

即発臨界超過時の燃料凝集挙動の評価

1. 始めに

「常陽」の ULOF における遷移過程解析では、基本ケースに対して不確かさの影響を評価する必要があると判断された FCI 及び燃料スロッシングについて不確かさを包絡する解析ケースとして、不確かさ影響評価ケース 1、及び不確かさ影響評価ケース 2 の解析を実施した。これらの解析の結果、第 1 表に示す即発臨界超過時の反応度挿入率と炉心平均燃料温度の最高値が得られ、不確かさ影響評価ケース 2 を用いて機械的応答過程の評価を実施した。

即発臨界超過におけるエネルギー発生挙動は、即発臨界超過時の反応度挿入率に支配される。反応度増加の主な原因は燃料の凝集によるものであることから、燃料の凝集挙動、あるいは凝集速度を定量化する物理量を定義することで、燃料の凝集挙動と反応度挿入の対応関係を示すことができる可能性がある。反応度の変化は単純な燃料凝集のみでなく、反応度の空間勾配と局所的な燃料の流速、スティーラの空間配位などの様々な因子に影響を受けるため、単純な燃料凝集量や燃料凝集速度と反応度の増減挙動は定量的には一致するわけではないが、これらの物理量を評価することで、反応度挿入挙動と燃料の凝集挙動の因果関係を定性的に把握することはできると考えられる。

2. 燃料凝集量 (Coagulation) の計算方法

Coagulation は燃料の凝集状態を表す物理量であり、ここでは燃料の重心からの距離を燃料の巨視的密度分布で重み付き平均した値に基づいて定義する。ここでは、凝集に従って増加し、かつ遷移過程開始時点からの変化の割合となるように、以下の式で計算する。

$$C = \frac{R_{CO}}{R_c}$$

$$R_c = \int_{core} \bar{\rho}_f |\vec{r}_G| dV / \int_{core} \bar{\rho}_f dV$$

ここで、C は coagulation、 $\bar{\rho}_f$ は燃料の巨視的密度、 \vec{r}_G は重心からの位置ベクトル、 R_c は重心からの距離の燃料密度による重み付き平均、 R_{CO} は遷移過程解析開始時点での R_c である。

ULOF(i) の基本ケース、不確かさ影響評価ケース 1 (FCI の不確かさ)、不確かさ影響評価ケース 2 (燃料スロッシングの不確かさ) について、燃料凝集量と反応度の時間変化をプロットしたグラフを第 1 図に示す。燃料凝集量と反応度の増減は定量的には一致しないが、その傾向はほぼ同様な変化を示しているとみなせる。即発臨界超過による発生エネルギーは即発臨界を超過する際の反応度挿入率に支配されるため、燃料凝集量と反応度に相関関係があるのであれば、即発臨界超過による発生エネルギーは同様に即発臨界を超過する際の燃料凝集量の時間変化率と相関関係を有するようになると考えられる。上記の 3 ケースについて、即発臨界を超過する最の燃料凝縮量の時間変化率を求めた結果を第 1 表に示す。予想される通りに、燃料凝集量の時間変化率が大きいと、反応度挿入率も大きくなっていることが確認される。

3. 燃料凝集率の評価

2. で評価した燃料凝集量 (Coagulation) は、燃料の空間分布における凝集の程度を表す物理量であり、各時点の燃料の配位のみ依存する。従って、Coagulation は燃料の空間配位から定まる反応度に対応する物理量であることから、即発臨界超過挙動の厳しさに対応する即発臨界超過時の反応度挿入速度に対応させるには、その時間変化率を求める必要があった。これに対して、中性子束分布が最も高い位置、すなわち中性子束分布の中心に向かう燃料の速度を燃料の巨視的密度で加重平均して求める燃料凝集率は反応度挿入率そのものに対応する物理量であると言える。燃料凝集率は次式で求める。

$$V_c = - \int_{core} \bar{\rho}_f \vec{e}_G \cdot \vec{v}_f dV / \int_{core} \bar{\rho}_f dV$$

ここで、 V_c は燃料凝集率、 $\bar{\rho}_f$ は燃料の巨視的密度、 \vec{e}_G は中性子束中心に向かう単位ベクトル、 \vec{v}_f は燃料の流速ベクトルである。右辺の“-”は中性子束中心に向かう方向を正とするために付加している。さらに、各地点で中性子束中心に向かう流速が正である燃料質量の炉心インベントリに対する割合、すなわち凝集に寄与する燃料質量の割合も求めた。

上記の3ケースについて、燃料凝集率と反応度挿入率の時間変化をプロットしたグラフを第2図に示す。燃料凝集率と反応度挿入率は定量的に比例関係にあるわけではないが、両者の変化挙動はほぼ一致していると言える。また、即発臨界を超過する最の燃料凝縮率と凝集に寄与する燃料質量の割合を第2表に示す。燃料凝集率との時間変化率と凝集に寄与する燃料質量の割合が大きいと、反応度挿入率も大きくなっている。

4. まとめ

燃料の重心からの距離を燃料の巨視的密度分布で重み付き平均した値の初期値からの変化割合の逆数として燃料の凝集量 (Coagulation) の時間変化率、燃料凝集率、および凝集に寄与する燃料質量の割合を評価し、SIMMER コードによる基本ケースと不確かさ影響評価ケース1及び2、さらに重力による1次元コンパクションを想定した簡易評価を対象として即発臨界を超過する際の反応度挿入率と比較した。これらの物理量と反応度挿入率は良く整合することが明らかとなった。これは、即発臨界を超過する状態での反応度の挿入は、主に燃料の凝集によるものであることを示している。

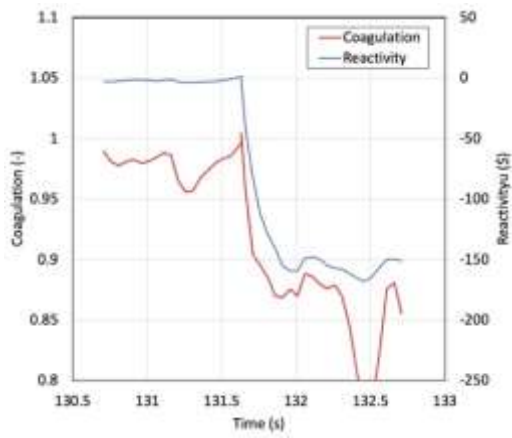
第1表 ULOF(i)において即発臨界を超過する際の凝集量の時間変化率と反応度挿入率の比較

| ケース | 凝集量の時間変化率 | 反応度挿入率 | 炉心平均燃料温度の最高値 |
|---------------------------|--------------|----------|--------------|
| 基本 | 約 0.15 (1/s) | 約 30\$/s | 約 3,700°C |
| 不確かさ影響評価ケース1 (FCIの不確かさ) | 約 0.27 (1/s) | 約 50\$/s | 約 4,070°C |
| 不確かさ影響評価ケース2 (燃料スロッシング挙動) | 約 0.30 (1/s) | 約 80\$/s | 約 5,110°C |

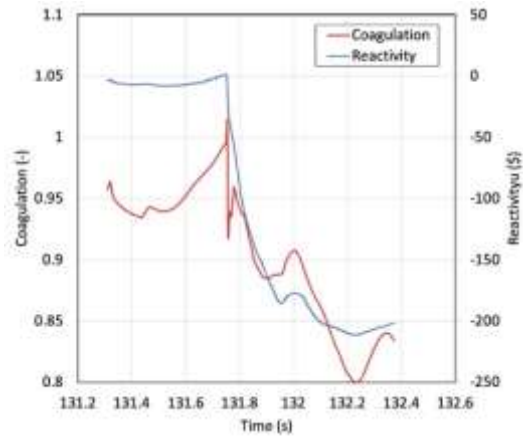
第2表 ULOF(i)において即発臨界を超過する際の燃料凝集率、凝集に寄与する(注1)燃料質量の割合、反応度挿入率の比較

| ケース | 燃料凝集率 | 凝集に寄与する燃料質量の割合 | 反応度挿入率 |
|---------------------------|---------------|----------------|----------|
| 基本 | 約 0.084 (m/s) | 約 32% | 約 30\$/s |
| 不確かさ影響評価ケース1 (FCIの不確かさ) | 約 0.136 (m/s) | 約 43% | 約 50\$/s |
| 不確かさ影響評価ケース2 (燃料スロッシング挙動) | 約 0.162 (m/s) | 約 55% | 約 80\$/s |

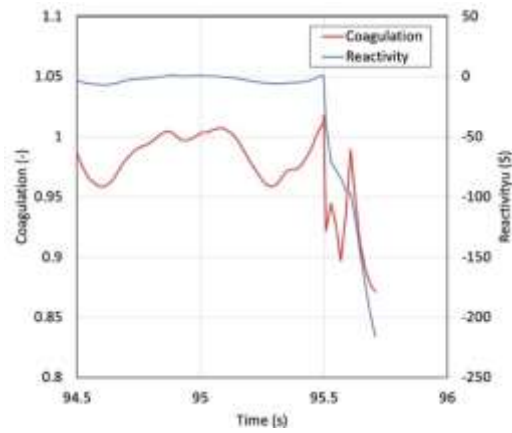
注1：中性子束中心に向かう速度が正



(a)基本ケース

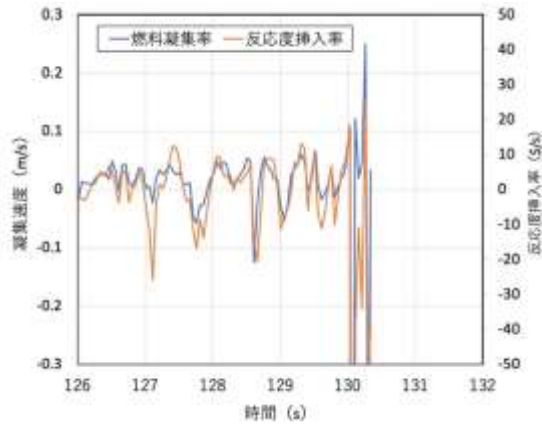


(b)不確かさ影響評価ケース1 (FCI)

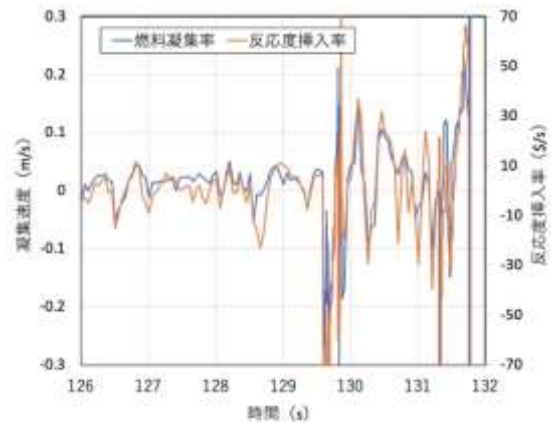


(c)不確かさ影響評価ケース2 (燃料スロッシング)

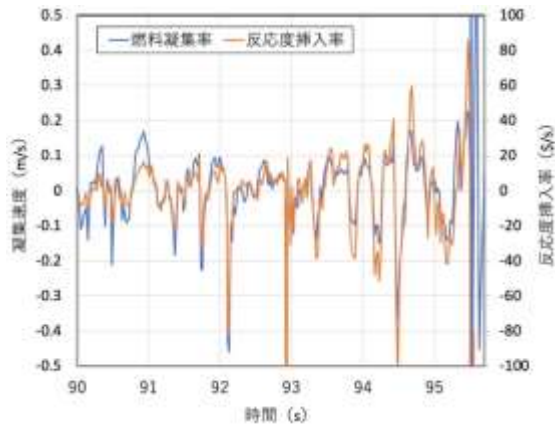
第1図 燃料凝集量と反応度の時間変化



(a)基本ケース



(b)不確かさ影響評価ケース1 (FCI)



(c)不確かさ影響評価ケース2 (燃料スロッシング)

第2図 燃料凝集率と反応度挿入率の時間変化