

ナトリウムヒートパイプの使用温度範囲について

山本 格*・田中 芳雄*・松本 成司*・佐々木正治*

(1982年1月6日受理)

On useful temperature range of sodium heat pipe

By

Tadashi YAMAMOTO, Yoshio TANAKA,
Seiji MATSUMOTO, Masaharu SASAKI

Abstract: In this paper, the result of the useful temperature range of the heat pipe employing sodium as the working fluid is presented.

The sodium heat pipe is manufactured from SUS 316 L stainless steel tube with 25 mm outer diameter and 1.5 mm thickness and capillary structure is two layers of 50 mesh screen stainless. The total length is 1000 mm, in which evaporator zone is 265 mm, adiabatic zone is 235 mm and condenser zone is 500 mm.

The test heat pipe was set mainly horizontally and the experiment was carried out at vapour temperature range from 500°C to 700°C, in which heater input fluctuation, surface temperature profile, heater input etc. are measured.

As the results of this test and another life test carried out in advance, the useful temperature range of the sodium heat pipe was discussed.

概 要

本研究はナトリウムヒートパイプの使用温度範囲に関するものである。

ナトリウムをヒートパイプの作動流体として使用する場合、使用温度範囲内では、蒸気圧は低く、ヒートパイプは不凝縮性ガスの影響を受け、作動開始温度は高くなるので、製造時に十分脱気を行い、不凝縮性ガスを排除することが肝要である。

* 公害資源研究所

ナトリウムヒートパイプの使用下限温度を決定する際の要因としては、この真空度のほかに、低圧下で発生する気泡の影響についても注目する必要がある。

本報では主にこの気泡によるナトリウムヒートパイプ不安定作動を調べ、使用下限温度について検討したものである。

1. はじめに

ナトリウムヒートパイプの使用温度範囲については、例えば Dunn [1] は 600~1200°C、本田 [2] は 450~800°C としている。この上限温度の相違は、使用する容器材料の違いによるものであるが、ナトリウムの物性値から判断すれば、1200°C まで使用可能である。また、下限温度の相違はヒートパイプ製造工程における真空度の違いによるもので、脱気を十分に行えば 450°C [3] でも工業的にはよく対応できると言われている。

産業規模で使用されるナトリウムヒートパイプの容器材料はオーステナイト系ステンレス鋼であると考えるのが妥当であるから、ナトリウムヒートパイプの上限温度は主にオーステナイト系ステンレス鋼の耐熱温度、ナトリウムに対する耐食性で決まる。

オーステナイト系ステンレス鋼を容器とするナトリウムヒートパイプの腐食については、SUS 304 鋼に対する Basiulus らの管材腐食調査 [4]、また筆者らの SUS 316 L 鋼の管材腐食調査 [5]、[6] からは特に重視すべき問題点は指摘されておらず、管体表面温度が 700°C でも十分実用に供し得ることが示されている。

SUS 316 L 鋼-ナトリウムヒートパイプの上限温度については、上記の管材調査結果から、筆者らはとりあえず 700°C 程度と定め、本研究では、主に下限温度について実験的に検討したもので、下限温度はヒートパイプが安定した作動を開始する温度とした。

2. 供試ヒートパイプ

ヒートパイプ容器は外径 25 mm、内径 22 mm、長さ 1000 mm の SUS 316 L 鋼で作られている。ウィックは #50 メッシュの SUS 316 L 金網 2 層のスクリーンウィックで、管体の両端部で数箇所を溶接固定している。

ナトリウム封入量はウィックの有効空間の 1.4 倍相当量である 54 g を目安とした。

供試ヒートパイプは蒸発部長さ 265 mm、凝縮部長さ 500 mm、残りを断熱部とした。断熱部はさらに第 1 断熱部と第 2 断熱部に分けられている。第 1 断熱部は蒸発部側端板と蒸発部までの 48 mm、第 2 断熱部は蒸発部と凝縮部の間 187 mm である。両断熱部には断熱材を 150 mm の厚さに巻いてある。

各断熱部には断熱部の内部温度を測定するための熱電対が取付けられている。

ヒートパイプ外表面には、表面温度測定用の $\phi 0.5$ mm の C. A 熱電対 28 本、また、蒸気温度測定用の $\phi 3.2$ mm の C. A シース熱電対を蒸発部側端板と凝縮部側端板からそれぞれ 100 mm の位置の管体内にそう入してある。表 1 に供試ヒートパイプの諸元を示す。

3. 実験装置と方法

Table 1 Heat Pipe Design Details

Working Fluid	Sodium (54g)
Container Material	SUS 316L
Overall length	1000mm Evaporator : 265mm Condenser : 500mm 1st adia. : 48mm 2nd adia. : 187mm
Diameter	25mm
Wall Thickness	1.5mm
Wick Material	SUS 316L, 50 mesh 2 layers screen
Wick Thickness	0.64mm

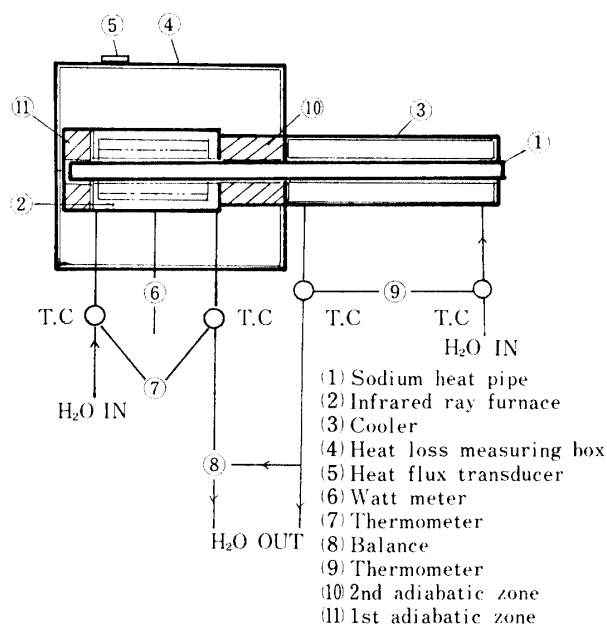


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for sodium heat pipe.

実験装置の系統図を図1に示す。装置は供試ヒートパイプ①、加熱装置②および冷却装置③の三つの主要部分で構成されており、加熱装置は鋼板製容器④に格納されている。実験装置全体は換気装置のある鋼板製遮へい容器内に設置され、その器内温度は約45°Cに保持されている。

ヒートパイプの傾斜角は任意に選ぶことができる。

加熱装置に赤外線加熱装置を使用した。加熱部有効長さは 265 mm、赤外線ランプ本数は 4 本。温度制御は PID 方式で行った。この制御方式により、供試ヒートパイプの設定温度を $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内で制御することができる。

さらに、実験装置は加熱装置への電気入力を測定するためのデジタル積算電力計⑥、加熱装置から冷却水が持去る熱量を測定するための冷却水量測定用の天びん⑧、冷却水の加熱装置入口、出口温度測定用の $\phi 1.0 \text{ mm}$ のシース熱電対⑦、鋼板製容器表面からの放散熱量測定用の 4 個の熱流計センサー⑤などで構成されている。

供試ヒートパイプの熱輸送量 Q はヒートパイプへの熱入力から求める。したがって、熱輸送量 Q は、デジタル積算電力計で測定した加熱装置の総熱入力 Q_1 から、冷却水の持去る熱量 Q_2 と加熱装置表面からの放散熱量 Q_3 を差し引いて、次式で算出する。

$$Q = Q_1 - (Q_2 + Q_3) \quad (1)$$

供試ヒートパイプの冷却には、広範囲の熱流束を得るために、温水、温風、冷風などを使用した。

実験はナトリウム蒸気温度を 500°C 、 550°C 、 600°C 、 650°C および 700°C に設定して、冷却条件を種々変化させた場合の熱輸送量、加熱装置への電気入力変動などを求めた。

4. 実験結果と考察

供試ヒートパイプの典型的な温度分布の一例として、水平加熱の場合を図 2 に示す。この図は蒸発部表面温度を図中に示した温度に設定し、大気中で自然冷却した場合のものである。設定温度 400°C の温度分布では、凝縮部表面温度は断熱部出口付近から急激な温度降下を生じており、ナトリウム蒸気が凝縮部まで完全に到達していないことを示している。

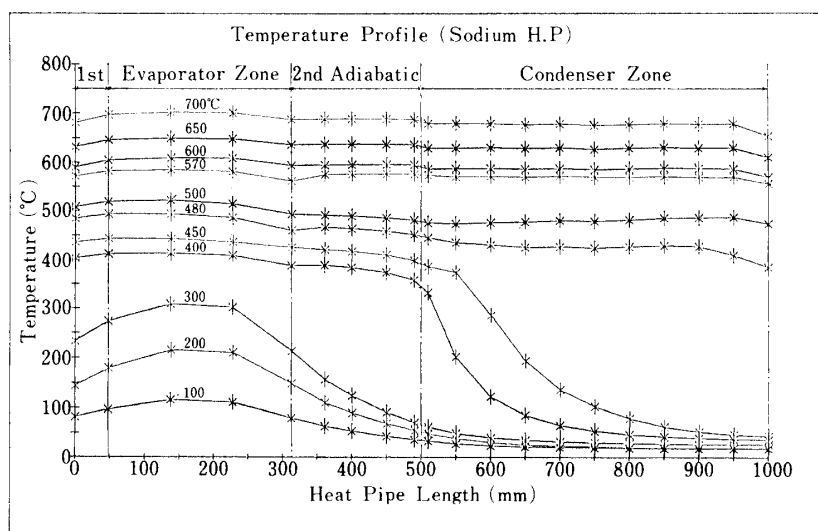


Fig. 2 Surface temperature profiles of sodium heat pipe.

熱入力を増加して蒸発部表面温度を 480°C 以上に昇温すると、凝縮部の表面温度分布は改善され、全域がほぼ恒温域となるが、凝縮部末端で温度降下が生じている。この温度降下の原因は不凝縮性ガスの影響と凝縮部端板部からの熱放散による。不凝縮ガスの影響は蒸発部表面温度を 400°C から 480°C に昇温する過程で顕著に表われている。これに対して、蒸発部表面温度 500°C 以上では、不凝縮性ガスの影響は比較的小さくなくなり、端板部からの熱放散が増加するものと思われる。この理由として、供試ヒートパイプの端板には、ナトリウム封入用ノズルとこれを保護するための長さ 100 mm、内径 25.4 mm の鋼管が取付けられており、この鋼管が拡大伝熱面として働き、末端部の表面温度降下をもたらしているものと考えられる。加熱後、供試ヒートパイプを切断し、端板面のナトリウム付着状況を観察した結果、付着量はウィック面と同程度であることから、蒸気温度が 500°C 以上に上昇すれば、ナトリウム蒸気はあまり不凝縮性ガスの影響を受けず端板まで到達するものと推察される。

温度分布的には、蒸発部表面温度 500°C 以上では、ほぼ同じような傾向を示しているが、次式で定義される総括熱抵抗 R (°C/W) は図 3 に示すように設定温度 500°C とそれより高い温度では明らかに相違した傾向を示している。図の設定温度は蒸気温度を表わし、蒸気温度 550~700°C に対して総括熱抵抗を同一曲線で描いてあるが、実際には蒸気温度によって異なり、蒸気温度が高くなるにしたがい、総括熱抵抗は減少するが、その差は少ないので、ここでは単に、熱入力に対する総括熱抵抗の変化をみるため、蒸気温度 550~700°C に対しては同一曲線で表わしている。また、図では実験値が少ないが、総括熱抵抗の値および全体の傾向は図 3 のようになることが、多数の実験から確認 [7] されており、図 3 は妥当なものと考えられる。

$$R = (t_e - t_c) / Q \quad (2)$$

ここに、 t_e : 蒸発部表面温度 (°C)

t_c : 凝縮部表面温度 (°C)

Q : 熱入力 (式 1 で求まるヒートパイプの熱輸送量)

熱入力を種々変化させた場合の各蒸気温度における総括熱抵抗の変化から、蒸気温度 550°C 以下とそれよりも高い温度では、供試ヒートパイプの特性に相違のあることが推測できる。このため、蒸発部の熱流束と過熱度との関係を水平加熱の場合について調べた一例が図 4 である。

図 4 は大気中での自然冷却の下で、供試ヒートパイプの蒸気温度を 550~700°C まで 50°C 刻みで昇温したときの熱流束と過熱度との関係を示すものであるが、蒸気温度を一定温度に設定して、熱入力を種々変化させた場合の熱流束と過熱度との関係を示すものでない。したがって、図中では各蒸気温度に対する熱流束と過熱度の関係は明白になっていないが、蒸気温度 500~550°C、550~600°C と 600°C 以上の三つの温度領域において、熱流束はそれぞれ異なる傾向を示している。

供試ヒートパイプの熱流束と過熱度との間には、初め過熱度の増加にともない熱流束も増加していくが、過熱度がある値に達すると、熱流束は一定のまま過熱度が急激に減少す

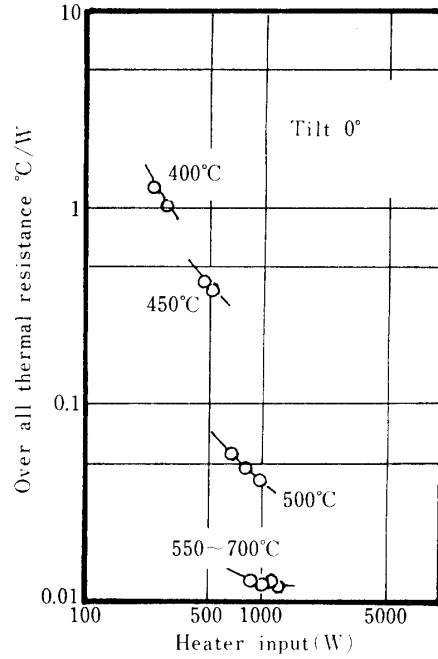


Fig. 3 Over all thermal resistance of test heat pipe.

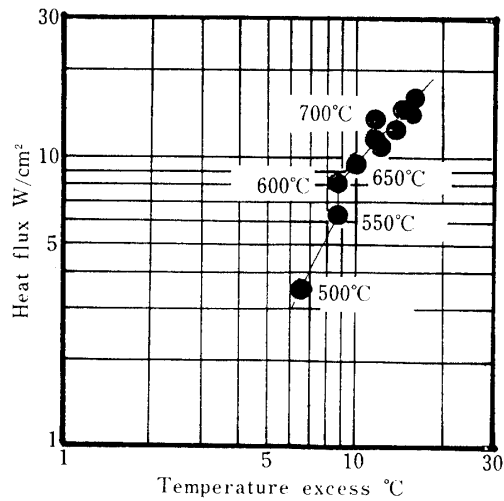


Fig. 4 Relation between heat flux and temperature excess.

る領域がある。その後、再び熱流束・過熱度ともにほぼ線型的に増加するような関係がある [8]。

上記の過熱度の大きな変化は、低圧下でしかも比較的熱流束の小さいところで生じており、その原因は恐らく核沸騰で生じた気泡の影響によるものと推察される。

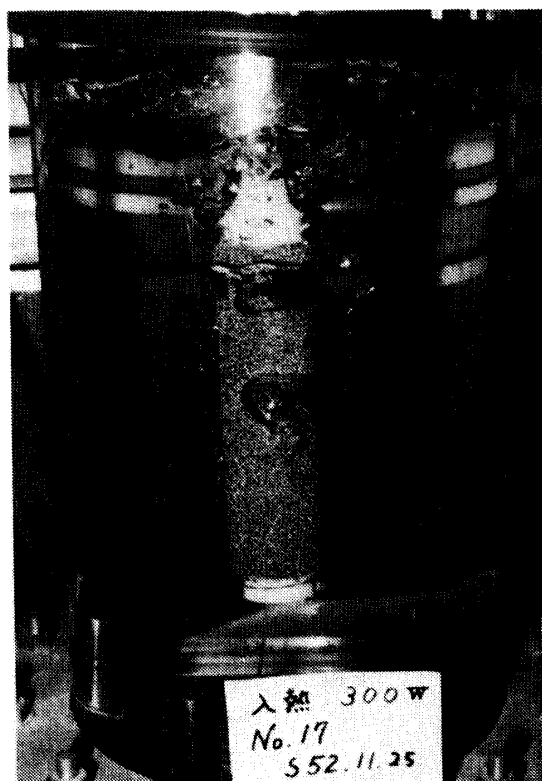


Photo. 1 Bubble behavior on wick surface under low pressure.

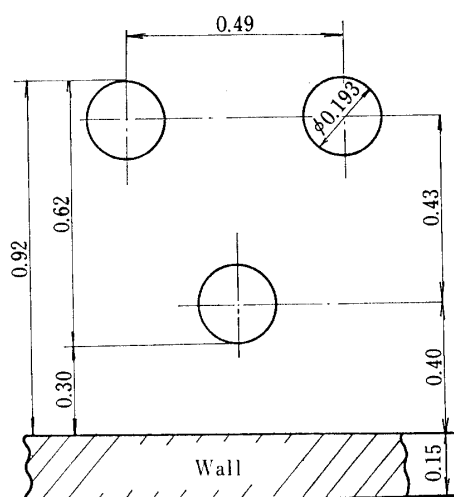


Fig. 5 Wick arrangement.

本実験とは別に低圧下での沸騰状態を可視化して調べた一例が写真1である。この写真は圧力を534 mmHgに設定した水槽内での発泡金属製ウィック表面に生じる気泡の状態を示しており、ウィック内部で発生した気泡はウィック表面に到達すると、瞬時に合体して大きな気泡を形成している。

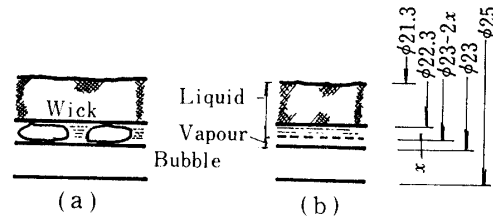


Fig. 6 Imaginary figures of bubble and sodium vapour layer thickness at evaporator zone under low pressure.

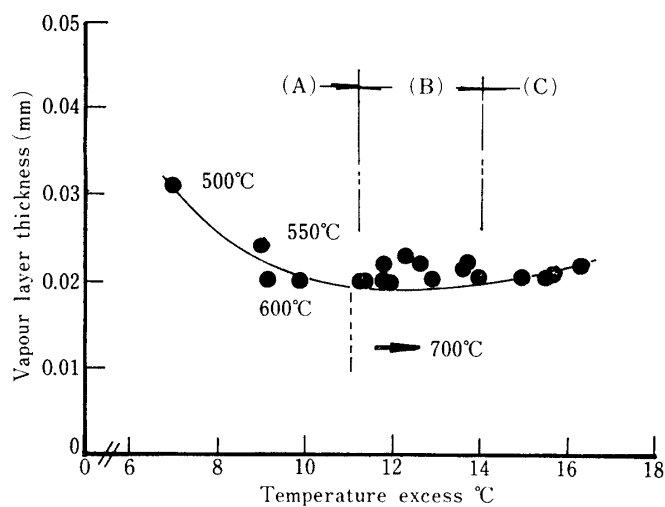


Fig. 7 Relation between sodium vapour layer thickness and temperature excess of test heat pipe.

本実験範囲におけるナトリウムの蒸気圧は非常に低いため、同様の現象がヒートパイプ蒸発部の管壁と金網ウイックの間で生じ、気泡の合体が進行しているものと考えられる。

供試ヒートパイプの金網ウイックと管壁との位置関係については、金属顕微鏡による観察から図5に示すような結果が得られており、管壁と金網ウイックの間には約0.3 mmの間隙があることが示されている。

金網ウイックと管内壁面の上に形成される気泡の説明図を図6に示す。図6-aに示す気泡の大多数は、音圧測定、熱入力測定の結果から、蒸発部側端板とウイックとの狭い間隙から蒸気通路側に放出されていると推察される。

この気泡は図6-bに示すように、管内壁面上に均一厚みの蒸気層を形成するとみなし、図5のデータを用いて、各蒸気温度に対する蒸気層厚み(x)を多層円管に対する次式の定常熱伝導式で計算すると過熱度に対して図7のようになる。

Table 2 Thermal Conductivity of Sodium (kcal/mh°C)

Temp. °C	500	550	600	650	700
Liquid	57.24	55.08	52.92	50.76	48.60
Vapour	0.0435	0.0478	0.0521	0.0543	0.0575

$$Q = \frac{2\pi(t_{w0} - t_v) \cdot l}{\frac{1}{\lambda_{Na-l}} \ln\left(\frac{D_{in} - 2x}{D_v}\right) + \frac{1}{\lambda_{Na-v}} \ln\left(\frac{D_{in}}{D_{in} - 2x}\right) + \frac{1}{\lambda_{pipe}} \ln\left(\frac{D_{out}}{D_{in}}\right)} \quad (3)$$

ここで、 Q ：式1で求まるヒートパイプの熱輸送量 (kcal/h)

t_{w0} ：蒸発部外表面温度 (°C)

t_v ：蒸気温度 (°C)

λ_{pipe} ：SUS 316 L 鋼の熱伝導率 (kcal/mh°C)，温度 t (°C) における熱伝導率は次式で与えられる。

$$\lambda_{pipe} = 10.1 + 0.0148t$$

$\lambda_{Na-l}, \lambda_{Na-v}$ ：液体ナトリウムと蒸気の熱伝導率を表わし，それぞれ表2 [9] に示す値を用いる。

D_{out} ：ヒートパイプ容器外径 (mm)

$$D_{out} = 25 \text{ mm}$$

D_{in} ：ヒートパイプ容器内径 (mm)

$$D_{in} = 23 \text{ mm}$$

D_v ：蒸気通路径 (mm) $D_v = 21.3 \text{ mm}$

x ：蒸気層厚み (mm)

l ：蒸発部長さ (mm) $l = 265 \text{ mm}$

過熱度 ΔT (°C) は次式で表わせる。

$$\Delta T = t_{wi} - t_v \quad (4)$$

ここで、 t_{wi} ：蒸発部管内壁面温度で次式で与えられる。

$$t_{wi} = t_{w0} - \frac{Q \ln(D_{out}/D_{in})}{2\pi\lambda_{pipe}}$$

したがって式4は

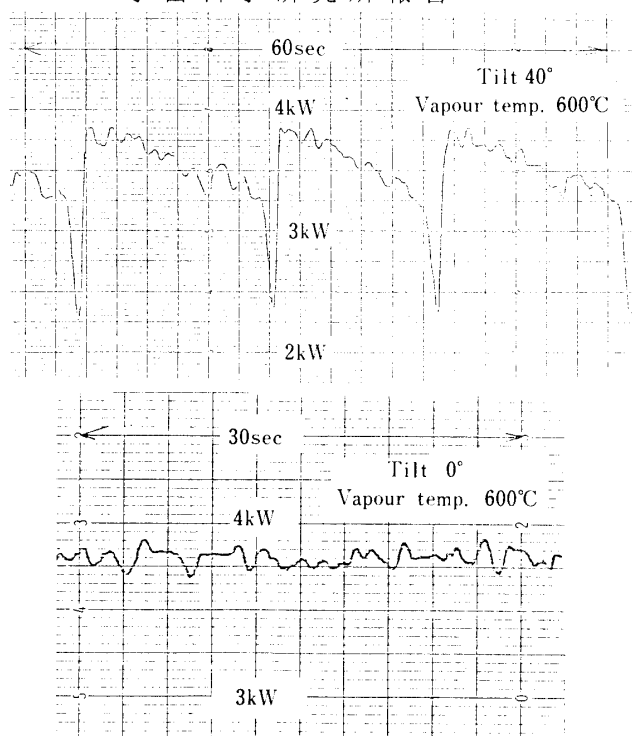


Fig. 8 Heater input fluctuation.

$$\Delta T = t_{w0} - \frac{Q \cdot \ln(D_{out}/D_{in})}{2\pi\lambda_{pipe}} \quad (5)$$

蒸気層厚みは図7(A),(B)および(C)で示した三つの領域で、それぞれ異なる傾向を示しており、(A)領域では、特に蒸気温度が500°Cから550°Cに上昇する間に、蒸気層厚みは大幅な減少傾向を示している。550°Cから600°Cにかけては蒸気層厚みの減少傾向は少ない。蒸気温度を700°Cに設定した(B)領域では、蒸気層厚みは0.02~0.025 mmの間で変動しているが、厚みそのものは蒸気温度600°Cの場合とほぼ同程度である。さらに熱流束を増加させた(C)領域では、蒸気層厚みは再び増加する傾向を示している。

図7は、蒸気温度500~550°Cの間で特に蒸気層厚みの減少が著しいこと、また(B)領域でみられる厚みの変動が(C)領域では消え、安定した増加傾向が現われており、各領域での伝熱機構に相違のあることを示している。すなわち、A領域では、図6-aに示すように大きな気泡とナトリウム液が共存した状態で、気泡を周期的に端板部から蒸気通路に放出する領域であり、供試ヒートパイプを熱流束制御すれば、過熱度は周期的に変化する。また、温度制御すると、熱入力も周期的に変動する領域で、ヒートパイプの作動は不安定である。熱入力変動の一例として、供試ヒートパイプの蒸気温度を600°Cに設定し、水平および傾斜角40度のときの加熱装置への電気入力変動例を図8に示す。

傾斜角40度の電気入力には2.3 kWから3.8 kWの間で周期的に変動している。これに対して、水平加熱では電気入力はほぼ一定の値を示しているが、蒸気温度500°C付近では水平加熱の場合にも周期的な大きな変動が記録されている。

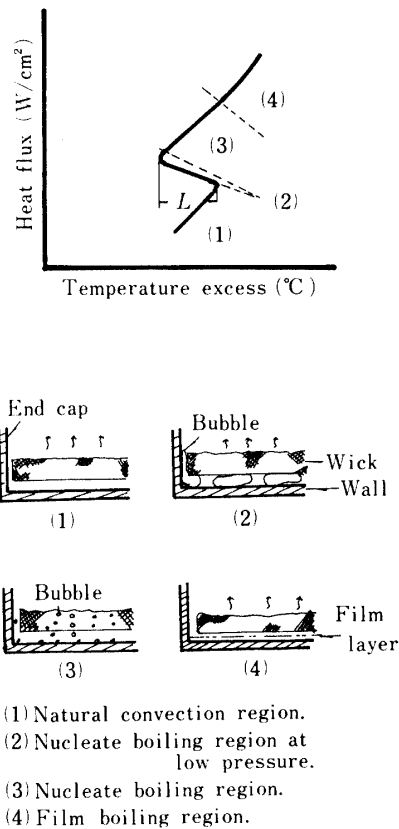


Fig. 9 Boiling curve of sodium heat pipe.

この電気入力変動は蒸発部での熱抵抗の変化によるもので、蒸発部表面からヒートパイプ内部への熱移動が円滑に行なわれていれば、電気入力は一定となるが、熱抵抗が増加すると蒸発部表面温度を一定に保持するためには、電気入力を減少させる必要がある。この電気入力変動例もまた蒸発部に熱抵抗の周期的変化をもたらす気泡の存在を示している。

この電気入力変動は一般に蒸気圧、熱流束の増加とともに小さくなり、やがては変動はほとんどなくなる。また、傾斜させると、電気入力変動の起る温度範囲は広がる。これはヒートパイプを傾斜すると、ウイックで保持しきれない過剰のナトリウムが蒸発部端板部に溜り、端板と金網ウイックの間の狭い気泡放出口を塞ぐ結果と考えられる。

このA領域に対し、C領域における蒸気層厚みは膜沸騰によるものと考えられる。

5. ま と め

1. 供試ヒートパイプの使用上限温度は、容器材料の耐熱温度、ナトリウムに対する耐食性からみて、蒸気温度 700°C またはそれよりも少し高い温度である。

2. ナトリウムの使用下限温度は製造工程での脱気度のほかに、蒸気圧、熱流束、傾斜角などで定まり、供試ヒートパイプの場合、使用温度範囲をより広くとるためには水平加

熱で使用する必要がある。

3. 下限温度は水平加熱の場合 550°C, またボトムヒートの場合は 550°C以上は必要である。

4. 金網ウイックを使用するヒートパイプの沸騰曲線に対して, 図9のようなモデルを考えることができる。図中(1)は自然対流によりウイック表面から蒸発が起る。しかし, この領域では, 供試ヒートパイプは十分機能していない。(2)の領域では, ウイック表面からの蒸発とともに, 気泡が端板から蒸気通路に放出される。(3)の領域では, 気体の合体が減速され, 金網ウイック内に小気泡が存在する領域で熱流束と過熱度との関係がほぼ45度線に平行して表わすことができる。(4)の領域は膜沸騰領域である。

蒸気圧の上昇とともに, 図中 L で示した過熱度の幅は狭くなる。また領域(3)では各蒸気温度に対して, 熱流束と過熱度との関係にはあまり大きな差は現われない。

ナトリウムヒートパイプの沸騰曲線についての詳細は次報で報告したい。

参 考 文 献

- [1] P. Dunn & D. A. Reay, (1976), *Heat pipe*, Pergamon Press, (N. Y.), 89.
- [2] 本田一郎, (1979), 金属, 49, 2 - 15.
- [3] 同 上
- [4] G. J. Ewell, A. Basiulius & T. R. Lamp (1978), *3rd International Heat Pipe Conference*, 297 - 302.
- [5] 山本, 田中, 佐々木, 服部, (1981), 燃協誌, 60 (649), 360 - 375.
- [6] Yamamoto T, Y. Tanaka, M. Sasaki & H. Hattori (1981), *4th International Heat Pipe Conference*, 389 - 398.
- [7] 山本, 佐々木, 服部, (1979), 第8回公資研研究発表会予稿集, 20 - 29.
- [8] 同 上
- [9] O. J. Foust, (1972), *Sodium - NaK Engineering Handbook, Vol. 1*, 43 - 47.