

氏名	たけ うち ゆう と 竹 内 右 人
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	論 工 博 第 3327 号
学位授与の日付	平 成 10 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
学位論文題目	BASIC STUDIES OF CONVECTION HEAT TRANSFER RELATED TO PASSIVE SAFETY OF FAST BREEDER REACTORS (高速増殖炉受動的安全性に関わる対流熱伝達の基礎研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 芹 澤 昭 示 教 授 鈴 木 健 二 郎 教 授 荻 野 文 丸

論 文 内 容 の 要 旨

高速増殖炉におけるプラントの安全性確保を目的とした事故防止対策は深層防護の理念に基づいている。受動的安全性は第2のレベルに位置づけられ、万一プラントに異常が発見された場合でも、これが重大事故へ拡大する前に炉を安定に停止させ、能動的な操作を要することなく崩壊熱を除去するための方策を講じることが熱水力設計に課せられている。本論文はこうした高速増殖炉の受動的安全性に関わる冷却材による対流熱伝達を主に理論的側面から考察したもので、物理モデルの構築とそれを用いた数値シミュレーション結果から、広範な熱流動条件に精度よく適用できる対流伝達の予測手法を確立するとともに、実用に供しうる表示式を提案したものである。

序論では、本研究の背景と内容の概要を述べている。

第1章では、単一水平円柱からの自然対流層流熱伝達について非定常2次元渦度輸送方程式及び流れ関数方程式を有限差分法を用いて離散化し、SOR法によりプラントル数が0.005から3000に至る広範囲の様々な流体に対して壁温一定及び等熱流束条件の下で数値解析を行い、単一水平円柱表面の局所及び平均ヌセルト数が±10%以内の誤差で精度良く予測できることを示した。さらに、これらの数値解を基礎に、プラントル数が0.005～18000、修正グラスホッフ数が $1.09 \times 10^{-7} \sim 2.15 \times 10^9$ の極めて広範囲の熱流動条件に対して現在までに報告されている殆どすべての実測値を±10%以内の誤差で予測する一般的な自然対流熱伝達表示式を導出した。

第2章では、同心環状流路における低ペクレ数域液体金属ナトリウムの強制対流定常層流熱伝達を取り上げて解析している。これは高速増殖炉(FBR)における一次冷却材流量喪失事故時の燃料集合体流路内サブチャンネル流れを模擬した垂直同心二重円管流路をもちいて、低流速域の液体金属ナトリウム単相流れの強制対流熱伝達及び共存対流熱伝達について理論及び実験の両面から追究したものである。理論解析では液体ナトリウム及び流路壁における熱伝導や局所的な自然対流の影響等を考慮した厳密な理論モデルを構築し、ペクレ数が0.7～70の範囲に対して有限差分法を用いて数値解析している。実験値との比較から、本モデルが低流速域における伝熱現象を精度よく記述しうることを、及び、発達した領域における局所ヌセルト数がペクレ数に依存せずほぼ6～7の間の一定値になることを明らかにした。また、解析や実験における加熱面局所温度や流体混合平均温度の評価・測定に関しても、液体金属のように熱伝導率が大きい流体に対しては、流れ方向への熱伝導の影響を無視した場合には、加熱面の局所温度や流体の混合平均温度を過小評価し、熱伝導率を厳密解に比べ60%以上も低く評価してしまうことを定量的に明らかにした。この解析結果は従来報告されている多くの実験データや知見の見直しの必要性を示唆する極めて重要な結論である。

第3章では、高速増殖炉の一次冷却系におけるポンプコストダウンによる冷却流量喪失事故時の過渡熱伝達特性解析を念頭に、同心環状流路における液体金属ナトリウム流量急減に伴う過渡強制対流及び共存対流熱伝達の理論解析及び実験研究を行っている。まず、第2章において展開した数理モデル及び解析コードを拡張した過渡熱伝達に関する理論モデルを構築し、液体金属流れの流量変化に伴う非定常熱伝達を解析している。理論モデルの展開と並行して、流量が約25秒でほぼ直線的に減少する場合の過渡条件についてペクレ数を種々変えて実験を行っている。流量減少開始後の過渡的な加熱面温度上

昇から定常状態に至るすべての期間において理論と実測値とがよく一致することを確認し、理論モデルの妥当性を検証している。その上で、この過渡熱伝達に関する理論解析と第2章で展開した定常熱伝達モデルによる解析結果とを比較し、ナトリウム流量減少速度によらず、定常熱伝達解析は加熱面温度を常に保守的に（即ち安全側に）評価することを明らかにした。また、ナトリウム流量減少時の局所ヌセルト数は、流量減少速度が大きくなるほど同一流量に対する定常時のときの値に比べ低下するが、その理由として加熱部下流域への熱損失に起因することを明らかにした。

第4章では、本論文を通じて得られた成果について要約し、論文全体に対する考察と結論を取り纏めている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、高速増殖炉における受動的安全性に関わる冷却材である液体金属ナトリウムによる対流熱伝達を理論的及び実験的側面から考察したもので、物理モデルの構築とそれを用いた数値シミュレーションの結果から、液体金属のみならず広範な流体条件や熱流動条件に対して精度よく適用できる対流熱伝達の一般的な予測手法を確立するとともに、実用に供しうる表示式を提案したものである。得られた主な成果は以下の通りである。

1. 単一水平円柱からの自然対流層流熱伝達について物理モデルを考察し、その結果に基づいて非定常2次元過渡輸送方程式及び流れ関数方程式をSOR法により数値解析し、プラントル数が0.05～18000までの広範囲の種々の流体に対して局所及び平均ヌセルト数を、等温壁及び等熱流束条件下で求め、実験結果との比較からモデルの妥当性を検証した。数値計算の結果から、広範囲の流体や熱流動条件に対して±10%以内の誤差で精度よく適用できる一般的な自然対流層流熱伝達表示式を提示した。

2. 高速増殖炉一次系ナトリウム流量喪失事故時の低流量冷却条件に対し、炉心燃料集合体サブチャンネルを模擬した垂直同心環状流路における液体金属ナトリウムによる定常強制対流層流熱伝達及び共存対流熱伝達について、厳密な理論モデルを提案し、数値解を求めるとともに、従来の解析及び実験手法の問題点を明らかにした。

3. 定常対流熱伝達に対して提案した物理モデル及び数値モデル、解析コードを拡張し、ポンプコーストダウンによるナトリウム流量急減に伴う非定常過渡強制対流熱伝達及び共存対流熱伝達解析に適用できる過渡熱伝達理論モデルを考察し、非定常熱伝達による局所ヌセルト数が加熱部下流域に存在する非加熱部への熱損失によって低下する事実を明らかにした。また、定常熱伝達解析モデルとの比較から、定常解析モデルが加熱面温度に対して常に保守的な解析結果を与えることを示した。

以上のように、本論文は高速増殖炉の受動的安全性評価に不可欠な液体金属ナトリウムによる定常、非定常対流熱伝達解析手法に関して多くの成果を挙げたものであり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成10年2月13日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。