放射線物理の基礎と応用

公益社団法人 日本アイソトープ協会
上蓑　義朋
（うわみの　よしとも）

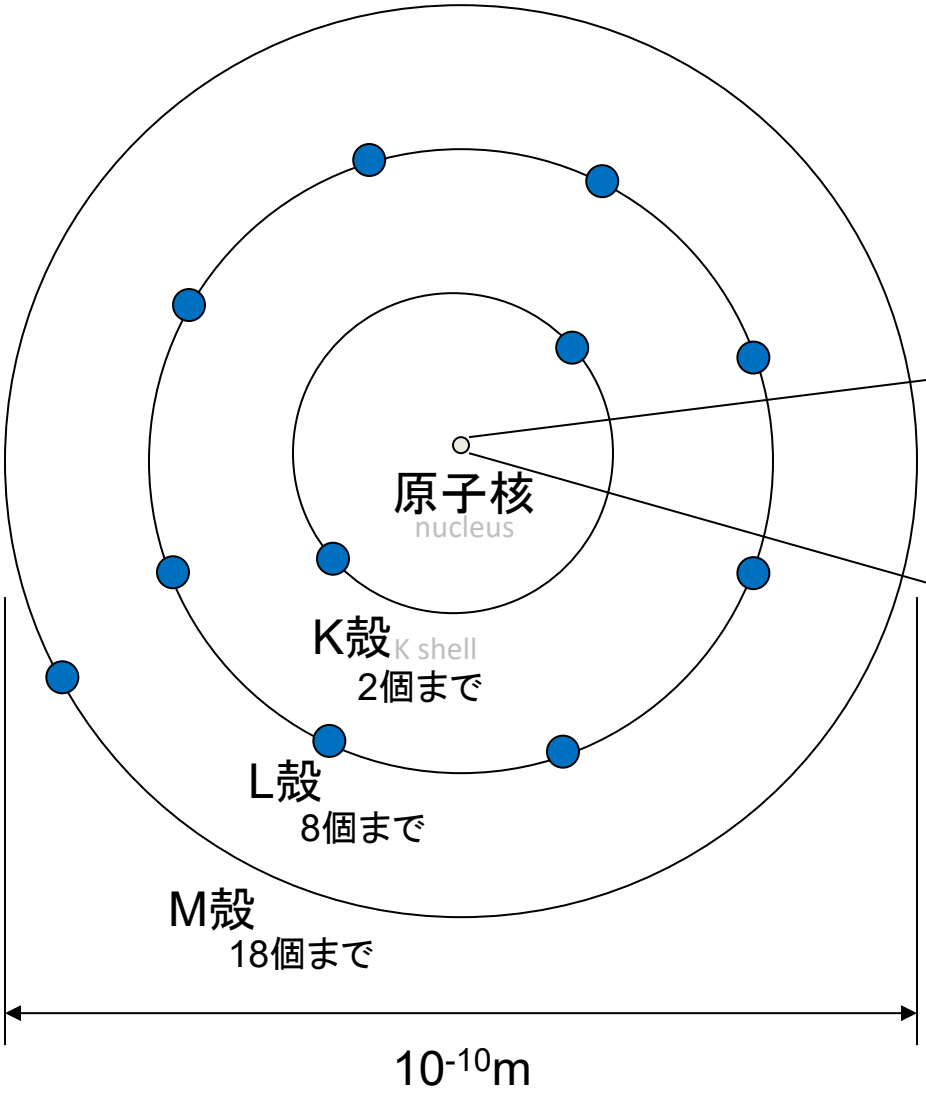
講義の概要

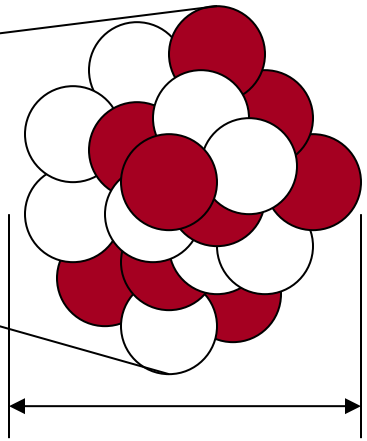
1. 原子と原子核
   （構子造，基本粒子，電子ボルト[eV]）
2. 放射線と放射性壊変
   （α 壊変，β 壊変，γ 線の放出，半減期）
3. 荷電粒子の相互作用
   （阻止能，飛程）
4. 光子の相互作用
   （光電効果，コンプトン散乱，電子対生成）
5. 中性子の相互作用
   （散乱，捕獲，放射線遮蔽）
6. 核分裂と原子炉
   （機構，生成物，連鎖反応，原子炉）
7. 加速器
   （静電型，高周波型，核反応，^{113}Nh ，RI製造）

原子と原子核

原子の構造 $_{11}$Na
atom

陽子 proton
中性子 neutron
核子 nucleon
電子 electron





10^{-15}～10^{-14}m

質量の99.97%

【大きさは核子の数にほぼ比例】

【大きさはどの元素でもほぼ同じ】

ことばの定義

- 陽子数＝原子番号　Z
  atomic number
  同一原子番号の原子：元素
  element
- 陽子数＋中性子数＝核子数＝質量数　A
  mass number
- 核種：$^{A}_{Z}\mathrm{X}$　あるいは簡単に $^{A}\mathrm{X}$
  nuclide
- 同じ元素で質量数 A が異なる核種：
  同位体（isotope，同位元素）

同位体の存在度

abundance

天然に存在する安定な同位体

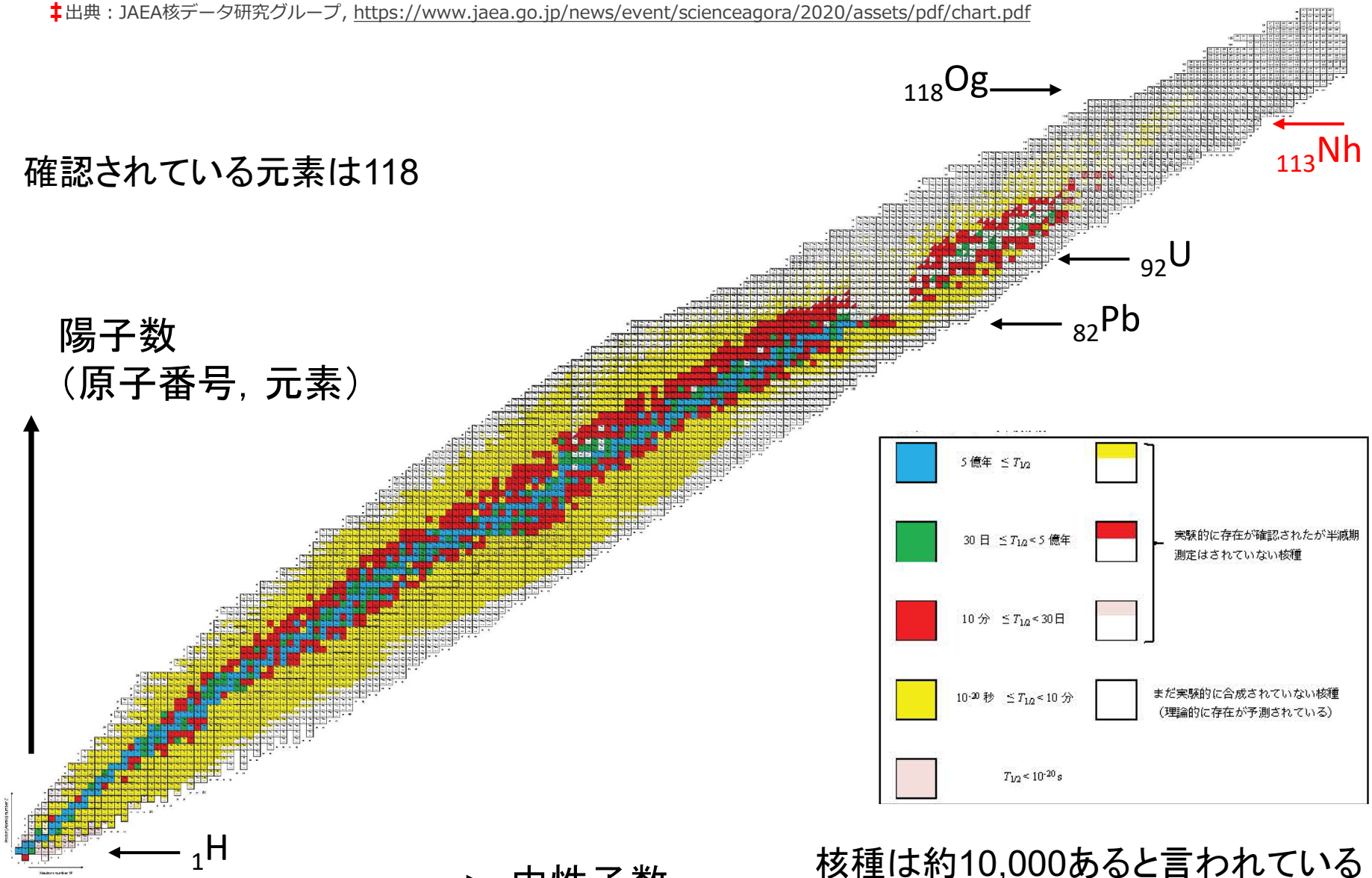
原子番号	元素名	同位体	存在度(%)	中性子数	中性子数/陽子数
6	炭素	^{12}C ^{13}C	98.93 1.07	6 7	1.00 1.17　平均 1.00
11	ナトリウム	^{23}Na	100	12	1.09　平均 1.09
26	鉄	^{54}Fe ^{56}Fe ^{57}Fe ^{58}Fe	5.8 91.8 2.1 0.3	28 30 31 32	1.07 1.15 1.19 1.23　平均 1.15
55	セシウム	^{133}Cs	100	78	1.42　平均 1.42
82	鉛	^{204}Pb ^{206}Pb ^{207}Pb ^{208}Pb	1.4 24.1 22.1 52.4	122 124 125 126	1.49 1.51 1.52 1.54　平均 1.53

- 陽子と陽子の間に働く核力（引力）は，中性子と中性子の間に働く核力と等しいが，クーロン力による斥力（反発力）が働く。
- 陽子と中性子の間に働く核力は，陽子どうし，中性子どうしに働く核力よりも大きい。

核図表

‡出典：JAEA核データ研究グループ, https://www.jaea.go.jp/news/event/scienceagora/2020/assets/pdf/chart.pdf

確認されている元素は118



核種は約10,000あると言われている

粒子の運動量とエネルギー

【古典力学】

運動量
momentum

$$p = mv$$

運動エネルギー
kinetic energy

$$T = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\mathrm{J}]$$

- m：質量（kg）
- v：速度（m s^{-1}）

【相対論】

運動量

$$p = m'v = \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}} \qquad \left[\beta = \frac{v}{c}\right]$$

運動エネルギー

$$T = E - mc^2 = m'c^2 - mc^2$$

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

- c：光の速度
  （3×10^8 m・s^{-1}）

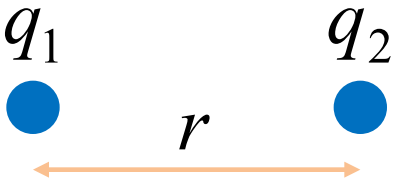
電気素量(素電荷)
elementary charge

$$e = 1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}\ (\text{クーロン})$$

- 電子の電荷 : $-\ 1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$
- 陽子の電荷 : $+\ 1.6 \times 10^{-19}\ \mathrm{C}$

クーロン力
Coulomb force

- 電荷間に働く力



$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad [\mathrm{N}]$$

ε：イプシロン

$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{kg^{-1}\ m^{-3}\ s^2\ C^2}$（真空の誘電率）

- ＋と＋，－と－では斥力(反発力）
- ＋と－では引力
- 位置エネルギー（無限遠を基準；＋と－では$E<0$）

$$E = \int_r^\infty F dx = \int_r^\infty \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{x^2} dx = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0} \left[\frac{-1}{x} \right]_r^\infty = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r} \ [\mathrm{J}]$$

電子ボルト（electron volt: eV）

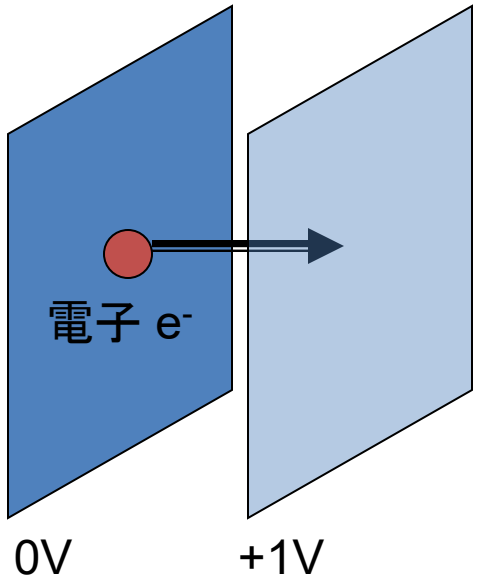
$$W = qV$$

$$= 1.6 \times 10^{-19}(\mathrm{C}) \times 1(\mathrm{V})$$

$$= 1.6 \times 10^{-19}(\mathrm{J})$$

1電子ボルト（eV）=1.6×10^{-19} J

1×10^{3} eV=1 keV
1×10^{6} eV=1 MeV
1×10^{9} eV=1 GeV



炭素原子が1個燃えたとき：　$C+O_2 \rightarrow CO_2+4.1eV$

質量とエネルギーの等価性

$$E=mc^2$$

- E: エネルギー(J)
- m: 質量(kg)
- c: 光速度(3×10^8 m/s)

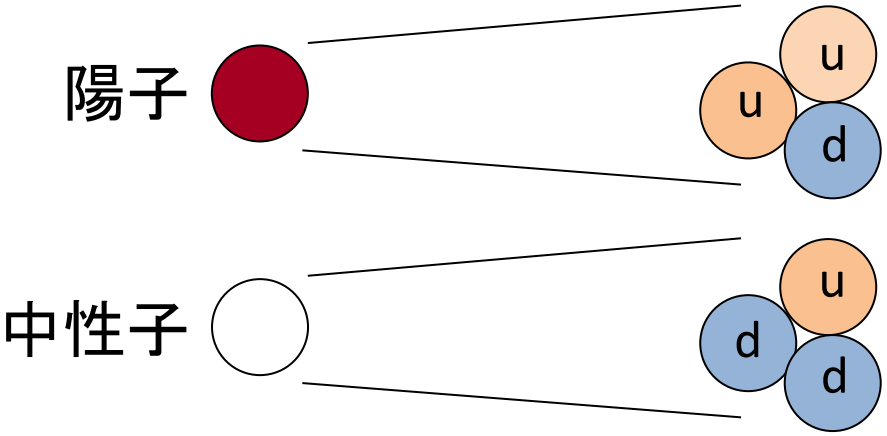
1kgの物質がすべてエネルギーに変わると9×10^{16}J ＝ 約350万トンの石炭の燃焼エネルギー

核子と電子の質量

粒子	質量（kg）	エネルギーに換算した質量（MeV）
陽子	1.673×10^{-27}	938.3
中性子	1.675×10^{-27}	939.6
電子	9.109×10^{-31}	0.5110

基本粒子（素粒子）
fundamental particles　elementary particles

【ハドロン】



物質を構成しているクォークとレプトン

世代	1	2	3	電荷
クォーク quark	アップ	チャーム	トップ	2/3 *e*
	ダウン	ストレンジ	ボトム	-1/3 *e*
レプトン lepton	電子ニュートリノ neutrino	ミューニュートリノ	タウニュートリノ	0
	電子	ミュオン muon	タウ粒子	-*e*

参考：KEK キッズサイエンティスト, https://www2.kek.jp/kids/multi/particle/physics.html

自然界の力

力とそのもとになっているゲージ粒子

gauge particle

力(相互作用)	力の強さ	力の作用半径	ゲージ粒子
万有引力 gravitation	10^{-40}	∞	重力子(graviton)
電磁気力 electromagnetic force	10^{-2}	∞	光子(photon)
強い力 strong force	1	10^{-15} m	グルーオン(gluon)
弱い力 weak force	10^{-5}	10^{-18} m	$W^{\pm}$, Z^0

参考：KEK キッズサイエンティスト, https://www2.kek.jp/kids/multi/particle/physics.html

原子核の結合エネルギー

binding energy

原子核は，核子がすべてバラバラな状態よりも結合エネルギー分だけ軽い

$$[\text{結合エネルギー}] = [\{Z\times(M_\mathrm{p}+M_\mathrm{e})+N\times M_\mathrm{n}\}-M_\mathrm{nuc}]\times c^2$$

$$[\text{核子あたりの結合エネルギー}] = [\text{結合エネルギー}]/A$$

質量超過（mass excess，Δ）を次式で定義する。

$$\Delta = M_\mathrm{nuc} - A\times[1\ \mathrm{Da}]$$

一方，

$$M_\mathrm{p}+M_\mathrm{e}=M_{^1\mathrm{H}}=\Delta_{^1\mathrm{H}}+1\times[1\ \mathrm{Da}],\quad M_\mathrm{n}=\Delta_\mathrm{n}+1\times[1\ \mathrm{Da}]$$

したがって，

$$[\text{結合エネルギー}]$$
$$= [\{Z\times(\Delta_{^1\mathrm{H}}+[1\ \mathrm{Da}])+N\times(\Delta_\mathrm{n}+[1\ \mathrm{Da}])\}-\{\Delta_\mathrm{nuc}+A\times[1\ \mathrm{Da}]\}]\times c^2$$
$$= [Z\times\Delta_{^1\mathrm{H}}+N\times\Delta_\mathrm{n}-\Delta_\mathrm{nuc}]\times c^2$$

ここで

- Z: 原子番号
- N: 中性子数
- A: 質量数
- M_p: 陽子の質量
- M_n: 中性子の質量
- M_e: 電子の質量
- M_nuc: 核種の質量
- c: 光速度
- 1 Da: ^{12}C原子1個の質量の1/12

[Daは統一原子質量単位]

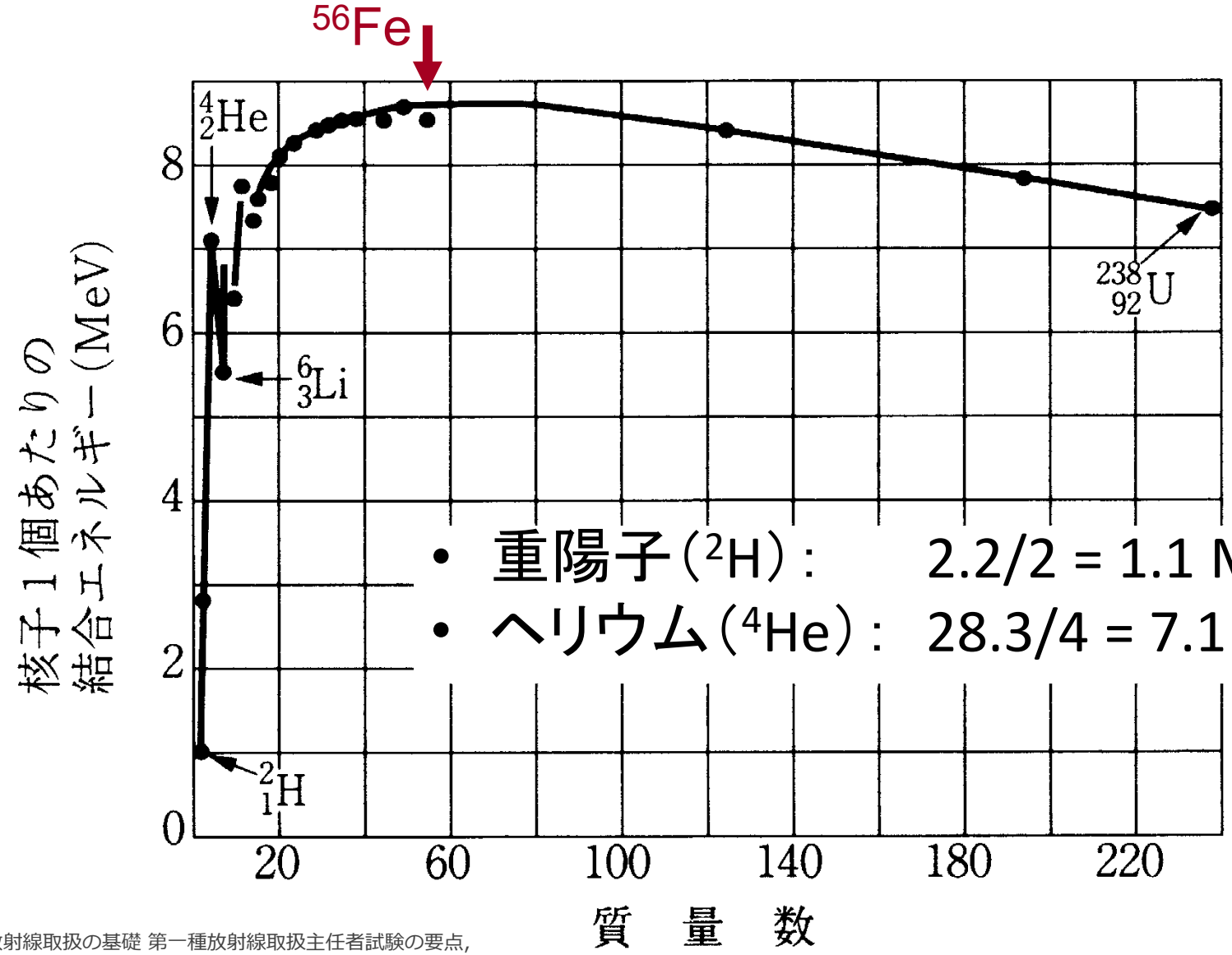
[1 Da=12/($N_\mathrm{A}\times12\times1000$) kg
=1/($N_\mathrm{A}\times1000$) kg]

[以前Daはuと書いていた]

核種	Z	N	$\Delta\times c^2$ [MeV]	結合エネルギー [MeV]	核子あたり結合エネルギー [MeV]
^{2}H(D)	1	1	13.1	2.2	1.1
^{4}He	2	2	2.4	28.3	7.1
^{12}C	6	6	0	92.2	7.7
^{56}Fe	26	30	-60.6	492.3	8.8
^{238}U	92	146	47.3	1801.7	7.6

$\Delta_\mathrm{H}\times c^2 = 7.3$ [MeV]，$\Delta_\mathrm{n}\times c^2 = 8.1$ [MeV]

核子あたりの結合エネルギー



- 重陽子(^{2}H)： 2.2/2 = 1.1 MeV
- ヘリウム(^{4}He)： 28.3/4 = 7.1 MeV

‡出典：10版 放射線取扱の基礎 第一種放射線取扱主任者試験の要点, 物理学 1 原子と原子核, p. 9, 図1.5, 日本アイソトープ協会

計算してみよう (1)〔軌道電子のエネルギー〕

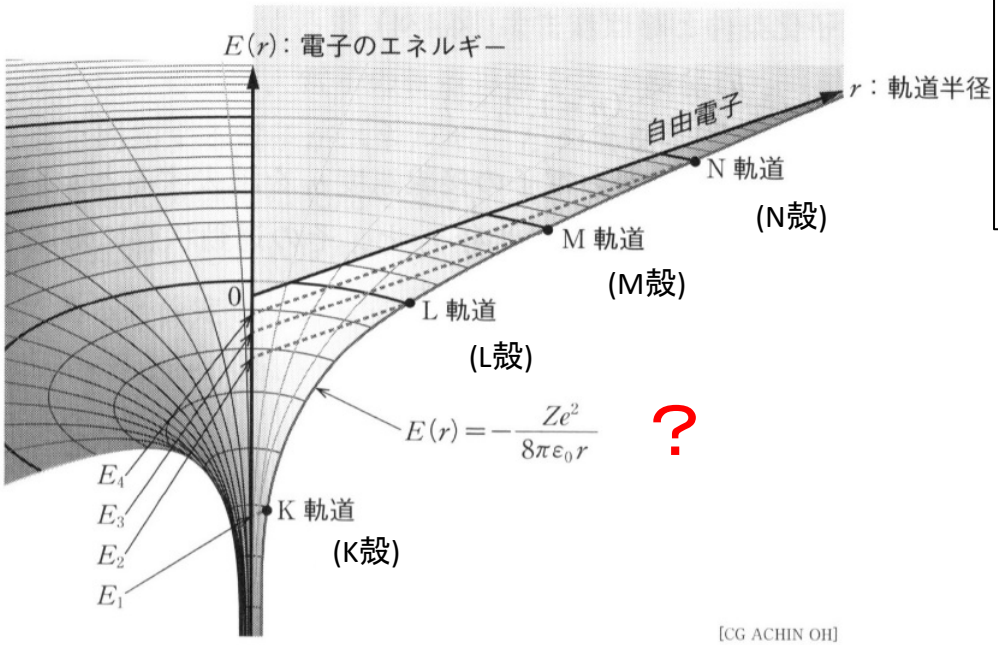


図 4·5　ボーアの原子模型

原子番号 Z の原子核の中心から半径 r の軌道を円運動する電子のエネルギー（位置と運動エネルギーの和）$E(r)$を求めよ。ただし電子は1個だけとせよ。以下の式を参考にしてよい。

電場の位置エネルギー

$$E_E = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{Ze^2}{r}$$

電子の運動エネルギー

$$E_M = \frac{1}{2}mv^2$$

電場から受ける力

$$F_E = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \times \frac{Ze^2}{r^2}$$

円運動による向心力

$$F_C = mr\omega^2 = \frac{mv^2}{r}$$

電子のエネルギー

$$E(r) = E_E + E_M$$

‡出典：多田順一郎 他 (2022), わかりやすい放射線物理学 (改訂3版), 第4章 原子の構造, p. 54, 図4·5, オーム社

解説 (1)

電場の位置エネルギー

$$E_E = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\times\frac{Ze^2}{r} \quad ①$$

電子の運動エネルギー

$$E_M = \frac{1}{2}mv^2 \quad ②$$

電場から受ける力

$$F_E = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\times\frac{Ze^2}{r^2} \quad ③$$

円運動による向心力

$$F_C = mr\omega^2 = \frac{mv^2}{r} \quad ④$$

電子のエネルギー

$$E(r) = E_E + E_M \quad ⑤$$

電場から受ける引力と円運動による向心力は釣り合うので，③と④より，

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\times\frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \quad ⑥$$

⑥より，

$$v = \sqrt{\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 mr}} \quad ⑦$$

⑦を②に代入し，さらに⑤より，

$$\begin{aligned} E(r) &= E_E + E_M \\ &= -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\times\frac{Ze^2}{r} + \frac{1}{2}m\times\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 mr} \\ &= -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\times\frac{Ze^2}{r} + \frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\times\frac{Ze^2}{r} \\ &= -\frac{1}{8\pi\varepsilon_0}\times\frac{Ze^2}{r} \end{aligned}$$

放射線と放射性壊変

放射線とは

主な放射線

- α 線：（alpha ray）　高速（光の5～7%）の^{4}He原子核
  +2価で重い

α：アルファ

β：ベータ

- β 線：（beta ray）　高速（光の25～98%）の電子または陽電子（+1価）（electron / positron）
  1価で軽い

- γ 線，X線：（gamma ray / X ray）　エネルギーの高い光（光子，電磁波）（photon / electromagnetic wave）
  γ 線：原子核，素粒子から放出
  X線：軌道電子，荷電粒子の制動などで放出
  電荷0

γ：ガンマ

- 中性子線：（neutron）　中性子
  電荷0

その他にも，宇宙線・加速器では，
陽子，重イオン，μ粒子（ミュオン），
ν（ニュートリノ），などなど

電磁波（γ線，X線，光子）の粒子性

光子のエネルギー

$$E = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad [\mathrm{J}]$$

- h：プランク定数（6.6×10^{-34} J･s）
- ν：振動数（s^{-1}）
- c：光の速度（3×10^{8} m･s^{-1}）
- λ：波長（m）

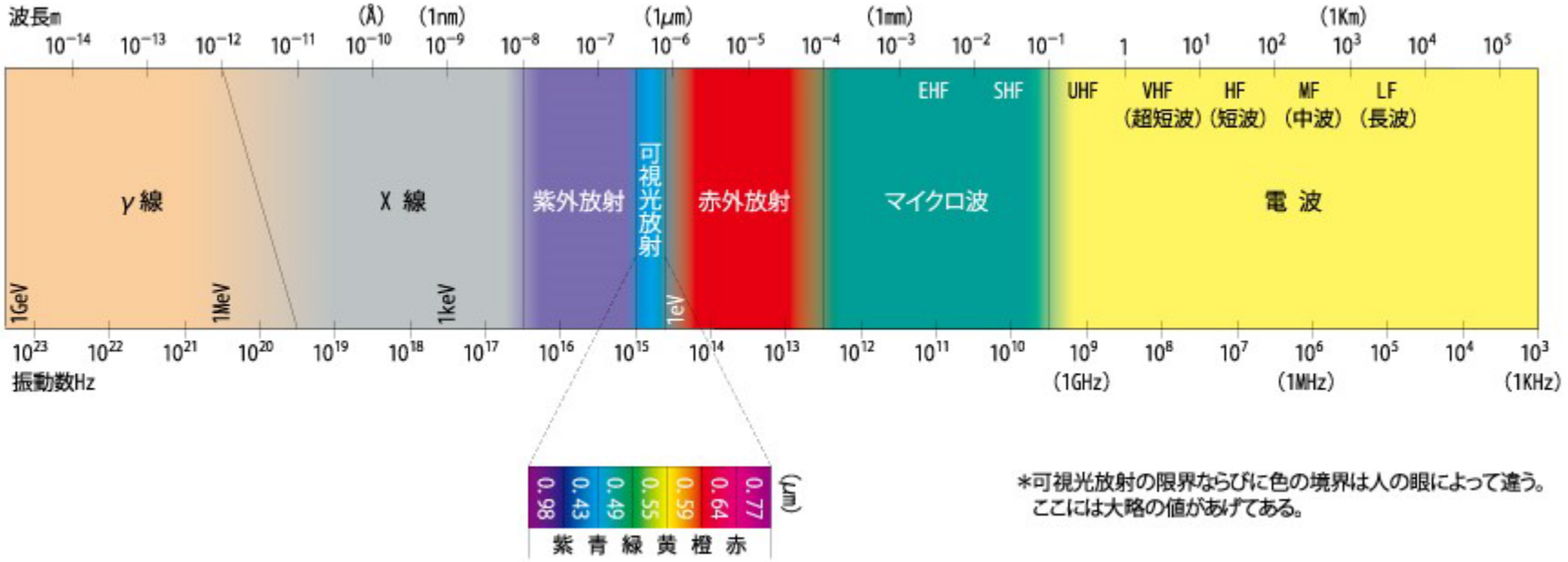
ν：ニュー

λ：ラムダ

光子の運動量

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

電離放射線
ionizing radiation



‡出典：ウシオ電機株式会社, https://www.ushio.co.jp/jp/technology/glossary/material/attached_material_01.html

- 可視光 : λ = 約380nm ~ 780nm
- 電離放射線 : $\lambda \lesssim 100\text{nm}\ (12\text{eV})$

【国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）】
International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

$E \gtrsim 10\ \text{eV}$

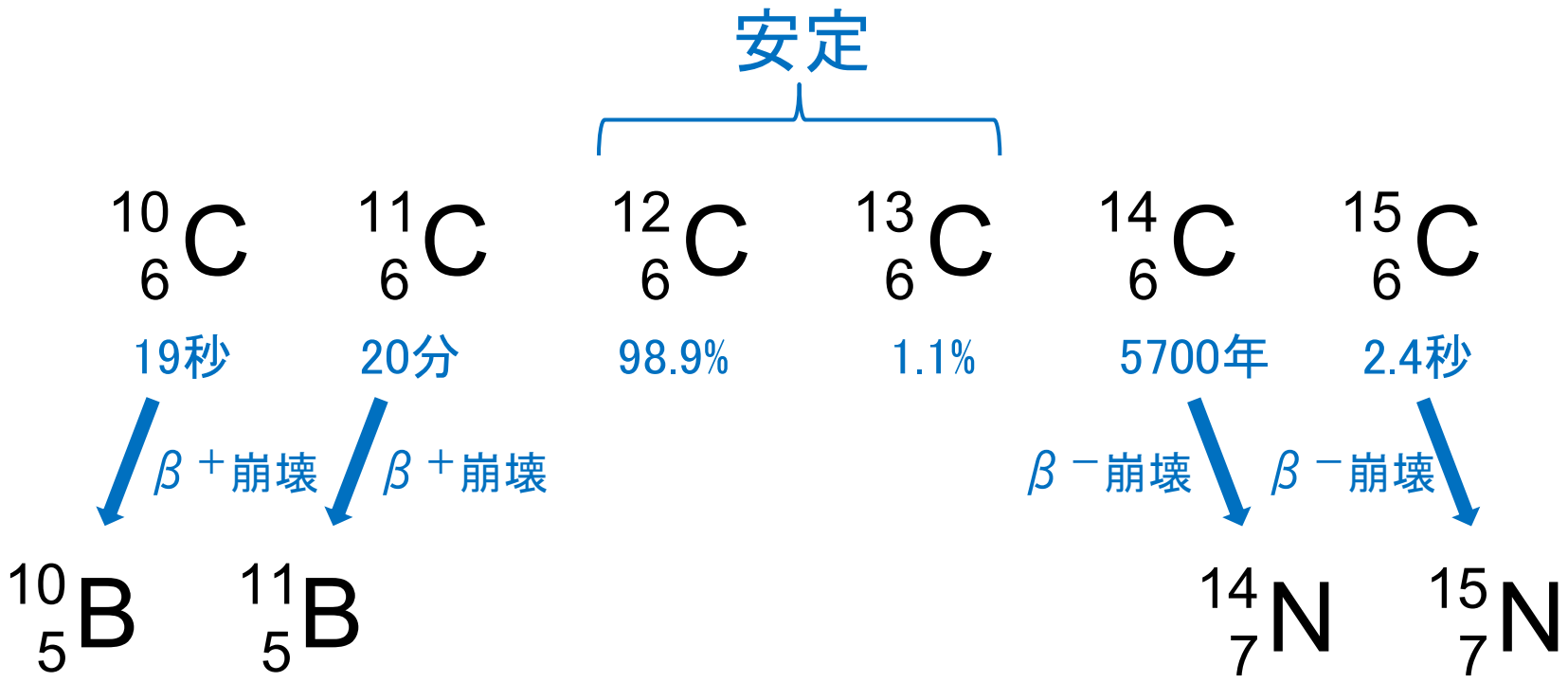
【国際放射線単位測定委員会（ICRU）】
International Commission on Radiation Units and Measurements

水素原子の軌道電子の結合エネルギーは~14 eV

安定な核種と放射性核種

stable nuclide　　radionuclide

炭素のいろいろな同位体



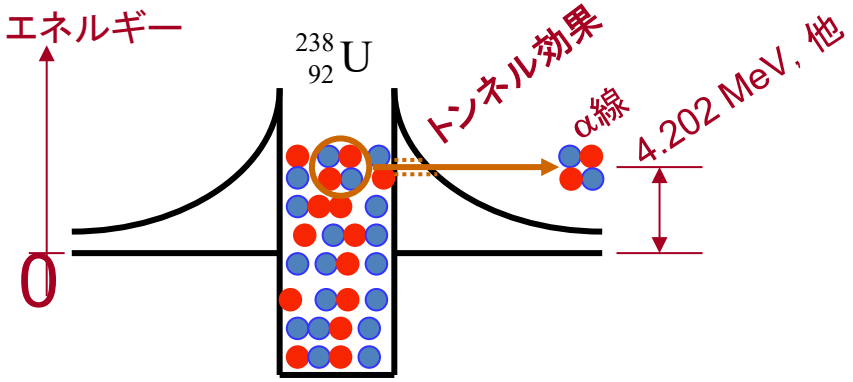
放射性壊変
radioactive decay

- 放射線を出す不安定な核種：
  放射性同位体 radioisotope（RI）
- 原子核の変化：
  放射性壊変 radioactive disintegration
  放射性崩壊 radioactive decay
- 壊変前の核種：
  親核種 parent
- 壊変後の核種：
  娘核種 daughter（子孫核種 progeny）

α壊変
alpha decay

$$^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$ ＝α

α：4.153 MeV（20.9%）
　　4.202 MeV（79.0%），他



壊変のQ値

【原子の質量超過】

^{238}U：Δ_{238U}＝ 47.303 MeV

^{234}Th：Δ_{234Th}＝ 40.609 MeV

^{4}He：Δ_{4He}＝ 2.424 MeV

【壊変にともない減少した質量】

$$\Delta_{238U} - (\Delta_{234Th} + \Delta_{4He})$$
$$= 47.303 - (40.609 + 2.424)$$
$$= 4.270\ [\mathrm{MeV}]$$

Q値：4.270 MeV

減少した質量に相当するエネルギーがα線と^{234}Thの運動エネルギーに分配される

β^-壊変，β^+壊変

beta (minus) decay　　beta plus decay

- β^-壊変（あるいは単にβ壊変）

$$^{137}_{55}\mathrm{Cs} \rightarrow {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} + e^- + \bar{\nu} \quad (=\beta^-)$$

天然のCsは^{133}Cs 100%，^{137}Csは4個中性子過剰

- β^+壊変

$$^{22}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} + e^+ + \nu \quad (=\beta^+) \qquad 89.8\%$$

天然のNaは^{23}Na 100%，^{22}Naは陽子過剰

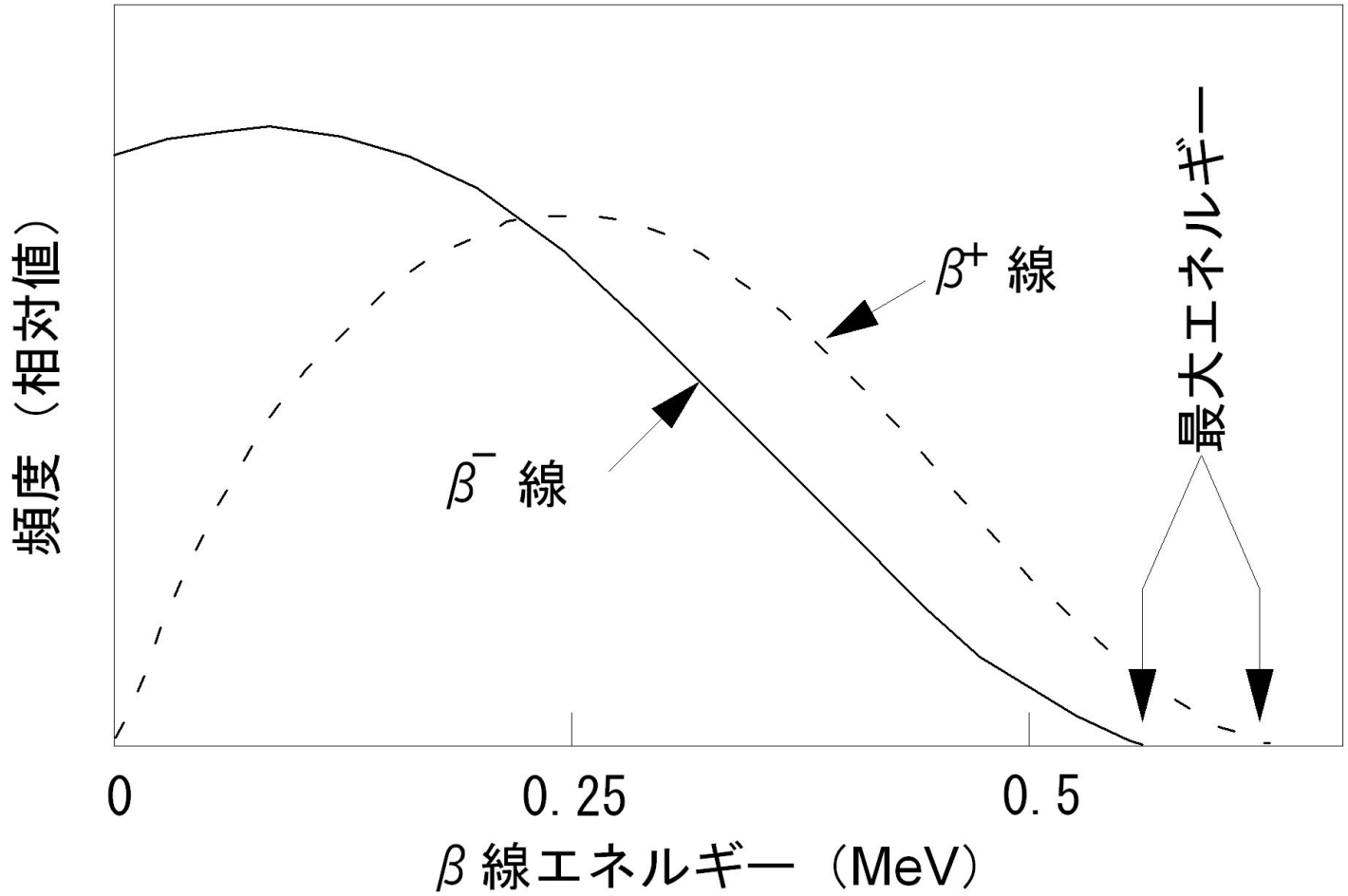
- 軌道電子捕獲，EC（electron capture）

$$^{22}_{11}\mathrm{Na} + e^- \rightarrow {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} + \nu \qquad 10.1\%$$

ν: ニュー
ニュートリノ粒子。
上の横棒は反粒子を表す。

β線のエネルギースペクトル〔^{64}Cu〕

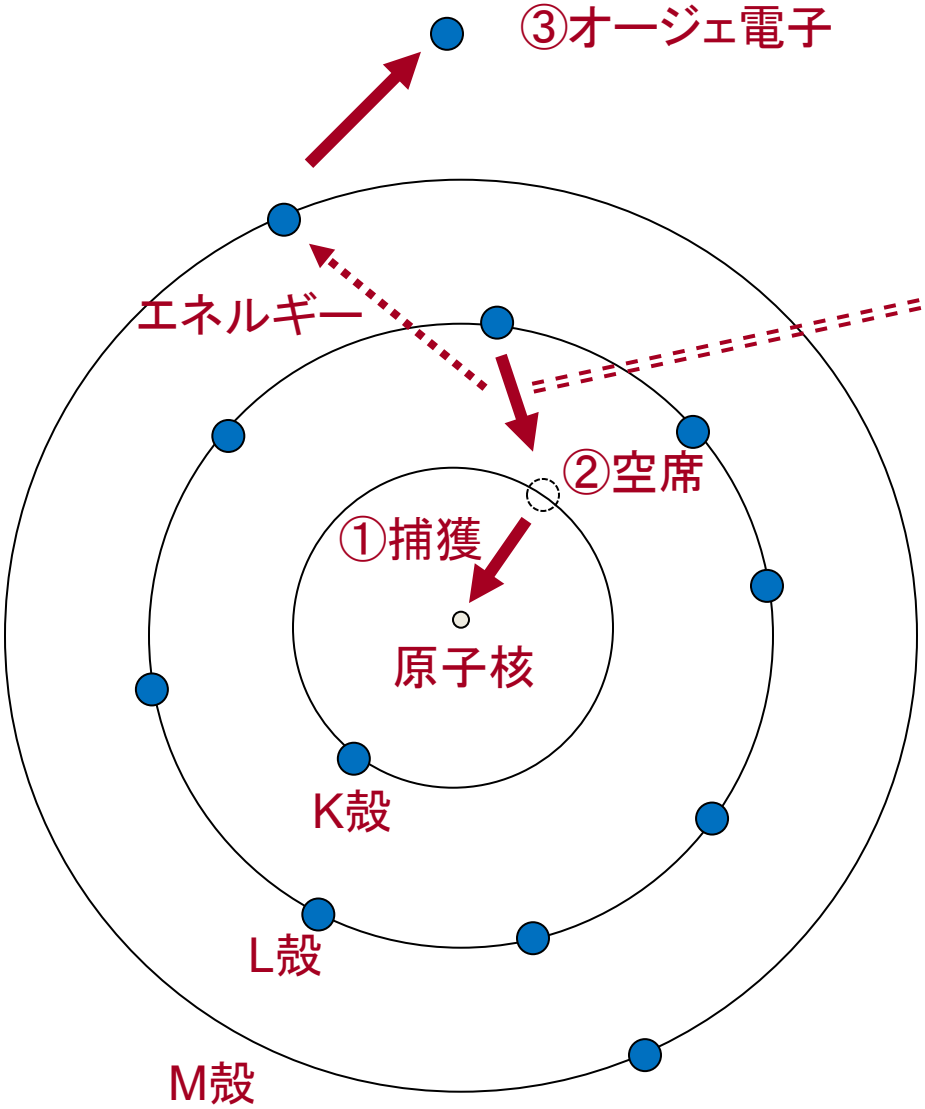
EC:43.6%, β^+壊変:17.4%〔0.653 MeV〕, β^-壊変:39.0%〔0.579 MeV〕



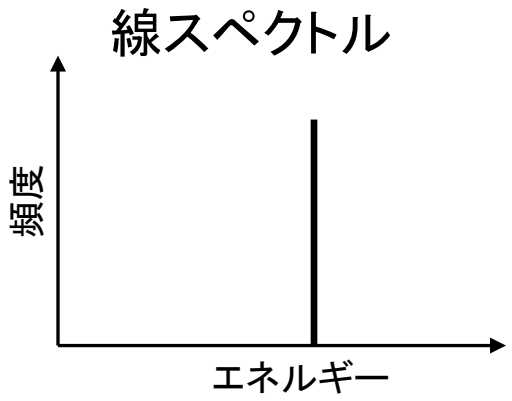
他のβ^-核種の最大エネルギーの例

^{3}H：18 keV, ^{63}Ni：66 keV, ^{90}Y：2.3 MeV

軌道電子捕獲，EC（electron capture）



競合する過程：
特性X線の放出
オージェ電子の放出



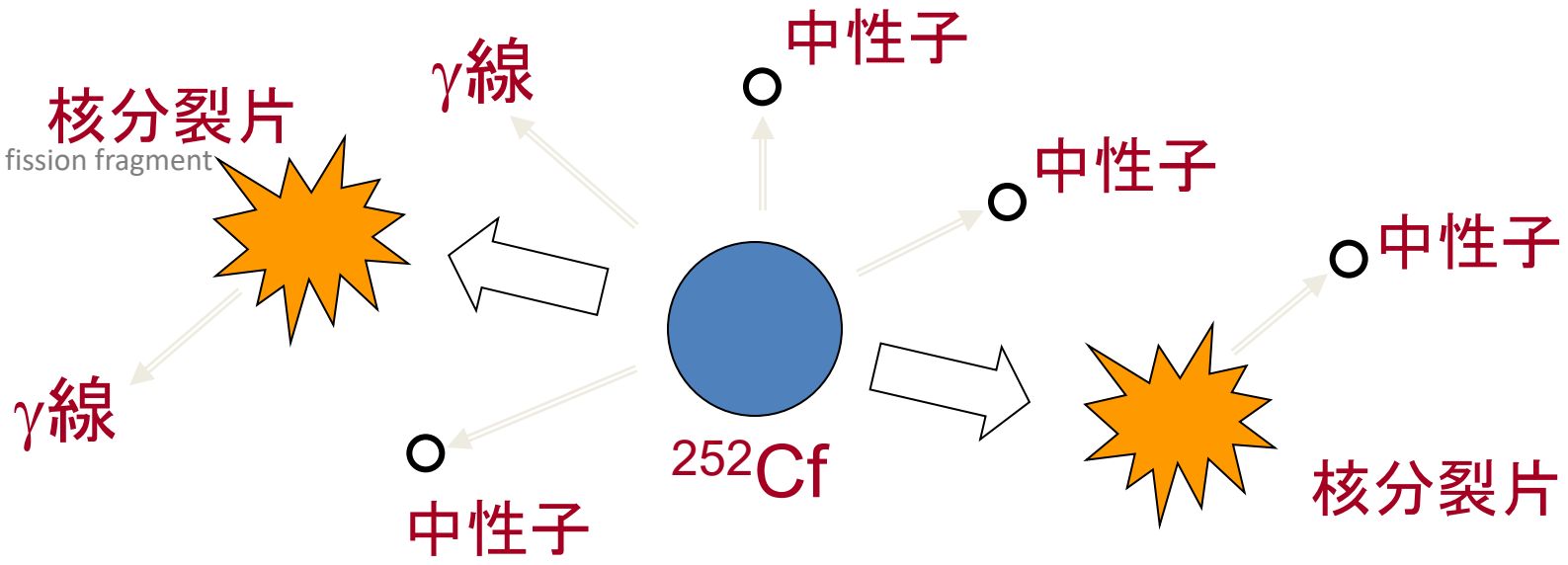
自発核分裂
spontaneous fission

^{252}Cf:

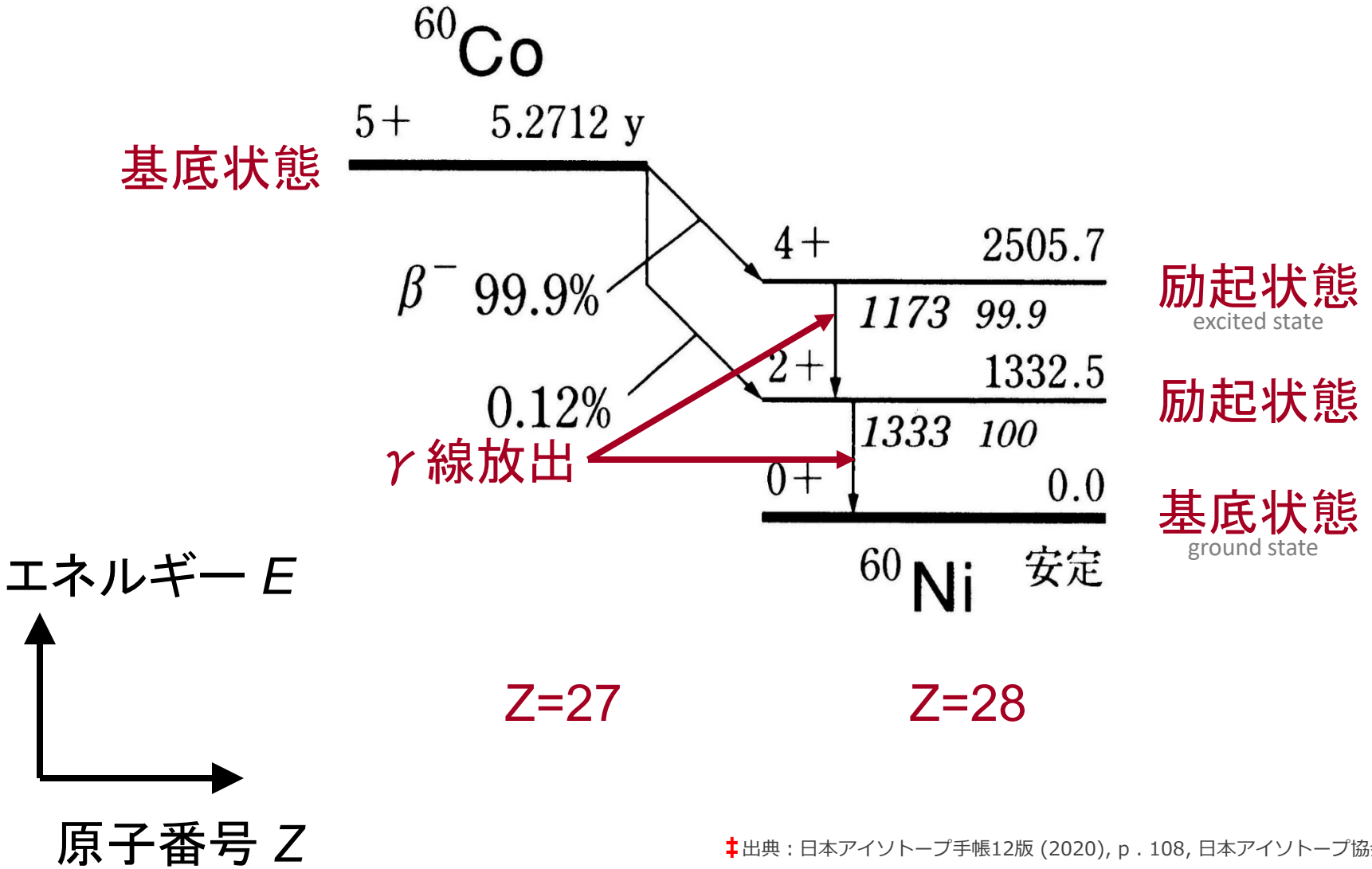
97%　α壊変

3%　　自発核分裂

（SF，Spontaneous Fission）

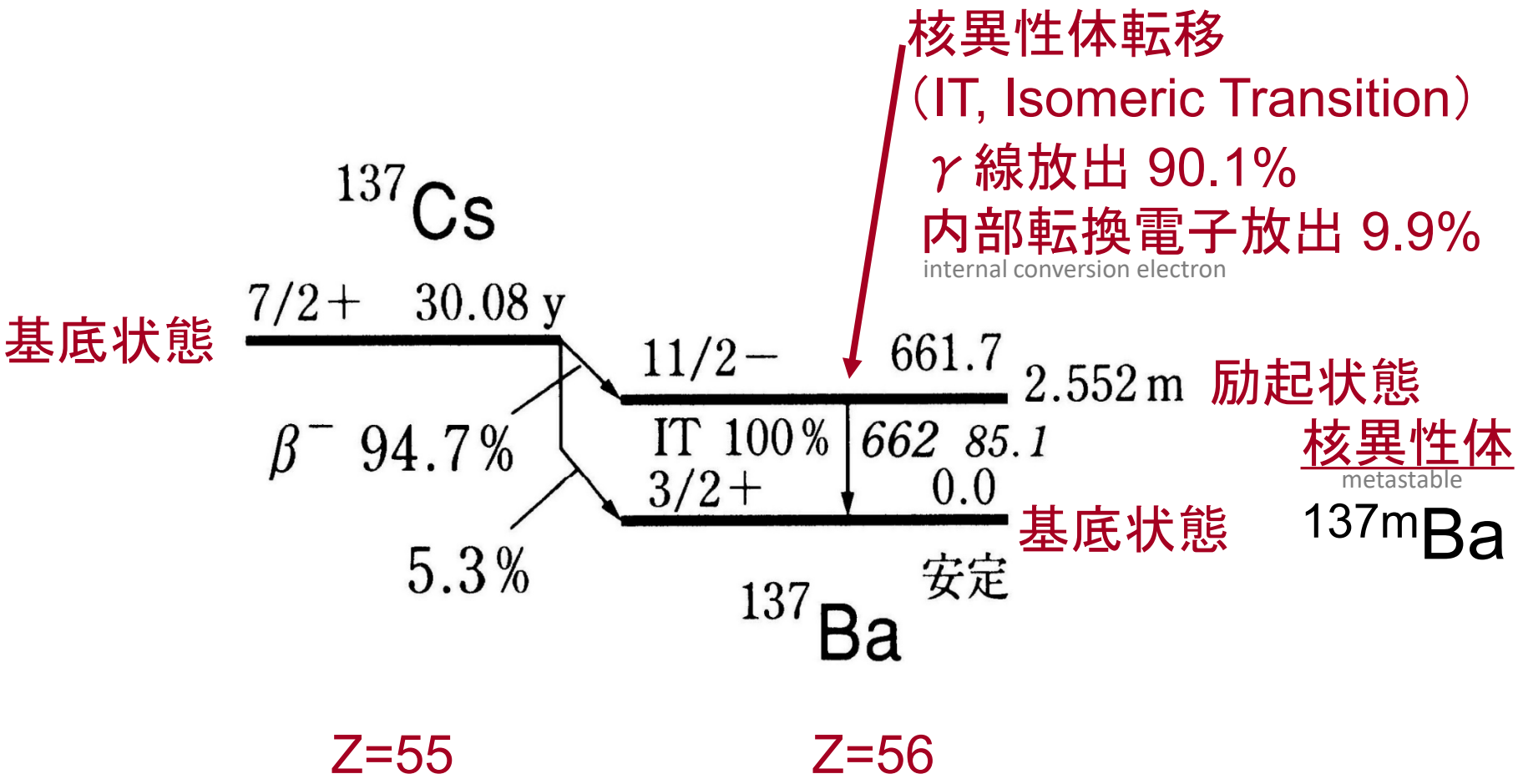


壊変図式（^{60}Co）



‡出典：日本アイソトープ手帳12版 (2020), p . 108, 日本アイソトープ協会

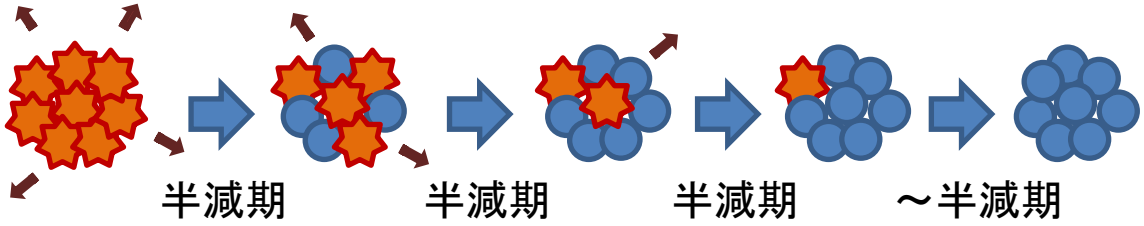
壊変図式（^{137}Cs）



‡出典：日本アイソトープ手帳12版 (2020), p . 113, 日本アイソトープ協会

壊変率
decay rate

- 壊変率 A（放射能，s^{-1}）：
  radioactivity, activity



$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$$\ln|N| = -\lambda t + C_1$$

$$N = \pm e^{-\lambda t + C_1} = C_2 e^{-\lambda t}$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

N：放射性同位体の個数

t：時間（s）

λ：壊変定数（s^{-1}） decay constant
（1個の放射性同位体が1秒の間に壊変する確率）

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$

放射能の単位

- 放射能：

  単位時間当たりに壊変する原子数

  Bq（ベクレル）〔s^{-1}〕

  Becquerel

kBq = 10^3 Bq （キロ）
MBq = 10^6 Bq （メガ）
GBq = 10^9 Bq （ギガ）
TBq = 10^{12} Bq （テラ）
PBq = 10^{15} Bq （ペタ）

昔使われていた放射能の単位：Ci（キュリー）

1Ci =3.7×10^{10} Bq（37 GBq）〔^{226}Ra（半減期1600年）1gの放射能〕

半減期 $T_{1/2}$

half-life

放射能(A)が，始めの強度(A_0)の半分に減じる時間

放射性核種の原子数(N)が，始めの個数の半分に減じる時間

$$\frac{A_0}{2} = A_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow \ln 2 = \lambda T_{1/2}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda}$$

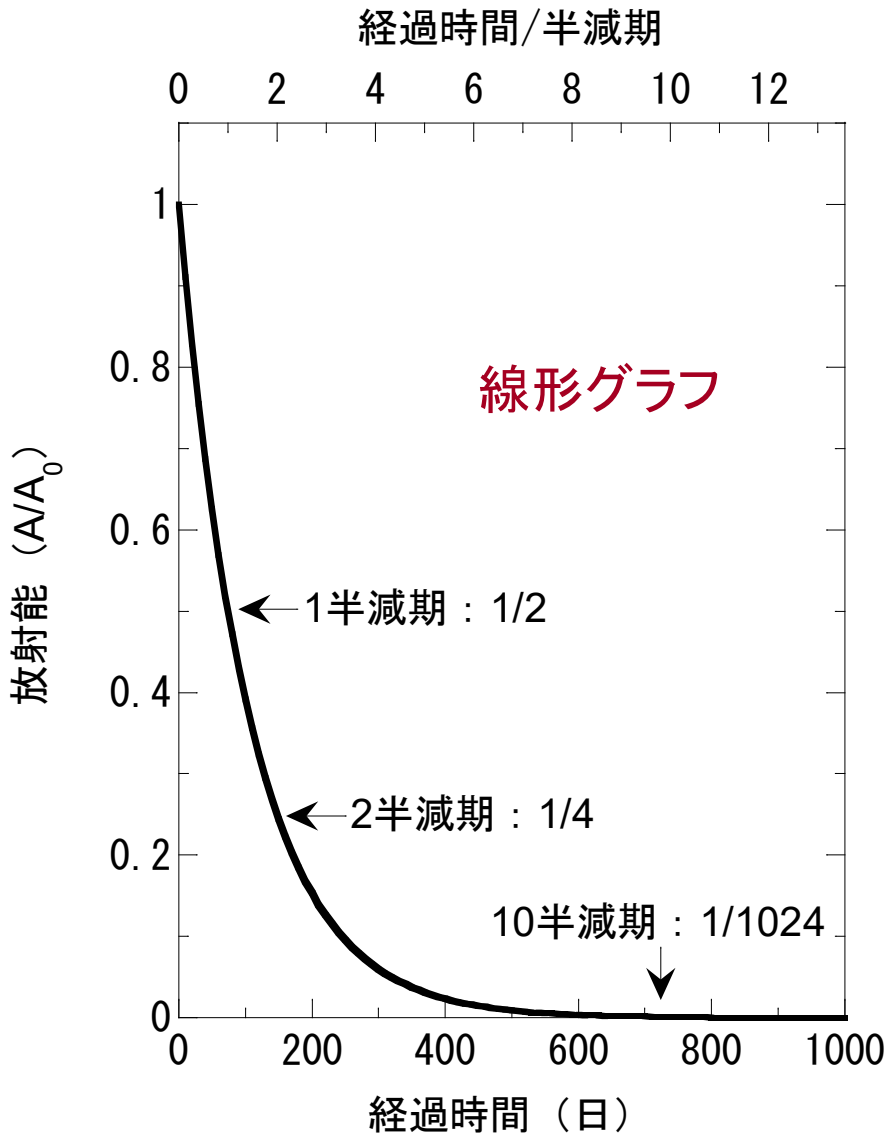
$\frac{1}{\lambda}$ 平均寿命

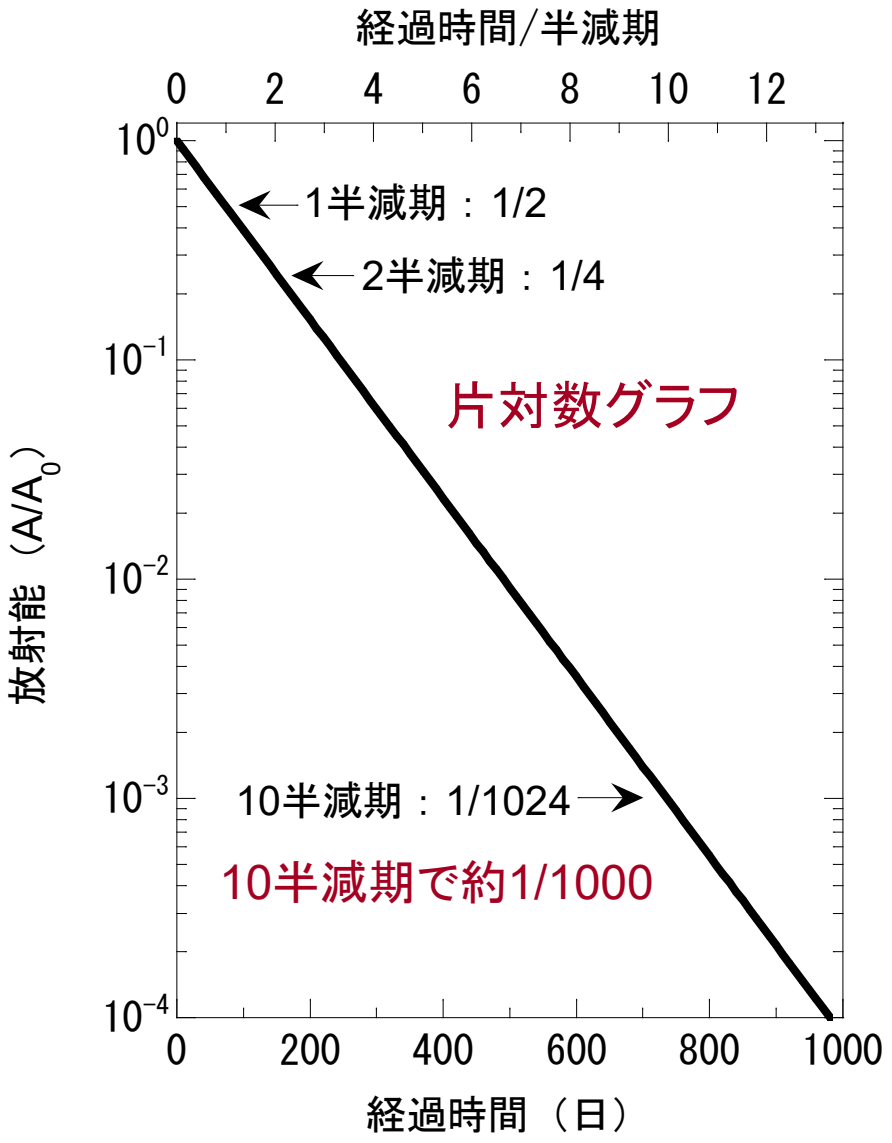
mean life, average life, lifetime

放射能の減衰を計算する実用的な方法

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

半減期(2)





^{192}Ir（半減期73.83日）放射能の時間変化

分岐壊変 例：^{40}K

branching decay

分岐比：　EC壊変（10.7%），β壊変（89.3%）

部分壊変定数：　$\lambda = \lambda_{EC} + \lambda_{\beta}$　$[\because\ A = \lambda N = \lambda_{EC} N + \lambda_{\beta} N]$

partial decay constant

$$\lambda = 1.8 \times 10^{-17}\ [\mathrm{s}^{-1}]$$

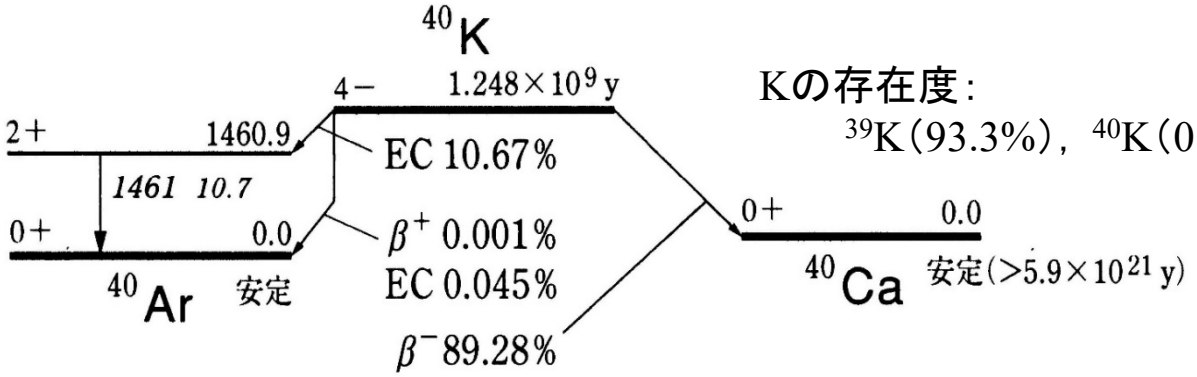
$$\lambda_{EC} = 0.107 \times \lambda = 0.107 \times 1.76 \times 10^{-17} = 1.88 \times 10^{-18}\ [\mathrm{s}^{-1}]$$

$$\lambda_{\beta} = 0.893 \times \lambda = 0.893 \times 1.76 \times 10^{-17} = 1.57 \times 10^{-17}\ [\mathrm{s}^{-1}]$$

部分半減期：　$\dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{T_{EC}} + \dfrac{1}{T_{\beta}}$　$\left(\lambda = \dfrac{\ln 2}{T}\right)$

partial half-life

$$T_{EC} = \frac{\ln 2}{\lambda_{EC}} = 1.17 \times 10^{10}[\mathrm{y}],\ T_{\beta} = \frac{\ln 2}{\lambda_{\beta}} = 1.40 \times 10^{9}[\mathrm{y}],\ T = 1.248 \times 10^{9}[\mathrm{y}]$$



Kの存在度：

^{39}K（93.3%），^{40}K（0.0117%），^{41}K（6.73%）

‡出典：日本アイソトープ手帳12版 (2020), p．107, 日本アイソトープ協会

天然の放射性核種（長半減期核種）

- 壊変系列を構成する天然1次放射性核種

核種	存在度(%)	半減期	壊変形式
^{232}Th	100	140億年	α
^{238}U	99.27	45億年	α
^{235}U	0.72	7億年	α

- 壊変系列を構成しない天然1次放射性核種

核種	存在度(%)	半減期	壊変形式
^{40}K	0.0117	12.5億年	β^-89%, EC11%
^{147}Sm	15.00	1066億年	α
^{209}Bi	100	2010京年$_{2\times10^{19}}$	α

ウラン系列（4n+2系列）

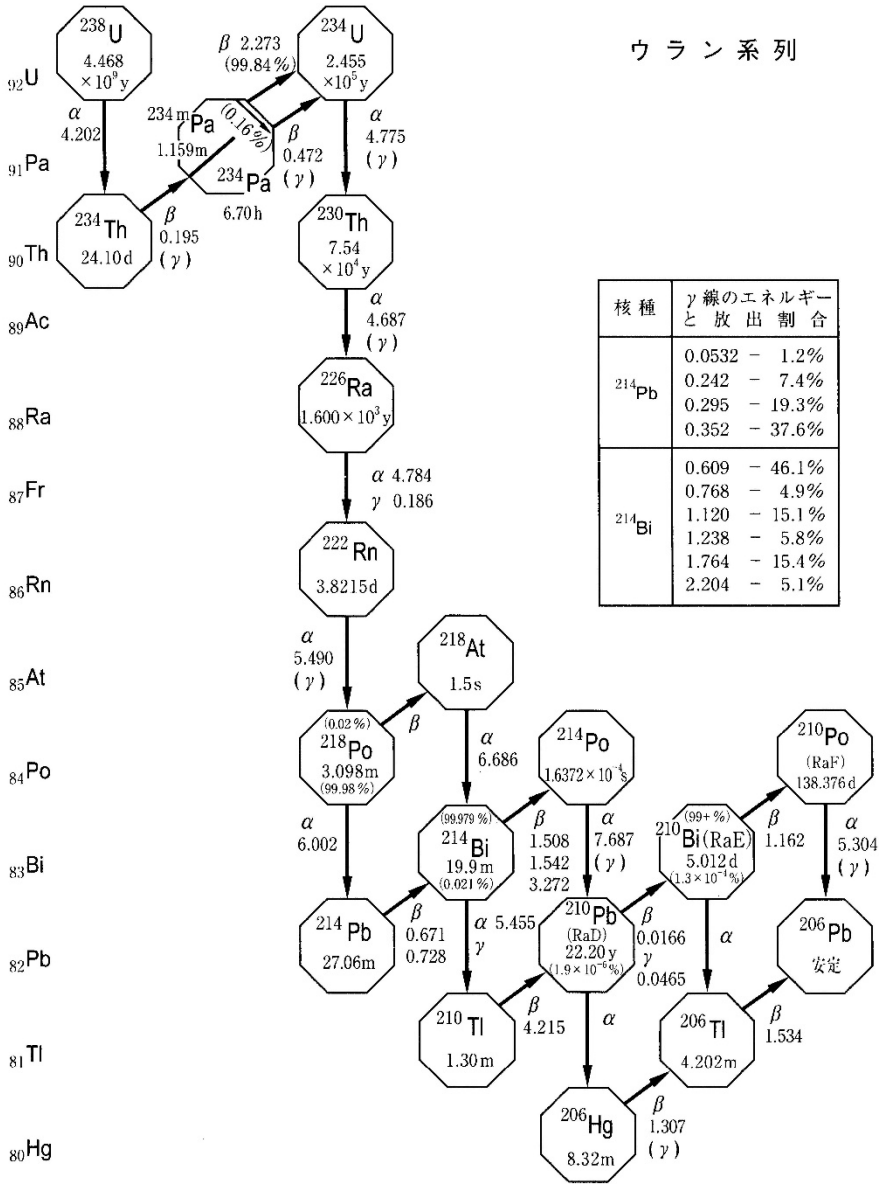
uranium series

^{238}U

^{232}Th:
トリウム系列，4n系列

^{237}Np:
ネプツニウム系列，4n+1系列
(半減期が210万年のためすでに消滅)

^{235}U:
アクチニウム系列，4n+2系列



核種	γ線のエネルギーと放出割合
^{214}Pb	0.0532 − 1.2% 0.242 − 7.4% 0.295 − 19.3% 0.352 − 37.6%
^{214}Bi	0.609 − 46.1% 0.768 − 4.9% 1.120 − 15.1% 1.238 − 5.8% 1.764 − 15.4% 2.204 − 5.1%

‡出典：日本アイソトープ手帳12版 (2020), p．11, 日本アイソトープ協会

天然の放射性核種（比較的短半減期の核種）

- 宇宙線によって常時生成される核種

  ^{3}H（12年，β 壊変）

  ^{14}N(n,^{3}H)^{12}C （Q値：-4.02 MeV）

  ^{14}N(p,^{3}H)^{12}N （Q値：-22.1 MeV）

  年間約 72 PBq(72 × 10^{15} Bq)生成

  （1Fからの放出計画は年間22 TBq(22 × 10^{12} Bq)）

  ^{14}C（5700年，β 壊変，年代測定）

  ^{14}N(n,p)^{14}C （Q値：626 keV）

^{14}C年代測定の原理

dating

- ^{14}Cは宇宙線によって常時生成

  生成率はほぼ一定　→　^{14}C/^{12}C比はほぼ一定*
  生物が死ぬと^{14}C，^{12}Cは固定され，^{14}Cは減少

$$M_{\mathrm{t}} = M_0 \exp\left(-\lambda t\right) \quad \rightarrow \quad t = -\frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{M_{\mathrm{t}}}{M_0}\right)$$

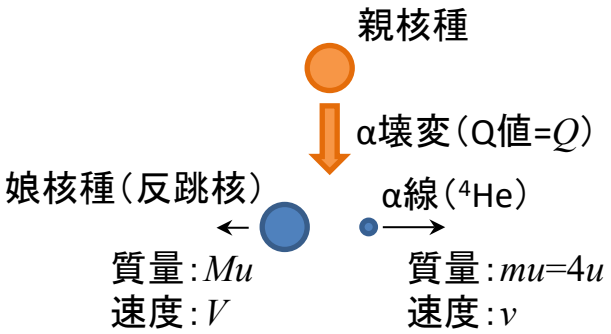
t: ^{14}C年代(BP：Before Present)
λ: ^{14}Cの壊変定数($\lambda = \ln 2/T_{1/2}$)
$T_{1/2}$: ^{14}Cの半減期(5700年)
M_{t}: 年代測定を行う試料の^{14}C/^{12}C比
M_0: 標準物質(「現代炭素」)の^{14}C/^{12}C比

* 実際は宇宙線強度が変動するので若干の調整が必要
https://www.jstage.jst.go.jp/article/radioisotopes/73/2/73_730206/_pdf　などを参照

計算してみよう (2) 〔α線のエネルギー〕

原子核がα壊変して，質量数Mの反跳核と質量数m(=4)のα線に分かれた。このα壊変のQ値をQとして，エネルギーと運動量の保存則から，α線と反跳核の運動エネルギーが質量数に反比例して分配されることを示せ。ただし現象は古典力学(ニュートン力学)に従うとせよ。

解説 (2)



運動量の保存則

$$MuV = muv \text{ すなわち } \quad V = \frac{m}{M}v \qquad ①$$

エネルギーの保存則

$$\frac{1}{2}MuV^2 + \frac{1}{2}muv^2 = Q \qquad ②$$

①を②に代入

$$\frac{1}{2}Mu\left(\frac{m}{M}v\right)^2 + \frac{1}{2}muv^2 = Q$$

$$\frac{1}{2}muv^2\left(\frac{m}{M}+1\right) = \frac{1}{2}muv^2\left(\frac{m+M}{M}\right) = Q \qquad ③$$

③より，α線のエネルギーE_αは，

$$E_\alpha = \frac{1}{2}muv^2 = \frac{M}{M+m}Q \qquad ④$$

①と④より，反跳核のエネルギーE_Dは，

$$E_\mathrm{D} = \frac{1}{2}MuV^2 = \frac{1}{2}Mu\left(\frac{m}{M}v\right)^2 = \frac{1}{2}muv^2 \times \frac{m}{M}$$

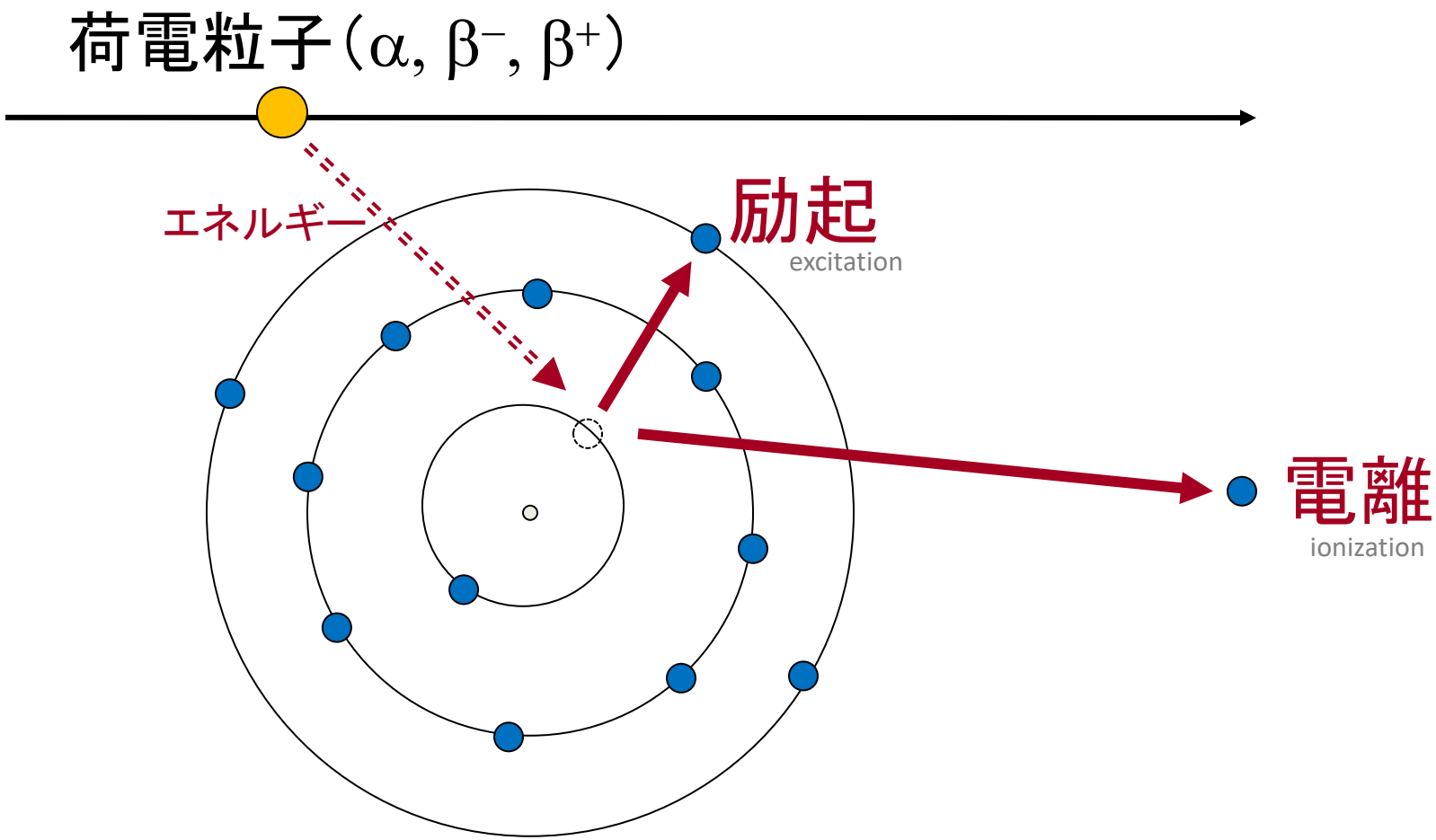
$$= E_\alpha \times \frac{m}{M} = \frac{m}{M+m}Q \qquad ⑤$$

④と⑤より，

$$\frac{E_\alpha}{E_\mathrm{D}} = \frac{M}{m}$$

荷電粒子の相互作用

クーロン相互作用
Coulomb interaction



荷電粒子は連続的にエネルギーを失うと近似できる

阻止能と飛程

- **線阻止能** linear stopping power $S = -\dfrac{dE}{dx}$ $[\mathrm{J \cdot m^{-1}}], [\mathrm{MeV \cdot mm^{-1}}]$

- **質量阻止能** mass stopping power $S_{\mathrm{m}} = \dfrac{S}{\rho}\left(= -\dfrac{dE}{d\rho x}\right)$ $[\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot m^{2}}], [\mathrm{MeV \cdot mg^{-1} \cdot cm^{2}}]$

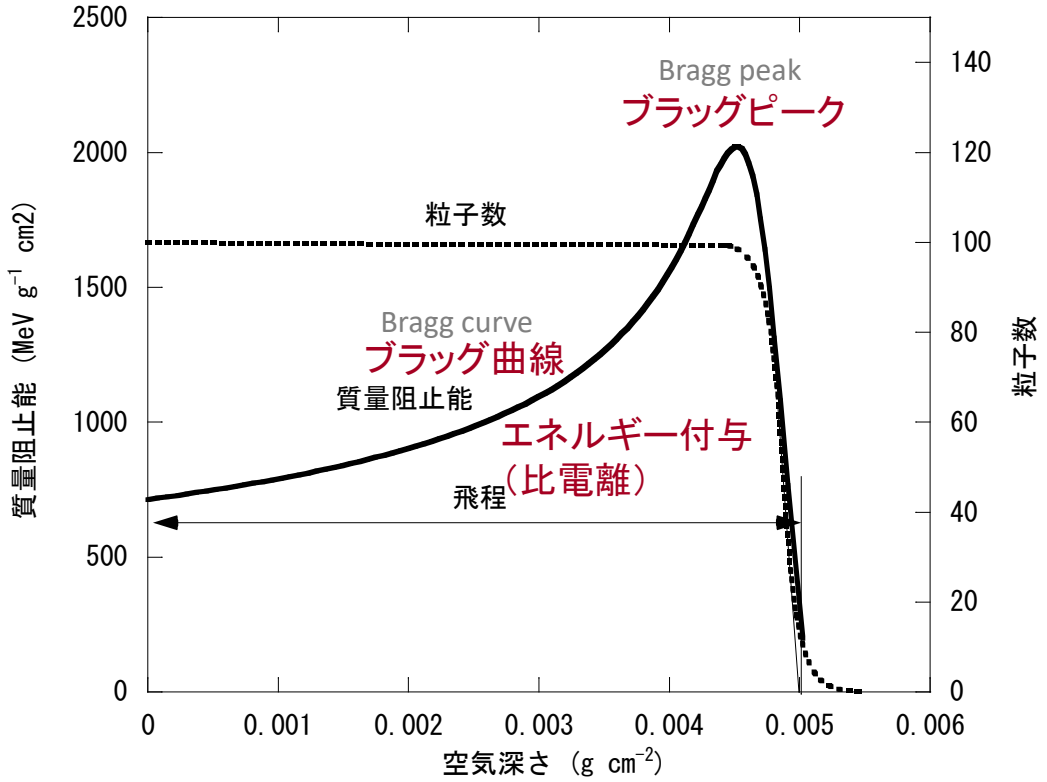
- **飛程**【物質に入射した荷電粒子が止まるまでに進んだ距離】 range

$$R = \int_{E}^{0} \frac{1}{\left(\dfrac{dE}{dx}\right)}(-dE) \quad [\mathrm{m}]$$

- 質量阻止能，飛程に密度 ρ を乗じた値の物質に対する依存性は小さい
  【単位質量の物質に含まれる電子数は物質にあまり依存しない】

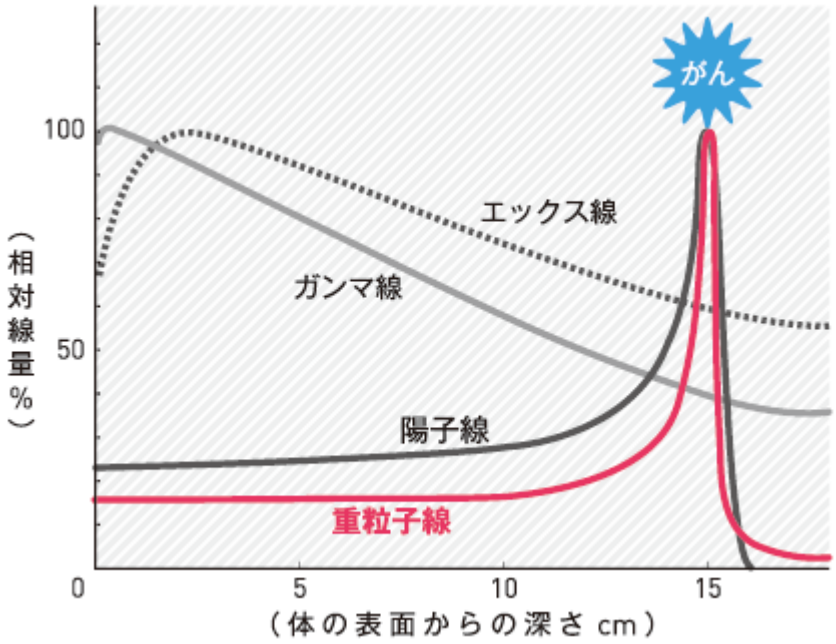
α線の飛程

- α線（^{4}Heの原子核）は物質中をほぼ直進する
  【電子に比べ約 7200 倍重いため】
- ^{241}Am 5.5MeVα線の空気中飛程：4.1cm（5.0×10^{-3} g cm^{-2}）

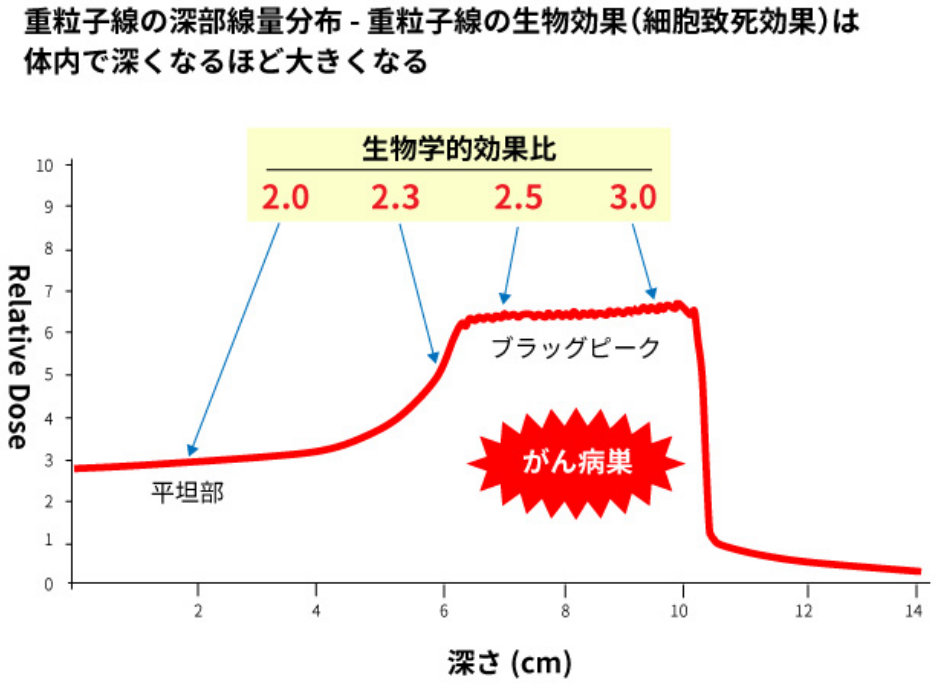


重荷電粒子を用いたがん治療（粒子線治療）

- ブラッグピークを利用してがん細胞に線量を集中
- 陽子（p, 約250MeV），炭素線（^{12}C, 核子あたり約400MeV）を使用



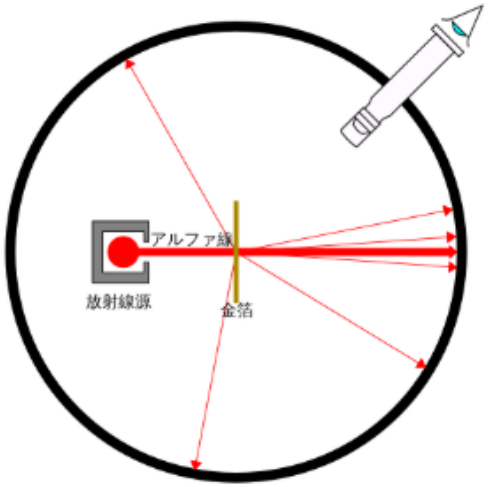
‡出典：九州国際重粒子線がん治療センター

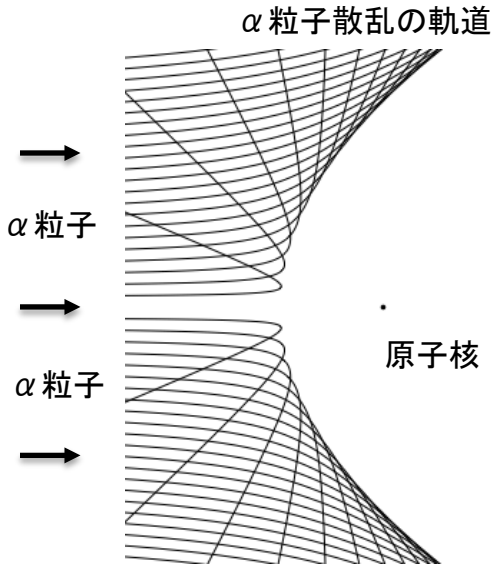


‡出典：重粒子線治療とは, 図4, 重粒子線の深部線量分布, 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構, https://hospital.qst.go.jp/radiotherapy/carbonion.html

ラザフォード散乱
Rutherford scattering

- 重い原子核による大角度散乱
  1911年，E. Rutherfordにより観測された物理現象。
  原子の構造の解明につながった。

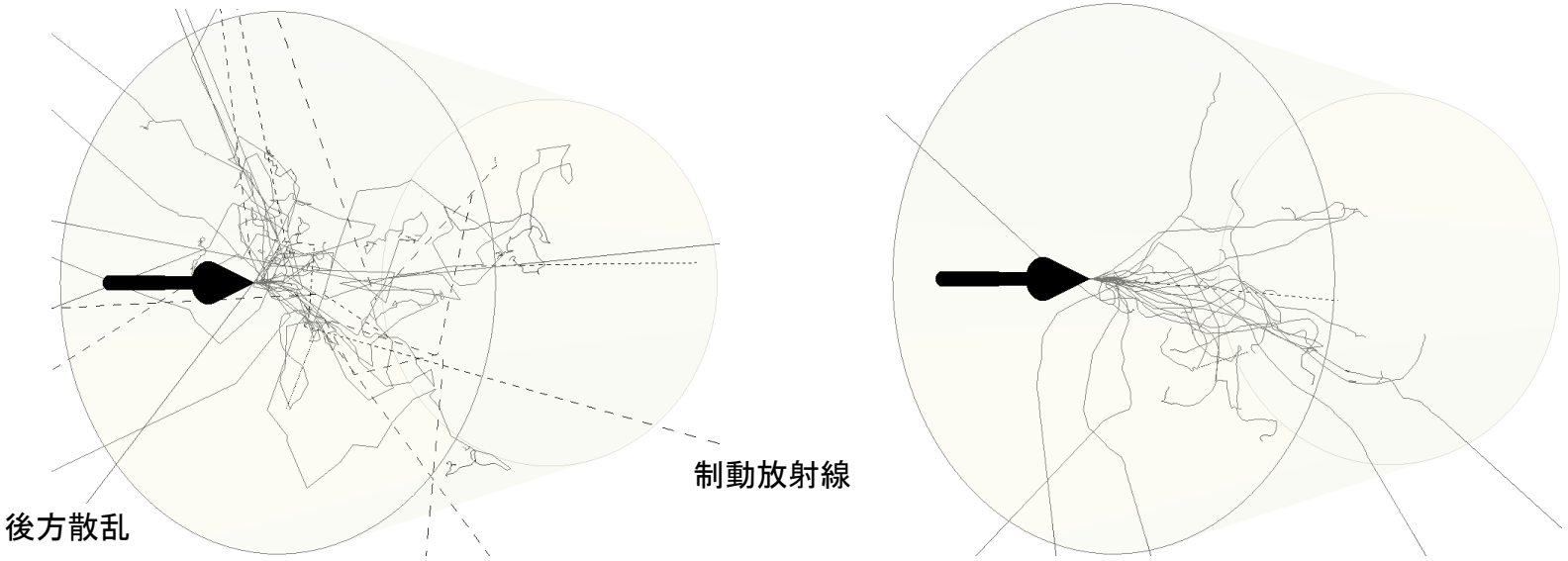




出典：Kurzon (2014), Wikimedia,
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a6/Geiger-Marsden_experiment_expectation_and_result_%28Japanese%29.svg

出典：YoshiGosu (2018), Wikipedia,
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RutherfordScattering.png

β線の飛跡



鉛およびアクリルに入射した2MeVのペンシルビームの電子の飛跡をモンテカルロ計算コードPHITSでシミュレートした図。鉛は10倍に拡大してある。破線は制動放射線。

‡出典：多田順一郎 他 (2022), わかりやすい放射線物理学 (改訂3版), 第8章 荷電粒子線と物質の相互作用, p. 134, 図8･7, オーム社
図提供：松田規宏 (国立研究開発法人 日本原子力研究会初機構)
T. Sato, et. al, Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135 (2024)., https://phits.jaea.go.jp/

電子の阻止能(1)

collision stopping power

- 衝突阻止能：S_{col}
  電子との衝突に起因する，電離や励起によって失うエネルギー

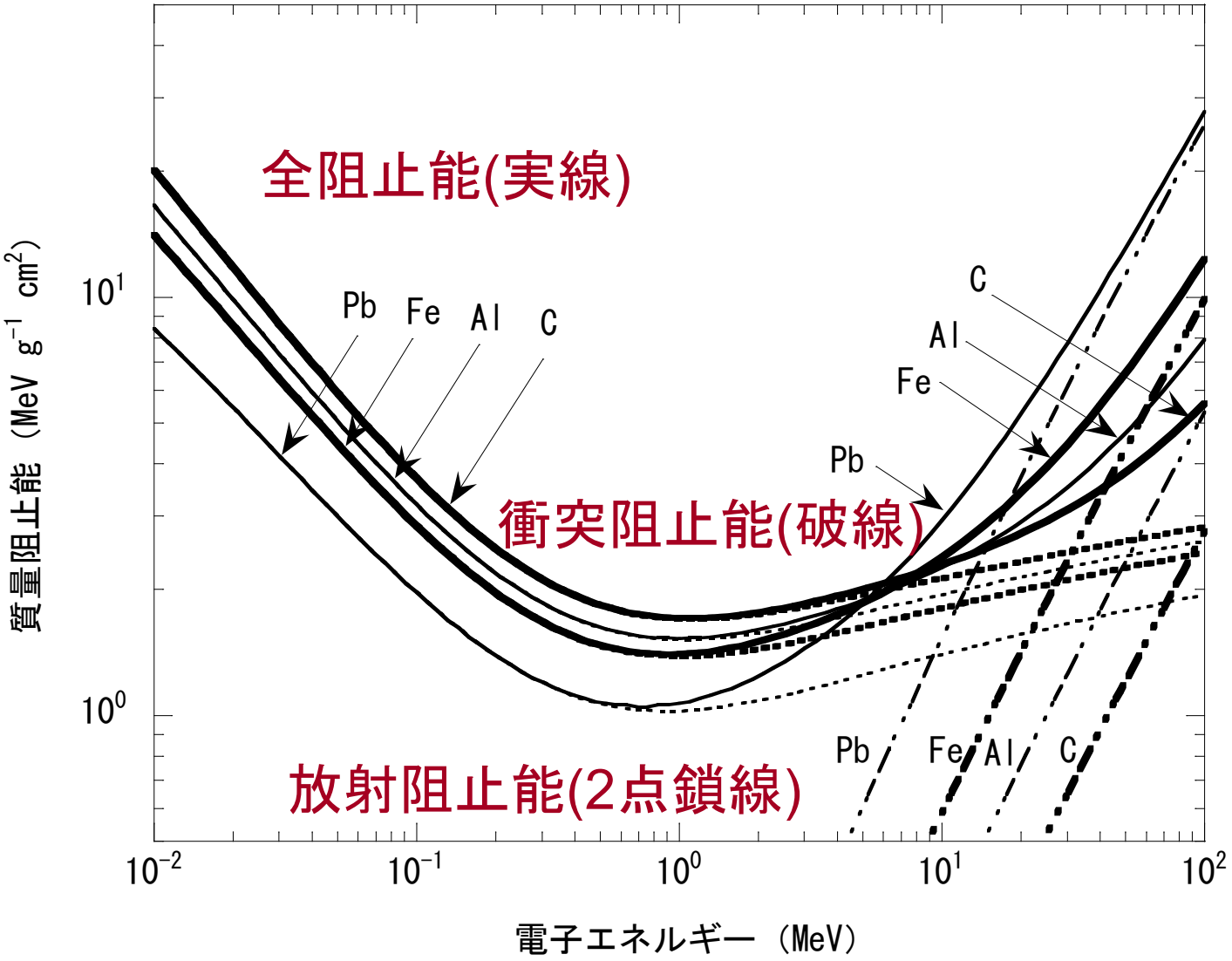
radiation stopping power

- 放射阻止能：S_{rad}
  原子核の近傍を通過するとき，強い電場によって進行方向を曲げられる際に受ける加速度によって，制動放射線を放出して失うエネルギー
  Bremsstrahlung
  【α線は重く，進行方向が変化しても受ける加速度は小さいため，制動放射は生じない】

$$\frac{S_{\mathrm{rad}}}{S_{\mathrm{col}}} = \frac{EZ}{800}$$

E：β線エネルギー(MeV)

電子の阻止能(2)

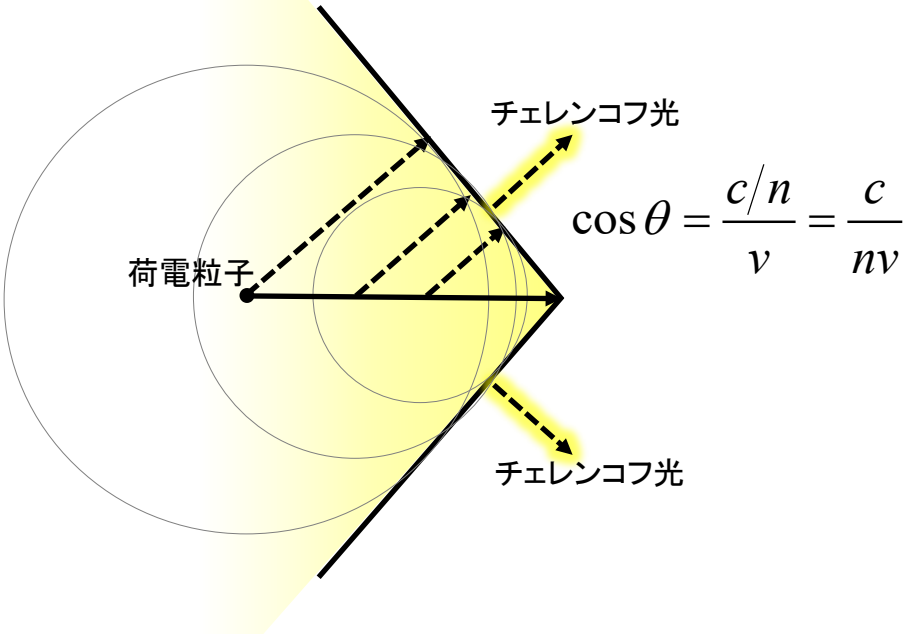

全阻止能(実線)
衝突阻止能(破線)
放射阻止能(2点鎖線)
Pb
Fe
Al
C
C
Al
Fe
Pb
Pb
Fe
Al
C
10^1
10^0
10^{-2}
10^{-1}
10^0
10^1
10^2
質量阻止能 (MeV g^{-1} cm^2)
電子エネルギー (MeV)

チェレンコフ光
Cherenkov light

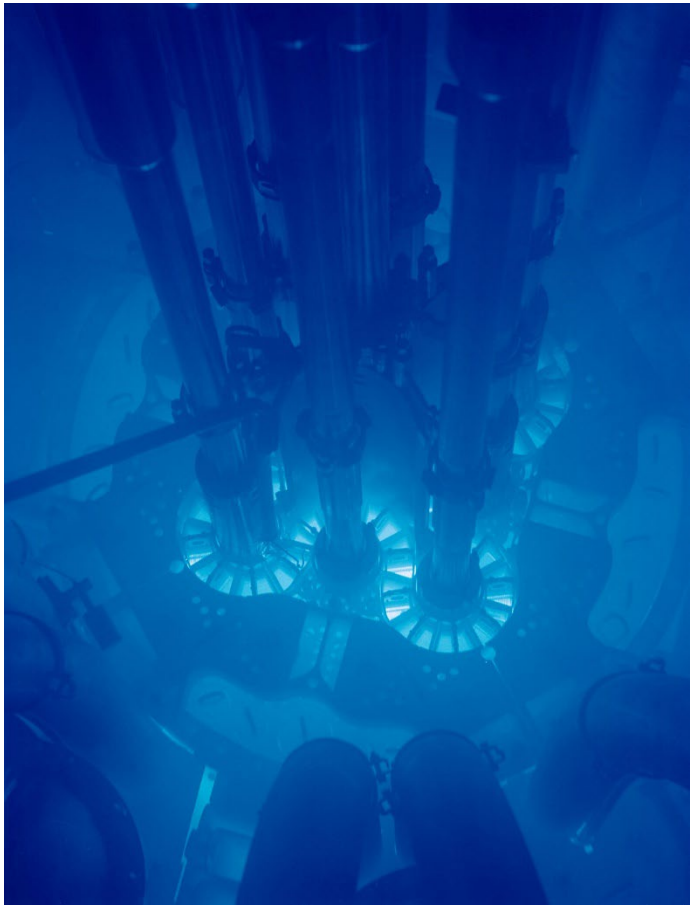
荷電粒子の速度 v が，
物質中の光の速度 c/n（n：屈折率）
よりも速いと，飛跡の各点から生じた電磁波の波面がそろい，光として観測される

refractive index

$$v > \frac{c}{n}$$



$$\cos\theta = \frac{c/n}{v} = \frac{c}{nv}$$

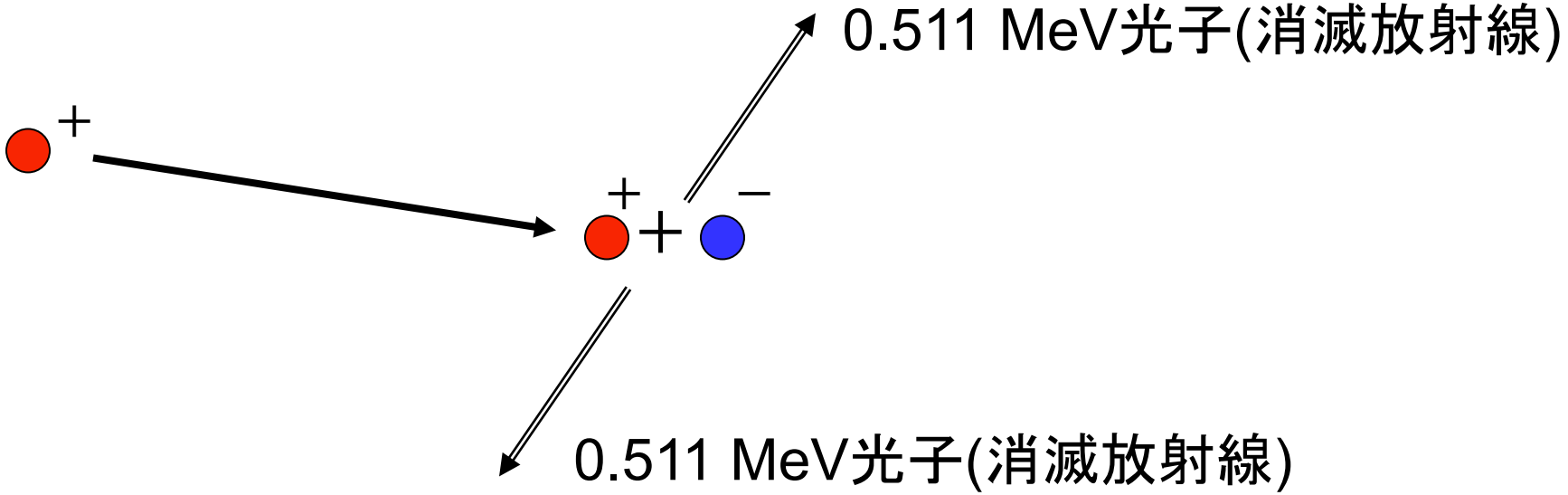


原子炉で観測されるチェレンコフ光

出典：Argonne National Laboratory, Flickr,
https://www.flickr.com/photos/35734278@N05/3954062594

消滅放射線
annihilation radiation

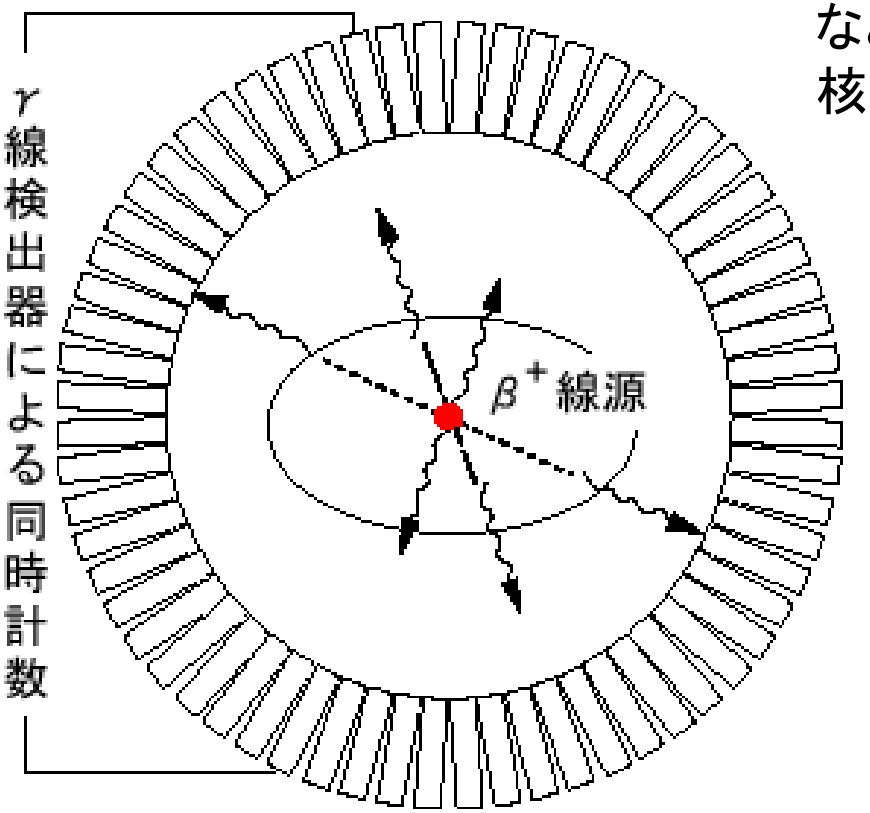
- 陽電子が停止すると，（陰）電子と結合して消滅し，2個の 0.511 MeV光子が正反対方向に放出される。

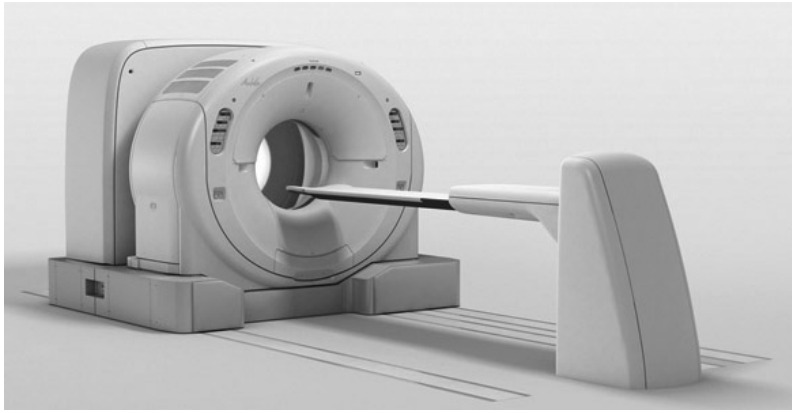


3個の光子を放出して消滅する場合もある(確率は1/137)
その場合の光子エネルギーは0.511MeVを最大とした連続スペクトル

陽電子断層撮像法（PET：Positron Emission Tomography）

^{18}F-FDG（^{18}F-fluorodeoxyglucose）などの薬剤はがんに集積するため，核医学診断に利用される





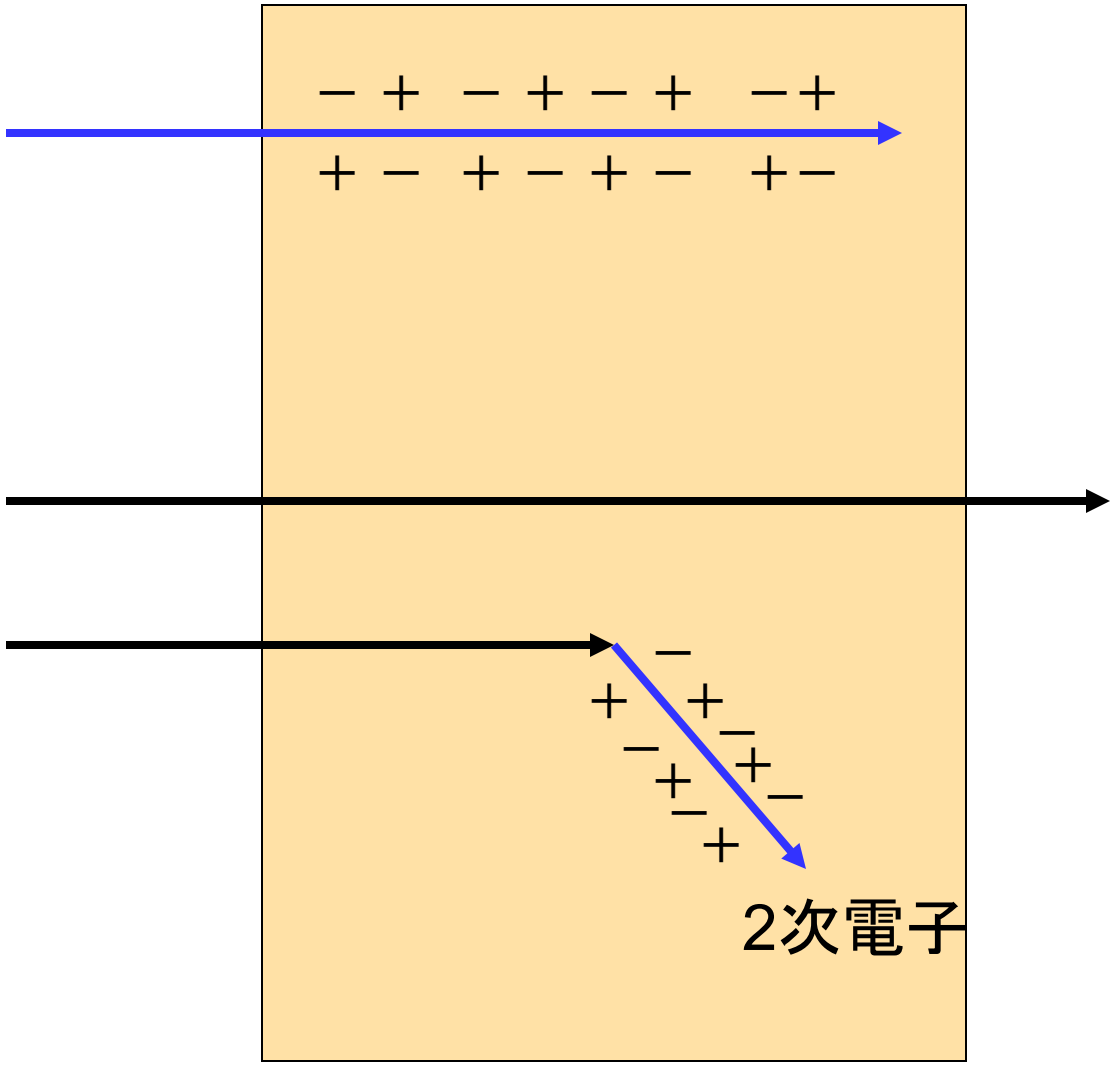
‡出典：村山秀雄 (2004), 放射線イメージング技術の最前線 (第6回) 次世代PET装置の開発, RADIOISOTOPES/53 巻3 号, p. 108, 図1, 日本アイソトープ協会, https://doi.org/10.3769/radioisotopes.53.179

‡出典：核医学診断システム | PET-CT | キヤノンメディカルシステムズ, https://jp.medical.canon/products/molecular-imaging

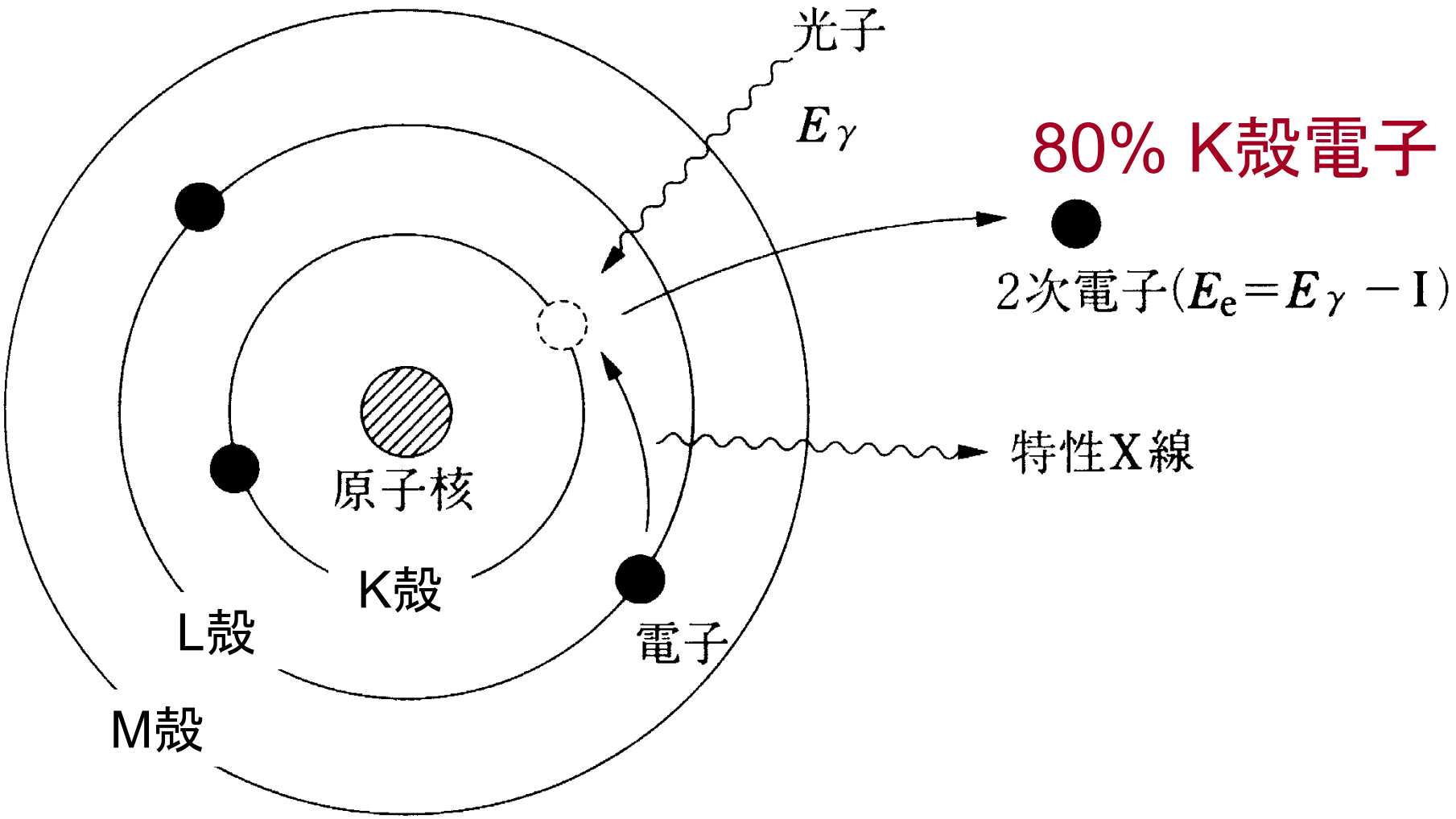
光子の相互作用

光子と物質との相互作用

- 荷電粒子
- 光子

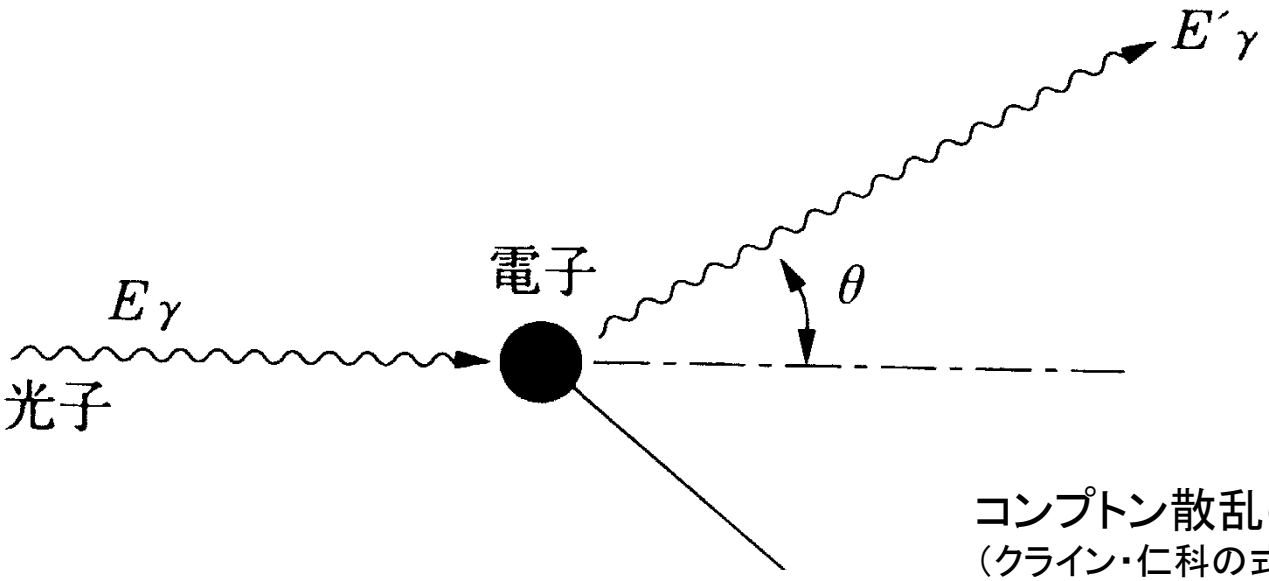


光電効果
photoelectric effect



‡出典：鶴田隆雄 (2022), 初級放射線 第2種放射線取扱主任者試験受験用テキスト, p. 75, 図5.1, 通商産業研究社

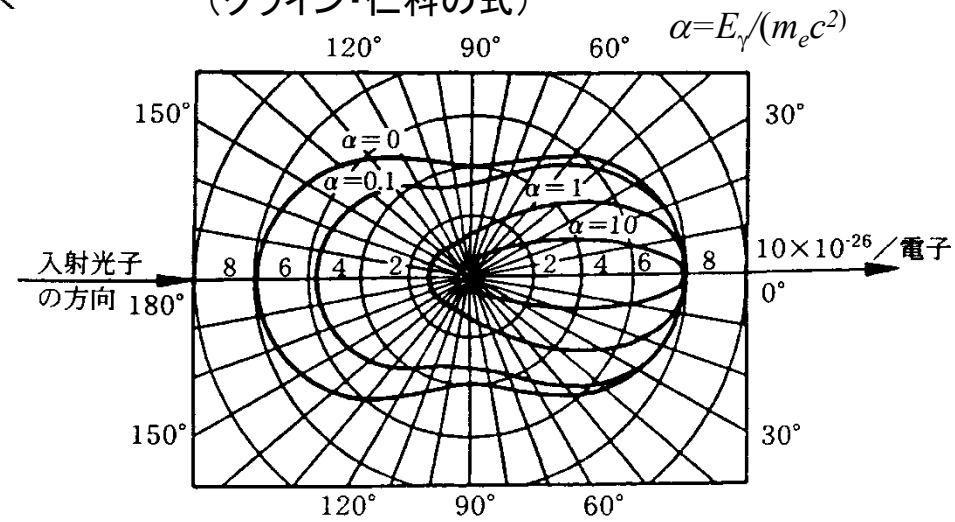
コンプトン効果（散乱）
Compton effect　　scattering



$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2}(1-\cos\theta)}$$

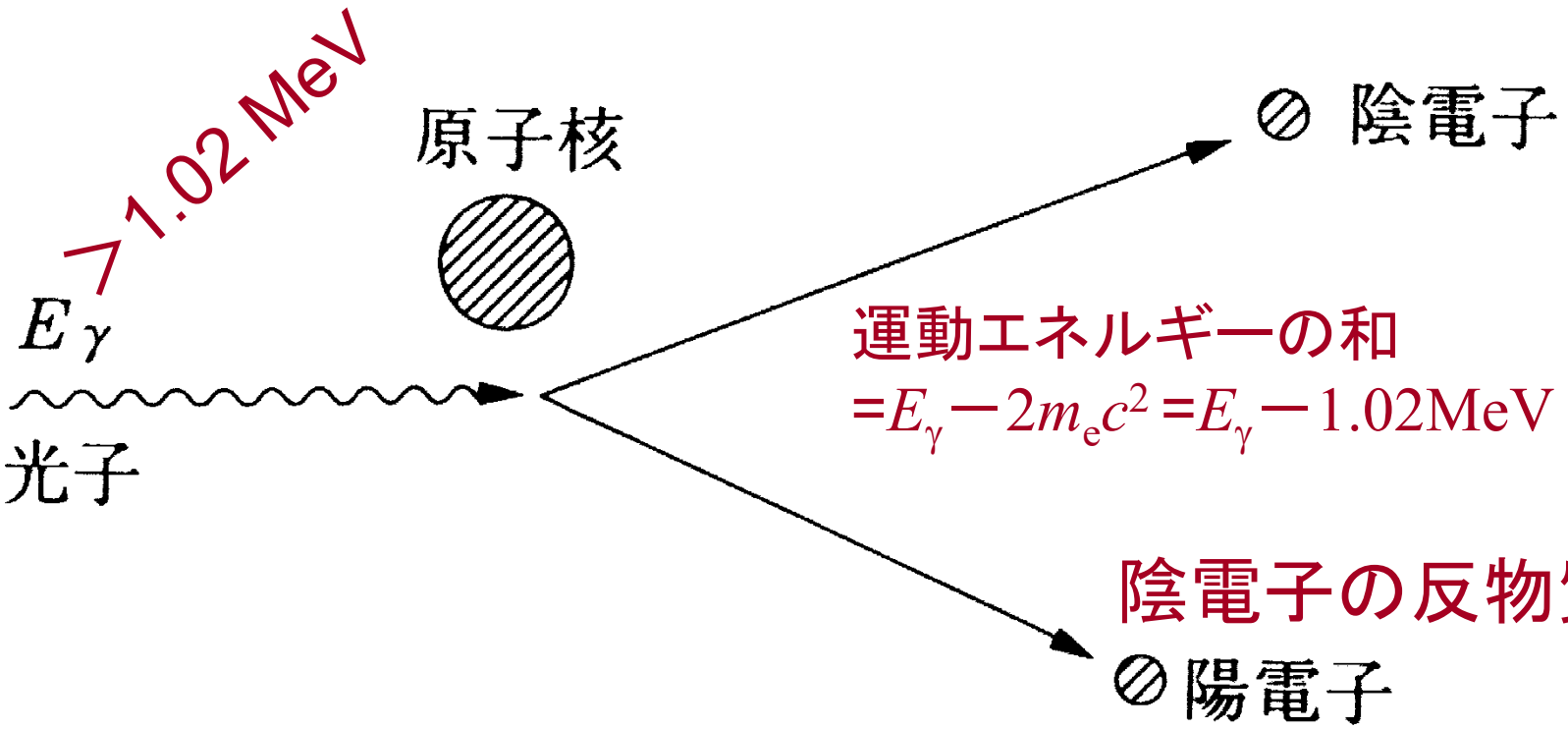
0.511 MeV

コンプトン散乱の微分断面積
（クライン・仁科の式）



‡出典：鶴田隆雄 (2022), 初級放射線 第2種放射線取扱主任者試験受験用テキスト, pp. 76-77, 図5.2, 図5.3, 通商産業研究社

電子対生成
electron-pair creation



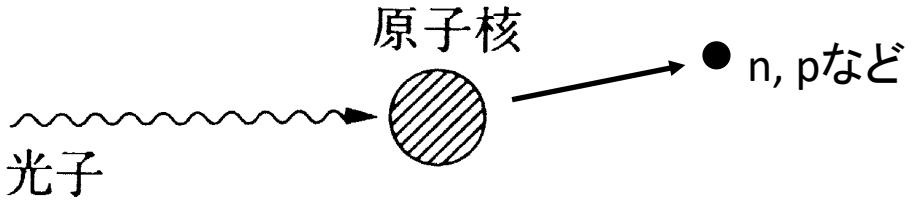
運動エネルギーの和
$=E_\gamma - 2m_e c^2 = E_\gamma - 1.02\mathrm{MeV}$

陰電子の反物質

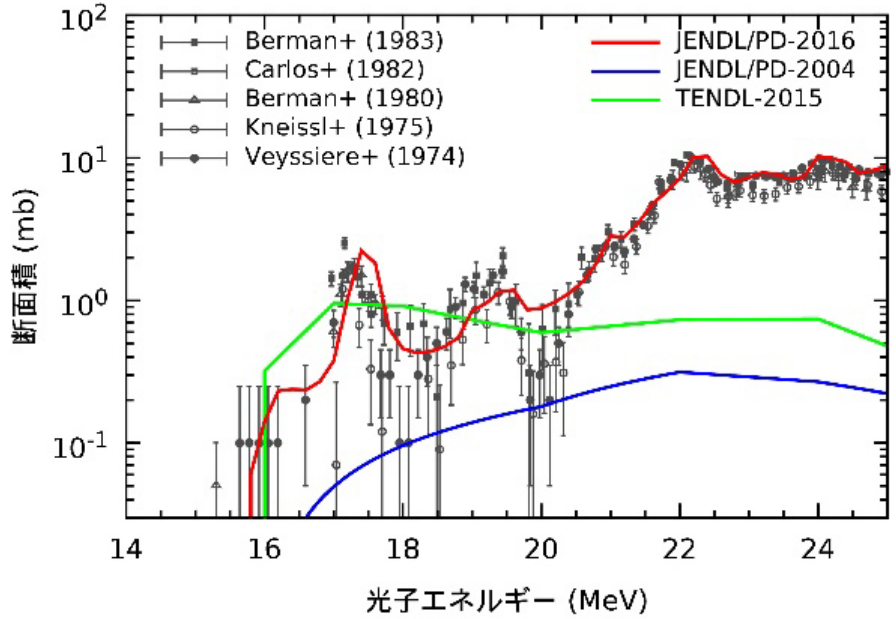
陰電子と衝突し，2個の0.511MeVの消滅放射線が正反対方向に放出

‡出典：鶴田隆雄 (2022), 初級放射線 第2種放射線取扱主任者試験受験用テキスト, p. 77, 図5.4, 通商産業研究社

光核反応
photonuclear reaction



反応の種類	核反応	反応の例
原子核の励起	(γ, γ′)	^{115}In(γ, γ′)^{115m}In
光核反応	(γ, n), (γ, p) など	^{2}H(γ, n)^{1}H, ^{16}O(γ, n)^{15}O
光核分裂	(γ, f)	^{232}Th(γ, f), ^{238}U(γ, f)



^{16}O(γ, n)^{15}O反応の断面積

‡出典：光核反応データベースJENDL/PD-2016について，図1，日本原子力研究開発機構 核データ研究グループ，https://wwwndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-pd-2016/jendl-pd-2016.html

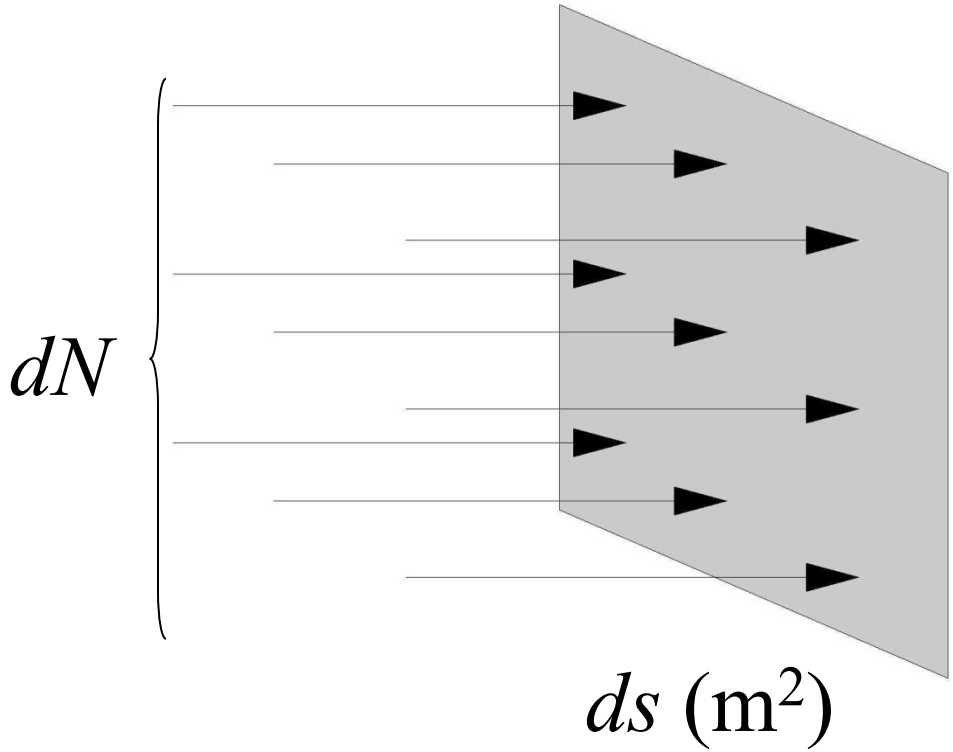
光子束（光子フルエンス）

フルエンス：

$$\phi = \frac{dN}{ds} \quad (\mathrm{m}^{-2})$$

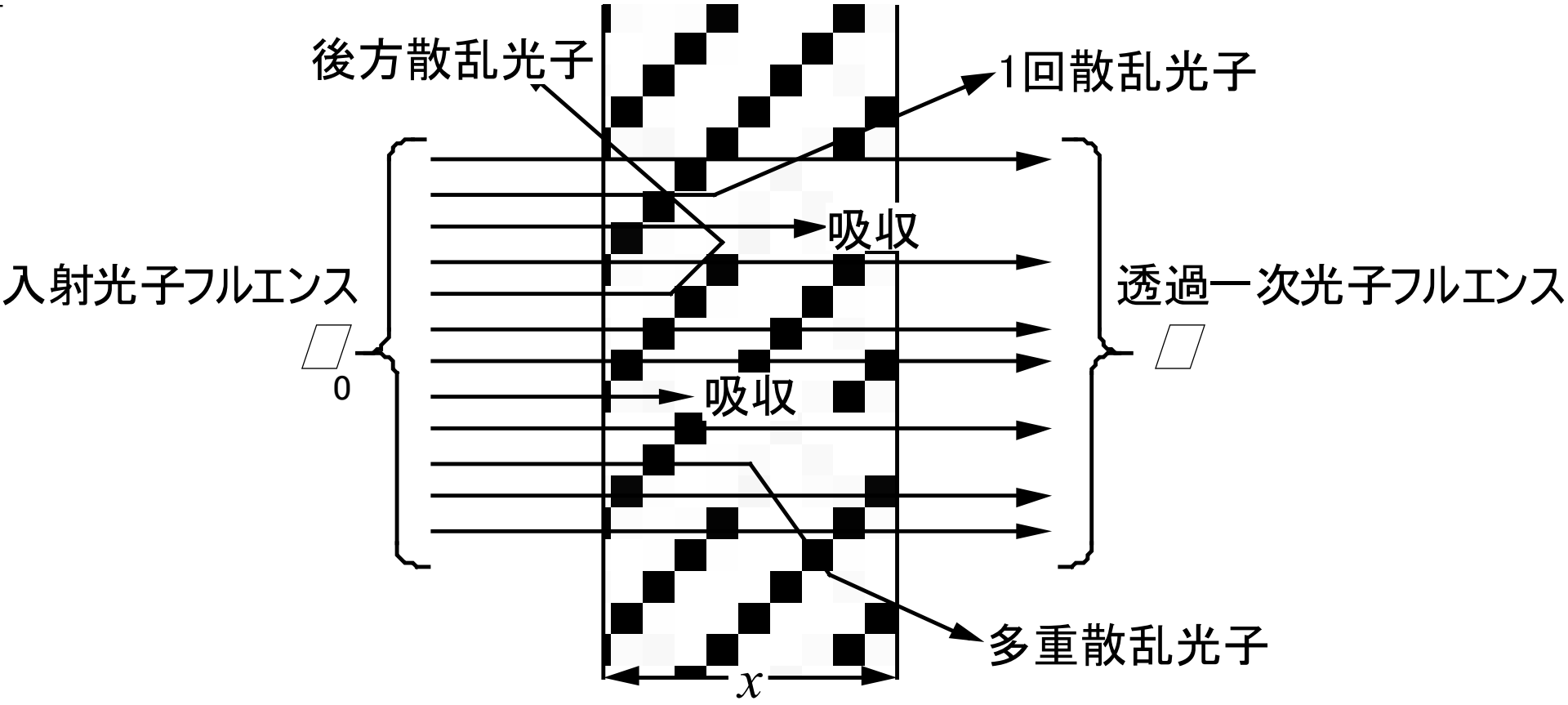
フルエンス率：

$$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt} \quad (\mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{s}^{-1})$$



ϕ: ファイ

光子の物質透過



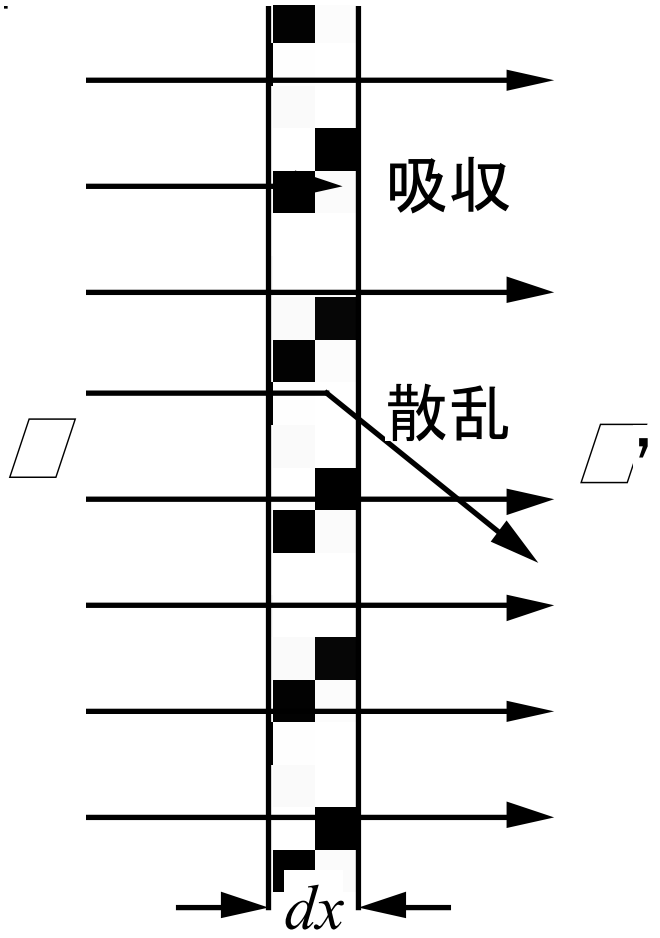
光子の減衰

$$\phi - \phi' = -d\phi = \mu \phi dx$$

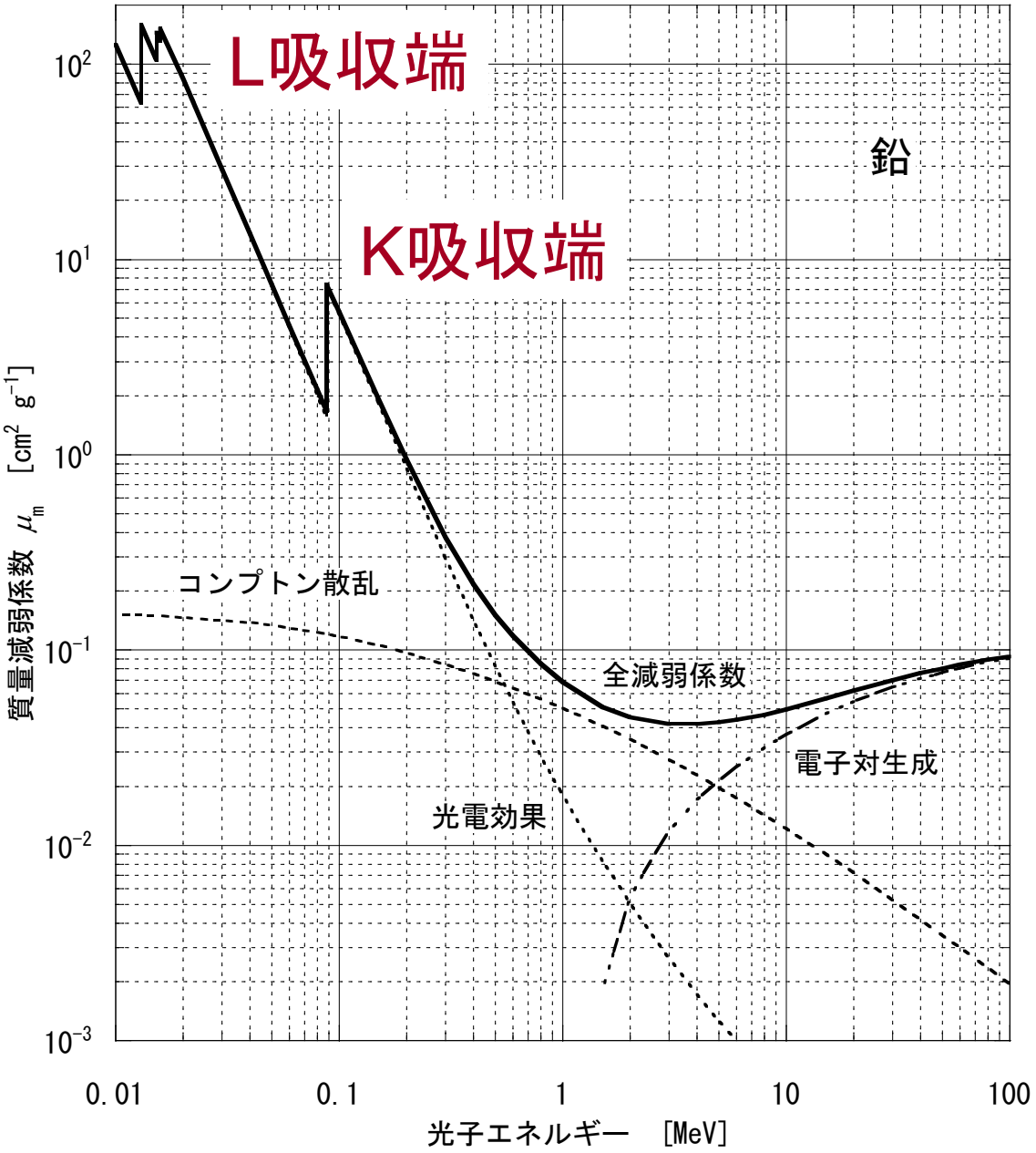
$$\phi = \phi_0 e^{-\mu x}$$

μ: 線減弱係数（m^{-1}, cm^{-1}）
linear attenuation coefficient
（線減衰係数）

μ_m: μ / ρ　(ρ: 密度)
質量減弱係数
mass attenuation coefficient
（質量減衰係数）
（$kg^{-1}\cdot m^2$, $g^{-1}\cdot cm^2$）



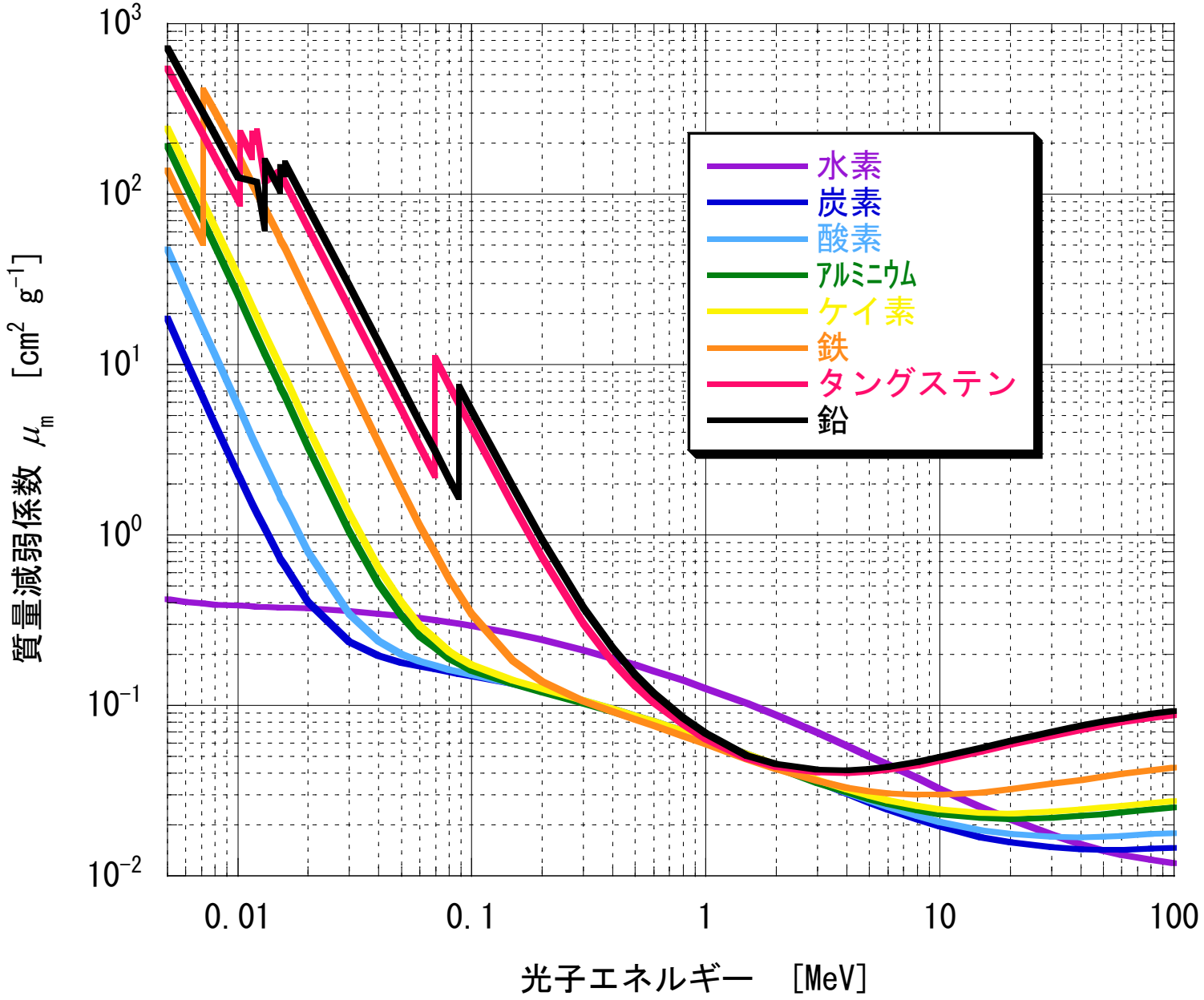
質量減弱係数　―鉛―



軌道電子結合エネルギー

Pb　K:　88.0　keV
　　L_1:　15.9
　　L_2:　15.2
　　L_1:　13.0

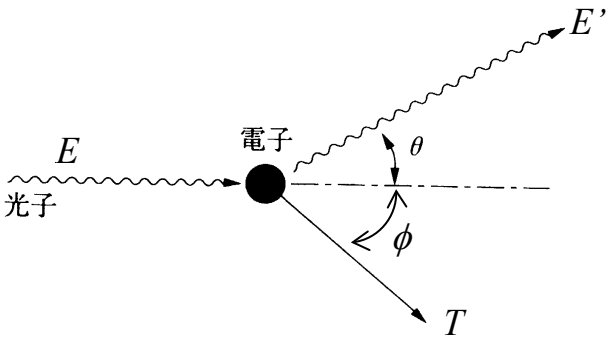
さまざまな物質の質量減弱係数



計算してみよう (3) 〔コンプトン散乱光子のエネルギー〕

コンプトン効果にともなう散乱後の光子のエネルギーが次式で与えられることを，
以下の(1)から(3)の式を基に求めよ。mは電子の静止質量とする。

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{mc^2}(1 - \cos\theta)}$$



光子の入射方向に対する運動量の保存則：

$$\frac{E}{c} = \frac{E'}{c}\cos\theta + \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}}\cos\phi \qquad (1)$$

ただし v はコンプトン電子の速度，$\beta = v/c$ とする。
入射方向に垂直な方向に対する運動量の保存則：

$$0 = \frac{E'}{c}\sin\theta - \frac{mv}{\sqrt{1-\beta^2}}\sin\phi \qquad (2)$$

エネルギーの保存則：

$$E = E' + mc^2\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1\right) \qquad (3)$$

‡出典：鶴田隆雄 (2022), 初級放射線 第2種放射線取扱主任者試験受験用テキスト, p. 76, 図5.2, 通商産業研究社

解説 (3-1)

まず，未知数ϕを消去するため，式(1)の右辺の1項を移項して2乗する。

$$\frac{m^2v^2}{1-\beta^2}\cos^2\phi=\frac{E^2}{c^2}+\frac{E'^2}{c^2}\cos^2\theta-2\frac{EE'}{c^2}\cos\theta \tag{4}$$

同様に式(2)も移項して2乗する。

$$\frac{m^2v^2}{1-\beta^2}\sin^2\phi=\frac{E'^2}{c^2}\sin^2\theta=\frac{E'^2}{c^2}\left(1-\cos^2\theta\right) \tag{5}$$

式(4)と(5)の辺どうしを足して，$\sin^2\theta+\cos^2\theta=1$ を適用する。

$$\frac{m^2v^2}{1-\beta^2}=\frac{E^2}{c^2}+\frac{E'^2}{c^2}-2\frac{EE'}{c^2}\cos\theta \tag{6}$$

次にβとvを消去するため，式(3)の右辺の一部を移項して2乗する。

$$\frac{1}{1-\beta^2}=\frac{\left(E-E'+mc^2\right)^2}{m^2c^4}\Rightarrow 1-\beta^2=\frac{m^2c^4}{\left(E-E'+mc^2\right)^2} \tag{7}$$

式(7)より，

$$\beta^2=1-\frac{m^2c^4}{\left(E-E'+mc^2\right)^2}\Rightarrow v^2=c^2-\frac{m^2c^6}{\left(E-E'+mc^2\right)^2} \tag{8}$$

解説 (3-2)

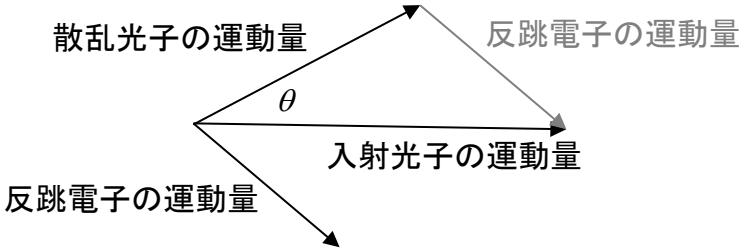
式(7), (8)を(6)に代入して整理する。

$$\left(E-E'+mc^2\right)^2\left\{1-\frac{m^2c^4}{\left(E-E'+mc^2\right)^2}\right\}=E^2+E'^2-2EE'\cos\theta$$

$$E'\left(E+mc^2-E\cos\theta\right)=Emc^2$$

$$E'=\frac{Emc^2}{E+mc^2-E\cos\theta}$$

$$E'=\frac{E}{1+\frac{E}{mc^2}\left(1-\cos\theta\right)}$$



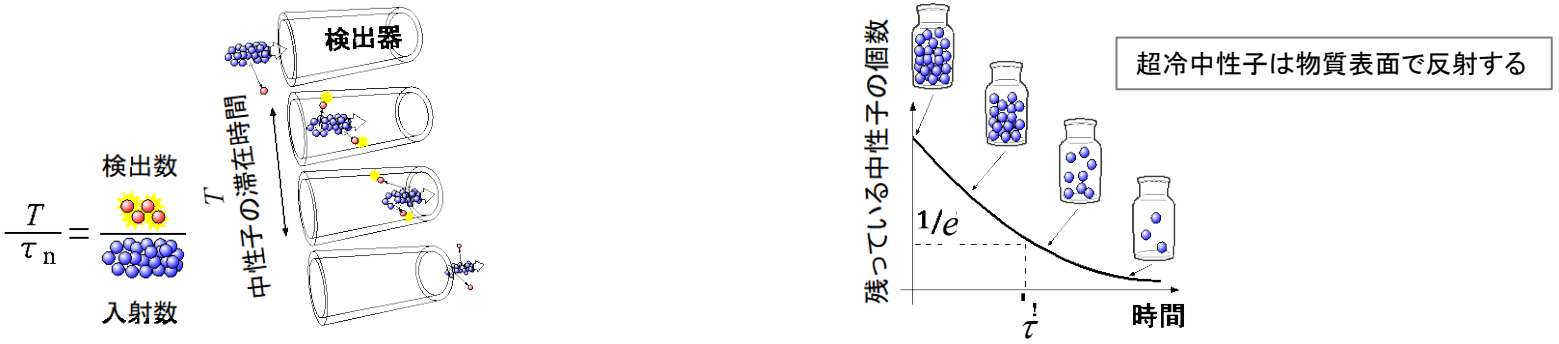
上記の関係に余弦定理を適用して華麗に解くことも可

中性子の相互作用

中性子

- 単独では不安定【半減期：約10分】　$\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p}^{+} + e^{-} + \bar{\nu}$

- 中性子寿命問題(Neutron lifetime puzzle)：
  ビッグバン元素合成(BBN)の解明に重要
  ビーム法：　887.7±2.2秒（2013年）［半減期：615.3±1.5秒］
  ボトル法：　877.7±0.8秒（2018年）［半減期：608.4±0.6秒］
  両者は有意に異なる



ビーム法(左)とボトル法(右)の実験

‡出典：三島賢二 (2021), 中性子寿命の謎, 解明に向けた新しい手法, Isotope News (No.778), p. 7, 図1, 日本アイソトープ協会, https://www.jrias.or.jp/pdf/2112_TENBO_MISHIMA.pdf

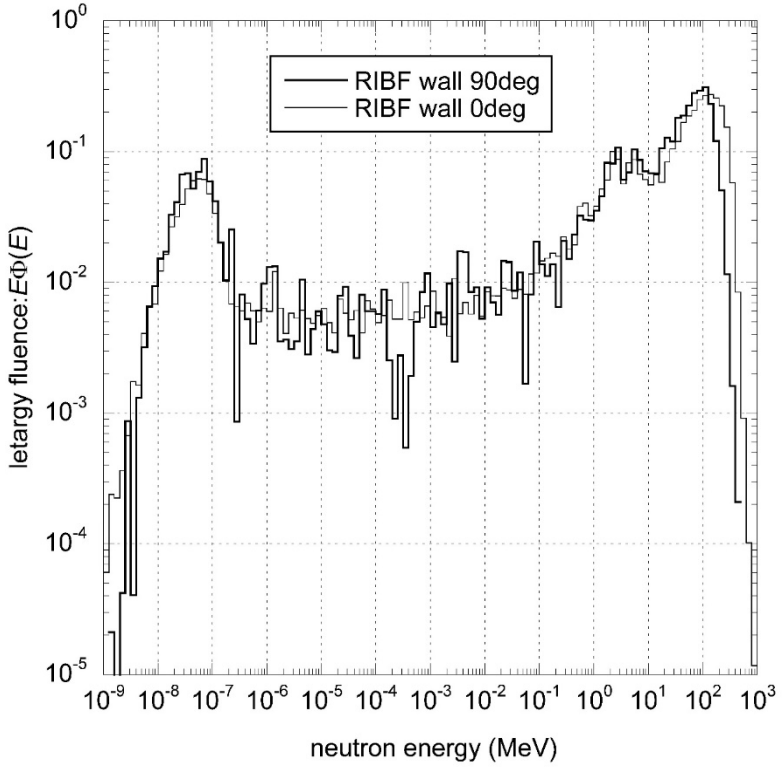
中性子と物質との相互作用

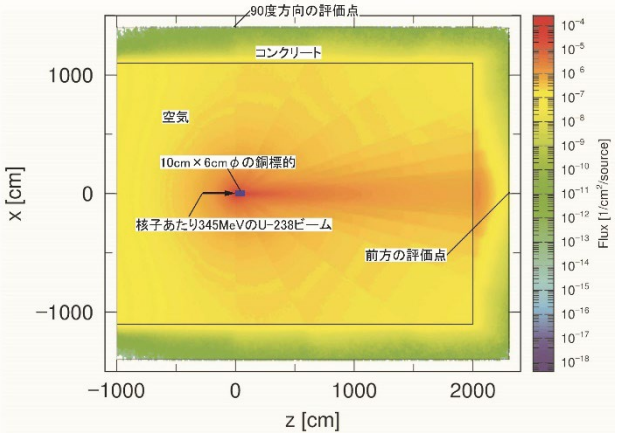
- 電荷を持たないため直接エネルギーを与えることはない（光子と同様）
- 原子核とのみ相互作用（核反応）する。
- クーロン力による反発が無いため，低エネルギーでも核反応を起こす。
- 反応は，中性子のエネルギー，相手の核の原子番号と質量数（核種）に依存する。

中性子のエネルギーによる分類

- 高速中性子 fast neutron
  自発核分裂線源，核反応などによって放出された直後の，数百keVから十数MeV（加速器ではTeVなど）の中性子
- 中速中性子
  0.1～500 keV
- 熱外中性子 epithermal neutron
  0.5～約 100 eV
- 熱中性子 thermal neutron
  散乱によってエネルギーを失い（減速），周辺の物質と熱平衡に達した中性子
  エネルギーの最確値： 0.025 eV
  速度の最確値： 2,200 m/s
- 冷中性子 cold neutron
  約 5 meV以下（波長 0.4 nm以上）

【エネルギーの境界には諸説あり】





中性子が起こす核反応

- 弾性散乱 elastic scattering
  （衝突前後で運動エネルギーの総和が変化しない）
- 非弾性散乱 inelastic scattering
  （衝突によって運動エネルギーの一部が原子核の励起エネルギーに移る。(n,n') 反応）
- 否弾性散乱（この日本語は一般的でない） non-elastic scattering
  （原子核反応を伴う散乱，(n,n'), (n,p), (n,α), (n,2n)反応など）
- 捕獲 capture
  （原子核に吸収され，多くはγ線放出を伴う，(n,γ)）

弾性散乱の運動学

kinematics

散乱後の標的核の実験室系でのエネルギー:

$$E_{\mathrm{T}}^{l} = 2\frac{mM}{(m+M)^2}E_{\mathrm{i}}(1-\cos\theta)$$

m: 入射粒子の質量
M: 標的核の質量
E_i: 入射粒子の実験室系での運動エネルギー
θ: 衝突後の中性子の重心系での散乱角度

標的核	m	M	$E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{L}}/E_{\mathrm{i}}$			$1-E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{L}}/E_{\mathrm{i}}$		
			θ=0°	θ=90°	θ=180°	θ=0°	θ=90°	θ=180°
n→^{1}H	1	1	0	0.5	1	1	0.5	0
n→^{2}H	1	2	0	0.44	0.89	1	0.56	0.11
n→^{12}C	1	12	0	0.14	0.28	1	0.86	0.72
n→^{56}Fe	1	56	0	0.03	0.07	1	0.97	0.93
n→^{238}U	1	238	0	0.01	0.02	1	0.99	0.98

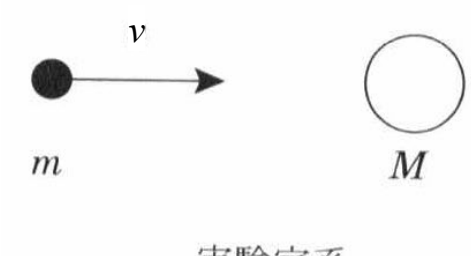
散乱後の中性子の平均エネルギー

- 水素（陽子 p），重水素（重陽子 d）との弾性散乱では大きくエネルギーを失う（約半分）
  ⇒水やポリエチレンはよい減速材【遮蔽材】
- 質量数の大きい原子核との衝突ではほとんどエネルギーを失わない。

計算してみよう (4) 〔弾性散乱の運動学〕

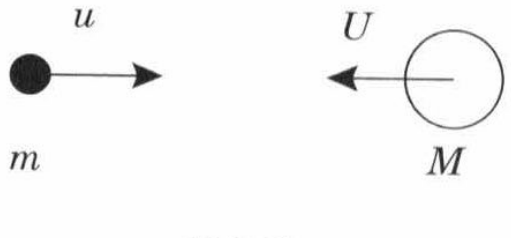
衝突(散乱)後の標的核(Target)の実験室系(Laboratory system)での運動エネルギーが次式で与えられることを示せ。

$$E_T^l = 2\frac{mM}{(m+M)^2}E_i(1-\cos\theta)$$



$$E_i = \frac{1}{2}mv^2$$

衝突前



【自分が重心にいるときに見える動き】



衝突後

‡出典：柴田徳思 (2021), 放射線概論 第一種放射線取扱主任者試験受験用テキスト, pp. 68-69, 図5.1, 図5.2, 通商産業研究社

解説 (4-1)

m: 入射粒子の質量
v: 入射粒子の実験室系での速度
u: 入射粒子の重心系での速度

M: 標的核の質量
U: 標的核の重心系での速度

W: 重心の速度

$$u = v - W,\ U = -W$$

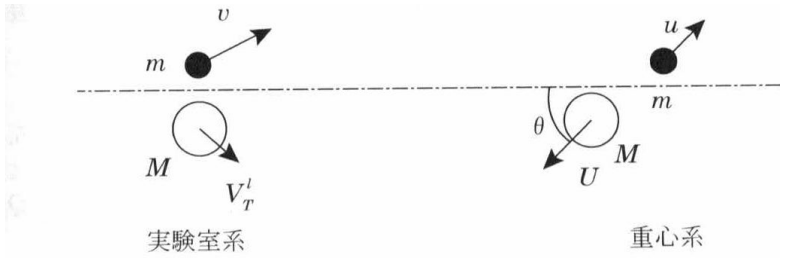
重心系での運動量の和は0であるから,

$$mu + MU = m(v - W) - MW = 0$$

したがって重心の速度は,

$$W = \frac{m}{m+M}v$$





‡出典：柴田徳思 (2021), 放射線概論 第一種放射線取扱主任者試験受験用テキスト, pp. 68-69, 図5.1, 図5.2, 通商産業研究社

重心系での入射粒子のエネルギーは, 実験室系でのエネルギーを $E_i = \frac{1}{2}mv^2$ として,

$$E_i^C = \frac{1}{2}mu^2 = \frac{1}{2}m(v-W)^2 = \frac{1}{2}m\left(v - \frac{m}{m+M}v\right)^2 = E_i\left(\frac{M}{m+M}\right)^2$$

重心系での標的核のエネルギーは,

$$E_T^C = \frac{1}{2}MU^2 = \frac{1}{2}MW^2 = \frac{1}{2}M\left(\frac{m}{m+M}v\right)^2 = \frac{1}{2}mv^2\frac{mM}{(m+M)^2} = E_i\frac{mM}{(m+M)^2}$$

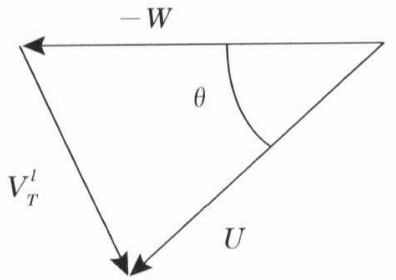
解説 (4-2)

重心系での入射粒子と標的核のエネルギーの和（重心系での全エネルギー）は，

$$E^C = E_i^C + E_T^C = E_i \frac{M^2}{(m+M)^2} + E_i \frac{mM}{(m+M)^2} = E_i \frac{M(M+m)}{(m+M)^2} = E_i \frac{M}{m+M}$$

弾性散乱では，散乱前後の重心系でのそれぞれの粒子の速度は変わらない。重心系での標的核の散乱角度をθとすると，図より，散乱後の標的核の実験室系での速度は U=-W なので，

$$V_T^l = 2W \sin\frac{\theta}{2}$$



散乱後の標的核の実験室系でのエネルギーは，

$$E_T^l = \frac{1}{2}M\left(V_T^l\right)^2 = \frac{1}{2}M\left(2W\sin\frac{\theta}{2}\right)^2 = 2MW^2\sin^2\frac{\theta}{2} = MW^2\left(1-\cos\theta\right)$$

すなわち，

$$E_T^l = M\left(\frac{m}{m+M}v\right)^2\left(1-\cos\theta\right) = \frac{m^2M}{(m+M)^2}v^2\left(1-\cos\theta\right)$$

$$= 2\frac{mM}{(m+M)^2}E_i\left(1-\cos\theta\right)$$

核分裂と原子炉

核分裂(fission)

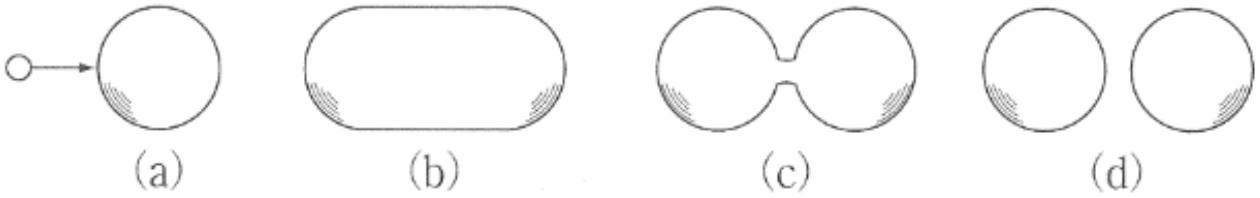
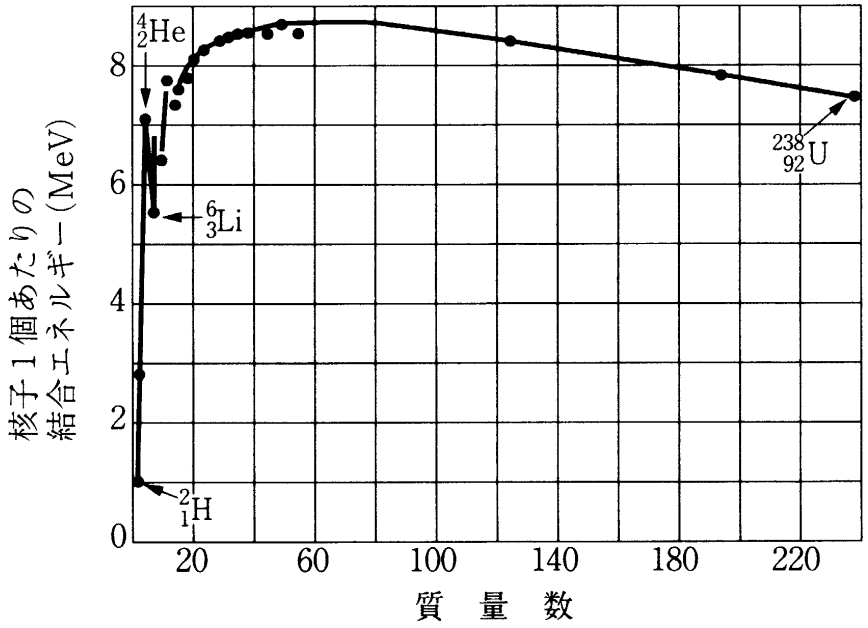


図 5.1　液滴模型による分裂の説明

‡出典：柴田徳思 (2021), 放射線概論 第一種放射線取扱主任者試験受験用テキスト, p. 196, 図5.1, 通商産業研究社

質量数の大きい(原子番号の大きい)核種では，核子あたりの結合エネルギーが比較的小さいため，原子核は熱中性子を捕獲することによって得た(結合)エネルギーによって長円形の振動を生じ，表面張力に打ち勝って亜鈴(ダンベル)形を経て2つに分裂する。



核子あたりの結合エネルギー

‡出典：10版 放射線取扱の基礎 第一種放射線取扱主任者試験の要点, 物理学 1 原子と原子核, p. 9, 図1.5, 日本アイソトープ協会

核分裂性核種（fissile nuclide / fissionable nuclide）

熱中性子によって核分裂する核種

$_{92}$U　核分裂性：　^{235}U(0.72%)，　^{233}U(0%)
　　非核分裂性：　^{238}U(99.27%)，　^{234}U(0.0054%)

$_{94}$Pu　核分裂性：　^{239}Pu

原子番号が偶数，質量数が奇数の核種が核分裂性

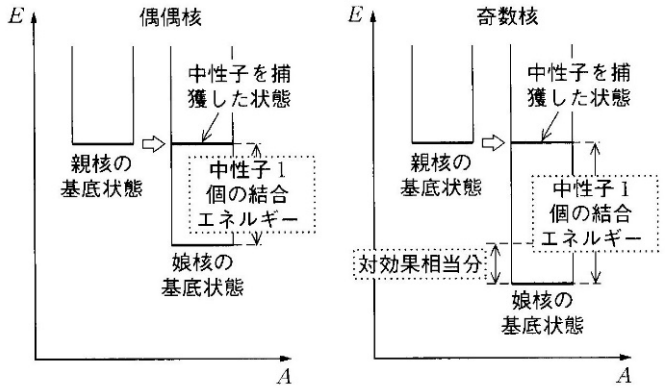


図 10·5　偶偶核と奇数核の相違

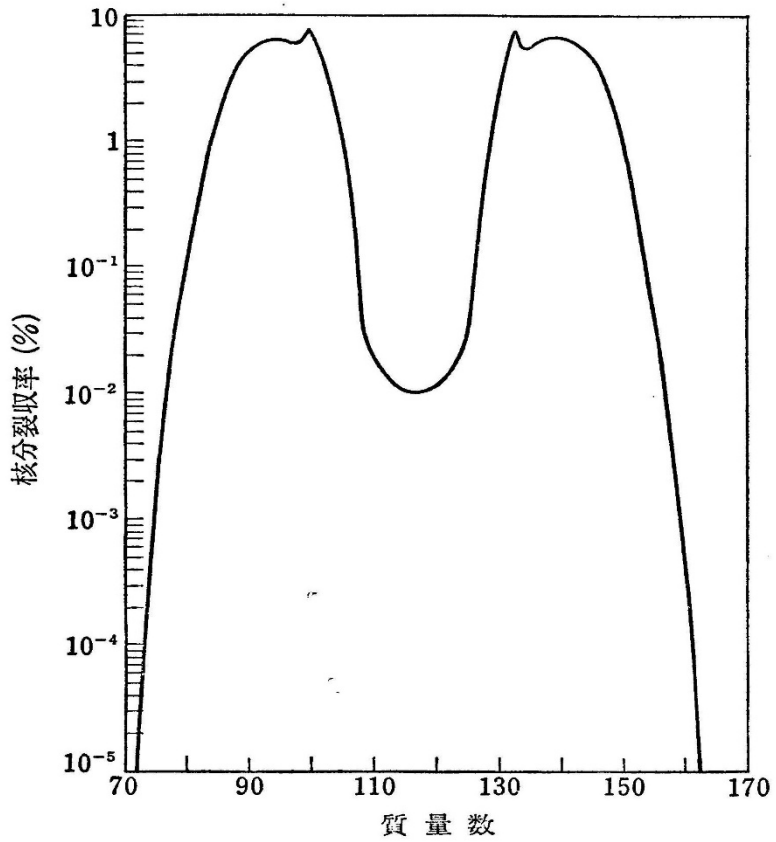
□中性子を捕獲した場合，標的核が奇数核である場合のほうが“対効果”により基底状態のエネルギーが低くなる分だけ，複合核の励起エネルギーは高くなる．

‡出典：多田順一郎 他 (2022), わかりやすい放射線物理学 (改訂3版), 第10章 中性子と物質の相互作用・原子核反応, p. 177, 図10·5, オーム社

核分裂の非対称性

$^{235}U + n \rightarrow {}^{236}U \rightarrow FP_1 + FP_2 + (2\sim3) \times n$

核分裂生成物 (fission product)の質量数の分布



中性子による核分裂では，質量数117辺のFPが生じることは少なく，95と138近にピークがある。

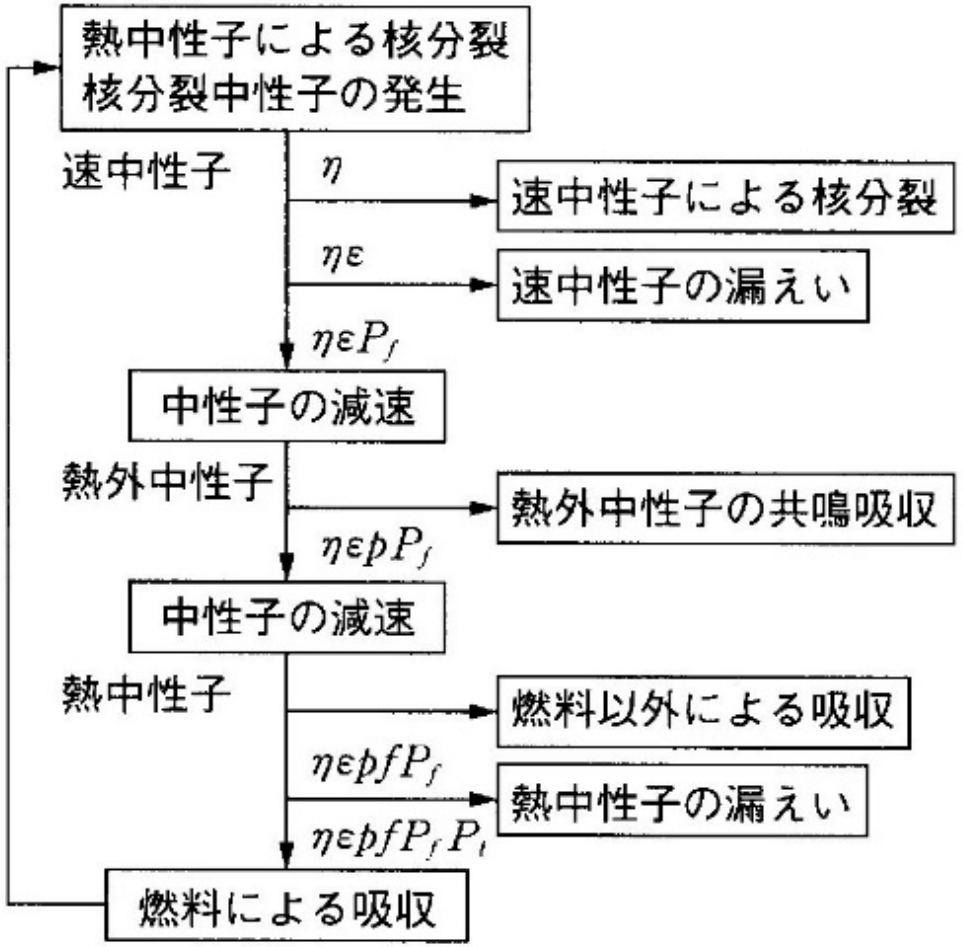
性子のエネルギーが高くなると谷は浅なり，対称核分裂が増える。

称，非対称になるメカニズムは核構造どが影響するが，複雑。

‡出典：富永健, 佐野博敏 (2011), 放射化学概論 第3版, 東京大学出版会

原子炉(連鎖反応)

nuclear reactor　　chain reaction



6 因子公式($k_{\mathrm{eff}} = \eta\varepsilon p f P_f P_t$)

η ：再生率
ε ：高速中性子核分裂因子
p ：共鳴吸収を逃れる確率
f ：熱中性子利用率
P_f ：速中性子が漏えいしない確率
P_t ：熱中性子が漏えいしない確率

$k_{\mathrm{eff}}=1$が臨界

criticality

中性子は1mも移動しないので，1サイクルに要する時間は1ms以下

図 10·10　原子炉における臨界の過程

‡出典：多田順一郎 他 (2022), わかりやすい放射線物理学 (改訂3版), 第10章 中性子と物質の相互作用・原子核反応, p. 184, 図10·10, オーム社

原子炉の制御

遅発中性子
delayed neutron

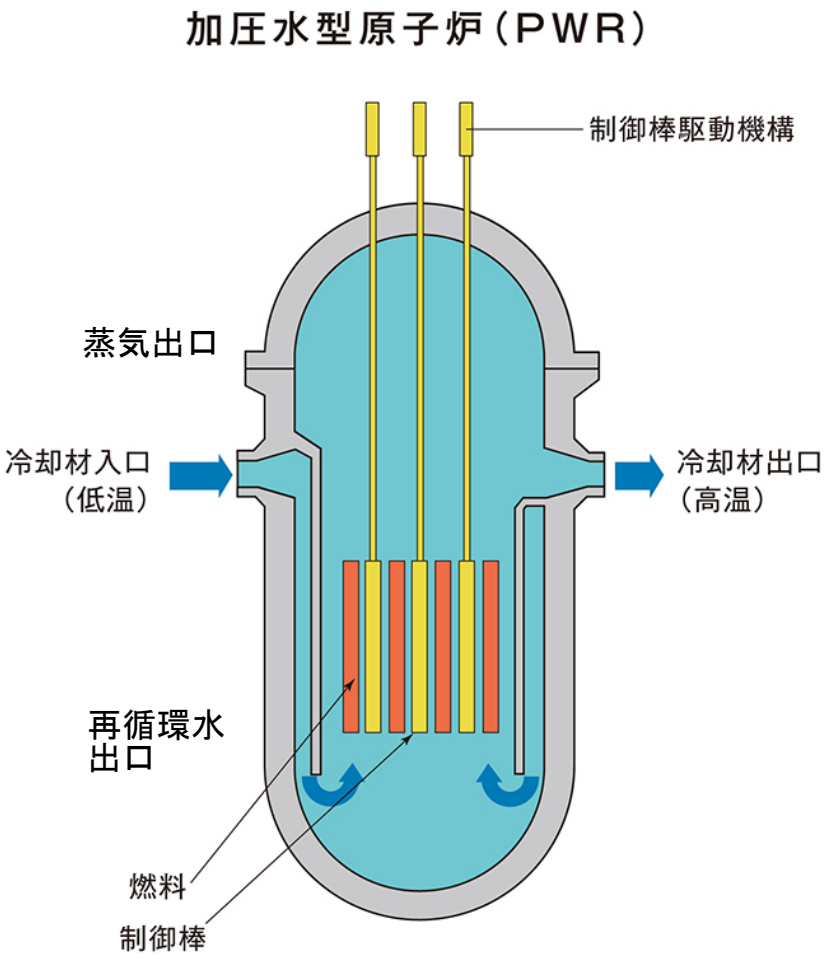
核分裂生成物から，やや遅れて中性子が放出

例：^{87}Br
（半減期55.6秒，β壊変 97.4%
中性子放出 2.6%）

核分裂によって放出される中性子のうち約 0.7%が遅発中性子

原子炉は増倍率 k_{eff} が1.007を超えないように設計

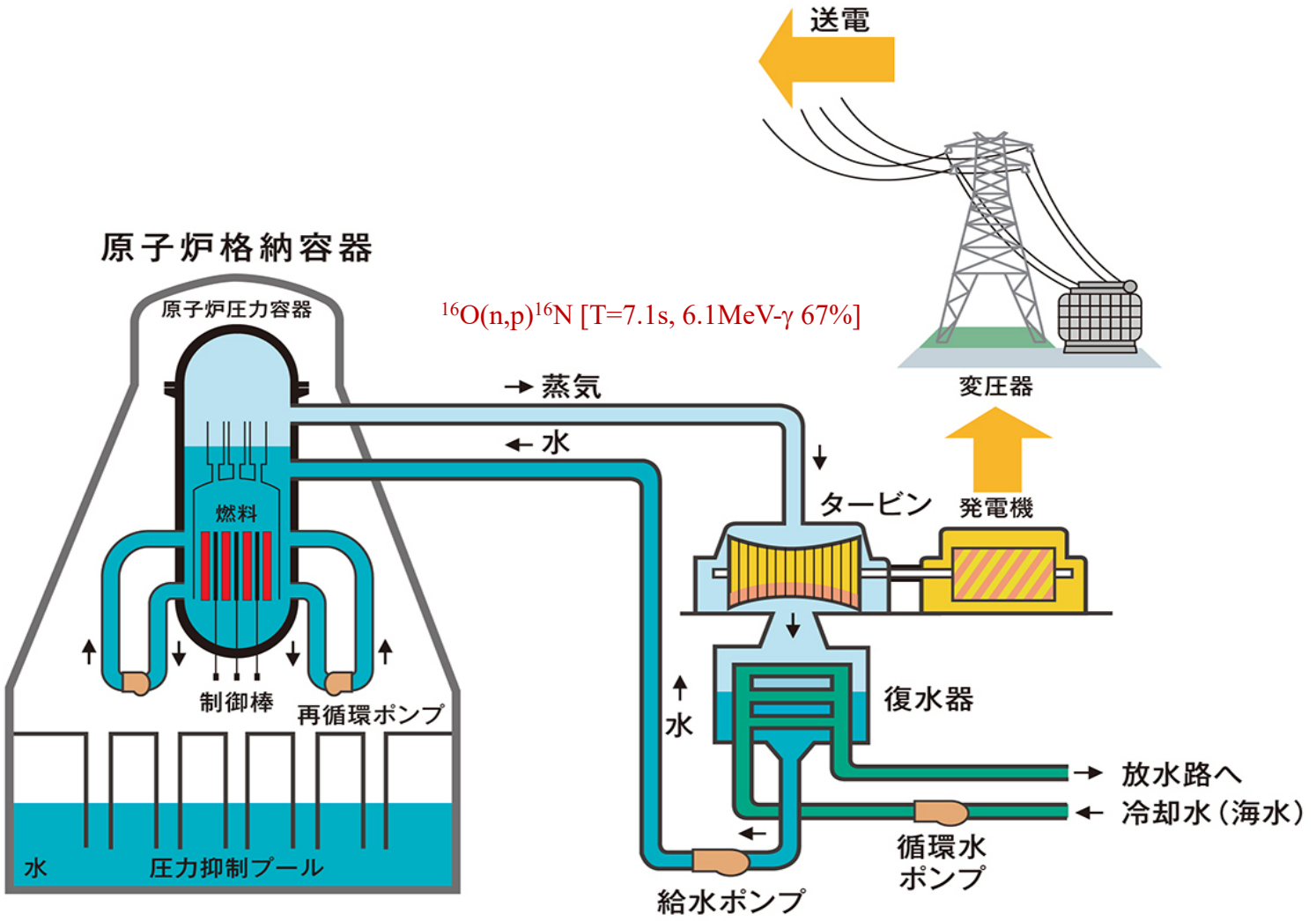
1.007を超えると即発臨界となり制御不能（チェルノブイリ事故）



‡出典：原子力・エネルギー図面集, 5-1-06, https://www.ene100.jp/zumen/5-1-6

沸騰水型炉(BWR)

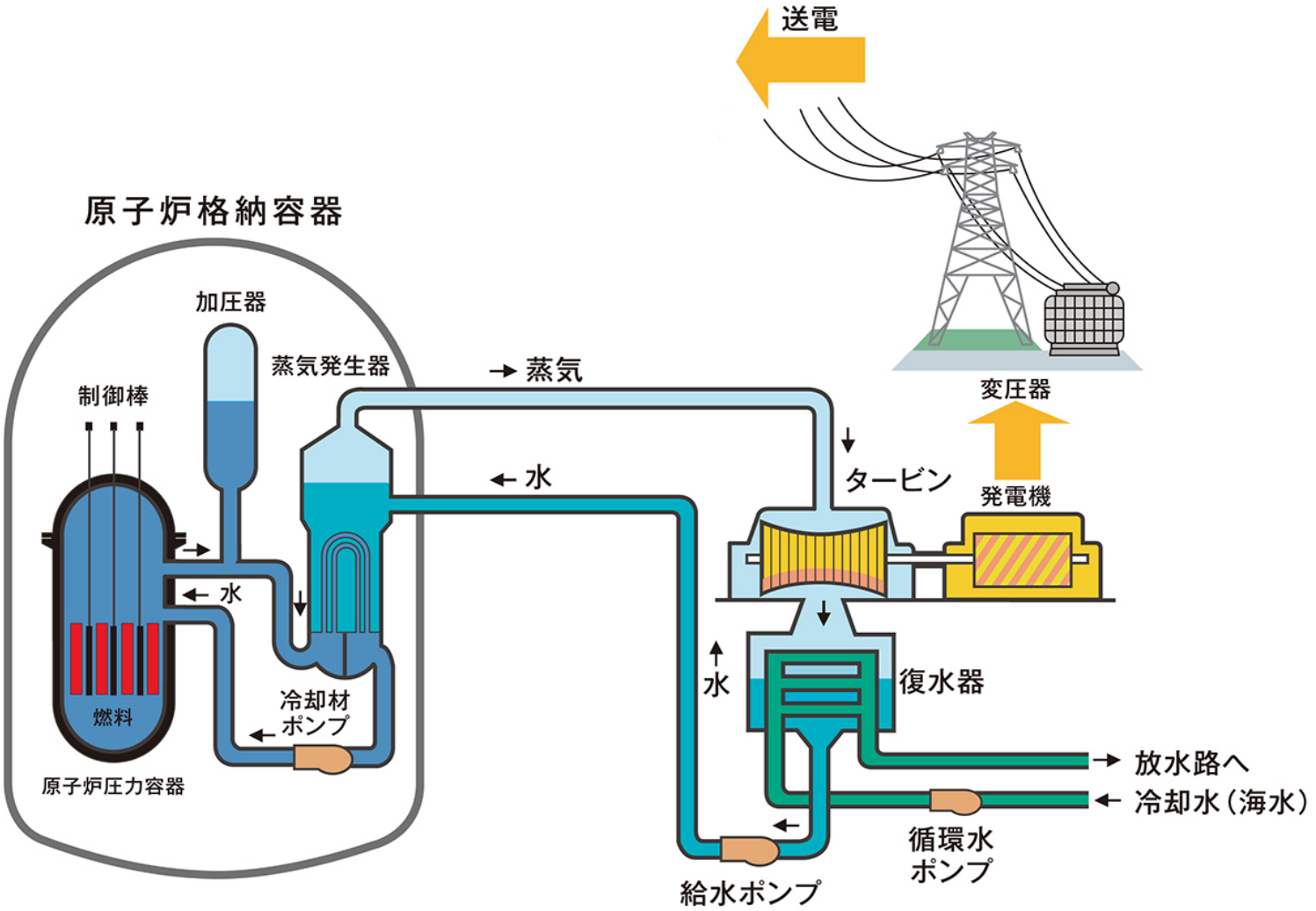
boiling water reactor



‡出典：原子力・エネルギー図面集, 5-1-02, https://www.ene100.jp/zumen/5-1-2

加圧水型炉(PWR)

pressurized water reactor



‡出典：原子力・エネルギー図面集, 5-1-05, https://www.ene100.jp/zumen/5-1-5

加速器

陽子，重イオン加速器の利用

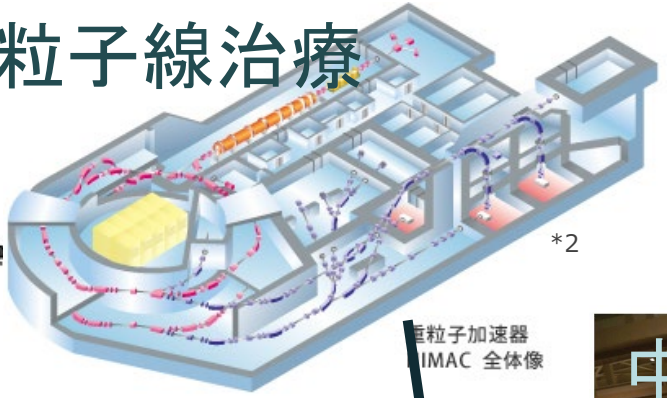
proton and heavy-ion accelerator

PET診断



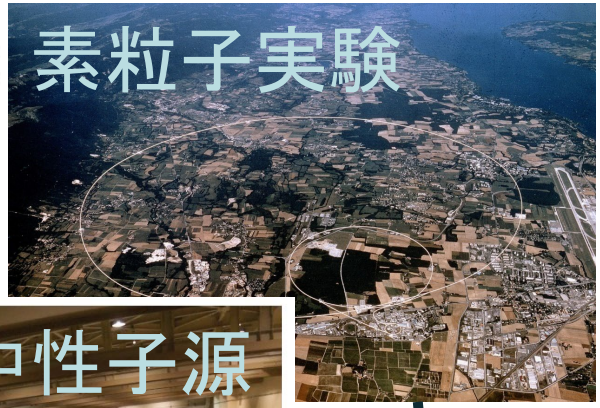
*1

粒子線治療



*2

重粒子加速器
HIMAC 全体像



*3

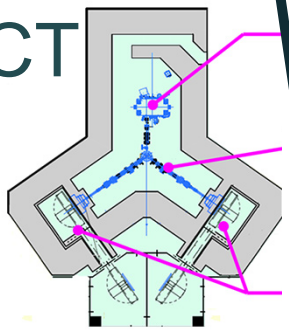
LHC
周長27km
p+p
6.5TeV/beam

イオン注入

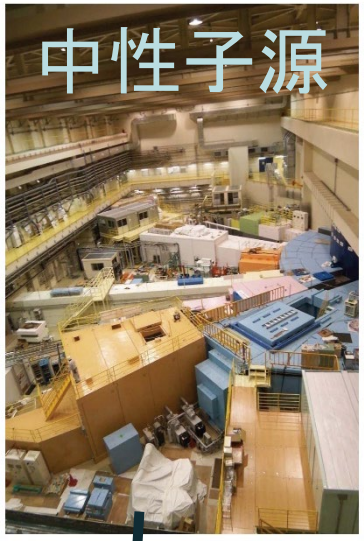


*4

BNCT



*5



*6

1 keV　1 MeV　1 GeV　1 TeV

‡出典：*1 HM-12, 住友重機械工業株式会社　*2 重粒子線がん治療装置, 量子科学技術研究開発機構, https://www.qst.go.jp/site/qms/1887.html
*3 Lo Presti, Giuseppe (2005), Peer-To-Peer Architectures in Distributed Data Management Systems for Large Hadron Collider Experiments, CERN-THESIS-2005-075, p. 51, Fig. 3.1, CERN Accelerating science　*4 日新イオン機器株式会社
*5 Treating Cancer through the Use of Neutrons, 住友重機械工業株式会社　*6 日本原子力研究開発機構

電子線加速器の利用

electron accelerator

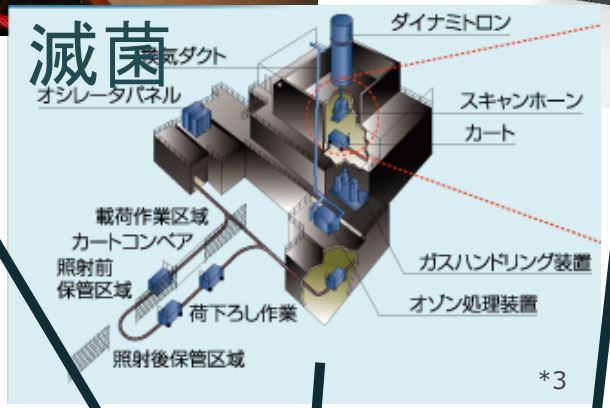


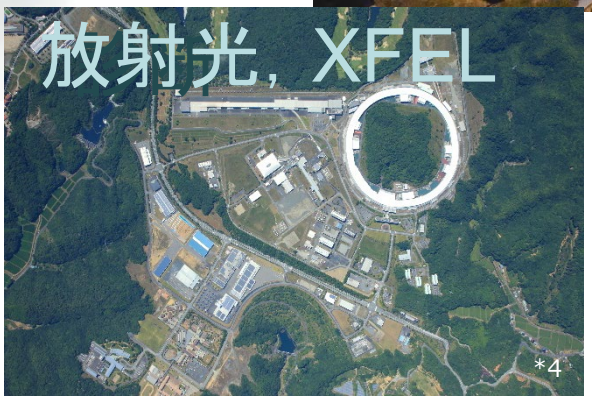
治療



*1







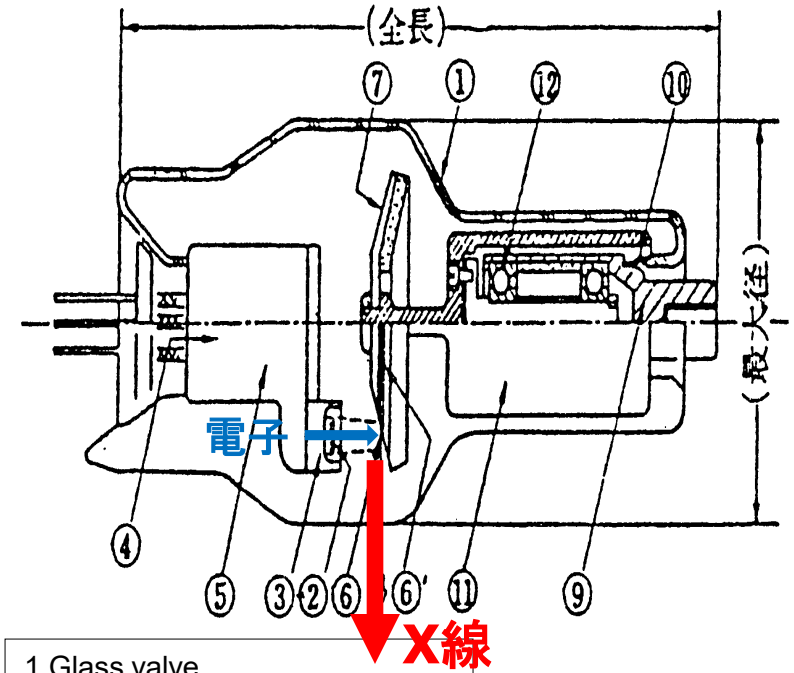
SLAC
2 mile(3.2km)
e^-+e^+
50GeV/beam

LEP@CERN
周長27km
e^-+e^+
100GeV/beam

1 keV　1 MeV　1 GeV　1 TeV

‡出典：*1 Varian Medical Systems, Inc.の厚意により掲載又は転載が許諾されています。無断複写・転載を禁じます。
*2 SLAC National Accelerator Laboratory. *3 住重アテックス株式会社, https://www.shi-atex.com/service/radiation/ebsterilization01.php
*4 国立研究開発法人理化学研究所, http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/manage_structure/contacts/imageterms/

X線装置



1.Glass valve
2. W coil filament
3. Focus electrode (Fe, NI)
4. Stem (Lead thru)
5.Cathode sleeve (Fe, NI)
6. Focus point (X-ray source)
6'.Focus trace (ring)
7. Target (Fe, W alloy etc)
9. Anode axis for rotation
10. Kobal ring (Fe alloy-glass)
11. Anode Rotor
12. Bearing with lubricant



‡出典：リガク

X線回折装置の例

‡出典：松田尚樹 (2010), 英語による教育訓練テキスト, 3 安全取扱 応用（X線）, 大学等放射線施設協議会

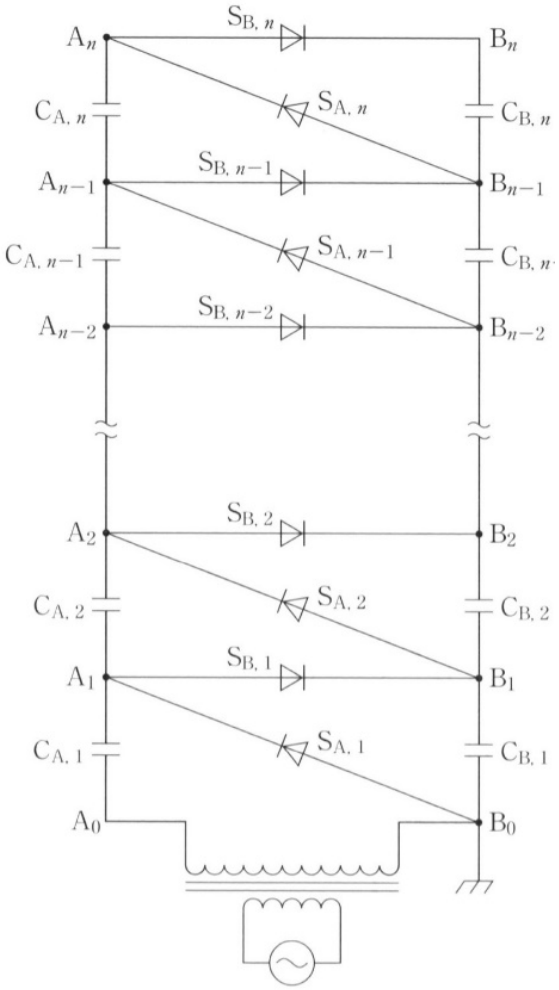
コッククロフト・ワルトン型加速装置

Cockcroft-Walton accelerator



810-kV Cockcroft-Walton accelerator at PSI, Switzerland.

‡出典：The PSI proton accelerator, PSI (Photo : Paul Scherrer Institute/Markus Fischer), https://www.psi.ch/en/research/the-psi-proton-accelerator



コッククロフト・ワルトン型高電圧発生回路

‡出典：大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構(KEK)

- 静電型
- 多段の整流器とコンデンサの結合で直流の高電圧を発生
- 2 MV程度までの加速
- 電子またはイオンを加速

加速エネルギーE:

$E=zeV$

E: エネルギー [J]

z: 粒子の価数

e: 電気素量 1.6×10^{-19} [C]

V: 加速電圧 [V]

あるいは,

$E=zV$

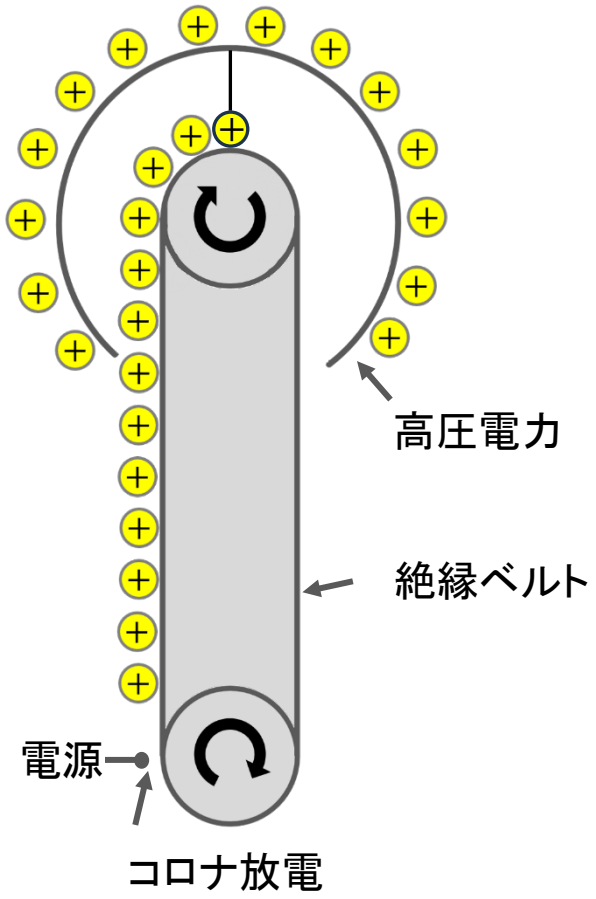
E: エネルギー [eV]

z: 粒子の価数

V: 加速電圧 [V]

ヴァン・デ・グラーフ型加速装置

Van de Graaff accelerator



- 静電型
- ベルトまたはペレットチェーンを用いて電荷を高圧電極に運ぶ
- 1～10 MV程度までの加速
- 絶縁性の良い高圧のSF_6ガスを入れたタンクの中に装置を入れることが多い
- 電子またはイオンを加速



‡出典：バンデグラフ加速器, 法政大学イオンビーム工学研究所, https://www.hosei.ac.jp/ionbeam/shisetsu/instruments/vdg/?auth=9abbb458a78210eb174f4bdd385bcf54

直線加速装置 ーアルバレ型ー

linear accelerator (linac) Alvarez type

- 加速空洞内に定在波を導入する
- 周波数はイオンの進行に同期させる
  （図の左から右にイオンは加速される。イオンは空洞内の電場が加速方向のときはチューブの間にあり，逆向きのときはチューブの中にある[導体の内部は電場が遮蔽される]。）
- 周波数は一定のため，電極の長さは次第に長くなる

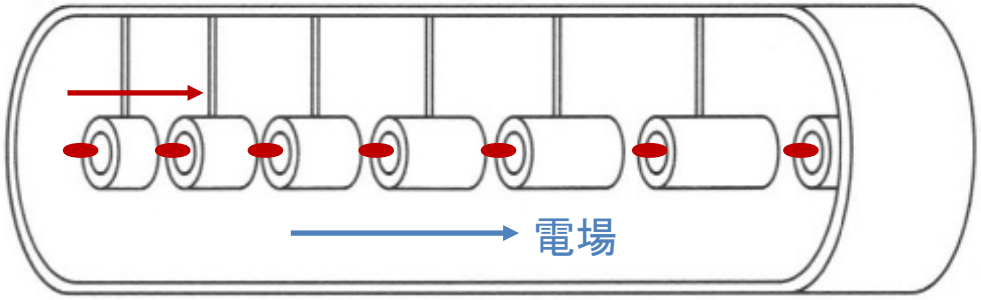


図 5.5　アルバレ型加速器

‡出典：10版 放射線取扱の基礎 第一種放射線取扱主任者試験の要点，物理学 4放射線発生装置・加速器，p. 45，図4.6，日本アイソトープ協会

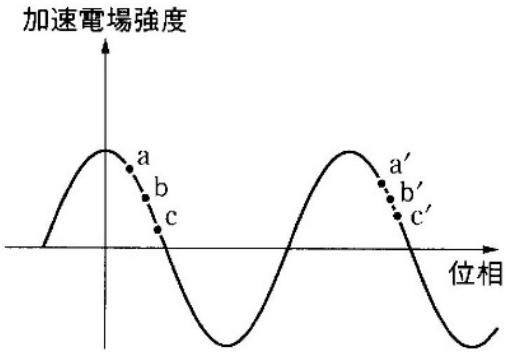


図 11·8　位相と加速電場強度との関係

安定点より位相の遅れた（速度が遅い）荷電粒子は，より大きな電圧で加速され，位相の進んだ（速度が速い）荷電粒子は，より小さな電圧で加速されるため，荷電粒子は安定点の前後を振動しながら加速される

‡出典：多田順一郎 他 (2022)，わかりやすい放射線物理学 (改訂3版)，第11章 加速器，p. 208，図11·8，オーム社

直線加速装置 ―進行波型―
linear accelerator (linac) traveling wave type

- 円筒形の導波管（加速管）内に絞り（孔の開いた金属製円盤）を入れる
- 絞りの間隔を調整し，導波管を進行するマイクロ波の位相速度を荷電粒子の速度に合わせる
- 電子は加速されるとすぐに光の速度に近づくため，マイクロ波の位相速度を合わせることができる
  （イオンでも極めてエネルギーの高い場合は加速が可能）

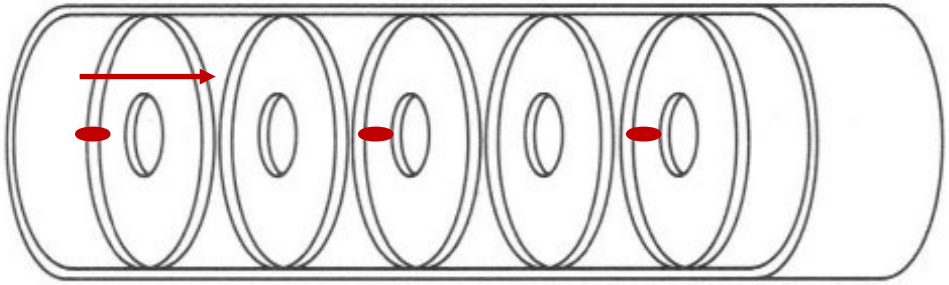
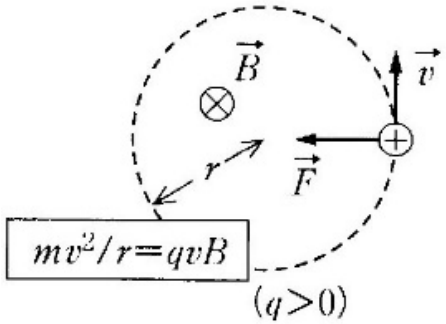


図 5.4　円盤装荷型導波管

‡出典：10版 放射線取扱の基礎 第一種放射線取扱主任者試験の要点, 物理学 4放射線発生装置・加速器, p. 45, 図4.6, 日本アイソトープ協会

サイクロトロン
cyclotron

- 一様な磁場の中を円運動するイオンの回転周期が速度に依存しないことを利用
- ディー（D）電極間を通過するごとに加速されるように電極に高周波電場をかける
- 相対論的効果により等時性が失われるため核子あたり 20 MeV程度が上限
  ［AVF型などで工夫し数百MeVまで加速可］



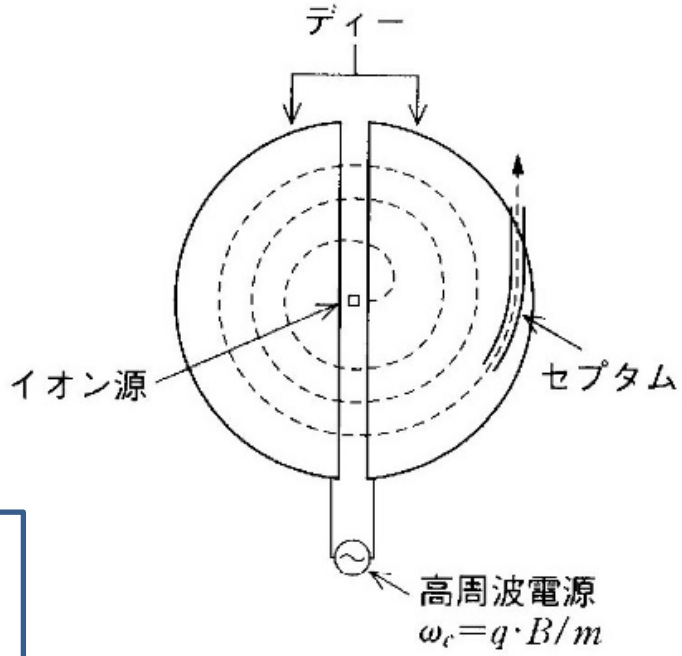


図 11·11　サイクロトロンの概念図

‡出典：多田順一郎 他 (2022), わかりやすい放射線物理学 (改訂3版), 第11章 加速器, p. 210, 図11·11, オーム社



医療用サイクロトロン HM20

‡出典：住友重機械工業株式会社, https://www.shi.co.jp/industrial/jp/product/medical/pet-radiopharmacy/cyclotron-hm20.html

ローレンツ力　$F_L = qvB$

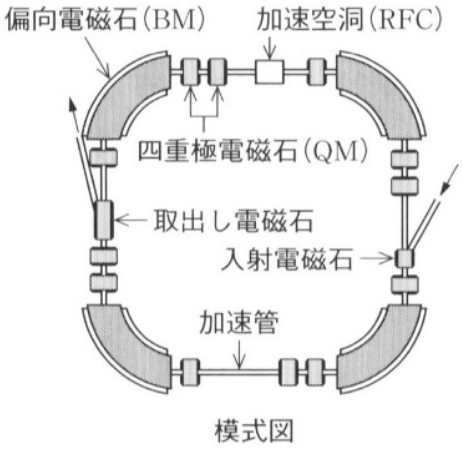
向心力　$F_C = \dfrac{mv^2}{r}$

両者は釣り合うため

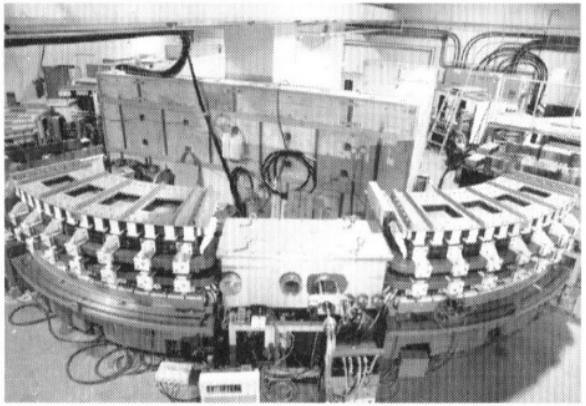
$$角速度=\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$

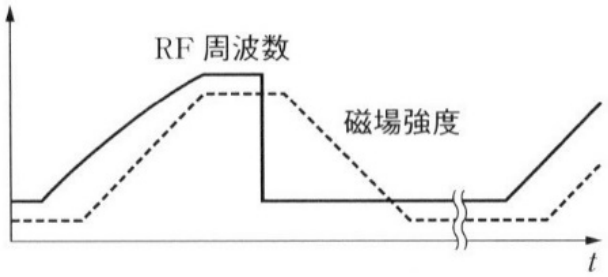
シンクロトロン
synchrotron

- 加速によってエネルギーが上がるのに合わせて磁場の強度を上げ，常に同じ軌道を周回させる
- エネルギーが上がると周回時間が短くなるのに合わせて加速高周波の周波数も上げる
- 高エネルギーまで加速可能（電子，イオンとも）



模式図


500 MeV 陽子シンクロトロン
[写真提供] 高エネルギー加速器研究機構 ©KEK



偏向電磁石の磁場，
加速周波数（RF）の変化

図 11·14　シンクロトロン（模式図）

高エネルギー加速器研究機構（KEK）　500 MeV 陽子シンクロトロン

‡出典：多田順一郎 他 (2022), わかりやすい放射線物理学 (改訂3版), 第11章 加速器, pp. 214-215, 図11·14, 図11·15, オーム社

Nihonium（113番元素，ニホニウム）



2016年11月，理化学研究所・森田浩介Grpによって命名されたニホニウム

‡出典：一家に1枚周期表 第13版 (2021), 文部科学省

$_{113}$Nhの合成

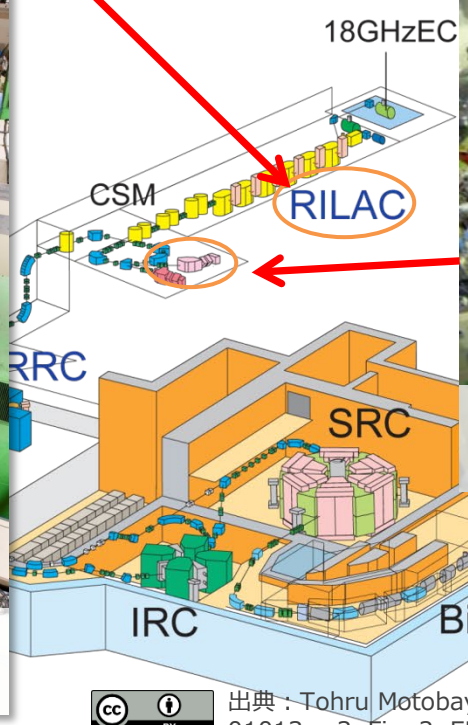
$$^{209}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{70}_{30}\mathrm{Zn} \rightarrow {}^{278}_{113}\mathrm{Nh} + \mathrm{n}$$

標的 target　　加速粒子 beam　　中性子 neutron



‡出典：理化学研究所 仁科加速器科学研究センター, https://www.nishina.riken.jp/researcher/archive/photo.html

理研重イオンリニアック(RILAC)

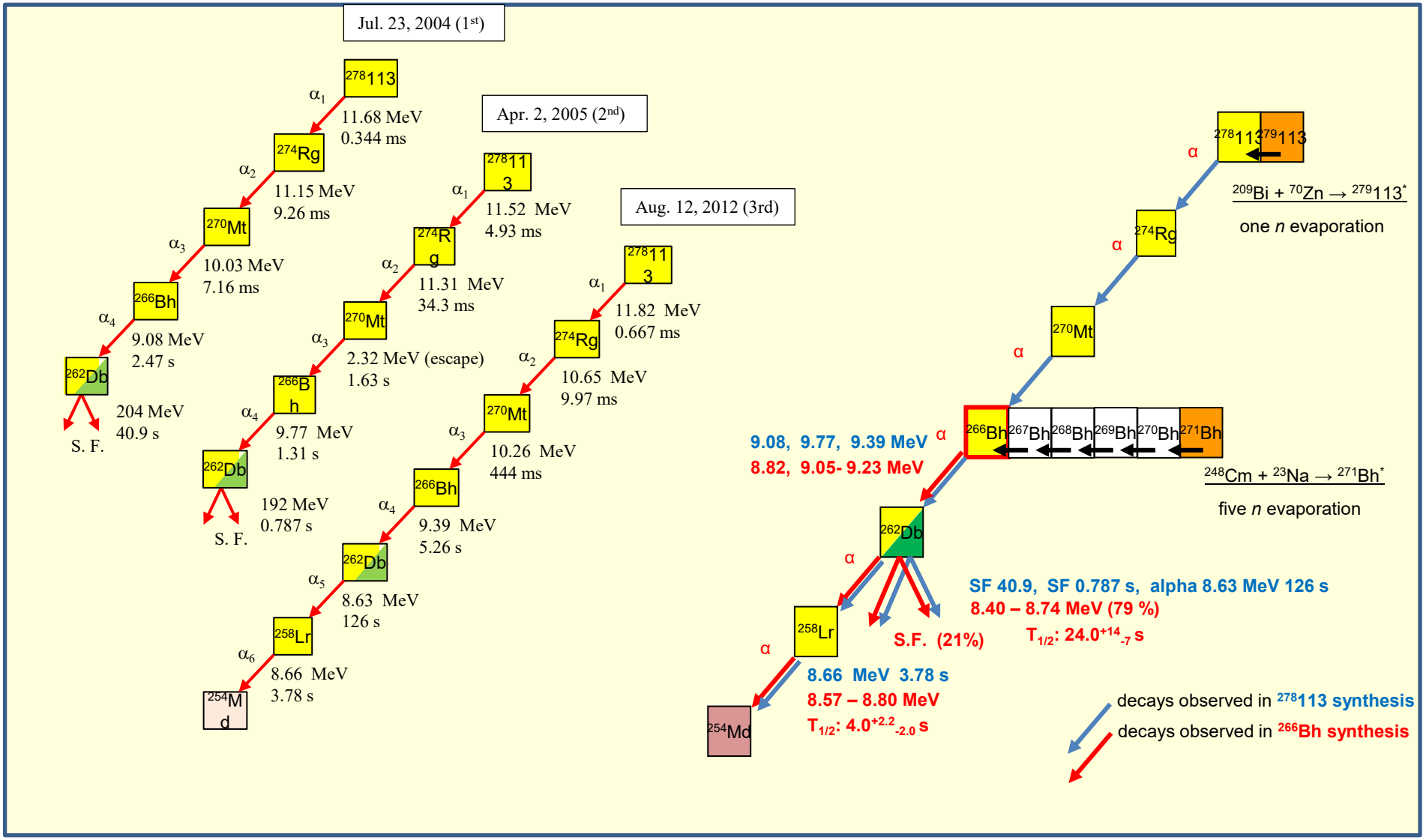




‡出典：理化学研究所 仁科加速器科学研究センター, https://www.riken.jp/medialibrary/riken/pr/publications/anniv/riken100/part1/riken100-1-5-5.pdf

出典：Tohru Motobayashi (2014), World new facilities for radioactive isotope beams, 01013-p.3, Fig. 2, EDP Sciences, https://doi.org/10.1051/epjconf/20146601013

$^{278}_{113}$Nhの崩壊チェーン



理研・仁科センター・森本幸司氏の好意による

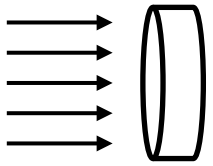
核反応断面積
nuclear reaction cross section

標的

面積: s m^2

厚さ: d m（薄いため粒子は2回以上反応しない）

原子密度: m m^{-3}



粒子

フルエンス率: ϕ m^{-2} s^{-1}
fluence rate

入射粒子数（毎秒）: $s\phi$

核反応の発生率: $\sigma s \phi d m$ （σは原子当たりの核反応のしやすさ）

σの単位: m^2 [面積]

⇒ σを「核反応断面積」あるいは単に「断面積」という

σの値は極めて小さいので，特別な単位としてb [バーン] がよく使われる

1 b = 10^{-28} m^2 (= 10^{-24} cm^2)

放射性核種の生成

核反応の発生率Y： $Y=\sigma s\phi d m=\sigma\phi N$ （目的とする放射性核種の生成率）

標的原子数： $N\ (=s\,d\,m)$

粒子フルエンス率： $\phi\ \mathrm{m^{-2}\ s^{-1}}$

放射性核種数 n の変化： $\dfrac{dn}{dt}=-\lambda n+Y$ これを解くと $n=\dfrac{1}{\lambda}Y\left(1-e^{-\lambda t}\right)$

壊変定数： λ

放射能Aの変化： $A=\lambda n=Y\left(1-e^{-\lambda t}\right)$

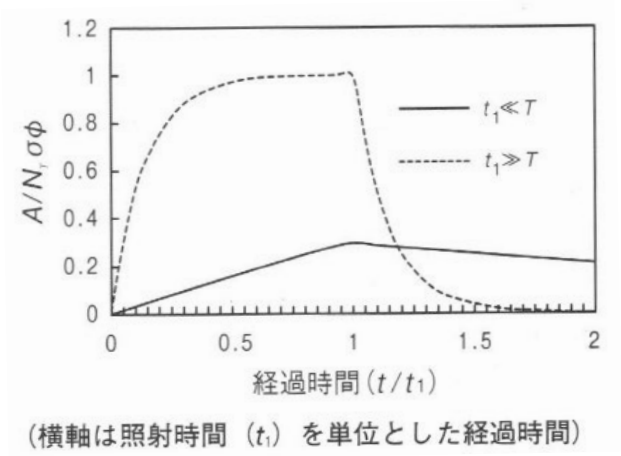
飽和放射能： $A_\infty=Y$

saturated activity

$t=0$ から T_R まで照射

照射後 T_C 時間経過したときの放射能：

$$A=\lambda n=Y\left(1-e^{-\lambda T_\mathrm{R}}\right)e^{-\lambda T_\mathrm{C}}$$



（横軸は照射時間（t_1）を単位とした経過時間）

‡出典：9版 放射線取扱の基礎 第一種放射線取扱主任者試験の要点, 物理学 4核反応, p. 35, 日本アイソトープ協会

放射性核種の利用と生成法

核種	放射線	用途	製造方法	製造装置
^{18}F	β^+→消滅γ	核医学診断	$^{18}O(p, n)^{18}F$	サイクロトロン
^{60}Co	γ線	放射線治療，滅菌	$^{59}Co(n, \gamma)^{18}F$	原子炉
^{99m}Tc	γ線	核医学診断	$^{235}U(n,fission)^{99}Mo \rightarrow ^{99m}Tc$ $^{98}Mo(n, \gamma)^{99}Mo \rightarrow ^{99m}Tc$ $^{100}Mo(\gamma, n)^{99}Mo \rightarrow ^{99m}Tc$	原子炉 原子炉 電子リニアック
^{131}I	β^-	核医学治療（甲状腺）	$^{235}U(n, fission)\ ^{131}I$	原子炉
^{211}At	α線	核医学治療	$^{209}Bi(\alpha, 2n)^{211}At$	サイクロトロン リニアック
^{225}Ac	α線	核医学治療	$^{232}Th(n, \gamma)^{233}Th \rightarrow ^{233}Pa \rightarrow$ $^{233}U \rightarrow ^{229}Th \rightarrow ^{225}Ra \rightarrow ^{225}Ac$	原子炉
^{252}Cf	中性子	中性子線源（水分計）	$^{238}U(n, \gamma) \times 14 + \beta^- \times 6$	原子炉

励起関数（核反応断面積のエネルギー依存性）
excitation function

例：^{211}Atは内用療法への利用が期待される半減期7.2時間のα線放出核種

^{209}Bi(α, 2n)^{211}At反応を用いて製造

α線のエネルギーが約30MeVで最も生成率が高くなるが，α>28.6MeVでは
^{209}Bi(α,3n)^{210}At(8.1h) → ^{210}Po(138d)が生成する（2006年に元ロシアのスパイ，リトビネンコの殺害に使われた？）。
(α,n)で生成する^{212}Atは，^{212}At(314ms) → ^{208}Bi(3.7y)

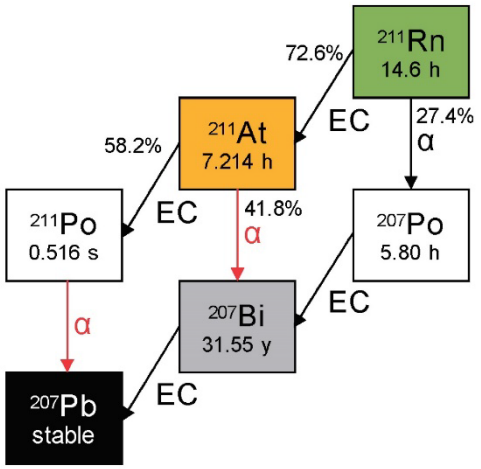
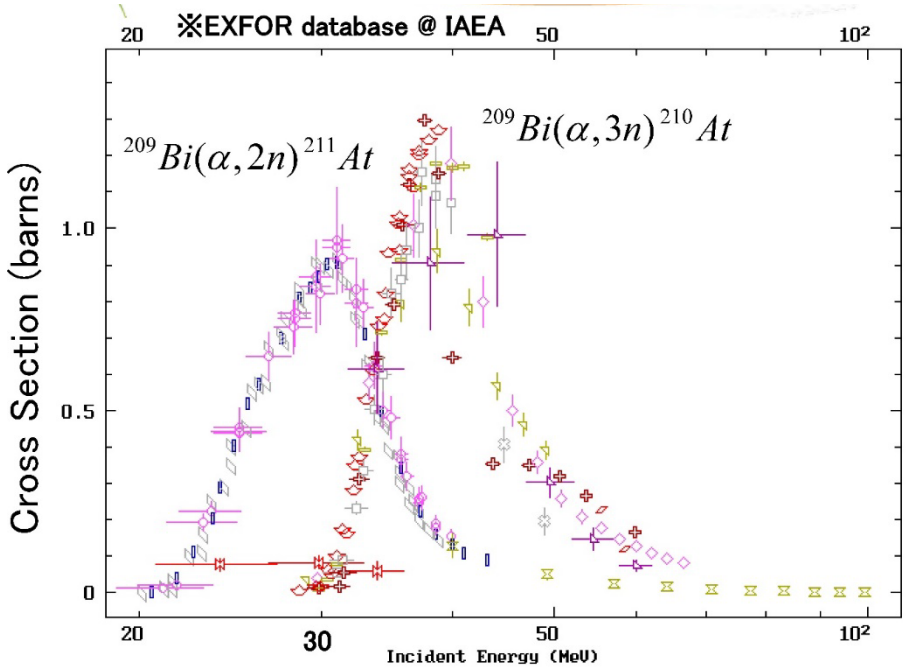


Fig. 5 Decay chain of ^{211}At.

‡出典：鷲山幸信 (2015), 総説 アイソトープ治療のためのアルファ放射体の製造, p. 26, Fig. 5, 放射化学, 第32号, 日本放射化学会, http://www.radiochem.org/pdf/rad_nw32.pdf



‡出典：福田光宏 (2021), 加速器法３ サイクロトロンによるAt-211生成とAc-225輸入計画