ナトリウムヒートパイプに関する実験的研究*
(第2報)山本 格^{*1}, 田中芳雄^{*2}, 池田義雄^{*3}
望月正孝^{*4}, 杉原伸一^{*5}, 劉 紀福^{*6}Experimental Study of Sodium Heat Pipes
(2nd Report)Tadashi YAMAMOTO, Yoshio TANAKA, Yoshio IKEDA,
Masataka MOCHIZUKI, Shinichi SUGIHARA and Jifu LIU

The purpose of this study was to investigate the performance of the sodium heat pipe having a screen mesh wick with a hole for the relief of vapor bubbles yielded in a narrow space between the inner surface and the screen mesh layers at the evaporator section. The heat pipe was fabricated from Inconel 600 tubing of 1.5 mm wall thickness 25 mm in outer diameter and 1000 mm in length. A 50-mesh screen was used as the wick. In order to examine the effect of this wick, the performance tests of this heat pipe were carried out in the vapor temperature range of 500°C to 1000°C. As a result, it became clear that this type of wick is useful for removing the vapor bubbles from the narrow space and can prevent early generation of dry-out.

Key Words: Sodium Heat Pipe, Heat Transfer Rate, Heat Flux, Effective Thermal Conductivity

1. はじめに

著者らは、産業分野での使用を目的とするナトリウムヒートパイプの研究開発を行っているが、熱輸送量の増大を図る必要から、ウィックの有効空間容積の1.4~1.8倍相当量⁽¹⁾のナトリウムを封入している。 $m=1.4$ のナトリウム封入量は60 g、 $m=1.8$ では80 gになる。後者の場合、蒸発部内容積の78%に相当し、重力形ヒートパイプの場合の蒸発部内容積の15~30%に比べ非常に多い。このため、金網ウィックと管体内壁面間の狭い空間は蒸気泡と液の通路となり、特にヒートパイプを水平または若干傾斜させた場合には、気泡がウィック断面の上部にあつまり、ドライアウト発生の原因となっている。

本報では、蒸発部で発生した蒸気泡を除去し、ドライアウトを防止する試みとして、断熱部出口付近のウ

ィックに設けた蒸気放出孔⁽²⁾の効果蒸気温度500~1000°Cの範囲で調べた結果を報告する。

記号

Q : 熱入力 W
 T_a : 蒸発部表面温度 °C
 T_v : 蒸気温度 °C
 L : 蒸発部長さ(=0.265) m
 D_o : 管体外径(=0.025) m
 D_i : 管内径(=0.022) m
 D_v : 蒸気通路内径(=0.02016) m
 λ_a : ウィックの有効熱伝導率 W/(m·K)
 λ_s : 管体ウィックの材料である Inconel 600 の熱伝導率 W/(m·K)
 λ_e : 液体ナトリウムの熱伝導率 W/(m·K)
 λ_v : ナトリウム蒸気の熱伝導率 W/(m·K)
 ε : 空げき率=ウィック内の作動流体の体積/ウィック全体の体積(=0.74)
 δ_{wt} : ウィック層厚み m
 m : 飽和封入液量に対する倍数

2. 実験装置と方法

実験装置と方法はほぼ第1報⁽¹⁾に準ずる。装置およ

* 平成元年4月4日 第66期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年9月30日。

^{*1} 正員、工業技術院公害資源研究所 (〒305 つくば市小野川16-3)。

^{*2} 工業技術院公害資源研究所。

^{*3} 正員、日本工業大学 (〒345 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4-1)。

^{*4} 藤倉電線(株) (〒135 東京都江東区木場1-5-1)。

^{*5} 藤倉電線(株)。

^{*6} ハルビン工業大学(中国、ハルビン市)。

表1 蒸発部表面温度変動例 (No.2 ヒートパイプの場合)

Net Watt	Control Temp.	No.3 Temperature(°C)				No.4 Temperature(°C)			
		1	2	3	4	1	2	3	4
3230	740	726.2	731.2	730.3	729.8	725.9	727.5	732.6	727.4
4600	850	832.2	847.3	866.7	860.9	831.9	886.1	940.7	848.6

び方法の概略は次のとおりである。

(1) 蒸気温度の上昇に伴い、ヒートパイプ容器材料を sus 316 L の替わりに、Inconel 600 を用いた。

(2) 金網ウィック層数を 2 層、ナトリウム封入量を 60 g とした。

(3) ヒートパイプの冷却は自然冷却により行い、ナトリウム蒸気温度を 500°C から 1000°C まで昇温、その間、蒸気温度 700°C までは 50°C 刻み、700°C 以上では 25°C 刻みで、蒸気温度を安定に保持し、熱入力とヒートパイプ表面温度分布を測定した。

(4) 蒸気放出孔の位置は水平に設置したヒートパイプを基準に、蒸気放出孔の位置を頂部、底部の 2 点、傾斜角を 0, 10, 20, 30° と変えた。

(5) 加熱装置の容量の関係で、凝縮部長さを 300 mm とした。なお、蒸気放出孔の効果を調べるため、蒸気放出孔のない、ナトリウム封入量 80 g と 60 g のヒートパイプ 2 本を蒸気放出孔効果比較用基準ヒートパイプとして用いた。

3. 実験結果

3.1 蒸気放出孔のない場合 (基準ヒートパイプ)

3.1.1 表面温度分布 基準ヒートパイプとして用いた 2 本のヒートパイプの温度分布は断熱部表面温度から推定した蒸気温度 740°C 以下で、蒸発部、断熱部、凝縮部、それぞれ各区分において均一な表面温度分布を示した。これに対し、蒸気温度 740°C 以上では、蒸発部端板から 138 mm (測定点 No.3) と 228 mm (測定点 No.4) の蒸発部でそれぞれ円周方向 4 箇所の測定値にかなりのばらつきがみられた。その一例を表 1 に示す。表 1 から明らかなように、蒸気温度 740°C に比べ、蒸気温度 850°C では、測定点 No.3 と No.4 との間に最大 109°C の温度差を生じた。また、No.3, 4 のそれぞれの位置における 4 箇所の温度測定値にも大きなばらつきが生じ、部分的にドライアウトが発生していることが推測された。

3.1.2 総括熱抵抗 ナトリウム封入量 80 g の No.1 ヒートパイプと 60 g の No.2 ヒートパイプの総括熱抵抗は図 1 に示すようになり、封入量、凝縮部長さ、傾斜角にかかわらず、蒸気温度 740°C 付近から急激な増加傾向に転じ、ヒートパイプの作動が極めて不

図1 基準ヒートパイプの総括熱抵抗

安定な状態にあることを示唆している。

毛細管限界と No.1 ヒートパイプの熱輸送量を蒸気温度に対して比較したものが図 2 である。水平設置、傾斜角 10° のいずれの場合も実測値は毛細管限界値よりも十分低く、毛細管限界に達していないことを示している。

3.2 蒸気放出孔を設けた場合

3.2.1 ウィック構造 ウィックの構造は図 3 に示すように 50 メッシュ金網 2 層からなり、管壁側の第 1 層めウィックには幅 6 mm のスリットが全長に刻まれており、蒸気通路側に置かれる第 2 層めのウィックに蒸発部側端板から 320 mm の位置に幅 6 mm、長さ 20 mm の蒸気放出孔が設けられている。

3.2.2 総括熱抵抗 水平に設置されたヒートパイプに対し、蒸気放出孔がウィック断面の上部の位置とその逆の場合の総括熱抵抗を図 4 に示す。

蒸気放出孔を設けない場合の総括熱抵抗は、図 1 に示すように 740°C 前後で急激な増加に転じているが、図 4 にはこのような傾向は現れていない。しかし、蒸

気温度 600~800°C の広範囲にわたり、図 1 には、みられない総括熱抵抗の緩慢な増加傾向が現れている。この蒸気温度領域を過ぎると、傾斜角に関係なく、総括熱抵抗は再び減少に転じる。本実験範囲では、蒸気放出孔を上部に設けた場合、蒸気温度の増加に伴い、総括熱抵抗はいずれの場合も減少するが、蒸気放出孔が下部で、傾斜角を持たせた場合、蒸気温度 900°C 前後で総括熱抵抗の増加傾向が顕れている。

蒸気温度範囲 600~800°C では、蒸発部表面平均温度の増加と凝縮部表面平均温度の減少により蒸発部表面平均温度と凝縮部表面平均温度差が増加する。このため、蒸気温度の増加に対する総括熱抵抗の変化は小さく、むしろ、増加傾向を示す。蒸気放出孔とその設置位置が総括熱抵抗の増加に関与しているものと思われる。ヒートパイプの製造条件などすべての条件が同一とみなすと、総括熱抵抗の比較から、蒸気放出孔はドライアウトの低減に機能するものと推測される。特に、蒸気放出孔が頂部、水平にヒートパイプを設置した場合、その効果が大きい。しかし、蒸気放出孔と蒸気通路を流れる蒸気流との相互作用などについては十分言及するまでには至っていない。

3.2.3 有効熱伝導率 蒸気放出孔の効果を見掛けの有効熱伝導率で比較するため、蒸発部における熱移動量を式 1 で表し、式中の λ_a を求めた。その結果を図 5 と図 6 に示す。

$$Q = [2\pi(T_a - T_v)L] / [\ln(D_o/D_i)/\lambda_s]$$

図 2 毛細管限界

$$+ \ln(D_{in}/D_v)/\lambda_a] \dots\dots\dots (1)$$

ウィックの厚み $[\delta_{wt} = (I_i - D_v)/2]$ は管内壁面とウィック間に存在する約 $3 \times 10^{-4} \text{ m}$ の間げきとウィック 2 層の厚みを含め、全体で $9.2 \times 10^{-4} \text{ m}$ とし、ウィックは蒸気層と液層から構成されるものと仮定する。したがって、有効熱伝導率 λ_a には、ナトリウム蒸気、液およびウィック素材である金網の熱伝導率を含めたものである。

本実験の温度範囲における飽和蒸気圧は大半が飽和蒸気圧 $1 \text{ kg/cm}^2(\text{atm})$ 以下を占め、低圧沸騰の影響が著しい温度領域である。

図 7 のモデルについて、蒸発部側の有効熱伝導率 λ_a を考察することにする。作動流体の封入量が $m=1$ の場合、熱入力が増加、すなわち、蒸発量の増加に伴い、ウィック内の液面は低下するが、本実験では、 $m=1$ 以上の過剰の封入量を用いているため、本実験範囲内では見掛け上、ウィック内での液面低下は起こらず、また、ウィック層の外側に付着する過剰のナトリウムの温度は蒸気温度と等しいものとする。

図 3 ウィックの構造

図 4 供試ヒートパイプの総括熱抵抗

したがって、本モデルでは、壁面上に形成される蒸気層厚みの影響のみを考える。熱入力が小さい場合、低圧時に発生する気泡径は大きく、壁面を覆う蒸気層は厚い。熱入力の増大に伴い、気泡径の減少、気泡の流動の活発化などにより蒸気層の平均厚みはある一定量まで減少する。その後、熱流束の増加に伴い、蒸気層厚みは再び増加に転じ、最終的には、ドライアウトする。一般に直列モデルにおける有効熱伝導率 λ は次式で表すことができる。

$$\lambda = \frac{1}{\frac{1-\varepsilon}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon}{\lambda_e}} \quad (2)$$

図5 見掛けの有効熱伝導率(I)

図6 見掛けの有効熱伝導率(II)

ウィック寸法にもとづきウィック全体の体積 V [m^3], ナトリウム蒸気が占める体積 V_1 [m^3]と蒸気層厚み δ [mm], 液体ナトリウムが占める体積 V_2 とするとそれぞれ次のようになる。

$$V = 1.615 \times 10^{-5} \text{m}^3$$

$$V_1 = 1.355 \delta \times 10^{-5} \text{m}^3$$

$$V_2 = 0.120 \times 10^{-4} - 0.136 \delta \times 10^{-4} \text{m}^3$$

したがって、蒸気の占める割合 ε_1 , ナトリウム液体が占める割合 ε_2 とウィックが占める割合 ε_3 はそれぞれ次のようになる。

$$\varepsilon_1 = 0.839 \delta$$

$$\varepsilon_2 = 0.743 - 0.842 \delta$$

$$\varepsilon_3 = 1 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

蒸気層を考慮した場合の金網ウィックの有効熱伝導率 λ_a は式3で表すことができる。

図7 蒸気層厚みと液層厚みとの関係

図8 熱流束と蒸気厚みとの関係(I)

図9 熱流束と蒸気厚みとの関係(II)

$$\lambda_a = \frac{1}{\frac{1 - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\lambda_s} + \frac{\varepsilon_1}{\lambda_v} + \frac{\varepsilon_2}{\lambda_e}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで, $\lambda_s = 0.0182 T[^\circ\text{C}] + 13.09^{(5)}$

$\lambda_v = (112.11 + 0.802 T[^\circ\text{C}]) \times 10^{-4(4)}$

$\lambda_e = 91.691 - 0.050 T[^\circ\text{C}]^{(4)}$

$T[^\circ\text{C}]$ は蒸気温度と管内壁面温度の平均温度

したがって, 平均蒸気層厚み δ は正味熱入力, 蒸気温度などの実測値を用いて, 式(1)と式(3)から求めることができる。前述の, 仮定に基づき, 実験値を用いて求めた平均蒸気層厚みと熱流束との関係を図8および図9に示す。図8は蒸気放出孔が上に, 図9は下にある場合を示している。

図8は概略S字のような変化をしており, 領域1と領域3では, 熱流束の増加に伴い蒸気層厚みは減少する。領域2では, 熱流束の増加に伴い蒸気層厚みは増加する。

領域1は飽和蒸気圧が極めて低く, 低圧沸騰領域に属し, 大口径の気泡が発生する領域である。したがって, 傾斜角の増大にしたがい, 熱流束と蒸気層厚みとの間に不安定な関係が現れる。しかし, 全般的に熱流

束すなわち飽和蒸気圧の増加に伴い, 蒸気層厚みは減少する。領域2は低圧沸騰領域に属するが, 領域1に比べ突沸現象がなくなり気泡のウィック開口部と蒸気放出孔から蒸気通路側への放出が困難になる領域である。したがって, 蒸気層厚みは増加傾向を示す。この領域は図4で総括熱抵抗が大略平衡する領域に当たる。領域3は飽和蒸気圧が十分上がり, 気泡径の減少と気泡の発生頻度の増加, 流動の活発化により, ウィック開口部と蒸気放出孔から蒸気通路へ気泡の放出が円滑に進み, 蒸気層厚みは減少する。したがって, 熱流束と蒸気層厚みとの関係が安定し, かつ, ヒートパイプを傾斜させるほど, 同一熱流束に対する蒸気層厚みが減少する。いわゆる傾斜角効果がよく現れてくる。また, この領域は蒸気層と液層が直列に配置された状態と概略みなすことができる。

図9は水平加熱の場合を除き, く字に変化している。領域1で低圧沸騰の影響がみられ, 熱流束と蒸気層厚みとの関係に若干乱れが生じている。領域2では, 水平加熱の場合を除き, 傾斜角の大きいほど, 低熱流束域においても, 蒸気層厚みの増加がはじまる。この領域では, 切欠部から集中的に還流液がナトリウムために流入するため, 蒸発部ウィックに保持されるナトリウムが不足し, 局所的にドライアウトが発生しやすい状態になる。

4. 結 論

蒸気放出孔の効果について検討した結果一応以下の結論を得た。

蒸気放出孔はその位置, 方向が適正であれば, 金網ウィックを用いた場合に発生しやすいドライアウトを回避するうえで, その効果が期待できる。しかし, 本研究では, 蒸気放出孔の設計に必要な十分な基礎資料を得るまでに至っていない。

文 献

- (1) 山本・田中, 機論, 53-490, B(1987), 1840.
- (2) 実用新案(国有), 登録 1677905
- (3) 山本・田中, 機論, 51-470, B(1985), 3199.
- (4) Foust, O. J. *Sodium-Nak Engineering Handbook*, 1 (1972) 57.
- (5) 三菱金属(株)技術資料.