

# 回転プラグ熱伝達試験

カバーガス空間の自然対流・放射熱伝達試験(1)

1979年7月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-  
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation)

## 回転プラグ熱伝達試験

## カバーガス空間の自然対流・放射熱伝達試験 (1)

布留川 修<sup>\*</sup> , 古谷 章<sup>\*\*</sup>  
橋本 義則<sup>\*\*</sup> , 高橋 淳<sup>\*\*</sup>

## 要 旨

高速増殖炉の炉容器内ナトリウム液面から回転プラグ下面への伝熱はカバーガス層を通しての放射、自然対流および凝縮熱伝達の三機構より成る。また、カバーガス中におけるナトリウムミストの存在はこれらの伝熱機構に大きな影響を及ぼすと考えられる。この複雑な伝熱現象を解明する試験の第一段階として、加熱アルミニウム円板によりナトリウム液面を模擬し、伝熱実験を行なった。

本模擬実験ではミストの存在しない状態で、自然対流および放射伝熱量を測定し次の結果を得た。

- (1) 試験容器を真空排気して測定した放射伝熱量は、アルミニウムおよびSUS-304の放射率の光学的測定値をもとに解析した値とよく一致した。
- (2) 原子炉容器カバーガス空間を模擬した形状のガス層において、ナトリウムミストが自然対流場に影響を与えない限り、レイリー数範囲  $3 \times 10^4 \sim 6 \times 10^6$  では、
  - (i) 自然対流伝熱量は Jacob または McAdams の式で評価できる。
  - (ii) カバーガス層の垂直方向温度分布は、上壁および下壁近傍の薄い温度境界層とほぼ温度一様な中央部分より成る。中央部分の温度は上、下壁温度の平均値にほぼ等しい。

---

\* 大洗工学センターナトリウム技術部

\*\* " " ナトリウム流動伝熱試験室

Heat Transfer to Rotating Plug Through Cover Gas in LMFBR Reactor Vessel

Simulation Test Using Heated Aluminium Disk (1)

Osamu Furukawa\*, Akira Furutani\*\*,  
Yoshinori Hashimoto\*\*, and Jun Takahashi\*\*

Abstract

In designing LMFBR reactor vessel, it is important to evaluate the heat transfer rate from liquid sodium surface to rotating plug through cover gas layer. On the first step to measure this heat transfer rate, a simulation test using heated aluminium disk was conducted and the heat flow combined radiation and natural convection was measured.

The test results are as follows.

- (1) Experimental data of radiation heat flux well agreed with calculated values based on the optically measured emissivity of aluminium and stainless steel.
- (2) Combined natural convection and radiation heat flow in horizontally enclosed argon and helium gas layer ( $Ra$  number range:  $3 \times 10^4 \sim 6 \times 10^6$ ) was measured. The measured data of natural convection heat flux agreed with the value calculated by Jacob's or McAdams' equation.
- (3) Measured temperature distribution of horizontal gas layer consists of three parts, namely, upper and lower thin boundary layers and a rather isothermal central core region. The temperature of the core region is approximately mean temperature of upper and lower wall.

---

\* Sodium Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

\*\* Fluid Dynamic Section, Sodium Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC.

## 目 次

要 旨	
緒 言	1
1. 試験装置および試験方法	2
1.1 試験装置	2
1.2 熱流束測定部	3
1.3 データ処理	3
1.4 試験方法	6
2. 結果と検討	7
2.1 試験結果	7
2.2 放射伝熱	7
2.2.1 放射伝熱の解析	7
2.2.2 放射伝熱量の測定	9
2.3 自然対流伝熱	10
2.4 カバーガス層の垂直方向温度分布	11
3. 結 言	12
謝 辞	13
参 考 文 献	14
付 録	32
(1) Ar, He, SUS-304 の物性値	32
(2) 試験容器側壁からの熱伝導の補正	32

## 記 号

a	温度伝導率	$m^2/h$
$F_{ij}$	形態係数	
Gr	グラスホフ数	
Gi	射度	$kcal/m^2 h$
$g$	重力加速度	$9.8 m/s^2$
L	距離	m
Nu	ヌセルト数	
Pr	プラントル数	
Qi	正味伝熱量	$kcal/h$
q	熱流束	$kcal/m^2 h$
Ra	レイリー数	$Gr \cdot Pr$
T	温度	$^{\circ}C, ^{\circ}K$
$\beta$	体膨張率	$1/^{\circ}C$
$\epsilon$	熱放射率	
$\lambda$	熱伝導率	$kcal/mh^{\circ}C$
$\nu$	動粘性係数	$m^2/h$
$\sigma$	ステファンボルツマン定数	$4.88 \times 10^{-8} kcal/m^2 \cdot h \cdot ^{\circ}K^4$

…… 添 字 ……

Al	アルミニウム
cv	自然対流熱伝達
cd	残存ガスによる伝熱
cal	解析値
gas	カバーガス
He	ヘリウムガス
L.S.	ステンレス板下面
L.H.	ヘリウム層下壁
meas.	測定値
SUS	ステンレス
U.S.	ステンレス板上面
U.H.	ヘリウム層上壁
U.G.	カバーガス層上壁

## 緒 言

ナトリウム冷却高速増殖炉（FBR）の設計において、炉容器上部の熱応力解析と回転プラグの冷却設備の設計を正確に実施するため、炉容器内ナトリウム液面からカバーガス空間を通し、回転プラグ下面への熱伝達機構を詳細に把握する必要がある。この熱伝達には、放射、自然対流およびナトリウムミストの凝縮伝熱の三機構が共存しており、カバーガス空間に存在するナトリウムミストは放射および自然対流熱伝達に大きな影響を及ぼしていることが予想される。

このような複雑な熱伝達現象を解明するためナトリウムの放射率測定、伝熱に対するミストの影響評価、全熱流束の測定、等の一連の試験をそれぞれ実施中である。

熱流束測定の第一段階として本報告書では、加熱アルミニウム円板を使用した模擬試験について記す。本模擬試験では放射率がナトリウムとほぼ同程度のアルミニウム円板によってナトリウム液面を模擬し、ナトリウムミストの存在しないカバーガス層を通しての放射および自然対流伝熱量を測定した。

本試験の目的は次の通りである。

- (1) 測定の容易な試験装置を用い、各種無次元数を大きく変化させ試験方法および計測法の精度を評価する。
- (2) 実機に近い形状においてナトリウムミストの存在しない場合の自然対流伝熱式を求める。
- (3) 放射熱流束の測定値と各面の放射率、形状係数、等から算出される解析値とを比較検討する。

本試験により上記目的を達成し、引き続き第2段階として試験容器にナトリウムを充填し、ナトリウム液面からカバーガスを通しての熱伝達量の測定を行なっているが、その結果については次報で報告する。

## 1. 試験装置および試験方法

試験装置 (Fig.1) は、円筒状容器で内部に加熱アルミニウム円板を有し、ナトリウム流動伝熱試験室内のナトリウム蒸着試験ループに据付けた。ただし、ループとはガス系のみを接続した。試験容器上蓋には熱電対を取りつけ熱流束測定部として使用した。試験体各部温度は常時レコーダで記録し、定常状態が十分達成されたことを確認してから熱流束データを取得した。

なお、熱流束測定部として当初製作したもの (以下、旧測定部と呼ぶ) は、その構造及び熱電対取り付け法に起因する誤差が大でデータの信頼性に乏しかったため、試験途中で構造を改造した。本報告書ではカバーガス層の温度分布測定を除き、改造後の測定部で得られたデータを取り扱う。

### 1.1 試験装置

試験部は Fig.1 に示すように SUS 製円筒状容器①、垂直方向に移動可能な加熱アルミニウム円板②および熱流束測定部⑤などで構成されている。容器外側には厚さ 300 mm の保温材③ (ファインフレックスおよびカポサイト) が取り付けられ、保温材層の中心部には補助ヒータ④を設置し、半径方向への熱損失を防止した。容器内側にはアルミニウム製の円筒状熱しゃへい板⑥をとりつけカバーガス層から容器側壁への伝熱を極力防止した。

試験部は既設ナトリウム蒸着試験装置に据付け、ガス配管のみをループに接続し他の配管 (⑧, ⑨, ⑩, ⑪) は全て盲フランジ構造とした。

試験部には熱流束測定用とは別に、加熱アルミニウム円板の温度制御、定常状態の監視、等のため各部に熱電対約 30 本が取り付けられている。

Fig.2 は加熱アルミニウム円板を示したもので、アルミニウム円板②にシーズヒーター①が鑄込まれ、円板表面には前述の熱しゃへい板 (Fig.1 ⑥) と同じ表面仕上のアルミニウム板③がネジ止めされている。アルミニウム板③表面には表面温度測定用熱電対が 5 本うめ込まれている。

加熱アルミニウム円板は上下に移動可能で、カバーガス層の厚さを 300, 200, 100 mm の 3 段階にわたり変えることができる。しかし改造後の熱流束測定部を使用した本実験では、カバーガス層の厚さ 100 mm の場合のみについて測定した。



## 1.2 熱流束測定部

加熱アルミニウム円板からの放射およびカバーガス層の自然対流による熱流は、上蓋 (Fig.1 ⑤) を兼ねた熱流束測定部を通し大気中に放熱される。

Fig.3 に熱流束測定部の詳細を示す。測定部は板厚40mmのSUS-304板①とその上方の厚さ5mmのHeガス層②より成り、SUS板の上下壁④、⑤およびHeガス層上壁⑥には各々5本の熱電対が取り付けられている。カバーガス空間からの放射および自然対流による熱流はSUS板およびHeガス層を通過して上方に流れるが、その絶対値は小さく測定が難しいため、①および②の2カ所で各々の温度差を測定することにより精度を高めた<sup>(注)</sup>。

熱流が測定面に対し垂直であれば、上述の両層から求められた熱流束は同じ値となるが、本測定部の場合、後に記すように両者には±10%以内の相違があった。誤差の原因はHe層のスペーサー⑦や、フランジ部を通しての伝導伝熱の影響と考えられる。

SUS板部では1~3℃という微小な温度差を測定する必要があるため、使用熱電対およびその取付法について特に下記の注意を払った。

- i) 型式 C-A, 0.5mmφ シース接地型
- ii) 員数 熱流束測定面における熱流の一様性を調べるため、Fig.3に示すように各面5点とし、かつ異なる中心角に配置した。
- iii) 起電力校正 水の沸点(100℃), Sn, Pb, Zn および Sbの凝固点(231.96, 327.50, 419.58, 630.74℃)において全熱電対の起電力校正を行った。なお、Sb点については3週間後、再度校正したが、すべての熱電対において特性変化は非常に少なく0.1℃以下であった。
- iv) 取付法 SUS板表面近傍のカバーガス温度境界層中には約10℃/mmの温度勾配があり、熱電対の微小な凸起でも温度計測の誤差原因となる。このためFig.3に示すうめ込み法を用いた。SUS板上下面にうめ込まれたそれぞれの熱電対間距離は37.5mmである。

## 1.3 データ処理

データ処理装置のブロックダイアグラムをFig.4に示す。熱電対起電力はスキャンニングデジタルボルトメータ(YODAC-80)で1μVのオーダまで読み取られ、HITAC-10IIにてオンライン処理される。HITACにおけるデータ処理プログラムのフローシートをFig.5に示す。データ解析方法は次の通りである。

- i) 温度換算 前述の熱起電力較正值より最小二乗法で温度換算式(二次式)を各熱電対ごとに作成しておき、これより各点の温度を算出する。

(注) 本試験条件におけるHe層のレイリー数Raは10以下のため、He層の伝熱はSUS板と同様純伝導である<sup>(1)</sup>。

ii) 熱流束 熱流束測定部における熱流は放射 ( $q_{rad}$ ) と自然対流 ( $q_{cv}$ ) の和であるから

$$q_{SUS} = q_{He} = q_{rad} + q_{cv} \quad \dots\dots (1.1)$$

また  $q_{SUS}$  および  $q_{He}$  は

$$q_{SUS} = \frac{\lambda_{SUS} (T_{L,S} - T_{U,S})}{L_{SUS}} \quad \dots\dots (1.2)$$

$$q_{He} = \frac{\lambda_{He} (T_{L,H} - T_{U,H})}{L_{He}} \quad \dots\dots (1.3)$$

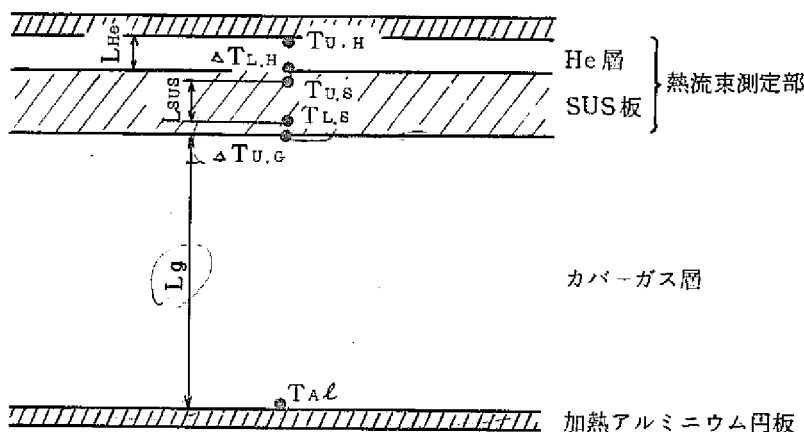
iii) 無次元数

グラスホフ数  $Gr = \frac{g \beta L_g^3 (T_{Al} - T_{U,G})}{\nu^2}$

プラントル数  $Pr = \frac{\nu}{a}$

レイリー数  $Ra = Gr \cdot Pr$

ここに  $q_{SUS}$  : SUS板の温度勾配より算出した熱流束,  $q_{He}$  : He層の温度勾配より算出した熱流束,  $\lambda_{SUS}$  : SUS-304の熱伝導率,  $\lambda_{He}$  : Heの熱伝導率,  $T_{L,S}$  : SUS板下部測定点温度(下表面より1.25mm上方),  $T_{U,S}$  : SUS板上部測定点温度(上表面より1.25mm下方),  $T_{U,H}$  : He層上壁温度,  $T_{Al}$  : 加熱アルミ板表面温度,  $T_{U,G}$  : カバーガス層上壁温度,  $T_{L,H}$  : He層下壁温度,  $L_{SUS}$  : SUS板上下部熱電対間距離(37.5mm),  $L_{He}$  : He層厚さ(5.0mm),  $L_g$  : カバーガス層厚さ,  $g$  : 重力加速度,  $\beta$  : 体膨張率,  $\nu$  : 動粘性係数,  $a$  : 温度伝導率である。なお,  $T_{L,H}$  および  $T_{U,G}$  は  $T_{U,S}$ ,  $T_{L,S}$  より外挿して求めた。温度と位置の関係を次に示す。



SUS板, He層およびカバーガス層の物性値は各々の上下壁温度の平均温度における値を使用した。SUS-304, Heガスおよびアルゴンガスの物性値の詳細を付録(1)に記す。

前述のように加熱アルミニウム円板, SUS板およびHe層上壁にはそれぞれ半径方向に温度計測点が5点あるが, 計算にあたっては容器側壁の影響の少ない中心部3点の平均値を使

用した。また、試験データは連続して6回取得し、その平均値をもって測定値とした。  
試験装置の主要仕様を次に記す。

## 試験装置の仕様

### 1. 試験容器 (Fig.1)

型 式	円筒型
型 状	612 $\phi$ ×690.5L×6t (mm)
最高使用温度	600℃
最高使用圧力	1 kg/cm <sup>2</sup> G
熱 電 対	C-A, 約30本

### 2. 加熱アルミニウム板 (Fig.2)

型 式	円板型
型 状	565 $\phi$ ×1067L (mm)
最高使用温度	400℃
定格熱出力	3 kw
使用電源	AC200V
制御方式	SCR PID方式
ヒータ仕様	SUS304 12mm $\phi$ シースヒータ
ヒータ本数	1本
ヒータ取り付け方法	鋳込み
熱 電 対	接地型 C-A 0.5 $\phi$ ANSI Special級 5本

### 3. 熱流束測定部 (Fig.3)

型 式	円板型
型 状	770 $\phi$ ×55t (mm)
最高使用温度	600℃
最高使用圧力	1 kg/cm <sup>2</sup> G
熱電対仕様	接地型 C-A 0.5 $\phi$ ANSI Special級 15本
He 層	625D×5L (mm)

#### 1.4 試 験 方 法

試験容器内をガス置換後、アルミニウム円板を一定電力で加熱し、一昼夜以上放置後、定常状態になったことを確認して熱流束を測定した。この間、温度制御・監視用熱電対出力は常時レコーダに記録するとともに、補助ヒータ（Fig.1 ④）の電気入力調整および熱流束測定部側方の保温材料（Fig.1 ②）の増減を行ない、加熱アルミニウム円板からの熱流が可能な限り測定面に垂直となるようにした。

## 2. 結果と検討

### 2.1 試験結果

試験結果を Table 1 に示す。本表により熱流束測定部 SUS 板上下測定点の温度差より算出した熱流束  $q_{SUS}$  と、He 層上下壁温度差より算出した熱流束  $q_{He}$  とは 10% 以内の誤差で一致している。また、両者の測定制度には特に差異が認められないため本報告では今後、熱流束の測定値  $q_{meas}$  として  $q_{He}$  と  $q_{SUS}$  の平均値を用いる。

$$q_{meas} = \frac{q_{He} + q_{SUS}}{2} \quad \dots\dots (2.1)$$

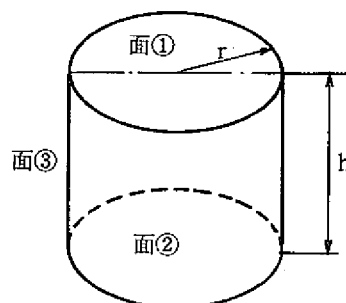
次に加熱アルミニウム円板および熱流束測定部 SUS 板の半径方向温度分布の代表例を Fig.6 ~ Fig.9 に示す。これらの図より、(1)加熱アルミニウム円板表面温度は中心がやや高いこと、および(2)熱流束測定部では半径方向に  $0.005 \sim 0.15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$  の温度勾配があること、がわかる。上記(1)はアルミニウム円板に鑄込まれたヒータの配置および発熱が不均一のため、(2)は測定部において熱流が測定面に垂直でないことを示している。すなわち、カバーガス層を通して測定面に垂直に伝熱される放射および自然対流伝熱量と容器側壁を伝わる熱伝導量との相違、ならびに測定部上面における周辺部分と中央部分からの放熱量の相違に基づく半径方向熱流が存在している。測定面に垂直な全熱流束は本温度分布をもとに、付録(2)に記す補正を行なって算出した。

### 2.2 放射伝熱

#### 2.2.1 放射伝熱の解析

本試験のように簡単な形状の等温壁で囲まれた空間の放射伝熱に関しては次のように理論解が求められる。

左図の体系を考える。



	半径	面積	温度 ( $^\circ\text{K}$ )	放射率
面①	$r$	$A_1 = \pi r^2$	$T_1$	$\epsilon_1$
面②	$r$	$A_2 = A_1$	$T_2$	$\epsilon_2$
面③		$A_3 = 2\pi r h$	$T_3$	$\epsilon_3$

まず各面相互の形状係数を求める。

$$X = r/h, \quad Y = 1/X, \quad Z = 2 + Y^2 \quad \text{とおけば,}$$

$$F_{11} = 0, \quad F_{13} = 1 - F_{12}$$

$$F_{12} = F_{21} = \frac{1}{2} (Z - \sqrt{4Y^2 + Y^4})$$

$$F_{31} = F_{32}, \quad \pi r^2 F_{13} = 2 \pi r h F_{31} \text{ であるから,}$$

$$F_{31} = F_{32} = \frac{X}{2} \cdot F_{13}, \quad F_{33} = 1 - F_{31} - F_{32}$$

次に各面の射度を $G_i$ とすれば各面における正味伝熱量 $Q_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) は次式で表わされる。<sup>(1)</sup>

$$\begin{cases} Q_i = \sum_{k=1}^3 (G_i - G_k) A_i F_{ik} & \dots\dots (2.2) \\ Q_i = (\sigma T_i^4 - G_i) A_i \frac{\epsilon_i}{1 - \epsilon_i} & \dots\dots (2.3) \end{cases}$$

ここに、 $\sigma = 4.88 \times 10^{-8} \text{ kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{K}^4$  (ステファン・ボルツマン常数) である。  
以上の式を整理すると最終的に次の3元連立方程式を得る。

$$\begin{cases} a_{11} Q_1 + a_{12} Q_2 + a_{13} Q_3 = a_{14} \\ a_{21} Q_1 + a_{22} Q_2 + a_{23} Q_3 = a_{24} \\ a_{31} Q_1 + a_{32} Q_2 + a_{33} Q_3 = a_{34} \end{cases} \dots\dots (2.4)$$

ただし、

$$q_1 = \sigma T_1^4$$

$$a_{11} = (1 + \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1}), \quad a_{12} = - \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} F_{12}, \quad a_{13} = \frac{A_1 (F_{12} - 1)}{A_3} \cdot \frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3}$$

$$a_{14} = A_1 \{ F_{12} (q_3 - q_2) + (q_1 - q_3) \}$$

$$a_{21} = - \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} F_{12}, \quad a_{22} = \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} + 1, \quad a_{23} = \frac{A_1 (F_{12} - 1)}{A_3} \cdot \frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3}$$

$$a_{24} = A_1 \{ F_{12} (q_3 - q_1) + (q_2 - q_3) \}$$

$$a_{31} = - \frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} \cdot \frac{A_3}{A_1} F_{31}, \quad a_{32} = - \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2} \cdot \frac{A_3}{A_1} F_{31}, \quad a_{33} = 1 + \frac{2(1 - \epsilon_3)}{\epsilon_3} F_{31}$$

$$a_{34} = (2q_3 - q_1 - q_2) A_3 F_{31}$$

放射伝熱量解析値は、試験条件における各部温度および別報<sup>(2)</sup>に記すアルミニウムおよびSUS-304の放射率を $a_{ik}$ に代入して求めた。なお、側壁(熱しゃへい板)は上下方向に温度分布を有するが本解析では簡単のため $(T_1 + T_2)/2$ の等温壁として計算した。

一方、上記体系において $r \ll h$ の場合、無限平板間の放射伝熱となり、面①への伝熱量 $Q_1$ はきわめて簡単に次式で表わされる。

$$Q_1 = A_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4) \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad \dots\dots (2.5)$$

また、側壁が断熱 ( $Q_3 = 0$ ) の場合は  $Q_1 = -Q_2$  であり、側壁の放射率  $\epsilon_3$  に無関係に次式で与えられる。

$$Q_1 = -Q_2 = A_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4) \frac{1 + F_{12}}{(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2})(F_{12} + 1) - 2 F_{12}} \quad \dots\dots (2.6)$$

$T_3$  も同様に

$$T_3^4 = \frac{\{(1 + F_{12})\epsilon_1 - F_{12}\epsilon_1\epsilon_2\}T_1^4 + \{(1 + F_{12})\epsilon_2 - F_{12}\epsilon_1\epsilon_2\}T_2^4}{(1 + F_{12})(\epsilon_1 + \epsilon_2) - 2 F_{12}\epsilon_1\epsilon_2} \quad \dots\dots (2.7)$$

本試験では熱しゃへい板 (Fig.1 ⑥) の効果が大きて断熱に近かったため、 $(T_1 + T_2)/2$  の値は (2.7) 式より求めた  $T_3$  にほぼ等しく、放射伝熱量は (2.6) 式から算出しても結果的には大差なかった。

### 2.2.2 放射伝熱量の測定

放射伝熱量を直接測定するには容器内を完全に真空にすればよい。本試験では加熱アルミニウム円板の温度設定を 413 °C および 283 °C とし、容器を真空に引き放射伝熱量を測定した。到達真空度は  $10^{-1}$  Torr 程度のため残存ガスの伝熱 (純伝導にほぼ等しい) を考慮した。

測定結果を前節の方法による解析値  $q_{rad, cal}$  とともに下に示す。ここに  $q_{meas}$  : 熱流束測定値,  $q_{cd}$  : 残存ガスによる熱伝導量,  $q_{rad, meas} = q_{meas} - q_{cd}$ , 他の記号は Table 1 と同じである。

真空度 (Torr)	$T_{AL}$ (°C)	$T_{LS}$ (°C)	$T_{LH}$ (°C)	$T_{UH}$ (°C)	$q_{meas}$ (kcal/m <sup>2</sup> h)	$q_{cd}$ ( " )	$q_{rad, meas}$ ( " )	$q_{rad, cal}$ ( " )	$\frac{q_{rad, meas}}{q_{rad, cal}}$
0.5	282.7	71.2	70.4	61.3	259	15	244	213	1.15
0.7	412.7	126.9	125.1	106.5	546	17	529	570	0.94

上表において、当室で光学的に測定した放射率を物性値に使用した放射熱流束解析値 ( $q_{rad, cal}$ ) と温度測定から求めた熱流束 ( $q_{rad, meas}$ ) とはよく一致している。

したがって密封カバーガス層を通しての熱伝達量測定において、放射熱流束は解析的に求め、全熱流束測定値から差し引くことにより自然対流熱流束を求める方法は妥当であると考えられる。

### 2.3 自然対流伝熱

水平密閉流体層において下壁加熱，上壁冷却の場合の自然対流伝熱については，これまで多くの研究がなされ一般的に使用される伝熱式も数種類ある（Table.2）。

この種の自然対流伝熱はグラスホフ数Grまたはレイリー数Raで整理され，ヌセルト数Nuにおける代表長さとしては流体層の厚さ，代表温度は上下壁の温度差を使用し本試験の場合次式で表わされる。

$$Nu = \frac{L_g \cdot q_{cv}}{\lambda_g (T_{A,L} - T_{U,G})} \quad \dots\dots (2.8)$$

$q_{cv}$  は自然対流熱流束で，前節に記したところにより

$$q_{cv} = q_{meas} - q_{rad,cal} \quad \dots\dots (2.9)$$

ただし  $q_{meas}$  ; 熱流束測定値， $q_{rad,cal}$  ; 放射熱流束解析値である。

カバーガスとしてアルゴンおよびヘリウムを使用し，加熱アルミニウム円板の温度を変えた試験結果を Fig.10(Gr数による整理) および Fig.11(Ra数による整理) に示す。これらの図中，実線は Table.2 に示した各伝熱式を示す。

Fig.10 および Fig.11 において Gr または Ra が  $10^5 \sim 10^7$  の実験点はアルゴンカバーガスの場合であり， $10^4 \sim 10^5$  の実験点はヘリウムカバーガスの場合である。

測定値は McAdams の式<sup>(3)</sup> または Jacob の式<sup>(5)</sup> の式と比較的一致している。

これらの伝熱式の特徴は Gr 数が  $10^5$  以上のとき，

$$Nu \propto Ra^{1/3} \quad \text{または} \quad Nu \propto Gr^{1/3}$$

したがって， $Nu \propto L_g$

一方， $q_{cv} \propto \frac{Nu}{L_g}$  であるから，自然対流伝熱量が流体層の厚み  $L_g$  に無関係なことである。

本モデル試験結果の実機への適用性を評価するため，カバーガス層の温度分布を測定し自然対流場の性質を調べた。



## 2.4 カバーガス層の垂直方向温度分布

ガス層温度分布は熱流束測定とは別に、Fig.12に示す熱電対微動装置を容器上蓋に取り付けて測定した。本装置は可動範囲が上蓋下面より0～100 mmの上側微動装置と200～300 mmの下側微動装置より成る。

Fig.13～Fig.15にカバーガス層の厚さがそれぞれ300 mm, 200 mmおよび100 mmの場合の温度分布を示す。但し装置の不調、等のため各ケースにおいて上側または下側のどちらか一方のデータしかない。

これらの図よりカバーガス層の厚みが100～300 mmに変化しても、上下壁近傍の温度境界層の厚みは常に10 mm程度であり、中央部にはほぼ等温領域が形成されその温度は上下壁温の平均値に近いことがわかる。中央部で温度一様となるのは乱流が十分に発達して流体が混合しているためであり、上下伝熱面はそれぞれ独立に中央部と熱交換している。このような自然対流場が形成されたため、前節に記したごとく自然対流伝熱量はカバーガス層の厚さに無関係となる。

以上の考察により、本熱流束測定実験（カバーガス厚さ100 mm）の結果は実機炉容器カバーガス層（厚さ500 mm）の自然対流伝熱に適用可能と考えられる。すなわちナトリウム蒸気およびミストの存在がガス層の自然対流場を変化させない限り、原子炉容器カバーガス層の自然対流伝熱はMcAdamsまたはJacobの式で計算できる。

### 3. 結 言

容器内に水平に設置された加熱アルミニウム円板によってナトリウム液面を模擬し、カバーガス空間を通して試験容器上壁へ伝達される自然対流および放射熱流束を測定し、次の結果を得た。

- (1) 系を真空に引いて測定した放射伝熱量と、アルミニウムおよび SUS-304 の放射率（光学的測定値）を用いて算出した放射伝熱解析値とはよく一致した。
- (2) 容器にアルゴンまたはヘリウムガスを封入した場合（レイリー数範囲  $3 \times 10^4 \sim 6 \times 10^6$ ）全伝熱量は自然対流伝熱量と放射伝熱量の和であること、および原子炉容器カバーガス層の自然対流伝熱量は、ガス中のナトリウム蒸気またはミストが自然対流場を変化させない限り Jacob の式、等の一般的な伝熱式で評価できることを確認した。
- (3) カバーガスの軸方向温度分布は上面および下面近傍の薄い温度境界層とほぼ温度一様な中央部の三領域で形成される。中央部温度は上面と下面の温度の算術平均値にほぼ等しい。

なお、以上の結果は今後実施されるナトリウム液面からの熱伝達試験の基礎データとして使用される。

## 謝 辞

本試験の実施にあたり、高所より御指導頂いた三本ナトリウム技術部長、計画立案、予算等の御配慮を頂いたFBR本部山崖副主研、山本ナトリウムグループリーダー、試験に関し有益な助言、御指導を頂いた服部副主研の諸氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- (1) 甲藤； 伝熱概論，（1974），養賢堂
- (2) 服部ほか； 回転プラグ熱伝達試験，—— 放射率の測定(1) ——，動燃社内報告書，印刷中
- (3) McAdams； Heat Transmision； 3rd ed.（1954），McGraw-Hill
- (4) McLain； Reactor handbook "Engineering" 2nd ed.， J. willy & Sons .
- (5) Jakob； Heat Transfer，（1967） John willy & Sons .
- (6) D. Dropkin and A. Carmi； Trans ASME, J. Heat Transfer， C 81，（1959）
- (7) G. Lemercier； DRP/SEMTR/CAD. R 6 0 4， May（1970） .
- (8) M. Fishenden et al； Introduction to Heat Transfer（1950）， Clarendon Press .
- (9) 化学工業会編； 物性定数 10集（1972） . 丸善
- (10) T P R C； Thermophysical properties of High temperature solid materials . vol.3（1967）， Purdue Univ .
- (11) 機械学会編； E P I C C 材料データ集（1977） .
- (12) 久保田 ほか； レーザフラッシュ法による  $2\frac{1}{4}$  Cr-1Mo 鋼の熱伝導率測定実験報告書，動燃報告書，SN941 78-04，（1978） .
- (13) K. G. Hollands and G. D. Raithby； Inter. J. Heat and Mass Transfer， Vol. 18， 879~884，（1975） .

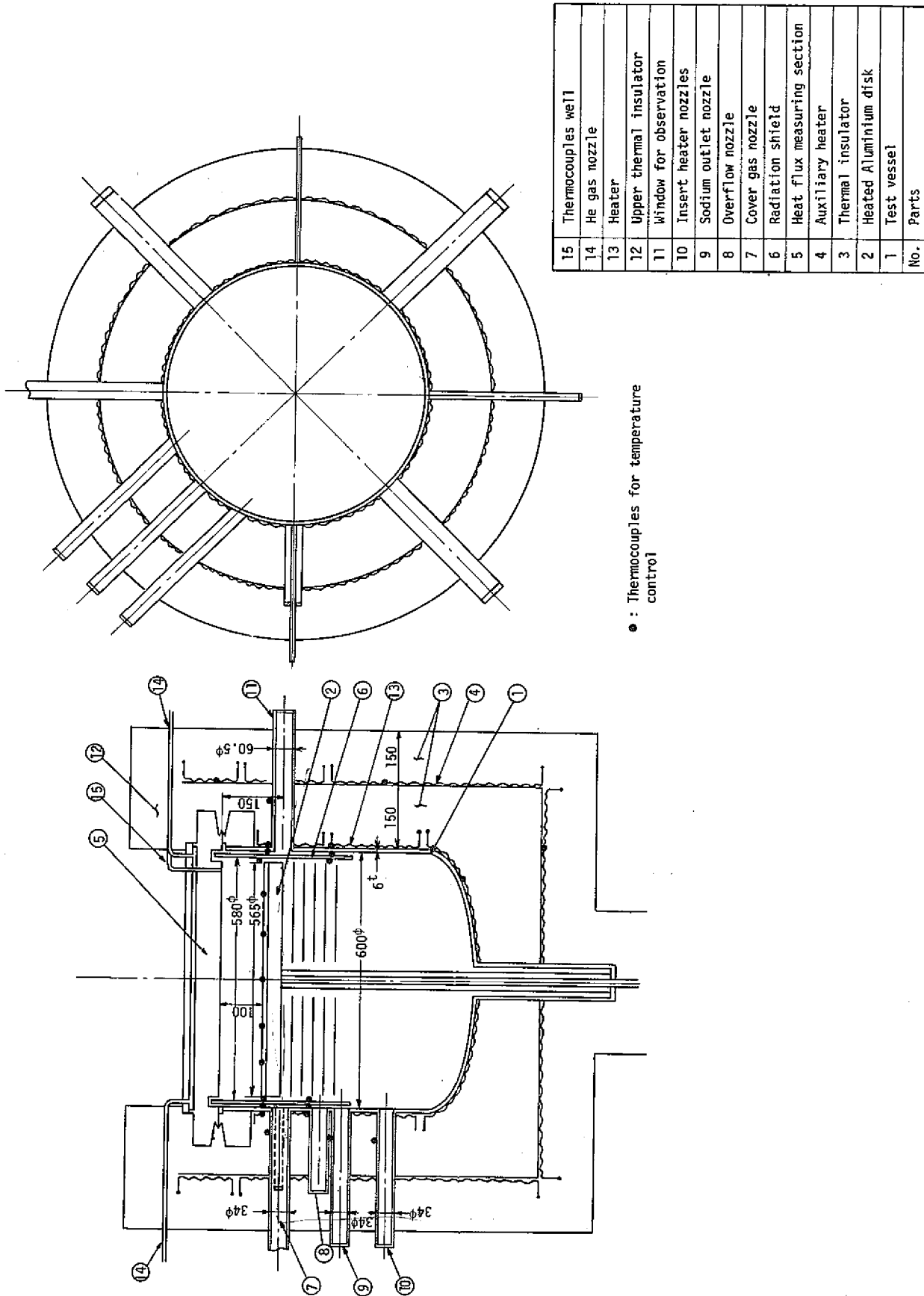


Fig. 1 Experimental Vessel

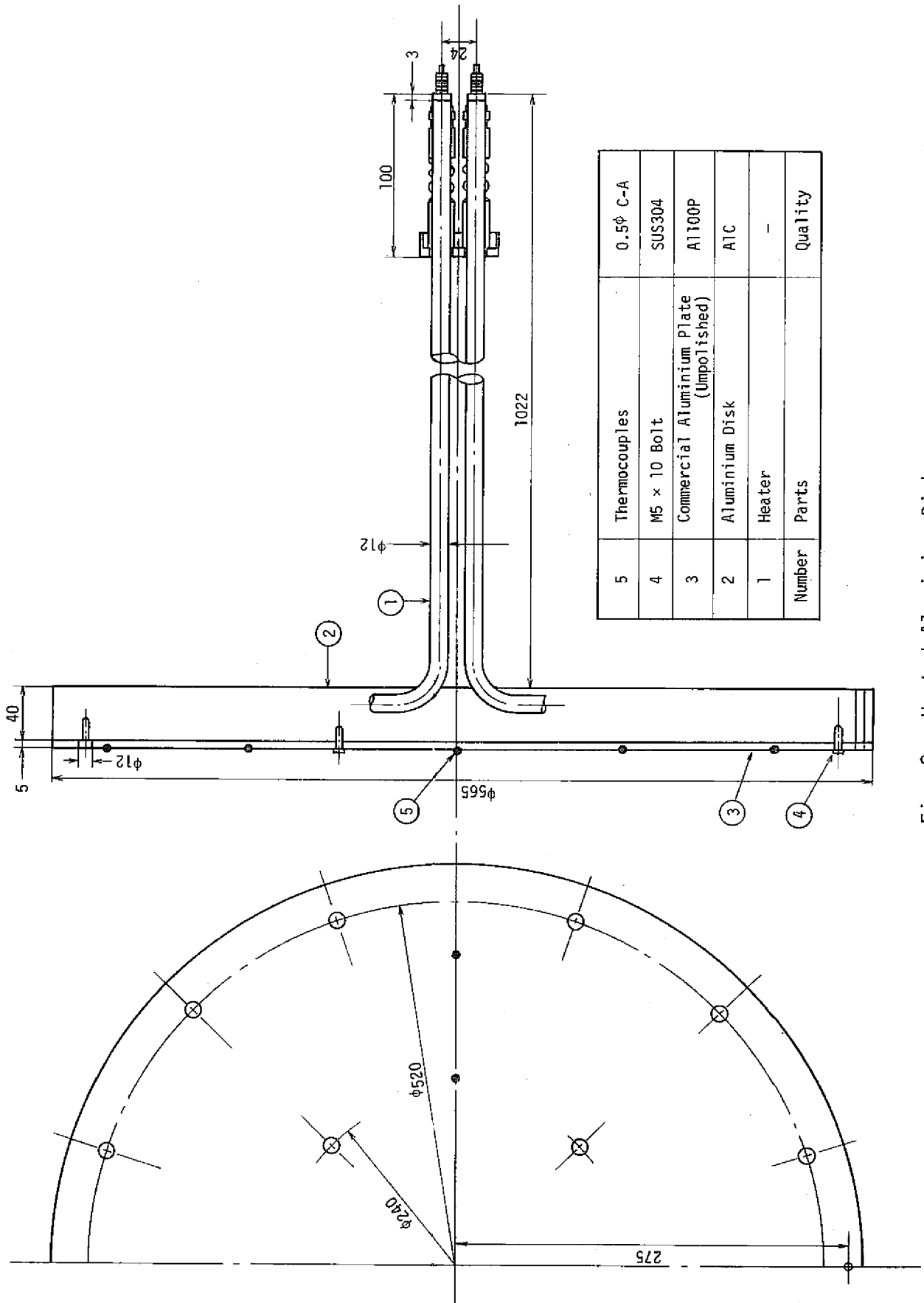


Fig. 2 Heated Aluminium Disk

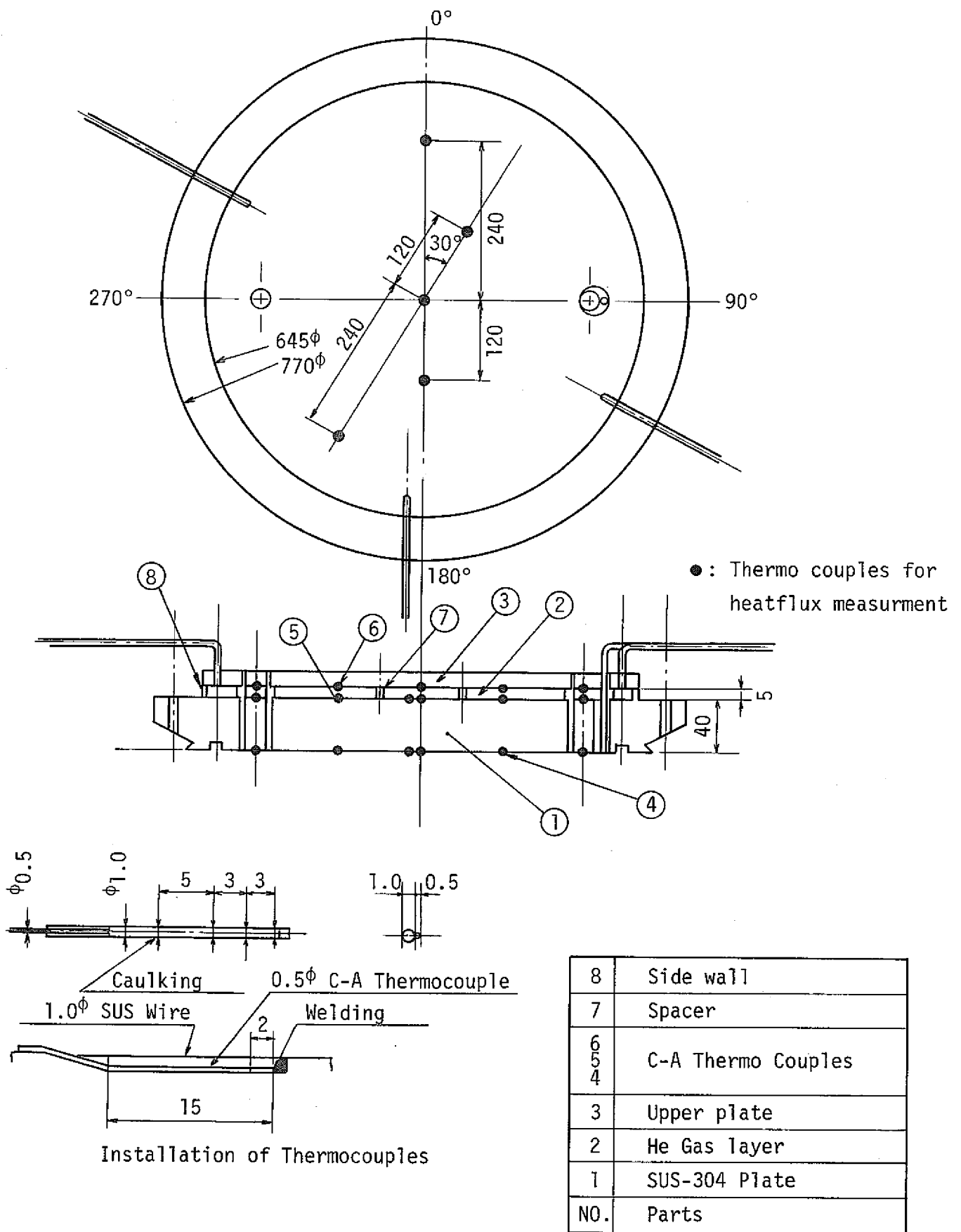


Fig. 3 Heat flux Measuring Section

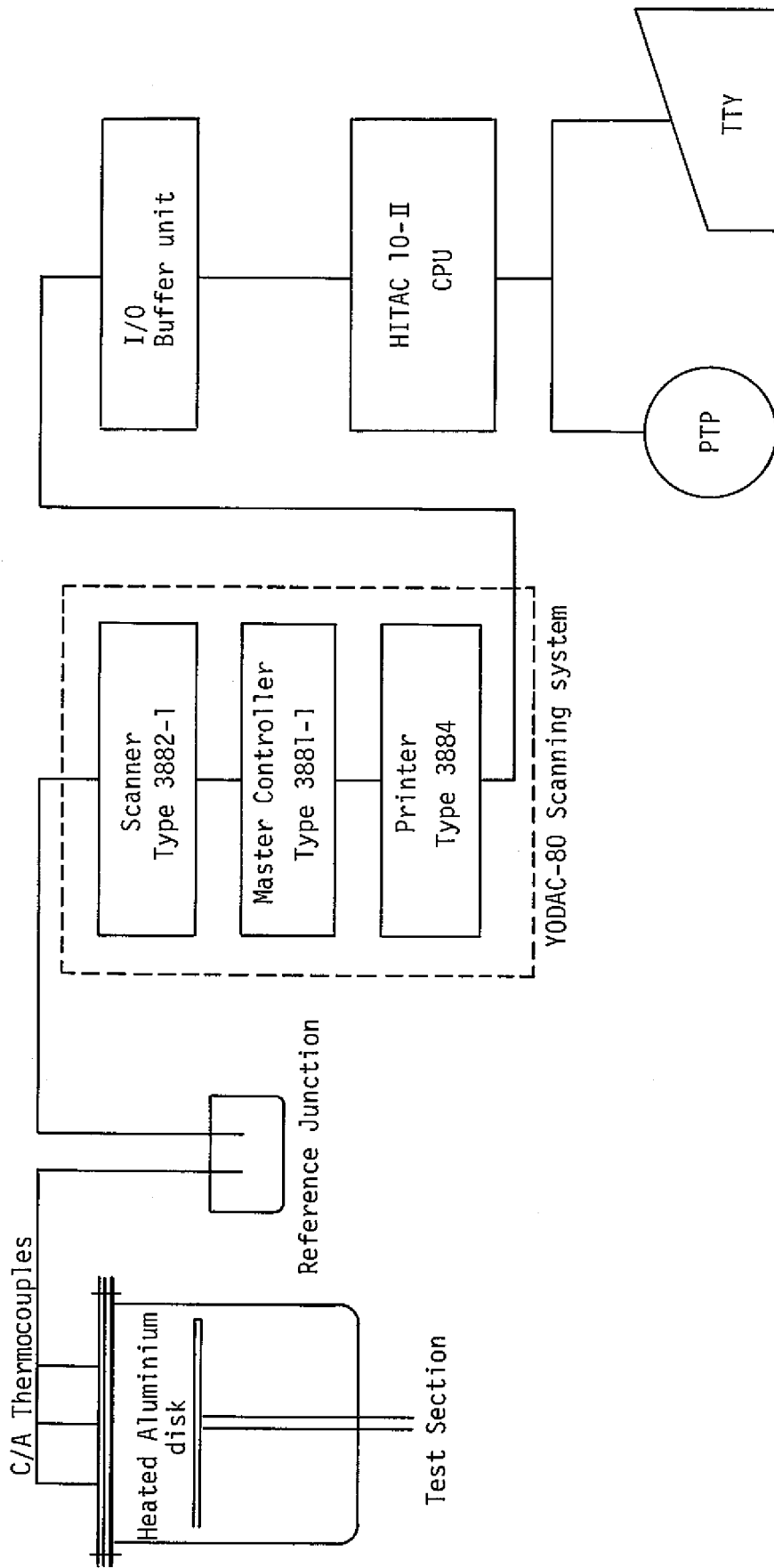


Fig. 4 Block diagram of Temperature Measuring System



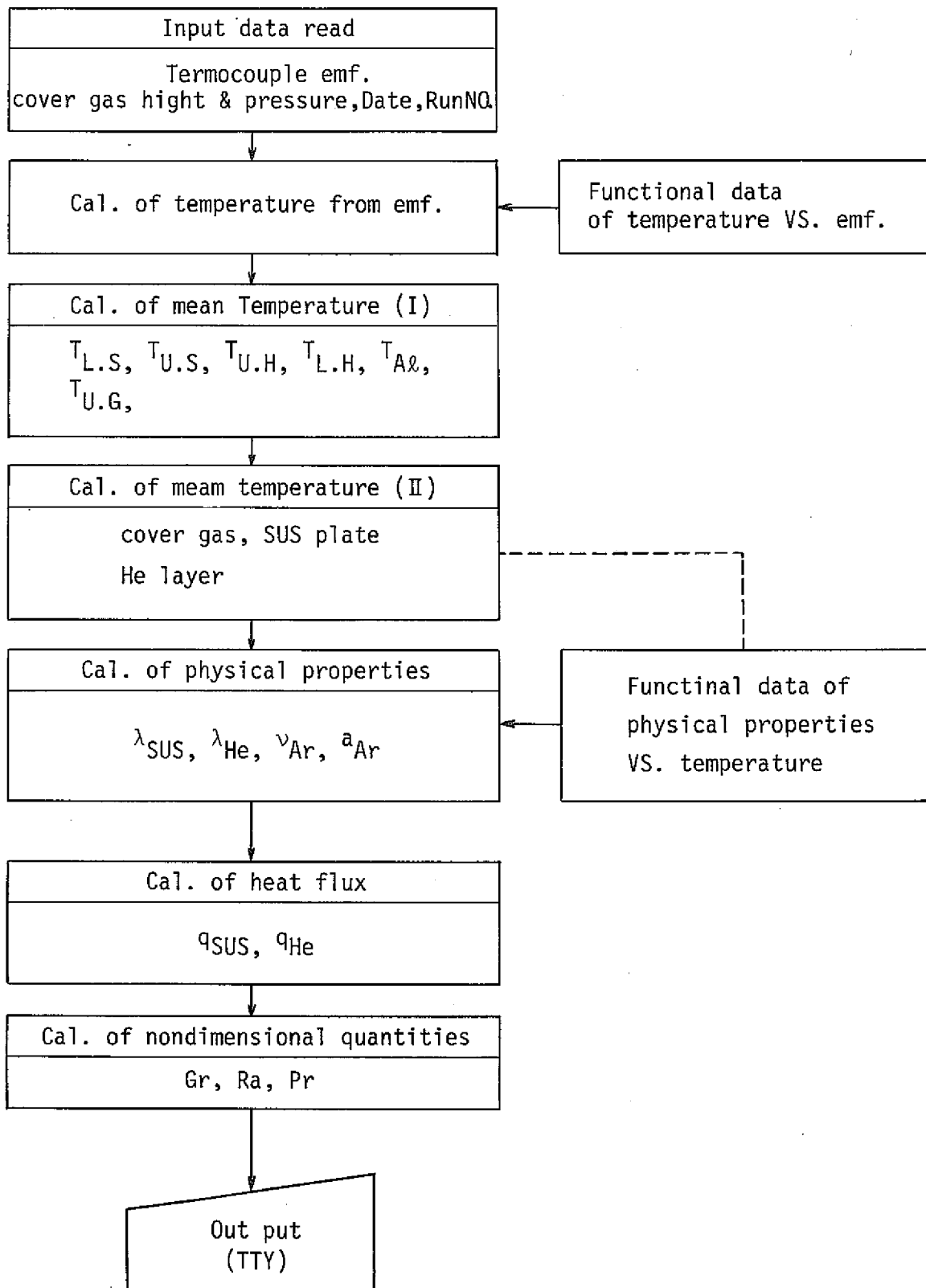


Fig. 5 Data acquisition program

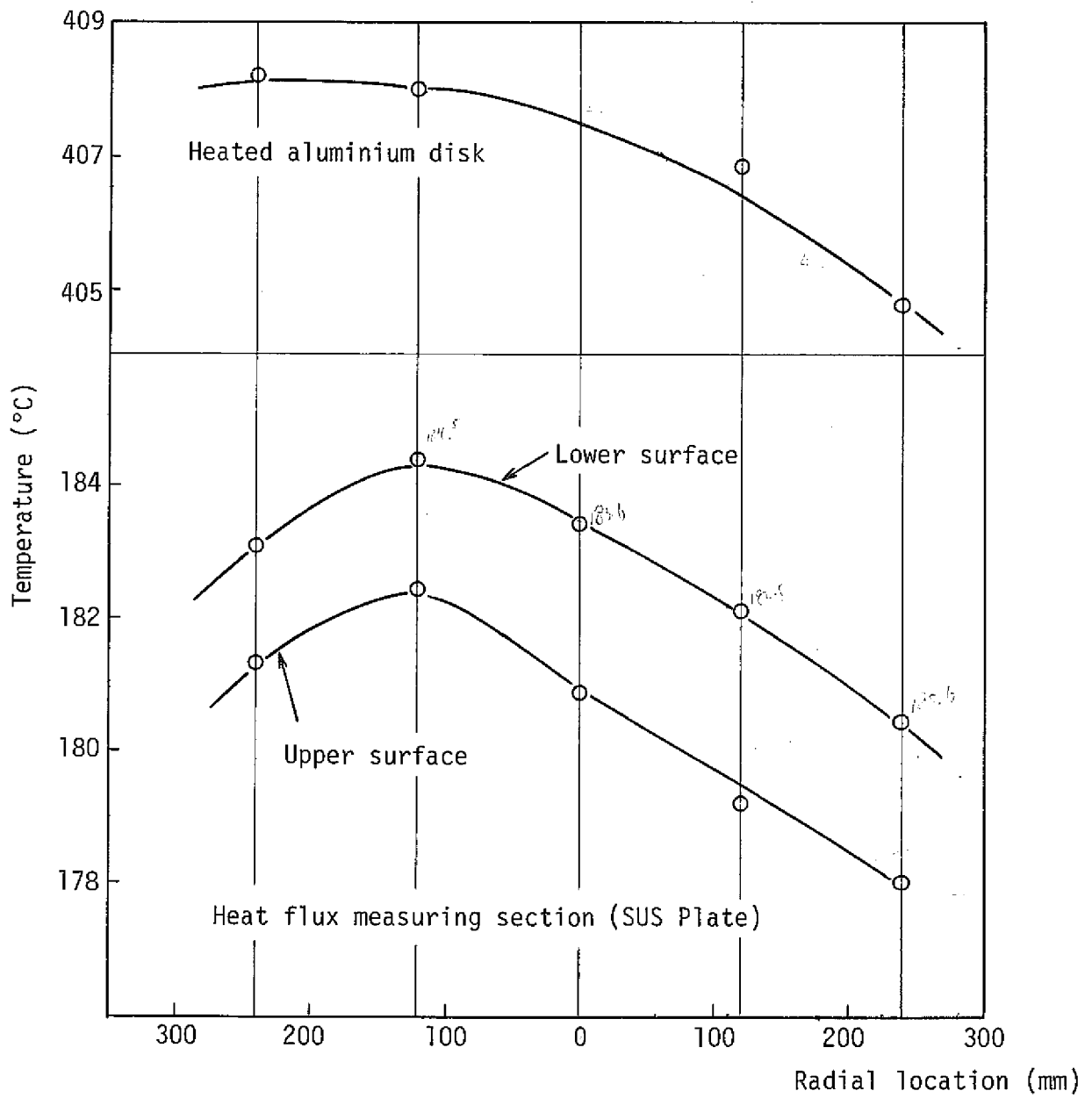


Fig. 6 Radial temperature distribution  
(Run NO. 2 )

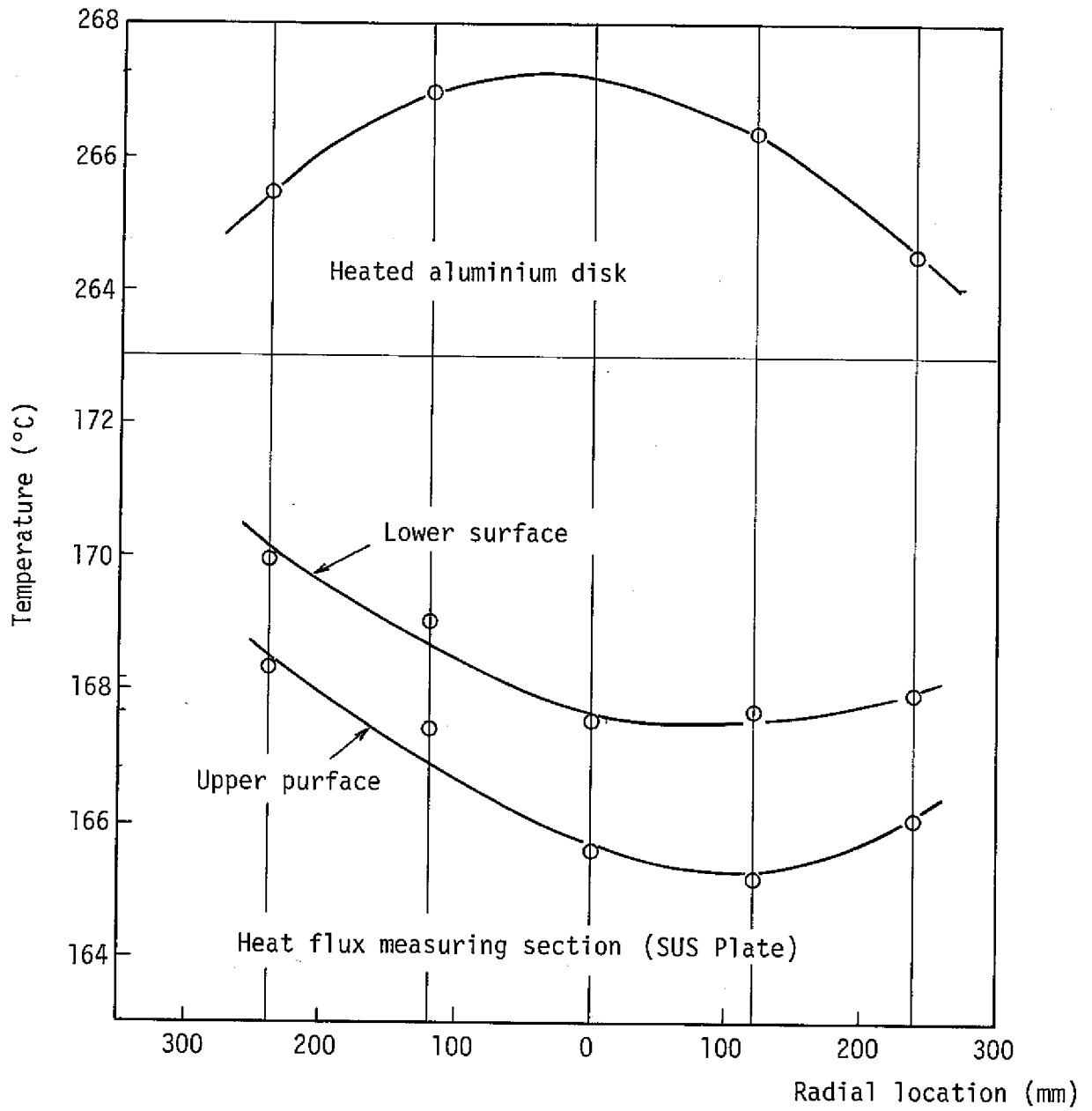


Fig. 7 Radial temperature distribution  
(Run NO. 5)

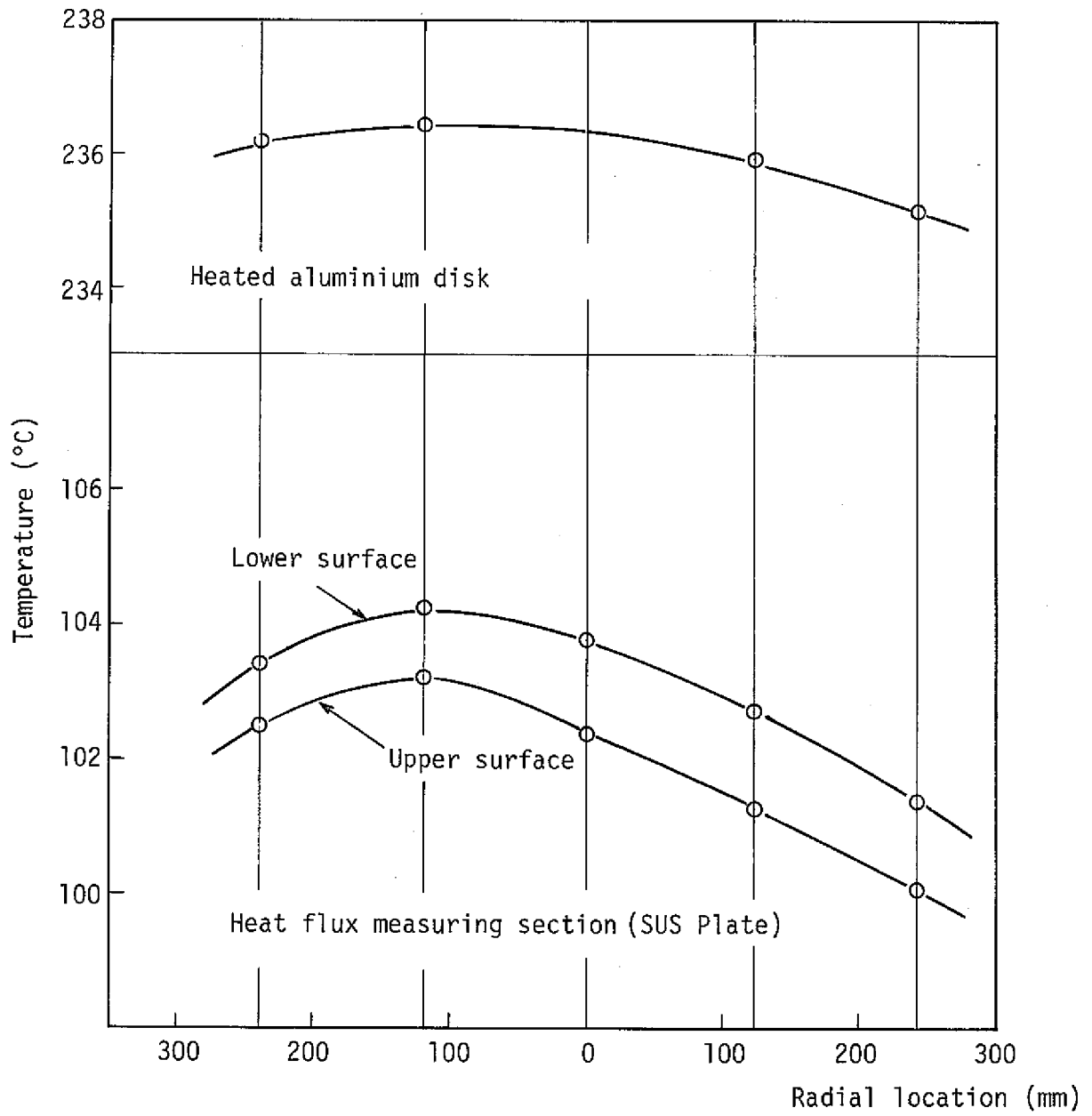


Fig. 8 Radial temperature distribution  
(Run NO. 10)

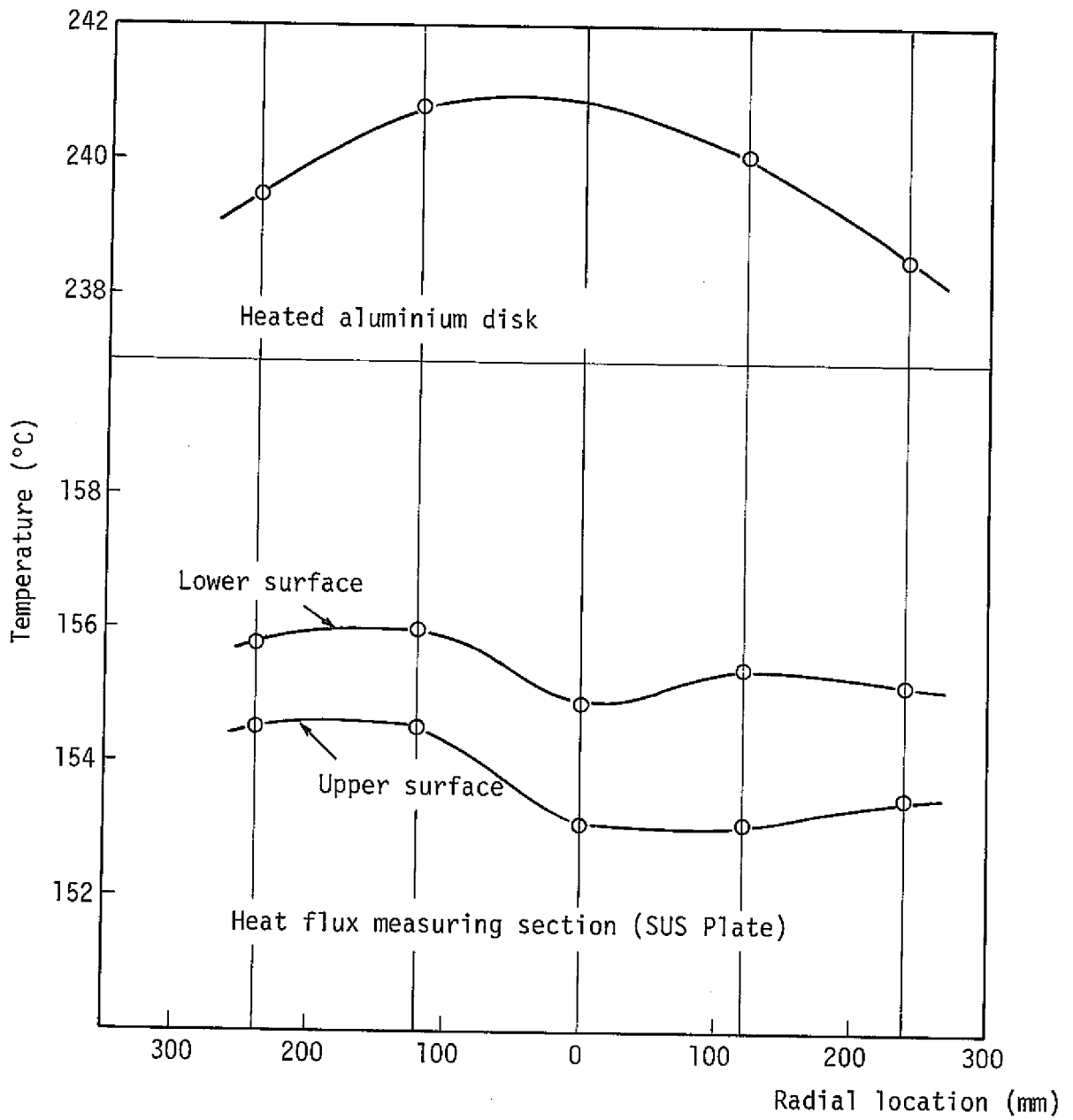


Fig. 9 Radial temperature distribution  
(Run NO. 15)

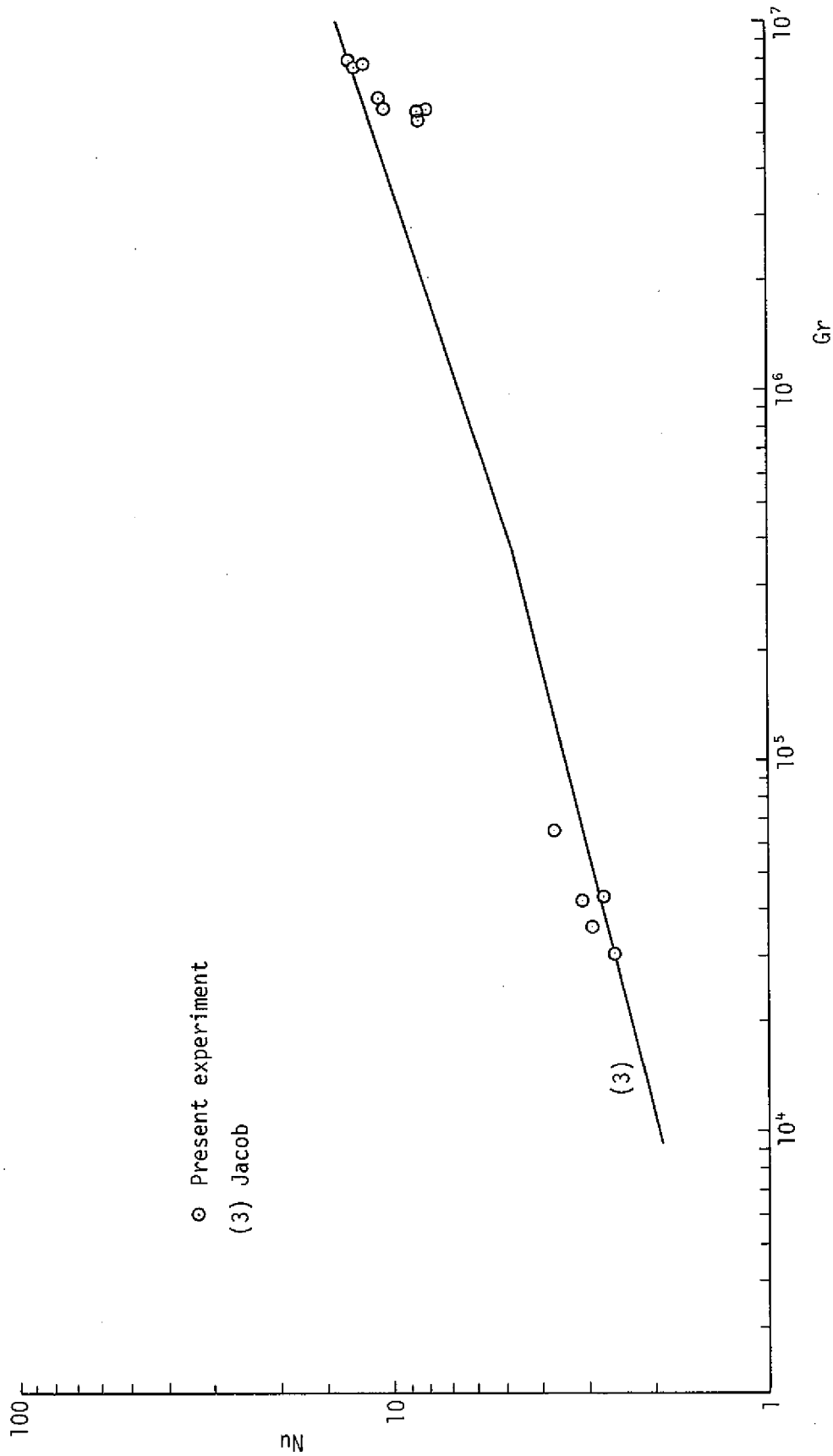


Fig. 10 Heat Transfer Characteristics (1)



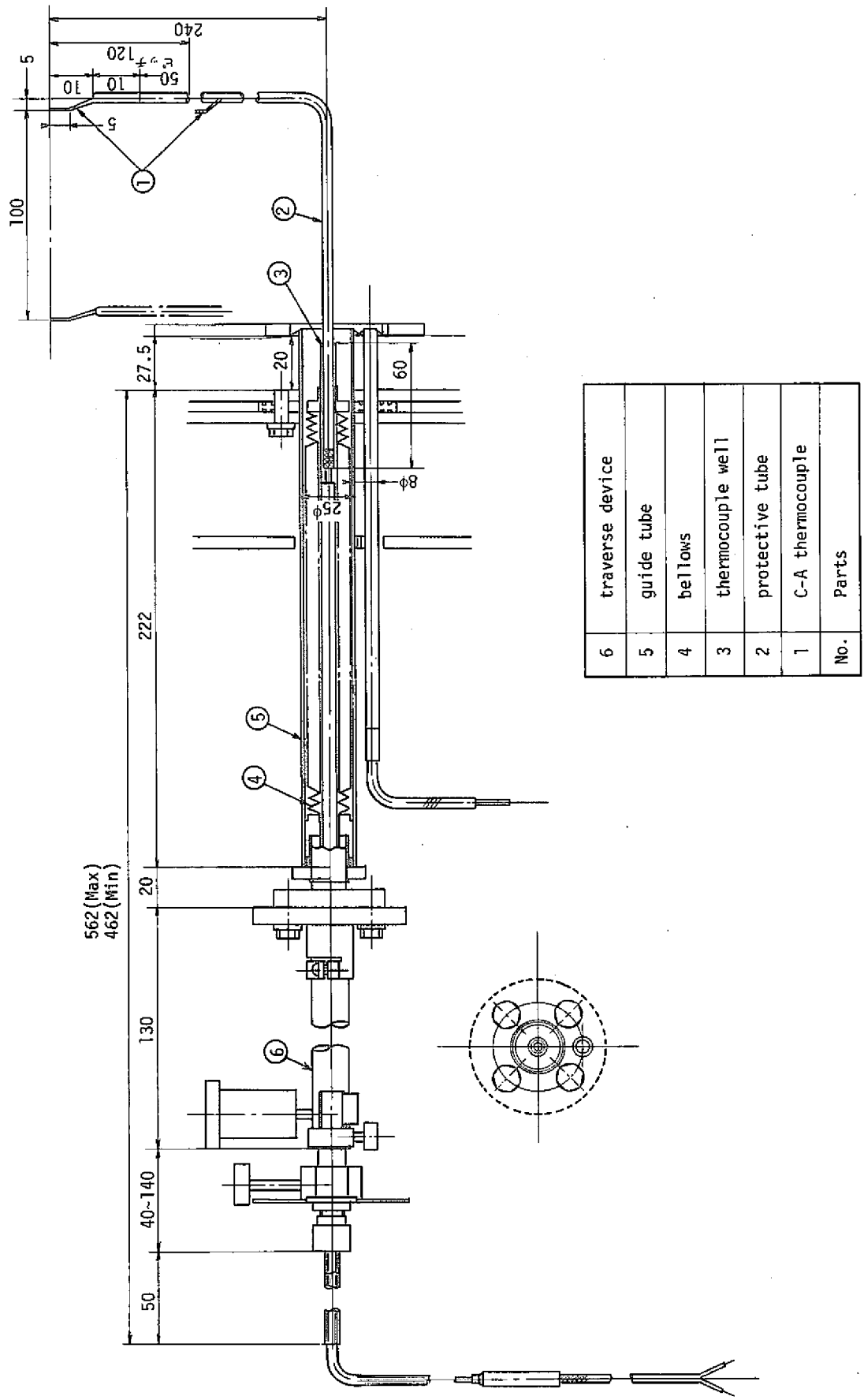


Fig. 12 Traverse device for adjusting thermocouples



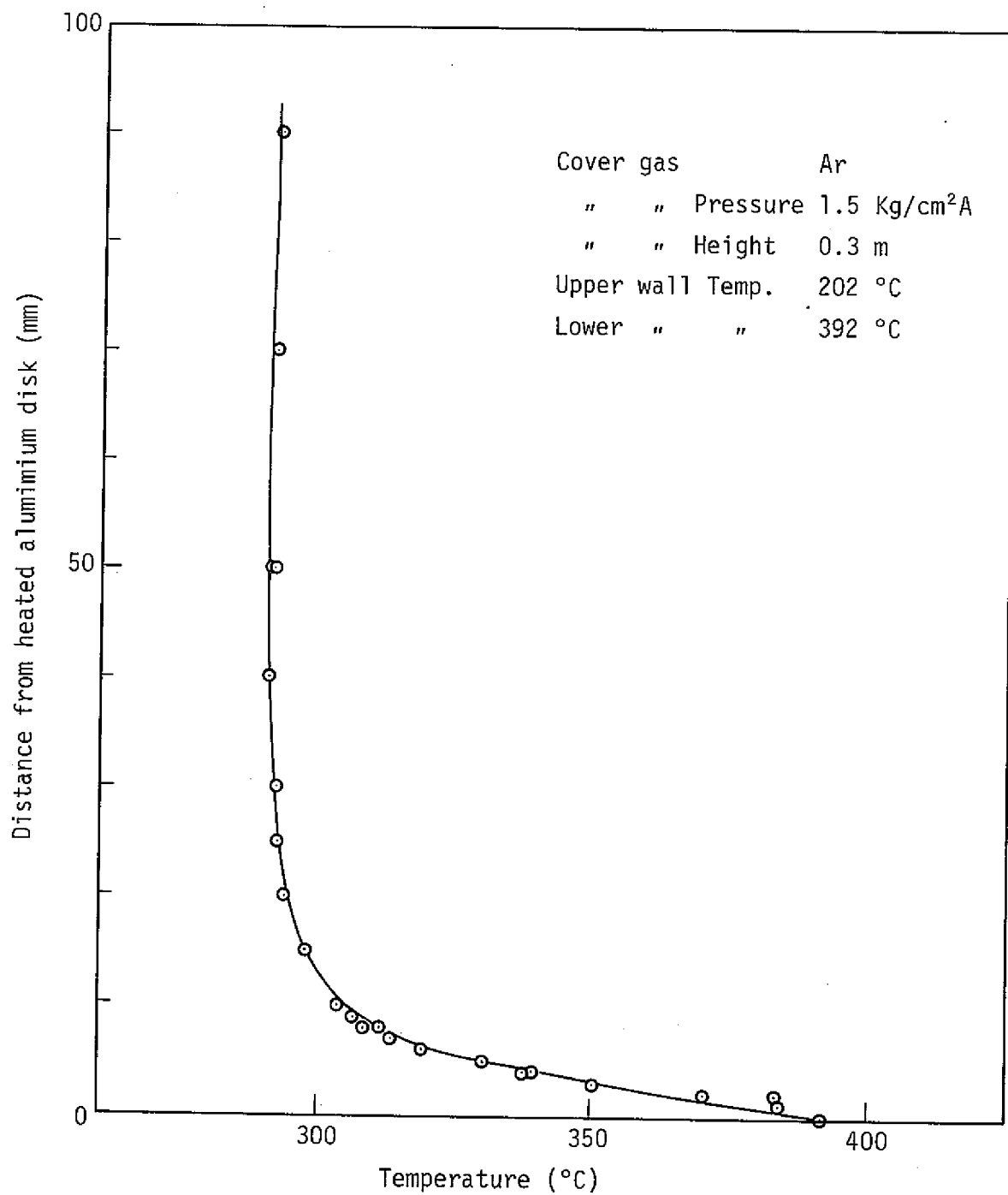


Fig. 13 Temperature distribution in cover gas space  
(Lower boundary layer)

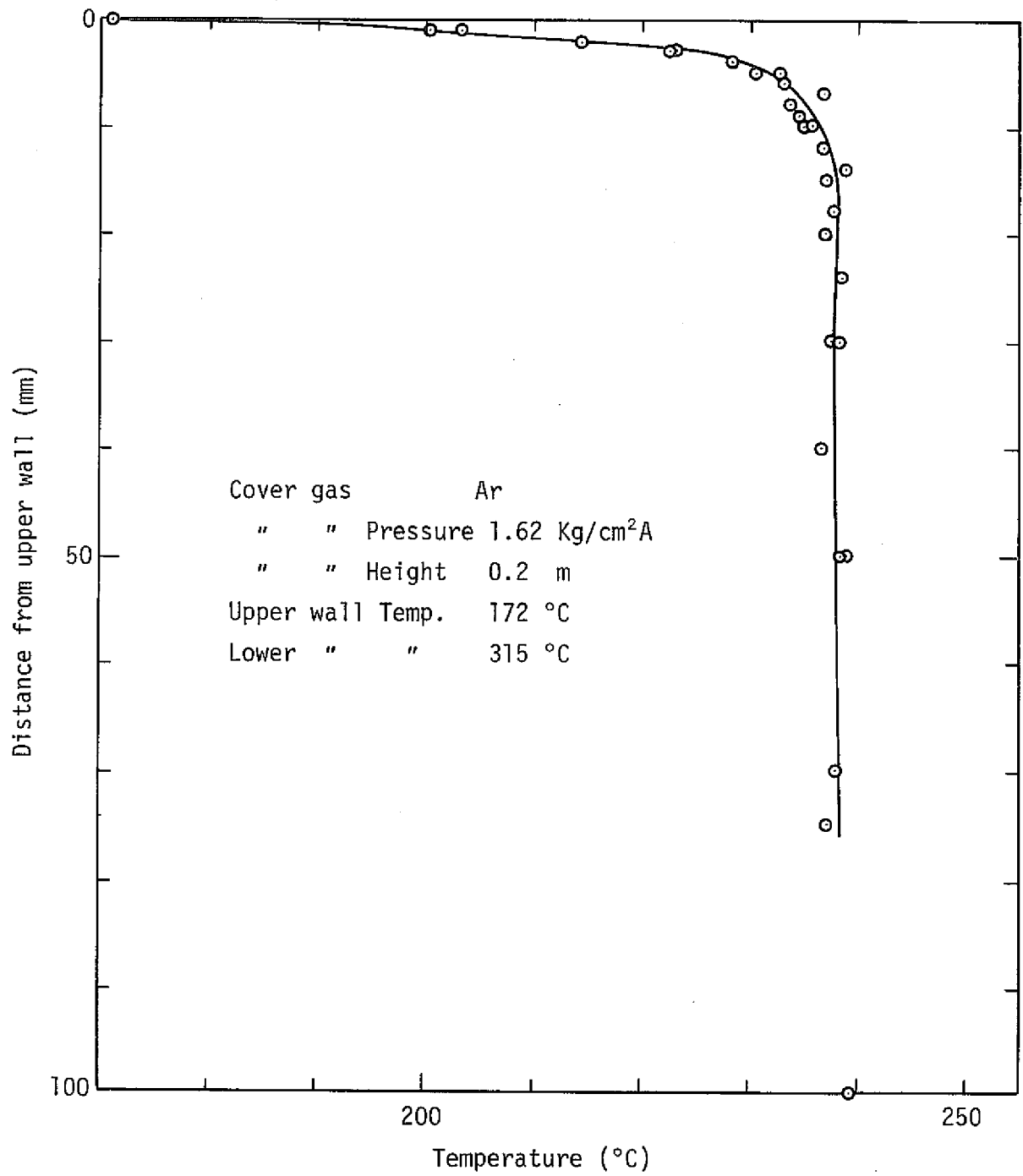


Fig. 14 Temperature distribution in cover gas space  
(Upper boundary layer)

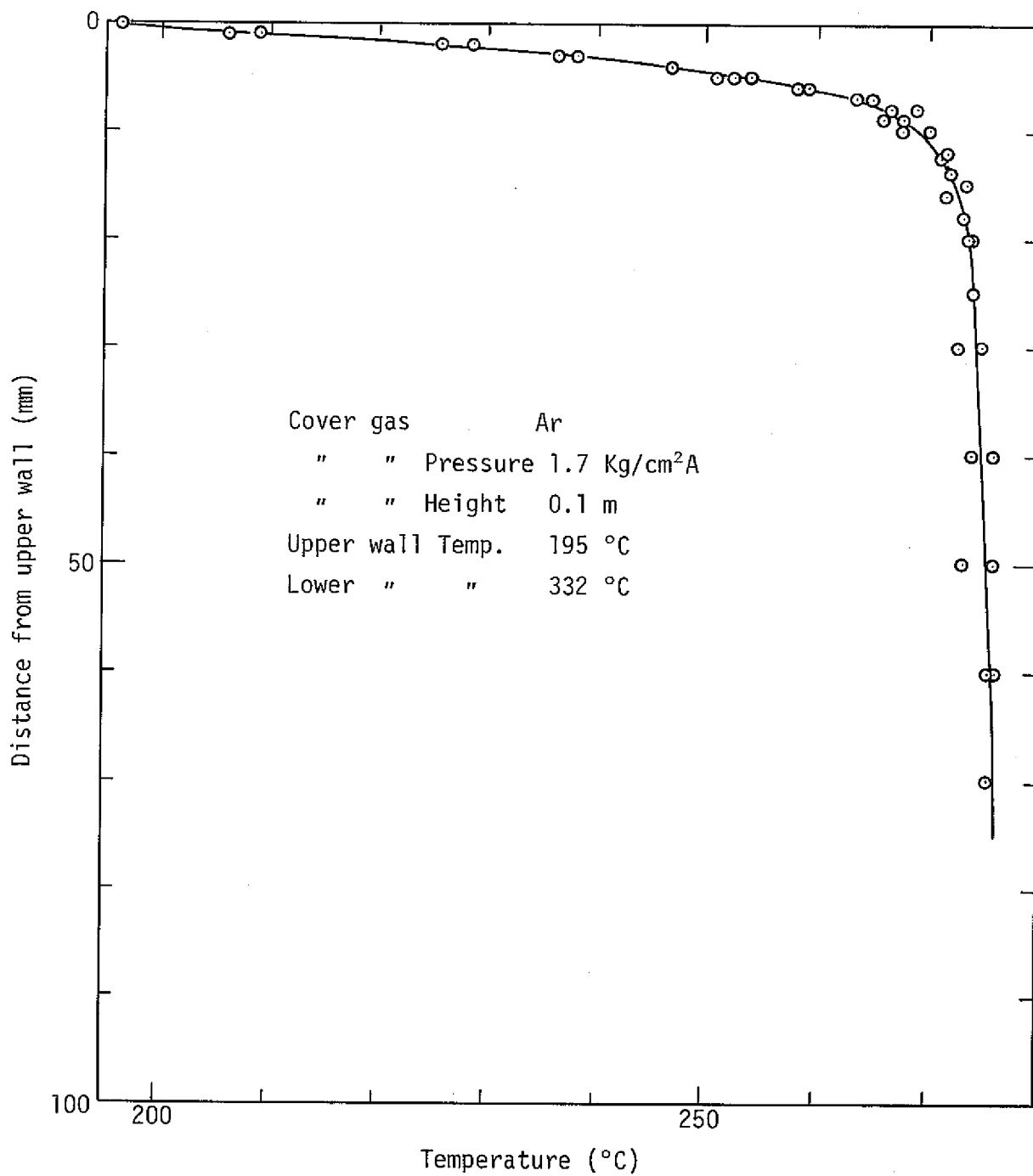


Fig. 15 Temperature distribution in cover gas space  
(Upper boundary layer)

TABLE. 1 EXPERIMENTAL DATA

RUN NO.	COVER GAS PRESSURE (Kg/cm <sup>2</sup> A)	TEMPERATURE (°C)								HEAT FLUX (Kcal/m <sup>2</sup> h)					DIMENSIONLESS NUMBER		
		T <sub>AT</sub>	T <sub>U.G.</sub>	T <sub>L.S.</sub>	T <sub>U.S.</sub>	T <sub>L.H.</sub>	T <sub>U.H.</sub>	q <sub>SUS</sub>	q <sub>He</sub>	(q <sub>SUS</sub> +q <sub>He</sub> )/2	q <sub>rad</sub>	q <sub>cv</sub>	Gr	Ra	Nu		
1	Ar 1.60	363.1	161.8	162.3	160.2	159.9	134.2	874	843	858	311	<sup>1176</sup> 547	4.80×10 <sup>6</sup>	3.21×10 <sup>6</sup>	10.57		
2	Ar 1.70	404.3	182.7	180.9	183.4	180.7	150.1	1023	1003	1013	525	<sup>498</sup> 488	4.65 "	3.10 "	8.67		
3	Ar 1.67	407.0	184.7	185.3	182.8	182.8	153.1	999	985	992	513	<sup>618</sup> 479	4.42 "	2.95 "	8.54		
4	He 1.79	386.0	238.6	237.2	234.2	234.2	195.6	1204	1392	1298	380	918	4.30×10 <sup>4</sup>	2.87×10 <sup>4</sup>	2.76		
5	He 1.45	265.8	168.3	167.4	165.5	165.4	140.5	633	815	724	109	<del>615</del>	4.22 "	2.67 "	3.16		
6	Ar 1.77	410.5	189.0	188.9	186.4	186.2	154.5	1027	1057	1042	553	<sup>688</sup> 489	4.82×10 <sup>6</sup>	3.21×10 <sup>6</sup>	8.09		
7	Ar 1.63	337.2	155.4	155.3	153.4	153.3	128.1	765	792	778	258	<sup>202</sup> 520	5.16 "	3.45 "	10.67		
8	Ar 1.72	292.7	132.9	132.9	131.1	131.0	108.2	688	688	688	174	<sup>205</sup> 514	6.80 "	4.55 "	13.3		
9	Ar 1.70	290.9	130.9	130.8	129.1	129.0	107.4	673	653	665	209	<sup>218</sup> 456	6.78 "	4.54 "	11.7		
10	Ar 1.53	235.8	103.6	103.7	102.3	102.2	86.0	520	468	494	123	<sup>218</sup> 371	6.78 "	4.56 "	12.5		
11	— 0.5 Torr	282.7	71.2	71.1	70.4	70.2	61.3	273	246	259	244	*(15)	—	—	—		
12	— 0.7 Torr	412.7	126.9	126.8	125.2	125.2	106.5	514	578	546	529	*(17)	—	—	—		
13	He 1.35	300.3	181.4	181.3	179.2	179.2	150.6	882	948	915	192	723	3.55×10 <sup>4</sup>	2.38×10 <sup>4</sup>	2.99		
14	He 1.47	402.6	239.7	239.5	236.3	236.3	195.3	1363	1478	1420	455	965	3.00 "	2.02 "	2.57		
15	He 1.80	239.9	154.7	154.9	153.0	153.0	129.2	698	752	725	101	624	6.54 "	4.37 "	3.79		

(\*) Heat transfer through rarefied Argon gas layer.

TABLE. 2 Heat transfer equation for natural convection in enclosed horizontal layer.

- (1)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Nu} = 0.21 \text{ Ra}^{1/4} \\ \text{Nu} = 0.075 \text{ Ra}^{1/3} \end{array} \right. \begin{array}{l} (10^4 < \text{Gr} < 3.2 \times 10^5) \\ \dots\dots\dots \\ (3.2 \times 10^5 < \text{Gr} < 10^7) \end{array} \text{ Mc ADAMS}^{(3)}$
- (2)  $\text{Nu} = 0.048 \cdot \text{Ra}^{0.370} \dots\dots\dots \text{ Mc LAIN}^{(4)}$
- (3)  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Nu} = 0.068 \cdot \text{Gr}^{1/3} \\ \text{Nu} = 0.195 \cdot \text{Gr}^{1/4} \end{array} \right. \begin{array}{l} (\text{Gr} > 4 \times 10^5) \\ \dots\dots\dots \\ (1 \times 10^5 < \text{Gr} < 4 \times 10^5) \end{array} \text{ JACOB}^{(5)}$
- (4)  $\text{Nu} = 0.069 \text{ Ra}^{1/3} \cdot \text{Pr}^{0.074} \dots\dots\dots \text{ DROPKIN}^{(6)}$   
 $(1.5 \times 10^5 < \text{Ra} < 6.8 \times 10^8, 0.02 < \text{Pr} < 8750)$
- (5)  $\text{Nu} = 0.0529 \text{ Ra}^{0.347} \dots\dots\dots \text{ G. LEMERCIER}^{(7)}$



## 付 録

## (1) アルゴン、ヘリウムおよび SUS-304 の物性値

アルゴンおよびヘリウムについては、文献(9)に記載された下記の熱伝導率、粘性係数をもとに温度に関する4次式で近似した。物性値計算式をTABLE-A1に示す。

温 度 (C)		25	100	200	300	400	500
熱 伝 導 率 (cal/cm·S·°K)	He	$\times 10^6$ 369.6	431.2	509.3	583.2	652.0	717.3
	Ar	$\times 10^6$ 42.20	50.92	61.18	70.50	78.73	86.65
粘 性 係 数 ( $\mu$ P)	He	198.63	231.73	273.66	313.38	350.37	385.45
	Ar	226.32	273.07	328.11	378.06	422.18	464.66

SUS-304の熱伝導率は種々の文献に記載されているが、本実験では精密値が必要とされるため熱流束測定部と同一素材に同一加工履歴を加えた材料を作成し、レーザーフラッシング法で直接測定した<sup>(12)</sup>。使用した装置は真空理工(株)製、熱定数測定装置TC-3000M型である。測定結果をTPRCデータ(Purdue Univ.)<sup>(10)</sup> および動燃で多く採用されているEPICC材料データ(機械学会編)<sup>(11)</sup>とともにFig.A1に示す。

## (2) 試験容器側壁からの熱伝導の補正

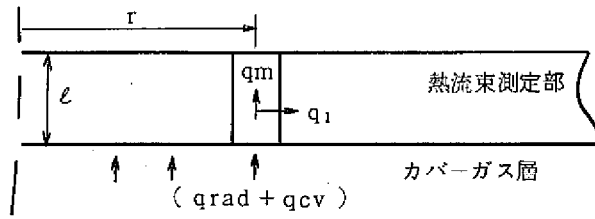
本実験では容器壁温の制御が十分ではなかったため、熱流束測定部において熱流は測定面に垂直とはならなかった。熱流束測定部の半径方向、伝熱量は次のように評価し、カバーガス空間からの熱伝達量を補正した。

(仮定) 次図において

- (1) カバーガス空間から測定部下面へ一様な熱流束( $q_{cv} + q_{rad}$ )が垂直に流入する。
- (2) 各体積要素において下面から流入した熱は半径方向( $q_1$ )と垂直方向( $q_m$ )とに分かれ、上下面温度差から実測した値は $q_m$ とする。

$$q_{cv} + q_{rad} = q_m + q_1$$

- (3)  $q_1$ は半径 $r$ によらず一定値である。



熱流束測定部の厚みを  $l$  とし、周方向温度は一様とすれば次の方程式が成立する。

$$\begin{cases} -\lambda \left( \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{d^2T}{dr^2} \right) = \frac{q_1}{l} & \dots\dots (A.1) \\ \text{B. C. } r=R \text{ のとき } T=T_R & \dots\dots (A.2) \end{cases}$$

これを解けば、

$$T = \frac{q_1}{4\lambda l} (R^2 - r^2) + T_R \quad \dots\dots (A.3)$$

すなわち温度分布は2次曲線となる。

中心と半径  $R$  の位置における温度  $T_R$  との  $\Delta T$  は、

$$\Delta T = T_{r=0} - T_{r=R} = \frac{q_1 R^2}{4\lambda l} \quad \dots\dots (A.4)$$

$$\therefore q_1 = \frac{4\lambda l \Delta T}{R^2} \quad \dots\dots (A.5)$$

したがって下面から流入した熱流束 ( $q_{rad} + q_{cv}$ ) は、

$$q_{rad} + q_{cv} = q_m + q_1 = q_m + \frac{4\lambda l \Delta T}{R^2} \quad \dots\dots (A.6)$$

測定された半径方向温度分布 (Fig.6 ~ Fig.9) において、温度分布の中心点とそれより 120 mm 離れた点の温度差  $\Delta T$  を求め、(A.6) に代入して測定値を補正した。

TABLE A1 Thermophysical Properties of Helium and Argon gas

(at 1 atm, 50-550°C)

$$y = a + bt + ct^2 + dt^3 + et^4$$

y : Thermophysical property, t : temperature (°C),

Thermo-physical property	unit	He					Ar					note
		a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	
$\lambda$ thermal conductivity	Kcal/mh°C	0.12145	0.33931	-0.17282	0.854	-0.413	0.14175	0.38694	0.21607	-0.1205	0.1143	slightly dependant on pressure
$a$ thermal diffusivity	m <sup>2</sup> /h	0.54761	0.35346	0.48216	-0.2467	-0.1862	0.63942	0.40863	0.73645	-0.18675	0.14735	inversly proportional to pressure
$\nu$ kinematic viscosity	10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /S	104.66	0.63051	0.9019	-0.1663	-0.4386	11.5745	0.08372	0.11099	-0.1147	0.16424	inversly proportional to pressure
$\mu$ viscosity	10 <sup>8</sup> KgS/m <sup>2</sup>	1.9071	0.45071	-0.65956	-0.27887	0.2217	2.1047	0.7518	-0.7340	0.6016	-0.8532	slightly dependant on pressure
$\gamma$ specific weight	Kg/m <sup>3</sup>	$\gamma = 48.778 \times \frac{1}{273 + t}$					$\gamma = 486.78 \times \frac{1}{273 + t}$					directly proportional to pressure
specific heat Cp	Kcal/Kg°C	1.242					0.1244					
atomic weight		4.0026					39.944					



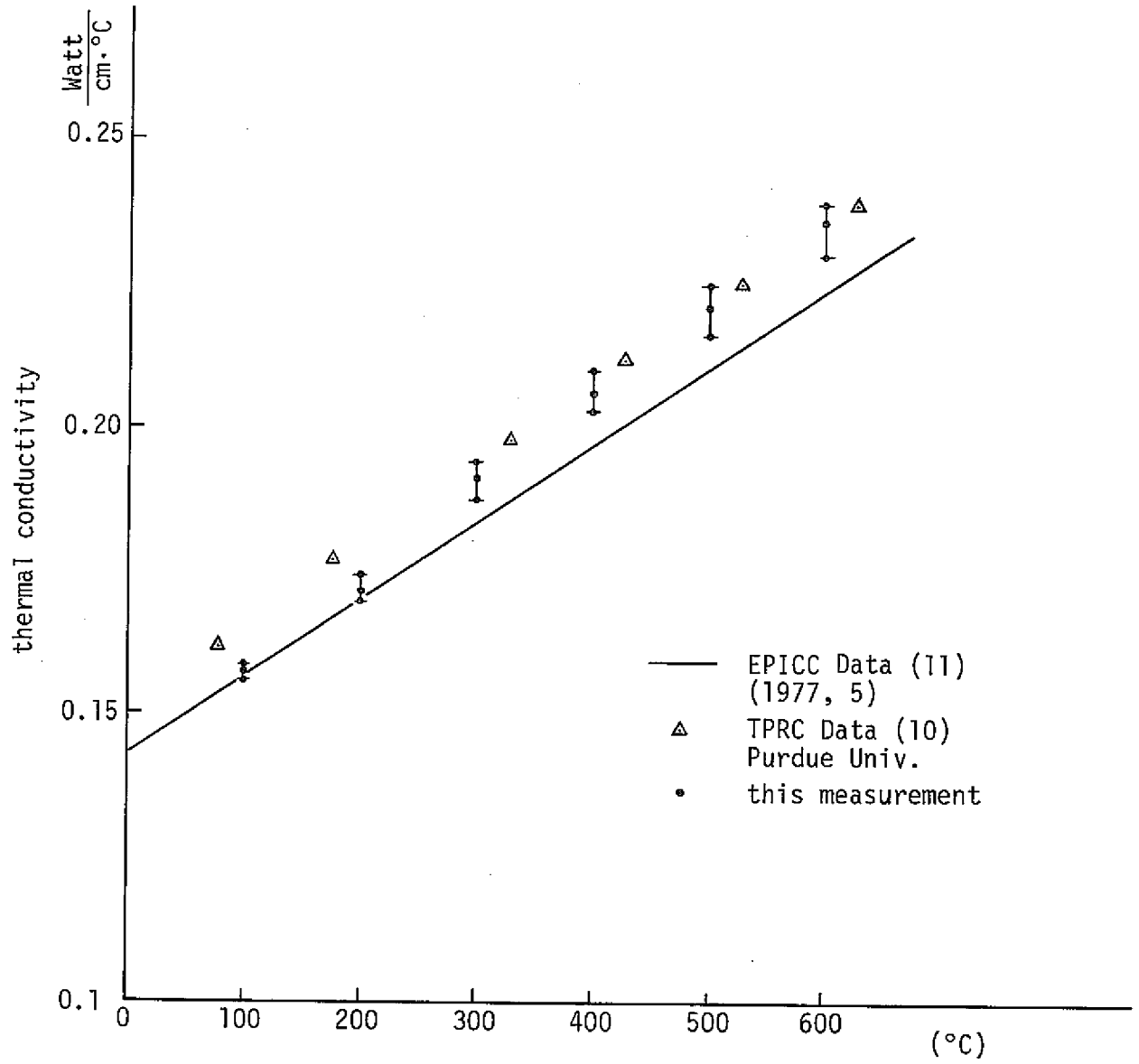


Fig. A1 Thermal Conductivity of SUS 304