

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 4 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360425

研究課題名(和文)放射線誘起表面活性による原子炉内伝熱特性向上のメカニズム解明に関する研究

研究課題名(英文)Study to clarify mechanism behind heat transfer enhancement in reactor due to RISA

研究代表者

波津久 達也 (Hazuku, Tatsuya)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授

研究者番号：60334554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円、(間接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、軽水炉炉心熱環境相当の高温高圧下における放射線誘起表面活性効果(RISA)による濡れ性及び沸騰伝熱特性の向上とそのメカニズムの解明を最終目的とし、雰囲気温度250℃までの高温高圧環境における動的濡れ性を詳細に評価した。前進接触角はガンマ線照射により本実験の全ての温度域で減少し、実炉相当の高温高圧条件においてもRISAにより動的濡れ性が向上することを確認した。また、環状噴霧流における壁面濡れ性と液膜ドライアウトの関係を評価するため、濡れ性の異なる2本のテスト管を用いてドライアウトが発生する際の液滴と液膜の流動特性を詳細に観察した。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this study is to clarify the mechanism behind enhancements of wall surface wettability and boiling heat transfer due to the radiation induced surface activation (RISA) under high-temperature and high-pressure conditions equivalent to thermal environment in a core of light water reactor. Detailed discussions about dynamic wettability at ambient temperatures up to 250 degrees centigrade were made based on the experimental data. The results showed that the advancing contact angles were decreased due to gamma-ray irradiation at all conditions tested and revealed that the dynamic wettability was enhanced due to the RISA even under high-temperature and high-pressure conditions. In order to evaluate the effect of surface wettability on liquid film dryout in annular-mist flow, the flow characteristics of liquid film and droplets near the condition in which the liquid film dryout occurs were also observed in detail using two-test pipes with different surface wettability.

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：放射線誘起表面活性 濡れ性 沸騰伝熱 伝熱向上 軽水炉 ドライアウト

1. 研究開始当初の背景

放射線誘起表面活性 (Radiation Induced Surface Activation, RISA) は、金属母材への放射線照射により表面酸化皮膜に電気化学反応を生じせしめ、濡れ性とこれに起因する伝熱特性及び母材の耐腐食性を向上させる、研究代表者らが開発した技術である¹⁾。軽水炉では、この放射線照射によって生じる RISA の作用により沸騰伝熱特性を向上させることが期待され、炉心の熱的安全裕度の向上に関連した各種の研究が実施されている。これまで、ほぼ大気圧から 1MPa までの低圧条件において、RISA による伝熱面濡れ性の向上と沸騰限界熱流束向上が確認されている。しかしながら、炉内環境 (強 γ 線照射下、高温高圧環境) における RISA の効果及びメカニズムは明らかになっていない。したがって、炉内環境相当条件における濡れ性及び沸騰限界熱流束向上メカニズムの解明が RISA 技術の実用化において求められている。

2. 研究の目的

本研究では、軽水炉炉心熱環境相当の高温高圧下における RISA 効果すなわち濡れ性及び沸騰限界熱流束の向上とそのメカニズムの解明を最終目的としている。特に濡れ性に関しては、液滴の静的な接触角についての知見に限られており²⁾、高温高圧下における動的な濡れ性 (液滴の前進・後退接触角) については、放射線非照射下においても十分に評価されていない。また、実機の沸騰限界熱流束は主として環状噴霧流域の液膜ドライアウトにおける壁面濡れ性と液膜ドライアウトの関係は明らかにされていない。そこで、本研究では、まず、高温高圧下の動的な濡れ性に対する RISA 効果を評価するため、 γ 線非照射前後において圧力 14 MPa および雰囲気温度 260°C までの高温高圧環境における動的な濡れ性を計測した。さらに、強制対流場における壁面濡れ性と液膜ドライアウトの関係の評価するため、濡れ性が異なる二種類のテスト管を用いて垂直上昇環状噴霧流の液膜流動特性、液滴飛散特性および最小濡れ膜流量を計測した。

3. 研究の方法

(1) 高温高圧下の動的な濡れ性の計測

軽水炉炉心熱環境相当の高温高圧下 (圧力: 最大 15MPa, 温度: 最大 300°C) における試験供試材の動的な濡れ性 (液滴の前進・後退接触角) を計測するための実験装置を準備した。図 1 に装置の概略を示す。装置は、高温高圧容器および液滴遠隔落下用ポンプから成る。高温高圧容器壁にはヒータが埋め込まれ、容器全体が所定の温度に加熱される。容器内部は、ガスボンベから直接供給される窒素ガスにより所定の圧力に加圧される。容器内中心に試験片が置かれ、試験片表面と上部 5 mm の位置の熱電対により、容器内部の温度がモ

ニターされる。試験片には 20×20mm のジルカロイ板が用いられた。液滴は、プランジャーポンプによって所定の供給量に設定後、試験片の上部に設置したシリンジの先端より試験片表面に供給される。また、液滴供給システムにはニードル弁が設置されており、このニードル弁を開くことで、試験片上の液滴をシリンジ先端より吸引し、大気に排出できる。試験片表面に供給する液滴が濡れ広がる際の画像と、ニードル弁を開いて液滴を吸引する際の画像を高速ビデオカメラと面発光型光源により透過光撮影する。撮影した液滴画像をパーソナルコンピュータに保存し、試験片表面上に液滴を供給する際 (濡れ広がる際) と吸引する際の動的接触角および接触線移動速度を画像解析により計測する。

試験片の γ 線照射は株式会社アトックス技術開発センターの ⁶⁰Co 照射施設において行われた。試験片表面における線量率は 15~18 kGy/h, 積算線量は 863~1464 kGy であった。

(2) 環状噴霧流の流動特性の計測

濡れ性の異なる 2 本のテスト管を用いて断熱系垂直管内上昇環状噴霧流の液膜流動特性、液滴飛散特性、液膜ドライアウトに及ぼ

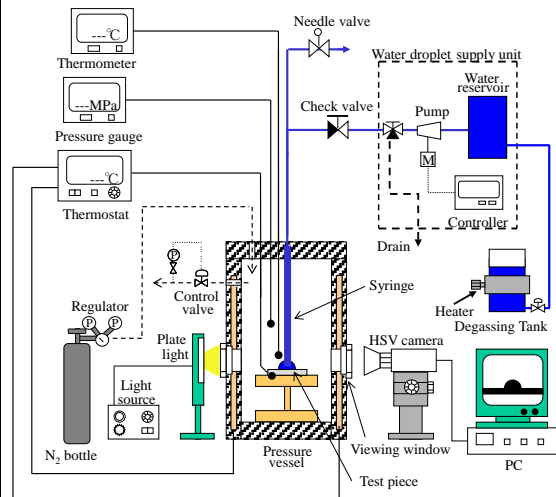


図 1 高温高圧下の濡れ性評価実験装置

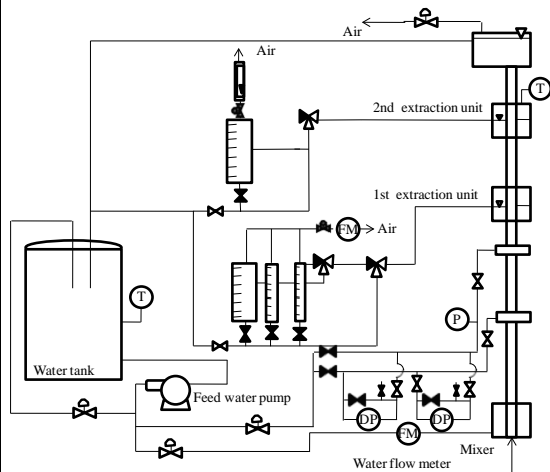


図 2 垂直上昇環状噴霧流ループ

す壁面濡れ性の影響を評価した。図2に本実験で使用した空気-水系垂直上昇環状噴霧流ループの概略図を示す。気相には空気を使用し、液相には約25℃に調整した純水を使用した。タンクより気液混合部に流入した水は、内径10mmのテスト管内面に一様な液膜となり空気と共にテスト管内を上昇する。テスト管には、アクリル管とFEP (Fluorinated Ethylene Propylene) 管を用いた。両テスト管の液接触角はそれぞれ60°、80°であった。

テスト管上部に設置した吸引部より管内外の圧力差によって液膜を吸引することにより液膜流量を計測し、全液相流量から液膜流量を差し引くことで液滴飛散量を整理した。液膜厚さの計測にはレーザーフォーカス変位計 (LFD) ³⁾ を使用した。また、気液混合部より下流側2150mmの位置に配置した高速度ビデオカメラ (每秒5400コマ) により、管内の流動画像を入手した。

4. 研究成果

(1) 高温高压下の動的濡れ性

① γ 線照射前の動的濡れ性

本研究では、高温高压下の動的な濡れ性に対するRISA効果の評価に必要な比較データを取得するため、まず、 γ 線照射前の試験片の動的濡れ性を計測した。図3に動的接触角の温度依存性を示す。図中の○は前進接触角を、□は後退接触角を示しており、エラーバーは、計測値の標準偏差を示している。また、過去の研究で取得された静的接触角²⁾を参考値として△で示している。前進接触角は、30~150℃において温度の上昇に伴い緩やかに減少しており、150℃以上の高温域において温度の上昇に伴い急激に減少している。

一方、後退接触角は、30~150℃において温度の上昇に伴い急激に減少し、150℃以上において緩やかに減少している。このように、低温域では温度の増加に対する接触角の減少割合が大きく、高温域では小さくなっており、前進状態のそれと逆の傾向を示した。

図4、5にキャピラリー数 ($Ca = \mu v_p / \sigma$: μ , v_p および σ は、それぞれ粘性係数、接触線移

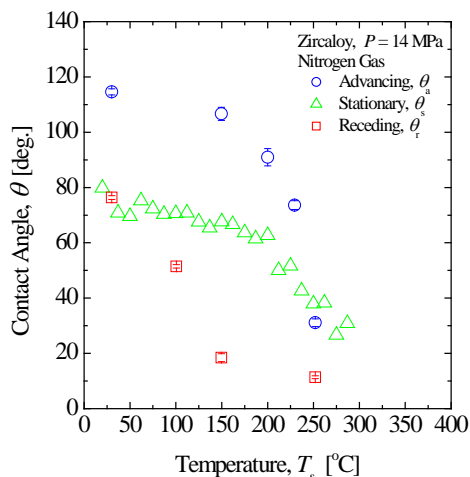


図3 接触角の温度依存性 (照射前)

動速度、表面張力) と前進、後退接触角の関係をそれぞれ示す。前進接触角は、キャピラリー数に対して若干増加する傾向を示しており、その勾配は約0.04であった。一方、後退接触角のキャピラリー数への依存性は低い。各圧力、温度条件におけるキャピラリー数の変化は、接触線速度による変化に依存するが、接触線移動速度が低い本実験の場合、接触線移動速度の動的接触角への影響は少ないことがわかる。また、各温度での接触角を比較すると、キャピラリー数が同程度の条件において、試験片表面温度の高い条件のほうが接触角は小さくなっている。試験片表面温度により接触角に差異が生じている理由は、試験片表面が高温になるにつれ活性化されることに起因していると推察される。

② γ 線照射後の動的濡れ性

図6、7に雰囲気温度30℃および250℃において撮影された試験片接触直後の液滴の画像を示す。画像は接触時 ($t = 0$ ms) から1ms毎の時間変化を示しており、各図の(a)(b)は、それぞれ、照射前後の画像である。また、図中の点は接触線位置、矢印はその位置における気液界面の接線を示している。

雰囲気温度30℃における接触角に着目す

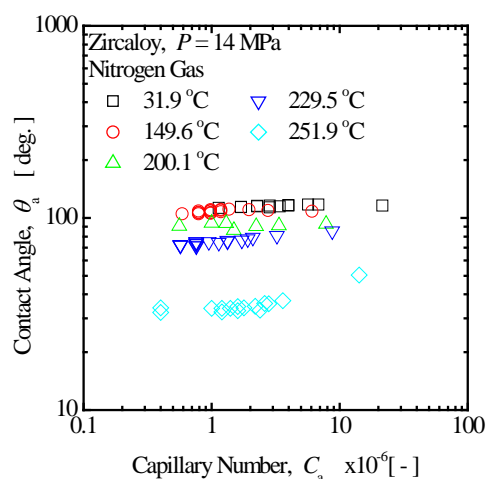


図4 前進接触角とキャピラリー数

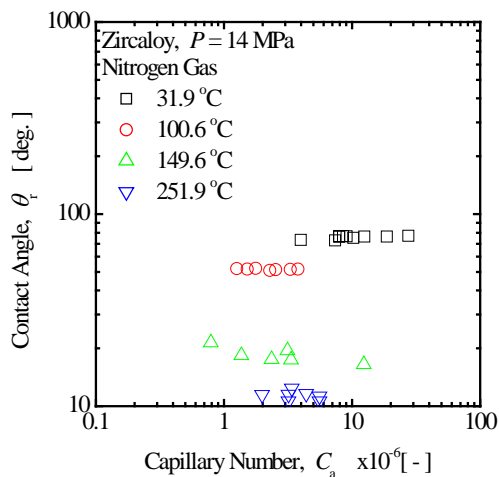


図5 後退接触角とキャピラリー数

ると、照射前は接触直後 90° 以上であり、その角度を維持したまま推移している。それに対し、照射後は接触直後から 90° 以下に急激

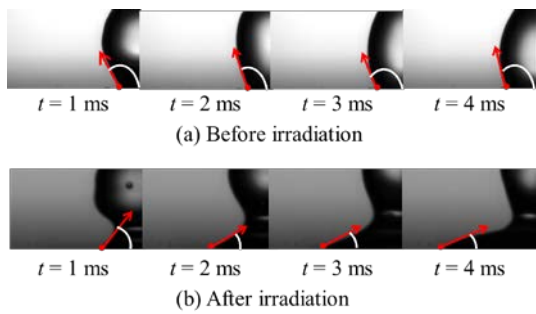


図 6 試験片接触直後の液滴画像 (30 °C)

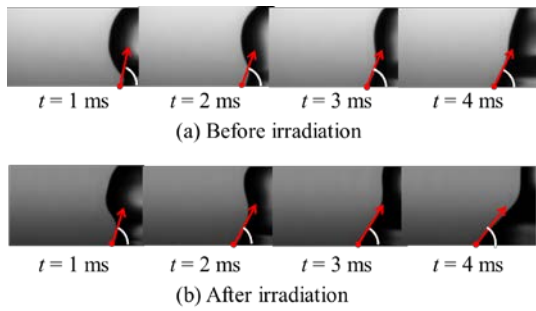


図 7 試験片接触直後の液滴画像 (250 °C)

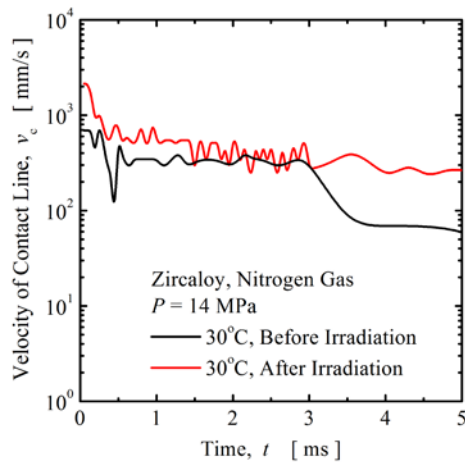


図 8 接触線移動速度 (30 °C)

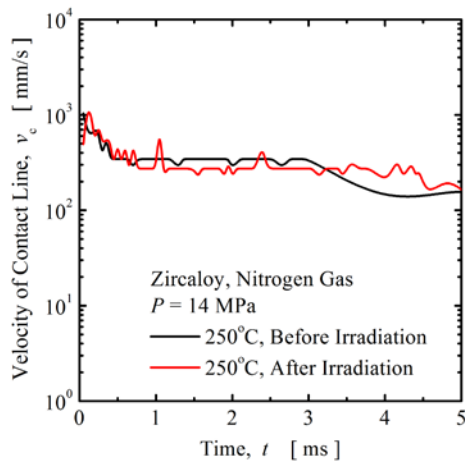


図 9 接触線移動速度 (250 °C)

に減少し、その後も時間の経過に伴い接触角が緩やかに減少している。また、照射前の接触線位置はほとんど移動していないのに対し、照射後は、短時間のうちに大きく濡れ広がる様子を示している。

雰囲気温度 250°C の高温条件においても照射前後で差異が見られた。接触角に着目すると、照射前は接触直後から 90° 以下となり、時間の経過に伴って減少している。一方、照射後は、照射前と同様に接触直後から 90° 以下となり、時間の経過に伴い減少しているが、その減少量は照射前よりも大きい。

図 8, 9 に画像解析により計測された 30°C と 250°C における液滴接触直後の接触線移動速度を示す。同様に前進接触角の結果を図 10, 11 に示す。雰囲気温度 30°C における接触線移動速度 (図 8) に着目すると、照射前は、接触直後約 700mm/s であるのに対し、照射後は最大約 2000mm/s となった。雰囲気温度 250°C では (図 9)、照射前において接触直後約 600mm/s であるのに対し、照射後は約 1100mm/s となった。この接触線移動速度の差は、濡れ広がり寄与する RISA の駆動力によるものとみなせる。

前進接触角に着目すると、雰囲気温度 30°C (図 10) において、照射前は接触直後に 130°

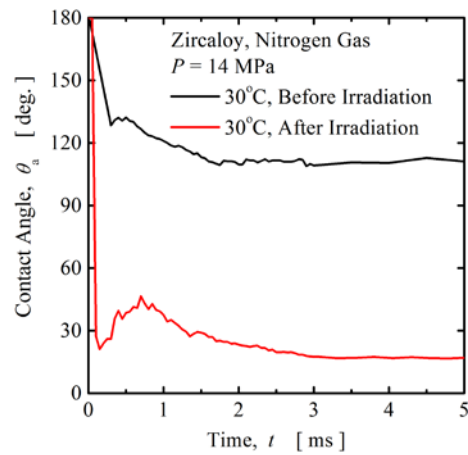


図 10 前進接触角 (30 °C)

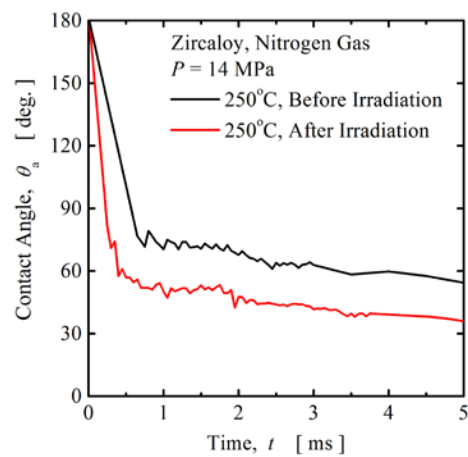


図 11 前進接触角 (250 °C)

まで減少し、2 ms 以降は 100° 以上で推移した。照射後は、接触直後約 0.1 ms のごく短時間で 25° まで減少し、3 ms 以降は 20° 以下で推移した。一方、雰囲気温度 250°C (図 11) において、照射前の前進接触角は接触直後に 70° まで減少するのに対し、照射後は接触直後 0.4ms で 55° まで急激に減少し、その後緩やかに減少していく傾向を示した。

図 12 に液滴接触角の温度依存性を示す。図中の○と□で示したデータは、それぞれ照射前後における前進接触角を示している。ここで、本図に示す前進接触角は、試験片に接触してから 2-3 秒後の準定常状態における平均値として整理している。また参考として、液の供給を停止した際の静的接触角を△で示す。照射前の前進接触角は、温度の上昇に伴い減少する傾向を示した。一方、照射後の前進接触角は、温度の上昇に伴いやや増加し、照射前の値に近づく傾向を示したが、本実験の全ての温度域において、照射後の値は照射前より常に低く、20° 以下の親水性状態となることが確認された。

以上、軽水炉炉心熱環境相当の高温高压条件においても RISA により動的濡れ性が向上することを確認した。

(2) 環状噴霧流の液膜ドライアウトに及ぼす壁面濡れ性の影響

図 13 に、アクリル管と FEP 管におけるドライアウト発生後の流動画像を示す。濡れ性が悪い FEP 管では、アクリル管よりも液相流量が数十倍多い条件においてドライアウトが発生した。アクリル管ではドライアウトが発生する際の液膜流量が非常に少ないため、擾乱波の形成は確認されなかった。また、ドライアウトが発生すると、短時間で広範囲に乾き部が広がり、液相は壁面上をリップレット(液すじ)となって上昇した。一方、FEP 管では、擾乱波の形成が確認された。さらに、FEP 管におけるドライアウトの形成プロセスはアクリル管のそれと大きく異なり、擾乱波通過後のリップル波領域において部分的に形成したドライパッチからドライアウトが

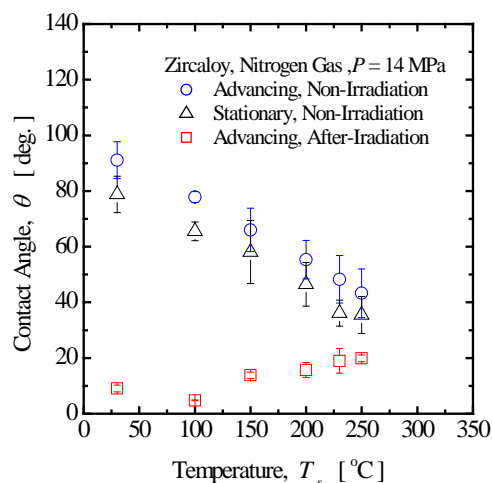


図 12 接触角の温度依存性 (照射前後)

広がっていく様子が確認され、また、形成した乾き部が、擾乱波の通過により再度液膜で覆われる現象(リウエット)が確認された。

図 14 に、液膜ドライアウトが発生する限界の液膜流量すなわち最小濡れ膜流量を示す。アクリル管の最小濡れ膜流量は、気相の見かけ速度の増加に伴って増加する傾向にある。アクリル管においてドライアウト近傍における液滴飛散量はほぼ零であったことから、テスト管に流入する液相のほぼ全量が液膜として流動する。アクリル管におけるドライアウト発生時の平均液膜厚さと最小液膜厚さに着目すると(図 15)、両液膜厚さは気相の見かけ速度の変化に対し、ほぼ一定に推移している。ドライアウトの発生機構を単純な三相界面における力のバランスで考えると、高気相流速条件では液膜の界面せん断力が増加することで壁面を濡らしやすくなり、界面せん断力が小さい低気相流速条件よりも最小濡れ膜流量が少ない条件においてドライアウトが起こると予想されるが、本実験結果は、それとは逆の傾向を示している。このことから、アクリル管のように、ドライアウト近傍において擾乱波と液滴飛散が形成せず極薄い液膜のみを形成する領域では、界面のせん断力よりも壁面の粘性力と濡れ性(各相間の張力)が支配的となり、ドライアウトの形成は、これらの因子により特徴づけられる液膜厚さの条件によってほぼ一義的に決定しているものと推察される。

一方、濡れ性が悪い FEP 管における最小濡れ膜流量は、アクリル管と比べて非常に高い値を示している(図 14)。また、その傾向についても差異が見られ、アクリル管の結果とは逆に、高気相流速条件において減少する傾向にある。これは、FEP 管ではドライアウト近傍における液膜流量が増加し、また擾乱波が形成することで、液膜の慣性力が支配的となるためと考えられる。つまり、高気相流速条件では、界面せん断力と界面擾乱波通過頻

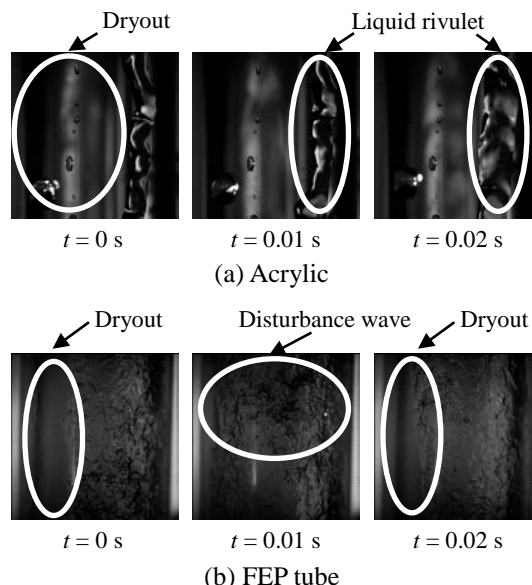


図 13 ドライアウト発生後の流動画像

度が増加し、それにより壁面を濡らしやすくする効果が働くことで、最小濡れ膜流量が減少したものと考えられる。

FEP管におけるドライアウト近傍の平均液膜厚さは、アクリル管が一定に推移していたのに対し、気相の見かけ速度の増加に伴って減少する傾向を示している(図15)。これは擾乱波の形成が強く関与していると考えられる。擾乱波は管内を高速で上昇し、一度に大量の液膜を輸送するため、擾乱波の上昇速度と通過頻度が大きくなる高気相流速条件では、液膜厚さは液膜流量に対して相対的に減少する。それにより高気相流速条件において液膜厚さが減少したものと推測される。

以上、断熱系垂直上昇環状噴霧流における壁面濡れ性と液膜ドライアウトの関係を実験的に評価した。

参考文献

- 1) Takamasa, T., et al., Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, Issue 3, 267-274 (2005).
- 2) 波津久・他5名, 機論 B, Vol. 75-758, 1911-1916 (2009).
- 3) Hazuku, T., et al., Int. J. Multiphase Flow 34 (2), 111-127 (2008).

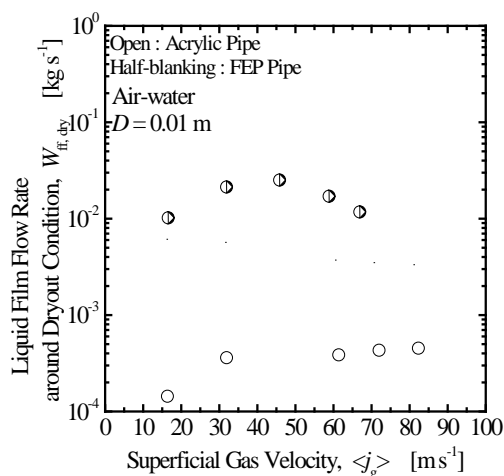


図14 最小濡れ膜流量

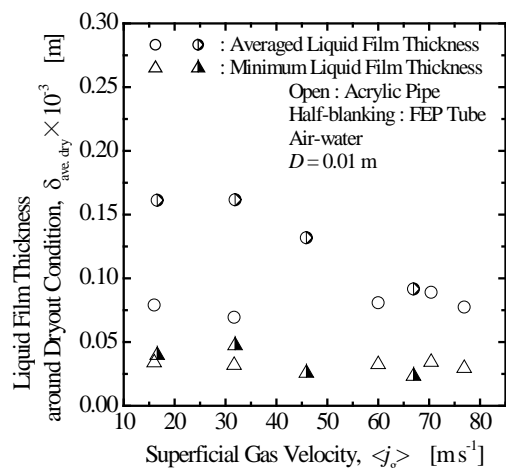


図15 ドライアウト近傍の液膜厚さ

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Tatsuya HAZUKU, Akihiko KAMURA, Tomoji TAKAMASA, Effect of Wall Wettability on Flow Characteristics of Annular Two-phase Flow, Multiphase Science and Technology, 査読有, Vol. 24-3, 2013, 223-237
DOI: 10.1615/MultScienTechn.v24.i3.30.
- ② Ryoji MATSUE, Tatsuya HAZUKU, Yutaka FUKUHARA, Tomoji TAKAMASA, Experimental Study on Annular Two-phase Flow Affected by Pipe Wall Wettability, Proc. 8th International Conference on Multiphase Flow, 査読有, USB No. ICMF2013-1003, 2013.

[学会発表] (計5件)

- ① 武翔太, 高温下における液体の動的接触角, 日本原子力学会2013年秋の大会, 2013年9月5日, 八戸工業大学.
- ② Ryoji MATSUE, Experimental Study on Annular Two-phase Flow Affected by Pipe Wall Wettability, 8th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2013), 2013年5月28日, Jeju, Korea.
- ③ Tatsuya HAZUKU, Effect of Wall Wettability on Flow Characteristics of Annular Two-phase Flow, 6th Japanese-European Two-Phase Flow Group Meeting, 2012年9月24日, KKR ホテル熊本.
- ④ 波津久達也, 高温下における液滴接触角の測定, 日本混相流学会年会講演会 2012, 2012年8月9日, 東京大学柏キャンパス.
- ⑤ 下村祐介, 環状噴霧流の液滴飛散と液膜ドライアウトに及ぼす壁面濡れ性の影響, 日本混相流学会年会講演会 2011, 2011年8月6日, 京都工芸繊維大学松ヶ崎キャンパス.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

波津久 達也 (HAZUKU, Tatsuya)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・准教授
研究者番号: 60334554

(2) 研究分担者

賞雅 寛而 (TAKAMASA, Tomoji)

東京海洋大学・海洋科学技術研究科・教授
研究者番号: 20134851

(3) 海外研究協力者

日引 俊 (HIBIKI, Takashi)

米国パデュー大学・原子力工学科・教授