

最新放射線安全管理学特論

# 放射線物理学

秋吉 優史

# 放射線について

## エックス線の発見

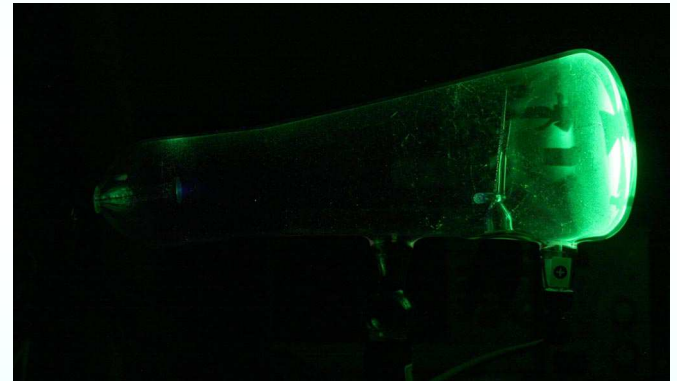
Wilhelm Konrad Röntgen

1895年放電の実験で偶然発見

1901年第1回ノーベル物理学賞受賞



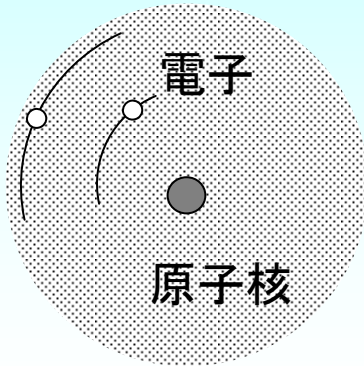
透視写真 → 診断への応用



X線を放出するクルックス管

# 原子の大きさと構造

## 原子



$\sim 10^{-10}$  m  
(1 Å)



原子を1円玉の大きさまで拡大すると...

1円玉が本州を覆うぐらいの大きさになる



$1 \times 10^{-2}$  m (1cm)

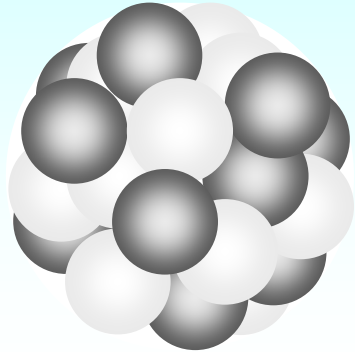
$10^8$  倍に拡大



青森-広島間 約1000km

# 原子の大きさと構造

原子核



陽子

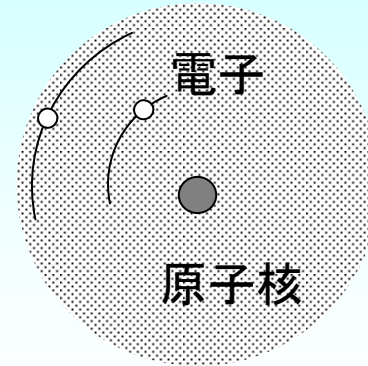


中性子

$10^{-15}$  m (fm)

$5 \times 10^{-15}$  m

原子



$\sim 10^{-10}$  m  
(1 Å)

原子核を1円玉の大きさまで  
拡大すると...

原子は東京ドームぐらいの  
大きさになる



$1 \times 10^{-2}$  m (1cm)

$2 \times 10^{12}$  倍に拡大



200m

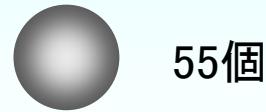
1cmの一円玉は $2 \times 10^7$  kmとなり、  
 $1.4 \times 10^6$  kmの太陽より大きくなる



# 放射性同位元素 (ラジオアイソトープ、RI)

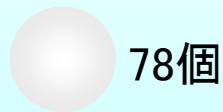
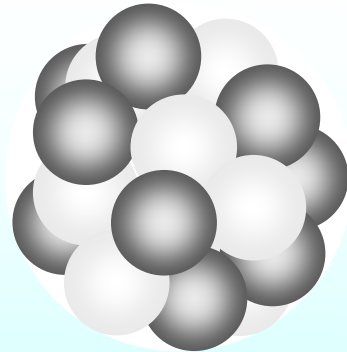
## 原子核の種類 (核種)

原子番号 55  
セシウム



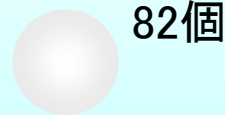
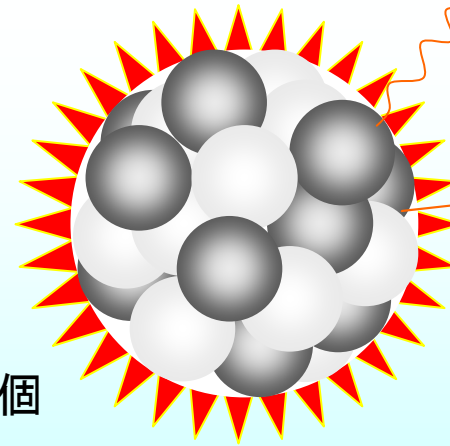
自然にある  
安定な原子核

$^{133}\text{Cs}$



原子炉で作られた  
不安定な原子核

$^{137}\text{Cs}$



ガンマ線

ベータ線

中性子79個の $^{134}\text{Cs}$ も放射性だが、 $\beta$ 線・ $\gamma$ 線のエネルギー、本数も寿命も異なる全くの別物

# 放射性物質と放射能

放射能: 放射線をだす能力  
(Radioactivity) という意味と、  
放射性物質 (Radioactive  
material) という意味の両方がある

単位 Bq ベクレル

一秒間に崩壊する原子核の数  
(放出される放射線の数ではない)

参考: 数10 gの物質中に約 $10^{24}$ 個の原子

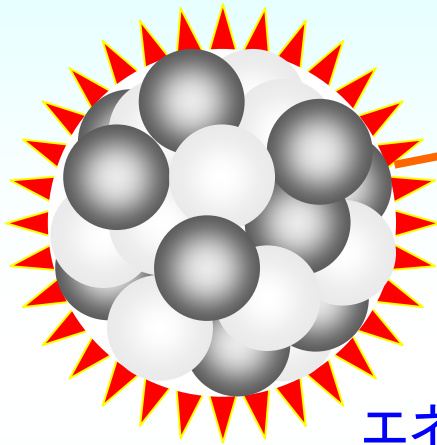


放射線

放射性物質  
(原子の集団)

# 放射線の正体

不安定な原子核

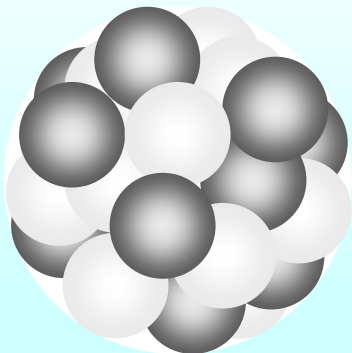


放射線

$^{60}\text{Co}$

エネルギーをはき出して  
安定に

安定な原子核へ



$^{60}\text{Ni}$

別の元素に変化する!

錬金術師が煮ても焼いても変化しなかった原子が変化する

放射線(エネルギーの運び手)の種類



アルファ線



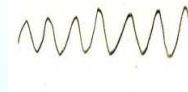
電子



ベータ線



中性子線



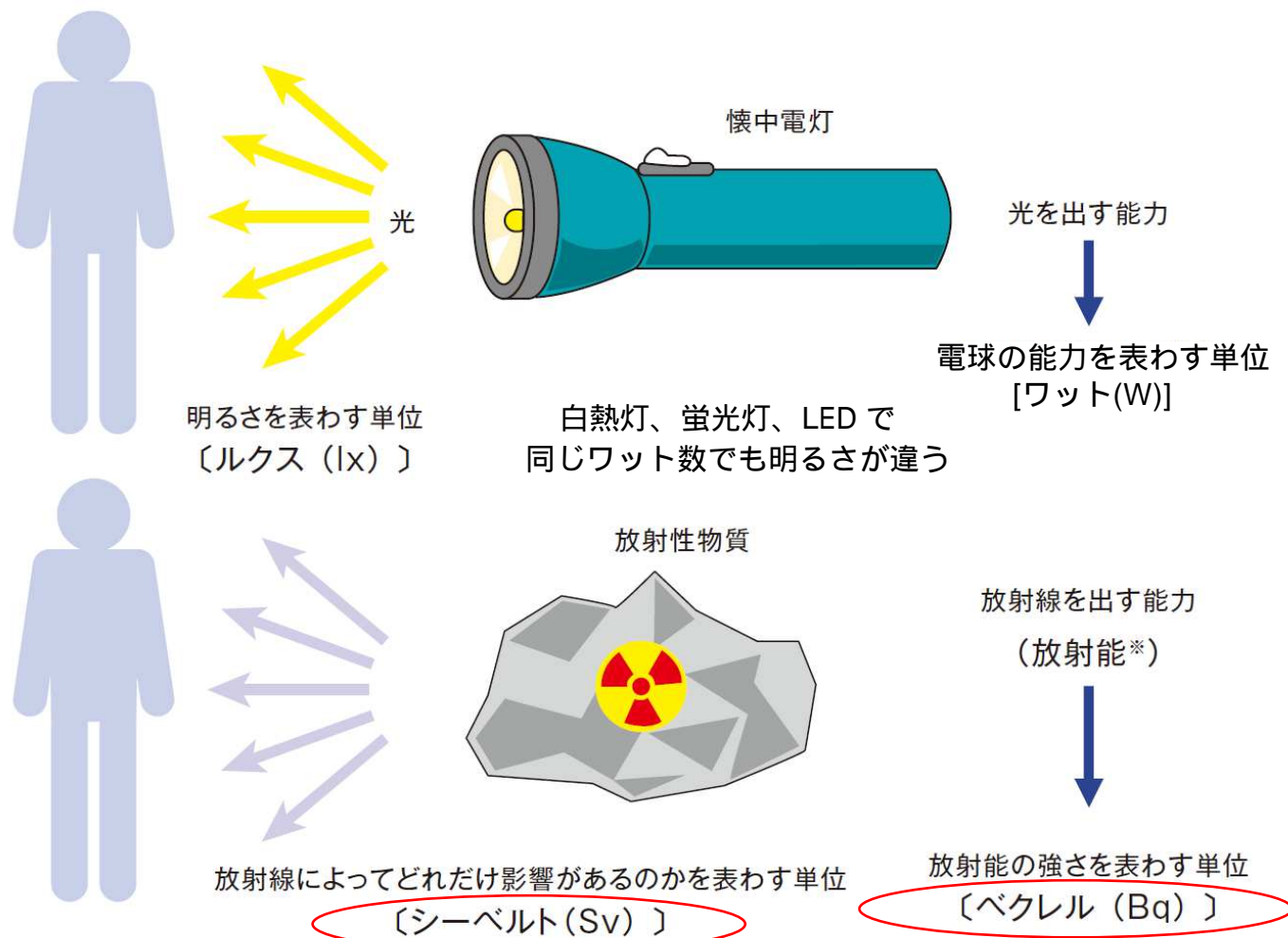
電磁波



エックス線  
ガンマ線

加速器などでも作れるが、  
 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線は原子核  
内起因の物だけをそう呼ぶ

# 放射能と放射線

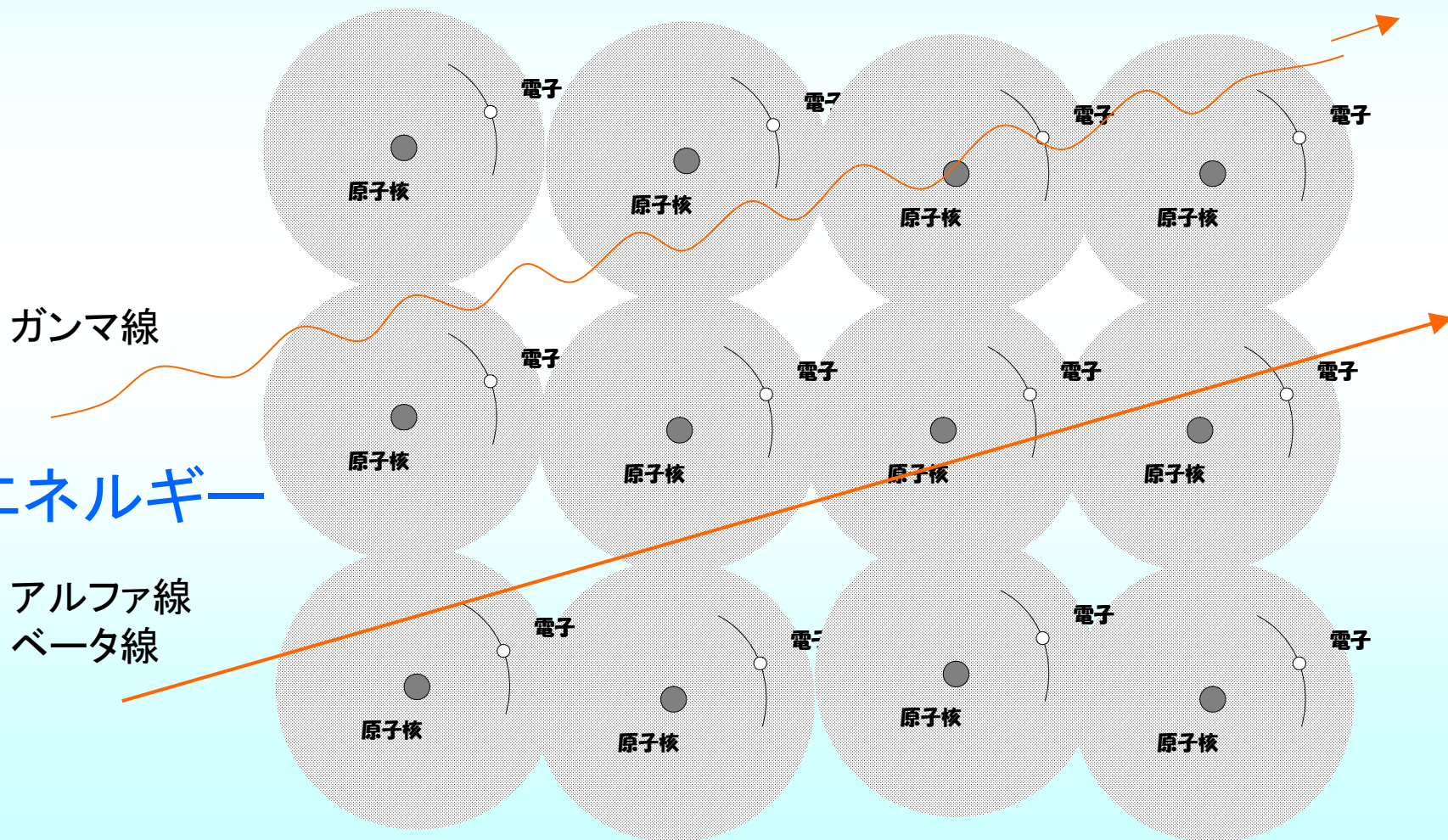


※放射能を持つ物質(放射性物質)のことを指して用いられる場合もある

核種によって同じベクレル数でも  
人体に対する影響が違う

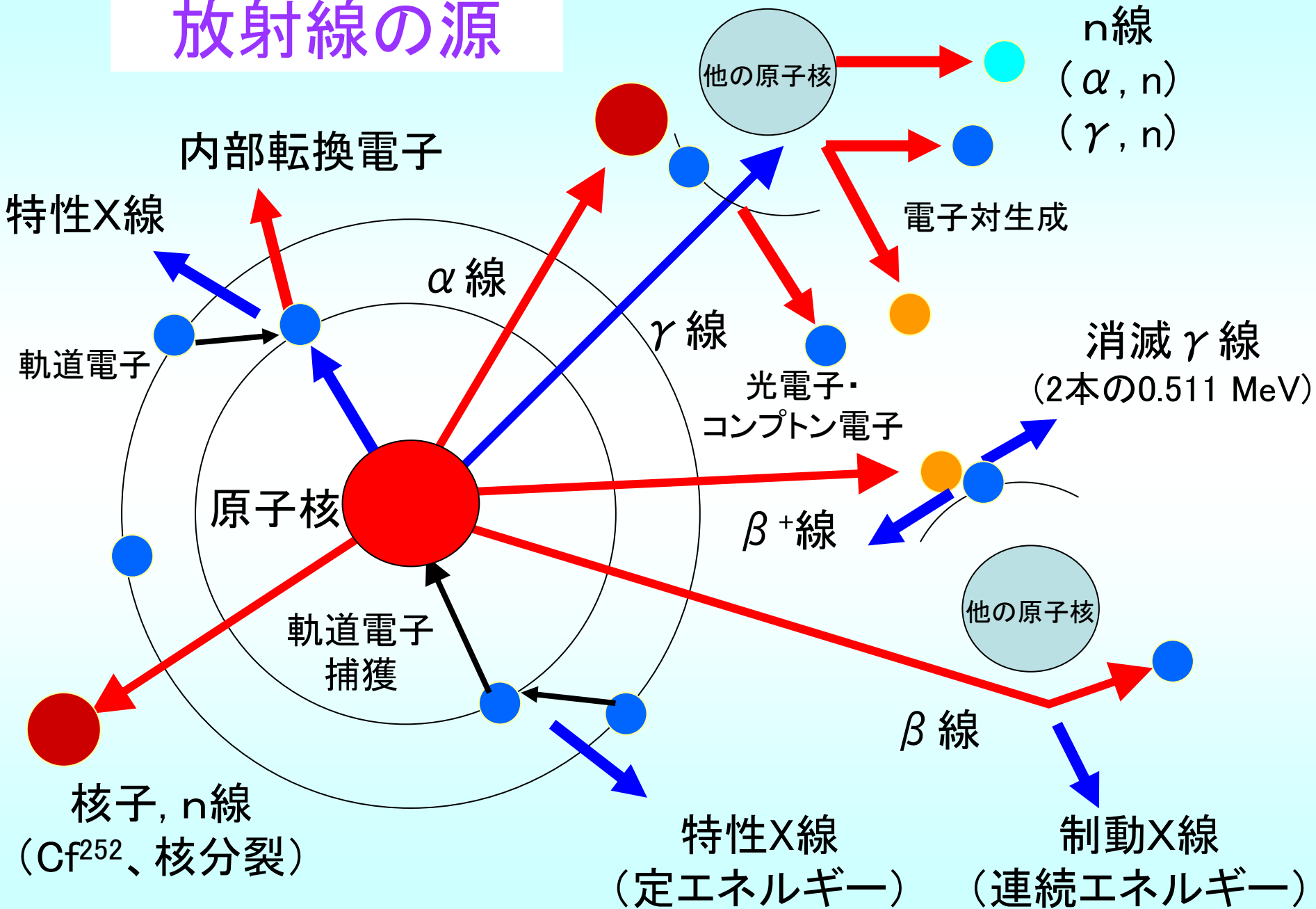
# 放射線の作用

ミクロな視点で





# 放射線の源



# 放射能の単位

1ベクレル(Bq) : 1秒間に1壊変

1 Ci =  $3.7 \times 10^{10}$  Bq (= 37 GBq)

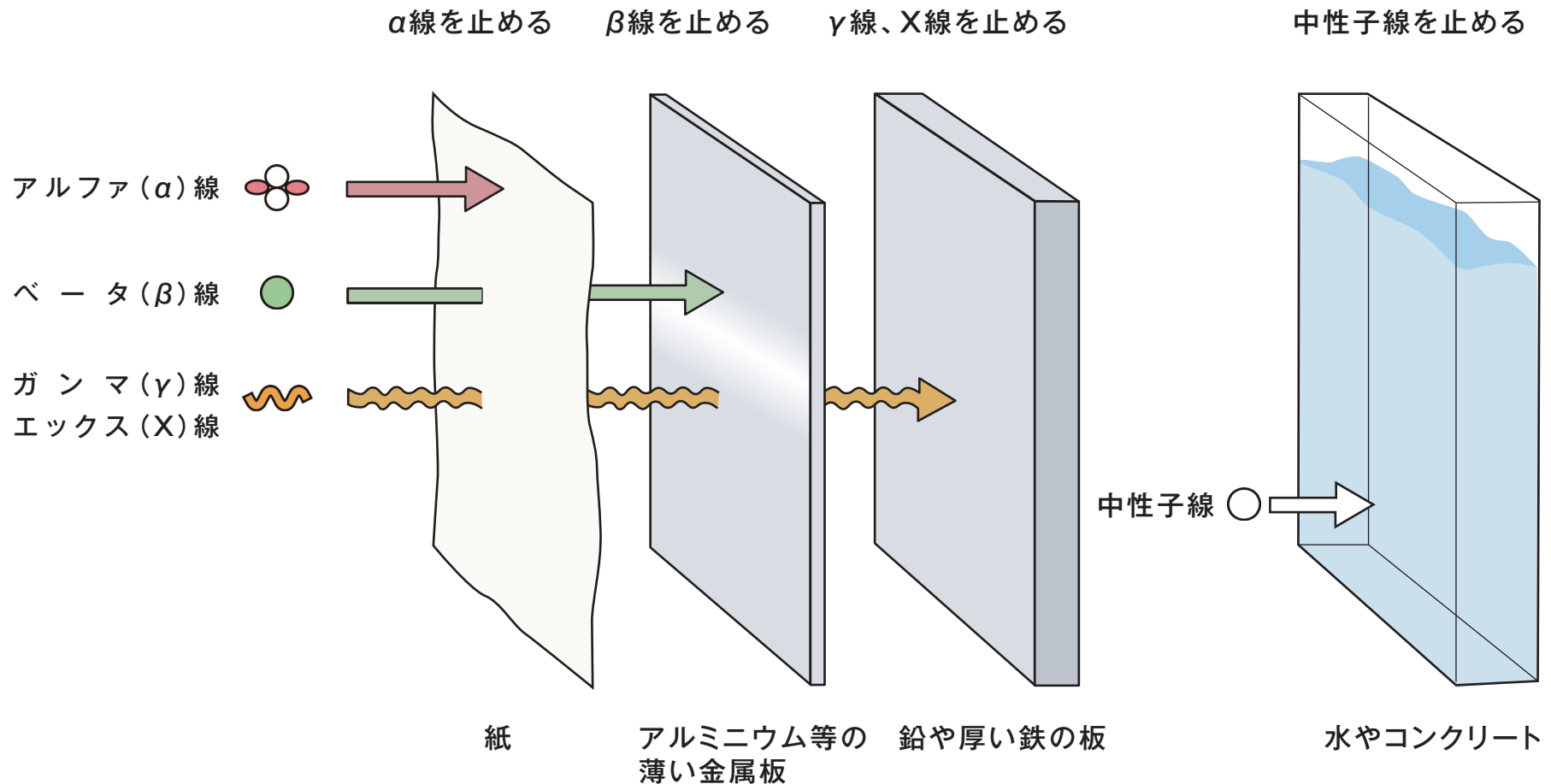
旧 100 mCi: 3.7 MBq

## 単位の接頭語

倍数	記号	読	み	倍数	記号	読	み
$10^{18}$	E	exa	エクサ	$10^{-1}$	d	deci	デシ
$10^{15}$	P	peta	ペタ	$10^{-2}$	c	centi	センチ
$10^{12}$	T	tera	テラ	$10^{-3}$	m	milli	ミリ
$10^9$	G	giga	ギガ	$10^{-6}$	$\mu$	micro	マイクロ
$10^6$	M	mega	メガ	$10^{-9}$	n	nano	ナノ
$10^3$	k	kilo	キロ	$10^{-12}$	p	pico	ピコ
$10^2$	h	hecto	ヘクト	$10^{-15}$	f	femto	フェムト
$10^1$	da	deca	デカ	$10^{-18}$	a	atto	アット

# 放射線の種類と透過力

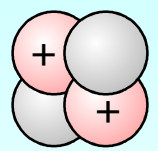
線は紙一枚で止まってしまいますが、逆に言うと紙一枚の厚さの範囲に持っているエネルギーを全部一気に放出してしまうため、体の中で線を出されるととても影響が大きくなります。



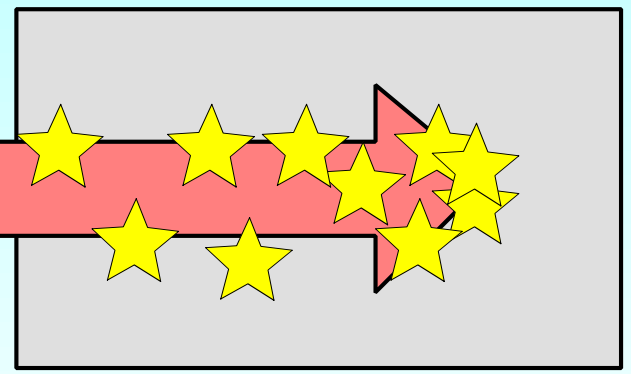
線は水の中(=体の中)を最大で2mm弱進むことが出来、細胞から見ると比較的広い範囲にエネルギーを落としていき、また体の外から来た場合はほとんど皮膚で止まります。

線は透過能力は高く、遠くから飛んできて体の中までやってきますが、逆に体内で放出されてもほとんど素通りしていきます。

アルファ  
**α線**



ヘリウムの  
原子核



狭い範囲に一気に  
エネルギーを放出します

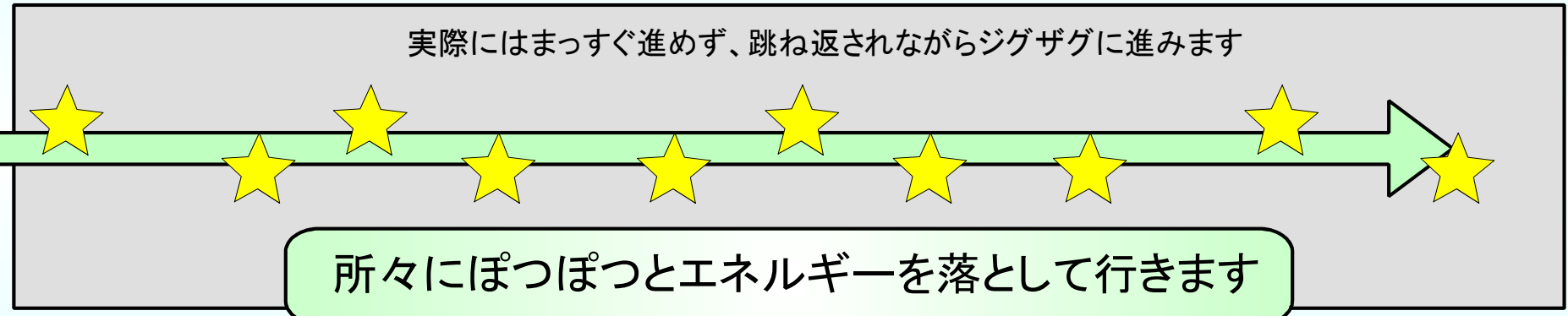
★  
放射線がエネルギーを  
物質に与えたところ  
(電離、励起など)

水の中では数十μm程度、空気の中でも数cmしか飛ばず、紙一枚で止まってしまいますが、その範囲に一気にエネルギーを放出します。

ベータ  
**β線**



電子  
ヘリウムの原子核の7000分の1の重さしか有りません



実際にはまっすぐ進めず、跳ね返されながらジグザグに進みます

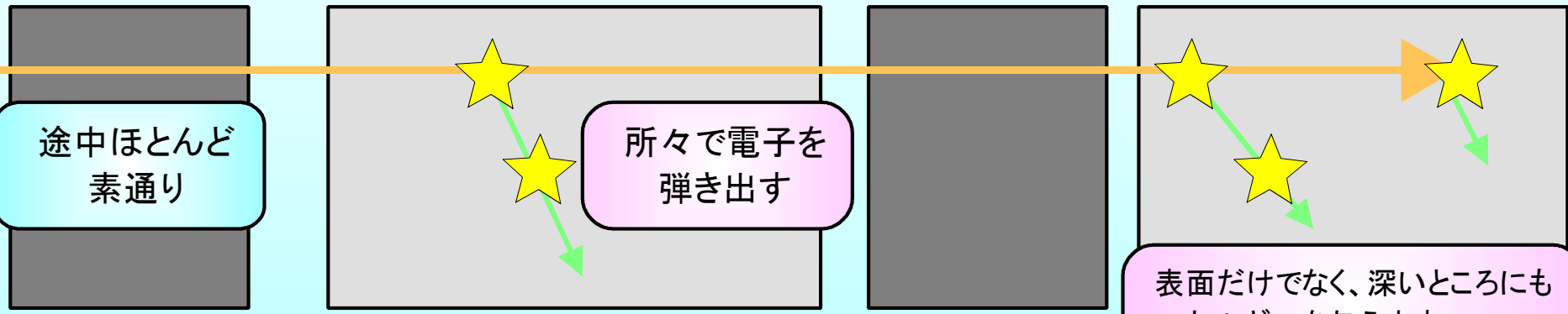
所々にぽつぽつとエネルギーを落として行きます

水の中でも1cm程度、空気の中では数m飛んでいき、少しずつしかエネルギーを落としません。

ガンマ  
**γ線**

波長の短い  
光の仲間

プラスやマイナスの電気を  
持っていないため、ほとんど  
素通りしていきます



途中ほとんど  
素通り

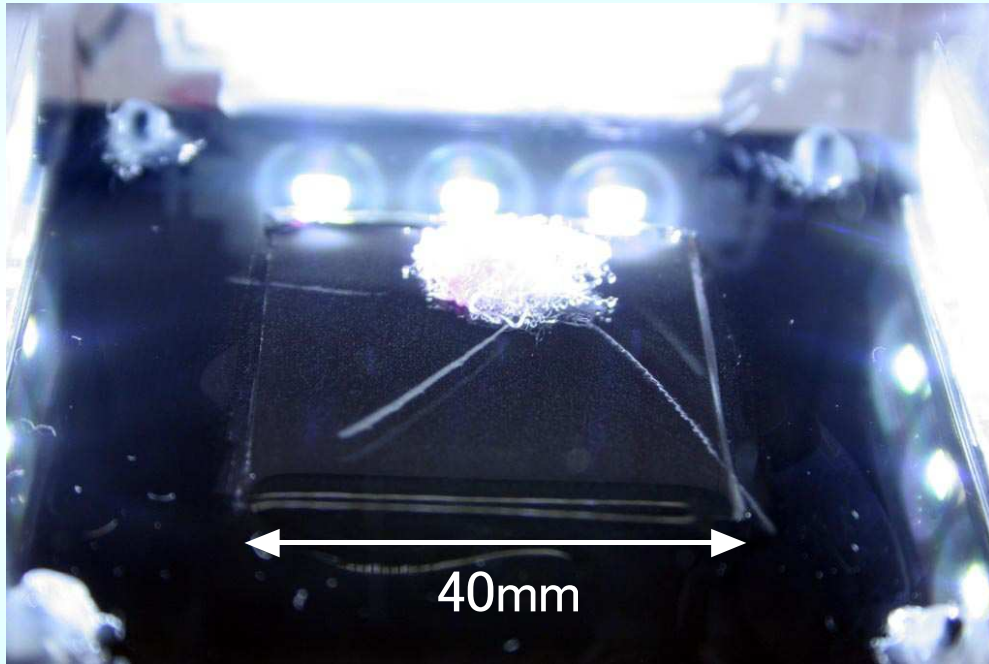
所々で電子を  
弾き出す

表面だけでなく、深いところにも  
エネルギーを与えます。

弾き出された電子は、β線と同じように振る舞います

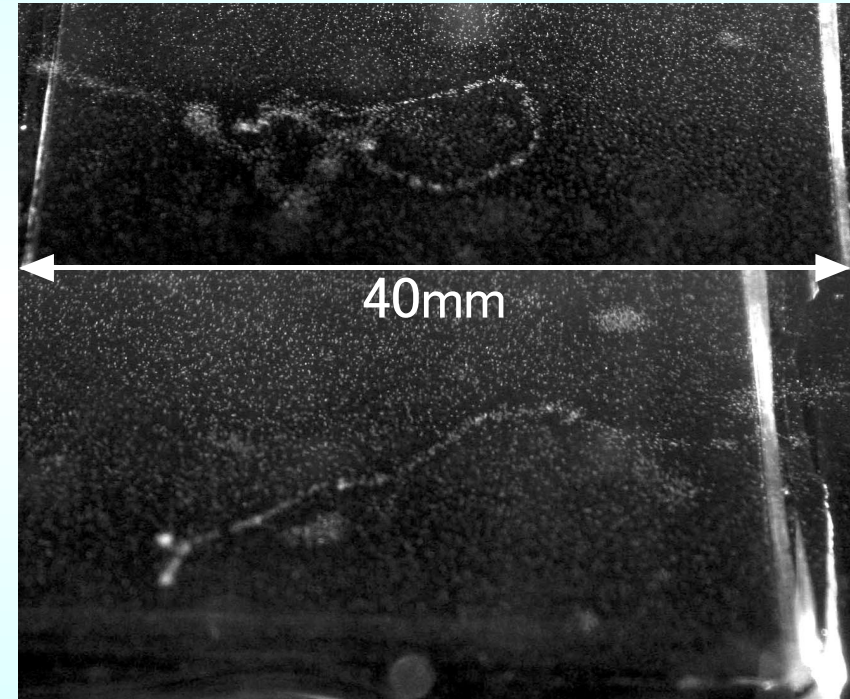
## 霧箱での飛跡の観察

### $\alpha$ 線の飛跡



真っ直ぐで、はっきりとしています。  
空気中を数cm飛んだだけで  
止まってしまいます。

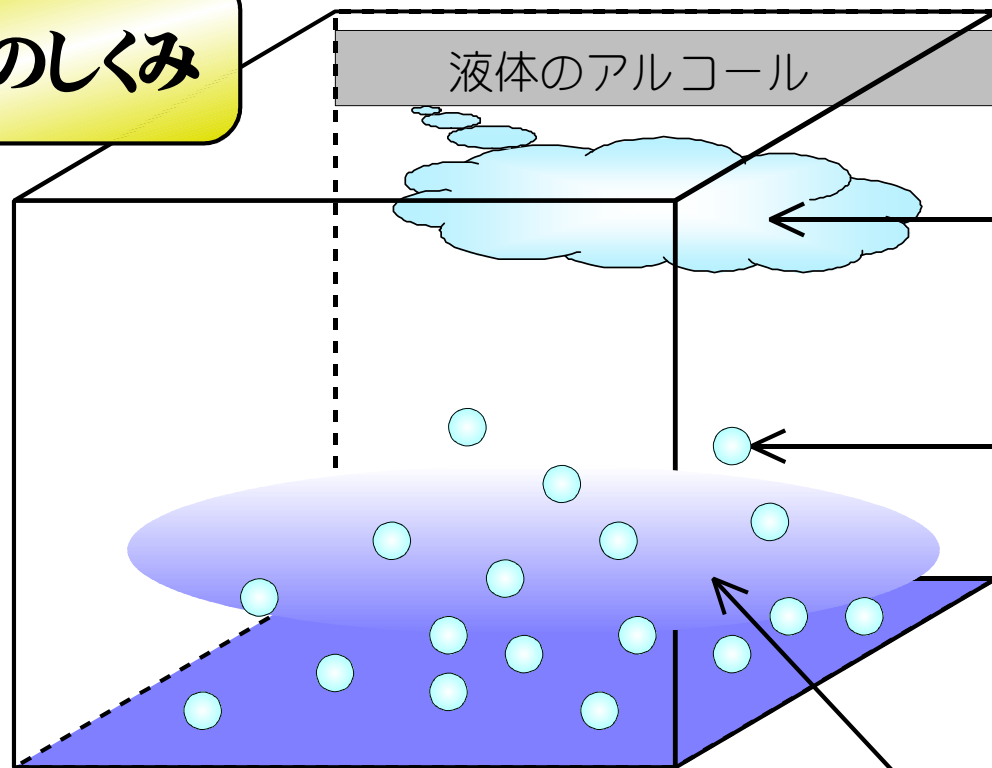
### $\beta$ 線の飛跡



糸くずのよううっすらとした、  
曲がりくねった跡を残します。  
よく見ないと、見ることはできません。



## 霧箱のしくみ



温度が高いとたくさん蒸発します

アルコールの蒸気

液体のアルコールの  
小さな粒

温度が低いと蒸気では居られません

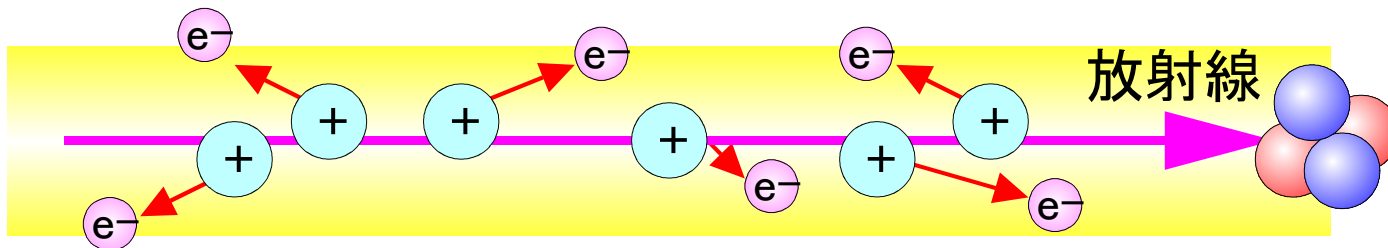
ドライアイスやペルチエ素子で  
とても冷たく冷やされています

過飽和の蒸気

温度が低くなると、蒸発した気体のアルコールは液体に戻ろうとします。霧のように見える白い点々は液体のアルコールの小さな粒です。でも、温度が下がったのに液体の粒を作らずにためらっている蒸気も漂っています（過飽和状態と言います）。そこにちょっとした刺激を加えてやると、過飽和の蒸気は次々に液体の粒に変化していきます。

## どうして白い筋の様に見えるの？

放射線が空気中を走ると、たくさんの電子を弾き飛ばしてプラスとマイナスのイオンのペアを作ります。このイオンが過飽和の蒸気の中に出来ると、そこを中心核にして小さな液体の粒になります。この液体の粒が放射線が通った後にたくさん出来るので、白い筋の様に見えるのです。（放射線の飛跡と言います）

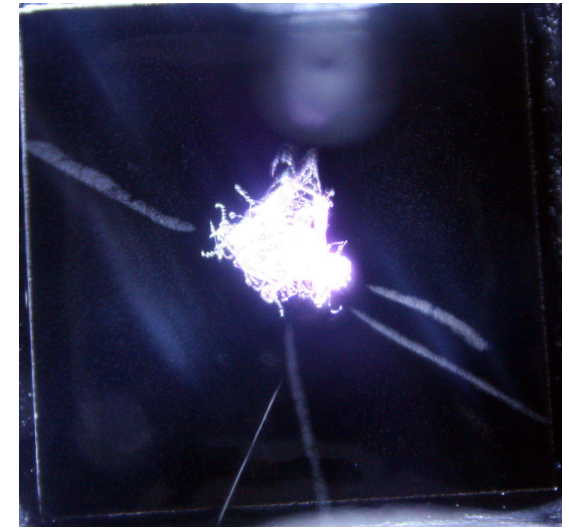


### 電離によるイオン対の生成

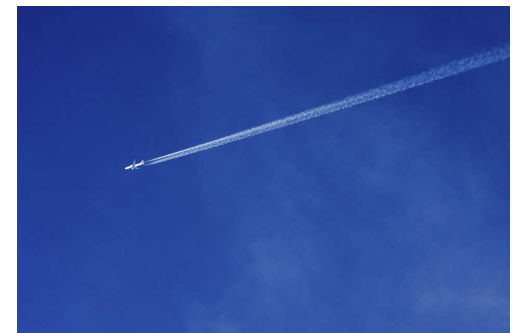
放射線として飛んで行っている原子核や電子は小さすぎてとても目では見られませんし、とても素早いので超スピードのカメラでも追いつきません。

でも、飛んでいった跡が残って、目で見えるのです。

これは、空の上の飛行機雲と同じです。飛行機が飛んでいった後にもしばらく飛行機雲が残っているのを見ることができます。飛行機雲は、空の上の寒いところで過飽和になった水蒸気が、飛行機のエンジンから出てきた排気ガスなどが刺激になって小さな液体の水の粒、つまり雲になった物です。



過飽和の蒸気は冷やされている容器の底に薄く広がっているだけなので、底に平行に走った放射線しか見ることができません。また液体の粒はすぐ蒸発してしまって、数秒で見えなくなってしまいます。



# 放射線を当てると放射性物質ができるか

普通は、放射線を当てても放射線を出す物質はできない

例外：加速器や原子炉

# 1.3 放射性壊変

## (5) 壊変の法則

壊変定数 $\lambda$ 、時刻 $t$ 、原子核の数 $N(t)$  とする  
壊変率(1秒間の壊変数)または放射能(Bq)

$$I = -dN(t)/dt = \lambda N(t)$$

$$N(t) = N(0) e^{-\lambda t} \quad \text{微分方程式の解}$$

$$I = \lambda N(t) = \lambda N(0) e^{-\lambda t}$$

平均寿命

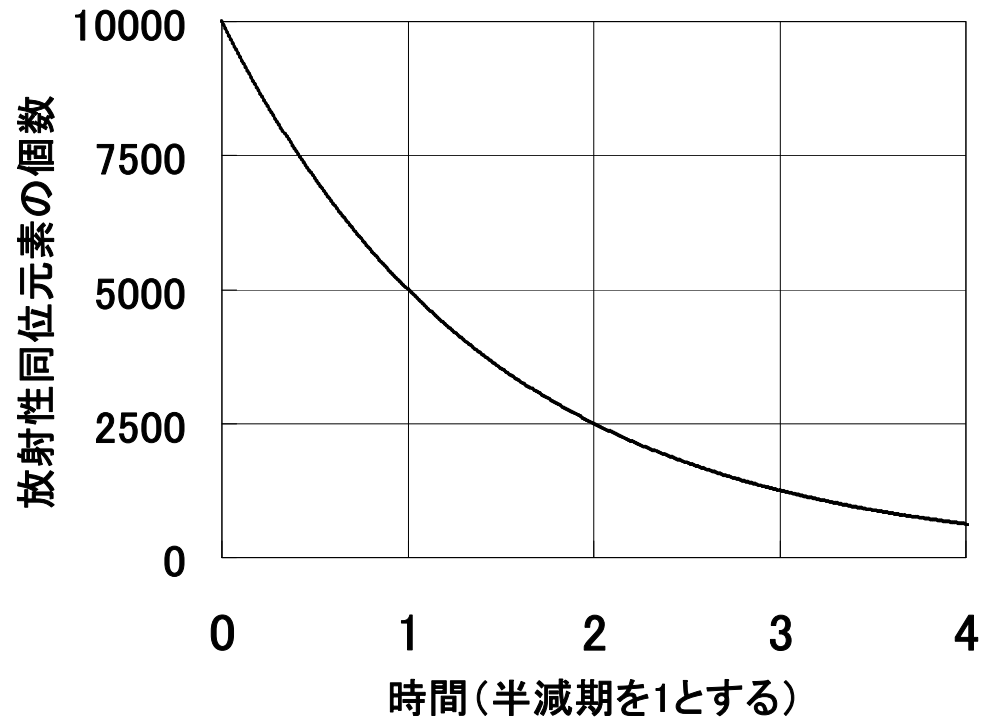
$N(t)$ が $1/e$ になる時間

$$1/\lambda$$

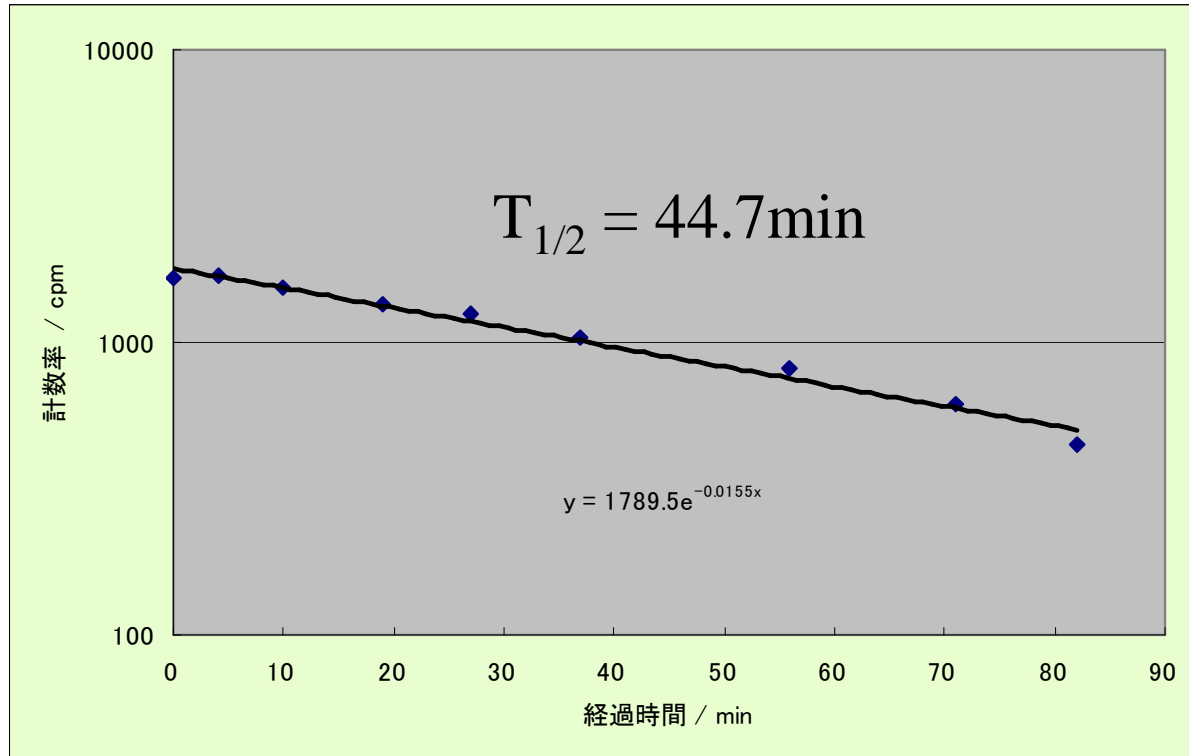
半減期  $T_{1/2}$

$N(t)$ が $1/2$ になる時間

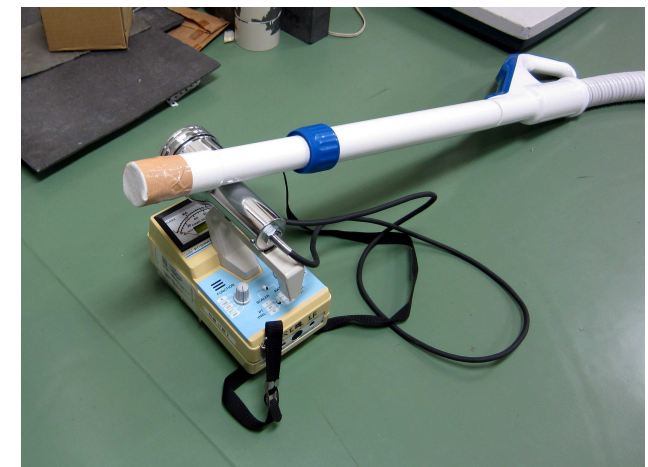
$$\ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$



## 空気中のラドンの娘核種の捕集と崩壊曲線



市販の掃除機吸入口先端にガーゼ(ベンコット)をかぶせて5分ほど吸引し、広窓型GMサーベイメータ TGS-136 のスケーラーモードで1分間計数した





# 天然の放射性核種

地球が誕生して約50億年、未だに天然の放射性核種が残る。

放射性核種の半減期則より

10半減期の後では元の1024分の1、

40半減期では1兆分の1 となるため、半減期の短い核種は既に消滅している。

## 壊変系列をつくる放射性核種

親となる核種の寿命が長く (U-238 45億年, Th-232 140億年)、  
 $\alpha$ 崩壊に伴って質量数が親核種から4ずつ小さくなる。

## 系列を作らない核種

大気上層で宇宙線により  $^3\text{H}$  ( $10^{18}\text{Bq/y}$ )、 $^{14}\text{C}$  ( $1.3 \times 10^{15}\text{Bq/y}$ ) が生成される。

$^3\text{H}$  は半減期12.3年、 $^{14}\text{C}$ は5730年と短い。

一方、地球誕生時から存在したものとして以下の核種などが知られている。

$^{40}\text{K}$	(半減期12.8億年, 天然のK中の存在比 0.0117%)、
$^{87}\text{Rb}$	(480億年、27.8%)
$^{147}\text{Sm}$	(1060億年, 15.1%)
$^{148}\text{Sm}$	(8000兆年, 11.3%)
$^{115}\text{In}$	(510兆年, 95.7%)
$^{113}\text{Cd}$	(9000兆年, 12.2%)
$^{187}\text{Re}$	(400億年, 62.6%)
$^{144}\text{Nd}$	(2100兆年、23.8%)

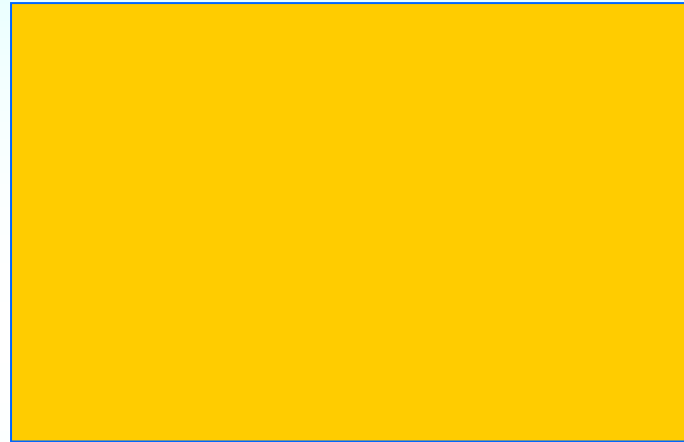
# 放射平衡



親核種の半減期が娘核種より長い場合  
過渡平衡

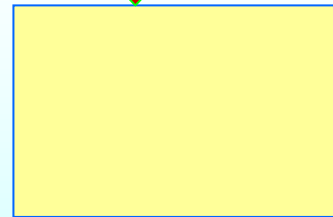
親娘の割合を保持したまま減衰  
永続平衡

親核種の半減期が特に長い場合  
親娘の割合と量を保持



親核種

壊変



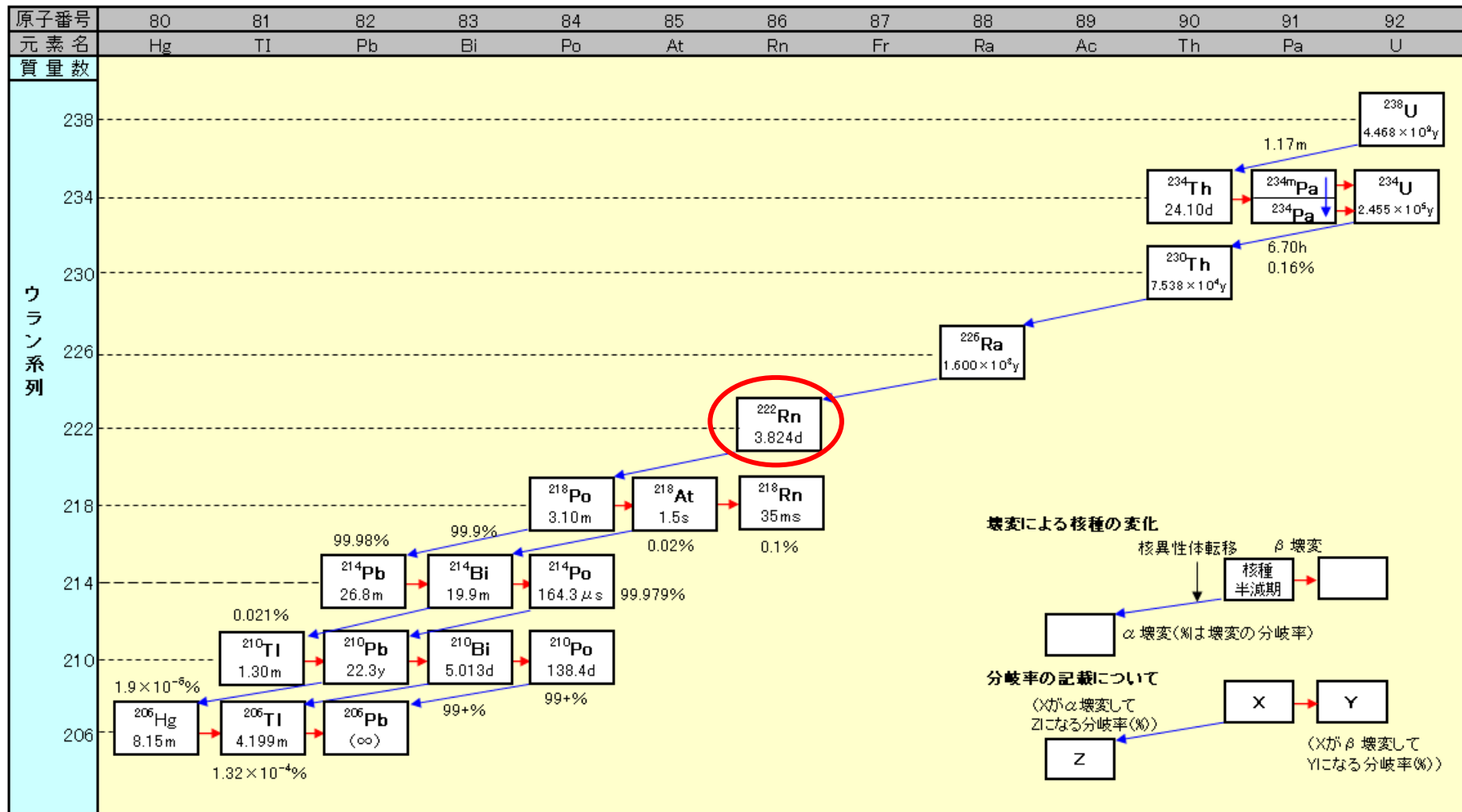
壊変

娘核種

例

$^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$

# 放射壊変系列 1: ウラン系列 (4n+2)



半減期の記号;s(秒), ms(10<sup>-3</sup>秒), μs(10<sup>-6</sup>秒), m(分), h(時), d(日), y(年)

図1-1 天然放射性核種の壊変系列図(ウラン系列)(1/4)

[出典] 国立天文台(編):理科年表 2010年版、丸善(2009年10月)、p.468-469

## 1.4 核反応 (nuclear reaction)

$a$  (入射粒子) +  $A$  (標的核)  $\rightarrow$   $b$  (放出粒子) +  $B$  (生成核)

この反応を  $A(a, b)B$  と表わす。

### (1) 核反応とエネルギー

複合核:  $a$  と  $A$  が融合し一時複合核を形成

捕獲反応: 放出粒子なし

核分裂反応: 2個の原子核に分裂

核破砕反応: 多くの粒子が飛散

$Q$ 値: 反応で生じるエネルギー

$$Q = M_A c^2 + M_a c^2 - (M_B c^2 + M_b c^2)$$
$$= \Delta A_A c^2 + \Delta A_a c^2 - (\Delta A_B c^2 + \Delta A_b c^2)$$

$\Delta A_A$ : 質量数  $A$  の原子の質量超過

$$Q = B(M_B) + B(M_b) - B(M_A) - B(M_a)$$

$B(M_A)$ :  $A$  の結合エネルギー

$Q > 0$  発熱反応  $Q < 0$  吸熱反応

吸熱反応の条件: 重心系での衝突エネルギー  $> -Q$

しきい値: 実験室系で反応に必要な最低エネルギー

## (2) 核反応の確率

1個の入射粒子  $a$  に対する反応  $A(a, b)B$  が起こる確率  $\sigma md$

$m$ : 単位体積当たりの  $A$  の数

$d$ :  $A$  の厚さ

$\sigma$ :  $A$  の核反応断面積 (確率) (<幾何学的断面積)

単位  $b$  (バーン)  $1 b = 10^{-24} \text{ cm}^2$

微分断面積  $d\sigma(\theta)/d\Omega$

$b$  が角度  $\theta$ 、微小立体角  $d\Omega$  内に放出される断面積

$\sigma$  (全断面積) はこれを全立体角で積分したもの

$a$  が毎秒  $n$  個入射するとき、

$B$  の核反応生成率 (核反応数/s)  $Y = \sigma nmd$

$\Phi$ : 粒子フルエンス particle fluence 単位面積を通過する粒子数

$\phi$ : 粒子フラックス (粒子束密度) particle flux  $\Phi/s$

$n = \phi \times (\text{ビームの面積})$  1秒間の全粒子数

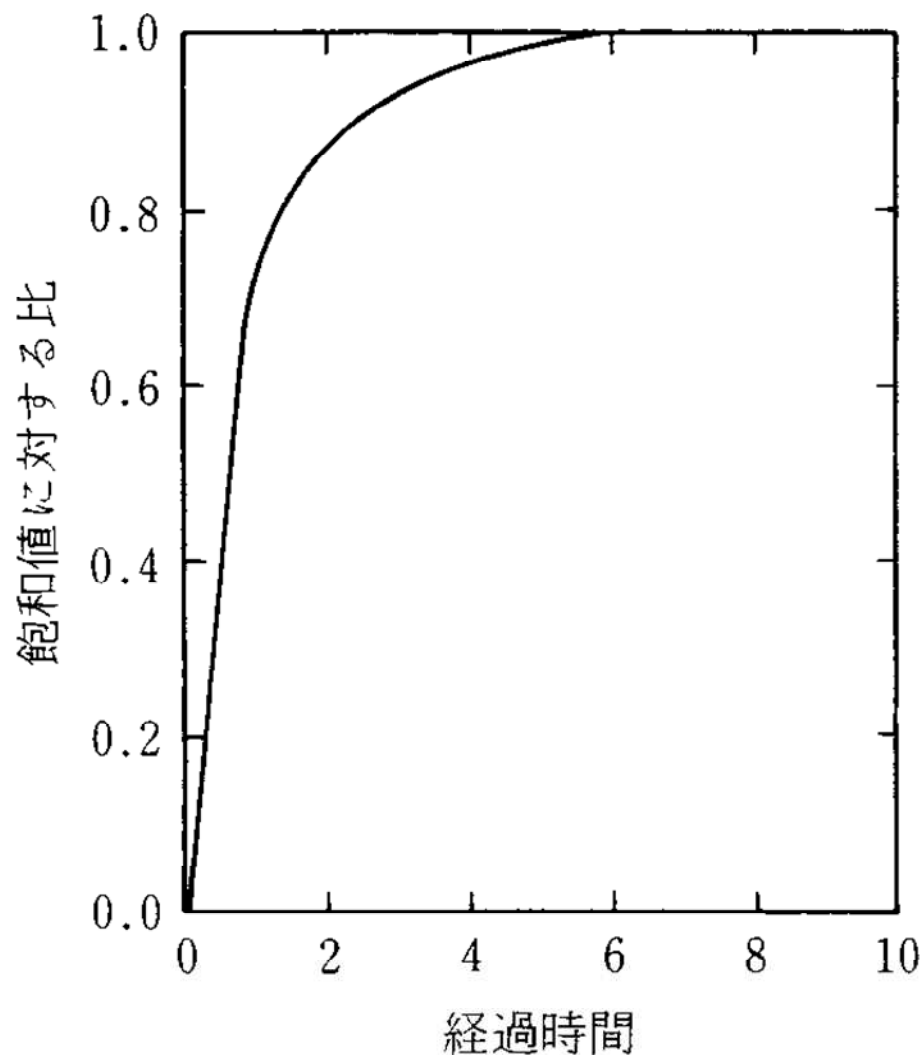
・  $B$  が壊変定数  $\lambda$  で減少するときの生成率

$dN(t)/dt = -\lambda N(t) + Y$   $N(t)$ : 時刻  $t$  における  $B$  の総数

$N(0) = 0$  として  $N(t) = \lambda^{-1} Y (1 - e^{-\lambda t})$

$B$  の放射能:  $\lambda N(t) = Y (1 - e^{-\lambda t})$   $t \rightarrow \infty$  で飽和放射能  $Y$  に達する





14.1 飽和放射能に対する比の時間依存性,  
横軸は平均寿命を単位とした経過時間

### (3) 核反応による放射性核種の生成

#### 1) 加速イオンによる核反応

nが放出されやすい→n不足

$\beta^+$ 放出核種、EC壊変核種の生成

軽イオン(Z = 1, 2)による核反応

$\beta^+$ 放射断層撮影(PET)で使用する短寿命核種  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{18}\text{F}$

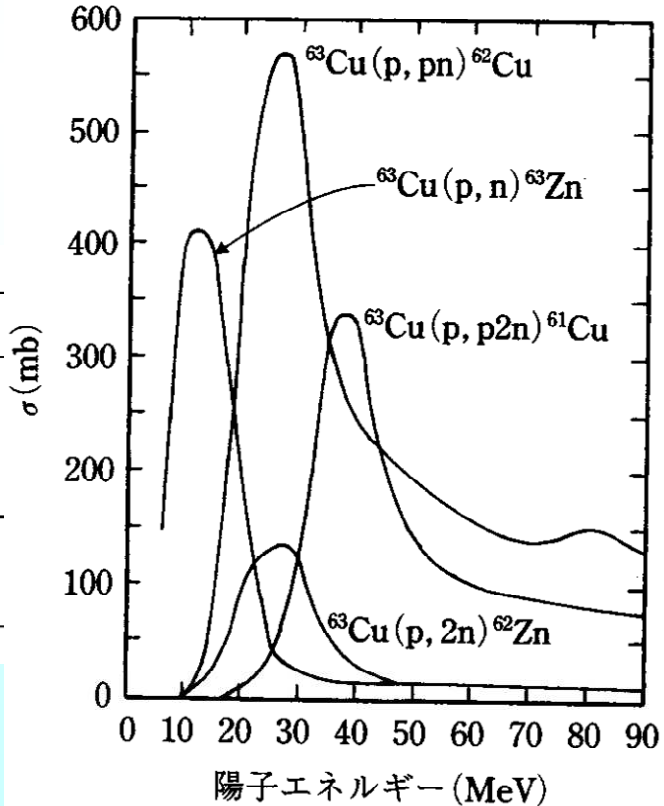
励起関数: 入射イオンのエネルギーと核反応断面積の関係

即発(ps~ns)  $\gamma$ 線(核反応の励起核種から)

と遅発  $\gamma$ 線(放射性壊変)

表 4.1 正電荷イオンの核反応

荷電粒子	記号	核 反 応 の 例
陽子	p	$^{11}\text{B}(p, n)^{11}\text{C}$ , $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$ , $^{58}\text{Mn}(p, 2n)^{57}\text{Fe}$
二重陽子	d	$^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ , $^{24}\text{Mg}(d, \alpha)^{22}\text{Na}$
三重陽子	t	$^{16}\text{O}(t, n)^{18}\text{F}$ , $^{28}\text{Si}(t, n)^{30}\text{P}$
$\alpha$ 粒子	$^3\text{He}$	$^{27}\text{Al}(^3\text{He}, 2p)^{28}\text{Al}$
	$\alpha$	$^{40}\text{Ar}(\alpha, p)^{43}\text{K}$ , $^{123}\text{Sb}(\alpha, n)^{126}\text{I}$



## 2) 原子炉での生成

### 核分裂

### 中性子との反応

冷中性子  $< 0.005 \text{ eV}$  と熱中性子  $\sim 0.025 \text{ eV}$

H原子核(水やパラフィン)との衝突で減速、熱化

軽元素と(n, p), (n,  $\alpha$ )反応

中性子捕獲反応(n,  $\gamma$ ) n過剰で $\beta$ -放出核種の生成

RI生産  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{64}\text{Cu}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{76}\text{As}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  
 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{124}\text{Sb}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{170}\text{Tm}$

$\beta$ -放出核種の生産  $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$ ,  
 $^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$

低速( $\sim 100 \text{ eV}$ )、中速( $100 \text{ eV} \sim 100 \text{ keV}$ )、高速( $\geq 100 \text{ keV}$ )

(n, p), (n,  $\alpha$ ), (n, 2n)

## 3) 光子による核反応(光核反応)

電子線( $\geq 50 \text{ MeV}$ )  $\rightarrow$  W, Pt をターゲットにして制動X線による

( $\gamma$ , n)反応により中性子を発生させる。

10MeV以下ではほとんど起こらない

表 4.3 中性子による原子核反応

核反応	原子番号変化	質量数変化	例
(n, $\gamma$ )	0	+1	$^{23}\text{Na}(n, \gamma)^{24}\text{Na}$ , $^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$
(n, p)	-1	0	$^{35}\text{Cl}(n, p)^{35}\text{S}$ , $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$
(n, $\alpha$ )	-2	-3	$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ , $^{35}\text{Cl}(n, \alpha)^{32}\text{P}$
(n, np)	-1	-1	$^{54}\text{Fe}(n, np)^{53}\text{Mn}$
(n, f)	~140, ~95	大	$\text{U}(n, f)^{90}\text{Sr}$ , $\text{U}(n, f)^{137}\text{Cs}$

表 4.4 光子による核反応

反応の種類	核反応	反応の例
光子による原子核の励起	( $\gamma, \gamma'$ )	$^{77}\text{Se}(\gamma, \gamma')^{77\text{m}}\text{Se}$ , $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma')^{115\text{m}}\text{In}$
ひかり 光核反応	( $\gamma, n$ )	$^2\text{H}(\gamma, n)^1\text{H}$ , $^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$
	( $\gamma, p$ )	$^{30}\text{Si}(\gamma, p)^{29}\text{Al}$
ひかり 光核分裂	( $\gamma, f$ )	$^{232}\text{Th}(\gamma, f)$ , $^{238}\text{U}(\gamma, f)$

## (4) 放射化と放射化物

原因: 加速ビーム、2次ビーム(X線、n)

加速器機器、しゃへい体、コンクリート壁などでの残留放射能

表 4.5 加速器による放射化で生成される放射性同位元素  
(半減期 10 時間以上 100 年以下の核種)

標的核	放射性同位元素 (半減期)	備考
アルミニウム	$^{22}\text{Na}$ (2.6 y), $^{24}\text{Na}$ (15.0 h)	
鉄	$^{54}\text{Mn}$ (312.0 d), $^{55}\text{Fe}$ (2.7 y), $^{56}\text{Co}$ (77.2 d), $^{57}\text{Co}$ (271.7 d), $^{58}\text{Co}$ (70.9 d), $^{60}\text{Co}$ (5.3 y)	$^{60}\text{Co}$ は不純物の Co より生成される
ステンレス	$^{44}\text{Ti}$ (60.0 y), $^{46}\text{Sc}$ (83.8 d), $^{54}\text{Mn}$ (312.0 d), $^{55}\text{Fe}$ (2.7 y), $^{56}\text{Co}$ (77.2 d), $^{57}\text{Co}$ (271.7 d), $^{58}\text{Co}$ (70.9 d), $^{60}\text{Co}$ (5.3 y), $^{63}\text{Ni}$ (100.1 y)	ステンレスの成分は Cr, Mn, Fe, Ni とした
銅	$^{57}\text{Co}$ (271.7 d), $^{58}\text{Co}$ (70.9 d), $^{60}\text{Co}$ (5.3 y), $^{63}\text{Ni}$ (100.1 y), $^{64}\text{Cu}$ (12.7 h), $^{65}\text{Zn}$ (244.1 d)	
コンクリート	$^3\text{H}$ (12.3 y), $^{134}\text{Cs}$ (2.1 y), $^{152}\text{Eu}$ (13.5 y), $^{154}\text{Eu}$ (8.6 y)	
土	$^3\text{H}$ (12.3 y), $^{152}\text{Eu}$ (13.5 y), $^{154}\text{Eu}$ (8.6 y)	

表 4.6 放射化により生成される放射性同位元素と核反応  
(半減期 10 時間以上 100 年以下の核種)

生成核種	半減期	核反応 [] 内の値は核反応の Q 値 (MeV)
$^3\text{H}$	12.3 y	$^6\text{Li} (n, \alpha) [+4.8]$
$^{22}\text{Na}$	2.6 y	$^{27}\text{Al} (n, \alpha 2n) [-22.5], ^{27}\text{Al} (p, p\alpha n) [-22.5]$
$^{24}\text{Na}$	15.0 h	$^{27}\text{Al} (n, \alpha) [-3.1], ^{27}\text{Al} (p, p^3\text{He}) [-23.7]$
$^{44}\text{Ti}$	60.0 y	$^{50}\text{Cr} (p, t\alpha) [-22.8]$
$^{46}\text{Sc}$	83.8 d	$^{50}\text{Cr} (n, p\alpha) [-10.1], ^{52}\text{Cr} (n, t\alpha) [-23.0]$
$^{54}\text{Mn}$	312.0 d	$^{55}\text{Mn} (\gamma, n) [-10.2], ^{55}\text{Mn} (n, 2n) [-10.2], ^{54}\text{Fe} (n, p) [+0.1],$ $^{56}\text{Fe} (n, t) [-11.9], ^{55}\text{Mn} (p, d) [-8.0], ^{56}\text{Fe} (p, ^3\text{He}) [-12.7]$
$^{55}\text{Fe}$	2.7 y	$^{56}\text{Fe} (\gamma, n) [-11.2], ^{54}\text{Fe} (n, \gamma) [+0.1], ^{56}\text{Fe} (n, 2n) [-11.2],$ $^{55}\text{Mn} (n, p) [-1.0], ^{56}\text{Fe} (p, d) [-9.0]$
$^{56}\text{Co}$	77.2 d	$^{58}\text{Ni} (\gamma, d) [-17.3], ^{58}\text{Ni} (n, t) [-11.1], ^{56}\text{Fe} (p, n) [-5.4],$ $^{58}\text{Ni} (p, ^3\text{He}) [-11.8]$
$^{57}\text{Co}$	271.7 d	$^{58}\text{Ni} (\gamma, p) [-8.1], ^{58}\text{Ni} (n, d) [-5.9], ^{56}\text{Fe} (p, \gamma) [+6.0],$ $^{58}\text{Ni} (p, 2p) [-8.1], ^{63}\text{Cu} (p, d\alpha n) [-21.0]$
$^{58}\text{Co}$	70.9 d	$^{59}\text{Co} (\gamma, n) [-10.5], ^{60}\text{Ni} (\gamma, d) [-17.8], ^{58}\text{Ni} (n, p) [+0.4],$ $^{63}\text{Cu} (n, \alpha 2n) [-16.2], ^{57}\text{Fe} (p, \gamma) [+7.0], ^{63}\text{Cu} (p, d\alpha) [-14.0]$
$^{60}\text{Co}$	5.3 y	$^{61}\text{Ni} (\gamma, p) [-9.9], ^{62}\text{Ni} (\gamma, d) [-18.2], ^{59}\text{Co} (n, \gamma) [+7.5],$ $^{60}\text{Ni} (n, p) [-20.4], ^{62}\text{Ni} (n, p2n) [-20.5], ^{63}\text{Cu} (n, \alpha) [+1.7],$ $^{65}\text{Cu} (n, \alpha 2n) [-16.1], ^{62}\text{Ni} (p, ^3\text{He}) [-12.7],$ $^{64}\text{Ni} (p, ^3\text{He} 2n) [-29.2], ^{63}\text{Cu} (p, p^3\text{He}) [-18.9]$
$^{63}\text{Ni}$	100.1 y	$^{64}\text{Ni} (\gamma, n) [-9.7], ^{62}\text{Ni} (n, \gamma) [+6.8], ^{63}\text{Cu} (n, p) [+0.7],$ $^{65}\text{Cu} (n, p2n) [-17.1]$
$^{64}\text{Cu}$	12.7 h	$^{65}\text{Cu} (\gamma, n) [-9.9], ^{63}\text{Cu} (n, \gamma) [+7.9]$
$^{65}\text{Zn}$	244.0 d	$^{65}\text{Cu} (p, n) [-2.1]$
$^{134}\text{Cs}$	2.1 y	$^{133}\text{Cs} (n, \gamma) [+6.9]$
$^{152}\text{Eu}$	13.5 y	$^{151}\text{Eu} (n, \gamma) [+6.3]$
$^{154}\text{Eu}$	8.6 y	$^{153}\text{Eu} (n, \gamma) [+6.4]$



# 放射線研究センター電子線ライナック加速器の 放射化物保管設備。



# 1.5 放射線発生装置

## (1) 加速器の原理

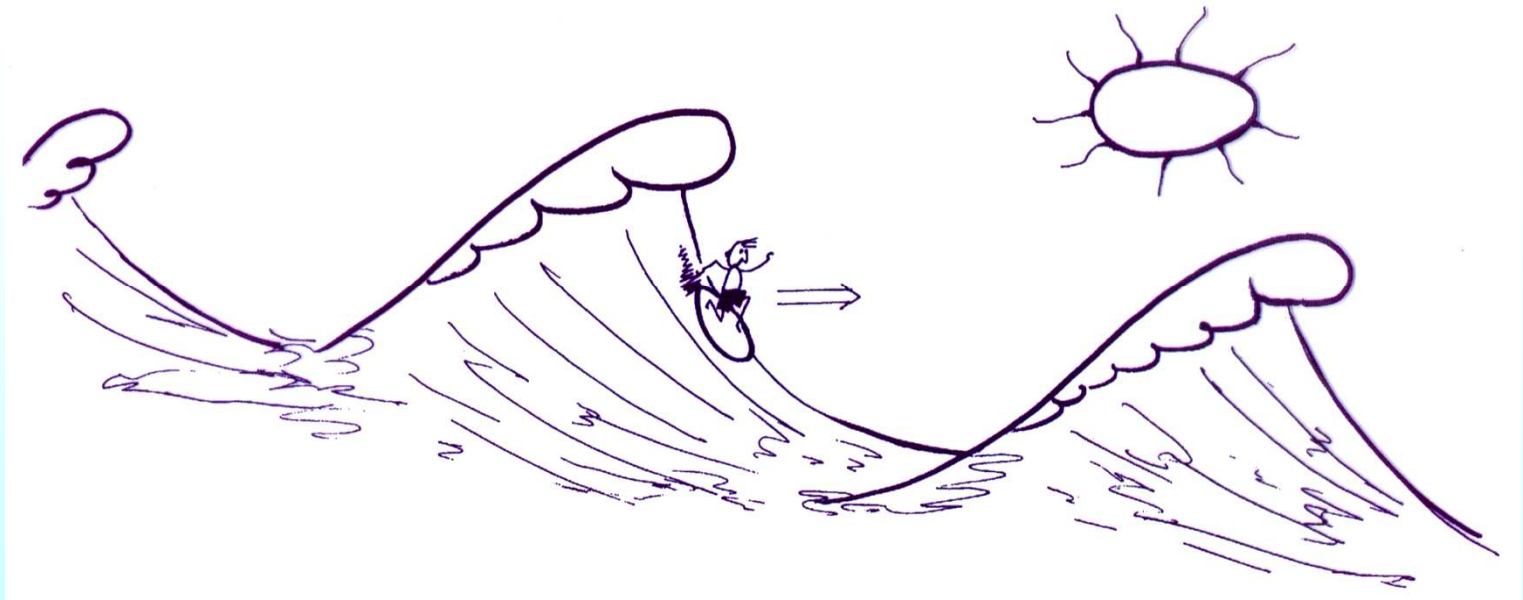
静電加速

[加速エネルギー] = [イオンの電荷 $ze$ ] × [電極への印加電圧 $V$ ]

高周波(マイクロ波)加速

高周波電場による加速と集群

磁場の時間変化での誘導電場による加速





# 放射線発生装置

- (1) サイクロトロン
- (2) シンクロトロン
- (3) シンクロサイクロトロン
- (4) 直線加速装置
- (5) ベータトロン
- (6) ファン・デ・グラーフ型加速装置
- (7) コッククロフト・ワルトン型加速装置
- (8) その他荷電粒子を加速することにより放射線を発生させる装置で、放射線障害の防止のため必要と認めて文部科学大臣が指定するもの
  - ① 変圧器型加速装置
  - ② マイクロトロン
  - ③ プラズマ発生装置(重水素とトリチウムとの核反応における臨界プラズマ条件を達成する能力を持つ装置であって、専ら重水素と重水素との核反応を行うものに限る。)

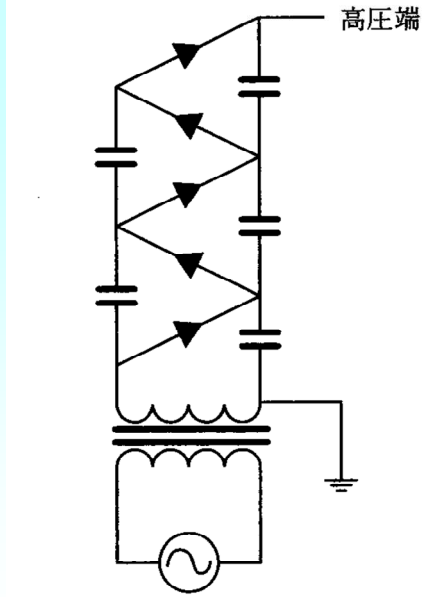
## (2) 放射線発生装置の種類

### 1) コッククロフト・ワルトン型加速装置

Cockcroft-Walton  
高電圧発生装置

### 2) ファン・デ・グラーフ型加速装置

Van de Graaff  
高電圧発生装置 1~20 MeV  
タンデム型ファン・デ・グラーフ  
倍の電圧が得られる



コッククロフト・ワルトン型加速装置

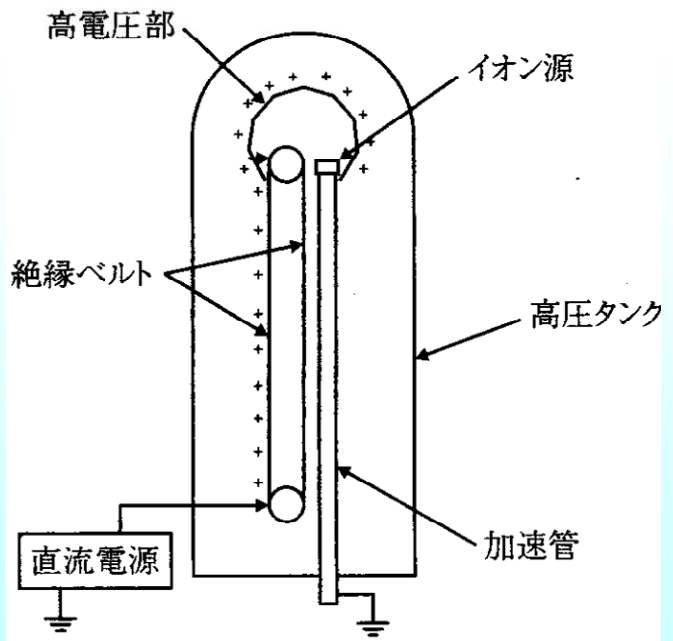
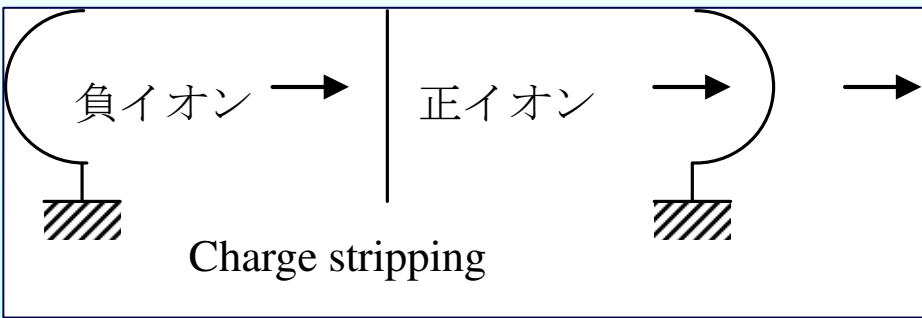


図 5.2 ファン・デ・グラーフ型加速装置



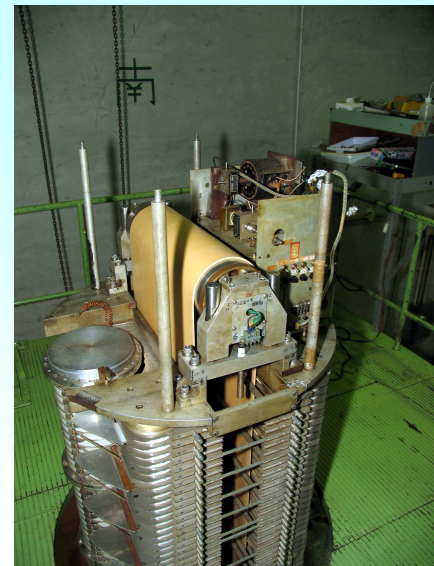
バンデグラフィオン加速器



加速管上部のイオン源と  
電場安定用フープ



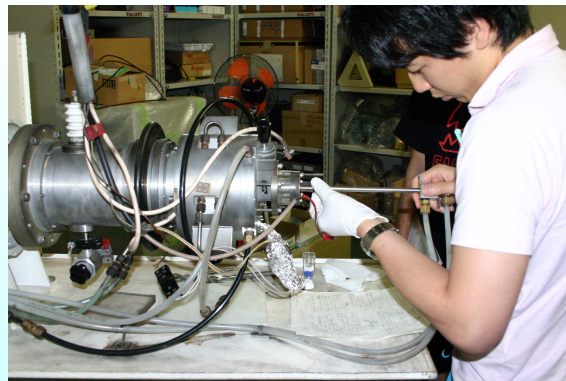
印加電圧均等配分の  
ための大抵抗素子



電荷輸送用の絶縁ベルト



タンデム型コッククロフト  
イオン加速器



セシウムスパッターイオン源



固体イオン源先端

- 3) 直線加速装置 (Linac、ライナック、リニアック)
  - ヴィデレー型加速器 (電極間に交流加速電場)
  - アルバレ型加速器 (空洞内に定在波加速電場)
  - Disc-loaded linac (進行波加速電場) 主に電子

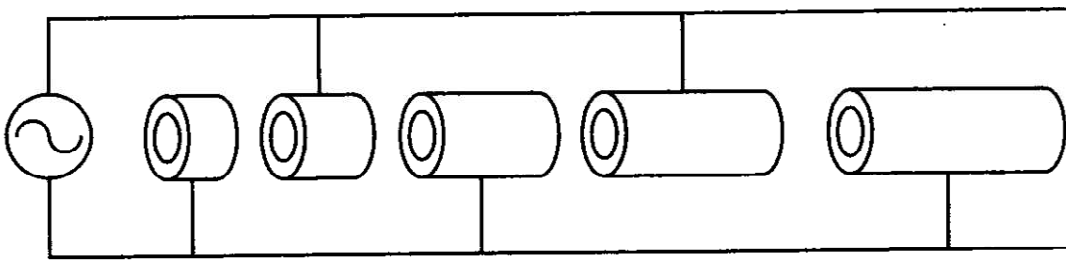


図 5.3 ヴィデレー型加速器

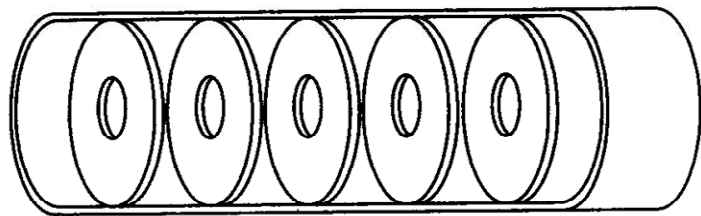


図 5.4 円盤装荷型導波管

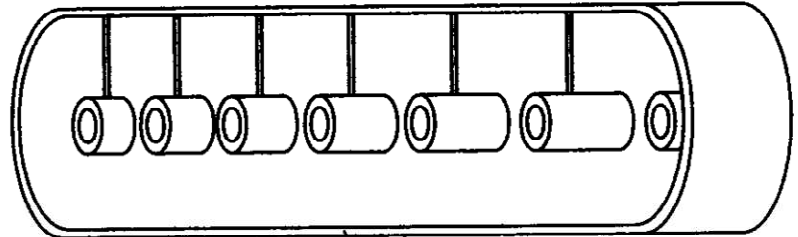
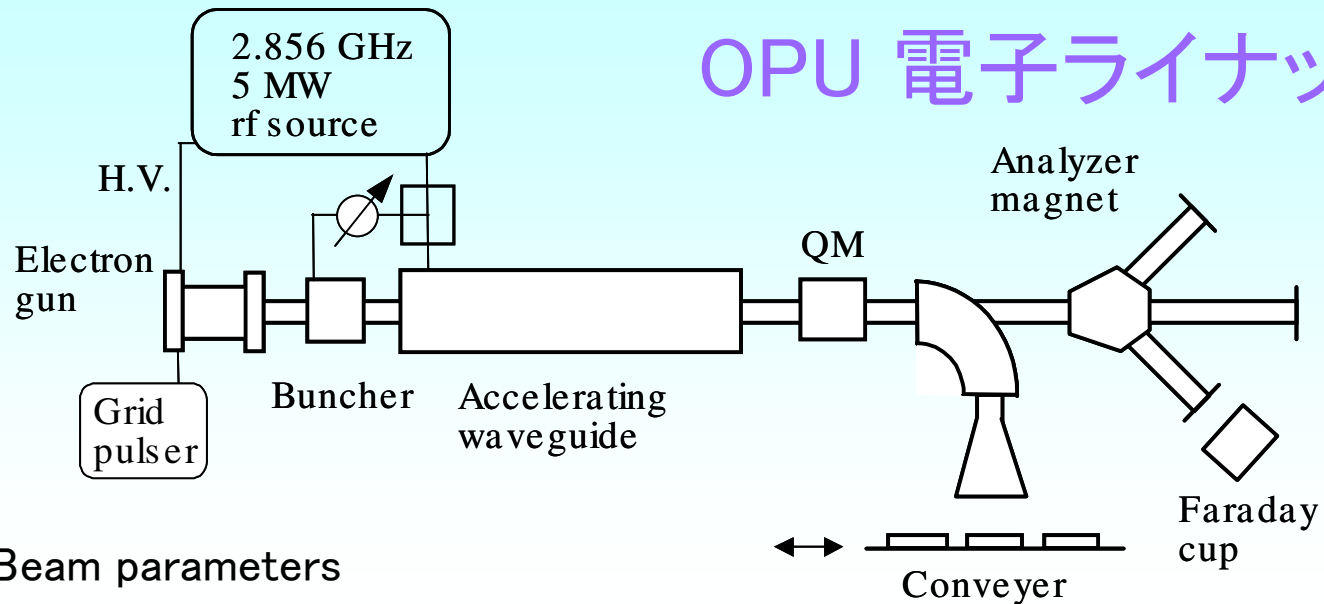


図 5.5 アルバレ型加速器



# OPU 電子ライナック



## Beam parameters

Energy: 4–16 MeV

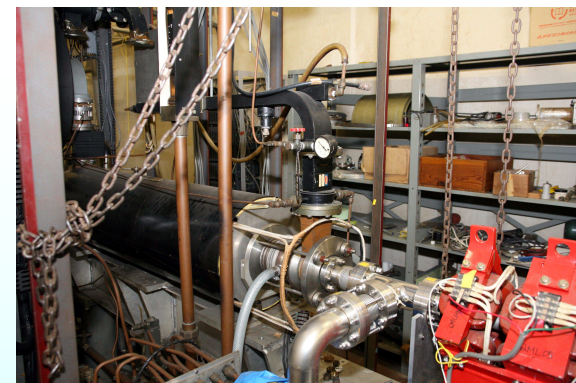
Repetition: 10 – 500 pps

Macropulse length: 1 ns – 5 ms

Peak beam current:  $\sim 0.1$  A

Average beam current:

$\sim 20 \mu\text{A}$  @ 10MeV



# 4) サイクロトロン (Cyclotron)

1931年 Lawrence (USA)

ローレンツ力  $evB = \text{遠心力 } mv^2/r$

一周に要する時間一定

pで20 MeV程度

医療用短半減期核種の製造

# 5) シンクロトロン (イオン、電子)

磁場強度をエネルギーの上昇と共に増加

電子蓄積リング

磁場中の制動X線 (放射光)

利用装置

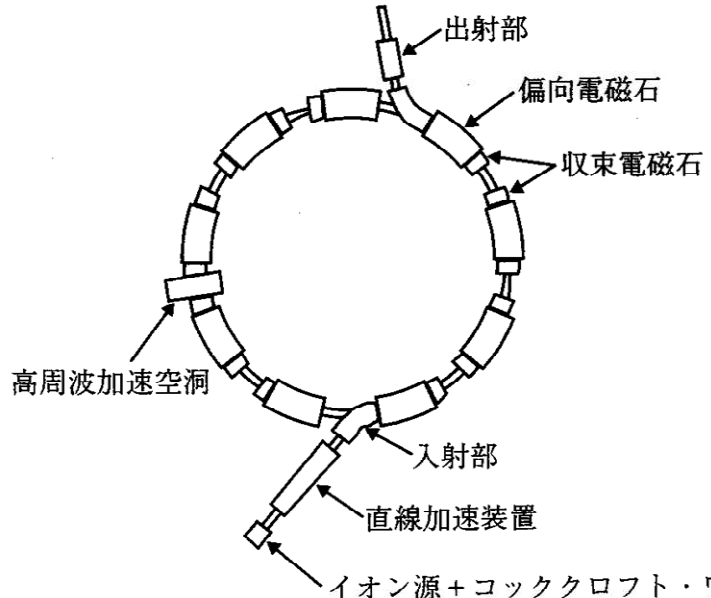
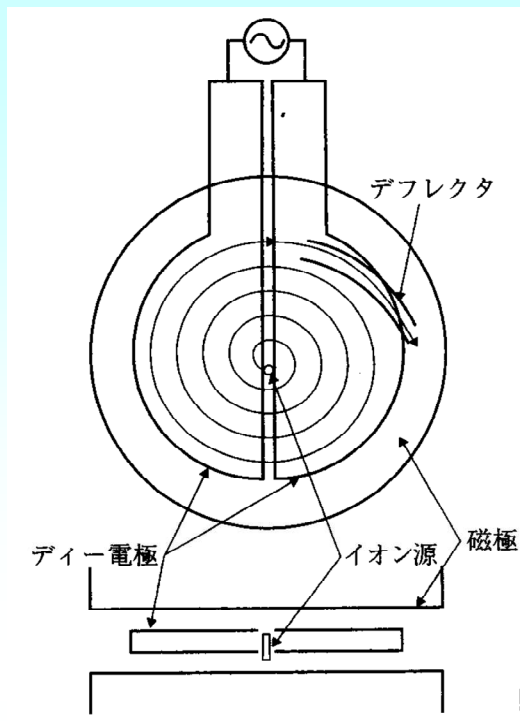


図 5.



# 兵庫県立粒子線治療センター

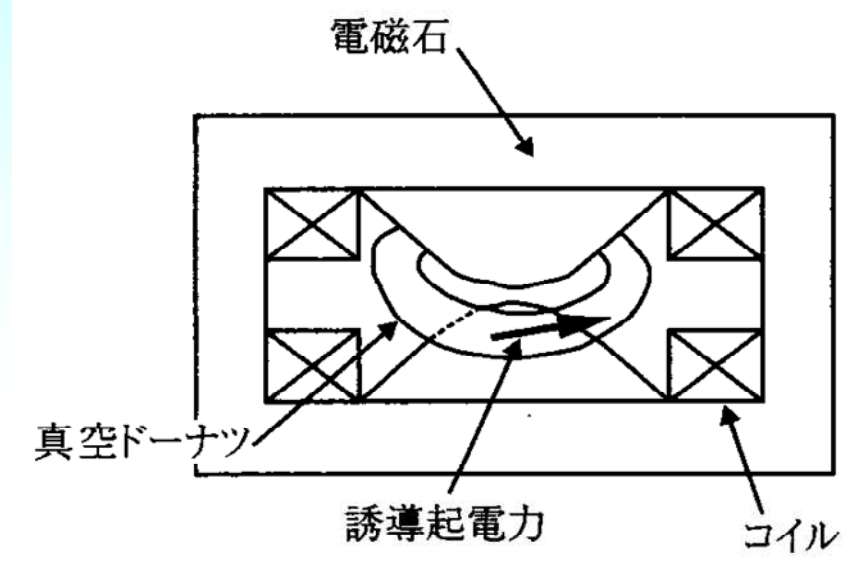
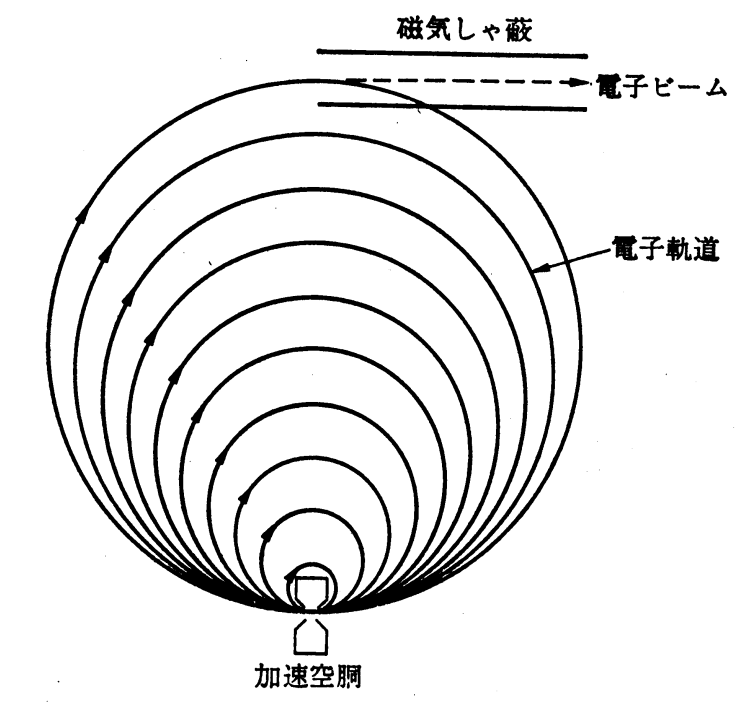


■粒子線治療装置イメージパース

# 6) ベータトロンほか

誘導起電力で加速：電子の加速

そのほか マイクロトロン  
トランス型加速器





# 1.6 放射線と物質との相互作用

## (1) 阻止能と飛程

荷電粒子(電荷 $ze$ )が物質内で反跳、励起、電離、制動放射で次第にエネルギーを失い、静止する。(光子や中性子などの非荷電粒子に対しては適用できない)

・電子によるクーロン相互作用 → 電子的阻止能

クーロン力  $f (\propto ze^2)$  通過時間  $\propto v^{-1}$

電子が受ける力積(運動量)  $\int f dt \propto ze^2/v$

電子が得るエネルギー(入射粒子のエネルギー損失)  $\propto (\text{力積})^2 (\propto (ze^2/v)^2)$

入射粒子のエネルギーに反比例、価数の二乗に比例

・エネルギー損失(阻止能stopping power)  $-dE/dx$  単位: J/m, MeV/cm

全阻止能  $S = S_{col} + S_{rad}$

衝突阻止能  $S_{col}$  → 電子的阻止能と核的阻止能

放射阻止能  $S_{rad}$  → 制動放射の発生によるエネルギー損失

・質量阻止能  $S_m (S/r)$  単位:  $Jkg^{-1}m^2, MeVg^{-1} cm^2$

質量衝突阻止能  $S_{m,col}$ 、質量放射阻止能  $S_{m,rad}$

物質にはあまり依存しない → 重量当たりの電子数は物質によらない

・線エネルギー付与(LET) ( $L_D$ ) 単位: keV/mm

特定のエネルギー  $D$  より小さい衝突に基づく

$-dE/dx \quad L_{\infty} = S_{col}$

・飛程(range)  $R$ : 止まるまでの距離

$R = \int dE/(dE/dx)$

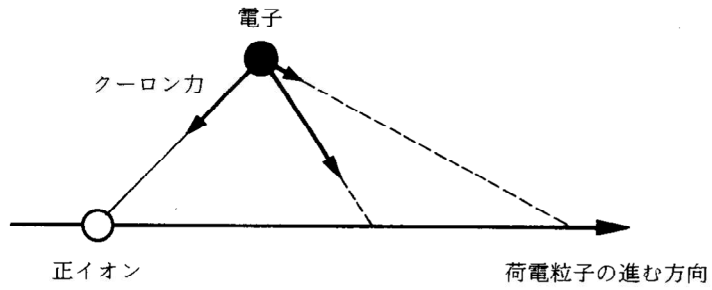


図 6.1 物質中を荷電粒子が通る時物質中の電子の受けるクーロン力

## (2) 電子と物質との相互作用

### 1) 電離と励起

$$S_{col} = e^4 nZF(I, v) / (8\pi e_0^2 m v^2)$$

$e_0$ : 真空の誘電率  $m$ : 電子の質量  $v$ : 入射電子の速度

$n$ : 1 cm<sup>3</sup>中の原子の数  $Z$ : 標的物質の原子番号

$I$ : 原子の平均励起エネルギー  $F(I, v)$ : 関数(変化小)

### 2) 散乱と制動放射 (制動放射の割合)

$$S_{rad} / S_{col} = (E + M_e c^2)Z / (1600 M_e c^2) \doteq EZ / 800 \quad (E [\text{MeV}])$$

### 3) 飛程R (g/cm<sup>2</sup>)

電子線は散乱による方向の変化が顕著

最大飛程: 最も深い飛程

$$R = 0.542 E - 0.133 \quad 0.8 \text{ MeV} < E$$

$$R = 0.407 E^{1.38} \quad 0.15 \text{ MeV} < E < 0.8 \text{ MeV}$$

### 陽電子の場合

陽電子消滅(電子との消滅)

0.511 MeVの光子を反対方向に2個放出

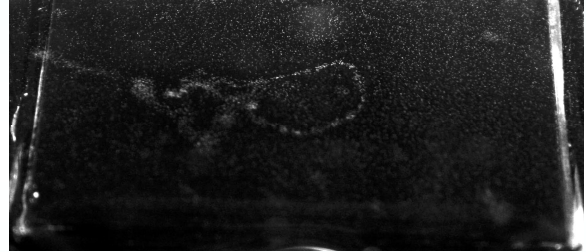
消滅放射( $\gamma$ )線 → 消滅相手の電子の

運動エネルギーによりエネルギーが変化

→ ドップラーシフト

電子の存在密度の違いにより寿命が変化

→ 陽電子消滅寿命測定法(PALS)



霧箱で観察したβ線の飛跡

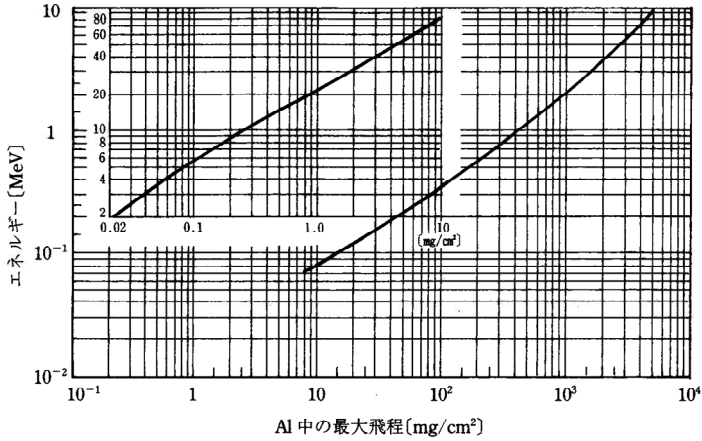


図 6.3 アルミニウム中のβ線の最大飛程とエネルギーの関係 (『アイソトープ便覧 改訂3版』p.33, 図5.4)

# 電子線(β線)の飛程

β線は、そもそも放出される時点でエネルギーが一様ではない。これはベータ崩壊の際に反電子ニュートリノが絡む三体崩壊であり電子のエネルギーが決まらないためである。さらに物質に入射後は非常に複雑な散乱過程を示すのであるが、概ね物質の厚さの増加に伴い指数関数的に強度が減少する。なお、入射する物質が変わっても質量衝突阻止能はほとんど変わらない。数MeV程度のβ線では制動放射に伴う放射阻止能は衝突阻止能よりずっと小さいが、ターゲットの原子番号Zに比例して大きくなるため、遮蔽の際には低Zの材料を使用する。

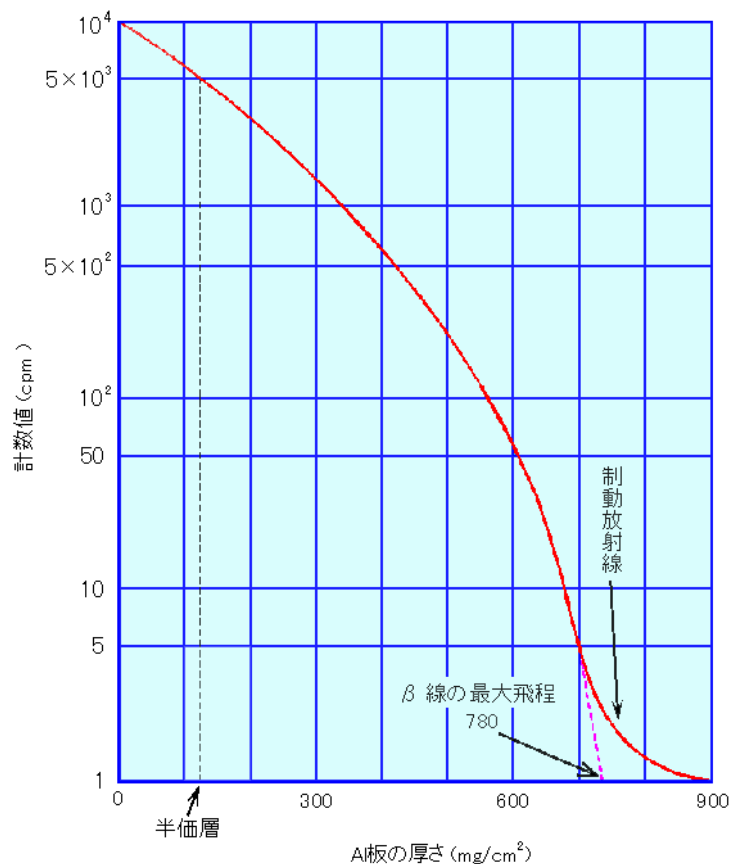


図3  $^{32}\text{P}$ のβ線のアルミニウムによる吸収曲線

[出典] 江藤秀雄(ほか): 放射線の防護, 丸善(1982年12月), p.56

入射電子線のエネルギー  $E$  (MeV),  
 最大飛程  $R$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) とすると、  
 アルミ中での最大飛程は以下の様に与えられる

$$R = 0.542 E - 0.133 \quad (0.8 < E)$$

$$R = 0.407 E^{1.38} \quad (0.15 < E < 0.8)$$

### (3) 重荷電粒子と物質との相互作用

#### 1) 電離と励起

$S_{col} = z^2 e^4 nZ \{ \ln(2mv^2 / (I(1-b^2))) - b^2 \} / (4\pi\epsilon_0^2 mv^2)$  ベーテの式

$m_i, z$ : 入射粒子の質量と原子番号  $b = v/c$

{ }の中は変化が少ないので  $S_{col} \propto z^2 / v^2 \propto z^2 m_i / E$

一次電離: クーロン力で直接電離

二次電子: 電離された電子がさらに電離(二次電離)するエネルギーを持つ場合  
 →  $\delta$ 線と呼ばれる

- ・イオン対(N個): 電離によるイオンと自由電子の対
- ・気体中でイオン対1個をつくるための平均エネルギー: **W値**  $W = E / N$
- ・ほとんど入射粒子のエネルギーに依存せず、電離エネルギーのほぼ2倍に等しい。
- ・空気中  $W = 33.97 \text{ eV}$

・**ブラッグ曲線**:  $S_{col}$ と侵入深さの関係 → 飛程直前で大きくなり**ブラッグピーク**を形成

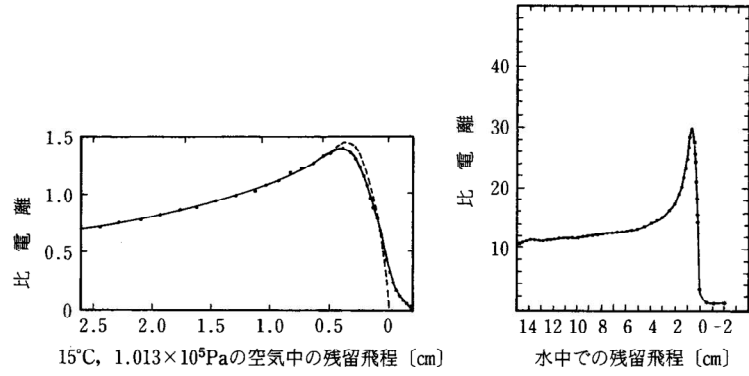


図 6.4  $\alpha$ 線に対するブラッグ曲線

左図は $^{210}\text{Po}$ からの $\alpha$ 線の空気中での比電離(単位長さの飛跡当たり電離されるイオン対の数)、右図は核子当たり225 MeVの $\alpha$ 線の水中の比電離を表す。飛程の最後のところのピークをブラッグピークという。横軸は残留飛程を表す。

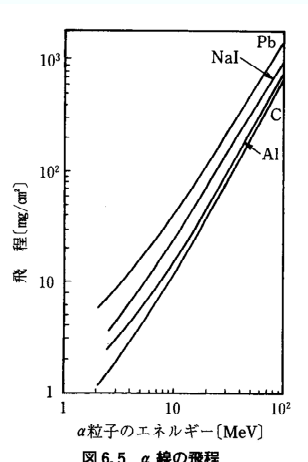


図 6.5  $\alpha$ 線の飛程



霧箱による $\delta$ 線の観察例

# 電子線(β線)とα線の比較

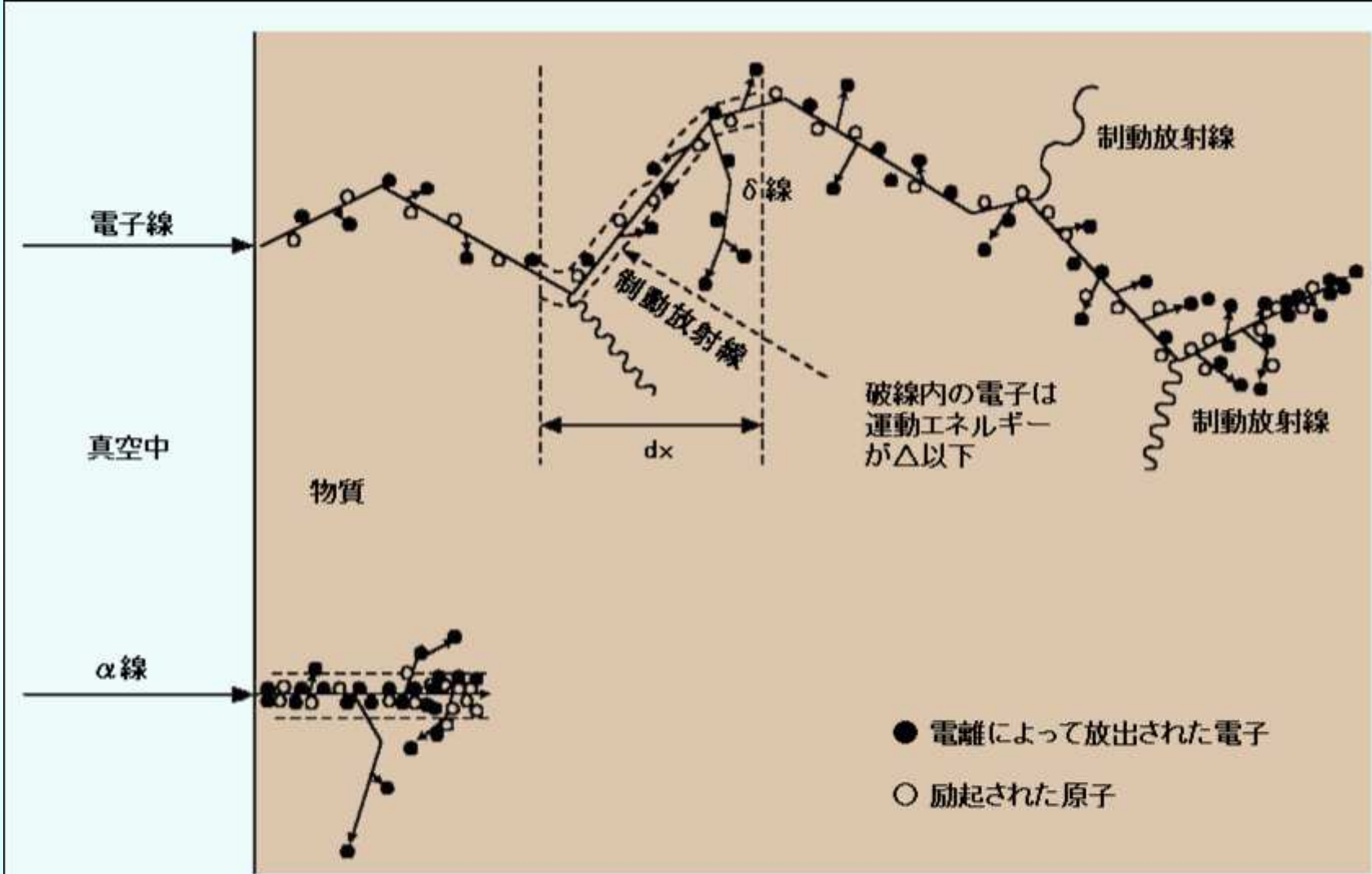


図1 荷電粒子と物質の相互作用

[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54



## 2) 散乱と制動放射

重イオンはほとんど方向を変えず直線的に進むため、制動放射は無視できる

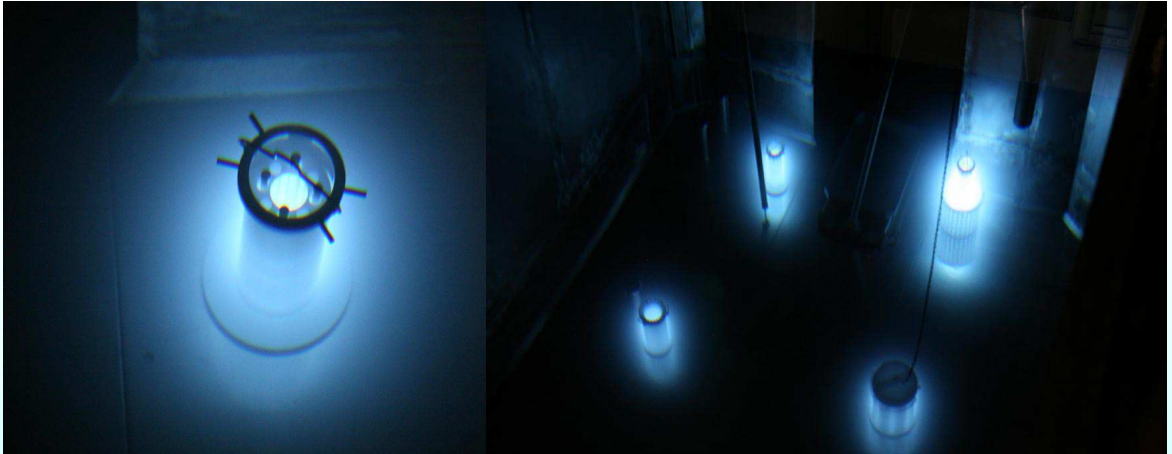
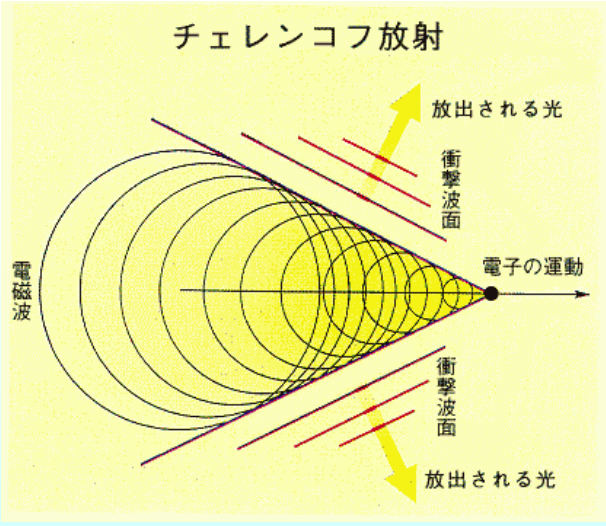
## 3) 飛程

$$S_{\text{col}} \propto z^2 m_i / E \text{より } R = \int dE / (dE/dx) \propto (E/z)^2 / m_i \propto m_i v^4 / z^2$$

この式から、例えば陽子の飛程から他のイオンの飛程が近似的に得られる  
 $\alpha$ 線の空気中での飛程  $R = 0.318E^{3/2}$  ( $E$  [MeV])

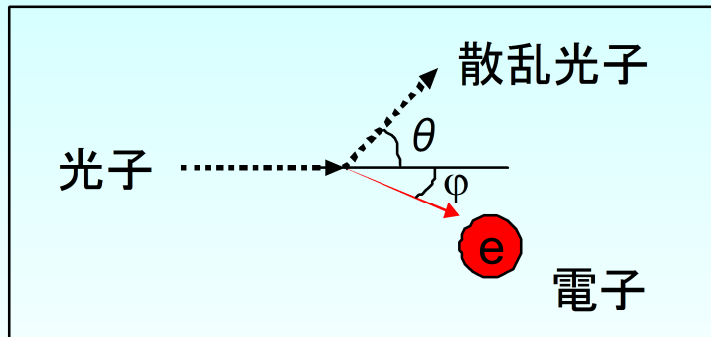
## 4) チェレンコフ効果

チェレンコフ光: 媒質中の光速より速い荷電粒子から発生する光

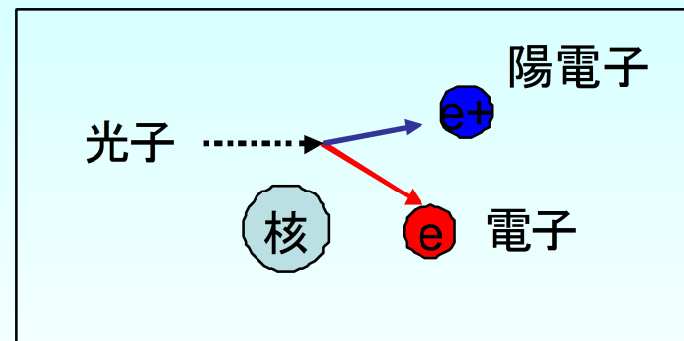


府大の照射プール中のCo-60線源からのチェレンコフ光。  
 $\gamma$ 線により叩き出された光電子が水中を走ることにより  
チェレンコフ光が発生する。

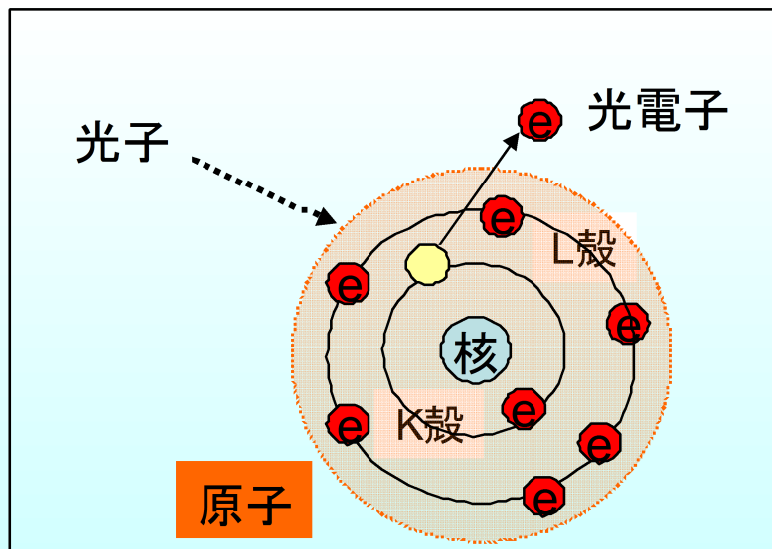
# ガンマ線と電子・原子核・原子との反応



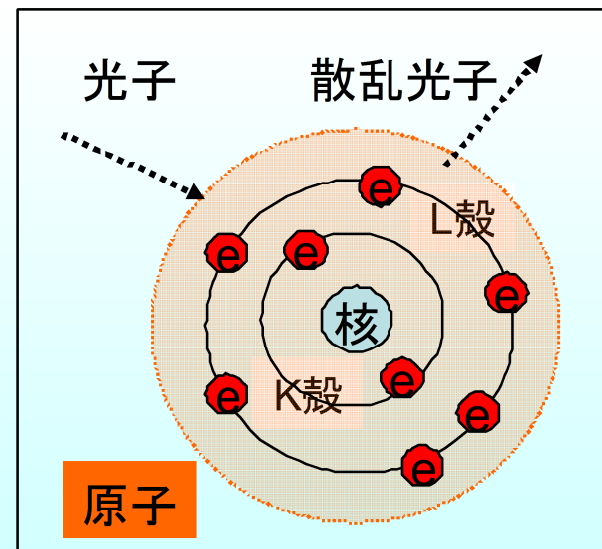
コンプトン散乱



電子対生成



光電効果



レイリー散乱

#### (4) 光子と物質との相互作用

$\gamma$ 線:  $\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊の余剰エネルギーが原子核から放出される  
(電子-陽電子の対消滅は例外的に消滅 $\gamma$ 線と呼ぶ)

X線: 電子の運動に伴い放出

##### 1) 光電効果

軌道電子が光子のエネルギー $E_\gamma$ を吸収してエネルギー $E_e$ で飛び出す  
(光電子、photoelectron)

$E_e = E_\gamma - I$   $I$ : 軌道電子の結合エネルギー(K殻、L殻、M殻、...で異なる)

光子の作用断面積がそれぞれの $I$ (吸収端)でジャンプ

原子断面積  $\tau \propto Z^5 E_\gamma^{-3.5}$  エネルギーが低いうちは原子番号に極端に依存

##### 2) コンプトン散乱 Compton scattering 光子の電子による散乱

エネルギーと運動量の保存則

$$E_\gamma = E_\gamma' / (1 + E_\gamma (1 - \cos \theta) / 0.511) \quad E_e = E_\gamma - E_\gamma'$$

$\theta = 180^\circ$  で $E_e$ 最大

$E_\gamma$ が十分大 最大の $E_e = E_\gamma - 0.256 \text{ MeV}$

散乱の原子断面積  $\sigma \propto Z$  電子の数に比例  $\rightarrow$  物質の密度に比例

##### 3) 電子対生成

原子核近傍の電場内で光子のエネルギーが電子と陽電子の物質に変化

$E_\gamma > 1.022 \text{ MeV}$  2個の電子の質量

運動エネルギーの和:  $E_\gamma - 2 m_e c^2$

対生成の原子断面積  $\chi \propto Z^2$  エネルギーとともに増加



# $\gamma$ 線・X線と物質の相互作用

## レイリー散乱

弾性散乱。入射光のエネルギーが変化しない散乱過程。

## 光電効果

軌道電子に入射光子のエネルギーを全て与えて、軌道エネルギーを差し引いたエネルギーを持つ高速電子(光電子)を生成する。断面積は入射光子のエネルギーの $-3.2$ 乗に比例する。

## コンプトン散乱

軌道電子に入射光子のエネルギーの一部を与えて、高速電子(コンプトン電子)を生成する。散乱後のエネルギーは散乱角に依存し、連続スペクトルとなる。

## 電子対生成

入射光子のエネルギーが  $1.022\text{MeV}$  以上の場合、原子核近傍のクーロン場中で電子と陽電子の対を生成する。入射光子は全エネルギーを失い消滅し、電子・陽電子の静止質量エネルギーの残りは運動エネルギーとして分配される。

## 光核反応

高エネルギーの光子が原子核と直接反応し、様々な素粒子が放出される。 $Z=50$ 程度の核種では中性子の結合エネルギーが $10\text{MeV}$ 程度であり、これ以上のエネルギーの光子の入射により $(\gamma, n)$ 反応を起こして中性子が放出される。

# γ線・X線の減衰

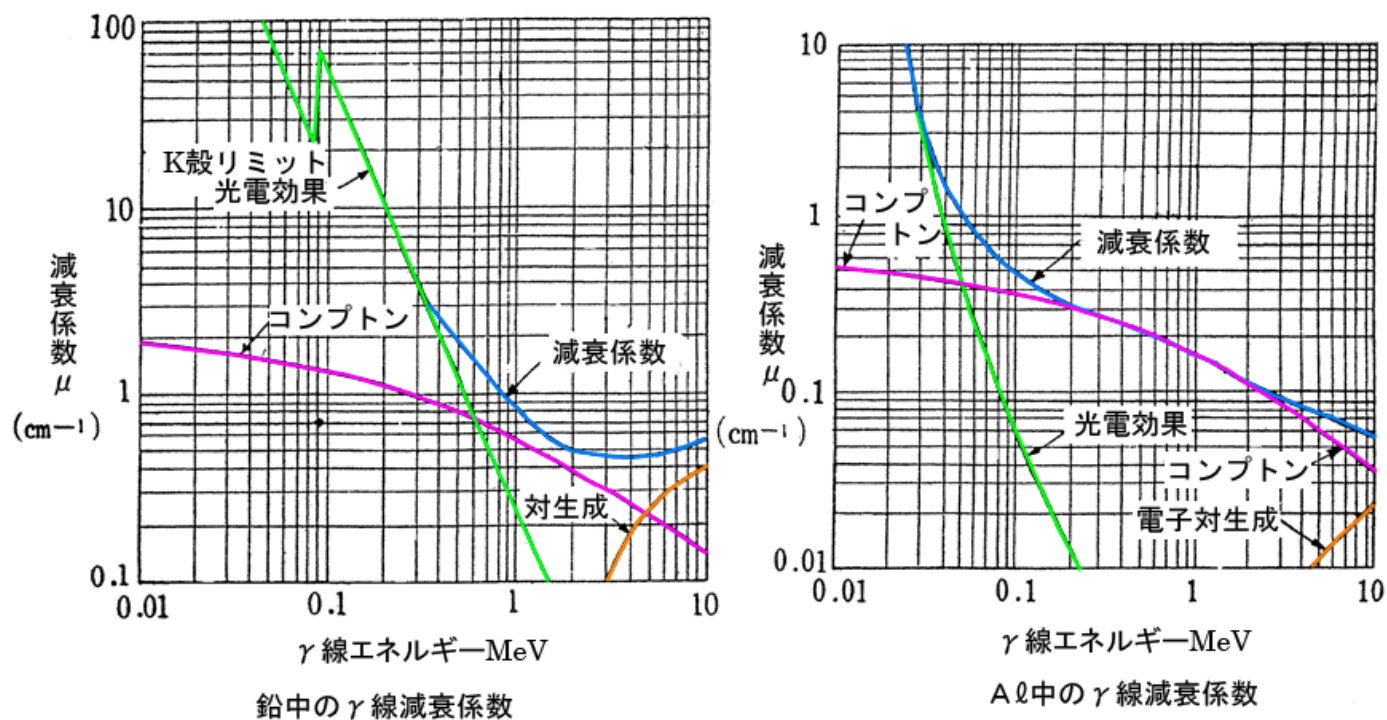


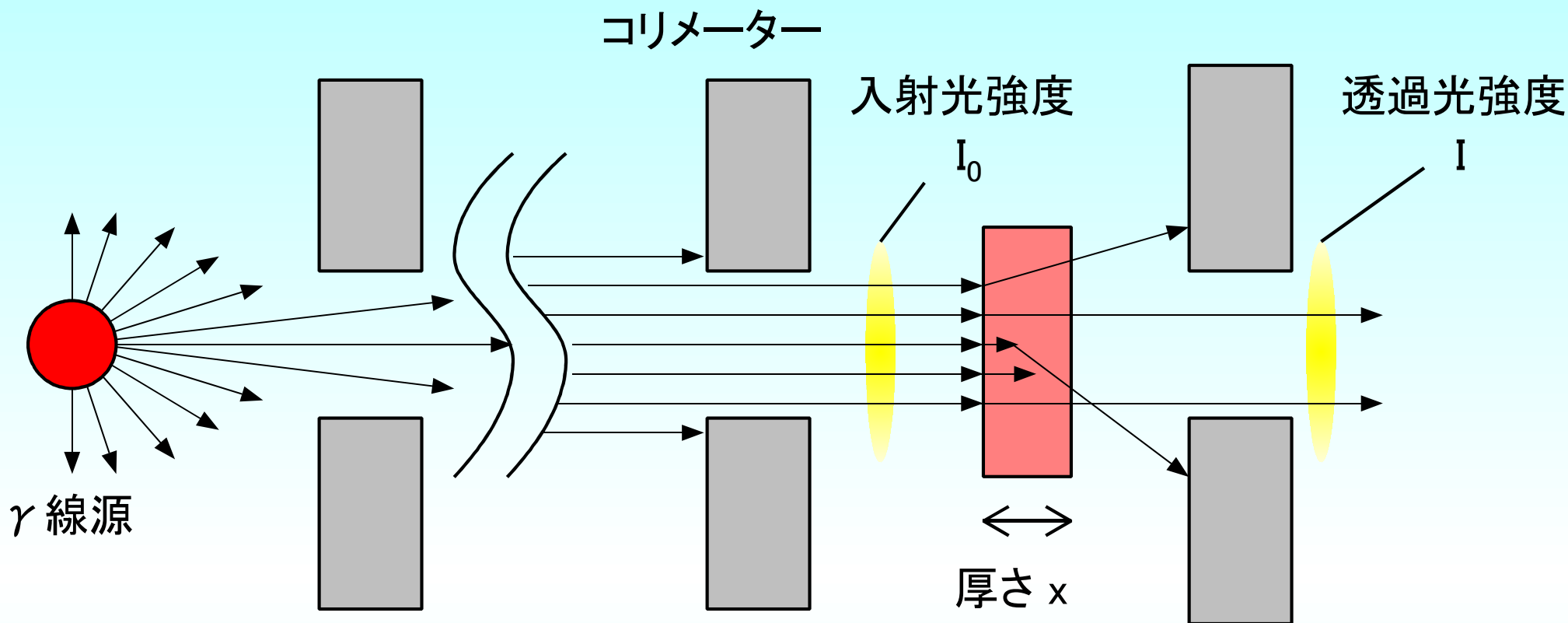
図3 γ線のコンプトン効果

[出典] 三浦 功、菅 浩一、俣野恒夫:「放射線計測学」、裳華房、p.21

ターゲットとなる物質の原子番号  $Z$  の増加と共に、線源弱係数は

光電効果  $Z^4 \sim 5$  に比例  
 コンプトン効果  $Z$  に比例  
 電子対生成  $Z(Z+1)$  に比例  
 となって  $Z$  が大きくなると急激に遮蔽能力が高くなる。

入射光子のエネルギー増加と共に、物質との相互作用を起こす効果が変わっていく。比較的低エネルギーではレイリー散乱、光電効果が主であり、次第にコンプトン散乱が支配的となる。高エネルギーでは電子対生成が主となる。光核反応は12-24MeV 付近で最大断面積となるが  $\mu$  への寄与は5%程度である。また、低エネルギーではK殻電子やL殻電子の電離エネルギー以上になると光電効果を起こせるがそれ以下では起こせないため、光電効果の効率が不連続に変化する。これをK吸収端、L吸収端と呼ぶ。



単一エネルギーで狭い平行線束  $\gamma$  線・X線の減衰は、

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

で表わされる。ここで  $I, I_0$  は光子のフラックスであり、散乱、吸収により試料の厚さ  $x$  [m] に伴って指数関数的に減衰していく。線減衰係数  $\mu$  の単位は  $[m^{-1}]$  などで、密度で除した質量減衰係数  $\mu_m$   $[m^2/kg]$  が様々な物質、エネルギーに対して与えられている。

## (5) 光子の減衰と物質へのエネルギー伝達

### ・コリメート光における光子数の変化

$$-d\phi/dx = s_{\text{tot}} N \phi = \mu \phi \quad N: 1 \text{ cm}^3 \text{内の原子の数} \quad s_{\text{tot}} = \tau + \sigma + \chi$$

光子束密度(光子フラックス)  $\phi$ : 単位時間に単位面積を通過する光子数

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

$\phi_0$ : 入射光子束密度

$\mu$ : 線減衰(減弱)係数  $\text{cm}^{-1}$

$\mu_m = \mu/\rho$ : 質量減衰(減弱)係数  $\text{cm}^2/\text{g}$   $x$ は $\text{g}/\text{cm}^2$ で表す

・半価層 $L_{1/2}$ :  $\phi$ が半分になる距離  $= \ln 2 / \mu = 0.693 / \mu$

・ $E$ : 1~2 MeV **コンプトン効果が支配的**

→  $\mu_m$ は**物質によらずほぼ一定**

(単位質量当たりの電子数が物質によらずほぼ同いため)

・広い光の場合

周りからの散乱線の影響が加わる(**ビルドアップ**)

$f = f_0 B e^{-mx}$   $B$ : ビルドアップ係数 ( $B > 1$ だが単純に求めることは出来ない)

・電子が受け取るエネルギーの割合

光電効果  $1 - \delta/E_\gamma$   $\delta$ : 放射X線の平均エネルギー(～結合エネルギー)

コンプトン散乱  $e$ の平均エネルギー /  $E_\gamma$

電子対生成  $1 - 2 m_e c^2 / E_\gamma$

## エネルギーの流れ

光子束:  $f$  エネルギーフルエンス:  $f E_\gamma$  単位:  $\text{Jm}^{-2}$

エネルギー束密度  $\phi$  (エネルギーフラックス) =  $\phi E_\gamma$  単位:  $\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$

・電子にエネルギーを与えて減衰する  $\phi$

$-d\phi/dx = \mu_{\text{TR}} \phi$ ,  $\mu_{\text{TR}}$ : エネルギー転移係数,  $\mu_{\text{TR}}/\rho$ : 質量エネルギー転移係数

・光子や非荷電粒子により、電子や荷電粒子に最初に与えられた単位質量当たりのエネルギー  $\rightarrow$  **カーマ** (kinetic energy released per unit mass):  $K$

$K = dE_{\text{TR}}/d\mu = f E_\gamma \mu_{\text{TR}}/\rho$  単位 Gy

・物質に吸収されるエネルギーの割合: エネルギー吸収係数  $\mu_{\text{en}} = \mu_{\text{TR}} (1-G)$

$G$ : **制動放射**で逃げるエネルギーの割合,  $\mu_{\text{en}}/\rho$ : 質量エネルギー吸収係数

$E_\gamma$  小の場合 (**空気で1 MeV以下**)  $\mu_{\text{en}} = \mu_{\text{TR}}$  ( $G=0$ )

・カーマの中で衝突損失により失われたエネルギー: 衝突カーマ  $K_c = f E_\gamma \mu_{\text{en}}/\rho$   
放出された荷電粒子からの制動放射による分を除いたもの

・荷電粒子平衡

ある領域への外部電子の侵入と内部電子の離脱が等しい状態 [吸収線量] =  $K_c$

・照射線量

X線、 $\gamma$ 線で単位質量の**空気**を照射して生じた電荷の量 (荷電粒子平衡下) C/kg

レントゲンR (cm, g, esu)  $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$

# 様々な放射線の単位

**フルエンス** fluence,  $/\text{m}^2$ ,  $\text{J}/\text{m}^2$  など

単位面積を通過する放射線の本数や、エネルギー。

ビーム状に一方向から来る場合だけでなく、ランダムな方向から飛来する場合にも定義され、その場合はベクトル量ではなくスカラー量として加算する。

単位時間あたりのフルエンスをフルエンス率もしくはフラックス (flux) と呼び、 $/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  や  $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$  などの単位となる。

空間を放射線がどの程度飛び交っているのかを定義した単位であり、実際には別の物理量を測定する必要がある。

加速器では照射したイオンや電子の粒子数を電荷量から求めるため、照射面積に対する電流(A)として測定する。

# 様々な放射線の単位

**照射線量** exposure, C/kg (旧単位 R)

X線、 $\gamma$ 線などの高エネルギーの光子によって空気1kgに吸収されたエネルギーによって発生した電荷量。

光子が空気中の原子を電離することによって発生する電荷の量を電離箱で測定することで求められ、空間線量の評価に用いられる。なお、光子のエネルギーが3MeVを超えると、発生した光電子が対象とした領域から出ていく量が無視できなくなり、「吸収したエネルギー」と「発生した電荷量」の関係が崩れるため補正が必要になる。

R(レントゲン)は旧単位で、 $1R=2.58 \times 10^{-4}C/kg$  である。

加速器などで照射を行った照射量を、照射線量と呼ばない様に注意が必要。



# 様々な放射線の単位

## カーマ kerma, Gy

kinetic energy of charged particles released in material の略で、入射光子(もしくは中性子などの非荷電粒子)のエネルギーのうち、単位質量の物質中で光電子などの荷電粒子の運動エネルギーとして吸収された量で、吸収線量の一つ。単位は $\text{J/kg} = \text{Gy}$ 。

吸収される物質によって空気カーマ、組織カーマなど呼称が異なる。また、発生した電子線からの放射損失を差し引いた衝突損失だけを考慮する場合、衝突カーマと呼ぶが、1MeV以下の光子では放射損失はほぼ無視できる。

$1\text{C/kg} = 33.97 \text{ Gy}$ (空気カーマ)の関係がある。

荷電粒子の場合に、衝突損失エネルギーを表わす量をシーマ(cema: converted energy per unit mass)と呼ぶ。

# 問題

1. 200 kVで加速した電子を厚い重金属ターゲットに入射したとき発生するエックス線の最小波長はいくらか。
2.  $^{12}\text{C}$ の結合エネルギーを求めよ。

# 問題 1 の解答

1. 200 kVで加速した電子を厚い重金属ターゲットに入射したとき発生するエックス線の最小波長は、

$$E_{\max} = h\nu_{\max}, \lambda_{\min} = c / \nu_{\max}$$

で、 $E_{\max} = 200\text{keV}$  で、 $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ,

$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  より、 $\lambda_{\min} = 6.2 \times 10^{-12} \text{ m}$

基本的な定数や公式は覚えておく必要がある

# 問題 2 の解答

2.  $^{12}\text{C}$ の結合エネルギーを求めよ。

(解答)

$^{12}\text{C}$ の質量を $M$ 、結合エネルギーを $\Delta M$ とすると、

$$\Delta M = N M_n + Z M_p + Z M_e - M$$

ここで、p、n、eの質量 $M_p$ 、 $M_n$ 、 $M_e$ はそれぞれ、

$$1.0073 \text{ u}, 1.0087 \text{ u}, 5.486 \times 10^{-4} \text{ u}$$

ただし電子の結合エネルギーは無視した。

また、 $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$ であるから、

$$\Delta M = 0.099 \text{ u} = 92 \text{ MeV}$$

## 問題3

1.4(2)において、核種Bの放射能 $I$ を、半減期 $T_{1/2} (= 0.693/\lambda)$ を用いて式で表しなさい。

## 問題4

Aの照射を時刻 $t=0$ から始め $t_1$ で終わるとき、 $I$ は $t_1$ を超えてどのように変化するか、グラフで示しなさい。ただし、 $t_1$ は $T_{1/2}$ に比べて十分長いものとする。

# 問題3と4の解答

問題3. 1.4(2)において、核種Bの放射能  $I$  を、半減期  $T_{1/2} (= 0.693/\lambda)$  を用いて式で表しなさい。

解答: ノートより  $I = \lambda N(t) = Y(1 - e^{-\lambda t}) = Y(1 - e^{-0.693 t/T_{1/2}})$

問題4. Aの照射を時刻  $t=0$  から始め  $t_1$  で終わるとき、 $I$  は  $t_1$  を超えてどのように変化するか、グラフで示しなさい。ただし、 $t_1$  は  $T_{1/2}$  に比べて十分長いものとする。

解答: ノートより  $I = \lambda N(t) = Y(1 - e^{-\lambda t})$

$0 \leq t \leq t_1$  において

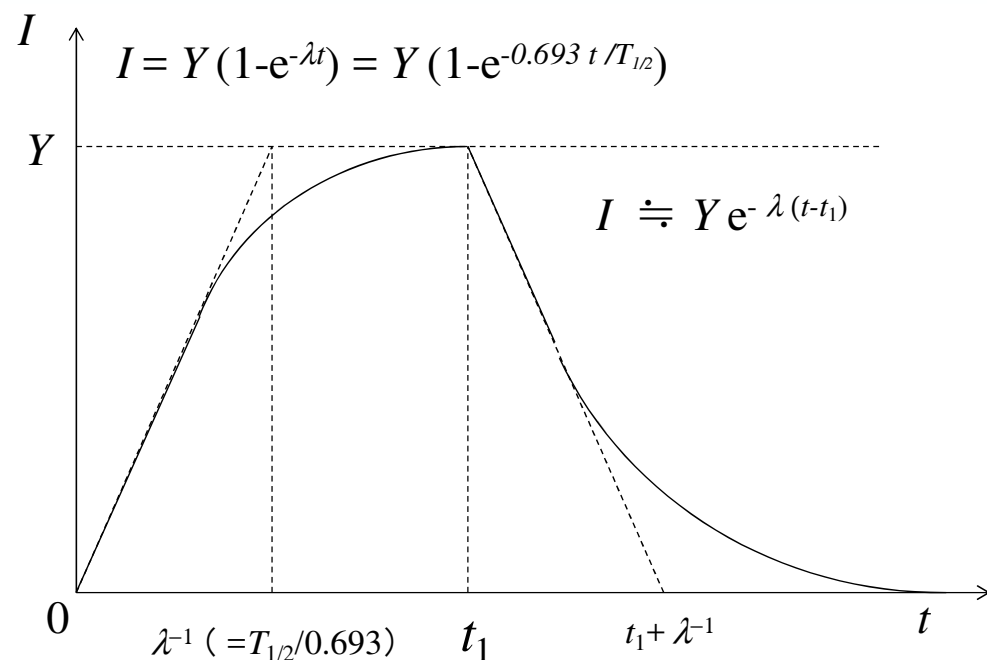
$$I = \lambda N(t) = Y(1 - e^{-\lambda t})$$

$t_1 \leq t$  において

$$I = \lambda N(t) = \lambda N(t_1) e^{-\lambda(t-t_1)}$$

$$\doteq Y e^{-\lambda(t-t_1)}$$

$$\text{ここで } \lambda N(t_1) \doteq Y$$



# 過去問の入手について

原子力安全技術センターのサイト

<https://www.nustec.or.jp/syunin/syunin05.html>

に、第一種、第二種放射線取扱主任者試験の過去問(6年分)が置いてあります。

(放射線取扱主任者試験 過去問 で検索すれば出てくる)

放射線取扱主任者試験問題集(通商産業研究社)などを購入しても良い。

こういった形で問題が出題されるか必ず確認すること。