

JAERI - M  
88-227

キャプセル用V.C.H.P.の作動特性

1988年11月

露崎 典平・斎藤 隆・根岸 完二\*

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 (株)原子力資料サービス

キャプセル用 V.C.H.P. の作動特性

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

露崎典平<sup>+</sup>・斎藤 隆・根岸完二<sup>\*</sup>

(1988年10月25日 受理)

材料試験炉 (Japan Materials Testing Reactor) で短期間で高い中性子照射量を得ようとする、試料は中性子束密度の高い照射孔に挿荷しなければならず、材料試料でもガンマ発熱のみで500°C以上となってしまう。

高中性子束領域で低温度照射を行うためには、試料の発熱を効率良く除熱する必要があり、可変コンダクタンス型ヒートパイプを用いて除熱する方法が検討されている。

本報告書は、キャプセル用可変コンダクタンス型ヒートパイプの開発に関してその基礎データを得るために実施した実験とその解析について述べたものである。

実験の結果 V.C.H.P. の性能は加熱位置に依存することが明らかになった。

A Fundamental Characteristic of V.C.H.P. for JMTR Capsule

Noriyoshi TSUYUZAKI<sup>+</sup>, Takashi SAITO and Kanji NEGISHI<sup>\*</sup>

Department of JMTR Project  
Oarai Research Estsblishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received October 25, 1988)

When a high dose is required within a short time, irradiation specimens are loaded in a high neutron flux position in the Japan Materials Testing Reactor (JMTR). Consequently, the temperature of the irradiation specimens is increased above 500°C by gamma heating.

In order to investigate the possibility of low temperature irradiation in high neutron flux position, a capsule equipped with a variable conductance heat pipe (V.C.H.P.) for heat removal and temperature control was tested in out-of-pile condition.

This paper reports the results of experiments and analysis on the out-of-pile test of V.C.H.P.. It is clear that the ability of the V.C.H.P. depends on the position of a evaporator part.

Keywords: Variable Conductance Heat Pipe Capsule, JMTR

---

<sup>+</sup> HTTR Designing Laboratory

<sup>\*</sup> Tokyo Metropolitan Institute of Technology

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. V.C.H.P.性能試験 .....	2
3. 性能試験結果 .....	2
4. 理論解析と考察 .....	4
4.1 コンダクタンス .....	4
4.2 試験結果との比較 .....	5
4.3 温度制御効果 .....	6
5. 結 論 .....	7
謝 辞 .....	8
参考文献 .....	8

## Contents

1. Foreward .....	1
2. Out pile test for variable conductance heat pipe .....	2
3. Results of out pile test .....	2
4. Consideration and fundamental analysis .....	4
4.1 Conductance .....	4
4.2 Comparison between analysis and test data .....	5
4.3 Temperature control of V.C.H.P. ....	6
5. Conclusion .....	7
Acknowledgements .....	8
References .....	8

## 1. ま え が き

ヒートパイプ内では、加熱部で作動流体が蒸発し、圧力の低い冷却部へ移動して冷却される。冷却された蒸気は、ここで凝縮しもとの作動流体にもどる。作動流体は毛細管力により加熱部へ還流され再び加熱される。ヒートパイプは、この過程がくり返され加熱部から冷却部へ、潜熱を利用して熱輸送を効率良く行うものである。

一般にヒートパイプの作動温度及び熱輸送量は、ヒートパイプの加熱部と冷却部の温度ならびに熱源とヒートパイプとの接触抵抗を含む伝熱条件に左右される。しかし、ヒートパイプを使用するに当たり、ヒートパイプ自身の熱輸送量を制御したいと云う要求が開発当初からあり、このために可変コンダクタンスヒートパイプ (Variable Conductance Heat Pipe) の開発が行われた。

VCHP の具体的な熱輸送量の制御方法として、現在までに次の方法が考案されている。

- (i) 蒸気流制御による方法
- (ii) 液流制御による方法
- (iii) 凝縮部伝熱面積を制御する方法

これらのうち最も研究開発が進められているのが(iii)の方法である。実際には、コンテナ内に作動流体とともに非凝縮性ガスを封入したものである。封入されたガスは、ヒートパイプの作動中凝縮部の末端に移動し、有効な冷却伝熱面積を減少させる。この結果、冷却部での熱移動量が制限され、ヒートパイプとしての伝熱量が制御される。この方式のものは、ガス制御型のV.C.H.P.と呼ばれている。

原子炉内の照射試験において、燃料試料は核発熱とガンマ線による発熱が、材料試料ではガンマ線による発熱が生じる。JMTRでは、照射利用者の希望照射温度を満足させるために、照射温度に見合ったキャプセル構造を決定し、使用材料を選定して来た。しかしこれまでのキャプセルは、構造及び使用材料により一次冷却水への伝熱量が決定されてしまうため、実現できる最低到達温度が照射孔の選定とともに決ってしまう。よって照射条件が低い温度の場合は、中性子束の低い照射孔を選択しなければならず必然的に、照射期間が長くなってしまう。

これらの問題を解決する方法として、JMTRでは、ヒートパイプを除熱素子として利用し、試料の発熱を炉心部より離れた位置まで輸送して放熱することにより、高中性子照射領域で低温度の照射が可能な新しい照射技術の開発を計画した。さらに、V.C.H.P.を使用することにより試料の温度制御を行う技術も合せて開発することにした。

本報告書は、炉内照射温度制御用V.C.H.P.の開発に先立ち、V.C.H.P.の基礎的な特性を調べるために実施した炉外実験をまとめたものである。

炉外実験は、熱入力が増加した場合の温度制御特性及び加熱位置の移動に伴う性能変化を調べた。

## 2. V.C.H.P. 性能試験

### (1) ヒートパイプの仕様

ヒートパイプは、キャプセル内で垂直方向に取付けて使用すること、加熱はボトムヒートとなることから、同じ径でウィック付ヒートパイプより熱輸送量が大きく取れる重力型 V.C.H.P. を選定した。ヒートパイプ外径は、JMTR の 40 mm $\phi$  標準キャプセルに適用可能な 8 mm $\phi$  とした。長さはキャプセル長を考慮して 500 mm とした。作動液は純水、封入ガスはアルゴンガスである。ヒートパイプの要目を Table 2.1 に、その構造を Fig. 2.1 に示す。

### (2) 性能試験装置

性能試験は、ヒートパイプの加熱部を電気ヒータで加熱し、冷却部を空気による自然対流で冷却する方式を用いた。

加熱部は、長さ 100 mm の溝付きアルミブロックに、ヒータを巻いた発熱体を取付けた。発熱体は、加熱部位置によるヒートパイプ作動限界を調べるために移動可能でかつヒートパイプに密着できるよう 2 つ割構造とした。

発熱体内側には、ヒートパイプ表面温度を測定するために、1.6 mm $\phi$  シース型クロメル・アルメル (C・A) 熱電対を、3 本取付けた。

ヒートパイプ冷却部表面には、0.5 mm $\phi$  銅-コンスタンタン熱電対 6 本をハンダに埋めて取付けた。性能試験装置の概略を Fig. 2.2 に示す。同図における発熱体位置「A」は、ヒートパイプ下端に取付けた場合である。「B」は、A 位置から 50 mm 上方に移動した位置、「C」は下端から 95 mm 上方に移動した位置である。

## 3. 性能試験結果

重力型アルゴンガス入り V.C.H.P. の性能試験は、ヒータ出力を約 30 W, 50 W, 70 W に変化させて各部の温度特性を調べるとともに、加熱部位置も Fig. 2.2 に示す A, B 及び C の位置に移動して行った。

加熱部の各位置における性能試験結果を以下に示す。

### (1) A の位置における試験結果

ヒートパイプの作動前液面は、下端から 133 mm の位置であり、したがって発熱体上端位置は、作動液面より 33 mm 下方になる。よって本試験は、加熱部全長がヒートパイプ作動液面より下方に位置する性能試験である。ヒータ出力に対するヒートパイプ各部の温度を Fig. 3.1 に示す。

ヒートパイプは、使用上加熱部、断熱部及び冷却部に分けられ、加熱部及び断熱部は蒸気流の移動により比較的均一温度となる。本試験は、断熱部と見做せる部分の外側に積極的な断熱

## 2. V.C.H.P. 性能試験

### (1) ヒートパイプの仕様

ヒートパイプは、キャプセル内で垂直方向に取付けて使用すること、加熱はボトムヒートとなることから、同じ径でウィック付ヒートパイプより熱輸送量が大きく取れる重力型 V.C.H.P. を選定した。ヒートパイプ外径は、JMTR の 40 mm $\phi$  標準キャプセルに適用可能な 8 mm $\phi$  とした。長さはキャプセル長を考慮して 500 mm とした。作動液は純水、封入ガスはアルゴンガスである。ヒートパイプの要目を Table 2.1 に、その構造を Fig. 2.1 に示す。

### (2) 性能試験装置

性能試験は、ヒートパイプの加熱部を電気ヒータで加熱し、冷却部を空気による自然対流で冷却する方式を用いた。

加熱部は、長さ 100 mm の溝付きアルミブロックに、ヒータを巻いた発熱体を取付けた。発熱体は、加熱部位置によるヒートパイプ作動限界を調べるために移動可能でかつヒートパイプに密着できるよう 2 つ割構造とした。

発熱体内側には、ヒートパイプ表面温度を測定するために、1.6 mm $\phi$  シース型クロメル・アルメル (C・A) 熱電対を、3 本取付けた。

ヒートパイプ冷却部表面には、0.5 mm $\phi$  銅-コンスタンタン熱電対 6 本をハンダに埋めて取付けた。性能試験装置の概略を Fig. 2.2 に示す。同図における発熱体位置「A」は、ヒートパイプ下端に取付けた場合である。「B」は、A 位置から 50 mm 上方に移動した位置、「C」は下端から 95 mm 上方に移動した位置である。

## 3. 性能試験結果

重力型アルゴンガス入り V.C.H.P. の性能試験は、ヒータ出力を約 30 W, 50 W, 70 W に変化させて各部の温度特性を調べるとともに、加熱部位置も Fig. 2.2 に示す A, B 及び C の位置に移動して行った。

加熱部の各位置における性能試験結果を以下に示す。

### (1) A の位置における試験結果

ヒートパイプの作動前液面は、下端から 133 mm の位置であり、したがって発熱体上端位置は、作動液面より 33 mm 下方になる。よって本試験は、加熱部全長がヒートパイプ作動液面より下方に位置する性能試験である。ヒータ出力に対するヒートパイプ各部の温度を Fig. 3.1 に示す。

ヒートパイプは、使用上加熱部、断熱部及び冷却部に分けられ、加熱部及び断熱部は蒸気流の移動により比較的均一温度となる。本試験は、断熱部と見做せる部分の外側に積極的な断熱



構造を設けていない。しかしFig. 3.1の測定結果から、加熱部上方で加熱部とほぼ同じ温度範囲は、断熱部と見ることができる。

実験No.1～No.3は、ヒータ入力の変化に伴い、均一温度範囲とみられる部分が上方に移動しており、蒸気圧の上昇に伴って、アルゴンガスが上方に凝縮していると考えられ、VCHPとして正常に作動していると考えられる。No.3の加熱部の温度が断熱部より約10℃高いのは、熱電対がシース型で1.6φと太いこと及び発熱体制の溝にうめ込まれて取付られていることから、ヒートパイプ表面温度より高い温度を計測しているものと考えられる。

V.C.H.P.として均一温度に制御できる範囲は、Fig. 3.1の測定結果からヒータ入力29.1Wのとき約200mm、49.8Wのとき約330mm、72.3Wのとき約360mmであると考えられる。

## (2) Bの位置における試験結果

本試験は、Aの試験より発熱体が50mm上方に移動した位置で行ったものである。ヒートパイプ作動前の液面位置は、発熱体上端より17mm下方である。試験結果をFig. 3.2に示す。

No.4の実験は、ヒータ入力が31.4Wと少ないので蒸気量も少くアルゴンガスがあまり凝縮されていないと考えられる。よって温度測定#8、及び#9の位置の温度はアルゴンガス温度を示していると考えられる。また測定点#5～#8までの温度分布は、ヒートパイプコンテナの熱伝導によるものと考えられる。蒸気とアルゴンガスの界面は、#5と#8との温度差が大きいため混合状態ではなく、※印の近傍で平面を形成しているものと推定できる。均一温度範囲は、約250mmの位置までである。

No.5の実験は、ヒータ入力が49.0Wの測定結果で均一温度範囲は約360mmの位置までである。温度測定点#7と#8の温度差が約40℃と少く、かつ#8と#9が同じ温度となっていることから、冷却部においては蒸気とアルゴンガスの界面が形成されてはいるが、アルゴンガス中には蒸気が侵入しているものと考えられる。

No.6の実験は、No.5の実験結果と均一温度範囲が変わらないこと、加熱部の温度上昇分がNo.3実験結果と比較して大きいことから、作動前液面位置付近でドライアウトが発生していると考えられる。均一温度範囲が同じであることは、不活性のアルゴンガスを凝縮させる圧力も同じであり、よって蒸気発生量もNo.5及びNo.6実験では、ほぼ同じと考えられる。No.6実験は、No.5実験に比べて約20W過入力でありこれにより、ドライアウトが発生し、加熱部の温度上昇となったと考えられる。ドライアウトの発生がなければ、加熱部はNo.3のデータからNo.6実験の断熱部温度#4、#5、#6、#7の温度より約10℃程度高温であると推定できる。

## (3) Cの位置における試験結果

本試験は、発熱体の下端から38mm下方に作動前の液面が位置した状態で行ったものである。ヒートパイプの各部温度測定結果をFig. 3.3に示す。

No.7の実験は、ヒータ入力が31.4Wであるが、加熱部が上方に移動し加熱される液量も少ないので、蒸気発生量が少ないこと、またコンテナ内面に添って重力により還流された作動液も、測定点#3付近で加熱され再び蒸気となってしまうこの付近でドライアウトの状態になっていると考えられる。

No.8及びNo.9の実験もNo.6、No.7の実験からやはりドライアウトが生じていると考え

られる。これは加熱部と断熱部の温度差が大きいことから明らかである。

## 4. 理論解析と考察

### 4.1 コンダクタンス

V.C.H.P.の一端を加熱して作動させると、それまでパイプ内に一様に分散していた非凝縮性ガスは、分溜作用によって凝縮部端に集められる。その際、作動流体の蒸気と非凝縮ガスとの境界がはっきりとした一平面を形成すると仮定したものが、平面界面モデル理論である。またより実際に界面でのガスと蒸気との分子拡散を考慮に入れた取扱いをするモデルが、拡散界面モデルである。

今回の試験は、ガス制御型V.C.H.P.の総合的な特性の基礎資料を得ることが目的であり、詳細な解析は必要ではない。よって実験結果は、平面解析モデルで近似して解析を行った。

V.C.H.P.の作動状態では、非凝縮ガスが凝縮端に集められ、その一部を占有することになるから、凝縮部に活動部と不活動部とを生じ結果的に冷却部の長さが制限されて熱輸送量が減少する。そこでこの不活動部の長さを積極的に何らかの方法によって変化させ、その結果ヒートパイプの熱輸送量を制限しようとするのが、ここで取扱うガス制御型V.C.H.P.である。

いま、凝縮部の活動部の長さ： $L_{ca}$  [m]、また単位長さ当りの伝熱面積： $a_c$  [ $m^2$ ]、パイプ内の蒸気からヒートパイプ外への熱通過率： $H_c$  [ $W/(m^2 K)$ ]としたとき、この凝縮部の伝熱能力を評価する1つの特性値としてのコンダクタンス： $G_c$  [ $W/K$ ]は、次式で表わされる。

$$G_c = H_c \cdot a_c \cdot L_{ca} \quad (1)$$

したがって、 $L_{ca}$ がこのコンダクタンスの制御の1つのパラメータである。

また、凝縮部全長： $L_c$  [m]、不活動部の長さ： $L_{ci}$  [m]とすれば

$$L_{ca} = L_c - L_{ci} \quad (2)$$

であり、いま非凝縮ガスの封入質量： $m_g$  [kg]が既知の場合には、不活動部の長さは、

$$L_{ci} = \frac{m_g \cdot R \cdot T_g}{P_g \cdot A_v} \quad (3)$$

ただし、 $R$ ：ガス定数（アルゴンガスでは $R = 208.13$  [ $J/(kg \cdot K)$ ]）、 $T_g$ ：圧力 [ $P_a$ ]として、 $A_v$ ：ヒートパイプのガス通路断面積 [ $m^2$ ]である。

なお、ガスの封入質量が直接不明で、たとえば、温度： $T_0$  [K]、圧力： $P_0$  [ $P_a$ ]でガス部容積 [ $m^3$ ]封入していることが分かっている場合には、封入質量は次式で計算される。

$$m_g = \frac{P_0 \cdot V_0}{R \cdot T_0} \quad (4)$$

式(2)と(3)を式(1)に代入すれば、コンダクタンス $G_c$ は次のようになる。

られる。これは加熱部と断熱部の温度差が大きいことから明らかである。

## 4. 理論解析と考察

### 4.1 コンダクタンス

V.C.H.P.の一端を加熱して作動させると、それまでパイプ内に一様に分散していた非凝縮性ガスは、分溜作用によって凝縮部端に集められる。その際、作動流体の蒸気と非凝縮ガスとの境界がはっきりとした一平面を形成すると仮定したものが、平面界面モデル理論である。またより実際の界面でのガスと蒸気との分子拡散を考慮に入れた取扱いをするモデルが、拡散界面モデルである。

今回の試験は、ガス制御型V.C.H.P.の総合的な特性の基礎資料を得ることが目的であり、詳細な解析は必要ではない。よって実験結果は、平面解析モデルで近似して解析を行った。

V.C.H.P.の作動状態では、非凝縮ガスが凝縮端に集められ、その一部を占有することになるから、凝縮部に活動部と不活動部とを生じ結果的に冷却部の長さが制限されて熱輸送量が減少する。そこでこの不活動部の長さを積極的に何らかの方法によって変化させ、その結果ヒートパイプの熱輸送量を制限しようとするのが、ここで取扱うガス制御型V.C.H.P.である。

いま、凝縮部の活動部の長さ： $L_{ca}$  [m]、また単位長さ当りの伝熱面積： $a_c$  [ $m^2$ ]、パイプ内の蒸気からヒートパイプ外への熱通過率： $H_c$  [ $W/(m^2 K)$ ]としたとき、この凝縮部の伝熱能力を評価する1つの特性値としてのコンダクタンス： $G_c$  [ $W/K$ ]は、次式で表わされる。

$$G_c = H_c \cdot a_c \cdot L_{ca} \quad (1)$$

したがって、 $L_{ca}$ がこのコンダクタレスの制御の1つのパラメータである。

また、凝縮部全長： $L_c$  [m]、不活動部の長さ： $L_{ci}$  [m]とすれば

$$L_{ca} = L_c - L_{ci} \quad (2)$$

であり、いま非凝縮ガスの封入質量： $m_g$  [kg]が既知の場合には、不活動部の長さは、

$$L_{ci} = \frac{m_g \cdot R \cdot T_g}{P_g \cdot A_v} \quad (3)$$

ただし、 $R$ ：ガス定数（アルゴンガスでは $R = 208.13$  [ $J/(kg \cdot K)$ ]）、 $T_g$ ：圧力 [ $P_a$ ]として、 $A_v$ ：ヒートパイプのガス通路断面積 [ $m^2$ ]である。

なお、ガスの封入質量が直接不明で、たとえば、温度： $T_0$  [K]、圧力： $P_0$  [ $P_a$ ]でガス部容積 [ $m^3$ ]封入していることが分かっている場合には、封入質量は次式で計算される。

$$m_g = \frac{P_0 \cdot V_0}{R \cdot T_0} \quad (4)$$

式(2)と(3)を式(1)に代入すれば、コンダクタンス $G_c$ は次のようになる。

$$G_c = H_c a_c \cdot \left( L_c - \frac{m_g \cdot R \cdot T_g}{P_g \cdot A_v} \right) \quad (5)$$

(5)式で示される凝縮部コンダクタンスの最大値は、非凝縮ガスが封入されていない場合 ( $m_g=0$ )、あるいは、封入されているにしてもその温度が絶対零度 ( $T_g=0$ ) の場合であり、これは

$$G_{cmax} = H_c \cdot a_c \cdot L_c \quad (6)$$

である。

そこで  $G_c$  を  $G_{cmax}$  で除し、無次元化したものを正規化コンダクタンス ( $\bar{G}_c$ ) と呼び、次式で示される。

$$\bar{G}_c = \frac{G_c}{G_{cmax}} = 1 - \frac{m_g \cdot R \cdot T_g}{P_g \cdot V_c} \quad (7)$$

ただし、 $V_c = A_v \cdot L_c$  [ $m^3$ ] は凝縮部の全容積である。

式(7)で、コンダクタンスを制御できる独立変数としては、 $m_g$  と  $T_g$  があげられる。ここで、 $P_g$  は本来はガス圧力であるが、これは作動中の蒸気とガスの界面における蒸気圧 ( $P_v$ ) と等しくて、界面のバランスを保っている。したがって作動温度から、その飽和蒸気圧として決定することができる。

$$\bar{G}_c = 1 - \frac{m_g \cdot R \cdot T_g}{P_v \cdot V_c} \quad (8)$$

なお  $V_c$  はヒートパイプの初期設計の段階で決定されるものであり、制御変数とはなり得ない。したがって、 $m_g$  と  $T_g$  のみを変数である。

## 4.2 試験結果との比較

ガス量 ( $m_g$ ) は、一般的なガス溜を持った V.C.H.P. の場合には、そのガス溜からヒートパイプの凝縮部に非凝縮ガスを出し入れすることによって変化させることが可能である。本試験に用いた V.C.H.P. はガス溜めがない  $m_g$  固定式の方式でありしたがって  $m_g$  は変数ではなく(8)式における  $T_g$  のみを変数と考えれば良い。

これは具体的には、実験における測定点 # 9 の温度がガス温度  $T_g$  を示していると考えられる。本実験では、直接ガス温度を測定していないが、# 9 測定点はガス・蒸気界面から離れていることから、ガス温度として問題ないとする。

ここでの解析は、試験の結果から直接求めることができる不活動部の長さ ( $L_{ci}$ ) 及び凝縮部の長さ ( $L_c$ ) の実験値と理論値の比較を行った。

前述の(8)式を(3)式の  $L_{ci}$  を求める式を用いて書き直すと、正規化コンダクタンス ( $\bar{G}_c$ ) は、

$$\bar{G}_c = 1 - \frac{L_{ci}}{L_c} \quad (9)$$

となる。

これらの計算結果及び試験から求めた結果を Table 4.1 に示す。なお試験結果から求めた蒸気・ガス界面位置は断熱部温度及び冷却部ガス温度の平均値を取った。蒸気・ガス界面の上下では、ガス温度が急激に変わっておりガス温度を直接測定すれば、その位置が明確になるが本試験では、ガス温度を測定していない。またコンテナ表面の測定では、コンテナの熱伝導によりその場所を特定するのがむずかしい。よって、実験 No. 1, No. 4 及び No. 7 は測定できた断熱部温度とコンテナの伝導を考慮した冷却部温度の中間値の位置を、蒸気・ガス界面位置とした。

熱入力の小さいところでは、不活動部の長さ ( $L_{ci}$ ) と正規化コンダクタンス ( $\bar{G}_c$ ) のいずれも理論値と実験値を比較すると良い一致がみられるが、熱入力が大きいときには、実験値が理論値を大きく上まわっている。

その理由として考えられることは、今回の試験方法では直接ガス温度 ( $T_g$ ) を測定できないため、計算値に熱電対 # 9 の壁温度をガス温度として用いた結果、ヒートパイプ内ガス温度を低く評価してしまったことによるものと思われる。

また、ドライアウトの生じている No. 7, No. 8 及び No. 9 実験では、実験値と理論値はあまり良い一致をみていない。

#### 4.3 温度制御効果

V.C.H.P. による照射試料の具体的な温度制御方法は、試料に V.C.H.P. の蒸発部 (加熱部) を接触させて、これによって試料からの発熱を汲み上げて除熱し、希望の温度に制御することである。

ヒートパイプの作動温度 (蒸気温度) :  $T_v$  [K], 低熱源の温度 (冷却水温度) :  $T_l$  [K] とすれば、V.C.H.P. の除熱能力は、 $G_c (T_v - T_l)$  [W] である。これに対して、試料の質量 :  $M$  [kg] 比熱 :  $C$  [J/kg·K], 炉内の環境温度とガンマ加熱による試料への熱入力 :  $W_1$  [W], さらに、同じく環境温度とガンマ加熱によるヒートパイプ蒸発部自体への熱入力 :  $W_2$  [W] とすれば、これらの熱流に関し、次式が導かれる。

$$G_c (T_v - T_l) = M \cdot C \cdot \Delta T / \Delta t + W_1 + W_2 \quad (10)$$

したがって、試料の温度変化は、

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{M \cdot C} \left\{ G_c (T_v - T_l) - (W_1 + W_2) \right\} \quad (11)$$

ここで、式(5)あるいは式(8)を用い、さらに、水冷却等による強制冷却で積極的に凝縮部を冷却すれば  $T_l = T_g$  と考えられ、式(11)は、次のようになる。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{M \cdot C} \left\{ H_c \cdot a_c \left( L_c - \frac{m_g \cdot R \cdot T_g}{P_v \cdot A_v} \right) (T_v - T_g) - (W_1 + W_2) \right\} \quad (12)$$

あるいは、

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{M \cdot C} \left\{ G_{\max} \left( 1 - \frac{m_g \cdot R \cdot T_g}{P_v \cdot V_c} \right) (T_v - T_g) - (W_1 + W_2) \right\} \quad (13)$$

したがって、ガス温度 ( $T_g$ ) を変化させることにより試料の温度制御が可能である。しかしその際、熱通過率:  $H$  [ $W/(m^2K)$ ] あるいは、最大コンダクタンス:  $G_{cmax}$  [ $W/K$ ] は、制御範囲を求めるためにあらかじめ実測しておく必要がある。なお、これらの測定は今後実施する計画である。

## 5. 結 論

照射試料の温度制御用 V.C.H.P. の開発に先立ち、V.C.H.P. の基礎的な特性を調べるために行った試験により、次の様な事項が明らかになった。

- (1) 本 V.C.H.P. の性能は、加熱位置に依存する。特に、発熱部が、液溜から上方に離れすぎると低熱入力でも局所的なドライアウトを生じ、ヒートパイプとして十分作動しなくなる。このことから除熱を必要とする照射試料は、V.C.H.P. の液溜部に十分接近させて設置しなければならない。
- (2) 温度制御用としての熱コンダクタンスの解析から、ドライアウトを生じないような正常作動状態ならば、理論解析は試験値とよい一致をみる。
- (3) J M T R 用温度制御キャプセルに使用する V.C.H.P. の制御範囲を計算するためには、ヒートパイプ製作後、最大コンダクタンスを求めておく必要がある。

したがって、ガス温度 ( $T_g$ ) を変化させることにより試料の温度制御が可能である。しかしその際、熱通過率:  $H_c$  [ $W/(m^2K)$ ] あるいは、最大コンダクタンス:  $G_{cmax}$  [ $W/K$ ] は、制御範囲を求めるためにあらかじめ実測しておく必要がある。なお、これらの測定は今後実施する計画である。

## 5. 結 論

照射試料の温度制御用 V.C.H.P. の開発に先立ち、V.C.H.P. の基礎的な特性を調べるために行った試験により、次の様な事項が明らかになった。

- (1) 本 V.C.H.P. の性能は、加熱位置に依存する。特に、発熱部が、液溜から上方に離れすぎると低熱入力でも局所的なドライアウトを生じ、ヒートパイプとして十分作動しなくなる。このことから除熱を必要とする照射試料は、V.C.H.P. の液溜部に十分接近させて設置しなければならない。
- (2) 温度制御用としての熱コンダクタンスの解析から、ドライアウトを生じないような正常作動状態ならば、理論解析は試験値とよい一致をみる。
- (3) J M T R 用温度制御キャプセルに使用する V.C.H.P. の制御範囲を計算するためには、ヒートパイプ製作後、最大コンダクタンスを求めておく必要がある。

## 謝 辞

炉外試験を実施するに当って、部品の設計製作を東海研技術部工作課菊地泰二氏にお世話になった。またキャプセル用VCHPの開発を効率良く実施するため大阪府立大学との協力研究を進めていただいた現企画室次長中野熙氏及び業務課長代理畔野松一氏、同業務係長高橋敏彦氏にお世話になった。

本報告書をまとめるにあっては、照射第1課長市橋芳徳氏に御指導いただいた。記して感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) Deverall, J.E., Waston, H.E.,: Temperature Control of Irradiation Experiments, LA-UR-73-81, (1973).
- (2) 大島, 松下, 村上, : ヒートパイプ工学, 朝倉書店, (1981)
- (3) Tsuyuzaki, N., Saito, T., Hishida, M., Negishi, K., Okamoto, Y.,: Heat-Removal Heat Pipe System of Nuclear Irradiation Facilities, 6th International Heat Pipe Conf., Grenoble, France, p.p.598-600, (1987).



## 謝 辞

炉外試験を実施するに当って、部品の設計製作を東海研技術部工作課菊地泰二氏にお世話になった。またキャプセル用VCHPの開発を効率良く実施するため大阪府立大学との協力研究を進めていただいた現企画室次長中野熙氏及び業務課長代理畔野松一氏、同業務係長高橋敏彦氏にお世話になった。

本報告書をまとめるにあっては、照射第1課長市橋芳徳氏に御指導いただいた。記して感謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) Deverall, J.E., Waston, H.E.,: Temperature Control of Irradiation Experiments, LA-UR-73-81, (1973).
- (2) 大島, 松下, 村上, : ヒートパイプ工学, 朝倉書店, (1981)
- (3) Tsuyuzaki, N., Saito, T., Hishida, M., Negishi, K., Okamoto, Y.,: Heat-Removal Heat Pipe System of Nuclear Irradiation Facilities, 6th International Heat Pipe Conf., Grenoble, France, p.p.598-600, (1987).

Table 2.1 Items of heat pipe

型式	サーモサイフォン (垂直でボトムヒート作動)
寸法	L=500mm , O.D.=8mmφ , I.D.= 6.8 mmφ
コンテナ材質	銅
作動流体	蒸留水(封入量:3.6cc)
制御ガス	アルゴンガス(封入量:19.3cc at 0°C 1atm)

Table 4.1 Relation between experimental and calculation data

実験 No	加熱 位置	熱入力 $Q_{in}$ [W]	ガス温度 <sup>1)</sup> $T_g$ [K]	蒸気温度 <sup>2)</sup> $T_v$ [K]	蒸気圧力 <sup>3)</sup> $P_v$ [MPa]	不活動部長 $L_{ci}$ [m]		正規化コンダクタ ンス $G_c$	
						理論値	実験値	理論値	実験値 <sup>4)</sup>
1	A	29.08	363	417	0.405	0.227	0.25	0.433	0.38
2	"	49.75	428	468	1.40	0.080	0.09	0.80	0.78
3	"	72.3	498	523	4.00	0.032	0.06	0.92	0.85
4	B	31.4	350	414	0.373	0.237	0.23	0.323	0.34
5	"	49.0	398	448	0.892	0.113	0.12	0.677	0.66
6	"	70.4	473	499	2.63	0.046	0.12	0.869	0.66
7	C	31.4	333	408	0.313	0.268	0.25	0.121	0.18
8	"	49.0	360	447	0.872	0.104	0.14	0.659	0.54
9	"	72.0	436	493	2.32	0.0476	0.13	0.844	0.57

- 1) 熱電対#9の温度とした。
- 2) 蒸発部と凝縮部の平均温度とした。
- 3) 日本機械学会、流体の熱物性値集、P208
- 4)  $L_{ci}$ の実験値から算出した。

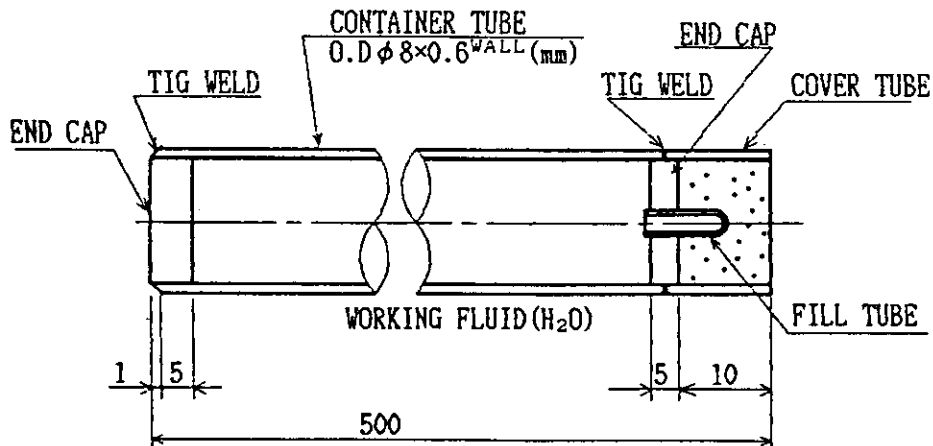


Fig. 2.1 Profile of Cu/H<sub>2</sub>O gravity-assisted heat pipe

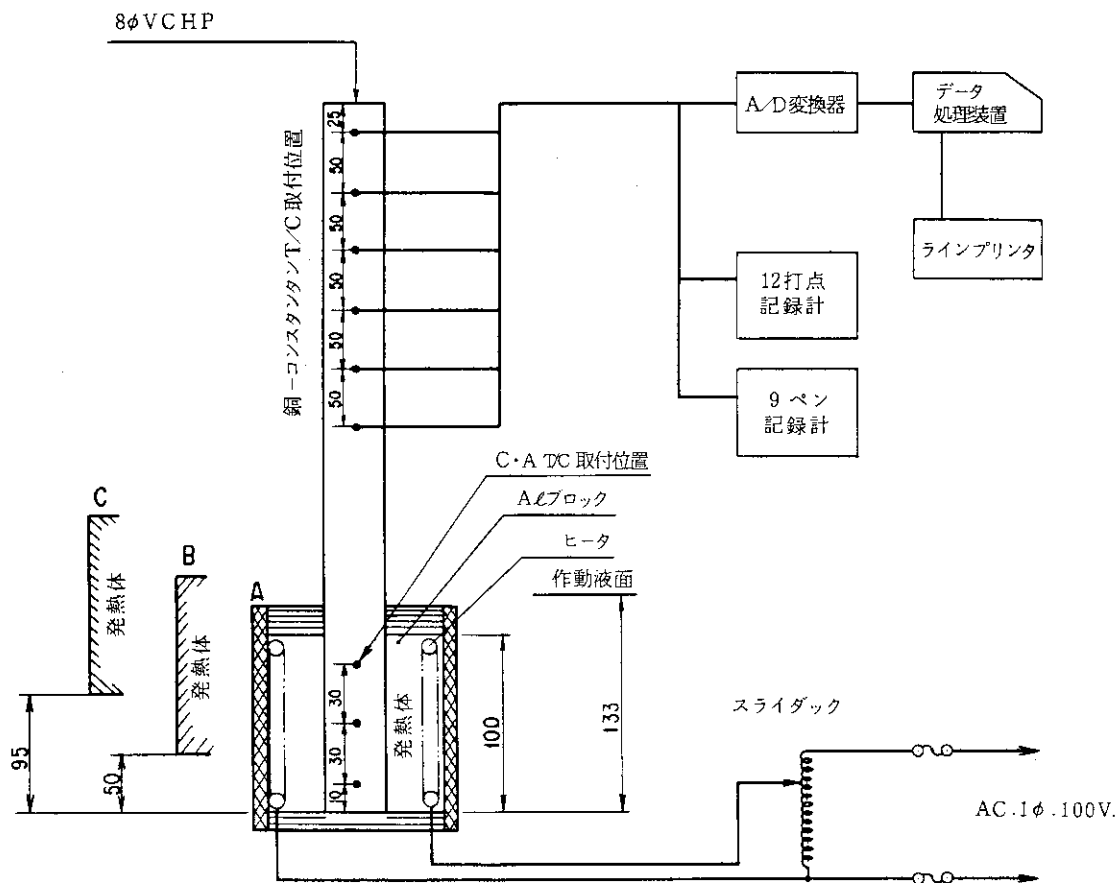


Fig. 2.2 Measurement block diagram

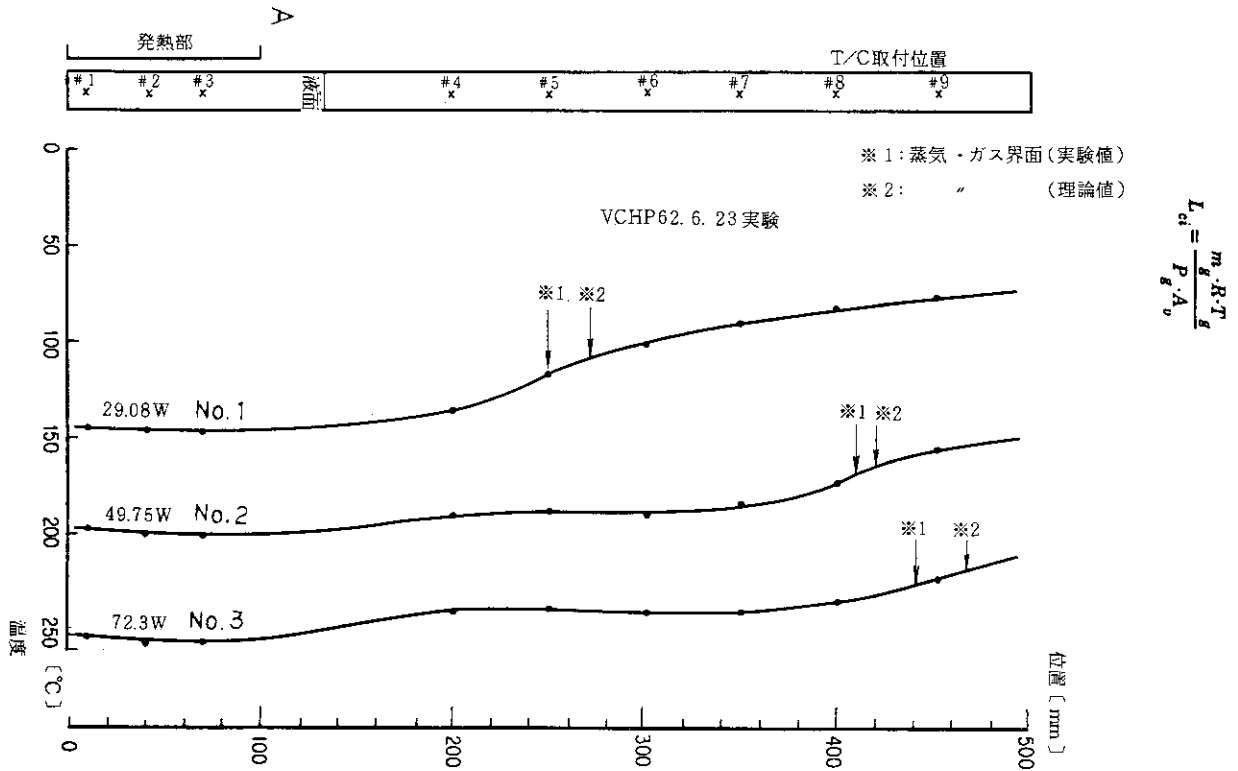


Fig. 3.1 Surface temperature of V.C.H.P. (No.1 experiment)

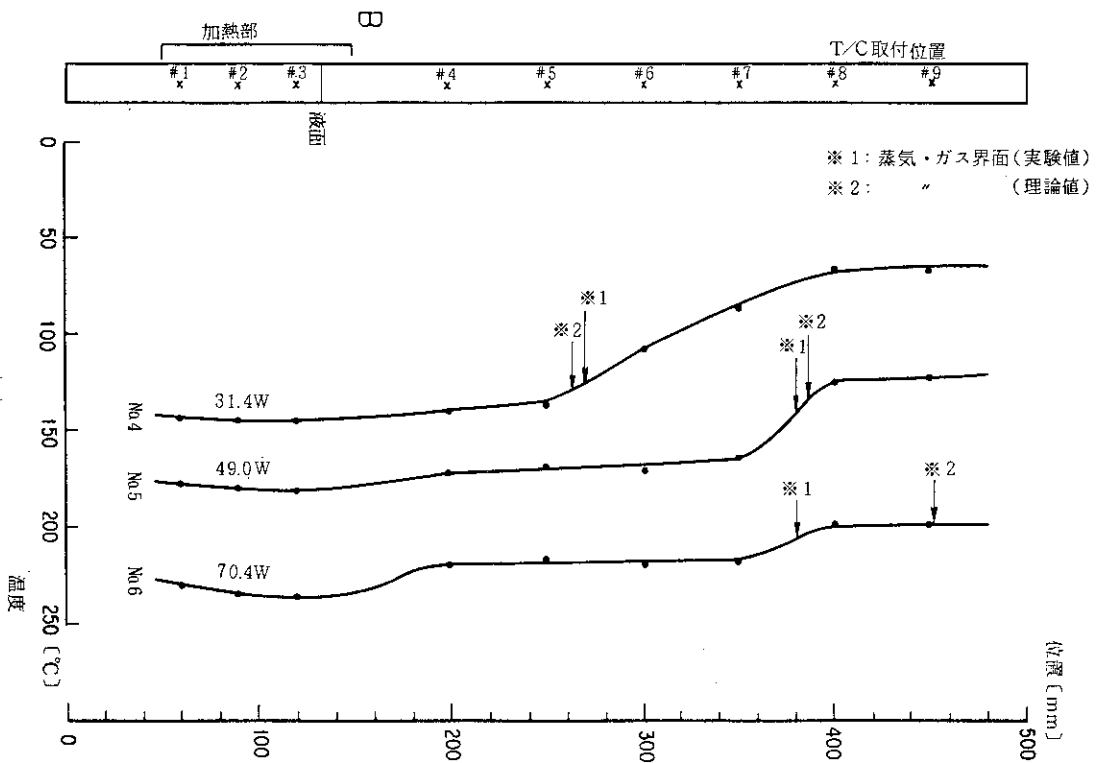


Fig. 3.2 Surface temperature of V.C.H.P. (No.2 experiment)

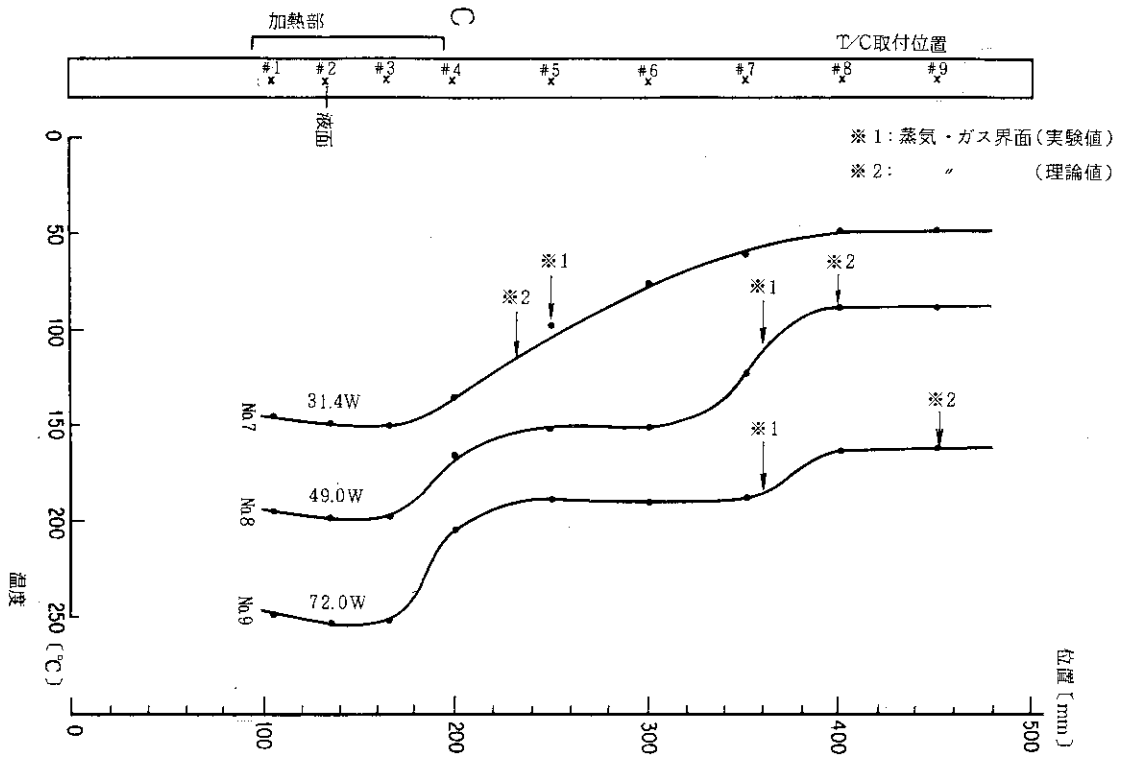


Fig. 3.3 Surface temperature of V.C.H.P. (No.3 experiment)