



Japan Atomic Energy Agency

未来へげんき  
To the Future / JAEA

令和3年度  
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門  
合同研究成果報告会

# 軽水炉炉心における沸騰遷移後の伝熱メカニズムに関する研究 —リウエット液膜先端近傍での熱伝達促進因子の検討—

令和3年11月2日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構  
安全研究・防災支援部門 安全研究センター  
熱水力安全研究グループ

和田 裕貴

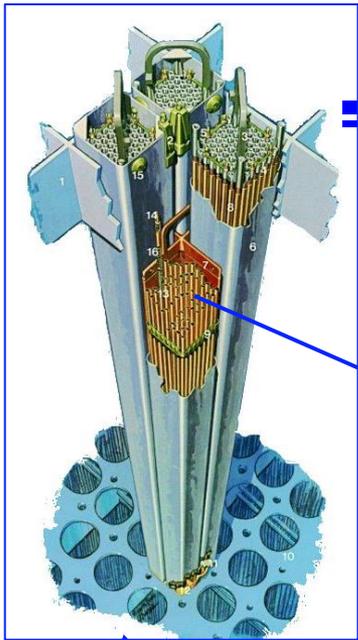
# 目次

---

---

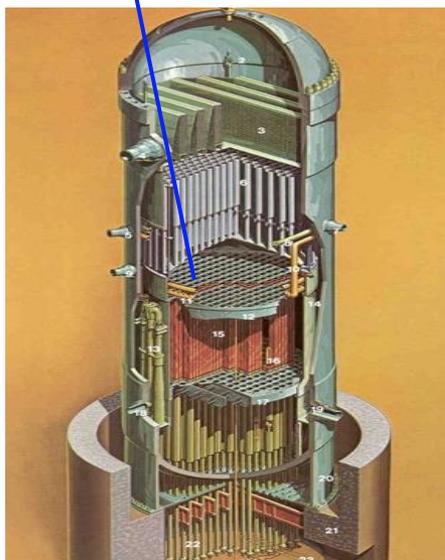
- 概要
  - ✓ 研究対象の概要
  - ✓ 研究背景・目的
  
- 実験装置と実験手順
  
- 実験結果
  - ✓ 可視化計測結果
  - ✓ 伝熱計測結果
  
- 伝熱促進メカニズムの推察
  
- まとめと今後の展開

# 本研究で対象とする炉心熱伝達の概要

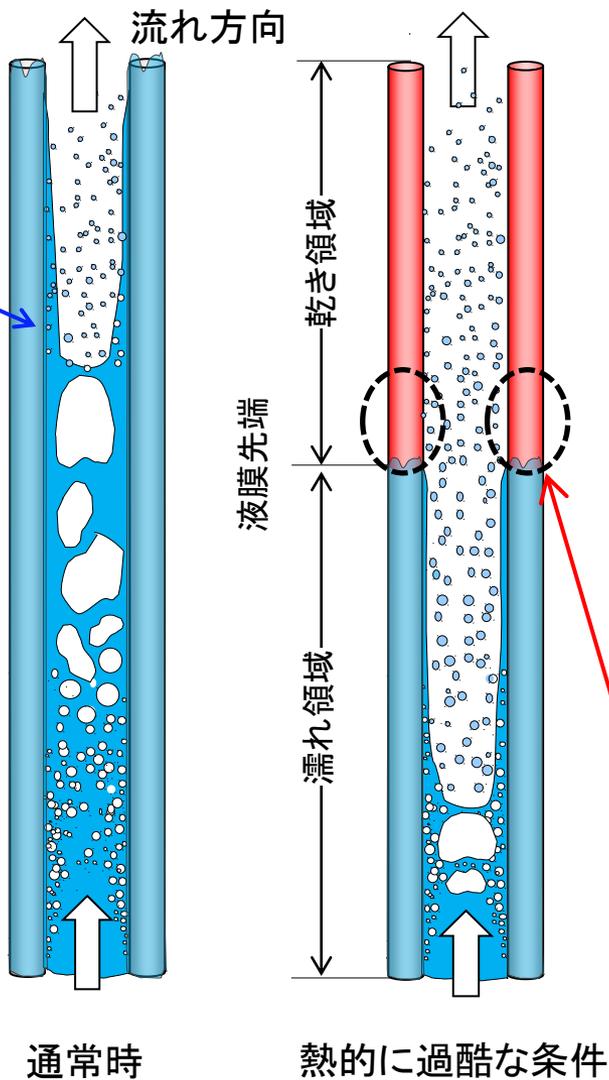


燃料棒

燃料集合体



BWR炉心



通常時

熱的に過酷な条件

本研究はBWRの炉心熱伝達を対象

- 通常時は燃料棒表面は液膜（液相）で覆われ、適切に除熱される
- 流量低下・出力上昇等により液膜が消失する（**ドライアウト**）
- ドライアウト後、流量回復・出力低下等により再び液膜（液相）で覆われる（**リウエット**）
- ドライアウト時間が長いと燃料棒表面温度が高くなり、ロッドや被覆管の変形等、燃料の健全性に影響
- このような沸騰遷移（BT）は想定した事故により様々な条件で現れる

本研究での対象

リウエット液膜先端近傍での熱伝達

BWR炉心での流動様式

# 研究背景

- 沸騰遷移後のリウエット挙動は炉心健全性の観点から重要な現象
    - ✓ 多くの研究が実施、いくつかのモデルが提案
    - ✓ 従来研究の特徴: 低圧、低出力、低流量
  
  - 1F事故後の新規制におけるSA拡大防止・影響緩和に関する規制要求
    - ✓ 例: ATWS(スクラム失敗事象、特徴: 高圧・高出力・高流量・非定常振動)
    - ✓ 現状では当該条件下で適用可能なモデルが確立されていない
    - ✓ ATWS条件は熱的に非常に過酷であり、フルスペック実験は不可能
      - 実験相関式よりも機構論モデルの構築が望まれる
- 
- JAEAでは以下の観点で実験装置を整備
    - ✓ メカニズム理解: 低圧可視化装置
    - ✓ 実機模擬: 高圧装置
  
  - 本日は、低圧可視化装置を用いた可視化・伝熱実験の結果、および液膜先端近傍での伝熱促進因子の考察結果について発表

# 研究背景 -JAEAでの従来研究-

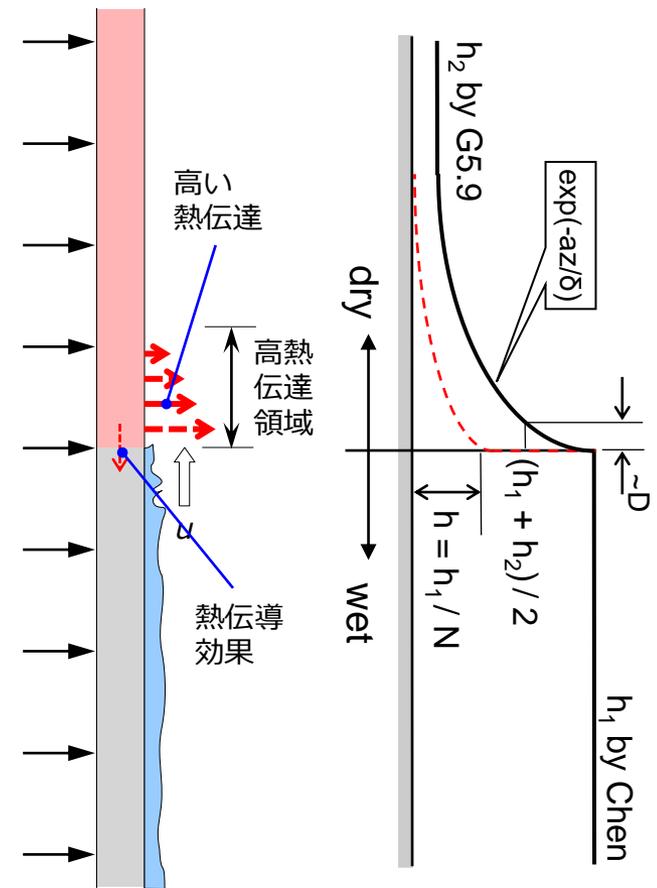
## 液膜先端乾き面の熱伝達の重要性

- ⇒ 1cm程度の**狭い領域での高い熱伝達率**
- 流れ場のパラメータを与えて求める従来の熱伝達式では再現できない
- 熱伝達係数を液膜先端からの**距離の関数**としてモデル化する必要
- 伝熱面内の固体**軸方向熱伝導**はリウエット進展にほとんど寄与しない

Sibamoto et al., 2013

## 技術課題

- ✓ 高い熱伝達を示す領域の大きさ、熱伝達係数等の把握は不十分
- ✓ 液膜先端の二相流と冷却の機構が不明、3流動場モデルの検証データの不足



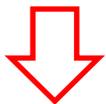
液膜先端近傍熱伝達概要図

Yonomoto et al., 2016

# 研究背景・目的

➤ 熱伝達メカニズムの理解には以下が不可欠

- ✓ 液膜・液滴挙動の計測
- ✓ 詳細な伝熱計測



➤ 低圧での可視化装置を整備

- ✓ 液膜先端近傍の液膜・液滴挙動の可視化

液膜先端近傍熱伝達の評価

⇔ リウエット挙動の評価

- ✓ リウエット(液膜上昇)速度
- ✓ リウエットするまでの時間
- ✓ 燃料棒表面最高温度(PCT)

本研究の目的

リウエット時の液膜先端近傍の熱伝達機構の解明  
機構論に基づいたリウエットモデルの構築

高圧実験データ・知見

最終目標

実機相当条件に適用可能な機構論モデルの構築

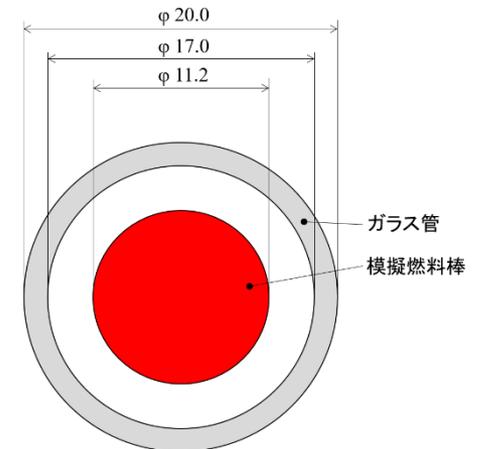
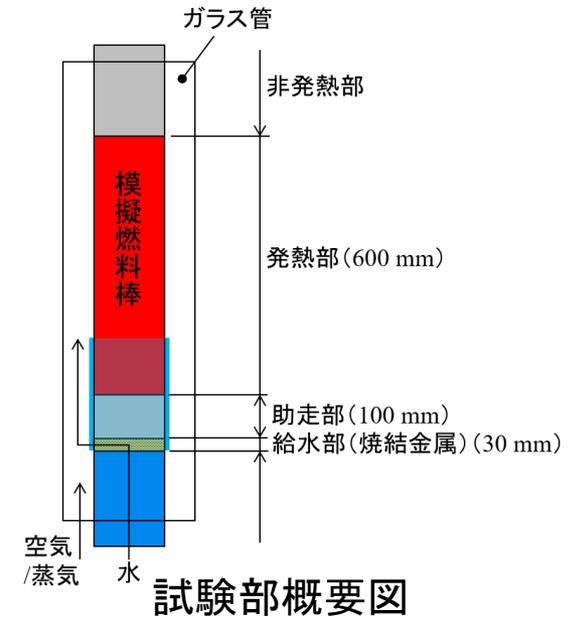
# 実験装置と実験手順

## 装置概要

- 作動流体: 水、空気
- 模擬燃料棒直径: 11.2 mm
- 試験部断面形状: 円形
- 円形試験部の内径: 17.0 mm
- 発熱部長さ: 600 mm
- 最大熱出力: 約6 kW(一様分布)

## 実験手順

- 気相单相流下で模擬燃料棒を所定温度まで加熱
- 所定流量の水を上流から液膜状に流す
- リウエット時の表面温度および液膜挙動を記録

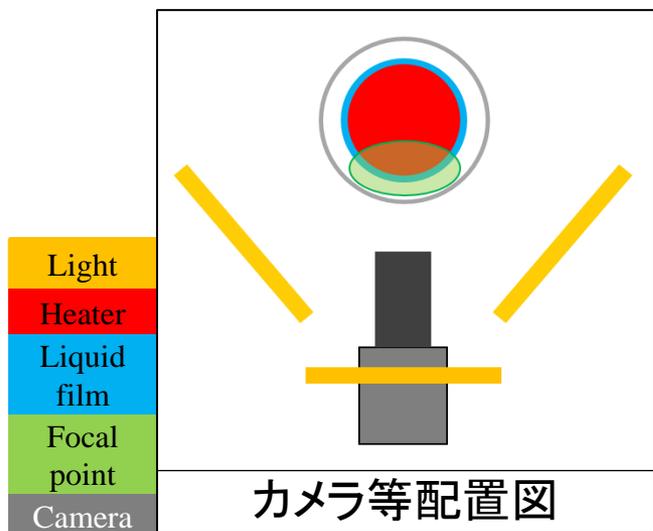


試験部断面概要図

# 可視化方法・温度測定方法

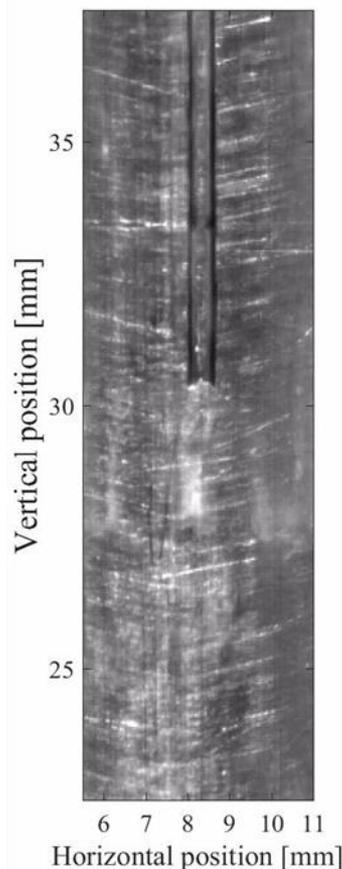
## 可視化方法

高速度カメラによる順光撮影  
液膜先端形状および液膜先端挙動を可視化

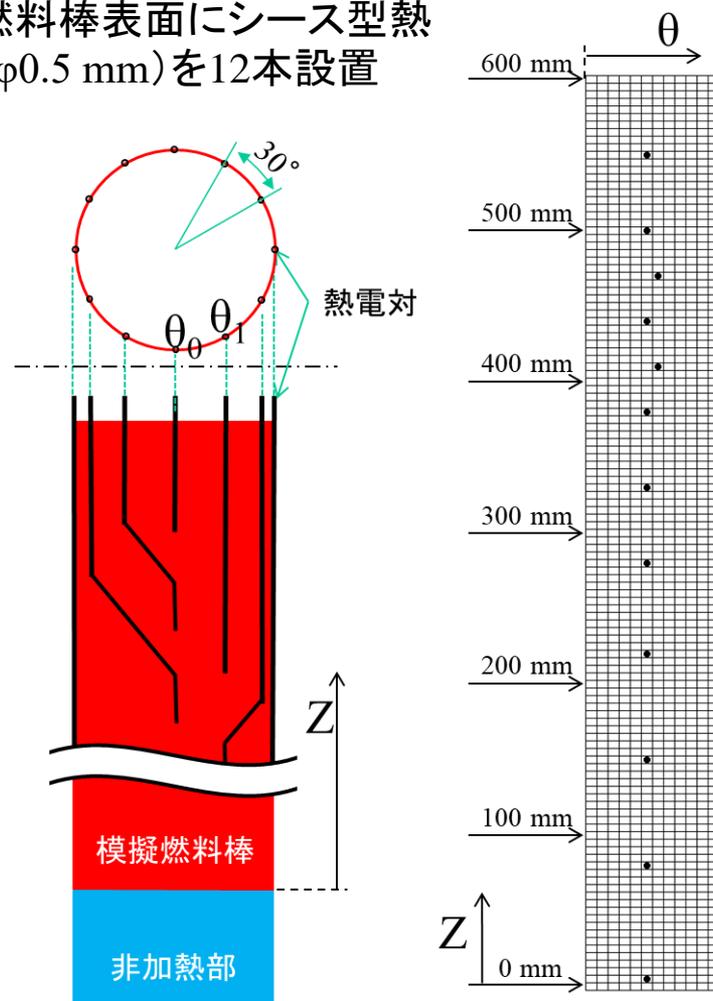


## 温度測定方法

模擬燃料棒表面にシース型熱電対(φ0.5 mm)を12本設置



撮影結果例



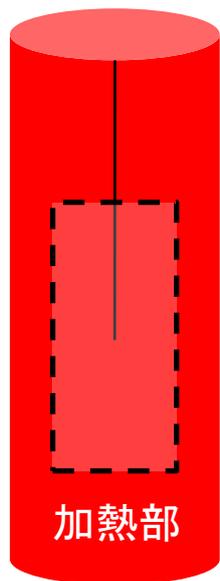
熱電対設置位置

# 壁面温度の違いによる液膜先端形状

$T_{ini}$  (初期壁面温度) = 100°C,

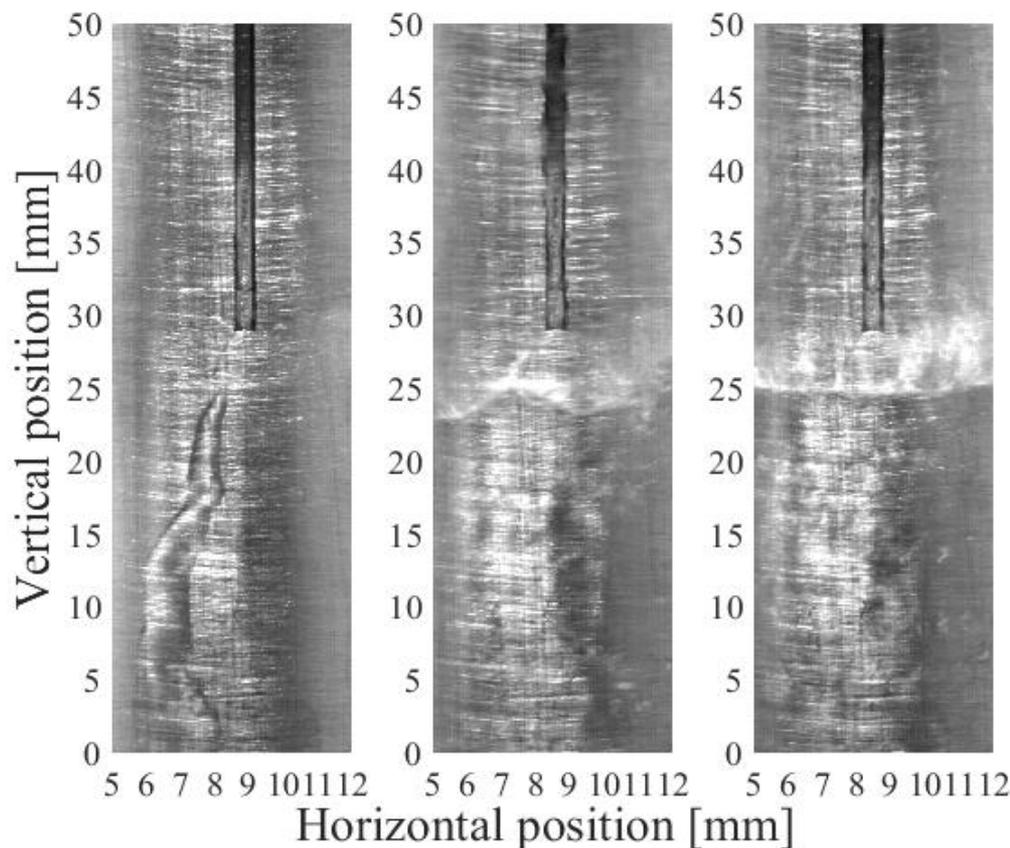
250°C,

400 °C



加熱部

撮影範囲



実験条件

$j_G = 64 \text{ m/s}$ ,

$j_L = 0.017 \text{ m/s}$

測定位置

加熱開始位置から  
80 mm 下流

$j_G$  : 気相のみかけ流速

$j_L$  : 液相のみかけ流速

みかけ流速

= 体積流量/断面積

- 壁温の増加に伴い液膜先端形状が周方向に均一となる
- 液膜先端では高温壁面に触れられないことから空気流中に液が飛散する

# 液膜先端での濡れ・乾き挙動

- リウエット時の液膜先端の特徴的な挙動

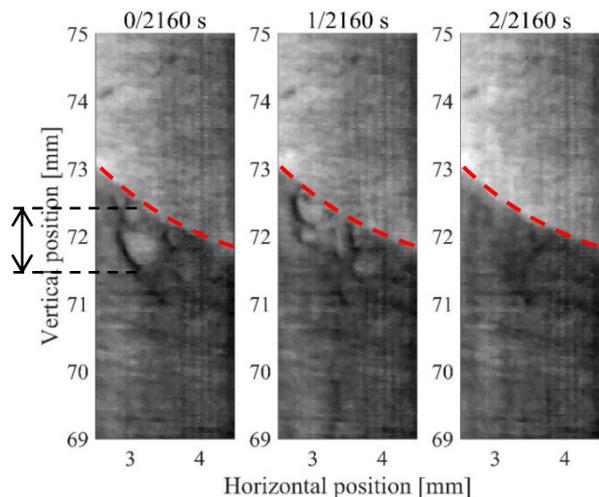
濡れ・乾きを繰り返しながら液膜が進展

→ ドライパッチ(液膜内で局所的に乾く領域)が発生

✓ 乾き要因: 液膜の蒸発に伴い液膜が薄くなる

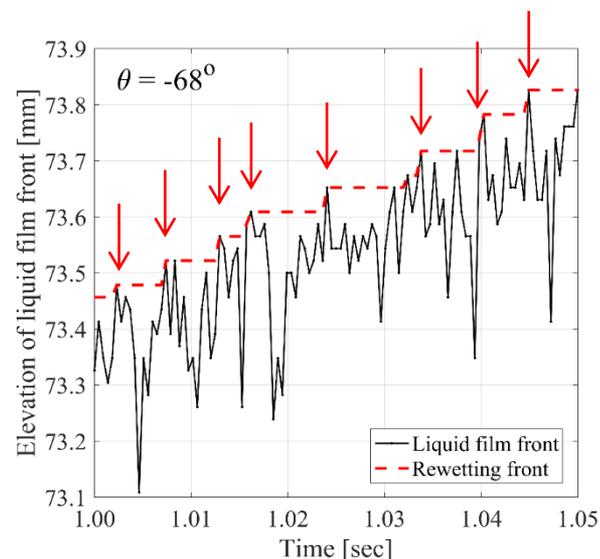
⇒ 最小液膜厚さを下回ることによって局所的に液膜が後退

✓ 濡れ要因: 伝播波の到達(右下図 ↓ が更新時刻)



液膜先端可視化結果

- - : リウエットフロント  
 (液膜最高到達高さ)  
 ⇔ : ドライパッチ深さ  
 (液膜後退長さ)  
 — : 液膜先端  
 (現時刻での液膜の先端)



液膜先端位置の時間変化

# 熱伝達係数の比較

## ➤ 乾き面における熱伝達係数を単相熱伝達相関式と比較

✓ 熱伝達係数:  $HTC = \frac{q''}{T_w - T_b}$

## ➤ バルク温度: $T_b$ の算出

✓ 質量・熱バランスに基づく

✓ 液膜表面からの蒸発はFickの法則に基づく

• 壁面熱流束:  $q''$

✓ 半径方向への1次元熱伝導解析から算出

## ➤ 二重管熱伝達相関式\*

✓ 管内流れに対するGnielinski式:  $Nu_G = \frac{\left(\frac{f}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{\frac{f}{8}}(Pr^{\frac{2}{3}} - 1)} \left[ 1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{2/3} \right]$

入口効果

ここで、最終項は加熱部入口効果補正項

✓ 二重管内側加熱補正項:  $0.86 \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^{-0.16}$

✓ 物性値の温度変化補正項:  $K = \left(\frac{T_b}{T_w}\right)^{0.45}$

$f = (1.82 \log_{10} Re - 1.64)^{-2}$

$L$ : 加熱部からの距離

$d_i$ : 内側円柱外径

$d_o$ : 外側円筒内径

$D$ :  $d_o - d_i$

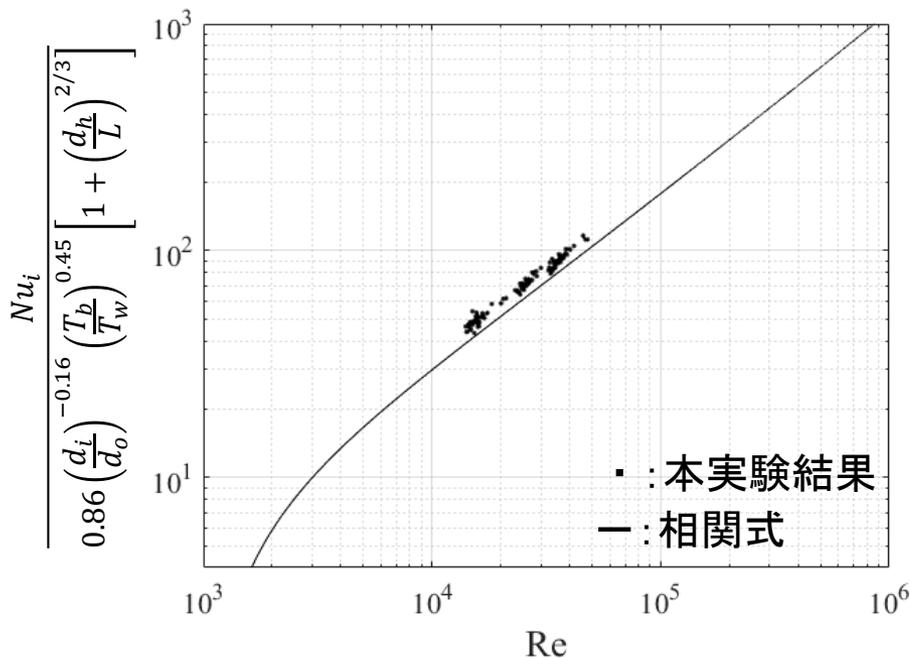
$T_b$ : バルク温度 (流体側主流温度)

$T_w$ : 壁面温度

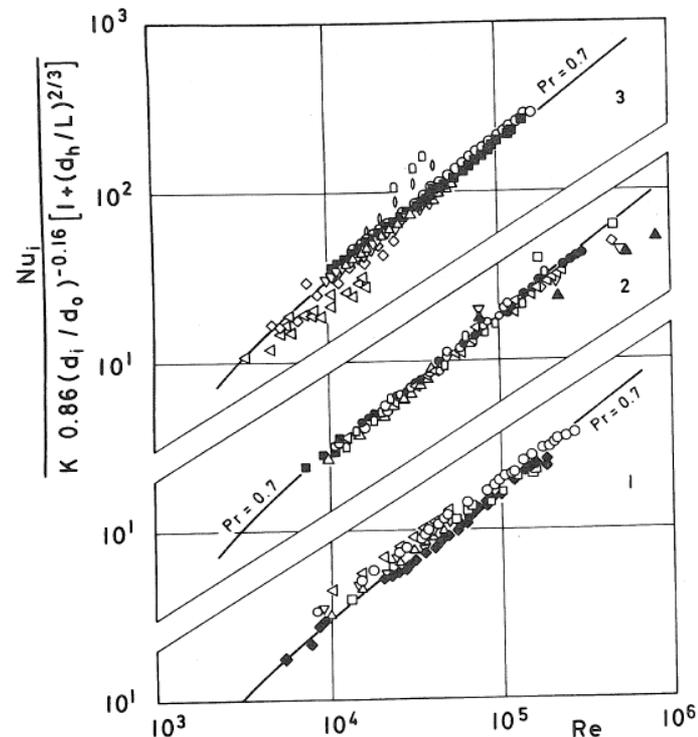
物性値は膜温度に基づく

$$Nu = Nu_G \times 0.86 \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^{-0.16} \times K$$

# 熱伝達係数の比較 (空気单相冷却時)



空気单相熱伝達相関式との比較

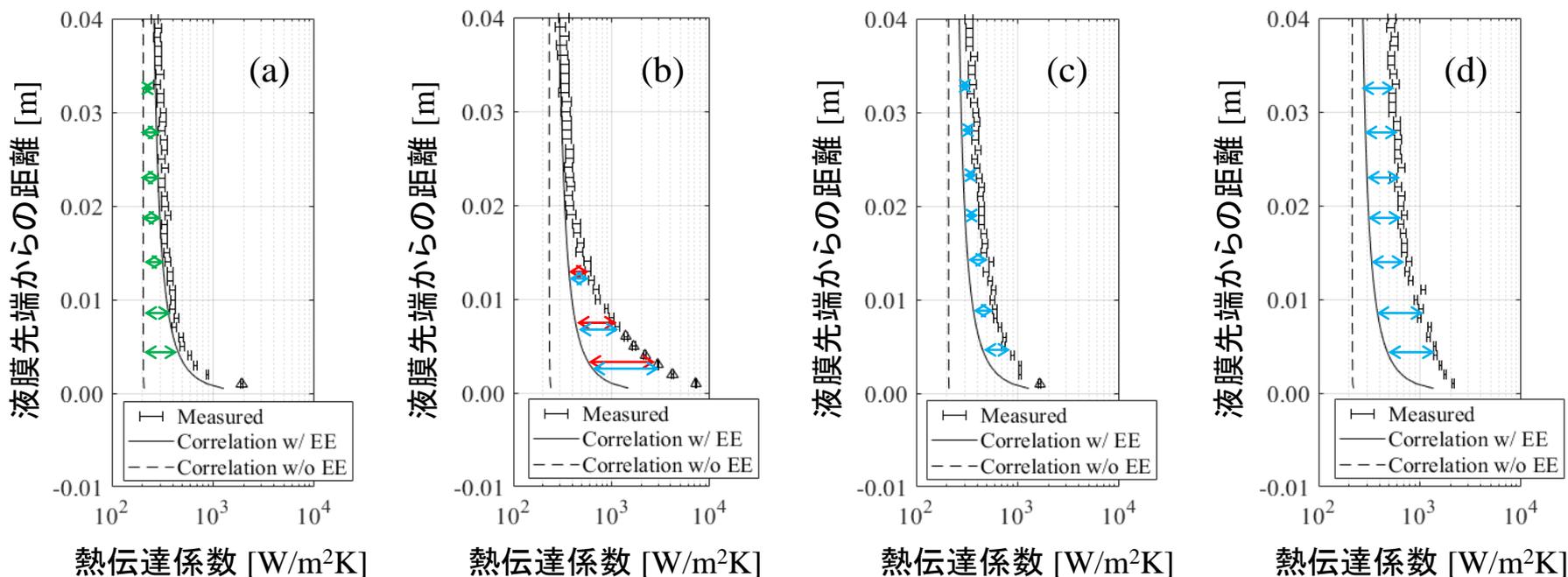


過去実験結果\*

- 過去の実験データと同程度のばらつきの範囲内で相関式と一致
- 空気单相における熱伝達係数は妥当な結果

\*Hemisphere handbook of heat exchanger design, G. F. Hewitt, Section 2.5.1 D

# 液膜先端近傍熱伝達係数(リウエット時)



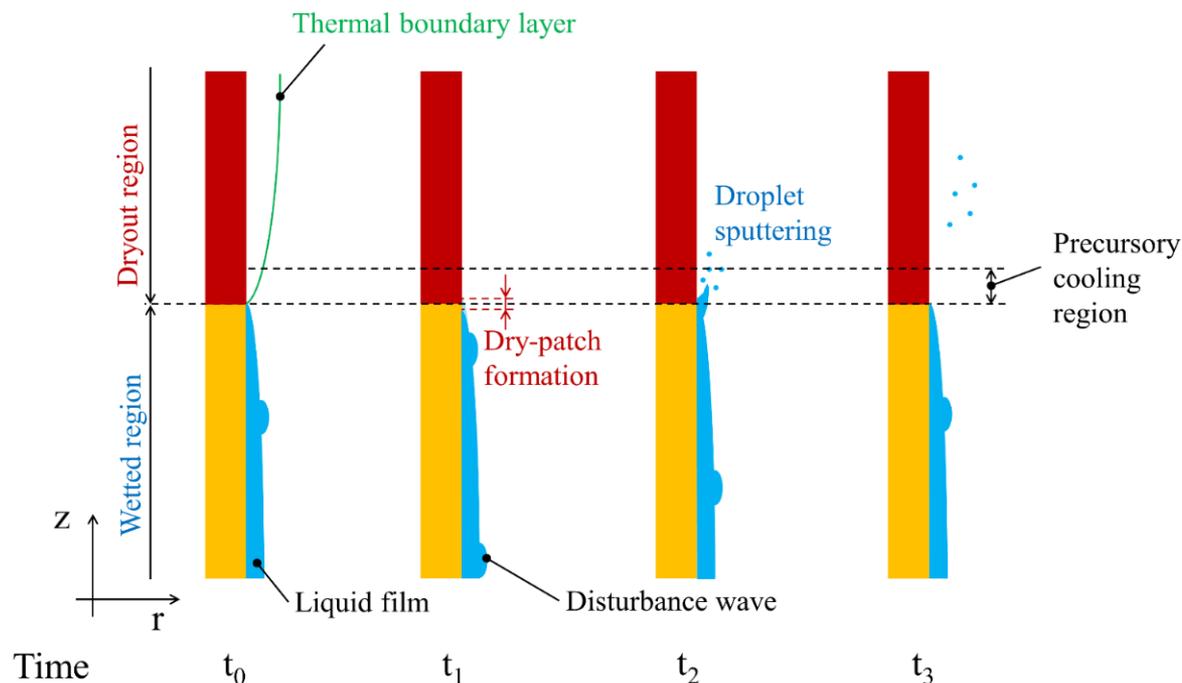
| 図記号 | $j_G$ [m/s] | $j_L$ [m/s] | $T_{ini}$ [°C] |
|-----|-------------|-------------|----------------|
| (a) | 65          | 0.014       | 400            |
| (b) | 65          | 0.014       | 250            |
| (c) | 65          | 0.054       | 400            |
| (d) | 65          | 0.130       | 400            |

Correlation: 気相单相熱伝達式

EE: 入口効果  $\left[ 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{2/3} \right]$

- (a): 相関式とよく一致 ← 水流量低・壁温高であり気相单相冷却に近い  
 ⇒ 入口(温度境界層未発達)効果を考慮することで実験値を良好に再現
- (b-d): 液膜先端近傍では気相单相熱伝達式に対して有意な差異が存在  
 ⇒ 壁温・飛散液滴等の乾き面熱伝達への影響を示唆

# 伝熱促進メカニズムの推察



## 液膜先端近傍での伝熱促進主要因子

- **伝熱面入口効果**: 温度境界層が薄いことによる伝熱促進効果
  - 別途CFDでも効果を確認
- **液滴等の衝突等**: 液滴等の乾き面への接近・衝突等による伝熱促進効果
  - 詳細計測・画像処理により液滴径・速度等のデータベースを構築中
- **ドライパッチ生成**: 高頻度の濡れ・乾き挙動による伝熱促進効果
  - 画像処理方法等の改良中

# まとめ

沸騰遷移後の伝熱メカニズム解明による熱伝達評価モデルの高度化、リウエット挙動評価の精度向上を目的とした、低圧可視化装置を用いた実験的研究を実施

## 主な結果

- リウエット時の液膜先端近傍では液滴が激しく飛散する特徴的な挙動を確認  
→ 乾き面冷却に寄与すると推察
- リウエット液膜先端では周期的な濡れ・乾き挙動を確認  
→ 液膜先端近傍での冷却に寄与すると推察
- 液膜先端近傍において、既存単相熱伝達相関式に過熱面への入口効果を考慮することで、気相単相冷却に近い条件での実験値を良好に再現

## 【参考文献】

- [1] 平成29年度原子力発電施設等安全調査研究委託費(軽水炉の事故時熱流動)事業に関する報告書、(2018).
- [2] 平成30年度原子力発電施設等安全調査研究委託費(軽水炉の事故時熱流動)事業に関する報告書、(2019).
- [3] Yuki Wada et al., "Liquid film behavior and heat-transfer mechanism near the rewetting front in a single rod air-water system", J. Nucl. Sci. Technol., 57, 1(2020), pp.100-113.  
(上記論文は第53回(2020年度)日本原子力学会賞論文賞を受賞)

# 今後の展開

---

## 実験に関して

- 圧力をパラメータとした実験 ← 圧力依存性評価のため
- 液膜・液滴挙動の詳細計測 ← 定量的評価のため

## モデル開発に関して

- 液滴移行等を考慮したモデルを検討
- 低圧実験で開発したモデルの高圧条件に対する適用性の検証のため別途実施している高圧体系での実験結果を利用
- 開発モデルのBEコードやサブチャンネルコードへの組み込みを検討

## 炉心熱伝達関連研究への適用

- スペーサ効果による液滴挙動等詳細計測
  - ← 本研究の可視化計測技術を適用