

---

# 第1章

## 原子核の物理

---

1. はじめに
  2. 原子と原子核
  3. 原子核の構造
  4. 結合エネルギー
  5. 原子核の崩壊
  6. 核反応
  7. まとめ
- 

〔この章のポイント〕

物質は原子でできており、原子は原子核とそれを取り巻く電子からできている。さらに原子核は陽子と中性子とから構成されている。原子核の質量は構成する個々の陽子と中性子の和より小さく、この質量差を質量欠損という。

質量とエネルギーが等価であるというアインシュタインの相対性原理に基づいて、質量欠損分のエネルギーを取出して利用するのが原子力である。

## 第1章 原子核の物理

## 1.1 はじめに

原子炉物理は、原子炉内で起こる核反応を伴う現象に関する物理である。その対象となるのは、核分裂や捕獲などの中性子と原子核の反応と、それに伴って引き起こされる原子核の崩壊・生成とその付随現象である。したがって、原子核の性質を知ること、原子炉で起こる現象を理解するためには欠かせない。

本章では、まず、エネルギーの単位と中性子などの質量について記述し、さらに原子と原子核の構造について説明する。

次に、原子核の結合エネルギーとそれに関係する半経験的質量公式について述べる。ここでは、「なぜ、原子炉に使う燃料はウランのような重い原子なのだろうか」「なぜ、安定な核種と放射性核種が存在するのだろうか」という疑問にも答えたいと思う。

原子炉の中では、様々な放射性核種が生成され、崩壊している。そこで、次に、崩壊によって原子核はどのように減衰していくのか、どのような崩壊の種類があるのか、について学ぶ。よく耳にする「放射線」や「放射能」という言葉の意味も説明する。

最後に、中性子と原子核とが衝突したときの反応（核反応）について説明する。核反応については、第2章以降で「断面積」という概念とともに頻繁に使われるので、その意味をここで把握してもらいたい。

## 1.2 原子と原子核

## 1.2.1 原子構造

私たちが目にする物質は、**原子** (atom) でできている。地球上に天然に存在する原子は、水素からウランまでの約90種類<sup>(注1.1)</sup>である。その大きさは $10^{-10}$ m程度であり、最近では、技術の進歩により、電子顕微鏡などで原子を見ることができるようになった。

原子は、中心にある**原子核** (atomic nucleus) とその周りを取り巻く**電子** (electron) でできている。原子核は、プラスの電荷を持つ陽子と、電気的に中性の中性子から構成されており、これらは原子核を構成していることから総称して核子と呼ばれている。

## 1.2.2 エネルギーの単位

ここで、エネルギーの単位について触れておく。原子炉物理でよく用いられるエネルギー単位はeV (電子ボルト) である。これは、静止していた電子が真空中で1ボルトの電位差で加速されたときに得る運動エネルギーに等しく、

$$1\text{eV}=1.602176487(40)\times 10^{-19}\text{J}$$

である<sup>(注1.2)</sup>。この $10^6$ 倍がMeVである。原子核レベルの現象は、MeV単位でエネルギーが授受される。

相対性原理によれば、質量とエネルギーは同等であり、

$$E=mc^2 \dots\dots\dots (1.1)$$

の関係がある。ここで、 $c$ は光の速さ $2.99792458\times 10^8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ である。原子の質量を表す単位に**原子質量単位** (atomic mass unit: u) が用いられる。1uは、「基底状態にある静止している核種 $^{12}\text{C}$ の質量の $1/12$ 」と定められている。すなわち、

$$1\text{u}=1.660538782(83)\times 10^{-27}\text{kg}$$

である。1uを式 (1.1) を用いてMeVに変換すると、

$$\begin{aligned} 1.66054\times 10^{-27}\text{kg}\times (2.99792\times 10^8\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^2 &= 1.49241\times 10^{-10}\text{J} \\ &= 9.3149\times 10^8\text{eV} \\ &= 931.49\text{MeV} \end{aligned}$$

である<sup>(注1.3)</sup>。ちなみに、中性子、陽子および電子の質量は、

$$\begin{aligned} \text{中性子の質量} &= 1.674927211(84)\times 10^{-27}\text{kg} \\ &= 1.00866\text{u} \\ &= 939.57\text{MeV} \end{aligned}$$

注1.1: 天然に存在するもっとも原子番号が大きな原子は、原子番号92のウラン (U) である。原子番号が大きな原子には**安定同位体** (stable isotope) が存在しない原子が多い。しかし、原子番号がビスマスより小さな原子でもテクネチウム (Tc) やプロメチウム (Pm) のように安定同位体が存在しないものがある。地球上に天然に存在するTcやPmは、ウラン鉱の中に自発核分裂生成物として極微量見出されているに過ぎない。

注1.2: 科学技術データ委員会 (CODATA, Committee on Data for Science and Technology) による2006年推奨値。 $1.602176487(40)\times 10^{-19}\text{J}$ は、 $1.602176487\times 10^{-19}\pm 0.000000040\times 10^{-19}$ を意味する。

注1.3: ジュールJ $\equiv$ N $\cdot$ m=W $\cdot$ s、ニュートンN $\equiv$ kg $\cdot$ m $\cdot$ s $^{-2}$ 、ワットW $\equiv$ J $\cdot$ s $^{-1}$

$$\begin{aligned}
 \text{陽子の質量} &= 1.672621637(83) \times 10^{-27} \text{kg} \\
 &= 1.00728 \text{u} \\
 &= 938.27 \text{MeV} \\
 \text{電子の質量} &= 9.10938215(45) \times 10^{-31} \text{kg} \\
 &= 0.00054858 \text{u} \\
 &= 0.51100 \text{MeV}
 \end{aligned}$$

である。陽子や中性子は、電子の約1800倍の質量を持っている。

### 1.2.3 化学反応のエネルギーと核反応のエネルギー

火力発電所は、石炭、石油、天然ガスなどの燃料を燃やして発電する。化石燃料を燃やして得るエネルギーは化学反応によるエネルギーを利用している。炭素が燃えて二酸化炭素になる反応は、熱化学方程式では次のようになる。

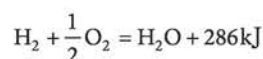


この式は、炭素1モルが燃焼して二酸化炭素1モルが生成するときに394kJの発熱があることを示している。これを1分子当りにすると、

$$\begin{aligned}
 394 \text{kJ} / (\text{アボガドロ数}) &= 394 \times 10^3 \text{J} / 6.022 \times 10^{23} \text{分子} \\
 &= 6.543 \times 10^{-19} \text{J/分子} \\
 &= 4.08 \text{eV/分子}
 \end{aligned}$$

4.08eVである。

また、25℃、1気圧のもとで水素が燃焼して水1モルが生成する場合は、



である。この場合は、水素1分子が燃焼すると2.96eVのエネルギーを発生する。このように化学反応のエネルギーは数eV～数十eVである。

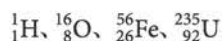
これに対し、原子核に係わる反応では1原子核当たりMeV単位のエネルギーが発生する。たとえば、原子力発電所は、ウランの核分裂エネルギーを利用して発電する。ウラン1個の核分裂で生成するエネルギーは約200MeVである。<sup>235</sup>Uの核分裂エネルギーと上で述べた炭素<sup>12</sup>Cの燃焼エネルギーを単位質量あたりで比べると、<sup>235</sup>Uの核分裂エネルギーの方が約 $3 \times 10^6$ 倍大きい。したがって、<sup>235</sup>U 1gから発生するエネルギーを得るためには約3tの炭素が必要である。

## 1.3 原子核の構造

### 1.3.1 原子番号と質量数

前述したように、原子核は陽子と中性子から構成されている(注1.4)。そのため、原子核は、二つの数で特徴付けられる。一つは、**原子番号** (atomic number) と呼ばれる陽子の数であり、Zで表される。原子番号Zは、核外の電子の数にも等しい。もう一つは、陽子の数と中性子の数の和であり、**質量数** (atomic mass number) と呼ばれ、Aで表される。すなわち、中性子の数をNとして、 $A = Z + N$ である。

原子もしくは原子核を記述するため、たとえば、



のように、元素記号の左肩に質量数Aを、左下に原子番号Zを付して表わす(注1.5)。

### 1.3.2 同位体と同重体

原子核は、陽子と中性子から構成されるが、その組み合わせも色々ある。たとえば、ホウ素を例にとると、原子番号Zは5であるが、中性子の数は5や6になりうる。すなわち、<sup>10</sup>Bや<sup>11</sup>Bが存在する。これらを**同位体** (isotope) と呼ぶ。自然界に存在する割合は、**存在比** (abundance) (注1.6) と言い、ホウ素の例では、<sup>10</sup>Bが19.9%、<sup>11</sup>Bが80.1%である。同位体は、電子が媒介となる化学的性質などは類似しているが、原子核が関与する特性は非常に異なっている。

表1.1に、いくつかの同位体の例を示す。

原子番号Zが同じ元素を同位体と呼んだが、質量数Aが同じであって原子番号が

注1.4：原子核が陽子と中性子から構成されているという考えは、1932年のチャドウィックによる中性子の発見に始まる。キュリー夫人の娘夫婦であるイレーヌとジョリオが、アルファ線をベリリウムに当てると透過力の強い放射線が出てくることを見出したが、彼らはそれをγ線であるとした。チャドウィックは、この放射線を色々な物質に当て、陽子をはじき出されることを見出し、陽子とほぼ同じ質量を持つ電荷を持たない粒子「中性子」であるとした。チャドウィックは、この功績により1935年にノーベル賞を受賞している。

注1.5：原子記号が原子番号に対応するので、原子番号を特記する必要がない場合には<sup>235</sup>Uのように左下のZを省略する。

注1.6：存在比は産地等により若干異なるが、本章では参考文献1)からの値を使用した。また、質量は参考文献2)を参照した。



表 1.1 同位体と存在比<sup>1) 2)</sup>

| 元素    | 陽子数 | 中性子数 | 記号                      | 原子量 (u)   | 存在比 (%)   |
|-------|-----|------|-------------------------|-----------|-----------|
| 水素    | 1   | 0    | ${}^1_1\text{H}$        | 1.00783   | 99.98850  |
|       | 1   | 1    | ${}^2_1\text{H}$ またはD   | 2.01410   | 0.01150   |
| リチウム  | 3   | 3    | ${}^6_3\text{Li}$       | 6.01512   | 7.59000   |
|       | 3   | 4    | ${}^7_3\text{Li}$       | 7.01600   | 92.41000  |
| ホウ素   | 5   | 5    | ${}^{10}_5\text{B}$     | 10.01294  | 19.90000  |
|       | 5   | 6    | ${}^{11}_5\text{B}$     | 11.00931  | 80.10000  |
| 炭素    | 6   | 6    | ${}^{12}_6\text{C}$     | 12.00000  | 98.93000  |
|       | 6   | 7    | ${}^{13}_6\text{C}$     | 13.00335  | 1.07000   |
| 窒素    | 7   | 7    | ${}^{14}_7\text{N}$     | 14.00307  | 99.63200  |
|       | 7   | 8    | ${}^{15}_7\text{N}$     | 15.00011  | 0.36800   |
| 酸素    | 8   | 8    | ${}^{16}_8\text{O}$     | 15.99491  | 99.75700  |
|       | 8   | 9    | ${}^{17}_8\text{O}$     | 16.99913  | 0.03800   |
|       | 8   | 10   | ${}^{18}_8\text{O}$     | 17.99916  | 0.20500   |
| ナトリウム | 11  | 12   | ${}^{23}_{11}\text{Na}$ | 22.98977  | 100.00000 |
| ウラン   | 92  | 142  | ${}^{234}_{92}\text{U}$ | 234.04095 | 0.00550   |
|       | 92  | 143  | ${}^{235}_{92}\text{U}$ | 235.04393 | 0.72000   |
|       | 92  | 146  | ${}^{238}_{92}\text{U}$ | 238.05079 | 99.27450  |

異なる元素を**同重体** (isobar) と呼ぶ。同重体の例としては、 ${}^{94}_{40}\text{Zr}$ と ${}^{94}_{42}\text{Mo}$ 、 ${}^{135}_{54}\text{Xe}$ と ${}^{135}_{53}\text{I}$ などがある。同重核の特殊なものとして、 ${}^{15}_7\text{N}$ と ${}^{15}_8\text{O}$ のように、原子核の中の陽子数Zと中性子数Nが互いに逆になっているものがあり、これらは**鏡像核** (mirror nuclei) と呼ばれる。

### 1.3.3 原子核の大きさ

電子が、原子の構成要素であることが分かってくると、電子の発見者であるジョセフ・ジョン・トムソン (Joseph John Thomson) によって、原子の大きさをもつに正に帯電した球の中に多くの電子がブドウパンのように埋め込まれた原子模型が提唱された (1903年)。これに対し、1904年に長岡半太郎が、中央に正の電荷を持つ核の周りを電子が回っている、土星型模型を提唱した。しかし、この長岡の主張は、当時、あまり注目されなかった。

しかし、ガイガーらの行った $\alpha$ 線の散乱実験で、 $90^\circ$ 以上の角度で散乱される大角度散乱が観測された。ラザフォードは、 $\alpha$ 粒子は重いので葡萄パンモデルでは大角度散乱を説明できないことから、原子の中心に小さいが極めて重い正に帯電した芯があり、その周りを電子が回っているという長岡と同様の原子模型を提唱した (1911年)。これが現在よく知られている原子模型であり、原子核の発見でもあった。

原子核の半径をRとすると、 $A \geq 30$ の多くの原子核に対して

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (1.2)$$

となる。ここで、 $r_0 \approx 1.2 \times 10^{-15} \text{m}$ である (注1.7)。たとえば、 $A=60$ の原子核の半径は、約  $5 \times 10^{-15} \text{m}$ であり、原子核の大きさは原子の大きさのほぼ1/10000の大きさである (注1.8)。

原子核はほぼ球形であるから、原子核の体積は、

$$\frac{4\pi}{3} R^3 = \frac{4\pi}{3} r_0^3 A \quad (1.3)$$

と表わせる。核子の密度は核種に依らず  $\frac{3}{4\pi r_0^3}$  である。この事実を核子密度の飽和性と呼び、原子核内の核子はあたかも液体の構造に似た構成を持っていると予想させる。

## 1.4 結合エネルギー

### 1.4.1 質量欠損

原子核が、陽子と中性子から構成されていると述べたが、原子核の質量は個々の陽子と中性子の質量の和よりも小さい。すなわち、原子番号Z、質量数Aの原子核の質量を $M(A, Z)$ 、陽子および中性子の質量を $M_p$ 、 $M_n$ とすると、



ジョセフ・ジョン・トムソン

注1.7:  $10^{-15} \text{m}$ をフェムトメートル(fm)と言う。従来は、原子核程度の長さの単位として、物理学者フェルミ(E.Fermi)に因んで、フェルミ(1fm= $10^{-15} \text{m}$ )という単位で呼ばれていた。

注1.8: 皇居の真ん中にある小さな1戸建ての家が原子核とすれば、原子はつくば、八王子、鎌倉、成田を結ぶ円に相当する大きさである。その原子核の重さが、原子の重さのほとんどを占めているのだから驚きである。



長岡半太郎

$$\Delta M = ZM_p + (A-Z)M_n - M(A, Z) \geq 0 \quad (1.4)$$

である。この $\Delta M$ を**質量欠損** (mass defect) という。

### 〈例題1.1〉

表1.1に示したように、重水素原子の原子量、すなわち原子の質量は2.01410 uである。重水素の質量欠損を求めよ。なお、水素原子の質量は1.00783 uである。

### 〈解答1.1〉

重水素は陽子1個、中性子1個からできているので、

$$\begin{aligned} \Delta M &= \text{陽子の質量} + \text{中性子の質量} - \text{重水素原子核の質量} \\ &= (\text{陽子の質量} + \text{電子の質量}) + \text{中性子の質量} - \\ &\quad (\text{重水素原子核の質量} + \text{電子の質量}) \\ &= \text{水素原子の質量} + \text{中性子の質量} - \text{重水素原子の質量} \\ &= 1.00783\text{u} + 1.00866\text{u} - 2.01410\text{u} \\ &= 0.00239\text{u} \end{aligned}$$

となる。したがって、重水素の質量欠損は0.00239uであり、エネルギーに換算すると2.23MeVになる。

## 1.4.2 結合エネルギーの特徴

1.4.1節で述べた質量欠損には、どのような意味があるのだろうか。

相対性理論<sup>(注1.9)</sup>によれば質量とエネルギーは等価である。したがって、質量欠損をエネルギーに換算すれば、原子核の状態は陽子や中性子が単独でいる状態より $\Delta Mc^2$ だけ低いエネルギーになっていることになる。言い換えれば、粒子が結合した原子核の状態から粒子を解き放つには $\Delta Mc^2$ のエネルギーを加えてやらなければならない<sup>(注1.10)</sup>。このエネルギーを**結合エネルギー** (binding energy) と呼ぶ。結合エネルギーが大きい原子核ほど、核子の結び付きが固く、安定で壊し難い。

図1.1に、核子1個当たりの結合エネルギーを示す。この図から、結合エネルギーには次のような特徴があることが分かる。

- (1) 核子1個当たりの結合エネルギーは、特に軽い元素を除いてほぼ一定 (6～9MeV) である。
- (2) 質量数が約60の元素を最大として、それより小さい元素も、大きな元素も結合エネルギーは小さい。この特徴は、軽い元素は結合することにより、重い元素は分裂することにより、より安定な元素になることを示唆している。

上では原子核と軌道電子の結合エネルギーには言及しなかったが、原子核と軌道電子の結合エネルギーは核子の間の結合エネルギーに比べて小さく無視できる (例題1.2参照)。

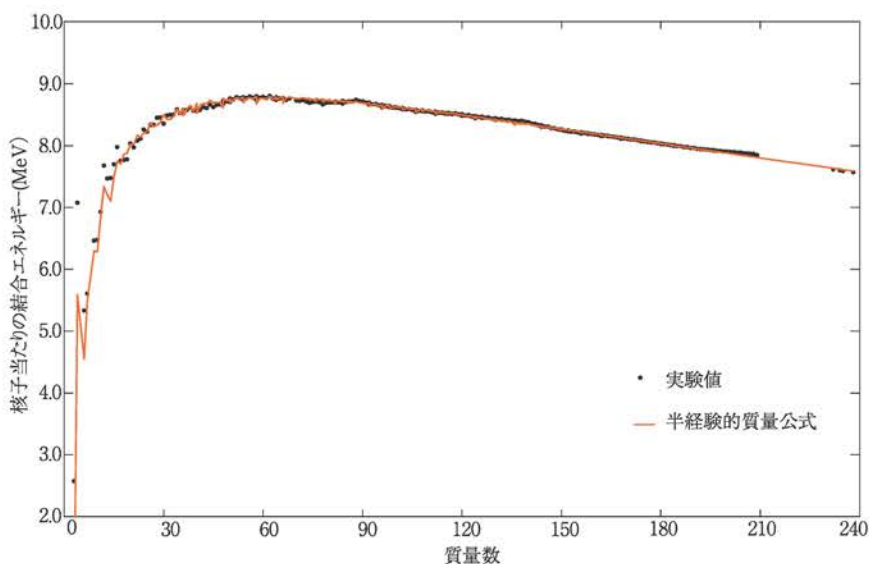


図1.1 核子当たりの結合エネルギー



アーネスト・ラザフォード

注1.9: アインシュタインが提唱した相対性理論には、特殊相対性理論 (1905年) と加速運動も含めて一般化した一般相対性理論 (1916年) がある。特殊相対性理論によれば、速度 $v$ で運動する粒子のエネルギーは

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$$

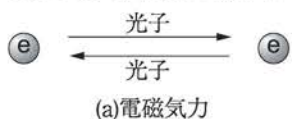
とすると、 $E \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2$  となる。右辺第

2項目は良く知られた古典力学での運動エネルギーであるが、右辺第1項は相対性理論で初めて示された $v=0$ でも存在するエネルギーで静止エネルギーと呼ばれる。すなわち、粒子は運動していなくても質量 $m(>0)$ があれば、 $mc^2$ のエネルギーを持っていることを示している (質量とエネルギーの等価性)。逆に、質量0の粒子は静止することができない。

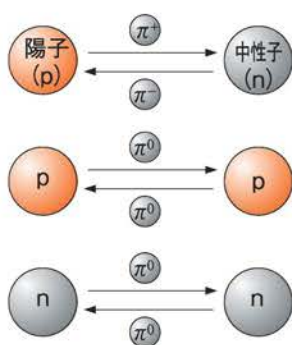
注1.10: 逆に、遠く離れたばらばらの陽子と中性子を原子核の大きさ程度まで寄せ集めるとエネルギーが発生することになる。これは地面に穴があいていて、物体をその穴の淵まで持って行き、突き落とすようなものである。穴に落とされた物体は底まで落ちる間に運動をし、そのエネルギーを周りの空気などに放出する。落下させる力は重力であるが、原子核の場合は後で述べる核力であり、エネルギーは $\gamma$ 線などで放出される。



注1.11:自然界には4つの基本的な力がある。すなわち、強さの順番に、“強い力”、“電磁気力”、“弱い力”、“重力”である。核力は強い力の一つであり、弱い力は $\beta$ 崩壊に働く力である。強い力と弱い力の影響範囲は $10^{-15}\text{m}$ 、 $10^{-18}\text{m}$ といった近距離であるのに対し、電磁気力と重力の影響範囲は無限大である。



(a)電磁気力



(b)核力

図1.2 核力のしくみ



湯川秀樹

注1.12:湯川の予言した $\pi$ 中間子は宇宙線の中で発見され(1947年)、1949年に湯川は日本人として初めてノーベル賞を受賞した。理化学研究所の仁科芳雄らは1937年に霧箱を使った宇宙線の観察から新しい粒子(メソトンと呼んでいた)を発見し、Physical Reviewに投稿していたが、論文が規定より長すぎるとして載らなかった。1949年、米国のアンダーソンらの投稿が採用された。余談になるが、現在では、陽子や中性子は3個のクォークからできており、クォークの間の力を伝達するのはグルーオンという粒子であると考えられている。 $\pi$ 中間子は、クォークと反クォークから構成される粒子とされている。

### 〈例題1.2〉

軌道電子の結合エネルギーは、電子の質量を $m$ 、電気素量を $e$ として次式で表せる。

$$E_n = \frac{me^4 Z^2}{8n^2 \epsilon_0^2 h^2} \dots \dots \dots (1.5)$$

ここで、 $\epsilon_0$ は真空の誘電率、 $h$ はプランク定数である。また、 $n$ は主量子数と呼ばれ、 $n=1$ の軌道をK軌道、 $n=2$ の軌道をL軌道、等々と呼ぶ。水素のK電子の結合エネルギーは13.60eVである。鉛( $Z=82$ )のK電子の結合エネルギーはいくらか。

### 〈解答1.2〉

上式において、 $n=1$ とすると

$$E_1 = \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot Z^2 = (\text{水素のK電子の結合エネルギー}) \times Z^2$$

である。したがって、鉛のK電子の結合エネルギーは $Z=82$ を上式に入れて、

$$13.60\text{eV} \times 82^2 = 91.4\text{keV}$$

となる。これは、原子核の結合エネルギーの約1/100であり、十分小さいことが分かる。

### 1.4.3 核力

自然界には色々な力がある(注1.11)。よく知られているのは重力、電磁力である。重力は質量の間に働く互いに引き合う力(引力)である。また、電磁力は電荷の間に働く力で、プラスの電荷同士、マイナスの電荷同士の間では反発力(斥力)が働き、プラスとマイナスの電荷の間では引力が働く。これらの力は、私たちが身近に感じることでできる力である。

ところで、原子核の中では、正の電荷を持った陽子が小さな空間に閉じ込められており、電気的な反発力があるにもかかわらず結合しているのは何故だろうか。それは、陽子と陽子、中性子と中性子、陽子と中性子の間にほぼ等しく働く力、すなわち**核力**(nuclear force)という力が作用しているからだ考えると都合がよい。

核力の起源を研究していた湯川秀樹は、電磁気力が光子をやりとりすることによって生じるということから類推して、核力は電子より200倍重い $\pi$ 中間子をやりとりすることで生じるという理論(中間子論)を提唱した。核力は、電磁力より強い力であるが、 $10^{-15}\text{m}$ 程度の近距離にだけに働く力であるため、私たちは日常生活の中で核力を感じることはできない。

電磁力(クーロン力)は、図1.2(a)に示すように、電子同士が光子をキャッチボールすることで生じる。光子は、質量が0なのでその影響範囲は無限大である。これと同じように、湯川は、核子の間でも中間子という粒子をやり取りすることで核力が生じると考えた。すなわち、中間子には電荷を持たない $\pi^0$ 、プラスおよびマイナスの電荷を持つ $\pi^+$ 、 $\pi^-$ の3種類があり、陽子や中性子が $\pi^0$ をやり取りした場合はそれぞれが変化せずに力を及ぼし合う。また陽子が $\pi^+$ を放出して中性子になり、それを受け取った中性子が陽子になるというキャッチボールや、中性子が $\pi^-$ を放出し受け取った陽子が中性子になるというキャッチボールで力を及ぼし合うこともあると考えたのである(図1.2(b))。さらに、中間子は質量を持っているため、影響距離が近距離であると考え、核力の影響範囲から中間子の質量を予測した(注1.12)。

自然界にある安定な核種を観察することにより、核力の性質などとして次のことが分かる。

- (1) まず、原子核は、陽子と中性子をほぼ同数含んでいるものが多い。軽い原子核はそれが顕著で、存在比の大きい元素は概ね同数の陽子と中性子から構成されている。このことから、核力は、陽子間、中性子間よりも陽子と中性子の間に作用するものの方が大きいと推定できる。実際、複数の核子からなる原子核で、陽子のみ、中性子のみで構成される原子核は存在しない。
- (2) しかし、図1.3に示すように、質量数が大きくなるにつれて、陽子の数より中性子数の大きい核種の方が安定になっている。これは陽子同士の電気的反発力のためである。

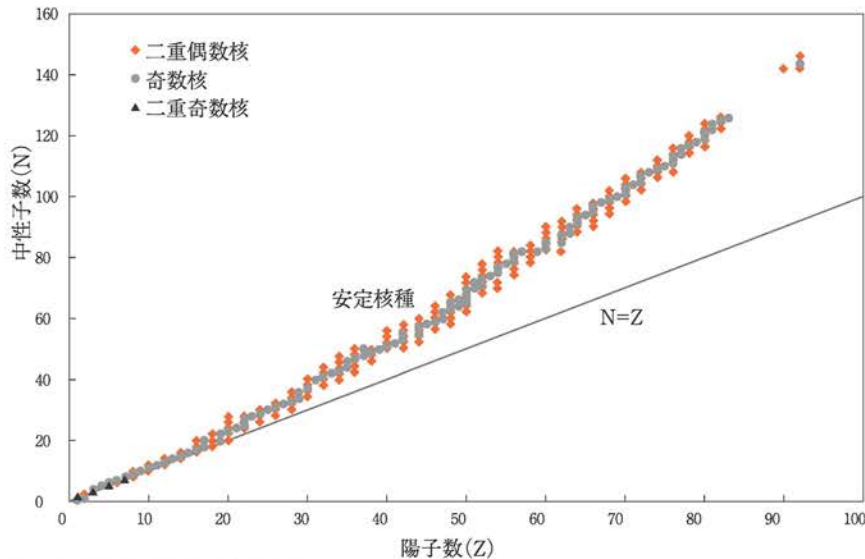


図1.3 核子数の偶奇と安定核種

- (3) さらに、陽子、中性子とも偶数の原子核（二重偶数核）がもっとも安定であることは、自然界には二重偶数核の安定核種がもっとも多いことでも分かる（図1.3参照）。次に多いのは陽子か中性子が奇数で、他が偶数である原子核（奇数核）で、もっとも少ないのは陽子と中性子がともに奇数の原子核（二重奇数核）である。

#### 1.4.4 半経験的質量公式

原子と原子核に係わる最も重要な量は、その質量である。質量欠損が原子（核）の質量から計算されることを考えれば、その重要性が分かるであろう。

原子核の質量を理論のみから正確に計算することは、現在では困難である。そのため、前節で述べた核力に基づく結合エネルギーの規則性をうまく盛り込んだ半経験的な質量公式が提案されており、原子核の性質を調べるのに役立っている。ここでは、ワイゼッカー・ベータ（Weizsäcker-Bethe）の半経験的質量公式を紹介し、その公式から得られる原子核の性質について次節で述べる。

1.3.3節で、原子核は液体に似た構成を持っていると述べた。**ワイゼッカー・ベータの質量公式**（Bethe-Weizacker mass formula）は、このような液体との類似性（液滴モデルと呼ばれる）を使って組み立てられており、次式で与えられる。

$$M(A, Z) = M_p \cdot Z + M_n \cdot N - B(A, Z) \quad (1.6)$$

ここで、 $M(A, Z)$ は陽子数 $Z$ 、中性子数 $N$ 、質量数 $A$ の原子核の質量であり、 $M_p$ と $M_n$ は陽子と中性子の質量である（質量の単位は全てMeVとする）。結合エネルギーの項 $B(A, Z)$ は、

$$B(A, Z) = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_4 \frac{(A - 2Z)^2}{A} + \delta(A) \quad (1.7)$$

$$\delta(A) = \begin{cases} +\frac{a_5}{A^{1/2}} & A \text{ が偶数、ただし、} N, Z \text{ がともに偶数（二重偶数核）} \\ 0 & A \text{ が奇数（奇数核）} \\ -\frac{a_5}{A^{1/2}} & A \text{ が偶数、ただし、} N, Z \text{ がともに奇数（二重奇数核）} \end{cases}$$

である（注1.13）。ここで、 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ は実験に合うように決めた定数であり、表1.2に示す値をとる。

それぞれの項は次のような意味を持っている。

第1項は、1.4.2節で述べた、核子当たりの結合エネルギーがほぼ一定であるということに対応する体積エネルギー項である。

第2項の $A^{2/3}$ は表面積に比例する。この項は、液滴の表面張力にあたる項で、表面にある核子は外側から作用を受けないので結合エネルギーが小さいという補正項で

注1.13：この式で計算した核子当たりの結合エネルギーを、図1.1に実線で示した。図に示すように、実験値の傾向をよく再現しており、特に軽い核種（ $A < 40$ ）を除けば極めてよい一致を示している。

表1.2 半経験的質量公式の係数

| 係数    | MeV    |
|-------|--------|
| $a_1$ | 15.753 |
| $a_2$ | 17.804 |
| $a_3$ | 0.710  |
| $a_4$ | 23.69  |
| $a_5$ | 12     |



ある。したがって、体積に比べて表面積の大きな原子核、すなわち、質量数の小さな原子核ほど核子当りの結合エネルギーが小さくなる。

第3項は、陽子が正の電荷を持つことに起因するクーロン反発エネルギーの項である。電荷が一様に分布する場合、クーロンエネルギーは

$$\frac{3}{5} \frac{(Ze)^2}{R} = \frac{3e^2}{5r_0} \frac{Z^2}{A^{1/3}} \dots\dots\dots (1.8)$$

と書けるから、この項は $Z^2/A^{1/3}$ に比例すると仮定した。

第4項は、前節で述べた陽子と中性子がほぼ同数の場合に核の安定性が高いという事実に基づく項で、対称項と呼ばれる。これは中性子と陽子の間の核力が、中性子-中性子、陽子-陽子の場合よりも多少大きいことを表している。

最後の項は、対エネルギー項と呼ばれ、前節で述べた二重偶数核が最も安定であり、次に奇数核、二重奇数核の順であるという事実に基づいて導入された項である。

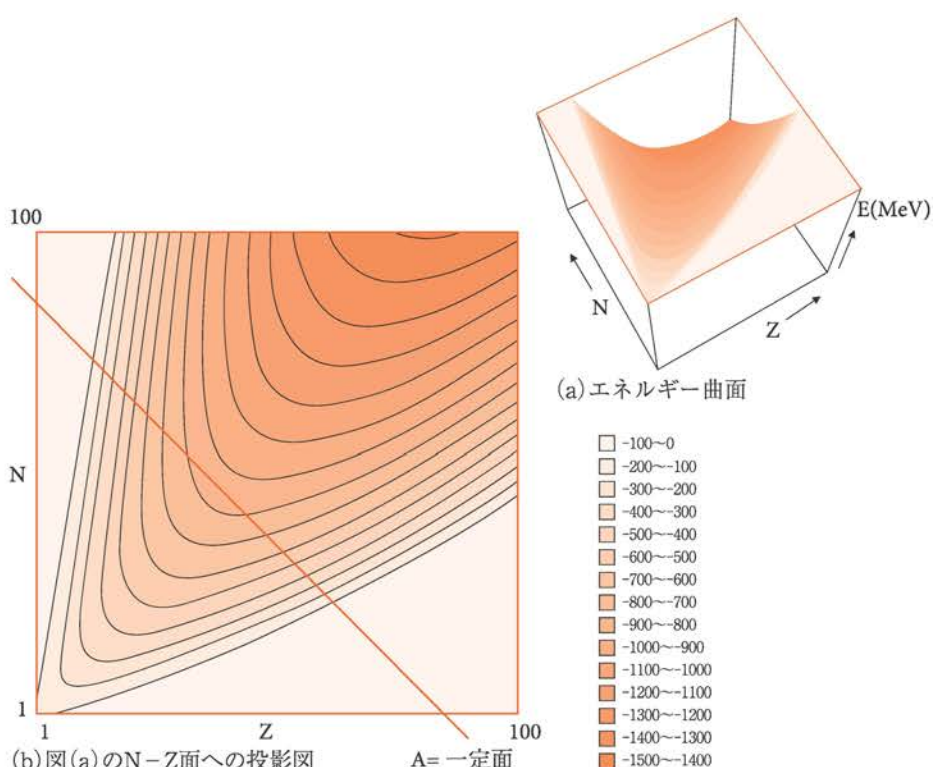


図1.4 エネルギー曲面

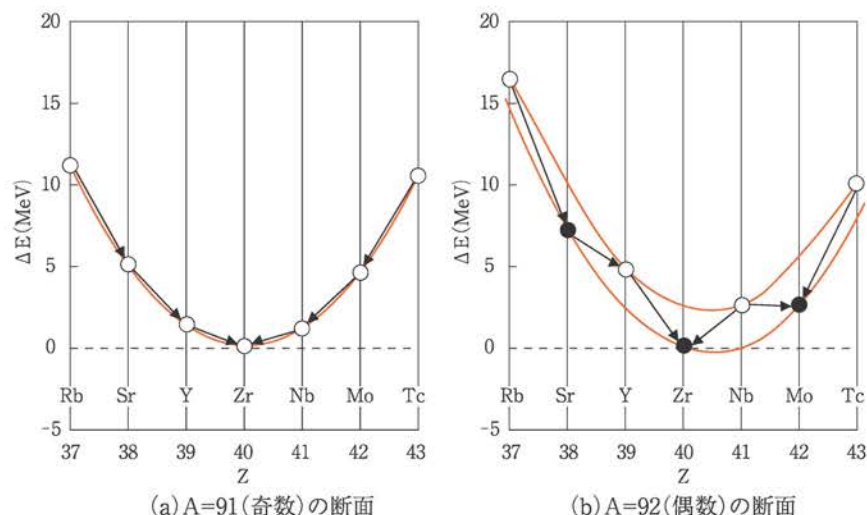


図1.5 原子核の安定性



## 1.4.5 原子核の安定性

式 (1.7) の結合エネルギーの符号を変えて、

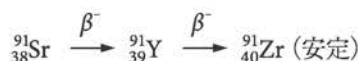
$$E = -B(A, Z) \dots\dots\dots (1.9)$$

とする。 $E$ が負の大きな値を取るほど原子核は安定である。 $E$ を陽子数 ( $Z$ ) と中性子数 ( $N$ ) とをパラメータにして図示すると、図1.4のように安定な核種が谷 (ハイゼンベルグの谷と呼ばれる) になったエネルギー曲面ができる。谷の部分は  $Z$  が小さいときは  $Z=N$  であるが、 $Z$  が大きくなると  $N$  の大きな方にシフトしていく。これはクーロン反発エネルギーが大きくなるためである。

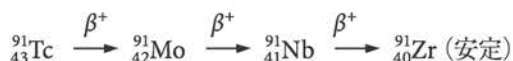
ところで、図1.4に示す  $A$  = 一定 (同重核) の面で切ると、図1.5のような切り口になる。ただし、図1.5は  $Zr$  を基準としたエネルギー差 ( $\Delta E$ ) を縦軸に取って、(a)  $A=91$  および (b)  $A=92$  のケースを示した。

$A$  が奇数の場合は、1.7式の  $\delta$  が0であるから、図1.5 (a) のように唯一の曲線となる。一方、 $A$  が偶数の場合は、 $\delta$  が二つの値をとりえるため、図1.5 (b) のように二段の曲線になっている。これらの図のもっとも低い位置にある核種がもっとも安定な核種である。

図1.5 (a) に示すように、 $A=91$  の場合は  ${}^{91}_{40}Zr$  がもっとも安定である。その左側の核種は、安定核種よりも中性子数が多いので、中性子が陰電子を放出して陽子に変わること ( $\beta^-$  崩壊) により安定な核種に崩壊していく。この例では、



となる。また、右側の核種は安定核種より陽子数が多いため、陽子が陽電子を放出する ( $\beta^+$  崩壊) か、軌道電子を取り込むこと (軌道電子捕獲) で中性子に変わり、安定核に移行する。すなわち、次のように崩壊する。



ここで示したように、質量数  $A$  が奇数の場合は、一般には、一つの安定核しか存在しない (注1.14)。

注1.14: 唯一の例外は  $A=113$  で、 ${}^{113}_{48}Cd$  と  ${}^{113}_{49}In$  の二つの安定核が存在する。

一方、図1.5 (b) に示すように、 $A=92$  の場合では、上の曲線は二重奇数核に対応し、下の曲線は二重偶数核に対応している。上の曲線にある核種は、下の線の上によりエネルギーの低い核種が必ずあるので、その核種に崩壊する。たとえば、 ${}^{92}_{43}Tc$  はエネルギーの低い  ${}^{92}_{42}Mo$  に崩壊する。しかし、1回の崩壊では複数の電子や陽電子を放出することができないので、 ${}^{92}_{42}Mo$  はよりエネルギーの低い  ${}^{92}_{40}Zr$  に崩壊することはできない。したがって、質量数  $A$  が偶数の同重体には2個以上の安定核種が存在しうることが分かる。

## 1.4.6 殻モデルとマジックナンバー

液滴モデルをベースとした結合エネルギーの半経験式は、上述したように原子核の性質を説明するのに多大な成功をした。しかし、説明できない事柄もいくつか残った。

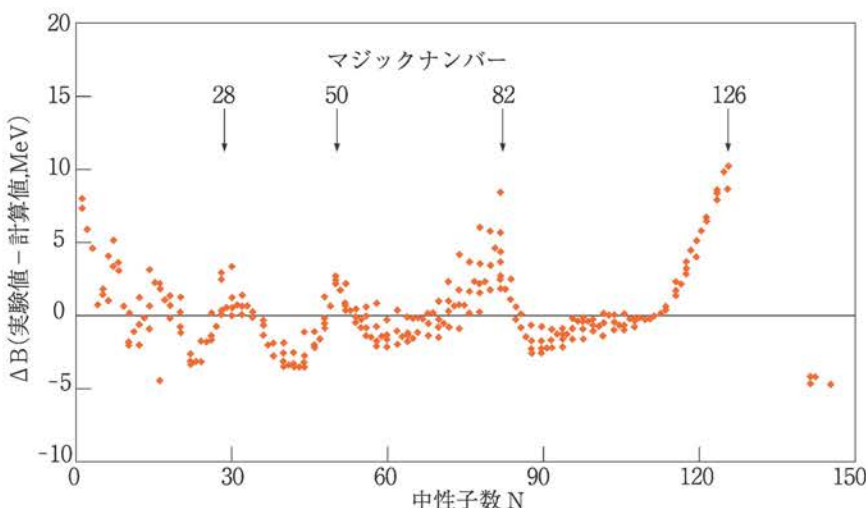


図1.6 結合エネルギーの実験値と計算値の  $\Delta B$



マリア・ゲッパート・メイヤー

注1.15: 少し難しい話をする、単に原子からの類推で、シュレーディンガー方程式に核力などによる中心力ポテンシャルを考慮しただけではマジックナンバーはうまく説明できない。殻モデルの成功は、強いスピン軌道力を導入したことによりマジックナンバーを説明したことにあると言える。この理論の成功により、メイヤーとエンセンは、1963年にノーベル物理学賞を受賞している。

図1.6は、中性子数 $N$ を横軸に、結合エネルギーの実験値と式(1.7)に基づく計算値との差( $\Delta B$ )をプロットしたものである。図に示すように、中性子数が28、50、82、126というところで差が大きくなっているのが分かる。核子数28、50、82、126という数は、“マジックナンバー (magic number: 魔法数)”と呼ばれ、特別に安定な原子核を作る。

マリア・ゲッパート・メイヤー (M.G.Mayer) とヨハネス・H・D・イェンセン (J.H. D.Jensen) は、殻モデル (shell model) という新しいモデルを提案し、何故マジックナンバーが存在するのかを説明した。簡単に言うと、原子では、軌道電子が閉殻を作るときに希ガスという安定な原子になる。これと同じように、原子核でも、陽子や中性子が閉殻を作るときに安定になるのである<sup>(注1,15)</sup>。

## 1.5 原子核の崩壊

### 1.5.1 崩壊の種類と崩壊法則

自然に存在する原子番号が80以上の元素は、多くが外部から何も作用させなくても放射線を出して崩壊する自然放射性元素である。放射線には、ヘリウムの原子核である $\alpha$ 線、電子である $\beta$ 線、波長の短い電磁波である $\gamma$ 線がある。崩壊の過程で発生する放射線によって、 $\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊などと呼ばれる。これらを総称して放射性崩壊（放射性変変ともいう）という。

放射性核種の崩壊は、次の式に従う。

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\lambda N(t) \quad \dots\dots\dots (1.10)$$

ここで、 $N(t)$ は時刻 $t$ における放射性核種の個数で、 $\lambda$ は崩壊定数と呼ばれ、一つの核種が単位時間に崩壊する確率を表す。式(1.10)から、

$$N(t)=N(0)e^{-\lambda t} \quad \dots\dots\dots (1.11)$$

である。したがって、放射性核種の個数が、 $t=0$ の $1/2$ に減少する時間 $T$ は、

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \dots\dots\dots (1.12)$$

となり、これを**半減期** (half-life) と呼ぶ。また、 $1/e$ に減少する時間

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots (1.13)$$

を**平均寿命** (mean lifetime) と呼ぶ。

放射性核種が、放射線を出す能力を**放射能** (radioactivity) という。放射能の強さは、1秒間に崩壊する数で表され、ベクレル (Bq) という単位で測られる。以前は、ラジウム1gの放射能に因んだキュリー (Ci) という単位が用いられていた。すなわち、1gのラジウムは毎秒 $3.7 \times 10^{10}$ 回の $\alpha$ 崩壊をするので、

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

である。

### 〈例題1.3〉

半減期が式(1.12)で表されることを示せ。

〈解答1.3〉

半減期は、放射性核種が初期の個数の $\frac{1}{2}$ になる時間である。したがって、核種の崩壊定数を $\lambda$ 、初期の核種数を $N_0$ 、半減期 $T$ における核種数を $N(T)$ とすると、

$$\frac{N(T)}{N_0} = e^{-\lambda \cdot T} = \frac{1}{2}$$

である。したがって、この式の対数をとると、



$$\lambda \cdot T = -\ln\left(\frac{1}{2}\right) = 0.693147 \approx 0.693$$

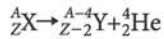
であるから、

$$T \approx \frac{0.693}{\lambda}$$

となる。

### 1.5.2 $\alpha$ 崩壊

$\alpha$ 崩壊 (alpha decay) は、親核種をX、娘核種をYとすると、



となる。 $\alpha$ 粒子はヘリウムの原子核であり、 $\alpha$ 崩壊では親核種より質量数が4、原子番号が2小さい核種が生成する。

$\alpha$ 崩壊の崩壊定数 $\lambda$ と、 $\alpha$ 粒子のエネルギー $E_\alpha$ の間には次の関係 (ガイガー・ヌッタルの法則) (注1.16) がある。

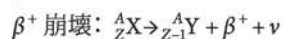
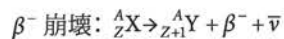
$$\log \lambda = A + B \log E_\alpha \quad \dots\dots\dots (1.14)$$

ここで、AおよびBは崩壊系列 (注1.17) に特有の定数である。この式は、崩壊定数の大きな (半減期の小さな) 核種からはエネルギーの高い $\alpha$ 粒子が放出されることを示している。

ガイガー・ヌッタルの法則は、古典力学では説明できず、1928年にジョージ・ガモフ (G. Gamow) らによって量子力学のトンネル効果を用いて初めて理論付けられた。

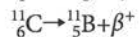
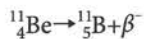
### 1.5.3 $\beta$ 崩壊

$\beta$ 崩壊 (beta decay) には、 $\beta$ 線の種類によって $\beta^-$ 崩壊と $\beta^+$ 崩壊の二種類がある。 $\beta^-$ 崩壊は、核内の中性子が陽子に変わることによって電子 ( $\beta^-$ ) と反ニュートリノ ( $\bar{\nu}$ ) が放出されるもので、 $\beta^+$ 崩壊は陽子が中性子に変わることによって陽電子 ( $\beta^+$ ) とニュートリノ ( $\nu$ ) が放出されるものである。 $\beta$ 崩壊の場合は、質量数は変化しないので親核種をX、娘核種をYとすると、



のように、原子番号が1だけ増減する。

既に述べたように、質量数を一定にしたときエネルギー的にもっとも安定な陽子数と中性子数の割合は一定しているので、これよりも中性子数が多い場合は $\beta^-$ 崩壊をし、陽子数が多い場合は $\beta^+$ 崩壊をする (1.4.5節参照)。たとえば、次のような崩壊である。



$\beta$ 崩壊で放出される $\beta$ 線のエネルギーは、0からその核種に特有な最大値まで連続的に分布する。 $\beta$ 線が持つエネルギーは、 $\beta$ 崩壊前後の質量差である。したがって、 $\beta$ 線の最大エネルギー $E_{\max}$ は、 ${}^A_ZX$ から ${}^A_{Z+1}Y$ の $\beta^-$ 崩壊では、それぞれの中性原子の質量を $\tilde{M}(A, Z)$ 、 $\tilde{M}(A, Z+1)$ 、とし、電子の静止質量を $m_e$ とすると、次のようになる。

$$\begin{aligned} E_{\max} &= [\tilde{M}(A, Z) - Zm_e] - [\tilde{M}(A, Z+1) - (Z+1)m_e + m_e] \cdot c^2 \quad \dots\dots\dots (1.15) \\ &= [\tilde{M}(A, Z) - \tilde{M}(A, Z+1)] \cdot c^2 \end{aligned}$$

$\beta$ 線のエネルギーが連続分布となるのは、ニュートリノがエネルギーの一部を持ち去るからである (注1.18)。さらに、生成された娘核は励起状態 (注1.19) にあることが多く、引き続き $\gamma$ 線を放出して基底状態に遷移する。このため、放出される $\gamma$ 線は核種に特有なエネルギーを持っている。

注1.16: ガイガー・ヌッタルの法則は崩壊定数と $\alpha$ 粒子の飛程Rとの関係が $\log \lambda = A' + B' \log R$ で与えられていた。しかし、飛程Rと $\alpha$ 粒子のエネルギー $E_\alpha$ の間には $R = CE_\alpha^{-1/2}$ という関係があるので、式 (1.14) のように書ける。

注1.17: 放射性崩壊で生じた核種も放射性核種であり、崩壊を繰り返して安定な核種になる。 $\alpha$ 崩壊では質量数が4減るが、その他の崩壊では質量数は変化しない。そのため、崩壊を繰り返す系列 (崩壊系列) は、nを整数とすると質量数が $4n, 4n+1, 4n+2, 4n+3$ の4種類しかない。特に、自然界には ${}^{232}\text{Th}$ から始まるトリウム系列 ( $4n$ )、 ${}^{238}\text{U}$ から始まるウラン系列 ( $4n+2$ )、 ${}^{235}\text{U}$ から始まるアクチニウム系列 ( $4n+3$ ) の3つの崩壊系列がある。これらの崩壊系列は、いずれも安定な鉛の同位体で終わる。 $(4n+1)$ の系列は、ネプツニウム系列と呼ばれ、地球生成時には存在していたが、現在では人工的に作られた核種による崩壊系列としてしか存在しない。

注1.18:  $\beta$ 線が様々なエネルギーを取ることによってエネルギー保存則が破れているのではないかという議論もなされた。しかし、パウリ (W. Pauli) はニュートリノという新しい粒子の存在を提唱し、これを解決した。

注1.19: 原子核の内部エネルギーが最低の状態を基底状態 (ground state) といい、それよりも高いエネルギーにある状態を励起状態 (excited state) という。

## 1.5.4 軌道電子捕獲 (EC)

**軌道電子捕獲** (orbital electron capture) は原子核の陽子が、その周りを回っている電子を捕獲し、中性子に変わる現象である。特に、原子核に近いK殻の電子が捕獲されやすいので、そのときはK殻電子捕獲と呼ばれる。

この崩壊は、質量数が変わらず、原子番号が1つ減少する点で、 $\beta^+$ 崩壊と類似している。一般に、 $\beta^+$ 崩壊と軌道電子捕獲は共存するが、 $\beta^+$ 崩壊は親核と娘核の中性原子質量差が電子質量の2倍 (1.02MeV) 以上でないと起こらない (例題参照) ので、それ以下のときは軌道電子捕獲のみが起こる。

## 〈例題1.4〉

${}^7\text{Be}$ と ${}^7\text{Li}$ の中性原子の質量は、それぞれ7.01693u、7.01600uである。 ${}^7\text{Be}$ が ${}^7\text{Li}$ に崩壊する場合に、 $\beta^+$ 崩壊が起こるか。

## 〈解答1.4〉

$\beta^+$ 崩壊では、 $\beta^-$ 崩壊の式 (1.15) に対応して、

$$\begin{aligned} E_{\max} &= [\{\tilde{M}(A, Z) - Zm_e\} - \{\tilde{M}(A, Z-1) - (Z-1)m_e + m_e\}] \cdot c^2 \dots\dots\dots (1.16) \\ &= [\tilde{M}(A, Z) - \tilde{M}(A, Z-1) - 2m_e] \cdot c^2 \end{aligned}$$

となる。 $\beta^+$ 崩壊が起こるためには $E_{\max} > 0$ でなくてはならない。したがって、 $\beta^+$ 崩壊が起こる条件は、 $\tilde{M}(A, Z) - \tilde{M}(A, Z-1) > 2m_e$ となる。

ところで、 ${}^7\text{Be}$ と ${}^7\text{Li}$ の中性原子の質量差は、

$$\begin{aligned} \text{質量差} &= 7.01693 - 7.01600 \\ &= 0.00093 < 2m_e \end{aligned}$$

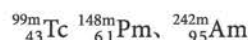
である。したがって、この崩壊は軌道電子捕獲で、 $\beta^+$ 崩壊は起こらない。

1.5.5  $\gamma$ 崩壊

原子核が励起状態にあって、この原子核がよりエネルギーの低い準位に遷移する際に $\gamma$ 線を放出する。これを **$\gamma$ 崩壊** (gamma decay) と呼ぶことがある。 $\gamma$ 崩壊では、原子番号も質量数も変わらない。放出される $\gamma$ 線は、核種に固有なエネルギーを持っており、原子核のエネルギーが飛び飛びの値しか取れないことが分かる。

励起状態からの遷移では、 $\gamma$ 線を放出する代わりに、励起エネルギーを直接軌道電子に与えて電子を放出する場合がある。これを**内部転換** (internal conversion) といい、放出された電子を内部転換電子という。

ところで、原子番号も質量数も同じ、エネルギー準位の異なる核種を互いに**核異性体** (isomer) と呼ぶ。核異性体は、励起状態の半減期が観測できるほど長いもので、そのような状態を質量数の後にmをつけて、

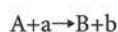


のように記す。このmは、**準安定状態** (metastable) の意味である。核異性体が $\gamma$ 線を出してより低いエネルギーの核異性体に移る $\gamma$ 崩壊は、**核異性体転移** (IT: isomer transition) とも呼ばれる。 ${}^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$ は $\gamma$ 線放射標識として広く医薬品に使われている。

## 1.6 核反応

中性子などの粒子を原子核に衝突させると、原子核が別の原子核に変換されたり、原子核が励起されたりする。このような原子核と粒子の衝突に起因する現象を総称して**核反応** (nuclear reaction) と呼ぶ。核反応の中には、粒子が核との衝突によって、エネルギーや方向だけを変化させることも核反応に含まれ、これは散乱と呼ばれる。

原子核Aに粒子aが衝突し、その結果、原子核Bと粒子bが生成される反応



注1.20: 核反応の記述の仕方は、 $A + a \rightarrow B + b$ を $A(a, b)B$ と書くこともある。

を考える<sup>(注1.20)</sup>。この場合、Aを標的核、aを入射粒子、Bを残留核、bを放出粒子と呼ぶ。このとき、標的核、入射粒子、残留核、放出粒子の質量を $M_A$ 、 $M_a$ 、 $M_B$ 、 $M_b$ とすると、



$$Q = [(M_A + M_a) - (M_B + M_b)]c^2 \quad (1.17)$$

を反応の**Q値** (Q value) という。Q値が、正 ( $Q > 0$ ) のときは発熱反応、負 ( $Q < 0$ ) のときは吸熱反応と呼ばれる<sup>(注1.21)</sup>。

中性子と原子核との反応は、次のように分類できる。

$$\text{核反応} \left\{ \begin{array}{l} \text{散乱} \left\{ \begin{array}{l} \text{弾性散乱}[(n,n) \text{ 反応}] \\ \text{非弾性散乱}[(n,n') \text{ 反応}] \\ (n,2n) \text{ 反応} \cdots \end{array} \right. \\ \text{吸収} \left\{ \begin{array}{l} \text{中性子捕獲}[(n,\gamma) \text{ 反応}] \\ \text{核分裂}[(n,f) \text{ 反応}] \\ \text{荷電粒子放出}[(n,\alpha) \text{ 反応}, (n,p) \text{ 反応}, \cdots] \end{array} \right. \end{array} \right.$$

これらの反応について、以下に説明する。

### 1.6.1 散乱反応

中性子が原子核と反応した後、再び中性子が放出される反応を、**散乱反応** (scattering reaction) という。散乱反応には、**弾性散乱** (elastic scattering) と**非弾性散乱** (inelastic scattering) とがある。

#### (1) 弾性散乱

弾性散乱は、衝突の前後で運動エネルギーが保存される散乱で、剛体球同士がぶつかり合ったような散乱である。弾性散乱には、中性子が原子核に取り込まれずに散乱するポテンシャル散乱と、中性子が一旦原子核に取り込まれ複合核を形成した後、エネルギーを失わずにその中性子が放出される共鳴散乱がある。第6章では、弾性散乱の力学について詳しく取り扱う。

#### (2) 非弾性散乱

非弾性散乱は、中性子が一旦原子核内に取り込まれて複合核を形成し、その後、その複合核から入射粒子と同種の粒子 (中性子) が放出される現象である。その際、入射粒子の運動エネルギーが原子核の内部エネルギーとして残され、後に $\gamma$ 線などとして放出されるため、衝突の前後で運動エネルギーが保存されない<sup>(注1.22)</sup>。

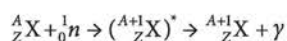
( $n,2n$ ) 反応、( $n,3n$ ) 反応なども、広い意味では非弾性散乱と考えることができる<sup>(注1.23)</sup>。

### 1.6.2 吸収反応

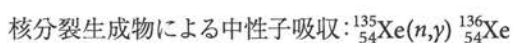
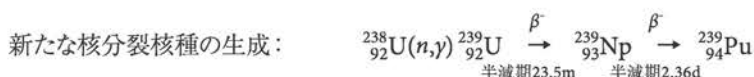
**吸収反応** (absorption reaction) は、中性子が原子核に取り込まれ、 $\gamma$ 線などの別種の粒子が放出される反応である。吸収反応には、捕獲、核分裂、荷電粒子放出などがある。

#### (1) 捕獲

**捕獲** (neutron capture) は、非弾性散乱と同様、中性子が原子核に取り込まれ複合核を形成し、その後、励起状態から基底状態に遷移する過程で $\gamma$ 線を放出する反応である。すなわち、



である<sup>(注1.24)</sup>。たとえば、 ${}_{92}^{235}\text{U}$  が中性子を捕獲し、 ${}_{92}^{235}\text{U}(n,\gamma){}_{92}^{236}\text{U}$  のように質量数が1つ増加した ${}_{92}^{236}\text{U}$  に変わる。原子炉の中では、核種が中性子を捕獲して、より質量数の大きな核種に遷移する現象は頻繁に起こる。特に、



のような反応は原子炉を運転する上で重要な意味を持つ。

注1.21: 発熱反応は入射粒子のエネルギーにかかわらず核反応を起こすが、吸熱反応は外部からエネルギーを与えないと核反応を起こさない。したがって、吸熱反応では入射粒子があるエネルギー以上の運動エネルギーを持って入射しなければ反応は起こらず、その運動エネルギーを「しきい値」という。その運動エネルギー $T_a$ は、 $T_a = |Q| \cdot \frac{M_A + M_a}{M_A}$ である。

注1.22: 非弾性散乱は、原子核の最小の励起エネルギーより高くなければ起こらない。すなわち、しきい値を持つ。しきい値は、 ${}^{238}\text{U}$  のような重い原子核では0.05MeV程度であり、軽い原子核では1MeV以上である。このように非弾性散乱は比較的高いエネルギーでの反応であり、原子炉における高速中性子のエネルギー分布形成に影響を与えている。一方、弾性散乱はあらゆるエネルギーの中性子に対して起こりうる。

注1.23: ( $n,2n$ ) 反応、( $n,3n$ ) 反応は、吸収に分類されることもある。

注1.24: ここで、(X)\*は原子核Xが励起状態にあることを示す。中性子捕獲反応は、 $\gamma$ 線を放出することから放射捕獲反応とも呼ばれる。

〈例題1.5〉

捕獲反応 $^{157}\text{Gd}+^1_0n\rightarrow^{158}\text{Gd}+\gamma$ のQ値を求めてみよう。なお、 $^{157}\text{Gd}$ および $^{158}\text{Gd}$ の中性原子の質量は、156.924u、157.924uである。

〈解答1.5〉

反応前後の静止エネルギーを計算すると、1u=931.49MeVを用いて次のようになる(注1.25)。

| 反応前               |         |          | 反応後               |         |          |
|-------------------|---------|----------|-------------------|---------|----------|
| 核種等               | 質量      |          | 核種等               | 質量      |          |
|                   | (u)     | (MeV)    |                   | (u)     | (MeV)    |
| $^{157}\text{Gd}$ | 156.924 | 146173.1 | $^{158}\text{Gd}$ | 157.924 | 147104.6 |
| $n$               | 1.00866 | 939.6    |                   |         |          |
| 反応前のエネルギー         |         | 147112.7 | 反応後のエネルギー         |         | 147104.6 |

したがって、Q値は8.1MeVとなる。Q値>0であるから発熱反応であり、このエネルギーは $\gamma$ 線のエネルギーとなって放出される。

注1.25：反応前後で電子の数は等しく、電子の結合エネルギー差も小さいので、核反応のQ値を中性原子の質量を用いて計算できる。

(2) 核分裂

$^{235}_{92}\text{U}$ や $^{239}_{94}\text{Pu}$ などの重い原子核に中性子が当たると、核子当たりの結合エネルギーが小さいため、質量数が95や140程度の軽い核に分裂する。このように、質量数の大きな原子核が2個以上の原子核(核分裂片もしくは核分裂生成物と呼ばれる)に分裂する現象を**核分裂**(fission)(注1.26)という。核分裂反応では、次のように同時に2～3個程度の中性子が放出される。

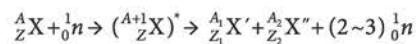


図1.1に示したように、核子当たりの結合エネルギーは、質量数が約60を最大にして重くなるにつれて減少する。したがって、重い核は軽い核に分裂すればより安定になり、そのエネルギー差が核分裂のエネルギーとして放出される。

核分裂は、次のような過程を経て起こると考えられている。すなわち、図1.7に示すように、液滴に外部から力を加える(a)と、振動を起こして長円状になる(b)。外部から与えられたエネルギーが表面張力より小さければ元に戻るが、表面張力より大きいと(c)のように垂鈴形になり、二つの液滴に分裂(d)する。核分裂も、これと同じように、中性子が $^{235}_{92}\text{U}$ や $^{239}_{94}\text{Pu}$ などの核分裂性核種に衝突(a)すると、吸収されて複合核を形成(b)する。その複合核が、不安定な振動を起こして十分高いエネルギーの励起状態(c)になり、ある限界のエネルギー(注1.27)を超えると核力を振り切って核分裂(d)を起こす。

核分裂の際には、約200MeVのエネルギーが放出され、約2MeVのエネルギーを持つ2～3個の中性子が飛び出す。核分裂と同時に放出されるので、この中性子を**即発中性子**(prompt neutron)という。

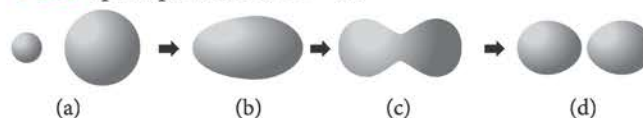


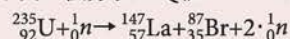
図1.7 液滴モデルに基づく核分裂の説明

また、核分裂片は中性子過剰で、不安定な核種が多く、 $\beta^-$ 崩壊を繰り返しながら安定な核に移行していく。この過程で、中性子を放出することがある。この中性子は、核分裂から時間遅れを持って放出されるので、**遅発中性子**(delayed neutron)と呼ばれる。

なお、核分裂については第3章でさらに詳細に述べる。

〈例題1.6〉

第3章で述べるように、核分裂における分裂の仕方は一通りではないが、一例として、次の核分裂のQ値(注1.28)を求めてみよう。



なお、 $^{235}_{92}\text{U}$ 、 $^{147}_{57}\text{La}$ 、 $^{87}_{35}\text{Br}$ の原子量は、235.044u、146.928u、86.921uである。

〈解答1.6〉

中性子捕獲の例題と同様、反応前後の静止エネルギーを求める。

注1.26：1938年にハーンとシュトラスマンが核分裂片の特定をした。この報告を聞いた、マイトナーと甥のフリッシュが、原子核が分裂を起こすという大胆な結論を出したことが、核分裂の発見につながった。

注1.27：臨界エネルギーとも呼ばれ、参考文献6)によれば4～7MeVである。 $^{235}_{92}\text{U}$ の核分裂では、入射中性子が複合核で持つ結合エネルギー(6.4MeV)だけで臨界エネルギー(5.3MeV)を超えるので、運動エネルギー0の中性子でも核分裂を起こす。天然ウランの99.3%を占める $^{238}_{92}\text{U}$ も1MeV以上のエネルギーの中性子によって核分裂を起こす。これは入射中性子が複合エネルギーで持つ結合エネルギーに約1MeVのエネルギーを加えることで、臨界エネルギーを超えるためである。すなわち、臨界エネルギーとこの結合エネルギーの差が核分裂のしきい値である。

注1.28：通常、核分裂のQ値というのは、起こりうる核分裂片の組み合わせの平均値である。また、参考文献6)では、核分裂のQ値が複合核の静止エネルギーとの差になっている。



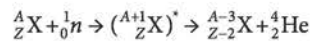
| 反応前              |         |          | 反応後               |         |          |
|------------------|---------|----------|-------------------|---------|----------|
| 核種等              | 質量      |          | 核種等               | 質量      |          |
|                  | (u)     | (MeV)    |                   | (u)     | (MeV)    |
| $^{235}\text{U}$ | 235.044 | 218941.1 | $^{147}\text{La}$ | 146.928 | 136862.0 |
|                  |         |          | $^{87}\text{Br}$  | 86.921  | 80966.0  |
| $n$              | 1.00866 | 939.6    | $2n$              | 2.01732 | 1879.1   |
| 反応前のエネルギー        |         | 219880.7 | 反応後のエネルギー         |         | 219707.1 |

これから、Q値は $219880.7\text{MeV}-219707.1\text{MeV}=173.6\text{MeV}$ となる。このエネルギーは、核分裂片 ( $^{147}\text{La}$ 、 $^{87}\text{Br}$ ) や即発中性子の運動エネルギーになるほか、一般に励起状態にある核分裂片が放出する $\gamma$ 線のエネルギーとして使われる。

これらの核分裂片は中性子を過剰に持っており、さらに $\beta^-$ 崩壊で安定核種に崩壊する。この過程で $\beta$ 線、 $\gamma$ 線などで約30MeVのエネルギーを放出する(第3章参照)。したがって、これらを合わせて、1回の核分裂で約200MeVのエネルギーが発生する。

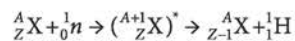
### (3) 荷電粒子放出

軽い原子核の中には中性子を吸収すると**荷電粒子放出** (charged particle emission) するものがある。特に、中性子の入射エネルギーが高くなると多くの核が陽子や $\alpha$ 粒子を出すようになる。放出される粒子が $\alpha$ 粒子であれば、 $(n,\alpha)$ 反応と呼ばれる。この反応は、



である。この例としては $^{10}\text{B}$ が中性子を吸収して $\alpha$ 粒子を放出する、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 反応がある。この反応は、原子炉の制御において非常に重要なものである。

陽子が放出される場合は、 $(n,p)$ 反応と呼ばれる。この反応では、

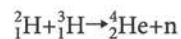


のように、原子番号が1小さい原子核が生成される。 $(n,p)$ 反応の例には $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ があり、空気中の窒素と宇宙線の中性子により常時 $^{14}\text{C}$ が生成されている。 $^{14}\text{C}$ は、半減期5730年で $\beta^-$ 崩壊をするため、考古学などの分野での年代測定(放射性炭素年代測定法)に用いられる。

### 1.6.3 核融合

核分裂は、質量数の大きな原子核が軽い原子核に分裂することにより、安定になる反応である。しかし、図1.1は、水素などの非常に軽い原子核が結合することで、安定になる可能性も示唆している。この反応が、**核融合** (nuclear fusion) である。

たとえば、重水素と三重水素を結合する



のような核融合反応がある。この反応を起こすためには、原子核同士を衝突させなければならない。しかし、原子核を核力が作用する程度まで近づけるためには、原子や原子核の持つクーロン反発力に打ち勝つエネルギーで衝突させなければならない。恒星では巨大な重力で核融合を引き起こすことができるが、地球上で核融合を起こすためには極めて高温にするか、極めて高压にする必要がある。

もっとも実現性が高い方法は、次の方法である。すなわち、 $10^7\text{C}$ 程度まで加熱すると、原子核が完全に電離した状態(プラズマ)になり、熱運動によって核同士が衝突し核融合が起こる。このような核融合を熱核融合反応と呼ぶが、太陽などの恒星内部ではこの熱核融合によって高熱が発生している。

#### 〈例題1.7〉

重水素と三重水素による核融合 ${}_1^2\text{H}+{}_1^3\text{H}\rightarrow{}_2^4\text{He}+n$ のQ値を求めよ。なお、 ${}_1^2\text{H}$ 、 ${}_1^3\text{H}$ 、 ${}_2^4\text{He}$ の原子量は、それぞれ2.01410u、3.01605u、4.00260uである。

### 〈解答1.7〉

反応前後の静止エネルギーを求める。

| 反応前              |         |        | 反応後               |         |        |
|------------------|---------|--------|-------------------|---------|--------|
| 核種等              | 質量      |        | 核種等               | 質量      |        |
|                  | (u)     | (MeV)  |                   | (u)     | (MeV)  |
| ${}^2_1\text{H}$ | 2.01410 | 1876.1 | ${}^4_2\text{He}$ | 4.00260 | 3728.4 |
| ${}^3_1\text{H}$ | 3.01605 | 2809.4 | n                 | 1.00866 | 939.6  |
| 反応前のエネルギー        |         | 4685.5 | 反応後のエネルギー         |         | 4668.0 |

したがって、 $Q$ 値は $4685.5\text{MeV}-4668.0\text{MeV}=17.5\text{MeV}$ となる。このエネルギーは、ヘリウムに約 $4\text{MeV}$ 、中性子に約 $14\text{MeV}$ 、運動エネルギーとして付与される。

## 1.7 まとめ

本章では、原子核の基礎的な性質について述べた。

原子核は陽子と中性子から構成されており、これら核子は核力によって強く結合されている。その核子当たりの結合エネルギーは、質量数約60の元素でピークを持つ。そのため、水素のような軽い核種は結合することでより安定になり、ウランのように重い核種は分裂することで安定になる。このため、軽い核種では核融合を、重い核種では核分裂を起こす。さらに、結合エネルギーをよく表せるワイゼッカー・ベータの公式を紹介した。この式を用いれば、どの核種が安定で、どの核種が放射性核種になるかなど、様々なことが分かる。

本章の知識は、原子炉の出力を決めるための核分裂や中性子捕獲などの核反応に係るエネルギーを算出するためにも役立つ。また、9章で述べる燃焼計算において、核燃料核種や核分裂生成物の生成・崩壊チェーンを理解する上での助けともなる。



## 《演習問題》

- [1] 質量数 $A$ 、原子番号 $Z$ の原子の質量を $\tilde{M}(A, Z)$ とする。この原子核の崩壊について次の記述のうち、誤っているものはどれか。ただし、軌道電子の結合エネルギーによる質量の寄与については考慮しないものとする。また、電子の質量を $m_e$ とする。

- ① $\beta^-$ 崩壊では、 $\tilde{M}(A, Z) > \tilde{M}(A, Z+1)$ が成り立つ。  
 ② $\beta^+$ 崩壊では、 $\tilde{M}(A, Z) > \tilde{M}(A, Z-1) + 2m_e$ が成り立つ。  
 ③EC(電子捕獲)では、 $\tilde{M}(A, Z) > \tilde{M}(A, Z-1) + m_e$ が成り立つ。  
 ④核異性体転移では、質量数 $A$ 、原子番号 $Z$ も変化しない。  
 ⑤ $\alpha$ 崩壊では、 $\tilde{M}(A, Z) > \tilde{M}(A-4, Z-2) + \tilde{M}(4, 2)$ が成り立つ。

(出典：技術士 原子力・放射線部門 平成16年度第一次試験)

- [2]  $^{60}\text{Co}$ の半減期は5.2年である。 $^{60}\text{Co}$  1 $\mu\text{g}$ の2.6年後の放射能は次のうちどれか。ただし、アボガドロ数を $6 \times 10^{23}$ 、 $\ln 2 = 0.693$ とする。

- ①3.0Bq ②30Bq ③30kBq ④30MBq ⑤30TBq

(出典：技術士 原子力・放射線部門 平成16年度第一次試験)

- [3] 1kgの質量をジュール単位にエネルギー換算した場合、正しいものは次のうちどれか。ただし、光速を $3 \times 10^8 \text{ km/s}$ とする。

- ① $9 \times 10^7 \text{ J}$  ② $9 \times 10^{10} \text{ J}$  ③ $9 \times 10^{16} \text{ J}$  ④ $9 \times 10^{19} \text{ J}$  ⑤ $9 \times 10^{23} \text{ J}$

(出典：技術士 原子力・放射線部門 平成17年度第一次試験)

- [4] 次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- ① $\beta^+$ 崩壊は、原子核の中の陽子が中性子、陽電子とニュートリノに崩壊する現象である。  
 ②中性子は電荷を持たないため、磁気能率を持たない。  
 ③原子核の内部では、陽子、中性子は殻構造を形成する。  
 ④原子核の質量は、それを構成する陽子と中性子の質量の総和より小さい。  
 ⑤核子数が2、8、20、28、50、82、126である場合、その原子核は特に安定な状態にある。この数を魔法の数という。

(出典：技術士 原子力・放射線部門 平成17年度第一次試験)

- [5] 次の記述について、実際に起こらないものの組合せは1～5のうちどれか。

- (a) $^{14}\text{C}$ は $\beta^-$ 崩壊して $^{14}\text{N}$ になる。  
 (b) $^{14}\text{C}$ は $\beta^+$ 崩壊して $^{14}\text{B}$ になる。  
 (c) $^{22}\text{Na}$ は $\beta^+$ 崩壊して $^{22}\text{Ne}$ になる。  
 (d) $^{22}\text{Na}$ は $\beta^-$ 崩壊して $^{22}\text{Mg}$ になる。  
 (e) $^{22}\text{Na}$ は電子捕獲 (EC) して $^{22}\text{Ne}$ になる。

- ①(a) (c) ②(a) (d) ③(b) (c) ④(b) (d) ⑤(b) (e)

(出典：技術士 原子力・放射線部門 平成18年度第一次試験)

- [6] 次の(A)～(D)について、半減期 $T$ 、崩壊定数 $\lambda$ の放射性核種において時間 $t$ 後に残っている個数の初期の個数に対する割合を表す関数として、正しいものの組合せは1～5のうちどれか。

- (A)  $e^{-\lambda t}$  (B)  $e^{-\frac{t}{T}}$  (C)  $(\frac{1}{2})^{\frac{t}{T}}$  (D)  $(\frac{1}{2})^{\lambda t}$

- 1(A)と(B) 2(A)と(C) 3(B)と(C) 4(B)と(D) 5(C)と(D)

(出典：技術士 原子力・放射線部門 平成19年度第一次試験)

[7] 次の記述のうち、誤っているものはどれか。

- ①陽子は水素原子核である。
- ②陽子は磁気モーメントを持っている。
- ③陽子の質量は電子の約5倍である。
- ④陽子の寿命は極めて長いと考えられる。
- ⑤陽子は電荷を持っている。

(出典：技術士 原子力・放射線部門 平成19年度第一次試験)

[8] ワイゼッカー・ベータの半経験的質量公式を用いて、同重核で最も安定となる原子量 $Z$ を与える式を導け。同重核で最も安定となる原子量は、結合エネルギーが極大になる $Z$ であるから、

$$\left( \frac{\partial B(A, Z)}{\partial Z} \right)_{A=\text{一定}} = 0$$

という条件から式が導ける。また、導いた式を用いて質量数45および91の場合の安定となる核種を推定せよ。

[9] 親の核種1 (崩壊定数 $\lambda_1$ ) の時刻 $t=0$ における原子数を $N_1^0$ 、核種1の子の核種2 (崩壊定数 $\lambda_2$ ) の時刻 $t=0$ における原子数を $N_2^0$ としたとき、時刻 $t$ における核種1および核種2の原子数 $N_1(t)$ 、 $N_2(t)$ を表す式を導け。

[10] 問題9で導いた式を用いて、崩壊定数 $\lambda_1$ が $\lambda_2$ に比べて非常に小さい場合、言い換えれば、親核種1の半減期が子の核種2の半減期に比べて非常に長い場合、十分時間が経ったときの核種1と核種2の原子数には $\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$ という関係 (永続平衡と呼ばれる) が成り立つことを示せ。

[11] ワイゼッカー・ベータの質量公式を用いて、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{56}\text{Fe}$ 、 ${}^{208}\text{Pb}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ の質量を計算せよ。