

## 第5章 核分裂と連鎖反応、発生エネルギー、崩壊熱

## 内容

第5章 核分裂と連鎖反応、発生エネルギー、崩壊熱.....	93
5.1 核分裂と連鎖反応.....	95
5.2 核分裂の発生エネルギー.....	100
5.2.1 結合エネルギーと核分裂の発生エネルギー.....	100
5.2.2 発生エネルギーの内訳.....	104
5.3 崩壊熱.....	105

## 【この章のポイント】

- ・ 核分裂の際に発生する中性子が新たな核分裂を引き起こすことを核分裂の連鎖反応と呼ぶ。
- ・ 核分裂の際に発生するエネルギーは主に核分裂片(核分裂時に発生する核種)の運動エネルギーとして放出され、その他には即発中性子のエネルギー、即発 $\gamma$ 線などの形で放出される。
- ・ 崩壊熱とは、核分裂生成物や超ウラン核種(原子番号がウランよりも大きい核種)の崩壊によって発生した放射線が熱エネルギーに変換されたものである。

エネルギーを取り出すことを目的とした「炉」を想定すると、炉としての成立条件の一つは、炉に投入するエネルギーよりも炉から得られるエネルギーを大きくすることである。発電用の原子炉において投入エネルギーより大きなエネルギーを得られる理由は、核分裂の連鎖反応が維持されて大きなエネルギーが発生するためである。また、原子炉で発生するエネルギーは、核分裂反応だけに由来せず、捕獲反応の際に放出される $\gamma$ 線や、核種の崩壊により発生する崩壊熱に由来するものもある。そのうち崩壊熱については、発電用の原子炉において核分裂の連鎖反応を止めたとしても放出され続けることに特徴がある。

第5章では、主に発電用の原子炉で発生するエネルギーについて理解を深めるため、核分裂の連鎖反応と、核分裂の発生エネルギー、崩壊熱について説明を行う。

## 5.1 核分裂と連鎖反応

## 【この節のポイント】

- ・ 核分裂の際に発生した中性子の一部は新たな核分裂を引き起こすことがある。
- ・ 軽水炉ではエネルギーの小さい(遅い)中性子が核分裂を引き起こしやすいため、軽水炉で連鎖反応を効果的に発生させるためには、様々な阻害要因を乗り越えて中性子を減速させることが重要である。

4.1.1 節で述べたように、ウランやプルトニウムといった質量数が大きい核種の原子核と中性子が反応すると、中性子を一旦吸収した原子核が分裂することがあり、これを**核分裂反応 (fission reaction)**と呼ぶ。

核分裂によってちぎれてできる二つの破片を**核分裂片 (fission fragment)**と呼ぶ。この核分裂片は極めて高いエネルギー状態にあるため、生成した直後に中性子と $\gamma$ 線を放出し、より低いエネルギー状態になる。このようにして出来る核種を、核分裂片と区別して**核分裂生成物 (核種) (Fission Product: FP)**と呼ぶ。上述の中性子と $\gamma$ 線の放出は核分裂反応の後の極めて短い時間スケールで起こるため、原子炉物理においては、核分裂反応と同時に中性子と $\gamma$ 線が放出され、核分裂生成物が生成されると見做すのが一般的である。

核分裂反応の起こりやすさは、第4章で述べたように微視的核分裂断面積によって表される。図5-1に、主に軽水炉において核分裂する核種の核分裂断面積を示す(JENDL-4.0[1])

の評価値に基づく)。U-235、Pu-239、Pu-241 は 0.1 eV~10 MeV までのエネルギーで約 1 barn 程度以上となっており、どのエネルギーの中性子でも核分裂をしやすい核種といえる。また、中性子のエネルギーが低いほうが断面積の値が大きいことが分かる。一方で、U-238 は 1 MeV を超えるエネルギーの高い中性子でのみ有意に核分裂する核種である。

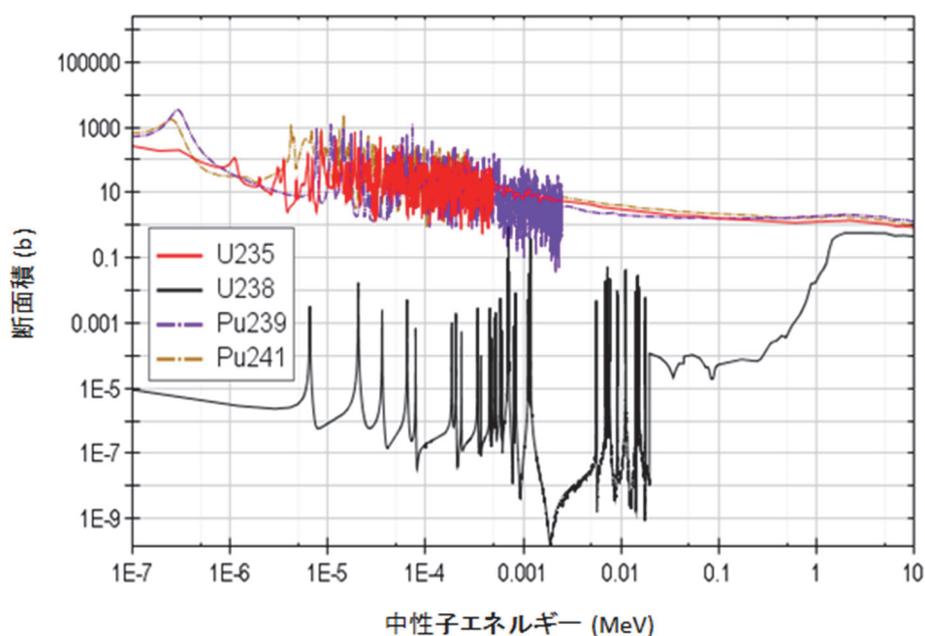


図 5-1 核分裂断面積の比較

核燃料として用いられるウランにはいくつかの同位体が存在するが、主なものは U-235 と U-238 の 2 つである。天然のウランには核分裂断面積が大きい U-235 が 0.7 wt%程度含まれ、高エネルギーでのみ核分裂が起きる U-238 の含有率が大部分 (99.3 wt%程度) を占める。軽水炉では、天然のウランを用いた場合、核分裂の連鎖反応を達成することは出来ないため、核分裂断面積が大きい U-235 の割合を高めた燃料を用いる。U-235 がウランに占める割合を **(ウラン) 濃縮度 (enrichment)** と呼び、濃縮度が高められたウランを **濃縮ウラン (enriched uranium)** と呼ぶ。また、濃縮ウランに対して、天然のウランを **天然ウラン (natural uranium)** と呼ぶ。

一回の核分裂時に発生する平均中性子数は、核分裂する核種や中性子の入射エネルギーに依存する。参考として、U-235 および Pu-239 の核分裂あたりの平均中性子発生数を図 5-2 に示す (JENDL-4.0[1]の評価値に基づく)。この図に示すとおり、0.1 MeV を超えたあたりから、U-235 と Pu-239 の両方で中性子数が増加する傾向が確認できる。なお、一回の核分裂時に発生する中性子の数は整数値であり、図 5-2 に示す中性子数は多くの核分裂が発生している場合の平均値であることに注意したい。

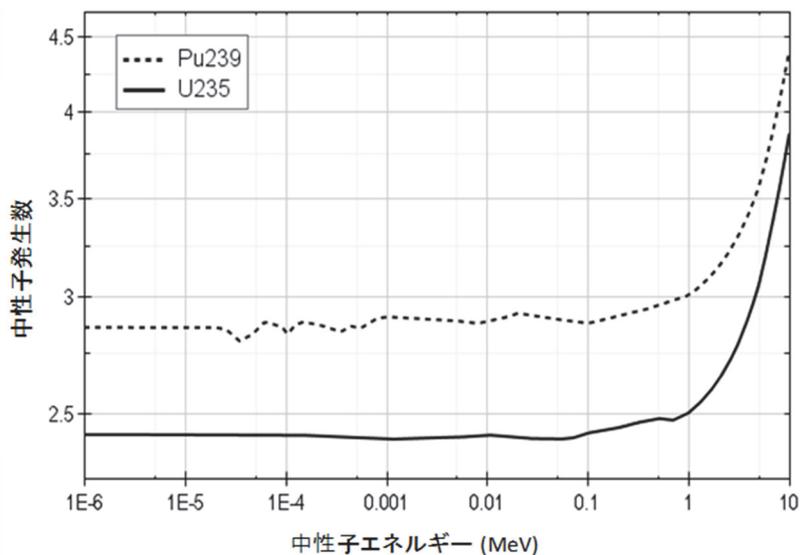


図 5-2 U-235 および Pu-239 の核分裂あたりの平均発生中性子数

また、軽水炉等において核分裂反応で発生した中性子は、核分裂反応を引き起こした中性子のエネルギーに依らず、ほぼ同一のエネルギー分布を有する。これを**核分裂スペクトル (fission spectrum)**と呼ぶ。U-235 の核分裂スペクトルを図 5-3 に示す (JENDL-4.0 の評価値に基づく)。10 keV から数 10 MeV にわたって分布しており、平均は 2 MeV 程度である。

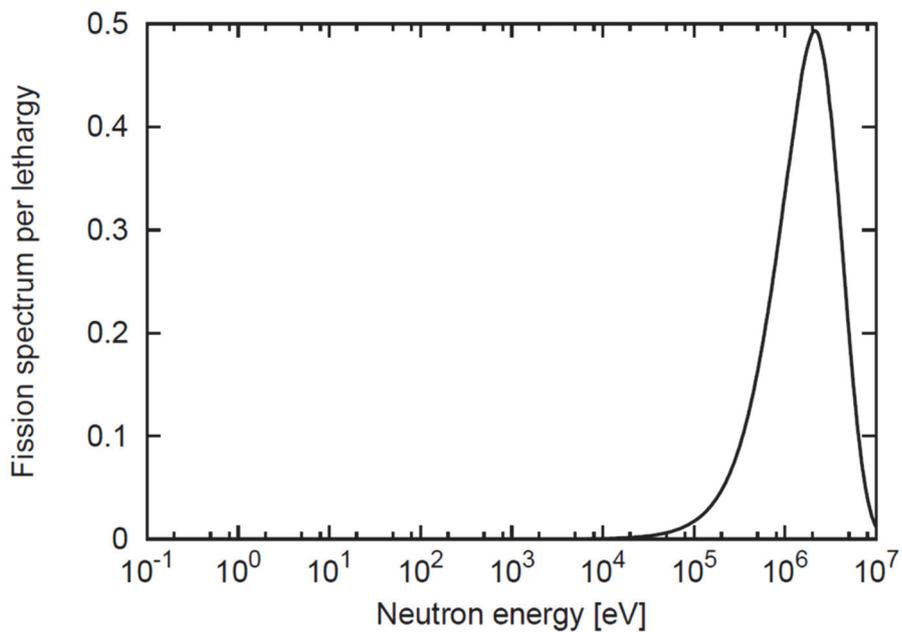


図 5-3 U-235 の核分裂スペクトル

原子炉において中性子が核分裂によって発生すると、この中性子は水などとの散乱や、核燃料や構造物による吸収といった反応、さらには原子炉の外へ漏れるなど、様々な事象を引き起こす。一部中性子は最終的に核分裂を引き起こすことがあり、この場合のように核分裂により発生した中性子が新たな核分裂を引き起こすことを**核分裂連鎖反応 (fission chain reaction)**と呼ぶ。

ウランによる核分裂連鎖反応の例を図5-4に示す。この図に示すように、中性子によりウランが核分裂反応を起こすと、2個の核分裂生成物(低い確率(~1%)で3つの核分裂生成物)とともに、平均で2~3個の中性子が生成される。これらの中性子の一部が最終的に次の核分裂を引き起こすと、核分裂連鎖反応をしている状態となる。最初の核分裂の際に発生する中性子を第一世代とすると、次の核分裂の反応により発生した中性子を第二世代とすることができる。このように、核分裂連鎖反応を理解するためには、中性子を世代に分けて整理することができる。なお、軽水炉においては、各世代の平均的な長さは  $10^{-5}$  秒オーダーとなる。

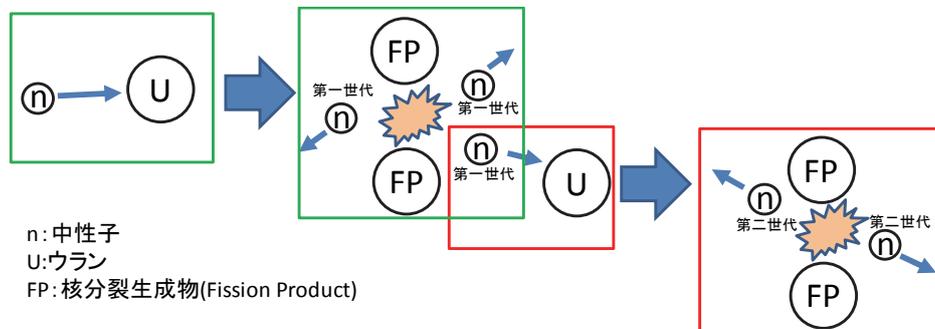


図 5-4 ウランによる核分裂連鎖反応

得られる核分裂生成物については、ある核分裂では Xe-140 と Sr-94、また別の核分裂では Ba-144 と Kr-90 といったように、核分裂ごとに核種が同じとはならない。核分裂時に核種がどれだけの確率で生成されるかを示した数値は**核分裂収率 (fission yield)**と呼ばれ、図5-5に示すように質量数約95と約140をピークとする2つの山が見られる。

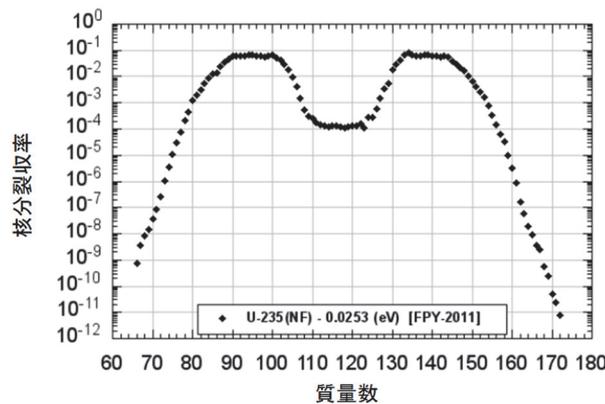


図 5-5 熱中性子により U-235 が核分裂を起こした場合の核分裂収率

(<https://www.ndc.jaea.go.jp/cgi-bin/FPYfig>)

軽水炉においては、主に 1 eV 以下のエネルギーの低い中性子によって核分裂が引き起こされる。このため、核分裂によって発生した 1~10 MeV 程度の高いエネルギーの中性子が次の世代の核分裂反応を引き起こすためには、様々な物質とぶつかり合って減速し、エネルギーを低くすることが効果的である。ただし、エネルギーの低い中性子になるまでに、いくつかの阻害要因を乗り越える必要がある。ここでいう主な阻害要因とは、下記のことを指す。

- ① エネルギーの高い中性子の原子炉からの漏れ
- ② U-238 などの共鳴反応による中性子の吸収
- ③ エネルギーの低い中性子の原子炉からの漏れ

また、上記の阻害要因を乗り越えてエネルギーの低い中性子になったとしても、水や制御棒などの構造物に吸収されると、核分裂を引き起こすことはできない。水や構造物に吸収されずに燃料へ吸収された中性子は、一定の確率で核分裂を引き起こし、ようやく次の世代の中性子が発生する。詳細は 6、7 章に記載するが、次の世代の中性子が発生するまでには様々な過程があることを理解してもらいたい。

【コラム】軽水炉で核分裂する核種

PWR のウラン燃料集合体体系におけるウランおよびプルトニウムの核分裂への寄与について、燃焼に伴う推移をまとめた結果を図 5-6 に示す。この図に示すとおり、燃焼中は U-238 が約 10%の割合で核分裂している。このことから、軽水炉においては、エネルギーの低い中性子だけでなく、エネルギーの高い中性子も核分裂に寄与していることがわかる。なお、ウランは一定確率で中性子を捕獲し、 $\beta$ 崩壊等を経てプルトニウムになる。特に Pu-239 と Pu-241 は軽水炉で核分裂しやすく、ウランを使用した燃焼集合体では、燃焼途中においてプルトニウムも核分裂に寄与する。

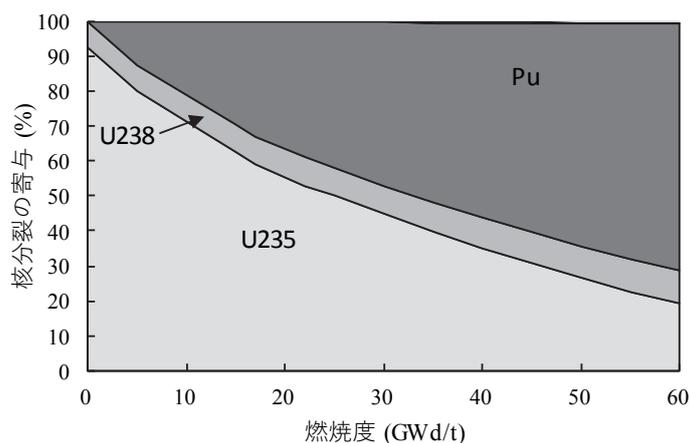


図 5-6 PWR ウラン燃料集合体におけるウランおよびプルトニウムの核分裂への寄与

## 5.2 核分裂の発生エネルギー

## 【この節のポイント】

- ・ 核分裂により結合エネルギーの変化分がエネルギーとして放出される。
- ・ 1回の核分裂により発生するエネルギーは平均としては約 200 MeV であり、発生エネルギーの大部分は核分裂片の運動エネルギーとして放出される。

## 5.2.1 結合エネルギーと核分裂の発生エネルギー

日常において、エネルギーは様々な方法で活用されている。例えば、火力発電所においては、燃料となる石油、石炭、天然ガスなどを燃焼させ、発生する熱エネルギーにより熱機関を動かして電力を生み出している。また、風力発電所においては、風（空気）の持つ運動エネルギーを電力に変換している。このように、エネルギーは人間にとって利用しやすい形態に変換されて用いられている。それでは、核分裂によって発生するエネルギーは何から変換されるのか？答えは、原子核における**結合エネルギー（binding energy）**である。

結合エネルギーとは原子核をバラバラの核子（中性子や陽子）に分けるために必要なエネルギーである。結合エネルギーが大きいということは核子間がしっかり結合しており、逆に小さいということは核子間が緩く結合していることを示す。図 5-7 に液滴モデルで概算した原子核の核子当たりの平均の結合エネルギー（結合エネルギーを核子の数で除した値）を示す。核子当たりの結合エネルギーを質量数の小さい順に見ると、水素やヘリウムなどの軽い元素は小さく、質量数 50~60 の鉄などの元素は大きく、さらに、質量数が大きくなると小さくなる傾向が確認できる。

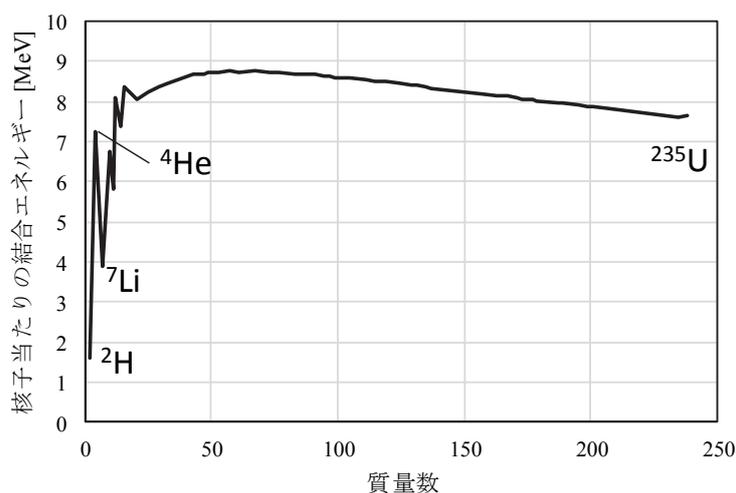


図 5-7 液滴モデルで概算した原子核の核子当たりの結合エネルギー

結合エネルギーが大きいということは、単に原子核がもつエネルギーが大きい、ということではないことに注意したい。結合エネルギーが大きいということは、核子をバラバラにするために必要なエネルギーが大きいことを意味しており、原子核がより安定になっていることを指す。なお、水素、ヘリウム、ウランなどの自然界に安定して存在する核種は、原子核内の中性子と陽子が丁度よい数となっており、核子間が結びつきやすい状態になっていることから、原子核として一定の安定性を有している。このため、質量数 50~60 の鉄などの元素より安定性の低い（核子当たりの結合エネルギーが小さい）核種であっても、自然界に安定して存在することができる。ここで、水素、ヘリウム、ウランなどは、原子核の安定性を一旦崩すためのエネルギーを得ることができれば、核反応でより安定な（核子当たりの結合エネルギーが大きい）原子核に変化することができる。核反応により安定な原子核に変化すると、安定となった分、つまり結合エネルギーの変化分がエネルギーとして発生することになる。エネルギーの発生する事象としては以下の 2 つがある。

- ① ウランなどの重い核種が分裂し、核子当たりの結合エネルギーがより大きい核種が生成される。
- ② 水素やヘリウムなどの軽い核種が融合し、核子当たりの結合エネルギーがより大きい核種が生成される。

項目①は原子炉で応用されている。核分裂が起こると、より核子当たりの結合エネルギーの大きい質量数 60 程度以上の核種が得られ、結合エネルギーの増加分がエネルギーとして放出される。ここで、例として U-235 が核分裂して Xe-140 と Sr-94 が得られる場合を考える ( $^{235}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{140}\text{Xe} + ^{94}\text{Sr} + 2^1_0\text{n}$ )。U-235、Xe-140、Sr-94 の核子当たりの結合エネルギーをそれぞれ 7.6 MeV、8.3 MeV、8.6 MeV とすると、結合エネルギーの変化、つまり放出されるエネルギーは  $(8.3 \times 140 + 8.6 \times 94 - 7.6 \times 235 = 184.4 \text{ MeV})$  となる。核分裂により発生する核種は確率的に決まるため、核分裂ごとに結合エネルギーの変化量が異なるが、結合エネルギーの変化量（発生エネルギー）の平均は約 200 MeV となる。

項目②は核融合炉で応用されている。水素やヘリウムなどは結合エネルギーが小さいため、核融合により結合エネルギーが増加し、この結合エネルギーの増加分がエネルギーとして放出される。ここで、例として重水素 (D) と三重水素 (T) が融合して He-4 が得られる反応を考える ( $\text{D} + \text{T} \rightarrow ^4\text{He} + ^1_0\text{n}$ )。D、T、He-4 の核子当たりの結合エネルギーをそれぞれ 1.1 MeV、2.8 MeV、7.1 MeV とすると、放出されるエネルギーは  $(7.1 \times 4 - 2.8 \times 3 - 1.1 \times 2 = 17.8 \text{ MeV})$  となる。

エネルギーと質量は等価であることがアインシュタインの特殊相対性理論において示されている。特殊相対性理論に基づくと、質量を  $m$ 、光の速度を  $c$  として、エネルギー  $E$  を  $mc^2$  と表現できる。この理論から、何らかの事象により質量が  $\Delta m$  だけ小さくなった場合は、放出されるエネルギー  $\Delta E$  を  $\Delta mc^2$  と表現できる。なお、この関係は核反応だけで成立するものではなく、化学反応や力学分野などの身近な事象でも成立する。つまり、化学反応による発熱も、自動車の摩擦熱も、核分裂や核融合により結合エネルギーの変化分が放出されるエネ

ルギーも、全て質量の変化で表現できる。核反応では反応前後の質量の変化が大きく、また  $\Delta E = \Delta mc^2$  の関係は核反応により実証されたことから、核反応により発生するエネルギーを質量の変化で表現することがしばしばある。例えば、核分裂の反応前後で 1 kg の質量が失われる場合、光の速度  $c$  を  $3 \times 10^8$  m/sec とすると、放出されるエネルギーは  $1 \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{16}$  J となる。

**【コラム】** なぜ原子核内の核子はバラバラにならないのか？

原子と比べて原子核は非常に小さく、この非常に小さい空間に陽子と中性子が存在している。原子核の中の陽子同士の電氣的反発が大きいと考えると、原子核の中の陽子はバラバラになりそうだと感じるかもしれない。しかし、実際には原子核はバラバラになることなく、安定して存在することができる。なぜか？これは核力と呼ばれる力が存在するからである。核力は中間子と呼ばれる粒子を核子同士が交換し合うことで発生すると理解でき、強い力で核子を結び付けている。少しイメージしにくいかもしれないが、世の中の力は全て粒子の交換によって発生すると考えられる。例えば、電磁気力は光子の交換により発生し、重力は（現在のところ発見されていないが）重力子の交換により発生すると考えられる。核力も粒子を交換して発生する力の一つであり、原子核の安定性を理解する上で重要な概念である。

**【コラム】** 結合エネルギーの理解に向けて

質量数の小さいものから順に核子当たりの結合エネルギーを確認すると、水素やヘリウムは小さく、その後は質量数とともに大きくなるが、質量数が 50~60 付近を超えるとまた小さくなる傾向が確認できた。この傾向については液滴モデルを用いることで理解を深めることができる。表面にある核子はその外側に核子がないことから、内側の核子よりも引き合う力が小さくなる効果（表面効果）がある。質量数が小さい水素やヘリウムは表面効果が大きくなるため、核子当たりの結合エネルギーが小さくなる。質量数 50~60 付近までは質量数が増えると表面効果が小さくなる影響が支配的であるため、核子当たりの結合エネルギーは増加する。さらに質量数が増えると、正の電荷をもつ陽子間で電氣的反発が大きくなることと、原子核における中性子の割合が大きくなることから、核子当たりの結合エネルギーが小さくなる。中性子の割合が大きい場合に核子当たりの結合エネルギーが小さくなる理由は、中性子同士の核力が中性子-陽子間の核力よりも小さいためである。

また、特定の質量数（2、8、20、28、50、82、126）となる場合、核子当たりの結合エネルギーは、液滴モデルでは説明できないほどに高くなることが確認されている。これは、殻モデルを用いることで理解できる。原子の電子軌道が閉殻の場合に安定となることは化学分野でよく知られている。殻モデルに基づくと、原子核の内部にも軌道があり、殻が閉じた場合に原子核が安定すると考えることができる。なお、原子核が安定となる特定の質量数は魔法数（マジックナンバー）と呼ばれている。

**【発展的内容】 炉物理で用いる質量の単位**

国際単位系では質量を示す単位としてキログラム (kg) が広く用いられており、本節でも用いたように、炉物理の分野でもしばしばキログラムを用いる。一方で、質量数などを求める場合には、C-12 の質量数の 1/12 を単位とした相対原子質量も広く用いられている。単位は統一したほうが分かりやすいが、なぜ一般的に広く使われているキログラムで統一されないのだろうか？実は、2019 年 5 月まで、キログラムの単位は「国際キログラム原器」と呼ばれる人工物が基準となっており、これまでに 3 回もの校正が行われてきた。このような背景もあり、キログラムの単位は長期安定性に懸念があった（と考える人もいた）。2019 年 5 月の改定で、キログラムはより普遍的な物理定数であるプランク定数をもとに定義されることとなり、単位としての信頼性が向上したといえるだろう。今後、炉物理で用いる質量の単位はキログラムで完全に統一されるかもしれない。

### 5.2.2 発生エネルギーの内訳

原子炉内で発生するエネルギーを理解するためには、核分裂により発生する全エネルギーと、最終的に熱として利用できるエネルギーを整理しておく必要がある。

一回の核分裂により発生するエネルギーは約 200 MeV である。例として熱中性子による核分裂から発生するエネルギーを表 5-1 に示す。この表に示すように、発生エネルギーの大部分は核分裂片の運動エネルギーとして放出される。核分裂片は正の電荷を有しているため、燃料中ですぐに止まり、熱エネルギーとして周囲の温度を上昇させることとなる。中性子は平均的には 2~3 個程度発生し、これらの合計として約 5 MeV のエネルギーを有する。核分裂生成物の崩壊により発生するβ線およびγ線は核分裂生成物の半減期に従い遅れて発生する。γ線は核分裂直後にも発生するので、これを即発γ線、核分裂生成物から放出されるものを遅発γ線と区別して呼ぶ場合がある。発生する中性子、β線、γ線は、基本的には原子炉内で熱エネルギーとして回収できると考えてよい。ただし、ニュートリノは他の物質との反応が発生しないため、原子炉で回収できない。

表 5-1 U-235 の熱中性子による核分裂で発生するエネルギーと  
原子炉でのエネルギー回収の可否

	エネルギー (MeV)	全発生エネルギーとの比(%)	エネルギー 回収の可否
核分裂片の運動エネルギー	169.1	83.5	可
中性子の運動エネルギー	4.8	2.4	可
即発γ線エネルギー	7.0	3.4	可
核分裂生成物からのβ線のエネルギー	6.5	3.2	可
核分裂生成物からのγ線のエネルギー	6.3	3.1	可
核分裂生成物からのニュートリノのエネルギー	8.8	4.3	否
計	202.5	100.0	

(出典：R. Sher, “Fission Energy Release for 16 Fissioning Nuclides,” *Proc. Specialists’ Mtg. Nuclear Data Evaluation and Procedures*, Upton, New York, BNL-NCS-5 1363 (1980).)

核分裂に由来して発生するエネルギーは前述のとおりであるが、原子炉において核反応により発生するエネルギーは、核分裂だけに由来しないことに注意したい。原子炉が臨界になっていることを考えると、一回の核分裂当たりに発生する中性子数を $\nu$ としたとき、そのうち 1 個は次の世代の核分裂に寄与することになる。軽水炉において、この 1 個を除いた $(\nu - 1)$ 個の中性子は、圧力容器の中で核分裂以外の反応で吸収されることになる。核分裂以外の吸収反応として、核燃料や構造物に中性子が捕獲されγ線を放出する反応がある。放出されたγ線のほぼ全てのエネルギーは圧力容器内で熱となることから、原子炉で回収するエネルギーを求める際には、このように核分裂に由来しないエネルギーも考慮している。

### 5.3 崩壊熱

**崩壊熱 (decay heat)** とは、核分裂生成物や超ウラン核種 (原子番号がウランよりも大きい核種) の崩壊によって発生する放射線のエネルギーが、原子炉内で熱エネルギーに変換されたものである。崩壊熱は核分裂により発生する熱ではないことに注意したい。放射線により熱が発生する原理は、赤外線ヒーターから放出される赤外線を人が吸収して暖くなる現象をイメージすると理解しやすいだろう。崩壊熱は運転中の原子炉でも放出されており、ある程度の期間、運転を行った原子炉では、全出力エネルギーの約 7%程度を崩壊熱が占めている。また、原子炉が停止した後、崩壊熱は指数関数的に減少する。その理由は、核分裂や中性子捕獲反応が停止するため、それらによる新たな崩壊熱の放出源 (核分裂生成物や超ウラン核種) の生成が行われず、燃料中に残存する放射線を放出する核種が崩壊により指数関数的に減少するからである。福島第一原子力発電所やスリーマイル島原子力発電所では、原子炉の停止後に放出された膨大な崩壊熱を適切に除去できず、冷却材である水の量が減少し、通常は冠水している燃料が水面から露出したことで被覆管-水の発熱反応も加わり、炉心溶融を引き起こした。

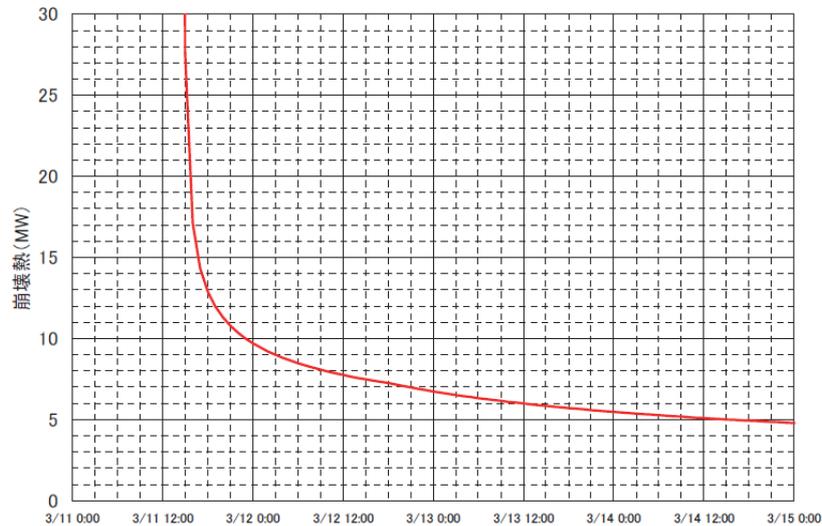
崩壊熱は燃料に存在する核分裂生成物や超ウラン核種の種類および量に依存するため、崩壊熱の大きさを一般的に示すことは容易でない。ただし、崩壊熱は簡易的には以下のパラメータで表現できる。

- ① 原子炉の運転時の出力
- ② 原子炉の運転時間
- ③ 原子炉が停止してからの経過時間

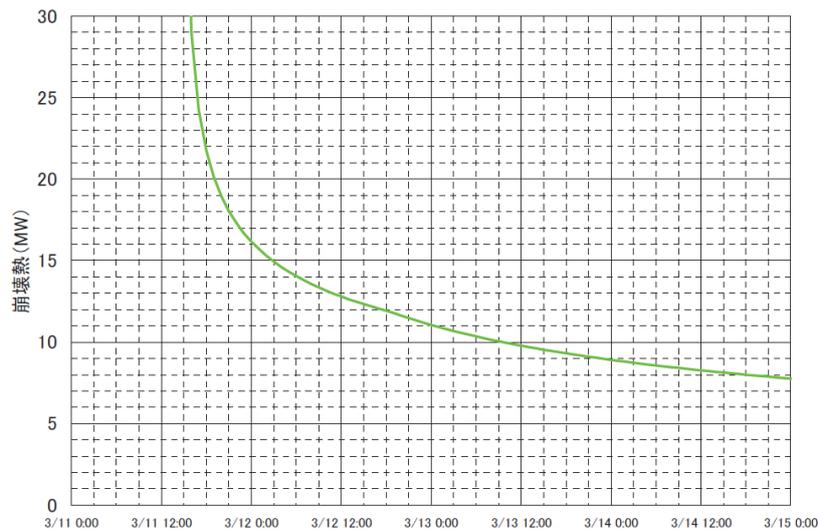
出力の小さな原子炉の場合は、運転中の原子炉内で崩壊している核種の量が小さいため、崩壊熱は小さいと考えられる。このことから崩壊熱は①運転時の原子炉の出力に依存することがわかるだろう。実際、崩壊熱は運転時の原子炉の出力に概ね比例する。また、新燃料のみが装荷された原子炉を起動後すぐに停止させれば、崩壊熱は小さいと考えることができる。このことから崩壊熱は②原子炉の運転時間に依存することが理解できる。最後に、崩壊熱は時間とともに小さくなることから、③原子炉が停止してからの経過時間に依存すると考えられる。

崩壊熱の大きさについて理解を深めるため、東日本大震災時の福島第一原子力発電所 1 号機および 2 号機の崩壊熱の評価結果を図 5-8 に示す。地震は 3 月 11 日 14 時 46 分に発生し、地震が発生する前までは 1 号機と 2 号機は通常運転中であった。1 号機と 2 号機の通常運転時の熱出力 (定格) はそれぞれ 1,380 MW および 2,381 MW である。運転出力に対する崩壊熱の比を求めると、原子炉の停止後 9 時間が経過した 3 月 12 日 0 時 0 分では両号機とも 0.7%程度である。このことから、崩壊熱は運転時の原子炉の出力に概ね比例することが確認できる。さらに、3 日が経過した 3 月 15 日 0 時 0 分では、両号機とも 0.35%程度まで低減している。このように、崩壊熱は時間とともに大きく低下する傾向が確認できる。ただし、運転出力に対する崩壊熱比が 0.35%であっても、1 号機では 5 MW (500 W のドライヤー1 万台分)、2 号機では 8 MW (500 W のドライヤー1.6 万台分) のエネルギーが放出されており、

崩壊熱が非常に大きいことを理解できるだろう。なお、事故から5年以上経過すると、運転出力に対する崩壊熱比は0.1%を下回る[4]。



(a) 1号機



(b) 2号機

図 5-8 東日本大震災時の福島第一原子力発電所 1号機、2号機の崩壊熱

(出典：東京電力株式会社、「福島第一原子力発電所 1～3号機の炉心状態について 東京電力株式会社、平成23年11月30日」、2011年.)

**【コラム】原子炉の崩壊熱の除去に必要な水の量の概算**

運転中の原子炉が何かしらの事象で停止した場合、炉心に冷却水を供給し、崩壊熱を冷却水に移して炉心を冷やすことが重要になる。では、どの程度の量の冷却水が必要になるか概算してみる。なお、ここでは原子炉の圧力が維持されている福島第一原子力発電所の1号機

および2号機を想定して考える。

まず、原子炉に供給された冷却水は30°Cから300°Cまで上昇すると考える。ここで、30°Cから300°Cまでの平均の水の比熱を4.5 kJ/kg/°Cと考える。温度上昇(30°C→300°C)が270°Cであるため、水1 kgにつき温度上昇で除去できるエネルギー(顕熱)は $(4.5 \times 270 / 1000 = 1.2 \text{ MJ})$ となる。さらに、原子炉では水が蒸発する際に奪う熱(潜熱)も利用しており、300°Cでの潜熱は1.4 MJ程度となる。顕熱と潜熱を合わせると、水1 kgにつき2.6 MJを除去できることとなる。

さて、福島第一原子力発電所1号機が停止してから1日間で放出される崩壊熱を $8.0 \times 10^5 \text{ MJ}$ とすると、この熱を除去するためには $8.0 \times 10^5 / 2.6 = 3.1 \times 10^5 \text{ kg}$ 、25 mプールで0.9杯分程度も水が必要となる。また、2日目で放出される崩壊熱が $5.3 \times 10^5 \text{ MJ}$ であるとする、この熱を除去するためには $5.3 \times 10^5 / 2.6 = 2.1 \times 10^5 \text{ kg}$ 、25 mプールで0.6杯分程度も水が必要となる。崩壊熱は運転時の原子炉の出力に概ね比例し、1号機と比較して2号機の出力は約1.7倍であることから、2号機の崩壊熱の除去に必要な水の量は1号機の約1.7倍となる。

#### 参考文献

- [1] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, J. Katakura, "JENDL-4.0: a new library for nuclear science and engineering," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 1-30 (2011).
- [2] 野上茂吉朗、「原子核」、裳華房、(1986).
- [3] ラマーシュ著、武田充司、仁科浩二郎共訳、「原子炉の初等理論」(上)、吉岡書店、(1976).
- [4] 西原健司、岩元大樹、須山賢也、「福島第一原子力発電所の燃料組成評価」、JAEA-Data/Code 2012-018、(2012).

