

# ペリオド法により測定される反応度の 核種毎遅発中性子割合に対する感度の計算

千葉豪

平成 27 年 2 月 1 日

炉物理実験において反応度を測定する手法として一般的に使われる方法のひとつにペリオド法がある。ペリオド法では、測定された原子炉安定ペリオドから反応度を求める際に種々の遅発中性子データを用いることから、これら遅発中性子データの精度が反応度測定値の精度に影響を及ぼす。従って、反応度測定値がどのような遅発中性子データに大きい感度を有するか、という情報は、反応度測定値の精度向上を図るうえで極めて有益である。

ペリオド法で反応度を測定する場合、通常は 6 群の遅発中性子データ（崩壊定数  $\lambda_i$ 、相対収率  $a_i$ ）を用いる。これら 6 群データを用いたときの反応度のペリオド依存性は簡潔な式により記述できるため、反応度測定値の個々の 6 群データに対する感度は容易に計算することが出来る。一方、近年、遅発中性子放出に関わる核種毎のデータ（核分裂収率や崩壊定数）をより高精度化しようという試みがあるが、このような場合には、ペリオド法で測定される反応度の核種毎の遅発中性子データに対する感度が有益な情報となる。

このような感度を定量化しようという試みは過去にも行なわれており [1, 2]、ペリオドを無限大に漸近させたときの反応度（微小な反応度）に対する各々の遅発中性子先行核の寄与が定量化されている。なお、この検討では、ペリオドを無限大に漸近させるという前提を置くことにより、遅発中性子先行核密度の時間依存性を厳密に取り扱うことを可能としている。

核分裂により遅発中性子先行核が各々の累積収率に従って瞬時に生成され、それらが各々の崩壊定数により遅発中性子を放出すると考えれば、従来の遅発中性子 6 群を用いた表式を遅発中性子先行核数群のものに置き換えるだけでよく、任意のペリオド（反応度）についての評価が可能となる。

ただし、遅発中性子先行核には、別の核分裂片が崩壊することにより時間遅れで生成するものもあるため、このような取扱いは厳密ではない。この影響を文献 [1] では「Decay chain effect」と呼称しているが、この Decay chain effect を考慮したときのペリオドに対する遅発中性子データの感度の定量化は文献 [4] に詳しく述べられている。

また、この方法で核分裂収率に関連するパラメータに対する感度を計算する場合は、累積収率によって定義されるパラメータに対するものしか評価できないことも短所となる（文献 [4] の評価では「独立」収率に対する感度が評価されている）。

本検討は、Decay chain effect を無視した簡略モデルで、ペリオド法により測定される反応度の核種毎の遅発中性子データに対する感度を計算することを目的とする。

Decay chain effect を無視した場合、反応度  $\rho$  とペリオド  $T$  は以下の式で関係づけられる。

$$\rho = \sum_{i=1}^N \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \quad (1)$$

ここで、 $N$  は遅発中性子先行核の数であり、 $\beta_i$  は先行核  $i$  から放出される遅発中性子の全核分裂中性子に対する割合（遅発中性子割合）を示す。 $\beta_i$  は、累積核分裂収率  $y_i$ 、遅発中性子放出を伴うチャンネルへの崩壊分岐比  $P_{ni}$ 、全核分裂中性子数  $\nu$  を用いて

$$\beta_i = y_i P_{ni} / \nu \quad (2)$$

と書ける。なお、崩壊により中性子が複数発生する場合は、それに応じた定数を乗ずる必要がある。反応度  $\rho$  の  $\beta_i$  に対する相対感度  $S_{\beta_i}^{\rho}$  は以下のように書ける。

$$S_{\beta_i}^{\rho} = \frac{\partial \rho}{\partial \beta_i} \cdot \frac{\beta_i}{\rho} = \frac{\frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T}}{\sum_{j=1}^N \frac{\beta_j}{1 + \lambda_j T}} \quad (3)$$

一方、個々の遅発中性子データに対して、より巨視的な量である核分裂あたりの平均遅発中性子発生数  $\nu_d$  は、比較的精度が良いと考えられている。そこで、 $\nu_d$  が不変、すなわち  $\beta = \sum_j \beta_j$  が不変であるという制限を課とするならば、この制限の下での感度  $\bar{S}_{\beta_i}^{\rho}$  は次のように書ける。

$$\bar{S}_{\beta_i}^{\rho} = \sum_j S_{\beta_j}^{\rho} \left( \delta_{ij} - \frac{\beta_i}{\beta} \right) \quad (4)$$

本稿では、式 (3) で定義される感度を Unconstrained sensitivity、式 (4) で定義される感度を Constrained sensitivity と呼ぶこととし、この両者を定量的に評価する。

ペリオド  $T$  に依存した  $\rho$  の  $\beta_i$  に対する感度を、U-235、Pu-239 の熱中性子核分裂と U-238 の高速核分裂について評価した。崩壊データとしては JENDL FP Decay Data File 2011、核分裂収率データとしては JENDL Fission Yield Data File 2011 を用いた [5]。

ペリオドを 1 秒から 1,000 秒まで 1 秒区切りで変化させ、相対感度が 0.01 を越える核種を特定し、それらについて、異なったペリオドでの感度を計算した。U-235 核分裂についての計算結果を Fig. 1 と Fig. 2 に、Pu-239 核分裂についての計算結果を Fig. 3 と Fig. 4 に、U-238 核分裂についての計算結果を Fig. 5 と Fig. 6 に、それぞれ示す。Unconstrained sensitivity は全て正の値をとるが、これは  $\nu_d$  が増えるため、ペリオドが減少することに由来する。U-235 核分裂における Br-89 のように、Unconstrained sensitivity では比較的大きな値をとるのに対して、Constrained sensitivity では小さな値をとるものがあるが、こういった核種は遅発中性子先行核のなかでも「平均的な」振る舞いをする核種である、ということが言えるであろう。

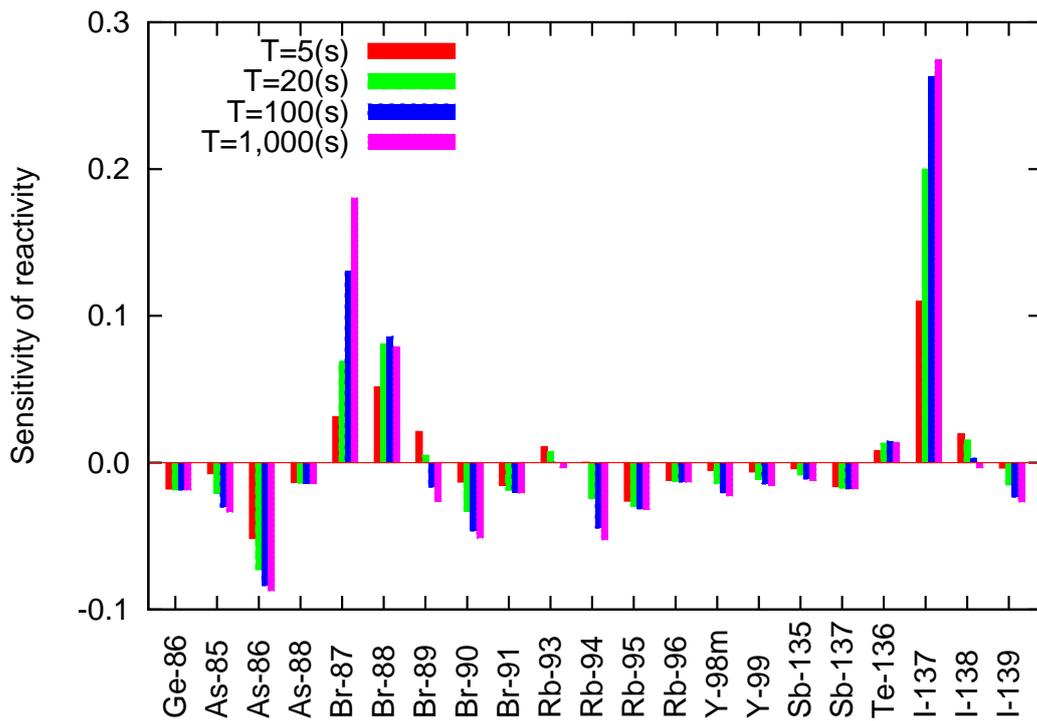


Fig. 1: Constrained sensitivity of reactivity to delayed neutron emission fraction (U-235 thermal fission)

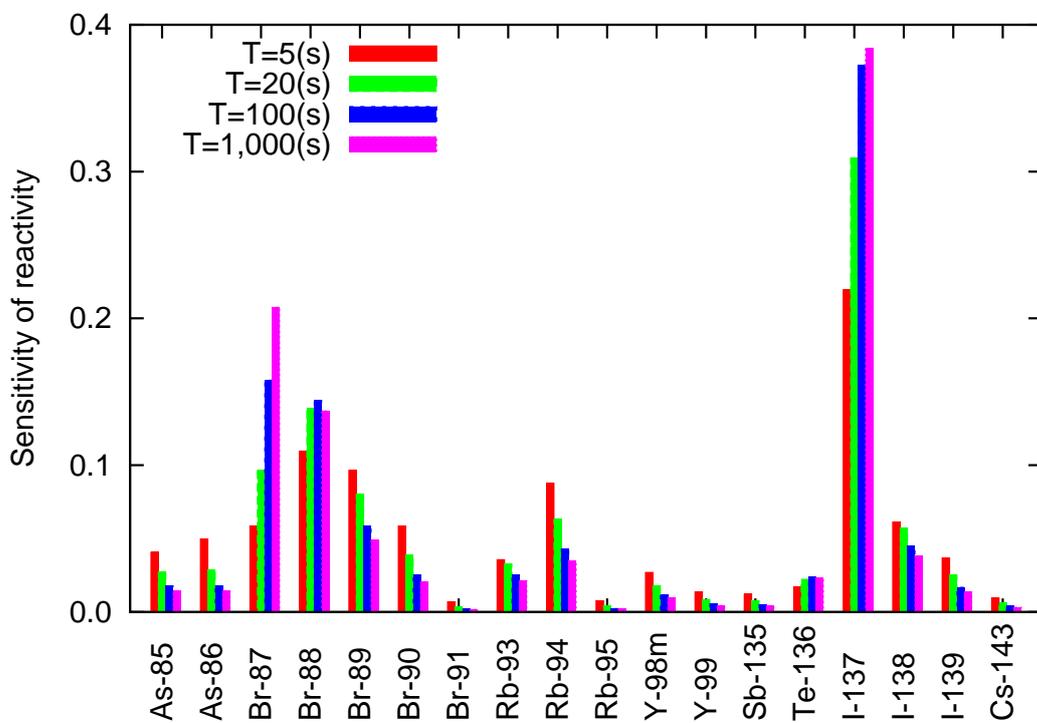


Fig. 2: Unconstrained sensitivity of reactivity to delayed neutron emission fraction (U-235 thermal fission)

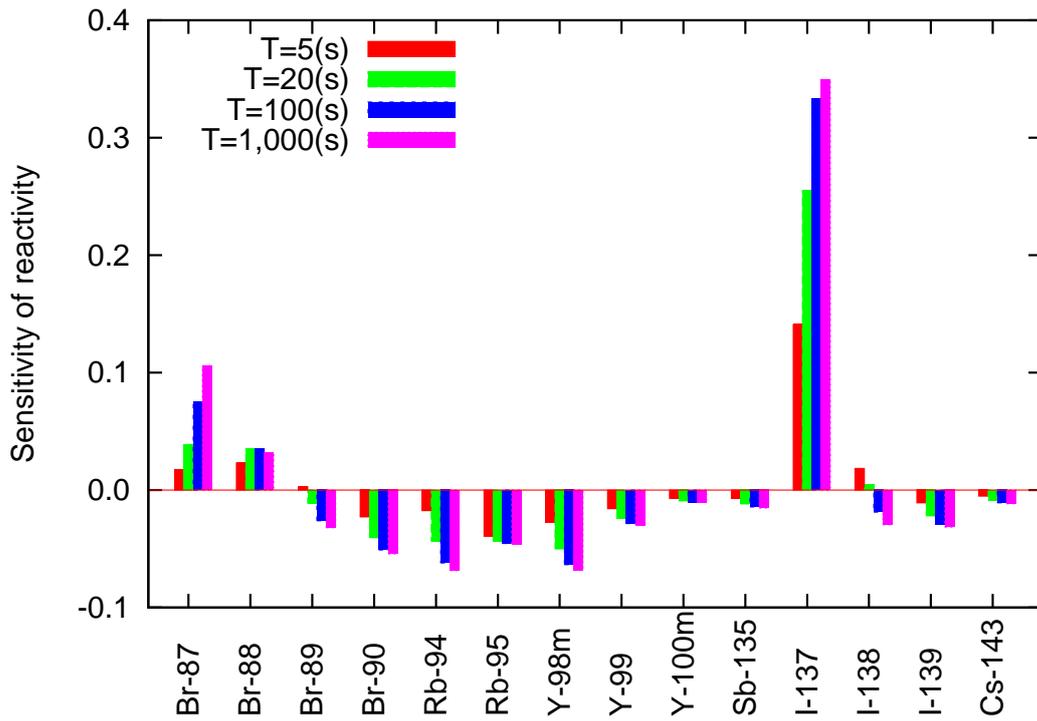


Fig. 3: Constrained sensitivity of reactivity to delayed neutron emission fraction (Pu-239 thermal fission)

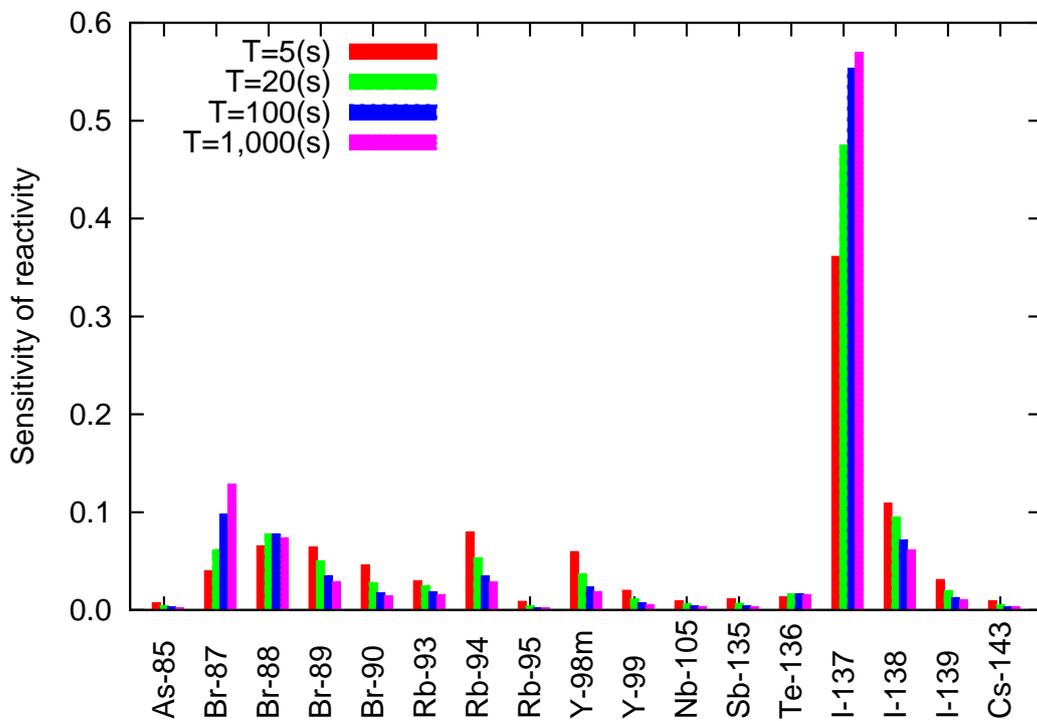


Fig. 4: Unconstrained sensitivity of reactivity to delayed neutron emission fraction (Pu-239 thermal fission)

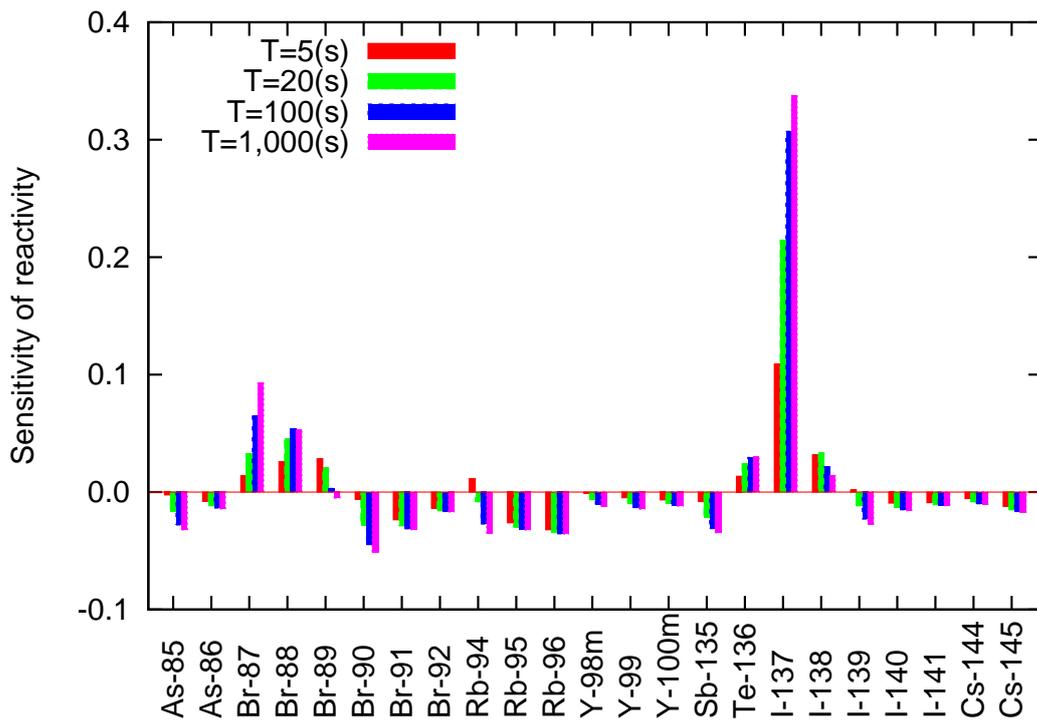


Fig. 5: Constrained sensitivity of reactivity to delayed neutron emission fraction (U-238 fast fission)

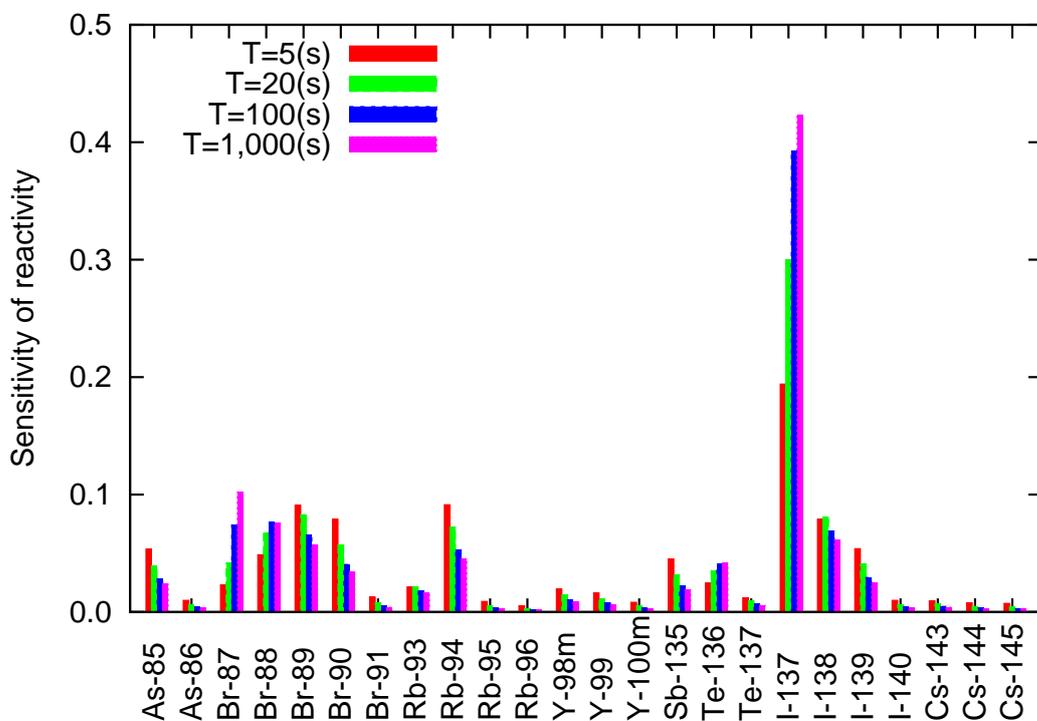


Fig. 6: Unconstrained sensitivity of reactivity to delayed neutron emission fraction (U-238 fast fission)

## 参考文献

- [1] 親松和浩、「反応度総和計算法と遅発中性子データへのフィードバック」、核データニュース、No.68, p.32 (2001).
- [2] K.Oyamatsu, 'Reactor kinetics calculated in the summation method,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, Supp. 2, pp.1109-1111 (2002).
- [3] T.Miyazono, *et al.*, 'Delayed neutron spectra and their uncertainties in fission product summation calculations,' *Proc. 1996 Symposium on Nuclear Data*, JAERI-Conf 97-005, p.83 (1996).
- [4] G.Chiba, *et al.*, 'Sensitivity and uncertainty analysis for reactor stable period induced by positive reactivity using one-point adjoint kinetics equation,' *J. Nucl. Sci. Technol.*, **508**[12], pp.1150-1160, (2013).
- [5] J.Katakura, 'JENDL FP Decay Data File 2011 and Fission Yields Data File 2011,' JAEA-Data/Code 2011-025 (2011).