

JAERI-M

9 3 6 1

原子炉用電線材料健全性試験装置  
(SEAMATE-II)の工学データ・1  
(急昇温実験)

1981年3月

田中 進・中瀬吉昭・日馬康雄  
伊藤政幸・岡田漱平・吉田健三

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

原子炉用電線材料健全性試験装置 (SEAMATE-II) の工学データ・1  
(急昇温実験)

日本原子力研究所高崎研究所開発試験場

田中 進・中瀬 吉昭・日馬 康雄

伊藤 政幸・岡田 漱平・吉田 健三

(1981年1月31日受理)

原子炉用電線材料健全性試験装置は、仮想LOCA条件下での電線ケーブル等の試験技術の確立、および当該試験規格が定められたとき、その試験を行う認定装置の設計に必要な工学データを得るために製作された。先ず、次のような工学的な検討を行ったので、その一部について報告する。

1) 蒸気流量計の検定、2) 急昇温中の圧力容器内(試料ケーブルが装荷される)の温度・圧力と蒸気流量の関係、3) 圧力容器内雰囲気を昇温させるために必要な熱量、および 4) 急昇温中の熱伝達率。

Engineering Data of SEAMATE-II , 1  
( Rapid Heating Test )

Susumu TANAKA, Yoshiaki NAKASE, Yasuo KUSAMA,  
Masayuki ITO, Sohei OKADA and Kenzo YOSHIDA

Pilot Scale Research Station  
Takasaki Radiation Chemistry Research  
Establishment, JAERI

(Received January 31, 1981)

Simulated Environmental Apparatus for Materials Testing (SEAMATE)-II was constructed in order to establish the techniques for the test of electrical cables under the conditions of postulated LOCA including radiation, and to provide the engineering data for designing the qualification testing facility which should be installed in Japan in near future.

A part of the engineering data is reported here, i.e. 1) calibration of steam flow meter, 2) relationship between temperature or pressure in the vessel set up in order to contain the cables and steam flow rate during rapid heating, 3) amounts of steam necessary to heat the atmosphere in the vessel, and 4) evaluation of heat transfer coefficient during rapid heating.

Keywords : SEAMATE-II , LOCA, Engineering Data, Rapid Heating,  
Heat Transfer Coefficient, Steam Flow

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 実験装置 .....	1
3. 蒸気流量計の検定試験 .....	2
3.1 実験方法 .....	2
3.2 実験条件 .....	3
3.3 実験結果 .....	3
3.4 実験結果の検討 .....	3
4. 急昇温実験 .....	3
4.1 実験方法 .....	3
4.2 実験条件 .....	4
4.3 実験結果 .....	4
4.3.1 蒸気流量および圧力容器内温度と圧力の時間的变化 .....	4
4.3.2 蒸気供給圧力の時間的变化 .....	5
4.3.3 急昇温時の圧力容器内水蒸気の飽和状態 .....	5
4.4 実験結果の検討 .....	5
4.4.1 急昇温時に必要な最大蒸気流量と所要時間の関係 .....	5
4.4.2 急昇温に必要な熱量 .....	6
4.4.3 急昇温時の熱伝達率 .....	7
5. まとめ .....	9
参 考 文 献 .....	11
付 録	
1. CONTEMPT-LT 入力データの1例 .....	63

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Experimental Facilities .....	1
3. Calibration of Steam Flow Meter .....	2
3.1 Experimental Procedure .....	2
3.2 Experimental Conditions .....	3
3.3 Results .....	3
3.4 Discussion .....	3
4. Rapid Heating Tests .....	3
4.1 Experimental Procedure .....	3
4.2 Experimental Conditions .....	4
4.3 Results .....	4
4.3.1 Time Traces of Steam Flow and Temperatures & Pressures in the Pressure Vessel .....	4
4.3.2 Time Trace of Steam Injection Pressure .....	5
4.3.3 Steam Saturations in the Pressure Vessel during Rapid Heating .....	5
4.4 Discussion .....	5
4.4.1 Relationship between Maximum Steam Flow Rates and Time Required to Reach the Desired Temperatures by Rapid Heating .....	5
4.4.2 Quantity of Heat for Rapid Heating .....	6
4.4.3 Heat Transfer Coefficients during Rapid Heating .....	7
5. Conclusion .....	9
References .....	11
Appendix 1. Example of Input Data for CONTEMPT-LT .....	63

## 1. はじめに

原子炉用電線材料健全性試験装置<sup>1)2)</sup>(以下 SEAMATE-II という)は、原子力発電所の安全評価における仮想事故の1つである冷却材喪失事故 (LOCA) 条件下での電線・ケーブル等の試験技術の確立 (基礎データの集積) をはかるとともに、将来原子炉用電線ケーブルの規格が定められた場合、その試験をする認定装置 (仮称) の製作に必要な設計資料 (工学的データ) を得ることを目的に製作された。LOCA 模擬環境として放射線、高温水蒸気、圧力、薬液スプレーおよび課通電があり、本装置は Fig. 1 に示す運転プログラムのような種々のプログラムに従って運転が実施できるように設計されている。

本報告は、SEAMATE-II の工学的試験の1部として、試料ケーブルが装荷される圧力容器内の温度を短時間で上昇させるときの急昇温挙動と必要蒸気量についての実験結果および結果の解析から得られた本装置の昇温性能、急昇温時に必要な熱量、急昇温時の熱伝達率等について報告する。

## 2. 実験装置

本実験に使用した圧力容器、アキュムレーター、ボイラー、各種の系統の配管、弁および計測機器のフローシートを Fig. 2 に示す。

圧力容器の断面図を Fig. 3 に示す。圧力容器は当研究所、コバルト第1棟第3照射室内に設置され、内径  $700\text{ mm } \phi$ 、高さ  $1300\text{ mm}$ 、容積約  $0.5\text{ m}^3$  で、中心に外径  $165.2\text{ mm } \phi$  の線源導入管が設けられている。フタは平板で厚さ  $110\text{ mm}$ 、フランジの締付けはクラッチドア式とした。また、圧力容器には Table 1 に示す各種ノズルが設けられ、予備口を除いてすべて配管されている。圧力容器内部には冷却水スプレーヘッダー、薬液スプレーヘッダー、試料ケーブルを巻きつけるためのマンドレルとその支持板および蒸気入口バップル板が設けられている。

アキュムレーターは、ボイラーから供給される約  $21\text{ kg/cm}^2\text{ G}$  の水蒸気を貯蔵し、圧力容器内へ短時間で大量に蒸気を供給するために設けた蒸気溜で、その容積は約  $4\text{ m}^3$  である。

ボイラーは、貫流 (水管) ボイラーで、定格実蒸発量  $1,500\text{ kg/h}$  ( $24\text{ kg/cm}^2\text{ G}$ ) のもの2缶である。ボイラーとアキュムレーターは、No.1 スチームヘッダー (SH-1) と減圧弁を径  $80\text{ A}$  の配管で連結されている。

アキュムレーターと圧力容器は、内径  $81.1\text{ mm } \phi$  の配管の径路 (以下 A ラインという) と内径  $42.6\text{ mm } \phi$  の配管の径路 (以下 H ラインという) で連結されている。ただし、A ラインと H ラインは照射室内に入る手前で1本化され、圧力容器に接続している。A ラインは圧力を  $21\text{ kg/cm}^2\text{ G}$  に調整する定圧弁 (SV-6)、空気作動式蒸気流量制御弁 (SV-11) および最大  $10,000\text{ kg/h}$  の蒸気流量が測定できるオリフィスによる差圧式流量計 (FX-1) が

## 1. はじめに

原子炉用電線材料健全性試験装置<sup>1)2)</sup>(以下 SEAMATE-II という)は、原子力発電所の安全評価における仮想事故の1つである冷却材喪失事故 (LOCA) 条件下での電線・ケーブル等の試験技術の確立 (基礎データの集積) をはかるとともに、将来原子炉用電線ケーブルの規格が定められた場合、その試験をする認定装置 (仮称) の製作に必要な設計資料 (工学的データ) を得ることを目的に製作された。LOCA 模擬環境として放射線、高温水蒸気、圧力、薬液スプレーおよび課通電があり、本装置は Fig. 1 に示す運転プログラムのような種々のプログラムに従って運転が実施できるように設計されている。

本報告は、SEAMATE-II の工学的試験の1部として、試料ケーブルが装荷される圧力容器内の温度を短時間で上昇させるときの急昇温挙動と必要蒸気量についての実験結果および結果の解析から得られた本装置の昇温性能、急昇温時に必要な熱量、急昇温時の熱伝達率等について報告する。

## 2. 実験装置

本実験に使用した圧力容器、アキュムレーター、ボイラー、各種の系統の配管、弁および計測機器のフローシートを Fig. 2 に示す。

圧力容器の断面図を Fig. 3 に示す。圧力容器は当研究所、コバルト第1棟第3照射室内に設置され、内径  $700\text{ mm } \phi$ 、高さ  $1300\text{ mm}$ 、容積約  $0.5\text{ m}^3$  で、中心に外径  $165.2\text{ mm } \phi$  の線源導入管が設けられている。フタは平板で厚さ  $110\text{ mm}$ 、フランジの締付けはクラッチドア式とした。また、圧力容器には Table 1 に示す各種ノズルが設けられ、予備口を除いてすべて配管されている。圧力容器内部には冷却水スプレーヘッダー、薬液スプレーヘッダー、試料ケーブルを巻きつけるためのマンドレルとその支持板および蒸気入口バップル板が設けられている。

アキュムレーターは、ボイラーから供給される約  $21\text{ kg/cm}^2\text{ G}$  の水蒸気を貯蔵し、圧力容器内へ短時間で大量に蒸気を供給するために設けた蒸気溜で、その容積は約  $4\text{ m}^3$  である。

ボイラーは、貫流 (水管) ボイラーで、定格実蒸発量  $1,500\text{ kg/h}$  ( $24\text{ kg/cm}^2\text{ G}$ ) のもの2缶である。ボイラーとアキュムレーターは、No.1 スチームヘッダー (SH-1) と減圧弁を径  $80\text{ A}$  の配管で連結されている。

アキュムレーターと圧力容器は、内径  $81.1\text{ mm } \phi$  の配管の径路 (以下 A ラインという) と内径  $42.6\text{ mm } \phi$  の配管の径路 (以下 H ラインという) で連結されている。ただし、A ラインと H ラインは照射室内に入る手前で1本化され、圧力容器に接続している。A ラインは圧力を  $21\text{ kg/cm}^2\text{ G}$  に調整する定圧弁 (SV-6)、空気作動式蒸気流量制御弁 (SV-11) および最大  $10,000\text{ kg/h}$  の蒸気流量が測定できるオリフィスによる差圧式流量計 (FX-1) が



設けられている。HラインはNo 2 スチームヘッダー (SH-2), 圧力を  $16 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$  に減圧する減圧弁 (SV-17, SV-20), 空気作動式蒸気流量制御弁 (SV-24) および最大  $1,000 \text{ kg/h}$  の蒸気流量が測定できるオリフィスによる差圧式流量計 (FX-2) が設けられている。

蒸気およびドレインの排出用配管は、圧力容器底部とドレン蒸発器を内径  $81.1 \text{ mm}$  の配管で連結し、途中に空気作動 ON-OFF 弁 (DV-2), スチームトラップ (ST-4) およびバイパス弁が並置されている。

これまでに述べた圧力容器、アキュムレーター、配管および弁類は、設計圧力  $25 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$  (負圧側  $-1 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ ), 設計温度  $250^\circ \text{C}$  で設計・製作されている。なお、Aライン、Hラインおよび排出用配管等に設けられた弁等は、Fig. 4 に示すとおり照射室外に配置されているため、圧力容器と流量制御弁 (SV-11, SV-24) との距離は  $10 \text{ m}$  以上になる。

本実験では圧力容器および蒸気供給経路の圧力・温度と蒸気流量の測定を行った。この場合の測定パラメータおよび実験装置に取付けた測定器の各種検出端および検出器を Table 2 に示す。また、特に急昇温時の圧力容器内外の温度を詳細に測定するために設けた熱電対の各測定点の取付位置を Fig. 5 に、取付方法を Table 3 に示す。なお、熱電対は素線径が  $0.6 \text{ mm}$  の銅・コンスタントンのガラスクロス絶縁線を用い、接合点から被覆を約  $1 \text{ cm}$  取り除いた。

蒸気流量計の検定のための試験においては、蒸気流量とアキュムレーター、A、& Hライン、圧力容器の圧力測定をデータロガーにより  $0.55$  秒の時間間隔で行った。その他の測定値はレコーダーにより連続記録した。

急昇温実験時の測定値の記録は蒸気流量、圧力容器内圧力と温度 (1点)、圧力容器内壁温度 (1点) について、データロガーにより  $0.55$  秒の時間間隔で行った。その他の測定値はレコーダーにより連続記録した。

### 3. 蒸気流量計の検定試験

急昇温実験時の蒸気流量を正確に知るために、先ず蒸気流量計の検定を行った。

#### 3.1 実験方法

実験方法を Fig. 2 のフローシートにより説明する。先ず A、& Hラインの流量制御弁と手動弁を全閉にし、圧力容器の排出側の ON-OFF 弁と手動弁を全開にする。また、ボイラーを起動し、アキュムレーターに蒸気を送る。アキュムレーターでは、空気抜きをしながら所定圧力 (約  $20 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ ) まで蒸気をためるとともに、アキュムレーター内壁を十分加熱する。圧力が一定になった時期にボイラーからアキュムレーターに蒸気を供給する配管の手動弁を閉じ、アキュムレーターへの蒸気供給を停止する。つぎに選定した蒸気供給ライン (Aラインまたは Hライン) の手動弁を全開にし、蒸気流量制御弁を所定の開度に開放し、蒸気を圧力容器内に流入させ、そのときの蒸気流量と圧力を測定する。

設けられている。HラインはNo.2 スチームヘッダー (SH-2), 圧力を  $16 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  に減圧する減圧弁 (SV-17, SV-20), 空気作動式蒸気流量制御弁 (SV-24) および最大  $1,000 \text{ kg/h}$  の蒸気流量が測定できるオリフィスによる差圧式流量計 (FX-2) が設けられている。

蒸気およびドレインの排出用配管は, 圧力容器底部とドレン蒸発器を内径  $81.1 \text{ mm}$  の配管で連結し, 途中に空気作動 ON-OFF 弁 (DV-2), スチームトラップ (ST-4) およびバイパス弁が並置されている。

これまでに述べた圧力容器, アキュムレーター, 配管および弁類は, 設計圧力  $25 \text{ kg/cm}^2\text{G}$  (負圧側  $-1 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ ), 設計温度  $250^\circ\text{C}$  で設計・製作されている。なお, Aライン, Hラインおよび排出用配管等に設けられた弁等は, Fig. 4 に示すとおり照射室外に配置されているため, 圧力容器と流量制御弁 (SV-11, SV-24) との距離は  $10 \text{ m}$  以上になる。

本実験では圧力容器および蒸気供給経路の圧力・温度と蒸気流量の測定を行った。この場合の測定パラメータおよび実験装置に取付けた測定器の各種検出端および検出器を Table 2 に示す。また, 特に急昇温時の圧力容器内外の温度を詳細に測定するために設けた熱電対の各測定点の取付位置を Fig. 5 に, 取付方法を Table 3 に示す。なお, 熱電対は素線径が  $0.6 \text{ mm}$  の銅・コンスタントンのガラスクロス絶縁線を用い, 接合点から被覆を約  $1 \text{ cm}$  取り除いた。

蒸気流量計の検定のための試験においては, 蒸気流量とアキュムレーター, A, & Hライン, 圧力容器の圧力測定をデータロガーにより  $0.55$  秒の時間間隔で行った。その他の測定値はレコーダーにより連続記録した。

急昇温実験時の測定値の記録は蒸気流量, 圧力容器内圧力と温度 (1点), 圧力容器内壁温度 (1点) について, データロガーにより  $0.55$  秒の時間間隔で行った。その他の測定値はレコーダーにより連続記録した。

### 3. 蒸気流量計の検定試験

急昇温実験時の蒸気流量を正確に知るために, 先ず蒸気流量計の検定を行った。

#### 3.1 実験方法

実験方法を Fig. 2 のフローシートにより説明する。先ず A, & Hラインの流量制御弁と手動弁を全閉にし, 圧力容器の排出側の ON-OFF 弁と手動弁を全開にする。また, ボイラーを起動し, アキュムレーターに蒸気を送る。アキュムレーターでは, 空気抜きをしながら所定圧力 (約  $20 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ ) まで蒸気をためるとともに, アキュムレーター内壁を十分加熱する。圧力が一定になった時期にボイラーからアキュムレーターに蒸気を供給する配管の手動弁を閉じ, アキュムレーターへの蒸気供給を停止する。つぎに選定した蒸気供給ライン (Aラインまたは Hライン) の手動弁を全開にし, 蒸気流量制御弁を所定の開度に開放し, 蒸気を圧力容器内に流入させ, そのときの蒸気流量と圧力を測定する。

### 3.2 実験条件

実験は総計6回行った。その実験条件をTable 4に示す。Aラインの流量制御弁の開度を変えたものは5ケースあり、Hラインについては1ケースである。ただし、Hラインの1ケースは、実験途中(0~160秒)まで、アキュムレーターへの蒸気供給を続けた場合である。

### 3.3 実験結果

各実験における蒸気流量とその積算値、およびアキュムレーター、圧力容器、A、&Hラインの各圧力の時間的変化を実験番号順にFig. 6.1~Fig. 6.6に示す。

### 3.4 実験結果の検討

蒸気流量計の信頼度を確認するため、先ずアキュムレーター等の保有蒸気の減少量(圧力低下)と蒸気流量実測値の比較検討を行った。

保有蒸気の減少量から求めた蒸気流量 $W_{ct}$ (計算値)は、

$$W_{ct} = V \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{t_2 - t_1} \right) \quad (1)$$

$W_{ct}$ : 時間  $t_1 \sim t_2$  における平均流量

$V$ : アキュムレーター等の蒸気保有容積

Aライン 4.149 m<sup>3</sup>

Hライン 4.215 m<sup>3</sup>

$\rho_1, \rho_2$ : 時間  $t_1, t_2$  における圧力  $P_1, P_2$  に対応する蒸気の密度

と表わされる。ここで  $t_1, t_2$  は 0.55 秒間隔でとり、データロガーで  $W_{ct}$  を計算した。各実験における計算値  $W_{ct}$  と実測値  $W_{al}$  (Aライン蒸気流量) または  $W_{hl}$  (Hライン蒸気流量) とを Fig. 7.1~Fig. 7.6 に示す。保有蒸気の減少量から求めた蒸気流量と実測値は、蒸気の流出開始時の大流量付近は比較的良く一致し、両者の差は約 10% 以内である。小流量では傾向は一致しているものの両者の差は最大 30% 程度となる。急昇温実験は主に大流量の蒸気で行うため、蒸気流量計の指示値をそのまま使用してよいことがわかった。

## 4. 急昇温実験

### 4.1 実験方法

実験方法を Fig. 2 のフローシートにより説明すると、先ず A, & Hライン、排出用配管の圧力容器に一番近い制御弁および手動弁を全閉にして、圧力容器内に常温常圧の空気を閉じ込

### 3.2 実験条件

実験は総計6回行った。その実験条件をTable 4に示す。Aラインの流量制御弁の開度を変えたものは5ケースあり、Hラインについては1ケースである。ただし、Hラインの1ケースは、実験途中(0~160秒)まで、アキュムレーターへの蒸気供給を続けた場合である。

### 3.3 実験結果

各実験における蒸気流量とその積算値、およびアキュムレーター、圧力容器、A、&Hラインの各圧力の時間的変化を実験番号順にFig. 6.1~Fig. 6.6に示す。

### 3.4 実験結果の検討

蒸気流量計の信頼度を確認するため、先ずアキュムレーター等の保有蒸気の減少量(圧力低下)と蒸気流量実測値の比較検討を行った。

保有蒸気の減少量から求めた蒸気流量 $W_{ct}$ (計算値)は、

$$W_{ct} = V \left( \frac{\rho_1 - \rho_2}{t_2 - t_1} \right) \quad (1)$$

$W_{ct}$ : 時間  $t_1 \sim t_2$  における平均流量

$V$ : アキュムレーター等の蒸気保有容積

Aライン 4.149 m<sup>3</sup>

Hライン 4.215 m<sup>3</sup>

$\rho_1, \rho_2$ : 時間  $t_1, t_2$  における圧力  $P_1, P_2$  に対応する蒸気の密度

と表わされる。ここで  $t_1, t_2$  は 0.55 秒間隔でとり、データロガーで  $W_{ct}$  を計算した。各実験における計算値  $W_{ct}$  と実測値  $W_{al}$  (Aライン蒸気流量) または  $W_{hl}$  (Hライン蒸気流量) とを Fig. 7.1~Fig. 7.6 に示す。保有蒸気の減少量から求めた蒸気流量と実測値は、蒸気の流出開始時の大流量付近は比較的良く一致し、両者の差は約 10% 以内である。小流量では傾向は一致しているものの両者の差は最大 30% 程度となる。急昇温実験は主に大流量の蒸気で行うため、蒸気流量計の指示値をそのまま使用してよいことがわかった。

## 4. 急昇温実験

### 4.1 実験方法

実験方法を Fig. 2 のフローシートにより説明すると、先ず A, & Hライン, 排出用配管の圧力容器に一番近い制御弁および手動弁を全閉にして、圧力容器内に常温常圧の空気を閉じ込

める。一方ではボイラーを起動し、アキュムレーターに蒸気を送り、空気抜きをしながら所定圧力(約 $20 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$ )まで蒸気をためる。ボイラーは起動状態を維持し、アキュムレーター内圧力が低下した場合すぐに蒸気の供給ができる状態にしておく。つぎに選定した蒸気供給ラインの手動弁を全開にした後、蒸気流量制御弁を所定の開度に開放し、蒸気を圧力容器に流入させる。圧力容器内に入った蒸気は、蒸気入口バフフル板により器壁円周方向および上部に向かって流動し、空気と水蒸気の混合気体となる。蒸気供給によってアキュムレーターと圧力容器内の圧力が同圧近くなると、その後はボイラーから供給される蒸気量が蒸気供給量となる。開始後180秒までこの状態を保つ。180秒後、蒸気流量制御弁を閉じて蒸気の供給を停止し、圧力容器内に冷却水をスプレーして常温まで器壁を冷却する。冷却開始と同時に冷却水排出のため、排出用配管のトラップ前の手動弁を全開にし、 $105^\circ\text{C}$ 以下(常圧附近)でON-OFF弁(DV-2)を開放にした。圧力容器壁が常温になった後、再度上述と同様に実験を繰り返した。

温度、圧力、流量等の測定は、流量制御弁開放開始と同時に開始した。すなわち、流量制御弁の制御を行うプログラム設定器の開始ボタン「ON」、または手動による制御設定スイッチの操作の開始時を開始時刻0秒として行った。

## 4.2 実験条件

実験は総計13回行った。その実験条件をTable 5に示す。Aラインの流量制御弁の開度を変えた場合11ケースとHラインの場合2ケースである。Aラインの11ケースのうち、後半の3ケースは短時間で蒸気の供給を停止し、蒸気流量計の低流量附近の誤差を取除くとともに、蒸気供給停止後の圧力容器内の温度と圧力の変化を測定した。アキュムレーター内初期圧力は、蒸気供給開始時をボイラーの燃焼サイクルと一致するように選んだため、各実験に対して同圧とならなかった。

## 4.3 実験結果

### 4.3.1 蒸気流量および圧力容器内温度と圧力の時間的変化

蒸気流量とその積算値および圧力容器内温度と圧力の時間的変化について、各実験番号にしたがってFig. 8.1~Fig. 8.13に示す。また、特に急昇温時の圧力容器内外の温度を詳細に測定した結果を前述と同様にFig. 9.1~Fig. 9.13に示す。図中の記号および数字は熱電対の取付位置(Table 3)を示す。

TD14~TD21はAラインの蒸気流量制御弁の開度を変えた実験で、蒸気流量に応じた昇温特性の違いが明らかとなっている。なお、急昇温後蒸気流量が減少し、零を示す場合があるが、これはAラインの蒸気流量計の不感帯( $370 \text{ kg/h}$ 以下)に入ったためである。TD24、TD28およびTD29は、蒸気流量が測定の不感帯に入らない $500 \text{ kg/h}$ 以上のうちに蒸気供給を停止した実験である。これらの実験では、蒸気供給停止後、圧力容器内の温度と圧力が低下するのに対し、TD14~TD21の実験結果では常に上昇しており、その違いが明らかである。TD22、TD23はHラインを用いて、

一定の蒸気供給を行った実験である。TD 23の実験において、圧力容器内の温度が蒸気供給開始後約20秒間昇温しない。この原因は蒸気供給配管に熱をうばわれたため、圧力容器内への蒸気の到達が遅れたことを示している。

#### 4.3.2 蒸気供給圧力の時間的变化

Fig. 10に、蒸気供給開始後の圧力容器内圧力と蒸気供給圧力の時間的变化の例を示す。蒸気供給開始とともにボイラーの再燃焼が開始され、蒸気を十分供給できた場合である。一方、そのタイミングがうまくいかなかった場合、または大流量の蒸気供給があった場合等はアキュムレーター内圧力が $14 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 程度に低下した。各実験のアキュムレーター内最低圧力をTable 5に示した。なお、TD 28, TD 29の実験は、アキュムレーターへの蒸気供給を停止し、アキュムレーター内の蒸気のみで行った。

#### 4.3.3 急昇温時の圧力容器内水蒸気の飽和状態

急昇温時の圧力容器内温度と飽和水蒸気の分圧との関係について、各実測値より求めた結果をFig. 11に示す。圧力容器内の温度実測値は、飽和水蒸気の圧力に相当する温度よりも若干高い値を示し、過熱の傾向となっている。

ここで、飽和水蒸気の分圧は、実測圧力より圧力容器内に存在する空気の圧力を差し引いて求めたものである。

### 4.4 実験結果の検討

#### 4.4.1 急昇温に必要な最大蒸気流量と所要時間の関係

本装置の急昇温時に対する設計性能は「圧力容器内の温度を $5 \text{ l/min}$  ( $20^\circ\text{C}$ )の薬液スプレー下において $20^\circ\text{C}$ から $150^\circ\text{C}$ まで5秒間で、また、 $150^\circ\text{C}$ から $200^\circ\text{C}$ まで30秒間で昇温させること。」である。(圧力容器内温度の制御性については別に報告する。)

急昇温実験で得られた各設定温度までに昇温するため必要な最大蒸気流量と所要時間の関係をFig. 12.1, Fig. 12.2に示す。Fig. 12.1は、すべての配管および圧力容器等全系が室温状態の時に開始した急昇温実験(1回目)の結果である。 $150^\circ\text{C}$ までには、約 $10 \text{ ton/h}$ の最大蒸気流量で4秒間で到達する。 $200^\circ\text{C}$ までに必要な昇温時間は40秒前後で、35秒以内には昇温できないことがわかる。この原因については4.4.2で検討する。なお、最大蒸気流量が低い場合、蒸気流入開始後であっても蒸気供給配管内で熱をうばわれるため、蒸気の圧力容器内への到達が遅れ、圧力容器内の温度が上昇しない。そこで、蒸気流出開始から温度上昇が検出されるまでにかかった時間をFig. 12.1に●印で併せて示した。

Fig. 12.2は急昇温後、圧力容器内のみを水冷し、室温に戻した時点で実験を再び開始した急昇温実験(2回目以降)の結果である。蒸気供給配管がすでに加熱されているために1回目ほどの蒸気流量は必要ではなく、 $150^\circ\text{C}$ にするためには $6 \sim 10 \text{ ton/h}$ の最大蒸気流量で3~4秒で十分である。また、 $200^\circ\text{C}$ に達するためにも $5 \text{ ton/h}$ 前後の最大蒸気流量で30秒あればよい。

したがって、蒸気供給配管等が加熱されている2回目以降の条件では、所定の性能、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 150^{\circ}\text{C} / 5$ 秒、および $150^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C} / 30$ 秒（ $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C} / 35$ 秒）は十分満足されている。

#### 4.4.2 急昇温に必要な熱量

急昇温実験で得られた積算蒸気流量と圧力容器内温度の関係をもとに、昇温に必要な熱量を検討した。

急昇温時に必要な全熱量 $Q_T$ は、伝熱面へ伝導する熱量 $Q_H$ 、圧力容器内等に保有される所定温度の飽和水蒸気の熱量 $Q_S$ 、圧力容器内等の空気を所定温度に加熱するための熱量 $Q_A$ および凝縮水の保有熱量 $Q_D$ とすると次式で表わされる。

$$Q_T = Q_H + Q_S + Q_A + Q_D \quad (2)$$

所定温度まで昇温するために必要な単位伝熱面積当りの熱量（ $Q_H + Q_S$ ）は、実験値より得られた急昇温に必要な総熱量から計算によって求めた $Q_S$ を差し引いた後、単位伝熱面積当りに換算して得た。なお、 $Q_A$ は絶対量が小さいため無視した。計算に用いた蒸気の平均エンタルピは $667 \text{ kcal/kg}$ 、伝熱面積と蒸気保有容積はTable 6に、結果をFig. 13に示す。いずれの温度でも所定温度に達するまでの時間が長いほど所要蒸気量も多くなる。これは、圧力容器等の伝熱壁全体の温度が次第に上昇していることを示している。

ここで、4.4.1において35秒以内に $200^{\circ}\text{C}$ まで急昇温できなかった原因を検討する。

SEAMATE-IIの設計において、急昇温に必要な熱供給量の計算は、①アキュムレーター内初期圧力 $21 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ 、②ボイラーからの蒸気供給量 $3 \text{ ton/h}$ を想定しており、35秒間における供給可能熱量は約 $2.75 \times 10^4 \text{ kcal}$ となる。ここで、

$$\begin{aligned} \text{ボイラーからの供給熱量} &= 3000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) \times 667 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \\ &\times \frac{35}{3600} \quad (\text{h}) \\ &= 1.95 \times 10^4 \text{ kcal} \end{aligned}$$

アキュムレーターからの供給熱量

$$\begin{aligned} &= \left( \frac{1}{0.0924} - \frac{1}{0.1260} \right) \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \\ &\times 4.15 \text{ (m}^3) \times 667 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \\ &= 8.0 \times 10^3 \text{ kcal} \end{aligned}$$

となる。一方、35秒間に $200^{\circ}\text{C}$ まで昇温するために必要な熱量は、Fig. 13から得られる $Q_H + Q_D$ と $Q_S$ を合わせて約 $2.31 \times 10^4 \text{ kcal}$ となる。ここで、

$$Q_H + Q_D = 1.63 \times 10^3 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2} \right) \times 12.25 (\text{m}^2)$$

$$= 2.00 \times 10^4 \text{ kcal}$$

$$Q_S = \left( \frac{1}{0.1260} \right) \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times 0.587 (\text{m}^3) \times 667 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

$$= 3.1 \times 10^3 \text{ kcal}$$

となる。設計計算値は昇温に必要な熱量に若干の余裕をもっているが、本実験の大部分はボイラーを1缶(1.5 ton/h)としたこと、またアキュムレーター内初期圧力が21 kg/cm<sup>2</sup>G(一定)ではなく低下しているため35秒間に供給可能な熱量は最大1.70 × 10<sup>4</sup> kcalとなる。したがって、蒸気供給はボイラー1缶では、不十分で、所定の昇温性能が得られなかったものと考えられる。

#### 4.4.3 急昇温時の熱伝達率

急昇温開始によって圧力容器内に流入した飽和水蒸気は、空気と水蒸気の混合気体となり、器壁で冷却され凝縮熱伝達が起る。圧力容器内に短時間で大量の蒸気を流入させた場合の凝縮熱伝達率については、LOCA時における格納容器内の熱力学的応答特性を解析する際、圧力と温度の過渡変化に大きく影響する因子として研究が多く行なわれている。<sup>3)~6)</sup> 現在、最も広く使用されているのは、約15年前我国のSAFEプロジェクト小委員会の下で日立製作所が行った実験結果にもとづくものであって、定常熱伝達率に対する内田のデータ<sup>4)</sup>および過渡熱伝達率に対する田上の式<sup>5)</sup>として知られているものである。

一方、SEAMATE-IIは、LOCA環境を模擬する装置ではあるが、原子炉格納容器内のLOCA時における凝縮熱伝達率の検討などの熱工学的試験を主眼として製作されたものではない。すなわち、γ線照射下での長時間連続運転に対応できるように、照射室内にはできるだけ機器を設置しない設計をした。このため、蒸気供給・排出系の制御弁類は照射室外に配置され、蒸気供給・排出用配管が非常に長くなった。また、圧力容器内にはノズル、スプレーヘッダー、マンドレル等の付属品が多数配置されているため、蒸気配管および圧力容器内付属品の伝熱面積は圧力容器本体のそれよりも大きくなっている。

これらの特徴をもつ本装置の急昇温時の熱伝達率を検討した。

本装置の熱伝達率の解析には、安全性研究で原子炉のブローダウン時における格納容器内の圧力・温度の応答特性を解析するために開発された計算コードCONTEMPT-LT<sup>7)</sup>を使用した。急昇温時の熱伝達率は、CONTEMPT-LTの入力として先ず適当な値の熱伝達率を入力し、得られた圧力容器内の温度・圧力の計算値と実測値の比較を繰り返して、両者が一致するように選定した。計算に用いた伝熱面の形状、面積、厚さおよび容積をTable 6に示した。エネルギーの入力は蒸気流量の実測値を用い、蒸気の平均エンタルピは667 kcal/kgとした。

熱伝達率の入力としては、300 kcal/m<sup>2</sup> h°C ~ 15,000 kcal/m<sup>2</sup> h°C の範囲の一定



値、内田のデータ、および参考として田上の式を一部変更した次式を用いて計算した値の三種類について検討した。

$$h(t) = 7.5.0 \left( \frac{\int_0^{t_m} q(t) dt}{V t_m} \right)^{0.6} \sqrt{\frac{t}{t_m}} \quad (3)$$

ただし、 $t \geq t_m$  で  $h(t) = h(t_m)$

ここで

$h(t)$ : 熱伝達率 (BTU/ft<sup>2</sup> h °F)

$q(t)$ : エネルギー放出率 (BTU/sec)

$V$ : 圧力容器等容積 (ft<sup>3</sup>)

$t_m$ : エネルギー放出率が最大となる時間 (sec)

計算に用いた入力データシートの1例を Appendix 1 に示す。

Fig. 1 4. 1 ~ Fig. 1 4. 1 3 に圧力容器内の温度と圧力の計算値と実測値 ( $T_{pv}$ , &  $P_{pv}$ ) を比較して、実験番号順に示した。図中の数字は、熱伝達率としてとった値である。TAGAMI または UCHIDA は熱伝達率の経時変化として(3)式(田上の式)および内田のデータを用いた場合である。これらの図から、ある一定値の熱伝達率を用いた計算値と実測値との差はそれ程大きくなく、一定値の熱伝達率を用いて圧力容器内の温度と圧力の概算ができることがわかる。一方、(3)式による熱伝達率は、温度を圧力の計算値が実測値より低くなっていることから、大部分が大きすぎる傾向にある。内田のデータによる熱伝達率は逆に小さい傾向にある。

Fig. 1 4. 1 ~ Fig. 1 4. 1 3 において、実測値と大きく違わないように選んだ平均的な熱伝達率(温度を基準とした場合  $\bar{h}_T$ , 圧力を基準とした場合  $\bar{h}_p$ ) と、最大エネルギー投入速度の圧力容器単位容積当りの値 ( $q_{\max}/V$ ) との関係を検討し、Fig. 1 5 に示した。ここで、 $q_{\max}/V$  は最大蒸気流量から求め、Table 7 に示した。なお、実験結果より得られた熱伝達率と ( $q_{\max}/V$ ) との関係は、次の実験式で表わすことができる。

温度を基準とした熱伝達率  $\bar{h}_T$

$$\bar{h}_T = 2.2.8 \left( \frac{q_{\max}}{V} \right)^{0.6} + 8.5.1 \times 10^{-4} \left( \frac{q_{\max}}{V} \right)^{2.0.1.3} \quad (4)$$

圧力を基準とした熱伝達率  $\bar{h}_p$

$$\bar{h}_p = 2.5.9 \left( \frac{q_{\max}}{V} \right)^{0.6} + 1.7.8 \times 10^{-2} \left( \frac{q_{\max}}{V} \right)^{1.6.1.3} \quad (5)$$

一方、連続的にエネルギーが投入される系においてエネルギーの投入がピークを持つ場合、( $q_{\max}/V$ ) だけではピーク前後のエネルギー投入状態についてまでも評価できない。そこで、

できるだけ連続的なエネルギー投入状態を知るため、田上の式の考え方をもとにし、一定時間内に圧力容器単位容積当り投入されたエネルギーの割合が最大となるような値 ( $Q(t_m)/V \cdot t_m$ ) で評価する。ここで、

$$\frac{Q(t_m)}{V \cdot t_m} = \frac{1}{V} \left( \frac{\int_0^t q(t) dt}{t} \right)_{\max} \quad (6)$$

である。 $(Q(t_m)/V \cdot t_m)$  と  $(q_{\max}/V)$  との関係を表 7 および Fig. 16 に示す。図から両者の関係は 1 点 (TD 24) を除いて比例関係を示しており、最大蒸気流入量が増大しても、ピーク前後のエネルギー投入状態が一定の傾向にあることを示している。 $(Q(t_m)/V \cdot t_m)$  と  $(q_{\max}/V)$  との関係は次式で表わすことができる。

$$\frac{Q(t_m)}{V \cdot t_m} = 1.68 \left( \frac{q_{\max}}{V} \right)^{0.9019} \quad (7)$$

## 5. ま と め

SEAMATE-II を用いた急昇温実験を行い、急昇温に関する工学的データとして次の知見を得た。

(1) SEAMATE-II には、圧力容器内の温度を短時間で上昇させるため、蒸気供給源としてボイラー 2 缶 (各 1.5 ton/h) と蒸気を溜めるアキュムレーター (4 m<sup>3</sup>) を設けた。蒸気供給量を変えた急昇温実験によって、アキュムレーターを設けたことが有効であること、また、現蒸気供給源での急昇温時の最大蒸気供給量が明らかとなった。

(2) SEAMATE-II は、 $\gamma$ 線照射下での長時間連続運転に対応できるように、照射室内にはできるだけ機器を設置しない設計を行った。このため蒸気流量制御弁、蒸気排出弁は照射室外に配置された。急昇温実験において、蒸気供給・排出用配管が長くなったため、昇温に必要な蒸気量が大幅に増加することがわかった。また、蒸気供給開始後、蒸気供給配管への伝熱によって圧力容器内への蒸気の到達が遅れ、圧力容器内の温度上昇が遅れること、およびその遅れ時間が明らかとなった。

(3) 蒸気供給ラインを A ラインとした急昇温実験では、蒸気流量制御弁の開度を 47.5% ~ 94% とした実験を行い、最大蒸気流量が 1,400 ~ 9,600 kg/h となること、および蒸気流量、圧力容器内の温度・圧力、圧力容器壁の温度の過渡的変化のデータを得ることができた。また、この結果より、急昇温時の制御に必要な初期蒸気流量と流量制御弁開度の関係を明らかにした。なお、急昇温時の圧力容器内蒸気は若干過熱化されていることがわかった。

(4) 急昇温実験で得られた積算蒸気流量と圧力容器内の温度の関係をもとに、急昇温時の熱計算を簡便に行なえる単位伝熱面積当りの必要熱量を得た。この結果を用いることによって、

できるだけ連続的なエネルギー投入状態を知るため、田上の式の考え方をもとにし、一定時間内に圧力容器単位容積当り投入されたエネルギーの割合が最大となるような値 ( $Q(t_m)/V \cdot t_m$ ) で評価する。ここで、

$$\frac{Q(t_m)}{V \cdot t_m} = \frac{1}{V} \left( \frac{\int_0^t q(t) dt}{t} \right)_{\max} \quad (6)$$

である。 $(Q(t_m)/V \cdot t_m)$  と  $(q_{\max}/V)$  との関係を表 7 および Fig. 16 に示す。図から両者の関係は 1 点 (TD 24) を除いて比例関係を示しており、最大蒸気流入量が増大しても、ピーク前後のエネルギー投入状態が一定の傾向にあることを示している。 $(Q(t_m)/V \cdot t_m)$  と  $(q_{\max}/V)$  との関係は次式で表わすことができる。

$$\frac{Q(t_m)}{V \cdot t_m} = 1.68 \left( \frac{q_{\max}}{V} \right)^{0.9019} \quad (7)$$

## 5. ま と め

SEAMATE-II を用いた急昇温実験を行い、急昇温に関する工学的データとして次の知見を得た。

(1) SEAMATE-II には、圧力容器内の温度を短時間で上昇させるため、蒸気供給源としてボイラー 2 缶 (各 1.5 ton/h) と蒸気を溜めるアキュムレーター (4 m<sup>3</sup>) を設けた。蒸気供給量を変えた急昇温実験によって、アキュムレーターを設けたことが有効であること、また、現蒸気供給源での急昇温時の最大蒸気供給量が明らかとなった。

(2) SEAMATE-II は、 $\gamma$ 線照射下での長時間連続運転に対応できるように、照射室内にはできるだけ機器を設置しない設計を行った。このため蒸気流量制御弁、蒸気排出弁は照射室外に配置された。急昇温実験において、蒸気供給・排出用配管が長くなったため、昇温に必要な蒸気量が大幅に増加することがわかった。また、蒸気供給開始後、蒸気供給配管への伝熱によって圧力容器内への蒸気の到達が遅れ、圧力容器内の温度上昇が遅れること、およびその遅れ時間が明らかとなった。

(3) 蒸気供給ラインを A ラインとした急昇温実験では、蒸気流量制御弁の開度を 47.5% ~ 94% とした実験を行い、最大蒸気流量が 1,400 ~ 9,600 kg/h となること、および蒸気流量、圧力容器内の温度・圧力、圧力容器壁の温度の過渡的変化のデータを得ることができた。また、この結果より、急昇温時の制御に必要な初期蒸気流量と流量制御弁開度の関係を明らかにした。なお、急昇温時の圧力容器内蒸気は若干過熱化されていることがわかった。

(4) 急昇温実験で得られた積算蒸気流量と圧力容器内の温度の関係をもとに、急昇温時の熱計算を簡便に行なえる単位伝熱面積当りの必要熱量を得た。この結果を用いることによって、

将来規格に基づく試験を行う認定装置（仮称）の製作に必要な熱計算を容易に行うことができる。

(5) 最大蒸気流量を  $500 \text{ kg/h} \sim 9,500 \text{ kg/h}$  とした場合の急昇温実験における蒸気流量をもとに、CONTEMPT-LT 計算コードで圧力容器内の温度・圧力を計算した。圧力容器内の温度・圧力の計算値と実測値を比較した結果、一定値の熱伝達率を用いた場合でも両者が良く一致することがわかった。これらの結果から、実測値と計算値が良く一致するように選んだ平均的な熱伝達率の実験式を得た。また、CONTEMPT 計算コードが本装置のような小規模の装置の熱計算にも使用できることがわかった。なお、実験によって得られた熱伝達率は、本装置の機器構成および規模から、そのまま原子炉における LOCA 条件の解析に適用することはできないが、LOCA 条件の小規模モデル実験および本装置と同種の装置製作における熱計算において、有用なデータとなる。

おわりに、SEAMATE-II の製作に中心的役割を果たされ、本実験の遂行に有益な助言をいただいた東海研究所大型トカマク開発部 JT-60 計画室、笠原佑幸氏に、本研究の実施にあたり有益な助言をいただいた、Head, Industrial Application and Chemistry, IAEA 町末男氏に、また本報告をまとめるにあたり有益な助言をいただいた開発試験場次長 田村直幸氏に感謝いたします。

## 参 考 文 献

- 1) a) 開発試験場技術開発課炉材料試験係, "原子炉用電線材料健全性試験装置の製作", (私信, 1978)
- b) 中瀬, 吉田, 日馬, 伊藤, 岡田, 町, "電線ケーブル絶縁材料のLOCA環境劣化における同時法と逐次法との比較", EIM-80-98 (NE-80-7)
- c) K. Yoshida, Y. Nakase, S. Okada, M. Ito, Y. Kusama, S. Tanaka, Y. Kasahara, and S. Machi, "Degradation of Insulating Polymer Materials under LOCA Condition", The Third International Meeting on Radiation Processing, Tokyo, Oct. 26-31, 1980
- d) K. Yoshida, Y. Nakase, S. Okada, M. Ito, Y. Kusama, S. Tanaka, Y. Kasahara, and S. Machi, "Methodology Study for Qualification Testing of Wire and Cable at LOCA Condition", USNRC Eighth Water Reactor Safety Research Information Meeting, USA. Oct. 27-31, 1980
- 2) 開発試験場技術開発課炉材料試験係, "原子炉用電線材料健全性試験装置の試作" (投稿中)
- 3) 石川 他, "格納容器温度圧力解析コードCONTEMPTの検討", JAERI-M 5339 (1973)
- 4) Slaughterbeck, D.C., "Review of Heat Transfer Coefficients for Condensing Steam in a Containment Building following a Loss-of-Coolant Accident", IN-1388 (1970)
- 5) Marshall, J. and Holland, P.G., "Blowdown into Full-Pressure Containment", conf. on Heat and Fluid Flow in Water reactor Safty, paper C209/77, IME (1977)
- 6) Nariai, H. et al, "Thermo-Hydraulic Behavior in a Model Pressure Suppression Containment During Blowdown", Topics in Two-Phase Heat Transfer and Flow, ASME (1978)
- 7) Wagner, R.J. and Wheat, L.L., "CONTEMPT-LT User's Manual", ANC Interim Report I-214-12.1 (1973)

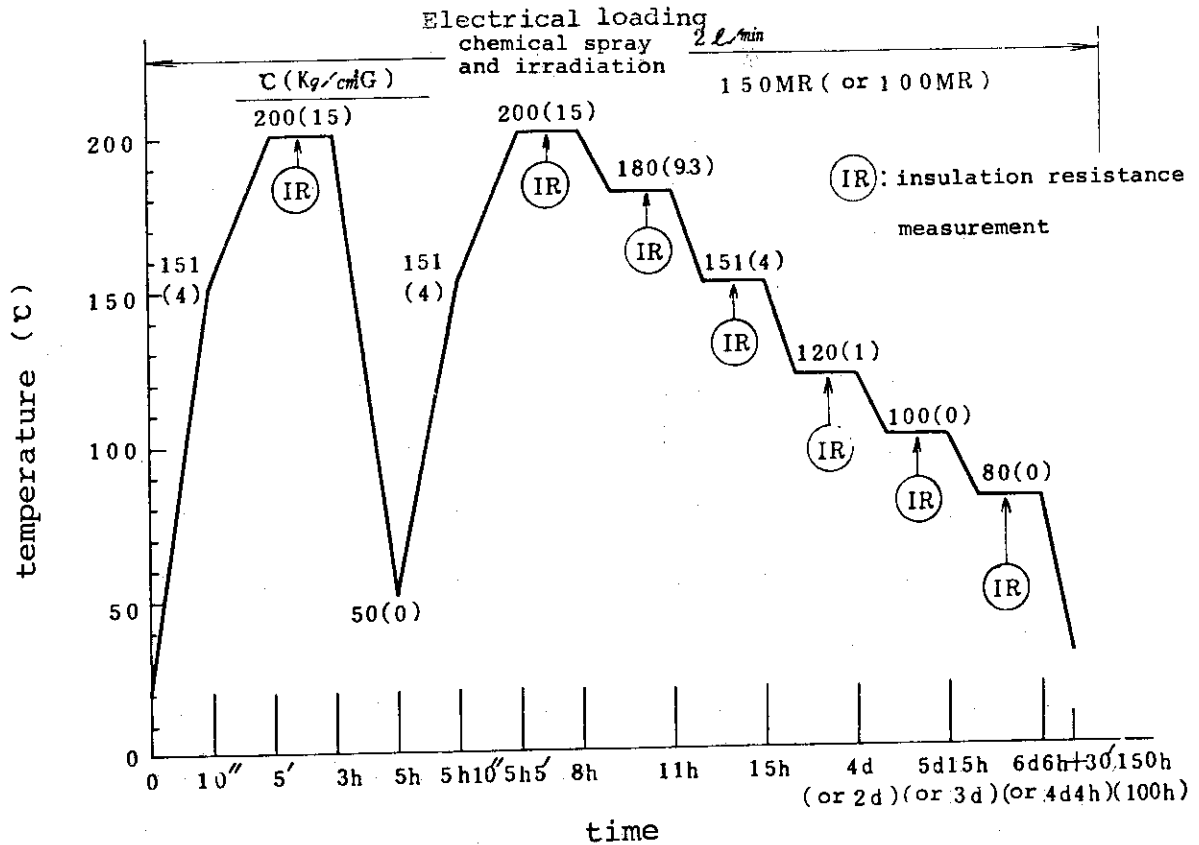


Fig. 1 Standard operation program specifying the design of SEAMATE-II .

The time-temperature(Pressure) profile and other conditions are analogous to postulated LOCA environments.

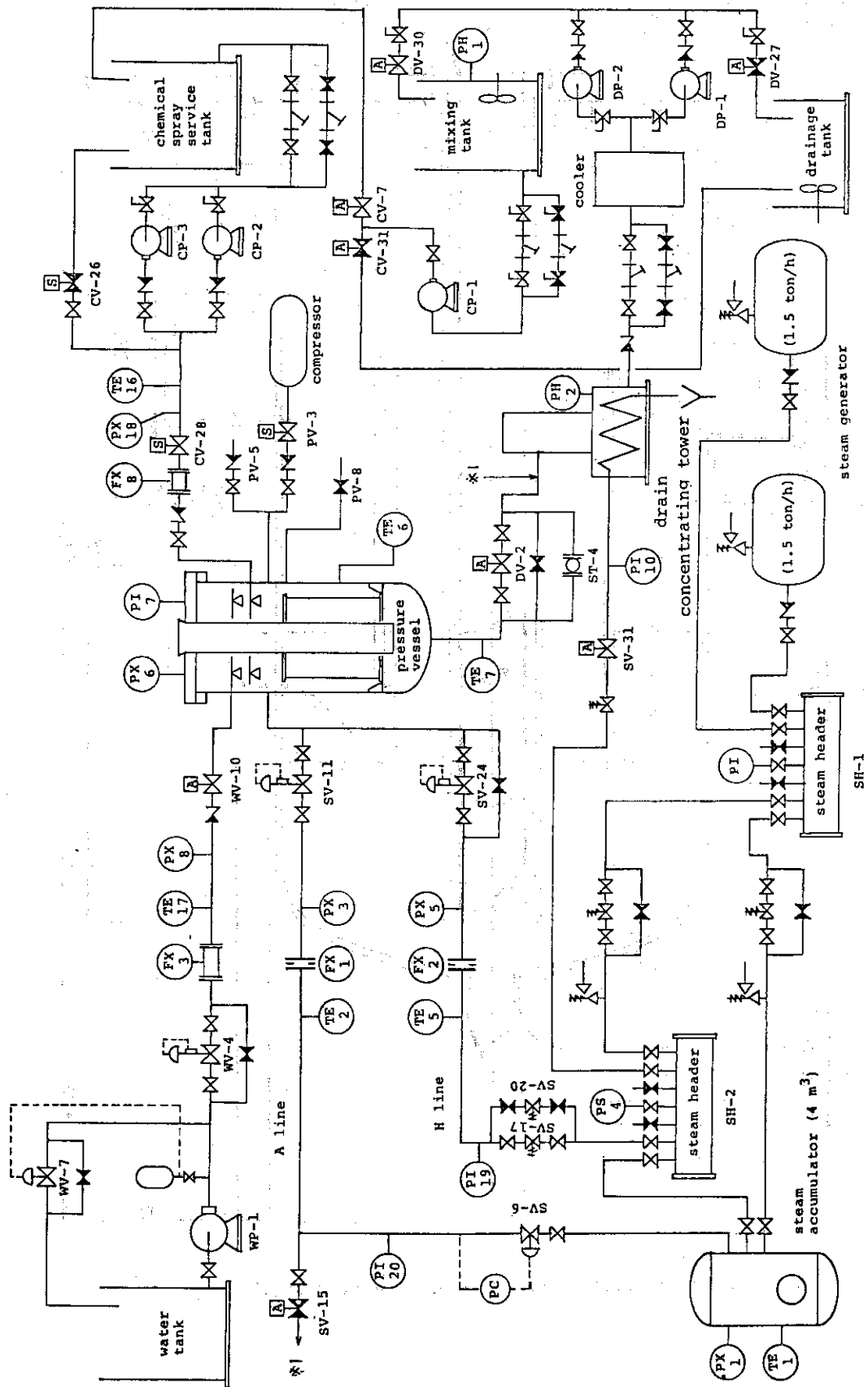


Fig. 2 Simplified flow sheet of SEAMATE-II

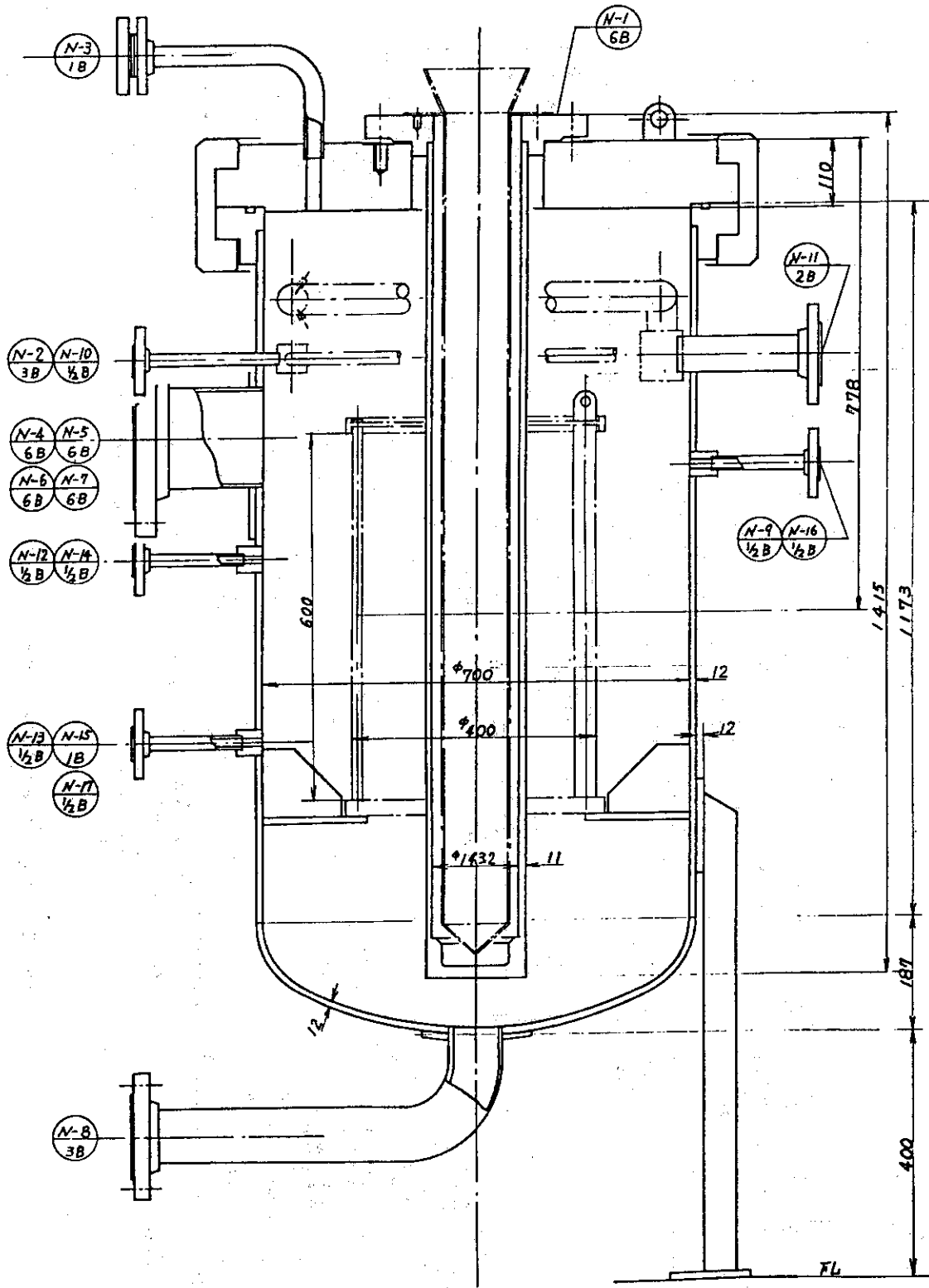


Fig. 3 Sectional view of pressure vessel (PV).



Table 1 List of nozzles attached to the pressure vessel

symbols	purpose	size	azimuth	neck of nozzles
N- 1	source guide	8 B	—	sch. 80
N- 2	steam inlet	3 B	270°	20s
N- 3	spare	1 B	315°	40
N- 4	penetration	6 B	135°	20s
N- 5	penetration	6 B	225°	20s
N- 6	penetration	6 B	315°	20s
N- 7	penetration	6 B	45°	20s
N- 8	drain outlet	3 B	(270°)	20s
N- 9	air inlet	1/2 B	0°	40
N-10	chemical inlet	1/2 B	0°	40
N-11	cooling water inlet	2 B	180°	20s
N-12	detector for pres.	1/2 B	90°	40
N-13	detector for pres.	1/2 B	165°	40
N-14	detector for temp.	1/2 B	270°	40
N-15	spare	1 B	0°	40
N-16	gas sampling outlet	1/2 B	180°	40
N-17	detector for temp.	1/2 B	90°	40

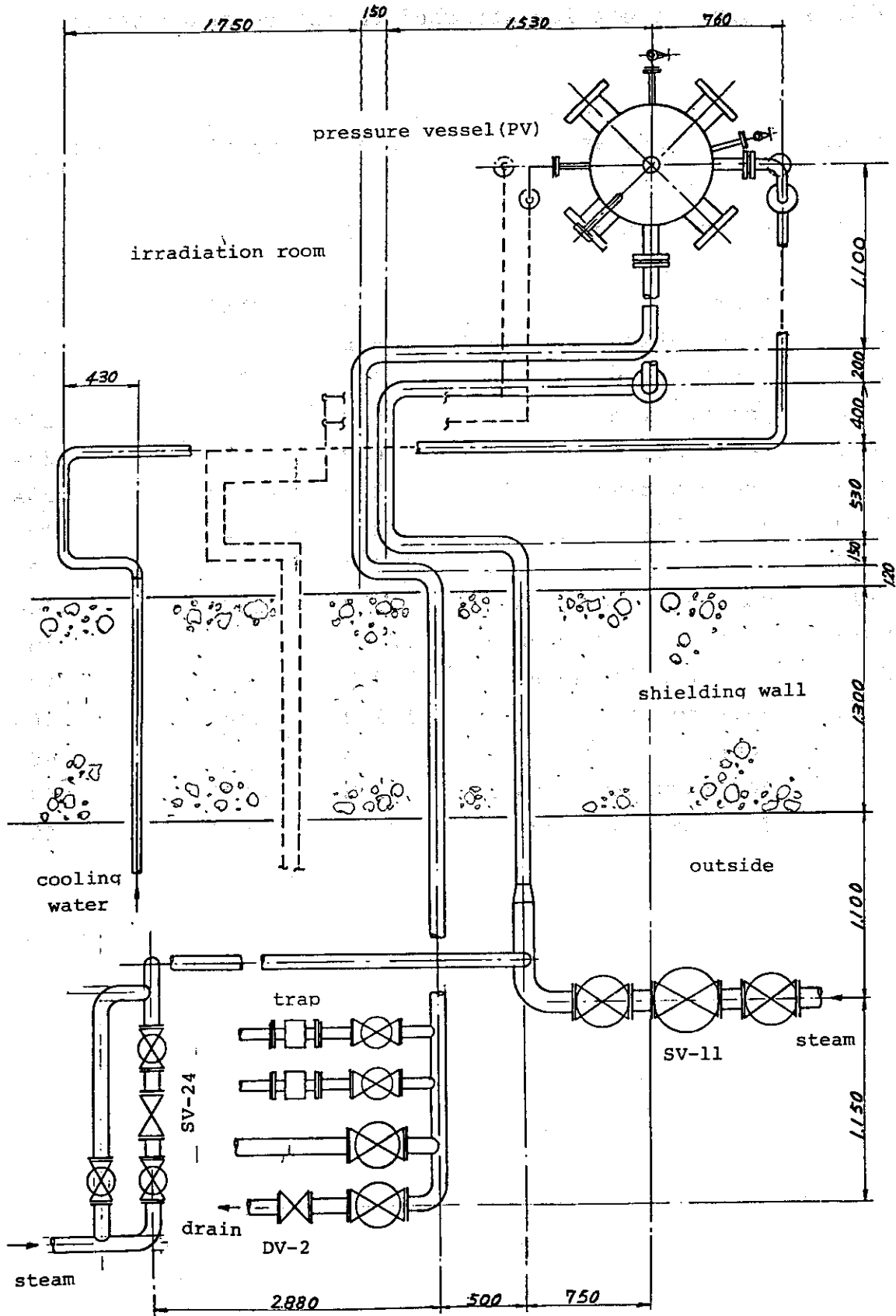


Fig. 4 Arrangements of pressure vessel and piping inside and outside irradiation room.

Table 2 Parameters and detectors for the measurements

symbols of parameter	symbols of detectors	items of measurements	sensors, transmitters and their ranges
$T_{sa}$	TE-1	temp. in SACC	MgO insulated TH.C. element C-C, dia. 0.25mm <sup>φ</sup> theath O.D. 1.6mm <sup>φ</sup> range 0 - 250 °C
$P_{sa}$	PIX-1	pres. in SACC	pressure transmitter range -1 - 24 kg/cm <sup>2</sup> g)
$T_{al}$	TE-2	temp. at A-line	same as $T_{sa}$
$P_{al}$	PIX-3	pres. at A-line	same as $P_{sa}$
$W_{al}$	FX-1	steam flow rate at A-line	orifice, d/p cell transmitter range 370 - 10,000 kg/h
$T_{hl}$	TE-5	temp. at H-line	same as $T_{sa}$
$P_{hl}$	PIX-5	pres. at H-line	same as $P_{sa}$
$W_{hl}$	FX-2	steam flow rate at H-line	orifice d/p cell transmitter range 37 - 1,000 kg/h
$T_{pv1}$	TE-6-1	temp. in PV (for record)	same as $T_{sa}$
$T_{pv2}$	TE-6-2	temp. in PV (for control)	same as $T_{sa}$
$P_{pv}$	PIX-6	pres. in PV	same as $P_{sa}$
$T_{pvo}$	TE-7	temp. at outlet of PV	same as $T_{sa}$
$T_{wl}$	TE-17	temp. of cooling water at inlet of PV	same as $T_{sa}$
$P_{wl}$	PX-8	pres. of cooling water at inlet of PV	pressure transmitter of range -1 - 40 kg/cm <sup>2</sup> g)
$W_{wl}$	FX-3	flow rate of cooling water	electromagnetic flow meter range 0 - 200 lit/min
$T_{cl}$	TE-16	temp. of chemicals at inlet of PV	same as $T_{sa}$
$P_{cl}$	PX-18	pres. of chemicals at inlet of PV	same as $P_{wl}$
$W_{cl}$	FX-8	flow rate of chemicals	electromagnetic flow meter range 0 - 10 lit/min

Fig. 2 Position of thermocouples, pressure transmitters and flow meters in the pressure vessel for temperature and pressure measurements during rapid heating tests. The exacting positions of the sensors are explained in Table 2.

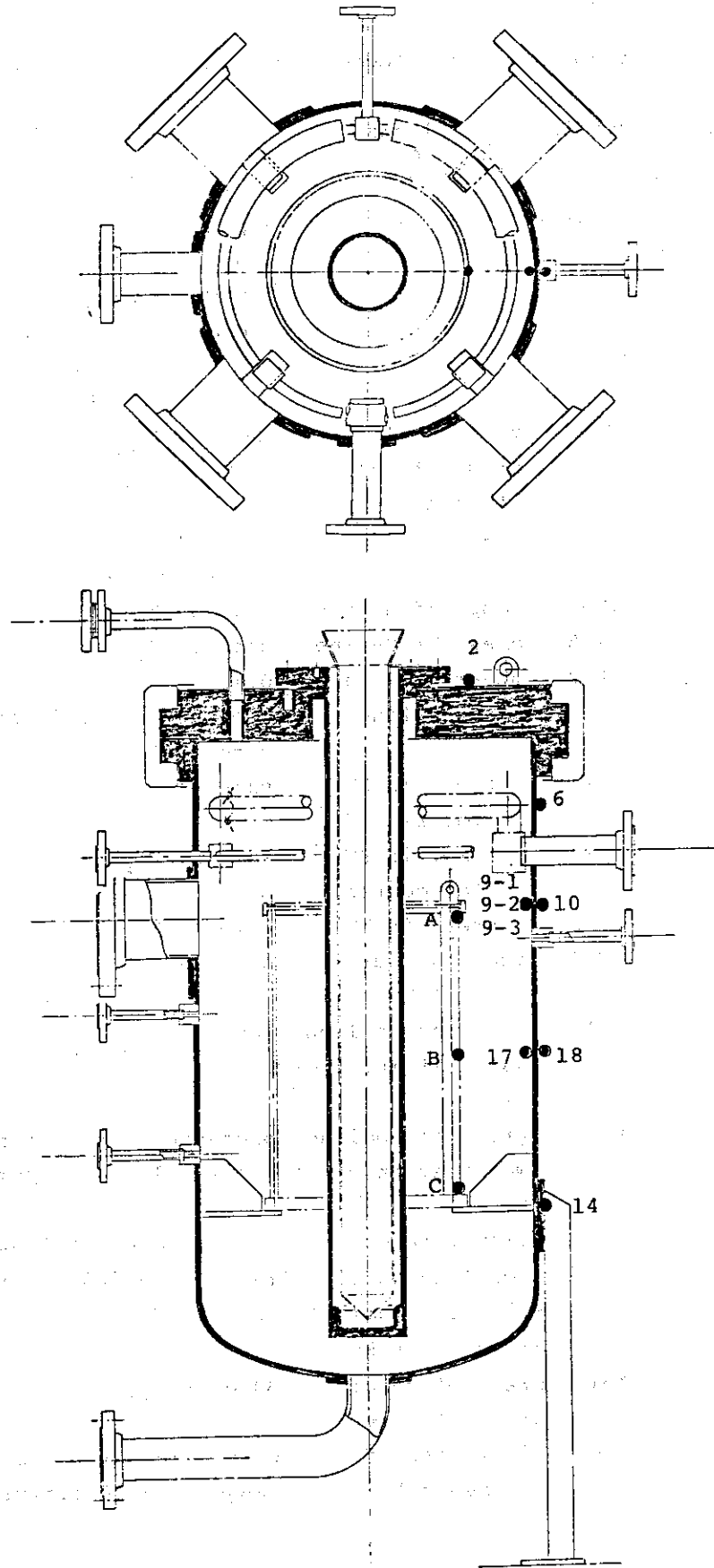


Fig.5 Positions of thermocouples (alphabet and numerals) in the pressure vessel for temperature measurements during rapid heating tests. The setting methods of the thermocouples are explained in Table 3.

Table 3 Setting of thermocouples in the pressure vessel (cf. Fig.5)

location	way of setting
A	bound with wire on mandrel
B	
C	
6	bound with fixture
9-1	
9-2	bound with epoxy putty soldered on fixture
9-3	
10	bound with fixture
14	
17	
18	

Table 4 Experimental conditions for steam flow meter test

symbol of experiments	serial order in a set of experiments	selection of		valve opening actual	measurement period	measurement note
		steam flow line	setting			
TD30	1	A	30 %	34 %	200 sec	
TD31	2	A	60	66	200	1)
TD32	3	A	75	80	200	
TD33	4	A	80	85	200	
TD34	5	A	93.5	95	200	
TD35	6	H	30	37	720	2)

1) Measurement was started after injection of steam.

2) Steam supply was stopped after 160 seconds.

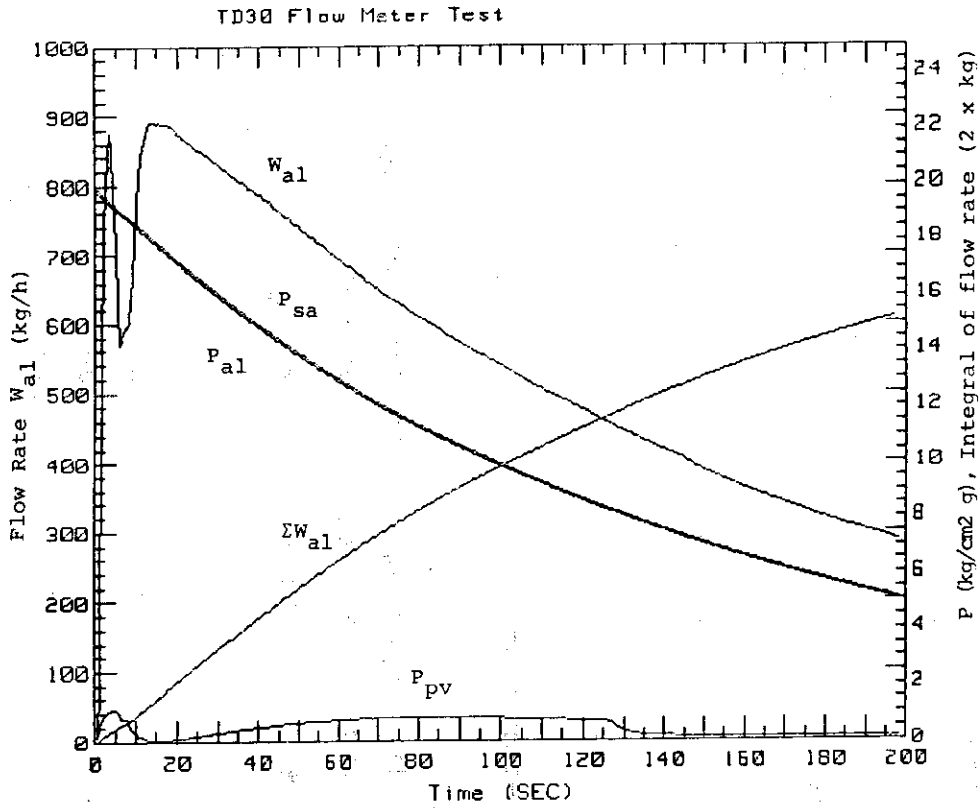


Fig. 6.1 Experimental results of flow meter test (TD30): time traces of steam flow rate ( $W_{al}$  or  $W_{hl}$ ), integrals of steam flow rate ( $\Sigma W_{al}$  or  $\Sigma W_{hl}$ ), and pressures in the accumulator ( $P_{sa}$ ), the steam flow line ( $P_{al}$  or  $P_{hl}$ ) and the pressure vessel ( $P_{pv}$ ). Figures from 6-1 to 6-6 correspond to the results obtained by each experiment (TD30 - TD35).

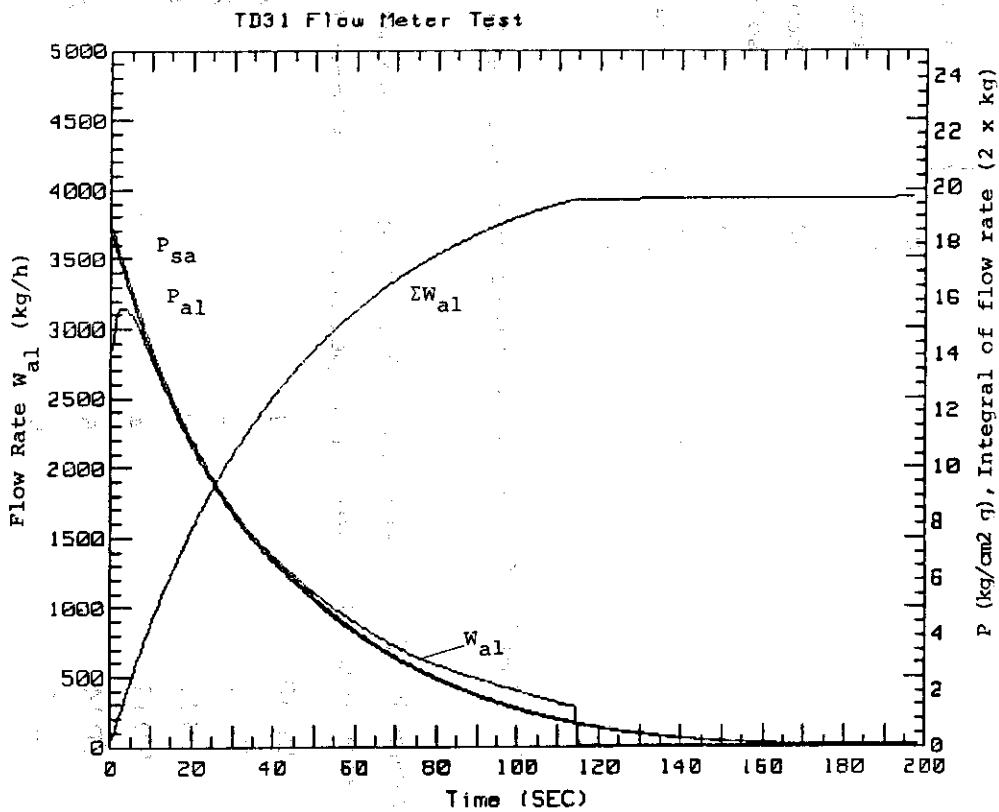


Fig. 6.2 (TD31)

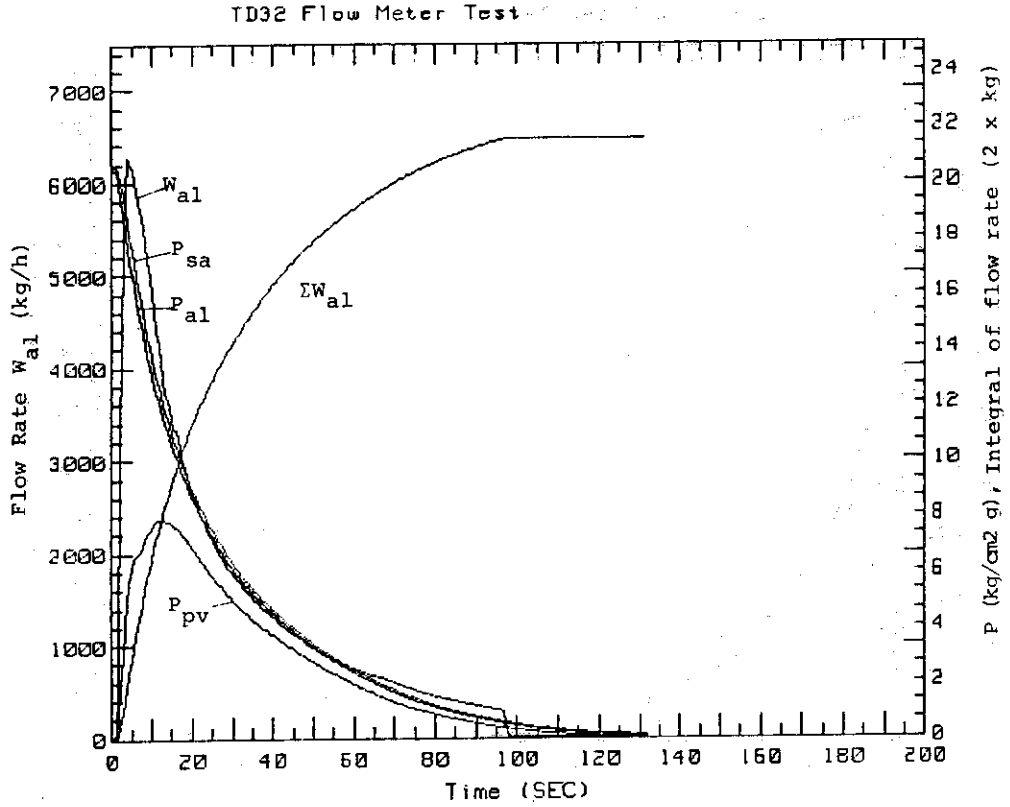


Fig. 6.3 (TD32)

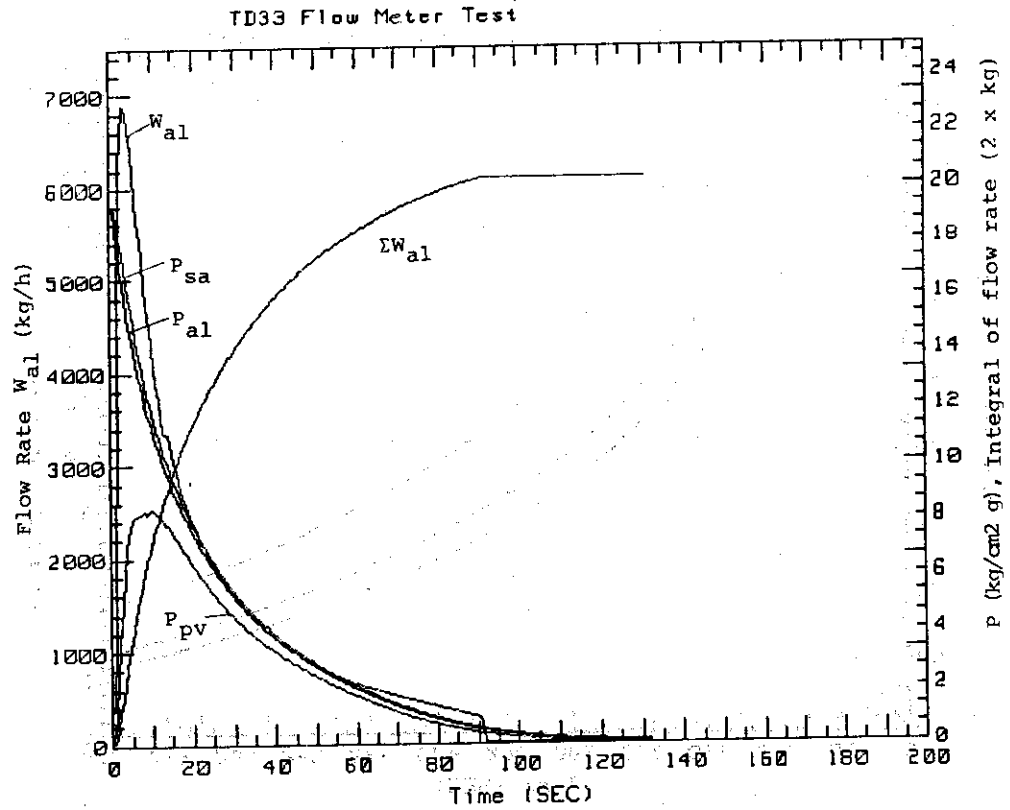


Fig. 6.4 (TD33)

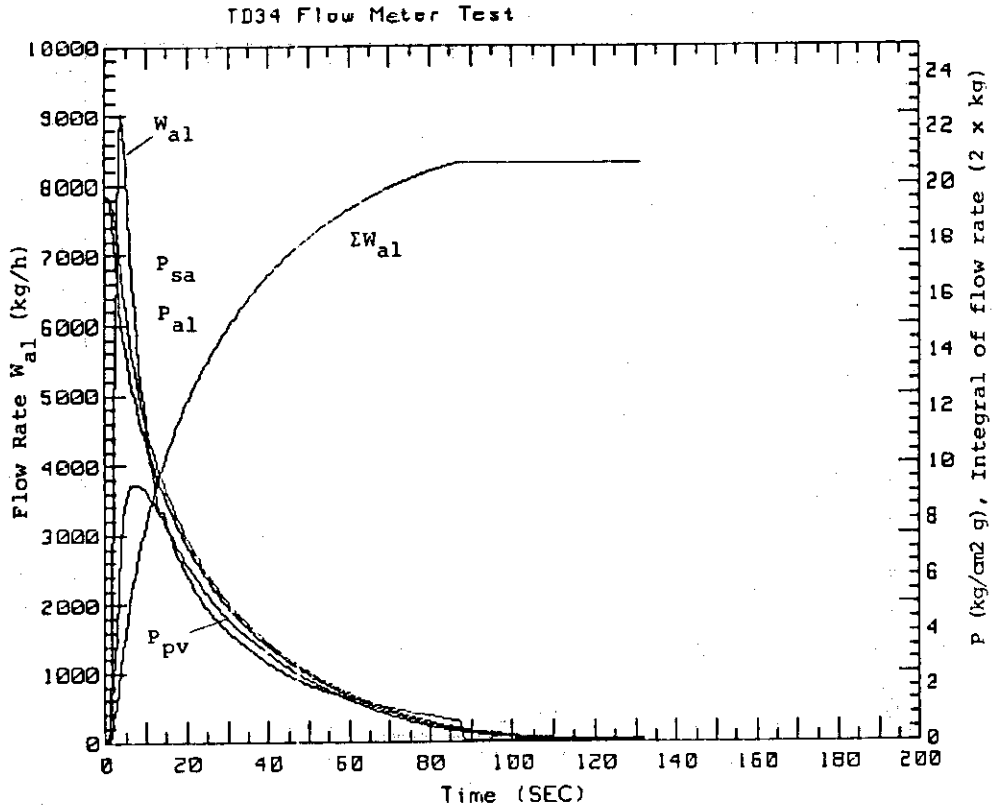


Fig. 6.5 (TD34)

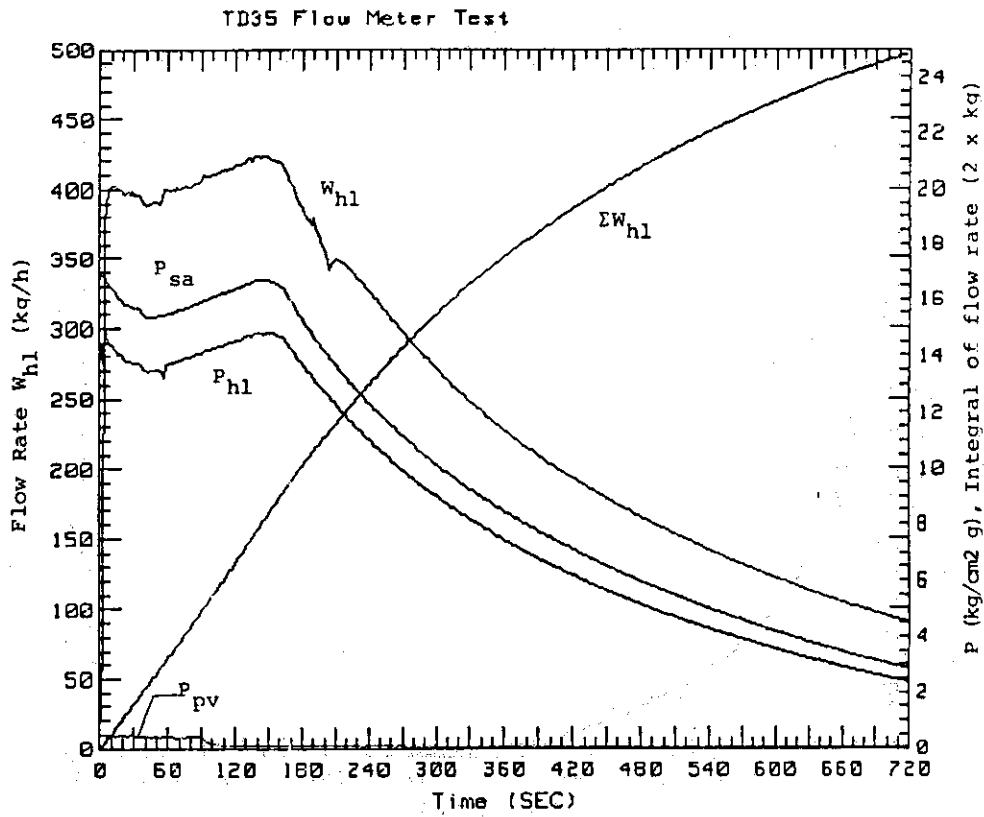


Fig. 6.6 (TD35)



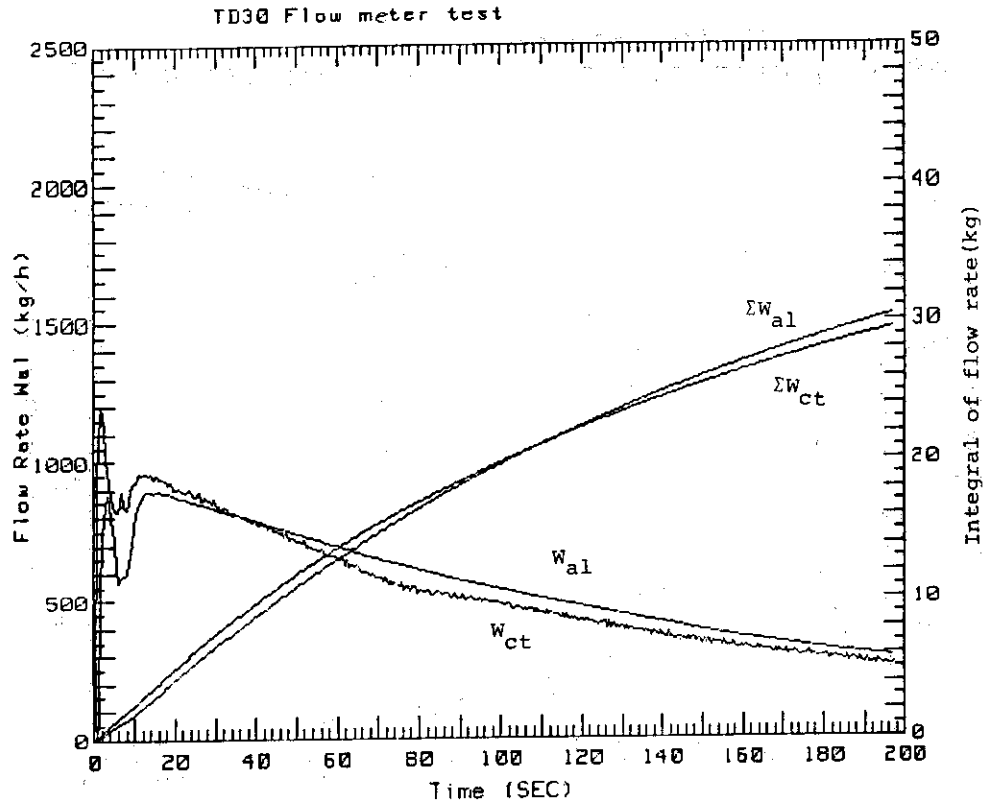


Fig. 7.1 Flow meter test (TD30): comparison of experimental results and calculations for steam flow rate and integral of steam flow rate. Figures from 7-1 to 7-6 correspond to the results obtained by each experiment (TD30 - TD35).

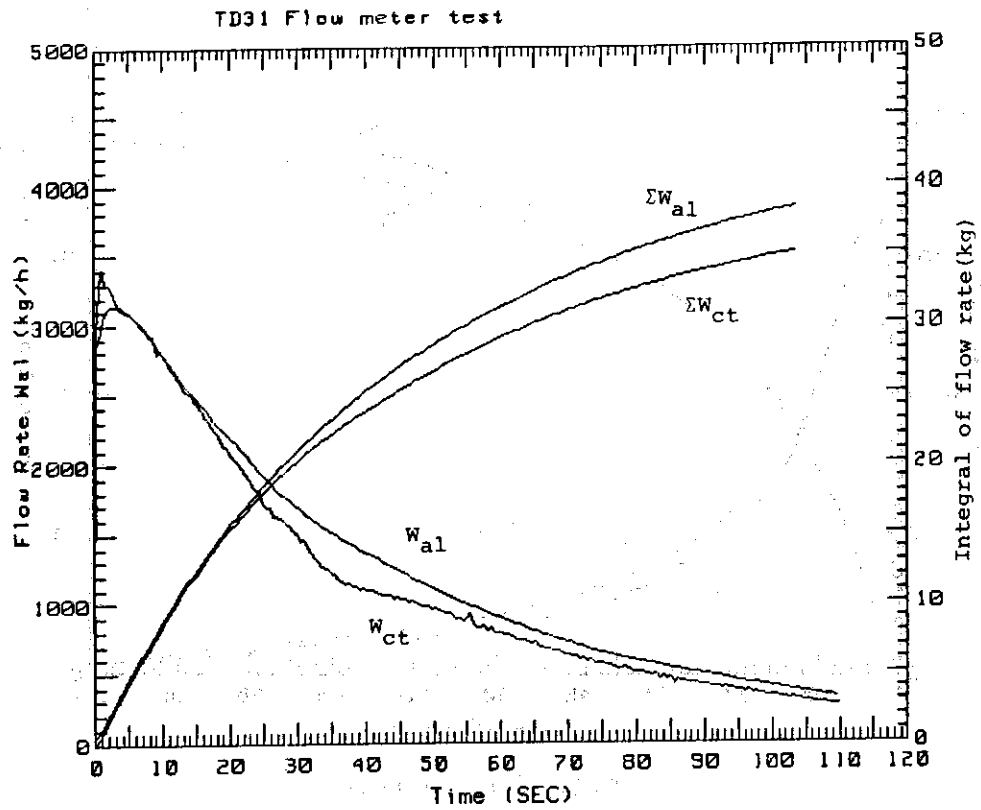


Fig. 7.2 (TD31)

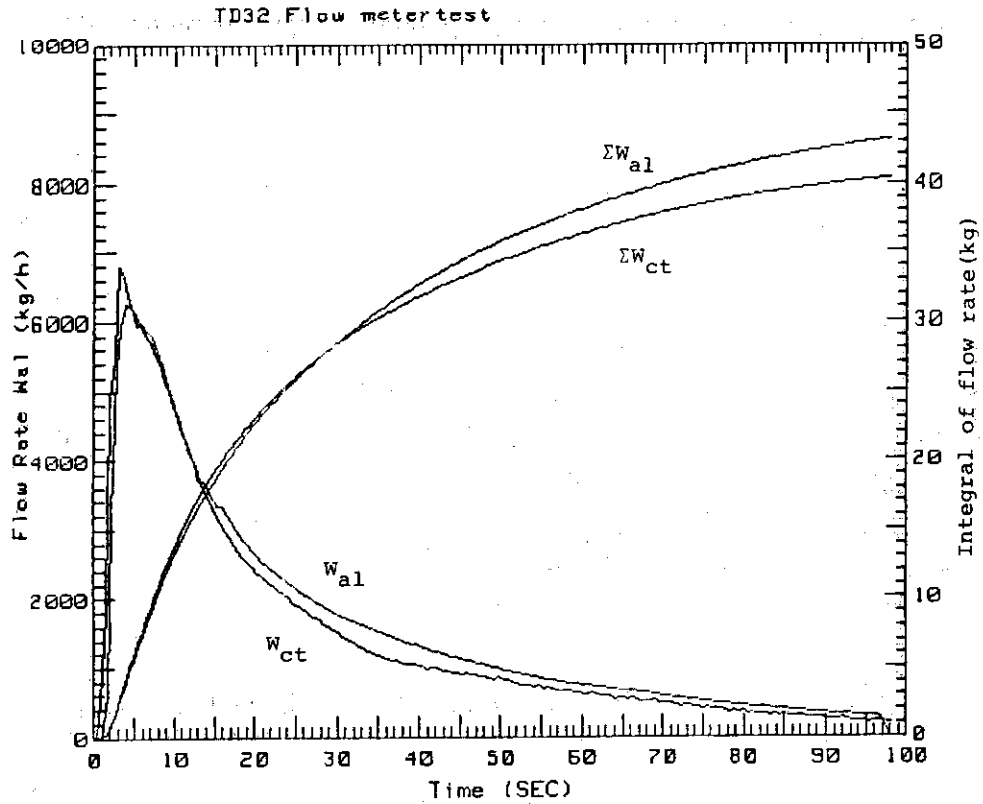


Fig. 7.3 (TD32)

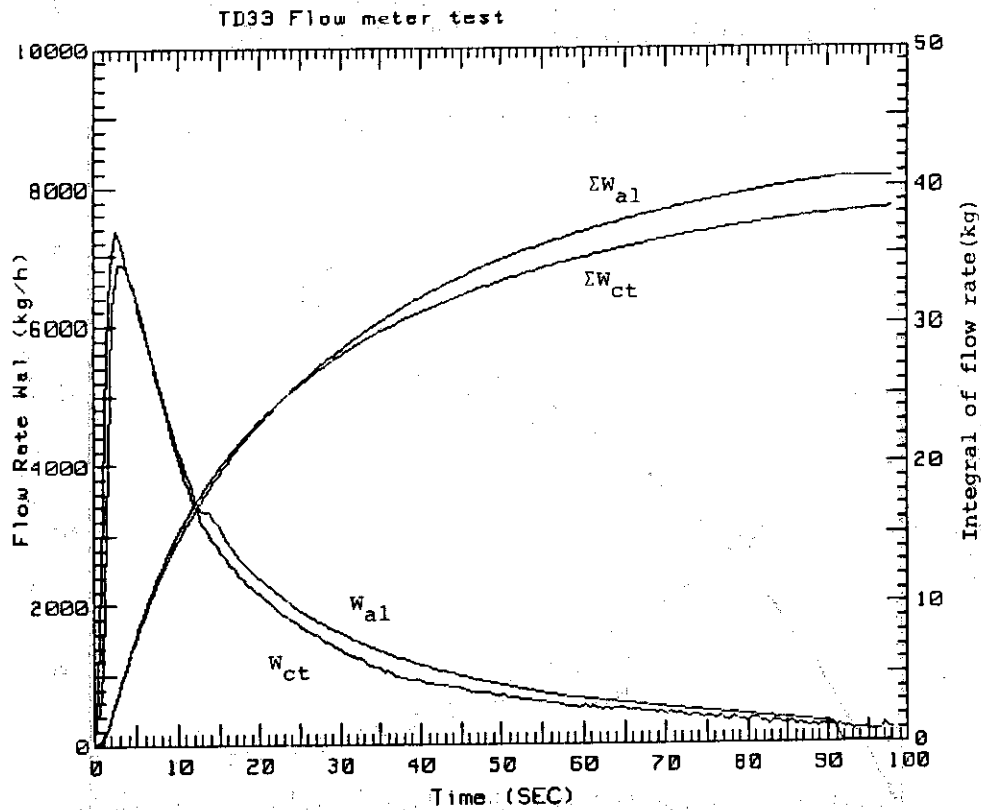


Fig. 7.4 (TD33)

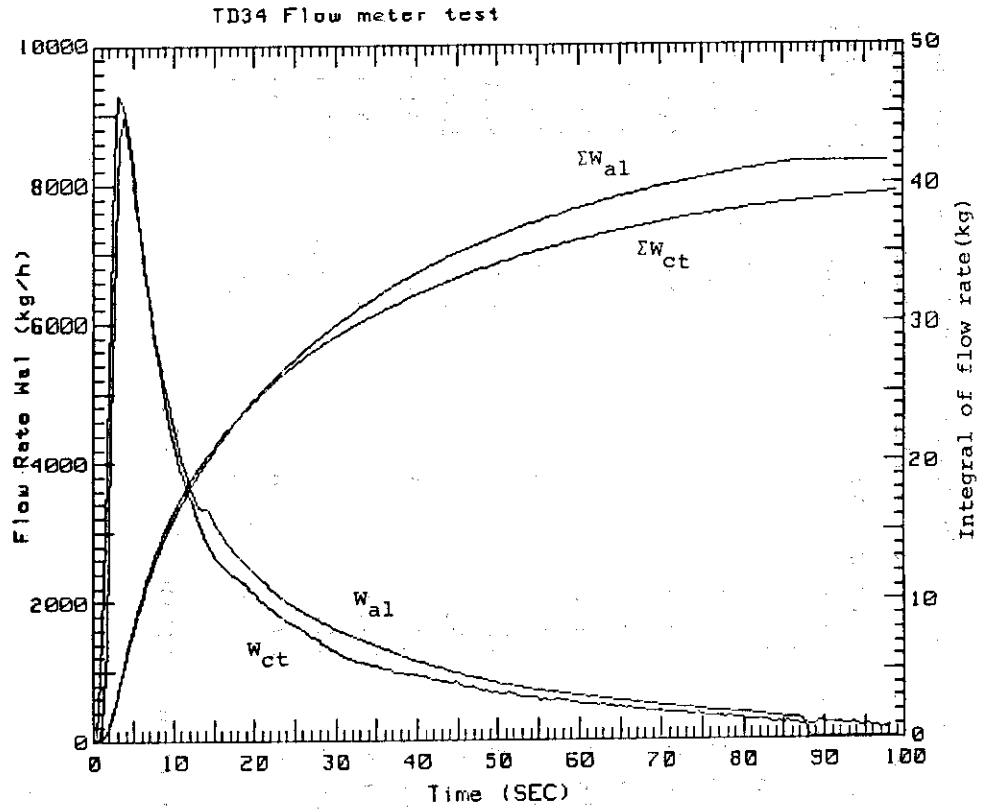


Fig. 7.5 (TD34)

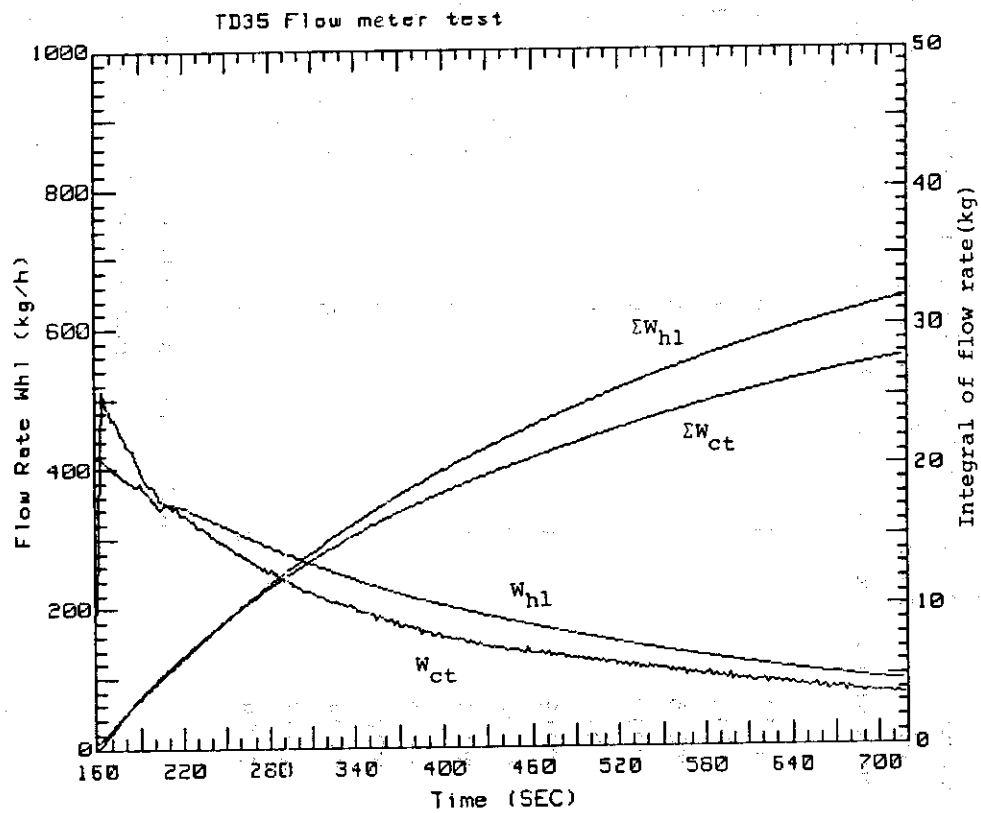


Fig. 7.6 (TD35)

Table 5 Experimental conditions for rapid heating test

symbol of experiments	serial order in a set of experiments	selection of steam flow line	opening of control valves setting (%)	actual pressure in accumulator (kg/cm <sup>2</sup> g)	minimum used of boilers	period of steam supply (sec)	maximum steam flow rate (kg/h)		
TD14	1	A	47.5	48.0	20.8	16.8	1	180	1500
TD15	2	A	47.5	48.0	20.5	16.3	1	180	1380
TD16	3	A	70.0	72.0	20.5	15.3	1	180	4660
TD17	4	A	70.0	-	19.7	16.2	1	180	4500
TD18	5	A	80.0	82.5	18.2	14.3	2	180	6000
TD19	1	A	80.0	84.0	20.9	14.7	1	180	7300
TD20	2	A	90.0	-	20.4	15.3	1	180	9200
TD21	3	A	50.0	50.0	19.1	16.5	1	180	1380
TD22	4	H	40.0	40.0	19.8	17.3	1	180	510
TD23	1	H	40.0	40.0	19.8	18.5	1	180	480
TD24	1	A	94.0	-	19.5	14.7	1	60+30 <sup>1)</sup>	9550
TD28	1	A	60.0	-	19.4	10.9	0	22	3100
TD29	2	A	60.0	-	20.0	12.2	0	25	2550

note 1) supplied for initial 60 seconds and again after 150 seconds until 180 seconds.

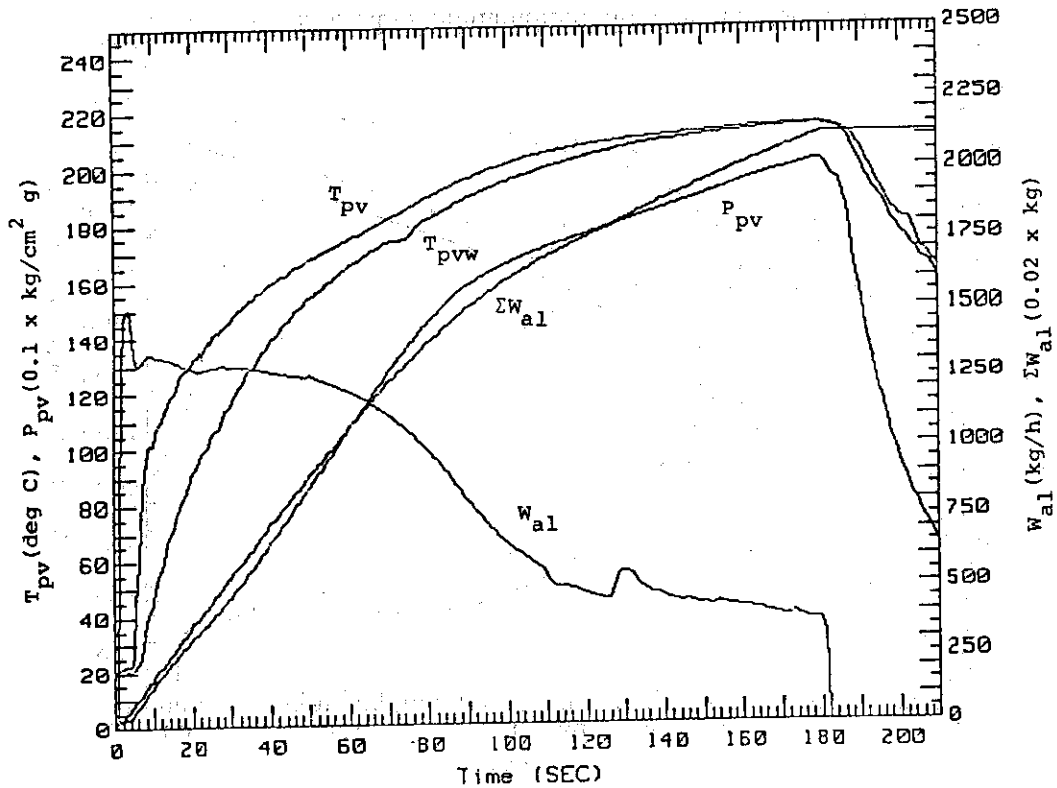


Fig. 8.1 Rapid heating test (TD14): time traces of steam flow rate ( $W_{al}$  or  $W_{hl}$ ), integrals of steam flow rate ( $\Sigma W_{al}$  or  $\Sigma W_{hl}$ ), temperatures in the pressure vessel ( $T_{pv}$ ) and inside the wall of the pressure vessel ( $T_{pvw}$ ), and pressures in the accumulator ( $P_{sa}$ ) and the pressure vessel ( $P_{pv}$ ).

Figures from 8-1 to 8-13 correspond to the results obtained by each experiment (TD14 - TD24 and TD28, TD29).

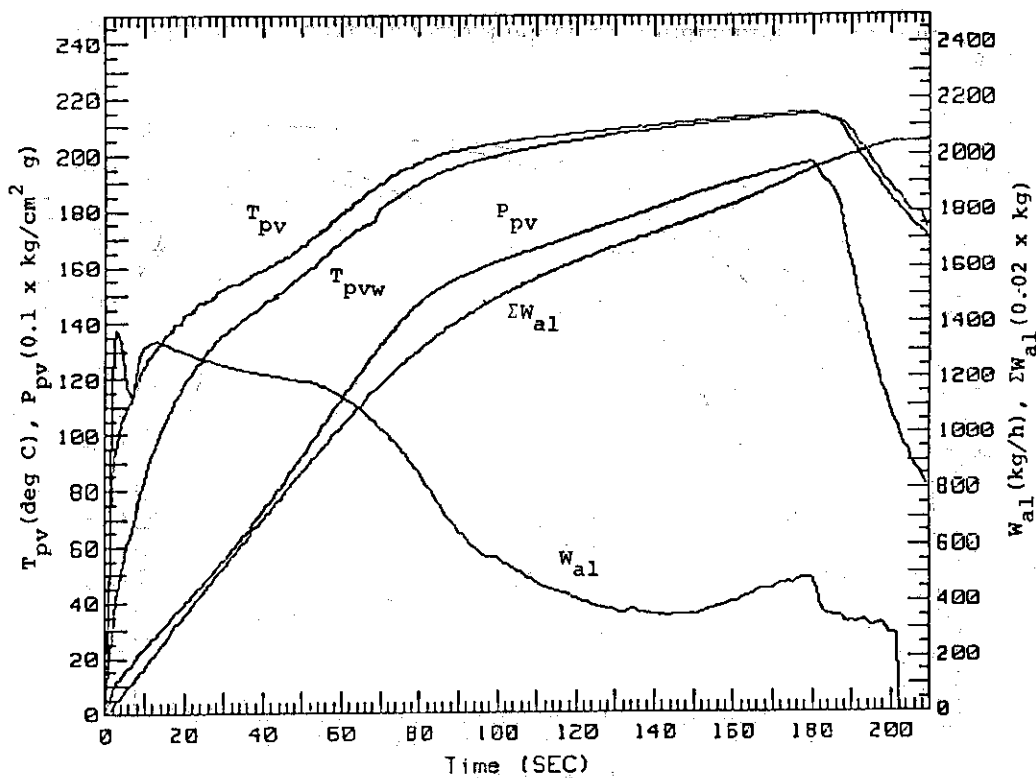


Fig. 8.2 (TD15)

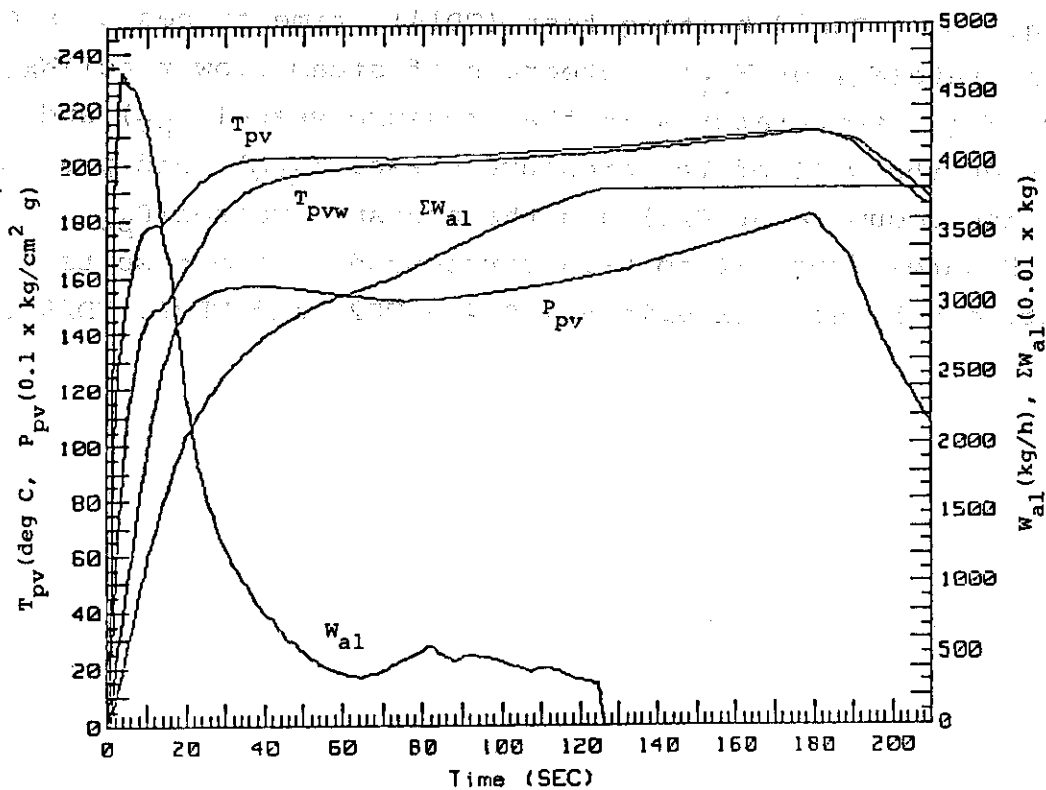


Fig. 8.3 (TD16)

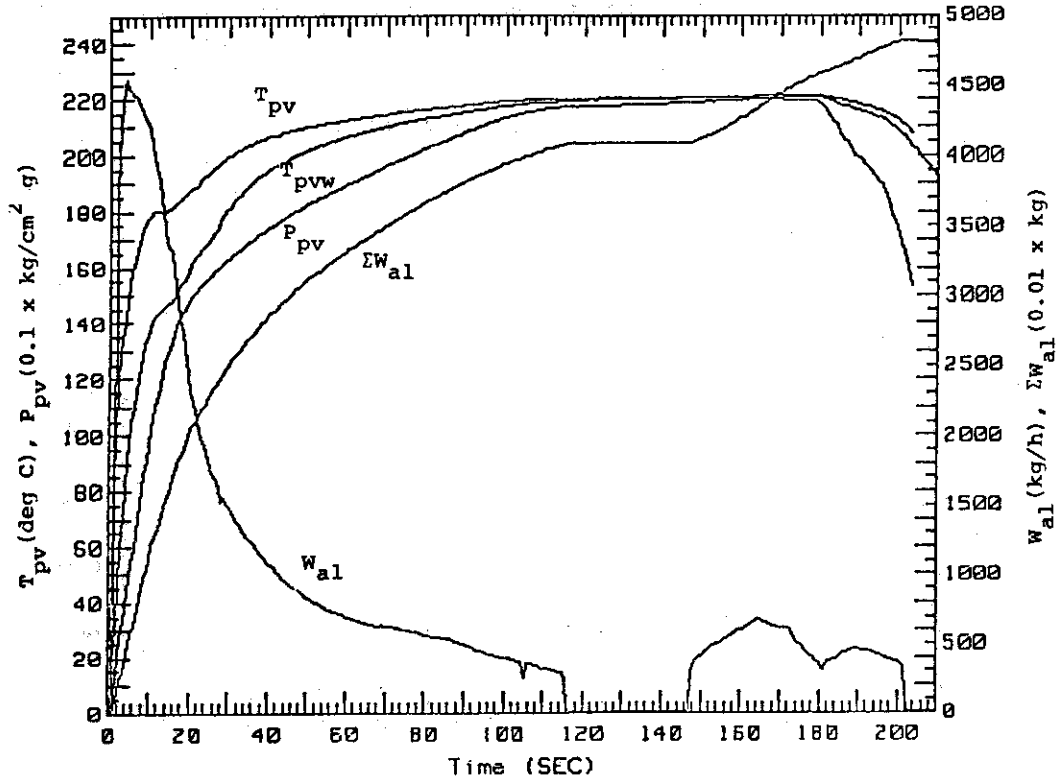


Fig. 8.4 (TD17)

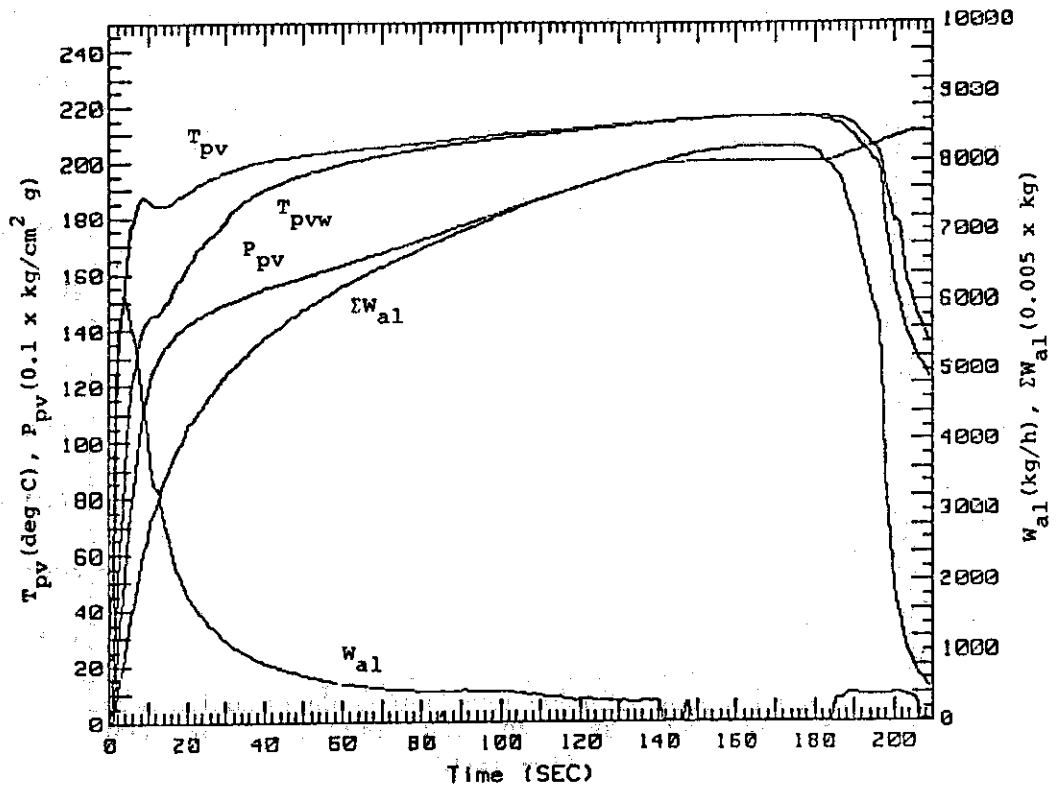


Fig. 8.5 (TD18)

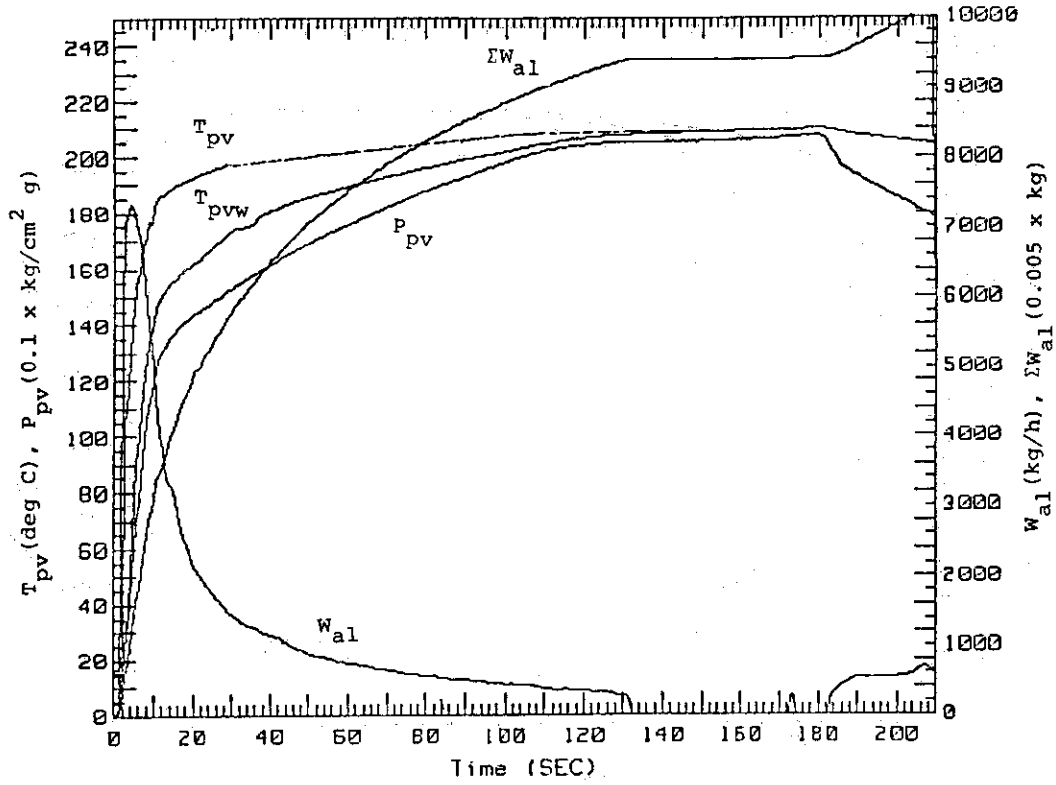


Fig. 8.6 (TD19)

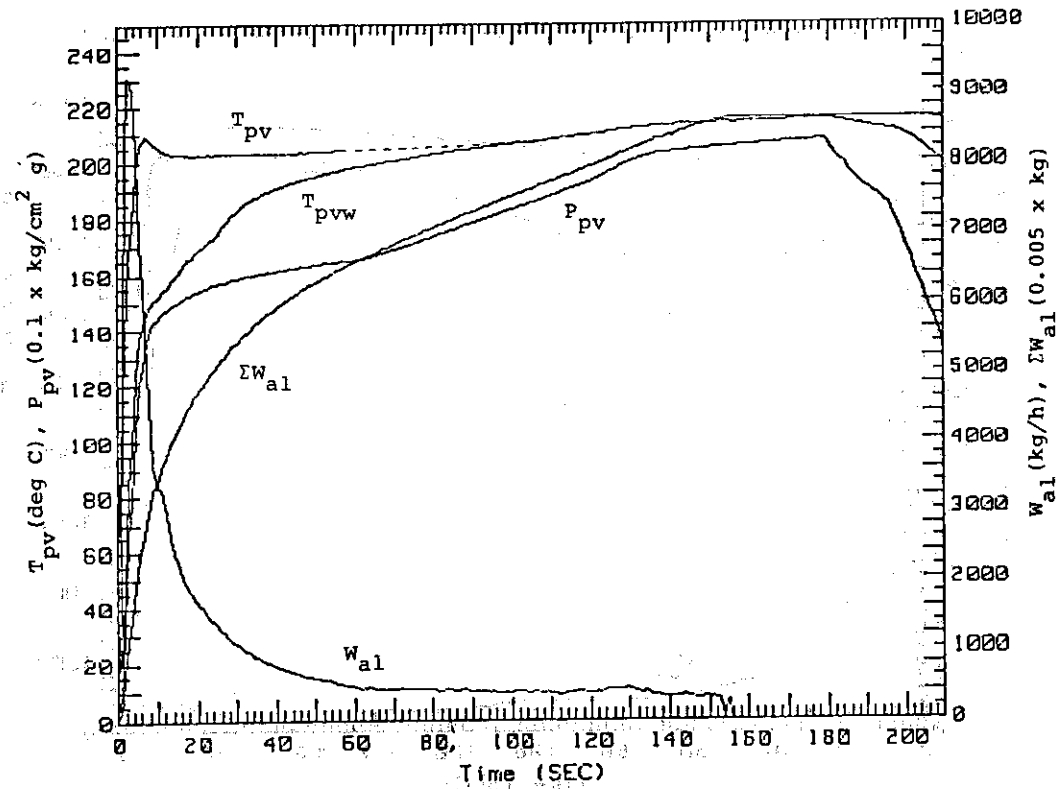


Fig. 8.7 (TD20)



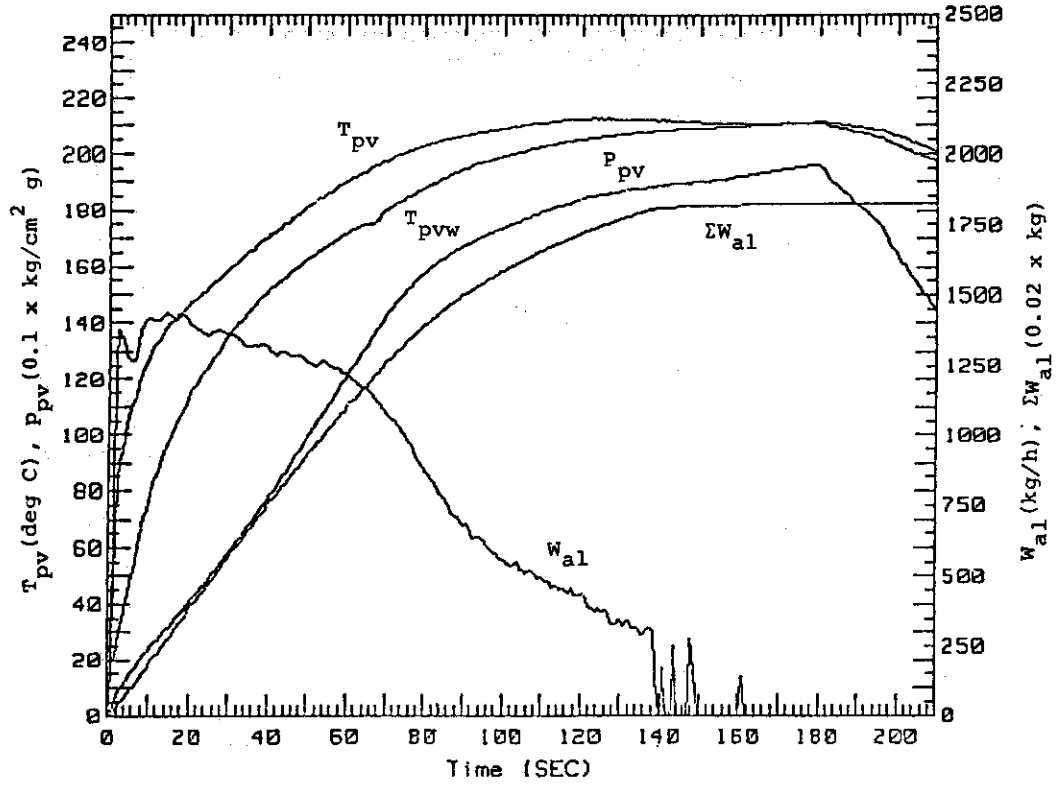


Fig. 8.8 (TD21)

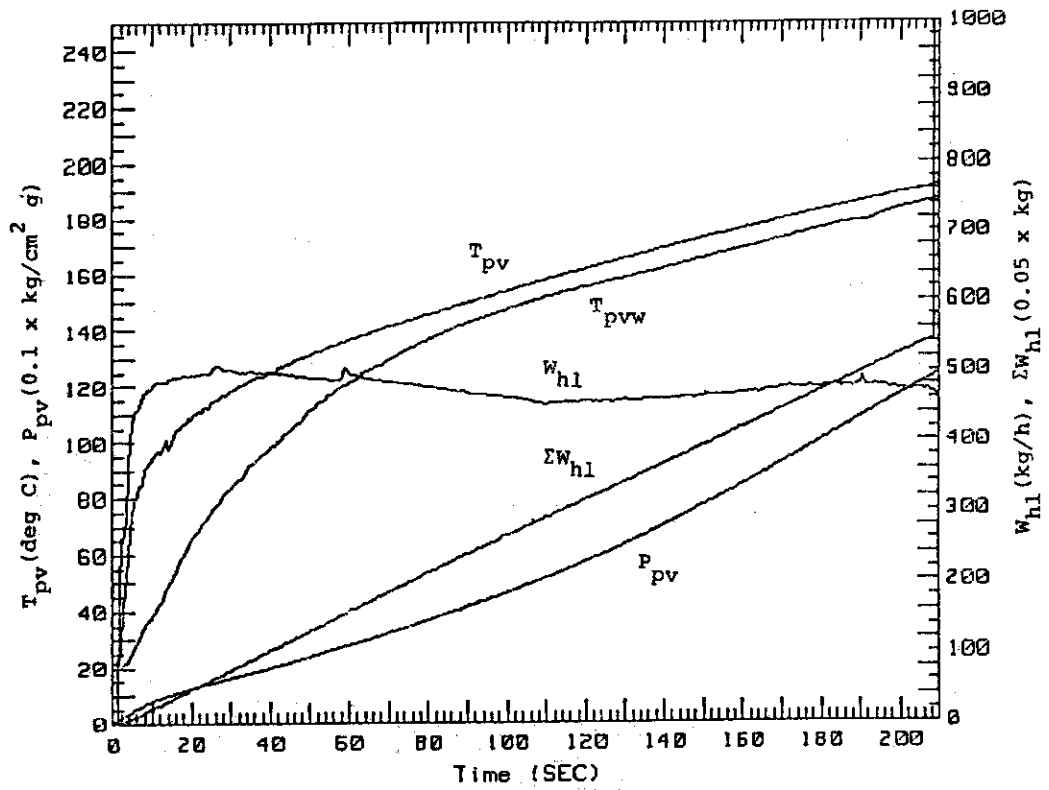


Fig. 8.9 (TD22)

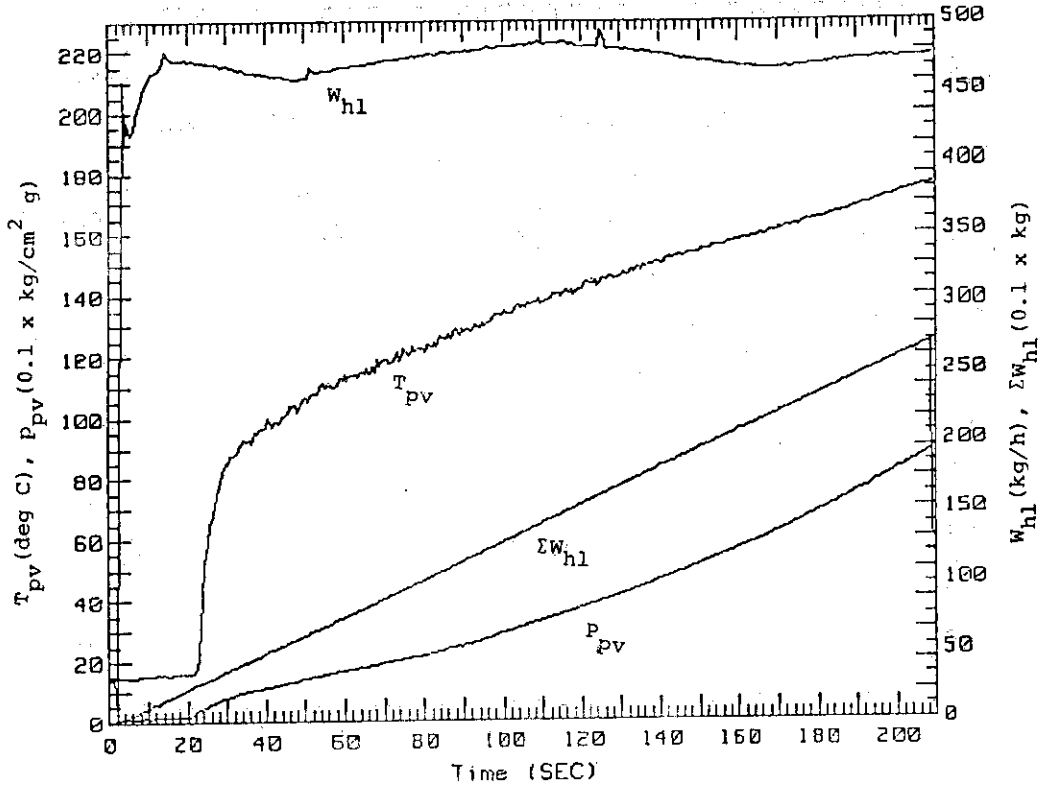


Fig. 8.10 (TD23)

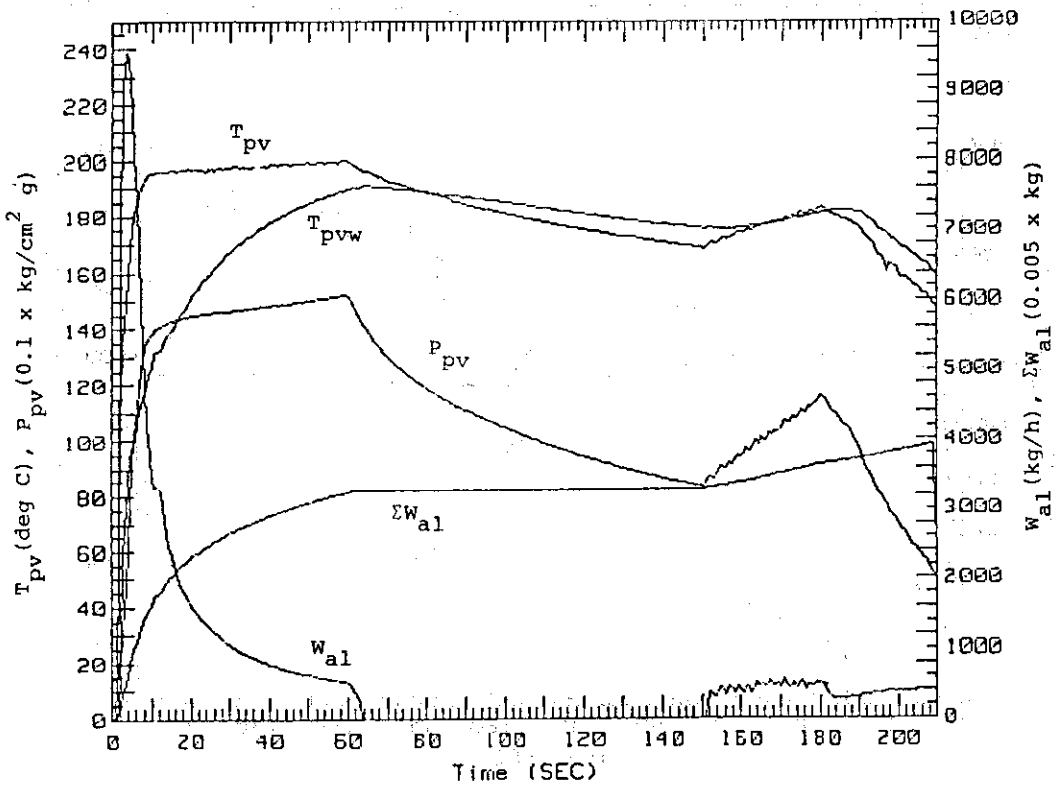


Fig. 8.11 (TD24)

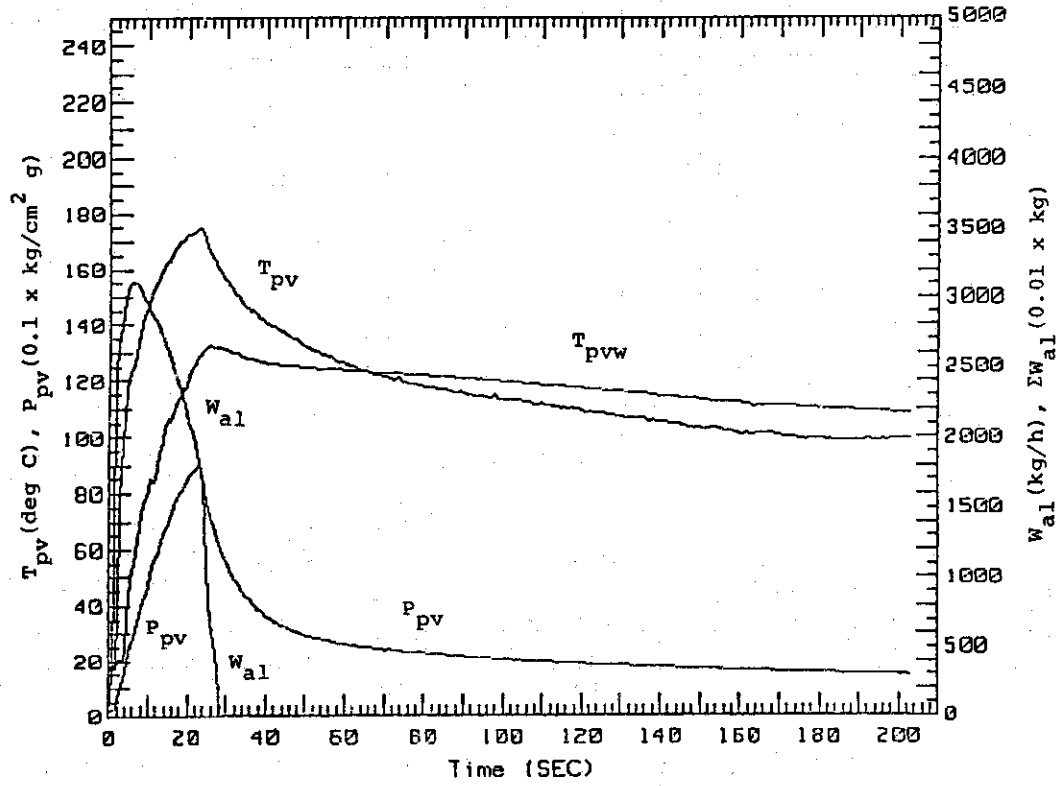


Fig. 8.12 (TD28)

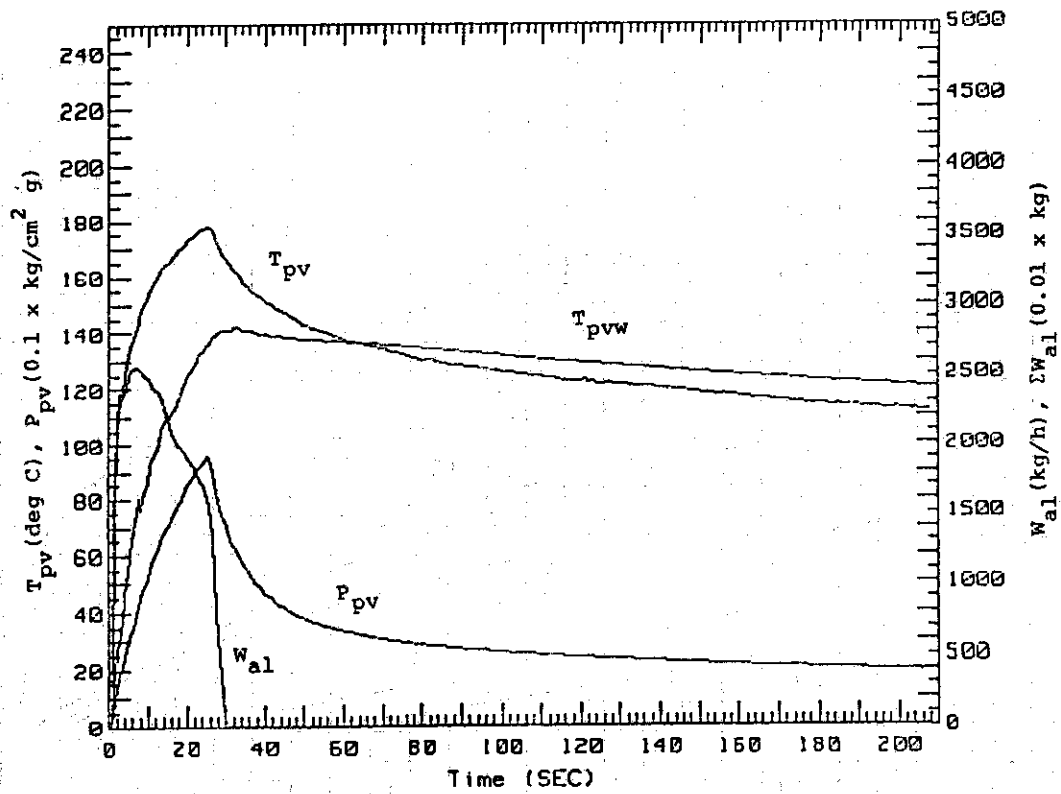


Fig. 8.13 (TD29)

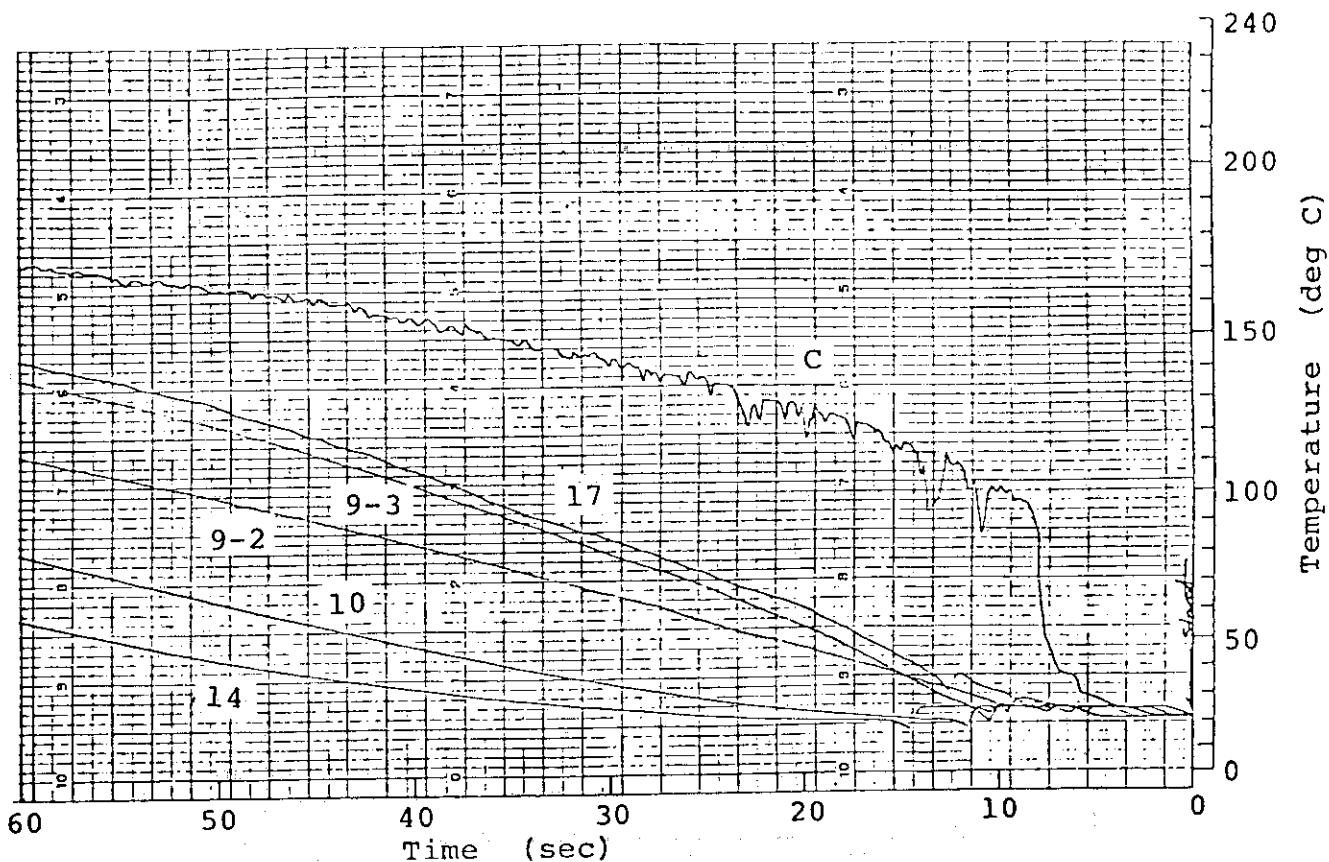


Fig.9.1 Rapid heating test (TD14) ; time traces of temperatures at various positions(cf. Fig.5 and Table 3) in the pressure vessel.

Figures from 9-1 to 9-13 correspond to the results obtained by each experiment (TD14 - TD24 and TD28, TD29)

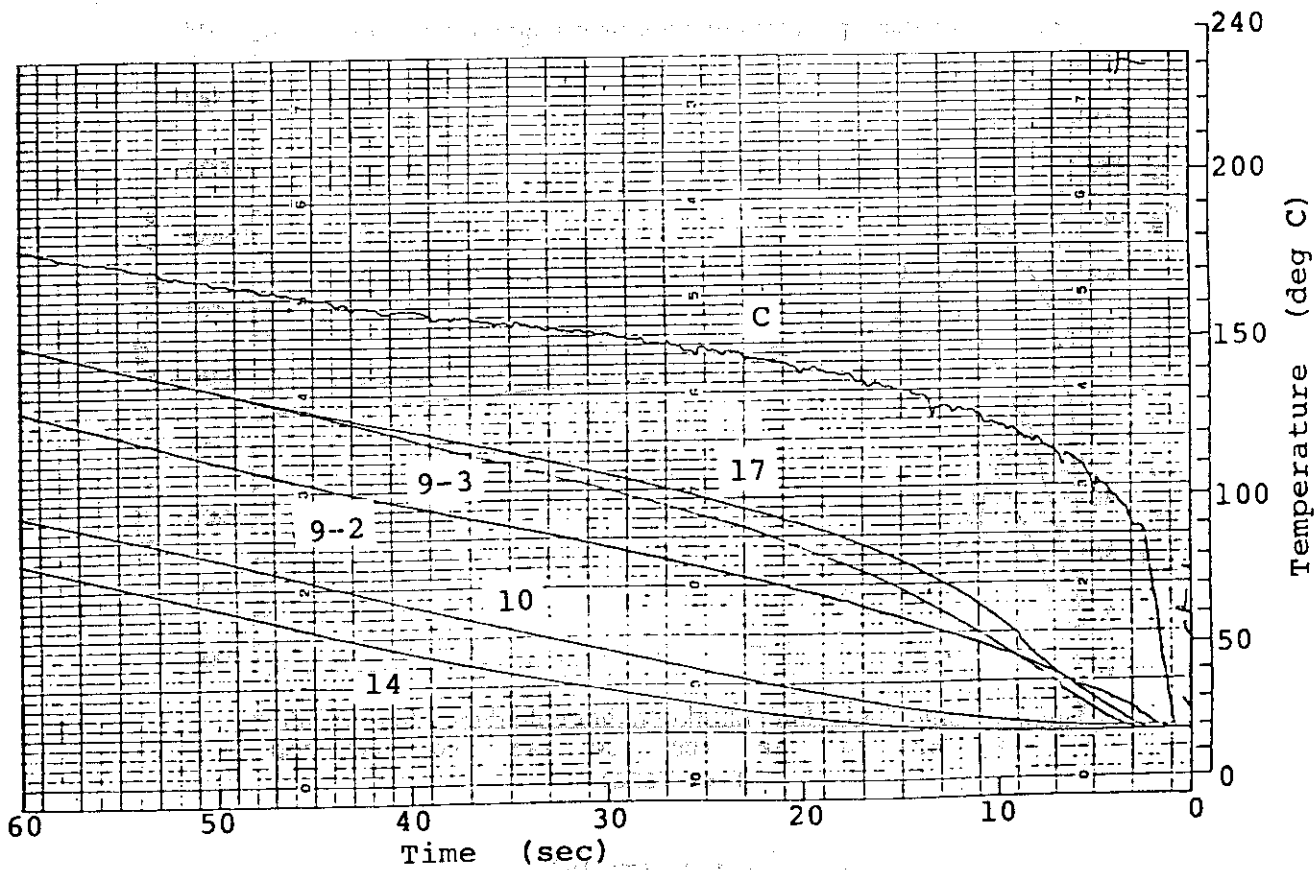


Fig. 9.2 (TD15)

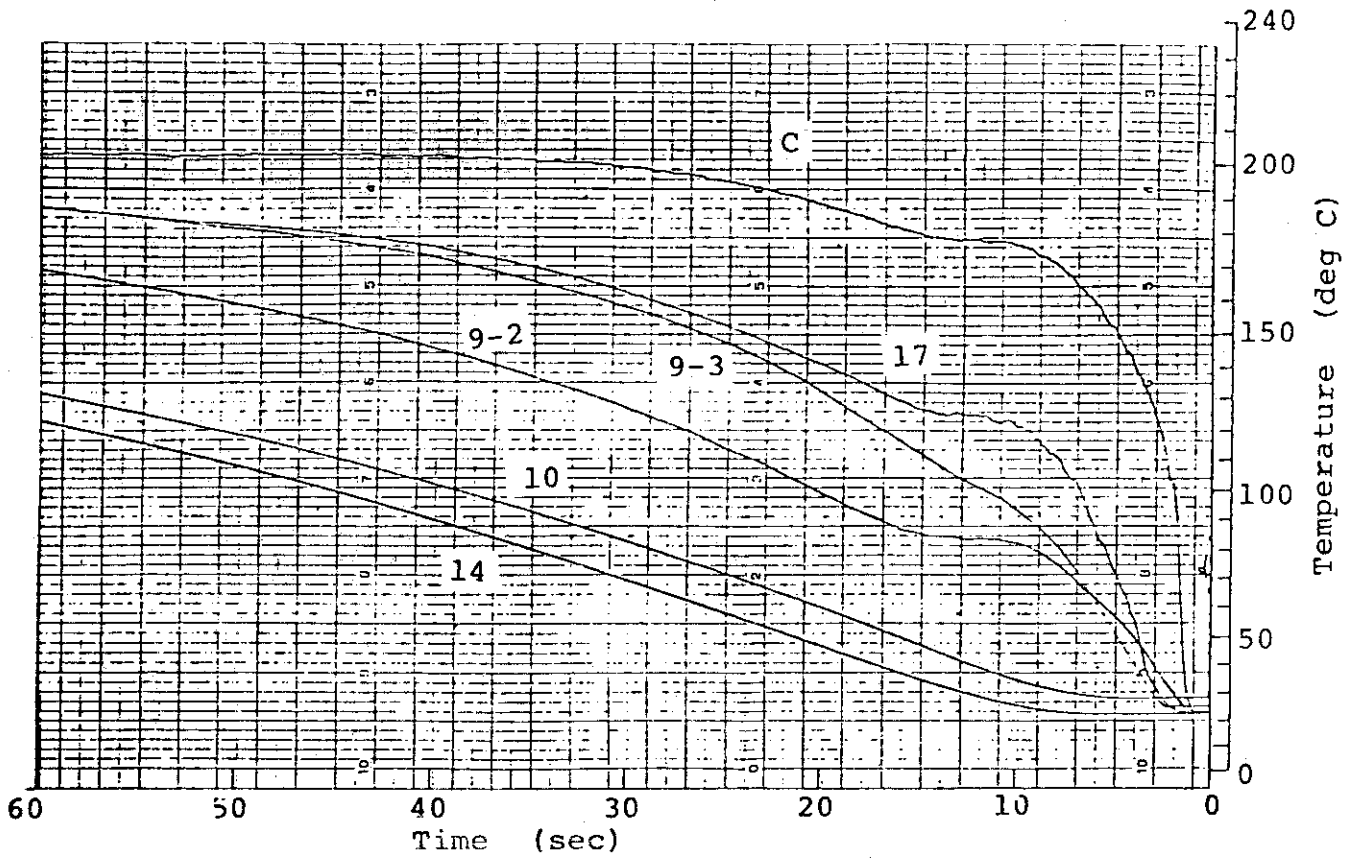


Fig. 9.3 (TD16)

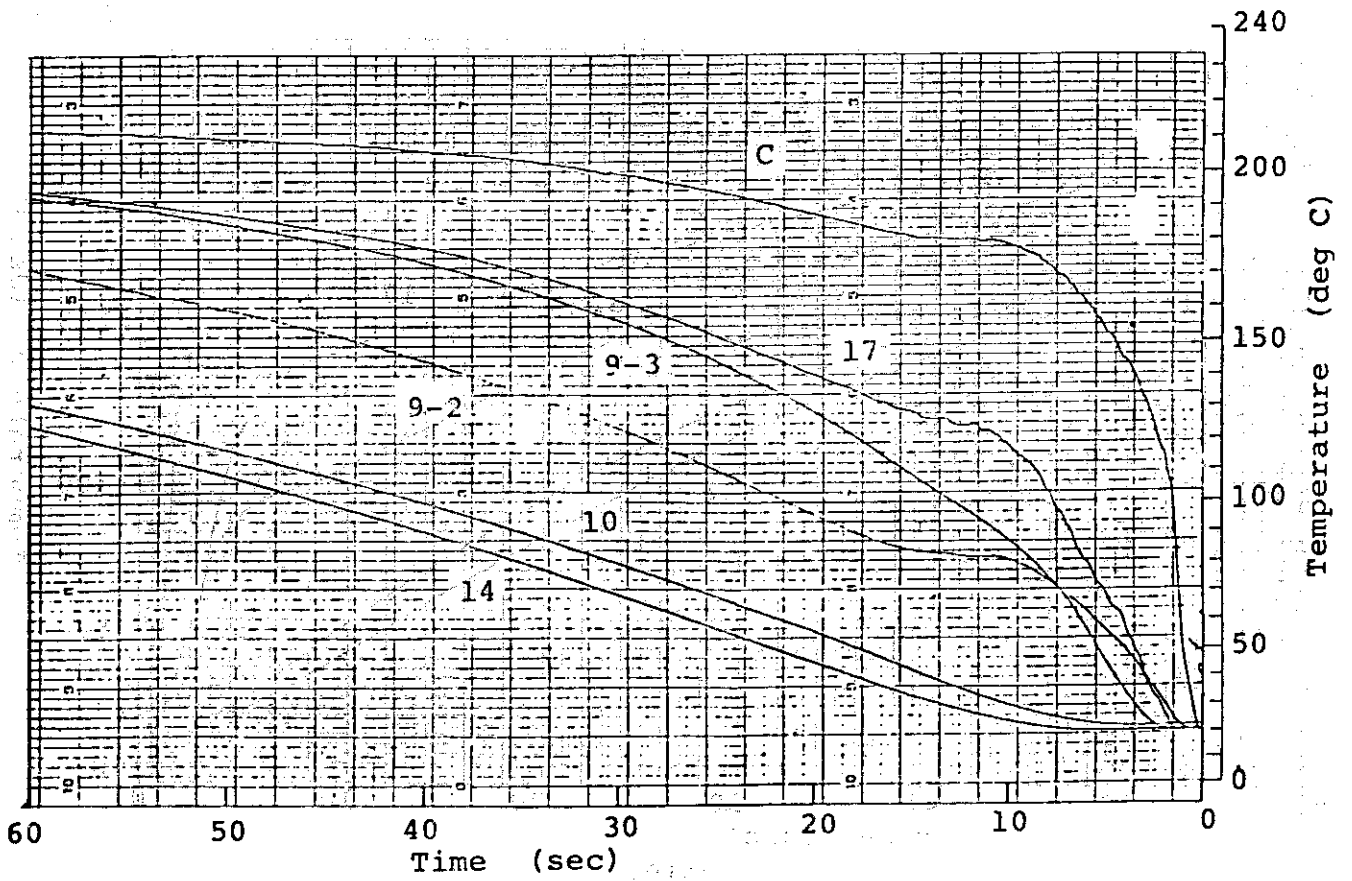


Fig. 9.4 (TD17)

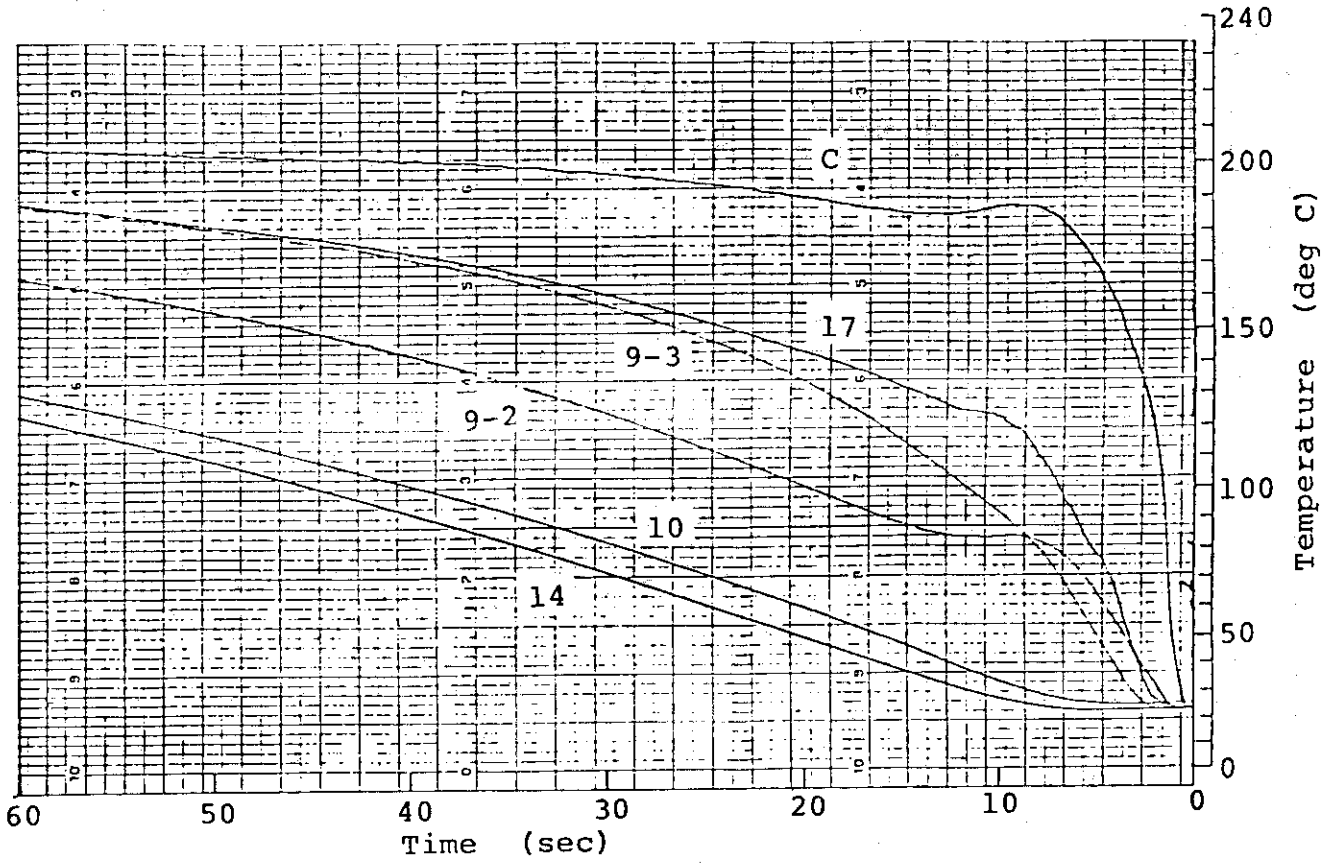


Fig. 9.5 (TD18)

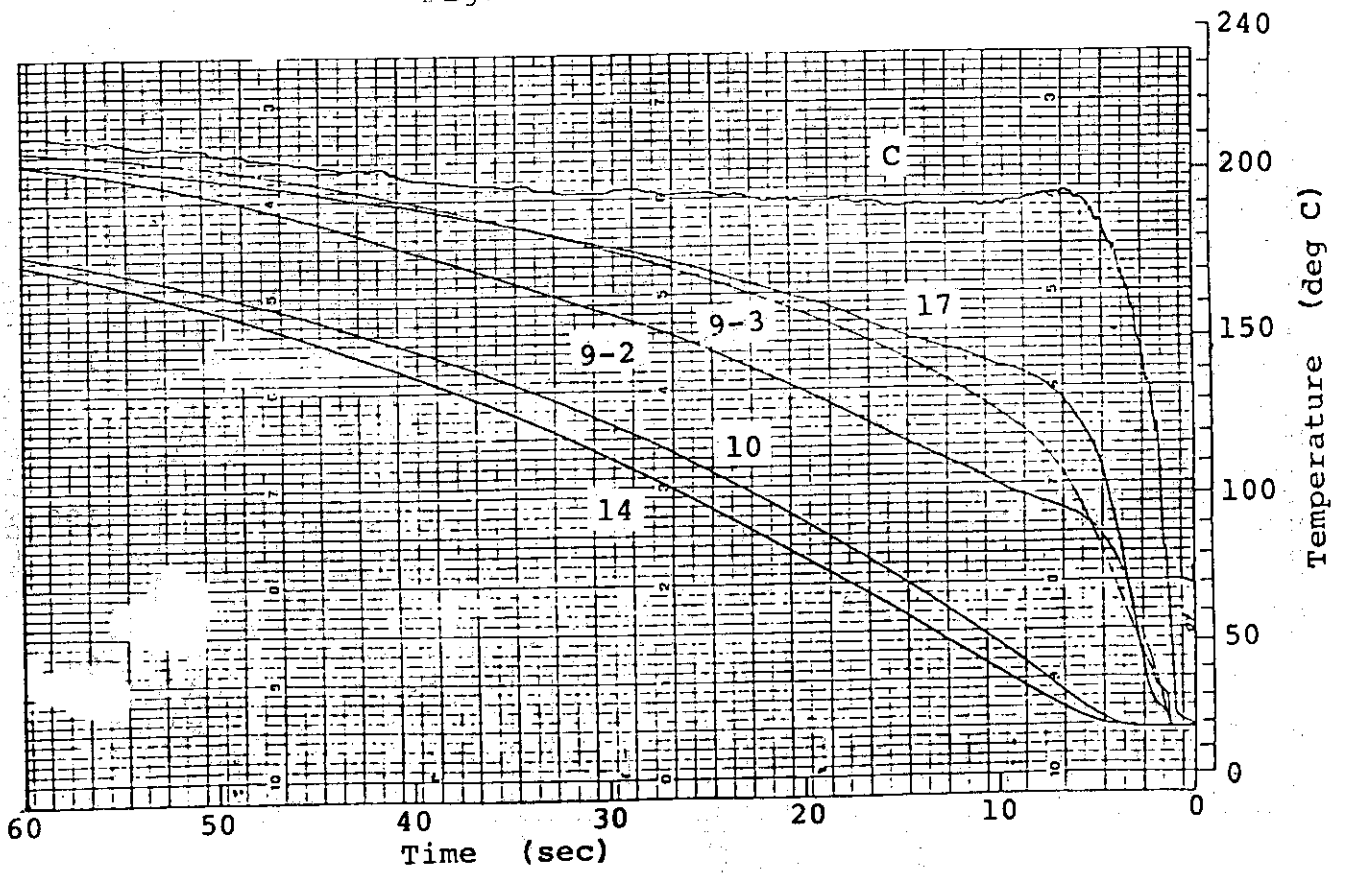


Fig. 9.6 (TD19)

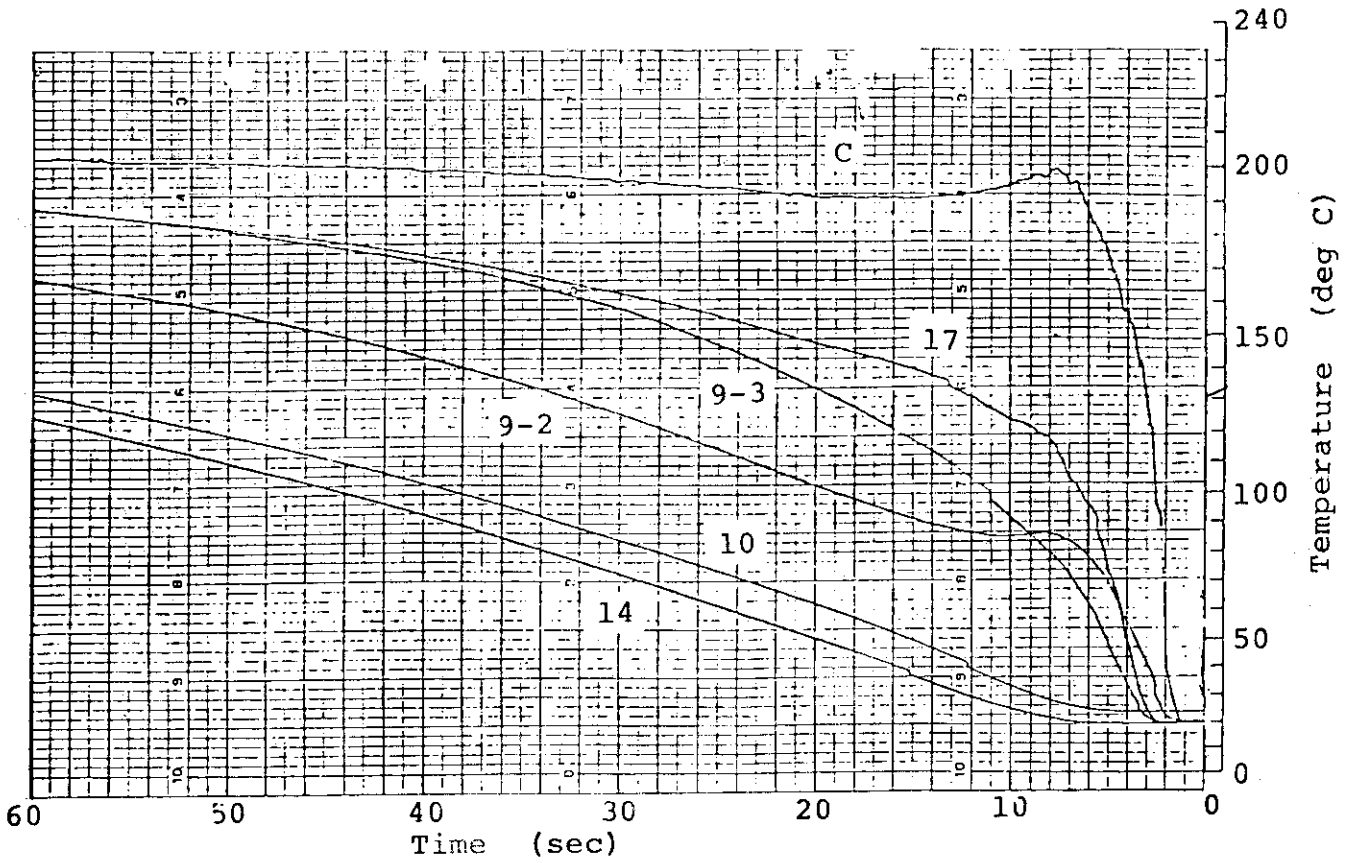


Fig. 9.7 (TD20)

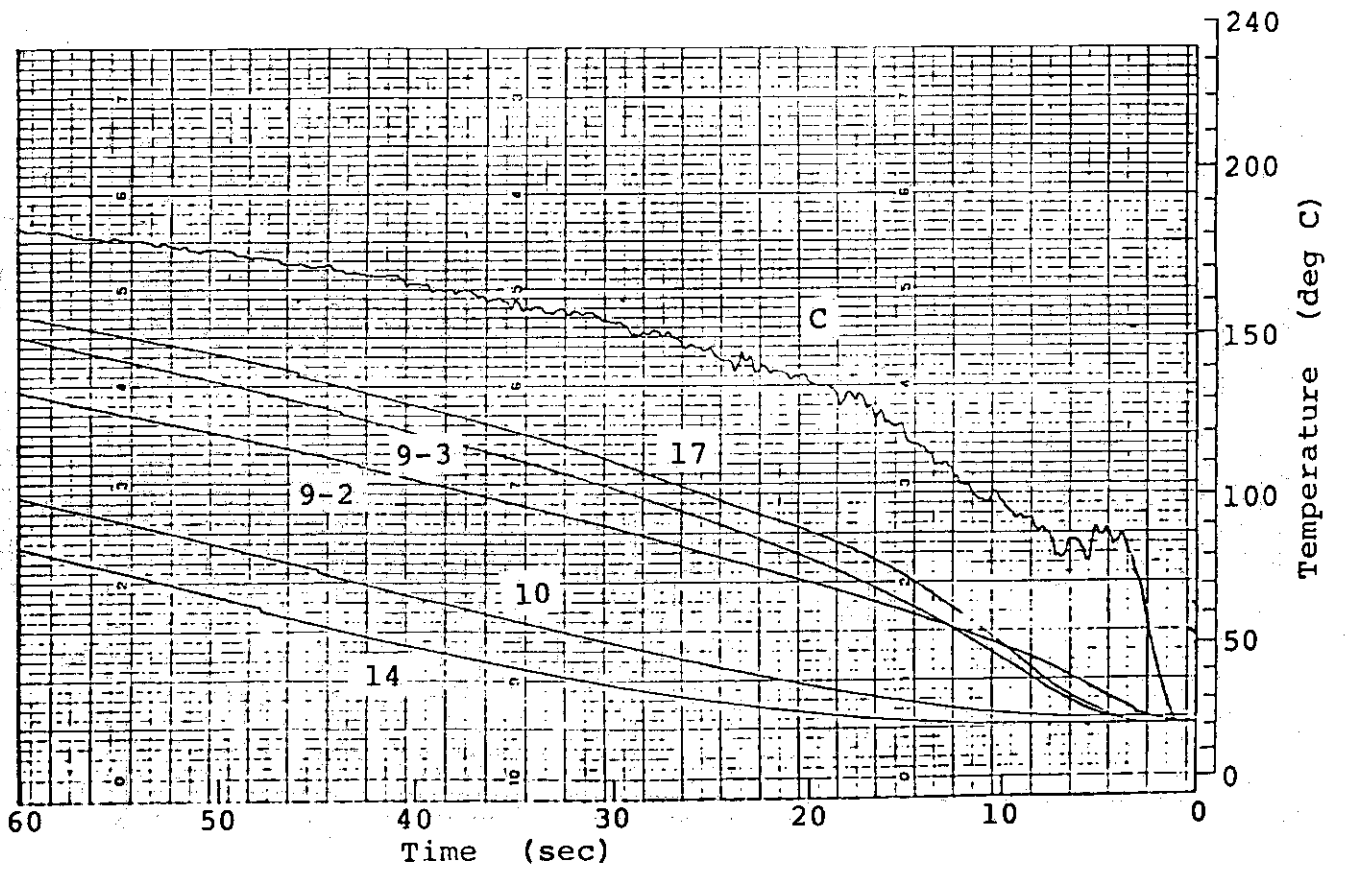
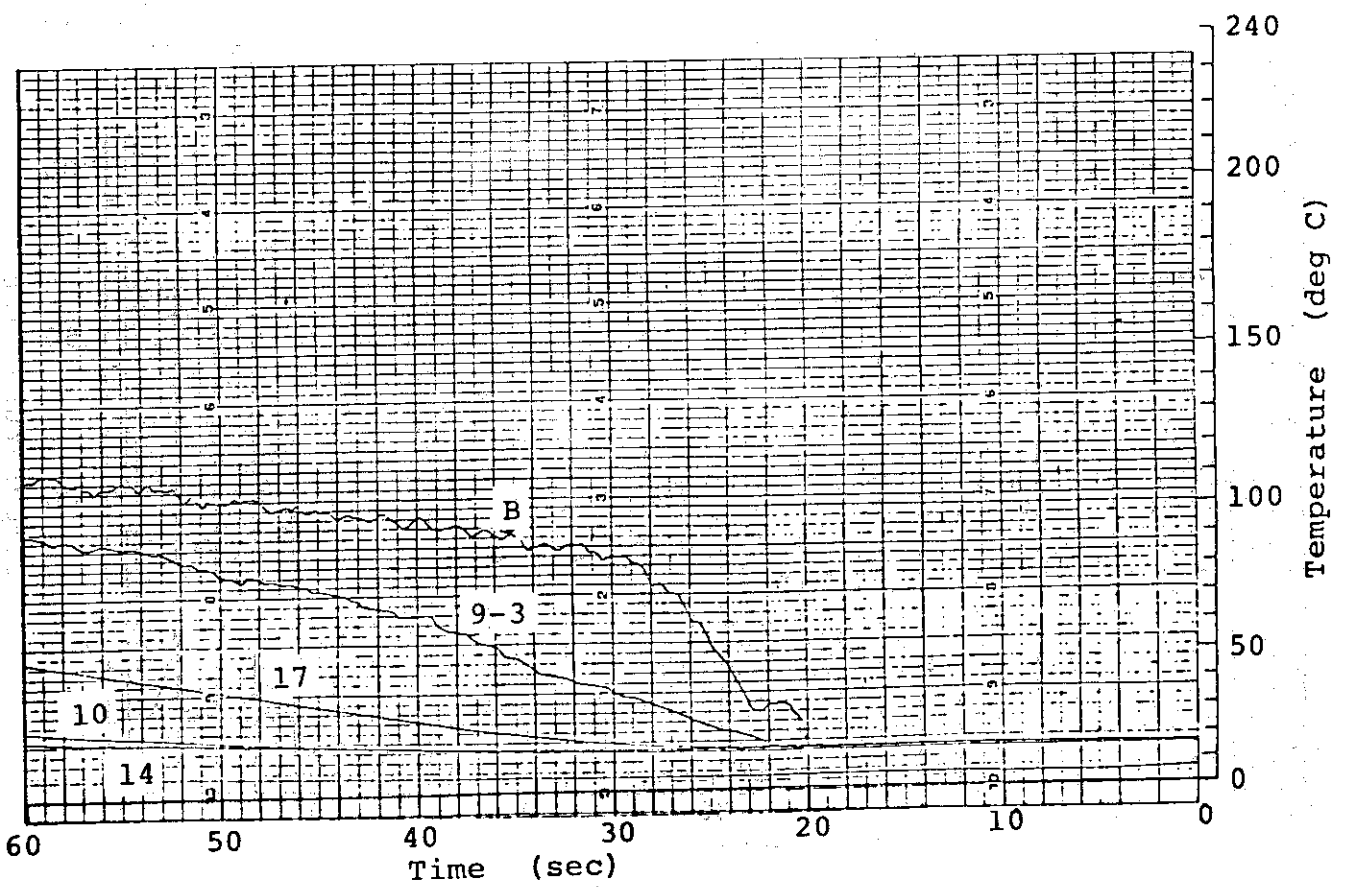
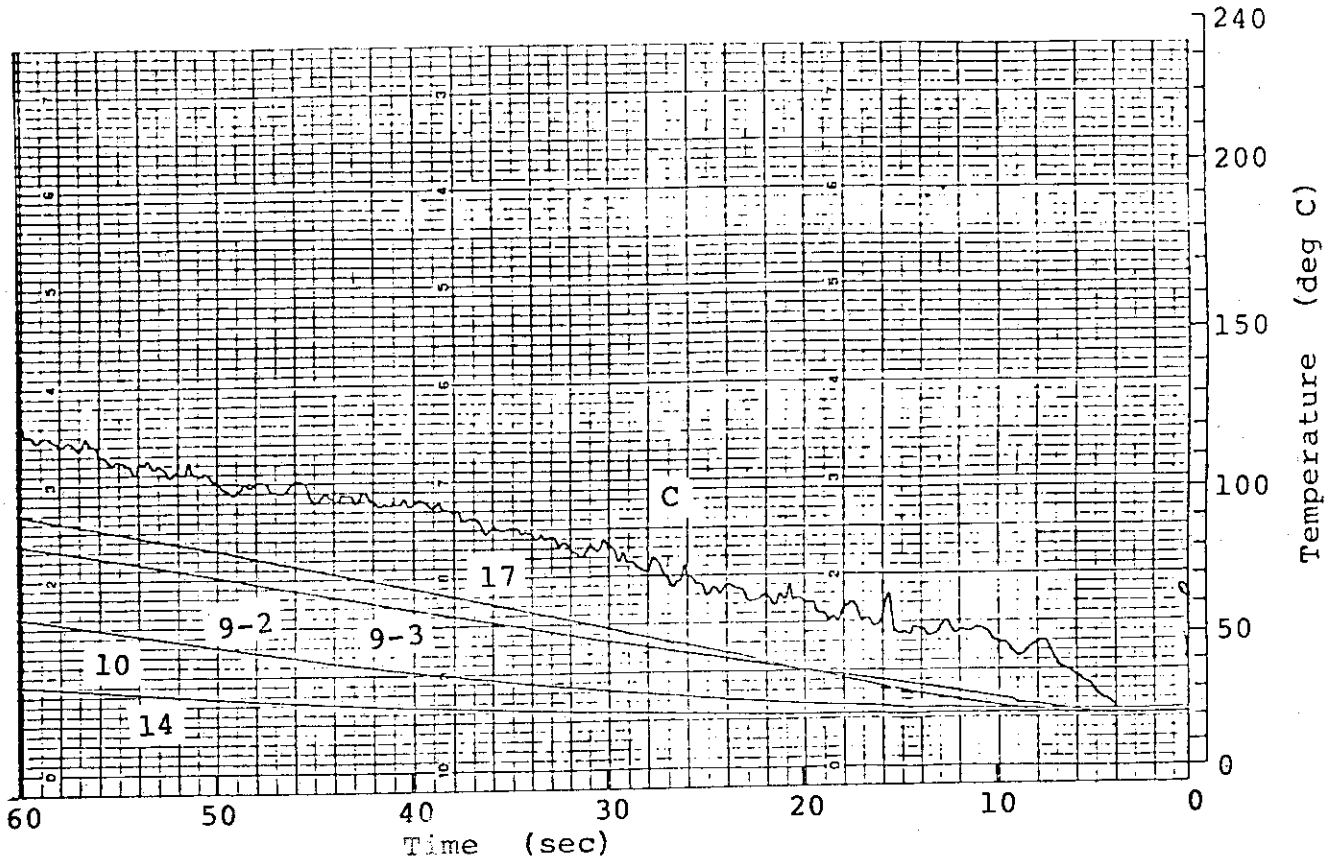


Fig. 9.8 (TD21)





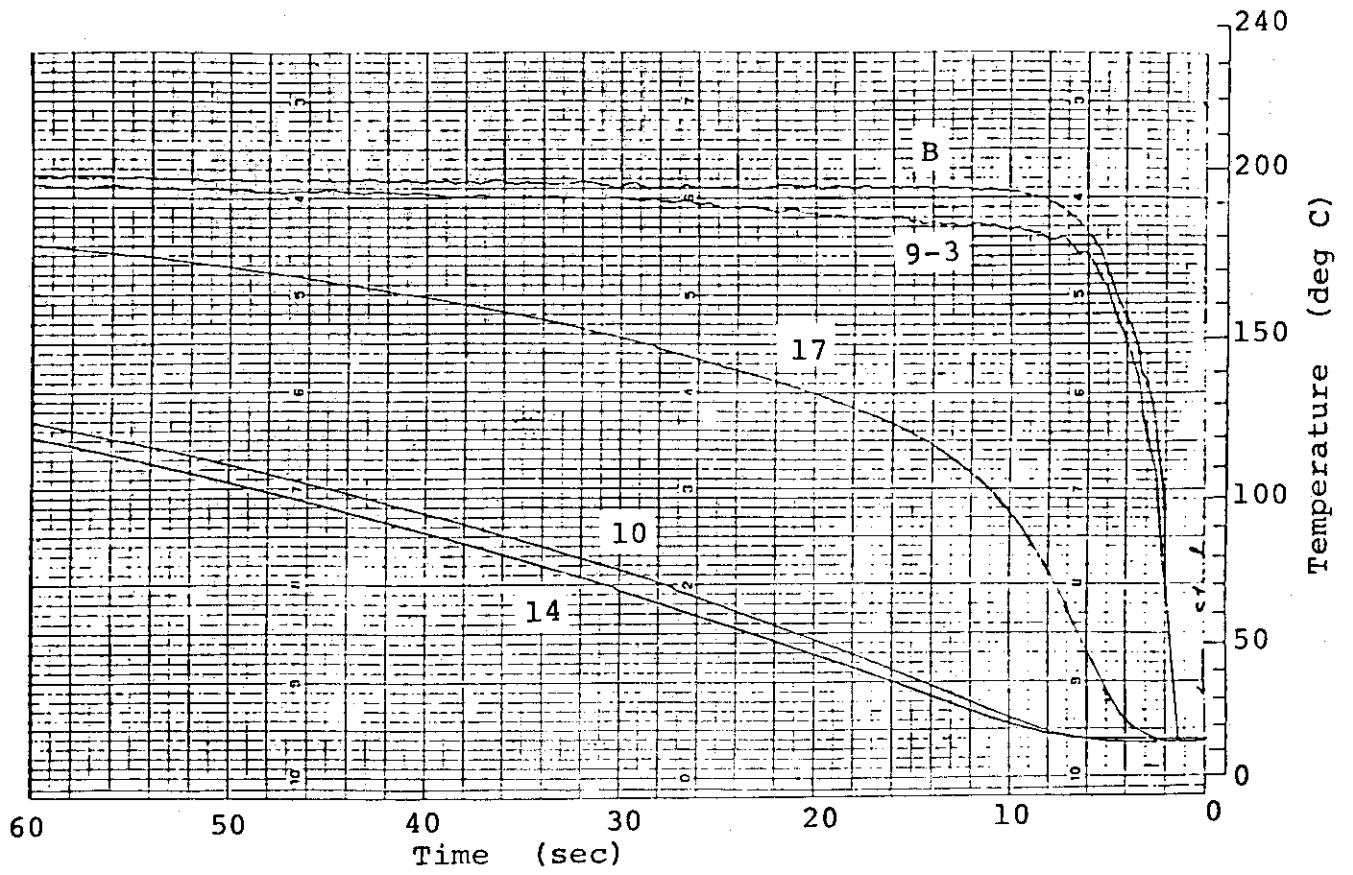


Fig. 9.11 (TD24)

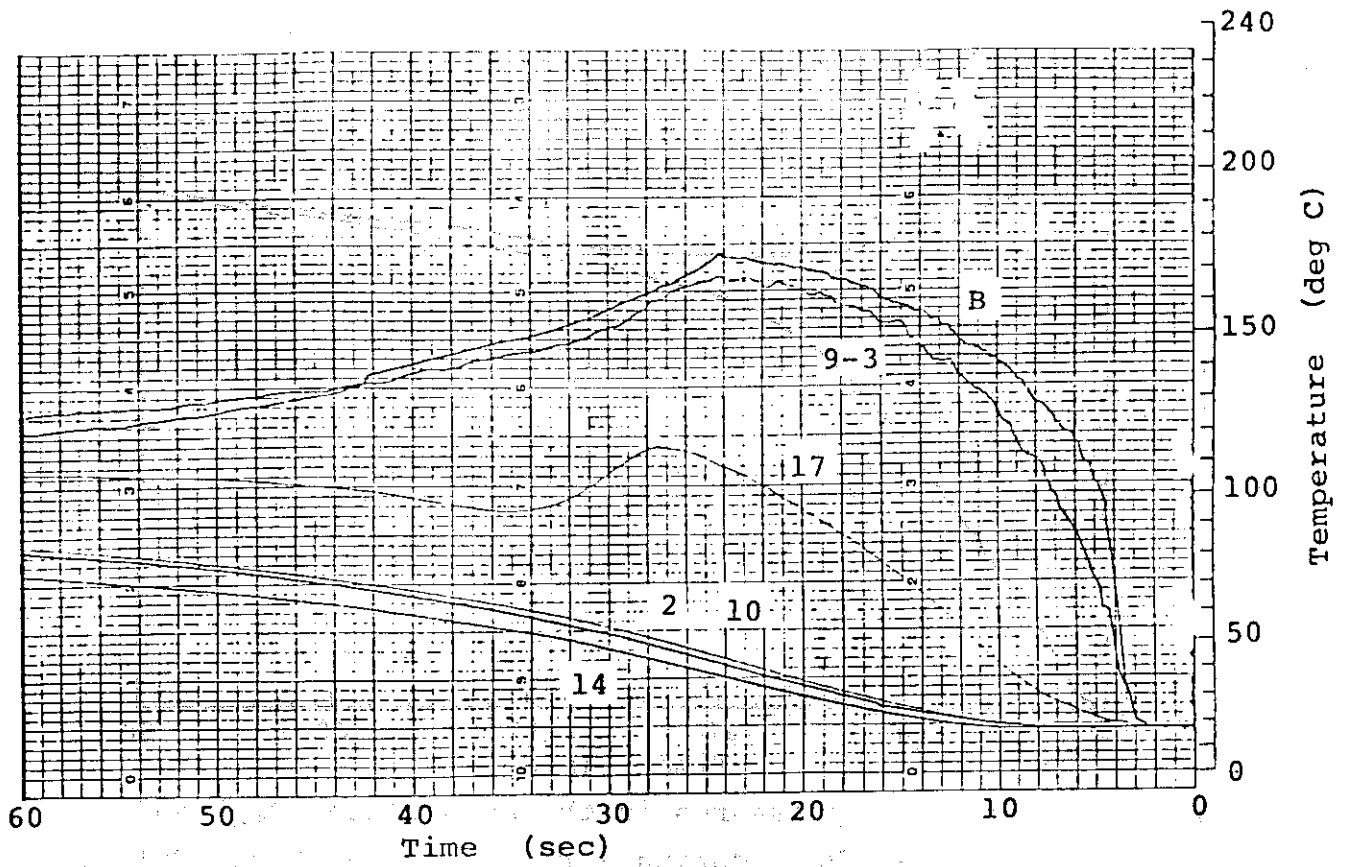


Fig. 9.12 (TD28)

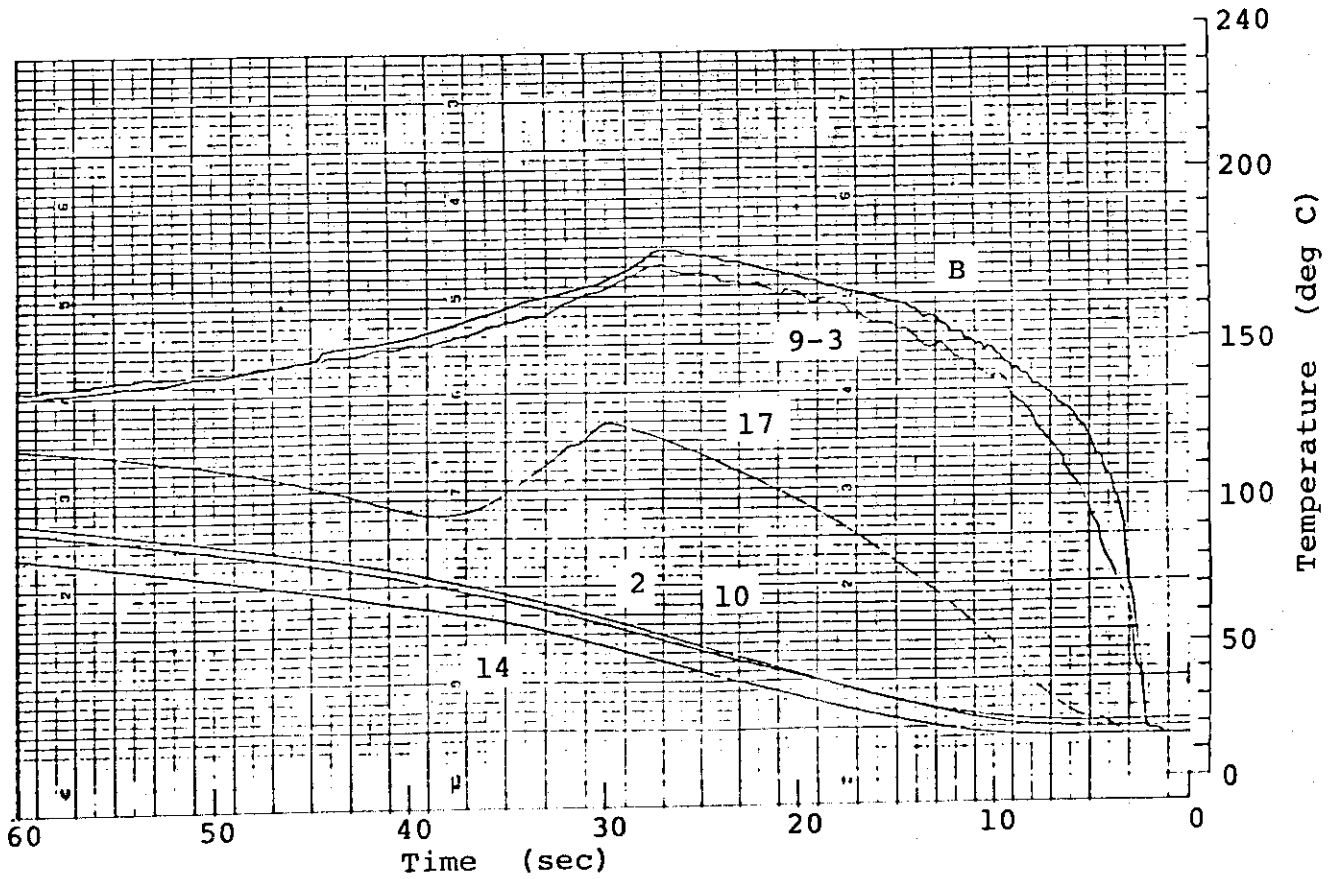


Fig. 9.13 (TD29)

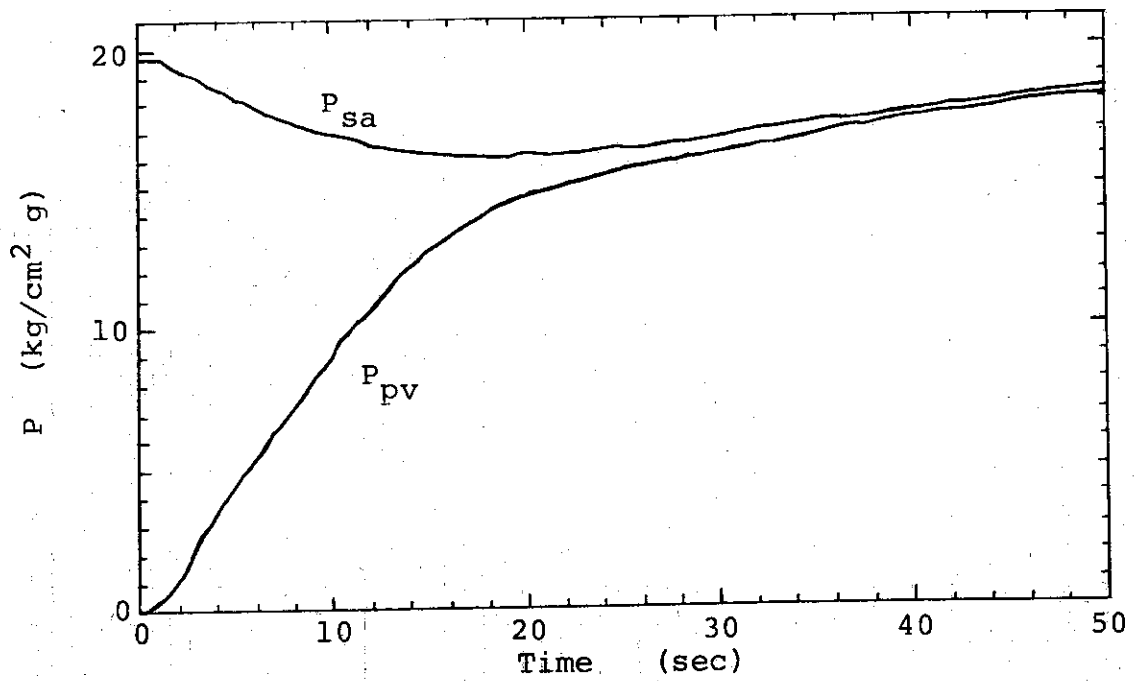


Fig. 10 Changes of pressures in the accumulator ( $P_{sa}$ ) and the pressure vessel ( $P_{pv}$ ) during a rapid heating test (TD16).

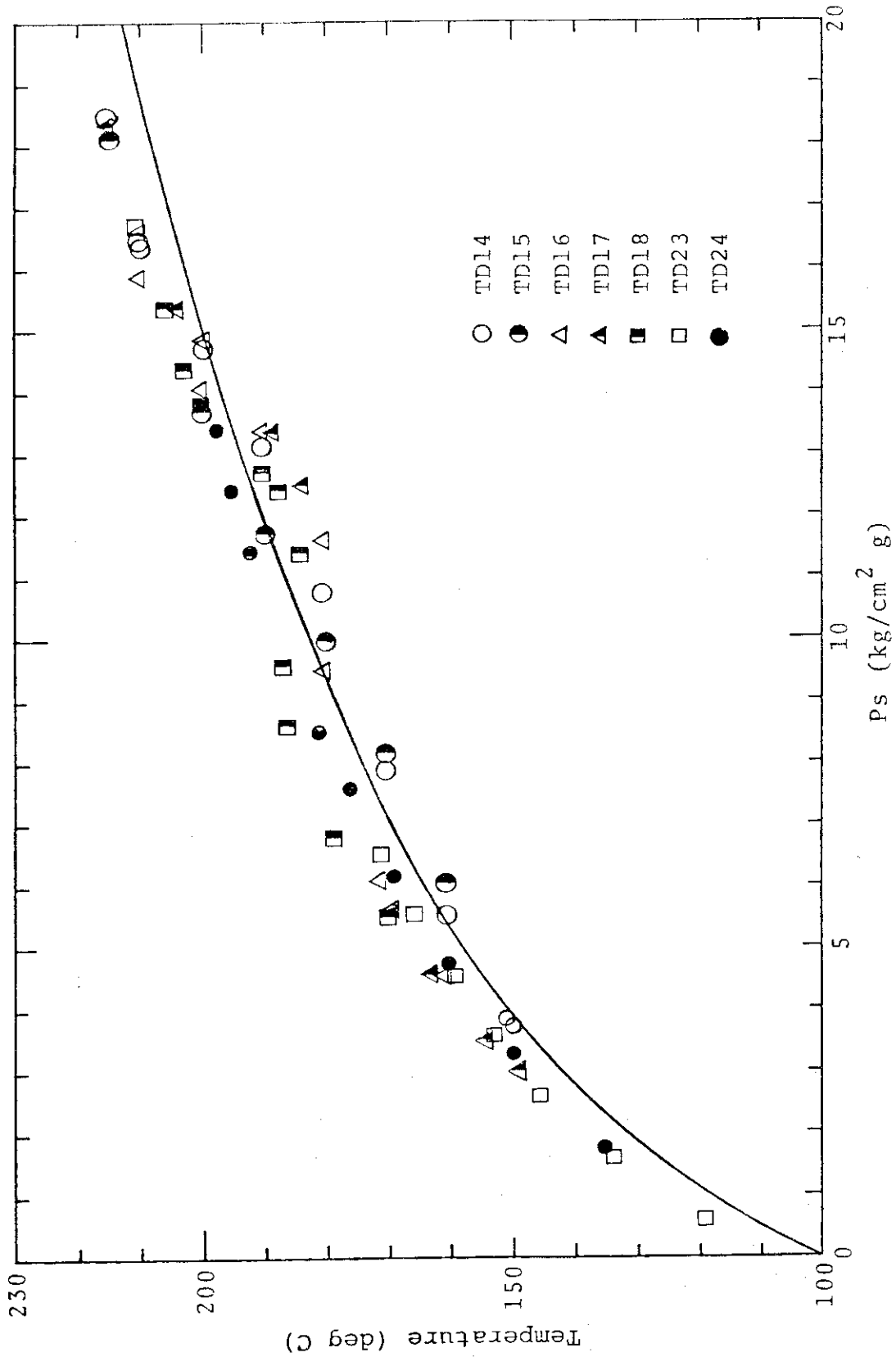


Fig.11 Relationship between partial pressure of steam and temperature in the pressure vessel during rapid heating tests (TD14 - TD24).  
 The solid line shows a relation between steam pressure and the corresponding temperature of saturated state.

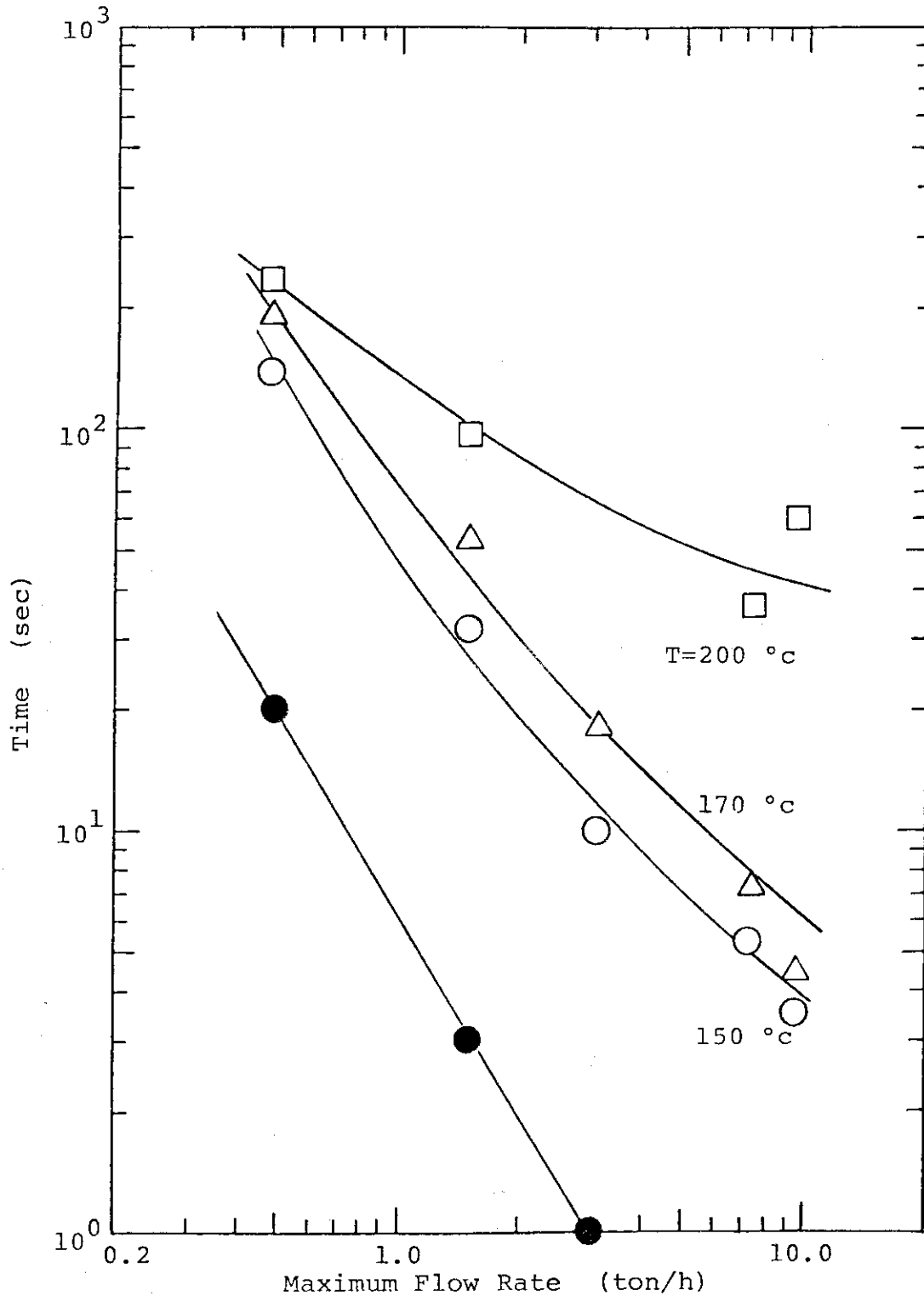


Fig. 1.2.1 Relationship between maximum steam flow rates and the time required for rapid heating from room temperature to 150, 170 and 200°C on the first test in a day. (The piping is not yet warmed up.)

● The time lag from opening of the steam supplying valve to steam injection into the pressure vessel. The start of the injection into the vessel is detected by the thermocouples in the vessel.

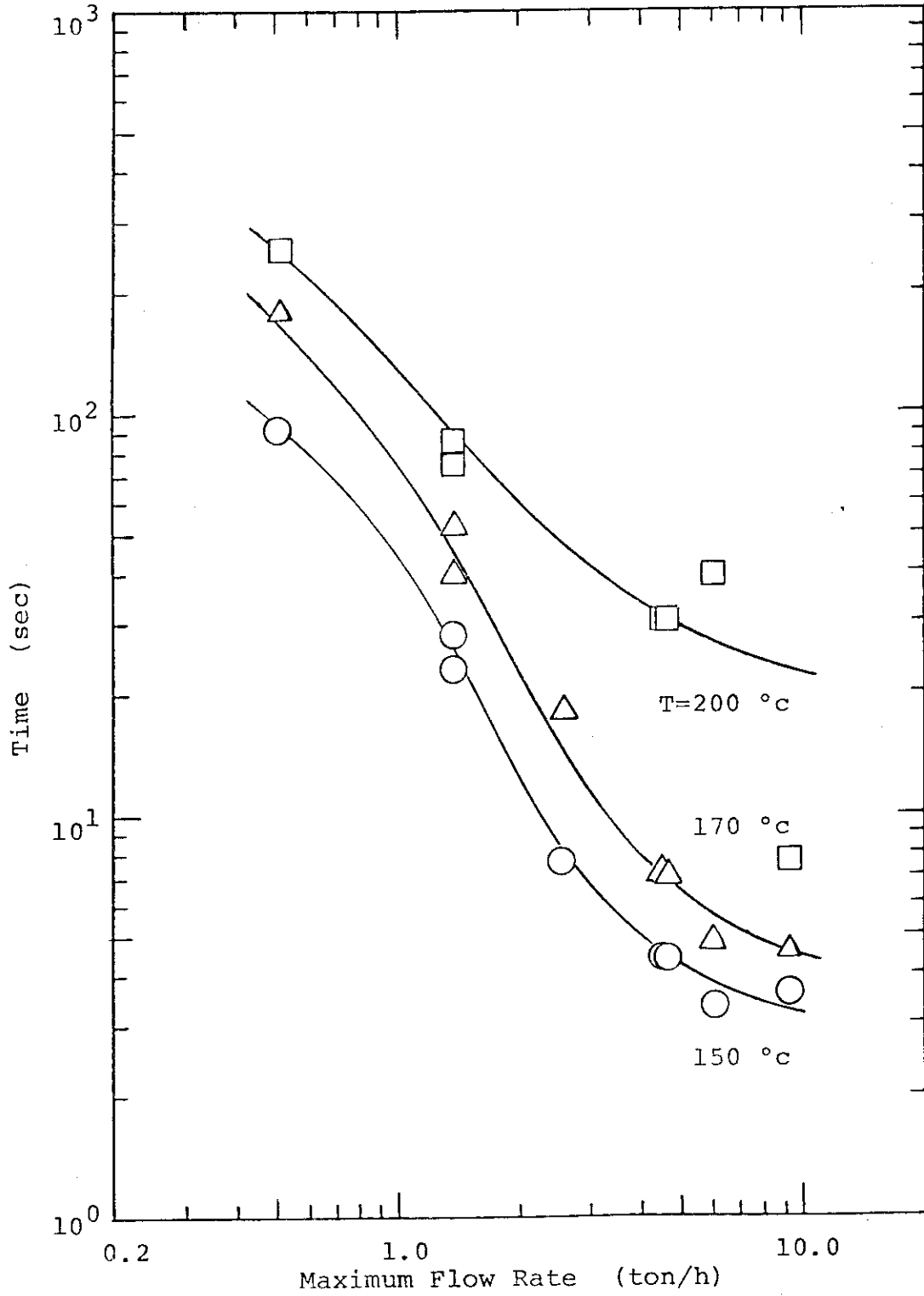


Fig. 1 2.2 Relationship between maximum steam flow rates and the time required for rapid heating on the latter test in a day. (The piping is already warmed up.)

Table 6 Area for heat transfer, wall thickness and volume of several components in the pressure vessel

No. of input	components or systems	area for heat transfer(m <sup>2</sup> )	thickness of equipment(mm)	volume (m <sup>3</sup> )
1	steam supply system			
	main pipe	2.533	4	0.0573
	sub pipe	0.575	3	
	main drain pipe	2.150	4	0.0436
	(total)	5.258	(4)*	0.1009
2	main parts of PV			
	cylinder & bottom	3.607	12	0.5027
	source guide pipe			-0.0290
	(total)	3.607	(12)	0.4737
3	cover etc. for PV			
	cover	0.488	110	-
	flanges(large nozzle)	0.232	110	-
	flanges(penetration)	0.127	110	0.0163
	(total)	0.847	(110)	0.0163
4	flanges, valves etc.			
	steam supply line	0.194	50	-
	steam drain line	0.127	50	-
	stiffened plate(PV)	0.300	24	-
	flanges & blind patches of PV	0.200	50	-
	(total)	0.821	(50)	
5	accessories in PV			
	mandrel	0.950	5	-0.0036
	spray headers	0.767	5	-0.0003
	(total)	1.717	(5)	-0.0039
	total	12.250		0.5870

\* average value to use as the input data for CONTEMPT-LT

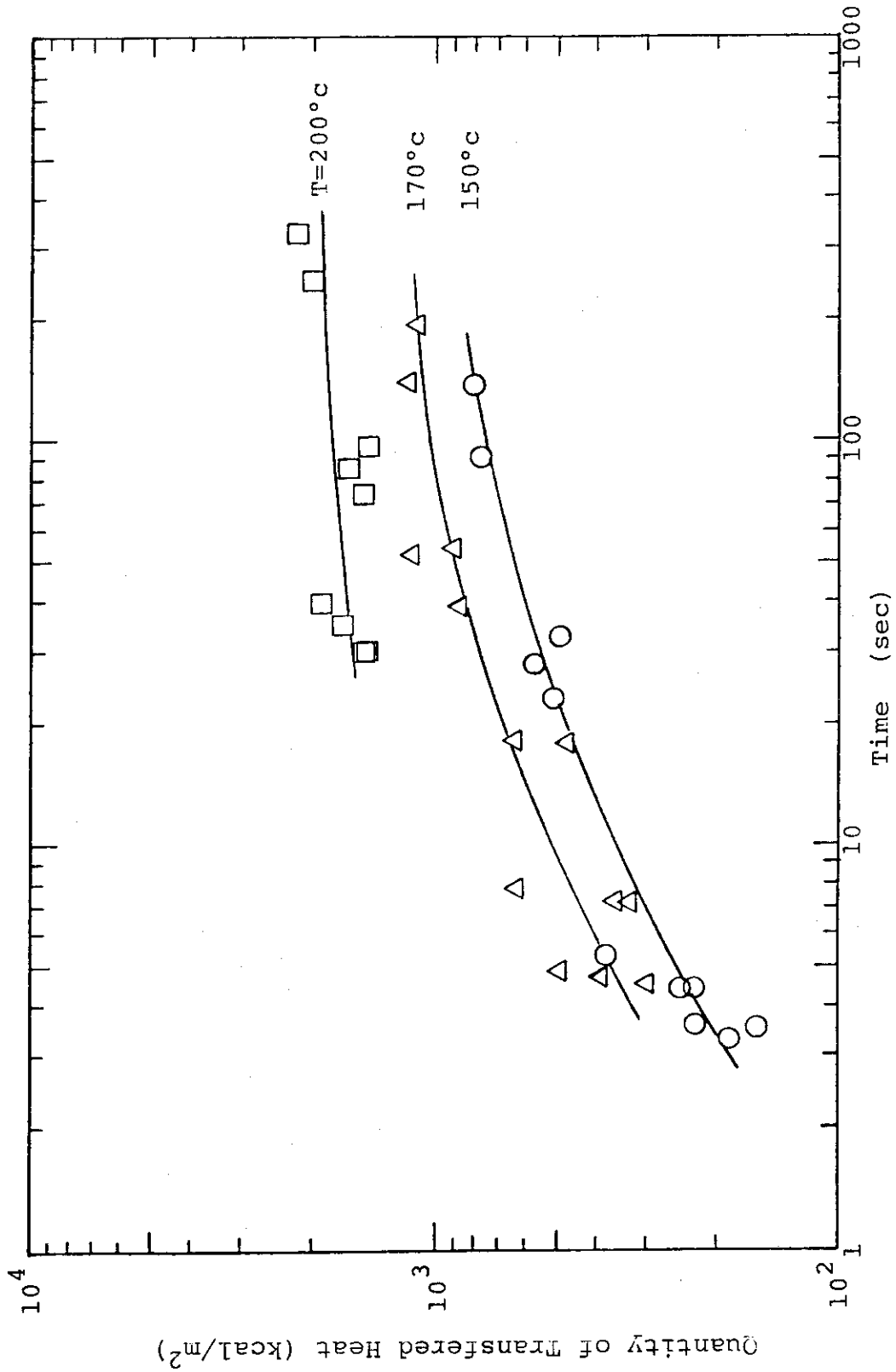


Fig. 13 Relationship between time and quantity of transferred heat per unit area for rapid heating from room temperature to 150, 170 and 200°C. (Quantity of transferred heat corresponding to the amount of steam in the pressure vessel is not included.)

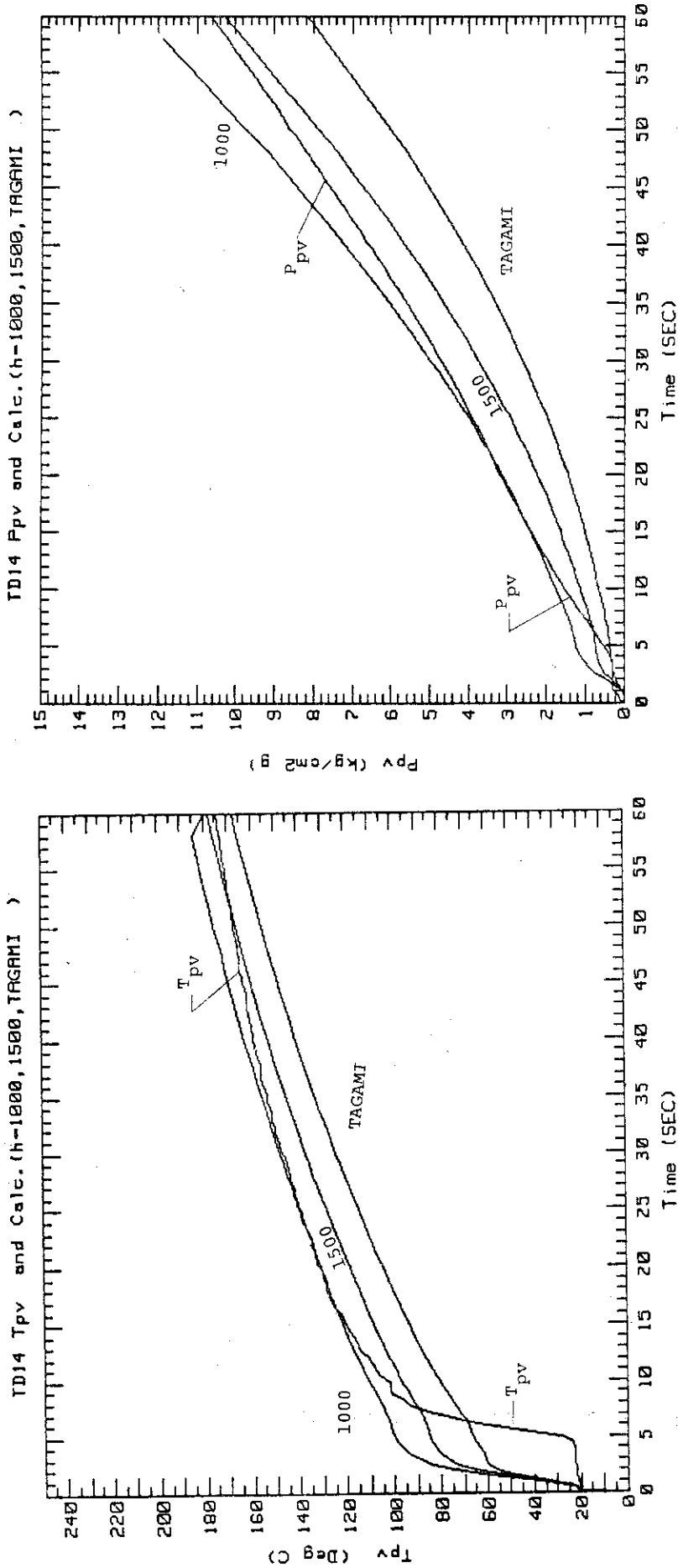


Fig. 1 4.1 Comparison between observed and calculated values of temperature(a) and pressure(b) in the pressure vessel at a rapid heating test (TD14).

The calculations are performed assuming constant values of heat transfer coefficients(300 - 15,000 kcal/m<sup>2</sup> h °C), TAGAMI's equation and UCHIDA's equation, respectively.



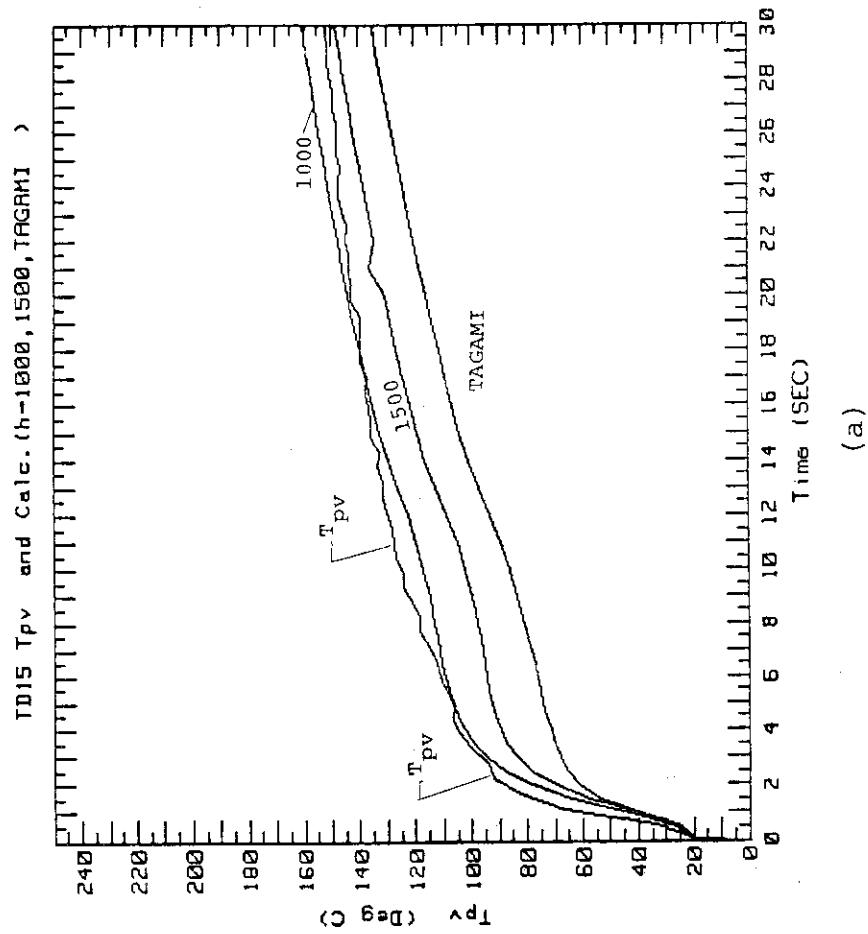
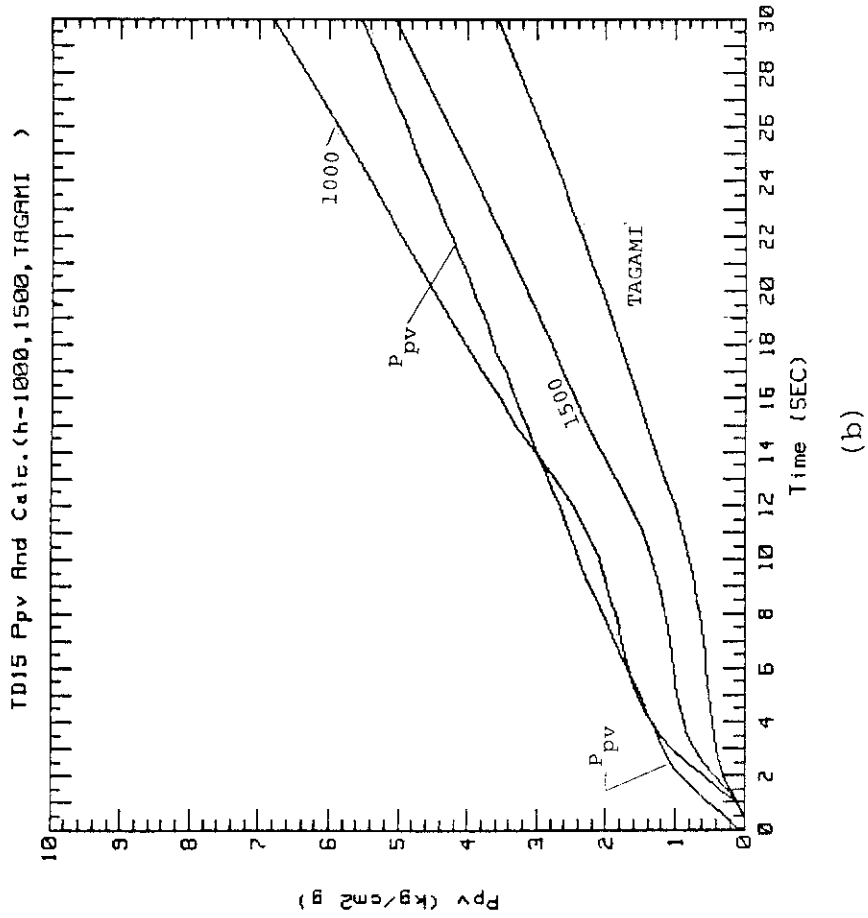


Fig. 1 4.2 (TD15)

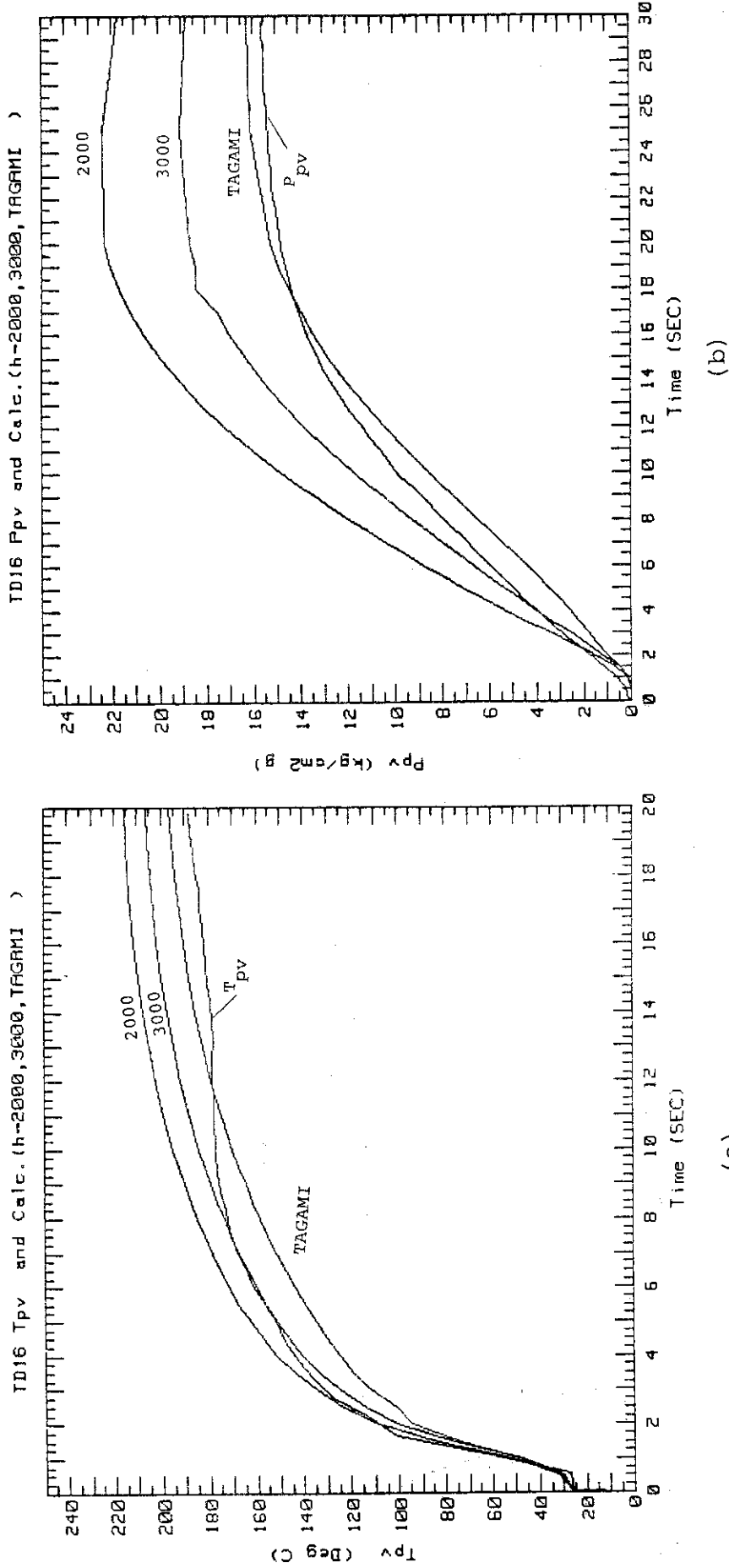


Fig. 1 4.3 (TD16)

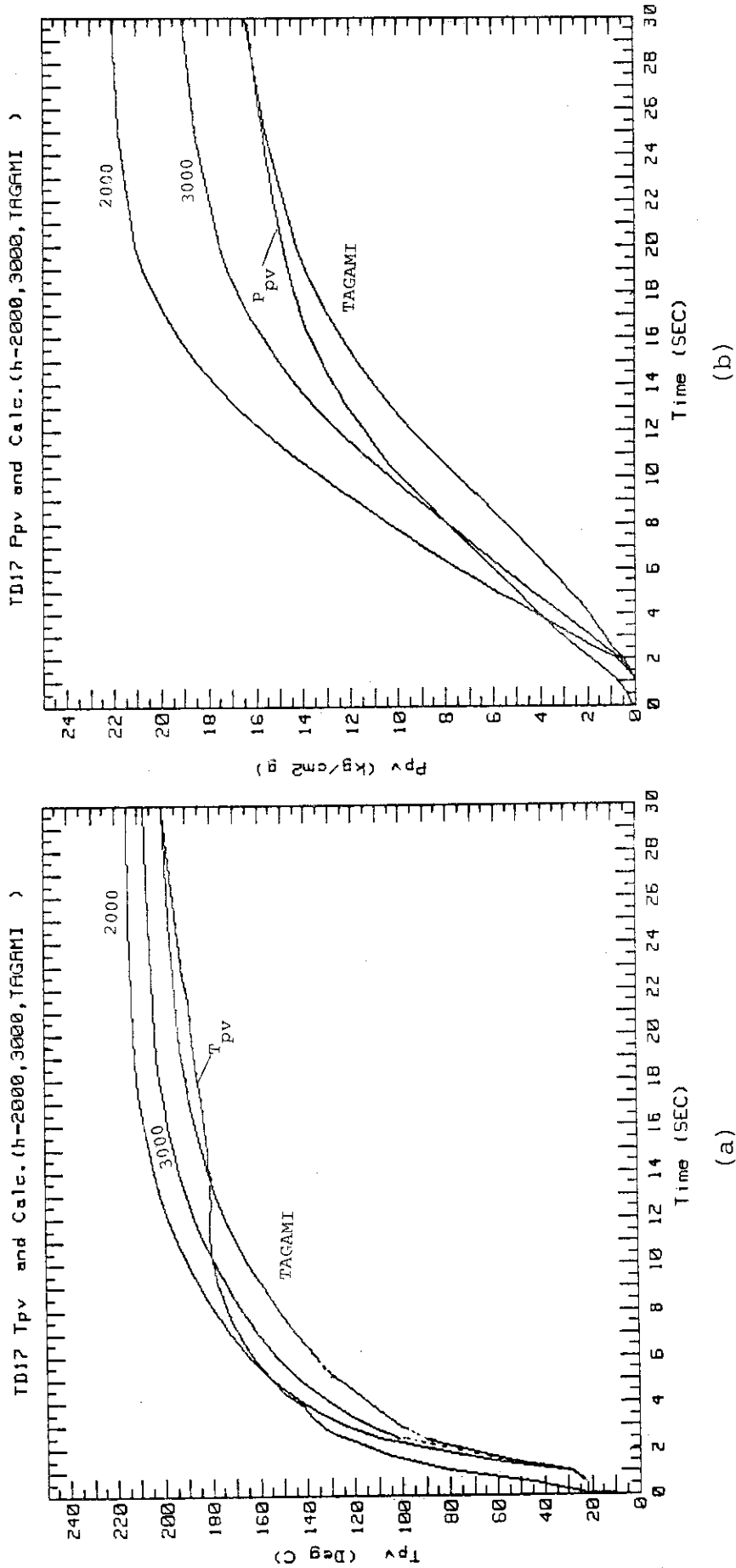


Fig. 1.4.4 (TD17)

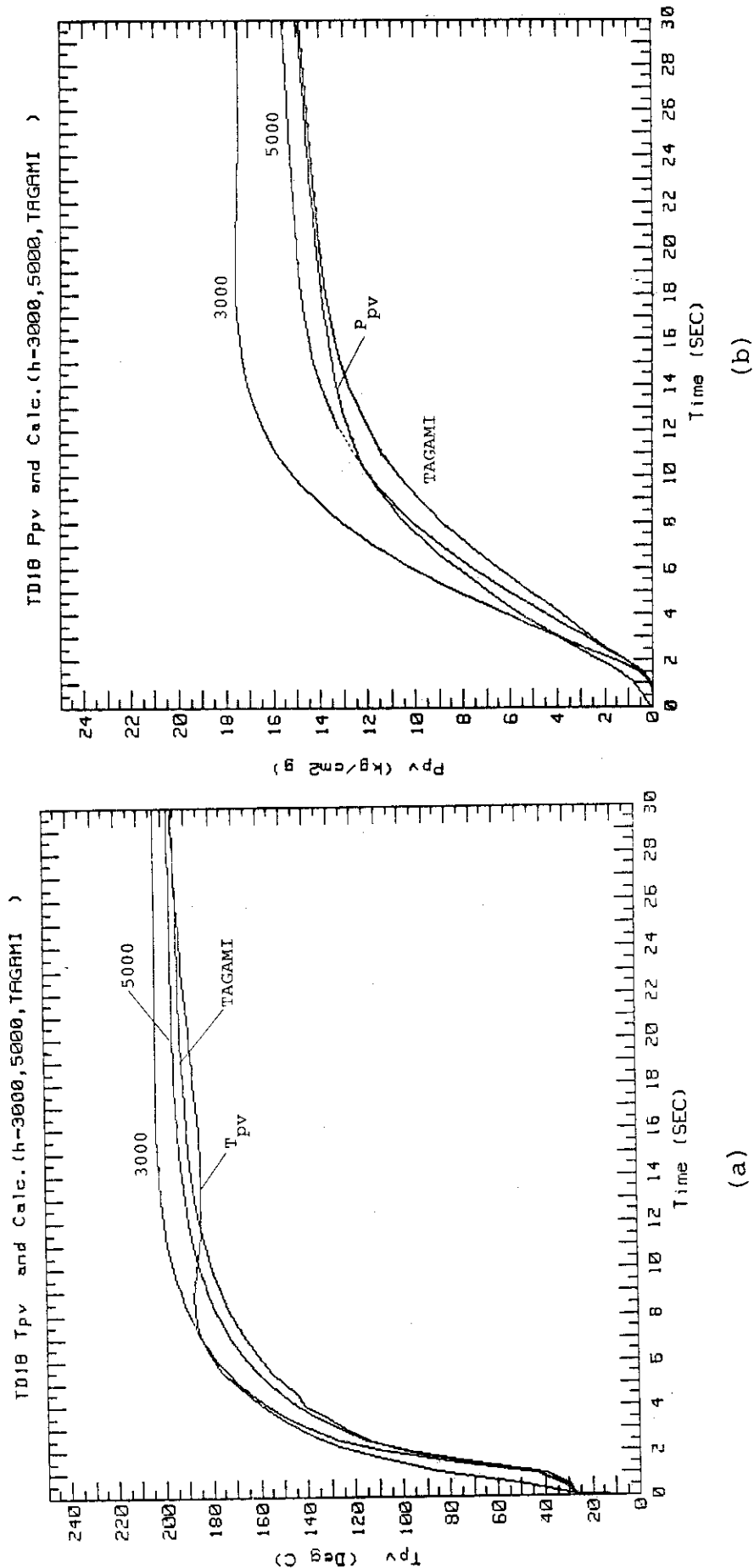


Fig. 1 4.5 (TD18)

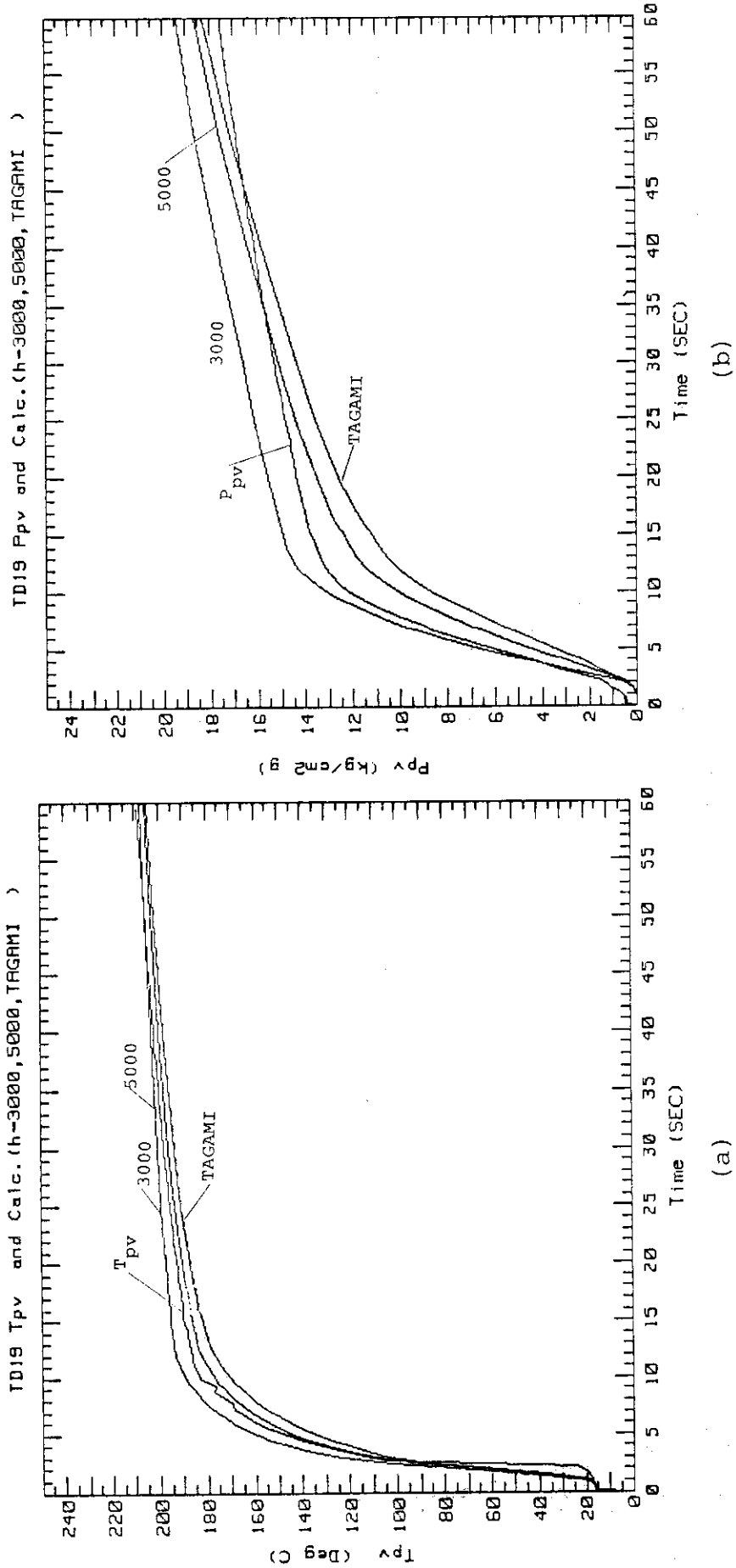


Fig. 1 4.6 (TD19)

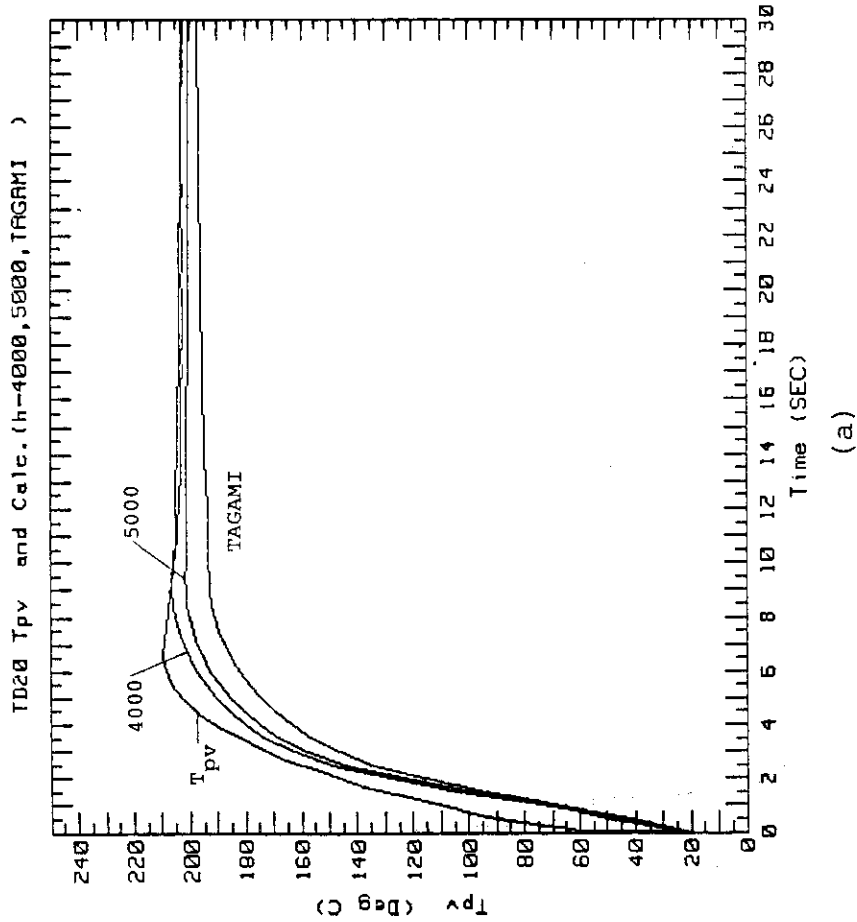
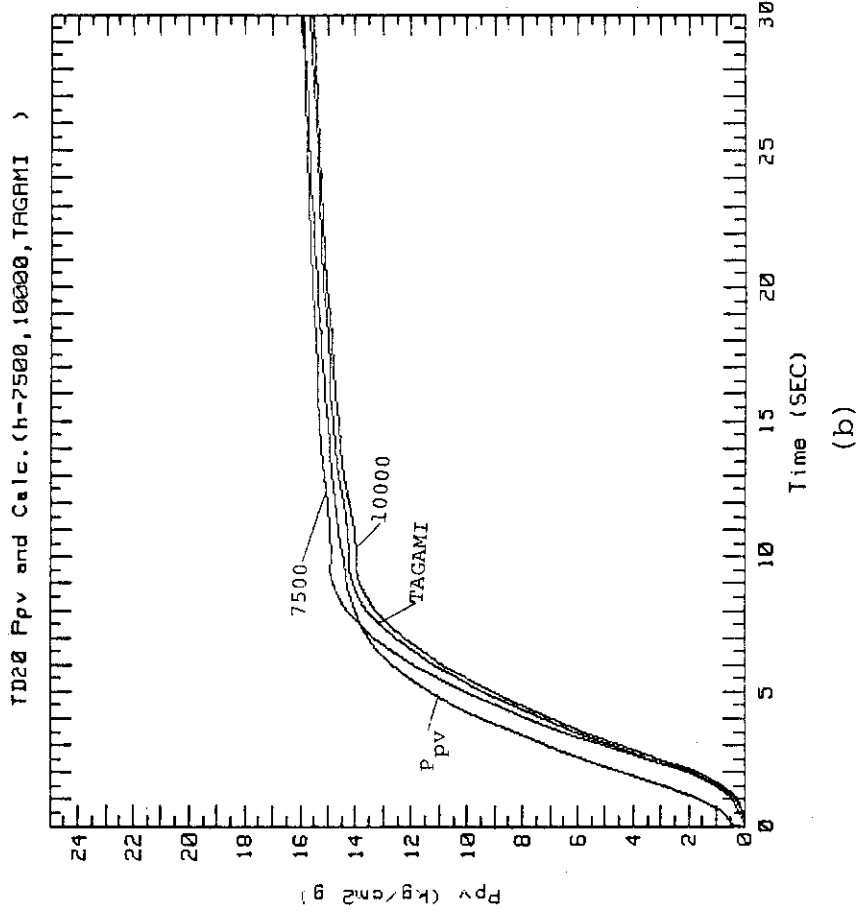


Fig. 1.4.7 (TD20)

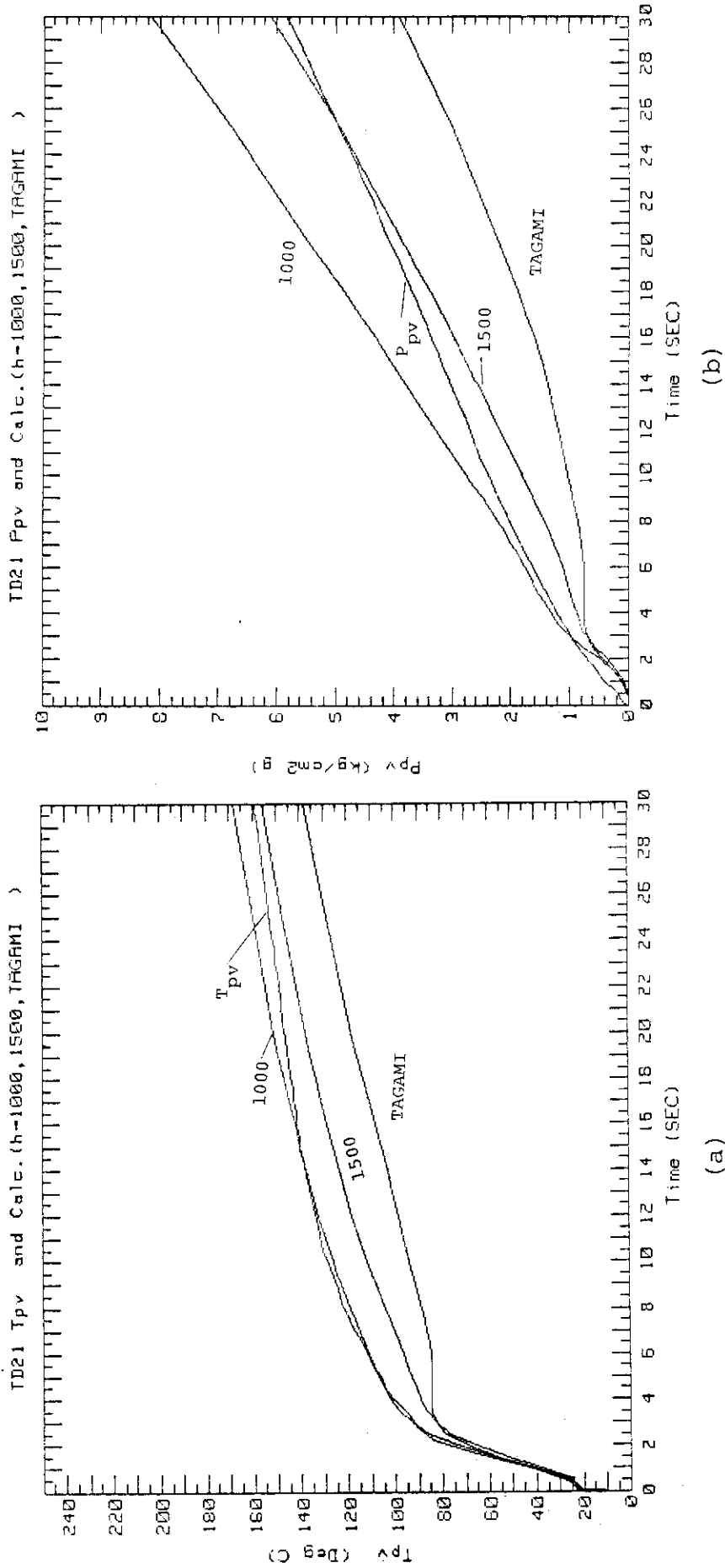


Fig. 1.4.8 (TD21)

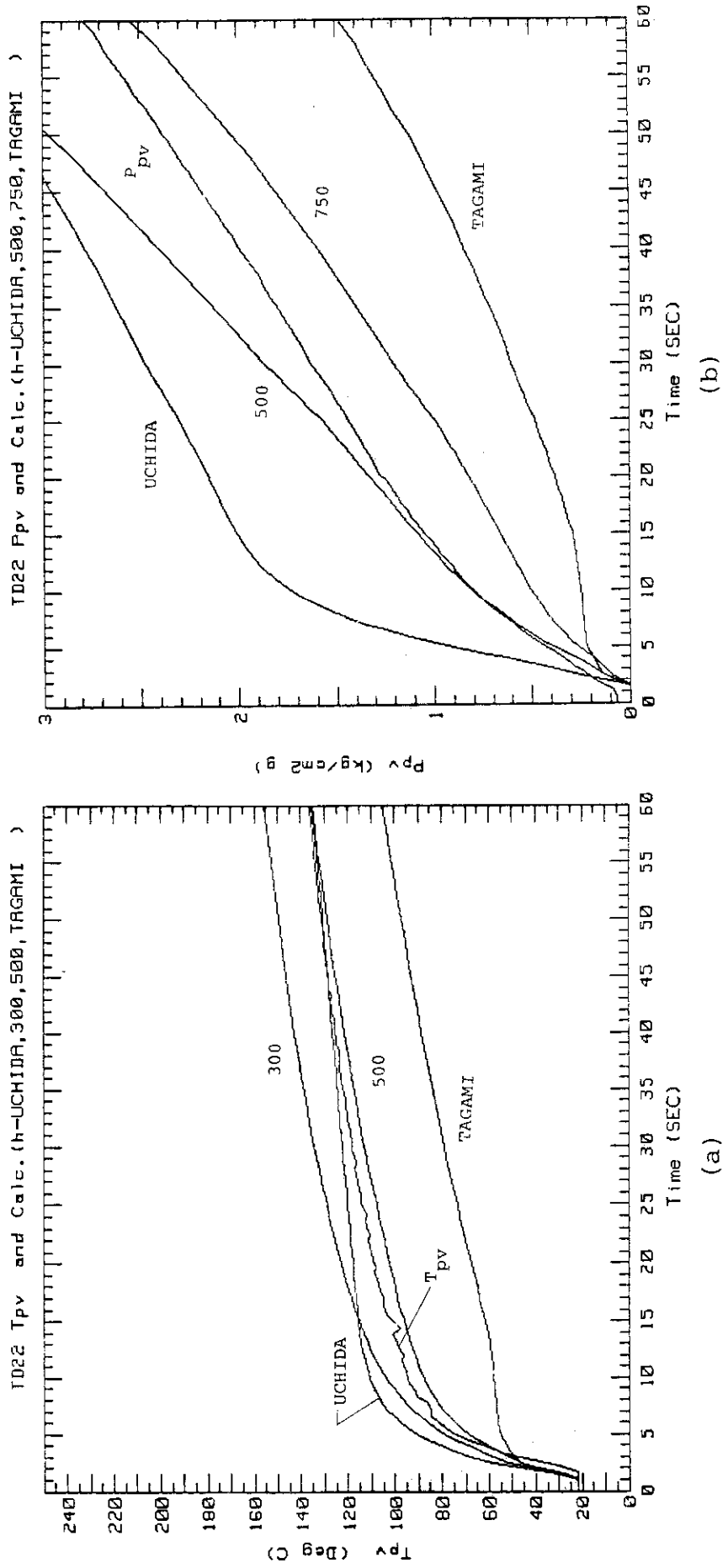


Fig. 14.9 (TD22)



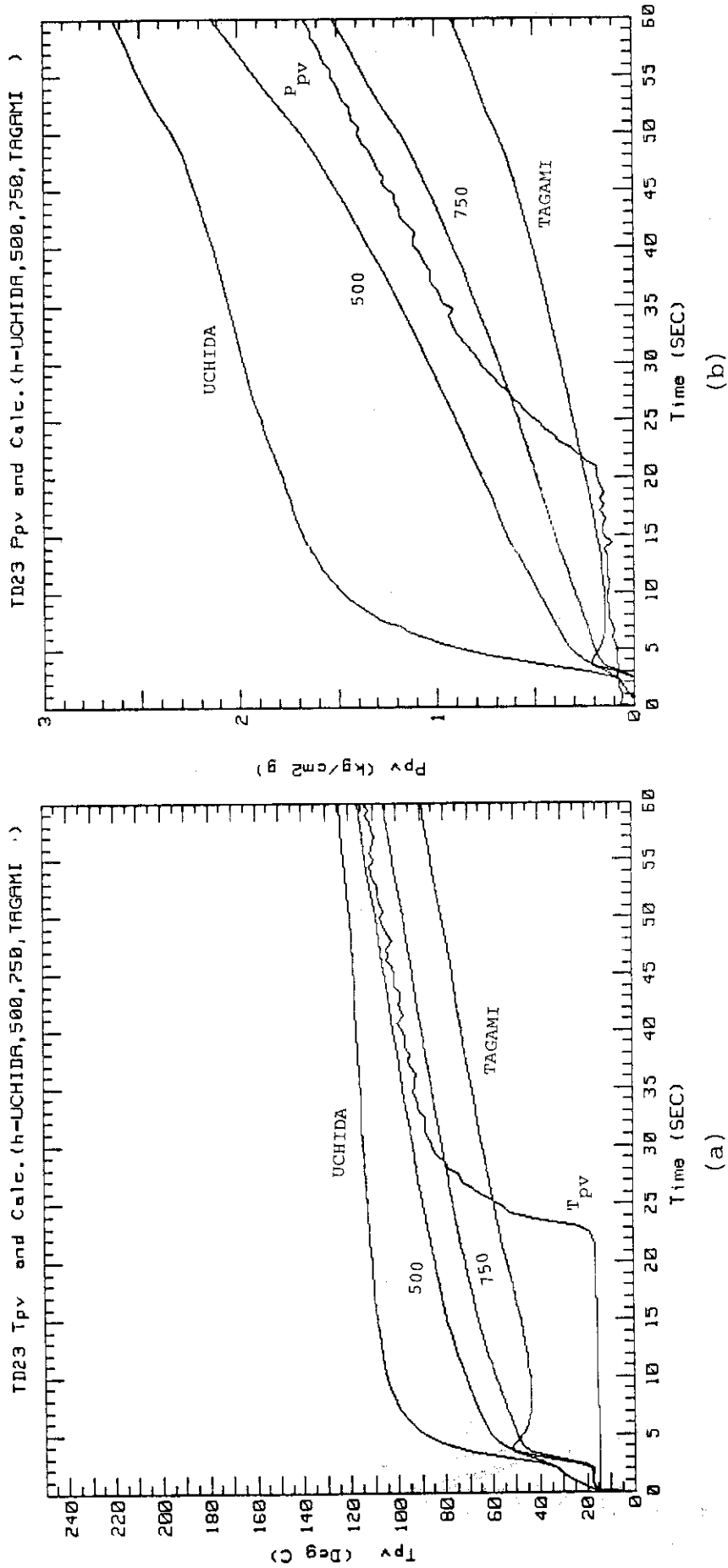


Fig. 14.10 (TD23)

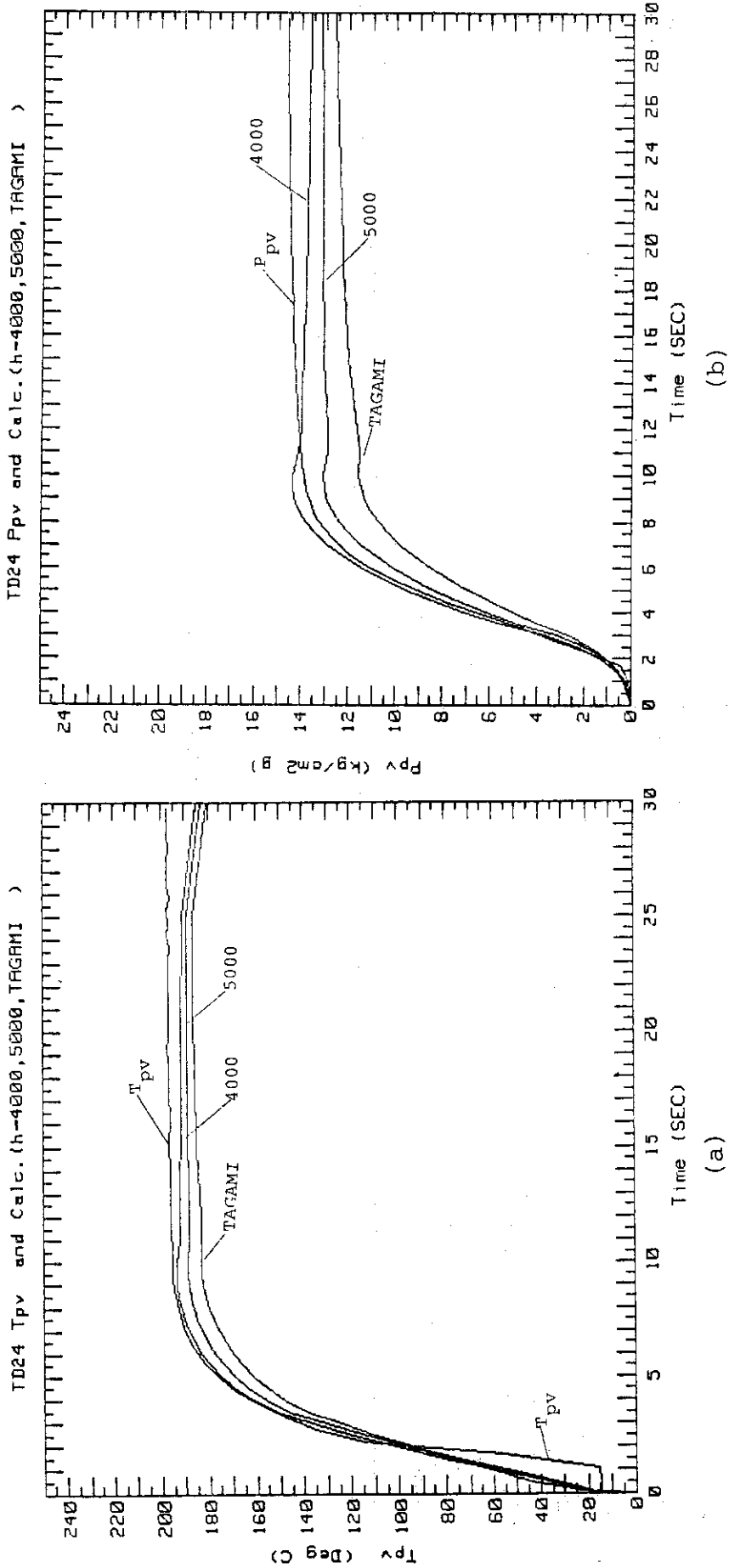


Fig. 1411 (TD24)

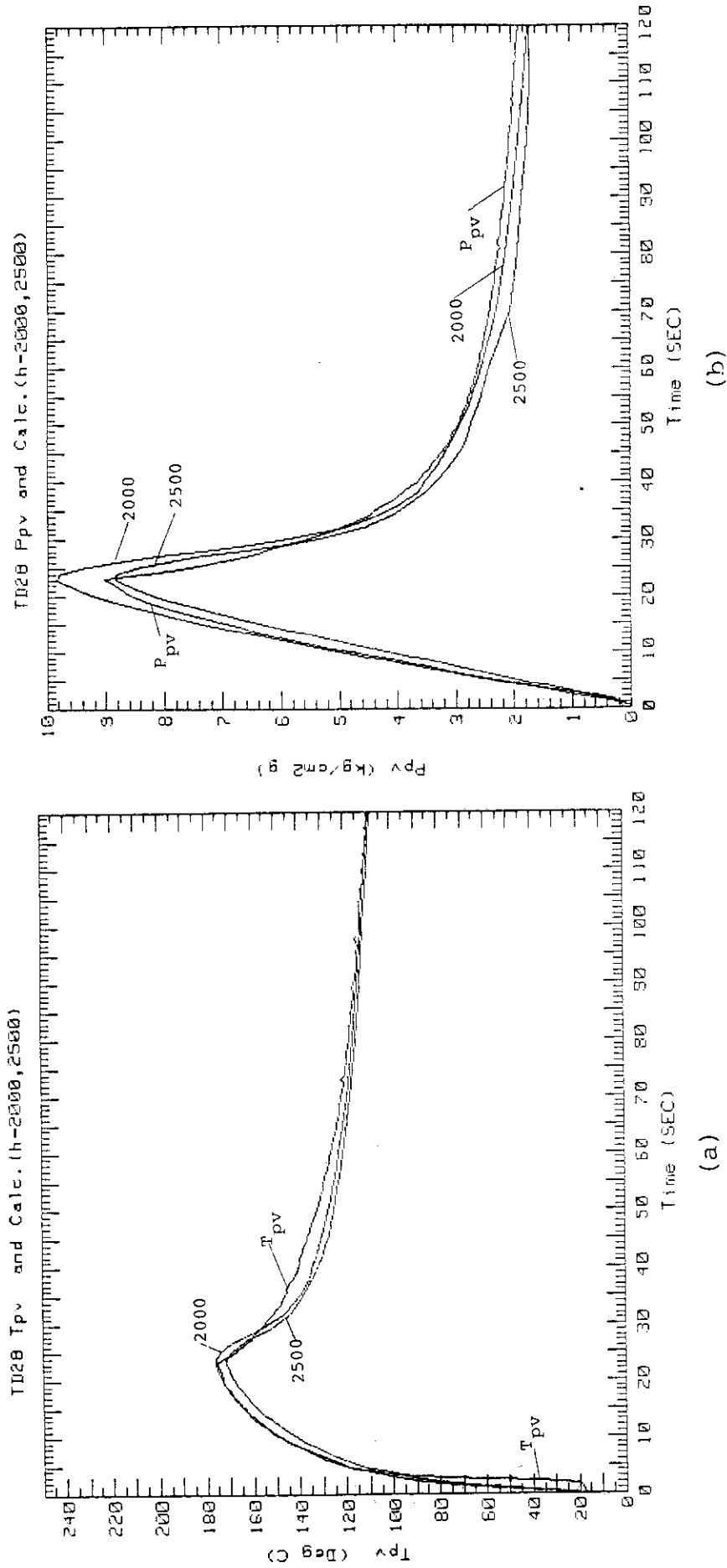


Fig. 14.12 (TD28)

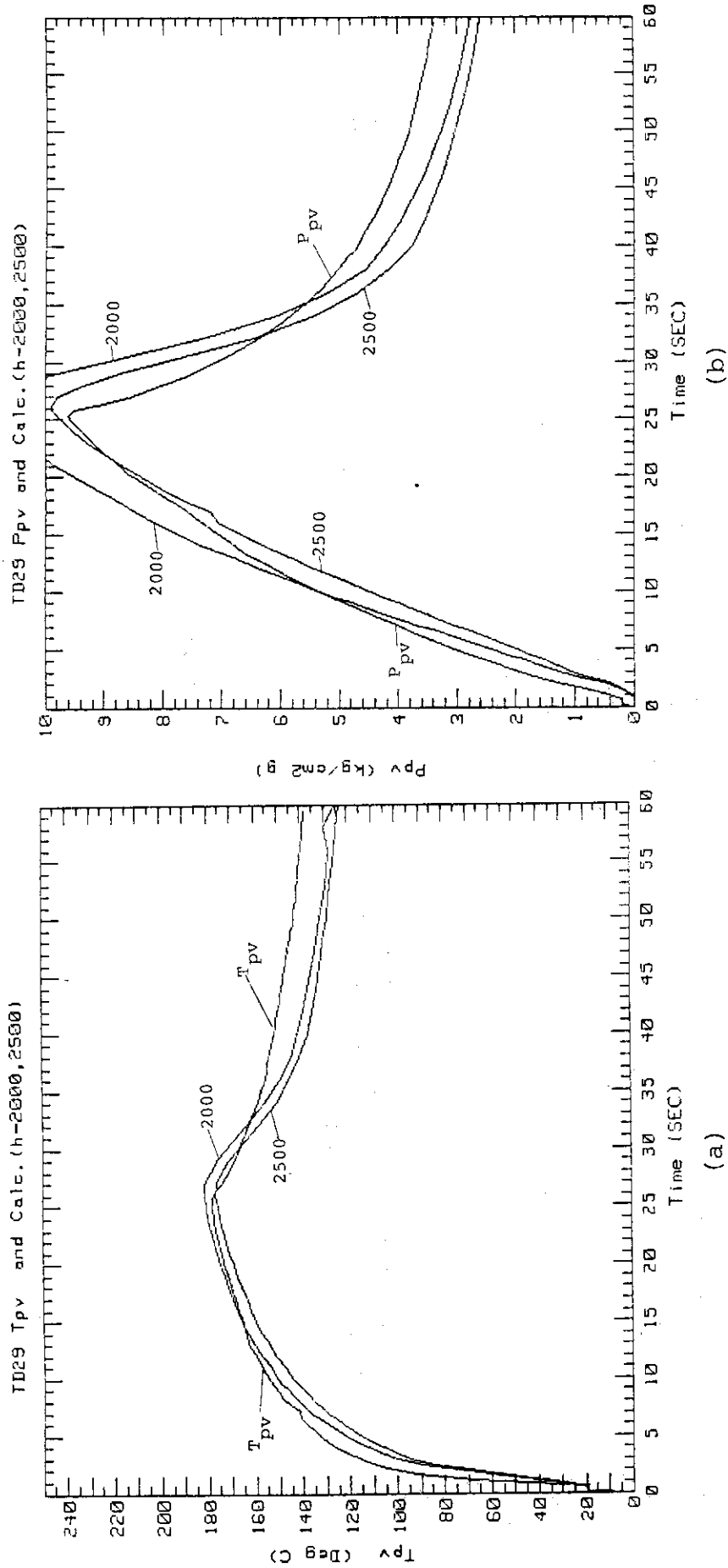


Fig. 1.4.13 (TD29)

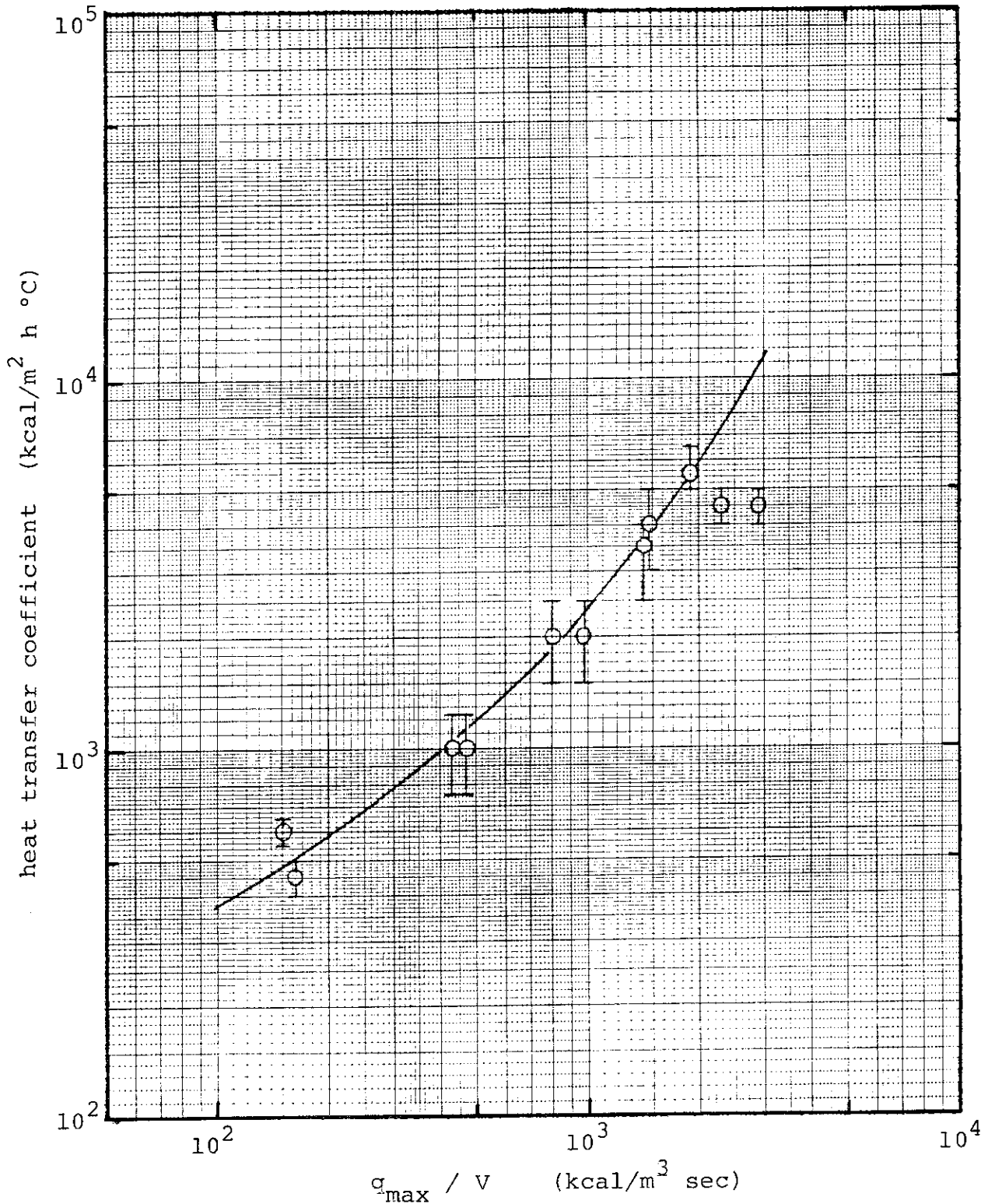


Fig. 15.1 Relationship between maximum energy flow rates ( $q_{\max}/V$ ) and heat transfer coefficients during rapid heating tests. I. The heat transfer coefficients are calculated based on temperature in the vessel.

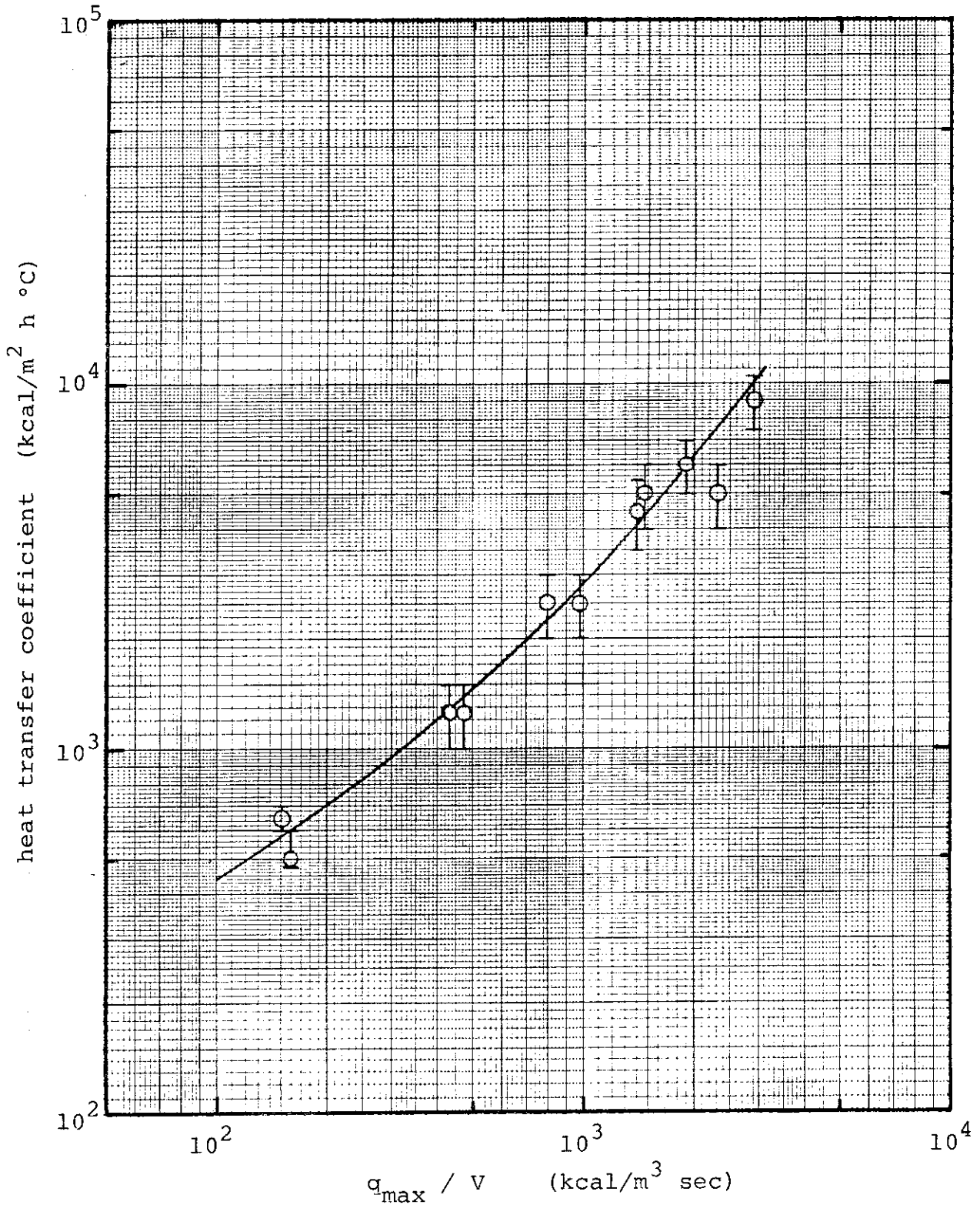


Fig. 15.2 Relationship between maximum energy flow rates ( $q_{\max}/V$ ) and heat transfer coefficients during rapid heating tests. II. The heat transfer coefficients are calculated based on pressure in the pressure vessel.

Table 7 Amounts of steam energy flow at rapid heating tests

symbol of experiments	valve opening(%)	maximum steam flow rate(kg/h)	$t_{q_{max}}$ (sec)	$t_m$ (sec)	$q_{max}/V$ (kcal/m <sup>3</sup> sec)	$Q(t_m)/V \cdot t_m$
TD14	47.5	1500	3.31	37.96	473.5	404.0
TD15	47.5	1380	2.76	31.36	435.6	391.8
TD16	70.0	4660	3.86	12.11	1471	1241
TD17	70.0	4500	3.86	12.11	1420	1205
TD18	80.0	6000	3.86	8.26	1894	1476
TD19	80.0	7300	3.86	8.26	2304	1815
TD20	90.0	9200	2.76	5.51	2904	2220
TD21	50.0	1380	14.31	33.01	435.0	420.8
TD22	40.0*	510	26.41	69.31	161.0	151.8
TD23	40.0*	480	124.9	149.6	151.0	148.4
TD24	94.0	9550	3.31	7.16	3014	1965
TD28	60.0	3100	6.06	13.76	978.5	844.8
TD29	60.0	2550	6.61	14.31	804.9	713.5

\* H-line

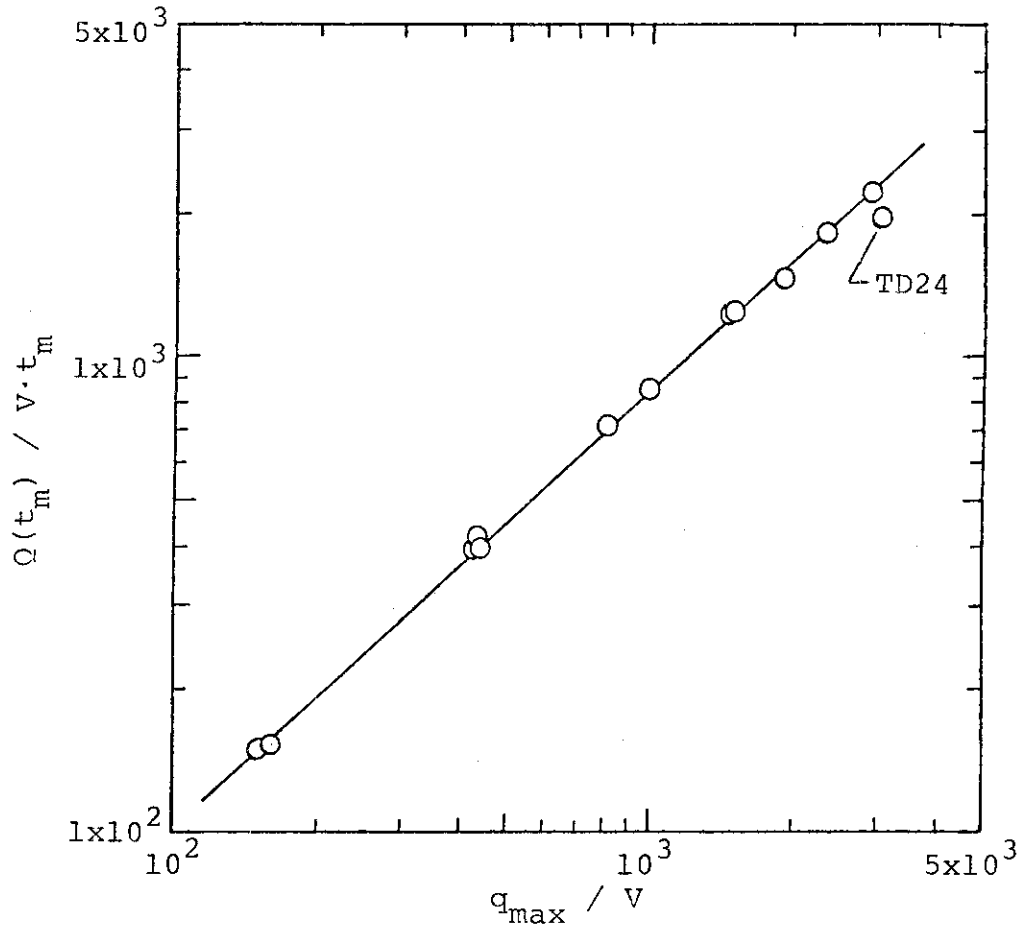


Fig. 16 Relationship between maximum energy flow rate ( $q_{\max}/V$ ) and maximum of time averaged energy flow ( $Q(t_m)/V \cdot t_m$ ) at rapid heating tests.



Appendix 1 Example of input data for CONTEMPT-LT (TD28)

LISTING OF INPUT DATA FOR CASE 1

1	=	CALCULATION OF TEMP. AND PRES. FOR SEAMATE-2 PV TD28
2	=	HEAT TRANSFER COEFFICIENT = 4.10E2 BTU/H FT**2 F (2000)
3	=	THARMAL CONDUCTIVITY = 9.408 VOLUMETRIC HEAT CAPACITY = 57.6
4	11001	0.0500 5 0 63.32 14.22 0.0 63.32 0.0 0.0 0.0 0.0
5	10031	20.727 0.000 63.32 63.32 14.22 1.0 0.0
6	10 1 1	SEC 0.0 60.0 0.0 355.5 50.0 482.0
7	9000	SEC
8	9001	10.0 0.002 500 250
9	9002	20.0 0.005 200 100
10	9003	50.0 0.02 250 50
11	9004	181.0 0.1 100 20
12	300	SEC KG/SEC J/KG
13	=	TD28 1ST EXPERIMENT
14	301	0.000 0.000 0.000
15	302	0.014 0.0000 2.796+6
16	303	1.663 0.6856 2.796+6
17	304	3.863 0.8330 2.796+6
18	305	5.513 0.8632 2.796+6
19	306	6.613 0.3512 2.796+6
20	307	12.66 0.7697 2.796+6
21	308	15.96 0.6986 2.796+6
22	309	18.71 0.6329 2.796+6
23	310	21.46 0.5575 2.796+6
24	311	23.11 0.5069 2.796+6
25	312	25.31 0.2341 2.796+6
26	313	28.61 0.0 2.796+6
27	=	TD22
28	101001	4 1 0 0.0 0.0 0.0 56.576 3 0
29	101101	3 1.312-2
30	101201	1
31	101300	0 0.0
32	101400	5 2 0 0
33	102001	10 1 0 0.0 0.0 0.0 38.811 3 0
34	102101	9 3.937-2
35	102201	1
36	102300	0 0.0
37	102400	5 2 0 0
38	103001	22 1 0 0.0 0.0 0.0 9.112 3 0
39	103101	21 3.6091-1
40	103201	1
41	103300	0 0.0
42	103400	5 2 0 0
43	104001	10 1 0 0.0 0.0 0.0 8.337 3 0
44	104101	9 1.6405-1
45	104201	1
46	104300	0 0.0
47	104400	5 2 0 0
48	105001	5 1 0 0.0 0.0 0.0 8.253 3 0
49	105101	4 1.6405-2
50	105201	1
51	105300	0 0.0
52	105400	5 2 0 0
53	430001	9.408 57.61
54	430001	0.0 4.10+2
55	430002	1.0 4.10+2
56	430003	10.0 4.10+2
57	430004	90.0 4.10+2
58	430005	180.5 4.10+2
59	.	