
第8章

原子炉の反応度

1. はじめに
2. 原子炉の出力変動と反応度の変化
3. 反応度係数の定義
4. いろいろな反応度係数
5. その他の反応度変化
6. 原子炉の固有の安全性
7. チェルノブイリ原子力発電所事故と反応度効果
8. まとめ

[この章のポイント]

炉心温度のような炉心の状態量が変わると、中性子の発生、吸収、漏れの量が変わって、反応度変化を生じ、出力を変化させる。状態量の単位変化に対する反応度変化を反応度係数といい、燃料温度係数、減速材温度係数、ボイド係数、出力係数などがある。反応度係数が正となるか負となるかは、炉心の状態、変化する状態量の種類、その大きさなどに依存する。

原子炉の安全設計では出力上昇に対して、原子炉が暴走せずに、安定した状態を維持できるように、出力係数を負にすることが重要である。

第8章 原子炉の反応度

8.1 はじめに

原子炉では、出力を制御するために反応度の調整を行なっている。誤って過大な正の反応度を加えてしまった場合、原子炉の出力が急激に上昇する、いわゆる（核的な）暴走状態となる。このような例として、第7章でアメリカのSL-1事故を紹介した。

原子炉を安全に運転制御するためには、想定外の大きな反応度を加えないことは勿論だが、原子炉自身が反応度を抑制する方向に働くようすることが有効である。すなわち、正の反応度が加えられ、出力や温度が上昇したときに、これを抑制する**負の反応度効果** (negative reactivity feedback effect (負の反応度フィードバック効果ともいう)) が働くように、原子炉を設計するのである。

本章では、このような原子炉の安全設計のために必要となる各種の反応度効果について述べる。なお、燃焼による反応度変化については、第9章において取り扱う。

8.2 原子炉の出力変動と反応度の変化

原子炉の出力変化などにより炉心の温度などのパラメータが変化したときの反応度に与える影響について考えてみよう。出力変化に伴い変化する代表的なパラメータとして燃料温度、減速材温度やボイド率があるが、これらの変化は、媒質（燃料や減速材）の密度、体積、そして反応断面積という、より基礎的な量の変化の組み合わせにより表現できる。ここでは、密度変化、体積変化、反応断面積の変化が反応度に及ぼす影響について説明する。

8.2.1 密度変化の影響

温度上昇などにより、媒質の密度が低下した場合、中性子が媒質中の原子核と衝突する割合が低下する。その結果、①中性子が体系外に漏れる割合が増加する（負の反応度効果）。また、媒質による中性子の散乱反応が減少し、②中性子の減速が起りにくくなる（一般に、負の効果）。媒質中に中性子吸収物質が含まれている場合は、③吸収反応が減少する（正の効果）。媒質中に核分裂性物質が含まれる場合には、④核分裂反応が減少する（負の効果）。

密度変化が起こった場合、これら①～④の効果の大小関係により、反応度効果が負に働くか、正となるかが決まる。

8.2.2 体積変化の影響

前項の密度変化に伴い体系の体積が変化する場合には、これによる反応度変化も考慮する必要がある。炉心体積の増加は、中性子の体系からの漏れを減少させることとなる。ただし、通常の原子炉は大型であり中性子の漏れが少なく、また周囲に反射体があるため、この影響は極めて小さい。中性子の漏れが大きな小型の裸炉心（反射体の無い炉心）では、体積変化の影響が大きくなる。

この他に、温度変化が大きい原子炉の場合には、炉心の構造材が体積変化（膨張）することによる反応度変化が生じることとなる。このような効果は、高速炉の設計において考慮されている。

8.2.3 反応断面積変化の影響

反応断面積の変化としては、共鳴吸収の実効断面積の変化がある^(注8.1)。共鳴吸収は、共鳴ピークのエネルギー近傍の狭いエネルギー範囲の中性子について生じる。温度の上昇に伴い、共鳴吸収する原子核の熱振動が激しくなり、その結果、共鳴吸収を生じるエネルギーの幅が広がり、共鳴吸収が起りやすくなる（図8.1参照）。これを**ドップラー効果** (Doppler effect) と呼ぶ^(注8.2)。

なお、これらの効果は、変化が炉心内のどの位置において発生するかによっても変わる。たとえば、減速材密度の減少が炉心中央領域で生じた場合と炉心端部で生じた場合とでは、反応度に与える影響が異なってくる。また、温度等のパラメータの変化も炉心内で一様ではなく、ある分布をもっている。反応度の変化を評価する際には、これら両者の空間依存性を考慮しなくてはならない。

注8.1: 4.4節で述べたように、原子炉の解析では、中性子のエネルギーをグループ化して取り扱う多群近似を用いる。多群近似を適用する際には、中性子束を重みとして断面積をエネルギー平均する。この際、共鳴吸収があるエネルギー領域では、6.4.2節で説明した中性子束の落ち込み（エネルギー的な自己遮蔽効果および空間的な自己遮蔽効果、図6.9参照）を考慮する必要がある。共鳴による中性子束の落ち込みを考慮して算出した多群断面積を実効断面積と呼ぶ。原子炉の解析では、共鳴領域の断面積として、必ず実効断面積を用いる必要がある。

注8.2: ドップラー効果により、共鳴吸収領域の断面積が変化する。その一例として、²³⁸Uの6.7eVにおける共鳴吸収断面積の温度変化を図8.1bに示す。温度が高くなるほど熱振動が大きくなり、共鳴吸収断面積のエネルギー幅が大きくなるが見て取れる。なお、詳細な説明は省くが、共鳴吸収断面積のエネルギー積分値、すなわち「山の下の面積」は、温度が変わっても一定である。これは、温度が高くなると「エネルギー幅は広がるがピークの高さは低くなる」ことを示している。つまり、ドップラー効果による共鳴吸収断面積の変化は「等面積変形」なのである。

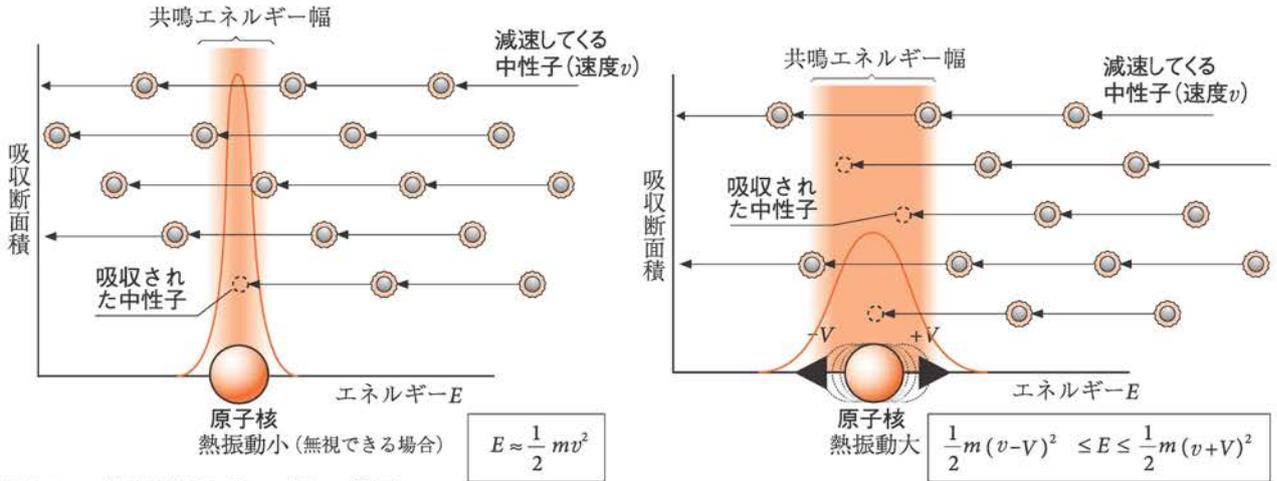


図8.1a 共鳴吸収のドップラー効果

原子核が±Vの速度で熱振動している場合、原子核からみた中性子の速さは $v \pm V$ となり、中性子のエネルギーは原子核の速さに対応した幅を持つ。これを中性子から見ると、原子核の共鳴エネルギー幅が広がったことになる(ドップラー効果)。

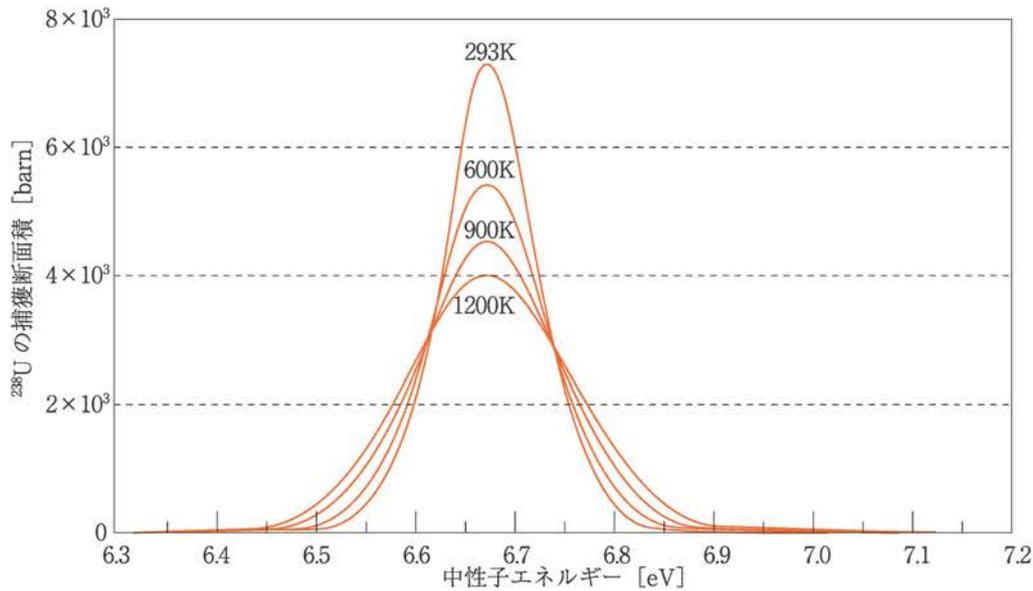


図8.1b ^{238}U の 6.7eV における共鳴捕獲断面積の温度依存性

8.3 反応度係数の定義

原子炉の運転パラメータである温度や出力が変化した場合の反応度 ρ への影響は、次式で定義される**反応度係数** (reactivity coefficient) により表される。

$$\text{反応度係数: } \alpha_x = \frac{\partial \rho}{\partial x} \dots \dots \dots (8.1)$$

ここで、 x は温度や出力などの着目しているパラメータである。実効増倍率を k とすると、反応度の定義($\rho = (k-1)/k$)により、以下のようにも書ける。

$$\alpha_x = \frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} \approx \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial x} \dots \dots \dots (8.2)$$

ここで、想定している体系では $k \approx 1$ であることを用いた。

実効増倍率を無限増倍率 k_∞ と中性子の漏れない確率 $P_F P_T$ の積として $k = k_\infty P_F P_T$ と表す(なお、第5章で述べたとおり、 P_F は高速中性子が漏れない確率、 P_T は熱中性子が漏れない確率である)と、

$$\alpha_x \approx \frac{1}{k_\infty} \frac{\partial k_\infty}{\partial x} + \frac{1}{P_F P_T} \frac{\partial P_F P_T}{\partial x} \dots \dots \dots (8.3)$$

化率を**ボイド係数** (void coefficient)、出力変化に伴う反応度の変化率を**出力係数** (reactivity power coefficient) などという。以下に、代表的な反応度係数を示す。

8.4.1 温度係数

温度係数は、対象としている媒質の温度が変化したときの単位温度 (1℃) 当りの反応度変化である。軽水炉のような燃料棒と減速材 (水) からなる非均質系では、燃料温度 T_f あるいは減速材温度 T_m をパラメータとした燃料温度係数および減速材温度係数が以下のように定義される。

$$\text{燃料温度係数: } \alpha_f^f = \frac{\partial \rho}{\partial T_f} \dots\dots\dots (8.11)$$

$$\text{減速材温度係数: } \alpha_T^m = \frac{\partial \rho}{\partial T_m} \dots\dots\dots (8.12)$$

(1) 燃料温度係数

燃料ペレットについては、温度変化による密度の変化は小さく、反応断面積の変化による反応度の変化が主となる。反応断面積の温度による変化は、上述のように共鳴吸収断面積のドップラー効果による実効断面積の変化であり、このときの温度係数は (8.4) 式の共鳴を逃れる確率 p の変化項のみで表され、**ドップラー係数** (Doppler coefficient) とも呼ばれる。すなわち次式となる。

$$\alpha_f^f = \frac{\partial \rho}{\partial T_f} = \frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial T_f} + \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T_f} + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial T_f} + \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial T_f} + \frac{1}{P_f P_T} \frac{\partial P_f P_T}{\partial T_f} \approx \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial T_f} \quad (8.13)$$

燃料温度が上昇すると、ドップラー効果により共鳴吸収が増加するため、共鳴を逃れる確率 p は減少する。従って、上記の温度係数は負の値となる。なお、軽水炉のように棒状燃料が軽水中に配置されているような非均質系では、燃料が発熱源であるため、燃料の温度変化は減速材に比べて大きくなる。また、過渡的な出力変化の場合には、初めに燃料温度が大きく変化する。このことから、ドップラー効果は、炉心過渡的な出力変動における出力抑制効果として重要な働きをしている。

(2) 減速材温度係数

減速材では通常の場合、共鳴吸収を有する核種は無く、吸収断面積はほぼ $1/v$ 特性を有している。また、散乱断面積は減速領域の中性子エネルギーに対してほぼ一定となっている。従って、高速～熱外エネルギー領域においては、微視的断面積の温度による変化は無視できると考えられ、減速材の密度変化による反応度変化が主となる。一方、熱領域においては、第6章において説明したように、熱振動による上方散乱が存在し、温度が高くなるとこの上方散乱が大きくなる。従って、減速材の密度変化とあわせ、温度の変化による微視的断面積の変化も考慮する必要がある。

減速材温度上昇により減速材密度が減少すると、中性子の漏えいが増え、また散乱反応が減少することにより、中性子スペクトルが高エネルギー側にシフトする (この現象を「スペクトルが硬化する」という)。また、熱領域において原子核の熱振動の影響で上方散乱が増えるため、やはり中性子スペクトルが硬化する原因となる。これらは、通常は負の反応度効果をもたらす。ただし、MOX (混合酸化物) 燃料のようなプルトニウムを含む燃料を使用している場合には、中性子スペクトルの硬化は核分裂を増加させ、正の反応度効果を生じる場合もある。また、燃料に比べて減速材の量が多い、いわゆる減速過剰になっている場合や減速材による中性子の吸収が無視できない場合にも、減速材密度の低下は正の反応度効果をもたらすこととなる。

以上は、非均質体系における温度係数であるが、溶液燃料体系のような均質系の場合には、燃料と減速材はほぼ同じ温度変化となり、密度変化もほぼ等しくなる。このような場合、非均質系のように**燃料温度係数** (fuel temperature coefficient) と**減速材温度係数** (moderator temperature coefficient) に分けることなく、単に温度係数として、両者の変化に伴う反応度変化を評価している。溶液燃料体系は、比較的小さな体系であることが多く、この場合には体積変化の影響が大きいことから、密度変化、断面積変化に加えて、体積変化も含めて評価しなくてはならないケースが多い。

積が変化することとなり、(8.16)式は適用できない。

たとえば、ウラン溶液を燃料とする原子炉では、密度減少による中性子スペクトルの硬化（高エネルギー側へのシフト）は負の反応度効果をもたらす、全体として負の反応度係数となるが、プルトニウム溶液の場合には、中性子スペクトルの硬化が核分裂反応を増加させることにより、全体として正の反応度効果を生じる場合がある。

ここで、(8.16)式により表される密度係数と温度係数の関係を考えてみる。無限増倍率が変化しないときの温度係数は、次式となる。

$$\begin{aligned} \alpha_T &= \frac{1}{P_f P_T} \frac{\partial P_f P_T}{\partial T} = \frac{1}{P_f P_T} \frac{\partial P_f P_T}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial T} = \alpha_N \frac{\partial N}{\partial T} \\ &= \frac{4}{3N} \frac{M^2 B^2}{1+M^2 B^2} \frac{\partial N}{\partial T} = \frac{4}{3} \left(\frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial T} \right) \frac{M^2 B^2}{1+M^2 B^2} \dots\dots\dots (8.17) \\ &= -\frac{4}{3} \left(\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} \right) \frac{M^2 B^2}{1+M^2 B^2} \end{aligned}$$

なお、 $\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T}$ は体積膨張率を表しており、最後の等式では、 $\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial T} = -\frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial T}$ である

(体積膨張率は、密度減少率に等しい)ことを用いた。この式により、一様な密度変化に伴う温度係数を評価することができる。また、(8.17)式において、体積膨張率が正であれば、他の量は全て正であるので、温度係数が負になることがわかる。

(3) 構造材の温度係数

高速炉のような炉心温度が高い原子炉では、構造体の膨張による反応度変化が無視できなくなる。高速増殖炉の設計においては、構造材温度係数として、燃料被ふく管やラッパ管、炉心支持板^(注8.3)の熱膨張による反応度変化を考慮している。

被ふく管およびラッパ管については、軸方向への膨張は構造材密度の減少となり、構造材による中性子の吸収が減少するため、正の反応度効果が生じると考えられる。また、径方向の膨張により、冷却材流路断面積が小さくなり、冷却材を減少させることにより中性子スペクトルが硬化して、核分裂反応が増えることから、これも正の反応度効果になるといえる^(注8.4)。

炉心支持板では、径方向への膨張は炉心体積を大きくし、中性子の漏れる確率を減少させることにより、正の反応度効果があると考えられるが、一方、燃料同士の間隔が大きくなり、冷却材の割合が増えるため、燃料割合の減少と中性子スペクトルの軟化による負の反応度効果も考えられる。炉心寸法が大きな炉では、炉心体積の変化による効果が小さくなるので、炉心支持板の温度係数は負になるといえる。

(4) 温度係数の測定例

温度係数の測定例として、軽水臨界実験装置TCAで行なわれた実験¹⁾について紹介する。TCAは、軽水炉の炉心部を模擬できる臨界実験装置であり、軽水中に低濃縮ウランのUO₂燃料棒あるいはPuO₂-UO₂混合酸化物(MOX)燃料棒を格子状に配列して炉心を構成する(図8.2、8.3参照)。

温度係数の測定実験では、軽水の温度を室温から最高約80℃まで変化させたときの反応度変化を測定している。実験では、炉心全体が一定温度になるようにしており、燃料棒温度も変化しているが、測定範囲におけるドップラー効果は小さく(全体の1割以下)、この実験では減速材温度係数を測定しているといえる。MOX燃料を用いた炉心(MOX炉心)の測定結果を図8.4に示す。

図8.4は、測定データを温度の2次式にフィッティングした結果を用いて描いており、水温20℃を基準とし、そこからの温度変化に対する反応度の変化を示している。また、測定は燃料と減速材(軽水)の体積比(減速材/燃料)を変えた4種類の炉心について行なっている。このうちの2つの炉心は、やや減速材が少ない炉心(減速不足の炉心)であり、残りの2つは減速材が多い炉心(過剰減速の炉心)である^(注8.5)。

この結果(図8.4)を見ると、減速不足の炉心(2.42Puと2.98Pu)では、温度の上昇に伴い反応度が減少しており、温度係数が負となっているが、過剰減速の炉心(4.24Puと5.55Pu)では、温度上昇とともに反応度が増加しており、正の温度係数となることがわかる。

注8.3: ラッパ管は高速炉の燃料集合体を取り囲む鞘管である(図10.23)。また、炉心支持板は燃料集合体を配列し支持する構造物であり、ラッパ管下部に取り付けられたノズルを支持板に挿入することにより、支持している。

注8.4: 軽水炉など、中性子を減速して使用する熱中性子炉では、中性子スペクトルが硬化(高エネルギー側にシフト)すると、核分裂反応は減少する。これは、低エネルギー領域では、エネルギーが高くなるとともに核分裂断面積が小さくなることによる。一方、高速炉においては、主として燃料として使用される²³⁹Puの核分裂断面積が高エネルギー領域(>10keV)においてエネルギーとともに大きくなる傾向を示すことから、中性子スペクトルの硬化は熱中性子炉とは逆に核分裂反応を増大させる方向に働く。

注8.5: 減速材と燃料の体積比を変化させていくと、臨界となる燃料量(臨界量)も変化する。臨界量が最も少なくなるときの体積比の状態を「最適減速」といい、これより減速材が少ない状態を「減速不足」、多い状態を「過剰減速」とよぶ。

軽水減速材は、水素による中性子の吸収効果が比較的大きいため、減速材の多い炉心の場合、減速材中において中性子の減速効果よりも吸収効果が大きくなる。このような炉心で、温度上昇により減速材密度が低下すると、吸収効果の減少が効き、合計では正の反応度が加わることとなる。ここで示した例はMOX炉心の場合であるが、 UO_2 炉心でも基本的には同様の結果となる。

なお、中性子スペクトルの変化も生じているが、測定した炉心はいずれも十分に減速された炉心であり、また、少なくとも正の反応度効果を有している2つの炉心では、温度上昇後でも十分な減速効果があるため、中性子スペクトルの変化による反応度

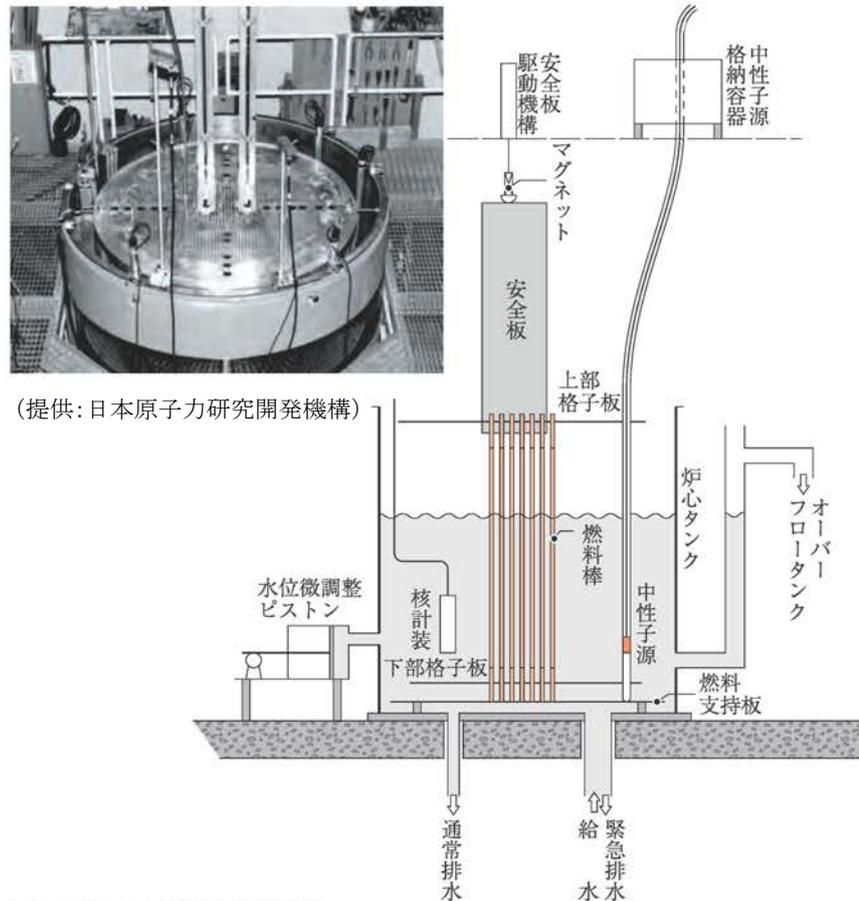


図8.2 TCAの外観および構造

TCAは直径約2m、高さ約2mの炉心タンク内に設置した、上下2枚の格子板に燃料棒を配置することにより炉心を構成する。制御棒は使用せず、減速材および反射材である軽水を炉心タンク下部から給排水し、水位を調整することにより反応度を制御する。

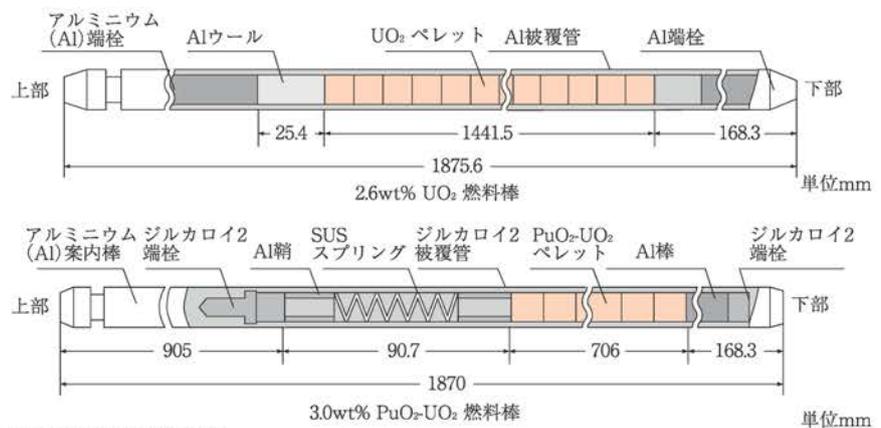


図8.3 TCAの燃料棒

上段：濃縮度2.6wt%の UO_2 の燃料棒、ペレット径12.5mm
 下段： PuO_2 富化度3.0wt%のMOX燃料棒、ペレット径10.65mm

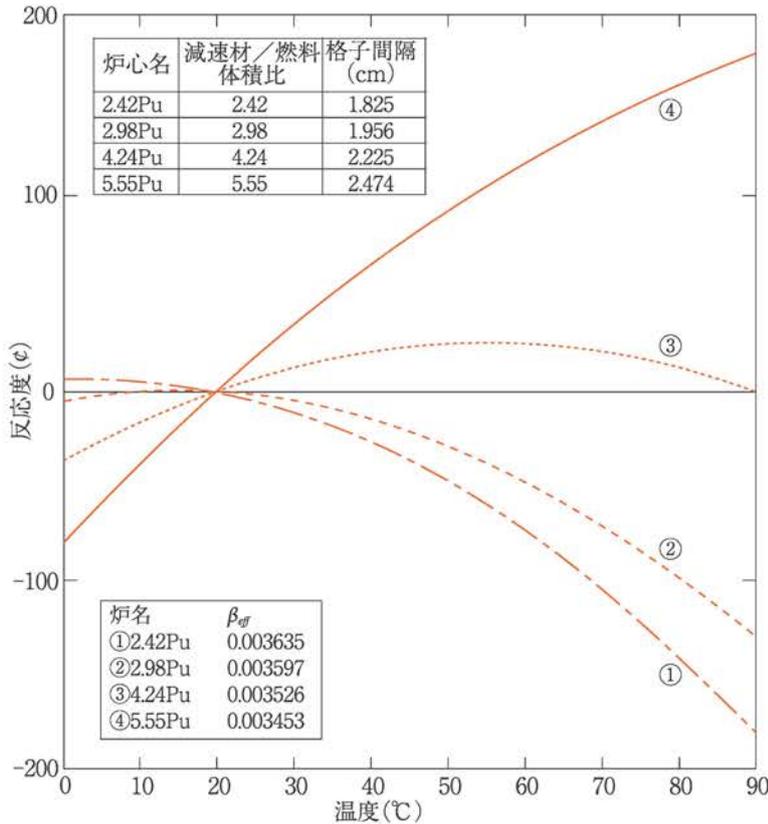


図8.4 MOX炉心の減速材温度係数¹⁾
 軽水炉臨界実験装置TCAにおける測定結果
 [富化度3.0wt%MOX (PuO₂-UO₂)燃料棒-軽水減速体系]
 水溫20°Cを基準とした反応度変化を測定した。縦軸の単位はセント(c) (第7.3節参照)。

変化は無視できると考えられる。

このように、同じ燃料棒を使用した炉心でも、減速材(軽水)が多いか少ないかで、温度係数の正負が逆になってしまう。軽水炉の設計では、温度係数が負となるように、減速不足の炉心構成としている(この点については、第10章であらためて議論する)。

このような温度係数の性質を、(8.4)式を用いて検討してみよう。ただし、体系が十分に大きいとして、中性子の漏れる確率は変化しないものとする。このとき、(8.4)式は次のようになる。

$$\alpha_T \approx \frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial T} + \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T} + \frac{1}{p} \frac{\partial p}{\partial T} + \frac{1}{\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial T} \dots\dots\dots (8.18)$$

ここで、中性子スペクトルの変化が小さいとすれば、高速核分裂因子 ϵ は変化しない。また、 η は燃料に吸収された中性子1個当りの核分裂で生成される中性子数であり、次式で定義されるが、

$$\eta = \frac{\nu \Sigma_{fF}}{\Sigma_{aF}} \dots\dots\dots (8.19)$$

熱中性子領域では燃料の吸収断面積 Σ_{aF} と核分裂断面積 Σ_{fF} の比は一定とみなせるので、中性子スペクトルの変化が小さければ、この値も変化しない。

共鳴を逃れる確率 p については、上述のように温度変化に対して負の反応度効果を有しているが、ここで考えている温度変化の範囲では、反応度効果は減速材温度係数に比べて小さく、 p の変化は無視できる。

熱中性子利用率 f は、全ての吸収反応に対する燃料の吸収反応の割合であり、次式で表される。

$$f = \frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}} \dots\dots\dots (8.20)$$

ここで、 Σ_{aM} は減速材の巨視的吸収断面積である。なお、この式では減速材と燃料以外の物質（構造材等）による吸収反応を無視している。温度上昇により減速材密度が低下すると（燃料密度の変化は無視できる）、分母の $\Sigma_{aM} = N_{aM}\sigma_{aM}$ が減少し、 f が増加する。この結果、正の温度効果が現れることとなる。これを (8.18)、(8.20) 式を用いて表すと、

$$\begin{aligned} \alpha_T &\approx \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial T} \approx \frac{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}(T)}{\Sigma_{aF}} \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\Sigma_{aF}}{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}(T)} \right) \\ &= \frac{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}(T)}{\Sigma_{aF}} \cdot \Sigma_{aF} \cdot \frac{\partial}{\partial T} (\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}(T))^{-1} \\ &= \frac{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}(T)}{\Sigma_{aF}} \cdot \Sigma_{aF} \cdot \left\{ -(\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}(T))^{-2} \right\} \frac{\partial \Sigma_{aM}(T)}{\partial T} \dots\dots\dots (8.21) \\ &= -\frac{1}{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}(T)} \frac{\partial \sigma_{aM} N_{aM}(T)}{\partial T} \\ &= -\frac{1}{\Sigma_{aF} + \Sigma_{aM}(T)} \sigma_{aM} \frac{\partial N_{aM}(T)}{\partial T} \end{aligned}$$

となる。ここで、最後の項の減速材密度 N_{aM} の温度変化は負の値となるので、温度係数は正の値となる。なお、この結論は、体系からの漏れの変化が無く、また中性子スペクトルも変化しないとの前提に基づくものであることに注意してほしい。例えば、減速不足の体系において温度上昇により減速材密度が低下する場合には中性子スペクトルの変化が無視できなくなり、この結論は適用できない。

8.4.2 ボイド係数

ボイド係数 (void coefficient) は、液相中にボイド（泡）が発生したときの単位ボイド（たとえば1%ボイド）当りの反応度変化であり、次式で定義される。

$$\alpha_V = \frac{\partial \rho}{\partial F_V} \dots\dots\dots (8.22)$$

ここで、 F_V はボイド率である。ボイドは非均質体系では、減速材中でのみ発生する。このときのボイド係数を減速材ボイド係数とも呼ぶ。ボイド率の変化は、密度変化であり、その反応度への影響は8.2.1節に述べたとおりである。

ナトリウム冷却の高速炉において、ナトリウム中にボイドが発生した場合、減速効果が減少し、中性子スペクトルが硬化する^(注8.6)ことにより、正の反応度効果が生じる。この効果と、中性子の体系からの漏れによる負の反応度効果の大小により、反応度係数の正負が決まる。なお、ナトリウムの高速中性子に対する吸収は小さく無視できる。大型炉の場合には中性子の漏れの効果が小さく、炉心中心部のナトリウムボイド係数は正となる。

ちなみに軽水炉では、上述のように減速不足の状態となっているため、ボイド率の増加（あるいはボイドの発生）は、減速効果を減少させ、負の反応度効果が生じることとなる。

8.4.3 出力係数

出力係数は、単位出力変化当りの反応度変化である。出力変化は、温度変化やボイド率変化を生じるが、出力係数はこれら諸量の変化を全て反映したものとなる。なお、出力変化に伴う、温度やボイド率変化は空間分布を有しており、また、各反応度係数も位置により変化するので、出力係数は以下のように炉心全体について空間的に積分し、平均した値となる。

$$\alpha_P = \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{V_{CORE}} \int \left(\frac{\partial T(\mathbf{r})}{\partial P} \frac{\partial \rho}{\partial T(\mathbf{r})} + \frac{\partial V(\mathbf{r})}{\partial P} \frac{\partial \rho}{\partial V(\mathbf{r})} + \dots \right) d\mathbf{x} \dots\dots\dots (8.23)$$

ここで、 V_{CORE} は炉心の体積、積分範囲は炉心領域全体とする。

注8.6：高速炉では、もともと中性子スペクトルは高速エネルギーに偏ったものとなっているが、それがさらに高エネルギー側にシフト（硬化）することとなる。

8.5 その他の反応度変化

これまでは原子炉出力の変化に伴う反応度効果（反応度フィードバック）について考えてきたが、この他に、燃料や構造材の移動、出し入れなども、原子炉に反応度変化を与える。原子炉の運転中に、炉心に「もの」を出し入れすることは、発電用原子炉では考えにくい、研究用原子炉では、照射用の試料の出し入れが頻繁に行われている。また、停止中であれば、燃料の配置変更（シャフリング）などによる「もの」の出し入れが行なわれる。あるいは、何らかの要因により、炉心内の燃料や構造材の位置が変化する可能性もある。

これらの変化による反応度効果についても、これまでと同様に (8.3) 式や (8.4) 式の各項の変化を評価することにより、その特性を把握することが出来る。以下では、やや特殊な例ではあるが、軽水減速炉心から燃料棒1本を出し入れしたときの反応度効果と裸の炉心に制御棒を出し入れしたときの反応度効果の測定例について取り上げる。

8.5.1 燃料棒の反応度効果

燃料棒の反応度効果の測定例として、上述の軽水臨界実験装置TCAにおける測定結果²⁾を紹介する。この測定は、低濃縮ウランのUO₂燃料棒を軽水中に配列した炉心において行われた。図8.5のグラフ内に示す炉心構成図のように、燃料棒17本×17本を正方格子状に配列した炉心の燃料棒1本を抜き差ししたときの反応度変化を測定している。燃料棒を抜いた部分は軽水で満たされるので、この測定では、「燃料」と「軽水」を置き換えたときの反応度（置換反応度）を求めていることとなる。

実験では、炉心構成図のA～Eで示した位置について測定を行った。炉心は十分厚い軽水反射体で囲まれており、図中の右端の位置は、反射体中における置換反応度となり、この場合には燃料棒本数が1本多くなっている（17本×17本+1本）。なお、炉心の減速材対燃料体積比は1.83であり、これはやや減速不足の状態である。

測定結果を、図8.5に示す。グラフの横軸は炉心中心からの距離であり、縦軸は「軽水」から「燃料」へ置換したときの反応度変化である。中心から3番目の測定位置までは負の反応度変化となっているが、これは測定位置の燃料棒をあらかじめ抜いて置いた炉心に、燃料棒を挿入したときの反応度変化が負になったということの意味している。

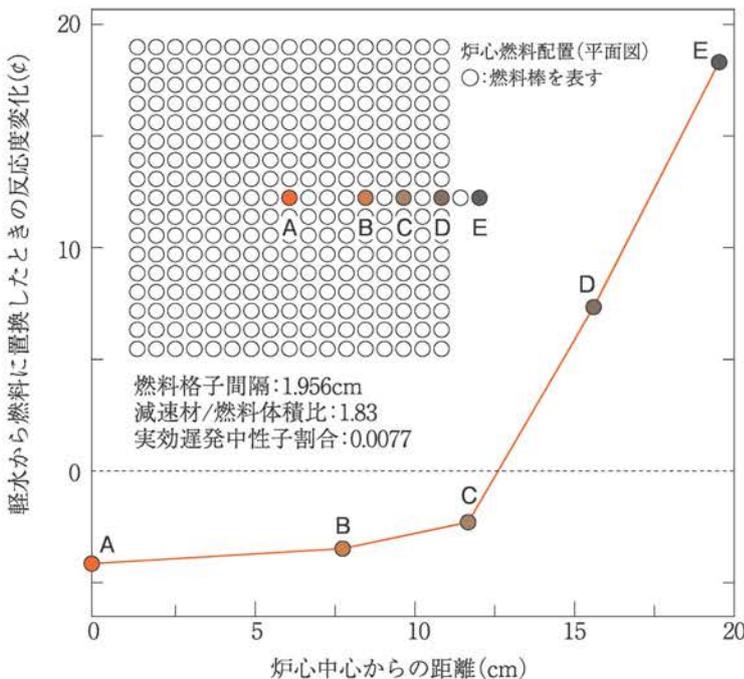


図8.5 燃料棒の反応度効果²⁾
 軽水臨界実験装置TCAにおける測定結果
 [濃縮度2.6wt% UO₂燃料棒-軽水減速・反射体系]
 図中の黒丸の位置(A～E)における軽水を燃料棒に置き換えたときの反応度を測定。

直感的には、炉心に燃料棒を1本追加した訳だから、正の反応度変化が生じるように思えるが、燃料を抜いてあった領域では、減速材が多く十分な減速が行なわれていたが、そこに燃料棒を追加して減速不足となったため、負の反応度効果が生じたのである。この効果が、燃料の増加による正の反応度効果を上回っており、負の反応度変化となった。

これが炉心の境界や反射体領域になると、図に示すように正の反応度効果に反転する。炉心境界や反射体領域では、周囲に軽水が十分にあるため減速材の排除による負の効果小さくなる一方、燃料の増加により、炉心のサイズが大きくなり、中性子の漏れる割合が減少する効果が大きくなるためである。

8.5.2 制御棒の反応度効果

次に、**制御棒の反応度効果** (control rod worth, reactivity effect of control rod) の測定例として、過渡臨界実験装置TRACYでの測定³⁾を取り上げる。TRACYは、JCO臨界事故のような溶液燃料体系の臨界事故現象を模擬した実験を行う装置であり、燃料としてウラン濃縮度10wt%の硝酸ウラニル水溶液を使用し、直径50cmの炉心タンクに溶液を給液することにより、臨界および超臨界状態としている。

測定を行なった制御棒は、炉心タンク中心の制御棒案内管の内部を上下に駆動できるものである。案内管内部には溶液は存在せず、制御棒を引き抜いた状態では、管内部は空(ボイド)となっている。

図8.6に、TRACY炉心の概念図と制御棒反応度効果の測定結果(グラフ)を示す。グラフの横軸は制御棒位置を示しており、0mmのときに制御棒の下部先端が炉心タンク底面の高さにあることとなる。測定時の炉心高さ(溶液の液位)は約46cmであり、これは制御棒を上限まで引き抜いたときに臨界となる高さ(液位)である。

制御棒が完全に挿入された状態(-100mm)では、制御棒反応度は約-2.8ドル(Dollar)(\$)については、第7.3節参照)であり、制御棒を引き抜くにつれて、負の反応度が小さくなっていく。炉心中心部近傍(200~300mm)において反応度変化(グラフの傾き)が最も大きくなり、炉心上端に近づくにつれて、反応度変化は小さくなる。

通常は、炉心上端部近傍で制御棒反応度は単調にゼロに漸近していくが、この測定では約400mm以上の範囲で、僅かではあるが正の反応度が測定されている。これは制御棒を完全に引き抜いた状態で臨界となっている炉心に、制御棒を挿入するために上から炉心へ近づけていくと正の反応度が加わることを意味している。

TRACYのような反射体のない、いわゆる裸の原子炉に外部から何らかの物質(この場合、制御棒)が近づくと、炉から漏れ出した中性子の一部が、その物質により散乱されて、炉心に戻る(反射される)割合が増加する。この結果、正の反応度効果が生じることとなる^(注8.7)。

TRACYの制御棒は、中性子吸収体として B_4C を使用しているが、どんなに吸収断

注8.7: TRACYの制御棒は、臨界事故を模擬するための反応度投入に使用される。原子炉停止用としては、別途、安全棒3本が設置されている。

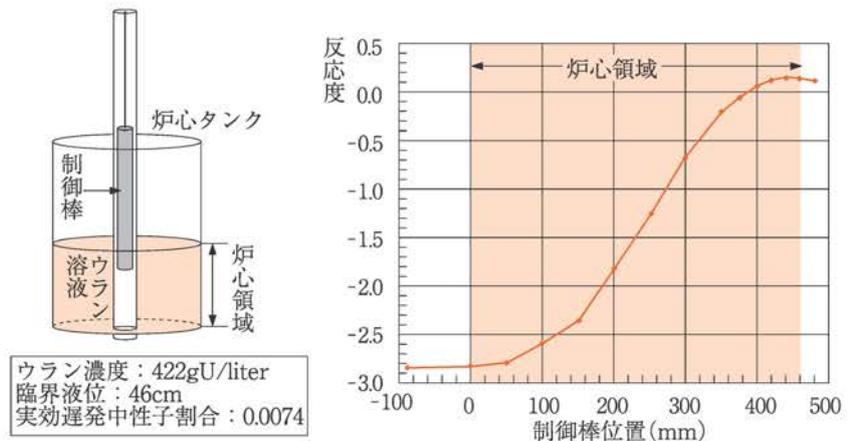


図8.6 制御棒の反応度効果³⁾

過渡臨界実験装置TRACYにおける測定結果
 [濃縮度10wt%ウランの硝酸ウラニル水溶液体系]
 直径50cmの円筒容器中にウラン溶液を高さ約46cmまで入れて臨界とした体系。容器中心の制御棒案内管中を制御棒(B,C)が移動したときの反応度を測定した。

面積が大きな物質でも、中性子を完全に吸収する物質（光の場合にならって、完全黒体という）は存在せず、中性子の一部は散乱されることとなる。このため、裸の原子炉のような中性子の漏れが非常に多い状態で臨界となる原子炉の近傍にあるものは、たとえそれが強い吸収体であっても、反射体として作用することに注意しなくてはいけない。なお、人間の体は、多くが水分であり、非常に良い反射体となりうる。過去にも、人が近づいたことにより未臨界であった体系が臨界超過となった事例がある（第5.9節参照）。

8.6 原子炉の固有の安全性

本章の冒頭で述べたように、通常の原子炉では誤操作などにより予想外の出力上昇が生じた場合に、出力を抑制するために負の反応度が加わるように設計している。具体的には、温度係数やボイド係数が負になるように設計している。これにより、原子炉の出力上昇がある範囲に抑えられることとなる。このような原子炉を**固有の安全性** (inherent safety) を有しているという。

出力上昇に対して、負の反応度フィードバックを有しているということは、逆に出力が減少するような場合は、それを抑えるために正の反応度が加わることとなる。このように、出力がある一定レベルを維持するような特性を有していることを、自己制御性があるという。原子炉は、安全上期待すべき状態が維持されるような自己制御性を有していることが望ましい。

旧ソ連で1986年に発生したチェルノブイリ原子力発電所の事故では、次節に述べるように、低出力運転時にはボイド係数が正となり、また、条件によっては制御棒挿入時に正の反応度が加わるようになっており、固有の安全性をもつ原子炉ではなかった。このことが大きな事故を引き起こした要因の一つとなっている。

8.7 チェルノブイリ原子力発電所事故と反応度効果

8.7.1 事故の概要

1986年4月25日、チェルノブイリ原子力発電所4号機（定格熱出力3,200MW）は定期点検のため停止する予定になっていた。そしてこの停止に合わせて、かねてから懸案であったある試験をすることになっていた。この原子炉では、常用の電源が失われた際に、原子炉に備え付けたECCS（非常用炉心冷却装置）の一部のポンプが、非常用ディーゼル発電機により起動される設計となっておらず、惰性で回転を続けている発電機からの電力を利用する設計となっていた。そこで、設計どおりにポンプが起動するかを試験して実証しようとした。

試験の方法は原子炉の熱出力が1,000MWを少し下回ったところで原子炉冷却材ポンプを発電機の負荷としてつなぎ、発電機を回すタービンへの蒸気を遮断して発電機が惰性回転で起こす電力が使えるかどうか確かめようとするものであった。実は、これより以前に二度その試験を行ったが、発電機の電圧が下がるのが速すぎてECCSがうまく作動しなかった。それで、発電機の励磁装置を改良し、今度こそうまく作動するだろうと期待して計画されたものであった。待ちに待った試験だったのである。

初めに断っておくが、この試験計画そのものが原子炉物理の特性試験とは直接関係ない電氣的な系統の試験であり、原子炉物理の専門家、設計部署、国家原子力監視委員会からまったく合意が得られておらず、電気技師長の指揮で行われたものであった。そしてこの3度目の正直を狙い、何としても成功させたいという思いが想定をはるかに越えた 未曾有の事故を発生させた遠因であった。本試験に原子炉物理の専門家が参加していなかったことが悔やまれる（図8.7）。

記録によると、25日午前1時ころから原子炉の停止操作に入り、徐々に出力を下げていき、午前11時頃には出力50%くらいになっていた。このまま順調に下げている、計画どおりに試験すれば、目的が果たせられたかどうかは別として、あるいは事故に至らなかったかもしれない。しかし運が悪いことに、このときの給電所から電力が不足しそうなので給電を続行するようとの指令が入った。それでしばらく電気出力50%で送電を続けなければならなかった。

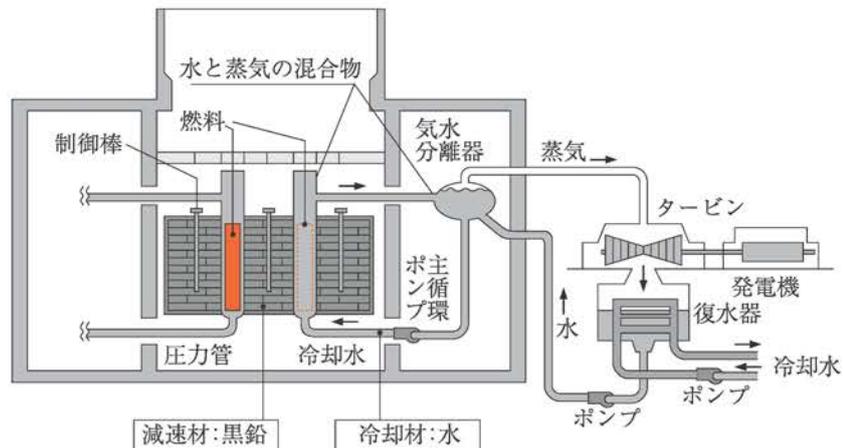


図8.7 チェルノブイリ原子力発電所4号機概念図

ところで、チェルノブイリ事故の全貌を語るには、原子炉の熱流動特性に関する事柄に触れる必要がある。しかし、本書は原子炉物理学の教科書であるから、熱流動に関する事柄は最小限に止め、詳しくは他書にゆずり、今は原子炉物理の側面に限定して説明する。

舞い込んできた給電指令はなかなか解除されず、午後11時頃になってやっと解除された。そこで出力を下げる操作が再開されたが、制御系の操作を間違えたため、目標とした1,000~700MWをずっと下回る30MWまで出力が下がってしまった。

ここで燃料の燃焼に伴う特有の事項について簡単に説明する。それは、長時間運転されてきた原子炉の燃料中には多くの核分裂生成物がたまるが、それらの中に¹³⁵Xe (キセノン135) という中性子を非常に吸収する核種が生まれるということである(9.3節参照)。¹³⁵Xeがたまると、これが中性子を無駄食いしウランの核分裂を阻害するため、原子炉の出力を30MWから再び上げるには制御棒を余分に引き抜かねばならない。読者は図9.6を見て欲しい。原子炉を停止、あるいは出力を下げたとき、¹³⁵Xeがたまるピークは原子炉出力低下後およそ12時間後あたりであると見て取れる。

チェルノブイリ4号機は、出力を下げてからまさにちょうどそのピークの時間帯にさしかかっていた。運転員は何とかがして目標の熱出力(700MW)まで回復させようとして大部分の制御棒を引き抜いたが、たかだか200MWまでしか回復させることができなかった。8.7.2節に述べるように、このような低出力運転状態では、この型の原子炉は出力係数が正となり、不安定で危険な状態となる。

また、チェルノブイリ型炉では制御棒が211本あるが、緊急停止の場合に備えて制御棒30本(主任技術者が特に認めた場合は15本)に相当する量は、「反応度操作余裕」(8.7.3節参照)として、炉心にある程度挿入しておくことが運転規則で定められていた。

上に述べたように、例外的には15本までは許されるが、いかなる場合でもそれを下まわって運転してはならないことになっていた。ところが、このときは出力を回復しようとして、結局6~8本相当の制御棒しか炉心内に残されていなかった。この行為は明らかに規則違反である。しかし、「反応度操作余裕」が規定値を下回っていたことは事故後に判明したことであり、運転員は運転中にこれを容易に知ることができるようにはなっていなかった。

事故後の調査により、「反応度操作余裕」が少なくなると、制御棒挿入初期に正の反応度が炉心に添加されるポジティブスクラム(8.7.3節参照)の値が大きくなり、また正のボイド反応度係数も大きくなることが明らかとなり、この「反応度操作余裕」が安全上非常に重要な量であることがわかってきた。しかし、当時の運転員はそのような意識は無く、単に空間的な出力の不均衡を制御するパラメータであるとの認識しか持っていなかった。このため、この規則違反を単に運転員の責任として、一概に責めることはできない。

4号機は上述のように、非常に不安定で危険な状態となっていた。それでも彼らは計画の試験を続行した。なぜ思い止まらなかったのか。後日の聴取によると、それは前記したように、この日の試験を逃すといつできるのかわからず、何としても実施した

かったからであった。

記録では午前1時23分4秒に試験が開始されたとある。正の出力係数を持つ不安定な炉の出力が上昇し、これを止めようとしてスクラムボタンを押したことにより、さらに正の反応度が加わり、23分41秒に原子炉は暴走を始め破壊に突き進んでいった。

大きな反応度が投入された結果、燃料が高温になり熱除去が間に合わなくなった。このため圧力管内で急激な蒸気圧上昇がおこり、この力で炉の上蓋になっている生体遮へい盤が持ち上がり横倒しとなり圧力管と気水分離器をむすぶ配管をことごとく引きちぎった。

後日の聴取によると、運転員は2回の爆発音を聞いたという。1回目の爆発音は生体遮へい盤と配管が破壊し蒸気が突出したときの音であろうとの説が有力である。燃料棒の一部が溶け蒸気爆発があったとされる。後の現場調査でちぎれた配管の中に燃料片が見つかったからである。燃料が壊れ、その破片の一部が冷却水の上昇で配管に運ばれ、直後に爆発で配管がちぎられたと考えられた。

後の爆発音は水素爆発との説がある。燃料の被ふく管の材料であるジルカロイ（ジルコニウムの合金）は高温になると水の酸素と結合し、水素を発生させる。この水素が爆発したという考え方である。なお、これらのことは他書にゆずり、ここではこれ以上触れない。

ただ、この爆発があたかもウラン燃料が小型の原子爆弾となり爆発したかのごとく説明されている場合があるが、これは誤りでありことを指摘しておきたい。すなわち、原子爆弾は核分裂から発生する核的なエネルギーを直接用いているが、ここでの爆発は高温になって溶けた燃料により冷却水が急激に水蒸気になり、蒸気爆発もしくは水素爆発を起こした、機械的あるいは化学的なエネルギーによるものであり、エネルギーの大きさ・性質ともに全く異なっている。

事故は、原子炉をことごとく破壊し、元々格納容器のようなものは備わっていなかったこともあり、炉心が空中に露出し、大量の放射性物質を環境に放出した。高温になった黒鉛が燃え出したことにより上昇気流が発生し、空中への放射性物質の放出を助長した。

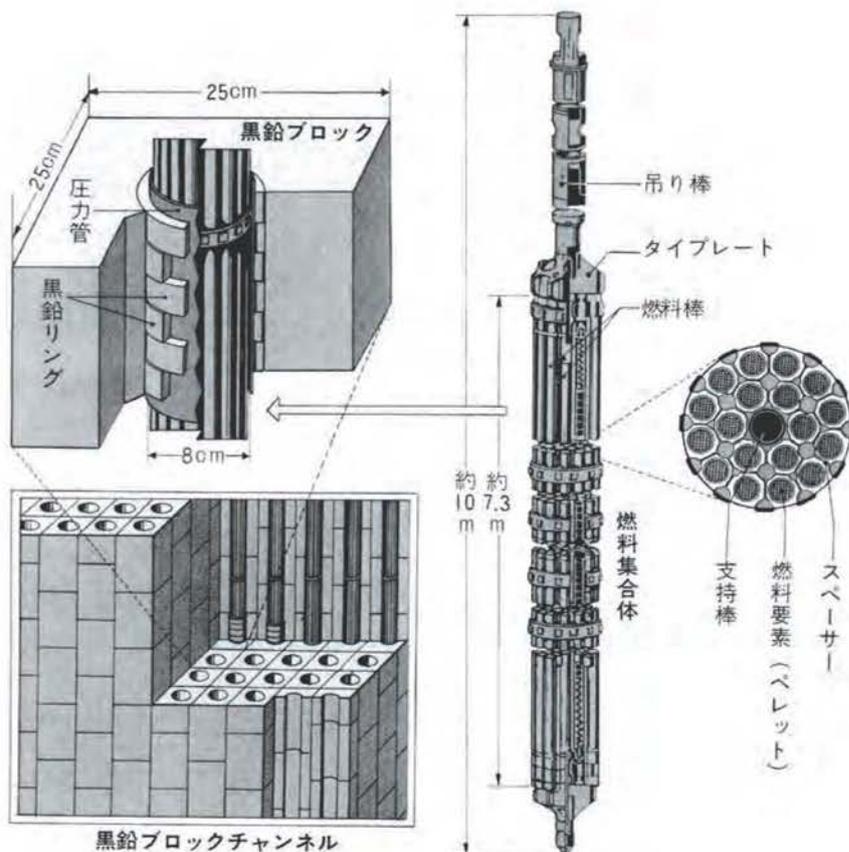


図8.8 圧力管周りの概念図

この事故により、大量の放射性物質が国境を越えて拡散した。希ガス核種については炉内存在量のほぼ100%が、その他の核種についても相当の量が放出されたと推定され、周辺住民や環境に大きな影響を与え、31名の死者（火傷等で死亡した3名を含む。平成8年（1996年）OECD/NEAレポート）と多数の被ばく者を出した。その影響はウクライナおよびその近隣諸国で現在も続いている。（以上、文献5）より一部改訂して引用。）

この事故を引き起こした要因として、ボイド係数が正であり、特に低出力状態では出力係数も正であったこと、および、制御棒挿入時に正の反応度が加わる設計であったことが挙げられている。以下に、これらの反応度効果について述べる。

8.7.2 ボイド反応度効果

4号機は、上述のように黒鉛減速・軽水冷却の炉心である（図8.8）。この炉におけるボイド係数を考えてみる。出力が上昇し、ボイド率が増加すると、軽水冷却材の密度が低下する。しかし、中性子の減速は黒鉛により行なわれるので、中性子スペクトルの変化はほとんど無い。

また、黒鉛減速炉は炉心寸法が大きいので、中性子の体系からの漏れが少なく、軽水密度減少による漏れの反応度効果は小さい。このため、ボイド率の増加は、吸収体である軽水（水素）密度が減少することによる正の反応度効果をもたらす。すなわち、ボイド係数は正の値となるのである。

では、出力変化に対する反応度の変化、すなわち出力係数はどうなるのであろうか。出力が上昇した場合、ボイド率の増加の他に温度の上昇も生じる。燃料温度の上昇は、先に述べたドップラー効果（8.2.3節参照）による共鳴吸収の増加により負の反応度を生じる。出力係数が正となるか負となるかは、これらボイド効果とドップラー効果の大小により決まる。

この原子炉では、ある程度以上の出力では、負のドップラー効果のほうが大きく、出力係数は負となっていた。しかし、ボイドが発生し始めるような低い出力状態では、出力増加に対するボイド率の増加割合が大きく、ボイド効果による正の反応度が、ドップラー効果を上回ってしまい、出力係数が正となっていた。このため、低出力状態では、非常に不安定な原子炉であり、そのような状態では運転すべきでなかった。しかしながら、4号機では実験開始時の出力は、当初計画の値であった70万kW（700MW）を大きく下回る20万kW（200MW）まで低下していた。なお、20万kWで

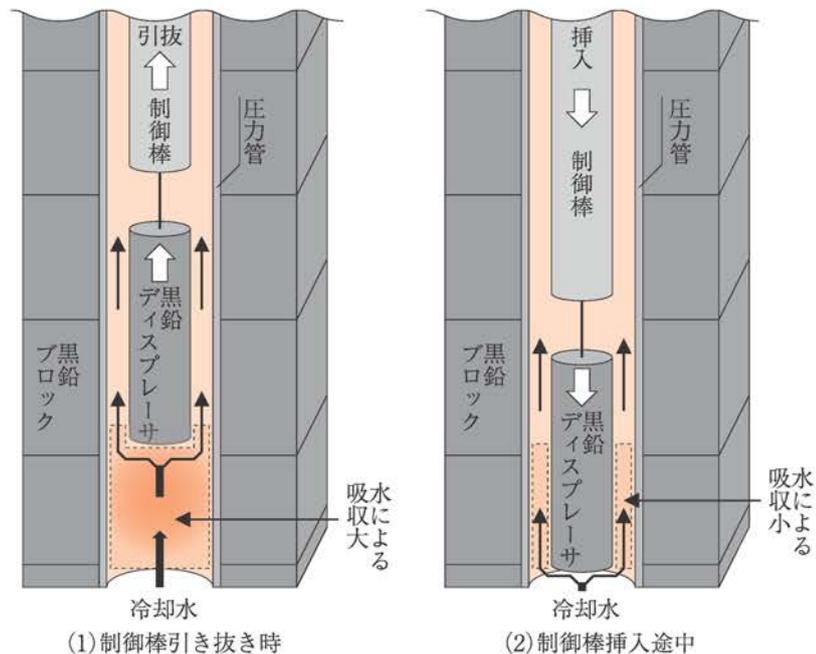


図8.9 ポジティブスクラムの発生原理

制御棒を挿入すると、制御棒下端に取付けられた黒鉛ディスプレーサが圧力管中の軽水を排除し、中性子の吸収が少なくなり、正の反応度が加わる（ポジティブスクラム）

の運転は規則違反ではないが、本来は禁止事項とすべきであったことおよび「運転員がその場で試験条件を変更するようなことはセーフティ・カルチャーの欠如を示すものである。」との厳しい批判がIAEAの調査報告に示されている^{6,7)}。

8.7.3 制御棒挿入の反応度効果⁶⁾

4号機の制御棒下端には、ディスプレイサと呼ばれる棒状の黒鉛が取り付けられていた。これは、制御棒を引き抜いた後の水への中性子の吸収を少なくするためのものである。

しかし、図8.9に示すように、制御棒をある位置以上に引き抜くと、炉心の下部では黒鉛棒がなくなり、圧力管内は軽水冷却材で満たされることとなる。

このような状態から、制御棒を挿入しようとする、炉心下部については、黒鉛により軽水が排除されて、中性子の吸収が減少し、正の反応度が加わる可能性がある。

この反応度は、中性子束分布のピークを外れた領域では、あまり大きな効果とはならない。しかし、多数本の制御棒が引き抜かれていると、中性子束分布が炉心下部にピークを持つような形に歪み、その結果、大きな正の反応度が加わってしまう。

4号機では、制御棒によるスクラム機能を維持するために、決められた本数以上の制御棒をある程度炉心内に挿入しておかなくてはいけないこととなっていた。この炉心に残しておくべき制御棒の本数を「反応度操作余裕」といい、15本相当以上を残しておく決まりとなっていた。

しかし、事故当時は、一度3万kW (30MW) まで低下してしまった出力を上昇させるために多数の制御棒が上限まで引き抜かれた状態であり、「反応度操作余裕」は7本程度となっていた。

後の解析では、この状態で制御棒を挿入すると、0.5秒で約0.6\$の正の反応度が添加されることが示されている。このため、不安定な状態になった原子炉を緊急停止しようとしてスクラムボタンを押し、制御棒を挿入すると、挿入開始当初には逆に正の反応度が加わってしまうのである。このような、スクラムにより正の反応度が加わることを、ポジティブスクラムと呼ぶ。

ポジティブスクラムが、大事故の主要因であったかについては、これまで多くの議論がされているが、最近の研究⁸⁾によると、ポジティブスクラムが引き金となり出力上昇が起き、それによりボイド率が増加し、正の反応度フィードバック効果により出力暴走に至ったとされている。

チェルノブイリ原発事故は、事故直後には運転員の規則違反が主原因とされていた⁴⁾が、その後の調査により、明らかな規則違反は上述の「反応度操作余裕」のみであり、むしろ原子炉の設計上の問題および「安全文化」の欠如が主原因であるということが明らかとなった^{6,7)}。原子炉の安全確保には、設計、建設、運転の各段階における配慮が必要であるが、その中でも設計において、固有の安全性をもたせることが重要である。

8.8 まとめ

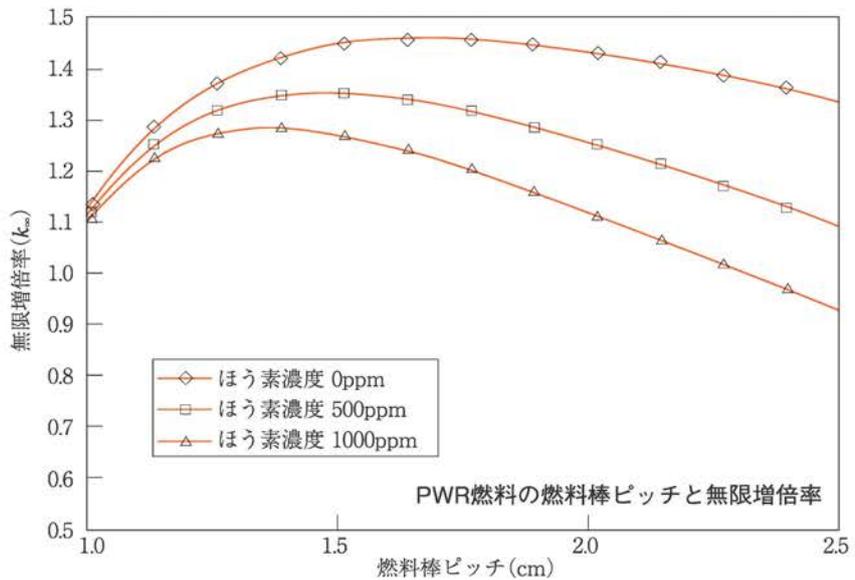
本章では、炉心の温度やボイド率などの状態量の変化が、中性子の生成、吸収、漏れの変化により、どのような反応度変化を生じるかを学んだ。なお、ここでは状態量は炉心内で一様に変化するとし、各種の反応度係数を検討したが、実際の原子炉では、状態量の空間分布が無視できないことから、8.4.3節で述べたように、状態量の空間効果を考慮した評価が必要となる。

《演習問題》

[1] 次のような軽水減速炉につき、密度効果による反応度の温度係数を求めよ。
 $M^2=3.5 \times 10^{-3} \text{m}^2$ 、 $B^2=1.0 \times 10^2 \text{m}^{-2}$
 ただし、水の体積膨張率は、 $2.1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ とする。
 (原子炉主任技術者問題を一部改訂)

[2] 下の図は、軽水減速の燃料棒 (PWR) の無限増倍率を、燃料棒ピッチおよび軽水中のほう素濃度をパラメータとして計算した結果である (図10.4を引用)。この図に関する以下の問いに答えよ。

- ① ほう素濃度1000ppmの場合、燃料棒ピッチが約1.4cmにおいて無限増倍率が最大となり、ピッチが小さくなくても大きくなっても無限増倍率は減少している。無限増倍率がこのように変化する理由を述べよ。
- ② ほう素濃度が減少するにつれて、無限増倍率が最大となる燃料棒ピッチが大きくなっている理由を述べよ。



[3] 図8.4に示したMOX炉心の減速材温度係数の測定結果のうち、炉心③4.24Puの結果を温度の2次式にフィッティングすることにより次式を得た。

$$\rho = 2.30 \cdot (T - T_0) - 0.021 \cdot (T^2 - T_0^2)$$

ここで ρ はセント単位の反応度 (図の縦軸) であり、 T 減速材温度 ($^\circ\text{C}$)、 T_0 は 20°C (基準温度) である。また、実効遅発中性子割合は 0.0035 とする。

- ① 次の各温度における減速材温度係数を求めよ。
 20°C 50°C 80°C
- ② 減速材温度係数がゼロとなる減速材温度を求めよ。また、この温度を境に減速材温度係数の符号 (正負) が変化するが、その理由を考察せよ。

[4] 次の反応度係数を有している研究用原子炉について、以下の問いに答えよ。ただし、ゼロ出力時の減速材および燃料温度は 20°C であるとし、出力5MW、運転時の減速材温度は 52°C 、燃料温度は 70°C とする。また、ボイドの発生は無いものとする。

減速材温度係数: $-1.0 \times 10^{-4} \text{dk/k}/^\circ\text{C}$

燃料温度係数: $-1.5 \times 10^{-6} \text{dk/k}/^\circ\text{C}$

- ① ゼロ出力から5MWまで出力を上昇させたときの反応度変化を求めよ。
- ② 単位出力 (1W) 当たりの反応度の変化、すなわち出力係数を求めよ。