

放射線安全工学

物理 I 原子核の性質と放射能 (鈴木)

1 - 1 基礎知識

1) これから話す世界

	宇宙	銀河	物質	原子	原子核	核子	電子
サイズ	150 億光年	数万光年	1cm	10^{-8} cm	10^{-12} cm	10^{-13} cm	0
	(1 光年=光の速さ $\times 365$ 日 $\approx 10^{18}$ cm, $c = 3 \times 10^{10}$ cm)						
質量	?	$\sim 10^{44}$ g	1g	(水素)	1.67×10^{-24} g		$\times 1/2,000$
種類	(1)	?	∞	114*	2,300	2	1

これから話すのは原子核のは世界

2) まず放射線とは

運動している素粒子、原子核、(高エネルギーの)光の総称
主なもの
線 線 線
 ヘリウム原子核 (He)
 電子
 高エネルギーの光
その他 陽子線、中性子線、 etc.
(線: 乾板に軌跡を残すから)

3) 歴史 放射線の発見

1896 Bequerel ウランの放射線の発見
1898 Pierre and Marie Curie Po, Ra の放射線の発見

4) 放射線はどこから来るか

主な生みの親は "不安定な原子核"
不安定な原子核は "放射能" をもつ。
(宇宙線の話)

5) 原子核の基礎知識

原子核は核子 (陽子、中性子) からなる。
陽子数 Z 、中性子数 N 、質量数 (核子数) $A = N + Z$
元素 (化学的性質) は Z で決まる。
H, He, C, …… , Pb, …… 約 100 種類 ($Z=114$, 2003.10 現在)
(原子質量: ^{12}C "原子" の $1/12$, $1 \text{ amu} = 1.66 \times 10^{-24}$ g)
原子核は Z と N で決まる。
約 2,300 種類 (安定核 272 種、不安定核 約 2,000)
 Z が同じで N が違うもの 同位体 (Isotope)
区別するための記号 A_Z 元素名
読み方の例 $^{208}_{82}\text{Pb}$ 鉛 208
陽子 p (proton) と中性子 n (neutron)
 p の質量 $m_p = 1.670 \times 10^{-24}$ g 電荷 $+e$
 n の質量 $m_n = 1.672 \times 10^{-24}$ g 電荷 0
 p は安定 ($> 10^{30}$ y)
 n (自由な) は崩壊する。(原子核の中ではなぜ安定か? 後で)
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ($\bar{\nu}_e$ 反ニュートリノ)
平均寿命 = 925 s = 15.4 分

平均寿命 T

崩壊定数 (夫々の素粒子、原子核に特有) を λ とすると、

$$\begin{aligned}dN &= -\lambda N dt, & \frac{dN}{dt} &= -\lambda N \\N &= C \exp(-\lambda t).\end{aligned}$$

$t = 0$ で $N = N_0$ とすれば

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

平均寿命 T は $N = 0$ が $1/e$ ($e \approx 2.7$) になる時間 : $T = 1/\lambda$.

半減期 $T_{1/2}$ は N が N_0 の半分になる時間

$$\begin{aligned}N_0 \exp(-\lambda T_{1/2}) &= \frac{1}{2} N_0 \\T_{1/2} &= \frac{1}{\lambda} \ln 2 \approx 0.693T.\end{aligned}$$

6) 放射能の単位

$$1 \text{ Ci (キュリー)} = 3.7 \times 10^{10} / \text{s}$$

放射線核種 (不安定原子核) が 1 秒間に 3.7×10^{10} の崩壊を起こす能力 $\approx \frac{226}{88} \text{ Ra}$
1g のもつ放射能の大きさにほぼ等しい。

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq (ベクレル)} \quad \text{SI 単位} \quad (1 \text{ Bq} = 1/\text{s})$$

7) エネルギーの単位

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m / s}^2$$

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N m} = 10^7 \text{ g cm}^2 / \text{s}^2 = 10^7 \text{ erg}$$

電子が 1 V で加速されるときに得る運動エネルギー : 1 eV (エレクトロンボルト)

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = 3.82 \times 10^{-20} \text{ cal}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV (メガエレクトロンボルト)}$$

相対論 : 質量とエネルギーは等価:

$$\begin{aligned}E &= \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} = mc^2, \quad (p = 0) \\&= pc, \quad (m = 0), \quad \text{光}\end{aligned}$$

$$1 \text{ g } c^2 = 9 \times 10^{13} \text{ J} = 5.6 \times 10^{26} \text{ MeV} = 2.14 \times 10^{13} \text{ cal}$$

$$p \text{ の質量} \rightarrow 938.3 \text{ MeV}$$

$$n \text{ の質量} \rightarrow 939.6 \text{ MeV}, \quad (\Delta E = 1.3 \text{ MeV})$$

$$\text{電子の質量} \rightarrow 0.5 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ amu} \rightarrow 931.5 \text{ MeV}, \quad (\Delta E \approx 7 \text{ MeV})$$

例

可視光線のエネルギーの波長 $\lambda = 10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ cm}$

$$E = pc = hc/\lambda = h\nu = 2.5 \text{ eV (for } \lambda = 5 \times 10^{-5} \text{ cm, } h = 4.1 \times 10^{-15} \text{ eV s)}$$

化学反応の世界 原子核と電子の間のクーロン力

$$\frac{e^2}{r} \approx 14 \text{ eV}, \quad (r = 10^{-8} \text{ cm}).$$

アボガドロ数がかかれば

$$1 \text{ eV} \times 6 \times 10^{23} / \text{g} = 2.4 \times 10^4 \text{ cal}$$

石炭 5,000~8,000 cal/g、石油 ~10,000 cal/g

原子核からの光線の波長 $\lambda \leq 10^{-8} \text{ cm}$

$$E = hc/\lambda \approx 1.25 \text{ MeV (for } \lambda = 10^{-10} \text{ cm)}$$

線は可視光線の 10^6 倍のエネルギー なぜか？

1 - 2) 自然界の四つの力

- 1) われが地球に立っているのは重力
質量(エネルギー)をもつ全ての物質にはたらく
- 2) 地球に引っ張られても壊れないのは電気力
電荷をもつものにはたらく。化学の世界
- 3) 原子核が電気力で壊れないのは核力(強い力)
核子間にはたらく短距離力
- 4) 中性子崩壊等にはたらくのは弱い力

ポテンシャルエネルギーの大きさの違い

重力 $Gm_p^2/r = 1.15 \times 10^{-30} \text{ eV (} r = 10^{-13} \text{ cm)}$

電気力 $e^2/r = 14 \text{ eV (} r = 10^{-8} \text{ cm)}$

核力 $V = 50 \text{ MeV (} r < 10^{-12} \text{ cm)}$

線のエネルギーが百万倍大きいのは
百万倍大きい力のはたらく世界から生まれるから

1 - 3) 原子核

原子核のポテンシャル(核子が閉じ込められる井戸)

$$V = -50 \text{ MeV, (} r < 10^{-12} \text{ cm)}$$
$$= 0, \quad (r \geq 10^{-12} \text{ cm}).$$

1) まず安定な原子核について

原子核の形と大きさ

$A^{1/3}$ に比例する半径 R の球 (1911 Rutherford 発見)

$$R = 1.2A^{1/3} \text{ fm, } 1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$$
$$= 3.0 \text{ fm, } ^{16}\text{O}$$
$$= 7.1 \text{ fm, } ^{208}\text{Pb}$$
$$< \sim 10 \text{ fm}$$

体積 $V = 4\pi R^3/3 \sim A$

従って核子密度 $V/A = \rho$ は A によらない。

$$\rho \approx 0.17 \times 10^{39} \text{ 個/cm}^3 \approx 2.85 \times 10^{11} \text{ kg/cm}^3$$

銀河 6×10^{-7} 個/cm³、水 1g/cm³、鉛 11g/cm³、太陽の中心部 100g/cm³

原子核の質量 M_A と結合エネルギー E_A

原子核を構成するのは核子がバラバラにあるときよりエネルギーが小さく安定ということであるから

$$E_A = M_A c^2 < Z m_p c^2 + N m_n c^2$$

このとき

$$B = (Z m_p c^2 + N m_n c^2) - E_A > 0$$

を核種 (A, Z) の全結合エネルギーという。

($\Delta M - (Z m_p + N m_n)$ を質量欠損という。)

安定な原子核の全結合エネルギーに対する半実験公式 (Bethe-Weizsäcker の公式)

$$B \approx a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A - 1/3} - a_a \frac{(N - Z)^2}{4A} \quad (\text{MeV})$$

ここで

$$a_v = 15.56(\text{体積}), a_s = 17.23(\text{表面}), a_c = 0.699(\text{電氣的}), a_a = 93.15(\text{非対称})(\text{MeV})$$

この公式から分かること

イ) (A, Z) が小さいときは $N = Z$

$${}^4\text{He}, {}^{12}\text{C}, {}^{16}\text{O}, {}^{40}\text{Ca}$$

ロ) Z が大きくなると $N > Z$. (電氣的エネルギーと非対称エネルギーのバランス)

$${}^{56}\text{Fe}, {}^{90}\text{Zr}, {}^{120}\text{Sn}, {}^{208}\text{Pb}$$

ハ) Z が大きくなると $B \rightarrow 0$. Z が極端に大きな原子核は存在しない。

ニ) B/A はほぼ 8 MeV

$$B({}^{40}\text{Ca}) = 8.48 \text{ (Exp. 8.55)}, \quad B({}^{208}\text{Pb}) = 7.80 \text{ (Exp. 7.86)} \quad (\text{MeV})$$

ホ) もう少し実験値 B/A を詳しく見ると

${}^{16}\text{O}$	7.91
${}^{40}\text{Ca}$	8.55
${}^{56}\text{Ni}$	8.64
${}^{132}\text{Sn}$	8.35
${}^{208}\text{Pb}$	7.86 (MeV)

もっとも安定な原子核 (Fe, Ni) と軽い原子核、

或いは重い原子核との核子当りの結合エネルギーの差は約 1 MeV。

これから核融合発電と原子力発電

1g の重い原子核 (${}^{235}\text{U}$) が核分裂したとすると

$$1\text{g} \times \frac{1}{1000} \rightarrow 2 \times 10^{10} \text{ cal}$$

(石炭を 7,000cal/g とすれば 3 トン分、3 百万倍)

2) 不安定な原子核

安定な原子核 平均寿命 $> 10^8 \text{ y}$ (${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$ を除く)

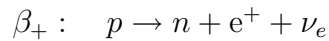
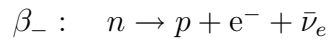
272 核種 (Z が最大のものは Bi)

不安定な原子核 平均寿命 $< 10^8 \text{ y}$ (定義に依存)

~ 2,000 核種 (理論的には今後さらに 4,000)

不安定な原子核の崩壊

イ) 崩壊 線を放出



中性子は結合して安定になる。

ロ) 崩壊 線を放出

トンネル効果 (量子効果) 主に $A > 210$

($A > 140$ 程度のものは $T_{1/2} \sim 10^7$ y かそれ以上。)

ハ) 崩壊 線を放出

励起状態

基底状態

二) その他

中性子や陽子を出して崩壊

不安定な原子核はどこにあるか

自然界に自然にあるもの

人工的に集める、人工的につくる、

安全 (宇宙での原子核創生の話)

要注意

まとめ

放射線とは

どこで生まれる

そのエネルギーは

運動している素粒子、原子核、高エネルギーの光

不安定な原子核

化学反応の100万倍

利用価値が大きい。しかし取り扱い注意

(自然のものは安全)

終わり