連載
講座

基礎から分かる未臨界

第1回 今なぜ未臨界か

名古屋大学 遠藤 知弘,
日本原子力研究開発機構 辻本 和文,
名古屋大学 山本 章夫

臨界管理や原子炉の運転等において、体系の中性子実効増倍率は最も基本的な概念の一つである。実効増倍率が1のときを臨界、1未満のときを未臨界と呼ぶことは良く知られているが、実は両者は大きく異なる状態である。本連載講座では、核燃料サイクル施設の臨界安全、原子炉施設の臨界管理や福島第一原子力発電所のデブリ取り出し等で重要となる未臨界状態について、臨界状態の原子炉との違い、炉物理的な特徴、未臨界状態であることを評価・測定する手法などを解説する。第1回では、臨界・未臨界の炉物理的な違いについて紹介する。

KEYWORDS: *Subcritical, Critical, Criticality safety, Monitoring of subcriticality, Accelerator driven system, Fuel debris*

I. 地球は未臨界か？

実効増倍率という概念がある。おおざっぱに言うと、ある体系において、時間とともに中性子がどの程度増加するのか、あるいは減少するのかを示す指標である。人口の増加率/減少率にほぼ対応した概念であると考ええると分かりやすい。実効増倍率は、原子力工学の最も基礎的な概念の一つであり、原子炉物理において学ぶ最も重要な概念である。原子力にかかわっている人であれば、この言葉と大まかな概念は知っているであろう。

原子炉物理の教科書では、原子炉は運転時に臨界となっている、と書かれており、以下の説明がなされている。

実効増倍率 > 1 : 超臨界

実効増倍率 $= 1$: 臨界

実効増倍率 < 1 : 未臨界

それではここで質問。「地球は未臨界か?」。地球にウラン鉱石は埋蔵されているが、その濃度は低いので、当然ながら、地球は未臨界、と考えて良いであろうか?

1. 地球の実効増倍率の計算値は？

(1) 地球をモンテカルロコードでモデル化すると

この問いは、臨界安全の分野では有名な「地球の実効増倍率問題」(英語では、k-effective of the world problem)である¹⁾。先に述べたように、地球にはウラン鉱石が埋蔵さ

れているが、その濃度は低く、また、核分裂を起こしやすいウラン 235 の濃縮度も約 0.7wt% と低い。そのため、地球全体をモンテカルロ法に基づく核特性計算コードでモデル化し(全地球モデルと呼ぶことにする)、計算を行ったとしたら、実効増倍率は限りなく零に近い値になることが予想される。

しかしながら、現在運転中の原子炉の炉心をモンテカルロ法でモデル化し、実効増倍率を計算すると、当然ではあるが、ほぼ1、つまり臨界であるという結果になるであろう。では、このモンテカルロ法で用いた炉心モデルに、地球全体を付け加えたらどうなるであろうか。一般に原子炉容器の外側の条件(モデル化)は、原子炉の実効増倍率にほぼ影響を与えない。従って、炉心+全地球モデルの実効増倍率は、ほぼ1になるはずである。

先に述べた実効増倍率がほぼ零の「全地球モデル」との違いはどこにあるのであろうか。地球上に点在している原子炉をモデル化していないことであろうか。仮に、地球上に点在している原子炉を全地球モデルに付け加えたとしても、モンテカルロコードで計算される実効増倍率は、ほとんどのケースでほぼ零となることが予想される。

モンテカルロコードでは、中性子を多数飛行させ、これらの中性子がどのように吸収・核分裂するかを評価している。具体的には、最初にある一定数の中性子を発生させ、それらが全て吸収などで消滅するまでの挙動を追跡計算する。この過程で核分裂が発生すれば、その位置と発生する中性子の個数を記録しておく。これらの核分裂で新たに発生する「次世代の」中性子数と、「現世代で」発生させた中性子数の比が実効増倍率になる。

Subcriticality - from basics to applications (I) ; Revisiting subcriticality : Tomohiro Endo, Kazufumi Tsujimoto, Akio Yamamoto.

(2019年5月13日 受理)

(2) モンテカルロコードによる計算値は

地球の体積に比べ、地球上に点在する原子炉の体積は微々たるものである。従って、全地球で計算に用いる中性子をランダムに発生させても、その中性子が原子炉に到達することはほぼなく、原子炉以外の場所で吸収されると予想される。そのため、実効増倍率はほぼ零と計算されるであろう。一方、運転中の原子炉内で全ての中性子を発生させたとしよう。これは、通常良く行われる原子炉の炉心解析と同じ計算となり、実効増倍率はほぼ1になると予想される。

このように、モンテカルロ法の計算条件によって計算される実効増倍率は大きく変わるが、炉心内で中性子を発生させるという適正な計算条件を用いれば、運転中の原子炉が一基でもある場合には地球の実効増倍率はほぼ1であるとの評価になる。一方、地球上の全ての原子炉が未臨界の停止状態であれば、地球の実効増倍率は1未満になると考えることが出来る。

(3) 遠い過去、地球は臨界だった？

なお、原子炉が存在しなくても、過去、「地球の実効増倍率」が1になっていた時期があることが知られている。ガボン共和国のオクロ地区に約20億年前に存在していたとされる天然原子炉である。ウラン238に比べてウラン235の半減期が短いため、現在は0.7wt%のウラン235濃縮度は、約20億年前には3.5wt%程度あったことが簡単な計算から確認できる。ここで、ウラン鉱床に水が適量存在すれば、臨界となり得る条件になり、実際にオクロの天然原子炉では、数十万年にわたって間欠的に「臨界になっていた」と推定されている。この時期は、間欠的にはあるが、まさに「地球の実効増倍率が1になっていた」と言えるかもしれない。

2. 一定出力で運転している動力炉は臨界である？

(1) 原子炉内の中性子数の計算

先の実効増倍率の定義では、実効増倍率は中性子数の変化率に対応した概念であり、臨界は実効増倍率が1、すなわち、原子炉内の中性子数に変動がない状態である。核分裂は、原子炉内の中性子数にほぼ比例するであろうから、一定出力→中性子数に変動がない→実効増倍率が1→臨界、ということになろうか。実際、一般的には、「運転中の原子炉は臨界になっている」との説明がなされる。

一般的には、この説明で問題ないであろう。しかしながら、厳密には、この説明は以下で説明するように正しくない。

原子炉には、核分裂の「火種」となる起動用の中性子源が必ず必要となる。初めて原子炉を起動する場合(初装荷炉心)では、カリフォルニウム252の自発核分裂を用いた一次中性子源などが用いられる。ここで、火種となる

中性子源から発生する中性子数を毎秒 S 個とし、実効増倍率を k とする。実効増倍率は、「1個の中性子が、核分裂で生成する新たな中性子数の平均値」と考えることが出来るため、中性子源から発生した S 個の中性子は、炉心の中で $S \times k$ 個の中性子を発生させる。この $S \times k$ 個の中性子はさらに $S \times k \times k$ 個の中性子を発生させる。このプロセスを繰り返すことにより、火種の中性子 S 個を起源として発生する中性子の総数は、以下で与えられる。

$$S + Sk + Sk^2 + \dots$$

仮に、実効増倍率 k が1であったとすると、

$$S + S + S + \dots = \infty$$

となり、上記の中性子の総数は無限大になる。つまり、原子炉の出力は無限大になり、ある有限の一定値にはならない。

つまり、中性子源が炉心内に存在する原子炉において、ある一定の出力で運転するためには、必ず実効増倍率 k が1未満でなければならない。この場合、上記の中性子の総数は、

$$S + Sk + Sk^2 + \dots = S/(1-k)$$

と有限の値になり、原子炉の出力(1秒あたりに発生する中性子数に比例)も有限の一定値になる。以上のことから、一定で運転している動力炉は厳密には臨界ではなく、わずかに未臨界の状態であると言える。

なお、カリフォルニウム252などの中性子源を用いなくても、炉心内にはウラン238等の自発核分裂により中性子が常時発生しており、「核分裂以外の中性子源が零」という原子炉は事実上存在しない。つまり、厳密に一定出力で運転している原子炉は、全てわずかな未臨界である。ただし、動力炉では中性子源の影響はごくわずかであることから、一定出力で運転している動力炉が「臨界である」と述べても事実上問題ないであろう。

3. 臨界と未臨界は見分けがつかない？

(1) どちらが臨界状態？

図1に極低出力で運転する試験用の原子炉(臨界集合体)における中性子検出率の時間変化を示す。この時間変化は、シミュレーションにより再現されたものであ

図1 臨界集合体における中性子計数率の時間変化(縦軸が経過時間、横軸が計数率)

る。図1には二つの時系列データが存在するが、そのうち一つは中性子源が入った未臨界状態、もう一つが臨界状態である。なお、シミュレーションを用いているので、厳密に臨界状態を再現できる。さて、どちらが未臨界時のデータであり、どちらが臨界時のデータであろうか？(答えはこの節の最後に記載。)

実は、中性子計数率の時間変化から、体系が中性子源で維持されている未臨界状態か、臨界状態であるかを判定することは、意外に難しい。トレンドとしては、いずれのケースも中性子計数率がほぼ一定であり、中性子計数率が「増えている」「一定」「減っている」という区分では判定できないからである。では、原子炉が臨界かどうか(臨界になるかどうか)を試験的に確認するためにはどのようにすれば良いだろうか。

(2) 動力炉での臨界の確認

動力炉では、おおよそ1年に一回定期検査が行われ、この際に炉心に装荷されている燃料が部分的に交換される。燃料交換後、原子炉を起動する際に、「炉物理試験」と呼ばれる炉心性能を確認する試験が実施される。炉物理試験は、炉心を臨界にして実施するが、この際、炉心が臨界になっているかどうかの判断は、「原子炉出力(中性子計数率)が一定になること」では行わない。先に述べたように、中性子源で維持された未臨界か、臨界かの区別がつかないためである。ではどうするのであろうか。

原子炉の出力は、炉心が超臨界状態になったとき、時間とともに指数関数状に上昇する性質がある。そこで、この性質を利用し、制御棒を引き抜いて原子炉に反応度を加えたあと、原子炉出力が時間とともに指数関数状に上昇しているかどうかで「臨界」になるかどうかを判定している。なお、原子炉出力計は出力が対数軸の表示になっている場合があり、この場合は、原子炉出力は時間とともに直線状に上昇することになる。なお、この試験の際、定規をあてて直線になっているかどうか確認する人もいるようである。(答え：図1は、左側：中性子源が存在する未臨界状態、右側：中性子源が存在しない臨界状態)。

4. 未臨界度の絶対測定：炉物理の難問

(1) 実効増倍率と中性子源強度の切れない関係

2. で説明したように、強度 S の中性子源が存在する実効増倍率が k の未臨界体系において、体系内の中性子数は、以下のように計算される。

$$S/(1-k)$$

同一の体系で実効増倍率が変化すると、体系内の中性子数、ひいては中性子計数率が増加する。実効増倍率が大きくなり1に近づくと、中性子計数率が増加し、逆に、実効増倍率が小さくなり1から離れると中性子計数率が減少する。従って、中性子計数率の変化を見ることによ

図2 中性子計数率の時系列データ

り、体系の実効増倍率の変化度合いを確認することができる。

しかしながら、やっかいな点が一つある。実効増倍率が変化せずに、中性子源強度が変化するとどうなるだろうか。中性子源強度が大きくなると、中性子計数率は増え、逆に中性子源強度が小さくなると、中性子計数率は減少する。つまり、実効増倍率の変化と見分けがつかないのである。言い換えると、小さい中性子源強度で実効増倍率が1に近いケースと、大きい中性子源強度で、実効増倍率が1から遠いケースでは、見分けがつかないことになる。

このため、中性子計数率の時系列データのみを用いて、体系の実効増倍率を測定することは、一般的に非常に難しく、現在でも完全には解決されていない炉物理上の難問となっている。

一般的には、体系をある未臨界状態にしておき、その状態での実効増倍率 $k_{基準}$ を何らかの手段で測定する(ペリオド法や制御棒落下法など)。その状態を起点として、体系内の中性子源強度を変えずに、実効増倍率だけを変化させる。この場合、中性子計数率 N は、

$$N \propto S/(1-k)$$

であるため、以下の等式が成り立つ。基準状態における計数率 $N_{基準}$ 、測定したい体系の計数率 $N_{測定}$ 、基準状態の増倍率 $k_{基準}$ が分かっているため、測定したい体系の増倍率 $k_{測定}$ を求めることができる。

$$N_{基準}/N_{測定} = (1-k_{測定})/(1-k_{基準})$$

では、中性子計数率の時系列データのみを用いて、体系の実効増倍率を推定することは不可能なのだろうか。図2に、実効増倍率が非常に低い体系(左)と、臨界に近い体系(右)における中性子計数率の時系列データの例を示す。

(2) ゆらぎがポイント

中性子計数率の平均値は両体系とも毎秒75カウントであり、ほぼ同一であることが分かる。従って、中性子計数率の平均値だけを見ていては、実効増倍率の違いを推定することはできない。しかし、図2をよく観察すると、計数率の「ゆらぎ」に明らかな違いがあることが分かる。

まず、結論から述べると、中性子計数率の「平均」とゆらぎを表す計数率の「分散」の比である「分散÷平均」の値

は、体系が臨界に近づくほど大きくなる特徴を持っている。この特徴を用いることで、体系の実効増倍率を測定することは原理的に可能であることが分かっている。この方法を雑音解析と呼んでいる。東電福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し時の臨界管理においては、雑音解析の適用も検討されている。

まず、最も簡単な例として、アメリカウム-ベリリウム中性子源が体系内にあり、体系の実効増倍率が0、すなわち、体系内で核分裂が全く発生しない場合を考えよう。この場合、単位時間内に計測される中性子の数は、ポアソン分布に従うことが知られている。計数率 N が十分に大きい場合、ポアソン分布は、平均 N 、標準偏差 $\sqrt{N}$ (分散 N)の正規分布とほぼ同じ形になり、核分裂が全く発生していない場合の「分散÷平均」の値はほぼ1となる。

一方、体系内で核分裂が発生している場合、図2から分かるように、分散が大きくなり、「分散÷平均」の値は1より大きくなる。この理由は以下の通りである。

(3) 釣りりとゆらぎ

湖で、冬場にワカサギ釣りをしたことがあるだろうか？(波止場でアジ釣りでも良い)。ワカサギは、群れをなして移動しており、釣れ始めると立て続けに釣れるが、群れが来ていないときにはほぼ釣れない。一方、例えばブラックバスは群れになっておらず、ポツポツと釣れる感じになる。仮に、1日に釣れた数が同じであったとしよう。この場合、1時間あたりに釣れた数を比較すると、ワカサギは釣れているときと釣れていないときの差が大きいため、1時間毎に釣れた数のばらつき、すなわち分散が大きくなることは想像できると思う。

原子炉の中には中性子が飛び交っているが、中性子の検出器は、原子炉の中に釣り竿を垂らして、中性子をつり上げているようなものである。核分裂が体系内で発生しない場合、中性子の発生と移動はランダムに起こるため、単発的に「ポツポツ」計数されることになる。一方、核分裂が発生する場合、一つの中性子から核分裂の連鎖反応で発生した同じ「家系」に属する中性子集団が原子炉内を動き回っており、計数される時は立て続けに、そうでないときは計数されない、という形で時間的なゆらぎが大きくなる。原子炉が臨界に近づくほど、核分裂の連鎖反応が長く続くようになり、一つの家系に属する中性子の集団が大きくなるため、立て続けに計測される中性子数が増え、計数率のゆらぎが大きくなる。実効増倍率とゆらぎの量に関連するため、計数率のゆらぎから実効増倍率を測定できることが知られている。

5. 福島第一2号機でキセノン135が検出された理由は再臨界か？

(1) キセノン135はどこから？

福島第一原子力発電所事故後、半年以上経った2011年

11月1日、福島第一原子力発電所2号機の格納容器ガスマ管理システムを用いて格納容器内部のガスをサンプリングし、放射線を測定したところ、核分裂で発生するキセノン135が検出された²⁾。キセノン135は、核分裂生成物のうち最も有名なものの一つであり、その半減期は約9時間と短い。事故後、半年以上経過していることから、事故前の運転時に発生していたキセノン135は完全に減衰してなくなっている。キセノン135は核分裂からしか発生しないため、2号機の過酷事故において、溶融し、原子炉容器下部や格納容器下部に堆積した核燃料が再臨界となっているのではないかと、この憶測を呼んだ。

このキセノン135の検出は、再臨界とは直接関係なく、自発核分裂を考えることで説明できる。通常のウラン燃料に含まれているウラン238や、核燃料の燃焼に伴って発生するプルトニウム238、240、キュリウム242、244といった核種は、自発核分裂しやすい性質を持っている。この自発核分裂で発生したキセノン135が、格納容器内部のガスサンプリングシステムで検出されたものと考えられる。

キセノン135が11月1日に検出された翌日、東電は、念のため炉心にホウ酸水を注入した。ホウ酸水は中性子を吸収する効果があるため、仮に燃料デブリが再臨界になっていたとすると、燃料デブリが未臨界になり、発生するキセノン135の量は大幅に減るはずである。しかしながら、ホウ酸水を注入した後も同程度の濃度のキセノン135が検出された。このことは、燃料デブリが再臨界になっていたのではなく、自発核分裂でキセノン135が発生しているとの推測と整合している。

(2) デブリ取り出し時の臨界管理

福島第一原子力発電所の廃炉作業では、溶け落ちた燃料(燃料デブリ)を取り出す作業が計画されている。現状では、燃料デブリは未臨界と判断できるが、燃料デブリの取り出しにおいては、固まった燃料デブリの掘削、移動などの作業が発生する。再臨界になる可能性は低いと予想されるものの、一方で、再臨界になることはないとは断言を持って作業することは安全上許容されない。そのため、燃料デブリ取り出しにおいては、何らかの形で臨界管理を実施することになると予想される。現在、そのための技術開発が進められている。

II. 本連載講座の概要

今後、本連載講座で取り扱う内容について、以下に概要をとりまとめる。

1. 未臨界度の定義(第2回)

未臨界度は、実効増倍率 k に対して

$$(1-k)/k$$

として定義されることが一般的である。しかしながら、実効増倍率は、体系がちょうど臨界状態にある際の中性子束の分布を用いて評価していることから、未臨界状態にある体系における中性子の増倍を的確に表しているとはいえない場合がある。これは、特に実効増倍率が1よりずっと小さい場合(未臨界度が深いとき)に顕著に表れる。そのため、未臨界状態における中性子の増倍(変化率)を適切に表す様々なパラメータが検討されている。第2回ではこれらのパラメータの概要について紹介する。

2. 未臨界度の測定(第3回)

体系の未臨界度(実効増倍率)を測定する手法として、様々な手法がこれまでに提案されている。これらの測定手法はそれぞれ長所と短所があり、これらを良く理解して適切な測定方法を使用する必要がある。第3回では、未臨界度測定手法の原理と特徴について説明する。

3. 臨界安全(第4回)

核燃料を取り扱う施設において、意図しない核燃料の臨界を防ぐことは、安全確保の基本である。第4回では、臨界安全について、未臨界確保の方策などに関連付けながら説明を行う。

4. 燃料デブリ取り出し(第5回)

福島第一原子力発電所において計画されている燃料デブリの取り出しにおいては、燃料デブリの臨界管理を行いながら作業を実施する予定である。第5回では、燃料デブリ取り出し作業における臨界管理の考え方と技術開発の状況を説明する。

5. 加速器駆動システム(ADS)(第6回)

加速器駆動システム(Accelerator Driven System)は、マイナーアクチノイド核種の核変換の手段として検討がなされており、未臨界状態の体系に、加速器で発生させた高エネルギー荷電粒子を用いて発生させた核破碎中性子を打ち込んで定常運転を行う。ADSの性能は、加速器のビーム強度とともに、体系の未臨界度に大きく依存するため、未臨界度の常時監視が重要となる。第6回では、ADSにおける未臨界度監視について説明する。

6. 動力炉での未臨界度監視(第7回)

商業炉における燃料交換は、未臨界であることを確認しながら実施されている。第7回では、商業炉、特にBWRにおける未臨界度の常時監視技術について紹介する。

7. 未臨界実験の活用(第8回)

一般に核特性の検証は、極低出力の臨界集合体を用いて行われている臨界実験データを用いる。臨界実験は、小型とはいえ、原子炉を用いる必要があるため、限られた条件でしか行うことが出来ない。一方、臨界にならないが、核燃料を用いた体系で実験を行うこともでき、これは未臨界実験と呼ばれている³⁾。体系を臨界にしないため、原子炉では実施できないような実験も実施できることが特徴になる。第8回では、未臨界実験と、そのデータの活用方法について説明する。

Ⅲ. まとめ

臨界と未臨界は、実効増倍率が1か1未満かの数字上の違いではなく、異なる物理状態であると考えたほうが良い。初回は、臨界と未臨界の違いについて、いくつかのトピックスを交えながら解説した。第2回目以降は、未臨界についての基礎的な知識を得られるよう、学術的な側面から実際の応用までを体系的に解説する予定である。

— 参考資料 —

- 1) G. E. Whitesides, "A Difficulty in Computing the k-effective of the World," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 14, 680(1971).
- 2) 福島第一原子力発電所2号機の格納容器からのXe135の検出について、東京電力株式会社、平成23年11月4日。
- 3) 未臨界実験データ評価研究専門委員会報告書、「未臨界実験データ評価」研究専門委員会、一般社団法人日本原子力学会、2011年3月。

著者紹介

遠藤知弘 (えんどう・ともひろ)
名古屋大学 工学研究科
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 臨界安全, 未臨界度測定

辻本和文 (つじもと・かずふみ)
日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 核変換

山本章夫 (やまもと・あきお)
名古屋大学 工学研究科
(専門分野/関心分野) 原子炉物理, 原子力安全