

非共溶性混合媒体の核沸騰熱伝達

大西, 俊輔

<https://doi.org/10.15017/1398350>

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済



目次

目次	i
記号表	iii
第1章 序論	1
第2章 従来研究	3
2.1 沸騰熱伝達に関する研究	3
2.1.1 気泡の発生, 成長, 離脱	4
2.1.2 核沸騰熱伝達	6
2.1.3 限界熱流束	9
2.1.4 サブクール度による限界熱流束の増大	12
2.2 沸騰冷媒に関する研究	14
2.2.1 共溶性非共沸混合媒体	14
2.2.2 非共溶性混合媒体	17
2.2.3 非共溶性混合媒体による乳濁液	20
2.3 非共溶性混合媒体の界面における気泡挙動に関する研究	21
2.4 第2章まとめ	23
第3章 非共溶性混合媒体	24
3.1 非共溶性混合媒体の気液相平衡図	24
3.2 密度と飽和温度による組み合わせとその効果	27
3.3 非共溶性混合媒体と溶解度	30
3.4 第3章まとめ	32
第4章 実験装置・データ処理及び実験条件	33
4.1 実験装置	33
4.1.1 沸騰容器	34
4.1.2 伝熱面の構造	34
4.1.3 スペーサ	35
4.1.4 凝縮器	36
4.1.5 周辺機器	37
4.2 実験手順	39

4.2.1 実験準備及び留意点.....	39
4.2.2 実験方法.....	40
4.3 データ処理方法.....	42
4.4 実験条件.....	44
4.4.1 試験媒体.....	44
4.4.2 気液相平衡図.....	46
4.5 第4章まとめ.....	49
第5章 実験結果および考察.....	50
5.1 非共溶性混合媒体による沸騰熱伝達特性.....	50
5.1.1 沸騰曲線.....	50
5.1.2 熱伝達係数と伝熱面表面温度.....	51
5.1.3 限界熱流束.....	53
5.1.4 気液挙動.....	71
5.1.5 インターミディエイトバーンアウト.....	79
5.2 非共溶性混合媒体による沸騰熱伝達特性に関するまとめ.....	87
5.3 第5章まとめ.....	89
第6章 結論.....	90
謝辞.....	92
参考文献.....	93

記号表

Alphabet

A	面積	m^2
c_p	定圧比熱	kJ/kg K
d_b	気泡離脱径	m
f_b	気泡離脱周期	$1/\text{s}$
g	重力加速度	m/s^2
h	対流熱伝達係数	$\text{W/m}^2\text{K}$
h_{fg}	蒸発潜熱	kJ/kg
L	代表長	m
La	ラプラス定数	m
N	発泡点密度	$1/\text{m}^2$
Nu	ヌセルト数	-
P	圧力	Pa
P	周長	m
P_c	臨界圧力	Pa
Pr	プラントル数	-
Q	熱量	W
q	熱流束	W/m^2
q_{CHF}	限界熱流束	W/m^2
q_{MHF}	極小熱流束	W/m^2
R	気体定数	kJ/kg K
R	伝熱面表面粗さ	μm
Re	レイノルズ数	-
r	半径	m
T	温度	K
t	時間	s
t_b	気泡離脱時間	s
v	比容積	m^3/kg
w_x	液相重量濃度	-
w_y	気相重量濃度	-
x	液相モル濃度	-
y	気相モル濃度	-

Greek

α	熱伝達係数	W/m ² K
β	接触角	-
β	体積膨張係数	1/K
ΔT	過熱度, 温度差	K
ΔT_{sat}	伝熱面過熱度	K
ΔP	圧力差	Pa
κ	温度拡散係数	m ² /s
λ	熱伝導率	W/mK
$\lambda_{ii}, \lambda_{ij}$	Wilson パラメータ	-
λ_T	Taylor 不安定の安定限界波長	m
λ_D	Taylor 不安定の最危険波長	m
μ	粘性係数	Pa s
ν	動粘性係数	m ² /s
ρ	密度	kg/m ³
σ	表面張力	N/m

Subscript

1	低沸点成分
2	高沸点成分
<i>b</i>	気泡
<i>bulk</i>	バルク液
<i>cb</i>	合体気泡
<i>ent</i>	随伴
<i>g</i>	気体
<i>grow</i>	成長
<i>id</i>	理想
<i>l</i>	液体
<i>m</i>	混合媒体, 計測
<i>pen</i>	突入
<i>s</i>	表面
<i>sat</i>	飽和状態
<i>sub</i>	サブクール状態
<i>w</i>	壁面, 伝熱面
<i>wait</i>	休止

第1章 序論

近年, 集積回路などの電子機器の高性能化に伴って発熱密度が急増しており冷却問題が開発の妨げになりつつある. それに対応して SiC や GaN のような高温に対応できる半導体素子の開発が行われているが, 現在広く用いられている Si 半導体は耐熱温度が低く約 100°C で上限温度に達してしまう. そこで, 半導体温度を上限温度以下に保ちかつ高発熱密度の機器に対応した高性能な排熱システムが求められている. そのために沸騰を用いた潜熱輸送を用いることで高い熱伝達特性を実現する二相流体ループを用いた排熱システムが注目されている.

二相流体ループの利点は, 沸騰による潜熱輸送を利用することで単相流体ループに比べ小さな伝熱面過熱度で除熱を行えること, 高発熱密度の冷却に対応できること, 圧力調節により飽和温度を調節できる特性を利用して冷却面表面温度を一定温度に容易に保持できることである. しかしながら, 沸騰冷却においては作動圧力下での飽和温度以下に伝熱面表面温度を維持できないため, 例えば大気圧の水では冷却面温度を 100°C 以下に保つことは原理的に不可能であり Si 半導体の冷却は困難である. これに対応するために一般的な沸騰冷却システムでは, 系圧力を変化させるか沸騰冷媒を変えることで飽和温度を制御し, 伝熱面表面温度を調整する. しかしながら, 減圧下では長時間の冷却運転中に不凝縮ガスである空気が混入する可能性があり, その結果, 冷却システムにおける凝縮能力が低下して, 冷却システム全体での排熱能力も低下してしまう. そのために, 伝熱面表面温度を機器の耐熱温度以下に冷却できる沸騰冷媒を利用し加圧系で冷却システムを運転することがより望ましい. 加圧系沸騰冷却装置では, 圧力が上昇するに従って液体の飽和温度が上昇し伝熱面表面温度も上昇するため半導体の冷却に使用できる沸騰冷媒の候補は少なくなる. また, 半導体の開発に伴い発熱密度がきわめて高くなっていることや冷却している機器に致命的なダメージを与えてしまうバーンアウトを防ぐ目的から限界熱流束の増大は沸騰冷却の課題として研究が行われている. 以上の背景から, 加圧条件下で作動する沸騰冷却装置において冷却面表面温度を半導体の耐熱温度より低く維持でき, さらに限界熱流束が既存のものより大きな冷却装置の開発が求められている. また一般に沸騰を開始する際に, 過冷液を対象とする場合, 平滑な伝熱面を使用する場合, 低圧力下, 伝熱面面積が小さい場合は沸騰の開始が遅延して伝熱面表面温度が上昇し高温となる. この発熱量の急激な増大時における伝熱面表面温度の超過をオーバーシュート現象と言う. オーバーシュートを低減することにより発熱量の急激な増加に対して安定な伝熱面表面温度の変化が期待できる. 以上のことを踏まえて以下に冷却システムに求められる要求をまとめる.

- (1) 限界熱流束の増大
- (2) 伝熱面表面温度の低下
- (3) 沸騰開始時における伝熱面表面温度のオーバーシュートの低減
- (4) 大気圧以上での作動

そこで上記要求を満たすべく、特に(1)の要求に対しては様々な研究がなされている。大きく分けると沸騰冷媒、流量等の作動条件と伝熱面構造である。その中でも本論文は沸騰冷媒に着目する。沸騰冷媒は大まかに単成分媒体と混合媒体に分けられ、混合媒体はさらに共溶性の媒体と非共溶性の媒体に分けることができる。単成分媒体については利点と欠点が混在するため全ての要求を満たすことはできない。また共溶性非共沸混合媒体については第2章で詳しく述べるが、限界熱流束が増大する場合があるが、一般的には物質拡散抵抗の存在により熱伝達の劣化を生じるので高性能なシステムは構築できない。一方で非共溶性混合媒体の研究はほとんどなされておらずその性能は未知であった。

そこで本論文では二相流体ループを用いた排熱システムへの適用を踏まえて、沸騰用混合冷媒の特性に着目し2成分の非共溶性混合媒体を用いたプール沸騰実験を行い、その沸騰熱伝達特性を明らかにし、その有用性を提案する。非共溶性混合媒体では双方の媒体の蒸気圧により混合媒体の飽和温度を著しく下げることができ、高サブクール度での沸騰を実現できる。サブクール沸騰は限界熱流束を飛躍的に増大させることから有効であるが、一方でプール沸騰においてはサブクール沸騰を実現するために別途冷却ループが必要になるという問題がある。しかし、非共溶性混合媒体を沸騰冷媒として用いることで、サブクール沸騰を通常のプール沸騰装置で生じさせることができる。その結果、冷却面表面温度が低く限界熱流束が現存のものよりはるかに大きい沸騰冷却を実現できると考える。

第2章 従来研究

2.1 沸騰熱伝達に関する研究

先ず沸騰について説明する。沸騰とは液体が蒸発するために十分なエネルギーを得て、気泡が発生する現象である。このとき、潜熱輸送によって熱伝達が起こる。Figure 2.1は縦軸に熱流束 q および熱伝達係数 α 、横軸に液体温度 T と伝熱面温度 T_w の差である伝熱面過熱度 ΔT をとった沸騰特性曲線を示している。伝熱面過熱度がある程度大きくなるまでは、自然対流による熱伝達が支配的である。これが A-B の領域である。それを超えて B-D の領域になると、沸騰が始まり熱伝達は沸騰に支配され、熱伝達が急激に向上する。この領域を核沸騰域という。核沸騰域の初期段階では気泡発泡点数がさほど多くないため発生した気泡は孤立したまま上昇する。しかし、高熱流束域になると気泡どうしが干渉して合体を始める。そして、D に至ると発生する気泡量が増大し、安定を失って核沸騰が成立しなくなる。また、過熱度が極端に大きい領域 E-G では、伝熱面が安定した蒸気膜に覆われた状態になる。この領域を膜沸騰域という。この領域では蒸気膜が形成され、気相への熱伝達が起こるために核沸騰よりもはるかに大きな過熱度が必要となり、熱伝達が非常に悪い。熱流束を上昇させて加熱していく場合、D 点から F 点に過熱度が急激に上昇し、核沸騰域から膜沸騰域に状態が急変する。一般に F 点の伝熱面温度は非常に高く、伝熱面が融解してしまうような危険な温度となるため、D 点のことをバーンアウト点、このときの熱流束を限界熱流束 q_{CHF} といい、工業上の最大熱負荷を与えるものとして重要な値となっている。逆に、熱流束を膜沸騰状態から下げていく場合、E 点から C 点に状態が変化する。この熱流束を極小熱流束 q_{MHF} という。領域 D-E は核沸騰から膜沸騰に遷移していく領域で遷移沸騰域という。熱流束の操作では核沸騰から膜沸騰、もしくは膜沸騰から核沸騰に状態が急変するため、この領域を経過することはないが、伝熱面温度が一定に保つよう加熱した場合は、この領域の存在を確認できる。また、沸騰は流体全体の流動が自然循環のみであるプール沸騰と強制的に流動させる強制対流沸騰に大別できる。さらに、液体の大半を占める温度（バルク温度 T_{bulk} ）が飽和温度で沸騰している状態を飽和沸騰という。これに対して、バルク温度が飽和温度 T_{sat} よりも低く、サブクール度 $\Delta T_{sub}(=T_{sat} - T_{bulk})$ が存在して沸騰している状態をサブクール沸騰という。この状態では、伝熱面で発生する気泡がバルク液に接触して凝縮し、消滅を生じる。

核沸騰における熱伝達特性に関する値を求めるための実験式や半理論式は多数存在するが、式ごとに予測値が大きく異なる。これは沸騰が関係因子の多い大変複雑な現象であることが原因である。関係する因子としては、単相流体の熱伝達を規定する密度、

熱伝導率，蒸発潜熱，粘性，さらには伝熱面の材質や幾何的特性などがあり，同一の実験条件で実験を行っても再現性が高いとはいえない．

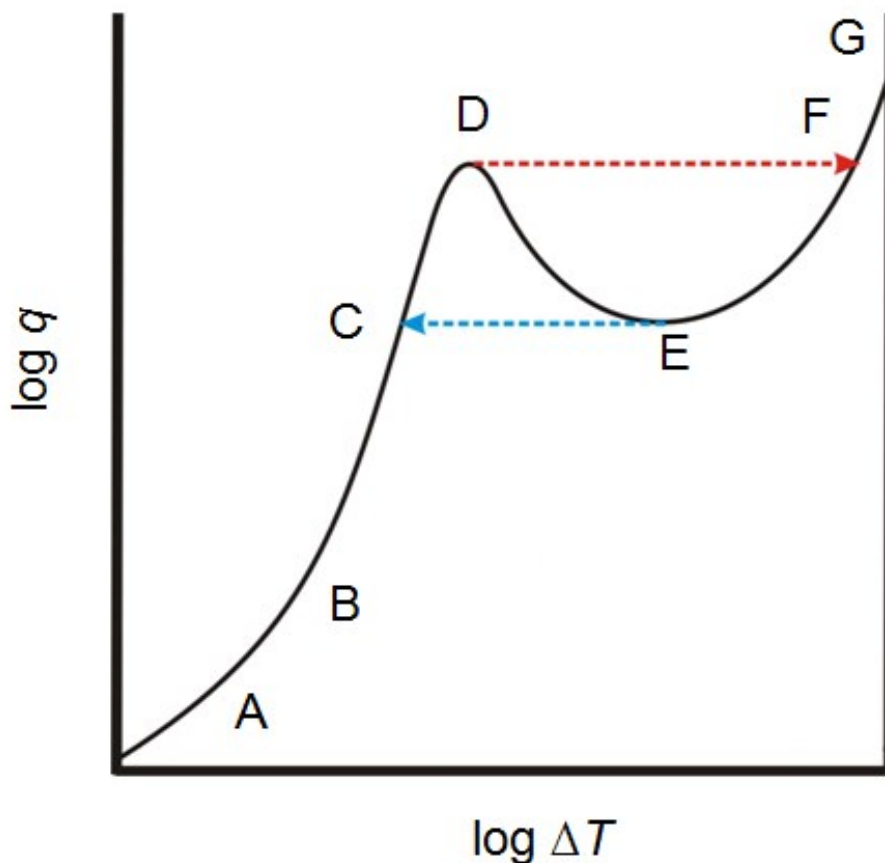


Fig. 2.1 Typical boiling characteristics curve

2.1.1 気泡の発生，成長，離脱

プール沸騰において，バルク液中における気泡挙動はあまり重要ではなく，伝熱面近傍における気泡の発生と成長，離脱，干渉や合体などの気泡挙動が重要である．

沸騰は通常伝熱面上にある微細な傷(キャビティ)を核として発生する．今，一様な過熱液体の中に半径が r_b の球形気泡があり，熱力学的な平衡状態にあるとすると気泡内の蒸気圧 P_g は周囲流体の圧力 P_l より気液界面における表面張力 σ が作用するために高く，Laplace の式よりその関係は以下のように示すことができる．

$$\Delta P = P_g - P_l = \frac{2\sigma}{r_b} \quad (2.1)$$

この圧力差によって、気泡内蒸気の飽和温度 T_g は液体の飽和温度 T_l より高く、その温度差（過熱度） ΔT は熱力学で周知の Clausius-Clapeyron の式によって以下のように与えられる。

$$\Delta T = T_g - T_{sat} = \frac{T_{sat}(\rho_l - \rho_g)}{\rho_g \rho_l h_{fg}} \Delta P \quad (2.2)$$

ここで、 ρ_l は液体の密度、 ρ_g は気体の密度、 h_{fg} は蒸発潜熱である。

Eq. 2.1 と Eq. 2.2 から、液体内に安定して存在する気泡の半径 r_b と過熱度 ΔT には以下のような関係が成立する。

$$\Delta T = \frac{2T_{sat}(\rho_l - \rho_g)\sigma}{\rho_g \rho_l h_{fg}} \cdot \frac{1}{r_b} \quad (2.3)$$

すなわち、液中で熱平衡状態にある気泡は、その半径が小さいほど大きな過熱度が必要であることがわかる。そのため気泡が伝熱面から発生するためには、非常に大きな液体過熱度が必要となるが、実際には伝熱面表面におけるキャビティに補足された気体を気泡核としているため、そのような液体過熱度は必要ないとされている。

気泡は伝熱面上で発生した後、伝熱面における更なる液体の蒸発によって成長し、ある大きさまで成長すると、伝熱面から離脱する。気泡の成長速度が小さな場合は、気泡の成長に伴い、気泡に働く浮力と表面張力による伝熱面への付着力との釣り合いが成立しなくなることで離脱が発生すると考えられている。Fritz (1936) の実験データを整理することによって離脱気泡径 d_b を以下のように与えられている。

$$d_b = 0.0209 \beta La, \quad La = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (2.4)$$

ここで β は気液界面と伝熱表面が成す液体側の角度である接触角、 g は重力加速度である。この式に含まれる La はラプラス定数と呼ばれ、気泡の代表長としてよく用いられる値である。水の大気圧下での沸騰においては $\beta = 50^\circ$ とすると十分に正確である。

低熱流束核沸騰では、気泡は同一気泡核から連続して発生する傾向がある。しかし、

気泡が離脱しても、後続の気泡が直ちに発生はしない。気泡離脱により周囲の過熱液層を同伴すること、蒸発により伝熱面が冷却され、キャビティ内に冷たい液体が進入することなどにより、次の気泡を発生するに必要な過熱度になるまでに時間を要するためである。これが休止時間 t_{wait} であり、気泡の1サイクルの時間 t_b は、気泡が伝熱面上で成長する時間 t_{grow} と t_{wait} の和として次のように表される。

$$t_b = t_{grow} + t_{wait} \quad (2.5)$$

単位時間あたりの気泡の離脱頻度 f_b は t_b の逆数となり、Jakob (1949)や Nishikawa (1954)は気泡の離脱頻度と離脱気泡径の間に以下の関係があることを示している。

$$d_b f_b = const \quad (2.6)$$

一方で、沸騰熱伝達がすべて相変化によるものと考えと、熱流束は単位時間に発生する気泡の全容積と比例関係にあるはずであるとして以下の関係式も与えられている。

$$d_b^3 f_b = const \quad (2.7)$$

2.1.2 核沸騰熱伝達

沸騰熱伝達に関してのさまざまなモデルが存在する。しかし、今までの解析結果などから、標準的な沸騰系において、沸騰する流体を指定すると、伝熱面特性 R 、圧力 P 、熱流束 q の3つが核沸騰熱伝達に影響する主要因子とされ、熱伝達係数 α との関係を下のように表現できると考えられており、実際に十分な結果を与えている。

$$\alpha = C G(R) F(P) q^m \quad (2.8)$$

ここで、 C は液体によって決定される定数、 $G(R)$ および $F(P)$ は伝熱面特性および圧力の影響を表す関数である。

純物質の核沸騰熱伝達に対し、多くの研究者が実験結果の整理式を導いているが、いまだに完全なものは得られていない。そこで、よく用いられる核沸騰熱伝達の整理式を以下にまとめる。

(1) Kutateladze の式

Kutateladze (1952)は核沸騰に関係を持つべき各種無次元数を導き、必要な無次元数を評価した。その上で伝熱面状態の評価は困難であるとして無視し、清浄な伝熱面に関する実験データの整理から以下の式を導いた。

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\lambda_l} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \\ = 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left[\frac{q}{h_{fg} \rho_g \nu_l} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \right]^{0.7} \left[\frac{P}{\sigma} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \right]^{0.7} \end{aligned} \quad (2.9)$$

ここで、 λ_l は液体の熱伝導率、 ν_l は液体の動粘性係数、 Pr_l は液体のプラントル数である。

(2) Rohsenow の式

Rohsenow (1952)は熱伝達の関数関係として一般的に知られている Eq. 2.10 と類似な Eq. 2.11 を式の基本として考えた。

$$Nu = f(Re, Pr_l) \quad (2.10)$$

$$Nu_b = f(Re_b, Pr_l) \quad (2.11)$$

ここで、 Nu はヌセルト数、 Re はレイノルズ数、 Nu_b は気泡ヌセルト数、 Re_b は気泡レイノルズ数である。

さらに、Rohsenow は境界層の破壊が伝熱面を離脱する気泡によって生じると考えて伝熱面における最大気泡径と蒸気の平均蒸発速度を代表長と代表速度にとり、清浄な伝熱面に関する実験データより以下の式を導いた。

$$\frac{\alpha}{\lambda_l} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} = \frac{Pr_l^{-0.7}}{C_{sf}} \left[\frac{q}{h_{fg} \rho_g \nu_l} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \right]^{0.67} \left[\frac{\rho_g}{\rho_l} \right]^{0.67} \quad (2.12)$$

ここで、 C_{sf} は液体と伝熱面の組み合わせで決まる定数であり、およそ $C_{sf}=0.0025\sim0.013$ である。この式は圧力を陽には含まないが、圧力が異なる場合にも使用できる。

(3) Forster-Zuber の式

Forster and Zuber (1955)は Rohsenow (1952)と同様に Eq. 2.11 を式の基本として考えた。

Rohsenow が境界層の破壊が伝熱面を離脱する気泡によって生じると考えたのに対して, Forster らは気泡生長の膨張によって生じると考え, 気泡半径と半径方向の気泡生長速度を代表長と代表速度にとりて, 以下の式を導いた. ただし, 熱流束を与えた場合に反復計算をする必要がある.

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\lambda_l} \left(\frac{\Delta T c_{p,l} \rho_l \sqrt{\pi \kappa}}{h_{fg} \rho_l} \sqrt{\frac{2\sigma}{\Delta P}} \sqrt{\frac{\rho_l}{\Delta P}} \right) \\ = 0.0015 \left[\frac{\rho_l}{\mu_l} \left(\frac{\Delta T c_{p,l} \rho_l \sqrt{\pi \kappa}}{h_{fg} \rho_l} \right)^2 \right]^{0.62} \left[\frac{\mu_l c_{p,l}}{\lambda_l} \right]^{0.33} \end{aligned} \quad (2.13)$$

(4) Nishikawa-Fujita の式

Nishikawa and Yamagata (1977)は自然対流熱伝達と核沸騰の類似性の立場に立って, 半理論的な整理式である以下の式を導いた.

$$\begin{aligned} Y &= 6.24 (f_s f_p X)^{2/3}, \quad (q \leq q_t) \\ Y &= 0.66 R^{-2/5} (f_s f_p X)^{4/5}, \quad (q_t \leq q) \end{aligned} \quad (2.14)$$

ただし, Y , X , f_p , q_t は以下の通りである.

$$\begin{aligned} Y &= \alpha L / \lambda_l \\ X &= \left[\left(\frac{1}{C_1^2 C_2} \right) \left(\frac{c_{p,l} \rho_l^2 g}{\lambda_l \sigma \rho_g h_{fg}} \right) \right]^{1/2} q R^{3/2} \\ f_p &= \left(\frac{P}{P_{atm}} \right)^{0.7} \left[\frac{1 + 3(P/P_c)^3}{1 + 3(P_{atm}/P_c)^3} \right] \\ q_t &= \frac{2.08 \times 10^7 R^{3/2}}{f_s f_p \left[\left(\frac{1}{C_1^2 C_2} \right) \left(\frac{c_{p,l} \rho_l^2 g}{\lambda_l \sigma \rho_g h_{fg}} \right) \right]^{1/2}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

ここで, L は伝熱面の代表寸法 (水平円板: 半径, 水平管: 管直径), P_{atm} は大気圧, P_c は臨界圧力, $C_1=1.976 \text{ W}$, $C_2=900 \text{ m}^{-1}$ である. また, f_s は気泡係数とよばれる係数であり通常 $f_s \approx 1$ として十分な値となっている.

(5) Stephan-Abdelsalam の式

Stephan and Abdelsalam (1980)は次元解析で抽出した 14 種類の無次元数を用いて、多数の実験データを回帰分析することで、純粋に実験データの整理を行った。整理方法としては 4 種類の液体グループに分け、便宜的に表面粗さを $1\mu\text{m}$ に仮定することでその影響は考慮しないことにして、接触角についても液体グループごとに同一の値を用いた。その整理式は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \text{水} : \quad & Nu = 0.246 \times 10^7 X_1^{0.673} X_3^{1.36} X_4^{-1.58} X_{13}^{5.22} \\ & \beta = 45^\circ, 10^{-4} \leq P/P_c \leq 0.886 \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \text{炭化水素} : \quad & Nu = 0.0546 X_1^{0.67} X_4^{0.248} X_5^{0.335} X_{13}^{-4.33} \\ & \beta = 35^\circ, 5.7 \times 10^{-3} \leq P/P_c \leq 0.9 \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \text{低温液体} : \quad & Nu = 4.82 X_1^{0.624} X_3^{0.374} X_4^{-0.329} X_5^{0.257} X_9^{0.117} \\ & \beta = 1^\circ, 4 \times 10^{-3} \leq P/P_c \leq 0.97 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \text{冷媒} : \quad & Nu = 207 X_1^{0.745} X_5^{0.581} X_6^{0.533} \\ & \beta = 35^\circ, 10^{-4} \leq P/P_c \leq 0.78 \end{aligned} \quad (2.19)$$

ただし、 Nu , X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 , X_6 , X_9 , X_{13} , d は以下の通りである。

$$\left. \begin{aligned} Nu &= \alpha d / \lambda_l, X_1 = qd / \lambda_l T_{sat}, X_2 = \kappa_l^2 \rho_l / \alpha d \\ X_3 &= c_{p,l} T_{sat} d^2 / \lambda_l, X_4 = h_{fg} d^2 / \kappa_l^2, X_5 = \rho_g / \rho_l \\ X_6 &= \nu_l / \kappa_l, X_9 = \rho_h c_{p,h} \lambda_h / \rho_l c_{p,l} \lambda_l, X_{13} = (\rho_l - \rho_g) / \rho_l \\ d &= 0.0146 \beta \sqrt{2\sigma / g(\rho_l - \rho_g)} \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

ここで ρ_h , $c_{p,h}$, λ_h はそれぞれヒータ（伝熱面）のカバー材の密度、定圧比熱、熱伝導率である。

これまで述べてきた純媒体の核沸騰熱伝達に関する整理式はよく知られているが、実験定数が必要であったりする上に、整理式によってそれぞれの物性値の変化に対する傾向が異なる。

2.1.3 限界熱流束

バーンアウト機構に関して、さまざまな研究が行われ、多くの提案がなされている。

その主なものとして、以下の3つがあげられる。

- (1) 気泡充満モデル
- (2) 不安定理論モデル
- (3) 薄液膜蒸発モデル

気泡充満モデルは、熱流束の増大による気泡の発泡点密度と発生周期の増大によって、気泡の上昇よりも先に伝熱面上に気泡が充満して広い乾き面が発生することで、伝熱面と蒸気との間で直接熱伝達を始めて熱伝達が急激に劣化することでバーンアウトを起こすという最も基本的なモデルである。

不安定理論モデルは、バーンアウト付近で発生する蒸気の上昇流とその周りの液体が伝熱面に向かって流れていく下降流との間の気液界面において、流体力学的な不安定状態が発生することで液体の供給が妨げられてバーンアウトが発生するというモデルである。

薄液膜蒸発モデルは、気泡が離脱するよりも早く、気泡底部に存在する薄液膜が蒸発することで、気泡底部の乾き面が拡大し、バーンアウトが発生するというモデルである。

このようにさまざまなモデルが存在するが、核沸騰から膜沸騰への遷移は速やかに行われるため、実際の物理現象を確認することは難しく、完全な現象の解明に至っていない。

純媒体の限界熱流束に対し、多くの研究者が実験結果の整理式を導いているが、いまだに観測されるバーンアウト現象と機構的にも一致すると考えられるような完全な整理式は得られていない。そこで、よく用いられる限界熱流束の整理式を以下にまとめる。

- (1) 気泡充満モデル

Rohsenow and Griffith (1956)は気泡充満モデルを基にして、半実験的に以下の式を導いた。

$$\frac{q_{CHF}}{h_{fg}\rho_g}\left(\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}\right)^{0.6} = 0.0121 \text{ m/s} \quad (2.21)$$

この式は、限界熱流束の重力依存性が考慮されていない。

- (2) 不安定理論モデル

一般に Zuber の式とよばれる以下の式を Kutateladze (1950)と Zuber (1959)がそれぞれ

に導いている.

$$\frac{q_{CHF}}{h_{fg}\rho_g} \left(\frac{\rho_g^2}{\sigma g(\rho_l - \rho_g)} \right)^{1/4} = C \quad (2.22)$$

ここで, 定数 C は液体, 伝熱面特性, 圧力などに依存する係数である. Kutatelaze はこの式を次元解析的な考察から導き, 定数 C として 0.16 を与えた. 一方, Zuber は不安定理論から気液界面の安定性を解析することによって, 水平無限平板に対する式を導き, 定数 C として $\pi/24=0.131$ もしくは 0.12~0.16 の値を推奨している. この Zuber の式は限界熱流束の予測式として最もよく用いられている.

(3) 薄液膜蒸発モデル

また, Haramura and Katto (1983) は薄液膜蒸発モデルから液膜厚さを因子として, Zuber (1959) の考えた不安定理論を用いることで解析的に以下の式を導いた.

$$\begin{aligned} \frac{q_{CHF,H-K}}{\rho_l h_{fg}} \left(\frac{\rho_g^2}{\sigma g(\rho_l - \rho_g)} \right)^{1/4} \\ = \left(\frac{\pi^4}{2^{11} 3^2} \right)^{1/16} \left(\frac{A_g}{A_w} \right)^{5/8} \left(1 - \frac{A_g}{A_w} \right)^{5/16} \left[\frac{\left(\frac{\rho_l}{\rho_g} + 1 \right)}{\left(\frac{11}{16} \frac{\rho_l}{\rho_g} + 1 \right)^{3/5}} \right]^{5/16} \end{aligned} \quad (2.23)$$

ここで, A_g は伝熱面上を占める蒸気面積, A_w は伝熱面面積である.

さらに, Haramura らは Eq. 2.22 と Eq. 2.23 を等値することによって, 水平無限平板 ($A_g/A_w \ll 1$, $\rho_g/\rho_l \ll 1$) において次式が成立することを示した.

$$\frac{A_g}{A_w} = 0.0584 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.2} \quad (2.24)$$

以上の他にもさまざまな整理式が存在するが, 現在のところ Zuber の式が十分な精度

を与えており、モデルには多くの問題点を指摘されることもあるが、よく使用されている。

2.1.4 サブクール度による限界熱流束の増大

Table 2.1 に既存のサブクール度による限界熱流束の増大についての関係式をまとめたものである。一般的にサブクール度が高い程限界熱流束は増大する。これは上昇する気泡が上部のサブクールされたバルク液体によって凝縮され、伝熱面上からの気泡除去が可能となるためである。

Table 2.1 Correlations of enhancement of critical heat flux by subcooled boiling

Researches	Correlations	Experimental conditions	Heater	Test liquid
Kutateladze (1952)	$\frac{q_{CHF,sub}}{q_{CHF,sat}} = 1 + 0.065 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{5}} Ja$	$0.1 \leq P \leq 1 \text{ MPa}$ $\Delta T_{sub} \leq 120 \text{ K}$	Rough graphite disk	Water Ethanol Iso-octane
Ivey and Morris (1962)	$\frac{q_{CHF,sub}}{q_{CHF,sat}} = 1 + 0.102 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{4}} Ja$	$P = 0.1 \text{ MPa}$ $\Delta T_{sub} \leq 70 \text{ K}$	Strip, wire tube	Water Iso-octane
Zuber (1959)	$\frac{q_{CHF,sub}}{q_{CHF,sat}} = 1 + 5.32 Pe^{\frac{1}{5}} Ja$	$0.1 \leq P \leq 1 \text{ MPa}$ $\Delta T_{sub} \leq 120 \text{ K}$	Surface	Water Ethanol

$$Ja = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right) \frac{c_{pl}(T_{sat} - T_{bulk})}{h_{fg}} \quad (2.25)$$

$$Pe = \frac{\sigma^{\frac{3}{4}}}{\kappa \rho_g^{\frac{1}{2}} [g(\rho_l - \rho_g)]^{\frac{1}{4}}} \quad (2.26)$$

(1) Kutateladze の式

Kutateladze (1952)はサブクールされた液体が飽和温度になるまでに必要な熱量によりサブクール時の限界熱流束が高くなると仮定した。 $C_0=0.065$, $m=0.8$ を使用する。

$$q_{CHF} = 0.16 h_{fg} \rho_g \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{\frac{1}{4}} \left[1 + C_0 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^m \left(\frac{c_{pl}(T_{sat} - T_{bulk})}{h_{fg}} \right) \right] \quad (2.27)$$

(2) Ivey-Morris の式

Ivey-Morris (1962)も同様の原理から以下の式を導いた． $C_0=0.1, m=0.75$ を使用する．

$$q_{CHF} = 0.16 h_{fg} \rho_g \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{\frac{1}{4}} \left[1 + C_0 \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^m \left(\frac{c_{pl} (T_{sat} - T_{bulk})}{h_{fg}} \right) \right] \quad (2.28)$$

(3) Zuber の式

Zuber (1959)は次のような仮定を用いサブクール度が限界熱流束に及ぼす影響について考えた．気泡とバルクの中の気液界面が瞬時に飽和温度に達し，ある期間 τ にバルク中に伝わる平均熱量を1次元の熱拡散より Eq. 2.29 で求めた．その後気泡の突き上げにより気液界面は破壊され，その過程を繰り返すとした．

$$\frac{Q}{A} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{\lambda (T_{sat} - T_{bulk})}{\sqrt{\pi \kappa \tau}} d\tau = \frac{2\lambda (T_{sat} - T_{bulk})}{\sqrt{\pi \kappa \tau}} \quad (2.29)$$

よってサブクールによる限界熱流束は以下のようになる．

$$q_{CHF} = \frac{\pi}{24} h_{fg} \rho_g \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{\frac{1}{4}} + \frac{2\lambda (T_{sat} - T_{bulk})}{\sqrt{\pi \kappa \tau}} \quad (2.30)$$

2.2 沸騰冷媒に関する研究

沸騰冷媒は大まかに単成分媒体と混合媒体に分けられ、混合媒体はさらに共溶性の媒体と非共溶性の媒体に分けることができる。沸騰冷媒は一般に通常重力下のプール沸騰により熱伝達特性を比較、評価される。

単成分冷媒については物性推算方法の確立や測定技術の進歩や過去の実験データにより、沸騰冷却システムを開発するために必要な精度の良い熱力学特性データを得られること、また、混合媒体に比べてその熱力学特性や沸騰熱伝達特性が安定しており凝縮性能もよいことから様々な沸騰システムで利用されている。逆に混合媒体は、混合割合によって熱力学特性を容易に変化させられることを利用して単成分媒体では実現できない特性を付加することができる。例えば、純水を使ったラジエータでは溶液が 0°C 以下になった際に凍結するという問題があるが、それを解決するためにエチレングリコール等の不凍液を混合した 0°C 以下で凝固しない LLC が使用される。純媒体と混合媒体それぞれに短所と長所があり、冷却機器の用途に合わせて適切な沸騰冷媒を用いることが望ましいとされる。

混合媒体は通常、液体がほぼ完全に混合する共溶性の媒体と液体間に分離を生じる非共溶性の媒体に分けられる。たとえば、標準大気状態では純水とプロパノールは混合するため共溶性混合媒体であり、一方純水と油は分離を起こすため非共溶性混合媒体と分類できる。しかしながら、非共溶性混合媒体をもちいたプール核沸騰実験は少なく熱伝達特性については研究が進められようとしている段階である。

2.2.1 共溶性非共沸混合媒体

Abe (2005)はヒートパイプにおける熱輸送の限界値が self-rewetting により増大したと報告した。また Figure 2.2 には self-rewetting により Water 単成分媒体に比べて熱抵抗が減少したことを示す。これは Figure 2.3 に示すマランゴニ力により引き起こされる。マランゴニ力は気液界面での温度勾配と濃度勾配による表面張力の差により伝熱面上の気泡下での3相界線に向かって液体が流入する作用を及ぼす。これらを濃度差マランゴニ効果と温度差マランゴニ効果と言う。

低沸点媒体の方が表面張力の低い混合媒体においては濃度差マランゴニ効果により、3相界線に向かう流れが生じる。一方、通常の流体では温度が高くなるにつれ表面張力が小さくなるが、特定の混合媒体の特定の濃度比ではこの逆の傾向を持つ。Vochten and Petre (1973)は Figure 2.4 に炭素数が4以上の高級アルコール水溶液の温度に対する表面張力の値を示した。どの水溶液でも低温側では通常と同様に温度の増加とともに表面張力は低下するが、それぞれの極小値以降では温度の増加とともに表面張力が大きくなっ

ていることが分かる．また Van Stralen (1956)は伝熱線によるプール核沸騰において限界熱流束が増大したことを報告している．Figure 2.5 にその結果を示す．一方で Salai et al. (2010)は self-rewetting による限界熱流束の増大が水平伝熱面では見られないと報告している．

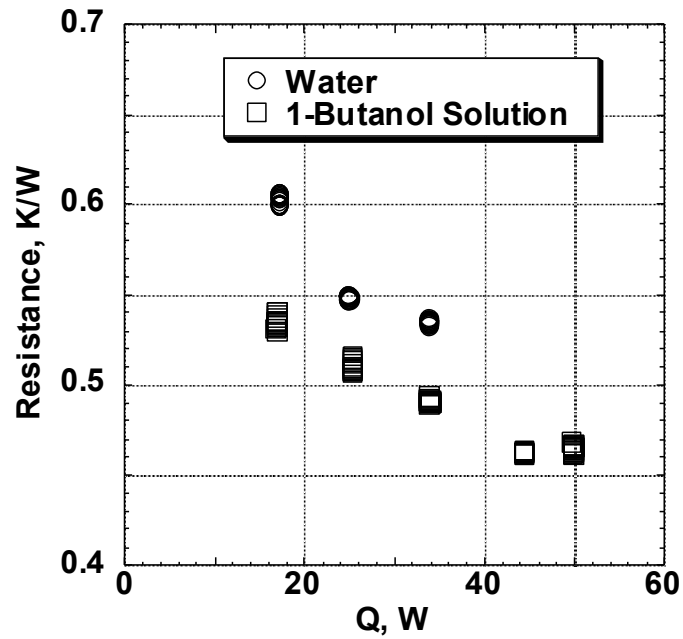


Fig. 2.2 Reduction of thermal resistance for heat pipe with 4mm diameter (Abe, 2005)

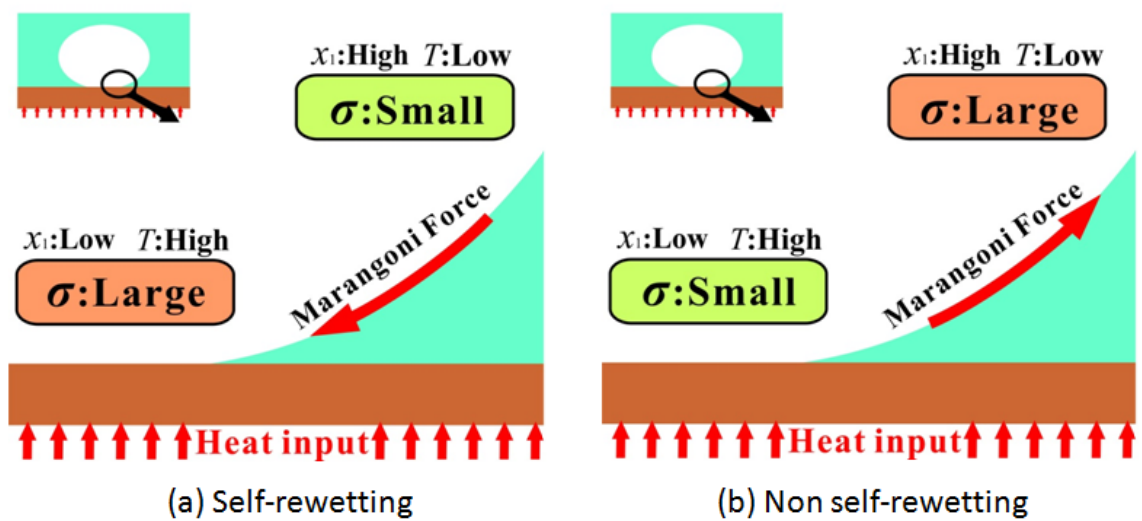


Fig. 2.3 Self-rewetting or non self-rewetting at the evaporation interface

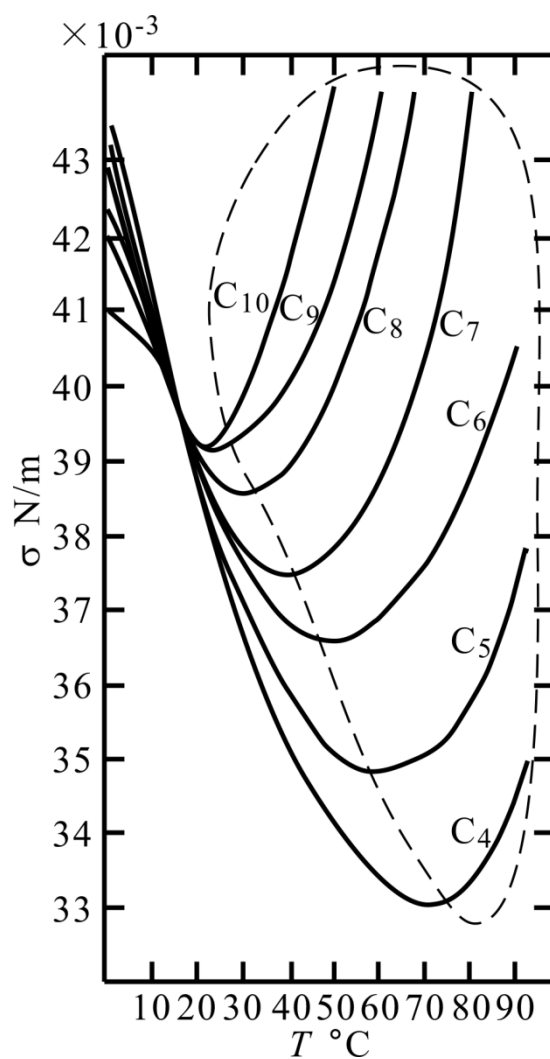


Fig. 2.4

Effect of temperature on surface tension of alcohol solution
(Vochten and Petre, 1973)

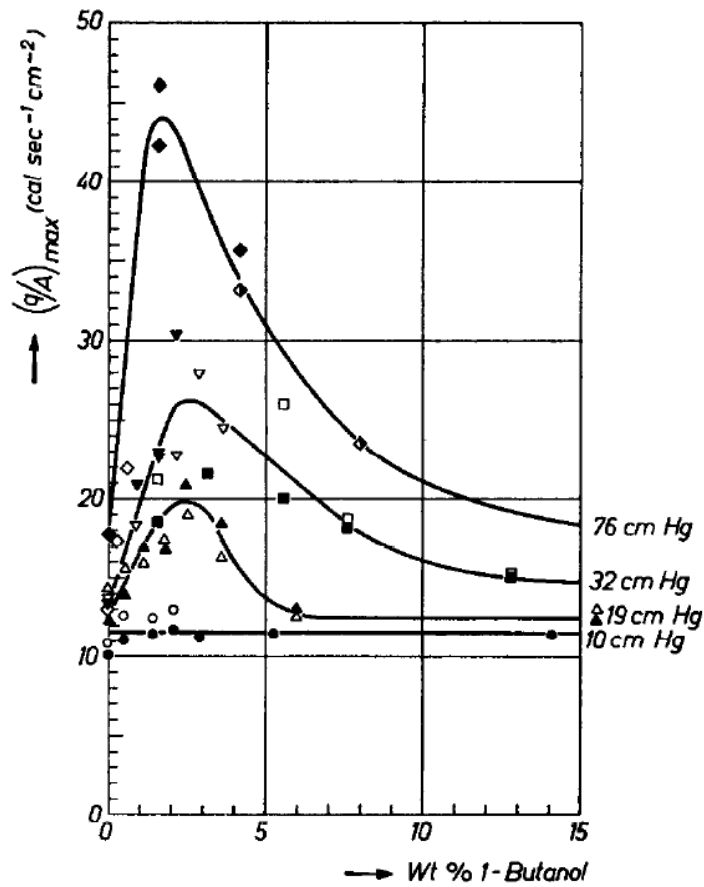


Fig. 2.5 Observed increase of CHF for an alcohol aqueous solution (Van Stralen, 1956)

2.2.2 非共溶性混合媒体

非共溶性混合媒体の熱伝達特性に関する研究はほとんど行われておらず、統一的な知見が得られていない。

Bragg and Westwater (1970)は純水に Perchloroethylene, Freon-113, Hexane をそれぞれ加え、水平上向き伝熱面をもつ実験装置を用いてプール沸騰実験を行い、伝熱面に接触する媒体の揮発度とそれぞれの媒体の伝熱形式が熱伝達特性に与える影響について調査した。このとき下層の媒体は混合媒体の熱伝達特性に大きく影響し、上層に媒体が存在することによって混合媒体の飽和温度が低下しサブクール沸騰状態となることが報告されている。また、熱伝達係数に関しては下層の伝熱面に触れている媒体のみの場合と比較すると上昇することが報告されている。また Table 2.2 に示す通り、各層における揮発性、密度、伝熱様式の違いによる非共溶性混合媒体の熱伝達形態を 11 個に分類している。

Table 2.2 Classification of boiling mode observed for different immiscible mixtures

Case	Bottom layer (Volatility)	Top layer (Volatility)	Possible Examples More-volatile/Less-volatile
1	Free Convection (Less-volatile)	Nucleate Boiling (More-volatile)	Mercury/Water Water/Hexane
2	Nucleate Boiling (More-volatile)	Free Convection (Less-volatile)	Water/Octadecane
3	Free Convection (Less-volatile)	Film Boiling (More-volatile)	Mercury/Pentane
4	Film Boiling (More-volatile)	Free Convection (Less-volatile)	Freon-113/Water
5	Film Boiling (Less-volatile)	Free Convection (More-volatile)	Perchloroethylene/Water
6	Nucleate Boiling (More-volatile)	Nucleate Boiling (Less-volatile)	Freon-112/Water
7	Nucleate Boiling (Less-volatile)	Nucleate Boiling (More-volatile)	Water/Hexane
8	Film Boiling (Less-volatile)	Film Boiling (More-volatile)	Water/Butane Mercury/Water
9	Nucleate Boiling (Less-volatile)	Film Boiling (More-volatile)	Mercury/Ether
10	Film Boiling (Less-volatile)	Nucleate Boiling (More-volatile)	Water/Hexane
11	Film Boiling (More-volatile)	Nucleate Boiling (Less-volatile)	Freon-112/Water

Sump and Westwater (1971)は純水に Freon-113, Freon-112, n-Hexane をそれぞれ混合しプール沸騰実験を行うことによって、非共溶性混合媒体における加熱部と媒体との位置関係や伝熱様式が熱伝達特性に与える影響を調査した。Figure 2.6 に実験装置を示す。加熱には銅製のチューブを用い、試験ボイラ内のそれぞれの媒体の高さは調節可能になっている。

Figure 2.7 に実験結果を示す。この実験から、膜沸騰領域において非共溶性混合媒体の沸騰曲線が単成分媒体のそれに比べてより高熱流束へ移動していることが報告されている。これは媒体を混合することによる飽和温度の低下の割合におおよそ比例している。しかし、核沸騰領域においてはあまり大きな影響はみられていない。また、非共溶

性混合媒体の飽和温度は両成分の液体が存在する場合その組成に依らず一意的に定まる。しかし、この実験では混合媒体の組成によって飽和温度が変化し、常に理想的な場合よりも高い飽和温度をとっており、それが熱伝達特性に影響を与えるため、混合媒体の組成は熱伝達特性に大きな影響を与えることが報告されている。

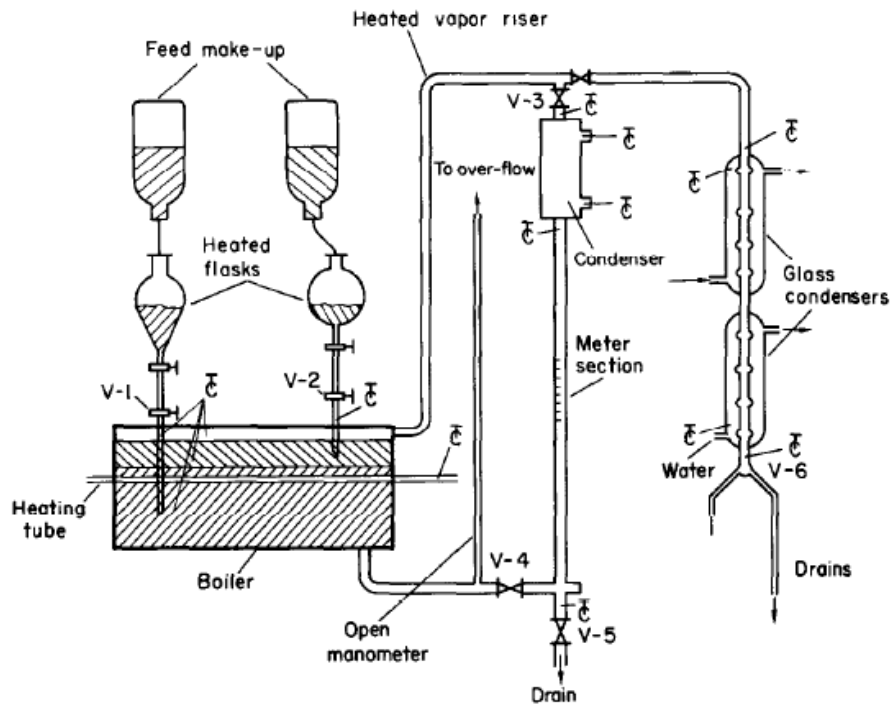


Fig. 2.6 Experimental apparatus (Sump and Westwater, 1971)

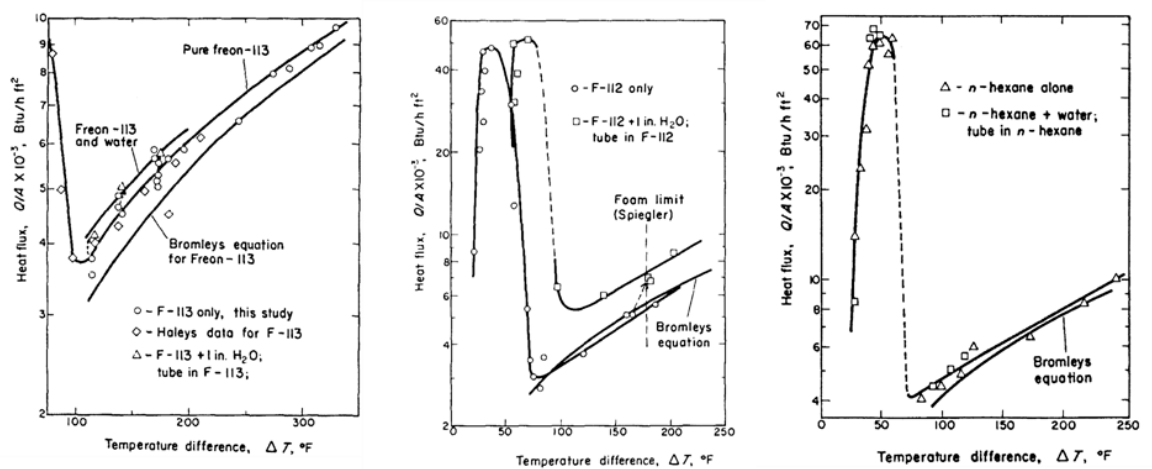


Fig. 2.7 Experimental results (Sump and Westwater, 1971)

2.2.3 非共溶性混合媒体による乳濁液

土方ら(1985)は、主媒体を純水とし、より沸点の低い R113 をごく微小な液滴として加え主媒体中に均一に分散させ管内沸騰実験を行い、R113 の沸騰機構と伝熱に及ぼす影響とともに R113 の混合比が熱伝達特性におよぼす影響について定量的に検討した。

この研究は、サイクルに非共溶性混合媒体を用いることによって主媒体がまだ沸騰していない状態において低沸点媒体を沸騰させ、その蒸発潜熱により混合媒体の低温領域での見かけの比熱を増大させるとともに、低沸点媒体の沸騰に伴う乱流混合の促進および体積膨張による加速効果などによる伝熱促進を図り、熱エネルギーを有効利用することを目的としている。

Figure 2.8 に実験装置を示す。装置は混合部、試験部および凝縮部からなる。混合部は混合タンクと微細化ノズルからなり、微細化ノズルによって R113 を微細化し純水と均一に混合する。

R113 の沸騰が進み気泡数が増加し気泡が管断面全体にわたって分布すると伝熱面上に発生する気泡によりかく乱が起こり、熱伝達率は水だけの場合と比べて約 2 倍程度に向上することが報告されている。またこの効果は R113 の混合比にあまり依存しない。さらに、混合されたすべての R113 が沸騰できるまで加熱した場合、R113 の沸騰による混合および体積膨張により伝熱が促進されることが報告されている。またこの伝熱の促進は R113 の沸騰が完全に終了するまで続くため、R113 の混合比の上昇にともなって熱伝達係数は向上する。Figure 2.9 に実験結果を示す。図中の ψ は R113 の体積含有率を示している。 ψ が大きくなるにしたがって伝熱面表面温度が低くなっていることがわかる。

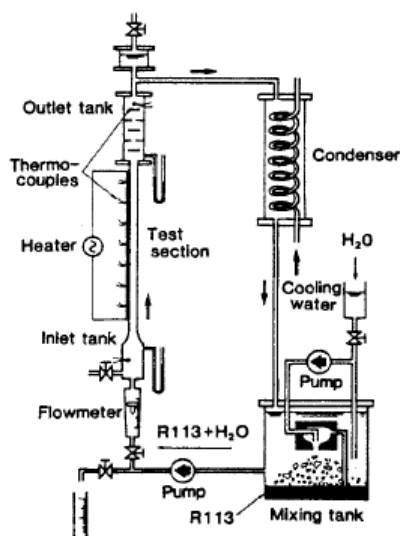


Fig. 2.8

Experimental apparatus (Hijikata, 1985)

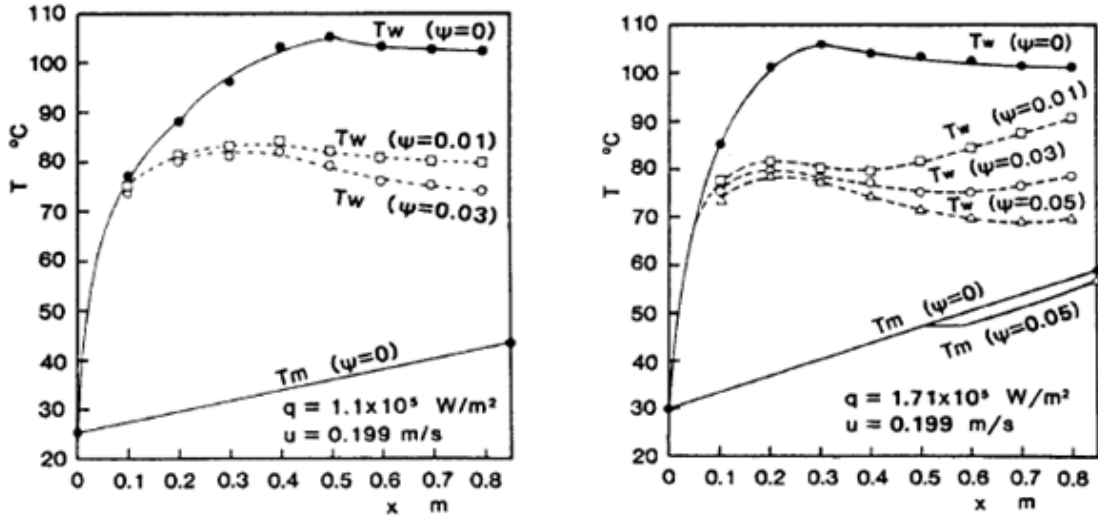


Fig. 2.9 Experimental results (Hijikata, 1985)

2.3 非共溶性混合媒体の界面における気泡挙動に関する研究

Greene et al. (1988)は密度の違う上層（下付き文字 2）と下層（下付き文字 1）の 2 成分非共溶性混合媒体の界面において、それに対して垂直方向に上昇する気泡による上層への突入に必要な、また下層の媒体を上層に持ち上げるための最小体積を解析により求めた。また 8 種類の非共溶性混合媒体の組み合わせによる実験値と比較し、一致したことを確認した。

上昇する気泡が上層へ突入する場合、界面張力が下向きの力を気泡の浮力が上向きの力となる。気泡の周りに同伴する下層の媒体の存在を無視すると、上層への突入に必要な気泡の最小体積は Eq. 2.31 のようになり、気泡を球と仮定すると最小直径は Eq.2.32 のようになる。

$$V_{pen}^* = \left[\frac{3.9\sigma_{21}}{g(\rho_2 - \rho_g)} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.31)$$

$$\phi_{pen}^* = 2 \left[\frac{3V_{pen}^*}{4\pi} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.32)$$

上昇する気泡が下層の媒体を持ち上げる場合、界面張力と下層の媒体の密度差による下向きの力と気泡の浮力による上向きの力が発生する。上昇する気泡が下層の媒体を上層に持ち上げるために必要な最小体積は Eq. 2.33 のようになり、気泡を球と仮定すると最小直径は Eq. 2.34 のようになる。

$$V_{ent}^* = V_{pen}^* \left[\frac{2}{3 - \rho_1 / \rho_2} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2.33)$$

$$\phi_{ent}^* = 2 \left[\left(\frac{2}{3 - \rho_1 / \rho_2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{3V_{pen}^*}{4\pi} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.34)$$

Greene et al. (1990)は2層の密度と界面張力、粘性をパラメータにとり、それが Eq.2.33 の体積にどのような影響があるかを、8種類の非共溶性混合媒体の組み合わせによる実験により調べ、以下のことがわかった。

- 下層液体の液体密度が小さいほど液体同伴量は大きい
- 上層液体の液体密度が大きいほど液体同伴量は大きい
- 界面張力の違いは液体同伴量に大きく影響しない
- 下層液体の粘性が小さい（下層での気泡速度が速い）ほど液体同伴量は大きい
- 上層液体の粘性の違いは液体同伴量に大きく影響しない

2.4 第2章まとめ

以下に第2章のまとめを示す.

1. 沸騰熱伝達に関して気泡成長, 核沸騰熱伝達と限界熱流束及びサブクールによる限界熱流束の増大に関する既存研究をまとめた.
2. 沸騰冷媒について共溶性混合媒体, 非共溶性混合媒体とその乳濁液についての既存研究をまとめその問題点を整理した. 共溶性非共沸混合媒体の核沸騰熱伝達に関する研究は多く存在するが, 非共沸混合媒体の利点はごく限られた条件下でしか現れない. 一方で非共溶性混合媒体の熱伝達特性に関する研究はほとんど行われておらず, 統一的な知見が得られていない.
3. 非共溶性混合媒体の界面における気泡挙動についての既存研究をまとめ, 気泡発生, 上昇による両液体の物理的混合の効果とその要因についてまとめた.

第3章 非共溶性混合媒体

本章では非共溶性混合媒体について、密度と飽和温度による組み合わせとその効果、気液相平衡図と溶解度との関係性について述べる。

3.1 非共溶性混合媒体の気液相平衡図

液体状態で互いに混ざり合うことのない非共溶性混合媒体の気液相平衡について考える。非共溶性混合媒体の気液相平衡図は共溶性媒体のそれとは大きく異なる。

Figure 3.1 は一般的な二成分非共溶性混合媒体の気液相平衡を示した図であり、圧力を一定のパラメータとし、横軸に媒体の組成、縦軸に飽和温度を示している。図上の実線は沸点曲線、破線は露点曲線を表しており、露点曲線よりも上方は気相状態、露点曲線と沸点曲線とに囲まれた領域は液相・気相の混合状態そして沸点曲線より下方が液相状態を表している。また沸点曲線と露点曲線が交わっている共沸状態が存在する。さらにその状態においては定圧条件の相平衡図上で極小温度または極大温度をとる。

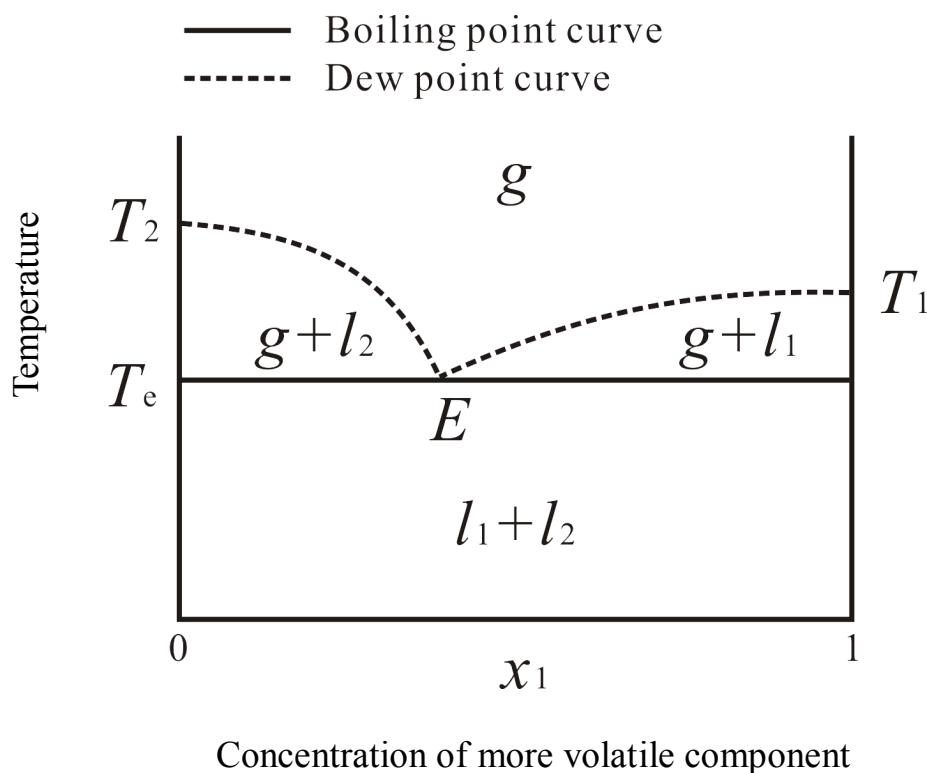


Fig. 3.1

Typical liquid-vapor phase equilibrium diagram of immiscible liquid mixture

非共溶性混合媒体の2成分混合媒体の沸点曲線は T_e の水平の実線で示されるように、2つの成分が共に液体状態で存在する場合はそれぞれの組成に依らず一定の値をとる。ただし、1つの成分がすべて蒸発しもう一方の成分だけになったとき沸点は、液体として存在している純成分の沸点 (T_1 または T_2) まで急激に上昇する。

沸点曲線は、系の全圧を P 、各成分の純蒸気の温度 T_e での飽和蒸気圧を $P_{sat,1}(T_e)$, $P_{sat,2}(T_e)$ とするとき Eq. 3.1 を満たす。

$$P = P_{sat,1}(T_e) + P_{sat,2}(T_e) \quad (3.1)$$

また、露点曲線 T_1E は、温度の関数として、純液体1と平衡にある蒸気の組成を与える。露点曲線 T_1E 上のある温度 T の点について考える。ここでは液相には成分1のみ、蒸気相には成分1と成分2の混合した状態で存在している。全圧を P 、各成分の純蒸気分圧を P_1 , P_2 とすると、Eq. 3.2 が成り立つ。

$$P = P_1 + P_2 \quad (3.2)$$

また成分1は気液相平衡状態で存在しているので、Eq. 3.3 となる。

$$P_1 = P_{sat,1}(T) \quad (3.3)$$

よって、露点曲線 T_1E 上のある温度 T の点において過熱蒸気状態で存在する成分1のモル分率 $x_1(T)$ は次のように求まる。

$$x_1(T) = \frac{P_1}{P} = \frac{P_{sat,1}(T)}{P} \quad (3.4)$$

また容器内の気液相平衡にある非共溶性混合媒体の状態について考える。液層より上部には両媒体の混合蒸気が存在し、ほぼ蒸気と両媒体の液相は熱平衡状態を保っている。すなわちこの平衡温度における各媒体の飽和蒸気圧の和が系圧力になっている。この時、一方の媒体に着目した場合、その温度に対する飽和圧力以上の圧力をもう一方の媒体の飽和蒸気圧によりかけられていることになる。この場合、各媒体は共に平衡温度に対する各飽和圧力よりも高く保たれているので、圧縮液状態である。別の見方をすると、Figure 3.2 に示すように両媒体の飽和蒸気圧の和となっている系圧力下で、ほぼ一様に保たれている平衡温度では各成分は共にそれぞれの飽和温度以下になっていることか

ら過冷（サブクール）状態である．また両媒体のサブクール度について，高沸点媒体の方が低沸点媒体よりも高い．これについては第4章の4.4.2にて説明する．

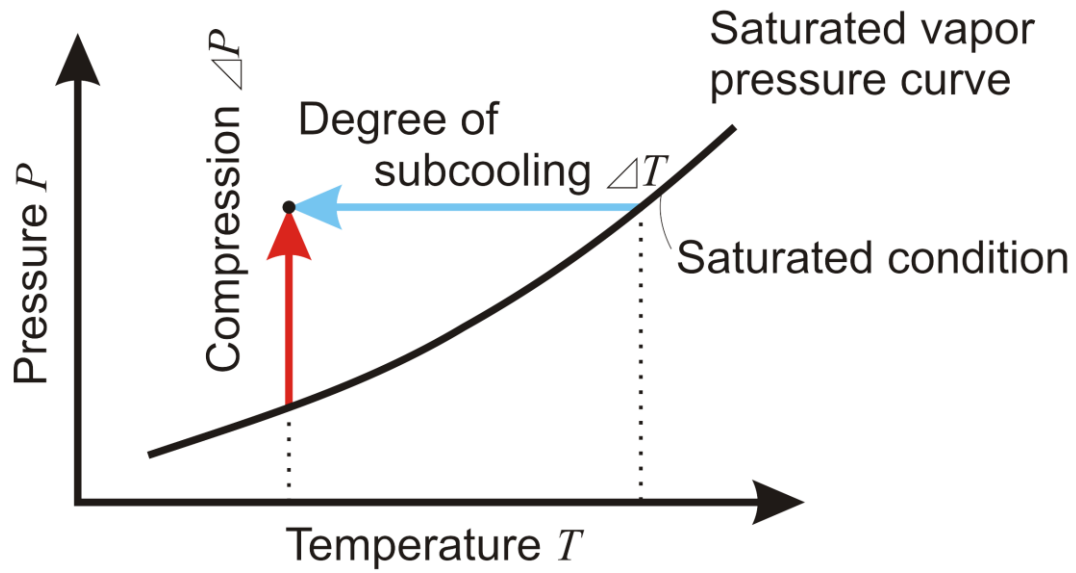


Fig. 3.2

Subcooled conditions in saturated vapor pressure curve

3.2 密度と飽和温度による組み合わせとその効果

2成分の非共溶性混合媒体を考える時、一般的にそれらの温度に対する蒸気圧と密度が異なる。蒸気圧が高いものでは例えばフロンやフロリナートなどの熱媒体であり、蒸気圧が低いものは純水が挙げられる。フロンやフロリナートは低温でも沸騰しやすく、水は沸騰しにくい。

下部に設置された冷却面に対して、密度が大きい媒体が直接的に接触することとなる。Figure 3.3 に飽和温度と密度の大小による組み合わせとその効果を示す。

- (a) 加熱開始前の層厚さが厚い密度の大きい低沸点媒体と層厚さが厚い密度の小さい高沸点媒体

伝熱面に直接触れる低沸点媒体の層厚さが大きく、熱流束によらず低沸点媒体の沸騰熱伝達が支配的となる。伝熱面表面温度は低沸点媒体への熱伝達により決まる。限界熱流束に対しては高沸点媒体の分圧の寄与が小さく、サブクール度が小さいため限界熱流束の増大効果は小さい。沸騰開始にはサブクール度の小さい低沸点媒体が伝熱面に触れるため、伝熱面表面温度のオーバーシュートは小さい。

- (b) 加熱開始前の層厚さが厚い密度の大きい高沸点媒体と層厚さが厚い密度の小さい低沸点媒体

伝熱面に直接触れる高沸点媒体の層厚さが大きく、熱流束によらず高沸点媒体の沸騰熱伝達が支配的となる。伝熱面表面温度は高沸点媒体への熱伝達により決まり、一般的には低沸点媒体よりも大きくなる。限界熱流束に対しては低沸点媒体の分圧の寄与が大きく、サブクール度が大きいいため限界熱流束の増大効果は大きい。沸騰開始にはサブクール度の大きい高沸点媒体が伝熱面に触れるため、伝熱面表面温度のオーバーシュートは大きい。

- (c) 加熱開始前の層厚さが薄い密度の大きい低沸点媒体と層厚さが厚い密度の小さい高沸点媒体

(a)と同様に低沸点媒体がバーンアウトを起こすが、Figure 3.4 に示す通り伝熱面に直接触れる低沸点媒体の層厚さが小さいため上層から高沸点媒体が流入することができ、熱流束の増大とともに高沸点媒体の沸騰熱伝達が支配的な領域へ移行する。よって伝熱面表面温度は低沸点媒体の熱伝達が支配的な領域ではその熱伝達により、高沸点媒体の熱伝達が支配的な領域ではその熱伝達により決まる。限界熱流束に対しては高沸点媒体の分圧の寄与が大きく、サブクール度が大きいいため限界熱流束の増大効果は大きい。沸騰開始にはサブクール度の小さい低沸点媒体が伝熱面に触れるため、伝熱面表面温度のオーバーシュートは小さい。

- (d) 加熱開始前の層厚さが薄い密度の大きい高沸点媒体と層厚さが厚い密度の小さい

低沸点媒体

(b)と同様に高沸点媒体がバーンアウトを起こすが、Figure 3.4 に示す通り伝熱面に直接触れる高沸点媒体の層厚さが小さいため限界熱流束は小さくなる。その後上層から低沸点媒体が伝熱面表面に向かって流入するが、伝熱面表面が高沸点媒体のバーンアウトを生じるほどの温度になっており、そのまま低沸点媒体もバーンアウトを迎えると予測できる。沸騰開始にはサブクール度の大きな高沸点媒体が伝熱面に触れるため、伝熱面表面温度のオーバーシュートは大きい。

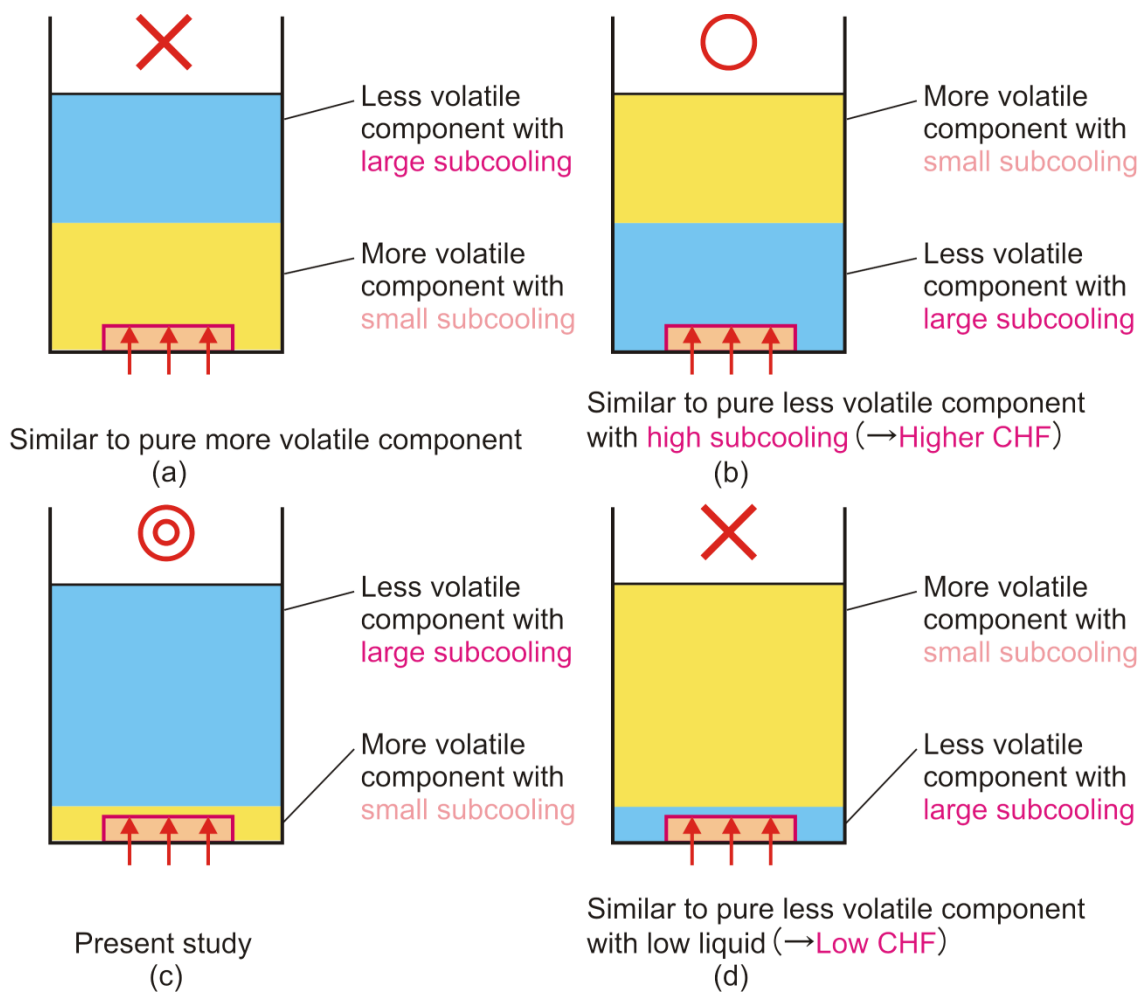


Fig. 3.3 Typical liquid-vapor phase equilibrium diagram of immiscible liquid mixture

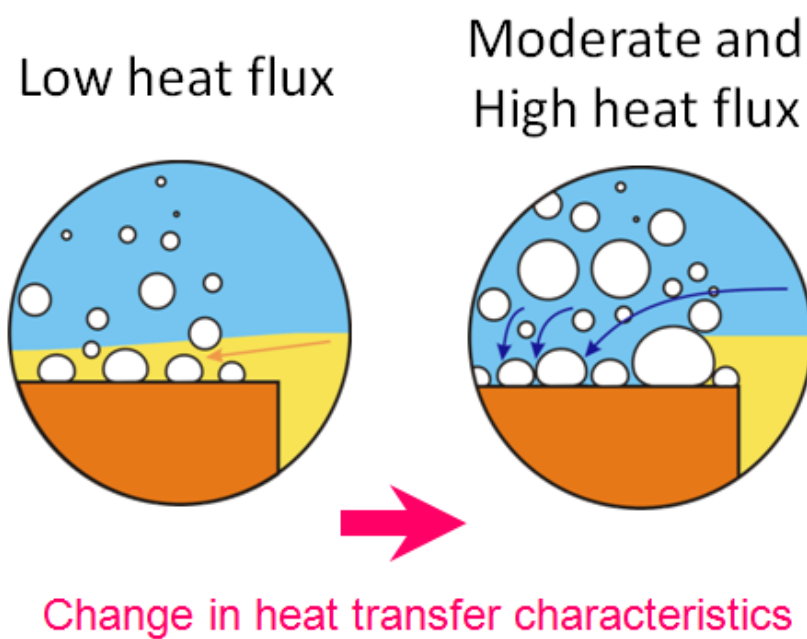


Fig. 3.4

Change of liquid contacting the heating surface in the case of small height of more-volatile component

3.3 非共溶性混合媒体と溶解度

2成分が全組成において完全に溶解せずに2相に分離する液液平衡について、Figure 3.5に示す作動温度内で互いに溶解しない不溶性混合媒体 (Insoluble mixture) (1)と作動温度内に互いに部分的に溶解する部分可溶性混合媒体 (Partially soluble mixture) (2)~(4)に分類できる。

- (1) どの温度に対しても2相に分離し、またその溶解度率も小さい。代表的な組み合わせは水/ベンゼンが挙げられる。
- (2) 低温で2相が分離し、高温で均一完全溶解となる。その境界を最高臨界完溶温度 (Upper Critical Solution Temperature) という。代表的な組み合わせは、水/フェノール、メタノール/ヘキサンと CH_4/CF_4 が挙げられる。
- (3) 低温で均一完全溶解し、高温で2相が分離する。その境界を最低臨界完溶温度 (Lower Critical Solution Temperature) という。代表的な組み合わせは、水/トリエチルアミンと水/2-ブタノールが挙げられる。
- (4) UCST と LCST を併せ持つ、閉じた溶解度曲線となる。(2)の場合でも十分な高温では(3)になると予想される。ただし、実際には UCST の前に気化するため実現することは少なく、(3)の場合は比較的少ない。一般的にある程度の高圧下を実現することが多い。代表的な組み合わせは、水/ニコチン、水/メチルビニルケトンとグリセリン/m-トルイジンが挙げられる。

またこれら溶解度曲線は圧力にも依存することが分かっている。(2)と(3)では圧力の増減により UCST や LCST の値が上下したり、ある圧力下に極値を持つ場合もある。また(4)では圧力が上がるとどの温度でも均一完全溶解を起こしたり、ある圧力以上になると初めて2相に分離したりする場合もある。

結果として2成分が全組成において完全に溶解せずに2相に分離する液液平衡について、作動温度内で互いに溶解しない不溶性混合媒体において非共溶性混合媒体の特徴が得られる。

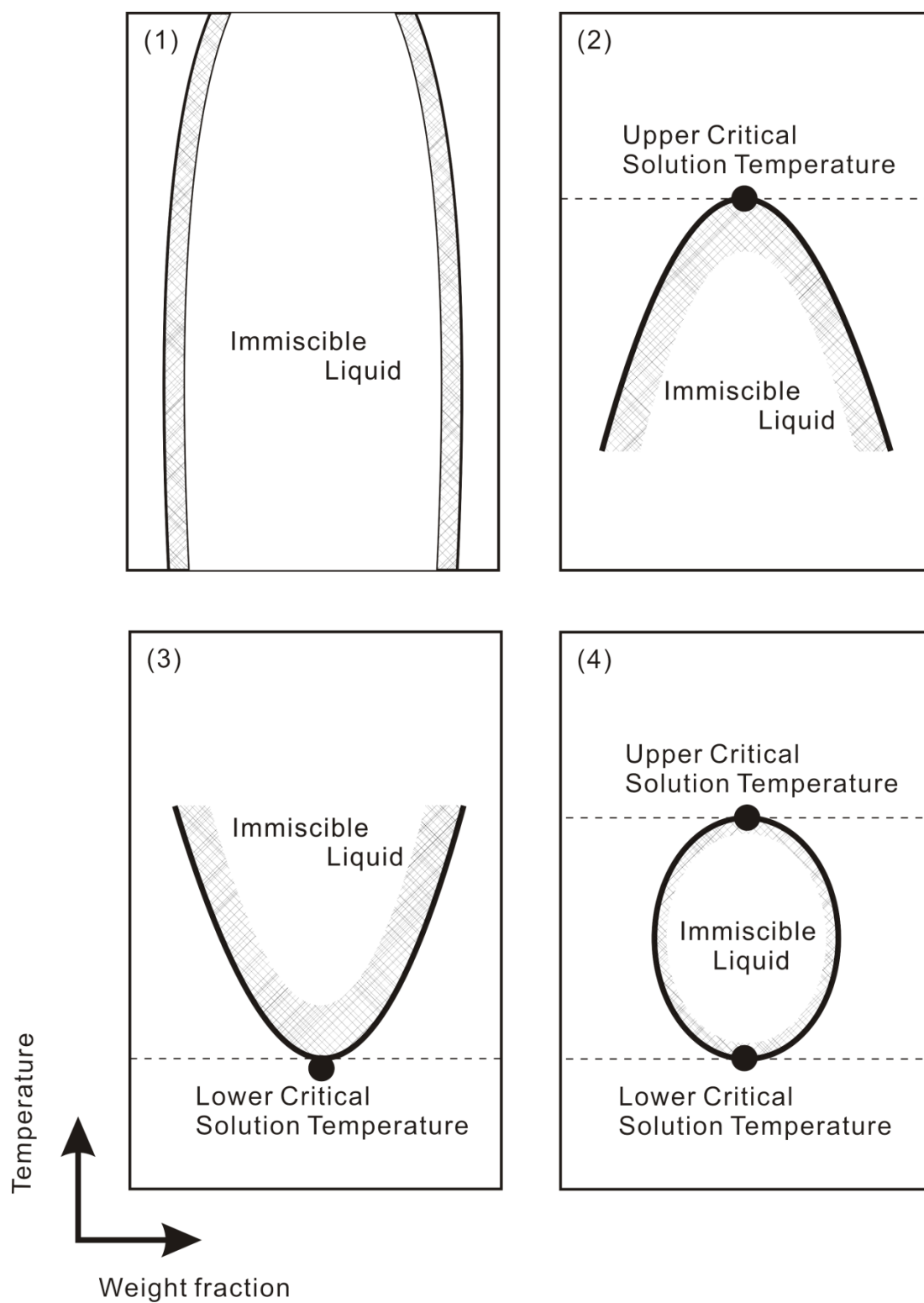


Fig. 3.5 Classification of solubility curve

3.4 第3章まとめ

本章では非共溶性混合媒体の特徴を説明した.

1. 非共溶性混合媒体の気液相平衡について考えた. 気液相平衡状態において平衡温度はそれぞれの飽和温度より低く, また両媒体はサブクール状態になっている. またその度合いは高沸点媒体の方が大きい.
2. 密度と飽和温度の組み合わせおよび伝熱面上の加熱前層厚さの違いによる 4 つの沸騰系の特徴をそれぞれ説明した. 加熱開始前の層厚さが薄い密度の大きい低沸点媒体と層厚さが厚い密度の小さい高沸点媒体の組み合わせにおいて, 優れた熱伝達特性が期待できる.
3. 2成分が全組成において完全に溶解せずに2相に分離する液液平衡について, 作動温度内で互いに溶解しない不溶性混合媒体と作動温度内に互いに部分的に溶解する部分可溶性混合媒体に分類でき, 不溶性混合媒体において非共溶性混合媒体の特徴が強調される.
4. 2および3より, 不溶性混合媒体であり, かつ層厚さが薄い密度の大きい低沸点媒体と層厚さが厚い密度の小さい高沸点媒体の組み合わせにおいて冷却システムへの適用に対して最も望ましい沸騰熱伝達特性が期待できる.

第4章 実験装置・データ処理及び実験条件

本実験では非共溶性混合媒体の沸騰熱伝達特性を評価することを目的としてプール沸騰実験を行った。本章では今回の研究において使用した実験装置，実験手順，取得したデータの処理方法，実験条件について説明する。

4.1 実験装置

実験装置は試験液体を沸騰させるための沸騰容器，下方から試験液体を加熱する水平伝熱面を含む加熱用ブロック，沸騰容器内の圧力を制御するための凝縮器，計測器，電源，チラー等の周辺機器によって構成されている。Figure 4.1 に実験装置の概観を示す。



Fig. 4.1

Overview of experimental apparatus

4.1.1 沸騰容器

沸騰容器は内径 200mm, 内容積 0.023m^3 のステンレス製の密閉容器である。沸騰容器の概略図を Figure 4.2 に示す。最高使用可能圧力は 1.5MPa である。沸騰容器は加熱用ブロックと一体となったフランジを下方から, 凝縮器と一体となったフランジを上方から取り付けることによって密閉状態となる。沸騰現象を視覚的に観測するために沸騰容器側面には観測用の窓が2つ設置されており, 一方を採光用とすることによって, もう一方からのカメラ観測を可能にしている。容器内部には温度測定用に4本の熱電対を挿入している。沸騰容器は断熱材, およびマントルヒータによって覆われており, それによって断熱性が上昇し, ヒートロスを低減し, 外部からの影響を受けにくくしている。

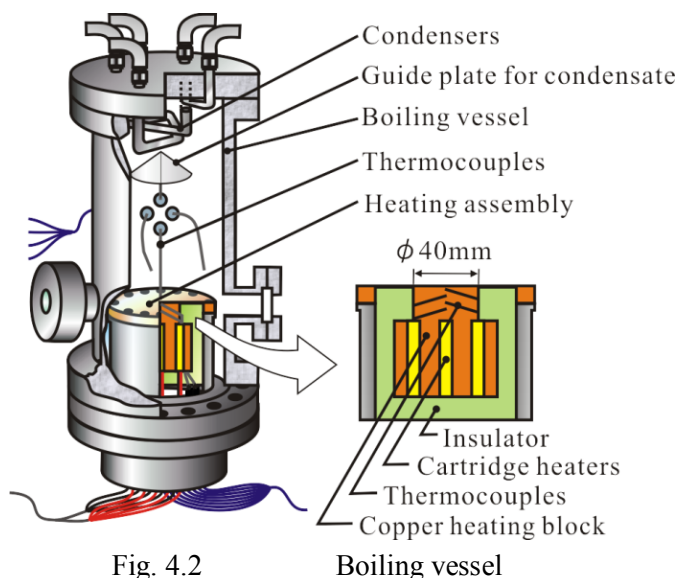


Fig. 4.2

4.1.2 伝熱面の構造

加熱用ブロックは水平伝熱面となる銅ブロック, 断熱材, 伝熱面加熱用カートリッジヒータおよびステンレス製フランジによって構成されている。加熱用ブロックの概観を Figure 4.3 に, 内部構造を Figure 4.4 に示す。銅ブロックはカートリッジヒータ挿入部分から伝熱面まで一体で加工されており, さらに銅ブロックは伝熱面の継ぎ目による発泡点の集中を防ぐために直径 40mm の円形水平伝熱面の周りに厚さ 0.5mm のフィンが一体で加工されている。フィン厚は十分に薄いために, 周方向ヒートロスはかなり低減されていると考えることができる。また, 銅ブロック内部の温度計測用に K-型熱電対を伝熱面の中心軸上および中心軸から 17.07mm 離れた軸上の深さ 1mm, 7mm, 13mm, および 19mm の位置にそれぞれ挿入している。

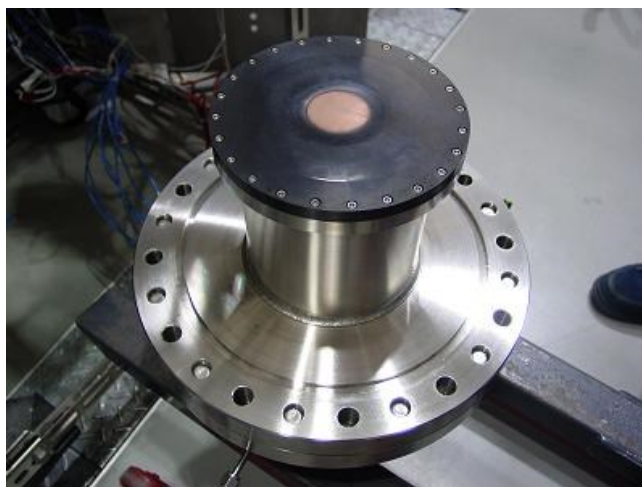


Fig. 4.3 Heating block

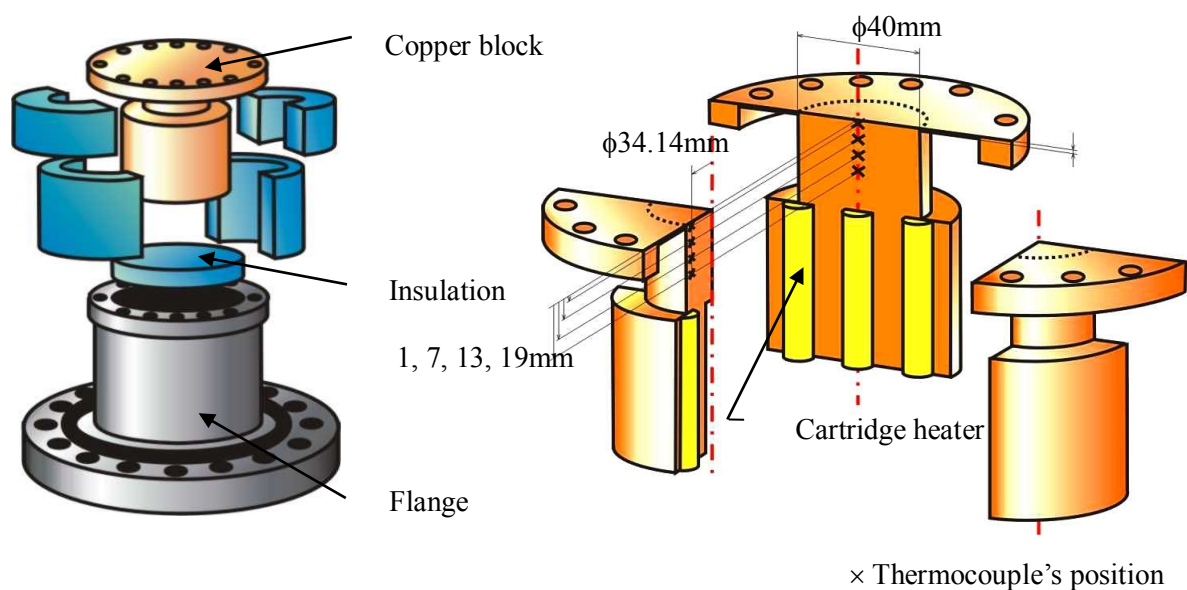


Fig. 4.4 Inner structure of heating block

4.1.3 スペーサ

スペーサは沸騰容器の底から伝熱面表面までスペースを埋めるために用いられる。スペーサの概略を Figure 4.5 に示す。今回の実験では媒体として互いに混ざり合わない非共溶性混合媒体を使用するため、構成する媒体が密度の違いにより層状に分離する。加熱用ブロックの外周にスペーサを挿入することによって、少ない体積で下層の媒体を伝熱面表面よりも高い位置まで容易に満たすことができるようになる。

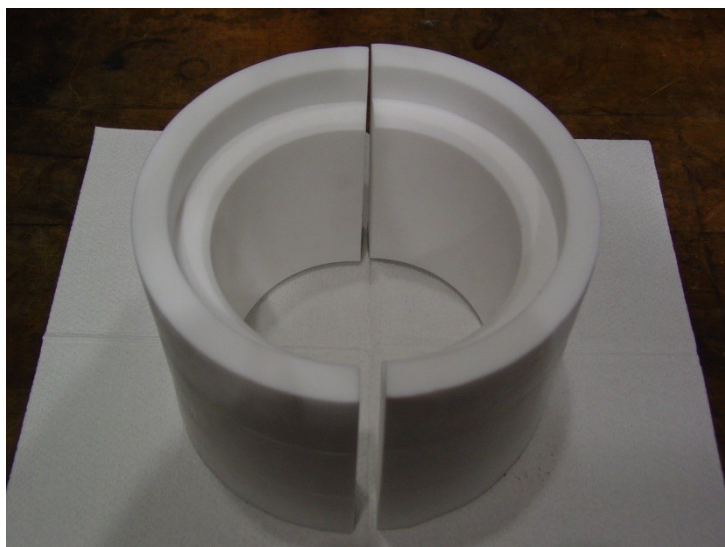


Fig. 4.5 Spacer installed around a heating block

4.1.4 凝縮器

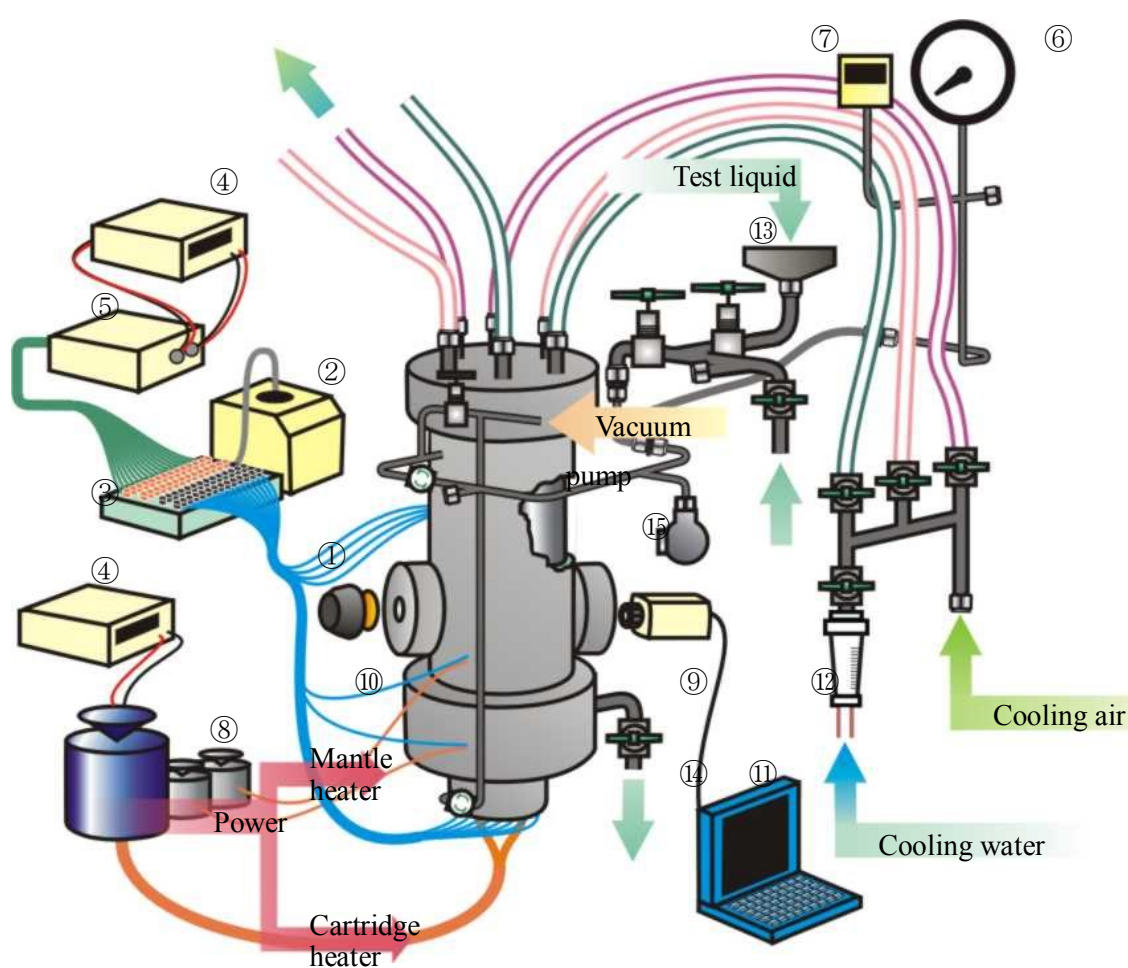
凝縮器は密閉状態にある沸騰容器内の圧力を制御するために用いられる。凝縮器の概観を Figure 4.6 に示す。凝縮器は既存の 100mm, 400mm の 2 種類の流路長をもった外径 10mm のステンレス管および追加の 1500mm の流路長を持った外径 10mm の銅管である。3 本の凝縮管に冷却水を流すことにより、沸騰容器内の試験液体の蒸気部分から熱を奪い、気相部分を凝縮させることによって沸騰容器内の圧力を制御する。3 つの流路を流れる流体の量はバルブによって制御できるようになっている。



Fig. 4.6 Condensers of 100mm, 400mm and 1500mm length

4.1.5 周辺機器

実験装置の周辺機器は温度計測機器，圧力計測器，加熱機器，撮影機器および配管に大別できる．周辺機器の概略図を Figure 4.7 に示す．また，それぞれの機器については以下に概説する．



- ① K-type thermocouple
- ② Zero-controller
- ③ Junction box
- ④ Digital multi-meter
- ⑤ Multiplexer

- ⑥ Bourdon pressure meter
- ⑦ Digital pressure meter
- ⑧ Volt-slider
- ⑨ High-speed-camera
- ⑩ Halogen lamp

- ⑪ PC
- ⑫ Flow-meter
- ⑬ Liquid inlet
- ⑭ Liquid outlet
- ⑮ Safety relief valve

Fig. 4.7

Experimental system for pool boiling

－ 温度計測器

温度計測には K-型熱電対を使用している。熱電対と冷接点器をつなぎ、その熱起電力をデジタルボルトメータ (KEITHLEY, 196 SYSTEM DMM) によって計測し、計測されたデータを PC に保存する。本実験では複数の熱電対からデータを取得するためにマルチプレクサ (Agilent Technologies, 40-Channel Armature Multiplexer L4421A) によって測定熱電対を切り替えている。

－ 圧力測定機器

圧力測定にはブルドン式アナログ圧力計 (長野計器, JIS 普通形圧力計 AE10-291) およびデジタル圧力計 (長野計器, 一般産業用デジタル圧力計 GC61-005) の 2 種類の圧力計を用いている。圧力の値は測定を行うときに実験条件で安定していることを判断するためにのみ用いる。

－ 加熱機器

水平伝熱面を加熱する際に用いるカートリッジヒータおよび沸騰容器を断熱状態とするために用いるマントルヒータの電圧はボルトスライダを介して印加している。大電圧のかかるカートリッジヒータの電圧値のみデジタルボルトメータで参照値として表示しているが、このデータはデジタルデータとしては取得していない。

－ 撮影機器

沸騰現象を撮影するために高速度ビデオカメラ (Vision Research, Phantom V4.1) を使用している。撮影結果は PC に保存される。採光用のライトとしてハロゲンライトを使用し、バックライトで撮影した。

－ 配管

配管は凝縮用、試験溶液の注入および排出用、真空引き用、圧力測定用に大別される。凝縮器用の配管には、チラー (オリオン機械, デジエコチラー RKED9000A-V-SP) によって精製水が供給され、3 つの流路長を持った凝縮器に 3 つのバルブによって流量調整された後に供給される。

媒体の注入および排出用の配管はそれぞれ上部と下部についており、媒体注入後はバルブを閉めることによって密閉状態を保つことができる。

真空引き用および圧力計測用の配管には途中に安全逃がし弁がついており、その設定圧は 1.5MPa である。真空引きには真空ポンプを使用する。

4.2 実験手順

本実験では有毒性を持つ有機溶媒を用い、また実験によっては沸騰容器内が高温、高圧になることがあり、実験を行う際は十分に危機管理し、実験手順に沿った実験を行うことが必要である。

4.2.1 実験準備及び留意点

実験のために必要な事前準備を以下に示す。

- － 試験液体の脱気

試験液体に溶解した残存空気の影響を最小にするために試験液体を十分に脱気する必要がある。試験液体の脱気は試験液体を一度沸騰させ、さらに真空ポンプで減圧状態にすることで脱気完了とした。

- － 伝熱面の研磨

沸騰熱伝達は伝熱面の表面状態が影響を及ぼすため、本実験では実験前に、伝熱面を1000番の紙やすりで研磨した後、600番のやすりで縦横に3回ずつ傷をつける。実験条件がほぼ一定になるように、傷をつけるときの力の入れ具合や回数は常に一定になるように心がける必要がある。

- － 実験条件に必要な液体量の計算

今回の実験ではパラメータとして伝熱面表面からのそれぞれの媒体の高さを変化させて実験を行った。そこで、実験条件に必要な液体量を実際に測定した。そこで決定した媒体の体積と伝熱面表面からの高さの関係を Table 4.1 にまとめる。

Table 4.1 Relationship between liquid volume and height from the heating surface

Height from the surface	Volume increment	Total volume	Height from the surface	Volume increment	Total volume
mm	ml	ml	mm	ml	ml
0	240	240	55	162	2264
5	170	410	60	162	2426
10	177	587	65	162	2588
15	185	772	70	162	2750
20	190	963	75	162	2912
25	204	1160	80	162	3074
30	208	1374	85	162	3236
35	198	1572	90	162	3398
40	187	1759	95	162	3560
45	177	1936	100	162	3722
50	166	2102			

4.2.2 実験方法

実験の手順を以下に示す。

- (1) 冷接点器，デジタルボルトメータおよびマルチプレクサ，PC の電源を入れる。

どの機器も動作が安定するにはある程度の時間が必要である．とくに冷接点器が安定するまでのデータには大きな誤差が発生するために電源を入れてから十分に時間がたってからデータを取得するようにする必要がある。

- (2) 実験装置の真空引きを行う。

バルブの開閉を確認し，真空ポンプを使用して真空引きを行う．真空引きは真空ポンプの電源を入れてから十分に時間をおいて，圧力計に変化が見られなくなった状態で真空引き完了とする．真空引きの後，真空ポンプをループから取り外した後に電源を切る．ループに取り付けたまま電源を切った場合，真空ポンプ内部のオイルが逆流する恐れがある。

- (3) 試験媒体を容器内に注入する。

媒体注入口より試験媒体を注入する．そのとき，空気が流入しないように十分注意する。

(4) マントルヒータおよびカートリッジヒータに電圧を印加する.

マントルヒータとカートリッジヒータを用いて沸騰容器内が試験圧力になるまで予熱する. 初期には沸騰容器内は真空に近い状態であるため, カートリッジヒータに高電圧をかけるとバーンアウトを起こす可能性があるため, およそ $1.0\sim4.0\times10^5\text{ W/m}^2$ の範囲で予熱する.

(5) 所定の試験圧力および熱流束における定常状態を確認する.

各熱電対の指示値が十分定常状態であること, および沸騰容器内部の圧力が所定の試験圧力であることを確認する. またマントルヒータの温度は, 内部の液温の $\pm1^\circ\text{C}$ の範囲に制御する.

(6) 所定のデータを計測する

マルチメータとマルチプレクサを用いて計測した熱起電力データを PC に保存する. 測定点数は 100 点であり, 測定周期はおよそ 1Hz である. 映像データは 1000Hz, 1 秒間の映像を取得する.

(7) バーンアウトを確認するまで, 熱流束を上昇させ, 手順(6), (7)を繰り返す.

銅ブロック内の温度が急激に上昇した時点をバーンアウトとし, 実験を終了して, 即座に電圧を切る. 限界熱流束は急激な温度上昇を確認した 1 つ前の定常データの熱流束の値とした.

4.3 データ処理

実験によって得られたデータの処理方法について以下に示す．均質等方な固体において，その内部の任意の1点の温度を T とすると，その点における微小面積 dA を通して単位時間に流れる流量 dQ は，一般にフーリエの法則によって得られる．

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dA \quad (4.1)$$

さらに，このフーリエの法則をエネルギー保存則に適用すると，(4.2)に示される熱伝導方程式が導かれる．

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial q_{gen}}{\partial t} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

本研究の実験装置において，カートリッジヒータによって加熱された円柱形銅ブロックは円周方向に完全に断熱され，一定の熱流束が付与されているとし，定常状態においては一次元定常熱伝導とみなした．また銅の熱伝導率は温度依存性を持つが，実験範囲の温度ではほとんど変化しないため熱伝導率は一定とみなすと，式(4.2)は以下のように変形できる．

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (4.3)$$

ただし， x 方向を円柱形銅ブロックの軸方向距離とする．式(4.3)に境界条件を与え，積分すると以下の式が得られる．

$$T(x) = \frac{dT}{dx} x + T_w \quad (4.4)$$

したがって，銅ブロック内の温度分布は線形分布であることが分かる．ただし， T_w は伝熱面表面温度とする．実験データと比較した結果，伝熱面中央部では銅ブロック内部の定常状態温度分布を求めた．ただし，熱起電力測定値と熱電対指示温度の変換は熱起電力表を各温度範囲で線形補間することによって行った．

さらに，式(4.1)に式(4.4)で求められる温度勾配 dT/dx を等値して，以下の式で伝熱面

中央における熱流束を計算して、これを本研究の伝熱面表面熱流束 q とした。

$$q = -\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} \quad (4.5)$$

ただし、伝熱面（銅）の熱伝導率 λ は伝熱面表面の温度より算出することにした。次に、熱伝達係数 α を計算する。固体と流体間の熱交換では以下の式で表される Newton の冷却法則が成立する。

$$\frac{Q}{A} = q = \alpha(T_w - T_\infty) \quad (4.6)$$

本実験では液体中心部に配置した熱電対で測定した平均温度を T_∞ として、伝熱面過熱度 ΔT を求め、熱伝達係数 α を計算する。

以上の計算を行うデータ解析用プログラムを作成して、データ解析を行った。

4.4 実験条件

4.4.1 試験媒体

以下に本研究で行ったプール沸騰実験の実験条件を Table 4.2 にまとめる．高密度低沸点媒体に FC72, Novec649 と Novec7200 を，低密度高沸点媒体に純水, n-Propanol と i-Propanol を選定した．第3章で述べたが非共溶性混合媒体にも作動温度内で互いに溶解しない不溶性混合媒体と作動温度内に互いに部分的に溶解する部分可溶性混合媒体が存在する．不溶性混合媒体については FC72/Water, Novec649/Water, Novec7200/Water と FC72/n-Propanol の組み合わせを選定し，部分可溶性混合媒体については FC72/i-Propanol を選定した．また Figure 4.8 に示す通り合計の液面高さを 100mm にそろえ，加熱前の低沸点媒体の層厚さ H_1 を 0mm, 5mm, 10mm, 50mm と変化させて実験を行い，第3章で述べた H_1 の効果を調べた．ここに H_2 は熱伝達特性に影響を及ぼさない．

Table 4.3 には各組み合わせにおける平衡温度と各媒体に対するサブクール度を示す．今回使用した媒体の熱物性を Table 4.4 に示す．

Table 4.2		Test conditions				
Immiscible mixture	1:More-volatile	2:Less-volatile	H_1 / H_2			
	component	component	50/50	10/90	5/95	0/100
Insoluble mixture	FC72	Water	○	○	○	○
	Novec649	Water	×	○	○	○
	Novec7200	Water	×	○	○	○
	FC72	n-Propanol	○	×	○	○
Partially soluble mixture	FC72	i-Propanol	○	×	○	○

Table 4.3 Equilibrium temperature and subcooling of component liquids at 0.1MPa
(*Sumitomo 3M Limited, personal communication)

1:More-volatile	2:Less-volatile	T_b	$\Delta T_{sub,1}$	$\Delta T_{sub,2}$
component	component	[°C]*	[K]	[K]
FC72	Water	51.6	4.3	48.4
Novec649	Water	45.9	3.3	54.1
Novec7200	Water	66.4	12.0	33.6
FC72	n-Propanol	51.7	4.2	45.6
FC72	i-Propanol	48.7	7.2	33.6

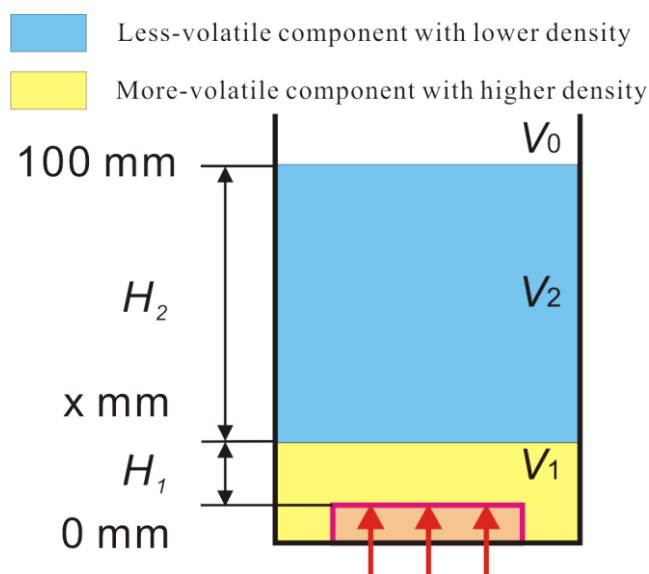


Fig. 4.8 Image of liquid-liquid interface with different thickness in nucleate boiling of immiscible mixtures on the horizontal heating surface

Table 4.4 Thermal properties of components at 0.1MPa

(*Incropera and DeWitt (2002), **Sumitomo 3M Limited, personal communication,

***日本機械学会 (2000))

Test fluid	Normal boiling point	Liquid density	Vapor density	Latent heat of vaporization	Thermal conductivity	Liquid viscosity	Isobaric Specific heat	Surface tension
	T_{sat} [°C]	ρ_l [kg/m ³]	ρ_g [kg/m ³]	h_{fg} [kJ/kg]	k_l [mW/mK]	μ_l [mPa s]	c_{pl} [kJ/kgK]	σ [mN/m]
Water*	100	958	0.60	2257	680	0.28	4.22	58.9
FC72**	55.9	1605	13.3	95.7	54.1	0.44	1.10	7.90
Novec649**	49.2	1531	12.7	88.6	54.2	0.45	1.12	9.20
Novec7200**	78.4	1307	9.47	113.4	58.2	0.33	1.33	9.18
n-Propanol***	97.3	720	1.99	679	142	0.49	3.10	17.6
i-Propanol***	82.3	727	2.06	663	145	0.49	2.88	18.8

4.4.2 気液相平衡図

Figure 4.10~4.14 に第3章で説明した方法を用いて求めた FC72/Water, Novec649/Water, Novec7200/Water, FC72/n-Propanol と FC72/i-Propanol の 0.1MPa における気液相平衡図を示す。気液相平衡を保つ場合 Table 4.5 に示す通り、非共溶性混合媒体では一般的に高沸点媒体のサブクール度が高くなる。これは Figure 4.9 に示す通り、全 0.1MPa に対する FC72 の分圧 0.088MPa が占める割合が大きく、純水に対するサブクール度 48.4K が大きくなるためである。一方で全 0.1MPa に対する純水の分圧 0.013MPa が占める割合が小さく、FC72 に対するサブクール度 4.3K は小さくなる。

また Figure 4.2 に示す密閉容器内において Figure 4.10~4.14 に示す 0.101MPa での気液相平衡を保つための最小の低沸点媒体の層厚さ $H_{l,min}$ を Table 4.5 に示す。これは Figure 4.8 に示す密閉容器内の低沸点媒体の体積 V_l と気相空間の体積 V_0 に低沸点媒体の気相が充満すると考え、Eq. 2.2 を使い、気体に比べて液体の比容積が十分小さいと仮定すると以下の式が成り立つ。

$$m_{l,min} = \rho_{l,1} A H_{l,min} = \frac{(V_l + V_0) T_{sat} (dP/dT)}{h_{fg,1}} \quad (4.7)$$

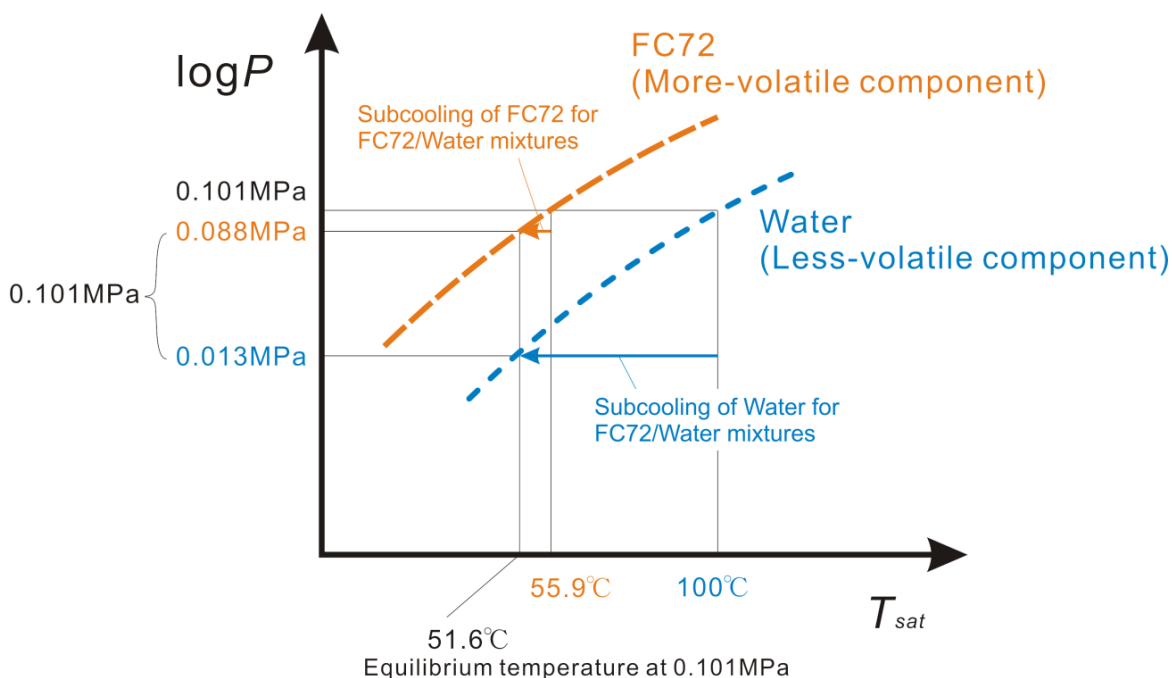


Fig. 4.9

Vapor pressure curve of pressure versus temperature for FC72/Water at 0.1MPa

Table 4.3 More-volatile component minimum height satisfied equilibrium temperature at 0.1MPa

1:More-volatile component	2:Less-volatile component	More-volatile component minimum height $H_{1,\min}$ [mm]
FC72	Water	2.2
Novec649	Water	2.3
Novec7200	Water	1.7
FC72	n-Propanol	2.0
FC72	i-Propanol	2.2

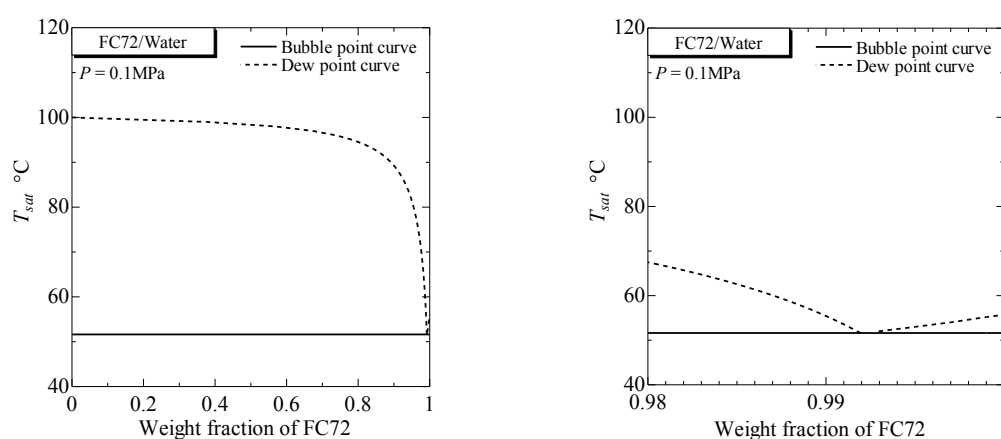


Fig. 4.10 Phase diagram for FC72/Water at 0.1MPa

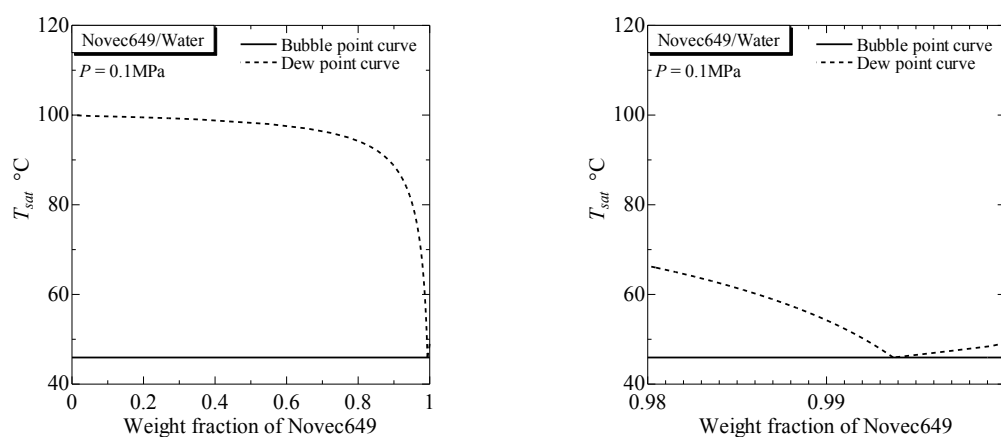


Fig. 4.11 Phase diagram for Novec649/Water at 0.1MPa

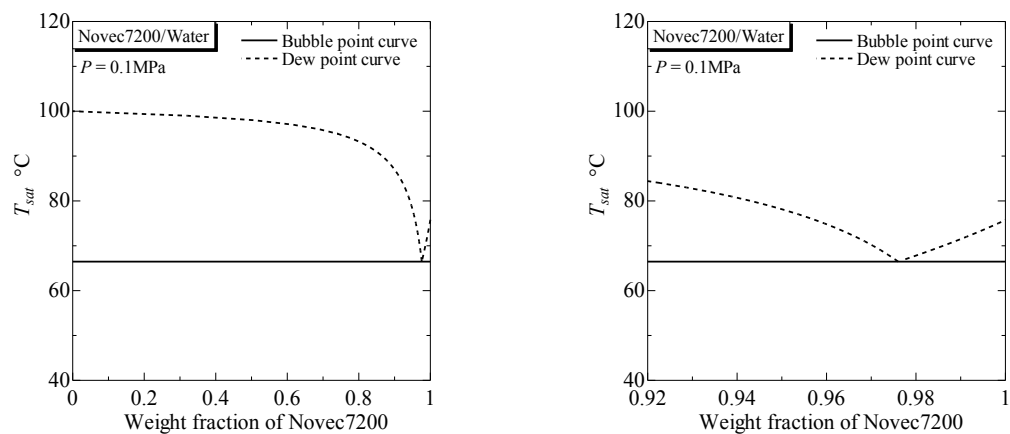


Fig. 4.12 Phase diagram for Novec7200/Water at 0.1MPa

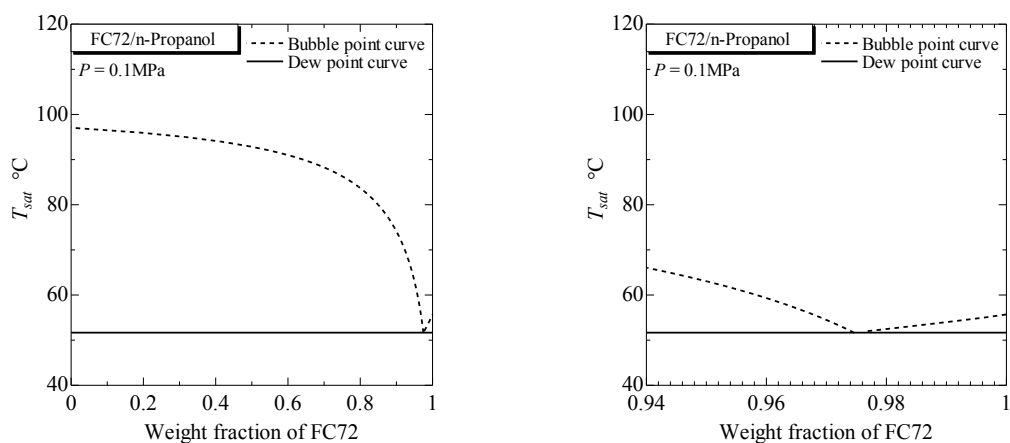


Fig. 4.13 Phase diagram for FC72/n-Propanol at 0.1MPa

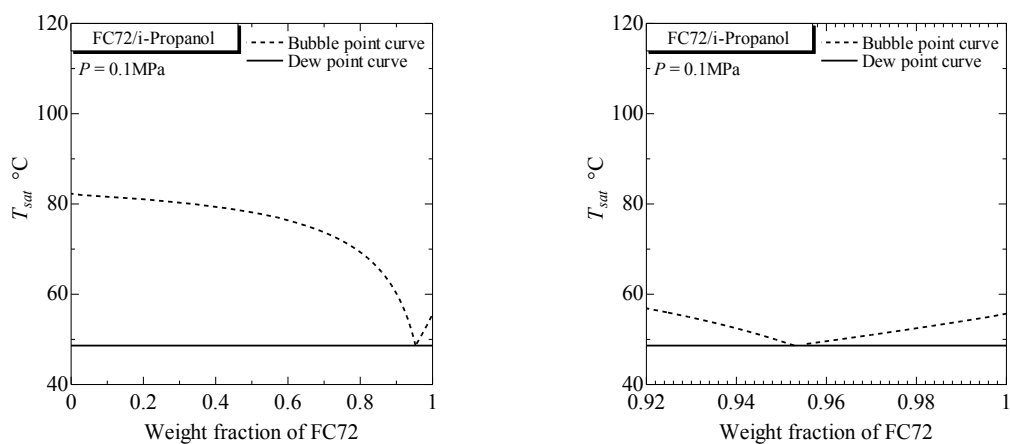


Fig. 4.14 Phase diagram for FC72/i-Propanol at 0.1MPa

4.5 第4章まとめ

以下に第4章のまとめを示す.

1. 本論文で使用するプール核沸騰実験において, 装置の仕様並びにその構造について説明した. また実験の手順と得られたデータに対する処理方法を示した.
2. 5種類の非共溶性混合媒体の実験を行い, 不溶性混合媒体については FC72/Water, Novec649/Water, Novec7200/Water と FC72/n-Propanol の組み合わせを, 部分可溶性混合媒体については FC72/i-Propanol を選定した. 合計の液面高さを 100mm にそろえ, 加熱前の低沸点媒体の層厚さ H_1 を 0mm, 5mm, 10mm, 50mm と変化させて実験を行い, H_1 の効果を調べた. それぞれの熱物性並びに気液相平衡図を示した.

第5章 実験結果および考察

本研究で行ってきたプール核沸騰実験の実験結果および考察を以下に示す。

5.1 非共溶性混合媒体による沸騰熱伝達特性

不溶性混合媒体と部分可溶性混合媒体それぞれについて沸騰曲線、熱伝達係数と伝熱面表面温度、限界熱流束の熱伝達特性の結果と気泡挙動とインターミディエイトバーンアウトの仕組みについて説明する。不溶性混合媒体では FC72/Water を代表に取り結果を説明し、他の組み合わせについてはその差異をもとに説明する。

5.1.1 沸騰曲線

Figure 5.1~5.5 に各組み合わせにおける熱伝達特性の結果を示す。全ての図において低沸点媒体単成分と高沸点媒体単成分の熱伝達特性の結果も合せて示す。実験において限界熱流束が計測された場合はその値を点線で示している。一部の実験条件については、実験装置の加熱能力および凝縮能力の限界に達し、実験継続不可能であったため、限界熱流束データの取得は出来ていない。

Figure 5.1(a)は FC72/Water 混合媒体と FC72 と純水それぞれの単成分媒体の沸騰曲線を示す。混合媒体では平衡温度との温度差 ΔT_b を、単成分媒体では伝熱面過熱度 ΔT_{sat} を用いた。FC72 液層の厚さが大きい FC72/Water[50mm/50mm]における沸騰曲線は FC72 に対するサブクール度が小さく、FC72 単成分媒体の沸騰曲線とほぼ同様な傾向になった。

一方で FC72 の液層厚さが小さい FC72/Water[10mm/90mm]や FC72/Water[5mm/95mm]では局所バーンアウトである小さな温度上昇が $2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 付近で発生している。これは FC72 単成分媒体の限界熱流束値よりも小さい。また FC72/Water における FC72 液相は純水の分圧により低いサブクール($P_1=0.088 \text{ MPa}$, $T_b=51.6^\circ\text{C}$, $\Delta T_{sub,1}=4.3 \text{ K}$, $P=0.1 \text{ MPa}$)を受けており、一方で FC72 単成分媒体は同圧力下でサブクールを受けていない。FC72 単成分媒体よりも低い限界熱流束値になったのは FC72 液層の初期厚さが小さいことによる FC72 の伝熱面への供給が不十分なためである。このように FC72 単成分媒体の沸騰曲線と違う傾向になる FC72 液層厚さの境界値が存在することがわかる。

5.1.5 で詳しく説明するが、局所バーンアウト後には純水が直接伝熱面表面に降下する。通常の FC72 単成分媒体のバーンアウトでは、FC72 液相は伝熱面表面に降下直後に蒸発し、蒸気膜を形成し続ける。一方で降下する純水の系圧力に対する飽和温度よりも伝熱面表面温度がかなり低いこの場合には、純水の自然対流により熱伝達が行われる。

結果として局所バーンアウトによる約 20K の伝熱面表面温度上昇が起こった後は定常的な熱伝達に復帰する。高熱流束域では純水の核沸騰を生じ、FC72/Water[10mm/90mm]やFC72/Water[5mm/95mm]の沸騰曲線は純水単成分媒体の沸騰曲線比べて同程度の勾配を保ちながら、より大きな温度差を生じている。これはFC72/Water[0mm/100mm]でも同様であった。FC72/Water[0mm/100mm]では加熱前には伝熱面周辺にFC72液相が存在するが、直接伝熱面表面に触れることはない。この温度差については5.1.2で詳しく説明する。非共溶性混合媒体の核沸騰において低沸点媒体の層厚さが小さい場合には、低沸点媒体単成分に対する熱流束前後の低い熱流束において特有の現象である小さな温度上昇が発生する。この現象をインターミディエイトバーンアウト (Intermediate burnout, 以降では Int.B.と記す) と名付ける。Int.B.の仕組みについては5.1.5にて詳しく説明する。

Figure 5.2(a)~5.5(a)はその他の媒体についての沸騰曲線を示す。Novec649/Water[10mm/90mm]や[5mm/95mm]では明確な Int.B.は確認されなく、低熱流束域においてNovec649/Water[0mm/100mm]の沸騰曲線と同様な傾向になった。この傾向はNovec649と純水の物理的混合によって引き起こされ、低沸点媒体の層厚さが小さい場合により顕著になった。より高い熱流束域ではどの厚さにおいてもNovec649/Water[0mm/100mm]の沸騰曲線と良く一致した。Novec7200/Water[10mm/90mm]と[5mm/95mm]では明確な Int.B.が確認された。Novec7200/Water[10mm/90mm]ではNovec7200単成分媒体の限界熱流束値よりも低い熱流束で Int.B.が発生した一方で、Novec7200/Water[5mm/95mm]ではより高い熱流束でより明確な Int.B.が発生している。この組み合わせにおいても Int.B.後の沸騰曲線はNovec7200/Water[0mm/100mm]と良く一致した。FC72/n-Propanol[5mm/95mm]における沸騰曲線はFC72/Water[10mm/90mm]と同様な緩やかな伝熱面表面温度の変化がある Int.B.が確認された。高沸点媒体の種類と低沸点媒体の層厚さ H_1 の違いによる Int.B.の形態の影響については5.1.5で詳しく説明する。FC72/n-Propanol[50mm/50mm]における沸騰曲線はFC72単成分媒体の沸騰曲線とほぼ同様な傾向になった。一方でFC72/n-Propanol[0mm/100mm]における沸騰曲線は低熱流束域からn-Propanolが熱伝達に支配的となった。

部分可溶性混合媒体であるFC72/i-Propanol[5mm/95mm]についてもその他の不溶性混合媒体と同様な傾向が見られ、FC72/i-Propanol[5mm/95mm]における沸騰曲線はFC72/Water[10mm/90mm]と同様に緩やかな伝熱面表面温度上昇がある Int.B.が確認された。

5.1.2 熱伝達係数と伝熱面表面温度

Figure 5.1(b)は熱流束に対してのFC72/Waterの熱伝達係数を示したものである。FC72

液層の厚さ H_1 が小さい場合では Int.B. が発生した後に明らかな熱伝達係数の低下が見られる。言い換えると Int.B. が発生する前の低熱流束域では FC72 単成分媒体に比べて、小さな熱伝達の劣化が確認された。Int.B. が発生した後の高熱流束域においてはより顕著な熱伝達の劣化が確認された。この劣化は共溶性非共沸混合媒体での物質拡散抵抗による伝熱劣化とは大いに異なり、熱伝達係数の定義に使用する液体温度に起因する。この液体温度は 0.1MPa の定圧下において体積率に依存しない平衡温度とほぼ等価になる。低熱流束域では 0.1MPa 下における FC72 単成分媒体の液体温度の約 55.9°C を使用するのに対し、FC72/Water 混合媒体ではサブクールされた液体温度の約 51.6°C を使用するため、見掛け上の温度差、言い換えるとサブクール度 $\Delta T_{sub,1}=4.3\text{K}$ が発生し、伝熱劣化を起こした。高熱流束域では 0.1MPa 下における純水単成分媒体の液体温度の約 100°C を使用するのに対し、FC72/Water 混合媒体ではサブクールされた液体温度の約 51.6°C を使用するため、見掛け上の温度差、言い換えるとサブクール度 $\Delta T_{sub,2}=48.4\text{K}$ が発生し、大きな伝熱劣化を起こした。Figure 5.1(c)において見掛けの伝熱劣化を起こしているにも関わらず、Int.B. が発生した後に伝熱面表面温度 T_w の大きな低下が確認された。このような伝熱面表面温度の低下が FC72/Water[0mm/100mm]においても確認されたのは注目に値することである。一般に核沸騰熱伝達ではサブクール度の変化によって伝熱面温度の変化がほとんど無いことを考えると、伝熱面表面温度の低下により核沸騰による熱伝達が Figure 5.1(b)で示した劣化を生じているのではなく、むしろ促進したことが分かる。この熱伝達の促進は平衡温度そのものの低下と低沸点媒体の気泡や気体スラグによって高沸点媒体の対流や沸騰を促進したことに起因する。一方、FC72 液層の厚さ H_1 が大きい場合の FC72/Water の熱伝達係数は FC72 単成分媒体に比べてサブクール度 $\Delta T_{sub,1}=4.3\text{K}$ の影響により見掛け上の伝熱劣化がある以外はほぼ同様な傾向を示した。

Figure 5.2(b)~5.5(b)にその他の媒体についての熱流束に対する熱伝達係数を示す。Novec649/Water[10mm/90mm]では低熱流束域において熱伝達係数がサブクール度 $\Delta T_{sub,1}=3.3\text{K}$ の影響により Novec649 単成分媒体に比べて見掛け上の伝熱劣化が確認された。熱伝達を支配するものが Novec649 の沸騰から徐々に純水の自然対流に移行し、高熱流束域では熱伝達係数が Novec649/Water[0mm/100mm]に良く一致した。Novec649/Water[5mm/95mm]では低熱流束域から Novec649/Water[0mm/100mm]の熱伝達係数に一致した。Novec7200/Water[10mm/90mm]や[5mm/95mm]では低熱流束域で大きなサブクール度 $\Delta T_{sub,1}=12.0\text{K}$ の影響で大きな見掛け上の伝熱劣化が確認された。また Int.B. 後の高熱流束域では熱伝達係数が Novec7200/Water[0mm/100mm]に良く一致した。FC72/n-Propanol と部分可溶性混合媒体である FC72/i-Propanol についても他の組み合わせと同様な傾向となった。

Figure 5.2(c)~5.5(c)にその他の媒体についての伝熱面表面温度の履歴を示す。Novec649/Water と Novec7200/Water では FC72/Water と同様に高熱流束域において純水単

成分媒体からの伝熱面表面温度の低下は明確であった。Novec7200/Water[0mm/100mm]での低下度は Novec7200/Water[5mm/95mm] に比べて小さかった。これは Novec7200/Water[0mm/100mm]の平衡温度が Novec7200/Water[5mm/95mm]に比べて高くなっているため Novec7200 液体が不足しており、純水の対流や沸騰を促進する働きがより低下したためである。FC72/n-Propanol については他の組み合わせと同様に、高熱流束域において n-Propanol 単成分媒体からの伝熱面温度の低下を確認した。部分可溶性混合媒体である FC72/i-Propanol では他の不溶性混合媒体と同様な傾向が得られた。

Figure 5.6 に $H_1=5\text{mm}$ における同一の高沸点媒体純水を使用した FC72/Water, Novec649/Water と Novec7200/Water の伝熱面温度の履歴を示す。純水の熱物性が熱伝達に支配的な高熱流束域において、低沸点媒体によらず伝熱面表面温度の履歴が一致した。この伝熱面表面温度の低下は低沸点媒体の気相による高沸点媒体の対流と沸騰の促進に起因する。この促進効果は低沸点媒体の気相密度に関係すると考え、一定の低沸点媒体の液相量から生成される気相量を評価するパラメータとして液体密度を気体密度で割った値を比較した。結果として FC72/Water, Novec649/Water と Novec7200/Water それぞれの値は 121, 121, 138 となり大きな違いは見られず、矛盾の無いことが分かった。

5.1.3 限界熱流束

Figure 5.1~5.5 において限界熱流束の値は垂直や水平に引かれた点線で表わしている。不溶性混合媒体の組み合わせにおいて限界熱流束値の傾向には一貫性が存在する。低沸点媒体の層厚さ H_1 が小さい場合は限界熱流束値が著しく増大する。これは両媒体の入れ替えが完全に起こり、高沸点媒体の核沸騰が支配的となると同時に、高沸点媒体に対して高いサブクール度が低沸点媒体の高い蒸気圧により発生するためである。この現象は $H_1=0\text{mm}$ でも同様である。一方で低沸点媒体の層厚さ H_1 が大きい場合は、Int.B.の形態に関わらず限界熱流束値は低くなる。これは Int.B.後でも両媒体が沸騰し続け、結果として低沸点媒体の液層が高沸点媒体の伝熱面表面への接触を妨げているためである。

サブクール度に対する限界熱流束値の増大について、Ivey-Morris が提案した相関式を Eq. 5.1 に示す(Ivey and Morris, 1966)。

$$\frac{q_{CHF,sub}}{q_{CHF,sat}} = 1 + 0.1 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/4} \frac{c_{pl} \rho_l \Delta T_{sub}}{\Delta h_{fg} \rho_g} \quad (5.1)$$

FC72/Water の組み合わせにおいて 0.1MPa 下での平衡温度は 51.6°C となるので、純水単成分媒体に比べて 48.4K のサブクール度となり、Eq. 5.1 に代入することで限界熱流束値

が $4.25 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ と推定することができる。この際に飽和状態での限界熱流束値は純水単成分に対する実験値を使用する。同じような限界熱流束の増大は FC72 液層厚さが小さい $H_1=5\text{mm}$ の場合でも期待できる。Table 5.1 は高沸点媒体単成分の限界熱流束の実験値, Eq. 5.1 での推定値と各組み合わせにおける計測された最大の限界熱流束値, 計測出来なかったものについては実験が行われた最大の熱流束をまとめたものである。実験装置の能力限界のため FC72/Water の限界熱流束値は確認できなかったが, 純水単成分媒体に比べて少なくとも 36%の増大を確認した。FC72/n-Propanol では推定したほどの増大は見られなかったが, 65%の限界熱流束値の増大が確認された。また部分可溶性混合媒体である FC72/i-Propanol では 19%の増大しか見られなかった。これは先でも述べたが伝熱面表面温度の上昇により溶解度が高くなることで熱物性が変化するとともに高沸点媒体の飽和温度が低下してサブクール度が低下するためである。

一方で低沸点媒体の層厚さ H_1 が大きい FC72/Water[10mm/90mm]では純水単成分媒体の限界熱流束値に比べて大変低い値となった。これは FC72 液層の蒸発が不十分なために Int.B.後でも FC72 と純水の両方が沸騰し続け, 結果として FC72 液層が純水の伝熱面表面への十分な接触を妨げているためである。Novec649/Water[10mm/90mm]では唯一純水単成分と同程度の限界熱流束値となった。これは Novec649 と純水の物理的混合が容易であるために両媒体の入れ替わりが促進されたためである。また FC72/n-Propanol と FC72/i-Propanol については[5mm/95mm]において FC72/Water[10mm/90mm]と同様な傾向が得られた。これは Int.B.の形態に起因し, 詳しくは 5.1.5 にて説明する。

Table 5.1 The value of $q_{CHF,sub}$ measured and estimated by Eq. 5.1
(*Sumitomo 3M Limited, personal communication)

1:More-volatile component	2:Less-volatile component	T_b [°C]*	$q_{CHF,sat}$ [W/m ²] Experimental value	$q_{CHF,sub}$ [W/m ²] ($q_{CHF,sub}/q_{CHF,sat}-1$) Experimental value	$q_{CHF,sub}$ [W/m ²] ($q_{CHF,sub}/q_{CHF,sat}-1$) Estimated value
FC72	Water	51.6	1.29×10^6	$< 1.76 \times 10^6$ ($< 36\%$)	4.25×10^6 (229%)
Novec649	Water	45.9	1.29×10^6	$< 1.37 \times 10^6$ ($< 6\%$)	4.59×10^6 (356%)
Novec7200	Water	66.4	1.29×10^6	$< 2.22 \times 10^6$ ($< 72\%$)	3.35×10^6 (260%)
FC72	n-Propanol	51.7	0.63×10^6	1.04×10^6 (65%)	1.72×10^6 (273%)
FC72	i-Propanol	48.7	0.58×10^6	0.69×10^6 (19%)	1.28×10^6 (221%)

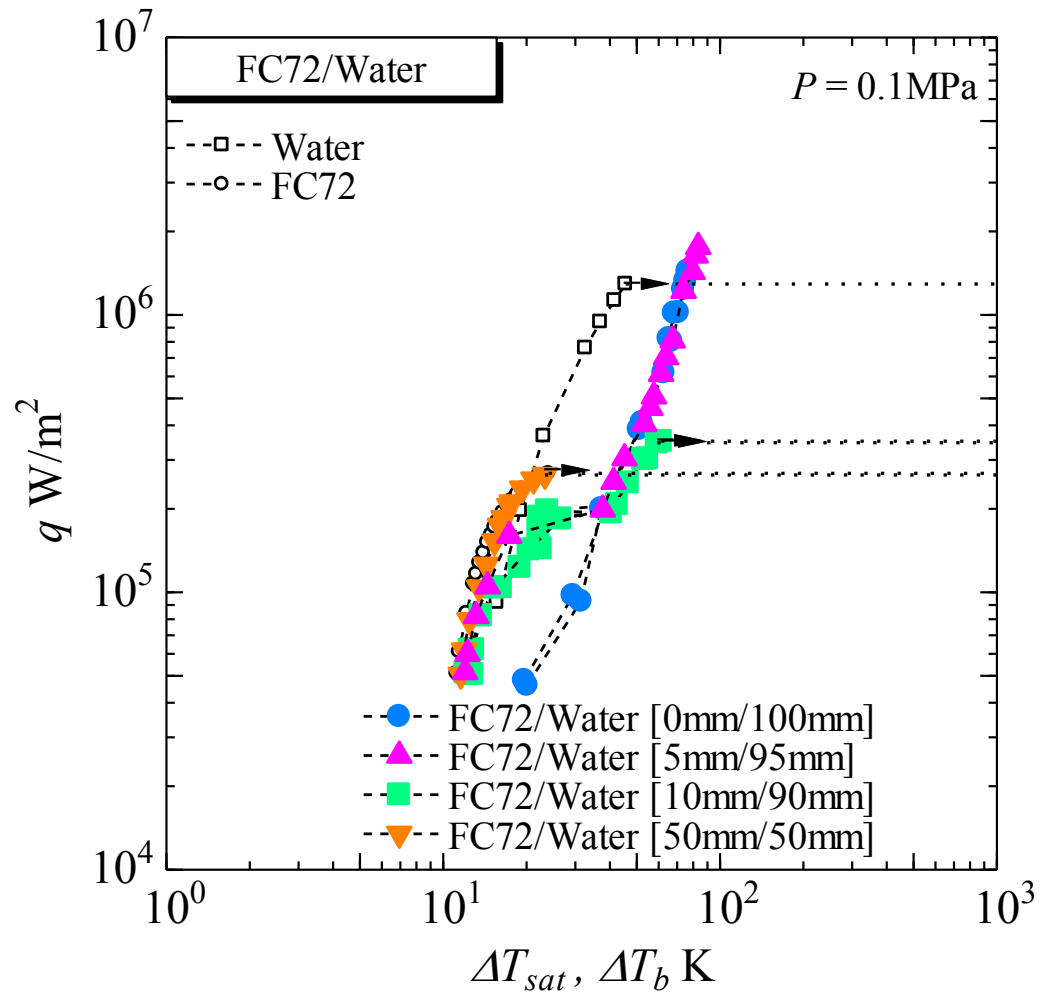


Fig. 5.1(a) Heat flux versus temperature difference for FC72/Water

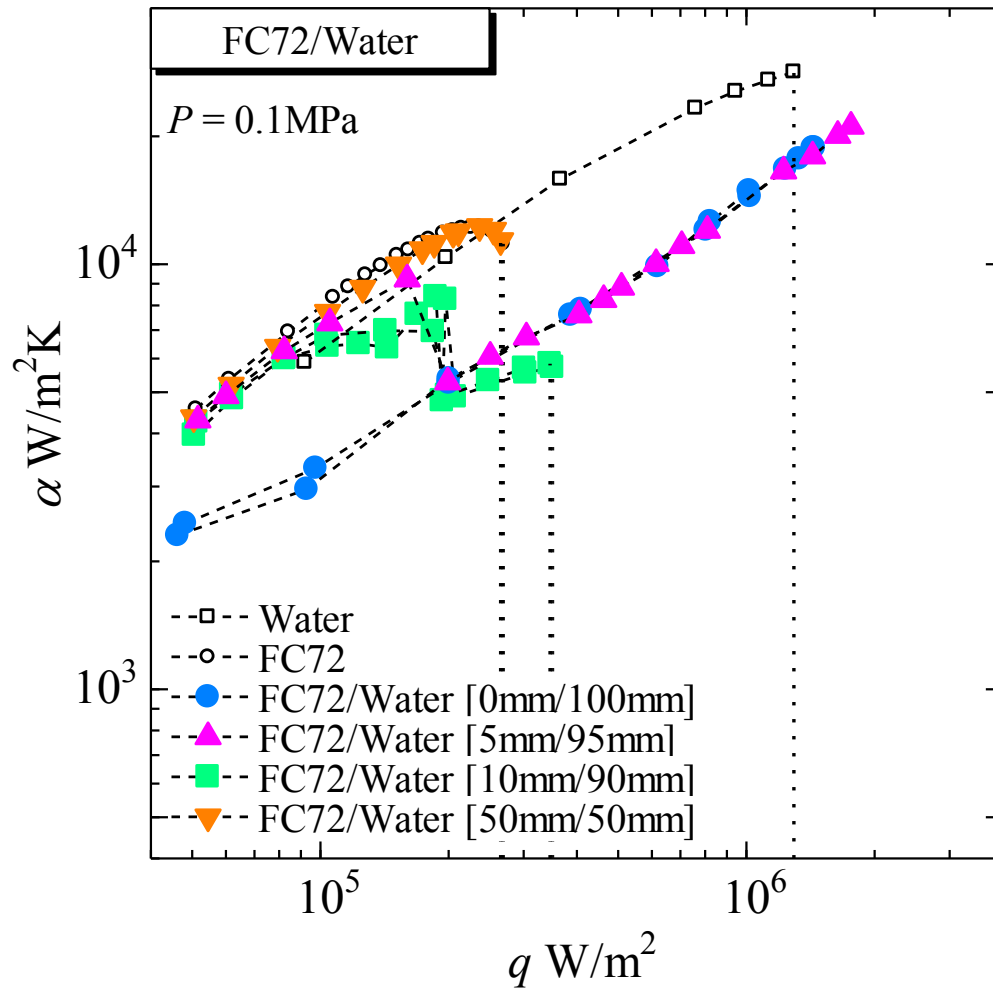


Fig. 5.1(b) Heat transfer coefficient versus heat flux for FC72/Water

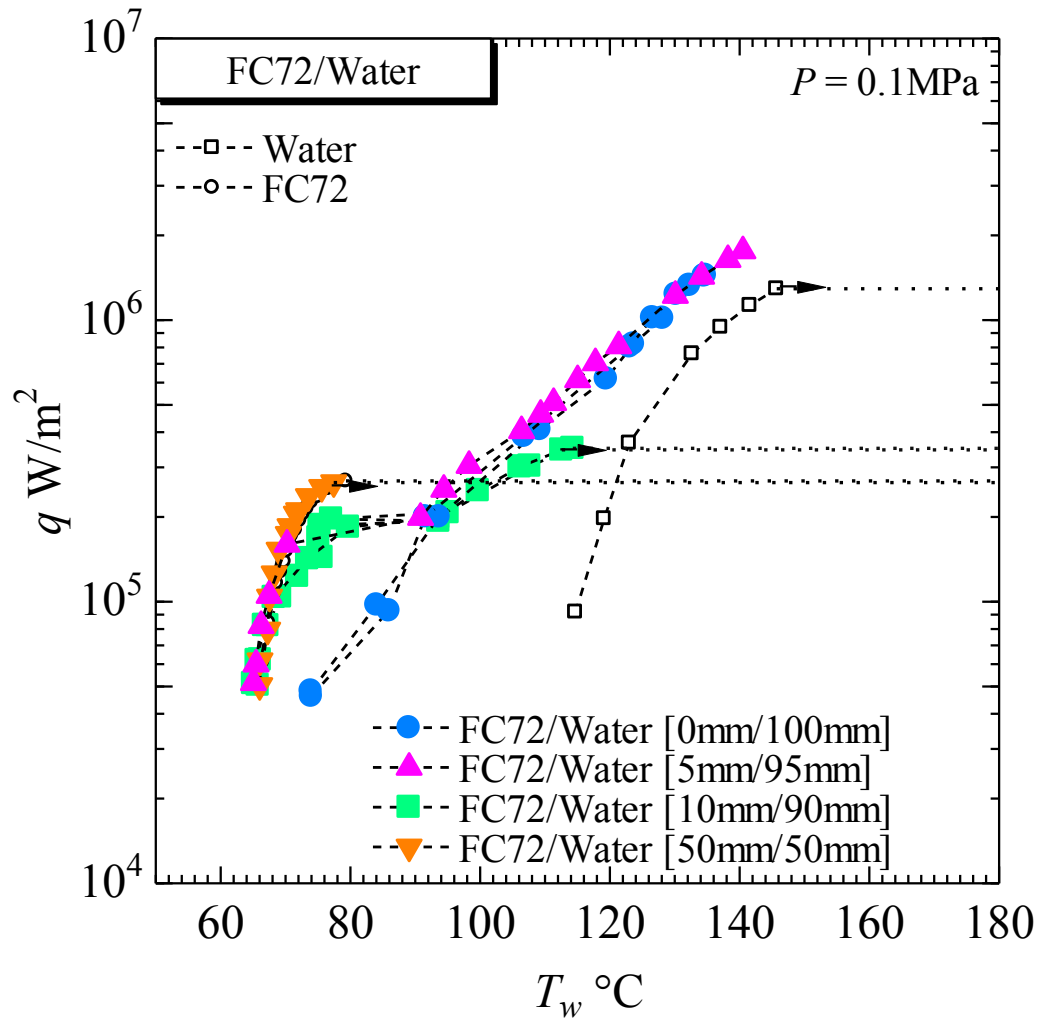


Fig. 5.1(c) Heat flux versus heating surface temperature for FC72/Water

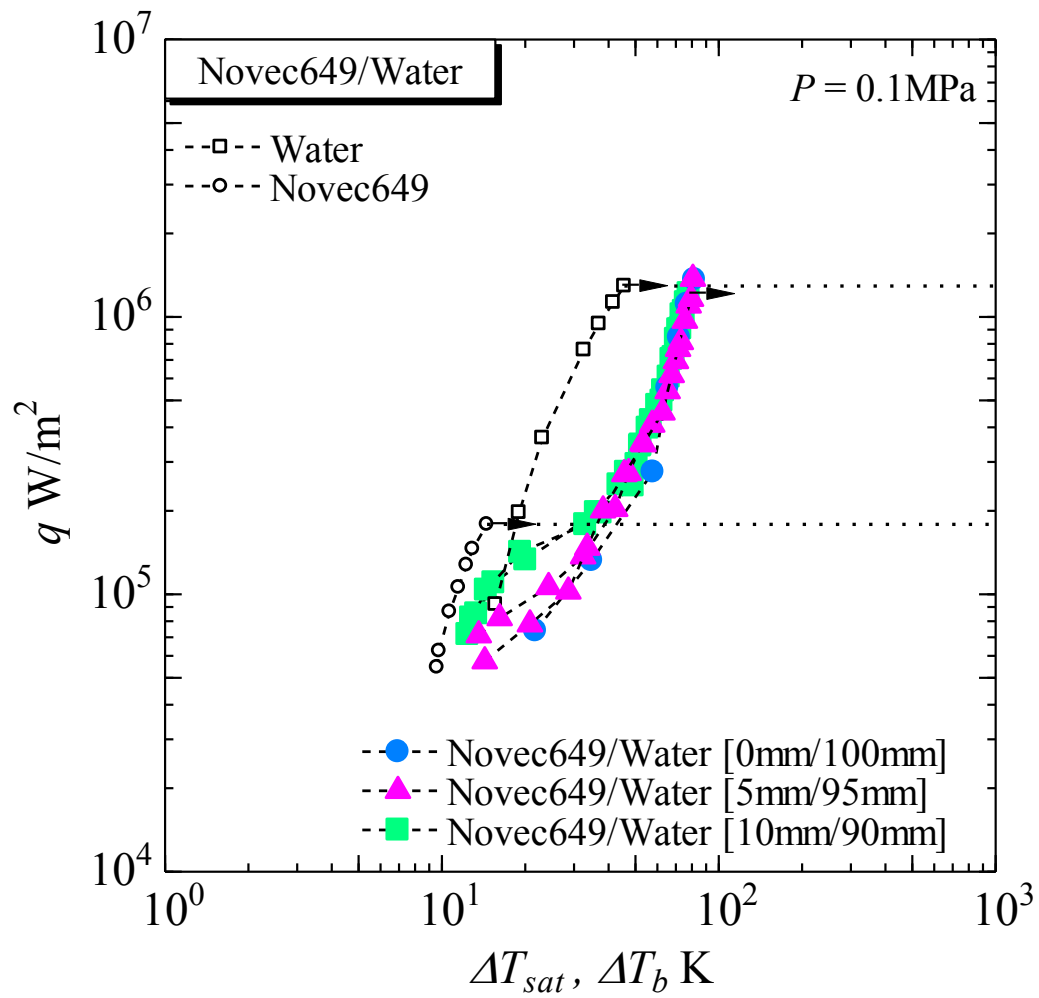


Fig. 5.2(a)

Heat flux versus temperature difference for Novec649/Water

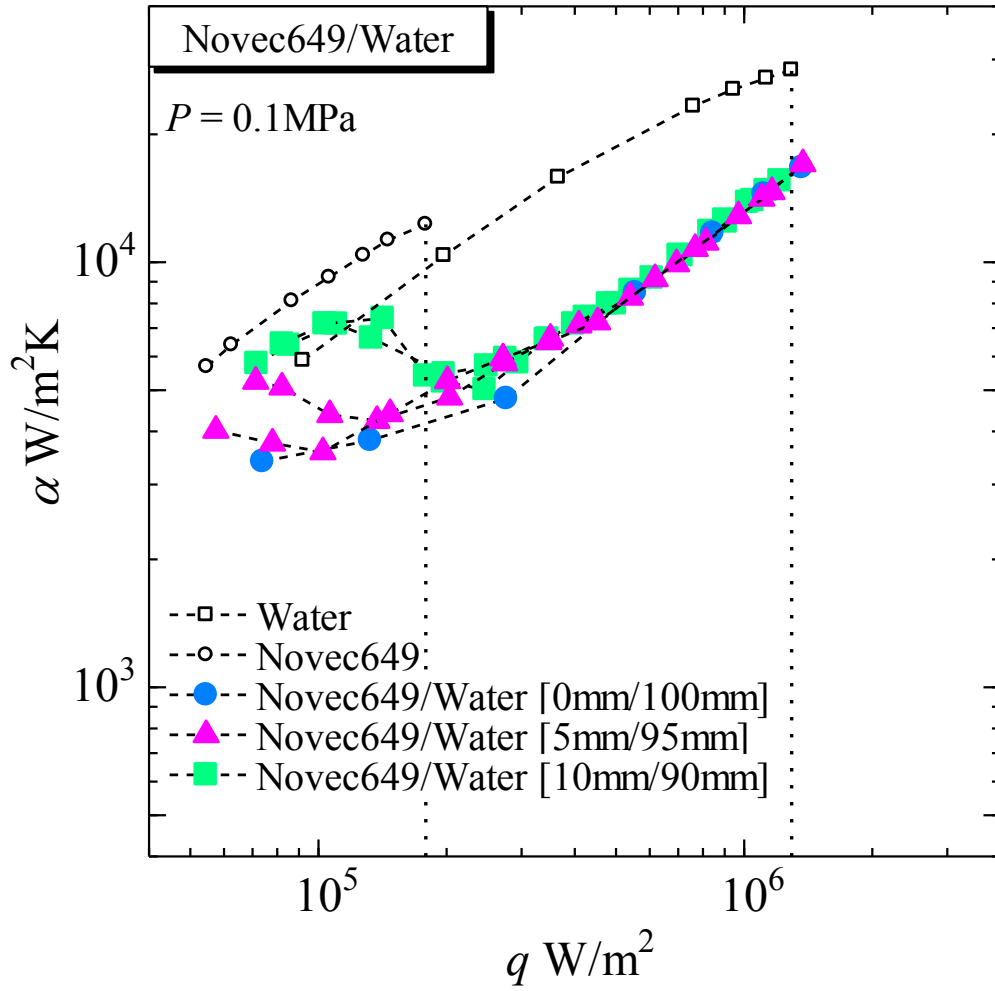


Fig. 5.2(b) Heat transfer coefficient versus heat flux for Novec649/Water

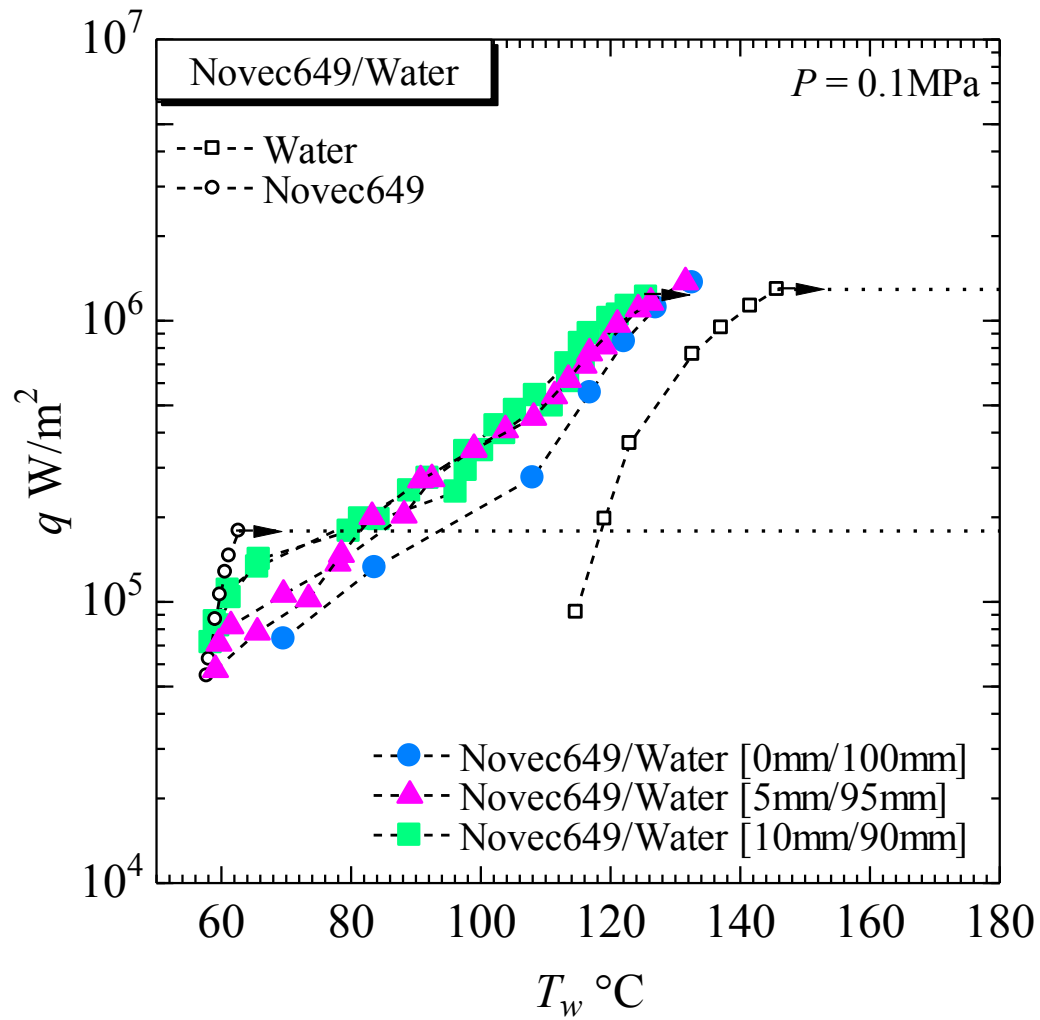


Fig. 5.2(c) Heat flux versus heating surface temperature for Novec649/Water

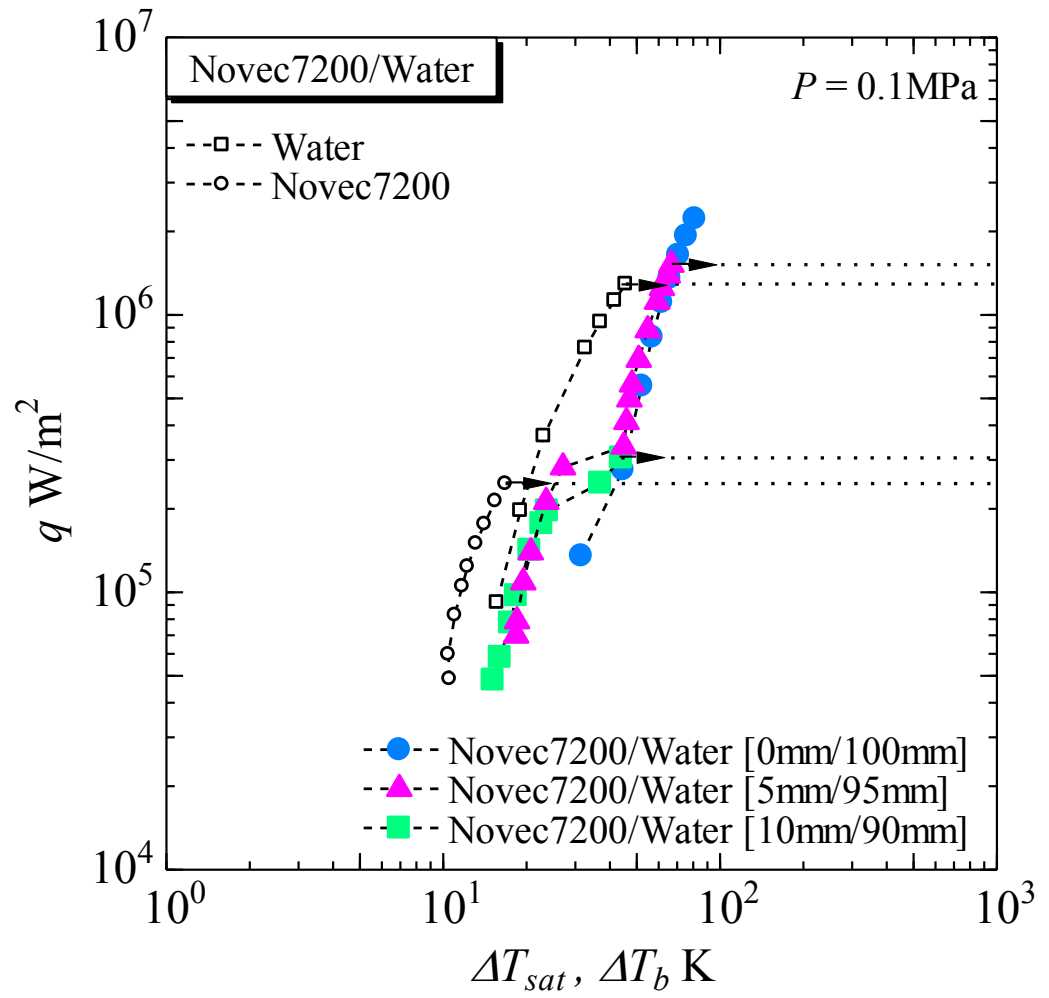


Fig. 5.3(a) Heat flux versus temperature difference for Novec7200/Water

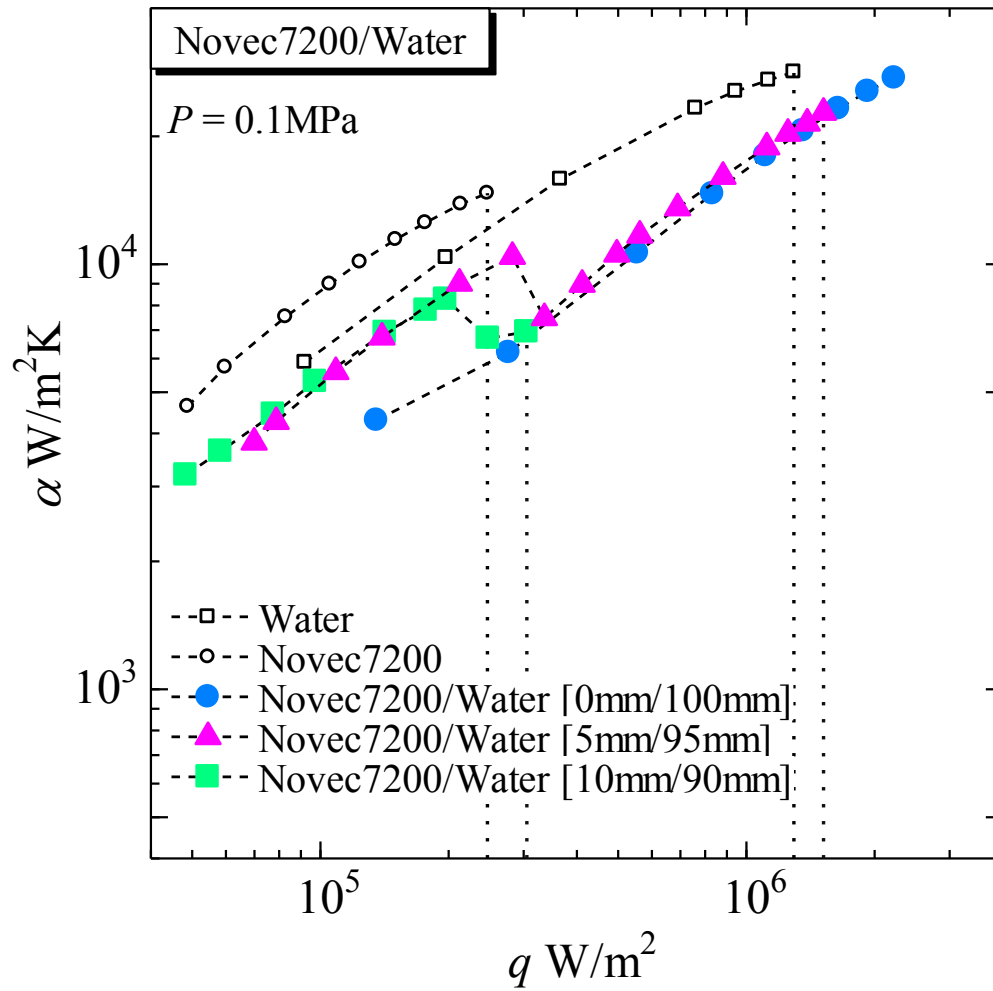


Fig. 5.3(b) Heat transfer coefficient versus heat flux for Novec7200/Water

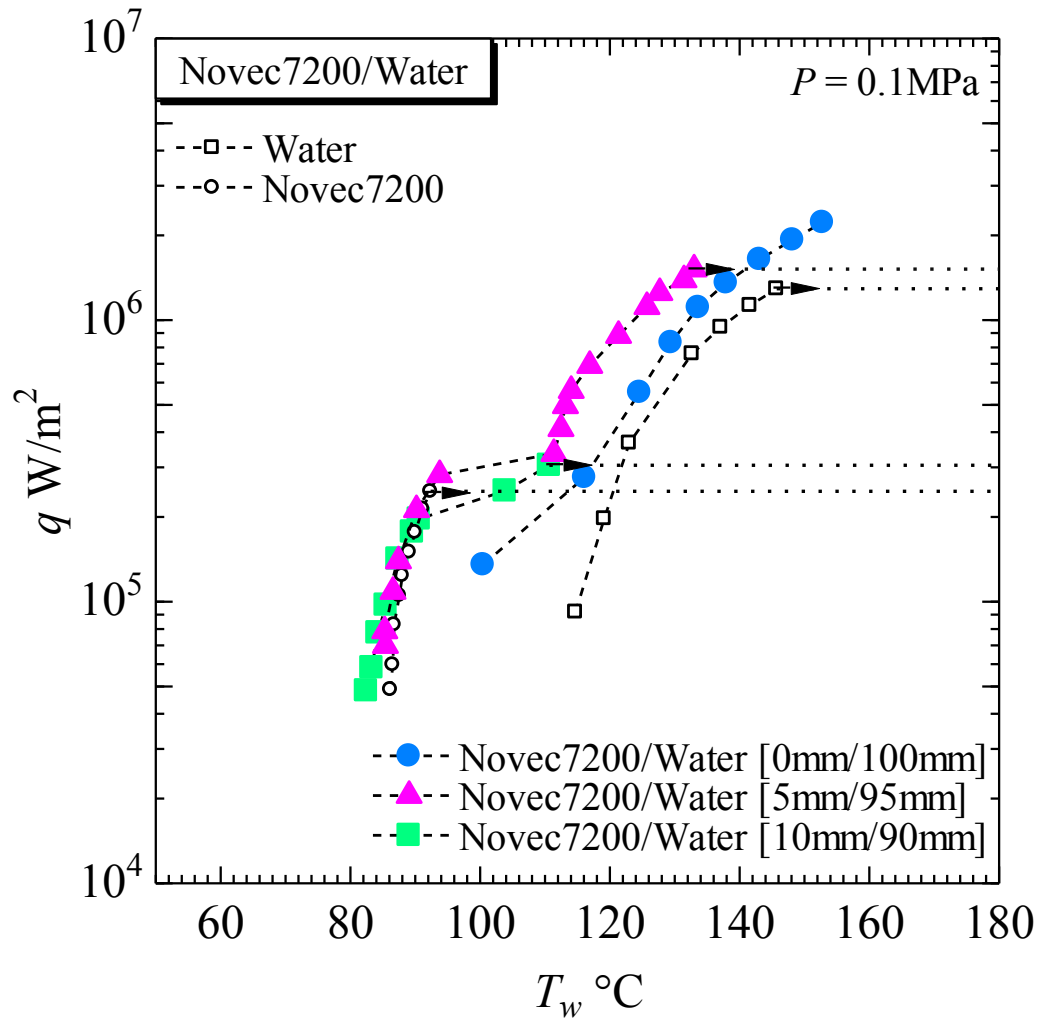


Fig. 5.3(c) Heat flux versus heating surface temperature for Novec7200/Water

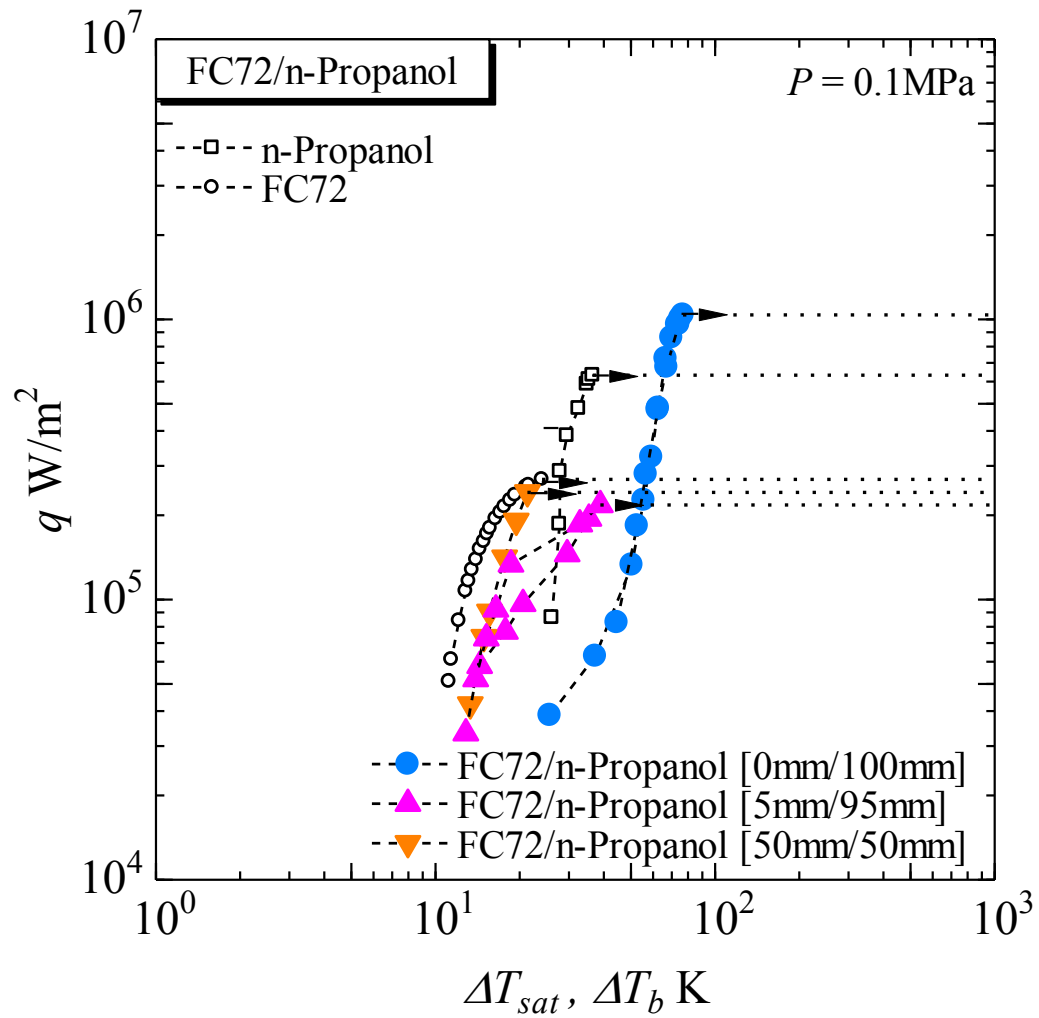


Fig. 5.4(a)

Heat flux versus temperature difference for FC72/n-Propanol

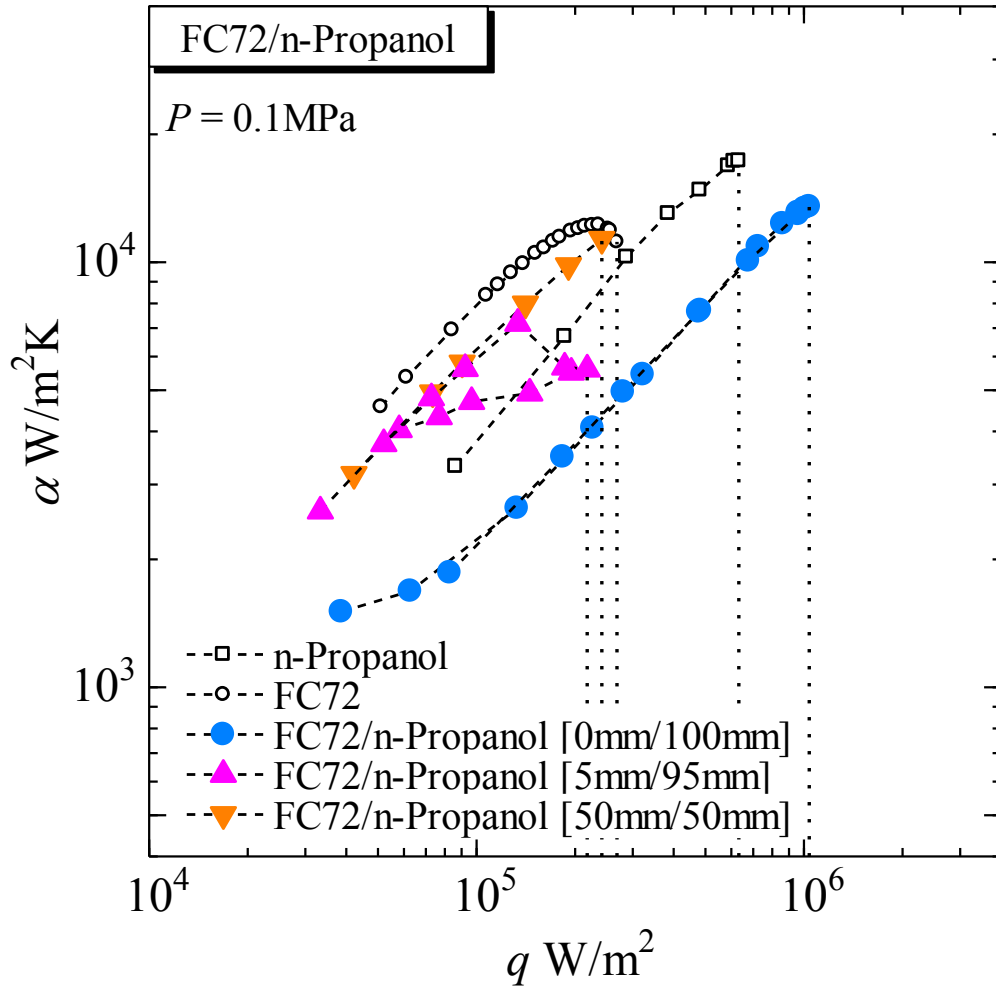


Fig. 5.4(b) Heat transfer coefficient versus heat flux for FC72/n-Propanol

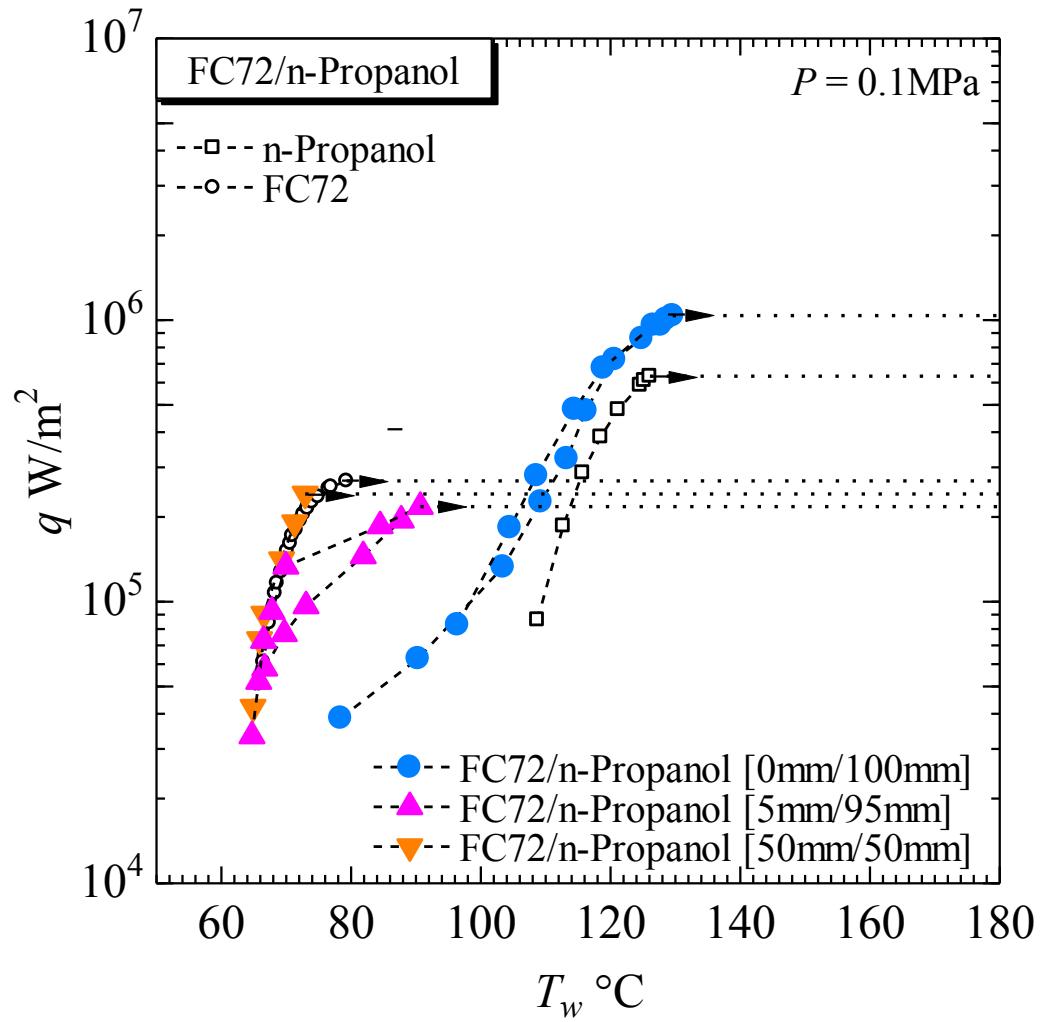


Fig. 5.4(c)

Heat flux versus heating surface temperature for FC72/n-Propanol

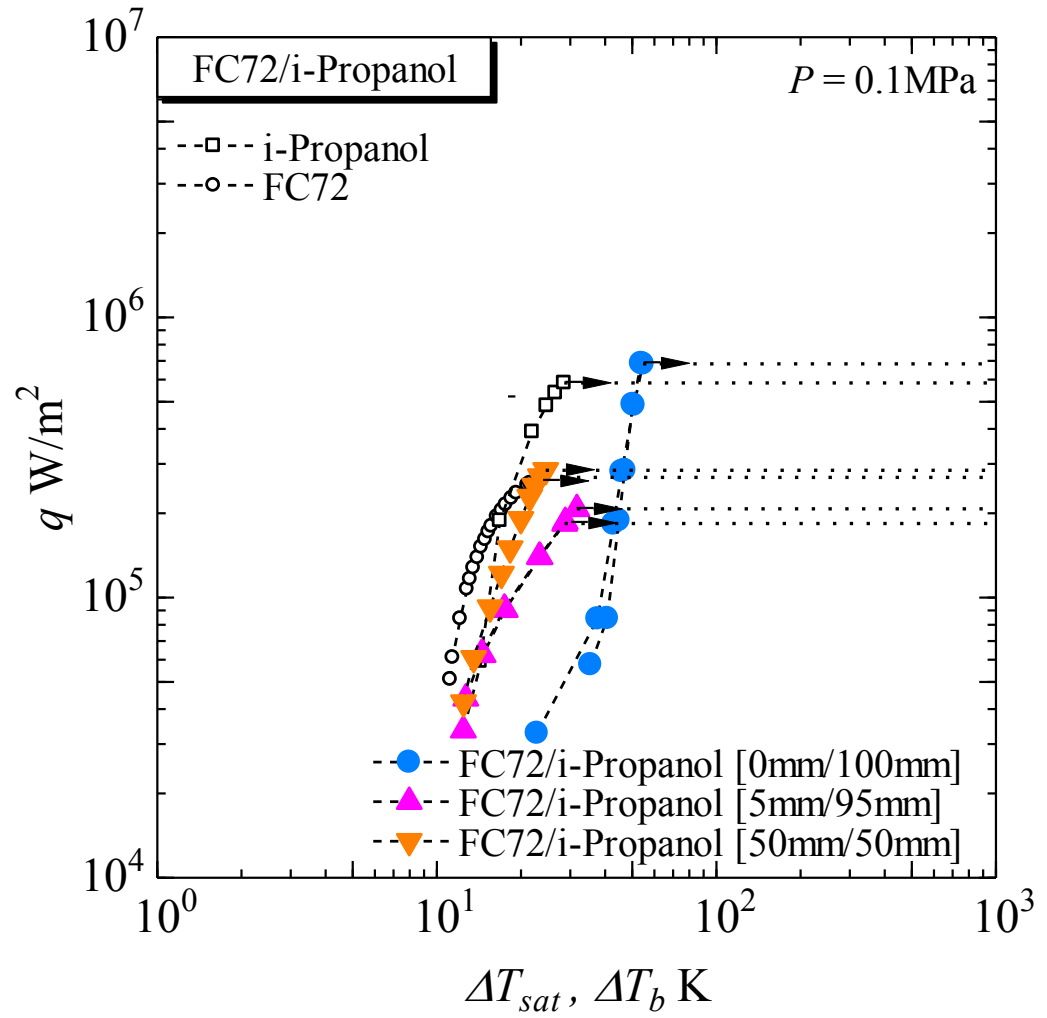


Fig. 5.5(a) Heat flux versus temperature difference for FC72/i-Propanol

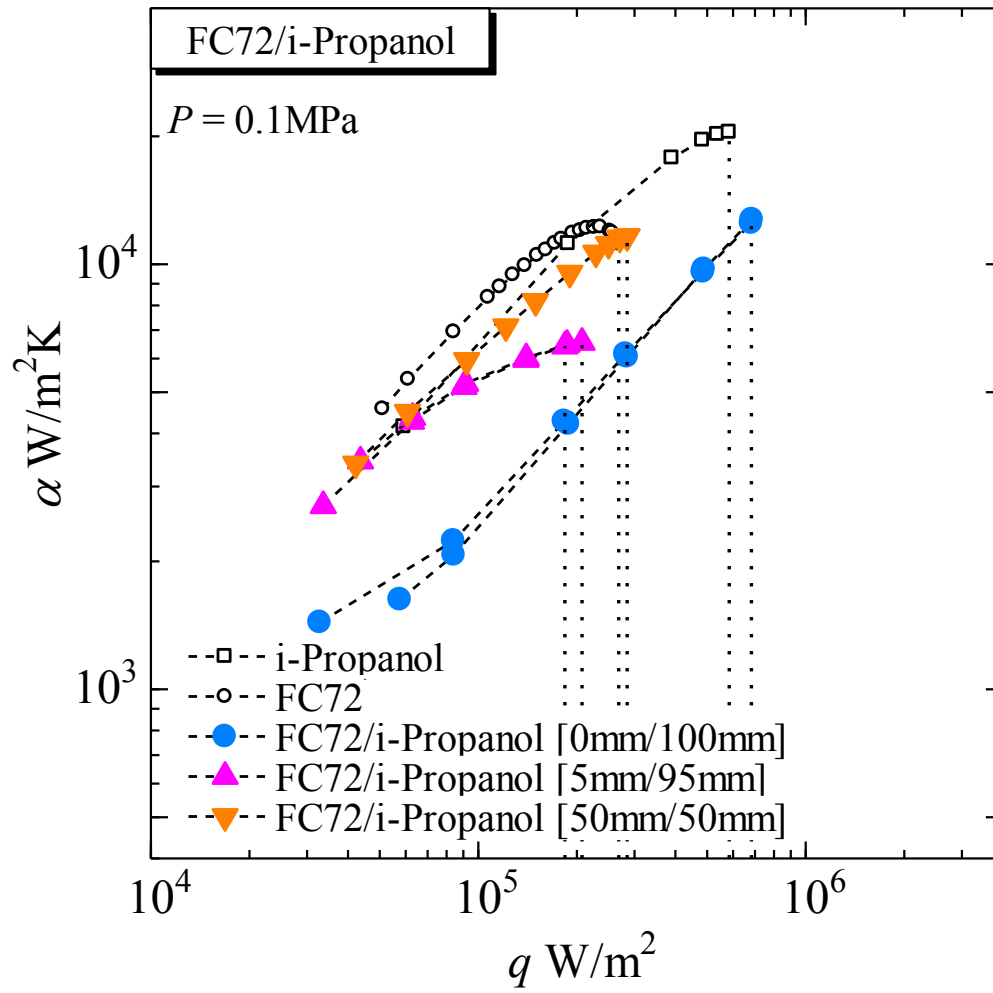


Fig. 5.5(b) Heat transfer coefficient versus heat flux for FC72/i-Propanol

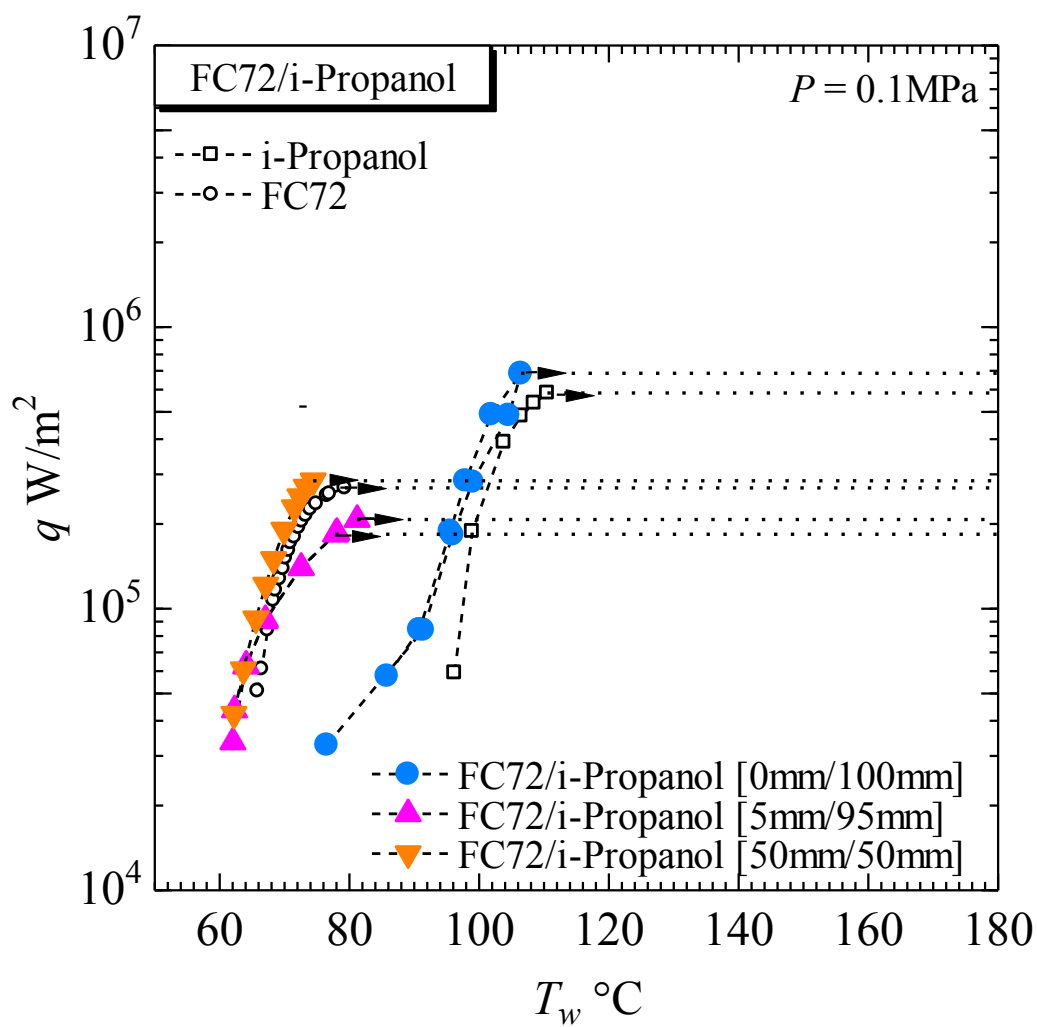


Fig. 5.5(c) Heat flux versus heating surface temperature for FC72/i-Propanol

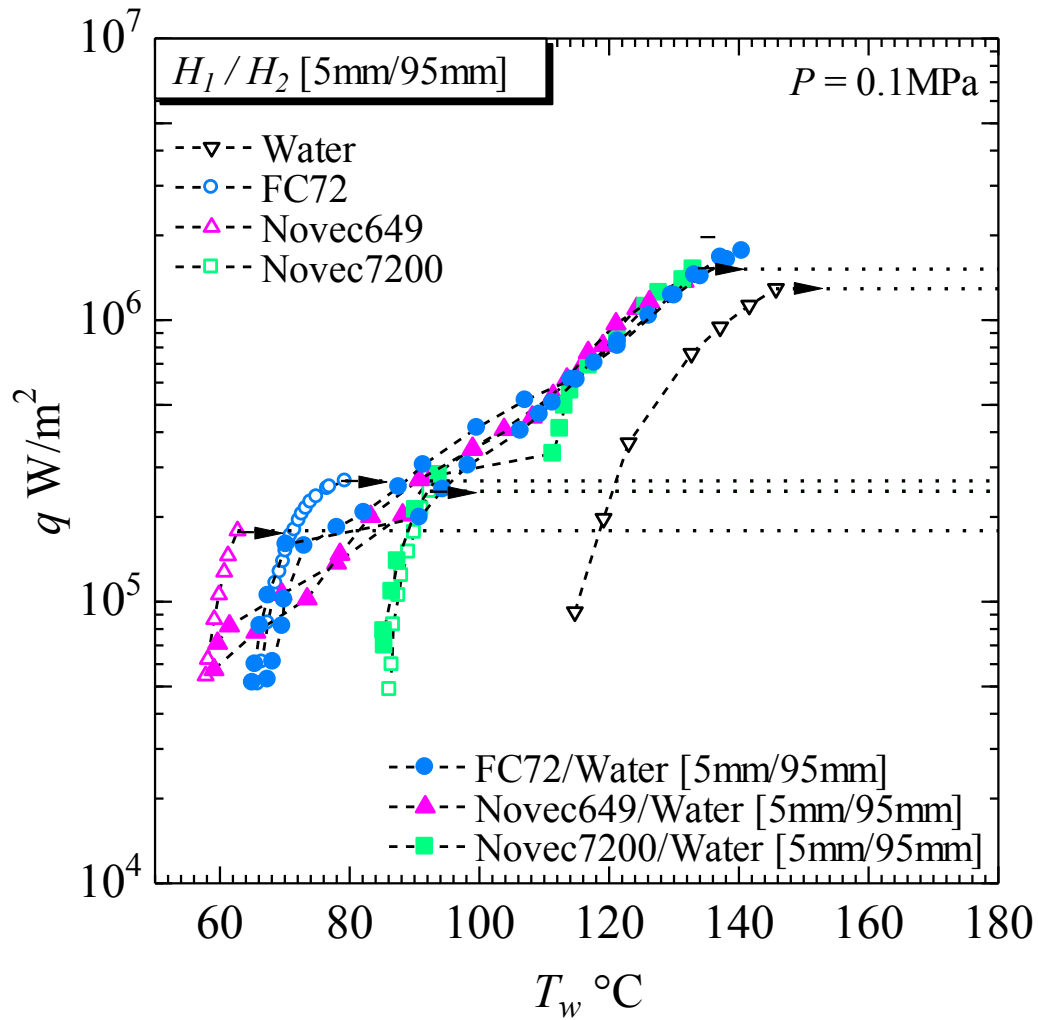


Fig. 5.6 Summary of nucleate boiling characteristics for three immiscible mixtures
 $[H_1/H_2] = [5\text{mm}/95\text{mm}]$ with thin layer of more volatile component

5.1.4 気液挙動

Figure 5.7 は各熱流束における FC72/Water の $H_1=50\text{mm}$, 5mm , 0mm の場合と純水単成分媒体の界面と気泡の挙動について示したものである。この時 $H_1=50\text{mm}$ については FC72 に対するサブクール度が小さいため FC72 単成分媒体と見なす。また熱流束が $4\times 10^5\text{W/m}^2$ 以上ではバーンアウトを起こしており、画像データは無い。

$H_1=0\text{mm}$ では伝熱面表面において純水の自然対流が発生することにより、伝熱面周辺の FC72 液相と純水液相との界面での擾乱を確認した。その FC72 液相の一部は伝熱面表面に運ばれ沸騰・蒸発する。蒸発した FC72 気泡径は FC72 単成分媒体での蒸発気泡径に比べて、遥かに大きくなった。水平方向に合体することにより FC72 気泡の体積が最小突入体積になり、その後純水液相に突入する。またその際に FC72 液相の同伴を生じることも確認した。FC72 液相を伴った FC72 気泡が純水表面に達した後に、FC72 気泡が崩壊し、FC72 液滴は重力により伝熱面表面に落下する。低熱流束域では純水の自然対流が熱伝達に対し支配的になる。より高い熱流束域では加熱用ブロック周囲より伝熱面表面に運ばれてくる FC72 液相の量が増え、大量の FC72 気泡が発生する。さらに高熱流束域では自然対流や純水成分を一部含んだ気泡からの潜熱放出により純水液相のサブクールが減少するため、伝熱面表面中心にて FC72 気泡を含んだ純水気泡が生成するのを確認した。さらに中心ではサブクールの減少により FC72 蒸気量もまた増える。一方で伝熱面周辺では純水への高いサブクールを保持しているため、純水気泡の発生は確認できなかった。

$H_1=5\text{mm}$ では低熱流束域において FC72 の沸騰が熱伝達に支配的であり、純水の自然対流の寄与は減少する。結果として両液層の界面は不明確になり、最小突入直径程度の FC72 気泡が FC72 に対しては低サブクール状態の純水液相に突入する。またその際に FC72 液相も純水液相に運ばれ、結果として微細な FC72 液滴が純水液相内に分散する。よって乳濁液のように純水液相内に微細な FC72 液滴がけん濁することで、 $H_1=5\text{mm}$ における液体全体の透明度は下がる。限界熱流束付近においても伝熱面中心に大きな合体気泡が確認されなかった。これについては 5.1.5 にて説明する。この場合、優先的に発生する FC72 の沸騰が純水の沸騰に比べて熱伝達においてより重要になり、FC72 気泡が凝縮によりその体積を大きく減らすことなく純水液相内を上昇する。結果として、高熱流束域においても純水液相は純水気泡に対して高いサブクール度を保つことができ、純水気泡は離脱することなく伝熱面上でただちに凝縮する。 $H_1=10\text{mm}$ では界面の挙動については $H_1=5\text{mm}$ の場合と同様であるが、一部に大きな合体気泡径が確認された。これについては 5.1.5 にて説明する。また限界熱流束はより低い熱流束の $3.5\times 10^5\text{W/m}^2$ で生じた。

Novec649/Water や Novec7200/Water においても FC72/Water と同様な傾向が確認された。

各媒体の組み合わせにおける低沸点媒体気泡の上昇による高沸点媒体液相への低沸点媒体の同伴効果，言い換えると両媒体の混合促進効果を Table 5.2 に示す．同伴量が多いほど両媒体の混合が促進される．Figure 5.12 は高沸点媒体を純水で共通として低沸点媒体を FC72 と Novec649, Novec7200 のそれぞれに対する両媒体の混合促進の程度を示したものである．ここではいずれも $H_1=5\text{mm}$ とし，同一熱流束で比較を行っている．促進効果が高い Novec649 や Novec7200 の方がより混合が顕著であることがわかる．

FC72/n-Propanol や部分可溶性混合媒体の FC72/i-Propanol についてはその他の不溶性混合媒体と同様な傾向になった．n-Propanol や i-Propanol 液相内の FC72 の液滴径についてはその他の不溶性混合媒体と比べて小さくなったが，これは界面張力の違いによるものである．

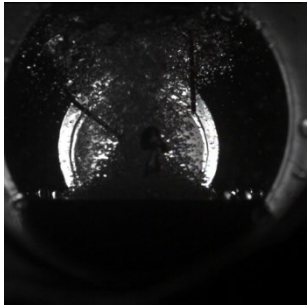
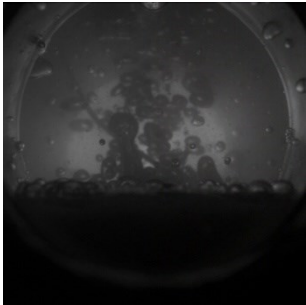
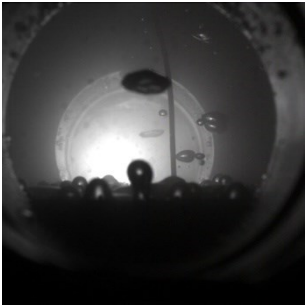
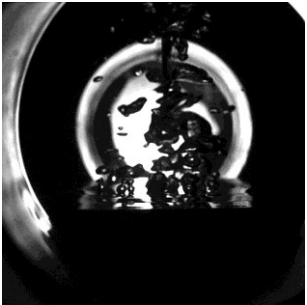
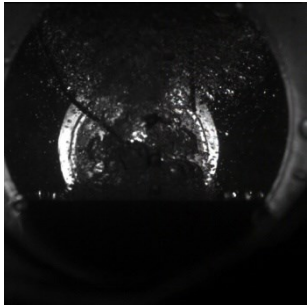
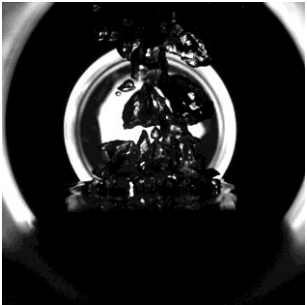
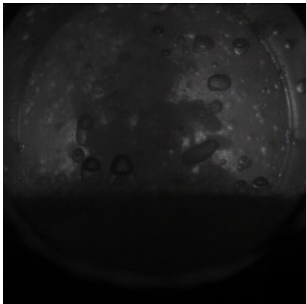
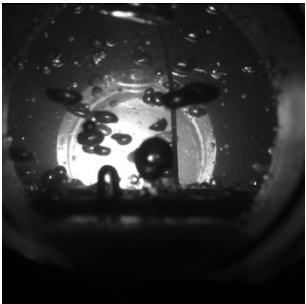
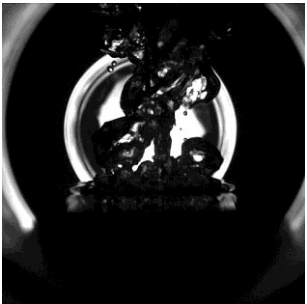
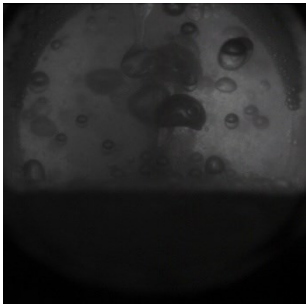
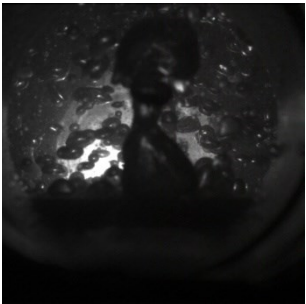
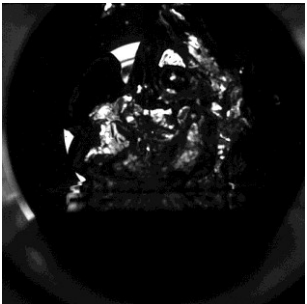
q W/m ²	FC72/Water [50mm/50mm] (Equivalent to pure FC72)	FC72/Water [5mm/95mm]	FC72/Water [0mm/100mm]	Pure Water
1×10^5				
2×10^5				
4×10^5	Burnout			
1×10^6	Burnout			

Fig. 5.7

Behaviors of liquid-liquid interface and bubbles for different layer thickness of more-volatile liquid and heat flux levels

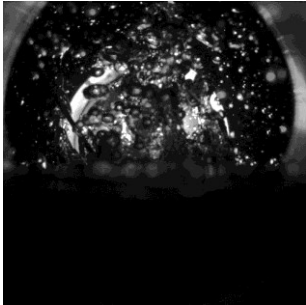
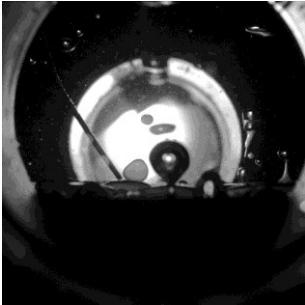
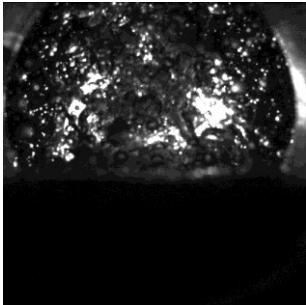
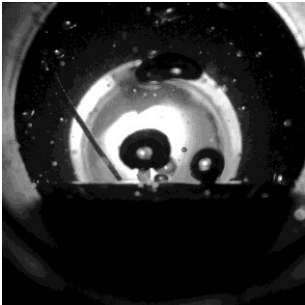
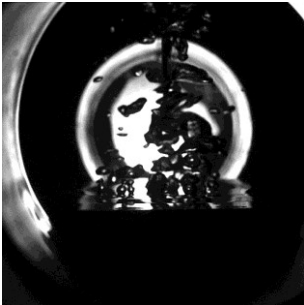
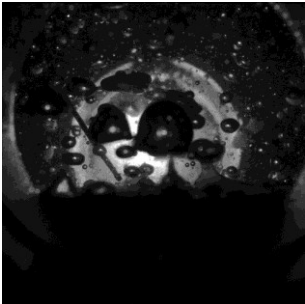
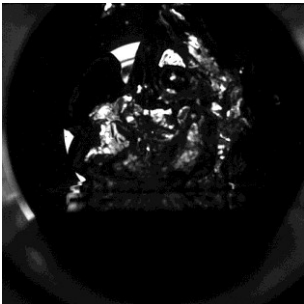
q W/m^2	Novec649/Water [50mm/50mm] (Equivalent to pure Novec649)	Novec649/Water [5mm/95mm]	Novec649/Water [0mm/100mm]	Pure Water
5×10^4	No data			No data
1×10^5	No data			
4×10^5	No data			
1×10^6	No data			

Fig. 5.8

Behaviors of liquid-liquid interface and bubbles for different layer thickness of more-volatile liquid and heat flux levels

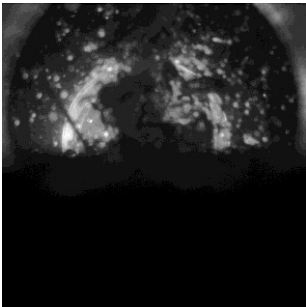
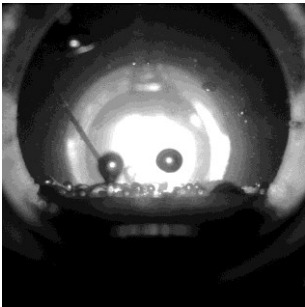
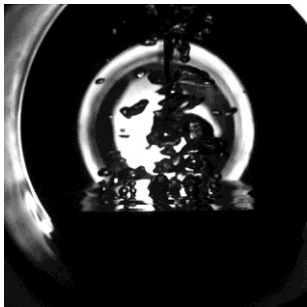
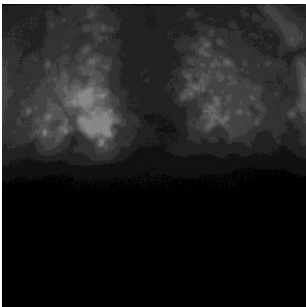
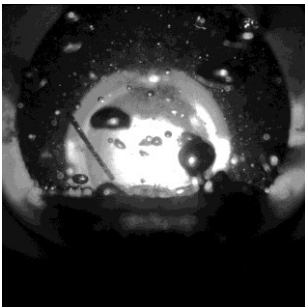
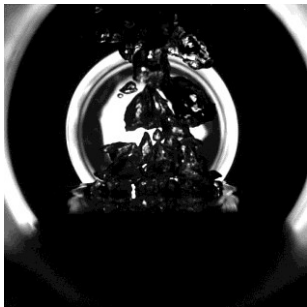
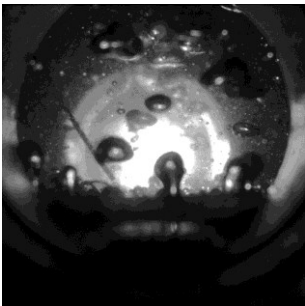
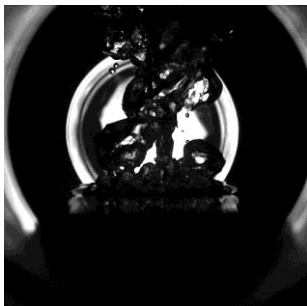
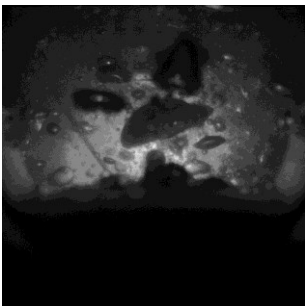
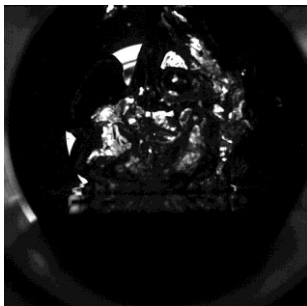
q W/m ²	Novec7200/Water [50mm/50mm] (Equivalent to pure Novec7200)	Novec7200/Water [5mm/95mm]	Novec7200/Water [0mm/100mm]	Pure Water
1×10^5	No data			
2×10^5	No data			
4×10^5	No data			
1×10^6	No data			

Fig. 5.9

Behaviors of liquid-liquid interface and bubbles for different layer thickness of more-volatile liquid and heat flux levels

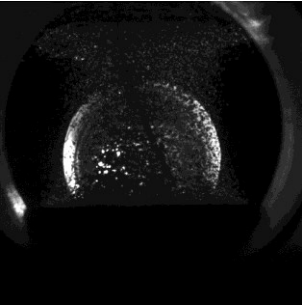
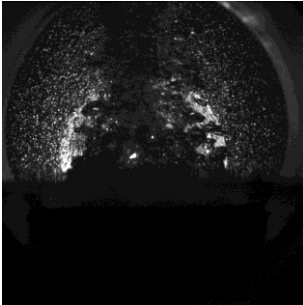
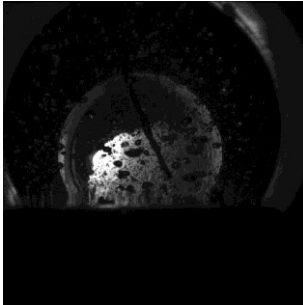
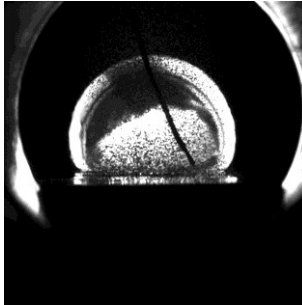
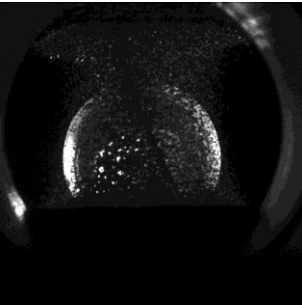
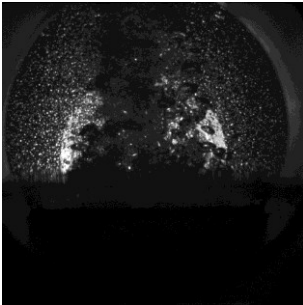
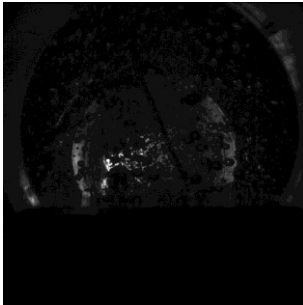
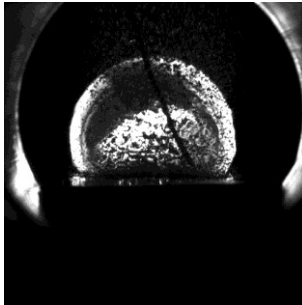
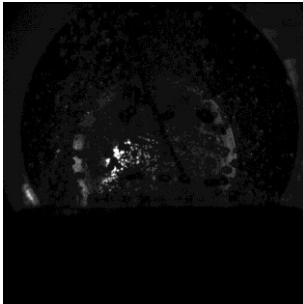
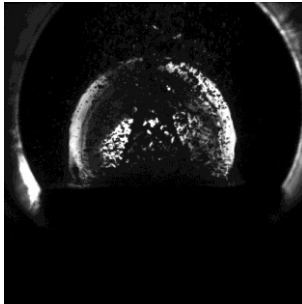
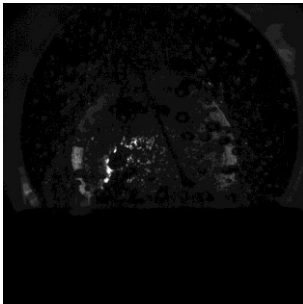
q W/m^2	FC72/n-Propanol [50mm/50mm] (Equivalent to pure FC72)	FC72/n-Propanol [5mm/95mm]	FC72/n-Propanol [0mm/100mm]	Pure n-Propanol
1×10^5				
2×10^5				
5×10^5	Burnout	Burnout		
1×10^6	Burnout	Burnout		Burnout

Fig. 5.10

Behaviors of liquid-liquid interface and bubbles for different layer thickness of more-volatile liquid and heat flux levels

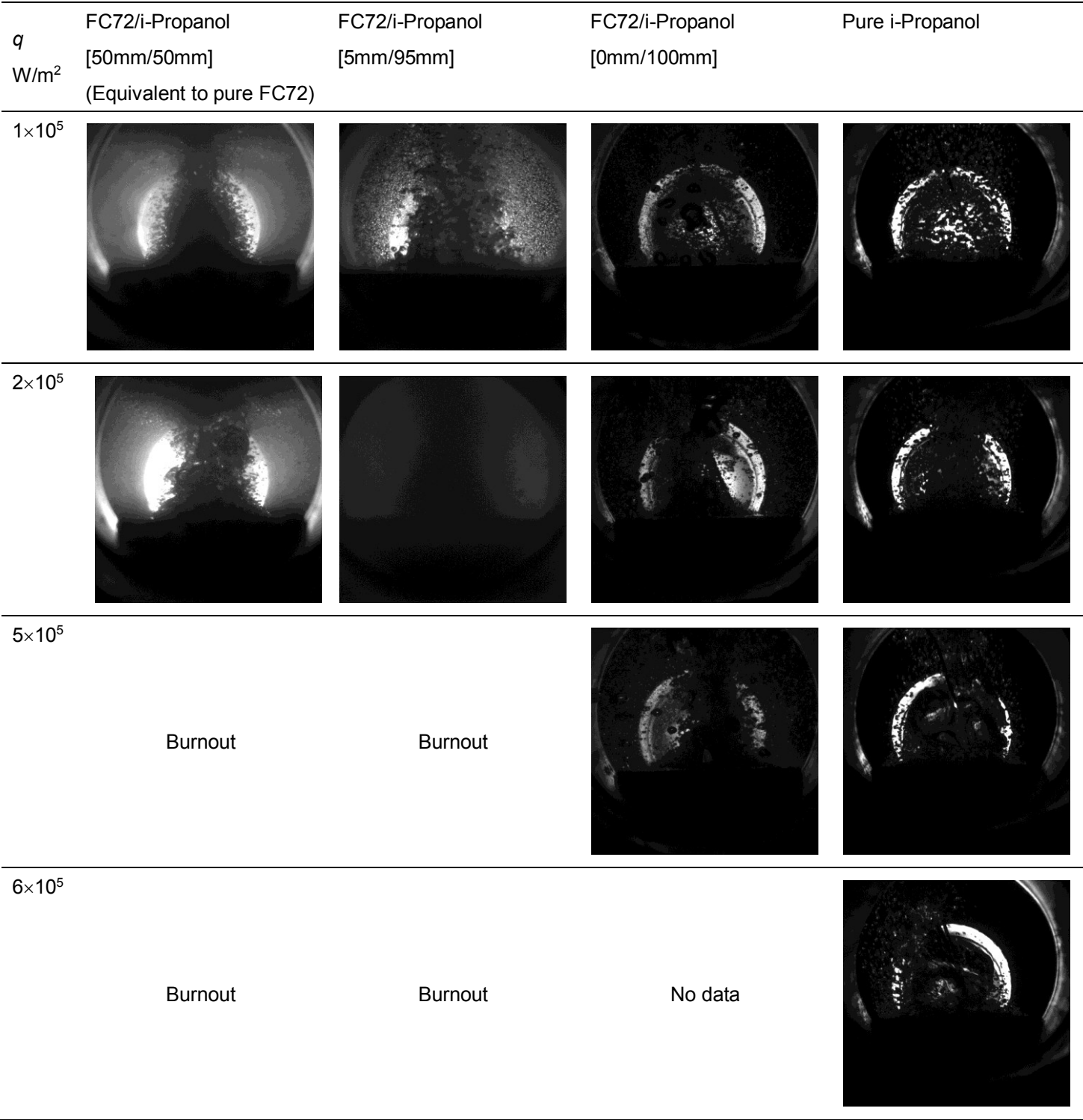


Fig. 5.11 Behaviors of liquid-liquid interface and bubbles for different layer thickness of more-volatile liquid and heat flux levels

Table 5.2 Effect of parameters on the entrained amount of more-volatile liquid into less-volatile liquid at 0.1MPa

Amount of Entrainment	Small		↔	Large	
More-volatile component	FC72			Novec649	Novec7200
Less-volatile component	i-Propanol	n-Propanol		Water	
Liquid density difference $\rho_1 - \rho_2$ [kg/m ³]	866	845	633	552	348
Liquid viscosity (bubble ascent velocity) μ_l [mPa s]		0.44		0.45	0.33
Amount of Entrainment	Small		↔	Large	
More-volatile component	FC72			Novec7200	Novec649
Less-volatile component	i-Propanol	n-Propanol		Water	
Parameter relative to more-volatile component evaporation velocity $\rho_{g1} h_{fg1}$ [kJ/m ³]		1.54×10^5		1.48×10^5	1.36×10^5

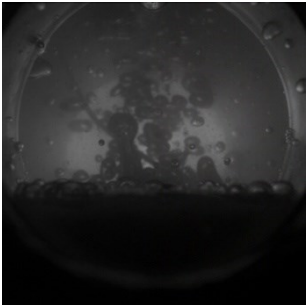
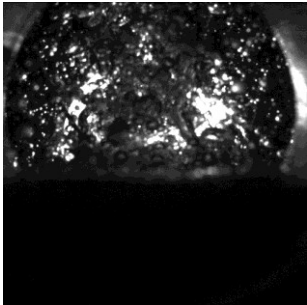
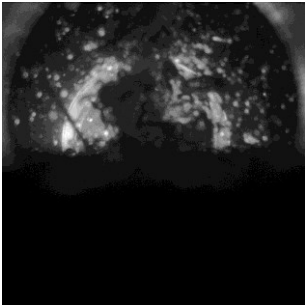
q W/m ²	FC72/Water [5mm/95mm]	Novec649/Water [5mm/95mm]	Novec7200/Water [5mm/95mm]
1×10^5			

Fig. 5.12 Difference in the amount of entrained more-volatile liquid into less-volatile liquid

5.1.5 インターミディエイトバーンアウト

5.1.1 にて一度議論したが、インターミディエイトバーンアウト (Int.B.) は低沸点媒体の層厚さ H_1 が小さい場合に発生し、ある熱流束において低沸点媒体が支配的な熱伝達領域から高沸点媒体が支配的な熱伝達領域に移行する現象である。本結果において2種類の Int.B.を確認した。それぞれの特徴を Figure 5.13 に模式的に示す。1つ目は Figure 5.13 において青線で示した熱流束の増加に対し急激な伝熱面温度変化を伴う現象であり、Int.B. type 1 と名付ける。例えば Figure 5.1(c)に示す FC72/Water[5mm/95mm]では $q = 2.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 付近で急激に T_w が上昇する Int.B. type 1 が発生している。2つ目は Figure 5.13 において赤線で示した部分的なドライパッチが存在し、熱流束の増加に対し緩やかな伝熱面温度変化を伴う現象であり、Int.B. type 2 と名付ける。例えば Figure 5.1(c)に示す FC72/Water[10mm/90mm]では $q = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 付近で緩やかに T_w が上昇する Int.B. type 2 が発生している。

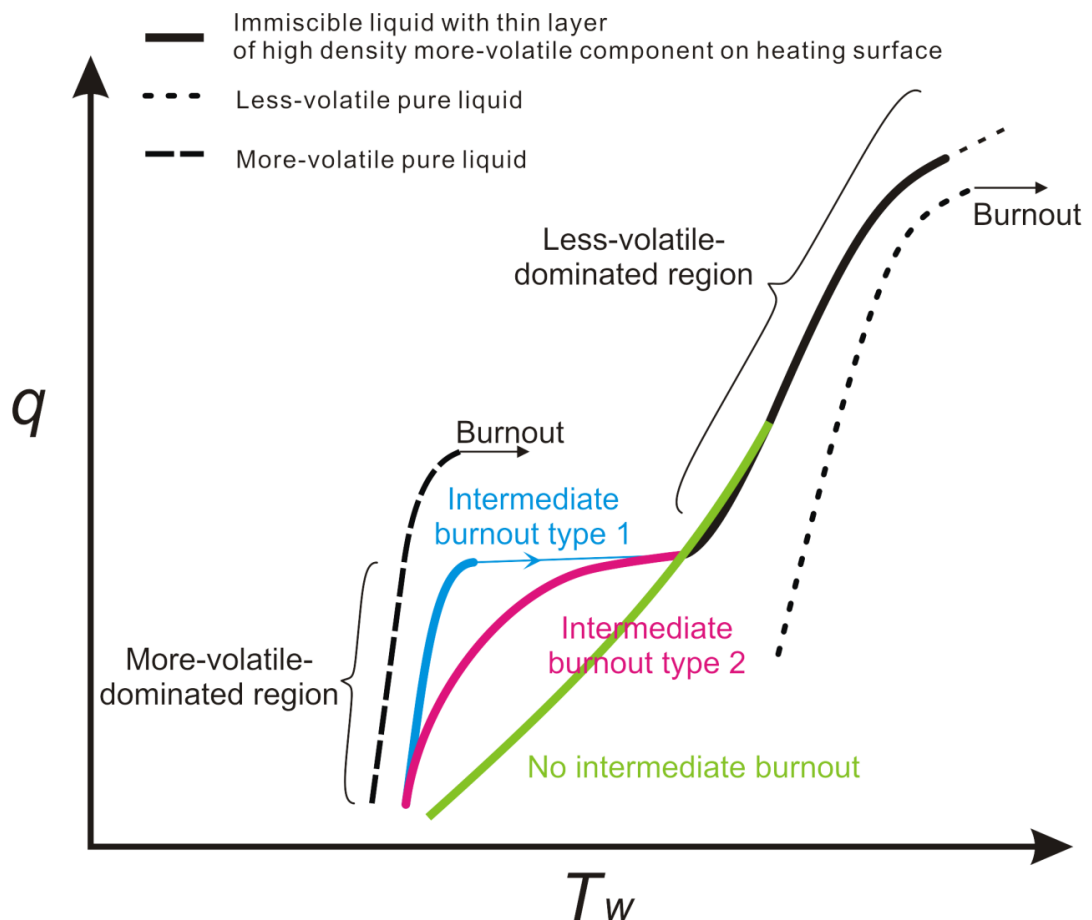


Fig. 5.13 Two different types of “Intermediate burnout” represented by heat flux versus surface temperature

Int.B. type 1 と type 2 の違いは低沸点媒体の層厚さ H_1 と Taylor の最危険波長 λ_D の関係に起因すると考えられる. この関係について FC72/Water を例にとり説明する. Table 5.3 に各組み合わせにおける Taylor の最危険波長 λ_D と第2章の2.3で説明した低沸点媒体気泡の高沸点媒体液相への最小突入直径 d_{pen}^* , 低沸点媒体液相を伴う最小同伴直径 d_{ent}^* と第2章の2.1.2で説明した低沸点媒体気泡の離脱直径 d_b を示す.

Table 5.3 Most dangerous wavelength and minimum bubble diameter of more-volatile liquid to penetrate and entrain more-volatile liquid into less-volatile liquid at 0.1MPa

More-volatile component	FC72			Novec649	Novec7200
Less-volatile component	i-Propanol	n-Propanol		Water	
Most dangerous wavelength λ_D [mm]	18.6	18.4	28.9	29.1	28.4
Penetration diameter d_{pen}^* [mm]	1.6	1.6	4.2	4.1	3.9
Entrainment diameter d_{ent}^* [mm]	2.4	2.3	5.1	4.8	4.3
Bubble departure diameter d_b [mm]	0.36	0.36	0.36	0.40	0.43

FC72/Water[5mm/95mm]ではFC72の合体気泡径 d_{cb} が λ_D まで成長せずに純水液相に放出される. Figure 5.14 に示すように沸騰により生じた FC72 の気泡 (離脱直径 d_b) が FC72/Water 界面で合体しながら, 最小突入直径 d_{pen}^* 以上に成長し, FC72 液相の薄液膜を気泡周りに同伴しながら純水液相内に突入する. また Taylor の最危険波長 λ_D まで気泡が成長しないため, 液液界面の不安定により純水液相が直接伝熱面に降下してくることはない. この結果熱流束がある程度高く, 同時に発泡点密度が高くなることで, 伝熱面全体を FC72 気相で覆ってしまい, 急激な温度上昇とともにインターミディエイトバーンアウトに至る. その後 Taylor 不安定により系圧力に対して高サブクール状態の純水液相が伝熱面に直接降下することにより伝熱面温度上昇は一定値の範囲に留まり, Int.B. type 1 となる. Figure 5.16 に示す通り, $q = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ における FC72 液相を伴った FC72 気泡径の平均計測結果は 7mm となり d_{ent}^* に近い値となることから分かる.

一方で FC72/Water[10mm/90mm]では FC72 の合体気泡径 d_{cb} が λ_D 以上に成長する. Figure 5.15 に示すように沸騰により生じた FC72 の気泡 (離脱直径 d_b) が FC72/Water 界面で合体しながら, Taylor の最危険波長 λ_D まで成長し, Taylor 不安定により純水液相が伝熱面に直接降下してくる. これにより局所的に純水の対流熱伝達と FC72 の沸騰熱

伝達が伝熱面上で共存することにより、伝熱面表面温度の安定が熱流束ごとに保たれ、結果として図上では緩やかな伝熱面温度変化を生じている。すなわち Int.B. type 2 となる。熱流束をさらに増加させると発泡点密度が高くなることで、その他の伝熱面を全て FC72 気相で覆ってしまい、伝熱面表面温度はさらに上昇する。その後 Taylor 不安定により純水液相が伝熱面に降下し、純水液相による自然対流主体の熱伝達に移行する。Figure 5.17 に示す通り、 $q = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ における FC72 液相を伴った FC72 気泡径の平均計測結果は 13mm となり λ_D の約半分の値となることから、このことが確認される。

Novec649/Water[5mm/95mm]については FC72/Water[5mm/95mm]と異なる低熱流束域から純水の自然対流が熱伝達に支配的となり、Novec649/Water[0mm/100mm]の沸騰曲線と同傾向を示した。これは FC72/Water に比べて Table 4.3 に示す加熱前低沸点媒体厚さ H_1 が同程度にも関わらず、低沸点媒体の同伴効果が大きいため、Novec649 と純水の混合が促進され、Novec649 の核沸騰ではなく純水の自然対流になったためである。一方で Novec649/Water[10mm/90mm]では FC72/Water[10mm/90mm]と同様に Int.B. type 2 が発生した。これは Figure 5.19 に示す通り $q = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ における Novec649 液相を伴った Novec649 気泡径の平均計測結果が 12mm となったことから分かる。Int.B.が発生した後は Novec649/Water[0mm/100mm]や Novec649/Water[5mm/95mm]と同じように純水の自然対流支配域に移行した。

FC72/Water と比べて、Table 4.3 に示す加熱前低沸点媒体厚さ H_1 が厚く、Taylor の最危険波長 λ_D が同程度であり、低沸点媒体の同伴効果が大きい Novec7200/Water では Int.B. の傾向は同じになった。Novec7200/Water[5mm/95mm]では Int.B. type 1 が発生した。その際 FC72/Water には見られなかったより小さな気泡が確認された。これは Figure 5.20 に示す通り、その他の Novec7200 の合体気泡に同伴した Novec7200 液相内に封入され純水液相内に突入したものである。一方で Novec7200/Water[10mm/90mm]では Int.B. type 2 が発生した。これは Figure 5.21 に示す通り、 $q = 2.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ における Novec7200 液相を伴った Novec7200 気泡径の平均計測結果は 16mm となり、 λ_D の約半分の値となったことからわかる。

FC72/n-Propanol では低沸点媒体の液相を高沸点媒体の液相へ同伴させる効果が小さいため、FC72/Water と同様な現象が見られる。また FC72/Water に比べて Taylor の最危険波長 λ_D が短くなっており、FC72/Water[10mm/90mm]で見られた Int.B. type 2 が FC72/n-Propanol [5mm/95mm]において発生している。Int.B. type 1 が生じる条件は $H_1 = 0 \sim 5 \text{ mm}$ である。これは部分可溶性混合媒体である FC72/i-Propanol でも同様に確認された。

低沸点媒体とその層厚さ H_1 が一定である FC72/Water[5mm/95mm]と FC72/n-Propanol [5mm/95mm]を比べる。Table 5.3 に示す Taylor の最危険波長 λ_D については FC72/n-Propanol の方が 18.4mm と FC72/Water の 28.9mm より小さくなっている。これ

は純水に比べて n-Propanol の液体密度 ρ_l が小さくなり λ_D が大きくなる効果よりも, 表面張力 σ が小さいことにより λ_D が小さくなる効果が強調された結果である. よって FC72/Water[5mm/95mm]では Int.B. type 1 が発生しが, FC72/n-Propanol [5mm/95mm]では IB type 2 が発生した.

Table 5.4 に Int.B. type 1,2 に起因するパラメータとその効果についてまとめた. 大きく分けて2つの効果が存在し, 1つは Taylor の最危険波長 λ_D であり, もう1つは低沸点媒体気泡の上昇による高沸点媒体液相への低沸点媒体の同伴効果, いずれも両媒体の混合を促進する要素である.

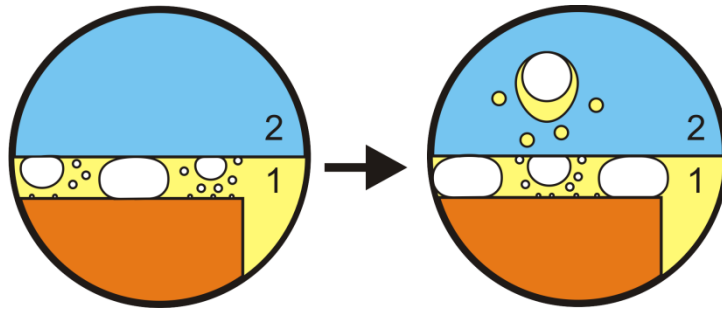


Fig. 5.14 Behaviors of bubbles in the vicinity of liquid-liquid interface for FC72/Water[5mm/95mm] in the case of $d_{cb} < \lambda_D$ at low heat flux

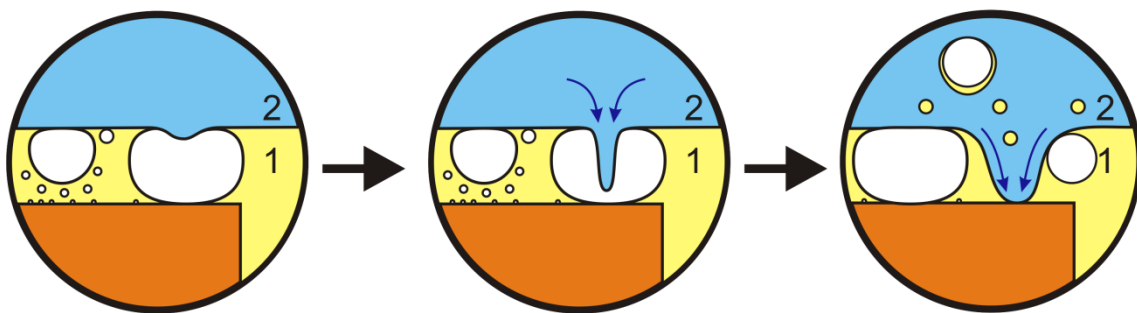


Fig. 5.15 Behaviors of bubbles in the vicinity of liquid-liquid interface for FC72/Water[10mm/90mm] in the case of $d_{cb} > \lambda_D$ at low heat flux

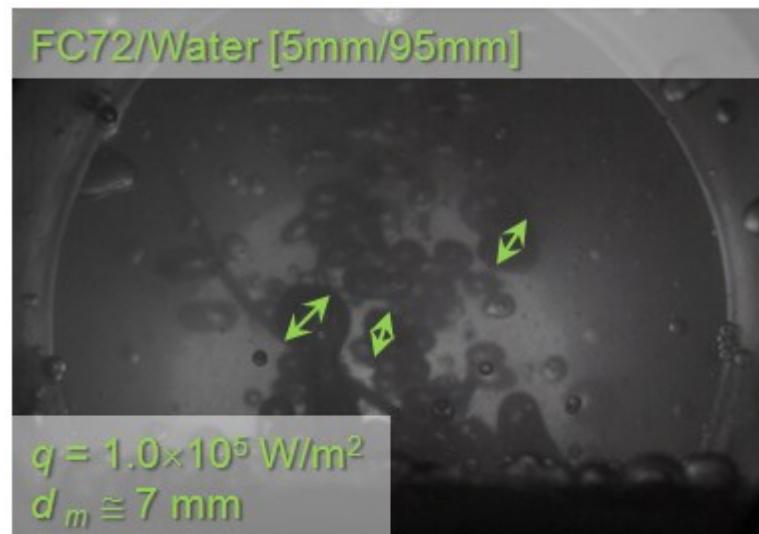


Fig. 5.16 Bubble diameter for FC72/Water[5mm/95mm] at $q = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

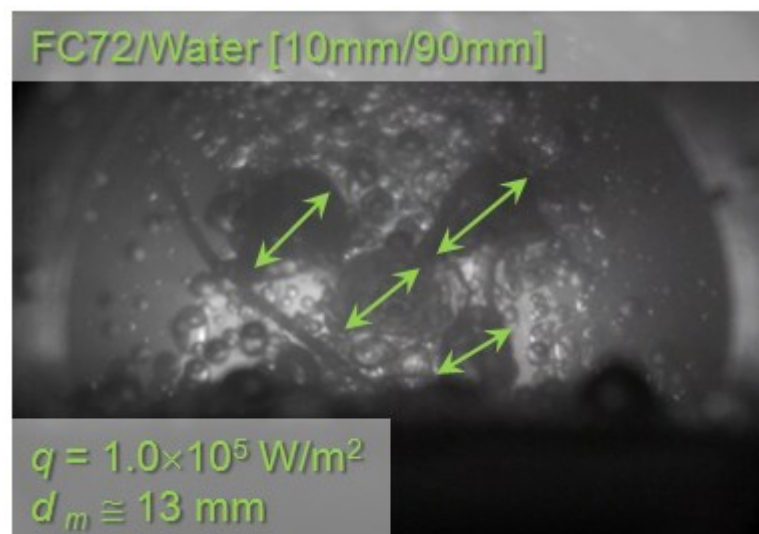


Fig. 5.17 Bubble diameter for FC72/Water[10mm/90mm] at $q = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

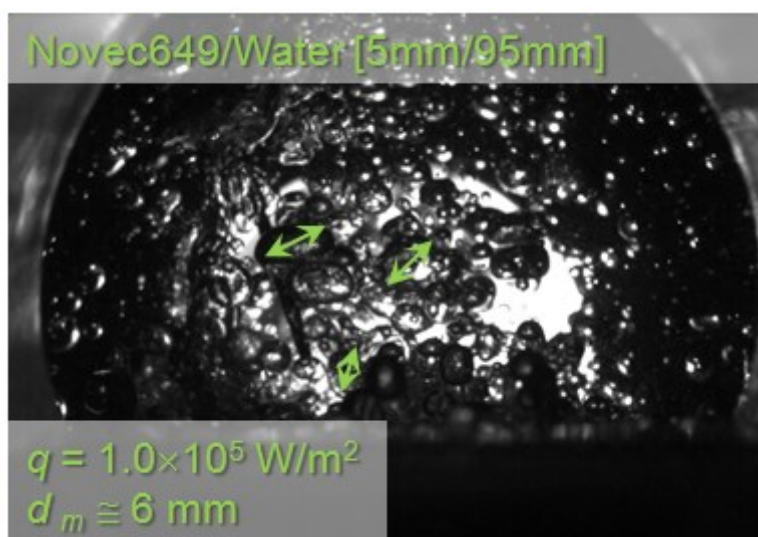


Fig. 5.18 Bubble diameter for Novec649/Water[5mm/95mm] at $q = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

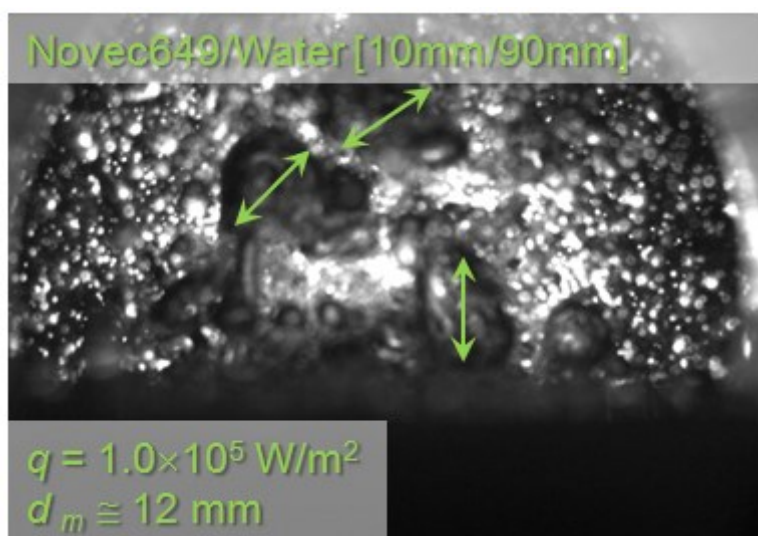


Fig. 5.19 Bubble diameter for Novec649/Water[10mm/90mm] at $q = 1.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

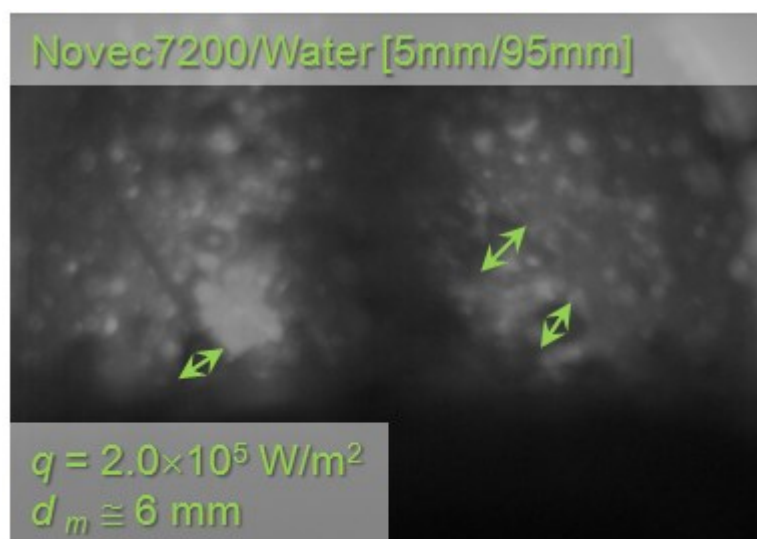


Fig. 5.20 Bubble diameter for Novec7200/Water[5mm/95mm] at $q = 2.0 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

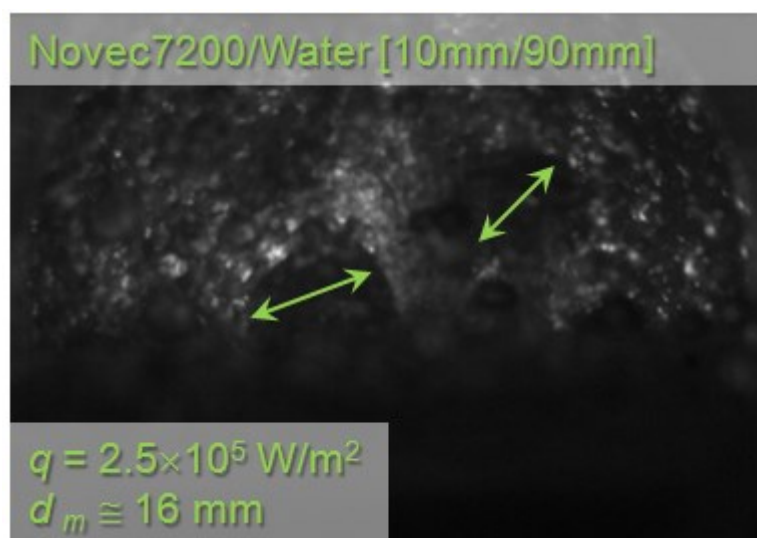


Fig. 5.21 Bubble diameter for Novec7200/Water[10mm/90mm] at $q = 2.5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$

Table 5.4 Key parameters for the type of “Intermediate burnout” when thin layer of more volatile component contacting the surface before heating

Items	Int.B. type 1	Int.B. type 2
Most dangerous wave length λ_D	Large	Small
Less-volatile component surface tension σ_2	Large	Small
Less-volatile component liquid density ρ_2	Small	Large
Amount of more-volatile component entrainment into less-volatile component	Large	Small
Interfacial tension σ_{21}	Small	Large
Liquid density difference $\rho_1 - \rho_2$	Small	Large
More-volatile component liquid viscosity (bubble ascent velocity) μ_{l1}	Small (Large)	Large (Small)
More-volatile component evaporation velocity $U_b = q / (\rho_{g1} h_{fg1})$	Large	Small
More-volatile component vapor density ρ_{g1}	Small	Large
More-volatile component latent heat of vaporization h_{fg1}	Small	Large

5.2 非共溶性混合媒体による沸騰熱伝達特性に関するまとめ

加熱前における高密度低沸点媒体の層厚さが小さい場合の、水平上向き平板による不溶性混合媒体の核沸騰熱伝達特性の傾向を Figure 5.22 に模式的に示した。核沸騰熱伝達特性はインターミディエイトバーンアウト (Int.B.) を境に低沸点媒体支配領域と高沸点媒体支配領域に区分できる。低沸点媒体支配領域では低沸点媒体の核沸騰が熱伝達に支配的である。一般的に低沸点媒体は低い限界熱流束値を持ち、低熱流束においてバーンアウトを起こす。低沸点媒体の層厚さが大きい場合はその限界熱流束値は低沸点媒体単成分とほぼ同程度となる。高沸点媒体の分圧の寄与が小さいためにサブクール度が小さく、これによる限界熱流束値の増大は見込めない。一方、低沸点媒体の層厚さが小さい場合は、Int.B.発生後も高熱流束まで高沸点媒体により熱伝達を続ける。高沸点媒体の熱伝達様式は比較的小さい熱流束では自然対流となり、高熱流束では蒸発した低沸点媒体の気泡や気体スラグの助けにより促進された核沸騰となる。

低沸点媒体支配領域では伝熱面表面温度と平衡バルク液体温度の差を使った沸騰曲線はほぼ低沸点媒体単成分のものと同一になる。これは Novec649/Water の場合を除き、低沸点媒体の層厚さが小さいにも関わらず、上層に存在する高沸点媒体の影響をほとんど受けないためである。一方、高沸点媒体支配領域では、同一の系圧力下における高沸点媒体単成分に比べて平衡バルク液体温度により定義される熱伝達係数は見掛け上劣化した。これは低沸点媒体の高い分圧により高沸点媒体に高いサブクールが付与され、過度の温度差が生じたことが主な原因で、単成分媒体のサブクール沸騰時の熱伝達係数をバルク液体温度で定義すると飽和温度で定義したそれよりも見掛け上低下するのと同じ意味である。熱伝達は低沸点媒体からの気泡発生 of の助けにより実質的には促進される。このことは高沸点媒体支配領域において同一の系圧力下における高沸点媒体単成分の場合に比べて伝熱面表面温度が低下することからもわかる。

不溶性混合媒体の限界熱流束値は加熱前における低沸点媒体の層厚さに大いに影響する。低沸点媒体の層厚さが大きい場合は、限界熱流束値は低沸点媒体単成分の値と同程度となる。これは高沸点媒体の低い分圧により低沸点媒体のサブクール度が小さくなることによるものである。低沸点媒体の層厚さが小さい場合は、限界熱流束値はサブクールされた高沸点媒体への熱伝達により決まり、低沸点媒体の高い分圧による高いサブクールの影響で、著しい限界熱流束値の増大が期待できる。

流体の組み合わせと加熱前的高密度低沸点媒体の層厚さに関する最適な条件において、不溶性混合媒体の沸騰は同一の系圧力下で高沸点媒体単成分に比べて伝熱面表面温度を低下し、限界熱流束値を増大することができる。加えて伝熱面表面に堆積する低沸

点媒体の薄い層により伝熱面表面温度のオーバーシュートを低減することができる。

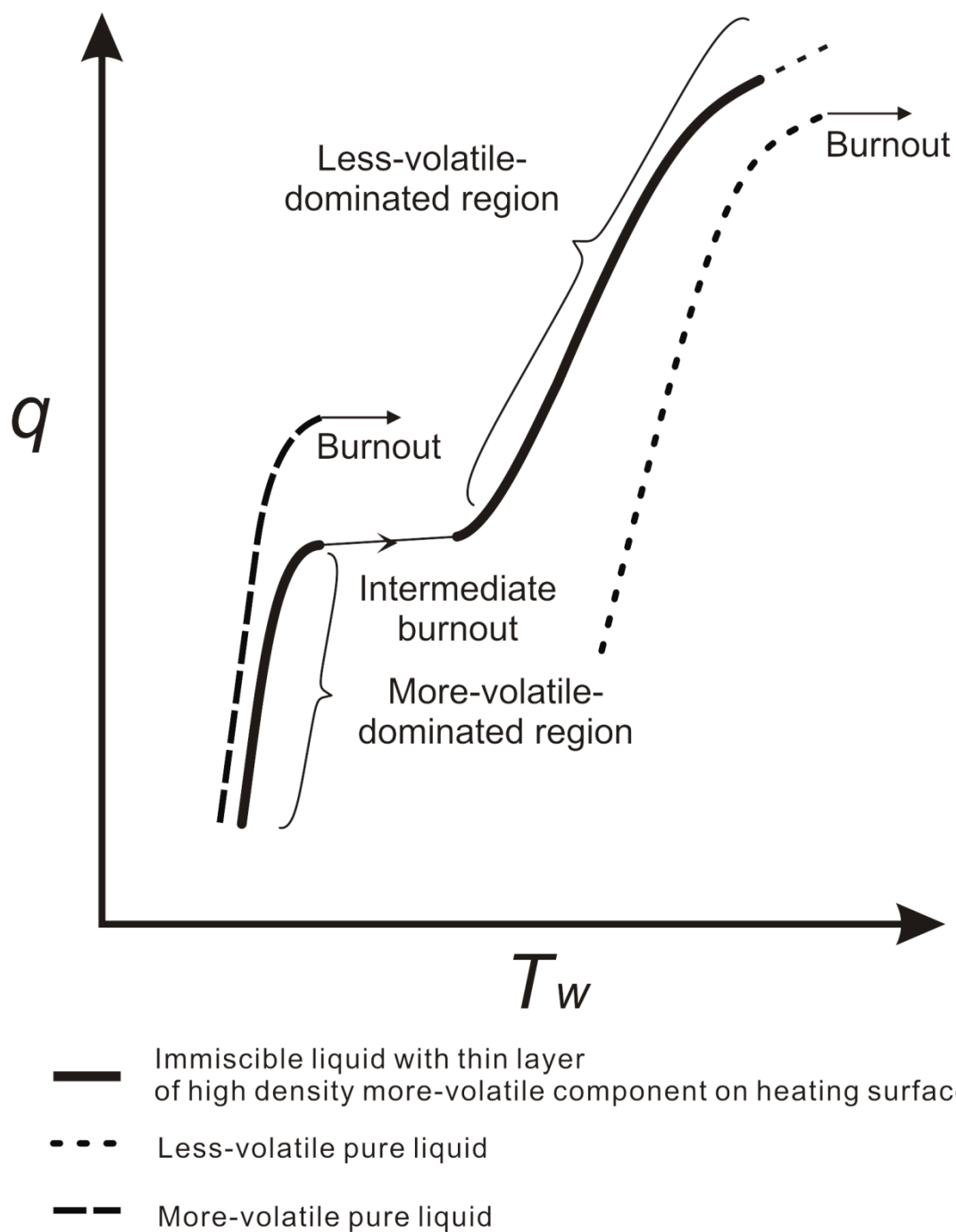


Fig. 5.22 Outline of heat transfer characteristics plotted by heat flux versus surface temperature when thin layer of more-volatile component contacting the surface before heating

5.3 第5章のまとめ

以下に第5章のまとめを示す.

1. 不溶性混合媒体である FC72/Water と Novec649/Water, Novec7200/Water, FC72/n-Propanol, 部分可溶性混合媒体である FC72/i-Propanol について沸騰曲線と熱伝達係数, 伝熱面表面温度, 限界熱流束に関する実験結果を示した.
2. 加熱前における高密度低沸点媒体の層厚さが小さい場合の非共溶性混合媒体の核沸騰熱伝達特性はインターミディエイトバーンアウトを境に低沸点媒体支配領域と高沸点媒体支配領域に区分できる.
3. 低沸点媒体支配領域において非共溶性混合媒体の沸騰曲線は低沸点媒体単成分のものと一致する. また高沸点媒体支配領域における熱伝達係数は平衡バルク液体温度が高サブクール状態にあるため, バルク液体温度を用いた熱伝達係数の定義上, 見掛けの伝熱劣化の傾向を示す. しかし実際には低沸点媒体の気泡や気体スラグの混入による高沸点媒体の対流や沸騰の促進により, 高沸点媒体単成分に比べて伝熱面表面温度は低下する.
4. 不溶性混合媒体では低沸点媒体の高い分圧により高沸点媒体に高サブクール度が付与されるため, 著しい限界熱流束値の増大が期待できる. 一方, 部分可溶性混合媒体では伝熱面表面温度の上昇により溶解度が高くなることで熱物性が変化し, さらにサブクール度も低下するために限界熱流束の増大は期待できない.
5. インターミディエイトバーンアウトの発生時には, 一定温度範囲で急激な伝熱面表面温度の増加を伴う場合と, 熱流束の増大とともに各熱流束値で伝熱面表面温度が平衡状態を保ちながら徐々に増加する場合が存在する. これらの違いは低沸点媒体の層厚さ H_l と Taylor の最危険波長 λ_D の大小関係に起因する. また低沸点媒体と高沸点媒体の混合効果にも影響される.

第6章 結論

本論文は高効率の冷却システムへの沸騰熱伝達の適用を目的として、非共溶性混合媒体のプール核沸騰の実験を行い、その結果を詳細に考察したものである。冷却システムへの適用に際して求められる内容のうち重要なものは以下の通りである。

- (1) 限界熱流束の増大
 - (2) 伝熱面表面温度の低下
 - (3) 沸騰開始時における伝熱面表面温度のオーバーシュートの低減
 - (4) 大気圧以上での作動
-
1. 非共溶性混合媒体では気液相平衡状態において、液体温度をそれぞれの飽和温度より低い平衡温度に設定でき両媒体をともにサブクール状態にすることができる。また水平上向き伝熱面を対象としたときの沸騰系として、密度と飽和温度の大小および伝熱面上の加熱前の層厚さの違いによる組み合わせは4種類考えられるが、(c)の場合において上記(1)~(4)をすべて満たす熱伝達特性が得られると結論される。
 - (a) 加熱前の層厚さが厚い高密度低沸点媒体と層厚さが厚い低密度高沸点媒体
 - (b) 加熱前の層厚さが厚い高密度高沸点媒体と層厚さが厚い低密度低沸点媒体
 - (c) 加熱前の層厚さが薄い高密度低沸点媒体と層厚さが厚い低密度高沸点媒体
 - (d) 加熱前の層厚さが薄い高密度高沸点媒体と層厚さが厚い低密度低沸点媒体
 2. 溶解度に注目すると非共溶性混合媒体は作動温度内で互いに溶解しない不溶性混合媒体と作動温度内に互いに部分的に溶解する部分可溶性混合媒体に分類でき、不溶性混合媒体において非共溶性混合媒体の特徴が得られる。不溶性混合媒体では FC72/Water, Novec649/Water, Novec7200/Water と FC72/n-Propanol を、部分可溶性混合媒体では FC72/i-Propanol について実験を行った。結果、(c)の場合の不溶性混合媒体では優れた沸騰熱伝達特性を得ることができた。
 3. 不溶性混合媒体では低密度高沸点媒体単成分に比べて限界熱流束が増大する。これは高密度低沸点媒体の高い分圧により低密度高沸点媒体に対して高いサブクール度が付与されることによる。
 4. 高熱流束域において低密度高沸点媒体単成分に比べて伝熱面表面温度が低下する。これは高密度低沸点媒体の気泡や気体スラグによる低密度高沸点媒体の対流や沸

騰が促進されたことによる。

5. 高密度低沸点媒体の熱伝達が支配的な領域から低密度高沸点媒体の熱伝達が支配的な領域へ移行する現象（インターミディエイトバーンアウトと命名）が確認された。これは、熱流束に対し急激な伝熱面表面温度の上昇が伴う Type 1 と緩やかな伝熱面表面温度の上昇が伴う Type 2 に分類される。これらの違いは低沸点媒体の層厚さ H_l と Taylor の最危険波長 λ_d の大小関係に起因する。また低沸点媒体と高沸点媒体の混合効果にも影響される。
6. 非共溶性混合媒体の沸騰では、不凝縮ガスの混入による凝縮性能の低下を防ぐため、大気圧以上での作動が容易である。これは系圧力を両成分媒体の分圧の和として設定可能であるため、バルク液体の平衡温度が系圧力に対して低く設定できるためである。
7. (c)の場合に対しては、伝熱面表面温度のオーバーシュートの低減により急激な負荷変動にも対応することが期待される。これは沸騰開始にサブクール度の小さい高密度低沸点媒体を使用できるためである。これは例えば自動車用インバータの冷却に有用である。

謝辞

本研究の御指導，御鞭撻を賜りました九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門 大田治彦教授に深謝の意を表します。

本論文を御査読いただき，多方面からの貴重な御意見を賜りました九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門 麻生茂教授，九州大学大学院工学研究院機械工学部門 北川敏明教授に心から御礼を申し上げます。

実験の準備からそのご指導，また快適な研究室生活を提供していただいた九州大学大学院工学研究院航空宇宙工学部門 新本康久助教に深く感謝致します。

出張等の事務手続きのお手伝いや，時には心の支えとなっていた事務補佐員の松尾百合さんに深く感謝致します。

実験方法の指導をしていただいた小林寛幸氏，また実験の際に暖かくサポートしてくれた大谷伸生氏と福山雄太氏，川久保彰人氏に深く感謝致します。また実験結果の評価を手伝ってくれた喜多祥太氏と羽野宏紀氏に感謝致します。

より良い研究室生活を提供していただいた宇宙利用工学研究室の皆様にはこの場を借りてお礼申し上げます。

最後にこれまでの長い大学生活をずっと陰で支えていただいた両親に心から感謝申し上げます。

参考文献

1. Abarzhi, S. I., Gorobets, A., and Sreenivasan, K. R., Rayleigh–Taylor turbulent mixing of immiscible, miscible and stratified fluids, *Physics of Fluids* 17, 081705, 2005.
2. Abe, Y., Thermal Management with Phase Change of Self-wetting Fluids, *Proc. IMECE2005*, 2005.
3. Berenson, P. J., Film Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface, *Trans. ASME Heat Transfer*, 83, 351-358, 1961.
4. Bonilla, C. F. and Eisenberg, A. A., Heat Transmission to Boiling Binary Mixtures, *Industrial and Engineering Chemistry*, vol.40, pp. 1113-1122, 1948.
5. Bragg, J. R. and Westwater, J.W., Film Boiling of Immiscible Liquid Mixture on a Horizontal Plate, *Heat Transfer 1970, Prof. Fourth International Heat Transfer Conference*, vol.6, B7.1, 1970.
6. Bruce, E. Poling, John, M. Prausnitz and John, P. O'Connell, *The properties of gases and liquids*. New York, McGraw-Hill, 2001.
7. Bulanov, N. V., Skripov, V. P., Gasanov, B. M. and Baidakov, V. G., Boiling of Emulsions with A Low-boiling Dispersed Phase, *Heat Transfer Res.*, vol. 27(5), pp.312-315, 1996.
8. Bulanov, N. V. and Gasanov, B. M., Peculiarities of Boiling of Emulsions with A Low-boiling Disperse Phase, *High Temp.*, vol. 44(2), pp.267-282, 2006.
9. Bulanov, N. V., Gasanov, B. M. and Turchaninova, E. A., Results of Experimental Investigation of Heat Transfer with Emulsions with Low-boiling Disperse Phase, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 51, pp.1628-1632, 2008.
10. Charles, M. E. and Redberger, P. J., The Reduction of Pressure Gradients in Oil Pipelines by the Addition of Water: Numerical Analysis of Stratified Flow, *C. J. Ch. E.*, vol.40(2), pp.70-75, 1962.
11. Clark, A. F. and Shapiro, A., U.S. Patent 2,533,878. 1949-5-31.
12. Dietrich, N., Poncin, S., Pheulpin, S. and Li, H. Z., Passage of a Bubble through a Liquid–liquid Interface, *AIChE Journal*, vol.54(3), pp.594-600, 2008.
13. Elkassabgi, Y. and Lienhard, J. H., Influences of Subcooling on Burnout of Horizontal Cylindrical Heaters, *J. Heat Transfer*, vol.110(2), pp.479-486, 1988.
14. Everage, A. E., Theory of Stratified Bicomponent Flow of Polymer Melts. I. Equilibrium

- Newtonian Tube Flow, *Trans. Soc. Rheol.*, vol.17, pp.629-646, 1973.
15. Filipczak, G., Troniewski, L. and Witczak S., Pool Boiling of Liquid-Liquid Multiphase Systems, In *Evaporation, Condensation and Heat transfer*, A. Ahsan, ed., Intech, 2012, available at <http://www.intechopen.com/books/evaporation-condensation-and-heat-transfer/pool-boiling-of-liquid-liquid-multiphase-systems>.
 16. Forster, H. K. and Zuber, N., Dynamics of Vapor Bubbles and Boiling Heat Transfer, *A.I.Ch.E. J.*, Vol. 1, No. 4, pp. 531-535, 1955.
 17. Fritz, W. and Ende, W., Maximum Volume of Vapor Bubbles, *Phys. Z.* 36, pp.379-384, 1936.
 18. Gorenflo, D., Gremer, F., Danger, E. and Luke, A, Pool Boiling Heat Transfer to Binary Mixtures with Miscibility Gap: Experimental Results for a Horizontal Copper Tube with 4.35 mm O.D., *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 25(5), pp.243-254, 2001.
 19. Greene, G. A., Chen, J. C. and Conlin, M. T., Onset of Entrainment between Immiscible Liquid Layers due to Rising Gas Bubbles, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 31(6), pp.1309-1317, 1988.
 20. Greene, G. A., Chen, J. C. and Conlin, M. T., Bubble Induced Entrainment between Stratified Liquid Layers, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 34(1), pp.149-157, 1991.
 21. Haramura, Y. and Katto, Y., A New Hydrodynamic Model of Critical Heat Flux, Applicable Widely to both Pool and Forced Convection Boiling on Submerged Bodies in Saturated Liquids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 26, No. 3, pp. 389-399, 1983.
 22. Hasson, D., Mann, U. and Nir, A., Annular flow of two immiscible liquids I. Mechanisms, *C. J. Ch. E.*, vol.48, pp.514-520, 1970.
 23. Hasson, D. and Nir, A., Annular flow of two immiscible liquids II. Analysis of Core Liquid Ascent, *C. J. Ch. E.*, vol.48, pp.521-526, 1970.
 24. Inoue, T., Kawae, N. and Monde, M., Effect of subcooling on critical heat flux during pool boiling, *Heat and Mass Transfer*, vol.33, pp.481-488, 1998.
 25. Ivey, H. J. and Morris, D. J., Critical Heat Flux and Subcooled Pool Boiling in Water at Atmospheric Pressure, *Proc. Third International Heat Transfer Conference*, vol.3, pp.129-142, 1966.
 26. Jacob, M., Heat Transfer, *Wiley, New York*, Vol.1, 1949.
 27. Kutateladze, S. S., A Hydrodynamic Model of the Critical Heat Transfer in Boiling Liquids

- with Free Convection, *Zh. Tekh. Fiz.*, Vol. 20, No. 11, pp. 1389-1392, 1950.
28. Kutateladze, S. S., *Heat transfer in condensation and boiling*. Moscow, State Scientific and Technical Publishers of Literature on Machinery, 1952.
 29. Minagawa, N. and White, J. L., Co-Extrusion of Unfilled and TiO₂-Filled Polyethylene: Influence of Viscosity and Die Cross-Section on Interface Shape, *Polymer Engng. & Sci.*, vol.15, pp.825-830, 1975.
 30. Mori, Y. H., Komotori, K., Higeta, K. and Inada, J., Rising Behavior of Air Bubbles in Superposed Liquid Layers, *C. J. Ch. E.*, vol.55, pp.9-12, 1977.
 31. Mori, Y. H., Configurations of Gas-liquid Two-phase Bubbles in Immiscible Liquid Media, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 4(4), pp.383-396, 1978.
 32. Mori, Y. H., Inui, E. and Komotori, K., Pool Boiling Heat Transfer to Emulsions, *J. Heat Transfer*, vol. 100(4), pp.613-617, 1978.
 33. Mori, Y. H., Classification of Configurations of Two-phase Vapor/Liquid Bubbles in an Immiscible Liquid in Relation to Direct-contact Evaporation and Condensation Processes, *Int. J. Multiphase Flow*, vol. 11(4), pp.571-576, 1985.
 34. Nishikawa, K. Effect of Surface Roughness on Boiling Heat Transfer, *Trans. JSME*, Vol. 20, No 100, pp.808-815, 1954.
 35. Nishikawa, K. and Yamagata, K., Correlation of Nucleate Boiling Heat Transfer Based on Bubble Population-density, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 20, pp. 233-245, 1977.
 36. Nukiyama, S., The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure, *J. Jap. Soc. Mech. Eng.*, vol.37, pp.367-374, 1934
 37. Prigogine, I. and Dfay, R., *Chemical thermodynamics*, Longmans Green and Co., 1954.
 38. Roesle, M. L. and Kulacki, F. A., Boiling of Dilute Emulsions-Toward a New Modeling Framework, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 49(11), pp.5188-5196, 2010.
 39. Roesle, M. L. and Kulacki, F. A., An Experimental Study of Boiling in Dilute Emulsions, Part A: Heat Transfer, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 55(7-8), pp.2160-2165, 2012.
 40. Roesle, M. L. and Kulacki, F. A., An Experimental Study of Boiling in Dilute Emulsions, Part B: Visualization, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 55(7-8), pp.2166-2172, 2012.
 41. Rohsenow, W. M., A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling of Liquids, *Trans. ASME*, Vol. 74, pp. 969-976, 1952.

42. Rohsenow, W. M. and Griffith, P., Correlation of Maximum Heat Flux Data for Boiling of Saturated Liquids, *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, Vol. 52, No. 18, pp. 42-49, 1956.
43. Russell, T. W. F. and Charles, M. E., The Effect of the Less Viscous Liquid in the Laminar Flow of Two Immiscible Liquid, *C. J. Ch. E.*, vol.37(1), pp.18-24, 1959.
44. Russell, T. W. F., Hodgson, G. W. and Govier, G. W., Horizontal Pipeline Flow of Mixtures of Oil and Water, *C. J. Ch. E.*, vol.37(1), pp.9-17, 1959.
45. Sakai, T., Yoshii, S., Kajimoto, K., Kobayashi, H., Shinmoto, Y. and Ohta, H., Heat Transfer Enhancement Observed in Nucleate Boiling of Alcohol Aqueous Solutions at Very Low Concentration, *Proc. 14th International Heat Transfer Conference*, IHTC14-22737, 2010.
46. Shinmoto, Y., Miura, S., Suzuki, K., Abe, Y. and Ohta, H., Development of Advanced High Heat Flux Cooling System for Power Electronics, *Proc. InterPACK' 09*, IPACK2009-89082, DVD-ROM 10 pages, 2009.
47. Southern, J. H. and Ballman, R. L., Stratified Bicomponent Flow of Polymer Melts in a Tube, *Appl. Polymer Symp.*, vol.20, pp.175-189, 1973.
48. Southern, J. H. and Ballman, R. L., Additional Observations on Stratified Bicomponent Flow of Polymer Melts in a Tube, *Appl. Polymer Symp.*, vol.13, pp.863-869, 1975.
49. Stephan, K. and Körner, M., Calculation of heat transfer in evaporating binary liquid mixtures, *Chem. Ing. Tech.*, vol.41, pp.409-417, 1969.
50. Stephan, K. and Abdelsalam, M., Heat Transfer Correlations for Natural-convection Boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 23, pp. 73-87, 1980.
51. Sump, G. D. and Westwater, J.W., Boiling Heat Transfer from a Tube to Immiscible Liquid-Liquid Mixtures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol.14, pp.767-779, 1971.
52. Suzuki, K., Kokubu, T., Nakano, M., Kawamura, H., Ueno, I., Shida, H. and Ogawa, O., Enhancement of heat transfer in subcooled flow boiling with microbubble emission, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 29, pp.827-832, 2005.
53. Thomas D. Hamill and Kenneth J. Baumeister, Effect of Subcooling and Radiation on Film-Boiling Heat Transfer from a Flat Plate, *NASA Technical Note D-3925*.
54. Tipman E. and Hodgson G. W., Sedimentation in Emulsions of Water in Petroleum, *J. Pet. Tech.*, vol.8(9), pp.91-93, 1956.
55. Uemura, T., Ueda, Y. and Iguchi, M., Ripples on a rising bubble through an immiscible

- two-liquid interface generate numerous micro droplets, *EPL (Europhysics Letters)*, vol.92(3), 34004, 2010.
56. Van P. Carey, *Liquid-vapor phase-change phenomena: An introduction to the thermophysics of vaporization and condensation processes in heat transfer equipment*. Washington, Hemisphere Publishing Corporation, 1992.
57. Van Stralen, S.J.D., Heat transfer to boiling binary liquid mixtures at Atmospheric and Subatmospheric Pressures, *Chem. Engng. Sci.*, vol.5, pp. 290-296, 1956.
58. Van Wijk, W. R., Vos, A. S. and Van Stralen, S. J. D., Heat transfer to boiling binary liquid mixtures, *Chem. Engng. Sci.*, vol.5, pp. 68-80, 1956.
59. Vochten, R. and Petre, G., Study of the heat of reversible adsorption at the air-solution interface, *J. Colloid Interface Sci.*, vol.42, pp.320-327 2005.
60. White, J. L., Ufford, R. C., Dharod, K. R. and Price, R. L., Experimental and Theoretical Study of the Extrusion of Two-Phase Molten Polymer Systems, *Appl. Polymer Sci.*, vol.16, pp.1313-1330, 1972.
61. White, J. L. and Lee, B. L., Theory of Interface Distortion in Stratified Two-Phase Flow, *Trans. Soc. Rheol.*, vol.19, pp.457-479, 1975.
62. Williams, M. C., Migration of Two Liquid Phases in Capillary Extrusion: An Energy Interpretation, *AIChE J.*, vol.21, pp.1204-1207, 1975.
63. Yu, H. S. and Sparrow, E. M., Experiments on Two-Component Stratified Flow in a Horizontal Duct, *J. Heat Transfer*, vol.91, pp.51-58, 1969.
64. Zuber, N., Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer, *USAEC Report*, AECU-4439, 1959.
65. Zuber, N., Stability of boiling heat transfer, *ASME J. Heat Transfer* 80, 711-720, 1958.
66. 中西浩一郎 (1982) 『溶解度の理論と計算』 講談社サイエンティフィック
67. 日本機械学会 (2000) 『技術資料 流体の熱物性値集』 丸善
68. 土方邦夫, 森康夫, 伊藤弘基, 「不溶解性 2 成分混合媒体の管内沸騰に関する実験的研究」 日本機械学会論文集 B 編, 51-464, 1985.
69. 藤井哲, 伝熱工学の進展, 3 (1974), 1.
70. プリゴジヌ, D. 妹尾学訳 (2002) 『化学熱力学 1』 みすず書房
71. プリゴジヌ, D. 妹尾学訳 (2002) 『化学熱力学 2』 みすず書房