

減圧下の水とLiBr水溶液のプール沸騰に関する研究

中里見 正夫*・斎藤 巧 七*

Characteristic of Boiling Heat Transfer Under the Reduced Pressure Water and LiBr Aqueous Solutions

Masao NAKAZATOMI, Kōhichi SAITŌ

Abstract

The characteristics of boiling heat transfer from a horizontal plate to water and lithium bromide aqueous solution under the low pressures (0.03~0.1 ata) were investigated.

This paper treats the effect on the boiling heat transfer of pressures, roughness and hydrolytic bubbles of heating surface.

1. ま え が き

低圧における沸騰伝熱特性に関しては、1930年代に Cryder¹⁾ Akin²⁾ および1950年に西川³⁾ Raben⁴⁾ による研究報告がみられる。近年、海水の淡水化、冷凍および冷房などにおける工業上の要請また低熱源の有効利用の上から再びこの領域の研究が取り上げられている。

低圧領域の沸騰伝熱特性は圧力の低下とともに劣化する事実が一つの特徴として知られていて⁵⁾⁶⁾、この伝熱特性を向上させる目的で、種々の方法が試みられている⁷⁾。たとえば低熱流束域での沸騰を促す目的で、伝熱面に金属粒子を溶射⁸⁾ または焼結⁹⁾ したものが用いられている。これらはおもに大気圧かそれ以上の圧力において実験がなされ、その沸騰促進効果がどの程度か平滑面に比較して明らかにされている。

本実験では大気圧以下に減圧された領域の沸騰特性を調べた。焼結伝熱面がこの領域にどの程度有効か、さらに沸騰促進法として水素気ほうを用いて実験した結果を述べる。また、57%LiBr水溶液の沸騰特性をも調べたので報告する。

2. 使用した記号

F	: 伝熱面積	m ²
H	: 水位	mm

h	: 熱伝達係数	kcal/m ² · h · °C
l	: 距離	m, mm
n	: 気ほうの発生ひん度	1/min
P	: 絶対圧力	ata, mmHg
Q _{loss}	: 熱損失	kcal/h
q	: 熱流束	kcal/m ² · h
t	: 温度	°C
t _b	: 液体温度	°C
t _g	: 飽和温度	°C
t _w	: 伝熱面温度	°C
Δt _s	: 伝熱面過熱度 (=t _w -t _s)	°C
W	: 消費電力	watt

3. 実験装置と実験方法

図1に実験装置の概要を示す。压力容器①は、寸法が内径300mm、高さ500mmのステンレス鋼製で、沸騰の様子を観察できるように観察窓(直径120mm)が設けられている。

直径40mmの伝熱面③は、主ヒータ④を鋳込んだ銅ブロックにネジ込み式に製作されていて取り替え可能になっている(図2)。伝熱面下には中心軸上に3本の熱電対がそう入されていて温度こう配を測定することができるほか、半径方向の温度分布を知るために一断面に、さらに2本の熱電対が取り付けられた(図2参照)。

液体温度と蒸気温度を測定するために、伝熱面上5、

* 宇部工業高等専門学校機械工学科

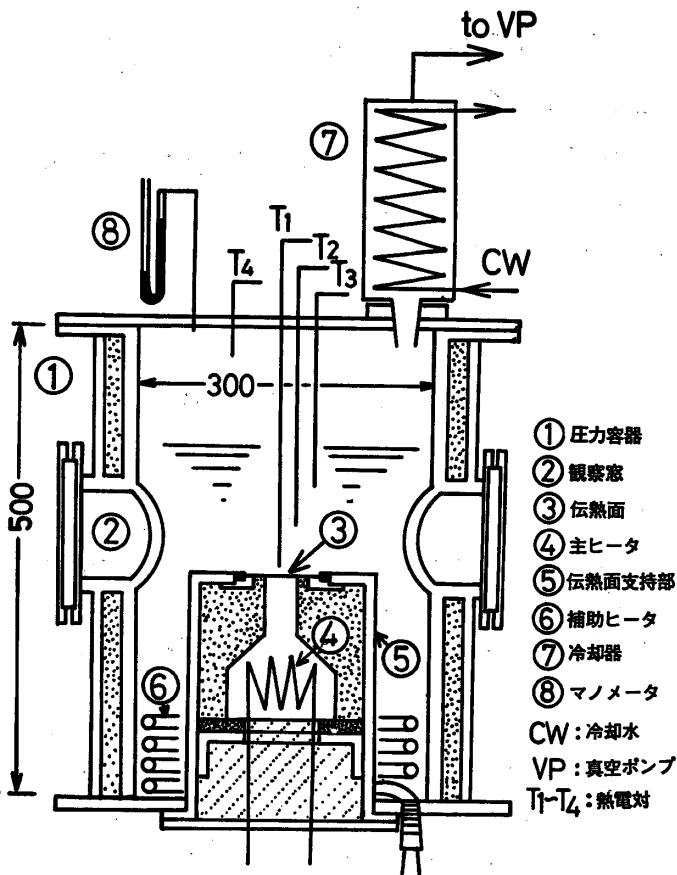


図1. 実験装置の概要

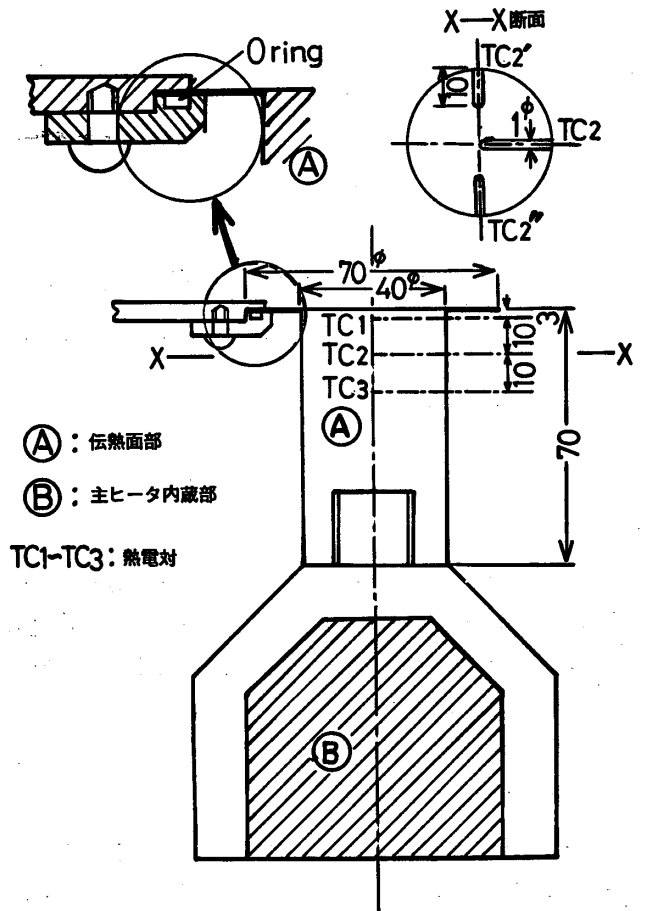


図2. 伝熱面の詳細

10, 20mm の位置に T_1 , T_2 および T_3 , さらに蒸気部に T_4 の熱電対が取り付けられている。発生した蒸気は本体の上部に設けた冷却器⑦内で凝縮されて容器内に戻される。冷却器の他端は真空ポンプ (VP) に接続されている。容器内圧力は水銀マンノメータ⑧によって測定される。本実験の圧力範囲が大気圧ないし、それ以下であるため温度的にシール部はすべてOリングを用いることができた。

伝熱面上に水素気ほうを発生させる方法は次のようにして行った。液体温度測定用の熱電対 (T_1) 取付部から電気絶縁した 2mm の銅棒 (プローブ) をそり入れ、先端が伝熱面と約 2mm の間隔になるように固定して、伝熱面側銅ブロックとの間に直流電圧を負荷し伝熱面上に水素気ほうを発生させた。

実験に先立って容器内を飽和温度にするために補助ヒータ⑥を用い、真空ポンプを用いて所定の温度と圧力に調整した。

加熱量の測定は主ヒータの消費電力 W を測定し、熱損失分 Q_{loss} を補正して正味熱負荷 q を式(1)によって算出

した。熱損失は伝熱面上に絶縁管を立て実験条件の範囲にわたってあらかじめ検定を行った。

$$q = (0.86W - Q_{loss}) / F \quad (1)$$

ここに F は伝熱面積 m^2 , W は消費電力 watt および Q_{loss} は熱損失 kcal/h である。

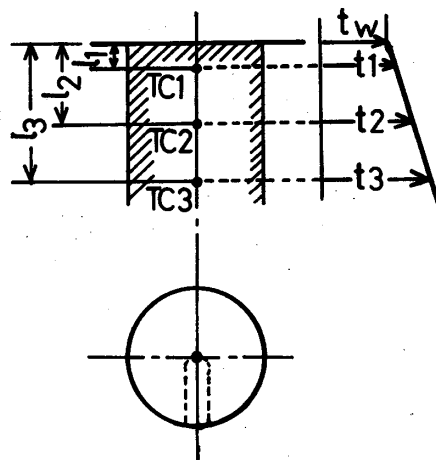


図3. 伝熱面温度 t_w の外挿法

伝熱面温度 t_w は伝熱面下の中心軸上に l_1, l_2 および l_3 の位置にそう入した3本の熱電対の測定値 (t_1, t_2 および t_3) を外そうして次のように求めた (図3参照).
 なお, 測定値 t_1, t_2 および t_3 が直線にのらないことがあるので, 誤差を小さくするために t_1 と t_3 を用いて算出した.

$$\frac{t_1 - t_w}{t_3 - t_w} = \frac{l_1}{l_3} \quad (2)$$

熱流束域において間欠沸騰 (突沸)⁶⁾ の現象が現われることによって特徴付けられている. これに伴う性質として (a) 蒸気ほうの平均体積の増大, (b) 発ぼう点密度の減少とがあげられる.

図4は間欠沸騰時の伝熱面下3, 13および23mmの位置における温度変化 (T_{c1}, T_{c2} および T_{c3}) と伝熱面上の流体温度 (T_1) の変化を示したものである. 沸騰が継続する期間と休止する期間とがほぼ一定周期で繰

液体	伝熱面	圧力 P		熱流束 q kcal/m ² ·h × 10 ⁵	水位 H mm	備考
		ata	mmHg			
純水	平滑面	0.054~0.138	40~100	0.4~7	200	E = 0 ~ 40 Volt E = 20 Volt
〃	焼結面	0.054~0.273	40~200	0.3~4	〃	
〃	平滑面 (水素気ほう法)	0.06	44	0.3~1.3	120	
〃	平滑面 (水素気ほう法)	0.08~0.41	59~300	0.03~3	100	
57% LiBr	平滑面	0.033~0.045	23~70	0.3~6	88	
純水	平滑面	0.08~0.41	59~300	0.4~7	100	
水道水	平滑面	0.08~0.41	59~300	0.3~7	100	

$$t_w = t_1 - \frac{l_1}{l_3 - l_1} (t_3 - t_1) \quad (3)$$

伝熱面過熱度 Δt_s は伝熱面温度 t_w と伝熱面上の圧力 p に対する飽和温度 t_s との差である.

$$\Delta t_s = t_w - t_s \quad (4)$$

ここに, 飽和温度 t_s は伝熱面上10mmの液体温度 t_b と伝熱面圧力に対する飽和温度がほぼ一致する場合は問題ないが, 差がある場合には両者の平均値をとった.

実験条件は上表のようである.

4. 実験結果

大気圧以下に減圧された液体のプール沸騰特性は, 圧力の低下とともに伝熱性能が劣化するほか, 核沸騰の低

り返されている様子がわかる.

伝熱面から蒸気ほうが発生すると伝熱面温度は低下し, 沸騰が休止して対流伝熱のみが支配する間に蓄熱され, 伝熱面温度が回復すると次の突沸に移行する (以下にはこれを間欠沸騰の周期という). この間欠沸騰時の特徴を観察結果に基づいてあげると次のようである.

- (1) 圧力の低下に伴い間欠沸騰の周期は減少し, 伝熱面温度の振幅は増大する傾向がある.
- (2) 発ぼう点位置が定まらなくなり突沸中でもたつ巻きもどきに伝熱面上を移動する.
- (3) 熱流束の低下とともに周期は減少し, 対流伝熱のし

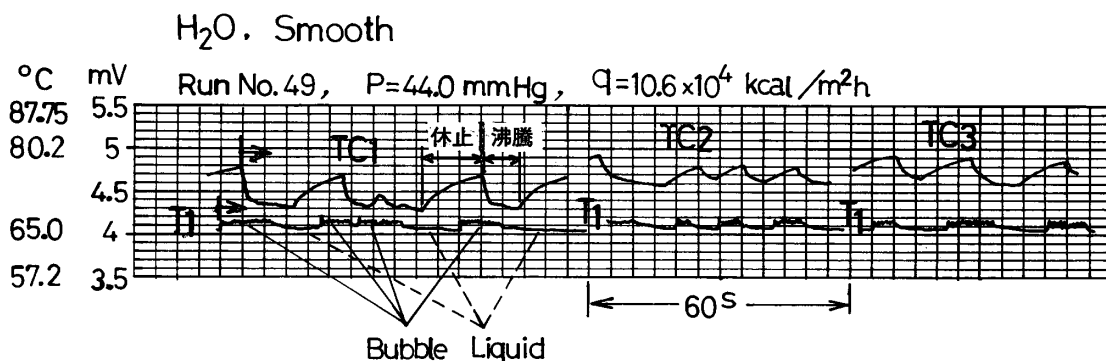


図4. 間欠沸騰時の温度変化の例

める期間が次第に増加し、ついには突沸が起らなくなる。

減圧下では上記のように沸騰を押さえる要素が強まり、沸騰特性曲線を過熱度の高い方へ移動させる結果となっている。これは、活性な安定した蒸気ほうの発生核の存在が減少するものと考えられる。そこで、有効な蒸気ほうの発生源を付加することができるならば、減圧下の条件であっても沸騰特性は改善され、過熱度の値を小さくし得るものと考えられる。

4・1 平滑面と焼結面との差異が沸騰特性に与える影響

伝熱面としてCuの平滑面(S)(No. 600エメリペーパで仕上)と平滑面上に平均粒度105ミクロンのCu粉末を0.48mmの平均厚さで焼結した粗面(R)の2種類を用いて沸騰特性に与える影響を調べた。液体はイオン交換した純水で伝熱面上の水位 H=200mmとした。

図5は平滑面(S)と焼結面(R)を伝熱面に用いて測定した沸騰特性曲線を示したものである。熱流束の範囲は $q = (3 \sim 70) \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 、圧力は $P = 0.054, 0.138$ および 0.273 ata (40, 100および200mmHg)の3種類

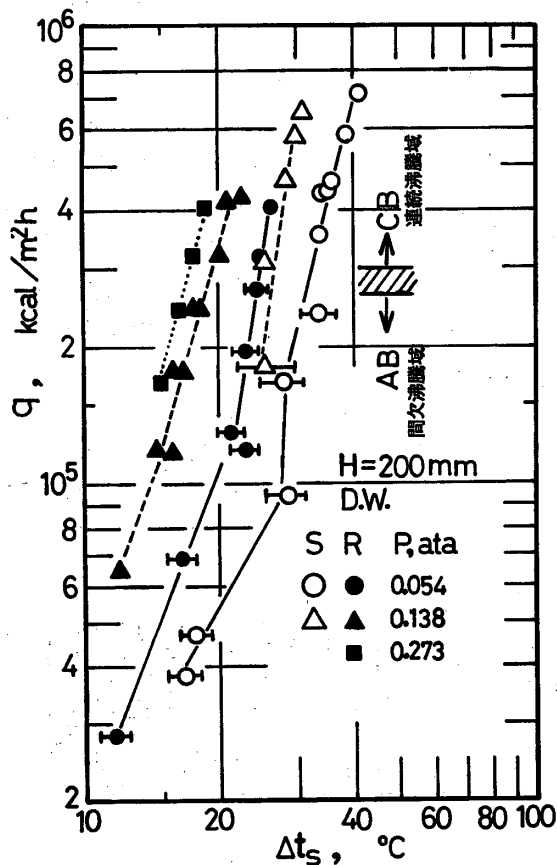


図5. 平滑面 S と焼結面 R の沸騰曲線の比較

である。同図中の記号に付した温度の変動範囲は間欠沸騰によって伝熱面温度が変化する範囲を示したものである。

観察結果から、間欠沸騰の範囲を示すと次のようである。

P ata	平滑面 S	焼結面 R
0.054	$q \leq 30 \times 10^5$	$q \leq 25 \times 10^5$ ほとんど認められない
0.138	$q \leq 30 \times 10^5$	

伝熱面の温度変動幅は平滑面で6~8°C、焼結面では平滑面の1/2ないしそれ以下であった。

図5から、平滑面では圧力Pが0.138から0.054 ataに減少すると沸騰曲線の過熱度 Δt_s は25~30°Cから30~40°Cに増加する。伝熱面SとRの沸騰曲線を比較すると、 $P = 0.054 \text{ ata}$ のもとに過熱度 Δt_s はSで30~40°C、Rで20~30°Cとなっていてほぼ10°C程度 Δt_s の小さい方へ曲線が平行移動していることがわかる。 $P = 0.138 \text{ ata}$ についても同程度の差異となっている。

上述のように、平滑面の代わりに焼結面を伝熱面として用いることによって減圧領域の沸騰をある程度促進させることが可能である。しかし、なお伝熱面過熱度 Δt_s は15~25°Cの値となっている。この値を10°C以下にする手段として次の水素気ほうによる沸騰促進法を試みた。

4・2 水素気ほうによる沸騰促進法

水素気ほうは液体の速度分布測定に古くから利用されている。本報がこれを採用した目的は、伝熱面上に水素気ほうを発生させ、これを沸騰の核にすることによって蒸気ほうの発生を容易にし、間欠沸騰領域を連続沸騰に変えることにある。このために、伝熱面上にプローブを近接させ、両者間に直流電圧を加える方法をとった(図6参照)。

図6は伝熱面上の中心に2mmの電気絶縁した銅棒を1.5mmまで近づけ伝熱面側を負極⊖、プローブ側を正極⊕として系統的に電圧を変化させて得られた沸騰曲線である。伝熱面上の水位はH=120mm、圧力は $P = 0.06 \text{ ata}$ (45mmHg)、伝熱面HSは平滑面である。同図中丸印は電圧0の場合で熱流束 $q \approx 5 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ を境界として核沸騰領域(間欠沸騰)と対流伝熱の領域に区分される。

6~40ボルトの電圧をかけて伝熱面上に水素気ほうを発生させると、沸騰曲線は過熱度の小さい方へ全体的に移動し、観察結果によると間欠沸騰領域および対流伝熱

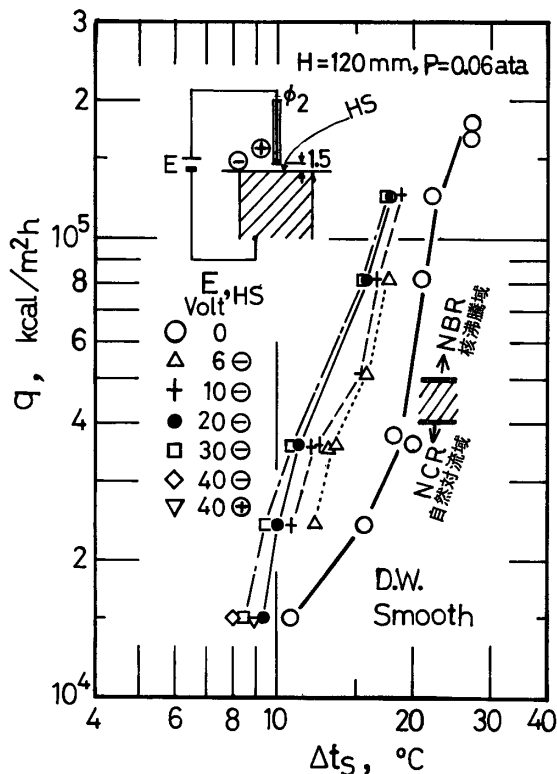


図6. 水素気ほう法による沸騰曲線の改善 (1点プローブ)

領域 ($q > 1.5 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$) とともに連続沸騰に変わることが確かめられた。伝熱面 HS の極性を正 ⊕ にした場合 (同図▽印) には当然のことながら効果は半減した。

図7と図8はそれぞれ熱伝達係数 h と蒸気ほうの発生

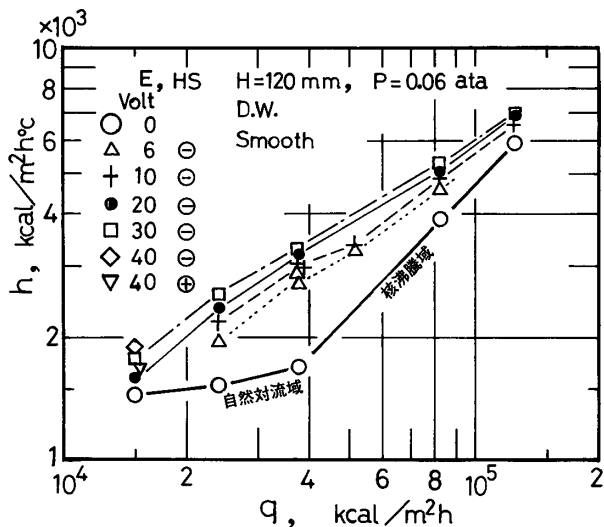


図7. 熱伝達係数 h と熱流束 q の関係 (水素気ほう法, 1点プローブ)

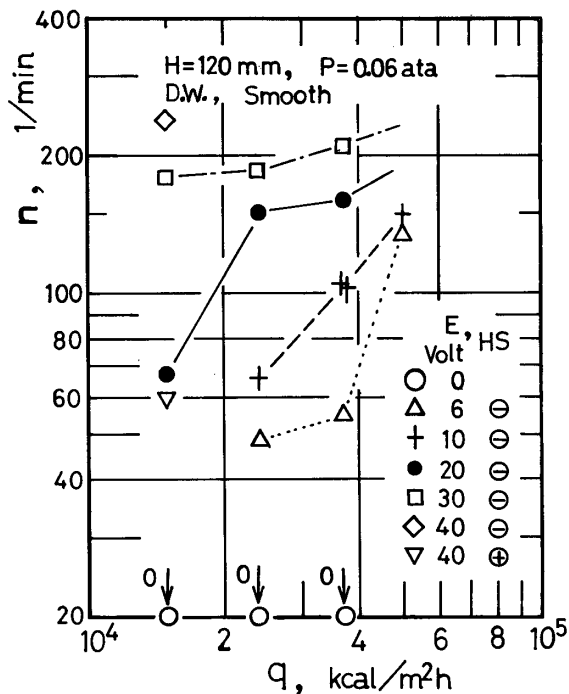


図8. 蒸気ほうの発生ひん度 (水素気ほう法, 1点プローブ)

ひん度 n を熱流束に対して示したもので図6の実験点に対応する。

熱伝達係数 h は測定された正味熱流束 q , 伝熱面温度 t_w および流体温度 t_b から次式のように表わされる。

$$q = h(t_w - t_b) \quad (5)$$

蒸気ほうの発生ひん度 n は伝熱面上の熱電対の信号と視察とから求めた。熱流束 $q \geq 6 \times 10^4 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 以上になると発ぼう状況が連続的になり、合体が促進され正確なひん度が上記の方法では得られ難い。

発ぼう箇所はプローブに近接した1箇所集中しているが、図6～図8からわかるように熱流束の広範囲にわたって大きな影響のあることがわかる。

次に伝熱面積当りのプローブ本数が増加した場合 (発ぼう箇所の増加) について調べた。プローブの先端に30mmのリングを取り付け、その円周上十字4ヶ所に電極端を増設して実験を行った。その結果をプロットしたのが図9である。白抜きの記号は電圧0の場合の実験点で、黒塗りの記号は電圧20ボルトの場合である。同図と図6とを比較してもわかるようにプローブ本数が増加した方が Δt_s の値をかなり低下させる結果となっている。特に、 $5 \times 10^4 > q > 5 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ の対流伝熱の領域において影響が大で過熱度は 10°C 以下になっている。

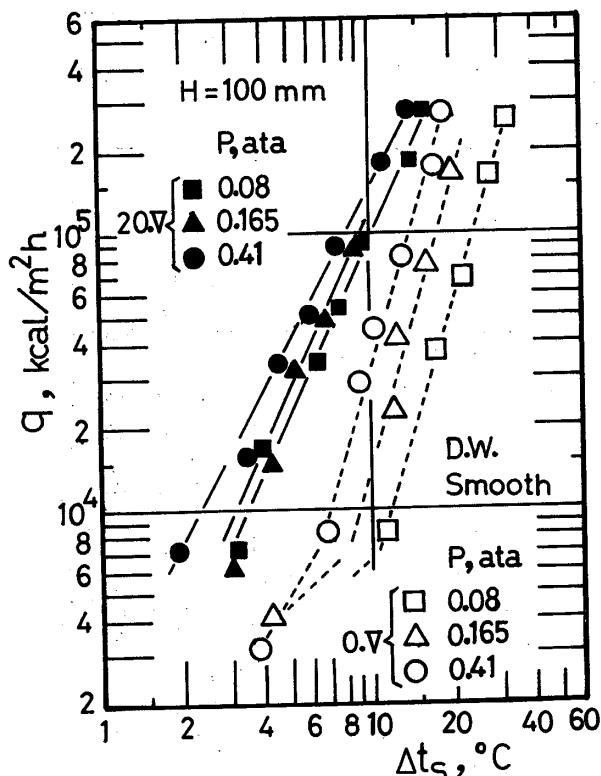


図9. 水素気ほう法による沸騰曲線の改善 (5点プローブによる)

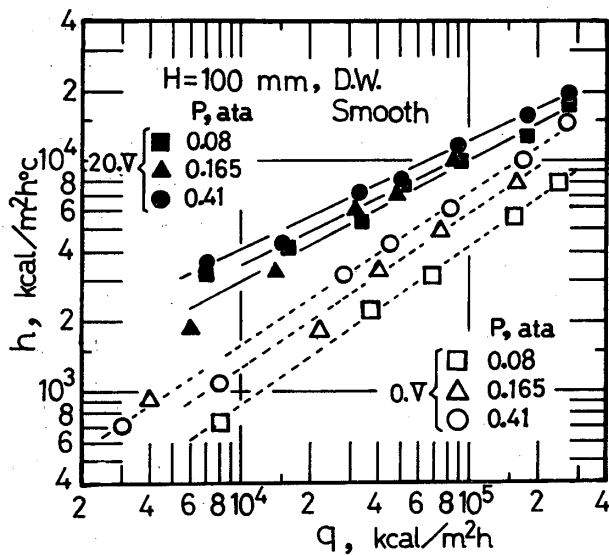


図10. h と q の関係 (5点プローブによる)

図10は熱伝達係数 h と熱流束の関係を示したもので図9の実験点に対応するプローブが1本の場合(図7)と比較すると図10の5本プローブの場合の h の値が約2倍大きくなっている。

4-3-1 純水と水道水との沸騰特性の差異

平滑伝熱面で液体としてイオン交換した純水 D.W. と水道水 T.W. をそれぞれ用い圧力を $P=0.08, 0.165, 0.41$ ata (60, 120, 300mmHg) の3通り変えて測定した結果が図11である。伝熱面上の水位は $H=100$ mm である。図中、純水 D.W. の実験点は白抜きの記号で示し、水道水 T.W. の実験点は黒塗りの記号で示した。水道水の沸騰曲線は純水と比較して、伝熱面過熱度 Δt_s の値が約 10°C 程度大きい方へ平行移動している。このことは、純水よりも水道水の方が活性な沸騰核を押える効果があることを示している。減圧下ではこのように伝熱面過熱度のわずかな差異が、高圧に比して相対的に大きな相違となって現われる。またこの程度の差異が低熱源の利用上では重要となる。

図12は純水の熱伝達係数 h と熱流束 q の関係を示したものである。当然のことながら圧力が低いほど h の値は小さくなっていることがわかる。

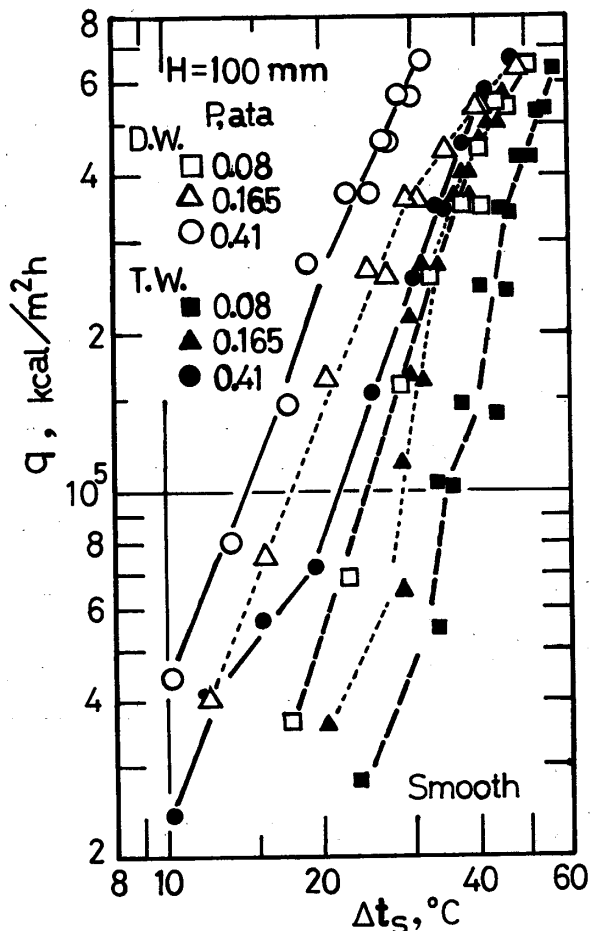


図11. 純水 D.W. と水道水 T.W. の沸騰曲線の相違

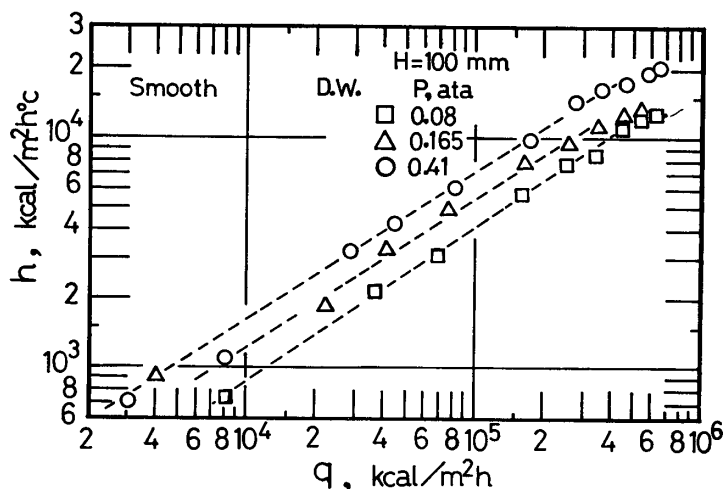


図12. h と q の関係 (純水)

4・3-2 LiBr 水溶液の沸騰特性

LiBr 水溶液は吸収式冷凍機の吸収剤として用いられているものである。この水溶液の沸騰特性については公

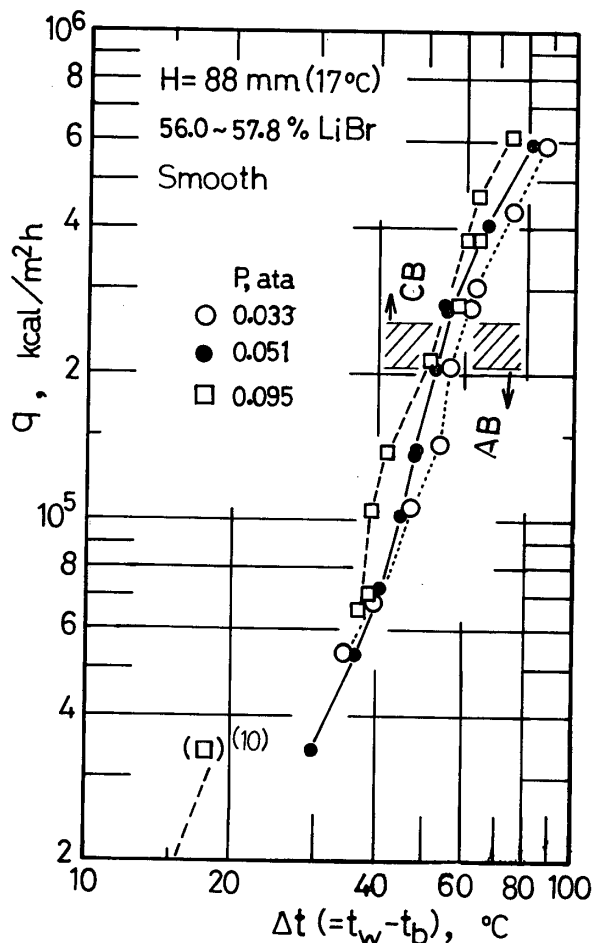


図13. リチウムブロマイド水溶液 (57%) の沸騰曲線

表されたものが少なく対流伝熱領域を研究の対象にした大西, 田島¹⁵⁾の報告がある。

ここでは, 平滑伝熱面を使用し57% LiBr 水溶液の沸騰特性を調べた。熱流束範囲は $q = (4 \sim 60) \times 10^4 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ で図13はその測定結果である。図中には大西ら¹⁰⁾のデータも一部示した。圧力は $P = 0.033, 0.051, 0.095 \text{ ata}$ (25, 37, 70mmHg) の3通りである。純水の場合と同様に間欠沸騰の現象がみられたが, その範囲は $q \leq 10^5 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ で水の場合よりせまく伝熱面温度の変動も小さい。

熱流束 $q = (4 \sim 60) \times 10^4 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ の範囲で沸騰特性曲線の伝熱面過熱度 $\Delta t_s = 30 \sim 80^\circ\text{C}$ にわたっていて, 純水に比較してかなり高い値となっている。熱伝達係数 h の値で純水の約 1/3 となっている。

沸騰特性曲線に与える圧力の影響は, 熱流束の値が $q \geq 10^5 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ の範囲で明らかに認められ, 水の場合と同様な傾向がある。大西らは低熱流束域 ($q < 3 \times 10^4$) の実験から圧力の影響は小さいとしている。

沸騰現象の観察から, (a)液体の過熱度によって蒸気部との境界面近くの溶液中で発ぼうがかなり認められること, (b)蒸気ほうが液面から離脱する際の破れつ音が高いことが指摘される。

LiBr 水溶液は銅に対して腐蝕性が強く, 伝熱面の外周のフィンの部分が腐蝕され, 実験の遂行に困難を伴った。水溶液の濃度および伝熱面性状などの影響を含めて広範囲な研究を行うためには伝熱面の材料と構造に工夫を要する。

LiBr 水溶液の沸騰促進には, 水素気ほう法は溶液の電解を伴い黒色汚たくするので用いられない。他の方法を考慮しなくてはならない。

5. むすび

大気圧以下に減圧された液体のプール沸騰熱伝達の実験を行ない, その沸騰特性を調べた。その結果を要約すると次のようである。

- (1) 減圧下では発ぼう点密度が極端に減少し, 間欠沸騰 (突沸) 現象が現われる。その熱流束範囲は沸騰開始熱流束から $q \cong 20 \times 10^4 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ 程度までおよぶ。また, その範囲は, 圧力による影響が顕著で圧力が低下するほど拡大する。
- (2) 伝熱面として焼結面を用いると平滑面に比して,

伝熱面温度がほぼ 10°C 程度低下する。突沸を伴う圧力範囲も低下する。

- (3) 突沸領域および対流伝熱領域の伝熱を促進する方法として水素気ほう法を適用した結果、両領域にかなりの効果が認められた。突沸領域は連続沸騰に移行し $q \geq 5 \times 10^3 \text{kcal/m}^2\text{h}$ 程度まで沸騰領域が拡大され伝熱面過熱度 $\Delta t_s < 10^{\circ}\text{C}$ を実現できた。このことから、沸騰核を付加することによって、低圧領域の沸騰の劣化を改善することが可能である。
- (4) 減圧下 ($P=0.03 \sim 0.1 \text{ ata}$) のリチウムブロマイド水溶液の沸騰特性が明らかになった。伝熱面過熱度は $q = (0.4 \sim 6) \times 10^5 \text{kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ に対して $30 \sim 80^{\circ}\text{C}$ となっている。

最後に、実験装置の製作に協力された実習工場の諸氏、また実験の遂行に協力された当時本校学生松田茂男、坪井三男、西村一男、松重宏二、有安一夫、山本一夫の諸君へここに銘記し謝意を表わす。

文 献

- 1) Cryder and Finalborgo, Trans, AIChE, **33** (1938), 346.
- 2) Akin and McAdams, Trans. AIChE, **41** (1939), 137.
- 3) 西川ら, 機論, **23**—136 (1957).
- 4) Raben et. al., AIChE, Chem. Eng. Progr. Symp. Ser., **54**—10 (1958), 77.
- 5) 西川ら, 九大工学集報, **46**—2 (1973).
- 6) 西川ら, 第812回熱工学講論, No. 710—17(1971), 117.
- 7) 佐藤ら, 第11回日本伝熱シンポジウム講論 (1974), 97.
- 8) 提ら, 第812回熱工学講論, No. 710—17 (1971), 121.
- 9) 老固, 蔵田, 日本機械学会関西支部第47期総会講論 (1972), 66.
- 10) 大西, 田島, 冷凍 **49**—562 (1974—8), 687.

(昭和52年9月1日受理)