536.423.1:532.542

沸騰によるバーンアウトの研究*

(第2報, サブクーリング, 管路径および含有空気量の影響)

佐藤 俊**, 岐 美 格**, 竹 内 貴一郎***

Experimental Studies of the Burnout under the Boiling

(2nd Report, On the Effects of Subcooling, Tube Diameter and Air Content)

by Takashi SATO, Itaru MICHIOYOSHI, and Kiichiro TAKEUCHI

Continued from the first report, this paper deals with the effects of subcooling, tube diameter and air content under the transient boiling caused by step heat input. The experiments were carried out under the condition of a natural circulation of the water under atmospheric pressure. The results obtained are as follows:

- 1) Until the burnout occurs, the surface temperature of heat generator (nichrome wire) is independent of the subcooling, the tube diameter or the air content, and the characteristics of heat transfer are similar to the steady boiling.
- 2) The time lag to the burnout caused, which increases with the decreasing of the power input, is proportional to the subcooling or the tube diameter, but it has no relation to the air content.
- 3) When the value of subcooling, the tube diameter or the power input is large, the burnout is caused by the partial film boiling, while it is caused by the bubble blocking when that value is small. In the case of the subcooling of 0°C , especially, the burnout occurs owing to the film boiling without being affected by the tube diameter.
- 4) The critical heat flux, which does not cause the burnout, depends on the subcooling or the tube diameter, but it is independent of the air content.

1. 緒 言

すでに, 第1報⁽¹⁾において垂直円管流路内の自然循環沸騰現象を, 細線発熱体に入力をステップ状に加えた場合につき調べ, その溶融焼損にいたる過渡現象を明らかにした. このとき, 水のサブクーリングおよび空気含有量は一定の場合を取扱った. 一方, 定常核沸騰時においては, McAdams ら⁽²⁾, Forster ら⁽³⁾ によってサブクーリングの度合は, その伝熱性能(熱負荷と壁面過熱温度との関係)にはほとんど影響を与えないと結論づけられているが, バーンアウト現象を生ずるような, しかも, 管路内における高熱負荷の過渡的沸騰時においては, 位置および時間により変化するサブクーリングの度合が気ほうの成長, 集合あるいは蒸気閉そくなどの現象に, 何らかの影響を及ぼすであ

うということが推察される. 上記 McAdams らや Gunther⁽⁴⁾ の研究においても, サブクーリングの度合が, バーンアウト熱負荷に影響を与えることを明らかにしている. なお, 空気含有量の影響について, Jens ら⁽⁵⁾ は高圧下における定常沸騰時の実験結果に基いて, その伝熱性能に及ぼす影響は無視しうると述べ, 一方, McAdams ら⁽²⁾ はその影響を無視し得ないことを明記している.

本論文は, 第1報と同様に種々の管路径の垂直管路内に張られた細線発熱体にステップ状入力を加え, 冷却水が自然循環する場合について, サブクーリング, 管路径ならびに空気含有量の影響を実験的に確かめた結果の報告である.

2. 実験装置ならびに実験方法

発熱体は, 第1報と同様に両端に同径の銅線を突合せ溶接してある長さ 200 mm, 径 0.2 mm のニクロム線であり, その表面処理法ならびに流路管への取付方法もまた第1報と同様である. これらの詳細は第1報の第1図および第2図に示してある.

昭和 35 年 3 月 18 日 関西支部 第 35 期 定時総会講演会において第3報として, および 昭和 36 年 3 月 18 日 関西支部 第 36 期定時総会講演会において 第5報 として講演, 原稿受付 昭和 36 年 4 月 5 日.

** 正員, 京都大学工学部(京都市左京区吉田本町).

*** 正員, 京都大学工学研究所.

第1図 実験水そう

また、本実験においてはサブクーリングおよび含有空気量の影響の調査を目的としているため、二重の実験水そうを用いた。すなわち、第1図に示すように内部水そう①は、第1報のものと同様なガラス製ビーカ形実験水そうであって、イオン交換樹脂純水製造装置を通じて、その比抵抗を $10^6 \Omega \text{ cm}$ 以上に高めた純水を満たす。この中に、前記ニクロム細線発熱体を取付けた種々の径の実験管路を垂直に装置する。外部水そう②は、600 mm×600 mm の断面をもつ深さ 900 mm の鋼板製水そうであり、前面には 650 mm×250 mm の内部観測窓③が備えられている。また、②の周囲は観測窓の部分を除き、断熱レンガ④およびコンクリート⑤で保温してある。外部水そう②と内部水そう①の間に水道水を満たして、②の底面よりガスバーナ⑤により加熱する。燃焼ガスはガス通路⑥を経て排気孔⑦より排出される間に、②の側面からも加熱を行なうようになっている。このとき、①は鉄製保持器⑧でつり、②の底面に直接触れないようになっている。このようにして所要の管路入口サブクーリングを得たが、入口サブクーリング 0°C の状態は外部加熱のみでは得られなかったため、この場合には、ステンレス鋼製の 1 kW 投込式電熱器を①にそう入し、さらに、ビニル膜でおおった木製のふたを用いて②の上部を保温した。

実験は、入口サブクーリング 0°C , 15°C , 25°C , 35°C , 50°C , 65°C および 80°C の7種類について行なったが、これらに相当する水温は、銅-コンスタンタン熱電対あるいは水銀温度計を用いて測定しつつ、所要温度からの片寄りが $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内にあるように調節した。

空気含有量の影響については、あらかじめ加熱を行なって含有空気量を減じた水、および脱気操作を行なわなかった水の2種類について、入口サブクーリング 80°C の場合に対して実験を行なった。これらの空気含有量を測定するために、Winkel 法によって溶存酸素量を求めた結果、脱気操作を行なったものに対しては 1.2 ppm、脱気操作を行なっていないものに対しては 13 ppm の含有量が検出された。それゆえ、含有空気量は窒素の溶存量を考慮すれば、これらの値の約3倍となる。

実験管路は、その内径が 2, 3, 4, 6, 8 および 10 mm のものを用い、さらに参考のためにプール沸騰に対する結果を得るため、管路を用いない場合についても実験を行なった。

実験方法は、第1報と全く同様に、試験発熱体として用いるニクロム線を一辺とする電橋を組み、その平衡をとり、温度変化によるニクロム線の抵抗値変化を電磁オシログラフによって記録せしめ、同時に、発熱体に加えられた加熱電流値も同様に電磁オシログラフにより記録せしめる。

オシログラムに記録されたニクロム線の平均温度より、第1報(5)式によって表面温度が算出される。

3. 実験結果およびその考察

(1) 試験発熱体の温度変化 オシログラムに記録された発熱体の温度変化の様子は、サブクーリング、管路径、入力などの条件が異なれば著しく相違するが、加熱開始直後急激に上昇し、最大 20°C にも及ぶオーバーシュート現象を経た後、準定常的な核沸騰期間に移行し、ついでパーンアウトするに至るという経路をたどる。第2図(a)および(b)図にその例を示してある。ここに(a)図は、入口サブクーリング 80°C 、含有酸素量 1.2 ppm、管路径 3 mm の場合、同じく(b)図は、入口サブクーリング 0°C 、含有酸素量 1.2 ppm、管路径 6 mm の場合であって、それぞれ、ニクロム線平均温度に対応する電磁オシログラフ振動子のふれ幅 $Z\theta$ の時間的变化を、入力(単位伝熱表面積当りの発熱量)をパラメータとして図示したものである。ここに $Z\theta$ は初温度からの温度上昇と入力の平方根との積に比例する。(a)図の場合には、準定常沸騰期間中に小さな温度変動がみられる。これは、パーンアウトするにいたるほどではないが、気泡の部分的集合が伝熱機構を阻害するためである。これに対し、(b)図においては、ほとんど準定常沸騰期間はみられず、なめらかな変化曲線をもってパーンアウトするにいたっている。

バーンアウト点は、第1報において定義したように、発熱体温度が準定常沸騰期間を経てから急激に上昇をはじめめる点を採用している。図より明らかなように、サブクーリングの大きな場合には、バーンアウト点を比較的明確に決定することができるが、サブクーリング 0°C の場合あるいは入力の大い場合には、その判定に困難を生ずる場合が少なくなく、そのため、実験結果にある程度のばらつきを生ずる。バーンアウト点を過ぎると、発熱体温度は急激に増大し、第1報において述べた A, B, C あるいは D 形による溶断を生

ずる。

オーバーシュート現象に関しての詳細は、本実験においてはオシログラフ振動子の制動を過大状態にして使用したため、満足すべき結果が得られなかったが、定性的には、サブクーリングが小さい場合でも著しいオーバーシュート現象が認められ、Rosenthal⁽⁶⁾の結果と異なった傾向を示した。

オーバーシュート点を経て、核沸騰を開始すると、熱伝達が急速によくなるため、発熱体温度は急激に低下し、バーンアウト点にいたるまでの期間は温度変化のさほど著しくない準定常状態が持続される。この状態は、入口サブクーリングの大きい場合ほど、あるいは入力の低い場合ほど長時間持続される。

(2) 準定常沸騰期間の発熱体表面温度

第3図は管径 2, 4 および 6 mm の場合のオーバーシュート点を経た後、準定常的な核沸騰を開始したと考えられる点(第1報第3図点2参照)における発熱体表面温度と管路入口水温との差 $\Delta T_{\text{sub}2}$ と、熱負荷 q_2 との関係を、入口サブクーリングをパラメータとして、入口サブクーリングが 0° , 25° , 50° および 80°C の場合に対して示している。図から $\Delta T_{\text{sub}2}$ と q_2 との関係には、定常時強制流動の場合⁽²⁾と同様に、著しい入口サブクーリングの影響がみられるが、一定の入口サブクーリングに対しては管径の影響はみられない。また、入口サブクーリング 80°C の場合に対しては、脱気水(1.2 ppm O_2) および非脱気水(13 ppm O_2) の二者を併記してあるが、ほとんどその影響は認められない。

次に、管径 2, 3, 4, 6, 8 および 10 mm ならびにプールの沸騰、入口サブクーリング 0° , 15° , 25° , 35° , 50° , 65° および 80°C 、含有酸素量 1.2 ppm および 13 ppm をそれぞれ組合せて行なった実験点のうち、繁雑を避けるためにその一部を、入口サブクーリングをパラメータとして上記の点2における表面過熱温度(発熱体表面温度と飽和温度との差) $\Delta T_{\text{sat}2}$ と熱負荷 q_2 との関係によって第4図に示す。図には第1報と同様に、定常時垂直二重管内強制流動の場合の結果(空気含有量 0.03~0.6 ppm)⁽²⁾、および水平細線プール沸騰時の結果(空気含有量は明記していない)⁽⁷⁾を併記して本実験結果と比較した。図から、実験値のちらばりはあるが、上記実験範囲に対し、 $\Delta T_{\text{sat}2}$ と q_2 との関係には入口サブクーリングの影響はほとんど認められない。また、第1報の場合と同様にその関係は、熱負荷が後述する限界熱負荷より大きい場合を含んでいるにもかかわらず、定常時に対する上記文献の結果とはほぼ同一の傾向を示している。

(a)

(b)

第2図 オシログラムの例

第3図 入口サブクーリングを用いたときの $\Delta T_{\text{sub}2}$ と q_2 との関係

第4図より本実験範囲に対して次式が得られる.

$$q_2 = 4.68 \Delta T_{\text{sat}2}^{1.71} \times 10^3 \text{ kcal/m}^2\text{h} \dots\dots(1)$$

ただし, $\Delta T_{\text{sat}2}$ = 点2における発熱体表面温度 - 飽和温度 $^{\circ}\text{C}$

(3) バーンアウト時間および限界熱負荷 第5,

6, 7 および8図は, 入口サブクーリングが 80° , 50° , 25° および 0°C の場合のバーンアウト時間 (沸騰開始よりバーンアウト点にいたる所要時間) τ_B と熱負荷 q_B との関係を両対数グラフにより示したものである. 第5図は特に脱気水と非脱気水との場合を併記して両者の比較を行っており, 他の図はすべて脱気水の場合に対する関係を示している.

これらの図より次の事実が認められる.

i) バーンアウト時間 τ_B と熱負荷 q_B との関係を

第4図 飽和温度を用いたときの $\Delta T_{\text{sat}2}$ と q_2 との関係

第5図 バーンアウト時間と熱負荷の関係 (入口サブクーリング 80°C)

両対数グラフに描いた場合, そのこう配は入口サブクーリング, 含有空気量, 管路径に無関係にほぼ一定とみられる. このこう配は, 本実験範囲では約 -1.7 である.

第6図 バーンアウト時間と熱負荷の関係 (入口サブクーリング 50°C)

第7図 バーンアウト時間と熱負荷の関係 (入口サブクーリング 25°C)

第8図 バーンアウト時間と熱負荷の関係 (入口サブクーリング 0°C)

ii) 管路径が変わるとバーンアウト時間は変る。すなわち、同一熱負荷のとき管路径が大になるほどバーンアウト時間が長くなる傾向を示している。しかしながら、サブクーリングが 0°C の場合には管路径のバーンアウト時間に対する影響はほとんど認められない。

iii) 管路径と熱負荷が与えられたとき、バーンアウト時間は入口サブクーリングの増加とともに長くなる傾向を示す。

iv) 含有空気量の影響は、本実験の範囲においては、ほとんど認められない。

v) 各図の右方に矢印によって、バーンアウトを生じない ($\tau_B = \infty$) 限界熱負荷 (= 限界入力) q_0 の値を示しているが、この値は入口サブクーリング、管路径によって異なり、含有空気量にはほとんど無関係である。これらの値を半対数グラフによって示せば第9図のようになる。図には次式で与えられる曲線が記入されている。ただし、入口サブクーリングが 0°C およびプールの沸騰の場合を除いてある。

$$q_0/10^7 = 4.5 D_e^{1.8} \Delta t^{0.824} \quad \text{kcal/m}^2\text{h} \quad (2)$$

ここに、 D_e = 管路径 - 発熱体直径 m

Δt = 入口サブクーリング $^{\circ}\text{C}$

vi) バーンアウト限界熱負荷以上の熱負荷を与えた場合のバーンアウト時間 τ_B s と q_B kcal/m²h との実験式を求めると、本実験範囲内において近似的に次式が得られる。

第9図 入口サブクーリングと限界熱負荷の関係

第 1 表

入口サブクーリング $^{\circ}\text{C}$	管 路 径 mm			
	2	3	4	6
80 (1.2 ppm O_2 13 ppm O_2)	2.95	3.90	6.20	6.20
50 (1.2 ppm O_2)	1.00	1.85	5.00	—
25 (")	0.30	0.52	0.95	—
0 (")	0.023	—	0.023	0.023

$$\tau_B = C(q_B/10^6)^{-1.7} \quad (3)$$

ここに、 C は入口サブクーリング、管路径によって定まる定数であって、それぞれの値は第1表に示される。

入口サブクーリング 0°C の場合には、それぞれの管路径に対応する限界熱負荷を越えると、ごく短時間 (0.1 s 前後) の間に、発熱体の全長にわたる膜沸騰によるバーンアウトを生ずるために、管路径の影響はほとんど認められず、それゆえ、 C はすべての管路径に対し同一の値を示している。なおバーンアウト時間は、その系の過渡応答におけるバーンアウト発生の時間遅れを意味している。

(4) 気ほうの挙動とそのバーンアウトに及ぼす影響
バーンアウト現象を理論的に取扱う試みは、すでに二、三の研究者によってなされているが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、管路内におけるバーンアウト現象を取扱ったものは、まだ少ないようである⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。そこで、理論的取扱いに対する基礎を得、また上記の実験結果を考察するために、測定と同時に現象の観察も行なった。以下これについて述べるが、文中に示す入力値は限界熱負荷付近あるいはそれ以上のものである。

i) 入口サブクーリング 80°C 、非脱気水の場合
バーンアウトが起るまでの気ほうのようすは、入力に応じて著しく変化する。すなわち、比較的低い入力値で、管路径の小さい場合は、発熱体表面において発生成長した気ほうは、管内平均水温の上昇とともに直径がおおよそ 1 mm にもなる。この大気ほうは表面を離脱し、管路内を上昇する。同時に表面に発生した大気ほうの間から微粉状の小気ほうが半径方向に噴出される。一方、比較的高い入力の場合、あるいは管路径が大きい場合には、大気ほうはほとんど発生せず、かなり大きな振動音とともに小気ほうが激しく噴出し、管路内に充満する。これらの気ほうの発生に伴う管路内の自然循環流動や、バーンアウトの発生の状態は、管路径および入力に応じて異なっている。管路径が小さく ($2, 3$ あるいは 4 mm)、入力値が比較的低い場合 (約 1×10^6 kcal/m²h 以下) には、大気ほうが上昇するにつれて集合し、管路上部において気ほうは管路を充満して蒸気閉そくを起す。このとき、この閉そく気ほう群が上部に移動し、管路外に抜けることもあり、またピストン運動におけるように周期的に上下運動をすることも、あるいは1箇所に静止することもある。これらの場合、蒸気ほうに包まれた部分の温度は上昇するが、この部分が比較的小さい場合や、ピストン運動をするときには必ずしもバーンアウトは起らない。一方、管路径が大きく、入力値があまり高くない場合には、主と

して小気ほうが発生し, これらの上昇とともに管路上部のサブクーリングが減少し, 気ほうの密度が大になってバーンアウトする. 入力をさらに増し, きわめて大きくすると, 管路内の水の流動がほとんど発達しないうちに, 膜沸騰によってバーンアウトする.

発生した気ほうのうちには, 消滅するのに長時間を要するものもあるので, 蒸気ほう以外に水中に含まれた空気が加熱脱気されて, 蒸気ほう中に混在しているものと考えられる. このことは, 脱気水を用いた場合気ほうの消滅が急速であったことから明らかである.

ii) 入口サブクーリングが 0°C より大きい脱気水の場合 バーンアウトが起るまでに発生する気ほうには, いろいろの大きさのものがあるが, 入口サブクーリングが大きく, かつ高入力の場合には, 比較的小さい気ほうの管路内に占める割合が多くなる. たとえば, 入口サブクーリング 80°C , 高入力 (およそ $1.4 \times 10^6 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 以上) の場合には, 大部分が小気ほうである. 一方, 入口サブクーリングが小さく, かつ入力が低い場合には比較的大きい気ほうの管路内に占める割合が多くなる. 入口サブクーリングが 15°C ないし 25°C の場合には, 大部分大気ほうが観察される. しかし, 入口サブクーリングが大きくても, 低入力で, しかも管路径が小さい場合には, 管路内の平均水温が上昇し, 入口サブクーリングが小さい場合と同様に, 大きい気ほうが認められる.

バーンアウトは, 大気ほうが多い場合には蒸気閉そくにより, 小気ほうの多い場合には膜沸騰により生ずるものと考えられる. しかし, バーンアウトが急速に起るときにはその現象を観察することは, むづかしいが, 蒸気閉そくによるものでないことは認められる. たとえば, 入口サブクーリングが小さい場合に, きわめて高い入力を加えると瞬間的に, バーンアウトするが, これは膜沸騰によるものと考えられる.

iii) 入口サブクーリング 0°C の場合 この場合に発生する気ほうは, 大気ほうのみである. 比較的低入力の場合には, この大気ほうが上昇し, 管路出口付近で蒸気閉そくを生じた結果バーンアウトを生ずる. 入力が増加するに従って管路内の流動が十分発達する前に膜沸騰によりバーンアウトを起すようになり, ついにはほぼ全長にわたる膜沸騰を生ずるようになる. また, 入口サブクーリングが 0°C の場合には, サブクーリングのある場合と異なって, バーンアウトの発生機構には, 上記の入力による相違のみがみられるのみで, 管路径による影響はほとんど認められない.

4. 結 論

長さ 200 mm, 直径 0.2 mm のニクロム線発熱体を用い, 大気圧のもとで, 冷却水が自然循環する場合の垂直二重管内沸騰時の過渡的現象について, 入口サブクーリング, 管路径および含有空気量の影響を実験により求めた結果, 次のような結論を得た.

(1) 準定常沸騰期間において, 発熱体表面温度は, 入口サブクーリング, 管路径ならびに含有空気量にほとんど無関係であり, (1) 式に示したように, 熱負荷に対して一義的に定まる.

(2) 発生する気ほうには, 大小 2 種類が認められ, 入口サブクーリングが小さく, 低熱負荷の場合には主として大気ほう, 入口サブクーリングが大きく, 高熱負荷の場合には主として小気ほうが発生する.

(3) バーンアウトは, 入口サブクーリング, 管路径および入力が大きい場合には, 部分的膜沸騰により, 入口サブクーリング, 管路径および入力が小さい場合には, 管路出口付近における蒸気閉そくにより, さらに入口サブクーリングが 0°C の場合には, 管路径に無関係に主として広範囲にわたる膜沸騰によって発生する.

(4) バーンアウトを生じない限界熱負荷 (限界入力) は, 入口サブクーリングおよび管路径によって異なっているが, 含有空気量にはほとんど無関係であり, その値は第 9 図に示されている.

(5) 沸騰開始点よりバーンアウト点にいたる時間は, 入口サブクーリングおよび管路径が大きくなるほど長くなり, また入力で逆比例するが, 含有空気量には無関係である. この関係は (3) 式ならびに第 5~8 図に示されている.

終りに, 本実験に協力された近藤奎五, 杉本滋郎, 大角晋三, 今岡恒夫 および 角家義樹の諸君に感謝する.

文 献

- (1) 佐藤・岐美・竹内・近藤, 機械学会論文集, **27**, 177 (昭 36-5), 722.
- (2) W.H. McAdams and Others, *Indust. Engng. Chem.*, **41**, 9 (1949-9), 1945.
- (3) K.E. Forster & R. Greif, *Trans. ASME*, Ser. C, **81**, 1 (1959-2), 43.
- (4) F.C. Gunther, *Trans. ASME*, **73**, 2 (1951-2), 115.
- (5) W.H. Jens & P.A. Lottes, *ANL-4627* (1951-5).
- (6) M.W. Rosenthal, *Nucl. Sci. Engng.*, **2** (1957), 640.
- (7) 抜山, 機械学会誌, **37**, 206 (昭 9-6), 367.
- (8) W. Rohsenow & P. Griffith, *Chem. Engng. Progr. Symposium Series*, **18**, 52 (1955), 47.
- (9) Y.P. Chang, *Trans. ASME*, **79**, 7 (1957-10), 1501.
- (10) 岐美, 京大工研研究報告 (英文), **10**, 10, Report No. 74 (1960-12).
- (11) W.R. Gambill & R.D. Bandy, *ORNL-3026* (1960-12).