H133

高温加熱面の膜沸騰崩壊温度に関する研究 Study on Film Boiling Collapse Temperature of Hot Dry Surface

正 大竹 浩靖(工学院大) ○学 永 嶋 望(工学院大院) 正 小 泉 安郎(信州大)

Hiroyasu Ohtake, Nozomi Nagashima and Yasuo Koizumi

Kogakuin University, 2665-1 Nakano-machi, Hachioji, Tokyo 192-0015

Shinshu University, 3-15-1 Tokida, Ueda, Nagano 386-8567

The behavior of rewetting on a high superheated and dry surface, focusing on rewetting temperature just as collapse of saturated and subcooled film boiling was investigated experimentally and analytically. Saturated and subcooled impingement jet experiments were conducted by using a Silicon wafer with 20 mm length, 20 mm width and 0.5 mm thickness and pure water at atmospheric condition. Temperature of the test heater was measured by using a commercial separated-type infrared thermometer from a back side of it. The present experimental results showed that as the liquid subcooling was high, MHF temperature was higher. Namely, the experimental results agreed with Dhir-Purohit's correlation.

Key Words: Film Boiling, Minimum Heat Flux, Rewetting

1. 序論 鉄鋼の製造工程、特に金属組織の生成は、水冷時の冷却特性と密接な関わりを持つ。多くの場合、この冷却には沸騰現象を伴い、沸騰熱伝達の詳細な理解、特に高温面上での濡れ開始条件の把握が必要である。これまで、濡れ開始条件及び濡れの挙動、即ち膜沸騰崩壊条件と遷移沸騰熱伝達に関して多くの報告^{[1]-[4]}が行われてきたが、詳細な理解に至っておらず、未だ不明瞭な点が多い。本研究では膜沸騰の崩壊条件の定量的把握として、水平上向き平板を用いた液ジェットを衝突させ、高温加熱面上の濡れの挙動を実験的に検討し、固液接触の温度条件及びその熱伝達特性を得ることを目的とする。本稿では、特に赤外線放射温度計を用いた非接触型の温度計測を試みた。

2. 実験方法 Figure 1 に実験装置概要図を示す。本実験装置は、⑥加熱面、①試験容器、⑨循環ポンプから構成される大気解放のループ系である。試験液体には脱気した純水を使用した。加熱面は厚さ 0.5mm の Si ウェハ(熱伝導率: 約 60W/mK, Bi 数: 約 0.0013)を幅 20×20mm に加工した薄板であり、この加熱面は SUS303 製支持円盤に耐熱性セラミック接着剤で裏面から接着された後、水平上向きに試験容器内部に固定される。以下に実験手順を示す。

① Test Vessel ② Main Tank ③ Sub Tank ④ Heater 1
⑤ Heater 2 ⑥ Test Plate ⑦ Rotameter ⑧ Mirror ⑨ Pump

Figure 1 Experimental Apparatus

(A) ②Main Tank 内の⑤ヒータ 2 で試験液体を脱気後、100℃まで加熱する。

(B) ③Sub Tank を所定の温度まで加熱した後、バイパス経由で試験液体を循環させ、試験液体を所定の液温度、液流量に設定する。この際、試験液体の液温度は③Sub Tank と

④ヒータ 1 を用いた間接加熱により調整し、試験液体の流量は⑦浮子式流量計を用いて調整する。

(C) 工業用ドライヤにて、⑥加熱面を 500℃まで加熱する。

(D) バルブ D を開け、液噴流により加熱面を冷却する。この冷却時の加熱面の面温度分布を⑧市販の鏡を介し、⑪赤外線放射温度計を用いて計測する。同時に、加熱面上の液挙動を⑩高速度カメラにて記録する。なお、面温度分布の計測速度は最大 60 面/s、高速度撮影は最大 3000fps にて行った。面温度分布の温度計測点は中心より 0mm、2.11mm、4.22mm の位置である。また、実験条件である液サブクール度は 0K~40K、液流量は 0.29m/s、0.58m/s である。本実験に使用した赤外線放射温度計の性能を Table 1 に示す。

Table 1 Performance of Infrared Thermometer

測定温度範囲	-40~500℃	空間分解能	1.5mrad
測定距離	30cm~∞	温度分解能	0.05℃以下
視野角	26.4° (H)~20.0° (V)	収録速度	最大60frame/sec

3. 実験結果と考察 Figure 2 に、本実験により得られた冷却曲線(温度履歴)の一例、赤外線放射温度による温度可視化画像、高速度カメラによる液挙動画像を示す。この温度計測に際し、放射率は 0.1 に設定した。Figure 2 に示すように、冷却曲線及び液挙動画像より、膜沸騰期間、クエンチ点(急冷開始点、すなわち膜沸騰最小温度)、急冷期間が確認できる。Figure 2 より $\Delta T_{sub}=0K$ 時に 413.12℃で確認できた。Figure 3 に沸騰曲線の一例を示す。Bi<0.1 であるため、熱流束は集中熱定数近似を利用して求めた。

$$q = \rho c \delta (\Delta T / \Delta t)$$

Figure 3 中には既存の相関式^{[2]-[6]}による計算値を各直線にて併記した。Figure 3 に示すように、MHF 点温度は Dhir-Purohit の式に近いことが確認できた。

$$T_{MHF} = 201 + 8\Delta T_{sub}$$

定量的な一致が確認できなかったのは、温度計測点を中心付近で行ったため液膜が進展する際の先端温度(スパッタリング点温度)の計測ができなかったことが原因であると考えられる。CHF 点温度も同様の理由で Ivey-Morris の相関式と一致が確認できなかった。Table 2 に本実験により得られた各液サブクール度と各液流速に対するクエンチ点温度の結果を表にして示した。Figure 4 に本実験により得られた各液サブクール度とクエンチ点温度の関係を示した。また、Dhir-Purohit の式の計算値を直線にて併記した。Figure 4 より液サブクール度の増加に伴いクエンチ温度が

増加することが確認された。Figure 5 に各液流速とクエンチ点温度の関係を示した。クエンチ点温度の液流速に対する依存性は確認できなかった。Figure 6 は液膜先端の移動に注目し横軸に中心からの液膜先端の位置、縦軸に液膜先端の温度を示したものである。蒸気膜を介して加熱面の温度が減少し、濡れが周囲へと進展することが確認できた。また、液サブクール度の増加に伴いクエンチ点温度が増加することも確認された。

Figure 2 Cooling Curves, the behavior of rewetting and temperature distribution of area(Liquid Subcooling 0K, Liquid Flow Velocity 0.29m/s)

Figure 3 Boiling Curves(Liquid Subcooling 0K, Liquid Flow Velocity 0.29m/s)

Table 2 Quench point temperature(Minimum film boiling point temperature)

	0K	10K	20K	30K	40K
0.29m/s	413.12	425.24	441.47	448.39	470.90
0.58m/s	423.58	425.56	429.59	412.02	458.23

Figure 4 Correlation of liquid Subcooling and quench point temperature

Figure 5 Correlation of liquid velocity and quench point temperature

Figure 6 Position of sputtering temperature

4. 結論 赤外線放射温度計を用いた非接触の温度計測手法により、高温過熱面上の面温度分布を計測し、膜沸騰崩壊温度条件及びその熱伝達特性を検討した。前者はDhir-Purohitの式に近いことを示した。クエンチ点温度に対する各液サブクール度及び各液流速の依存性を検討し、サブクール度の増加に伴いクエンチ点温度が増加し膜沸騰期間が短くなることが確認できたが、液流速の依存性は少ないことが確認できた。

参考文献 [1] 日本機械学会編, 沸騰熱伝達と冷却, (1989), 日本工業出版. [2] Dhir, V. K. and Purohit, G. P., Nucl. Eng. Des., 47(1978), 49. [3] Nishio, S., Int. J. Heat Mass Transf., 30-10(1987), 2045. [4] Ivey, H. J. and Morris, D. J., Rept. AEEWR 137, (1962). [5] Berenson, P. J., Trans. ASME, J. Heat Transfer 83, (1961), 351. [6] Rohsenow, W. M., Trans. ASME, J. Heat Transf., 74-3(1952), 969.