



Title	アルゴン流によるナトリウムの強制蒸発実験 (I)
Author(s)	熊田, 俊明; Kumada, Toshiaki; 笠原, 文雄 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 76, 117-125
Issue Date	1975-08-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41301">https://hdl.handle.net/2115/41301</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	76_117-126.pdf



## アルゴン流によるナトリウムの強制蒸発実験 (I)

熊田俊明 笠原文雄 石黒亮二

(昭和49年12月27日受理)

### Sodium Evaporation into a Forced Argon Flow

Toshiaki KUMADA Fumio KASAHARA Ryoji ISHIGURO

(Received December 27, 1974)

#### Abstract

Evaporation from a rectangular sodium free surface into an argon flow was measured. Tests were carried out with varying sodium temperature, argon velocity and argon temperature respectively under conditions of fog formation being possible. In order to clarify the enhancement of evaporation by fog formation, convection heat transfer from a plate of the same geometry into an air flow was also measured. The evaporation rate and Sherwood number were compared with those predicted by both the heat transfer experiment and the theory proposed by Hill and Szekely, and also a comparison was run with the previously reported experimental results of sodium evaporation.

As a result it was shown that the sodium evaporation rate in this experiment is at least four times as large as that predicted by the heat transfer experiment and varies almost linearly with the heat transfer rate and the sodium vapour pressure.

#### 1. ま え が き

ナトリウム冷却高速増殖炉の開発に関連して種々の新しい問題が提起されているが、ナトリウムの蒸発や凝縮現象もその一つである。例えば原子炉容器内のナトリウム自由液面からアルゴン雰囲気への蒸発やナトリウム蒸気の各種機器への凝縮、炉内から引き出された使用済燃料集合体に付着しているナトリウムの強制蒸発による除去などがある。蒸発過程は流れ場、温度場および濃度場が相互に依存し、蒸発面に吹き出しがあるため一般には複雑な現象である。しかしナトリウムの蒸発で実際に問題となっているのはむしろ蒸気圧の低い場合であり、蒸発面の吹き出し速度や蒸気の濃度差による気相の密度差が無視できるため流れ場や温度場が濃度場と独立に取り扱える。一方、ナトリウム液面と気相(アルゴン)の温度差が大きい場合には蒸発面近傍に fog が生成し、それが蒸発に影響するなど現象を複雑にしている。

ナトリウムの蒸発に関する従来の研究は開発試験的な研究が主である。原子炉容器上部のアルゴンガス相での蒸発現象を模擬した Horst ら<sup>1)</sup> や Sutherland ら<sup>2)</sup> の自然蒸発実験や模擬燃料集合体に付着しているナトリウム薄膜からの強制蒸発実験<sup>3)</sup> がある。さらに炉内カバーガス中のナトリウム蒸気がどのように凝縮するかを調べる実験や理論解析が散見される<sup>4),5)</sup>。著者らはすでに水平等温平板の一部が矩形状のナトリウム液面となっている密封体系について自然蒸発実験

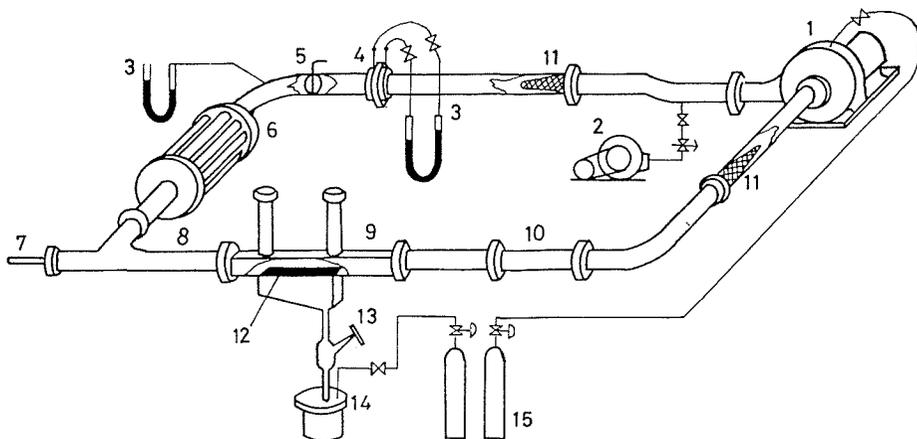
と、同体系について熱伝達実験および数値解析を行ない、これらの結果に基づいてナトリウム液面近傍に fog が形成されることにより蒸発が著しく促進されることを明らかにした。しかし、ナトリウムの強制蒸発については、この種の基礎的研究は著者らは寡聞にして知らない。本研究はアルゴン流によるナトリウムの強制蒸発に関する実験である。矩形ダクトの底面の一部をナトリウム自由液面としてナトリウムの蒸発促進に果たす fog 生成の影響を明らかにするとともに、ナトリウム液面温度、アルゴンガス温度、アルゴンガス流速などによって蒸発量がどのように変化するかを実験的に確かめることを目的としている。また、fog の生成が蒸発促進におよぼす影響を確かめるため、蒸発実験と同様な体系を用いた熱伝達実験を行い、fog が生成しない場合の Sherwood 数を求め、さらに fog の生成による蒸発促進に関する理論解析<sup>7)</sup>と比較した。また Horst<sup>1)</sup>、Sutherland<sup>2)</sup>や著者らがすでに行なった自然対流蒸発実験<sup>9)</sup>および本実験など異なる体系について蒸発促進の効果を比較した。

## 2. 蒸発実験装置および測定法

### 2.1 実験装置

Fig. 1 にアルゴンループの構成を示す。プレート型ブロワー (1) より吐出されたアルゴンガスはオリフィス (4)、流調ダンパ (5)、加熱器 (6) などを経てブロワーに戻る。

**a. 蒸発試験部** Fig. 2 に蒸発試験部の詳細を示す。矩形ダクトの寸法は幅、高さ、長さがそれぞれ 45, 20, 360 mm である。ナトリウムポットはダクト底面に位置し、開口部はダクト入口より 110 mm の位置から始まり、幅 37 mm、長さ 140 mm である。試験部にはナトリウム液位観察用の窓をポット開口部前後を観察できる位置に取り付けている。ポット開口部は、蒸発実験中を除いて無用のナトリウム蒸気の漏洩を防ぐため銅製の蒸発防止板により閉じられており、これを引き抜くことにより蒸発実験を開始する。この蒸発防止板にはヒーターを取り付け、ナト



- |                |                             |                    |
|----------------|-----------------------------|--------------------|
| 1. blower      | 7. cover plate handle       | 11. bag filter     |
| 2. Vacuum pump | 8. mixing section           | 12. sodium surface |
| 3. manometer   | 9. evaporation test section | 13. sodium valve   |
| 4. orifice     | 10. cooling pipes           | 14. sodium tank    |
| 5. damper      |                             | 15. argon bomb     |
| 6. main heater |                             |                    |

Fig. 1. Schematic drawing of the test equipment for sodium evaporation

リウム液面や周囲温度より高く保つことによりナトリウム蒸気の蒸着を防いだ。また蒸発試験部全体は一樣温度に加熱されている。

**b. バグフィルター** バグフィルターの寸法は内径 75 mm, 長さ 25 mm のほぼ円筒状のステンレス製網の内側に 16 層の同型の乾燥ガーゼを重ねた構造となっている。試験部の流速が 5 m/s で, バグフィルターの面に垂直に一樣にアルゴンが流出するとして, 見かけの流速は 10 cm/s 以下である。バグフィルターは, ブロー入口と出口の二箇所に取り付け, 循環する fog を捕集している。

**c. アルゴンガス流速測定系** 流速測定には開口部 16 mm $\phi$  の JIS 規格によるオリフィスを用い, 微圧の測定には灯油と水の密度差を利用したマノメータ (3) を使用した。流速調整には流調ダンパー (5) とブローの回転数を変えて行った。

**d. 各部の温度測定** 蒸発試験部の温度は上面, 側面, ナトリウムポット底面に取り付けたガラスシース熱電対により測定した。また, ナトリウム液面温度測定のため外径 3 mm $\phi$  の接地型ステンレスシース熱電対の先端をナトリウム液面下 10 mm の位置に挿入した。ナトリウム液面温度の測定精度を高めることが実験精度を高める上で重要であるが, 蒸発試験部全体が一定温度に保たれているので, ナトリウムポット内の温度差は小さく, また熱伝達により失なわれる熱量もわずかである。ナトリウム液位を 3~5 mm 変えて熱電対の熱伝導による接点の冷却による影響を調べた結果 1 $^{\circ}$ C 程度の変化であった。その他オリフィス入口および蒸発試験部入口のアルゴンガス主流の温度測定を行い, 蒸発試験部のアルゴン流速の計算に用いた。

**e. その他** 系内のガスの排気にはロータリポンプを使用し, 真空度はピラニーゲージにより測定した。ブローの軸封は静止時にはシリコンパッキングにより行ない, 回転時には締付けボルトを緩めた。ブロー回転中は軸とパッキングのすき間からアルゴンガスが漏れるため系内にアルゴンガスを流入させ, ループ中を大気圧より幾分高い一定圧力に保った。

加熱器は長さ 60 cm の 1 インチ管 13 本を並列に接続した構造のもので, 各々の管にはヒーターを取り付け, その外側を保温した。混合部は曲管部を含み, 加熱部出口ガス温度とほぼ同温度に保たれており, ガスは一樣温度となって蒸発試験部に入る。

## 2.2 測定方法および蒸発ナトリウムの定量

まず系内を 0.1 torr 以下にし, アルゴンガスによる加圧・大気操作を 10 回程度繰り返したあとアルゴンガスを封入する。ナトリウムタンクを約 200 $^{\circ}$ C に加熱し, 各部をそれぞれ所定の温度にした後, ポット内にナトリウムをダクト底面より 5 mm 程度下の位置まで充填する。ポット内のナトリウム温度は一時降下するが, 所定の温度に回復した時点でブローの作動, 蒸発防止板の抜き取り, およびナトリウム液位の調整の操作をほぼ同時に行ない実験を開始する。

実験終了後冷却パイプを取りはずし, 配管内面に付着したナトリウムを蒸留水に浸したガーゼで払拭し, バグフィルタに捕集されたナトリウムと合わせて 1  $\ell$  の蒸留水に溶かし, 溶液の一部を 0.01 規定の塩酸で定量した。

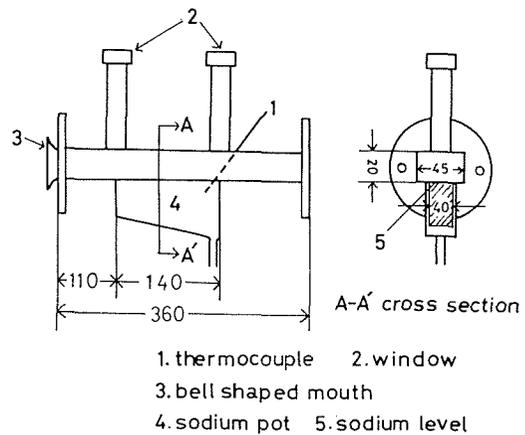


Fig. 2. Details of the evaporation test section.

1. thermocouple 2. window  
3. bell shaped mouth 4. sodium pot 5. sodium level

### 3. 蒸発実験

#### 3.1 物性値

a. 拡散係数 ナトリウム—アルゴン系に対する拡散係数については、現在のところ実測値が報告されていない。そこで気体運動論に基づく理論解析式の中で、単原子気体の拡散によく用いられている Gilliland の式を用いた

$$D = 2.936 \times 10^{-5} \times \frac{T^{3/2}}{P} \quad (1)$$

ここで  $D$ =拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec),  $T$ =温度 (°K),  $P$ =系の圧力 (atm)

他の二成分混合ガス系の拡散係数の実測値との比較によると、(1)式の誤差は有機物の拡散では-20%程度とされているが、不活性ガス—アルカリ金属系では-100%程度となる可能性もある。

b. ナトリウム蒸気圧 種々の式が提案されているが、ここでは Fischer の式<sup>8)</sup>を用いた。

$$\ln P_s = 10.658 - \frac{12303.3}{T} \quad (2)$$

ここで  $P_s$ =飽和蒸気圧 (atm),  $T$ =温度 (°K)

c. 物性値の評価温度 本実験のように、ナトリウム液面とアルゴン主流の温度差が大きく、かつナトリウム液面近傍に fog が生成し、それが蒸発を著しく促進するような場合における物性値の評価温度については明らかではない。ここでは通常の熱伝達実験の場合と同様に蒸発面(加熱面)とガス主流の平均温度で物性値を評価した。

#### 3.2 実験値の整理法

実験により得られたナトリウム蒸発率に基づき Sherwood 数を以下のごとく求めた。

物質伝達の式より

$$\dot{m}'' = h_D(\rho_w - \rho_\infty) \quad (3)$$

$\rho_w \gg \rho_\infty$  であるから  $\rho_\infty \doteq 0$  とすると次式が得られる。

$$\dot{m}'' = h_D \rho_w \quad (4)$$

液面における蒸気密度は理想気体の状態方程式により次式で与えられる。

$$\rho_w = MP_{s,w}/RT_w \quad (5)$$

式(4), (5)より物質伝達率  $h_D$  は

$$h_D = \dot{m}''/\rho_w = \dot{m}''RT_w/MP_{s,w} \quad (6)$$

従って Sherwood 数は次式により求められる。

$$Sh_e = \frac{h_D l}{D} = \frac{\dot{m}'' RT_w l}{D MP_{s,w}} \quad (7)$$

ここで  $\dot{m}''$ =蒸発率 (g/cm<sup>2</sup> sec),  $h_D$ =物質伝達率 (cm/sec),  $\rho_w, \rho_\infty$ =ナトリウム液面およびアルゴン主流におけるナトリウム蒸気密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $M$ =ナトリウム分子量 (g/mole),  $P_{s,w}$ =ナトリウム液面温度に対応する飽和蒸気圧 (atm),  $R$ =ガス定数 (atm·cm<sup>3</sup>/mole·deg),  $D$ =拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec),  $l$ =代表長さ (=蒸発面長さ) (cm),  $Sh_e$ =Sherwood 数, である。

### 4. 熱伝達実験

本実験のように、ナトリウムの蒸気圧が低く、ナトリウム液面近傍の蒸気の吹き出し速度が無視できるような場合には同じ体系の熱伝達と物質伝達の間にはアナロジーが成立し、特に Lewis

数が1の時は Nusselt 数からただちに Sherwood 数が求まる。本実験の場合 Lewis 数はほぼ1であるので、Nusselt 数を求めることにより fog の生成しない場合の Sherwood 数を求めることができる。そこで蒸発試験部と同じ構造の熱伝達実験装置を用いて空気の流れについて Nusselt 数を求めた。

一方ナトリウムの蒸発実験においては、ナトリウムとナトリウムポット内壁との濡れが不十分のため、ナトリウム液面とポット内壁との間に Fig. 3 に示すような凹を生じ、流れの剥離が起こって蒸発量にも影響を与えていると考えられる。そこで熱伝達実験においては、ナトリウム液面に相当する加熱板の端にも同様な凹を設けて実験を行なった。

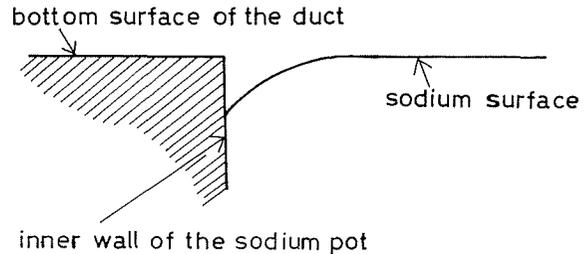


Fig. 3. Gap by the non-wetting condition of sodium surface

### 5. 実験結果および検討

Table 1 は蒸発実験の結果である。拡散係数の算定に大きな誤差を生じる可能性があり、厳密な比較ができないので、Nusselt 数としては常温における空気の実験値をそのまま用いた。

Fig. 4 はアルゴン流速、ナトリウム液面温度をそれぞれ約 2.0 m/s, 420°C に保ち、アルゴン温度を変化させた時の Sherwood 数の変化を示す。測定範囲ではアルゴン温度が下がり、ナトリウムとの温度差が大きくなると共に実験結果に基づく Sherwood 数は大きくなっている。一方、

Table 1 Results of sodium evaporation

	ナトリウム 温 (°C)	アルゴン温度 (°C)	アルゴン流速 (m/s)	蒸発時間 (min)	蒸発量 (g)	蒸発率 (g/cm <sup>2</sup> ·sec)	Sherwood 数
1	426	260	2.01	16.00	0.806	1.60 × 10 <sup>-6</sup>	129.2
2	422	225	2.01	12.00	0.060	1.48 × 10 <sup>-6</sup>	138.0
3	425	177	1.79	10.00	0.084	2.50 × 10 <sup>-6</sup>	229.3
4	415	147	1.82	10.00	0.060	1.78 × 10 <sup>-6</sup>	219.0
5	427	145	1.83	7.67	0.071	2.70 × 10 <sup>-6</sup>	245.6
6	505	158	1.80	8.50	0.481	1.68 × 10 <sup>-5</sup>	262.3
7	459	147	1.77	8.00	0.124	4.62 × 10 <sup>-6</sup>	195.2
8	463	87	1.58	13.00	0.246	5.60 × 10 <sup>-6</sup>	233.4
9	493	95	1.62	9.00	0.239	7.91 × 10 <sup>-6</sup>	169.5
10	429	102	3.48	9.00	0.120	3.96 × 10 <sup>-6</sup>	263.6
11	424	59	2.77	9.67	0.092	2.83 × 10 <sup>-6</sup>	315.3
12	427	105	2.42	8.00	0.076	2.82 × 10 <sup>-6</sup>	270.9
13	423	92	1.05	8.00	0.051	1.88 × 10 <sup>-6</sup>	203.1
14	427	279	2.16	5.00	0.019	1.13 × 10 <sup>-6</sup>	86.7
15	424	95	1.76	10.00	0.078	2.33 × 10 <sup>-6</sup>	246.5
16	422	209	1.90	9.00	0.062	2.05 × 10 <sup>-6</sup>	194.3
17	436	395	2.22	8.00	0.040	1.50 × 10 <sup>-6</sup>	80.8
18	403	293	2.14	7.5	0.013	5.02 × 10 <sup>-7</sup>	70.3
19	415	95	1.74	11.00	0.092	2.49 × 10 <sup>-6</sup>	329.3
20	380	122	1.82	7.00	0.023	9.78 × 10 <sup>-7</sup>	324.4
21	327	158	1.98	10.00	0.011	3.40 × 10 <sup>-7</sup>	559.3

熱伝達実験の結果得られた fog の生成しない場合の Sherwood 数は変化しない。アルゴンガス温度が下がると蒸気の過飽和度が大きくなり fog が生成しやすくなる。このため蒸発面近傍の蒸気の濃度勾配が大きくなり、蒸発が促進されるものと考えられる。またおよそ  $100^{\circ}\text{C}$  以下の温度差

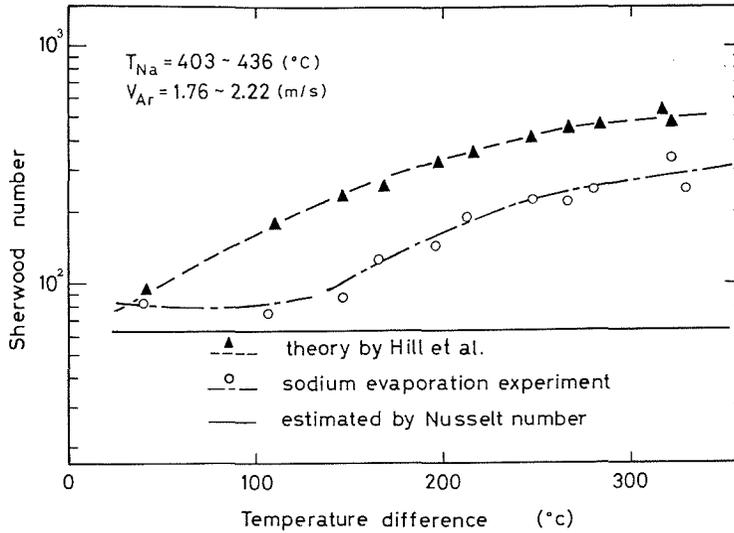


Fig. 4. Effect of temperature difference between sodium and argon on Sherwood number ( $T_{Na}$ =temperature of sodium surface,  $V_{Ar}$ =velocity of argon main stream)

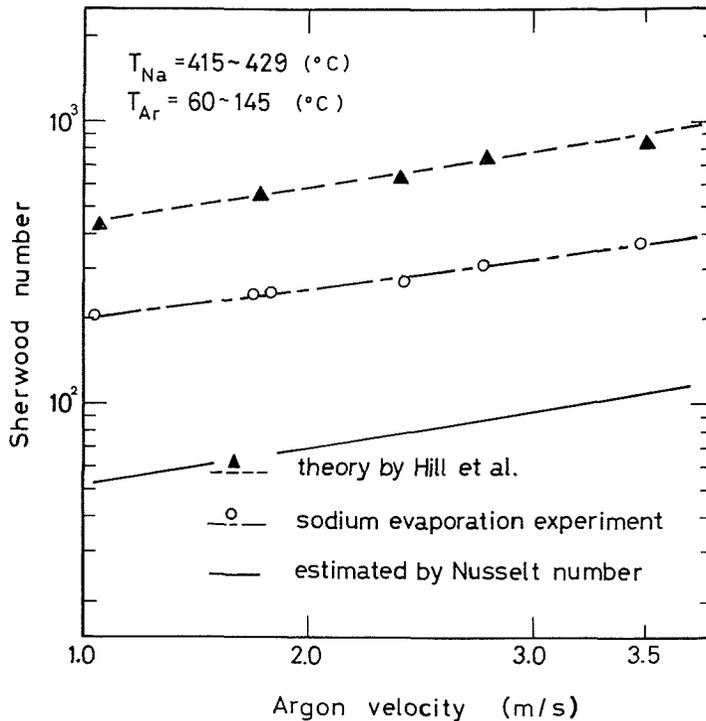


Fig. 5. Effect of argon velocity on Sherwood number ( $T_{Na}$ =temperature of sodium surface,  $T_{Ar}$ =temperature of argon main stream)

では fog 生成による蒸発促進の効果は顕著ではない。Fig. 4 の上方に破線で示している値は、ナトリウム液面近傍の蒸気濃度分布が温度分布に対応する飽和蒸気濃度に抑えられると仮定して導かれた Hill らの解析<sup>7)</sup>による値で、次式により計算したものである。

$$\frac{Sh}{Nu} = \frac{\frac{C}{T_w^2} \left\{ (T_w - T_s) + \frac{H}{C_p} m_w \right\}}{1 + \frac{H}{C_p} m_w \frac{C}{T_w^2}} \quad (8)$$

ここで  $Sh$  = Sherwood 数,  $Nu$  = 同じ体系の Nusselt 数,  $T_w$ ,  $T_s$  = 液面および主流温度 (°K),  $m_w$  = 液面での蒸気質量分率,  $C_p$  = 蒸気の定圧比熱 (cal/g·deg),  $H$  = 潜熱 (cal/g),  $C$  = 定数

(8) 式は蒸気の凝縮によって fog が生成されて蒸発が促進される効果の上限値を与えている。本実験の場合は、温度差が 300°C 付近で Sherwood 数はこの理論予想値の約 1/2 であり、熱伝達実験の結果得られた fog の生成しない場合の Sherwood 数の約 4 倍である。

Fig. 5 に蒸発率におよぼすアルゴン流速の影響を示す。ナトリウムおよびアルゴンの温度は約 420°C および 100°C に保たれている。流速を増すことにより、fog のない場合の Sherwood 数が増加しており、蒸発実験結果に基づく Sherwood 数はほぼそれに比例して変化している。本実験における流速は 3.5 m/s 以下である。また、ダクト入口から発達する境界層厚さに基づく Reynolds 数は流速 4 m/s, ダクト入口からの距離 (ナトリウム液面下流側の端まで) を 25 cm とし計算すれば約 23000 であり、一応層流と考えられる。しかし第 4 章でも述べたように、蒸発面 (加熱銅板も同様に加工) 両端が凹となっており、しかも蒸発試験部上流側に整流部を設置していない。さらに、上流側に熱電対や蒸発防止板などの主流の流れを乱す機器が取り付けられている。ダクト入口を平板前縁、ダクト内平均流速を平板上の一様流とした途中加熱による平板の層

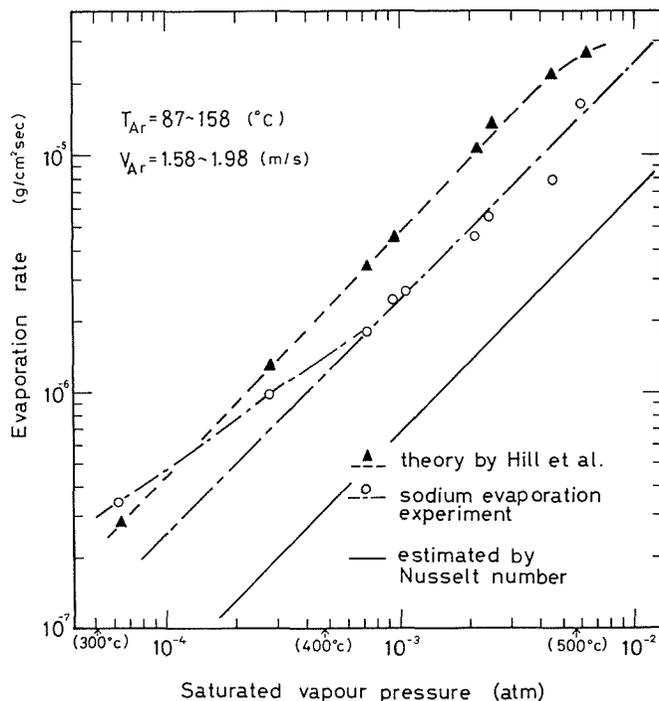


Fig. 6. Effect of sodium temperature on evaporation rate ( $T_{Ar}$  = temperature of argon main stream,  $V_{Ar}$  = velocity of argon main stream)

流熱伝達率と比較すると第4章の熱伝達実験結果は約20%大きくなっている。

Fig. 6にナトリウム液面温度に対応する飽和蒸気圧と蒸発率との関係を示す。ナトリウム温度が400°Cから500°Cの間では、蒸発率は蒸気圧にほぼ比例している。蒸気圧が低いところで蒸発率がかなり大きい値が見られるのは、系内の残存酸素とナトリウム蒸気との反応によると考えられる。系内には空気とアルゴンの置換の際に約0.5 torr程度の空気が残存するが、アルゴン加圧—大気放出の操作を10回程度繰り返し、約0.05 torr程度まで下げている。これによって封入アルゴンの純度はほぼボンベ内アルゴンの純度に保たれる。ナトリウム液面温度を下げると蒸気圧が下がり、酸素の量が相対的に多くなる。このため蒸発面近傍でもナトリウム酸化物が生成され、ナトリウム蒸気圧を下げると共に fog の生成核となり、蒸発を著しく促進する<sup>9)</sup>。

Fig. 7は本実験、著者らによる自然蒸発実験<sup>6)</sup>、また Horstら<sup>1)</sup>、Sutherlandら<sup>2)</sup>による自然蒸発実験の結果を横軸に、ナトリウム温度、縦軸に Sherwood 数と Nusselt 数を比の形でとったものである。本実験は強制対流で、アルゴンガスの温度は87~150°Cの範囲であり、他の自然蒸発実験は室温に近いアルゴンガス温度で実験が行なわれている。このため強制蒸発実験による蒸発促進の効果は、ナトリウム温度400°C以上では幾分小さめとなっている。また、これらの比較に用いた Nusselt 数は次のとおりであり大きな差はない。

Sutherland <i>et al.</i> <sup>2)</sup>	$Nu \approx 55$	(代表長さ 15.3 cm)
R. Ishiguro <i>et al.</i> <sup>6)</sup>	$Nu \approx 77$	(代表長さ 14 cm)
本 実 験	$Nu \approx 70$	(代表長さ 14 cm)

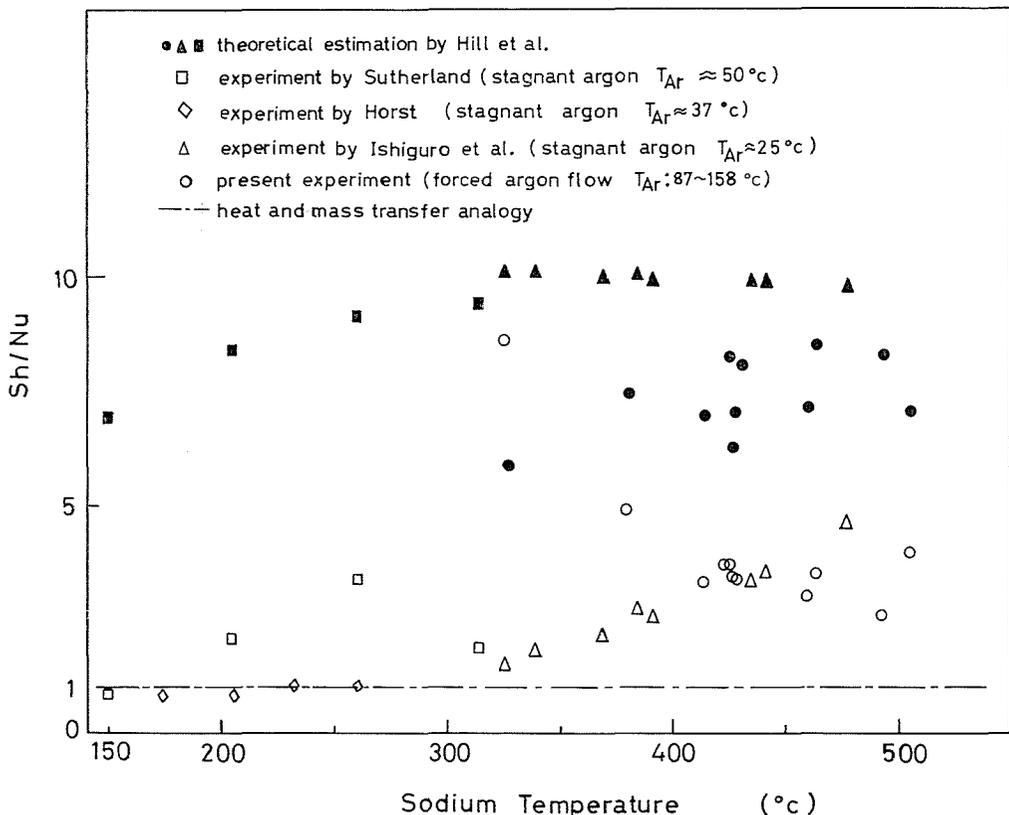


Fig. 7. Comparisons of various results of sodium evaporation

図中黒ぬりの値は各実験値に対応する Hill らの解析による理論値である。本強制対流実験にこの解析を適用した結果が多少バラついているのは、ガスの主流温度が一定でないためである。また  $Sh/Nu=1$  に対応する一点鎖線は fog の生成しない場合のアナログによる結果に相当する。図からわかるように、ナトリウムの蒸発では fog の生成がある場合、体系が異なっても  $Sh/Nu$  の値は 2~4 程度で Hill らによる解析値の  $1/3 \sim 1/2$  の範囲である。また強制対流と自然対流との比較でも  $Sh/Nu$  の比にはあまり差がない。本強制対流実験の結果で、ナトリウム温度  $400^{\circ}\text{C}$  以下の二つの大きな値は Fig. 6 で説明した酸素の影響によるものである。また、ナトリウム液面温度が低い領域における Horst ら<sup>1)</sup>の実験結果はほぼ  $Sh/Nu \cong 1$  である。この理由は、蒸発率に基づく Sherwood 数を求める体系と Nusselt 数を求めるための体系 (Boelter<sup>10)</sup> の実験装置) が著しく異なることによるものである。

## 6. 結 論

矩形ダクト底面の一部をナトリウム液面として、アルゴンの強制対流によるナトリウムの蒸発実験を行ない、以下のような結論を得た。

(1) ナトリウム温度、アルゴン流速をほぼ一定に保った場合、アルゴンガスの温度を下げるに従い fog の生成による蒸発促進の効果が大きくなる。また蒸発率はナトリウム温度を約  $420^{\circ}\text{C}$  としてアルゴンガスとの温度差が約  $300^{\circ}\text{C}$  で、熱と物質移動のアナログによる予想値の 4 倍程度になる。

(2) ナトリウム温度、アルゴン温度を一定にして、アルゴン流速を変えた場合、Sherwood 数は流速の変化による Nusselt 数の変化にほぼ比例する。

(3) アルゴン流速、温度を一定にした場合、蒸発率はナトリウム液面温度に対応する飽和蒸気圧にほぼ比例する。

(4) 蒸気の凝縮による fog の生成がある場合のナトリウムの蒸発量は、比較した体系ではナトリウム温度が  $150 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 、アルゴン温度が、室温付近の範囲で熱と物質移動のアナログによる予想値の 2~4 倍、また Hill らによる予想値の  $1/3 \sim 1/2$  倍の範囲にある。

最後に、本研究に卒業研究として参加され、実験に助力された原子工学科学生、本多貢君 (現東京芝浦電気株式会社) に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) Horst, K. M.: GEAP-4742 (1964).
- 2) Sutherland, J. D. et al.: *Trans. ASME.*, 107 (1970).
- 3) Van Dievoet, J., Michel, A. and Lanckman, R.: ANL-7520 (1968).
- 4) 工藤一彦, 下屋敷重広: 日本原子力学会年会 (48 年), 第 1 分冊.
- 5) 工藤一彦, 平田 賢: 第 11 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (昭 49 年).
- 6) R. Ishiguro, T. Kumada and T. Abe: *Heat Transfer 1974 (Proceeding of 5th International Heat Transfer Conference)*, Vol. 5, 15-19 (1974).
- 7) Hill, A. W. D. and Szekely, J.: *Int. J. Heat Mass. Trans.* Vol. 12, pp. 111-114 (1968).
- 8) Gerald, H. et al.: *Reactor and Fuel-Processing Technology*, Vol. 11, No. 1 (1967-68).
- 9) Turkdogan, E. T. et al.: *J. Phys. Chem.*, Vol. 67, p. 1647 (1963).
- 10) Boelter, L. M. K., et al.: *Ind. Eng. Chem.*, Vol. 38, No. 6, pp. 596-600.