

**原子力システム研究開発事業 – 基礎研究開発分野 –**  
**若手対象型 事後評価総合所見公表用フォーマット**

研究開発課題名（研究機関名） ミリチャンネル二相熱流動場の高信頼性予測実現のための研究開発（国立大学法人大阪大学）	
研究開発担当者 機関名：国立大学法人大阪大学                      総括代表者：大川富雄 機関名：株式会社東芝                                      代表者：山本泰 機関名：国立大学法人神戸大学                      代表者：富山明男 機関名：学校法人関西大学                              代表者：梅川尚嗣	
研究期間及び予算額 平成17年度～平成19年度（3年計画）    95,343 千円	
項目	要 約
1. 当初の目的・目標	<p>有力な革新的原子炉の一つである沸騰水型高速炉では、高転換比実現のため、炉心内冷却材流路を水力等価直径が1cm未満のミリチャンネルとすることが必要不可欠となる。また、液体金属冷却炉では、水流路の小口径化が可能となれば蒸気発生器のコンパクト化が図れる。しかしながら、既存の気液二相流解析手法は、より大口径の流路を用いて得られた実験データに強く依存しており、ミリチャンネル内二相流に対する適用性に関して十分な検討は行われていない。そこで、本研究開発では、ミリチャンネルの内部に生じる熱流力的非平衡性の強い強制対流沸騰を対象に、現象素過程の機構論的モデリングを基礎とする高信頼性予測手法を構築することを目的とする。すなわち、従来の経験則に基づく予測手法を、「現象を支配する素過程の理解」と「実験的検証」に裏打ちされた機構論的手法に置換することを目指す。したがって、本研究開発の成果は、限界熱流束およびサブクール沸騰域におけるボイド率分布を予測する上で、大規模実証試験への依存度を軽減し、前記の革新的原子炉の「安全余裕の高信頼性評価」、「出力分布の高精度予測」及び「システムのコンパクト化」実現に資するものと期待できる。ミリチャンネル内における強制対流沸騰では、冷却材として用いられる流体の速度および温度の径方向分布が急峻となるため、サブクール沸騰域における気泡挙動および環状流域における液滴挙動が複雑化することが予想される。そこで、サブクール沸騰域におけるボイド率分布および環状流域で液膜ドライアウトに起因して生じる限界熱流束状態への移行を主な検討対象とする。</p> <p>本事業では以下の2つの項目についての研究開発を実施する。</p> <p>(1) 機構論的限界熱流束予測手法の開発</p> <p>① 液滴付着率試験          小口径管内環状流中の液滴付着率を支配する因子を明らかにするため、二段階液膜抽出法および二段階液膜ドライアウト法に基づく液滴付着率計測を実施する。さらに、液膜ドライアウト発生時における熱流束の計測も実施する。</p> <p>② 液滴解析モデル開発          障害物流路内環状流中の液滴挙動及び液滴付着率を高い信頼性で機構論的に評価可能な数値解析手法の構築を目指す。さらに、機</p>

	<p>構論的限界熱流束予測手法の構築に向けた研究作業を実施する。</p> <p>③限界熱流束試験  強制対流沸騰を生じる加熱流路において、その内部に障害物を設置した場合に限界熱流束が受ける影響を実験的に検討する。また、限界熱流束状態移行時における管内熱流動状態の物理的描像について考察する。</p> <p>④限界熱流束解析モデル開発  障害物流路にも適用可能な、液膜流モデルに基づく機構論的限界熱流束解析モデルを開発することを目的とした研究開発を実施する。</p> <p>(2)強制対流サブクール沸騰中多次元ボイド率分布予測モデルの開発</p> <p>①気泡挙動可視化試験  高速度カメラを使用して強制対流サブクール沸騰の様子を観察し、発泡核で形成されてからサブクール水中で凝縮するまでの蒸気泡の挙動や発泡核における気泡生成周期等についての実験情報を得る。</p> <p>②気泡直接計算  強制対流サブクール沸騰中における気泡挙動解明を目指して気泡直接計算を実施する。また、複雑流れ場における気泡運動の数値的予測可能性の検討および数値計算結果検証用の実験データの取得を行う。</p> <p>③気泡挙動モデル開発  気泡挙動可視化試験および気泡直接計算を通して得られた知見を活用し、強制対流サブクール沸騰中の気泡挙動を記述する機構論的かつボイド率分布解析モデルに組み込み可能な気泡挙動予測相関式の開発を目指す。</p> <p>④ボイド率計測  ボイド率解析モデルにより得られる数値解の検証用実験データを整備することを目的として、強制対流サブクール沸騰中の局所ボイド率について、プローブ法を用いた高速度時系列計測を実施する。</p> <p>⑤ボイド率解析モデル開発  気泡挙動可視化試験および気泡直接計算の結果をベースに開発した気泡挙動モデルを活用することにより、強制対流サブクール沸騰中の多次元ボイド率分布を機構論的かつ数値的に予測するための解析モデルを開発する。</p>
<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・当初予定の成果</li> <li>・特筆すべき成果</li> <li>・副次的な成果</li> <li>・論文、特許等</li> </ul>	<p>【事業項目1】機構論的限界熱流束予測手法の開発</p> <p>ミリチャンネル内強制対流沸騰における限界熱流束状態への移行は、環状流中の液膜が消失することによって引き起こされると考えられる。そこで、液滴付着率試験および液滴解析モデル開発を通して、液膜流量に多大な影響を及ぼす環状流中の液滴挙動を決定する物理メカニズムについて、実験的および数値解析的に考察を実施した。これらの研究開発作業を通して得られた知見を用いて、液膜蒸発量、液滴付着量および液滴発生量を考慮しつつ液膜ドライアウトに起因する限界熱流束を計算する限界熱流束解析モデル開発を行い、さらに限界熱流束試験で整備</p>

した限界熱流束データを活用してその妥当性を検討した。

#### ①液滴付着率試験

ミリチャンネル内環状流中における液滴挙動を理解するため、二段階液膜抽出法および二段階液膜ドライアウト法を用いて、各々水・空気および水・蒸気環状流中の液滴付着率を計測した。特に、水・空気試験では流動方向を、水・蒸気試験では流路内における障害物の有無を実験パラメーターに加えた。これらの実験を通して、気流・液滴間相互作用力、流体物性および流路内障害物が小口径鉛直管内環状流中の液滴付着率に及ぼす影響について検討し、液滴付着率評価手法の開発に必要となる実験データベースを整備した。また、二段階液膜ドライアウト法で用いる試験部を利用し、限界熱流束データの収集もあわせて実施した。液滴付着率は、上昇流体系と比較して下降流体系でやや大きい値となった。気液間の相対速度が平衡状態にある場合、液滴に作用するせん断揚力は上昇流体系では流路中央方向に、下降流体系では流路壁方向に働く。したがって、液滴付着率が下降流体系でより大きい値となったのは、せん断揚力が環状流中の液滴挙動に影響を及ぼしたためと考えられる。次に、水・蒸気環状流実験で圧力をパラメーターとして流体物性を变化させたところ、液滴輸送係数は気流中の無次元液滴濃度を用いてよく整理できることがわかった。これは、気相密度の低下とともに、気流乱流場およびその内部を運動する液滴の挙動に及ぼす液滴濃度の影響が顕著になったものと解釈できる。また、流路内に障害物を設置すると液滴付着率が大きく増加し、このときの増加量は障害物の断面形状に強く依存することを示した。なお、限界熱流束の計測結果は、水・蒸気系データを基礎とする既存の相関式による予測結果と概ねよく一致した。

#### ②液滴解析モデル開発

高速気流中における液滴挙動を支配する物理メカニズムについて深い理解を得るため、詳細数値解析モデルを用いて環状流中の液滴挙動を解析した。気流解析は詳細乱流モデルの一つである LES (Large Eddy Simulation) を用いて行い、その内部を運動する液滴の挙動は Lagrange 座標を用いて個別に解析した。本数値解析を通して、気流・液滴間相互作用力および気流中の液滴濃度が環状流中の液滴付着率に影響を及ぼす機構を検討し、さらに流路内障害物の影響評価を実施することにより、環状流中の液滴付着率を決定する物理メカニズムについて検討した。気泡に作用するせん断揚力は、液滴付着を促進する効果を有することを示した。小液滴の場合、せん断揚力を考慮しない計算では液滴が粘性低層内に蓄積する傾向があるが、せん断揚力は液滴の蓄積を解消する効果があった。このため、せん断揚力による液滴付着促進効果は、小液滴の場合に特に顕著であった。次に、液滴濃度が増加すると、気流中に形成される乱れが緩和され、この結果液滴付着率は減少することを示した。したがって、多量の液滴を含有する流れ場で液滴付着率を正確に評価するためには、液滴が気流中の乱れ場に及ぼす影響を考慮することが必要といえる。また、流路内に障害物を設置すると、障害物の前縁部および下流部で液滴付着率が大きく増加した。これらの結果には、各々障

害物との衝突により引き起こされる液滴の運動方向の変化および障害物の後流における乱流強度の増加が大きく寄与していることを示した。

#### ③限界熱流束試験

限界熱流束解析モデルの信頼性を検証する上で必要となる限界熱流束データを整備するため、流路サイズおよび流路内に設置する障害物の形状と設置位置をパラメーターとして、水・蒸気環状流中で液膜ドライアウトに起因して生じる限界熱流束の実験計測を実施した。この結果、流路内に障害物を設置すると、強制対流沸騰中の限界熱流束は上昇する傾向があることを示した。これは、主に障害物の液滴付着促進効果に起因して生じたものと考えられる。また、限界熱流束の上昇幅は、障害物の断面形状だけでなく、障害物の軸方向設置位置によっても変化し、障害物を加熱部の出口近くに設置した場合の方が限界熱流束の増加は顕著であった。これより、障害物の下流の熱流動状態により限界熱流束が影響を受けることを示した。

#### ④限界熱流束解析モデル開発

液滴付着率試験および液滴解析モデル開発で得られた結果を用いて、機構論的な立場から限界熱流束の解析に相当と考えられる環状流中の液滴挙動評価式を提示した。さらに、本液滴挙動評価式を用いた限界熱流束解析モデルを開発し、限界熱流束試験で得られた実験データとの比較を通して解析モデルの信頼性を検討した。解析により計算された限界熱流束は、実験結果と定性的によく一致した。これより、ここで提示した評価式は、環状流中における液滴挙動の基本特性および液滴挙動に及ぼす流路内障害物の影響をよく捉えており、内部に障害物を内在するミリチャンネル内強制対流沸騰中における液膜ドライアウトの発生に十分適用可能であることが確認できた。ただし、定量的に見ると、障害物の設置位置が加熱部出口から遠くかつ質量流束が高い条件では、限界熱流束をやや過大評価する傾向があった。そこで、過大評価の原因について考察を行い、障害物による液滴発生促進効果等が障害物下流の液膜流量に影響を及ぼした可能性を指摘した。

#### 【事業項目2】強制対流サブクール沸騰中多次元ボイド率分布予測モデルの開発

気泡挙動可視化試験および気泡直接計算を通して、強制対流サブクール沸騰中のボイド率の機構論的予測を行う上で重要となる気泡挙動を決定する物理メカニズムについて考察を行った。気泡挙動モデル開発では、これらの研究開発作業を通して得られた知見を用いて、気泡挙動を記述する物理モデルを提示した。ボイド率解析モデル開発では、気泡挙動モデル開発で提示したモデルを用いて強制対流サブクール沸騰中ボイド率分布の機構論的予測を行い、ボイド率計測で収集したボイド率データと比較検討することによりその信頼性について検討を実施した。

#### ①気泡挙動可視化試験

強制対流サブクール沸騰中では、加熱壁近くには飽和温度以上の過熱液相が形成されるが、バルク液は飽和温度に達していない状態となる。

したがって、加熱壁で形成された蒸気泡は、加熱壁を離脱してバルク液中に移動すると速やかに凝縮・消滅する。したがって、サブクール沸騰域におけるボイド率を正確に予測するためには、加熱壁で形成された後の気泡挙動を正しく理解する必要がある。これまでに提案されているサブクール沸騰モデルの多くでは、加熱壁で形成された気泡に、表面張力に起因する付着力が作用することを想定している。しかしながら、気泡挙動に及ぼす表面張力の影響は、加熱面の濡れ性により大きく変化する可能性がある。そこで、気泡挙動に多大な影響を及ぼす可能性のある伝熱面表面性状の計測を実施するとともに、異なる圧力条件下で当該体系における気泡挙動の観察を実施し、気泡挙動をモデル化する上で必要となる実験情報を収集した。高温かつ放射線の影響を受けることから、原子炉運転中の伝熱面表面は、比較的濡れ性の高い状態にある可能性が高い。そこで、表面を酸化させることにより伝熱面の表面性状を調整し、伝熱面の表面濡れ性を接触角 45 度程度まで高めた上で実験を実施した。既存のサブクール沸騰モデルで採用されている想定とは異なり、本伝熱面を用いた可視化実験において、気泡は発泡後速やかに伝熱面を離脱してバルク液中で消滅するケースが多く、伝熱面上に付着することはほとんどなかった。これは、濡れ性の高い伝熱面上における沸騰の特徴と考えられる。気泡の伝熱面への付着の有無が伝熱面の濡れ性によって変化することから、気泡の離脱および付着現象には、気泡下に形成される三相界線の挙動が深く関わっていることが強く示唆される。また、伝熱面離脱時における気泡径の決定には伝熱面近くに形成される過熱層の厚さが重要な役割を担っていると考えられること、気泡の凝縮熱伝達率が既存の相関式を用いてよく再現できることを示した。

#### ②気泡直接計算

気液界面追跡計算に基づく詳細数値解析および気泡可視化装置を用いた詳細な気泡挙動の時系列観察を通して、液流中の気泡挙動および気泡回りに形成される複雑な流動場について検討し、気泡挙動を決定する物理メカニズムの解明を試みた。数値解析結果に基づき、沸騰体系で観察される気泡の伝熱面離脱現象は、気泡の表面エネルギー変化の立場から解釈可能であることを示した。すなわち、発泡核において形成された蒸気泡は通常扁平な形状をとるため、表面積および表面エネルギーの高い状態にある。このため、球形気泡に対して過剰となる表面エネルギーが液相の運動エネルギーに転化され、気泡の伝熱面離脱を誘起すると解釈することにより、気泡の伝熱面離脱速度を合理的に評価できることを示した。また、気泡運動の時系列観察の結果、気泡が鉛直壁と衝突および反発する過程についても同様の解釈が可能であり、この場合の気泡上昇速度は、既存モデルに基づく予測結果とよく一致することを示した。

#### ③気泡挙動モデル開発

Lagrange 座標を用いた気泡追跡法の使用を前提とするとともに、気泡挙動可視化試験および気泡直接計算で得られた結果をベースとして、強制対流サブクール沸騰中の気泡挙動の機構論的予測を行う上で適当と考えられる気泡挙動モデルを構築した。伝熱面上の発泡核で形成され

た気泡は、伝熱面過熱度に応じて成長し、所定のサイズに達すると伝熱面を離脱してバルク液方向に移動するものとした。伝熱面離脱時における気泡サイズは過熱液相厚さに比例し、伝熱面と垂直方向の離脱時気泡速度は初期表面エネルギーの関数として定式化した。伝熱面離脱後の気泡挙動は、サブクール液との熱交換による凝縮を考慮して質量保存則を解き、気泡運動の評価においては、気泡に作用する力として、浮力、抗力、せん断揚力、仮想質量力を考慮することとした。各力に対して適当と考えられる評価式を提示するとともに、液中の乱れが気泡運動に及ぼす影響を考慮するための手法を示した。

#### ④ボイド率計測

ボイド率解析モデル開発で解析結果の検証用データとして使用するため、圧力、流量、壁面熱流束等の異なる条件下で強制対流サブクール沸騰中の多次元ボイド率分布に関する実験データを収集した。流路断面は5×10mmの矩形形状とし、流路下端よりサブクール水を流入させるとともに、幅10mmの1面をヒーター加熱して、流路内をサブクール強制対流沸騰状態とした。ボイド率分布の計測は、レーザー式ボイドプローブを断面内でトラバースして得られた時系列データを、計測時間にわたって時間平均することにより行った。伝熱面離脱後の気泡凝縮は急速に進展するため、実験範囲内において、伝熱面近傍に形成される気泡層の厚さは最大で1mm程度であり、ボイド率が最大となる位置と伝熱面との距離は伝熱面上に形成される典型的な気泡の半径と同程度であった。各実験条件におけるボイド率のピーク値は、熱流束の増加および質量流束の低下とともに上昇したが、圧力による顕著な影響は認められなかった。

#### ⑤ボイド率解析モデル開発

強制対流サブクール沸騰中のボイド率予測で必要となる核沸騰開始条件、熱伝達率、沸騰核密度、気泡生成周期に関する相関式を整理した。これらの相関式および気泡挙動モデル開発で定式化したモデルを気泡追跡法に基づく数値解析プログラムに組み込み、強制対流サブクール沸騰中の多次元ボイド率の数値的予測を行った。また、ボイド率計測で得られた実験データ等との比較を通して、解析に用いた気泡挙動モデルの信頼性を検討した。解析結果と実験データの一致は概ね良好であり、モデルの妥当性が確認できた。ただし、気泡層の厚さをやや過大評価する傾向が認められた。このため、過大評価を誘起する原因について考察し、高ボイド率域では、気泡の合体や相互干渉により伝熱面近傍における流れ場および温度場が影響を受け、気泡の横方向伝熱面離脱速度の低下や気泡凝縮のより急速な進展が生じた可能性のあることを指摘した。

#### 【事業全体】

ミリチャンネル内部に生じる熱流力的非平衡性の強い強制対流沸騰を対象に、環状流中で発生する液膜ドライアウトに起因する限界熱流束およびサブクール沸騰域における多次元ボイド率分布を予測するための手法を開発した。予測手法の開発にあたっては、解析結果に強い影響

	<p>を及ぼすと考えられる現象素過程、すなわち環状流中における液滴挙動およびサブクール沸騰域における気泡挙動について、実験計測および数値解析を通して詳細に検討するとともに、検討対象とした素過程を機構論的にモデル化した。本モデルによる限界熱流束およびボイド率分布予測結果は、併せて実施した検証実験の結果と概ねよく一致し、予測手法の信頼性を確認することができた。さらに、予測精度の低下が見られる条件を特定するとともに、その原因について考察を行い、今後の研究開発の方向性を示した。</p> <p>論文、特許等については、以下のとおりである。</p> <p>○学会口頭発表</p> <p>(1) Tomio Okawa, Effect of Flow Direction on the Deposition Rate of Droplets in Vertical Annular Flow, 6th International Conference on Multiphase Flow, Leipzig, Germany (2007).</p> <p>(2) 大川富雄、ミリチャンネル二相熱流動場の高信頼性予測実現のための研究開発、日本原子力学会・熱流動部会炉心・燃料・機器の合理的な熱流動評価・開発手法調査専門委員会炉心・機器熱流動評価分科会第5回委員会 (2007).</p> <p>(3) 梅川尚嗣、管内に障害物を有する垂直沸騰伝熱管における限界熱流束特性、第45回日本伝熱シンポジウム、B142 (2008).</p> <p>(4) 梅川尚嗣、限界熱流束特性に対する管内障害物の影響、日本混相流学会年会講演会、B137 (2008).</p>
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目的・目標の設定の妥当性</li> <li>・研究計画設定の妥当性</li> <li>・研究費用の妥当性</li> <li>・研究の進捗状況</li> <li>・研究交流</li> <li>・研究者の研究能力</li> </ul>	<p><b>【目的・目標の設定の妥当性】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・複雑な気液二相流の重要なパラメーターを対象に、実験や直接数値解析を活用してモデリングする試みは、適切なものとする。</li> </ul> <p><b>【研究計画設定の妥当性、研究の進捗状況】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・きちんと計画を立て、手間暇かけて大量の実験を行い、その成果を出しており、研究はほぼ計画通り進展したと考える</li> </ul> <p><b>【研究交流、人材育成、研究者の研究能力、成果】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・精度の高い実験に裏打ちされた現象素過程のモデリングにおいて、期待された成果が得られている。本研究で得られた知見の多くは、工学的な評価手法の高度化に役立つものとする。また、研究の連携推進も適切に行われたと判断する。</li> </ul>

4. その他	<p>・学術的にたいへん高いレベルの研究成果が得られたが、これを工学的な評価手法の高度化にどのように活用できるのか、またその適用の限界等を整理できるとさらに良いものとなる。</p>
5. 総合評価	<p>・液滴付着率に及ぼす液滴濃度の効果を解析的に解明し、従来経験的に知られていたことを物理メカニズムとして明らかにした。伝熱面の酸化度を調整して液滴の濡れ性の及ぼす効果を実験的に得たこと、円筒形あるいは円柱形で障害物を模擬し、液滴付着と限界熱流束に対する障害物の効果を実験で明らかにしたことなど、非常に良く考えられた研究プロジェクトが遂行されたことを高く評価する。</p> <p>・地道な努力の積み重ねがされており、一定の規模でこのような研究開発が続けられることには意味があると考え。伝熱面離脱時の気泡挙動について一層の成果を期待したい。</p> <p>A) 想定以上の成果が得られ、今後大いに期待できる。  <b>B) 想定通りの成果が得られ、今後が期待できる。</b>  C) 想定通りの成果が一部得られなかった。  D) 想定通りの成果が全く得られなかった。</p>