

審査の結果の要旨

氏名 王凱

原子炉溶融事故が発生した後の影響緩和策として、IVR(In-Vessel Retention)が検討されている。溶融燃料を原子炉容器内に閉じ込めるために、原子炉容器を水に浸して冷却する。溶融燃料が高温であり、容器表面で高熱流束となることから、限界熱流束を超え容器が溶融する懸念があり、限界熱流束を向上させるための様々な技術が提案されてきている。実機の原子炉容器外表面は、空気中にあり、かつ通常運転時は 300 度程度の高温となっており表面が酸化している。本研究では、容器下部の下向き伝熱面を対象とし、表面酸化が限界熱流束に与える影響を実験的に評価し、下向き伝熱面の限界熱流束発生機構を明らかにすることを目的としている。本論文は7章にて構成されている。

第1章では、原子炉燃料溶融事故時の影響緩和策である IVR について、その必要性と、伝熱特性について述べている。下向き伝熱面だけではなく、過去の限界熱流束実験の結果をレビューし、表面酸化により限界熱流束が増大する実験結果だけではなく、条件によっては、逆に限界熱流束が減少する実験結果などが得られていることを示している。また、数値流体シミュレーション(CFD)によって限界熱流束を評価している過去の研究結果をレビューしている。これらの研究成果をもとに、本研究の目的を記述している。

第2章では、銅を伝熱面として用いた、下向き伝熱面強制対流限界熱流束実験の結果をまとめている。酸化被膜形成のために、空気中で銅を加熱炉で酸化させている。加熱時間を長くするに従い、伝熱面の濡れ性が良くなるとともに、限界熱流束が向上していくことを明らかにしている。また、沸騰様相を可視化した画像を解析することによって、沸騰核密度が減少していくことを明らかにしている。加熱時間を長くすることで酸化被膜が形成され、限界熱流束が向上するとともに、沸騰核密度が減少する。表面状態を走査型電子顕微鏡によって観察し、表面に酸化が進んでいる様相を確認している。

第3章では、炭素鋼を用いた下向き伝熱面のプール沸騰限界熱流束実験をまとめている。既往研究では、銅を用いた同様の実験が行われている。同じ条件

において銅よりも炭素鋼における限界熱流束が向上することを実験的に明らかにするとともに、その違いが材料の熱伝導率の違いに起因することを考察している。

第4章では、炭素鋼の表面を酸化させた条件における、下向伝熱面の限界熱流束の実験結果をまとめている。限界熱流束実験を繰り返すことで、炭素鋼表面に酸化被膜が形成される。プール沸騰実験及び強制対流実験を実施し、いずれの場合でも、エメリペーパーで表面酸化被膜を落とした初期条件に比べて、実験を繰り返して酸化被膜が形成された場合の限界熱流束が向上することを明らかにしている。この時、可視化画像を評価して、沸騰核密度が銅の場合と同様に減少することを明らかにしている。

第5章では、第2章から第4章の実験で得られた、限界熱流束の向上と沸騰核密度の減少を説明するための新しいモデルを提案している。下向き伝熱面の限界熱流束を、沸騰気泡が伝熱面を覆う条件と仮定し、限界熱流束が沸騰核密度の $-1/2$ 乗に比例する事を理論的に導いている。本研究だけではなく、既往研究のデータとも照合することで、提案したモデルの妥当性を確認している。

第6章は、CFDコードにより、沸騰核密度を変化させた場合の限界熱流束を解析的に求めている。コードにおける沸騰核密度モデルや気泡離脱頻度モデルをさまざまに変化させた、感度解析を実施し、計算結果の妥当性を確認している。また、計算結果を評価し、沸騰核密度を変化させた場合の、限界熱流束の関係が、 $-1/2$ 乗に比例することを確認し、提案モデルの妥当性を評価している。

第7章は、結論であり、本論文の成果をまとめている。

以上、本論文は、原子炉燃料溶融事故時の影響緩和策であるIVRを想定し、伝熱面酸化による、下向伝熱面限界熱流束の影響を実験的に評価し、沸騰核密度と限界熱流束に負の相関があることを確認するとともに、その相関を説明する新しいモデルを提案し、さらに、CFDによっても、新モデルの相関が得られることを確認するなど、原子力発電所の安全性に影響を与える限界熱流束に対して重要な知見を与えることから、原子力工学の進展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。