

令和4年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

ハニカム冷却技術による
超臨界圧軽水炉の IVR 確立

成果報告書

令和5年3月

国立大学法人 九州大学

本報告書は、文部科学省の原子力システム研究開発事業による委託業務として、国立大学法人九州大学が実施した令和元年度—令和4年度「ハニカム冷却技術による超臨界圧軽水炉の IVR 確立」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	vi
1. はじめに	1
2. 業務計画	4
2.1 全体計画	4
3. 業務の実施内容及び成果	6
3.1 放射線照射効果による CHF 劣化回避策（再委託先：東京大学）【R1-R4】	6
3.2 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【R1-R4】	23
3.2.1 金属多孔体性状と作製条件の明確化【R1-R3】	23
3.2.2 製作した金属多孔質体の耐久性・強度に関する検討【R3-R4】	23
3.3 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【R1-R4】	28
3.3.1 二層構造 HPP の CHF モデルの構築による HPP 構造の最適化とその実証【R1-R4】	28
3.3.2 CFD をベースとした沸騰二層流解析手法の開発及び HPP 近傍沸騰二相流解析 【R1-R4】	33
3.4 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）	60
3.4.1 ナノ粒子層の性状と CHF の関係の明確化【R1-R4】	60
3.4.2 HPP 内部にナノ粒子が目詰まりしないメカニズムの解明【R2-R4】	67
3.4.3 まとめ	71
3.5 研究推進	72
4. 結言	73

表一覧

表 2.1-1	年度別全体計画	4
表 3.3-1	HPP 底面と伝熱面との距離の流体輸送に及ぼす効果に関する計算ケース	36
表 3.3-2	伝熱面配置角度効果計算ケース	38
表 3.3-3	各ケースにおける気泡挙動	39
表 3.4-1	ナノ流体中での核沸騰による HPP 透過性能の変化	70

図一覧

図 1	ハニカム多孔質体	vi
図 2	放射線照射による CHF 劣化	vi
図 3	伝熱面設置角度の影響	vii
図 4	HPP の実機への適用例 (プール沸騰型 IVR システムの構成図)	viii
図 5	HPP による CHF の向上の原理 (上向き伝熱面)	viii
図 1-1	ハニカム多孔質体	1
図 1-2	放射線照射による CHF 劣化	2
図 1-3	伝熱面設置角度の影響	2
図 3.1-2	強制流動沸騰実験装置の概略図	6
図 3.1-1	強制流動沸騰実験装置の写真	6
図 3.1-3	試験ブロックの寸法	7
図 3.1-4	放射線照射による CHF 変化 (銅)	9
図 3.1-5	放射線照射による CHF 変化 (アルミ)	9
図 3.1-6	放射線照射による CHF 変化 (炭素鋼)	10
図 3.1-7	放射線照射による CHF 変化 (銀)	10
図 3.1-8	ハニカム構造における沸騰曲線	11
図 3.1-9	ハニカム構造における放射線照射後の沸騰曲線	12
図 3.1-10	温度履歴の例 (15x15mm 伝熱面 (HC))	13
図 3.1-11	伝熱面サイズ 15×15 mm における沸騰曲線	14
図 3.1-12	伝熱面サイズ 10×20 mm における沸騰曲線	15
図 3.1-13	伝熱面サイズ 10×30 mm における沸騰曲線	15
図 3.1-14	サファイアガラス (左:表、右:裏)	17
図 3.1-15	サファイアガラスの沸騰曲線	18
図 3.1-16	サファイアガラスの沸騰様相	18
図 3.1-17	ITO 膜伝熱面における照射と CHF	19
図 3.1-18	ITO 膜面における沸騰曲線	20
図 3.1-19	非照射状態における沸騰様相 (50 V : 0.68 MW/m ²)	20
図 3.1-20	ガンマ線照射後 (176 kGy) の沸騰様相 (50 V : 0.67 MW/m ²)	21
図 3.1-21	ガンマ線照射後 (728 kGy) の沸騰様相 (50 V : 0.50 MW/m ²)	21
図 3.1-22	電子線照射後 (33 kGy) の沸騰様相 (50 V : 0.70 MW/m ²)	21
図 3.2-1	電解析出装装置概略	24
図 3.2-2	電解析出時の様子	25
図 3.2-3	真空炉	25
図 3.2-4	沸騰実験装置概要	26
図 3.2-5	沸騰曲線	26
図 3.3-1	二層構造ハニカム多孔質体	29
図 3.3-2	二層構造ハニカム多孔質体を用いた場合の沸騰曲線	29
図 3.3-3	二層構造ハニカム多孔質体を用いた場合の熱流束と熱伝達率の関係	30

図 3.3-4	Wi の計測生データ.....	31
図 3.3-5	Wi と CHF 向上比の関係.....	32
図 3.3-6	HPP を設置した時の壁近傍流れの特性.....	42
図 3.3-7	HPP の構造.....	43
図 3.3-8	有効半径 R_s の毛細管内における液柱の上昇（液柱平衡高さは heq ）.....	43
図 3.3-9	HPP 底面と伝熱面間との距離の効果に関する解析の計算体系.....	44
図 3.3-10	計算セル分割.....	45
図 3.3-11	境界条件設定.....	45
図 3.3-12	多孔質体空隙率及び粘性抵抗の入力.....	46
図 3.3-13	HPP 下部 2 セル分の多孔質体における体積力の入力.....	47
図 3.3-14	y 軸中心断面におけるボイド分布（Case2）.....	48
図 3.3-15	HPP の上面、側面及び底面における流入流出流量の時間変化（Case1）.....	49
図 3.3-16	HPP 底面からの流出流量及び water bottom 部への流入流量の時間変化 （Case1）.....	49
図 3.3-17	HPP 底面からの流出流量の比較（Case1 及び Case2）.....	50
図 3.3-18	Bottom water 部への流入速度の比較（Case1 及び Case2）.....	50
図 3.3-19	伝熱面平均温度の比較（Case1 及び Case2）.....	51
図 3.3-20	全解析領域における蒸気量変化の比較（Case1 及び Case2）.....	51
図 3.3-21	伝熱面配置角度効果解析の計算体系（配置角度 0° 時）.....	52
図 3.3-22	伝熱面配置角度効果解析のメッシング.....	53
図 3.3-23	伝熱面配置角度効果解析の境界条件設定.....	53
図 3.3-24	伝熱面配置角度 Case1（上向き 0° ）における気泡挙動.....	54
図 3.3-25	伝熱面配置角度 Case2（垂直 90° ）における気泡挙動.....	55
図 3.3-26	伝熱面配置角度 Case3（下向き 135° ）における気泡挙動.....	56
図 3.3-27	伝熱面配置角度 Case4（下向き 175° ）における気泡挙動.....	57
図 3.3-28	伝熱面配置角度 Case5（下向き 180° ）における気泡挙動.....	58
図 3.4-1	実験装置（ナノ粒子の素材及び濃度の影響検討用）.....	61
図 3.4-2	伝熱ブロック.....	61
図 3.4-3	実験装置（伝熱面材質の影響検討用）.....	62
図 3.4-4	沸騰曲線（伝熱面材質の影響検討用）.....	64
図 3.4-5	粒子濃度の変化に伴うナノ粒子層の毛管力と CHF の変化.....	65
図 3.4-6	CHF の毛管力依存性.....	65
図 3.4-7	伝熱面の材質等が CHF に及ぼす影響.....	66
図 3.4-8	ハニカム多孔質体（HPP）を設置した場合の沸騰曲線.....	68
図 3.4-9	HPP の外観観察結果（左：実験前、右：実験後）.....	69

略語一覧

CHF	: Critical Heat Flux (限界熱流束)
CFD	: Computational Fluid Dynamics (数値流体力学)
DDS	: Deposition + low current Deposition + Sintering (電解析出に低電流を合わせて析出させ, その後真空焼結を 組み合わせて作製した多孔質層)
DS	: Deposition + Sintering (電解析出と真空焼結を組み合わせて作製した多孔質層)
HPP	: Honeycomb Porous Plate (ハニカム多孔質体)
HTC	: Heat Transfer Coefficient (熱伝達率)
ITO	: Indium Tin Oxide (透明導電膜, 酸化インジウムスズ)
IVR	: In-Vessel Retention (炉心熔融デブリ炉内保持技術)
ONB	: Onset Nucleate Boiling (核沸騰開始)
SEM	: Scanning Electron Microscope (走査型電子顕微鏡)
Wi	: Wickability (吸水性能を表す無次元数)

記号一覧

A_w	有効濡れ面積
g	重力
G	質量流束
h	熱伝達率
I	電解析出電流
q	熱流束
T	温度
T_s	平均温度
T_{sat}	飽和温度
ΔT	過熱度
V	体積
Ra	算術平均粗さ
Rq	二乗平均平方根粗さ
V_o''	吸水体積流束
Wi	Wickability
ギリシャ文字	
λ	熱伝導率
σ	表面張力
ρ	密度
τ	電解析出時間

概略

2030年から2050年の間に運転年数60年を超える既設軽水炉は、我が国をはじめ世界で約270基に上り、これらのリプレース需要に加え、アジアや中近東の原子力新規導入国などの新設需要も拡大すると予想される。これらの世界的な需要に対し、原子力の国際展開、特に日本独自の原子炉である超臨界圧軽水炉の開発を進めることは、世界のエネルギーの安定供給と地球温暖化問題への貢献とともに、我が国の経済成長の観点からも極めて重要である。これら日本の原子力技術の継続的な持続・発展のためには過酷事故時におけるIVR技術（原子炉容器を水中に丸ごと水没させ冷却する手法。）の開発は、極めて重要な技術開発の1つである。そこで、図1のHPPを伝熱面に装着するというシンプルでIVRに適用可能な新しい冷却法を提案し、これまでの研究より、以下の重要な知見を得た。

- ① 放射線照射下における下向き流動沸騰において限界熱流束（以下、CHFと略記。）劣化現象を発見した（図2参照）。
- ② ナノ流体とHPPの組み合わせにより上向き伝熱面CHFの大幅な向上に成功した（従来比320%の向上、 3.2 MW/m^2 ）。
- ③ HPPによる下向き伝熱面の大幅なCHF向上を達成した（図3参照）。

現状の喫緊の課題は、放射線照射によるCHF劣化現象を解明することである。現状のCHF予測設計式は、放射線照射効果を考慮していないため、それも加味した検討は重要である。また、過酷事故時の安全防護策として開発中のIVR技術の成立性にも大きな影響を与える。そのIVR技術には、下向き・大伝熱面・高熱流束除去を安定して達成できることが必須である。必要除熱流束は 3 MW/m^2 が下向き伝熱面で除去できればシステム構成が簡易なプール沸騰（図4参照）によるIVRが期待できるものの、現状では下向き伝熱面において 3 MW/m^2 の除熱をすることは極めて困難である（図3）。加えて曲率を持った圧力容器底部にHPPを設置する必要がある、大地震などの過酷状況下においてもHPPが圧力容器から外れない設置法も念頭においた開発が必要である。

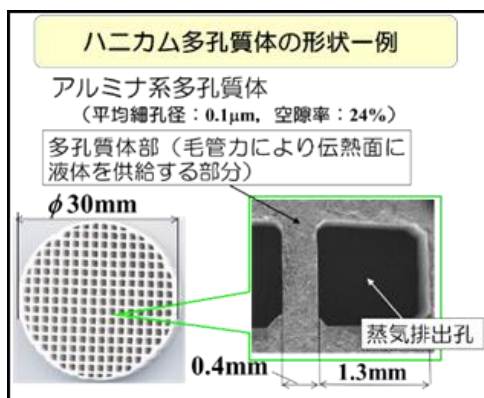


図1 ハニカム多孔質体

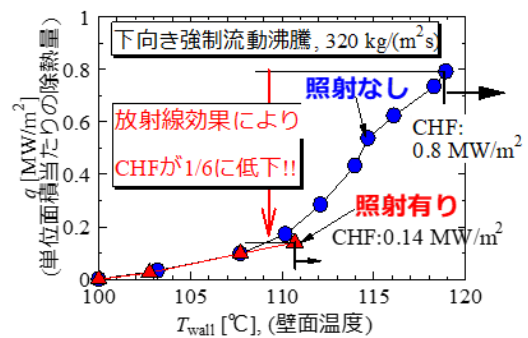


図2 放射線照射によるCHF劣化

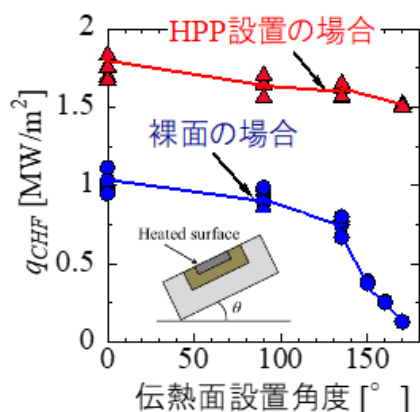


図3 伝熱面設置角度の影響

上記で述べた背景を踏まえ、IVR技術のモックアップ試験に進むためには、放射線照射効果によるCHF劣化を回避可能な方策を検討する必要がある。放射線環境下にある炉心やIVRにおいても、CHF低下を阻止する伝熱面性状を明らかにし、それに加え独自の発想によるハニカム冷却技術を高度化することで、その放射線照射効果によるCHF劣化を阻止するどころか、飛躍的なCHFの向上を目指す。

したがって、本課題における達成目標を以下の通りとする。

『放射線照射効果によるCHF劣化を回避し、放射線照射下の下向き大伝熱面CHFを3.0 MW/m²以上に向上させる冷却技術を確立すること』

具体的には、以下の課題を実施する。

- ① 放射線照射効果によるCHF低下の検討及びCHF劣化防止策の開発
- 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

上記を達成するためには、異分野間(熱流体工学、材料科学及び原子力工学)の連携が不可欠である。

放射線照射効果による大幅なCHF劣化現象は、これまで報告がなく、原子炉の安全性、さらにはIVRの成立性にも大きな影響を与えるもので、そのメカニズムを解明しておくことは必須である。一方、CHF劣化対策としてCHF向上技術の開発も重要なテーマで、伝熱面の微細構造を制御し飽和プール沸騰のCHF向上の研究がある。特に原子炉容器底部のような超大伝熱面・高熱流束除去に適用できる冷却技術は、HPP技術以外に存在しない。本事業で提案するHPPを用いるとCHFが大伝熱面でも大きく向上する原理は、以下の通りである。図5に示すように、プール水中の発熱面上にHPPを設置し加熱するとHPP底部には気液相変化に伴いメニスカスが形成される。加熱によりそのメニスカス部が蒸発すると強烈な毛管力(毛管圧力は、細孔径が0.1 μmの場合、1 MPaにも達する。)で伝熱面に液体が供給される。

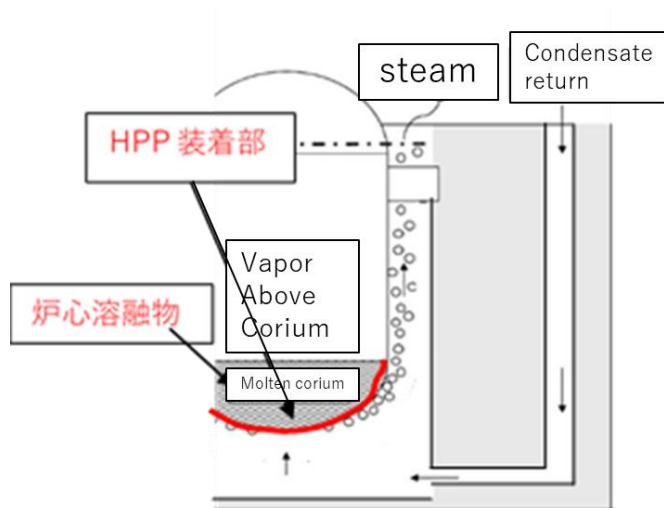


図4 HPPの実機への適用例
(プール沸騰型 IVR システムの構成図)

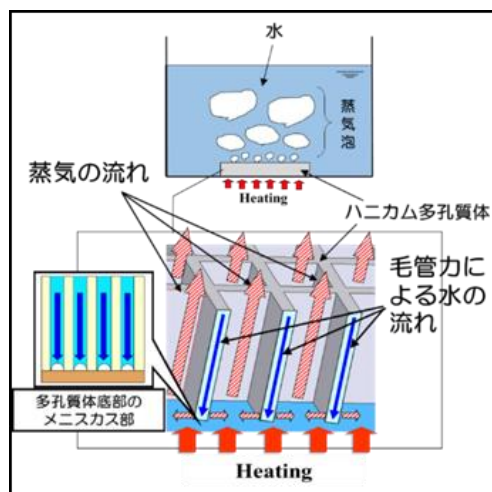


図5 HPPによるCHFの向上の原理
(上向き伝熱面)

それと同時に、伝熱面近傍で発生した蒸気を迅速にマクロ孔（蒸気排出孔）から排出させる。その結果、気液の循環が一次元的に促進させられるため、大伝熱面においても CHF が向上する。本手法は従来手法と全く異なり、無動力・簡易・安価で高熱流束の大伝熱面積を冷却できる。このような HPP のマイクロ構造（毛管力）とマクロ構造（蒸気の排出口）をうまく組み合わせ、CHF を大きく向上させた冷却手法は極めて少なく、特徴的な点である。

以上を踏まえ、本業務では、原子力プラント安全性向上のための炉心溶融デブリ炉内保持 (IVR) 技術の実現を目指し、放射線照射効果が沸騰冷却の限界低下に与える効果を検討して、その冷却性能低下を阻止する手法を開発するとともに、HPP を用いた下向き伝熱面の革新的冷却手法を導入することで、実機条件を模擬した放射線照射下においても超臨界軽水炉の IVR の限界性能を飛躍的に向上させる手法を開発するため、(1)放射線照射効果による CHF 劣化回避策、(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、(5)研究推進を実施する。全体計画は表 2.1-1 に示す通りである。以下に各研究テーマ別に目的、実施内容、研究成果、及び令和 4 年度への見通しについて概略を述べる。

(1) 放射線照射効果による CHF 劣化回避策では、令和 2 年度に引き続き、放射線照射による伝熱劣化現象に関する実験を進めるとともに、メカニズムを明らかにした。併せて、実機における評価を行った。具体的には、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進めた。特に、ITO 膜などを用いた照射実験について検討を進めた。

(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では、金属多孔質体形状と作製条件を明確にするために電解析出法により金属多孔質体を作製して確認し、それら金属多孔質体の Wickability（動的な濡れの性能）を測定しつつ、一様多孔質体の CHF を測定した。さらに二層構造 HPP を伝熱面に直接金属ハニカム多孔質体を形成する技術を開発した。また、製作した金属多孔質体の耐久性・強度に関する検討に関しては実機条件の耐久性・強

度を検証するための実験条件・手法を IVR メーカーの 1 つである三菱重工業などとディスカッションして検討し、予備試験を実施した。

(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 向上技術の革新では、二層構造 HPP の CHF モデルの構築による HPP 構造の最適化とその実証を行うために理論モデルをベースに二層構造 HPP の最適化を行い、(2)の電解析出法で開発した手法を用いて伝熱面に直接金属ハニカム多孔質体を形成した。さらに CFD をベースとした沸騰二相流解析手法の開発及び HPP 近傍沸騰二相流解析においては、HPP による CHF 向上要因の 1 つとして、HPP の毛管力により水を加熱面近傍へ提供し、それにより加熱面近傍での蒸気量が減少し、また、よりスムーズに加熱面近傍から蒸気を除去できることが考えられる。このような HPP の CHF の向上メカニズムを理解するために、令和 3 年度は 1 セルの HPP を模擬し、沸騰流動解析の試計算を実施した。試計算において、高熱流束の条件も考慮し、必要に応じて沸騰モデルの改良を行った。

(4) ナノ流体と HPP による CHF 向上メカニズムの解明・応用では、ナノ粒子層の性状と CHF の関係を明確にするために様々な条件で製作した伝熱面を用い、その上に HPP を設置した場合としない場合の両方で沸騰実験を実施し、沸騰熱伝達率と限界熱流束を調べた。令和 2 年度に取得したナノ粒子層の性状に関する実験結果と照合して、ナノ粒子層厚さや表面粗さ等がナノ粒子層の形成による沸騰熱伝達特性に及ぼす影響を定量化した。さらに、各因子の影響より、ナノ粒子層の形成により沸騰熱伝達率に変化を生じるメカニズムを検討した。特に、CHF の向上を実現する上で、最も高い CHF 向上効果が得られるナノ粒子層の作成手法を明らかにした。さらに HPP 内部にナノ粒子が目詰まりしないメカニズムを解明するために、ナノ粒子の付着が最も顕著と考えられる条件を含めて複数の実験条件でナノ粒子を付着させた HPP の内部に水を流した。HPP 内における水の流動状況より透過係数を算出し、ナノ粒子の付着が HPP の透過係数に及ぼす影響を検討した。以上の手続きを通して得られた実験情報より、ナノ粒子の材質や濃度が HPP の透過係数に及ぼす影響を明らかにした。

(5) 研究推進では、研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にし、(1)から(4)の研究成果を総合してハニカム冷却技術の IVR への適用性を評価できるよう、情報の共有化に努めながら研究を進めた。

1. はじめに

2030年から2050年の間に運転年数60年を超える既設軽水炉は、我が国をはじめ世界で約270基に上り、これらのリプレース需要に加え、アジアや中近東の原子力新規導入国などの新設需要も拡大すると予想される。これらの世界的な需要に対し、原子力の国際展開、特に日本独自の原子炉である超臨界圧軽水炉の開発を進めることは、世界のエネルギーの安定供給と地球温暖化問題への貢献とともに、我が国の経済成長の観点からも極めて重要である。これら日本の原子力技術の継続的な持続・発展のためには過酷事故時におけるIVR技術（原子炉容器を水中に丸ごと水没させ冷却する手法）の開発は、極めて重要な技術開発の1つである。そこで、図1-1のHPPを伝熱面に装着するというシンプルでIVRに適用可能な新しい冷却法を提案し、これまでの研究より、以下の重要な知見を得た。

- ① 放射線照射下における下向き流動沸騰においてCHF劣化現象を発見した（図1-2参照）。
- ② ナノ流体とHPPの組み合わせにより上向き伝熱面CHFの大幅な向上に成功した（従来比320%の向上、 3.2 MW/m^2 ）。
- ③ HPPによる下向き伝熱面の大幅なCHF向上を達成した（図1-3参照）。

現状の喫緊の課題は、放射線照射によるCHF劣化現象を解明することである。現状のCHF予測設計式は、放射線照射効果を考慮していないため、それも加味した検討は重要である。また、過酷事故時の安全防護策として開発中のIVR技術の成立性にも大きな影響を与える。そのIVR技術には、下向き・大伝熱面・高熱流束除去を安定して達成できることが必須である。必要除熱流束は 3 MW/m^2 が下向き伝熱面で除去できればシステム構成が簡易なプール沸騰によるIVRが期待できるものの、現状では下向き伝熱面において 3 MW/m^2 の除熱をすることは極めて困難である。加えて曲率を持った压力容器底部にHPPを設置する必要がある、大地震などの過酷状況下においてもHPPが压力容器から外れない設置法も念頭においた開発が必要である。

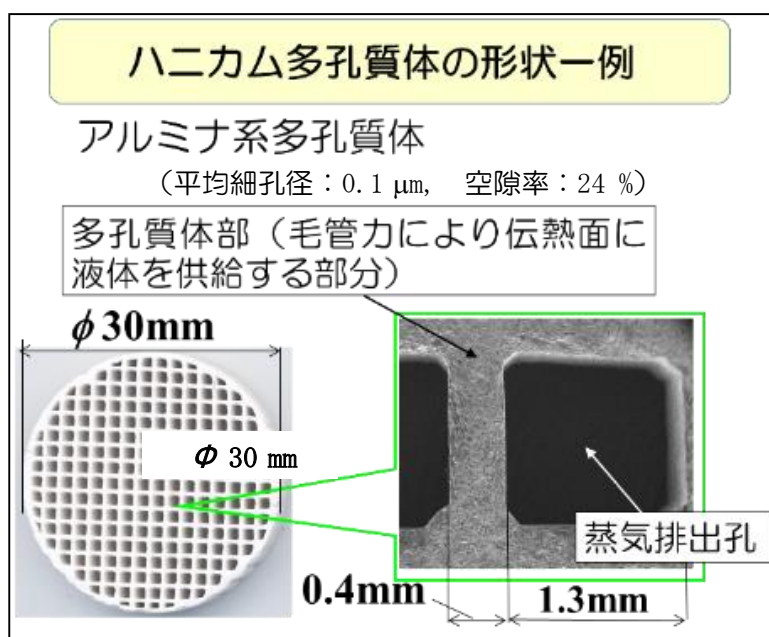


図1-1 ハニカム多孔質体

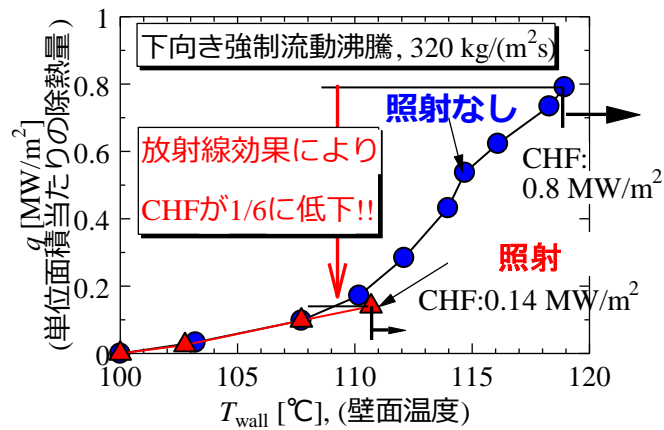


図 1-2 放射線照射による CHF 劣化

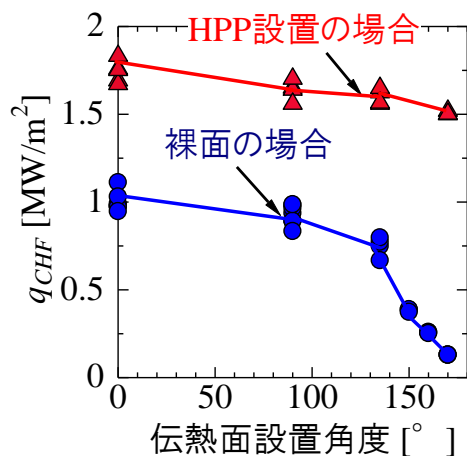


図 1-3 伝熱面設置角度の影響

上記で述べた背景を踏まえ、IVR 技術のモックアップ試験に進むためには、放射線照射効果による CHF 劣化を回避可能な方策を検討する必要がある。放射線環境下にある炉心や IVR においても、CHF 低下を阻止する伝熱面性状を明らかにし、それに加え独自の発想によるハニカム冷却技術を高度化することで、その放射線照射効果による CHF 劣化を阻止するどころか、飛躍的な CHF の向上を目指す。

したがって、本課題における達成目標を以下の通りとする。

『放射線照射効果による CHF 劣化を回避し、放射線照射下の下向き大伝熱面 CHF を 3.0 MW/m² 以上に向上させる冷却技術を確立すること』

具体的には、以下の課題を実施する。

- ① 放射線照射効果による CHF 低下の検討及び CHF 劣化防止策の開発

- 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

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 年度別全体計画

研究項目	令和元年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度
	実験・解析 手法の確立	要素技術の開発		要素技術の確立
(1)放射線照射効果による CHF 劣化回避策(東京大学)	装置設計・製作	予備試験と評価	本実験と評価	本実験と評価 (2)で開発した HPP を用いても実験を行う)
(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	装置設計・製作	予備作製と評価	本作製と評価	
①金属多孔体性状と作製条件の明確化				
②製作した金属多孔質体の耐久性・強度に関する検討			予備試験と評価	本試験と評価
(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				
①二層構造 HPP の CHF モデルの構築による HPP	予備検討	予備試験と評価	本実験と評価	本実験と評価

<p>構造の最適化とその実証(九大)</p> <p>②CFD をベースとした沸騰二相流解析手法の開発及び HPP 近傍沸騰二相流解析</p>	<p>予備検討</p>	<p>モデルの精査・選定・開発及び CFD コードへの組み込み</p>	<p>試計算及びモデル改良</p>	<p>HPP 近傍の沸騰二相流解</p>
<p>(4) ナノ流体と HPP による CHF 向上メカニズムの解明・応用 (電気通信大学)</p> <p>①ナノ粒子層の性状と CHF の関係の明確化</p> <p>②HPP 内部にナノ粒子が目詰まりしないメカニズムの解明</p>	<p>装置設計・製作</p>	<p>ナノ粒子層の性能解明</p> <p>ナノ粒子の付着状況検討</p>	<p>CHF 計測</p> <p>透過係数の計測</p>	<p>ナノ粒子層の形成過程解明</p> <p>HPP 素材の影響評価</p>
<p>(5) 研究推進</p>	<p>連携・打ち合わせ</p>	<p>連携・打ち合わせ</p>	<p>連携・打ち合わせ</p>	<p>連携・打ち合わせ</p>

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 放射線照射効果による CHF 劣化回避策（再委託先：東京大学）【R1-R4】

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、3.2 節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。さらに、放射線照射による伝熱の変化を考察するため、透明電極である ITO 膜を用いた照射実験も実施した。

その結果、放射線照射による、CHF 劣化現象を確認するとともに、そのメカニズムについて考察を行った。さらに、ハニカム構造を持つ伝熱面を利用することで、CHF 劣化現象が回避されることを明らかにした。以上より、伝熱劣化防止策として、ハニカム構造を用いることを提案し、本業務の目的を達成することができた。

(1) 放射線照射と CHF

下向き伝熱面を持つ、金属伝熱面における、飽和水流動条件下での限界熱流束について実験的に評価した。特に、放射線照射による CHF に関する実験を実施した。放射線照射は、量子科学技術研究開発機構（QST）の高崎研究所の照射施設を用いて実験を行った。

特に、3.2 節において製作されたハニカム構造（HC）を伝熱面とした場合の、CHF への影響を実験的に評価することを目的としている。

① 実験装置

図 3.1-1 に強制流動沸騰実験装置の写真、図 3.1-2 にその概略図を示す。強制流動沸騰実験装置は水の温度を飽和温度である 100 °C に保ちながら水を循環させる機能を持つ。装置内に溜められた水は下流側タンク内にあるプレヒーターで温められる。プレヒーターはスライダッ

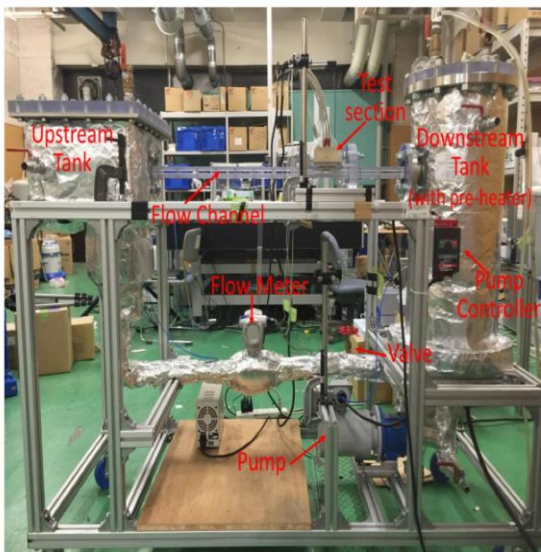


図 3.1-1 強制流動沸騰実験装置の写真

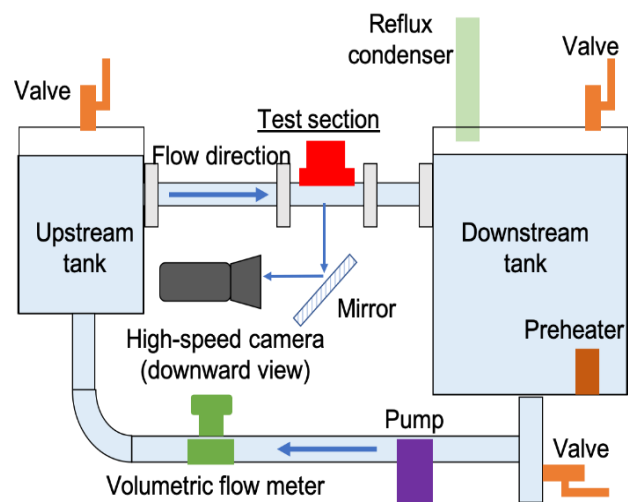


図 3.1-2 強制流動沸騰実験装置の概略図

クに接続されており、その電圧を変化させることで加熱量を調節することができる。水は装置下部に設置されたポンプによって流動する。ポンプの出力（流量）は、コントローラーで調節が可能である。水の流量は質量流速計によってモニタリングされる。上流側タンクと下流側タンクの間には透明なアクリル製のフローチャンネルがあり、その断面は幅 40 mm、高さ 10 mm の長方形をしている。フローチャンネルの途中に沸騰面を含む試験ブロックを下向き伝熱面として設置できる構造である。試験ブロックの沸騰面で生じた蒸気は下流側タンクに運ばれ、下流側タンクの上部にある復水器で水に戻される。上流側タンクと下流側タンク内には熱電対が設置されており、ループする水の温度をモニタリングする。

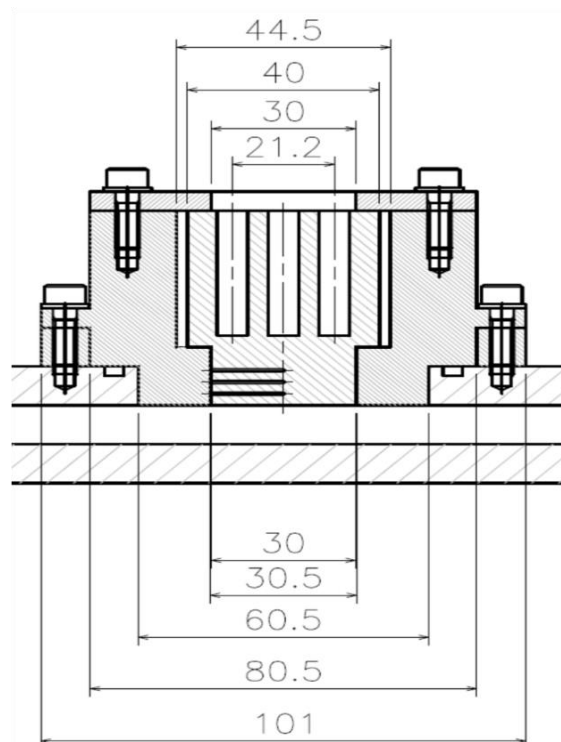


図 3.1-3 試験ブロックの寸法

フローチャンネルは透明なアクリル製であり、試験ブロックの沸騰面を下から撮影を行った。沸騰面とフローチャンネルの直下に 45 度傾けた鏡を設置し、水平に固定した高速度カメラが鏡を通して沸騰面を撮影した。また、沸騰面の様子を明瞭に撮影するために、沸騰面を下から照らすハロゲンライトを設置した。

図 3.1-3 には試験ブロックの寸法を示す。試験ブロックは中心の金属部分とそれを囲むポリエーテルエーテルケトン (Poly Ether Ether Ketone : PEEK) 部分からなる。金属部分の上には 9 つの穴が空いており、ここにカートリッジヒーターを挿し込み加熱をする。カートリッジヒーターはスライダックに接続されており、スライダックの電圧を変えることで加熱量を調節できる。金属部分には沸騰面から 3 mm、6 mm、9 mm の位置に熱電対が挿入され温度を測定することができる。この熱電対の温度履歴から、熱流束及び表面過熱度を求める。つまり 3 点の温度勾配に銅の熱伝達係数を乗ずることで熱流束を、3 点の温度勾配を外挿することで 0 mm（表面）の温度を求めている。沸騰面が銅あるいはアルミニウムの場合、金属部分はすべてそれぞれの金属でできており、一体化している。一方で沸騰面が銀あるいは炭素鋼の場合、銅ブロックの表面を削って 2 mm の厚さの試験片を銀はんだで接着することにより試験ブロックを製作する。

また、3.2 節で製作されるハニカム構造を用いる実験では、銅ブロックを用いて実験を実施した。銅ブロックに、ハニカム構造をはんだ付けにより設置している。

照射施設

ガンマ線照射及び電子線照射は群馬県高崎市にある量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所で行われた。ガンマ線照射は、コバルト 60 照射施設のコバルト第 1 棟もしくは第 2

棟を利用した。電子線照射は、1号加速器を用いている。ガンマ線の照射に利用したコバルト60照射施設はコバルト60の崩壊により発生するガンマ線(1.17 MeV、1.33 MeV)を利用するものである。ガンマ線照射線量率は、6~10 kGy/hであった。一方、電子線照射は、2 MeVで1 mAとした。線量率としては、約100 kGy/minである。流動試験装置を高崎研究所に持ち込み、照射終了後直ちにCHF実験を実施した。なお、照射中のCHF実験は、照射設備の構造上不可能であり、照射後の実験となる。過去の研究において、照射後2時間以内であれば、伝熱面の接触角は維持されていることが分かっており、伝熱面性状変化は維持されていると考えられている。このため、照射による伝熱面性状変化が維持されている時間内に実験が終わるように工夫を行っている。

実験手順

金属材料にガンマ線を照射する前に、紙やすりで表面を研磨した。紙やすりは主に粒度が1200のものを用いた。紙やすりで十分研磨したのちに、蒸留水で表面を綺麗にし、加えてアセトンを染み込ませた綿棒で汚れを拭き取った。最後に蒸留水とティッシュペーパーで拭いて仕上げた。十分研磨できたかを確認するために、表面に水滴を乗せてその接触角を観測した。接触角が90度に近ければ研磨ができたものとした。著しく接触角が小さいと思われた場合には再び研磨した。

次に照射を行った。照射をしない場合の実験を東京大学本郷キャンパスで行い、比較材料とした。照射が終了した試験ブロックは、1号加速器棟内の実験室に設置された強制流動沸騰実験装置のフローチャンネルに取り付けられる。取り付け後、強制流動沸騰実験装置に十分な量の蒸留水を注入し、プレヒーターによる加熱を行う。また、強制流動の質量流束は160、320、640 kg/m²sとした。上流側タンク及び下流側タンク内の温度が100℃に達したことを確認し、沸騰実験を開始する。

実験においては、スライダックを調節してカートリッジヒーターに一定の電圧をかけて沸騰を開始させる。金属ブロック内の温度が安定したことを確認して高速度カメラで沸騰面の撮影を行い、カートリッジヒーターの電圧を上げた。はじめは電圧を20 Vずつ上昇させ、沸騰面の様子を見ながら限界熱流束に近づくにつれて上げ幅を10 V、5 V、2.5 Vと変えていった。各々の電圧で高速度カメラによって沸騰面の撮影を行った。限界熱流束に達すると金属ブロック内の温度が急上昇するため、カートリッジヒーターの電圧をすぐに0に戻した。金属ブロックの温度が十分に冷めたら試験ブロックをフローチャンネルから取り外し、空冷した。次の照射の直前に再び紙やすりによる研磨を行った。高速度カメラは1024×1024の解像度と5000 fpsで撮影し、主に500フレーム、つまり100 msを記録した。

② 令和元年度から令和3年度までの概要

令和元年度に実験装置を整備し、この実験装置を用いて、令和2及び3年度に、4種類の伝熱面に対して、限界熱流束(CHF)計測実験を実施した。実験条件は、30×30 mmの正方形下向き伝熱面とし、大気圧下、160~320 kg/m²sの質量流束、飽和沸騰における限界熱流束を実験的に計測した。伝熱面としては、銅、アルミ、炭素鋼、銀の伝熱面を用いた。

令和2年度に電子線、令和3年度にガンマ線を用いて伝熱面の照射を行い、照射直後に実験

装置に伝熱面を設置して、限界熱流束の計測実験を行った。その結果、4種類の伝熱面に対して、放射線の影響に関するデータを得ることができた。図 3.1-4～図 3.1-7 に、それぞれの伝熱面における CHF の結果を載せる。横軸は吸収線量 (kGy) で、縦軸が得られた CHF である。非照射 (0 kGy) の値を赤の点線で示した。電子線照射の場合を橙色、ガンマ線照射の場合を青で示している。なお、銅については、Wang ら [1] の実験結果も併せて示している。

電子線照射量を増加することにより、炭素鋼 (鉄) と銀は、CHF が増加する傾向を示した。アルミニウムは、電子線照射量増加により CHF は大きく変化しなかった。銅は、電子線照射により CHF が減少する傾向を確認した。ガンマ線照射については、いずれの伝熱面についても、照射を行うことで CHF が増加する傾向を確認した。

以上より、伝熱劣化は、電子線照射によって発生し得ることが確認された。特に銅の伝熱面において伝熱劣化が顕著に発生している。

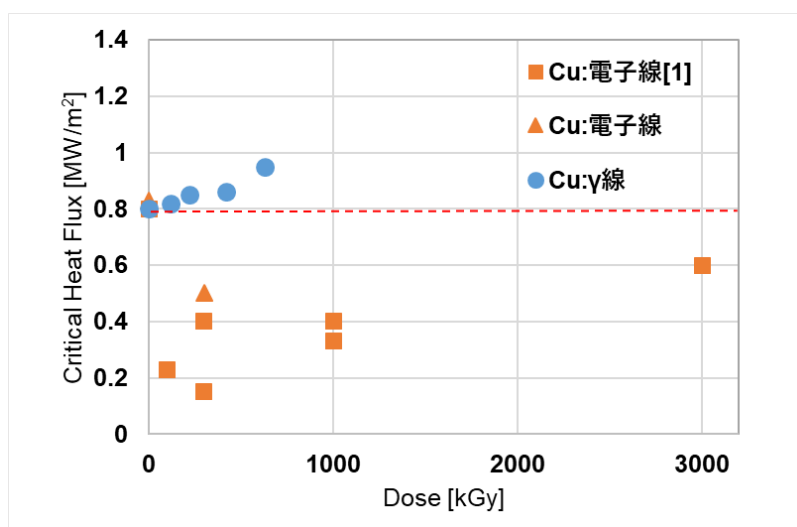


図 3.1-4 放射線照射による CHF 変化 (銅)

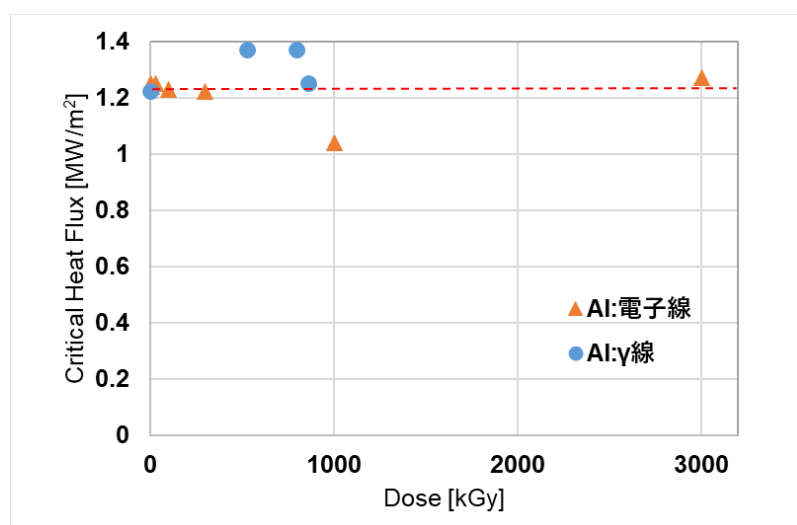


図 3.1-5 放射線照射による CHF 変化 (アルミ)

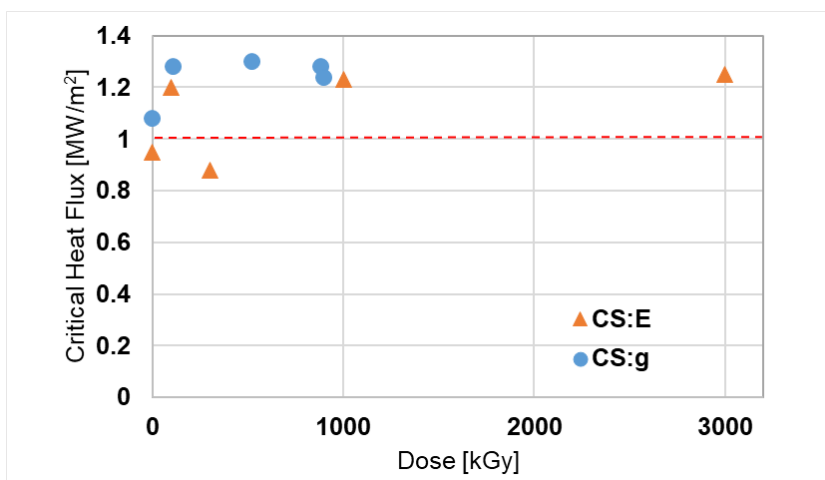


図 3.1-6 放射線照射による CHF 変化（炭素鋼）

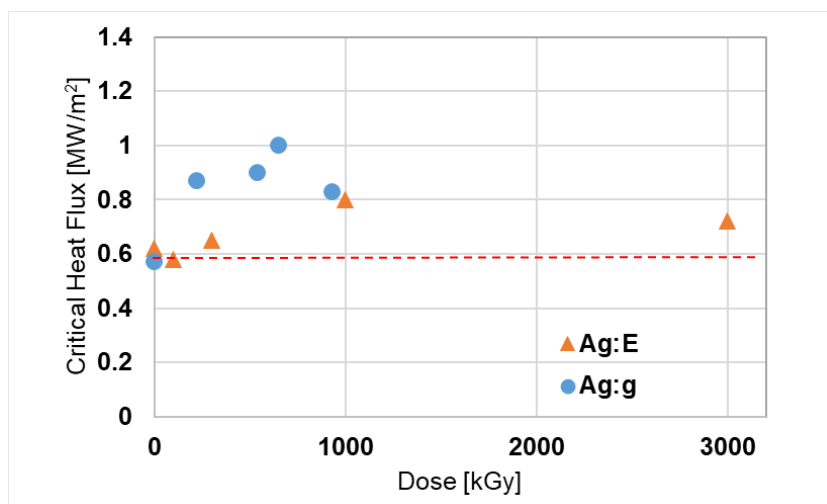


図 3.1-7 放射線照射による CHF 変化（銀）

③ ハニカム構造による伝熱劣化防止【令和4年度】

3.2 節で評価しているハニカム構造を伝熱面に加えることで、放射線照射後の限界熱流束がどのように変化するかを実験的に考察した。伝熱劣化が顕著に見られる銅ブロックを用い、ハニカム構造も銅製である。実験は、照射をしない場合と、電子線照射及びガンマ線照射を実施したあとに限界熱流束を評価した。

20×20 mm 伝熱面

図 3.1-8 にハニカム構造を付けた場合と平面の場合の沸騰曲線を示す。なお、前項までの実験は、伝熱面として 30×30 mm の正方形伝熱面を利用していた。予備実験において、ハニカム構造を設置した 30×30 mm の伝熱面では試験装置における加熱量の限界から限界熱流束が得られないことが分かったので、伝熱面積を小さくして熱流束を増加させることとし、20×20 mm の伝熱面を利用することとした。

流量 4 L/min (160 kg/m²s) の場合を比べると、ハニカム構造を付けない平面伝熱面 (Bare) の場合は、約 0.9 MW/m² で CHF が発生しているのに対して、2.5~3.0 MW/m² まで加熱ができています。一方、この実験においては、最大のヒーター出力になっても CHF は発生していない。安定的な除熱ができていていることを示している。つまり、CHF は 3 MW/m² 以上であるが、20×20 mm に伝熱面積を小さくしても、本実験装置の限界により計測することができないことを意味する。いずれにせよ、ハニカム構造によって、大幅な CHF 増加が確認できた。

次に、ハニカム構造を付けた場合に、ガンマ線 (1256 kGy) もしくは電子線 (1350 kGy) の照射を行った結果を図 3.1-9 に示す。ハニカム構造のみを付けた場合と沸騰曲線はほぼ同一となる。なお、最大熱流束は 2 MW/m² 近傍となっているが、この状態で最大のヒーター出力となっている。20×20 mm の実験結果では、照射による伝熱劣化は、ハニカム構造を付けることによって回避できることが明らかとなった。

具体的には、ハニカム構造を設置しない裸の伝熱面ケース (Bare) では、CHF が約 1 MW/m² 程度であり、これは、従来の結果と大きく変わらない。一方、ハニカム構造を設置した場合 (HC) では、4 L/min の流量で比較しても、2.8 MW/m² 以上に CHF が増大している。さらに、ハニカム構造を、ガンマ線及び電子線で照射した場合にも、2 MW/m² の CHF が得られており、裸伝熱面に比較しても大幅な CHF の向上が観測されている。

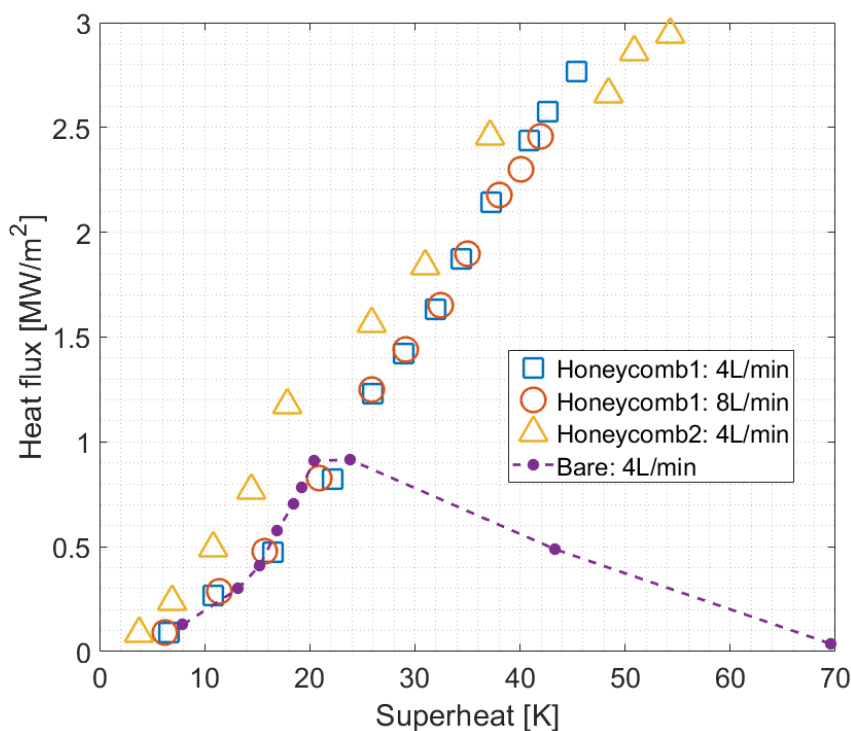


図 3.1-8 ハニカム構造における沸騰曲線

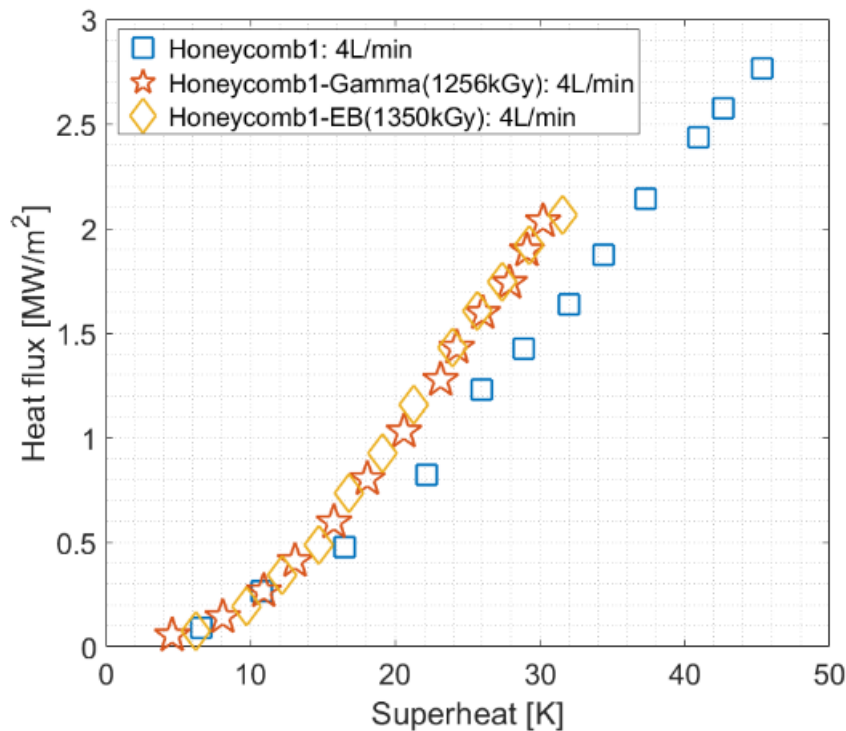


図 3.1-9 ハニカム構造における放射線照射後の沸騰曲線

小伝熱面積実験 (15×15 mm、10×20 mm、10×30 mm)

上記のように、ハニカム構造を用いると限界熱流束が大幅に増大し、ヒーター出力限界と伝熱ブロック温度が上昇したため、限界熱流束を得ることができなかった。限界熱流束を検討するために、伝熱面積をさらに小さくするとともに、流れ方向の影響を考察するため、15×15 mm、10×20 mm、10×30 mm の3種類の伝熱面を製作し、ハニカム構造の有無、照射によって限界熱流束がどのように変化するかを実験的に取得した。伝熱面が小さくなると、流動方向の伝熱面長さの影響が顕著に出てくることが想定されるため、流動方向に20 mm及び30 mmと長さを変化させた実験も行っている。

図 3.1-10 に 15×15 mm 伝熱面における実験で得られた3本の熱電対の温度履歴を示す。この温度勾配から熱流束と過熱度を求めている。金属面での CHF では、CHF になると急激な温度上昇が観測されるので、カートリッジヒーターの入熱を直ちに切る必要がある。これは、核沸騰から膜沸騰に遷移して伝熱面からの除熱が極めて小さくなり、壁面温度が急激に上昇するためである。一方、ハニカム構造における限界熱流束では、図 3.1-10 の 1350 秒以降に示すように、それぞれの熱電対の温度差（熱流束に相当）は変わらず、温度（過熱度に相当）が単調に上昇していく様相が捉えられている。熱電対の温度変化は、ゆっくりと単調増加で増大し続けていくため、この温度変動を見てカートリッジヒーターの入熱を停止している。通常の CHF が膜沸騰になることによって、急激な温度上昇をもたらすのに対して、ハニカム構造を設置した

伝熱面における CHF は、急激な温度上昇はない。つまり、核沸騰から膜沸騰に遷移するいわゆる沸騰遷移 (BT: Boiling Transition) や核沸騰離脱 (DNB: Departure from Nucleate Boiling) ではなく、核沸騰が継続している状態である。核沸騰のままであるが、除熱量に限界値があり、それ以上の除熱ができなくなるため、入熱 (ヒータ加熱) が除熱をわずかに上回るため、ゆっくりと温度が上昇していくことになる。ハニカム構造によって、表面積が増大しているだけでなく、気泡の離脱が促進されることから、気泡に伝熱面が覆われる膜沸騰になることがなく、核沸騰が継続できると考えられる。ここでは、熱電対の指示値が緩やかに、継続的上昇を始めた時点をもって限界熱流束 (CHF) と定義することとする。図 3. 1-10 によればこのケースでは、

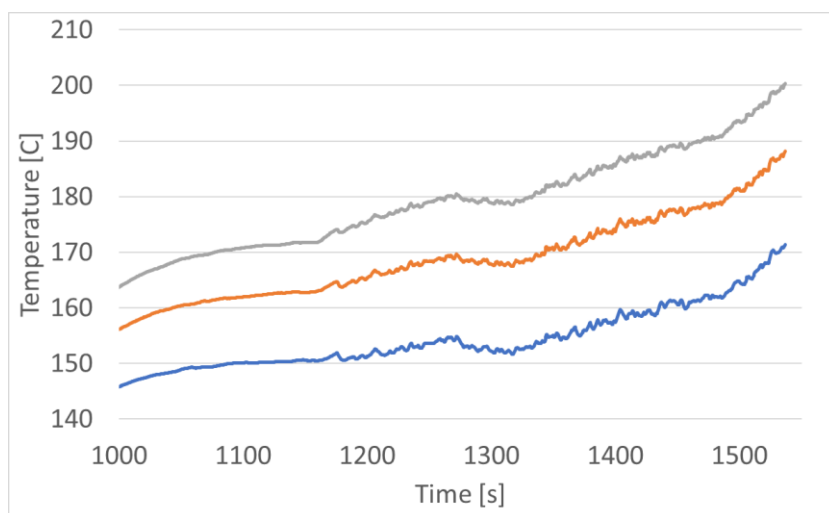


図 3. 1-10 温度履歴の例 (15x15mm 伝熱面 (HC))

約 2 MW/m^2 となる。温度データにおいてももう 1 つ顕著な温度履歴は、過熱度が 40°C 程度で、過熱度が不安定に変動する状況が観測されている。1100 秒あたりまでは、温度が安定しており、加熱量を増やすと数分で安定な温度分布となる。一方、1200 秒で加熱量を増加させたのちは、温度履歴が不安定になり、1250 秒あたりで、温度が急激に下がる現象も確認されている。ハニカム構造内部の沸騰の様相が変化し、熱伝達が改善したことを意味していると考えられる。その後、温度は単調増加となり、1500 秒あたりで、温度上昇率が増えている。実験では、 200°C を超えた時点で加熱を停止しており、その後は温度は一気に下がる。膜沸騰状態ではなく核沸騰が継続しているため、温度の下がる速度は速い。

このような沸騰除熱量が限界となる限界熱流束はハニカム構造を設置した条件のみで観測される。ガンマ線及び電子線を照射した場合でも同様の傾向を示す。熱電対の温度をもとに熱流束と過熱度を評価し沸騰曲線として示したものを図 3. 1-11～図 3. 1-13 に示す。図 3. 1-11 は $15 \times 15 \text{ mm}$ 伝熱面で 4 L/min ($160 \text{ kg/m}^2\text{s}$) の流動条件における沸騰曲線である。青のハニカム構造を付けない条件 (Bare) においては、 1.5 MW/m^2 の CHF が観測されている。伝熱面が小さくなることによって、CHF が増大することは従来から知られているが、 $30 \times 30 \text{ mm}$ の約 0.8 MW/m^2 と比較しても大きくなっている。一方、ハニカム構造を設置 (HC) することで、限界熱流束は約 2 MW/m^2 と増大することが分かる。伝熱面積が小さいために、CHF の増大割合は顕著ではない。上述のようにハニカム構造を付けた伝熱面における限界熱流束はそのメカニズムが異なっていることに留意する必要がある。ハニカム構造を付けた伝熱面に対して、それぞれ約 900 kGy

のガンマ線照射 (γ -ray) 及び電子線照射 (EB) を行った。その後得られる最大熱流束は、未照射 (橙色: HC) の場合と比較すると、限界熱流束が下がることが確認されている (灰色: γ -ray 及び黄色: EB)。照射によってハニカム構造内部の濡れ性などが変化していると考えられる。3.2 節で議論するように、ハニカム構造による CHF 増加は、表面張力による伝熱面への液体供給と、沸騰気泡が容易に離脱しやすいことに起因している。詳細はまだ分からないが、表面張力が変化することで、液体供給性能に影響が及んでいる可能性がある。結果として、照射後のハニカム構造は、非照射に比べて CHF が減少する傾向が見られるが、それでも、ハニカム構造のない場合に比較して同等の限界熱流束となっている。これは 15×15 mm の伝熱面積の場合であるが、上述のようにより大きな伝熱面においては、照射後のハニカム構造において、ハニカム構造がない場合よりも大きな CHF となっている。結論として、裸の伝熱面よりは大きくなっており、ハニカム構造を設置することによる伝熱劣化は回避できる。

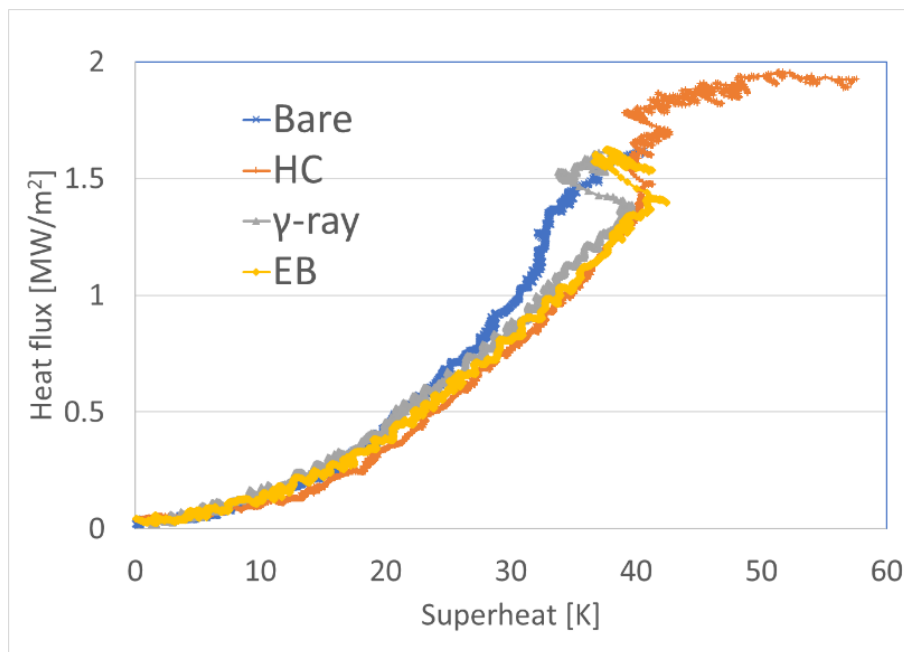


図 3.1-11 伝熱面サイズ 15×15 mm における沸騰曲線

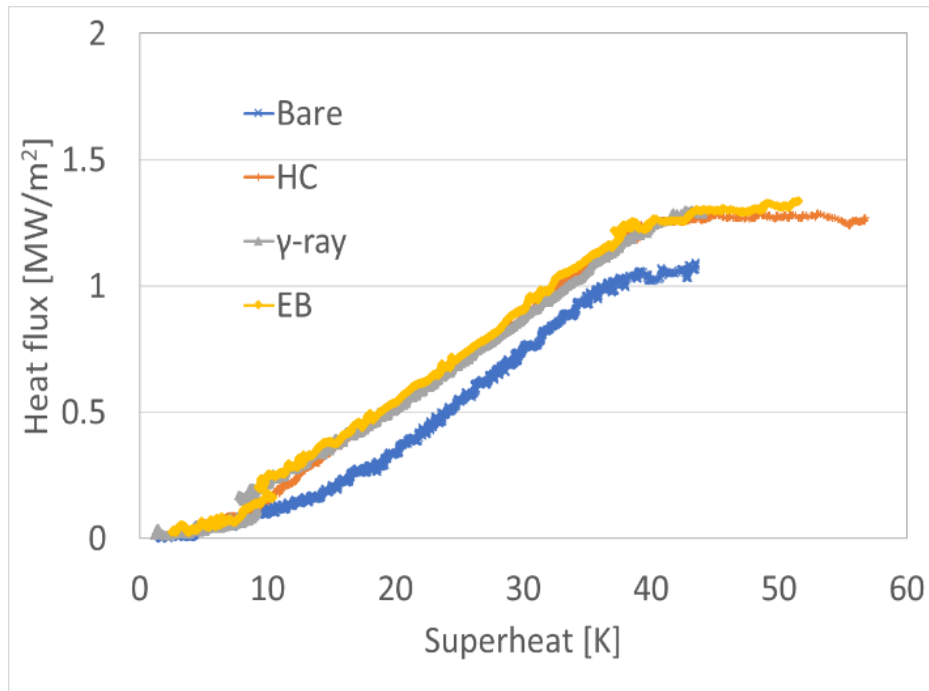


図 3.1-12 伝熱面サイズ 10×20 mm における沸騰曲線

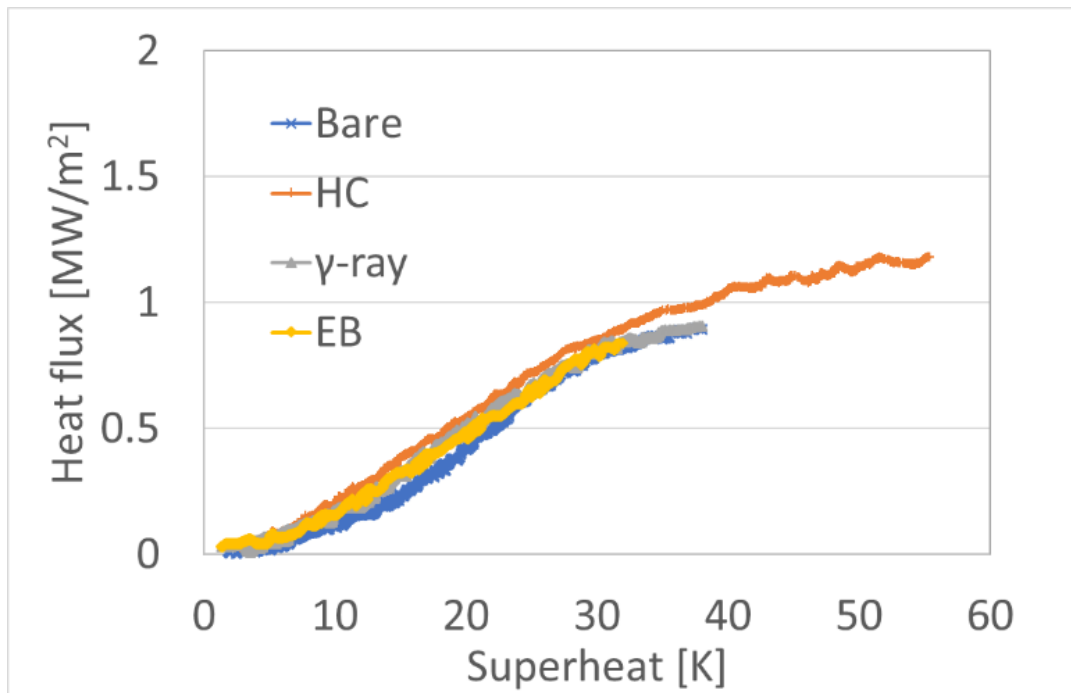


図 3.1-13 伝熱面サイズ 10×30 mm における沸騰曲線

伝熱面サイズの影響を検討するため、10×20 mm, 10×30 mm と流動方向に長い伝熱面を持った銅ブロック伝熱面についても同様の実験を行った。まず、図 3.1-12 に示す、10×20 mm の場合の沸騰曲線は、ハニカム構造のない裸 (Bare) の場合に比較して、ハニカム構造を設置した場合 (HC) に沸騰曲線が低過熱度側にシフトし、CHF も大きくなった。一方、15×15 mm の場

合とは異なり、ガンマ線照射 (γ -ray) 及び電子線照射 (EB) の影響はほとんど見られない。なお、照射量はいずれも約 900 kGy である。また、15×15 mm で見られた、過熱度の急変も観測されなかった。伝熱面の観察によれば、上流側から発生した気泡が下流側のハニカム構造を大きく覆う現象も確認されている。10 mm という限定された幅の伝熱面については、流動方向の上流側と下流側の流動条件や伝熱条件が 15 mm もしくは 20 mm という幅の伝熱面と異なってくる可能性があると考えられる。

図 3.1-13 に示す 10×30 mm の場合は、ハニカム構造のない裸 (Bare) よりもハニカム構造を設置 (HC) することで、CHF は増大する。しかし、いずれも 10×20 mm の条件よりも CHF は小さくなる。下流側の伝熱面が蒸気泡に覆われるという影響がより大きく出てきている可能性がある。また、ガンマ線 (γ -ray) と電子線照射 (EB) (いずれも約 900 kGy) の結果では、裸 (Bare) の場合とほぼ同等となっている。これは、15×15 mm の場合と同様な結果となっている。いずれにせよ、流動方向の伝熱面の影響が大きいことが想定される。

以上、20×20 mm、15×15 mm、10×20 mm、10×30 mm という伝熱面条件において、ハニカム構造のない裸 (Bare) の伝熱面、ハニカム構造を付けた伝熱面 (HC) をガンマ線 (γ -ray) 及び電子線 (EB) で照射した場合についての知見をまとめる。

ハニカム構造を付けることによって、付けない伝熱面よりも CHF は大幅に増大する。900 kGy 程度のガンマ線もしくは電子線照射によって、CHF が減少する可能性があることが観測された。しかしながら、その場合であっても、ハニカム構造を付けない伝熱面における CHF と同等もしくは大きいことが確認された。

よって、本研究の目的である、伝熱劣化の回避策として、ハニカム構造を伝熱面表面に付けることが有効であることを確認することができた。

なお、照射によりハニカム構造を付けた伝熱面の最大除熱熱流束が減少するメカニズムについては今後の課題である。また、伝熱面の大きさ (特に流動方向長さ) がハニカム構造を付けた伝熱面の CHF に与える影響についても今後の課題である。

(2) 透明伝熱面を用いた CHF 実験

可視化によって放射線照射の流動沸騰伝熱現象実験を行うことで、CHF メカニズムの評価に資することを目的として、透明ヒーターである ITO をスパッタした透明伝熱面 (サファイアガラス) を用いた実験を実施した。

① 実験

実験装置

前項で用いた、下向き沸騰面で飽和強制流動沸騰ループに透明な伝熱面を設置して実験を行う。図 3.1-14 は透明伝熱面であるサファイアガラスの図面を示す。赤い部分が酸化インジウムスズ (ITO)、金色の部分が金とクロムを、青い部分のサファイアガラスにスパッタする。ITO、金、クロム、サファイアガラスの厚さはそれぞれ 250 nm、200 nm、30 nm、1 mm (106 nm) である。また、ヒーターとなる ITO の面積は 10 mm×10 mm である。金・クロムの部分に導線を

繋げて ITO に電流を流すことでジュール熱を発生させて沸騰面とすることができる。しかし、事前の試験でスパッタ条件によって、ITO 以外で沸騰するものが見られたため、ITO がある表面を空気側とし、裏面のサファイアガラス面を沸騰面として実験を進めた。なお、令和 4 年度の実験は、ヒーター面である ITO 面を水側とし、ヒーターから直接加熱することとした。

このサファイアガラスを金属沸騰面実験で用いたものと同様にサファイアガラス用の寸法にした試験ブロックに嵌め込み、試験ブロックをフローチャンネルに設置する。

サファイアガラスへのガンマ線及び電子線の照射は、金属伝熱面と同様に、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所のコバルト 60 照射施設及び 1 号加速器を利用した。高速度カメラによる沸騰面の撮影は気泡が表面から発生する様子を見るために透明伝熱面越しに行われた。つまり、金属伝熱面の実験とは反対に、沸騰面の真上に鏡を取り付けて、気泡に邪魔されることなく、沸騰面の様相を撮影した。

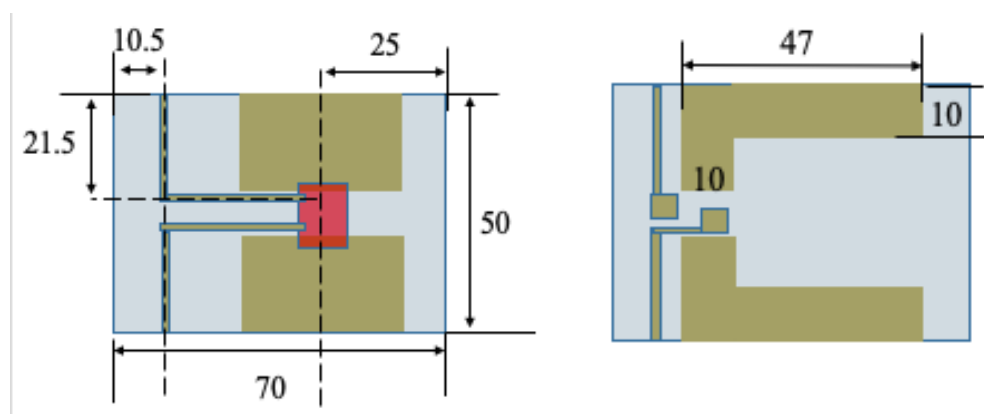


図 3.1-14 サファイアガラス（左：表、右：裏）

実験手順

照射実験の最初の手順はサファイアガラスへの照射である。金属伝熱面実験と同様に、ガンマ線もしくは電子線で、照射時間を変更することで、吸収線量を変更した。

照射が終了したサファイアガラスは即座に実験室へと運ばれた。次に、電流を流すための導線をはんだ付けし、試験ブロックに嵌め込んだ。試験ブロックをフローチャンネルに設置した。強制流動装置に蒸留水を溜め、プレヒーターによって蒸留水が飽和温度の 100 °C に達するまで待機する。その間、電源の電圧を 1 V にして ITO に電流を流した。この時、上流側タンクと下流側タンクの平均温度を ITO の温度とみなし、温度と抵抗値の関係を取得した。上流側タンクと下流側タンクの温度が 100 °C に達したら実験を開始した。

直流電源の電圧を徐々に上昇させながら、沸騰様相を記録した。各電圧において、高速度カメラで沸騰面を撮影した。高速度カメラは 1024×640 の解像度と 5000 fps で撮影し、主に 500 フレーム、つまり 100 ms を記録した。

② 令和元年度から令和 3 年度までの概要

ITO を用いた実験準備を実施し、令和 3 年度に、透明サファイアガラスのガラス面を伝熱面

とする実験を実施した。ITO ヒーターは空気側となる。なお、サファイアガラスの熱抵抗は無視した。具体的には、ヒーター加熱量を表面積 ($10 \times 10 \text{ mm}^2$) で割った値を熱流束とした。表面温度は、ヒーターの抵抗値から求めた。サファイアガラスの熱抵抗を無視しているため、実際の表面温度よりは大きな過熱度となっている。図 3.1-15 に、非照射の場合と、ガンマ線 (655 kGy) を照射したサファイアガラスの沸騰曲線を示す。また、図 3.1-16 に 50 V 付加した時点での、沸騰気泡の様相を示す。図に示すように、ガンマ線照射後のサファイアガラスにおいて、沸騰気泡の大きさが増大し、CHF が大きく減少することが確認された。ガラスの濡れ性が大きく改善し、沸騰気泡が伝熱面を大きく覆うことができるようになったため、除熱性能が劣化し、少ない熱流束で CHF に至ったものと考えられる。以上より、照射による濡れ性の変化が、サファイアガラス面で大きく影響していることが想定される。

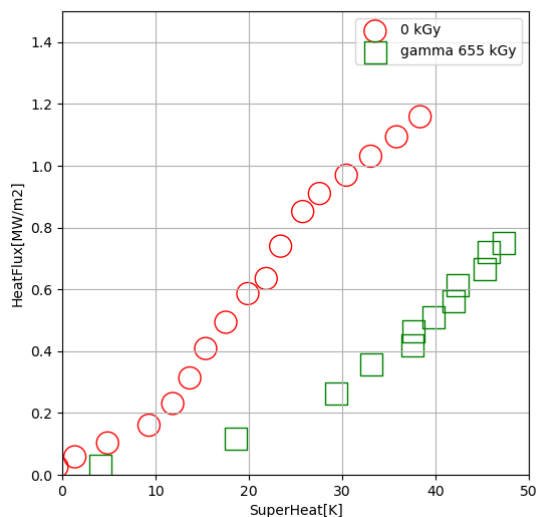


図 3.1-15 サファイアガラスの沸騰曲線

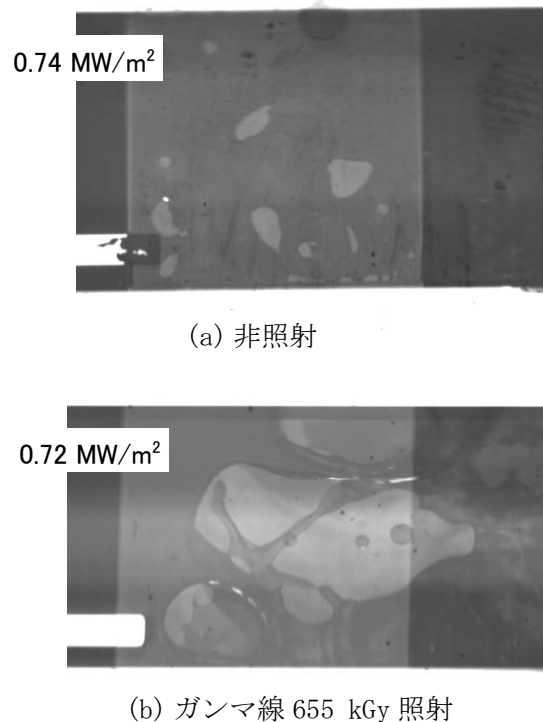


図 3.1-16 サファイアガラスの沸騰様相

③ 放射線照射の影響【令和4年度】

令和3年度に実施した実験では、ヒーター面を空気側とし、1 mm のガラスを通して伝熱させる沸騰伝熱実験を行った。令和4年度は、ITO 膜（ヒーター）面を水側とし、ITO 膜（ヒーター）面からの直接の沸騰伝熱実験を実施した。照射量は、電子線照射は金属伝熱面と同じ、2 MV、1 mA（100 kGy/min）の条件で照射時間をパラメータとしている。また、ガンマ線は、10

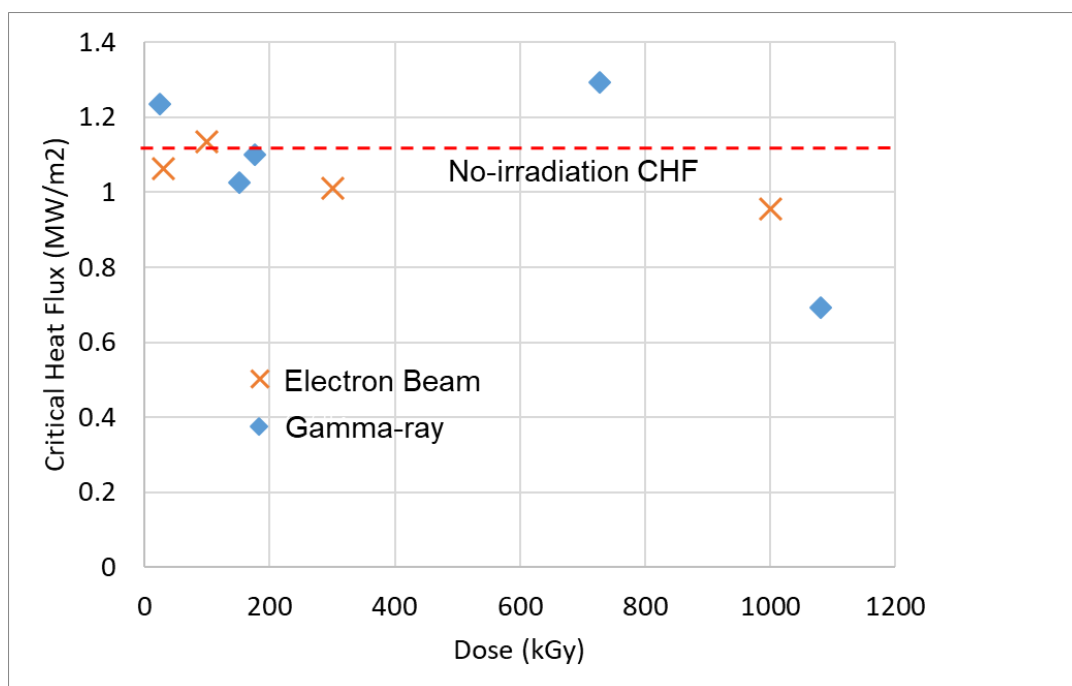


図 3.1-17 ITO 膜伝熱面における照射と CHF

kGy/h のコバルト線源であり、やはり照射時間をパラメータとしている。図 3.1-17 に、令和4年度の実験で得られた、ITO ヒーター伝熱面における限界熱流束データを示す。

金属面と同様に赤点線が非照射時の CHF であり、橙が電子線、青がガンマ線照射後の CHF である。ITO 面での限界熱流束については、ガラス面と異なり、照射の影響があまり見えていない。なお、照射量が増えると、ITO 膜が放射線照射によって性質が変わっている様相が確認できる。具体的には、電圧をかけることにより、抵抗が時間とともに増大する傾向が得られた。非照射では、抵抗の変化はほとんどないため、抵抗が温度の関数のみとして過熱度を評価することができたが、照射後の ITO 膜では、抵抗値が時間の関数となり、過熱度を評価することができなかった。ITO 膜側を沸騰面としたためか、令和3年度と異なる傾向が見られた。照射された ITO 膜と沸騰現象との相互作用によって、抵抗変化が生じた可能性がある。

具体的に、図 3.1-18 に電子線 33 kGy を照射した場合の沸騰曲線を示すが、図に示すように、同じ熱流束で保持していても、徐々に過熱度が上昇している。これは、過熱度の上昇を表しているのではなく、抵抗値が時間とともに上昇していくことによって、過熱度の推定値が上昇していることを意味している。つまり、この過熱度はデータとして用いることはできない。なお、特に 1000 kGy を超える照射では、ITO ヒーターの抵抗が数倍と大きく変化し、CHF の精度は悪い。

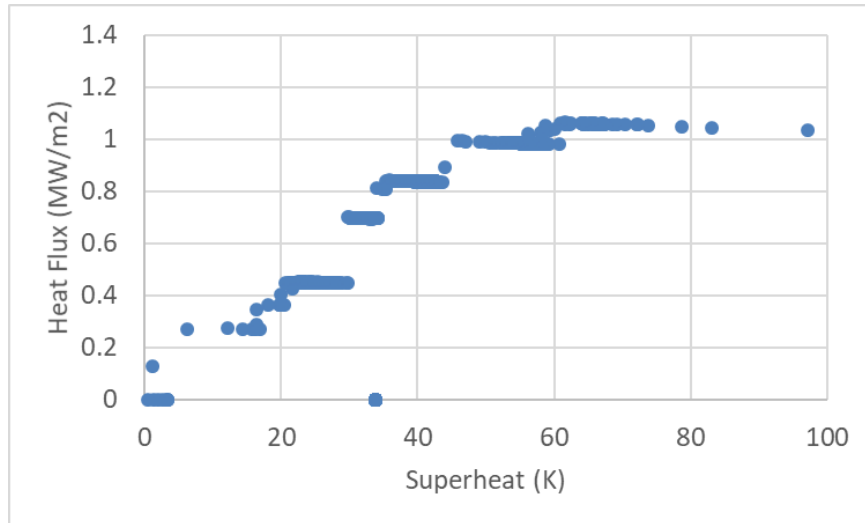


図 3.1-18 ITO 膜面における沸騰曲線

図 3.1-19～図 3.1-22 に、50 V における沸騰様相を示す。ガラス面実験と同様に、照射を行うことで、気泡の大きさは大きくなり、全面を覆いやすくなっている傾向が見えている。ガラス面と ITO 膜の照射影響が異なるため、生成される沸騰気泡の様相は、ガラス面の可視化画像（図 3.1-16）とは異なっている。しかしながら、未照射の場合には、細かい沸騰気泡が多数形成されているのに対して、照射後においては、沸騰気泡の数が少なくなり、比較的大きな気泡に成長していることが確認される。CHF については、非照射も照射も大きな変化がないが、33 kGy という少ない照射量でも気泡形状には変化が見られる。ガラス面の方が、より濡れ性が改善し、重力の影響もあって、沸騰気泡が容易に伝熱面を覆うことから CHF が変化したと考えられる。一方、ITO 膜面では、表面構造の違いから、気泡が大きく成長したとしても、気泡と伝熱面の間に液膜が存在する可能性があり、CHF が大きく変化しなかったものと考えられる。

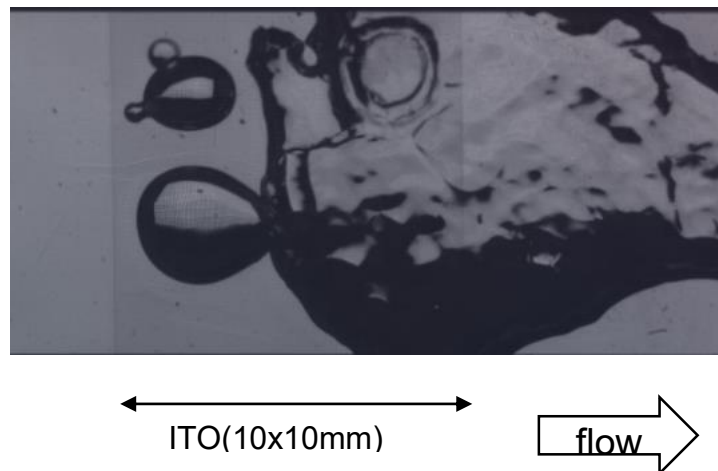


図 3.1-19 非照射状態における沸騰様相 (50 V : 0.68 MW/m²)

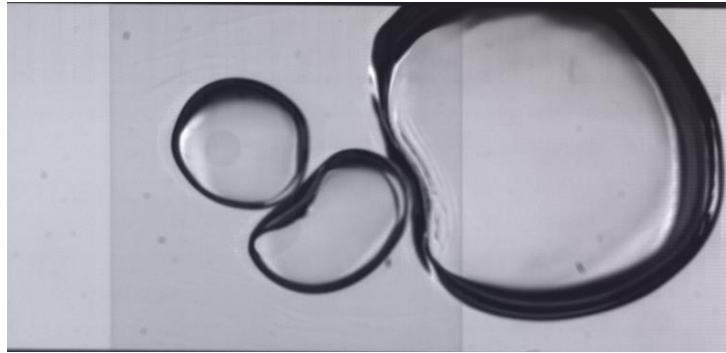


図 3.1-20 ガンマ線照射後 (176 kGy) の沸騰様相 (50 V : 0.67 MW/m²)

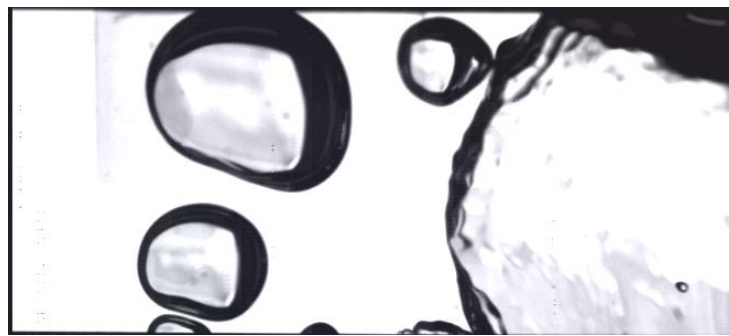


図 3.1-21 ガンマ線照射後 (728 kGy) の沸騰様相 (50 V : 0.50 MW/m²)

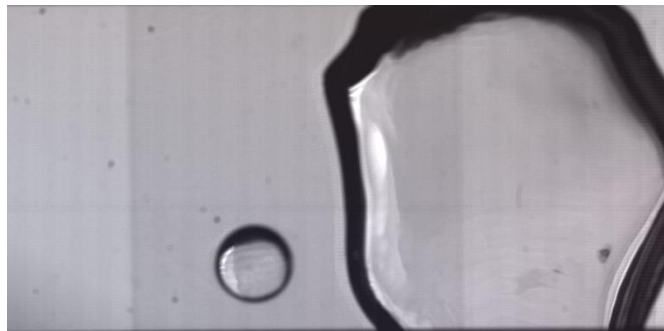


図 3.1-22 電子線照射後 (33 kGy) の沸騰様相 (50 V : 0.70 MW/m²)

以上の結果をまとめると、ガラス面及びITO膜面ともに、照射によって濡れ性が変化し、沸騰気泡の発生状況が変化することが確認された。下向き伝熱面の場合は、重力の関係で、沸騰気泡が伝熱面を覆いやすくなる。ガラス面のように表面の平面度が良い材料においては、伝熱面を沸騰気泡が覆うことでCHFが小さくなる傾向がある。一方、ITO膜面のように、スパッタによって表面を形成している場合には、ミクロな液膜が継続することによって、CHFはあまり影響しないことが考えられる。なお、ITO膜は照射によってダメージを受け、1000 kGy以上の実験は困難であることも確認された。

(3) まとめ

放射線照射による限界熱流束(CHF)の劣化現象を評価するために、実験的研究を行うとともに、伝熱劣化現象を回避するために、ハニカム構造が有効であることを示した。

銅、銀、アルミニウム、炭素鋼という4種類の金属に対して電子線及びガンマ線による照射を実施した。大気圧下、下向き伝熱面飽和強制流動沸騰の条件の下、吸収線量ごとに限界熱流束を測定した。また、沸騰面の様子を解析するために、高速度カメラで沸騰面の撮影を行った。これらの結果より、伝熱劣化現象に対するメカニズムを検討した。具体的には、照射による表面性状の変化に伴い、沸騰核密度が変化することで、CHFが変化することを確認した。

さらに、上記メカニズムについて確認するため、透明なITOガラスを用いた可視化実験を行い、放射線照射の有無による、沸騰伝熱面の変化を可視化した。ガラス面と金属面の性状の違いに注意する必要があるが、放射線照射によって沸騰核密度及び濡れ性が変化し、CHFが変化することを確認した。

3.2節で検討したハニカム構造を伝熱面に設置することによって、CHFが大きく改善することを実験的に確認した。照射によって、ハニカム構造伝熱面のCHFが減少する現象も確認されたが、ハニカム構造を付けない伝熱面よりもCHFは大きくなることを確認した。以上によって、ハニカム構造を用いることによって、放射線照射によるCHF劣化現象を回避することができることが分かった。つまり、CHF劣化現象回避のためにはハニカム構造が有効であることを示した。

参考文献

- (1) L. Wang, N. Erkan, H. Gong, K. Okamoto, Electron beam irradiation effect on critical heat flux in downward-facing flow boiling, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 120, pp. 300-304, (2018)

3.2 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【R1-R4】

3.2.1 金属多孔体性状と作製条件の明確化【R1-R3】

【令和3年度までの実施内容・成果の概要】

電解析出装置を設計製作し、溶液濃度、電流密度、印可時間などを変化させ、金属多孔質体が作製できることを確認し、形成された多孔質体を走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope：以下、SEMと略記。)で観察する技法の習得、さらにWickability(動的な濡れの性能)が計測可能な装置を設計・製作し、形成した多孔質体の特性を定量的に評価可能な計測システムを構築した。電解析出法により金属多孔質体を作製して確認し、それら金属多孔質体のWickability(動的な濡れの性能)を測定しつつ、一様多孔質体のCHFを測定した。その結果、金属多孔質層を伝熱面に用いることで裸面の2.5倍にCHFが向上することが分かった。また、従来示されていた1+WickabilityとCHFの直線的な関係が成り立たない領域が存在することも分かった。これはWickabilityは伝熱表面の吸水性能を表す無次元数であるが、吸水性能以外にも多孔質体内部のドライアウトなどを考慮する必要のある重要なパラメータがあると考えられる。

さらに二層構造HPPを伝熱面に直接金属ハニカム多孔質体を形成する技術を開発した。

3.2.2 製作した金属多孔質体の耐久性・強度に関する検討【R3-R4】

【令和3年度の実施内容・成果の概要】

実機条件の耐久性・強度を検証するための実験条件・手法をIVR技術に詳しいプラントメーカーの1つである三菱重工業などとディスカッションして検討し、予備試験を実施した。その検討結果は、RPV外表面での環境条件への耐性を検討すべきであり、特に熱膨張・収縮(径方向、軸方向)に対する耐久性実験(設計寿命60年)が重要であることが分かった。具体的には1年に1度ほど定期検査があるので、常温から超臨界圧ボイラーの運転条件である、374℃程度まで上げて、熱膨張・収縮の影響がないかを検討すれば良いことが分かった。

また、現状では、銅の多孔質体を電解析出させているので、圧力容器と材質が異なるため、直接銅を析出させることはできない。そこでステンレス板を電極板として使用した。ステンレス板は析出させる銅との密着が悪いため、ニッケルメッキ処理を行い、その後銅メッキ処理を行った。作成した多孔質のうち1つは実機条件を模すため300℃まで加熱し1時間維持させ、その後25℃まで温度を下げる。この操作を10回繰り返した。加熱前後のSEM画像からは両者に大きな違いは見られず、摩擦によっても崩れることはなく、強度や構造に大きな差はないことが分かった。

【令和4年度実施内容・成果の詳細】

令和4年度には、実機を模擬するために300℃まで加熱し1時間維持させ、その後25℃まで温度を下げる。この操作を10回繰り返し、熱応力をかけた。HPPの耐久性について実験的に検証した。具体的には加熱処理前後でCHFが変化するのかについて検討を行った。以下に、ハニカム多孔質体の作成方法と実験方法の詳細について述べる。

(1) 電解析出による多孔質層の作製装置

多孔質体の製作装置を図3.2-1に示す。CuSO₄ 0.4 mol/L、H₂SO₄ 1.5 mol/Lのめっき浴200 mLを調製した。使用した電極板は直径30 mm、厚さ0.3 mmの純度99.96%の銅の円板である。電極間距離は2 cmとした。

この硫酸銅めっき浴に電流を流すと、カソードでは以下の反応が同時に起こる。



銅の析出反応と水素発生が同時に起こり、水素ガスによって銅の析出反応が部分的に妨げられ、銅の多孔質構造がカソード表面に形成される。

まず、直流電源装置（日本スタビライザー工業製：最大電圧18 V、最大電流100 A）を用いて、3 Aの電流を1分、2分、4分、5分、8分、16分流して6通りの多孔質を作製した（図3.2-2）。次に、多孔質体の強度を高めるために、0.3 Aの低電流を30分間流した。最後に、図3.2-3の真空炉（フルテック製：最高温度1200 °C、炉内サイズφ43 mm×60 mm）で950 °Cで30分間焼結させた。なお、流れた電子の数量に応じて、銅と水素が上記で示した化学反応式の通り生成されるため、実験は定電流モードで行い、印可電圧は銅の析出物によって変化する。

SEMで観察したところ、構造はほぼ類似で、厚さのみを変化させることが可能であること、さらに200 μm程度の蒸気排出孔をもつマイクロハニカム多孔質体が自己組織的に形成されていることが分かった。

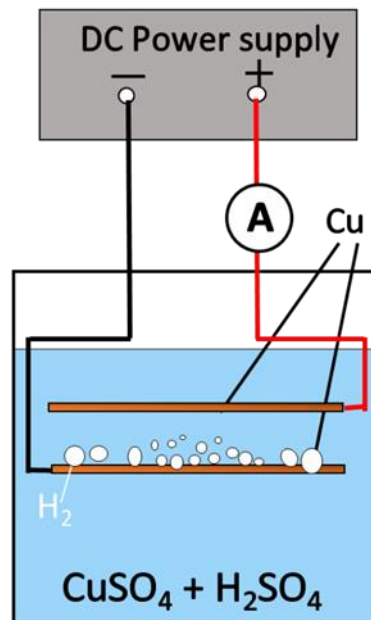


図 3.2-1 電解析出装置概略



図 3.2-2 電解析出時の様子



図 3.2-3 真空炉

(2) プール沸騰試験

図 3.2-4 は実験装置の概略を示す。伝熱面はプール底面と同じ高さで、流体と接する伝熱面直径は 30 mm である。銅ブロック表面に電解析出法で作製した多孔質層をはんだで固定した。加熱は銅円柱底部に埋め込んだカートリッジヒータにより行った。伝熱面から下方へそれぞれ 10 mm (TC1)、15 mm (TC2)、20 mm (TC3)、25 mm (TC4) 位置の銅円柱中心軸上に $\phi 0.5$ mm の K 型シース熱電対を設置し、この 2 つの熱電対の測定値を外装して伝熱面温度を、指示温度差、設定距離及び銅の熱伝導率からフーリエの式より伝熱面熱流束を算定した。プールは、内径 87 mm のパイレックスガラス製で内部沸騰様相が観察できる。試験液体は蒸留水、水深は 60 mm、システム圧は 0.1 MPa で、予備ヒータで伝熱面周囲の液体を加熱して飽和温度を維持した。発生した蒸気は冷却器で凝縮させて容器内に戻した。実験は、カートリッジヒータに印加する電圧を約 5 V ずつ (約 0.10 MW/m^2 刻み) 増加させながら加熱を行い、TC1 及び TC2 の温度変化が、10 分間で 0.25 K 以下となった場合に定常状態に達したとみなし、測定を行った。以上の操作を、定常状態が維持できなくなり、壁温が急上昇を開始して、バーンアウトが発生するまで繰り返した。また、バーンアウトが発生した場合には、直ちに加

熱を中止し、その直前の熱流束を限界熱流束とした。また実機を模擬するために 300 °C まで加熱し 1 時間維持させ、その後 25 °C まで温度を下げた。この操作を 10 回繰り返し、熱応力をかけた。また HPP の耐久性について実験的に検証した。具体的には加熱処理前後で CHF が変化するかについて検討を行った。

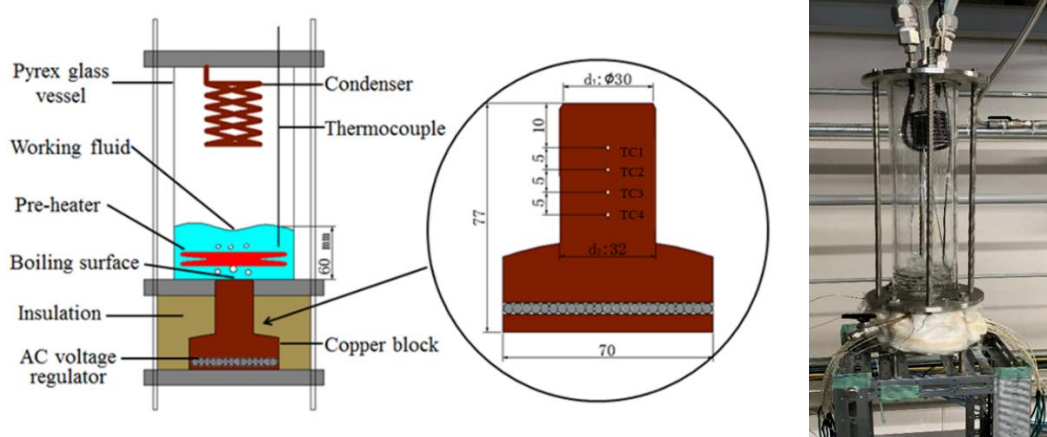


図 3.2-4 沸騰実験装置概要

(3) 実験結果

図 3.2-5 に沸騰曲線を示す。図中に加熱処理前後の SEM 写真を掲載している。これからも SEM 様相はほぼ同じであることが分かる。限界熱流束は通常条件と実機条件に大きな差はない。また沸騰実験中に多孔質が崩れることなく、耐久性についても問題がないことが分かった。また熱伝達率は、通常条件よりも実機条件において熱伝達率は低下している。この理由は、実機条件では表面が酸化しているので、ぬれ性が良くなる効果により発泡点密度が低下したことや酸化銅による熱抵抗の増加に起因している可能性がある。

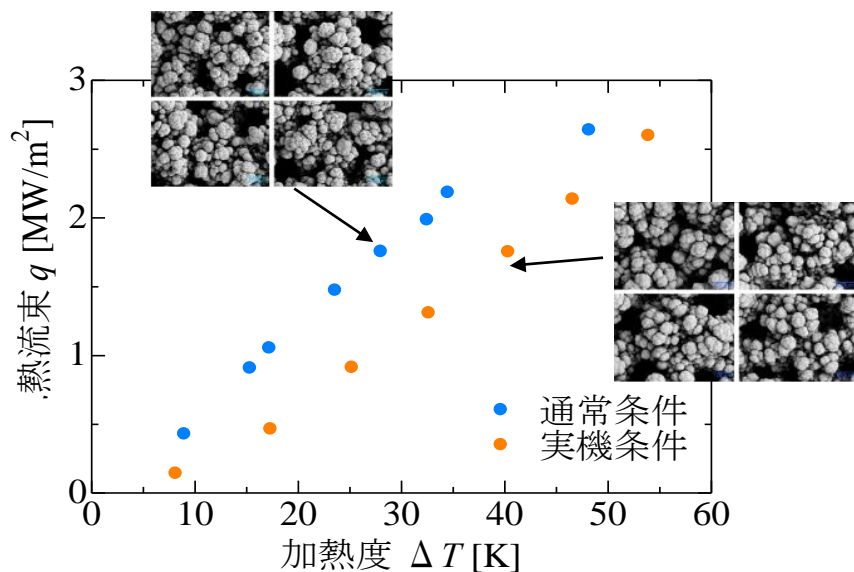


図 3.2-5 沸騰曲線

(4) まとめ

実機を模擬した熱応力をかけて、HPP の耐久性について実験的に検証することを目的として以下の実験的検討を行った。すなわち 300 °C まで加熱し 1 時間維持させ、その後 25 °C まで温度を下げる操作を 10 回繰り返す、熱応力をかけた。その後に、HPP の耐久性について実験的に検証するために加熱処理前後で CHF を測定し、CHF が変化しないという結果を得た。また沸騰実験中に多孔質が崩れることなく、耐久性についても大きな問題がないことも確認できた。

3.3 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【R1-R4】

3.3.1 二層構造 HPP の CHF モデルの構築による HPP 構造の最適化とその実証【R1-R4】

【令和3年度までの実施内容・成果の概要】

沸騰の実験装置（熱伝達率測定、CHF測定）を設計製作し、測定精度を検討した。その結果、溶液濃度、電流密度、印可時間などを変化させ金属多孔質体が作製できることを確認した。さらにCHFに相関が高い吸水力の高い多孔質体を作製できる条件が定性的に明らかになった。次にハニカム状の多孔質層を伝熱面に設置し、プール沸騰試験を行って熱伝達率とCHFを測定した。その結果、裸面の2倍のCHFを達成した。また電流密度が同じであれば一様形状、ハニカム形状のCHFは等しく、HTCは一様形状の方が大きくなった。それらの結果をベースに二層構造HPPのCHFのモデルを構築した。理論モデルをベースに二層構造HPPの最適化を行い、本プロジェクトで開発した電解析出法を用いた手法を用いて伝熱面に直接金属ハニカム多孔質体を形成した。

【令和4年度実施内容・成果の詳細】

(1) 実験装置・方法

前年度に作成した二層構造 HPP を用いて CHF 実験を実施して、CHF 向上率を実験的に検証した。用いた実験装置は図 3.2-4 と同様である。まず、二層構造の作製手順は、1 A、12 min で電解析出後、850℃、30 min で真空焼結を行い、さらに 12 A、3 min で電解析出を行った後に強度向上のため、0.3 A、30 min で低電流電解析出を行い、再び 850℃、30 min で真空焼結を行った。

(2) 実験結果

まず多孔質体内部の構造をマイクロ X 線 CT で可視化した。その結果、図 3.3-1 に示すように伝熱面に近い側では孔径が 100~150 μm 小さく、上部では 300~450 μm と大きくなっている。次にこれを用いて CHF の実験を行った。図 3.3-2 に示すように裸面に比べて約 5 倍まで大幅に除熱可能熱流束が向上する結果となった。なお、この時、実験装置の加熱の限界から CHF に至らせることができなかった。今後レーザー加熱を用いるなど、大幅な装置改良をしなければこれ以上の高熱流束の実験ができない。以上、本手法は裸面に比して 5 倍以上の CHF 向上効果があることが明らかになった。また図 3.3-3 に示した熱伝達率に関しても裸面の場合より 3 倍以上向上するという興味深い結果も得た。

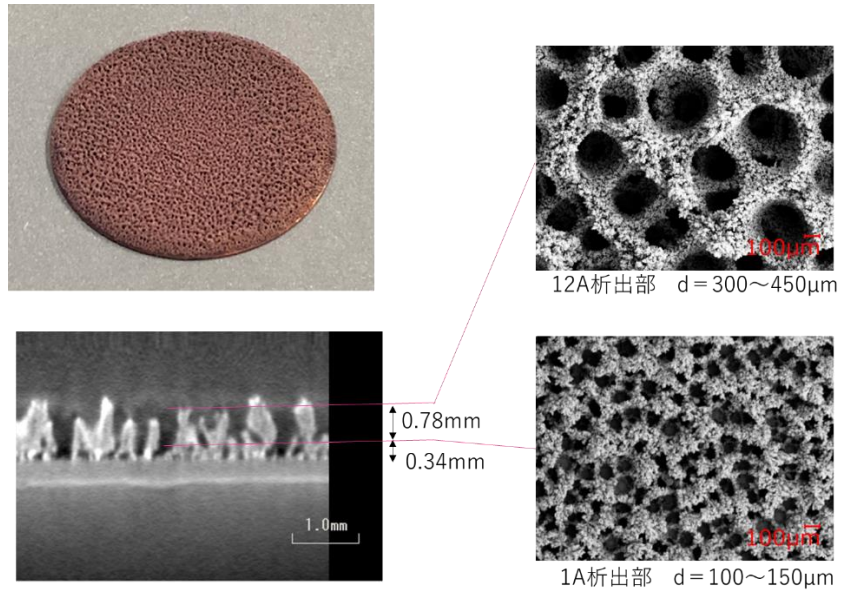


図 3.3-1 二層構造ハニカム多孔質体

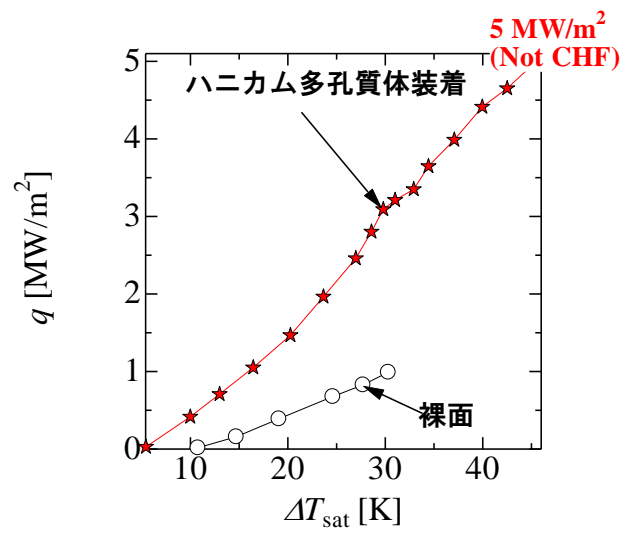


図 3.3-2 二層構造ハニカム多孔質体を用いた場合の沸騰曲線

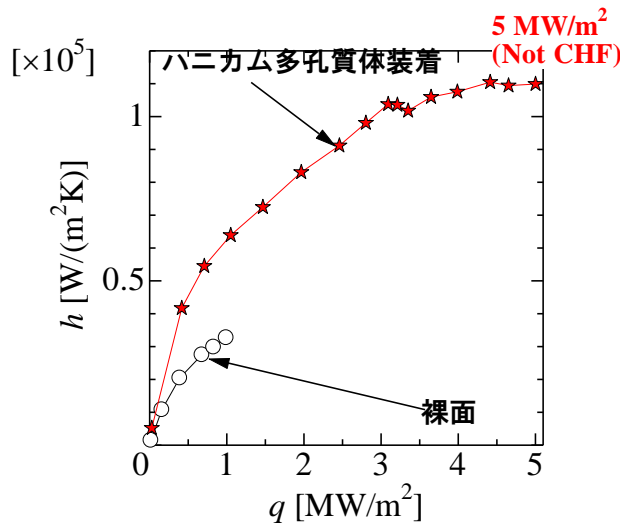


図 3.3-3 二層構造ハニカム多孔質体を用いた場合の熱流束と熱伝達率の関係

以降、電解析出法により金属多孔質体を作製して厚さの影響について検討した結果について述べる。今回使用した多孔質体は電解析出法により作製された。0.4 mol/L の H_2SO_4 溶液 200 mL に CuSO_4 を 10 g 加えた溶液中にアノード電極 (Cu, 40×40 mm、厚さ 1 mm) とカソード電極 (Cu, ϕ 30 mm、厚さ 0.3 mm) を間隔 15 mm で平行に並べて浸水させた状態で、直流電源で電流値を固定して電流を流すことで多孔質を析出した。

電流値 3.0 A の電流を数分間流したあとで、高強度化のために 0.3 A の一定値低電流を 30 分流し、その後真空状態で 30 分間真空炉内 850°C の条件で焼結を行った。作製した多孔質体には多孔質部と銅板から垂直方向に伸びる蒸気排出孔からなるハニカム構造が確認された。通電時間が増すにつれ析出が進み多孔質も厚くなり、多孔質厚さ $\delta = 0.47$ mm、0.70 mm、1.10 mm、1.73 mm の 4 通りのサンプルを作製し、各実験に使用した。電解析出法により作製した 4 つのサンプルの Wi 数測定結果を図 3.3-4 に示す。横軸が吸水開始からの時間、縦軸が単位吸水面積当たりの吸水量である。Wickability の値がサンプルごとに異なっている原因の 1 つとして、表面構造の差異による影響が考えられる。多孔質厚さ 0.47 mm のものは表面の平均蒸気排出孔径が 190 μm であるのに対し、多孔質厚さ 1.37 mm のものは表面の平均蒸気排出孔径が 285 μm であり、この径が大きいほど流体が透過しやすくなり Wickability も向上することが考えられる。

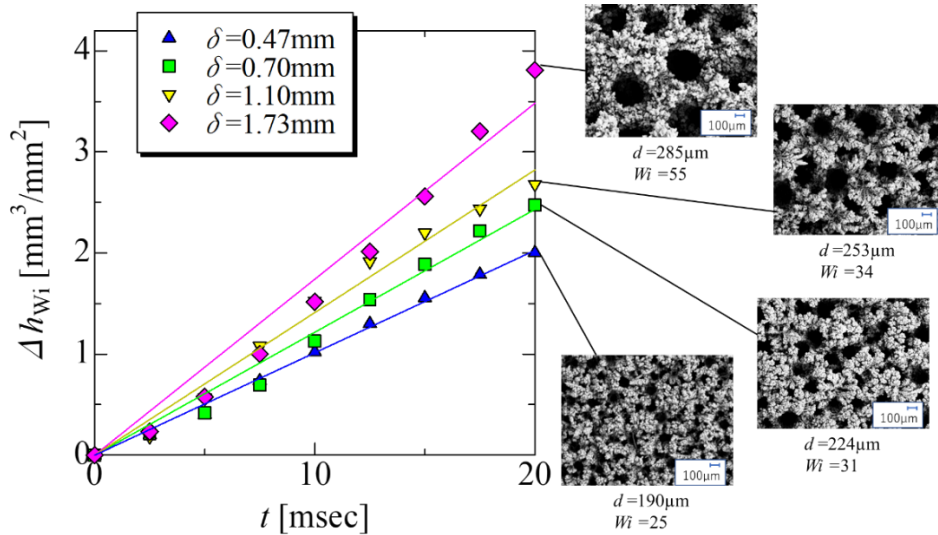


図 3.3-4 Wi の計測生データ

沸騰実験の結果、銅の平滑面で $q_{CHF} = 1.23 \text{ MW/m}^2$ 、 $\delta_h = 0.47 \text{ mm}$ で $q_{CHF} = 2.19 \text{ MW/m}^2$ 、 $\delta_h = 0.70 \text{ mm}$ で $q_{CHF} = 2.37 \text{ MW/m}^2$ 、 $\delta_h = 1.10 \text{ mm}$ で $q_{CHF} = 3.32 \text{ MW/m}^2$ 、 $\delta_h = 1.73 \text{ mm}$ で $q_{CHF} = 3.74 \text{ MW/m}^2$ となった。図 3.3-5 は各多孔質体サンプルで得られた Wi 数と沸騰実験で得られた CHF を比較したもので、縦軸は銅の平滑面との CHF 比で表している。エラーバーは複数回測定した Wi 数の標準偏差を表している。グラフでは Wi 数が増加するにつれ CHF も向上しており、式 3.3-3 における定数を $C = 0.04$ とすることで直線的な CHF の増加が見られる。

$$Wi = \frac{V_0'' \rho_l}{\rho_v^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4}} \quad (\text{式 3.3-1})$$

$$V_0'' = \frac{1}{A_w} \left(\frac{\Delta V}{\Delta t} \right)_{t=0} \quad (\text{式 3.3-2})$$

$$\frac{q_{CHF}}{q_{CHF,plain}} = 1 + C Wi \quad (\text{式 3.3-3})$$

沸騰現象において、この蒸気排出孔は多孔質構造下部の伝熱部で生成された蒸気の通り道となり排出を促す効果を持っているが、気泡が抜け瞬間的に液が供給された際に吸水を促す効果があるとすれば、今回測定した三次元的な効果を含む Wickability が CHF に大きく関与していると予想できる。一方で、これまでの研究では $C = 1$ (Rahman et al, 2014)、 $1/4$ (Li et al, 2019a) となっていたのに対し、今回は $C = 0.04$ と、定数 C の値がずいぶん小さく、すなわち CHF に対して Wi 数がこれまでより大きく得られた。今回使用したキャピラリーチュ

一ブ径がこれまでより 2 倍以上大きかったこと等の測定条件の違い以外にも、使用する多孔質の種類や伝熱面の大きさ等によって考慮すべき要因が存在すると考えられる。

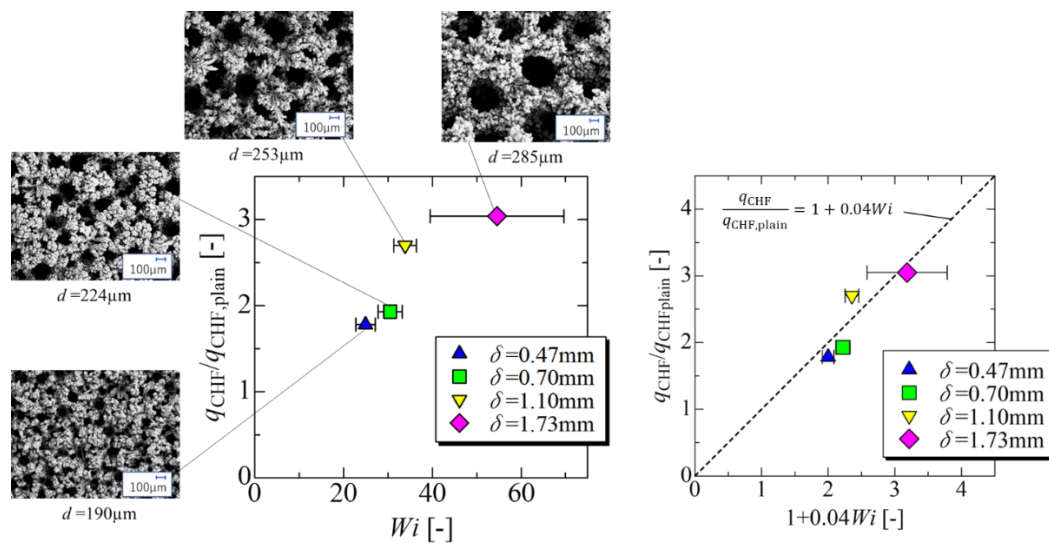


図 3.3-5 Wi と CHF 向上比の関係

(3) まとめ

二層構造 HPP を用いて CHF 実験を実施して、CHF 向上率を実験的に検証した。その結果、今回作製した多孔質体の除熱性能が極めて高く、裸面に比べて約 5 倍まで大幅に除熱可能熱流束が向上する結果となった。この時、実験装置の加熱の限界から CHF に至らなかった。今後レーザー加熱を用いるなど、大幅な装置改良し CHF 実験を実施する必要がある。以上、本手法は裸面に比して最低でも 5 倍以上の大幅な CHF 向上効果があることが明らかになった。この熱流束 (5 MW/m^2) は直径 30 mm の大伝熱面においてはチャンピオンデータである。これに加え熱伝達率についても裸面の場合より 3 倍以上向上するという興味深い結果も得た。

さらに、CHF と Wi の相関は、従来から指摘されているように、線形の関係があることも確認できた。

3.3.2 CFD をベースとした沸騰二層流解析手法の開発及び HPP 近傍沸騰二相流解析

【R1-R4】

【令和3年度までの実施内容・成果の概要】

飽和プール沸騰において直径 30 mmφ 水平上向き伝熱面上に HPP を設置するというシンプルな方法で、大気圧条件下において CHF が裸面時の 2 倍以上に向上することを確認されている⁽²⁾。図 3.3-6 には水平上向き伝熱面上に HPP を設置した時の壁近傍流れの特性を示す。水プールの発熱面上に HPP を設置し加熱すると、HPP 底部には相変化よりメニスカスが形成され、このメニスカス部の液膜が蒸発し、気液界面の形成・維持することにより、毛管力が発生し伝熱面に液体を供給する。同時に伝熱面近傍で発生した蒸気がマクロ孔（蒸気排出口）から排出される。これにより、気液の循環が一次的に促進され、CHF が向上する原因と考えられる。

HPP の CHF を向上する原因を理解するため、また、HPP の最適化設計に繋ぐため、本研究は、数値流体力学（CFD）を用いて HPP 近傍沸騰二相流解析を実施している。令和1年度は、既存 CFD コードの沸騰二相流解析への適用性を調査し、HPP 近傍二相流解析のための CFD コードの選定を行った。使用の便利さや技術サポートなど総合的な考慮の結果、Ansys Fluent を選定した。

令和2年度は、Ansys Fluent に組み込まれている沸騰を模擬するための相変化モデル、HPP 構造を模擬するに必要な多孔質モデル及び多相流を取り扱うための表面張力モデルを精査した。これらのモデルをベースとして、さらに HPP の多孔質壁の毛細管力による水の輸送をモデル化し、多孔質壁の毛細管効果による水の輸送に関する検証計算及び VOF 法を用いた沸騰計算を実施した。多孔質壁の毛細管効果による水の輸送を正しく計算可能、また沸騰二相流計算も実施可能であることを確認し、HPP の伝熱流動解析が可能な沸騰二相流熱伝達流動解析手法を開発した。

令和3年度は1セルの HPP を模擬し、1セルの HPP を模擬し、比較的低い熱流束 ($q_w = 80000 \text{ W/m}^2$) 条件と比較的に高い熱流束 ($q_w = 200000 \text{ W/m}^2$) 条件に対して沸騰流動解析を実施した。また、比較的に高熱流束の条件において、沸騰モデルの改良を行い、蒸気量を高くした条件で計算を実施し、蒸気量の HPP の液相を伝熱面近傍へ提供する能力に影響があるかを確認した。その結果、多孔質体における毛管吸引力による液相の輸送速度が正しく計算できると同時に、Lee モデルを使って、相変化により伝熱面で気泡は発生・成長したあと、伝熱面から離脱し、そしてプールの中で上昇していく一連の挙動を定性的に計算できた。さらに、熱流束が高くなると壁温が高くなり、蒸発量が大きくなると壁温が下がるという計算結果が得られ、沸騰計算が定性的に合理であることが分かる。最後に、高熱流束条件で蒸気量が増え、HPP 蒸気排出口における蒸気量の増大は毛管力による液相の輸送速度に及ぼす影響が少ないことが計算から分かった。

【令和4年度実施内容・成果の詳細】

令和4年度は HPP 近傍沸騰二相流解析を実施し、HPP による CHF の促進メカニズムを理解したとともに、HPP 構造の最適化に繋げるためのパラメータ計算を実施した。具体的には、HPP 底面と伝熱面との距離 δ 及び伝熱面配置角度をパラメータにして、HPP 底面の伝熱面間

との距離 δ の流体輸送に及ぼす効果及び伝熱面配置角度の気泡挙動の及ぼす効果を調べた。

図 3.3-7 に実際の HPP の構造を示す。HPP 多孔質壁の厚みは 0.4 mm であり、HPP 多孔質壁に囲まれたマクロ孔は 1.3 mm の正方形である。また、HPP 多孔質壁の細孔径は 1.6 μm であり、その空隙率及び有効吸い上げ高さは実験によって計測され、それぞれ 0.25、10 m である。透過係数 k は $2.4 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ である。

(1) 基礎モデル

① 多孔質体における圧力損失のモデリング

Ansys fluent では、多孔質体に対して、標準運動量方程式に粘性損失項 (Darcy 項 : 式 3.3-4 右辺の第 1 項)、と慣性損失項 (式 3.3-4 右辺の第 2 項) を加えることで多孔質体の圧力損失をモデル化している。

$$\vec{F}_i = -\left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j\right) \quad (\text{式 3.3-4})$$

ここで、 \vec{F}_i は i 方向 (x, y, z) の運動量方程式の運動量ソース項である、 $|v|$ は速度の大きさ、 D_{ij} と C_{ij} はそれぞれ粘性抵抗 (viscous resistance) と慣性抵抗 (inertial resistance) である。これらの運動量項は、多孔質セル内の圧力勾配に寄与し、セル内の流体速度 (または速度の二乗) に比例した圧力損失を発生する。

単純な均質の多孔質媒体の場合、式 3.3-4 は下記式 3.3-5 になる。

$$\vec{F}_i = -\left(\frac{\mu}{k} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i\right) \quad (\text{式 3.3-5})$$

ここでは、 k は多孔質体の透過係数で、粘性抵抗 D の逆数と定義される。 C_2 は慣性抵抗係数である。

② 多孔質体における毛細管力のモデリング

HPP による CHF の向上のメカニズムに関して、ハニカム壁の多孔質体に存在する微小流路の毛管力による水の伝熱面への輸送が 1 つの要因と考慮されている。Ansys fluent は、多孔質体内流体の圧力損失をモデル化されているものの、毛細管効果をモデル化されていない。

図 3.3-8 に示す半径 R_s の毛細管において、液体の表面張力によって、気液界面で式 3.3-6 に示す毛管力が働く。この毛管力によって、毛細管内の液面が周囲液面より高くなる。

$$\Delta p = \frac{-2\sigma \cos(\theta)}{R_s} \quad (\text{式 3.3-6})$$

ここで、 R_s は多孔質内毛細管の有効半径と呼ばれる。毛細管の有効半径から得られる最大の静的水柱高さ h_{eq} は次のように計算することができる。

$$h_{eq} = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{R_s \rho g} \quad (\text{式 3.3-7})$$

ハニカム多孔質体に対する試験測定値として、 $R_s = 0.8 \mu\text{m}$ 、 $h_{eq} = 10 \text{ m}$ が得られていた。その結果、有効半径 R_s のハニカム多孔質体の気液界面において、式 3.3-8 に示す毛管力が働く。

$$\Delta p = \rho_l g h_{eq} = 10 \rho_l g \quad (\text{式 3.3-8})$$

これまでに、毛管力を HPP 全体に作用する体積力として処理してきた。しかし、本来 HPP の毛細管力は HPP 底部のメニスカス部に作用するものであるため、体積力を作用させる領域は HPP 底部の薄い領域に作用させることが望ましい。そこで、今年度は、気液界面で働く毛管力を、多孔質体下部 2 セル (0.1 mm) 分の体積に作用させ、下記式 3.3-9 に示す体積力を印加した。この体積力を運動量保存式に加えることにより、毛管力を模擬することとした。

$$F_{vol} = \frac{\rho_l g h_{eq}}{H_2 \text{ cell}} = 10^5 \rho_l g = 9.4 \times 10^8 \text{ N/m}^3 \quad (\text{式 3.3-9})$$

③ 沸騰モデリングするための蒸発モデル

沸騰をモデリングするためには、式 3.3-10 に示す Lee モデル⁽³⁾を用いた。

$$\dot{m}_{lv} = coef \cdot \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}} \quad \text{if } T_l > T_{sat} \quad (\text{式 3.3-10})$$

ここでは \dot{m}_{lv} は単位体積当たりの液相から気相への相変化流量 (kg/s/m^3) である。 T_{sat} は液体が蒸発する温度(K)である。下付き文字 l は、液体の物性値であることを示す。 α_l と ρ_l はそれぞれ液相の体積率と液相の密度である。 $coef$ は、緩和時間と解釈できる係数であり、0.1~2000 までの広い幅で変化し、解析条件によって調整する必要がある (Yang ら⁽⁴⁾や Lorenzini ら⁽⁵⁾)。Lee⁽³⁾は、気泡流領域に対して $coef = 0.1$ を推奨しているため、本計算においても $coef$ に0.1を採用した。

(2) HPP 底面と伝熱面間との距離 δ の流体輸送に及ぼす効果に関する解析

HPP 底面と伝熱面との距離 δ の HPP の流体輸送に及ぼす効果を調べるため、HPP 底面と伝熱面間との距離 δ をパラメータにして解析を行った。

① 計算体系及び計算ケース

図 3.3-6 に示す HPP 設置したプール沸騰を模擬するため、図 3.3-9 に示す計算体系を用い

た。計算体系は断面 1.7×1.7 mm の正方形で、高さはおおよそ 12 mm のプールとした。プールの底面近傍には、1 つの HPP セルを設置した。なお、HPP の高さは 1 mm、プール底面との距離は δ mm である。ここでは距離 δ をパラメータとし、0.3 mm と 0.1 mm の 2 ケースを考慮した。プールの底面の熱流束は 80000 W/m^2 とした。計算ケースを表 3.3-1 にまとめる。

表 3.3-1 HPP 底面と伝熱面との距離の流体輸送に及ぼす効果に関する計算ケース

計算ケース	HPP 底面と伝熱面との距離 δ
Case1	0.1 mm
Case2	0.3 mm

② メッシュ、境界条件及び初期条件

メッシュに関しては四面体 Structured メッシュを採用し、最大サイズを 0.05 mm とした。その結果、全解析領域の総メッシュ数は 0.45 M であった。プールの一番上の面を圧力一定 (1 bar) の出口と設定し、プール下部の多孔質体の上下の面、及び多孔質体に囲まれた 1.3 mm のマクロ流路に面した多孔質体の側面を水の輸送が可能な interior wall として設定した。一方、伝熱面であるプール底面は水の輸送ができない wall と設定した。プールの左右前後の境界面を対称と設定した。メッシュ分割及び境界条件の設定を図 3.3-10、図 3.3-11 に示す。

なお、初期条件としてプール内に速度のない 373.15 K の飽和水を充満した。

③ 計算方法

本計算において、界面追跡法 VOF を用いた。表面張力モデルには連続表面力 (CSF) モデルを用いた。接触角 (液-固接触角) を 110° と設定した。また、計算領域が狭いため、層流として計算した。

図 3.3-12 には多孔質体に対して空隙率及び粘性抵抗の入力を示す。多孔質体内の速度が低いと想定されるため、慣性抵抗 (式 3.3-5 の C_2) を 0 とした。また、図 3.3-13 には HPP 下部 2 セル分に多孔質体に対する z 方向運動量ソース項に、式 3.3-9 に示す体積力の入力を示す。

VOF 法の計算は計算負荷が大きく、長い時間の計算ができなかったため、計算時間を 1 s とした。

④ 計算結果

Case2 ($\delta = 0.3$ mm) に対して、代表的な時間における y 軸中心断面におけるボイド分布を図 3.3-14 に示す。相変化により伝熱面で気泡は発生・成長した後、伝熱面から離脱し、そしてプールの中で上昇していく一連の挙動が観察できる。HPP 壁の上部までに上昇した大気泡は、多孔質壁の毛細管力の吸引により多孔質壁内部に入り、一部が伝熱面に輸送されるという解析結果も得られた。本来、多孔質壁の上部に気相が入った時点で、多孔質壁上部と下部のメニスカスでの毛管力がバランスされ、吸引力がなくなり、多孔質壁を通した流体の輸送

が停止すると考えられるが、本研究では、式 3.3-9 に示す体積力を用いて多孔質壁下部の毛管力を模擬しているため、吸引力が常に存在する計算となっていることから、このような結果となった。

図 3.3-15 には Case1 ($\delta = 0.1 \text{ mm}$) に対して、HPP の上面、側面及び底面における流量の時間変化を示す。正及び負の値は、それぞれ HPP に対する流入及び流出を意味する。HPP 下部の気液界面の毛管力により、流体は HPP の側面より流入し、そして HPP の底面から流出し伝熱面に輸送される。一方、HPP の上面は、HPP の側面より流動抵抗が高いため、ほとんど流入しないことが分かる。また、時間の進展とともに蒸気量が増えるため、HPP に流入するのは液相だけではなく、気相も含まれる。そのため、HPP への流入流量及び流出流量が下がる傾向となった。図 3.3-16 には Case1 に対して、HPP 底面からの流出流量及び water bottom 部への流入流量の時間変化を示す。両質量流量のバランスが取れていることが分かる。また、図 3.3-17 に HPP 底面と伝熱面間との距離 δ が変わった Case1 ($\delta = 0.1 \text{ mm}$) 及び Case2 ($\delta = 0.3 \text{ mm}$) の HPP 底面からの流出流量の比較を示す。両ケースは、初期ではほぼ同じ流量を HPP 底面から伝熱面へ輸送されるが、時間の進行とともに、 δ の小さい Case1 は、 δ の大きい Case2 より輸送量が大きいことが分かる。

図 3.3-18 に Case1 ($\delta = 0.1 \text{ mm}$) 及び Case2 ($\delta = 0.3 \text{ mm}$) の Bottom water 部への流入速度の比較を示す。 δ の違いにより、流動面積が変化し、Bottom water 部への流入速度に影響を与える。計算初期を含むすべての計算時間内で δ の小さい Case1 ($\delta = 0.1 \text{ mm}$) の Bottom water 部へ流入速度は、 δ の大きい Case2 ($\delta = 0.3 \text{ mm}$) より高い。その結果、Case1 のプール底面の熱伝達が促進し、図 3.3-19 に示すように、伝熱面平均温度は Case2 ($\delta = 0.3 \text{ mm}$) より低いことが分かる。伝熱面平均温度が下がると、伝熱面での相変化量が減少し、その結果、図 3.3-20 に示すように全解析領域における蒸気量が減少する。蒸気量が減少することにより HPP の側面からの液相水の吸入量が増え、HPP からもっと多い水が伝熱面に輸送され、さらに伝熱面の伝熱を促進することになる。

以上のことから、本研究の計算の δ 範囲では、 δ が小さくなると、壁面への輸送される流体の流量及び速度が増加し、伝熱を促進する結果となった。

(3) 気泡挙動に及ぼす伝熱面配置角度の効果に関する解析

IVR 時において原子力容器下部プレナムからの発熱は、その外部に流れる水によって冷却される。そのため、流路の伝熱面の配置角度は下向け水平から垂直まで変化する。そこで、伝熱面配置角度をパラメータにして、伝熱面の配置角度は気泡の離脱挙動に及ぼす影響を調べた。

① 計算体系及び計算ケース

配置角度 0° (伝熱面水平上向き) 時の計算体系を図 3.3-21 に示す。計算体系は $12 \times 12 \times 12 \text{ mm}$ の立方体である。立方体底面に高さ 1 mm の構造体を設置し、HPP を模擬する。また、構造体の中心に、断面 $1.3 \times 1.3 \text{ mm}$ の正方形孔を設け、HPP のマクロ孔 (蒸気排出孔) を模擬する。立方体底面は加熱されないが、 $1.3 \times 1.3 \text{ mm}$ の正方形孔から蒸気を流入させる。伝熱面の配置角度の気泡挙動に及ぼす影響を調べるための計算ケースを表 3.3-2 にまとめる。

表 3.3-2 伝熱面配置角度効果計算ケース

計算ケース	伝熱面配置角度	伝熱面配置状況
伝熱面配置角度効果 Case 1	0°	水平上向き
伝熱面配置角度効果 Case2	90°	垂直
伝熱面配置角度効果 Case3	135°	下向き
伝熱面配置角度効果 Case4	175°	下向き
伝熱面配置角度効果 Case5	180°	水平下向き

② メッシュ、境界条件及び初期条件

メッシュに関しては四面体 Structured メッシュを採用し、最大サイズを 0.2 mm とした。その結果、全解析領域の総メッシュ数は 0.95 M であった。プール上面を圧力一定 (1 bar) の出口、プール下部多孔質体の上下の面及びプールの上面以外の面を水の輸送ができない wall として設定した。プール底面中心の断面 1.3×1.3 mm の孔から蒸気を流入する設定とした。壁面熱流束 80000 W/m² を模擬し、蒸気の流入流量を 6×10⁻⁸ kg/s と設定した。詳細メッシュ分割及びメッシュサイズを図 3.3-22 に、境界条件の設定を図 3.3-23 に示す。

なお、初期条件としてプール内に速度のない 373.15 K の飽和水を充満した。

③ 計算方法

本計算において、界面追跡法 VOF を用いた。表面張力モデルには連続表面力 (CSF) モデルを用いた。接触角 (液—固接触角) を 90° と設定した。また、計算対象は自然循環のため、層流として計算した。

④ 計算結果

伝熱面配置角度が 0° (上向き) の Case1 における y 軸中心断面におけるボイド分布を図 3.3-24 に示す。伝熱面で気泡が成長した後、伝熱面から離脱していく一連の挙動が観察できる。気泡離脱は 0.5 s 近傍で発生したと判定し、離脱時の気泡体積及び気泡が球状と仮定した場合の気泡離脱直径を表 3.3-3 に示す。離脱直径は 4.6 mm であり、従来のプール沸騰実験結果と概ね一致する。

図 3.3-25 及び図 3.3-26 にそれぞれ伝熱面配置角度は垂直 90° の Case2 及び下向き 135° の Case3 における y 軸中心断面におけるボイド分布を示す。Case1 と違って、Case2 及び Case3 では明確な気泡離脱が見られず、気泡は壁面に引っ張られるように、伝熱面に沿ってスライディングしていく挙動が見られた。Case2 及び Case3 の気泡のスライディングし始める時間をそれぞれ 0.278 s と 0.277 s と判定した。スライディング開始時の気泡体積及び気泡が球状と仮定した場合の気泡直径を表 3.3-3 に示す。

図 3.3-27 及び図 3.3-28 にはそれぞれ Case4 (下向き 175°) と Case5 (下向き 180°) における y 軸中心断面のボイド分布を示す。Case4 (下向き 175°) では、気泡が生成・成長し

た後、1.29 s 頃に蒸気がプールの上部流出口から流出し、気泡が縮小し始めた。その後、気泡が崩れて一部の伝熱面が気泡に覆われる状態から解放された(1.391 s)。そして、気泡が再び成長していく(1.45 s)ことが観察された。一方、Case5(下向き 180°)では、気泡が生成・成長した後、1.38 s 頃に蒸気がプールの上部流出口から流出し始め、気泡が縮小し始めた。しかし、Case4 と違って、Case5 はその後、気泡が崩れることなく伝熱面が常に気泡に覆われる状態となっている。完全下向き 180° 条件では気泡が常に居座る状態であり、伝熱的最も厳しい条件であることが分かった。表 3.3-3 にも Case4(下向き 175°)と Case5(下向き 180°)における気泡挙動をまとめて示す。

表 3.3-3 各ケースにおける気泡挙動

計算ケース	時間 s	気泡体積 $\times 10^{-8} \text{ m}^3$	気泡直径 mm	気泡特徴
伝熱面配置角度効果 Case1 (0°)	0.5	5.01733	4.58	離脱時刻
伝熱面配置角度効果 Case2 (90°)	0.278	2.78819	3.76	スライディング開始時刻
伝熱面配置角度効果 Case3 (135°)	0.277	2.767	3.75	スライディング開始時刻
伝熱面配置角度効果 Case4 (175°)	1.29	13.085	6.3	最大気泡時刻 その後、蒸気の流出により気泡が縮小し、また気泡が崩れて伝熱面の一部は気泡が覆われる状態から解放される(冷却が復帰される)。
伝熱面配置角度効果 Case5 (180°)	1.38	13.776	6.41	最大気泡時刻 その後、蒸気の流出により気泡縮小するが、伝熱面は常に気泡が覆われる状態である。

175° と 180° の解析結果では、明確な気泡の離脱やスライディングは観察されなかったが、気泡の生成と成長後には、浮力の影響で蒸気が放出され、気泡が収縮し、気泡発生位置近傍の蒸気量が減少した。完全下向き(180°)条件を除いて、浮力は気泡の離脱を引き起こす力として機能するため、気泡サイズが一定程度大きくなった後、気泡が必ずいずれの形(離脱やスライディングまたは流出)でその全部か一部かが発生位置から離れることになる。本計算では、HPP 壁サイズを 5.5 mm×5.5 mm と設定しているため、気泡の横方向サイズがこの壁サイズを超えると、浮力の効果により蒸気が放出する結果となったが、無限に大きい HPP 壁の場合、気泡のサイズが十分大きくなると、気泡が壁に沿ってスライディングしていくと考える。一方、無限に大きい完全下向き 180° の場合、気泡は発生位置から離れることができないが、実機では伝熱面が

180° から 90° まで連続に変化するため、気泡が大きくなるにつれ、一部の気泡は完全下向き位置からずれることにより、浮力が働いて気泡の一部がスライディングすることになる。また、実機では冷却水が自然循環するため、完全下向きの部分でも冷却水の流れにより気泡やその一部が流され则认为。

(4) まとめ

HPP 底面と伝熱面間との距離 δ をパラメータとし、0.3 mm と 0.1 mm の 2 ケースの解析を実施し、HPP 底面と伝熱面間との距離 δ の流体輸送に及ぼす効果及び伝熱面配置角度の気泡挙動の及ぼす効果を調べた。計算初期において、 δ の変化は HPP から伝熱面への流体の輸送質量に影響が少ないことが分かった。一方、 δ が小さくなると、流動面積の減少により Bottom water 部へ流入速度が増加し、伝熱面の伝熱が促進され、伝熱面温度が下がる。その結果、伝熱面での相変化量が減少し、HPP からの液相水の吸入量が増え、HPP からもっと多い液相が伝熱面に輸送され、さらに伝熱面の伝熱を促進することになる。その結果、本研究の計算の δ 範囲では、 δ が小さくなると、壁面への提供される流体の流量及び速度が増加し、伝熱を促進する結果となった。

また、12×12×12 mm の正方体プールにおいて、伝熱面を水平上向き (0°)、垂直 (90°)、下向き 135°、下向き 175° 及び完全下向き 180° に配置した 5 ケースに対して計算を行い、伝熱面配置角度の気泡挙動に及ぼす効果を調べた。その結果、角度 0° (水平上向き) の条件では、伝熱面から気泡の離脱が見られ、その離脱直径は 4.6 mm であり、従来のプール沸騰実験結果と概ね一致する。また、角度 90° (垂直配置) 及び 135° (下向き 45°) のケースでは明確な気泡離脱が見られず、気泡は壁面に引っ張られ、伝熱面に沿ってスライディングしていく挙動が見られた。さらに、配置角度 175° (下向き 75°) と 180° (完全下向き) では、明確な気泡離脱・スライディングが見られない。配置角度 175° の条件では、気泡が生成・成長した後、蒸気の流出より気泡が縮小・崩れることにより、一部の伝熱面が気泡に覆われる状態から解放されることが観察された。一方、180° (完全下向き) では、蒸気の流出により気泡は縮小するが、崩れることなく伝熱面が常に気泡に覆われる状態である。完全下向き 180° 条件では気泡が常に居座る状態であり、伝熱的最も厳しい条件であることが分かった。

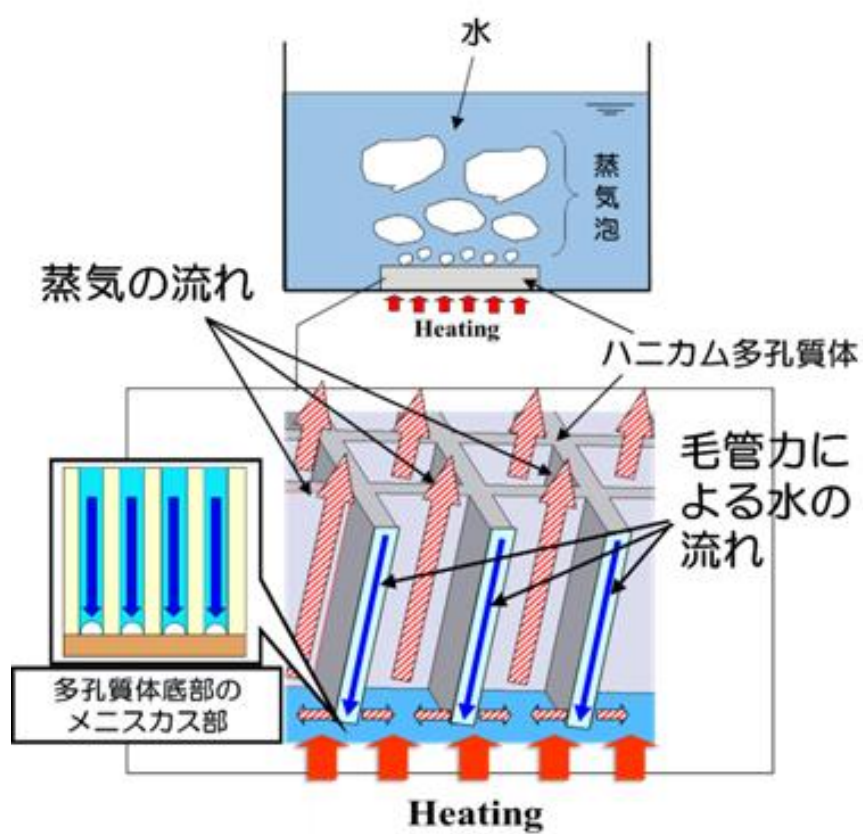


図 3.3-6 HPP を設置した時の壁近傍流れの特性

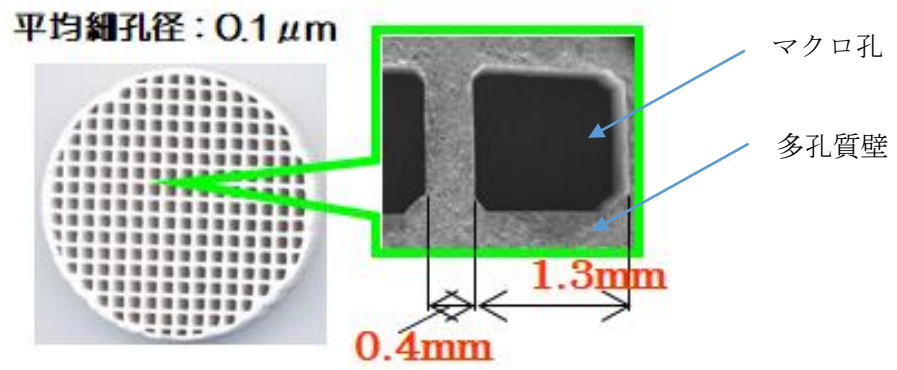


図 3.3-7 HPP の構造

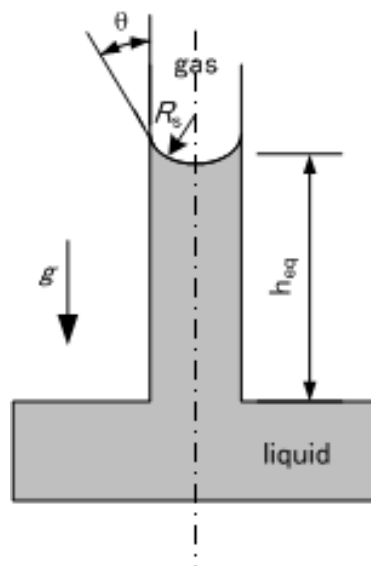


図 3.3-8 有効半径 R_s の毛細管内における液柱の上昇（液柱平衡高さは h_{eq} ）

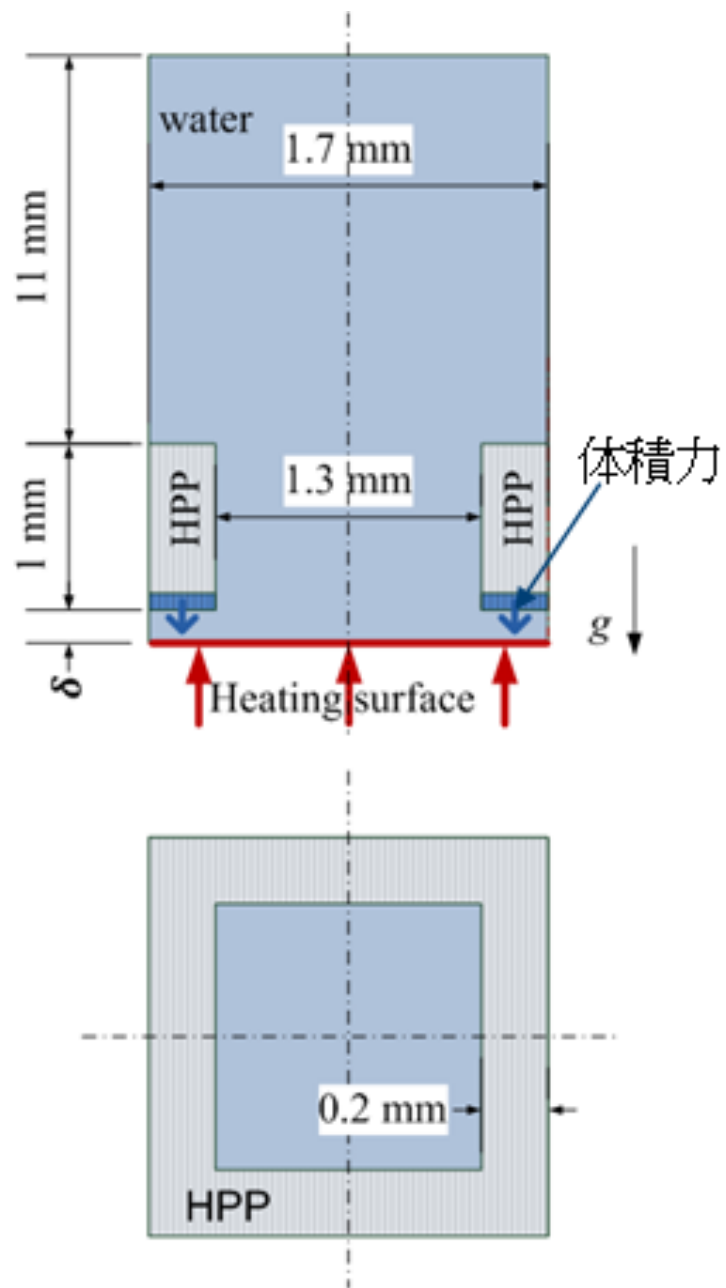


図 3.3-9 HPP 底面と伝熱面間との距離の効果に関する解析の計算体系

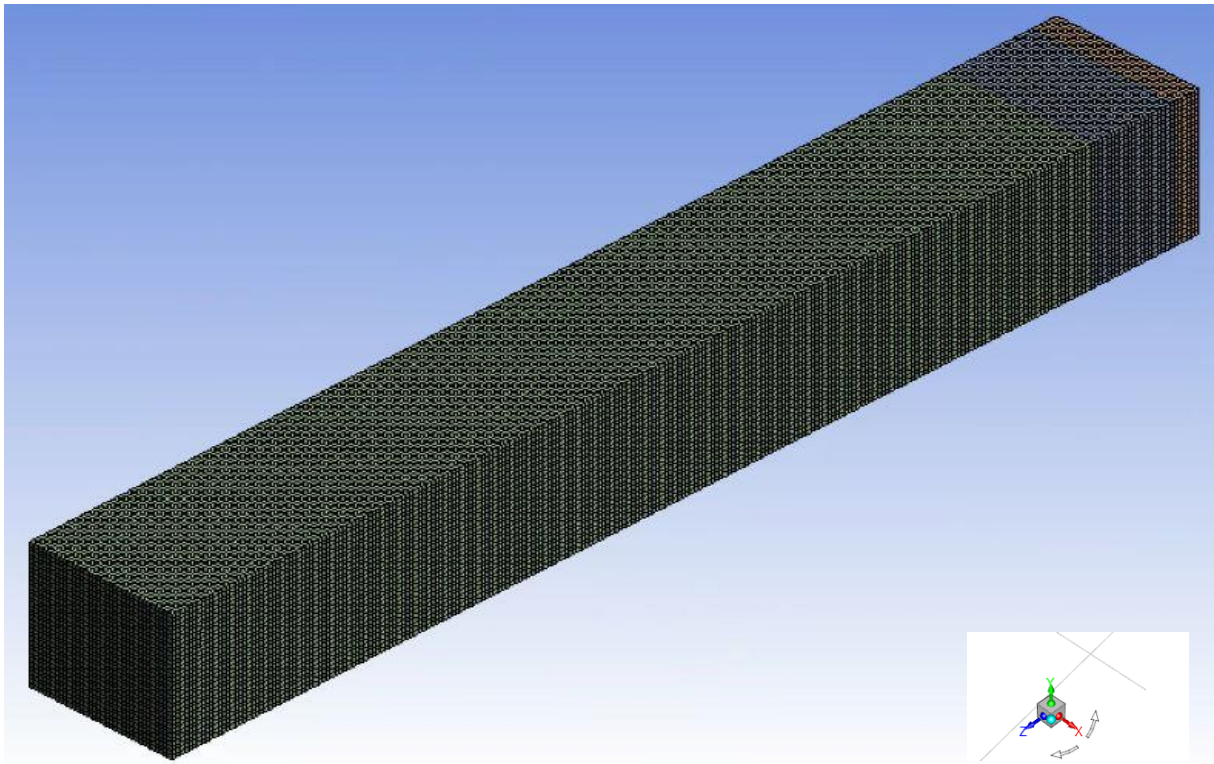


図 3.3-10 計算セル分割

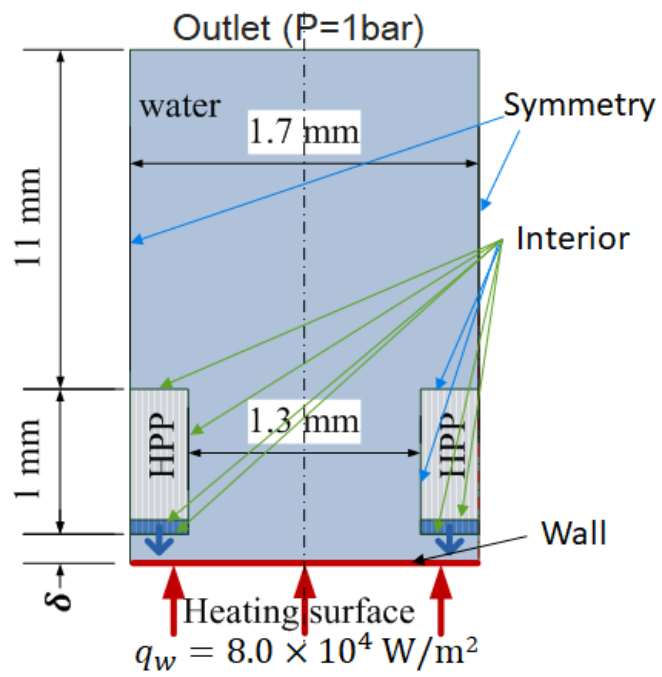


図 3.3-11 境界条件設定

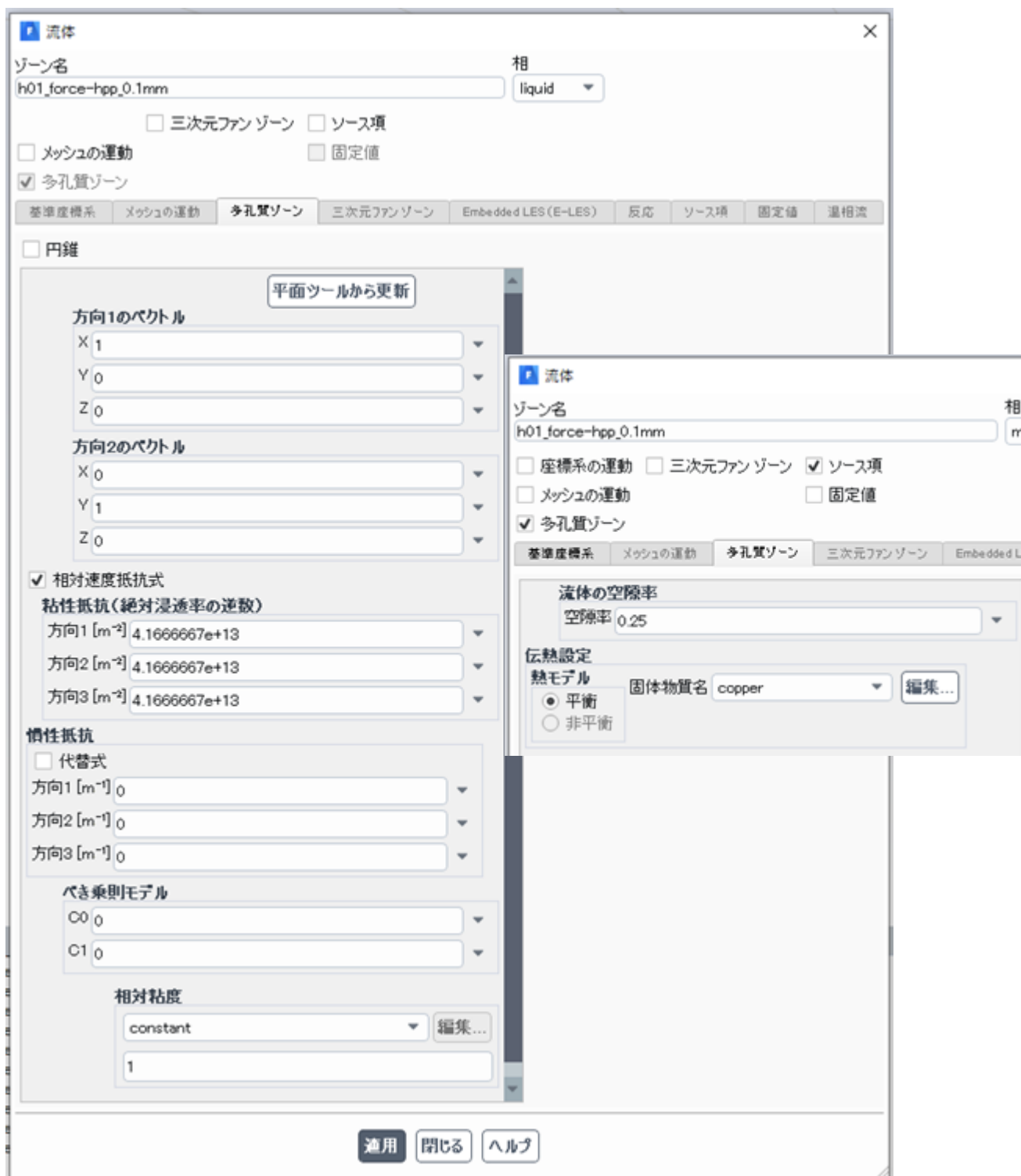


図 3.3-12 多孔質体空隙率及び粘性抵抗の入力

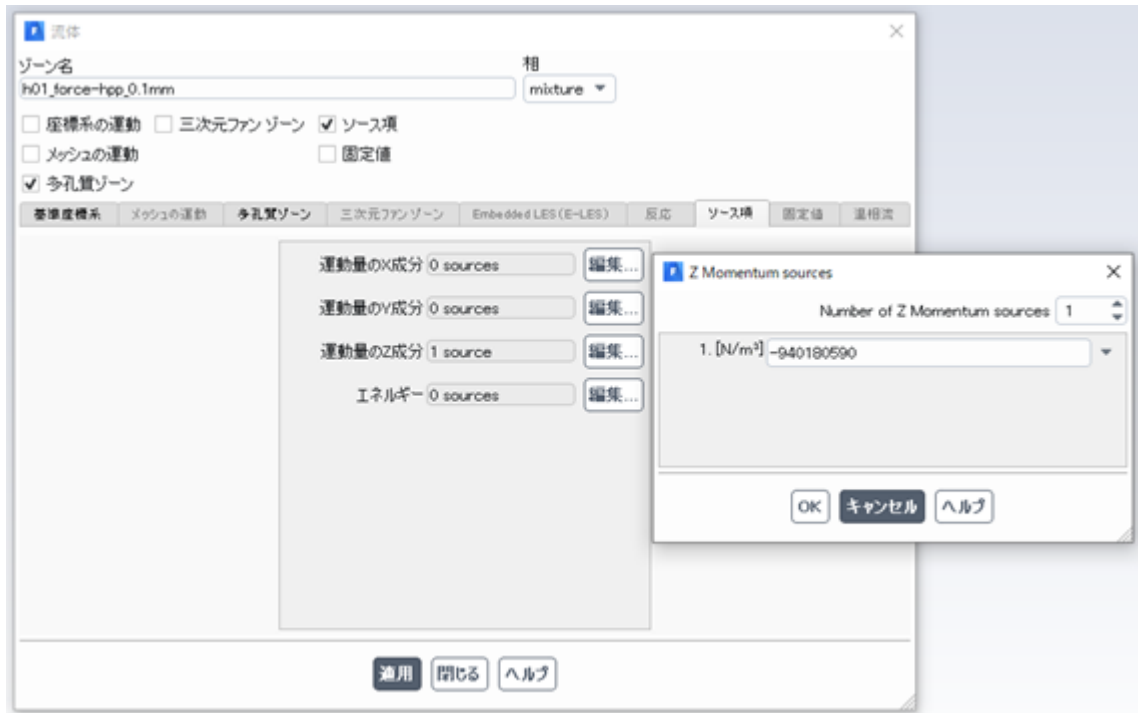


図 3.3-13 HPP 下部 2 セル分の多孔質体における体積力の入力

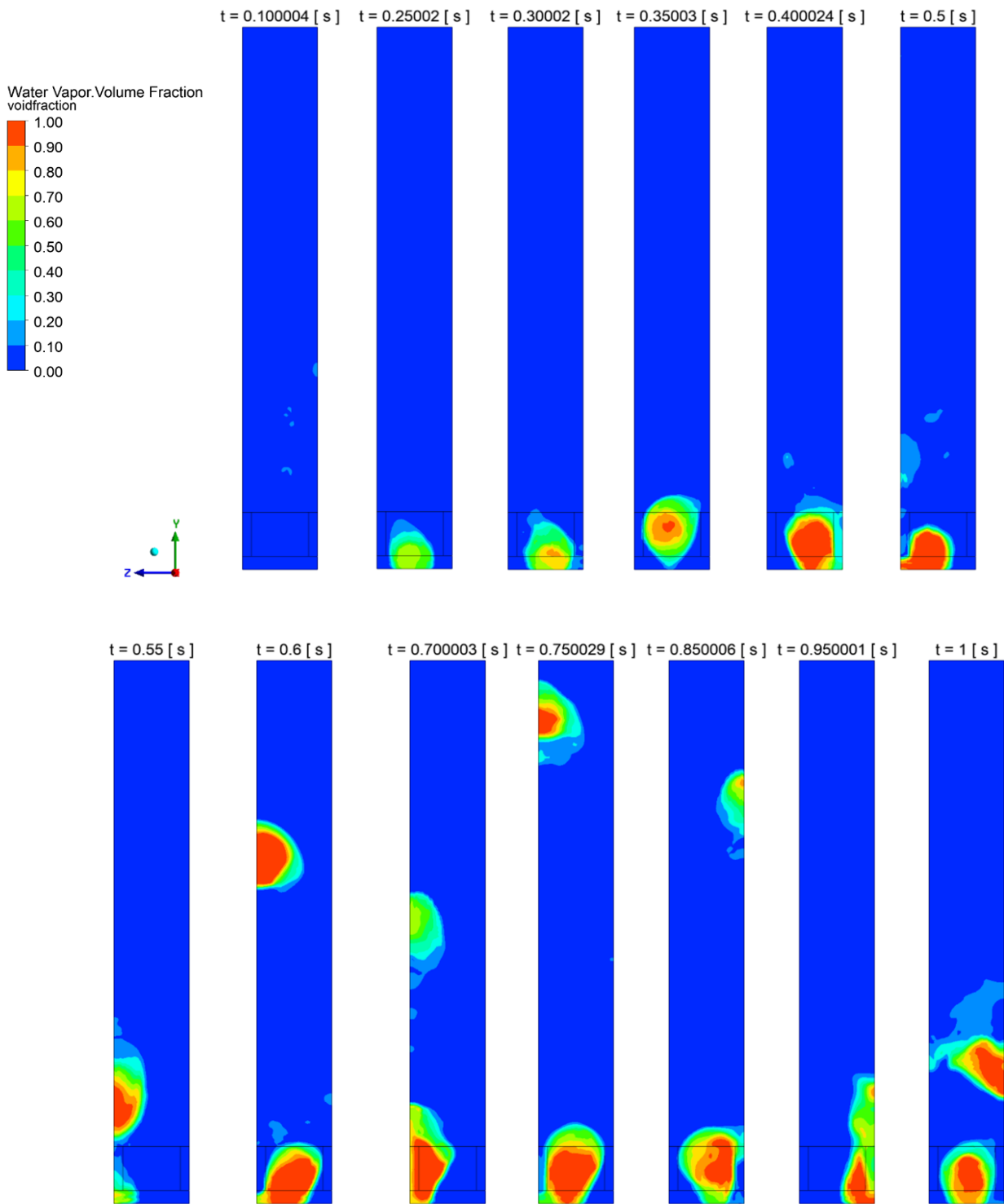


図 3.3-14 y 軸中心断面におけるボイド分布 (Case2)

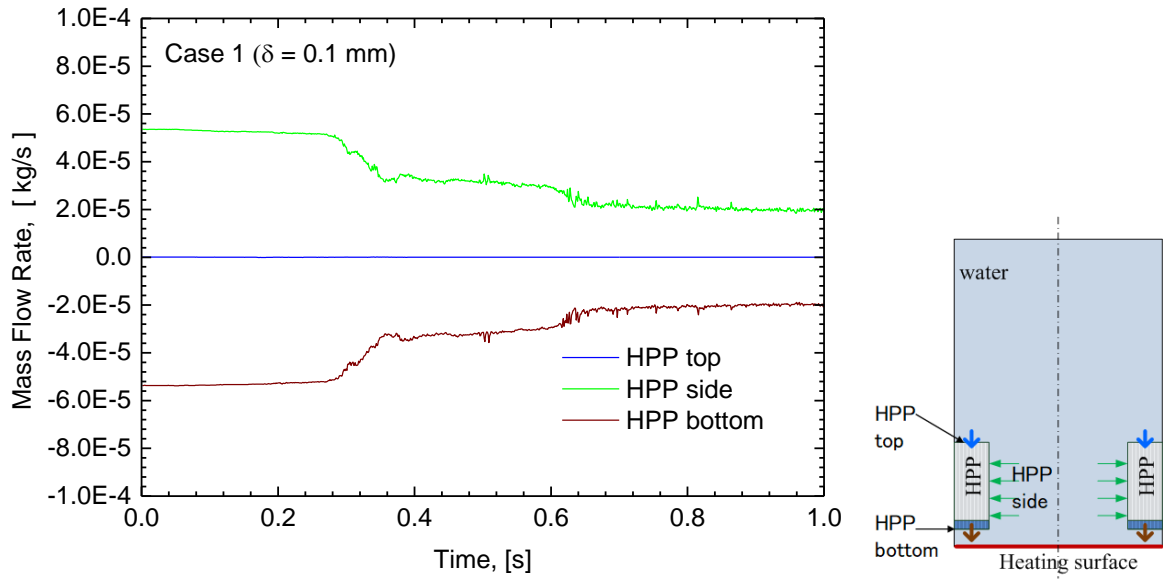


図 3.3-15 HPP の上面、側面及び底面における流入流出流量の時間変化 (Case1)

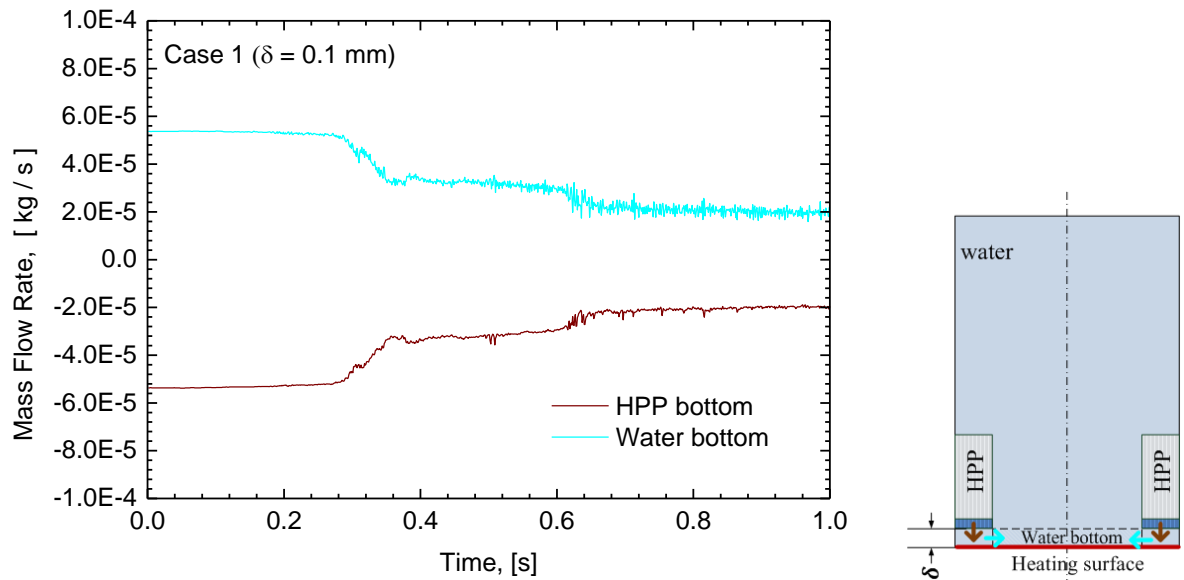


図 3.3-16 HPP 底面からの流出流量及び water bottom 部への流入流量の時間変化 (Case1)

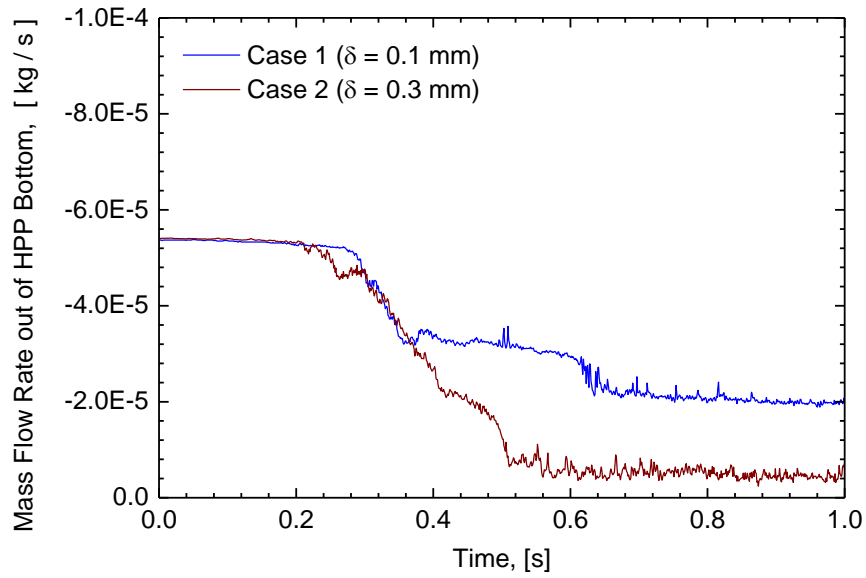


図 3.3-17 HPP 底面からの流出流量の比較 (Case1 及び Case2)

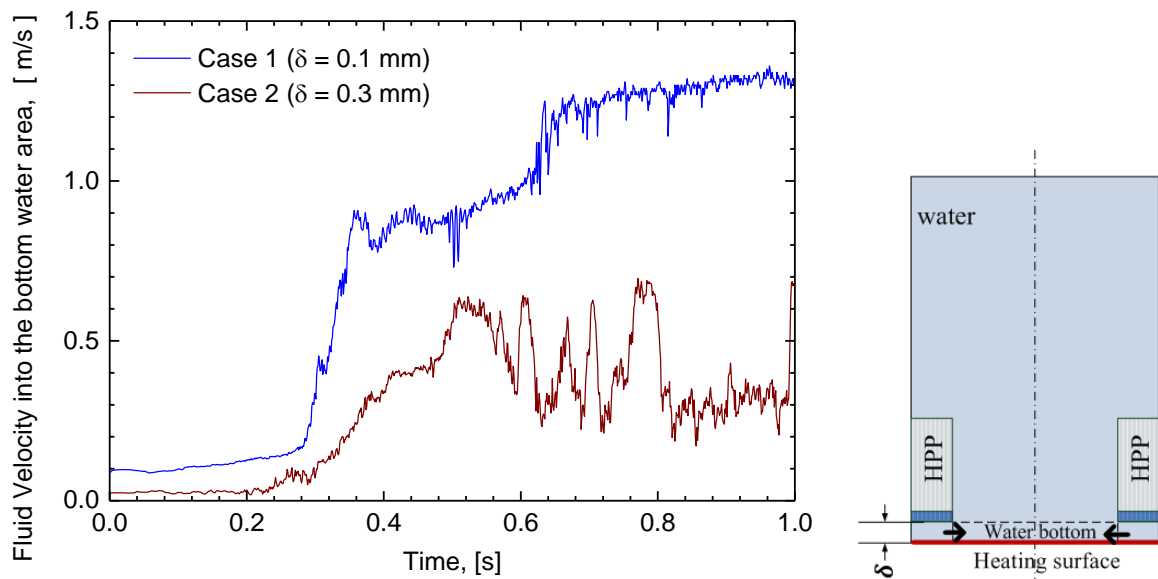


図 3.3-18 Bottom water 部への流入速度の比較 (Case1 及び Case2)

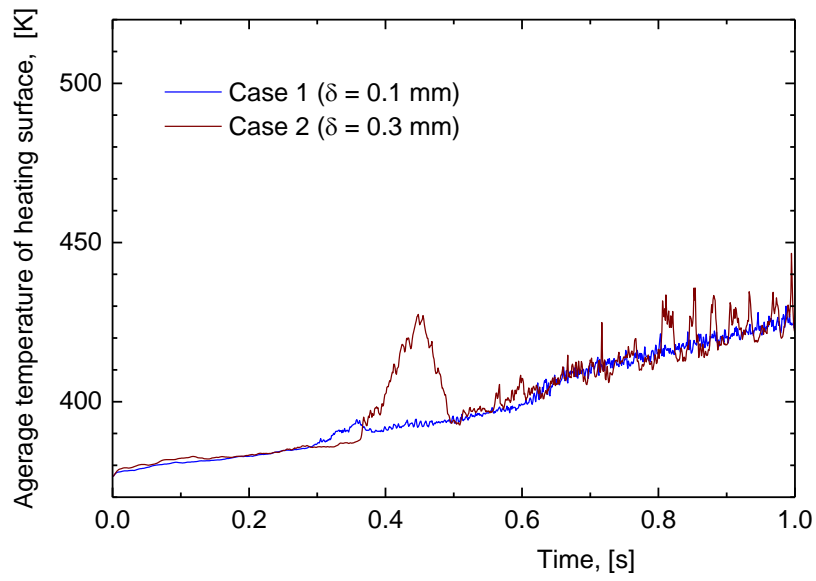


図 3.3-19 伝熱面平均温度の比較 (Case1 及び Case2)

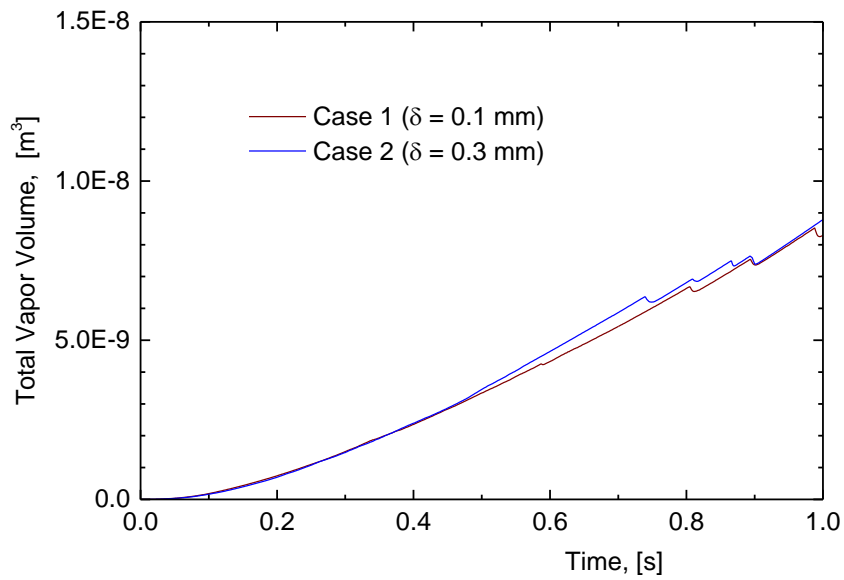


図 3.3-20 全解析領域における蒸気量変化の比較 (Case1 及び Case2)

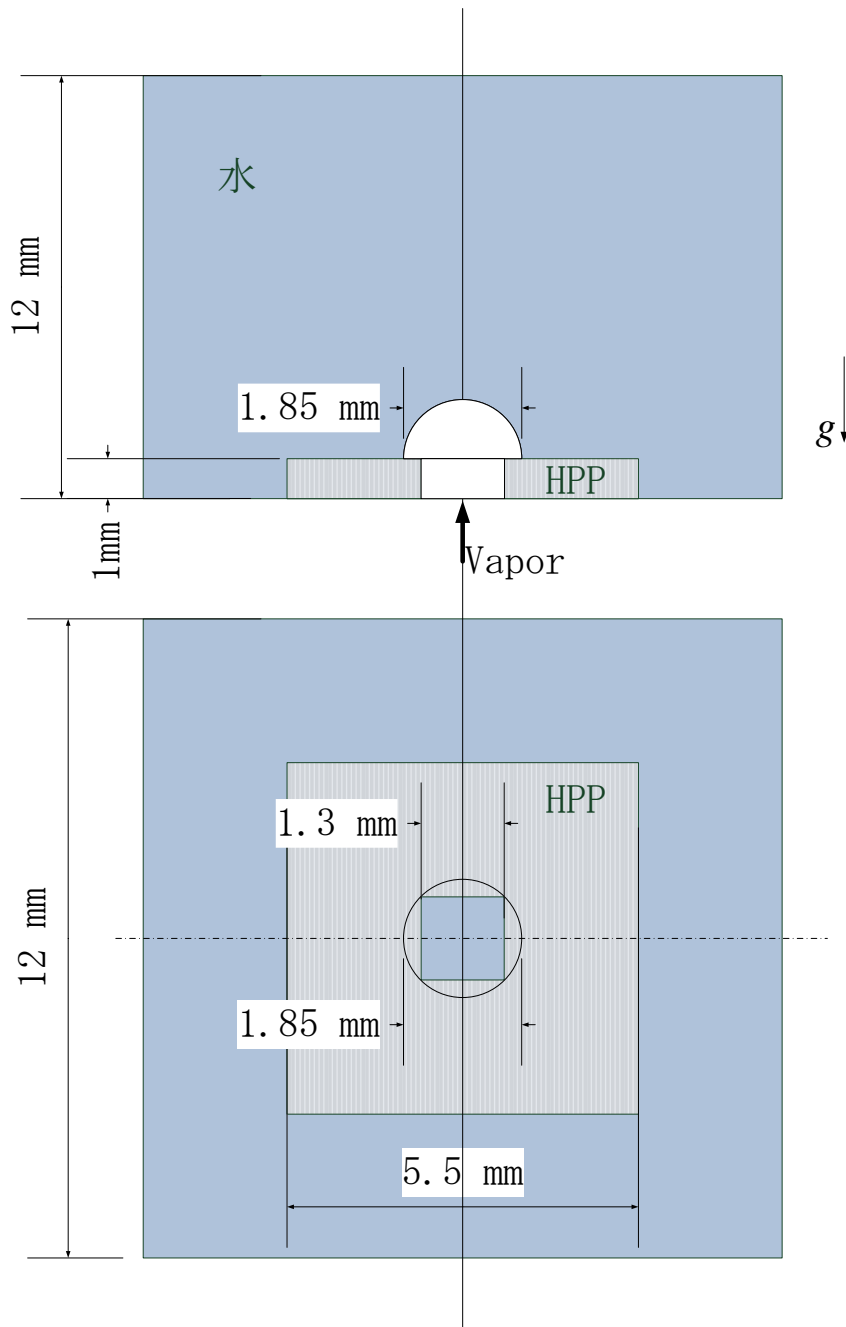
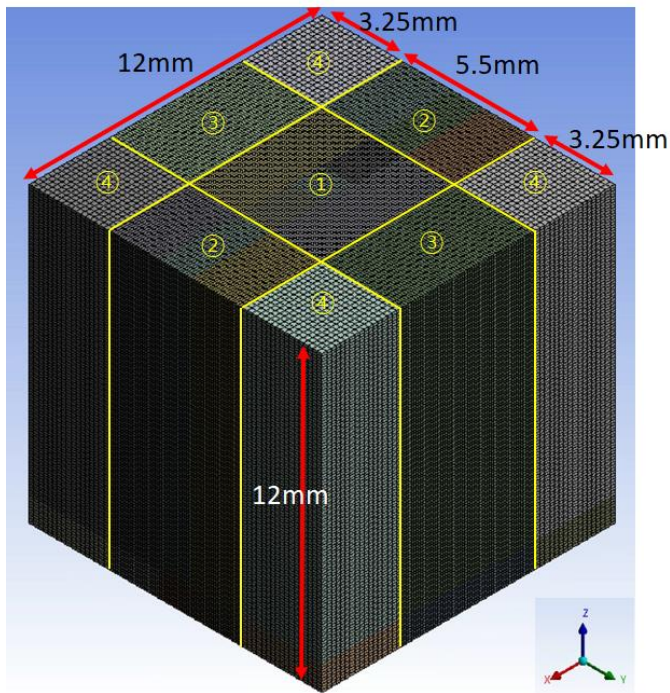


図 3.3-21 伝熱面配置角度効果解析の計算体系（配置角度 0° 時）



区域	メッシュサイズ (mm) (x × y × z)
①	0.1 × 0.1 × 0.1
②	0.2 × 0.1 × 0.1
③	0.1 × 0.2 × 0.1
④	0.2 × 0.2 × 0.1

図 3.3-22 伝熱面配置角度効果解析のメッシング

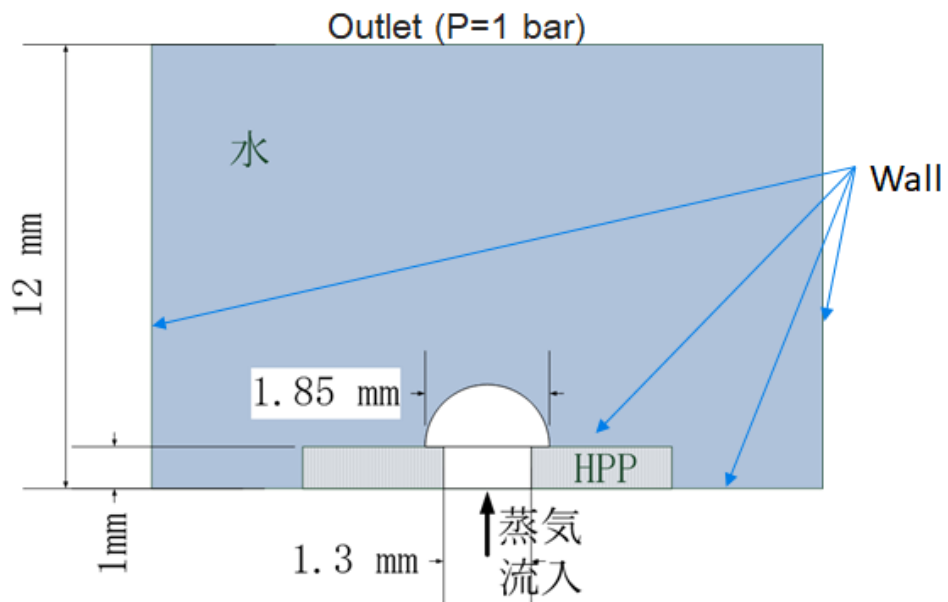


図 3.3-23 伝熱面配置角度効果解析の境界条件設定

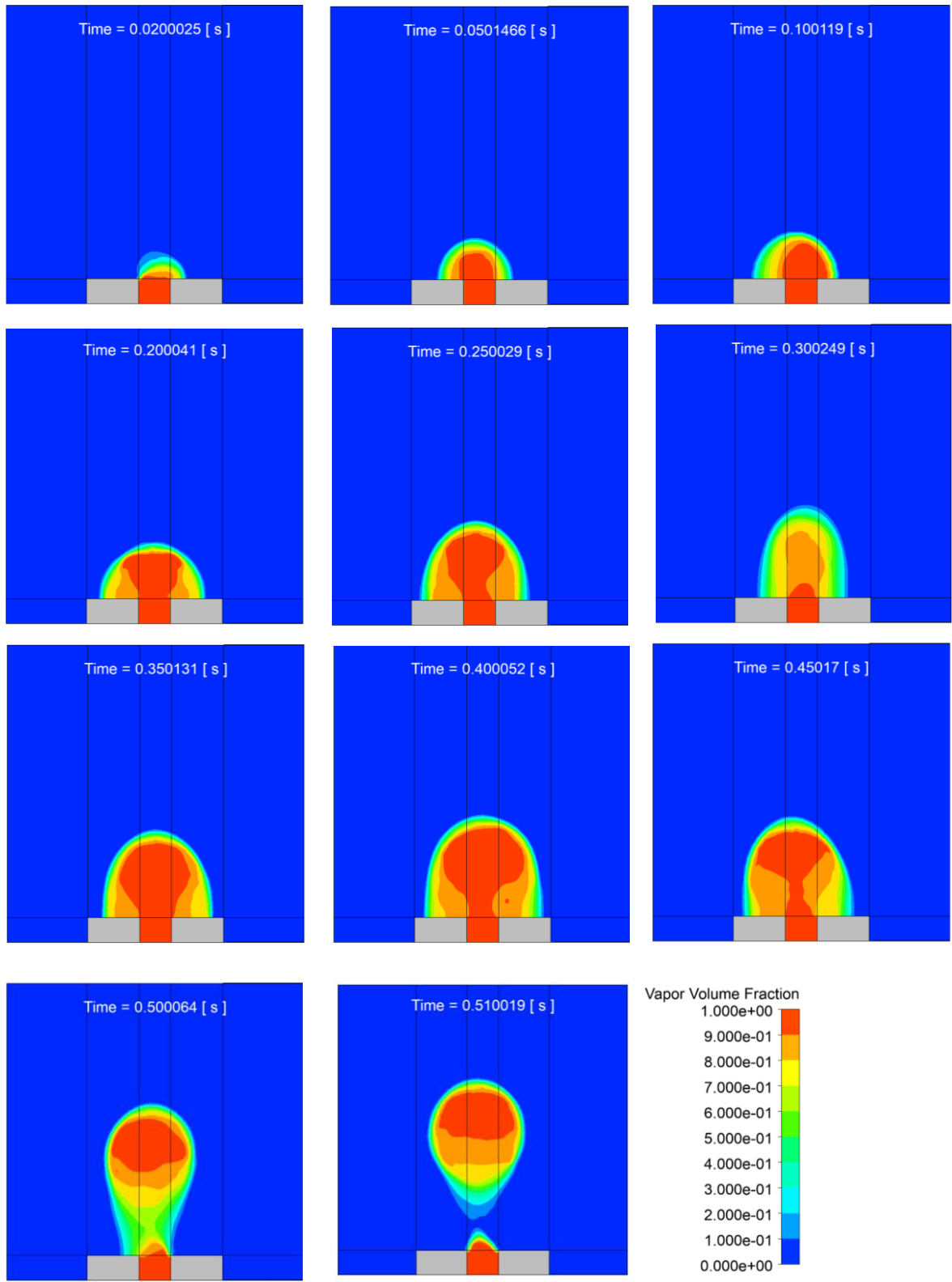


図 3.3-24 伝熱面配置角度 Case1 (上向き 0°) における気泡挙動

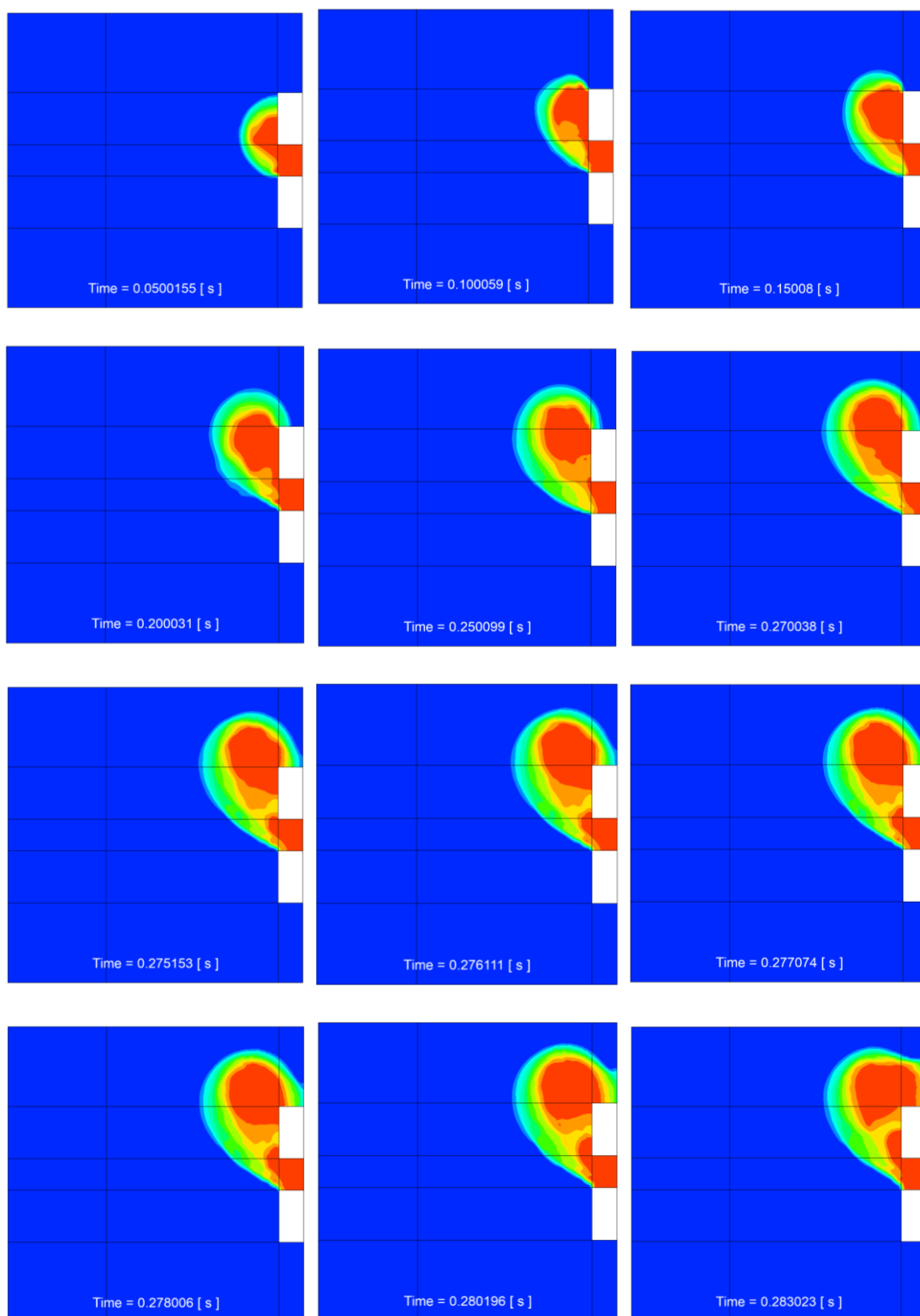


図 3. 3-25 伝熱面配置角度 Case2 (垂直 90°) における気泡挙動

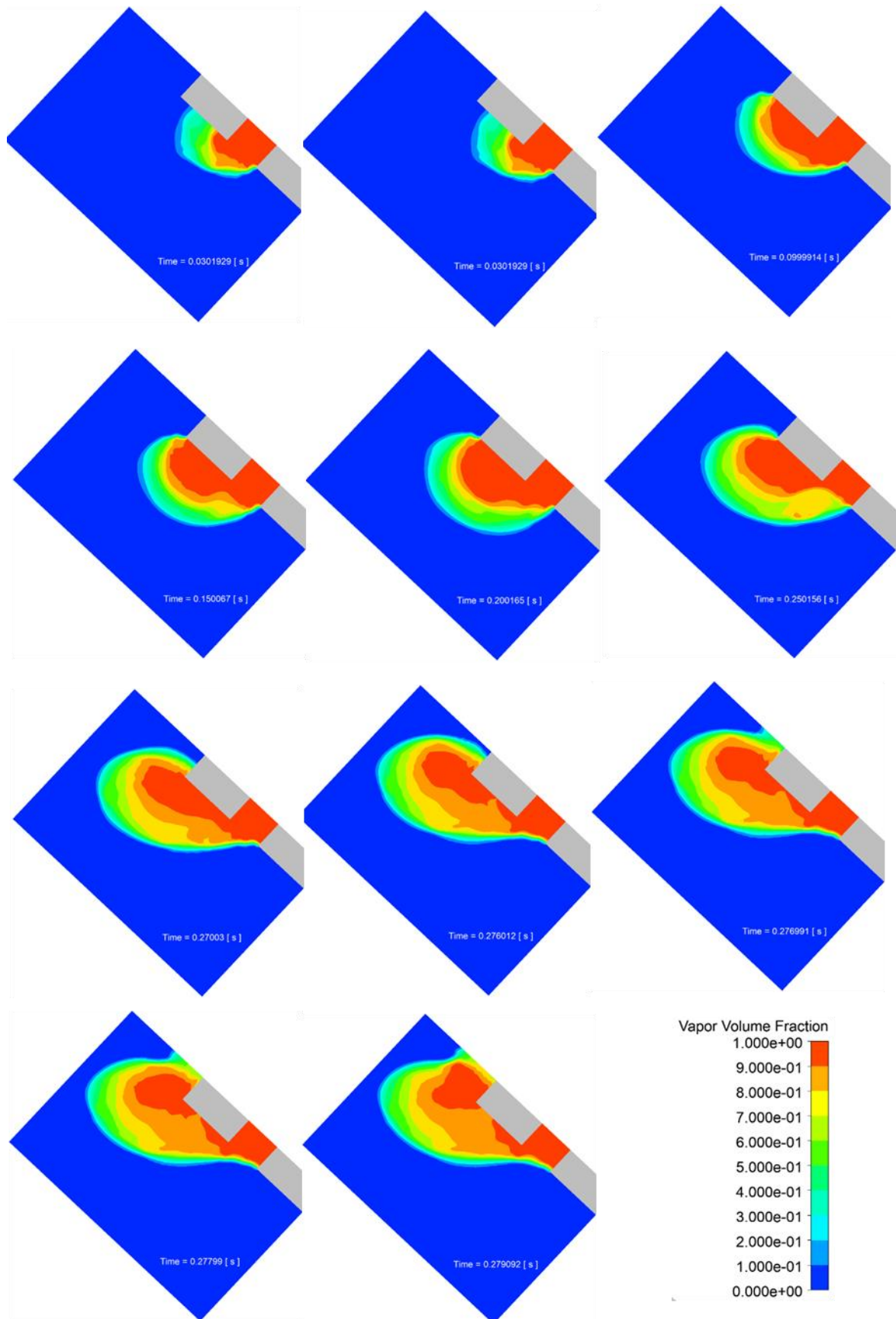


図 3.3-26 伝熱面配置角度 Case3 (下向き 135°) における気泡挙動

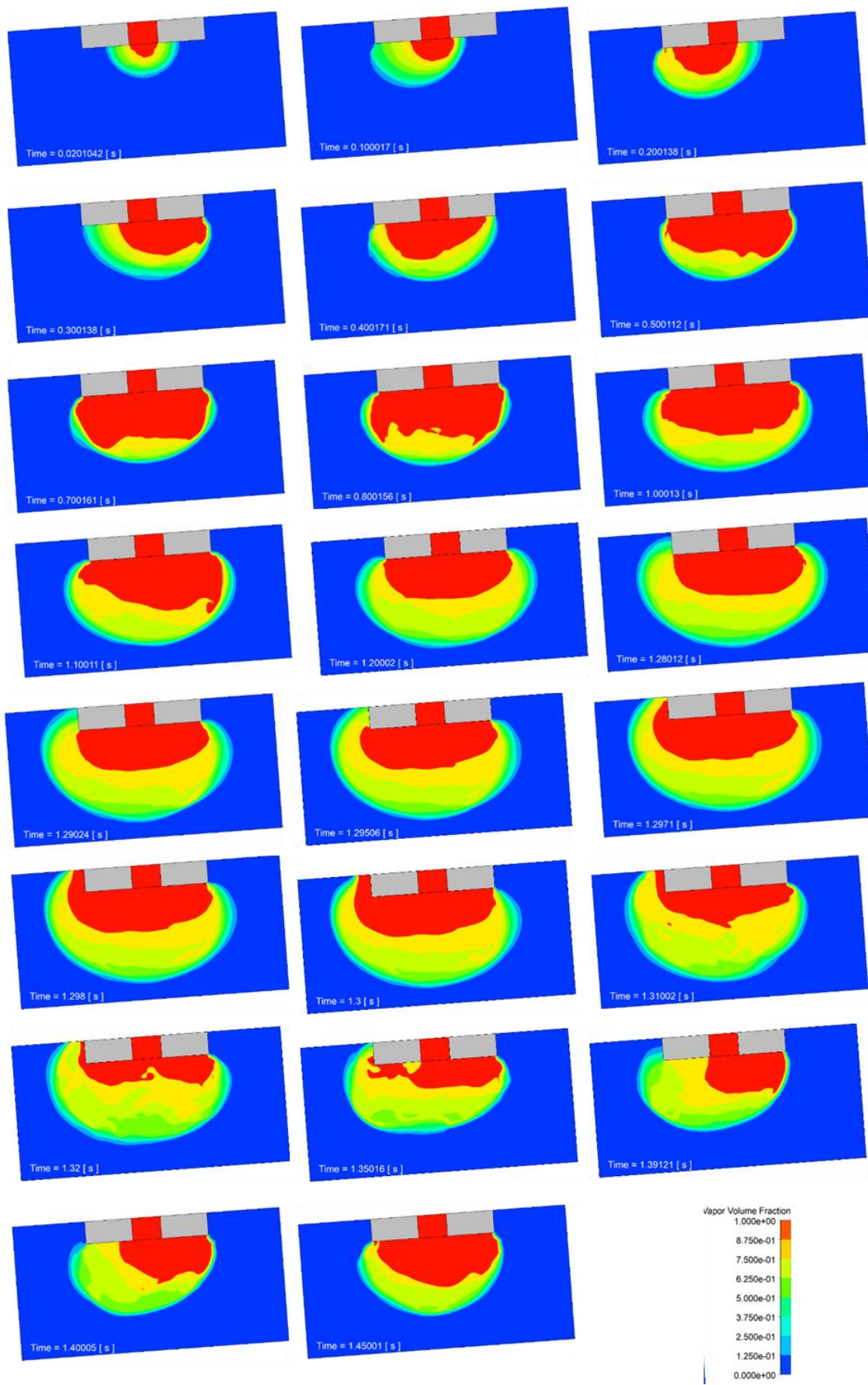


図 3.3-27 伝熱面配置角度 Case4 (下向き 175°) における気泡挙動

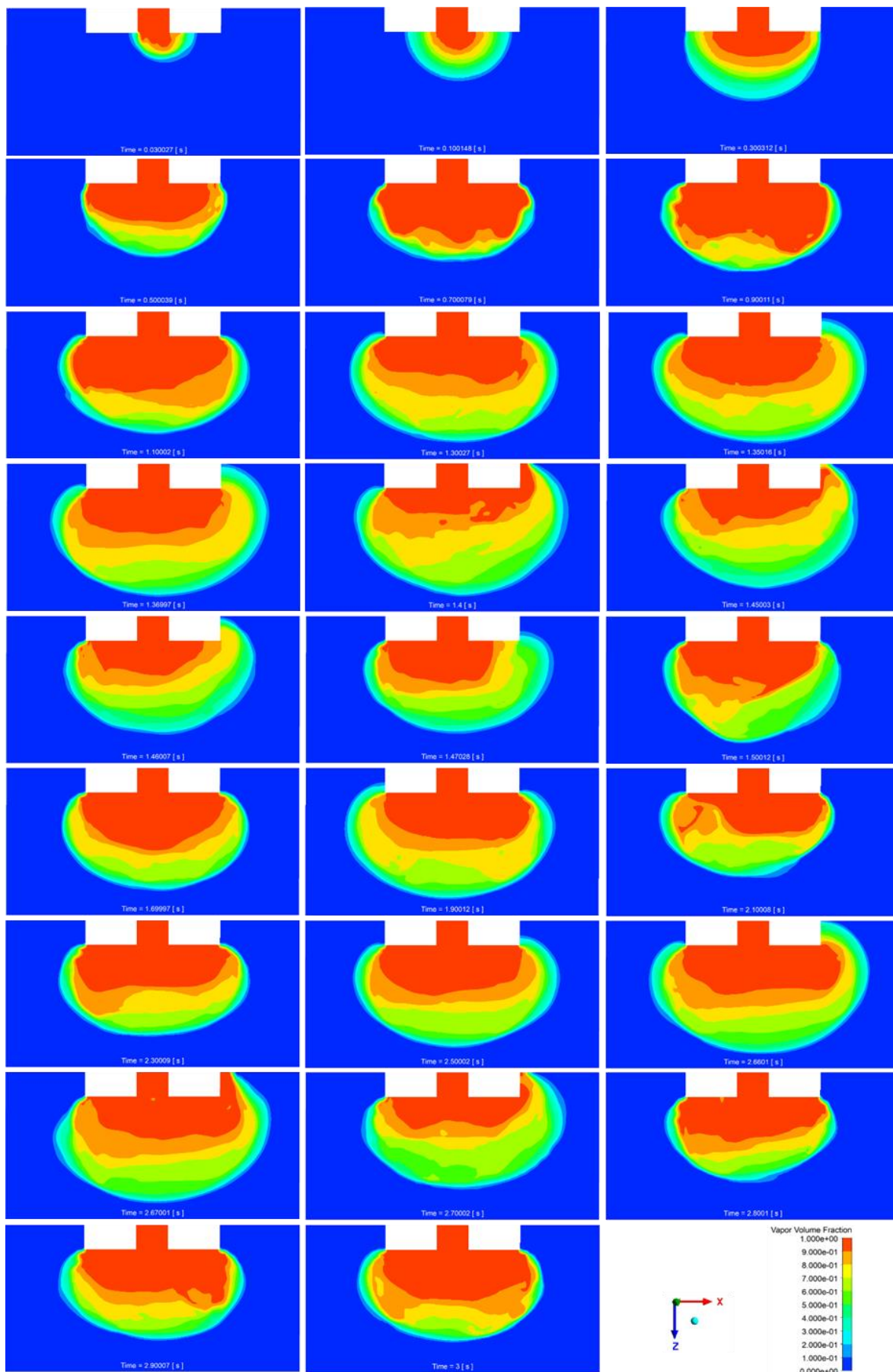


図 3.3-28 伝熱面配置角度 Case5 (下向き 180°) における気泡挙動

参考文献

- (2) S. Mori et al., CHF enhancement by honeycomb porous plate in saturated pool boiling of nanofluid, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Volume 53, Issue 7, pp 1028-1035, 2016
- (3) W. H. Lee, "A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Modeling". Technical Report LA-UR 79-975. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, 1979.
- (4) Z. Yang, X.F. Peng and P. Ye, "Numerical and experimental investigation of two phase flow during boiling in a coiled tube", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51, pp. 1003-1016 (2008)
- (5) D. Lorenzini and Y. Joshi, "CFD Study of Flow Boiling in Silicon Microgaps with Staggered Pin Fins for the 3D-Stacking of ICs", 15th IEEE ITherm Conference, 978-1-4673-8121-5, Las Vegas, Nevada, USA, 2016

3.4 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）

3.4.1 ナノ粒子層の性状と CHF の関係の明確化【R1-R4】

【令和3年度までの実施内容・成果の概要】

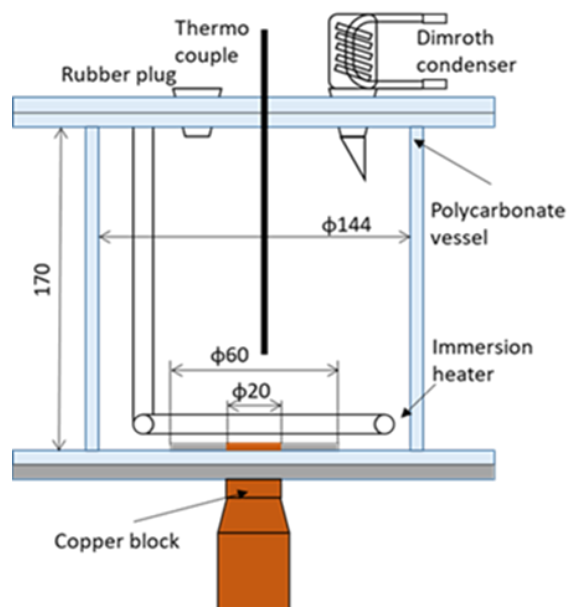
ナノメートルサイズの微粒子懸濁液であるナノ流体中で核沸騰を生じると、液体中のナノ粒子が伝熱面に付着してナノ粒子層を形成する。この結果、粒子濃度が微小であっても、伝熱面表面性状の変化に起因して、核沸騰熱伝達特性が有意に変化し、特に CHF が大きく向上する。このため、ナノ粒子の素材と濃度、伝熱面の素材を主な実験パラメータとして、蒸留水をベース液とする飽和プール沸騰実験を実施し、伝熱面上に形成されるナノ粒子層の性状と CHF の関係を調べた。

ナノ粒子の素材と濃度の影響解明に使用した実験装置と伝熱ブロックを各々図 3.4-1 と図 3.4-2 に示す。試験容器は透明のポリカーボネート製で、内径 144 mm、高さ 170 mm の密閉円筒容器である。図 3.4-1 に示すように、ステンレス製容器の底部にカートリッジヒーターを内蔵した銅ブロックを装着し、試験容器の頂部には、容器内の圧力と液量を一定に保つためにジムロート式の凝縮器を配置した。また、飽和沸騰を維持するため、プレヒーターとして投げ込みヒーターを設置するとともに、飽和沸騰が維持されていることを確認するため、伝熱面の上方 10mm の位置に K 型熱電対を配置した。実験中は、試験容器の側面を断熱材で覆い、熱損失を低減した。図 3.4-2 に示すように、カートリッジヒーターと K 型熱電対を内蔵した銅ブロックの直径 20 mm の円形端面を伝熱面として使用した。壁面温度と熱流束は、K 型熱電対を用いて計測した温度データより、直線状の温度分布を仮定するとともに熱伝導に関する Fourier の法則を用いて算出した。カートリッジヒーターへの投入電力の調整はボルトスライダにより行い、実験中における温度及び投入電力は、データロガーを用いて 1 秒ごとに記録した。

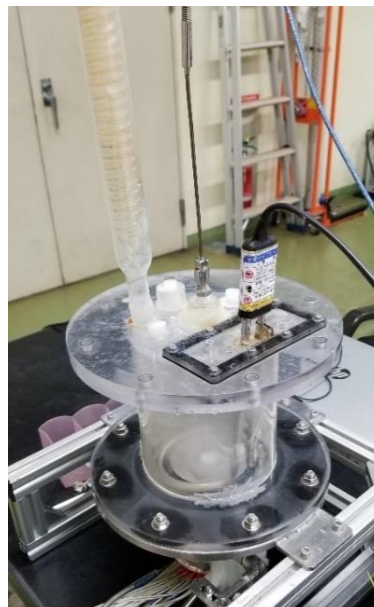
ナノ粒子の素材は TiO_2 、 Al_2O_3 、 SiO_2 の 3 種類、ナノ粒子の濃度は 0.5 g/L を基準として、 SiO_2 の場合にはさらに 0.05 及び 0.005 g/L の低濃度条件でも実験を実施した。各実験条件において、まず実験容器を蒸留水で満たすとともに、脱気のために投げ込みヒーターに通電して 40 分間核沸騰を継続した。このあと、投げ込みヒーターへの投入電力を調整して試験液体を飽和温度に保ちつつ、高濃度のナノ流体を試験液体に加えてナノ粒子の濃度を所定値とした。その後、伝熱ブロック内のカートリッジヒーターに通電して伝熱面に投入する熱流束をステップ状に増加させることで、壁面熱流束 q と壁面過熱度 ΔT の関係、すなわち沸騰曲線を得た。ナノ流体中で核沸騰を生じるため、伝熱面上にナノ粒子層が形成される。そこで、ナノ粒子層の性状を把握するため、沸騰曲線を得た後に、ナノ粒子の堆積質量やナノ粒子層の毛管力 (Wickability) 等の計測を実施した。

実験の結果、 TiO_2 、 Al_2O_3 及び低粒子濃度の SiO_2 ナノ流体では、伝熱面上におけるナノ粒子の堆積量が 1.5 g/m^2 程度以下であるのに対し、高粒子濃度の SiO_2 ナノ流体では、 4 g/m^2 を超える量のナノ粒子が堆積した。これに対応して、高粒子濃度の SiO_2 ナノ流体では、他の条件よりも有意に高い毛管性能及び CHF 値が達成された。Watanabe 等⁽⁶⁾は、ナノ粒子層の伝熱面への付着力を実験的に調べ、 Al_2O_3 や TiO_2 と比較して、 SiO_2 の付着強度が極めて大きいことを報告している。ナノ流体のプール沸騰中では、ナノ粒子の伝熱面への付着と気泡形成に起因する圧力変動等によるナノ粒子層の剥離が同時進行する。このため、より多くのナノ粒子を堆積

させるには、ナノ粒子の付着量を増加させると同時に、ナノ粒子層の剥離を抑制する必要がある。単位時間当たりのナノ粒子付着量は液中の粒子濃度と比例関係にあり、ナノ粒子層の付着力の増加とともにナノ粒子層の剥離は抑制されるため、高粒子濃度の SiO₂ ナノ流体で、他の条件よりも多くのナノ粒子が伝熱面上に堆積するとともに、高い毛管性能が発現し、この結果、高い CHF が達成されたものと考えられることを示した。

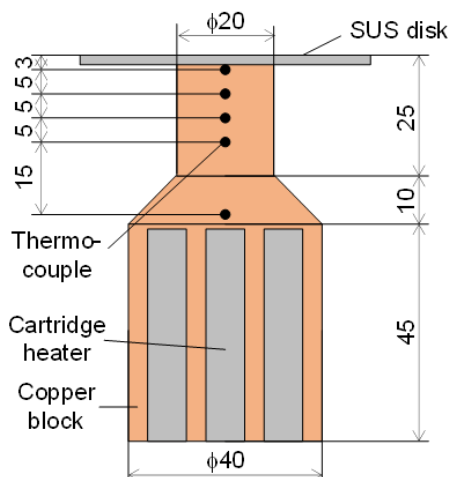


(a) 構成図

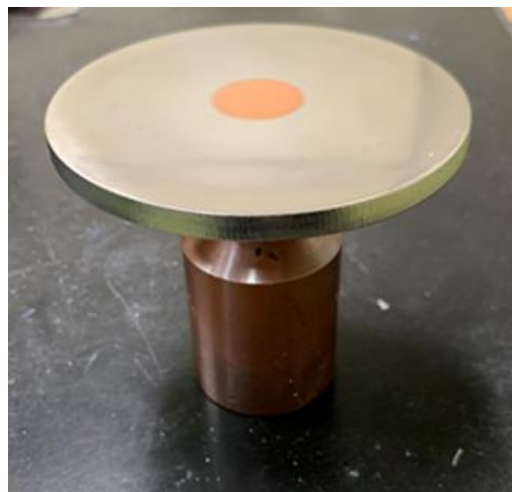


(b) 写真

図 3.4-1 実験装置（ナノ粒子の素材及び濃度の影響検討用）



(a) 構成図



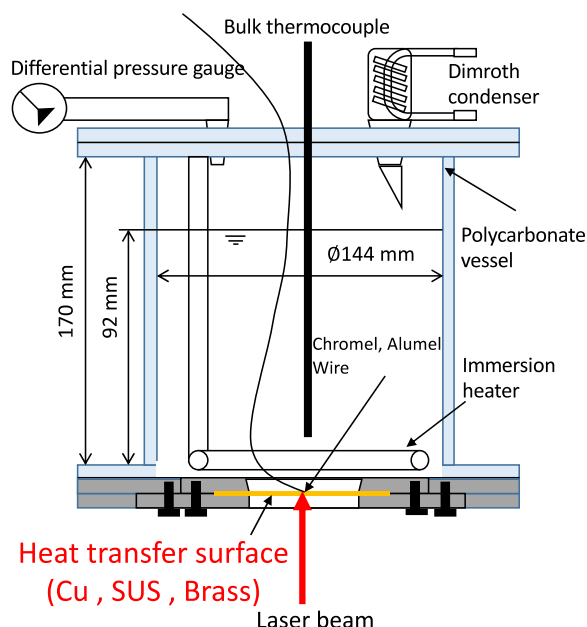
(b) 写真

図 3.4-2 伝熱ブロック

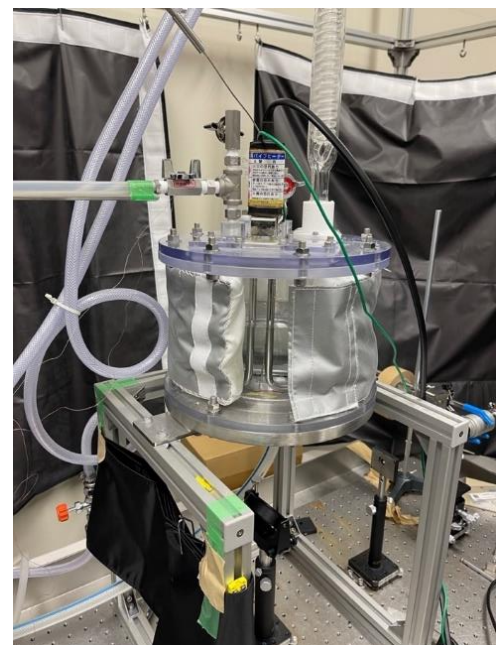
次に、伝熱面素材の影響評価では、伝熱面素材として、銅、真鍮、ステンレスの3種類を用いた。ここで、図 3.4-1 に示す実験装置の構成で伝熱ブロックの材質を真鍮やステンレスに変更すると、低熱伝導率に起因して伝熱ブロックが極めて高温になり、沸騰曲線を得ることがで

きない。このため、図 3.4-3 に示すように、金属板を伝熱面として、この下部からレーザー光を照射することにより伝熱面の加熱を行った。金属板の下面には、黒体スプレーを塗布して、レーザー光の反射を極力低減した。本実験において、 q はレーザー光の出力と照射部の面積より算出し、 ΔT は伝熱面の上部にスポット溶接した熱電対による温度計測値より計算した。試験流体は、蒸留水または粒子濃度 0.05 g/L の SiO_2 ナノ流体とし、金属板の厚さは 0.1 mm、照射領域の半径は 5 mm とした。実験手順は、 q をステップ状に増加させて沸騰曲線を得た後、ナノ粒子の堆積量とナノ粒子層の毛管力 (Wickability) を計測した。

実験の結果、ナノ粒子の堆積量とナノ粒子層の毛管力は、伝熱面材質の影響をほとんど受けないのに対し、CHF は、熱伝導率の大きい銅の場合に真鍮やステンレスよりも高い値を示すことが分かった。ナノ粒子が伝熱面に付着する時、初期においては、伝熱面の母材上にナノ粒子が付着するが、後続のナノ粒子は、既に形成されたナノ粒子層に付着することになる。したがって、核沸騰の開始初期を除けば、伝熱面の母材はナノ粒子層の形成過程に強い影響を及ぼさないと考えられる。これより、伝熱面上に形成されるナノ粒子層の構造は母材の影響を受けず、この結果、ナノ粒子層の堆積量と毛管力は、伝熱面の材質の影響を受けなかったものと解釈できる。次に、伝熱面上に CHF を引き起こすような大気泡が形成されると、気泡の底部に乾き域が生じて、局所的な温度上昇を引き起こす。この時、伝熱面構成材の熱伝導率が高ければ、周囲の低温域への熱拡散により、気泡底部における局所的な温度上昇が抑制される。したがって、伝熱面材質による CHF の差異は、伝熱面上に形成されるナノ粒子層の特性の相違によるものではなく、伝熱面を構成する材料の放熱特性に起因して生じたものと考えられることを示した。



(a) 構成図



(b) 写真

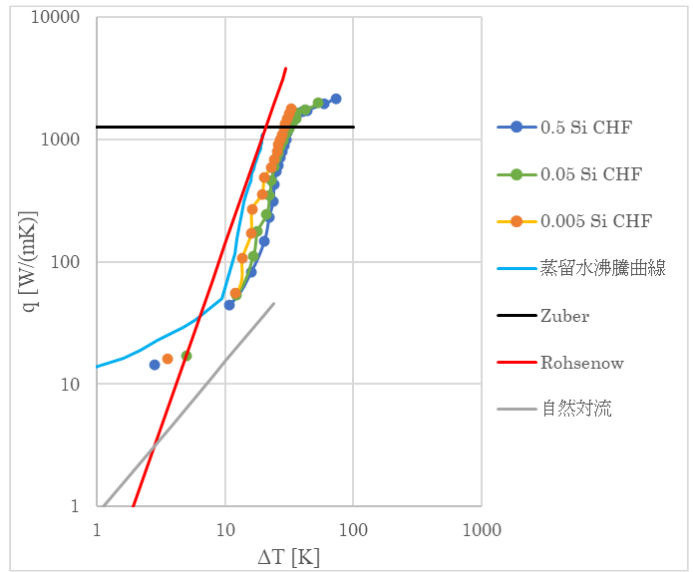
図 3.4-3 実験装置 (伝熱面材質の影響検討用)

【令和4年度実施内容・成果の詳細】

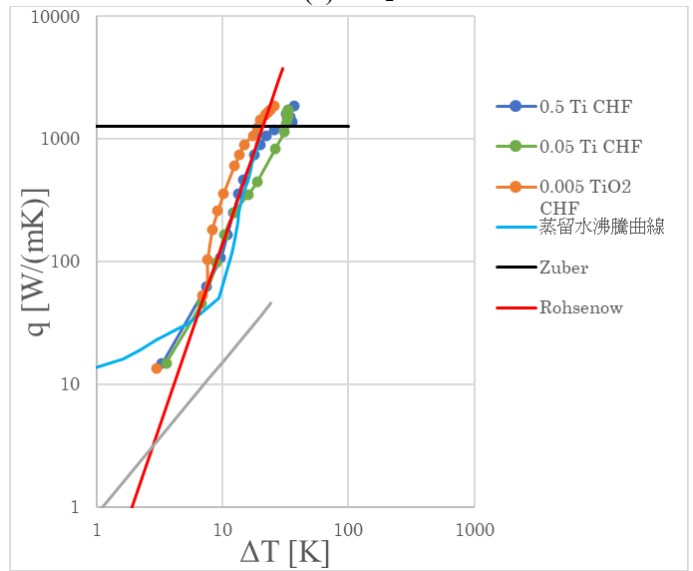
前年度までに得られた結果を踏まえ、ナノ粒子の素材と濃度の影響検討では、 SiO_2 に加えて TiO_2 と Al_2O_3 でも粒子濃度を実験パラメータとし、伝熱面素材の影響評価では、伝熱面の素材に加えて伝熱面として用いる金属板の厚さ δ と加熱域の半径 R を実験パラメータとすることで、実験条件を拡大して実験データを取得した。

各ナノ粒子素材で粒子濃度を 0.005, 0.05, 0.5 g/L とした時の沸騰曲線を図 3.4-4(a)～(c)に示す。図中には、比較のため、蒸留水に対して得られた沸騰曲線の他、自然対流熱伝達相関式⁽⁷⁾、Rohsenow による核沸騰熱伝達相関式⁽⁸⁾、Zuber による限界熱流束(CHF)相関式⁽⁹⁾も示した。まず、蒸留水を用いて得られた沸騰曲線を見ると、自然対流域では飽和温度を維持するために用いた投げ込みヒーターで生成される気泡が誘起する対流の影響により q が大きい、核沸騰開始後の熱伝達率と CHF は、各々 Rohsenow による核沸騰熱伝達相関式⁽⁸⁾ と Zuber による CHF 相関式⁽⁹⁾ に概ね一致しており、実験手法の信頼性が確認できる。次に、図 3.4-4(a) に示す SiO_2 ナノ流体の結果を見ると、最高濃度の 0.5 g/L では q が 2 MW/m² 程度を超過すると ΔT が顕著な増加を見せるとともに、高い CHF が達成されている。これは、高熱流束条件でナノ粒子の伝熱面への付着が促進される結果、ナノ粒子層の厚みが増して熱抵抗となり熱伝達率が低下するとともに、毛管性能の向上により高い CHF が達成されたものと解釈できる。0.05 g/L では、程度は小さいものの同様の傾向が見られるが、最低濃度の 0.005 g/L では、CHF に至る前に ΔT が顕著に増加する傾向は認められず、CHF 値も相対的に低い。これは、低粒子濃度条件では短時間当たりの粒子付着量が小さいため、多量のナノ粒子付着を生じることができず、ナノ粒子層の毛管性能の向上も限定的であったためと考えられる。次に、 TiO_2 ナノ流体に対する図 3.4-4(b) 及び Al_2O_3 ナノ流体に対する図 3.4-4(c)を見ると、いずれの粒子濃度条件でも、CHF に至る前に ΔT が顕著に増加する傾向は認められず、CHF 値も高濃度 SiO_2 ナノ流体と比較すると低い値となっている。これは、壁面への付着力の弱いナノ粒子の場合、ナノ粒子層の剥離が顕著なため、高濃度のナノ流体を用いても、多量のナノ粒子付着を生じることができないためと考えられる。

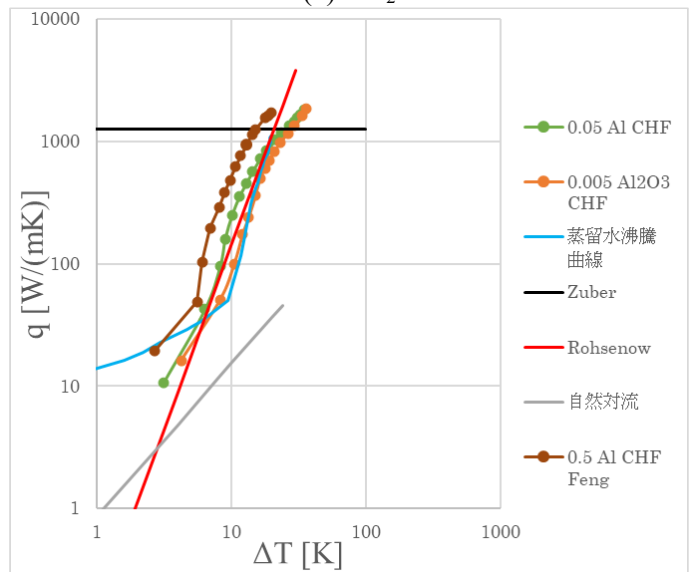
ナノ粒子濃度の変化に伴うナノ粒子層の毛管力と CHF の変化を図 3.4-5 に示す。なお、CHF に至ると、伝熱面温度の急上昇によりナノ粒子層が破壊される可能性があると考え、ナノ粒子層の毛管力の計測は、CHF 後と CHF 値の 90 % で実験を終了した場合の 2 通りの条件で行った。ナノ粒子層の毛管力を示す図 3.4-5(a)を見ると、付着力の強い SiO_2 では、粒子濃度の増加とともに毛管力は向上し、CHF 後と 90 % CHF のデータを比較すると、熱流束の大きい CHF 後により高い毛管力が計測されており、自然な結果となっている。一方、付着力が弱い Al_2O_3 と TiO_2 の結果を見ると、粒子濃度の増加とともに毛管力は必ずしも向上せず、粒子濃度 0.5 g/L の TiO_2 ナノ流体に対して計測された毛管力は、CHF 後よりも 90 % CHF における値の方が高くなっている。これは、ナノ粒子の付着率は粒子濃度及び熱流束の増加とともに単調に増加するものの、特に付着力の弱いナノ粒子の場合、ナノ粒子層の剥離が不規則に生じるため、毛管力の粒子濃度及び熱流束に対する依存性が複雑になったものと解釈できる。



(a) SiO₂

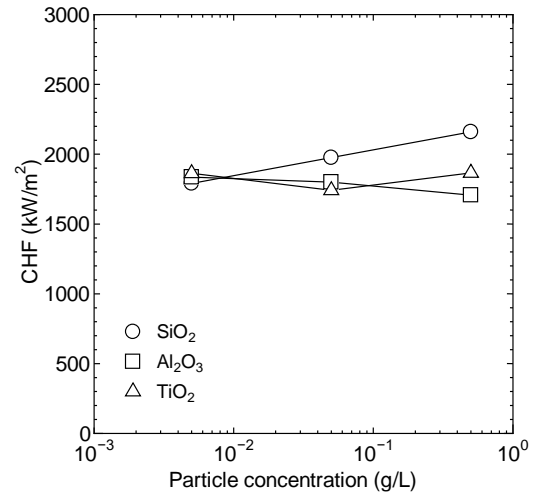
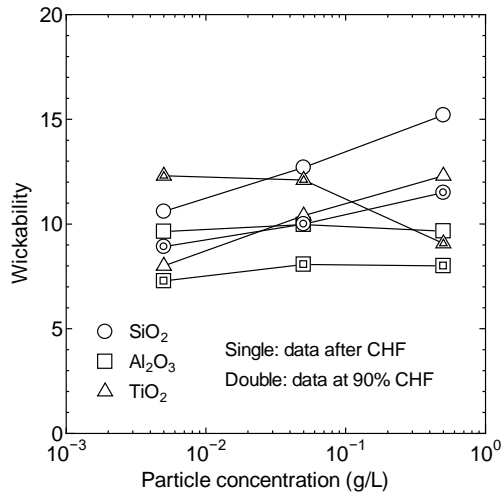


(b) TiO₂



(c) Al₂O₃

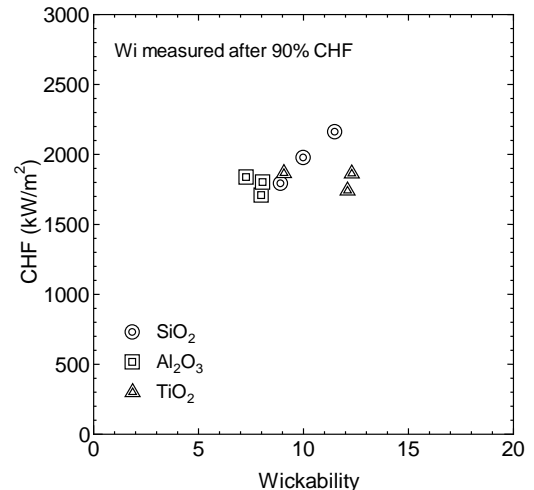
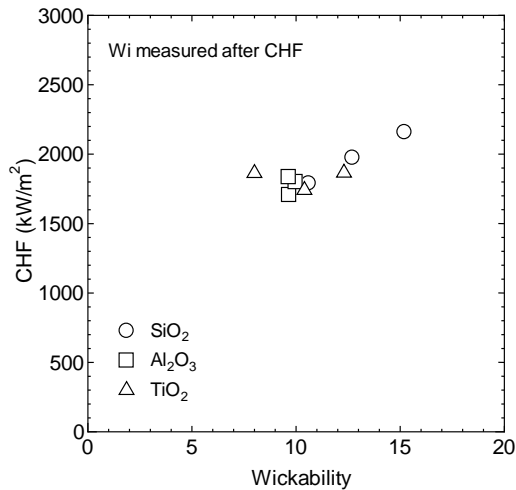
図 3.4-4 沸騰曲線（伝熱面材質の影響検討用）



(a) ナノ粒子層の毛管力

(b) CHF

図 3.4-5 粒子濃度の変化に伴うナノ粒子層の毛管力と CHF の変化



(a) CHF 後の毛管力との関係

(b) 90% CHF 後の毛管力との関係

図 3.4-6 CHF の毛管力依存性

毛管性能と CHF の関係を調べた結果を図 3.4-6 に示す。付着力の大きい SiO₂ では、毛管力の増加とともに CHF が高くなる傾向が明確に認められるが、付着力の弱い Al₂O₃ と TiO₂ では、計測される毛管力によらず、CHF は概ね一定である。これより、ナノ粒子の付着力が十分に強い場合には、ナノ粒子層の毛管力に応じて CHF が定まるが、ナノ粒子の付着力が弱い場合には、熱流束の増加によりナノ粒子層に作用する衝撃が強くなると、ナノ粒子層の剥離により毛管力が急低下し、CHF に至るものと考えられる。

図 3.4-3 に示す実験装置を用いて、伝熱面の材質、伝熱面板厚 δ 、加熱域半径 R の影響を調べた。ここで、伝熱面の材質には、銅、真鍮、ステンレスを用いた。板厚 δ は 0.1 mm、加熱域半径 R は 5 mm を標準値とし、一方を標準値に固定した上で、 δ は 0.1~1 mm、 R は 3~9 mm の範囲に設定して飽和プール沸騰実験を実施した。なお、前年度までの実験で、伝熱面材質の影響は蒸留水とナノ流体で共通であることが既知であるため、試験流体には蒸留水を使用

した。CHF の計測結果を図 3.4-7 に示す。大気泡底部に形成される高温の乾き域から周囲の低温域への放熱は、伝熱面材料の熱伝導率の増加、板厚の増加、加熱領域半径の減少とともに顕著になる。図 3.4-7(a), (b) に示す δ 及び R の影響は、予想に沿った結果となっており、伝熱面材質が CHF に及ぼす影響は、大気泡の生成により形成される局所的な高温域から周囲の低温域への放熱によりもたらされると言える。また、 $R=9\text{ mm}$ の条件でも、銅に対する CHF 値は真鍮及びステンレスの場合よりも有意に高く、この傾向は伝熱面が肉厚の場合により顕著になるものと予想される。したがって、伝熱面が十分に厚くかつ加熱領域が十分に広い一般的な条件においても、プール沸騰の CHF は伝熱面材料の放熱特性、より具体的には熱伝導率あるいは温度伝導度の影響を受けるものと考えられる。

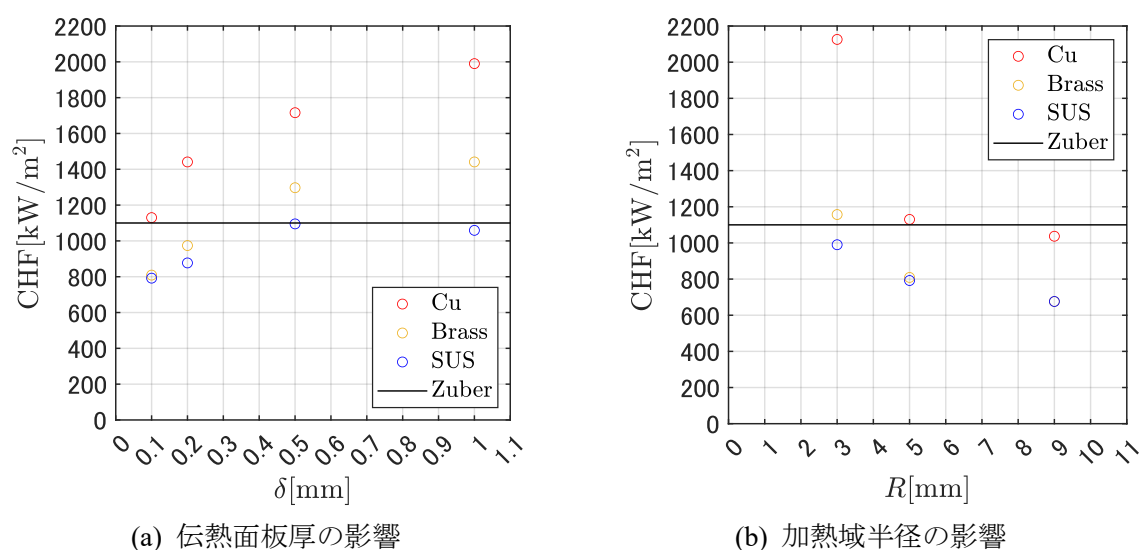


図 3.4-7 伝熱面の材質等が CHF に及ぼす影響

以上に述べた実験検討の結果より、ナノ流体中における CHF の向上は、核沸騰中に生じるナノ粒子の付着により伝熱面上に形成されるナノ粒子層の毛管力により引き起こされるものと結論される。ここで、ナノ粒子層の毛管力はナノ粒子の堆積量とともに向上する傾向であり、ナノ粒子の堆積量は、単位時間当たりのナノ粒子付着量とナノ粒子層の剥離量のバランスにより決定される。このため、高粒子濃度のナノ流体を用いてナノ粒子の付着を促進するとともに、付着力の大きいナノ粒子素材を用いてナノ粒子層の剥離を抑制することで、より高い CHF 値を達成できることを示した。また、伝熱面構成材は、伝熱面上に形成されるナノ粒子層の特性には顕著な影響を及ぼさないが、大気泡の底部に形成される局所的な高温部から周囲への低温部への放熱特性の相違に起因して、CHF 値には有意な影響を及ぼし得ることが分かった。プール沸騰実験では、伝熱面の材質として高熱伝導率の銅が選択される場合が多いのに対して、原子炉の事故時に問題となる伝熱面は、より低熱伝導率の材料で構成されている場合が多い。したがって、伝熱面材料の放熱特性に起因する CHF の影響について、十分な配慮が必要と考えられる。

3.4.2 HPP 内部にナノ粒子が目詰まりしないメカニズムの解明【R2-R4】

【令和3年度までの実施内容・成果の概要】

図 3.4-1 及び図 3.4-2 に示す実験装置及び伝熱ブロックを用いるとともに、伝熱面上にセラミック製のハニカム多孔質体 (HPP) を設置して、飽和プール沸騰実験を実施した。試験流体は、蒸留水、TiO₂ ナノ流体 (粒子濃度 0.5 g/L)、Al₂O₃ ナノ流体 (粒子濃度 0.5 g/L)、SiO₂ ナノ流体 (粒子濃度 0.5、0.05 g/L) の 5 種類とした。HPP を設置した場合、すべての条件で伝熱面過熱度が低下するとともに CHF は向上することから、HPP は、蒸留水中と同様にナノ流体中でも核沸騰熱伝達特性向上効果があることを確認した。

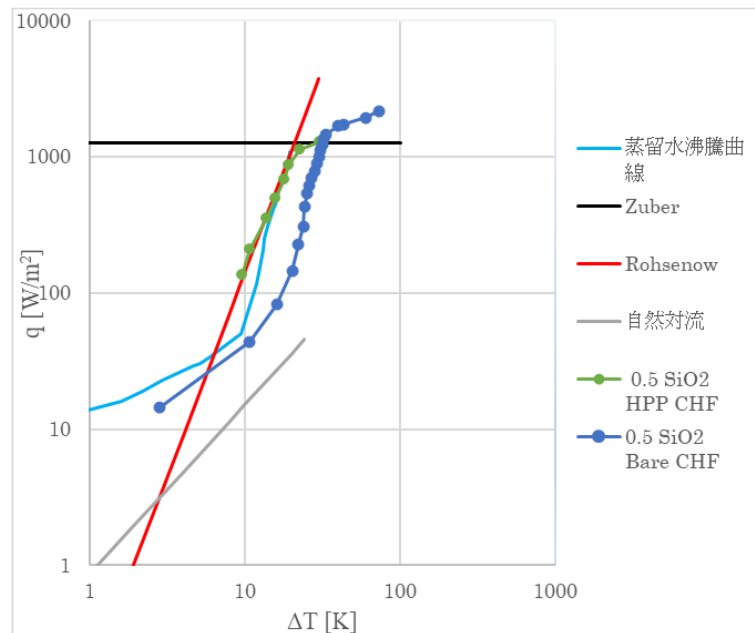
次に、ナノ流体中を用いたプール沸騰実験の前後で、HPP の表面状態観察と吸水性能計測を実施したところ、いずれの項目においても特段の変化は認められなかった。ナノ流体中の核沸騰では、生成蒸気泡の底部に形成される薄液膜中のナノ粒子が伝熱面に付着して、ナノ粒子層を形成する。一方、本実験では、HPP と伝熱面の間には接触熱抵抗があるため、HPP の表面で蒸気泡は生成されず、この結果、HPP の表面上にナノ粒子層が形成されることもない。したがって、HPP と伝熱面の間には接触熱抵抗がある条件では、HPP の表面にナノ粒子層が形成されることはなく、ナノ粒子による目詰まりが生じる可能性は十分に低いと考えられることを示した。

【令和4年度実施内容・成果の詳細】

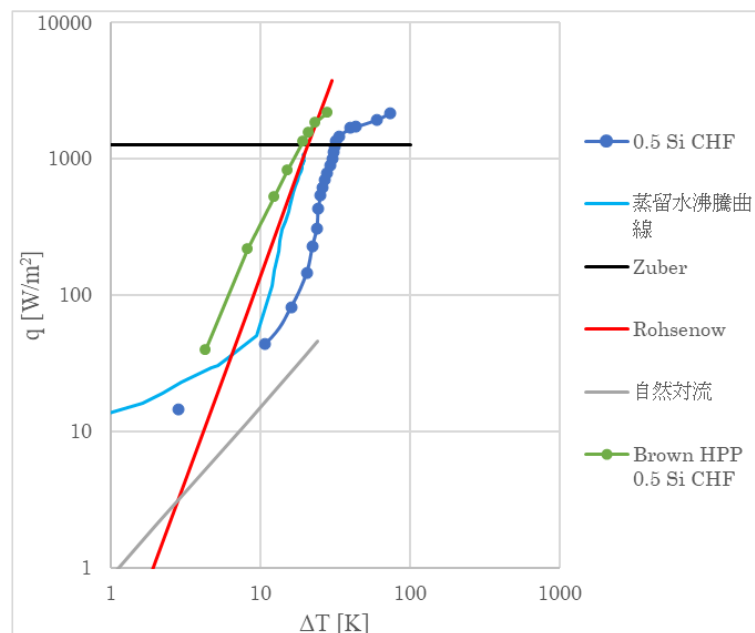
セラミック製のハニカム多孔質体に加え、電解析出法を用いて製作した金属製のハニカム多孔質体を伝熱面上に設置して、ナノ流体を試験流体とする飽和プール沸騰実験を実施した。試験流体は、HPP 表面への付着が最も顕著と考えられる高粒子濃度 (0.5 g/L) の SiO₂ ナノ流体とした。得られた沸騰曲線を図 3.4-8(a), (b) に示す。セラミック製 HPP を設置した場合の伝熱面過熱度 ΔT は Rohsenow 相関式と同程度であるが、金属製 HPP ではさらに低い過熱度となっており、本実験条件において、金属製 HPP はセラミック製 HPP よりも優れた核沸騰熱伝達率向上効果を有することが分かる。なお、いずれの HPP を用いた場合でも、CHF には至らず、銅ブロック温度が規定値 (500°C) を上回った時点で、加熱を 10 分継続してから実験を終了した。したがって、いずれの HPP も CHF 向上効果を有するが、セラミック製 HPP と金属製 HPP のいずれがより高い CHF 向上効果を有するかは不明である。

デジタルカメラ及びレーザー顕微鏡を用いて、沸騰実験の前後における HPP の外観を観察した結果を図 3.4-9 に、沸騰実験の前後に計測した HPP の Wi と実験後の Wi を実験前の Wi で除して得られる透過係数を表 3.4-1 に示す。まず、図 3.4-9 に示すように、セラミック製 HPP と金属製 HPP のいずれにおいても、ナノ粒子の HPP 表面への付着は、明確には認められなかった。また、表 3.4-1 に示すように、実験前における HPP の Wi 値は、金属製 HPP の方がわずかに高かった。沸騰実験の後、セラミック製 HPP では Wi がわずかに増加、金属製 HPP ではわずかに減少する結果、実験前とは逆に、セラミック製 HPP の方がわずかに高い Wi 値を示した。透過係数は、セラミック製 HPP で 1.01、金属製 HPP で 0.96 であり、セラミック製 HPP の方が高いが、いずれの HPP においても 1 に近い値であり、ナノ粒子の目詰まりによる HPP の性能低下は、無視し得るほどであった。金属製 HPP は、はんだ付けにより伝熱面上に設置したため、圧着しているのみのセラミック製 HPP と比較すると、HPP と伝熱面間の接触熱抵抗

は、小さかったと考えられる。このため、HPP の表面上に存在する発泡核で蒸気泡が生成される可能性はあるが、伝熱面からの距離とともに温度は急低下するため、蒸気泡の生成は、主に伝熱面に近い部分で生じたものと考えられる。このため、金属製 HPP の上側では、ナノ粒子の付着が無視できる程度であり、顕著な目詰まりが生じなかったものと考えられる。

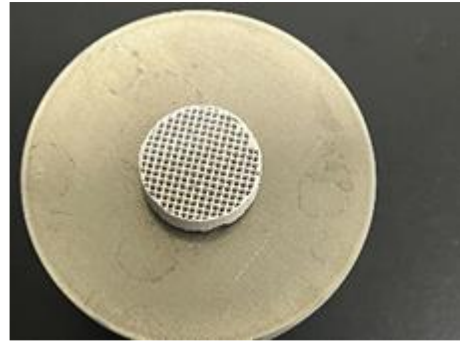
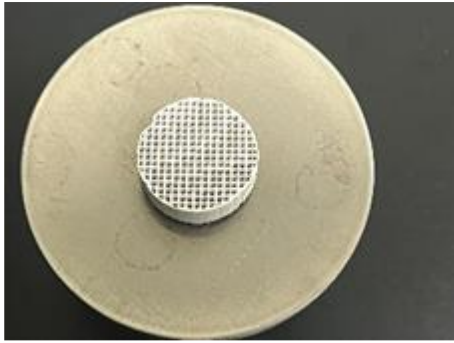


(a) セラミック製 HPP

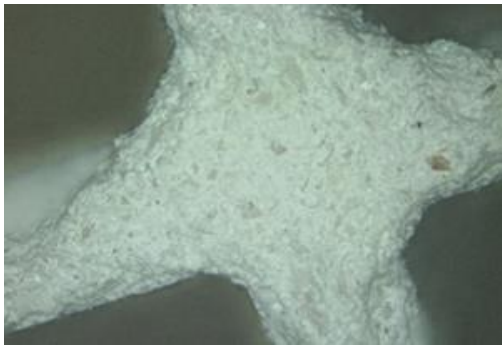


(b) 金属製 HPP

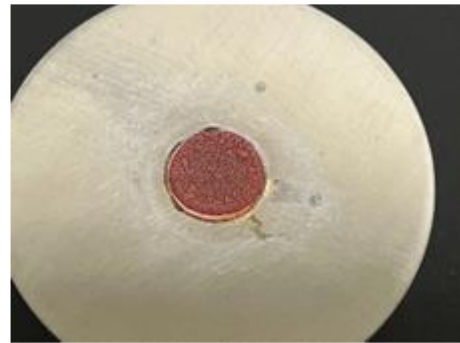
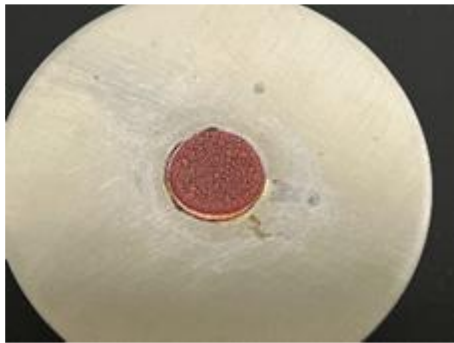
図 3. 4-8 ハニカム多孔質体 (HPP) を設置した場合の沸騰曲線



(a) セラミック製 HPP (デジタルカメラ)



(b) セラミック製 HPP (レーザー顕微鏡)



(c) 金属製 HPP (デジタルカメラ)



(d) 金属製 HPP (レーザー顕微鏡)

図 3.4-9 HPP の外観観察結果 (左 : 実験前、右 : 実験後)

表 3.4-1 ナノ流体中での核沸騰による HPP 透過性能の変化

HPP	実験前 Wi	実験後 Wi	透過係数
セラミック製 HPP	11.5	11.6	1.01
金属製 HPP	11.8	11.3	0.96

【令和4年度実施内容・成果のまとめ】

以上に述べた結果より、ナノ流体中での核沸騰により HPP の目詰まりを生じる可能性を極力低減するという観点では、(1)伝熱面と HPP の間に接触熱抵抗を残存させることで HPP の表面に存在する発泡核における蒸気泡の生成を抑制する、(2)ナノ流体中の粒子濃度を低く抑えることでナノ粒子の付着を抑制する、(3)付着力が弱いナノ粒子素材を選択することでナノ粒子層の剥離を促進する、などの方策が考えられる。ただし、本実験の結果によれば、接触熱抵抗を低減するとともに高付着力かつ高粒子濃度のナノ流体を用いた場合でも、ナノ粒子による HPP の目詰まりは無視し得る程度であり、ナノ流体と HPP を併用する場合に、目詰まりの問題に格段の注意を払う必要はないと考えられる。

3.4.3 まとめ

ナノ流体と HPP による CHF 向上メカニズムの解明・応用では、ナノ流体の飽和プール沸騰中で伝熱面上に形成されるナノ粒子層の性状と CHF の関係について実験的に調査し、ナノ流体中における CHF の向上幅を決定する上で、ナノ粒子層の毛管力が重要な役割を果たすことを明らかにした。ここで、ナノ粒子層の毛管力はナノ粒子の堆積量の増加とともに向上する傾向であるため、より高い CHF を達成するには、伝熱面上に多量のナノ粒子を堆積させることが重要となる。ナノ流体のプール沸騰中では、ナノ粒子の付着とナノ粒子層の剥離が同時進行するため、より高い CHF を達成する上で、高濃度のナノ流体を用いることで粒子付着を促進するとともに、付着力の強いナノ粒子素材を用いることでナノ粒子層の剥離を抑える方策が有効であることを示した。したがって、今後の課題としては、ナノ流体中でより高い粒子濃度を達成するための方策を検討するとともに、ナノ粒子層の付着力を決定するメカニズムを解明することで、より高い CHF を達成するための方策の開発に繋がるものと期待できる。次に、0.5g/L の高粒子濃度ナノ流体とセラミック及び金属多孔質を素材とする HPP を併用してナノ流体と HPP を併用して飽和プール沸騰実験を行い、本体系で HPP の内部にナノ粒子が目詰まりしないメカニズムについても検討を実施した。ここで、ナノ粒子の素材には、付着力が強いシリカを用いた。ナノ流体中では、核沸騰により形成される気泡の底部でナノ粒子の付着が生じる。したがって、HPP と伝熱面が熱的に接合していない場合、HPP 上で気泡は生成されず、この結果、HPP 表面へのナノ粒子の付着は無視できる。また、HPP が伝熱面と熱的に接合している場合でも、気泡生成はより高温の伝熱面で主に生じるため、HPP の表面へのナノ粒子の付着は顕著ではない。以上の結果より、少なくとも粒子濃度 0.5g/L のナノ流体とセラミックまたは金属多孔質体を素材とする HPP を併用した場合に、ナノ流体と HPP を併用した場合に、ナノ粒子により HPP が目詰まりして CHF の向上効果が低減する可能性は極めて小さいと考えられることを示した。

参考文献

- (6) Y. Watanabe, K. Enoki, T. Okawa, “Nanoparticle layer detachment and its influence on the heat transfer characteristics in saturated pool boiling of nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 125, 171-178 (2018).
- (7) F. P. Incropera, D. P. Dewitt, A. S. Lavine, T. L. Bergman, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer,” 6th Edition, Wiley, New York (2006).
- (8) W. M. Rohsenow, “A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids,” *Transactions of ASME* 74, 969-976 (1952).
- (9) N. Zuber, “On the stability of boiling heat transfer,” *Transactions of ASME* 80, 711-720 (1958).

3.5 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進め、3.1～3.4の研究成果を総合してハニカム冷却技術のIVRへの適用性を評価できるよう、コロナ下を考慮して適宜オンラインやメールで情報の共有化に努めながら、研究を進めた。全体の研究成果を総合して、ハニカム冷却技術を用いれば、当初懸念されたRISA効果によるCHF低減効果以上のCHF向上があることが明らかになり、電解析出を用いた手法を用いて多孔質体を作製できれば裸面の場合の5倍以上の大幅なCHF向上効果と耐久性も含めて得られることが明らかとなった。また、ナノ流体と組み合わせることでさらなる裕度も得られることも明らかとなった。したがって、本プロジェクトで開発した技術を用いることで実機のIVR確立に大きく近づいたと言える。今後は、水の導入のタイミングを逸した場合に圧力容器が高温になり、膜沸騰になることが懸念される。ハニカム冷却技術によりクエンチ促進の機能も持たせることが次のステップの課題である。

4. 結言

以下に4ヵ年計画の研究成果を研究テーマごとにまとめると以下の通りである。

(1) 放射線照射効果による CHF 劣化回避策

銅、銀、アルミニウム、炭素鋼という4種類の金属に対して電子線及びガンマ線による照射を実施した。大気圧下、下向き伝熱面飽和強制流動沸騰の条件の下、吸収線量ごとに限界熱流束を測定し、伝熱劣化現象が銅伝熱面の電子線照射で見られることを明らかとした。また、伝熱劣化現象に対するメカニズムを検討した。具体的には、照射による表面性状の変化に伴い、沸騰核密度が変化することで、CHFが変化することを確認した。

上記メカニズムについて確認するため、透明なITOガラスを用いた可視化実験を行い、放射線照射の有無による、沸騰伝熱面の変化を可視化した。ガラス面と金属面の性状の違いに注意する必要があるが、放射線照射によって沸騰核密度及び濡れ性が変化し、CHFが変化することを確認した。

3.2節で検討したハニカム構造を伝熱面に設置することによって、CHFが大きく改善することを実験的に確認した。照射によって、ハニカム構造伝熱面のCHFが減少する現象も確認されたが、ハニカム構造を付けない伝熱面よりもCHFは大きくなることを確認した。以上によって、ハニカム構造を用いることによって、放射線照射によるCHF劣化現象を回避することができることが分かった。つまり、CHF劣化現象回避のためにはハニカム構造が有効であることを示した。

(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

硫酸銅めっき浴に電流を流す電解析出装置により金属多孔質体を作製し、CHFに相関の高い吸水力の高い多孔質体を作製できる条件を定性的に明らかにした。異なる形状でも電流密度が同じであれば多孔質の構造は同様であることが明らかになった。電解析出法によって作製した金属多孔質層を用いてプール沸騰実験及びWickabilityの測定を行い、金属多孔質層を伝熱面に用いることで裸面の2.5倍にCHFが向上することが分かった。

最終的に電解析出法により金属多孔質体を作製し、それら金属多孔質体のWickabilityを測定しつつ、一様多孔質体のCHFを測定した。さらに二層構造HPPを伝熱面に直接金属ハニカム多孔質体を形成する技術を開発した。

(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

① 二層構造 HPP の CHF モデルの構築による HPP 構造の最適化とその実証

沸騰の実験装置を設計・製作し、測定精度を検討し、十分な精度で実験が可能であることを確認した。実験の結果、 W_i と CHF の関係が線形の関係にあることも確認でき、今後 CHF 向上に対する大きな指標を得た。ハニカム状多孔質層を伝熱面に設置し、プール沸騰試験を行った。その結果、裸面の2倍のCHFを達成し、電流密度が同じであれば一様形状、ハニカム形状のCHFは等しく、HTCは一様形状の方が大きくなった。これらの実験結果をもとに、さらなるCHF向上が可能な二層構造HPPのCHFモデルを構築した。最終的に、理論モデルをベースに二層構造HPPの構造を高性能化するように最適化を行い、電解析出法で開発した手法を

用いて伝熱面に直接金属ハニカム多孔質体を形成させ 4.65 MW/m^2 (CHF に到達せず) の超高熱流束除熱に成功した。この値は、当初の目標値 (3.0 MW/m^2) を大幅に超えるものであり、他者の CHF データと比較しても大伝熱面・高熱流束が除熱においてはチャンピオンデータと言える。

② CFD をベースとした沸騰二層流解析手法の開発及び HPP 近傍沸騰二相流解析

Ansys Fluent に組み込まれている沸騰を模擬するための相変化モデル、HPP 構造を模擬するために必要な多孔質モデル及び多相流を取り扱うためのモデルを精査した上で、HPP の多孔質壁の毛細管力による流体の輸送をモデル化し、HPP の伝熱流動解析が可能な沸騰二相流解析手法を開発した。開発した沸騰二相流解析手法を用いて、1 セルの HPP を模擬して、熱流束の HPP 多孔質壁の流体輸送速度に及ぼす影響を調べた。高熱流束条件では蒸気量が増え、HPP 蒸気排出口における蒸気量の増大は HPP 多孔質壁の流体輸送速度に及ぼす影響が少ないことが分かった。また、HPP 底面と伝熱面間との距離をパラメータとし、HPP 多孔質壁の流体輸送及び伝熱面熱伝達に及ぼす効果を調べた。HPP 底面の伝熱面間との距離が 0.3 mm から 0.1 mm に小さくなると、伝熱面へ輸送される流体の流量及び速度が増加し、伝熱面での熱伝達が促進されることが分かった。さらに、プール沸騰における伝熱面配置角度の気泡挙動に及ぼす効果を調べた。伝熱面配置角度の変化により気泡挙動が大きく変化することが分かった。下向き水平 (180°) 条件では気泡が常に伝熱面上に居座り、熱的に最も厳しいである。一方、上向き水平 (0°)、垂直 (90°) 及び下向き傾斜 (135° 、 175°) 条件では、気泡の離脱やスライディング、また崩れることにより伝熱面から気泡が一時離れられることができ、下向き水平条件より熱的に厳しくないことが分かった。

(4) ナノ流体と HPP による CHF 向上メカニズムの解明・応用

ナノ流体と HPP による CHF 向上メカニズムの解明・応用では、ナノ流体の飽和プール沸騰中で伝熱面上に形成されるナノ粒子層の性状と CHF の関係について実験的に調査し、ナノ流体中における CHF の向上幅を決定する上で、ナノ粒子層の毛管力が重要な役割を果たすことを明らかにした。ここで、ナノ粒子層の毛管力はナノ粒子の堆積量の増加とともに向上する傾向であるため、より高い CHF を達成するには、伝熱面上に多量のナノ粒子を堆積させることが重要となる。ナノ流体のプール沸騰中では、ナノ粒子の付着とナノ粒子層の剥離が同時進行するため、より高い CHF を達成する上で、高濃度のナノ流体を用いることで粒子付着を促進するとともに、付着力の強いナノ粒子素材を用いることでナノ粒子層の剥離を抑える方が有効であることを示した。したがって、今後の課題としては、ナノ流体中でより高い粒子濃度を達成するための方策を検討するとともに、ナノ粒子層の付着力を決定するメカニズムを解明することで、より高い CHF を達成するための方策の開発に繋がるものと期待できる。次に、ナノ流体と HPP を併用して飽和プール沸騰実験を行い、本体系で HPP の内部にナノ粒子が目詰まりしないメカニズムについても検討を実施した。ナノ流体中では、核沸騰により形成される気泡の底部でナノ粒子の付着が生じる。したがって、HPP と伝熱面が熱的に接合していない場合、HPP 上で気泡は生成されず、この結果、HPP 表面へのナノ粒子の付着は無視できる。また、HPP が伝熱面と熱的に接合している場合でも、気泡生成はより高温の伝熱面で主に生じるため、HPP の表面へのナノ粒子の付着は顕著ではない。以上の結果より、ナノ流体

と HPP を併用した場合に、ナノ粒子により HPP が目詰まりして CHF の向上効果が低減する可能性は極めて小さいと考えられることを示した。