

第 6 章 中性子の増倍と臨界

内容

第 6 章 中性子の増倍と臨界.....	109
6.1 中性子の増倍	111
6.1.1 中性子の生成・消滅と増倍率.....	112
6.1.2 無限増倍率	113
6.1.3 実効増倍率	114
6.2 未臨界・臨界・臨界超過.....	119
6.2.1 未臨界・臨界・臨界超過とは.....	119
6.2.2 外部中性子源が存在するときの未臨界・臨界.....	121

【この章のポイント】

- ・ 原子核の核分裂反応によって中性子は生成され、原子核に取り込まれる反応や体系外への漏れにより中性子は消滅する。
- ・ 核分裂反応により生成される中性子数と、原子核に取り込まれる反応や体系外への漏れにより消滅する中性子数のバランスにより、未臨界・臨界・臨界超過（超臨界）状態が決定される。
- ・ さらに、未臨界・臨界状態においては、外部中性子源の存在の有無により、原子炉の状態の時間変化が異なる。

運転中の原子炉では、核分裂連鎖反応を維持し、原子炉内の中性子数も常に一定となる臨界状態を保つことにより、一定の出力を維持するように制御されている。

一方で、運転中の原子炉を停止状態にするためには、出力を減少させる目的で、原子炉内を（時間とともに中性子数が減少していく）未臨界状態とする必要がある。未臨界状態を維持することで中性子数が減少し、最終的に核分裂連鎖反応が維持できなくなり、原子炉は停止状態へと向かう。

また、停止状態の原子炉を一定の出力状態にするためには、最初の核分裂連鎖反応を引き起こすための外部中性子源と呼ばれる「種火」を元として、原子炉を（時間とともに中性子数が増加していく）臨界超過状態と臨界状態に繰り返し変化させることで、少しずつ出力を上昇させていく。

さらに、種火により発生する中性子の存在の有無により、未臨界・臨界状態での中性子数の時間変化が異なる挙動を示す。

原子炉の安全性を確保するためにも、これらの現象を理解し原子炉の状態を見極めたうえで、適切に運転・制御を実施しなくてはならない。第6章では、その基礎となる原子炉の状態、つまり、原子炉の臨界状態と中性子の増倍の関係について、重点的に説明する。

6.1 中性子の増倍

【この節のポイント】

- ・ 原子炉では一般に、中性子は原子核の核分裂反応によって生成し、原子核に取り込まれる反応や体系外への漏れにより体系内から消滅する。この生成・消滅のバランスを表す指標を増倍率という。
- ・ 無限増倍率とは、消滅する中性子数について、中性子が原子核に取り込まれる反応のみを考慮したものである（体系外への漏れが無いような無限に広い体系内での反応を考えたものである）。
- ・ 実効増倍率とは、消滅する中性子数について、中性子が原子核に取り込まれる反応と体系外へ漏れ出る中性子を考慮したものである。

6.1.1 中性子の生成・消滅と増倍率

核分裂反応によって生成された中性子は高いエネルギーを持つ、いわゆる高速中性子である。原子炉（軽水炉）で主に核分裂反応を起こすのはウラン燃料中の U-235 であるが、U-235 は低いエネルギーを持つ熱中性子によって核分裂反応を起こしやすい。そのため、核分裂で生じた高速中性子のエネルギーを下げる（「減速させる」という）必要がある（高速中性子も一部は核分裂反応を引き起こすが、ここでは、核分裂の全てが熱中性子により引き起こされるものと仮定する）。軽水炉では（普通の）水である軽水を減速材としており、高速中性子は主に水に含まれる水素原子（H-1）と衝突することで、エネルギーの一部を水素原子（水分子）に受け渡ししながら徐々に減速し、やがて熱中性子になる。しかし、核分裂反応により生成された高速中性子全てが熱中性子になれるわけではなく、減速する過程で様々な核種と反応を起こすなどして消滅してしまう中性子が存在する。たとえば、ウラン燃料中の U-238 や、制御棒、PWR では減速材中のほう素といった中性子吸収材との捕獲反応により消滅する中性子が存在するし、そもそも原子炉内で原子核と反応することなく原子炉外（炉心周囲の水領域）へ漏れ出て消滅する中性子も存在する。つまり、核分裂により生成された中性子のうち、U-235 と核分裂反応することができる中性子はサバイバルゲームを勝ち抜いた選ばれし者なのである。第5章において、中性子の世代について簡単に述べたが（詳細は第7章で述べる）、このゲームは各世代で実施される。そして、ある世代のゲームを勝ち抜いた中性子が、次の世代のゲームの参加者である中性子を生み出すことができる。裏を返すと、ある世代のゲームの勝者が一人もいなければ（全ての高速中性子が減速過程で捕獲反応または原子炉外へ漏れ出ることにより消滅すれば）、次の世代のゲームの参加者を生み出すことができなくなり、ゲームそのものが打ち切りとなってしまう。

ある世代のゲーム参加者のうち、ゲーム勝者により生み出された次の世代のゲーム参加者と、ゲーム中に消滅してしまう参加者とのバランス、つまり、中性子の生成量と消滅量のバランスのことを**増倍率（multiplication factor）**¹と呼ぶ。中性子の生成量と消滅量がちょうど釣り合っていれば、増倍率は1となる。また、生成量が消滅量を上回っていれば増倍率は1より大きくなり、逆に消滅量が生成量を上回っていれば増倍率は1より小さくなる。ゲームで例えると、増倍率はある世代のゲーム参加者数と次の世代のゲーム参加者数の比で表される。次の世代の参加者が多ければ増倍率 > 1 、同じであれば増倍率 $= 1$ 、次の世代の参加者が少なければ増倍率 < 1 となる。仮に、ある世代のゲームの勝者が U-235 と核分裂反応を起こして次の世代のゲーム参加者を1人あたり2.5人生み出すとすると、ある世代のゲーム参加者全員のうち40%以上が最終的に勝ち残れば、増倍率は $2.5 \times 0.4 = 1$ 以上を確保できるのである（図6-1）。

さて、このサバイバルゲームには、脱落ルール（中性子の消滅方法）の違いにより2種類のゲームが存在する。当然、ルール（ゲーム）が異なれば参加者数に占める勝者数の割合も異なり、世代間の比（増倍率）も変わる。そこで、次項以降でこの2種類のゲームとそのル

¹ 「中性子増倍率」とする場合もあるが、ここでは「増倍率」と記述する。

ールについて説明する。

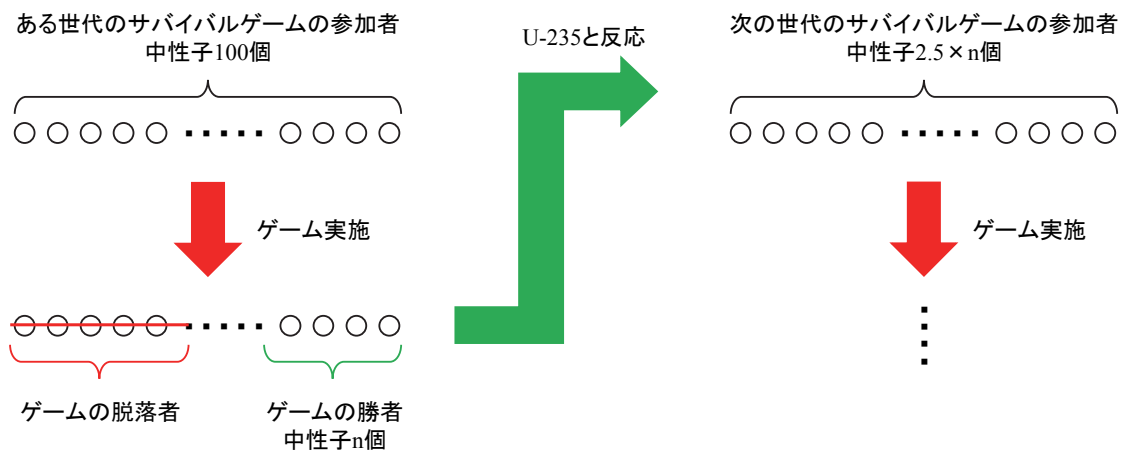


図 6-1 サバイバルゲームの概念図

6.1.2 無限増倍率

前項でも述べた 2 種類のサバイバルゲーム、つまり、増倍率のうちの一方は**無限増倍率 (infinite multiplication factor)** と呼ばれるものである。では、この無限増倍率なるサバイバルゲームのルールはどのようなものなのか。そもそも、このゲームの脱落方法（中性子の消滅の仕方）は大きく分けて 2 つある。一つが原子核に取り込まれる捕獲反応（増倍率を求める際に消滅の仕方でよく用いられるのは吸収反応であるが本章では捕獲反応を用いる。詳細はコラムで述べる）で、もう一つが原子核と反応せずに原子炉外へ漏れ出て行くものである。無限増倍率とは、原子炉外へ漏れ出る中性子が存在しないとしたものである。つまり、原子炉の「外」という概念の無い状況でのゲームであると言える。中性子を完全に反射する物質で囲まれた空間（無限に広い空間）内で中性子の生成・消滅のバランスを表しているものとも言えよう。サバイバルゲームで例えると、まったく出口の無い封鎖された空間（周囲を通り抜けることのできない大きな柵で囲まれたフィールドを想像すると分かりやすいかもしれない）でゲームを実施したものが無限増倍率である。端的に言うと、場外に出ることができず、場内での脱落ルール²のみを適用したサバイバルゲームが無限増倍率なのである。この無限増倍率の概念を示したものが、図 6-2 になる。

² ゲーム好きな読者なら、サバイバルゲームにおける場内脱落ルールと聞くと、脱落者の中には、中性子同士で干渉し合った結果、脱落した中性子（つまり、中性子によって脱落させられた中性子のこと）も含まれることを想像される読者もいるかもしれない。しかし、このゲームでは中性子同士の干渉は無く、フィールド内に仕掛けられた罠（U-238 や B-10 などの中性子を捕獲する核種）によって脱落することのみを考えればよい。つまり、罠から逃げながら最終的なゴール（U-235 との核分裂）までたどり着くのが、このサバイバルゲームである。

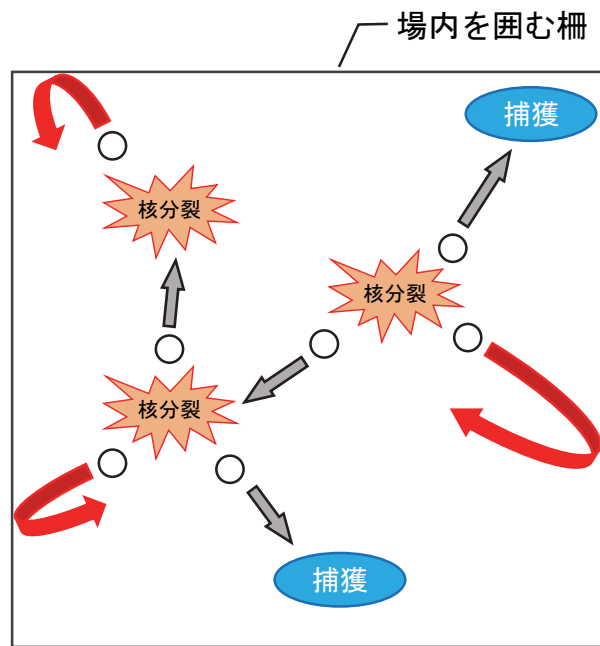


図 6-2 無限増倍率の概念

6.1.3 実効増倍率

2種類あるサバイバルゲーム（増倍率）のうちの一つが無効増倍率であるのに対し、残りのもう一つが本項で述べる**実効増倍率（effective multiplication factor）**と呼ばれるものである。両者でどのような違いがあるのだろうか。無限増倍率は消滅する中性子のうち、原子炉外へ漏れ出てしまう中性子が存在しないとしたものであった。一方、実効増倍率は、消滅する中性子に原子炉外への漏れを考慮したものである。中性子の漏れを考慮するか考慮しないかが無限増倍率と実効増倍率の大きな違いなのである。

これをサバイバルゲームで例えると、無限増倍率では周囲を柵で囲まれたフィールドでゲームを実施していたが、実効増倍率では周囲を切り立った崖に囲まれたフィールドでゲームを実施するものである（当然、崖から落ちると脱落することになる）。つまり、フィールド場外に出ることができず、場内での脱落（捕獲反応による消滅）のみ取り扱っているのが無限増倍率で、一方、フィールド場内での脱落ルールに、場外へ出た時点で脱落する（原子炉外への漏れ）というルールを追加したものが実効増倍率である。この実効増倍率の概念を示したものが図 6-3 になる。また、表 6-1 にサバイバルゲームにおける無限増倍率と実効増倍率のルールをまとめておく。

ここで仮に、ある世代のサバイバルゲームの参加者、フィールド場内の条件（原子核に捕獲される中性子数）が全く同じだとする。フィールド場外への脱落ルールの有無により、ゲームの勝者数はどのようになるだろうか。当然、中性子からすると場外への脱落ルールを追加したほうが、サバイバルゲームの難易度が上がることで勝者は減少する。つまり、一般的に実効増倍率 < 無限増倍率となるのである。

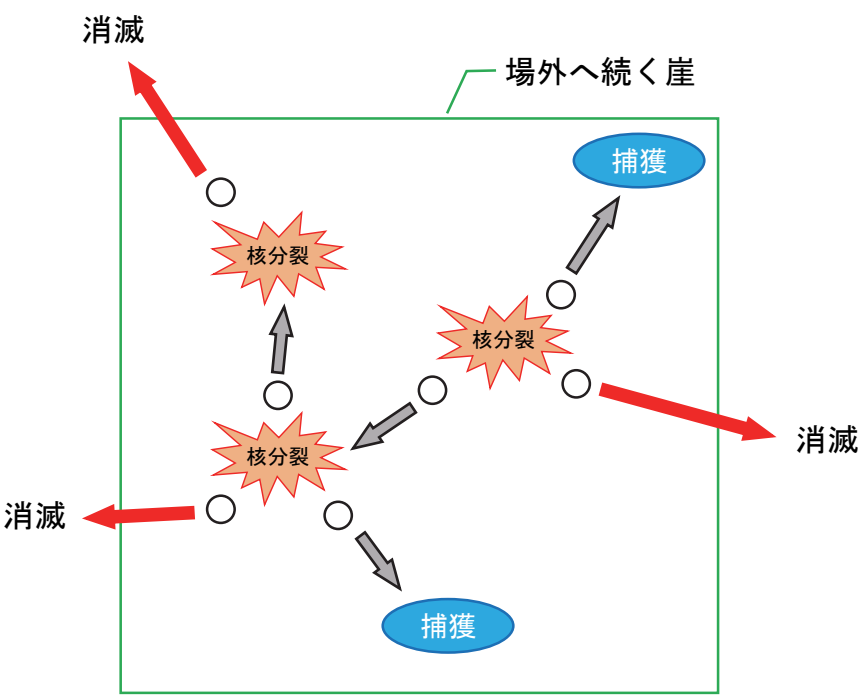


図 6-3 実効増倍率の概念

表 6-1 サバイバルゲームにおける各増倍率のルール

	無限増倍率	実効増倍率
場外脱落ルール	なし	あり
場内脱落ルール	あり	

【コラム】無限増倍率と実効増倍率

本節では無限増倍率と実効増倍率をサバイバルゲームに例えて、イメージとして捉えられるように説明した。先述の通り、増倍率とはゲーム参加者数の世代間の比として表されるが、この二つの増倍率を物理的な式で表すとどのように表現できるのか、このコラムで補足しておく。このとき、無限増倍率と実効増倍率は以下の式で表すことができる。

・無限増倍率

=

次の世代のゲーム参加者数

ある世代のゲーム参加者数

=

勝者により生み出された次の世代のゲーム参加者数

ゲームの勝者数 + フィールド場内の脱落者数

=

生成量

核分裂量 + 捕獲量

=

生成量

吸収量

$$\begin{aligned}
 \text{・実効増倍率} &= \frac{\text{次の世代のゲーム参加者数}}{\text{ある世代のゲーム参加者数}} \\
 &= \frac{\text{勝者により生み出された次の世代のゲーム参加者数}}{\text{ゲームの勝者数+フィールド場内の脱落者数+フィールド場外への脱落者数}} \\
 &= \frac{\text{生成量}}{\text{核分裂量+捕獲量+漏洩量}} \\
 &= \frac{\text{生成量}}{\text{吸収量+漏洩量}}
 \end{aligned}$$

当然のことながら、ゲームの勝者数、脱落者数に負の値は存在しない。したがって、フィールド場外への脱落者が存在する場合は、場外への脱落者が存在しない場合と比べて、相対的にゲーム勝者数が減少し、結果として次の世代のゲーム参加者数（分子）が小さくなる。そのため、炉心内の環境（燃料の組成等）を全く同じとした場合、一般的に、実効増倍率の方が無限増倍率より小さくなる。

また、各増倍率の最終的な式に吸収量という言葉があるが、中性子の消滅を考えるとときには**吸収反応（absorption reaction）**が多く用いられる。第4章でも述べたが、吸収反応は主に捕獲反応と核分裂反応の2つを合わせたものである。本節で例として示したサバイバルゲームは、原子核による捕獲反応や体系外への漏洩（実効増倍率のみ）から逃げつつ、U-235 との核分裂反応という最終的なゴールまで生き延びれば勝ち、というルールにしている。仮に、増倍率を説明する際に吸収反応を使用すると、中性子にとってのゴールである核分裂反応も中性子の消滅、つまり脱落に含まれてしまい、読者を混乱させてしまう可能性がある。したがって、ゲームクリアとゲームオーバーを明確に分けるために本稿では捕獲反応を用いているのである。

【発展的内容】4 因子公式と6 因子公式

増倍率を定量的に評価する方法として、**4 因子公式（four factor formula）**と**6 因子公式（six factor formula）**が存在する。それぞれの公式で用いられる因子を以下に記載する。また、本章では中性子の生成・消滅の概念を簡単に捉えるため、高速中性子による核分裂反応については触れていないが、実際の原子炉では高速中性子による核分裂反応が一定数存在する。ここでは、そのことについても少しだけ触れることにしよう。

η : 熱中性子再生率

燃料に吸収された熱中性子1個あたり、核分裂反応により生成された中性子の数。

f : 熱中性子利用率

燃料・構造材等に吸収された全熱中性子のうち、燃料に吸収された中性子の割合。

p : 共鳴吸収を逃れる確率

高速中性子から減速される過程で、どの原子核にも吸収されずに熱中性子へと減速された中性子割合。

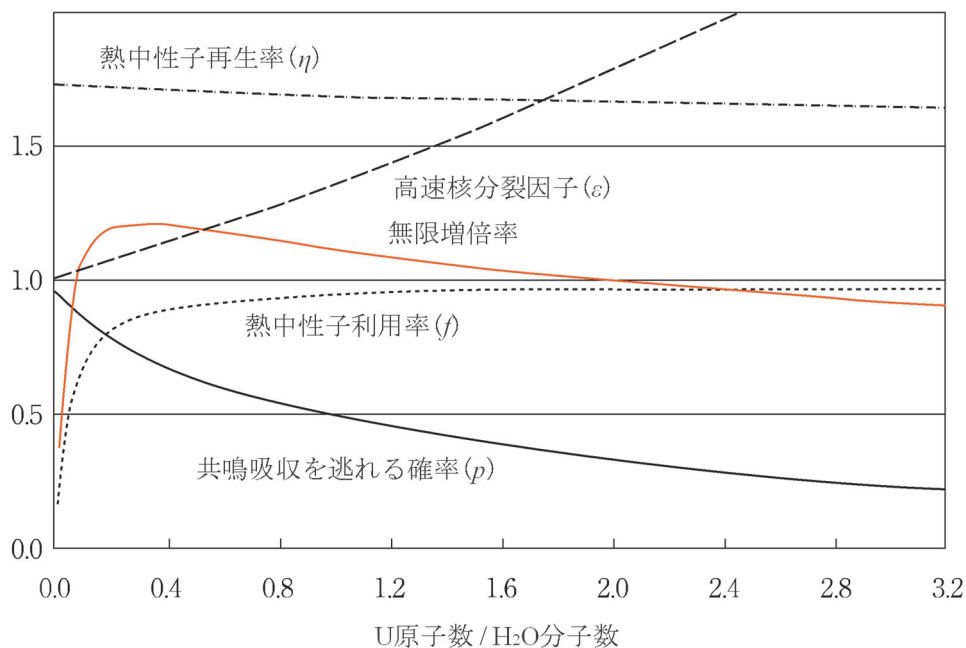
ε : 高速核分裂因子

高速中性子により発生した核分裂反応の目安。すべての核分裂反応が熱中性子により発生したのであれば $\varepsilon = 1$ となり、高速中性子により発生した核分裂反応の寄与が大きくなるほど大きな値をとる。

P_F : 高速中性子が炉心から漏れない確率

P_T : 熱中性子が炉心から漏れない確率

増倍率は、これらの因子の積で表される。因子の意味からも分かるように、原子炉からの中性子の漏れを考慮しない無限増倍率では、 $P_F = P_T = 1$ となるため必然的に4つの因子の積 $\eta f p \varepsilon$ で表される。一方、実効増倍率は炉心からの中性子の漏れを考慮するので6つの因子の積 $\eta f p \varepsilon P_F P_T$ で表すことができる。以下に、U-235の濃縮度が2wt%のウラン燃料と水を均質に混合した体系において、無限増倍率および4つの因子を計算したものを示す[1]。



熱中性子再生率は、ウラン/軽水の原子数比を増加させてもほとんど変化しない。熱中性子再生率は核種、特に燃料組成による影響が大きく、図の例では、燃料組成（ウラン燃料中のU-235とU-238の割合）は常に一定となっているため、ほとんど変化を示さない。

熱中性子利用率は、ウラン/軽水の原子数比が大きくなるにつれ増加する。これは単純に水（水素）による吸収が減り、燃料に吸収される割合が増加するためである。

高速核分裂因子についてもウラン/軽水の原子数比が大きくなるにつれ増加していく。実際の原子炉では高速中性子による核分裂はある程度存在する（主な核分裂は熱中性子によ

るものであるが)。水が少なくなることで高速中性子の減速効果が弱まり、高速中性子の割合が増加する。その結果、高速中性子による核分裂が増えるため高速核分裂因子は増加する。

一方、共鳴吸収を逃れる確率は、ウラン/軽水の原子数比の増加に伴い減少していく。ウラン/軽水の原子数比が小さいときは、燃料等に吸収される前に高速中性子は減速されて熱中性子になる。しかし、ウラン/軽水の原子数比が大きくなるにつれ、水による減速効果が弱まることと、ウラン（特に U-238）割合が増加することから高速中性子が減速する前に共鳴吸収される。そのため共鳴吸収を逃れる確率は減少していく。

無限増倍率は4つの因子の掛け合わせにより表されるが、ウラン/軽水の原子数比がある値をとるときに増倍率は最大値となっている。このときのウラン/軽水の原子数比を**最適減速 (optimal moderation)**という。通常運転時にはこの最適減速状態から右側（ウランの割合が大きくなる側）になるように燃料と水の量を調整している。この理由は、事故等の事象により原子炉内の減速材（冷却材）が減少した場合、人の操作が加えられなくても増倍率が下がっていくようにするためである。仮に、運転中にウラン/軽水の原子数比が最適減速状態の左側（ウランの割合が小さくなる側）であったとする。このとき、事故等により減速材が減少した場合、増倍率は増加する方向に向かってしまい、人による制御が行なえない状態であれば、原子炉が暴走する可能性がある。したがって、通常の運転時には最適減速状態よりもウラン/軽水の原子数比が大きくなるように設定されている。

6.2 未臨界・臨界・臨界超過

【この節のポイント】

- ・ 中性子の生成・消滅のバランスにより、未臨界・臨界・臨界超過が定まる。
- ・ 未臨界・臨界状態において、外部中性子源の存在の有無によって、中性子は時間とともに異なる挙動を示す。

6.2.1 未臨界・臨界・臨界超過とは

前節では増倍率について述べたが、未臨界・臨界・臨界超過は増倍率を用いて以下のように表すことができる。なお、これより増倍率と記載したものは、特に断りのない限りすべて実効増倍率のことを指すものとする。

- ・ **未臨界** (subcriticality) : 増倍率 < 1
- ・ **臨界** (criticality) : 増倍率 $= 1$
- ・ **臨界超過** (supercriticality) : 増倍率 > 1

これまで、増倍率について述べた際、ある世代と次の世代の 2 世代分のみを取り扱ったが、実際の原子炉では、臨界状態、つまり、増倍率 $= 1$ を各世代にわたり維持し続ける必要がある。ここで、未臨界・臨界・臨界超過の 3 つの状態を維持し続けることのイメージを掴むためにサバイバルゲームを例にしたものを図 6-4～図 6-6 に示す（簡単のために、参加者数を円の大きさで表している）。未臨界状態では増倍率 < 1 であり、世代を追うごとにゲームの参加者は減少し、やがて消滅していく。臨界状態では増倍率 $= 1$ であり、世代に依らずゲームの参加者は常に一定である。一方、臨界超過状態では増倍率 > 1 であり、世代を追うごとにゲームの参加者が増加する。

すでに第 5 章でも述べたが、中性子が核分裂反応を引き起こすとエネルギーが放出される。ここでも同じように、ゲームの勝者が次のゲーム参加者を生み出す際にエネルギーが放出されると仮定する。このとき、未臨界状態では次第に勝者たちによるエネルギーの放出量が減少していくことが分かる。運転中の原子炉を停止状態にするためには、ゲームの参加者、つまり、中性子数を減らして出力を下げていくような操作を行う必要がある。

一方、停止状態の原子炉を運転状態まで出力を上げるためには、図 6-6 のようにゲーム参加者、つまり、中性子数を増やしていく必要がある。このために制御棒引抜きなどの操作を行い、捕獲反応による中性子の消滅量を減少させることで、次の世代のゲーム参加者を増加させるような操作を行っている。

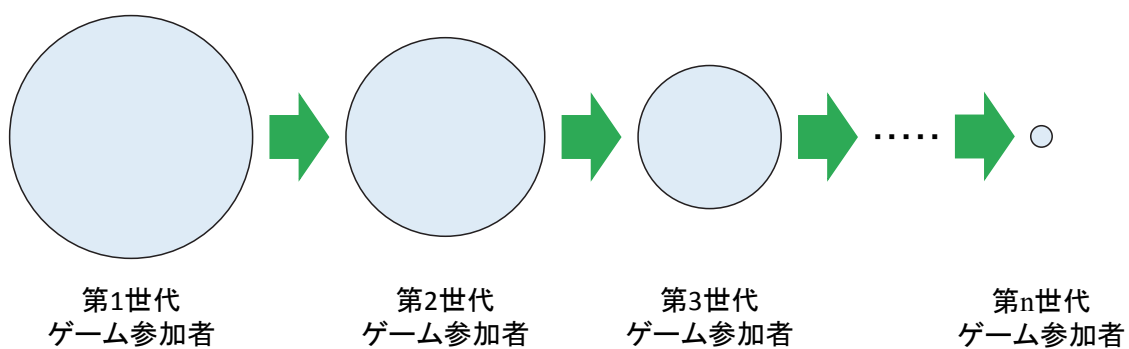


図 6-4 未臨界状態のイメージ

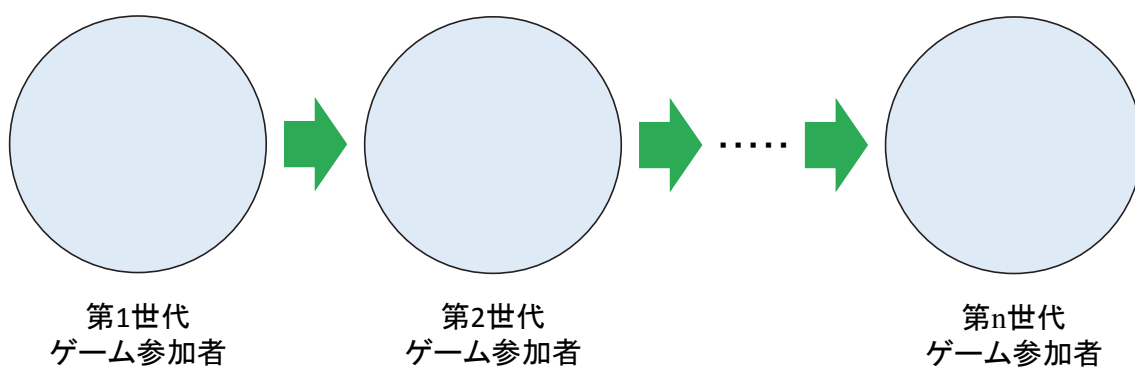


図 6-5 臨界状態のイメージ

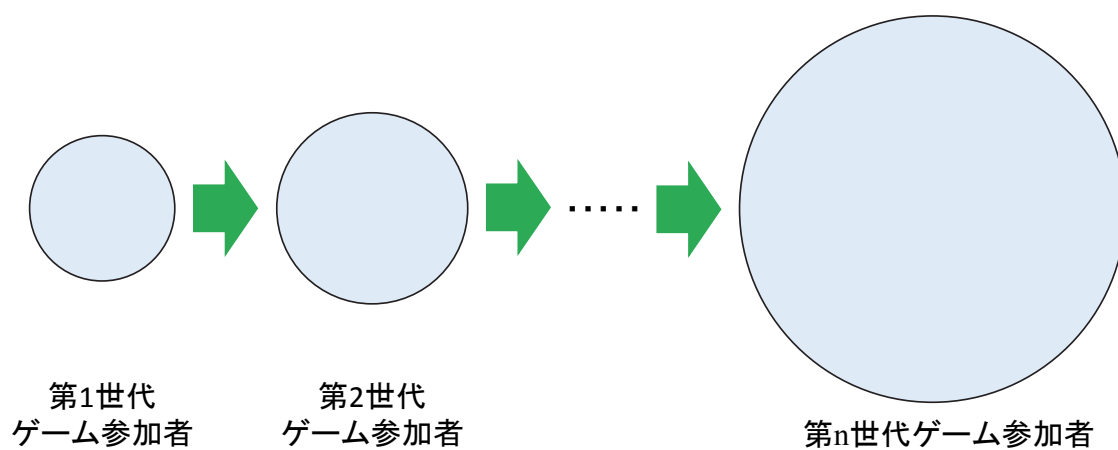


図 6-6 臨界超過状態のイメージ

【コラム】即発中性子、遅発中性子

核分裂反応により発生する中性子は、大きく分けて2種類存在する。ひとつは核分裂反応後すぐに放出される（核分裂後の 10^{-17} 秒以内に発生する）**即発中性子（prompt neutron）**であり、もう一つが核分裂反応後に一部の核分裂生成物から時間遅れで放出される**遅発中性子（delayed neutron）**である（核分裂生成物が β 崩壊して出来た後の核種から放出されるものもある）。U-235 の核分裂反応により生成される中性子のうち、遅発中性子の割合は約0.65%である。本章では臨界状態のイメージを捉えやすくするために、即発中性子と遅発中性子を区別せずに説明しているが、実際の原子炉の制御では特に遅発中性子の存在が重要となる。即発中性子と遅発中性子の詳細については第9章で述べることになるが、ここでは即発中性子と遅発中性子を区別することでどのような影響があるか、簡単に述べることにする。

仮に、核分裂反応により生成される中性子がすべて即発中性子であったとする。即発中性子の寿命が約 10^{-4} 秒、増倍率が 1.001 であったとする。このとき、1 秒経過すると、第 10,000 世代以上までゲームが実施されたことになるが、1 秒後の第 10,000 世代目のゲーム参加者は第 1 世代目のゲーム参加者の約 22,000 倍になる。通常の原子炉で考えると、1 秒後に出力が 20,000 倍以上まで上昇することになり、到底制御することができない。しかし、遅発中性子の影響を考えると「実効的な」世代時間はかなり長く、1 秒後の出力は 1.012 倍になる。出力が e （約 2.718）倍になる時間を**原子炉安定炉周期（reactor stable period、原子炉ペリオドとも呼ばれる）**というが、増倍率が 1.001 のとき、即発中性子のみの場合、原子炉ペリオドは 0.1 秒程度（1 秒後には出力が $e^{1/0.1}$ 倍となる）となり、遅発中性子を考慮すると、原子炉ペリオドは 85 秒程度（1 秒後には出力が $e^{1/85}$ ）となる[1]。

仮に、増倍率を 1.001 として原子炉の出力を上昇させるとしたとき、原子炉ペリオドが数時間単位であれば、所定の出力にするまでに膨大な時間を要してしまう。一方、原子炉ペリオドが非常に短ければ、このような操作を制御して行うことは困難となるであろう。この 85 秒という値が人類の時間感覚からすると絶妙な値であるということを覚えておいてほしい。

6.2.2 外部中性子源が存在するときの未臨界・臨界

前項では、3つの原子炉の状態について述べた。しかし、これは外部中性子源による中性子の追加が無いことを想定している。原子炉の起動では、「種火」となる外部中性子源から発生した中性子を用いて、徐々に未臨界から臨界に近づけていく。実際の発電用原子炉では、この種火となる外部中性子源は取り除かれることなく、常に炉心に挿入されている状態が続く。外部中性子源からは常に一定の中性子が放出されているが、この外部中性子源の存在により、特に図 6-4 と図 6-5 に示される、未臨界状態と臨界状態のイメージが大きく変わってくる。外部中性子源が存在するときの臨界状態は、外部中性子源が存在しないときと混同されやすいので、先に簡単に説明しておく。そもそも、臨界状態とは外部中性子源が存在しないときに中性子数が常に一定になる状態のことを指している。つまり、外部中性子源が存

在する臨界状態とは、中性子数が単調に増加していく状態のことを指している。外部中性子源が存在するときに中性子数が一定となる状態は、臨界状態ではない（実際には未臨界状態のことを指す）。このときの状態をイメージとして捉えてもらうために、以下の図 6-7 ～ 図 6-8 に外部中性子源が存在する場合の未臨界状態、臨界状態を示す。先に簡単に説明しているが、サバイバルゲームを例として少し詳しく説明すると、前項でのゲームは途中参加者が全く存在しないものであった。そのため、第 2 世代のゲーム以降は、第 1 世代のゲーム参加者の子孫にあたるものしか参加者が存在しないものであった。外部中性子源とは、各世代で実施されるゲームに一定数の参加者が追加されるものである。簡単のため、ある未臨界状態において、ある世代からの子孫が n 世代の後に途絶えてしまう、と仮定しよう。この未臨界状態では、第 $n+1$ 世代で第 1 世代からの子孫が途絶え、第 $n+2$ 世代では第 2 世代からの子孫が途絶えることになる。ただし、世代ごとに、新たに外部中性子源からの（一定数の）参加者が加わっているため、第 n 世代の後には、ゲームに参加している者の数は一定になることがわかる。このように、外部中性子源が存在する未臨界状態では、参加者の総数はやがて世代に依らず一定となっていく。一方で、臨界状態だと、世代ごとに一次関数的（直線的）に増加していくことがわかる。

ひとえに臨界状態、未臨界状態といっても、外部中性子源の存在の有無により、その挙動は変わってくる。特に、外部中性子源が存在する未臨界状態の挙動の把握は非常に重要になる。実際の原子炉では、停止中の原子炉を起動させ、徐々に臨界に近づけていく操作を行う際（これを**臨界近接（critical approach）**と言う）、図 6-7 のように、外部中性子源が存在するときの未臨界状態では中性子数がやがて一定となることを利用して、原子炉の状態がどのくらい未臨界なのか（増倍率が 0 に近い未臨界なのか、増倍率が 1 に近い未臨界なのか）を適切に監視している。具体的にどのような手法で原子炉の状態を把握しているかは、やや高度な内容になるため詳細は第 13 章に譲るが、読者のなかで原子力分野（特に原子力発電関係、実験炉関係）に興味のある方は一度目を通しておくことをお勧めする。

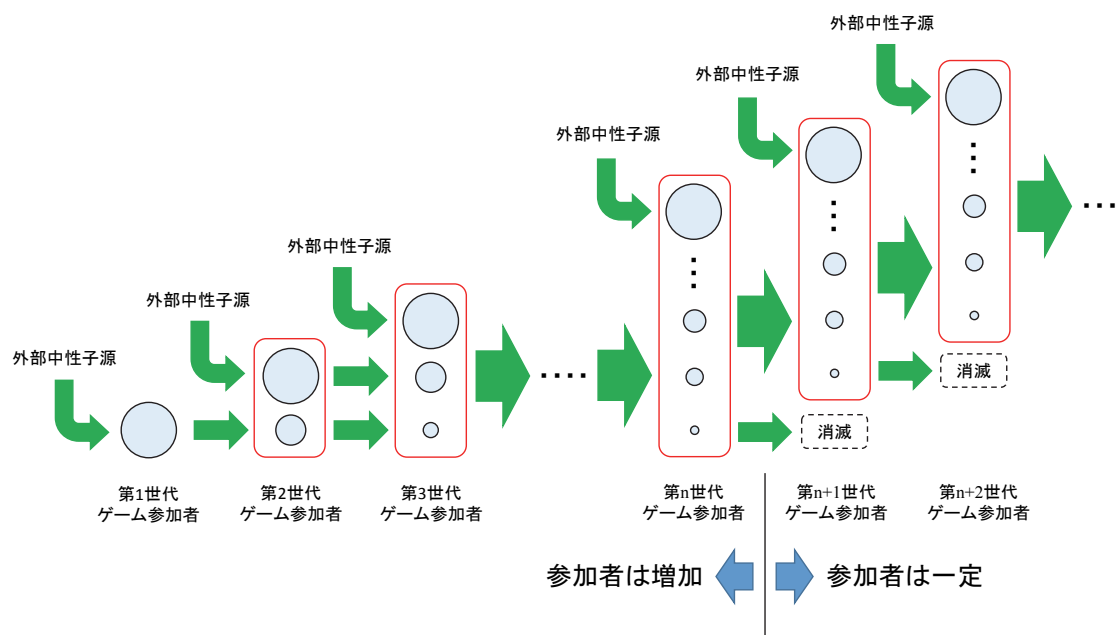


図 6-7 外部中性子源が存在するときの未臨界状態のイメージ

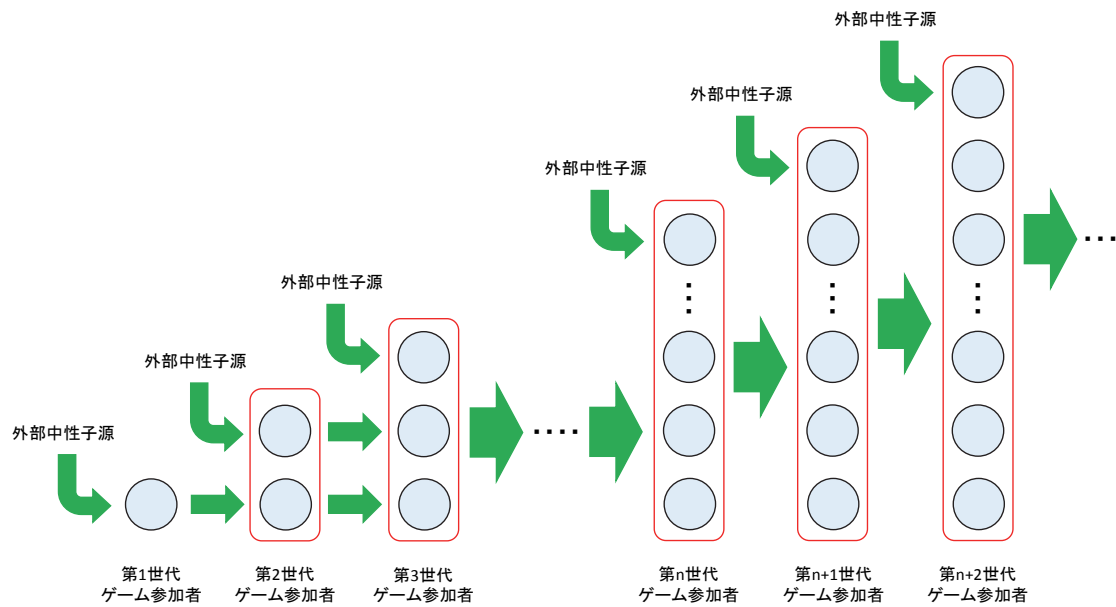


図 6-8 外部中性子源が存在するときの臨界状態のイメージ

【コラム】原子炉運転中の臨界状態

運転中の原子炉では常に臨界状態を保っており、一定の出力を得るように制御されている。原子炉の起動時に使用した外部中性子源であるが、発電用原子炉では運転中でも取り出されずに原子炉に装荷されたままである。このとき図 6-8 を見た人なら、「外部中性子源が存在する臨界状態であれば、出力は上昇し続けるのではないのか」、と疑問に思うだろう。厳密にいうと、運転中の発電用原子炉は限りなく臨界状態に近い未臨界状態である。しかし単に未臨界状態といっても、様々な状態がある。外部中性子源が存在しない場合、各世代で 900 個の中性子が生成され、1,000 個の中性子が消滅したとすると原子炉は未臨界状態（増倍率 = 0.9）である。一方で 99,999,999,900 個の中性子が発生し、100,000,000,000 個の中性子が消滅しても原子炉はやはり未臨界状態（増倍率 = 0.9999...）である。ここで、外部中性子源が存在するとして、そこから供給される中性子数を各世代で 100 個と仮定する。前者のときでは、外部中性子源からの中性子供給による原子炉内の中性子数に対する影響は非常に大きくなる。外部中性子源が存在するとき、原子炉内の中性子数は 1,000 個で一定となるが、外部中性子源を取り除くと 100 世代後には中性子数は $1,000 \times 0.9^{100} = 0.027$ となり、出力はほとんど 0 となってしまう。一方、後者のときでは外部中性子源から供給される中性子数は、原子炉内の中性子数に対してほとんど影響を与えない。先ほどと同様に考えると、外部中性子源が存在するとき、原子炉内の中性子数は 1,000 億個で一定となるが、外部中性子源を取り除き 100 世代経過しても、中性子数は $1,000 \text{ 億} \times 0.9999 \dots^{100} = 999.9 \dots \text{ 億}$ となり、出力はほとんど（まったくといっても過言ではない）変化しない。運転中の発電用原子炉は、先述の未臨界状態のうち後者の状態に近いものとなる。つまり、運転中の原子炉は、厳密には未臨界状態とはいっても、臨界状態といって差し支えないような状態なのである（臨界近傍という表現が適切かもしれない）。

参考文献

- [1] 「シリーズ：現代核化学の基礎 1 原子炉物理」、日本原子力学会 (2008).