

## 下部プレナムにおける溶融燃料のデブリ化について

### 1. はじめに

溶融燃料の下部プレナムへの移行挙動は大量に存在するサブクールされたナトリウム中への浸入となる。溶融燃料は熱伝導度の高いナトリウムにより効率的に冷却・クエンチされ、長距離浸入する前に微粒化してデブリベッドが形成される。FRAG 試験及び FARO/TERMOS 試験は、炉心物質とナトリウムを用いた試験であり、試験の条件は大量のナトリウムが存在する「常陽」の条件よりも炉心物質の微粒化しやすさに関しては厳しい条件であるにもかかわらず炉心物質はほぼ全て微粒化している。このことから、「常陽」の有効性評価において炉心物質がデブリ化することの根拠及びデブリの性状の根拠として適用できる。

これらに関する具体的な根拠は以下のとおりである。

### 2. 下部プレナムでの燃料のデブリベッド形成の条件

炉心領域から下部プレナムに移行した燃料がデブリベッドを形成するためには、

- (1) 溶融燃料がクエンチ（ナトリウムの飽和温度以下の温度まで冷却）されること
- (2) 溶融燃料が原子炉容器底部に到達するまでに微粒化されること

が必要である。そこで、以下の方法により根拠を示す。

- (1) 下部プレナム領域のナトリウムが飽和温度まで加熱されるために必要なエネルギーと、溶融燃料が全量クエンチするのに必要な除熱量の比
- (2) 溶融ジェットの微粒化距離と下部プレナム領域高さの比較

#### 2.1 溶融燃料がクエンチされる条件

下部プレナム領域のナトリウムが飽和温度まで加熱されるために必要なエネルギーと、溶融燃料が全量クエンチするのに必要な除熱量の比は、以下の式で計算する。

$$\frac{M_{Na}(e_{Na}(T_{sat}) - e_{Na}(T_0))}{M_f(e_f(T_{melt}) - e_f(T_{sat}))} \quad (1)$$

ここで、 $M$ は質量、 $e(T)$ は温度 $T$ における比エンタルピーである。下付文字 $Na$ は冷却材ナトリウム、 $f$ は燃料を表す。また、 $T_{melt}$ はクエンチ前の溶融燃料温度で保守的に 3, 200K、 $T_{sat}$ はナトリウム飽和温度で約 950°C、 $T_0$ は原子炉入口 1 次冷却材温度で 350°C である。上式に諸量を代入すると、比は約 5.0 となる。したがって、溶融燃料の全量が下部プレナム領域に移行したとしてもナト

リウムは飽和温度以下であり、かつ、ナトリウム冷却高速炉では冷却材は伝熱特性に優れ、また、高速炉の事故条件下では熔融燃料とナトリウムとの接触境界面に安定蒸気膜が形成されることなく液液接触状態が維持されるため、熔融燃料が効果的にクエンチされる。

## 2.2 熔融ジェットの微粒化距離と下部プレナム領域高さの比較

微粒化距離の計算には、酸化燃料-ナトリウム系条件に対する適用性が比較的高いとされる Epstein らの式<sup>[1],[2]</sup>を用いる。

$$\frac{L_{brk}}{D_j} = \frac{1}{2E_0} \left( \frac{\rho_j}{\rho_c} \right)^{0.5} \quad (2)$$


ここで、 $L_{brk}$ は微粒化距離、 $D_j$ は融体ジェットの直径、 $\rho$ は密度である。下付文字 $j$ は融体ジェット、 $c$ は冷却材を表す。また、 $E_0$ はエンタレイメント係数と呼ばれるものでおよそ 0.05~0.1 である。上式に諸量を代入すると、微粒化距離約 0.48~0.97m を得るが、この微粒化距離は「常陽」の下部プレナム領域高さ約 1.3m と比較すると短い。また、Epstein らの式は流体力学的効果のみを関係づけたもので、同式で考慮されていないナトリウムの局所的な沸騰とその結果生じるナトリウム蒸気の膨張に伴う微粒化<sup>[3],[4]</sup>も加わることで、微粒化距離は更に短くなること が確認されている。このため、熔融燃料は原子炉容器底部に到達するまでに微粒化する。

## 3. FRAG 試験や FARO/TERMOS 試験の条件と常陽の条件の比較

FRAG 試験<sup>[5]</sup>は、米国のサンディア国立研究所 (SNL) で実施された一連の大規模 FCI 試験であり、13~20kg の熔融物質 (FRAG4~FRAG6 及び FRAG13 試験では  $UO_2$ - $ZrO_2$  (70%)、スチール (30%)) を 23kg のナトリウム中へ落下させた試験である。内径 0.34m の試験容器にナトリウムが満たされており、その高さは 500°C で 0.285m、熔融物質とナトリウムの質量比は約 1.1 である。一方、「常陽」の下部プレナム温度は 350°C、高さは約 1.3m、燃料とナトリウムの質量比は約 0.1 である。FRAG 試験では「常陽」よりも微粒化の発生に関して厳しい条件で炉心物質は微粒化した結果が得られている。

FARO/TERMOS 試験<sup>[6]</sup>は、伊国イスプラの共同研究センター (JRC) で実施された 100kg の  $UO_2$  を 130kg のナトリウム中へ落下させた大規模 FCI 試験である。ナトリウムは内径 0.47m の容器に満たされている。ナトリウム高さは 900°C で 2.50m、燃料とナトリウムの質量比は約 0.8 である。第 3.1 図は FARO/TERMOS 試験及び FRAG 試験で得られたデブリベッドのポロシティである。FARO/TERMOS 試験と FRAG4 試験の結果を比較すると、デブリベッド底部~中間部ではほとんど同じポロシティである。したがって、本試験のデータについても「常陽」の有効性評価に適用できると考えられる。

上述のとおり、FRAG 試験や FARO/TERMOS 試験は炉心物質とナトリウムを用いた試験であり、試験の条件は大量のナトリウムが存在する「常陽」の条件よりも炉心物質の微粒化に関して厳しい条件であるにもかかわらず炉心物質がほぼ全て微粒化していることから、「常陽」の有効性評価において炉心物質がデブリ化することの根拠及びデブリの性状の根拠として適用できる。



著作権の関係から公開できません。

第 3.1 図 FARO/TERMOS 試験及び FRAG 試験におけるポロシテイ<sup>[6]</sup>

#### 参考文献

- [1] Epstein, M. and Fauske, H.K., 2001. Applications of the turbulent entrainment assumption to immiscible gas-liquid and liquid-liquid systems. IChemE 79 (Part A), 453-462.
- [2] 松尾栄治、他、「格子ボルツマン法によるジェットブレイクアップ挙動解析」、日本機械学会論文集、Vol.81, No.822, 2015.
- [3] Matsuba, K. et al., Distance for fragmentation of a simulated molten-core material discharged into a sodium pool, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.53, No.5, 707-712, 2016.
- [4] Matsuba, K. et al., Experimental discussion on fragmentation mechanism of molten oxide discharged into a sodium pool, Mechanical Engineering Journal, Vol.3, No.3, 2016.
- [5] T. Y. CHU, "Fragmentation of Molten Core Material by Sodium," Proc. Int. Topi. Mtg. LMFBR Safety and Related Design and Operational Aspects, Lyons, France, July 19-23, 1982, Vol. III, p. 487, European Nuclear Society (1982).
- [6] Magallon, D., Hohmann, H. and Schins, H., "Pouring of 100kg-scale molten UO<sub>2</sub> into sodium", Nuclear Technology, Vol. 98, No. 1, pp.79-90, 1992.