

様式 I

博士學位論文調査報告書

論文題目

軽水炉サブチャンネル解析法と限界熱流束予測手法の開発

申請者

淀 忠勝

最終学歴

令和 5年 3月
京都大学大学院エネルギー科学研究科エネルギー基礎科学博士後期課程
研究指導認定見込

学識確認

平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員
(主査)

京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 齊藤 泰司

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科
教授 三澤 毅

調査委員

京都大学大学院工学研究科
教授 横峯 健彦

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	淀 忠勝
論文題目	軽水炉サブチャンネル解析法と限界熱流束予測手法の開発		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、軽水炉の実用的な熱水力設計評価方法の開発を目的として、原子炉内の冷却材挙動を予測するサブチャンネル解析法および原子炉の安全性の判断基準の1つである限界熱流束の予測手法の開発についてまとめたもので、5章からなっている。</p> <p>第1章は、本研究の背景と目的について述べており、世界における化石エネルギー・再生可能エネルギー・原子力などのエネルギー情勢について示し、我が国では、S+3Eのバランスをとりながら、安全を大前提として原子力エネルギーを利用することの重要性について論じている。軽水炉は、発電のためにもっとも多く利用されてきた炉型であり、その安全解析手法についても数多くの研究がされてきた。しかしながら、東電福島第一原子力発電所事故を起因に、さらなる原子炉の安全確保のために、従来の設計基準事象を超える事故事象を対象として解析・検証することが必要となった。このため、設計事象を超えた場合の炉心の安全評価に必要なサブチャンネル解析法および、安全解析に使用すべき限界熱流束の相関式における、従来の研究の課題を明らかにし、本論文の構成をまとめている。</p> <p>第2章は、二流体モデルを用いたサブチャンネル解析コードの開発についてまとめている。既存の加圧水型原子炉向けサブチャンネル解析コードは混合物モデルである均質流モデルやドリフトフラックスモデルを採用しており、従来の設計想定のある事故事象を超えるようなときに生じる気液分離や二相水位が形成される事象の評価には、混合物モデルが前提としている物理現象を逸脱するために正しく物理量が計算できないなどの課題がある。本研究では、その課題に対して、気液分離や二相水位を伴う二相流現象を正確に評価するために、気相と液相の各相を個別に評価可能な二流体モデルを採用したサブチャンネル解析コード MIDAC-T を開発した。軽水炉を対象とした大規模実験で得られたボイド率計測値データとの比較により、開発したサブチャンネル解析コードは、4.9～16.6MPaの広範な圧力条件や、二相水位が生じる極低流量条件での試験データに対して±10%の範囲でボイド率を予測できることがわかった。</p> <p>第3章は、加圧水型原子炉の通常運転時の主な冷却材範囲であるサブクール沸騰領域における限界熱流束予測手法の高度化についてまとめている。通常運転時に生じる可能性があるのは、サブクール沸騰領域の限界熱流束条件で生じる Departure from Nucleate Boiling (DNB) 現象と考えられる。本研究では、DNB の発生メカニズムを模した機構論モデルの一つである</p>			

Liquid Sublayer Dryout (LSD) モデルを基にして限界熱流束相関式を導出した。LSD モデルでは、限界熱流束の計算に収束計算が必要となるが、原子炉の評価では収束計算の必要がない相関式の方が安定して予測値を得ることが求められる。したがって、本研究では限界熱流束の予測手法として実用性が高い相関式を開発した。相関式開発のベースになった LSD モデルとして、広範囲の冷却材条件に適用可能な Katto の機構論モデルを採用し、Katto 機構論モデルの予測結果から、モデル上で最も重要な物理量である液膜底層厚さと大蒸気泡速度の無次元相関式を導出した。最終的に液膜底層厚さと大蒸気泡速度の無次元相関式を用いて、ウェーバー数、密度比、ラプラス数などの無次元数をもつ簡略化限界熱流束相関式を導いている。さらに、相関式の予測精度を向上させるために、精度の高いデータベースとして知られる Groeneveld らの Look-up Table を用いて、簡略化限界熱流束相関式の係数を補正して最終的な相関式を導いた。相関式の適用範囲は、圧力 0.1~18MPa、質量速度 500~8000kg/m²s、熱平衡クオリティ 0.5~0.05 である。最後に得られた相関式と従来の相関式および他の LSD モデルとの比較検討を行い、開発した相関式が従来の相関式より広い条件で限界熱流束の予測ができることを示した。

第4章は、加圧水型原子炉の事故時などの事象における主な流動様式である環状流を対象にしたドライアウト型限界熱流束予測手法の高度化についてまとめている。環状流領域を対象とした機構論モデルの一つとして、Annular Film Dryout (AFD) モデルを基に数値積分を必要としない相関式を導出した。機構論としては、Jiao らの AFD モデルを基にして、界面せん断による液滴発生率と液滴付着率が一致すると仮定し、AFD モデルの支配方程式を解析的に積分して相関式を導出した。積分した相関式には未知パラメータとして積分液膜厚さが現れるが、本研究では Jiao らの AFD モデルを用いて、積分液膜厚さを液相レイノルズ数、気相主流ウェーバー数、密度比の無次元数の関数として導いた。さらに、得られた積分液膜厚さの相関式を熱収支式に代入して、AFD モデルに基づく機構論モデルベース限界熱流束相関式を得た。得られた相関式は圧力 0.1~16MPa、質量速度 500~3000kg/m²s、熱平衡クオリティ 0.05~0.7 の環状流領域の限界熱流束予測に適用可能であり、使用したデータベースに対して標準偏差 16.9%のばらつきで予測可能である。また、環状流長さが短い場合には、AFD モデルの予測精度が低下することを明らかにした。これは、AFD モデルが安定した環状流液膜を対象としているため、環状流液膜が十分に発達していない領域では、AFD モデルの予測精度が低下することを意味している。さらに、環状流長さや管径の比が小さい領域のデータ選別を実施した場合、標準偏差はさらに低減可能な見込みを得た。

第5章は、本論文で得られた成果の総括と今後の研究課題・展望についてまとめている。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、軽水炉の実用的な熱水力設計評価方法の開発を目的として、サブチャンネル解析法および限界熱流束予測手法の開発をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 広範囲な冷却材条件に対して、炉心内の冷却材挙動の予測が可能な二流体モデルを採用したサブチャンネル解析コード MIDAC-T を開発した。軽水炉を対象とした大規模実験で得られたボイド率計測値データとの比較により、4.9～16.6MPa の広範な圧力条件や、二相水位が生じる極低流量条件での試験データに対して±10%の範囲でボイド率を予測できることがわかった。
2. 加圧水型原子炉の通常運転時の主な冷却材範囲であるサブクール沸騰領域における限界熱流束予測手法の高度化のためにサブクール沸騰条件下の DNB 型機構論モデルベース相関式を開発した。相関式の適用範囲は、圧力 0.1～18MPa、質量速度 500～8000kg/m²s、熱平衡クオリティ-0.5～-0.05 である。開発した相関式は広い適用範囲を提供し、従来の機構論モデルのような収束計算を要しない実用性の高い限界熱流束相関式である。
3. 加圧水型原子炉の事故時などの事象における主な流動様式である環状流を対象にしたドライアウト型限界熱流束予測手法の高度化のために、環状流領域を対象とした AFD モデルを基に相関式を導出した。この開発により、従来必要であった数値積分を必要としない環状流条件下のドライアウト型機構論モデルベース相関式を開発することが可能となり、得られた相関式は圧力 0.1～16MPa、質量速度 500～3000kg/m²s、熱平衡クオリティ 0.05～0.7 の環状流領域の限界熱流束予測に適用可能であり、使用したデータベースに対して標準偏差 16.9%のばらつきで予測可能である。また、環状流長さが短い場合には、AFD モデルの予測精度が低下することを明らかにし、環状流長さ と 管直径の比が小さい領域のデータ選別を実施した場合、予測精度のさらなる向上が可能であることを示した。

以上から、本研究では、広範囲に適用可能なサブチャンネル解析コードおよび限界熱流束予測の機構論モデルベース相関式の基礎モデルを開発した。開発技術は、軽水炉の設計想定事象を超えるような広範囲の冷却材条件への適用や将来の基盤技術としての応用が期待され、今後の軽水炉の安全性向上に資するところが多い。

よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値のあるものと認める。また、令和 5 年 2 月 24 日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降