

ハニカム冷却技術による 超臨界圧軽水炉のIVR確立

森 昌司(九大), 岡本孝司(東大), 大川富雄(電通大), 劉維(九大)

研究期間: 令和元年4月 ~ 令和5年3月

本研究の背景と概要

過酷事故回避技術の高度化

福島第一事故と同様な状況
(電源すべて喪失)



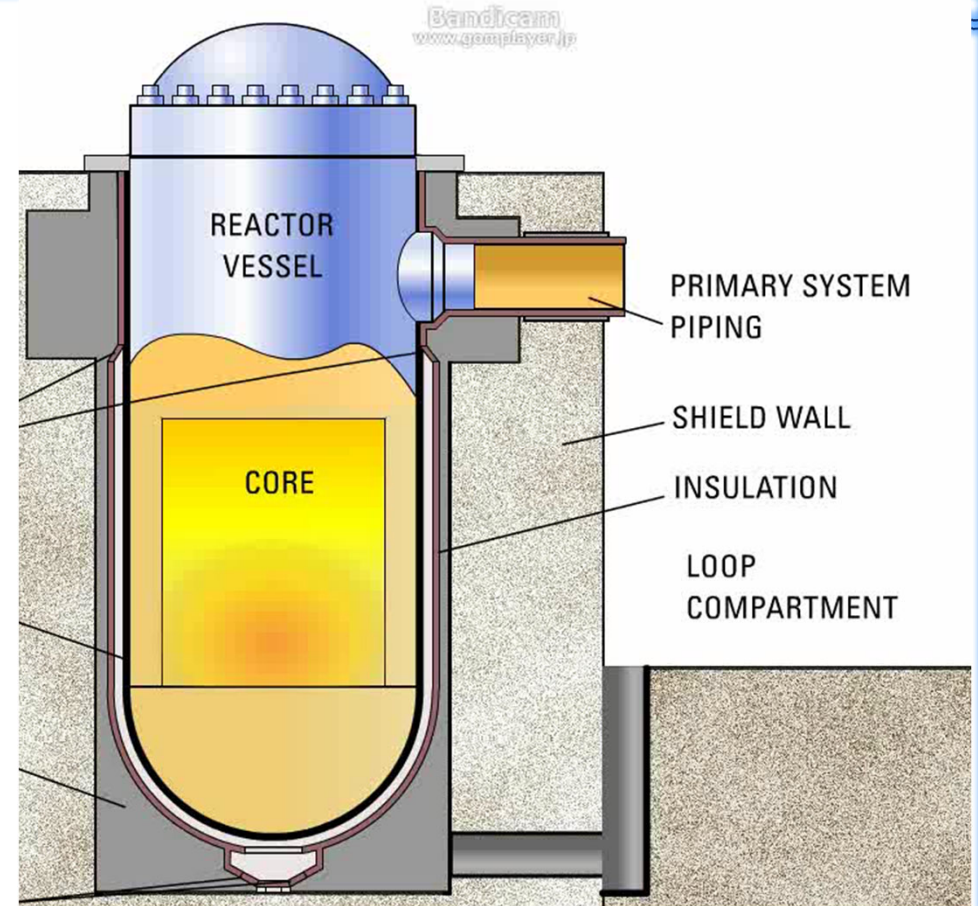
原子炉容器のメルトスルーの阻止



原子炉容器内保持システム
(IVR : In-Vessel Retention)

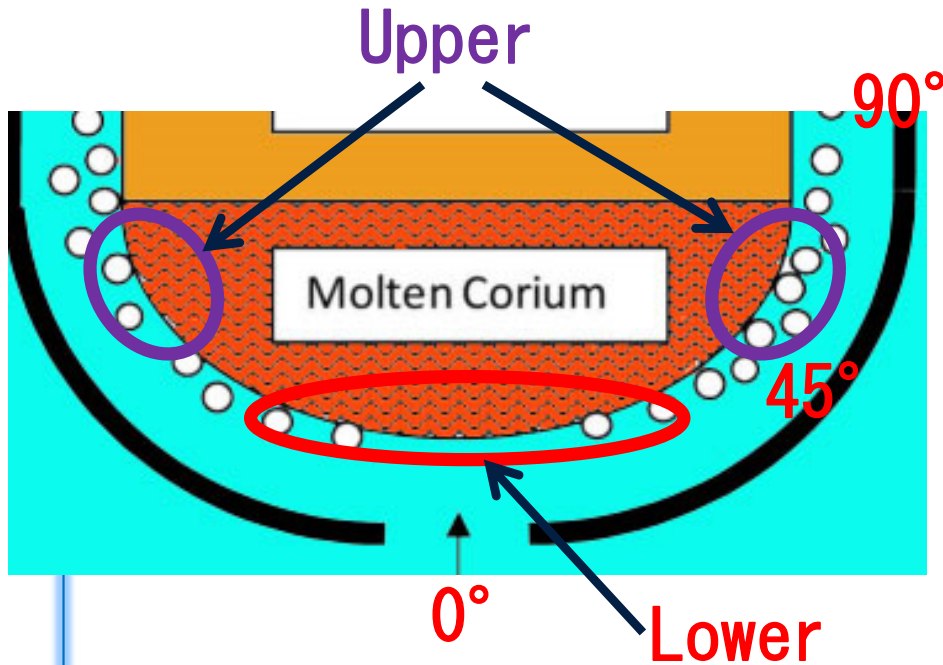


本研究開発では、
**超臨界圧軽水炉のIVRを
成立させる冷却手法を開発**



IVR システム概要

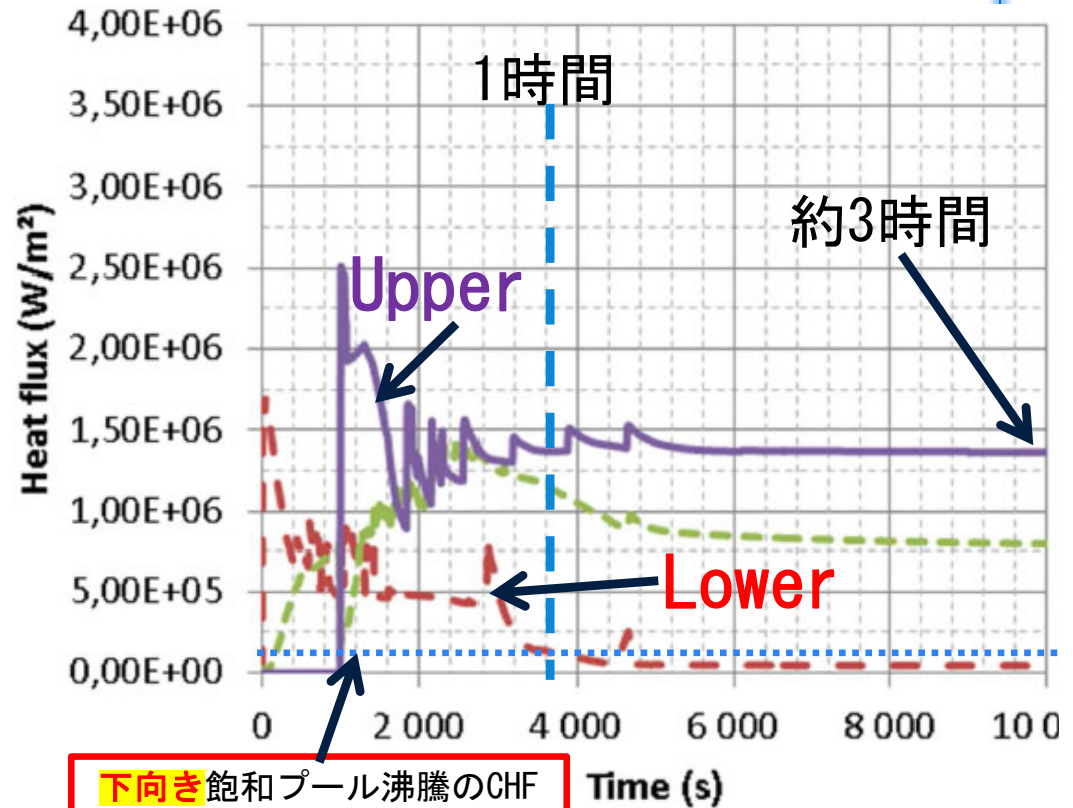
過酷事故時の原子炉容器表面の熱流束変動解析



実機で除熱性能が最も低いのは、蒸気滞留しやすい下向き伝熱面であり、冷却に失敗するとメルトスルーが発生

革新的な冷却手法の開発

(パッシブ・大伝熱面・高熱流束除去)



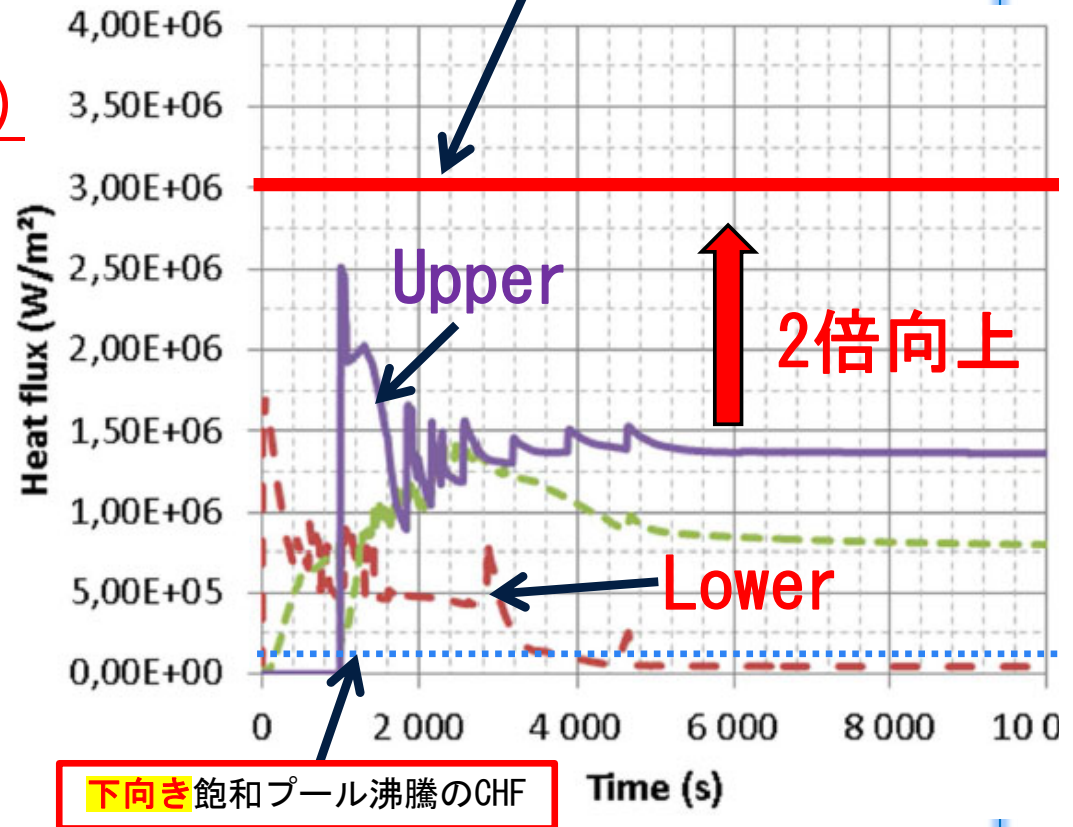
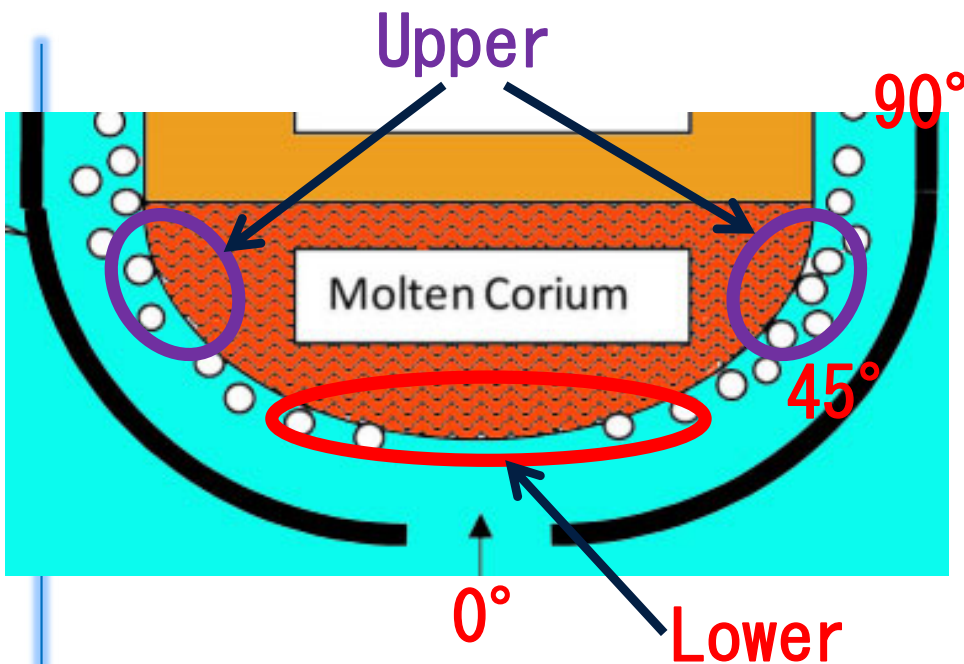
溶融炉心が下部プレナムへ到達後、**約1時間が非常に高い熱流束が持続**

L. Carénini, F. Fichot, The Impact of Transient Behavior of Corium in the Lower Head of a Reactor Vessel for In-Vessel Melt Retention Strategies, ICONE24@Charlotte.

研究開発目標

高熱流束除去（放射線下、下向き伝熱面）：3 MW/m²

➡ 新型IVRの実現（プール沸騰型）
（簡素化による安全性・経済性向上）



L. Carénini, F. Fichot, The Impact of Transient Behavior of Corium in the Lower Head of a Reactor Vessel for In-Vessel Melt Retention Strategies, ICONE24@Charlotte.

実施内容

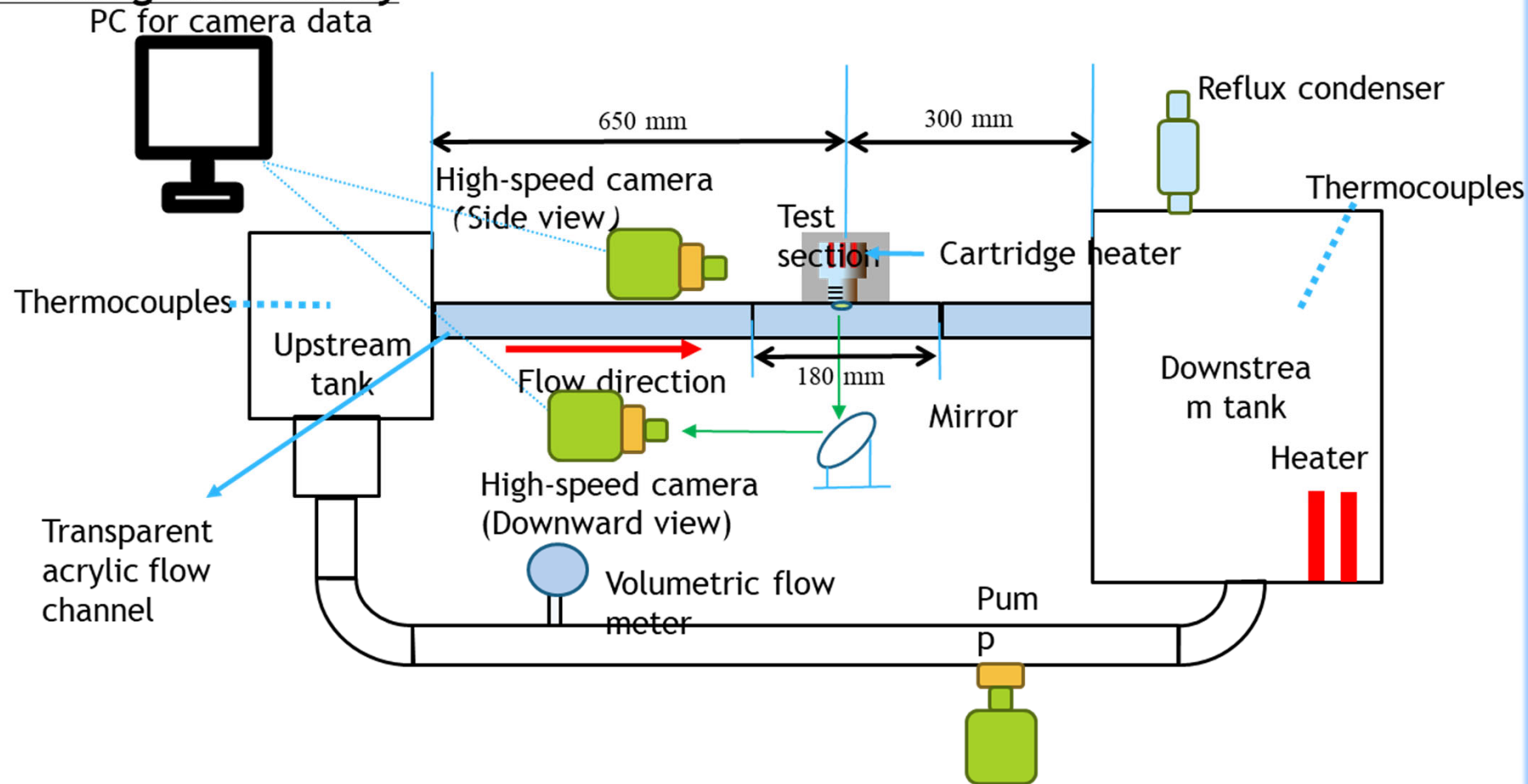
- (1) 放射線照射効果によるCHF劣化回避策（再委託先：東京大学）
- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発（九州大学）
- (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新（九州大学）
- (4) ナノ流体とHPPによるCHF向上メカニズムの解明・応用
（再委託先：電気通信大学）

実施内容

- (1) 放射線照射効果によるCHF劣化回避策（再委託先：東京大学）
- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
- (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新
- (4) ナノ流体とHPPによるCHF向上メカニズムの解明・応用
（再委託先：電気通信大学）

(1)放射線照射効果によるCHF劣化回避策（再委託先：東京大学）

Flow boiling Test facility



強制流動沸騰ループ（下向き加熱）

(1)放射線照射効果によるCHF劣化回避策（再委託先：東京大学）

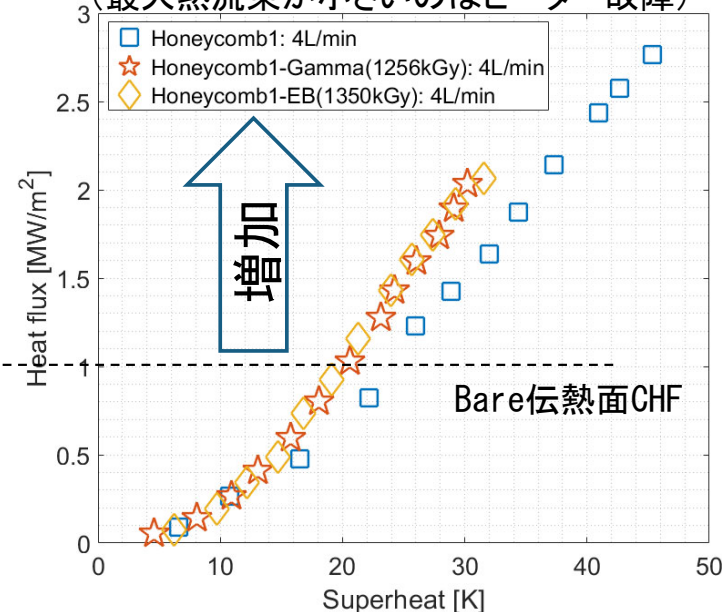
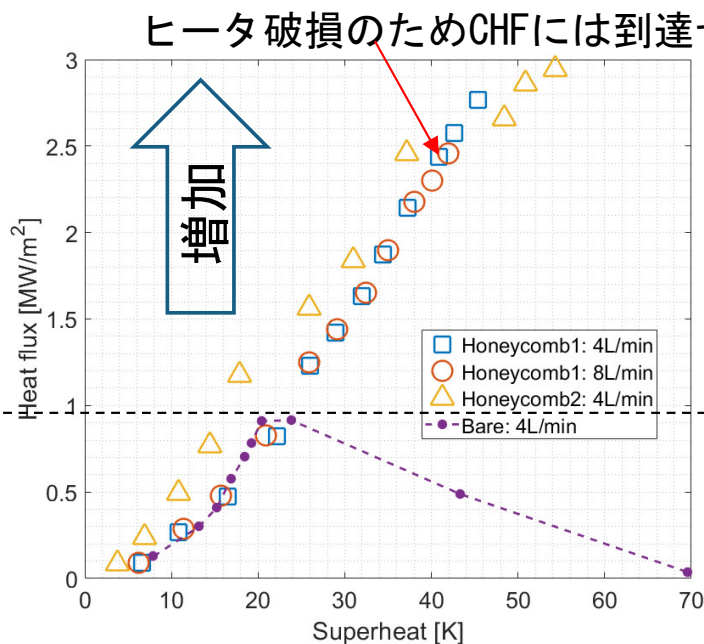
放射線照射により、限界熱流束（CHF：Critical Heat Flux）が劣化するという伝熱劣化現象が報告されている。本業務では、伝熱劣化現象の防止策を検討することを目的として、実験的研究を行った。具体的には、様々な伝熱面と、研究項目②で開発されたハニカム構造を持つ伝熱面について、量子科学技術研究開発機構において放射線照射を行うとともに、可視化を含む実験を実施した。

いずれもCHFに至らず

（最大熱流束が小さいのはヒーター故障）

下向き伝熱面：
20 x 20 mm
流路断面積：
W40 mm x H10 mm
流動沸騰条件：
4 L/min→0.17 m/s

パラメータ：
ハニカム
照射



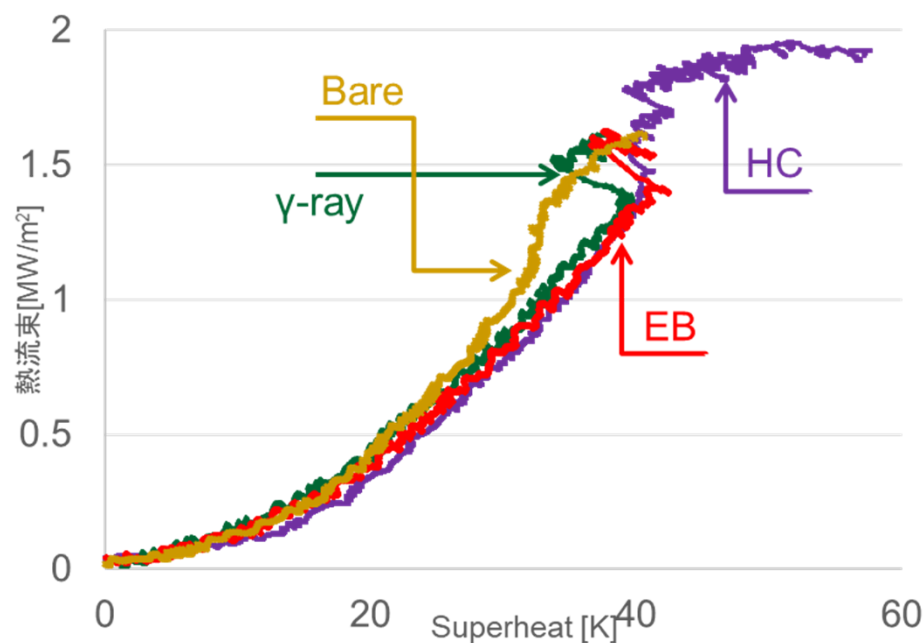
流動沸騰状態でハニカム設置により、CHFが3倍以上に大幅に増大した（CHFに至らなかった）

1MGy以上のγ線照射、電子線照射でも伝熱劣化は観測されず

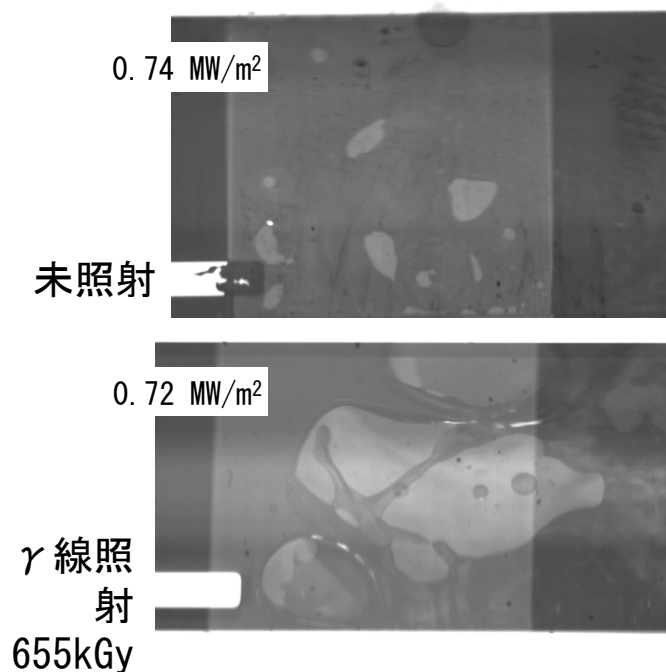
照射するとCHFは、ハニカムの方がBareより大

(1)放射線照射効果によるCHF劣化回避策（再委託先：東京大学）

15x15mm小伝熱面実験でもハニカムは照射してもCHFは劣化しないことを確認（照射しても劣化はBareと同程度）



透明伝熱面にγ線照射すると濡れ性が改善し沸騰核密度と沸騰気泡の大きさが変化しCHFが変化する



ハニカム構造を用いることで、伝熱劣化が回避できることを確認し、当初の目的（伝熱劣化回避策の提案）を達成した。
また、照射により濡れ性が変化し、沸騰核密度及び気泡大きさが変化しCHFが影響を受ける事を明らかにした。

実施内容

- (1) 放射線照射効果によるCHF劣化回避策（再委託先：東京大学）
- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
- (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新
- (4) ナノ流体とHPPによるCHF向上メカニズムの解明・応用
（再委託先：電気通信大学）

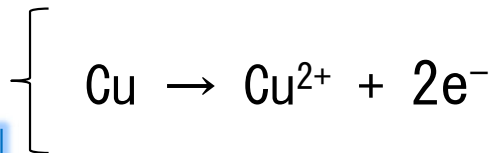
- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
 (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新

電解析出法

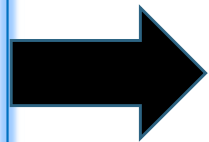
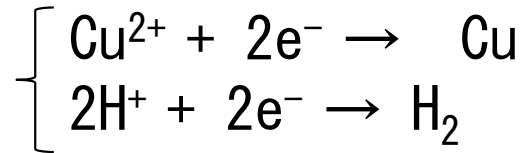
水溶液：硫酸銅 (0.4M) + 硫酸 (1.5M)

電極：銅

Anode



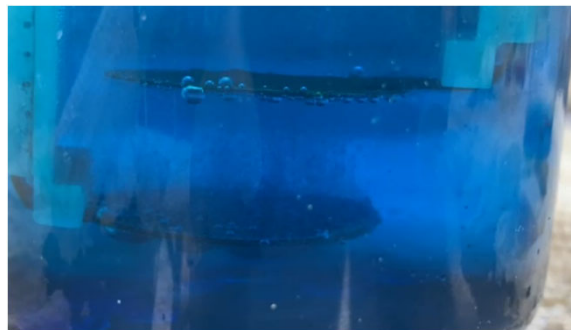
Cathode



多孔質構造

問題点

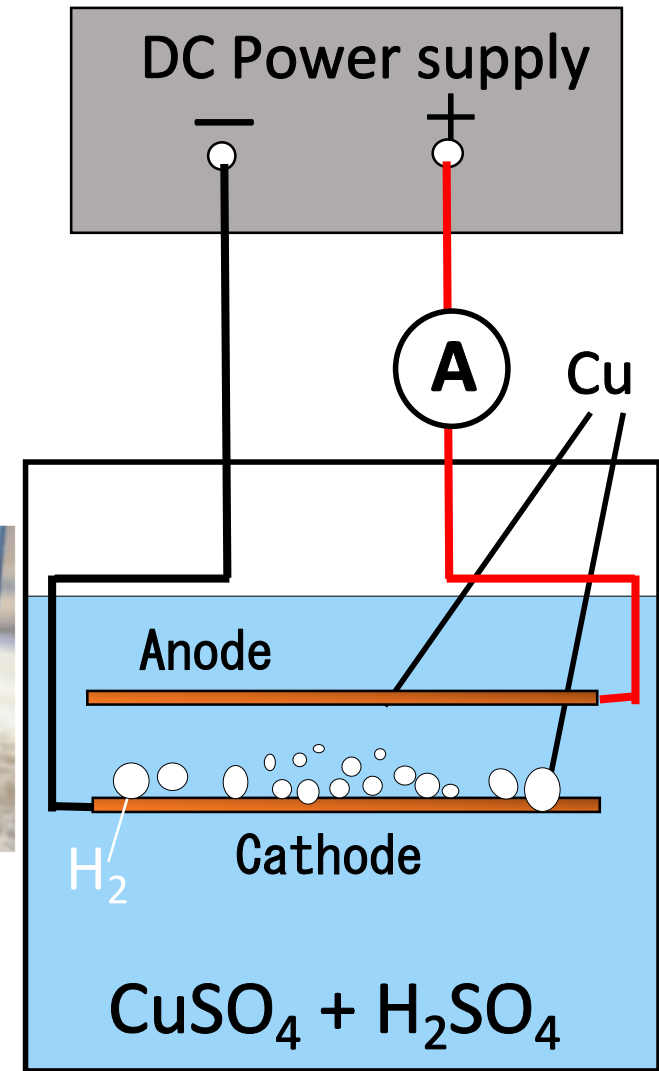
非常に脆い



改善策

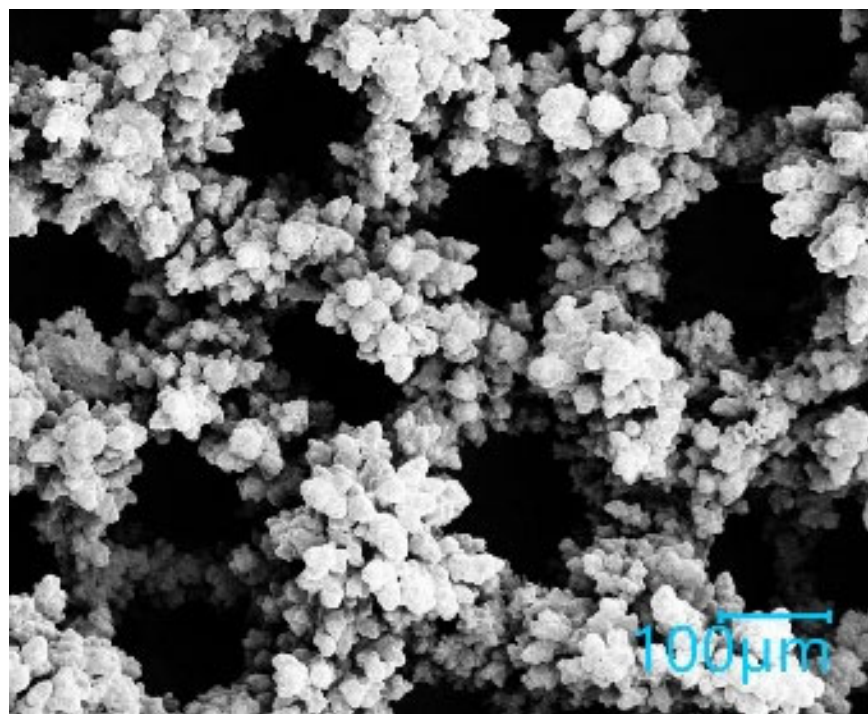
低電流析出 + 真空焼結

(0.3A--30min) (950°C--30min)

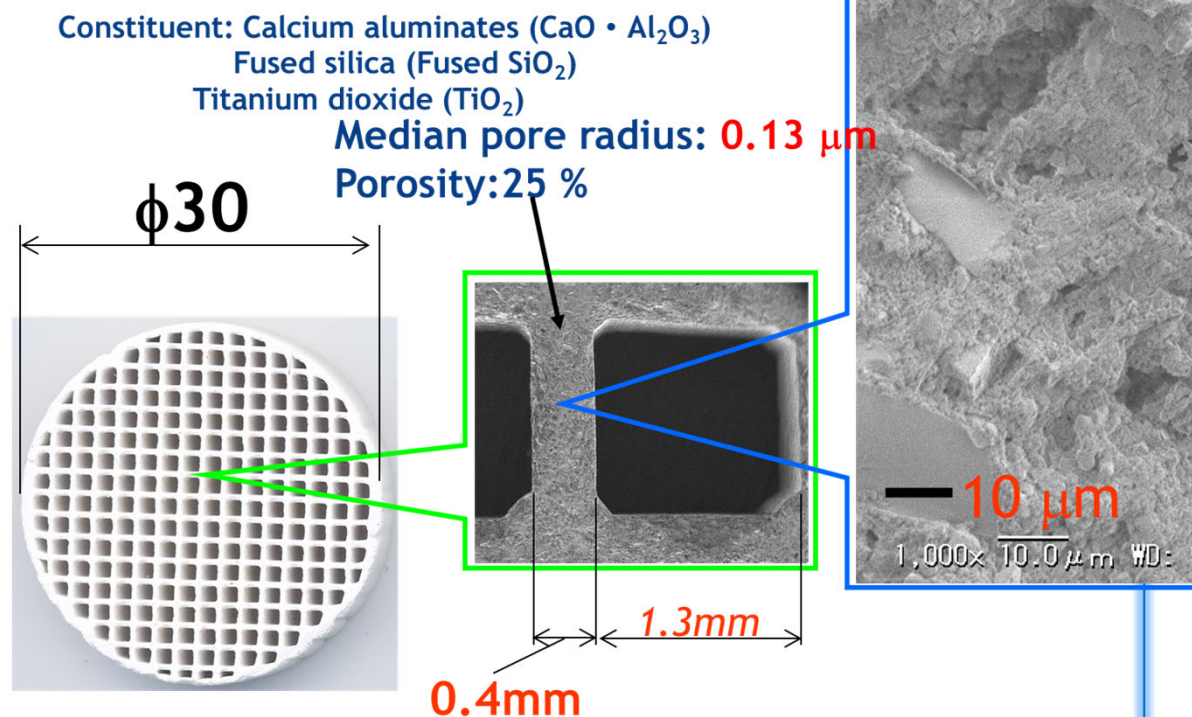


Heon-Cheol Shin · Meilin Liu, Chem. Mater. 2004, 16, 5460-5464

- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
(3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新



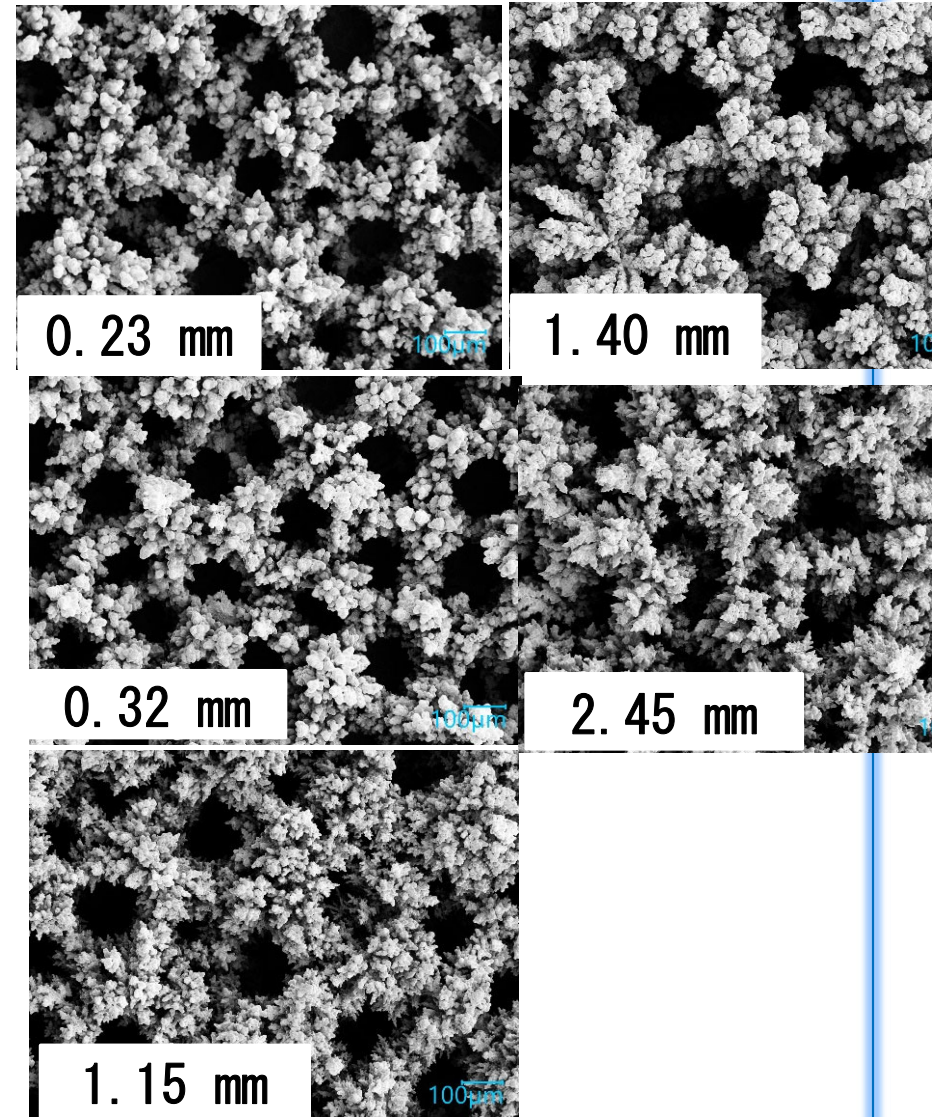
新規マイクロハニカム多孔質体
(電流値：3A, 2分、厚さ0.32 mm)



従来のハニカム多孔質体
(自動車の排ガス処理で利用)

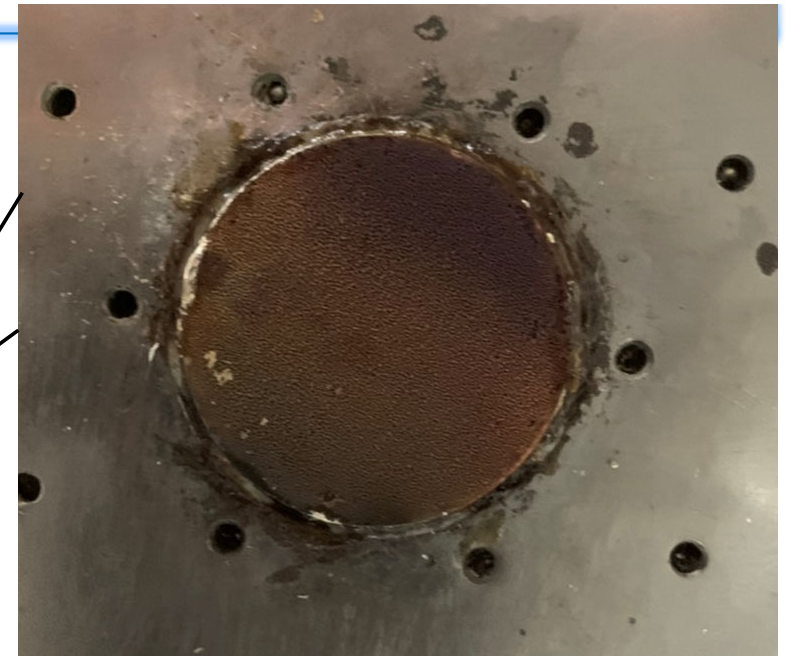
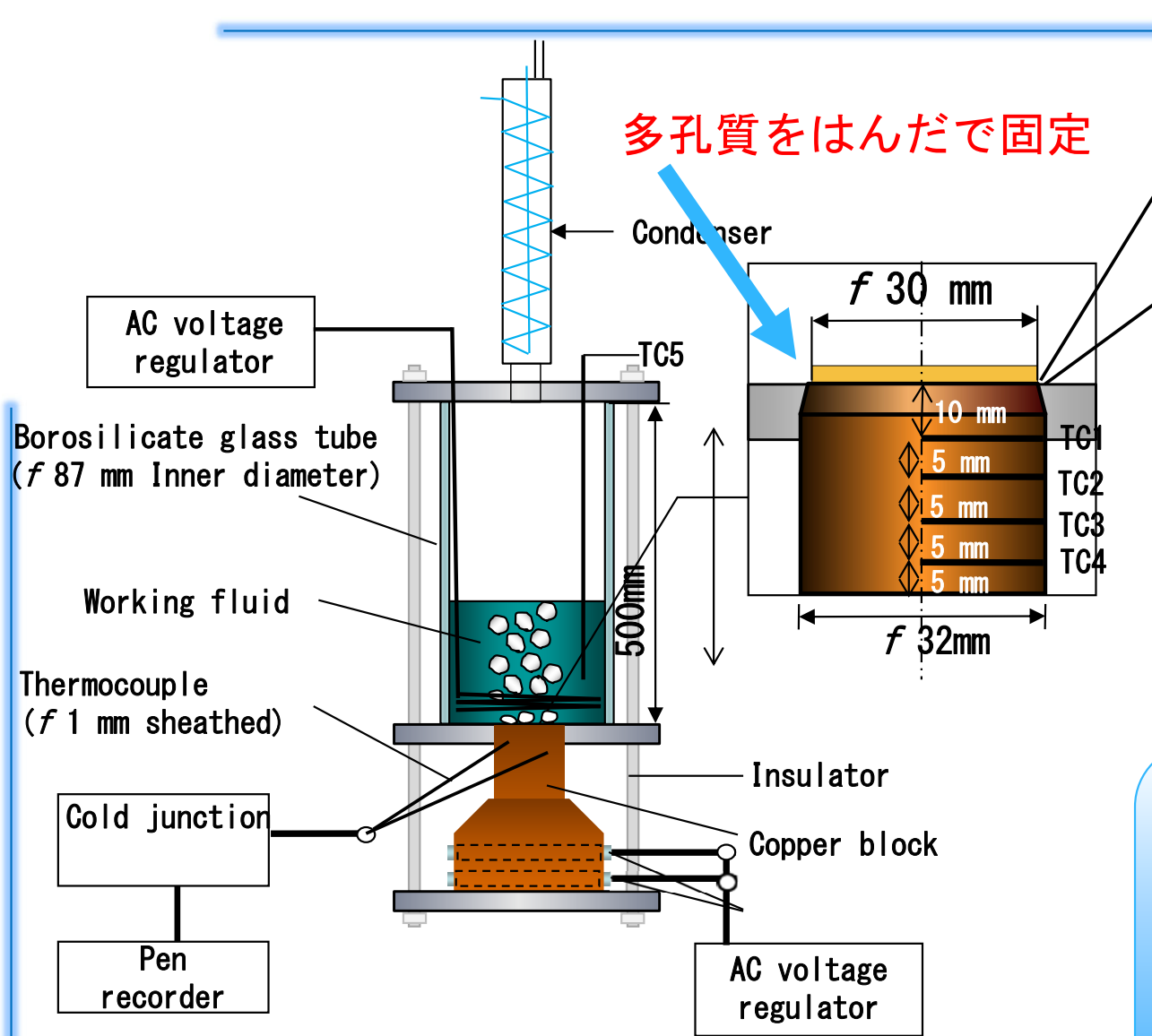
- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
 (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新

電流値 [A]	時間 [min]	厚さ [mm]	空隙率 [-]
3	1	0.23	0.91
	2	0.32	0.91
	5	1.15	0.93
	8	1.40	0.92
	16	2.45	0.92



電解析出の時間：大→厚さ：大

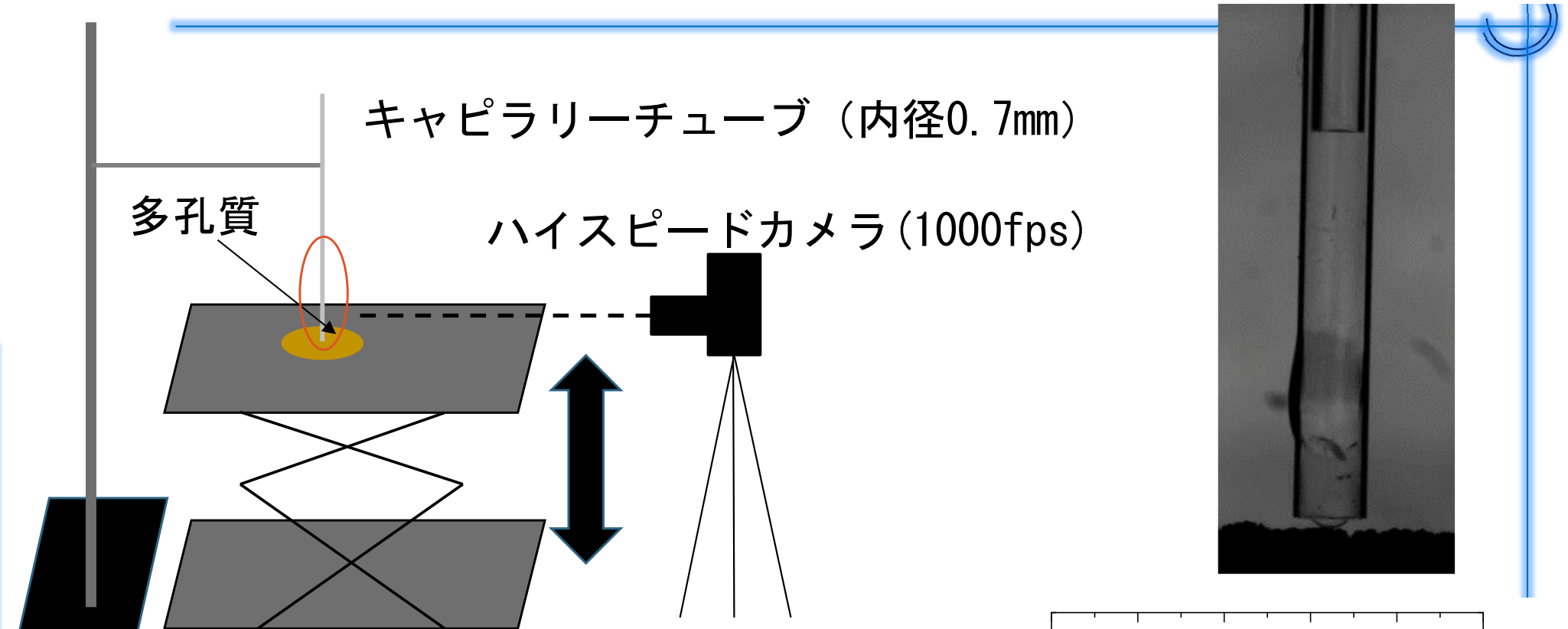
- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
- (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新



実験条件

作動流体：蒸留水
 サブクール度：0 K
 圧力：大気圧

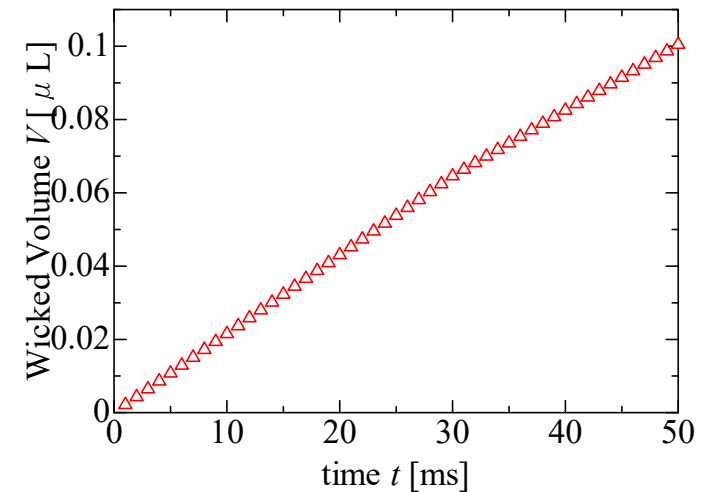
- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
 (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新



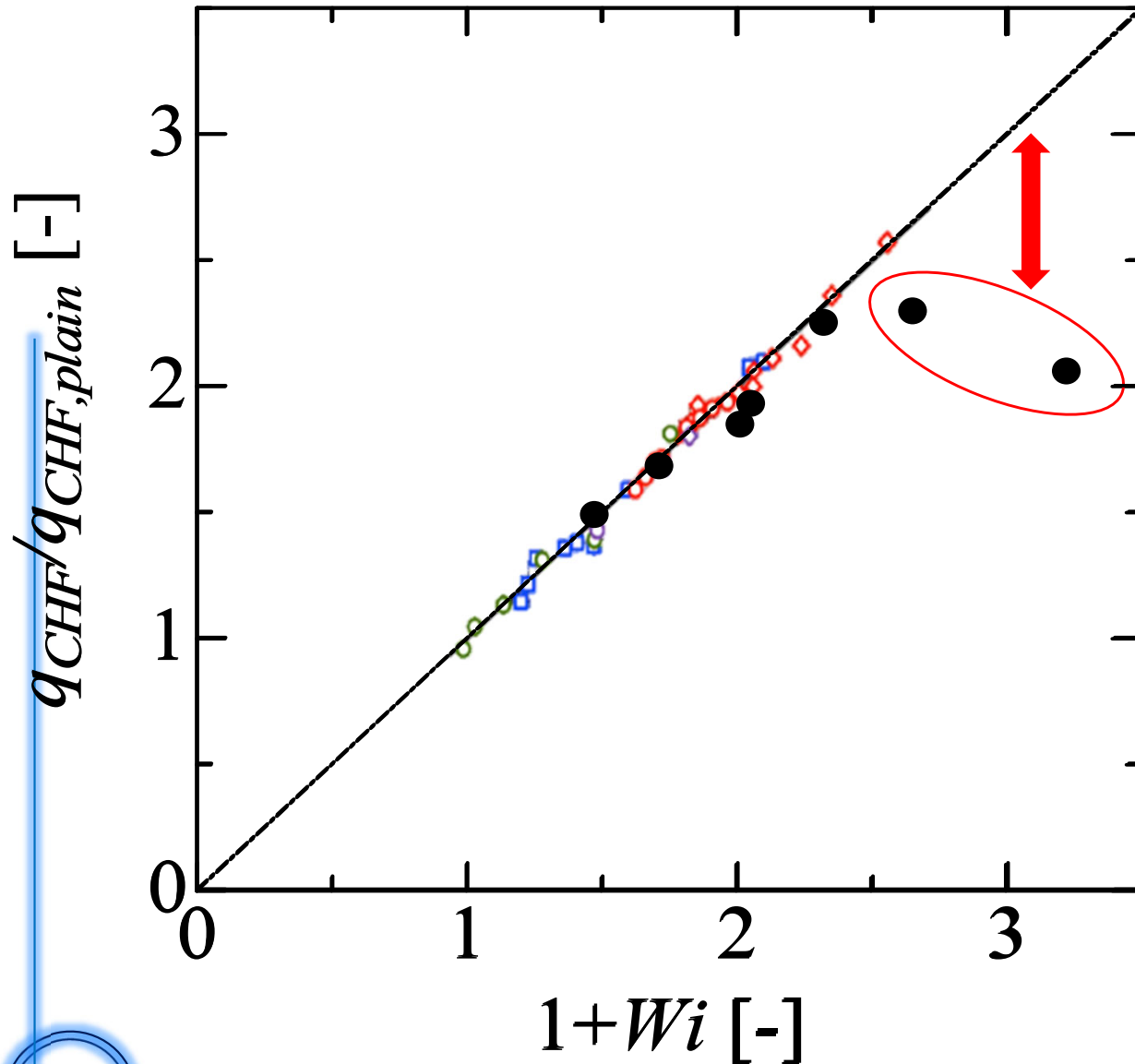
最大吸水量速度 V'' : $V'' = \frac{1}{A_W} \left(\frac{dv}{dt} \right)_{t=0}$

最大吸水量速度を無次元化したWickability :

$$W_i = \frac{V'' \rho_l}{\rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4}}$$

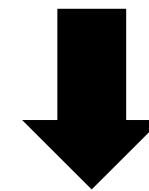


- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
- (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新



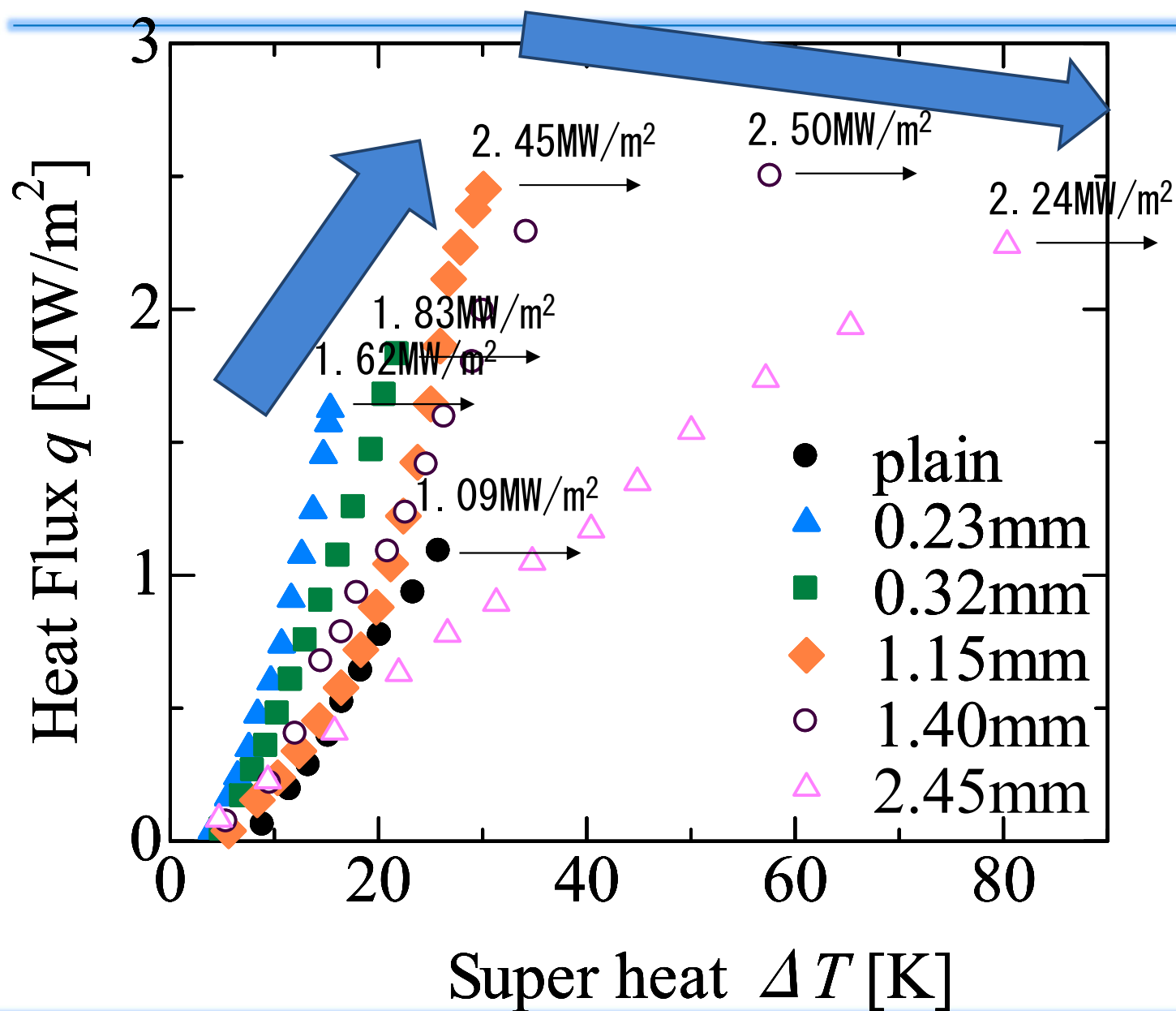
$$\frac{q_{CHF}}{q_{CHF,plain}} = 1+Wi$$

成立しない



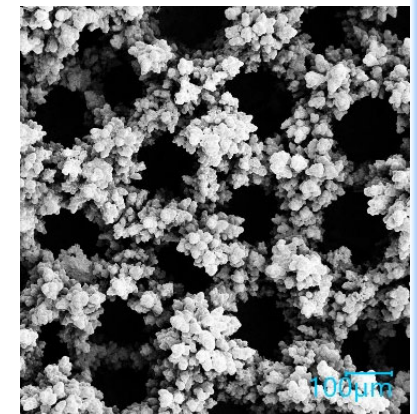
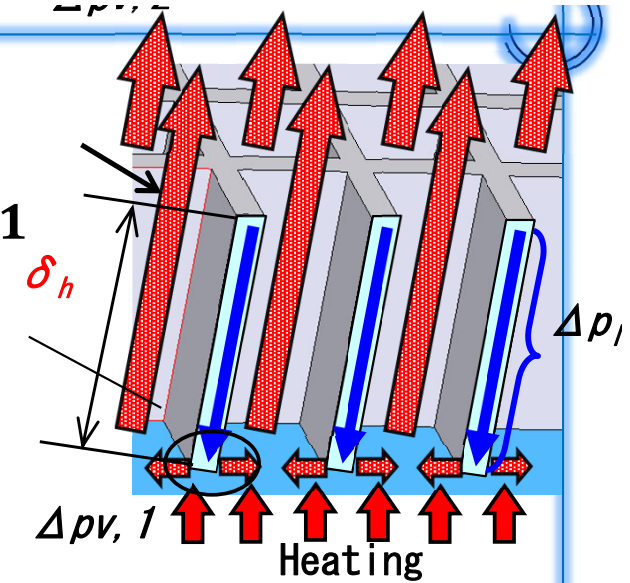
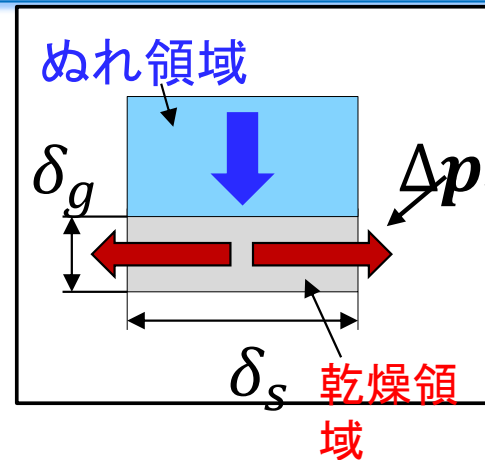
多孔質の吸水性能より
厚さ増加による損失増
加が影響!?

- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
- (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新



- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
 (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新

液供給能力の限界値 = 気液流の圧力損失の和



$$\Delta p_{c,max} = \Delta p_l + \Delta p_{v,1} + \Delta p_{v,2}$$

↑
ラプラスの式

↙ ↘
ダルシーの式

↑
ハーゲン・ポアズイユの式

$$\frac{2\sigma}{r_{eff}} = \frac{\mu_l Q_{max} \delta_h}{K A_w \rho_l h_{fg}} + \frac{\mu_v Q_{max} (\delta_s/2)^2}{2K A_w \rho_v h_{fg} \delta_g} + \frac{128\mu_v Q_{max} \delta_h}{n\pi d_v^4 \rho_v h_{fg}}$$

$$q_{CHF} = \frac{Q_{max}}{A} \quad (A : \text{伝熱面積})$$

σ : 表面張力 [N/m], r_{eff} : 有効細孔半径 [m], μ : 粘性係数 [Pa·s], δ_h : 構造体厚さ [m]

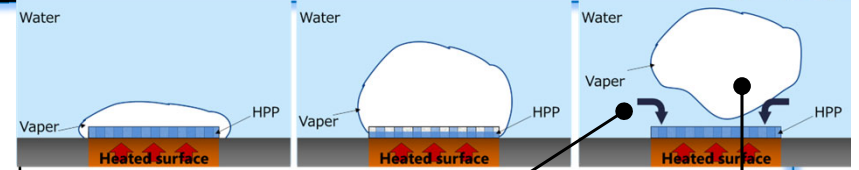
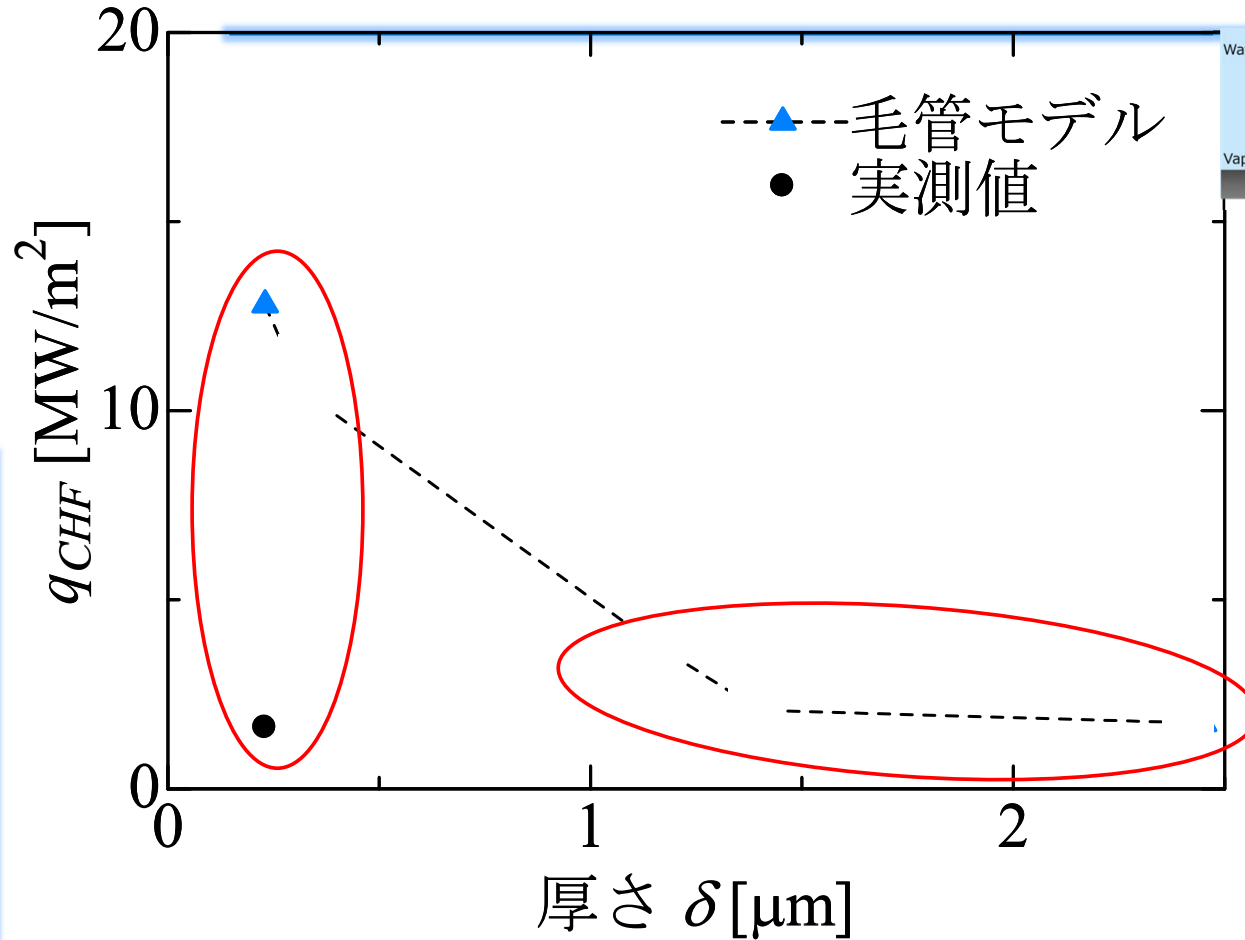
Q_{max} : 最大熱移動速度 [W], K : 透過係数 [m²], A_w : ハニカム多孔質体の断面積 [m²]

ρ : 密度 [kg/m³], h_{fg} : 蒸発潜熱 [J/kg], d_v : 蒸気排出孔直径 [m], n : 蒸気排出孔の個数

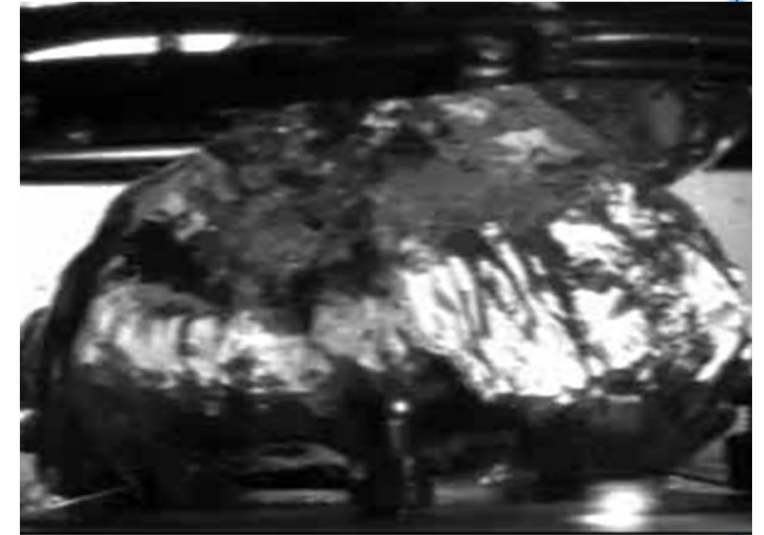
δ_s : 壁厚 [m], δ_g : 蒸気膜厚さ [m]

(2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発

(3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新



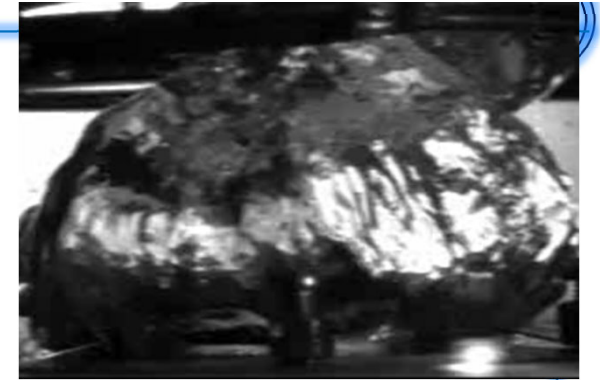
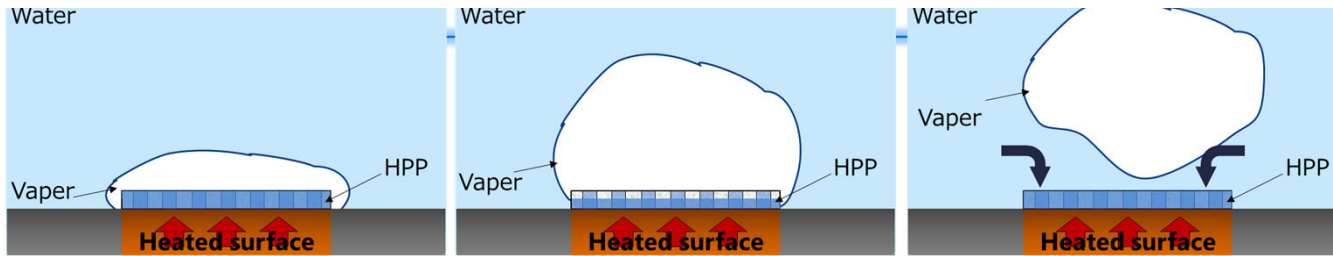
液流入 蒸気の離脱



毛管限界に起因して
限界熱流束に到達

液枯れに起因して
限界熱流束に到達した可能性

- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
 (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新



合体泡の離脱周期 τ_{d1} [s]

$$\tau_{d1} = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/5} \left[\frac{4(\xi\rho_l + \rho_g)}{g(\rho_l - \rho_g)}\right]^{3/5} v_1^{1/5}$$

$$(v_1 = \frac{\lambda_d^2 q}{\rho_g h_{fg}}, \lambda_d = 2\pi \sqrt{\frac{3\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}}, \xi = \frac{11}{16})$$

多孔質内の液体が消費するのに
要する時間 τ_{d2} [s]

$$\tau_{d2} = \frac{\varepsilon A_w \delta_h \rho_l h_{fg}}{q_{CHF} A}$$

$\tau_{d1} \approx \tau_{d2} \rightarrow$ 液枯れあり

$\tau_{d1} \ll \tau_{d2} \rightarrow$ 液枯れなし

δ [mm]	τ_{d1} [s]	τ_{d2} [s]
0.23	0.14	0.19
0.32	0.15	0.22
1.15	0.15	0.50
1.40	0.16	0.79
2.45	0.15	1.19

$\delta = 0.23, 0.32$ [mm] : $\tau_{d1} \approx \tau_{d2}$



液枯れに起因して限界熱流束に到達

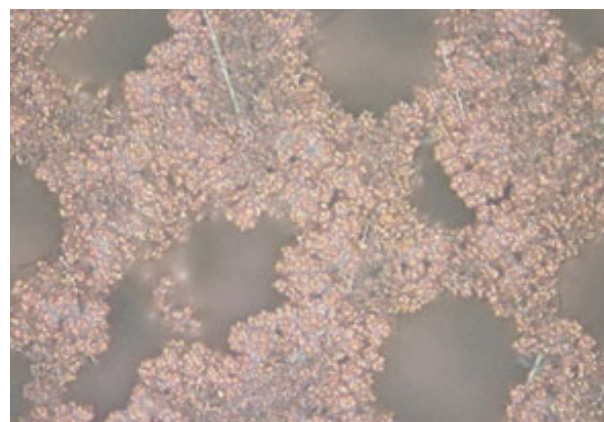
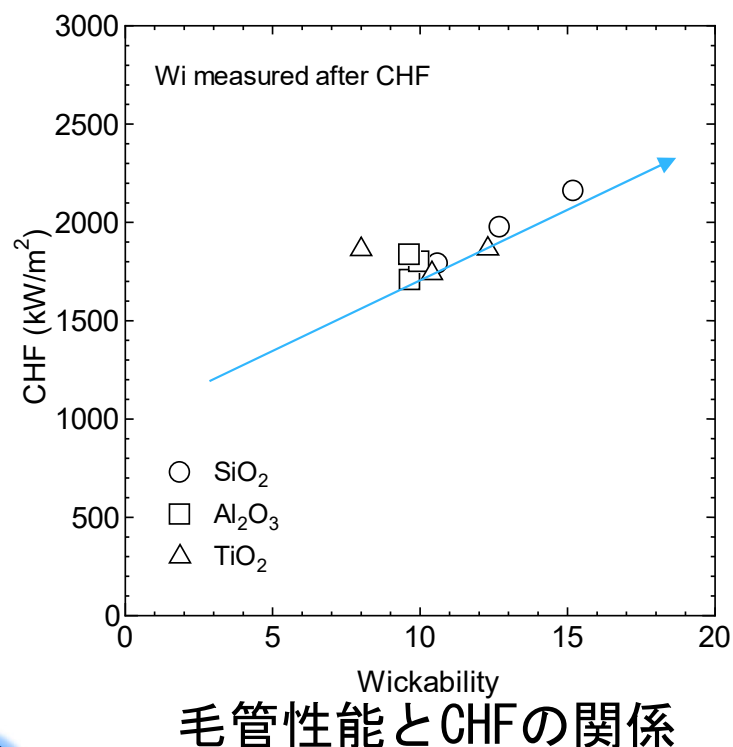
実施内容

- (1) 放射線照射効果によるCHF劣化回避策（再委託先：東京大学）
- (2) 電解析出法を用いた金属多孔質内部のナノ細孔構造制御手法の開発
- (3) HPP内部構造の微細構造制御による下向き大伝熱面のCHF向上技術の革新
- (4) ナノ流体とHPPによるCHF向上メカニズムの解明・応用
（再委託先：電気通信大学）

(4) ナノ流体とHPPによるCHF向上メカニズムの解明・応用 (再委託先：電気通信大学)

ナノ粒子の素材及び濃度を様々に変更してCHFを計測したところ、毛管力に優れ、かつ付着強度の強いナノ粒子層が形成される条件で、より高いCHFが達成されることを明らかにした。

HPPとナノ流体を併用して沸騰実験を実施したところ、セラミック製HPPと金属製HPPの両方で、ナノ粒子の付着は顕著ではなく、また、HPPの毛管性能の変化も無視し得る程度であった。



CHF実験後のHPP（金属製）の観察結果

CHFの向上に有効なナノ流体の選定法を明らかにするとともに、HPPと併用した際に目詰まり等の課題も無視し得る程度であることを示した。

【成果の新規性】

1. 放射線照射効果によるCHF劣化現象を発見し、そのメカニズムを解明した点。
2. 開発したハニカム冷却技術は、超大伝熱面・高熱流束除去に適用可能なオンリーワンの冷却技術で、電解性出法による高性能な新規ハニカム多孔質体を開発した点。5 MW/m²の超高熱流束除熱に成功した成果は学術的にも極めて意義が高い。
3. ナノ流体プール沸騰において、限界熱流束及び熱伝達率が変化するメカニズムを解明し、蒸留水中の限界熱流束が伝熱面材料の熱伝導率により変化することを実験的に示すとともに、そのメカニズムも解明した点。

【研究効果】

世界中のすべての軽水炉にも適用可能で『過酷事故回避技術の高度化』に大きな寄与があり、1Fの教訓を踏まえた**革新的原子力システムの安全基盤技術の向上に多大に貢献**

他の技術分野への波及効果

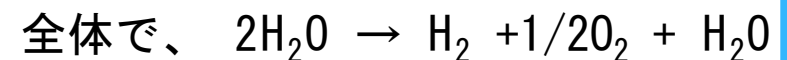
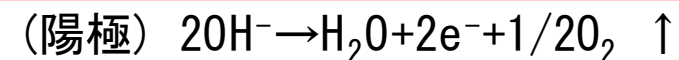
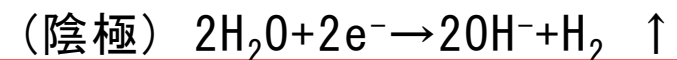
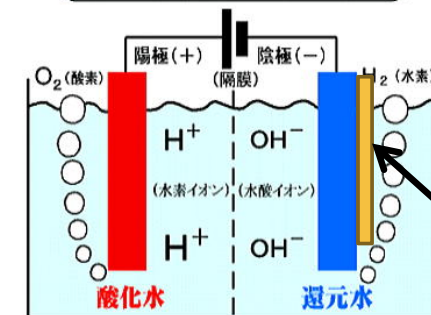
工学的

- ・ 電子機器の冷却、**データセンタ**などの熱機器の**無動力冷却**
(本手法により、データセンタの外気直接冷却が実現すれば、25.7億kWh (119万ton-CO₂) 削減可能)
- ・ ハイブリッドカー、電気自動車、燃料電池車などの**車載用インバーターの冷却**
(高発熱密度・大面積を冷却できる技術は現状存在しない)
- ・ アルカリ水電解の**水素生成効率の飛躍的な向上**
(**極限物質生成技術**)

学術的

- ・ **熱と物質の相似性**を活用したHPP技術による**極限冷却技術から極限物質生成技術への応用**
- ・ 多孔質体**内部の相界面現象の基礎学理**や**最適化技術**を**深化**させることで幅広い学問分野へ貢献

水の電気分解の原理(酸化還元反応)



HPPによるアルカリ水電解の高効率化

7. 成果の外部発表

<論文発表>10件、<口頭発表>35件

8. 関連研究の国内外の状況

過酷事故時、IVR時の圧力容器表面での熱流束分布に不確実性



現状、圧力容器の設計された部分がメルトスルーする設計

本プロジェクトで開発した技術：

IVR時の熱流束分布の不確実性以上に冷却能力を上げることが可能



メルトスルーを阻止する革新的な技術として適用可能

9. 今後の課題・方向性

過酷事故時のシナリオ

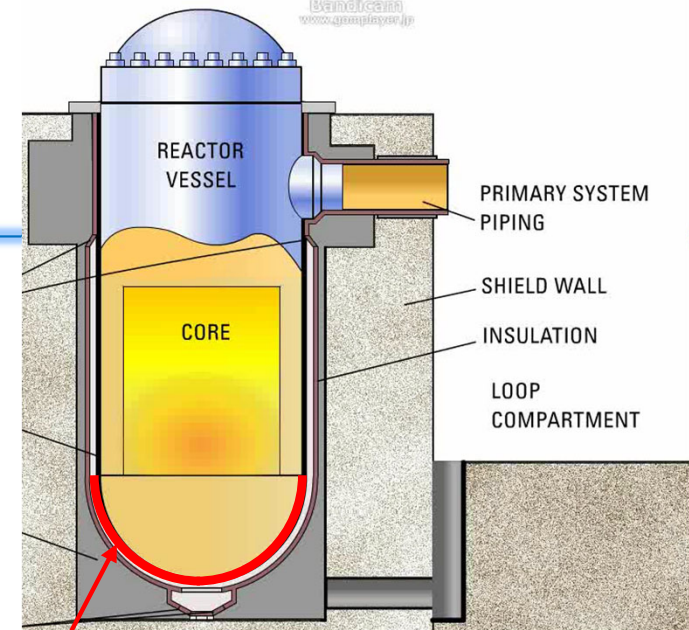
原子炉容器の水没が遅れ、
原子炉容器が高温になった場合



B) 高温となった原子炉容器を**短時間で冷却**
(原子炉容器壁の溶融を最小限に!)
～膜沸騰から核沸騰への遷移促進～



A) 原子炉容器表面の高熱流束除去
～核沸騰域～



ハニカム多孔質体を事前に設置

B) 高温体の急速冷却技術

A) 高熱流束除去技術
(A-2 令和元年～4年度公募研究)

9. 今後の課題・方向性

A) 高熱流束除去技術 + B) 高温体の急速冷却技術

両立 ↓

重要なポイント

A) と B) の全く異なる冷却を、
一つのパッシブな冷却手法で達成できるか！？

10. その他

本テーマで研究に興味を持った日本人1名が、博士課程に進学することとなり、今後も原子力分野の人材を継続的に育成していきたい。