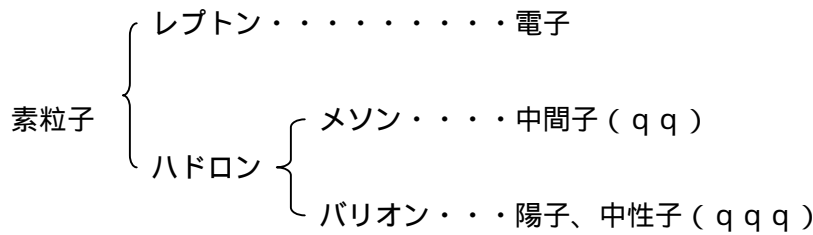


第 部 放射性同位元素の科学

1 . 原子の構造



原子核は核子 (陽子と中性子) から構成されている。

質 量 数 : $A = Z + N$

核 種 : Z と N の組合せで規定される原子

同 位 体 : Z の等しい核種

同 重 体 : A が等しく Z が異なる核種

放射性核種 : 自発的に放射線を出して他の核種へ変化する核種 (R I)

例:窒素は質量数 14 と 15 の 2 種類の核種が安定同位体であり、天然存在比は 14N が 99.635%、15N が 0.305%である。原子量は、2 種類の核種の質量の重みをつけた平均値である。

$$14.003074 \times 0.99635 + 15.000107 \times 0.00365 = 14.0067 \quad \text{窒素の原子量}$$

核種	存在比(%)	質量 (amu)
14N	99.635	14.003074
15N	0.365	15.000107

1 . 2 量子数

原子の電子軌道は 4 種類の量子数で規定される。 例 : 2p(n=2, l=1)、3d(n=3, l=2)

名称	記号	可能な値
主量子数	n	n 1
方位量子数	l	0 1 n - 1
磁気量子数	m	- l m l
スピン量子数	s	$\pm 1 / 2$

主量子数は軌道のだいたいの大きさ、つまり

電子のエネルギー準位を決める。

方位量子数は軌道の形を決める。

$$l = 0、1、2、3、\dots$$

$$s、p、d、f、\dots$$

磁気量子数は軌道の方向性を規定する。

スピン量子数は電子の自転の向きを決める。

1.3 状態とエネルギー

基底状態・・・最も安定、すなわち最もエネルギーの低い状態

励起状態・・・基底状態よりもエネルギーの高い状態

1.4 原子核の安定性

Zの小さい範囲($Z < 20$)では、ZとNが同数またはほぼ等しい核種が安定である。

Zが増加するにつれ $Z < N$ である核種が安定になる。

陽子・中性子が偶数で組を作ることが、原子核の安定化に重要である。

Z、Nがマジックナンバーである核種は非常に安定である。

マジックナンバー：2、8、28、50、82、126

1.5 質量とエネルギーの単位

原子質量単位 (amu)

^{12}C の1原子の質量を12.000000とする。

$$1 \text{ amu} = 1.660 \times 10^{-24} \text{ g}$$

電子ボルト (eV)

電気素量eの電荷を持つ粒子が、真空中で電位差1Vの2点間で加速される時に得るエネルギー

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

質量とエネルギーは $E = mc^2$ で関係づけられており、互いに変わり得る。

$$E(1 \text{ amu}) = 931.5 \text{ MeV}$$

$$\text{電 子} : 5.486 \times 10^{-4} \text{ amu} \quad 0.511 \text{ MeV}$$

$$\text{陽 子} : 1.0072766 \text{ amu} \quad 938.256 \text{ MeV}$$

$$\text{中性子} : 1.0086652 \text{ amu} \quad 939.550 \text{ MeV}$$

2. 放射能

放射能：物質から自発的に放射線が放出される（放射線壊変する）性質。

放射線：放射線壊変によって放出される粒子（光子を含む）の作るビーム。

線、線、線がある。

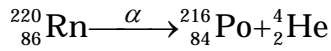
2.1 壊変

質量数Aが大きい核種の多くのは過剰の質量を 粒子の形で放射しようとする傾向がある。

親核種	Z	N	A
娘核種	Z - 2	N - 2	A - 4
粒子	2	2	4

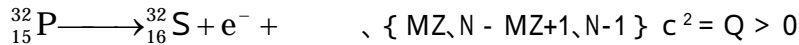
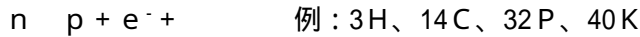
$$\{ MZ, N - (MZ-2, N-2 + M2, 2) \} c^2 = Q > 0$$

親核種 娘核種 粒子 壊変エネルギー



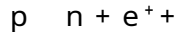
2.2 壊変

陽子数 Z に比べて中性子数 N が過大な核では、原子核内で中性子 n が陽子 p に変わり、それに伴い電子 e⁻ が核外に放射される。



2.3 ・壊変と電子捕獲

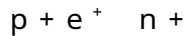
陽子数 Z が中性子数 N に比べて課題のときは、原子核内で陽子が中性子に変化し、それとともに陽電子 e⁺ が放射される。



$$(MZ, N - MZ - 1, N - 1) \quad c^2 - 2mc^2 = Q > 0$$

親核種 娘核種 電子対生成エネルギー

また、陽子過剰の原子核は軌道電子の 1 つを核内に取り込んで次の変化をすることもある。これを電子捕獲という。



$$(MZ, N - MZ - 1, N + 1) \quad c^2 - W = Q > 0 \quad W: \text{捕獲される軌道}$$

親核種 娘核種 電子のイオン化

例: 11C, 13N, 15O, 18F エネルギー

2.4 壊変

原子核が励起状態から基底状態へ遷移するとき、エネルギーを粒子（光子）として放射する。壊変、壊変においても、多くの場合親核種からの遷移は娘核種の基底状態とともに励起状態へも起こる。したがって および 壊変でも同時に 粒子の放射があることが普通である。

励起状態がしばらく存続し核異性体として分離できることがある。核異性体がより安定な状態へ変わることを核異性体転移 (IT) という。

核異性体が 粒子放射の代わりに壊変のエネルギーを軌道電子に与えてこの電子が放射されることがある。このことを内部転換といい、放射される電子を内部転換電子という。

2.5 壊変図式

放射性核種が、どのように壊変していくかを模式的に表現した図。

- (1) どの放射線がどのくらいの強度で放射されるか。
- (2) どのような励起準位を經由して基底状態に到達するか。
- (3) 各励起準位の励起エネルギー、半減期などその準位を特徴づけることがら記入され

ている。

原子核のエネルギー準位は水平な直線で遷移は矢印の付いた直線で示される。放射線の放出によって

原子番号の増加する場合（ β^- 壊変）は右斜め下向きの、

原子番号の減少する場合（ β^+ 壊変，EC）は左斜め下向きの、

原子番号の変化しない場合（ α 壊変，IT）は垂直の矢印の付いた直線で示す。

2.6 放射壊変の速度

放射壊変はランダムに起こる現象であって、特定の原子に注目するときそれがいつ壊変するかは予言できず、ただある時間間隔 t に壊変する確率 p を知り得るのみである。多数（ N 個）の原子があった場合には t に壊変する原子数 $- \Delta N$ は、

$$-\Delta N = Np$$

と期待できる。 t が小であれば p は t に比例すると考えられる。比例定数を λ として、

$$p = \lambda t.$$

したがって、

$$-\Delta N = Np = N \lambda t$$

$$-\Delta N / t = -\lambda N.$$

t を十分小さいとすると、

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

放射壊変の速度は存在する原子の数のみに比例する。比例定数 λ を壊変定数という。

減少の速度が、常にそのときの量に比例する場合、減少の過程は必ず指数関数となる。放射壊変はランダムに起こる現象であって、放射壊変の速度は存在する原子数のみに比例するから、比例定数を λ として、

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

となる。 λ を壊変定数という。積分すると、

$$\log N = -\lambda t + C.$$

初期条件を $t = 0$ のとき $N = N_0$ とすると

$$\log N_0 = C.$$

$$\log (N / N_0) = -\lambda t$$

$$N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

指数関数の性質として、ある時間に N だったのが N/n に減少するのに要する時間間隔は N によらず常に等しい。特に半分になるのに要する時間 T を半減期という。

$$\text{半減期 } T = \frac{\log 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

2.7 放射能の単位

放射能：単位時間に生起する核壊変の数。単位はベクレル（Bq）を用いる。

以前は、慣用単位としてキュリー（Ci）が用いられていた。

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

ベクレルやキュリーは放射能の単位であり、放射性物質の単位ではないが、慣用的には放射性物質の単位のようにも用いられている。

また、単位時間に検出する放射線（粒子）の数（計数率）を用いることもある。計数率は cps（counts per second；毎秒あたりのカウント数）や cpm などの単位で示される。

放射能は、放射線の強さや放射線が生物体に与える影響とは無関係であり、これらのことは他の単位（吸収線量グレイ Gy、線量当量シーベルト Sv）などで表される。

線量当量は、それぞれの放射線の比生物学的効果の適当な数を吸収線量にかけたものである。

放射線の種類	RBE 値
X線、 γ 線、 β 線	1
中性子線、陽子線	10
陽子より重い粒子線	20

2.8 放射線量の単位

放射線量は

- (1) 放射線の照射量を記述する照射線量
- (2) 物質に吸収されたエネルギー量を記述する吸収線量
- (3) 生物学的効果により評価した線量
- (4) 線量当量

に分けられる。

$$(1) \text{ 照射線量 } X = Q / m$$

ここで Q は質量 m の空気中で光子によってエネルギーを与えられた電子が停止するまでに生じた陽（または陰）イオンの電荷の和である。

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C / kg}$$

以前の定義は空気 0.001293 g あたり 1 esu の電荷を生じさせる放射線量であった。

$$1 \text{ R} = 1 \text{ esu} / 0.001293 \text{ g} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/g}$$

$$(2) \text{ 吸収線量 } D = E / m$$

ここで E は電離放射線により質量 m の物質に与えられたエネルギーである。単位はラド (rad) が用いられてきたが現在はグレイ (Gy) を用いる。

$$\begin{aligned}
 1 \text{ rad} &= 1 / 100 \text{ J / kg} \\
 &= 100 \text{ erg / g} \\
 &= 1 / 100 \text{ Gy}
 \end{aligned}$$

(3) 生物学的効果により評価した線量・・・単位はレム (rem) が用いられてきたが現在はシーベルト (Sv) を用いる。

$$\begin{aligned}
 \text{rem} &= \text{rad} \times \text{RBE} \\
 &= 1 / 100 \text{ Sv}
 \end{aligned}$$

(4) 線量当量・・・線量当量 = 吸収線量 × Q × N

線量当量は放射線防護のために使用される線量である。線量当量は吸収線量に線質計数Qおよびすべての修正項Nをかけた値で表され、その単位はRBE線量の単位と同じSvまたはremである。Qは、放射線の種類やエネルギーに依存する値で当分の間RBE値を用いることが認められている。

まとめ

- (1) 吸収線量 = E / m 単位は $1 \text{ rad} = 1/100 \text{ Gy}$
- (2) 照射線量 = Q / m 単位は $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/g}$
- (3) RBE線量 = 吸収線量 × RBE値 単位は $1 \text{ rem} = 1/100 \text{ Sv}$
- (4) 線量当量 = 吸収線量 × Q × N 単位は $1 \text{ rem} = 1/100 \text{ Sv}$

rem・・・人体レントゲン当量 roentgen equivalent man に由来する。

人体がX線、線の1Rの照射を受けると、約0.94radの吸収線量に相当し、線量当量は0.94remとなる。すなわち、

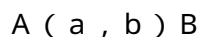
$$1 \text{ R} \sim 1 \text{ rad} \sim 1 \text{ rem}$$

である。

3. 原子核反応

3.1 核衝撃反応

核反応：原子核とほかの粒子との衝突によって起こる現象。特に、原子核の転換を伴う場合をいう。



A：標的核

B：生成核

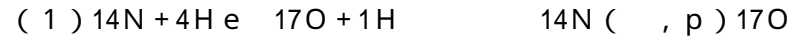
a：入射粒子

b：放出粒子

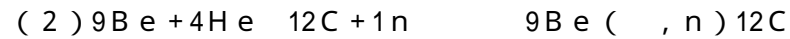
反応の前後では、

- (1) 電荷の和は一定。
- (2) 粒子の総数は一定。ただし、陽子、中性子のそれぞれの数は、その核反応に中間子が関与している場合は変わることもある。

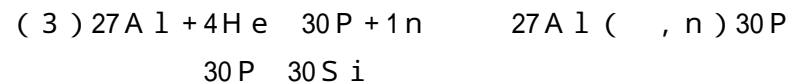
核反応の例



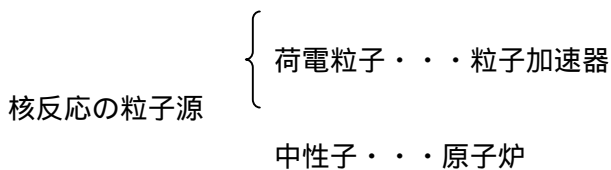
1919年ラザフォードが発見した反応で、初めて元素を人工変換した。



1932年チャドウィックが中性子を発見した反応である。



1934年F. ジョリオとI. ジョリオ=キュリーが発見した反応であり、初めて人工放射性核種をつくった。



3.2 原子核反応

質量数が大きく中性子過剰の原子核に中性子を照射すると、原子核がほぼ大きさの等しい2つの原子核に分裂し、同時に多数の中性子を放出することがある。この核反応を原子核分裂といい、分裂して生成する質量数の小さい核種を核分裂生成物という。

結合エネルギー

原子核を構成する核子の質量の和から原子核の質量を差し引いた差を質量欠損という。質量Mの原子核がZ個の陽子とN個の中性子から成っているとす。陽子と中性子の質量をMp、Mn、原子核の質量をMとすると、質量欠損 m は常に正である (m > 0)、

$$m = Z \cdot M_p + N \cdot M_n - M$$

質量mとエネルギー E との間には

$$E = m c^2 \quad c \text{ は光速}$$

の関係がある。すなわち、ばらばらに存在する陽子と中性子が原子核になるとき m に相当する $B = m c^2$ のエネルギーを放出し、核子はこのエネルギーによって結合し原子核を形成する。これを原子核の結合エネルギーという。Bを質量数Aで除した B / A は核子一個当たりの平均結合エネルギーとなる。

3.3 核融合反応

質量数の小さな原子核が融合してエネルギーを放出する核反応を核融合反応という。

例 . $2\text{H} + 3\text{H} \rightarrow 4\text{He} + 0\text{n} + 17.6\text{MeV}$

2H 2.014102amu
 3H 3.016049amu
 4He 4.002603amu
 1n 1.011268amu

$$\begin{aligned} & \{(2\text{H} + 3\text{H}) - (4\text{He} + 1\text{n})\} \times c^2 \\ & = 0.018883\text{amu} \times 931.5\text{MeV/amu} \\ & = 17.59\text{MeV} \end{aligned}$$

4 . 放射線

放射性壊変によって放出される α 線、 β 線、 γ 線を放射線という。しかし、これらと同程度以上のエネルギーを持つ電子線、陽子線、中性子線、中間子線、X線なども含めて、一般に放射線ということもある。

物質との相互作用における光、電波と放射線・光・電波：選択的である ($E = h\nu$)、1回の相互作用で全てのエネルギーを与える。

放射線：選択的でない。何回かの相互作用をしながら次第にエネルギーを失う。

4 . 1 電離放射線

直接電離放射線：放射線自身が物質と相互作用して、直接イオン化をする。

例、 α 線、 β 線、電子線、陽子線、中間子線などの荷電粒子線

間接電離粒子線：放射線と物質との相互作用で物質から放出された電子が主としてイオン化をする。例、X線、 γ 線、中性子線。

4 . 2 光子・電磁波

4 . 2 . 1 波長と光子の性質

X線と γ 線は非常に短波長の電磁波で電離放射線である。

発生源	エネルギー
-----	-------

γ 線	原子核の状態の変化	不連続、0.1 ~ 2 MeV
X線	原子核外の現象	連続あるいは不連続(特性X線)、0.1 ~ 100 keV

4 . 2 . 2 γ 線と物質との相互作用

1) 光電効果	$E_e = h\nu - W$
2) コンプトン効果	$E_e = h\nu - h\nu'$
3) 電子対生成	$E_e = h\nu - 2m_e c^2$

4.2.3 線の吸収

厚さ x の物質中を通過することによる強度の減衰（吸収）は、普通の光の場合と同じように表される。

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

I : 入射線の強度
 I_0 : 厚さ x の物質を通過後の線強度
 μ : 吸収係数

1 ~ 3 MeV の線では μ は吸収体の種類により大きな差はない。つまり、物質の線阻止能は物質の密度によりほぼ決まる。したがって、一定体積の物質で線をできるだけ阻止するには密度の大きい物質が有利である。普通、線のしゃへいに鉛が用いられるのはこの理由による。

放射線強度が半減する厚さは強度によらず一定である。これを半価層といい、 $x_{1/2}$ で表せば、

$$x_{1/2} = \log 2 / \mu = 0.693 / \mu$$

である。

光電効果 (p.e.)、コンプトン効果 (com)、電子対生成 (p.p.) の過程は独立して起こるから、各々の過程に対して吸収係数 μ が定義できる。したがって、全吸収係数は

$$\mu = \mu_{p.e.} + \mu_{com} + \mu_{p.p.}$$

(1) 低エネルギーでは、光電効果が主である。 $\mu \sim \mu_{p.e.}$

(2) 200 keV ~ 5 MeV ではコンプトン効果が重要な部分である。

(3) 5 MeV 以上では電子対生成が主な過程である。

(4) 物質の原子番号 Z が大きくなると、光電効果と電子対生成の確率は急速に増大するので、低原子番号物質では相対的にコンプトン効果の割合が多い。

.

4.3 線

エネルギーをもった電子が放出されるのは、

- (1) 壊変
- (2) 線、X線による光電効果、コンプトン効果、電子対生成
- (3) 内部転換電子
- (4) オージェ電子
- (5) 粒子加速器 (ベータトロン)

4.3.2 線と物質との相互作用

高速の電子が物質中を通過するとき、次のような相互作用を起こす、

- (1) 原子核との弾性衝突によって、方向を変えられるが、エネルギーには変化がない。
- (2) 軌道電子との非弾性衝突によってエネルギーの一部を与え、その結果衝突された電子は

外側の軌道に移るか（励起） または原子の外へ飛び出す（電離またはイオン化）。

(3)原子核近傍の電場によって減速される際、エネルギーの一部を光子の形で放射する（制動放射）。

高速電子はこのようにしてその進行方向を変えつつ次第にエネルギーを失い、やがて停止する。

4.3.3 線の吸収

線が吸収されるまでに通過する物質の厚さを飛程という。しかし、線の場合のように物質の厚さに対し単純な関係にはない。その原因は次のようである。

(1)散乱のため通過した長さで物質の厚さが一致しない。

(2)1回の衝突による損失エネルギーの分布が大きい。

(3)線は連続エネルギースペクトルの電子線である。

線のしゃへいには、高エネルギーの線でも最大飛程は $1\text{g}/\text{cm}^2$ 程度であるのでガンマ線と異なり、比較的少ない物質で充分である。しかし高線量の線源に対しては、制動放射によるX線のしゃへいを考慮しなければならない。制動放射を少なくするには低原子番号物質によるしゃへいが必要である（線の場合とは逆であることに注意）。

4.4 線（重荷電粒子線）

重荷電粒子と物質との相互作用の種類は線の場合と同じであるが、制動放射はほとんどなく、弾性散乱されることも少ない。重荷電粒子は一定距離までほとんど数は減少せず、わずかな範囲で急速に吸収される。放射線が進路の単位長さにつくるイオン対の数を比電離度という。重荷電粒子の比電離度は線、線とは比較にならないくらい大きい。

4.5 放射線から物質が受ける影響

物質との相互作用でエネルギーを失った放射粒子は、

(1)光子は消滅し、

(2)電子は分子について陰イオンを生じ、

(3)線のような重荷電粒子線は電荷を失い ^4He のような中性原子になる。

したがって、物質中には、励起された分子とイオンが残る（励起と電離）。励起分子はやがてエネルギーを放出して基底状態になる。放出の仕方の一つは蛍光としてこのエネルギーを放射するものであってシンチレーションという。しかし、大部分のエネルギーは、分子の熱運動あるいは熱振動に消費され、熱エネルギーに転換されることになる。