

機関番号：14401
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20360419
 研究課題名（和文） 稠密・高出力密度軽水炉の成立性評価に資する機構論的沸騰二相流解析技術の開発
 研究課題名（英文） Development of mechanistic boiling two-phase flow analysis methods for the design of high-power density light water reactors
 研究代表者
 大川 富雄（OKAWA TOMIO）
 大阪大学・工学研究科・准教授
 研究者番号：20314362

研究成果の概要（和文）：

稠密・高出力密度軽水炉では、現行軽水炉と比べて流量不安定が生じやすい。このため、流動振動下における限界熱流束状態への移行メカニズムを理論的、数値解析的、実験的に検討し、非線形波動理論に基づく予測の有効性を示した。また、流動安定性および燃料燃焼度の評価で重要となるサブクール沸騰域のボイド率について検討し、スライド気泡による伝熱促進および気泡合体が、ボイド率の決定で支配的な役割を果たすことを示した。

研究成果の概要（英文）：

In high-power-density tight-lattice LWRs, margin to the onset of flow instability is reduced comparing with conventional ones. The mechanisms of the transition to the CHF condition under flow oscillation conditions were hence investigated theoretically, numerically, and experimentally. It was revealed that the nonlinear wave theory can be applied to the prediction of CHF in this situation. Void fraction in subcooled boiling region is of importance in evaluating the hydraulic stability and fuel burn-up. It was demonstrated that heat transfer enhancement by sliding bubbles and bubble coalescence play important roles in determining the axial development of the void fraction.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,600,000	3,180,000	13,780,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：沸騰流、気液二相流、限界熱流束、ボイド率、ドライアウト、流量振動、非線形波動理論、気泡挙動

1. 研究開始当初の背景

エネルギーの長期的安定供給および二酸化炭素排出量低減の要請から、高い安全性と経済性に加えて高転換比を実現する原子炉の開発が強く求められている。これを受けて、液体金属冷却型高速炉や冷却材に水を使用しつつ高転換比を狙う稠密・高出力密度軽水

炉の研究開発が国内の研究開発機関で精力的に進められている。稠密・高出力密度軽水炉は、冷却材に水を使用するため、現行の軽水炉技術を幅広く利用できる。このため、特にウラン資源の有効利用を早期に実現する上で期待が大きい。ただし、高転換比を達成するためには、炉心内の冷却材体積を減らし、

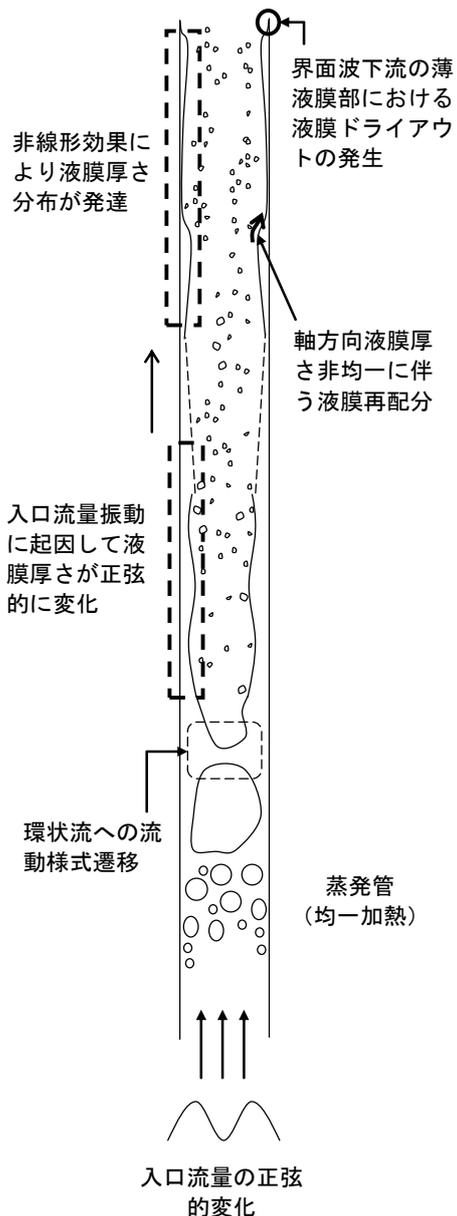


図1 入口流量振動下における液膜ドライアウトの発生

中性子の減速を極力抑えた設計としなければならない。このため、炉心内冷却材流路を水力等価直径が3~5mm程度の小口径流路とすることが必要不可欠となる。さらに、水体積の低減および経済性向上の観点から、高出力密度の大型燃料を用いた設計を志向する場合が多い。

この結果、稠密・高出力密度軽水炉では、炉心内冷却材流路の等価直径が小さく、かつ炉心部における単位体積あたりの相変化量が大きくなる傾向がある。したがって、熱流力的な観点で見た場合、以下に示す2つの研究課題が特に重要と考えられる。

・二相部の流動圧損が増加するため、流動振動およびこれに引き続く出力振動を生じや

すい体系となる。したがって、流量振動発生の有無を正確に評価するとともに、発振が生じた後の炉心内二相流の挙動、特に環状流部の液膜がドライアウトして沸騰遷移に至るまでの過程を高い信頼性で予測可能な手法を開発する必要がある。

・流路断面内における流体の温度および速度の勾配が急峻となるため、炉心内に複雑な二相熱流動場が形成される。この傾向は、熱的非平衡状態にあるサブクール沸騰域で特に顕著となる。サブクール沸騰域のボイド率は、燃料燃焼度評価の誤差要因となるため、強非平衡二相熱流動場にも適用可能なサブクール沸騰域ボイド率解析手法を構築する必要がある。

2. 研究の目的

伝熱流動の観点から稠密・高出力密度軽水炉の開発に資するため、本研究の目的を以下のように設定した。

・流量が時間的に変動する系を対象に、液膜ドライアウトに起因する沸騰遷移の発生機構を解明する。本検討結果を基礎として液膜挙動を支配する物理モデルを構築し、発振下においても定常状態と同等の信頼性を有する限界熱流束予測手法を開発する。

・サブクール沸騰域における蒸気泡の挙動を支配する物理メカニズムについて、実験的に検討を行う。また、蒸気泡挙動の観察結果に立脚して、ボイド率の軸方向発展を決定する上で重要となる物理現象を解明する。

3. 研究の方法

(1) 発振下における液膜ドライアウト予測

管内強制対流沸騰において、流路壁からの加熱熱流束を一定とすれば、環状流中の液膜厚さは入口流量の増加とともに増加する。したがって、典型的な発振状況として、図1に示すように入口流量が正弦状に時間変化する場合を想定すると、環状流遷移点近くでは液膜厚さは軸方向に概ね正弦的に変化すると考えられる。しかし、主に運動量保存式中の非線形項の効果により、液膜の界面形状は軸方向に発達していく。このため、下流では液膜厚さの軸方向空間勾配に急峻な領域が生じ、さらに表面張力および粘性・乱流拡散による液膜の軸方向再配分が生じる。一方、液膜ドライアウトに起因する沸騰遷移は、加熱部出口で液膜厚さの瞬時値が0となることにより引き起こされる。したがって、流量振動あるいは出力振動の振幅や周期の影響を含めて、発振下における限界熱流束を正確に予測するためには、非線形効果に伴う液膜厚さの軸方向発達過程を精度よく評価しなければならない。しかし、既存の限界熱流束予測手法は、主に定常状態における使用を前提

としているため、発振下で重要となる液膜の軸方向再配分は十分に考慮されていない。

以上の考察結果より、本タスクでは以下に示す項目を実施する。

- ・非線形波動理論に基づく考察：発振下における環状流中の液膜挙動は、非線形波動理論の知見を用いて記述できる可能性がある。このため、非線形波動理論に基づく理論解析を実施し、定常状態および発振下における限界熱流束の間に成立する関係の特徴づけるパラメータを導出する。

- ・液膜流モデルに基づく数値解析：液膜流モデル（一次元三流体モデル）に基づく限界熱流束計算を実施し、定常 CHF と発振下 CHF の関係を数値実験的に明らかにする。

- ・発振下における CHF および液膜挙動の実験的把握：上記の理論解析および数値解析で得られた結果を検証するため、ステンレス製鉛直円管の下部からサブクール水を流入させるとともに、直流電源を用いた直接通電加熱により内部に沸騰二相流を形成する。入口流量を強制的に時間変化させた状態で、局所液膜厚さおよび限界熱流束に関する実験データを収集する。

(2) サブクール沸騰域におけるボイド率発展機構の解明

横向き伝熱面を用いたプール沸騰体系で、蒸気泡挙動に及ぼす伝熱面濡れ性の影響を検討した結果によれば、濡れの悪い面では明確な三相界線が形成されて、気泡が伝熱面に拘束されるが、濡れの良い面では気泡は伝熱面による拘束をほとんど受けずにバルク液中に向けて伝熱面から速やかに離脱する。強制対流サブクール沸騰では、伝熱面表面近くに形成される過熱液層の厚さが薄い。このため、伝熱面を離脱すると、凝縮により気泡は急速にその体積を減じる。したがって、伝熱面による気泡拘束の有無は本条件下におけるボイド率分布に多大な影響を及ぼすため、機構論的ボイド率予測を行う上で伝熱面表面性状の影響を無視することはできない。なお、既存のサブクール沸騰モデルの多くは、伝熱面による気泡の拘束が存在することをモデル開発の前提としているが、稠密・高出力密度軽水炉の燃料棒表面は、通常運転条件下において、きわめて濡れの良い状態にあると考えられる。したがって、既存モデルの適用性には機構論的な観点で疑問が残る。

以上の考察結果より、本研究では、高濡れ面を伝熱面として使用し、気泡挙動を支配する物理メカニズムとサブクール沸騰中のボイド率発展機構との関連を調べる。具体的な実施内容を以下に示す。

- ・プール沸騰体系で、沸騰核における形成後の気泡挙動を調べ、伝熱面からの気泡離脱を生じる原因を解明する。

- ・流動沸騰体系で、特に核沸騰開始直後にお

ける気泡挙動を調べ、プール沸騰実験の結果と対比しつつ、その挙動を支配する物理メカニズムを検討する。

- ・強制対流サブクール沸騰体系で、ボイド率の軸方向発展を調べる。気泡挙動に関する実験結果を基に、ボイド率発展機構、特に、正味の蒸気生成を開始する原因を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 発振下における液膜ドライアウト予測

定常 CHF と発振下 CHF の間に成立する関係を明確化できれば、定常 CHF に関する知見を活用して発振下 CHF を高い信頼性で予測することが可能となる。発振下における CHF を q_{OSC} とすれば、 q_{OSC} は最低流量に対応する定常 CHF (q_{MIN}) より大きく、平均流量に対応する定常 CHF (q_{AVE}) より小さい値になると考えられる。これより、発振下における無次元 CHF (q^*) を以下で定義する。

$$q^* = \frac{q_{OSC} - q_{MIN}}{q_{AVE} - q_{MIN}} \quad (1)$$

一次元三流体モデルに基づく液膜の質量保存式と、液膜に作用する界面せん断力と壁面せん断力の釣り合いを考慮すれば、液膜の断面平均体積率 α_f は、近似的に次の偏微分方程式を満足することが導かれる。

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + c_f \frac{\partial \alpha_f}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$c_f = (1 + 75\alpha_f) \sqrt{\rho_v / \rho_f} J_v \quad (3)$$

ここで、 t は時間、 x は軸方向位置、 ρ_v と ρ_f は蒸気と液膜の密度、 J_v は蒸気の体積流束である。上式より、 α_f の移流速度 c_f が、 α_f の一次関数になっていることから、液膜挙動は典型的な非線形波動問題として取扱い可能であることがわかる。したがって、液膜流量が正弦的に時間変化する場合、次第に液膜流量の空間勾配が急峻になるとともにショックを形成し、その後振幅が徐々に減衰すると結論される。加熱長 L が短い場合、液膜の加熱部通過時間も短いから、流量振動振幅の減衰は期待できず、 $q_{OSC} = q_{MIN}$ ($q^* = 0$) となり、逆に L が十分大きい場合には、 $q_{OSC} = q_{AVE}$ ($q^* = 1$) になるものと期待できる。また、非線形波動理論の知見を活用することにより、 q^* が次式で定義される無次元加熱長 L^* の単調増加関数で与えられることを導いた。

$$L^* = \frac{2L \sqrt{\rho_v \rho_f} \sqrt{1 + 300\Delta G^*} - 1}{G_{MIN} t_{OSC} (1 + 150\Delta G^*)} \quad (4)$$

$$\Delta G^* = \frac{\Delta G}{G_{MIN}} \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_f}} \quad (5)$$

ここで、 G_{MIN} は最小流量、 t_{OSC} は振動周期、 ΔG は振動振幅である。

液膜流モデルを用いて定常 CHF と発振下

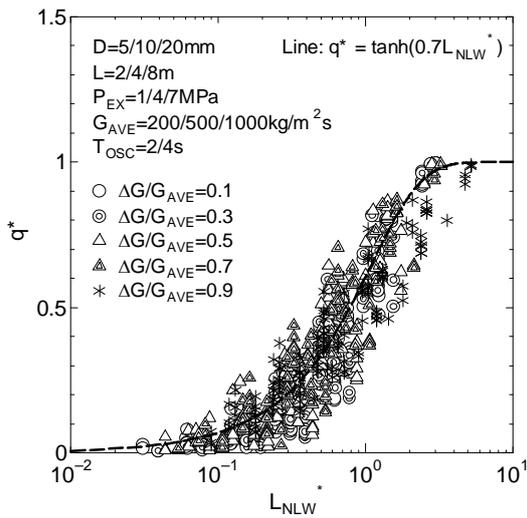
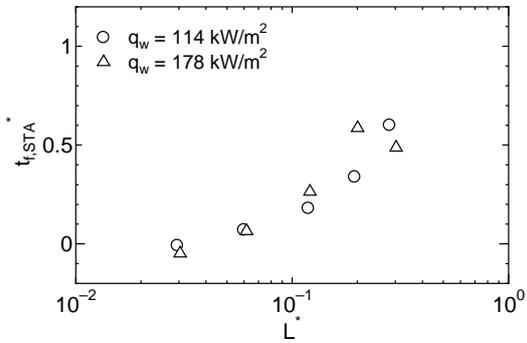
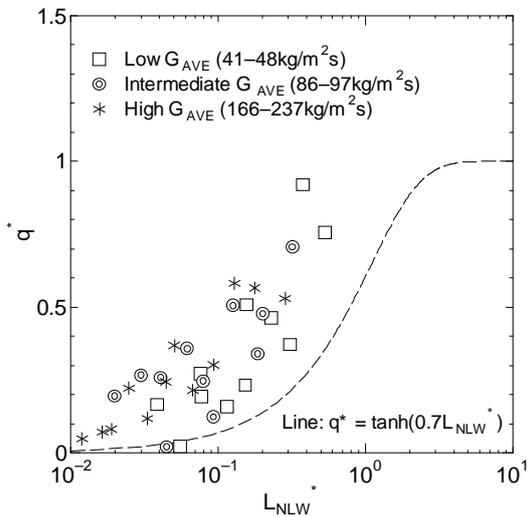


図2 無次元加熱長と発振下無次元 CHF の関係 (液膜流モデルに基づく数値解析)



(a) 薄液膜部における液膜厚さ



(b) 限界熱流束

図3 発振下における液膜厚さおよび限界熱流束の測定結果

CHF の数値予測を行い、 L^* と q^* の間に成立する関係を数値実験的に調べた。結果を図2に示す。管路内径 D 、加熱長 L 、出口圧力 P_{EX} 、平均流量 G_{AVE} 、振動周期 t_{OSC} 、振動振幅 ΔG

を様々に変化させているが、非線形波動理論に基づく理論解析結果より予測される通り、 q^* が L^* の単調増加関数としてよく近似できることがわかる。なお、液滴・液膜間における質量交換 (液滴付着と液滴発生) も発振下 CHF に影響を及ぼすと考えられる。図2に示す液膜流解析では、これらの質量交換も考慮しているが、 q^* が L^* のみの関数としてよく相関できることから、これらの影響は副次的と考えられる。

発振下における環状流中の液膜厚さと限界熱流束を実験的に調べた結果を図3に示す。まず、図3aより、流量振動中の最小流量に対応する薄液膜部の無次元液膜厚さ $L_{f,STA}^*$ は、 L^* とともに増加傾向にあることがわかる。 $L_{f,STA}^*$ が L^* でよく相関できていることから、厚液膜部から薄液膜部への液輸送量が、概ね非線形波動理論に従っていることが確認できる。限界熱流束の測定結果を示す図3bによれば、無次元 CHF は L^* とともに単調に増加傾向する傾向が認められるが、絶対値は数値計算結果より導いた相関式

$$q^* = \tanh(0.7L^*) \quad (6)$$

による予測値よりもやや大きい。これより、通常非線形波動の他、液膜界面に形成される擾乱波などが、さらに最小液膜部への液輸送を促進していることが示唆される。これより、定常 CHF の予測に用いられている通常解析手法と式(6)を併せ用いることにより、発振下 CHF を、保守性を維持しつつ高い信頼性で評価可能と結論できる。

(2) サブクール沸騰域におけるボイド率発展機構の解明

プール沸騰条件で、濡れの良い鉛直伝熱面上に形成される蒸気泡の挙動を観察した結果を図4に示す。本図より、初期の急速な気泡成長の後に成長速度が徐々に緩慢になること、気泡成長に伴い形状にも変化が見られること、凝縮による気泡サイズの低下は気泡が伝熱面を離脱す前に開始することなどがわかる。詳細な画像解析を行った結果、図中で明確に認められる気泡の伝熱面離脱には、非定常成長力、変形効果、凝縮効果が関係していることを明らかにした。なお、低濡れ面では、気泡が伝熱面に付着する傾向があり、気泡挙動に及ぼす伝熱面濡れ性の影響はきわめて大きい。また、図4は沸騰開始条件近くでの観察結果であるが、接触角により CHF も大きく変化することから、気泡挙動に及ぼす伝熱面濡れ性の影響は高熱流束条件でも維持されることを確認した。

次に、流動沸騰系で核沸騰開始点における気泡挙動を観察したところ、図4と類似して気泡が伝熱面を離脱する場合(Lift-off)と、図5に示すように長い距離をスライド上昇する場合(Sliding)があることがわかった。観察さ

れた気泡挙動を P - Ja 線図上にプロットした結果を図 6 に示す。ここで、 P は圧力、 Ja は伝熱面過熱度に基づく Jacob 数を表す。本図より、Lift-off は Ja の高過熱度域で、Sliding は低過熱度域で観測されることがわかる。 Ja が大きいとき、気泡はより速い速度で成長を遂げることが知られている。したがって、プール沸騰の場合と同様に、非定常成長力および変形効果が Lift-off を促進したと考えられる。図 7 は、各実験条件で得られた平均気泡径の Ja 依存性を示す。高 Ja 条件では、気泡の急成長が生じる結果、気泡径が伝熱面近くに形成される過熱層の厚さ δ_{th} を大きく上回ることがわかる。したがって、気泡の大部分がサブクール液にさらされることから、 Ja の増加とともに凝縮効果も顕著になると考えられる。一方、Sliding を生じる原因は、二成分系二相流の場合と同様に、せん断流れに起因する揚力の影響と考えられる。したがって、流動沸騰系で生じる蒸気泡の伝熱面離脱の原因は、プール沸騰の場合と同様であり、離脱促進効果が揚力による離脱抑制効果を上回るときに Lift-off が生じると解釈できる。なお、蒸気密度が小さいために、沸騰開始時における Ja の値は圧力の低下とともに上昇する。このため、図 6 に示すように、Lift-off は低圧化で生じやすい。

既存のボイド率予測モデルでは、気泡が沸騰核から離脱するとボイド率の急上昇 (NVG, 正味の蒸気生成) を開始すると仮定するケースが多い。しかし、高濡れ面では、気泡が沸騰

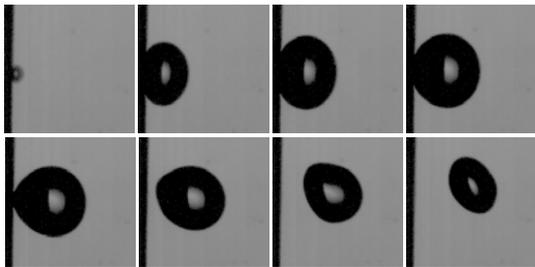


図 4 高濡れ面を用いたプール沸騰体系における蒸気泡挙動の観察結果

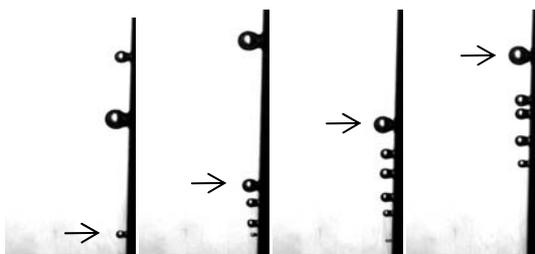


図 5 流動沸騰系で鉛直伝熱面をスライド上昇する気泡の様子

核に付着しないため、既存モデルの使用は少なくとも機構論的な観点では適切ではない。低圧条件で、NVG 前後の気泡挙動を観察した結果を図 8 に示す。NVG 以前は気泡が概ね孤立した状態にあるが、NVG 後は気泡の合体により巨大気泡が形成されていることがわかる。孤立気泡は Lift-off によりサブクール状態にあるバルク液中に移動して消滅したが、合体泡は、移動速度が上昇する結果、他の小気泡との合体を繰り返し、その体積をより増加させる傾向があった。合体泡の挙動は複雑で、バルク液中に一方向的に移動することはなかった。気泡サイズの増大による界面積濃度の低下も手伝って、その存在時間は孤立泡域と比較して大きく増加した。また、合体泡と加熱壁面で挟まれた領域では、サブクール液との熱交換が阻害される結果、蒸気泡の生成がより盛んにおこなわれる様子が観察された。これらは、いずれもボイド率の増加を

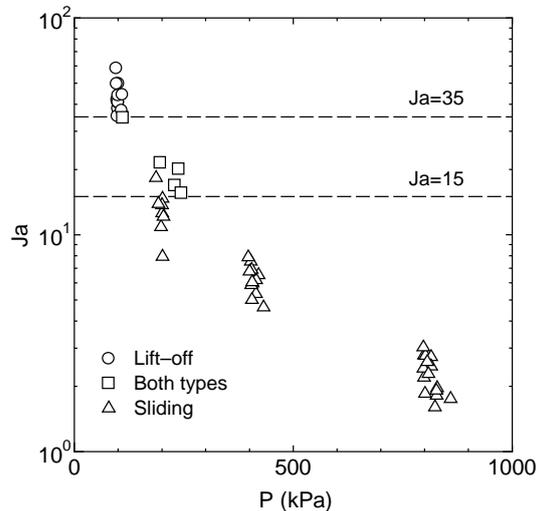


図 6 系圧力および伝熱面過熱度が気泡挙動に及ぼす影響

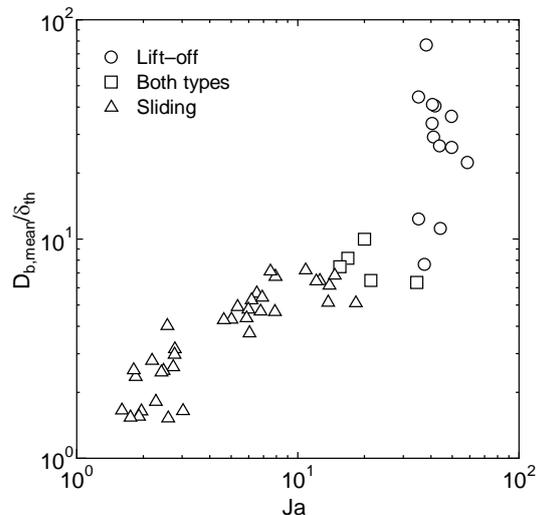


図 7 伝熱面過熱度と無次元気泡径の関係

引き起こし得る物理現象であり、強制対流サブクール沸騰域におけるボイド率を決定する上で、気泡合体の有無が重要な役割を果たしていることを実験的に示した。

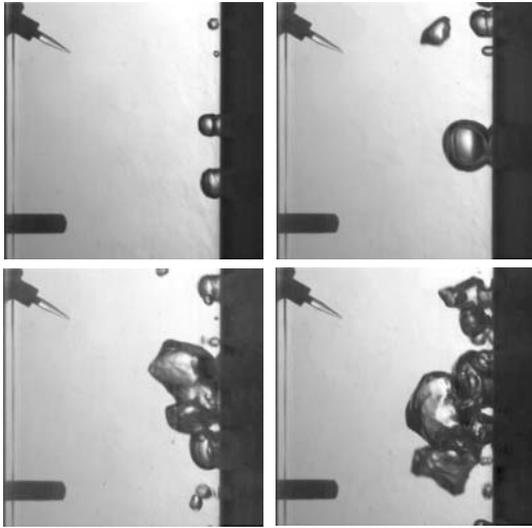


図 8 NVG 前後における気泡挙動の変化 (上段 : NVG 前、下段 : NVG 後)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) Tomio Okawa, Taisuke Goto, Yosuke Yamagoe, Liquid film behavior in annular two-phase flow under flow oscillation conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer, 査読有, Vol. 53, pp. 962-971 (2010).
- (2) Tomio Okawa, Takahiro Harada, Yuta Kotsusa, Photographic study on bubble motion in subcooled pool boiling, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 査読有, Vol. 132, Paper No. 102922 (2010).

[学会発表] (計 12 件)

- (1) Rouhollah Ahmadi, Tatsuya Ueno, Tomio Okawa, Bubble behavior in subcooled flow boiling in a vertical rectangular channel, 19th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE19-43556, 2011.5, Makuhari, Chiba, Japan. (震災影響のため開催中止・CD 出版のみ)
- (2) Rouhollah Ahmadi, Yosuke Yamagoe, Tomio Okawa, Influence of Mass Flux on Bubble Interaction During Subcooled Flow Boiling, 7th Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety, 2010.11.15, Chuncheon, Korea.
- (3) 大川富雄, ルハラ・アハマディ、強制対

流サブクール沸騰中におけるボイド率発展機構、日本原子力学会秋の大会、K25, 2010.9.16, 北海道大学.

- (4) 大川富雄, 山越洋祐、ルハラ・アハマディ、強制対流サブクール沸騰中のボイド率発展に関する一考察、日本機械学会 2010 年度年次大会、S0802-2-2, 2010.9.8, 名古屋工業大学.
- (5) 大川富雄, 村上寿浩、流量振動下における液膜ドライアウト予測モデルの開発、日本混相流学会年会講演会、2010.7.19, 静岡大学.
- (6) Tomio Okawa, Takahito Kamiya, Experimental studies on pool boiling characteristics of titanium dioxide-water nano-fluids, 18th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE18-30157, 2010.5.18, Xian, China.
- (7) Tomio Okawa, Toshihiro Murakami, Isao Kataoka, A simple model for the dryout heat flux under oscillatory flow conditions, 5th European-Japanese Two-Phase flow Group Meeting, 2009.9.22, Spoleto, Italy.
- (8) 大川富雄, 神谷崇仁、ナノフルイドによる伝熱面改質時間に関する実験的検討、日本原子力学会秋の大会、C01, 2009.9.16, 東北大学.
- (9) 大川富雄, 非線形波動理論に基づく流量振動下ドライアウト熱流束評価法の提案、混相流学会年会講演会、C334, 2009.8.7, 熊本大学.
- (10) Toshihiro Murakami, Rei Takei, Tomio Okawa, Variation of critical heat flux by flow oscillation in a small vertical channel, 17th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE17-75147, 2009.7.14, Brussels, Belgium.
- (11) Yosuke Yamagoe, Taisuke Goto, Tomio Okawa, Experimental study on liquid film dryout under oscillatory flow conditions, 17th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE17-75400, 2009.7.14, Brussels, Belgium.
- (12) Tomio Okawa, Takahiro Harada, Yuta Kotsusa, Photographic study on bubble motion in subcooled pool boiling, 17th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE17-75387, 2009.7.13, Brussels, Belgium.

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
大川 富雄 (OKAWA TOMIO)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号 : 20314362