

# 放射性崩壊

## 目次

- 1.放射能の発見
- 2.放射線と放射能
- 3.放射性崩壊の種類と特徴
- 4.崩壊法則と放射能の強さ
5. 比放射能
6. 複数の崩壊様式と有効崩壊定数, 有効半減期
- 7.自然放射性同位元素(核)の崩壊系列
- 8.原子炉に蓄積された放射能の時間変化
- 9.原子炉停止後の崩壊熱の時間変化

made by R. Okamoto (Emeritus Prof., Kyushu Inst. of Tech.)  
filename=decay-summary20171213.ppt

# 1.1放射能の発見とその衝撃

## 放射能の発見

1895年 レントゲン(Roentgen):によるX線の発見

1896年 ベクレル(Becquerel):ウラン化合物からの放射能の発見

1898年 キュリー夫妻(Curie):放射性のラジウム、ポロニウム発見

## 放射線の種類

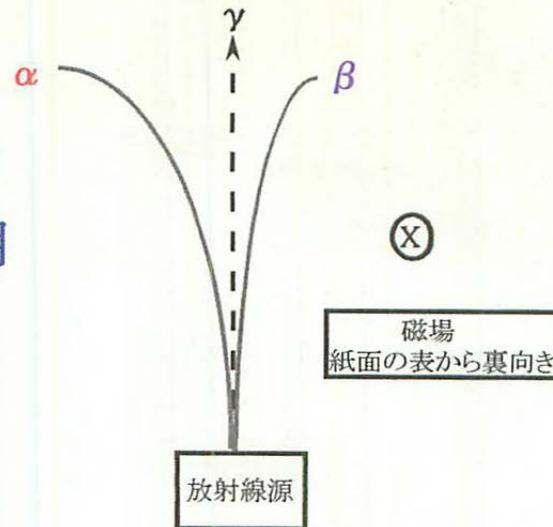
アルファ( $\alpha$ )線

ベータ( $\beta$ )線

X線、ガンマ( $\gamma$ )線

## 放射線と磁場との相互作用

$\alpha$ 線と $\beta$ 線は磁場の向きに垂直に、  
かつお互いに垂直な向きに偏向される。  
しかし、X線、 $\gamma$ 線は影響を受けない。



## 放射線の実体

$\alpha$ 線 = (高速の) $^4\text{He}$  原子核の流れ

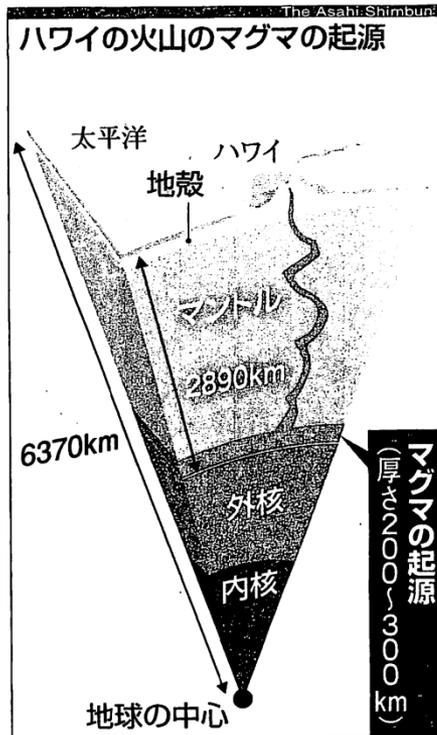
$\beta$ 線 = (高速の)電子の流れ

X線、 $\gamma$ 線 = 高エネルギーの電磁波

原子は分割できない、  
不変の粒子のはずだった! ?

# 1.2 宇宙から降り注ぐ自然放射線と体内の放射線

地面から: U(ウラン),  
Th(トリウム),  
Rn(ラドン),  
K(カリウム)



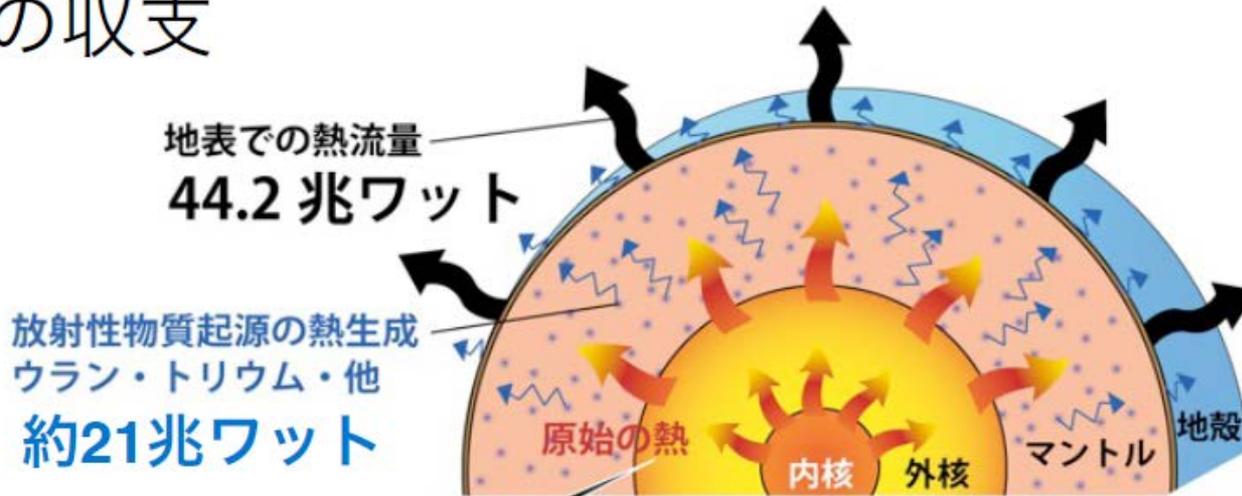
**ハワイ諸島火山  
マグマ深さ2500キロ**

ハワイ諸島の火山のマグマは深さ約2700〜2500キロ付近から上昇しているとみられることが、パリ地球物理研究所の河合研志客員研究員と東京大のロバート・ゲラー教授の研究でわかった。

ハワイの火山はホットスポット型と呼ばれ、地下深くに起源がある。河合さんは「放射性元素の崩壊熱で上昇流が起きると考えられているが、今回の熱源の場所が特定できた。この分布を詳しく調べ、地球の磁場をつくる核の状態を解明したい」と

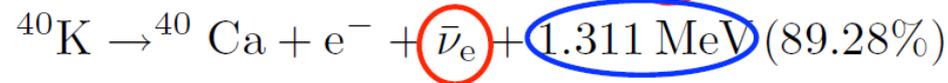
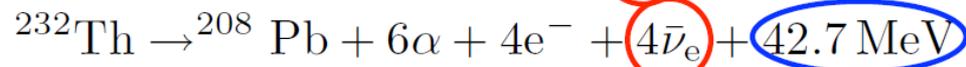
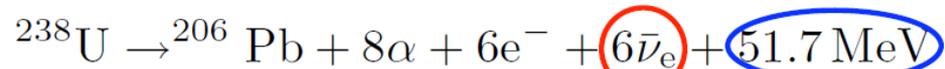
出典: 朝日新聞 2011.6.20

# 地熱の収支



## 地球形成時の熱は残存していた

地球内部に含まれる放射性物質も、ベータ崩壊をして反電子ニュートリノを放出する。



出典：東北大学ニュートリノ科学研究センター

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/rcns/?p=3778> 4

## 2. 放射線と放射能

### 放射線 (radioactive ray)

原子核から放出される高いエネルギーの粒子線(粒子の線束)または電磁波である。粒子線としては $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、中性子線、陽子線や重イオンなどが含まれる。高エネルギーの電磁波は $\gamma$ 線と呼ばれる。

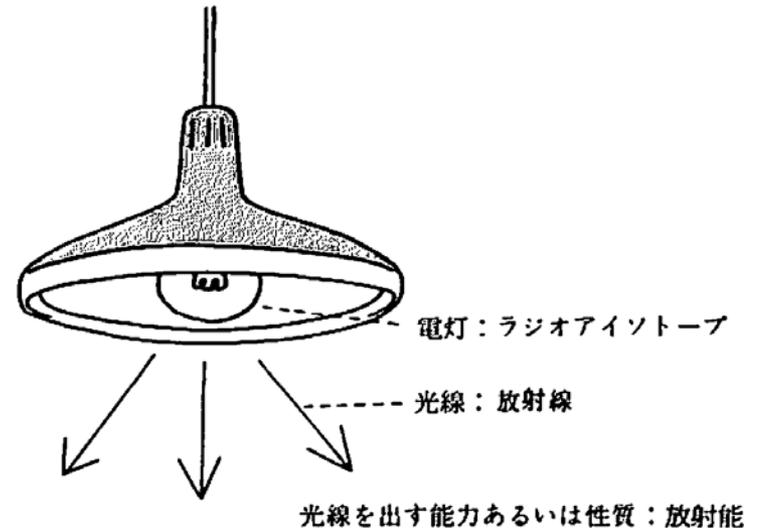
### 放射能 (radioactivity)

「放射線」を放出する能力または性質。

### 放射性物質(微粒子)

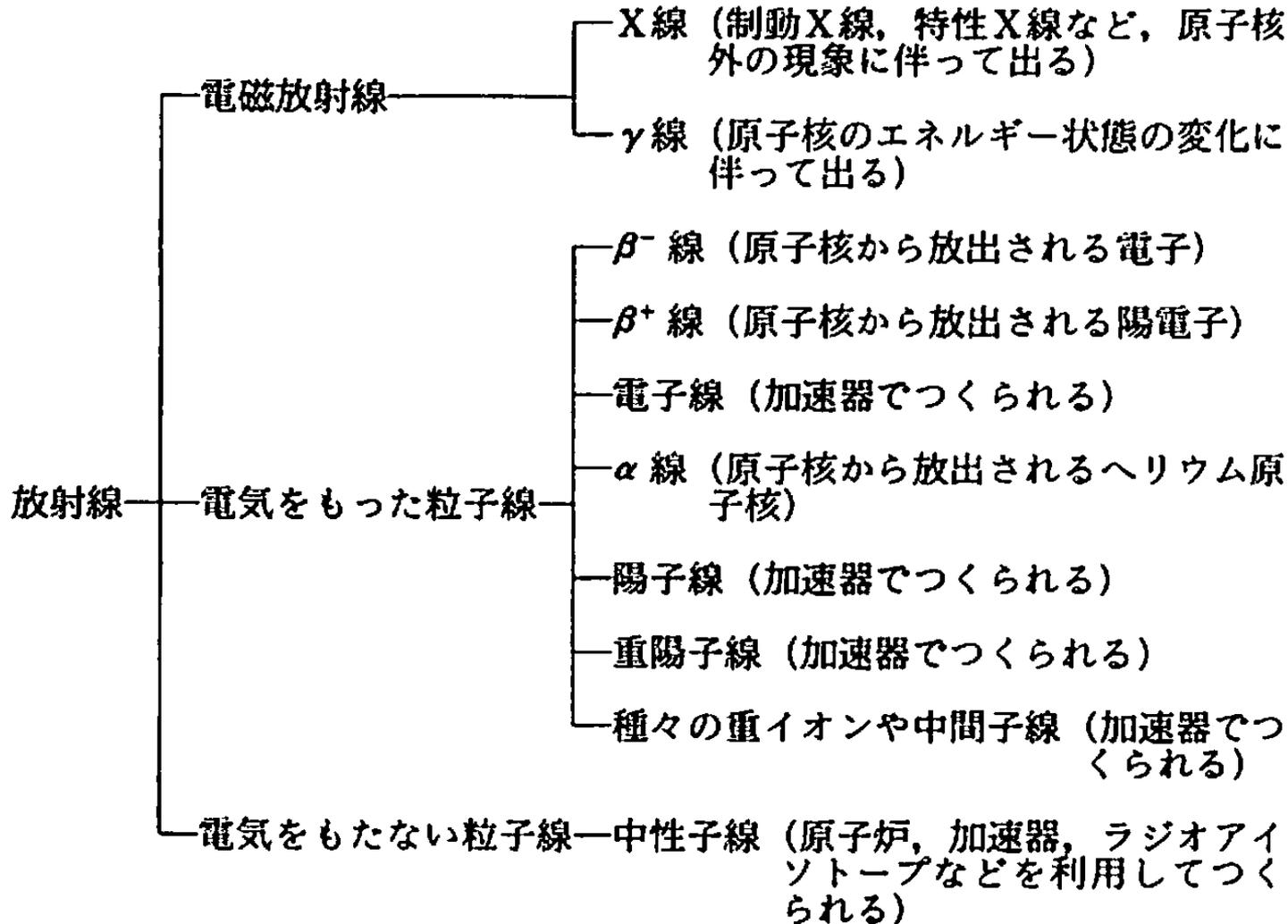
放射線を放出する同位元素。

あるいはこれらの原子(核)を含む物質を放射性物質という。



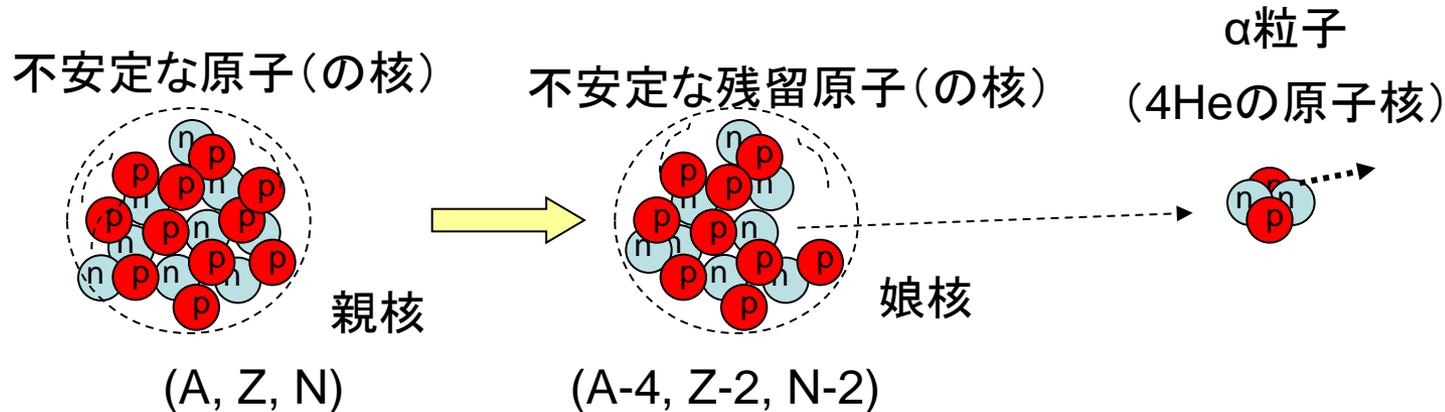
しかし、現在でも放射能という言葉が放射性物質という意味で使用されることもあり、注意すべきである。例えば、「放射線漏れ」とは放射線を出す源を囲む遮蔽などが不十分で外に放射線が漏れていることを意味する。「**放射能漏れ**」とは、文字通りでは、放射線を放出する能力が外に漏れていることであるから、源が外に漏れていることを意味する。しかし、「放射線漏れ」の意味で使用される場合もあるので、放射性物質が外に漏れたかどうかを確認する必要がある。

# 放射線の種類



# 3.放射性崩壊の種類と特徴

## 3.1アルファ崩壊



 中性子

 陽子

原子番号 $Z$

中性子数 $N$

質量数 $A=Z+N$

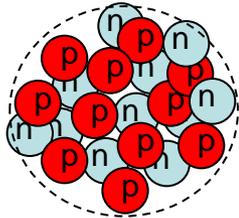
- (1)ウラン(U), プルトニウム(Pu)など重い核の場合に起こりやすい.
- (2) $\alpha$ 崩壊の後も, 残留原子(の核)は不安定(励起状態)であり, ベータ崩壊, ガンマ崩壊を引き続き起こす場合が多い,
- (3)放出された $\alpha$ 粒子は基底状態で, その運動エネルギーは崩壊熱と呼ばれる, 熱を発生する原因となる.

## 3.2 広義のベータ崩壊(ベータ崩壊と逆ベータ崩壊)

ベータ崩壊( $\beta$ -崩壊);

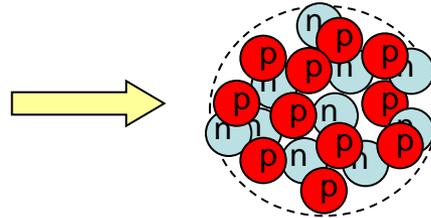
原子核内部の中性子1個が陽子に変わり, (高エネルギーの)電子と反中性微子(反ニュートリノ)が核外に放出される.

不安定な原子(の核)



(A, Z, N)

不安定な残留原子(の核)



(A, Z+1, N-1)

反ニュートリノ



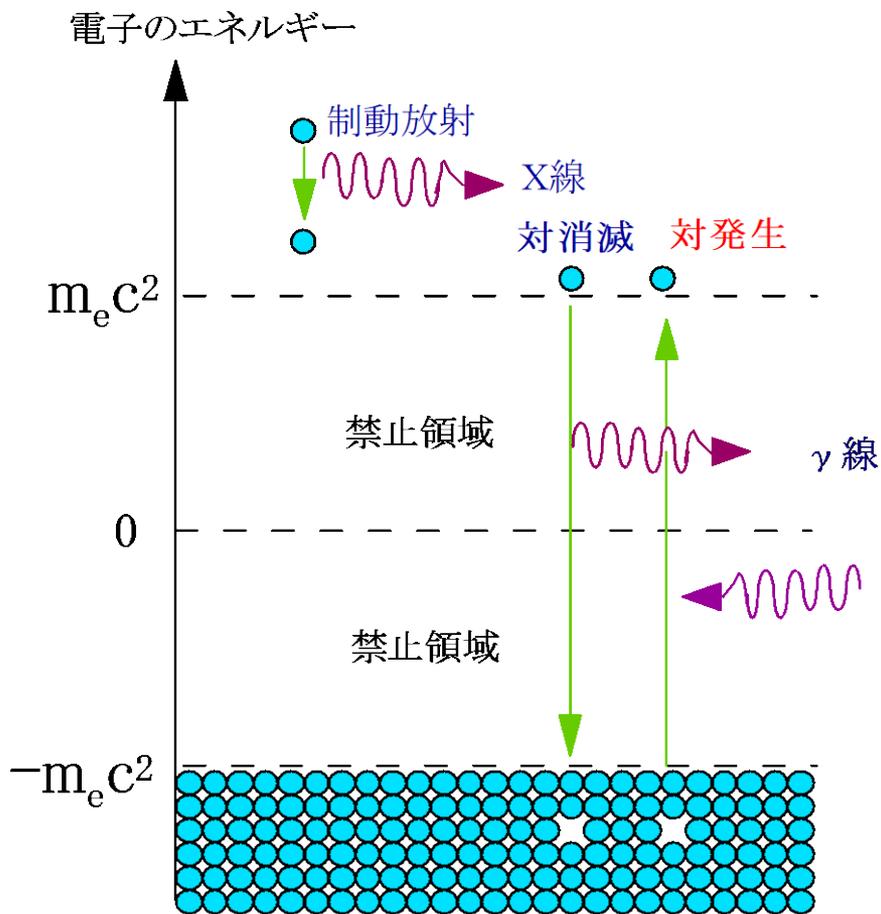
電子

- (1)中性子数過剰の核の場合に起こりやすい.
- (2)ベータ崩壊の後も, 残留原子(の核)は不安定(励起状態)であり, ガンマ崩壊を引き続き起こす場合が多い,
- (3)放出された電子は基底状態で, その運動エネルギーは崩壊熱と呼ばれる, 熱を発生する原因となる.

逆ベータ崩壊( $\beta^+$ 崩壊);

原子核内部の陽子1個が中性子に変わり, (高エネルギーの)陽電子と中性微子(ニュートリノ)が核外に放出される. 陽子数過剰の核の場合に起こりやすいことを除けば, ベータ崩壊と類似の性質がある.

# 参考：陽電子とは何か



アインシュタインの特殊相対論(1905)によれば, 質量 $m_e$ , 運動量 $p$ の電子の相対論的エネルギーは次の式で与えら

$$E^2 = (m_e c^2)^2 + (cp)^2$$

静止している場合( $p=0$ )の場合

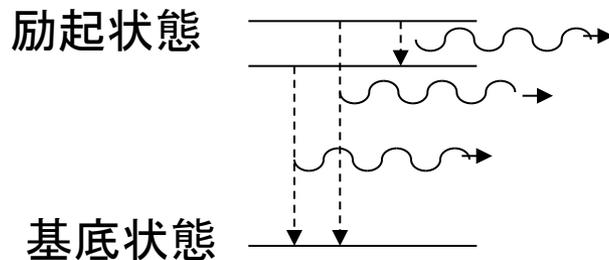
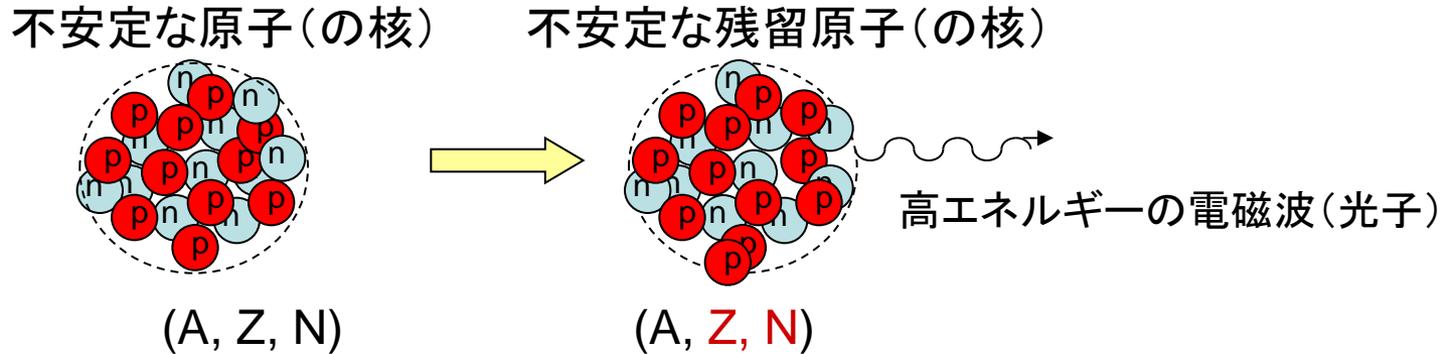
$$E = \pm m_e c^2 \cong \pm 0.51 \text{ MeV}$$

P. .M. A. Diracの相対論的電子論(1928)によれば

- 1) エネルギー $E$ が $-m_e c^2 < E < m_e c^2$ の範囲は禁止される,
- 2) 真空は, エネルギー配位においては負エネルギーをもつ電子の準位が完全に占有されている状態である。  
(負エネルギー電子の“海”)
- 3) 外部から $2m_e c^2$ 以上のガンマ線のエネルギーを吸収すると, 負エネルギー電子が $+m_e c^2$ 以上のエネルギー状態に励起される. これが通常の電子であり, 電子の穴(の状態)はプラスの電荷をもつ以外は電子と同じ物理的性質を示す. 電子の穴(の状態)を陽電子(positron)という.

### 3.3 ガンマ崩壊 ( $\gamma$ 崩壊)

励起状態にある原子核から、(高エネルギーの)電磁波(光子)が原子核外に放出されること。



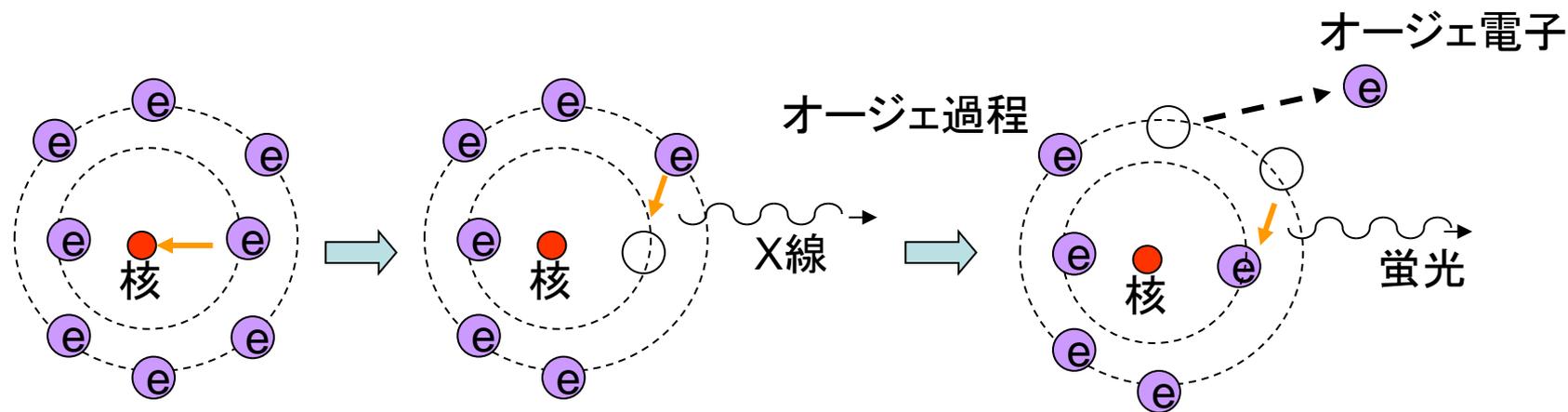
それぞれの原子核に固有で、2つの状態のエネルギーに対応する離散的な波長(振動数)の電磁波(光子)が放出される。

参考:歴史的には、原子の励起状態にある電子がより低い励起状態に遷移する場合に放出される電磁波のうち、波長の極端に短いものをX線と呼ぶ。しかし、現在は加速器によって高エネルギーの光子線を生成できるようになっているので、X線とガンマ線の原理的な区別は意味がなくなってきた。

### 3.4 電子捕獲とオージェ電子の放出

電子捕獲=EC, electron capture

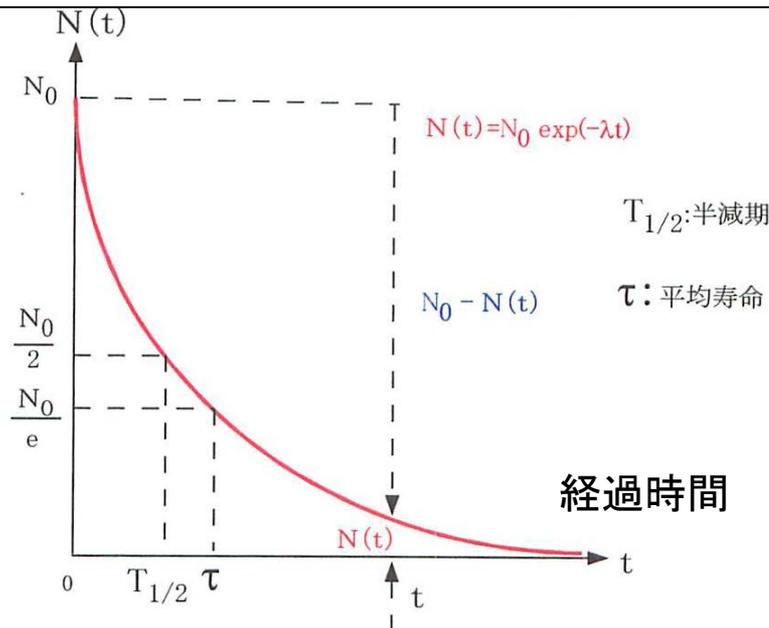
ある種の原子核において、核に近い軌道(K殻)の電子が電磁的相互作用により、核に吸収され、核内の陽子1個が中性子1個に変わる過程がある。この現象が起ると、K殻軌道が空になり、他の電子がこれを埋めるために、K-X線と呼ばれる光子を放出する。あるいは、この光子放出の代わりに、外殻軌道にある電子にエネルギーを与えて、原子外に放出されて、原子全体のエネルギーが下がる(脱励起)こともある。後者の過程をオージェ過程(Auger process)と呼ばれ、一種の自己電離現象である。このときに放出される電子をオージェ電子(Auger electron)と呼ぶ。



原子核の変化  $(A, Z, N) \longrightarrow (A, Z-1, N+1)$

それぞれの原子に固有で、2つの状態のエネルギーに対応する離散的な波長(振動数)の電磁波(光子)が放出される。

# 4. 崩壊法則と放射能の強さ



初めの原子(核)の個数  $N_0$

$$-\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t), \lambda: \text{崩壊定数},$$

$$N_0 \equiv N(0)$$

時刻  $t$  だけ経過後,  
残存している元の原子〔核〕の個数

$$\begin{aligned} N(t) &= N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot e^{-t/\tau} \\ &= N_0 \cdot \exp(-\lambda t) = N_0 \cdot \exp(-t/\tau) \end{aligned}$$

半減期  $T$

$$N(t + T) = \frac{1}{2} N(t) \rightarrow e^{-\lambda T} = 2^{-1}$$

$$\rightarrow \ln(e^{-\lambda T}) = \ln(2^{-1}) \rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} \cong \frac{0.693}{\lambda}, (\ln \equiv \log_e)$$

放射能(radio-activity)の強さ

半減期を人為的に変化させることはできない!

$$A(t) \equiv \lambda N(t)$$

$$= -\frac{dN(t)}{dt}; \text{単一崩壊様式の場合}$$

放射能の単位:

ベクレル (Bq) = 毎秒1個の崩壊 (壊変) 12

## 5. 比放射能

放射性同位体を含む物質の、単位質量あたりの放射能の強さを比放射能 (specific radioactivity) ことである。言い換えれば、単位時間・単位質量あたりに同一の放射性物質が壊変する回数であり、SI単位で表せば  $\text{Bq g}^{-1}$  となる。

$$S \equiv \frac{A}{m} \\ = \frac{\lambda N_A}{M} \dots (1)$$

ここで、考えている核種の質量を  $m$ 、粒子数を  $N$ 、グラム原子量を  $M$ 、崩壊定数を  $\lambda$ 、半減期を  $T_{1/2}$ 、アボガドロ数を  $N_A$  とすると

$$N = \frac{m}{M} N_A, \dots (2), \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cong \frac{0.693}{T_{1/2}} \dots (3)$$

である。

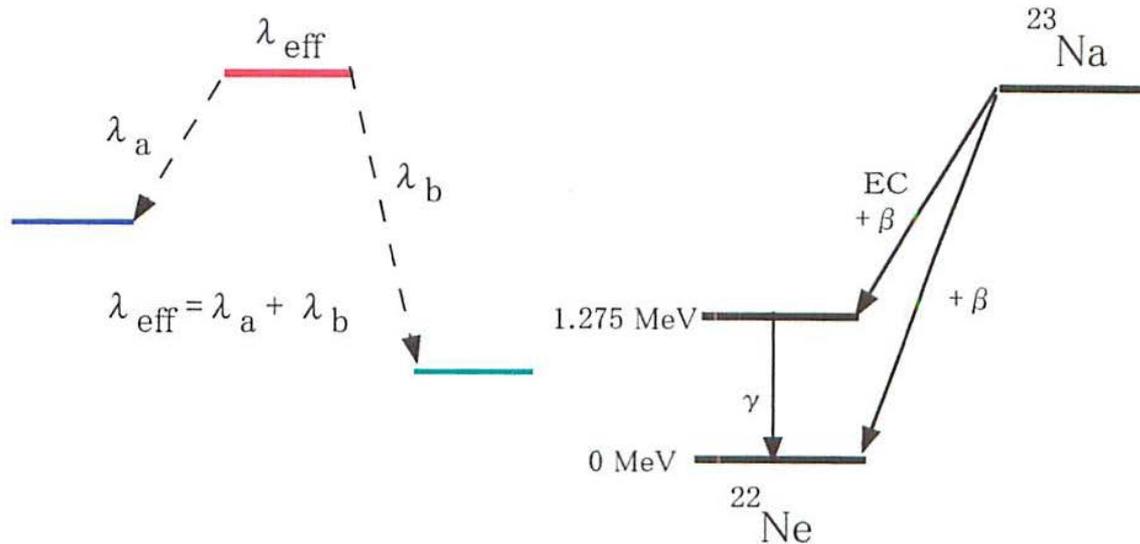
$$\text{半減期が年単位の場合, } S \cong \frac{1.32 \times 10^{16}}{\left(\frac{T_{1/2}}{\text{year}}\right) \left(\frac{M}{\text{g}}\right)} \text{Bq/g, 半減期が秒単位の場合, } S \cong \frac{4.17 \times 10^{23}}{\left(\frac{T_{1/2}}{\text{s}}\right) \left(\frac{M}{\text{g}}\right)} \text{Bq/g,} \dots (1')$$

$S$  の次元・単位

$$[S] = \text{Bq/g, Bq/Kg} \dots (4)$$

核種名	半減期	比放射能
トリチウム, T	12.3年	3.59x10 <sup>14</sup> Bq/g, 1g当り359兆 Bq
炭素14	5,700年	1.66 x10 <sup>11</sup> Bq/g, 1g当り1,160億 Bq
カリウム40	1.25x10 <sup>9</sup> 年	2.65x10 <sup>5</sup> Bq/g, 1g当り26.5万 Bq
コバルト60	5.27年	4.18x10 <sup>13</sup> Bq/g, 1g当り41.8兆 Bq
ストロンチウム89	50.5日	1.07x10 <sup>15</sup> Bq/g, 1g当り1070兆 Bq
ストロンチウム90	28.9年	5.09x10 <sup>12</sup> Bq/g, 1g当り5兆900万 Bq
ヨウ素131	8.02日	4.60x10 <sup>15</sup> Bq/g, 1g当り4600兆 Bq
セシウム134	2.06年	4.79x10 <sup>13</sup> Bq/g, 1g当り47.9兆 Bq
セシウム137	30.1年	3.21x10 <sup>12</sup> Bq/g, 1g当3兆2100億 Bq

## 6. 複数の崩壊様式と有効崩壊定数, 有効半減期



$$dN = -\lambda_a N dt - \lambda_b N dt$$

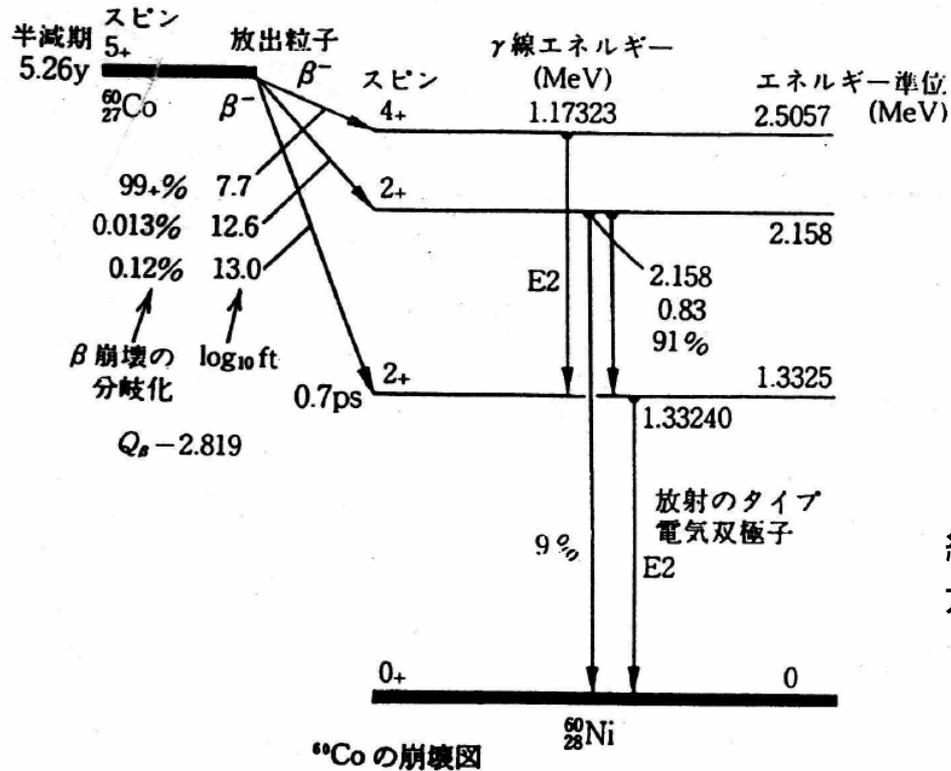
$$\equiv -\lambda_{\text{eff}} N dt$$

$$\rightarrow \lambda_{\text{eff}} = \lambda_a + \lambda_b, T_{\text{eff}} \equiv \frac{T_a \cdot T_b}{T_a + T_b}$$

有効崩壊定数

有効半減期

# $^{60}\text{Co}$ の崩壊図





## 8.原子炉に蓄積された放射能の時間変化(近似式と使用法)

熱出力 $P_{\text{thermal}}$ の原子炉が運転時間 $T_0$ 、運転停止後経過時間 $t$ のとき、放射能 $A(t, T_0)$

$$A(t, T_0) \approx 4.29 \times 10^{20} \times \left( \frac{P_{\text{thermal}}}{\text{GW}} \right) \cdot \left[ \left( \frac{t}{\text{s}} \right)^{-0.2} - \left( \frac{t + T_0}{\text{s}} \right)^{-0.2} \right] \text{Bq}, \quad \text{Wigner-Wayの近似式}$$

$P_{\text{thermal}}$  : 熱出力, MW=Mega W(watt)= $10^6$ W,

GW=Giga W(watt)= $10^9$ W=100万kw, 1Bq=1dps

出典

1)豊田正敏他「原子力技術読本」  
オーム社、1973年、p.79.

### 近似公式の使い方

$$P_{\text{thermal}} = 3\text{GW}(\text{電気出力}100\text{万kw}),$$

$$T_0 = 1 \text{ year} = 3.1536 \times 10^7 \text{ s}, \quad t = 100\text{days} = 8.64 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\rightarrow A(t = 100\text{days}) = 4.292 \times 10^{20} \text{ Bq}$$

福島第一原発事故： 2011年6月発表値

汚染水中の推定放射能が80万テラベクレル(約100万テラBq= $10^{18}$ Bqと近似)

$$\text{放出割合}(\%) = \frac{10^{18} \text{ Bq}}{4.292 \times 10^{20} \text{ Bq}} \times 100 \approx 0.2\%$$

空気中などへの漏洩を含めて10倍と仮定しても、高々2%程度の放出

## 8.原子炉停止後の崩壊熱の時間変化(近似式と使用法)

熱出力 $P_{\text{thermal}}$ の原子炉が運転時間 $T_0$  [s],停止後経過時間 $t$  [s]のとき、崩壊熱 $P_{\text{decay}}$

$$P_{\text{decay}}(t, T_0) \approx 6.22 \times 10^{-2} \times P_{\text{thermal}} \left[ t^{-0.2} - (t + T)^{-0.2} \right],$$

ただし、係数は6.22(文献1,2),6.56(文献3)

$P_{\text{thermal}}$ : 停止前の熱出力

Borst-Wheelerの関数  
とも呼ばれる。

出典

- 1) 豊田正敏他「原子力技術読本」, オーム社, 1973年, p.80
- 2) E.E.ルイス「原子力炉の安全工学(上)」, 現代工学社, 1985年, p.10.
- 3) ラマーシュ「原子炉の初等理論(上)」, 吉岡書店, 1995年, p.134.

### 近似公式の使い方

電気出力100万kw (=1 GW=10<sup>9</sup>W) の場合、熱効率33%として →  $P_{\text{thermal}} \cong 3\text{GW}$ ,

運転1年間, 運転停止後100日目の場合

$$T_0 = 1 \text{ year} = 365 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s} = 3.15 \times 10^7 \text{ s},$$

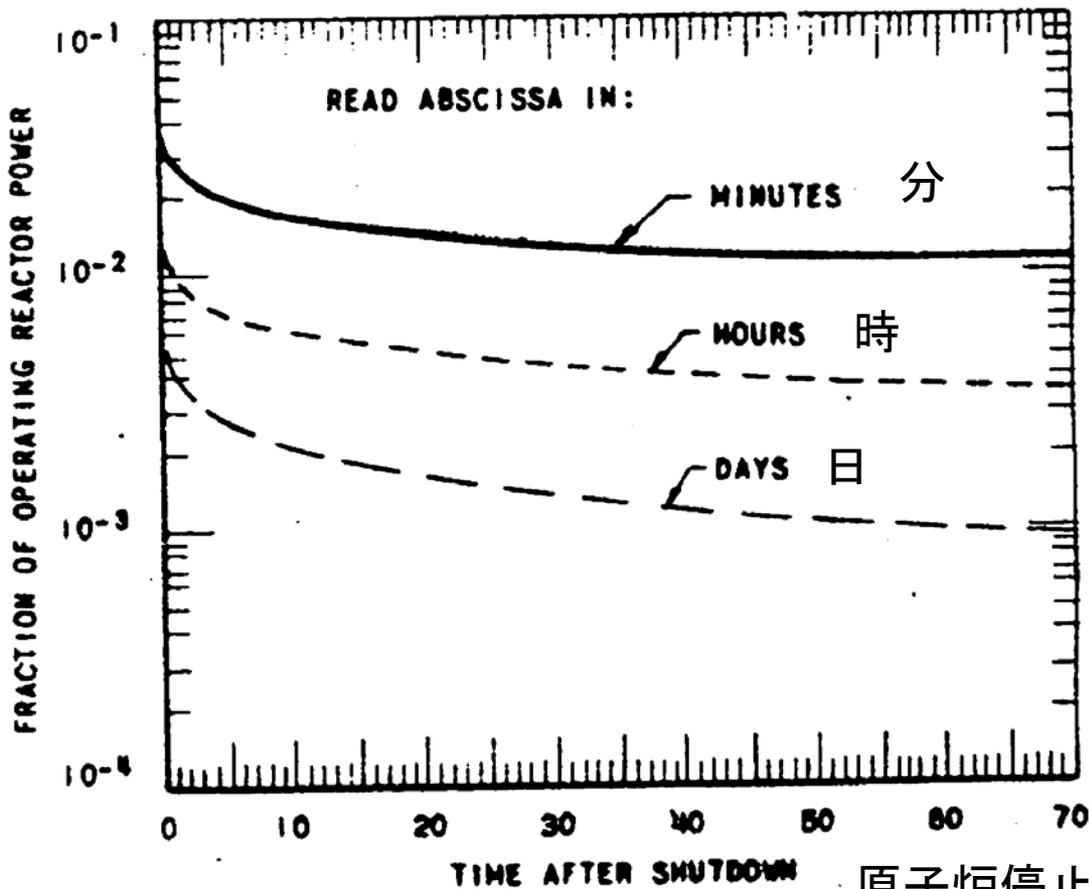
$$t = 100 \text{ days} = 100 \times 24 \times 60 \times 60 \text{ s} = 8.64 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\rightarrow P_{\text{decay}}(1\text{y}, 100\text{d}) = 6.22 \times 10^{-2} \times 3\text{GW} (0.041 - 0.030)$$

$\cong 1866 \text{ kW}$  ; 100 W 電球の18660個相当

# 原子炉における崩壊熱の時間経過(詳細)

ある時刻における  
崩壊熱出力  
÷  
原子炉停止  
直後の熱出力



縦軸は対数であることに注意

Reactor Physics Constants, ANL-5800, 1958, p.636.  
ANL=Argonne National Laboratory, USA.