

“今こそ復習！”主任者の基礎知識 —「もっと基礎を，ここが肝」編—

## 第1回 物理の話題（1）

上 義 朋

2011年3月の東日本大震災発生の後、我々放射線取扱主任者は、専門家として一般の方に放射線の話をする機会が急に増えました。シリーズ「今こそ復習！」主任者の基礎知識は、自分たちの知識を深める目的で、様々な方に解説記事を執筆していただき、本年4月号まで11回にわたって連載してきました。これはいわば応用編として、内容はやや高度なものでした。

一方、これから連載を始める「もっと基礎を，ここが肝」編は、主任者の受験勉強からずっと時間が経ってしまった多くの方を想定し、基礎の基礎をもう一度おさらいしてみようという企画です。

### 原子と原子核の大きさ

原子の半径は、元素の種類によらずおよそ $10^{-10}$  mである。原子の大きさは、原子核の周りを回る電子の分布範囲である。これがなぜ元素の種類にあまり依存しないのかは、以下のように考えることができる。

原子番号 $Z$ の中性の原子では、原子核が有する電荷は $+Ze$  ( $e$ は素電荷)であり、核外電子数も $Z$ 個である。最も外側の殻を回る電子から見ると、その内側にある電子の数は $Z-1$ であるから、原子核の電荷のうち、 $+(Z-1)e$ は遮蔽されて打ち消されてしまうことになり、結局 $+e$ の電荷が内側に存在するようになる。したがって最外殻の電子にとっては、水素の原子核の周辺にいるのと同じことになり、軌道半径も水素と同じ、すなわち原子の大きさも水素とあまり変わらないことになる。

一方原子核は、核子という硬い球の集まりと考えることができるので、体積は核子数、すなわち質量数にほぼ比例する。したがって原子核

の半径 $R$  (m) は次式で与えられる。

$$R=r_0A^{1/3} \quad (1)$$

ここで $r_0$ は $1.2\sim 1.4\times 10^{-15}$  mである。原子と原子核の大きさの違いは、水素ではざっと10万倍、鉛でも約1万倍である。これは原子の大きさを直径100 mの運動場と考えた場合、原子核の大きさは高々1 cmか1 mm程度ということになる。したがって荷電粒子のように、遠くの電子と電気的な相互作用をする放射線にとっては、物質とは密に詰まった電子の塊のように感じられるが、中性子のように原子核とだけしか相互作用をしない放射線にとっては、重い物質といえども中はほとんど何もない真空であり、原子核と衝突する確率は極めて低いことになる。

(1)式において $r_0=1.2\times 10^{-15}$  mとして鉄の原子核の断面積を求めると、 $6.6\times 10^{-29}$  m<sup>2</sup>である。一方、一辺が1 cmの鉄の立方体に含まれる原子数は $8.4\times 10^{22}$ 個である。仮にその数の原子核を1 cm<sup>2</sup>の平面上に重ならないようにび

## 主任者 コーナー

っしり並べても、占める面積は  $0.055 \text{ cm}^2$  にしかならず、約 95% は空いた空間になる。中性子が遮蔽しづらいのはこのためである。

### 原子番号と質量数

希ガスについて、原子番号  $Z$  と中性子数  $N$  を表 1 に示した。ただし  $N$  は最も存在度が大きい同位体の値である。原子番号が小さい元素では  $N \approx Z$  であるが、原子番号が大きくなるにつれて中性子数が増え、ラドンやウランでは陽子数の 1.6 倍にもなる。このようになるのは以下の性質のためである。

- ・陽子と陽子の間に働く核力（引力）は、中性子と中性子の間に働く核力と等しいが、クーロン力による斥力（反発力）が働く。
- ・陽子と中性子の間に働く核力は、陽子どうし、中性子どうしに働く核力よりも大きい。

すなわち、クーロン力の影響が小さい、原子番号の小さい元素では、陽子数と中性子数がほぼ同じ場合に安定であるのに対し、原子番号の大きい元素では、安定になるには、クーロン力が働かない中性子の数が陽子数よりある程度大きい必要がある。

### 原子核の結合エネルギー

天然に存在する核種の、核子当たりの結合エネルギーを図 1 に示した<sup>1)</sup>。当然のことながら、原子核が陽子 1 個だけからなる  $^1\text{H}$  の結合エネルギーはゼロである。

軽い核では結合エネルギーは一般に小さいが、 $^4\text{He}$  では  $7.1 \text{ MeV}$  と特異的に大きい。 $^{12}\text{C}$  や  $^{16}\text{O}$  なども、周辺の核種に比べるとやや結合エネルギーが大きい。

鉄はあらゆる原子核の中で結合エネルギーが最大であり（正確には  $^{62}\text{Ni}$  の  $8.7945 \text{ MeV}$  が最大。 $^{56}\text{Fe}$  は  $8.7902 \text{ MeV}$ 、 $^{58}\text{Fe}$  は  $8.7921 \text{ MeV}$ ）、

表 1 原子番号（陽子数）と中性子数

元素	原子番号 $Z$	中性子数 $N$	$N/Z$
He	2	2	1.0
Ne	10	10	1.0
Ar	18	22	1.2
Kr	36	48	1.3
Xe	54	78	1.4
Rn	86	136	1.6

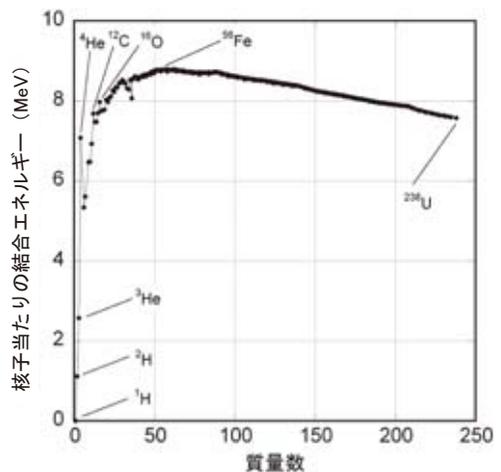


図 1 天然に存在する核種の核子当たり結合エネルギー

最も安定な原子核であることが分かる。

商業用の原子炉では、 $^{235}\text{U}$  に熱中性子を吸収させて核分裂を起こしている。 $^{235}\text{U}$  の核子当たりの結合エネルギーは  $7.59 \text{ MeV}$ 、質量数が半分の  $^{118}\text{Sn}$  と仮定) のそれは  $8.52 \text{ MeV}$  であるから、核分裂によって結合エネルギーは  $0.93 \text{ MeV}$  増えることになる。つまりウランは核分裂によって  $0.93 \times 235 = 219 \text{ MeV}$  軽くなり、 $219 \text{ MeV}$  のエネルギーが、核分裂片の運動エネルギーや中性子、 $\gamma$  線のエネルギーとして放出される\*<sup>1)</sup>。

一方、代表的な重水素の核融合反応である  $^2\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow ^3\text{He} + n$  では、核子当たりの結合エ

エネルギーは 1.11 MeV ( $^2\text{H}$ ) から 2.57 MeV ( $^3\text{He}$ ) が増える。全結合エネルギーの増加は  $2.57 \times 3 - 1.11 \times 4 = 3.27$  MeV であり、この融合反応によって 3.27 MeV のエネルギーが発生することになる。太陽のように核融合をする天体では、成分がゆっくり鉄に近づいていくことによって結合エネルギーが増え、光り輝いているのであるが、鉄になってしまうと融合反応は終わる。

核融合や核分裂反応のように、原子核の反応では、核子当たりざっと 1 MeV のエネルギーを取り出すことができる。一方、化学反応では、例えば 1 mol の水素ガスが燃えるとき、284 kJ の燃焼熱が発生する。これは水素原子 1 個当たりに換算すると 1.5 eV である。すなわち化学反応に比較して、原子核反応では、同じ質量の燃料から約 100 万倍のエネルギーを取り出すことができる。

### α線のエネルギーと速度、飛程

図 2 は  $^{241}\text{Am}$  を例に、α壊変の概念を表したものである。原子核には 95 個の陽子と 146 個の中性子が、エネルギー準位に従って底からびっしりと詰まっている。核子を束縛する堤防のような壁（クーロン障壁）があるため、図 2 のように上の方の核子はゼロエネルギーよりも高い状態に存在することがある\*2。α粒子はトン

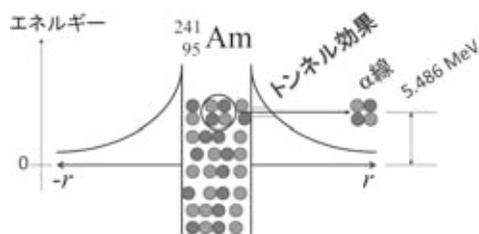


図 2 α壊変の概念図

表 2 α線のエネルギー（放出割合）、速度の光速に対する割合、空気中の飛程<sup>2)</sup>

核種	エネルギー MeV (%)	速度/c %	空気中飛程 mg/cm <sup>2</sup>	cm
$^{238}\text{U}$	4.202 (79)	4.7	3.4	2.8
$^{241}\text{Am}$	5.486 (85)	5.4	5.0	4.2
$^{214}\text{Po}$	7.687 (100)	6.4	8.5	7.0

ネル効果という量子力学的な働きによって、障壁を抜けて飛び出てきたものである。飛び出したα粒子は、自分の電気量 (+2e : e は素電荷) と原子核の電気量の反発力によって加速され、原子核から十分離れた場所では 5.486 MeV の運動エネルギーを持つようになる。

核子がクーロン障壁の上端近くまで詰まっている場合は、トンネル効果は頻繁に起きるため、半減期は短く、またα線のエネルギーは大きい。例えば半減期 46 億年の  $^{238}\text{U}$  のα線エネルギーは 4.2 MeV であるのに対し、その子孫核種である半減期  $1.6 \times 10^{-4}$  秒の  $^{214}\text{Po}$  のそれは 7.7 MeV と大きい。

幾つかの核種から放出されるα線のエネルギー（複数放出されるものはエネルギーが最大のもの）と速度（光の速度の何%か）、空気（密度 1.20 mg/cm<sup>3</sup>）中の飛程を表 2 に示す。α線のエネルギー損失（阻止能）は、主に物質中の電子とどれだけ衝突するかで決まる。物質が異なっても、同じ質量に含まれる電子数は大きく

\*1 実際は補足されないニュートリノがエネルギーを持ち去ったりするため、利用可能なエネルギーは約 200 MeV である。また熱中性子による核分裂では、対称に真っ二つに分裂することはほとんどなく、質量数が 95 近辺と 134 近辺の非対称の核分裂片が生じることが多い。

\*2 図 2 は正確ではない。電荷に働くクーロン力によって生じるクーロン障壁のため、陽子は正のエネルギー領域に存在することがあるが、中性子にはクーロン力が働かないため障壁はなく、負のエネルギー領域にのみ存在する。

は異なるため、 $\text{mg}/\text{cm}^2$  で表した飛程は物質にあまり依存しない（もう少し正確に言えば、物質の質量数の平方根に比例する〔ブラッグ・クレーマン則〕）。

**$\beta$ 壊変、軌道電子捕獲と Q 値**

$\beta^-$ 壊変、 $\beta^+$ 壊変では、電子又は陽電子とともにニュートリノが放出されるため、エネルギーは単一にならず、ゼロから最大エネルギーまで連続に分布する。 $^{64}\text{Cu}$  は 3 通りの壊変形式が競合（44%：軌道電子捕獲（EC）、39%： $\beta^-$ 壊変、17%： $\beta^+$ 壊変）する核種であるが、この場合の  $\beta$ 線エネルギースペクトルを図 3 に示す。ただし  $\beta^-$ 線がいつでも図 3 の黒色の形状を示すわけではなく、 $\beta^-$ 線、 $\beta^+$ 線によらず、原子核の条件によって黒色あるいは灰色に類似のスペクトルを示す。

壊変の Q 値は、壊変前後のすべての粒子の静止質量の差で求められる。

$\beta^-$ 壊変では、壊変によって原子番号が 1 増えるため、 $\beta^-$ 線として放出された電子は、壊変後の原子に取り込まれることによって（同一の電子ではないにしても）、中性の原子になる。すなわち質量がほぼゼロのニュートリノの放出を無視すれば、壊変後には中性の娘原子以外に

は何も余らない。

一方、 $\beta^+$ 壊変では原子番号が 1 減るため、軌道電子の内の 1 個は不要になる。したがって中性の娘原子以外に、 $\beta^+$ 線として放出された陽電子と合わせ、合計 2 個の電子（1 個は陽電子）が余分になる。

EC によっても原子番号は 1 減るが、軌道電子のうちの 1 個は既に捕獲されて減っているため、壊変後の電子に過不足はない。

以上を考慮すれば、壊変の Q 値は以下のようになる。ただし親核種の中性原子の質量を  $M_p$ 、娘核種のそれを  $M_D$ 、電子の質量を  $m_e$ 、光の速度を  $c$  とする。

$$\beta^- \text{壊変} : (M_p - M_D) c^2$$

$$\beta^+ \text{壊変} : (M_p - M_D - 2m_e) c^2$$

$$\text{EC} : (M_p - M_D) c^2$$

すなわち、 $\beta^+$ 壊変では EC と異なり、親核種と娘核種の質量差が  $2m_e$ （1.02 MeV に相当）より大きくないと起こらない。「 $\beta^+$ 壊変と EC は競合する」と言っても、EC しか生じない核種が多数あるのはこのためである。

**$\beta$ 線のエネルギーと速度、飛程**

代表的な  $\beta$ 壊変核種と最大エネルギー、速度、空気中の最大飛程を表 3 に示す。 $^{90}\text{Y}$ 、 $^{106}\text{Rh}$  はそれぞれ  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{106}\text{Ru}$  の娘核種であり、永続平衡を示す。

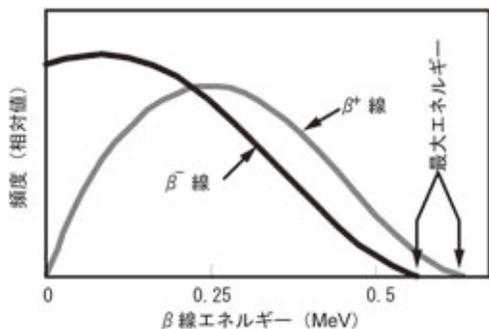


図 3  $^{64}\text{Cu}$  から放出される  $\beta^-$ 線、 $\beta^+$ 線のエネルギースペクトル

表 3  $\beta$ 線の最大エネルギー（放出割合）、速度の光速に対する割合、空気中の最大飛程<sup>2)</sup>

核種	エネルギー keV (%)	速度/c %	空気中最大飛程 $\text{mg}/\text{cm}^2$	cm
$^3\text{H}$	18.6 (100)	26	0.86	0.72
$^{14}\text{C}$	157 (100)	64	34	29
$^{32}\text{P}$	1711 (100)	97	914	760
$^{90}\text{Y}$	2280 (100)	98	1250	1030
$^{106}\text{Rh}$	3541 (79)	99	1960	1620

$^3\text{H}$ は低エネルギー $\beta$ 線の代表例であるが、電子は質量が小さいため、速度は光の26%もある。 $^{32}\text{P}$ では速度は光とほぼ等しくなる。

空気中の飛程は、 $^3\text{H}$ では1 cmに満たないのに比べ、 $^{32}\text{P}$ では10 m近くに及ぶ。ただしこの値は、最大エネルギーの電子の最大飛程である。電子は飛行中に進行方向をしばしば大きく変えるので、この距離に達する電子数は大きくはない。

## 参考文献

- 1) Firestone, R.B., *et al.*, "Table of Isotopes", 8th Ed. CD-ROM Update, Appendix G., John Wiley & Sons, Inc. (1999)
- 2) Ziegler, J.F. and Biersack, J.P., SRIM-2013, <http://www.srim.org>
- 3) Berger, M.J. and Seltzer, S.M., NASA SP-3012 (1964)

(独立行政法人理化学研究所  
仁科加速器研究センター)