

「常陽」の ULOF 及び UTOP 事象における崩壊炉心の特徴と現実的な事象推移

1. 「常陽」の崩壊炉心の特徴

「常陽」の ULOF 及び UTOP 事象では、「常陽」のボイド反応度がほぼ全炉心において負であることから、原子炉出力が低い状態のまま炉心損傷の進展は極めて緩慢なものとなり、冷却材のボイド化、被覆管の溶融、固体燃料ペレットの崩落、ラップ管の溶融による崩壊領域の拡大が徐々に進行する。損傷した炉心は燃料ペレットが崩落してデブリベッド状に堆積し、その間隙を溶融したスチールが埋める状況となる。「常陽」炉心の全燃料質量は約 950kg、全スチール質量は約 440kg であり、遷移過程で崩壊領域が炉心全体にまで拡大した時点での燃料平均温度は約 2,700K、スチール平均温度は約 2,500K である。燃料及びスチールの体積はそれぞれ約 0.100m³ 及び約 0.068m³ である。崩落した燃料ペレットからなるデブリベッドの空隙率は、代表的な FCI 試験で形成される不定形で、かつ、粒子径分布を持つデブリベッドのデータから高々約 0.6 程度であると考えられる（第 1 図）。したがって、「常陽」における崩壊炉心においては崩落した燃料のデブリベッドの空隙を溶融したスチールが満たし、密度差による燃料とスチールの分離は起きない状態となる（第 2 図）。また、この状態の炉心物質の流動性は極めて小さく、流動やスロッシングは実際にはほとんど発生しないと考えられる。

2. SIMMERによる「常陽」解析における保守的想定

(1) 燃料粒子の密度

SIMMERによる「常陽」の評価事故シーケンス ULOF (i) の遷移過程解析においては、燃料ペレットが崩落する領域が拡大する過程で燃料の凝集による正の反応度挿入に続いて数十秒間の間に複数回の反応度及び出力の変動が生じている。第 3 図にこの時の固体燃料粒子の炉心平均温度及び加熱速度の時間変化を示す。燃料粒子の温度は約 2,700K 前後で推移して、出力上昇の都度、約 2,800～2,950K 程度まで上昇した後に約 2,700K 程度まで低下する挙動を示す。加熱速度は一時的なピークを除いて全体を通じてほとんどの時間は約 100～200K/s 以下で推移する。

固体燃料ペレットの急速加熱時の挙動に関しては、米国サンディア研究所の試験炉 ACRR において EBR-II で照射した燃料ペレットを急速加熱した FD 及び STAR 試験が実施された。これらの試験で得られて幅広い加熱速度の範囲での燃料ペレットの過渡挙動に関する知見を第 4 図^[1]に示す。燃料の加熱速度が 300K/s 以下では固体燃料はスエリング、すなわち固体燃料の結晶粒内

及び粒界にトラップされている FP ガスが膨張することによって固体のまま膨張する挙動を示す。一方、加熱速度が 1,000K/s を超えると燃料ペレットは一気に破砕 (spallation) する。

「常陽」の遷移過程における加熱速度約 100~200K/s はスエリングが発生する条件である。燃料ペレットが崩落する前にスエリングが発生すると、燃料粒子の膨張によって低密度で崩落・堆積することとなり、正の反応度挿入は起こりにくくなる。また、燃料膨張により炉心内の自由空間は燃料粒子によって占められ、物質が流動することができなくなり、燃料の凝集による反応度及び出力の増加も発生しなくなる。

「常陽」の有効性評価では、燃料の凝集による反応度の増加、さらには即発臨界超過の結果発生する機械的エネルギーが原子炉容器と格納容器に与える影響を評価することを目的としているため、前述のとおり、このスエリングが発生せず、燃料ペレットは焼結密度を保って高密度のまま堆積するという極めて保守的な想定を用いて S I M M E R による解析を行った。

(2) 炉心物質の流動性

前節で述べたとおり、「常陽」の遷移過程解析では炉心は実際には固化した燃料粒子、未熔融の燃料ペレットがデブリベッド状に堆積し、その間隙を熔融したスティールが埋めた状況となる(第2図)。このような炉心物質の流動性は極めて小さく、ほとんど流動しないと考えられる。一方、燃料ペレットのスエリングを無視して実施した S I M M E R を用いた「常陽」の遷移過程解析では、この低流動性の炉心物質のスロッシング挙動を解析する際に、粘性による運動量拡散を無視する、すなわち炉心物質の粘性率を零として自由に流動できるとする想定を用いた。このことにより、全ての損傷炉心物質が燃料スロッシングによる燃料凝集に寄与できるとなり、燃料スロッシングで燃料が凝集する際の移動速度、すなわち正の反応度挿入を過大に見積もるため、即発臨界超過時のエネルギー放出を評価する上では極めて保守的な解析となる。

(3) S I M M E R による「常陽」解析における保守的想定のまとめ

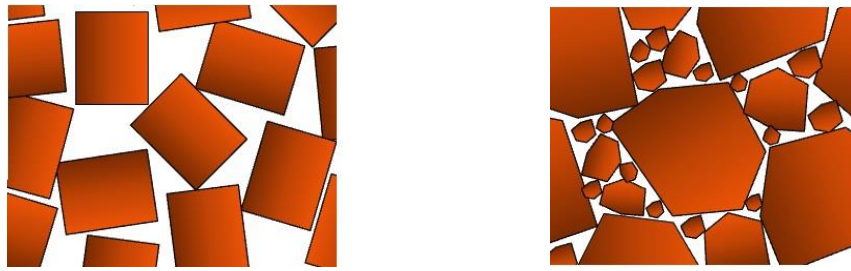
燃料のスエリングを考慮した場合としない場合、及び炉心物質の流動性が小さいことを考慮した場合と考慮しなかった場合の事象進展の概念を比較した図を第5図に示す。スエリングが発生する現実的な事象推移では、低密度の燃料が堆積するためその反応度効果は小さく、また、炉心の空間をスエリングした燃料と熔融スティールが占め、炉心物質はほとんど流動しないまま炉心の中心から徐々に熔融領域が広がっていく。また、スエリングの発生を無視して燃料は焼結密度を保って堆積するという保守的な想定(1)を用いた場合においても、燃料のデブリベッドの間隙を熔融スティールが占めた炉心物質の流動性は極めて小さく、炉心物質はほとんど揺動しない。いずれの場合においても炉心の中心から徐々に熔融領域が拡大して、炉心物質の揺動は熔融している限られた範囲で発生し、その結果燃料凝集によって発生する即発臨界超過の放出エネルギーは限定されたものになる。

一方、燃料スエリングが発生せず(保守的想定(1))、さらに、本来流動性が極めて小さい炉心物質の粘性率を零とする(保守的想定(2))として炉心物質が自由に流動するとの想定を用いた S I M M E R による解析では、全ての炉心物質が燃料スロッシングによる燃料凝集に寄与で

きることとなり、燃料スロッシングで燃料が凝集することによる即発臨界超過のエネルギー発生を評価する上では極めて保守的な条件を積み重ねた解析である。

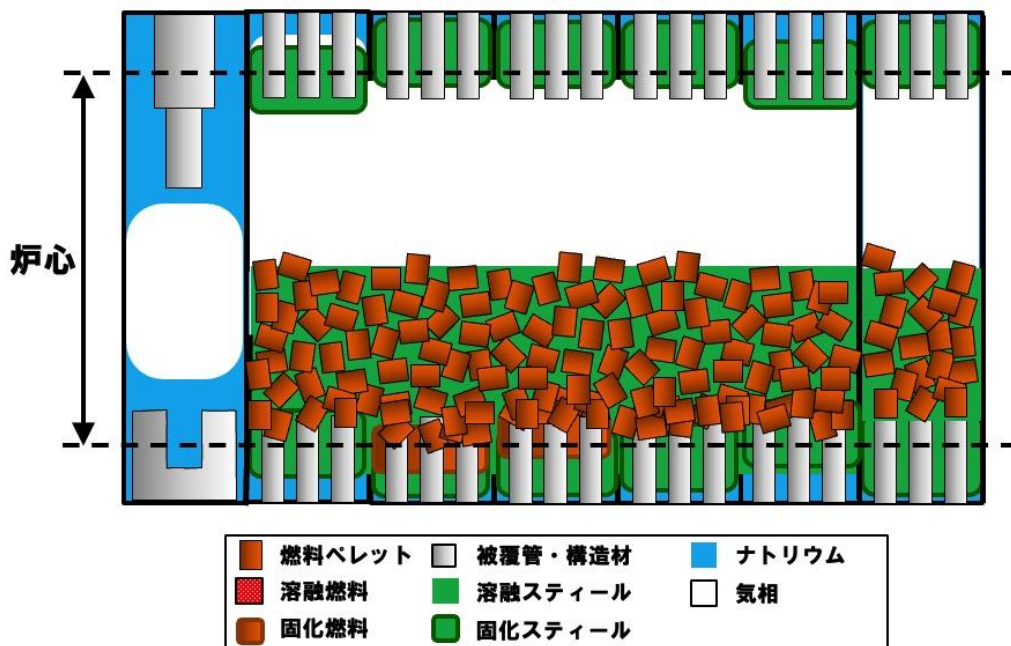
参考文献

- [1] P. Royl, et al., “CONTRIBUTIONS FROM THE ACRR IN-PILE EXPERIMENTS,” Nucl. Eng. and Design, 100, 387-408, 1987.

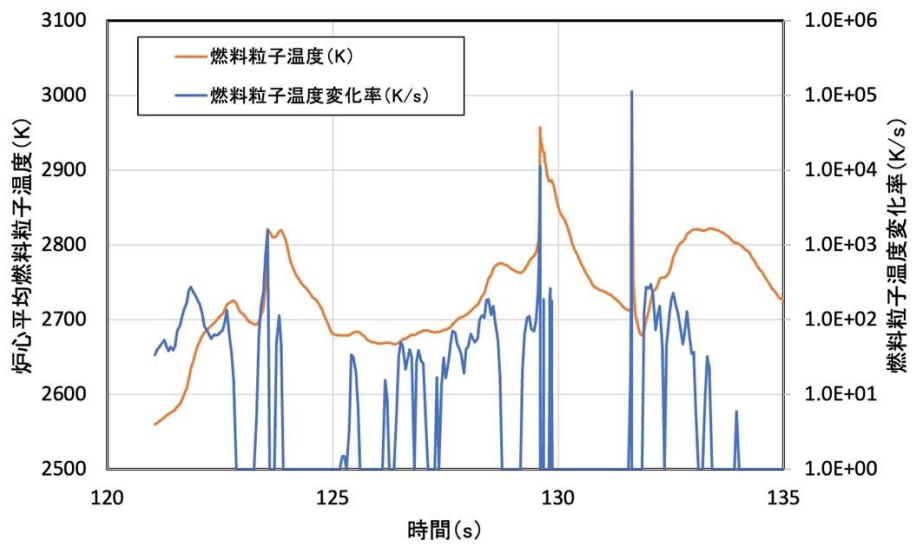


FCI で発生した粒径分布を有する不定形粒子が堆積したデブリベッド (右図) では大きな粒子の間隙にも小さな粒子が存在できるため、同一サイズの燃料ペレットなどが堆積したデブリベッド (左図) よりも空隙率は小さくなる。

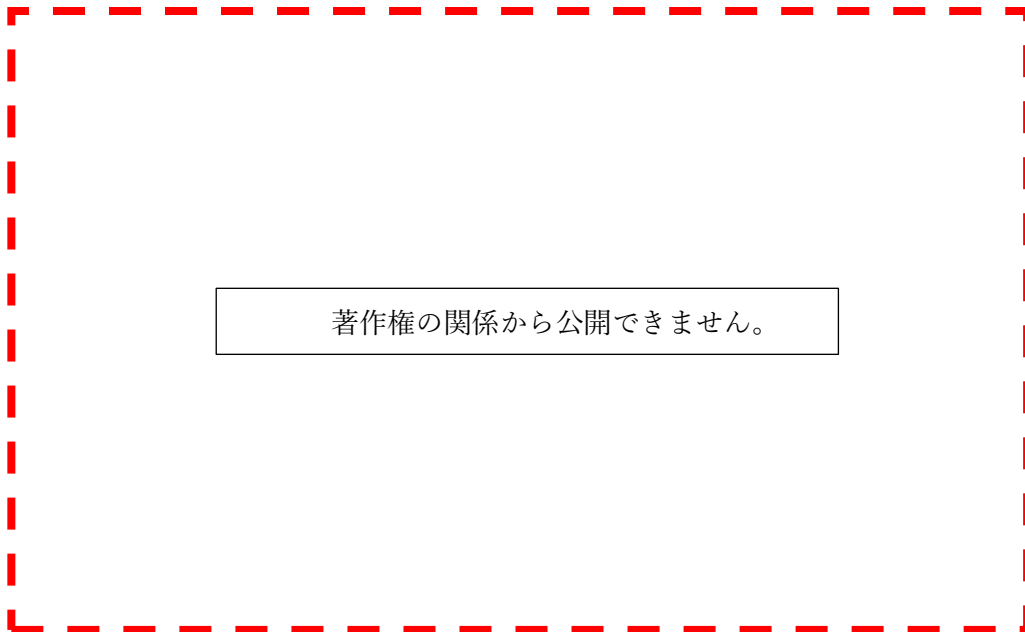
第 1 図 燃料ペレット (円筒形) と粒径分布を有する不定形粒子のデブリベッドの概念図



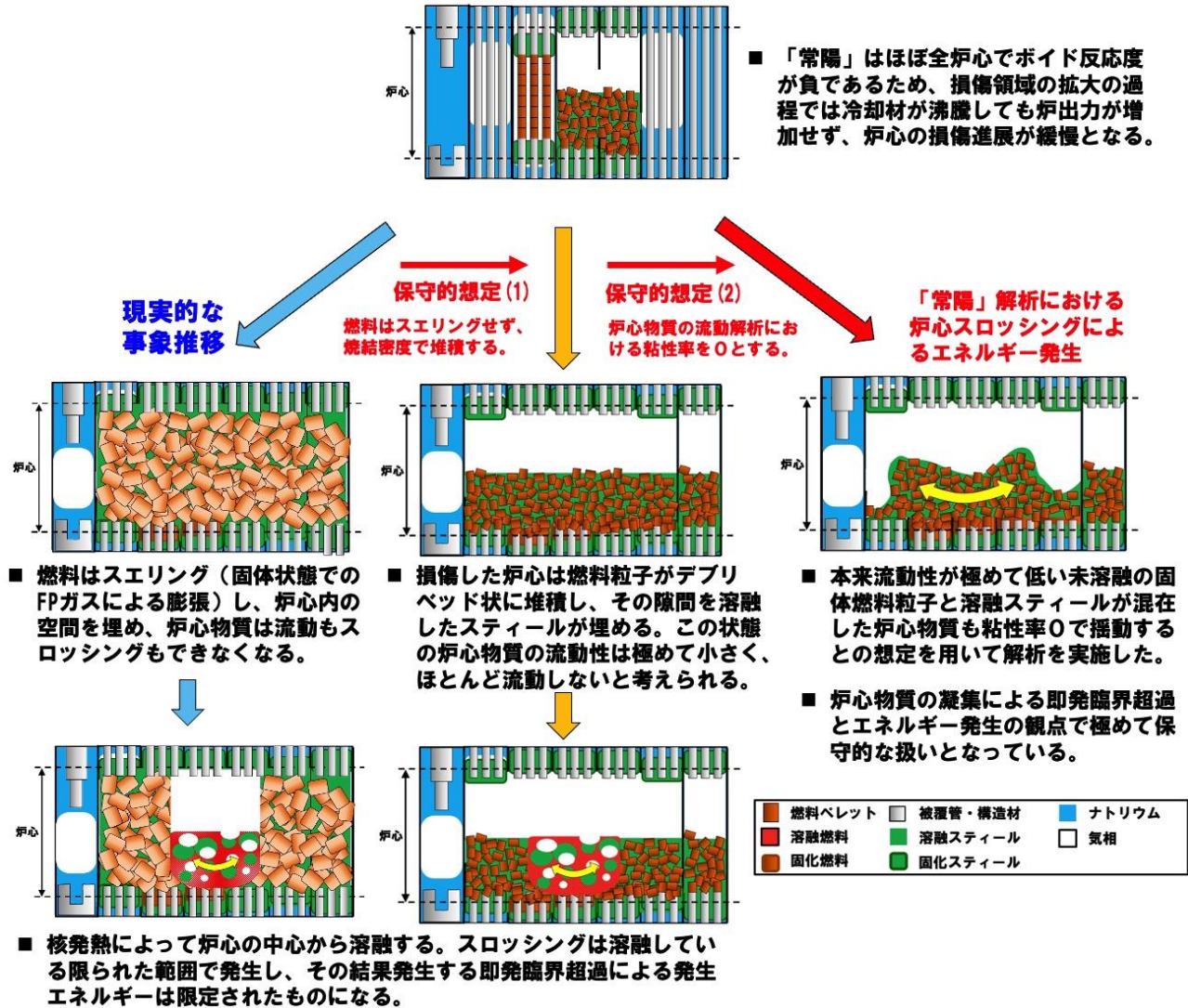
第 2 図 「常陽」 崩壊炉心における炉心の燃料とスチールの混合状態



第3図 ULOFの遷移過程における炉心平均燃料粒子温度と加熱速度の時間履歴



第4図 燃料ペレットの加熱速度と破損挙動の関係^[1]



第5図 「常陽」遷移過程の現実的な事象推移と本評価で想定した保守的な事象推移