1 放射線・放射能

1. 放射線

放射線はすべての電磁波および粒子線のことであるが，一般的には物質を通過するときに原子や分子をイオン化する電離放射線のことを放射線という．電磁波は電場および磁場が時間の関数として周期的に変化し，そのエネルギーが空間を伝わる波動のことである．その物理的性質は電磁波としての波と光子としての粒子の両方の性質を持つ．粒子線は α 線，β 線，電子線，陽子線，重粒子線などの荷電粒子線，および中性子線などの非荷電粒子線がある．

2. 主な放射線の特徴

a．α 線

α 線はヘリウムの原子核で，陽子 2 個と中性子 2 個からなり，光速の 1/10 の速度で空中を 3〜8 cm 飛ぶエネルギーを持つ．その透過力は弱く紙 1 枚で遮蔽できる．

b．β 線

β 線は原子核から放出される電子であり，陰電子と陽電子（ポジトロン）がある．光速に近い速度

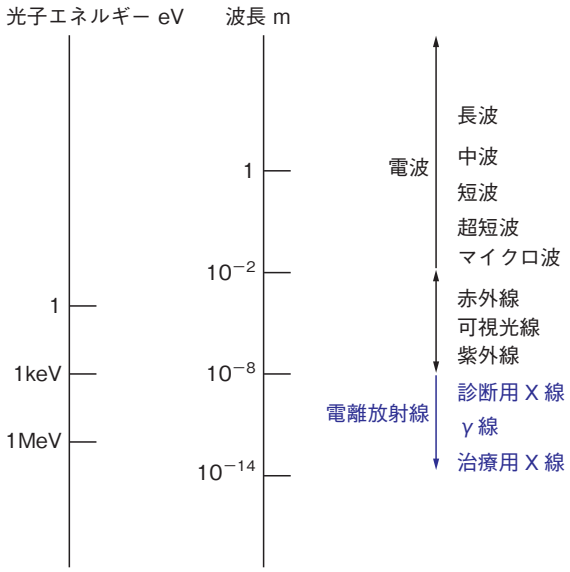

図 1　電磁波の分類

JCOPY 498-06524

で空中飛程は数 m 以内，透過力は弱くアルミニウム数 mm で遮蔽される．

c．γ線

元素の壊変などにより放出される波長の短い電磁波で，物質の透過力が大きい．

d．X線

γ線が原子核から放出されるのに対し，原子核外の現象により放出される電磁波．γ線と同様に物質の透過力が大きい．

＊γ線とX線の違い

両者とも電磁波でありその違いは発生過程にある．すなわちγ線は放射性崩壊などにより原子核から放出される．それに対しX線は原子核外の現象により放出される．

e．中性子線

中性子線は中性子の流れであり，電荷を帯びていないため，原子の中に自由に入り込める．そのためいずれの放射線より透過能力が強い．

3. 放射線と物質の相互作用

a．荷電粒子と物質の相互作用

荷電粒子線は電離や励起により物質にエネルギーを与え，自らの運動エネルギーを失っていく．物質内で荷電粒子線が，単位長当りどの程度のエネルギーを失うかを表すものを，その物質の阻止能と呼ぶ．

b．陽電子消滅

陽電子は陰電子と結合して消滅するときに 0.51 MeV のエネルギーを持つ 2 個の光子（消滅γ線）を生じる．これらの光子は互いに 180 度反対の方向に進む．医療分野で利用されている PET（positron emission tomography）は陽電子放出核種を用いて，体内より放出される消滅γ線により画像を得ている．

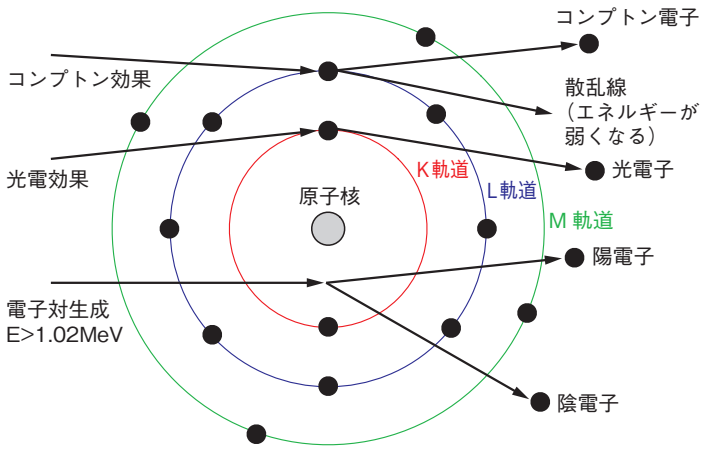

図 2　電磁放射線の相互作用

c．X線・γ線と物質の相互作用

1）光電効果

X線・γ線の電磁放射線が原子の核外電子にそのエネルギーを全部与えて核外電子を原子外に飛び出させ，自らは消滅する現象である．電磁放射線が完全に吸収されるため光電吸収ともいわれる．光電効果が起きると核外電子に空位が生じ，それより外側の軌道の電子がその空位に落ち込み，特性X線が放出される．光電効果の起こる確率は，物質における光電効果の断面積と表され，その断面積は，電磁放射線のエネルギーが高くなると急速に減少する．すなわち光電効果は比較的エネルギーの低い領域で多くみられる．

2）コンプトン効果

電磁放射線が原子の外殻軌道電子にそのエネルギーの一部を運動エネルギーとして与え，自らは与えた分のエネルギーを失って散乱される現象である．電磁放射線の散乱にはほかに，トムソン散乱があるが，トムソン散乱は散乱によってそのエネルギーを失わず，これを可干渉性散乱ともいう．これに対しコンプトン散乱は非干渉性散乱という．

3）電子対生成

電磁放射線のエネルギーが電子の静止エネルギー（0.51 MeV）の2倍より大きくなると，電磁放射線が原子核のクーロン場の作用を受けて消滅し，電子と陽電子が生成されることがある．これを電子対生成という．先に述べた，陽電子消滅の逆の現象である．

4. 放射能

放射能とは放射性核種の原子核が崩壊して放射線を出す能力のことをいう．一般には放射性物質のことを放射能といい表すことがあるが，これは誤用であり使用すべきではない．放射能の単位はベクレル（Bq）で，1 Bqは1秒間に1個の原子核が崩壊することである．Bqの代わりにdpsが用いられることもある．

従来から用いられてきたキュリー（Ci）はラジウム1 g当たりの放射能を基準とした単位で，1 Ci $=3.7\times10^{10}$ Bqである．

a．放射性崩壊

放射性核種は過剰なエネルギーを放射線として放出して安定な核種に変わり自然に減少していく性質がある．放射性核種の量が，半分になるまでの時間を半減期（half life）といい，核種により異なっている．

（例）^{15}O：2分，^{18}F：110分，^{99m}Tc：6時間，^{201}Tl：73時間

放射性核種の崩壊は確率的法則に従い，時間のみに依存し温度，圧力などその他の外界の影響は全く受けない．単位時間に崩壊する確率はその核種に特有であり，崩壊定数といい，λで表される．いま時間tにおける放射性核種の数をN(t)とすると，単位時間に崩壊する原子の数はλN(t)となり，これは，放射性核種が単位時間当たりに減少する数$-$dN(t)/dtと等しくなる．

すなわち，$-\mathrm{dN(t)/dt}=\lambda\mathrm{N(t)}$　が成り立つ．

T＝0のときのN(t)をN_0とし上式をN(t)について解くと，

$$\mathrm{N(t)}=\mathrm{N_0}\exp(-\lambda t)$$

JCOPY 498-06524

となる．この式より，放射性核種の数は，時間とともに指数関数的に減少していくことがわかる．

また，崩壊定数 λ と半減期 T は

$$\lambda = \ln 2/T$$

の関係があり，時間 t における放射能を A(t) とすると，

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

$\lambda N_0 = A_0$（t＝0 のときの放射能）とおくと，放射能の時間的変化は

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t)$$

となり，放射能も指数関数的に減衰することがわかる．上式を半減期 T を用いて表すと

$$A(t) = A_0 (1/2)^{t/T}$$

となり，半減期で放射能が半分となることがわかる．

b．放射性同位元素

原子は中心に原子核をもち，その周りを電子が回っている構造である．原子核は，陽子と中性子からなり，陽子はプラスの電荷を持ち，中性子は電荷を持たない．原子核の周りを回っている電子がマイナスの電荷を持ち，原子は陽子と電子の数が等しく，電気的に中性を保っている．元素の性質は電荷を持つ陽子または電子の数により定まり電荷に係っていない中性子はその数が異なっても同じ元素と見なされる．中性子の数が異なる原子核を持つ原子を同位元素，または同位体（isotope）という．

同位元素の中で不安定な原子核は安定な原子核になろうとする．その際崩壊を起こし，放射線を放出する．このような同位元素を放射性同位元素（radioisotope）という．放射性同位元素には自然界に存在する天然放射性同位元素と，人工的に作り出された人工放射性同位元素がある．

c．放射性崩壊の特徴

不安定な原子核は安定な原子核になろうとするが，核種の安定性は原子核の陽子と中性子の数により決まる．中性子の数が多すぎると（中性子過剰核），中性子は陰電子を放出して陽子に変換することにより安定な核になる．逆に中性子の数が少なすぎると（中性子欠損核），陽子が陽電子を放出あるいは核外電子を取り込んで中性子に変換し，安定な核になる．

1）α 崩壊

原子核から α 線（陽子 2，中性子 2 からなる $^{4}_{2}\mathrm{He}$ の原子核）が放出され，崩壊後の核種は原子番号が 2，質量数が 4 減少する．α 崩壊は質量数の大きな核種に限られていて，$^{226}\mathrm{Ra}$，$^{241}\mathrm{Am}$，$^{235}\mathrm{U}$ などが知られている．

2）β 崩壊

β 崩壊には，陰電子が放出される β^- 崩壊，陽電子が放出される β^+ 崩壊，原子核が陰電子を取り込む軌道電子捕獲の 3 種類がある．

①β^- 崩壊

中性子が過剰の場合，中性子が陽子に変化すると同時に電子（陰電子）および中性微子が放出される．質量数は変わらず，原子番号が 1 大きい元素に変化する．

②β^+ 崩壊

陽電子が過剰の原子核では，陽子が中性子に変わると同時に陽電子と中性微子が放出される．質

量数は変わらず，原子番号が 1 小さい元素に変化する．

③軌道電子捕獲（electron capture：EC）

β 崩壊のなかで，β 線（β^-，β^+）を出さない崩壊形式である．陽子が過剰の場合，原子核が核外電子 1 個を取り込み，陽子と結びつき中性子とニュウトリノが生成される．質量数は変わらず，原子番号が 1 小さい元素に変化する．軌道電子（通常最も原子核に近い K 軌道電子）が核内に取り込まれ，そこが空位になると外側の軌道から電子が遷移する．その際余分なエネルギーを特性 X 線の形で放出する．特性 X 線を放出する代わりに軌道電子を放出することもあり，放出される電子をオージェ電子という．

3）γ 崩壊

原子核は，原子における軌道電子のように多くのエネルギー状態をとることができる．その中で，最も低く安定した状態を基底状態といい，それよりエネルギーの高い状態を励起状態という．α 崩壊，β 崩壊後の原子核が励起状態にある場合，γ 線を放出して基底状態に移る．このとき放出される γ 線のエネルギーは両状態間のエネルギー差に等しく，その原子核に固有の値である．γ 線の放出は原子核のエネルギー状態の変化によるものなので崩壊といわずに転移という．またその放出は通常崩壊直後に起こるが，崩壊後の原子核がかなり長い間，励起状態のまま存在し，半減期を持って転移する核種がある．そのような核種を核異性体といい，核異性体が γ 線を放出して転移することを核異性体転移（isomeric transition：IT）という．準安定（metastable）状態の核異性体は各核種と同様に独立したものとして扱い，質量数の右側に m の符号を付け，^{99m}Tc，^{81m}Kr のように表記する．

また，励起状態の原子核が γ 線を放出せずに，軌道電子にそのエネルギーを与えてその電子を外に放出することがあり，これを内部転換といい，放出された電子を内部転換電子という．このとき軌道電子に空位ができ，特性 X 線が放出される．さらに，特性 X 線が放出される代わりにオージェ電子が放出されることがある．

d．放射平衡

放射性核種 A が娘核種 B になり，さらに崩壊して孫核種 C に変わっていく例が数多く知られていて，崩壊系列という．

親核種の半減期が娘核種の半減期よりも長い場合，十分な時間が経過すると，親核種，娘核種の原子数の比は一定となり，娘核種は親核種の半減期で減衰する．これを過渡平衡という．

親核種，娘核種の原子数を $N_1(t)$，$N_2(t)$，崩壊定数を λ_1，λ_2，半減期を T_1，T_2，放射能を $A_1(t)$，$A_2(t)$ とすると，十分な時間が経過すると以下の式が成り立つ．

$$N_2(t)/N_1(t) = \lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$A_2(t)/A_1(t) = \lambda_2/(\lambda_2 - \lambda_1) = T_1/(T_1 - T_2)$$

また，親核種の半減期が娘核種の半減期に比べ非常に長い場合は，十分な時間が経過すると

$$N_2(t)/N_1(t) = \lambda_1/\lambda_2$$

$$A_2(t) = A_1(t)$$

となり，親核種と娘核種の放射能が等しくなり，娘核種は親核種の半減期で減衰し，減衰曲線は水平となる．これを永続平衡という．過渡平衡と永続平衡をあわせて放射平衡という．

＜飛坂　実＞

JCOPY 498-06524