

F L U E N T の境界条件（熱流束）の設定について

1. 損傷炉心物質の冷却性評価の伝熱計算モデル

1.1 概要

ULOF の再配置・冷却過程における残留炉心物質の冷却性を評価するために使用した伝熱計算モデルは、炉心物質内部の発熱と周囲への伝熱の熱収支、及び炉心物質が溶融した際の物質再分布を 1 次元体系で計算する簡易モデルである。

残留炉心物質の冷却性評価においては、炉心物質から周囲への局所的な伝熱挙動を解析することにより、炉心物質の内部がスチールの蒸気圧が発生するような高温となることがなく、安定冷却状態に移行することを確認するとともに、原子炉容器内全体の熱流動を解析する F L U E N T の境界条件となる残留炉心物質から 3 方向（上方向、下方向、径方向）への熱流束履歴を計算する。

1.2 熱収支計算モデル

第 1.1 図に熱収支計算モデルの計算体系を示す。残留炉心物質は高さ方向に一樣ではなく、物質混合の有無、溶融の有無等の様々な性状を区別するため、溶融燃料層、溶融スチール層、混合層（固体燃料粒子と溶融スチールの混合層）及び燃料クラスト層を考慮する。それぞれについて実効的な熱伝導率又は熱伝達率を求める。例えば、混合層については固体燃料粒子を空隙のある固体円筒として、燃料クラスト層については空隙率 0 の固体円筒としてモデル化して熱伝導率を計算する。また、溶融層（溶融燃料層及び溶融スチール層）については自然対流による熱伝達率を計算する。要素分割は高さ方向 1 次元であるが、径方向への除熱についても、混合層及び燃料クラスト層では内部発熱のある径方向固体熱伝導、溶融層では自然対流による熱伝達を考慮する。

各要素に対する熱収支は以下の式で計算する。

$$M_k \frac{dh_k}{dt} = Q_{dh,k} + Q_k - Q_{k+1} - Q_{r,k} \quad (1)$$

ここで、 M は質量、 h は比エンタルピー、 Q_{dh} は崩壊熱による発熱量、 Q_k は要素 $k-1$ から要素 k への軸方向熱移行量、 $Q_{r,k}$ は要素 k からの径方向熱移行量である。また、下付文字 k は要素番号である。熱収支計算では比エンタルピーを使用することにより、燃料やスチールの溶融潜熱を考慮している。

熱移行量は、先述のとおり混合層と燃料クラスト層では固体熱伝導で計算し、溶融燃料層と溶融スチール層では自然対流熱伝達を仮定し複数要素をひとつの領域にまとめて熱伝達率を用いて計算する。混合層と燃料クラスト層から径方向境界への熱移行量は、要素 k の温度と径方向境界温度（溶融燃料及び溶融スチールが接する境界の温度をそれぞれの融点とする。）に対して、内部発熱を持つ円筒の径方向温度分布から定まる径方向境界での熱流束を求めることによって計算する。

軸方向の自然対流熱伝達率について、溶融燃料層の熱伝達率の評価には、平行平板間の体積発熱プールの自然対流に対する Steinberner-Reineke の Nu 数相関式^[1]、溶融スチール層は下面が加熱された非発熱流体の自然対流に対する Churchill の Nu 数相関式^[2]を適用して熱移行量を計算する。また、径方向熱伝達率の評価には、SCARABEE BF シリーズ炉内試験の試験解析でその適用性が確認された Nu 数相関式を用いる^[3]。

1.3 物質再分布計算

再配置・冷却過程解析の初期状態においては、第 1.2 図 (1) に示すように、残留炉心物質は全体が一様な混合層を形成しているものと仮定する。混合層内の燃料が崩壊熱により加熱されて再熔融すると、第 1.2 図 (2) に示すように、密度差により物質の再分布が生じる。すなわち、ある要素で燃料が熔融すると、熔融燃料は密度が高いため下側の要素に沈降する。沈降先の要素では、密度の低い熔融スチールが上側へ浮き上がり分離される。さらに、沈降した熔融燃料より上側の要素では、沈降した熔融燃料の体積分だけ固体燃料粒子が順次落下する。第 1.3 図に物質再分布計算モデルの概念図を示す。本モデルのアルゴリズムは次のとおりである。

第 1.3 図 (0) の初期状態は固体燃料粒子と熔融スチールの混合物が存在しているが、第 1.3 図 (1) において、ある要素で燃料の熔融が生じると、熔融した燃料は下の要素に移行する。ここで、熔融した燃料は、下の要素の熔融スチールの体積分のみ移行できる。一方、熔融燃料の沈降により排除された熔融スチールは、上の要素に移行するとする。すなわち、 $\alpha_{f,liq,k}$ 及び $\alpha_{s,liq,k}$ をそれぞれ要素 k 中の熔融燃料及び熔融スチールの体積割合とすると、

$$\alpha_{f,liq,k+1}\Delta z_{k+1} \leq \alpha_{s,liq,k}\Delta z_k \quad (2)$$

のとき、要素 $k+1$ の熔融燃料を同体積の要素 k の熔融スチールと入れ替える。

$$\alpha_{f,liq,k+1}\Delta z_{k+1} > \alpha_{s,liq,k}\Delta z_k \quad (3)$$

の場合は、要素 k の熔融スチールを同体積の要素 $k+1$ の熔融燃料と入れ替える（この場合、要素 $k+1$ の熔融燃料は一部残ることになる。）。物質の入れ替えを行うとともに平均温度を計算する。この操作を $k=1$ から解析体系の上端である $k = k_{max}$ まで行う。なお、第 1.3 図 (2) に例示するように、固体燃料粒子はある最大体積割合以上には充填できないことを考慮して再分布計算を行う。

崩壊熱による燃料の熔融、あるいは周囲への伝熱による熔融燃料の固化は、物質の再分布の時間スケールと比べて極めて緩慢に進行するため、本物質再分布モデルのようにステップ状に再分布を取り扱う簡易的な手法が適用できる。ただし、物質再分布のタイミングで特に径方向の熱伝達率がステップ状に変化し、熱流束の履歴にも比較的大きな変動が生じる場合がある。このような変動は物質分布の変化に伴う一時的な挙動であって、残留炉心物質の全体的な熱収支の計算や周囲への熱移行量に影響を及ぼすことはない。

2. 残留炉心物質から周囲への熱移行計算モデル

2.1 境界条件の設定

境界条件の設定方法を第 2.1 図に示す。解析体系は、残留炉心物質、下部炉心構造及び上部炉心構造を高さ方向 1 次元に要素分割して計算する。遷移過程の終状態に基づいて、解析体系下端は下部反射体上端から約 10cm 下方で冷却材飽和温度を境界温度とし、解析体系上端は燃料集集体上部端頂部で約 680°C (ULOF (iii) の場合) を境界温度とする。燃料集集体上部端頂部は上部プレナムのナトリウムによって冷却され温度が低下していくと考えられるが、ここでは遷移過程の終状態の温度に保たれるとして保守的な境界条件とする。また、遷移過程の終状態における炉心損傷状態を反映し、内側及び外側燃料集集体の範囲で炉心が損傷し、残留炉心物質は内側反射体に接している状況を想定する。残留炉心物質が遷移過程の終状態から径方向へ拡大しないという想定のもと、熔融燃料及び熔融スチールが接する境界の温度はそれぞれの融点とする。なお、この想定に基づいて評価した熱流

束を用いた F L U E N T の解析の結果、炉心周囲のナトリウム温度が沸点を超えて除熱ができないとの結果になった場合は、残留炉心物質が周囲の構造材を溶融して拡大することになる。一方、除熱が可能との結果が得られた場合は、少なくとも残留炉心物質は当初の炉心の範囲を超えて拡大することは無く、崩壊熱の低下とともに最終的には冷却して固化することになる。

残留炉心物質からの熱流束評価面は、第 1.1 図に示した通り、残留炉心物質上面、残留炉心物質側面、及び下部炉心構造下面とする。残留炉心物質上面に伝わる熱流束は概ね、後述するリフラックス冷却によって上部端（上部プレナム）まで伝わることから、残留物質から上方向の熱流束評価面を残留炉心物質上面としている。

2.2 下方向への熱移行

1.2 節で示したとおり、下方向への熱移行は混合層では固体燃料粒子を空隙のある固体円筒としてモデル化して熱移行量を計算している。

2.3 径方向への熱移行

1.2 節で示したとおり、径方向への熱移行は混合層と燃料クラスト層では固体熱伝導、溶融燃料層と溶融スチール層では Nu 数相関式を適用して熱移行量を計算している。径方向への熱移行のうち支配的となるのは、下方に存在する燃料から加熱され自然対流が発達した溶融スチールによる熱伝達である。溶融スチール層から径方向への熱伝達率については特に、物質再分布のタイミングで下方に存在する混合層で燃料に加熱された高温のスチールが新たに溶融スチール層に取り込まれることにより、溶融スチール層の温度及び厚みがステップ状に変化することによって、径方向の熱伝達量もステップ状に変化する場合がある。

2.4 上方向への熱移行（リフラックス冷却）

リフラックス冷却とは、冷却材が液膜となって流路の壁面を下方向へ重力によって流れ、下部で加熱されて蒸気流となって流路中央部を上向きに流れ、上部で蒸気が凝縮して再び液膜として環流することで、流路下部から上部へ熱を伝える現象である。蒸気流によって蒸発潜熱としての熱を効果的に輸送することができる。リフラックス冷却による熱移行が安定に継続するためには、蒸気流に逆らって流れる液膜の環流が安定に生じる必要がある。

第 2.2 図に円管内の気液対向流の模式図を示す。液膜と蒸気が対向して流れ、蒸気の上向き流れによって液膜の下方向への流れが止められる状態である CCFL (counter-current flow limitation : 気液二相対向流制限) がリフラックス冷却の成立限界となる。「常陽」における冷却材はナトリウムであるが、ここで用いる CCFL 相関式には蒸気-水系用に作成された Wallis の式^[4]である。

$$j_v^{*1/2} + m j_l^{*1/2} = C_w, \quad j_k^* = j_k \left(\frac{\rho_k}{g \Delta \rho D} \right) \quad (k = v, l) \quad (5)$$

ここで、 j は見かけ流速、 ρ は密度、 g は重力加速度、 $\Delta \rho$ は液体と気体の密度差、 D は開口直径である。 m は定数で 1 である。下付文字 v は蒸気、 l は液体を表す。(5) 式に流入液体流量と流出蒸気流量が等しくなる流量

$$G_{crit} = j_v \rho_v = j_l \rho_l \quad (6)$$

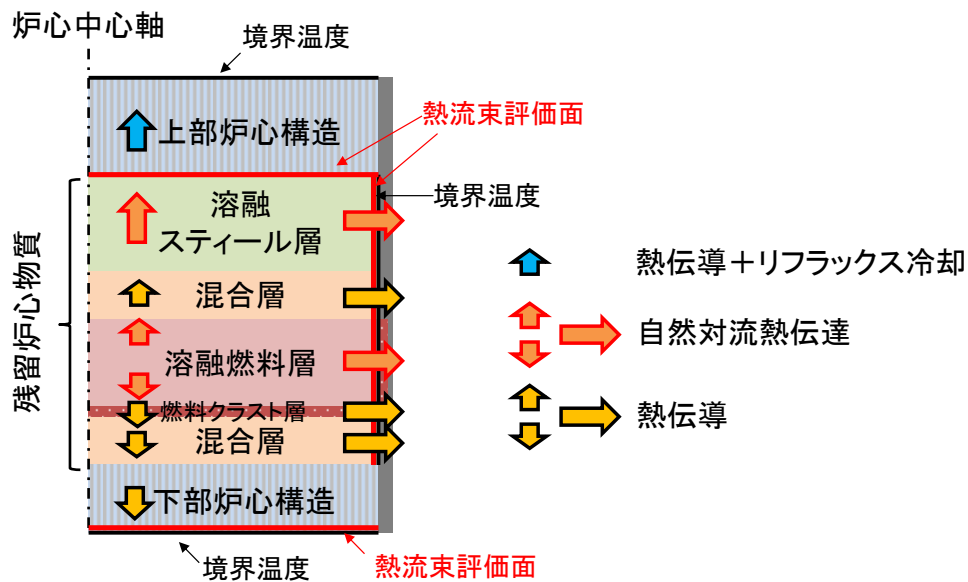
を代入することにより、

$$G_{crit} = C_w^2 \cdot \frac{\sqrt{gD\rho_v\Delta\rho}}{[1 + (\rho_v/\rho_l)^{1/4}]^2} \quad (7)$$

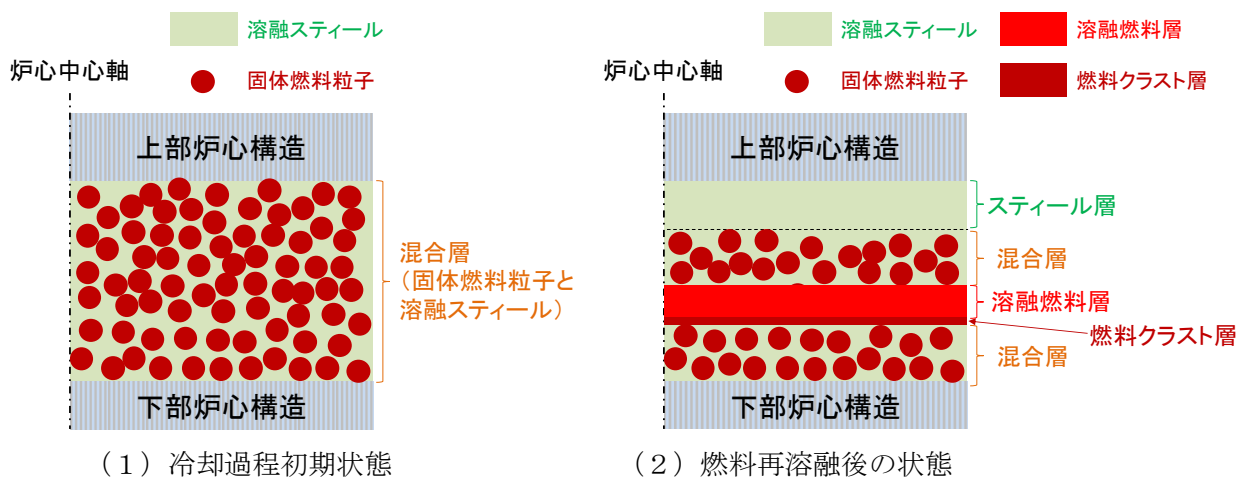
を得る。(7)式において流入する液体がすべて蒸発して蒸気によって熱が運ばれると仮定した場合、蒸発潜熱分の単位流路断面積当たりの除熱量は、以下の式で計算できる。

$$q = h_{lv}G_{crit} \quad (8)$$

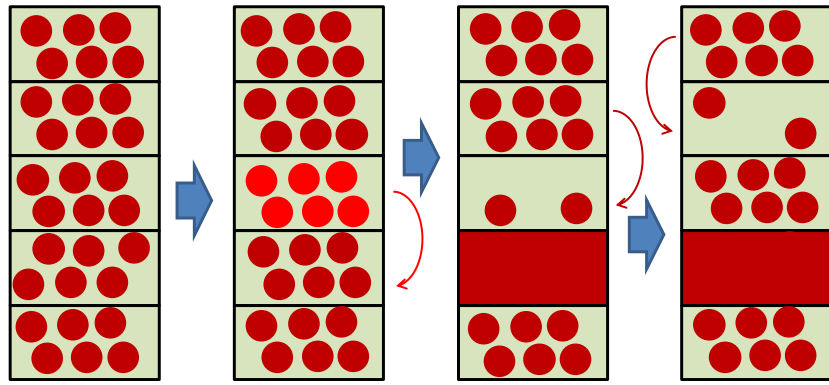
ここで、 h_{lv} は冷却材の蒸発潜熱であり、 C_w は定数で垂直円管では 0.7~1.0 の範囲にある^[5]。 C_w が大きくなると除熱量も増加するため、本解析では保守的に下限値の 0.7 を用いた。その結果、リフラックス冷却による単位流路面積当たりの除熱量として最大約 3.3MW/m²を得る。



第 1.1 図 熱収支計算モデル



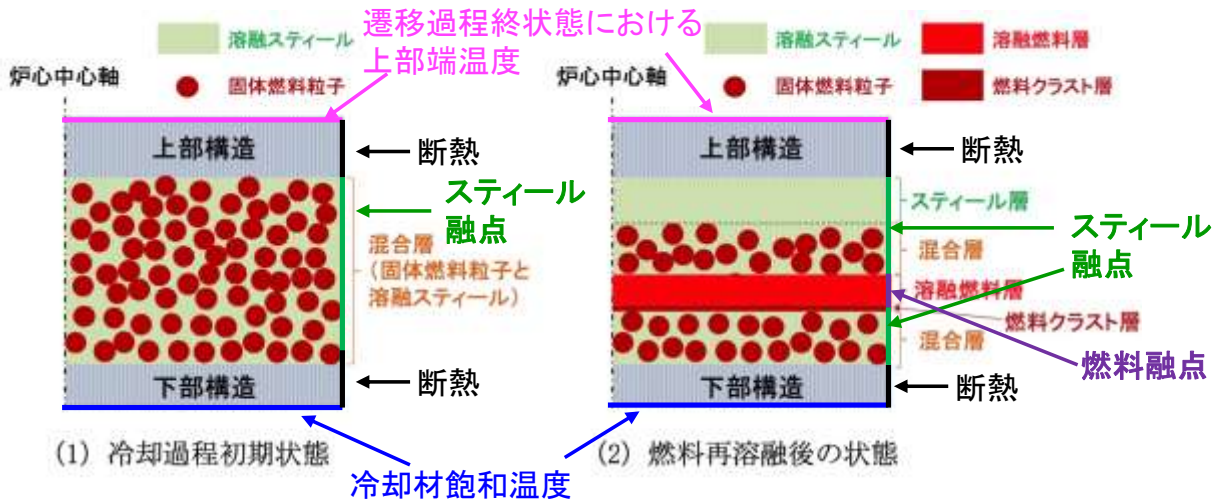
第 1.2 図 典型的な炉心物質の状態 (概念図)



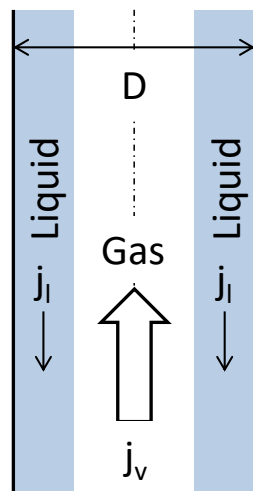
(0)初期状態 (1)溶融燃料の沈降 (2)燃料粒子の落下

● 燃料粒子 ● 溶融燃料 ■ 固化燃料
 □ 溶融スチール

第 1.3 図 物質再分布計算モデルの概念



第 2.1 図 境界条件の設定方法



$$G_{\text{crit}} = j_v \rho_v = j_l \rho_l$$

第 2.2 図 円管内の気液対向流

参考文献

- [1] Steinberner, U., Reineke, H.-H., Turbulent buoyancy convection heat transfer with internal heat sources, Proceedings 6th International Heat Transfer Conference, Toronto, Canada, August, 1978.
- [2] Churchill, S. W., Heat Exchanger Design Hand Book, 2.5.8, (1983), VDI-Verlag GmbH, Hemisphere
- [3] Breton, J. P., Jamond, C., Camous, F. and Santamarina, A., “The SCARABEE molten and boiling pool test series BF experimental results, modeling and interpretation”, Proceedings of the 1990 International Fast Reactor Safety Meeting, Vol. II, Snowbird, Utah, 12-16 August 1990, pp. 357-366.
- [4] Wallis, G. B., One-dimensional Two-phase Flow, Mc-Graw Hill, Inc., 1969, 431p
- [5] 小泉、植田、「垂直円管内対向気液二相流の液上昇開始条件（下部に気液混合物水位のある場合）」、日本機械学会論文集（B編）、Vol. 59(567)、pp.3537-3543、1993年