



**第53条（多量の放射性物質等を放出する事故の拡大の防止）に係る  
計算コード及び有効性評価等に対するコメントへの回答  
（FLUENT境界条件の熱流束の設定）**

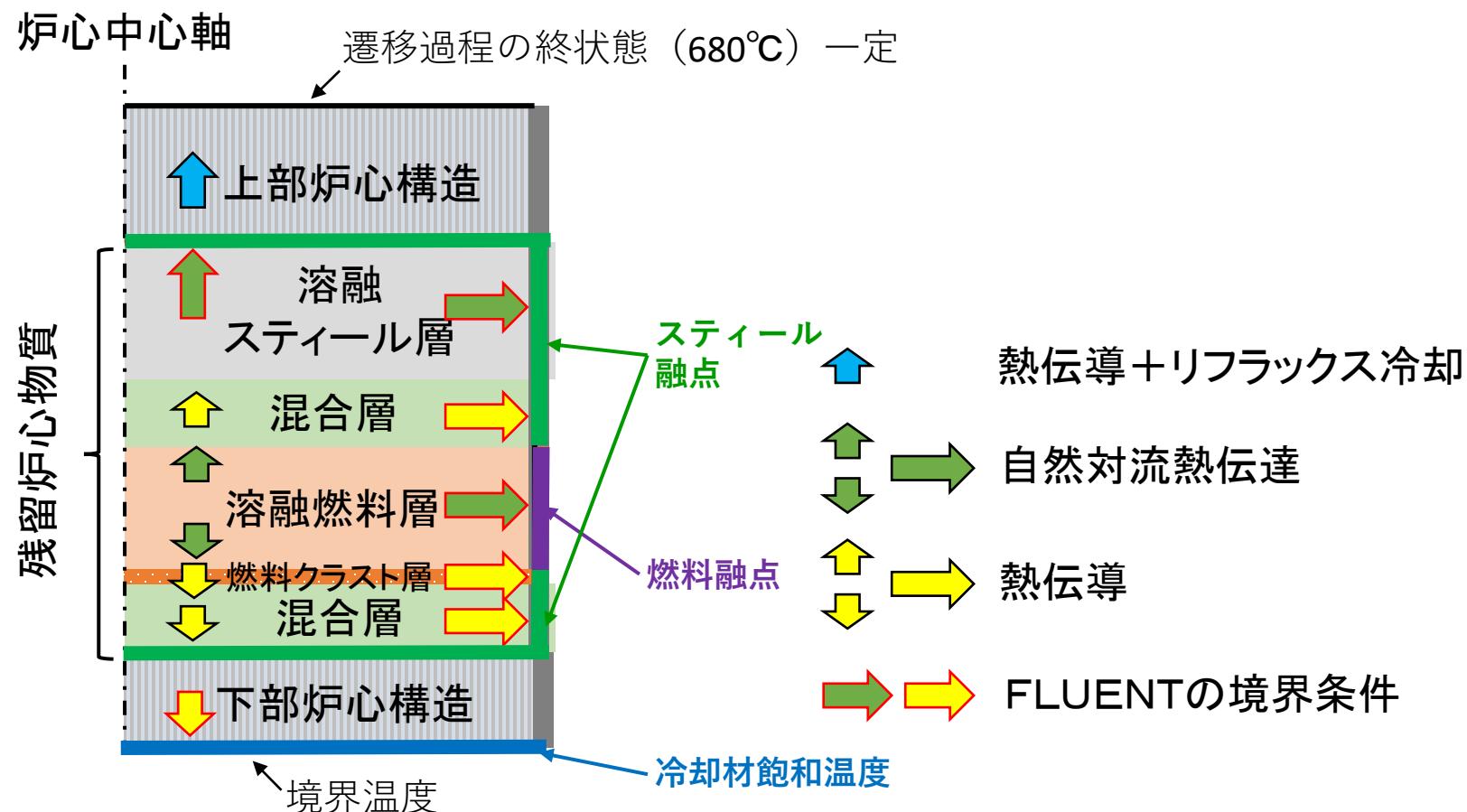
**2021年11月26日**

**日本原子力研究開発機構 大洗研究所  
高速実験炉部**

**No. 246 再配置冷却過程におけるFLUENTによる解析では、境界条件を熱流束で与えているが、径方向及び上方向それぞれの熱流束の設定を詳細に説明すること。また、上方向の熱流束は、リフラックス冷却のモデル化も詳細に説明すること。**

# 残留炉心物質の冷却性評価の伝熱計算 モデルの概要

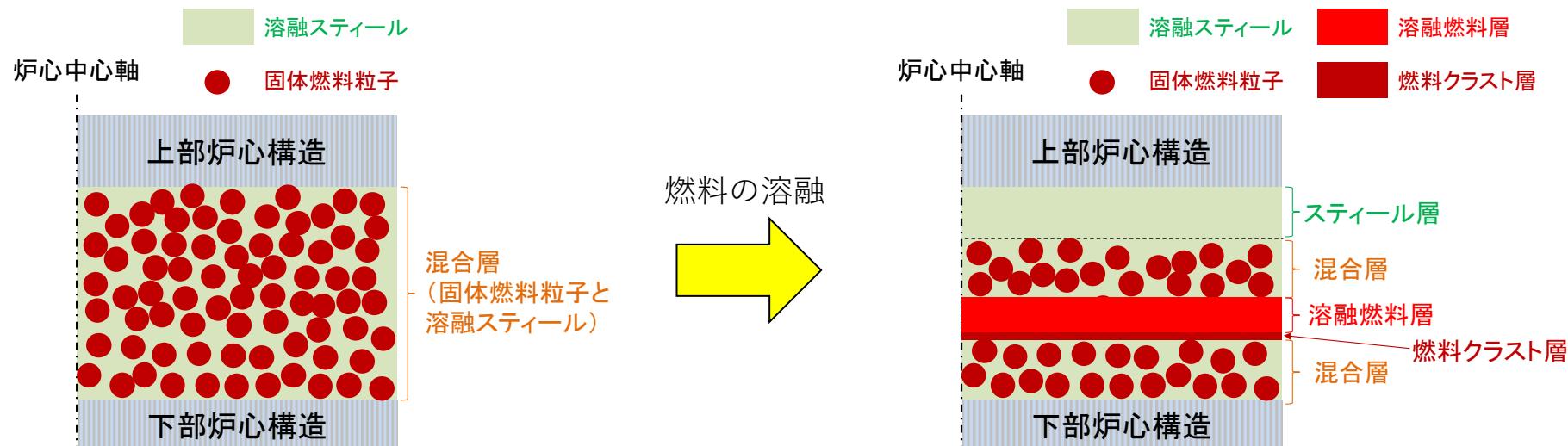
- 残留炉心物質の冷却性を評価するために使用した伝熱計算モデルは、炉心物質内部の発熱と周囲への伝熱の熱収支、及び炉心物質が溶融した際の物質再分布を1次元体系で計算する簡易モデルである。
- 溶融領域内は自然対流熱伝達係数、混合層（燃料粒子デブリベッドの間隙に溶融スチールが存在）、燃料クラスト層、構造材は熱伝導率、上部炉心構造（ピン束）内は熱伝導と冷却材によるリフラックス冷却を考慮して伝熱を計算する。
- 溶融燃料及び溶融スチールが接する固体境界をそれぞれの融点として熱流束を計算し、FLUENTの境界条件となる残留炉心物質から3方向（上方向、下方向、径方向）への熱流束を計算する。



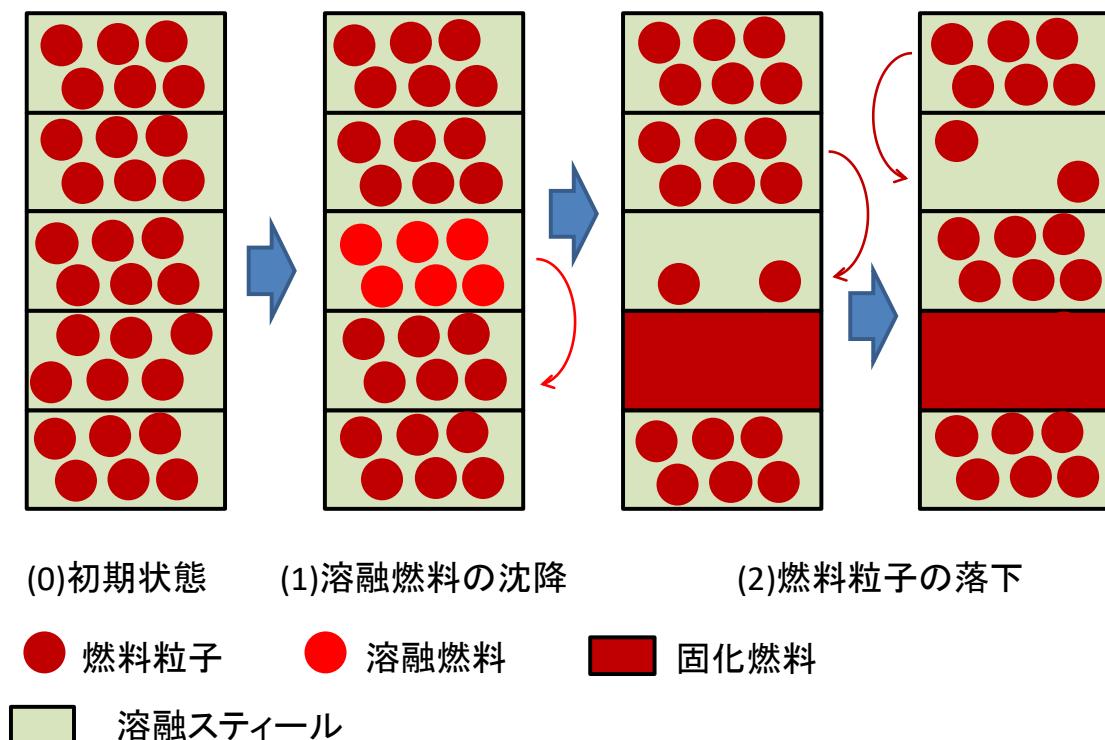
# 残留炉心物質の冷却性評価の伝熱計算

## 物質再分布計算

- 混合層内の燃料が崩壊熱により加熱されて再溶融すると、密度差により物質の再分布が生じる。



- 同一セル内の燃料とスチールは同一温度を持つ。あるセルの燃料が融点（liquidus）に達した場合、その下のセルの同一体積の溶融スチールと入れ替え（※）、それぞれのセルで平均温度を計算する。
- あるセルの燃料粒子の充填率が最大充填率より小さくなった場合は、その上のセルから燃料粒子を順次移行させる。



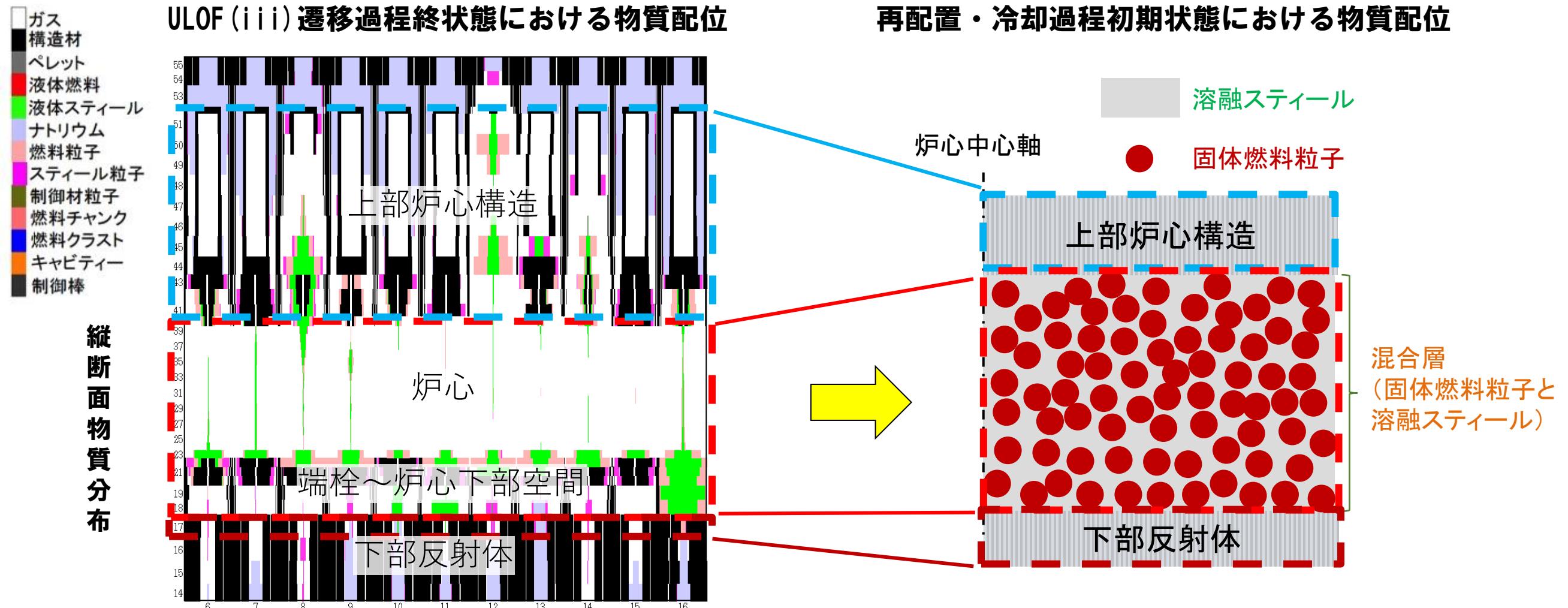
※ 崩壊熱による燃料の溶融、あるいは周囲への伝熱による溶融燃料の固化は、物質の再分布の時間スケールと比べて極めて緩慢に進行するため、本物質再分布モデルのようにステップ状に再分布を取り扱う簡易的な手法が適用できると考える。

# 残留炉心物質の冷却性評価の伝熱計算

## 遷移過程から再配置・冷却過程への引継ぎ

ULOF (iii) 遷移過程終状態における物質配位

再配置・冷却過程初期状態における物質配位



- 遷移過程から再配置・冷却過程への引継時刻は、遷移過程の解析において炉心から炉心物質が流出して深い未臨界となった時刻 (ULOF (i) で約161s、ULOF (iii) で約91s) とする。
- 遷移過程において、損傷炉心物質は下部空間部 (下部反射体上端) まで浸食するものの、構造スティールの体積割合が大きい下部反射体上端で浸食が停止する。遷移過程終状態を反映して、冷却過程初期状態における炉心プール下端位置は下部反射体上端とする。
- 遷移過程の終状態では、炉心物質は炉心の上下及び径方向へ流出しているが、径方向反射体ギャップへ流出した以外の炉心物質は炉心領域に戻し、損傷炉心物質の温度は遷移過程終状態における炉心領域の平均温度を保守的に切り上げた値 (約2200K) を初期値とする。混合層は炉心物質が密に詰まり、上部炉心構造が落下してその上に接した状態を想定する。

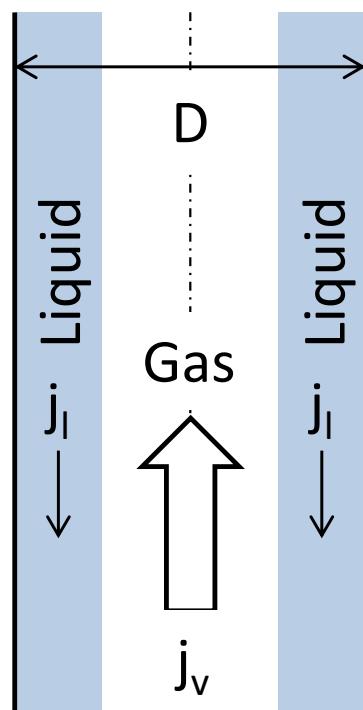


# 残留炉心物質の冷却性評価の伝熱計算

## 炉心上方向構造材におけるリフラックス冷却

- 冷却材が液膜となって流路の壁面を下方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。
- 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。Wallis<sup>[1]</sup>によるCCFL相関式を用いて評価する。

- 単位流路断面積当たりの除熱量



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

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

- $C_w$ は定数で垂直円管では0.7~1.0の範囲<sup>[2]</sup>。保守的に下限値の0.7として、「常陽」の炉心上部にあるピン束構造の幾何形状、ナトリウムの物性値を用いると、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約3.3MW/m<sup>2</sup>を得る。
- これはULOFの残留炉心物質からの上方向への熱流束の最大値約1.05MW/m<sup>2</sup>に比べて十分に大きい。

[1] Wallis, G. B., One-dimensional Two-phase Flow, Mc-Graw Hill, Inc., 1969, 431p

[2] 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

# 残留炉心物質の冷却性評価の伝熱計算モデル

## 評価結果

- ULOF ( i ) 及び ULOF ( iii ) の事象発生から約580秒後に燃料が再溶融し始め、残留炉心物質最高温度は約2,890℃まで上昇するが、崩壊熱の減衰とともに低下する。
- 炉心周囲への熱流束の ULOF ( i ) 及び ULOF ( iii ) の最高値として、事象発生後約900～1,200s にかけて上方向・側面ともに約1.05MW/m<sup>2</sup>、下方向は事象発生後約3,000sで約0.29MW/m<sup>2</sup>となるが、崩壊熱の減衰とともに低下する。

