

高速炉重大事故時の即発臨界超過現象における非線形性の影響評価

1. 即発臨界超過現象における非線形性について

高速炉の代表的重大事故である ULOF の事故シーケンスにおいては、溶融燃料が凝集して即発臨界を超過すれば出力逸走によって大きなエネルギー放出が生じる可能性がある。反応度が即発臨界を超過すると出力は指数関数的に増加するため、その時のエネルギー放出量は反応度挿入を駆動する燃料運動の規模や同時性に大きく影響される。

「常陽」の ULOF 遷移過程の解析においては、炉心物質の運動に伴って反応度が何度か変動しながらその規模は炉心溶融の進展と共に拡大していく傾向が示された。すなわち、炉心中心の下部に燃料が凝集して出力逸走が発生すると、その中心部の温度・圧力上昇により炉心物質は分散し、いったん反応度は未臨界となる。その後、分散した炉心物質は炉心外周部から再び炉心中心部へ揺り戻って集中することで再び反応度は即発臨界を超過する。このような反応度の大きな増減を伴う炉心物質の集中と分散、いわゆる自励的スロッシングが炉心物質の炉心からの流出により反応度レベルが十分に低下するまで繰り返される。

このように、高速炉の溶融炉心における出力変動は、炉心物質の流動が出力変動を生起し、その出力変動がその後の炉心物質の流動に影響を与えるという自己再帰的な現象である。特に、指数関数的に出力が上昇する出力逸走では物質配位のわずかな変動が反応度の変化を通してエネルギー放出に大きな影響を与えることも相俟って、遷移過程における物質の運動と出力の変動は、事故シーケンスの初期状態の微少な違いや物質挙動の変動に対して鋭敏性を有する非線形挙動となる。

ここでは、この非線形性による放出エネルギーの評価結果の範囲に対する影響の評価を行う。

2. 非線形性の影響評価

非線形性の影響の評価を行う対象は、「常陽」の ULOF 遷移過程解析で重要現象の不確かさの影響を考慮して放出エネルギーの上限値を評価するケースとする。これは、このケースの結果を用いて原子炉容器の機械的健全性と格納容器（床上）へのナトリウム漏えい量を解析し、格納容器破損防止措置の有効性評価を行うためである。このケースは 2次元軸対象の体系で炉心外への燃料流出を無視することで、横方向の

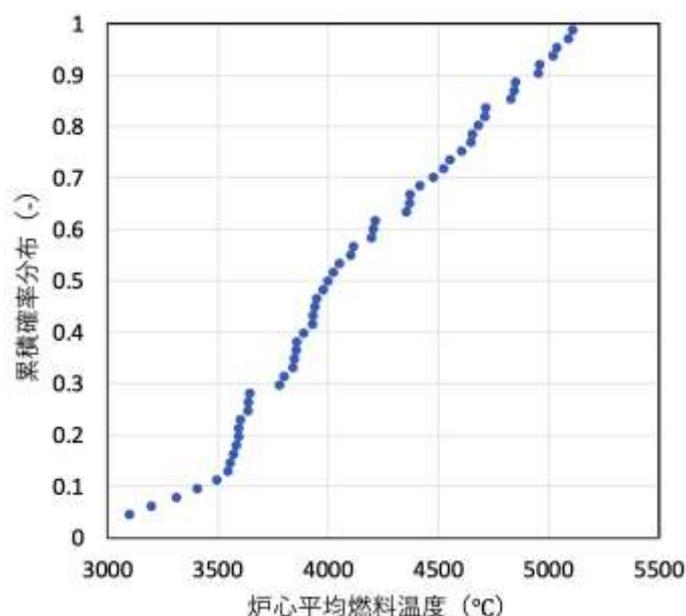
物質移動が一齐に中心軸に向かうという仮想的な解析ケースである。また、燃料が焼結密度のまま高密度で堆積する、固体燃料デブリを含み本来流動性が極めて低い炉心物質の粘性をゼロとするなどの保守的な仮定を用いている。このため、現実の3次元挙動に比べて反応度の増減が過大に計算され、前述の非線形性が強く影響すると考えられる。

エネルギー放出過程の非線形性の影響を評価するために事故シーケンスの解析に初期状態の微少な違いを与える手段として、同一の入力データに対して初期タイムステップ幅のみを微妙に変えた多数の解析を実施し、最大の放出エネルギーを与える解析ケースを採用する方法を採った。解析ケース数は解析から得られる炉心平均燃料温度の最も高い値が上位5%となる信頼水準が95%を超えるように59ケース^[1]とした。

3. 解析結果、及び統計的分析

放出エネルギーを代表する評価指標である炉心平均燃料温度が最も高くなった約5,110°Cを計算した解析ケースを有効性評価において選定した。得られた炉心平均燃料温度の累積確率分布をメジアンランク法で求めた結果を第1図に示す。

この炉心平均燃料温度の計算結果を用いて、Jeffreysの無情報事前分布を仮定した確率計算^[2]により、炉心平均燃料温度が約5,110°Cを超過する確率は約0.83%となった。なお、この超過確率の計算、及び解析結果の確率分布に対数正規分布とGumbel分布を当てはめて検討を行った結果を添付に示す。



第1図 各ケースにおける炉心平均燃料温度解析結果の分布

4. まとめ

「常陽」の格納容器破損防止措置の有効性評価では、ULOF の遷移過程におけるエネルギー発生挙動が有する非線形性を考慮した保守的な評価とするために、微少な初期擾乱を与えた多数の解析を実施した。解析から得られる炉心平均燃料温度の最も高い値が上位 5%となる信頼水準が 95%を超えるケース数^[1]の解析を実施し、評価指標である炉心平均燃料温度が最も高くなった約 5,110°Cを計算した解析ケースを有効性評価において選定した。またこの放出エネルギーを超過する確率は統計的分析^[2]によって約 0.83%と評価されており、十分に小さく抑えられている。

参考文献

- [1] 学会標準 AESJ-SC-S001:2008 「統計的安全評価の実施基準：2008」
- [2] 学会標準 AESJ-SC-RK001:2010 「原子力発電所の確率論的安全評価用のパラメータ推定に関する実施基準：2010」

添付 SIMMER による ULOF 解析結果の統計的分析

(1) 事前情報無しの一項データに対する確率分布

炉心平均燃料温度の最高値を超えるか超えないかの on/off 事象（二項データ）として、炉心平均燃料温度の最高値を超える確率を評価する。学会標準 AESJ-SC-RK001:2010 の Jeffreys の無情報事前分布を仮定した確率計算を行う。

$$\alpha_{post} = \alpha_{prior} + x$$

$$\beta_{post} = \beta_{prior} + n - x$$

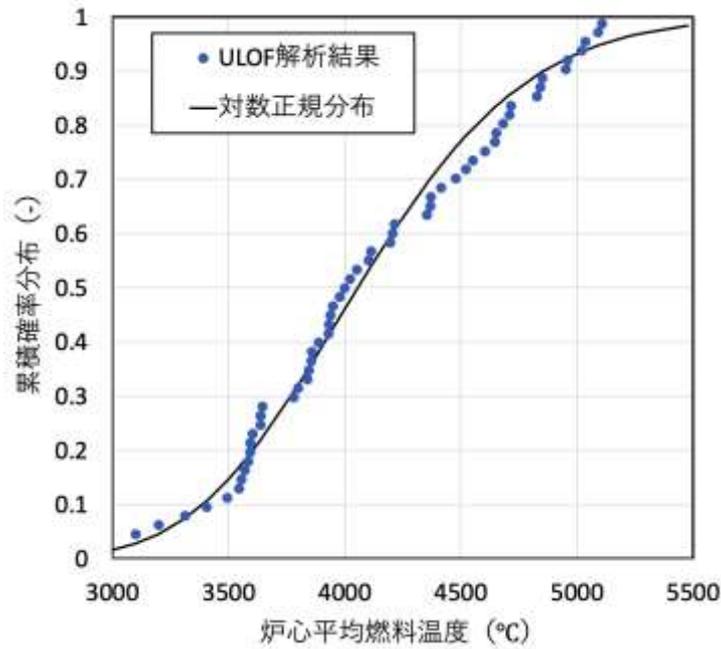
$$\text{超過確率} = \alpha_{post} / (\alpha_{post} + \beta_{post})$$

これに事前情報無しであることから、 $\alpha_{prior} = \beta_{prior} = 1/2$ 、 $x=0$ 、 $n=59$ を代入して、炉心平均燃料温度が約 5,110°C を超過する確率は約 0.83% となる。

(2) 対数正規分布の適用

炉心平均燃料温度の計算結果の確率分布に対して、負値をとらない物理量に対して適用される対数正規分布の平均及び分散を計算し、対数正規分布への適合性を検討した。SIMMER の解析結果と対数正規分布の累積確率分布を第 1 図示す。

対数正規分布を用いて、炉心平均燃料温度が約 5,110°C を超過する確率を求めると、約 5% となる。ただし、第 1 図では 5,000°C 以上の高温側で SIMMER の解析結果の確率分布関数は対数正規分布よりも大きくなり、特に約 5,000°C 以上では対数正規分布の超過確率が SIMMER の解析結果による超過確率を過大評価することが確認される。これは SIMMER による解析結果の尖度が負値である -0.60 となり、解析結果の確率分布関数は正規分布に比べて平坦で裾が狭い分布であることに対応している。実際に解析結果では高温側の裾の領域のデータが存在しないという特徴を有しており、サンプル数が十分でない影響の可能性もあるが、SIMMER の計算結果の累積確率分布は遷移過程解析における即発臨界超過に伴う放出エネルギーに何らかの上限が存在する可能性を示唆している。



第 1 図 炉心平均燃料温度の累積確率

(3) Gumbel 分布の適用

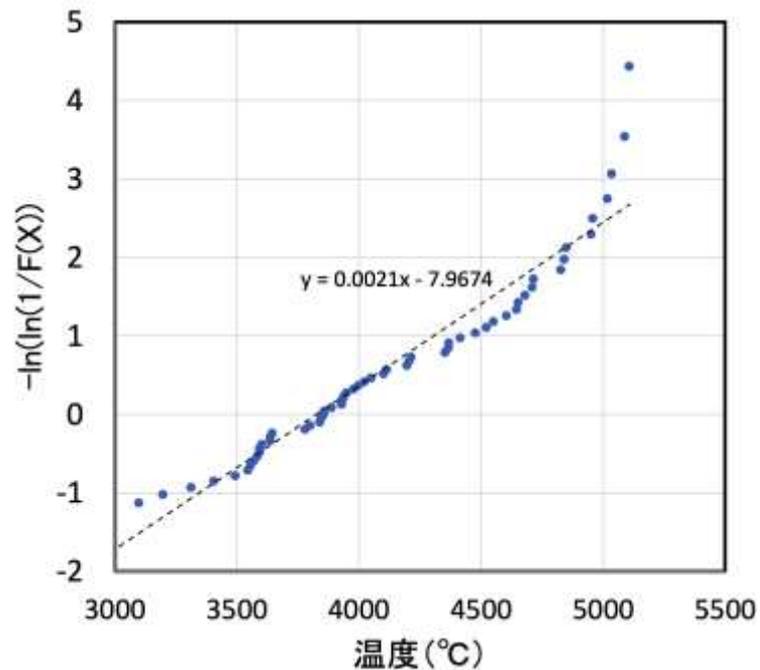
正規分布に従う母集団からランダムに抽出した最大値は、サンプル数が増えると二重指数分布 (Gumbel 分布) に従うとされている。ULOF の炉心平均燃料温度について Gumbel 分布への適合性を検討した。Gumbel 分布は以下の分布関数で与えられる。

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left\{ -\left(\frac{x - \mu}{\eta} \right) \right\} \right] \quad (1)$$

従って、 $F(x)$ の逆数の 2 回自然対数を取ると、

$$Y = -\ln \left\{ \ln \left(\frac{1}{F(x)} \right) \right\} = \frac{x - \mu}{\eta} \quad (2)$$

(2) 式のように x の一次関数になる。燃料温度の累積確率分布関数の逆数の 2 回自然対数を取ってプロットしたグラフを第 2 図に示す。



第2図 炉心平均燃料温度の累積確率の Gumbel 分布への適用

第2図から炉心平均燃料温度が約 5,000°C以下であれば Gumbel 分布に適合するが、それ以上の高温側では Gumbel 分布よりも確率分布関数は大きくなり、Gumbel 分布には適合しない。すなわち、Gumbel 分布を用いて高温側の超過確率を評価すると過大評価することになる。これは前述のように燃料温度を正規分布に当てはめた場合の尖度が負の値を取ったことに対応しており、即発臨界超過に伴う放出エネルギーには何らかの上限値が存在することを示唆している。

第2図には最小自乗法を用いてフィッティングした直線も示している。この結果を用いて Gumbel 分布のパラメータを求め、炉心平均燃料温度約 5,110°Cの累積確率分布関数は約 93.3%、すなわち超過確率は約 6.7%であるが、前述のように Gumbel 分布は高温側の超過確率を過大評価している。