

いろいろな炉物理パラメータ*

千葉豪

平成 30 年 3 月 5 日

1 はじめに

炉物理の分野で用いられるパラメータ（以降、「炉物理パラメータ」と呼称）にはさまざまなものがある。本稿では、以下のパラメータについて解説を行う（適宜、追加していく予定である）。

- 中性子増倍率
- 反応度
- 反応率（分布）
- 反応率比

2 中性子増倍率

言わずもがなである炉物理の基本パラメータであり、無限体系の場合は「中性子無限増倍率（ k_{∞} ）」、有限体系（漏れのある体系）の場合は「中性子実効増倍率（ k_{eff} ）」として使い分けられる。

中性子増倍率は、「ある世代に系に存在する中性子の総数の、一つ前の世代に系に存在する中性子の総数に対する比」や、「ある世代における核分裂反応の総数の、一つ前の世代における核分裂反応の総数に対する比」などと定義される場合もある一方で、「体系での核分裂による中性子発生総数の、体系での漏洩及び吸収による中性子損失総数に対する比」と定義される場合もあるが、これらはいずれも同義である。

単一媒質で構成される体系におけるエネルギー 1 群の中性子拡散方程式は以下で記述される。

$$-D\nabla^2\phi(r) + \Sigma_a\phi(r) = \frac{1}{k}\nu\Sigma_f\phi(r) \quad (1)$$

この式に現れるパラメータ（固有値方程式の固有値）である k が中性子増倍率となる。この両辺を全ての空間で積分し、 k について整理すると以下の式を得る。

$$k = \frac{\int \nu\Sigma_f\phi(r) dr}{\int (-D\nabla^2\phi(r) + \Sigma_a\phi(r)) dr} \quad (2)$$

この式の分子は「体系での核分裂による中性子発生総数」であり、分母は「体系での漏洩及び吸収による中性子損失総数」に対応するため、中性子増倍率はそれらの比として定義されることが分かる。

また、次のような考え方も可能である。まず、式 (1) を以下のように簡略化して表示する。

$$A\phi = \frac{1}{k}F\phi \quad (3)$$

* /Document/Education/ReactorPhysicsParameters

ここで、ある世代の中性子束分布 $\phi_i(r)$ が式 (3) を満足しているものとする。この中性子束分布が生成する核分裂中性子源の分布は $F\phi_i(r)$ と書け、またこの核分裂中性子源分布によって生じる次の世代の中性子束分布 $\phi_{i+1}(r)$ は以下の式で書ける。

$$A\phi_{i+1}(r) = F\phi_i(r) \quad (4)$$

従って、 $\phi_{i+1}(r)$ は以下のように書ける。

$$\phi_{i+1}(r) = A^{-1}F\phi_i(r) \quad (5)$$

ここで、式 (3) より以下の式が得られる。

$$k\phi_i(r) = A^{-1}F\phi_i(r) \quad (6)$$

これより、 $\phi_{i+1}(r)$ は以下のように書けることになる。

$$\phi_{i+1}(r) = k\phi_i(r) \quad (7)$$

この式の両辺を全ての空間で積分し、 k について整理すると以下の式を得る。

$$k = \frac{\int \phi_{i+1}(r) dr}{\int \phi_i(r) dr} \quad (8)$$

この式は、「ある世代に系に存在する中性子の総数の、一つ前の世代に系に存在する中性子の総数に対する比」という定義に対応する。また、式 (7) の両辺に F を作用させることで

$$k = \frac{\int F\phi_{i+1}(r) dr}{\int F\phi_i(r) dr} \quad (9)$$

が得られる。この式は、「ある世代における核分裂反応の総数の、一つ前の世代における核分裂反応の総数に対する比」という定義に対応する。

3 反応度

反応度 ρ は中性子増倍率 k を用いて以下で定義される。

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \quad (10)$$

この式から分かるように、 ρ は、 k と同様に、ある体系での核分裂反応による中性子の増倍を定量化するパラメータである。

一方、ある系に対して何かしらの外乱を与えることで系の反応度が変動することになる。この外乱前後の反応度の差は「外乱が反応度に与える影響 (価値)」と考えられるので、これを「反応度価値」と呼ぶ。例えば、制御棒を挿入することにより生じる反応度の差は「制御棒の反応度価値」と呼ばれる。なお、「反応度価値」も「反応度」と呼ぶことが一般的であり、この場合、反応度はその差 (価値) も含めて「反応度」と呼称されることになる。

3.1 ドップラー反応度

系の温度が変動することによって、核反応断面積に共鳴構造を有するものについては、その実効的な断面積が変動する場合がある。これによる反応度の変化を「ドップラー反応度」と呼ぶ。ドップラー反応度はウラン 238 による共鳴吸収の影響に対して用いられるのが一般的であり、燃料温度が上昇することにより負のドップラー反応度が系に印加されることになる。

3.2 冷却材ボイド反応度

冷却材が沸騰（ボイド化）した場合には、中性子の減速や冷却材による吸収、体系からの中性子の漏洩が変化し、それに伴って系の反応度が変動する。このような反応度を「冷却材ボイド反応度」と呼ぶ。高速中性子炉では、冷却材がボイド化した場合に正の反応度が印加される場合があり、安全上、重要な炉物理パラメータとなっている。

4 反応率（分布）

反応率は正確には「中性子核反応率」と呼ばれ、中性子と原子核との反応がどの程度起こっているかを示すパラメータである。反応率には「微視的反応率」と「巨視的反応率」があり、前者は $\sigma\phi$ 、後者は $\Sigma\phi$ で示される。反応断面積 σ や Σ 、中性子束 ϕ は中性子入射エネルギー E に依存するため、反応率も E に依存するパラメータである。例として、Pu-239 と U-238 の核分裂断面積、及び臨界集合体 Jezebel の炉中心における中性子束と反応率のエネルギースペクトルについて、多群化したものを Fig. 1 に示す。

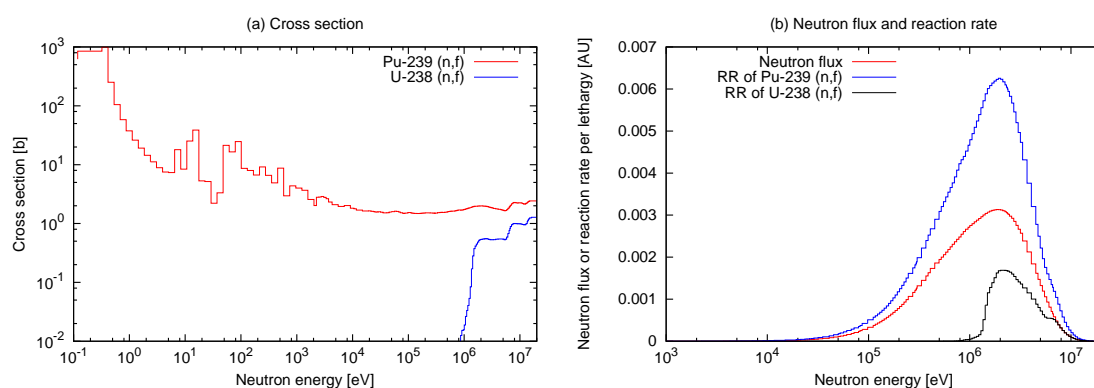


Fig. 1: Jezebel 炉中心における中性子束と反応率のエネルギースペクトル

なお、一般的には、反応率はエネルギーを積分したものと定義される。この場合、微視的反応率は $\int \sigma(E)\phi(E)dE$ 、巨視的反応率は $\int \Sigma(E)\phi(E)dE$ と定義される。

また、中性子束の空間依存性を考慮した場合は、反応率も空間依存となる。従って、例えば巨視的吸収反応率の空間分布 $R(r)$ は以下で定義される。

$$R(r) = \int \Sigma_a(r, E)\phi(r, E)dE \quad (11)$$

反応率の空間分布の一例として、球形臨界集合体 Jezebel の Pu-239 と U-238 の核分裂反応率分布を Fig. 2 に示す。

原子炉の出力分布も反応率分布の一種といえる。出力分布 $P(r)$ は以下の式で定義できるであろう。

$$P(r) = \sum_i \xi_i N_i(r) \int \sigma_{f,i}(E)\phi(r, E)dE \quad (12)$$

ここで、 ξ_i は核分裂性核種 i が 1 核分裂あたりに発生するエネルギーを、 N_i は核種 i の数密度を、それぞれ示す。臨界集合体を用いた臨界実験では、原子炉の出力分布に対する予測精度を検証するためのデータとして、U-235 や Pu-239 などの核分裂性核種について、微視的核分裂反応率分布を測定したりする。また、高速炉を模擬した臨界実験では、ブランケット領域の増殖に関するパラメータとして、U-238 の微視的捕獲反応率分布を測定したりする。

なお、一般的には中性子束分布の絶対値を（実験的に）求めるのは難しいため、反応率分布については特定の位置（例えば原子炉の中心）で規格化した値を用いる。

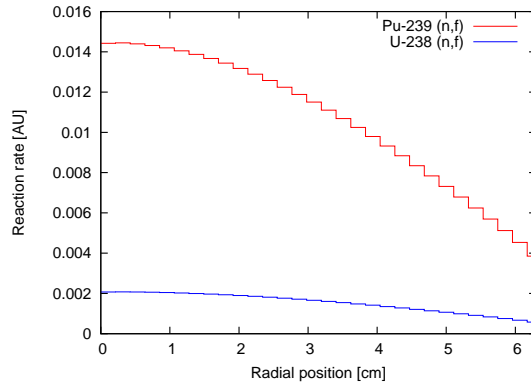


Fig. 2: Jezebel における反応率空間分布

5 反応率比

2つの異なる反応率の比が「反応率比」と呼ばれるパラメータである。例えば、ある核種の微視的核分裂反応率と微視的捕獲反応率の比 RRR は以下で定義される。

$$RRR = \frac{\int \sigma_f(E)\phi(E)dE}{\int \sigma_c(E)\phi(E)dE} \quad (13)$$

この式から明らかなように、分子、分母のいずれも中性子束 $\phi(E)$ に比例することから、反応率比には中性子束の絶対値の大きさは影響しない。従って、反応率分布と異なり、反応率比はその絶対値が意味をもつことになる。

反応率比は中性子束のエネルギースペクトルの情報を得る場合に便利なパラメータである。例として、U-235 及び U-238 の核分裂断面積を Fig. 3 に示す。図に示されているように U-235 の核分裂断面積は低エネルギーの中性子に大きな感度がある一方、U-238 の核分裂断面積は MeV 領域の中性子だけに感度がある。従って、このふたつの反応率比は、低エネルギー領域と高エネルギー領域の中性子束の比に対応することになる。このように反応率比は中性子束のエネルギースペクトルの情報に強く関連することから、「スペクトルインデックス」と呼ばれる場合もある。

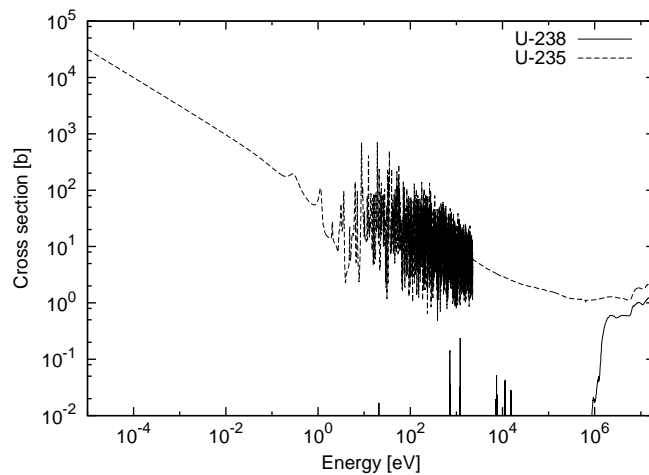


Fig. 3: U-235 及び U-238 の核分裂断面積