



鉛直管の上端フラッシング状態における管内流動特性に関する研究

高木, 俊弥

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2021-09-25

(Date of Publication)

2022-09-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8172号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008172>

※ 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 _____ 高木 俊弥 _____

専 攻 _____ 機械工学 _____

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

鉛直管の上端フラッシング状態における

管内流動特性に関する研究

指導教員 _____ 富山 明男 _____

(注) 2, 000 字～4, 000 字でまとめること。

加圧水型原子炉は、通常運転時には加圧器によって一次冷却系の冷却水を加圧して单相流状態を維持しているが、例えば配管破断による冷却材喪失事故 (LOCA) が発生した場合、減圧沸騰が生じて気液二相流になる。この時一次冷却系の水量減少により、蒸気と凝縮水の気液対向流が生じ、蒸気流束が大きいとフラッシングが生じる場合がある。このため、加圧水型原子炉の事故解析においては、一次冷却系における気液対向流条件での落下水制限 (CCFL)、冷却水量、圧力損失などを適切に評価する必要がある。

そこで本研究では、一次元モデルに基づく原子炉の事故解析コードに使用できる気液対向流条件の CCFL 特性、ボイド率、壁面摩擦、及び界面摩擦に関する相関式の構築を目的とした。加圧水型原子炉の一次冷却系において気液対向流が生じ得る鉛直管には蒸気発生器伝熱管と加圧器サージ管がある。加圧器サージ管の直径は約 0.3 m である。配管破断の面積が小さい小破断 LOCA では、一次系圧力が二次系の運転圧力である約 7 MPa まで低下すると、一時的に圧力低下が抑制され、一次系内の水量低下により気液対向流が生じやすくなることから、二相流相関式の使用は約 7 MPa までとなる。したがって、CCFL、ボイド率、壁面摩擦、及び界面摩擦に対する相関式を作成し、実機を想定して大口徑、高圧でも定性的に妥当な評価ができることを目標とした。

第 2 章では、気液対向流条件におけるボイド率や界面及び壁面での摩擦係数に関する知見が不足しているため、直径 40 mm、上端シャープエッジの鉛直管を用いて気液対向流実験を行い、CCFL 特性、管内差圧、及びボイド率を測定し、界面及び壁面摩擦係数を実験的に評価した。その結果、管上下端の形状によらず、気相体積流束が低い時に落下液膜の気液界面が比較的滑らかな Smooth Film となり、気相体積流束を増加させると管内部で擾乱波が生じる流動様式遷移 (Transition) が起こり、さらに増加させると擾乱波が上端から流出する Rough Film に変化することを確認した。CCFL 特性は、直径 40 mm でも Kutateladze パラメータで整理できることを確認した。壁面摩擦係数は、单相流に対する壁面摩擦係数の相関式で表せるが、層流から乱流への遷移域では单相流に対する相関式より大きくなることを明らかにした。ボイド率測定値から Smooth Film の液膜厚さを求め、層流では自由落下液膜に対する Nusselt の式で表せるが、乱流では自由落下液膜より厚くなることを明らかにした。また、界面摩擦係数は従来相関式では適切に表せないことを確認した。

第 3 章では、加圧器サージ管における落下液流量がシャープエッジの鉛直管上端部で制限されることを踏まえ、鉛直管上端部での CCFL を検討した。具体的には、従来データを収集し、鉛直管の上端形状の影響を分類し、加圧器サージ管上端と類似する構造に絞って直径と流体物性値の影響を評価した。その結果、直径が 30 mm～250 mm (無次元直径が 11～94) の範囲では Kutateladze パラメータで整理すると流体物性値の影響を包含できること

(氏名：高木 俊弥 NO.2)

を確認し、CCFL 相関式を作成した。次に、圧力勾配の測定値からボイド率を求める際に必要となる壁面摩擦係数について検討した。壁面摩擦係数は、単相流に対する相関式で表せるが、層流から乱流への遷移域では単相流に対する相関式より大きいことを明らかにし、新たな壁面摩擦係数相関式を提示した。

第4章では、まず、圧力勾配データまたは CCFL データからボイド率を求める方法を検討し、壁面摩擦係数の相関式と圧力勾配の測定値を用いてボイド率を適切に評価できることを明らかにした。次に、ボイド率の測定値及び圧力勾配データから求めたボイド率を用いて、Smooth Film に対する液膜厚さの相関式を作成した。液膜厚さは層流域では Nusselt の式で表せ、遷移域と乱流では自由落下液膜より厚くなる。遷移域では液相レイノルズ数 Re_L の 1/2 乗に比例し、乱流では Re_L の 2/3 乗に比例することを明らかにし、相関式を作成した。測定値の 95 % が相関式と一致する不確かさはボイド率 0.87~0.98 に対して ± 0.0062 と小さい。作成した液膜厚さ相関式のデータ範囲は無次元直径 7.3~18.6 であるが、相関式を大口径、高圧条件に適用しても定性的に妥当な値を与えることを確認した。

第5章では、事故解析コードで界面摩擦係数やドリフトフラックスの相関式が使用されることを踏まえ、本研究での測定値と従来データ（無次元直径 7.8~18.6）を用いて、これらの相関式を作成した。作成した相関式は実機条件に外挿使用できないことから、前章で作成した液膜厚さ相関式を用いて直径 0.3 m、圧力 7 MPa（無次元直径 187）までの高温高圧の蒸気・水系における界面摩擦係数とドリフトフラックス変数を計算し、計算値を用いて界面摩擦係数とドリフトフラックスの相関式を補正した。補正した界面摩擦係数相関式は、直径 0.3 m、圧力 7 MPa（無次元直径 187）まで外挿使用しても定性的に妥当であることを確認した。ドリフトフラックス相関式において、分布定数は環状流での値である 1.0 であった。液膜厚さ相関式を使用して計算したドリフト速度を利用して作成した相関式は無次元直径 187 まで外挿使用してもボイド率の計算値は定性的に妥当であった。

以上、鉛直管の上端制限状態における管内流動特性について、直径 40 mm での空気・水対向流実験及び従来データの活用により CCFL、ボイド率、壁面摩擦、及び界面摩擦に関する相関式を構築した。CCFL 相関式、壁面摩擦係数相関式、及びボイド率から求まる液膜厚さ相関式については、大口径で高圧となる実機条件でも定性的に妥当な評価が可能と考えられる。これらの相関式を、例えば過渡・事故解析コードに組み込む、あるいは既存コードの検証に使用することにより、プラント事故解析の信頼性を向上できる。

以上

氏名	高木 俊弥		
論文題目	鉛直管の上端フラッシング状態における管内流動特性に関する研究		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	富山 明男
	副査	教授	浅野 等
	副査	教授	今井 陽介
	副査		
	副査		
印			
要 旨			
<p>加圧水型原子炉の通常運転時では、加圧器により一次系冷却水は加圧され単相流状態を維持しているが、例えば配管破断による冷却材喪失事故(LOCA: Loss of Coolant Accident)が発生した場合、減圧沸騰が生じ気液二相流となる。この際、一次冷却水系の水量の減少により蒸気と凝縮水の気液対向流が生じ、蒸気流量が大きいと凝縮水の炉心への還流が妨げられるフラッシング状態となる可能性がある。このため、加圧水型原子炉の事故解析においては、一次冷却系における気液対向流制限(CCFL: Counter Current Flow Limitation)、冷却水還流量、圧力損失などを適切に評価する必要がある。そこで本研究では、一次元モデルに基づく原子炉の事故解析コードに使用できる気液対向流条件における CCFL 特性、ボイド率、壁面摩擦、及び界面摩擦に関する相関式の構築を目的としている。加圧水型原子炉の一次冷却系において気液対向流が予想される鉛直管には蒸気発生器伝熱管と加圧器サージ管がある。加圧器サージ管の直径は約 0.3 m である。また、配管破断面積が小さい小破断 LOCA では、一次系圧力が二次系運転圧力である約 7 MPa まで低下するとさらなる圧力低下は抑制され、一次系内水量低下により気液対向流が生じやすくなる。このため、相関式の適用範囲は約 7 MPa までとなる。このため、本研究で構築する CCFL、ボイド率、壁面摩擦、及び界面摩擦に対する相関式の適用範囲目標を管直径 0.3 m、圧力 7 MPa としている</p> <p>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。</p> <p>第2章では、気液対向流条件におけるボイド率・界面摩擦係数・壁面摩擦係数の実験データが不足しているため、直径 40 mm、上端シャープエッジの鉛直管を用いて気液対向流実験を行い、流動様式、CCFL 特性、管内差圧、ボイド率を測定し、界面摩擦係数と壁面摩擦係数を評価している。その結果、管上下端の形状によらず、気相体積流量が低い場合は落下液膜の気液界面が比較的滑らかな Smooth Film となること、気相体積流量が増加するにつれ管内部で擾乱波が生じる流動様式遷移が生じ、さらに増加すると管上端からの擾乱波の流出を伴う Rough Film 状態となることが確認されている。また、CCFL 特性は Kutateladze パラメータで整理できること、壁面摩擦係数は単相流用の相関式で表せるが、層流から乱流への遷移域では単相流相関式より大きくなることを明らかにしている。さらに、ボイド率測定値から Smooth Film の液膜厚さを求め、層流では自由落下液膜に対する Nusselt の式で液膜厚さを評価できるが、乱流では自由落下液膜より厚くなることも明らかにし、界面摩擦係数は既存の相関式では適切に評価できないことが確認されている。</p> <p>第3章では、加圧器サージ管における落下液流量がシャープエッジの鉛直管上端部で制限されることを踏まえ、鉛直管上端部での気液対向流制限を検討している。既存の実験データを鉛直管上端形状に基づいて整理した上で、加圧器サージ管上端と類似する構造に絞って直径と流体物性値が気液対向流に及ぼす影響を評価している。その結果、管直径が 30 mm~250 mm の範囲では Kutateladze パラメータ Ku を用いて CCFL 特性を整理すると流体物性値の影響を適切に考慮できることを確認し、Ku を独立変数とする CCFL 相関式を提示している。次に、圧力勾配測定値からボイド率を求める際に必要となる壁面摩擦係数を検討し、層流から乱流への遷移域を含めて適用できる新たな壁面摩擦係数相関式も提示されている。</p> <p>第4章では、まず、圧力勾配測定値または CCFL 測定結果からボイド率を求める方法が検討されている。その結果、壁面摩擦係数相関式と圧力勾配測定値を組み合わせるとボイド率を適切に評価できることを明らかにしている。次に、この評価方法で求めたボイド率を用いて Smooth Film に対する液膜厚さの相関式</p>			

氏名

高木 俊 弥

を作成している。液膜厚さは層流から乱流への遷移域では液相レイノルズ数の 1/2 乗、乱流では 2/3 乗に比例することを明らかにし、層流から乱流まで適用できる相関式を構築している。さらに、構築した液膜厚さ相関式を直径 0.3 m、圧力 7 MPa まで適用しても工学的非合理性はないことも確認されている。

第 5 章では、事故解析コードでは界面摩擦係数やドリフトフラックス相関式が利用されることを踏まえ、本研究での実験値と既存の実験データを用いて、まず、これらの相関式を作成している。作成した相関式は実機条件には外挿適用できないため、前章で構築した液膜厚さ相関式を用いて直径 0.3 m、圧力 7 MPa までの高温高圧蒸気・水系における界面摩擦係数とドリフトフラックス変数を算出し、その結果を用いて界面摩擦係数とドリフトフラックスの相関式を補正している。その結果、補正した界面摩擦係数相関式及びドリフトフラックス相関式は、直径 0.3 m、圧力 7 MPa まで外挿適用しても非合理性がないことを確認している。

第 6 章には、本研究の成果が総括されている。

以上、本研究は鉛直管上端で落水制限が生じる際の気液対向二相流について、その流動構造、液膜厚さ、ボイド率、界面摩擦係数、壁面摩擦係数及び気液対向流制限特性を研究したものであり、原子炉安全性評価に寄与する重要な知見を得たものとして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、学位申請者の高木俊弥は、博士(工学)の学位を得る資格があると認める。