

下部プレナムにおけるデブリベッド冷却に関する不確かさの影響

1. はじめに

本資料では、下部プレナムにおけるデブリベッド冷却に関して以下の不確かさの影響を考慮する。

- 事故シーケンスの違いや移行過程不確かさによる下部プレナムへ移行する損傷炉心物質の量の違い
- デブリベッドの性状（粒子径、空隙率（ポロシティ））
- 半球構造の原子炉容器底部に堆積することによるデブリベッド堆積厚みの不均一性

下部プレナムへ移行する損傷炉心物質の量とデブリベッドの性状の不確かさについては、感度解析を実施し不確かさの影響を評価する。デブリベッド堆積厚みの不均一性については、「常陽」で想定されるデブリベッド形状と有効性評価の条件としたデブリベッド形状を比較してその影響を考察する。

2. 下部プレナムへ移行する損傷炉心物質の量とデブリベッド性状に関する不確かさの影響

デブリベッド冷却解析の基本ケースにおいては、有効性評価の評価項目である損傷炉心物質の冷却・保持に関わる重要なパラメータである以下の解析条件を設定する。

- **下部プレナムへ移行する損傷炉心物質の量**：ULOF（i）では炉心インベントリの 30%、ULOF（iii）では炉心インベントリの 40%とする。ULOF（i）及び ULOF（iii）でそれぞれ、炉心領域に残留する損傷炉心物質の量が炉心インベントリの約 50%及び約 40%を下回ると、崩壊熱と炉心周辺構造への熱損失のバランスによって残留炉心物質の溶融が止まるとともに下部プレナムへの流出も止まる。このため、炉心領域から下部プレナムへ移行する損傷炉心物質の量は ULOF（i）及び ULOF（iii）でそれぞれ、炉心インベントリの 30%及び 40%とする。原子炉容器底部にデブリベッドが形成される時刻は ULOF（i）及び ULOF（iii）いずれも、残留炉心物質の冷却において、炉心インベントリの約 30%及び約 40%の燃料が再溶融する時刻（いずれも事象発生から約 600 秒後）とする。
- **デブリ粒子径**：ULOF（i）及び ULOF（iii）いずれも 400 μ m とする。これは、FRAG 試験^[1]（米国のサンディア国立研究所（SNL）で実施された大規模 FCI 試験）のうち、20kg の溶融金属（UO₂-ZrO₂（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 FRAG4～6 及び 13 試験で得られた粒径分布の中央値の平均である。第 2.1 図に FRAG 試験で得られた粒径分布を示す。
- **デブリベッドのポロシティ**：ULOF（i）及び ULOF（iii）いずれも 0.6 とする。これは、第 2.2

図に示す FARO/TERMOS 試験^[2]（伊国イスプラの共同研究センター（JRC）で実施された 100 kg の UO_2 を 130 kg のナトリウム中へ落下させた大規模 FCI 試験）及び FRAG4 試験で得られたポロシティから 0.6 を設定したものである。

以上の基本ケースに対して、感度解析では重要なパラメータにおける不確かさの影響評価のために、基本ケースで使用したパラメータの値を 1 つずつ計算結果を厳しくするように保守側に変化させた解析を実施する。第 2.1 表及び第 2.2 表にそれぞれ、ULOF (i) 及び ULOF (iii) デブリベッド冷却解析の基本ケース及び不確かさ解析ケースの解析条件を示す。感度解析における解析条件の設定は、ULOF (i) 及び ULOF (iii) いずれも以下のとおりである。

- **下部プレナムへ移行する損傷炉心物質の量**：不確かさとして炉心インベントリの 70%を設定する。下部プレナムへの損傷炉心物質の流出量は、流出タイミングに依存する。炉心領域から溶融した残留炉心物質が制御棒下部案内管 (LGT) を通じて下部プレナムに移行しないと想定した場合は、崩壊熱と炉心周辺構造への熱損失のバランスによって炉心領域で溶融し得る燃料の量は炉心インベントリの約 70%となる。この状態で、溶融した残留炉心物質が LGT を通じて下部プレナムに移行する場合を下部プレナムのデブリベッドの冷却に対する保守的な上限とする。原子炉容器底部にデブリベッドが形成される時刻は、残留炉心物質の冷却において、炉心インベントリの約 70%の燃料が再溶融する時刻（事象発生から約 1,200 秒後）とする。
- **デブリ粒子径**：不確かさとして、前述の FRAG4~6 及び 13 試験で得られた粒径分布の不確かさ範囲 270~480 μ m のうち保守側の値 270 μ m を設定する。
- **デブリベッドのポロシティ**：不確かさとして、前述の FARO/TERMOS 試験及び FRAG4 試験で得られたポロシティの不確かさ範囲 0.5~0.7 のうち保守側の値 0.5 を設定する。

第 2.3 図に ULOF (i) デブリベッド最高温度の履歴を示す。原子炉容器底部の鏡板の下方を断熱条件として解析しているため、デブリベッド最高温度の履歴と原子炉容器底部の鏡板の温度履歴はほぼ等しくなる。基本ケースでは、デブリベッド最高温度は、崩壊熱により初期の 420 $^{\circ}$ C から事象の開始から約 1,100 秒後にかけて最高約 600 $^{\circ}$ C まで上昇するが、その後はデブリベッド内冷却材の自然対流による除熱量の増加や崩壊熱の減衰と共に低下した。不確かさ①~③の影響により、デブリベッド最高温度は約 60~120 $^{\circ}$ C 高くなる（不確かさの影響が最も大きいのは下部プレナムへ移行する損傷炉心物質の量）が、いずれもサブクール状態を維持しながら、安定冷却に移行した。

第 2.4 図に ULOF (iii) デブリベッド最高温度の履歴を示す。基本ケースでは、デブリベッド最高温度は、崩壊熱により初期の 440 $^{\circ}$ C から事象の開始から約 1,200 秒後にかけて最高約 640 $^{\circ}$ C まで上昇するが、その後はデブリベッド内冷却材の自然対流による除熱量の増加や崩壊熱の減衰と共に低下した。不確かさ①~③の影響により、デブリベッド最高温度は約 70~130 $^{\circ}$ C 高くなる（不確かさの影響が最も大きいのはデブリベッドのポロシティ）が、いずれもサブクール状態を維持しながら、安定冷却に移行した。

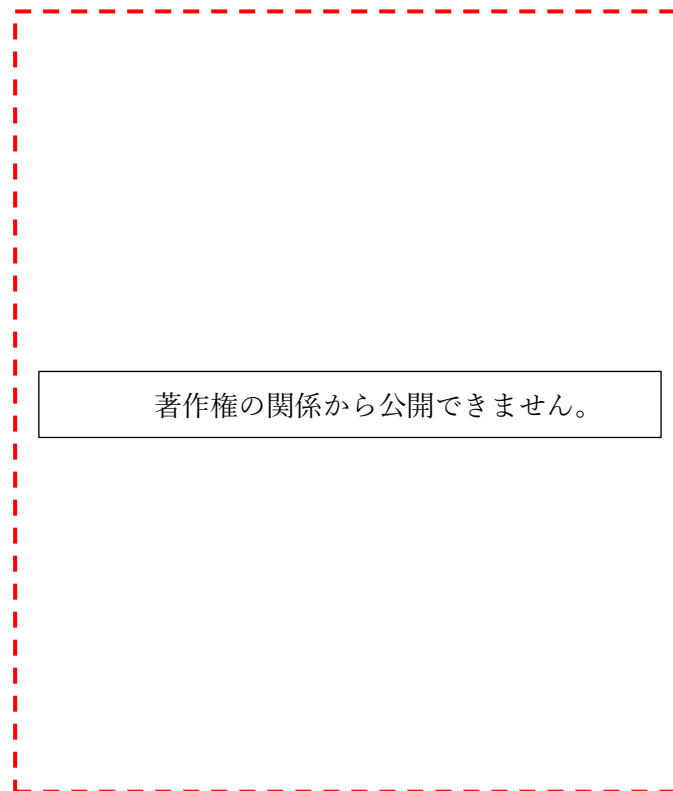
以上のことから、評価項目に関わる重要現象である原子炉容器底部におけるデブリベッドは安定に冷却できることが示された。冷却性に関する判断基準は「デブリベッドがドライアウトしないこと」としているが、不確かさの影響を考慮したとしても余裕を持って飽和温度を下回った。

第 2.1 表 ULOF (i) デブリベッド基本ケース及び不確かさ解析ケース

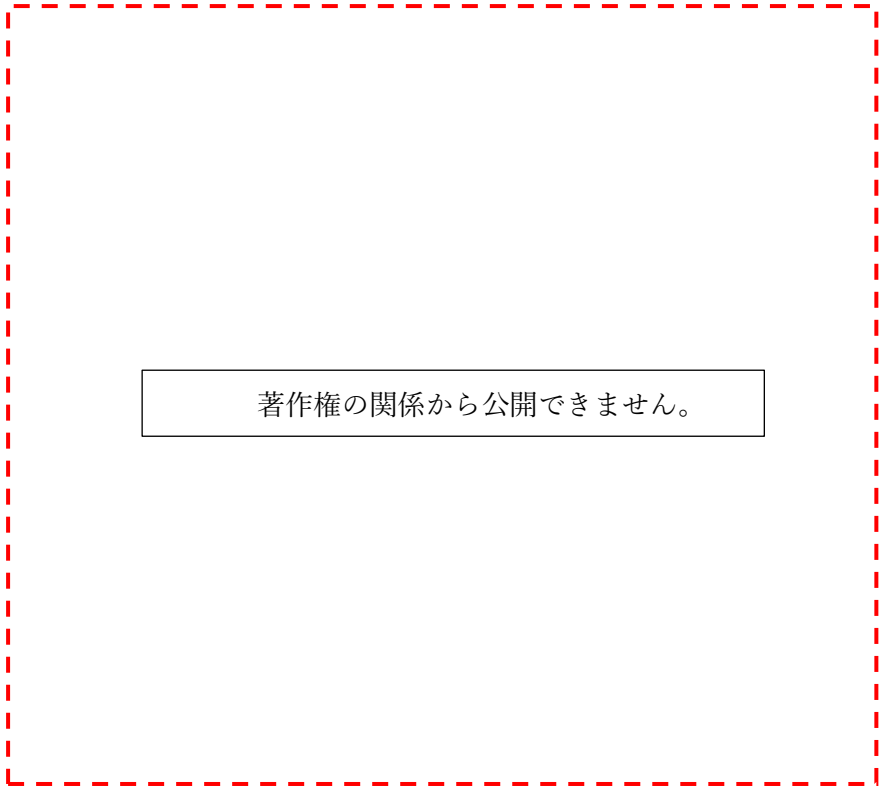
| | 下部プレナムへ移行する 損傷炉心物質の量 | 粒子径 | ポロシティ |
|-----------------|-------------------------|-------------|-------|
| デブリベッド 基本ケース | 30% | 400 μ m | 0.6 |
| 不確かさ① | 70% | | |
| 不確かさ② | | 270 μ m | |
| 不確かさ③ | | | 0.5 |

第 2.2 表 ULOF (iii) デブリベッド基本ケース及び不確かさ解析ケース

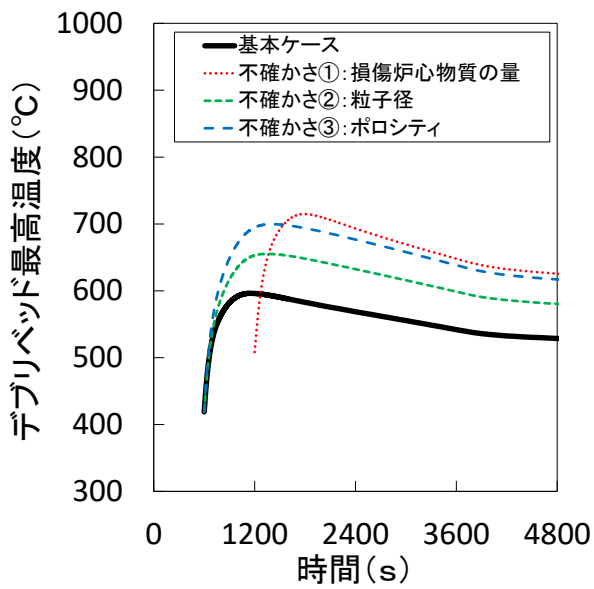
| | 下部プレナムへ移行する 損傷炉心物質の量 | 粒子径 | ポロシティ |
|-----------------|-------------------------|-------------|-------|
| デブリベッド 基本ケース | 40% | 400 μ m | 0.6 |
| 不確かさ① | 70% | | |
| 不確かさ② | | 270 μ m | |
| 不確かさ③ | | | 0.5 |



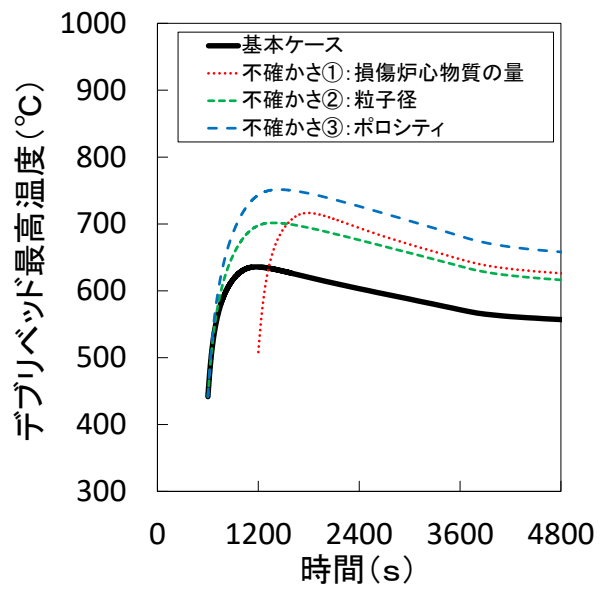
第 2.1 図 FRAG 試験における粒径分布 (参考文献[1]に読み取り値を加筆)



第 2.2 図 FARO/TERMOS 試験及び FRAG 試験におけるポロシティ^[2]



第 2.3 図 ULOF (i)
デブリベッド最高温度の履歴



第 2.4 図 ULOF (iii)
デブリベッド最高温度の履歴

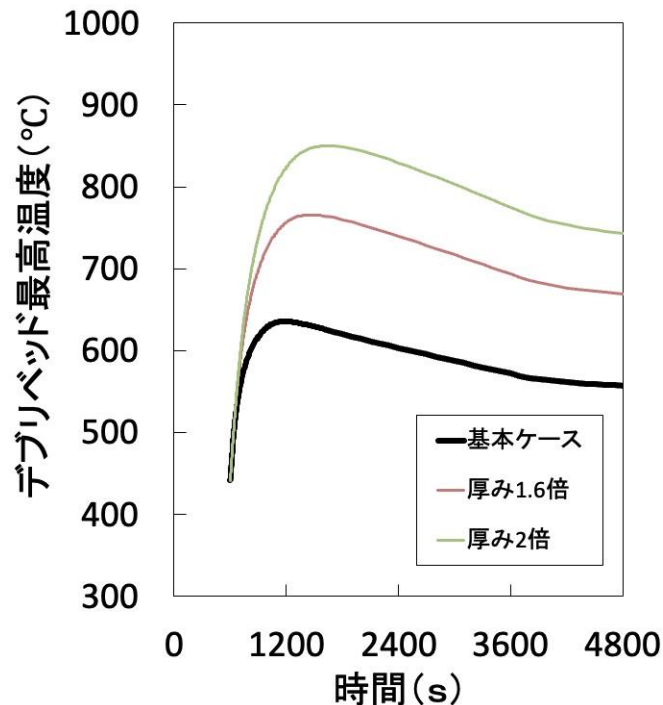
3. デブリベッド堆積厚みの不均一性の影響

有効性評価においては、デブリベッド最大厚み位置で高さ方向 1 次元に要素分割して解析しているが、「常陽」で想定されるデブリベッド形状においては、デブリベッドは半球構造の原子炉容器底部に堆積するため厚みが不均一となる。この場合、デブリベッド内冷却材の自然対流は、デブリベッドの厚い領域では上昇流、薄い領域では下降流として発達すると考えられるが、有効性評価の解析では、保守的にデブリベッドが最大厚みとなる位置で径方向への熱移行を無視した 1 次元体系の解析を行うことでデブリベッド温度が高くなるように計算される。

また、デブリベッドが堆積する過程で局所的に厚みが不均一となり、上述の最大厚みを超えた厚みとなることを想定し、ULOF (iii) の基本ケース (40%の炉心物質が下部プレナムへ移行) の最大厚みに対して、100%の炉心物質が移行した場合 (厚みが 1.6 倍)、及び厚みを 2 倍としたパラメトリック解析を実施した。結果を第 3.1 表と第 3.1 図に示す。いずれのケースもデブリベッドの最高温度はナトリウムの沸点以下であり、厚みの不均一性を考慮してもデブリベッドは安定に冷却できている。

第 3.1 表 ULOF (iii) デブリベッド厚み感度解析
(40%ケースに対して厚みを変えた場合)

| ケース | 厚み [m] | 最高温度 [°C] | 備考 |
|-----------|--------|-----------|----------|
| 基本ケース | 0.1561 | 640 | 40% |
| 厚み約 1.6 倍 | 0.2495 | 770 | 100%厚み相当 |
| 厚み 2 倍 | 0.3122 | 850 | |



第 3.1 図 ULOF (iii) に対するデブリベッド厚み感度解析

4. 参考文献

- [1] 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).
- [2] Magallon, D., Hohmann, H. and Schins, H., "Pouring of 100kg-scale molten UO₂ into sodium", Nuclear Technology, Vol. 98, No. 1, pp.79-90, 1992.