

科目名 原子力と放射能基礎論
～原子力と放射線の今を考える～
講義 No. 5 「核分裂と原子力発電」

講師：桑江 良明

【0. 講義の目的】

原子力発電は原子力平和利用の中心的な一形態である。我が国では水力発電・火力発電とともに原子力発電が基幹電源の一翼を担い、経済の成長と安定を支えた。そして、近年の地球環境問題への関心の高まりから、さらなる期待が寄せられていた（H22.6「エネルギー基本計画」等）。そのような状況の中で、福島第一原子力発電所の事故が発生し、今後原子力発電をエネルギー政策上どのように位置づけるかが国民的議論となっている。国民が将来的にどのような選択をするにせよ、その議論の前提として、原子力発電に関する客観的で正確な知識と理解が必要となる。

【1. 原子と原子核】

全ての物質は原子からなり、原子は原子核とその周りをとりまく電子からなる。さらに原子核は正の電荷を持つ陽子と電氣的に中性な中性子からなる。陽子と中性子を総称して核子という。ある原子核の陽子数を Z 、中性子数を N とすると、両者の和すなわち核子の総数 $A=Z+N$ を質量数という。原子の化学的な性質は陽子の数で決まることから Z を原子番号と呼ぶ。特定の原子番号 Z および特定の質量数 A をもつ原子核 X を核種といい、「 ${}^A X$ 」あるいは「 $X-A$ 」で表わす（ X は元素記号）。たとえば質量数 12 の炭素は ${}^{12}C$ あるいは $C-12$ となる。 Z が等しく A が異なる核種を同位体と呼ぶ。

【2. 質量欠損と結合エネルギー】

陽子、中性子、電子の質量を原子質量単位（amu）で表わすと次のようになる（ここで、原子質量単位は $C-12$ 原子の質量を正確に $12[amu]$ とする質量の単位である）。

陽子の質量 $m_p=1.007276[amu]$ 、中性子の質量 $m_n=1.008665[amu]$ 、電子の質量 $m_e=0.000549[amu]$

ここで、 $C-12$ 原子を構成する粒子、すなわち 6 個の陽子と 6 個の中性子と 6 個の電子それぞれの質量の総和を計算してみると、 $6 m_p + 6 m_n + 6 m_e=12.09894[amu]$ となる。

しかし、 $C-12$ 原子の質量は原子質量単位の定義から $12.00000[amu]$ であり、この原子の質量は構成粒子の質量の総和より、 $0.09894[amu]$ だけ小さいことになる。

一般に、質量数 A 、原子番号 Z の原子は、 Z 個の陽子、 Z 個の電子および $(A-Z)$ 個の中性子からなるが、この原子の質量 $M[amu]$ は、個々の粒子の総和 $(Z \times m_p + (A-Z) \times m_n + Z \times m_e)$ とはならず、それよりも小さくなる。この質量の差を**質量欠損**と呼ぶ。

アインシュタインは質量とエネルギーは等価であるとし、光速 c 、質量 m 、エネルギー E の間に $E=mc^2$ の関係を与えている。

個々の粒子がばらばらで在るよりも原子核を構成した状態の方が安定でありエネルギーの低い状態にあるといえる。質量欠損に相当するエネルギーは、原子核を構成する核子相互間の結合の程度を与えるものであり、これを**結合エネルギー**と呼ぶ。

【3. 核分裂と核融合】

原子核の結合エネルギーを原子の質量数で割った「核子 1 個あたりの結合エネルギー」は、質量数の小さな原子核では質量数の増大とともに急激に大きくなり、質量数が約 60 程度で最大値をとり、以後、質量数の増大とともに緩やかに減少することがわかっている。これにより、たとえば質量数の小さな原子核が融合して、質量数の大きな原子核になる際には結合エネルギーの差に相当するエネルギーを外部に放出することになり、これは**核融合**と呼ばれる。一方、質量数の大きな原子核が質量数の小さい 2 つの原子核に分裂する場合にも、結合エネルギーの差に相当するエネルギーを外部に放出することになる。これは**核分裂**と呼ばれ、原子炉の内部で起きている核反応である。核融合、核分裂の別を問わず、「原子力エネルギー」とはすなわち原子核の結合エネルギーの差に相当するエネルギーが放出されたものにほかならない。

【4. 核分裂の説明】

U-235 が核分裂する場合、中性子が一度 U-235 の原子核の中に入り込み複合核 U-236 をつくる。複合核としてできた U-236 は通常よりも余分の内部エネルギーを持ち不安定な状態でおおよそ 10^{-14} 秒間で壊変する。複合核の壊変には核分裂のほか捕獲、弾性散乱、非弾性散乱がある。

複合核は核分裂の際に 2 つに割れ、割れた後の原子核のことを**核分裂片**という。一般的に核分裂による原子核の割れ方は非対称であり多様であるが、その割れ方には一定の確率がありこれを**核分裂収率**という。核分裂収率は核分裂核種や入射する中性子のエネルギーに依存するが、多くの場合、質量数が 95 付近と 140 付近にピークを持つ。

【5. 崩壊熱】

核分裂片は一般に安定核より中性子が多い。そのため放射性核種であり、何回か β 壊変して安定核となる。核分裂片の放射性核種は百数十種類におよび、その半減期も数分の 1 秒から数百万年にもおよぶ。このため、原子炉は停止した後も、核分裂によって生じた生成物（核分裂片の集まり）の放射性壊変（崩壊）のために熱を発生し続ける。これを**崩壊熱**という。

【6. 原子力発電のしくみ】

原子炉は、核燃料を装荷し燃料内で核分裂を起こさせ、その核分裂の連鎖反応を制御しつつ多量のエネルギーを発生させる装置である。原子炉の中に冷却材（軽水炉の場合は水）を通して熱を奪いその熱で得られる蒸気を蒸気タービンに供給して発電が行われる。蒸気タービン以降の設備は基本的に火力発電設備と変わらない。火力発電で用いられるボイラーでは燃料の供給量を調節することで出力を制御するが、原子力発電の場合には、原子炉に予め数年分の核燃料を装荷しておき、制御棒の出し入れ等により原子炉の起動、運転および停止を行う。

火力発電のボイラーでは、例えば発電を止めるような事故が起こった時、燃料の供給を止めれば即座にボイラーの燃焼を停止させることができる。燃料が燃焼し尽くせば、その後ボイラーの発熱はない。これに対し原子力発電の原子炉では、制御棒を入れて核分裂による発熱を停止させても炉心では燃料棒に蓄積した核分裂生成物（FP）の崩壊熱による発熱が続く。

【7. 原子力発電の特徴】

長所：エネルギー密度が大きい、燃料供給・供給価格の安定性、発電過程で CO_2 を発生しない
短所：大事故のリスク、放射線の影響、放射性廃棄物処分の問題、核セキュリティの問題

< 出典：桑江ほか、「電力発生工学」、数理工学社、2012. 8 >

以上

【例題 1】

${}^4\text{He}$ 原子の質量は 4.0026amu である。陽子の質量が 1.0073amu、中性子の質量が 1.0087amu、電子の質量が 0.00055amu であるとき、質量欠損 [kg] と結合エネルギー [J] を求めよ。

【解答 1】

${}^4\text{He}$ 原子を構成する陽子、中性子、電子がそれぞれ単独にあるときの質量の総和は、陽子 2 個、中性子 2 個、電子 2 個の質量の和 $(1.0073 \times 2 + 1.0087 \times 2 + 0.00055 \times 2) = 4.0331$ [amu] であって、 ${}^4\text{He}$ 原子の質量 4.0026amu より大きい。この場合の質量欠損 ΔM は

$$\Delta M = 4.0331 - 4.0026 = 0.0305 \text{ [amu]}$$

ここで、 C-12 原子がアボガドロ数 (6.022×10^{23}) だけ集まれば 12g となることおよび、原子質量単位の定義より、 $1 \text{ [amu]} = 1 \text{ [g]} \div (6.022 \times 10^{23}) = 1.661 \times 10^{-24} \text{ [g]}$

であるから、 $\Delta M = 1.661 \times 10^{-24} \text{ [g]} \times 0.0305 = 5.07 \times 10^{-26} \text{ [g]} = 5.07 \times 10^{-29} \text{ [kg]}$

$E = mc^2$ (c は光速 $= 2.998 \times 10^8 \text{ [m/s]}$) の式より結合エネルギー E を求めると

$$E = \Delta M \cdot c^2 = 5.07 \times 10^{-29} \text{ [kg]} \times (2.998 \times 10^8 \text{ [m/s]})^2 = 4.557 \times 10^{-12} \text{ [J]}$$

【例題 2】

質量 M [amu] をエネルギー E [MeV] に換算する式を導け。

また、得られた式を用いて、例題 1 の結合エネルギーを [MeV] 単位で求めよ。

【解答 2】

$1 \text{ [amu]} = 1.661 \times 10^{-24} \text{ [g]} = 1.661 \times 10^{-27} \text{ [kg]}$ だから、1 amu の質量を $E = mc^2$ の式でエネルギー [MeV] に換算すると

$$1.661 \times 10^{-27} \text{ [kg]} \times (2.998 \times 10^8 \text{ [m/s]})^2 \div (1.602 \times 10^{-13} \text{ [J/MeV]}) = 932 \text{ [MeV]}$$

となるから、 $E \text{ [MeV]} = 932 \times M \text{ [amu]}$ が得られる。

この式を用いて例題 1 の結合エネルギーを求めると

$$E = 932 \times 0.0305 \text{ [amu]} = 28.426 \text{ [MeV]} \quad \text{となる。}$$

【例題 3】

質量数 235 のウラン (U-235) が中性子 1 個を吸収して、質量数 98 のモリブデン (Mo-98) と質量数 136 のキセノン (Xe-136) に核分裂し、中性子を 2 個放出した。このときに発生する核分裂エネルギーを、メガエレクトロンボルト (MeV) 単位で求めよ。

ただし、 U-235 の質量を 235.0439amu、 Mo-98 の質量を 97.9054amu、 Xe-136 の質量を 135.9072amu、中性子の質量を 1.0087amu とする。

【解答 3】

反応前の質量の合計は、 $235.044 + 1.009 = 236.053$ [amu]

反応後の質量の合計は、 $97.905 + 135.907 + 1.009 \times 2 = 235.830$ [amu]

反応前後の質量差 $\Delta M = 236.053 - 235.830 = 0.223$ [amu]

となる。よって、核分裂のよって発生するエネルギー E [MeV] は、

$$E = 932 \times \Delta M \text{ [amu]} = 932 \times 0.223 \text{ [amu]} = 207.8 \text{ [MeV]}$$

以上