九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

Fragmentation Behavior of Molten-Core Materials during Core Disruptive Accidents in Sodium-Cooled Fast Reactors

松場，賢一

https://hdl.handle.net/2324/1931897

出版情報：九州大学，2017，博士（工学），課程博士
バージョン：
権利関係：やむを得ない事由により本文ファイル非公開（3）

氏　　名　：松場　賢一

論文題名　：Fragmentation Behavior of Molten-Core Materials during Core Disruptive Accidents in Sodium-Cooled Fast Reactors
（ナトリウム冷却高速炉の炉心損傷事故における溶融炉心物質の微粒化挙動）

論　文　の　要　約

ウラン資源の有効利用と環境負荷低減の観点から有望なナトリウム冷却高速炉の安全目標の一つは、炉心損傷事故が発生しても原子炉容器の破損を防止することである。損傷した炉心からは、液柱状の溶融炉心物質（以下、「溶融ジェット」）が原子炉容器底部に流出する。この溶融ジェットが微粒化によって崩壊すると、安定冷却が可能となる粒子状固化物が形成される。従って、この安全目標を達成するためには、これら一連の挙動（以下、「微粒化挙動」）を評価し、溶融ジェットと原子炉容器下部構造との衝突を防止する必要がある。しかしながら、ナトリウム冷却条件での微粒化挙動に関する実験的知見が不足しているため、溶融ジェットの崩壊に必要なナトリウムの深さ（以下、「ジェット崩壊距離」）の評価における不確かさが大きく、過度の保守性を排除して原子炉容器下部構造を設計することが困難であった。本研究は、ナトリウム冷却高速炉において合理的な原子炉容器下部構造の安全設計を実現するため、溶融炉心物質の流出条件とジェット崩壊距離の関係を表す実験相関式を開発し､実機条件での微粒化挙動の評価に対する適用性確認を行ったものである。

本研究では、はじめに微粒化のメカニズムを解明するため、模擬物質を用いた基礎実験及びナトリウム中可視化実験を行った。次に、これらの実験で得たデータを用いて、ジェット崩壊距離に関する実験相関式を開発した。さらに、開発した実験相関式を実機評価に適用するため、実機相当条件で得られた実験データを用いて実験相関式の妥当性を検討した。最後に、原子炉容器下部構造の合理的な安全設計の実現性を検討するため、実験相関式を用いて炉心損傷事故における溶融炉心物質の微粒化挙動を評価した。

本論文は 7 章で構成される。

第 1 章では、ナトリウム冷却高速炉の開発意義、安全性の特徴と課題、微粒化挙動に関する既往研究の問題点並びに本研究の目的を述べた。

第 2 章では、ナトリウム冷却条件での溶融ジェット崩壊の特徴、すなわち、溶融ジェットと冷却材との間に安定な蒸気膜が形成されることなく冷却材中を侵入する条件での微粒化挙動について述べた。低融点合金の溶融ジェットを水中に落下させる基礎実験の結果、ジェット崩壊距離の実測値が従来の予測値と比べ顕著に短い傾向が見られた。これは、溶融炉心物質と冷却材との接触境界面付近で起こる冷却材の沸騰に伴う蒸気圧が微粒化の促進メカニズムとして作用することがその原因であることが分かった。さらに、微粒化に伴い発生する液滴の冷却挙動を評価した結果、溶融ジェットの急速な温度低下はジェット崩壊によるものであるという知見を得た。

第 3 章では、ナトリウム中を落下する金属アルミニウムの溶融ジェットの微粒化挙動について述べた。X 線画像を用いたナトリウム中の物質分布の観察結果から、溶融ジェットの近傍で発生したナトリウム蒸気によって溶融ジェットが急速に微粒化される挙動を明らかにし、ナトリウム中での微粒化のメカニズムは水中での溶融ジェット崩壊挙動と共通であることを示した。

第 4 章では、ジェット崩壊距離に関する実験相関式の検討について述べた。溶融ジェットの崩壊時はジェットの運動エネルギーと周辺冷却材による抵抗力に起因するエネルギーが釣り合うと仮定した評価モデルを用いて、溶融ジェットと冷却材との相互作用の大きさを評価した。その結果、水中では比較的高い蒸気圧に起因する強い相互作用が生じ、ジェット崩壊距離が顕著に減少することが分かった。さらに、この知見に基づいて蒸気圧の効果を実験相関式に取り入れることで、従来、最大約 25 倍の過大評価となっていたのに対し、50%の誤差範囲内で実験データを予測することを可能とした。

第 5 章では、実機条件に対する実験相関式の適用性について述べた。酸化ウラン燃料と同等の物理特性を有する酸化アルミニウムをナトリウム中に落下させた大規模実験の結果を実験相関式と比較した。その結果、実験相関式を実機条件に外挿できることが分かった。さらに、実験結果と実験相関式の差異は、測定されたジェット崩壊距離の方にジェット崩壊後の冷却距離が含まれることが主因であることを明らかにした。すなわち、本研究で開発した実験相関式を実機条件でのジェット崩壊距離の評価に適用することは妥当であることを確認した。

第 6 章では、炉心損傷事故における微粒化挙動の評価結果について述べた。従来、原子炉容器下部構造の破損を防止するために、溶融炉心物質の流出径と流出速度を制限するよう設計していたが、本研究で新たに提案した実験相関式を適用することで設計の合理化を図ることを可能とした。すなわち、本研究で開発した実験相関式が従来よりも合理的な原子炉下部構造の安全設計の実現に資するものであることを示した。

第 7 章では、本論文の総括と今後の展開を述べた。本研究では、模擬物質の溶融ジェットを冷却材中に落下させる基礎実験及びナトリウム中可視化実験を行うことによって、ナトリウム冷却条件での微粒化のメカニズムを解明するとともに、溶融炉心物質の流出条件とジェット崩壊距離の関係を表す実験相関式を開発した。さらに、実機相当条件で得られた実験結果との比較による実験相関式の妥当性の確認結果を踏まえ、炉心損傷事故における微粒化挙動の評価を行い、本研究で新たに開発した実験相関式を適用することで従来よりも合理的な原子炉下部構造の安全設計の実現を図ることを可能とした。今後の展開として、炉心損傷事故時の原子炉容器破損の防止を確実にするため、微粒化によって形成される粒子状の炉心物質の冷却挙動を解明し、原子炉下部構造の健全性評価に反映する必要がある。