

## 機械的エネルギー発生過程におけるエネルギーの配分

## 1. 概要

炉心流量喪失時原子炉停止機能喪失（以下「ULOF」という。）の遷移過程において即発臨界超過による出力逸走が発生すると、ごく短時間の間のエネルギー放出により、炉心物質は高温高圧となる。高温高圧となった炉心物質は炉心上方にある反射体、ガスプレナム、制御棒下部案内管等の構造（以下「炉心上部構造」という。）を通して上部プレナムの底部に放出される。炉心物質は上部プレナムのナトリウムと FCI を起こし、上部プレナムのナトリウムプールの底部に蒸気泡を形成して上部プレナム内のナトリウムを上方に加速して機械的エネルギー（主にナトリウムスラグの運動エネルギー<sup>1)</sup>）を発生させる。この過程において、出力逸走で放出され燃料内に保持されていた熱エネルギーは原子炉容器内の物質に熱として散逸し、一部が機械的エネルギーに変換される。これらのエネルギーの分配挙動について、機械的エネルギー発生解析結果に基づいて、以下に述べる。

## 2. エネルギー配分の時間変化

格納容器破損防止措置の有効性評価においては、ULOF 遷移過程の不確かさ影響評価ケース（2次元軸対象円筒座標体系による遷移過程解析）の出力逸走直後の燃料の内部エネルギー（炉心平均燃料温度）が最高値となる炉心状態を初期条件として機械的エネルギー発生解析を行った。解析体系全体の各物質が保持する内部エネルギーの時間変化を第1図に示す。ナトリウムは質量が大きいので、内部エネルギーの値も大きくなっている。変化を見やすくするために、各物質の内部エネルギーの初期値からの時間変化を第2図に示す。また、解析体系内の燃料、スティール及びナトリウムの平均温度の時間変化を第3図～第5図にそれぞれ示す。全体的な熱エネルギーの移行挙動を以下に説明する。

- 出力逸走によって瞬間的に燃料内で放出された核エネルギーは約 1,500MJ である。出力逸走後の燃料の内部エネルギーの初期値は約 2,300MJ である。この時、炉心内の燃料は全量が熔融状態、スティールはほとんどが熔融状態で一部はラップ管として残存している。
- 極短時間の間に炉心内で燃料からスティールへ約 300MJ の熱エネルギーが移行する。燃料温度は急速に低下し、スティール温度は急速に上昇する。これは両者の間の初期の大きな温度差（平均温度で約 3,500°C以上）による急激な熱移行によるものである。
- 燃料からスティールへの熱移行の継続により、約 0.1 s までに燃料の内部エネルギーは約 1,300MJ 減少し、スティールの内部エネルギーは約 1,000MJ、ナトリウムの内部エネルギーは約 300MJ 増加する。

---

<sup>1)</sup> ナトリウムスラグの運動エネルギーの一部はナトリウムスラグの上昇と共にカバーガスの圧縮エネルギー及び位置のエネルギーに変換される。これらのエネルギーのなかで、冷却材バウンダリの健全性に直接影響を与えるのはナトリウムスラグの運動エネルギーであるが、有効性評価の機械的エネルギーはこれら3つのエネルギーの合計の最大値として保守的に定義した。

- 初期に炉心平均温度約 5,110°C（内部エネルギー約 2,300MJ）であった燃料は最終的に約 2,000MJ のエネルギーをスチール及びナトリウムに移行する（第 2 図）。第 3 図に示す燃料の平均温度の低下が 0.1s~0.2s にかけていったん停滞しているのは相変化（固化）に対応している。その後、熔融燃料はほぼすべてが凝固して固体燃料粒子となり、温度も約 0.5s 以後は約 1,000°C で一定となる。
- 第 2 図に示すスチールの内部エネルギーの初期値からの変化量、第 4 図に示すスチールの平均温度は燃料からの伝熱によって約 0.1s でピーク値を取った後、徐々にナトリウムへの熱移行に伴って低下する。最終的には上部プレナム内のナトリウムによってクエンチされて、燃料から受けたエネルギーをほぼ全てナトリウムへ伝え、その平均温度は約 1,160°C で一定となる。
- 上部プレナムの底部に放出される炉心物質とナトリウムとの FCI によって機械的エネルギーが発生するが、炉心物質の温度は炉心部での出力逸走直後の高温状態ではなく、以上のエネルギー散逸過程を経て温度が低下した状態である。
- この FCI は大きな圧力発生を伴う大規模なものではないが（発生圧力の最大値は高々 2MPa）、ナトリウムの蒸発により上部プレナム底部に蒸気泡を形成し、その膨張によってナトリウムスラグが上方に加速される運動エネルギーとして機械的エネルギーが発生する。
- ナトリウムは最終的に約 2,000MJ のエネルギーを受け取り、第 5 図に示すナトリウムの平均温度は初期値の 500°C から約 60°C 上昇して約 560°C で静定する。

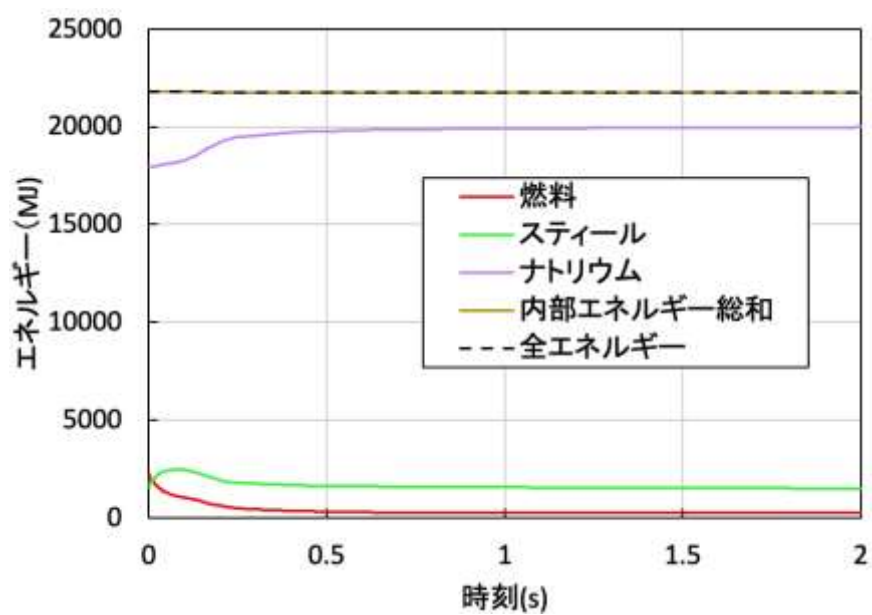
以上のとおり、ナトリウムスラグを加速して機械的エネルギーを発生させる元となる出力逸走後の燃料が保有する熱エネルギーは、炉心物質が上部プレナム底部に放出されるまでの間にその多くの割合がスチール（構造材を含む。）及びナトリウムへの熱移行により散逸する。このため、FCI は初期値に比べて大きく温度低下した炉心物質とナトリウムの間で起きることになり、発生する機械的エネルギーは低減される。

なお、かつての簡易評価において機械的エネルギーの指標として燃料の等エントロピー膨張を仮定して評価されてきた仕事ポテンシャル（「常陽」においては最大約 200MJ）は、出力逸走で放出された全熱エネルギーを熱力学法則に従って単純に圧力と体積変化の積を用いて仕事量に換算したものである。これは全熱エネルギーと一対一に対応する物理量であって、実際に FCI を起こして機械的エネルギー発生に関与する熱エネルギー、あるいはその結果発生する機械的エネルギーを代表するものではない。

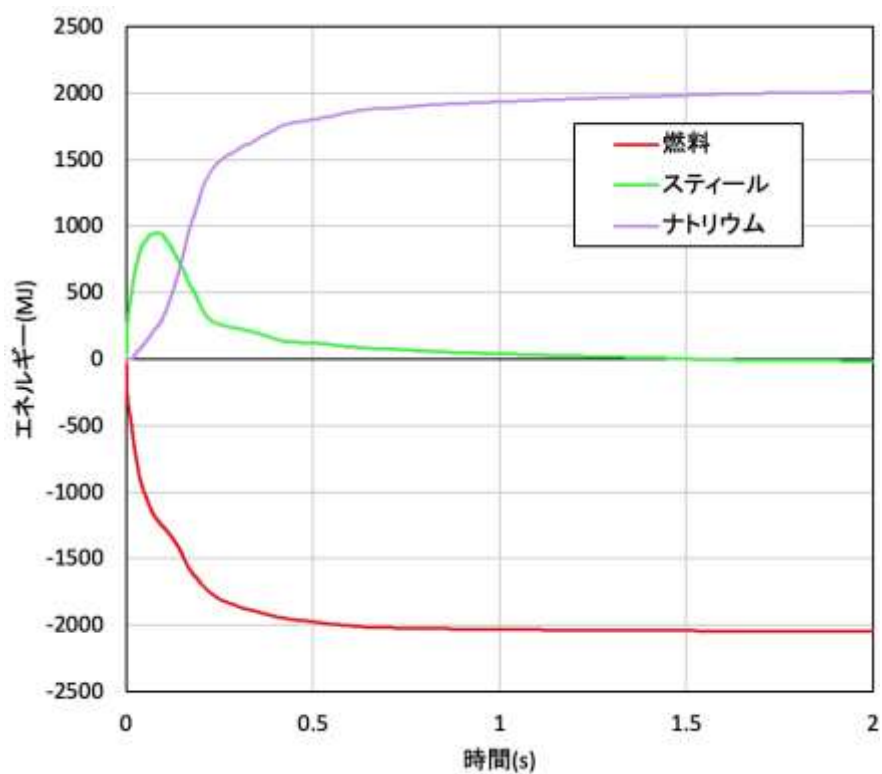
### 3. まとめ

ULOF 遷移過程における即発臨界超過による出力逸走で放出される熱エネルギーによって機械的エネルギーが発生する過程を S I M M E R -IV による多次元熱流動解析により機構論的に解析した。物質の熱エネルギーの時間変化に関する解析結果の分析から、出力逸走後の燃料が保有する熱エネルギーは炉心物質が上部プレナム底部に放出されるまでの間にその多くの割合が機械的エネルギーの発生する過程でスチール（炉心上部構造材を含む。）への熱移行により低減する。機械的エネルギーを発生させる上部プレナム下部での FCI は初期値に比べて大きく温度低下した炉心物質の一部

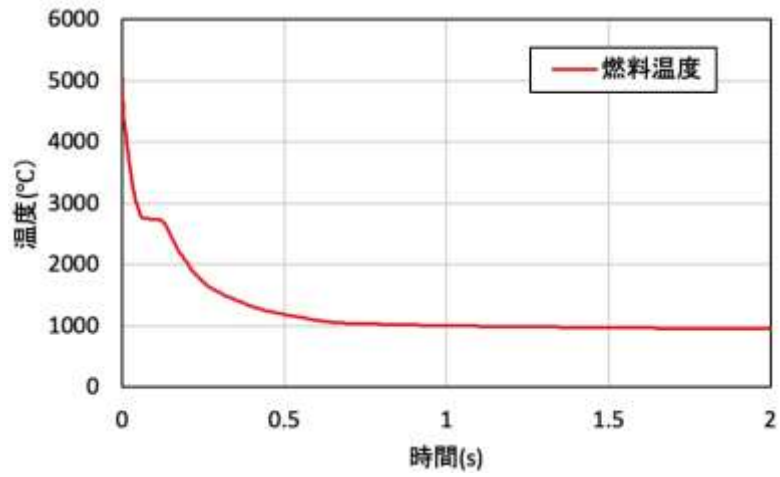
と上部プレナム下部のナトリウムとの間で生じることとなり、これが発生する機械的エネルギーを低減させる。炉心物質が持つエネルギーはそのほとんどが最終的には上部プレナムのナトリウムへ移行し、上部プレナムのナトリウム平均温度を約 60℃上昇させる。



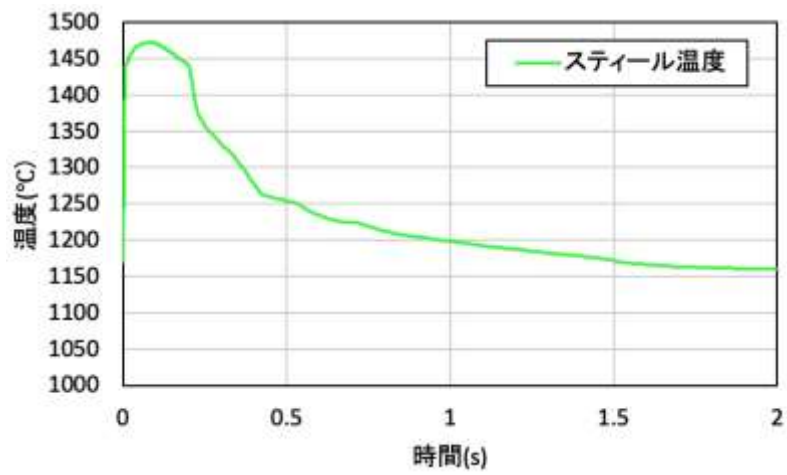
第1図 機械的エネルギー発生過程におけるエネルギーの時間変化



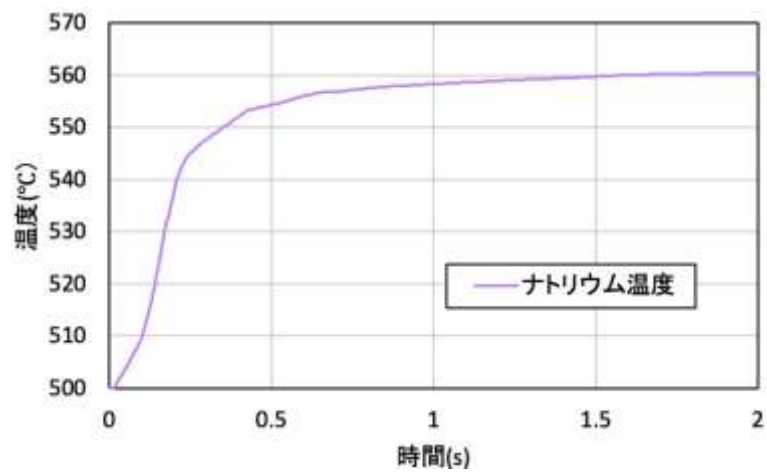
第2図 機械的エネルギー発生過程におけるエネルギーの初期値からの時間変化



第3図 燃料の解析体系内平均温度の時間変化



第4図 スチールの解析体系内平均温度の時間変化



第5図 ナトリウムの解析体系内平均温度の時間変化