

一般セッション | III. 核分裂工学：304-1 伝熱・流動（エネルギー変換・輸送・貯蔵を含む）

2024年9月12日(木) 14:45 ~ 16:05 H会場(講義棟B棟1F B102)

[2H10-14] 混相流1

座長:上遠野 健一(日立)

14:45 ~ 15:00

[2H10]

フィルム型光導波路を用いた薄膜計測法の開発

*水嶋 祐基¹、中野 幸佑¹ (1. 静岡大)

15:00 ~ 15:15

[2H11]

強制対流サブクール沸騰中における薄液膜厚さの計測

*大川 富雄¹、Nguyen Thanh-Binh¹ (1. 電通大)

15:15 ~ 15:30

[2H12]

PIVによるロッドバンドル内の流速分布測定と支持格子ミキシングベーンの形状効果の評価

*井上 純也¹、笹川 達也¹、水谷 義隆¹、平井 康志¹、久保 雄一郎¹、藤原 和志¹、細川 茂雄² (1. 原燃工、2. 関西大)

15:30 ~ 15:45

[2H13]

金属3Dプリンターにより造形した自己発熱模擬粒子状デブリ内のプール沸騰挙動

*植田 翔多¹、新井 崇洋¹、古谷 正裕¹、大川 理一郎¹ (1. 電中研)

15:45 ~ 16:00

[2H14]

放射線環境下におけるPEG水溶液の水蒸気爆発抑制効果

*新井 崇洋¹、古谷 正裕¹、森田 圭吾²、坂口 英之² (1. 電中研、2. 北陸電力)

16:00 ~ 16:05

座長持ち時間

フィルム型光導波路を用いた薄膜計測法の開発

Development of measurement method for thin liquid film via optical waveguide film (OWF)

*水嶋 祐基, 中野 幸佑

静岡大学

フィルム型光導波路 (OWF) は厚さ 0.1 mm ほどの柔らかいシートの中に複数本の光導波路を内包した樹脂フィルムであり、その面内には複数のマイクロ光センサが加工されている。各センサ部では気相と液相の相検出や液相の厚さ計測が可能である。本報では OWF を用いた衝突液滴や液膜厚さの計測について報告する。

キーワード：液膜流, 液滴衝突, 厚さ計測, フィルム型光導波路

1. 緒言 流動中における液膜・液滴の直接計測を目標に、数十 \sim μm オーダーの膜厚分布や衝突液滴の測定・検出を実現する流体センサを開発した。

2. 試験装置 液滴発生装置にて再現よく生成した液滴[1]を OWF 上に落下衝突させ、信号検出した (Fig. 1)。二方向から高速度カメラにて落下位置や衝突前後の様子を可視化し、信号挙動と比較を行った。液体は水とエタノールの二種類を用いた。また、吹き出し型風洞にて気流に伴われた薄い液膜流[2]を形成し (Fig. 2)、流路上に設置した OWF およびレーザーフォーカス変位計 (LFD) で時系列液膜厚さを算出、比較した。

3. 試験結果 エタノール液滴の衝突を OWF にて検出した際の信号を Fig. 3 に示す。可視化によると Ch1 に最初に液滴が接触し、Ch2 \sim 5 へとぬれ広がる様子が捉えられたが、OWF 信号はこれと異なる挙動を見せたことから、液滴衝突面が微小に変形、気体のトラップが起こったことで生じた検出時刻の遅れと判断した。次に Fig. 4 に OWF と LFD から算出した液膜流の平均膜厚を示す ($j_G=20\sim 70\text{ m/s}$, $j_L=0.003\text{ m/s}$)。気流速度が小さい場合、OWF の結果が比較的過大傾向になるものの、両結果は概ね良好に一致した。

4. 試験結果 OWF にて衝突液滴、液膜流の計測を行い、その妥当性を確認した。

参考文献

[1] Y. Miyachi et al., *Rev. Sci. Instrum.* **93**(6): 065107 (2022). <https://doi.org/10.1063/5.0075435>

[2] Y. Mizushima, *Nucl. Technol.*, **209**(12), 1886–1897 (2023). <https://doi.org/10.1080/00295450.2023.2229998>

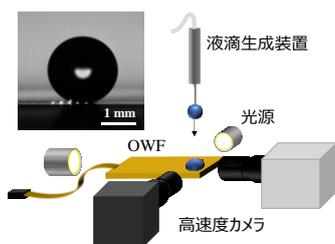


Fig. 1 Schematic of droplet impingement detection

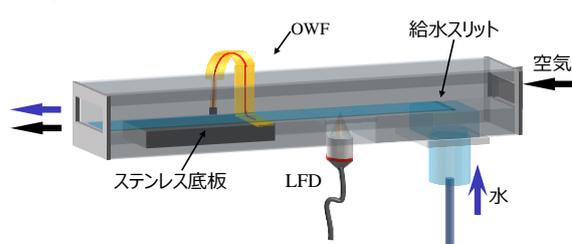


Fig. 2 Schematic of liquid film flow measurement

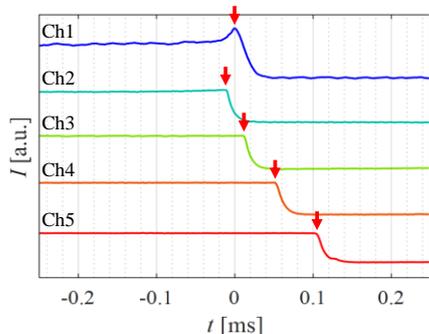


Fig. 3 Droplet impingement signal via OWF sensor array

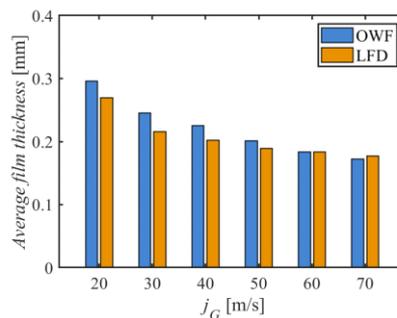


Fig. 4 Comparison of mean thickness between OWF and LFD

*Yuki Mizushima and Kosuke Nakano

Shizuoka Univ.

強制対流サブクール沸騰中における薄液膜厚さの計測

Measurement of Liquid Sublayer Thickness in Subcooled Flow Boiling

*大川 富雄, グエン タン ビン

電気通信大学

機構論的 DNB 予測手法の高度化に資するため、透明伝熱面を用いた強制対流サブクール沸騰実験を行い、伝熱面と大気泡の間に形成される薄液膜厚さを計測した。今後、本実験データの信頼性検証を行う。

キーワード：強制対流サブクール沸騰、DNB、Liquid sublayer、レーザー計測、液膜厚さ

1. 緒言

PWR の安全性評価で重要となる DNB 熱流束 q_{DNB} の機構論的予測では、Liquid Sublayer Dryout (LSD) モデルが広く支持されている[1,2]。本モデルでは、伝熱面上に形成される大気泡の長さ L_B と速度 U_B 、大気泡と伝熱面の間に形成される薄液膜 (Liquid sublayer) の厚さ t_{LS} の関数として q_{DNB} を推算する。しかし、 q_{DNB} については数多くの実験データがあるが、 L_B , U_B , t_{LS} に関するデータは少なく、LSD モデルの妥当性検討を行う上での障害となっている。本研究では、特に計測が困難な物理量として t_{LS} の実験計測を試みる。

2. 実験装置・方法

サファイヤガラス上に透明かつ導電性の ITO 膜を成膜し、これを通電加熱することで伝熱面とした。試験体は透明のポリカーボネート製、試験流体は水、圧力は大気圧近くとした。三角測量方式による t_{LS} のレーザー計測と高速カメラによる気泡挙動の観察を同期して行った。

3. 実験結果と考察

レーザー変位計を用いて、基準面から伝熱面と液膜表面までの距離を高時間分解能で計測し、これらの差分を液膜厚さ t_{LS} とした。計測例として、3つの大気泡の瞬時画像を図1に、各気泡の下で計測された t_{LS} の時間変化を図2に示す。 t_{LS} の計測値は概ね 20~150 μm となった。機構論的 DNB 予測手法の性能向上に資するため、今後、本実験結果の信頼性検証を行う。

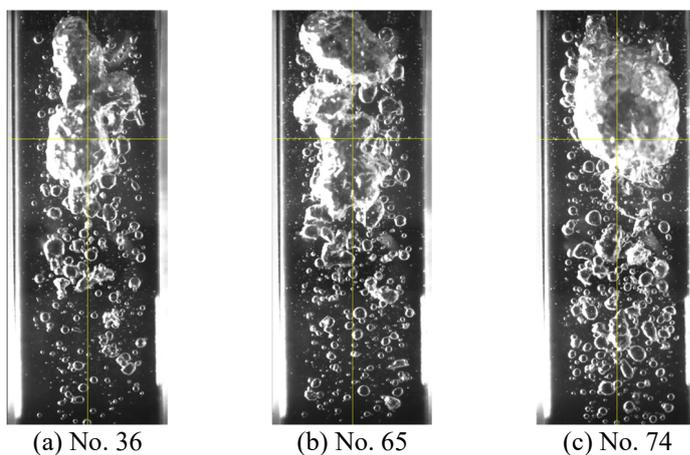


Fig. 1 Snapshots of large bubbles

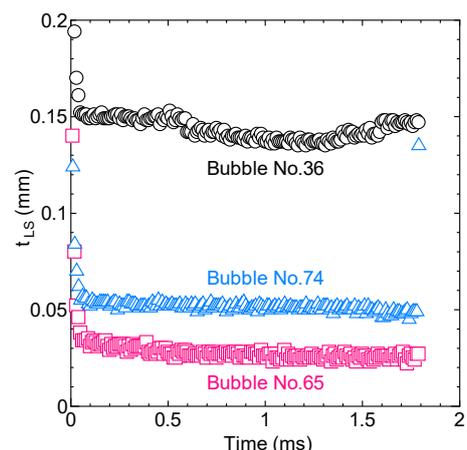


Fig. 2 Liquid sublayer thickness

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP 22K03940 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] T.-B. Nguyen, T. Okawa, *Int. J. Therm. Sci.* 195 (2024) 108646. [2] Y. Liu et al., *Prog. Nucl. Energy* 148 (2022) 104225.

*Tomio Okawa, Thanh-Binh Nguyen

The University of Electro-Communications

PIVによるロッドバンドル内の流速分布測定と 支持格子ミキシングベーンの形状効果の評価

PIV Measurements in 5x5 Rod Bundle and Investigation on Shape Effects of Mixing Vane of Spacer Grid

*井上 純也¹, 笹川 達也¹, 水谷 義隆¹, 平井 康志¹, 久保 雄一郎¹, 藤原 和志¹, 細川 茂雄²

¹原燃工, ²関西大

本研究では、PWR 燃料の模擬支持格子を装着した 5×5 ロッドバンドル体系を対象にして Particle Image Velocimetry (PIV) によって流速分布を測定し、ミキシングベーンの形状が冷却材の攪拌能力に与える効果を確認するとともに、CFD 解析結果との比較を行い、その予測性を調査した。

キーワード：PWR 燃料，ミキシングベーン，PIV

1. 緒言

PWR 燃料の支持格子に設けられるミキシングベーンは、冷却材を攪拌させ燃料の熱的性能を向上させる役割をもつ[1]。本研究は、予め CFD 解析で攪拌性能に差異が確認された 2 種類のベーンについて実験的に形状効果を確認するため、模擬支持格子を装着した 5×5 ロッドバンドル体系を対象にして PIV による流速測定を行った。また、CFD 解析の予測性能を把握することを目的として、CFD 結果と試験結果の比較を行った。

2. 試験内容

現行 PWR 燃料のミキシングベーンを模擬したベーン A と、ベーン A に比して投影面積を 38%増加させ CFD 解析で攪拌性能の向上が見られたベーン B をそれぞれ有する 2 種類の模擬支持格子を作成した。流路装置中の試験部は透明壁の矩形流路であり、その中に模擬支持格子を装着した 5×5 ロッドバンドルを設置した。グリッド下流 50 mm の高さに水平 2 方向からレーザーを試験部に入射させ、上部窓から高速度カメラで撮影することで水平方向の流速の PIV 測定を行った。試験条件は、水温 30°C、流量 300L/min (断面平均流速 1.6 m/s) とした。画像群をライブラリー社の Flow-PIV を使用して PIV 処理および平均化処理し、平均水平流速を求めた。

3. 結果・考察

図 1 に試験結果を示す。ベーン A に比してベーン B は支持格子下流の平均水平流速が大きい傾向にあり、これは事前の CFD 解析で予測されたベーンの攪拌性能の向上が表れているものと考えられる。試験と CFD 解析の結果を比較すると、CFD

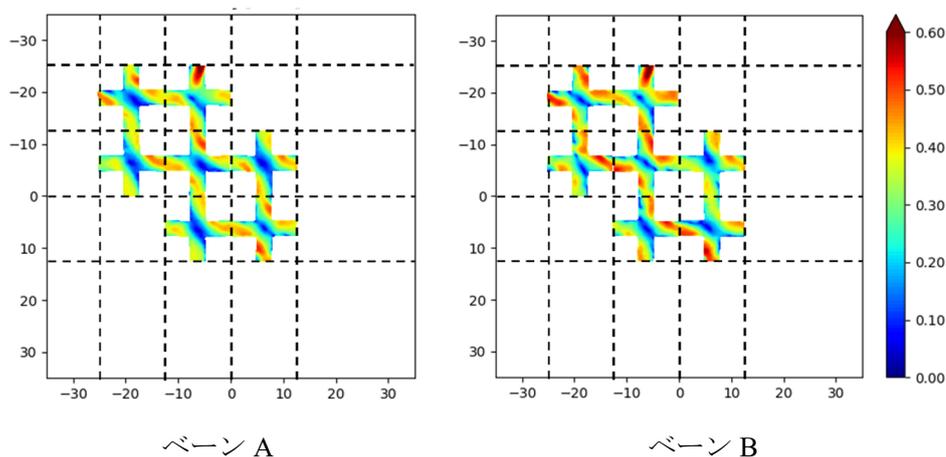


図 1 平均水平流速

の結果はロッド間の流速がより大きく、サブチャンネル部の流速がより小さい傾向が見られた。これは使用した $k-\varepsilon$ モデルが乱れの等方性を仮定していることに由来すると考えられる。

参考文献

[1] 原子力安全研究協会編，軽水炉燃料のふるまい（改訂第 5 版），平成 25 年

*Junya Inoue¹, Tatsuya Sasakawa¹, Yoshitaka Mizutani¹, Yasushi Hirai¹, Yuichiro Kubo¹, Kazushi Fujiwara¹ and Shigeo Hosokawa²

¹NFI, ²Kansai Univ.

金属 3D プリンターにより造形した自己発熱模擬粒子状デブリ内のプール沸騰挙動

Pool boiling in heated particulate beds fabricated by metal 3D printer

*植田 翔多¹, 新井 崇洋¹, 古谷 正裕¹, 大川 理一郎¹

¹電中研

金属 3D プリンターで造形した自己発熱模擬粒子状デブリにおけるプール沸騰挙動を高速カメラにより可視化し、試験体内部の多次元温度分布を光ファイバセンサにより測定することで、充填構造と境界条件が自己発熱模擬粒子状デブリ内の伝熱特性に及ぼす影響を検討した。

キーワード: 粒子状デブリ, 充填層, プール沸騰, 金属 3D プリンター

1. 緒言 軽水炉重大事故時の溶融燃料—冷却材相互作用により生じる粒子状デブリについて、充填構造が粒子状デブリベッドの冷却特性や沸騰二相流に与える影響に関する知見は限定的である。本研究では、充填構造が既知でステンレス製の自己発熱模擬粒子状デブリを用いた大気圧プール沸騰実験を行った。充填構造と境界条件が模擬粒子状デブリ内の伝熱特性に及ぼす影響を検討した。

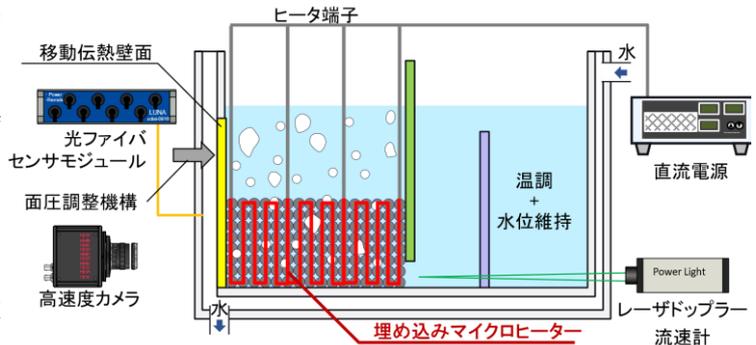


図 1 実験装置の概略図

2. 実験方法と結果 図 1 は、実験装置の概略図である。透明な二重水槽の内側容器内に模擬粒子状デブリを据え付け、容器の外側に所望の温度とした水を流すことで環境温度を制御した。模擬粒子状デブリは、金属 3D プリンターで充填構造が既知のステンレス製模擬粒子状デブリを高さ 50.0 × 幅 74.6 × 奥行 78.1 mm で造形し、内部にマイクロヒータを埋め込むことで製作した。粒子径 d_p は $\phi 5$ もしくは $\phi 10$ mm の単一粒子径とし、充填構造は六方最密構造 (hcp) と単純立方構造 (cubic-P) の 2 種類を製作した。模擬粒子状デブリにおけるプール沸騰挙動を高速カメラにより可視化し、試験体内部の多次元温度分布を光ファイバセンサ (OFS) により測定した。試験体表面の熱流束 q_d は崩壊熱を想定して 1.0–3.5 kW/m² の範囲とし、試験体と側壁の接触面圧 p_c は 0–0.5 MPa の範囲で与えた。図 2 は OFS 計測位置である。例として、 $d_p = \phi 5$ 、hcp 充填構造、 $q_d = 1.0$ kW/m²、 $p_c = 0.2$ MPa、入口サブクール度 5°C における OFS 計測結果から評価した試験体内部の熱伝達率と Kutateladze の式^[1]による計算結果を図 3 に示す。実験値と計算値のオーダーが合っていることから実験値は概ね妥当と考えられる。実験値では、入口サブクール水に起因して試験体内部に生じる熱伝達率の空間分布が表れている。

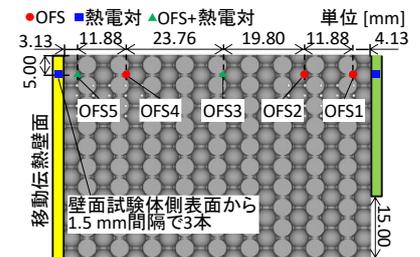


図 2 OFS 計測位置 (正面)

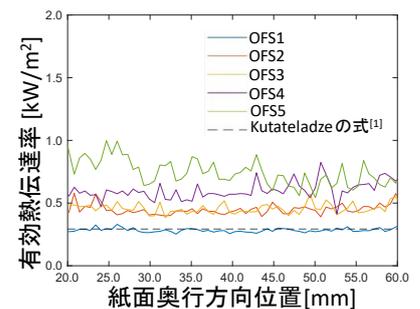


図 3 試験体内熱伝達率

3. 結論 金属 3D プリンターで造形した自己発熱模擬粒子状デブリを用いたプール沸騰実験を行い、充填構造や接触面圧などの境界条件が自己発熱模擬粒子状デブリ内の伝熱特性に及ぼす影響を検討した。

参考文献 [1] Kutateladze, S. S., 1951

謝辞 本研究成果の一部は、原子力規制庁委託事業「令和 4 年度原子力施設等防災対策等委託費 (粒子状デブリ冷却性実験) 事業」として実施したものである。

*Shota Ueda¹, Takahiro Arai¹, Masahiro Furuya¹ and Riichiro Okawa¹

¹CRIEPI

放射線照射下での PEG 水溶液の水蒸気爆発抑制効果

Radiation effect on suppression of steam explosions in PEG aqueous solution

*新井 崇洋¹, 古谷 正裕¹, 森田 圭吾², 坂口 英之²

¹ 電中研, ² 北陸電力

ポリエチレングリコール (PEG) を添加した水溶液プール中に低融点熔融金属をジェット状に流下する小規模実験を実施し、放射線照射下での PEG 水溶液における水蒸気爆発抑制効果を検討した。

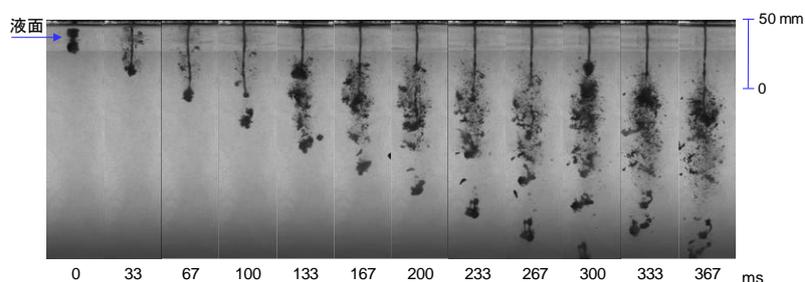
キーワード: 水蒸気爆発抑制材, ポリエチレングリコール, 曇点現象, 放射線影響

1. 緒言 水への PEG 添加は、高温の熔融金属が水プールに落下した際の水蒸気爆発トリガリングを抑制する効果がある。これは、PEG 水溶液が有する曇点現象、すなわち液温がある温度を超えると PEG が析出する現象により熔融金属周囲の蒸気膜が安定化し、膜沸騰蒸気膜の崩壊及び熔融金属の微細な混合を阻害するためである。一方、高分子材である PEG は放射線照射によって劣化する可能性があることから、本研究では放射線環境が PEG 水溶液の水蒸気爆発抑制効果に及ぼす影響を把握する。

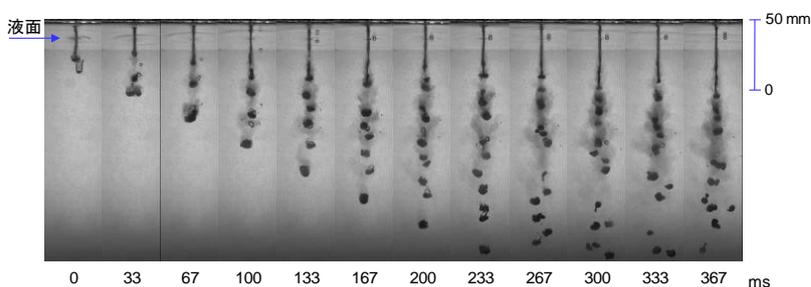
2. 実験 試験金属として錫を用いて、水プール中に熔融物ジェットとして流下させる体系での小規模実験を実施した。錫をステンレス製溶解坩堝内で電気加熱にて熔融させ、700℃に熔融保持した状態で坩堝底部のノズル (内径 2 mm) からジェット状に流下させた。ノズル先端から水面までの落下距離は 20 mm とした。水プール容器は幅 100 mm、奥行き 100 mm、高さ 200 mm の透明矩形容器であり、水深は 190 mm とした。初期水温は 20℃とした。実験では、線源 ⁶⁰Co からの γ 線を積算線量 50–200 Gy 照射した水溶液を用いた。

3. 実験結果 図 1 に熔融錫がプール液中に流下したときの様子を高速カメラで撮影した連続画像を示す。図 1(a)は水の場合であり、水中で水蒸気爆発のトリガリングが断続的に発生して熔融錫が微粒化した。図 1(b)は積算線量 200 Gy を照射した 0.05 wt%PEG 水溶液の場合である。放射線照射なしの場合と概ね同等の水溶液濃度で水蒸気爆発抑制効果が得られることを確認した。

4. 結論 熔融錫をプール液中に流下させる実験を実施し、積算線量 200 Gy までの放射線照射下における PEG 水溶液の水蒸気爆発抑制効果を明らかにした。



(a) 水 (放射線照射なし)



(b) 0.05 wt%PEG 水溶液 (γ 線積算線量 200 Gy)

図 1 プール液中での熔融物ジェットの可視観察結果

*Takahiro Arai¹, Masahiro Furuya¹, Keigo Morita², Hideyuki Sakaguchi²

¹CRIEPI, ²RIKUDEN