

Oral presentation | III. Fission Energy Engineering : 304-1 Thermal Hydraulics, Energy Conversion, Energy Transfer, Energy Storage

📅 Thu. Sep 12, 2024 4:05 PM - 5:10 PM JST | Thu. Sep 12, 2024 7:05 AM - 8:10 AM UTC 🏠 Room
H(Recture RoomsB 1F B102)

[2H15-18] Multiphase Flow2

Chair:Takahiro Arai(CRIEPI)

4:05 PM - 4:20 PM JST | 7:05 AM - 7:20 AM UTC

[2H15]

Effective diffusion coefficient in wall condensation from steam-air mixture

*Michio Murase¹, Toshiya Takaki¹ (1. Institute of Nuclear Safety System, Inc.)

4:20 PM - 4:35 PM JST | 7:20 AM - 7:35 AM UTC

[2H16]

Analysis for experiments of natural convection condensation from steam-air mixture on a vertical flat plate

*Toshiya Takaki¹, Michio Murase¹ (1. INSS)

4:35 PM - 4:50 PM JST | 7:35 AM - 7:50 AM UTC

[2H17]

Study on the flow pattern of concentric-tube two-phase thermosyphon

*Yohei Okada¹, Naoya Kaminaga¹, Hideaki Monji¹, Chikako Iwaki², Rei Kimura², Takashi Mawatari² (1. Univ. of Tsukuba, 2. TOSHIBA ESS)

4:50 PM - 5:05 PM JST | 7:50 AM - 8:05 AM UTC

[2H18]

Development of a Method for Predicting Droplet Entrainment Rate During Nucleate Boiling in a Liquid Film

*Kaito Nade¹, Raka Firman¹, Yuki Narushima², Tomio Okawa¹, Kenichi Katono² (1. UEC, 2. Hitachi)

5:05 PM - 5:10 PM JST | 8:05 AM - 8:10 AM UTC

Time reserved for Chair

蒸気と空気の混合流体からの壁面凝縮における有効拡散係数

Effective diffusion coefficient in wall condensation from steam-air mixture

*村瀬 道雄¹, 高木 俊弥¹

¹原子力安全システム研究所

蒸気質量分率 Y_s の対数則分布を用いて乱流域での有効拡散係数 D_{eff} を求め、蒸気と空気の混合流体から鉛直平板への凝縮熱流束 q_c を予測する方法について検討し、 q_c を簡易に計算できる見通しを得た。

キーワード：壁面凝縮，非凝縮性ガス，熱流束，拡散係数，境界条件

1. 緒言 原子炉の事故時における格納容器（CV）内では、空気中に蒸気や水素が流出し、蒸気が構造物表面で凝縮する。本研究では、数値流体力学（CFD）コードを用いた CV 解析で構造物表面に与える凝縮熱流束 q_c と壁関数の相関式について検討してきた[1,2]。一方、Soma et al. [3]は、蒸気質量分率 Y_s の壁関数（ Y_s^+ ）を用いて乱流域での有効拡散係数 D_{eff} を評価し、壁面での蒸気質量流束 m_s の相関式を求めた。この場合、CV 解析で境界条件が q_c 相関式[1]より簡易化される可能性がある。そこで、本報告では、壁面凝縮に対する CFD 解析の結果[4]を使用して D_{eff} と q_c の相関式について検討した。

2. 評価方法 本報告では、Soma et al. [3]による計算式の一部を変更し、分子拡散係数 D と D_{eff} の最大値を使用した。

$$m_s = -\max(D, D_{eff}) \frac{\rho}{1 - Y_s} \frac{\partial Y_s}{\partial y}, q_s = m_s h_{fg} \quad (1)$$

Y_s^+ の従来の定義式を用いると流れ方向分布の相違が大きいため、Murase et al. [2]による次の定義式を用いて D_{eff} を求めた。

$$Y_{s,mod}^+ = -\frac{\rho u_\tau Y_s - Y_{s,i}}{m_s} \frac{1}{1 - Y_s}, D_{eff} = \frac{\nu y^+}{Y_{s,mod}^+} \quad (2)$$

式(2)と従来式との相違は $1/(1-Y_s)$ である。 u_τ は摩擦速度である。

強制対流凝縮に対する CFD 解析結果[4]での分布 $Y_s(y)$ を用いた凝縮熱流束の予測値 $q_{c,y}$ を図 1 に示す。 q_c は CFD 計算値である。 $Y_{s,mod}^+$ の相関式には、平板に対する式(3) [2]を使用した。また、層流から乱流への遷移域での $q_{c,y}$ を式(4)により改善した。

$$Y_{s,mod}^+ = 1.87 \ln(y^+) + 3.64 \quad (3)$$

$$Y_{s,mod}^+ = 2.5 \ln(y^+) \quad (4)$$

3. 結論 Y_s^+ の対数則分布から D_{eff} を求め、壁面からの距離 y での物理量を用いて q_c を簡易に計算できる見通しを得た。

参考文献

- [1] M. Murase, et al., Trans. ASME, NERS, **8**, 031404, 2022.
- [2] M. Murase, et al., Trans. ASME, NERS, **9**, 011401, 2023.
- [3] S. Soma, et al., Nucl. Eng. Des., **416**, 112754, 2024.
- [4] 歌野原陽一, 他, 原子力学会 2023 秋の大会, 2G02, 2023.

*Michio Murase¹, Toshiya Takaki¹

¹Institute of Nuclear Safety System, Inc.

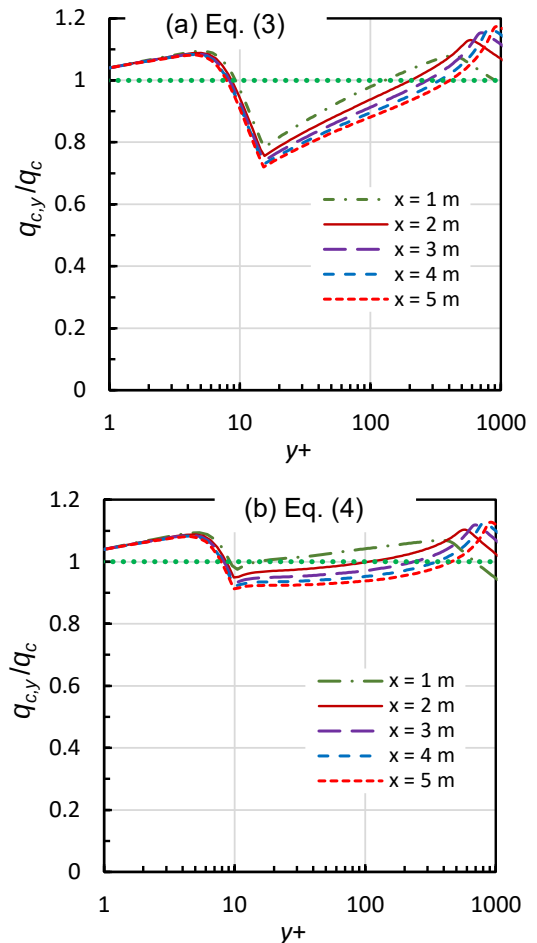


図 1 凝縮熱流束の予測値 $q_{c,y}$ (x は流れ方向位置)

蒸気と空気の混合流体から鉛直平板への自然対流凝縮の実験解析

Analysis for experiments of natural convection condensation from steam-air mixture on a vertical flat plate

*高木 俊弥¹, 村瀬 道雄¹

¹原子力安全システム研究所

蒸気と空気の混合流体から鉛直平板への凝縮伝熱に関する従来実験を対象として CFD コード FLUENT を使用して実験解析を行い、CFD 解析で自然対流凝縮での熱流束を比較的良好に再現できることを確認した。

キーワード：壁面凝縮，非凝縮性ガス，鉛直平板，CFD，自然対流，熱流束

1. 緒言 原子力発電所の事故時における格納容器（CV）内では、空気（もしくは窒素ガス）雰囲気蒸気が流出し、構造物表面で非凝縮性ガス存在下での壁面凝縮伝熱になる。本報告では、CFD コード FLUENT を使用し、既報[1]で作成した蒸気と空気の混合流体から鉛直平板への凝縮伝熱解析モデルに水素もしくはヘリウムを追加し、従来実験 COPAIN [2]での自然対流凝縮の解析を行い、熱流束 q の測定値[3]と比較した。

2. 評価方法 計算対象は、二次元の鉛直並行平板とし、平板間距離を 440 mm、流入部を両面断熱で長さ 1 m、凝縮面を高さ 6 m で厚さ 10 mm の SUS304 にして対面を断熱にした。定常計算とし、SST $k-\omega$ 乱流モデルを使用した。壁面での凝縮熱流束は $q_c = -\{D\rho/(1-Y_s)\}(\partial Y_s/\partial y)h_{fg}$ [4]で与えた（ D は拡散係数、 h_{fg} は潜熱、 Y_s は蒸気質量分率、 y は凝縮面からの距離、 ρ は密度）。流れ方向セル幅 $\Delta x = 5$ mm、凝縮面に接する y 方向セル幅 $\Delta y = 0.05$ mm とした。以上は既報[1]と同じである。流体は蒸気と空気に水素もしくはヘリウムを追加して 3 成分系にした。前報[5]で蒸気と空気の混合気体での COPAIN 実験[2, 3]を対象とした強制対流凝縮の検証解析を実施したのに対し、本報告では自然対流凝縮の実験解析を行った。平板間距離 440 mm では自然対流による加速により出口で逆流が生じて影響が上流に伝播したため、平板間距離を 2 倍の 880 mm に拡大した（凝縮面に接する y 方向セル幅は $\Delta y = 0.10$ mm に拡大）。

P0444 実験では入口での速度 $u_{in} = 0.5$ m/s、蒸気質量分率 $Y_{s,in} = 0.227$ 、P0344 実験では $u_{in} = 0.33$ m/s、 $Y_{s,in} = 0.136$ である。熱流束 q の測定値と計算値の比較を図 1 に示す。 q の測定値は、CFD 計算値と Corradini の相関式[6]による計算値の間にあり、これらの不確かさの範囲内で評価できる。

3. 結論 COPAIN 実験での自然対流凝縮熱流束を評価し、CFD 計算値は過小評価し、Corradini 相関式は過大評価したが、これらの不確かさの範囲内で計算できることを確認した。

参考文献

- [1] 歌野原陽一ほか, 原子力学会 2023 秋の大会, 2G02, 2023.
- [2] X. Cheng, et al., Nucl. Eng. Des., **204**, 267-284, 2001.
- [3] H. Bian, et al., Int. J. Thermal Sci., **145**, 105948, 2019.
- [4] A. Dehbi, et al., Nucl. Eng. Des., **258**, 199-210, 2013.
- [5] 歌野原陽一, 他, 原子力学会 2024 春の年会, 3K11, 2024.
- [6] M. L. Corradini, Nucl. Technol., **64**, 186-195, 1984.

* Toshiya Takaki¹, Michio Murase¹

¹Institute of Nuclear Safety System, Inc.

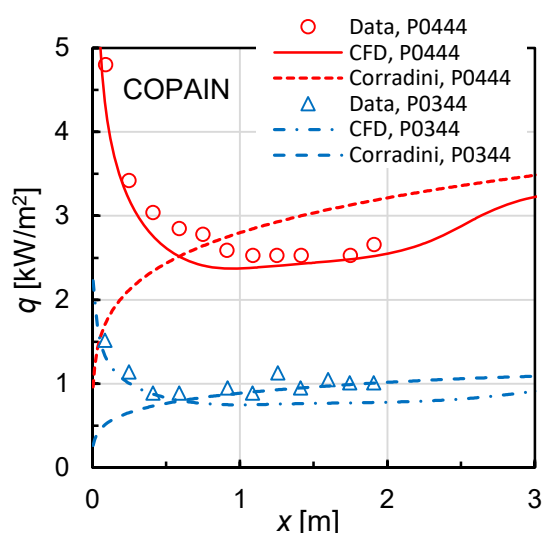


図 1 COPAIN 実験 P0444 と P0344 での熱流束 q (x は流れ方向位置)

二重管二相熱サイホンの流動様相に関する研究

Study on the flow pattern of concentric-tube two-phase thermosyphon

*岡田 陽平¹, 神永 尚也¹, 文字 秀明¹, 岩城 智香子², 木村 礼², 馬渡 峻史²

¹筑波大学, ²東芝エネルギーシステムズ株式会社

超小型炉MoveluX™ (Mobile VErY small reactor for Local Utility in X-mark)における炉心の除熱方法として、受動的除熱が可能である二重管二相熱サイホンによる熱輸送が検討されている。本研究では、二重管二相熱サイホンの実験装置を用いて、投入熱量を変化させた時の管内の流動を観察した。

キーワード：二重管熱サイホン, 蒸気-水 二相流, 流動様相, 沸騰, 加熱条件

1. 緒言

超小型炉 MoveluX™ [1]では炉心の除熱において動的機器を排除し受動的安全性やメンテナンス性を高める事を目指している。その手段としてサーモサイホンの適用、特にループ式と比べて体積が小さい利点を持つ二重管二相熱サイホンによる熱輸送が検討されている。しかし二重管の形状や投入熱量を変化させた際の管内の流動と限界熱輸送量の関係は明らかでない。そこで本発表では、熱輸送量評価モデル開発のための基礎実験として、今後の限界熱輸送量モデル構築に資するために、投入熱量を変化させた際の流動を評価した。

2. 実験概要

図1に実験装置の概略図を示す。装置は冷却部、二重管、加熱部の3つで構成されており、冷媒として蒸留水を使用した。冷媒は、加熱部で加熱され、蒸気となり、それが冷却部で凝縮され、水となり内管と加熱部へと戻る循環を示す。実験条件として冷却温度を10℃、冷却部の初期圧力を5kPa、投入熱量を100W–380Wで変化させた。

3. 実験結果

100Wの管内での流動は、沸騰流動状態と静止状態を周期的に繰り返す、間欠的な挙動となった。図2に200Wと380Wの管内での流動を示す。図2(左図)から150W–300Wでは、連続的な蒸発と凝縮により、外管に大きな蒸気泡を含む上昇流、内管に下降水流が観察された。投入熱量が大きくなると内管内に気泡が確認できた。この気泡は、冷却部で凝縮された水が非凝縮性ガスを巻き込む形で内管内に押し下げ、発生したと考えられる。380Wでは図2(右図)のように内管内を蒸気流が上方に流れる吹き出し現象が確認され、循環型ヒートパイプとして機能しない状態を示した。

4. まとめ

流動の観察から、本実験装置では、内管に蒸気が侵入して冷媒の循環が妨げられ、熱輸送限界に達した。本研究では熱輸送限界と流動の関係を示した。今後、圧損等の物理量を測定し、限界熱輸送量モデルの構築を進める。

参考文献

[1] 木村ほか “水素化物減速ヒートパイプ冷却超小型炉 MoveluX の開発(1): 原子炉システム及び炉心コンセプト概要”
日本原子力学会 2019 年春の年会 1J04

*Yohei Okada¹, Naoya Kaminaga¹, Hideaki Monji¹, Chikako Iwaki², Rei Kimura², and Takashi Mawatari²

¹Univ. of Tsukuba, ²Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

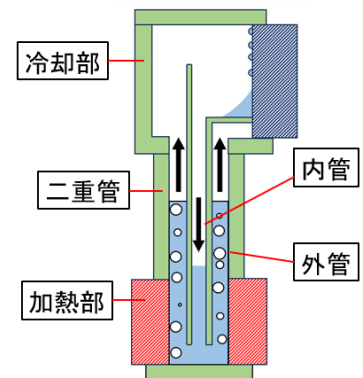


図1 実験装置の概略図

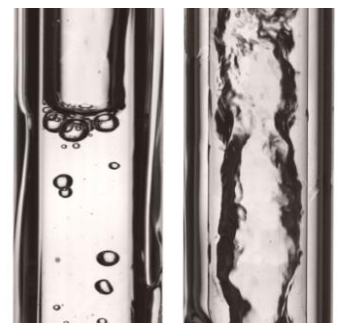


図2 管内の様子
(左図：200W, 右図：380W)

流下液膜内核沸騰による液滴飛散率予測手法の開発

Development of a Method for Predicting Droplet Entrainment Rate During Nucleate Boiling in a Liquid Film

*名手 海人¹, Raka Firman¹, 成島 勇気², 大川 富雄¹, 上遠野 健一²

¹電気通信大学, ²日立製作所

液膜からの液滴飛散率を予測するため、強制対流液膜の加熱試験を行い、液膜からの液滴飛散現象に着目した。液滴飛散率の計測を行い、得られた試験結果を用いて、液滴飛散率の相関式を開発した結果を示す。

キーワード：液滴飛散、液膜ドライアウト、熱流束、気液二相流、沸騰水型原子炉

1. 緒言

沸騰水型原子炉の燃料棒は環状流領域では燃料棒表面の液膜によって冷却が行われる。管内壁の液膜が完全に消失することを液膜ドライアウトといい、伝熱面の焼損につながる。そのため、液膜ドライアウト点を正確に予測することは原子炉の安全設計上非常に重要であり、液膜の挙動を予測するために液滴飛散現象を解明する必要がある。⁽¹⁾ 液滴飛散現象は、気流のせん断力で発生すると仮定して、非加熱の水・空気試験結果をもとに相関式が開発されてきた。本研究では加熱系で試験を行い、せん断力ではなく液膜内核沸騰の影響に着目し、液膜からの液滴飛散現象の可視化計測及び飛散量の計測から、液滴飛散率の相関式を開発した。

2. 試験装置概要

流路は長さ 400 mm であり、高さ 10 mm、幅 15 mm の矩形流路である。流路の入口から気相と液相が独立して流入する構造とし、合流部で強制対流液膜を形成した。流路下流で液膜を加熱し、加熱には銅ブロックに内蔵したカートリッジヒータを用いた。伝熱面はオーバル形状で長さが 50 mm、幅が 11 mm である。

3. 結果・考察

図 1, 2 に気相速度 J_g [m/s]、液相速度 J_l [m/s] の変化に対する液滴飛散率 m_{EB} [kg/m²s] の測定結果を示す。図 1, 2 の両方の図が示す通り壁面熱流束 q_w [kW/m²] が増加するほど液滴飛散率も増加する傾向がみられた。また、気相速度が増加すると液滴飛散率は減少した。気相速度が増加すると界面でのせん断力が増加し、液膜厚さが薄くなり液膜速度が増加する。その結果、液膜内核沸騰によって生じた蒸気泡が崩壊する前に、対流によって蒸気泡が伝熱面を通過するために液滴飛散率が減少する。さらに、液相速度が増加すると液滴飛散率は増加した。液膜内核沸騰により蒸気泡が発生する影響で液膜が乱れるが、液相速度の増加に伴い液膜 Reynolds 数 Re_{film} が増加する影響で液膜の乱れが増長される。その結果、気流せん断力による液滴飛散の影響が顕著になるので液滴飛散率が増加した。以上の図 1, 2 の結果を用いて液滴飛散率を Wever 数 We の関数としてグラフにプロットした結果を図 3 に示す。なお We は以下の式で評価した。

$$We = \rho_l \delta \left(q_w / (h_{fg} \rho_g) \right)^2 / \sigma$$

ここで、 ρ_l 及び ρ_g は液相、気相の密度 [kg/m³]、 δ は液膜厚さ [m]、 σ は表面張力 [N/m]、 h_{fg} は蒸発潜熱 [kJ/kg] である。 Re_{film} が小さいときは液膜内核沸騰により蒸気泡が発生し崩壊する”Filament type”の液滴飛散が顕著であるが、 Re_{film} が大きくなると液膜の乱れが増え、さらに液膜内核沸騰による蒸気泡が発生で液膜の乱れが増長され、液滴が飛散する”Wave type”の液滴飛散が顕著となり液滴飛散のメカニズムが変化する。したがって、液滴飛散率は Re_{film} の大小によって分類され We に相関が見られた。相関式の詳細を以下の式に示す。

$$m_{EB} / (q / h_{fg}) = X (We)^n, \begin{cases} Re_{film} < 7800 \text{ のとき } X = 2.4 \times 10^{-1}, n = 0.61 \\ Re_{film} > 7800 \text{ のとき } X = 8.6 \times 10^{-2}, n = 1.9 \end{cases}$$

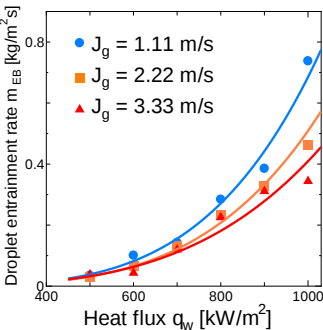


Fig.1. Droplet entrainment rate as a function of gas-phase velocity

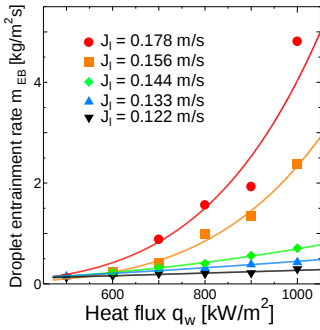


Fig.2. Droplet entrainment rate as a function of liquid-phase velocity

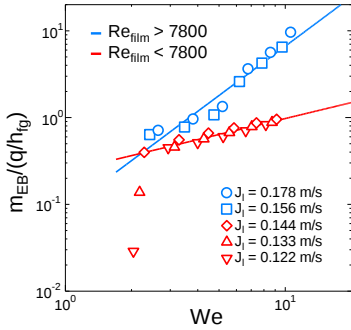


Fig.3. Correlation of boiling entrainment rate

参考文献

[1] Raka Firman B. P., J. Tabuchi, Y. Narushima, H. Furuichi, T. Okawa, K. Katono, Experiments on the onset of boiling entrainment from a falling liquid film with gas sheared flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.220 (2024), 125006.

*Kaito Nade¹, Raka Firman¹, Tomio Okawa¹, Yuki Narushima² and Kenichi Katono²

¹The University of Electro-Communications, ²Hitachi, Ltd.