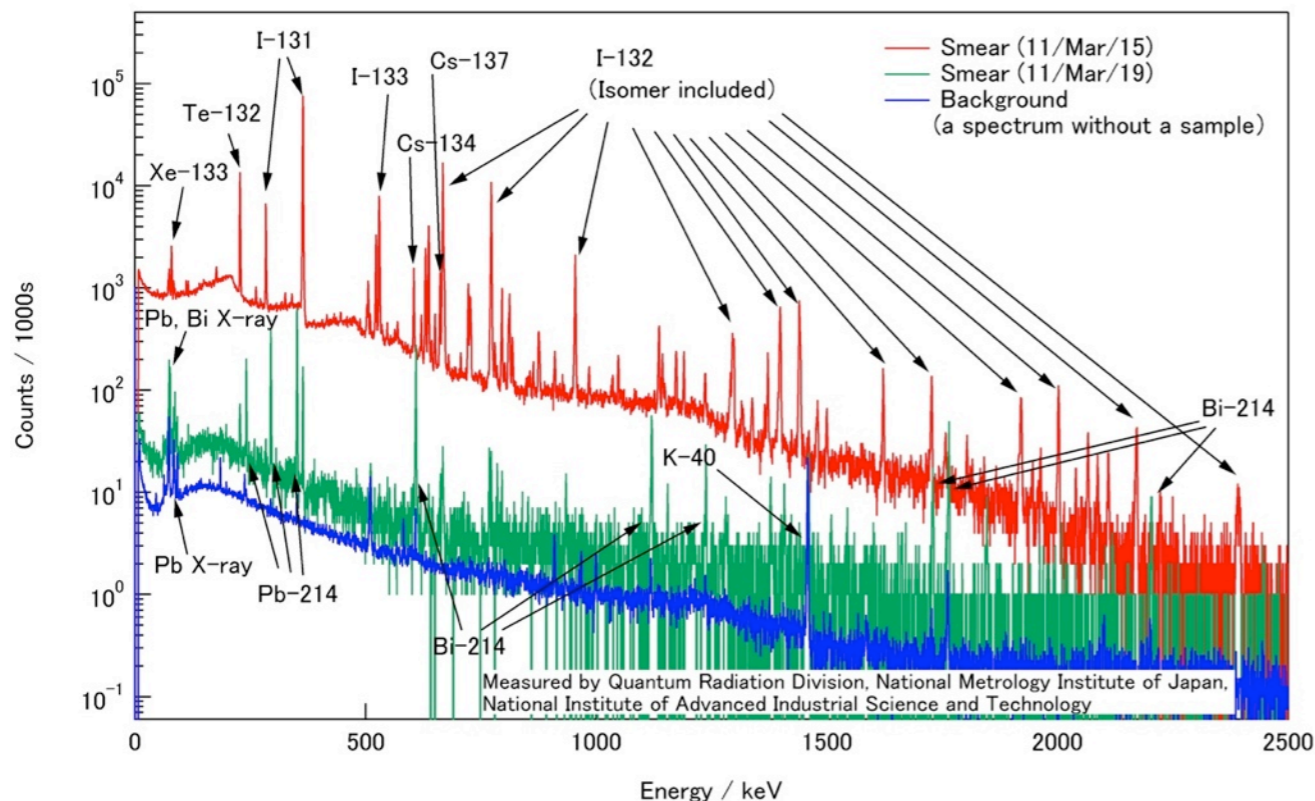
$\gamma$  ゲルマニウム検出器 (Ge detector)

**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)

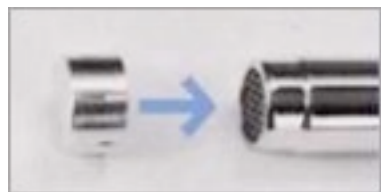


NaI (Tl)



$\beta$  ( $\gamma$ )

【表面汚染検査】



$\gamma$

$\beta$  ( $\gamma$ )



GM管

$\alpha$



ZnS (Ag)

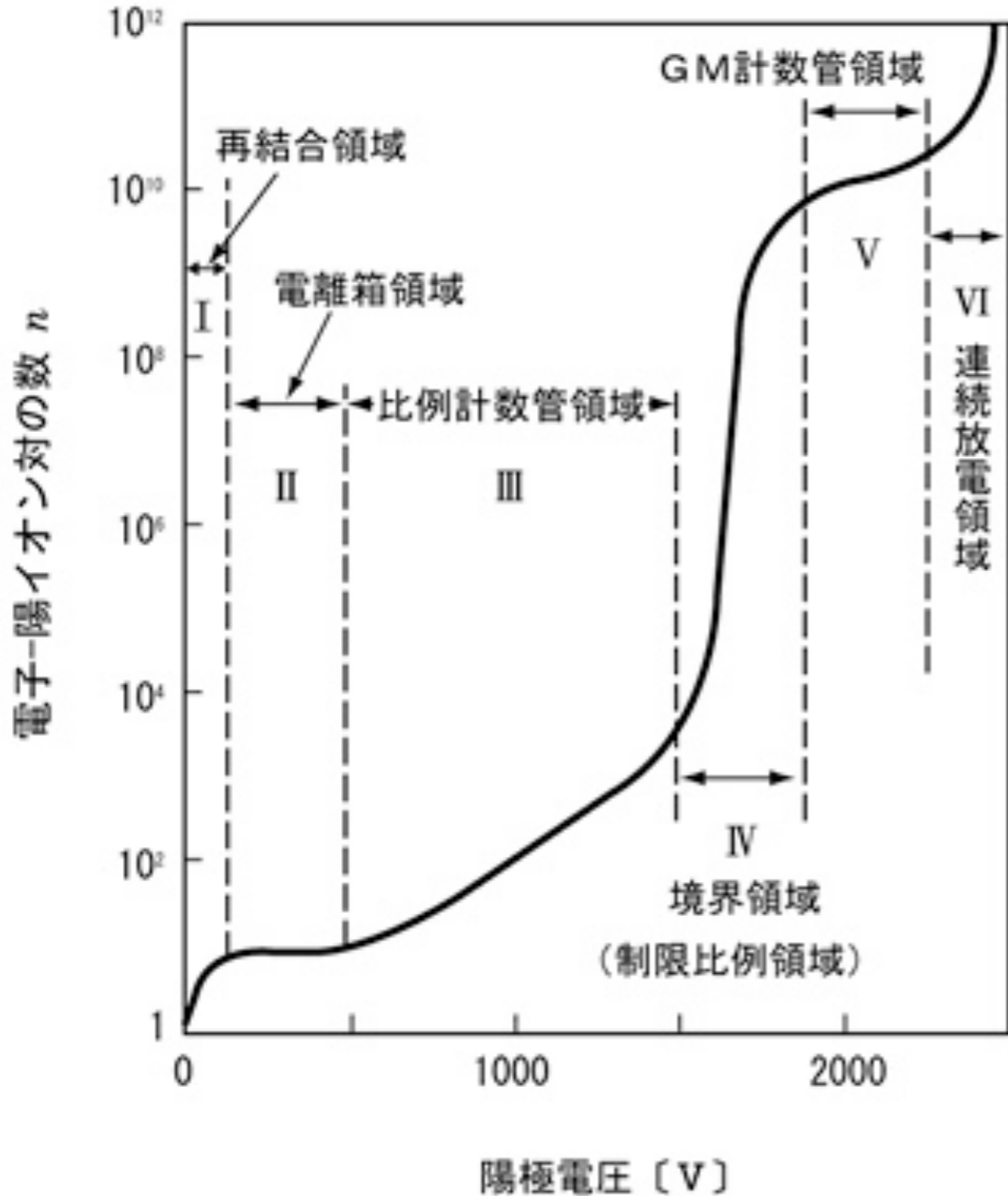




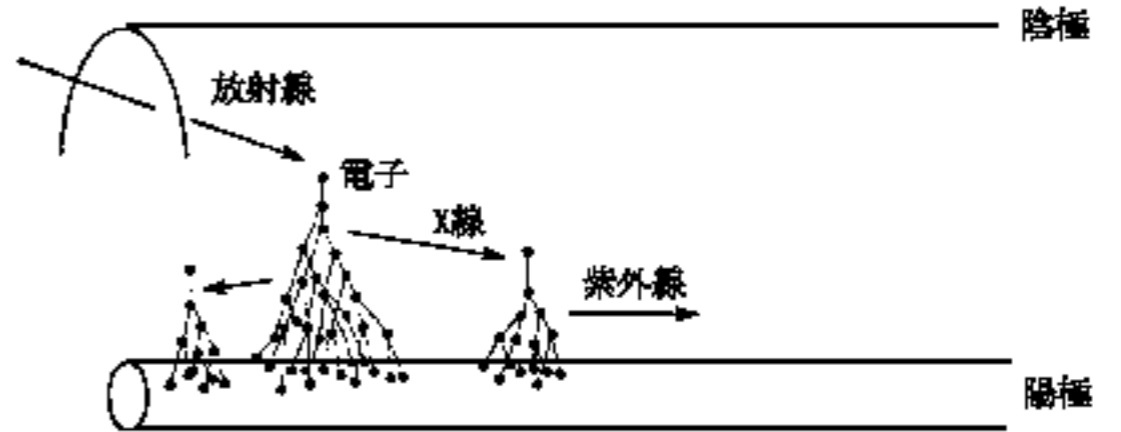
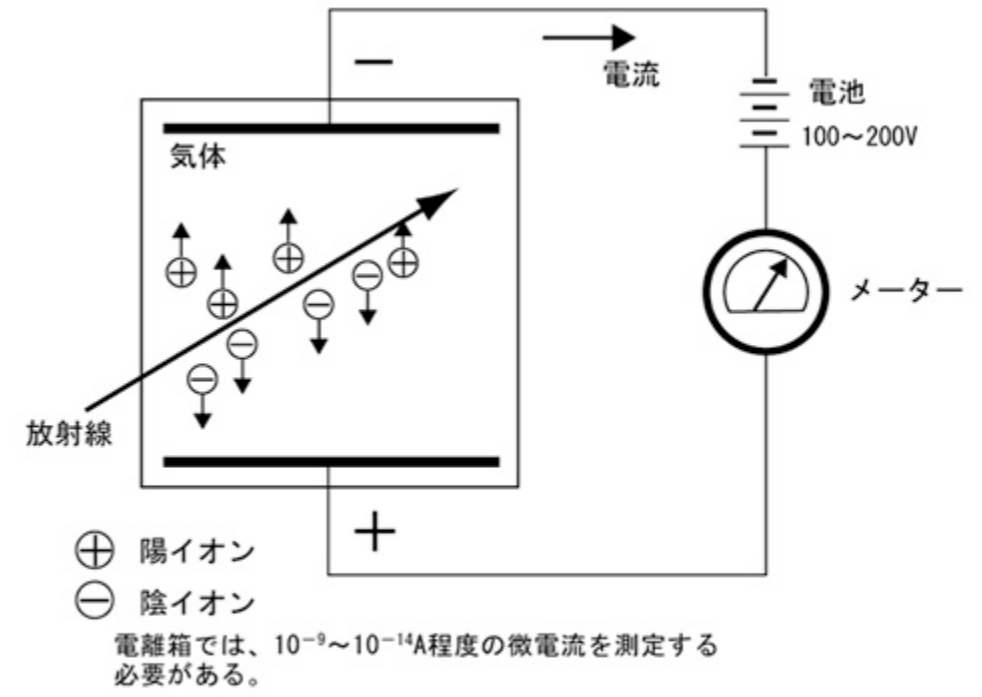
# 気体の電離を利用する放射線計測

## 電離箱, 比例計数管, GM管

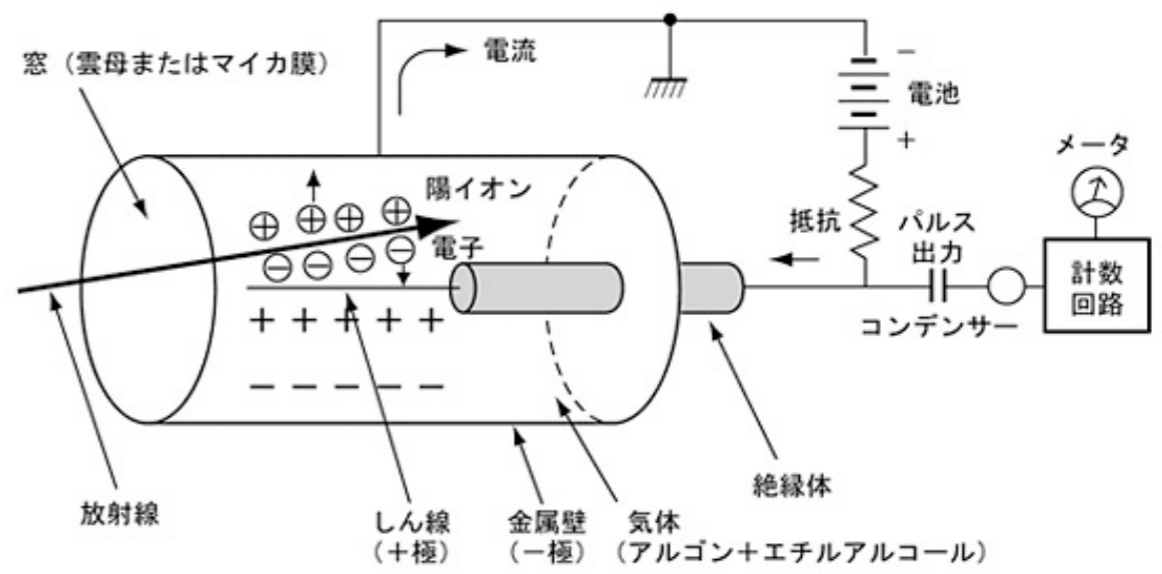
(ガイガー・ミュラー管)



### 電離箱

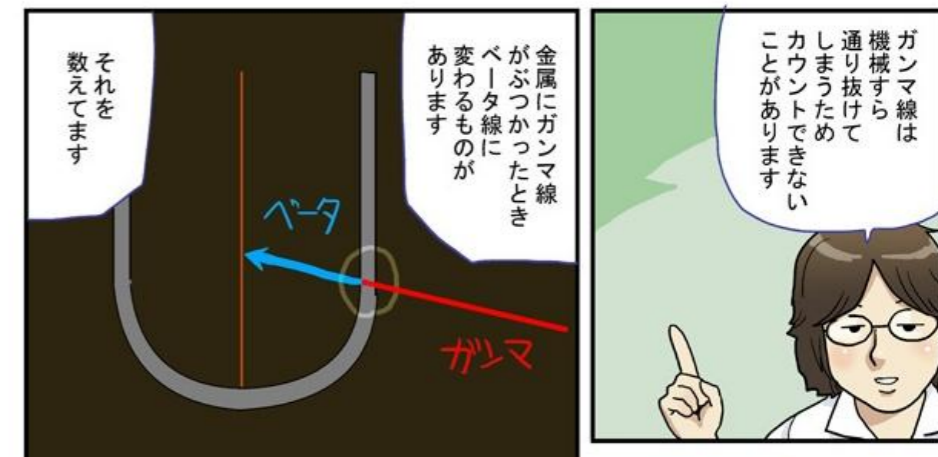
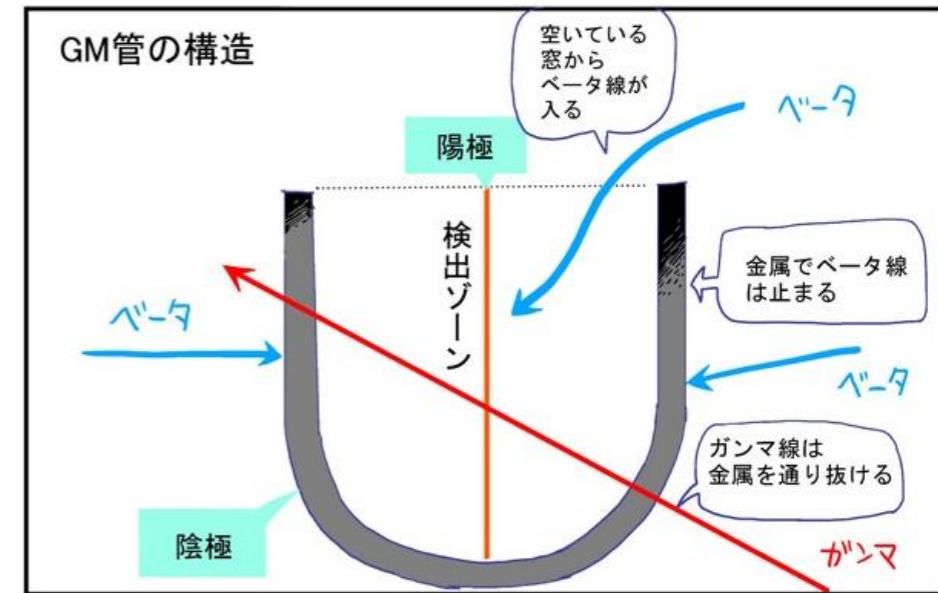


### GM管



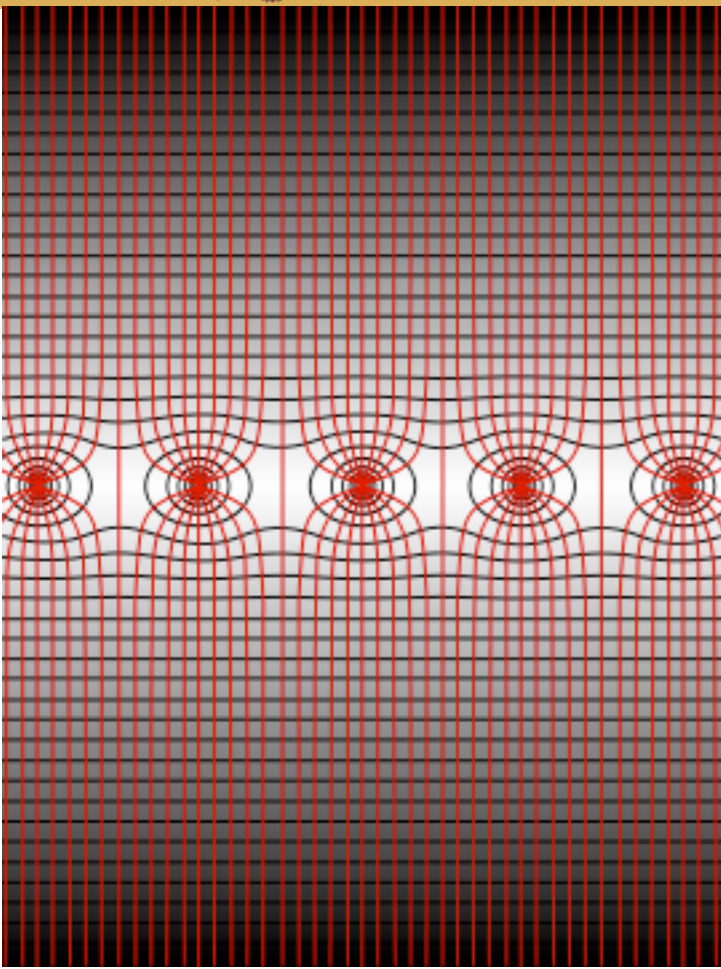
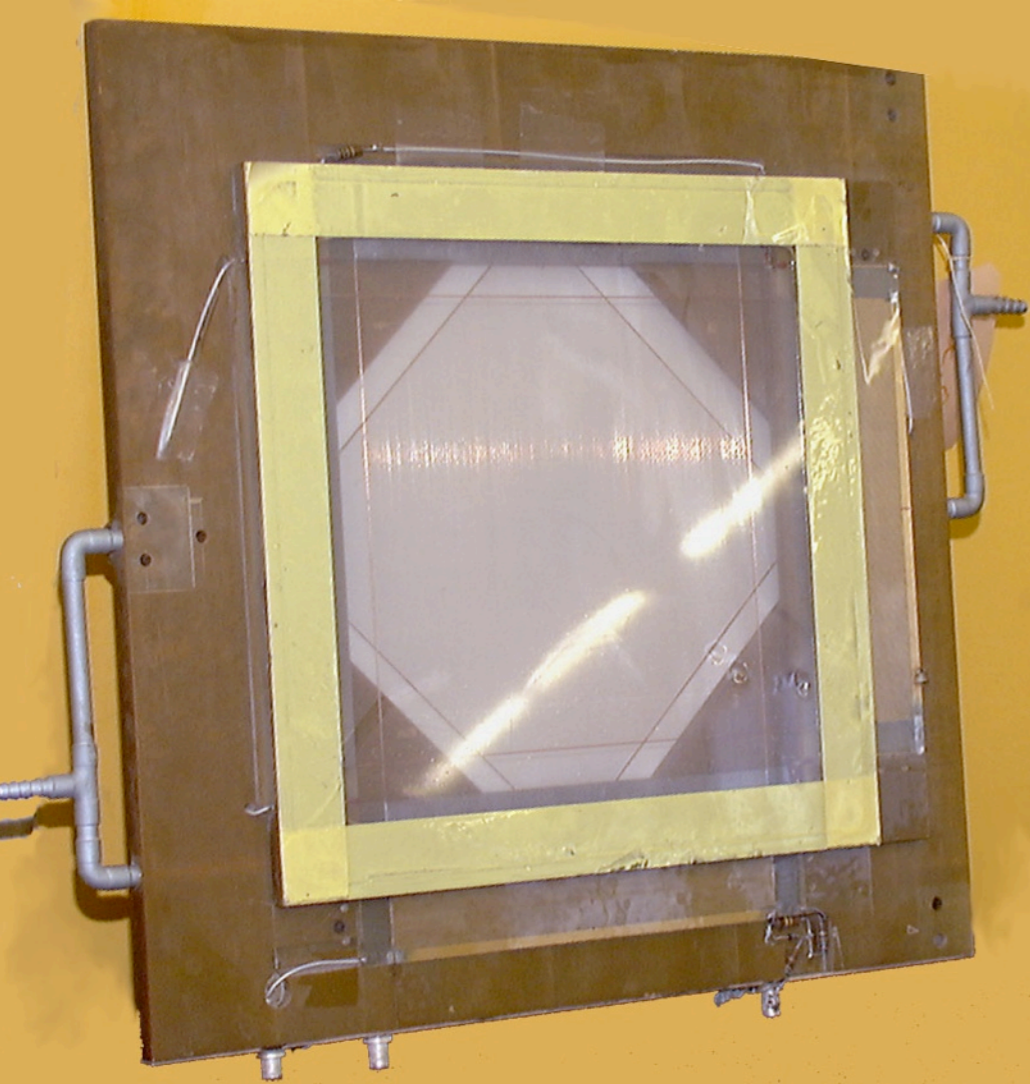
## GM管の検出効率

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



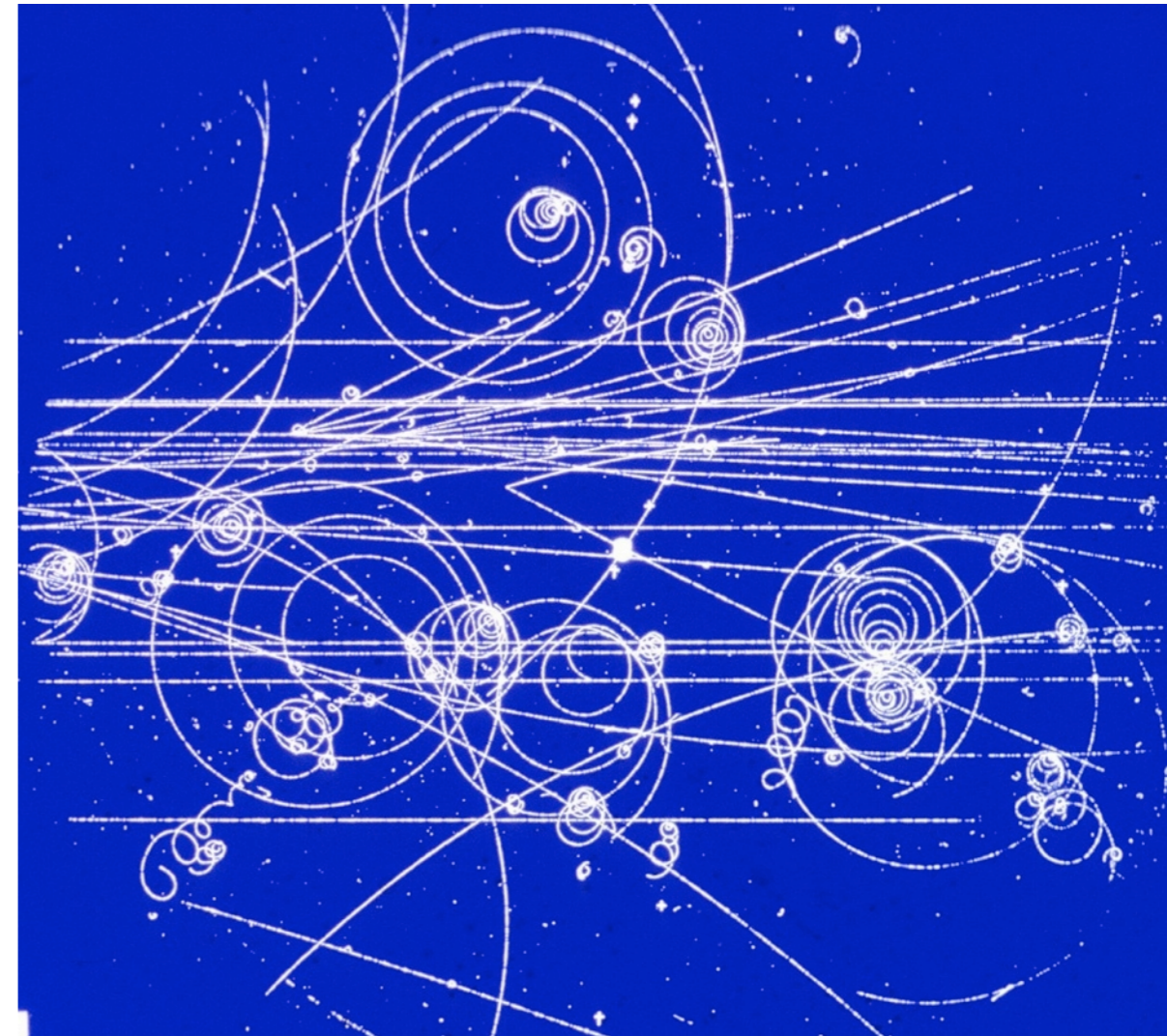
# ワイヤーチェンバー MWPC

Multi-wire proportional chamber



# 泡箱

Bubble chamber



霧箱

Stream chamber



# 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)



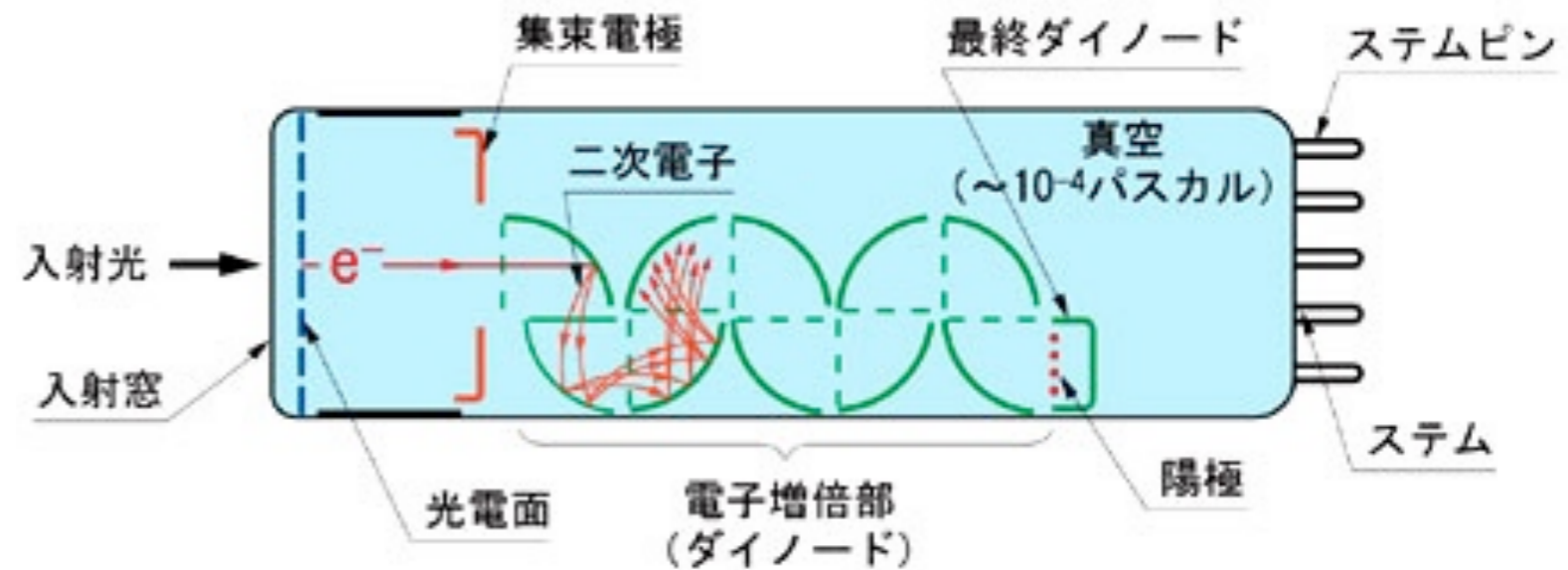
例 : Si(Li) 検出器、Ge 検出器 (高エネルギー分解能) (γ線)

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

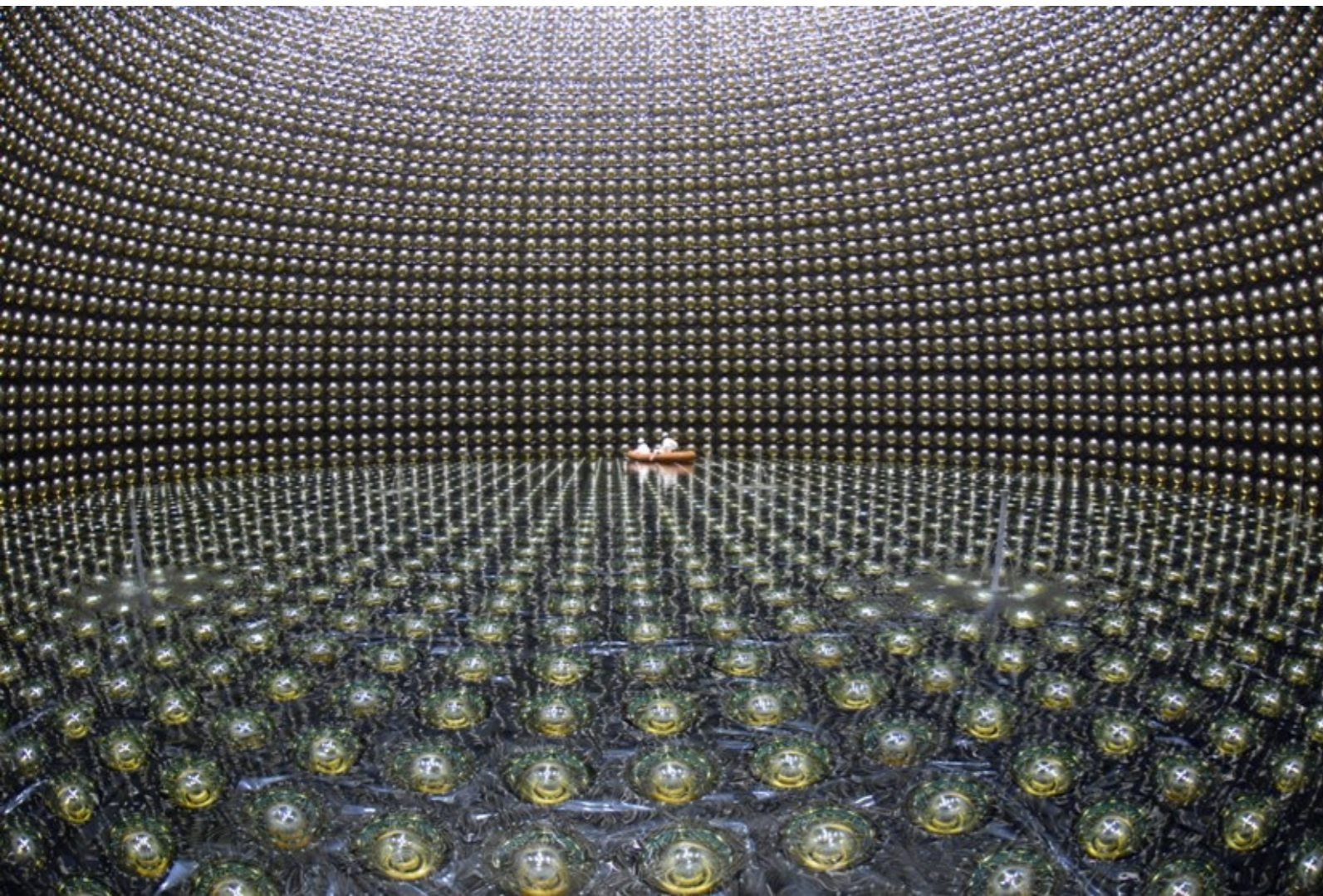
# 光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



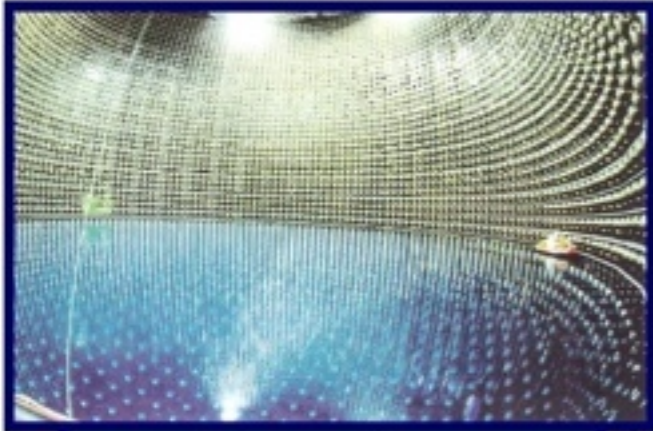
光 ⇒ 光電効果 ⇒ 電子増幅  
⇒ 電流

シンチレータとの組み合わせ  
Scintillator

放射線 ⇒ 分子の励起 ⇒ 蛍光  
光 ⇒ 光電子増倍管



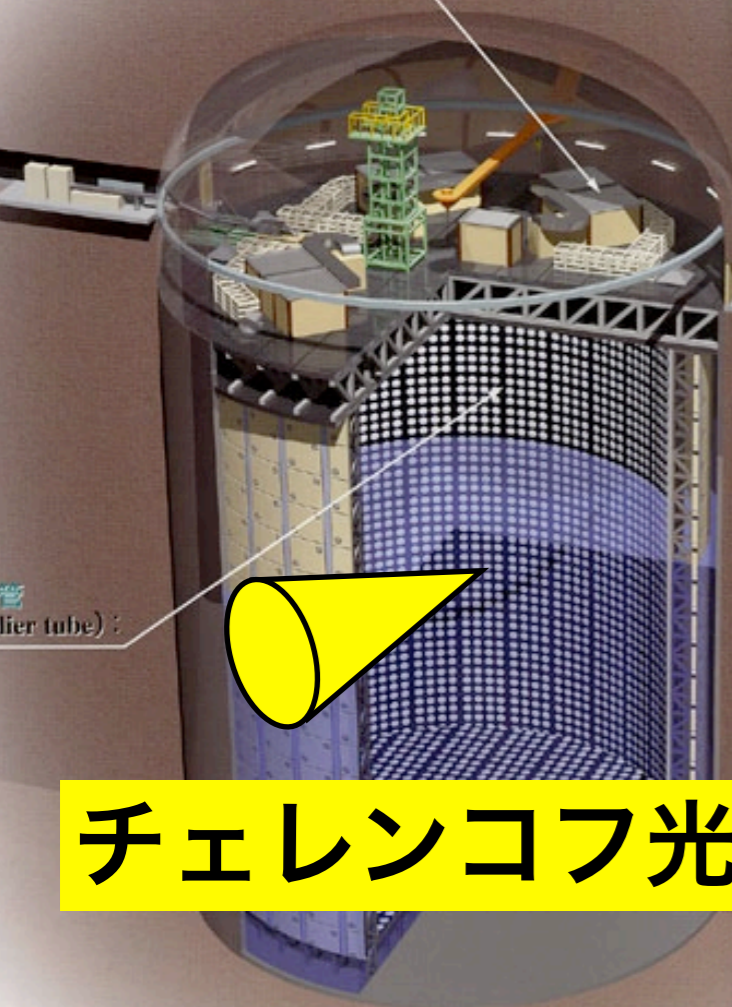
# Super-Kamiokande



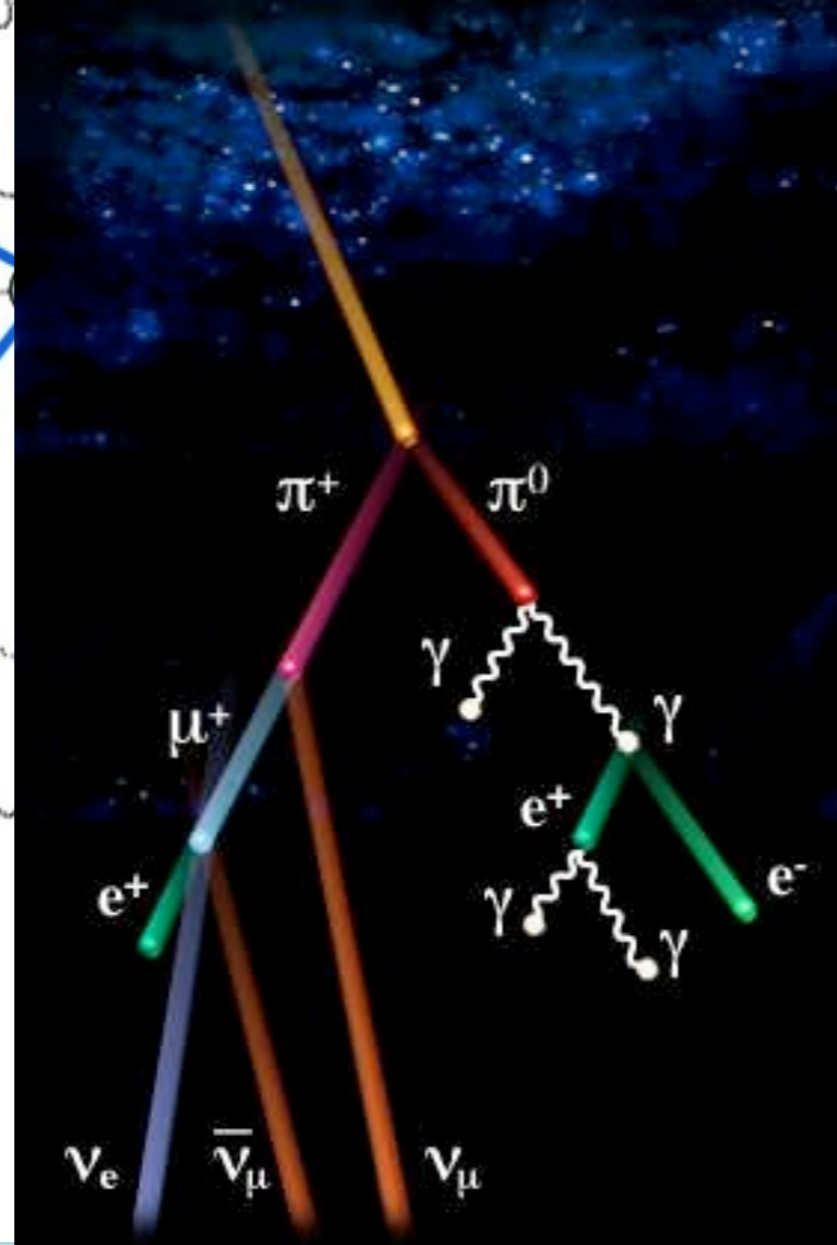
スーパー  
カミオカンデ



●エレクトロニクスハット  
(Electronics hut):



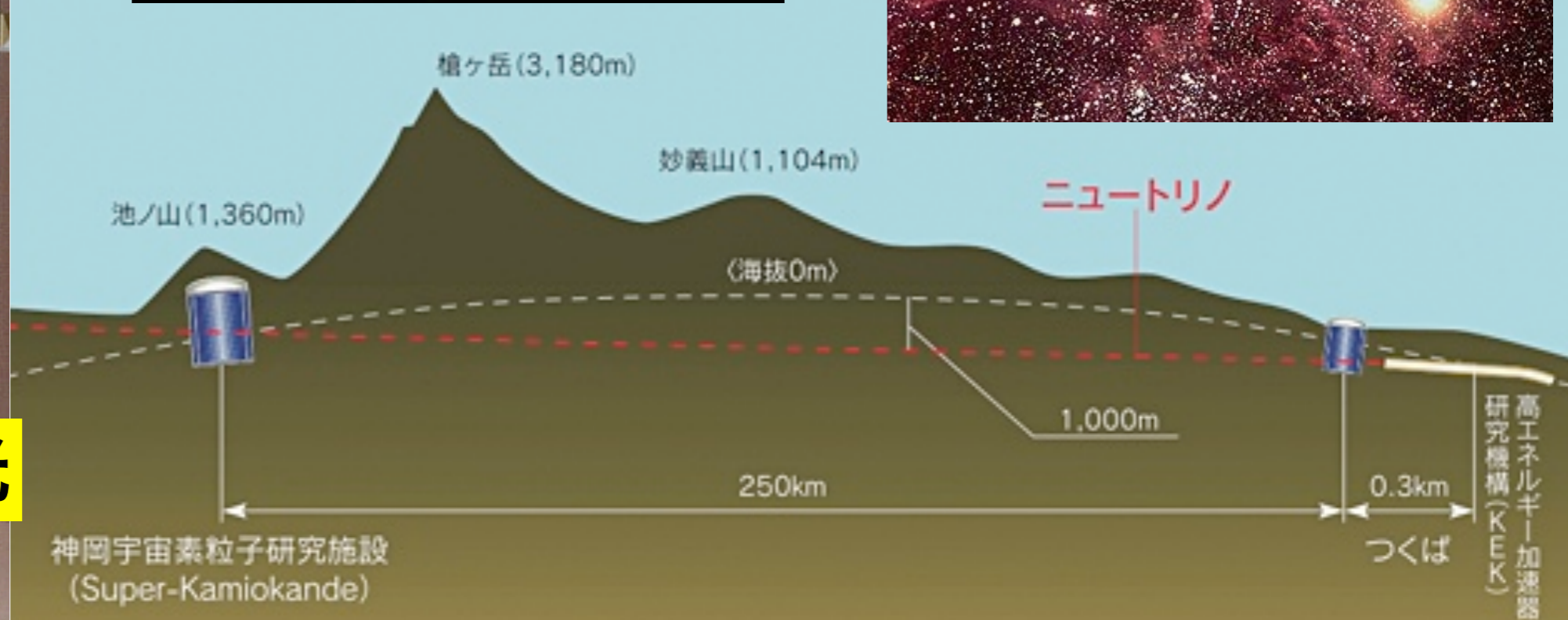
チェレンコフ光



# 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)

フリッケ線量計 Fricke dosimeter

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

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

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

電子・正孔が格子欠陥に捕えられる

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

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

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

ガラス線量計: コバルトガラス  $\rightarrow$  発光中心 (着色)

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

ポケット線量計: 電離箱、半導体検出器

フィルムバッジ: 銀塩写真フィルム AgBr

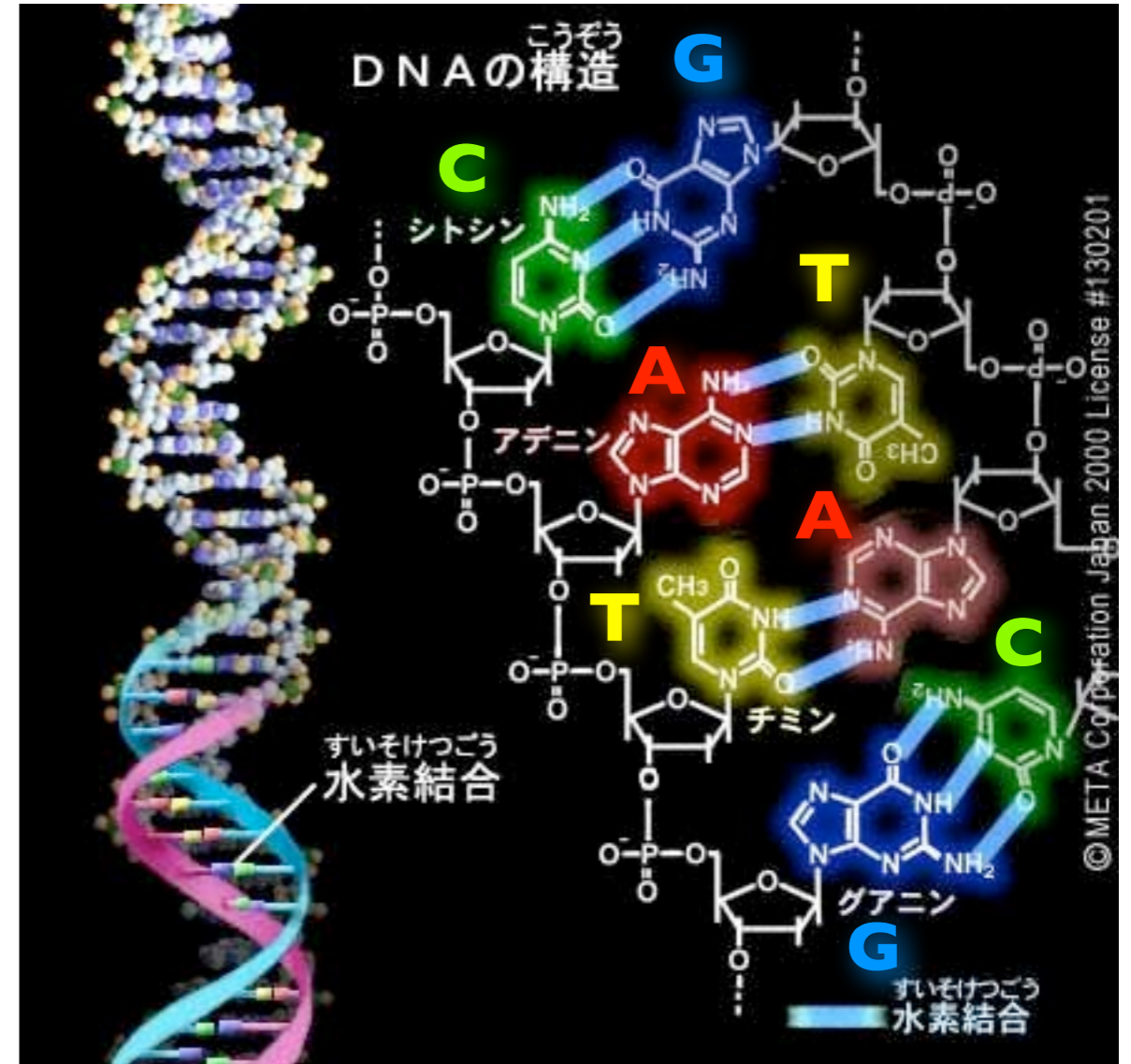
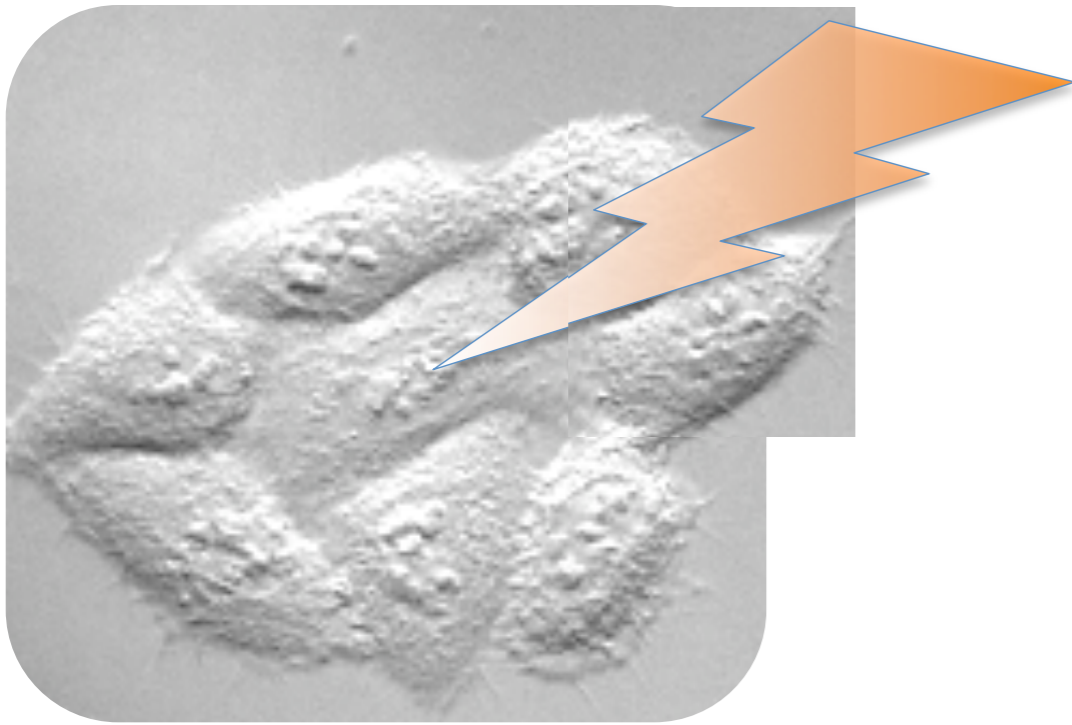


# 原発事故の影響

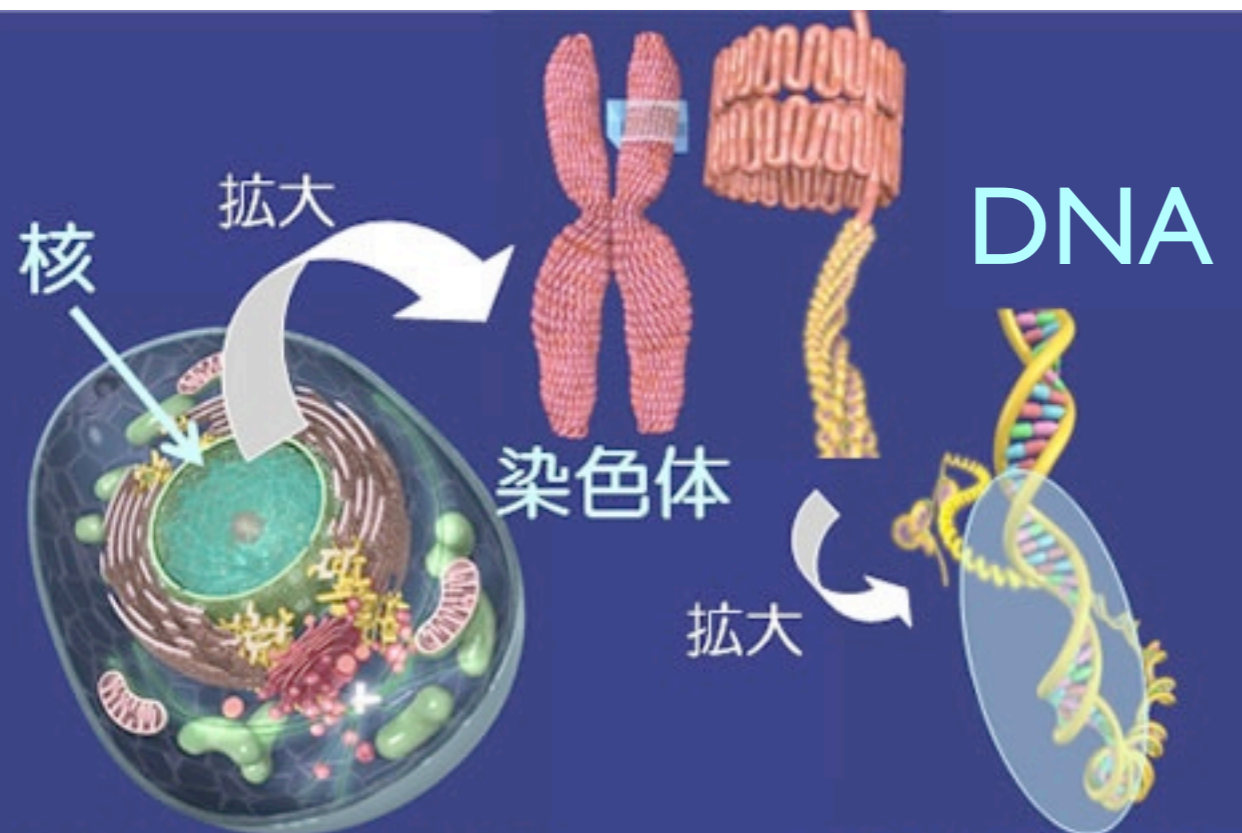
チェルノブイリとの比較

# 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/>



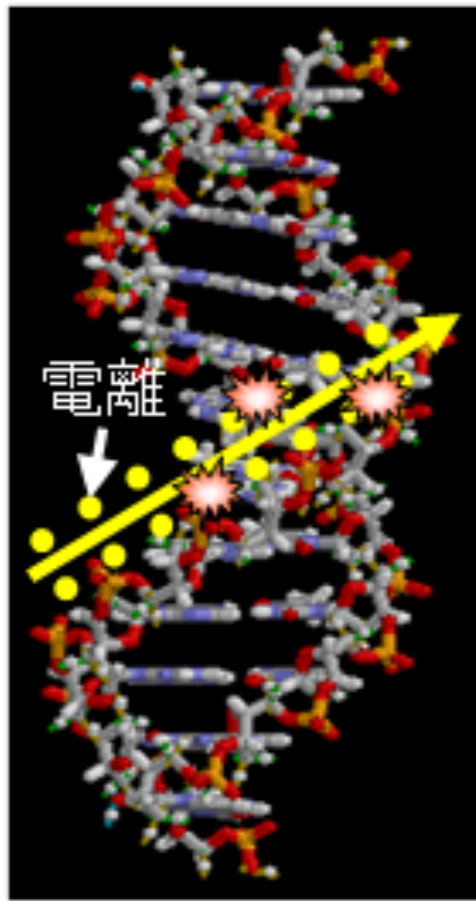
細胞(60兆個)

一部が遺伝子

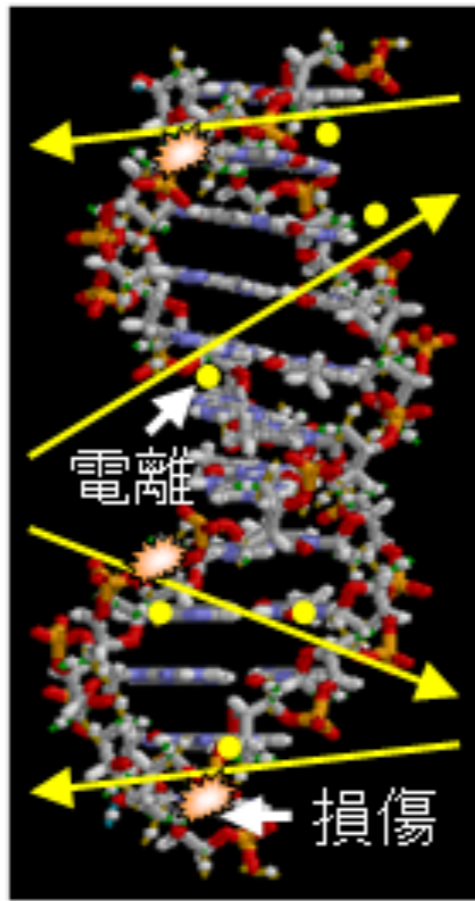
図1 核、染色体、遺伝子

# 放射線による DNA 損傷

**ラジカル  
(活性酸素)**



重イオン



電子

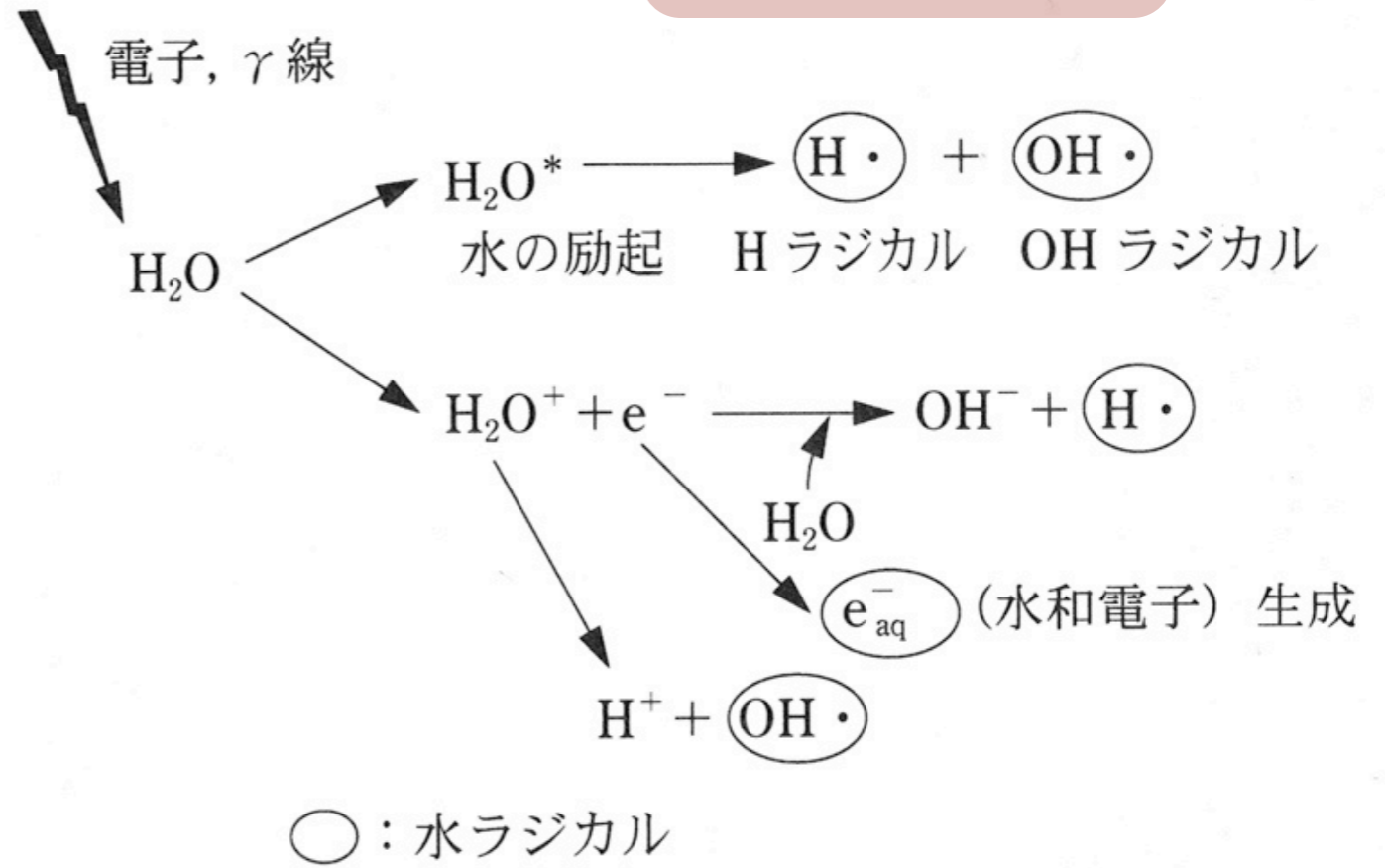
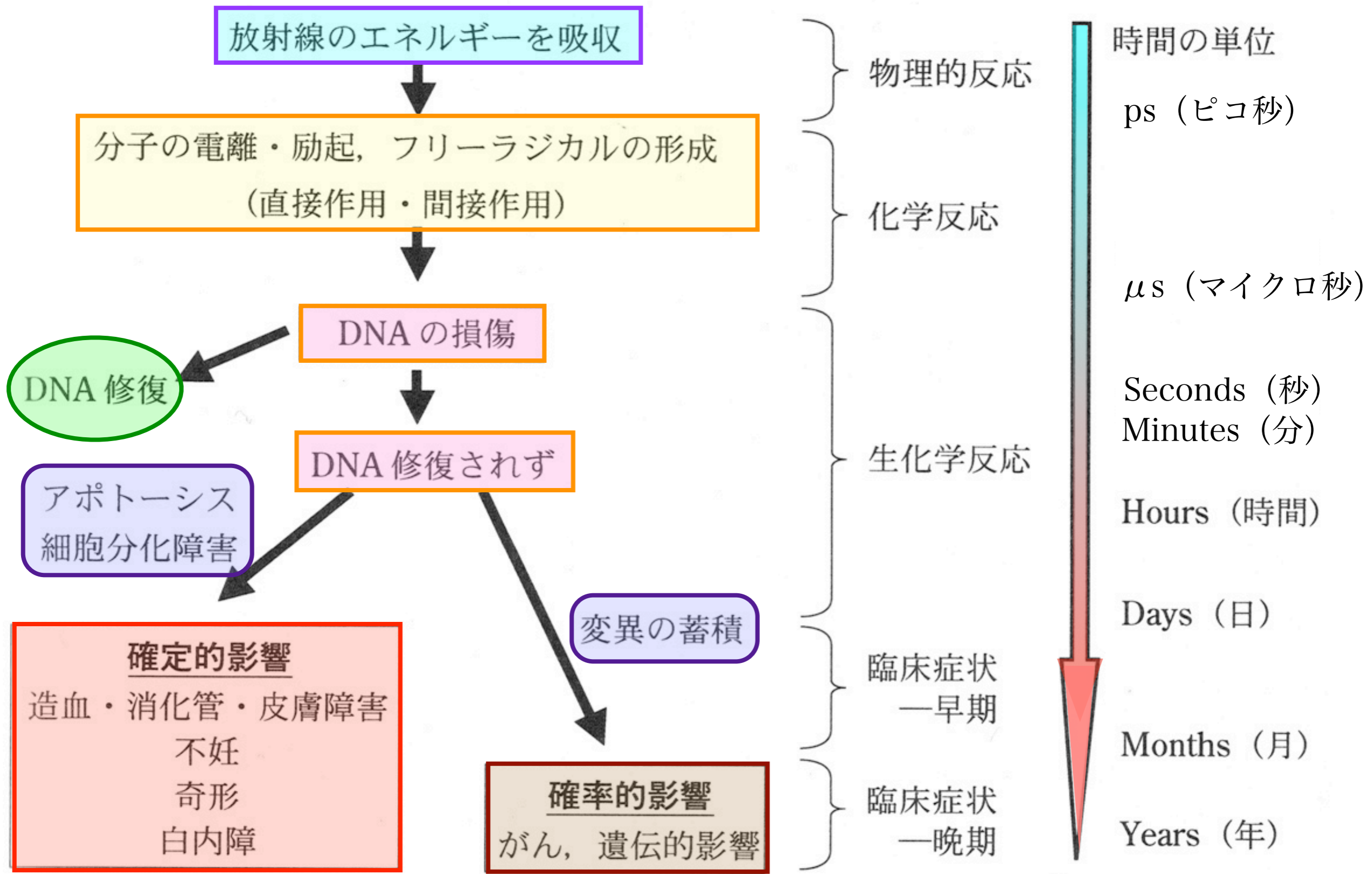


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

## LET : 線エネルギー付与

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

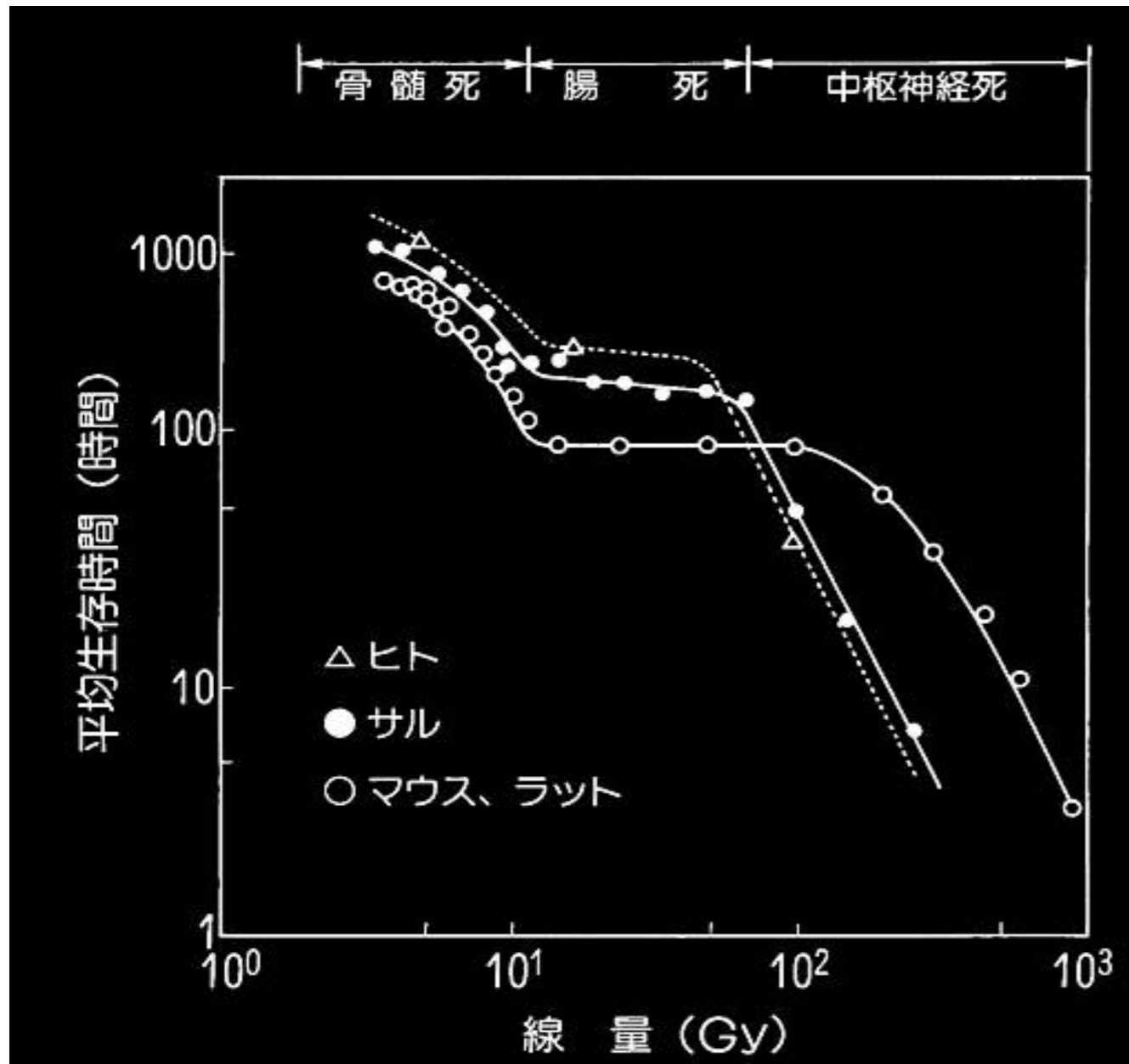
と間接作用 : 水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用  
**低 LET 放射線**  
 $\beta$ 線,  $\gamma$ 線



放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

# 急性放射線障害

## 全身被曝による死亡



骨髓死 4 Gy

腸管死 10 Gy

中枢神経死 20 – 100 Gy以上

東海村 JCO 事故

チェルノブイリの消防隊員

原爆

# 確定的影響の閾値

組織及び影響	しきい値 (1回照射、ミリシーベルト)
骨髄 造血能低下)	500
悪心・嘔吐	1000
精巣 一時的な不妊 精子の一時的減少) 永久不妊	150 3500—6000
卵巣 不妊	2500—6000
水晶体 検知可能な白濁 視力障害 白内障)	500—2000 5000
胎児 奇形 重度精神発達遅滞	100 120—200

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。

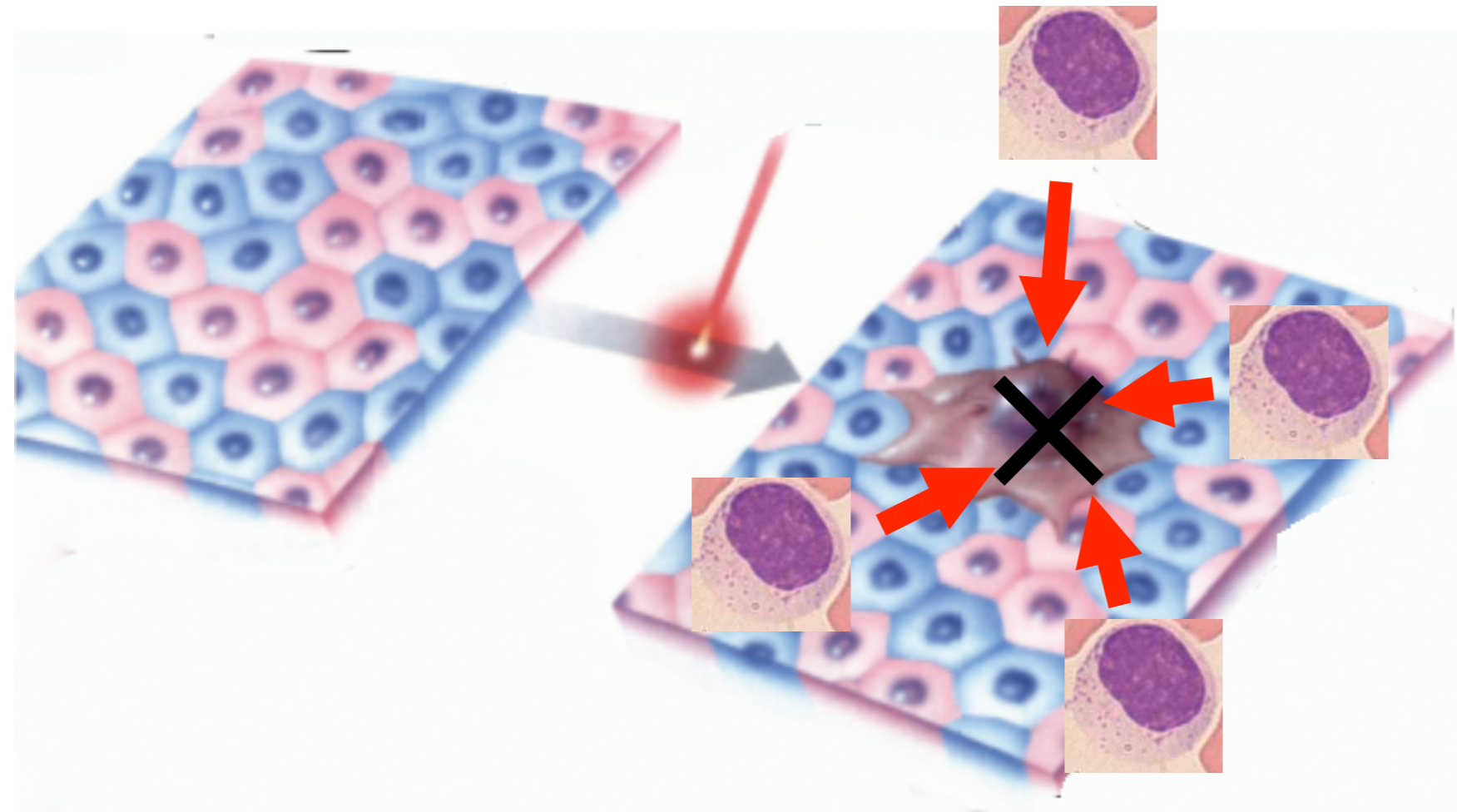
(日本人の3人に1人はがんで死亡する。)

**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？

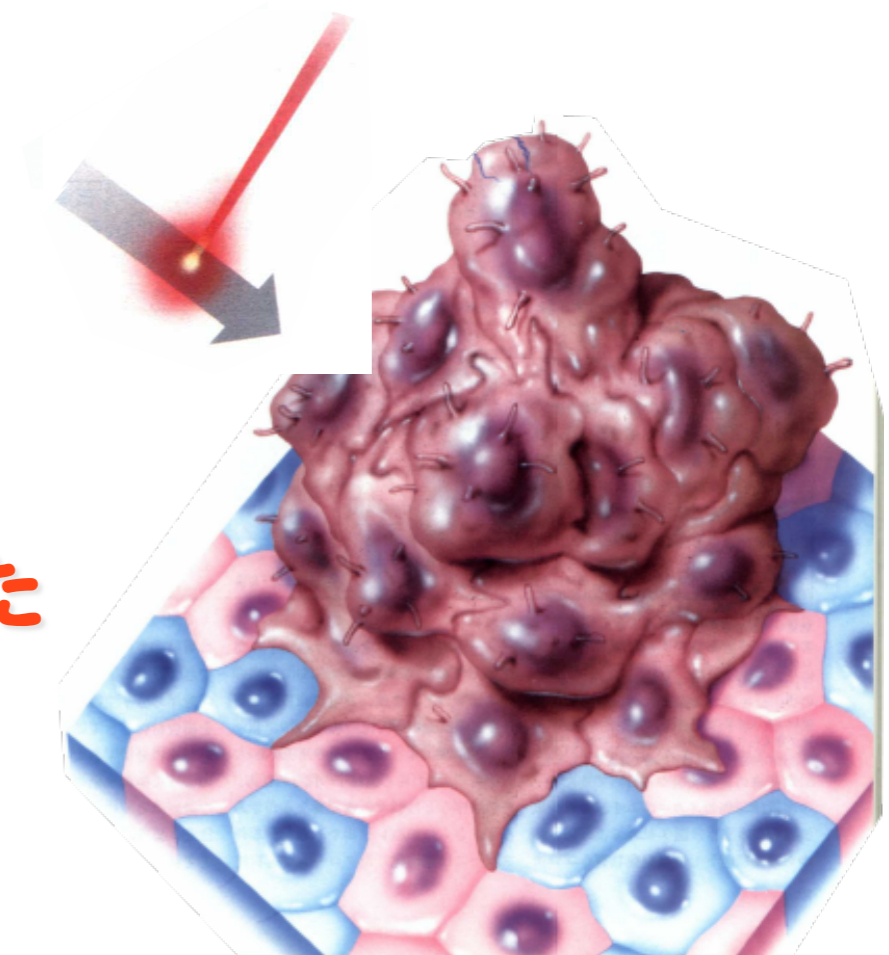
がん細胞は毎日5000個もできている！！



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」



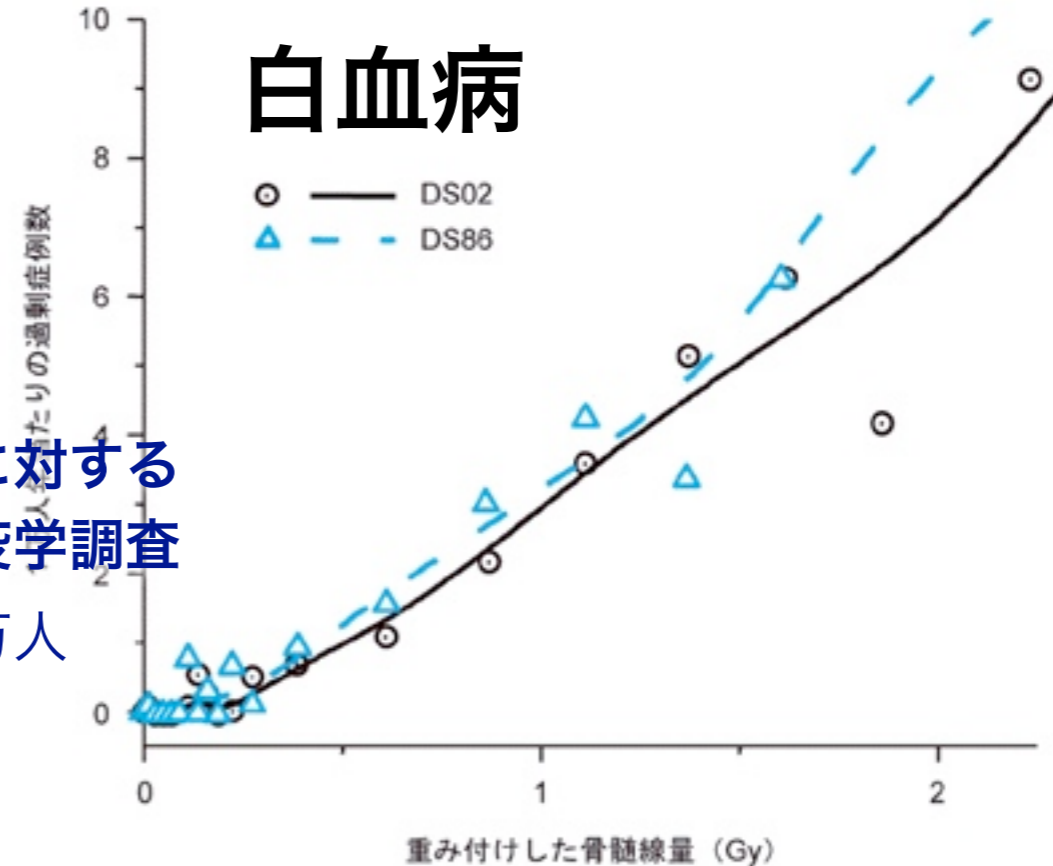
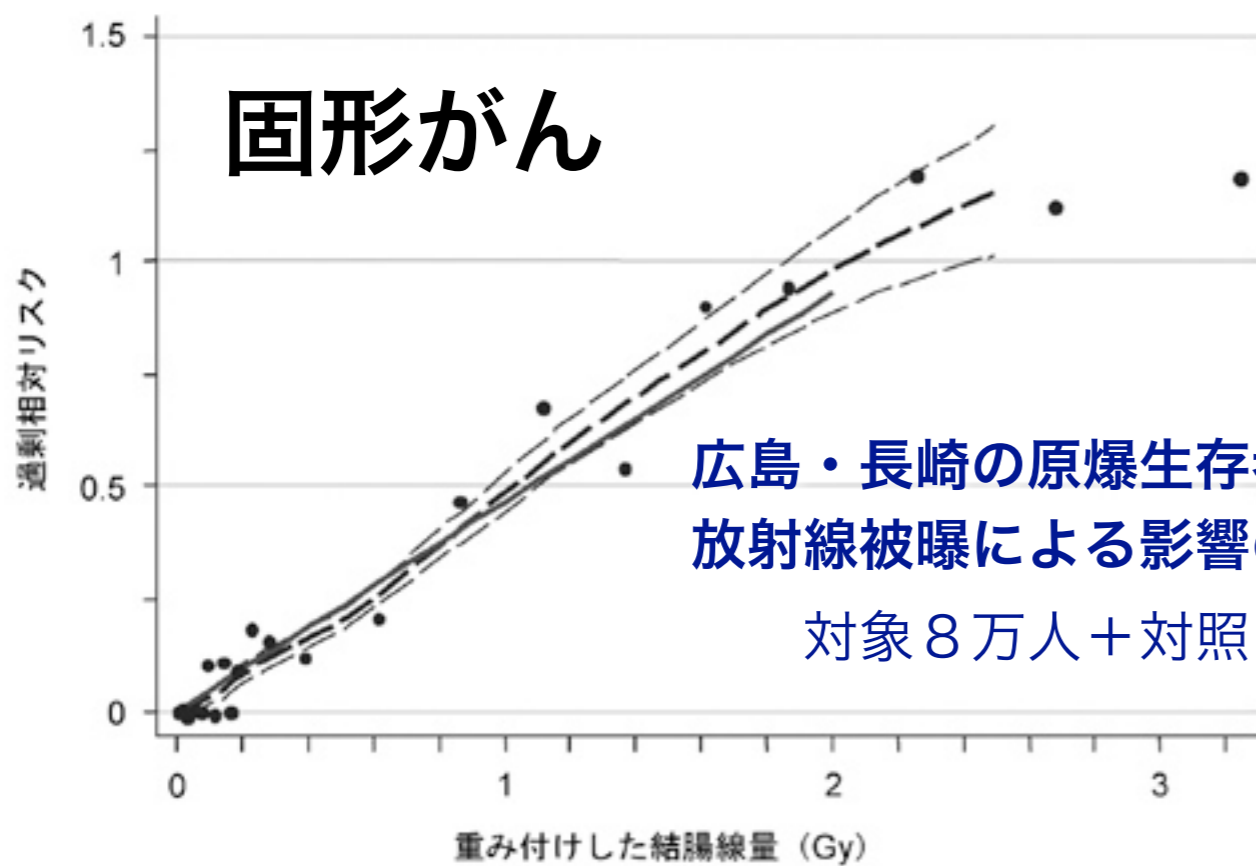


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

図. DS02とDS86による白血病のノンパラメトリックな線量反応、1950-2000年。被爆時年齢20-39歳の人の1970年における男女平均リスク。

表. LSS集団における固形がん発生のリスク (線量別)、1958-1998年

重み付けした結腸線量 (Gy)	対象者数	がん		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	27,789	4,406	81	1.8%
0.1 - 0.2	5,527	946	75	7.6%
0.2 - 0.5	5,935	1,144	179	15.7%
0.5 - 1.0	3,173	688	206	29.5%
1.0 - 2.0	1,647	460	196	44.2%
>2.0	564	185	111	61.0%
合計	44,635	7,851	848	10.7%

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

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

(財) 放射線影響研究所 データ

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

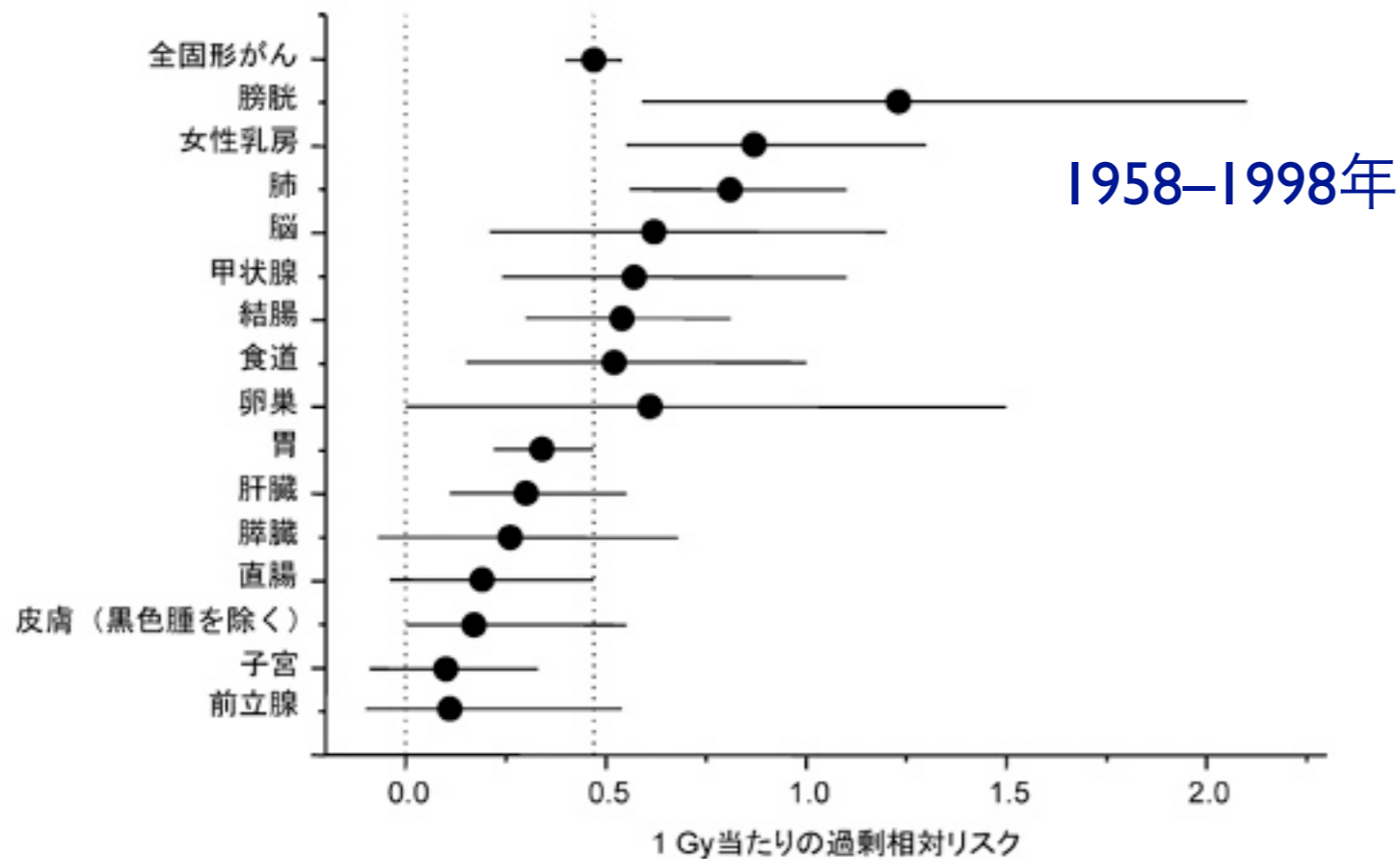


図1. LSS集団における被曝時年齢30歳（男女平均）の人が、70歳に達した時の1 Gy 当たりの部位別がん発生率の過剰相対リスク。横線は90%信頼区間を示す。

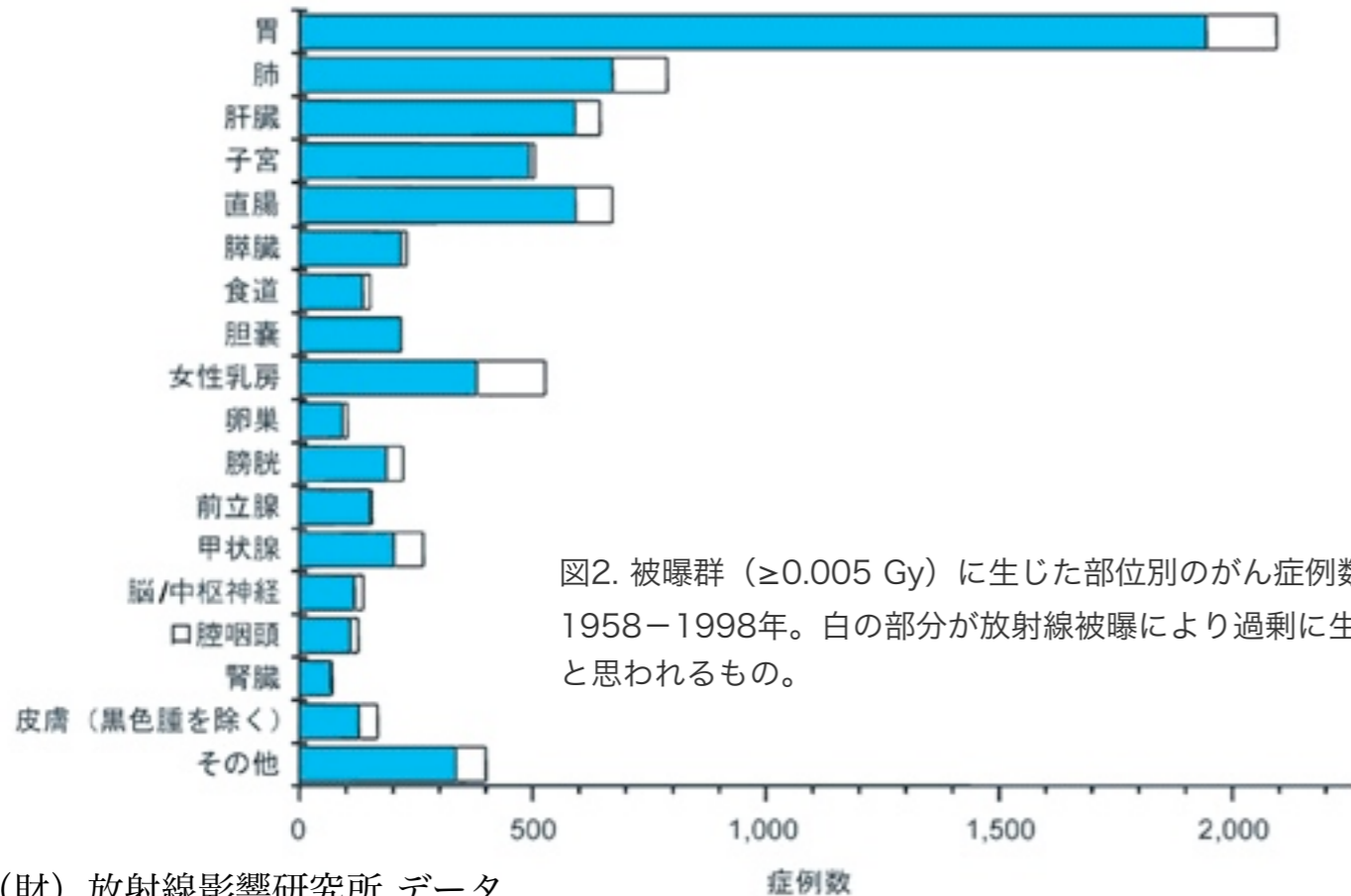
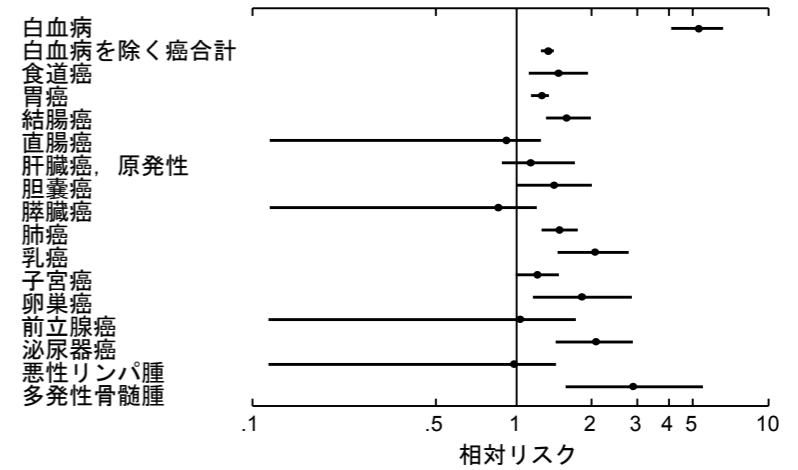


図2. 被曝群 (≥0.005 Gy) に生じた部位別のがん症例数、1958-1998年。白の部分が放射線被曝により過剰に生じたと思われるもの。

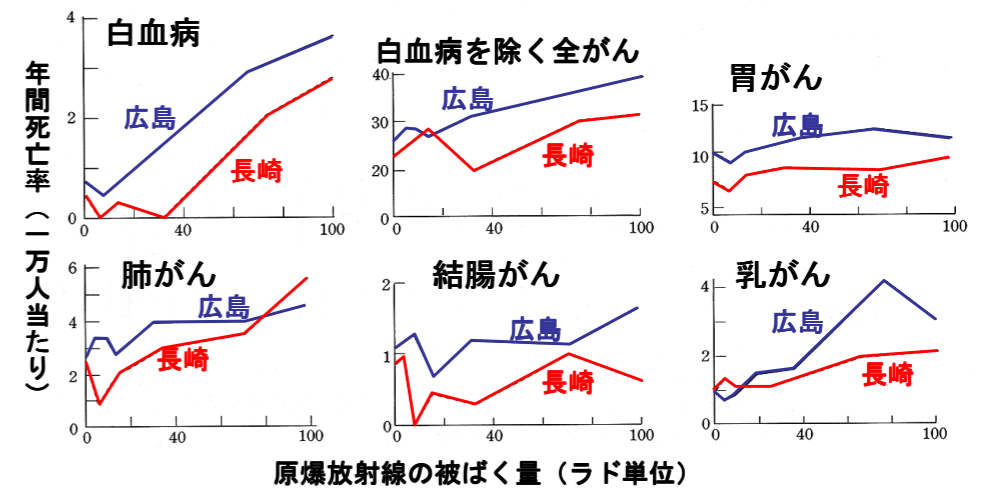
(財)放射線影響研究所 データ

部位別癌死亡の1Gy（遮蔽カーマ線量）における相対リスクおよび90%信頼区間, 1950~1985年



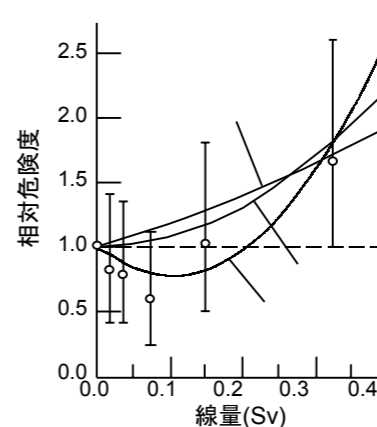
加藤寛夫、清水由紀子 他：原爆放射線の人体影響1992、文光

5種類のがん死亡率（1950-1986間の平均値）と低レベル原爆放射線被ばく量の関係

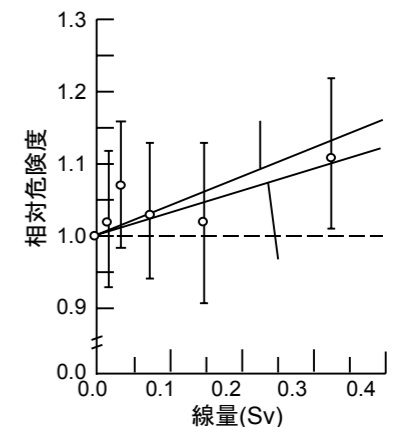


清水由紀子ほか（1987）

白血病

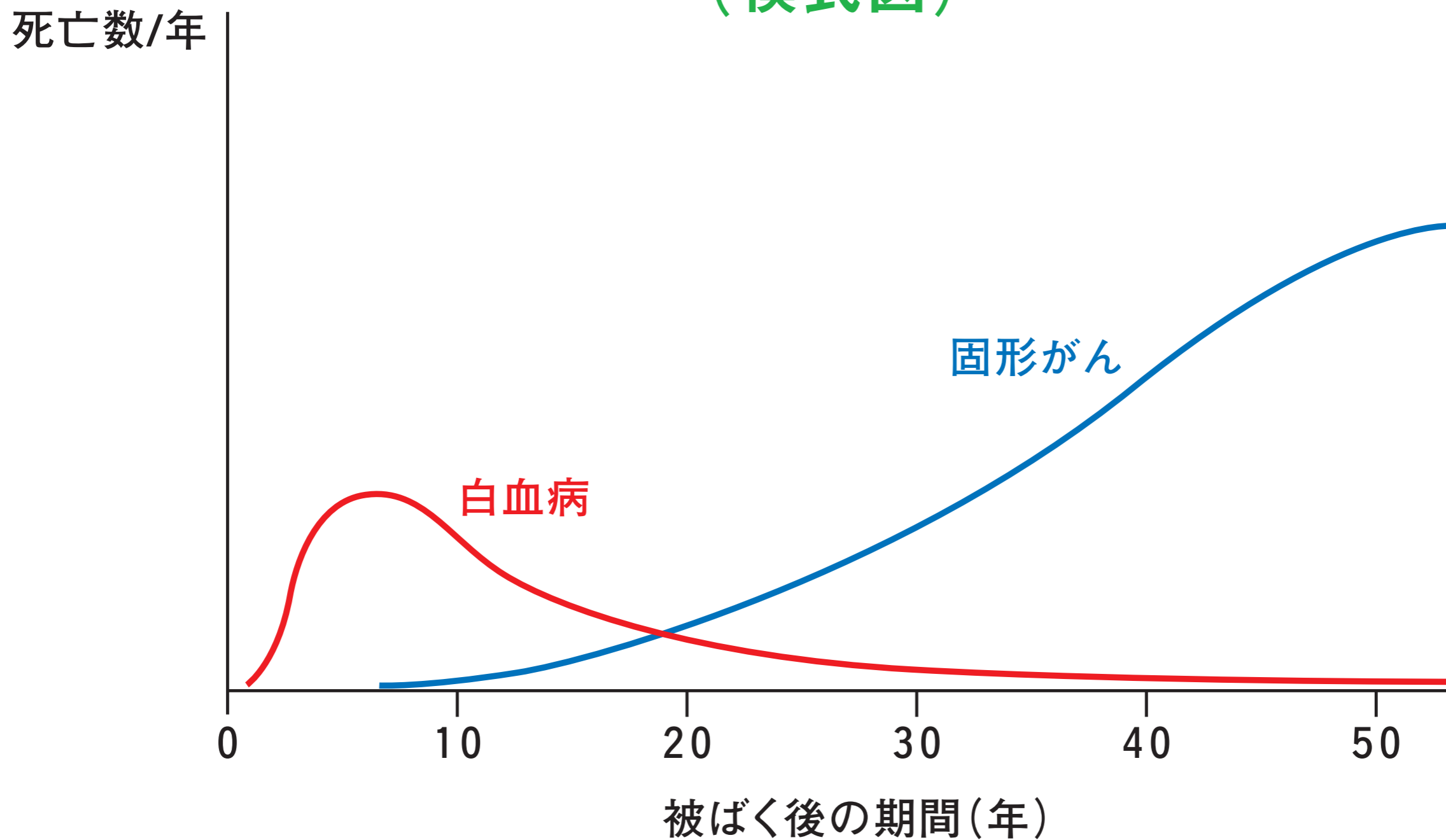


白血病以外の全がん



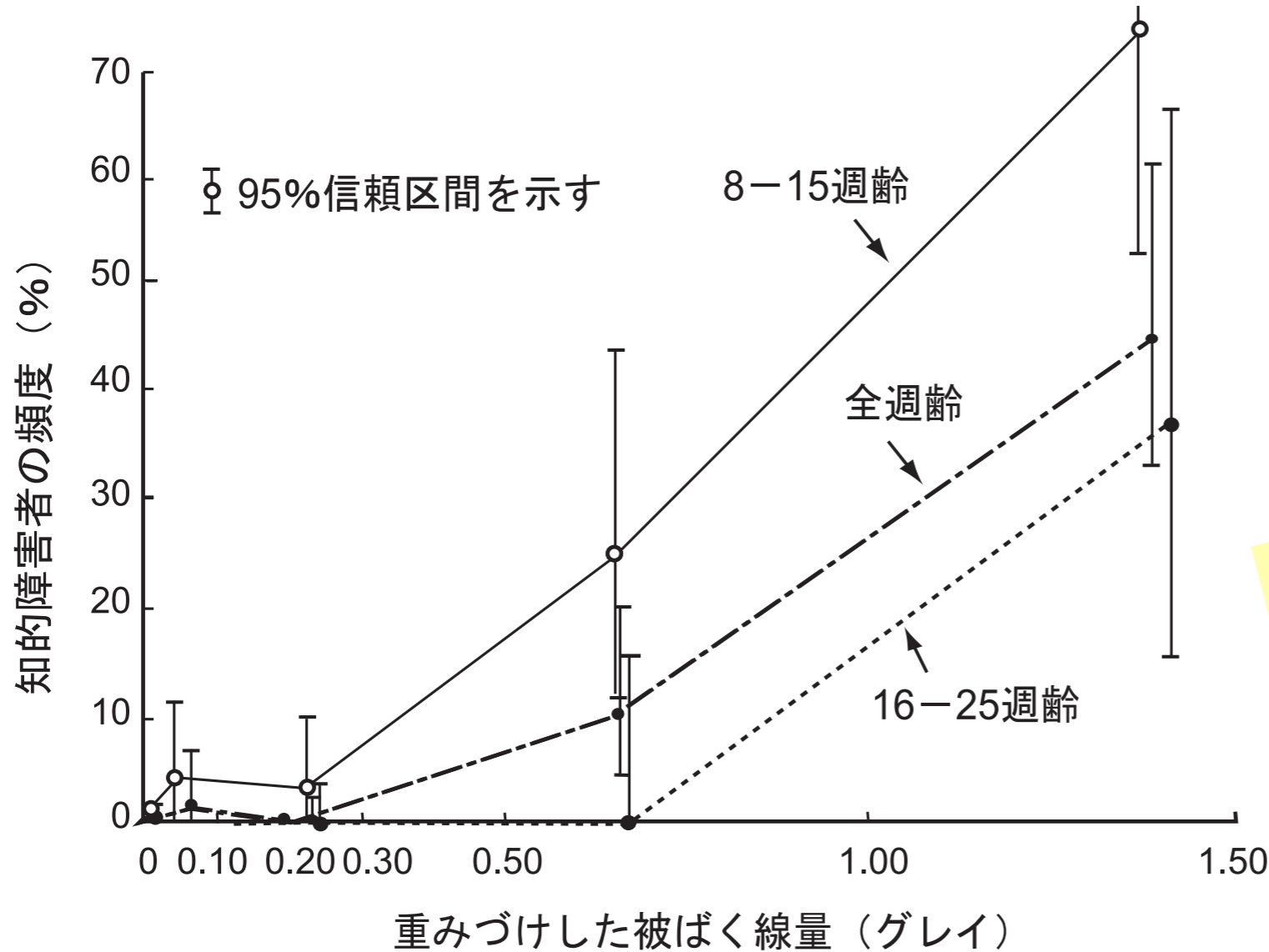
Shimizu, Y., et al.: RERF Update RERF News 1992.

# 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



(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」

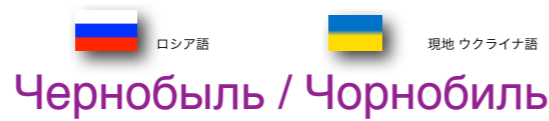
チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な墮胎が数万人以上だったともいわれる。(風評・過度の心配による犠牲)

## 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



## チェルノブイリ原発事故

チェルノブイリ原発  
黒鉛炉  
格納容器なし  
1週間燃え続けた

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

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

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

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

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

(最大で 750 mSv の被曝)

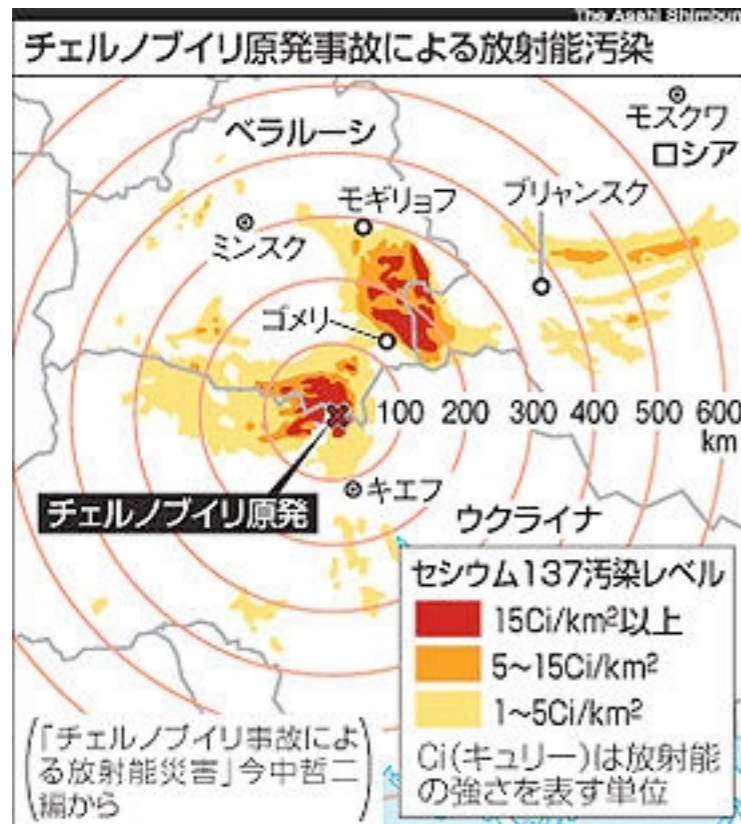
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

一般住民で確認された健康への影響は  
**こどもの甲状腺ガン**の増加のみ。

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

甲状腺平均被曝量 2 Gy !!

と、ずっと大きいストレスによる失調



# 低線量・低線量率の被曝とガン死亡

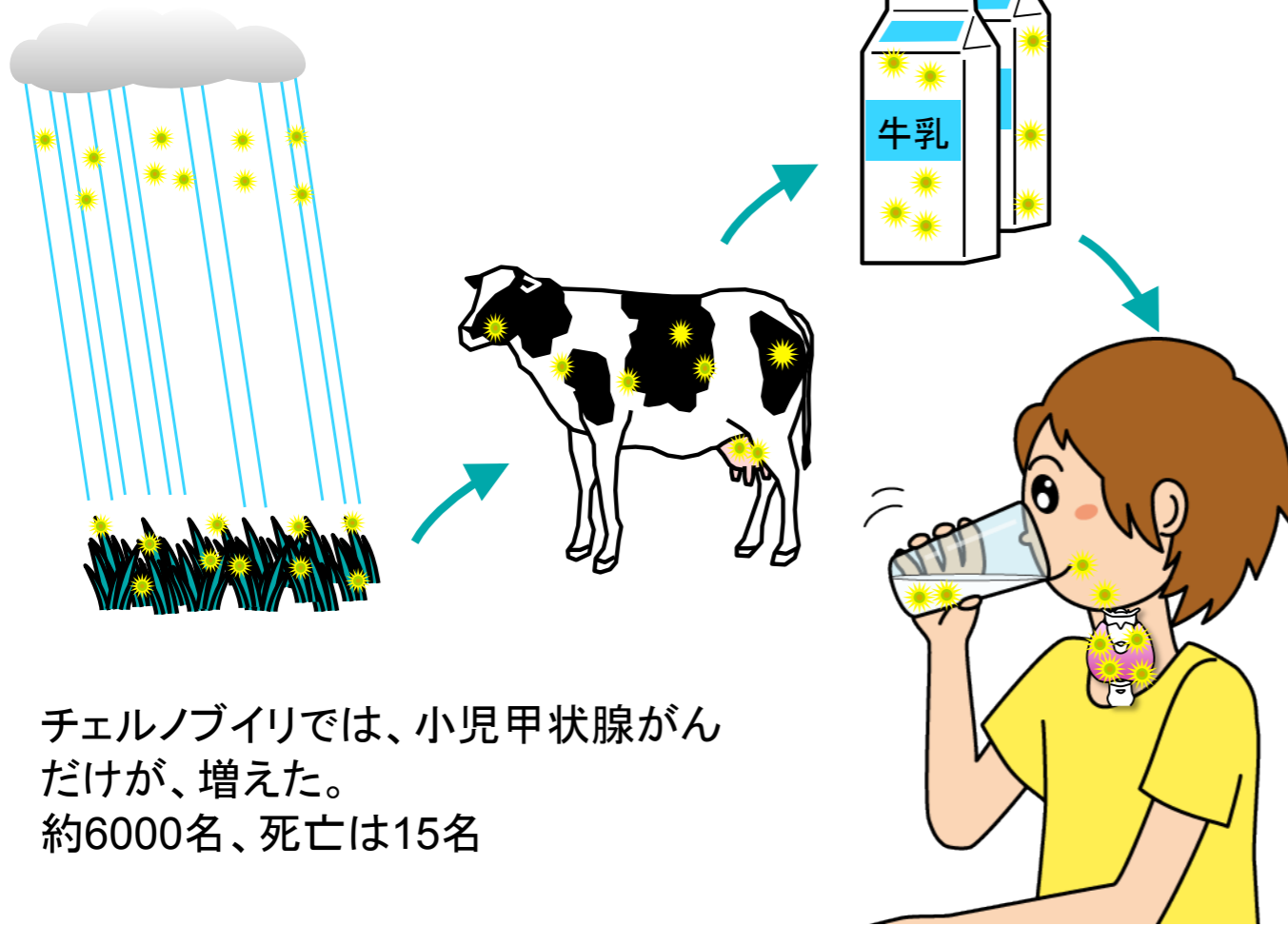


ロシア語  
Чернобыль / Чорнобиль



## チェルノブイリ原発事故

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



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

一般住民で確認された健康への影響は  
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。  
(地産地消の牛乳による摂取が問題)

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

甲状腺平均被曝量 **2 Gy**

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

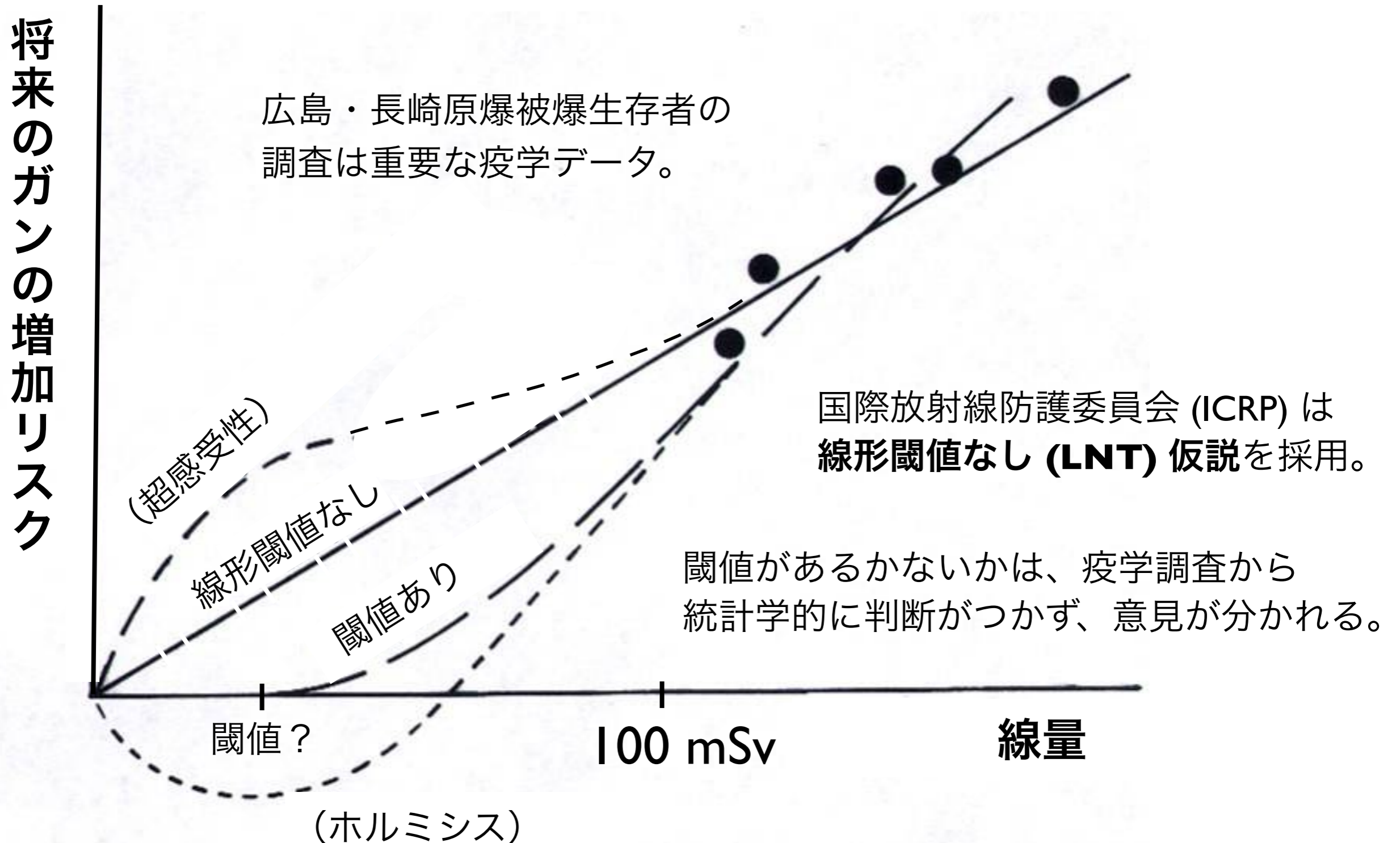
いわき市、飯舘村のこどもの甲状腺被曝調査  
最大で **35 mSv** の被曝 (甲状腺等価線量)

震災・事故による喪失感は共通

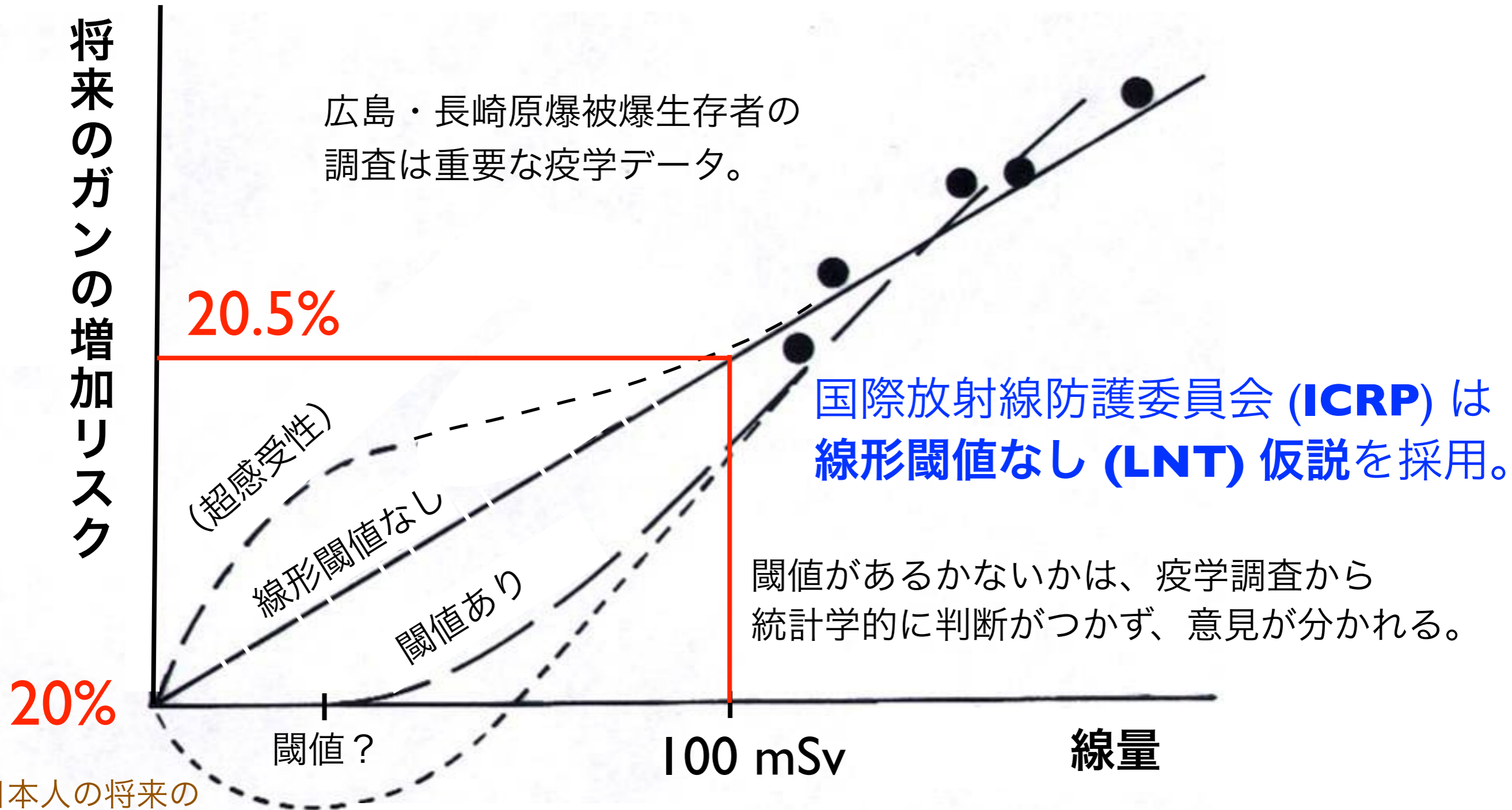
# 放射線防護学



# 低線量におけるリスク評価



# 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）

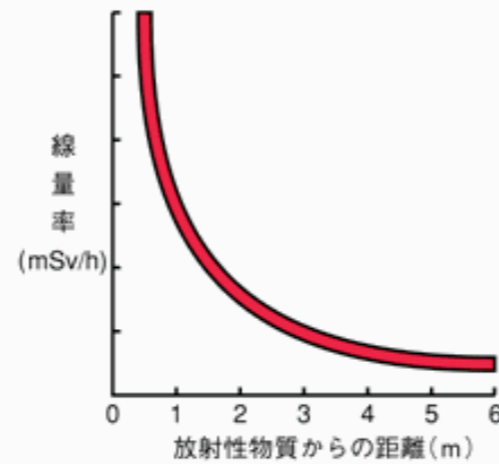
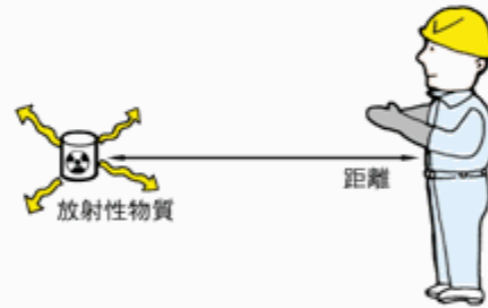
**等価線量も実効線量も、放射線防護の目的にのみ使用できる量である。つまり、放射線を利用する計画に伴う将来のリスクを予測評価するための目安であって、すでに受けてしまった放射線曝露から個人が受けるリスク（たとえば、将来がんを誘発する可能性）を評価するために用いるべきではない。**

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

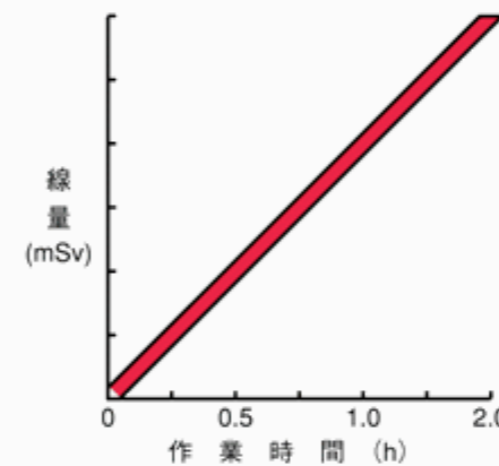
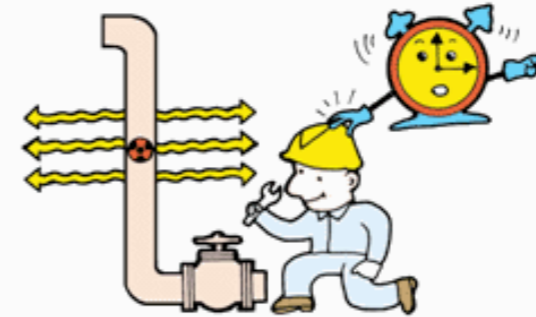
## ● 距離による防護

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



## ● 時間による防護

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



## ● 遮へいによる防護

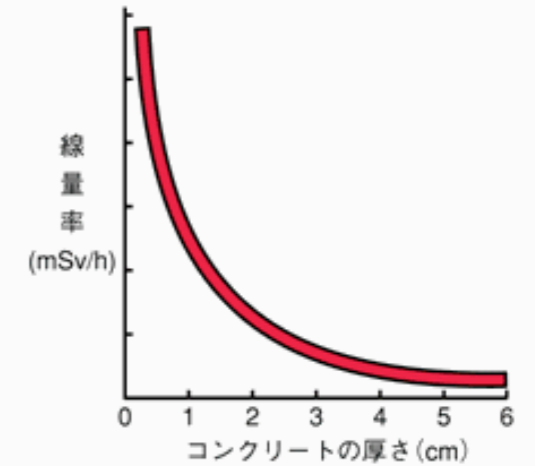
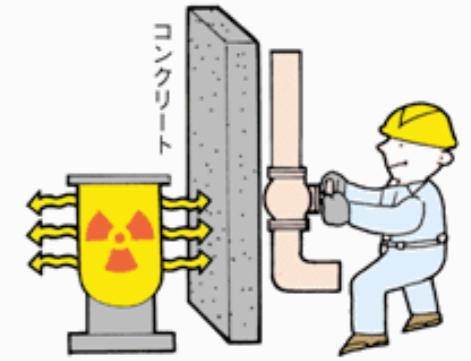


図1 遮へい3原則の図

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

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

**(ALARA の原則 = As Low As Reasonably Achievable)**

# 個人被曝の線量限度

## 線量限度の一覧表（作業者）

### 職業被曝（作業者 放射線業務従事者）

実効線量	100 mSv / 5年 かつ 50 mSv / 年
女子 妊娠中の女子	5 mSv / 3月 内部被曝について 1 mSv / 期間中
等価線量	
水晶体	150 mSv / 年
皮膚	500 mSv / 年
妊娠中の女子の 腹部表面	2 mSv / 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 <sup>2)</sup>
皮膚等価線量	500mSv/年 <sup>1)</sup>	500mSv/年
手・足の等価線量	500mSv/年	500mSv/年 <sup>3)</sup>
その他の組織	—	500mSv/年

1) 被ばく部位に関係なく、深さ7 mg/cm<sup>2</sup>、面積1 cm<sup>2</sup>の皮膚についての平均線量に適用される。

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

## 線量限度の一覧表（一般公衆）

### 公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量	
水晶体	—
皮膚	—

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

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

2) 1985年のパリ声明で実効線量当量の制限によって不要になった。

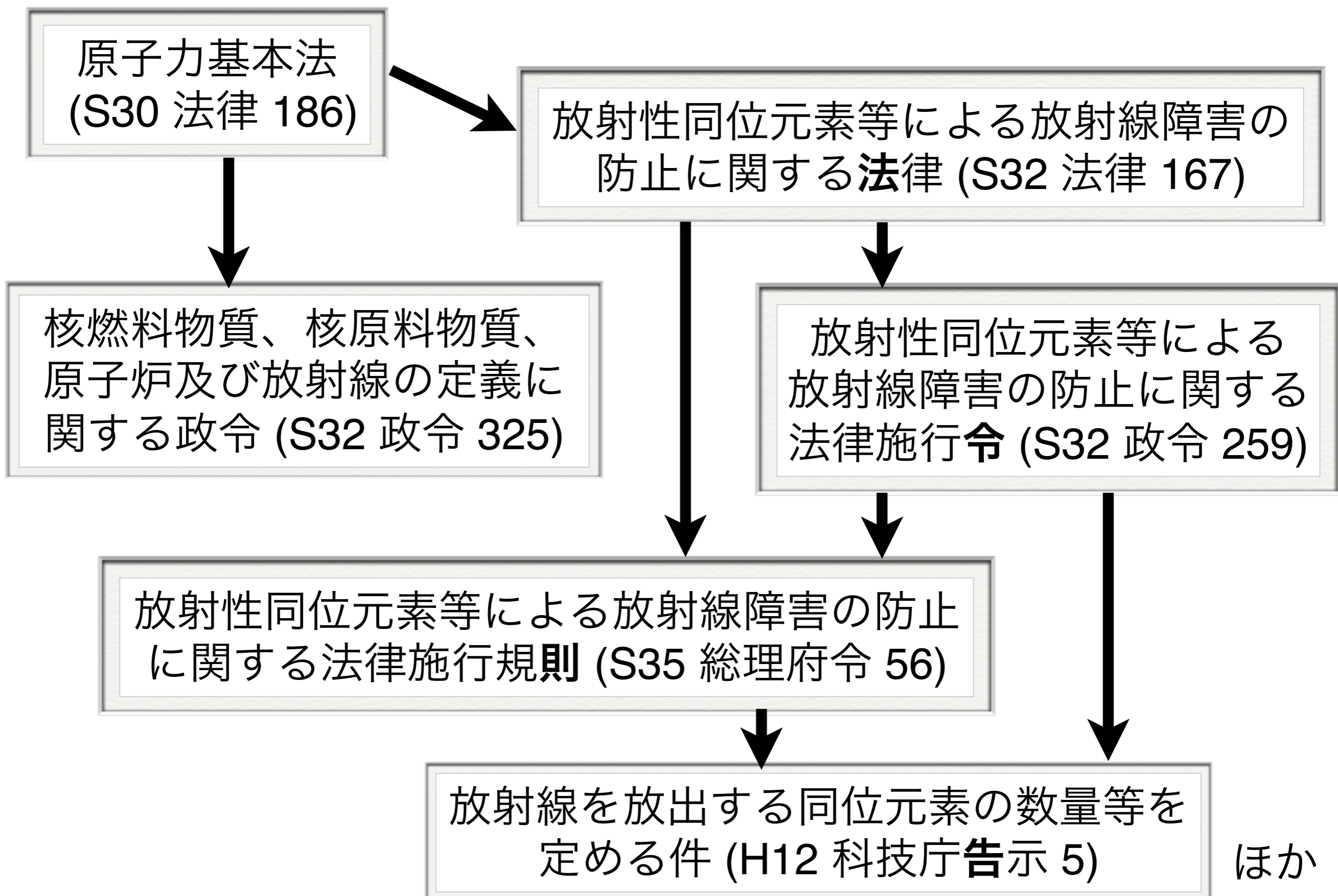
**年リスク1万分の1** (毎年被曝の場合、65歳までの最大値) **ICRP 勧告**

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

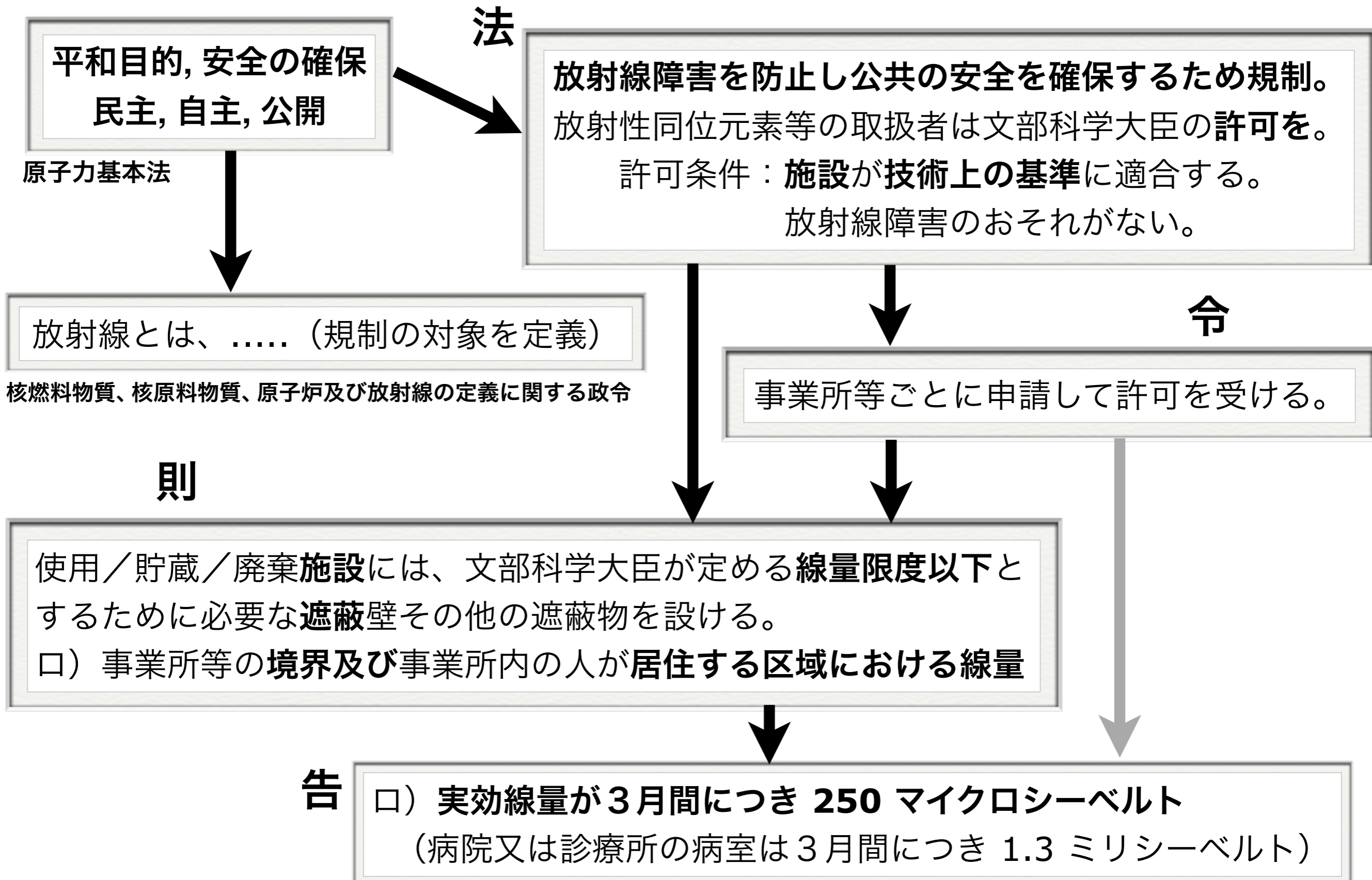
〔「ICRP1990年勧告-その要点と考え方-」、草間朋子編、日刊工業新聞社、50ページ〕

国内法令による防護基準

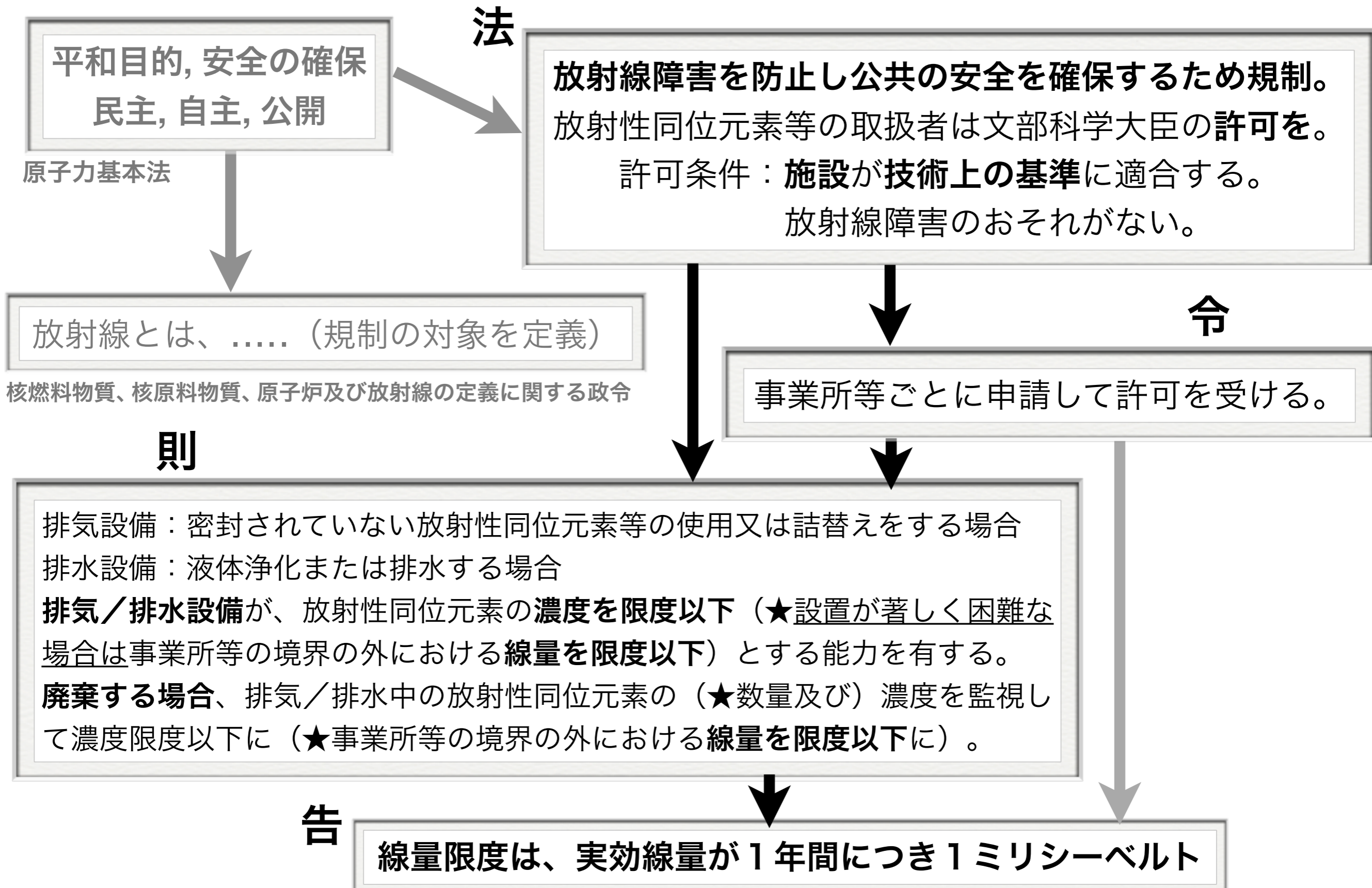
# 放射性同位元素等による放射線障害防止の法体系



# 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)





# 放射線規制に関するそのほかの法令・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年間につき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**

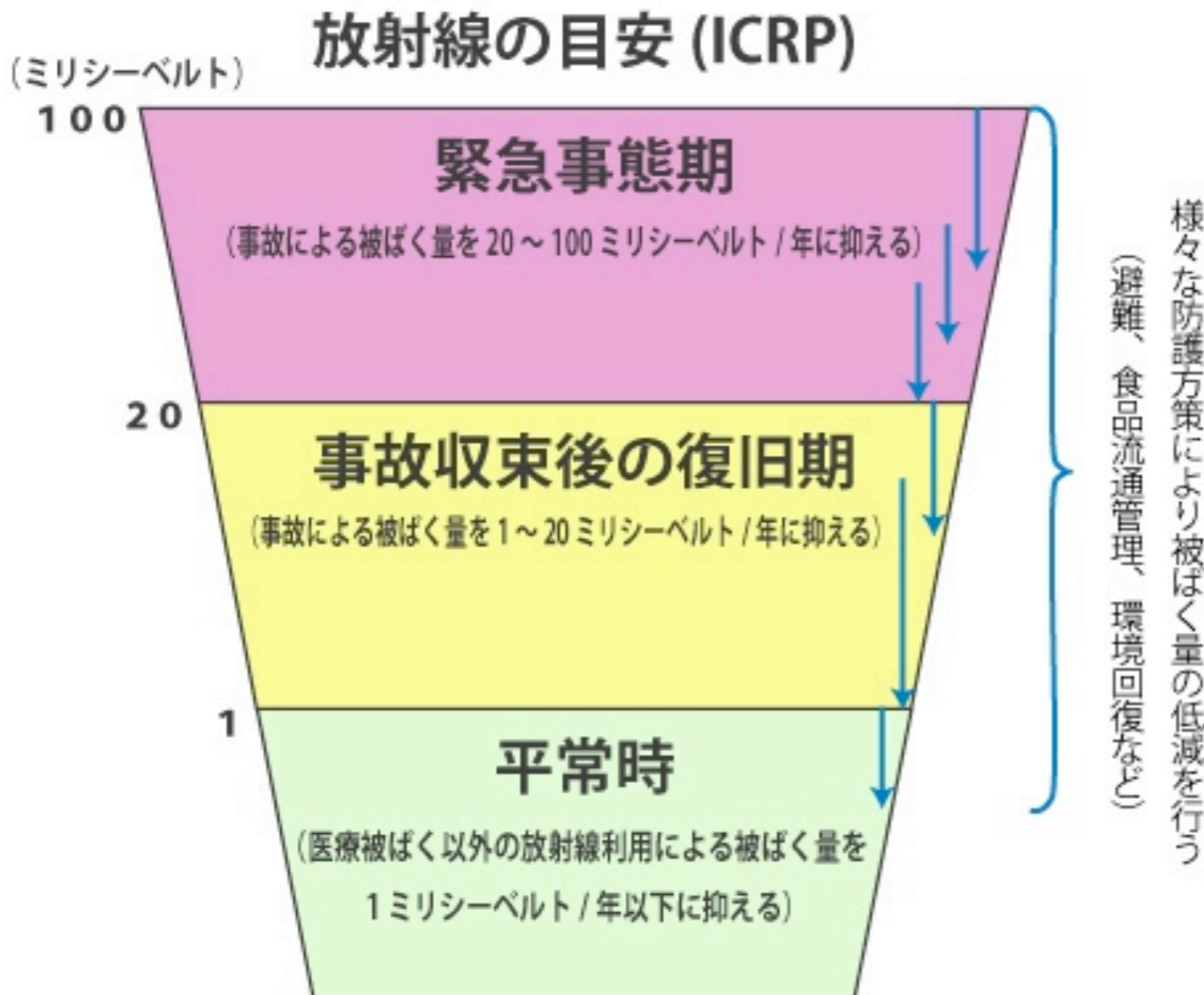
# Q. 政府が計画的避難地域を指定しましたが、基準になっている20ミリシーベルトの意味について教えてください。

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。

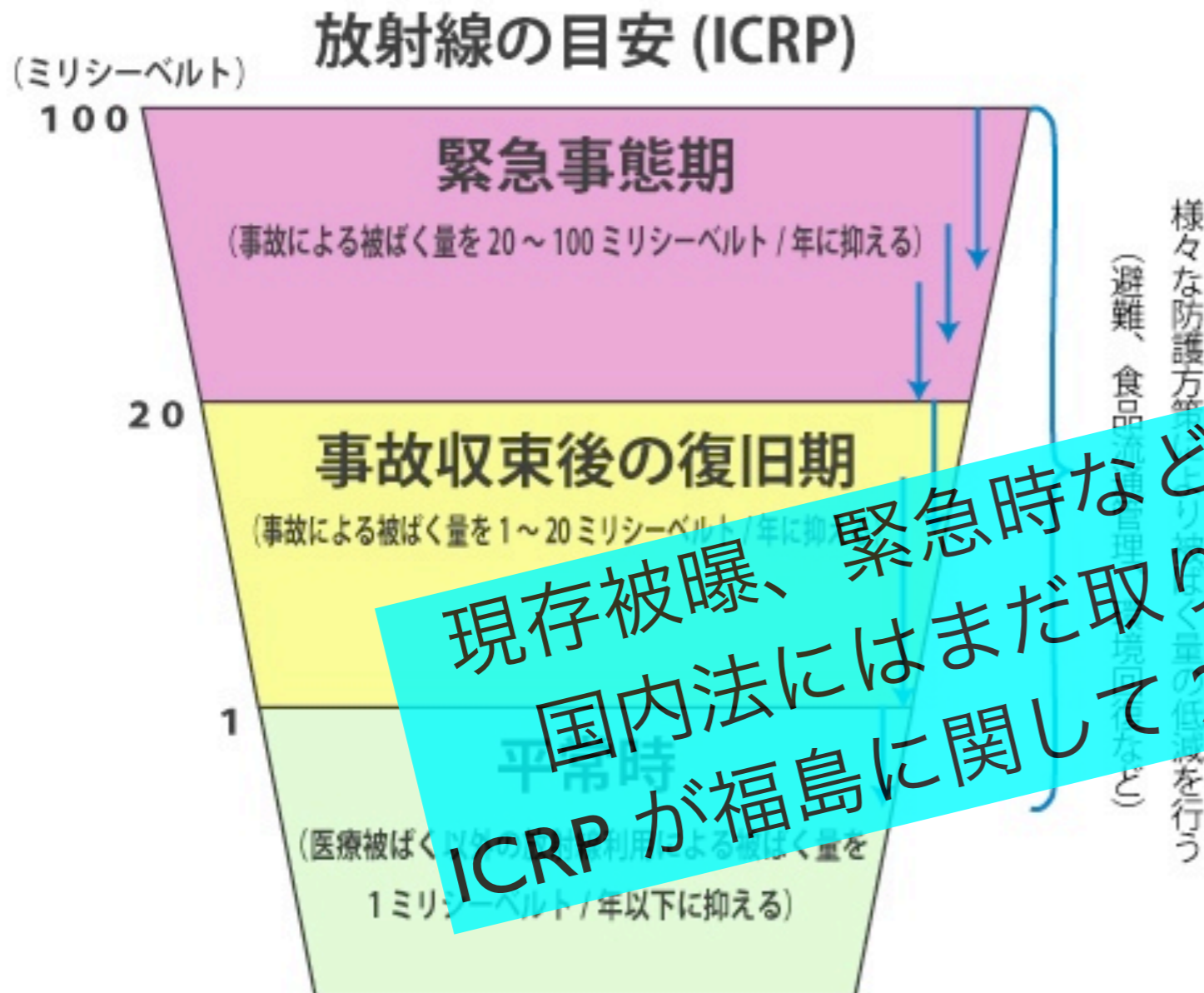


**Q. 政府が計画的避難地域を指定しましたが、基準になっている20ミリシーベルトの意味について教えてください。**

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值にあたるもので、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。



現存被曝、緊急時などICRP 2007年勧告は、**ICRPが福島に関して2011/3/21に改めて勧告。**  
国内法にはまだ取り入れられていない。

# 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

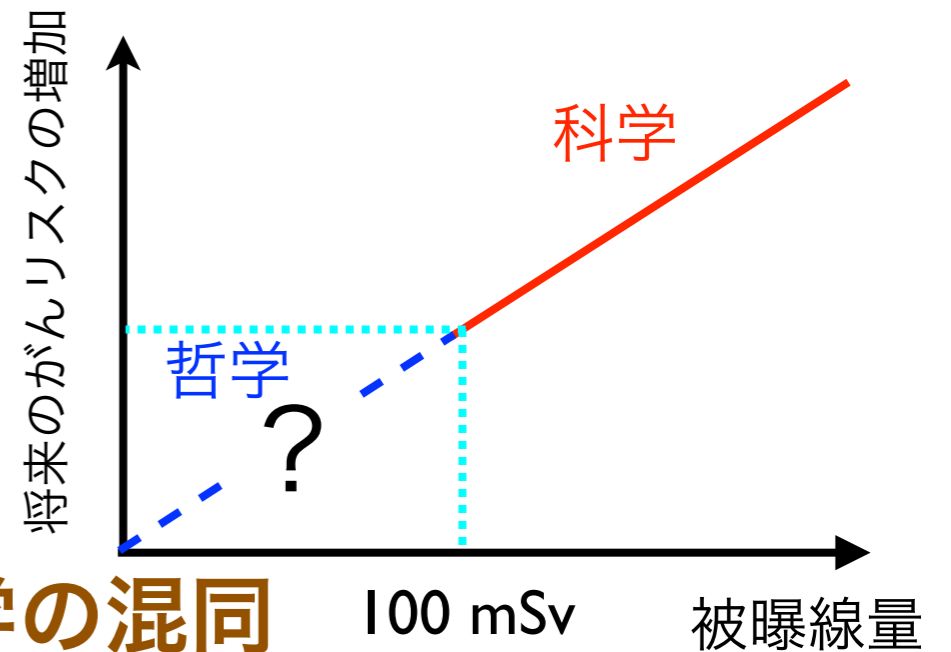
がんの原因が医学的に分かっていない

疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係 スクリーニング効果・別の要因

線形のリスク  
は判断し難い

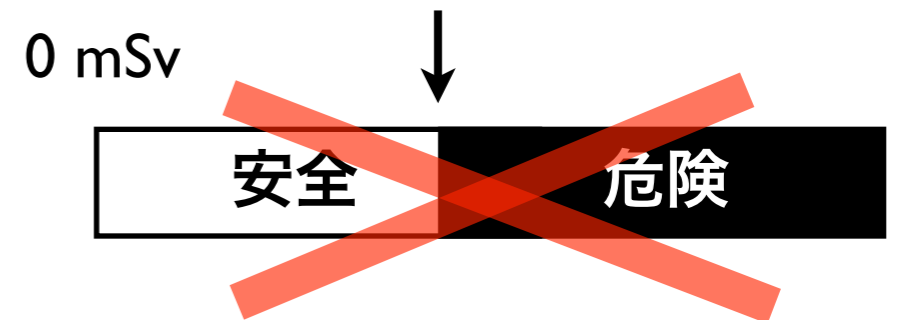


科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

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

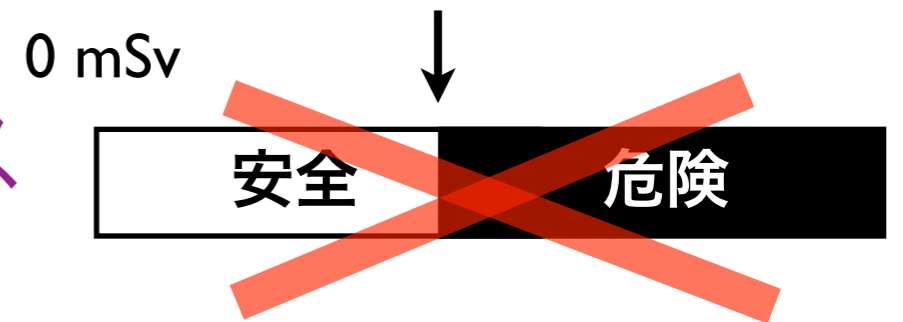
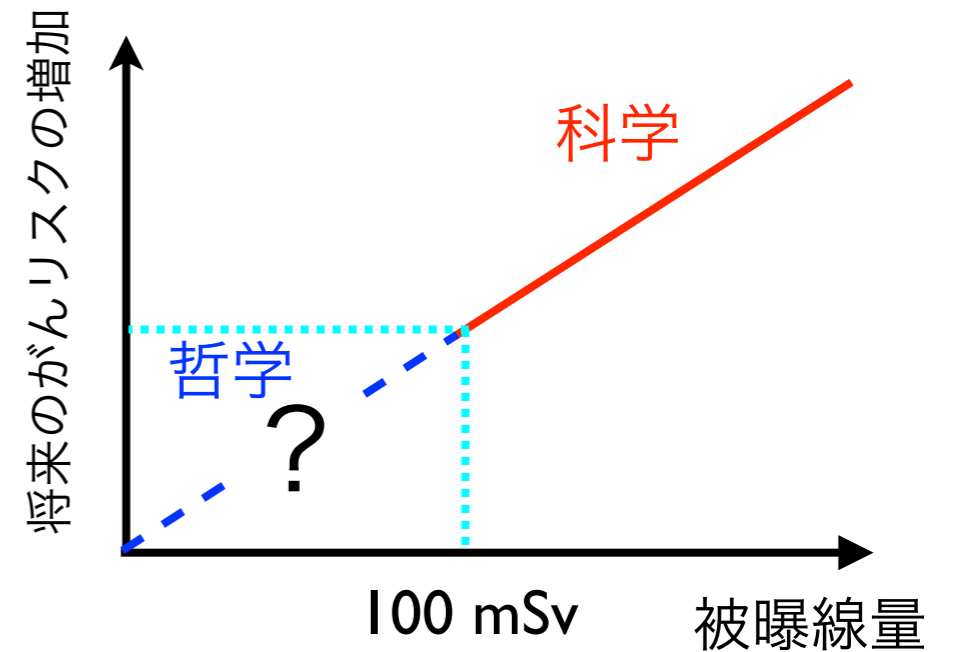
生業・収入の損失

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

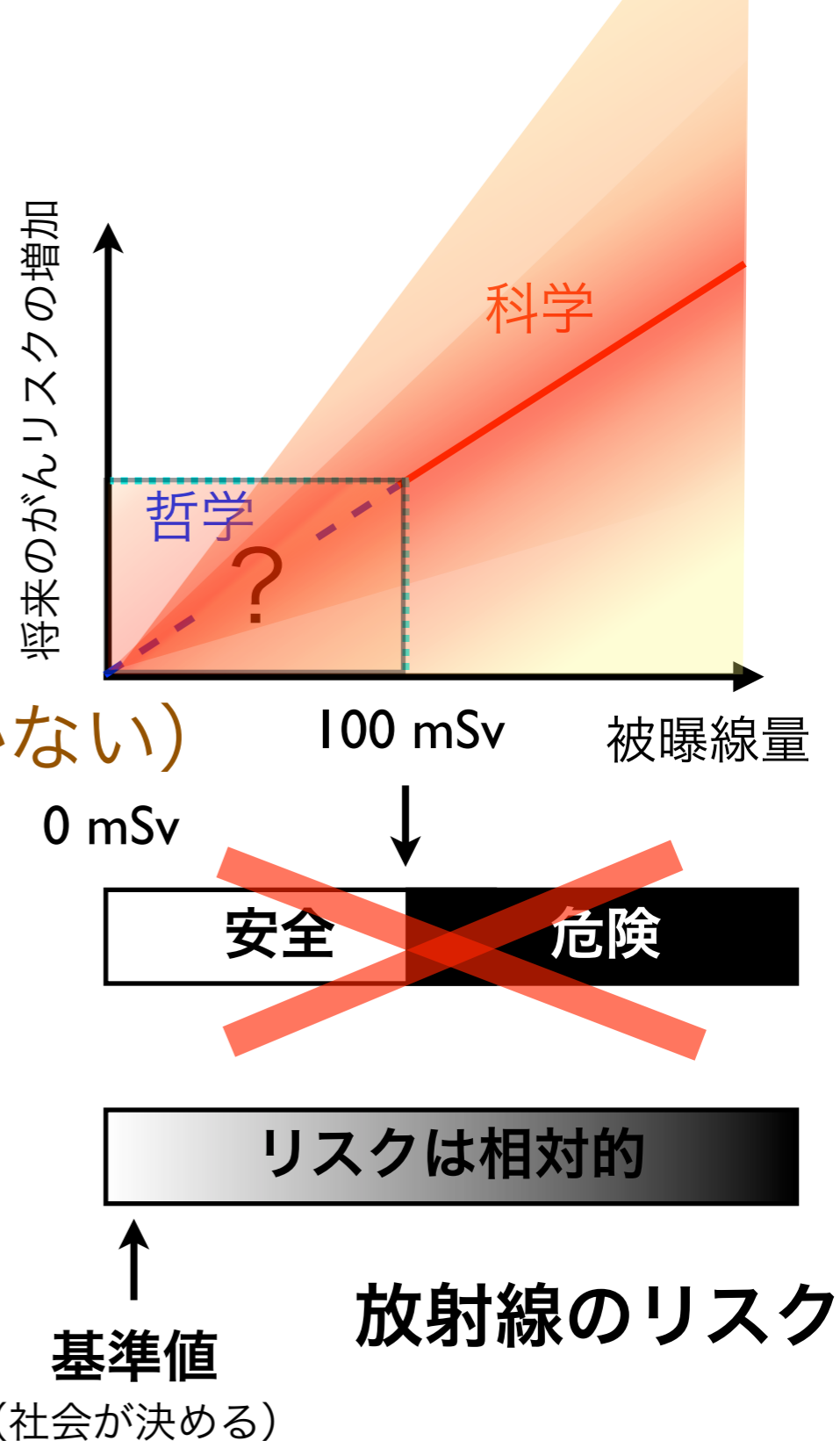
個別の事象との因果関係は分からない

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





# 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

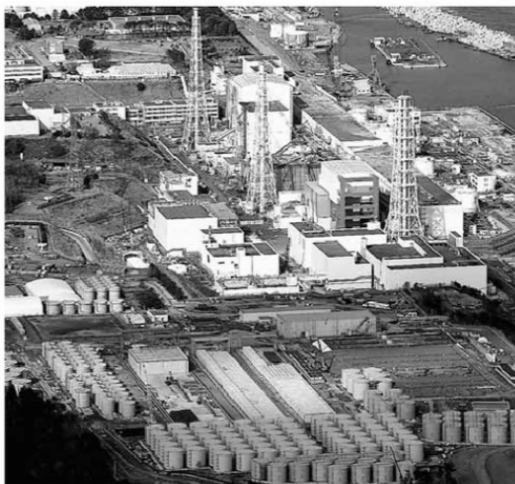
**国際放射線防護委員会（ICRP）**  
1928年に前身の組織が生まれた。医療現場でエックス線の利用が広まり始めたころだった。50年にいまの組織に。主委員会と五つの専門委員会構成され、世界約30カ国の専門家が無報酬で参加。運営費は各国にある約20の原子力の研究組織による資金援助が8割、残りは刊行物の収入。日本からは、主委員会のメンバーで震災後に福島に移住した丹羽太貴・京都大学名誉教授ら7人がいる。

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ったうえで、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ザーをするのが目的で、そこにどこまでいかにこだわるか、という点にこだわります。福島行きの列車にコートをお忘れくださいとありますが、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ミシン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

「だがそれは、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ずれまでと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えません。ただ、3年という時間を経て、1ミシン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」

「二つの事故を通して感じたことはあります。『時代背景も国土の広さも経済状況もメディアの発達度も違いますが、驚いたのは二つの事故後の人々の反応が同じだったという点です。親世代の懸念や我々に聞いてくる質問内容。事故直後の怒りがやがて無力感に変わる……。捨てられ、忘れられ、差別を受けるのでは、という恐れへと変容する姿も同じでした』

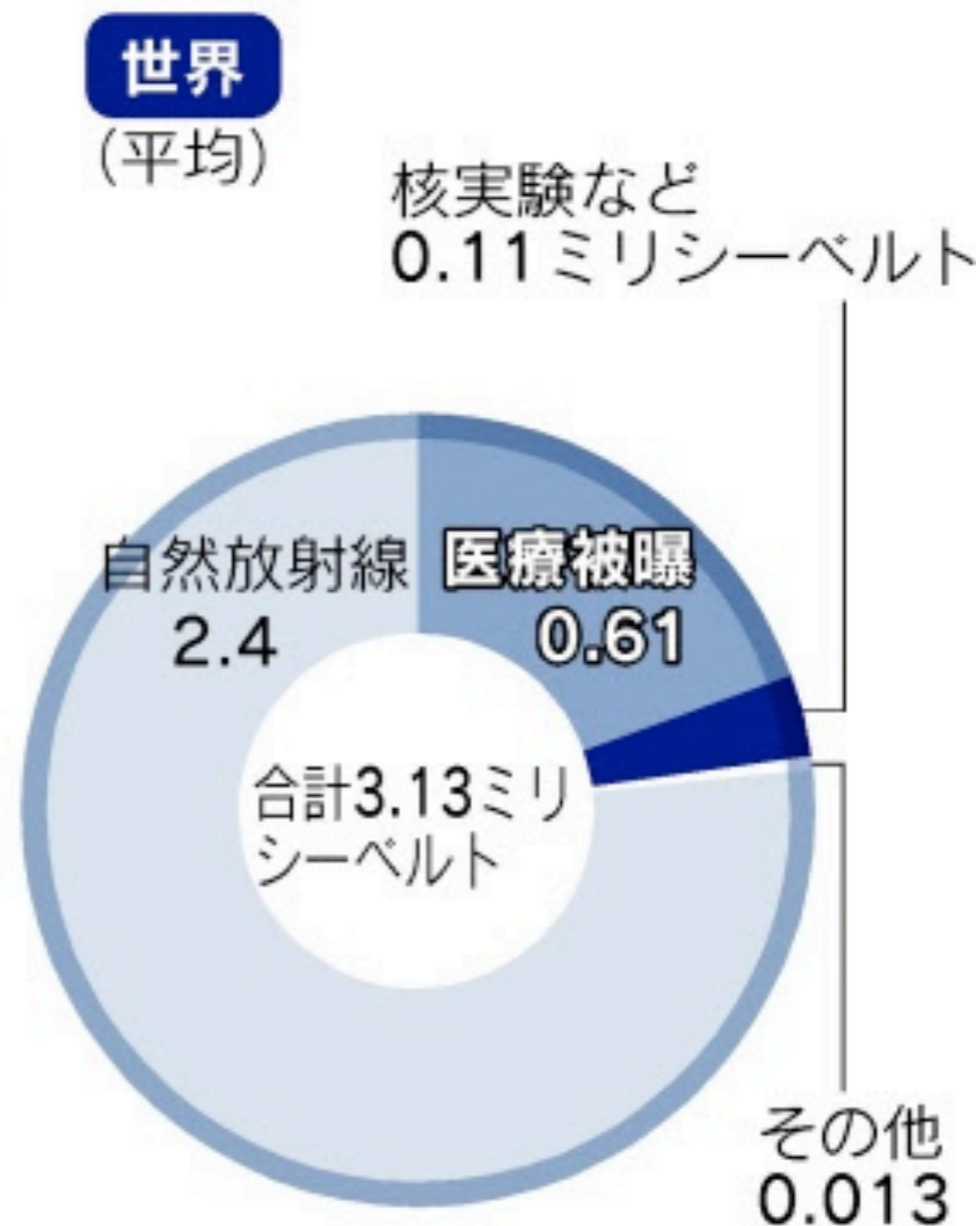
「日本にはチェルノブイリ事故の経験を福島に生かす以前に、広島や長崎の原爆体験があります。広島大学のシンポジウムに招かれて広島に

「『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ミシン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」

「ロシャルールさん自身もチェルノブイリ事故の調査や支援に長く関わっていました。」  
「事故から4年後に汚染地域を訪ねると、住民は無力で事態をコントロールできていない状態でした。私

（聞き手・梶原みずほ）

# 1人が1年間に浴びる放射線量



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

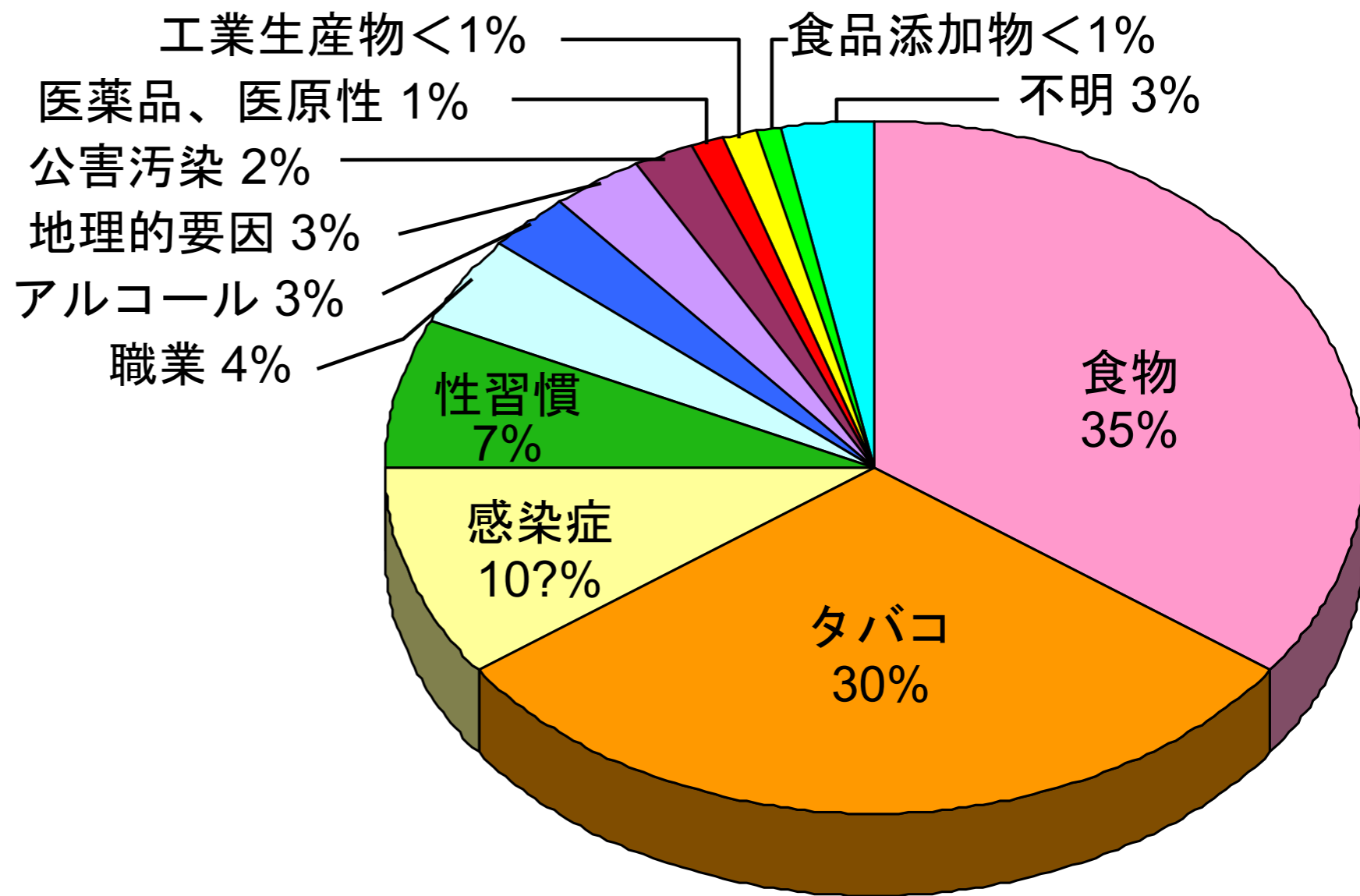
## 放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

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

※網かけは放射線

(注)相対リスクは、例えば喫煙者と非喫煙者のがんの頻度を比較した数字

## ヒトのがんの原因と関連のある因子



(R.Dool and R.Peto, 1981)

表の値は短時間での被曝の場合。

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

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

「ものをこわがらな過ぎたり、こわがり過ぎたり  
するのはやさしいが、**正当にこわがる**ことは  
なかなかむつかしい**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望みます。

大反対です！今回の瓦礫受け入れは、**放射線に関する科学的知識の欠如、**  
被災地の隣、**科学者の社会への情報発信の失敗、**  
物ばかりです。**行政に対する不信感、が問題。**  
をかけてでも、**行政に言う「大丈夫」を、一般国民の何人が心から信じますか？**  
この期に及んで、近隣都県の食べ物を高くても、手間

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。**

内部被曝は怖い！という主張

チェルノブイリの「悲惨な例」のイメージ

放射線の安全を説く本は売れない。

安全と安心

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。

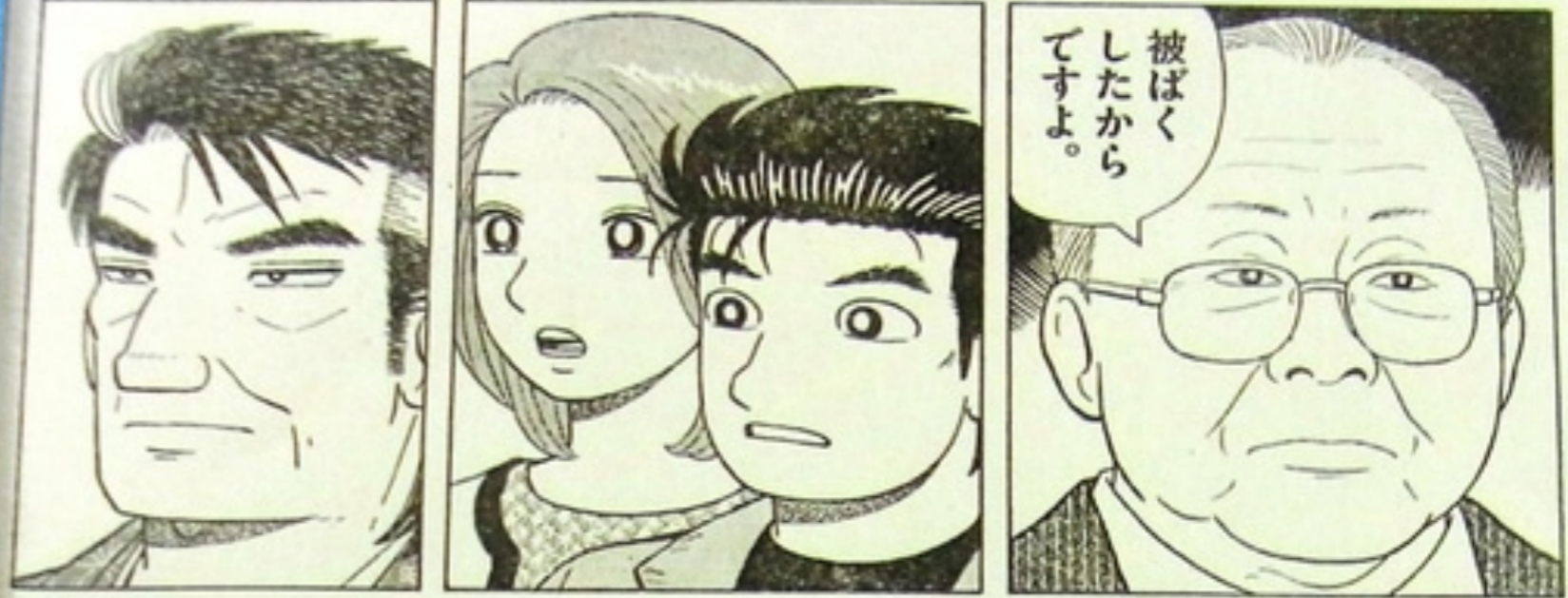
読者自身に判断してもらおうことができない

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、福島の方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ちろんあります。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、広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思えば、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ことですが、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、次のとおり嚴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。

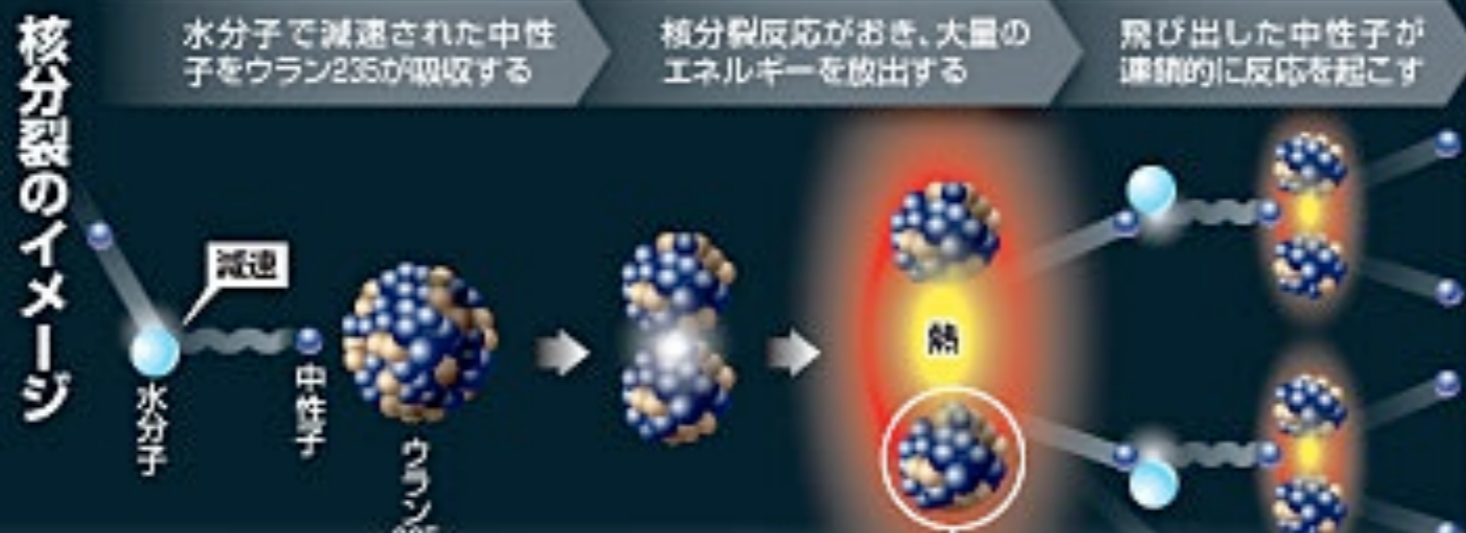
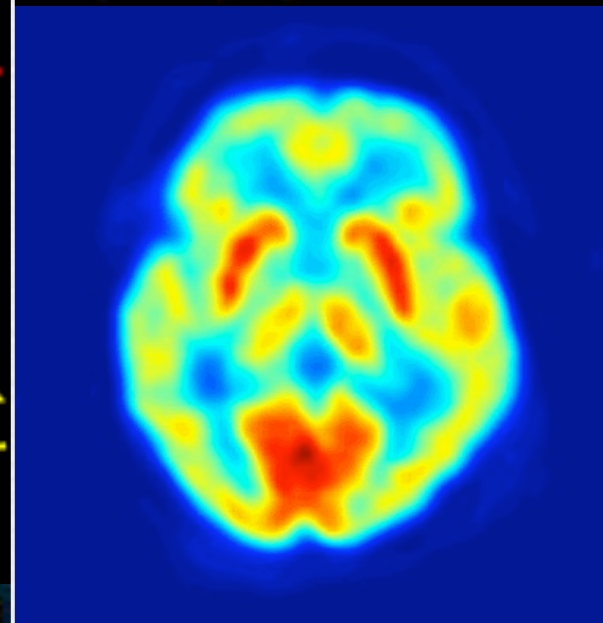
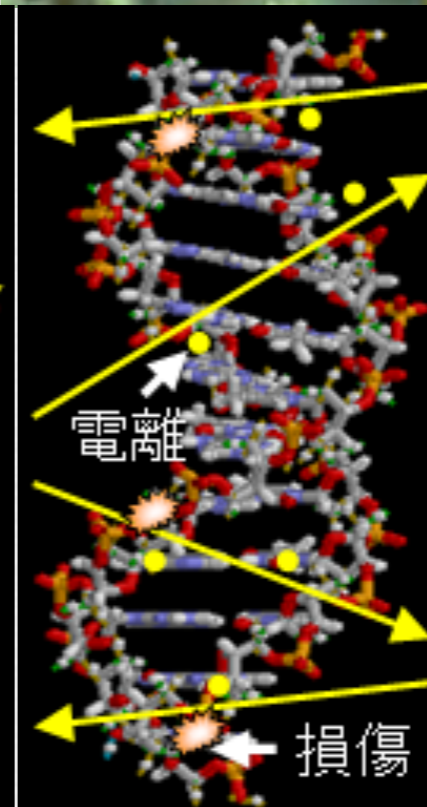
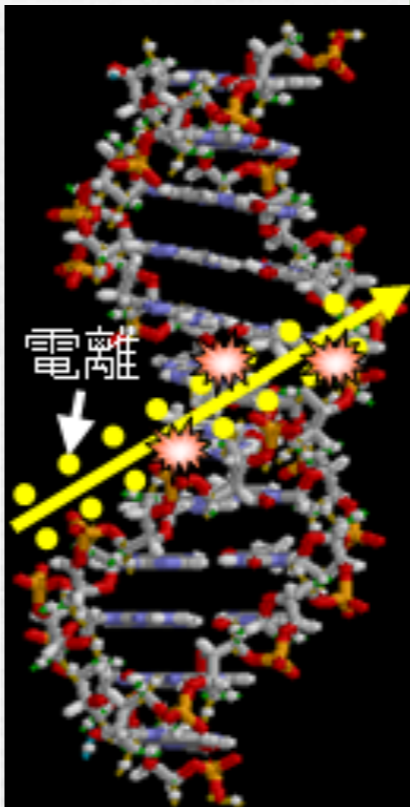
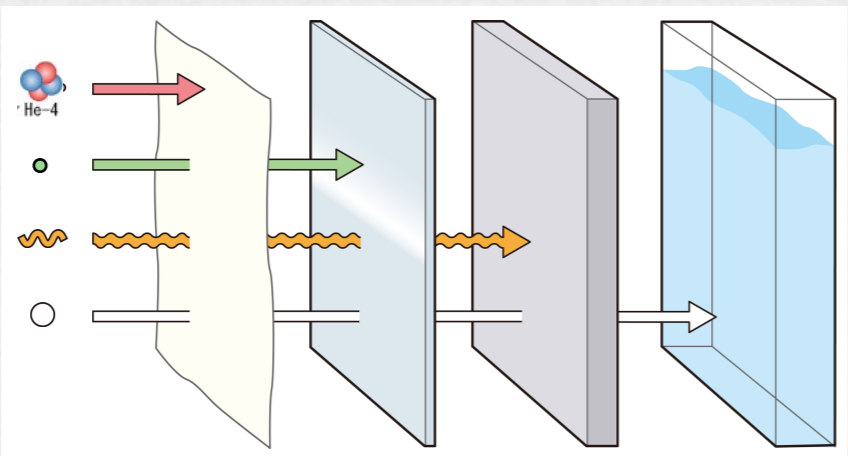
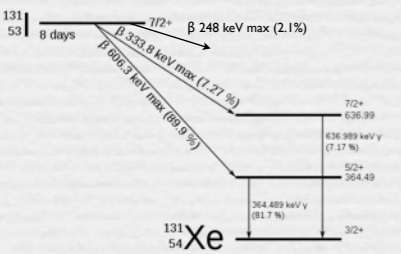
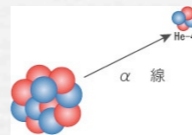
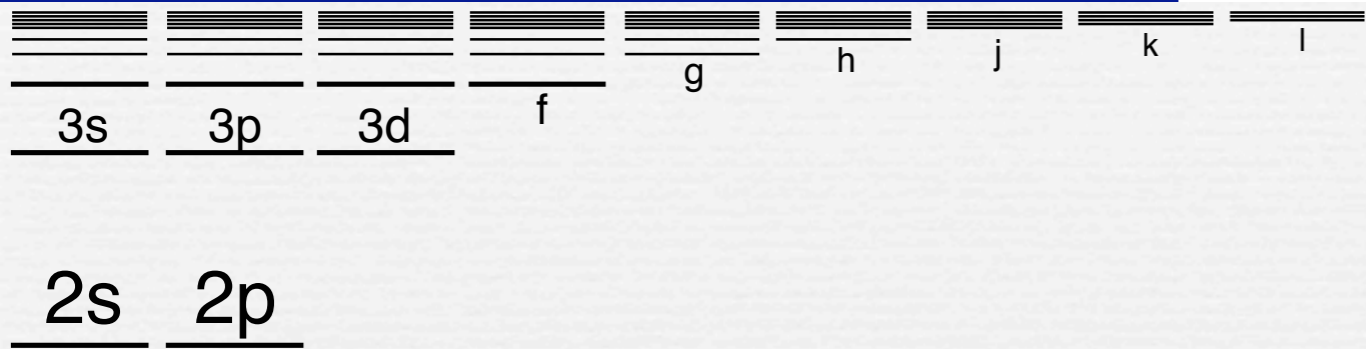
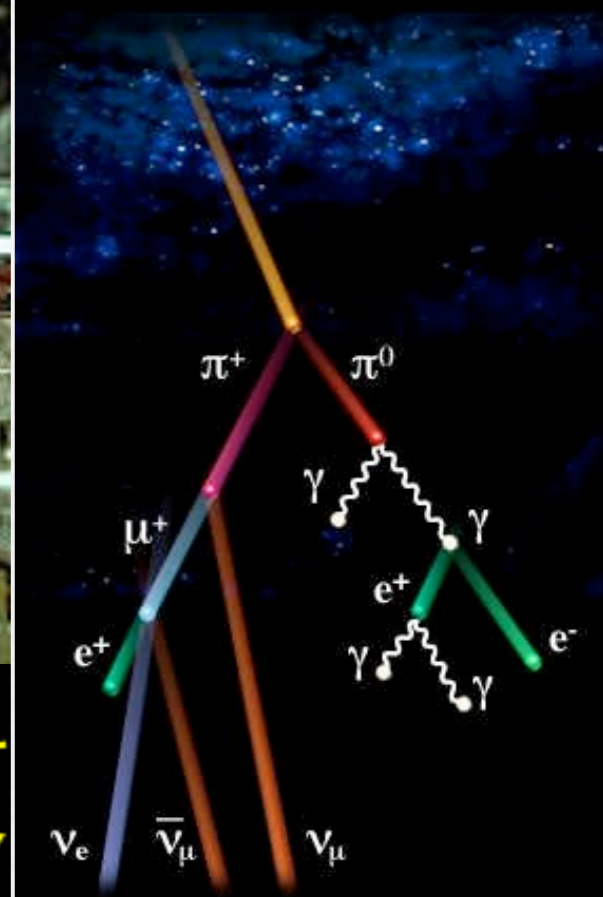
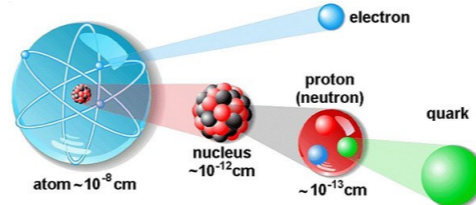
## 福島では放射線の話題はタブー

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

- 9/18 放射線入門 【鳥居】
- 9/25 放射線物理学 【鳥居】
- 10/ 2 放射線計測学 【小豆川】
- 10/ 9 放射線物理・化学 【鳥居】
- 10/16 放射線生物学 【渡邊】
- 10/23 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 10/30 原子核物理学・原子力工学 【鳥居】
- 11/ 6 環境放射化学 【小豆川】
- 11/13 環境放射化学 【小豆川】
- 11/24 放射線医療 【芳賀】
- 11/27 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 12/ 4 放射線の利用 【渡邊】
- 12/11 加速器科学・放射線防護学 【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》

芳賀 昭弘 《医学部附属病院放射線科》

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

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

担当教員：鳥居 寛之

Fine

完



**Fine.**

**Grazie per la vostra attenzione.**

**Gratias ago pro audientia vestra.**

**Спасибо за внимание.**

**Merci de votre attention.**

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.**

**Thank you for your attention.**

**경청해 주셔서 감사합니다.**

**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**