

即発臨界超過時の燃料凝集量 (Coagulation) 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、ステイール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、燃料凝集量の評価することで、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。

実際の SIMMER 解析体系における計算手順を添付に示す。

3. 燃料凝集量の評価

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。

4. 簡易評価における燃料凝集量の評価

集合体の重力による1次元的なコンパクト性を想定した即発臨界超過の簡易評価では、炉心集合体を同心円状のリングに分割し、それぞれのリングを炉心中心から順次コンパクトさせて反応度変化を評価し、即発臨界を超過する状態での反応度挿入率を求めた(第2図参照)。この結果、第4リングがコンパクト化する際に即発臨界を超過することが示された。さらに詳細な分析を実施した結果、第4リング内の集合体が集合体の出力順にコンパクトをしていく過程で、最後の4集合体がコンパクトしている間に即発臨界を超過することが判明した。この際の反応度挿入率を計算すると約7\$/sであったが、同時にコンパクト化する集合体数の不確かさを考慮して、1次元的な重力コンパクト性を想定した簡易評価では反応度挿入率を約20～30\$/sと評価した。そこでSIMMER-IVコードによる基本ケースの反応度挿入率約30\$/sを発生させるために必要な同時にコンパクト化する集合体数を概算すると、 $30/7 \times 4 = \text{約} 17$ 体である。

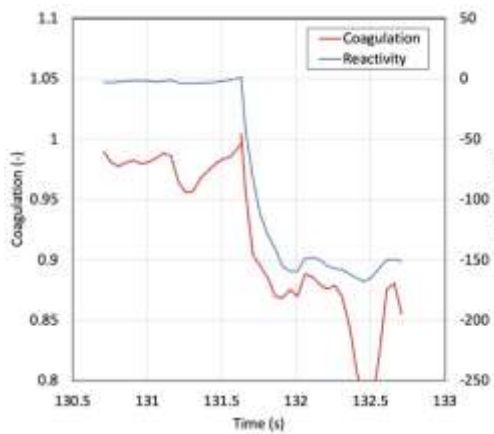
炉心燃料が円筒形状で分布している場合の凝集量(Coagulation)の算出方法を添付2に示す。この算出方法に基づいて、第4リングの17集合体が重力落下によって100%密度にコンパクトして即発臨界を超過する際の凝集量の時間変化率を求めると、約0.14(1/s)となった。これは第1表に示した基本ケースの反応度凝集量の時間変化率約0.15(1/s)とほぼ一致する値である。

5. まとめ

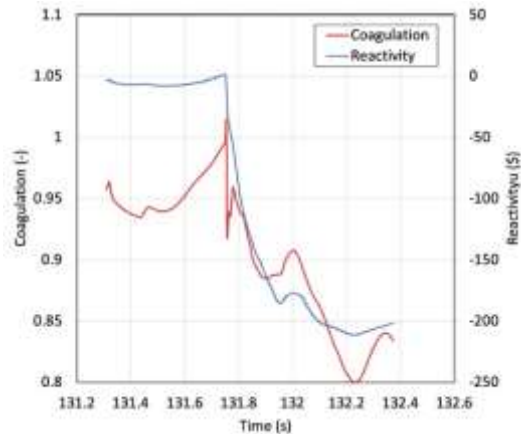
燃料の重心からの距離を燃料の巨視的密度分布で重み付き平均した値の初期値からの変化割合の逆数として燃料の凝集量(Coagulation)を定義し、SIMMERコードによる基本ケースと不確かさ影響評価ケース1及び2、さらに重力による1次元コンパクト性を想定した簡易評価を対象として燃料の凝集量を算出した。即発臨界超過による発生エネルギーを支配する即発臨界超過時の反応度挿入率に対応すると考えられる即発臨界超過時の燃料凝集量の時間変化率を計算したところ、反応度挿入率と燃料凝集量の時間変化率は良く整合することが明らかとなった。これは、即発臨界を超過する状態での反応度の挿入は、主に燃料の凝集によるものであることを示している。

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

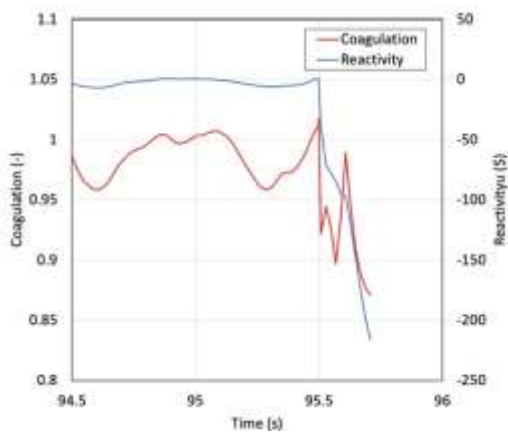
ケース	即発臨界超過する際の凝集量の時間変化率	即発臨界超過する際の反応度挿入率	炉心平均燃料温度の最高値
基本	約 0.15 (1/s)	約 30\$/s	約 3,700°C
不確かさ影響評価ケース1 (FCIの不確かさ)	約 0.27 (1/s)	約 50\$/s	約 4,070°C
不確かさ影響評価ケース2 (燃料スロッシング挙動)	約 0.30 (1/s)	約 80\$/s	約 5,110°C



(a)基本ケース



(b)不確かさ影響評価ケース1 (FCI)

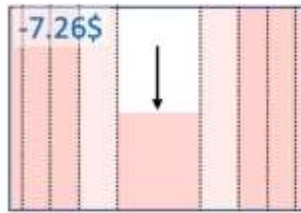


(c)不確かさ影響評価ケース2 (燃料スロッシング)

第1図 凝集量と反応度の時間変化

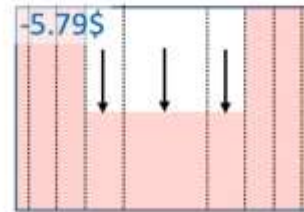


②Naボイド化、温度2800°C
 ②-a Naボイド化、温度運転状態
 反応度<0
 ②-aの状態
 反応度=全炉心ボイド反応度とする



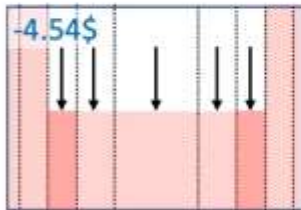
⑥-1 内側炉心を2領域、外側炉心を3領域に分割し、それぞれ順番に圧縮
0.42\$
 炉心物質圧縮高さ0.351318m (100%密度)

外側炉心100%密度

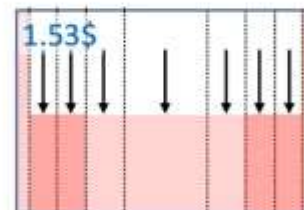


⑥-2
1.89\$

領域の半径は内側から、0.1139、0.1876m、0.218m、0.3361m



⑥-3
3.14\$



⑥-4
9.21\$

第2図 簡易評価体系における反応度変化

添付1 Coagulation の評価方法

Coagulation は燃料の凝集状態を表す物理量で、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、以下の式で評価する。

$$C = \frac{R_{C0}}{R_c}$$

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

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_{C0} は遷移過程解析開始時点での R_c である。

実際の SIMMER 解析体系では、以下の手順で計算する。

(1) 重心位置の計算

r-z 2次元体系 (SIMMER-III) では、半径方向の重心座標は原点 ($r_G = 0$) である。垂直軸方向は、ある軸方向メッシュ位置 j の水平メッシュ全体の燃料質量 $M_{f,j}$ を求め、

$$M_{f,j} = \sum_{i \in j}^{core} \bar{\rho}_{f,i,j} V_{cell,i,j}$$

$M_{f,j}$ を用いて、z 方向セル中心位置の加重平均を行い、重心の z 方向座標とする。なお、この総和は炉心領域でなくても燃料が存在しなければ総和の範囲に含まれていても問題ない。

$$z_G = \sum_j^{core} M_{f,j} z_j / \sum_j^{core} M_{f,j}$$

x-y-z 3次元体系 (SIMMER-IV) においてもほぼ同様の計算で求める。x 方向の重心位置を例にとる。まず、ある x 方向メッシュ位置 i に直交する垂直平面内の燃料質量を求める。

$$M_{f,i} = \sum_{j,k \in i}^{core} \bar{\rho}_{f,i,j,k} V_{cell,i,j,k}$$

この総和は炉心領域でなくても燃料が存在しなければ総和の範囲に含まれていても問題ない。 $M_{f,i}$ を用いて、x 方向セル中心位置の加重平均を行い、重心の x 方向座標とする。

$$x_G = \sum_i^{core} M_{f,i} x_i / \sum_i^{core} M_{f,i}$$

y 方向、z 方向についても同様にして重心座標を求める。

(2) Coagulation の計算

r-z 2次元体系 (SIMMER-III) では、次式で重心からの距離の重み付き平均 R_c を求める。

$$R_c = \sum_{i,j}^{core} \bar{\rho}_{f,i,j} \sqrt{(r_i - r_G)^2 + (z_j - z_G)^2} V_{cell,i,j} / \sum_{i,j}^{core} \bar{\rho}_{f,i,j} V_{cell,i,j}$$

x-y-z 3次元体系 (SIMMER-IV) でも同様である。

$$R_c = \sum_{i,j,k}^{core} \bar{\rho}_{f_{i,j,k}} \sqrt{(x_i - x_G)^2 + (y_k - y_G)^2 + (z_j - z_G)^2} V_{cell_{i,j,k}} / \sum_{i,j,k}^{core} \bar{\rho}_{f_{i,j,k}} V_{cell_{i,j,k}}$$

両体系ともに、得られた R_c を用いて coagulation C を計算する。

添付2 同心円柱の Coagulation の計算方法

高さ H 、軸方向の重心位置 Z_G 、内外の半径が R_1 と R_2 の同心円の Coagulation は次式で計算する。

$$\begin{aligned}
 R_C &= \int_{R_1}^{R_2} \int_{-z_G}^{H-z_G} 2\pi r \sqrt{r^2 + z^2} dr dz / \int_{R_1}^{R_2} \int_{-z_G}^{H-z_G} 2\pi r dr dz \\
 &= \left[\left[\frac{1}{12} z \sqrt{r^2 + z^2} (5r^2 + 2z^2) + r^4 \left\{ \frac{1}{4} \log(\sqrt{r^2 + z^2} + z) - \frac{1}{16} \right\} \right]_{-z_G}^{H-z_G} \right]_{R_1}^{R_2} / H(R_2^2 - R_1^2) \\
 &= \left[\left[\frac{1}{12} z \sqrt{r^2 + z^2} (5r^2 + 2z^2) + \frac{1}{4} r^4 \log(\sqrt{r^2 + z^2} + z) \right]_{-z_G}^{H-z_G} \right]_{R_1}^{R_2} / H(R_2^2 - R_1^2) \\
 &= \left[\left[\frac{1}{12} (H - z_G) \sqrt{r^2 + (H - z_G)^2} (5r^2 + 2(H - z_G)^2) + \frac{1}{4} r^4 \log(\sqrt{r^2 + (H - z_G)^2} + (H - z_G)) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1}{12} (-z_G) \sqrt{r^2 + z_G^2} (5r^2 + 2z_G^2) + \frac{1}{4} r^4 \log(\sqrt{r^2 + z_G^2} - z_G) \right]_{R_1}^{R_2} \right] / H(R_2^2 - R_1^2)
 \end{aligned}$$