

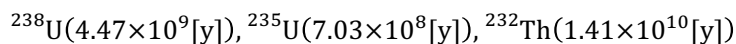
### 3 天然放射性核種

#### 3.1 分類

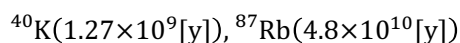
##### (1) 一次放射性核種

元素生成が行われた  $5 \sim 10 \times 10^9$  年前から存在し、壊変で消滅しきれずに現在まで残存している放射性核種。 $T_{1/2} > 10^8 [y]$  でなければ、現在は検出が困難である。

##### ➤ 壊変系列を作る親核種



##### ➤ 壊変系列を作らない核種



##### (2) 二次放射性核種

一次放射性核種の子孫。

自発性核分裂 (SF) の結果生じる核種も含まれる。

##### (3) 誘導放射性核種

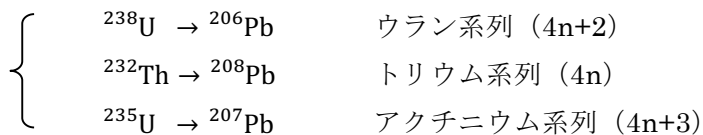
天然における核反応により作られて、常時供給されているため、半減期が短くても天然に存在する。

##### (4) 消滅放射性核種

$T_{1/2}$  が  $10^7 \sim 10^8 [y]$  程度の核種で、地球・隕石などの生成におけるある段階までかつて存在していた。今でもかつて存在していた痕跡が認められる。

#### 3.2 壊変系列を作る天然放射性核種

(p.14 参照)



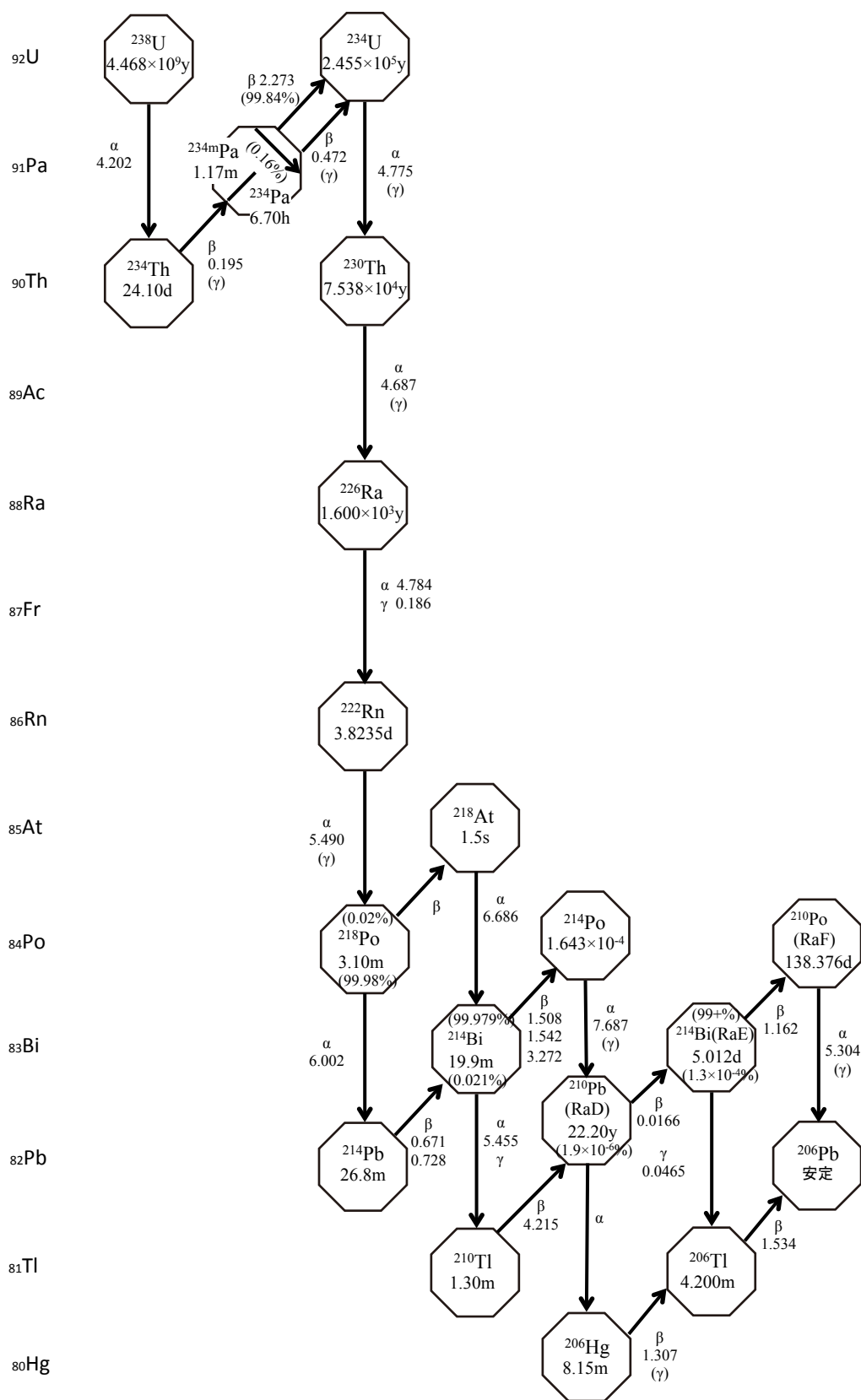
が天然に存在。



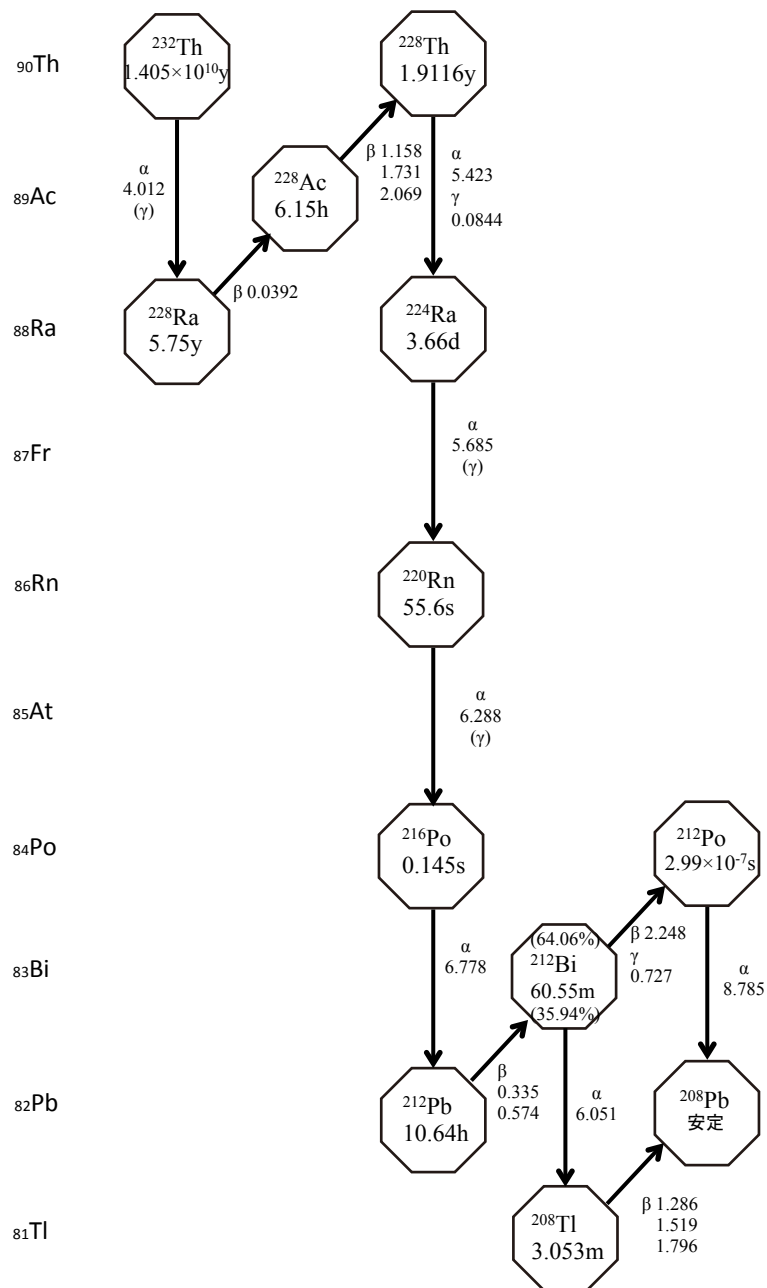
※誘導放射性核種  $^{237}\text{Np}$  ( $2.14 \times 10^6 [y]$ )

表 1 天然物中のウラン含有量 [1]

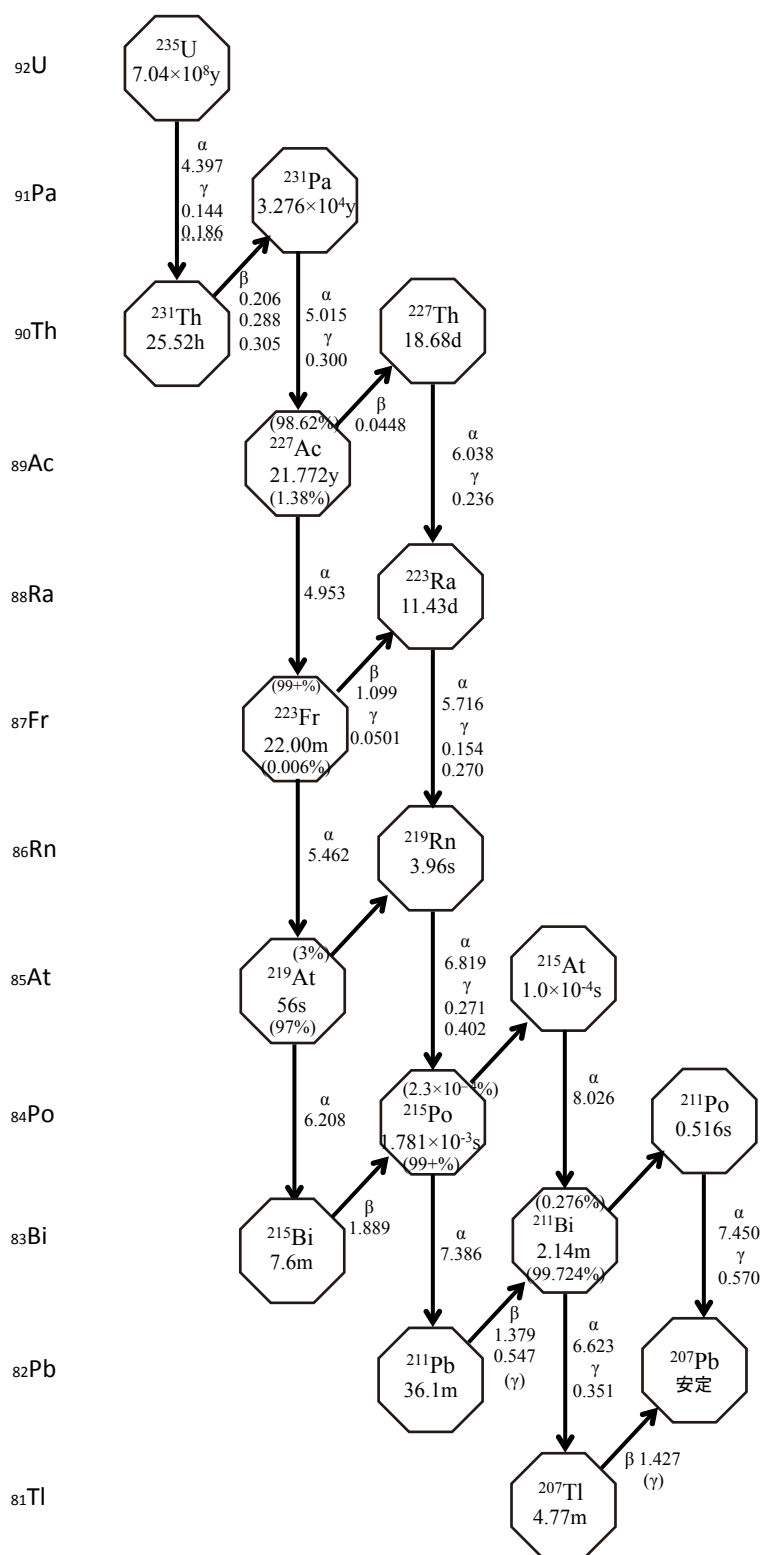
	ウラン濃度 (gU/g)
火成岩	$4 \times 10^{-6}$
玄武岩	$0.2 \times 10^{-6}$
花崗岩	$25 \times 10^{-6}$
堆積岩	$1 \sim 2 \times 10^{-6}$
海水	$1.1 \sim 1.4 \times 10^{-9}$
生物体	$10^{-4} \sim 10^{-9}$
石質イン石	$1 \times 10^{-8}$
海底沈積量	$0.8 \times 10^{-4} \text{ g/m}^2/\text{year.}$



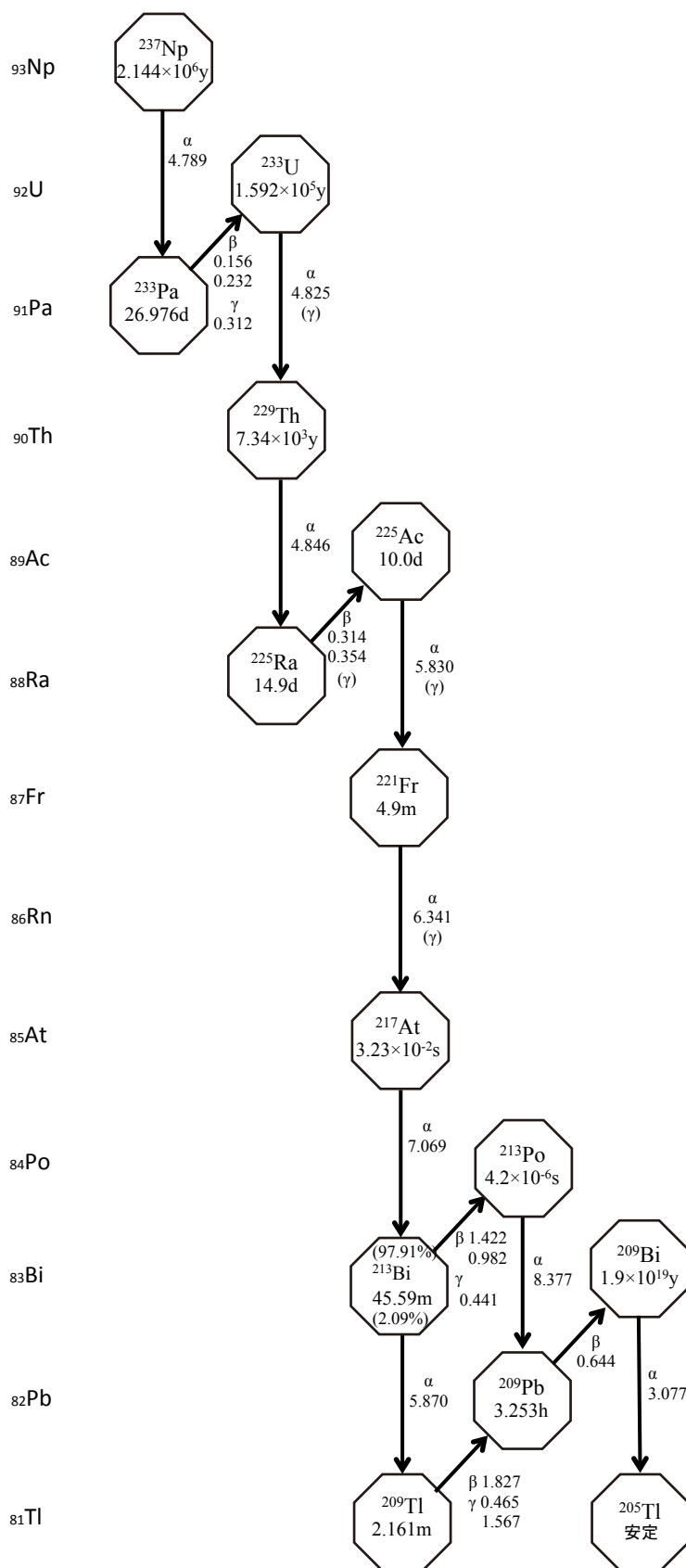
ウラン系列



トリウム系列



アクチニウム系列



ネプツニウム系列

### 3.3 系列を作らない天然放射性核種

質量数  $A$  一定、陽子数  $Z$  変化

$$\rightarrow E_b = aZ^2 + bZ + c \pm dA^{-1} \quad (\text{p.18 参照})$$

放射性であることが予想される天然に存在する核種は次のようになる。

(1) 次の同重体の一方 (p20 の図 26 参照)

A=87	A=113	A=115	A=123	A=187
$^{87}_{37}\text{Rb}$	$^{113}_{48}\text{Cd}$	$^{115}_{49}\text{In}$	$^{123}_{51}\text{Sb}$	$^{187}_{75}\text{Re}$
$^{87}_{38}\text{Sn}$	$^{113}_{49}\text{In}$	$^{115}_{50}\text{Sn}$	$^{123}_{52}\text{Te}$	$^{187}_{76}\text{Cs}$

(2) 次の同重体の真ん中のもの (p20 の図 25 参照)

A=40	A=50	A=138	A=176	A=180
$^{40}_{18}\text{Ar}$	$^{50}_{22}\text{Ti}$	$^{138}_{56}\text{Ba}$	$^{176}_{70}\text{Yb}$	$^{180}_{72}\text{Hf}$
$^{40}_{19}\text{K}$	$^{50}_{23}\text{V}$	$^{138}_{57}\text{La}$	$^{176}_{71}\text{Lu}$	$^{180}_{73}\text{Ta}$
$^{40}_{20}\text{Ca}$	$^{50}_{24}\text{Cr}$	$^{138}_{58}\text{Ce}$	$^{176}_{72}\text{Hf}$	$^{180}_{74}\text{W}$

  : 放射性核種であることが確かめられたもの

核 種	同位体存在比 (%)	半減期(年)	放 射 能
$^{40}\text{K}$	0.0118	$1.27 \times 10^9$	$\beta^-$ ; 89% (1.34 MeV), EC; 11% $\gamma$ (1.46 MeV)
$^{50}\text{V}$	0.24	$6 \times 10^{15}$	$\beta^-$ ; (0.4 MeV), EC; $\gamma$ (0.78, 1.59 MeV)
$^{87}\text{Rb}$	27.8	$4.8 \times 10^{10}$	$\beta^-$ ; (0.27 MeV)
$^{115}\text{In}$	95.7	$6 \times 10^{14}$	$\beta^-$ ; (0.48 MeV)
$^{123}\text{Te}$	0.87	$1.2 \times 10^{13}$	EC;
$^{138}\text{La}$	0.089	$1.1 \times 10^{11}$	$\beta^-$ ; 30% ( $\beta^-$ 0.20, $\gamma$ 0.81 MeV), EC; 70% $\gamma$ (1.43 MeV)
$^{142}\text{Ce}$	11.07	$\approx 5 \times 10^{15}$	$\alpha$ ; (1.5 MeV)
$^{144}\text{Nd}$	23.85	$2.4 \times 10^{15}$	$\alpha$ ; (1.83 MeV)
$^{147}\text{Sm}$	14.97	$1.1 \times 10^{11}$	$\alpha$ ; (2.15 MeV)
$^{152}\text{Gd}$	0.20	$1.1 \times 10^{14}$	$\alpha$ ; (2.14 MeV)
$^{176}\text{Lu}$	2.59	$3 \times 10^{10}$	$\beta^-$ ; ( $\beta^-$ 0.43, $\gamma$ 0.31, 0.20, 0.088 MeV)
$^{174}\text{Hf}$	0.18	$2 \times 10^{15}$	$\alpha$ ; (2.50 MeV)
$^{187}\text{Re}$	62.9	$4.3 \times 10^{10}$	$\beta^-$ ; (0.001 MeV)
$^{190}\text{Pt}$	0.0127	$7 \times 10^{11}$	$\alpha$ ; (3.11 MeV)

表 2 系列をつくらない一次放射性核種 [1]

### 3.4 誘導放射性核種

- 宇宙線による核反応で生成
- 一次放射性核種から放出された  $\alpha$  線、 $\gamma$  線との核反応（例： ${}^9\text{Be} \xrightarrow{(\alpha,n)} {}^{12}\text{C}$ ,  ${}^9\text{Be} \xrightarrow{(\gamma,n)} {}^8\text{Be}$ ）により生成した中性子で起こる核反応生成。
 

${}^{239}\text{Pu}$  : 1948 年 Seaborg ピッチブレンド中で  
 ${}^{237}\text{Np}$  : 1952 年 Peppard //
- 自発性核分裂の中性子による核反応で生成

表 3 おもな地球上における天然誘導放射性核種 [1]

核 種	半 減 期	検出される試料	生 成 核 反 応
${}^3\text{H}$	12.26 年	雨水, 陸水等	${}^{14}\text{N}(n, t){}^{12}\text{C}$ , 破砕反応
${}^7\text{Be}$	53.6 日	雨 水	N, O の破砕反応
${}^{10}\text{Be}$	$2.5 \times 10^6$ 年	海底土	N, O の破砕反応
${}^{14}\text{C}$	5730 年	大気中の $\text{CO}_2$ , 生物体 海水中の炭酸イオン等	${}^{14}\text{N}(n, p){}^{14}\text{C}$
${}^{22}\text{Na}$	2.58 年	雨 水	Ar の破砕反応
${}^{32}\text{Si}$	710 年	海水, 陸水	Ar の破砕反応
${}^{32}\text{P}$	14.22 日	雨 水	Ar の破砕反応
${}^{33}\text{P}$	24.4 日	雨 水	Ar の破砕反応
${}^{35}\text{S}$	87 日	雨 水	Ar の破砕反応
${}^{36}\text{Cl}$	$3.0 \times 10^5$ 年	地上の Cl を含む岩石 放射性鉱物	${}^{35}\text{Cl}(n, \gamma){}^{36}\text{Cl}$
${}^{39}\text{Cl}$	55.5 分	雨 水	Ar の破砕反応
${}^{237}\text{Np}$	$2.20 \times 10^6$ 年	ウラン鉱物	${}^{238}\text{U}(n, 2n){}^{237}\text{U} \xrightarrow{\beta^-}$
${}^{239}\text{Pu}$	$2.44 \times 10^4$ 年	ウラン鉱物	${}^{238}\text{U}(n, \gamma){}^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-}$

### 3.5 消滅放射性核種

- 半減期  $10^7 \sim 10^8$  [y] の核種について、その可能性が調べられている。  
 例： ${}^{129}\text{I}(\beta^-, 1.6 \times 10^7 [\text{y}])$ ,  ${}^{236}\text{U}(\alpha, 2.4 \times 10^7 [\text{y}])$ ,  ${}^{244}\text{Pu}(\alpha, 8 \times 10^7 [\text{y}])$   
 ${}^{146}\text{Sm}(\alpha, 5 \times 10^7 [\text{y}])$ ,  ${}^{247}\text{Cm}(\alpha, 1.6 \times 10^7 [\text{y}])$ ,  ${}^{205}\text{Pb}(\text{EC}, 3 \times 10^7 [\text{y}])$
- 壊変生成物の元素（例： ${}^{129}\text{Xe} \leftarrow {}^{129}\text{I}$ ,  ${}^{142}\text{Nd} \leftarrow {}^{146}\text{Sm}$ ）の同位体組成を調べ、消滅核種が壊変して加えられた核種が多くなっているか否か、等
- ${}^{129}\text{I}$  と  ${}^{244}\text{Pu}$  について、かつて存在していたことを示す痕跡が見出されている。  
 ${}^{129}\text{I}$  : 通則ならば  ${}^{129}\text{I}$  の存在率は 6% 以下  
 → 実測 26%、差 20% は、 ${}^{129}\text{I}$  の壊変で二次的に増加。

## 4 放射線と物質との相互作用

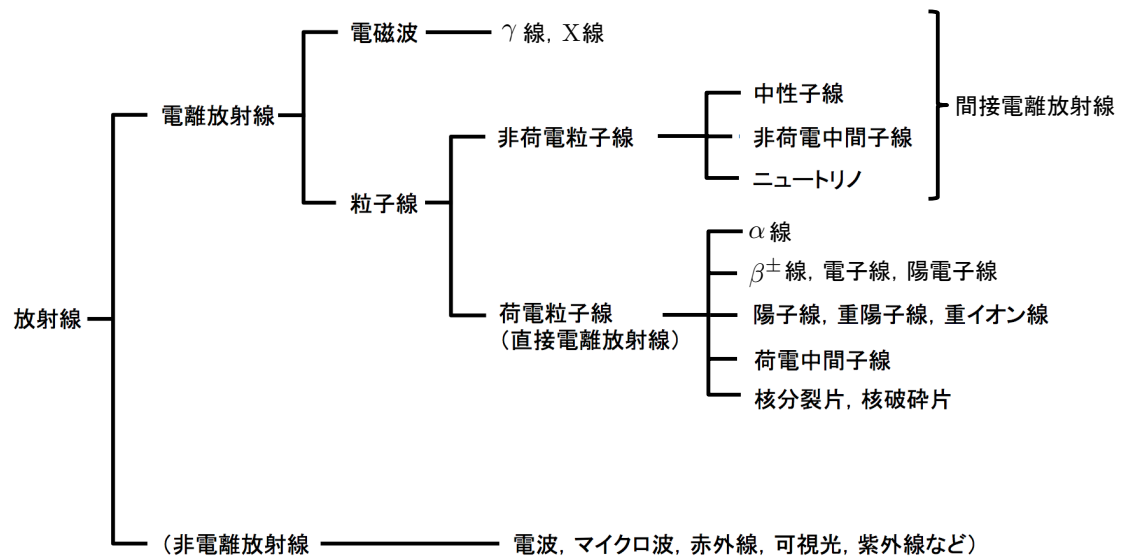
放射線のエネルギー：数十[eV]以上

これは、

イオン化エネルギー	:	< 15 [eV]
化学結合のエネルギー	:	1 ~ 5 [eV]

と比較して大きい。

→イオン化（電離）や化学結合を切断。“電離放射線”と呼ばれることもある。



放射線の種類



#### 4.1 相互作用の概要

##### 放射線の吸収プロセス概要

断面積( $\sigma$ )は約1MeVの放射線で $Z=20$ の物質に対するオーダー)

放射線	反応相手、場	反応の型	断面積 $\sigma$ (バーン)	プロセス名
陽子、 重イオン	軌道電子	原子励起と電離によるエネルギー損失	$\geq 100000$	イオン化、(原子) 励起
		弾性散乱	$\leq 10$	原子核散乱
	原子核	非弾性散乱	$\leq 1$	原子核 (クーロン) 励起
		粒子捕獲、複合核生成	$\leq 0.1$	原子核変換
電子、 陽電子、 ベータ線	起動電子	原子励起と電離によるエネルギー損失	$\geq 100$	イオン化、(原子) 励起
		低エネルギー陽電子の消滅、2-3光子の生成	100%	陽電子消滅
	核の電場	粒子はエネルギー損失を伴い散乱、 $h\nu$ の連続放出	$\geq 1$	制動放射
フォトン	軌道電子の場	$\gamma$ 線がエネルギー損失なしに散乱	$\leq 0.01$	コヒーレント散乱
	自由 (外側) 電子	$\gamma$ 線がエネルギー損失して散乱、電離	$\leq 10$	コンプトン効果
	結合 (内側) 電子	$\gamma$ 線が完全に吸収、1電子はじき出し		光電効果
	核力の場	$\gamma$ 線消滅、陽電子-電子対生成 ( $E(\gamma) > 1.02\text{MeV}$ )		対生成
	原子核	$\gamma$ 線がエネルギー損失なしに散乱	$\leq 0.001$	メスバウアー効果
		$\gamma$ 線がエネルギー損失して散乱		核励起
		$\gamma$ 線が原子核に吸収、核変換 ( $E(\gamma) > 5\text{MeV}$ )		光核効果
中性子	原子核	中性子がエネルギー損失して散乱	$\leq 10$	中性子減速
		中性子捕獲、核変換	$\leq 10000$	中性子捕獲

バーン :  $E(-24)\text{cm}^2$

反応率 (個/cm<sup>3</sup>sec) = フラックス (個/cm<sup>2</sup>sec)  $\times \sigma$  (cm<sup>2</sup>)  $\times$  数密度 (個/cm<sup>3</sup>)

表 4 放射線の吸収プロセス [2]表 6-1 より作成

- 荷電粒子との相互作用の確率は、核反応の確率よりかなり大きい。  
中性子は電氣的に中性→原子核との衝突が必要。
- 飛程 (range)
  - 電子、陽子、重イオンのような荷電粒子の場合、 $\phi/\phi_0$ はある距離でゼロになる。  
→飛程が明確。
  - 中性子や $\gamma$ 線では、最大飛程を特定できない。吸収されるまでに、1～数回、吸収体と相互作用する。

#### 4.2 $\gamma$ 線と物質との相互作用

- $\gamma$ 線と X 線
  - $\gamma$ 線：電磁波。核のエネルギー準位の変化に伴って放出。
  - X 線：電磁波。核外電子のエネルギー準位の緩和に伴って放出。 $\gamma$ 線よりもエネルギーの小さいものが多い。
- $\gamma$ 線の波長 ( $\lambda$ )、振動数 ( $\nu$ )、エネルギー ( $E$ )、

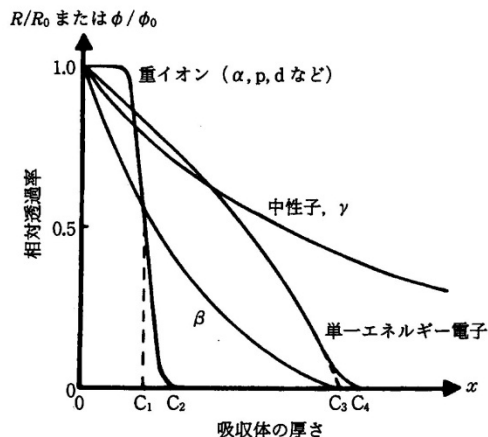


図 1 吸収体の厚さ $x$ の関数として示した相対透過率 ( $\phi/\phi_0$  (または  $R/R_0$ )) 曲線。 $C_1$  と  $C_3$  は平均飛程。 $C_2$  と  $C_4$  は最大飛程。 [2]

運動量（p）の関係

$$E = h\nu, \quad E[\text{Mev}] = 0.0124/\lambda[\text{\AA}]$$

$$p = h\nu/c = h/\lambda$$

- $\gamma$  線は電荷も静止質量ももたないことより、吸収体の構成原子と長い距離にわたって相互作用を起こす確率が小さい。ある一定の距離内に生成されたイオン対の数は、同じエネルギーの  $\beta$  粒子により生成されたイオン対の数の 1～10% 程度。

（例）1[MeV]の  $\gamma$  線は、空気 1cm あたりおよそ 1 個のイオン対を生成するのみ。

→イオン化は事実上、最初に生成した高エネルギーの  $e^-$ ,  $e^+$  の反応により起こる二次的なものがほとんど。

- 減弱係数（吸収係数）

多数回の衝突によりエネルギーを失う重粒子や電子とは異なり、 $\gamma$  線は 1 回あるいは数回の相互作用で完全に止まる。

吸収体が薄いとき、 $\gamma$  線の減衰は、次のように表される。

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

$\mu$  : (全) 減弱係数 (attenuation coefficient)

厚さ  $x$  が [ $m$ ] のとき、 $\mu$  は [ $m^{-1}$ ] (線減弱係数)

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} : \text{質量減弱係数 } [\text{cm}^2/\text{g}]$$

$$\mu = \mu_{\text{コヒーレント散乱}} + \mu_{\text{光電効果}} + \mu_{\text{コンプトン散乱}} + \mu_{\text{電子対生成}}$$

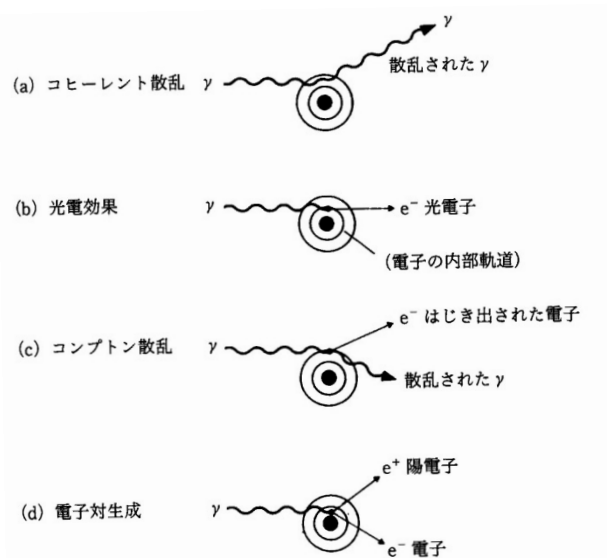


図 2  $\gamma$  線の相互作用 [2]

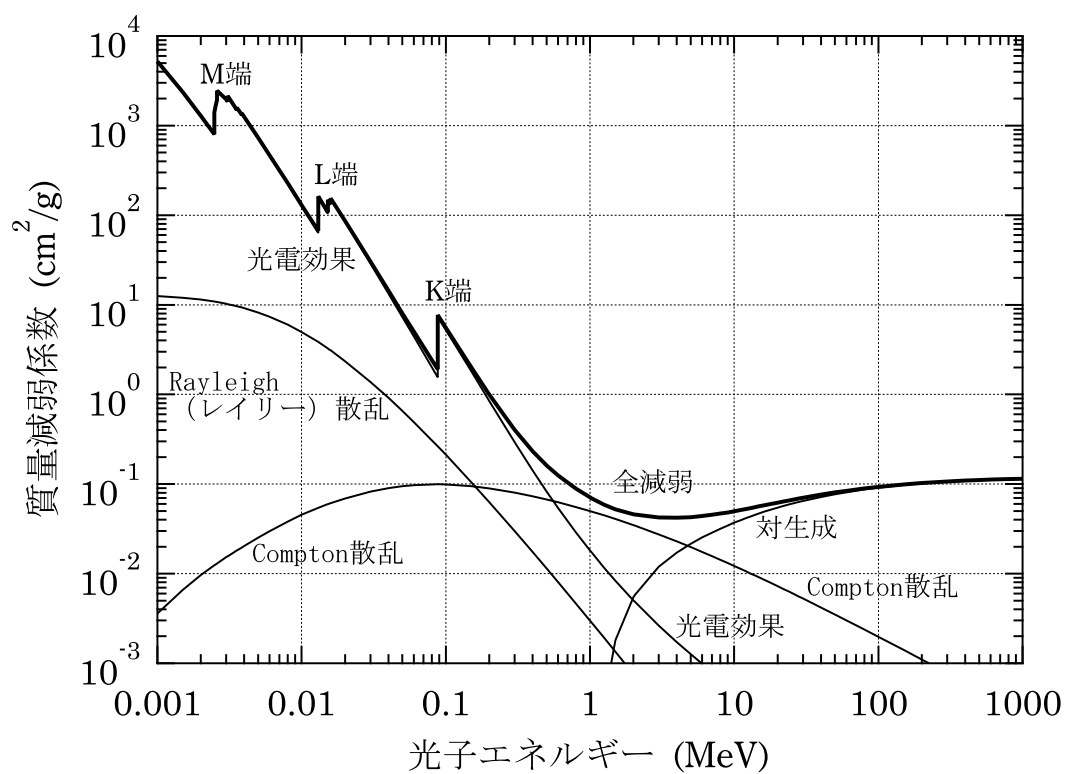


図 3 鉛に対する光子の質量減弱係数

➤ コヒーレント散乱（レイリー散乱）

$\gamma$  線は吸収され、ただちに原子からエネルギー一定のまま、別の角度に放出される。

コヒーレント散乱の確率は、吸収体の原子番号の平方とともに増加し、 $\gamma$  線のエネルギーとともに減少する。

➤ 光電効果

- 低いエネルギーの  $\gamma$  線は、多くの場合、原子の軌道電子にそのエネルギーを与えて自らは消失する。この現象を光電効果という。

$$\text{電子の運動エネルギー } E_e = h\nu - E_B$$

（ $E_B$ ：軌道電子の結合エネルギー＝電子の電離エネルギー）

- 光電効果は一種の共鳴現象で、入射  $\gamma$  線のエネルギーが電離エネルギー  $E_B$  に近いとき（ただし、 $h\nu > E_B$  において）起こりやすい。
- 入射  $\gamma$  線と放出された電子だけの系では、エネルギー保存と運動量保存を両立させることができないため、原子核が運動量の一部をもらう必要がある。原子核に強く結びついている電子（K 電子）がもっとも光電効果によって放出されやすい。
- 入射  $\gamma$  線のエネルギーが K 殻電子の結合エネルギーより小さい場合には、L、M 殻などの電子が放出される。

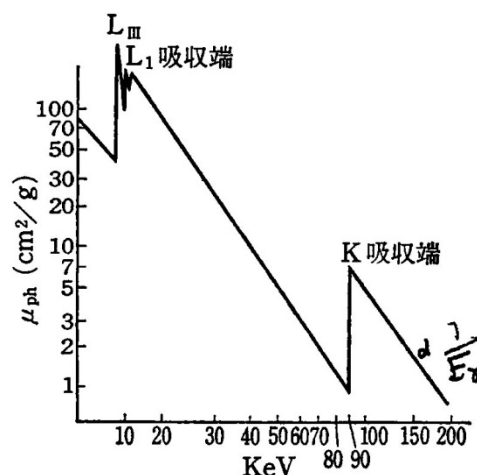


図 4 鉛の光電効果による吸収係数 [1]

≡二問題

光電効果のあとにどのような電子放出現象があるか

➤ コンプトン効果（散乱）

- 軌道電子の結合エネルギーよりはるかに大きいエネルギーの  $\gamma$  線が電子と衝突すると  $\gamma$  線のエネルギーの一部を電子に与え、 $\gamma$  線は残りのエネルギーに相当するエネルギーで散乱される。
- $\gamma$  線を粒子と考えて、電子との弾性衝突を力学的に取り扱うことから導き出される。

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta)$$

$m_0$  : 電子の静止質量

$$\cot \phi = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{1}{\sin \theta} - \cot \theta$$

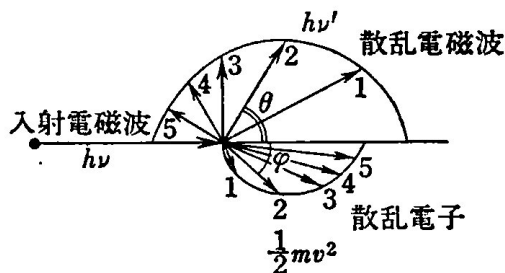
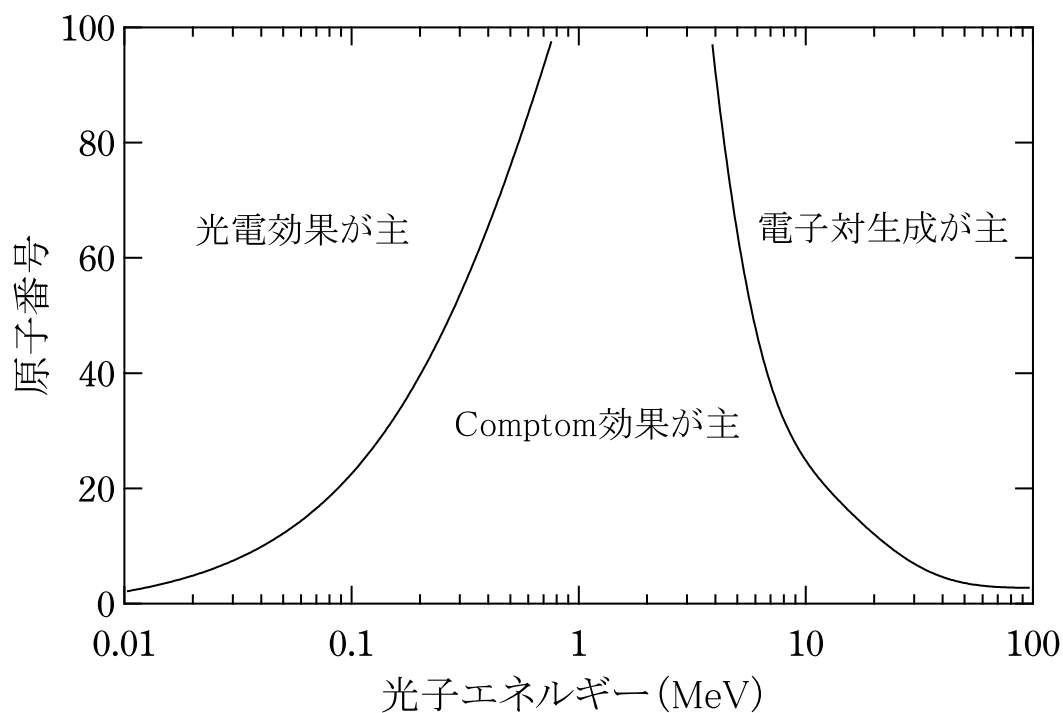


図 5 コンプトン散乱による散乱方向とエネルギー [1]

➤ 電子対生成

- 1.02[MeV] ( $2 \times m_e c^2 = 2 \times 0.511[\text{eV}]$ ) 以上の  $\gamma$  線は、原子核の近くで陽電子と（陰）電子を作って自分自身は完全に消滅。
- 高エネルギーの  $\gamma$  線の吸収の主体
- 入射  $\gamma$  線の運動量の一部を受け取り、また電子対の生成には核の近くの電場が重要な役割をしている。



光子と物質の 3 つの相互作用のそれぞれが主となる領域

### 4.3 $\beta$ 線と物質との相互作用

静止質量

$$m_0 = 9.1091 \times 10^{-28} [\text{g}]$$

質量

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

電荷

$$e = 1.602 \times 10^{-19} [\text{C}]$$

運動エネルギー

$$T = mc^2 - m_0c^2$$

加速された電子は、

- ① 核から放射される  $\beta$  線
  - ②  $\gamma$  線による光電効果
  - ③  $\gamma$  線によるコンプトン散乱
  - ④  $\gamma$  線による電子対生成
  - ⑤  $\gamma$  壊変に伴う内部転換電子
  - ⑥ 加速器による発生

などで作られる。

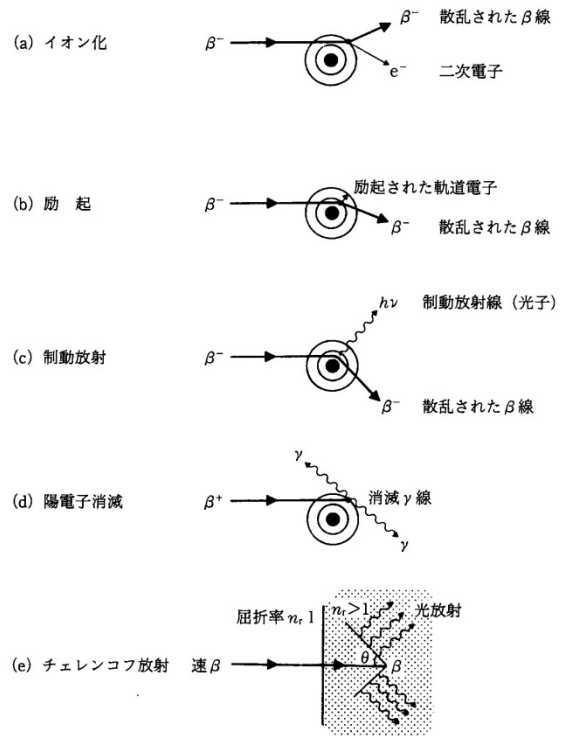


図 7  $\beta$  粒子吸収における五つの過程 [2]

➤ イオン化、励起

□ 加速電子が物質中を通過するとき、原子との電氣的な相互作用によって軌道電子のエネルギー準位をあげる（励起）、または、原子から飛び出させて電離（イオン化）

非弾性衝突

□  $\beta$  線がその進路に沿って何個のイオン対を作るかが重要。

→  $\beta$  線が単位長さ進行したとき、電離作用で失うエネルギー ( $F$ ) に比例。

1 個のイオン対を作るために消費するエネルギー  $\epsilon$  により、単位長さあたり生成するイオン対の数は  $F/\epsilon$ 。

$F$  : 制動能 (stopping power)

$$\propto (\text{物質中の電子密度}[n/cc]), (\text{電子の速度})^{-2}$$

➤ 制動放射 (bremsstrahlung)

□ 電子の速度が光速に近くなると、原子核の近くの強い電場を通過するとき、制動を受けて電磁波を放出してエネルギーを消費する。

□ 制動放射による  $\beta$  線のエネルギー消費量は、吸収物質の原子番号  $Z$  の 2 乗と、 $\beta$  線のエネルギー  $E$  の積に比例する。

□ イオン化で消費する  $\beta$  線のエネルギーを  $\Delta E_{\text{ion}}$  とすると、制動放射で失うエネルギー  $\Delta E_{\text{rad}}$  は、次のように表される。

$$\Delta E_{\text{rad}} \cong \Delta E_{\text{ion}} \frac{ZE}{800} \quad E: \beta \text{ 線のエネルギー [MeV]}$$

□  $\beta$  線が外に出ないように遮蔽しても、制動放射による電磁波が外部に出ることがある。

➤ 散乱

□  $\beta$  線が物質中を通過するとき、もっとも数多く行われる相互作用。原子核との弾性衝突。

□ この場合には  $\beta$  線のエネルギーに変化がなく、進行方向が変化する。

□ 1 回の弾性衝突で散乱される角度は一般に小さい。しかし、多数回の衝突では、短距離でも大きな屈曲をうける。

表 5  $\beta$  線が気体中でイオン対 1 個をつくるため  
消費するエネルギー  $\epsilon$  [1]

気体の種類	エネルギー消費量 $\epsilon$ (eV)	気体の種類	エネルギー消費量 $\epsilon$ (eV)
水 素	<u>36</u>	キセノン	20.8
ヘリウム	27.8	窒 素	35.3
ネオン	27.4	酸 素	32.0
アルゴン	25.4	空 気	<u>32.3</u>
クリプトン	22.8	メタン	30.0

➤ 吸収と飛程

- 一様なエネルギー（線スペクトル）の電子線の時（図 8）

$$R_p \text{ (実用飛程, [g/cm}^2\text{)]} = 0.526E - 0.094$$

E : 入射電子の運動エネルギー[MeV]

$R_p$  : [g/cm<sup>2</sup>]

一様なエネルギーの電子線でも、物質中を通過するとき、一定の深さまで入ると停止するというわけではない。

→電子と原子核との衝突で失うエネルギーが広い範囲にわたっていることと、散乱によって実際に走った長さと、通過した吸収板の厚さが異なるため。

- 実際に原子核から放出された  $\beta$  線は連続スペクトルのため、 $\beta$  線の吸収の現象はさらに複雑である。

- 近似的には  $I = I_0 e^{-\mu \rho x}$

$$\mu[\text{g/cm}^2] \cong 17.0 E_{\text{max}}^{-1.48}$$

$\beta$  線の強度が半減する厚さ  $d_{1/2}[\text{g/cm}^2]$  を用いると

$$\mu = \frac{\ln 2}{d_{1/2}} = \frac{0.693}{d_{1/2}}$$

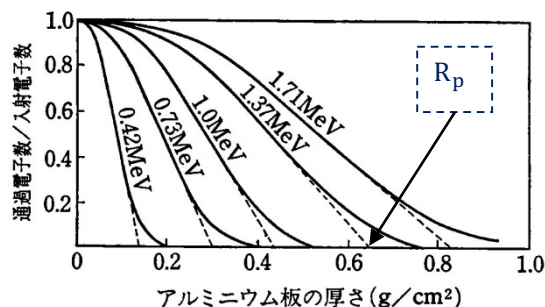
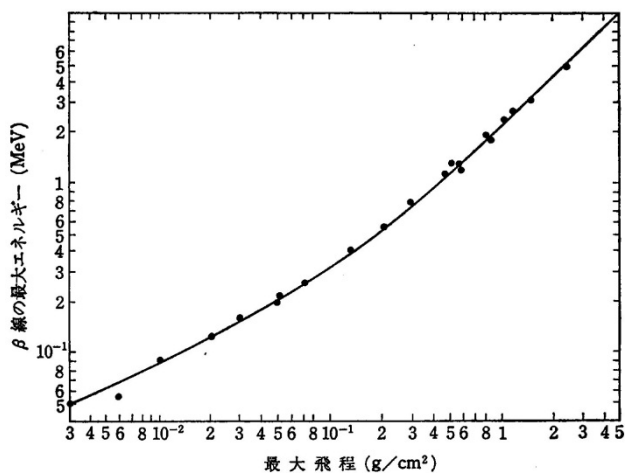
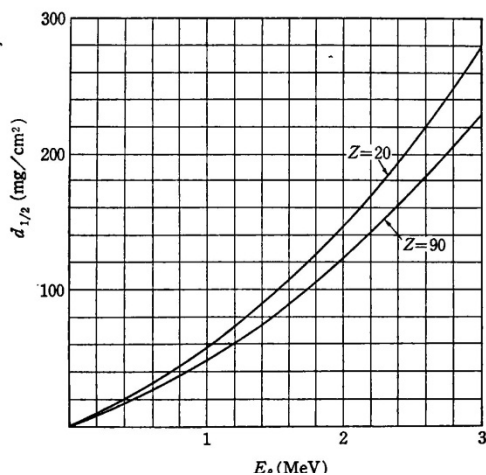
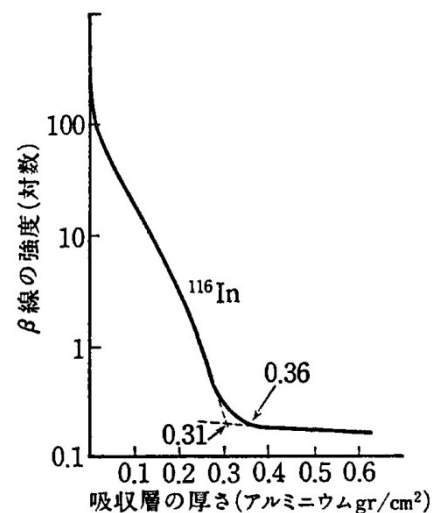


図 8 アルミニウムによる一様なエネルギーの電子線の吸収 [1]





- 図の吸収曲線で  $I=0$  に外挿した吸収体の厚さ：最大飛程（ $\sim \beta$  線の最大エネルギーに近いものが吸収体の中を直線に近い進路で進んだときの到達距離）

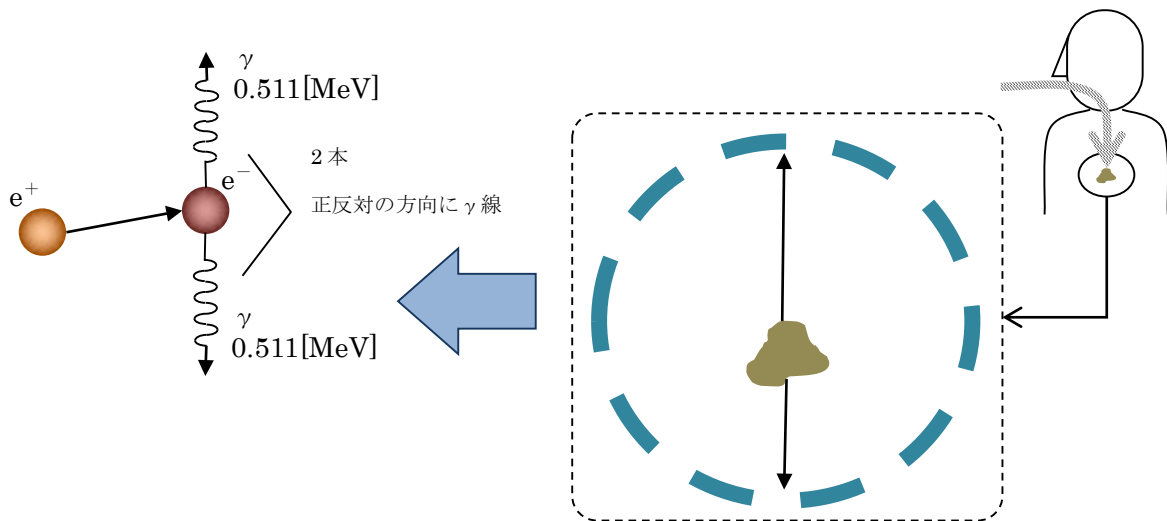
実験式

$$E_{\max} > 0.7[\text{MeV}] \quad : \quad R(\text{g}/\text{cm}^2) = 0.543E_{\max} - 0.160$$

$$0.05 < E_{\max} < 0.15[\text{MeV}] \quad : \quad R(\text{g}/\text{cm}^2) = 0.667E_{\max}^{1.66}$$

➤ 陽電子と物質との相互作用

- 陽電子：ポジトロンともいう。 $e^+$
- 制動能（stopping power）、電離、吸収、飛程については陰電子の場合とほとんど同じである。
- 陽電子は陰電子と合体して、物質消滅(annihilation)を行い、2 個の等しいエネルギー（ $m_0c^2 = 0.511[\text{MeV}]$ ）の光量子を正反対の方向に出す。消滅放射線、陽電子消滅という。
- 陽電子が消滅するまでの平均時間は、通常  $10^{-10}$ [秒]程度。 $\beta$  線が放出されてから電子が熱平衡に至るまでの時間は  $5 \times 10^{-12}$ [秒]以下であるから、陽電子の消滅は、 $e^+$  の運動が熱平衡になってから起こるものと考えられる。



- PET（positron emission tomography：ポジトロン断層撮影）

陽電子を放出して崩壊する放射性核種（例えば、 $^{22}\text{Na}$

$$\left[ \begin{array}{l} T_{1/2} = 2.602[\text{y}], \beta^+ 90.6\%, \text{EC } 9.4\% \\ \beta^+ 0.545 [\text{MeV}](90.4) , \gamma 1.27[\text{MeV}] \end{array} \right]$$

を用いて非侵襲的に生体機能の断層画像を得る方法。

2 本の  $\gamma$  線を同時計測し、CT（computer tomography：計算機断層像法）の原理を応用して、陽電子の消滅する位置を示す。

# □ ポジトロニウム

物質の種類によっては、陽電子と陰電子が結合して、水素原子と同様な原子“ポジトロニウム”を作る可能性がある。このとき、陰陽電子のスピンが平行のものは、逆平行のものより消滅するまでの時間が  $10^3$  倍長い。

→ポジトロニウムが安定に存在しうるような媒質中では、できたポジトロニウムのスピンが逆平行のものは、約  $10^{-10}$ [秒]で消滅し、平行のものは  $10^{-7}$ [秒]程度の寿命を持つ。

→スピン平行のものを、オルトポジトロニウムという。周辺の分子などとの衝突や化学反応により電子をやりとりしてパラポジトロニウムや、裸の陽電子になるため、周辺の化学環境により寿命が影響される。ポジトロニウムの寿命を測定すれば、周辺の物質の電子状態や固相での相転移、格子欠陥などの状態を調べる手がかりを得られる。(例えば、 $^{22}\text{Na}$ では、 $1.27[\text{MeV}]$ の  $\gamma$  線をスタート信号として、消滅  $\gamma$  線をストップ信号とする。)

## ➤ チェレンコフ放射

物質中での光の速度  $c'$  は、その物質の屈折率  $n_r$  に依存

$$c' = c/n_r \quad \text{水中では } n_r = 1.33$$

$0.4[\text{MeV}]$ 以上のエネルギーを持つ  $\beta$  粒子は、水中では光よりも速く動く。

→粒子の速度  $v_p$  が光速  $c'$  よりも大きいとき、電磁放射線が粒子の運動方向を軸として円錐状に放出。 $\sin \theta = c'/v_p$

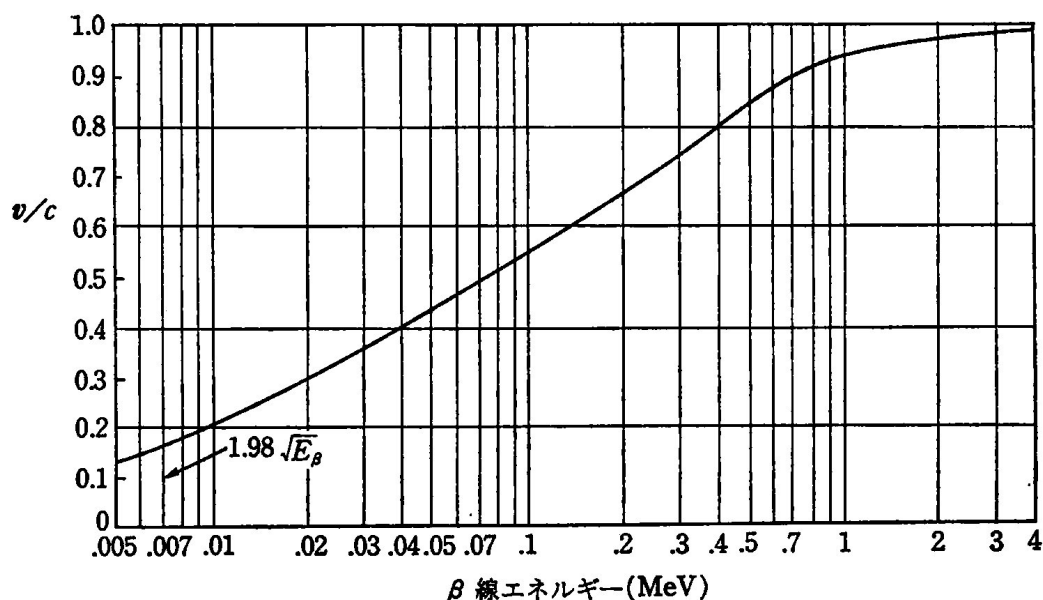


図 12  $\beta$  線のエネルギー  $E_\beta$  と  $v/c$  の関係 ( $v/c = \sqrt{1 - \left(\frac{0.511}{E_\beta + 0.511}\right)^2}$  のグラフ) [1]

#### 4.4 $\alpha$ 線と物質との相互作用（プロトンや重イオンでも同様）

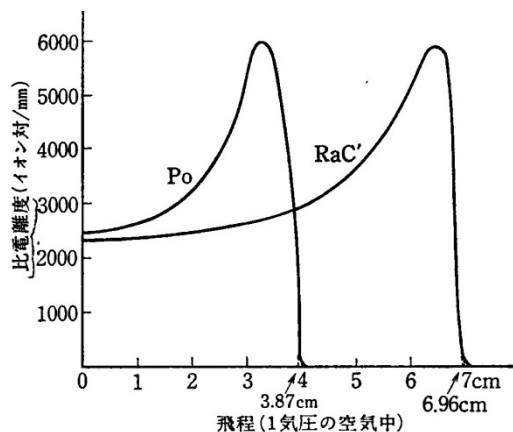
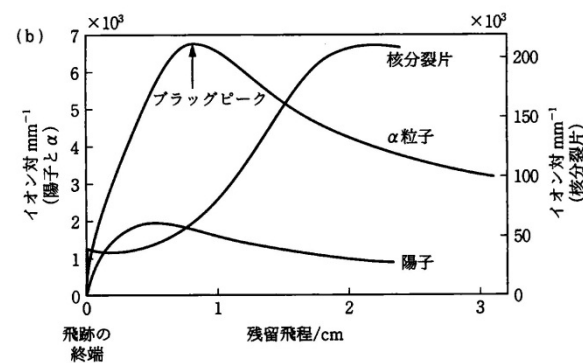
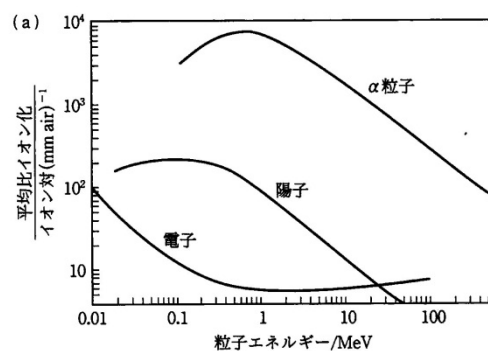
静止質量  $m_0 = 4.002604[\text{amu}]$   
 質量  $m = m_0 / \sqrt{1 - (v/c)^2}$   
 運動エネルギー  $T = 2.08 \times 10^{-18} v^2 / \sqrt{1 - (v/c)^2} [\text{MeV}]$

〔  $\alpha$  線は重いので相対論による補正項  $\sqrt{1 - (v/c)^2}$  は小さい。  
 4[MeV] の  $\alpha$  線で、0.11%、10[MeV] の  $\alpha$  線で 0.27% 〕

##### ➤ 電離

$\alpha$  線と原子との相互作用による電離は、 $\beta$  線の場合と本質的に同じ。しかし、 $\alpha$  線は電子よりはるかに重いため、1 回の相互作用で電子に与えるエネルギーは自分自身の持つエネルギーに比較して非常に小さい。 $\alpha$  線の電離作用で直接加速された電子（ $\delta$  線）は、1.8[MeV] の  $\alpha$  線で最高 1[keV]、平均 100[eV] 程度。

- $\alpha$  線は原子との相互作用で一般にはわずかのエネルギーしか失わないから、進行方向はほとんど変わらず物質中を直進する。
- 直進する  $\alpha$  線の進路に沿って作られるイオン対の数は、 $\alpha$  線のエネルギー消費量（制動能）をイオン化に費やされるエネルギー（ $\varepsilon$ ）で割ったもの。（ $\varepsilon$  は  $\beta$  線の場合とほとんど変わらない）
- 進路 1[cm] あたり生成するイオン対の数  
 = 比電離度
- 比電離度は、 $\beta$  線の場合に比べればかなり大きい。（ $\sim 10^3$ ）



- $\alpha$  線が単位長さ移動する間に電離作用で失うエネルギー＝制動能（stopping power） $F$

$$F = -\frac{dE}{dx} = \frac{2\pi Z^2 e^4}{E} \frac{m}{m_e} \frac{N}{A} Z \left[ \ln\left(\frac{E}{Z}\right) + \ln\left[\frac{4m_e}{I_0 m}\right] \right]$$

$E$  :  $\alpha$  線のエネルギー、 $m$  :  $\alpha$  線の質量、 $\rho, A, Z$  : 吸収体の密度、原子量、原子番号  
 $I$  : 平均の電離エネルギー

- $\alpha$  線の飛程

$$R = \int_0^E \frac{dE}{-dE/dx}$$

$\alpha$ 線のエネルギー[MeV]	3.0	5.0	10.0
空気[cm]	1.66	3.49	10.6
Al [mg/cm <sup>2</sup> ]	3.81	6.63	17.4

$$R = R_{\text{air}} \times \sqrt{\frac{A}{A_{\text{air}}}} \cdot \frac{\rho_{\text{air}}}{\rho}$$

(近似的に)

#### 4.5 中性子と物質との相互作用

- 中性子は電荷がないため物質との相互作用は  $\alpha$  線や  $\beta$  線とはまったく異なる。電荷を持っている粒子は、電子及び原子核とかなり遠距離から電磁氣的相互作用を強く及ぼしあうが、電荷のない中性子は原子核に極度に近づいて（衝突）相互作用する。

→原子核との弾性衝突による散乱と原子核反応

- 中性子の弾性衝突と中性子の減速

1 回の衝突で失う最大のエネルギーは、 $4AE_0/(A+1)^2$

→軽い元素ほど効果的にエネルギーを失う。

例)

プロトン (H) との衝突では、最高 100%、1 回平均約 70%のエネルギーが中性子から失われる。このとき、物質中のプロトンは、中性子から大きなエネルギーを受け取るため、それ自身が高エネルギーの荷電粒子となって 2 次的な電離を引き起こす（反跳粒子、recoiled proton）。

- 核反応

中性子はエネルギーに応じて、また、相手の原子核に応じて、様々な核反応を引き起こす。

例)

$(n, \gamma)$  反応                      中性子捕獲

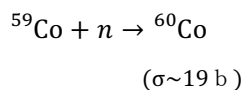
$(n, f)$  反応                      核分裂反応

$(n, 2n)$  反応、他

- $(n, \gamma)$  反応

熱中性子は原子核への捕獲が比較的大きい。

例)



$^{60}\text{Co} \cdots T_{1/2} = 5.26[\text{y}]$

$\beta^-$  壊変、 $\gamma$  (1.33[MeV]、1.17[MeV])

放射化反応、放射化分析：

微量物質の分析や中性子束の測定に用いられる。

➤  $(n, f)$  反応（核分裂）

$^{233}\text{U}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、 $^{239}\text{Pu}$ ・・・熱中性子で核分裂

□ 反応の程度を表す指標：断面積  $\sigma(\text{b})$ （b：バーン、 $10^{-24}[\text{cm}^2]$ ）

反応する原子核数 $[\text{個}/\text{cm}^3 \cdot \text{sec}]$

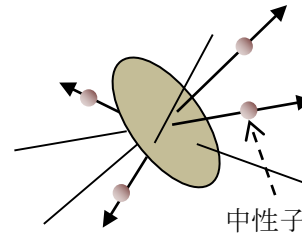
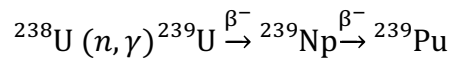
$$= \sigma N \times \phi$$

$\sigma$  :  $[\text{cm}^2]$

$N$  : 相手の原子核の密度 $[\text{個}/\text{cm}^3]$

$\phi$  : 中性子束 $[\text{個}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec}]$

□  $^{239}\text{Pu}$  ができる反応



#### 4.6 放射線による化学反応

##### ➤ 放射線エネルギーの物質による吸収

- 放射線が物質にあたって、そのエネルギーが吸収されると、物質中に様々な化学反応が引き起こされる。放射線的作用によって生ずる反応などの化学変化を調べる学問を放射線化学（radiation chemistry）という。一方、放射化学（radiochemistry）は、放射線を出す側である放射性核種（放射性物質）の性質、挙動や放射能現象を研究対象とする。

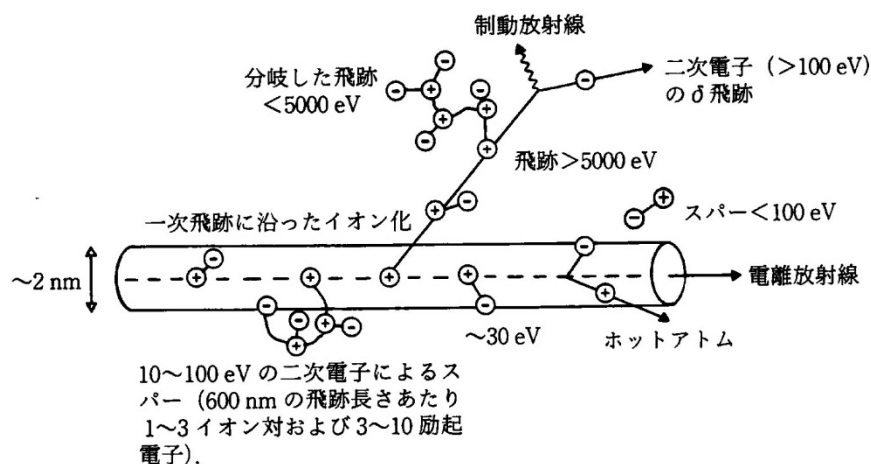


図 15 電磁放射線により固体中に生成した飛跡。飛跡に沿ったイオン対間の距離は  $\gamma$  線約 1000[nm]、高速電子では 500~1000[nm]、低速電子および  $\alpha$  粒子では約 1[nm] である。 [2]

- 放射線化学では、放射線は光や熱と同様、化学反応を誘起するためのエネルギー源である。光と比べると、エネルギーの大きさが  $10 \sim 10^6$  [eV] と広範囲で多色的、励起が増殖的、多重的（2 次電離）に起こることなど著しい違いがある。
- 物質中では、放射線のエネルギーによって、イオンや励起分子（原子）が生ずる。液相や固相での、それらの微視的な空間分布は、放射線の種類によってかなり異なる。
- 放射線的作用により飛び出した電子は、さらに 2 次的な電離 を引き起こし、およそ 100[eV] 以下になった 2 次電子は、最終的には半径 10[Å] 程度の球状の領域（スパーク）内でエネルギーを消費し、数個のイオンや励起分子を作り出す。
- $\beta^-$  線の場合には、物質中の入射電子と 2 次電子の飛跡に沿って、このようなスパークが点々と存在する。
- $\alpha$  線のように思い荷電粒子では、スパークが飛跡沿いに密接に生ずるため、互いに融合し、飛跡自体が大きな 1 つの円筒形スパークと考えられる。
- $\gamma$  線のような電磁波では、たとえば、コンプトン散乱で生じた電子の飛跡に  $\beta^-$  線と同様スパークが生成するが、次の散乱までは一般に大きく隔たっているため、スパークの生成数は、 $\beta^-$  線よりもはるかに少ない。
- このように物質中での放射線エネルギーの吸収の様子は、放射線の種類によって

も異なる。さらに同種の放射線でもエネルギーによって異なる。→放射線がある一定の物質を通過するとき、飛跡の単位長さ（1[μm]）あたりに与えるエネルギー[keV]の大きさを、線エネルギー付与（LET、linear energy transfer）という。

LET：

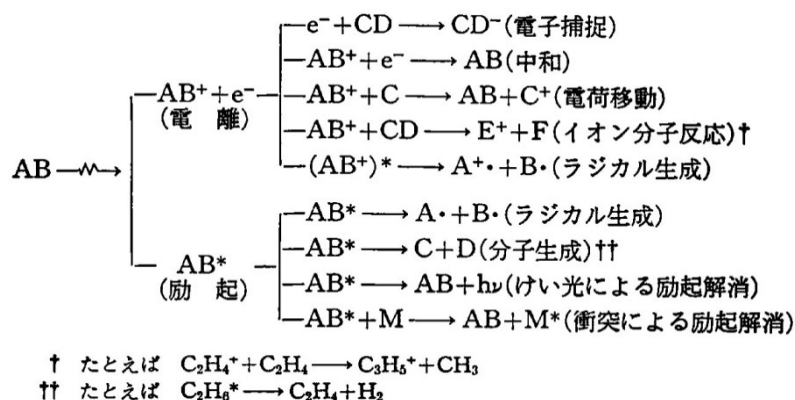
イオン化の密度を表す目安。電荷の大きい、エネルギー（速度）の小さい粒子の方が LET が大きい。

表 6 核種放射線の水中における LET [3]

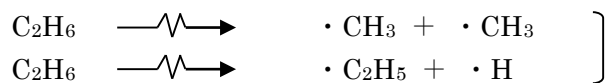
放射線(エネルギー)	水中での LET (keV μm <sup>-1</sup> )
α 線(4 MeV)	110
陽子(1 MeV)	28
陽子(10 MeV)	4.7
β <sup>-</sup> 線(0.01 MeV)	2.3
β <sup>-</sup> 線(1 MeV)	0.2
γ 線(1.1~1.3 MeV)	0.3
X 線(0.25 MeV)	3.0

➤ 放射線によって起こる反応

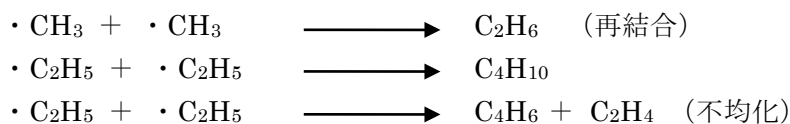
- 放射線エネルギーを吸収すると物質中で電離や励起  
→さらに引き続いて様々な反応が進む。
- AB なる分子からなる物質に放射線が当たったとき、まず起こる主な反応（素反応）  
一般の放射線化学反応は、これらの素反応が組み合わさった複雑なもの。



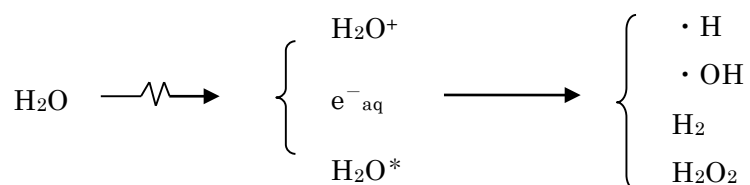
- 放射線によるラジカル（遊離基）の生成は重要な素反応によって最終的な生成物が得られる。例えばエタン  $C_2H_6$  の放射線分解では次のようになる。



生じたラジカルは、

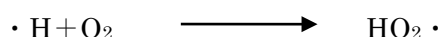


- 水溶液の放射線照射では、溶質に直接放射線があたって起こる化学変化（直接作用）よりも、溶媒である水分子の放射線分解によって生じるラジカルなどの活性化学種が溶質と 2 次的な反応（間接反応）を起こすほうがはるかに重要。
- 水の放射線分解は、酸素がないときは、



で生成した、 $\cdot H$ 、 $\cdot OH$ 、 $H_2O_2$  などが溶質とさらに反応。

酸素があるときには、



で、 $HO_2 \cdot$  が生成される。

- 固体物質に放射線があたったときにおこる変化は、イオン性結晶・絶縁体と金属・半導体で異なる。

a. イオン性結晶・絶縁体

放射線によって励起された原子・分子などが低いエネルギー状態に戻る際に、可視部の光を出すことがある（シンチレーション（蛍光））。また、放射線によって原子からたたき出された電子は、結晶内部の欠陥（空孔や不純物）に一時的にトラップされるが、結晶を加熱するとトラップから飛び出して低いエネルギー状態に移行する過程で発行する（熱ルミネセンス）。

b. 金属・半導体

放射線のエネルギーによって電子は伝導帯に上がるが、これらの電子の運動エネルギーは最終的には熱エネルギーに変わる。重粒子の放射線があたると、原子が格子点から跳ね飛ばされて欠陥ができる。→照射欠陥



#### 4.7 放射線量の単位

➤ 照射線量と吸収線量

{	照射線量 (exposure)	: 空間のある場所を通過する放射線のエネルギー量
	吸収線量 (absorbed dose)	: そこで物質に与えられるエネルギー量

➤ 照射線量の単位

光子が空気と相互作用する場合      C (クーロン) / kg

➤ 吸収線量の単位: グレイ [Gy]

1[Gy]: 物質 1[kg]あたり 1[J]のエネルギー吸収

➤ 同じ吸収線量であっても、放射線の種類、エネルギーによって、放射線の生物学的効果は異なる。

実効線量、等価線量 ([Sv] シーベルト、[J/kg])

= 放射線荷重係数 (以前は物質係数) × 吸収線量

実効線量: 全身に、      等価線量: 組織、臓器に

水中の LET 値 $\text{eV nm}^{-1}$	荷重係数 $w_R$	放射線の種類とエネルギー
0.2~35	1	光子 (X 線と $\gamma$ 線)
0.2~1.1	1	5 keV を超えるすべての電子
20	5	10 keV 以下の遅い中性子
50	20	0.1~2 MeV の中性子
	10	2~20 MeV の速中性子
	5	2 MeV を超える陽子
130	20	5 MeV 程度の $\alpha$ 粒子, 高エネルギーイオン

#### 4.8 放射線の生体に及ぼす効果

- 生体は多数の因子で有機的に支配された複雑な系であり、放射線照射の効果の現れ方も多様である。
- 生体のおよそ 70%が水分であり、生体における放射線の効果は、水の放射線分解による間接作用が大部分である。重要な生体物質の分子が、水の放射線分解生成物の活性化学種と反応して化学変化を受け、これが細胞や組織・器官、個体へと影響する。
- 確定的影響と確率的影響

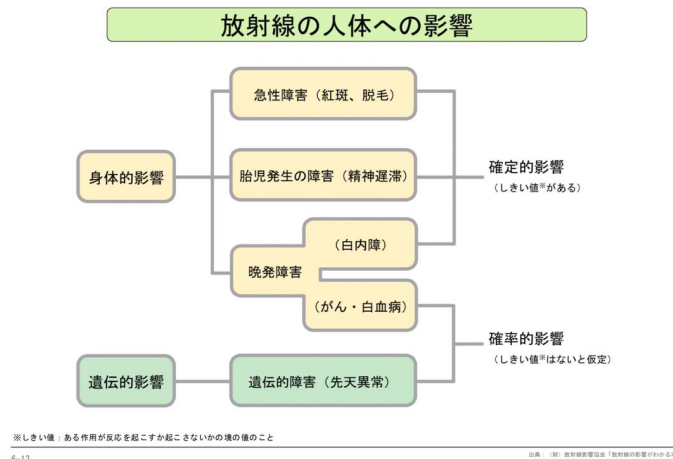


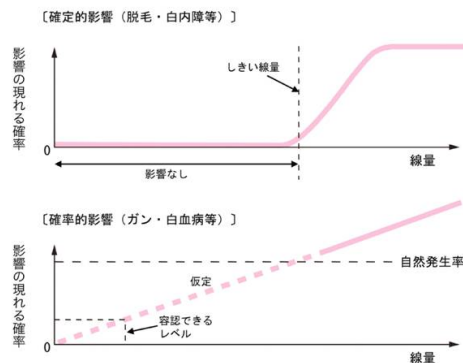
図 16 放射線の人体への影響 [4]

- 高等動物の細胞の放射線に対する感受性は、その種類や状態に左右される。増殖過程にあって細胞分裂・増殖がさかんに起こっている細胞や組織は感受性が大きく、影響を受けやすい。

#### 放射線防護の考え方

確定的影響は、しきい線量以下に抑えることで影響をなくす。

確率的影響は、しきい値※は無いと仮定し、合理的に線量を低くすることで影響の現れる確率を容認できるレベルにする。



※しきい値：ある作用が反応を起こすか起こさないかの境の値のこと

6-15

出典：「財」放射線影響協会「放射線の影響がわかる本」

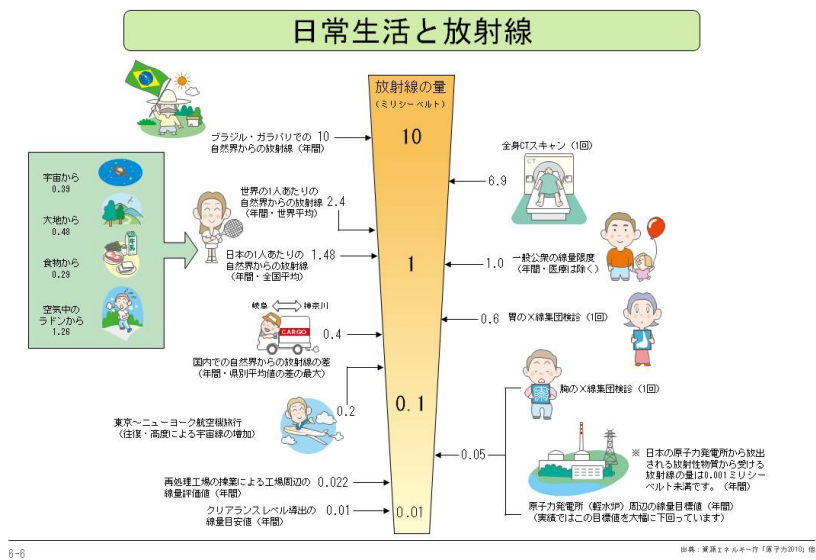


図 18 日常生活と放射線 [4]

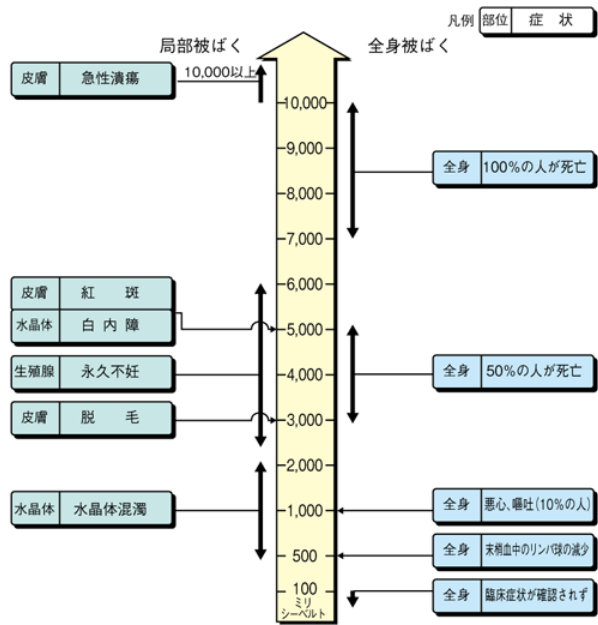


図 19 急性の放射線影響 [5]

(注) 一般の人の線量限度 1.0mSv/年、原子力発電所周辺の線量目標 0.05mSv/年

## 引用文献

---

1. 木越邦彦. 放射化学概説. 東京都：培風館, 1968.
2. ショパン, ほか. 放射化学. 東京都：丸善, 2005.
3. 富永健, 佐野博敏. 放射化学概論. 東京都：東京大学出版会, 1983.
4. 日本原子力文化振興財団. 「原子力・エネルギー」図面集. 東京都：日本原子力文化振興財団, 2011.
5. ー. 「原子力・エネルギー」図面集（2009）. 東京都：日本原子力文化振興財団, 2009.