

# “Generation time” の訳し方

千葉豪

平成 27 年 7 月 31 日

## 1 「世代時間」とは？

はじめに即発中性子のみの方特性方程式を文献 [1] に従って導出する。

いま核分裂性物質とその他の構成材からなる体系において外部からの中性子の供給はなく、かつその内部の中性子密度分布がその体系固有の定常的な分布に達しているものとする。この体系内における中性子数  $n$  のバランスは以下の式で表現される。

$$\frac{dn}{dt} = S - A - L \quad (1)$$

ここで、 $S$ 、 $A$ 、 $L$  はそれぞれ単位時間あたりの平均的な中性子の発生数、吸収数、漏れ数を示している。中性子増倍率  $k$  はこれらを用いて以下のように定義される。

$$k = \frac{S}{L + A} \quad (2)$$

$L + A$  は単位時間あたりの平均中性子消滅数を示す。従って、ある時点に存在する全中性子  $n$  が全て消滅するのに要する平均時間、すなわち中性子の平均寿命  $l$  は  $l = n / (L + A)$  となる。同様に、 $S$  は単位時間あたりの平均中性子発生数であるから、 $n$  をそれで割ったものが中性子の生成に要する平均の時間となる。従って、中性子の平均生成時間を  $\Lambda$  と定義すると  $\Lambda = n / S$  が得られる。中性子生成時間は英語では「Generation time」と呼称されるが、いくつかの炉物理の教科書ではこれを「世代時間」と訳している場合がある。それが及ぼす混乱を明確にするのが本メモの趣旨である。

なお、中性子の平均寿命  $l$  と平均生成時間  $\Lambda$  について、式 (2) を用いることにより、 $\Lambda = l / k$  の関係が得られる。

式 (1)、(2) より次式が得られる。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k - 1}{l} n \quad (3)$$

これが即発中性子のみの方特性方程式である。また、この方程式の解は次のように与えられる。

$$n = n(0) \exp\left(\frac{k - 1}{l} t\right) \quad (4)$$

さて、中性子寿命が  $l$  で与えられている場合、ひとつの中性子がイベントを起こす（反応を起こすか体系から漏れるかする）ために必要な時間は  $l$  であるため、時間  $l$  が経過したとき中性子数は  $k$  倍になると直感的に考えられる。すなわち、

$$n(l) = kn(0) \quad (5)$$

となると考えられる。一方、式 (4) に  $t = l$  を代入すると、以下の式を得る。

$$n(l) = n(0) \exp(k - 1) = n(0) \left( 1 + (k - 1) + \frac{(k - 1)^2}{2} + \dots \right) \neq kn(0) \quad (6)$$

すなわち、中性子寿命に相当する時間経過後、中性子数は  $k$  倍にはならないことが分かる。

また、生成時間 ( $t = l/k$ ) を用いた場合はどうなるであろうか。この場合、

$$n(l/k) = n(0) \exp\left(\frac{k - 1}{k}\right) \neq kn(0) \quad (7)$$

となり、生成時間に相当する時間経過後、中性子数は  $k$  倍にはならないことが分かる。

式 (4) より、中性子数が  $k$  倍になる時間  $\bar{t}$  は以下のように得られる。

$$\bar{t} = \frac{\ln k}{k - 1} l \quad (8)$$

ここで、 $\bar{t}$  を「世代時間 one-generation」と定義する。世代時間と生成時間の中性子寿命に対する比を Fig. 1 に示すが、世代時間は中性子寿命と生成時間の中間の値をとることが分かる<sup>1</sup>。

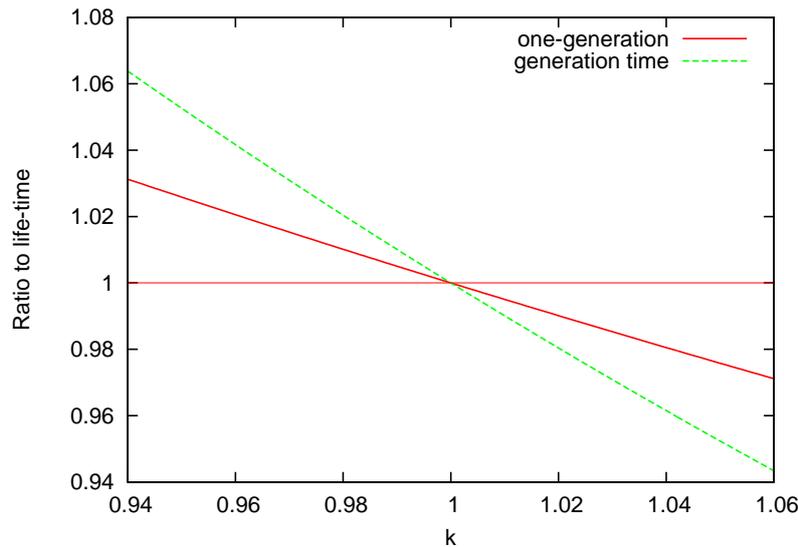


Fig. 1: Ratio of one-generation or generation time to life time

以上より、「生成時間」と「世代時間」とが異なる概念のものであること、Generation time は「一個の中性子が生成されるために必要な平均時間」であり、「Generation」はあくまで「Neutron generation」の意味であり「世代」の意味は持たないことを明確にした。Generation time を「世代時間」と訳すのは誤りであり、中性子の「世代」の時間を定義する場合には、中性子寿命や生成時間とは異なるものになると考える。

なお、そもそも中性子の生成と消滅がバランスしていない状態で、「一世代の時間」を定義する意味がどこにあるのか、筆者は疑問に思っている。

<sup>1</sup> $k \rightarrow 1$  のときは  $\bar{t} \rightarrow l$ ,  $\Lambda \rightarrow l$  となるため、中性子寿命、生成時間、世代時間は同一となる。つまり、臨界近傍では、この議論は「どうでもよい」ものである。

時間  $l$  で中性子数  $n$  が  $k$  倍になる場合には  $n$  の時間依存性は以下のように書けるであろう。

$$n(t) = n_0 k^{t/l} = n_0 (\exp(\ln k))^{t/l} = n_0 \exp\left(\frac{\ln k}{l} t\right) \quad (9)$$

従って、 $n$  が従う微分方程式は次のように書ける。

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\ln k}{l} n \quad (10)$$

これを以下のように書き直す。

$$\Delta n = (\ln k) n \frac{\Delta t}{l} \quad (11)$$

つまり、時間  $l$  で中性子数  $n$  が  $k$  倍になる場合には、中性子寿命で規格化された単位時間あたりの中性子数の変動は  $\ln k$  に比例しなければならないことが分かる。

## 2 反応に要する時間

即発中性子寿命に対する新しい解釈が林氏により与えられている [2] ので、ここではそれについて紹介する。

無限均質媒質の原子炉を考え、エネルギーを 1 群で扱うと、 $S = \nu \Sigma_f n v$ 、 $A = \Sigma_a n v$ 、 $L = 0$  と書けるので、 $l$ 、 $\Lambda$  はそれぞれ以下のように表せる。

$$l = \frac{1}{v \Sigma_a}, \quad (12)$$

$$\Lambda = \frac{1}{v \nu \Sigma_f} \quad (13)$$

巨視的断面積の逆数は平均自由行程に対応する。これらの式では各々の反応に対する平均自由行程が速度で除されているため、 $l$ 、 $\Lambda$  はそれぞれの反応を起こす時間に対応していることが分かる。

ここで、核分裂により発生した中性子が次の反応を起こすまでの「平均」距離について考える。1 群モデルの場合、反応としては捕獲と核分裂が考えられるが、いずれにしろ、中性子はいったん「吸収」されるので、次の反応を起こすまでの距離は吸収断面積のみに依存することになり、反応が捕獲であろうが核分裂であろうが、その距離は  $1/\Sigma_a$  と書ける。従って、これらの反応を起こすために必要な時間はいずれも  $1/v \Sigma_a$  となる、というのが林氏の主張である（と著者は考える）。

ある中性子が核分裂反応を起こすまでに距離  $x$  だけ移動したとする。この場合、吸収の結果、核分裂を起こさず捕獲された中性子が別に  $(\Sigma_a - \Sigma_f)/\Sigma_f$  存在することになる。その移動距離は同様に  $x$  であるから、ある中性子が核分裂反応を起こすまでに移動した距離にこの捕獲された中性子の移動距離を足し合わせると  $x + x(\Sigma_a - \Sigma_f)/\Sigma_f = x \Sigma_a / \Sigma_f$  となる。 $x$  として平均距離  $1/\Sigma_a$  を用いると、ある中性子が核分裂反応を起こすまでの全ての中性子の総平均移動距離は  $1/\Sigma_f$  となる。一個の核分裂中性子が生成するのに要する中性子の総平均移動距離は  $1/\nu \Sigma_f$  となるので、平均の（正味の）中性子生成に要する時間は  $1/v \nu \Sigma_f$  で与えられることになる。

中性子生成時間、平均寿命について、もう一つの文献 [3] にも触れておきたい。この文献における主張は以下の通りである。

- 真空境界条件が与えられている体系では、真空領域で中性子が崩壊して消滅することを考慮すれば、中性子の平均寿命は異なるものとなる。
- 熱中性子核分裂断面積がゼロである体系を想定すると、高速領域のみで連鎖反応は規定できるので、中性子の平均寿命は高速領域の情報のみで定義されることになるが、中性子が熱領域で吸収されて消滅することを考慮した場合には、平均寿命は異なるものとなる。

この主張に対してコメントするつもりはないが、真空領域にしる、熱中性子核分裂断面積がゼロのときの熱領域にしる、インポートランスはゼロになるため、インポートランスが乗ぜられる平均寿命、生成時間の定義に基づく場合には、上記の点はパラメータに全く影響しないと考える。なお、文献 [3] に対するやりとりが文献 [4] に与えられていることを付記する。

本件については、辻雅司先生と伴雄一郎氏に議論につきあっていただくとともに、様々な示唆をいただきました。

## 参考文献

- [1] 伏見康治責任編集、「実験物理学講座 29 原子炉」、第二章、共立出版、(1972).
- [2] 林正俊、「即発中性子寿命の新しい解釈」、日本原子力学会誌、**37**、p.1050 (1995).
- [3] M. Hayashi, 'Ambiguity of the mean time to loss of a neutron in a critical reactor,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, **36**, p.957 (1999).
- [4] S. Zimin, 'Comment on the short note by Masatoshi Hayashi,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, **37**, p.324 (2000).