

レーザフラッシュ法による $2\frac{1}{4}\text{Cr-IMo}$ 鋼の
熱伝導率測定実験報告書

1978年1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)

1978年1月

レーザーフラッシュ法による $2\frac{1}{4}$ Cr-IMo鋼の 熱伝導率測定実験報告書

久田	淳*
鎌田	滋**
竹内 孝	行***
栗山 正	明****
土屋 毎	雄*
川真田 和	雄*

要 旨

ナトリウム加熱蒸気発生器においては、ナトリウム側熱伝達率が高い等の理由から、全熱抵抗に占める伝熱管壁熱抵抗の割合が約30%～60%と非常に大きい。そのためSG性能試験結果の解析又は設計計算等を高い精度で実施するには、伝熱管の熱伝導率を厳密に求める必要がある。

この様な理由から、レーザーフラッシュ法を用いて蒸発器に使用されている $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の熱伝導率を測定した。試料は不安定現象試験装置および50MW SG 2号機伝熱管の残材から切り出したもの2種、安定化鋼管から切出したもの1種の合計3種について実施した。

試験結果としてデータのバラツキが極めて少なく、信頼性の高い測定値を得た。得られた実験式は次の通りである。

$2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼

$$\lambda = -3.0199 \times 10^{-5} T_K^2 + 2.9766 \times 10^{-2} T_K + 2.58071$$

Ni, No添加安定化 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼

$$\lambda = -2.7713 \times 10^{-5} T_K^2 + 2.7649 \times 10^{-2} T_K + 2.41383$$

得られた測定値はORNLのデータと良い一致を示した。

-
- * 大洗工学センター50MW蒸発器試験室
 - ** 同上囑託（三井造船）
 - *** 同上協力者（三井造船）
 - **** 無機材質研究所（現在、日本原子力研究所）

Jan., 1978

Measurement of Thermal Conductivity
of 2 1/4 Cr-1Mo steel by Laser Flash Method

Jun Kubota*, Shigeru Kamata*, Yoshiyuki Takeuchi*,
Mashaaki Kuriyama**, Tsuneo Tsuchiya*, and Kazuo Kawamata*

Abstract

In the sodium heated steam generator, the heat transfer coefficients are very high and thermal conduction through the tube walls contributes a large part (30~60%) of the total conduction between two fluids. Therefore, we must have available accurate value of thermal conductivity for analysis of all kinds of performance test results and design calculation and so on.

We measured thermal diffusivity and thermal conductivity of 2 1/4 Cr-1Mo steel by laser flash method. Test pieces are made from heat transfer tubes of Instability Test Rig (I.T.R.), 50MW Steam Generator (No. 2 evaporator) and Ni-Nb stabilized steel.

Results of measurement by laser flash method are agreed with the data of ORNL within 2~5%. Experimental equations of thermal conductivity by the least square method are as follows.

2 1/4 Cr-1Mo steel (standard steel)

$$\lambda = -3.0199 \times 10^{-5} T_K^2 + 2.9766 \times 10^{-2} T_K + 25.8071$$

Ni - Nb stabilized steel

$$\lambda = -2.7713 \times 10^{-5} T_K^2 + 2.7649 \times 10^{-2} T_K + 24.1383$$

* Oharai Engineering Center 50MW Steam Generator Section

** JAERI

目 次

1. はじめに	1
2. 測定原理と装置	2
3. 試験試料	6
4. 試験方法及びデータ整理方法	9
4.1 比熱の絶対測定	9
4.2 レーザーパワーメーターの校正	11
4.3 比熱の相対測定	11
4.4 温度伝導率，熱伝導率の測定	13
5. 試験結果	15
5.1 比熱測定結果	15
5.1.1 パワーメーター校正結果	15
5.1.2 比熱の絶対測定結果	15
5.1.3 比熱の相対測定結果	21
5.2 温度伝導率及び熱伝導率の測定結果	21
6. おわりに	37
文 献	38
付 録 テストピース作成要領	39

1. はじめに

ナトリウム加熱蒸気発生器（以下SG）においては，ナトリウム側熱伝達率が良い等の理由から，全熱抵抗に占める伝熱管壁抵抗の割合が30%～60%と非常に大きい。そのためSG性能試験結果の解析，設計計算等を高い精度で実施するには伝熱管の熱伝導率を厳密に知る必要がある。

今回，科学技術庁無機材質研究所（筑波研究学園都市）の御好意により同研究所所有のレーザーフラッシュ法による熱定数測定装置を用いて蒸発器に使用されている $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の熱伝導率を測定した。試料は動燃事業団，大洗工学センターの不安定現象試験装置（略称ITR）および50MW SG 2号機の残材から切り出したもの2種，Ni-Nb添加安定化鋼管から切り出したもの1種の合計3称について実施した。

レーザーフラッシュ法は現在のところ，特に高温領域において最も測定精度が高いといわれており，米国の規格にも採用されているものである。

本報告書では，測定原理と装置および試験試料の説明をそれぞれ第2章と第3章に，試験方法及びデータ整理方法を第4章に示した。試験結果を第5章に示したが得られた測定値を用いて最小2乗法により実験式を作成した。

2. 測定原理と装置

レーザーフラッシュ法による熱拡散率の測定については文献1に詳細に説明されている。ここでは、文献1から抜粋して、本測定で使用した測定原理と装置について述べる。

測定の手順は、直径8～10mm、厚さ1～3mmの円盤状試料をあらかじめ所定の温度に保持しておき、試料前面をレーザーフラッシュで瞬時的(1ms以下)に照射、加熱する。これと同時に試料裏面の温度変化を熱電対または光電素子でキャッチし、その温度履歴を解析して、熱拡散率を求める。

測定装置の概略を図2.1に示す。又、装置の写真を図2.2に示す。

レーザーヘッドより発生されたパルス状のレーザー光は、半透形反射鏡により、1部、フォトセル型のレーザー出力計に分岐されるが、殆んどは全反射鏡により方向を変えられて、テストピースへ到達し、テストピース加熱源として消費される。

テストピースは、断熱を考慮されたホルダーに固定されるが、これ等は、対流伝熱による熱放散を抑えるために、高真空($\sim 10^{-5}$ Torr)に保持された炉の中に設置されている。

加熱炉は、熱定数計測温度を種々変化させるために、外部にヒーターが布設され、印加電圧調整等により炉内温度を一定に保つ事が出来る。

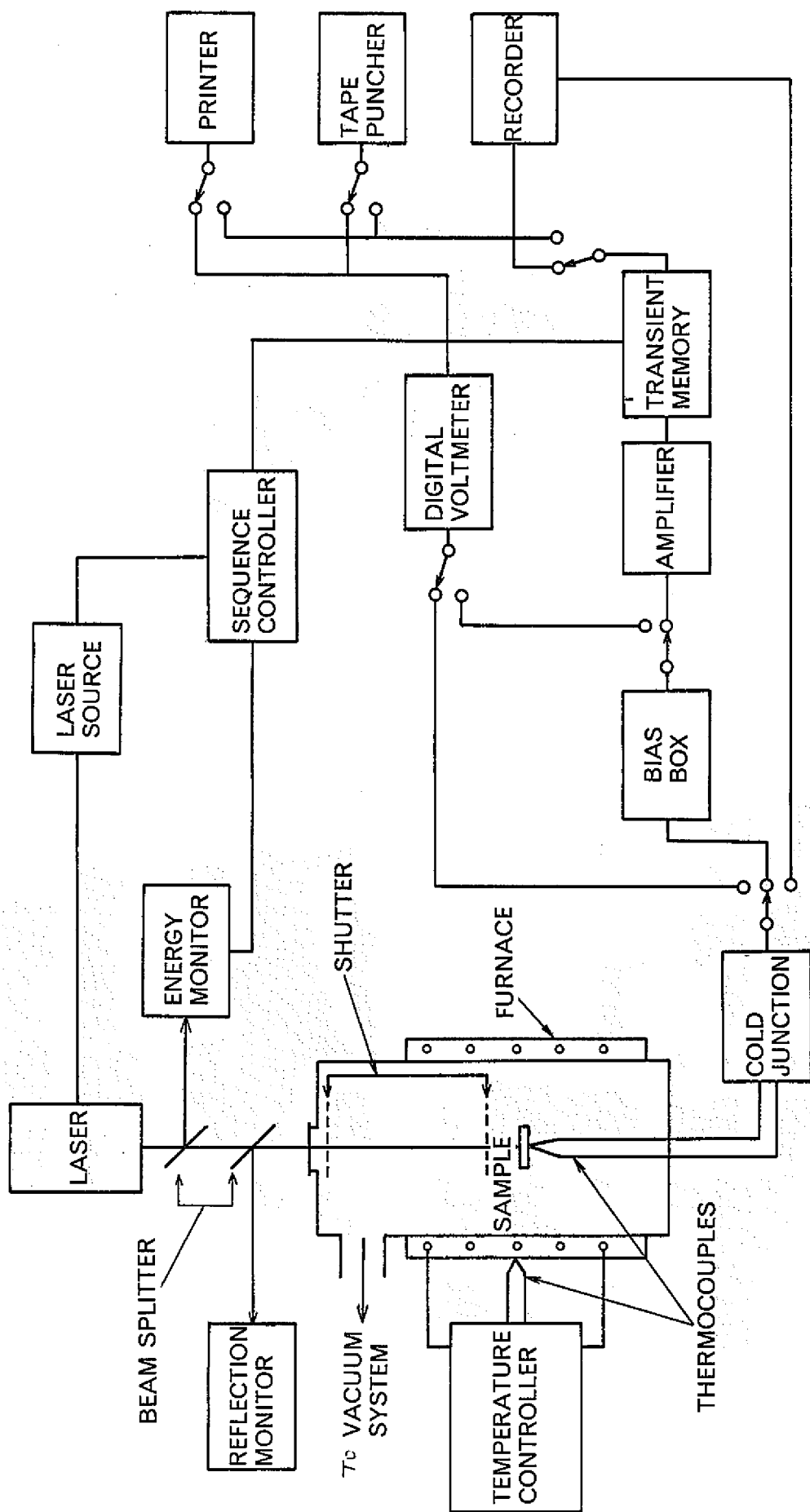
テストピース裏面には、50 μ 程度の熱電対素線が点溶接されており、計測された裏面温度は、プリアンプにて増幅された後、デジタルメモリー+レコーダーにより記録される。

温度の測定結果を基に、非定常熱伝導解析等により、テストピースの温度伝導率、比熱が求められる。

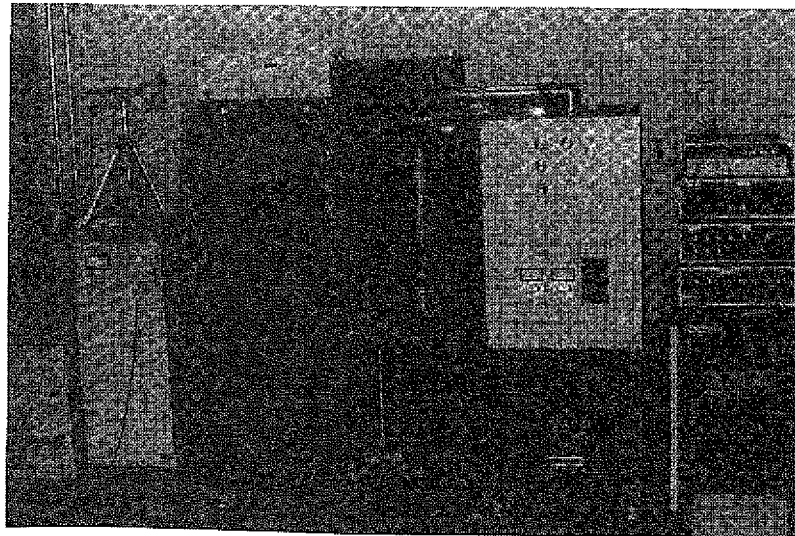
ここで、

- (1) 試料が断熱的に保たれている、すなわち試料からの熱リークがない。
- (2) レーザー光の試料への照射時間(パルス幅)は、試料裏面の温度上昇に要する時間にくらべて十分に短い。
- (3) 試料に照射されるレーザー光のエネルギー密度が一様で、かつ表面での光の吸収も一様である。

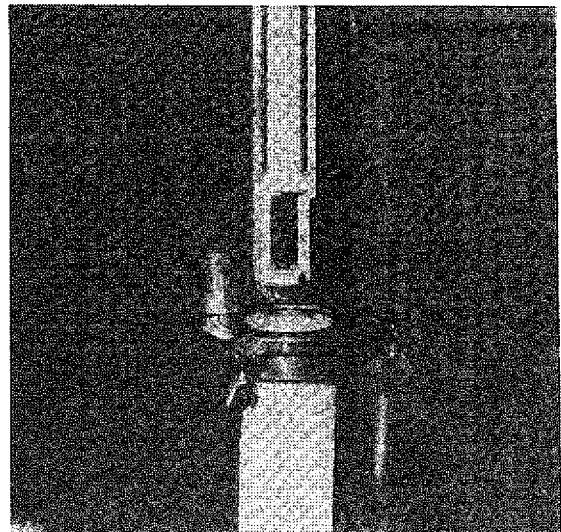
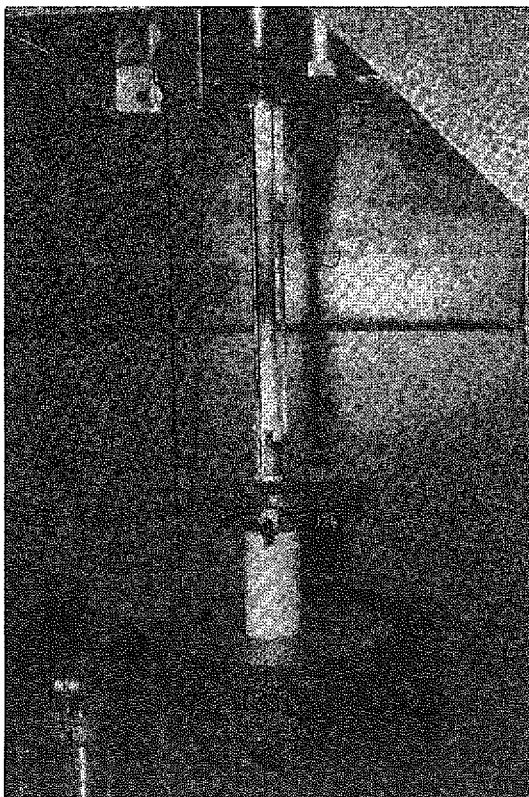
という条件のもとに1次元熱伝導方程式を解くと、試料表面よりxの位置での時間tに



2.1 SCHEMATIC DIAGRAM



(a) General view



(b) Test Section

⊠ 2.2 A Photograph of Laser Flash Method Rig

おける温度履歴 $T(x, t)$ について、次の解が得られる。

$$T(x, t) = \frac{Q}{\rho C_p L} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2}{L^2} K t\right) \right] \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 K : 熱拡散率 ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$)

Q : 吸収エネルギー密度 (J cm^{-2})

ρ : 試料の密度 (g cm^{-3})

C_p : 比熱容量 ($\text{J g}^{-1} \text{K}^{-1}$)

L : 試料の厚さ (cm)

である。

レーザー照射後、試料裏面 ($x=L$) の温度上昇が最高値 $4T_{\text{max}}$ の $\frac{1}{2}$ に達するまでの時間を $t_{\frac{1}{2}}$ (sec) として 2.1 式を変形すれば次式が得られる。

$$K = \frac{1.37 L^2}{\pi^2 t_{\frac{1}{2}}} (\text{cm}^2 \text{s}^{-1}) = \frac{0.493 L^2}{\pi^2 t_{\frac{1}{2}}} (\text{m}^2 / \text{h r}) \dots\dots\dots (22)$$

熱拡散率 K が求まると、熱伝導率 λ ($\text{kcal/m hr } ^\circ\text{C}$) は比熱 C_p ($\text{kcal/kg } ^\circ\text{C}$) と比重量 γ (kg/m^3) より、2.3 式で求まる。

$$\lambda = K C_p \gamma \dots\dots\dots (23)$$

3. 試 験 試 料

本測定に用意した試験試料を表 3.1 に示す。

ここで実際に測定したのは C-1, D-1, E-2 だけであり, 他は時間の制約によって実施できなかった。

各試験試料の成分表を表 3.2 に示す。

試験片の製作は次の 2 段階に分けて実施した。

(1) 素材加工

実際の伝熱管から切り出して製作した。製作要領の詳細に関しては付録に示した。製作後の寸法測定結果を表 3.3 に示す。

(2) 測定用前処理

円板状に成形されたテストピースは, 計測現場において洗浄, 受光面処理, 熱電対取付を行った。

(a) 洗浄処理

素材加工後, 防錆油の塗布がされているので, アセトン等により脱脂洗浄, 乾燥を行う。

(b) 表面処理

加熱源はレーザー光によって与えられるので, レーザー光を温度条件に関係なく, 全体均一に吸収するために, テストピース受光面に d.g.f (dry grafite film) を真空蒸着により均一に付着させる。(但し, 比熱の絶対測定時は Glassy Carbon をシリコングリースにより付着した。)

(c) 熱電対取付

テストピース裏面の温度計測のため熱電対を設置する。熱電対は起電力の大きなクロメル・コンスタンタンとし放熱, 応答性を考慮して 50μ の素線としテストピース裏面にパーカッションウェルディングにて付着させる。

表 3.1

T/P №	来 歴	熱 処 理	個 数
C-1~3	I T R用伝熱管	プレス加工後施行	3
C-4~6	同 上	施行せず	3
D-1~3	50M 2号機用伝熱管	プレス加工後施行	3
E-1~3	安定化鋼	"	3

表 3.2 Chemical Composition of the test pieces (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mn	Nb
C-1~3	0.10	0.40	0.46	0.018	0.009	—	—	2.20	0.97	—
D-1~3	0.11	0.44	0.48	0.020	0.007	—	—	2.18	0.96	—
E-1~3	0.04	0.34	0.61	0.008	0.015	—	0.54	2.30	1.03	0.61

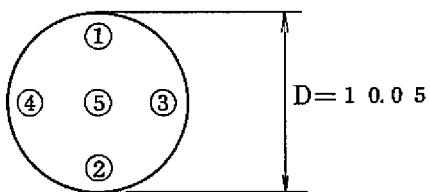
ITR-78-0002

表 3.3 measured value of thickness of the test pieces

Test Piece No.		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	measured base
A	1	+23	+25	+23	+24	+25	2.190 (mm)
	2	+24	+18	+18	+25	+20	
	3	+28	+30	+28	+29	+30	
B	1	+07	+04	+01	+11	+05	2.190 (mm)
	2	+09	+06	+11	+03	+08	
	3	-30	-23	-26	-29	-27	
C	1	-15	-11	-17	-16	-13	2.190 (mm)
	2	-16	-09	-08	-23	-12	
	3	-09	-01	-07	-04	-04	
C	4	-14	-06	-06	-12	-05	2.190 (mm)
	5	-35	-34	-36	-34	-33	
	6	-26	-04	-17	-11	-13	
D	1	-16	-17	-16	-15	-16	2.190 (mm)
	2	-16	-14	-13	-18	-15	
	3	-29	-31	-45	-16	-30	
E	1	-11	-02	-05	-06	-05	1.830 (mm)
	2	-06	-10	-08	-09	-10	
	3	-04	-04	-01	-06	-04	

(unit : 1 / 1000 mm)

measured point



ITR-78-0003

4. 試験方法及びデータ整理方法

次に実際に行った試験手順にしたがって試験方法及びデータ整理方法を説明する。

計測は大別して、次下の3プロセスに分けて実施した。

- (1) 比熱の絶対測定
- (2) 比熱の温度依存性測定
- (3) 温度伝導率の測定 (各温度について)

又、計測に際しての基本方針は次の通りである。

- (1) 計測温度は、常温、100℃～500℃迄100℃毎に5点 計6点とする。
- (2) 1つの条件で、3～4回計測を繰り返す。
- (3) 1つの素材につき、3個のテストピースが作製されているが、時間の制約より、1個のテストピースについてのみ計測を行う。

データの信頼性に問題有る場合は、後日追加テストを行う。

今回の計測の全体の流れを図4.1に示す。以下各項目別に説明する。

4.1 比熱の絶対測定

常温にて比熱を直接計測する。

パルス状(1ms程度)のレーザー光を照射されたテストピースの裏面温度は、図4.2の様な挙動を呈する。これより、放熱がない時のテストピース温度上昇値($\Delta\theta_M$)を外挿により求め式(4.1)により、テストピース比熱を求める。

尚計測は、デジタル電圧計(DVM)により0.5sec毎に行いプリンターに印字した。比熱は次式により求められる。

$$C_P = \frac{1}{m} \left\{ \frac{Q}{\Delta\theta_M} - (C_P' \cdot m' + C_P'' \cdot m'') \right\} \dots\dots\dots (4.1)$$

ここで、

- m : ラストピース質量
(精密天秤により計測。但し熱電対質量は微少として無視した。)
- Q : 受熱量
(レーザーパワーメーターにより計測。尚、レーザーパワーメーターの校正については、次頁にて記述)

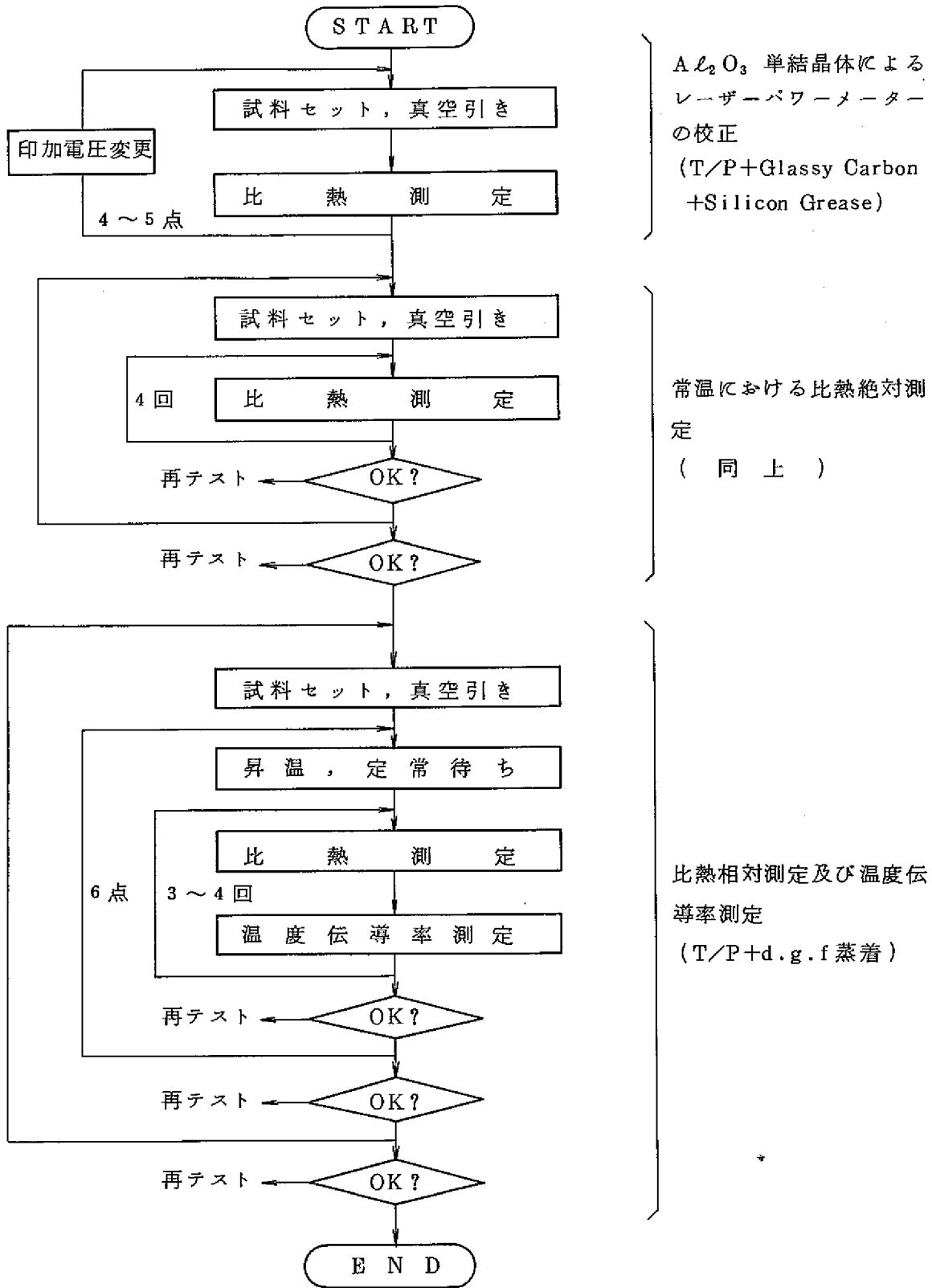


図 4.1 熱定数実測の概要

ITR-78-0004

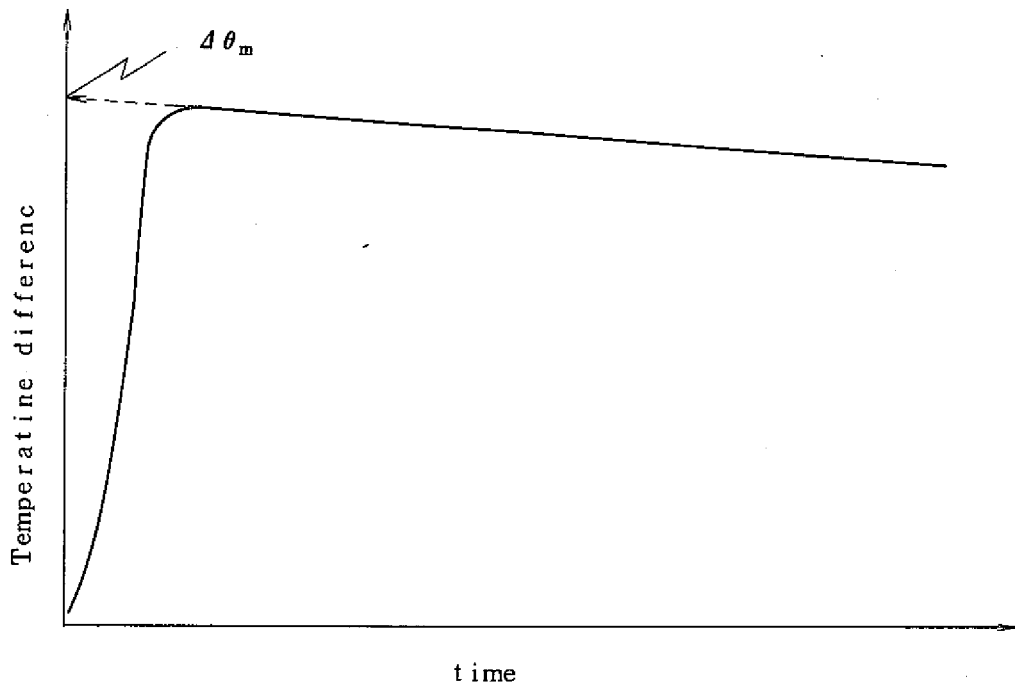


図 4.2 Temperature decay curve of the back face of specimen on the specific heat measurement

C_p', m' : グラッシーカーボン熱容量
 C_p'', m'' : シリコングリース熱容量

尚, グラッシーカーボン, シリコングリース質量は精密天秤により実測する。

4.2 レーザーパワーメーターの校正

前項において, 比熱を正確に計測するためには, 受熱量を正確に求めておかねばならない。このため, 比熱が充分正確に判っている Al_2O_3 単結晶のテストピースを使って前項と同一な, 計測を行い, 得られた $\Delta\theta$ より式 (4.2) により, 受熱量を算出する。レーザー電圧を, 種々変化させて (5.3~5.7 kV) 計測する事により, 図 4.3 の様な校正曲線を得る。

$$Q = (C_p \cdot m + C_p' \cdot m' + C_p'' \cdot m'') \Delta\theta \dots\dots\dots (4.2)$$

4.3 比熱の相対測定

比熱の温度依存性を計測するものである。相対測定の場合は 4.1 項で述べた常温での絶対測定の場合とレーザー光の照射法が異なる。その様子を図 4.4 に示す。これは絶

対測定の場合は熱量を正確に求めることを優先し、相対測定の場合は、1次元熱流の実現を優先するためである。

そのため、高温領域での測定値は相対値となるが、常温での絶対測定値を使用して温度依存曲線を補正し、絶対値を求める。

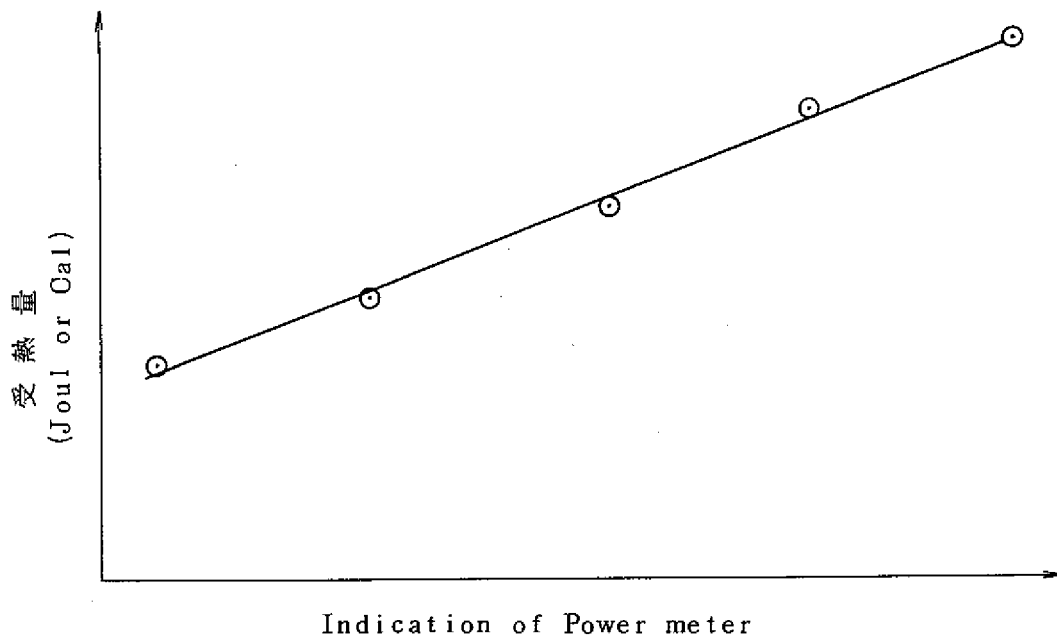


図 4.3 Calibration Curve of Power meter

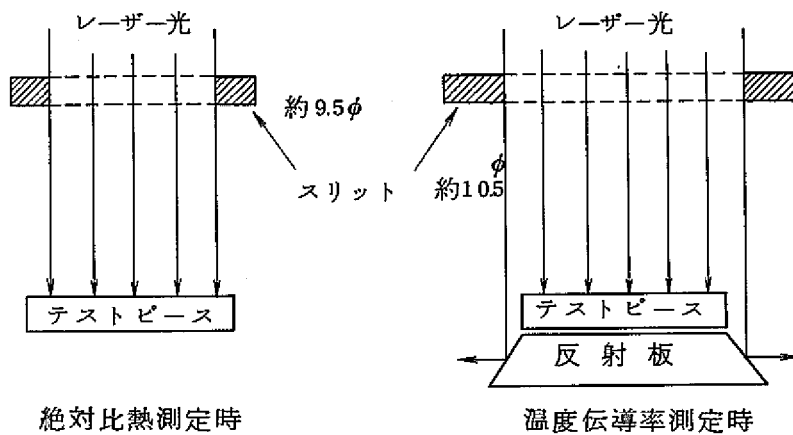


図 4.4 レーザー光照射法

4.4 温度伝導率，熱伝導率の測定

温度伝導率および熱伝導率の測定法については2項で詳しく述べたのでここでは省略し，実際の測定例を図4.5に示す。

なお，レーザー光照射後のテストピース温度変化は非常に速い現象であるので計測に当っては，熱電対指示値をDigital Memoryに一旦ストアして試験後図4.5の様にレコーダーに画かせ $t_{\frac{1}{2}}$ を続取り取って温度伝導率の決定を行った。

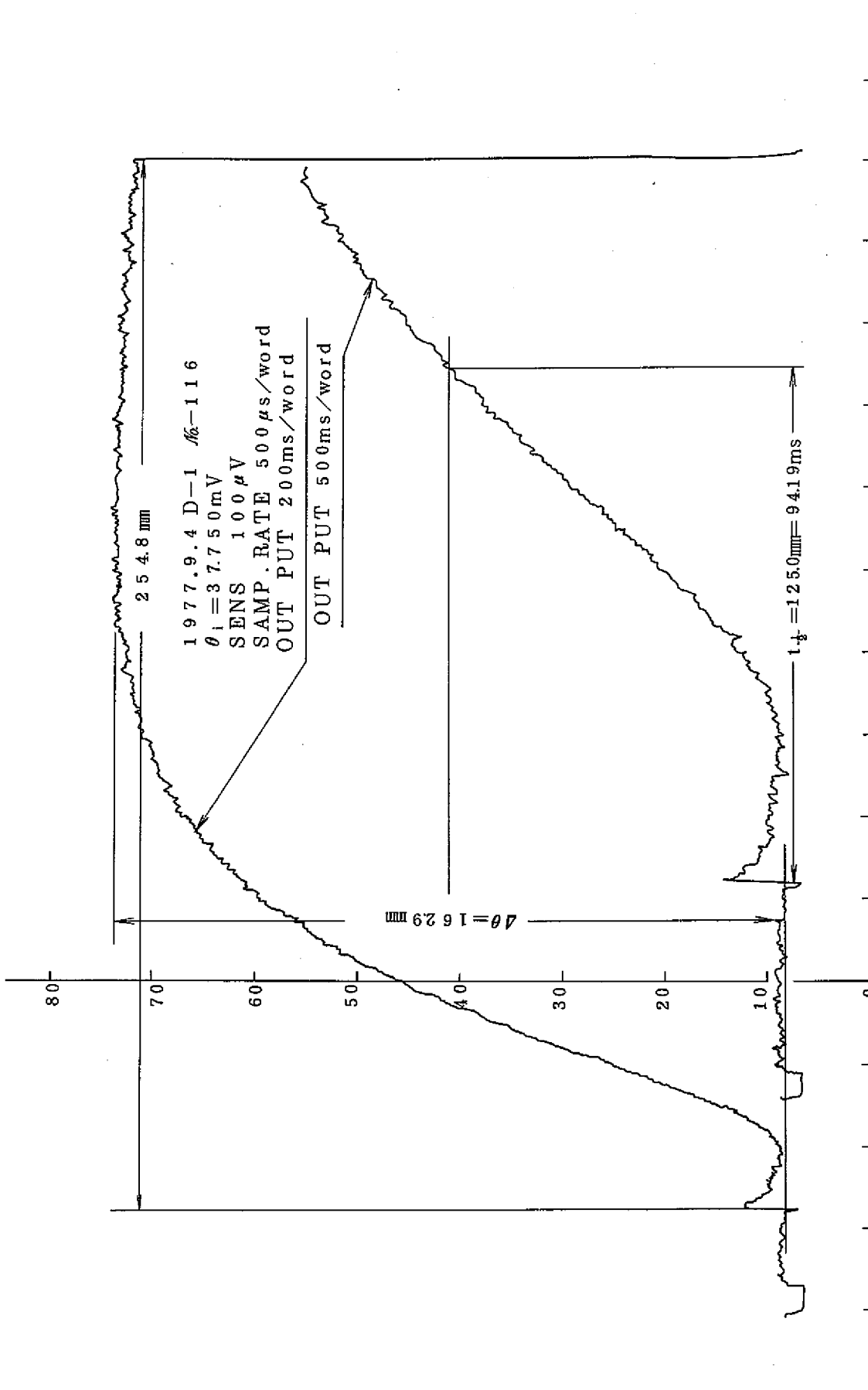


图 4.5 An Example of measurement of thermal diffusivity (r) by Laser Flash Method

ITR-78-0005

5. 試験結果

5.1 比熱測定結果

5.1.1 パワーメーター校正結果

結果の一覧を表 5.1 にパワーメーター指示値と受熱量の関係を図 5.1 に示す。
これより、パワーメーター換算式は、式 (5.1) にて求められる。

$$Q = 2.91 \cdot 0 \times 10^{-4} P + 0.0180 \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

$\left\{ \begin{array}{l} Q : \text{受熱量 (Joul)} \\ P : \text{パワーメーター指示値 (デジタル値)} \end{array} \right.$

図 5.1 より明らかな如くレーザーパワーメーターは±0.5% 以上の精度にて受熱量を把握する事が可能である。

5.1.2 比熱の絶対測定結果

試験結果を表 5.2 に示す。表中 D-1 №5~7 は再現性確認のために行ったものである。

本表に示された試験結果は各鋼種毎のデータのバラツキが 0.3%~0.7%、又再現性は約 0.7% と精度及び安定性の高いデータであり、充分信頼出来ると考えられる。

後述する相対測定値の整理のために得られたデータの平均値を算出し以下に示す。

資料 T.P. №	C-1	E-2	D-1	A-1	E-1 (再)
温度 (K)	298.37	298.56	298.14	298.40	299.06
比熱 (Cal/g·K)	0.1084	0.1060	0.1051	0.1027	0.1063

表 5.1 Calibrated Results of Power meter

Sample Name : Al_2O_3 Sample Weight: 0.66345 G.C=0.02638g S.G=0.0042g
 G.C(C_p) : 0.6920 (290K) S.G: 1.50 (290K)
 0.7209 (300K) Δ_{10} =0.02890 1.52 (300K) Δ_{10} =0.02

No	$T_i + \frac{1}{2}\Delta Q$ Tamp (K)	ΔQ	PM	RM	RM/PM	$Al_2O_3O_3$ C_p	(G.C) C_p	(S.G) C_p	$C_p \cdot W$ (Al_2O_3)	$C_p \cdot W$ (G.C)	$C_p \cdot W$ (S.G)	Jou \mathcal{L} Q	Ca \mathcal{L} /gK C_p
1	298.18	2.827	5174 (5.7kV)	4171	0.8062	0.7749	0.7156	1.516	0.5141	0.0189	0.0064	1.5248	
2	298.15	2.542	4700 (5.6kV)	3789	0.8062	0.7748	0.7156	1.516	0.5141	0.0189	0.0064	1.3709	
3	298.13	2.287	4177 (5.5kV)	3365	0.8056	0.7748	0.7155	1.516	0.5140	0.0189	0.0064	1.2333	
4	298.02	1.998	3639 (5.4kV)	2928	0.8046	0.7746	0.7152	1.516	0.5139	0.0189	0.0064	1.07732	
5	297.91	1.731	3154 (5.3kV)	2540	0.8053	0.7743	0.7149	1.516	0.5137	0.0189	0.0064	0.9329	
6	298.17	1.764	3193 (5.3kV)	2571	0.8052	0.7749	0.7156	1.516	0.5141	0.0189	0.0064	0.511	

ITR-78-0006

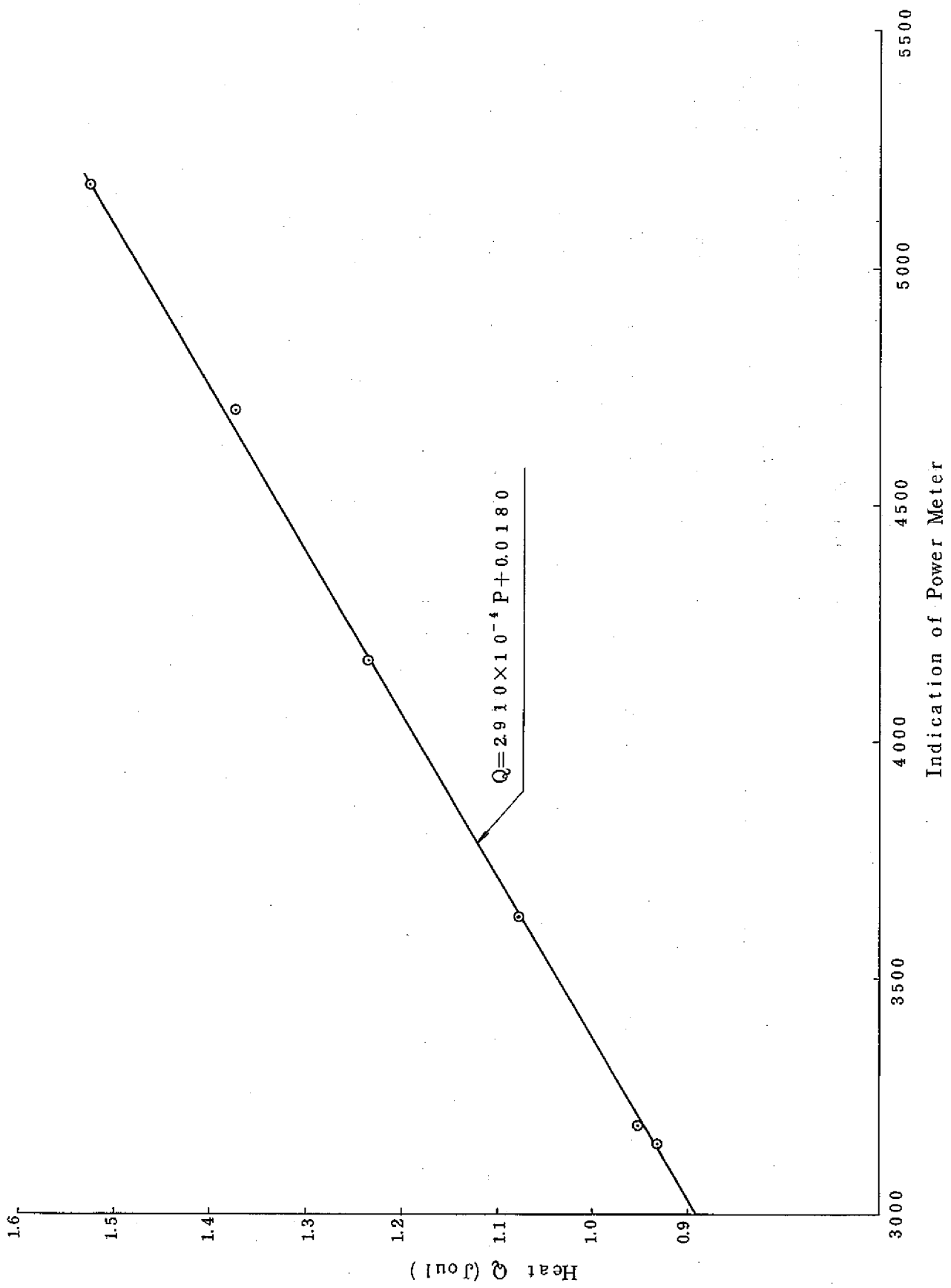


Fig 5.1 Calibrated Results of Power Meter

表 5.2 (1) Measured Values of Specific Heat

Sample Name : C-1 G.C Weight : 0.02638g Cp (G.C) : 0.6920 (290K) Cp (G.C) : 1.50 (290K)
 Sample Weight : 1.35089g S.G Weight : 0.00502g 0.7209 (300K) Δ Cp=0.02890 1.52 (290K) Δ Cp=0.02

No	Mean Temp (K)	$\Delta\theta$	P.M	R.M (RM/PM)	Q (JouL)	Cp (G.C)	Cp (S.G)	Q/ $\Delta\theta$	Cp · W (G.C)	Cp · W (S.G)	Cp (JouL/gK)	Cp (Cal/gK)
1	298.09	2.086	4514	2717 (0.6019)	1.3316	0.7154	1.516	0.6384	0.0189	0.0076	0.4530	0.1082
2	298.32	2.101	4551	2750 (0.6043)	1.3423	0.7160	1.517	0.6390	0.0189	0.0076	0.4534	0.1083
3	298.49	2.112	4577	2782 (0.6078)	1.3499	0.7165	1.517	0.6393	0.0189	0.0076	0.4536	0.1084
4	298.59	2.026	4394	2680 (0.6099)	1.2967	0.7168	1.517	0.6400	0.0189	0.0076	0.4542	0.1085
1	298.41	2.649	4679	4897 (1.0466)	1.3796	0.7163	1.517	0.5208	0.0189	0.0046	0.4430	0.1058
2	298.47	2.562	4524	4786 (1.0579)	1.3345	0.7165	1.517	0.5209	0.0189	0.0046	0.4431	0.1059
3	298.68	2.612	4624	4938 (1.0679)	1.3636	0.7171	1.517	0.5221	0.0189	0.0046	0.4441	0.1061
4	298.68	2.625	4649	4970 (1.0690)	1.3709	0.7171	1.517	0.5222	0.0189	0.0046	0.4442	0.1061

Sample No E-2 S.G Weight 0.00301g Power Meter Q=2910×10⁻⁴P+0.0180
 Sample Weight 1.12272g

ITR-78-0008

表 5.2 (2) Measured Values of Specific Heat

G.C Weight: 0.02638 Cp(G.C): 0.6920 (290 K) $\Delta C_{P10} = 0.02890$ Cp(S.G): 1.50 (290 K) $\Delta C_{P10} = 0.02$
 Sample Name: D-1 Sample Weight: 1.34228 S.G Weight: 0.00328

No	Mean Temp (K)	$\Delta \theta$	P.M	R.M (PM/RM)	Q (JouL)	Cp (G.C)	Cp (S.G)	Q/ $\Delta \theta$	Cp · W (G.C)	Cp · W (S.G)	Cp (JouL/gK)	Cp (Cal/gK)
1	297.96	2.233	4656	2739 (0.5883)	1.3729	0.7150	1.516	0.6147	0.0189	0.0050	0.4402	0.1052
2	298.27	2.226	4636	2751 (0.5934)	1.3671	0.7159	1.517	0.6142	0.0189	0.0050	0.4398	0.1051
3	298.45	2.158	4478	2670 (0.5962)	1.3211	0.7164	1.517	0.6122	0.0189	0.0050	0.4383	0.1047
4	298.57	2.143	4480	2665 (0.5949)	1.3217	0.7168	1.517	0.6168	0.0189	0.0050	0.4418	0.1055
1	298.07	2.107	4368	2653 (0.6074)	1.2891	0.7153	1.517	0.6120	0.0189	0.0076	0.4285	0.1024
2	298.49	2.158	4498	2736 (0.6083)	1.3269	0.7165	1.517	0.6150	0.0189	0.0076	0.4307	0.1029
3	298.48	2.153	4489	2746 (0.6117)	1.3243	0.7165	1.517	0.6152	0.0189	0.0076	0.4308	0.1029
4	298.56	2.148	4469	2735 (0.6120)	1.3185	0.7167	1.517	0.6139	0.0189	0.0076	0.4299	0.1027

Sample Name A-1 Sample Weight 1.36627 S.G Weight 0.00503g Power Meter Q=291 × 10⁻⁴ P+0018

表 5.2 (3) Measured Values of Specific Heat

G.C Weight: 0.02638g Cp(G.C): 0.6920 (290K) $\Delta C_{P10} = 0.02890$ Cp(S.G): 1.50 (290K) $\Delta C_{P10} = 0.02$
 Sample Name: D-1 (Remeasured) Sample Weight: 1.34228g S.G Weight: 0.0417g

$\frac{1}{2}$	Mean (K) Temp	$\Delta \theta$	P.M	R.M (RM/PM)	Q (JouL)	Cp (G.C)	Cp (S.G)	Q/ $\Delta \theta$	Cp · W (G.C)	Cp · W (S.G)	Cp (JouL/gK)	Cp (Cal/gK)
5	299.03	2.134	4502	2597 (0.5769)	13.281	0.7181	1.518	0.6223	0.0189	0.0063	0.4448	0.1063
6	299.01	2.166	4571	2640 (0.5776)	13.482	0.7180	1.518	0.6226	0.0189	0.0063	0.4450	0.1063
7	299.15	2.134	4497	2604	13.266	0.7184	1.518	0.6217	0.0190	0.0063	0.4444	0.1062

5.1.3 比熱の相対測定結果

比熱の相対測定結果を表 5.3 および図 5.2 に示す。図 5.2 には絶対値測定温度における比熱の相対値（最小自乗法による相対値温度依存式による計算値）と絶対値との比が全温度領域にわたって等しいとして補正した補正值も実線で示している。

得られた補正值を表 5.3 に示す。これより鋼種による相違はないと考え、これらのデータを用いて最終的な比熱の実験式を最小二乗法により得た実験式を次式に示す。

$$C_p = 3.7252 \times 10^{-2} + 3.7234 \times 10^{-4} T \\ - 5.8750 \times 10^{-7} T^2 + 3.9256 \times 10^{-10} T^3$$

5.2 温度伝導率及び熱伝導率の測定結果

温度伝導率 K ，及び熱伝導率 λ の測定結果を表 5.3 及び図 5.3，図 5.4 に示す。

図 5.3 及び図 5.4 には ORNL²⁾，ASME 等のデータも同時に示した。図より以下の事が分かる。

- (1) 温度伝導率，熱伝導率共にデータのバラツキは最大 2.5% と小さく，精度の高い実験値が得られた。
- (2) 50MW SG 2号機伝熱管 (D-1) と不安定現象試験装置伝熱管 (O-1) の温度伝導率及び熱伝導率の値は共に 200°C 以下の低温領域を除いてよく一致している。これより同一メーカーであればロットのちがひによる温度伝導率，熱伝導率の相異はほとんど無いといえる。
- (3) 安定化鋼は他の 2 種に比べて温度伝導率，熱伝導率共に 5~6% 程度低い値を示した。安定化用に添加されている Ni, Nb の影響と思われる。
- (4) ORNL データは，今回の実験値に対して 2~3% 程度低い値となっているが大差はなく温度依存特性も同一である。
- (5) 50MW SG 使用値 (SG 静特性解析コード POPAI 組込み値) は 200°C ~ 300°C の低温域で最大 10% と大きく相違するが，最つとも多く使用する 400°C 近傍では大きな差はない。

得られた実験値から最小二乗法を用いて実験式を作成した。測定結果を整理して表 5.5 及び表 5.6 に，実験式を表 5.7 に示す。

表 5.3 Dependency of Temperature of Specific Heat (Corrected Value)

TEMP (°K) TEST DIECE	300	350	400	450	500	550
C-1	1.086E-01	1.142E-01	1.191E-01	1.236E-01	1.279E-01	1.322E-01
D-1	1.053E-01	1.111E-01	1.159E-01	1.201E-01	1.240E-01	1.277E-01
E-2	1.062E-01	1.120E-01	1.168E-01	1.211E-01	1.250E-01	1.290E-01
	600	650	700	750	800	
	1.367E-01	1.418E-01	1.477E-01	1.546E-01	1.628E-01	
	1.317E-01	1.362E-01	1.415E-01	1.478E-01	1.555E-01	
	1.334E-01	1.386E-01	1.449E-01	1.525E-01	1.620E-01	

ITR-78-0011

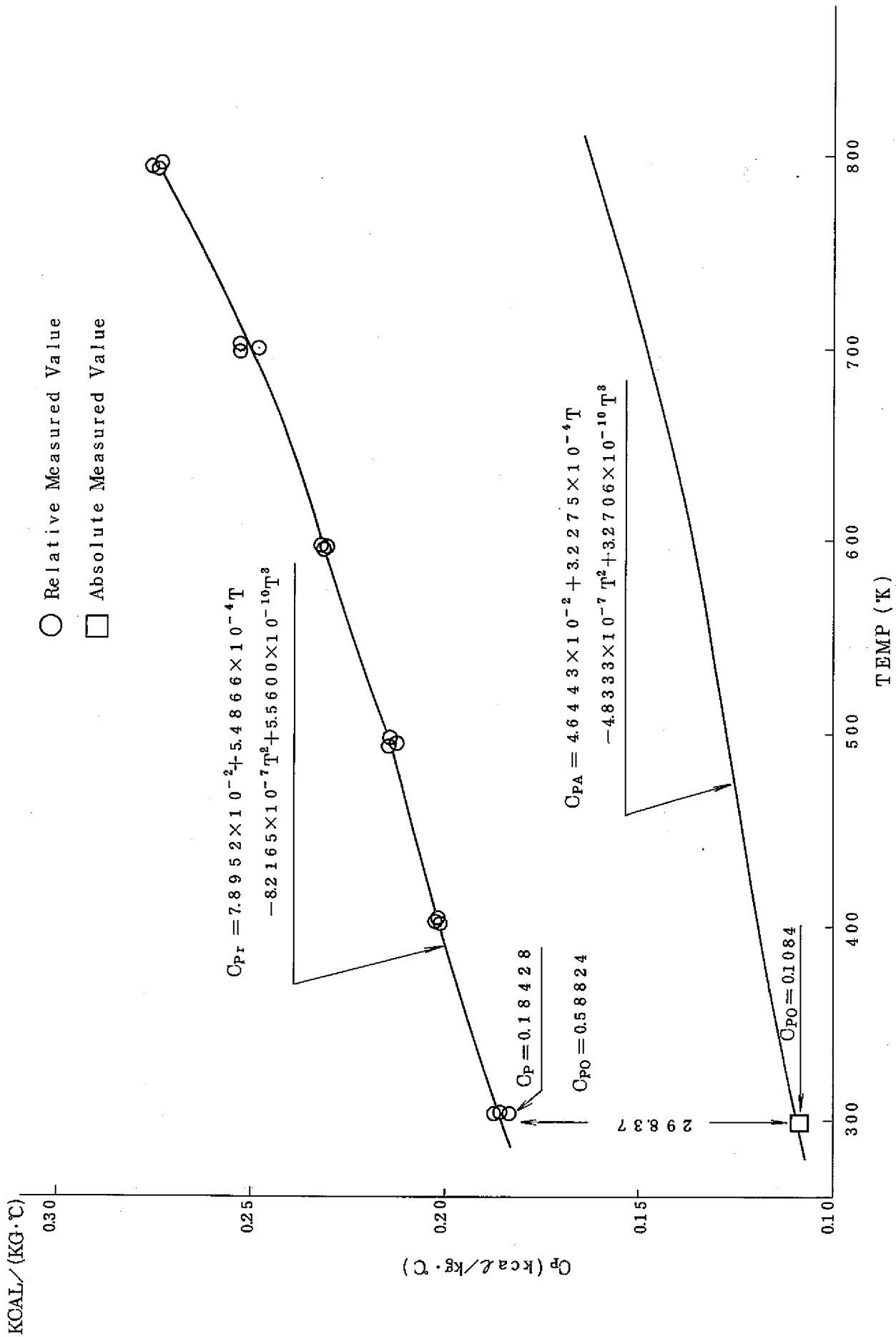


表 5.2 (1) Measured Result of Specific Heat (Sample No. C-1)

ITR-78-0012

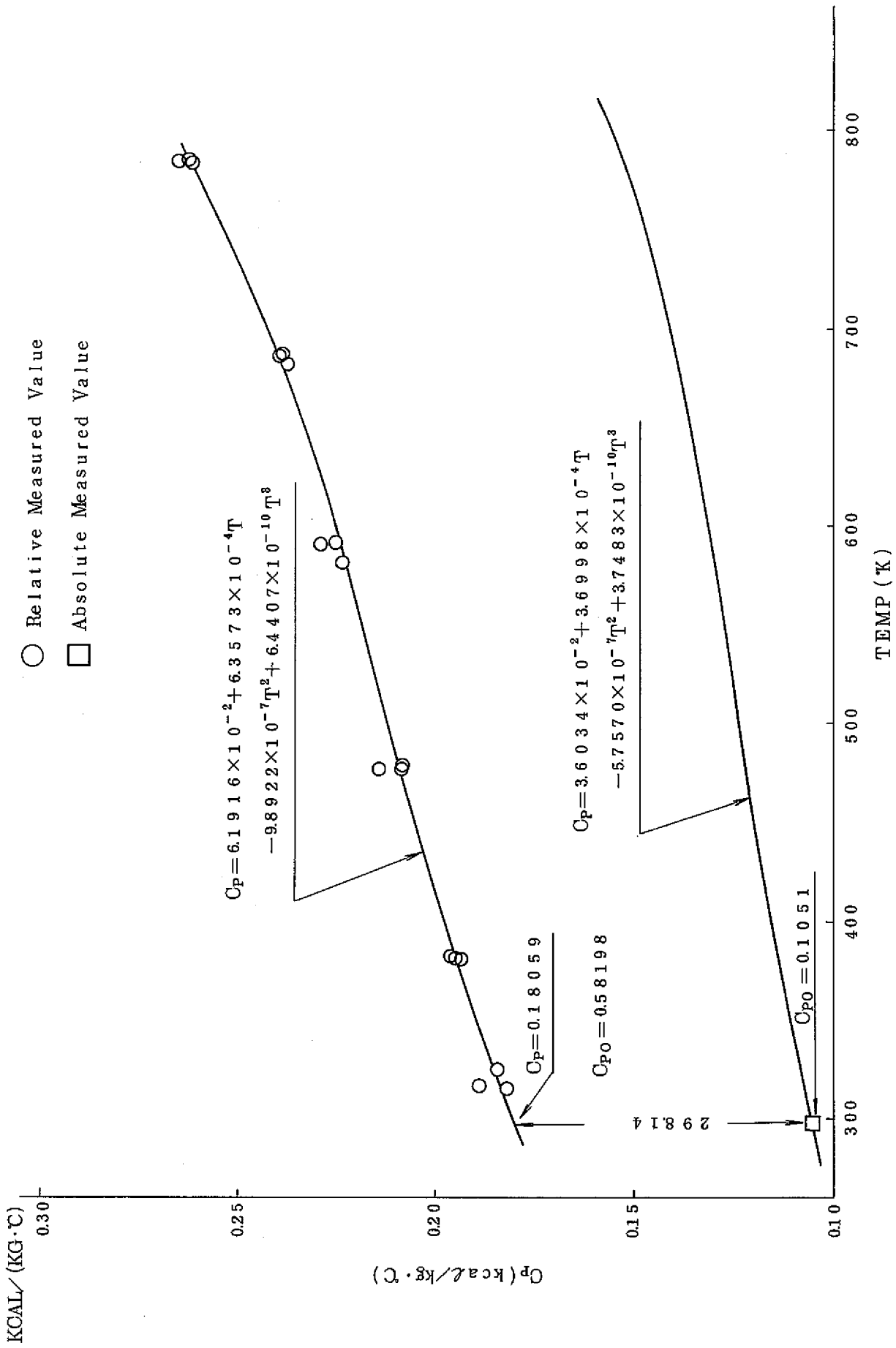


表 5.2 (2) Measured Result of Specific Heat (Sample No. D-1)

ITR-78-0013

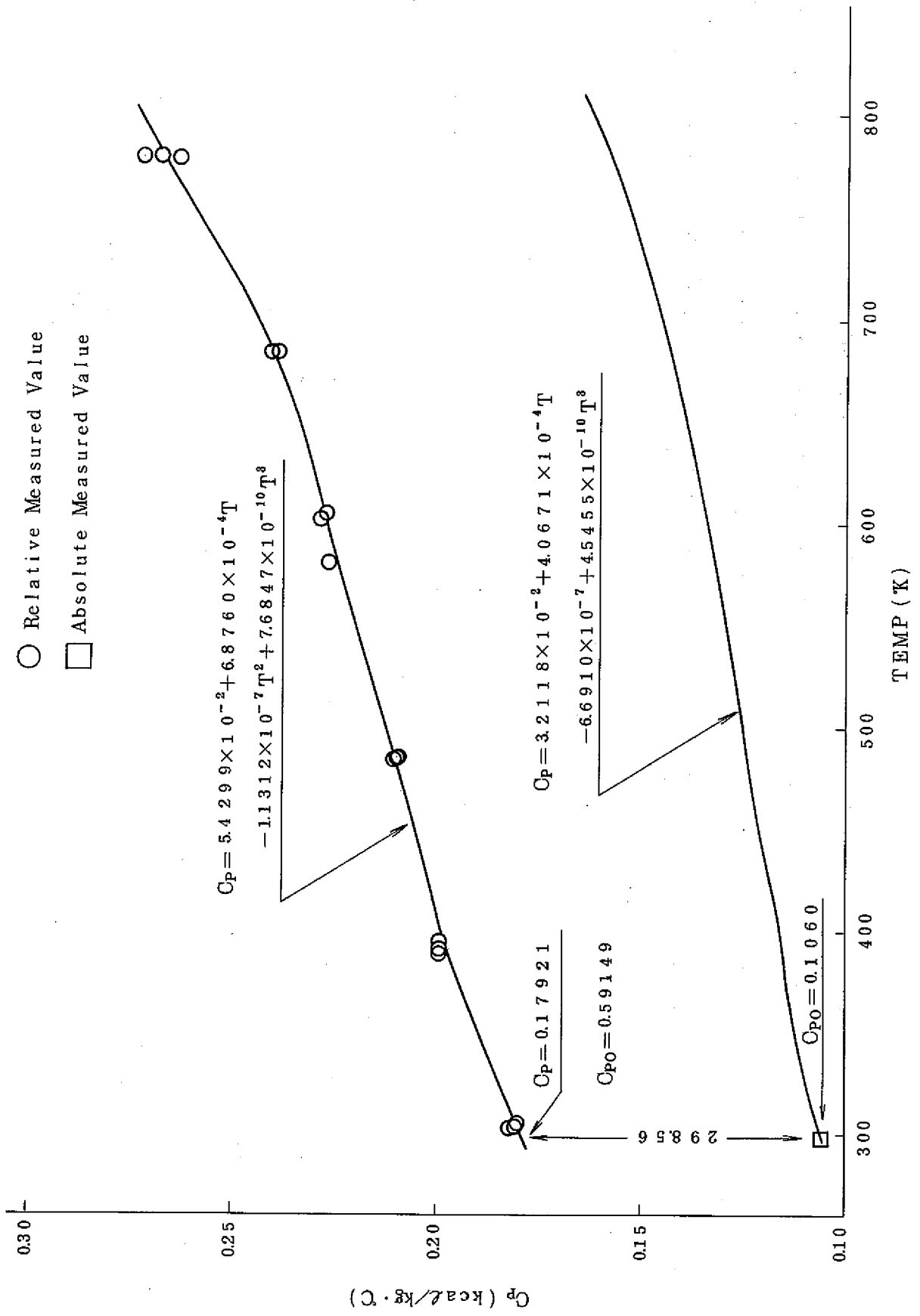


表 5.2 (8) Measured Result of Specific Heat (Sample No. E-2)

表 5.4 (1) Measured Result of Relative Specific Heat and Thermal Conductivity

T/P № C-1(1)

Outer diameter, thickness (mm): $100.42\phi \times 2.176\phi$ Volume (mm³): 17214 Specific weight (KG/M³): 7847.8

Weight (g) net: 135089 After T/C attached: 135228 After G.C.S.G attached: 138368 After d.g.f attached: 135242

№	Temp (°C)	EXPE №	EXPE TEMP (K)	P.M 指示	Q (CAL)	$\Delta\theta_M$ (°C)	Cp kcal/(KG·°C)	t _{1/2} (sec)	κ (M ² /HR)	λ kcal/(M·HR·°C)	REMARKS
1	Room Temp	C-1 (11)	30222	3743	0.2645	1.0478	0.1869				
		(12)	30222	3691	0.2609	1.0543	0.1832				
		(13)	30260	3892	0.2749	1.0990	0.1852				
		(14)	30243	2928	0.2079	0.8320	0.1850				
2	130°C	C-1 (102)	30097				0.1068	0.06183	0.03825	3.206	
		(103)	30155				0.1069	0.06092	0.03882	3.256	
		(104)	30162				0.1069	0.06076	0.03893	3.265	
		C-1 (15)	40144	4246	0.2995	1.1035	0.2009				
		(16)	40177	4316	0.3044	1.1133	0.2024				
		(17)	40218	4344	0.3063	1.1263	0.2013				
		C-1 (105)	40188					0.1175	0.06470	0.03656	3.371
3	220°C	(106)	40215				0.1175	0.06450	0.03667	3.382	
		(107)	40224				0.1175	0.06352	0.03724	3.434	
		C-1 (18)	49238	4351	0.3068	1.0603	0.2142				
		(19)	49214	4215	0.2974	1.0272	0.2143				
		(20)	49180	4406	0.3106	1.0716	0.2146				
		C-1 (108)	49123					0.1249	0.06845	0.03455	3.387
		(109)	49123				0.1249	0.06776	0.03491	3.422	
		(110)	49101				0.1249	0.06925	0.03415	3.347	

表 5.4 (2) Measured Result of Relative Specific Heat and Thermal Conductivity

T/P No O-1(2)

Outer diameter, thickness (mm):

Volume (mm³): Specific weight (KG/M³):

Weight (g) net:

After T/C attached:

After G.C.S.G attached:

After d.g.f attached:

No	Temp (°C)	EXPE No	EXPE TEMP (K)	P.M 指示	Q (CAL)	$\Delta\theta_M$ (°C)	Cp kcal/(KG·°C)	$t_{\frac{1}{2}}$ (sec)	κ (M ² /HR)	λ kcal/(M·HR·°C)	REMARKS
4	320°C	C-1 (21)	594.85	4311	0.3040	0.9720	0.2315				
		(22)	595.10	4265	0.3008	0.9631	0.2312				
		(23)	595.26	4370	0.3081	0.9847	0.2316				
		C-1 (111)	602.14				0.1341	0.07524	0.03144	3.310	
		(112)	602.27				0.1342	0.07617	0.03105	3.269	
		(113)	602.64				0.1342	0.07518	0.03120	3.286	
5	425°C	C-1 (24)	698.49	4312	0.3041	0.8905	0.2528				
		(25)	698.94	4308	0.3038	0.8898	0.2528				
		(26)	699.07	4259	0.3004	0.8949	0.2485				
		C-1 (114)	697.68				0.1444	0.08379	0.02823	3.198	
		(115)	697.81				0.1444	0.08456	0.02797	3.169	
		(116)	698.02				0.1444	0.08466	0.02794	3.167	
6	520°C	C-1 (27)	794.64	4234	0.2987	0.8081	0.2736				
		(28)	794.63	4316	0.3044	0.8155	0.2763				
		(29)	794.58	4266	0.3009	0.8106	0.2748				
		C-1 (117)	792.68				0.1588	0.09638	0.02454	3.058	
		(118)	792.76				0.1588	0.09449	0.02503	3.119	
		(119)	792.97				0.1588	0.09630	0.02456	3.061	

表 5.4 (B) Measured Result of Relative Specific Heat and Thermal Conductivity

T/P % D-1(1)

Outer diameter thickness (mm): $1.0016\phi \times 2.174t$ Volume (mm³): 171.31 Specific weight (KG/M³): 78354

Weight (g) net: 134228 After T/C attached: 134335 After G.C.S.G attached: 137301 After d.g.f attached: 134376
134326

%	Temp (°C)	EXPE %	EXPE TEMP (K)	P.M 指示	Q (CAL)	$\Delta\theta_M$ (°C)	Cp kcal/(KG·°C)	t _{1/2} (sec)	κ (M ² /HR)	λ kcal/(M·HR·°C)	REMARKS
1	Room Temp	D-1 (11)	320.39	3806	0.2689	1.0873	0.1843				
		(12)	316.17	3889	0.2747	1.0825	0.1890				
		(13)	314.98	3822	0.2700	1.1040	0.1822				
		D-1 (101')	317.63				0.1088	0.06425	0.03674	3.133	
		(102')	313.83				0.1084	0.06403	0.03687	3.131	
		(103')	313.27				0.1083	0.06450	0.03660	3.106	
2	106°C	D-1 (14)	379.63	3760	0.2657	1.0218	0.1937				
		(15)	380.06	3786	0.2675	1.0212	0.1952				
		(16)	380.23	3878	0.2739	1.0445	0.1954				
		(104)	380.08				0.1155	0.06528	0.03616	3.271	
		(105)	380.80				0.1155	0.06601	0.03576	3.237	
		(106)	381.04				0.1155	0.06631	0.03560	3.223	
3	203°C	D-1 (17)	476.73	3780	0.2671	0.9528	0.2088				
		(18)	477.23	3892	0.2749	0.9542	0.2146				
		(19)	476.89	3790	0.2678	0.9582	0.2082				
		D-1 (107)	477.00				0.1238	0.06989	0.03378	3.276	
		(108)	477.70				0.1238	0.06926	0.03409	3.308	
		(109)	477.78				0.1239	0.06959	0.03392	3.292	

表 5.4 (4) Measured Result of Relative Specific Heat and Thermal Conductivity

T/P No D-1(2)

Outer diameter, thickness (mm): Volume (mm³): Specific weight (KG/M³):
 Weight(g) net:134228 After T/C attached: After G.C, S.G attached: After d.g.f attached:

Temp (°C)	EXPE No	EXPE TEMP (K)	P.M 指示	Q (CAL)	Δθ _M (°C)	C _p kcal/(KG·°C)	t _{1/2} (sec)	ε (M ² /HR)	λ kcal/(M·HR·°C)	REMARKS
315°C	D-1 (20)	591.01	3804	0.2688	0.8776	0.2282				
	(21)	591.65	3690	0.2609	0.8634	0.2251				
	(22)	580.11	3700	0.2615	0.8736	0.2231				
	D-1 (110)	587.92				0.1329	0.07573	0.03197	3.245	
	(111)	587.80				0.1329	0.07611	0.03102	3.229	
410°C	(112)	587.94				0.1329	0.07596	0.03108	3.236	
	D-1 (23)	682.58	3588	0.2538	0.7965	0.2374				
	(24)	684.68	3594	0.2	0.7893	0.2399				
	(25)	685.68	3654	0.2583	0.8030	0.2397				
	D-1 (113)	684.71				0.1428	0.08567	0.02756	3.083	
510°C	(114)	684.78				0.1428	0.08405	0.02809	3.143	
	(115)	684.80				0.1428	0.08333	0.02833	3.170	
	D-1 (25)	784.72	3597	0.2544	0.7244	0.2616				
	(26)	784.83	3683	0.2604	0.7305	0.2655				
	(27)	784.88	3585	0.2536	0.7194	0.2626				
510°C	D-1 (116)	782.47				0.1570	0.09419	0.02506	3.082	
	(117)	783.22				0.1571	0.09480	0.02490	3.065	
	(118)	782.94				0.1570	0.09446	0.02499	3.075	

表 5.4 (5) Measured Result of Relative Specific Heat and Thermal Conductivity

T/P % E-2(1)

Outer diameter, thickness (mm) : 1.0013φ × 1.821t
 Volume (mm³) : 14.346 Specific weight (KG/M³) : 78258

Weight(g) net: 1.12272 After T/C attached: 1.12408 After G.C, S.G attached: 1.15347 After d.g.f attached:

C_{PO} = 0.1807

%	Temp (°C)	EXPE %	EXPE TEMP (K)	P.M 指示	Q (CAL)	Δθ _M (°C)	C _p kcal/(KG·°C)	t _{1/2} (sec)	κ (M²/HR)	λ kcal/(M·HR·°C)	REMARKS	
1	Room Temp	E-2 (11)	30.356	3912	0.2763	1.3597	0.1810					
		(12)	30.441	3828	0.2704	1.3381	0.1800					
		(13)	30.353	3943	0.2784	1.3696	0.1811					
		E-2 (101)	31.716					0.1088	0.04683	0.03537	3.011	
		(102)	31.469					0.1085	0.04635	0.03574	3.034	
		(103)	31.442					0.1084	0.04719	0.03510	2.979	
2	115°C	(104)	30.384				0.1072	0.04657	0.03557	2.983		
		(105)	30.456				0.1072	0.04651	0.03561	2.989		
		(106)	30.528				0.1073	0.04704	0.03521	2.958		
		E-2 (14)	38.881	3793	0.2679	1.2279	0.1944					
		(15)	38.886	3962	0.2798	1.2729	0.1958					
		(16)	38.895	3952	0.2791	1.2772	0.1946					
3	210°C	E-2 (107)	38.895				0.1163	0.04815	0.03440	3.131		
		(108)	38.895				0.1163	0.04905	0.03377	3.073		
		(109)	38.895				0.1163	0.04862	0.03407	3.101		
		E-2 (17)	48.392	3515	0.2487	1.0515	0.2106					
		(18)	48.415	3354	0.2375	1.0129	0.2088					
		(19)	48.429	3393	0.2402	1.0212	0.2095					
		E-2 (110)	48.387				0.1243	0.05173	0.03202	3.116		
		(111)	48.397				0.1243	0.05110	0.03242	3.155		
		(112)	48.395				0.1243	0.05206	0.03182	3.096		

表 5.4 (6) Measured Result of Relative Specific Heat and Thermal Conductivity

T/P No. E-2(1)

Outer diameter, thickness (mm):

Volume (mm³): Specific weight (KG/M³):

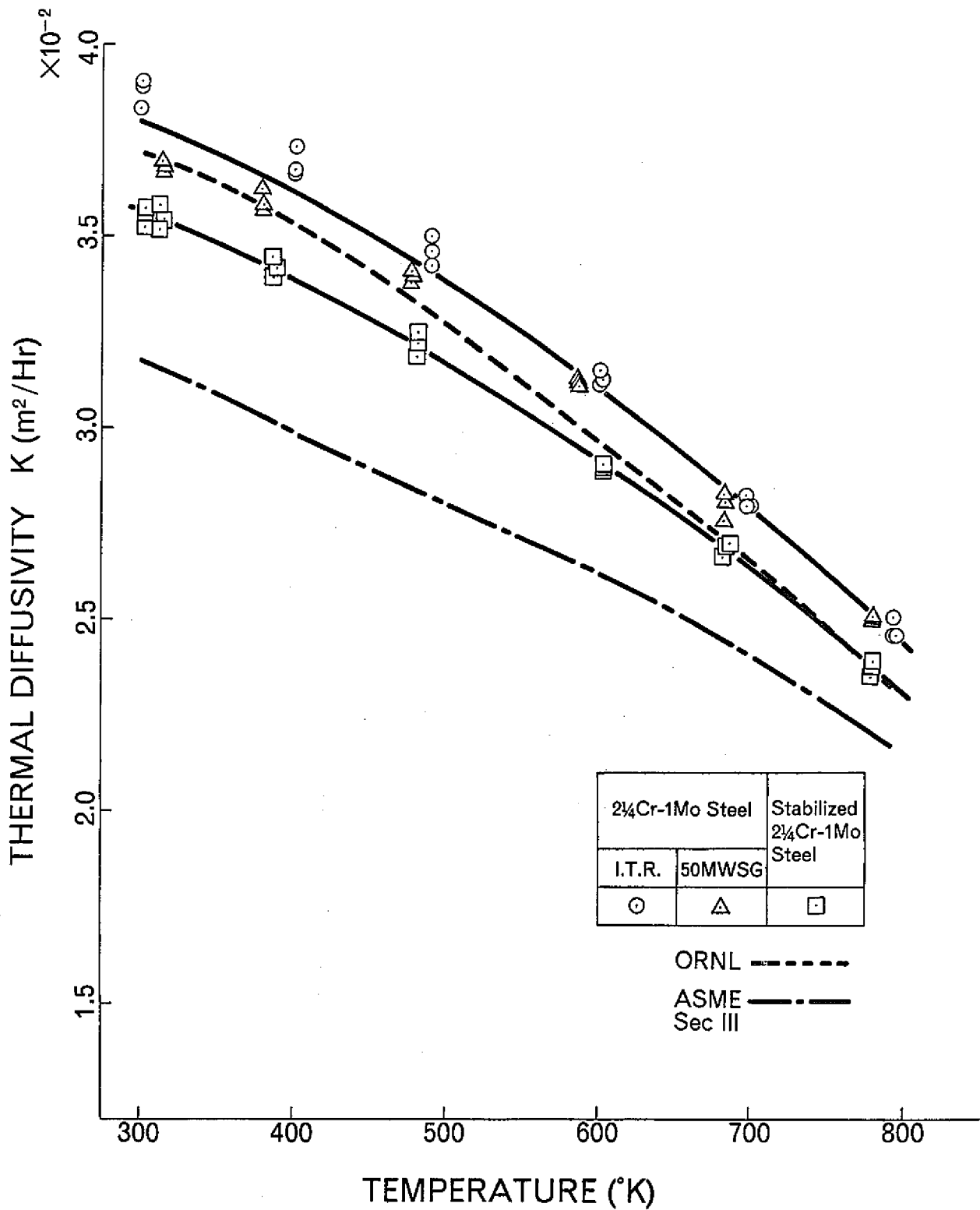
Weight (g) net:

After T/C attached:

After G.C.S.G attached:

After d.g.f attached:

No.	Temp (°C)	EXPE No.	EXPE TEMP (K)	P.M 指示	Q (CAL)	$\Delta\theta_M$ (°C)	Cp kcal/(KG·°C)	t _{1/2} (sec)	κ (M ² /HR)	λ kcal/(M·HR·°C)	REMARKS	
4	309°C	E-2 (20)	591.66	3433	0.2430	0.9577	0.2260					
		(21)	603.81	3392	0.2401	0.9382	0.2280					
		(22)	604.25	3232	0.2290	0.9032	0.2258					
		E-2 (113)	603.25				0.1342	0.02896	0.05719	3.043		
		(114)	603.87				0.1343	0.02892	0.05728	3.040		
5	410°C	(115)	603.92			0.1343	0.02896	0.05720	3.044			
		E-2 (23)	683.61	3456	0.2446	0.9102	0.2393					
		(24)	683.61	3340	0.2365	0.8791	0.2396					
		(25)	683.33	3391	0.2401	0.8617	0.2481					
		E-2 (116)	686.55				0.1430	0.02686	0.06167	3.006		
6	505°C	(117)	687.33			0.1431	0.02689	0.06160	3.011			
		(118)	683.28			0.1426	0.02658	0.06232	2.966			
		E-2 (26)	778.79	3390	0.2400	0.8135	0.2628					
		(27)	778.96	3304	0.2410	0.7915	0.2712					
		(28)	779.01	3542	0.2506	0.8349	0.2673					
	505°C	E-2 (119)	778.66			0.1563	0.02378	0.06966	2.909			
		(120)	779.66			0.1565	0.02389	0.06934	2.925			
		(121)	778.21			0.1562	0.02350	0.07048	2.873			



5.3 THERMAL DIFFUSIVITY OF $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo STEEL

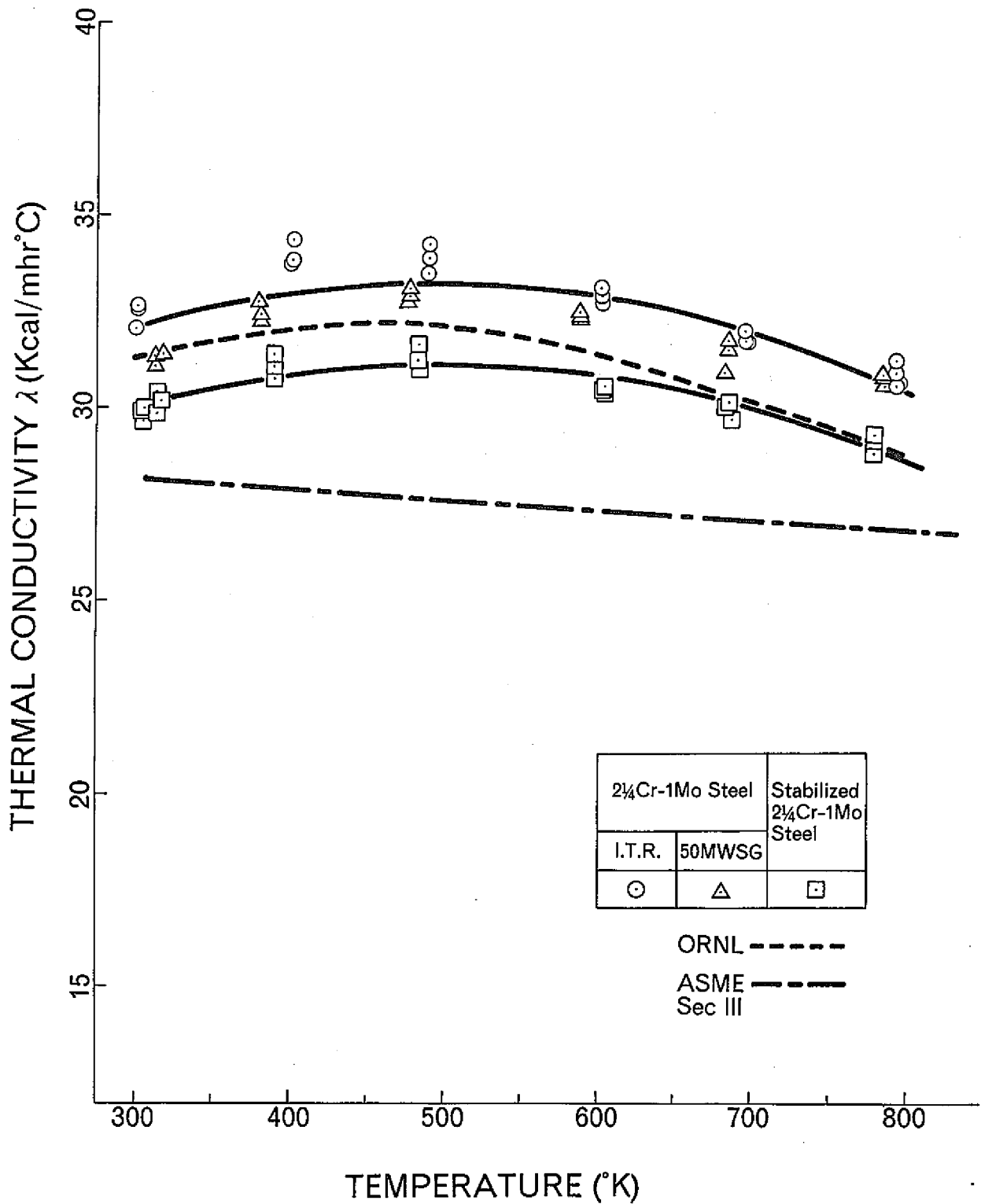


图 5.4 THERMAL CONDUCTIVITY OF $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo STEEL

表 5.5 Measured Result of Thermal Diffusivity

C-1		D-1		E-2	
TEMP (K)	K (m ² /Hr)	TEMP (K)	K (m ² /Hr)	TEMP (K)	K (m ² /Hr)
30.097	0.03825	31.763	0.03674	31.716	0.03537
30.155	0.03882	31.383	0.03687	31.469	0.03574
30.162	0.03893	31.327	0.03660	31.442	0.03510
40.188	0.03656	38.008	0.03616	30.384	0.03557
40.215	0.03667	38.080	0.03576	30.456	0.03561
40.224	0.03724	38.104	0.03560	30.528	0.03521
49.123	0.03455	47.700	0.03378	38.895	0.03440
49.123	0.03491	47.770	0.03409	38.895	0.03377
49.101	0.03415	47.778	0.03392	38.905	0.03407
60.214	0.03144	58.792	0.03117	48.387	0.03202
60.227	0.03105	58.780	0.03102	48.392	0.03242
60.264	0.03120	58.794	0.03108	48.395	0.03182
69.768	0.02823	68.471	0.02756	60.325	0.02896
69.781	0.02797	68.478	0.02809	60.387	0.02892
69.802	0.02794	68.480	0.02833	60.392	0.02896
79.268	0.02454	78.247	0.02506	68.655	0.02686
79.276	0.02503	78.322	0.02490	68.733	0.02689
79.297	0.02456	78.294	0.02499	68.328	0.02658
				77.866	0.02378
				77.966	0.02389
				77.821	0.02350

ITR-78-0021

表 5.6 Measured Result of Thermal Conductivity

C-1		D-1		E-2	
TEMP (K)	λ (kcal/M·Hr·°C)	TEMP (K)	λ (kcal/M·Hr·°C)	TEMP (K)	λ (kcal/M·Hr·°C)
3.010E+02	3.206E+01	3.176E+02	3.133E+01	3.172E+02	3.011E+01
3.015E+02	3.256E+01	3.138E+02	3.131E+01	3.147E+02	3.034E+01
3.016E+02	3.265E+01	3.133E+02	3.106E+01	3.144E+02	2.979E+01
4.019E+02	3.371E+01	3.801E+02	3.271E+01	3.038E+02	2.983E+01
4.022E+02	3.382E+01	3.808E+02	3.237E+01	3.046E+02	2.989E+01
4.022E+02	3.434E+01	3.810E+02	3.223E+01	3.053E+02	2.958E+01
4.912E+02	3.387E+01	4.770E+02	3.276E+01	3.890E+02	3.131E+01
4.912E+02	3.422E+01	4.777E+02	3.308E+01	3.890E+02	3.073E+01
4.910E+02	3.347E+01	4.778E+02	3.292E+01	3.890E+02	3.101E+01
6.021E+02	3.310E+01	5.879E+02	3.245E+01	4.839E+02	3.116E+01
6.023E+02	3.269E+01	5.878E+02	3.229E+01	4.839E+02	3.155E+01
6.026E+02	3.286E+01	5.879E+02	3.236E+01	4.840E+02	3.096E+01
6.977E+02	3.198E+01	6.847E+02	3.083E+01	6.032E+02	3.043E+01
6.978E+02	3.169E+01	6.848E+02	3.143E+01	6.039E+02	3.040E+01
6.980E+02	3.167E+01	6.848E+02	3.170E+01	6.039E+02	3.044E+01
7.927E+02	3.058E+01	7.825E+02	3.082E+01	6.866E+02	3.006E+01
7.928E+02	3.119E+01	7.832E+02	3.065E+01	6.873E+02	3.011E+01
7.930E+02	3.061E+01	7.829E+02	3.076E+01	6.833E+02	2.966E+01
				7.787E+02	2.909E+01
				7.797E+02	2.825E+01
				7.782E+02	2.873E+01

表 5.7 実験式

Test Piece №	Thermal Diffusivity	Thermal Conductivity
C-1	$K = -2.0885 \times 10^{-6} T_K^2 - 5.8924 \times 10^{-6} T_K + 4.2429 \times 10^{-2}$	$\lambda = -3.1260 \times 10^{-5} T_K^2 + 2.9704 \times 10^{-2} T_K + 2.66139$
D-1	$K = -2.3100 \times 10^{-6} T_K^2 - 2.1567 \times 10^{-7} T_K + 3.9191 \times 10^{-2}$	$\lambda = -2.9635 \times 10^{-5} T_K^2 + 3.0246 \times 10^{-2} T_K + 2.49474$
C-1 +D-1	$K = -2.1426 \times 10^{-6} T_K^2 - 3.6368 \times 10^{-6} T_K + 4.0936 \times 10^{-2}$	$\lambda = -3.0199 \times 10^{-5} T_K^2 + 2.9766 \times 10^{-2} T_K + 2.58071$
E-2	$K = -1.8465 \times 10^{-6} T_K^2 - 4.8791 \times 10^{-6} T_K + 3.8734 \times 10^{-2}$	$\lambda = -2.7713 \times 10^{-5} T_K^2 + 2.7649 \times 10^{-2} T_K + 2.41383$

unit : K (m²/Hr)
 λ (kcal/M·Hr·C)
 T_K (K)

TIR-78-0023

6. お わ り に

以上、レーザーフラッシュ法による $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の熱伝導率測定結果について述べた。

従来、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼の熱伝導率については、問題点としながらも独自に測定することは行われていなかった。今回のデータは本文に述べたごとく非常に高精度のものであり、不安定現象装置、及び50MW SG 2号機の性能試験結果の解析はもとより広く一般の使用に耐えるものとする。

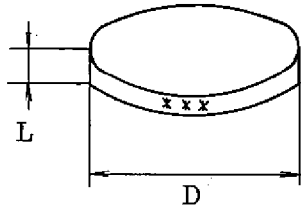
最後に心よく装置の使用許可していただいた無機材質研究所の関係者の方々、協力者の派遣を許された三井造船KK原子力事業室小関守史氏に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 高橋洋一, 他 2 名: “レーザーフラッシュ法による熱拡散率の測定” 熱・温度測定と熱分解 1974 p45
- 2) C.R.Brinkman et al “Mechanical & Physical Properties of $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo Steel in Support of CRBRP Steam Gevevatar Pesign” Int. Cont.on Material for Nuclear Steam Generator.Gatlinburg tennessee 1975

付 録

- (1) テストピースの形状 (径10φ, 厚さ2mmの円板)



D : 10mm±0.05

L : 2mm±0.05

(但し機械仕上げ後1μくらいまでの精度で計測する)

平行度 : 両端の板厚誤差は0.05mm以下。

材質が4種類あるので、それを区別するために端面に電気ペンで印をつけること。

- (2) 数 量

6種類×210=12枚(完成品)

- (3) 製造工程案

- (a) 粗材(パイプ)を $\frac{1}{3}$ 内に管軸方向に分割する。



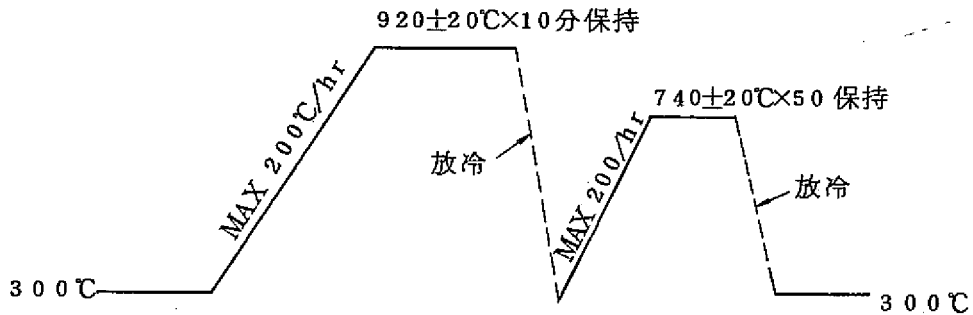
- (b) 熱間加工にてプレスで平板にする。

(熱間加工の温度は工作者に一任)

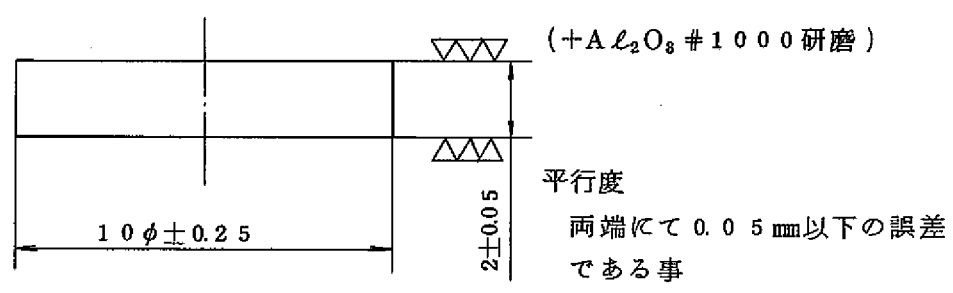
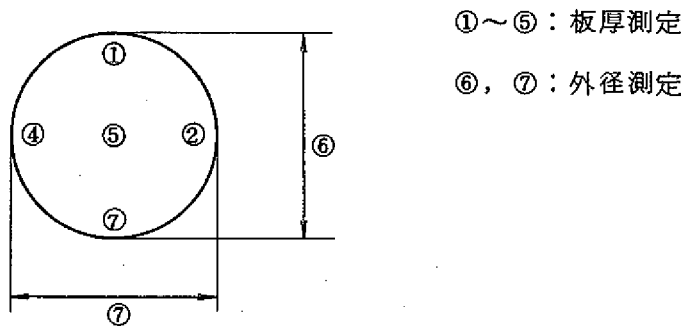
- (c) 加工影響を除去するために熱処理を実施する。

(うち1種類については熱処理を実施しない)

熱処理温度は次の通りである。



- (d) 板厚 2 mm の平板を作る。(平面研磨, 表面粗さは特に規定しない)
 $A\ell_2O_3 = 1000$ 程度
 - (e) 平板より 10ϕ 円板を 3 枚切り取る。(余裕 1 板)
 - (f) テストピース 1 個, 1 個に印をつけ, 寸法の実測結果(厚み)を検査結果として作製する。
- (4) テストピース寸法測定要領
- (a) 製作したテストピースにつき, 下図に示す箇所の実測を行なう。
 - (b) 寸法測定はダイヤルゲージ, マイクロメータによるものとし板厚については 1μ オーダーの読み取りを行なう。
 そして測定結果をデータシートとして各テストピース毎に記録する。



(製作上の注意事項)

- (i) 寸法精度は厳守の事, 各テストピース共実測データを必要とする。寸法計測上有無なバリ等は, 充分細かいサンドペーパー(エメリーペーパー)にて落とす事。
- (ii) 各テストピースの判別が後日容易に出来る様, ケガキ又はアークによりテストピース側面に No を記入する事
- (iii) 製作後は防錆のため T/P 表面に油膜をつける事, 又清潔な容器に保管する事。

6	TEST PIECE	E-1~3	STBA24 S.C	3		安定化鋼
5		D-1~3				50M 2号機伝熱管
4		C-4~6				ITR伝熱管(熱処理なし)
3		C-1~3				ITR伝熱管(加工後熱処理)
2		B-1~3				神鋼 F.A 材
1	TEST PIECE	A-1~3	STBA24 S.C	3		神鋼 N.T 材

I T R 伝熱管熱定数実測試験

テストピース製作図