蒸気発生器の管支持板クレビス部における 熱流動現象に関する研究[†]

上野隆司・平尾康彦・柘植綾夫・川西康平

三菱重工業(株) 高砂研究所^{††}

蒸気発生器の管支持板における穴形状の改良検討を、クレビス内での濃縮ポテンシャル低減の観点で種々の管支持板についての系統的な熱流動実験を行った。

クレビス内で発生するドライ・ウェット領域には実験後の伝熱管表面に蒸発残さが多く存在したことから、高い濃縮ポテンシャルを有していることがわかった。ドライアウト領域が発生すると、このドライ・ウェット領域が生じるため、クレビス内でドライアウトが発生するか否かを判定することが、濃縮ポテンシャルを評価する上で重要であることを指摘した。

実機の温度、圧力を模擬した高圧ループでの伝熱管過熱度の周方向分布から、伝熱管と接する管支持板の穴形状が凹曲面である場合には伝熱管との接触線付近でドライアウトが発生するが、フラットな面である場合にはドライアウトの発生がなく、濃縮ポテンシャル低減効果の観点から実機適用に有効であることがわかった。

緒 言

加圧水型原子力プラントの蒸気発生器に関しては、伝熱管壁と管支持板とで形成される狭い隙間（以下、クレビスと呼ぶ）において、缶水中の不純物の濃縮による伝熱管の腐食が生ずる可能性が高い。この腐食を防止するため、濃縮ポテンシャルの低いクレビス形状を有する管支持板を開発することが必要である。ここで濃縮ポテンシャルとは、クレビス部における濃縮現象によって増加し得る不純物濃度とクレビス部外（缶水中）の不純物濃度の比を言う。腐食を生じさせる不純物としては、配管の溶接部等から溶出した遊離アルカリ、すなわちNaOH等の強アルカリで濃度の増加に伴ってpHが増加するものが挙げられており、これまで清浄度向上を狙いとした水質の変更に関する研究や耐食性向上を狙いとした伝熱管材質の変更に関する研究がなされている^{4,5,7,8)}。狭い隙間内での熱流動現象についてはこれまでかなりの研究がさされている¹⁻³⁾が、周方向に隙間が零から変化する問題に適用できる知見は与えられていない。

本報では、まず、クレビス部における濃縮現象に関する基礎データを取得することを目的に、低圧ループ(0.2~0.3MPa)及び高圧ループ(2.2~5.8MPa)の実験装置を用い、既存の管支持板の管穴形状並びに新たに考案し

た種々の管穴形状について圧力、熱流束、サブクール度及び流束を変え、伝熱管壁周方向の過熱度分布を測定した。ついで、伝熱管上の沸騰状況および蒸発残さ沈着状況の目視観察結果も加味して、ドライアウト領域、すなわち伝熱管表面が蒸気相に直接接触する乾いた状態の領域、の存在の有無を検討し、最適な管支持板の管穴形状について言及した。

1. 実験装置

Fig. 1に実験装置の主要部を示す。低圧・高圧ループ共に、テストセクションは二重管となっており、その環状部に缶水を送水した。伝熱管である内管は外径22.2mmのインコネル600製で、蒸気もしくは水を伝熱管内に流し、流体加熱方式で伝熱管を加熱した。低圧ループの外管は内径64.8mmの炭素鋼管で、ドライアウト領域の発生状況を目視観察するための観察窓を設けた。一方、高圧ループの外管は内径37.8mmのステンレス鋼管で、缶水をサブクーラに導き、所定のサブクール度に調整した。またテストセクション上部にコンデンサを設置し、冷却水流量を変えて圧力を制御した。

伝熱管は管支持板と、Fig. 2に示すように、線接触状態になるように設置した。伝熱管壁内には径0.5mmのK型シース熱電対を周方向に合計10本埋め込み、熱電対の温接点は管支持板厚みの中央に位置させた。

管支持板はガラス製（低圧ループ）またはステンレス製（高圧ループ）で、Fig. 3に示すように、管穴が円形

[†] 1992年7月8日受理；第27回日本伝熱シンポジウム（名古屋，1990年5月）にて一部発表

^{††} 〒676 兵庫県高砂市荒井町新浜2-1-1

Fig. 1 Schematic diagrams of test loops

Fig. 2 Circumferential positions of thermocouples

状の既存の管支持板タイプD-typeと、クレビス部での濃縮ポテンシャルを低下させるために新たに考案したB-type, EC-type, BEC-typeの4種類である。低圧ループ実験でのD-typeについては、ドライアウト熱流束に及ぼすクレビス隙間の影響をみるため、管穴寸法を3種類変えた。

B-typeは管穴の流路面積を増やして液をクレビス内へ流入させることによって、さらにEC-type, BEC-typeは伝熱管と接触する管穴部分をフラットな面として接触線近傍のクレビス隙間を大きくすることによって、それぞれドライアウト領域が発生しにくい管穴形状となるよう工夫されている。

Fig. 3 Configurations of tube support plates

実験は、Table 1に示すように、缶水側の圧力 P 、熱流束 q 、缶水のサブクール度(=飽和温度-缶水温度) ΔT_{sub} 、管支持板への近寄り液流速 v を変えて行った。なお、低圧ループ実験を行った理由は、目視観察を比較的容易に行える利点もあるが、低圧でのドライアウト熱流束は高圧(実機条件)の場合よりも小さいので、ドライアウト領域が発生しないという判定に対しては、高圧実験よりも低圧実験の方が安全側の評価になるためである。

2. 実験結果および考察

2.1 低圧ループ実験結果

D-typeの管支持板での沸騰状況の写真およびスケッチをFig. 4に示す。伝熱管と管支持板の接触線から周方向の角度 $\theta=0\sim40^\circ$ の角度で伝熱管表面が常に乾いた状態のドライアウト領域が存在し、その周辺 $\theta=40\sim60^\circ$ には間欠的に乾いた状態と濡れた状態が繰り返されるドライアウト・ウェット領域が存在している。写真では明確ではないが、目視観察によると、気泡はドライ・ウェット領域から斜め上方向にクレビス外へ流れ、クレビスの最大隙間部($\theta=180^\circ$)はこの気泡流れで攪乱状態にあ

Table 1 Experimental conditions

		Low pressure loop test	High pressure loop test
P	[MPa]	0.2~0.3	2.2~5.8
q	[MW/m ²]	0~0.35	0.12~0.29
ΔT_{sub}	[K]	0	0~25.8
v	[m/s]	0.07~0.6	0.08~0.44

った。

また、B-typeの管支持板においても、伝熱管との接触線近傍 $\theta=0\sim5^\circ$ においてドライアウト領域が発生した。B-typeの隙間は $\theta=0\sim15^\circ$ および $\theta=75\sim105^\circ$ で小さくなっている。この隙間が小さい領域から隙間が大きい領域 $\theta=15\sim75^\circ$ に向かって、水平方向に蒸気の激しい吹き出しがあった。

一方、EC-typeの管支持板においてはドライアウト領域の発生は認められなかった。EC-typeの隙間は全般的に大きく、伝熱管表面は核沸騰状態にあったが、特に伝熱管との接触線近傍での核沸騰状態が激しい様相を呈していた。

実験後の伝熱管表面を見ると、D-type および B-type の場合のドライ・ウェット領域には他の部分に比べて多くの蒸発残さが存在し、高い濃縮ポテンシャルを有することがうかがえた。このドライ・ウェット領域においては、激しい沸騰による液の蒸発が生じており、その蒸発量を補う液の供給が、隙間が小さいために抑制されることによって、濃縮ポテンシャルを高めているものと考えられる。ドライアウト領域が発生すると、この高い濃縮ポテンシャルを有するドライ・ウェット領域が生じるため、クレビス内でドライアウトが発生するかどうかを判定することが、濃縮ポテンシャルを評価する上で重要であると言える。

Fig. 5 に無次元過熱度 ΔT_{sat}^* の周分布の管穴形状による差異を示す。 ΔT_{sat}^* は管外が断熱の場合に $\Delta T_{sat}^*=1$ となるように、管壁の測定温度 T_w 、管支持板部の管内流体バルク温度 T_i 、管外の飽和温度 T_{sat} を用いて次式で定義した。

$$\Delta T_{sat}^* = (T_w - T_{sat}) / (T_i - T_{sat}) \quad (1)$$

D-type の場合、前述の観察結果と対応して考えると、ドライアウト領域が存在する $\theta=0\sim40^\circ$ で ΔT_{sat}^* は大きく、ドライ・ウェット領域が存在する $\theta=40\sim60^\circ$ で ΔT_{sat}^* は急激に低下するとともに温度変動も大きくなる。さらに、 θ が増加するに伴い隙間も増加するので、液流速が増大し、 ΔT_{sat}^* は緩やかに低下している。

B-type の場合、ドライアウト領域が狭くなっている。D-type に比べて過熱度が小さく、 $\theta=10^\circ$ のと

(D-type; $\delta_{\max}=0.4\text{mm}$, $P=0.2\text{MPa}$)
 $(q=0.12\text{MW/m}^2, \Delta T_{sub}=0\text{K})$
 $v=0.4\text{m/s}$

- (C/L) : Contact Line
- (D) : Dryout Region
- (D/W) : Dry and Wet Region
- (S) : Steam Bubbles

Fig. 4 Dryout state on tube surface
(Low pressure loop test; D-type)

ころでドライ・ウェット領域特有の急激な ΔT_{sat}^* の低下と温度変動が生じている。 $\theta=20^\circ$ のところでは、接触線近傍の隙間が小さい領域からの蒸気の激しい吹き出しによって、熱伝達率が向上し、 ΔT_{sat}^* は最小値をとる。また、図示範囲において隙間が最も大きくなる $\theta=45^\circ$ で、蒸気の吹き出しの影響が小さくなり、 ΔT_{sat}^* は極大値をとることがわかる。

ドライアウトの発生のないEC-typeの場合の ΔT_{sat}^* は小さく、その分布は平坦となっている。低圧でのドライアウト熱流束は高圧（実機条件）の場合よりも小さいことを考えると、実用化されている蒸気発生器の最大熱流束 0.35MW/m^2 においてもドライアウトの発生がないと言える。

Fig. 5 Circumferential variation of wall superheat (Low pressure loop test)

以上述べたように、クレビス内の沸騰状況の観察結果と ΔT_{sat}^* の周方向の分布には相関性があり、目視観察が不可能な場合でも、 ΔT_{sat}^* の周方向の分布からドライアウト領域発生 の判定ができることがわかった。

前述したように、クレビス内でドライアウトが発生するか否かは濃縮ポテンシャルを評価する上で重要である。この観点から、ドライアウトの発生有無に関する基礎データを得るため、ドライアウトが最初に観察される熱流束、すなわちドライアウト熱流束に及ぼす主要因子の影響を調べた。主要因子としてはクレビスの隙間と液流速を挙げ、これらのドライアウト熱流束に及ぼす影響を、広いドライアウト領域が現れて観察が最も容易なD-typeの管支持板（隙間が θ に関して単純増加関数で $\theta = 180^\circ$ で最大隙間 δ_{max} を有する）を用いて調べた。ドライアウト熱流束 q_d と支持板への近寄り液流速 v の関係を、最大隙間 δ_{max} をパラメータにして、Fig. 6 に示す。 δ_{max} および v が大きいほど、 q_d は大きくなる。 q_d に及ぼす v の影響は v が大きくなるほど小さくなり、むしろ δ_{max} の影響の方が大きいことがわかる。

2.2 高圧ループ実験結果

ΔT_{sat}^* の周方向分布の管穴形状による差異をFig. 7 に示す。これら高圧ループ実験と前述の低圧ループ実験での ΔT_{sat}^* 分布は、双方のD-type, B-type どちら、並びにEC-type とBEC-type は定性的に同一傾向にあり、低圧ループ実験での目視観察結果と ΔT_{sat}^* 分布との対応から、高圧ループ実験での ΔT_{sat}^* 分布の傾向を推論することにする。D-type の場合、伝熱管と管支持板の接触線近傍で ΔT_{sat}^* は大きく、高圧下においてもドライアウト領域が発生していると考えられる。D-type に比べB-type の ΔT_{sat}^* は低下しているが、管支持板との接触線近傍の ΔT_{sat}^* は大き

Fig. 6 Effect of liquid velocity and crevice gap on dryout heat flux (Low pressure loop test)

Fig. 7 Circumferential variation of wall superheat (High pressure loop test)

く、B-type の場合、依然としてドライアウト領域が発生しているものと考えられる。BEC-type の場合、 ΔT_{sat}^* 分布は平坦であり、高圧下においてもドライアウト領域の発生はないものと考えられる。

前述の低圧ループ実験によると、ドライアウト領域の周辺にはドライ・ウェット領域が存在し、その部分に蒸発残さが多く存在するが、蒸発残さの存在がドライアウト領域およびドライ・ウェット領域の存在の確認手段となる。実験後における管支持板との接触線近傍の伝熱管表面の写真をFig. 8 に示す。D-type の場合は楕円形状の、B-type の場合は長方形の、他の部分に比べて多くの蒸発残さが存在する領域が認められる。一方、BEC-type の場合は接触線近傍に棒状の蒸発残さが認められ、この部分の濃縮ポテンシャルは他の部分よりも高くなっている。このことと、 $\theta = 0^\circ$ での ΔT_{sat}^* がBEC-type の最低値を示すこと (Fig. 7) を併せて考えると、接触線近傍での沸騰濃縮現象を次のように推論できる。 $\theta = 0^\circ$ において

D-type

B-type

BEC-type

5mm

Fig. 8 Typical deposit pattern on the tube surface after high pressure loop test

ΔT_{sat}^* が低いということを熱伝達の観点から考えると、 $\theta = 0^\circ$ における伝熱管外表面の熱伝達係数が大きいと解釈できる。熱伝達係数は沸騰核の数の増加とともに大きくなり⁶⁾、またこのことは、前述したEC-typeでの接触線近傍での核沸騰状態が、激しい様相を呈していたという観察結果と一致する。したがって、 $\theta = 0^\circ$ における伝熱管外表面沸騰核の数は他の部分に比べて多く、また隙間も比較的小さいことから液の供給も抑制され易いため、他の部分に比べて多く蒸発残さが存在したものと推定される。

D-typeおよびBEC-typeの ΔT_{sat}^* の周方向分布に及ぼす主要パラメータの影響をFig. 9に示す。それぞれFigs. 9(a), (b), (d)に示すように、主要パラメータの中で圧力 P 、熱流束 q 、液流速 v の影響は小さく、Fig. 9(c)に示すサブクール度 ΔT_{sub} の影響が顕著であることがわかる。D-typeの場合、 $\Delta T_{sub} \leq 12K$ ではその影響は小さいが、 $\Delta T_{sub} = 25.8K$ では ΔT_{sat}^* は低下しており、ドライアウト領域が狭くなっていることがうかがえる。一方、BEC-typeの場合、接触線近傍を除けばサブクール度の影響はD-typeの場合よりも大きく現れている。これはフラットな面で隙間が大きいため、冷たい水がクレビス内に流入しやすいことによるものと考えられる。

以上の検討から、伝熱管と接する管支持板の穴形状が凹曲面である場合(D-typeおよびB-type)、伝熱管との接触線付近でドライアウトが発生するが、フラットな面である場合(BEC-type)、ドライアウトの発生がなく、濃縮ポテンシャル低減効果の観点から実機適用に有効であることがわかった。新型の蒸気発生器にはこのBEC-typeの管支持板が採用されており、伝熱管の腐食は現段階までは見いだされていない。

結 言

蒸気発生器の管支持板における穴形状の改良検討をクレビス内での濃縮ポテンシャル低減の観点で、既存の管支持板の管穴形状並びに新たに考案した種々の管穴形状についての系統的な熱流動実験を行い、次の知見を得た。

① 低圧ループ実験において、既存の管支持板D-typeの場合、 $\theta = 0 \sim 40^\circ$ でドライアウト領域が発生し、その周辺 $\theta = 40 \sim 60^\circ$ にドライ・ウェット領域が存在した。また、B-typeの管支持板においても、 $\theta = 0 \sim 5^\circ$ においてドライアウト領域が発生した。一方、EC-typeの管支持板においてはドライアウト領域の発生は認められなかった。

② 実験後の伝熱管表面を見ると、D-typeおよびB-typeの場合のドライ・ウェット領域には他の部分に比べて多くの蒸発残さが存在し、高い濃縮ポテンシャルを有することがうかがえた。

Fig.9 Circumferential variation of wall superheat (High pressure loop test)

③ ドライアウト領域が発生すると、このドライ・ウェット領域が生じるため、クレビス内でドライアウトが発生するかどうかを判定することが、濃縮ポテンシャルを評価する上で重要であることがわかった。

④ 高圧ループ実験における ΔT_{sat}^* の周方向分布の測定結果から、D-typeとB-typeの場合にはドライアウト領域が発生し、BEC-typeの場合にはドライアウト領域の発生はないものと推論した。

⑤ 伝熱管と接する管支持板の穴形状がフラットな面である場合、ドライアウトの発生がなく、濃縮ポテンシャル低減効果の観点から実機適用に有効であることがわかった。

Nomenclature

d	= tube hole diameter for D-type	[mm]
P	= presure in the outside of tube	[MPa]
q	= heat flux	[MW/m²]
q_d	= dryout heat flux	[MW/m²]
T_i	= bulk temperature of heating medium	[K]

T_{sat}	= saturation temperature outside of tube	[K]
T_w	= temperature at tube wall	[K]
ΔT_{sub}	= subcooling	[K]
ΔT_{sat}^*	= dimensionless superheat defined by Eq.(1)	[-]
v	= approaching velocity of liquid	[m/s]
δ	= crevice gap	[mm]
δ_{max}	= maximum crevice gap for D-type	[mm]
θ	= angle from contact line	[deg]

Literature cited

- 1) Ishibashi, E.: *Trans. of JSME, Ser. B*, 34-260, pp. 743-749 (1968)
- 2) Jensen, M.K. *et al.*: Proc. of 16th National Heat Transfer Conference, AIChE, St. Louis, ERI-76284, pp.1-10 (1976)
- 3) Katto, Y. and Yokoya, S.: *Trans. of JSME, Ser. B*, 32-238, pp.948-958 (1966)
- 4) Kishida, A. *et al.*: Proc. of 3rd. Inter. Symp. on

Degradation of Nuclear Power Systems-Water Reactor, pp.465-471 (1988)

- 5) Ueda, T. *et al.*: *Mitsubishi Tech. Bulltin*, **19**-6, pp. 53-66 (1982)
- 6) Yamagata, K. *et al.*: *JSME*, **18**-67, pp.53-56 (1952)
- 7) Yashima, S.: Proc. of Third International Topical

Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, pp.B9. 1-B9. 8 (1988)

- 8) Yonezawa, T. *et al.*: EPRI Workshop on Thermal Treated ALLOY 690 for Tubes in Nuclear Steam Generators, pp.1-14 (1985)

Study of Thermal-Hydraulic Behavior in Tube Support Plate Crevices within a Steam Generator

Takashi Ueno, Yasuhiko Hirano, Ayao Tsuge
and Kohei Kawanishi

Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Takasago Research & Development
Center, 2-1-1, Shinhamma, Arai-cho, Takasago, Hyogo Pref., 676 Japan

Key Words : Boiling, Chemical Concentration, Local Dryout, Tube Wall Superheat, Steam Generator

Improvement in the hole configuration of the tube support plate within a steam generator was investigated to reduce the potential of chemical concentration within the crevices. Systematic thermal hydraulic tests of various tube support plate types were performed.

Large deposit accumulations on the tube surface in the dry and wet region occurred within the crevices. A high potential of chemical concentration was found in the dry and wet region, because the active boiling and insufficient flow of water produced inferior rinse effect. It was noted that evaluation of the occurrence of the dryout region was important, because the dry and wet region occurred together with the occurrence of the dryout region. In the case of a concave surface support plate which the tube contacts, dryout occurred in the contact area and the dry and wet region occurred around it. On the other hand, in the case of a flat surface support plate, dryout did not occur. This type of tube support plate is usable in actual steam generators to reduce the potential of chemical concentration within the crevices.