

氏名	齋藤 慎平		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	博甲第9021号		
学位授与年月日	平成31年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
審査研究科	システム情報工学研究科		
学位論文題目	On the fragmentation and phase-change heat transfer during melt-jet breakup (溶融ジェットブレイクアップ過程における微粒化および相変化伝熱に関する研究)		
主査	筑波大学 教授	博士(工学)	阿部 豊
副査	筑波大学 教授	工学博士	文字 秀明
副査	筑波大学 准教授	博士(工学)	金子 暁子
副査	福岡大学 教授	博士(工学)	松隈 洋介
副査	筑波大学 名誉教授	工学博士	成合 英樹

## 論文の要旨

本論文は、原子炉の過酷事故時における溶融ジェットのブレイクアップ過程における溶融ジェットの微粒化と相変化過程などの素過程に着目し、実験および数値解析を駆使して、従来未解明であった現象の詳細とメカニズムを解明するとともに、得られた知見を統合し一般化することによって、過酷事故時の溶融物冷却性評価を可能とする新しい手法を開発した結果について述べている。

第1章では、原子炉過酷事故時において炉心溶融物と冷却材間において生じる熱流動現象の複雑性について述べ、関連する既存研究のレビューを通して本論文の位置づけを確立している。

第2章では、液液二相系のジェットに関する実験を行い、ジェット崩壊現象を特徴づける物理量を整理している。さらに、これらデータを基にしてジェット崩壊現象に及ぼす流入条件や物性の影響を一般化し、実規模相当条件でのジェット崩壊モードを予測可能としている。

第3章および第4章では、二成分二相に対する格子ボルツマン法の Color-gradient モデルを用いて、液液二相ジェットの体系に適用可能なモデルを開発している。第2章で実施した実験を対象とした解析により、新たに開発した計算手法の妥当性を確認し、既存の大規模試験と等価な条件における溶融ジェットの流動解析を行って、実機条件における微粒化挙動を明らかにしている。

第5章では、一成分二相に対する格子ボルツマン法の Pseudo-potential モデルと有限差分法をと統合して、相変化を解析している手法を構築している。この手法を、粒子周りの沸騰熱伝達体系へ適用することによって、冷却性評価で用いるべき膜沸騰熱伝達式が評価できることを示している。

第6章では、得られた知見を統合し、溶融物の冷却材評価で用いる相関式群を整理して、生成した溶融物粒子のサイズおよびプール深さなど、冷却性に寄与する指標の重要度を明らかにしている。

## 審査の要旨

### 【批評】

大規模集中型の動力プラントにおいては、その極めて高いエネルギー密度から、安全の確保が何より重要である。原子力発電所の過酷事故時においては、炉心が損傷を受け炉心燃料が熔融する可能性があり、一旦熔融した炉心熔融物を安定に冷却保持するためには、その冷却性を定性的かつ定量的に把握することが求められる。事故時のアクシデントマネージメントを成功させ炉心熔融物を冷却固化して圧力容器内に安定保持するためには、熔融燃料ジェットの微粒化挙動を予測評価することが必要不可欠である。しかしながら、取り扱う現象は、熔融ジェットが冷却材中に突入し、極めて複雑な流動と相変化を伴う伝熱現象であり、複雑な相互作用をもたらすことから、これまで現象の本質を定性的にも定量的にも特定することができていなかった。

本論文では、そのような複雑な熔融燃料ジェットの微粒化挙動を対象に、模擬物質を用いた実験により微粒化挙動を明らかにした上で、無次元数を用いて一般化し、実機条件において卓越するジェットの微粒化モードを明らかにしている。さらに最新のレーザー誘起蛍光法(LIF)を用いて、これまで計測できなかった熔融ジェット界面の流動構造を捉えることに成功している。その上で、新しい数値流体力学手法である格子ボルツマン法に着目し、極めて複雑な界面変形を伴うジェット微粒化挙動に適用可能な数値モデルを構築し、熔融ジェットの微粒化挙動の定量的な再現に成功している。

本研究は、従来のアプローチとは全く異なる手法を用いて、熔融ジェットの分散微粒化の基本的なプロセスに焦点を当て、流体力学のおよび熱的なものを含む複雑な相互作用現象の本質を特定し、現象の素過程のメカニズムを解明することによって、熔融ジェットの熔融冷却性評価の方法論を確立したものであり、従来に無い結果を得ている。その成果は、物理学分野における権威ある国際誌 *Physical Review E* に、連続して2報が掲載されている。この論文は、イタリアおよびオランダの研究者との国際共著論文であり、当該論文は、*Physical Review E* のトップページにおいて、*Kaleidoscope* として取り上げられるなど国際的に高く評価されている。国内においても、我が国最大規模の学術機関である日本機械学会が発行する論文誌に掲載され、年間アクセス数トップ10にランクインするなど大きな注目を集めた。その他にも、国内外の権威ある学会誌に掲載されるとともに多くの国際会議において成果発表され、それらの成果に対して、10件に上る表彰を受けている。このように本論文の成果は、我が国を代表する世界的な成果と認められるものである。

### 【最終試験の結果】

平成31年2月6日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。