

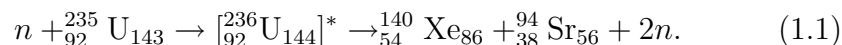
核分裂とその連鎖反応

1 核分裂

核分裂 (nuclear fission) とはウランなど重い原子核が中性子や γ 線, 重陽子を吸収することにより、または自発的に二つまたは三つの原子核に分裂する現象である。ここではまず、中性子を吸収しておこる誘起核分裂を主として考える。

1939 年、化学者のハーン (Otto Hahn) とシュトラスマン (Strassman) が注意深い化学分析により、熱中性子を照射したウランの中からバリウムなど初め含まれていなかった軽い元素を発見した。化学者のハーンから相談された物理学者のマイトナー (Meitner) とその甥のフリッシュ (Frish) はウランが半分くらいの核に分裂する可能性を指摘して、実際に電離箱を用いて核分裂片のつくる大きな電離を観測した。またほとんど同時に、ボーア (N. Bohr) とホイーラー (Wheeler)、またフレンケル (Frenkel) が詳しい理論的解析を発表した。二つの分裂片の質量はいろいろな組み合わせが可能で、代表的な例は次のようになる。

(核分裂の図の挿入予定)



これは驚くべきことであった。というのは、原子分子に比べて、非常に強い力で結合していると考えられてきた原子核が、原子核の世界では無視できる運動エネルギー (0.025eV) しかもたない熱中性子の吸収により分裂したからである！

ウラン 235 が中性子を吸収したら必ず核分裂するわけではないことに注意すべきである。一般には中性子を吸収しても、核分裂する場合と、核分裂をせずに γ 線を放出する場合 (中性子捕獲反応、capture reaction) が

ある。核分裂または中性子捕獲の反応の起こる確率はミクロ断面積 σ_f, σ_c で表わされる。したがって、中性子を吸収して核分裂の起こる相対的確率は $\sigma_f/(\sigma_f + \sigma_c)$ となり、熱中性子により誘起されるウラン 235 の核分裂の場合は約 0.85(85%) である。

1.1 核分裂により発生するエネルギー

1. 核分裂により発生するのはエネルギー、核分裂片などの放射性物質と β , γ 線および中性子などの放射線である。
2. 核分裂により発生するエネルギーは約 200MeV で、約 95%が熱エネルギーに転化する。約 83%以上は核分裂片の運動エネルギーである。
3. 中性子を吸収して、核分裂し、即発 γ 線を放出するまでの時間は $10^{-14} \sim 10^{-13}\text{sec}$ である。

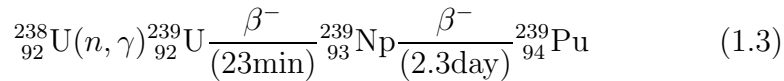
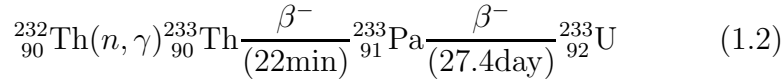
分裂片の運動エネルギー	$165 \pm 5\text{MeV}$
即発中性子の運動エネルギー (2-3 本)	$5 \pm 0.5\text{MeV}$
即発 γ 線エネルギー (約 5 本)	$6 \pm 0.5\text{MeV}$
分裂片からの β 線エネルギー (約 7 本)	$8 \pm 1.5\text{MeV}$
分裂片からの γ 線エネルギー (約 7 本)	$6 \pm 1\text{MeV}$
分裂片からのニュートリーノのエネルギー (約 7 本)	$12 \pm 2.5\text{MeV}$
核分裂の全エネルギー	$202 \pm 6\text{MeV}$

1.2 核分裂性核種と親物質

核分裂を起こすものは特定の核種に限られる。原子炉の核燃料として実際に使用されるものは U, Pu, Th の同位核であり、これらは質量数が奇数であるか偶数であるかによって核分裂性が異なる。これは、偶数個の核子が対をつくる傾向があるなど原子核が超伝導状態になっていることに起因している。

奇数の質量数をもつ ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, ${}^{241}_{94}\text{Pu}$ を、原子炉工学では核分裂性核種(fissile nuclide), またはその物質を核物質(fissile material/fissionable material)という。

偶数の質量数をもつ ${}^{232}_{90}\text{Th}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{240}_{94}\text{Pu}$ を親物質または核原料物質 (fertile material) という。これらは高エネルギーの中性子によって核分裂を起こすこともあるが、原子炉内では主として中性子を捕獲し、次のようにして核分裂性物質となる。



核分裂性物質のうち天然に存在するのは ${}^{235}_{92}\text{U}$ だけであり、他は原子炉内でつくられる。

備考:

1. ${}^{240}_{94}\text{Pu}$ は自発核分裂する確率も小さない。(この事実が長崎型原爆 (爆縮型原爆) の開発の契機となった。)
2. 原子核物理学では、核子から構成される無限一様に広がった理想的な物質を核物質 (nuclear matter) という。

1.3 核分裂生成物と放射線

核分裂に伴って発生する核分裂生成物と放射線の性質について考える。中性子については別項でより詳しく触れるので、ここでは放射線としては中性子以外を考える。

1. 核分裂片は運動量保存則とエネルギー保存則を同時に満たすように運動し、重い方は質量数は約 140、陽子数は約 54、運動エネルギーは約 65MeV、そして軽い方は質量数は約 90、陽子数は約 38、運動エネルギーは約 97MeV であり、光速の約 30 分の 1 くらい的高速である。また、二つの分裂片を核とする原子の電子は部分的に剥ぎ取られて、約 + 20e 程度に帯電した重い荷電粒子となる。
2. 核分裂片の運動エネルギーは核分裂する点から数ミクロン (μm) から $0.5 \times 10^{-3}\text{cm}$ の距離内で失われ、熱に変わる。ウラン塊の中では約 10^{-9}sec で静止してしまう。
3. β 線のエネルギーは数センチ (cm) 以外で失われ、熱に変わる。
4. γ 線のエネルギーは数メートル (m) 以外で失われ、熱に変わる。

5. 中性微子 (ニュートリーノ ν) は物質粒子とほとんど相互作用をしない、すなわちエネルギーとしても利用できず、はるかかなたへ飛んで行く。
6. 核分裂片は運動エネルギーを失った後も、相当の時間にわたって励起状態であり、ガンマ線、ベータ線やまたまれに中性子 (遅発中性子) を放出する。ガンマ線、ベータ線は周囲の物質との相互作用により熱に変わるので、この熱を崩壊熱 (decay heat) という。。このようにして発生する崩壊熱は原子炉の停止直後にもかなりの熱となり、その除去が重要となる。
7. 核分裂により生成される原子核を運動エネルギーをもっている状態の時に、分裂片 (fission fragments) といい、運動エネルギーをもたなくなった状態を分裂生成物 (fission products) と区別することがある。

1.4 核分裂により発生する中性子

1. 即発中性子と遅発中性子

核分裂に伴って放出される高速の中性子には実は二種類ある。ひとつは即発中性子 (prompt neutron) であり、他は遅発中性子 (delayed neutron) である。即発中性子は全放出中性子数の 99% 以上を占め、核分裂とほぼ同時に (約 10^{-14} 秒後) 放出される。一方、遅発中性子は全放出中性子数の 1% 以下の小量で、核分裂の後ある時間経過後に放出される。

即発中性子が放出される理由は、核分裂直後、分裂片が余分のエネルギーをもち、また安定性の点から多すぎる中性子をもつためと考えられる。

2. 核分裂中性子のエネルギー

即発中性子はいずれも高速であるが、そのエネルギー範囲は広がっていて、0.05MeV から 7MeV 以上のものまであり、その平均値は 2MeV である。このエネルギースペクトラムは経験式として、 ^{235}U の場合には、図に示されているように、

(中性子スペクトル図の挿入予定)

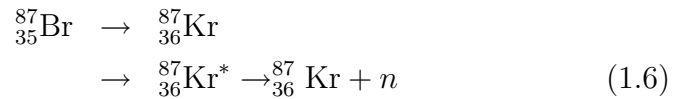
$$n(E) = 0.453 \times e^{-1.036E} \sinh \sqrt{2.29E} \quad (1.5)$$

と表わされる。ただし、中性子のエネルギー E の単位は MeV で、 $n(E)$ は全エネルギー領域の中性子数の合計が 1 になるように規格化されている。($\int_0^\infty n(E)dE = 1.$)

3. 遅発中性子の役割

遅発中性子は全放出中性子数の 1% にも満たない数しかないが、後に議論するように、原子炉の制御を容易にしている点で実用的な意味が大きい。

遅発中性子がなぜ発生するのだろうか。重要なものは核分裂片の臭素 Br とヨウ素 I の崩壊に関連している。次の式に示すように、



β 崩壊の後、 ${}^{87}_{35}\text{Br}$ の一部は、基底状態の ${}^{87}_{36}\text{Kr}$ になり、引き続き β 崩壊を行う。しかし、残りはまず、 ${}^{87}_{36}\text{Kr}$ の励起状態になり、1 個の中性子を放出して安定な ${}^{86}_{36}\text{Kr}$ となる。この中性子が遅発中性子となる。

1.5 核分裂の断面積

熱中性子以外のエネルギーの中性子では分裂しないのかどうか、またウラン 235 以外の核は分裂しないのだろうか。そこで、核分裂のミクロ断面積のエネルギー依存性を調べてみる。

U235, U238, U233, Pu239 の断面積のエネルギー依存性

1.6 核分裂の機構

液滴模型による核分裂の機構の理解：

1936年に結合エネルギーの半経験公式が発表され、それによれば重い核は二つに分裂した方がエネルギー的に得すること、すなわち、核分裂が予想できたはずだが、1939年の発見まで誰も気づかなかった。

核分裂への量子効果。

1.7 誘起核分裂と自発核分裂

外部から、中性子入射などにより励起エネルギーを与えなくとも核分裂は生じる場合がある。このような現象を自発核分裂 (spontaneous fission) という。ウラン、プルトニウム、トリウムのような原子核では小さいが自発核分裂の確率がある。自発核分裂の半減期の例を表に示す。この表

${}_{90}^{232}\text{Th}$	$> 10^{20}\text{year}$	${}_{94}^{239}\text{Pu}$	$\text{約 } 5.5 \times 10^{15}\text{year}$
${}_{92}^{235}\text{U}$	$\text{約 } 1.8 \times 10^{17}\text{year}$	${}_{94}^{240}\text{Pu}$	$\text{約 } 1.2 \times 10^{11}\text{year}$
${}_{92}^{238}\text{U}$	$\text{約 } 8 \times 10^{15}\text{year}$	${}_{94}^{242}\text{Pu}$	$\text{約 } 8.0 \times 10^{10}\text{year}$

のように、ウラン 238 も、小さな割合だが自発核分裂する。これが原子炉では連鎖反応の火種ともなりうる。また、プルトニウム 240 も相対的に小さくない確率で核分裂し、この事実が長崎原爆 (爆縮型原爆) の作成の契機になった。

2 核分裂連鎖反応

2.1 核分裂連鎖反応と臨界条件

ここで、核分裂というミクロな要素的な過程がマクロな量の核エネルギーの解放となる核爆発と原子炉と臨界事故を統一的に理解してみよう。

1. 臨界、臨界超過、臨界未満

ウランやプルトニウムのような核燃料が一カ所に集まり、ある条件が整うと核分裂反応が次から次に起こる状態、すなわち核分裂連鎖反応が持続的に起こる状態になる。時間が経っても核分裂の数が一定である状態を「臨界状態」という。核分裂の数が時間とともに増

加していく状態を「臨界超過」または「超臨界状態」、減少していく状態を「臨界未満」または「未臨界状態」という。

すでに述べたように、核分裂に伴って発生する中性子には核分裂とほぼ同時に発生する即発中性子と、やや時間経過して、核分裂生成物から放出される遅発中性子がある。即発中性子による臨界を即発臨界、遅発中性子による臨界を遅発臨界と呼ぶ。

臨界を越えた超過分が中性子数の増加率にして約 0.8%程度までならば、中性子数の増加速度は遅く、制御装置で増大を抑える時間的余裕がある（遅発臨界）。しかし、中性子数の増加率にして約 0.8%を越えると、中性子増加速度は突然速くなり、制御装置の有無に関係なく制御できない状態となる（即発臨界）。

2. 原子炉では臨界になっている。

原子力発電では、水を循環させた鋼鉄製の容器の中に規則正しく並べられたウランやプルトニウムの核燃料棒で熱エネルギーが作られ、その熱エネルギーによって高温になった水から得られる高圧の水蒸気でタービンを回して発電している。すなわち、多数の燃料棒の中に水を送り込んで高温高圧の水蒸気を生み出す装置が原子炉である。そして、水と燃料棒から構成される構造物を原子炉の炉心と呼んでいる。炉心では、核分裂連鎖反応が一定の割合で継続しており、必要なエネルギーを生成している。すなわち、原子炉では定められた電力量を供給できるように核分裂連鎖反応を制御して臨界状態を保っている。さらに、通常の原子炉（軽水型熱中性子利用原子炉）では熱中性子による核分裂の確率の大きいウラン 235 の濃縮率は 2 ～ 2 – 3% である。

原子炉では即発中性子と遅発中性子の総数が熱中性子まで減速されて制御され、緩やかに臨界が続いている。

通常の状態では原子炉の臨界は遅発臨界である。

3. 核兵器は臨界超過状態を利用したものである。。

核分裂連鎖反応をできるだけ短い時間内に起こさせ、強烈な爆発力を発生させるものである。すなわち、核兵器の臨界超過状態ではできるだけ大きなエネルギーを短時間に発生させることを目的としている。これらの核兵器には金属状の濃縮ウランやプルトニウムが用いられている。（発電用原子炉の燃料は金属の形態ではなく、酸化物を焼き固めたものを金属の鞘に詰めたものである）。兵器に使用されるウラン 235 の濃縮率は、原子炉用の低濃縮ウランと異なり、90% 以上の高濃縮ウランが使用される。しかし、中程度の濃縮ウランでも

爆発効率の低い核爆発を起こすことは可能であるという見解もある。原爆（核分裂兵器）では、高速の即発中性子による臨界超過状態で核分裂のエネルギーを極短時間に一挙に放出されている。核分裂兵器における臨界は即発臨界であり、原子炉と同じ意味の制御は不可能となる。

4. 原子炉以外の核燃料サイクル施設は臨界にならない設計になっている。

これらの施設では間違っても一定量以上の核燃料が一カ所に集まって臨界にならないよう臨界安全管理を行なうことが法律で義務づけられている。しかし、核分裂性物質が何らかの原因で集積すれば原理的には核分裂（連鎖反応）が起こりうること、その場合も想定した対策は必要である。臨界事故が発生した場合を想定し、臨界を速やかに終息させることができるように、溶液状核燃料を別の安全な貯槽に移したり、核分裂連鎖反応の仲介役の中性子をいち早く吸収して核分裂反応を抑制する作用のあるほう酸水溶液などを非常用に備えている場合もある。

5. 臨界事故とは期せずして臨界超過になってしまった状態を指す。

臨界超過状態をそのままにしておくとその核燃料の状態に応じて様々だが、大量のエネルギーが熱や放射線（中性子線、ガンマ線、ベータ線）の形で放出されることになる。

臨界事故の場合には、即発臨界と遅発臨界の両方が現れることが過去の事故例で確認されている。即発臨界の場合には、核分裂性物質を含む溶液などの装置または容器内で急激に温度が上昇し、気泡ができるバースト現象が起こる。火薬の爆発とは異なるが、場合により臨界を起こした装置または容器が吹き飛ぶ可能性もある。1999年9月の東海ウラン臨界事故では最初的大量の中性子線は即発臨界によるものであったが、その後は遅発臨界が約20時間ほど続いた。

臨界量は中性子の反射体があるかないか、また反射体の性能によりいろいろな値をとる。

表 1: 臨界量 (通常の密度の場合)

核種	反射体	厚さ (cm)	臨界量 (kg)
ウラン 235	なし		49
ウラン 235	ベリリウム	10	14
ウラン 235	天然ウラン	10	18
プルトニウム 239	なし		12.5
プルトニウム 239	ベリリウム	5.2	5.4
プルトニウム 239	ベリリウム	32	2.5
プルトニウム 239	天然ウラン	5	6.4
プルトニウム 239	天然ウラン	24	4.4

2.2 核爆発の原理と機構

核分裂連鎖反応による巨視的なエネルギーの発生を理解するために、高速中性子による爆発的な核分裂連鎖反応を考えてみる。通常、原子炉では制御された核分裂反応が起こり、核爆発は制御されない連鎖反応であると解釈されている。しかし、以下に示すように、核兵器においては "逆向きの制御" がなされている。すなわち核兵器においては高濃縮ウランを利用してではあるが、核分裂エネルギーが極短時間に放出されるように制御されるのである。

1. 中性子の吸収による、核分裂のミクロ断面積を σ_f 、核分裂性の原子核の数密度 (= 単位体積あたりの個数) を n とすれば、中性子の平均自由行程 ℓ_f は

$$\ell_f = \frac{1}{n\sigma_f}. \quad (2.1)$$

となる。

2. 中性子の運動エネルギーを E_n 、質量を m とすれば、一回の核分裂について中性子の平均自由時間 (= 緩和時間) は連鎖反応の 1 世代 (generation) の時間でもあるので t_g とすれば、それは近似的につぎのように表わされる。中性子の速度 v を用いて、核分裂の緩和時間は

$$t_g = \frac{\ell_f}{v} = \frac{1}{vn\sigma_f} \quad (2.2)$$

と表わされる。一方、速度と運動エネルギーの関係より

$$\begin{aligned} E_f &= \frac{1}{2}mv^2 \\ \rightarrow v &= \sqrt{\frac{2E_n}{m}} \\ \rightarrow t_g &= \frac{1}{n\sigma_f} \sqrt{\frac{m}{2E_n}}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

3. 連鎖反応中のある時刻 t の中性子の数を $N(t)$ とし、1 回の核分裂で発生する中性子数を n_f 、系外に漏洩する中性子数を n_ℓ とすると、連鎖反応の 1 世代あたりの中性子数の増加は $\{N(n_f - n_\ell) - N\}$ ($(n_f - n_\ell) \equiv x$) である。

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &\approx \frac{Nx}{t_g} \\ \rightarrow N(t) &= N_0 \exp\left(\frac{xt}{t_g}\right). \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで、 N_0 は連鎖反応が始まったときの中性子数である。 $N(t)$ は連鎖反応の世代数 ($t/t_g \equiv n_g$) の関数と見なすこともできるから、関係式 (2.4) は

$$N(n_g) = N_0 \exp(x n_g) \quad (2.5)$$

と表わすことができる。

4. ここで、具体的に、ウランの密度 $\rho = 18.7\text{g/cm}^3$, エネルギー $E_n = 2\text{MeV}$ に対するウラン ^{235}U の核分裂断面積を $\sigma_f = 1.4 \text{ barn}$ とすれば、

$$n = \frac{18.7\text{g/cm}^3}{235\text{g}} \times (6 \times 10^{23}) = 0.477 \times 10^{23} \text{cm}^{-3}, \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \ell_f &= \frac{1}{(0.477 \times 10^{23} \text{1/cm}^3) \times (1.4 \times 10^{-24} \text{cm}^2)} \\ &= 14.97 \text{ cm}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$v = c \sqrt{\frac{2E_n}{mc^2}} = 0.065c = 0.195 \times 10^{10} \text{cm/s}, \quad (2.8)$$

$$t_g = \frac{14.97 \text{ cm}}{0.195 \times 10^{10} \text{cm/s}} = 0.768 \times 10^{-8} \text{s}. \quad (2.9)$$

また、 $n_f = 2.5$, $n_\ell = 0.5$, $x = 1.0$ であるとすれば、

$$N(n_g) = N_0 \exp(n_g). \quad (2.10)$$

5. s 回連鎖的に核分裂が起こったとき発生した中性子の総数 N はどう表わされるか。簡単のために、最初の中性子数 $N_0 = 1$ とする。求めるべき N は等比 e の等比級数の和であるから

$$\begin{aligned} N &= e + e^2 + \cdots + e^s, \\ &= \frac{e(e^s - 1)}{e - 1}, \quad (e = 2.718). \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここでウラン 1kg 中の ^{235}U 核の個数を計算する。

$$\frac{1\text{kg}}{235\text{g}} \times 6 \times 10^{23} \text{nuclei} \approx 2.56 \times 10^{24} \text{nuclei}. \quad (2.12)$$

広島型原爆に使用された高濃縮ウラン (^{235}U) は約 60kg といわれている。爆発所要時間の近似的推定のために、ウラン 60kg 中の ^{235}U 核の個数に近い世代数 $s = 60$ を用いれば、発生する総中性子数は

$$N(s = 60) = 1.79 \times 10^{26} \quad (2.13)$$

となる。この世代数 $s = 60$ を用いて、連鎖反応の全過程でかかる時間 $t_{\text{explosion}}$ は次のように推定される。

$$\begin{aligned} t_{\text{explosion}} &\approx 0.768 \times 10^{-8} \text{s} \times 60 = 46.08 \times 10^{-8} \text{s} \\ &\approx 0.46 \mu\text{s}. \end{aligned} \quad (2.14)$$

すなわち、約百万秒分の 1 程度である。注目すべきことは各世代で発生する中性子数が指数関数的に増加することと発生する核分裂エネルギーが中性子数に比例することを考えれば、次のように、爆発エネルギーの 99.9% 以上は最後の数世代によりもたらされることがわかる。

$$N(n_g = 55) = \exp(55) = 7.65 \times 10^{23}, \quad (2.15)$$

$$N(n_g = 56) = \exp(56) = 2.08 \times 10^{24}, \quad (2.16)$$

$$N(n_g = 57) = \exp(57) = 5.65 \times 10^{24}, \quad (2.17)$$

$$N(n_g = 58) = \exp(58) = 1.54 \times 10^{25}, \quad (2.18)$$

$$N(n_g = 59) = \exp(59) = 4.18 \times 10^{25}, \quad (2.19)$$

$$N(n_g = 60) = \exp(60) = 1.13 \times 10^{26}. \quad (2.20)$$

このように核兵器こそ極めて高い精度の制御が必要である。

参考 (核兵器の威力 (爆発力) の単位について)

高性能火薬 (成分名により TNT 火薬と略) の千トン相当のエネルギー、および対応する核分裂性物質の質量は次のように定義されている。

$$1\text{kton of TNT} \equiv \text{fission of } 0.057\text{kg of fissionable material} \quad (2.21)$$

$$\equiv \text{Fission of } 1.45 \times 10^{23} \text{ nuclei} \quad (2.22)$$

$$\equiv 4.18 \times 10^{12} \text{ joule} \quad (2.23)$$

$$\equiv 2.6 \times 10^{25} \text{ MeV}. \quad (2.24)$$

3 参考文献

1. 八木浩輔「原子核物理学」(朝倉書店、1977 年)
2. フラウエンフェルダー, ヘンレイ「サブアトミックフィジクス(下)」産業図書、1980 年、
3. 山田克哉「原子爆弾」(講談社ブルーバックス、1996 年)
4. ジュール・ゲロン「原子力エネルギー」(白水社クセジュ文庫、1978 年)

5. S.Glasstone and P.J.Dollan, The Effects of Nuclear Weapons, (United States Department of Defence and Energy Resaerch and Development Administration, USA, 1977 年)
6. 大山 彰「現代原子力工学」(オーム社、1986 年)
7. 原子力文化事業振興財団編「原子力基礎講座」、1977 年
8. 九州電力原子力建設部編「原子力基礎理論」(米 WH 社「原子力基礎理論講義」) 1975 年
9. 伏見康治他「原子炉物理学」(共立出版、1961 年)