

JAERI-M  
89-099

飽和温度キャプセルに関する熱特性試験

1989年8月

新見 素二・染谷 博之・小林 敏樹\*  
大内 光男・原山 泰雄

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）で複写による実費領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, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-  
ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 日青工業株式会社

飽和温度キャプセルに関する熱特性試験

日本原子力研究所大洗研究所材料試験炉部

新見 素二・染谷 博之・小林 敏樹\*

大内 光男・原山 泰雄

(1989年7月10日受理)

材料試験炉部は照射技術向上の一つとして、“飽和温度キャプセル”の開発を進めている。“飽和温度キャプセル”とは、キャプセル内部に加圧水を供給し、その水を沸騰させる型式のキャプセルである。これは、キャプセル内の水を飽和温度に保ち、原子炉内でガンマ加熱される照射試料の温度設定に利用しようという構想に基づいている。しかし、内部に水を注入する型式のキャプセルについて設計や運転等に利用するデータは極めて少ないことから、熱特性試験を計画した。

キャプセルを電気ヒータによる加熱で模擬した炉外実験装置を製作し、実験を行った。この実験に用いられた模擬キャプセルとして導水管方式を採用した。導水管方式とは、注入水を導水管でキャプセル内の上部から下方に導く注水方法である。

実験の目的は、キャプセル内の熱的特性を把握すること、キャプセル制御装置の性能特性を確認することである。実験の結果、キャプセル内の熱的特性としてキャプセルに注入する供給水の流量を変化させることにより、キャプセル内の供給水温度を容易に変更できること、またキャプセル制御装置は安定に稼働することが確認された。

Thermal Characteristic Test for Saturated Temperature  
Type Capsule

Motoji NIIMI, Hiroyuki SOMEYA, Toshiki KOBAYASHI\*  
Mitsuo OHUCHI and Yasuo HARAYAMA

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

(Received July 10, 1989)

The Japan Material Testing Reactor Project is developing a new type capsule so-called "Saturated Temperature Capsule", as a part of irradiation technique improvement program. This type capsule, in which the water is supplied and boiled, bases on the conception of keeping the coolant at the saturated temperature and facilitating the temperature setting of specimens heated by gamma-ray in reactor. However, out-pile test was planned, because there were few usable data for design and operation of the capsule into which the coolant was injected.

A out-pile apparatus, simulated the capsule with electric heaters, was fabricated and experiments were carried out, to obtain data concerning design and operation for the capsule into which the water was injected.

As a structure of simulated capsule, a type of downward coolant supply was adopted. The downward coolant tube type injectes the water in the bottom of capsule by tube through the upper flange.

Major objects of experiences were to grasp thermal features under operation and to provide performances of capsule control equipment.

---

\* on leave from NKK

Experimental results proved that the temperature of water within the capsule was easily varied by controlling supply water flow rate, and that the control equipment was operated stably and safety.

Keywords: Saturated Temperature, Gamma Ray, LWR Condition Material  
Irradiation Test, Capsule, Void Fraction

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験装置 .....	2
2.1 実験装置の概要 .....	2
2.2 模擬キャプセル実験部 .....	2
3. 実験装置特性ならびに実験 .....	8
3.1 実験装置特性 .....	8
3.2 実 験 .....	8
3.2.1 実験(その1) : キャプセル内発熱量と供給水温度分布 .....	9
3.2.2 実験(その2) : キャプセル内供給水流量と供給水温度分布 .....	9
3.2.3 実験(その3) : キャプセル外側の条件と供給水温度分布 .....	10
4. 実験結果の解析と検討 .....	19
4.1 解析上の仮定 .....	19
4.2 解析(計算)結果 .....	20
4.2.1 実験(その1) についての解析結果 .....	20
4.2.2 実験(その2) についての解析結果 .....	20
4.2.3 実験(その3) についての解析結果 .....	21
4.2.4 解析結果より見たプログラム SATCAP の特性 .....	21
5. 結 論 .....	29
謝 辞 .....	30
参考文献 .....	30

## Content

1. Introduction .....	1
2. Experimental Apparatus .....	2
2.1 Outline of experimental apparatus .....	2
2.2 Part of modified capsule .....	2
3. Experiment and Apparatus Performances .....	8
3.1 Apparatus performances .....	8
3.2 Experiment .....	8
3.2.1 Effect of heat rate of heaters on temperature of supply water (Run No. 1) .....	9
3.2.2 Effect of flow rate of coolant on temperature of supply water (Run No. 2) .....	9
3.2.3 Effect of out side boundary of capsule on temperature of supply water (Run No. 3) .....	10
4. Analysis of Experiment and Discussions .....	19
4.1 Assumptions on analysis .....	19
4.2 Analitical results .....	20
4.2.1 Analitical results for Run No. 1 .....	20
4.2.2 Analitical results for Run No. 2 .....	20
4.2.3 Analitical results for Run No. 3 .....	21
4.2.4 Program features led from standpoint of analysis results .....	21
5. Conclusions .....	29
Acknowledgement .....	30
References .....	30

## 1. はじめに

### (1) 飽和温度型式キャプセル

材料試験炉部は、JMTRを用いて試料等の照射試験の照射技術向上の一つとして、新しい“飽和温度キャプセル”の開発を進めている。このキャプセルは、その内部に水を供給し、供給した水を沸騰させる型式である。すなわち、キャプセル内部に水を流し、その水が照射試料のガンマ加熱等の熱を除熱する。そして、ある圧力下では水の飽和温度が一定であることから、試料の照射温度の設定に利用する。照射温度の設定は圧力を調整することによって行う。水の気化潜熱を利用し、気化中の箇所に装荷した試料部分の一定温度領域を広範囲に保持する。供給水にかかる圧力には技術上自ら制約があり、それ程高圧とすることはできない。しかし、LWRの条件約75気圧、300℃程度までは充分実現可能である。実現できれば、この型式のキャプセルはLWRの材料照射試験に有力な手段を提供できる。

### (2) 実験目的

材料の照射を目的にした照射用キャプセル設計の基本課題の一つは、試料の照射温度を可能な限り一定範囲に保持することである。飽和温度キャプセルは、温度一定範囲がどの程度か等キャプセル内の熱的挙動を把握しておく必要がある。しかしながら、試料周りを加圧水あるいは水蒸気の雰囲気として照射するキャプセルは、JMTRでの経験として豊富なものではない。この問題の解決に向けてのアプローチの一つとして、キャプセル内の供給水の流動状態、沸騰状態を確認する炉外実験を計画した。将来製作する飽和温度のキャプセルに関する設計ならびにその運転に必要な情報を得ることを目的に新たに炉外実験装置を製作するとともに実験を行った。実験の目的は次の通りである。

1) キャプセル内を飽和温度条件とすることができるかを確認する。また、この型式のキャプセルを実用化するためには、キャプセル制御装置はどのような方式が最適かを調査する。すなわち、例えば、キャプセル内部に注入する水の圧力はどのように制御するのが最適か等、制御装置を含みキャプセル運転方式に関する資料を得て、キャプセル制御装置の設計に資するデータを得る。

2) 照射試料温度を軸方向に均一にするために内部供給水を沸騰させる方式を採用し、供給水温度が軸方向にどのような温度分布になるかを測定する。試料装荷部の温度分布がどの程度均一化できるかを確認する。

3) 飽和温度キャプセルの熱設計用プログラムの検証データとして使用する。

なお、実験条件としての目標飽和温度は、 $290 \pm 30^\circ\text{C}$ とした。



## 2. 実験装置

### 2.1 実験装置の概要

実験装置の主要部は、飽和温度キャプセルを模擬した模擬キャプセルとキャプセル内に水を送り、また、系内を定圧に保持するためのキャプセルまわりの装置（この報告書では制御装置と言う）である。なお、キャプセル内部に水を注入する方式として導水管方式を採用した。

#### (1) P&I D (Piping and Instruments Diagram)

この装置のP&I DをFig 2.1に示す。システムの加圧は往復動型プランジャーポンプ(P1)で行い、システム圧力の保持および調整は高圧保圧弁(RV1)で行う。ポンプは、定容量型なので圧力のいかにかわらず定められた流量を系内に送込む。保圧弁は機械式ばね構造であり流量のいかにかわらず系内を定められた圧力に保持する。系のソリッド状態の防止および圧力サージの吸収はシステムに結合している窒素加圧のアキュムレータ(AQ1)で行う。供給水の加熱は3段のヒータで行い、キャプセル外筒冷却(キャプセル・ジャケット)および系内の供給水の放出時の冷却(クーラ)は常温の水道水によって行う。

#### (2) 装置構成の主要機器

装置の主要機器の要目をTable 2.1に示す。試料のガンマ加熱は3段のヒータの出力4.5KW(1.5KW/段)で模擬することになっている。

#### (3) 設計条件

この装置の製作設計条件は

1) キャプセル内設計圧力	115kg/cm <sup>2</sup> a
2) キャプセル設計温度	320℃
3) 雰囲気温度	常温
4) キャプセル外筒冷却水温度	20℃
5) 高圧給水系使用流体	純水

とした。設計圧力は、320℃における飽和圧力である。

### 2.2 模擬キャプセル

実験装置のうち、キャプセルを模擬した実験部をFig. 2.2に示す。主要なものは、ヒータ、二重の外筒および温度計測用熱電対等である。

#### (1) ヒータ

3段のヒータの総出力は4.5KW(1.5KW/段)である。このヒータは各段独立に出力を0から1.5KWまで変化させることができる。飽和温度キャプセルの適用の一つとして、ステンレス鋼試料を軽水炉温度条件で照射するキャプセルを予定している。その場合の試料の発熱率を試算すると、約7KWとなる。この点で出力を比較すると出力不足である。しかし、炉外装置とし

この寸法上の制約および利用可能なヒータ型式を考慮し、製作可能なシース型ヒータを採用した。この実験装置としての模擬キャプセル内に利用できるシース型ヒータとしては最大出力である。

## (2) 計測系

計測あるいは検出する物理量は、内部に注入する供給水の温度とボイドの有無とした。内部に注入する供給水の温度測定用として熱電対を取付けた。熱電対はキャプセル内筒内に取付け供給水の上昇流の温度を測定する。供給水が下降する導水管には、取付けていない。これは、導水管の外/内径が6φ/4φmmと小さく、取付ける余裕空間がないためである。実験装置の測定系の一つとして探針式ボイド計を取付けた。検出位置はヒータ上部とした。このボイド計は実験部内部のボイドの有無判定の検出器としてのみ使用した。

## (3) 内、外筒

模擬キャプセル胴部は、三重管構造である。最も外側の空間には、冷却水を通すので、キャプセル自体の模擬は二重管である（この報告書では、紛らわしく無いかぎり模擬キャプセルをキャプセルと略称する）。この二重管内の空間にはガスを封入後密封あるいは排気状態にできるようにした。これは、熱的にヒータ出力が高くとれないことから、内部の供給水が沸騰しない事態を考慮して、内部からの熱の放出の低減化を図ることにしたためである。構造強度設計上は、例えば、最も内側の管の外側を冷却水ジャケットとするとその内外温度差が大きくなり、熱応力が大きくなることをさけたためである。

最も内側の管の外径は60φmmとした。内側の管の外径として、JMTRで一般的なキャプセルの外径40φmmを当初予定したが、ヒータ出力を4.5kwとすると、そのヒータの径が約40φmmとなることにより、これに供給水の流路を加え60φmmを採用した。これらの三重管は、設計圧力等を考慮し最適のスケジュール管を選定した。

## (4) 導水管

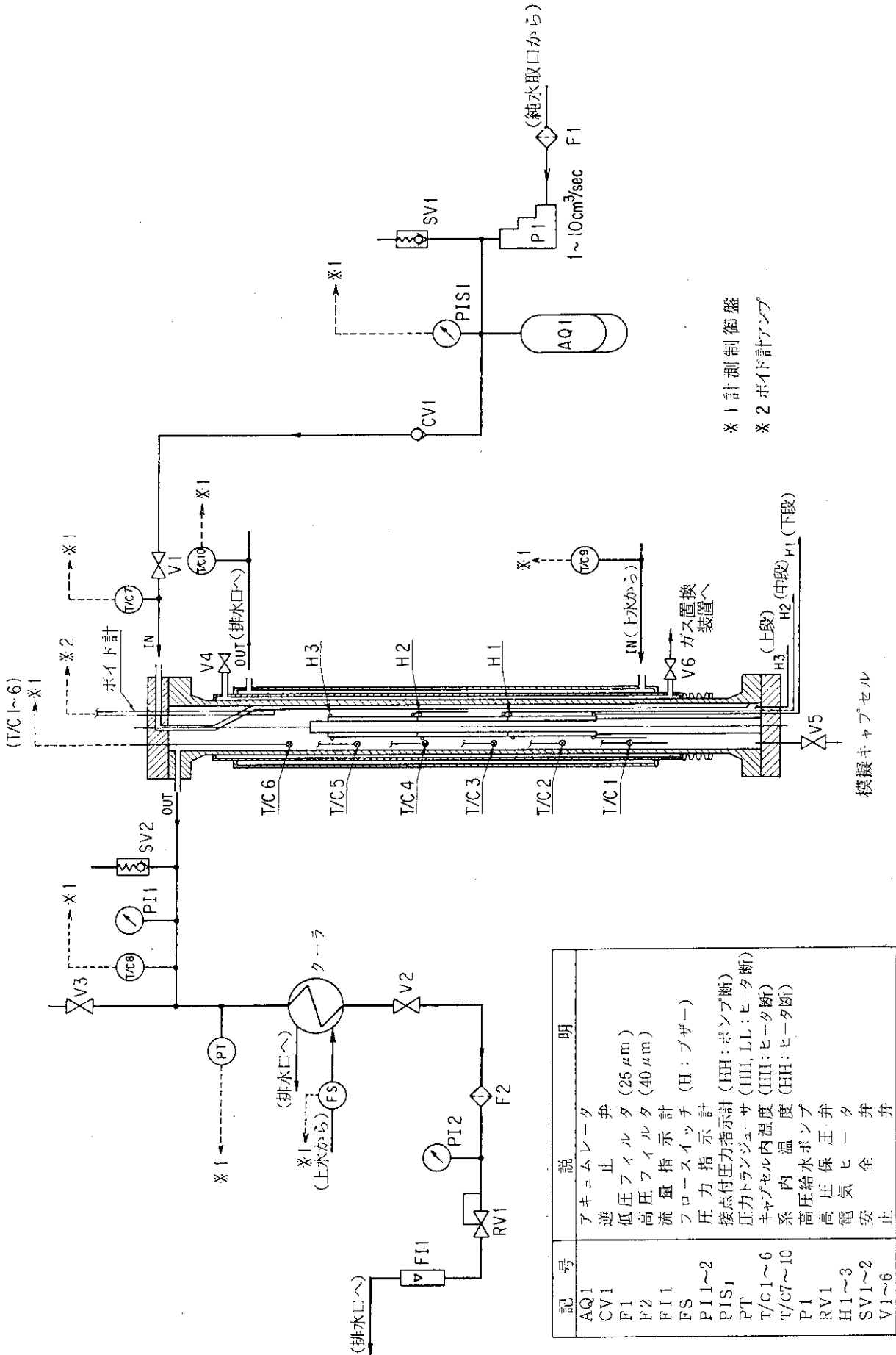
模擬キャプセル部への水の供給方法は、水を細管でキャプセル上方から下部に導く導水管方式とした。飽和温度キャプセル構造を決定する重要な要素としてのキャプセル内部に水を注入する方式にはいくつかの方式が考えられる。この実験装置にはJMTRですでに照射実績のあるBOCAキャプセル等を参考に単純な構造である供給水を細管でキャプセル上方から下部に導く導水管方式を採用した。

Table 2.1 装置機器要目

機器名	項目	型式	形状及び主要寸法	材質	備考
模擬キャプセル	キャプセル本体	三重円筒型計測付	内筒 $\phi 60.5 \times 5.5$ mm 外筒 $\phi 76.3 \times 2.1$ mm キャプセルジャケット $\phi 89.1 \times 2.1$ mm キャプセル全長 $\sim 960$ mm	SUS304 及び SUS316	上下部はフランジ
	照射試料模擬ヒータ	シース型ヒータ ヒータ容量: 最大1.5kW $\times$ 3段	$\phi 3.2$ mm (シース外径)	芯線: Ni-Cr シース材: ステンレス鋼	キャプセルからの 出し入れが可能
	ボイド計	探針型電気抵抗式	$\phi 6 \times 450$ mm	ステンレス鋼	外部出力 0-10V (アナログ)
	熱電対	クロメル-アルメル	$\phi 1$ mm (シース外径)	ステンレス鋼	6本装荷
	高圧給水ポンプ	吐出量可変型 プランジジャー式		接液部: ステンレス鋼	吐出量: 0 $\sim$ 10cm <sup>3</sup> /s (連続可変) 吐出圧力: 最大115kg/cm <sup>2</sup>
	アキュムレータ	ブラダ型	$\phi 114.3 \times 300$ mm	ステンレス鋼	加圧ガス: N <sub>2</sub> ガス 充填圧力: $\sim 50$ kg/cm <sup>2</sup> ガス容積: 1 $\ell$

Table 2.1 装置機器要目(つづき)

機器名	項目	型式	形状・寸法	材質	備考
キャブセル制御装置	流量計	面積式	50×100×200 mm	硬質ガラス	測定範囲：0～10cm <sup>3</sup> /s 精度：±2%
	高圧保圧弁	機械式ばね構造	φ80×465 mm	ステンレス鋼	
計測制御盤	ヒータ出力制御装置	三段独立制御			<ul style="list-style-type: none"> <li>出力計測可能</li> <li>インターロック要因 圧力『高』, 圧力『低』 温度『高』, 漏電, 過電流</li> <li>ヒータ1本当たり4.5kWまで出力制御可能</li> </ul>
	圧力表示	検出器：歪ゲージ式			表示：デジタル 外部出力：アナログ 警報設定可能
	温度表示				表示：デジタル 外部出力：アナログ 警報設定可能



※ 1 計測制御盤  
 ※ 2 ボイド計アンプ

記号	説明	明
AQ1	アキュムレータ	
CV1	逆止弁	
F1	低圧流量計	(25 μm)
F2	高圧流量計	(40 μm)
FS	流量指示計	(H: プザー)
PI1~2	圧力指示計	(HH: ポンプ断)
PI S1	接点付圧力指示計	(HH, LL: ヒータ断)
PT	圧力トランスジューサ	(HH: ヒータ断)
T/C1~6	キャプセル内温度	(HH: ヒータ断)
T/C7~10	系内温度	
P1	高圧給水ポンプ	
RV1	高圧保圧弁	
H1~3	高圧気圧	
SV1~2	電気安全	
V1~6	弁	

Fig. 2.1 飽和温度キャプセル炉外実験装置P & ID

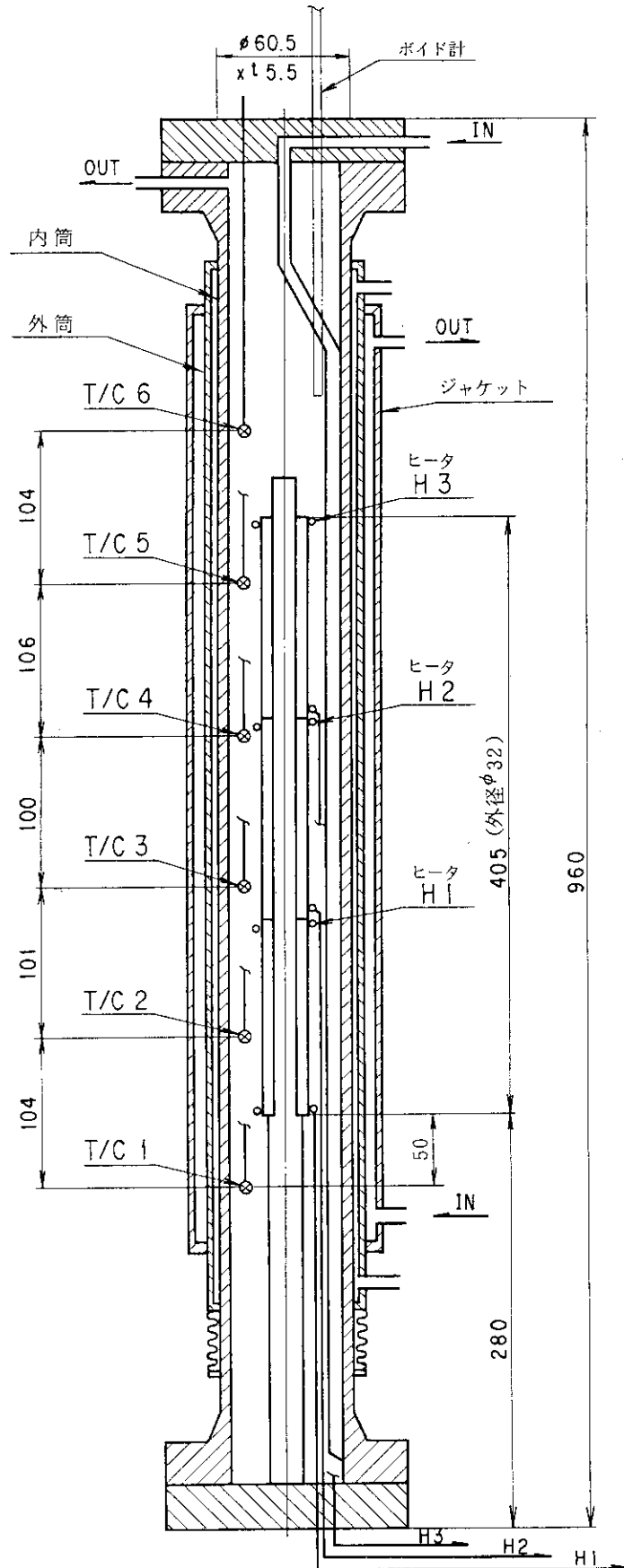


Fig. 2.2 模擬キャプセル

### 3. 実験装置特性ならびに実験

#### 3.1 実験装置特性

実験に先立ち、実験装置の特性を調査した。装置全体の運転状態の結果はきわめて良好であった。気泡の発生や消滅による圧力、流量の変動は観測されなかった。また、装置全体としてのシステム圧力の保持もスムーズであった。

(1) 実験を実施する場合、その実験条件となる圧力、流量に関し保圧弁バルブ開度とポンプの流量の関係を必要とするため、およそ実機のキャプセル制御装置等のシステムを実際に設計、製作してゆく場合のシステム特性の参考データを得るためにデータを採取した。

(2) Fig. 3.1(a)に、 $76 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$  の定圧状態における、ポンプに取付けたプランジャー・ストローク設定用目盛りとその時の流量 (FI 1) で読んだ関係を示す。この関係は、流量調整が  $1.5 \sim 10 \text{ cm}^3/\text{sec}$  の範囲にわたり可能なことを示している。

(3) Fig. 3.1(b)は、保圧弁特性を示した図である。実験に必要な圧力は、保圧弁開度を調整することにより、設定可能であることを示している。保圧弁開度の調整により、圧力は主として  $50 \sim 100 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$  にわたり変動させた。このシステムに使用しているポンプは、定容量型である。したがって、ポンプで必要流量を設定したら、系の圧力を変えても原則として系の流量は変わらない。図は、流量をポンプで設定した後、保圧弁の開度を変化させた時の圧力を示す。図に見られるように保圧弁により系を昇圧すると、少し流量の低下がおこる。しかし、実験に大きな影響を与えるものではない。

#### 3.2 実験

飽和温度キャプセル内部の特性を把握するため、次の実験を行った。

- (i) 実験 (その 1)、キャプセル内発熱量と供給水温度分布
- (ii) 実験 (その 2)、キャプセル内供給水流量と供給水温度分布
- (iii) 実験 (その 3)、キャプセル外側の条件と供給水温度分布

ここで、供給水温度分布とは高さ方向についての分布である。

実験の目標温度は、 $290 \pm 30^\circ \text{C}$  とすることにした。実験圧力は、この温度に対応する圧力として  $75$  ないし  $76 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$  を選んだ。なお、先の温度は照射試料についての温度であるが、この実験では供給水温度がこの温度になるかどうかを判定用の基準温度と考えることにした。

実験装置の測定系として、探針式ボイド計が取付けられている。この計器は模擬キャプセル部のボイドの有無の検出に使用した。理由は、定量的なボイド率を計測値から推定するには、別途推定システムの整備が必要のためと<sup>1)</sup>、実験解析に用いるプログラムで実験目的のキャプセル設計に必要なボイド率は推定可能と判断したからである。

いずれの実験においても、流量、ボイドの状態は、大幅かつ急激な変動や不安定状態を見ることはなかった。これら流量、ボイドの状態は、それぞれの計器の安定状態を目視観察することによった。

### 3.2.1 実験（その1）：キャプセル内発熱量と供給水温度分布

(1) システム圧力および供給水量を一定とし、発熱量を変化させた時、発熱量が供給水温度に与える効果を測定した。この実験におけるシステム圧力は $76 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ 、供給水流量は $3.0 \text{ cm}^3/\text{sec}$ である。発熱量としてのヒータ出力は、定格 $4.2 \text{ kw}$ に対し、 $3.6, 20., 50., 80., 90., 100\%$ とした。ここで、3段のヒータの各出力は、各段共同一出力とした。なお、内外筒間のガス層内の気体は空気とし、かつ密閉状態とした。

(2) 測定した模擬キャプセル内の高さ方向の供給水温度をFig. 3.2に示す。この結果は、出力 $90\%$  ( $3.82 \text{ kw}$ )、 $100\%$  ( $4.2 \text{ kw}$ )で、ヒータの下端部を除くと所定の冷却水温度範囲内( $290 \pm 30^\circ\text{C}$ )に達することを示している。照射条件が冷却水温度 ( $290 \pm 30^\circ\text{C}$ ) で規定される場合、ヒータを実機キャプセル内の試料と考えるとキャプセル下部に装填された試料は、規定温度を下回ることがあり得ることを示唆する。

(3) Fig. 3.3は、実験その1により得られた供給水の最高到達温度と最下段の測定温度をヒータ出力に対してプロットした図である。これより、最高到達温度は、 $4.2 \text{ kw}$ で $76 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ の飽和温度 ( $290^\circ\text{C}$ ) に達することがわかる。しかし、この温度は出力に直線的な比例関係を持たず、やや飽和することを示している。このことは、キャプセル全体の温度が上昇するにつれて外筒等からの放熱が大きくなることによると考えられる。最下段の測定値は最高到達温度と逆の傾向をもち、出力と共に上昇することを示している。これは、最下段の温度は、キャプセル内の温度が高くなるほど導水管で下降中よく加熱されるためと考えられる。

### 3.2.2 実験（その2）：キャプセル内供給水流量と供給水温度分布

(1) システム圧力および発熱量を一定とし、供給水流量を変化させた時、流量が供給水温度に与える効果を測定した。この実験におけるシステム圧力は $76 \text{ kg/cm}^2 \text{ g}$ 、発熱量としてのヒータ出力は、 $4.2 \text{ kw}$ の一定値とした。供給水流量は、 $9.6, 5.0, 3.9, 3.5, 3.0, 2.8, 2.7, 2.2, 1.6 \text{ cm}^3/\text{sec}$ と変化させた。その他の実験条件は、実験（その1）に同じである。

(2) 測定した模擬キャプセル内の高さ方向の供給水温度をFig. 3.4に示す。この結果は、供給水流量を低下させていくと、ヒータの下端部を除き、供給水流量、 $3.5 \text{ cm}^3/\text{sec}$ で規定の最低温度 ( $260^\circ\text{C}$ ) に達し、その流量以下、 $3.0, 2.8, 2.7, 2.2, 1.6 \text{ cm}^3/\text{sec}$ では十分に目標温度に達することを示している。なお、 $2.7 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 以下に流量なるとヒータ部のほぼ全領域が飽和温度になる。

(3) 実験その2により得られた供給水の最高到達温度と最下段の熱電対で測定された温度の供給水流量による変化をFig. 3.5に示す。この図より、以下のことが分かる。

- i) キャプセル内最高到達温度は、約 $3 \text{ cm}^3/\text{sec}$ の流量で飽和温度に達している。
- ii) 最下段の温度（ヒータの下部）は導水管で供給水が下降中に加熱された効果を表している。この温度は供給水の減少とともに上昇するが、最高到達温度が飽和温度に近づくとともに温度上



昇は小さくなる。

iii) 最下段温度は流量の減少につれて上昇するが最高到達温度との温度差は約30°C以下にはならない。

iv) 圧力、発熱（圧力7.6 kg/cm<sup>2</sup>g、ヒータ出力4.2 kw）が一定の状態では流量を変化させた場合、3.5 cm<sup>3</sup>/sec以下に流量を絞ると290 ± 30°Cが達成される。このことは、流量を増加、減少させることにより、温度を低下、上昇させることができることを示す。

v) キャプセル上方から下方に注入される導水管の供給水は下降中に加熱される。この効果は、キャプセル内の温度の均一化に大きく寄与する。この効果は、流量が小さい程大きい。

### 3.2.3 実験（その3）：キャプセル外側の条件と供給水温度分布

(1) システム圧力、発熱量、供給水流量を一定とし、キャプセル内・外管内のガス層の条件を変更したときの供給水温度に与える効果を測定した。ただし、発熱に関しては、ヒータ出力に分布を与えた。この実験におけるシステム圧力は75 kg/cm<sup>2</sup>g、供給水流量は、2.9 cm<sup>3</sup>/secの一定値とした。発熱量も一定値、4.12 kwであるが、上下のヒータ出力は1.346 kwとし、分布を持たせた。この分布はJ M T R炉心の出力分布を模擬したものである。キャプセル部の内・外筒内のガス層の条件として3状態を作り供給水温度を測定した。3状態の一つは空気の密封、一つはヘリウム密封であり、残りの一つは真空ポンプを用いてガス層内を排気状態とした後、密封したものである。

(2) 測定した模擬キャプセル内の高さ方向の供給水温度をFig. 3.6に示す。この結果は、キャプセル内・外筒間の熱伝達の条件がヘリウム、空気、排気状態（低圧）になるに従い供給水温度が上昇することを示している。供給水温度は、外筒からの熱の放出状態に影響されることを示す。すなわち、内外管間のガスの熱伝導率が供給水温度に関係することが示されている。

この実験では、出力に分布を与えたが、その効果は、実験結果に顕著には表れない。このことは、実験その1の出力3.82, 4.2 kwの結果（Fig. 3.2参照）と比較してもその温度分布の傾向に大差がないことから分かる。これは、供給水温度がその下部までのヒータ出力の積算出力に関係していること、および導水管によるキャプセル内温度の均一化の効果によると考えられる。

(3) 実験その3により得られた結果をみると上部の測定値の供給水最高到達温度は、それぞれの条件の場合、ほぼ等しい。この結果のみに注目すれば、長手方向の熱の移動は無視しうのように見える。最高到達温度の部分で発生した熱は径方向、キャプセル部外管外の冷却水ジャケット部のみに流れるとしう。すなわち、この部分で径方向の熱バランスが成立しているかに見える。しかし、導水管内の供給水温度変化は測定されていない。したがって、このことのみで判断はできない。このことは、次のような検討を行って見れば分かる。

いま、径方向の熱バランスが成立していると仮定する。そこで、キャプセル部の内管内面から外管外面に至る総括熱伝達率を $h$ とし、この間の温度差を $\Delta T$ とすると、

$$q'' = h \cdot \Delta T$$

が成立するはずである。ヒータ出力が3種の条件を通じて等しいので、熱流束 $q''$ は等しいはずである。ジャケット内の冷却水温度を18°Cとして、 $h$ を求める。その結果をFig. 3.7に示す。

ただし、空気の場合の $h$ を基準にし、ヘリウム、排気状態（低圧：実験では空気の状態から真空

に引いた)の値は、その比で示す。

図に示されるように総括熱伝達率の変化は約±5%の相違にしかない。総括熱伝達率は、概略

$$1/h = 1/h_i + t_i/k_s + g/k_g + t_o/k_s + 1/h_o$$

と表される。ここで、 $h_i, h_o$  : 内管内面、外管外面における表面熱伝達率、 $t_i, t_o$  : 内外管肉厚、 $g$  : 内外管間ギャップ層厚さ、 $k_s$  : 内外管熱伝導率 (ステンレス鋼)、 $k_g$  : ガス熱伝導率、とする。

ギャップ層の条件が変化するとき、上記評価式上最も大きな影響を与える支配因子は $k_g$ である。他のパラメータ $h_i, h_o$ 等は変わらないとすると、ステンレス鋼のような金属の熱伝導率に比較し $k_g$ は小さいので、総括熱伝達率 $h$ はほぼ $k_g$ に比例して変化する。200℃前後の熱伝導率はヘリウムガスで $0.21 \times 10^{-2} \text{ w/cm} \cdot \text{°C}$ 、空気では $0.04 \times 10^{-2} \text{ w/cm} \cdot \text{°C}$ 程度である。すなわち、1桁の相違がある。ギャップ層のガスは、熱伝導のみで熱の伝達を行っているのではなく、場合によってはギャップ層での対流をも考えられる。しかし、それを考慮しても先に図に示される総括熱伝達率の小さな変化を説明することは困難である。

この結果は、径方向の熱バランスが成立していないことを示している。ギャップ層の条件は、キャプセル全体の熱バランスに大きな影響を与え、全体の熱バランスによって最高到達温度に効果を持っているが、部分的な最高到達温度に直接効果を持っているものではない。すなわち、最高到達温度には、導水管内を流下する供給水温度変化が影響しており、この効果を見逃すことができないことを示している。

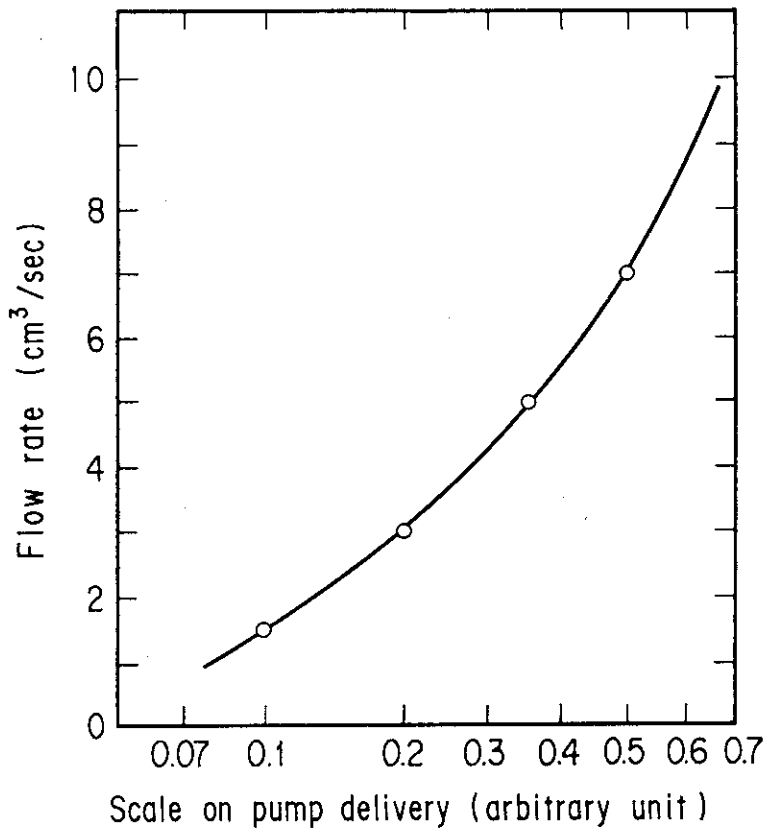


Fig. 3.1(a) Relation between flow rate and scale on pump delivery (under system pressure of 76 kg/cm<sup>2</sup>g)

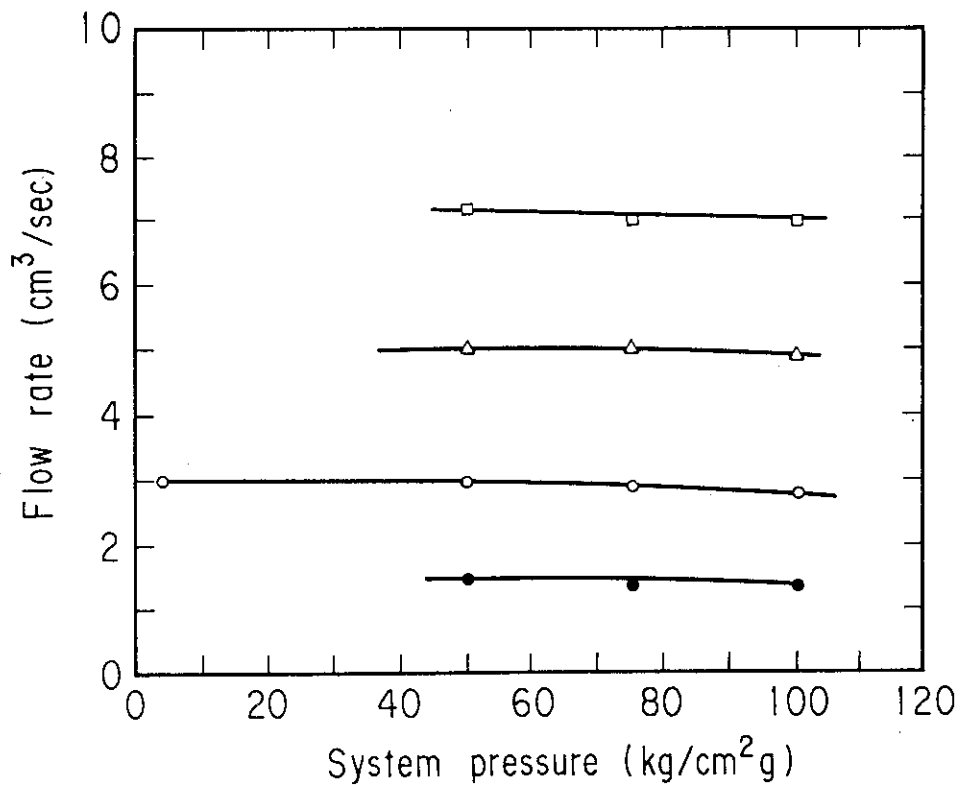


Fig. 3.1(b) Flow rate and system pressure in accordance with closing of pressure adjusting valve

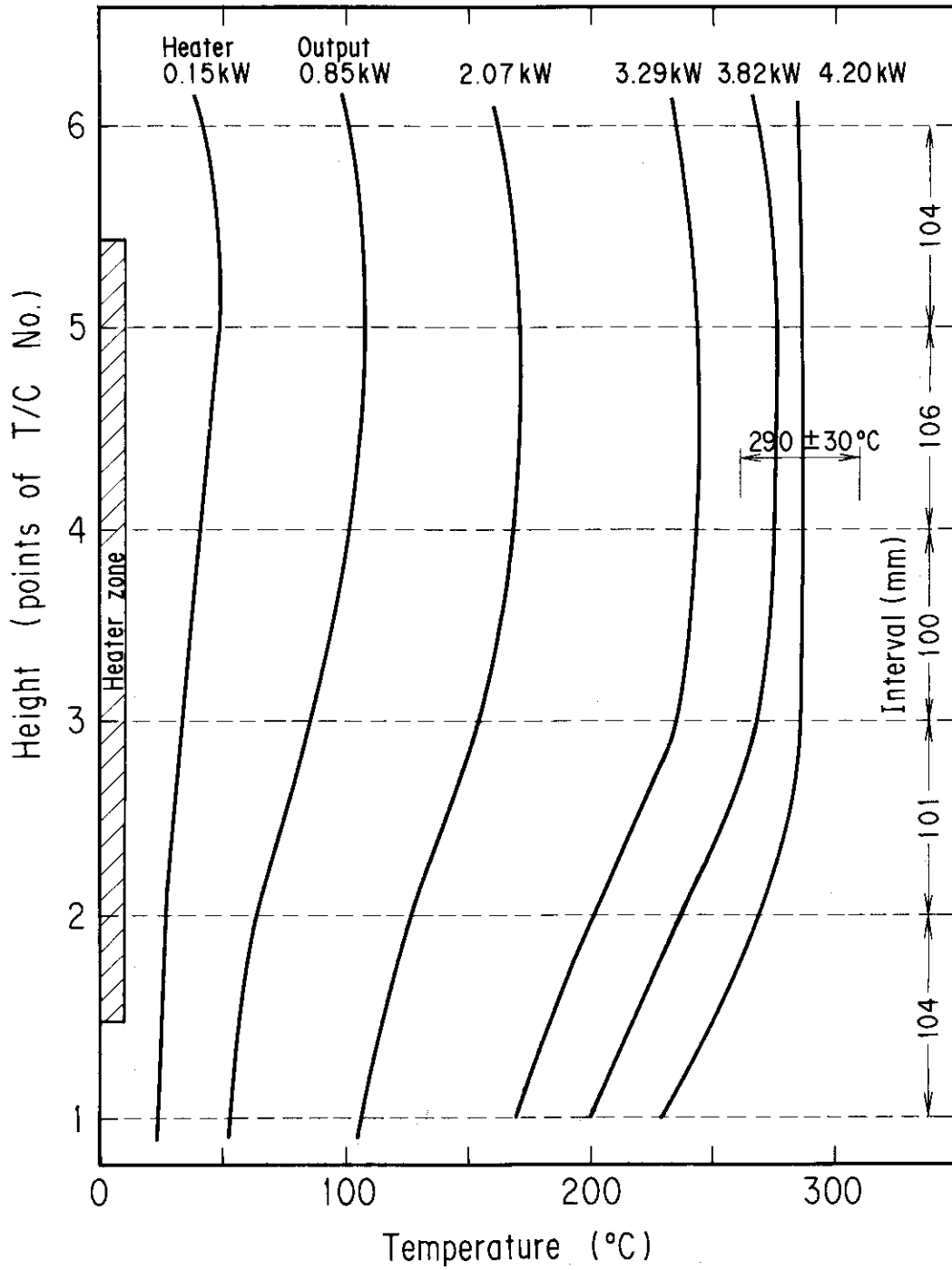


Fig. 3.2 Temperature in capsule (Run No. 1)

- Effect of output of heaters on temperature -

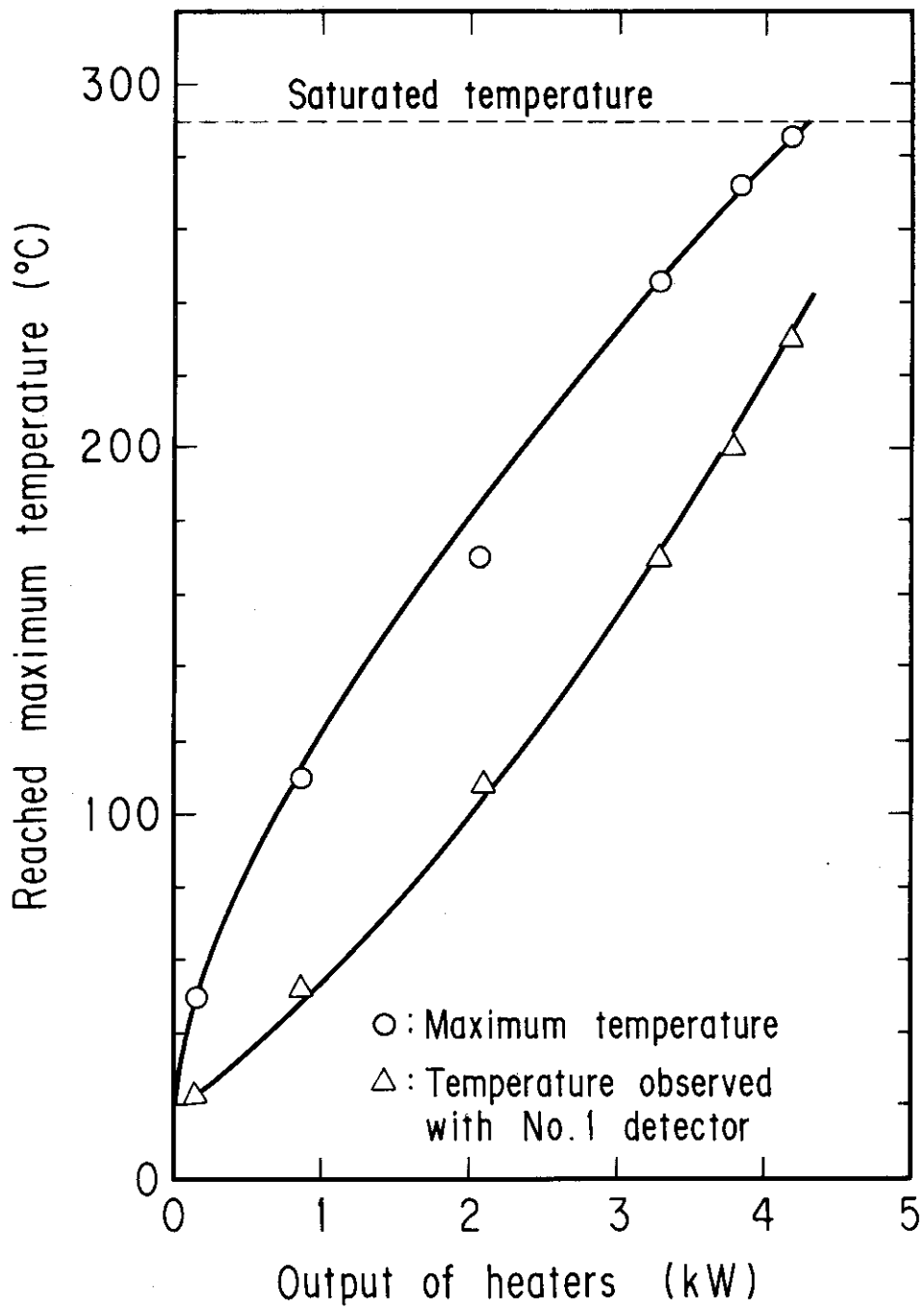


Fig. 3.3 Reached maximum temperature against to output of heaters

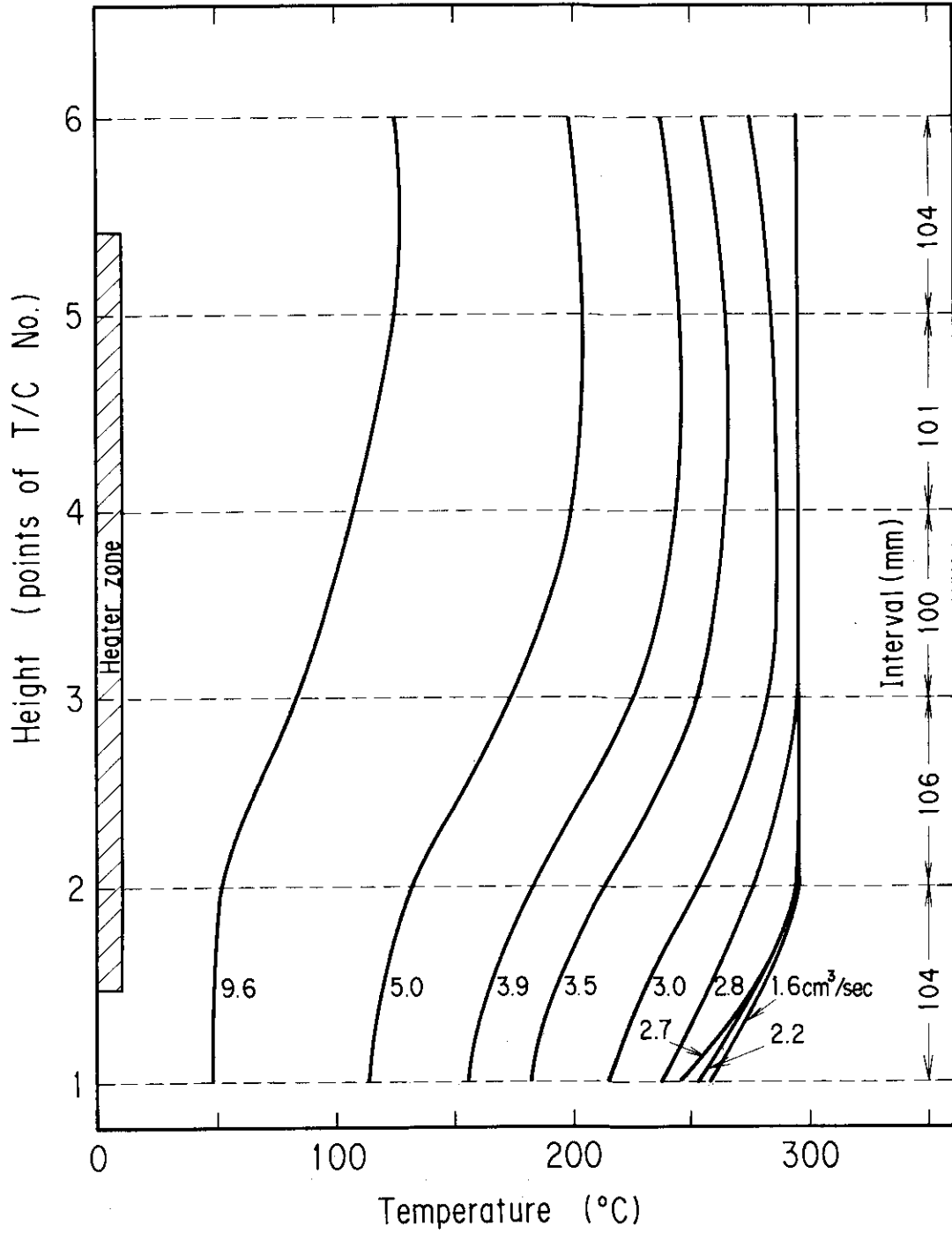


Fig. 3.4 Temperature in capsule (Run No. 2)  
 - Effect of supply water flow rate on temperature -

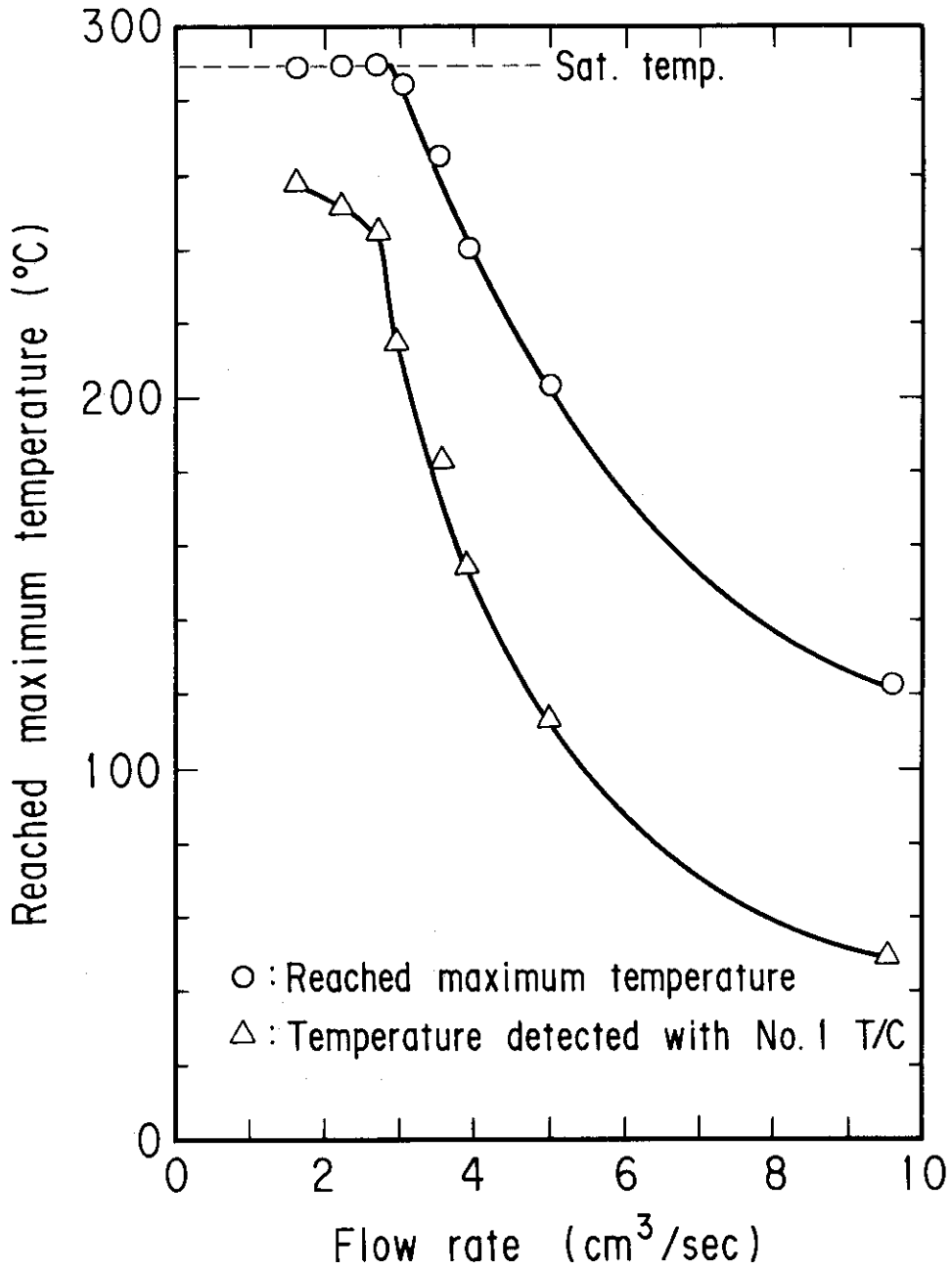


Fig. 3.5 Reached maximum temperature and temperature detected with No. 1 T/C, against to flow rate of supply water

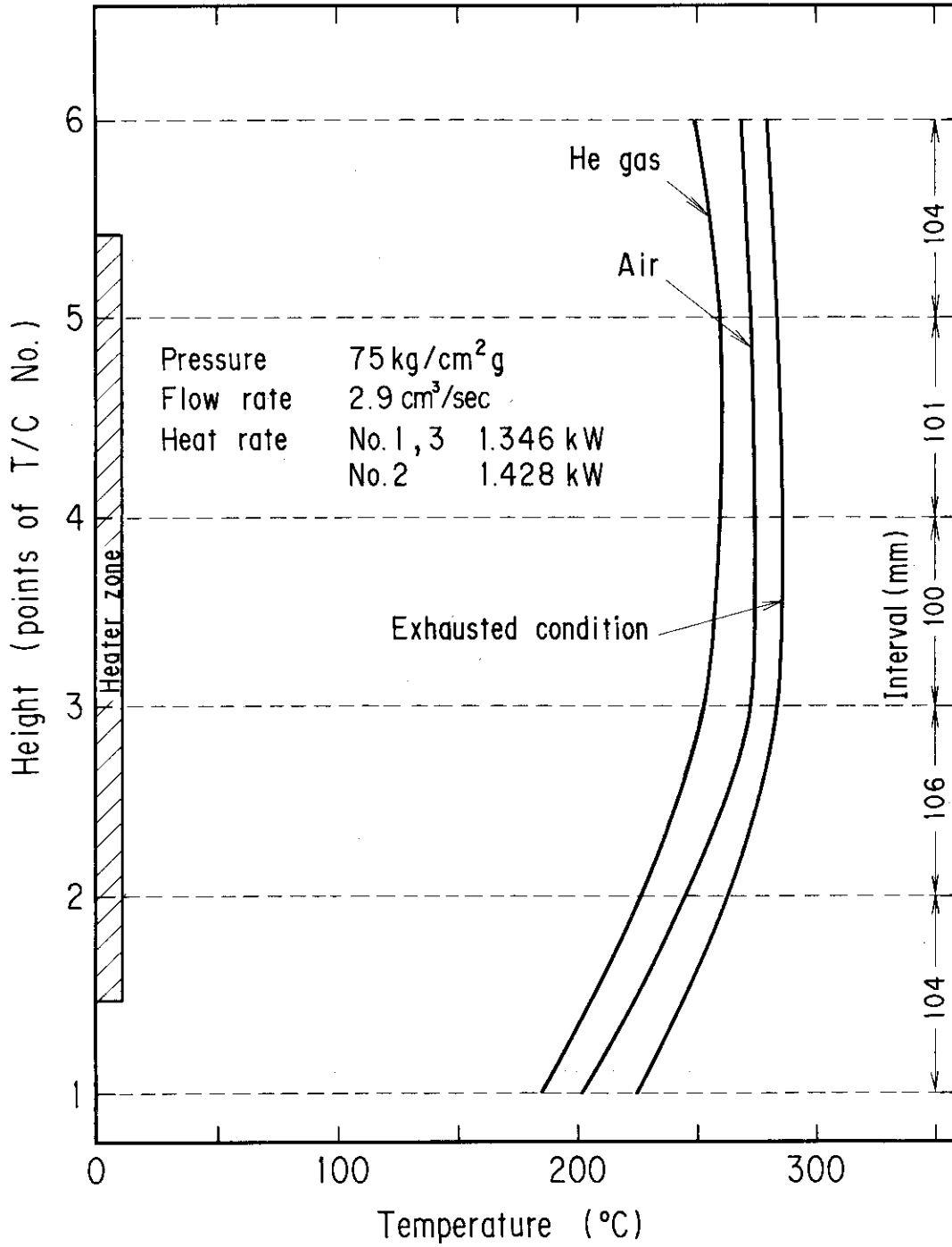


Fig. 3.6 Temperature in capsule (Run No. 3)

- Effect of outside boundary of capsule on temperature -



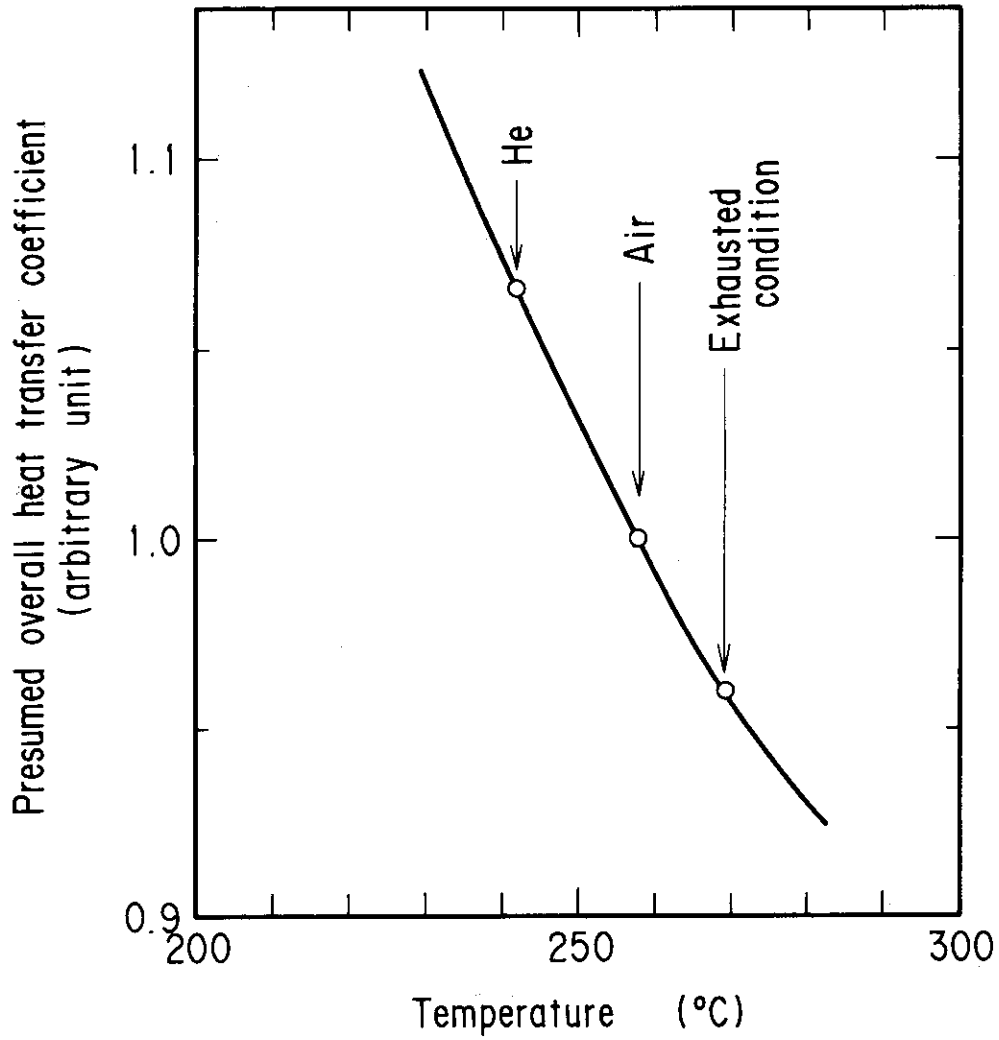


Fig. 3.7 Presumed overall heat transfer coefficient for outer boundary of capsule at reached maximum temperature, assuming to balance radial heat flow

## 4. 実験結果の解析と検討

実験により得られた温度測定値の定量的検討を行うため、その解析検討手段としてプログラム SATCAP を利用した。SATCAP は、飽和温度キャプセルの熱設計に利用することを目的に開発したプログラムである<sup>2)</sup>。この解析検討はプログラム自身の検証を兼ねて実施した。プログラムを検討に利用せざるを得ない理由は、例えば、第3.2.3節に述べたように径方向のヒート・バランスを考へても、供給水の下降中の温度変化を考慮しなければならないが、下降中の供給水温度は測定されていないので、これ等を簡単に評価することはできないからである。なお、プログラムはこの実験装置の設計に際しても使用した。

### 4.1 解析上の仮定

実験装置の模擬キャプセル部は、外筒二重管タイプであり、実験(その3)に示される如く内・外管の間の条件によって供給水温度が変化する。そこで、内・外管間の条件を含んだ外筒に関する総括熱伝達率を調整する方法を採用した。この値の調整手段として、二重管内部のギャップ層内のガスの熱伝導率を調整することにした。

テストランの結果、実験結果の解析に使用するガス層内のガスがヘリウムおよび空気の場合、その熱伝導率 ( $k_g$ ) には、

$$\begin{aligned} k_g (\text{ヘリウムの場合}) &= 0.46 \times 10^{-2} && \text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C} \\ k_g (\text{空 気 の 場 合}) &= 0.30 \times 10^{-2} \sim 0.43 \times 10^{-2} && \text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

の値を仮想値として使用することにした。この値は、ヘリウムおよび空気の熱伝導率の実験時の温度約200°Cにおける概略値、

$$\begin{aligned} k_g (\text{ヘリウム}) &= 0.21 \times 10^{-2} && \text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C} \\ k_g (\text{空 気}) &= 0.04 \times 10^{-2} && \text{W/cm} \cdot ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

に比較し高い値である。

プログラムのテストランにおいて、実験(その3)のギャップ層のガス種に対応する熱伝導率の概略値をプログラムに入力し計算を実施した。しかし、その計算結果は、実験(その3)の測定値と大幅な相違を生じた。すなわち、ギャップ層の熱伝導率にその概略値を使用して計算をすると、温度測定値からみて沸騰していない状態でも、沸騰状態になる計算結果となった。この結果は、外筒に関する総括熱伝達率が小さいと、キャプセル内部が沸騰状態となり測定結果と一致が得られないことを示唆した。そこで、総括熱伝達率を大きくする手段として、ギャップ層内のガスの熱伝導率に大きな値を使用することにした。

この相違の理由は、装置のキャプセル部の外筒内ガス・ギャップ寸法が片側で3.8mm (72.1φ - 60.5φ = 7.6mm)のため、ギャップにおける熱移動は単純な熱伝導でなく、対流を起こして

いる可能性があること、およびSATCAPは、計算の基本仮定で計算上分割した部分のヒート・バランスを算出するが、上部、下部端栓部分からの熱の放出は考慮しないことの2点によると推定した。

## 4.2 解析（計算）結果

### 4.2.1 実験（その1）についての解析結果

(1) 実験（その1）の内、ヒータ出力3.29と4.2kwの測定のものを取上げた。システム圧力は $76\text{kg/cm}^2\text{g}$ 、供給水流量は $3.0\text{cm}^3/\text{sec}$ である。内・外管内のガス層は、いずれも空気密封である。当初、2.07kwについての実験値を解析することを予定したが、Fig. 3.3に見るようにこのデータは、実験その1の実験全体を通してみると少し疑問があるため、3.29kwの測定値を使用することにした。

計算結果をFig. 4.1ならびにFig. 4.2に示す、ただし、計算にはギャップ層における熱伝導率として $k_g = 0.3 \times 10^{-2} \text{w/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ の値を使用した。

(2) 計算結果は、一般的に実験値の傾向をよく記述している。しかし、Fig. 4.1では、計算結果の最高温度は実測値より高い温度となっている。Fig. 4.1の計算条件のギャップ層の熱伝導率を高くすれば、最高温度についての一致性はさらに良くなるが、実験値全体の一致性がよい $k_g = 0.3 \times 10^{-2} \text{w/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ の値を使用した。

この図より、ガス熱伝導率を変更（外筒に関する総括熱伝達率の変更）すれば、計算値は測定値へ良く接近の可能性があることを示している。

### 4.2.2 実験（その2）についての解析結果

(1) 実験（その2）で得られた測定値のうち流量3.9, 2.8,  $1.6\text{cm}^3/\text{sec}$ のデータについて解析を実施した。結果をFig. 4.3～4.5に示す。いずれもギャップ層の熱伝導率 $k_g = 0.3 \times 10^{-2} \text{w/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ とした。

(2) Fig. 4.3の図は、流量 $3.9\text{cm}^3/\text{sec}$ についての解析結果を示す。使用した熱伝導率 $k_g = 0.3 \times 10^{-2} \text{w/cm} \cdot ^\circ\text{C}$ の値では、やや最高温度を高め評価する傾向があるが、実験値全体から見るとよく温度分布の傾向を表している。

(3) Fig. 4.4および4.5図は、流量2.8と $1.6\text{cm}^3/\text{sec}$ についての解析結果を表す。流量が減少したとき、下端温度と計算値には差が生じその差は流量が小さくなる程大きくなる。この理由は模擬キャプセルの下部は冷却されていないが、計算の方は冷却されているとの条件の相違に基づくと考えられる。

(4) Fig. 4.4（流量 $2.8\text{cm}^3/\text{sec}$ ）の計算結果の最高ボイド率は80%、Fig. 4.5（流量 $1.6\text{cm}^3/\text{sec}$ ）の計算結果の最高ボイド率は100%である。計算の仮定は、slip ratioを1にとっているため、実際上はこの値より小さいと考えられるが、それでもかなりのボイド率に達していると考えねばならない。

(5) 最上段の測定値と計算値とを比較すると、一般的に測定値は計算値より高い温度になっている（Fig. 4.1, 4.2, 4.3参照）。この理由は、その場所付近での熱伝達率（導水管、キャプセル

ル内筒内面等)が計算に使用している値より低いためであろう。計算における熱伝達率はプログラム組込みの熱伝達率推定モデルの上、下の限界値を越え、すべて上下方向に一定値になっている。また、模擬キャプセルではキャプセル・ジャケットに流す冷却水は下部から流入し、上部で流出する。上部では下方のキャプセル部分の除熱により冷却能力が劣化しているのではないかと推測する。一方、計算は全長にわたりキャプセル外筒外の冷却水温度は一定値と仮定している。

(6) Fig. 4.4 と 4.5 の計算結果は導水管で下降中の予熱による温度上昇が大きくなると、キャプセル下部での放熱量が大きくなり、ヒータ下部での温度は逆に低下する傾向があることを示している。

#### 4.2.3 実験(その3)についての解析結果

(1) ヘリウムと空気ギャップ層の実験結果についてのみ解析を行った。結果を Fig. 4.6, 4.7 に示す。Fig. 4.6 はヘリウム・ギャップ層のものである。Fig. 4.7 は、空気ギャップ層のものである。Fig. 4.7 は、空気ギャップ層であるが、 $k_g = 0.43 \times 10^{-2} \text{ w/cm} \cdot ^\circ\text{C}$  とした計算である。いずれも計算条件は、実験条件と同じ圧力  $75 \text{ kg/cm}^2\text{g}$ 、発熱量としてのヒータ出力は  $4.12 \text{ kw}$ 、供給水流量  $2.9 \text{ cm}^3/\text{sec}$  である。出力は定格の約98%で上下方向に分布をもつ。

空気ギャップの解析において、他のその1やその2の実験解析と異なり、空気ギャップ層の熱伝達率を  $k_g = 0.43 \times 10^{-2} \text{ w/cm} \cdot ^\circ\text{C}$  としたが、それぞれの実験時の状態によって、外筒に関する総括熱伝達率を変化させねばならない理由は、実験時の状態によって実験装置の熱の放出状態が変化するのではないかと考える。

(2) Fig. 4.6 において、計算された温度は飽和温度に達しているが、実験で得られた温度は飽和温度まで達していない。Fig. 4.7 も同じ傾向を示している。これ等の計算結果において、供給水の上昇流に関する計算値の変動幅は、実測値の変動幅より大きいことが共通に見られる。

#### 4.2.4 解析結果より見たプログラム SATCAP の特性

解析計算結果より、プログラム SATCAP の特性として次のようなことが言える。

- (1) 計算結果は、一般的に実験値の傾向をよく記述する。
- (2) 上昇流の最上段の計算値は、実測値を下回る。この理由として、次のことが考えられる。
  - i) 実験装置のキャプセルの上部は、冷却されていないが、プログラム上では冷却されているとする。これが導水管中の下降する供給水の温度との関係で間接的に影響を与えている。
  - ii) プログラム上では導水管内外の熱伝達率を一定としているが、実際の熱伝達率は変化している。
- (3) キャプセル下部での計算値も実測値とあまりよい一致を示さない。これは、キャプセル上部での上昇流と導水管内供給水の熱交換の結果によることで、各部の熱伝達率評価のいかんにかかっている。
- (4) 実験値の温度分布解析結果における導水管に関する熱伝達率は、導水管内面  $5.68 \text{ w/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 、外面  $0.568 \text{ w/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  程度になっている。この内面の値は高すぎ、外面の値は低すぎると考えられる。しかし、全体的に計算値が実験値にほぼ一致することから導水管に関する総括熱伝達率は大きな誤りが無いと考えられる。総括熱伝達率は約  $0.518 \text{ w/cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  程度と推定される。

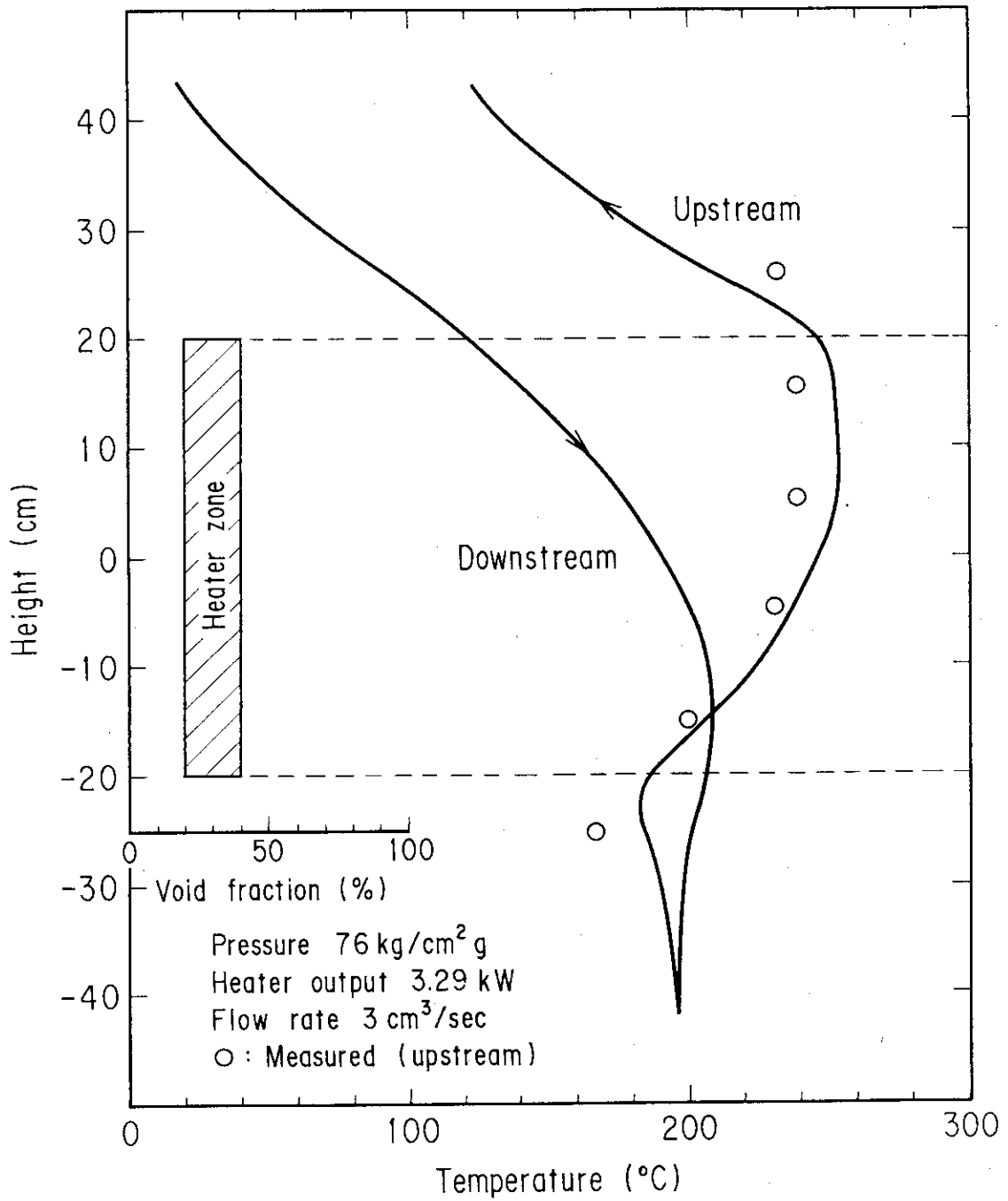


Fig. 4.1 Analytical results for Run No. 1, in case of heater output of 3.29 kW

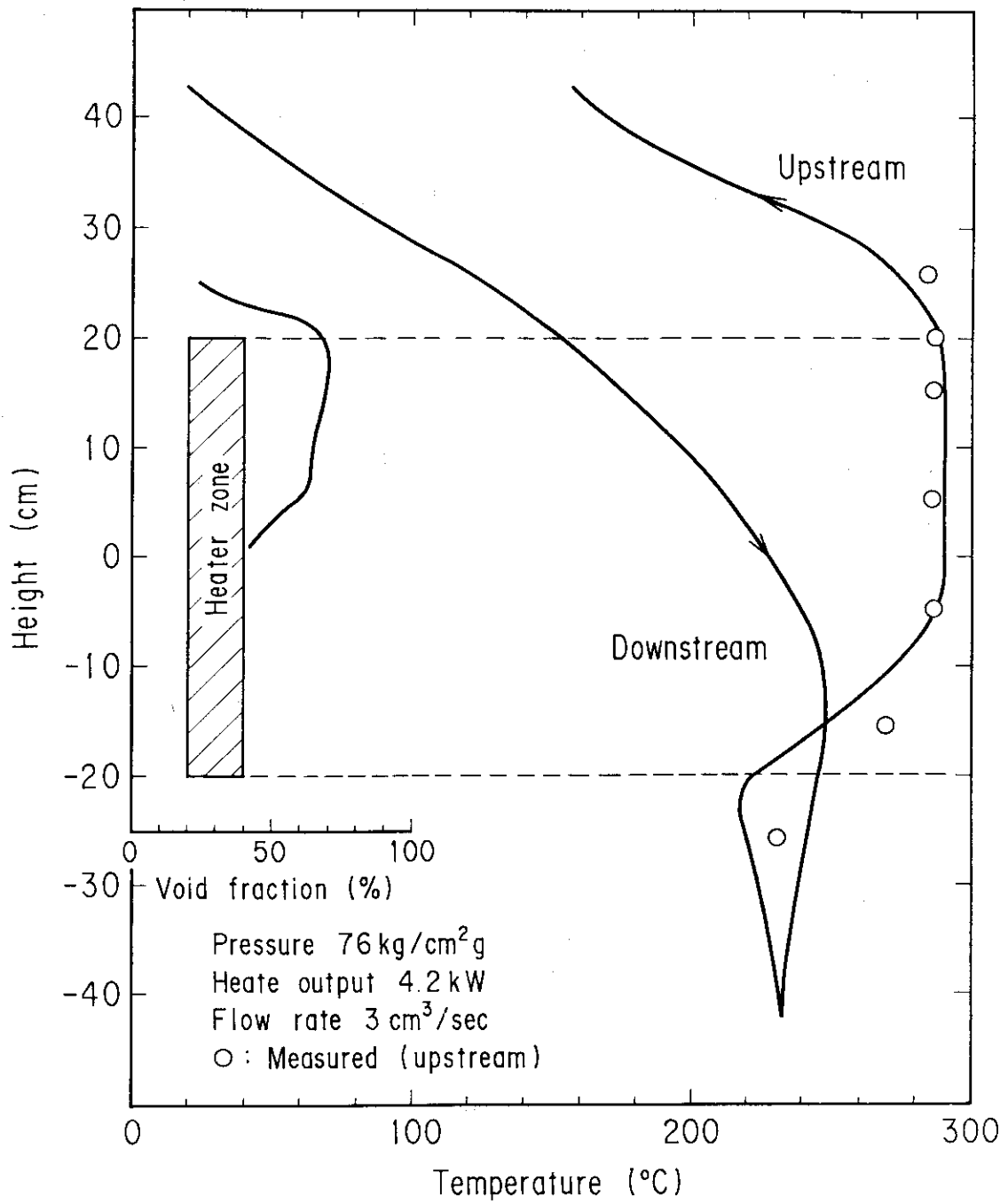


Fig. 4.2 Analytical results for Run No. 1, in case of heater output of 4.2 kW

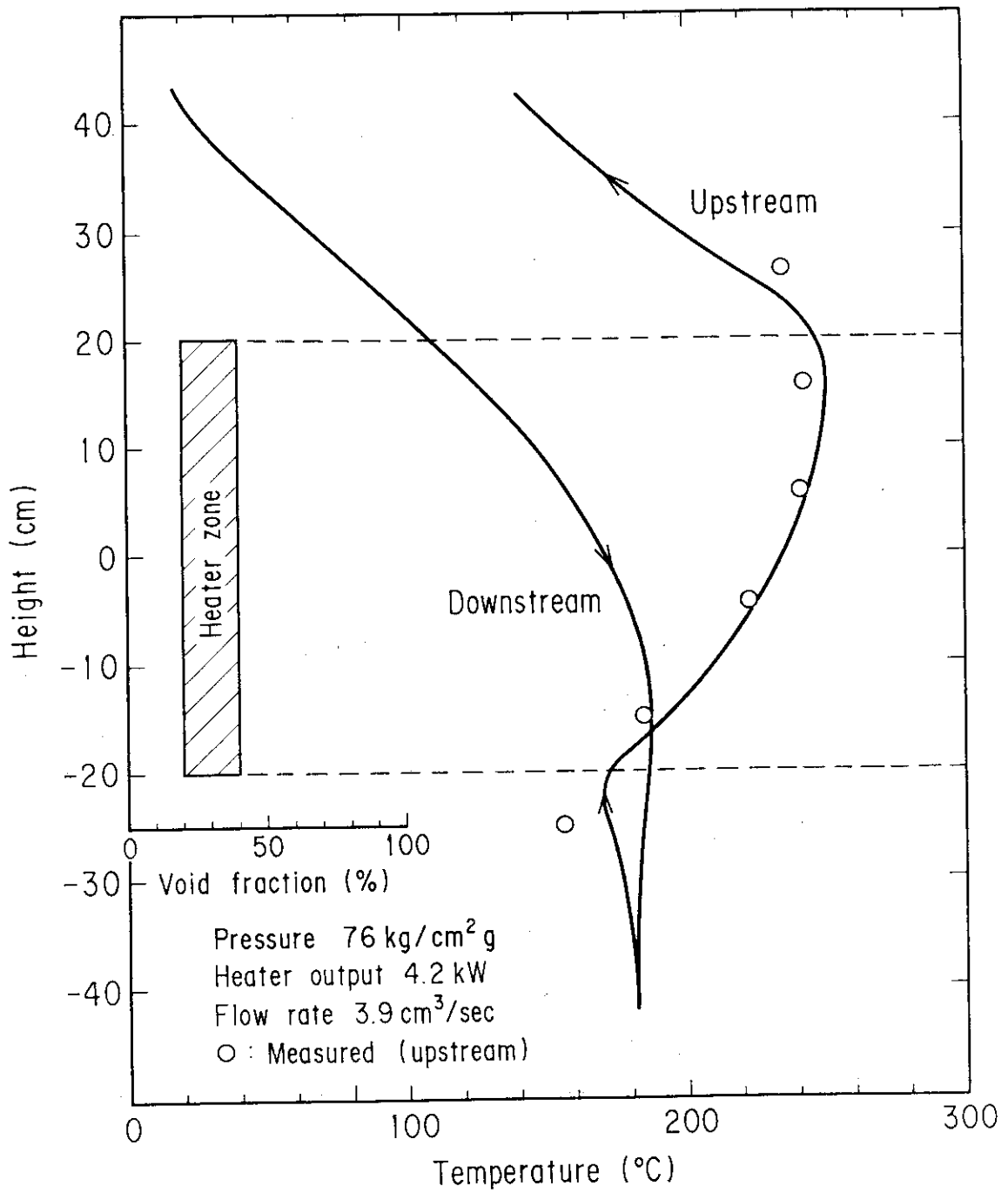


Fig. 4.3 Analytical results for Run No. 2, in case of flow rate of 3.9 cm<sup>3</sup>/sec.

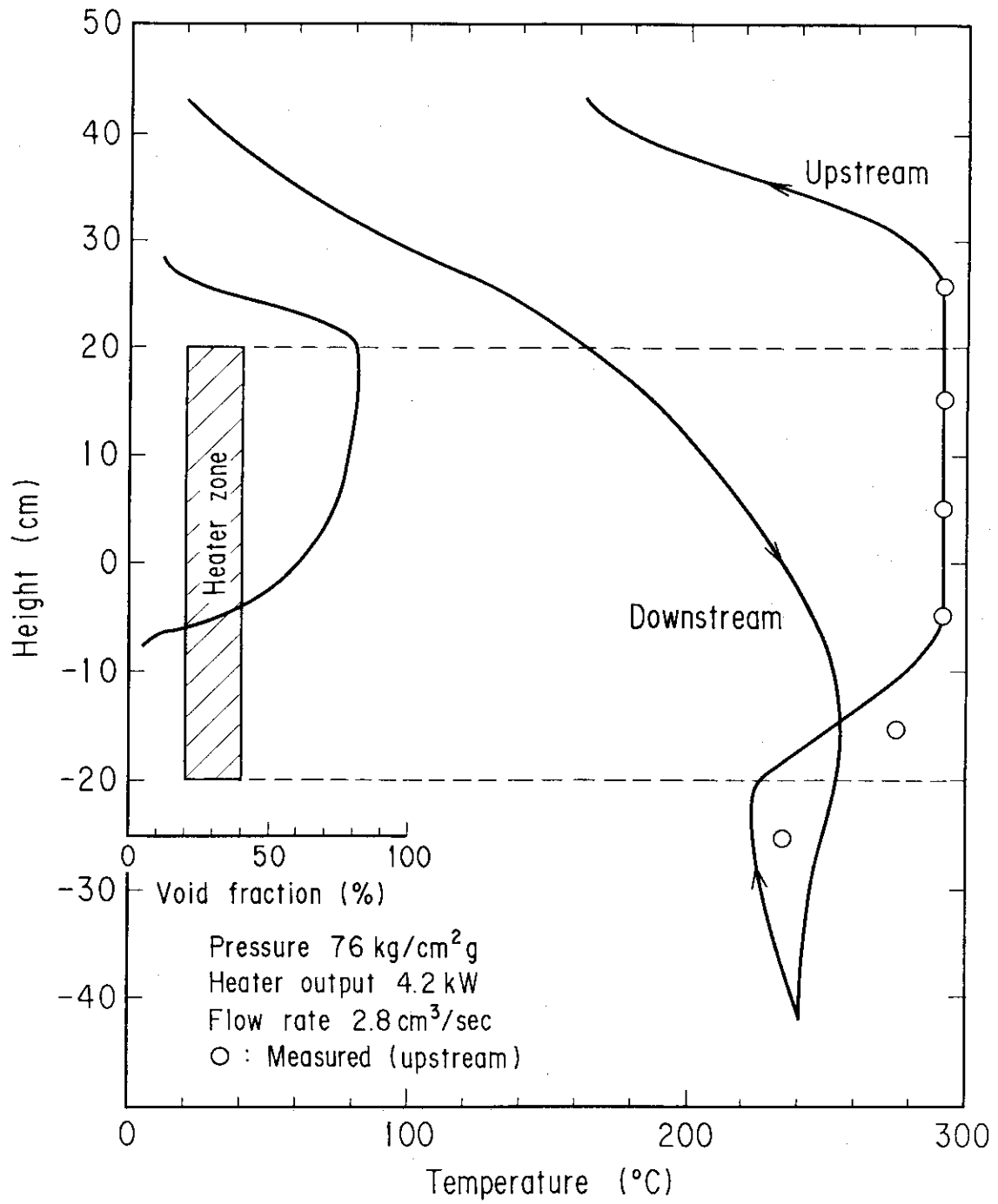


Fig. 4.4 Analytical results for Run No. 2, in case of flow rate of 2.8 cm<sup>3</sup>/sec.



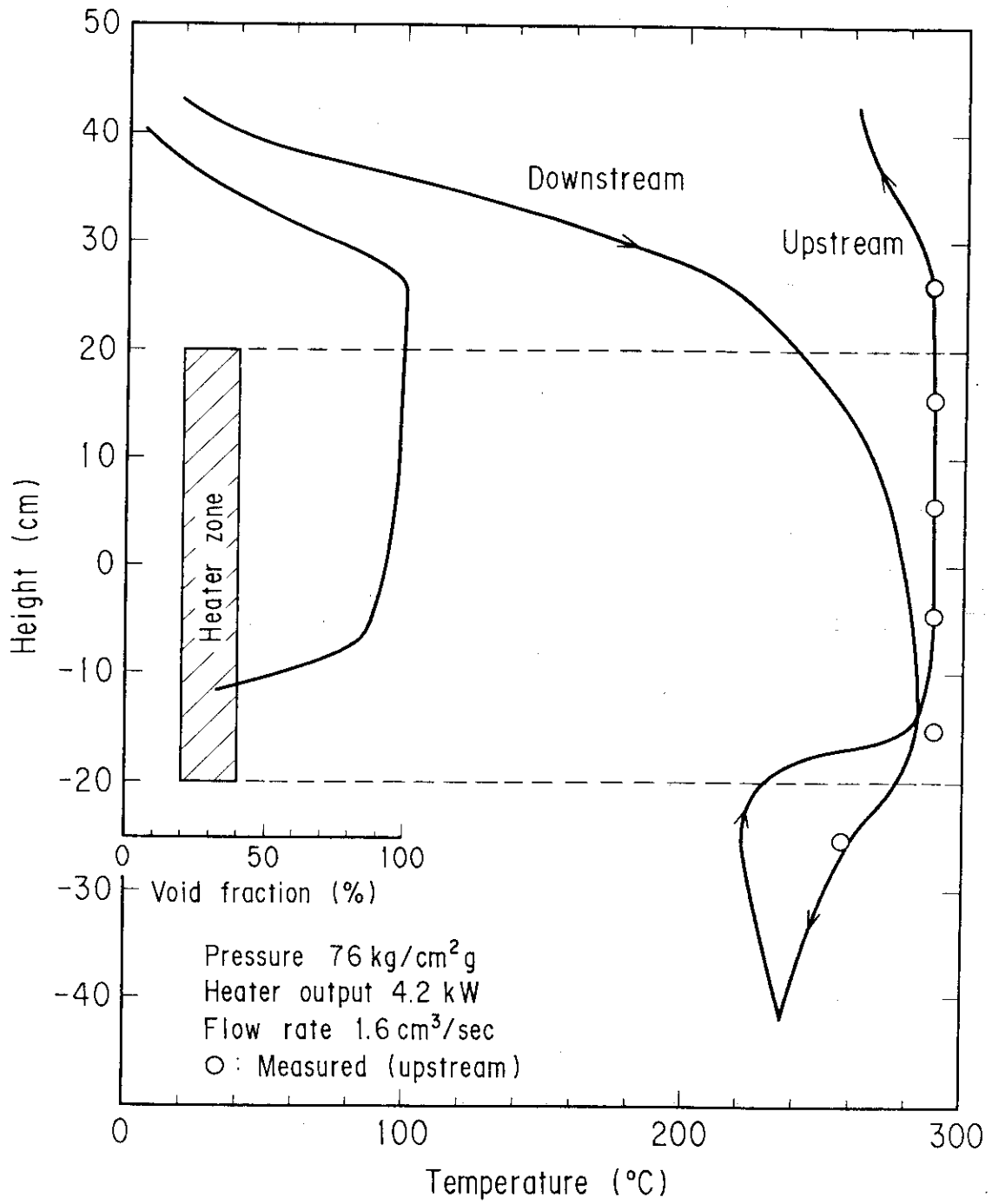


Fig. 4.5 Analytical results for Run No. 2, in case of flow rate of 1.6 cm<sup>3</sup>/sec.

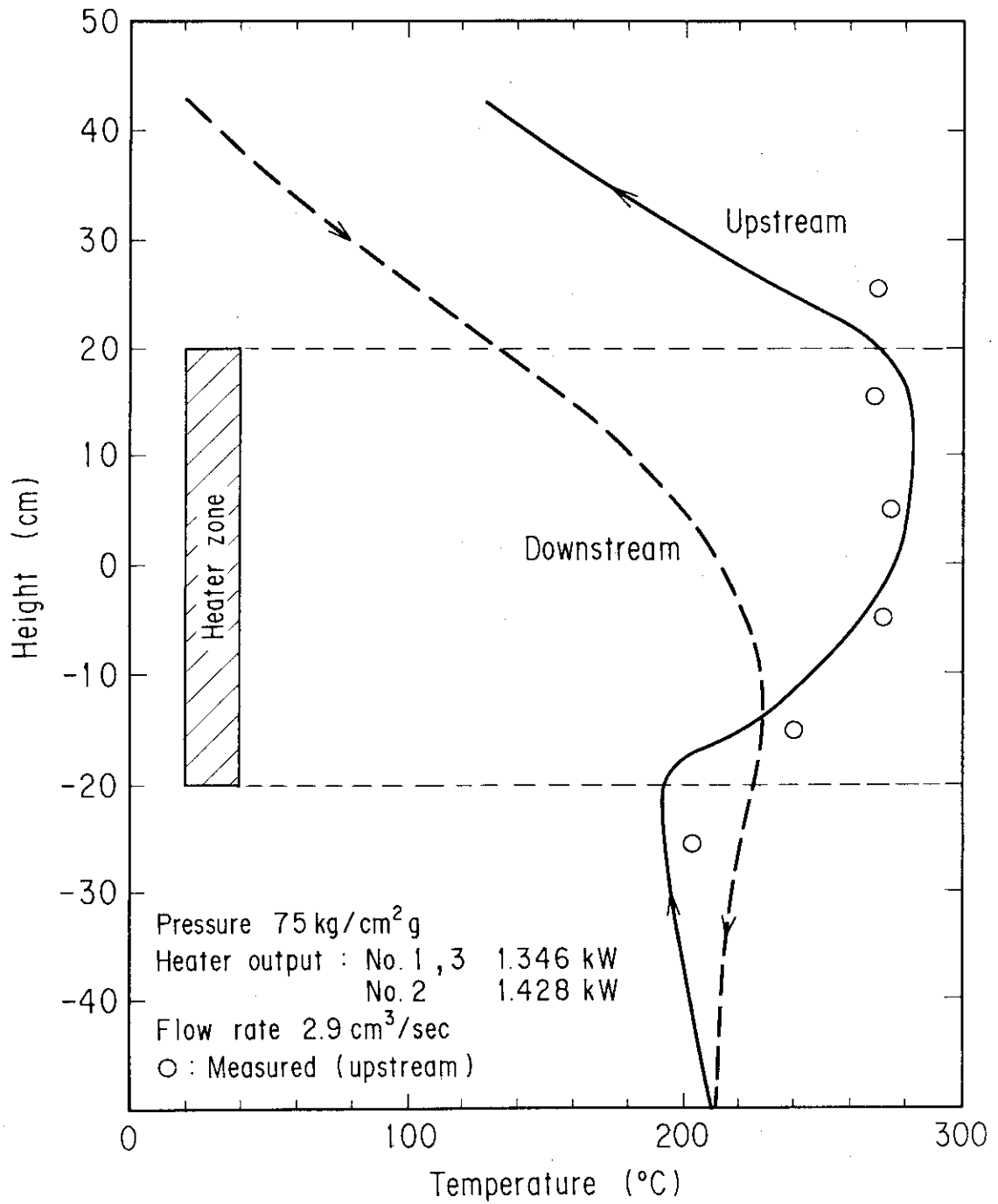


Fig. 4.6 Analytical results for Run No. 3, in case of He gas in capsule jacket

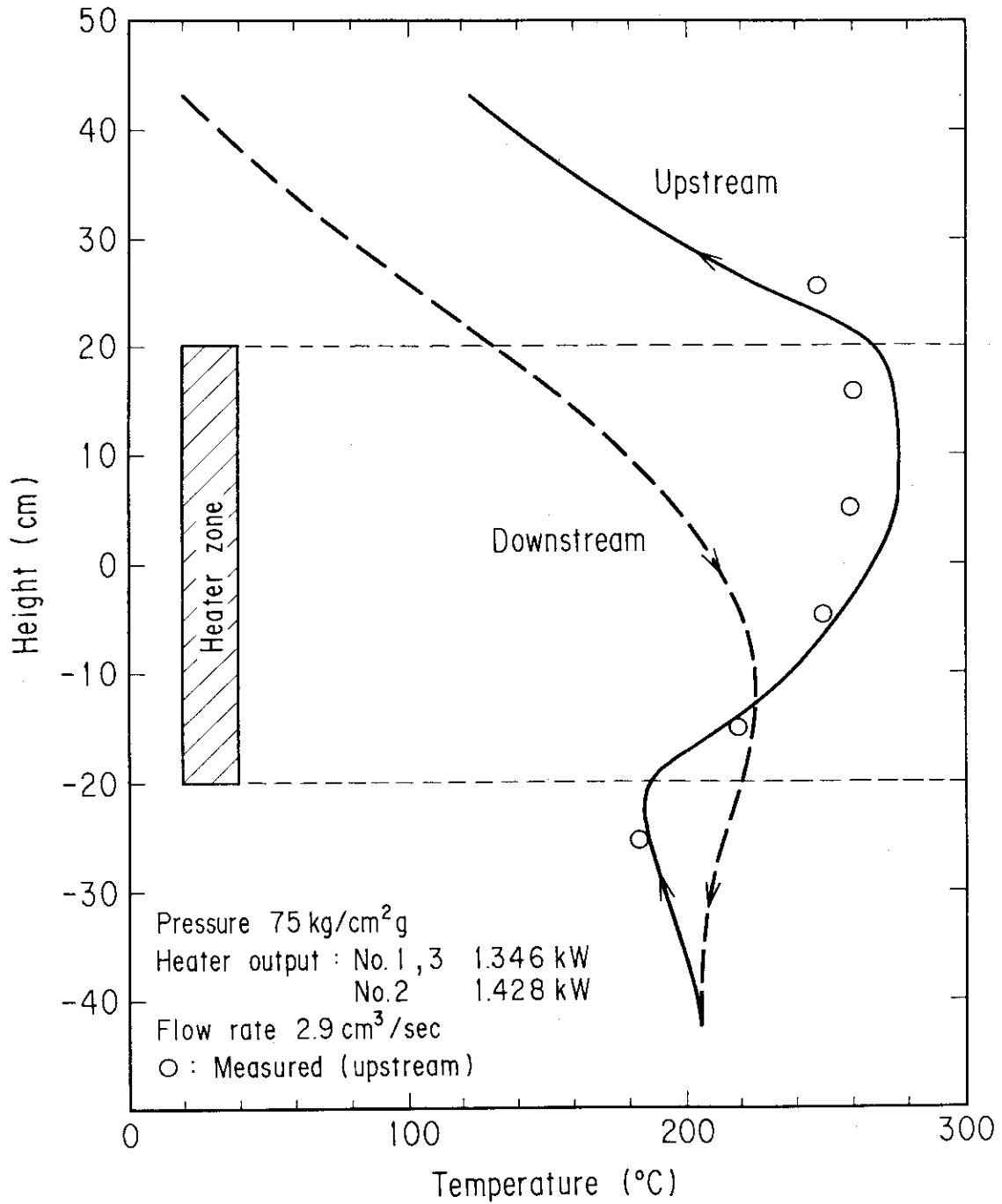


Fig. 4.7 Run No. 3 analytical results calculated as  $0.43 \times 10^{-2}$  of thermal conductivity of air in capsule jacket

## 5. 結 論

この実験には、3種の目的があった。一つは“飽和温度キャプセル”を実現するためキャプセル本体外の装置（制御装置）はどのような型式とすべきか、また、その運転状態は、安定かつ制御可能かと言うことであった。第二は、キャプセル本体に関する事でキャプセル本体内部の温度を飽和温度状態にするためには、どのような条件とすれば良いか、また、そのためにはどのような手段をとれば良いかと言うことであった。第三は、実験データを用い、実機“飽和温度キャプセル”の設計に使用を考えているプログラムSATCAPの検証を行うことであった。

実験ならびにその実験結果の解析検討および実験に用いた装置の運転を通し、次の結論を得た。

### (1) 制御装置について

- 1) 実験に使用した定容量型式のポンプと機械式ばねによる圧力保持弁を用いたシステムはキャプセル本体内の加熱される部分（実験装置ではヒータ、実機キャプセルでは試料）に接する供給水温度を目的とする軽水炉温度条件に近い飽和温度（ $290 \pm 30^{\circ}\text{C}$ ）にできることが確認された。
- 2) 実機に用いたシステムの実験、運転状態の観察から、制御装置は気泡の発生、消滅によると考えられる圧力、流量の変動はなく、安定に運転でき、かつ運転上の制御も可能であることが確認された。

### (2) キャプセル本体について

- 1) 供給水は導水管で下降中に導水管周りの上昇流によって加熱され、その温度が上昇する。これは、キャプセル内の供給水温度の均一化に大きな効果を持っている。
- 2) キャプセル内の供給水温度には、ヒータ出力、供給水流量、外筒内外の熱伝達上の状態が影響する。キャプセル内に流す供給水流量を変更すると、キャプセル内の温度分布が大きく変化することが確認された。特に流量を絞るとキャプセル内の温度は飽和温度になるばかりか、均一化される。実機のキャプセルを考えた場合、このことは、供給水流量が温度均一化等のための温度制御の制御変数として使用可能なことを示している。

### (3) プログラムSATCAPについて

- 1) プログラムSATCAPを用いた実験値の解析検討は、キャプセル内の供給水温度分布の傾向を良く把握することができることを示した。このことは、プログラムの仮定等に大きな誤りが無いことを示しており、飽和温度キャプセルの設計に使用可能と考えられる。
- 2) 実機のキャプセルへの適用を考えた場合、実験解析にも見られるように、外筒に関する総括熱伝達、各部の熱伝達には、なお、不確かさが残る。正確な評価を行うには、各部の熱伝達率の評価に留意する必要がある。しかし、この不確かさを回避する手段として供給水の流量を調整することが可能なように制御装置を設計すれば、温度の調整は可能と考えられる。
- 3) 照射試料に接する供給水温度が必ず、飽和温度でなければならないと言う条件から計算結果を判定すると、試料配置の下部付近はこの条件を満たさない恐れがある。しかし、SATCAPの上昇流に関する温度計算の変動幅は、一般的に実験結果の温度変動幅より大きい

ことからみて、実機ではより小さい変動幅に収まることが予想される。

## 謝 辞

この実験に用いた実験装置は、クールズ科学館によって製作された。その際、著者らのかなり無理な要求を装置上に実現された。叶野松一、高橋敏彦（材料試験炉部）の両氏から実験遂行上種々の援助を得た。以上に、その氏名を記し、謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 砂田謙二、北山正文、「デジタル・ボイド速度計の開発」、日本原子力学会誌、  
p.p.401~406, Vol.22, No.6 (1980).
- 2) 原山、小林、新見、染谷、「SATCAP: 飽和温度キャプセル熱設計用プログラム」、  
JAERI-M89-013 (1988).

ことからみて、実機ではより小さい変動幅に収まることが予想される。

## 謝 辞

この実験に用いた実験装置は、クールズ科学隊によって製作された。その際、著者らのかなり無理な要求を装置上に実現された。叶野松一、高橋敏彦（材料試験炉部）の両氏から実験遂行上種々の援助を得た。以上に、その氏名を記し、謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 砂田謙二、北山正文、「デジタル・ボイド速度計の開発」、日本原子力学会誌、  
p.p.401~406, Vol.22, No.6 (1980).
- 2) 原山、小林、新見、染谷、「SATCAP: 飽和温度キャプセル熱設計用プログラム」、  
JAERI-M89-013 (1988).

ことからみて、実機ではより小さい変動幅に収まることが予想される。

## 謝 辞

この実験に用いた実験装置は、クールズ科学館によって製作された。その際、著者らのかなり無理な要求を装置上に実現された。叶野松一、高橋敏彦（材料試験炉部）の両氏から実験遂行上種々の援助を得た。以上に、その氏名を記し、謝意を表す。

## 参 考 文 献

- 1) 砂田謙二、北山正文、「デジタル・ボイド速度計の開発」、日本原子力学会誌、  
p.p.401~406, Vol.22, No.6 (1980).
- 2) 原山、小林、新見、染谷、「SATCAP: 飽和温度キャプセル熱設計用プログラム」、  
JAERI-M89-013 (1988).