核沸騰過程におけるマイクロ液膜構造に基づく伝熱特性の検討*

中村 考作^{*1}, 宇高 義郎^{*2}Heat Transfer Characteristics Based on Micro-Layer Configuration
in Nucleate BoilingKosaku NAKAMURA and Yoshio UTAKE^{*3}^{*3} Division of Systems Research, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

The objective of the study is to elucidate the contribution of micro-layer on heat transfer in nucleate pool boiling of isolated bubble region on the basis of the measurement of configuration of micro-layer. The distribution of micro-layer thickness formed under a growing bubble was measured by laser extinction method using specially devised system with a thin optical fiber in thin tube and gas blowing in the previous report. In this report, the dominant factors determining the characteristics of micro-layer such as micro-layer thickness distribution, duration of micro-layer existence, size of micro-layer area on the heat transfer surface and so-forth were expressed by nondimensional form based on the similarity of bubble growth rate. Finally, the contribution of evaporation from micro-layer in nucleate boiling of isolated bubble region was shown by using the relations among dominant factors.

Key Words: Phase Change, Pool Boiling, Micro-Layer, Laser Extinction Method, Bubble, Heat Transfer

1. はじめに

核沸騰現象は、他の熱伝達現象と比較して高い熱伝達率を持ち、気液両相を利用できることなどの特徴をもつため、工業的に多く利用されている。しかし核沸騰現象は多くの研究がなされているにも拘わらず、気泡の成長や運動、気液界面での相変化現象など多くの物理化学的な要因に影響を受けるため、その伝熱機構や特性は未だ定量的に解明されていない事項が多く残されている。

核沸騰現象の主要な伝熱機構として、これまで気泡攪乱機構、顕熱輸送機構、薄液膜蒸発機構などが提案されており、それらは気泡の挙動・上昇による過熱液層内の対流促進による効果と、マイクロ液膜の蒸発による効果に大別されるが、どちらがどのように影響をもつか定量的に明らかにされていない。薄液膜蒸発機構は潜熱輸送機構とも呼ばれ、伝熱面表面と沸騰気泡との間に形成されるマイクロ液膜が蒸発することによって大量の熱が輸送されると考えられている。

マイクロ液膜厚さに関しては、従来から Cooper & Lloid⁽¹⁾の理論式が多くの研究において用いられてきているが、その適否についての検討は十分でなかった。

前報⁽²⁾では、図1に示したように、コア径 94 μm の極細光ファイバを金属細管に通したレーザー光射出装置を沸騰気泡上部のバルク液中に設置した。細管先端からレーザーに対して透明な窒素気泡を放出、これを沸騰気泡と衝突させ、光ファイバからマイクロ液膜までの間の液体を除くための構造を考案した。沸騰系とレーザー透過割合測定系から構成される実験装置を用いて、プール核沸騰気泡下部に存在するマイクロ液膜の厚さを、レーザー消光法を用いて測定した。ここで、レーザー光がディテクタまで安定して透過可能なように、伝熱面には厚さ 2 mm の石英ガラス板を、加熱には窒素ガス噴流を用いた。また、発泡位置を安定させるように伝熱面には微細なキャビティを設けた。その結果、初

Fig.1 Measuring method of micro-layer thickness

* 原稿受付 2008年6月12日.

^{*1} 正員, 日立アプライアンス(株) (☎ 329-4493 栃木県下都賀郡大平町富田 800).^{*2} 正員, 横浜国立大学大学院工学研究院 (☎ 240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5).

E-mail: utaka@ynu.ac.jp

期マイクロ液膜は1~8 μm の厚さを有し、発泡点から離れるにしたがって厚くなる傾向を示した。

本研究では核沸騰過程において、前報⁽²⁾で示したマイクロ液膜厚さ構造と核沸騰気泡の生成および成長の過程を同時に撮影した画像からマイクロ液膜の特性を導き出し、それらを基にマイクロ液膜からの蒸発の核沸騰熱伝達特性への影響について検討することを目的とする。

記号

A	: 消光係数 [m^{-1}]
h	: 伝熱面からの光ファイバ先端高さ[m]
H_{Bd}	: 離脱点における沸騰気泡高さ [m]
I	: レーザー光のマイクロ液膜透過強度 [-]
I_0	: レーザー光の基準強度 [-]
k	: 熱伝導率 [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
L	: 蒸発潜熱 [J/kg]
q	: 熱流束 [W/m^2]
Q_{ML}	: ミクロ液膜を通して気泡へ伝わる熱量 [J]
r	: 発泡点からの距離 [m]
r_L	: 発泡点と測定点間の距離 [m]
R_{M}	: ミクロ液膜半径 [m]
R_{Mmax}	: 最大マイクロ液膜半径 [m]
R_{Bmax}	: 最大沸騰気泡半径 [m]
R_{Bd}	: 離脱点における沸騰気泡半径 [m]
t	: 沸騰気泡発生からの経過時間 [s]
t_{Mmax}	: 最大マイクロ液膜半径に達する時間 [s]
t_{Md}	: 気泡発生から気泡離脱開始までの時間 [s]
t_{Bd}	: 気泡発生から気泡離脱完了までの時間 [s]
V_b	: 蒸気泡体積 [m^3]
V_s	: ミクロ液膜からの蒸気生成体積 [m^3]
V_{Mmax}	: R_{Mmax} までの平均マイクロ液膜先端速度 [m/s]
δ	: ミクロ液膜厚さ [m]
δ_0	: 初期マイクロ液膜厚さ [m]
δ_{max}	: R_{Mmax} における初期マイクロ液膜厚さ [m]
Δt_{Mc}	: ミクロ液膜期間 [s]
ΔT	: 伝熱面過熱度 [K]
ρ_v	: 蒸気密度 [kg/m^3]
ρ_l	: 液体密度 [kg/m^3]

2. 前報の結果

図2は前報⁽²⁾の主要な結果である、発泡点からの位置に対する初期マイクロ液膜厚さ δ_0 の変化を示している。測定範囲では δ_0 の熱流束への依存性はみられず、発泡点からの距離が増加するにしたがって直線的に増加する傾向を示し、数ミクロン前後の厚さの分布をもっていることが明らかになった。発泡位置からの距離

Fig.2 Variation of initial micro-layer thickness against distance from incipient bubble site

$$\delta_0 = 3.15 \times 10^{-3} \times r_L \quad (1)$$

とマイクロ液膜厚さの関係は式(1)のように表された。また、Cooper & Lloidが導いたマイクロ液膜厚さの理論式と比較を行った結果、前報で測定したマイクロ液膜厚さはCooper & Lloidの理論式より大幅に小さい値を示し、気泡成長速度に対する傾向も異なる結果が得られた。

3. プール核沸騰におけるマイクロ液膜に関する諸特性

はじめに主要な支配要因に関する定義を行うため、図3に沸騰気泡が発生してから沸騰気泡の成長形態と経過時間を模式的に示した。気泡が発泡点から生成し、成長とともに伝熱面との間にマイクロ液膜が形成され、その伝熱面上を半径が増大してゆく。その後、浮力等の影響により気泡は伝熱面より離脱する。離脱過程において、形成されたマイクロ液膜半径は減少し、伝熱面上バブル液で覆われマイクロ液膜は消滅する。気泡成長速度等の条件は異なっても、図3に示されるような気泡が発泡してから離脱するまでのマイクロ液膜半径 R_{M} の経時変化の傾向は類似していた。ここで、最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} が現れるまでの時間を t_{Mmax} 、気泡の離脱開始時の水平方向の気泡半径を R_{Bmax} 、その時間

Fig.3 Definition of times relating to size of micro-layer and bubble growth

を t_{Md} とする。また、気泡離脱完了時の水平方向気泡半径を R_{Bd} 、気泡高さを H_{Bd} 、時間を t_{Bd} とし、さらに半径 r におけるマイクロ液膜の存在時間をマイクロ液膜期間 Δt_{Mc} と定義する。ここで各半径および時間については、液膜厚さ測定と同期して撮影した高速度撮影画像から値を読み取った。

図4に伝熱面上に拡大するマイクロ液膜領域の寸法を表すマイクロ液膜半径 R_M の経時変化を、測定データのうちの多くの例についてまとめて示した。マイクロ液膜半径 R_M が大きいくほど存在時間は長くなるが、熱流束への依存性はみられないことが分かる。その寸法は概ね10~30 ms程度の時間で急激に拡大し、その直後に最大値を迎える。その後少し遅れて気泡が離脱に向かうとともに減少し始め、気泡の離脱とともに消滅する。最大値を経てからは、成長過程に比較してマイクロ液膜半径は比較的ゆるやかに減少することが分かる。

図5は最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} に対する気泡離脱時間 t_{Bd} の変化を示している。熱流束に関係なく、 R_{Mmax} が増

加するにしたがって t_{Bd} も増加することが分かる。最大マイクロ液膜半径と気泡離脱時間の関係は式(2)で表される。

$$t_{Bd} = 4.94 \times R_{Mmax} + 6.92 \times 10^{-3} \quad (2)$$

図6および図7は、それぞれ最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} と気泡離脱半径 R_{Bd} の関係、および気泡離脱半径 R_{Bd} と気泡離脱高さ H_{Bd} の関係を示している。両グラフとも直線的变化を示しており、 R_{Mmax} と R_{Bd} 、および R_{Mmax} と H_{Bd} はそれぞれほぼ比例関係と見なすことができる。以上から、 R_{Mmax} のときの気泡寸法は式(3)および式(4)にて表される。

$$R_{Bd} = 1.33 \times R_{Mmax} \quad (3)$$

$$H_{Bd} = 1.782 \times R_{Mmax} + 9.53 \times 10^{-4} \quad (4)$$

また、最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} に対する R_{Mmax} のときの初期マイクロ液膜厚さの値 δ_{max} との関係には、それらを式(1)にあてはめることにより、式(5)のように表される。

Fig.4 Variation of radius of micro-layer on heat transfer surface

Fig.6 Variation of radius at bubble departure against maximum micro-layer radius

Fig.5 Variation of bubble departure time against maximum micro-layer radius

Fig.7 Variation of height at bubble departure against radius at bubble departure

$$\delta_{\max} = 3.15 \times 10^{-3} \times R_{M\max} \quad (5)$$

図8に位置 r_L に対するマイクロ液膜期間 Δt_{Me} の変化を示す。マイクロ液膜期間 Δt_{Me} は位置 r_L が増加するにしたがって減少する傾向を示した。しかし、同じ位置においてもマイクロ液膜期間の値は大きく異なり、図5~7のような良好な関係を現していないことが分かる。

4. プール核沸騰におけるマイクロ液膜特性の整理

前掲の図4に示したように、気泡発泡から離脱までのマイクロ液膜半径 R_M の経時変化は気泡の離脱半径には依らず、定性的な傾向が類似していることが分かった。したがって、気泡成長に係わる物理要因は、マイクロ液膜半径と気泡成長時間を規格化することにより系統的な傾向を得られる可能性が考えられる。

そのような視点から、まず図4で示した気泡発生から離脱までのマイクロ液膜半径 R_M の経時変化を、最大マイクロ液膜半径 $R_{M\max}$ と気泡離脱時間 t_{Bd} によって無次元化した結果を図9に示した。なお、図中の線の重なりにより条件との対応がわかりにくいのが、等しい条件の図4により区別される。無次元化することにより、成長曲線はほぼ一致し、

Fig.8 Variation of duration of micro-layer against position

Fig.9 Variability of dimensionless radius of micro-layer over dimensionless time

マイクロ液膜は相対的に成長することが確認される。したがって、上述のように、マイクロ液膜成長に関する諸要因については、このような無次元化を利用することによってより良好な整理につながると考えられる。

図8で示した局所位置とマイクロ液膜期間の関係を、それぞれ最大マイクロ液膜半径 $R_{M\max}$ と気泡離脱時間 t_{Bd} により無次元化して表した結果を図10に示した。このような無次元化により、図8の結果と比べてまとまりの向上が確認される。無次元位置と無次元存在時間の関係は式(6)で表される。

$$\frac{\Delta t_{Me}}{t_{Bd}} = -0.674 \times \frac{r_L}{R_{M\max}} + 0.946 \quad (6)$$

図2で示した、初期マイクロ液膜厚さ δ_0 と位置 r_L の関係についても同様の整理を行った。図11の座標は、 $R_{M\max}$ における初期マイクロ液膜厚さ δ_0 の最大値 $\delta_{\max}$ および r_L を $R_{M\max}$ により規格化したものである。

Fig.10 Variation of dimensionless duration of micro-layer against dimensionless position

Fig.11 Relation between dimensionless micro-layer thickness and dimensionless position

R_{Mmax} に達するまでのマイクロ液膜半径の平均成長速度 V_{Mmax} と熱流束 q をパラメータとして示している。本測定範囲ではそれらのパラメータに対する依存性は見られず、無次元マイクロ液膜厚さは式(7)のように無次元位置に対して一通りに決まることが分かる。なお、この関係式は式(1)および(5)から導かれる関係と一致する。

$$\frac{\delta_0}{\delta_{max}} = \frac{r_L}{R_{Mmax}} \quad (7)$$

5. ミクロ液膜蒸発に関する検討

式(2), (5)および式(6), (7)に最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} を与えることにより、 t_{Bd} , δ_{max} が決まり、それらから伝熱面上の初期マイクロ液膜厚さ δ_0 の分布およびマイクロ液膜存在時間 Δt_{Mc} が決定される。

ここでは、以下の条件を与えることにより、マイクロ液膜が伝熱面から沸騰気泡へ伝える熱量および生成蒸気量を計算する。

- 1) 初期マイクロ液膜の特性・構造は、熱流束によらず一定である。
- 2) 液膜が非常に薄く、存在時間が短いことから、蒸発期間中に液膜内の液体移動はなく、マイクロ液膜は伝熱面から沸騰気泡へ熱伝導のみで蒸発する。
- 3) ミクロ液膜のドライアウト領域では、その熱流束をゼロとおく。
- 4) 沸騰領域は核沸騰の孤立気泡域とし、他の気泡からの干渉はない。
- 5) 離脱気泡形状を回転楕円体とみなし、式(3), (4)により蒸気泡体積を求める。

マイクロ液膜は、過熱度 ΔT を駆動力としてマイクロ液膜を通して熱伝導により蒸発し、初期マイクロ液膜厚さ δ_0 から時間と共にその厚さを減少させていく。それらの関係は式(8)および(9)によって定められる。

$$\delta(t) = \delta_0 - \frac{q}{\rho_l L} t \quad (8)$$

$$q = k \frac{\Delta T}{\delta(t)} \quad (9)$$

なお、上記1)は図11の結果を表しており、また4)の条件に関連して、Moissis-Berenson⁹⁾は孤立気泡域から、気泡干渉域と孤立気泡域が入り混じった第一遷移域への遷移熱流束 q_{tr} を式(10)で与えている。

$$q_{tr} = 0.11 \rho_v L \cdot \theta^{0.5} \left[\frac{g \sigma}{(\rho_l - \rho_v)} \right] \quad (10)$$

本研究の親水・撥水処理を施していないガラス面においては、水の一般的な接触角は $20^\circ \sim 40^\circ$ であり、遷移熱流束の

範囲は $q_{tr} = 105 \sim 149 \text{ kW/m}^2$ と計算される。本実験の熱流束の範囲は高熱流束側で 103 kW/m^2 であり、本測定の領域は観察結果と同様に、孤立気泡域にあることになる。

単一の気泡において、マイクロ液膜が生成されてから最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} に達し、その後減少・消滅するまでの間、すなわち、半径 r の位置におけるマイクロ液膜期間 Δt_{Mc} 内の沸騰気泡へ伝える熱量の総計 Q_{ML} は、式(8), (9)を用いれば式(11)のように表される。

$$Q_{ML} = \int_0^{R_{Mmax}} 2\pi r \int_0^{\Delta t_{Mc}} \left[k \Delta T / \left(\delta_0 - \frac{q}{\rho_l L} t \right) \right] dt dr \quad (11)$$

図12は熱流束が一定条件 $q = 76 \text{ kW/m}^2$ におけるマイクロ液膜厚さの時間変化を式(8)から計算した結果を表している。 $t=0$ はマイクロ液膜が生成した瞬間で、気泡の外側へ向かうほどマイクロ液膜期間は短くなる。蒸発によりマイクロ液膜厚さは減少してゆき、発泡点の近傍では初期マイクロ液膜厚さが小さいため、 $\delta=0$ となるドライアウトが生じる場合が現れる。

図13は、孤立気泡域の熱流束範囲における、ミクロ

Fig.12 Variation of micro-layer thickness

Fig.13 Variation of radius of dry out region against heat flux

Fig.14 Variation of total heat through micro-layer in single bubble against heat flux

Fig.15 Contribution of evaporation from micro-layer

液膜のドライアウト部分の半径と熱流束の関係、最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} をパラメータとして表している。本研究で用いた熱流束の範囲においては、最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} の中心から 4 ~ 10% 部分がドライアウトする計算結果を得た。なお、図 13 ~ 図 15 中のシンボルは測定における熱流束値を表している。

同様に、孤立気泡域の熱流束範囲において、単一の気泡が発生してから離脱するまでの、マイクロ液膜を通して気泡へ伝わる熱量 Q_{ML} と熱流束の関係を図 14 に示した。熱流束の増大とともに、熱量はマイクロ液膜の存在する部分では熱流束に比例して増加するが、ドライアウト部の拡大とともに有効な伝熱領域が減少するため比例関係からずれてくる。

図 15 は、同様に孤立気泡域の熱流束範囲において、式(12)によるマイクロ液膜からの蒸発による生成蒸気体積 V_s と、式(3), (4) および式(13)より求めた沸騰気泡の全蒸気体積 V_b の比率が熱流束に対してどのように変化するかを、最大マイクロ液膜半径をパラメータとして示したものである。

$$V_s = \frac{Q_{ML}}{\rho_v L} \quad (12)$$

$$V_b = \frac{4}{3} \pi \times R_{Bd}^2 \times \frac{H_{Bd}}{2} \quad (13)$$

本研究で用いた熱流束の範囲では、全蒸発量に対するマイクロ液膜からの蒸発割合は 5 ~ 11% であった。

式(10)から計算される孤立気泡域の最大熱流束 ($q = 149 \text{ kW/m}^2$) においては、全生成蒸気量のうちマイクロ液膜蒸発の影響は 16 % 程度であることがわかる。

実際の核沸騰の高熱流束領域においては、本研究の対象とする孤立気泡域とは異なり、気泡の合体などの複雑な影響が加わってくることになる。特に、限界熱流束のメカニズムと関連して様々なモデルが提案されている。それらのうち、例えば Zhao et al.⁽⁴⁾ はマイクロ液膜の乾燥が進むことにより限界熱流束が生じるとの観点から、限界熱流束を決定しているなど、高熱流束域でのマイクロ液膜の蒸発特性の検討も重要性を持っている。ここでは参考として、大気圧下の水のプール核沸騰における限界熱流束 (Zuber⁽⁵⁾ によれば $q_c = 1.11 \text{ MW/m}^2$) 付近まで、本研究の孤立気泡域のマイクロ液膜厚さ構造が維持されると仮定して、マイクロ液膜からの蒸発の影響を試算してみることにする。

図 16 ~ 19 は、それぞれ図 12 ~ 15 における物理量を、

Fig.16 Variation of micro-layer thickness

Fig.17 Variation of radius of dry out region against heat flux

Fig. 18 Variation of total heat through micro-layer in single bubble against heat flux

Fig. 19 Contribution of evaporation from micro-layer

大気圧下の水のプール核沸騰における限界熱流束付近まで計算したものである。図 17 ~ 19 においては実線の領域が孤立気泡域を、破線の領域が気泡干渉域を表している。なお、本実験の範囲ではマイクロ液膜厚さの熱流束への依存性はみられなかったが、ひとけた大きな熱流束付近まで本結果の適用が可能かどうか現時点では明らかでない。しかし、発泡点密度および発泡点からの気泡生成頻度の増加など、必ずしも熱流束の増加がすべて気泡成長速度の増大につながるものではなく、またマイクロ液膜形成が流体力学的なメカニズムに依存する現象であることを考えると、本実験の範囲における結果をより大きな熱流束範囲に拡張して検討することは意味を持つものと考えられる。

図 16 は、最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} が 3.0 mm、 $q = 1.0$ MW/m² の条件におけるマイクロ液膜厚さの時間変化を示している。図 8 の測定結果によれば、 $r = 1.5$ mm におけるマイクロ液膜期間 Δt_{Me} は 8 ~ 20 ms 程度の範囲にあるが、限界熱流束点付近の非常に高い熱流束においては $r = 1.5$ mm で 11 ms 程度でドライアウトが生じて

いることがわかる。したがって、本測定の程度のマイクロ液膜厚さが生じる場合には、熱流束の増大にともなって急速な乾燥が進み、ドライアウト領域が広く出現することが推測される。

図 17 に、マイクロ液膜のドライアウト部半径と熱流束の関係を、最大マイクロ液膜半径 R_{Mmax} をパラメータとして示した。熱流束の増加にともなってドライアウト部半径は増大するが、その増加割合はドライアウト領域の増加により低下していく傾向を示している。熱流束 1.0 MW/m² では中心から 54 ~ 63% 部分がドライアウトする計算結果を得た。

図 18 は熱流束に対する単一の気泡が発生してから離脱するまでの、マイクロ液膜を通して気泡へ伝わる熱量 Q_{ML} の変化を示している。図 17 のドライアウト部半径の変化と類似して、高熱流束においてはドライアウトの影響が現れるため、マイクロ液膜を通して気泡へ伝わる熱量 Q_{ML} は熱流束と比例関係にはならないことが分かる。

沸騰気泡の全蒸気量体積 V_b に占めるマイクロ液膜からの蒸発による生成蒸気体積 V_s の割合を図 19 に示した。全生成蒸気に対するマイクロ液膜からの生成蒸気は熱流束の増加とともに大きくなっていき、 $q = 1.0$ MW/m² では 80% 程度になり、高熱流束ではマイクロ液膜蒸発の影響が強くなる傾向が読み取れる。 R_{Mmax} の影響は小さく、ほぼ熱流束だけの関数として表される傾向を示した。

6. 結 論

プール核沸騰過程において伝熱面上の沸騰気泡下部に生成するマイクロ液膜の厚さの測定から得られたマイクロ液膜の厚さ構造を基に、マイクロ液膜蒸発に関する伝熱特性の検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 実験を行った熱流束範囲において、気泡成長にともなうマイクロ液膜の成長速度は相似的に変化することから、マイクロ液膜に関する主要な特性量であるマイクロ液膜厚さおよびマイクロ液膜の存在時間を最大マイクロ液膜半径の関数として無次元形で表した。
- (2) ミクロ液膜特性の整理結果を基に、核沸騰の孤立気泡域におけるマイクロ液膜からの蒸発量を求め、その貢献度を明らかにした。すなわち、本実験の熱流束範囲において、マイクロ液膜からの生成蒸気量は全沸騰気泡蒸気体積に対し 5 ~ 11 % の寄与をしており、その寄与度は熱流束が大きくなるほど増加する傾向を示した。孤立気泡域ではマイクロ液膜からの蒸発が全蒸発量の最大 16 % 程度である

と推測された。

本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究(B) 17360096）の補助を受けて遂行された。

文 献

- (1) Cooper, M.G., Lloyd, A.J.P., The microlayer in nucleate pool boiling. *Int. J. Heat and Mass Transfer*. Vol.12, (1969) pp.895-913.
- (2) Utaoka, Y., Nakamura, K., Sakurai, A., Itagaki, K. and Sonoda, A., Configuration of Micro-layer in Nucleate Boiling, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Series B)*, (2008), in press.
- (3) Moissis, R., and Berenson, P.J., On the Hydrodynamic Transitions in Nucleate Boiling, *Journal of Heat Transfer*, 85-3, (1963) pp.221-229.
- (4) Zhao, Y., Masuoka, T. and Tsuruta, T., Prediction of Critical Heat Flux Based on the Microlayer Model, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (Series B)*, Vol.62, No.598, (1996) pp.2338-2343.
- (5) Zuber, N., On stability of boiling heat transfer, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 80-3, (1958) pp.711-720.