

非線形の温度フィードバックを有する体系の 瞬時反応度添加による臨界事故時放出エネルギー

Energy released in criticality accident by instantaneous reactivity insertion to
system with non-linear temperature feedback

*山根祐一

日本原子力研究開発機構

非線形の温度フィードバック反応度を有する体系を対象として、瞬時反応度添加の臨界事故で放出される核分裂エネルギーを添加反応度等の関数として表す式を、一点炉動特性方程式に基づいて導出した。一点炉動特性コード AGNES による数値計算の結果と比較し、両者の差が添加反応度に応じて数十%~4%程度であることを確認した。

キーワード： 臨界事故、エネルギー、非線形温度フィードバック反応度、瞬時反応度添加、AGNES

1. 緒言 臨界事故時の公衆の被ばくを評価するためには、核分裂により生成される放射性物質の量が重要であり、このため、臨界事故時の総核分裂数の評価が必要となる。出力の第1ピークにおいて生成された遅発中性子先行核が中性子源となって、第1ピークに続く出力単調減少^[1]を主導するとの考えに基づいて必要な条件を設定し、出力単調減少時に出力 $n(W)$ が満たすべき一点炉動特性方程式の解析解を求めた。この成果は臨界によるリスク評価を効率よく行う手法の開発に資する。以下では、エネルギーの単位 (J) で議論するが、核分裂あたりのエネルギーは約 200MeV であり、この関係 (3.2×10^{11} J/fission) を用いればエネルギーは容易に核分裂数に換算できる。

2. 方程式の導出 瞬時に反応度 ρ_0 ($>>1\%$) が添加され、反応度フィードバックは温度上昇のみ (上昇温度の2次関数) とする。核燃料から容器等への熱の移動は無視できる程度とする。出力単調減少時には、第1ピークにおいて過剰に生成された遅発中性子先行核の崩壊で生じる中性子によって出力が維持される準定常状態にあると考え、一点炉動特性方程式の dn/dt はその他の項に比べて小さく、無視できると仮定した。その結果得られる方程式を全放出エネルギー $E(J)$ について解析的に解くと、第1ピークで生じた核分裂エネルギーを $E_p(J)$ ^[2]、反応度温度係数を $\alpha_1(1/^\circ\text{C})$, $\alpha_2(1/^\circ\text{C}^2)$ 、熱容量の逆数を K と ($^\circ\text{C}/\text{J}$) して、反応度添加時からの時刻 $t(s)$ までに放出された核分裂エネルギー $E(J)$ はこれらの関数として表される。

$$E = \left(-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3} \right)^{1/3} + \left(-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3} \right)^{1/3}$$

$$p = -3 \left(\frac{\rho_0 - \beta}{\alpha_2 K^2} + \frac{A^2}{K^2} \right), \quad q = -\frac{3F}{\alpha_2 K^2} + \frac{3(\rho_0 - \beta)}{\alpha_2 K^3} + \frac{A^3}{K^3},$$

$$F = \frac{1}{3} \alpha_2 K^2 E_p^3 + \frac{1}{2} \alpha_1 K E_p^2 - (\rho_0 - \beta) E_p + E_p \sum \beta_i (1 - e^{-\lambda_i t}),$$

$$E_p = \frac{1}{\sqrt{\alpha_2 K}} \left[\sqrt{12(\rho_0 - \beta + \alpha_2 A^2) - 3\alpha_2 A^2} - \frac{1}{3} \sqrt{\alpha_2 A^2} \right].$$

... Eq.1. ここで、 $A = \alpha_1/2\alpha_2$ 、 ρ_0 : 添加反応度、

β : 遅発中性子割合である。

3. 計算結果 TRACY のステップ状反応度添加実験^[3]のデータに式1 ($t = \infty$ とした) を適用した。一点炉動特性コード AGNES^[4]による数値計算結果 ($t = 10000s$) と比較したところ、図1に示すように、超過反応度の十分広い範囲 (2~100%) に対して、両者は概ね近い値を示した。その差は超過反応度が大きくなるほど小さくなり、 $\rho_0 = 3\%$ で33%、 $\rho_0 = 100\%$ で4%程度であった。数値計算の結果示される、全放出エネルギーの超過反応度に対する非線形的な振る舞いを、式1の解析結果は概ね再現している。

参考文献 [1] Yuichi Yamane, ISBN 978-953-51-0042-3, pp159-174(2012). [2] 日本原子力学会 2015 春の年会予稿集 J25 (2015). [3] Miyoshi, et al., NEA No.6285(2009). [4] Nakajima, et al., JAERI-Data/Code2002-004 (2002).

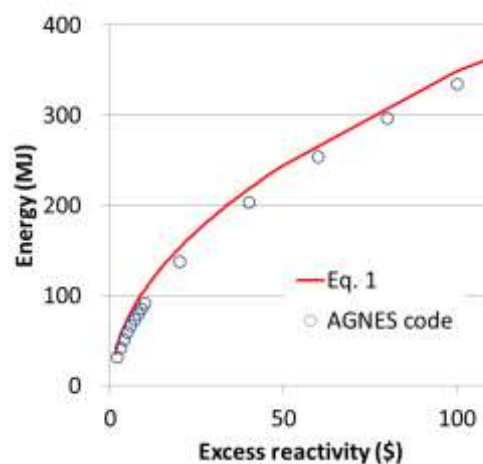


図1：エネルギーの解析解及び数値計算結果の比較

*Yuichi Yamane

Japan Atomic Energy Agency.