

高温高圧下での凝縮熱伝達に関する研究

師岡 慎一[†] 久保 伸二[†] 白川 健悦[†]
湯浅 寛子[†] 山本 哲三[†] 小野 寛[†]

Study on Condensing Heat Transfer Test under High Temperature and High Pressure Conditions

Shinichi MOROOKA[†], Shinji KUBO[†], Ken-etu SHIRAKAWA[†]
Hiroko YUASA[†], Tetuzou YAMAMOTO[†] and Hiroshi ONO[†]

Abstract

The condensing heat transfer coefficient is one of the important factors to evaluate the pressure change under BWR (Boiling Water Reactors) abnormal transients. Condensing condition is about 7 MPa of pressure with vapor flow. Many condensing studies have been done under atmospheric conditions with stagnant vapor. However, the condensing test results under BWR conditions have not reported. Therefore, the condensing heat transfer test of the saturated vapor with vertical upward vapor flow has been done under high temperature and high pressure conditions.

The final purpose of this study is to develop the condensing correlation under BWR conditions. In this report, the data under pressures of 0.5 and 1 MPa are reported. Test section is tube. The inner diameter and condensing length is 57.6 mm and 2000 mm. Test fluid is saturated vapor. The following test results were obtained

(1) Flooding may have occurred at a higher vapor velocity. (2) Vertical vapor flow has the effect to enhance the condensing heat transfer. (3) The measured heat transfer coefficients are larger than that of Nusselt model due to the vertical vapor flow

Key Words: *Condensing heat transfer, Vertical vapor flow, High temperature and high pressure conditions*

1 緒言

沸騰水型原子炉において例えばタービン系統の不具合が発生し主蒸気止め弁が急閉した場合、原子炉では圧力上昇が生じ、最大圧力を評価するために凝縮熱伝達率を予測する必要がある。この場合、流体の条件は圧力7 MPa そして蒸気流がある。Nusseltは静止飽和蒸気状態での層流膜状凝縮熱伝達率相関式[1]を理論的に誘導するとともに、流動飽和蒸気でのモデルも提案しており、蒸気流速が増大つまり気液界面せん断力が増大するに従い、熱伝達率も増大するとしている。従来、蒸気流がある場合の凝縮熱伝達の研究は、上原

ら[2]そして Viewrow ら[3]により実施されており、上原らにより蒸気流を考慮した相関式も作成されているが、低圧データに基づいて作成されたものである。また、寺西ら[4]により、空気が混入した上向き蒸気流の場合の凝縮試験から内部の流れの状況の可視化が行われ、蒸気流により凝縮液が上部に運ばれる一種のfloodingが発生していることが報告されている。この場合も圧力は大気圧近傍である。

このように、高温高圧で蒸気流が有る場合の研究の報告は著者の知る範囲ではない。そこで、高温高圧下での凝縮熱伝達率の測定を行い、試験データの検討および既存相関式との比較を行ったので、報告する。

受付日: 2006年3月8日, 第43回日本伝熱シンポジウムより受付, 担当エディター: 瀧本 昭

[†] (株)東芝 (〒235-8523 神奈川県 横浜市磯子区新杉田町8)

2 試験体, 測定方法および試験条件

図 1 に試験体の概略図を示す. 試験体は, 凝縮管と水冷ジャケットより構成されている. 凝縮管で蒸気を凝縮し, 凝縮熱伝達率を測定する. 水冷ジャケットは, 凝縮管の外側に設置し, 蒸気を凝縮するためのものである. 蒸気はこの試験体の下部から流入させる. 流入した蒸気の一部は凝縮管内で凝縮し, 凝縮水は下部配管より排出され, この凝縮水量(以下ドレン量ともいう)を測定する.

凝縮熱伝達率は, 図 2 に示す凝縮管の半径方向に埋め込まれた熱電対より測定された温度分布から熱流束, 凝縮管内面温度をもとめ, 蒸気温度測定値を使用することにより算出した. 今後, 評価に使用するデータは全て局所凝縮熱伝達率(以下, 凝縮熱伝達率)である.

熱伝達率測定位置は蒸気流入上流側(下部位置)より#1 から#5 (5 箇所)あり, 各位置の冷却水温度そして蒸気温度を測定した.

試験装置は, 8 MPa まで試験が可能であるが今回の試験条件は以下とした.

- ・ 流体 : 飽和蒸気
- ・ 蒸気の流れ方向: 上向き
- ・ 圧力 : 0.5, 1.0 MPa
- ・ 液膜レイノルズ数: 400 ~ 1500
- ・ 上向き蒸気流速 ~ 15 m/s

液膜レイノルズ数 Re の求め方を#4 の場合を例にとって説明する.

#5 から, #4 熱伝達率測定位置までの凝縮量 W は冷却ジャケットの流量 G と#5 から#4 までの冷却水の温度上昇から求められる熱量 Q より次式により求める.

$$W = \frac{GC_p(T_{\#4} - T_{\#5})}{H_{fg}}$$

ここで, C_p :比熱 H_{fg} :潜熱

液膜レイノルズ数 Re は, 以下の式より求めた.

$$Re = \frac{4W}{L\mu_\ell}$$

ここで, L :凝縮面の周長(この場合は, 内径 $\times\pi$)

3 試験結果および検討

3.1 凝縮量

図 3 は縦軸に $Ratio = (\text{ドレン量}) / (\text{冷却水の奪った熱量が全て凝縮に利用されるとして計算した凝縮量: 正味の凝縮量})$ を, 横軸に蒸気流速をとり 圧力をパラメータ

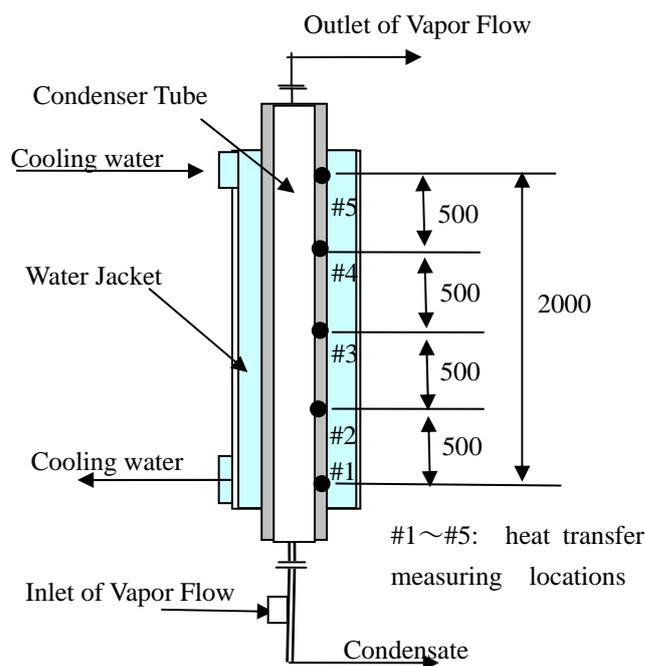


Fig. 1 Test section.

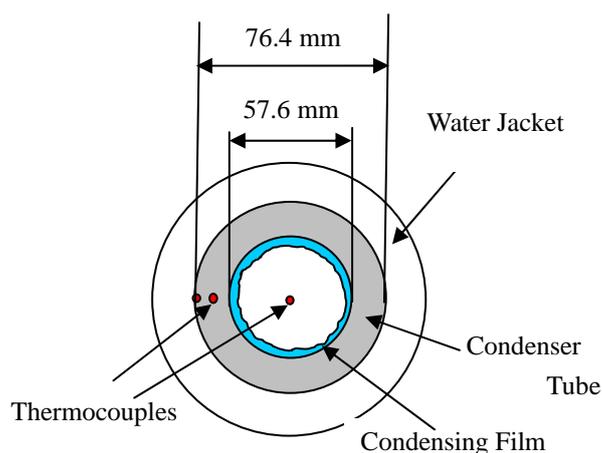


Fig. 2 Cross-sectional view.

にしてデータをプロットしている. 蒸気流速は, 軸方向で変化するが, ここでは入口での蒸気流速を示している. 圧力 1 MPa では蒸気流速が約 7 m/s 以上で, ドレン量が急激に減少している. 図 4 には, データより内部の流れの状況を推定した図を示す. 図 3 の図中には, 図 4 の流動状況を対応させて示している. 低い蒸気流速では, 液膜表面は波立っているが Ratio が 1 に近いということから, 液滴の飛散は少ないと考えられる(流動様相 (a)). 蒸気流速を増加すると, 流動様相 (b) に見られるように液膜表面から液滴が飛散し蒸気流により上部に運

ばれるようになる。更に、蒸気流速を増加させると、部分的な液膜の逆流が生じる(流動様相(c))。最終的には、凝縮液は蒸気により全て上部に運ばれ、一種の上昇二相流となっていると推測される。このように、寺西らが低圧で観察しているように、蒸気流速を増加させると、最初は液膜表面が波立つが、その後、ある蒸気流速になると蒸気の力によって、液膜表面から液滴が発生し、上部に液体が運ばれる現象、一種の **flooding** が発生していると考えられる。従って、ドレン量は冷却水の奪った熱量が全て凝縮に利用されるとして計算した凝縮量より小さくなっている。(Ratio が 1 以上になっているのは計測誤差と思われる。)

圧力が高い 1.0 MPa では、0.5 MPa の場合に比べ蒸気密度が増大し、液膜を引きちぎる力(せん断力)が増大するために、より低い蒸気流速でこのような現象が発生している。つまり、上昇蒸気流の凝縮は、静止蒸気あるいは下降蒸気流の凝縮とは異なる現象が発生している。

3.2 軸方向壁面温度分布

図 5 に横軸に壁面表面温度、縦軸に熱伝達率測定位置をとり、代表的な軸方向壁面温度分布を示す。下部に行くに従い、若干温度が上昇しているように見えるが、軸方向でそれほど大きな温度分布はない。

3.3 凝縮熱伝達率

図 6 に横軸に蒸気流速、縦軸に凝縮熱伝達率をとり、蒸気流速による凝縮熱伝達率への影響を示す。プロット○、●は、図 1 の熱伝達率測定位置#4、3 の結果を示す。図中には、図 3 から推定した **flooding** が開始した流速(5m/s)とほぼ凝縮液が上昇流となっている流速(10m/s)を線で示している。液膜レイノルズ(Re)がほぼ一定の場合、蒸気流速が増大するに従い、凝縮熱伝達率は全体的に増加している。上昇蒸気流による伝熱への影響を検討する。

効果 1: 液膜速度の減速による伝熱悪化

上昇蒸気流により液膜界面に上向きせん断力が働き、液膜速度が減速し、液膜厚さが増大することにより、伝熱は悪化する。

効果 2: 液膜表面の乱れによる伝熱改善

蒸気流により液膜界面が乱れ液膜内の熱移動が活発になると伝熱は改善する。

効果 3: **flooding** による伝熱改善

蒸気流により液膜界面から液滴が飛散すると液膜流量が減少し液膜厚さが薄くなると伝熱は改善する。

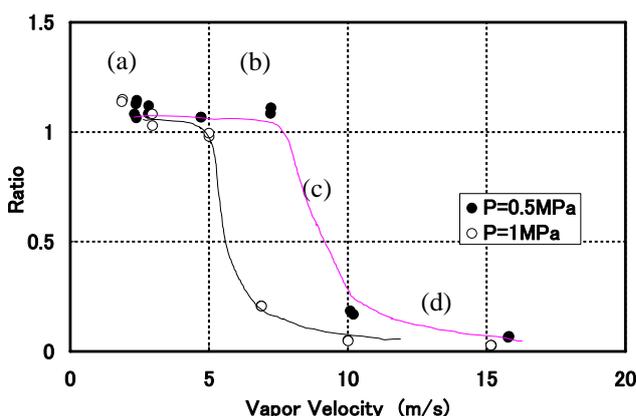


Fig. 3 Effect of vapor velocity on ratio of measured condensate and evaluated condensate from cooling water.

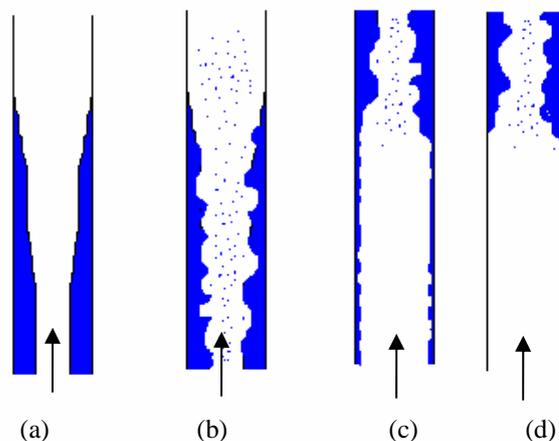


Fig. 4 Flow pattern.

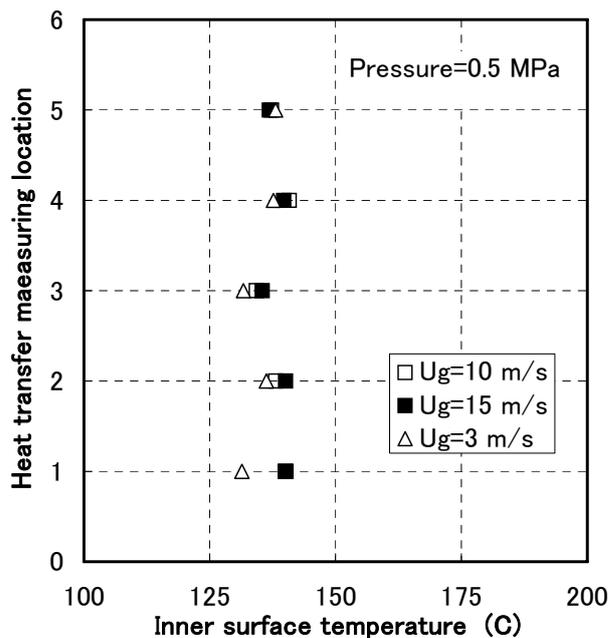


Fig. 5 Axial temperature distribution of condensing surface.

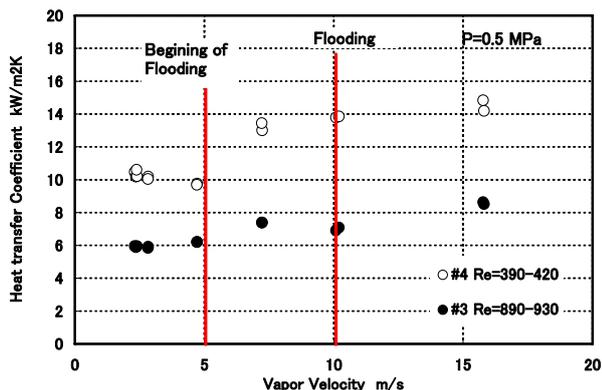


Fig. 6 Effect of vapor velocity on condensing heat transfer coefficient.

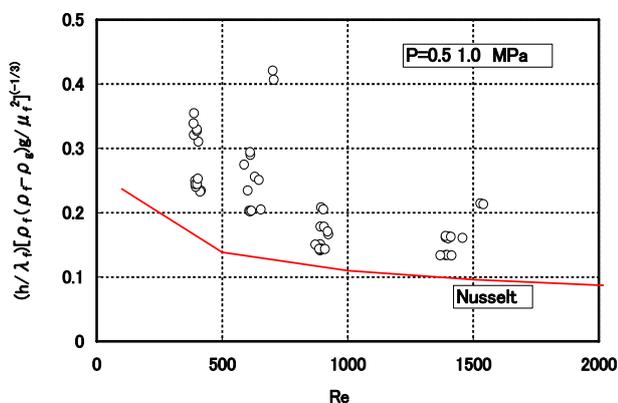


Fig. 7 Comparison of Nusselt theory.

総合的な伝熱は上記効果 1,2,3 の複合効果となる。

データを詳細にみると、蒸気流速を7から10 m/sでは、熱伝達率が減少する。これは効果1の液膜速度減速効果が出たためと考えられる。その後、蒸気流速を増加すると熱伝達率が增大している。つまり、効果1<(効果2+

効果3) となったと思われる。液膜がこのRe範囲では、蒸気流は伝熱を改善する方向に働くと考えられる。

図7は、floodingが発生していないデータを抽出して、Nusseltの膜状凝縮相関式[1]と比較したものである。気液界面の波立ちの影響を考慮していないNusseltモデルより上昇蒸気流の影響により熱伝達率は増加している。

4 結論

高温高圧下での上昇飽和蒸気の凝縮熱伝達の測定を行い、以下の結果を得た。

- (1) Reが1500以下の範囲においては、上昇蒸気流は凝縮熱伝達率を増加させる。
- (2) 本試験範囲では、Nusseltモデルよりも測定値は大きな熱伝達率を与える。

参考文献

- [1] Nusselt, W., Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes the surface condensation of water, *Zetschr. Ver.Deutch. Ing.*, **60** (1916), 541-546.
- [2] 上原ら, "鉛直面上の波流膜状凝縮", *日本機械学会論文集*, **48-433,B** (1982), 1751-1760.
- [3] Viewrow, K. M. *et al.*, "Condensation in a natural circulation loop with noncondensable gases", *Proc. ICMF 91 Tsukuba* (1991), 183-186.
- [4] Teranishi, T. *et al.*, "Effect of flow direction on condensation heat transfer of air-water mixture inside a vertical cooled tube", *Proc. 6th ASME-JSME Thermal Eng. Conf., TED-AJ03-306* (2003).