

# 原子核反応とエネルギー

1905年 アインシュタインが発表した特殊相対性理論

## 「質量とエネルギーの一体化」

→ 物体のもつエネルギーの増加・減少に伴って、その物体の質量が増加・減少することになる。  
速く動くものは運動エネルギーを多く持つので、質量は増える！

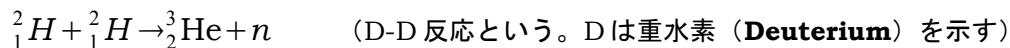
その換算式は エネルギーを  $E$ 、質量の変化  $m$  とすると  $E = mc^2$

原子核の質量 → 質量数 12 の炭素原子（炭素 12）を基準にする

- 1 原子質量単位の定義 →  $1\text{u}$  (=炭素 12 原子の質量の 12 分の 1) と定める。(化学での定義と同一)
- 2 原子核を構成している粒子（核子）の質量を合計しても、原子核の質量にはならない！（アインシュタイン）
- 3 核子が結合するとき、結合エネルギー分を放出するので、核子の合計質量より軽くなる。
- 4 減少した質量分を「 $\Delta m$ 」という。この質量減少分がエネルギー ( $E = mc^2$ ) として放出される。
- 5  $1\text{u}$  の質量は ( ) [kg] (  $1\text{g}$  をアボガドロ数で割ったものに相当 )
- 6  $1\text{u}$  の質量をエネルギーで示すと、( ) [J] (  $931\text{ [MeV]}$  (電子ボルト) ] に相当 )
- 7 陽子は  $1.0073\text{u}$ 、中性子は  $1.0087\text{u}$  である。 中性子のほうがやや重い (0.1%ほど)

核反応方程式 → 質量の合計が変化（質量保存の法則が成立しない）

初級 二つの重水素原子核が、等しい運動エネルギー  $0.35\text{ [MeV]}$  で正面衝突し、次のような反応を起こした。

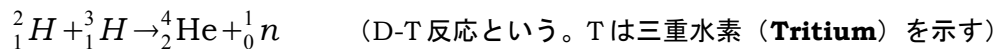


- (1) この核反応で放出される核エネルギーは、いくらになるか。  
ただし、重水素、ヘリウム、中性子の質量をそれぞれ  $2.0136\text{ u}$ 、 $3.0150\text{ u}$ 、 $1.0087\text{ u}$  とする。  
(質量欠損  $Dm$  を求めて、アインシュタインの式を適用するとよい。)

- (2) 反応後に生じるヘリウムおよび、中性子の運動エネルギーはいくらになるか。  
(エネルギー保存の法則と、運動量保存の法則を適用する。)  
エネルギー保存の法則より

運動量保存の法則より (ヒント：最初の運動量の和はゼロ)

標準 下記のような核融合反応を起こすことで、高速のヘリウムの原子核と高速中性子が生成される。これら粒子の運動エネルギーを利用して、それらのエネルギーを熱エネルギーに変えて発電に使われる。



中性子および、それぞれの原子核の質量を原子質量単位で示すと、中性子が  $1.0087\text{u}$ 、重水素が  $2.0136\text{u}$ 、三重水素が  $3.0156\text{u}$ 、ヘリウム 4 が  $4.0015\text{u}$  である。また、 $1\text{u}$  の質量は  $931\text{ [MeV]}$  になる。

- (1) 1 反応あたりに発生するエネルギーはいくらになるか。
- (2) 重水素、三重水素それぞれを  $2\text{ [g]}$ 、 $3\text{ [g]}$  (合計  $5\text{ [g]}$ ) を完全に核融合反応させたとき、発生するエネルギーを求めなさい
- (3) 水素が酸素と反応するときの反応熱を調べて、(2) と比較せよ。(水素の反応熱は化学の教科書参照)

## 原子核反応とエネルギー (解説)

1905年 アインシュタインが発表した特殊相対性理論

「エネルギーと質量は等価である！」

→ 物体のもつエネルギーの増加・減少に伴って、その物体の質量が増加・減少することになる。

速く動くものは運動エネルギーを多く持つので、質量は増える！

その換算式は  $E = mc^2$  である。

原子核の質量 → 質量数 12 の炭素原子を基準にする

- 1 炭素 12 の質量の 12 分の 1 を原子質量単位で  $1u$  ( $= 1.66 \times 10^{-27}[\text{kg}]$ ) と定める。
- 2 原子核を構成している粒子(核子)の質量を合計しても、原子核の質量にはならない！
- 3 核子が結合するとき、結合エネルギー分を放出するので、核子の合計質量より少なくなる。
- 4 減少した質量分を「質量欠損」という。この質量欠損分がエネルギーとして放出される。
- 5  $1u$  の質量は  $1.66 \times 10^{-27} [\text{kg}]$  (1[g]をアボガドロ数で割ったものに相当)
- 6  $1u$  の質量は  $1.44 \times 10^{-10} [\text{J}]$  (931 [MeV]) のエネルギーに相当
- 7 陽子は  $1.0073u$ 、中性子は  $1.0087u$  である。 中性子のほうがやや重い (0.1%ほど)

核反応方程式 → 質量の合計が変化する(質量保存の法則が成立しない)が、エネルギーも考慮すると、「質量+エネルギー」保存の法則は成立している。

初級  ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$  (D-D 反応による核融合)

- (1) 重水素、ヘリウム、中性子の質量を  $2.0136 u$ 、 $3.0150 u$ 、 $1.0087 u$  であるので、 $2.0136 \times 2 - (3.0150 + 1.0087) = 0.0035$  である。したがって、衝突時に持っていた重水素の運動エネルギーが  $0.35 \times 2 [\text{MeV}]$ 、核融合での質量欠損分が  $931 \times 0.0035 [\text{MeV}]$  だから、合計で  $3.96 [\text{MeV}]$
- (2) 反応前の運動量の和はゼロだから反応後の運動量の和もゼロ。それぞれの質量をヘリウムを  $M$ 、中性子を  $m$ 、速度をヘリウムを  $V$ 、中性子を  $v$  とすると、エネルギー保存の法則より、 $\frac{1}{2}MV^2 + \frac{1}{2}mv^2 = 3.96$  [MeV]、運動量保存の法則より、 $MV + mv = 0$  である。また、質量の比より、 $M = 3m$  より、 $3 \times \frac{1}{2}MV^2 = \frac{1}{2}mv^2$  であるので、ヘリウムのと中性子の運動エネルギーの比が  $1 : 3$  になることからヘリウムが  $0.99 [\text{MeV}]$ 、中性子が  $2.97 [\text{MeV}]$  になる。

標準  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$  (D-T 反応による核融合)

- (1) 核反応方程式  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$  だから、中性子および、それぞれの原子核の質量が、中性子が  $1.0087u$ 、重水素が  $2.0136u$ 、三重水素が  $3.0156u$ 、ヘリウム 4 が  $4.0015u$  であるとする、1 反応あたりの質量欠損は  $(2.0136u + 3.0156u) - (4.0015u + 1.0087u) = 0.019u$  になる。したがって、1 反応で発生するエネルギーは  $931 [\text{MeV}] \times 0.019 = 18 [\text{MeV}]$  になる。
- (2) 重水素、三重水素それぞれを  $2 [\text{g}]$ 、 $3 [\text{g}]$  (合計  $5 [\text{g}]$ ) では、それぞれの原子数は  $6.0 \times 10^{23}$  個だから、 $18 [\text{MeV}] \times 6.0 \times 10^{23} = 1.1 \times 10^{25} [\text{MeV}] = 1.7 \times 10^{12} [\text{J}]$  になる。1 兆 7 千億ジュールだ。
- (3) 水素が酸素と反応するときの反応熱を調べて、(2) と比較しなさい。(水素の反応熱は化学の教科書参照)  
水素 1 モルの反応熱は数百キロカロリーレベルだから、比較できないくらいに巨大な違いがある。