

## 学 位 論 文 題 名

ナトリウムプールに侵入する溶融金属ジェットの  
変形・破碎挙動に関する研究

## 学位論文内容の要旨

資源に恵まれない我が国は、エネルギーの安定確保と資源の有効利用のために、核燃料サイクルの確立を基軸にした原子力エネルギー政策を推進してきた。核燃料サイクルを確立する上で重要な要素である高速増殖炉 (FBR) は、ウラン資源の飛躍的な有効活用が可能な原子炉であり、将来の主要なエネルギー源として期待されている。

このような背景から、現在、日本原子力研究開発機構 (旧核燃料サイクル開発機構) が中心となり、「FBR サイクル実用化戦略調査研究」を実施している。本調査研究においては、従来、主に研究開発が行われてきた混合酸化物 (MOX) 燃料のみならず、各種新型燃料についても基礎的な燃料物性の取得や、それらを用いた炉心の設計研究等が進められている。その中でも、安全に対する裕度が高い燃料である金属燃料を採用した炉心が、MOX 燃料炉心以外の有力な選択肢の一つに挙げられている。

一般に、液体金属冷却型 FBR は軽水炉とは異なり、炉心が最大反応度体系ではないという特徴に起因して、スクラム失敗を伴う異常な過渡変化 (ATWS) 時に炉心損傷事故 (CDA) に至る可能性が指摘されている。CDA の発生頻度は極めて低いものの、CDA の潜在的リスクを考慮し、CDA の事故シーケンスについて、設計段階で評価しておくことが要求されている。

金属燃料炉心は熱伝導率と内部転換率が高いため、ATWS に対して良好な受動的炉停止能力を保持していることがこれまでの検討により示されている。しかしながら、予測解析で使用されている物性値や、現行の解析モデルなどに対しては、大きな不確実性が含まれているため、現段階では CDA が発生しないと断言できるまでには至っていない。その一方で、金属燃料炉心の成立性を明らかにするために、異常影響の緩和の観点も含めて、炉心が損傷した状況においても核的・熱的にプラントの安全が確保しうることを定量的に示すことが求められている。

金属燃料炉心における CDA の事象進展を精度良く予測するためには、破損した被覆管から冷却材流路へ放出された溶融燃料と冷却材の相互作用 (FCI)、および FCI により破碎・微細化された燃料の炉心領域からの排出の可能性について把握しておく必要がある。仮に、破損した被覆管から放出された相当量の溶融燃料が FCI により破碎・微細化され、炉心領域外へ排出された場合、十分な負のフィードバック反応度が投入されるとともに炉心の冷却性が確保されて CDA は終息する。一方、融点近傍の溶融燃料が炉心領域に集積・凝固し、冷却材流路の閉塞を引き起こした場合、炉心冷却能力が低下し、再臨界に至る可能性も考えられ、深刻なシナリオとなる。したがって、CDA の事象進展を定量的かつ良好な精度で予測するためには、溶融燃料の破碎メカニズムを明らかにし、さらには破碎された燃料の粒径や形状のデータをもとに炉心領域外への燃料排出量

を評価して、反応度フィードバック解析や炉心冷却性の検討を行う必要がある。

本研究では、熔融金属燃料とナトリウムの FCI に伴って発生する燃料破碎現象に着目し、破碎に及ぼす支配因子の影響と破碎メカニズムの解明、および金属燃料炉心における CDA 時の炉心挙動評価に適用可能な、破碎後の燃料粒子の粒径を予測できる相関式の作成を目的として、熔融金属燃料の模擬物質とナトリウムを用いた FCI 模擬実験を実施した。

第 1 章では、金属燃料炉心における炉心損傷事故の概要と、熔融金属ジェットのナトリウム中での破碎現象を対象とした既往研究について述べた。周囲流体中を移動する別の流体の破碎（ブレイクアップ）現象に関する既往研究は、流体力学の分野で多数存在するが、二流体が非等温系でかつ温度差が大きく、相変化が想定され、さらに両流体ともに熱伝導の良好な液体金属を想定した研究は非常に限定されていることを示した。

第 2 章では、燃焼初期の金属燃料炉心で想定される、燃料ピンからの燃料噴出速度が小さく、燃料の破碎に対してより厳しい条件での破碎現象を対象として実施した FCI 模擬実験について述べた。本実験は、物性が比較的金属燃料に近い銅および銀を低流速でナトリウムプールへ重力落下させる体系で行った。従来、破碎が起こりにくいと予想されていた、熔融金属とナトリウムの瞬時接触界面温度が熔融金属の融点より低くかつ冷却材の沸点より高い条件においても、熔融金属ジェットとナトリウムの間に生じた流体力学的運動によりジェット内部に局所的にナトリウムが捕らえ込まれ、それが沸騰することによって破碎が発生し得ることを明らかにした（内部起因型の熱的破碎機構）。また、破碎の主要な支配因子とその影響について、破碎後の凝固物の粒径データをもとに定量的に明らかにした。さらに、燃焼初期相当の燃料噴出速度が小さい条件に適用可能な、破碎後の凝固物の粒径予測相関式を作成し、凝固物の質量メジアン径がジェットの過熱度（初期温度と融点との差）と熔融潜熱の関数で表現できることを示した。

第 3 章では、金属燃料炉心の燃焼中期から末期に想定される、燃料ピンからの燃料噴出速度が大きい条件を対象に、燃料模擬物質として熔融銅を用いて実施した FCI 模擬実験について述べた。本実験の目的は、熔融燃料の破碎に及ぼす流体力学的な影響を明らかにすることである。熔融銅ジェットの速度が小さい条件では、破碎の進展度はジェットの過熱度に依存し、過熱度の増加とともに破碎は進展した。また、熔融銅ジェットの速度が大きい条件（燃焼中期から末期の金属燃料炉心に近い条件）では、ジェットの過熱度の影響がほとんどなくなり、ジェットの破碎に対して周囲ウェーバー数（ジェット速度の 2 乗に比例する無次元数）の影響が支配的となった。さらに、周囲ウェーバー数の影響が支配的となる燃料噴出速度が大きい条件について、破碎後の銅凝固物の粒径予測相関式を作成し、凝固物の質量メジアン径が周囲ウェーバー数の関数で表現できることを示した。

第 4 章では、金属燃料とステンレス製被覆管の鉄成分との共晶反応により形成された液相の金属燃料とナトリウムとの FCI を対象に、融点が液相形成温度に近い熔融アルミニウムを用いて実施した FCI 模擬実験について述べた。本実験の目的は、燃料の破碎が生じにくいと予想される、ナトリウムの沸騰が起こらない温度条件下での破碎の可能性と破碎メカニズムを明らかにすることである。二流体の瞬時接触界面温度がナトリウムの沸点より低い温度条件においても、表面凝固を伴う熔融アルミニウムは、その内部で発生する圧力上昇により破碎した。本結果から、金属燃料炉心実機において、共晶反応により形成された液相の金属燃料は、その表面でナトリウムの沸騰が起こらない場合にも破碎される可能性があることが示唆された。

以上のように、本研究では、熔融金属燃料とナトリウムの FCI に伴って発生する燃料破碎現象に着目し、熔融金属燃料の模擬物質とナトリウムを用いた FCI 模擬実験を実施して、燃料の破碎に及ぼす支配因子の影響と破碎メカニズムを明らかにした。また、破

砕された凝固物の粒径データをもとに、金属燃料炉心の CDA 評価用解析コードに適用可能な、FCI 後の燃料の粒径予測相関式を作成した。本成果により、従来よりも精度の高い炉心の安全評価が可能になると考える。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 杉 山 憲一郎

副 査 教 授 島 津 洋一郎

副 査 教 授 佐 藤 正 知

副 査 助 教 授 奈 良 林 直

## 学 位 論 文 題 名

### ナトリウムプールに侵入する溶融金属ジェットの 変形・破碎挙動に関する研究

21世紀の最重要課題の1つであるエネルギー安定供給に貢献することを目標に、安全性、経済性、持続性、核拡散抵抗性、廃棄物低減性を要件として、第4世代原子力システムの開発が国際協力で進められている。この国際協力研究は、増殖炉を対象としており、液体金属冷却高速炉やガス冷却高温炉の開発が目標となっている。本研究は、液体金属冷却高速炉の金属燃料炉心を対象として、安全性評価上重要な溶融金属燃料と液体ナトリウムとの相互作用(Fuel-Coolant Interaction: 以下 FCI と記す)時の溶融金属燃料の破碎機構を解明している。特に、安全性評価上重要でありながら、従来解明が行われていない溶融金属燃料の温度が低く、瞬時接触界面温度が凝固点以下の条件下で破碎機構を明らかにしている。

第1章では、高速増殖炉開発の意義と金属燃料炉心における炉心損傷事故シナリオの概要が述べられている。また、FCI に関連する既往研究がまとめられており、等温流体ジェットの破碎現象に関連する研究が流体力学の分野で多数存在するが、非等温系で表面凝固が想定され熱伝導の良好な溶融金属ジェットを対象とする破碎機構の研究は報告されていないことが述べられている。

第2章では、燃焼初期の金属燃料炉心で想定される、燃料ピンからの溶融燃料の噴出速度が小さく、最も厳しい条件での破碎現象を対象として実施した FCI 模擬実験について述べている。本実験は、流体力学的物性が金属燃料に近い銅および銀を低流速でナトリウムプールへ重力落下させ、破碎が起これないと予想されていた瞬時接触界面温度が溶融金属の凝固点より低く、かつ、冷却材の沸点より高い条件において、溶融金属ジェットとナトリウムの間に生じる組織化された運動によりジェット内部に局所的にナトリウムが捕らえ込まれ、熱膨張と相変化により破碎が発生し得ることを解明している。すなわち、従来報告されていない内部起因型の熱的破碎機構が存在することを初めて明らかにしている。また、破碎後の凝固物の形態をもとに破碎の支配因子とその影響について検討し、粒径分布

はジェットの過熱度（初期温度と凝固点との差）と溶融潜熱の関数で表現できることを示し、安全性評価上重要な溶融金属燃料の破碎平均粒径予測相関式を提案している。

第3章では、金属燃料炉心の燃焼中期から末期に想定される、燃料ピンからの溶融燃料の噴出速度が大きい条件を対象に、溶融銅を用いて実施した FCI 模擬実験について述べている。溶融銅ジェットの速度が小さい条件では、破碎の進展度はジェットの過熱度に依存するのに対して、溶融銅ジェットの速度が大きい条件では、ジェットの破碎に対してジェットの過熱度の影響がなくなり、周囲ウェーバー数（ジェット速度の2乗に比例する無次元数）の影響が支配的となることを明らかにしている。また、その破碎機構は、ジェット先端の表面凝固層を高温・高速の後続ジェットが溶融貫通し、レーリー・テラー不安定とジェット先端の鈍い物体としての剥離分散によると説明している。この実験事実に基づき、表面凝固が発生し、周囲ウェーバー数の影響が支配的となる溶融燃料噴出速度が大きい領域について、溶融金属燃料ジェットの破碎平均粒径予測相関式を提案している。

第4章では、金属燃料炉心の欠点とされている金属燃料とステンレス鋼製被覆管の鉄成分との共晶反応により形成される低融点金属燃料とナトリウムとの FCI 現象を対象に、融点が低融点金属燃料に近い溶融アルミニウムを用いて実施した FCI 模擬実験について述べている。ナトリウムの沸騰が起こらない温度条件下でも破碎が確認され、瞬時接触界面温度がナトリウムの沸点より低い温度条件においても、溶融アルミニウムは、その内部で発生する圧力上昇により破碎することを解析でも確認している。この結果に基づき、金属燃料炉心においても、共晶反応により形成された低融点金属燃料は、その表面でナトリウムの沸騰が起こらない条件下でも破碎が生じる可能性があることを示唆している。第5章では、これらの成果をまとめている。

これを要するに、著者は、液体ナトリウム冷却高速増殖炉の安全性評価上重要な表面凝固を伴う溶融金属燃料ジェットの破碎の支配因子とその破碎機構を実験的に明らかにし、溶融金属燃料とナトリウムの相互作用の新知見を得たものであり、原子力工学の分野に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。