

JAERI-M

9 6 9 9

原子炉用電線材料健全性試験装置
(SEAMATE-II) の工学データ・2
(圧力容器内温度の制御特性実験)

1981年9月

田中 進・中瀬吉昭・岡田漱平
伊藤政幸・日馬康雄・吉田健三

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

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・2
(圧力容器内温度の制御特性実験)

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・岡田漱平

伊藤政幸・日馬康雄・吉田健三

(1981年9月4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法の確立に資するとともに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的データを得るために製作された。工学的な検討のうち、蒸気排出ラインを閉鎖した条件下で圧力容器内雰囲気を急昇温した実験についてはすでに報告した。

ここでは、自動運転による圧力容器内温度の制御特性実験について報告する。

1) 急昇温時における制御補機の制御性、2) 温度検出温度制御 (T), 圧力検出温度制御 (P/T) 及び圧力検出圧力制御 (P) の各制御方式の制御性の比較、3) 自動運転による急昇温及び急降温時の制御性、4) 全自動運転に必要な蒸気量及び冷却水量等。

Engineering Data of SEAMATE-II, 2
(Test on the Characteristics of Temperature
Regulation in the Pressure Vessel)

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

Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, JAERI

(Received September 4, 1981)

SEAMATE-II (Simulated Environmental Apparatus for Material Testing) was constructed in order to establish methodologies 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. A part of engineering data have been previously reported on rapid heating of the inside of the pressure vessel with its outlet valve closed.

The engineering data reported here are as follows,

- 1) controllability of the control devices at rapid heating,
- 2) comparison of the temperature control systems based on temperature detection, pressure detection and temperature converted from detected pressure, 3) controllability of the automatic control system during rapid heating and rapid cooling, 4) quantities of steam and cooling water required for the automatic control.

Keywords : SEAMATE-II, LOCA, Engineering Data, Rapid Heating, Rapid Cooling, Controllability, Temperature Control

⁺) Osaka Laboratory for Radiation Chemistry, JAERI

目 次

| | |
|-----------------------------------|----|
| 1.はじめに | 1 |
| 2.実験装置 | 1 |
| 2.1 制御方法の基本方針 | 1 |
| 2.2 圧力容器内温度・圧力の制御機器 | 2 |
| 2.2.1 機器、配管及び弁類 | 2 |
| 2.2.2 制御補機 | 3 |
| 2.2.3 制御回路 | 5 |
| 2.2.4 制御方式の選択 | 6 |
| 2.2.5 計測機器 | 7 |
| 3.急昇温時における制御補機の動作実験 | 8 |
| 3.1 実験方法 | 8 |
| 3.2 実験条件 | 9 |
| 3.3 実験結果及び検討 | 9 |
| 3.3.1 Hライン選択における制御補機の制御性 | 9 |
| 3.3.2 Aライン選択における制御補機の制御性 | 13 |
| 4.制御方式の比較実験 | 14 |
| 4.1 実験方法 | 14 |
| 4.2 実験条件 | 14 |
| 4.3 実験結果 | 14 |
| 4.3.1 温度（「T」）制御方式の制御性能 | 14 |
| 4.3.2 圧力-温度（「P/T」）制御方式の制御性能 | 15 |
| 4.3.3 圧力（「P」）制御方式の制御性能 | 15 |
| 4.4 実験結果の検討 | 16 |
| 4.4.1 制御性能 | 16 |
| 4.4.2 制御方式の選定 | 17 |
| 4.4.3 制御に必要な蒸気量及び冷却水量等 | 18 |
| 5.急昇温及び急降温実験 | 20 |
| 5.1 実験方法及び実験条件 | 20 |
| 5.2 実験結果及び検討 | 20 |
| 6.まとめ | 21 |
| 参考文献 | 23 |

CONTENTS

| | |
|--|----|
| 1. Introduction | 1 |
| 2. Experimental Apparatus | 1 |
| 2.1 Design principle of Automatic Control System..... | 1 |
| 2.2 Temperature and Pressure Control Systems | 2 |
| 2.2.1 Equipments, Valves and Piping | 2 |
| 2.2.2 Control Devices | 3 |
| 2.2.3 Control Circuits | 5 |
| 2.2.4 Selection of Control Systems | 6 |
| 2.2.5 Measuring Instruments | 7 |
| 3. Performance of Control Device at Rapid Heating | 8 |
| 3.1 Experimental Procedure | 8 |
| 3.2 Experimental Conditions | 9 |
| 3.3 Results and Discussion | 9 |
| 3.3.1 Controllability of Control Devices by Selecting Steam Line H | 9 |
| 3.3.2 Controllability of Control Devices by Selecting Steam Line A | 13 |
| 4. Comparison of Control Methods in Automatic Control with Program Generator | 14 |
| 4.1 Experimental Procedure | 14 |
| 4.2 Experimental Conditions | 14 |
| 4.3 Results | 14 |
| 4.3.1 Controllability of the Automatic Control Based on Temperature(T) Detection | 14 |
| 4.3.2 Controllability of the Automatic Control Based on Temperature Converted from Detected Pressure(P/T).... | 15 |

| | |
|---|----|
| 4.3.3 Controllability of the Automatic Control Based on Pressure(P) Detection | 15 |
| 4.4 Discussion | 16 |
| 4.4.1 Controllabilities | 16 |
| 4.4.2 Selection of Control Systems | 17 |
| 4.4.3 Quantities of Steam and Cooling Water Required for Automatic Control | 18 |
| 5. Rapid Heating and Rapid Cooling | 20 |
| 5.1 Experimental Procedure and Conditions | 20 |
| 5.2 Results and Discussion | 20 |
| 6. Conclusion | 21 |
| References | 23 |

1. はじめに

^{1), 2), 3)}
 原子炉用電線材料健全性試験装置（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一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法の確立に資する劣化挙動のデータを得るとともに、将来原子炉用電線ケーブルの規格が定められた場合、その性能認定を行う認定装置（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 模擬環境の 1 例として Fig.1 に米国電気電子学会（IEEE）の電線等に対する型式試験法（IEEE std. 323 '74）を示す。このように LOCA 模擬環境には放射線、高温高圧水蒸気、薬液スプレーおよび課通電があり、本装置はこれらの環境を実現するために必要とされる工学的データを得るために Fig.2 に示すような種々の運転プログラムに従って、運転ができるように設計されている。²⁾ ³⁾

本装置の機器構成のうち、機械部分については既に報告した。また、前報で本装置の工学試験の 1 部として行った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した。

本報告は、SEAMATE-II の上記以外の工学データとして、圧力容器内の温度を所定温度プログラムで運転するために設けた制御機器、制御補機および制御回路について報告する。また、工学試験として、これらの機器類の制御性能を確認するために行った実験の結果の解析から得られた自動運転の制御方法、制御性能および制御に必要な蒸気流量と冷却水等について報告する。

2. 実験装置

SEAMATE-II は圧力容器系、蒸気供給系、冷却系、薬液系、排出系より構成され、これに計測制御系、課通電系および電源系が加わっている。本実験に使用した圧力容器、アクチュエーター、ボイラーとこれらを結ぶ配管、弁類および計測制御機器のフローシートを Fig.3 に示す。本装置の機械的機器構成についてはすでに詳細に報告されているので、本報告では主として圧力容器内の温度を所定のプログラムで制御するために設けた機器および制御補機等について述べる。

2.1 制御方法の基本方針

本装置は、Fig.1 および Fig.2 に示した運転プログラム、および特に急速・低速昇温と急速・低速降温の工学的データを得るために設けた Fig.4 に示す特殊運転プログラムによる運転を想定して設計した。

1. はじめに

^{1), 2), 3)}
 原子炉用電線材料健全性試験装置（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一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法の確立に資する劣化挙動のデータを得るとともに、将来原子炉用電線ケーブルの規格が定められた場合、その性能認定を行う認定装置（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 模擬環境の 1 例として Fig. 1 に米国の電気電子学会（IEEE）の電線等に対する型式試験法（IEEE std. 323 '74）を示す。このように LOCA 模擬環境には放射線、高温高圧水蒸気、薬液スプレーおよび課通電があり、本装置はこれらの環境を実現するために必要とされる工学的データを得るために Fig. 2 に示すような種々の運転プログラムに従って、運転ができるように設計されている。²⁾ ³⁾

本装置の機器構成のうち、機械部分については既に報告した。また、前報で本装置の工学試験の 1 部として行った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した。

本報告は、SEAMATE - II の上記以外の工学データとして、圧力容器内の温度を所定温度プログラムで運転するために設けた制御機器、制御補機および制御回路について報告する。また、工学試験として、これらの機器類の制御性能を確認するために行った実験の結果の解析から得られた自動運転の制御方法、制御性能および制御に必要な蒸気流量と冷却水等について報告する。

2. 実験装置

SEAMATE - II は圧力容器系、蒸気供給系、冷却系、薬液系、排出系より構成され、これに計測制御系、課通電系および電源系が加わっている。本実験に使用した圧力容器、アキュムレーター、ボイラーとこれらを結ぶ配管、弁類および計測制御機器のフローシートを Fig. 3 に示す。本装置の機械的機器構成についてはすでに詳細に報告されているので、本報告では主として圧力容器内の温度を所定のプログラムで制御するために設けた機器および制御補機等について述べる。

2.1 制御方法の基本方針

本装置は、Fig. 1 および Fig. 2 に示した運転プログラム、および特に急速・低速昇温と急速・低速降温の工学的データを得るために設けた Fig. 4 に示す特殊運転プログラムによる運転を想定して設計した。

これらの運転プログラムの特徴は、① 急昇温および急降温を制御すること、② 長時間連続運転が可能であること、が挙げられる。このため圧力容器内の温度を飽和蒸気と冷却水で制御することとし、とくに急昇温のために通常制御とは別個の制御回路を設けることにした。また、長時間連続運転を容易にするため中央監視制御方式をとり、装置全系について全自动運転ができるようにするとともに、故障時対策と個々の機器の性能試験のために個別自動運転及び手動運転ができるようにした。

2.2 圧力容器内温度・圧力の制御機器

ここでは圧力容器内の温度・圧力を所定のプログラムで制御するために設けた機器、補機等について述べる。

2.2.1 機器、配管及び弁類

本装置の蒸気供給源として貫流（水管）ボイラ（定格実蒸発量 1.5 ton/h ($24 \text{ kg/cm}^2\text{G}$)）を2缶設置した。ボイラの機種選定には蒸気発生の立上り時間の短いこと、長時間連続運転に対応できること、取扱資格及び価格等を勘案した。さらに急昇温時に必要な蒸気源として、大量の蒸気をためるアキュムレーター（ 4 m^3 ）を併用することにした。

圧力容器内への蒸気供給は、最大蒸気供給量 10 ton/h の経路（Aライン）と 1 ton/h の経路（Hライン）を設けた。Aラインは、急昇温時等に必要な大量の蒸気を短時間で圧力容器内へ供給するためのもので、定圧弁（SV-6、常時設定圧力 $21 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ ）及び蒸気流量制御弁（SV-11）が設けられている。

Hラインは、圧力容器内の温度・圧力制御に必要な蒸気を常時供給するためのもので、減圧弁（SV-17, SV-20、常時設定圧力 $16.5 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 、特殊実験用（本実験中）設定圧力 $18 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ ）と蒸気流量制御弁（SV-24）が設けられている。Hラインには、圧力容器内圧力を $0 \sim 15 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ の広範囲にわたり長時間連続して安定した制御をするための故障対策として、減圧弁を2個設けた。

圧力容器内へ注入する冷却水は、ボイラ用軟化水を用いた。冷却水は軟化装置を経て冷却水タンク（ 1 m^3 ）にためられ、冷却水ポンプ（WP-1、最大流量 $150 \ell/\text{min}$ ）により定圧回路（WV-7）、流量制御弁（WV-4）及びON-OFF弁（WV-10）を経て圧力容器内に噴霧される。なお、圧力容器上部のフタ及びフランジが厚肉（約 110 mm ）のため、上部の冷却が十分行えるように、上方に向けたスプレーノズルを併設した。

蒸気のドレイン、冷却水等を排出する排出ラインには、ON-OFF弁（DV-2）とディスク型スチームトラップ（ST-4, ST-5）が設けられている。ON-OFF弁は圧力容器内の温度・圧力の制御及びドレインの排出に用いられる。スチームトラップは、圧力容器内圧力が常圧以上（約 $0.3 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ 以上）の温度・圧力制御時に生ずるドレイン等を確実に排出し、かつ不必要に蒸気を排出しないように設けたものである。なお、圧力容器内圧力が常圧以上の場合に、制御性をよくするためにスチームトラップを用いることについては、SEAMATE-⁴⁾Iを用いた蒸気圧力 $4 \text{ kg/cm}^2\text{G}$ での圧力制御実験で、良好な結果が得られることを確認した。

ここでは、最高圧力 $1.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ (200°C)までの圧力容器内の温度・圧力の制御性、冷却中のドレイン排出能力と制御性及び長時間連続運転でのスチームトラップの信頼性を確認するために設けた。

以上に述べたラインの他に、圧力容器内の温度・圧力を確実に制御するため、圧縮空気供給ラインと真空破壊ラインを設けた。圧縮空気供給ラインは自動運転において、圧力容器内温度が 105°C 以下の場合に圧縮空気を圧力容器内に供給し、ドレインの排出を確実にするために設けたラインである。なお、圧縮空気源として常時コンプレッサー (PCM-1) を用いているが、他の気体（例えば窒素）を用いる場合には、ポンベを接続するだけで供給できるように配管が行なわれている。真空破壊ラインは、圧力容器内圧力が常圧以下となった場合、吸入側が大気開放された逆止弁 (PV-5) から空気を吸入し、圧力容器内を負圧としないように設けた。

なお、LOCA 模擬環境を実現するため圧力容器には、さらにケミカルスプレーラインが設置されている。

2.2.2 制御補機

圧力容器内の温度を $20^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ ($0 \sim 1.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$) の範囲の所定温度プログラムにもとづき、各段階で昇温、降温および一定温度に制御するために重要な制御補機の関係を Fig. 3 に示した。主要補機であるプログラム設定器、温度調節器、開度調節器、圧力容器内圧力警報器、蒸気飽和度警報器の概要を次に述べる。

(1) プログラム設定器 (PRO)

プログラム設定器 (HAMAX 製) は、プログラムパターンを内部メモリーにストアードし、時間経過に応じプログラムパターンを発生し、出力するものである。プログラムパターンの設定は時間／温度または時間／圧力（絶対圧力）の座標点を入力することにより行われ、隣り合う点を直線で結び、希望するパターンとして出力する。また、タイミング出力設定が付加されており、時間と ON または OFF のプログラムを書き込むことにより接点の開閉を行う。入力仕様は次のとおりである。

温度（圧力）設定

範囲 $0 \sim 250^\circ\text{C}$ ($0.0 \sim 25.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$)

最小設定 1°C (0.1 kg/cm^2)

プログラム走行時間設定

範囲 $0 \sim 999$ 時間 59 分 59 秒

最小設定 1 秒

最大傾斜（勾配） $250^\circ\text{C}/5 \text{ sec}$

プログラムパターン数 4 パターン (1 ~ 4)

プログラムステップ数 20 ステップ (1 ~ 20)

タイミング出力パターン数 8 パターン (1 ~ 8)

使用用途 1 急昇温リレー

2 昇温リレー

- 3 絶縁抵抗測定
- 4 降温リレー
- 5 ~ 7 絶縁抵抗測定
- 8 予備

タイミング出力設定ステップ数 20ステップ(1~20)

(2) 温度調節器 (TIC-6)

温度調節器（横河製ICE（5341-3502型）指示調節計）は、「AUTO」に設定することによって伝送器、変換器から1~5Vdcに変換された制御量を測定信号として受信し、この測定信号と設定値の偏差に比例(P)、積分(I)、微分(D)演算を行い、4~20mAdcの出力信号を操作端に送るものである。また、「MAN」に設定した場合は、計器前面にある手動設定レバーを操作することにより、0~100%（4~20mAdc）の出力信号を直接操作端に送ることができる。入力信号としては、圧力容器内の温度・圧力測定値の変換信号を、設定値としてはプログラム設定器からの出力信号を受信する。出力信号は、蒸気流量制御弁(SV-11, SV-24)及び冷却水流量制御弁(WV-4)に送られる。なお、設定指示範囲0~100%は2つのスプリットレンジに分けられ、0~50%が冷却用に、50~100%が昇温用に用いられる。すなわち、指示が0~50%の間にある場合は指示値と50%の偏差が冷却水流量制御弁へ制御信号として送られ、指示が50~100%の間にある場合は、指示値と50%との偏差が蒸気流量制御弁へ制御信号として送られる。仕様は次のとおりである。

| | |
|----------|--------------------|
| 制御方式設定 | AUTO/MAN |
| 測定入力信号 | 1~5Vdc |
| 設定方式 | LOCAL/REMOTE |
| リモート設定 | 4~20mAdc |
| 調節動作 | 比例(P)+積分(I)+微分(D) |
| 比例帯 | 2~500% |
| 積分時間 | 0.01~2.5分, 0.1~25分 |
| 微分時間 | O F F 及び 0.04~10分 |
| 入出力設定指示計 | 指示範囲 0~100% |
| 出力信号 | 4~20mAdc |

(3) 開度調節器 (HC-1)

開度調節器（横河製IML（5343-1000形）手動操作器）は、計器前面の設定ホイールを操作することにより、4~20mAdcの電流信号を出力信号として供給指示するもので、調節計の遠隔設定や操作端の手動調節などに使用するものである。本器は急昇温時の蒸気流量制御弁(SV-11)の開度設定に用いられ、温度調節器の出力信号と同様に、設定値と50%の偏差が制御信号として送られる。仕様は次のとおりである。

| | |
|-------|--------------------------|
| 出力信号 | 4~20mAdc (設定ホイールにより連続可変) |
| 出力指示計 | 0~100% |

(4) 圧力容器内圧力警報器 (PA-6, (HH, HHH))

圧力容器内圧力警報器（横河製5352形警報設定器）は、警報設定点数が2点の一般プロ

セス用の警報設定器である。入力 1 ~ 5 Vdc で、設定範囲 0 ~ 100 % である。警報回路は入力信号が設定値を通過する際 ON - OFF する。

本器への入力信号は、圧力容器内圧力測定 (PA-6) 信号である。警報接点は、急昇温時の圧力容器内圧力を制御する「圧力容器内圧力高高 (HH)」、圧力容器内圧力が異常に高くなるのを防止する「圧力容器内圧力異常高 (HHH)」に用いられる。仕様は次のとおりである。

| | |
|------|-----------|
| 入力 | 1 ~ 5 Vdc |
| 設定数 | 2 |
| 設定範囲 | 0 ~ 100 % |
| 警報動作 | 上下限非励磁 |

(5) 蒸気飽和度警報器 (DTS-6)

蒸気飽和度警報器 (横河製 (5352-2691Z) IKY) は、1 ~ 5 Vdc (2入力) を受信し、この2入力の偏差が設定した値を越えた時に警報を発するもので、2設定共独立にプラスまたはマイナス偏差の設定ができる。

本器への入力は、圧力容器内温度測定 (TE-6) 信号と、圧力容器内圧力測定 (PE-6) 信号を COMPUTER UNIT で飽和蒸気温度に換算した信号である。警報の設定は通常士 10 % に設定されている。仕様は次のとおりである。

| | |
|------|----------------------------|
| 入力 | 1 ~ 5 Vdc (2入力) |
| 設定数 | 2 |
| 設定範囲 | (-)50 ~ 0 ~ (+)50 % (2設定共) |
| 警報動作 | 上下限非励磁 |

2.2.3 制御回路

2.2.1 及び 2.2.2 で述べた個々の制御機器及び制御補機を用いて、圧力容器内雰囲気を所定の温度プログラムで制御するために構成した制御回路を機能別に示すと次のとおりである。

- ① 圧力容器内への蒸気投入量の制御
- ② 圧力容器内を飽和蒸気で満たすための制御
- ③ 圧力容器内雰囲気及び器壁を冷却するための冷却水の制御
- ④ 圧力容器内ドレインを排出するための制御
- ⑤ ①~④を補助する制御

①~⑤の機能を組合せて所定の温度プログラムに従って昇温、一定温度保持、降温及び本装置の特徴の1つである急昇温、急降温を制御する制御回路、インターロック回路等を Fig.5 ~ Fig.7 に示す。Fig.5 は蒸気及び冷却水供給ラインの制御回路である。本装置には圧力容器内に短時間で大量の蒸気を投入する必要のある急昇温を実現するための一定開度モードと制御モードの2つの制御方式を設けた。Fig.5 の制御回路によって説明すると、一定開度モードはプログラム設定器の「急昇温リレーON」及び圧力容器内圧力警報器 (PA-6) の制御設定圧力 「HH」以下において、開度設定器 (HC-1) の開度設定信号で A ライン蒸気流量制御弁 (SV-11) が設定開度まで開放される。このように一定開度モードでは、急昇温初期に大量

の蒸気を圧力容器内へ投入できるようになっている。制御モードは、ライン選択（COS-2）がHラインに選択されていた場合、常時温度調節器からの信号をHライン蒸気流量制御弁（SV-24）に送信するようになっており、一定開度モード中でも並行して圧力容器内の温度・圧力を制御する。一方、Aラインに選択されていた場合は、「急昇温リレーOFF」または圧力容器内警報器「HH」以上で制御モードとなり、温度調節器からの信号がSV-11に送信され、圧力容器内の温度・圧力を制御する。しかし、一定開度モード及び制御モードのいずれかの場合にも温度調節器の指示が50%以下になった時には、制御信号が冷却水制御弁（WV-4）に送信される。この回路では圧力容器内雰囲気の制御を蒸気と冷却水で行うことになるが、蒸気と冷却水による制御では、制御が不安定になること、エネルギー損失が大きいことが予想されたため昇温及び一定温度保持中は蒸気のみで制御することにした。このためFig.6に示したように、冷却水ポンプとON-OFF弁（WV-10）をプログラム設定器の「降温リレーON」時に作動するようにし、降温中のみ冷却水が圧力容器内に供給されるようにした。

Fig.7に排出ラインのON-OFF弁（DV-2）の制御回路を示した。DV-2は、プログラム設定器の「昇温リレーON」動作時に、圧力容器内温度警報器（TA-6）「LL」（通常設定値105°C）に至るまで開放され、圧力容器内の蒸気と空気の混合気体を排出する。また、同様の目的のために、常時、圧力容器内蒸気飽和度警報器（DTS-6）の設定範囲（通常設定値±10%）外の場合にDV-2を開放する。両制御回路により急昇温初期の残留空気を排出し、圧力容器内を所定の蒸気飽和度内に制御する。更に、プログラム設定器「昇温リレーON」中を除いて、圧力容器内温度警報器「L」（通常設定値105°C）以下の温度においてDV-2を開放し、ドレインの排出を行う。また、プログラム設定器「降温リレーON」の時に、圧力容器内温度警報器「L」以下の温度において圧縮空気供給弁（PV-3）を開放し、ドレインの排出を促進する。なお、安全対策として、圧力容器内圧力警報器「HHH」以上でDV-2を開放し、蒸気を排出する。Fig.8～Fig.10に圧力容器内の温度・圧力制御補機のLOOP DRAWINGを示す。Fig.8, Fig.9はFig.5に示した蒸気及び冷却水供給ラインの制御回路に相当するもので、個々の制御補機間の関係を示した。Fig.10は圧力容器内等の温度、圧力及び流量等の測定信号を変換するCOMPUTER UNITへの接続関係を示したものである。

2.2.4 制御方式の選択

本装置はFig.2に示したように、20°C～200°Cの範囲の温度プログラムに従って、各一定温度に圧力容器内雰囲気を制御する。圧力容器内雰囲気の温度制御方法としては、温度が指標になることから温度制御が一般的である。ところが飽和蒸気を使用する場合、蒸気圧力約5kg/cm²a以上では圧力の変化に対して温度の変化量が少なくなる傾向にあることが、Fig.11に示した飽和蒸気の圧力と温度の関係から明らかである。つまり、制御範囲（0～250°Cまたは0～25kg/cm²a）を等分割して、設定値と検出値の偏差量によって制御する方式において、約150°C以上の温度では圧力による制御の方が温度による制御より有利であると想定される。このため、本装置では温度制御（「T」制御方式）及び圧力制御（「P」制御）が行えるようにした。しかし、圧力制御では設定された圧力で設定プログラムの2点間を結ぶため、

温度は Fig. 2 で示したような昇温、降温カーブを示さない。この問題を解決するために圧力を検出し、温度で制御する制御（「P/T」制御）をさらに加えた。各制御方式の内容を次に示す。

(1) 「T」制御方式

| | |
|-----------|--|
| プログラム設定入力 | 温度 (0 ~ 25.0°C) |
| 検出 | 圧力容器内温度 (TE-6) |
| 制御 | 温度調節器 (TIC-6) は温度測定信号とプログラム設定器からの設定信号を受信し、その偏差に比例、積分、微分演算を行った出力信号を蒸気流量制御弁または冷却水流量制御弁へ送る。 |

(2) 「P」制御方式

| | |
|-----------|--|
| プログラム設定入力 | 圧力 (0.0 ~ 25.0 kg/cm ² a) |
| 検出 | 圧力容器内圧力 (PE-6) |
| 制御 | 温度調節器は圧力測定信号とプログラム設定器からの圧力設定信号を受信する。以下「T」制御と同じ作動をする。 |

(3) 「P/T」制御方式

| | |
|-----------|--|
| プログラム設定入力 | 温度 (0 ~ 25.0°C) |
| 検出 | 圧力容器内圧力 (PE-6) |
| 制御 | 圧力測定信号は、COMPUTER UNIT で対応する飽和蒸気の温度信号に変換され、プログラム設定器からの温度設定信号と共に温度調節器に送信される。以下「T」制御と同じ作動をする。 |

2.2.5 計測機器

本装置は圧力容器系、蒸気供給系、冷却系、薬液系、及び排出系より構成され、個々の系について必要な個所に温度、圧力、流量、レベル、PH 等の計測機器が設置されており、その配置を Fig. 3 に示した。（詳細については別に報告する。）

本実験では圧力容器及び蒸気供給経路の圧力・温度と蒸気流量、冷却系及び薬液系の各供給経路の圧力・温度と流量の測定を行った。この場合の測定パラメータ及び実験装置に取付けた測定器の各検出端及び検出器を Table 1 に示す。

本実験中の測定値の記録は、データロガーによる 0.5 秒の時間間隔での記録（デジタル表示）と、レコーダーによる連続記録（アナログ表示）を併用した。

3. 急昇温時における制御補機の動作実験

圧力容器内雰囲気の温度・圧力制御用機器のうち制御補機の設定値を変え、自動運転によって急昇温実験を行い、急昇温中の制御状態の比較を行った。

3.1 実験方法

実験方法を Fig.3 に示したフローシートにより説明する。先ず、A ライン及び H ラインの蒸気流量制御弁 (S V - 1 1, S V - 2 4) 及び S V - 1 1 前の手動弁 (S V - 1 0) を全閉にする。一方ではボイラーワン缶を起動し、キュムレーターに蒸気を送り、ドレン排出用手動弁を適宜開放し空気抜きしながら所定圧力 (約 $20 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$) まで蒸気を貯める。ボイラーは起動状態を持続し、キュムレーター内圧力が低下した場合すぐ供給ができる状態にしておく。中央監視制御盤のスイッチ類を運転要領 (マニアル) に従って自動運転ができるように設定するとともに、次に示すように制御補機を実験条件に合わせた値に設定する。

① プログラム設定器 (P R O.)

圧力容器内温度変化に対応する運転プログラム (時間: 温度) の書き込み、及び「急昇温リレー」、「昇温リレー」動作時間の設定をする。

② 圧力容器内圧力警報器 (P A - 6)

「急昇温リレー」動作中の圧力容器内圧力の最高制御圧力を「H H」に設定する。

③ 開度調節器 (H C - 1)

「急昇温リレー」動作中の A ライン蒸気流量制御弁 (S V - 1 1) の開度を設定する。

④ 温度調節器 (T I C - 6)

圧力容器内雰囲気の温度制御のための P I D 設定を昇温速度を考慮して行う。

⑤ 制御方式切換 (C O S - 1)

「T」制御方式に設定する。

⑥ A - H ライン切換 (C O S - 2)

制御モードで使用するラインを選択する。

制御補機の設定終了後、実験開始前にキュムレーター内圧力等を確認し、A ライン手動弁 (S V - 1 0) を全開にすると共に温度調節器を「A U T O」にし、「全自动開始」ボタンを押して実験を開始する。圧力容器内の温度制御は、制御補機に設定されたプログラムに従って進行する。プログラム終了後は「全自动停止」ボタンを押すことにより、自動的に圧力容器内の冷却が開始される。圧力容器内を常温まで冷却した後、再度設定値を変えた実験を繰り返した。

3.2 実験条件

実験は総計14回行った。その実験条件をTable 2に示す。制御モード中の蒸気供給ラインの選択をHラインにしたもの10ケースと、Aラインとしたもの4ケースである。Hラインの選択では、開度調節器、圧力容器内圧力警報器、温度調節器及びプログラム設定器等の設定値を変えてその条件における制御性の実験を行った。Aラインの選択では、温度調節器とプログラム設定器等の設定値を変えて、制御性の実験を行った。なお、温度プログラムは、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 151^{\circ}\text{C} / 10\text{ sec}$, $151^{\circ}\text{C} \rightarrow 170^{\circ}\text{C} / 4\text{ min } 50\text{ sec}$ とした。

3.3 実験結果及び検討

各実験における圧力容器内温度(T_{pv})・圧力(P_{pv})、A及びHラインの蒸気流量(W_{a1} 及び W_{h1})の時間的変化を実験番号順にFig.12.1～Fig.12.14に示す。なお、Fig.12.1～Fig.12.5とFig.12.6～Fig.12.14とは横軸のスケールが異っている。

実験結果をHライン選択とAライン選択に分け、各々における制御結果を以下に述べる。

3.3.1 Hライン選択における制御補機の制御性

Table 2に示した実験条件における個々の制御補機の制御性を次に示す。

(1) 圧力容器内圧力警報器(PA-6、「HH」)の制御性

圧力容器内温度を急昇温するプログラムは $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 151^{\circ}\text{C} / 10\text{ sec}$ である。PA-6「HH」の設定値は到達温度 151°C を考慮して、 $4\text{ kg/cm}^2\text{G}$ とした実験をTD37(Fig.12.1)～TD39(Fig.12.3)及びTD43(Fig.12.6)で、また $5\text{ kg/cm}^2\text{G}$ にした実験をTD44(Fig.12.7)～TD46(Fig.12.9)で行った。なお、急昇温リレー動作時間は、通常運転時は急昇温時間(この実験条件では10秒間)が設定値となるが、PA-6「HH」の制御性を知るためTable 2に示したように10～30秒間作動させた。また、同様の目的のため、HC-1の開度設定値を20%から40%の間で変えた。

TD37(Fig.12.1)は、PA-6「HH」を $4\text{ kg/cm}^2\text{G}$ 、HC-1開度を20%にした実験で、20秒間の急昇温リレー動作中にPA-6「HH」は1回も動作しなかった。これはHC-1開度設定値が低いため蒸気投入量が少なくなり、急昇温リレー動作中に圧力容器内圧力が $4\text{ kg/cm}^2\text{G}$ まで達しなかつたためである。Hライン選択の場合は、「急昇温リレーON」かつPA-6「HH」OFFでAラインが開度一定モードで開放されるとともに、これと並行してHラインが制御モードで開放されるが、PA-6「HH」がONとならなかつたためにHラインのみによる制御モードへの移行は急昇温リレーがOFFとなる20秒後に行われている。

TD38(Fig.12.2)は、HC-1開度設定値のみを40%に変更した実験で、20秒間の急昇温リレー動作中にPA-6「HH」は2回動作し、所定の圧力に自動調節し、設定値 151°C より大巾にずれないように制御した。Hラインからの蒸気供給は、PA-6「HH」が作動しAライン蒸気流量が大きく低下した時点から開始されている。

TD39(Fig.12.3)及びTD43(Fig.12.6)では、急昇温リレーをそれぞれ30,

20秒間動作したが、その間にPA-6「HH」はTD39では3回、TD43では4回動作した。しかし各動作毎に圧力容器内圧力は約±0.5 kg/cm²変動しながら少しづつ上昇する傾向がみられた。この現象は次のように説明される。PA-6「HH」のONによってAライン蒸気流量制弁(SV-11)が閉鎖動作に移る。このため蒸気投入量が減少し、圧力容器内圧力が低下する。次にPA-6「HH」がOFFとなると、SV-11は開放動作に移って蒸気が投入される。この動作の繰り返し中のSV-11の動作遅れと圧力容器壁が暖たまることによつて伝熱量が減少して、徐々に圧力容器内圧力が高くなつたものと想定される。

TD44(Fig.12.7)～TD46(Fig.12.9)は、PA-6「HH」の設定値を5kg/cm²Gに設定した実験である。HC-1開度設定値を30%としたTD44及びTD45は、急昇温リレー動作時間10秒間に各1回、PA-6「HH」が動作した。TD46はHC-1開度を20%としたため、蒸気投入量が少なくなり、PA-6「HH」は1回も動作しなかつた。しかし、Fig.12.8及びFig.12.9で明らかなように、急昇温リレー動作終了後、温度は一時設定値151°Cより低くなり、その後設定値より高くなっている。これは、一定開度モードから制御モードへの移行がうまくいかず、Aラインからの蒸気供給が終了してもHラインからの蒸気供給が遅れ、圧力容器内温度は一時期設定温度より低くなるため蒸気流量が増大し、それに伴つて温度が上昇するものと想定される。

これまでの結果から、PA-6「HH」はHC-1開度設定値が大きく、急昇温リレーの動作時間の長い場合に動作している。また、PA-6「HH」が1回以上動作する場合、1回目以降少しづつ圧力容器内圧力(温度)が上昇した。

以上のことから、PA-6「HH」の設定値を設定温度に対応する飽和蒸気圧力とし、必要蒸気量より若干多めの蒸気流量が得られるHC-1の開度設定値を選べば、圧力容器内圧力はPA-6「HH」によって容易に制御できるものと推定される。

(2) 開度調節器(HC-1)の制御性

圧力容器内温度を10秒間で151°Cにするために必要な最大蒸気流量は、前報の急昇温実験の結果から1回目の昇温では3300kg/h以上、昇温後いったん冷却した後の2回目以降の昇温(蒸気供給配管系等が暖っている)では2500kg/h以上となる。これを確かめるためTable 2に示したように、Aライン蒸気流量制御弁(SV-11)の開度設定(HC-1開度)を20%, 30%, 40%にして実験を行つた。Fig.12.1～Fig.12.9に示した結果から明らかに最大蒸気流量は2300～2800, 3400, 4500kg/hとなつた。しかし、急昇温に必要な蒸気流量を供給したにもかかわらず、10秒間で151°Cの設定値に到達しない場合が多い。この原因は、実験開始後蒸気流量が最大となるまで1～3秒かかること、圧力容器内が飽和蒸気状態に達するまで蒸気飽和度警報器(DTS-6)が動作し、また圧力容器内温度が105°Cになるまで圧力容器内温度警報器(TA-6「LL」)が動作して、排出ラインON-OFF弁(DV-2)が開放され、蒸気が排出されるため、圧力が上昇しないことが挙げられる。

以上のことから開度調節器(HC-1)の設定は、蒸気流量が最大となるまでの遅れ時間と排出ラインON-OFF弁(DV-2)の開放による蒸気損失を補正して開度を決定する必要がある。なお、補正に関しては4.4.3で詳しく述べる。

(3) プログラム設定器 (P R O.) の制御性

プログラム設定器による制御については、所定温度プログラムの設定及びその出力について何ら問題がなかったので、急昇温に直接関係する急昇温リレーの設定時間の変更による制御性について述べる。急昇温リレー動作中は、一定開度モードによる制御 (H C - 1 開度設定による蒸気流量の制御, P A - 6 「H H」による一定開度モードのON-OFF制御), 及びHラインの制御モードによる制御 (T I C - 6 によるHラインの蒸気流量の制御) が行われる。一定開度モードは設定温度に対する粗い制御であり、これに並行して制御モードによる精密な制御が加わる。したがって、急昇温リレー動作時間は、一定開度モードによる粗い制御でほぼ所定の温度に制御した後、Hラインのみによる制御モードの制御にスムーズに移行するように時間を選定しなければならない。

実験は前述の条件を考慮し、急昇温リレー動作時間を10, 20, 30秒間として行った。T D 5 1 (Fig.12.14) は、H C - 1 開度設定値20%, 急昇温リレー動作時間10秒間の実験で、蒸気供給配管が室温である急昇温1回目の結果であり、Aラインから圧力容器への蒸気が配管を暖めるために使われ、圧力容器への流入が遅れ、一定開度モード中にHラインから蒸気が供給されている。この場合には急昇温リレー動作時間が短く、Aラインからの蒸気流入量が不足し、151°Cまで温度が上昇しなかった。他の実験は、急昇温2回目以降の実験であるが、T D 3 9 (Fig.12.3) を除いて急昇温リレー動作終了後、Hラインによる制御モードだけの制御への移行がうまくいっていない。T D 3 9 は圧力容器内初期温度が88°Cと高温であったこと、急昇温リレー動作時間が30秒間と長く、一定開度モードの動作中にタイミング良くHラインによる制御モードが動作し、一定開度モードと制御モードが並行して行われたため、制御モードのみの制御への移行がスムーズに行われたものと考えられる。急昇温リレー動作時間が20秒間であるT D 3 8 (Fig.12.2) は、2回行われたP A - 6 「H H」動作の間にHラインからの蒸気供給が開始され、一見制御モードへの移行がスムーズに行われたようであるが、一定開度モードと制御モードの並行制御時間が短かく、圧力容器内温度は設定温度プログラムに制御されていない。T D 3 8と同じ条件で、P A - 6 「H H」の設定値を5kg/cm²GとしたT D 4 3 (Fig.12.6) の実験では、一定開度モードの制御が設定温度プログラムより高めに制御しているため、急昇温リレー動作終了後10秒以上経過してHラインからの蒸気供給が行われている。H C - 1 開度設定値を20%としたT D 3 7 (Fig.12.1), T D 4 0 (Fig.12.4), T D 4 1 (Fig.12.5), T D 4 6 (Fig.12.9) の実験のうち、T D 4 6のみが所定温度プログラムに近い制御が行われている。これは制御モードの制御を行う温度調節器 (T I C - 6) のP I D設定値が、T D 4 6のみ違っているためである。

このように急昇温の粗い制御をする一定開度モードの制御はH C - 1 開度設定、P A - 6 「H H」に影響されるため、これらの設定を適正に行った上で急昇温リレーを比較的長時間動作させる必要がある。

(4) 温度調節器 (T I C - 6) の制御性

温度調節器は制御モードによる圧力容器内温度制御の中心的役割を果す制御補機である。Hラインを選択した制御モードを用いた急昇温制御中には、一定開度モードの制御と並行して制御モードの制御が行われる。急昇温リレー動作終了後は、所定の温度プログラムに従い、制御

モードの制御のみによって圧力容器内温度を制御する。ここで、急昇温を行う時間は短時間のため、急昇温から所定温度プログラムへの移行途中において、TIC-6のPID設定値を変更することができない。つまり、TIC-6のPID設定は、急昇温中及び比較的ゆるやかな変化をする所定温度プログラムの両制御が可能な設定値を選定する必要がある。このため、PID設定値は、変化に対して比較的ゆるやかな制御をするP:30%, I:0.3min, D:0.04min(ケースA)、変化に対して追従性の良いP:6%, I:0.1min, D:OFF(ケースB)とした2ケースを選定し、実験を行った。なお、ケースAのPID設定値は、装置製作メーカーの作成した運転マニアルから温度プログラムに適合する設定値を選定したものである。

TD37(Fig.12.1)～TD44(Fig.12.7)及びTD51(Fig.12.14)はケースAの条件で、TD45(Fig.12.8)及びTD46(Fig.12.9)はケースBの条件で行った実験である。各実験におけるHラインによる制御モードの制御については、(1)～(3)で述べたので、ここではPID設定値以外の実験条件が同じであるTD44(Fig.12.7)とTD45(Fig.12.8)との比較を行う。TD44はケースAの条件の実験で、急昇温リレー動作終了後、圧力容器内温度が設定値より大きく下がつてからHラインの蒸気供給が開始され、最大流量の50%の開度で制御されている。しかし、圧力容器内の温度は徐々に設定温度に近づき、安定しているもののゆっくりした制御となっている。一方、ケースBの条件のTD45では、Hラインの蒸気供給開始まではTD44と同じであるが、蒸気供給は100%の開度で行われている。このため、圧力容器内温度は急上昇し、一時設定温度より高くなるが早い時期に設定温度に近づいている。

ここで行った実験は、ケースA及びケースBの2種類のPID設定条件であるため、PID設定条件の最適値を限定することはできないが、大体の目安を得ることができた。

(1)～(4)の制御補機の制御性能を総合評価すると、Hラインによる制御モードを用いた急昇温制御は、次にあげる問題があることが明らかとなった。

- ① 急昇温リレー動作中において、PA-6「HH」の動作によってAラインからの蒸気投入が停止され、圧力容器内温度が低下した場合、Hラインの制御モードは追従性が悪く、安定した制御が行われない。
- ② 急昇温リレー動作終了後（一定開度モード終了後）の制御モードによる圧力容器内温度制御は、大量の蒸気が必要であるのにAライン（最大蒸気流量10,000kg/h）からHライン（最大蒸気流量1,000kg/h）に切換えられるため、設定温度に追従しない場合が多い。
- ③ 圧力容器内温度を急昇温するために急昇温リレーの動作時間を長くし、HC-1開度及びPA-6「HH」で制御することは可能であるが、この場合は並行して行なわれるHライン制御モードの追従性がよくない限り一定圧力制御に近くなり、温度プログラムによつては適合しない場合がある。例えば、Fig.3で示した運転プログラムでは、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 151^{\circ}\text{C} / 10\text{ sec}$, $151^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C} / 4\text{ min } 50\text{ sec}$ であり、Fig.4に示した特殊運転プログラムでは、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 150^{\circ}\text{C} / 5\text{ sec}$, $150^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C} / 30\text{ sec}$ で、 151°C

または 150°C からの昇温が本実験条件 ($151^{\circ}\text{C} \rightarrow 170^{\circ}\text{C} / 4\text{min } 5\text{ sec}$) より急昇温となっている。このため、一定圧力制御では設定温度プログラムに圧力容器内温度を精度良く制御することはできない。

3.3.2 A ライン選択における制御補機の制御性

制御モードをAラインにした実験では、①急昇温リレー、PA-6「HH」及びHC-1による一定開度モードの制御、②急昇温リレーを動作させず(一定開度モード不使用)、Aラインを用いた制御モードのみによる急昇温制御の実験を行った。実験条件をTable 2に示した。

(1) 急昇温リレー動作による制御性

急昇温リレー動作時間を10秒間とし、TIC-6のPID設定値を3.3.1で述べたケースAとケースBの2種類とし、ケースAをTD48(Fig.12.11)で、ケースBをTD47(Fig.12.10)で行った。Fig.12.10及びFig.12.11に示したように、PID設定をケースB(TD48)にした方が急昇温リレー動作終了後の圧力容器内温度の低下が少なく、制御性の良い結果が得られている。これはPID設定値の違いによるものと考えられる。しかし、いずれの場合も3.3.1で述べたHライン選択による急昇温より、急昇温後の圧力容器内温度は安定し、制御性は良好である。なお、PA-6「HH」を $4\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$ とし、また急昇温リレー動作時間を20秒間程度にすれば更に良い結果が得られると推定される。

(2) 温度調節器(TIC-6)による制御性

TD49、TD50(Table 2)は急昇温リレーを動作させず、Aライン選択の制御モードによって制御した同一条件の実験である。Fig.12.12、Fig.12.13に示すように両実験結果とも10秒後、圧力容器内温度は $125^{\circ}\text{C} \sim 130^{\circ}\text{C}$ であるが、プログラム設定器の出力は $151^{\circ}\text{C} \rightarrow 170^{\circ}\text{C} / 4\text{min } 5\text{ sec}$ に移行しているため、TIC-6はこの出力に沿った制御を開始している。このため、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 151^{\circ}\text{C} / 10\text{ sec}$ の所定プログラムを追従していないが、その制御性は、3.3.1で述べたHライン選択による急昇温よりも安定している。なお、急昇温後、Aラインの蒸気投入流量は、急昇温開始時より減少しているが大量($1,000 \sim 3,000\text{kg/h}$)の供給を行っており、Hラインのみによる蒸気供給(最大蒸気供給量 $1,000\text{kg/h}$)では不足することがここでも明らかとなった。

以上の結果、急昇温時にAラインを選択した場合、十分な蒸気供給が一定開度モード終了後も得られるため、圧力容器内温度の制御性能はHライン選択よりも良好であることがわかった。したがって、急昇温制御は、Aライン選択によって行う方が良い。なお、急昇温時以外の一定温度保持及び降温制御は、蒸気供給量の少ないHラインが適することは当然推定できる。そこで、全自动運転を行うためには、急昇温後適当な時期にAラインからHラインへ自動的に切り換える必要があるが、この制御はプログラム設定器のタイミング出力設定を用いることによって、簡単に行うことができる。

4. 制御方式の比較実験

Fig.1に示した運転プログラム（IEEE std.基準）において、温度設定を整数化し、運転時間を短縮したプログラム（プログラム1）と、Fig.2で示した運転プログラム（SEAMATE-IIの性能評価用）の運転時間を短縮したプログラム（プログラム2）を用いて、「T」、「P/T」、「P」制御方式の制御性の比較実験を行った。運転時間の短縮は、運転プログラムの制御上の問題点が明らかとなるように考慮して次のように行った。

- ① 両プログラム共、急昇温時間はそのままとした。
- ② 両プログラム共、一定温度保持時間を25分間、降温時間を5分間とした。
- ③ 1回目の急昇温後の降温時間は、プログラム1では30分間に、プログラム2では35分間にした。

なお、プログラム1をFig.22.1の上部に、プログラム2をFig.22.2の上部に示す。

4.1 実験方法

実験方法は、3.1で述べた手順と同様である。ただし、実験開始約5分後にケミカルスプレー（2.3ℓ/min）を開始し、実験終了まで続行した。また、圧力容器内の温度・圧力を制御するために供給した蒸気及び冷却水の積算流量を5分おきに、蒸気供給源であるボイラーへの給水量及びボイラーの燃料消費量等を15分おきに読み取り記録した。

4.2 実験条件

「T」制御方式については、制御性及び装置全系の運転状態を知るため、プログラム1及び2の全行程の運転を行った。しかし、「P/T」及び「P」制御方式については、主として制御性に着目し、プログラム前半のみの運転を行った。実験条件は両プログラム共、開度設定器設定値20%，温度調節器PID設定値P：30%，I：0.3min，D：0.04min、急昇温リレー動作時間10秒間である。なお、本実験は全自動運転で行うため、途中からライン切換の必要のないHライン選択による制御モードとした。

制御方式及びプログラム別の実験番号をTable 3に示す。

4.3 実験結果

4.3.1 温度（「T」）制御方式の制御性能

プログラム1を「T」制御方式で行った実験（MDT1）によって得られた圧力容器内温度（ T_{pv} ）、供給された積算蒸気量（ Q_{st} ）、冷却水量（ Q_{w1} ）、ケミカルスプレー量（ Q_{c1} ），

ポイラー給水量 (Q_{bo}) の経時変化を Fig.13 に示す。圧力容器内温度は、設定温度プログラムに対して、急昇温時（開始後 3 分以内）を除いて昇温、一定温度保持及び降温共良く一致し、良好な制御性を示している。ただし、 100°C 以下の降温時において、こまかい温度の上下がみられるが、これは蒸気供給と冷却水注入による温度制御のため生ずるもので、止むを得ないものである。

プログラム 2 による実験 (MDT 2) 結果をプログラム 1 と同様に Fig.14 に示す。また、圧力容器内圧力 (P_{pv})、アクチュエーター内圧力 (P_{sa}) 及び H ライン蒸気供給圧力 (P_{hl}) の時間的变化を Fig.15 に示す。Fig.14 に示すように圧力容器温度は、設定温度プログラムに対して急昇温時、 200°C 及び 80°C の一定温度保持中を除いて良好な制御性（変動は土 1.0°C 以内）を示している。 200°C 一定温度保持時に、圧力容器内温度が設定温度に対しむらついている ($198.5 \sim 202.5^{\circ}\text{C}$) のは、Fig.15 に示すように圧力容器内圧力と H ライン蒸気供給圧力が同期して大きく変動しており、H ラインの蒸気供給圧力が所要圧力よりわずかしか高くなく、さらに飽和蒸気は 200°C 付近において小さな温度変化に対して圧力変化が大きくなるため、制御性が悪くなつたものと考えられる。また、 80°C 一定温度保持時の制御において、圧力容器内温度は土 3°C でふらついているが、これは 105°C 以下のため排出ライン ON-OFF弁 (DV-2) が開放され、更に一定温度保持のため蒸気供給のみによる制御であるから、 80°C に安定するまで時間がかかったものと想定される。

4.3.2 圧力一温度（「P/T」）制御方式の制御性能

プログラム 1 の前半を「P/T」制御方式で行った実験 (MDPT 1) 結果を Fig.16 に示す。圧力容器内の温度制御は設定温度プログラムに対して、急昇温時（3 分以内）と約 100°C 以下の時とで悪くなっている。約 100°C 以下で急激に温度が低下し、プログラムラインより大きくずれている原因は、排出ライン ON-OFF弁 (DV-2) の開放により圧力容器内圧力が常圧となるが、圧力検出による制御のため、圧力をさらに $1\text{ kg/cm}^2\text{ a}$ 以下に低下させるように制御が働き、冷却が続行されたためである。

プログラム 2 の前半についての実験 (MDTP 2) 結果を Fig.17 に示す。また、圧力容器内圧力等の時間的变化を Fig.18 に示す。圧力容器内の温度の制御性は、プログラム 1 の結果及びその考察に関しても全体的に同じであるが、最高温度 (200°C) 保持時に、圧力容器内温度が設定温度に対してやや高く ($199.5 \sim 201.5^{\circ}\text{C}$) なっている。Fig.18 に示すように、 200°C 保持時の圧力容器内圧力は $1.5.0 \sim 1.5.8\text{ kg/cm}^2\text{ a}$ となっており、 200°C の飽和蒸気の圧力 $1.5.8\text{ kg/cm}^2\text{ a}$ 以下であるから、圧力容器内が飽和蒸気で満たされていれば、圧力容器内温度が 200°C 以上になることはあり得ない。よって、圧力容器内温度が 200°C 以上になった原因是、蒸気が過熱化されているためと考えられる。

4.3.3 圧力（「P」）制御方式の制御性能

プログラム 1 の前半を「P」制御方式で行った実験 (MDP 1) 結果を Fig.19 に示す。プログラム設定器の入力は圧力設定で、 $0.1 \rightarrow 3.7 \rightarrow 8.5 \rightarrow 8.5 \rightarrow 0.1\text{ kg/cm}^2\text{ a}$ である。ここで、 $0.1\text{ kg/cm}^2\text{ a}$ は飽和蒸気で 73.6°C に相当し、「T」及び「P/T」制御のプログラムと若干

違っている。なお、この実験では降温時に冷却水を供給せず、開始時より続行しているケミカルスプレーを冷却に利用したが、約 $3.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ (135°C) 以下になると冷却水が不足し、圧力(温度)はプログラム通り下らない。

プログラム2の前半についての実験(MDP2)結果をFig.20に示す。また、圧力容器内圧力等の時間的变化をFig.21に示す。プログラム設定器の入力は、 $0.1 \rightarrow 5.0 \rightarrow 15.9 \rightarrow 15.9 \rightarrow 0.1 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ である。Fig.21に示したようにHラインの蒸気供給圧力は、圧力容器内制御圧力である $15.9 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ 以下まで大きく変動しているが、Fig.15で示した「T」制御方式による 200°C 一定温度保持制御時の不安定さはなく、圧力 $15.9 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ の一定圧力の制御が順調に行なわれている。しかし、圧力容器内温度は $200.5 \sim 202.0^\circ\text{C}$ となっており、対応する飽和蒸気の温度より高いことから、「P/T」制御と同様に圧力容器内蒸気が過熱化されていることが考えられる。また、降温時の制御において、 $15.9 \rightarrow 1.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ ($200 \rightarrow 100^\circ\text{C}$) の圧力制御は良好に行なわれている。しかし、 $1.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ (100°C) では圧力容器内が開放され、 $1.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ 以下の圧力になるように冷却すべく制御が行なわれたが、圧力容器内温度は下がらなかった。この原因として、最大冷却水量を約 $30 \ell/\text{min}$ (装置の最大流量 $50 \ell/\text{min}$) にしたため冷却水が不足したことがあげられる。

4.4 実験結果の検討

4.4.1 制御性能

全自動運転時における急昇温、一定温度保持及び降温制御の制御性能について検討する。なお、制御方式の比較検討は4.4.2で述べる。

(1) 急昇温制御

本実験は全自動運転で行うため、一定温度保持及び降温制御の行い易いHラインによる制御モードを選択した。したがって、すでに述べたように全ての実験において、急昇温初期は蒸気量が不足し、圧力容器内温度は所定温度プログラムを追従していない。

3.3.2で述べたように急昇温時にAラインの制御モードを選択し、その後の一定温度保持及び降温制御をHラインで行うようにすれば蒸気流量が確保でき、かつ制御性能が満足される。

(2) 105°C 以上の一定温度保持及び降温制御

一定温度保持中の制御は蒸気の供給のみで行い、降温中は蒸気と冷却水を用いる。生じたドレインはスチームトラップ(ST-4)から排出する。スチームトラップの動作状況は、排出音によって確認し、ドレインが確実に排出されていることが明らかとなった。このことからも常圧以上の圧力における圧力容器内の温度・圧力制御にスチームトラップを用いることが可能であり、制御機器として使用できることが明らかとなった。

一方、実験中の蒸気供給圧力は、 200°C 一定温度保持制御に合うように設定した。すなわち、ボイラーは $21.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ で燃焼開始、 $23.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ で燃焼停止し、この圧力範囲内の蒸気を供給する。ボイラーからアキュムレーターへの配管には、 $21.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に設定された減圧弁が設置されており、最高 $21.5 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の蒸気がアキュムレーターへ供給される。アキュムレーターからAライン及びHラインへ蒸気が供給され、Aラインには $21.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に設

定された定圧弁が設置され、Hラインには $18.0 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ に設定された減圧弁が設置されている。しかし、ボイラー内最低圧力は $20 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ であるが、アクチュエーター内圧力は $18 \sim 21 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の範囲で変動し（Aライン蒸気供給圧力も同値）、Hライン蒸気供給圧力も同様に同期して $15 \sim 18 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の範囲で変動し、定圧弁及び減圧弁で一定圧力になつてないことがわかる。これらの減圧弁の制御性の悪い原因是、減圧弁に対する1次圧と2次圧の差が少ないためである。例えば、Hラインの所要蒸気供給圧力を $18 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とすれば、減圧弁に必要な差圧は約 3 kg/cm^2 であり、減圧弁が2個あるためボイラの最低供給圧力を $24 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ とすることが必要である。

(3) 105°C 以下の一定温度保持及び降温制御

105°C 以下におけるドレインの排出は、排出ラインON-OFF弁（DV-2）を開放して行った。このため、圧力容器内は開放状態になったが、「T」制御方式は一定温度保持及び降温制御共良好な制御性を示した。特に難しいと考えられていた 100°C 付近の一定温度保持制御は、蒸気供給量が若干多くなつただけで安定していた。蒸気供給量をさらに少なくするためには、排出ラインON-OFF弁（DV-2）前の手動弁を適度に閉じ、排出蒸気量を最少限にすることが必要である。

4.4.2 制御方式の選定

$20^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ の範囲の所定温度プログラムを実施するための最適制御方式を選定するために「T」、「P/T」、「P」制御方式で行った実験結果の比較検討をする。ここで比較検討は急昇温、高温及び 105°C 以下の低温の制御について行う。

(1) 急昇温制御

急昇温初期の制御は、一定開度モードでの制御が主となるため、Aラインの蒸気流量制御弁（SV-11）の開度が温度の上昇速度を決定し、制御方式に関係しない。一定開度モード終了後の制御は「T」、「P/T」制御共同様に良好な制御性を示している。また、「P」制御方式は設定圧力プログラムに対して良好な制御性を示しているが、当然昇温カーブは「T」及び「P/T」制御とは違っている。

(2) 高温制御

200°C 一定温度保持制御時に各制御方式によって記録された温度は、「T」制御で $198.5^\circ\text{C} \sim 202.5^\circ\text{C}$ 、「P/T」制御で $199.5^\circ\text{C} \sim 201.5^\circ\text{C}$ 、「P」制御で $200.5^\circ\text{C} \sim 202.0^\circ\text{C}$ である。このうち「T」制御方式において圧力容器内の温度は、Hラインの蒸気供給圧力の変動に同期し、影響されている。しかし、同様の条件での「P」制御による一定圧制御（ $15.9 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ ）は、 200°C の所定温度より若干高めの温度となっているが、圧力は非常に安定している。「P/T」制御での圧力容器内圧力は $15.0 \sim 15.8 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ と多少変動しているが、温度は $200.5^\circ\text{C} \pm 1.0$ と若干高めで安定している。

これらの結果から、 200°C 一定温度保持制御の安定性の良い順は、「P」、「P/T」、「T」制御方式となる。しかし、4.4.1(2)で述べたようにHラインの蒸気供給圧力の安定性を良くすれば「T」制御方式の制御も安定し、各制御方式の差はほとんどなくなるものと予想される。

(3) 105°C以下の制御

4.3.2 及び 4.3.3 で述べたように、「P/T」及び「P」制御方式共、105°C以下では設定温度(圧力)プログラムを追従するように制御し圧力容器内温度は低下しているが、所要の温度プログラムに制御されていない。この結果は、105°C以下において圧力容器内ドレインの排出を、排出ラインON-OFF弁(DV-2)の開放によって行うと決めた設計当初に予想されており、両制御方式の欠点である。したがって、105°C以下の制御は「T」制御方式で行う必要がある。

この結果から、20°C～200°Cの範囲の所定温度プログラムを全自動運転で実施できる制御方式は、「T」制御であることが明らかとなった。ただし、200°Cの一定温度保持制御をより安定にするためには、Hラインの蒸気供給圧力の安定化が必要である。また、「P」制御方式は 15.9 kg/cm² a (飽和蒸気 200°C相当) の一定圧制御で他の制御方式に比べ非常に良い安定性を示した。

4.4.3 制御に必要な蒸気量及び冷却水量等

プログラム1及び2に従って「T」制御方式で行った実験(MDT1及びMDT2)において、運転中に供給した蒸気と冷却水の平均流量をプログラムと対応させて、Fig.22.1及びFig.22.2に示す。ただし、図中に示されていないが、瞬間に蒸気は平均流量の約10倍、冷却水は平均流量の約3倍の量が供給されている場合もある。

プログラム1及び2の実験初期の急昇温時に圧力容器内へ供給した蒸気量と、所定温度まで急昇温するために必要な熱量をもとに、計算によって求めた蒸気量との比較をTable 4に示す。なお、必要な熱量 Q_T は次式によって求めた。

$$Q_T = Q_S + Q_H \quad (1)$$

$$Q_S = \rho \cdot V \cdot h'' \quad (2)$$

$$Q_H = q_u \times A \quad (3)$$

ここで

Q_S ：圧力容器内に保有される所定温度の飽和水蒸気の熱量

Q_H ：伝熱面へ伝導する熱量及び凝縮水の保有熱量

ρ ：所定温度の飽和水蒸気の密度 (kg/m³)

$$\rho = 4.134 \text{ kg/m}^3 \quad (172^\circ\text{C})$$

$$\rho = 7.937 \text{ kg/m}^3 \quad (200^\circ\text{C})$$

V ：圧力容器及び蒸気供給配管等の容積 (0.587 m³)

h'' ：所定温度の飽和水蒸気のエンタルピー (667 kcal/kg)

A ：圧力容器及び蒸気供給配管等の伝熱面積

急昇温1回目(MDT1, MDTP1, MDT2)では 1.225 m²

急昇温2回目以降(昇温後圧力容器内を冷却した後の昇温。蒸気供給配管等が暖っている。MDP1, MDT P2, MDP2)では 9.14 m^2

q_u : 所定の温度及び時間の急昇温に必要な単位伝熱面積当りの熱量

$$q_u = 1.4 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2 \quad (20^\circ\text{C} \rightarrow 172^\circ\text{C} / 300 \text{ sec})$$

$$q_u = 2.0 \times 10^3 \text{ kcal/m}^2 \quad (20^\circ\text{C} \rightarrow 200^\circ\text{C} / 300 \text{ sec})$$

プログラム1の実験(MDT1, MDT P1, MDP1)では、積算蒸気量の実測値と計算値の差は約1.2kgと一定である。プログラム2(MDT2, MDT P2, MDP2)の実験では、MDT2とMDT P2はその差が約8kgであるが、MDP2は0.6kgと非常に少ない。この原因はMDP2の実験開始時、圧力容器壁を十分な時間冷却しなかったことによって、内壁のみ冷却され、外壁等の冷却しにくい部分の温度が高いままであったため、必要蒸気量が減少したものと考えられる。また、急昇温時に必要な蒸気量の実測値と計算値に差の生ずる原因是、次のような実験条件の違いによるものと考えられる。

- ① 前報の急昇温実験においては、実験開始前に排出ラインを全閉し、圧力容器を閉鎖した。このような条件下では圧力容器内に空気が残っているため、大量の蒸気を導入して急昇温⁵⁾した時の内壁への熱伝達率が低くなる。つまり、所定温度まで急昇温するために必要な蒸気量が少なくてよい。
- ② 本実験においては、実験開始時に排出ラインON-OFF弁(DV-2)は全開され、圧力容器内が 105°C 以上になり、かつ蒸気飽和度が設定範囲内($\pm 10\%$)になって、始めて全閉される。DV-2が全閉されるまでの時間は5秒間以内であるが、この間に蒸気及び空気が排出される。しかし、この5秒間で圧力容器内に入った蒸気が全量排出されたとしても約5kg程度であり、実測値と計算値の差(約1.2kg及び8kg)より少ない。一方、本実験条件では最初の5秒以内に蒸気と共に空気が追い出され、圧力容器内での空気の混在量が非常に少なくなることが考えられ、このため熱伝達率が高くなり、必要な蒸気量が増加したものと想定される。

以上の結果から、急昇温における制御方法を本装置と同様にした場合に必要な熱量は、(1)～(3)式で求められた計算値に本実験で得られた実測値と計算値の差(約3.0%)を補正して求めることができる。

各実験における積算ボイラー給水量(Q_{bo})をFig.13(MDT1), Fig.14(MDT2), Fig.16(MDPT1), Fig.17(MDPT2), Fig.19(MDP1)及びFig.20(MDP2)に示した。ボイラーからアキュムレーターへの蒸気供給量は、ボイラー給水量より連続ブロード量($50\ell/\text{h}$)を引いた値である。それぞれの図から明らかなように、ボイラーからの蒸気供給量は、圧力容器への蒸気供給量の約2倍である。この差の蒸気量は機器、配管等からの放熱によって生ずるドレンとして排出されたものと考えられる。また、ボイラーの換算蒸発倍数を蒸気供給量(kg/h)／重油消費量(ℓ/h)とすると、実験中における換算蒸発倍数はMDT1で9.4, MDT2で9.9となった。この値を用いて、今後本装置の運転を行う場合に必要な燃料消費量を概算することができる。

5. 急昇温及び急降温実験

本装置の制御性能の限界である最高速急昇温あるいは急降温の特殊運転プログラム (Fig. 4) を実施し、その制御性等の検討を行った。

5.1 実験方法及び実験条件

実験方法は 3.1 で示した手順と同様であるが、ここでの急昇温実験は、 $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 151^{\circ}\text{C}$ / 5 sec, $151^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C}$ / 25 sec に温度プログラムを設定し、「T」制御方式及びAラインを選択した。開度調節器設定は 50 %, 急昇温リレー動作時間 10 秒, 温度調節器の P I D 設定は P : 6 %, I : 0.1 min, D : OFF である。

急降温実験は、急昇温実験後続けて行い、 $200^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}$ / 10 min に温度プログラムを設定し、「T」制御方式, H ラインを選択した。この場合の温度調節器の P I D 設定は P : 30 %, I : 0.3 min, D : 0.04 min である。

5.2 実験結果及び検討

(1) 急昇温実験

本急昇温実験における圧力容器内温度 (T_{pv}), 圧力 (P_{pv}), アキュムレーター内圧力 (P_{sa}) 及び蒸気流量 (W_{al}) の時間的变化を Fig. 23 に示す。圧力容器内温度は、所定温度プログラムに対して変動しながら追従し、急昇温及び一定温度保持制御共良好な制御性を示している。アキュムレーター内圧力は、蒸気供給開始と共に低下し、 200°C 一定温度保持制御時には圧力容器内圧力に近接している。これは蒸気供給がボイラーレンジで行われたためである。前報でも指摘したように、1 缶 (1.5 ton/h) では蒸気供給量の余裕がなく、 200°C の高温制御が不安定となることを示している。

圧力容器内への蒸気流入量は急昇温開始時に約 5,900 kg/h であるが、その後 $151^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C}$ の間に最大 7,000 kg/h となり、2,000 ~ 6,000 kg/h の間を変動しながら低下している。なお、 $151^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C}$ の間の必要な熱量 Q は、(1)~(3)式を用いて計算すると $1.81 \times 10^4 \text{ kcal}$ (27.1 kg) となる。27.1 kg の蒸気を 25 秒間で供給する平均流量は、3,900 kg/h となり、計算上でも大量の蒸気が必要であることがわかる。ここで、

$$Q = 200^{\circ}\text{C} \text{までの急昇温に必要な熱量} - 151^{\circ}\text{C} \text{までの急昇温に必要な熱量}$$

$$= Q_{T2} - Q_{T1} = 214 \times 10^4 - 331 \times 10^3 = 1.81 \times 10^4 \text{ (kcal)}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{T1} &= Q_{S1} + Q_{H1} \\
 &= 2.62 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times 0.587 (\text{m}^3) \times 667 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \\
 &\quad + 250 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2} \right) \times 9.14 (\text{m}^2) \\
 &= 3.31 \times 10^3 (\text{kcal})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{T2} &= Q_{S2} + Q_{H2} \\
 &= 7.86 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times 0.587 (\text{m}^3) \times 667 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \\
 &\quad + 2.0 \times 10^3 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2} \right) \times 9.14 (\text{m}^2) \\
 &= 2.14 \times 10^4 (\text{kcal})
 \end{aligned}$$

(2) 急降温実験

急降温実験において、圧力容器内温度 (T_{pv})・圧力 (P_{pv}) 及び冷却水量 (F_{w1}) の時間的変化を Fig. 24 に示す。圧力容器内温度の制御は全体的に良好であるが、約 100°C 以下の制御は若干冷却し過ぎの傾向となっている。冷却水の流量は、常圧以上において $2 \sim 17 \ell/\text{min}$ の範囲で大きく変動し、常圧以下では $90^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ において $1 \sim 19 \ell/\text{min}$ の範囲で大きく変動している。圧力容器内温度が常圧以下で不安定となつた原因は、冷却水温度（約 20°C ）と制御温度との差が少なくなり、大量の冷却水と蒸気の交互供給による制御になつたためである。

以上の結果から本装置は、特殊運転プログラムでの最高速急昇温及び急降温においてもその制御性は良好で、性能を十分満足していることが確認された。また、 200°C 一定温度保持制御を A ラインからの蒸気供給とすることによって、安定した制御ができることも確認した。

なお、特殊運転プログラムの低速昇温 ($20^{\circ}\text{C} \rightarrow 150^{\circ}\text{C} / 250\text{ sec}$, $150^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C} / 300\text{ sec}$) 及び低速降温 ($200^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C} / 3\text{ h}$) については、4.で示した MDT 1 及び MDT 2 の $20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ の一定温度保持及び降温制御の結果から容易に実施できることが想定されるので省略した。

6. まとめ

SEAMATE-IIを全自動運転で行った場合の急昇温時の制御補機の動作実験、制御方式の比較実験及び最高速急昇温、急降温実験を行い、装置の制御性及び運転性能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、 $20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ の範囲の所定温度プログラムを全自動運転で実

$$\begin{aligned}
 Q_{T1} &= Q_{S1} + Q_{H1} \\
 &= 2.62 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times 0.587 (\text{m}^3) \times 667 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \\
 &\quad + 250 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2} \right) \times 9.14 (\text{m}^2) \\
 &= 3.31 \times 10^3 (\text{kcal})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{T2} &= Q_{S2} + Q_{H2} \\
 &= 7.86 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times 0.587 (\text{m}^3) \times 667 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \\
 &\quad + 2.0 \times 10^3 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2} \right) \times 9.14 (\text{m}^2) \\
 &= 2.14 \times 10^4 (\text{kcal})
 \end{aligned}$$

(2) 急降温実験

急降温実験において、圧力容器内温度 (T_{pv})・圧力 (P_{pv}) 及び冷却水量 (F_{w1}) の時間的変化を Fig. 24 に示す。圧力容器内温度の制御は全体的に良好であるが、約 100°C 以下の制御は若干冷却し過ぎの傾向となっている。冷却水の流量は、常圧以上において $2 \sim 17 \ell/\text{min}$ の範囲で大きく変動し、常圧以下では $90^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ において $1 \sim 19 \ell/\text{min}$ の範囲で大きく変動している。圧力容器内温度が常圧以下で不安定となった原因は、冷却水温度（約 20°C ）と制御温度との差が少なくなり、大量の冷却水と蒸気の交互供給による制御になったためである。

以上の結果から本装置は、特殊運転プログラムでの最高速急昇温及び急降温においてもその制御性は良好で、性能を十分満足していることが確認された。また、 200°C 一定温度保持制御を A ラインからの蒸気供給とすることによって、安定した制御ができることも確認した。

なお、特殊運転プログラムの低速昇温 ($20^{\circ}\text{C} \rightarrow 150^{\circ}\text{C} / 250 \text{ sec}$, $150^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C} / 300 \text{ sec}$) 及び低速降温 ($200^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C} / 3 \text{ h}$) については、4.で示した MDT1 及び MDT2 の $20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ の一定温度保持及び降温制御の結果から容易に実施できることが想定されるので省略した。

6. まとめ

SEAMATE-IIを全自動運転で行った場合の急昇温時の制御補機の動作実験、制御方式の比較実験及び最高速急昇温、急降温実験を行い、装置の制御性及び運転性能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、 $20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ の範囲の所定温度プログラムを全自動運転で実

施するため、プログラム設定器、温度調節器、開度調節器及び蒸気飽和度警報器等の制御補機による圧力容器内温度・圧力制御回路が設けられている。

急昇温時における制御補機の動作実験によって、各制御補機の動作状況及び制御性能の良好なことを確認した。また、急昇温時に必要な蒸気供給量を確保するためには、A ラインを用いるべきであることがわかった。

- (2) 「T」、「P/T」及び「P」制御方式の比較実験によって、 $20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ の範囲の所定温度プログラムを全自動運転で制御する場合には、「T」制御方式が最適であることを明らかにした。一方、 200°C の一定温度保持制御において、「P」制御では温度が 200°C を若干超えているものの制御が非常に安定しており、圧力制御方式が優れていることがわかった。
- (3) 全自動運転による $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 172^{\circ}\text{C} / 300\text{ sec}$ 及び $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C} / 300\text{ sec}$ の温度プログラムの運転実験によって、急昇温時に必要な蒸気量を正確に求めた。この結果と前報で報告した所定温度に急昇温するため必要な熱量から求めた蒸気量とを比較し、全自動運転による急昇温の方が約 30 %程度蒸気量が多く必要であることを明らかにした。ここで、全自動運転による急昇温時の蒸気量増大は、排出弁開放中に排出される蒸気のほかに、空気混在量の減少によって熱伝達率が高くなり、必要蒸気量が増加することによるものと考えられる。
- (4) $20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ の範囲の所定温度プログラムを「T」制御方式で全自動運転し、制御に必要な蒸気量、冷却水量、ボイラーからの蒸気供給量及び重油消費量を得た。これらのデータを用いれば、装置の運転計画を容易に立案することができる。
- (5) 全自動運転による $20^{\circ}\text{C} \rightarrow 200^{\circ}\text{C} / 30\text{ sec}$ 及び $200^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C} / 10\text{ min}$ の最高速急昇温及び急降温の温度プログラムの運転結果から、本装置は設計時の性能を十分満足していること、及び想定できる極端な変化を要求する温度プログラムに対しても良好な制御性を示すことが明らかとなった。

おわりに、SEAMATE-IIの製作に中心的役割を果され、本実験の遂行に有益な助言をいただいた現東海研究所大型トカマク開発部 JT-60 計画室 篠原佑 樹氏及び本研究の実施にあたり御配慮いたいた元技術開発課長 町末男氏（現 IAEA 出向、Head, Industrial Application and Chemistry），及び本報告をまとめるにあたり有益な助言をいた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), 1980
 - c) K.Yoshida, Y.Nakase, S.Okada, M.Ito, Y.Kusama, S.Tanaka, Y.Kasahara, and S.Machi, "Degradation of Insulating Polimer 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.Mach, "Methodology Study for Qualification Testing of Wire and Cable at LOCA Condition", USNRC Eighth Light 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) 田中, 中瀬, 日馬, 伊藤, 岡田, 吉田, “原子炉用電線材料健全性試験装置(SEAMAT E-II)の工学データ・1(急昇温実験)”, JAERI-M 9361 (1981)
- 4) 中瀬, 岡田, 伊藤, 笠原, 田中, “高温高湿照射劣化実験装置による研究成果”, JAERI-M (投稿中)
- 5) H.Uchida, A.Oyama, Y.Togo, "Evaluation of Post-Incident Cooling Systems of Light Water Power Reactors", Third United Nations Intenational Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, May 1964

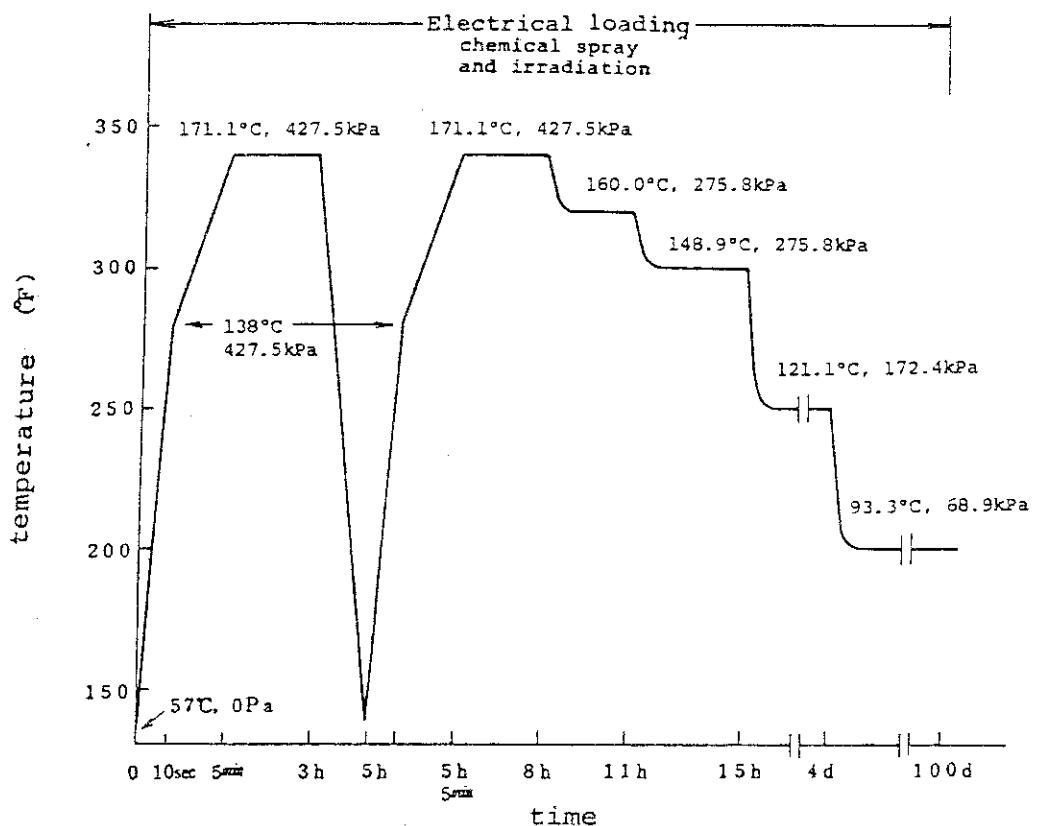


Fig. 1 Test program recommended in IEEE std. 323 '74

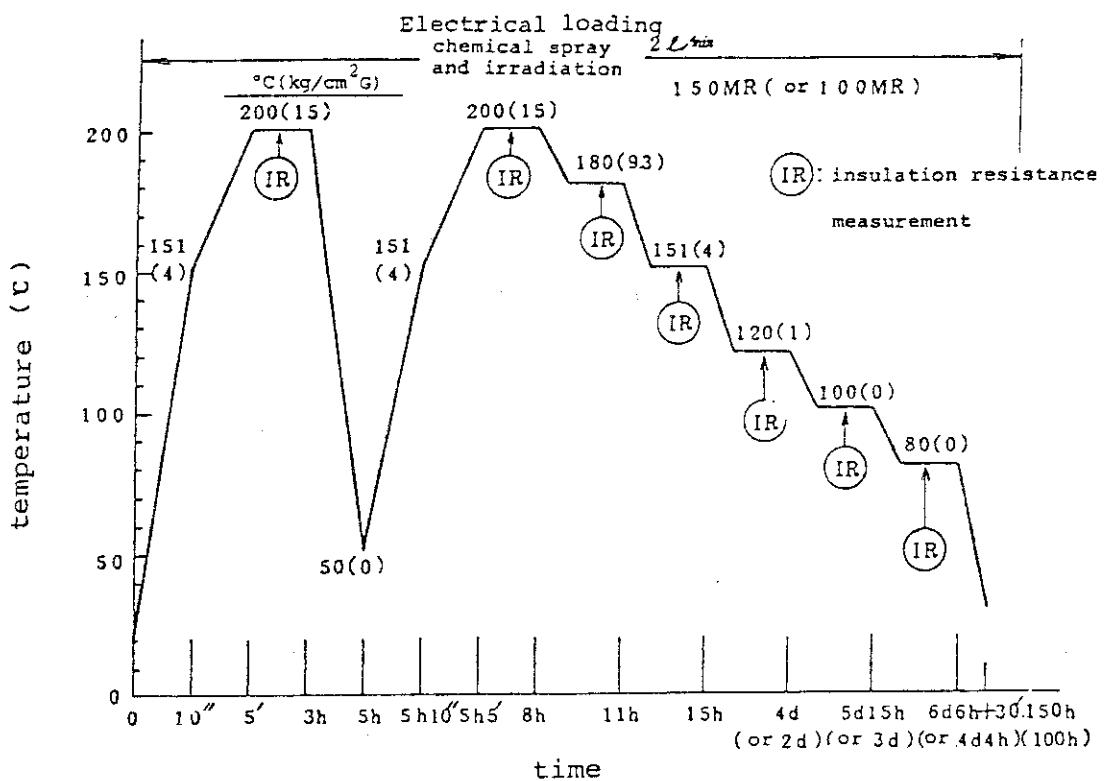


Fig. 2 Standard operation program specifying the design of SEAMATE-II.

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

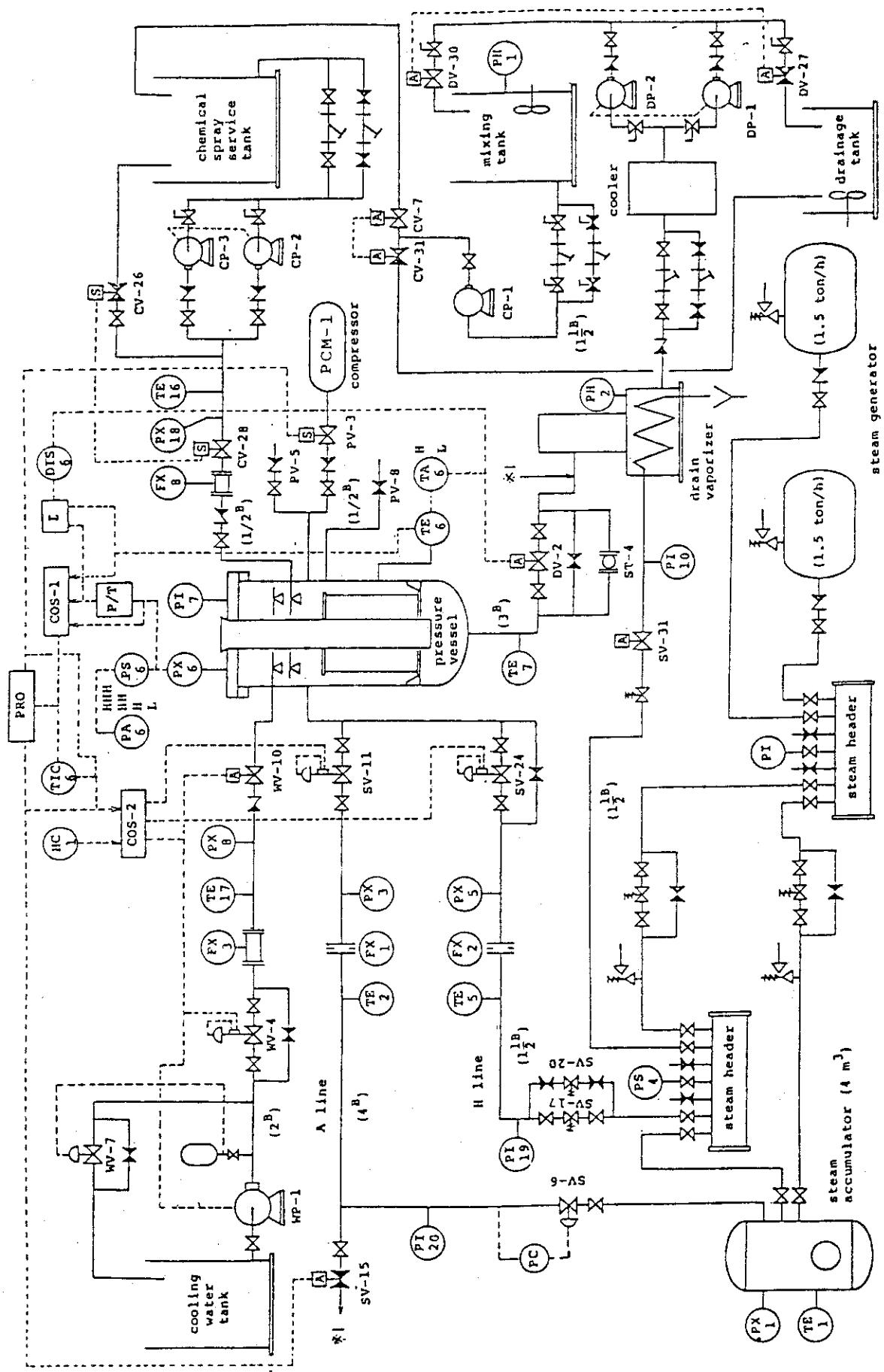


Fig. 3 Flow sheet of SEAMATE-II

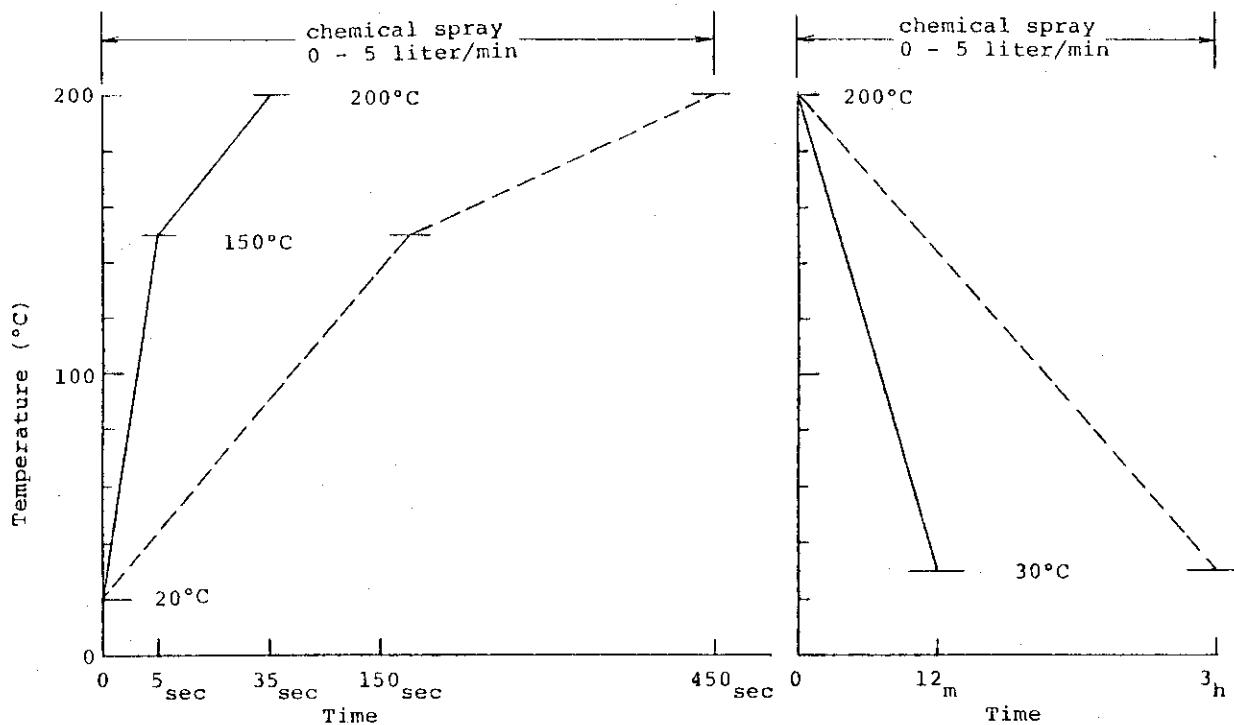


Fig. 4 Extreme operation program specifying the design of SEAMATE-II. The solid line shows the most rapid heating or cooling, and the broken line shows the slowest heating or cooling.

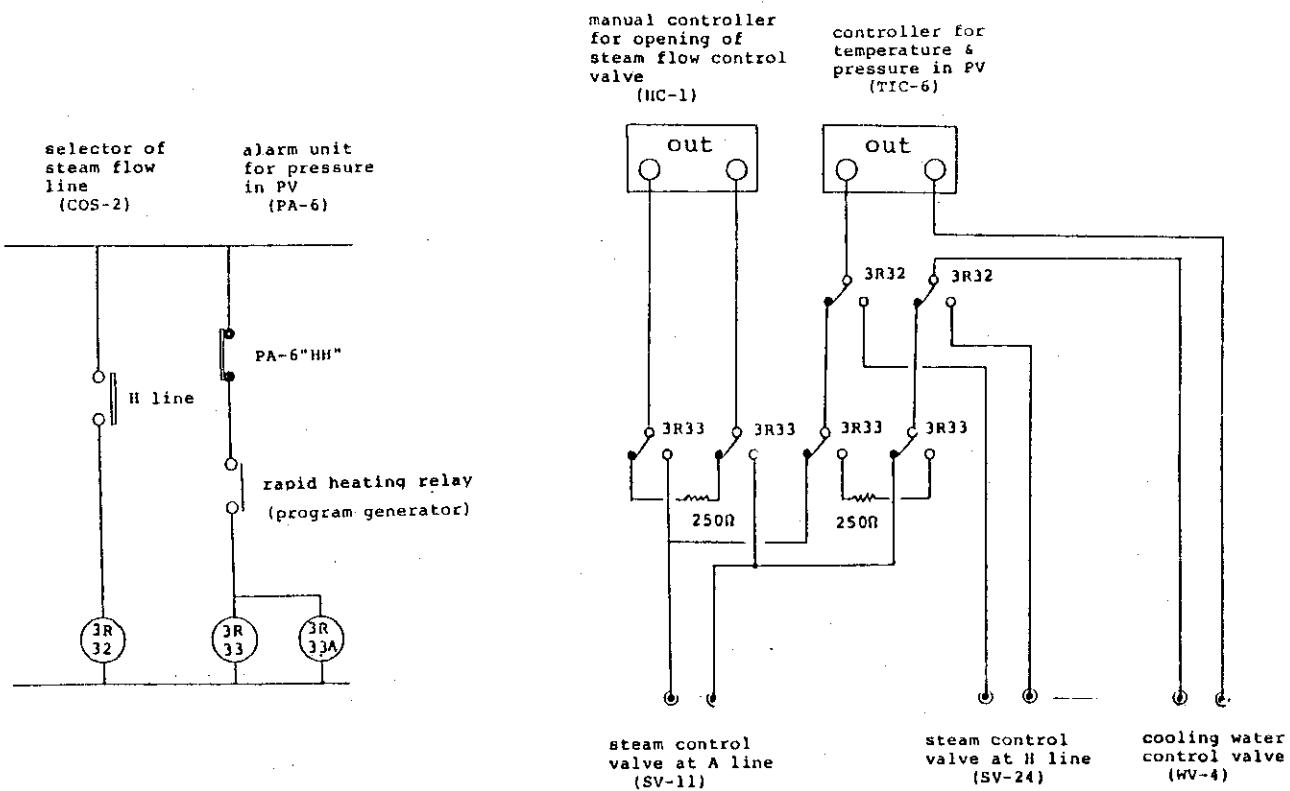


Fig. 5 Control circuits for steam and cooling water supply

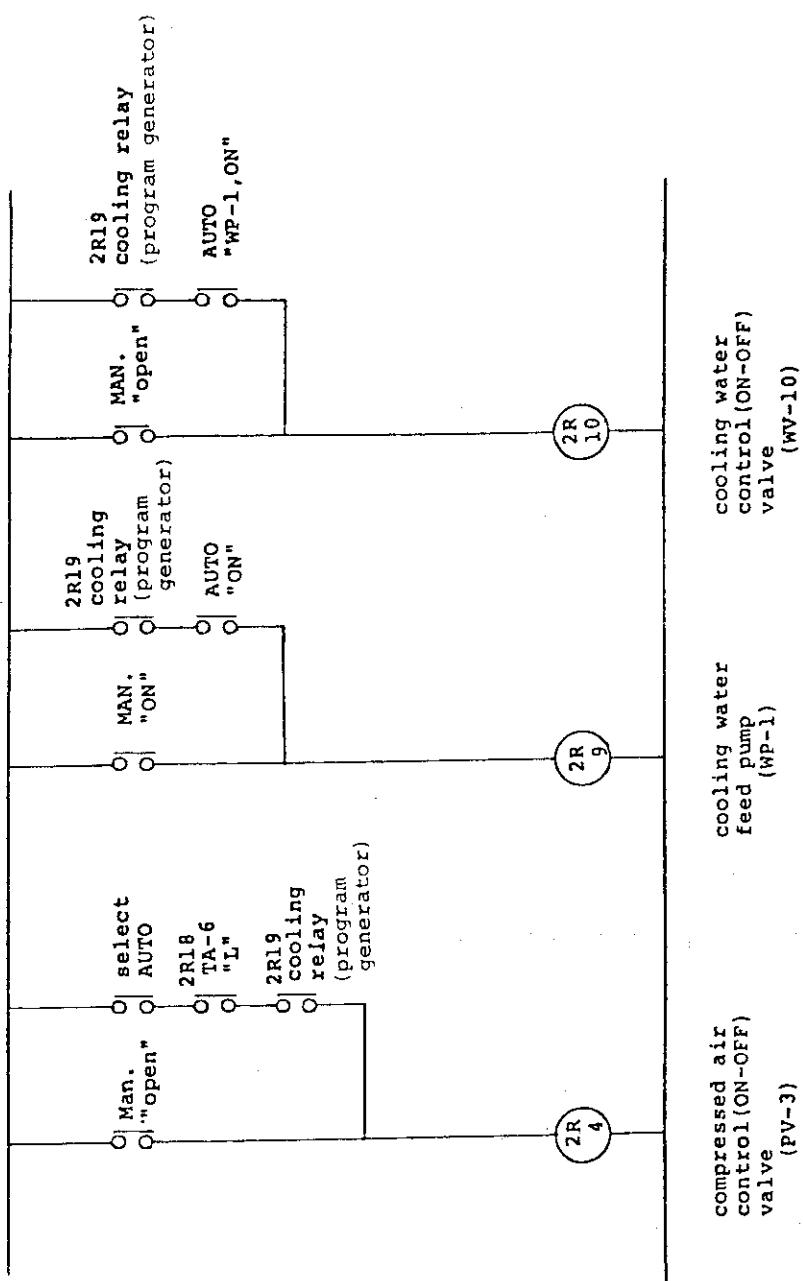


Fig. 6 Control circuits for cooling water supply and compressed air supply.

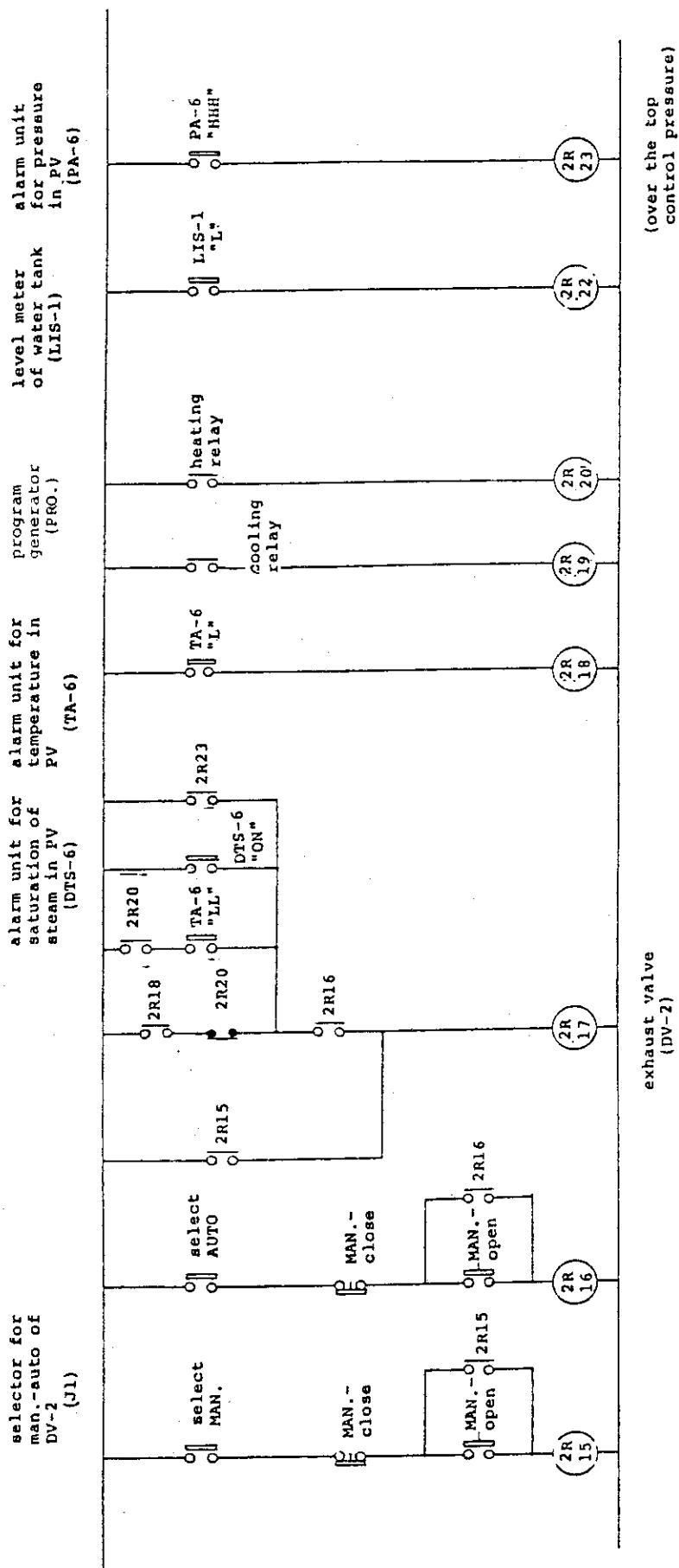


Fig. 7 Control circuits for the exhaust valve

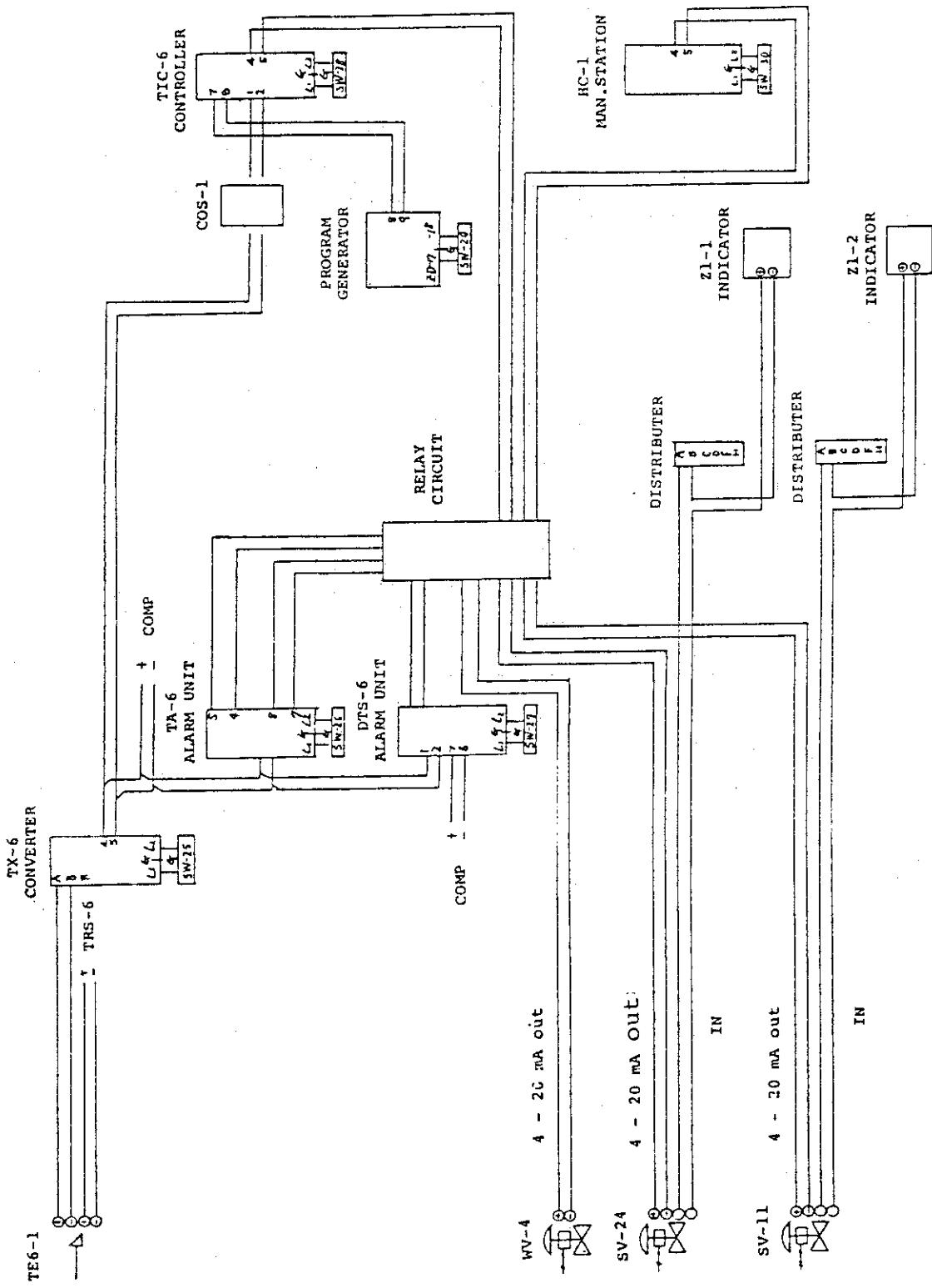


Fig. 8 Loop drawing for steam and cooling water supply

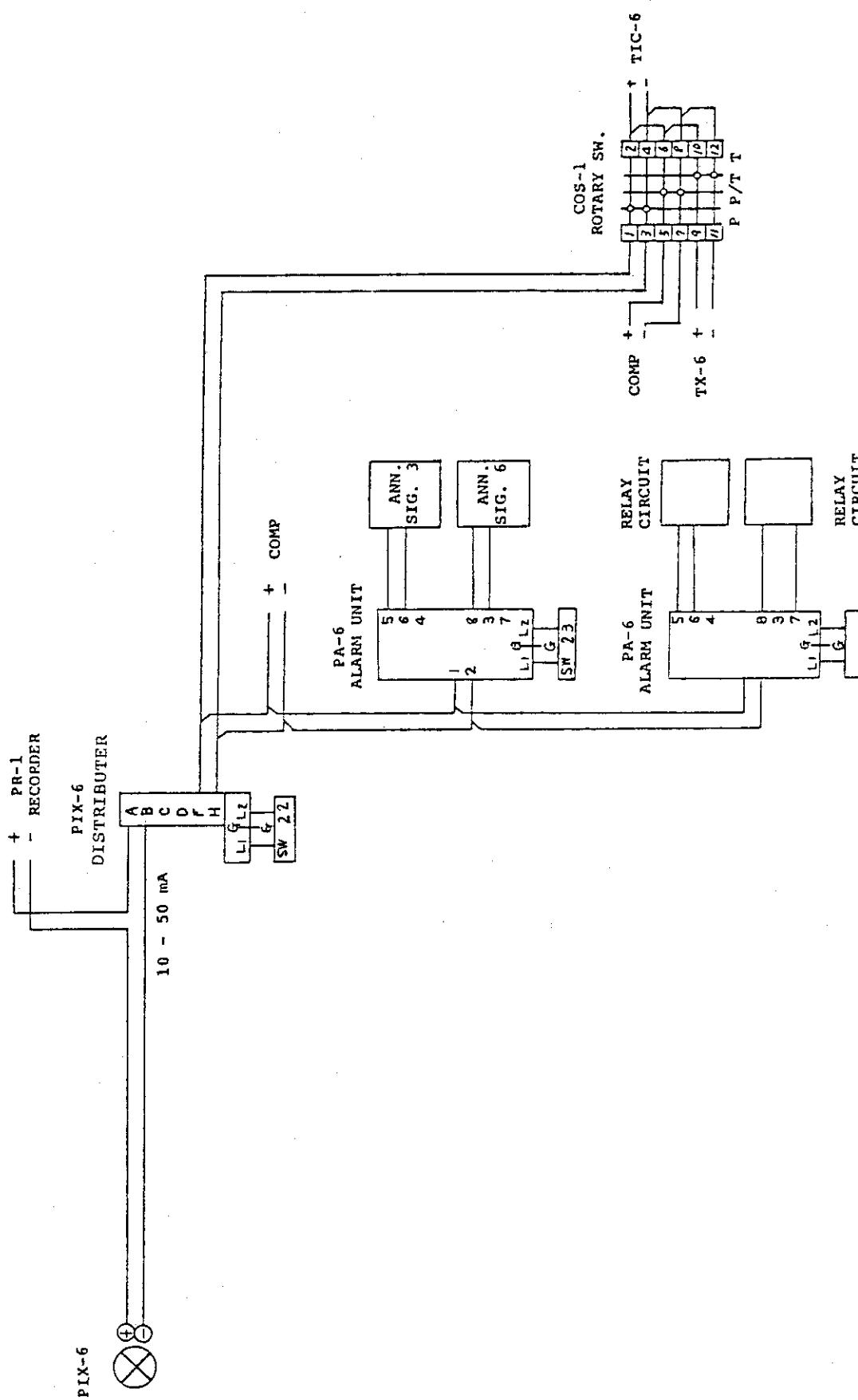


Fig. 9 Loop drawing for the pressure detector in the pressure vessel and the selector of controlled systems.

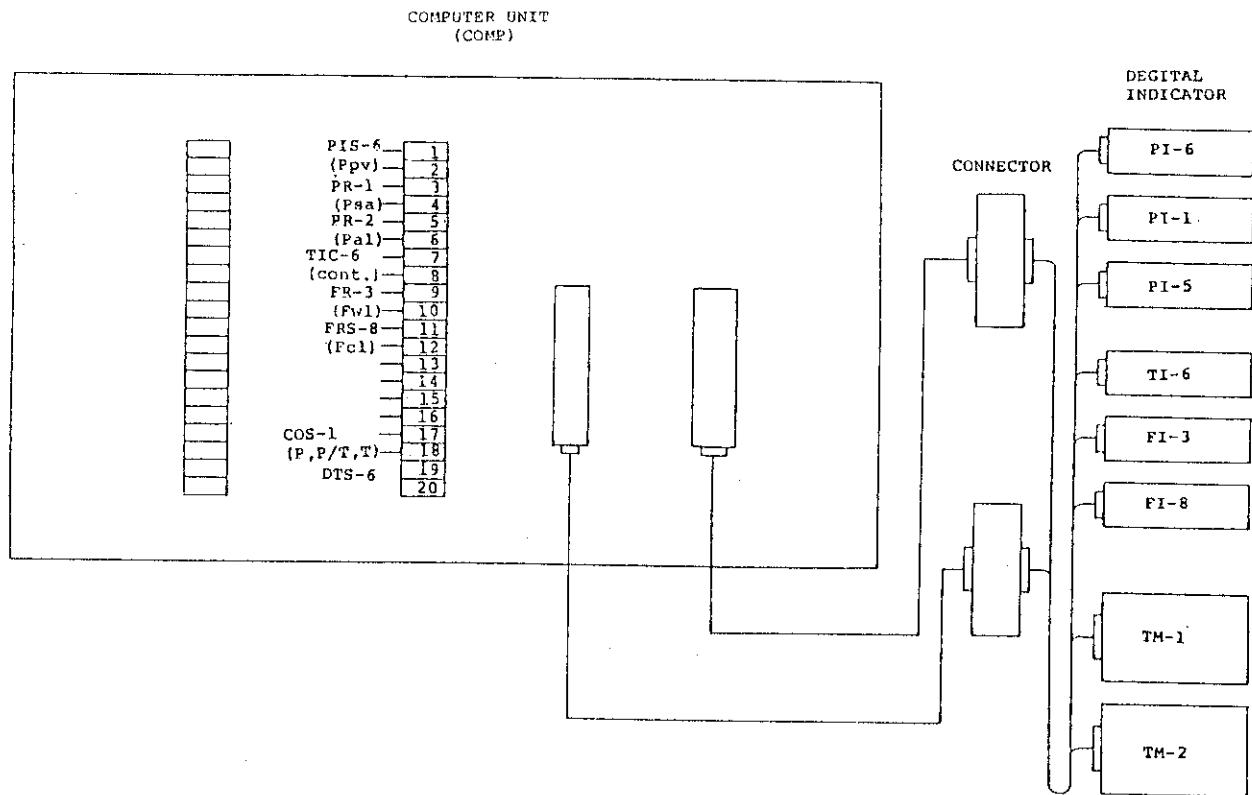


Fig. 10 Loop drawing for the computer unit

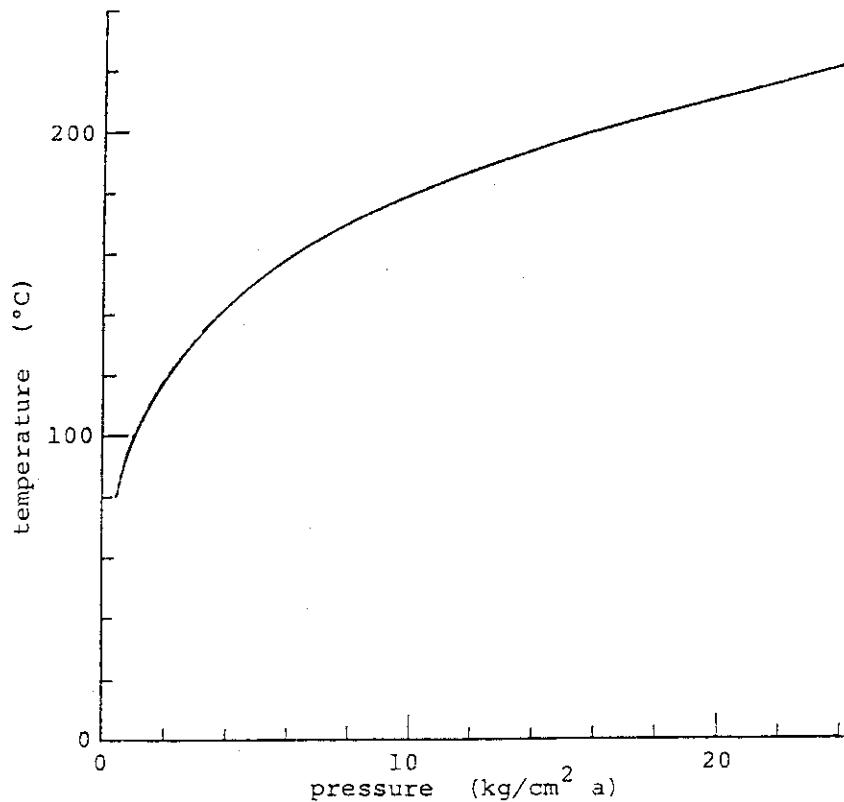


Fig. 11 Relationship between saturated steam pressure and the corresponding temperature.

Table 1 List of symbols indicating detectors and their signals.

| 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 ^Φ theath O.D. 1.6mm ^Φ range 0 - 250 °C |
| P_{sa} | PIX-1 | pres. in SACC | pressure transmitter range -1 - 24 kg/cm ² 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_{pvl} | 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 range -1 - 40 kg/cm ² 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 |

Table 2 Experimental conditions applied for performance tests
of the control devices at rapid heating.

| symbol of experiments | selection of steam flow line | manual station (HC-1) | alarm unit (PA-6, HH) | controller (TIC-6) P(%) I(min) | D(min) | program generator(PO.) relay off rapid heating | relay of heating |
|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--------|--|---------------------|
| TD37 | H | 20 * | 4 kg/cm ² G | 30 0.3 | 0.04 | 20 sec | 5 min |
| TD38 | H | 40 | 4 | 30 0.3 | 0.04 | 20 | 5 |
| TD39 | H | 40 | 4 | 30 0.3 | 0.04 | 30 | 5 |
| TD40 | H | 20 | 9 | 30 0.3 | 0.04 | 10 | 0.17 |
| TD41 | H | 20 | 9 | 30 0.3 | 0.04 | 10 | 0.17 |
| TD43 | H | 40 | 4 | 30 0.3 | 0.04 | 20 | 5 |
| TD44 | H | 30 | 5 | 30 0.3 | 0.04 | 10 | 5 |
| TD45 | H | 30 | 5 | 6 0.1 | OFF | 10 | 5 |
| TD46 | H | 20 | 5 | 6 0.1 | OFF | 10 | 5 |
| TD47 | A | 20 | 5 | 6 0.1 | OFF | 10 | 5 |
| TD48 | A | 20 | 5 | 30 0.3 | 0.04 | 10 | 5 |
| TD49 | A | 20 | 5 | 30 0.3 | 0.04 | 0 | 5 |
| TD50 | A | 20 | 5 | 30 0.3 | 0.04 | 0 | 5 |
| TD51 | H | 20 | 9 | 30 0.3 | 0.04 | 10 | 5 |

* opening positioner

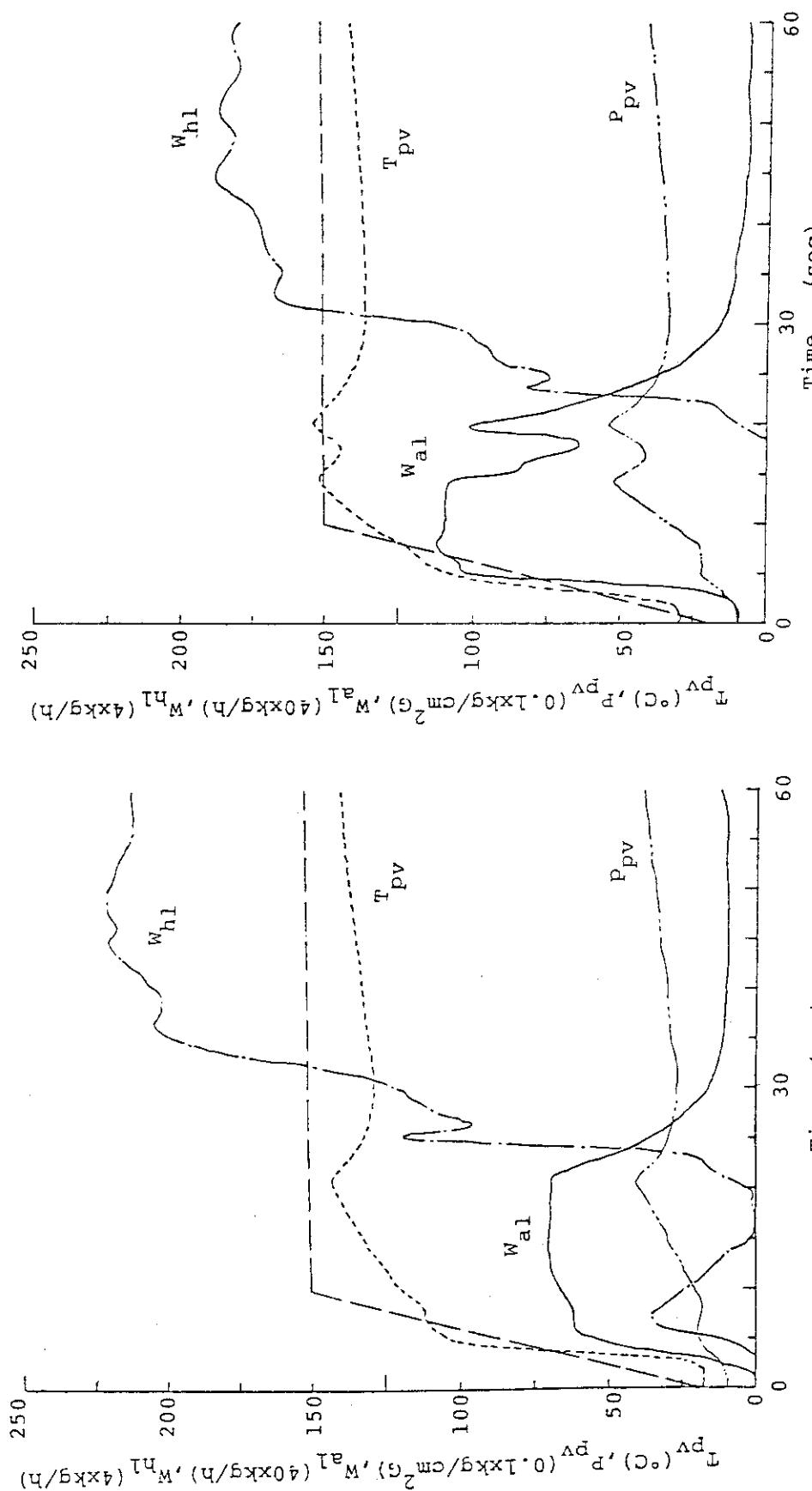


Fig. 12.2 (TD38)

Fig. 12.1 Performance test of the control devices at rapid heating (TD37). Changes of steam flow rate (W_{a1} or W_{h1}), temperature (T_{PV}^{d}) and pressure (P_{PV}) in the pressure vessel are shown. Each figure from 12.1 to 12.14 corresponds to the results obtained from the experiments (TD37-TD41, TD43-TD51).

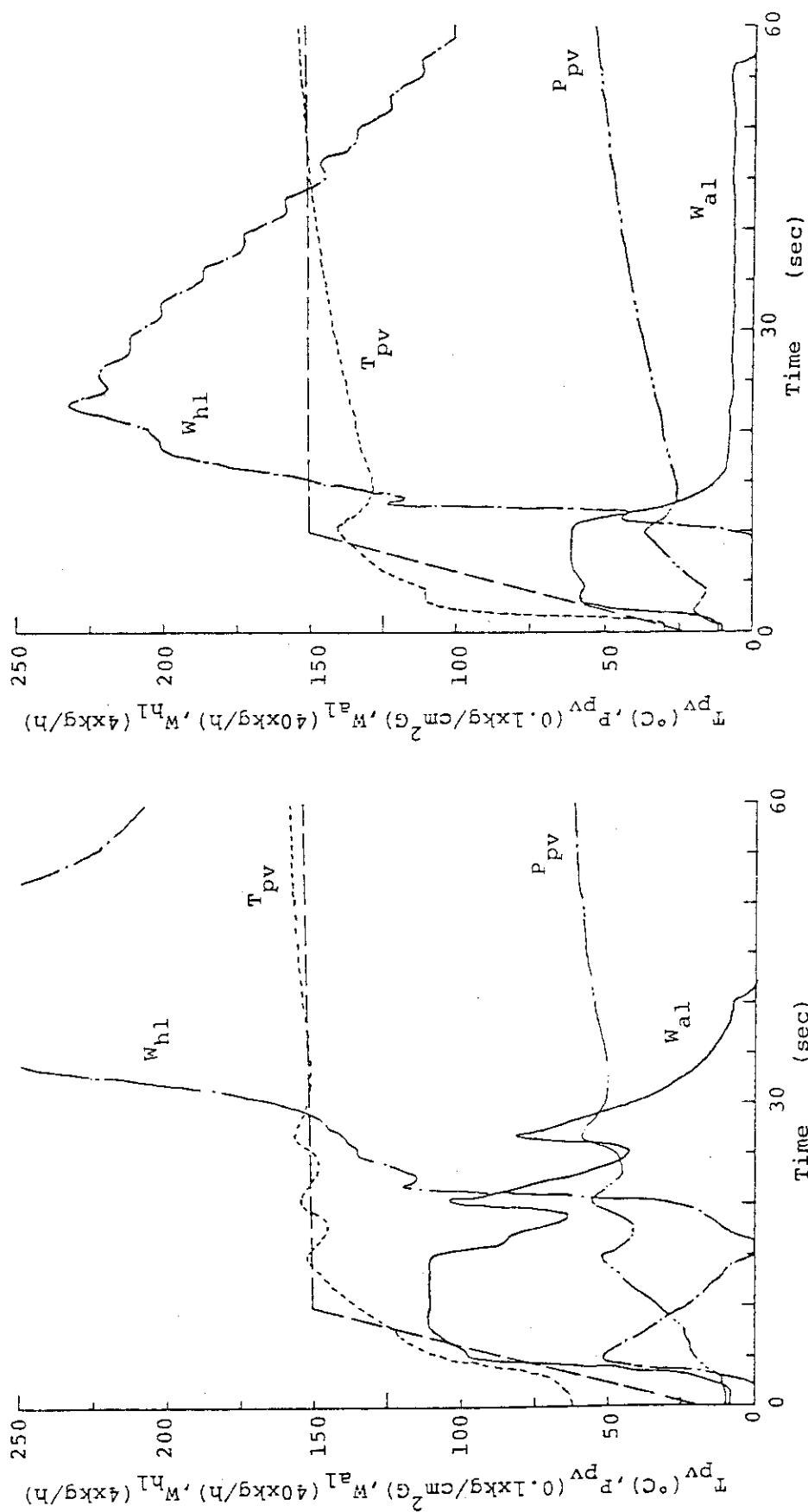


Fig. 12.4 (TD40)

Fig. 12.3 (TD39)

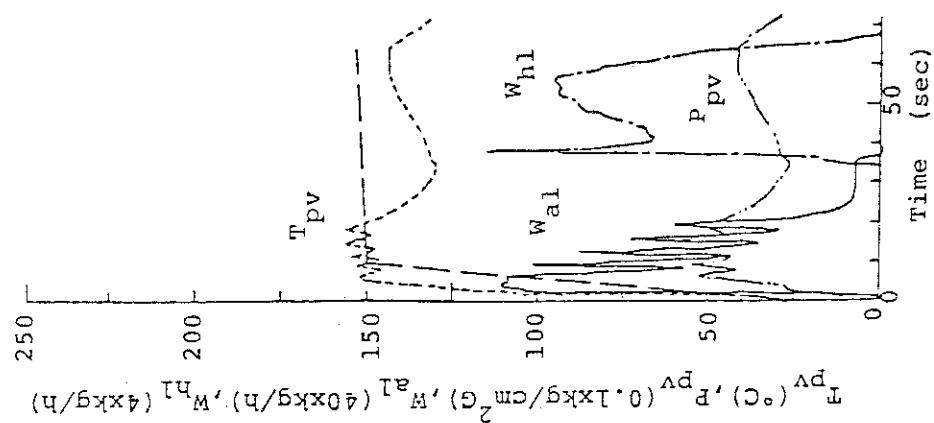


Fig. 12.6 (TD43)

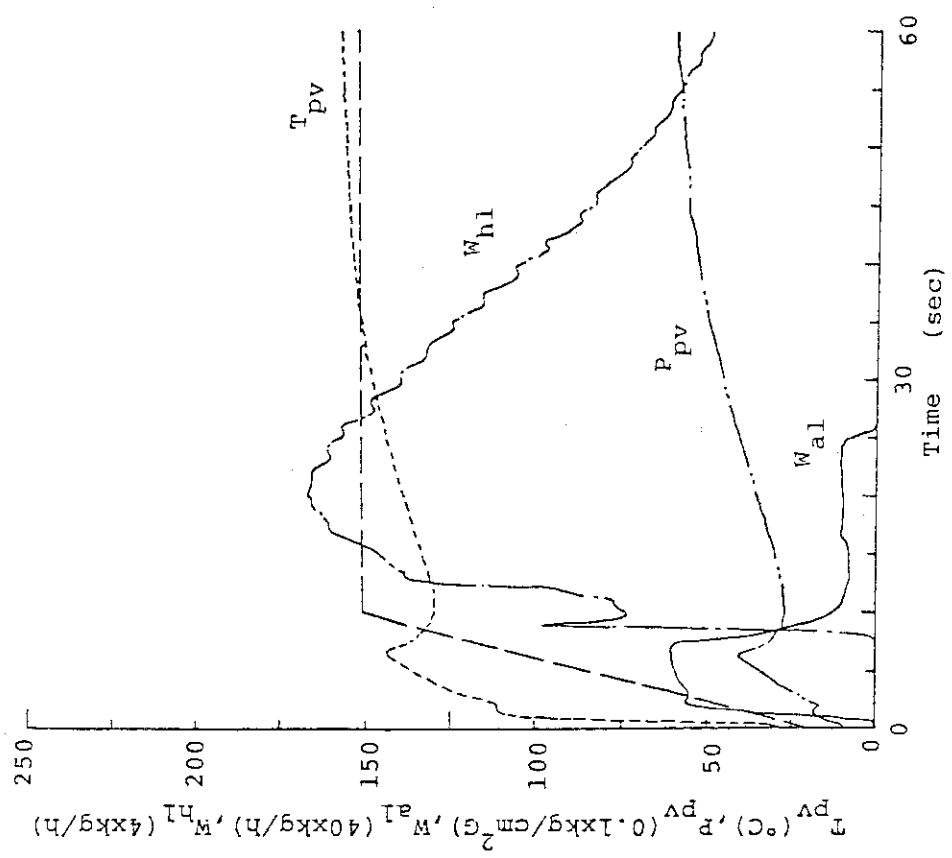


Fig. 12.5 (TD41)

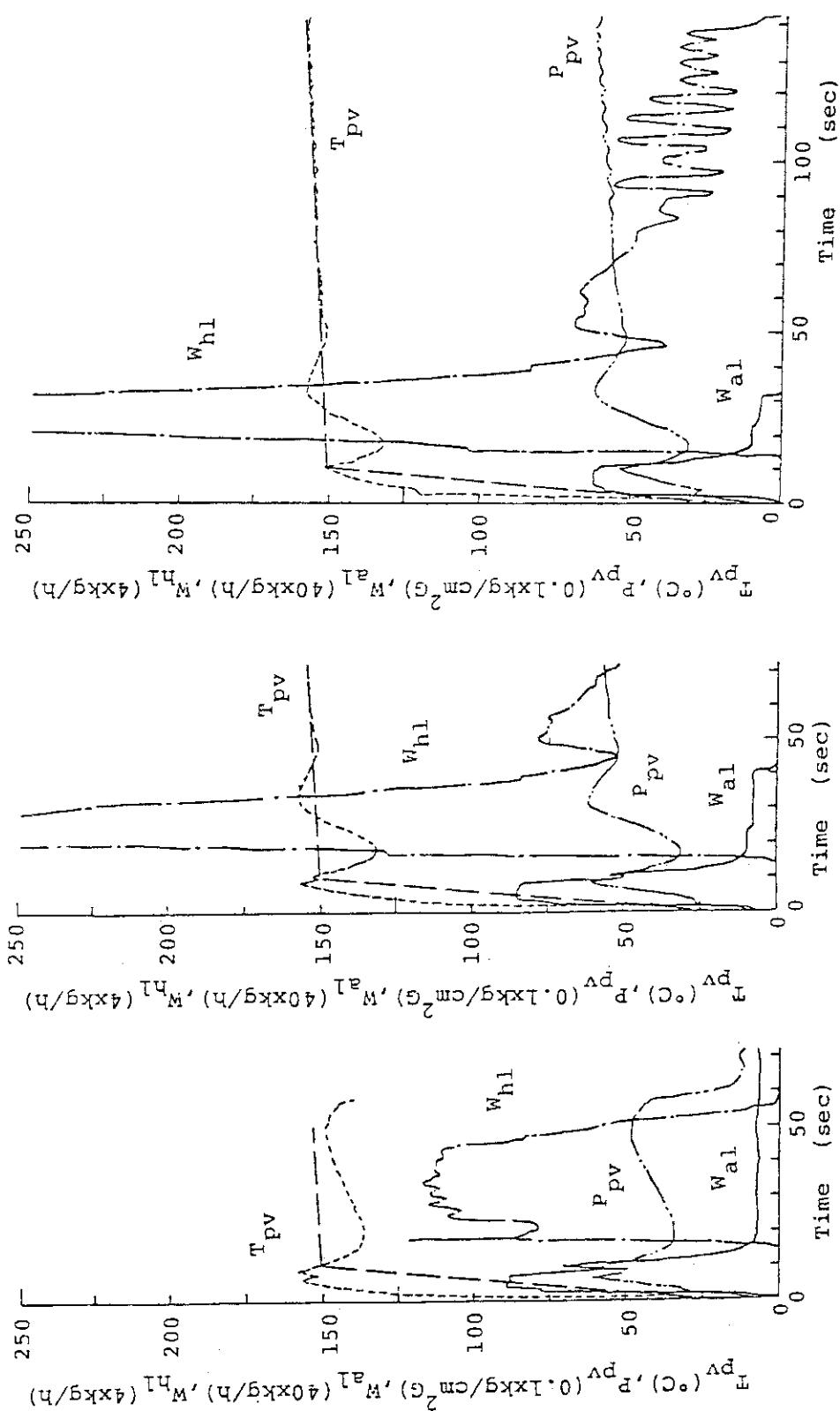


Fig. 12.7 (TD44)

Fig. 12.8 (TD45)

Fig. 12.9 (TD46)

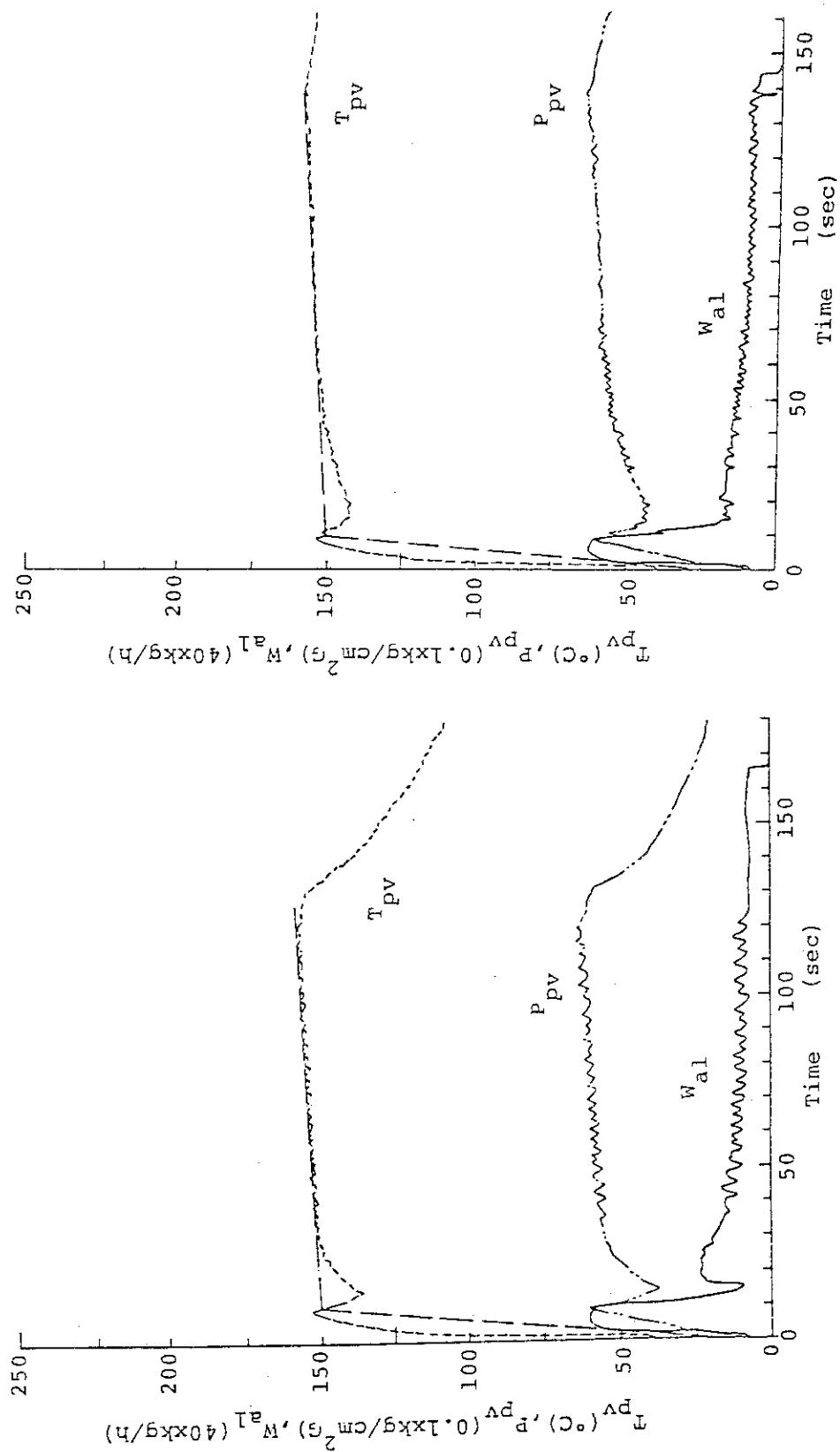


Fig. 12.11 (TD48)

Fig. 12.10 (TD47)

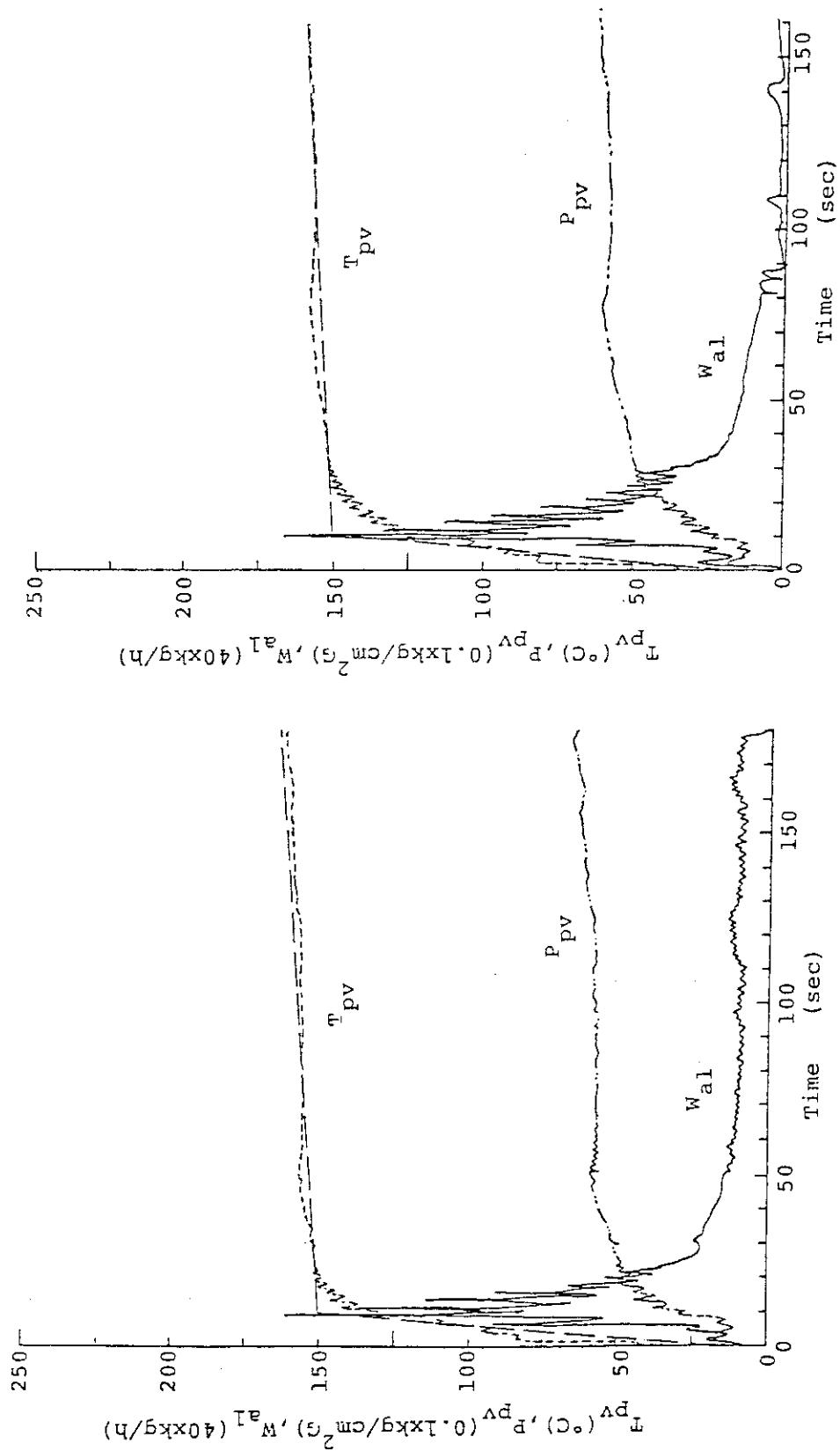


Fig. 12.13 (TD50)

Fig. 12.12 (RD49)

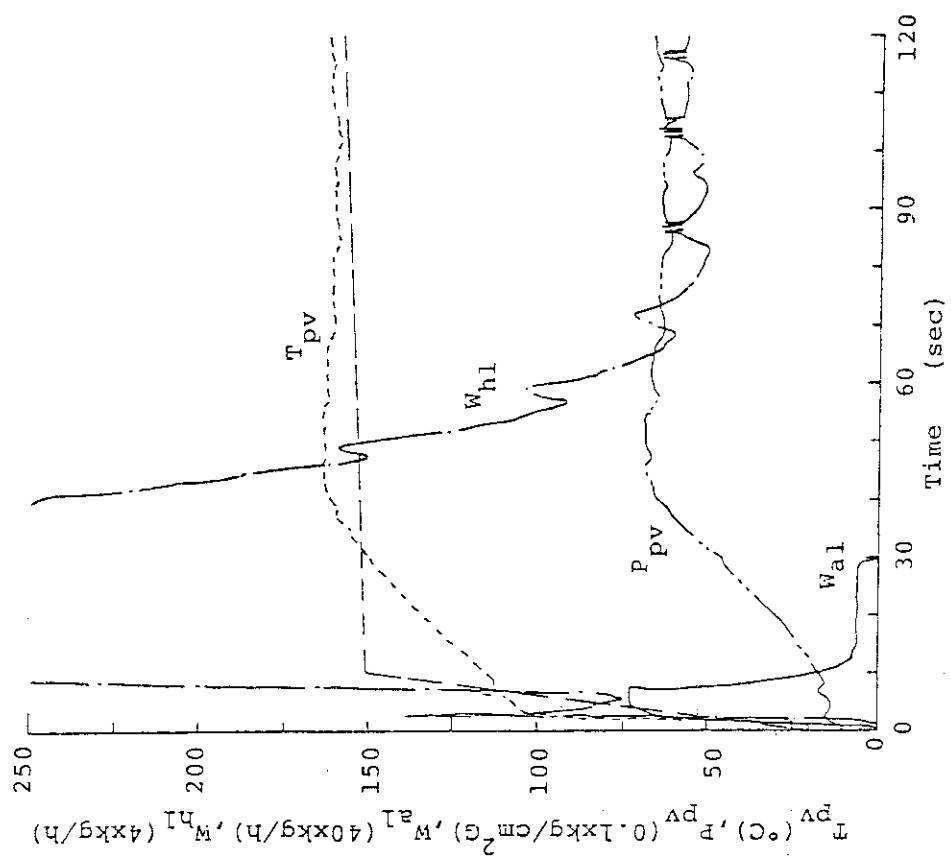


Fig. 12.14 (TD51)

Table 3 Experimental conditions of the test comparing regulation of control methods in automatic control with a program generator.

| symbol of experiments | serial order in a set of experiments | control* system | program** |
|-----------------------------|--|--------------------|-----------|
| MDT1 | 1 | (T) | 1 |
| MDT2 | 1 | (T) | 2 |
| MDPT1 | 1 | (P/T) | 1 |
| MDPT2 | 2 | (P/T) | 2 |
| MDP1 | 3 | (P) | 1 |
| MDP2 | 4 | (P) | 2 |

* (T) : regulated by temperature basis control

(P/T) : regulated by pressure converted to temperature

(P) : regulated by pressure basis control

** Program 1 and 2 are shown in Fig.22.1 and Fig.22.2

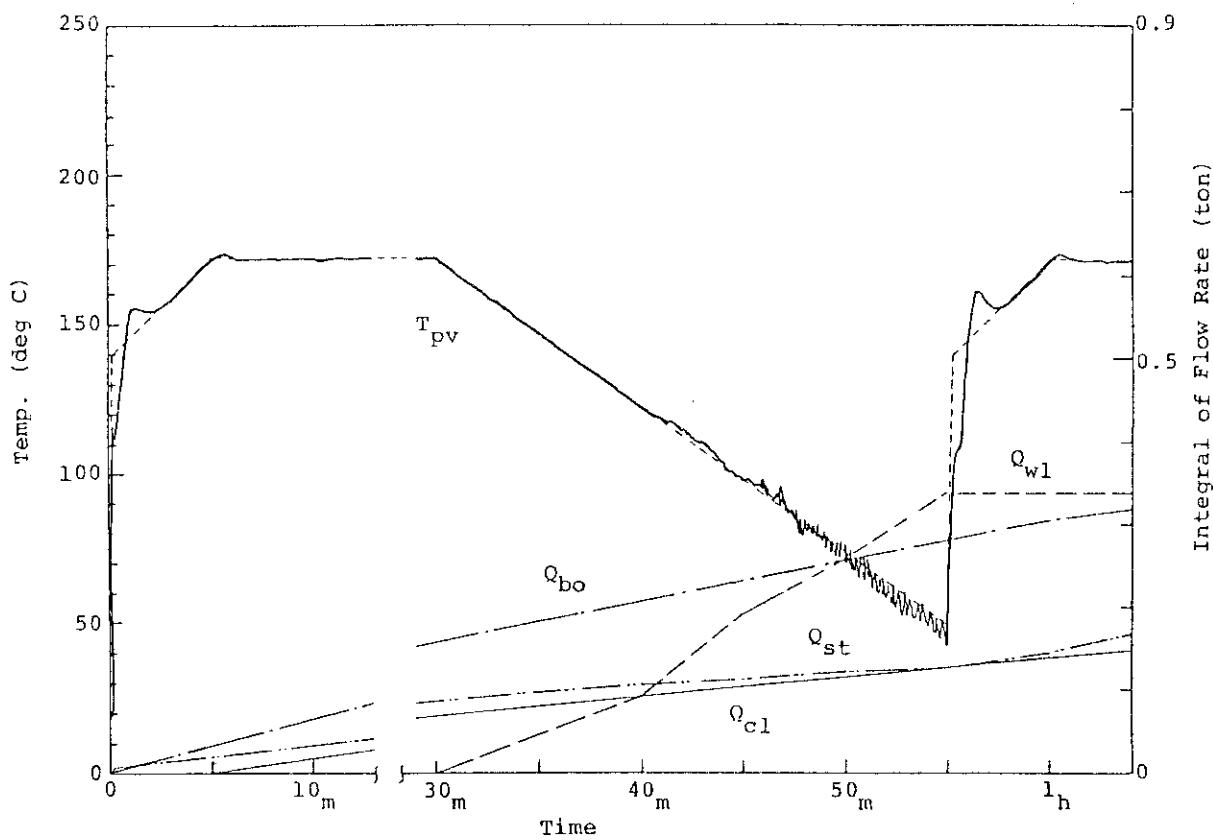


Fig. 13 Automatic control test according to program 1 regulated by temperature(T) basis control(MDT1).

Changes of temperature(T_{pv}) in the pressure vessel, integral of volume flow rates of steam(Q_{st}), chemical spray (Q_{cl}), cooling water(Q_{wl}) and feed water to boiler(Q_{bo}) are shown.

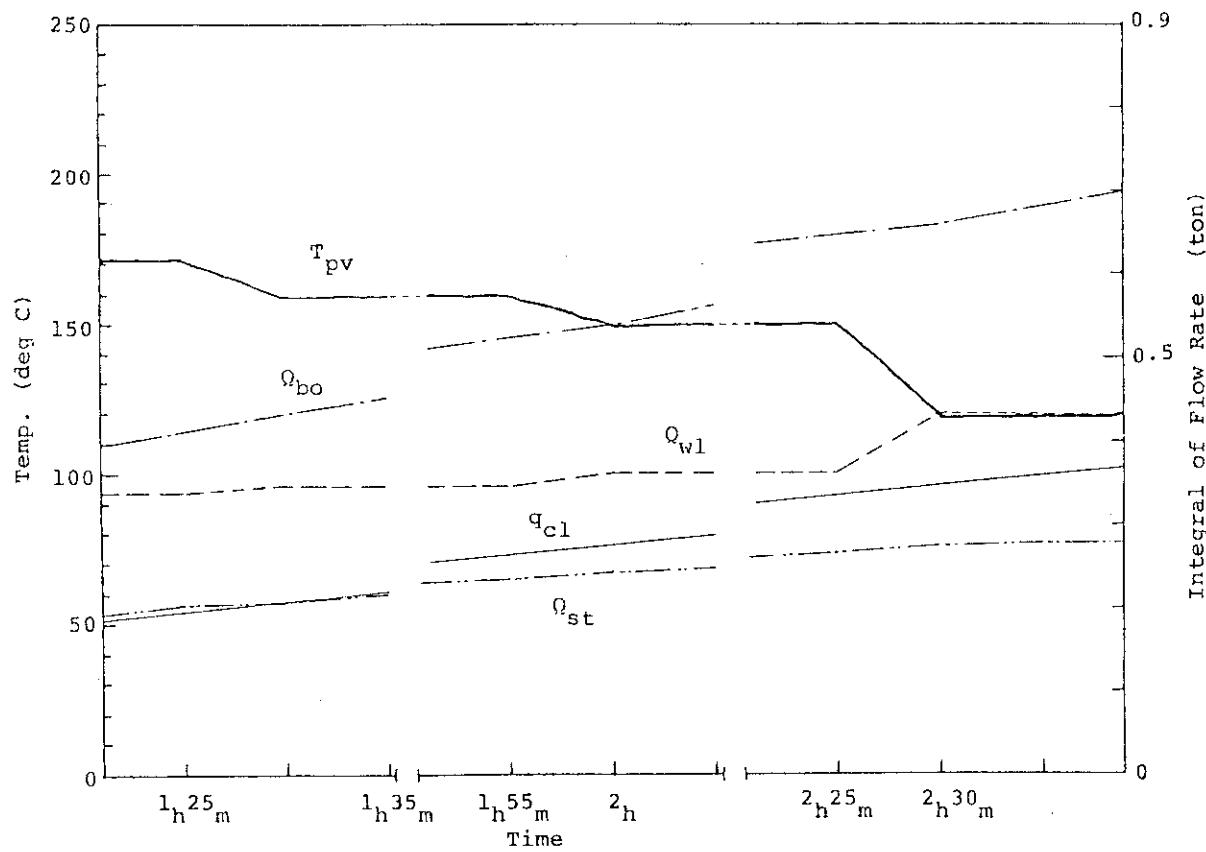


Fig. 13 (continued)

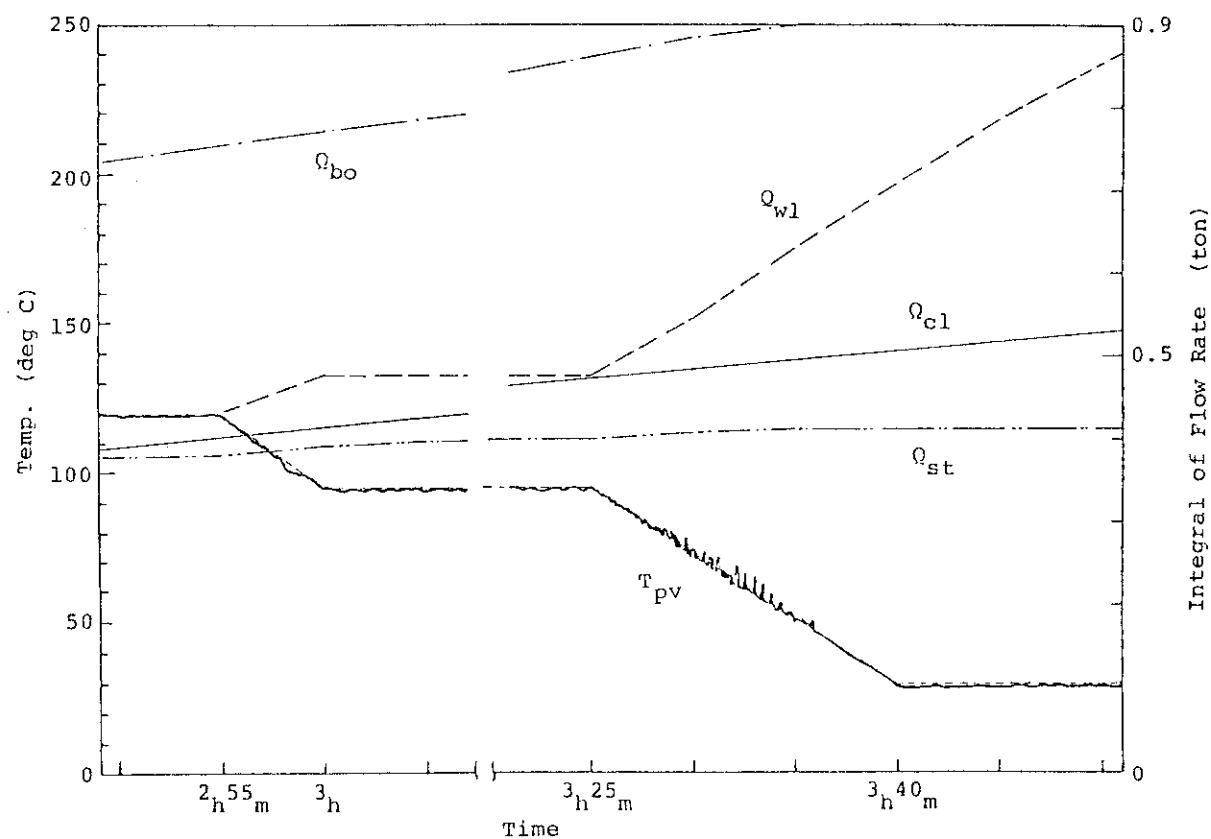


Fig. 13 (continued)

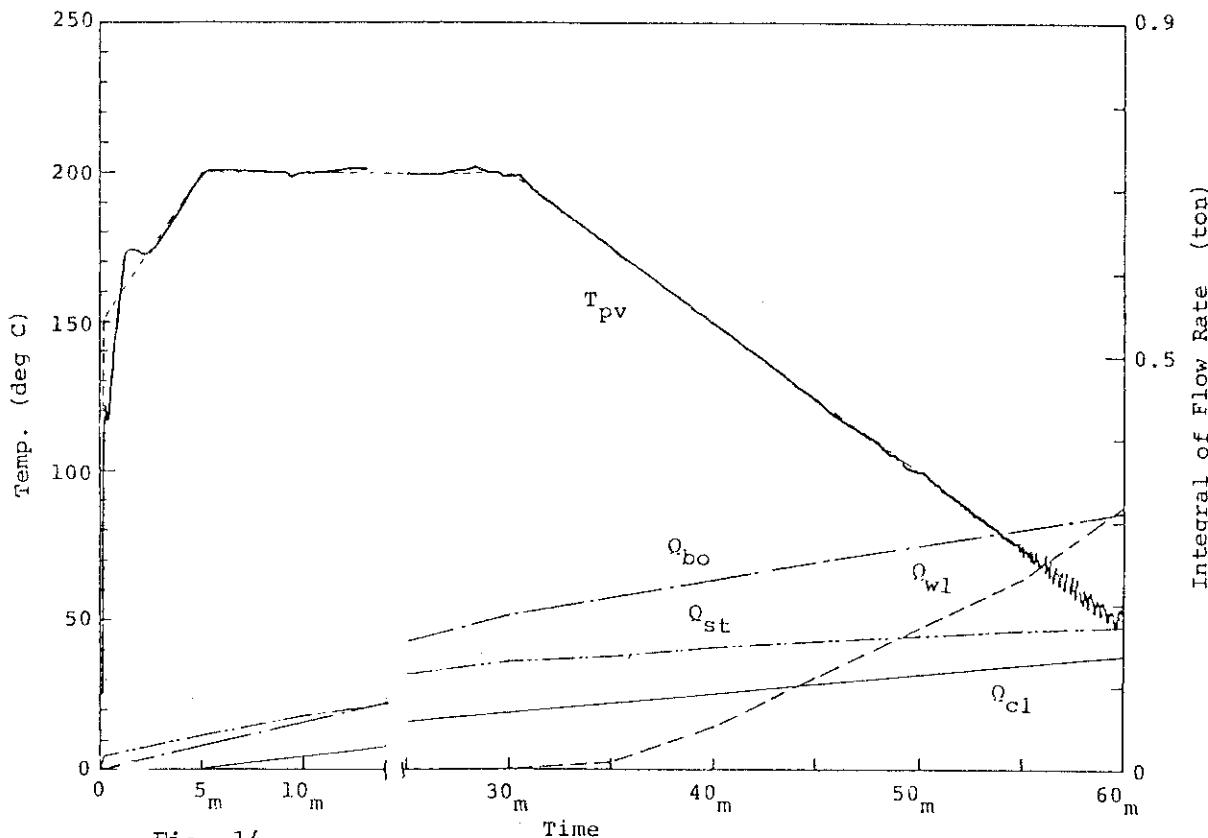


Fig. 14 Automatic control test according to program 2 regulated by temperature(T) basis control(MDT2).

Changes of temperature(T_{pv}) in the pressure vessel, integral of volume flow rates of steam(Q_{st}), chemical spray (Q_{cl}), cooling water(Q_{wl}) and feed water to boiler(Q_{bo}) are shown.

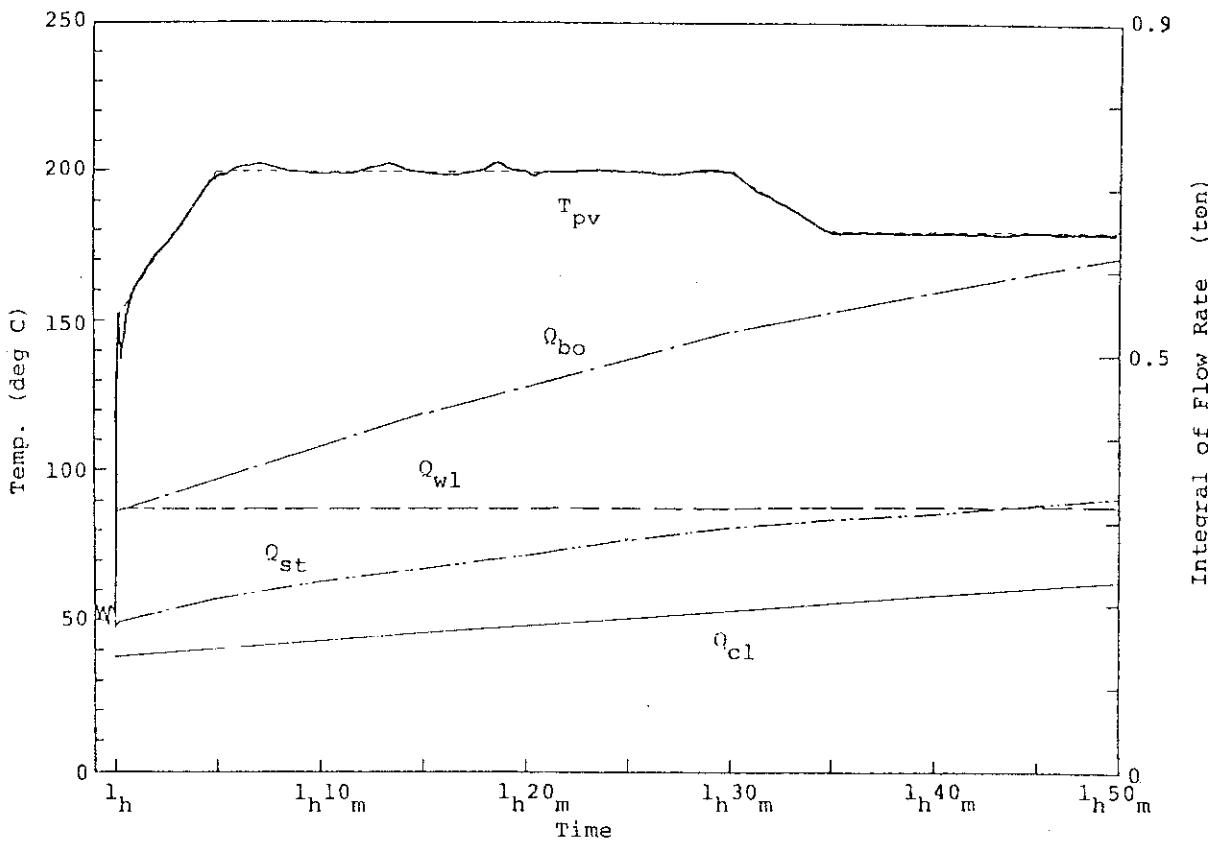


Fig. 14 (continued)

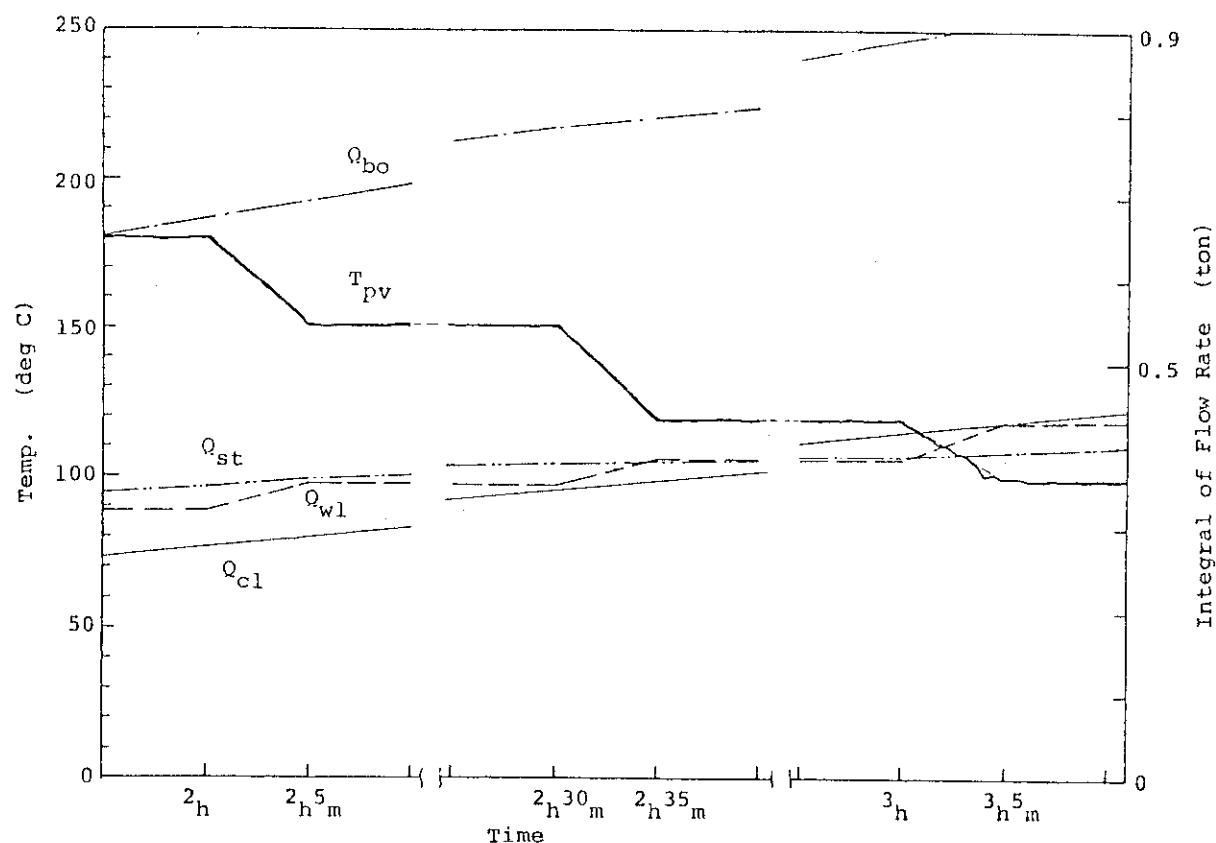


Fig. 14 (continued)

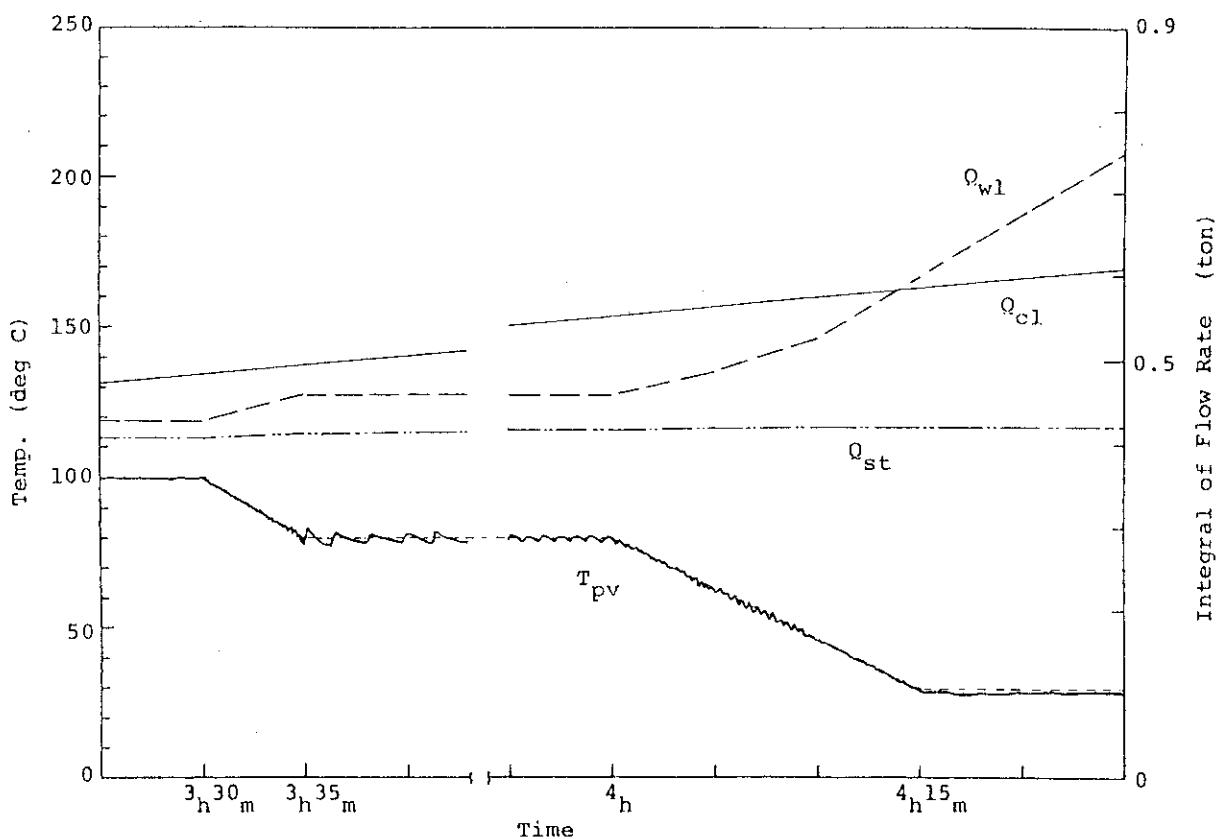


Fig. 14 (continued)

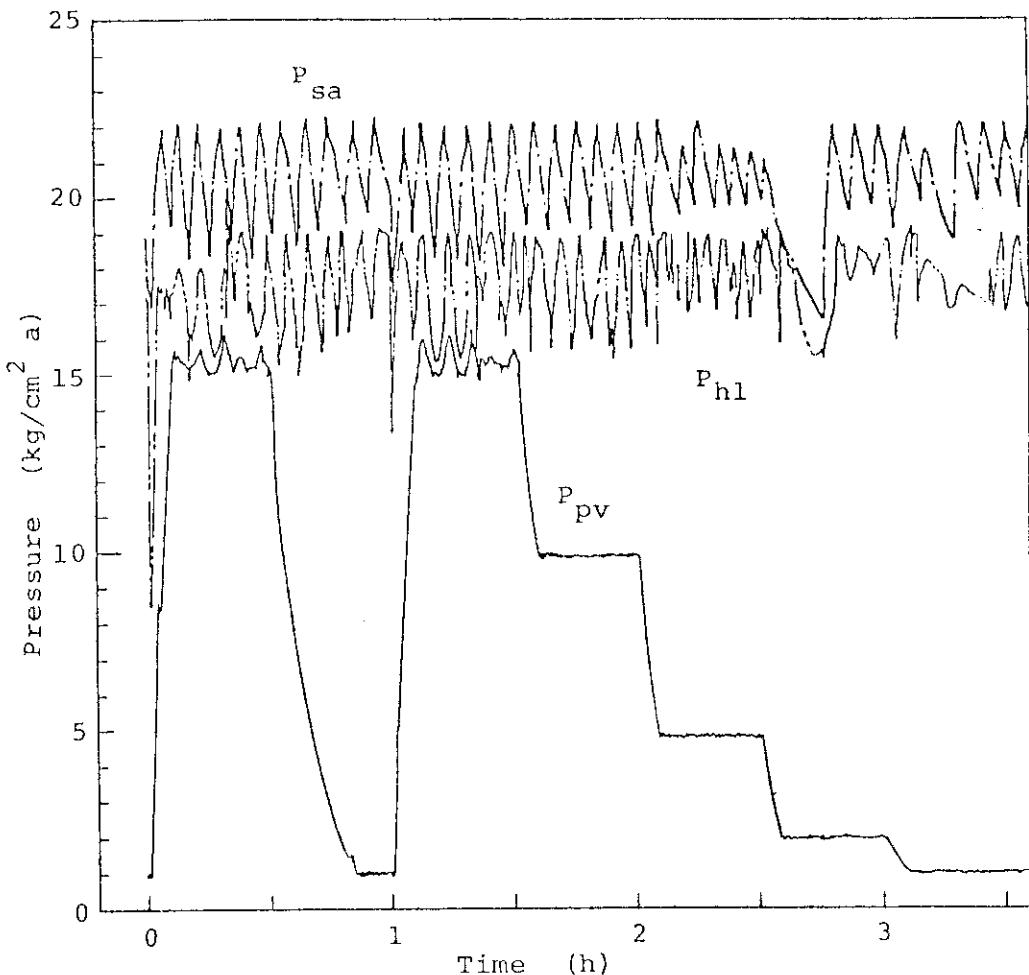


Fig. 15 Automatic control test according to program 2 regulated by temperature(T) basis control(MDT2).

Changes of pressure in the pressure vessel(P_{pv}) and accumulator(P_{sa}), and in the line H(P_{hl}) are shown.

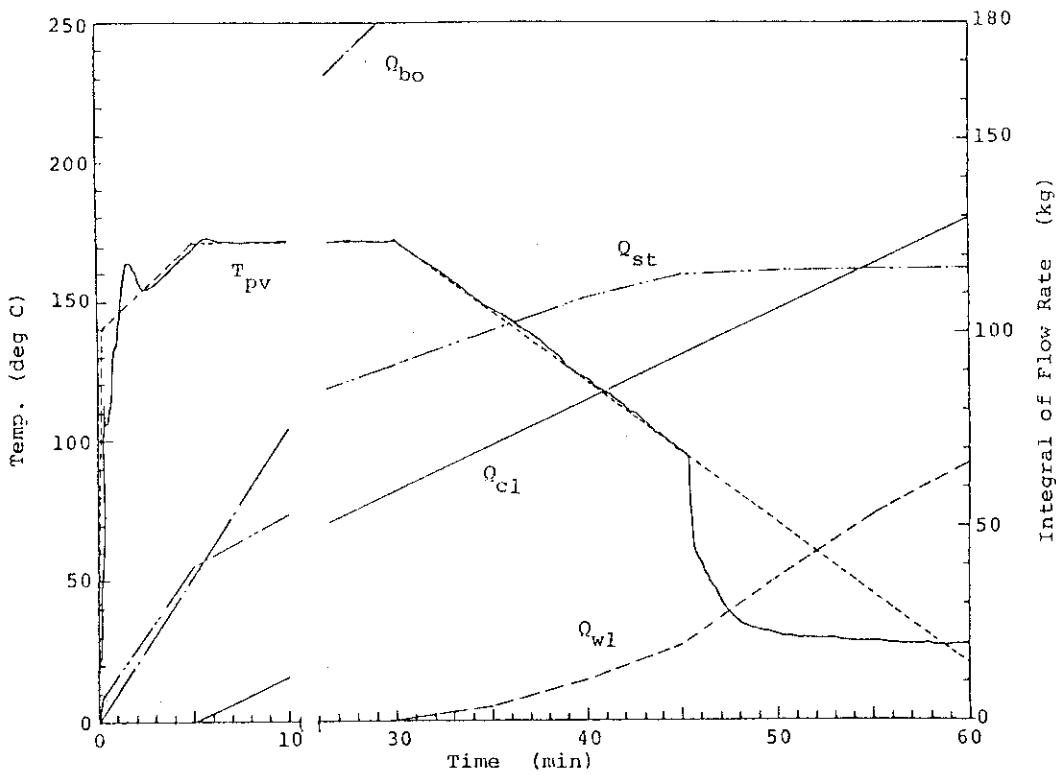


Fig. 16 Automatic control test according to program 1 regulated by pressure converted to temperature(P/T, MDPT1).

Changes of temperature(T_{pv}) in the pressure vessel, integral of volume flow rates of steam(Q_{st}), chemical spray (Q_{cl}), cooling water(Q_{wl}) and feed water to boiler(Q_{bo}) are shown.

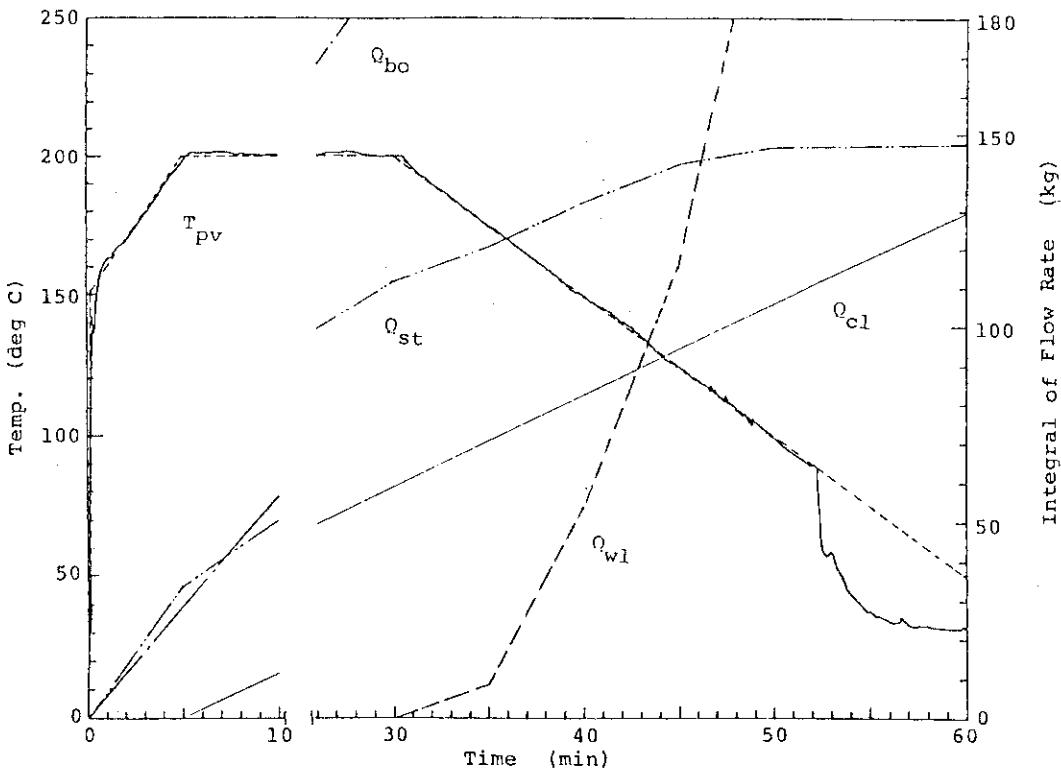


Fig. 17 Automatic control test according to program 2 regulated by pressure converted to temperature(P/T, MDPT2).

Changes of temperature(T_{pv}) in the pressure vessel, integral of volume flow rates of steam(Q_{st}), chemical spray (Q_{cl}), cooling water(Q_{wl}) and feed water to boiler(Q_{bo}) are shown.

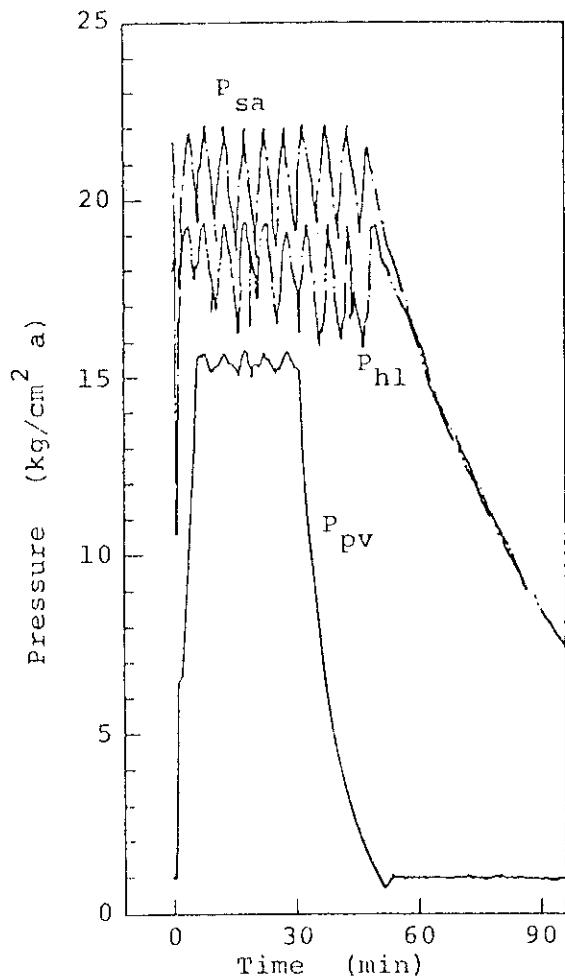


Fig. 18 Automatic control test according to program 2 regulated by pressure converted to temperature(P/T , MDPT2).

Changes of pressure in the pressure vessel(P_{pv}) and accumulator(P_{sa}), and in the line H(P_{hl}) are shown.

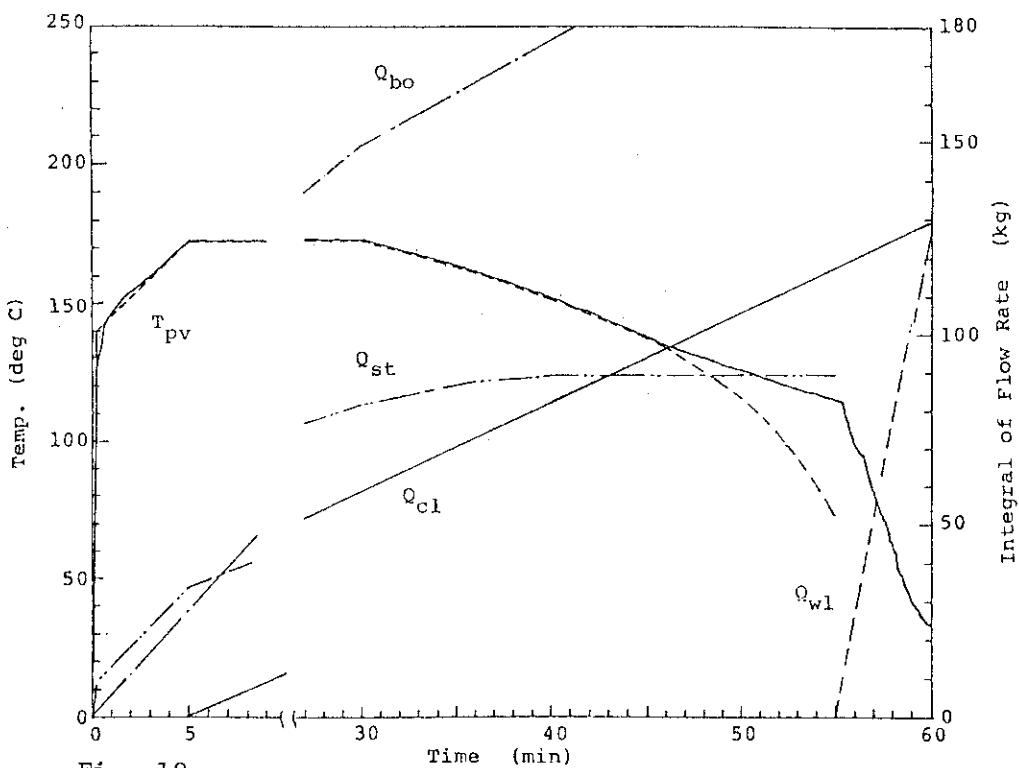


Fig. 19 Automatic control test according to program 1 regulated by pressure(P) basis control(MDP1)

Changes of temperature(T_{pv}) in the pressure vessel, integral of volume flow rates of steam(Q_{st}), chemical spray (Q_{cl}), cooling water(Q_{w1}) and feed water to boiler(Q_{bo}) are shown.

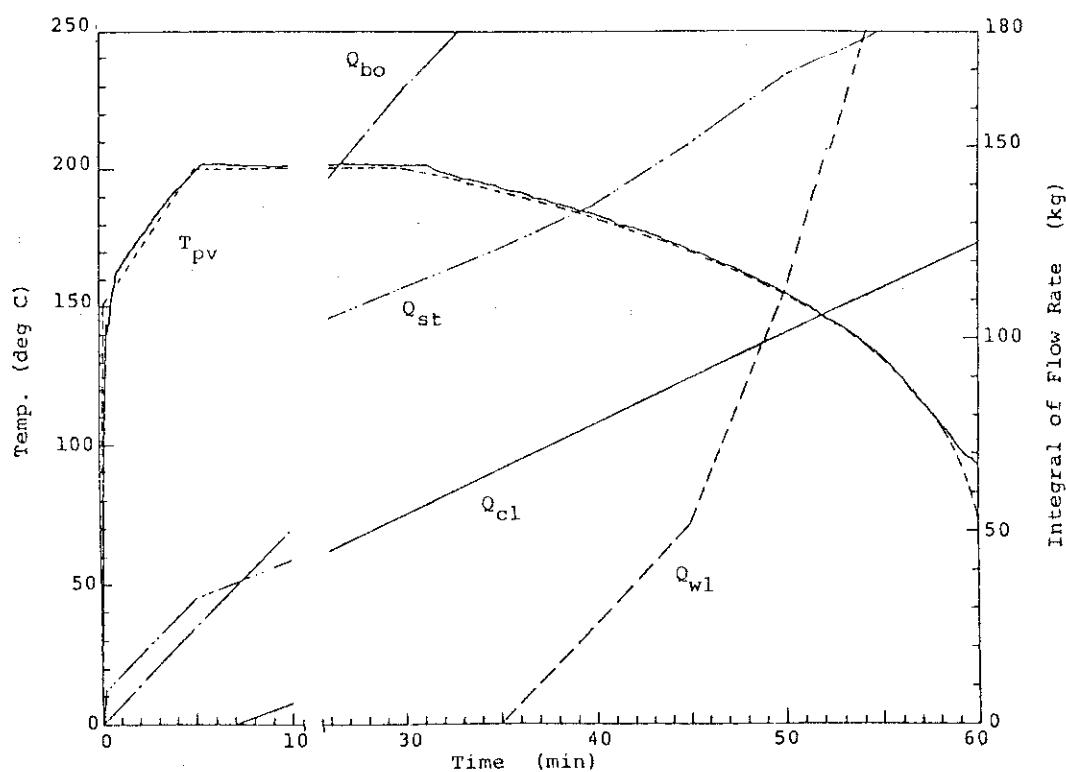


Fig. 20 Automatic control test according to program 2 regulated by pressure(P) control(MDP2).

Changes of temperature(T_{pv}) in the pressure vessel, integral of volume flow rates of steam(Q_{st}), chemical spray (Q_{cl}), cooling water(Q_{w1}) and feed water to boiler(Q_{bo}) are shown.

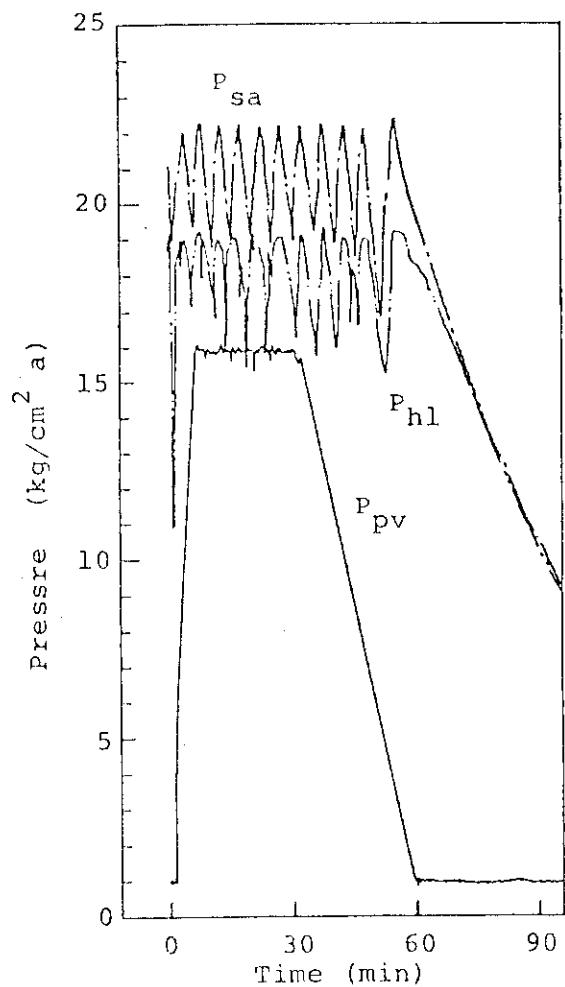


Fig. 21 Automatic control test according to program 2 regulated by pressure(P) control(MDP2).

Changes of pressure in the pressure vessel(P_{pv}) and accumulator(P_{sa}), and in the line H(P_{hl}) are shown.

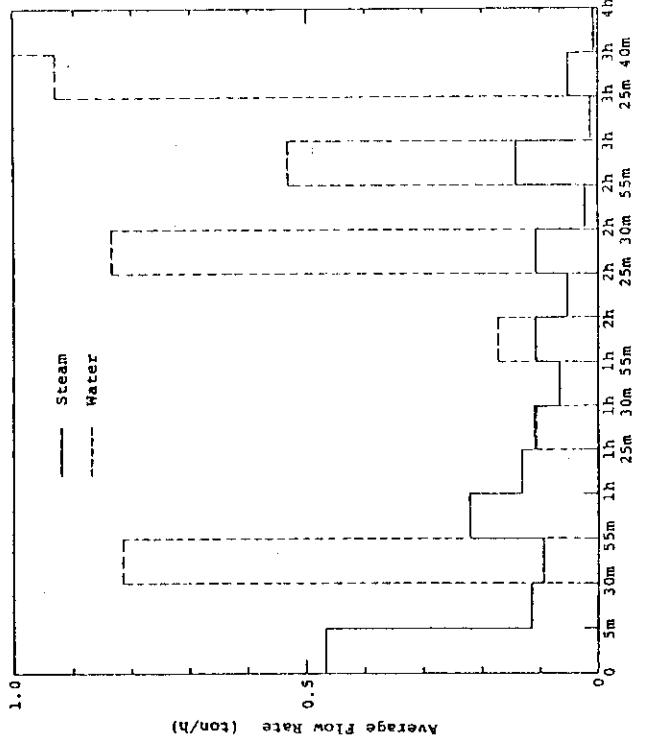
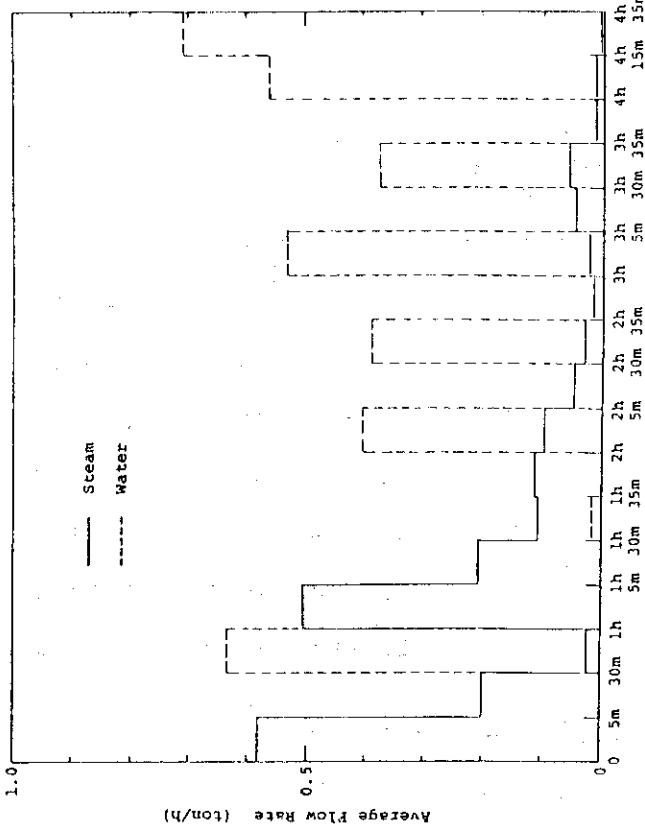
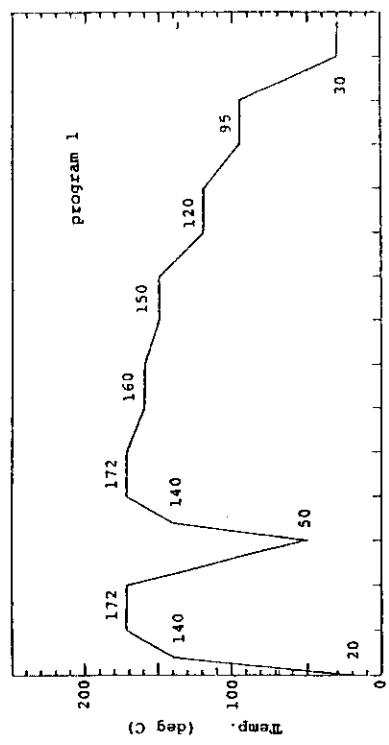
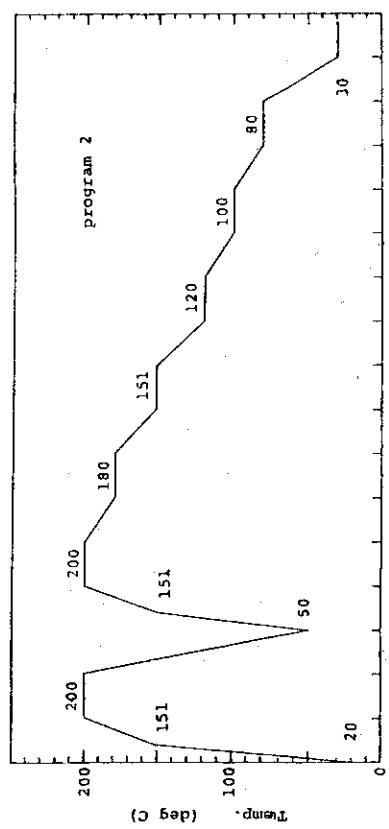


Fig. 22.1 Quantities of steam and cooling water required for control commanded by the program 2 operated temperature basis control (MDT1).

Fig. 22.2 Quantities of steam and cooling water required for control commanded by the program 2 operated temperature basis control (MDT2).

Table 4 Comparison of actual and estimated volume of steam required for rapid heating.

| symbol of experiments | program* | experiment | | calculation | | E-C | |
|-----------------------------|----------|---------------|------|---------------|------|--------|------|
| | | (E) (kcal) | (kg) | (C) (kcal) | (kg) | (kcal) | (kg) |
| MDT1 | A | 2.60E4 ** | 39.0 | 1.89E4 | 28.3 | 7.1E3 | 10.7 |
| MDPT1 | A | 2.68E4 | 40.2 | 1.89E4 | 28.3 | 7.9E3 | 11.9 |
| MDP1 | A | 2.23E4 | 33.5 | 1.45E4 | 21.7 | 7.9E3 | 11.8 |
| MDT2 | B | 3.24E4 | 48.5 | 2.76E4 | 41.4 | 4.7E3 | 7.1 |
| MDPT2 | B | 2.73E4 | 40.9 | 2.14E4 | 32.1 | 5.9E3 | 8.8 |
| MDP2 | B | 2.18E4 | 32.7 | 2.14E4 | 32.1 | 0.4E3 | 0.6 |

* A : 20°C → 172°C/300sec

B : 20°C → 200°C/300sec

** to be read as 2.60×10^4

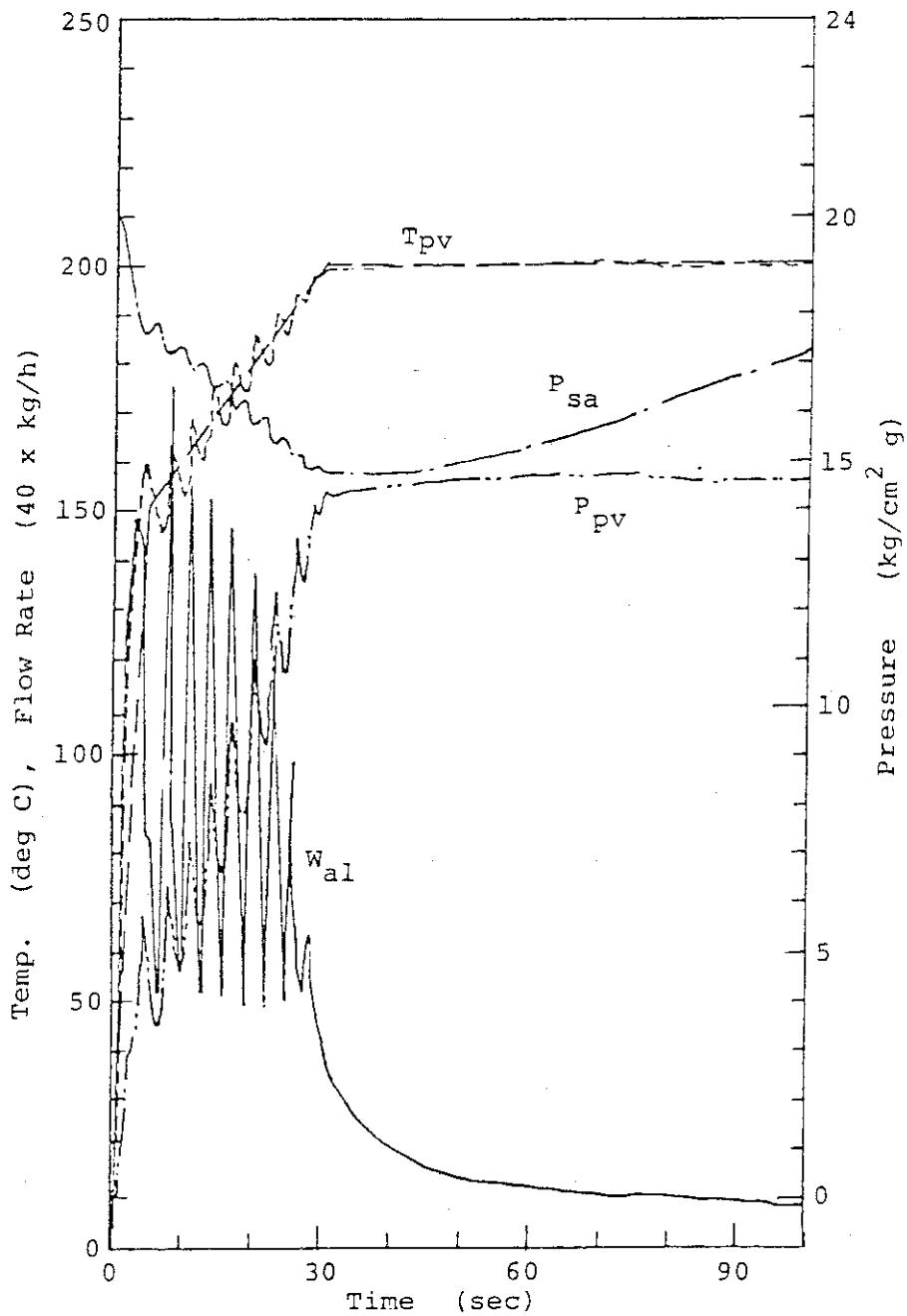


Fig. 23 Typical rapid heating.

Changes of temperature(T_{PV}) and pressure(P_{PV}) in the pressure vessel, and changes of pressure in the accumulator(P_{sa}) and steam flow rate(w_{al}) are shown.

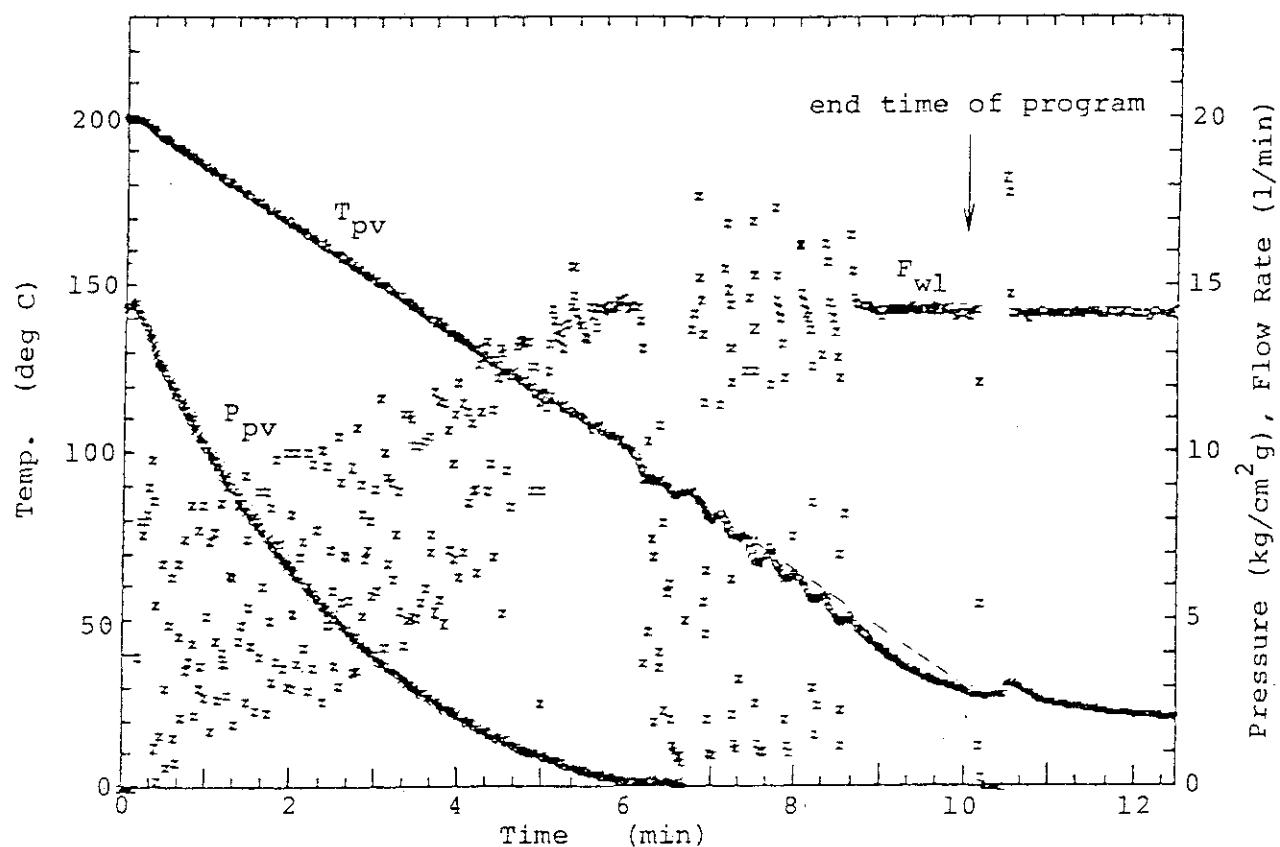


Fig. 24 Typical rapid cooling.
Changes of temperature(T_{pv}) and pressure(P_{pv}) in the pressure vessel and change of cooling water flow rate(F_{wl}) are shown.