



放射線

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎
著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

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

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

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

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

2014年度冬学期 主題科目テーマ講義

放射線

を

科学的に

理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE
(West)

K303教室

2014 / 10 / 31 (金)



γ 線



中性子線



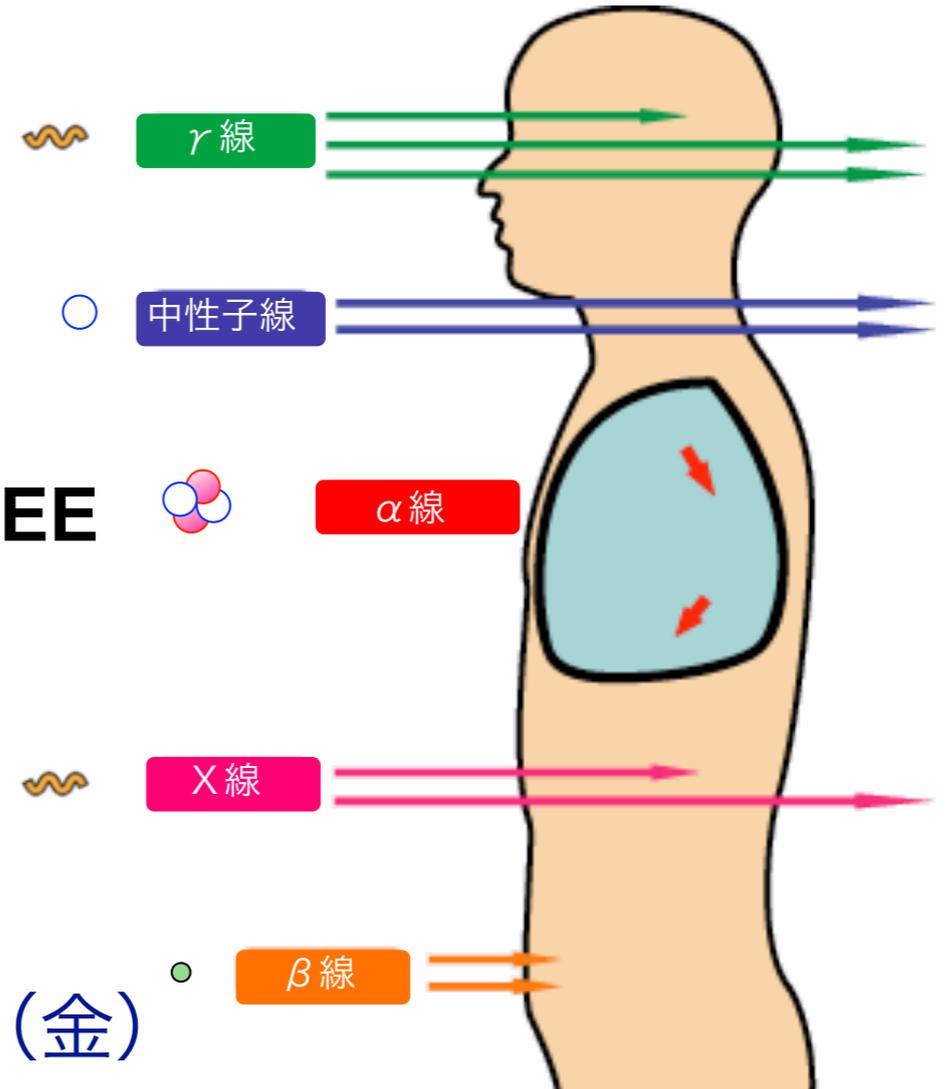
α 線



X線



β 線



第4回

放射線物理学・放射線化学

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

放射線を科学的に理解する

- 10/10 放射線入門 【鳥居】
- 10/17 放射線物理学 【鳥居】
- 10/24 放射線計測学 【小豆川】
- 10/31 放射線物理・化学 【鳥居】
- 11/ 7 放射線生物学 【渡邊】
- 11/14 放射線影響の疫学 【小笹】
- 11/28 原子核物理学・原子力工学 【鳥居】
- 12/ 5 環境放射化学 【小豆川】
- 12/12 環境放射化学 【小豆川】
- 12/19 被曝調査・医療支援 【坪倉】
- 1/ 9 放射性物質汚染と農業 【藤原】
- 1/23 放射線の利用 【渡邊】
- 1/27 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》

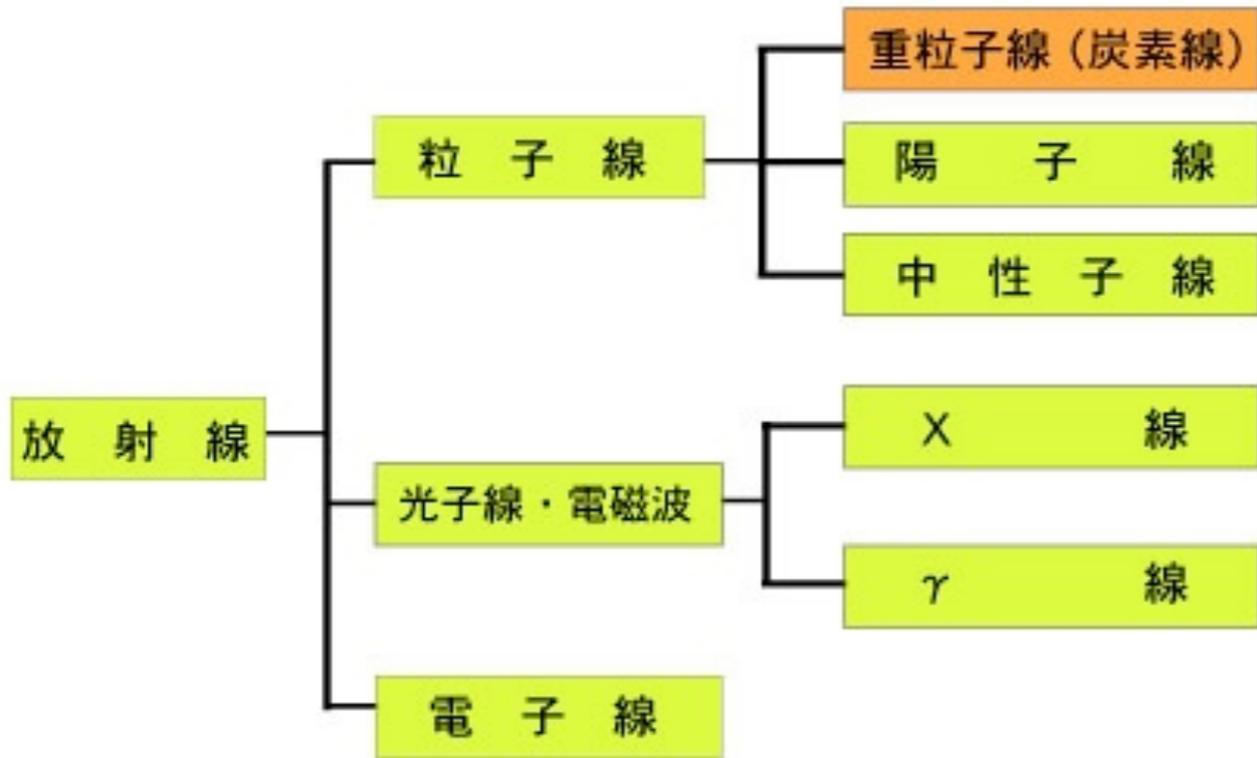
坪倉 正治 《医科学研究所》

小笹 晃太郎 《放射線影響研究所 (広島)》

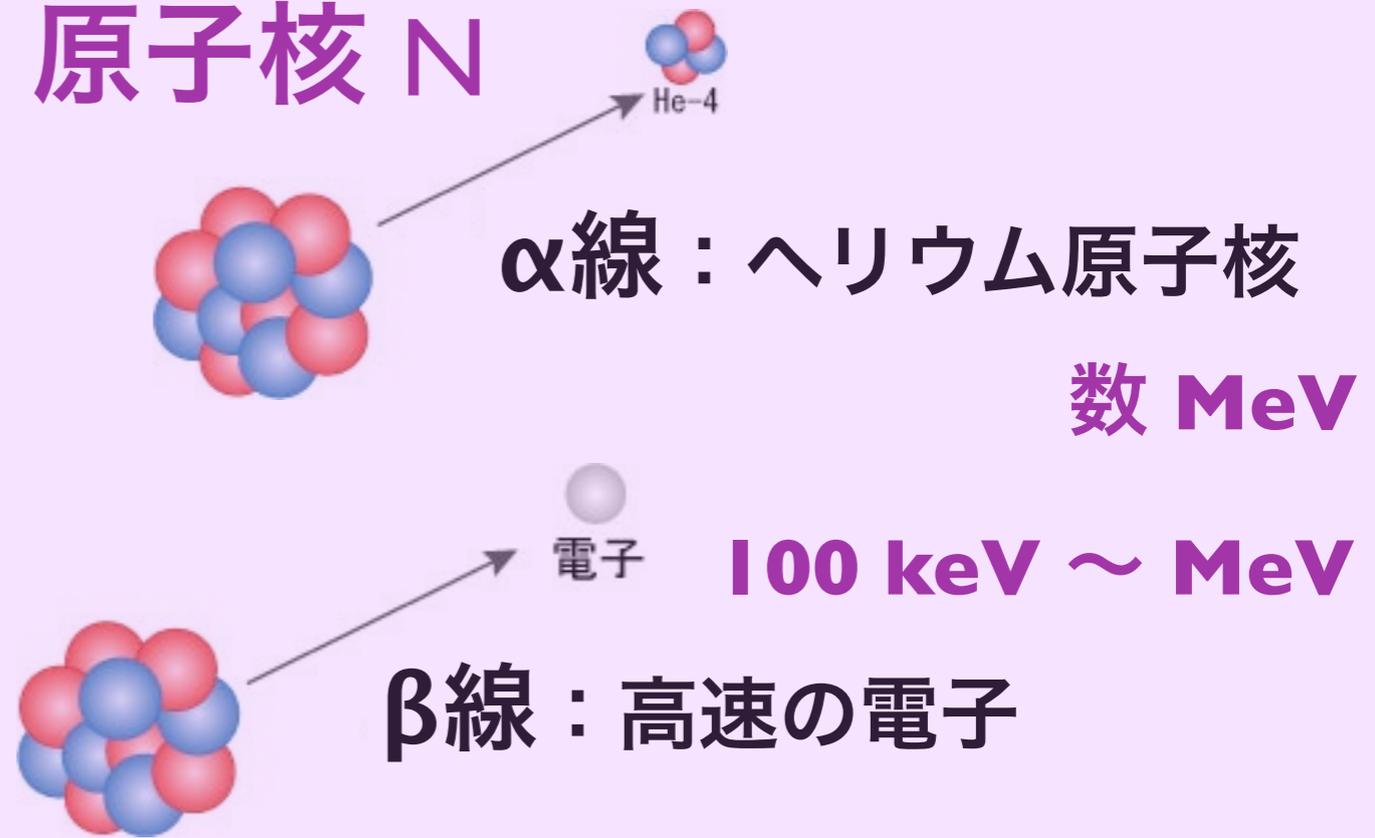
藤原 徹 《農学部応用生命化学》

ゲスト講師

放射線の種類



原子核 N



放射線のもつエネルギーは？

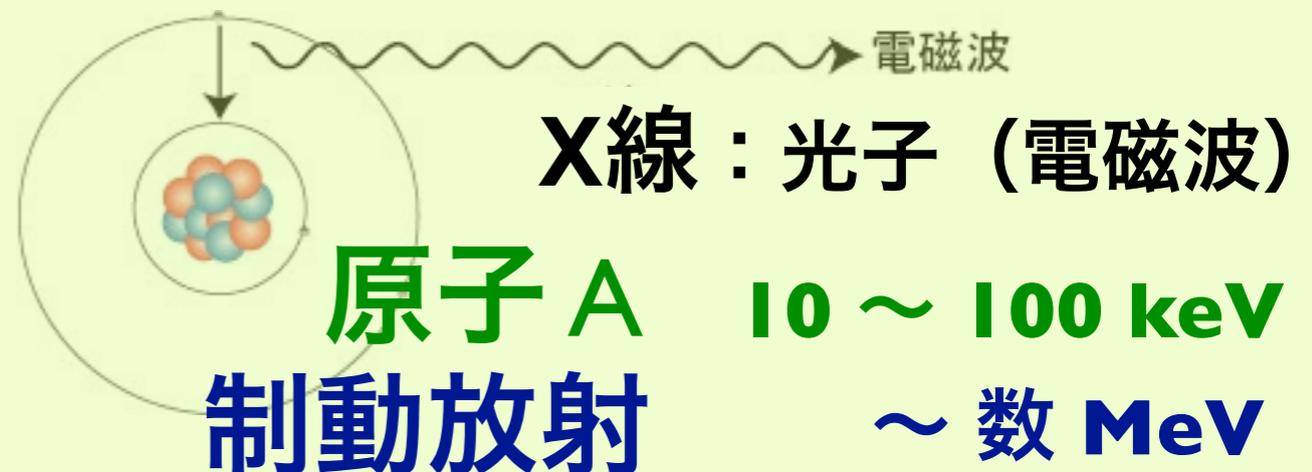
☞ **100 keV ~ 数 MeV** (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

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

放射線の速度は？

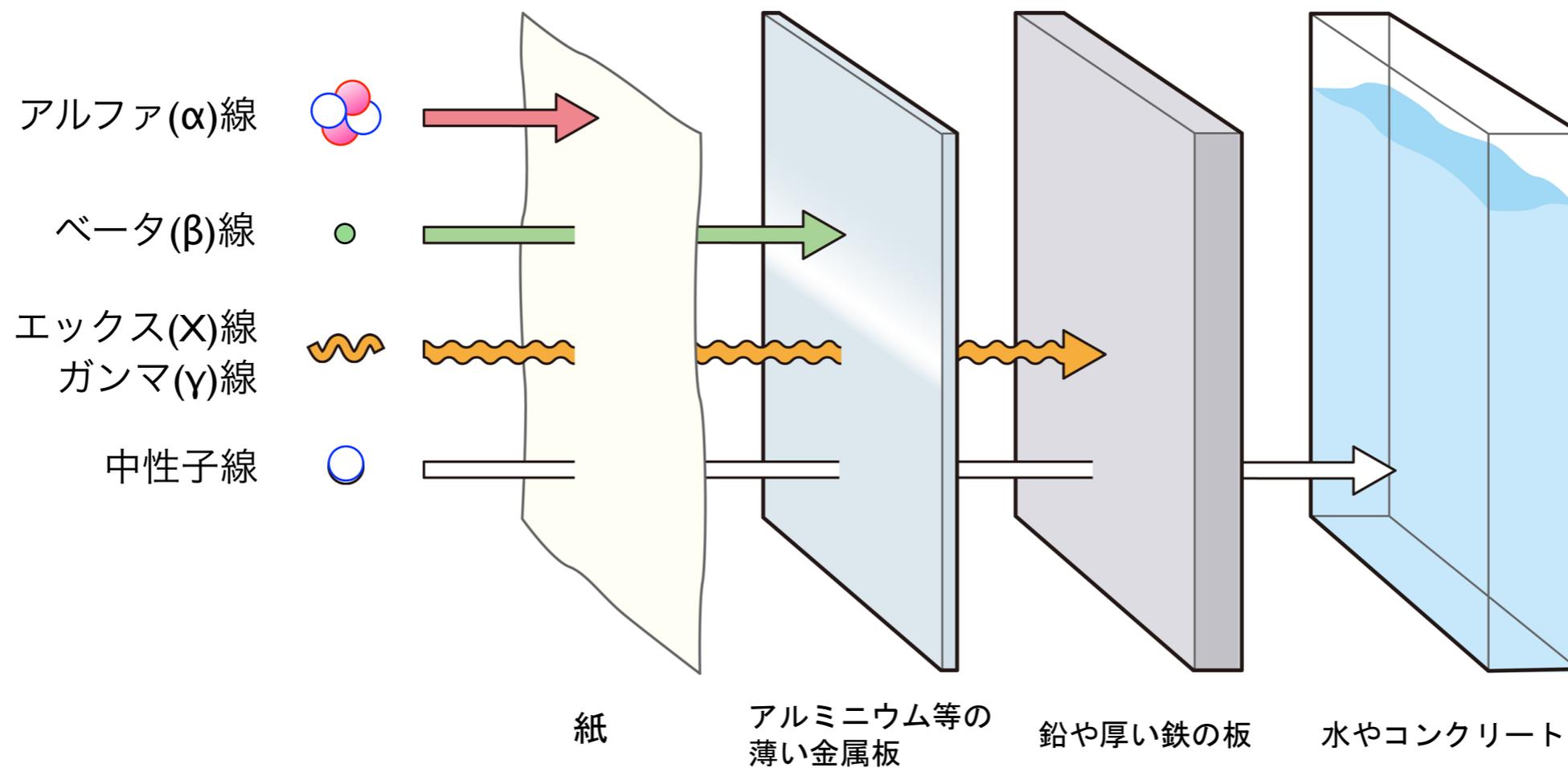
☞ **光速の数% ~ 100%**



放射線と物質との相互作用

物質中でのエネルギー損失過程

放射線の種類と透過力



荷電粒子（ α 線・ β 線など）の減速（**エネルギー損失**）

荷電粒子は物質中の多数の電子を蹴散らかしつつ
徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

単位距離当たりの**エネルギー損失** $-\left\langle\frac{dE}{dx}\right\rangle$ が重要

光子（X線・ γ 線）の減衰（減弱）

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

反応断面積 σ （単位距離当たりの**反応確率**を与える）が重要

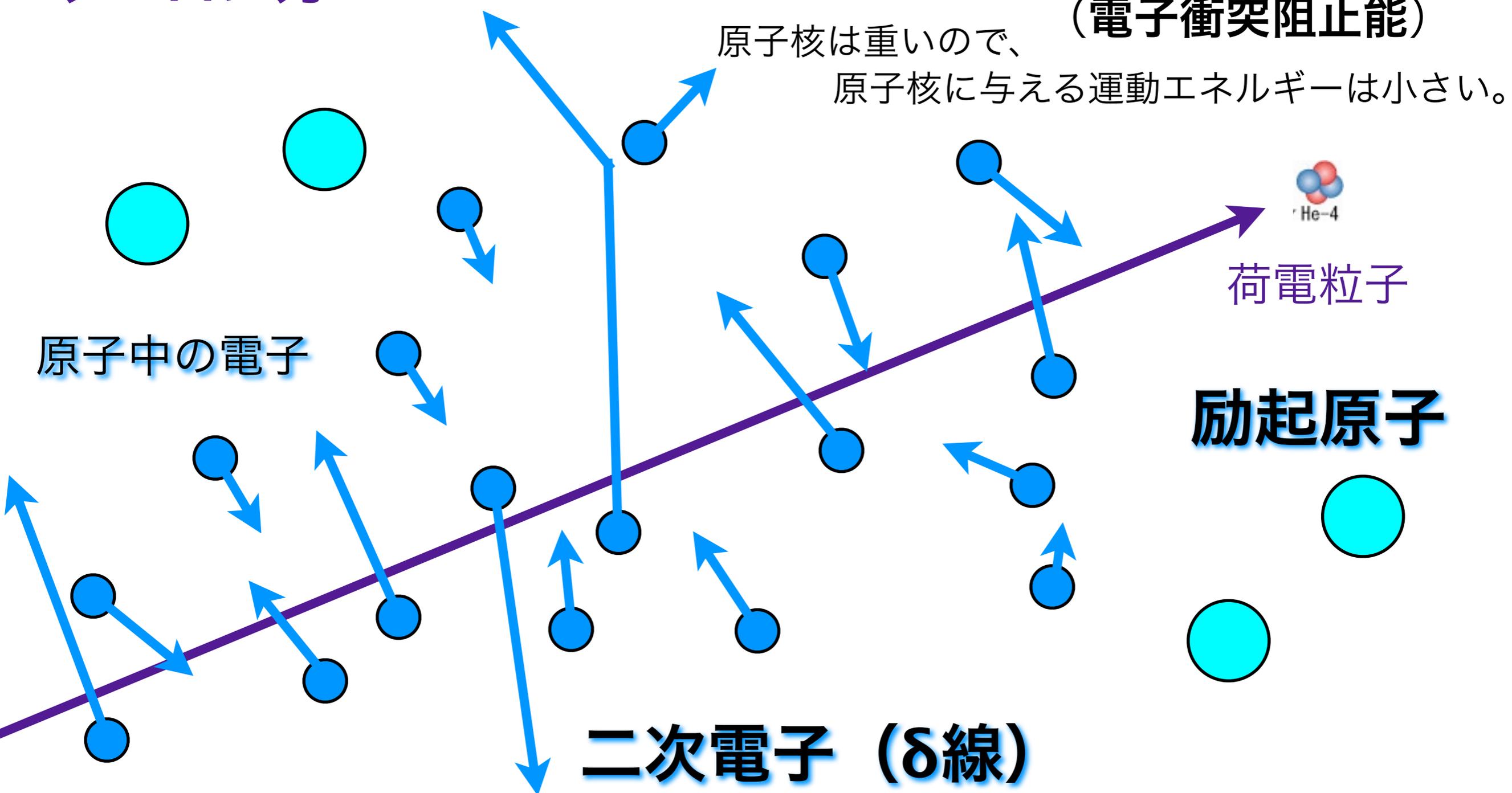
荷電粒子のエネルギー損失過程

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される。

荷電粒子：
クーロン力

(電子衝突阻止能)

原子核は重いので、
原子核に与える運動エネルギーは小さい。



荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

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

励起原子

電子

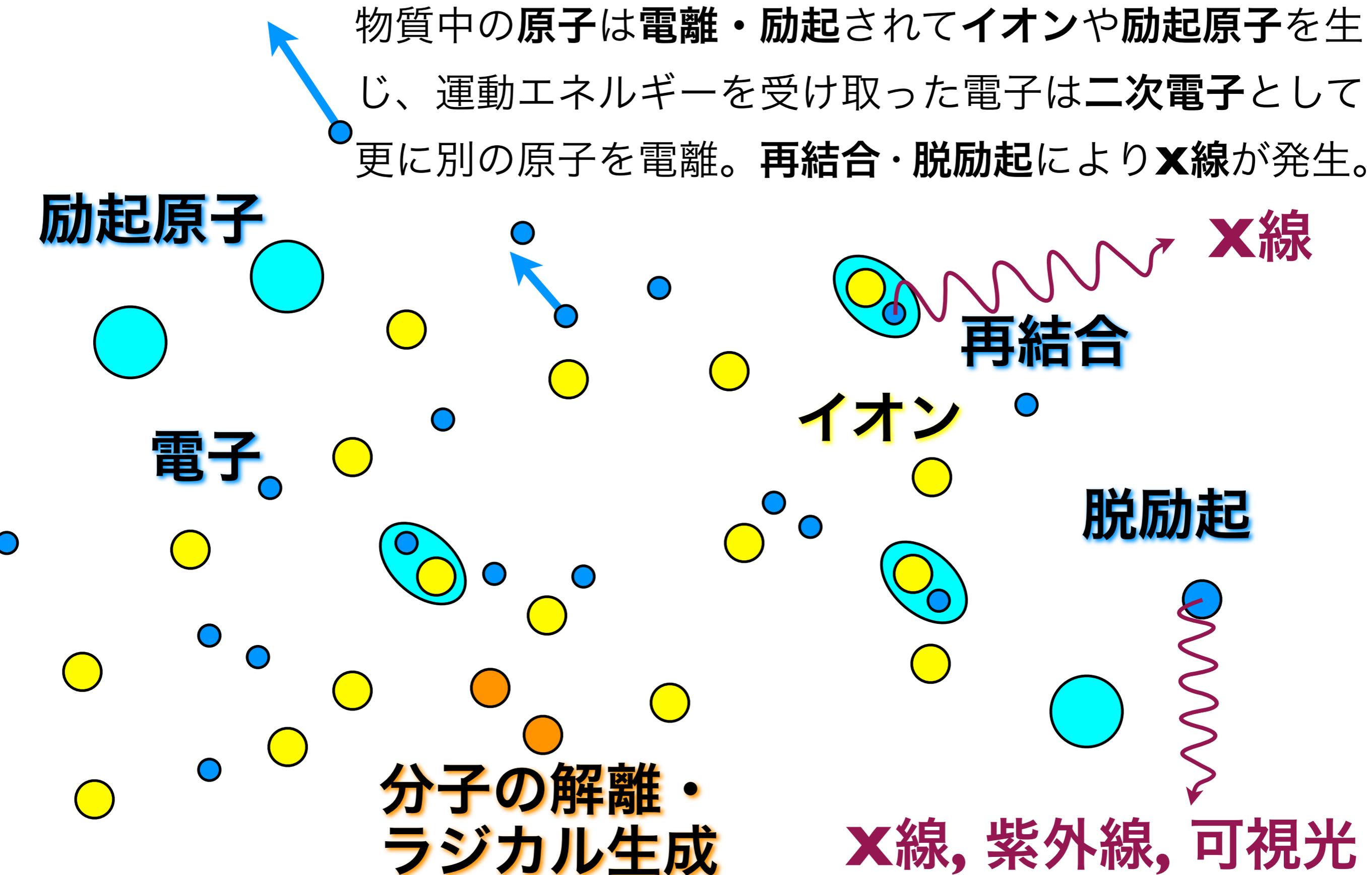
イオン

再結合

脱励起

分子の解離・ラジカル生成

X線, 紫外線, 可視光



荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

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

原子の電離（イオン化）・励起

励起原子の脱励起

X線、紫外線・可視光

イオン・電子の再結合

化学結合の切断、組み替え

ラジカル、活性分子の生成

DNA の損傷

シンチレーション光

(放射線による原子・分子の蛍光)

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

荷電粒子の阻止能 (**エネルギー損失**)

Stopping power

Energy Loss

(線エネルギー付与)

Bohr の計算

Linear Energy Transfer : LET

ただし式の単位系を国際単位系 SI に直した。

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

黒板にて導出

Bethe-Bloch の式

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

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

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

水素以外はほぼ $Z/A \approx 1/2$

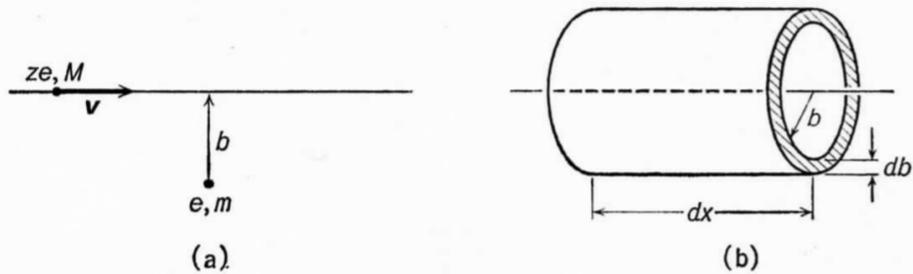
物質の種類にさほど依らない

質量阻止能
MeV / (g / cm²)

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

4-2 荷電粒子の物質内でのエネルギー損失†

荷電粒子が物質中を通るとき、物質を構成している原子の電子と電磁相互作用をおこしエネルギーを損失する(電離損失)。またそのときイオン化現象で軌道から飛び出す電子によって荷電粒子の検出が可能になる。次に荷電粒子がエネルギーを損失する機構を古典的に考察してみよう。



4.2 図

4.2 図(a)のように、質量 M 、電荷 ze の荷電粒子が速度 v で原子の電子(質量 m 、電荷 e)から b の距離を運動しているとする。さらに粒子が電子に最も接近したとき、電子は静止状態にあるとしよう。電荷 ze の電界によって電子は衝撃を受けるので、粒子の通過後電子には運動量を与えら

† 4-2~4-4 の考察は主として Fermi の方法(参考書 4. 参照)に従う。

I の平均値 \bar{I} と考えてよい。(9) はあくまで近似的に求めた式であり非相対論的であって、粒子の散乱も考慮していない。しかしエネルギー損失がどの変数の関数であるかを示し、エネルギー損失の大まかな計算をするためには便利な式である。

新物理学シリーズ14「高エネルギー物理学」山本祐靖 著、培風館(1973)(絶版)より抜粋。ほかに、William R. Leo, "Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments", Springer-Verlag (1987) が詳しい。

れる。この場合電界は b 方向の垂直成分 E_{\perp} だけを考えればよい(水平成分 E_{\parallel} は平均すると 0 になる)。 b 方向の衝撃 I_{\perp} は

$$I_{\perp} = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp}(t) dt = e \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(t) dt$$

$$= e \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(x) \frac{dt}{dx} dx = \frac{e}{v} \int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(x) dx \quad (6)$$

SI (MKSA) 単位系での式を記す。

と与えられる。Gauss の法則を使えば
本書は CGS-Gauss 単位系での記述。~ に注意

$$\int_{-\infty}^{\infty} E_{\perp}(x) dx = \frac{2ze}{b}$$

$$I_{\perp} = \frac{2ze^2}{bv}$$

となるので、電子に与えられた運動量 p は $p = I_{\perp} = \frac{2ze^2}{bv}$ である。これをエネルギーに書きかえると

$$E = \frac{p^2}{2m} = \frac{2z^2e^4}{mv^2b^2}$$

となる。次に荷電粒子の通る物質中に 4.2 図(b)のような厚さ db の中空円筒があるとす。物質中の電子の密度を n_e とすると、この壁の中の電子によって生じる荷電粒子のエネルギー変化 dE は

$$-dE(b) = \frac{4\pi n_e dx}{mv^2} z^2 e^4 \frac{db}{b} \quad (7)$$

で与えられる。 b を b の最低値から最大値まで積分すると

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} n_e \ln \left| \frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right| \quad (8)$$

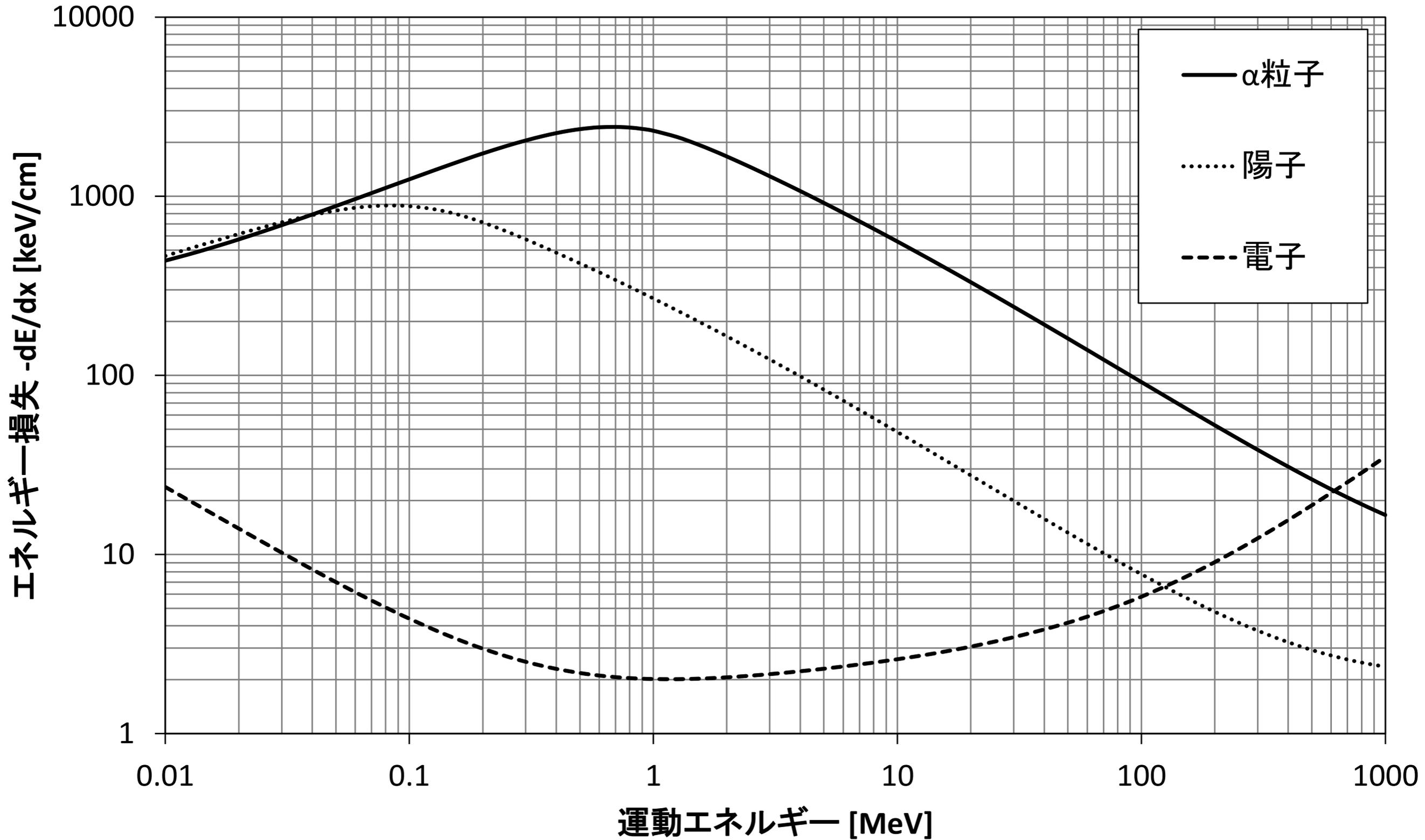
と単位距離に対するエネルギー損失率が与えられる。

量子力学により、粒子には粒子性と波動性があり、運動量 p をもった電子の波長は de Broglie (ド・ブローイ) の式で $\lambda = h/p$ (h は Planck の定数 h を 2π で割った数) で与えられ、 b はこの波長より短くはならないと考えられる。荷電粒子から電子を観測した場合、つまり荷電粒子が静止状態の座標系では電子の速度は v であるから、 $b_{\min} \approx \lambda = h/mv$ となる。また電子が軌道を一周する周期を τ とすると、電子に運動量を与えられるためには、衝突がおきる時間が τ と大体同じか短くなければならない。この時間を t とすると、 $t \approx b/v$ であり、上の条件を満たすためには $t = b/v \leq \tau = 1/\nu$ (ν は電子のこの軌道での周波数) でなければならない。これより $b_{\max} = v/\nu$ となる。 b_{\max} と b_{\min} の値を(8)に代入すると

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4}{mv^2} n_e \ln \left| \frac{mv^2}{h\nu} \right| \quad (9)$$

が得られる。ここで $h\nu$ は大体この原子の各軌道のイオン化ポテンシャル

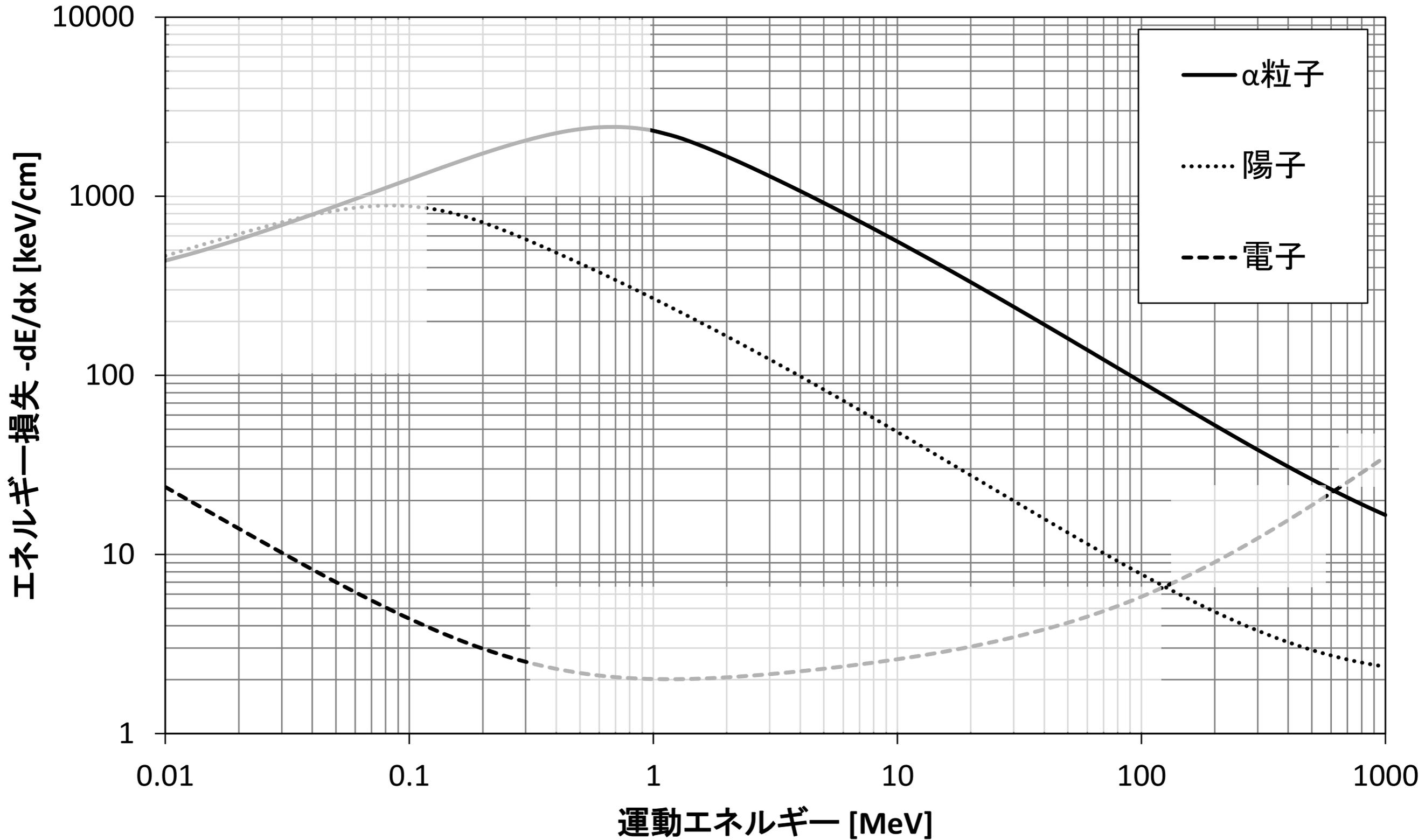
図A: さまざまな荷電粒子に対する空気の阻止能



質量阻止能
MeV / (g / cm²)

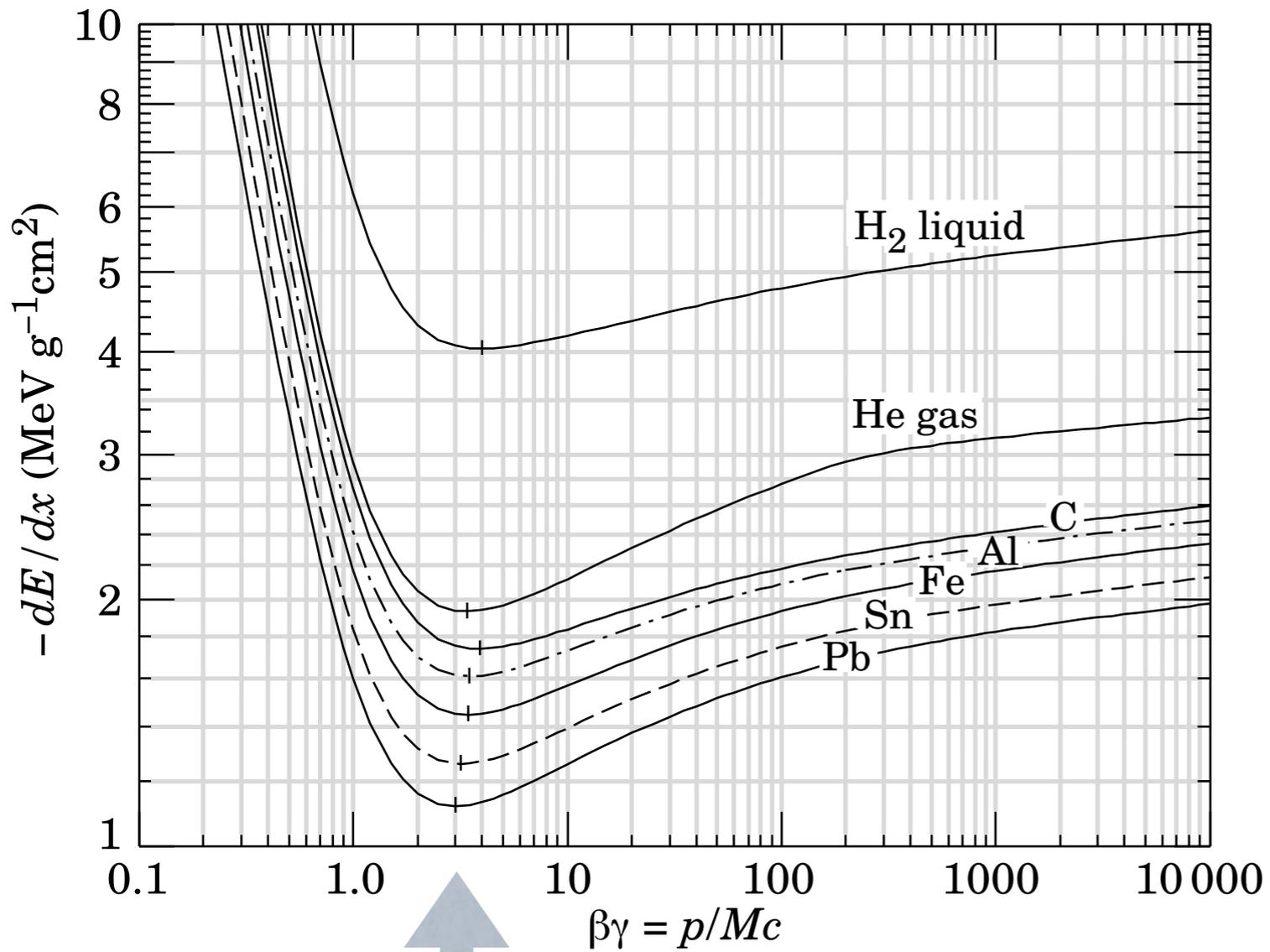
$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

図A: さまざまな荷電粒子に対する空気の阻止能

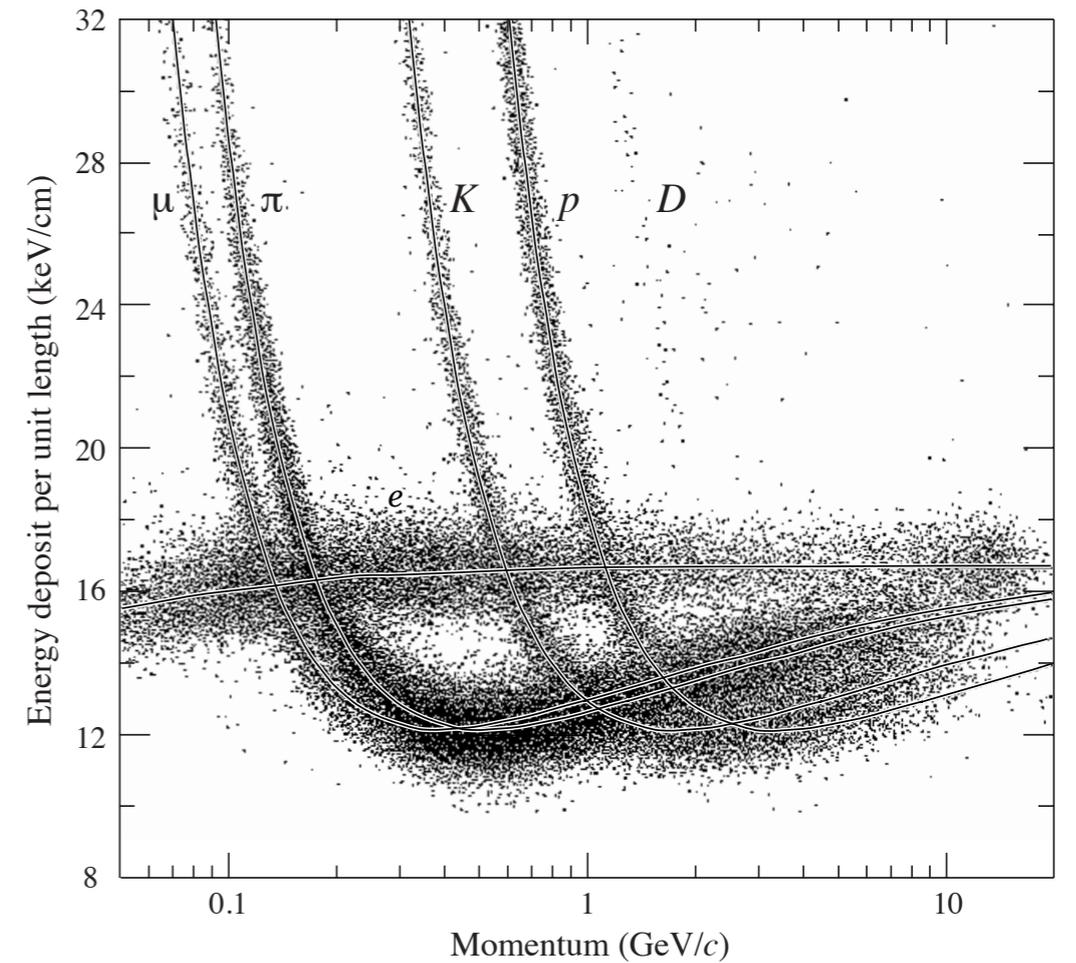


質量阻止能
MeV / (g / cm²)

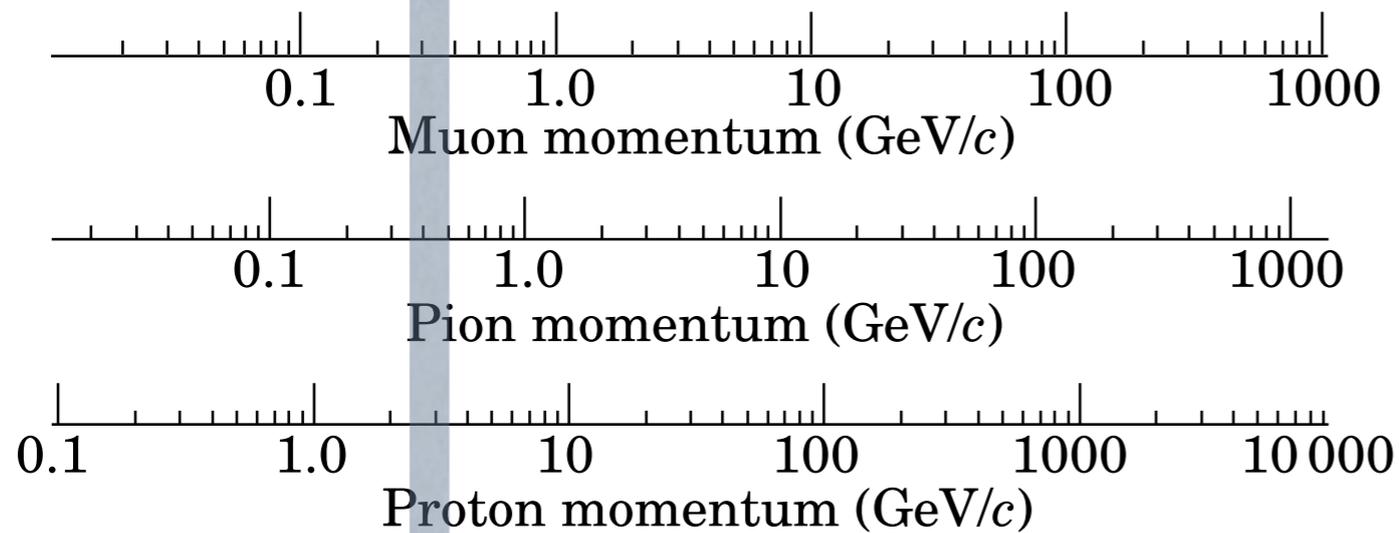
$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$



粒子識別



(8.5 atm Ar-CH₄ 80:20)

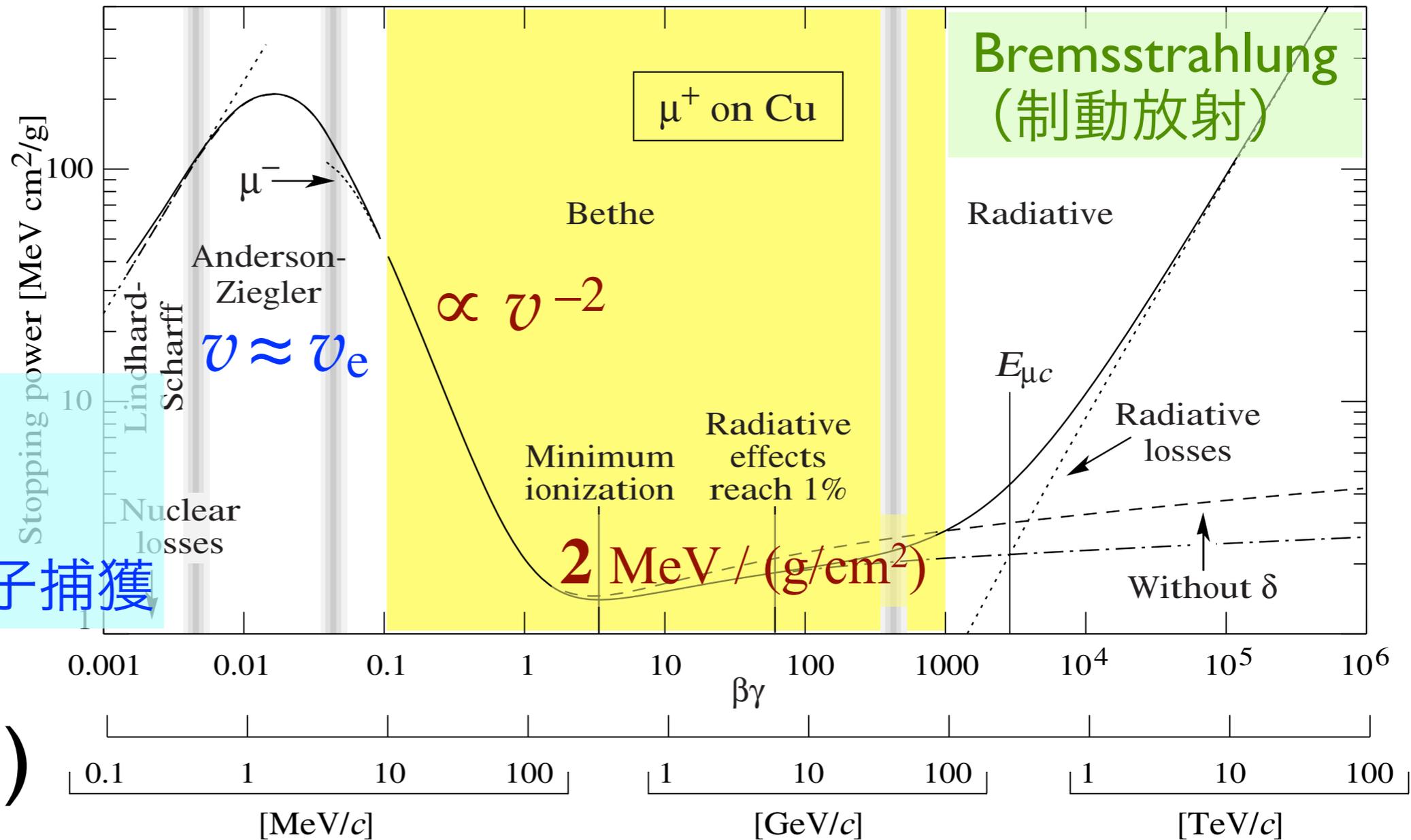


minimum ionizing $\approx 2 \text{ MeV} / (\text{g/cm}^2)$

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

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

- 非断熱的
- Barkas 効果
- イオンは電子捕獲



(線エネルギー付与)
keV / μm

Muon momentum

27.2.2. Stopping power at intermediate energies :

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

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

質量阻止能
MeV / (g / cm²)

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

阻止能（エネルギー損失、線エネルギー付与）

Stopping power

Energy Loss

Linear Energy Transfer : LET

陽子線(p) / α 線 / 重粒子線 : 高 LET 放射線

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

電子(β)線 : 低 LET 放射線

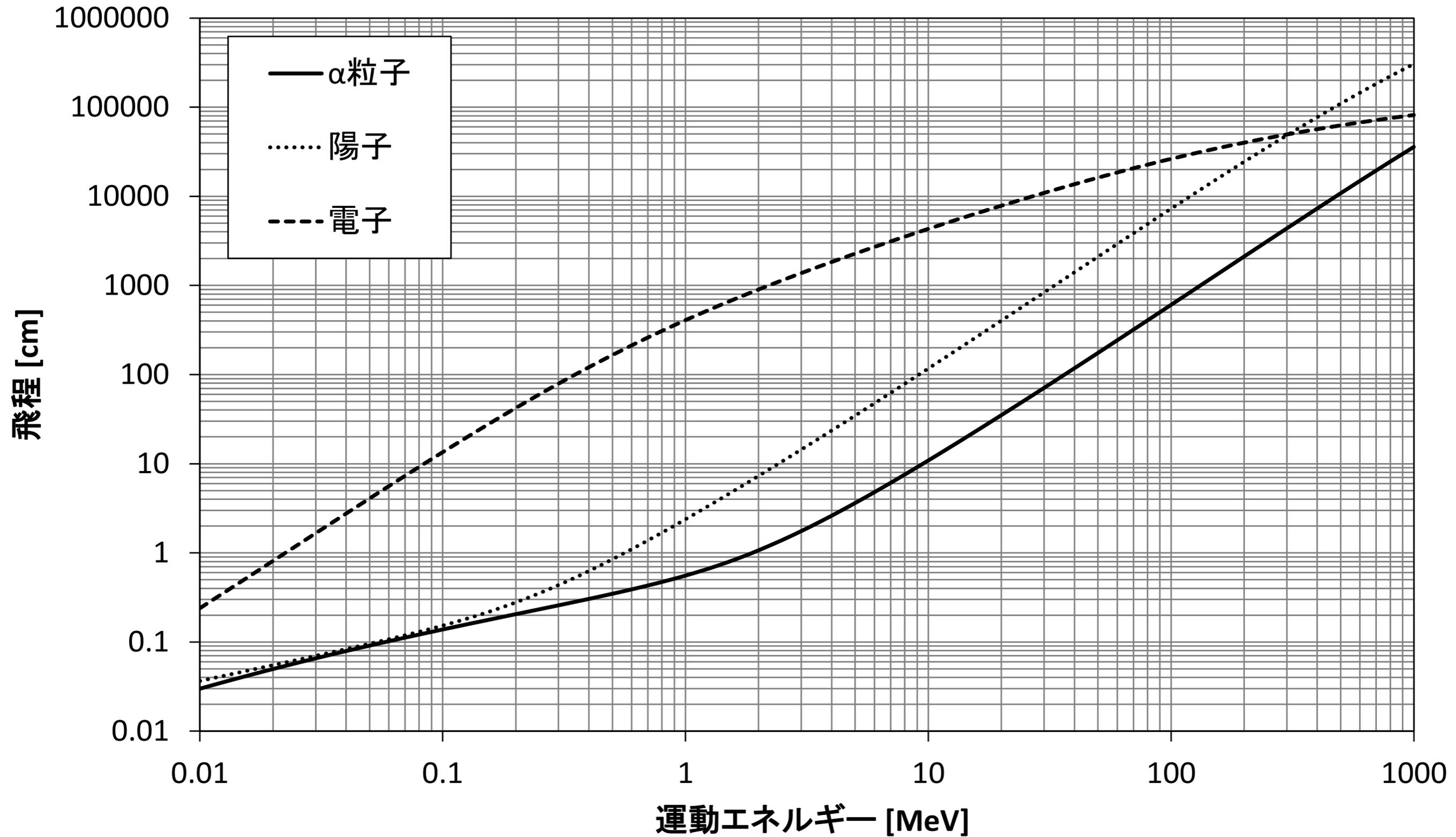
光子(X線, γ 線) : 物質中の電子を弾き出す。

あるいは高エネルギーでは電子陽電子対を生成する。
低い LET。

物質の種類にさほど依らない

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

図B: さまざまな荷電粒子の空気中での飛程



飛程 Range
阻止能の逆数を積分。

$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle^{-1} dE$$

飛程

Range

阻止能の逆数を積分。

陽子線(p) / α 線 / 重粒子線：短い飛程。

外部被曝に対して、遮蔽は容易。

中性子線(n)：電子と相互作用しないので遠くまで飛ぶ。

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

短い飛程。水素原子を含む物質で遮蔽。

電子(β)線：p, α , 重粒子線に比べて長めの飛程。

軽いので散乱されやすい（相手も電子）。

物質の種類にさほど依らない

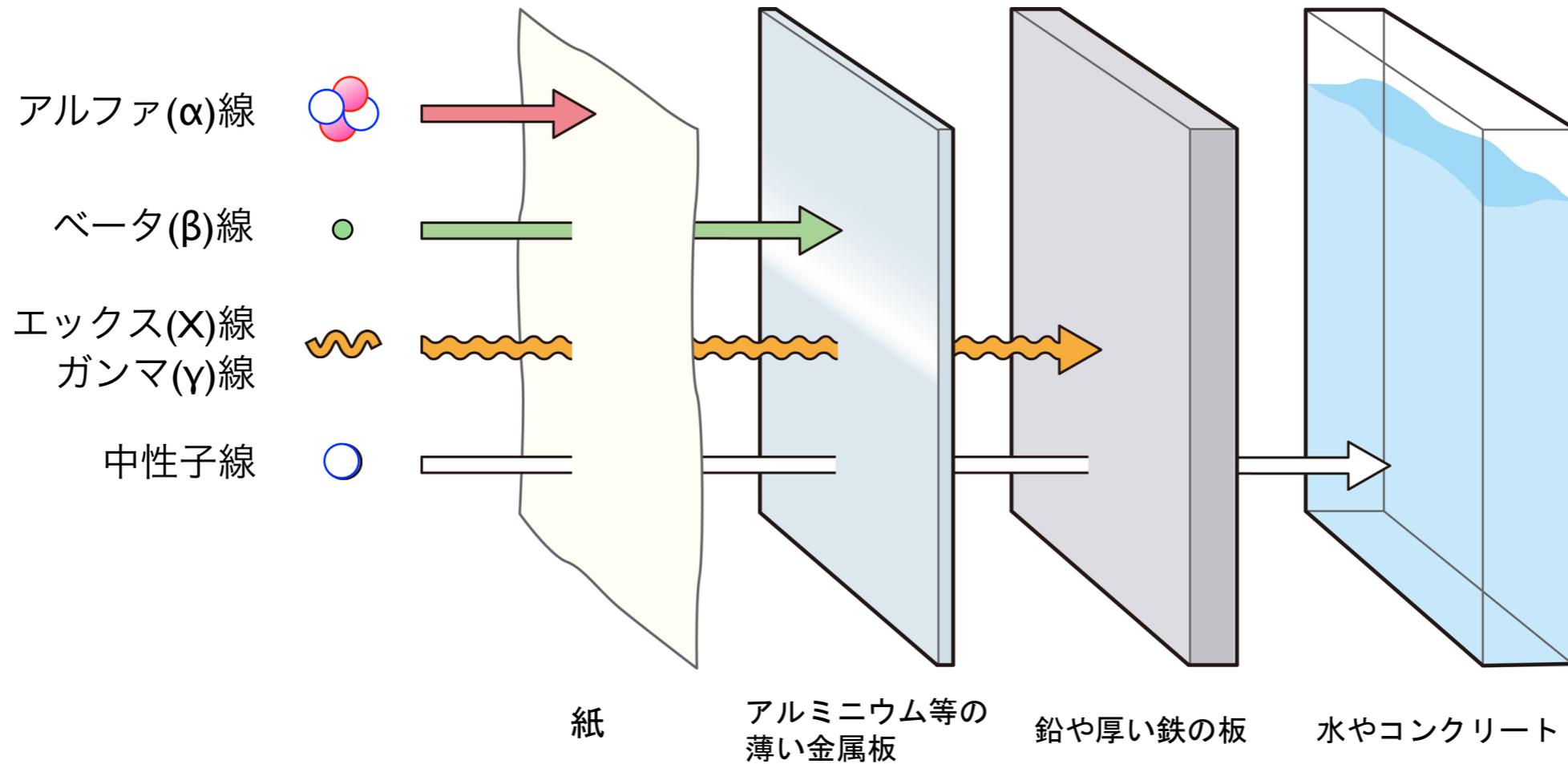
$$\begin{array}{l} \text{質量阻止能} \\ \text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2) \end{array} \quad - \frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

飛程

Range

阻止能の逆数を積分。

$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle^{-1} dE$$



質量阻止能
MeV / (g / cm²)

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

放射線の透過力・線量計算

- **α 線は空気中の飛程が数 cm。**
生体では**表層**の細胞 2-3 個で止まる。
- **β 線も外部被曝では皮膚への影響を**考える (**β 線熱傷**)。
- **α 線も β 線も内部被曝が問題。**全てのエネルギーが短い飛程の間に細胞に与えられる。
- **γ 線は多くは相互作用 (光電効果・コンプトン散乱) せず体を素通りし、一部が体内で吸収される。**外部被曝でも体内も被曝する。
- **X線の場合も吸収されるエネルギーは何割か程度。**

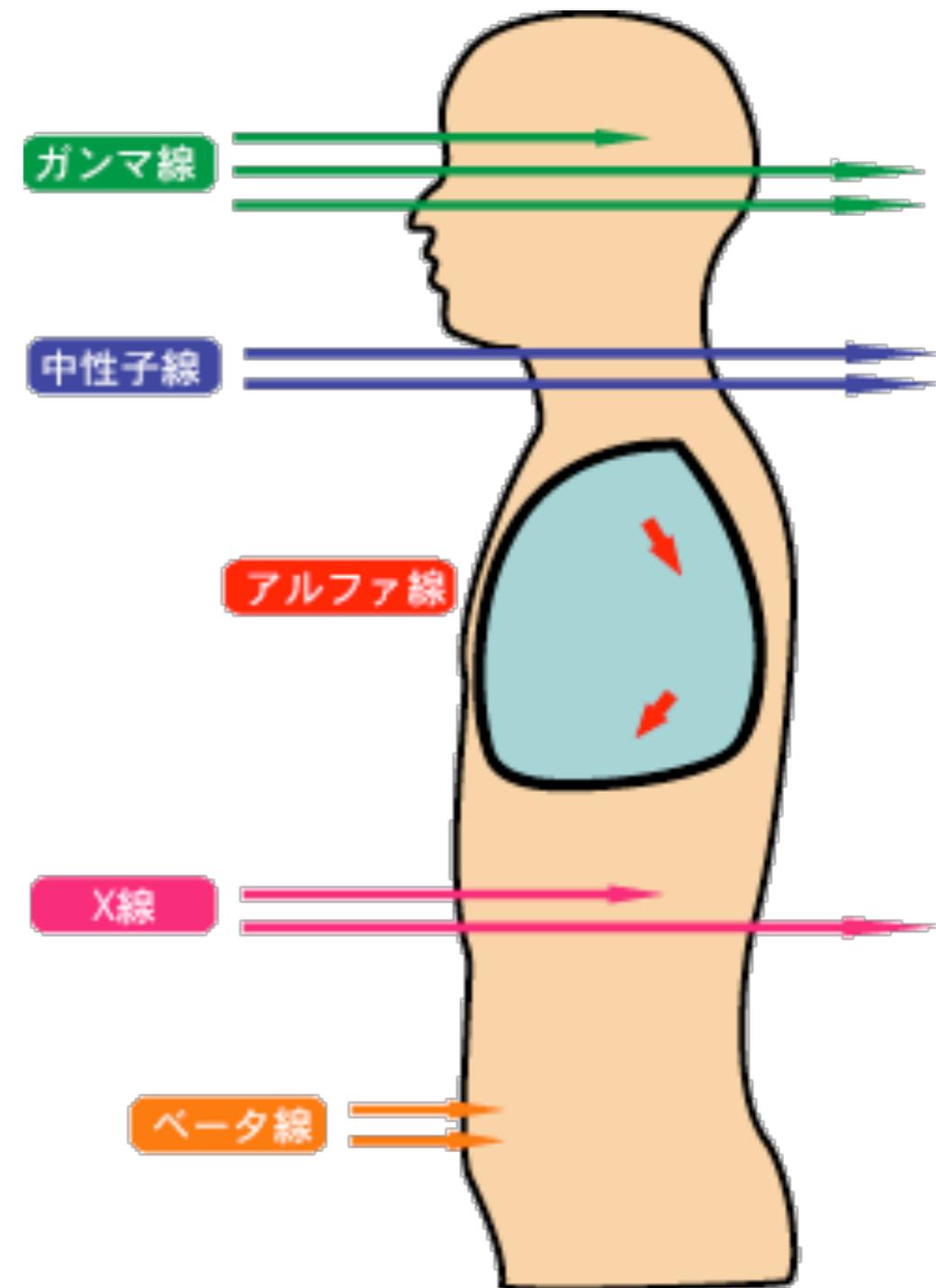


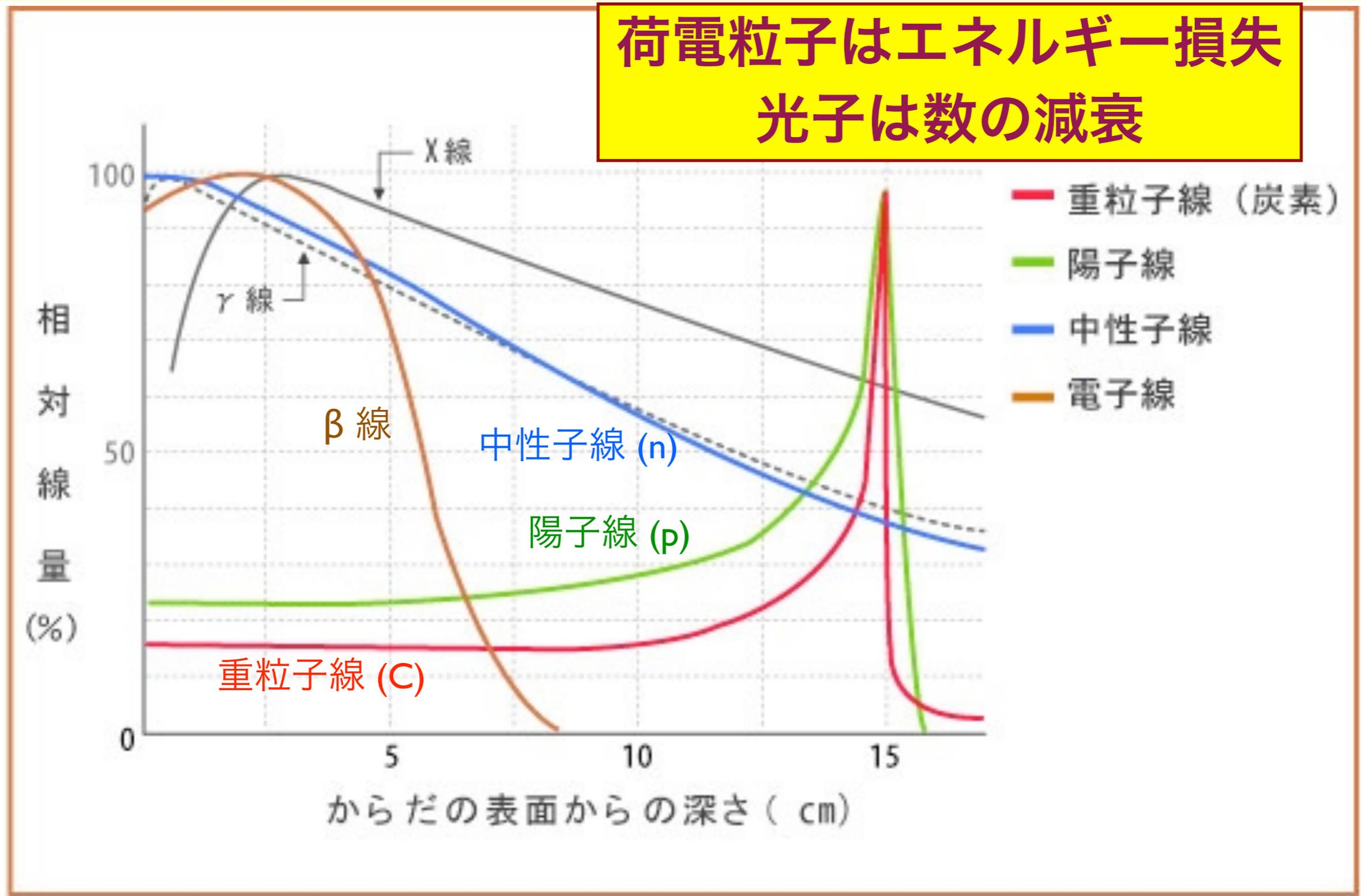
図3 人体を透過する放射線

陽子(p)、 α 、重粒子線は飛程が揃っている。

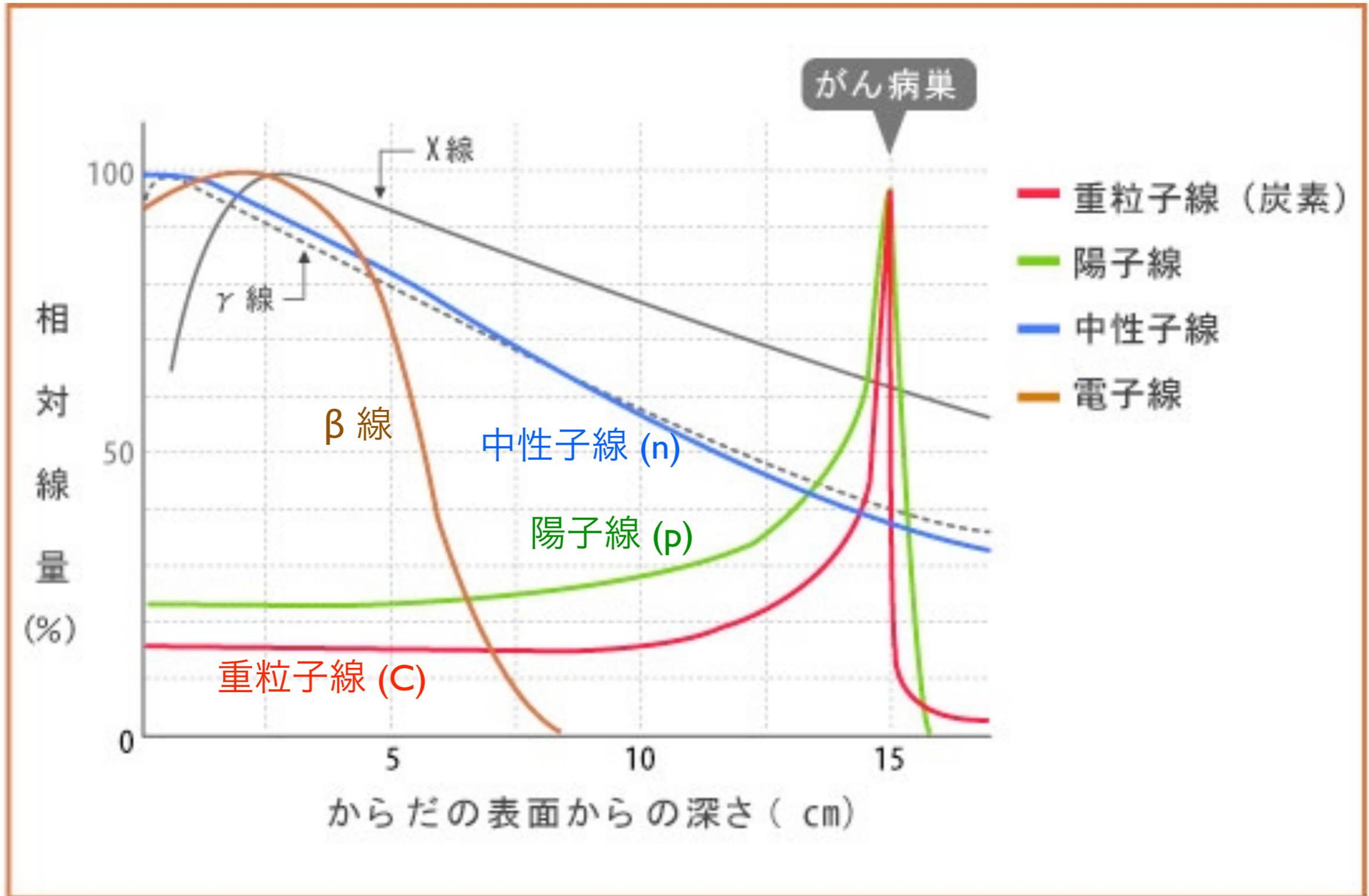
電子(β)は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

中性子(n)、光子(X, γ) は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失
光子は数の減衰**



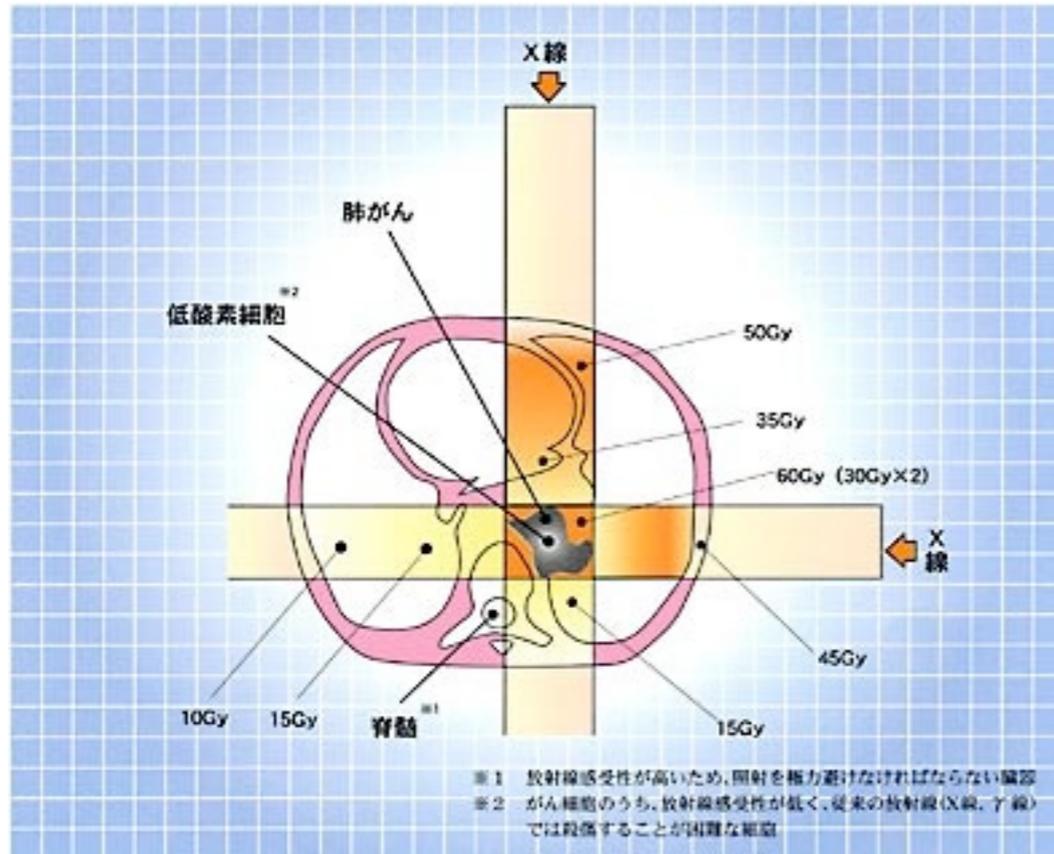
Bragg peak



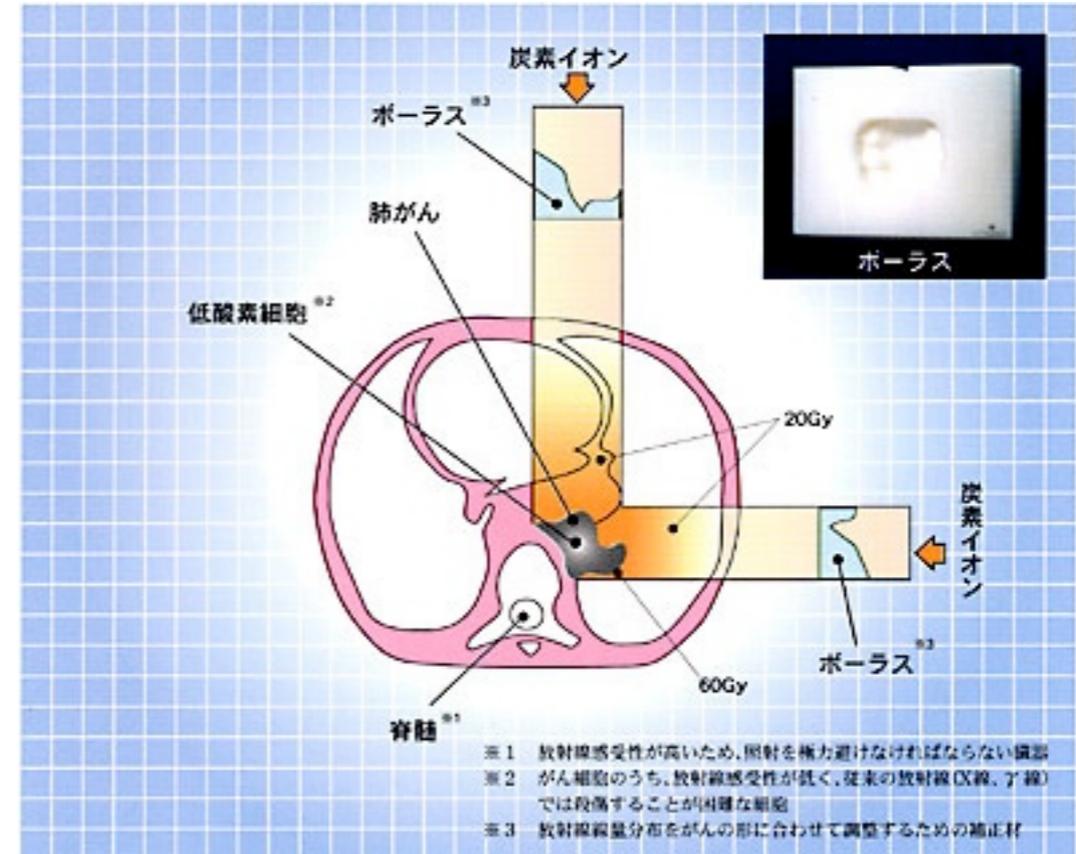
放射線医療：がん治療

数 Gy を複数回

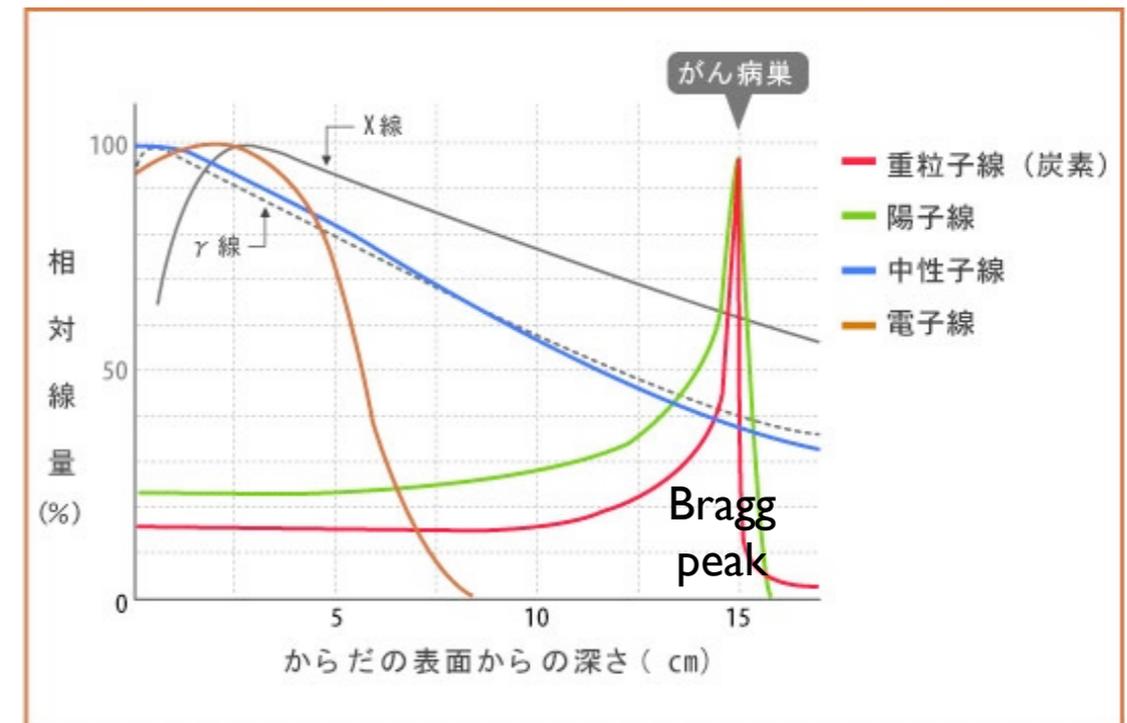
X線



重粒子線 (炭素イオン)



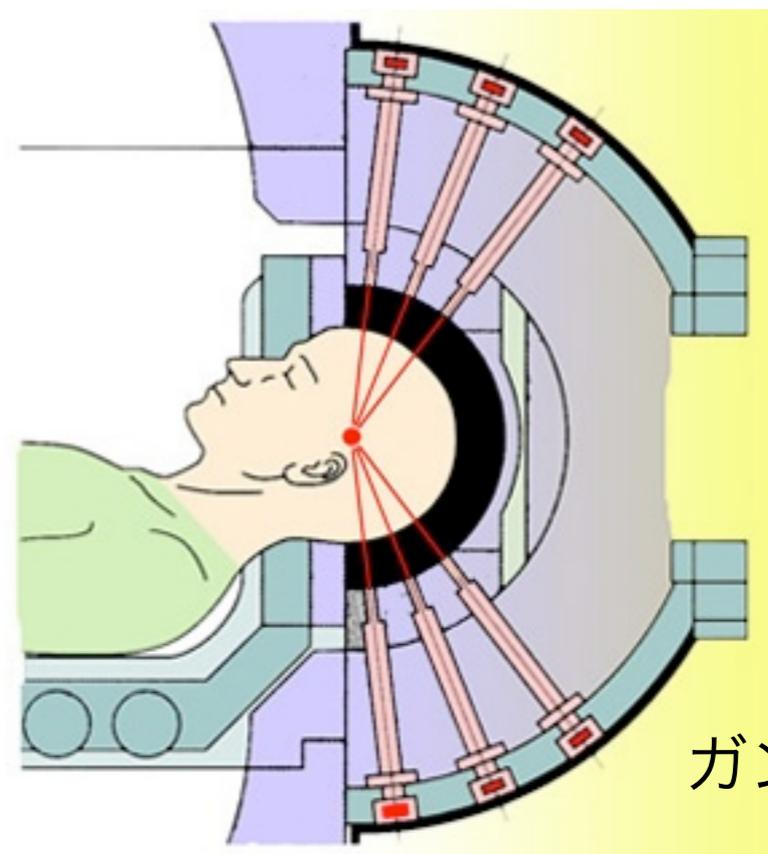
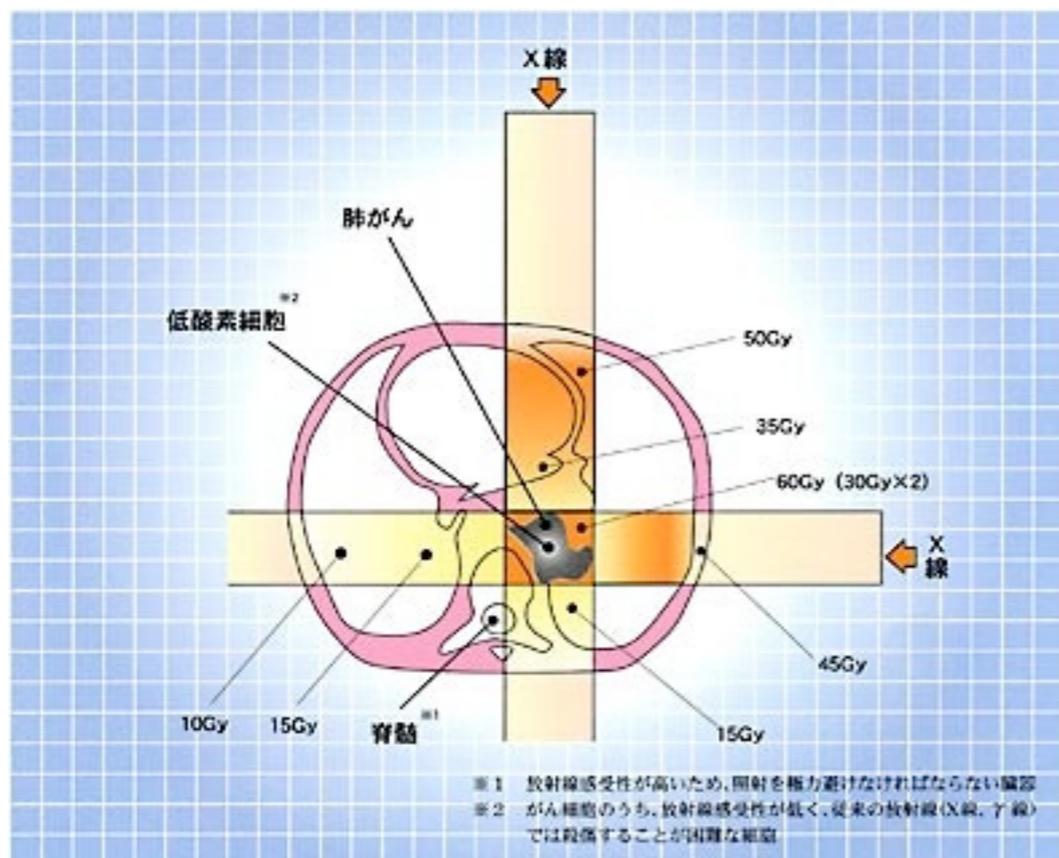
他には：ガンマナイフ、
陽子線、パイ中間子
研究中：反陽子



放射線 がん治療

数 Gy を数十回

X線 外部照射



ガンマナイフ

医療技術：ガンマナイフ (γ線)
サイバーナイフ (X線)

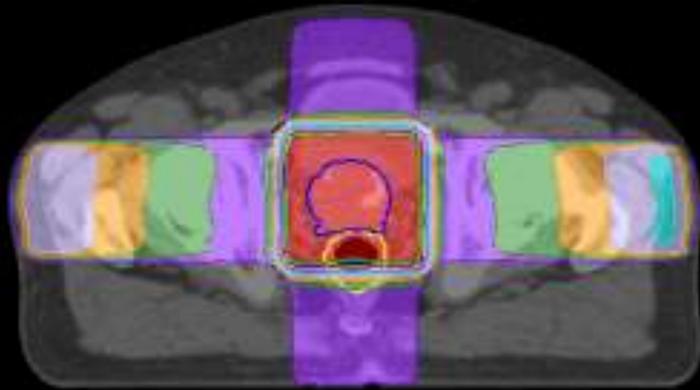


サイバーナイフ

写真提供：(独)放射線医学総合研究所

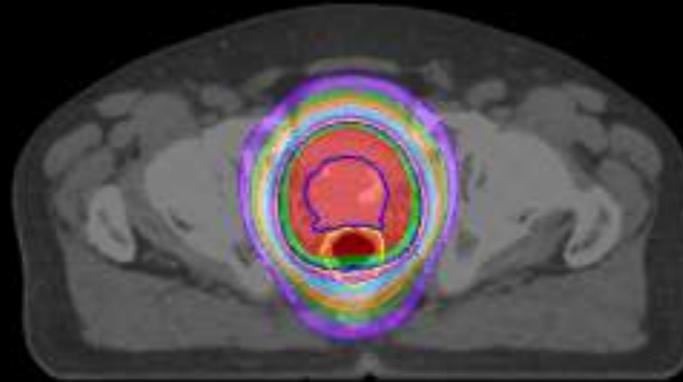
前立腺がんの例

前後左右4門照射



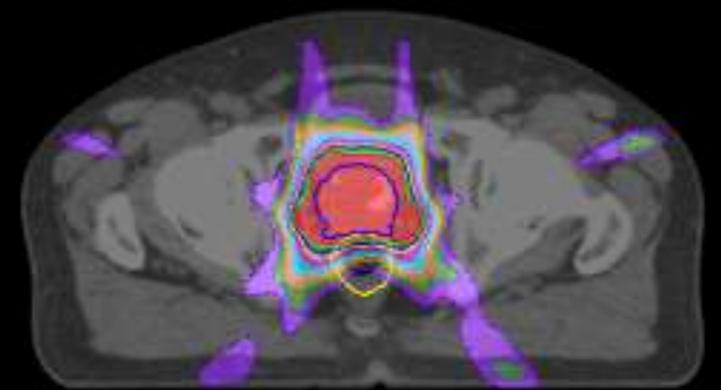
- 前立腺の他に、膀胱や直腸が高線量域に含まれる
- 70Gyが限界（難治性の晩期粘膜障害の発現を許容範囲に抑えるためには、実際には60～66Gy程度が限界となる）

3次元原体照射



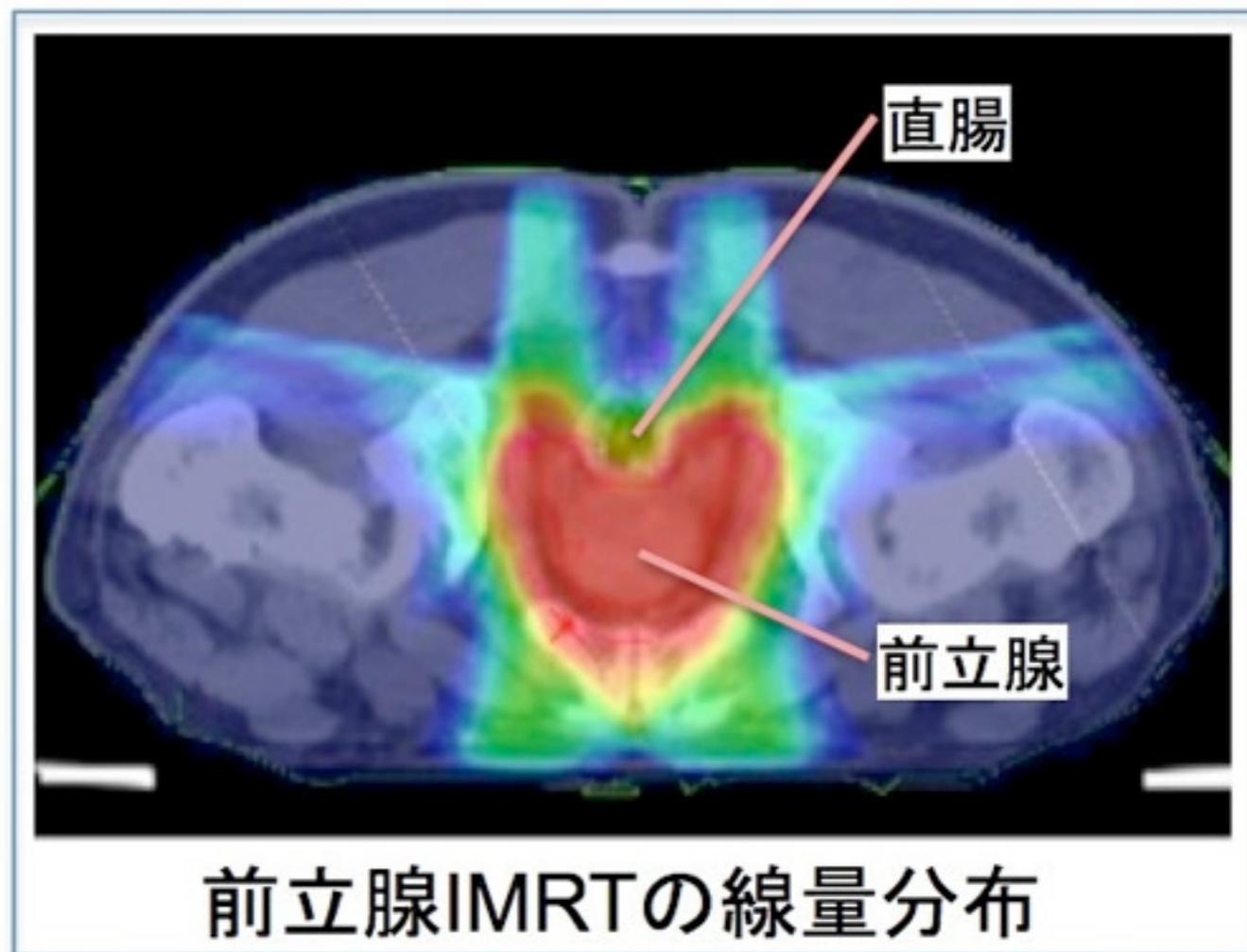
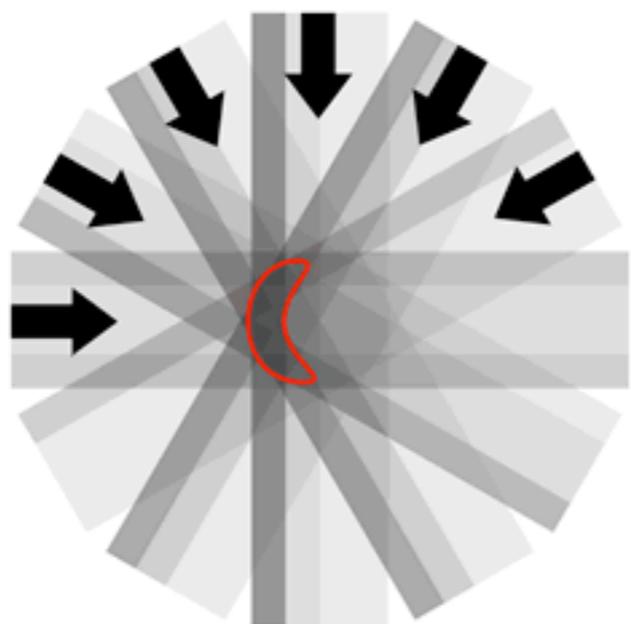
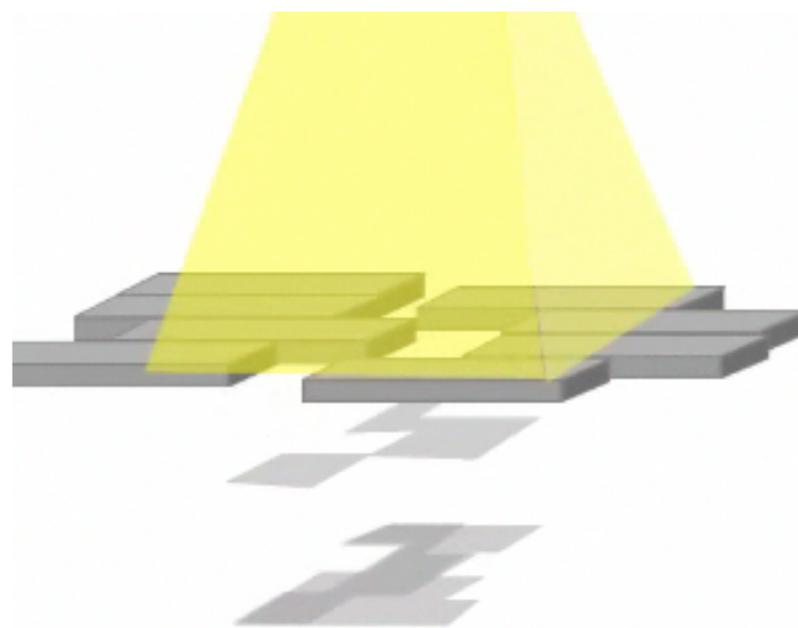
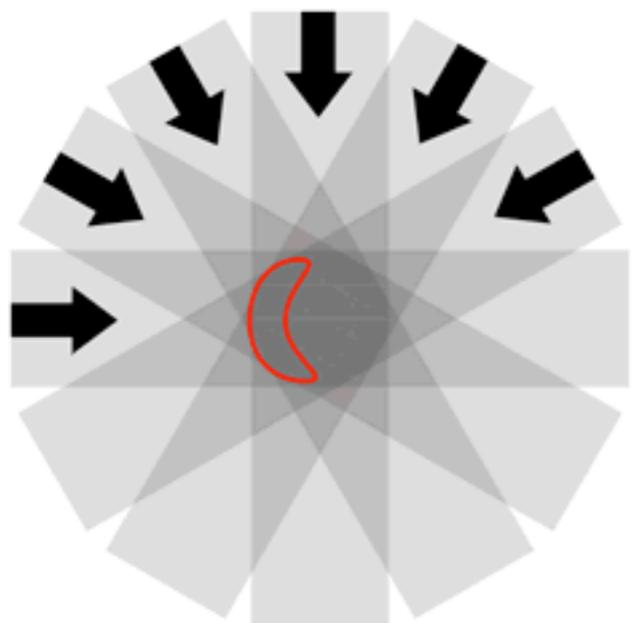
- 前立腺に線量が集中し、膀胱や直腸への線量が低く抑えられる
- 70Gy以上の投与が可能であるが、線量の集中に限界があり、線量増加に伴う副作用の増加が懸念される

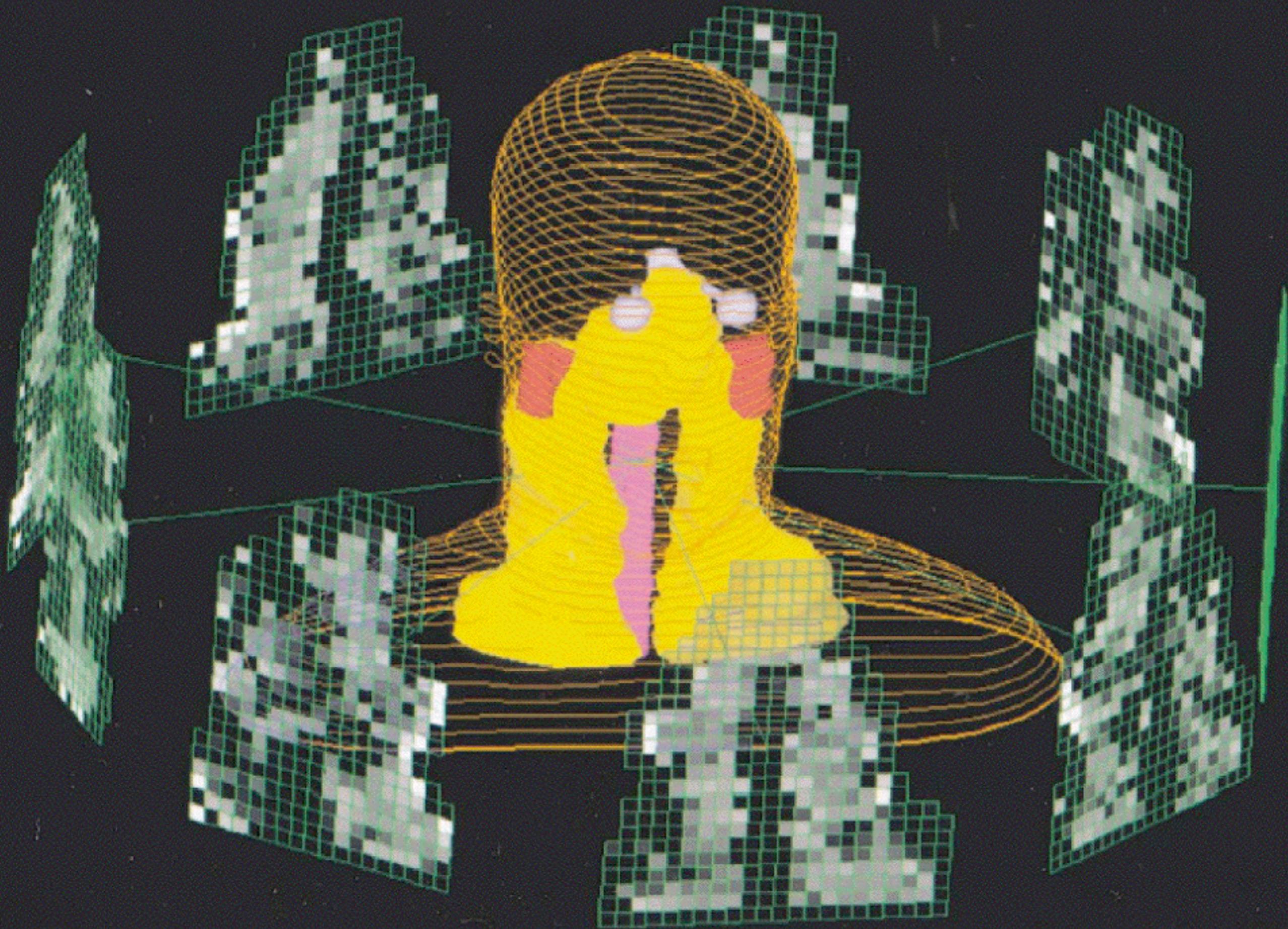
強度変調放射線治療



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

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





放射線と物質との相互作用

光子の物質中での減衰過程

荷電粒子（ α 線・ β 線など）の減速（**エネルギー損失**）

荷電粒子は物質中の多数の電子を蹴散らかしつつ
徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

単位距離当たりの**エネルギー損失** $-\left\langle\frac{dE}{dx}\right\rangle$ が重要

光子（X線・ γ 線）の減衰（減弱）

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

反応断面積 σ （単位距離当たりの**反応確率**を与える）が重要

光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

光電効果

コンプトン散乱

電子対生成

制動放射

原子核が反跳



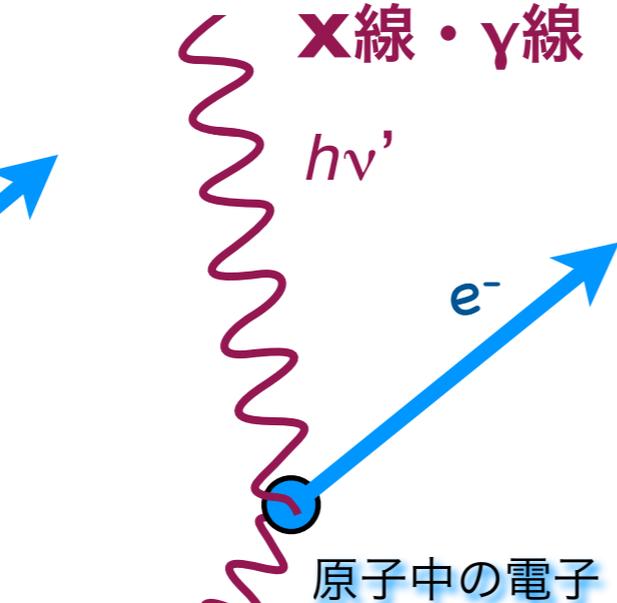
原子中の電子

$h\nu$
X線・γ線

光子が原子中の
電子1個を
たたき出す。
光子は消滅。

X線・γ線

$h\nu'$

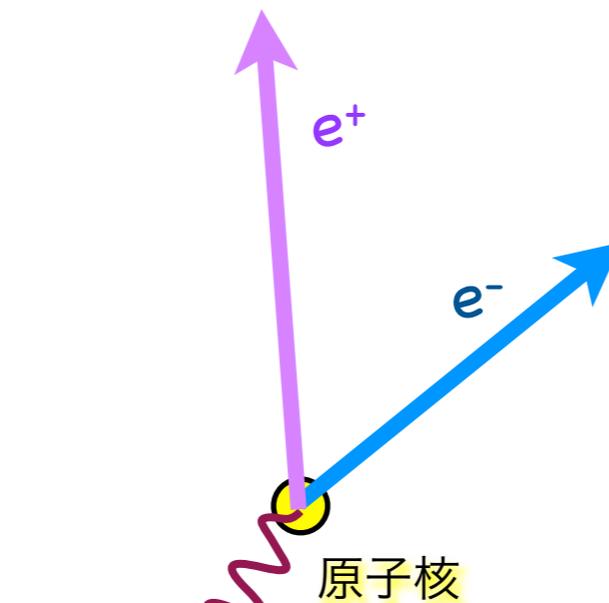


原子中の電子

$h\nu$
X線・γ線

光子が電子1個に
散乱され、光子は
大きくエネルギーを
減じる。

e^+

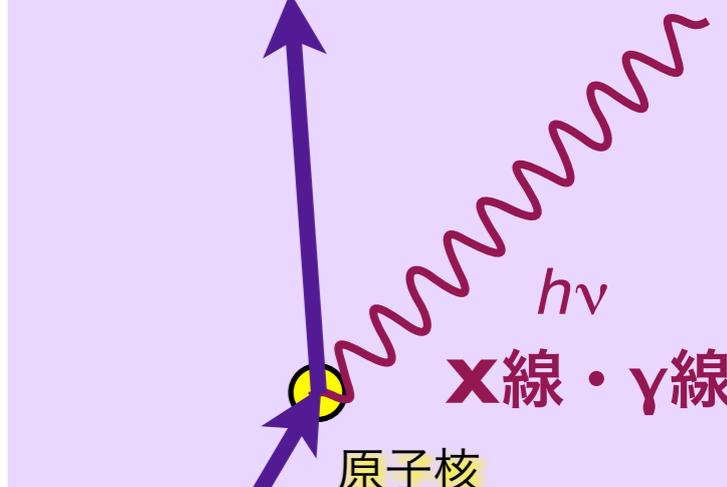


原子核

$h\nu$
X線・γ線

MeV 以上の光子が
電子・陽電子の対を
生成する。

荷電粒子



原子核

荷電粒子

荷電粒子が制止したり
軌道を曲げられたり
するとき光子を
放出する。

高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

光子

反応断面積

$$1 \text{ Mb} = (0.1 \text{ \AA})^2$$

1 Mb

1 kb

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = (10 \text{ fm})^2$$

1 b

1 mb

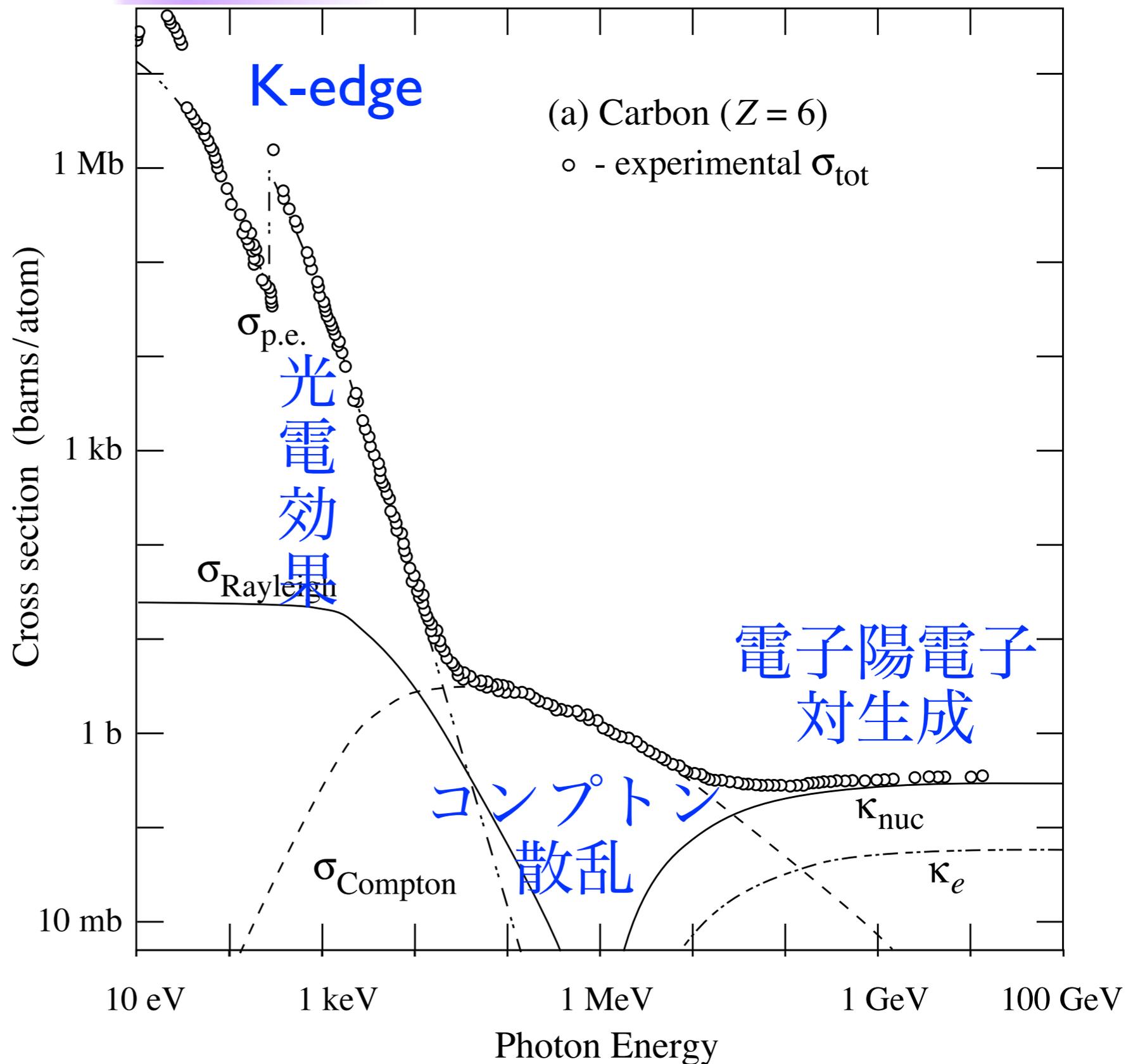
紫外線

X

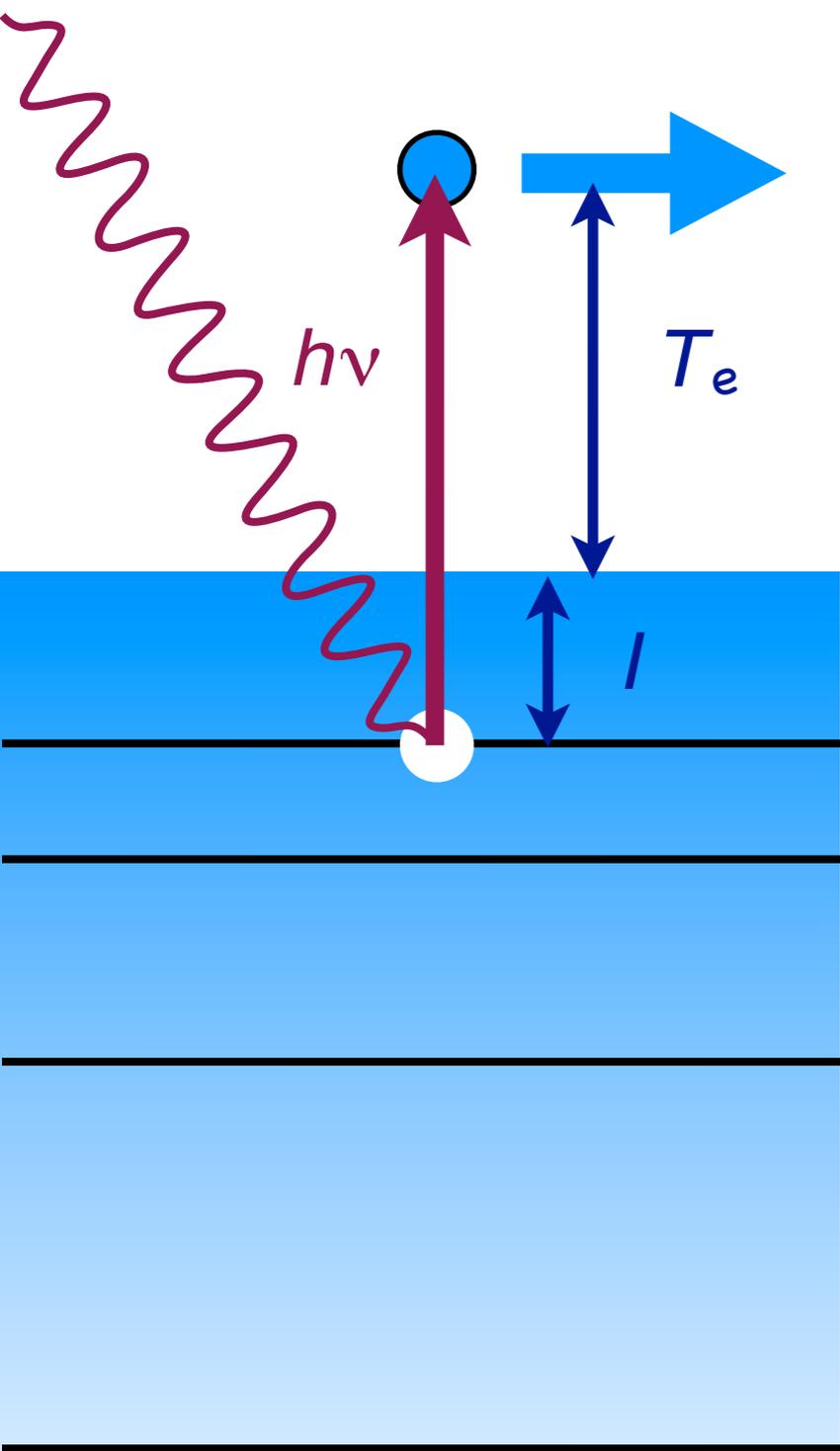
線

γ

線



光電効果

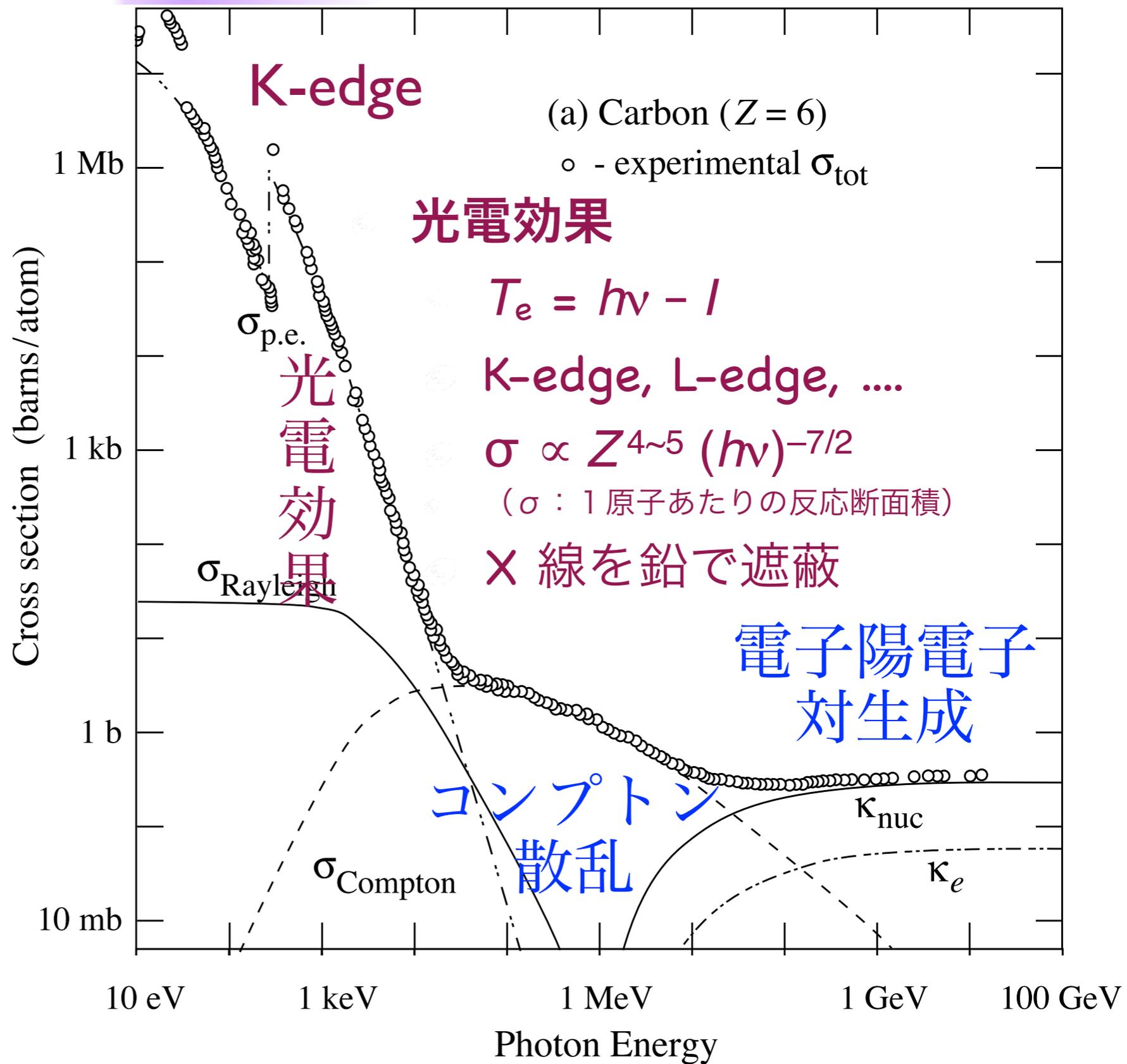


紫外線

X線

γ

線



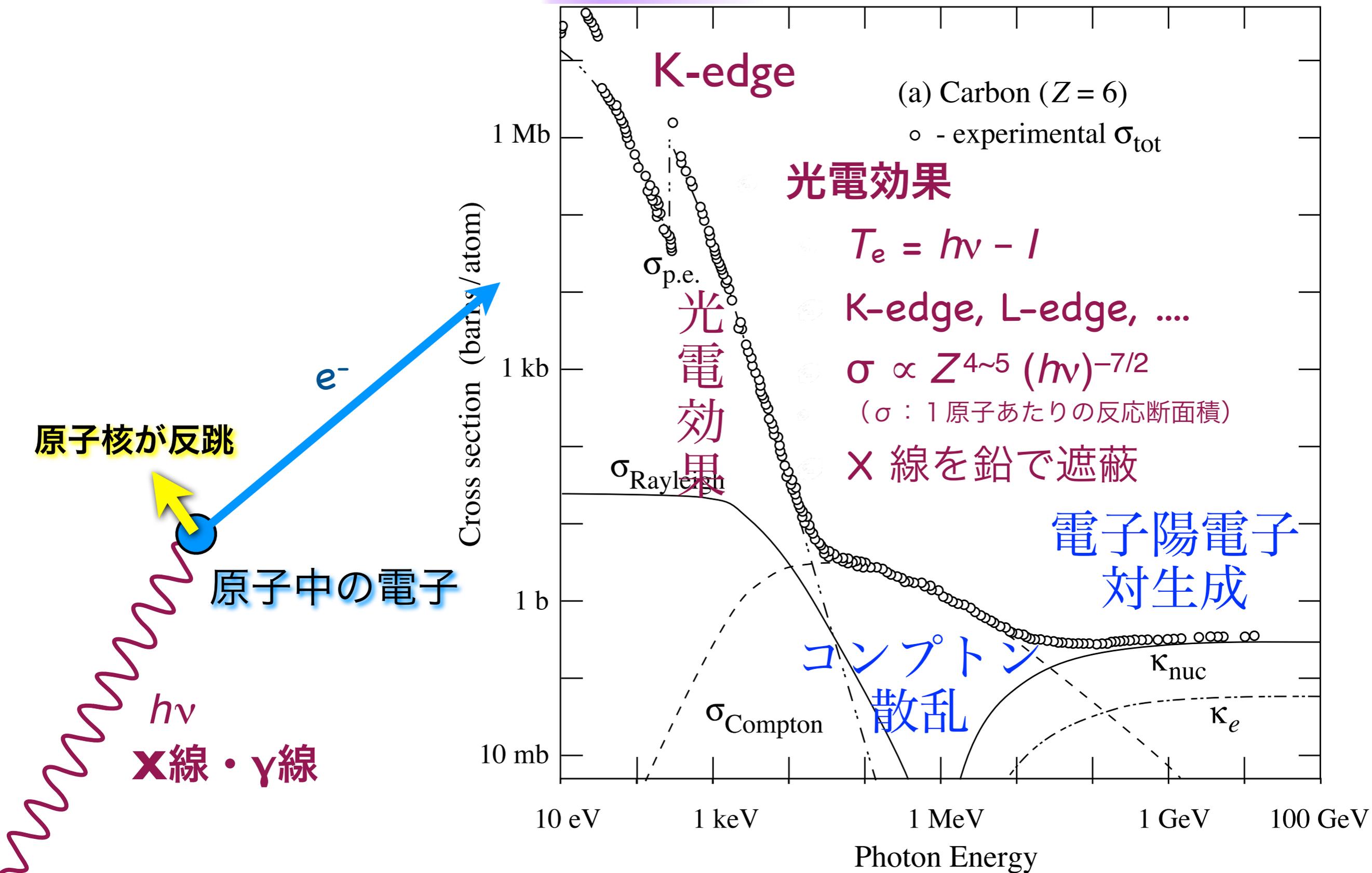
光電効果

紫外線

X線

γ

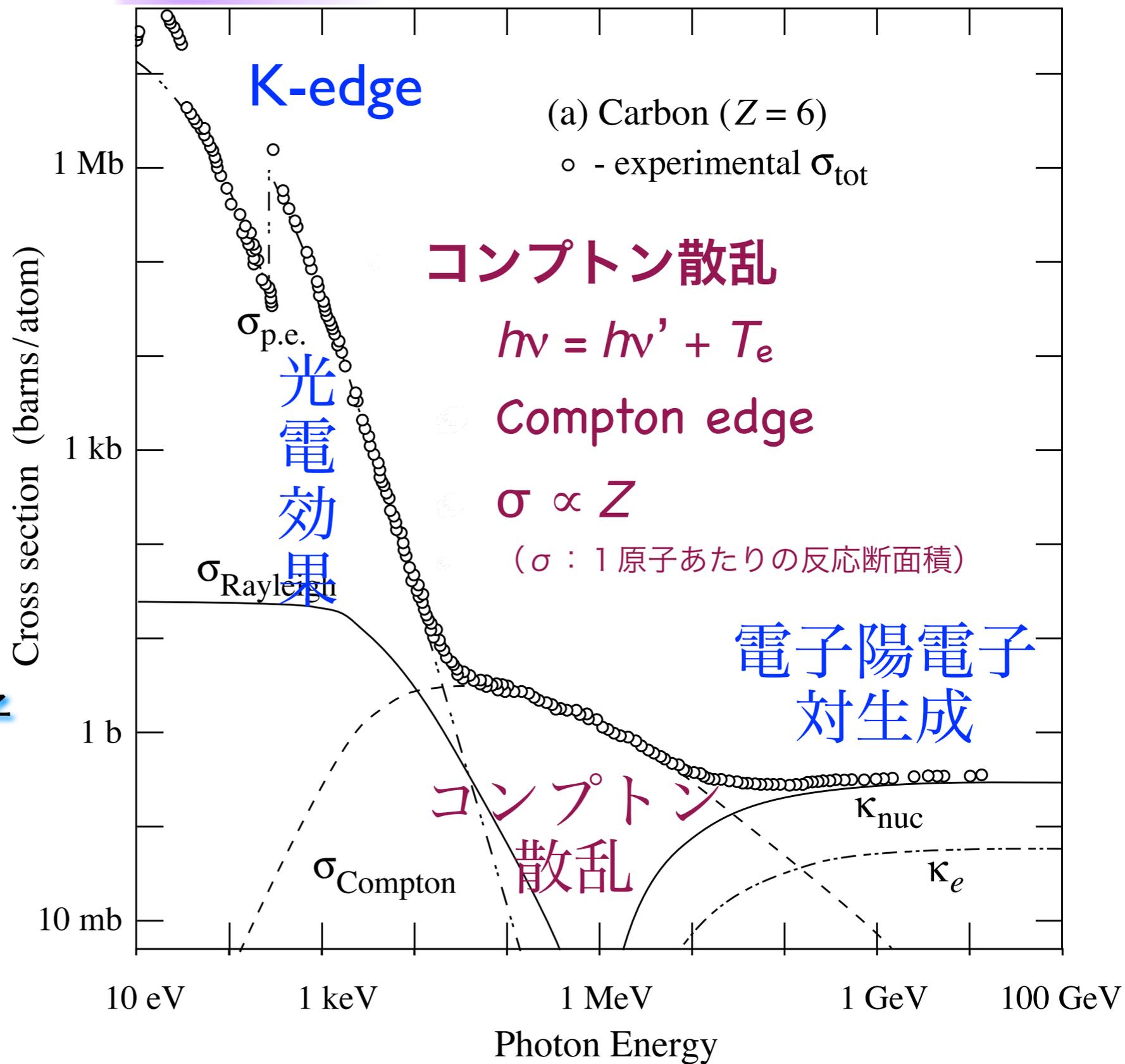
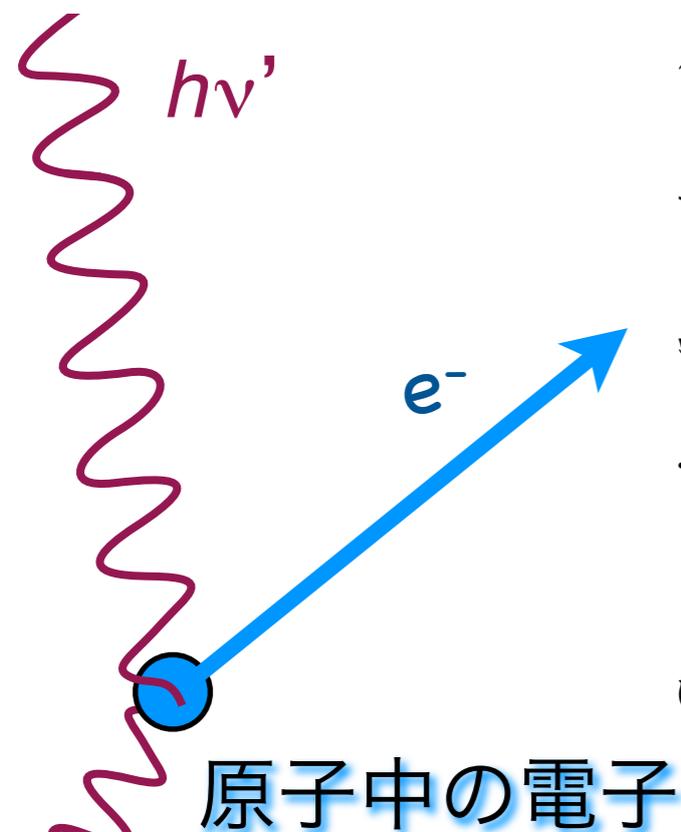
線



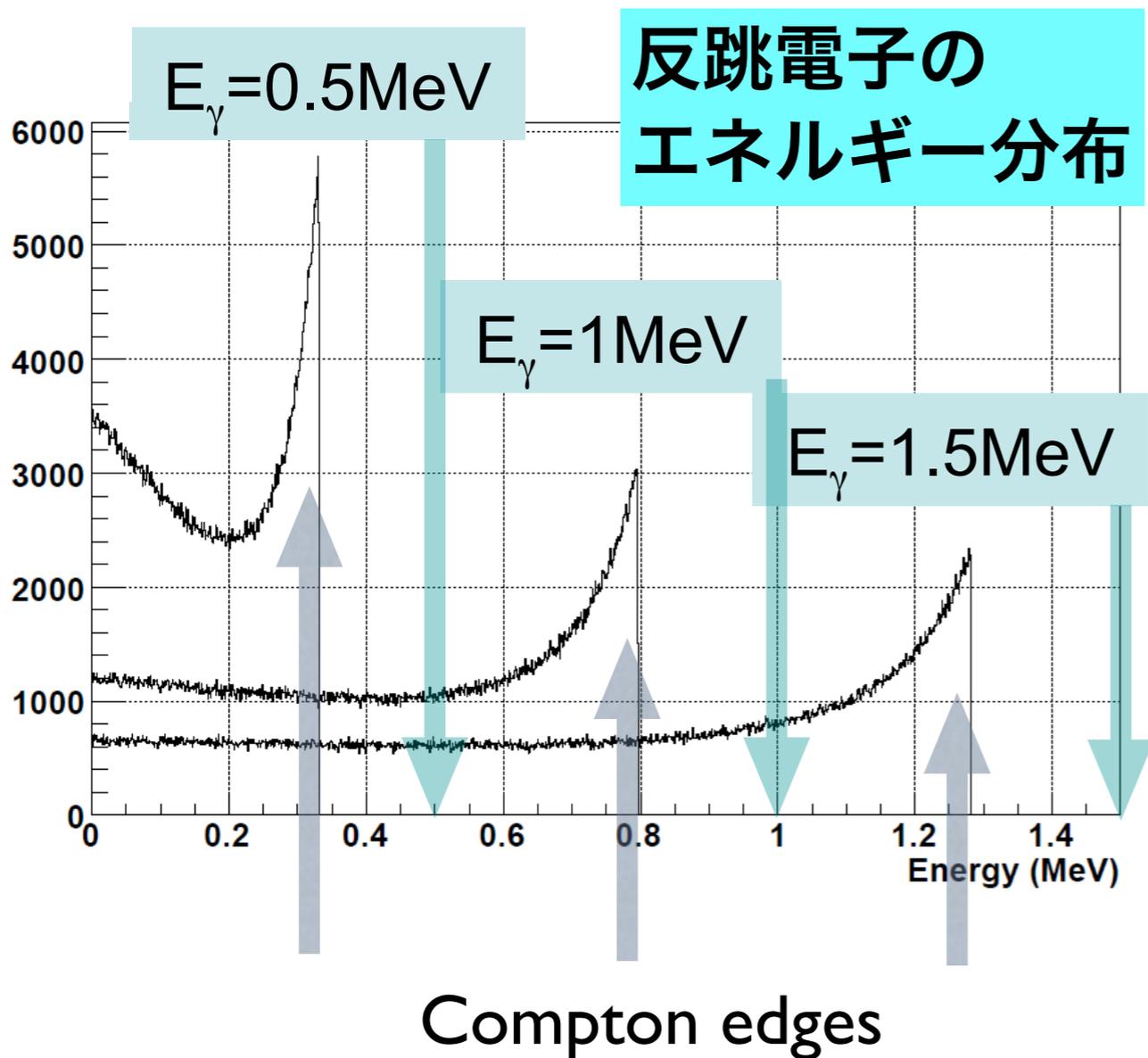
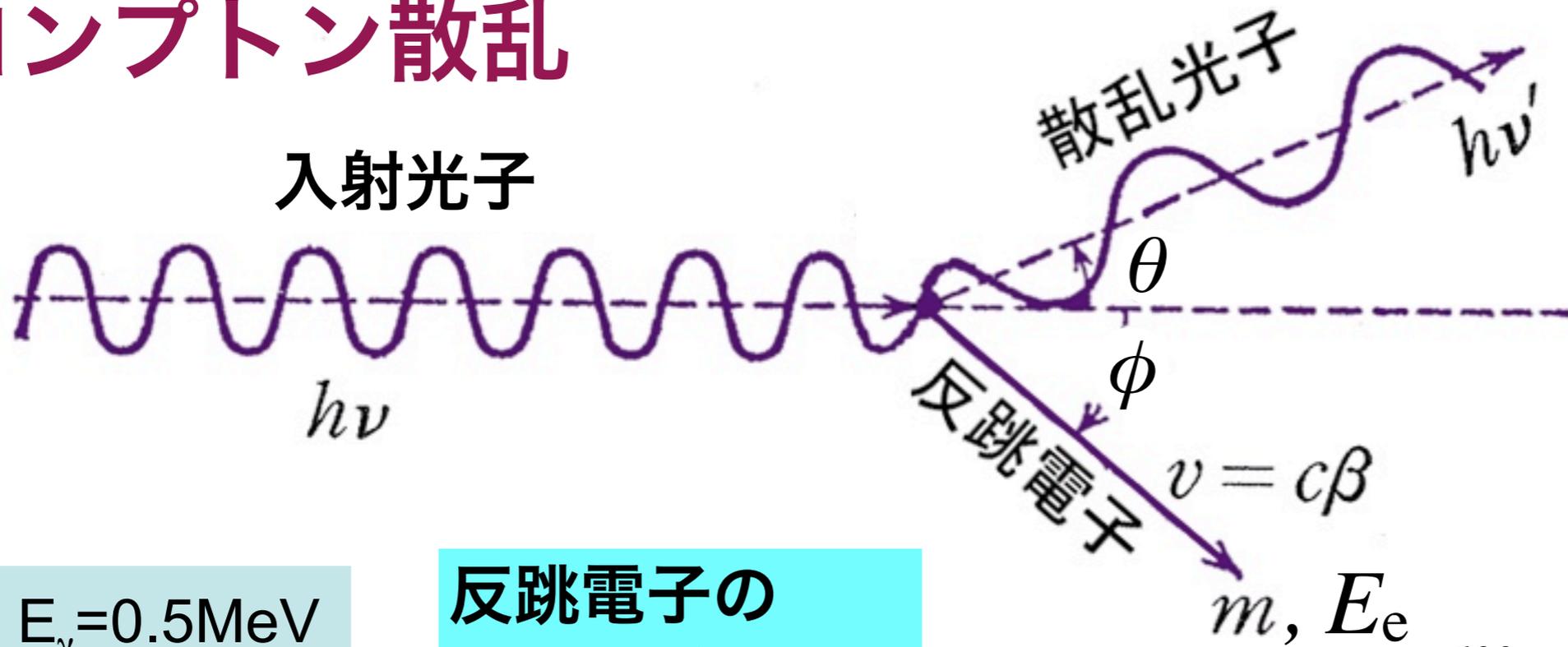
コンプトン散乱



X線・γ線



コンプトン散乱



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

$$E_\gamma = h\nu$$

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

空間線量率測定

放射線の測定

試料測定



β (γ)



γ

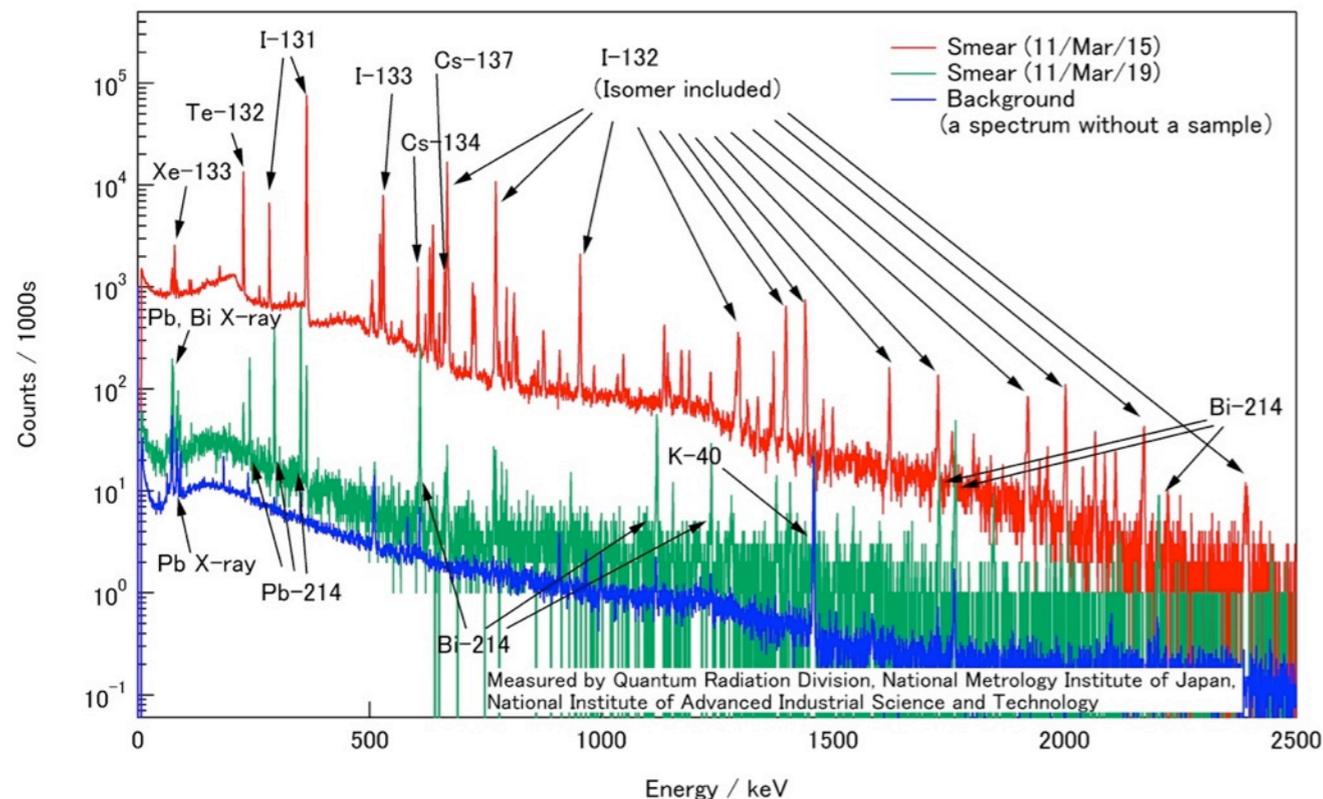
γ ゲルマニウム検出器 (Ge detector)

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)

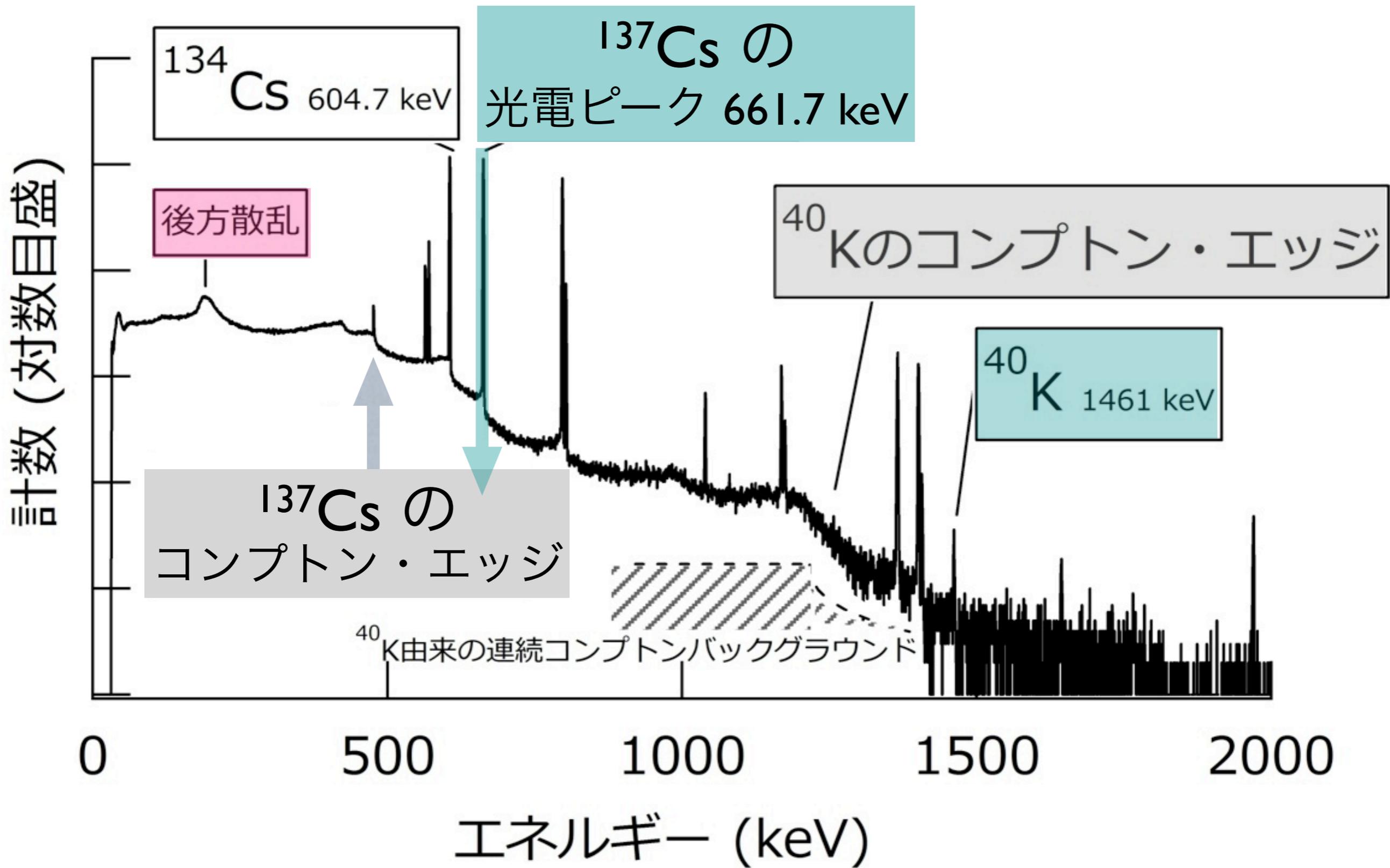
エネルギー分析 (核種同定)

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





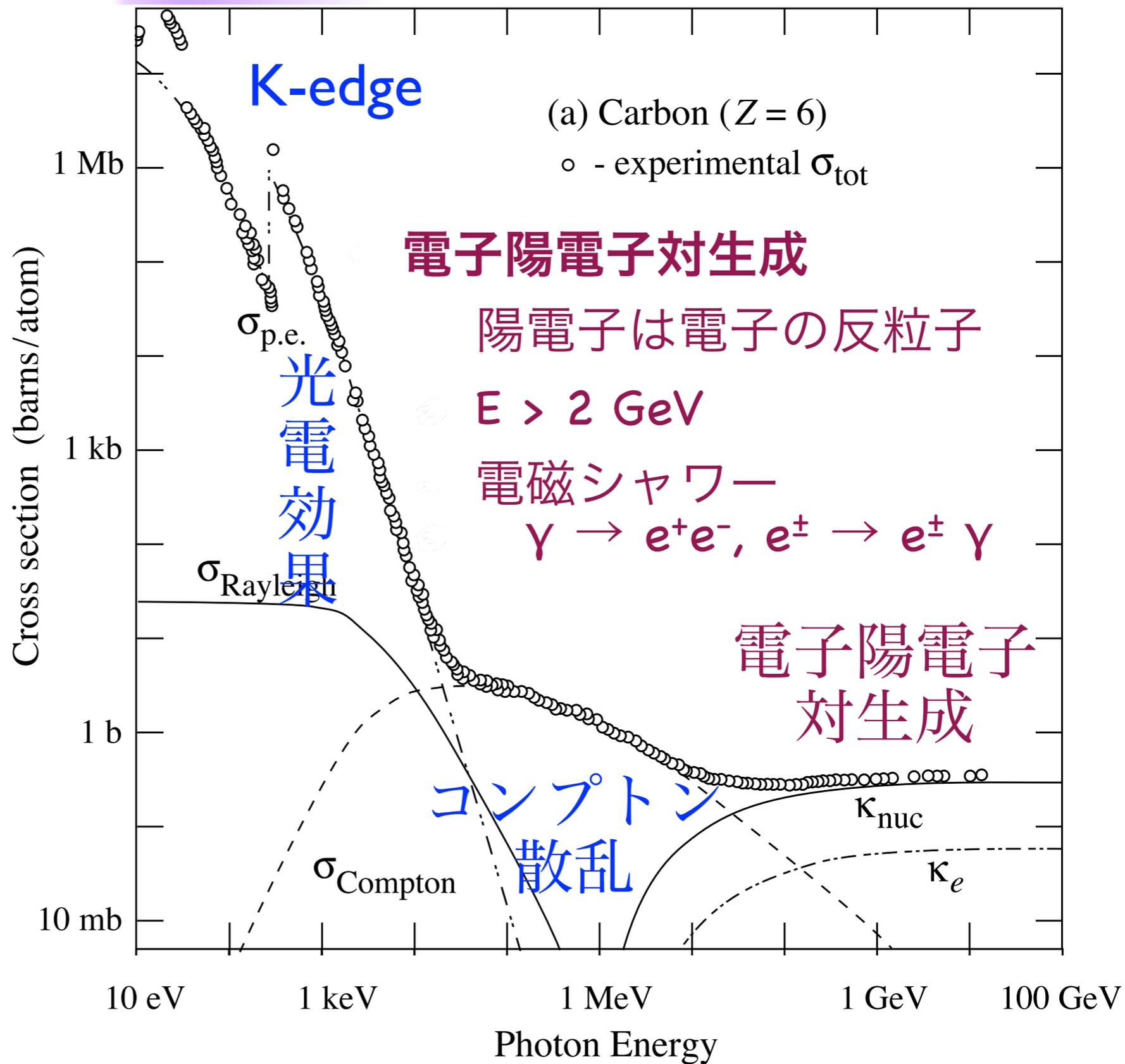
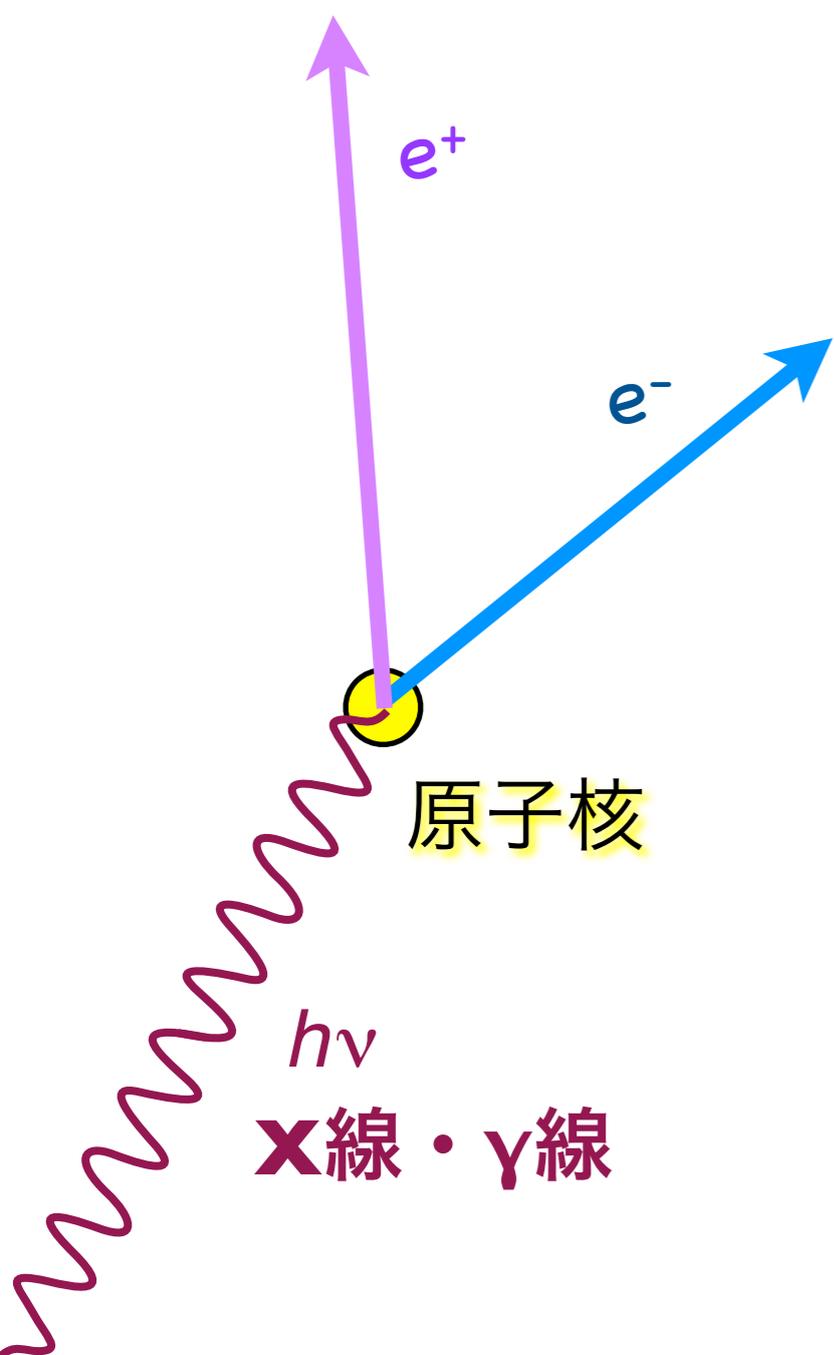
電子対生成

紫外線

X線

γ

線



制動放射 (Bremsstrahlung)

紫外線

X線

γ線

γ線

荷電粒子

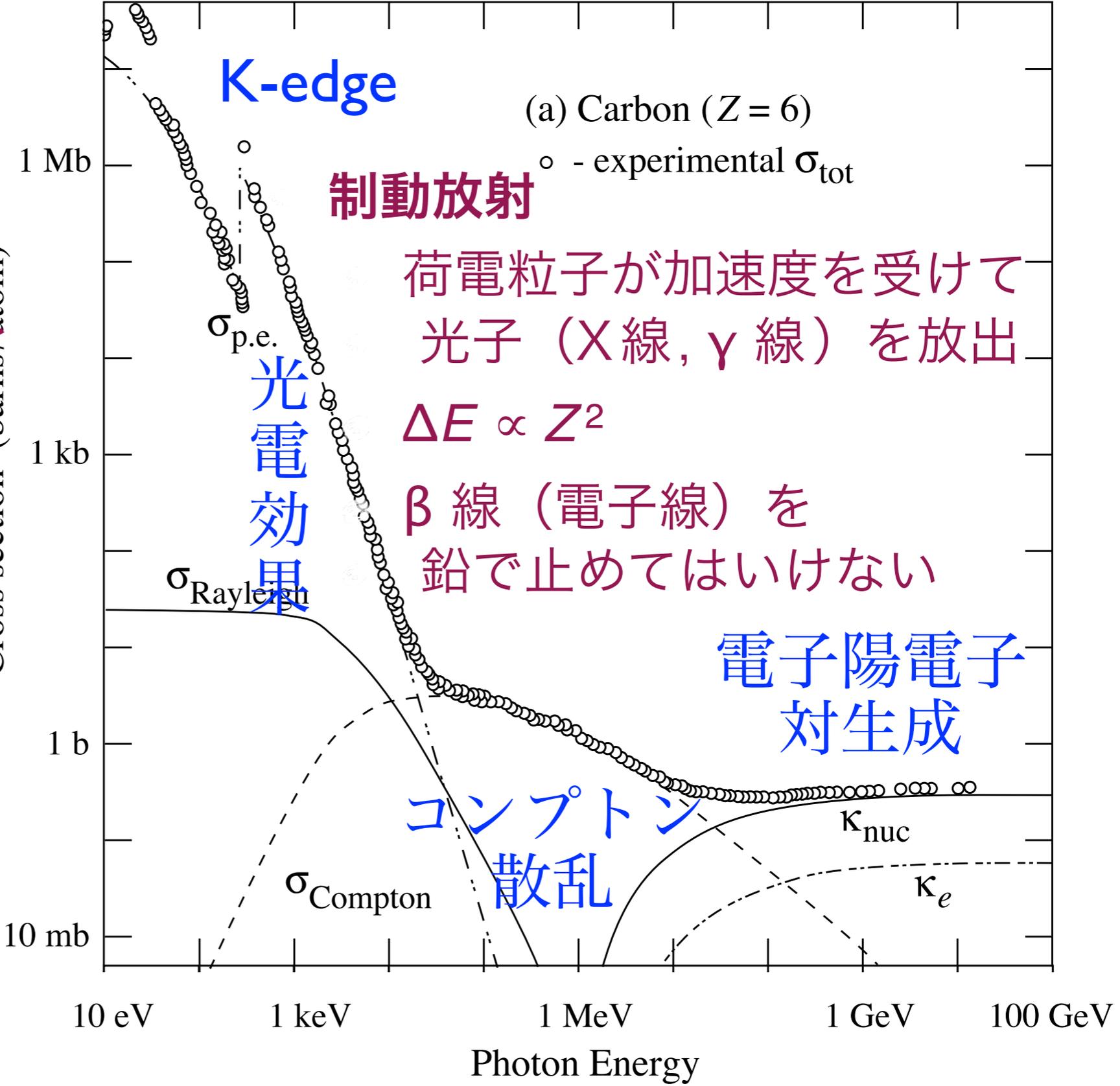


原子核

荷電粒子

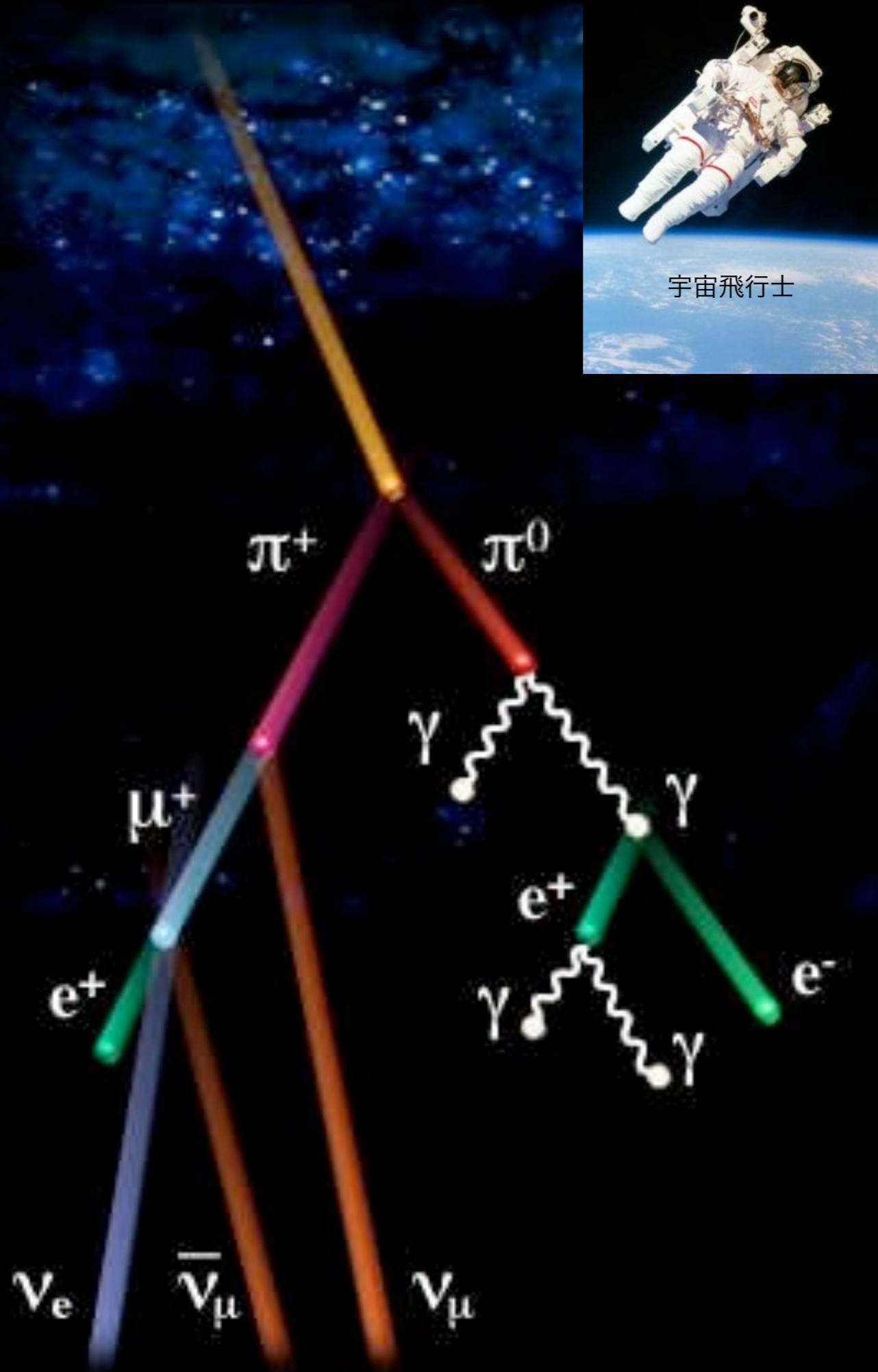
X線・γ線

Cross section (barns/atom)





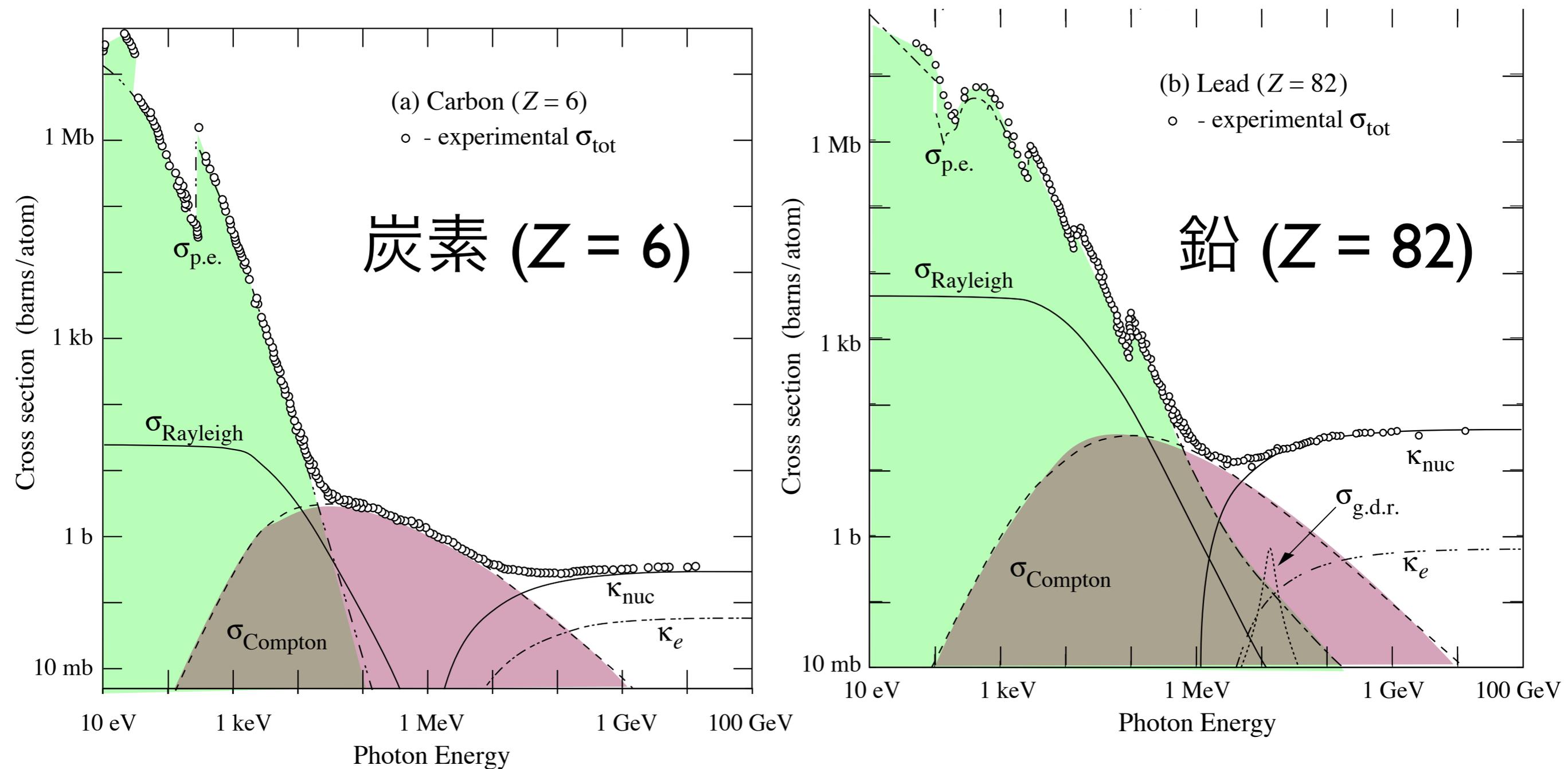
宇宙飛行士



宇宙線

電磁シャワー

光子の反応断面積の物質依存性



光電効果 $\propto Z^{4\sim 5}$

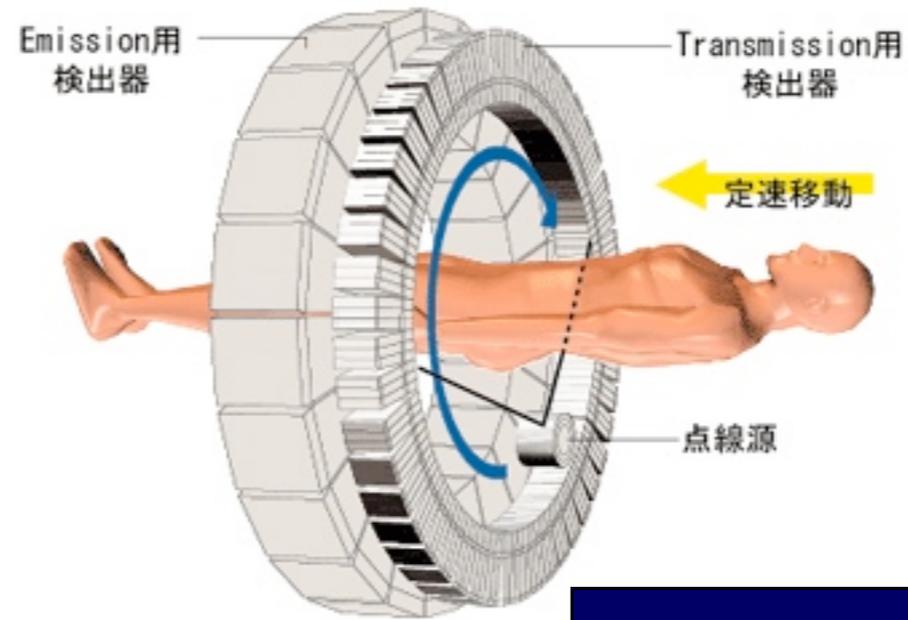
コンプトン散乱 $\propto Z$

制動放射 $\propto Z^2$

胸部単純X線撮影

胸部正面像

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

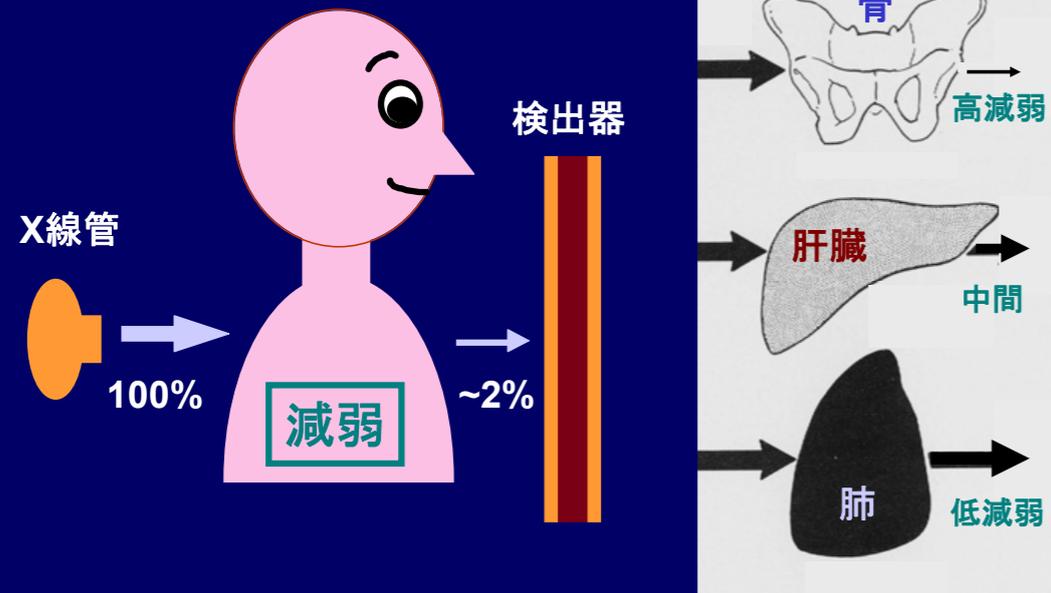
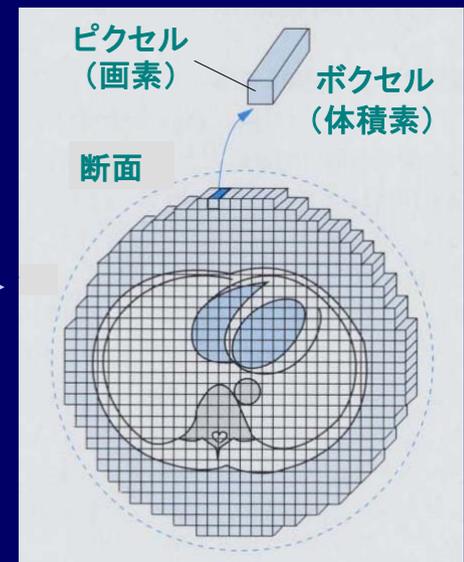
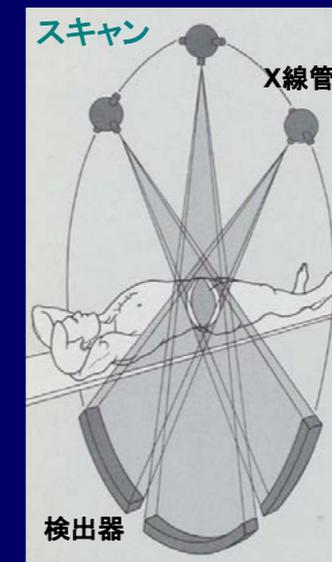


X線 CT

レントゲン(X線)撮影

国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

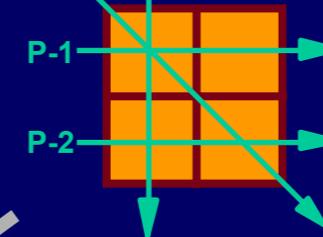
X線コンピュータ断層撮影法:CT



未知の線減弱係数

μ_1	μ_2
μ_3	μ_4

X線投影



連立方程式

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

解答

1	7
5	4

逆問題

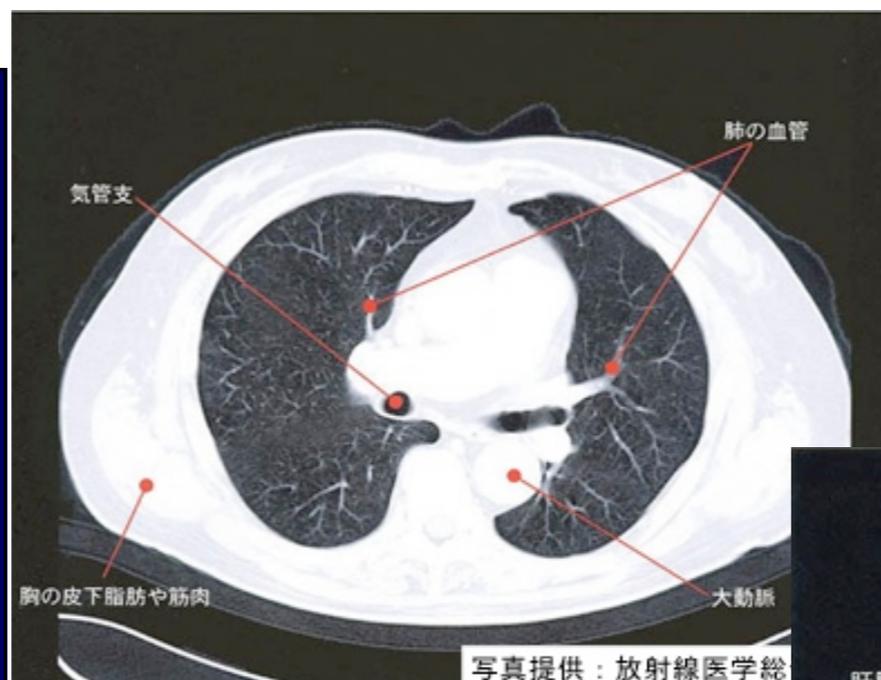
X線検査用造影剤

* 陽性造影剤

	元素	原子番号	K吸収端
・ヨード造影剤: 血管造影用	I	53	33.16 keV
・硫酸バリウム: 消化管造影用	Ba	56	37.41 keV
・キセノンガス(脳血流CT)	Xe	54	34.56 keV

* 陰性造影剤

- ・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...
- ・オリーブ油(膀胱CT)



写真提供: 放射線医学総研



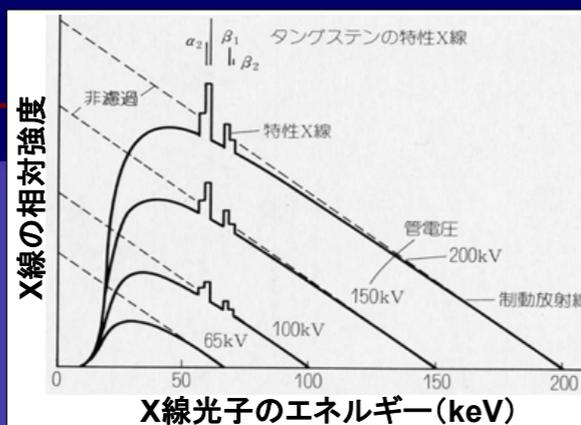
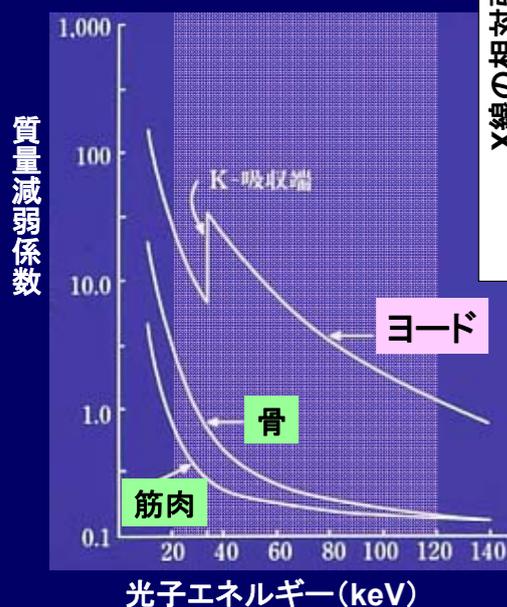
写真提供: 放射線医学総合研

(減弱)

造影剤 (I, Ba, Xe): Z 大 = 減衰係数 大

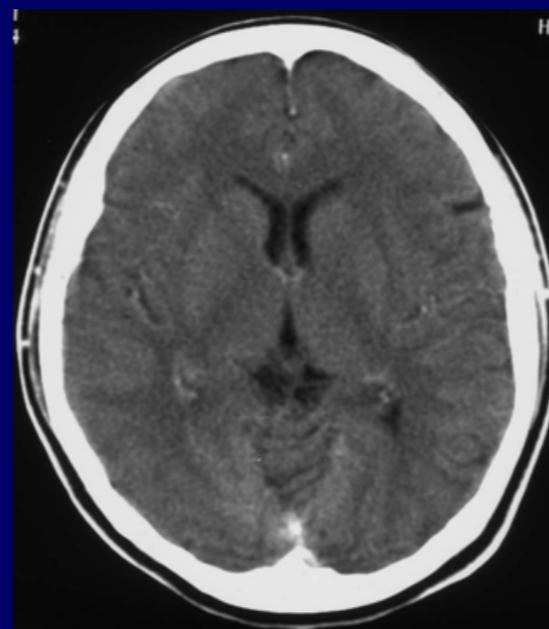
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

X線の発生と減弱

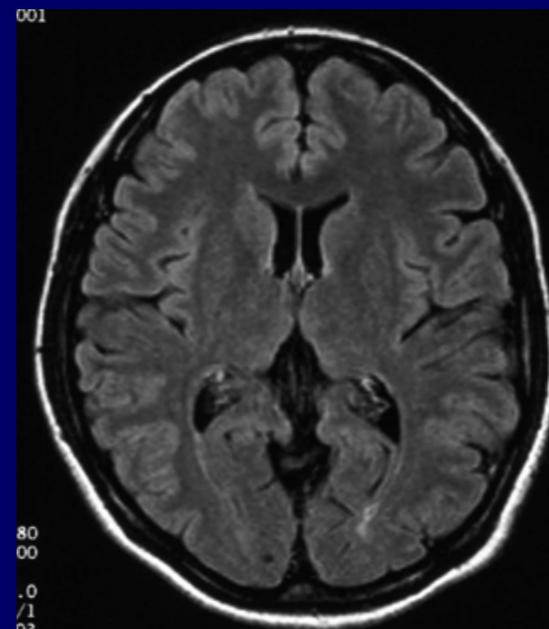


- * 光電効果: 光電吸収
- ・元素のK吸収端 (keV):
H 0.0136, C 0.283, O 0.531
- * コンプトン散乱: 非弾性散乱

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



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



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

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

μ : 線減衰係数

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

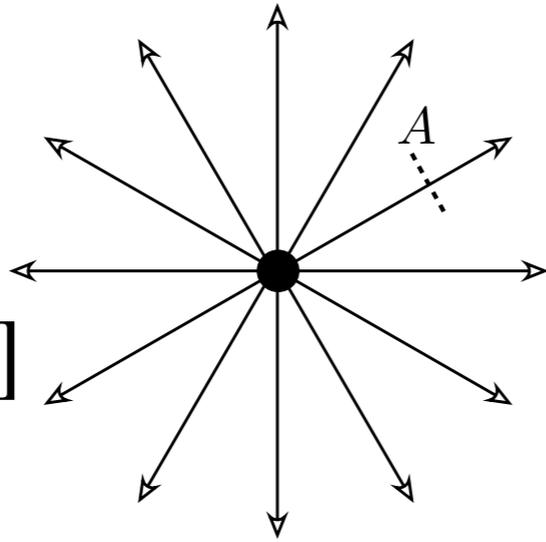
μ/ρ : 質量減衰係数 $\mu_{\text{en}}/\rho < \mu/\rho$ $(\mu/\rho)^{\text{air}} = 0.077 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$

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)

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

P : 放射能 [Bq]

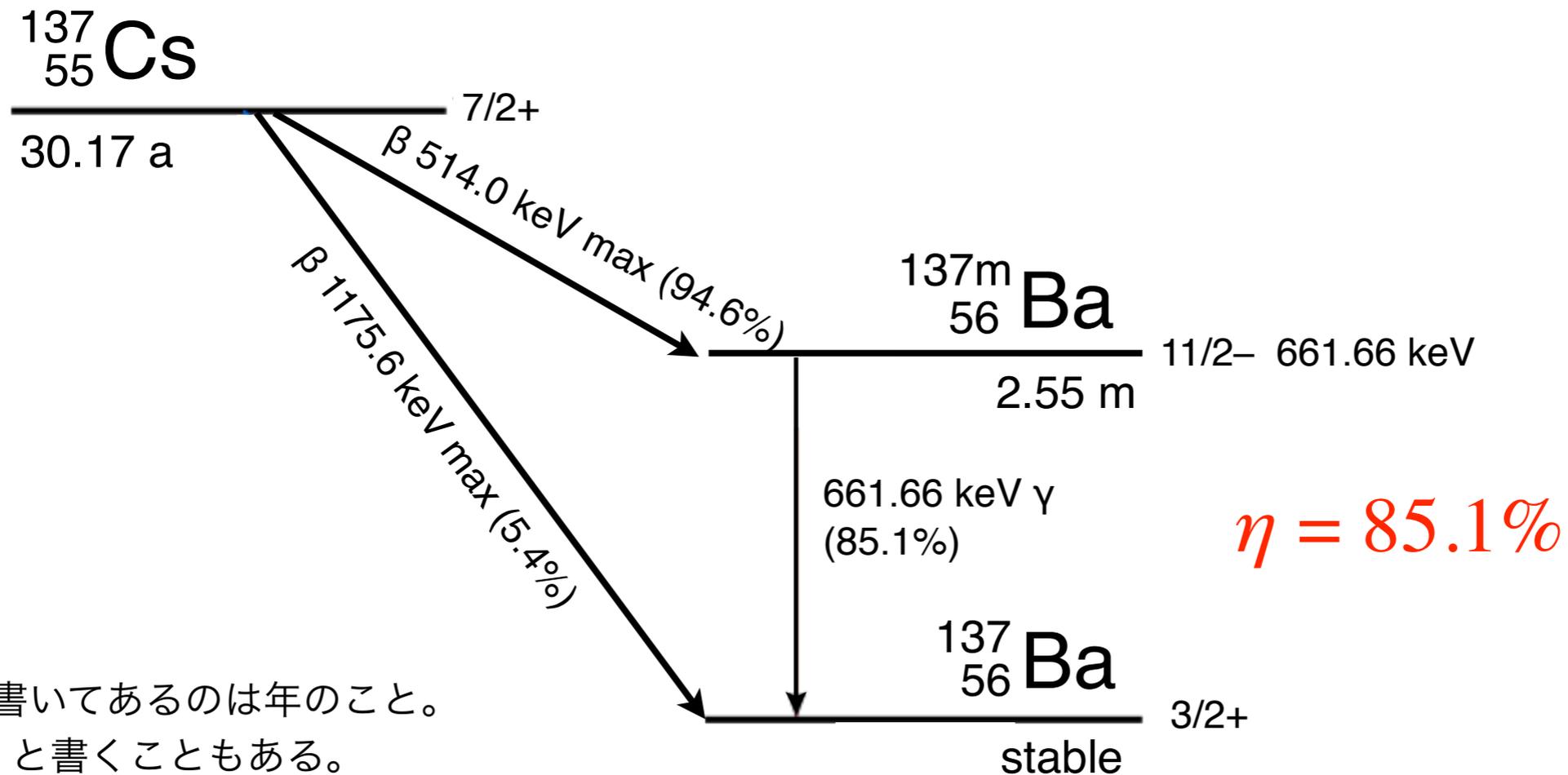


\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

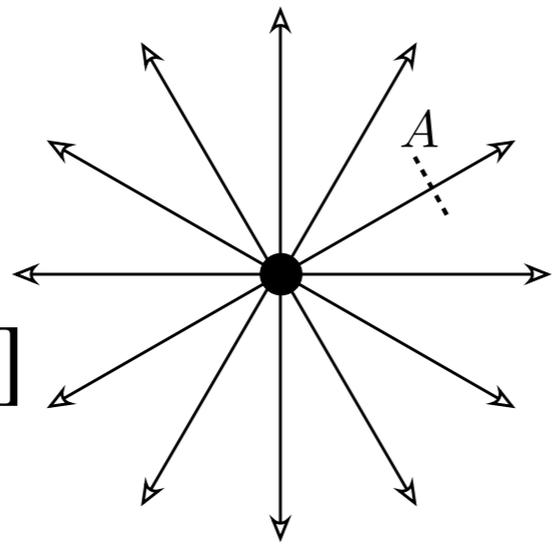
$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}$$

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

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



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



P : 放射能 [Bq]

\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

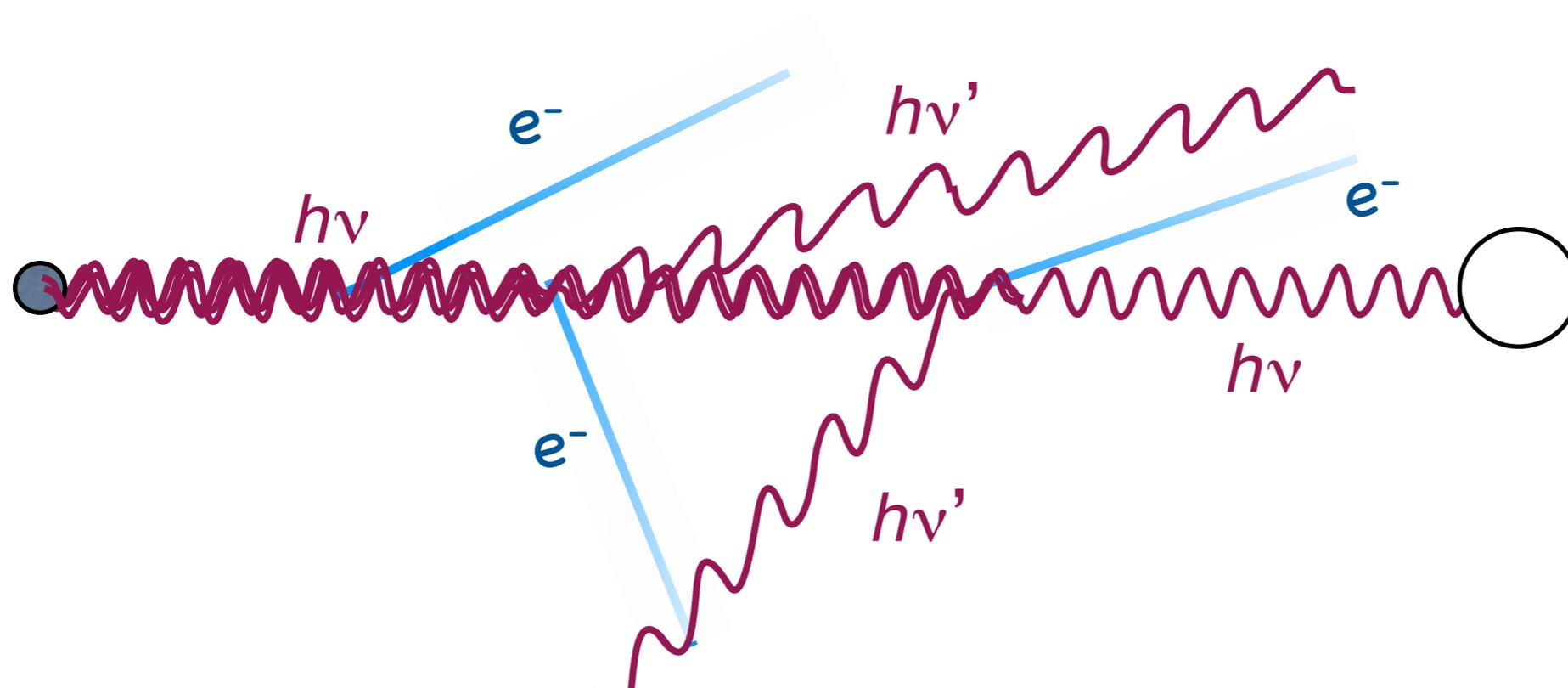
$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi} \quad \eta : \text{放出率}$$

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

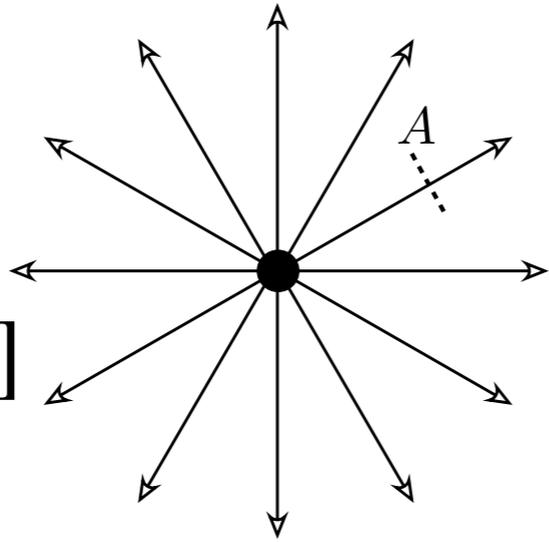
μ : 線減衰係数

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

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



P : 放射能 [Bq]

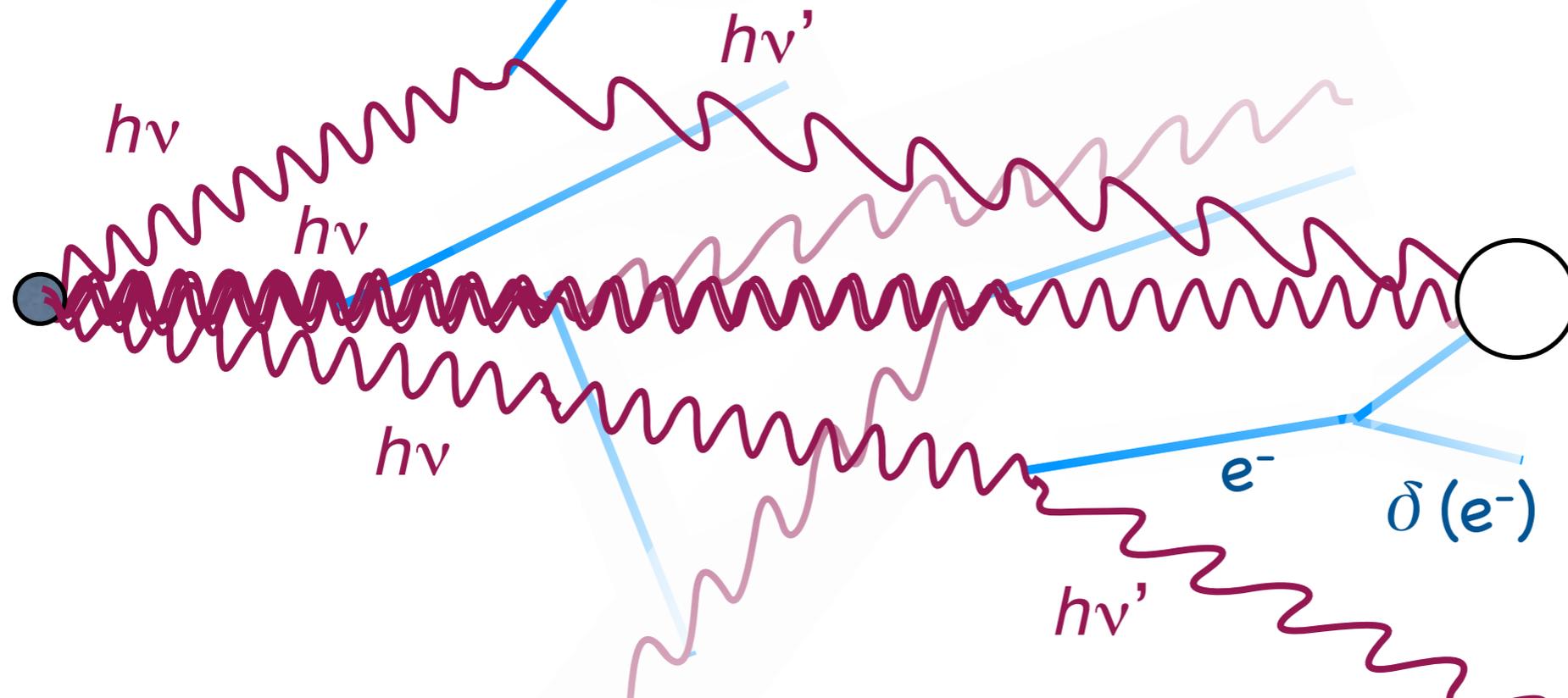


\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

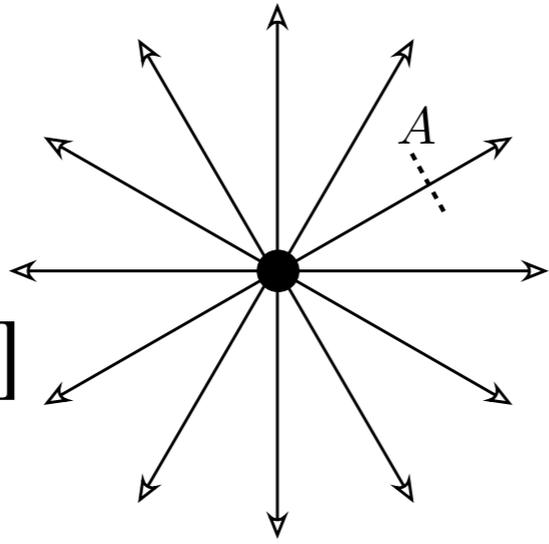
$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi} \quad \eta : \text{放出率}$$

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

上の式では散乱された 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。



P : 放射能 [Bq]



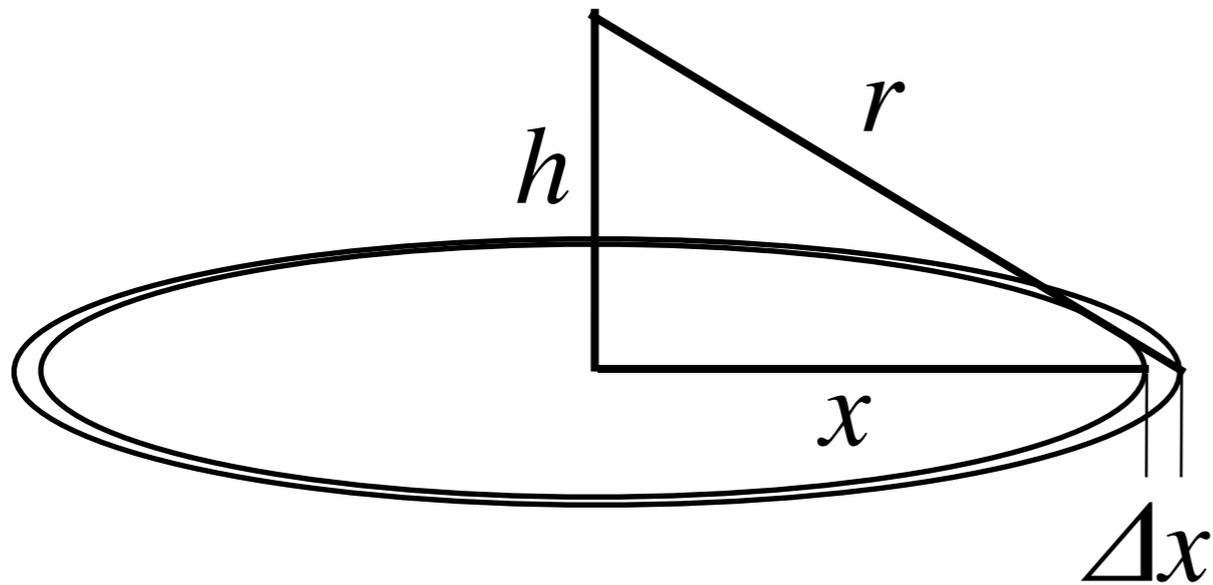
\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

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

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

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]

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

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

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

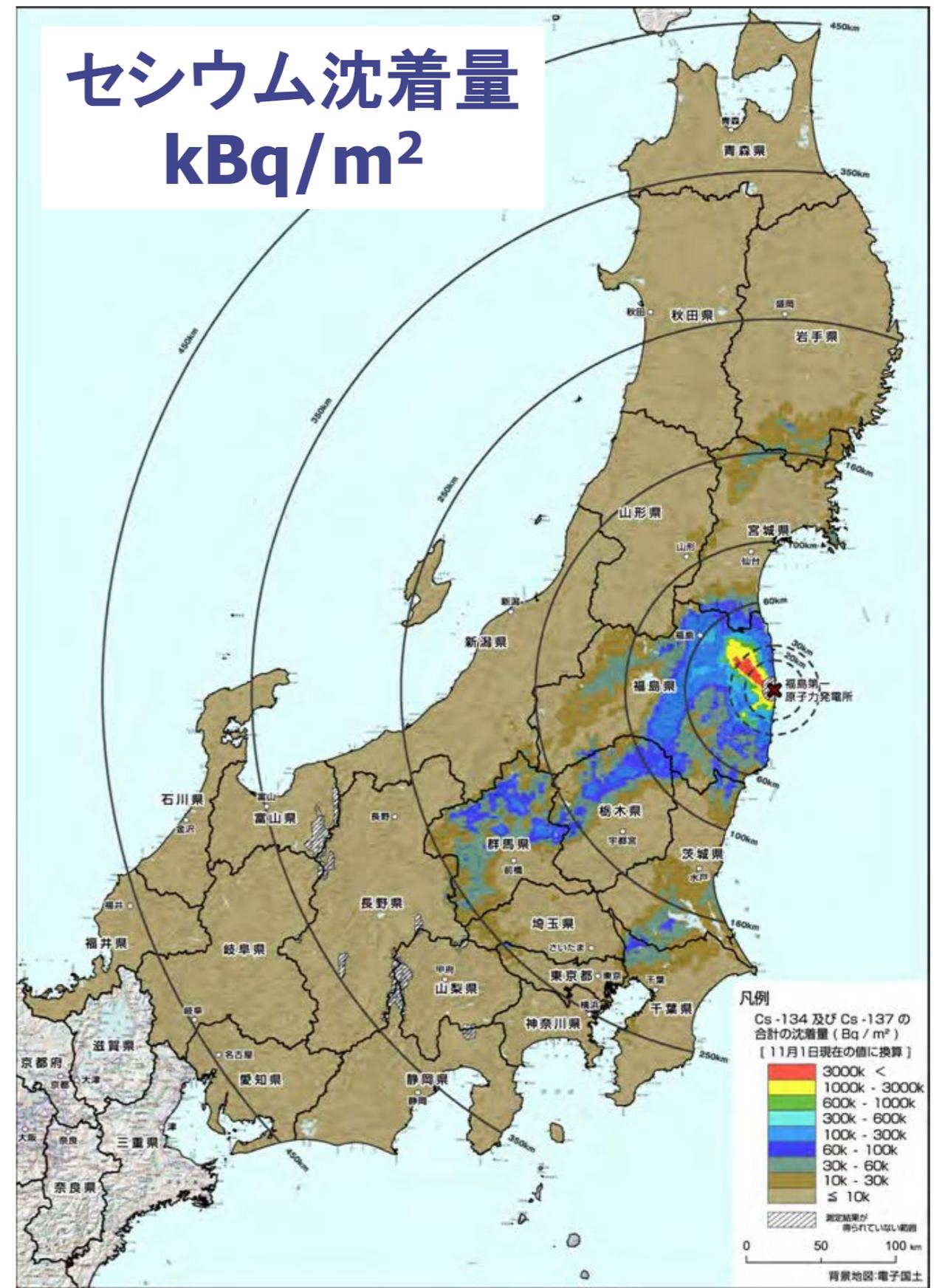
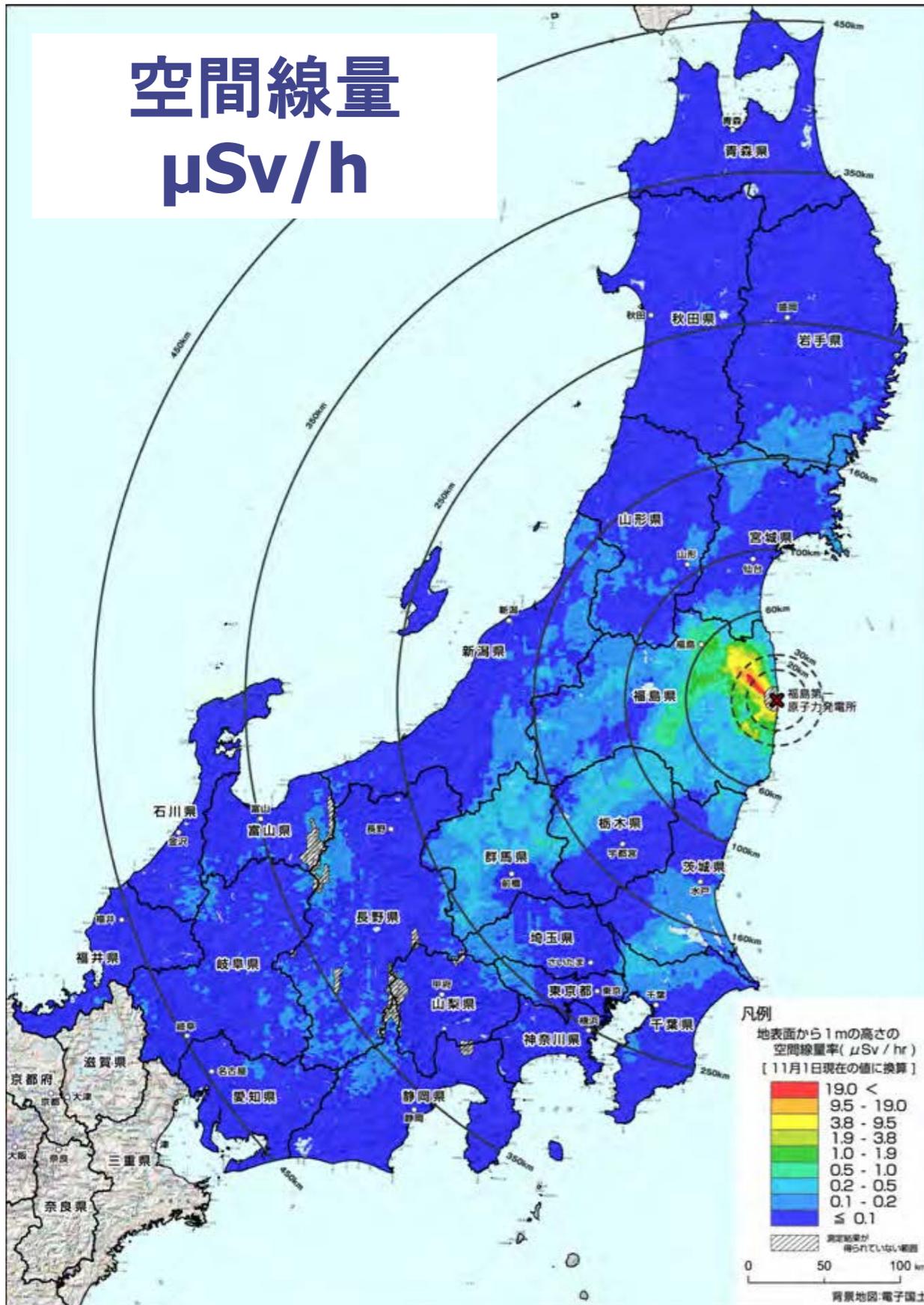
散乱された γ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの γ 線(ビルドアップ束)による効果を加味する必要がある(50%くらい増える)。

^{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

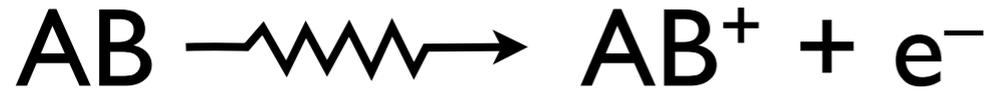
G 値（放射線化学収率）：

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

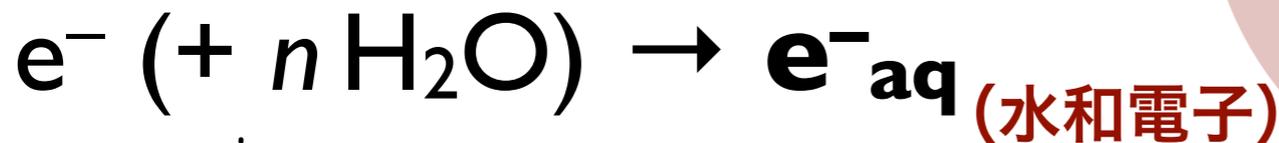
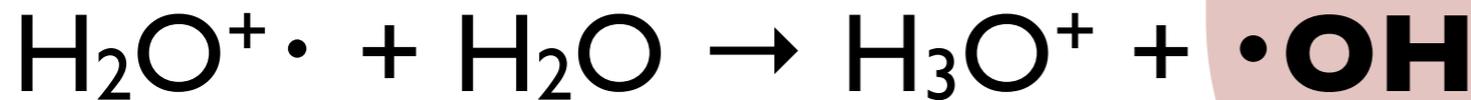
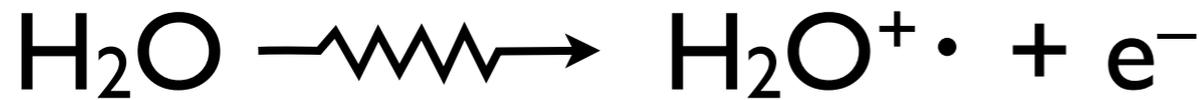


再結合



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



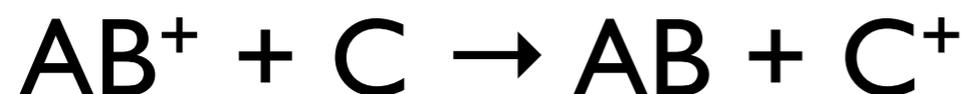
電離（イオン化）



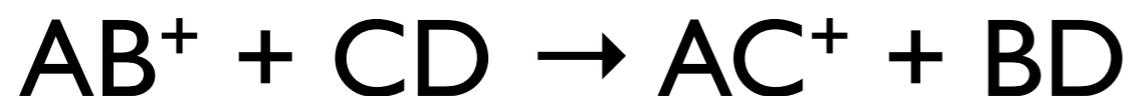
励起



再結合



電荷移動



イオン分子反応



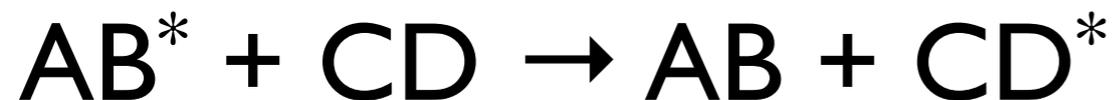
電子捕捉



ラジカル生成



脱励起・蛍光放出



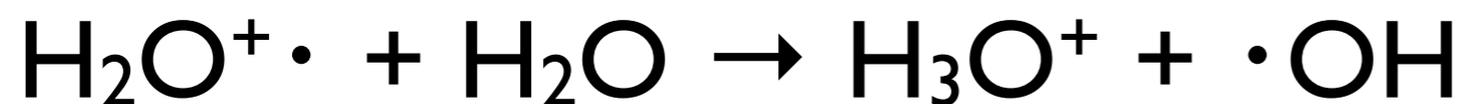
励起移動

水中での反応



電離（イオン化）

励起



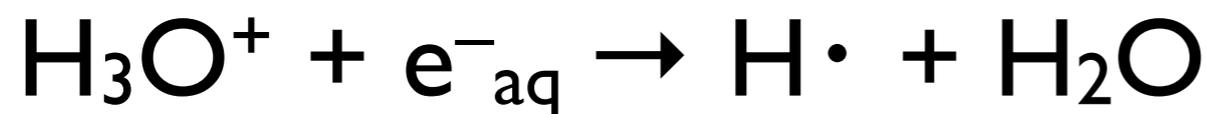
イオン分子反応



水和電子生成



解離（ラジカル生成）



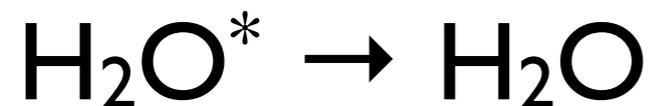
電子捕捉



再結合



電子捕捉



脱励起



分子生成

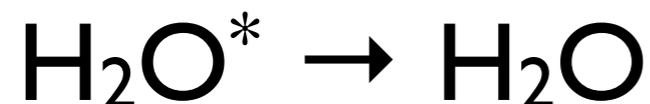
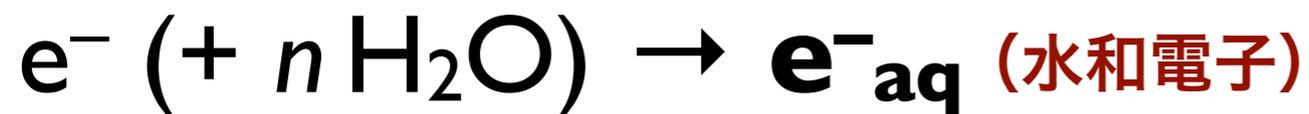
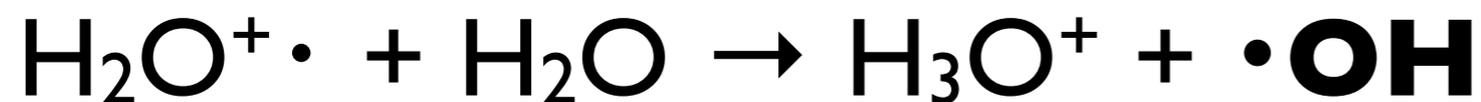
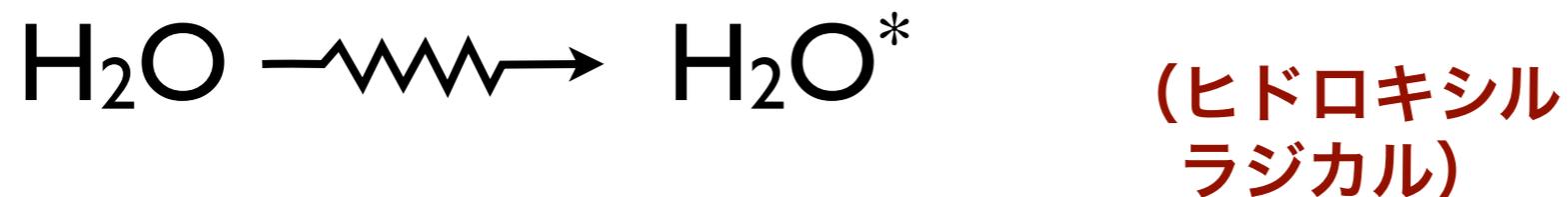
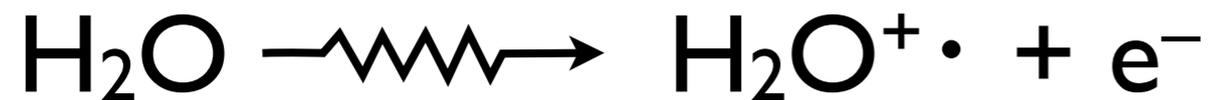


分子生成



分子生成

水中での反応



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

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

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

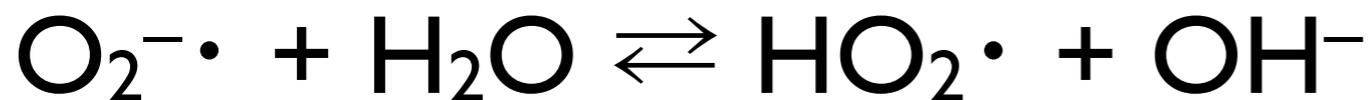
$$G(\text{H}_2) = 0.45$$

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

γ線照射による
放射線化学収率
(G値)

酸素効果

(活性酸素)



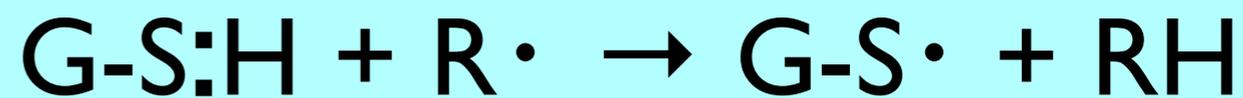
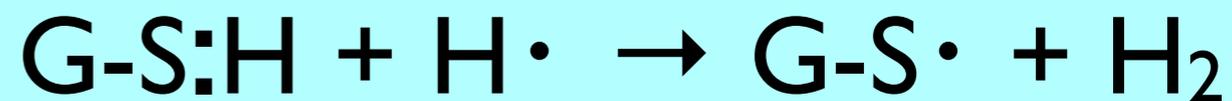
放射線防護剤

(ラジカルスカベンジャー)

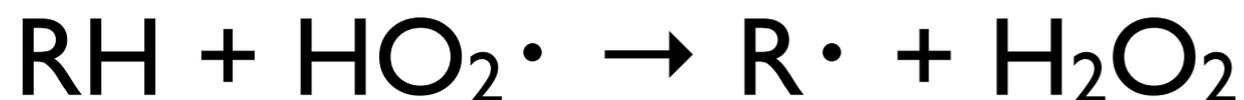
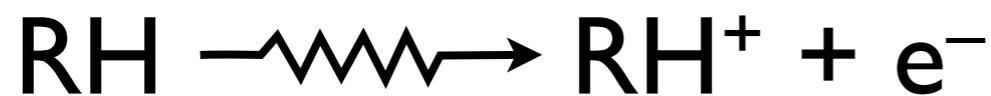
SH基, S-S 結合

例: システイン、システアミン

(グスタチオン)

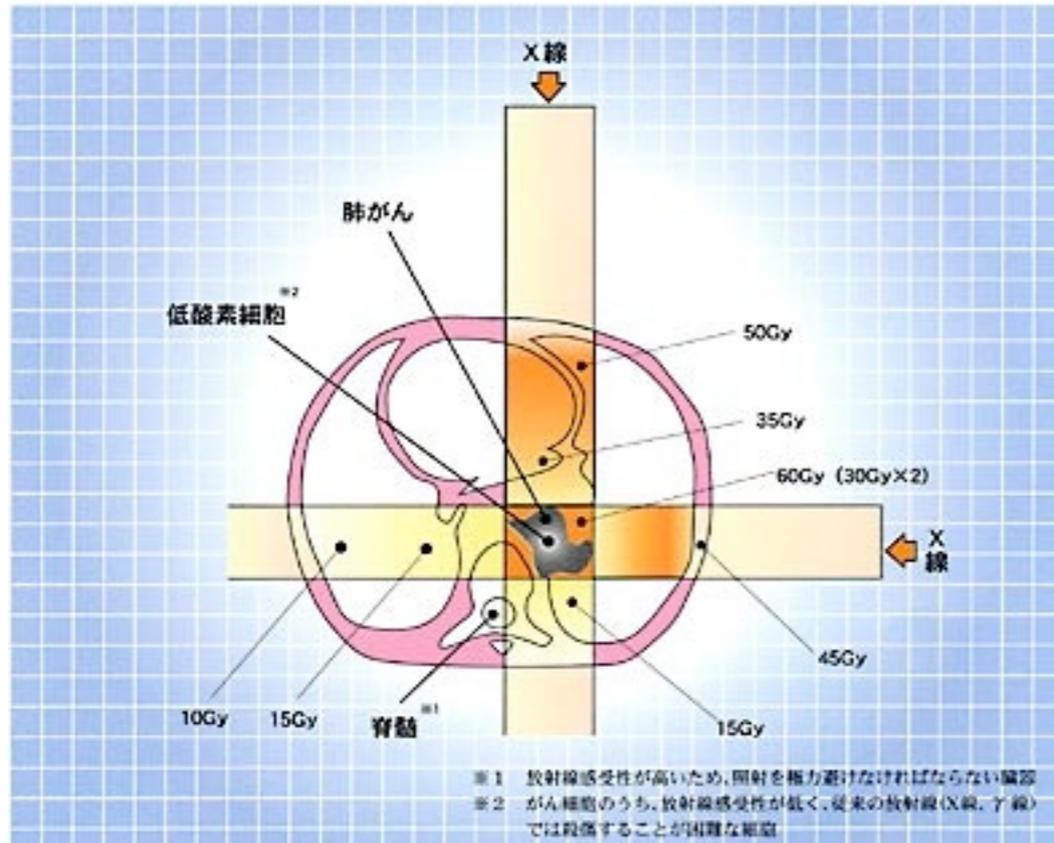


有機物の放射線化学反応



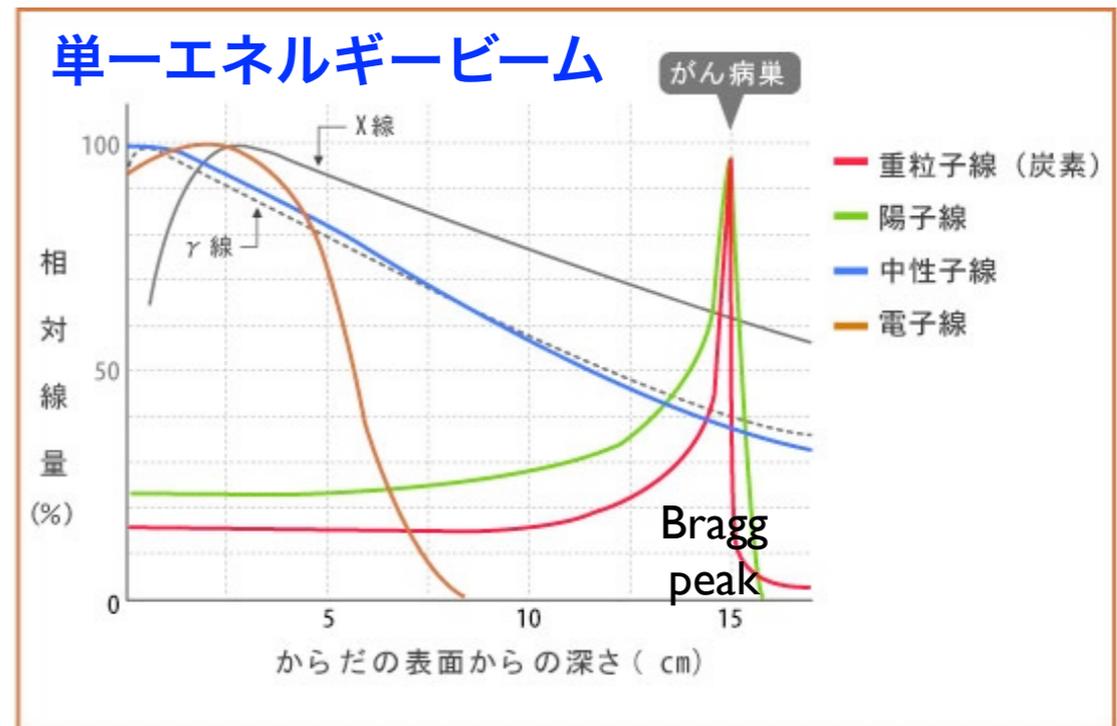
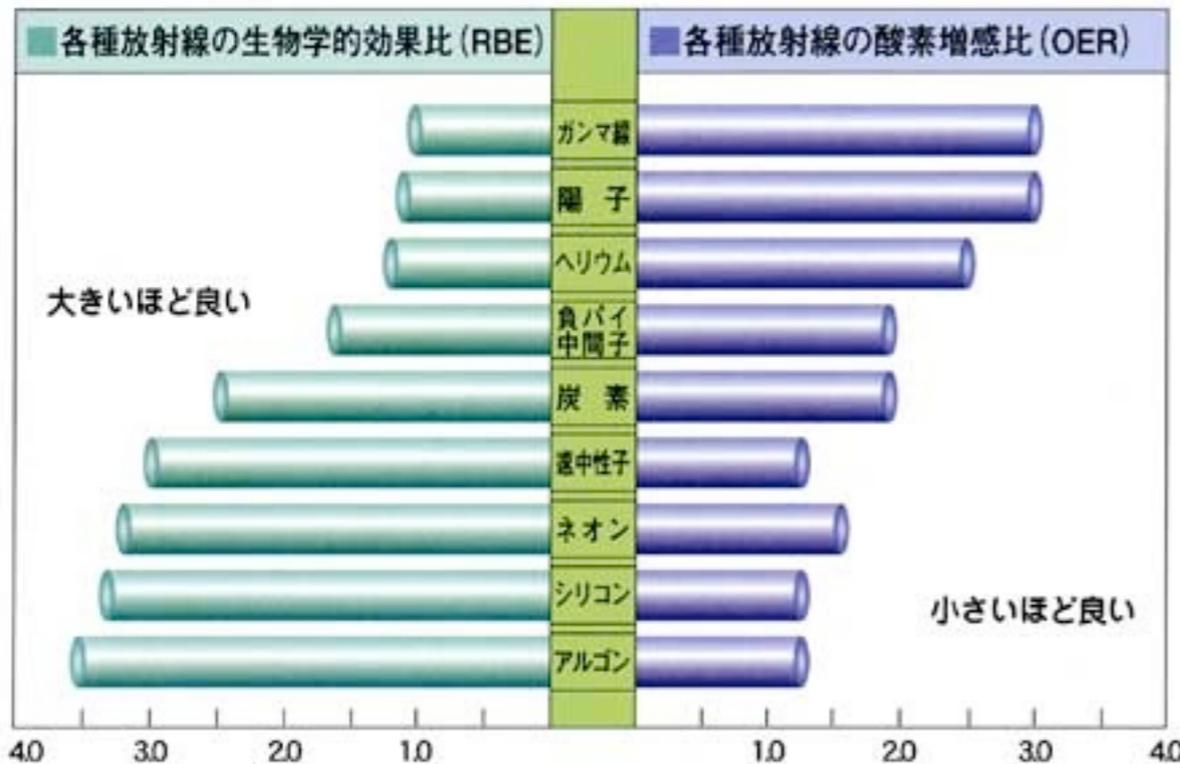
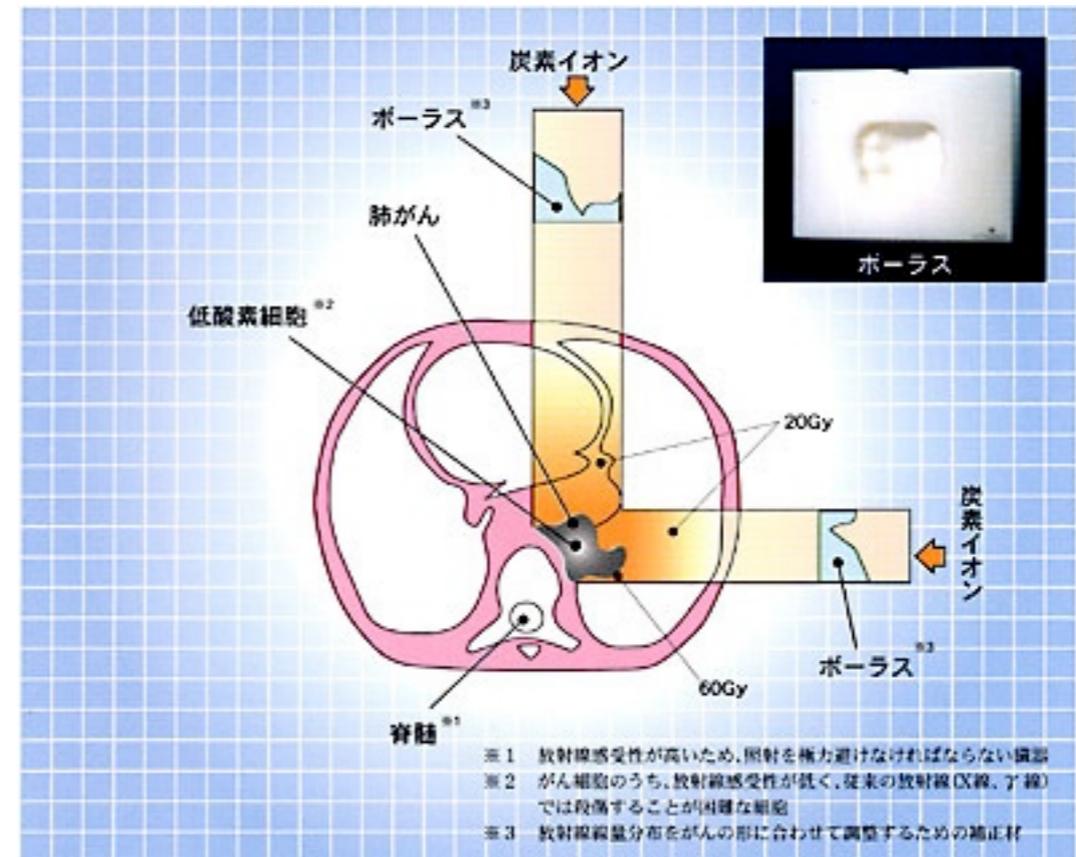
放射線 がん治療

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

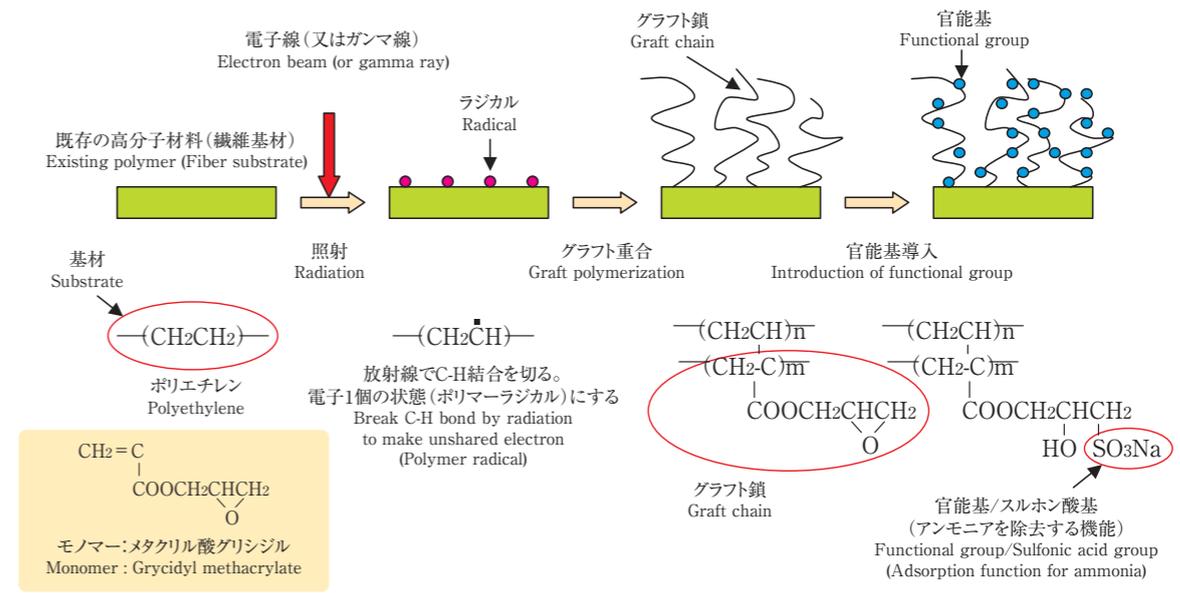
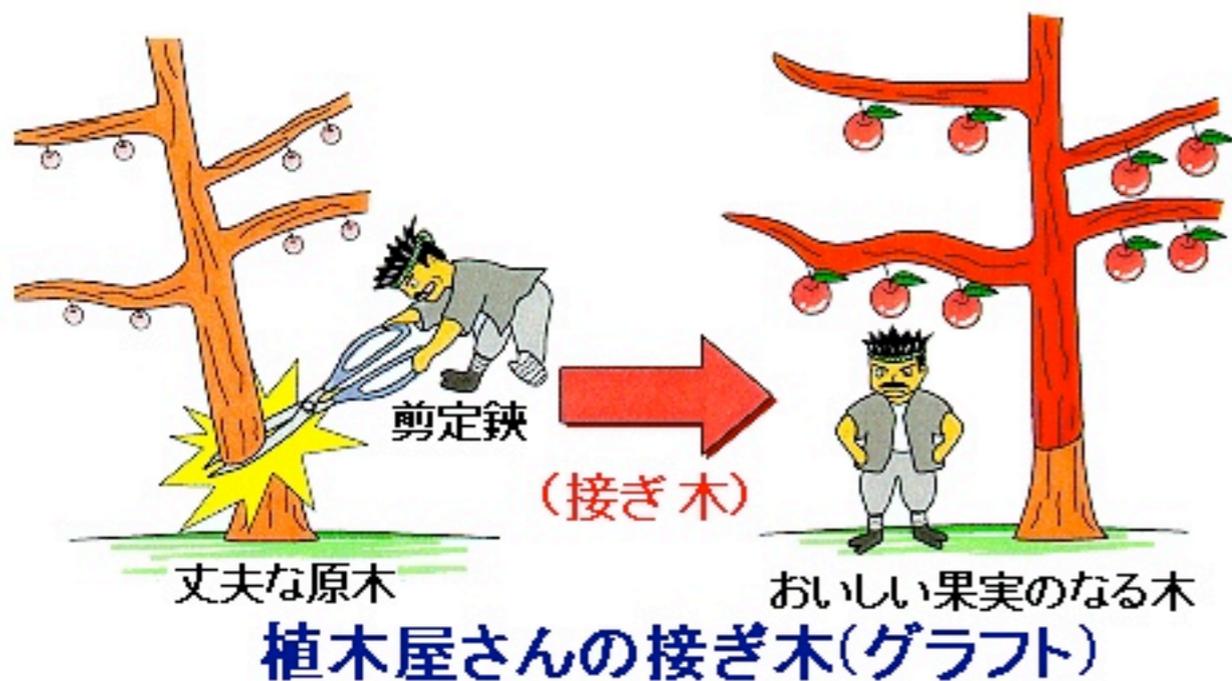


図1 放射線グラフト重合法によるイオン交換体の合成方法
Fig. 1 Reaction scheme of ion exchange material by radiation induced graft polymerization

エバラ時報 No. 216 (2007-7) 藤原邦夫氏論文より引用

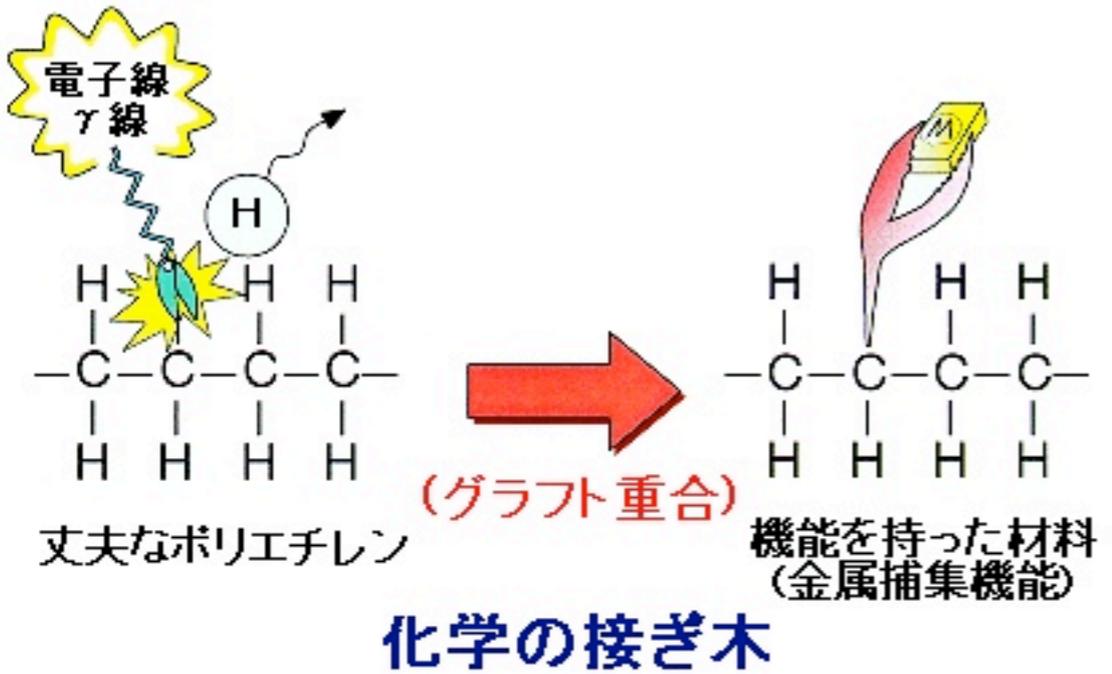


図1 接ぎ木の技術とグラフト重合

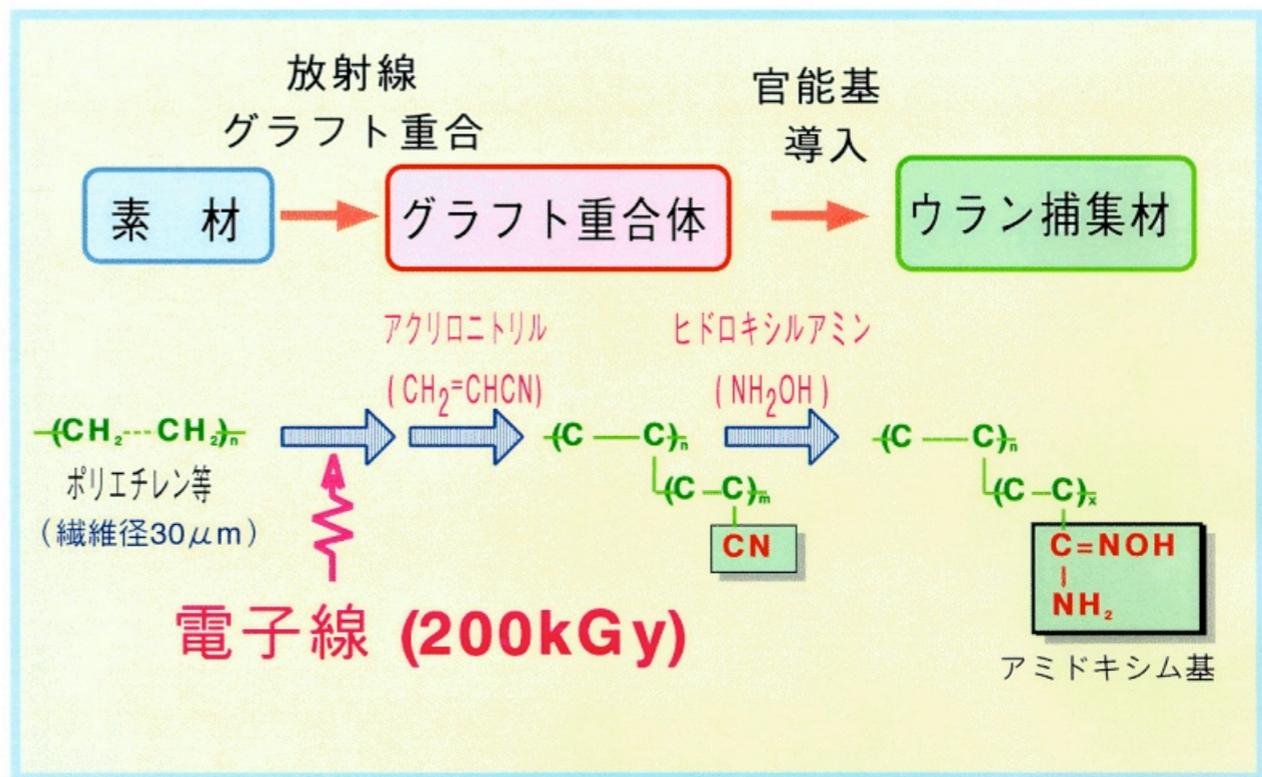


図2 放射線グラフト重合によるウラン捕集材の合成法

[出典]片貝 秋雄、瀬古 典明、川上 尚志、斉藤 恭一、須郷 高信、原子力学会誌 40(11)、879(1998)

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。

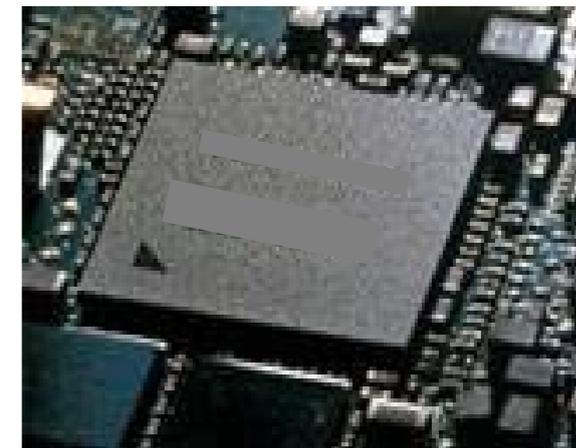


ラジアルタイヤ、耐熱電線

○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)

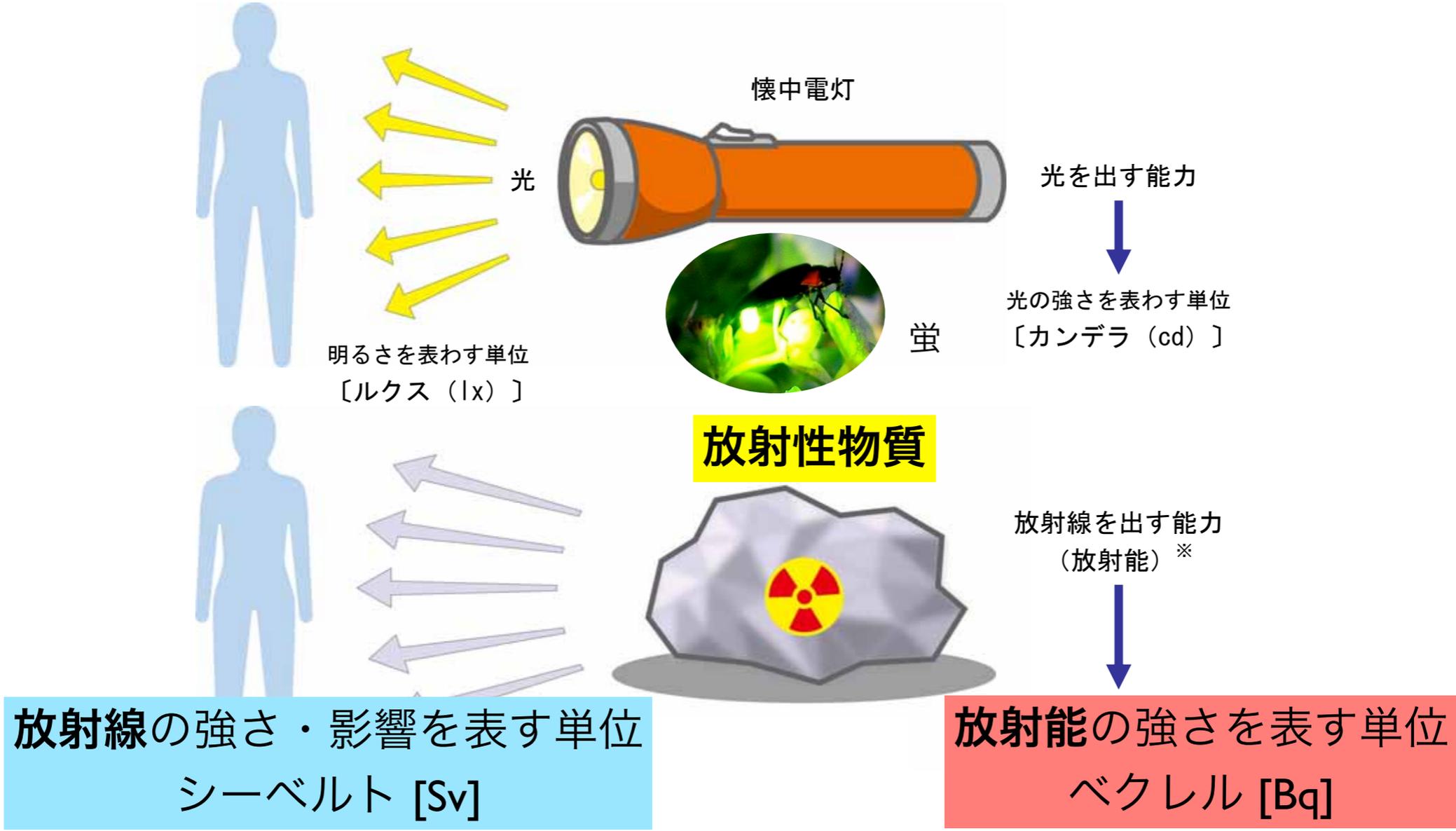
お風呂場で使うバスマット、あるいはプールで使うビート板に使用されている発泡ポリエチレンをご存じですか。あの防水性、浮力が高く、ほどよく硬い素材は、ポリエチレンに放射線を照射し、加熱することで内部に細かい気泡をつくりだしたもので、これもいまから20年以上も前に開発された素材です。



発泡ポリエチレン

放射線の単位

放射能と放射線



6-1

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」



放射能 (radioactivity) の単位

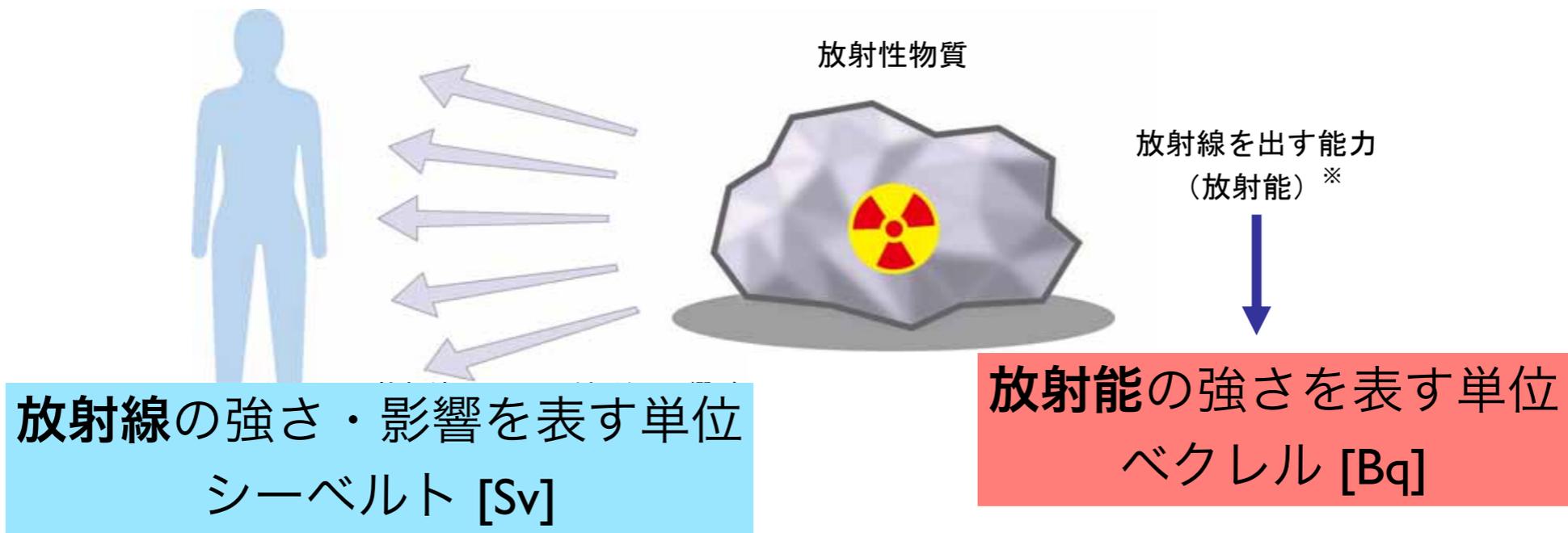
[Bq] | Bq = 1 dps, [Ci] | Ci = 37 GBq

Becquerel

decay/disintegration
per second

Curie





放射線量の単位

グレイ

吸収線量 $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量 $H_T [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

実効線量 $E [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

放射能の単位

放射能の強さ [Bq]
ベクレル

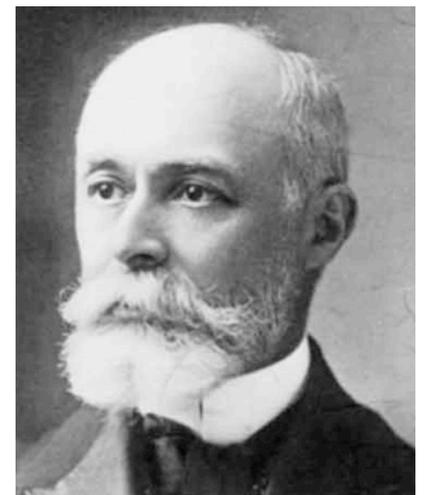
Gray



Sievert



Becquerel



放射線量の単位

放射場には

多様なエネルギーの

多種放射線（光子、粒子線）が

様々な方向を向いて飛び交い、

それぞれの強度で存在している。

これをひとつの物理量で表すのは

一筋縄ではいかない。

様々な放射線量の単位が存在する。

放射線量の単位



Röntgen



Gray

放射計測量 radiometric quantity

粒子フルエンス fluence Φ [cm^{-2}]

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

線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー変換

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

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

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

線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー付与

吸収線量 D [J / kg] = [Gy], [erg / g] = [ram] | Gy = 100 ram

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

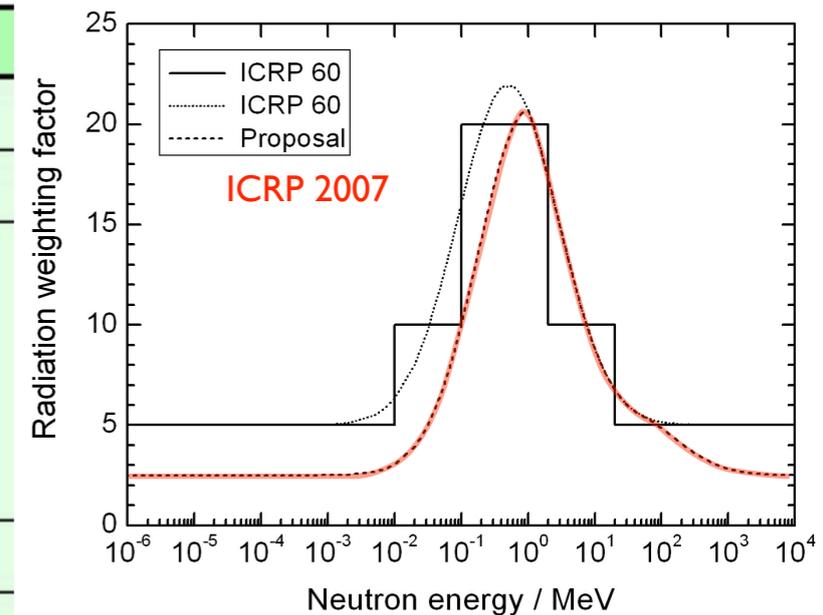


- 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

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

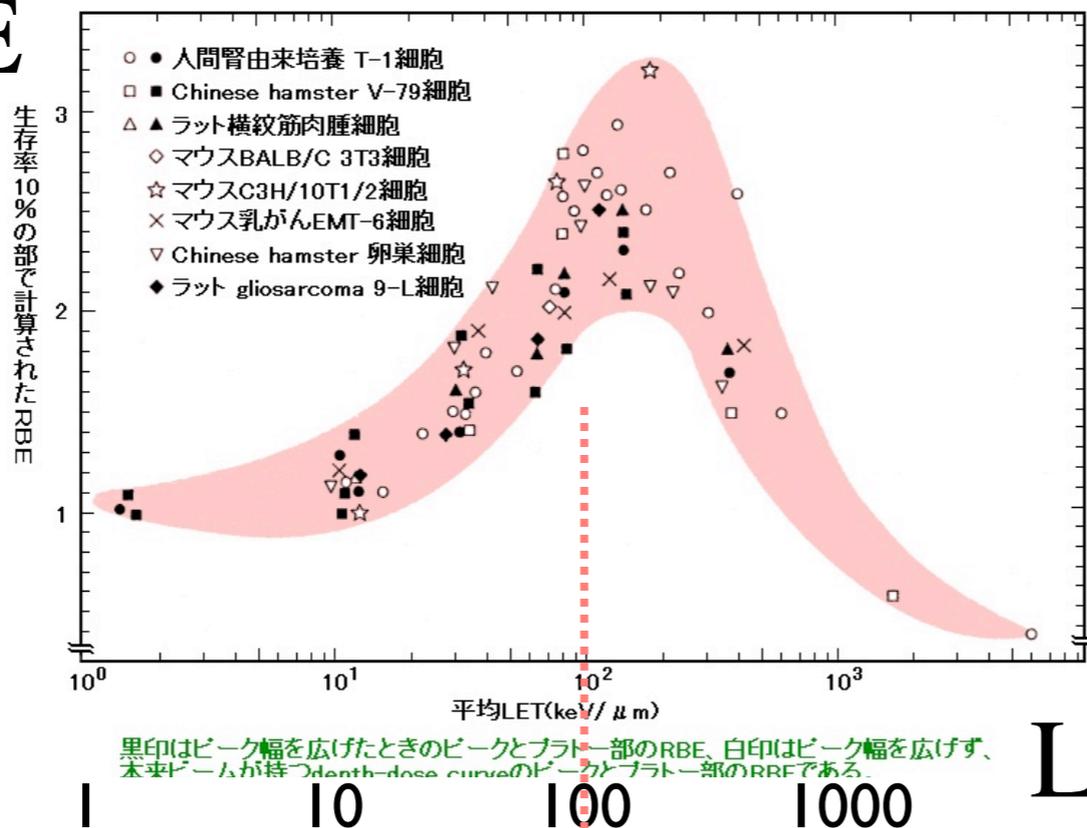
- 全身被曝での影響に換算（臓器ごとに組織加重係数 w_T をかけて合算）

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

Sievert



RBE



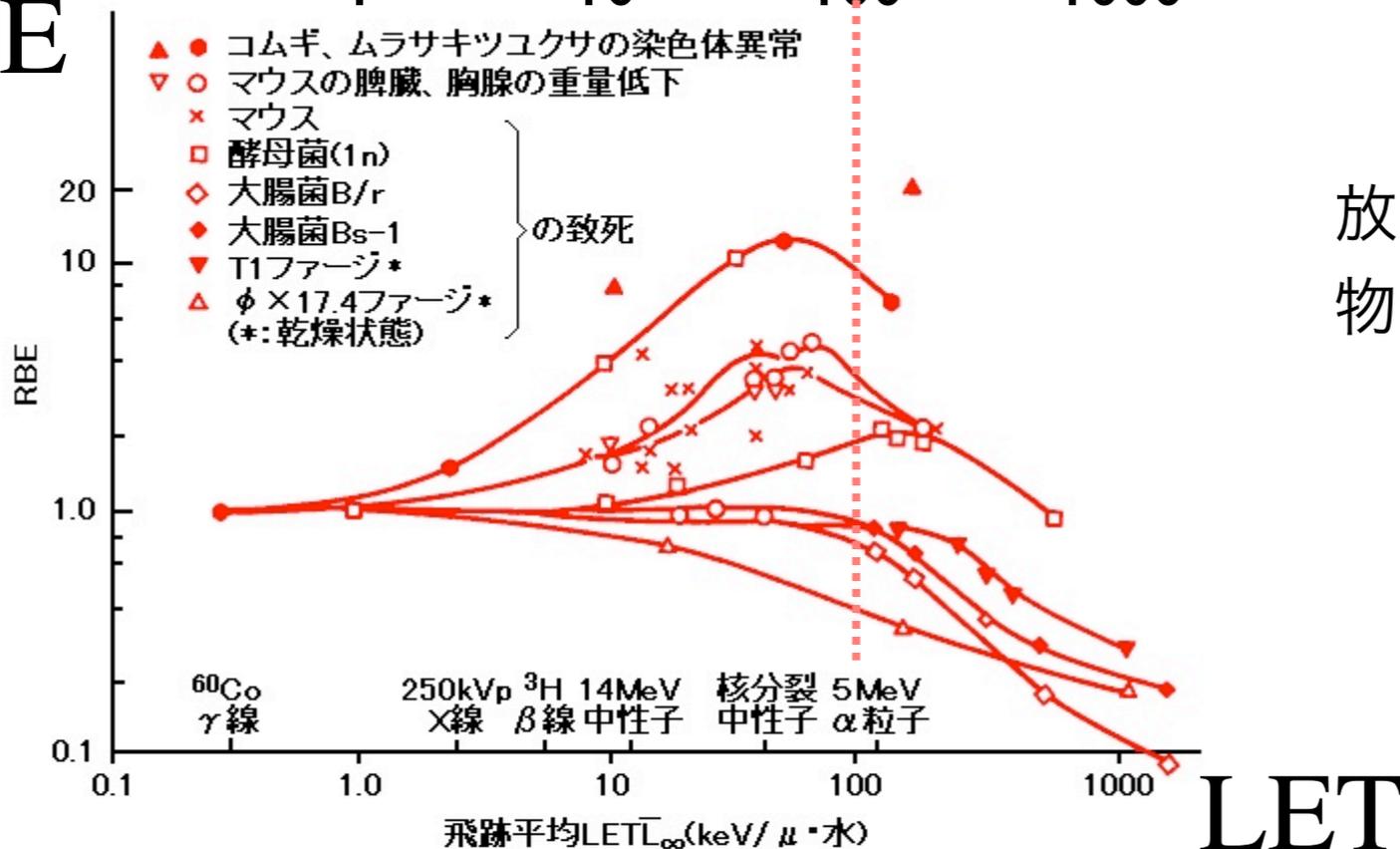
生物学的効果比 RBE

(Relative Biological Effectiveness)

LET (線エネルギー付与)
keV/μm

放射線の軌跡上の単位長さ当たり
物質に与えられるエネルギー

RBE



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

図2 体細胞的効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係

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

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

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

組織 T の組織加重係数

組織 T における
等価線量 [Sv]

組織 T における
平均吸収線量 [Gy]

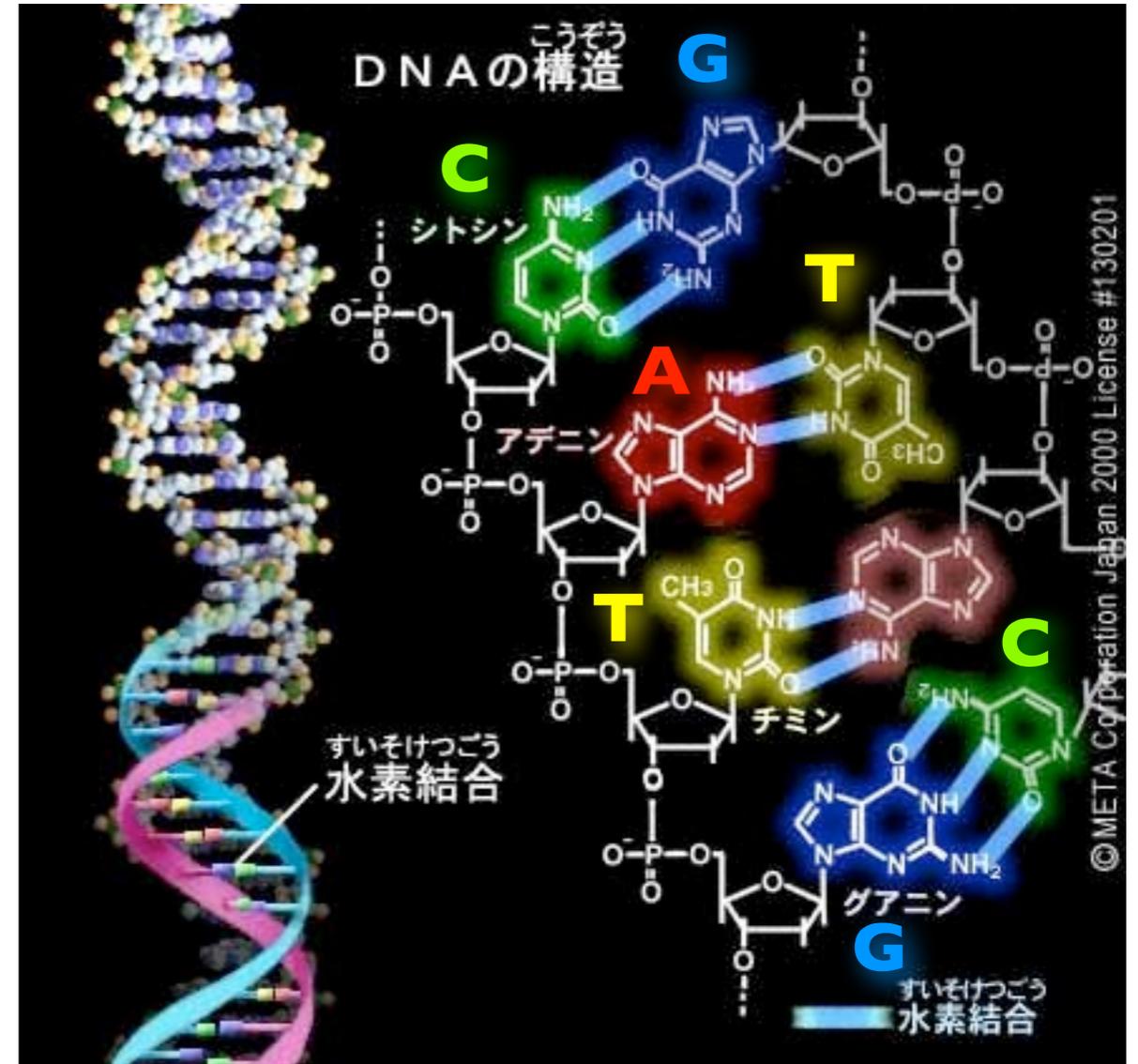
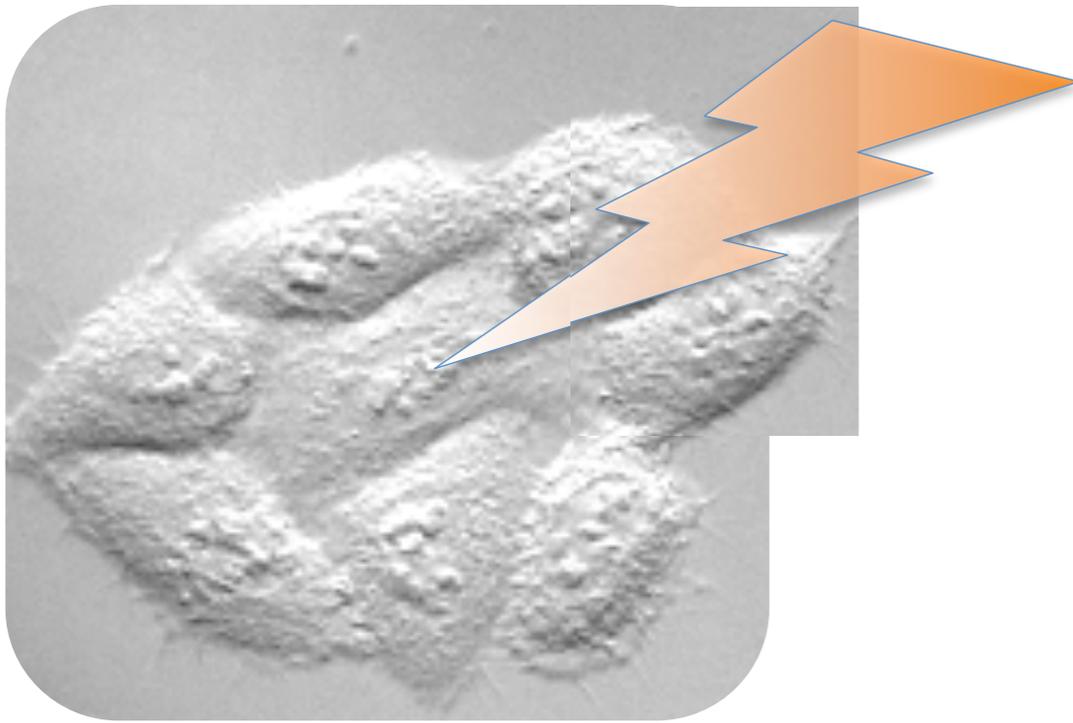
器官・組織	組織加重係数: w_T	
生殖腺	0.20	0.08
骨髄(赤色)	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
膀胱	0.05	0.04
乳房	0.05	0.12
肝臓	0.05	0.04
食道	0.05	0.04
甲状腺	0.05	0.04
皮膚	0.01	0.01
骨表面	0.01	0.01
脳		0.01
唾液腺		0.01
残りの器官・組織 ^{※2}	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

左欄黒字 ICRP 1990

右欄赤字 ICRP 2007

細胞の核に放射線が照射

DNA



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

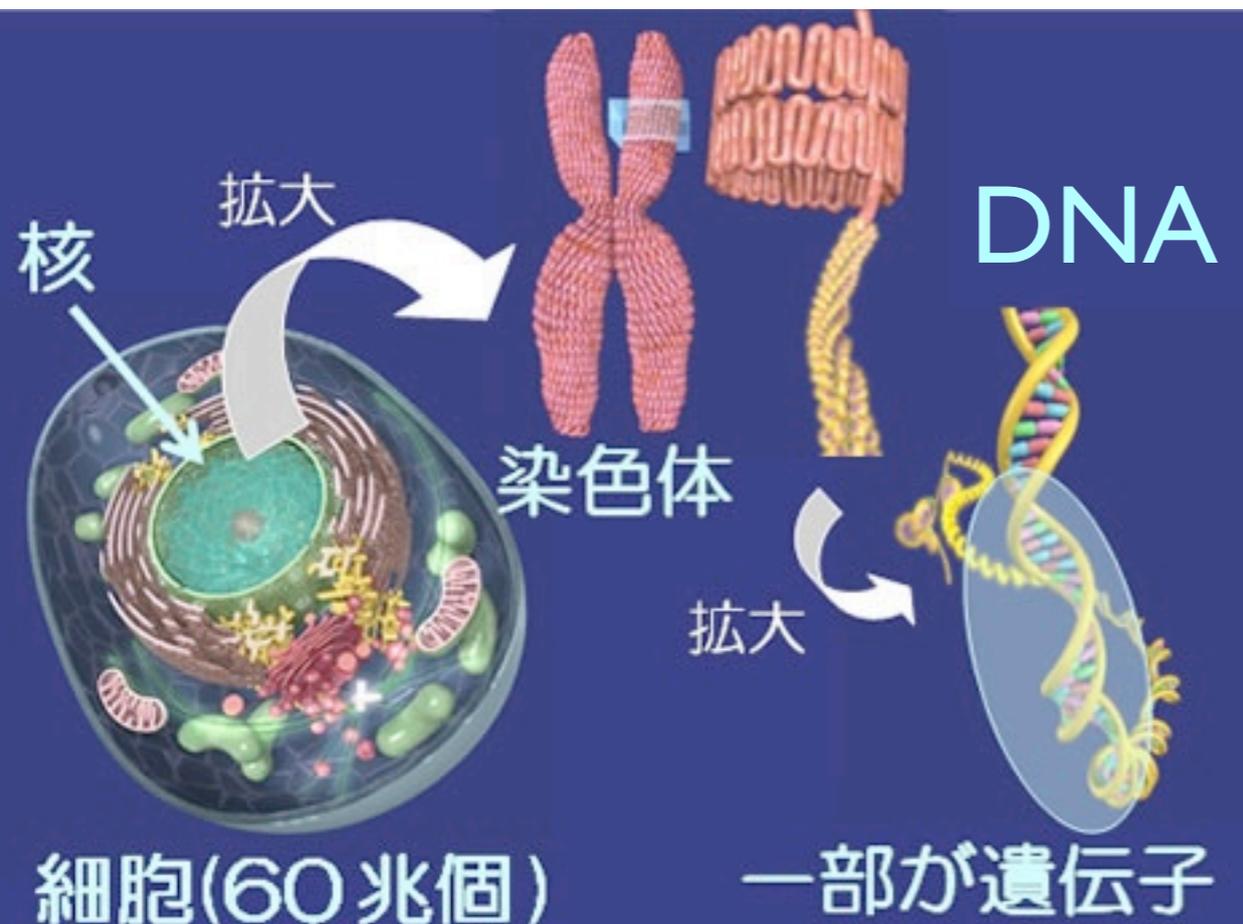
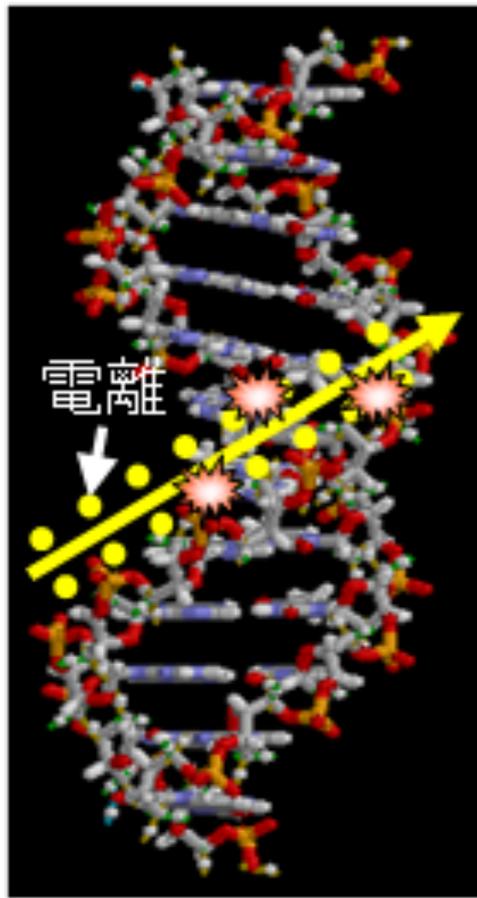


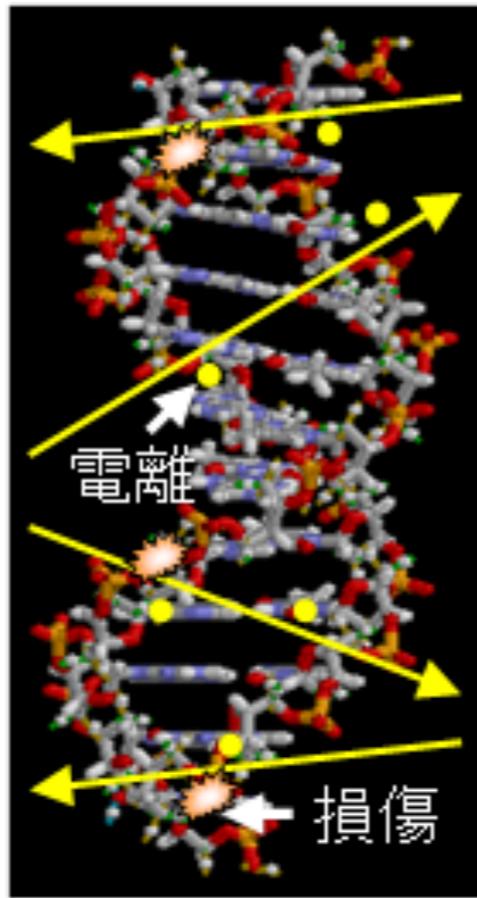
図1 核、染色体、遺伝子

放射線による DNA 損傷

**ラジカル
(活性酸素)**



重イオン



電子

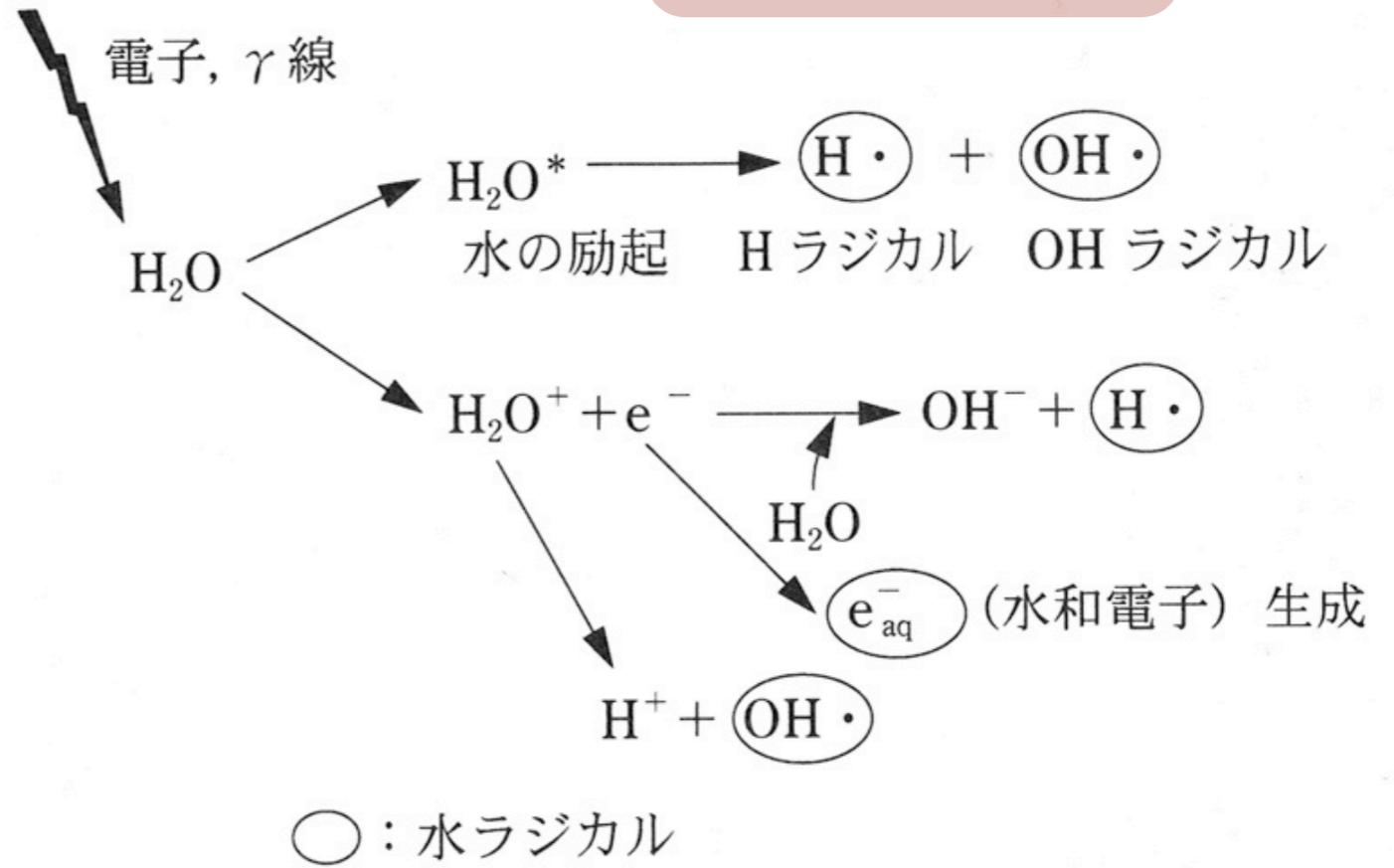


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

LET：線エネルギー付与

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

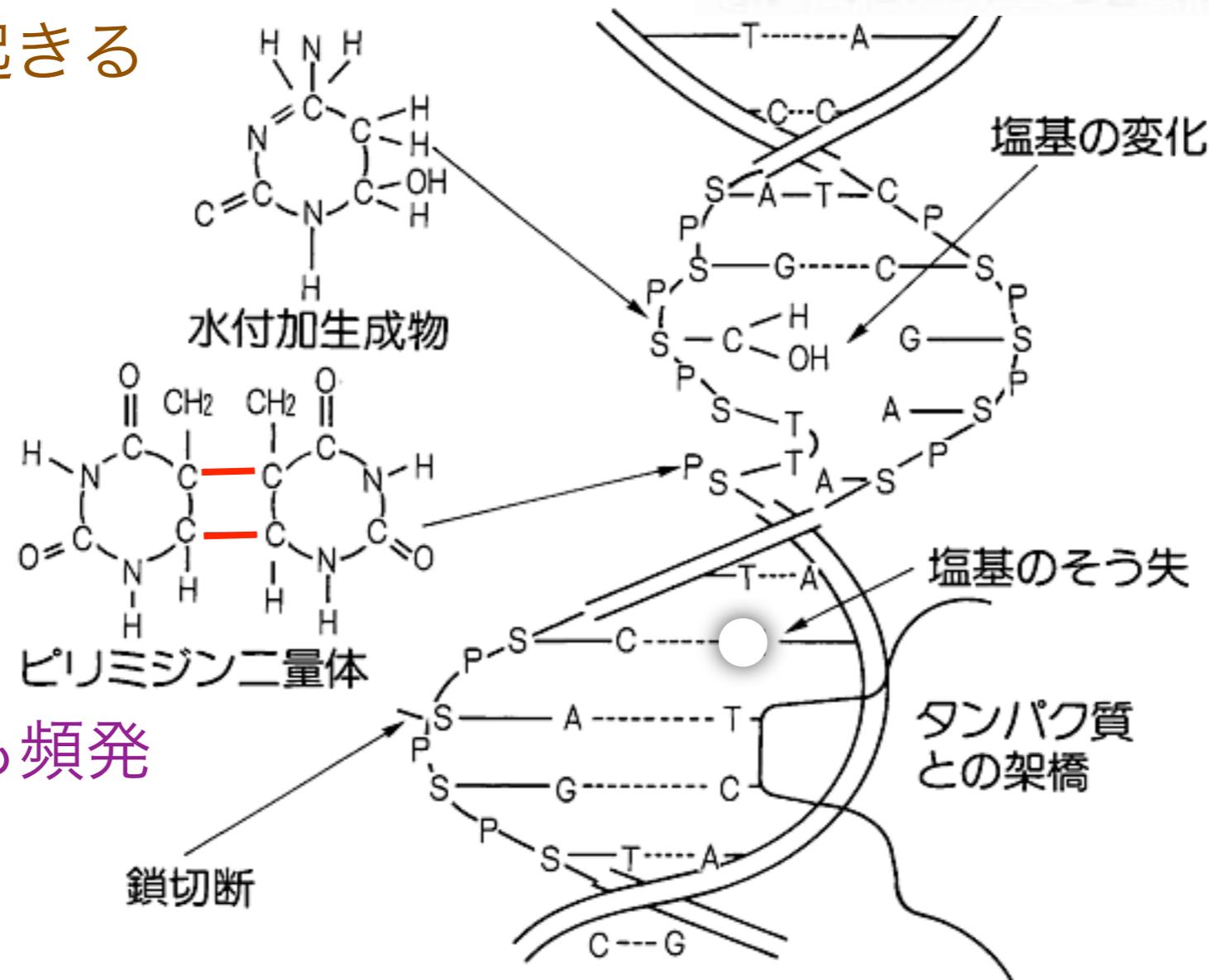
と間接作用：水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用
低 LET 放射線
 β 線, γ 線

何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較⁷⁾

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



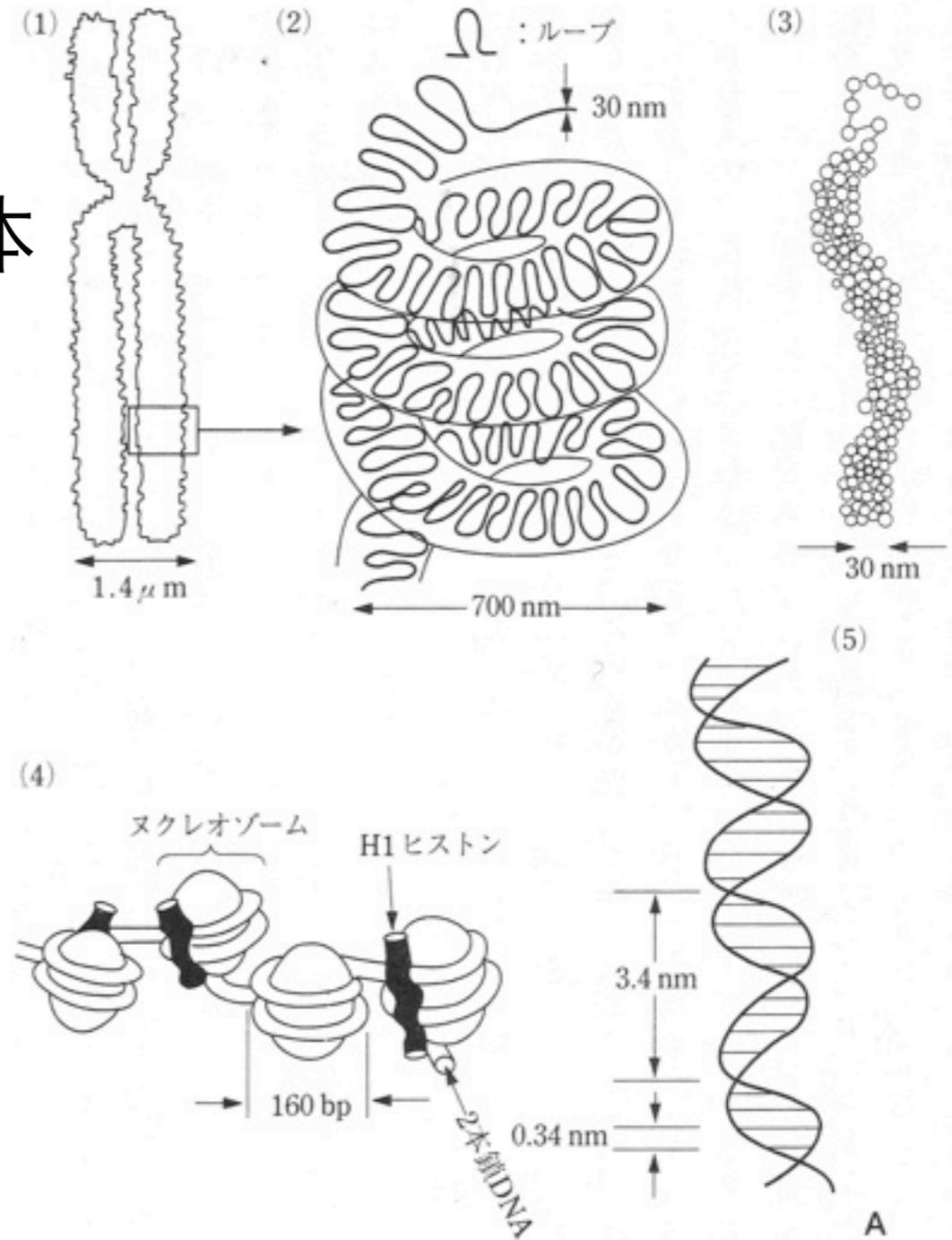
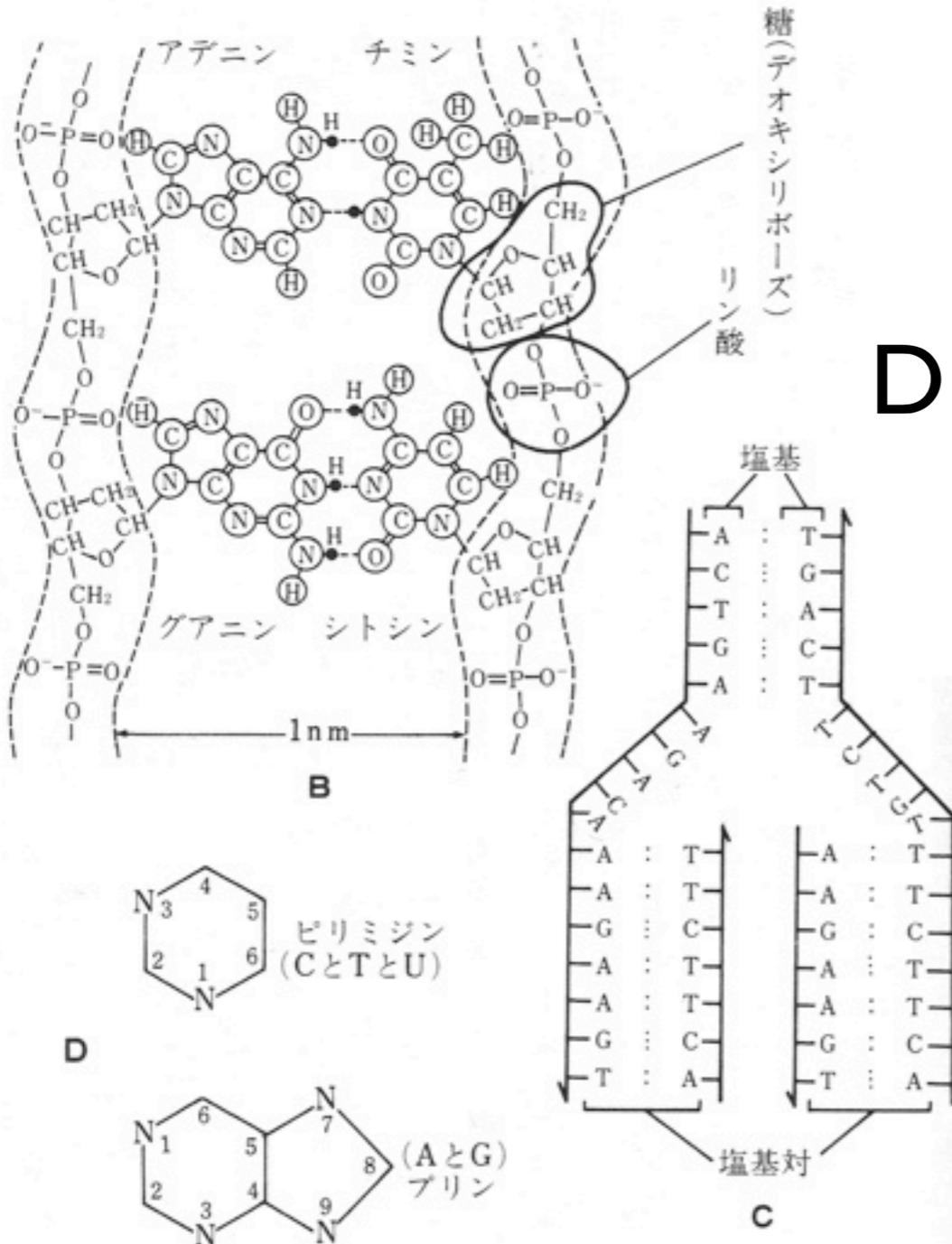
紫外線照射でも頻発

図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

[出典] 江上信雄：生き物と放射線、東京大学出版会、1975

染色体

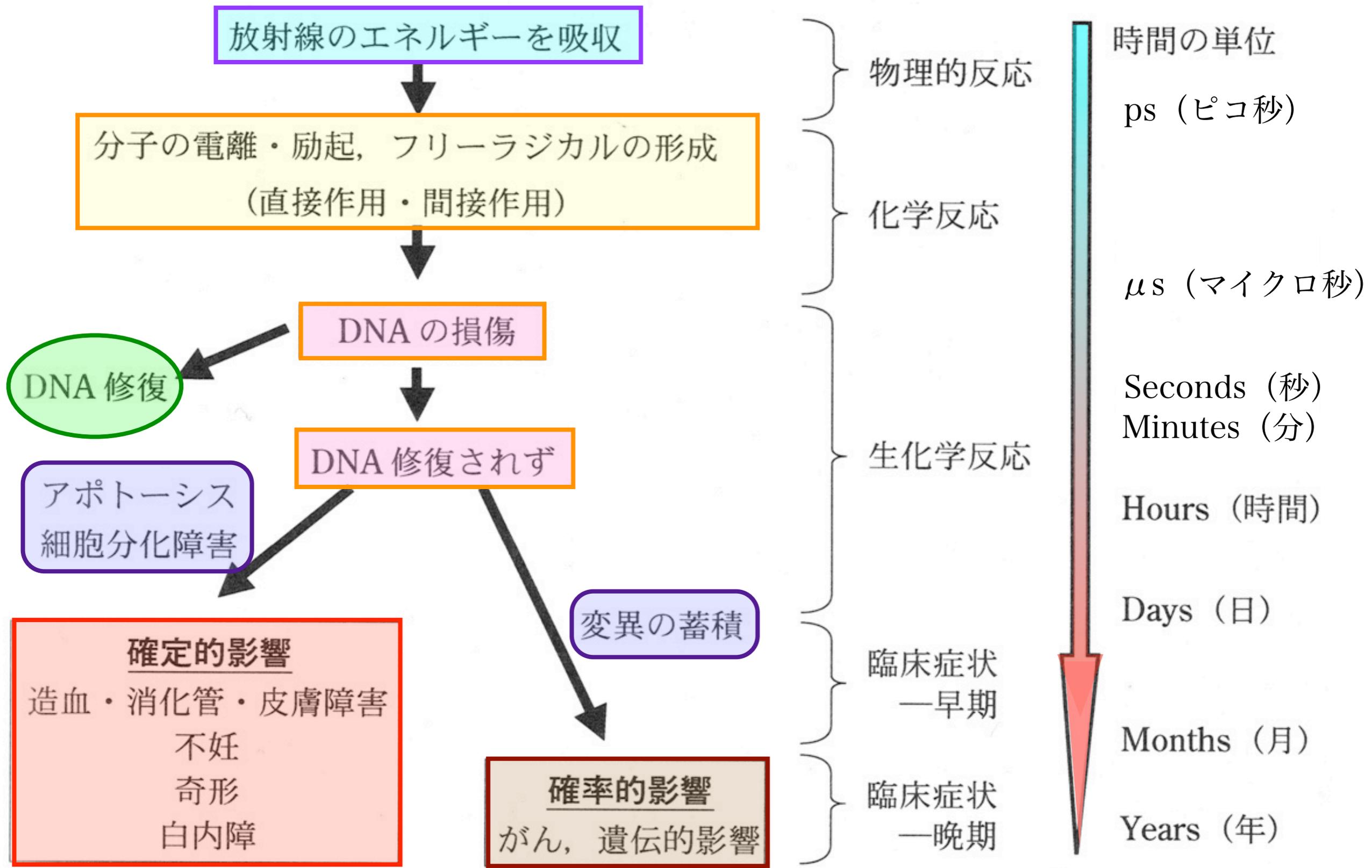
DNA



図III-16 ヒト染色体からDNAまで。

A. 染色体の構造。(1) ヒトの染色体。(2) クロマチンの高次構造（模式図）クロマチンはループ状になり、それがさらに高次の折りたたみ構造をとってコンパクトになる。(3) クロマチンの凝縮した線維構造とほどけた状態（先端部，○印はヌクレオゾーム）。(4) クロマチンの微細構造の模型：ヌクレオゾーム（ヒストンタンパク質に巻きついたDNA鎖）が単位となり、その相互作用で連帯的会合体の線維構造をつくる。(5) DNAの二重らせん型の構造。（文献5より改写）

図III-16(つづき) DNAの化学構造と複製の模式図。
 B. DNAの化学構造。
 C. DNA複製の模式図。
 D. 塩基内の炭素または窒素の位置を示す番号によるよび名。



放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

レポート

各分野ごとに1本選択、合計3本

(それより多く提出してもよい)

• 物理分野 #1

物理：鳥居

締切：12月12日

環境化学：小豆川

生命：渡邊・小笹・坪倉・藤原

(a), (b) 両方に回答。

(a) 放射線と物質（原子・分子）との相互作用の知識をもとに、 α 線・ β 線・ γ 線の場合のそれぞれについて、内部被曝と外部被曝の影響の違いについて述べよ。

(b) γ 線の遮蔽に鉛が有効なのはなぜか。一方で、 β 線の遮蔽にはアクリルやアルミの板が用いられ、鉛を使ってはいけない。なぜだろうか。

この課題(#1)は誰でも選択可。

レポート

各分野ごとに1本選択、合計3本

(それより多く提出してもよい)

• 物理分野 #2

物理：鳥居

環境化学：小豆川

締切：12月12日

生命：渡邊・小笹・坪倉・藤原

放射線と物質（原子・分子）との相互作用の知識をもとに、(a) GM管 (b) NaI シンチレータ の2種類の放射線検出器について、放射線計測の動作原理について説明した後、 α 線、 β 線、 γ 線のそれぞれの場合について、反応過程と検出効率を論ぜよ。

GM管についての参考文献：基礎物理学実験教科書 霧箱・GM管 種目

この課題(#2)は誰でも選択可。

レポート

• 物理分野 #3

締切：12月12日

この課題の選択は、文系または理科 II, III 類で高校時代に物理を履修しなかった学生に限る。

自然放射線は、日本各地あるいは世界各地で、場所ごとに線量が異なる。具体的に特徴的な場所を複数選んで、その地域の放射線量および放射線の種類を述べ、その要因について解説せよ。

また、放射線の規制はどうあるべきか。自然放射線量が年間数 mSv 以上の地域がある一方で、法律は公衆の追加線量を年間 1 mSv までとしているが、医療被曝は対象としないこと、低線量被曝の人体への影響の知見も踏まえて、考えを述べよ。福島県の避難区域について、帰還の目安はどうするのがよいと思うか。

準教科書

「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

初版 **第3刷** 以降

丸善出版 本体 2500円＋税

ご購入は生協書籍部の
教科書販売所で

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

準教科書

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

本日の講義内容

次回の講義内容

「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

初版 **第3刷** 以降

丸善出版

本体 2500円＋税

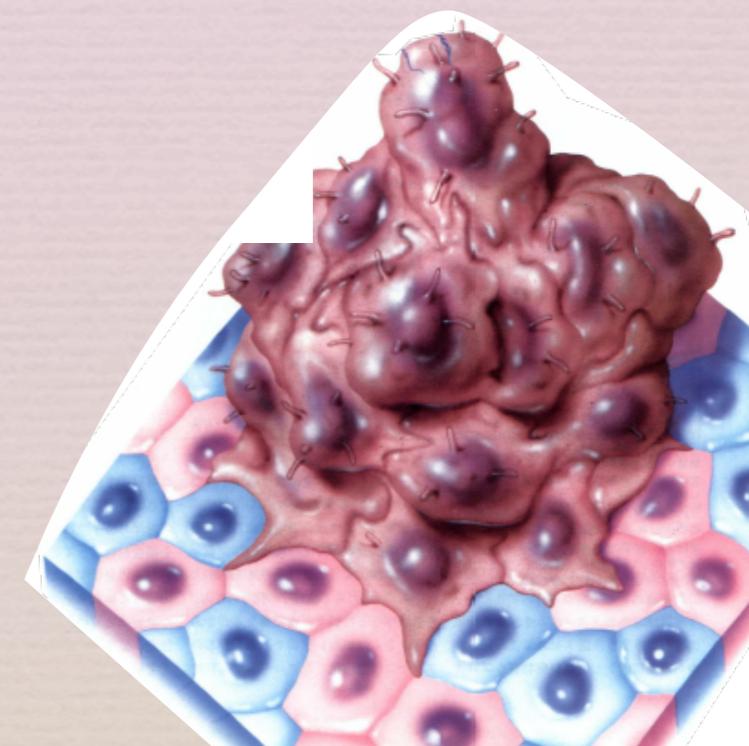
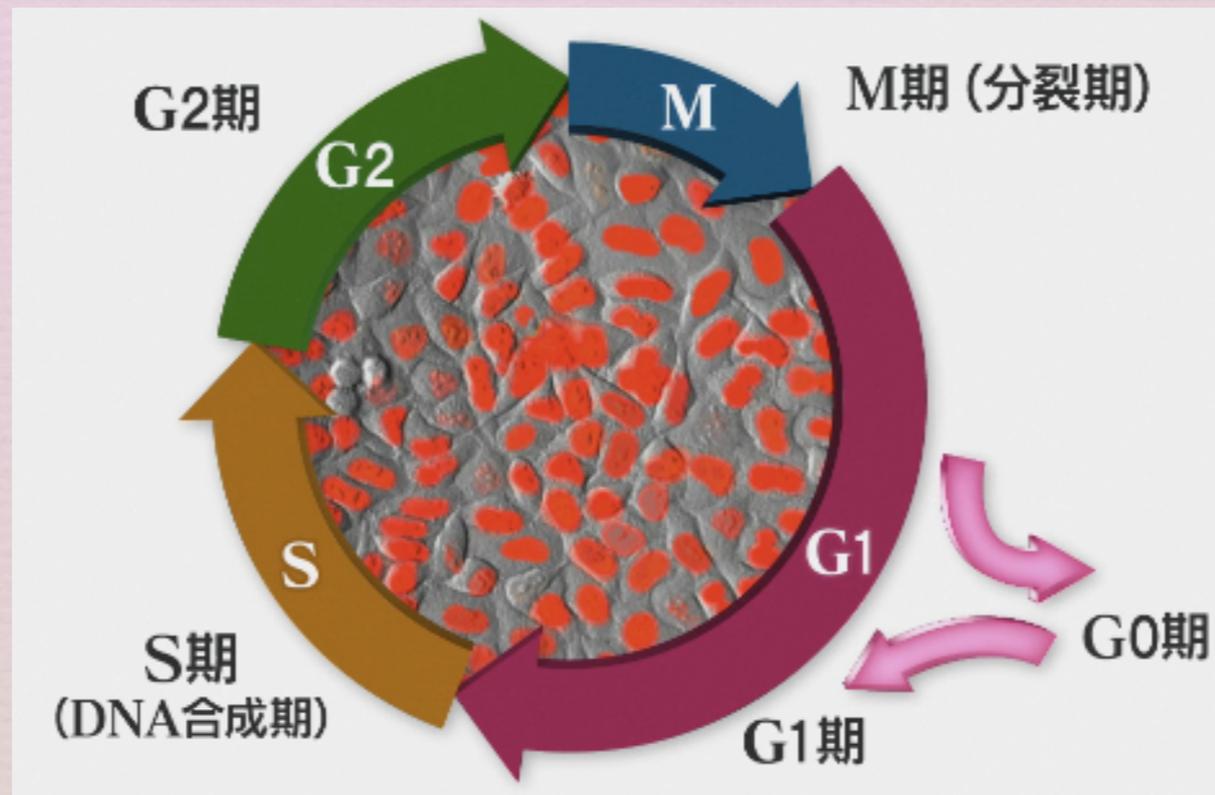
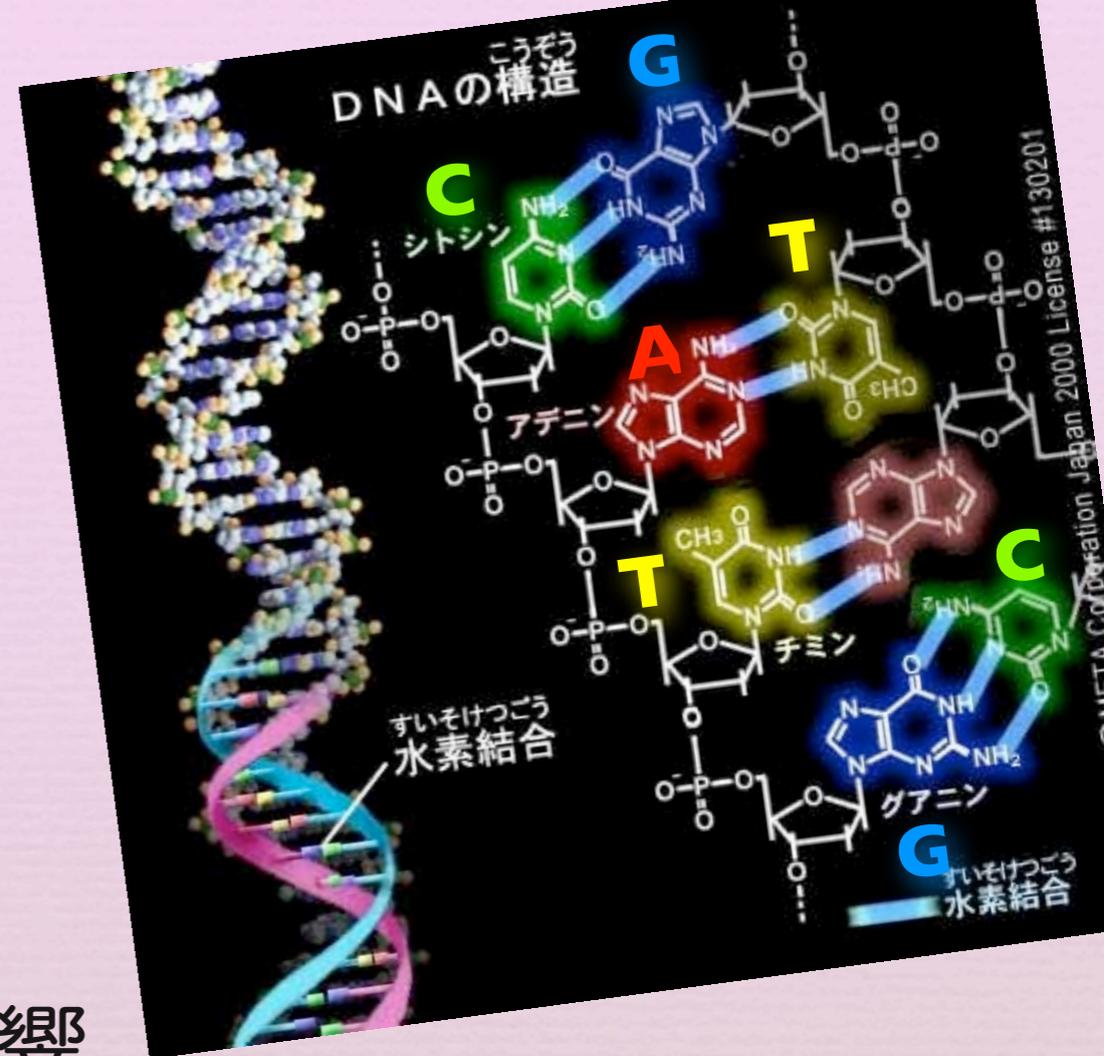
ご購入は生協書籍部の
教科書販売所で

次回予告

第5回 (11/7)

● 放射線生物学

● 放射線の細胞および生体への影響



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 テーマ講義



検索

連絡先

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

担当教員:鳥居 寛之

Fine. Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 여기서 마치겠습니다.

Ci vediamo la prossima settimana.

On se voit la semaine prochaine.

See you next week.

Увидимся на следующей неделе.

다음 주에 또 만납시다.