



蒸気発生器内の逆U字管下端における気液対向流制限に関する研究

楠木, 貴世志

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2015-09-25

(Date of Publication)

2016-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6474号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006474>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



論文内容の要旨

氏 名 楠木 貴世志

専 攻 機械工学専攻

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

蒸気発生器内の逆 U 字管下端における気液対向流制限に関する研究

指導教員 富山 明男

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

加圧水型原子炉(PWR: Pressurized Water Reactor)の事故時には、炉心冷却手段の一つとして蒸気発生器(SG: Steam Generator)によるリフラックス冷却が期待されている。しかしながら、リフラックス冷却時には、U字管の上昇流側やホットレグにおいて炉心で発生した蒸気と凝縮水が対向して流れることから、気液対向流制限(CCFL: Counter-Current Flow Limitation)が生じる可能性がある。これまで鉛直管のCCFL特性に関して、多くの実験が行われており、Wallisパラメータを用いた実験相関式が提案されている。ただし、既存の研究では、気液対向流挙動に対する鉛直管の形状や流体物性値の影響に関して十分な検討は行われておらず、既存のCCFL相関式の実機U字管条件への適用性は明確でない。

そこで本論文では、PWRプラントのSGのU字管上昇側の下端に対するCCFL相関式の信頼性を向上させ、その不確かさを小さくするため、0.1～7 MPaの範囲に適用できるU字管下端におけるCCFL相関式とその不確かさを導出することを目的とした。

第2章では、SGのU字管下部を模擬した鉛直管下端でのCCFL特性に対して影響を及ぼす鉛直管の形状の因子、および、CCFL特性を適切に表す主要変数を明らかにすることを目的とした。そのために、管長、上部タンクの水頭および鉛直管下端面取り長さをパラメータとして、空気と水を用いた鉛直管でのCCFL実験を行った。取得した実験データと既存のデータ(異なる管径)を用いて鉛直管下端に対するCCFL相関式を導出した。その結果、管長と管径の比が15以上では下端でCCFLが発生することから、SGのU字管下部を模擬した鉛直管下端でのCCFL相関式は、実機U字管に適用できることを明らかにした。また、管径が20～51 mmの範囲では下端CCFLはWallisパラメータを用いて整理できること、管長、上部タンクの水頭および面取り長さはCCFL特性に有意な影響を及ぼさないことを明らかにした。

第3章では、鉛直管下端でのCCFL特性に影響を及ぼす流体物性値を明らかにすることを目的とした。そのために、第2章で実施した空気と水を用いた鉛直管でのCCFL実験を対象として、数値シミュレーションを用いて評価を行った。最初にCCFL計算結果を既存のデータと比較した。次に気相密度、液相密度、液相粘性および表面張力をパラメータとして計算を行い、CCFL特性に影響を及ぼす流体物性値を検討した。その結果、CCFLの定性的評価にVOF法を使用できることを確認した。さらに、CCFL計算結果は気相密度に依存しなかったこと、および、液相密度および表面張力が異なっても液相粘性が同じであればCCFL計算値に依存しなかったことから、液相粘性がCCFL特性に影響を及ぼす主なパラメータであることを確認できた。

第4章では、流体物性値の影響を表わす補正項を明らかにするとともに、U字管下端部におけるCCFL相関式とその不確かさを導出することを目的とした。そのために、気相に空気、液相に粘性の高い40%と60%のグリセリン水溶液を用いて、鉛直管でCCFL

氏名	楠木 貴世志		
論文 題目	蒸気発生器内の逆 U 字管下端における気液対向流制限に関する研究		
審査委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教 授	富山 明男
	副 査	教 授	山根 隆志
	副 査	教 授	大村 直人
	副 査	准教授	細川 茂雄
	副 査		
要 旨			
加圧水型原子炉事故時の炉心冷却手段の一つとして蒸気発生器によるリフラックス冷却の利用が検討されている。リフラックス冷却時には、蒸気発生器内の逆 U 字管の上昇流側やホットレグにおいて炉心で発生した蒸気と凝縮水が対向して流れるため、気液対向流制限(CCFL：Counter-Current Flow Limitation)が生じる可能性がある。これまで鉛直管の CCFL 特性に関しては多くの実験が行われており、無次元フルード数に相当する Wallis パラメータを用いた実験相関式が提案されている。しかしながら、既存の研究では気液対向流挙動に対する鉛直管の形状や流体物性値の影響に関して十分な検討はなされておらず、既存 CCFL 相関式の実機逆 U 字管への適用性は明確でない。そこで本論文では、逆 U 字管の上昇側下端で発生する気液対向流制限に対する相関式の信頼性向上を目的とし、0.1～7 MPa の系圧に適用できる CCFL 相関式の開発とその不確かさの明確化を試みている。 第 1 章には、本研究の背景・既存の研究・目的が整理されている。 第 2 章では、逆 U 字管下部を模擬した鉛直管下端での CCFL 特性に影響を及ぼす幾何学的因子と CCFL 特性を適切に表す主要変数を明らかにすることを目的としている。管長、上部タンクの水頭および鉛直管下端面取り長さをパラメータとして、空気と水を用いた鉛直管での CCFL 実験を実施している。取得した実験データと既存のデータを活用して鉛直管下端で発生する CCFL の実験相関式を導出している。また、管長と管径の比が 15 以上では管下端で CCFL が発生するため、蒸気発生機の逆 U 字管下部を模擬した鉛直管下端での CCFL 相関式が実機逆 U 字管に適用できることを明らかにしている。さらに、管径が 20～51 mm の範囲では下端 CCFL は Wallis パラメータを用いて整理できること、管長、上部タンクの水頭および面取り長さは CCFL 特性に有意な影響を及ぼさないことも明らかにしている。 第 3 章では、鉛直管下端での CCFL 特性に影響を及ぼす流体物性値の特定を目的としている。まず、第 2 章で実施した空気と水を用いた鉛直管での CCFL 実験を対象として界面追跡法に基づく数値シミュレーションを実施し、CCFL 計算結果を既存の実験データと比較している。次に気相密度、液相密度、液相粘性および表面張力をパラメータとした計算を行い、CCFL 特性に影響を及ぼす流体物性値を検討している。その結果、CCFL の定性的評価に界面追跡法を使用できることを確認するとともに、CCFL 計算結果が気相密度に依存しないこと、液相密度および表面張力が異なっても液相粘性が同じであれば CCFL 計算値に大きな差がないこと、すなわち、液相粘性が CCFL 特性に影響を及ぼす主なパラメータであることを確認している。 第 4 章では、CCFL 相関式に流体物性値の影響を考慮する方法の検討と、逆 U 字管下端部における CCFL 相関式の構築とその不確かさの評価を目的としている。気相に空気、液相に粘性の高い 40%と 60%のグリセリン水溶液、及び気相に飽和蒸気、液相に飽和水を使用して鉛直管による CCFL 実験を実施し、流体物性値が CCFL 特性に及ぼす影響を調べている。その結果、飽和蒸気・飽和水系において管径が CCFL に及ぼす影響は Wallis パラメータで考慮できることを確認するとともに、流体物性値の影響を考慮するパラメータとしては気液粘性比が適していることを明らかにしている。この結果を基に、気液粘性比を補正項として組み込んだ CCFL 相関式を構築している。 第 5 章では、前章で導出した CCFL 相関式の凝縮系への適用性を検討している。また、原子炉安全性解			

(氏名：楠木 貴世志 NO.3)

実験を行い、流体物性値が CCFL 特性に及ぼす影響を調べた。合わせて、大気圧で気相に飽和蒸気、液相に飽和水を用いて鉛直管で CCFL 実験を行った。その結果、鉛直管での飽和蒸気・飽和水系における管径の及ぼす影響は Wallis パラメータで整理できることを確認した。また、流体物性値の影響を表わす補正項として気液粘性比が適していることを明らかにし、気液粘性比を補正項に用いた CCFL 相関式を導出した。

第 5 章では、第 4 章で導出した CCFL 相関式の凝縮系への適用性を確認すること、および、統計解析に用いる過渡・事故解析コードでは Wallis 型の CCFL 相関式($J_G^{*1/2} + mJ_L^{*1/2} = C$) が用いられていることから、Wallis 型の CCFL 相関式とその不確かさを導出することを目的とした。そのために、SG 伝熱管を模擬した逆 U 字管内に流入する蒸気と蒸気の凝縮水により生じる気液対向流を対象に CCFL 実験を行った。その結果、逆 U 字管の凝縮実験の CCFL 特性は、第 4 章で導出した CCFL 相関式の不確かさの範囲内になったことから、凝縮系にも適用できることを確認した。また、0.1～7 MPa まで適用できる Wallis 型 CCFL 相関式を導出した。

以上、蒸気発生器 U 字管下端での気液対向流制限について、CCFL 実験および数値計算により CCFL 特性を調べ、0.1～7 MPa の範囲に適用できる U 字管下端における CCFL 相関式とその不確かさを導出した。導出した CCFL 相関式を用いて実機条件における CCFL 特性をより精度よく予測できた。さらに、導出した Wallis 型 CCFL 相関式を例えば過渡・事故解析コード RELAP5/MOD3 に組み込むことにより、プラントの事故解析の信頼性およびその精度を向上させることができる。

氏名	楠木 貴世志
析コードによる統計解析では Wallis 型の CCFL 相関式が使用されているため, Wallis 型の CCFL 相関式をその不確かさも含めて導出することを目的としている. このため, 蒸気発生器伝熱管を模擬した逆 U 字管内に流入する蒸気と蒸気の凝縮水により生じる気液対向流を対象に CCFL 実験を実施している. その結果, 逆 U 字管凝縮実験の CCFL 特性は, 第 4 章で導出した CCFL 相関式の不確かさの範囲内で整理できること、すなわち, 凝縮系にも適用できることを確認している. また, 0.1~7 MPa まで適用できる Wallis 型 CCFL 相関式も導出し, その不確かさも明らかにしている. 第 6 章には, 本研究の成果が総括されている. 本研究は、加圧水型原子炉事故時の炉心冷却評価に不可欠となる蒸気発生器内気液対向流制限評価手法を構築するとともにその不確かさを明らかにした研究であり, 流体力学, 原子力安全工学における価値ある集積である. 提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており, 学位申請者の楠木貴世志は, 博士(工学)の学位を得る資格があると認める.	