

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06217

研究課題名(和文)強制流動サブクール沸騰限界熱流束発生機構 - 壁近傍気液構造に関する研究

研究課題名(英文)Developmental Mechanism of the Critical Heat Flux in Subcooled Flow Boiling - Research on the Vapor-Liquid Structure in the Near Wall Region

研究代表者

劉 維 (Liu, Wei)

九州大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70446417

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：強制流動沸騰気泡挙動を観察できる試験ループ及び試験装置を製作した。試験装置の流路は断面 8×8 mmの正方形である。その一面は銅の加熱面で、残りの三面はガラス製で流路内の様子が観察できる。また、伝熱面が下向き水平から垂直まで配置角度が調整可能な構造である。高速度カメラを用いてCHF現象の起点である正味蒸気発生点における気泡離脱挙動データを取得した上、管壁に停留する気泡に作用する力の詳細分析に基づいて伝熱面配置角度の効果を取り入れた気泡離脱直径モデルを提案した。提案した気泡離脱モデルをCHFモデルに組み込み、伝熱面配置角度が変化する強制流動サブクール沸騰CHFを精度よく予測できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

限界熱流束は水冷却原子炉を含む伝熱機器の除熱限界を定めるため、限界熱流束の発生メカニズムの解明及び限界熱流束の向上は伝熱機器出力の向上に直接つなく、エネルギー利用の観点からインパクトが大きい。また、本研究は伝熱面配置の角度の正味蒸気発生点への影響を明らかにするとともに、新たに伝熱面角度の効果もCHFモデルに取り入れた。これにより、伝熱面配置角度が変化する条件におけるCHFに対して機構論的な予測手法を開発し、シビアアクシデント時原子炉IVRの成立性の定量評価に貢献した。

研究成果の概要(英文)：To understand the mechanism of forced flow subcooled flow boiling CHF, a test loop and a test device were constructed. The test device has a square flow channel with a cross section of 8×8 mm. One of the channel surface is a heated surface of copper and the other three are made of glass to observe the flow inside the channel. The test piece setting angle can be adjusted freely from downward facing to vertical facing. We observed bubble departure behavior at the net vapor generation point, which is the starting point of the CHF phenomenon. Based on the detailed analyzing of the force balance on bubbles staying on the tube wall, a bubble departure diameter setting model that can account for the effect of the heating surface setting angle was proposed. The proposed bubble departure model was then incorporated into a CHF model. It has been confirmed that the forced flow subcooled boiling CHF under different arrangement angle conditions can be predicted accurately.

研究分野：伝熱流動

キーワード：限界熱流束 伝熱面配置角度 強制流動 正味蒸気発生点 気泡離脱直径 限界熱流束予測 IVR

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

強制流動サブクール沸騰は高い熱伝達率を有するため、加圧水型原子炉や核融合炉インバーターなどの高熱流束機器の冷却に使用あるいは使用が検討されている。これら機器の出力は冷却限界、いわゆる限界熱流束(CHF)に制限されるため、CHFの予測は機器の設計上重要である。また、近年、軽水炉における炉心溶融を伴う過酷事故時において、炉内溶融物保持(IVR)時の原子力圧力容器(RPV)の健全性を保つため、原子炉容器とその外側にある保温材の隙間に水を流入させて原子炉容器を冷却し、炉心溶融物を原子炉内に閉じ込める炉心溶融物保持(IVR)手法が、シビアアクシデント時の影響緩和策として期待されている⁽¹⁾。IVRを実現するために、また定量的な評価するために、原子炉外部冷却時における限界熱流束(CHF)データの拡充及び予測精度の向上が必要とされている。一方、CHFの予測はボイド率を正しく予測する必要があるため、ボイド発生の開始点として流路内で気泡が最初に離脱する正味蒸気発生点(NVG)の予測が重要である。既存の強制流動NVG点に関する研究は軽水炉の熱設計を背景に実施されたものが多いため垂直円管(体系)での研究が多く、IVRのような伝熱面配置角度が変化する条件に対応できない。

2. 研究の目的

CHFの予測に関しては、実験データに基づき、適用範囲の制限を持つ相関式による予測法が主流であったが、近年、CHF発生機構に基づいたモデルの開発により適用範囲が制限されない予測法に関する研究が盛んになっている。本研究は、IVRのような伝熱面配置角度が変化する条件に対しても対応できる機構論的CHFモデルの確立のために、伝熱面配置角度の変化がCHFのスタートポイントである正味蒸気発生点における気泡離脱への影響に関する研究を実施するとともに、伝熱面配置角度効果を従来の液膜ドライアウトCHFモデルに導入し、IVRのような伝熱面配置角度が変化する条件に対応できるCHFモデルの確立を目的とする。

3. 研究の方法

3.1 実験装置概要

図1に示す気泡離脱挙動を可視化できる試験装置を製作した。試験体は流路と加熱部から構成されている。流路は断面が8mm×8mmの正方形である。その一面は銅の加熱面で、残りの三面はガラス製で流路内部の流動の様子を観察できる。銅の伝熱ブロック内部にカートリッジヒーターを挿入し、流路を加熱した。IVRの伝熱面配置角度の変化を模擬するため、図2に示す試験体角度調整装置を導入した。これにより伝熱面が下向き水平(0°)から垂直方向(90°)まで5°毎に配置角度を設定できる。加熱面近傍の伝熱ブロック内部に、9本の熱電対を設置して伝熱ブロック温度のモニター及び熱流束の評価に用いる。また、流路の入口及び出口に熱電対を設置し、流体の入口温度及び出口温度を計測した。

3.2 実験条件

図1の試験体を水ループに設置して実験を実施した。出口圧力は大気圧、質量流束は550～750 kg/m²s、熱流束は0.11～0.15 MW/m²と入口サブクール度は10～20°Cの条件で、下向き水平(0°)から垂直(90°)まで15°増分ごとに加熱面配置角度を変更し、計21ケースの実験データを取得した。高速度カメラによる正味蒸気発生点における離脱気泡の記録の他、正味蒸気発生点の試験体入口との距離も計測し、正味蒸気発生点における主流サブクール度も記録した。図3に記録した気泡生成から離脱までの様子を示す。記録した気泡画像から、Image pro plusを使用して気泡の離脱直径を測定した。

4. 研究成果

4.1 正味蒸気発生点における気泡離脱直径モデル及びその検証

正味蒸気発生点における気泡離脱直径の計算について、気泡上における力のバランスに基づいて、従来ではLevyモデル⁽²⁾とStaubモデル⁽³⁾がある。これらのモデルは気泡接触角の代わりに定数を使用し、また、力のバランスを考慮する際、気泡成長力を無視した。本研究は、管壁に停留する気泡に作用する力を詳細分析したKlausnerモデル⁽⁴⁾に基づいて、伝熱面配置角度の効果を力のバランスに取り入れて、伝熱面配置角度の変化に対応可能な気泡離脱直径モデルを提

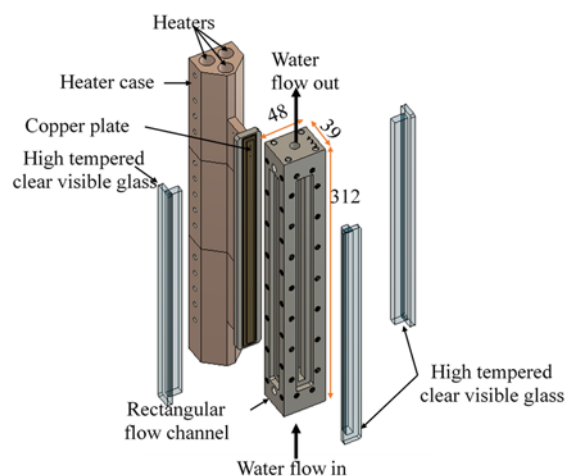


Fig. 1 Schematic diagram of the test section assembly

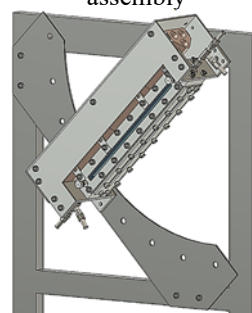


Fig. 2 Angle adjustment of test section

案した。

上記提案した気泡離脱モデルを2つのデータベースを用いて検証した。1つ目のデータベースは、2.で説明した本実験で取得したデータである。その結果を図4に示す。提案したモデルはほぼすべてのデータを $\pm 25\%$ 以内で予測できることを確認した。また、加熱面配置角度に対する本モデルの予測性能を図5に示す。ここで使われたデータは Sugrue⁽⁶⁾ データである。加熱面を下向きの水平状態(0°)から垂直(90°)に向けて回転すると、離脱直径の減少傾向が見られた。加熱面の垂直配置に近づくにつれ、浮力の接線成分が大きくなり、その結果、気泡の離脱が促進され、離脱直径が小さくなる。

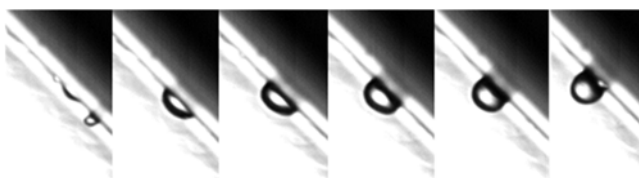


Fig. 3 Consecutive image of bubble departure from its initial growth for 45o angle

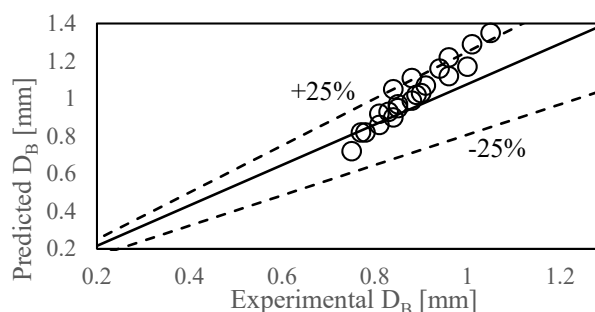


Figure 4 Comparison between model and experimental data

4.2 伝熱面配置角度変化時における CHF の予測

伝熱面配置角度の CHF 発生点における大気泡上の力バランスへの影響を考慮し既存の液膜ドライアウトモデル⁽⁶⁾を修正した。そして、さらに上記新規提案された正味蒸気発生点の気泡離脱直径モデルを既存液膜ドライアウトモデル⁽⁶⁾に導入し、伝熱面配置角度の変化に対応可能な CHF モデルを提案した。修正された CHF モデルは伝熱面角度が変化する条件の CHF データ⁽⁷⁾を用いて検証し、図6に示すように実験データを $\pm 20\%$ の精度で予測できることを確認した。また、図7に示すように強制流動サブクール沸騰 CHF は伝熱面配置角度に依存し、提案された CHF モデルが伝熱面配置角度の効果を予測できることを確認した。

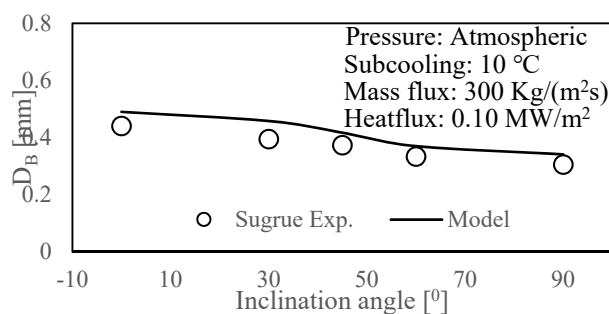


Figure 5 Comparison of departure diameter with experimental data for different inclination angle

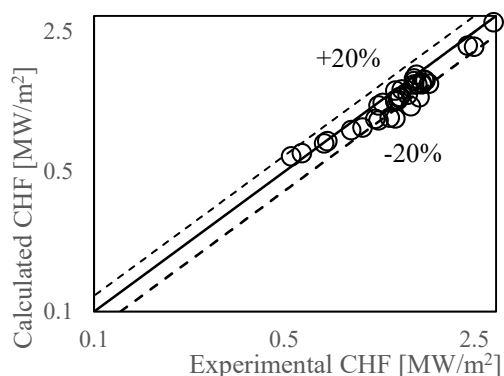


Fig. 6 Experimental vs calculated CHF

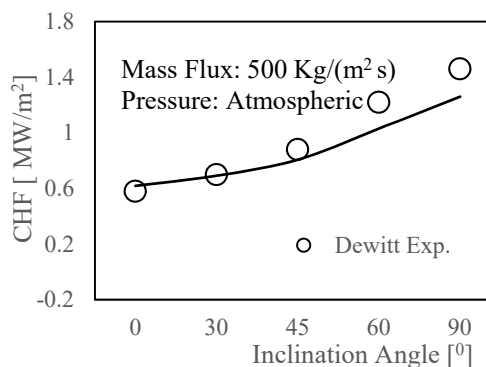


Fig. 7 Predicted CHF compared against Dewitt data for different inclination angle.

References

- (1) F.B. Cheung, et al., Nuclear Technology, 152 (2), pp. 145-161(2005)
- (2) S. Levy et al., Int. J. Heat Mass Trans, 10(7), pp. 951-965 (1967)
- (3) F. W. Staub et al., J. Heat Trans, 90 (1), pp. 151-157 (1968)
- (4) J. F. Klausner, et al., Int. J. Heat Mass Trans, 36 (3), pp. 651-662 (1993)
- (5) R. Sugrue, et al., Nuclear Eng. Design, 279, pp. 182-188 (2014)
- (6) W. Liu, H. Nariyai, and F. Inasaka, Int. J. Heat Mass Trans, 43 (18), 2000, pp. 3371-3390.
- (7) G. Dewitt, T. Mckrell, J. Buongiorno, L. H. Hu and R. J. Park. Nuclear engineering and technology, 45(3), 2013, pp. 335-347.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Wei Liu |
| 2. 発表標題 Predictions of Critical Heat Flux for Subcooled Flow Boiling in Annulus |
| 3. 学会等名 Proceedings of 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, Operation and Safety (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年～2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Wei Liu |
| 2. 発表標題 Prediction of transient surface temperature Changes at subcooled flow boiling DNB |
| 3. 学会等名 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年～2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Md Abdur Rafiq Akand, Tatsuya Matsumoto, Wei Liu and Koji Morita |
| 2. 発表標題 Prediction of bubble departure diameter for downward facing heating surface with different inclination angle in IVR condition |
| 3. 学会等名 日本原子力学会2020春の大会 |
| 4. 発表年 2019年～2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Md Abdur Rafiq Akand, Kei Kitahara, Wei Liu and Koji Morita |
| 2. 発表標題 伝熱面配置角度を考慮した強制流動サブクール沸騰正味蒸気発生点に関する研究 |
| 3. 学会等名 第57回日本伝熱シンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------|--|--|----|
| 研究 分担 者 | 小泉 安郎 (Koizumi Yasuo) (20215156) | 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究 部門 原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター・嘱 託 (82110) | |