

JAERI-Research  
98-006



受動的安全炉JPSRにおける冷却材均圧注入系の  
熱水力挙動に関する実験的検討

1998年2月

佐藤 隆・渡辺博典・新谷文將・中嶋勝利・岩村公道・村尾良夫

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1998

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷(株)

受動的安全炉 J P S R における冷却材均圧注入系の熱水力挙動に関する実験的検討

日本原子力研究所東海研究所原子炉工学部

佐藤 隆・渡辺 博典・新谷 文將・中嶋 勝利・岩村 公道<sup>+1</sup>・村尾 良夫<sup>+2</sup>

(1998年1月23日受理)

原研、原子炉工学部では、受動的安全炉 JPSR の概念設計研究を実施して來た。本報は、受動的安全炉 JPSR で採用を検討して來た工学的安全施設である受動的冷却材注入系としての冷却材均圧注入系の熱水力特性を把握するために平成5年度、6年度に実施した冷却材均圧注入実験の計測データを収録すると共に実験結果をまとめたものである。また、本実験に先立って実施した予備試験の結果についてもまとめた。

実験の結果、均圧配管内の冷却材サブクール度が大きくなると注入に遅れの生じること、炉心補給水タンク(CMT)内を小さな領域に分割する構造物を挿入する事により水面下に形成される高温層の拡散を抑制する事ができ CMT 内の蒸気凝縮量を緩和できること、冷却材喪失流量と作動開始までの時間の関係は線形ではなく均圧管内の蒸気凝縮に基づく気液対向流により影響されること、今回試作した差圧作動受動弁を用いた場合断続的な注入になることが分かった。尚、今回試作した弁では作動差圧の設定の困難及びビビリ音の発生、CMT 内に冷却材が有効に使われず残存するといった問題があり、これらは再閉止防止機構の設置により改善可能であり、この改善の提案も行った。

---

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

+1 企画室

+2 国際原子力総合技術センター

Experimental Study on Thermal-Hydraulic Behaviors of a Pressure Balanced Coolant  
Injection System for a Passive Safety Light Water Reactor JPSR

Takashi SATOH, Hironori WATANABE, Fumimasa ARAYA, Katsutoshi NAKAJIMA,  
Takamichi IWAMURA<sup>+1</sup> and Yoshio MURAO<sup>+2</sup>

Department of Reactor Engineering  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken  
(Received January 23, 1998)

A conceptual design study of a passive safety light water reactor JPSR has been performed at Japan Atomic Energy Research Institute JAERI. A pressure balanced coolant injection experiment has been carried out, with an objective to understand thermal-hydraulic characteristics of a passive coolant injection system which has been considered to be adopted to JPSR. This report summarizes experimental results and data recorded in experiment run performed in FY. 1993 and 1994. Preliminary experiments previously performed are also briefly described.

As the results of the experiment, it was found that an initiation of coolant injection was delayed with increase in a subcooling in the pressure balance line. By inserting a separation device which divides the inside of core make-up tank (CMT) into several small compartments, a diffusion of a high temperature region formed just under the water surface was restrained and then a steam condensation was suppressed. A time interval from an uncoupling of the pressure balance line to the initiation of the coolant injection was not related by a linear function with a discharge flow rate simulating a loss-of-coolant accident (LOCA) condition. The coolant was injected intermittently by actuation of a trial fabricated passive valve actuated by pressure difference for the present experiment. It was also found that the trial passive valve had difficulties in setting an actuation set point and vibrations noises and some fraction of the coolant was remained in CMT without effective use. A modification was proposed for resolving these problems by introducing an anti-closing mechanism.

Keywords: Passive Safety Reactor, Passive Coolant Injection System, Pressure Balanced  
Coolant Injection System, Thermal-hydraulic Experiment

---

+1 Office of Planning

+2 Nuclear Technology and Education Center

## 目 次

1. 序 .....	1
2. C M T の作動原理と冷却材均圧注入実験装置 .....	4
2. 1 J P S R における C M T の作動原理 .....	4
2. 2 実験装置 .....	4
3. 実験方法及び実験条件 .....	20
3. 1 実験方法 .....	20
3. 2 実験条件 .....	21
4. 実験結果と考察 .....	25
4. 1 実験結果 .....	25
4. 2 考 察 .....	26
5. 結 論 .....	47
謝 辞 .....	47
参考文献 .....	48
付録A 炉心補給水タンク特性に関する予備試験 .....	49
付録B 各実験ケースの計測データ .....	53

Contents

1. Introduction .....	1
2. Principle of CMT Actuation and Experimental Facility .....	4
2.1 Actuation Principle of CMT in JPSR .....	4
2.2 Experimental Facility .....	4
3. Experimental Procedure and Test Conditions .....	20
3.1 Experimental Procedure .....	20
3.2 Test Conditions .....	21
4. Experimental Results and Discussions .....	25
4.1 Experimental Results .....	25
4.2 Discussions .....	26
5. Conclusions .....	47
Acknowledgments .....	47
References .....	48
Appendix A Preliminary Experiments on CMT .....	49
Appendix B Recorded Data in Each Test Case .....	53

## 1. 序

本報告では、原研で概念設計を進めている受動的安全炉 JPSR<sup>1)</sup>で採用を検討していた工学的安全施設のひとつである受動的冷却材注入系としての冷却材均圧注入系の熱水力特性を把握するために平成5年度、6年度に実施した冷却材均圧注入実験について、計測したデータを収録とともに実験結果についてまとめたものである。また、これに先立って実施した予備試験についても付録Aにまとめた。

受動的安全炉 JPSR では、工学的安全施設は図1に示すような受動的安全システムにより構成されている。即ち、事故時の安全確保は、冷却材の自然循環により一次系を冷却する受動的熱除去系と、重力等の自然力により冷却材を補給する受動的冷却材注水系により構成されている。冷却材の補給は、高圧、中圧、低圧の領域で、それぞれ冷却材均圧注入系、蓄圧注水系、重力注水系からほう酸水が弁の開放により、自然循環力、加圧ガスの膨張力及び重力水頭といった物理的原理により受動的に行われる。こうした方式の採用は、弁の開放後の注入のために動的機器の作動を必要とせず自然力により行うことから、作動の信頼性を高め、安全性の向上に大きく貢献している。このことは一方において、安全確保のための非常用電源を必要としなくなるため、システム構成の簡素化に貢献し、ひいては運転・保守の容易性を高めることになる。中圧及び低圧での受動的冷却材注水系の早期作動開始のために、受動的熱除去系が設置されているが、必要に応じ、低圧での注水を早期に行うために減圧弁を開放することにより、一次系を急速減圧させ、重力注水プール水の水頭圧により注水することも可能である。また、重力注水プールの水量は、最低、一次系配管破断時に一次系配管水平部が完全に冠水するまで、一次系を水没することのできるだけの容量を有する。冷却材均圧注入系は、完全に受動的に作動を開始するとともに、作動開始後においても自然循環力により冷却材を注入するように設計されている。本設備は冷却材注入系としての目的の他、後備炉停止用ほう酸注入タンクとしての役割も兼用している。

従来のPWRでの事故時には、ポンプの作動、並びに、余熱除去系への冷水供給等のため注入ポンプの電力が必要であるので、工学的安全施設の作動のためには、非常用ディーゼル電源の起動が必要である。また、非常用ディーゼル電源への冷水の供給など非常用として重要な機器の確実な起動も必要である。このため、安全を確保するために保守すべき機器、システムが多く、保守に対する負担が大きい要因になっている。これに対し、JPSR では、工学的安全施設の作動は自然力によるため一部のシステムを除いて非常用電源を必要とせず、小電力で安全確保が可能である。また、構造の複雑な機器がない、システムが簡素化されていることから、保守に要する労力は大幅に削減できる設計になっている。

本試験で対象とする冷却材均圧注入系は、冷却材喪失事故に高圧状態で作動する受動的注入系である。受動的機器は上記のような利点を有することから、本注入系と同様の概念が、AP-600<sup>2)</sup>や SPWR<sup>3)</sup>等の受動的安全炉においても採用されている。受動的機器は一方において能動的機器と比べて駆動力が小さいため想定通り作動するかどうかを確認する必要がある。JPSR 概念における冷却材均圧注入系からの注入方式は、系統を構成する炉心補給水タンク(CMT)に冷水を蓄え、高温の一次系との間に生じる自然循環により供給する方式をとっている。本系統では、CMT 内に冷水を蓄えているため、ここで蒸気の凝縮がおこり、冷却材の供給に支障が生じるのではない

かとの懸念が持たれていた。本報で報告する一連の実験はこうした、懸念に答えるべく、本系統の熱水力的挙動を把握するために実施したものである。尚、平成9年3月現在での原研型受動的安全炉JPSRの設計においては、非常用炉心冷却は本実験結果と安全解析結果<sup>4)</sup>より蓄圧注入系及び重力注水系の2系統により行い、CMTを用いない設計とされているが、AP-600等の受動的安全炉ではCMTを用いる設計となっている。

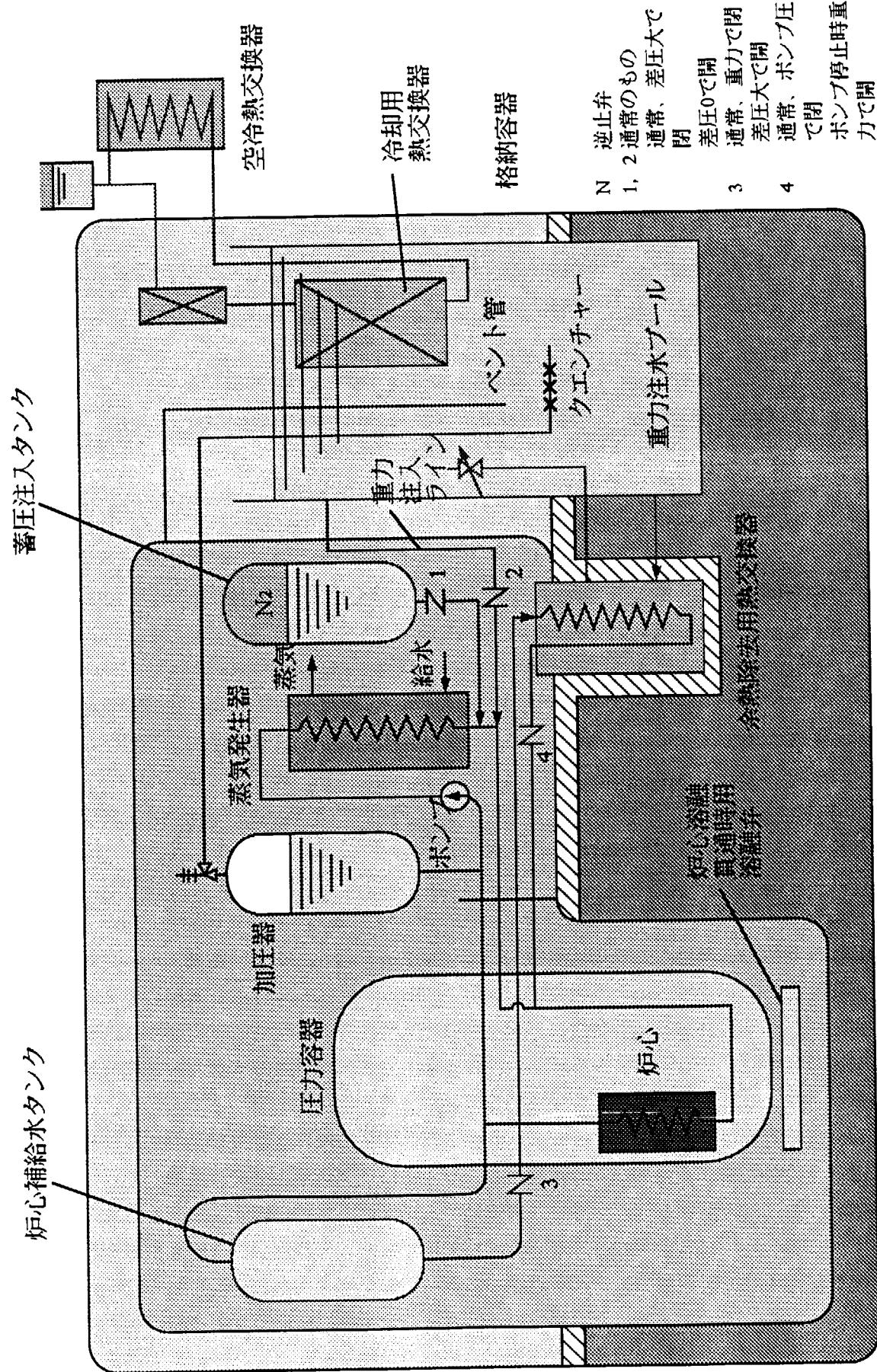


図1. 受動的安全炉 JPSR の受動的安全系の構成概念 (平成6年の設計)

## 2. CMT の作動原理と冷却材均圧注入実験装置

### 2.1 JPSR における CMT の作動原理

JPSR における CMT の設置方式は AP-600 等と異なる。即ち、AP-600 では、高温水の流入配管である均圧配管はコールドレグに接続され、一方、注入配管はタンク内の低温水の注入先がダウンカマになるように CMT からダウンカマへ接続されている。これに対して JPSR では、均圧配管、注入配管ともに上部プレナムに接続され、上部プレナムとの間に循環ループが形成され、CMT 内の低温冷却材を上部プレナムに注入する設計になっている。均圧配管は注入配管よりわずかに高い位置に接続され、冷却材喪失事故時に注入配管より早く水位低下により蒸気中へ露出するように配置されている。

また、作動開始の方式も JPSR と AP-600 で異なっている。即ち、AP-600 では作動開始の方式は非公開なので詳細は不明であるが、加圧器の水位信号と推定される情報を基に、作動弁を開放する信号を発し、この信号を基に弁を開放して CMT の作動を開始させている。これに対して JPSR では、図 2 に示すように、冷却材の喪失による上部プレナムの水位低下により均圧管が蒸気中に露出し、蒸気と均圧管内の液相が置換する。このことにより生じる CMT を含む一巡のループ内の圧力バランスの崩れにより弁を受動的に開放して作動させようという設計になっている。即ち、均圧配管が水面下に没している間は、CMT を含むループ内一巡の圧力がほぼバランスしているため、注入ラインに設置されている差圧作動受動弁にかかる差圧は小さい。しかし、水位が低下し、均圧配管が蒸気中に露出すると蒸気と均圧管内の液相の置換が起こり、一巡のループの圧力バランスがくずれ、受動弁に差圧が加わるようになる。この差圧が、ある設定値に達したとき受動弁が自然に開き、注入を開始するように設計されている。以上のように、JPSR における CMT の作動開始は全く受動的に行われることになる。また、JPSR では CMT を冷却材注入系としてのみでなく、炉停止系として使用することも想定されており、この目的のために受動弁と並列に手動操作で解放可能な能動弁も設置されている。

### 2.2 実験装置

冷却材均圧注入実験装置は JPSR の設計における CMT を含む一巡の自然循環ループの熱水力的挙動を把握するために行うための実験装置で、最高使用圧力 4 MPa の DNB 実験のための試験ループである既設の過渡沸騰試験装置に、CMT 等の追加や配管の改造を行って製作したものである。本装置は CMT、上部プレナム模擬部（既設の加圧器と気水分離器で構成）、冷却器、蒸気流量校正タンク、及びこれらの機器を結ぶ配管系及び弁等で構成されている。

本装置の外観写真を写真 1 に、フローシートを図 3 に、試験装置差圧計取付図を図 4 に示す。受動的冷却材注入系を構成する CMT は新規に製作し、本ループの最上位置に設置した。これと既設加圧器との間に均圧配管と注水配管を各々接続することにより均圧注入ループを形成した。平成 5 年度に実施した予備試験の経験等から均圧管内流動状況、上部プレナム吃水部流動状況及び CMT 内上部流動状況を把握することが重要である事が分かっていたため、これらに対応した位置に観察窓を可能な限り多く設けた。又、CMT 内水温分布を把握するために壁近傍と中心線上の高さ方向に集中的に熱電対を取付けた。本装置の平面配置図を図 5 に、立面配置図を図 6 に

示す。その他、既存の設備としては、容量 0.5MW の電源設備、純水給水装置、空気圧縮器とデータ集録装置等がある。以下に各機器の概要を述べる。

### (1) 炉心補給水タンク (CMT) (第一種圧力容器)

CMT は、上部プレナム模擬部である既設加圧器に重力で冷却材を注入するための冷水を蓄えるタンクで、上部プレナム模擬部とは均圧配管と注水配管で接続される。

本タンクは、内容積 189 l の縦型円筒状圧力容器である。タンクの構造図を図 7 に流体温度計測用熱電対群と共に示す。以下に主要仕様を示す。

最高使用圧力 : 4 MPa

最高使用温度 : 250 °C

主要寸法 : 長さ 2134 mm 内径 336 mm

内容積 : 0.189 m<sup>3</sup>

材質 : SUS 304

本タンク内には、流体温度分布を調べるために内壁近傍温度計測用熱電対群と中心線部温度計測用熱電対群を取付けた。中心線部熱伝対は保持用ホルダーを設けることにより、中心部温度の計測を可能にした。図 8 に熱電対ホルダーを温度計側点と共に示す。熱電対ホルダーは、長さ 2.2 m、直径 22 mm の中空支持棒 (SUS 製) で、温度計測位置は内壁用のものと対応できる位置とした。実験では、炉心補給水タンクの内部での水面下高温層の拡散を抑制することにより蒸気の凝縮を抑制することを目的としてタンク内を小さな縦長の領域に分割する構造物の有無による影響を調べる実験を実施する事としているので、これに対応できるように脱着式の中空アルミパイプ (長さ 1.5 m、外径 32 mm) をタンク内に挿入して使用することとした。タンク内には最大 47 本の装着が可能である。内部構造物の装着作業をタンク上方から容易に出来るよう、本タンクの構造は上蓋の取り外しが可能な 2 分割開放型とした。流体の挙動を観察するための観察窓を 2 個、タンク頂部と均圧配管接続位置の対向部に設けた。

本タンクの取付位置は可能な限り上部プレナム模擬部との高低差を得るために、建て屋天井直下までタンクを上げ、床面上約 8 m の高さの位置に設置した。計測器としては、水温計測用熱伝対を内壁近傍用とタンク中心線部用として、上下方向に各 15 cm 計 30 cm、タンク頂部に圧力センサを 1 個、差圧伝送器を用いた液位計を 1 個取り付けた。その他、本タンクには実験時に必要となる圧縮空気及び冷却水を供給するための配管や冷却水オーバーフロー配管等を取り付けた。

### (2) 上部プレナム模擬部 (2 基の第一種圧力容器で構成)

上部プレナム模擬部は、既設の気水分離器 (気相部模擬部) と加圧器 (液相部模擬部) とで模擬した。本模擬部は、加圧器に設置されたヒータの加熱により所定の圧力条件を設定し、飽和水と飽和蒸気を得ると共に、上部プレナムを模擬し、実験中炉心補給水タンクからの冷水が注水される場所になる。

気水分離器は加圧器の上部に位置し、本容器下部から加圧器までは長さ約 1.2m、呼び径 3 B の L 字型の配管で連結されている。本容器は横置円筒状容器 (胴部内径 : 0.6m、長さ (両鏡板間

距離) : 1.107m、内容積: 276l) であり、内部には気液の分離向上を目的に邪魔板が入れてある。材質はSUS304である。

本試験のために気水分離器の改造は行わなかったが、蒸気流量を校正するために気水分離器頂部から新規に設置した流量校正タンクまで2B配管により接続した。

加圧器は気水分離器の下部に位置し、試験に必要な飽和水と飽和蒸気を得るために圧力制御機構(PICとTIC-1)をもつ液体加熱器であり、横型円筒状容器(胴部内径: 0.6m、長さ(両鏡板間距離) : 1.307m、内容積332l)である。図9に構造図を示す。本容器は、炉心補給水タンクと連結するための均圧配管及び注水配管用ノズル、観察窓の取り付け用ノズル並びに計測器ノズルの追加等の改造を行った。また、装置の加熱を早めるため、本容器内に所内蒸気の供給ができるように蒸気注入ノズルを取り付けた。その際、加圧器側からの逆流防止用として逆止弁1個を設けた。容器材質はSUS304である。

加圧器に内蔵されている電気ヒータは、5.5kWヒータ(電力密度: 4.5 kW/cm<sup>2</sup>) 4本(計22 kW)の一括ON/OFF制御による圧力調節が可能であり、実験の初期条件として最大4 MPaの飽和水と飽和蒸気を作ることができる。ヒータの詳細を図10に示す。制御方法としては、液面が低下してヒータ表面が露出するのを防止するための空だき防止用インターロックや温度指示調節系(TIC-1)を設置して加圧器温度の制御を行なう。

上部プレナム模擬部内気相部の蒸気を大気へ放出し高圧状態から開放するための放圧ライン(放圧弁VC-2「開」によりサイレンサーを通して大気に放出される。)は既存のものを利用した。

### (3) 冷却器(2基の第一種圧力容器で構成)

実験での冷却材喪失事故(LOCA)の模擬は、上部プレナム模擬部から高温水を連続的に抽出する事により行うが、冷却器は、この時の高温水を100℃以下に冷却して排水するためのもので、縦置型円筒シェルアンドチューブ型熱交換器である。シェル側(1次側)に高温水が流入し、チューブ側(2次側)に冷却水が流れる構造となっており、各々安全弁が設置されている。本容器の改造は行わなかったが、上部プレナム部と冷却器間圧力を均圧にするための均圧管(SUS管: 15φ)を新規に連結した。

### (4) 蒸気流量校正タンク及び冷却管

校正系は、蒸気流量の校正を目的に設置したもので、校正タンク(約2m<sup>3</sup>、図11参照)、蒸気配管、冷却管から構成される。

以下に主な仕様を示す。

#### (校正タンク)

設計圧力: 大気圧

設計温度: 99℃

使用流体: 温水

容器寸法: 2200mmH × 3000mmW × 300mmL

溶接部材: SUS304

可視部材: ポリカーボネイト

冷却材 : S U S 3 0 4

(冷却管)

冷却管材質 : S U S 3 0 4

管内圧力 : 5. 0 k g / c m<sup>2</sup>

伝熱面積 : 5. 8 m<sup>2</sup>

冷却管寸法 : 21. 7 mm  $\phi$  × 1. 5 mm t (全長 : 92 m)

縦方向段数 : 12 段

横配列 : 6 列

ただし、脱着可能な構造とした。

(5) 連結用配管

① 均圧配管 : (配管径が 3 B の S U S 3 0 4 製管)

均圧配管は、CMT 頂部と上部プレナム模擬部（液相部、旧加圧器）を均圧するための配管である。CMT と上部プレナム模擬部は約 3.6m の垂直配管部と約 2m の曲がり配管部及び遠隔操作弁 FV-3 (3 B) にて連結されている。FV-3 は加圧器の昇温・昇圧の際に、密度差に起因して発生する配管内自然対流を避け、配管内の冷却材温度を制御するための弁である。配管内全体の水温を制御できるように加圧器との接続部付近に取り付けた。計測器類としては、蒸気流量を計測するためのオリフィス式流量計を FV-3 取付位置中心より 1.7m 高さの所に設けた。観察窓は垂直配管部の上部、下部にそれぞれ取り付けた。熱電対 3 個、圧力センサ 1 台、差圧計 6 台を図 2 及び 3 に示す位置に取り付けてある。

② 注水配管 : (配管径が 3 / 2 B の S U S 3 0 4 製管)

注水配管は、CMT に蓄えておいた冷却材を上部プレナム模擬部（液相部、旧加圧器）へ注水するための配管である。本配管は、CMT から差圧作動受動弁 D P V (1 B) 及び遠隔操作弁 FV-1 (3 / 2 B) を通して受動的に冷却材の注水を開始するラインと、これと並列して設けた遠隔操作弁 FN-2 (3 / 2 B) を通して能動的に注水を開始するラインがあり、切替えて用いる。注入流量を計測するためのオリフィスプレートを C M T ~ D P V 間に取り付けた。

D P V は、今回製作したものであり、この弁の両側にかかる圧力の差がある設定値に達したら、この差圧により弁が開放し、受動的に冷却材の注入を開始できるように市販の逆止弁を改造したものである。この弁は弁稼動部が自重で作動する方式のものから、バネの力により作動開始差圧を変更できるバネ式の構造に改造した。弁の設計作動値は 2 m H<sub>2</sub>O までである。C M T 内圧力と上部プレナム内圧力との差圧が設定差圧に達した場合に、弁座が押し上げられ冷却材が上部プレナム模擬部（既設加圧器）に流れようになっている。差圧作動弁の構造図を図 12 に示す。

計測器として、熱電対 1 個、差圧計 3 台を図 3 の位置にそれぞれ取り付けた。

(6) 抽出配管 (3 / 2 B)

抽出配管は、上部プレナム模擬部（既設加圧器）内の水を本配管を通して排出する事により、LOCA を模擬するための配管であり、加圧器排水ラインから遠隔操作弁 FCV-1(3/2B)を通して既設冷却器へ連結している。排出液は 2 台の冷却器にて 100°C 以下に冷やされて一般排出溝へ排出される。

排出流量を計測するために、オリフィス式流量計を加圧器排出ライン～FCV-1 間に取り付けた。

(7) データ収録装置

最大32チャンネルの温度、差圧、圧力、液位データを高速データ収録装置（岩通（株）製プログラマブルデータロガーYS-8503）に取り込んだ。これらのうちデータのモニタリングには最大入力チャンネル数が8チャンネルの2台のデジタル指示記録計（横川（株）製LR8100デジタル指示計）を用いた。

各観察窓にはデレビカメラを設置して流動状況を撮影記録した。

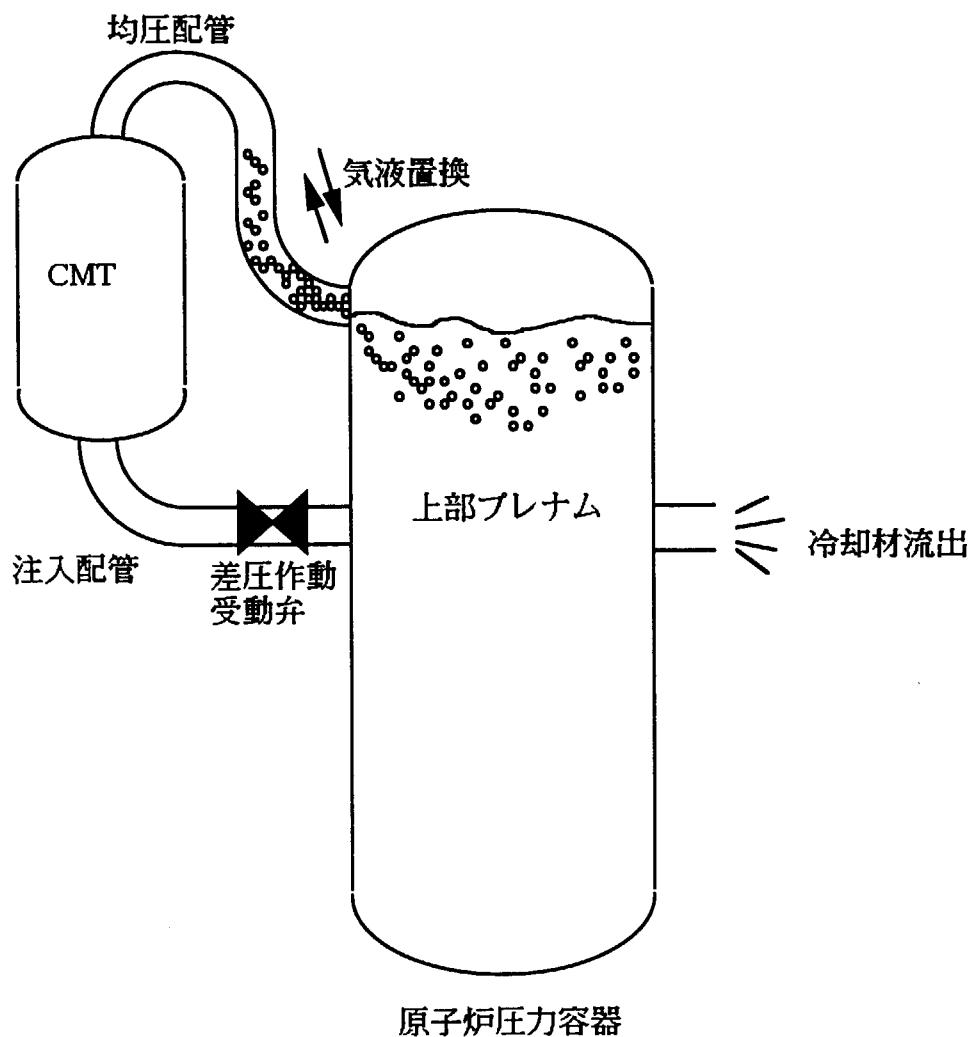


図2. 受動的安全炉 JPSR における CMT の作動原理

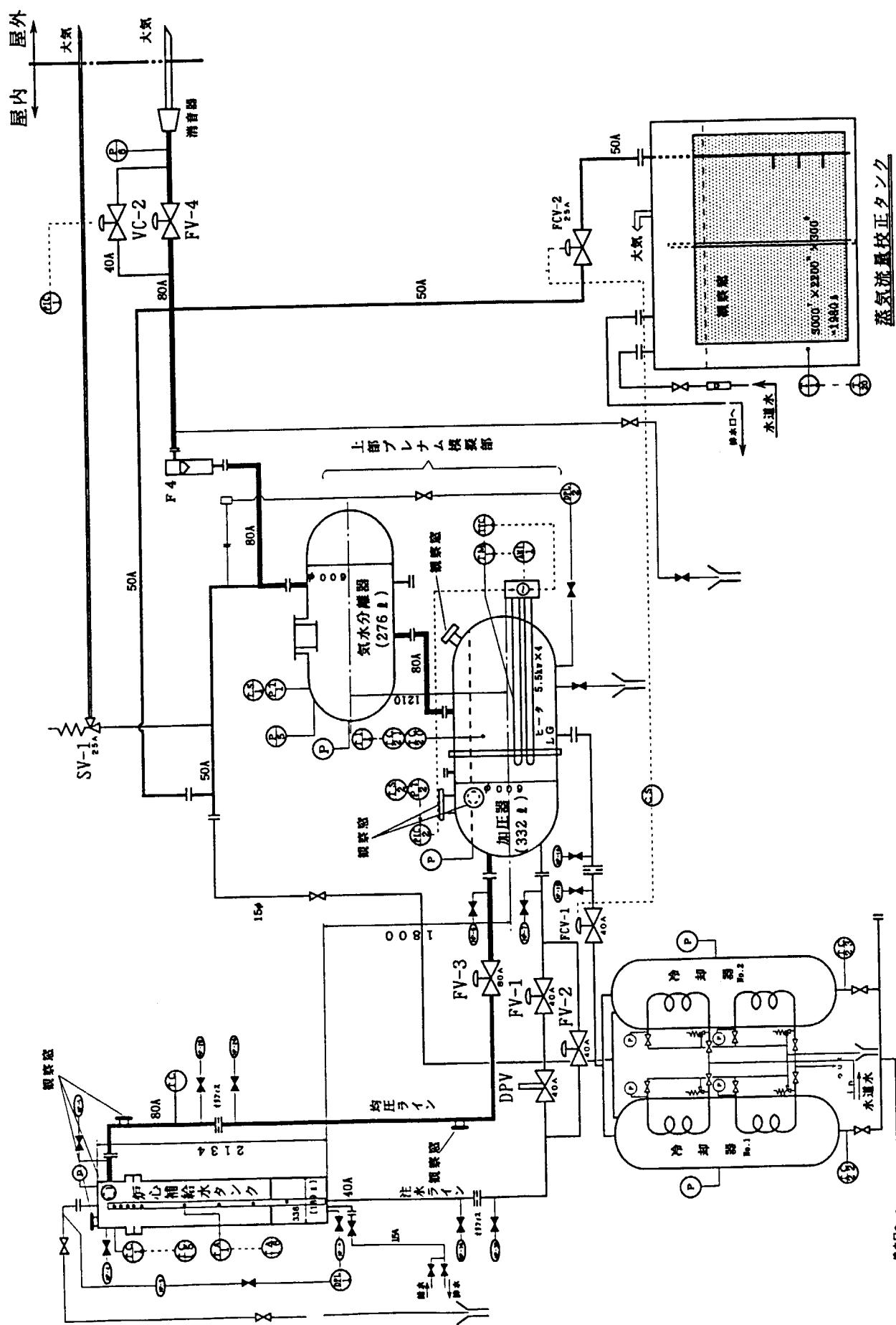


図3. 冷却材均圧注入実験装置フローシート

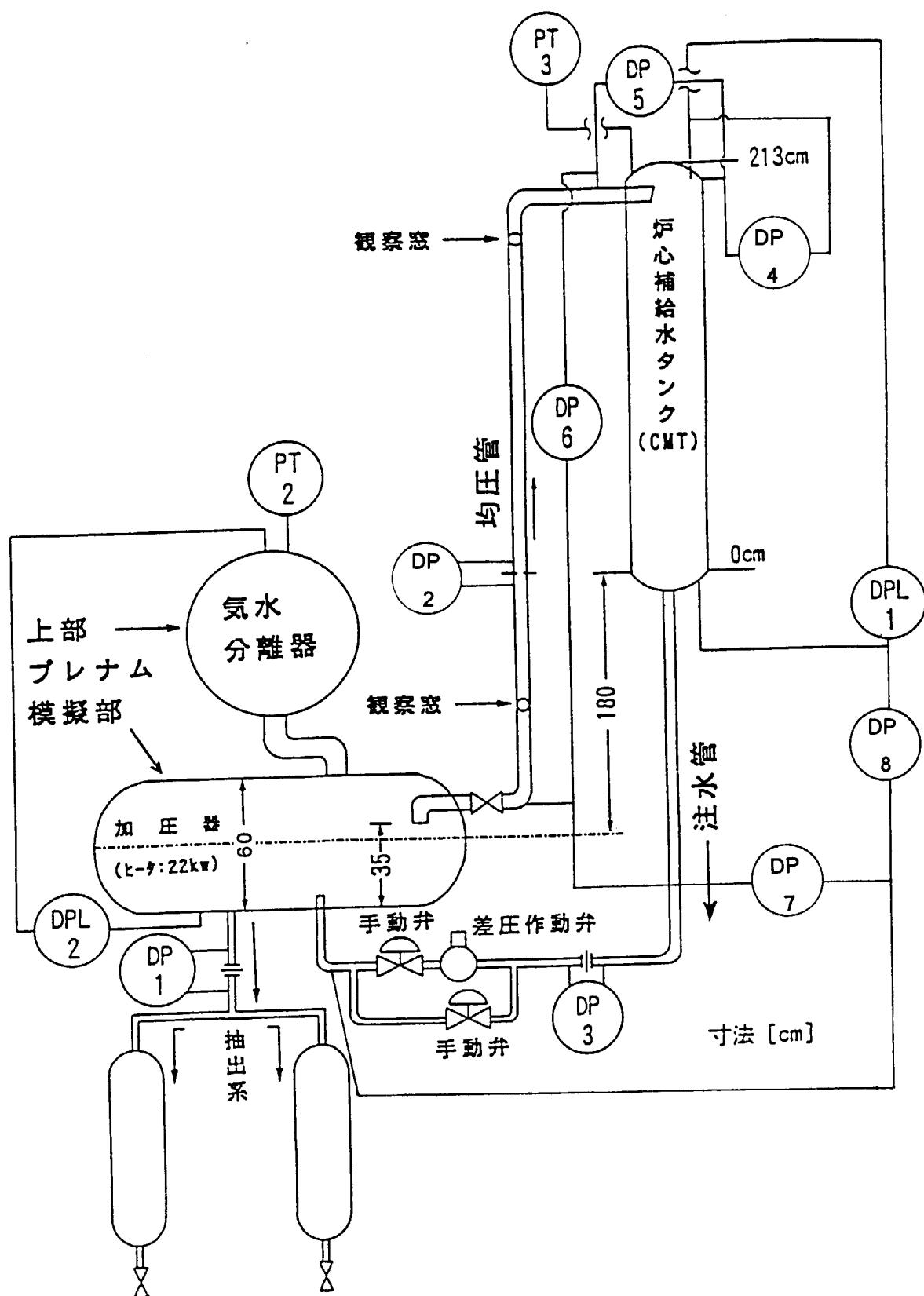


図4. 冷却材均圧注入実験装置差圧計取付図

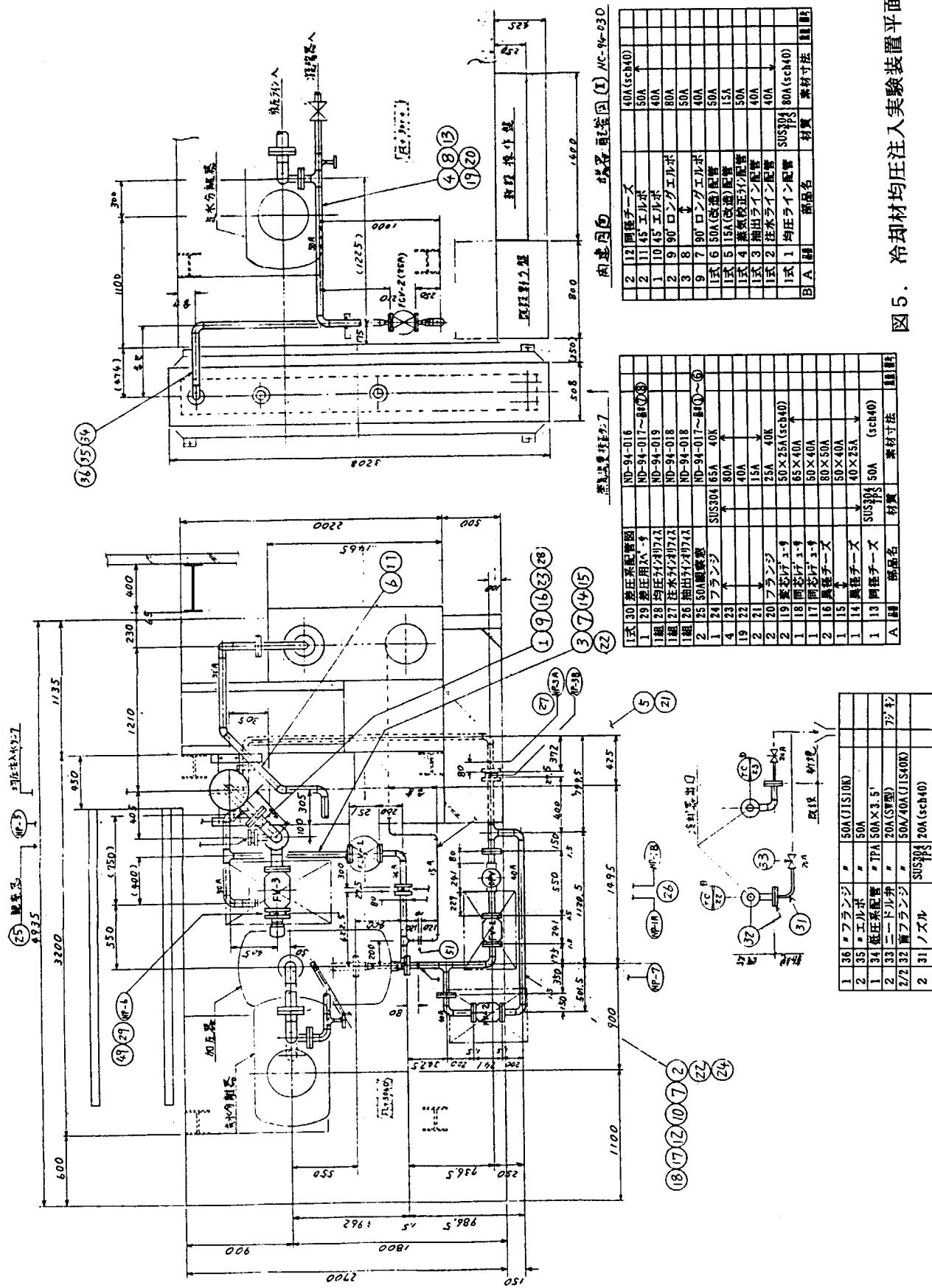


図5. 冷却材均圧注入実験装置平面図

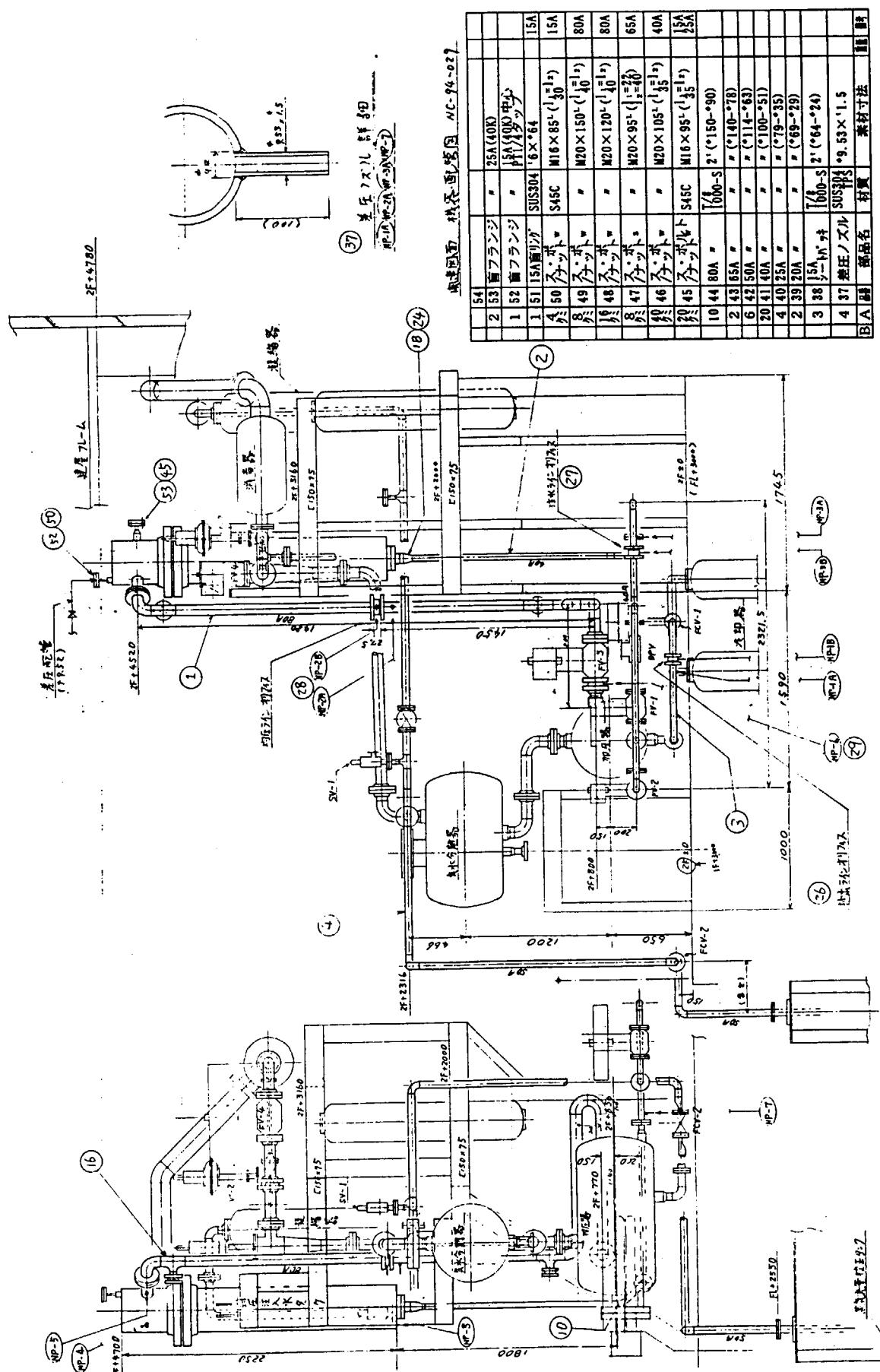


図6. 冷却材均圧注入実験装置立面図

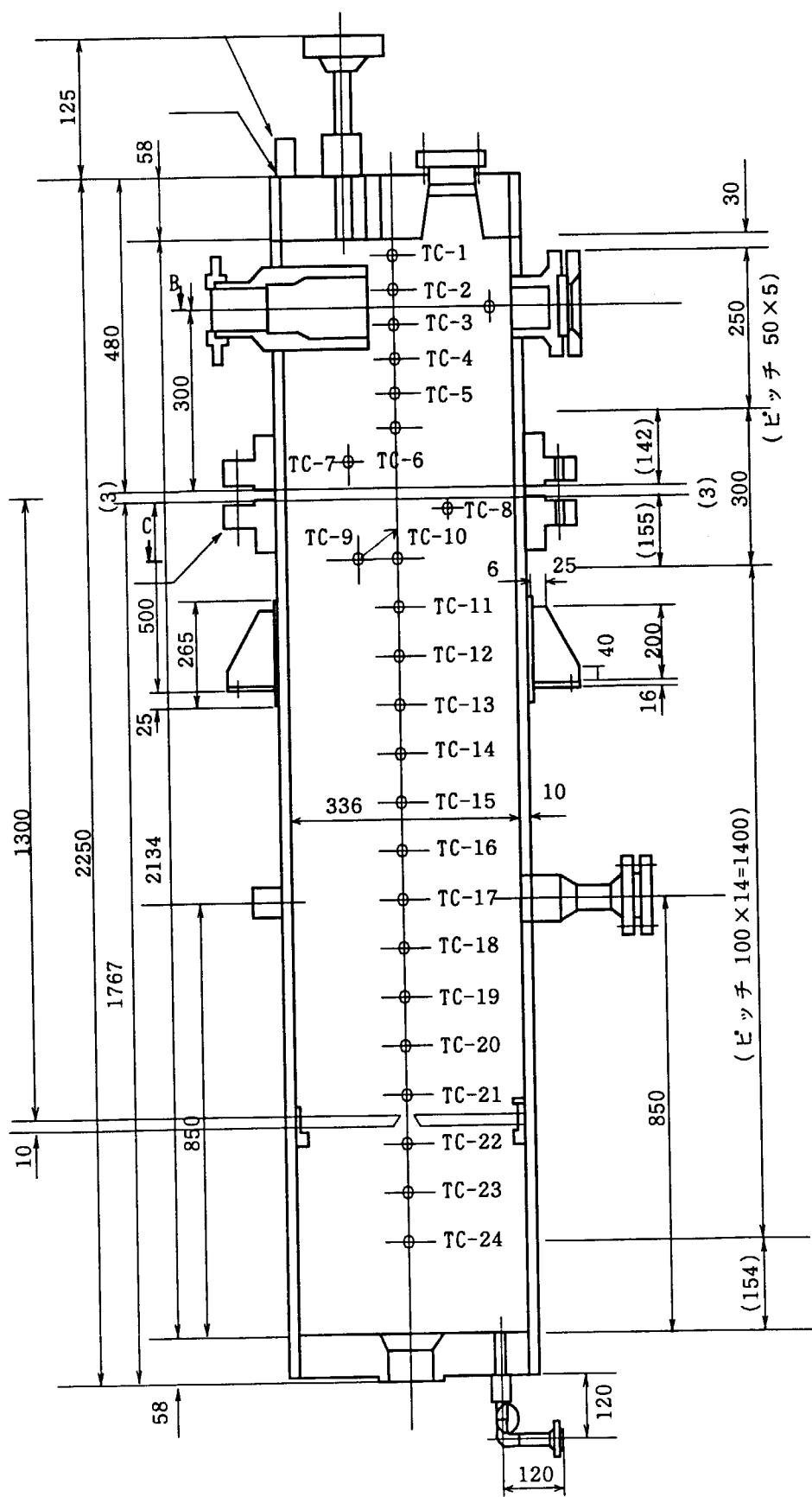


図7. 炉心補給水タンク及び内壁近傍流体温度計測用熱電対取付位置

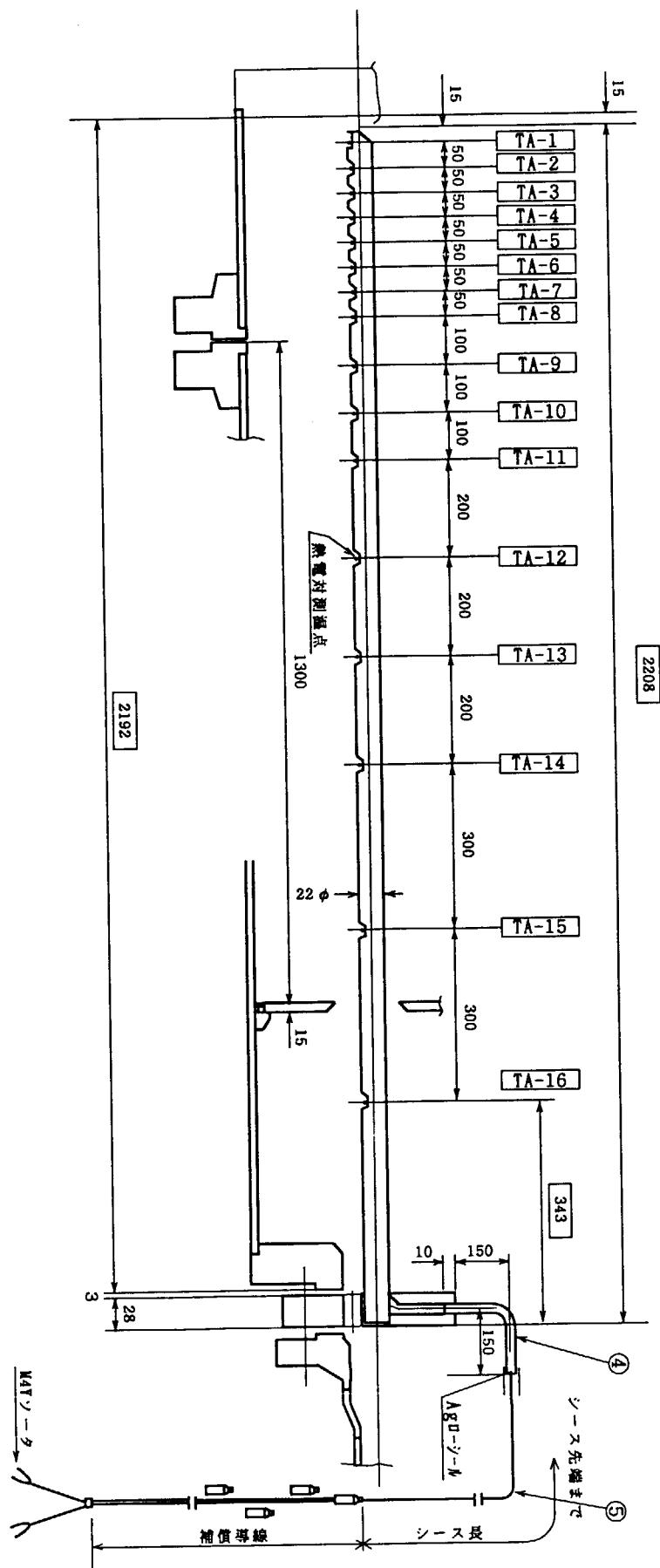


図8. 炉心補給水タンク中心部流体温度計測用熱電対ホルダー

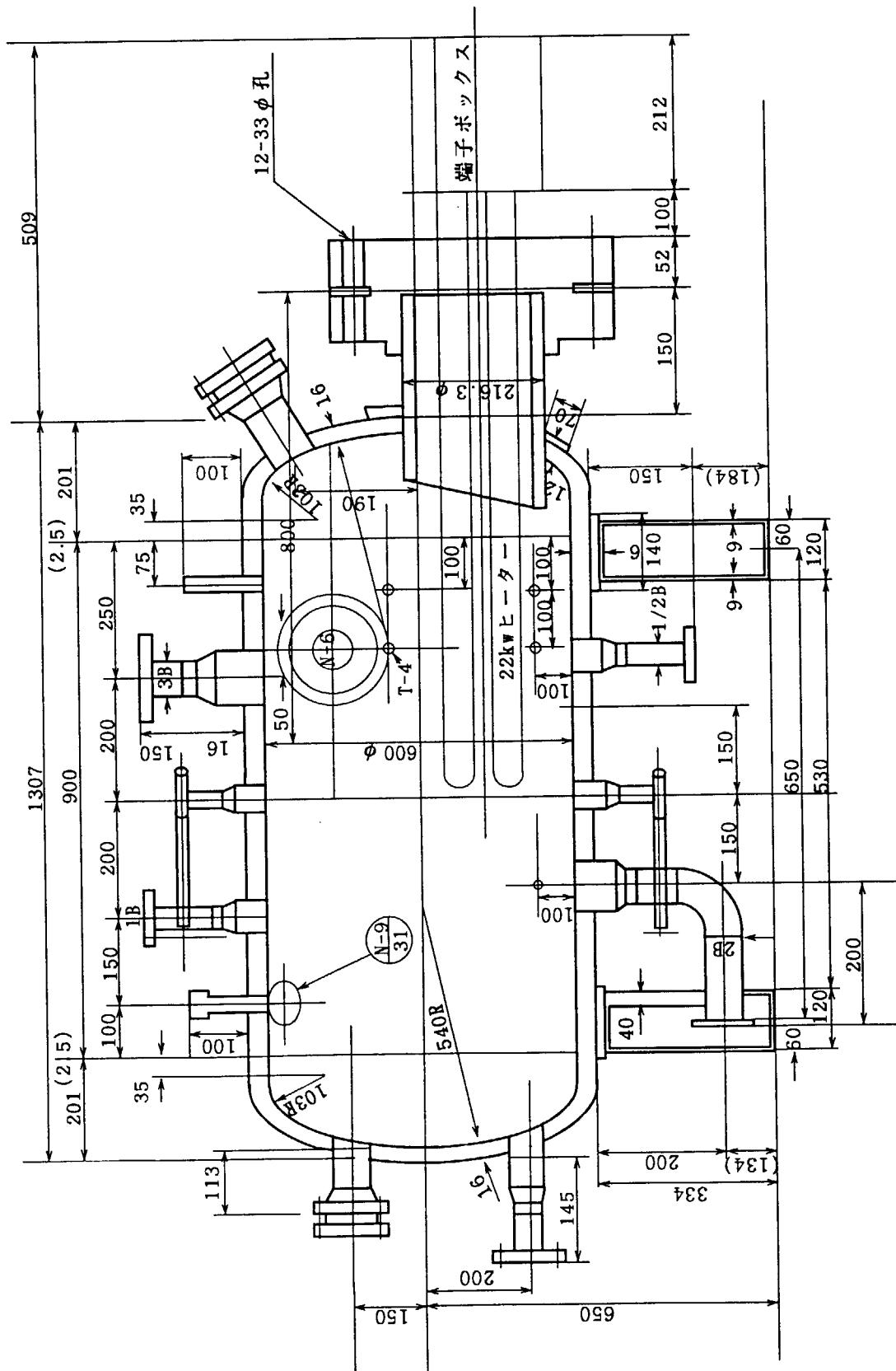


図9. 上部プレナム液相部模擬倍積造図

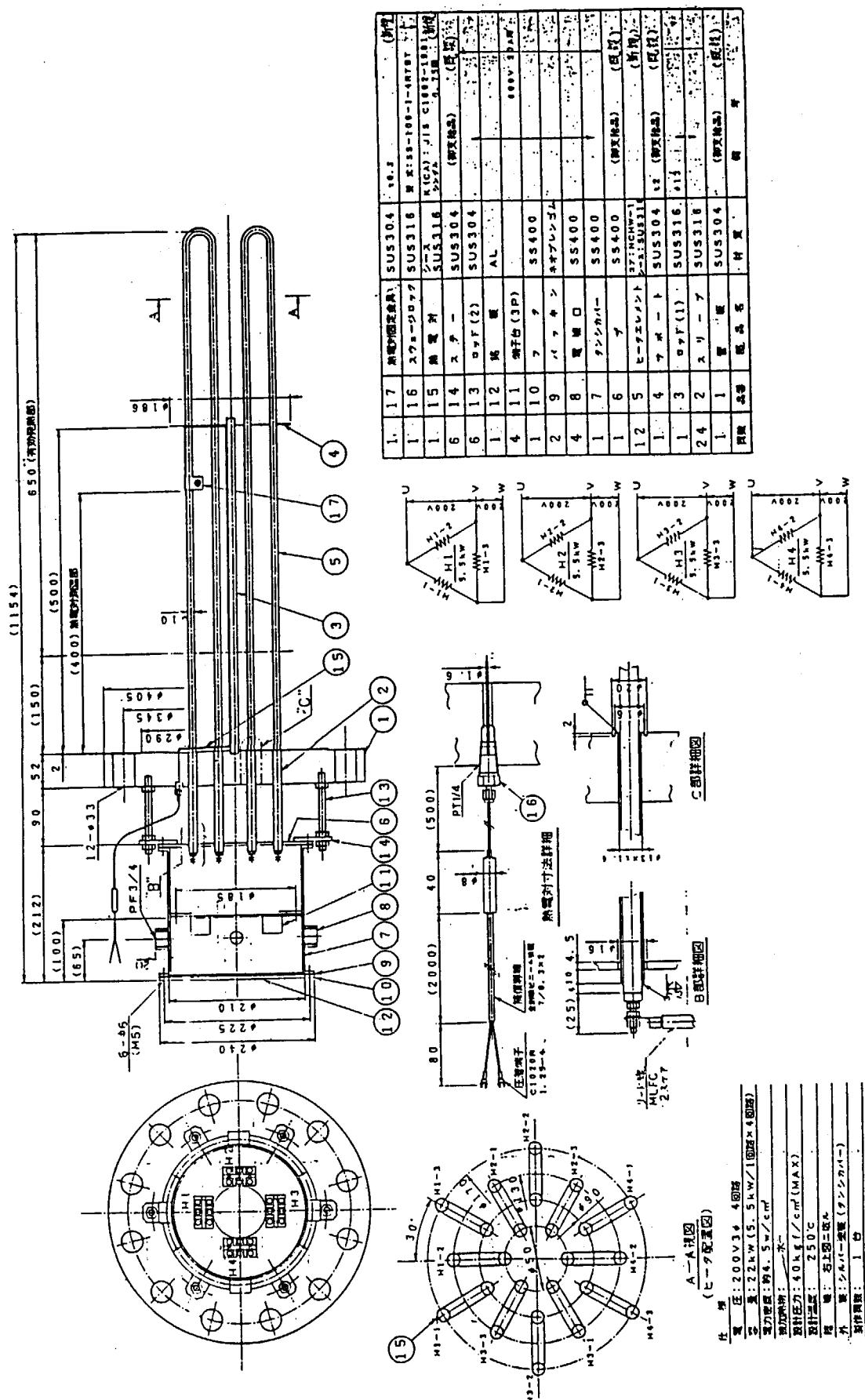


図 10 上部プレナム液相部模擬部ヒータ図

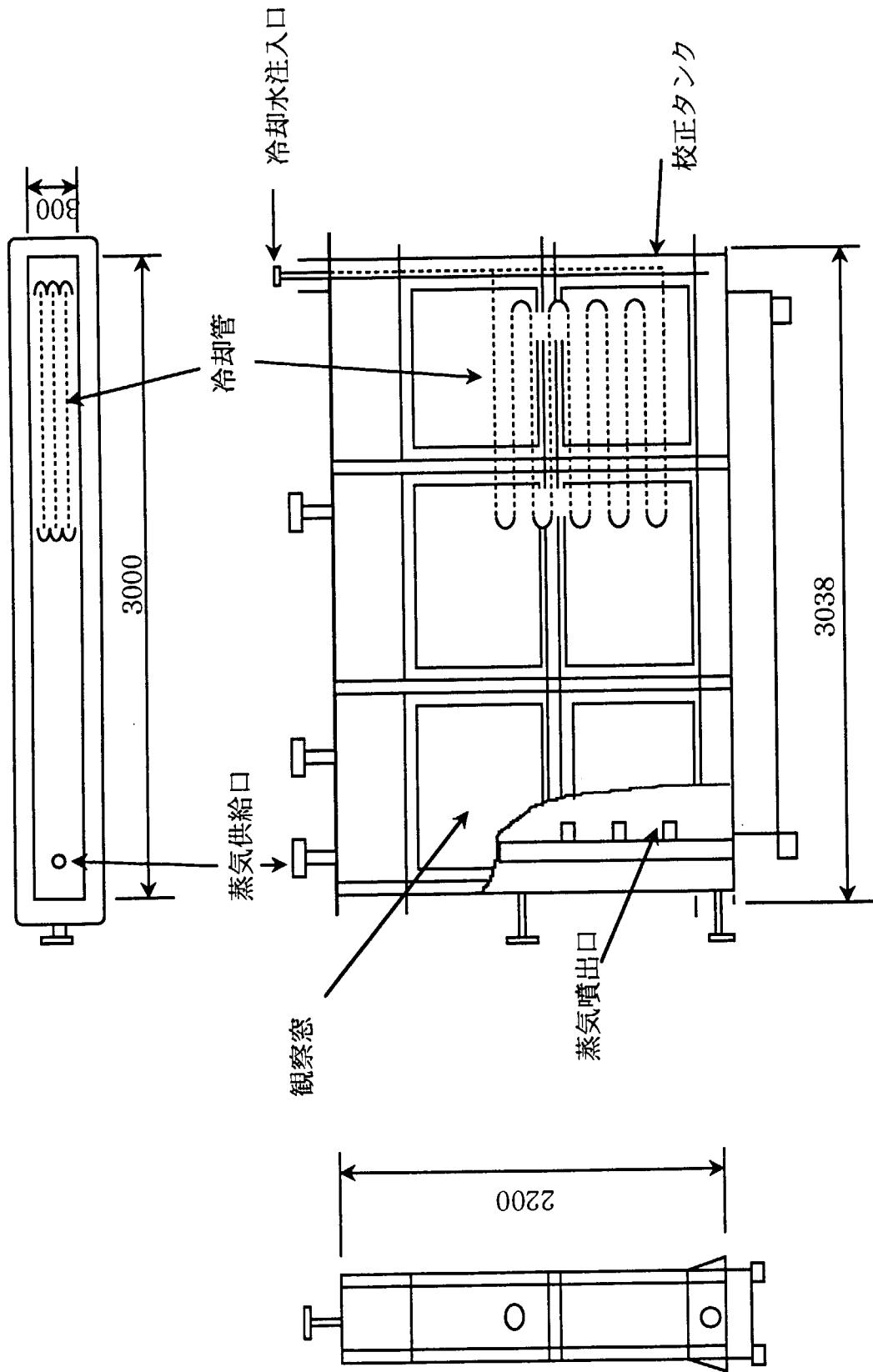


図 11. 蒸気流量校正タンク図

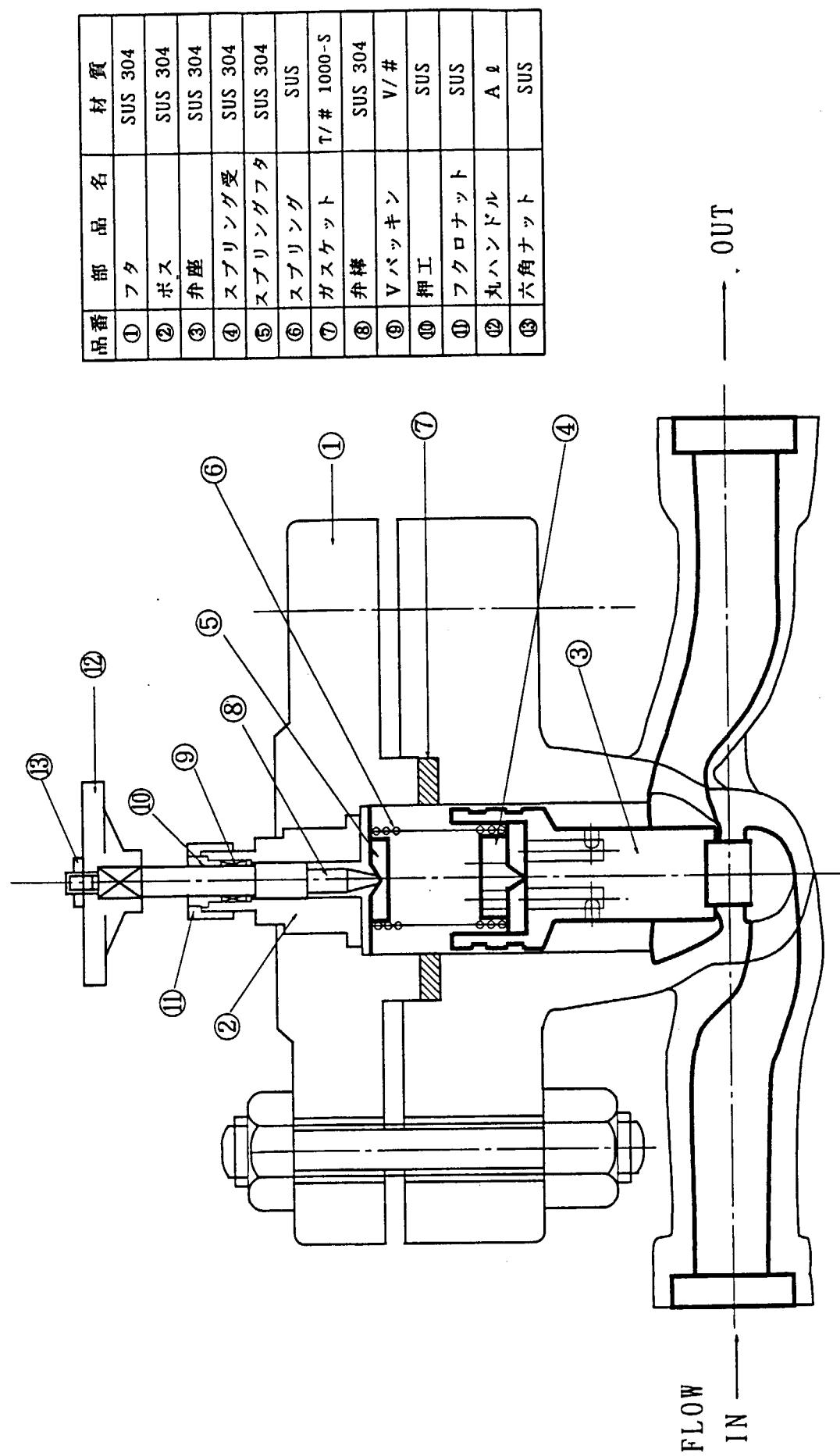


図 12. 差圧作動弁の構造図

### 3. 実験方法及び実験条件

#### 3.1 実験方法

実験方法を図3のフローシートと対比させて以下に述べる。

##### (1) 実験準備

CMT、注水管、均圧管、上部プレナム模擬部及び差圧計配管をエアー抜きしながら純水を張る。この際、上部プレナム模擬部を作る水位は、均圧管の下端より15cm位高い位置になるようにした。水張り後は注水弁(FV-1、-2)と均圧弁(FV-3)は原則として閉じておく。この時、全差圧計のコールドフィルデータをチェックする。次に、上部プレナム模擬部に内蔵している電気ヒータを指示調節計(TIC-1)を用いて水温を所定の温度まで上昇させる。この昇温昇圧時に脱気を完全に行う。これは、上部プレナム模擬部気相ブローパイプを水中に引き込み、気相を放出させ、空気の放出が無くなることを目視確認する事で行った。

##### (2) 実験手順

冷却材均圧注入実験装置では、冷却材喪失事故の模擬は上部プレナム水の抽出（又は、蒸気の大気放出）により模擬することができる。水の抽出は、抽出用配管の途中に設けてある2基の水冷式冷却器を通して連続的に行うことができる。均圧注入用の冷却水は、今回新規に製作したCMTから注入する。典型的な実験例では、均圧弁(FV-3)と手動弁(FV-1)は実験中（上部プレナム水抽出開始後）は開いているが、注水開始前には、注水管に取り付けられた差圧作動弁(DPV)及び手動バイパス注入弁(FV-2)は閉じている。また、実験開始前にFV-1とFV-3を閉じておくが、それは実験前の昇温昇圧時に上部プレナム模擬部とCMT間に自然循環流が生じて水温の逆転現象が起きることを阻止するためである。差圧作動受動弁DPVは、均圧管下端が水面上に露出するまで上部プレナム模擬部の水位が低下し、均圧管内差圧が変化して水頭が初期の50%に減少した時点で開作動となり、CMTから上部プレナム模擬部に注水できるように設定した。これは、本装置において、CMT下端がほぼ均圧管の中央に位置することから、CMT内の冷却水を全て排出しきる事のできるような差圧を設定したものである。

均圧管内のサブクール度の影響を検討するための実験では、上部プレナム水と均圧管内水との間の温度差を利用して、注水開始前に均圧弁(FV-3)を開く時間を見てサブクール度の変更を行った。内部構造物の影響を見る実験では、CMT内に内部を縦長セルに細分化するためのアルミパイプ(1.5m長さ、32mm径のもの47本)の構造物を挿入した。破断流量の影響の検討に於いては、抽出流調弁(FCV-1)の開度調節により、5%小破断冷却材喪失事故解析により得られたCMT水位低下速度を模擬する流量5l/minとその2倍の流量に設定した実験を実施した。

実際の実験では、差圧作動弁が、所定の作動特性を得ることができなかつたため、均圧管の水頭が全水頭の50%(1.8mH<sub>2</sub>O)に達すると全開となる差圧作動弁を想定して、バイパス注水弁(FV-2)を手動開として注水した。従って、多くの実験では差圧作動受動弁の注入管(DPV、FV-1)は用いなかつた。

##### (3) 実験データの計測

本実験での主要計測項目は、圧力、差圧、温度、液位等で、いづれも流体抽出開始後均圧管下端が水面上に露出する少し以前から、CMTの注入後期で変動が落ち着くまでの約1000秒間程度

を計測した。各計測データでは、直流増幅器により-10～+10V の電圧信号に変換し、更に、増幅器に内蔵されているローパスフィルターにより 10Hz または 3Hz 以下の信号出力のみが通過されデータ収録装置（岩通製プログラマブルデータロガーSY-5803）に収録される。収録可能データ数は最大 32 チャンネルである。また、データ収録間隔の標準値は 0.05sec である。

試験中のデータはハードディスクに収録し、試験終了後、原研大型計算機に転送し、そこに格納した。

デジタル指示記録計は、主として試験条件達成の確認（温度、圧力等の平衡化）や各データの現在値のモニターとして用いた。

### 3.2 実験条件

実験条件の決定に於いては、前年度実施した予備実験の経験等から、注入特性に大きな影響を及ぼす因子として均圧管内水温のサブクール度の相違、CMT 内を縦細のセルに細分する構造材（ここでは前述したパイプを用いた）の有無及び抽出流量の相違があり、これらについて対比実験を行うこととした。

また、当初実験に用いることとしていた差圧作動弁の作動特性対比実験も実施した。対比実験の実験条件のリストを表 1 に示す。

対比実験条件表

対比項目	Test No	均圧管内水温サブクール度の大小	CMT内の構造材の有無	抽出流量(l/min)	注入弁(FV-1)手動開時のDP-6水頭(m)
I 均圧管内水温サブクール度対比実験群	T-17	大(136°C)	有	5	1.73
	T-18 ( )	小(103°C)	有	5	1.73
	T-16	小(100°C)	有	5	~1.73
	T-33	大(133°C)	無	5	1.73
	T-34	小(97°C)	無	5	1.73
II CMT内構造物の有無対比実験群	T-17	大(136°C)	有	5	1.73
	T-33	大(133°C)	無	5	1.73
	T-16 ( )	小(100°C)	有	5	1.73
	T-18	小(103°C)	有	5	1.73
	T-34	小(97°C)	無	5	1.73
III 抽出流量対比実験群	T-19	大(130°C)	有	10(10%破断相当)	1.73
	T-17	大(136°C)	有	5(5%破断相当)	1.73
IV 注水管に差圧作動弁を用いた場合と能動弁(手動弁)を用いた場合の対比実験	T-31	大(145°C)	有	5	DPV 使用
	T-16	大(136°C)	有	5	1.73

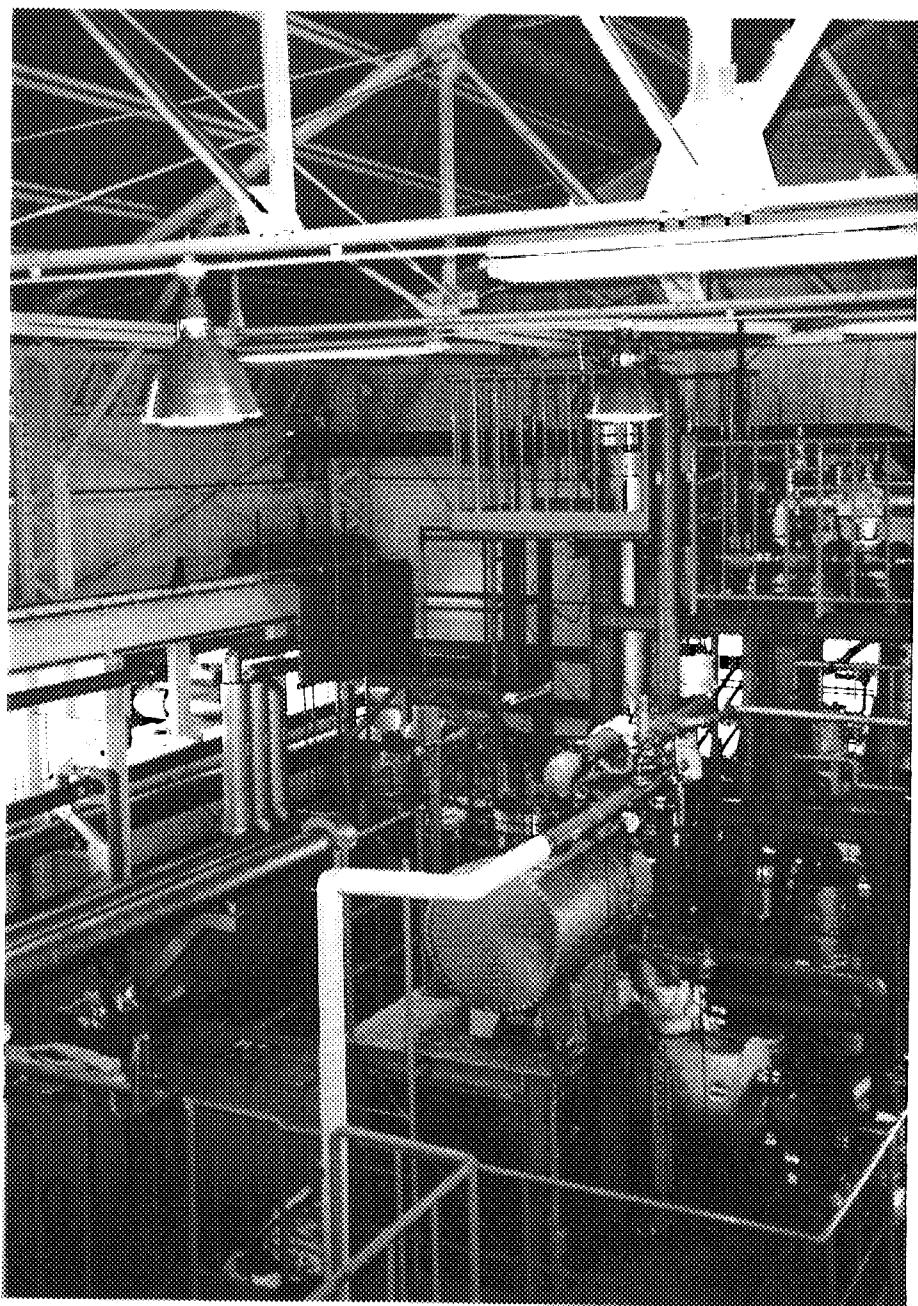


写真1. 冷却材均圧注入実験装置概観

This is a blank page.

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 実験結果

いづれの実験の場合も実験開始後に、上部プレナム模擬部内の均圧管下端が水面上に露出後CMT内冷却材が上部プレナム模擬部に流入することが観察され、その有効性が確認されたが、その注入の様子には各々差異があったので、これらをまとめて表2の実験結果対比表で述べる。

実験中に観察された流動状況の変遷は以下の通りで、その状況の模式図を図13に示す。

I. 実験開始時： 均圧弁FV-3は開で、バイパス注水弁FV-2及び差圧作動弁DPVは閉じており、両管内とCMT内には冷水が閉じこめられている。下側に位置する2個の冷却器はその中に冷却用コイルを持つ円筒容器であることを利用して予め冷水を満たしておいて、その冷水を下部から大気中ピットに放出することにより、放出した体積と同一容積分の熱水を上部プレナム模擬部から抽出する事にした。

II. 注水開始直前： 均圧管内にサブクール度が存在する場合には、均圧管下端が蒸気中に露出後、均圧管内の差圧計測値が大きく振動しはじめる。また、目視観察によると、均圧管下端部では、均圧管内液相の落下と蒸気と液相の均圧管内への吸い込みが交互に起こり気液の置換が行われているのが観察される。この時点では、均圧管下部は高温の二相状態になっているものの、均圧管頂部へは気相は到達できない。上部プレナム模擬部では、気液対向流により均圧管から冷却水が落下し、本実験の基本抽出流量範囲では実験中の水位は均圧管下端にほぼ等しいか、わずかに低下するのみに留まった。これに対し、均圧管内が飽和状態の場合には、均圧管下端の露出後すぐに蒸気は均圧管頂部へ到達し、大きな差圧計の振動も観測されない。

III. 注入開始直後： 注水弁開放直後、上部プレナム模擬部では、均圧管内で激しい上昇流が形成されるため、均圧管下端から気液上昇二相流が形成され、上部プレナム模擬部の液相を吸い上げる。均圧管内は蒸気と熱水との二相上昇流となり、CMT上部に流れ込む。CMT内上部では流入蒸気と熱水のために高温液相がサブクール水上に形成される。この高温液相のため、蒸気凝縮により注水を阻止するほどまでには至らなかった。CMT内では下部から上部プレナム模擬部への冷水の急激な注入に伴い、押し込み駆動力が急激に減少するため、急激な注入以後この注入流量は急速に減少し低流量の注入に至る。

IV. 注入後期： 均圧管内の下半分は熱水、上半分は蒸気単相流となり、CMT水位とほぼつりあった位置に停滞し、CMTから上部プレナム模擬部への注水もほぼ停止する。CMT内部の様子は上部は蒸気、中間は熱水層、下部は冷水層を形成し、この状態は熱水層の厚みをわずかながら増加させながら実験が終了するまで続く。

上部プレナム模擬部はCMTから冷水が注入されるものの冷水の一部は抽出水に分れて放出されるため、保有水の急激な温度低下が避けられ、実験条件が比較的長時間持続できた。実験中、均圧管内での蒸気凝縮により軽い配管の振動が発生した。

写真2は実験中の上部プレナム模擬部内均圧管下端が水面上に露出する瞬間の観察例である。均圧管下端では均圧管内水の流出及び上部プレナム模擬部熱水の吸い込みが交互に生じる様子が観察された。写真3はCMT内液面が降下する様子である。液面の低下の際、多くの場合液面は静かに低下したが、揺れながら低下する場合も観察された。写真に写っている中心の棒は、温度

計測用熱電対ホルダーである。

表2の実験結果対比表は均圧管内の凝縮による注入遅れ時間とCMT内の熱水層厚さについてまとめたものである。

図14～21に各ケースの液位、差圧データを示す。また、付録Bには計測した生のデータを示した。

以下に、計測したデータ間の整合性について検討する。検討対象とするのは、本実験で最も重要なパラメータのひとつである上部プレナム模擬部及びCMTの水位と冷却器を通じて抽出される抽出流量の間の関係について検討する事にする。扱う実験ケースは図14及び図B-1に示すT-16とする。このケースの抽出流量は5l/minである。

まづ、上部プレナム模擬部水位DPL-2と抽出流量の関係について、時刻ゼロと200秒の間での水位低下とこの間の抽出流量について検討する。両時刻での水位の計測値は37.4cm及び35.6cmである。この間の体積変化は13.0 lと上部プレナム模擬部の形状データから評価されるが、上部プレナム模擬部は1.4 MPaの飽和状態にある事を考慮して補正すると実際には15.0 lの体積変化である事が分かる。抽出流量は5 l/minであるので、これを基に、抽出時間を求めると、180.0秒となり、実際の評価時間より約10%短い時間に評価される。このことから、抽出流量と上部プレナム水位との間には10%程度の誤差範囲で一致している事が分かる。

次に、CMTから注入される冷却水による上部プレナム模擬部の水位上昇とCMT水位変化の関係について検討する。CMTから注入開始する740秒と実験の終了した980秒時点での水位変化量の関係について検討する。上部プレナム模擬部とCMTの水位はそれぞれ34.04から38.33cm, 242.6から150.0cmへ変化している。CMTに関しては、CMT頂部から18.3cm上方へ導圧管が突き出た配置になっている事を考慮して流出容積を求めると65.8lとなる。一方、上部プレナム模擬部の体積変化は36.8 l、240秒間の抽出流量は20.0 lであるので、合計56.8 lの体積変動があったことになる。従って、水位変化から求められる両者の体積変化の差は約14%程度の誤差範囲で一致している事が分かる。

以上の検討から、計測したデータはそれぞれ10数パーセントの範囲内で一致したデータを提供しており、解析的検討に有用なデータである事が分る。

## 4.2 考察

前節で記述したように、実験は均圧管内サブクール度及びCMT内構造材、抽出流量及び受動弁の影響について検討する事を目的に実施した。以下にそれについての考察を加える。

### (1) 均圧管内サブクール度の影響

実験開始前は、均圧管内サブクール度より、むしろCMT内サブクール度の影響が大きいと考えられていたが、実際に実験を実施してみると蒸気がCMT内に到達するよりも以前に均圧管内で蒸気の凝縮が発生し、CMTの作動条件に到達するまでの間に問題のある事に気が付き主要な実験項目にする事になった。本実験では、均圧管内の温度を制御する機能が無いため、均圧管内のサブクール度は均圧管の上部プレナム模擬部（加圧器）に接続する場所に設置された弁FV-3を開放し、上部プレナム模擬部から対流により流入する高温水により昇温する事にした。

図22に均圧管内サブクール度の異なる実験(高サブクール度ケースT-33及び低サブクール度ケ

ース T-34)の対比結果が示されている。この図から、均圧管内サブクール度が大きいほど、注入を開始する条件に到達するまでの時間が長くなることが分かる。これは、均圧管内で蒸気が凝縮される事による影響であるが、どのようなメカニズムによるものか検討を要する。即ち、均圧管内のサブクール水が蒸気と置換するためには、均圧管が蒸気中に露出する前から存在した水と均圧管内に進入した蒸気が凝縮してできた水が蒸気と置換する必要がある。因みに、図 22 に示されている高サブクール度ケース T-33 と低サブクール度ケース T-34 の差を検討してみると、両者のサブクール度の差に起因する凝縮水の量の差は、受動弁の作動基準までの水頭差に相当する配管部分に対しては約 1.83kg(=1.87 l)となる。これは、冷却材の抽出流量 5l/min で排出と想定すると、排出に 22.5sec 要することになり、実験での時間の差 65sec と大きく異なる。このような大きな遅れは、均圧管下端から均圧管へ流入する蒸気により生じる液相の落下の抑制効果が大きな要因であると推定される。また、上部プレナム模擬部の水位が均圧管下端の露出後も低下を続けることからも裏付けられる。観察窓からの目視観察によると、液相の落下と蒸気の流入による落下の停止あるいは吸い込みが交互に生じていることが観察されており、このことからも裏付けられる。以上のように、均圧管の露出から CMT 作動までの遅れの評価には、蒸気の凝縮率、蒸気と液相の対向流の評価を同時に行う必要のある事が分かる。

### (2) 構造材装填による CMT 内小領域分割の影響

図 23 に CMT からの注水の妨げとなる CMT 内の蒸気凝縮の緩和を目的に挿入された円筒状の構造材の影響を検討するための比較実験(構造材有りのケース T-17 及び構造材無しのケース T-33)での水面下の温度分布の比較図を示す。この構造材は CMT 内を小さな部屋に分割し、CMT からの注入時の水面下の高温層と低温層の混合を極力抑える事により、水面での蒸気凝縮を抑えることを目的としている。図 23 は、CMT の作動開始から同一時間(100se)経過後の水面下の温度分布を表示したものである。実験は構造材の有無以外の条件を揃えて実施したが、構造材による水排除体積の差により同一時刻での水面位置は異なっている。この図に示すように、構造材を挿入したケースの方の高温層の厚さは明らかに 1/2 程度に薄くなっている。この事は、当初想定した構造材の温度拡散抑制効果が大きく、水面での蒸気凝縮抑制に大きな効果のあることを示している。

### (3) 抽出流量の影響

抽出量は JPSR における LOCA 時の破断面積の大きさの実験への反映である。本実験では、JPSR の解析で得られた CMT 水位の低下速度を模擬するように抽出量を設定した。解析で得られたコールドレグ配管 1 本の断面積の 5 % に相当する面積の破断口からの冷却材喪失事故 (LOCA) 時の CMT 水位低下速度から、本実験装置では 5 l/min を抽出する事により水位低下速度を模擬できるため、これを基本の抽出量として設定した。これに対し、対比実験では基本抽出量の 2 倍の 10 l/min を抽出することにした。

対比実験の結果は図 24 に示されている。ここに示されるように、均圧ラインが水面上に露出後、注入までに要する時間は、抽出量 5 l/min の T-17 ケースの 375sec に対し、2 倍の抽出量の 10 l/min の T-19 ケースで 207 sec と、抽出量に対し反比例の関係にはなっていない。これは、目視観察によると、T-17 ケースでは、抽出量が少ないため、上部プレナム模擬部の水面の低下が緩やかで、均圧管下端と水面位置との差が小さく、冷却材の流入流出の繰り返しが長時間継続するの

に対し、T-19 ケースでは抽出量が多いため、水面が低下し、早くから均圧管下端が水面上に完全に露出し、完全に均圧管からの冷却材の流出が抑えられる時間帯があるという流動状況の差に起因していると考えられる。即ち、T-19 ケースでは気液対向流制限 CCFL がより強く現れたため、CMT の作動開始時刻の評価に抽出流量のみでは評価できなかったものと考えられる。

#### (4) 受動弁の影響

JPSR では、CMT の受動作動のために CMT を含む一巡のループの差圧変動を利用して、受動的に作動を開始させるような設計を採用している。即ち、弁にかかる差圧がある設定値に到達した際、この差圧で開放するような弁を設置する設計になっている。本実験では、既存の逆止弁を改良して、この作動差圧を自由に設定できる弁を試作し、その特性を調べることにした。弁の形状は図 12 に示されている。ここに示すように、弁上部のハンドルを回転する事により、弁座を抑えているバネの力を変化させて作動差圧を変更しようとするものである。今回の実験では、試作した差圧作動受動弁 DPV にかかる差圧が均圧管内のボイド率が 50% になったら作動する事を想定して、差圧が  $1.8\text{mH}_2\text{O}$  に到達したら開放するように設定して実験を実施した。ただし、今回実施した実験の多くは、受動弁の作動特性が十分でなかったことから受動弁を使わず、均圧管の差圧変動が  $1.8\text{mH}_2\text{O}$  に到達した時点でバイパス弁を手動で開放して注入することにした。

実験結果を図 25 に示す。ここで注入流量を示すオリフィスの差圧 DP-3 は均圧ラインの差圧 DP-6 が作動設定圧に達する約 380sec 以前の約 300sec に注入を開始している事を示している。注入開始後、流量は急激に増加し差圧が減少に転じた時点から急激な減少に転じ、流れが停止している。これは、注入により CMT 内水位が低下すると共に均圧管下端が水没し液相を均圧管内に吸い込むことにより差圧が減少し、開放設定差圧以下になったためである。その後、再度均圧管内の差圧が減少し、差圧作動弁にかかる差圧が増加すると再び注入を開始し、繰り返すといった挙動を繰り返した。

以上のように、本実験結果は、差圧作動の受動弁を用いる現在の設計では、破断の大きさに依存して断続的に注入が行われ、有効に冷却材の補給を繰り返す事が分かる。しかし、本実験では、試作した差圧作動受動注入弁は作動特性が想定通りではなかった。即ち、設定差圧と異なる差圧で作動してしまった。この点は、今後弁座を抑える力の変更方式を現在のばね式から閉止力を直接計測できる空気圧力等を用いる他の方式へ変更する事により改善可能と考えられる。しかし、実験データ収録停止後、注入の最終段階に到達するあたりで、弁からビビリ音が発生した。これは、差圧が作動設定圧近傍で停滯すると弁の開閉を繰り返すようになるためと考えられる。このような状況が継続すれば弁を損耗する事になるため好ましくなく、改善が必要な点である。また、他の実験ケースでは弁が閉まらず注入が継続したり、実験準備中に弁の閉止が不十分なために CMT 内の冷却材が失われてしまう等の問題も起こった。更に、本実験を図 25 に示した時刻以後、実験を継続すれば、注入設定差圧に対応する水位まで CMT の水位が減少するまでこのような断続的な注入を繰り返し、到達以後は注入を停止することになると考えられる。従って、作動差圧があまりにも大きい場合には、注入されずに CMT 内に残る水量が多く冷却材の補給という観点からは不利な要因になる。ビビリ音と冷却材の CMT 内への残存に関しては、ラッチ機構等による再閉止防止機構の設置により受動弁を改善できると考えられる。

以上の弁座閉止方式と再閉止防止機構を同時に実現する方式として、弁座をピストンを用いて

空気圧で押さえつける機構を提案できる。この概念を図 26 に示す。ここに示した方式により、押さえつける力は空気圧として計測でき、しかも、ピストンが差圧の上昇により上方に移動すると圧空が下のピストンの下面に作用し弁の閉止を防ぐことが可能になる。

This is a blank page.

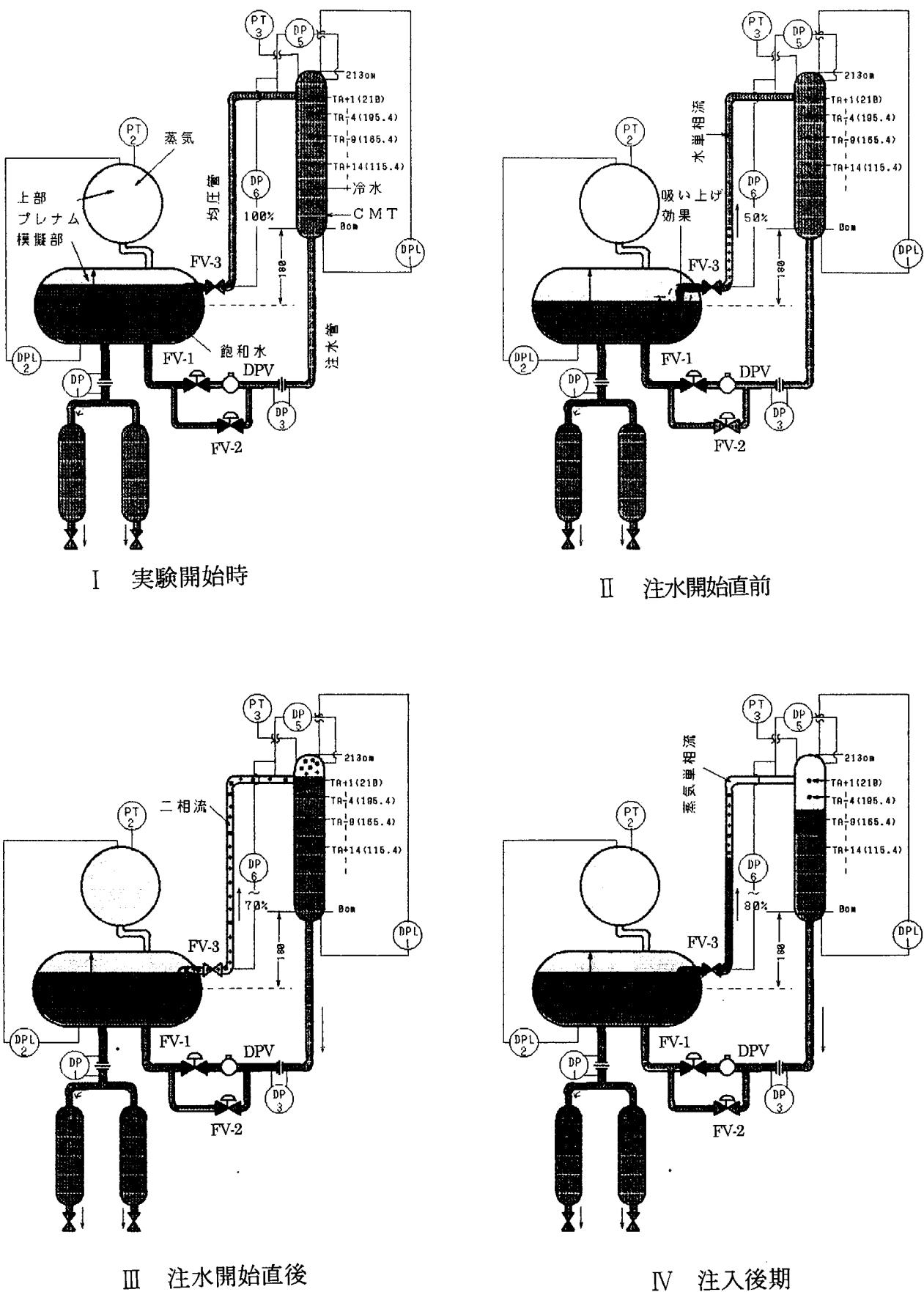


図 13. 流動状況推移概念図

This is a blank page.

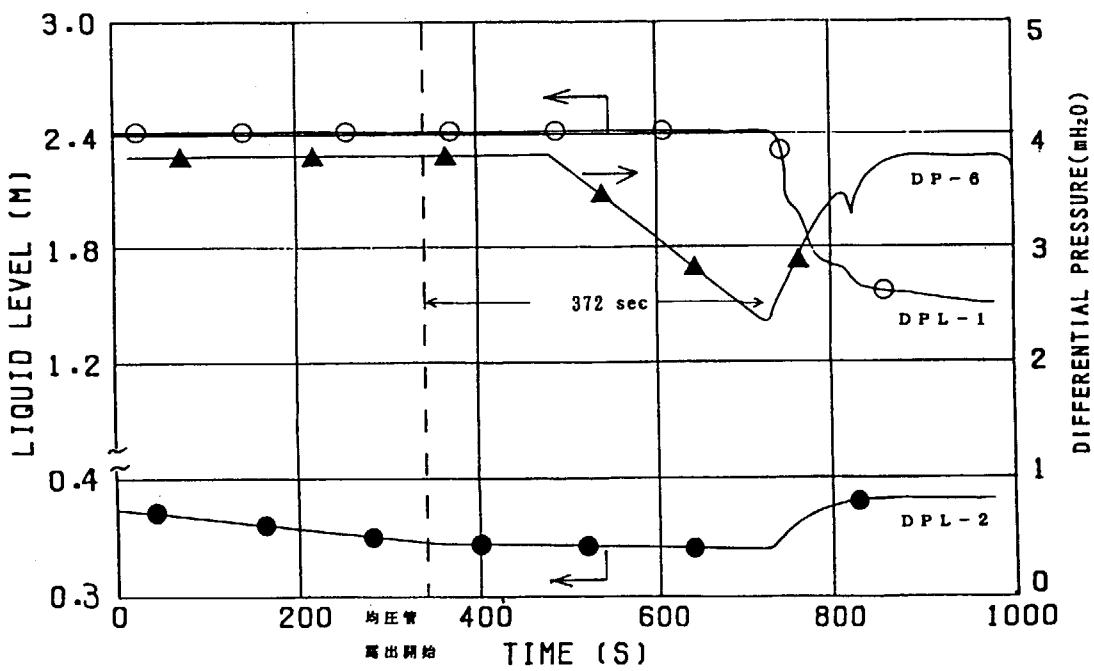


図 14. 各部水位変化 (ケース T-16)

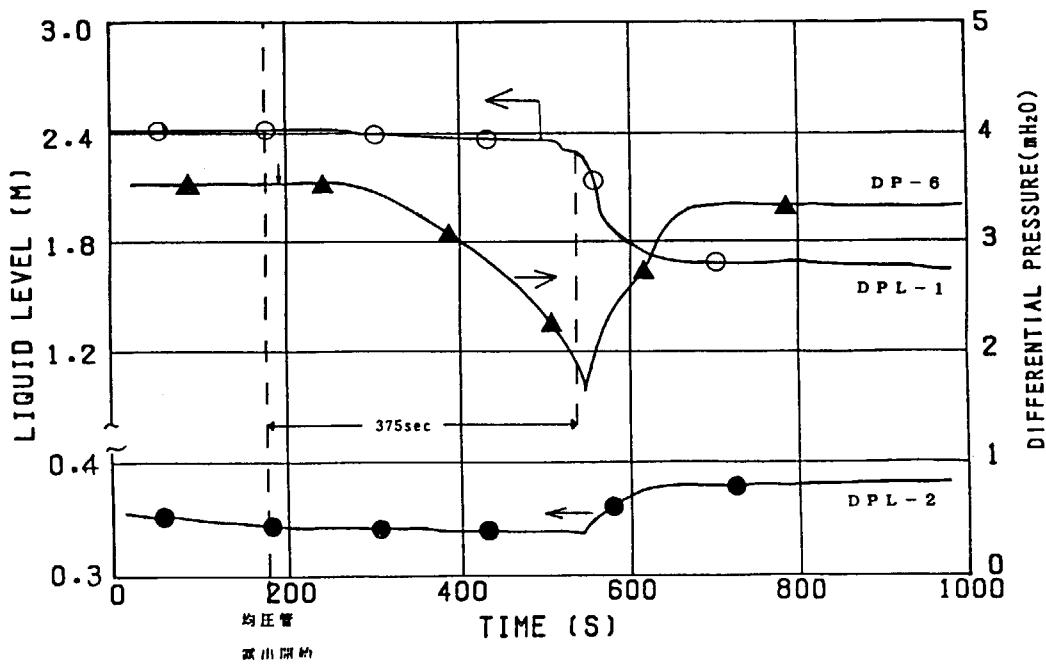


図 15. 各部水位変化 (ケース T-17)

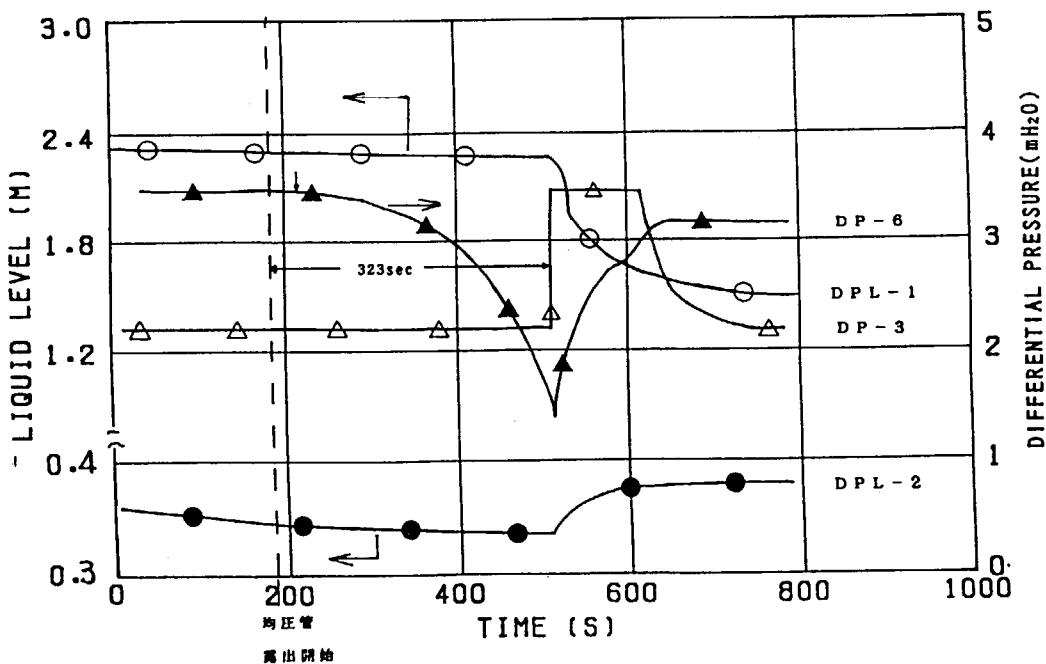


図 16. 各部水位及び注入流量（ケース T-18）

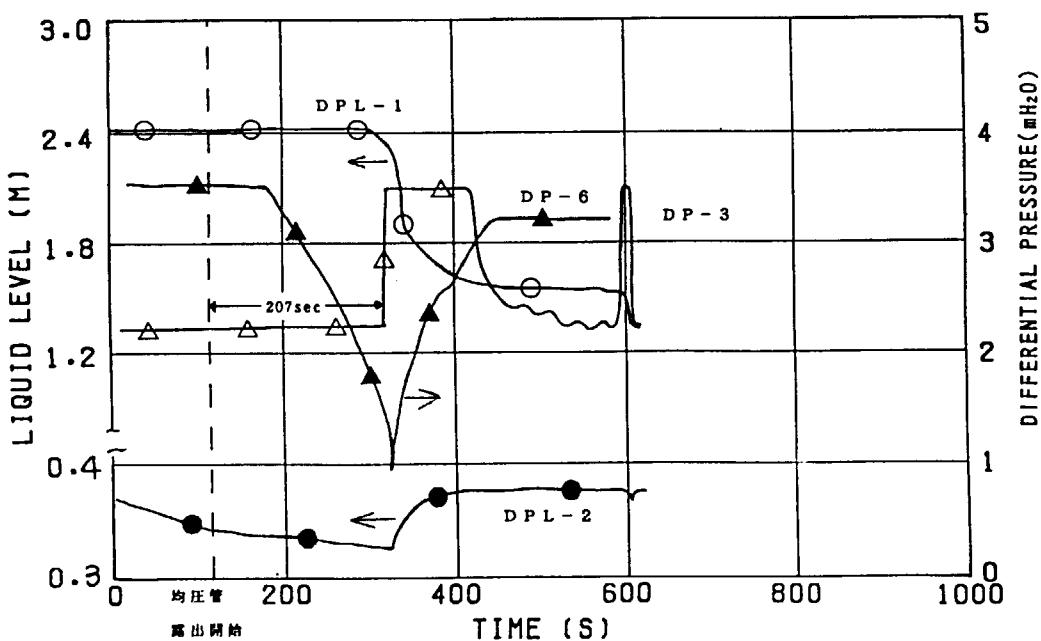


図 17. 各部水位及び注入流量（ケース T-19）

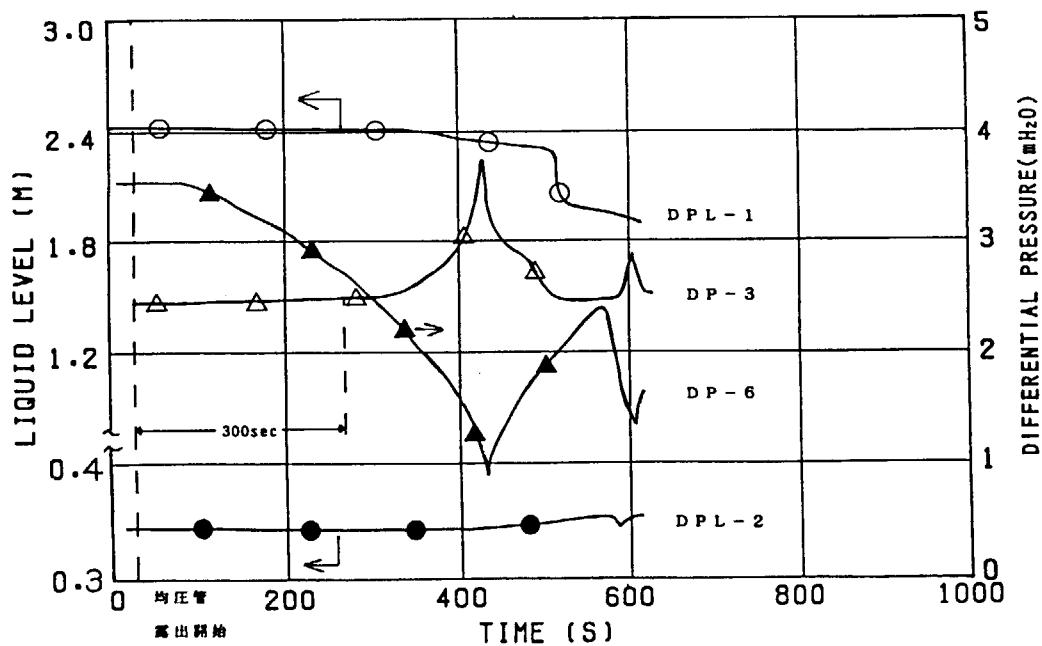


図 18. 各部水位及び注入流量（ケース T-31）

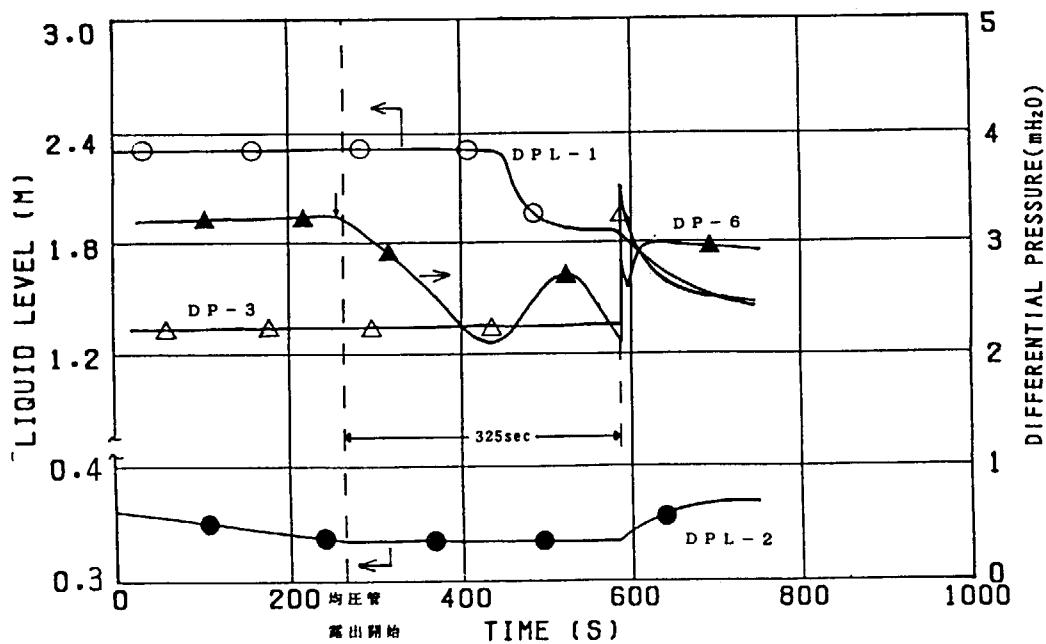


図 19. 各部水位及び注入流量（ケース T-32）

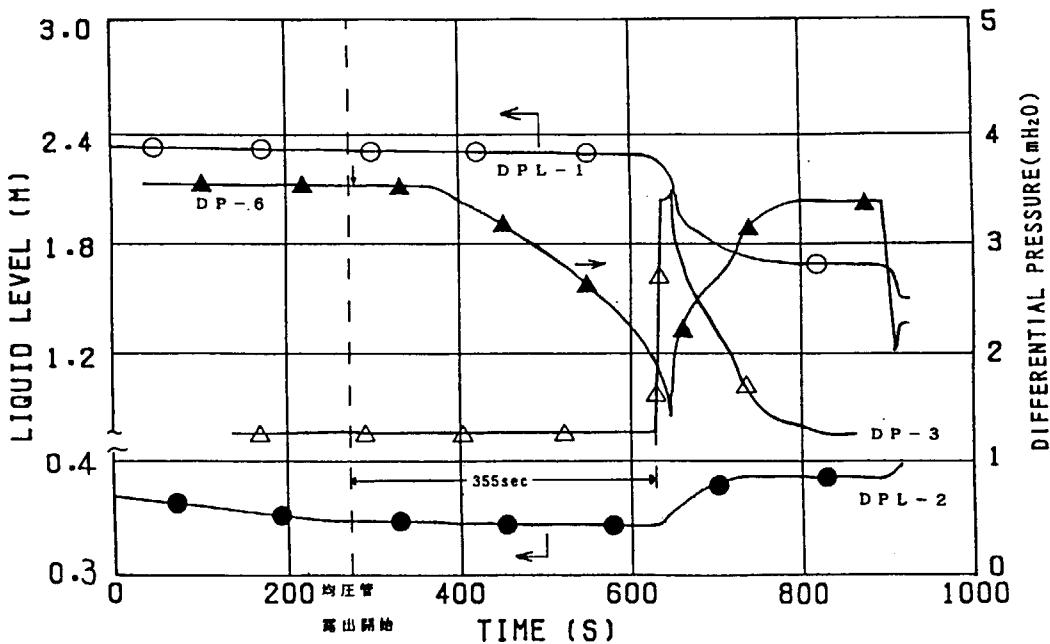


図 20. 各部水位及び注入流量 (ケース T-33)

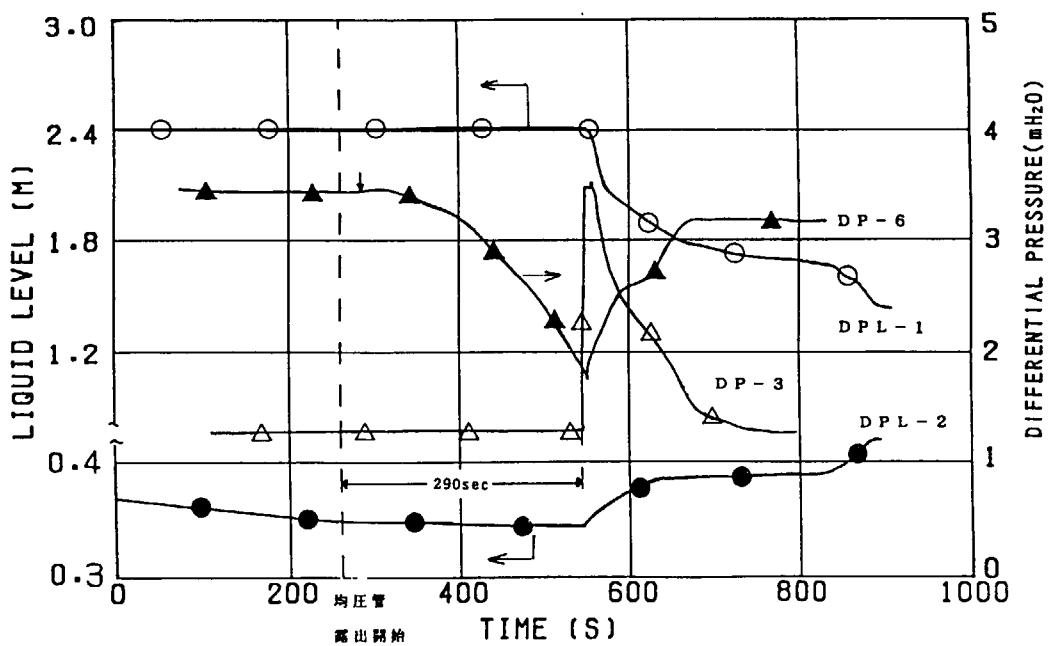


図 21. 各部水位及び注入流量 (ケース T-34)

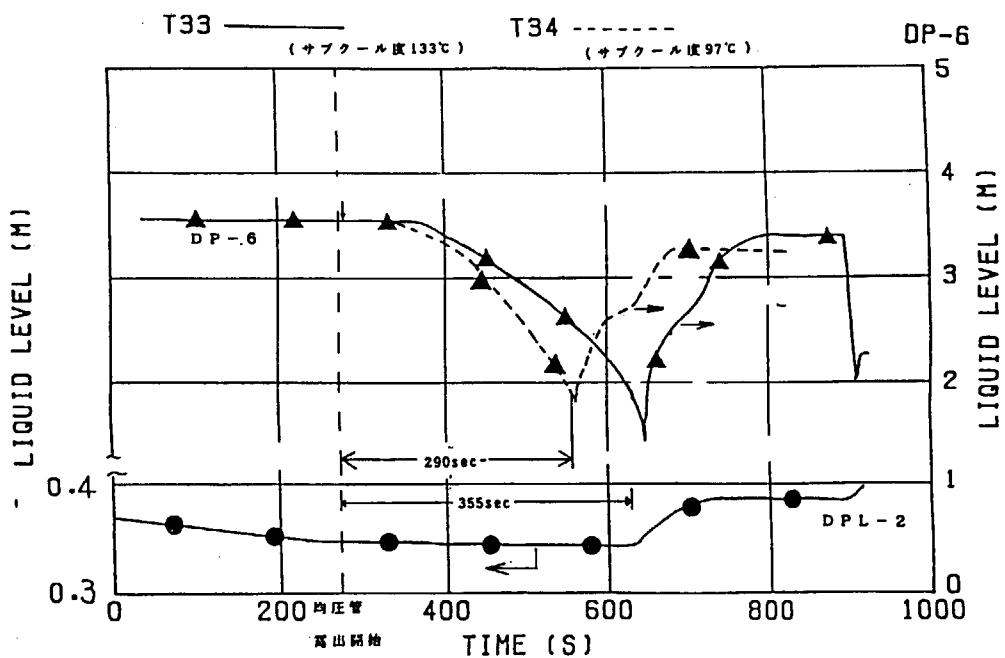


図 22. 均圧管内サブクール度の影響

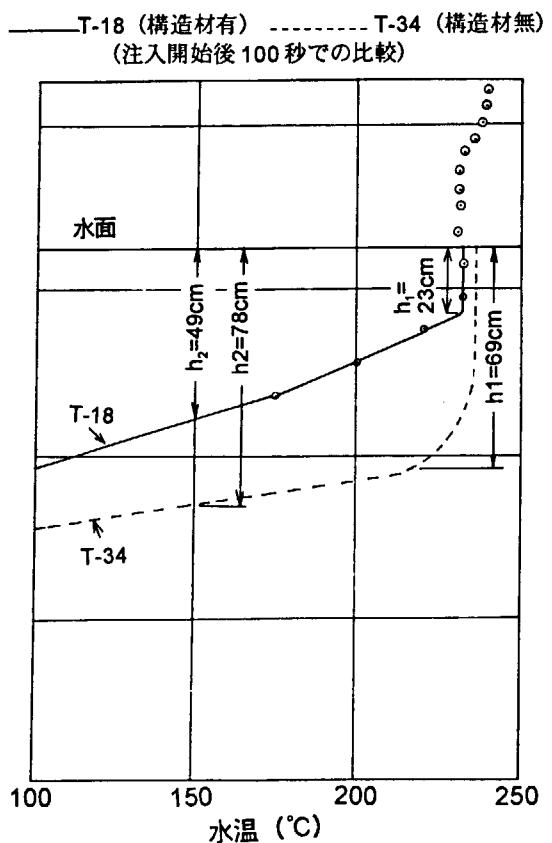


図 23. CMT 内構造材の水面下温度分布影響

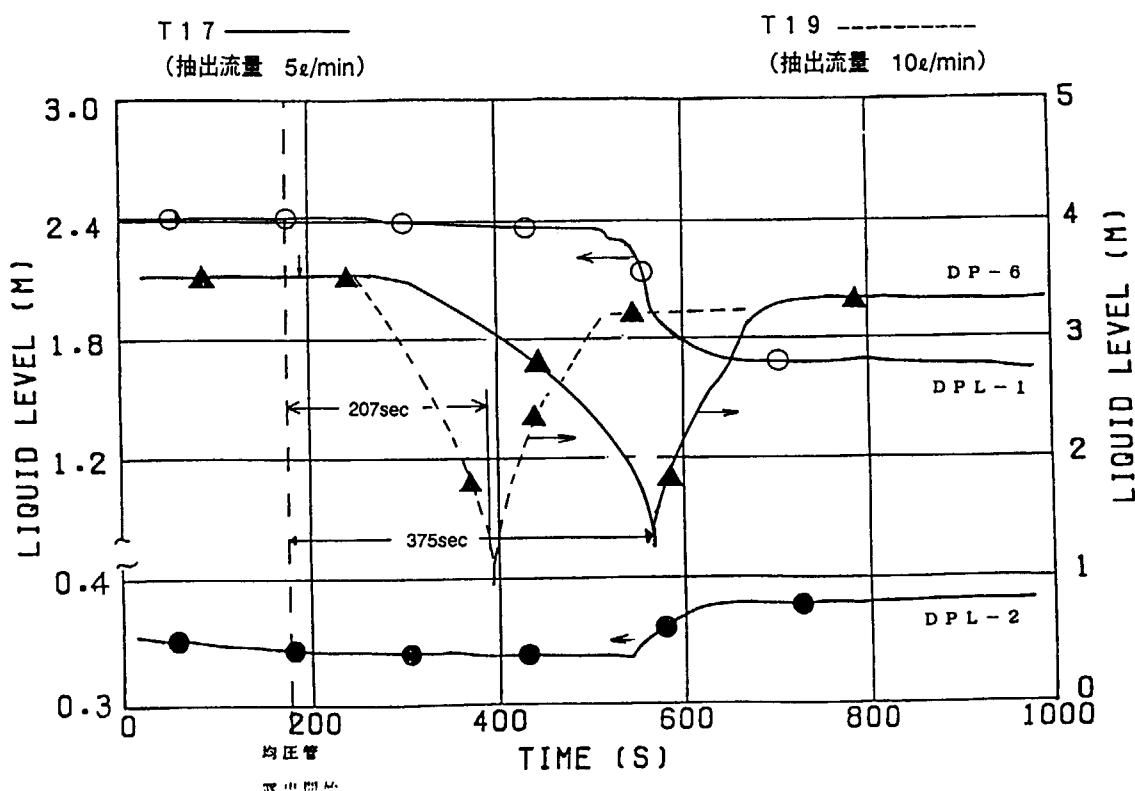


図 24. 冷却材抽出流量の影響

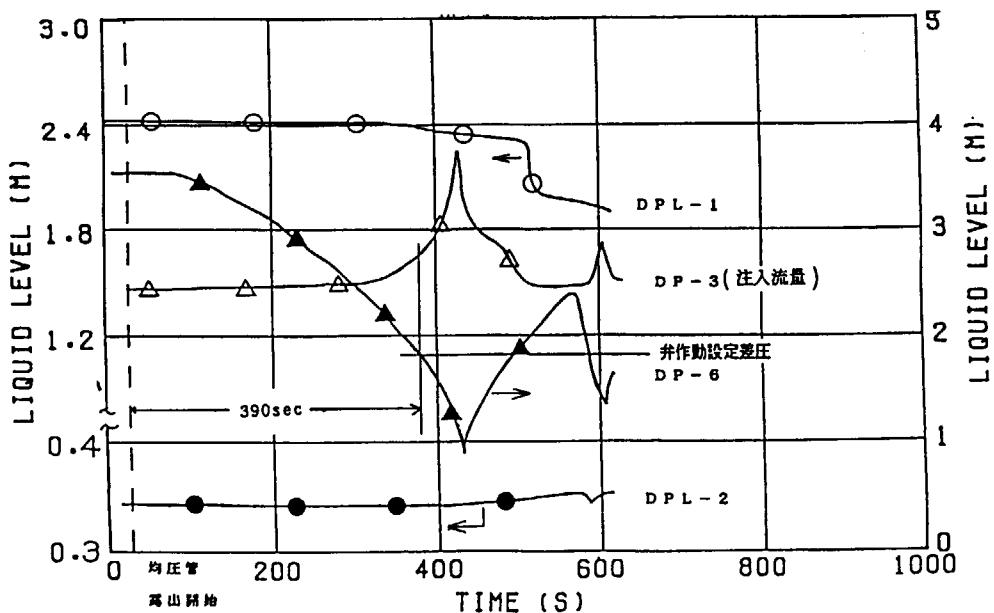


図 25. 差圧作動弁使用時注入特性

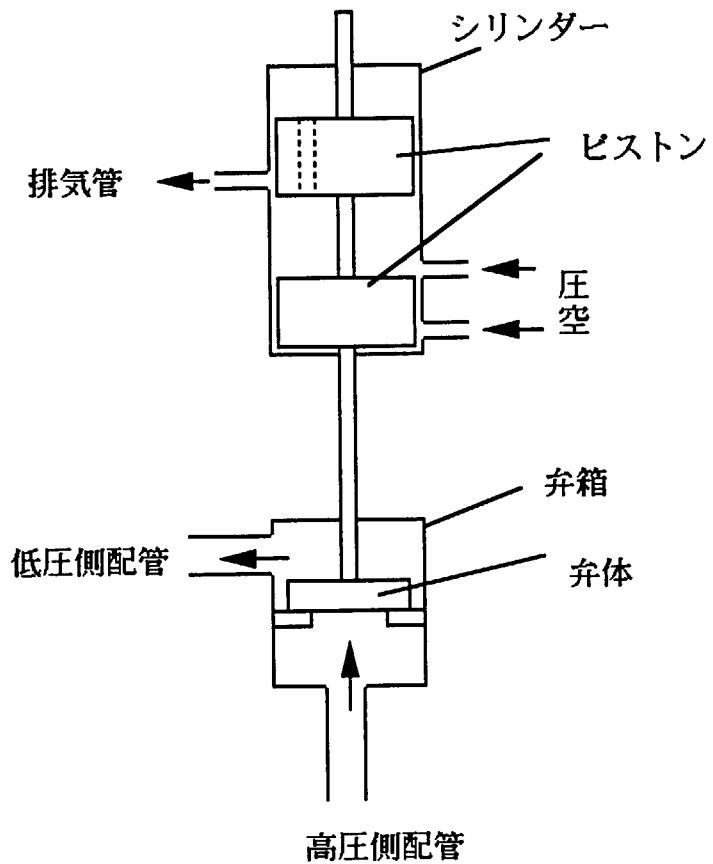


図 26. 差圧作動受動弁の改善案概念図

表2. 実験結果の概要 (1/4)

均圧管上端初期サブクール度による分類 観察項目	注入遅れ時間 ( $t_1$ ) = time (DP-3振れ開始)-(line 均圧管下端露出 注入F用 DPL-2拡大 図より判定)	均圧管内水頭 差が満水時から 1/2に減少 するまでの時 間( $t_2$ ) (均圧管水頭 差値で-1.73 mHgに要する 時間)	注入流量 (DP-3振れ開始) 注入F用 DPL-2拡大 図より判定)	h <sub>1</sub> : 水温が220°C以上の層厚み, h <sub>2</sub> : 水の温度が150°C以上の層厚み, カッコ( )内は注入開始後時間	
				水面が205cmのとき	水面が195cmのとき
T-1.6 (構造材有) ・均圧管上端部温度 (~90°C) (サブクール度 100°C) ・抽出流量 5 l/min ・注入弁手動閉 (均圧管水頭が満水時の1/2 で閉)	t <sub>1</sub> = 373sec (355sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>2</sub> = 372sec (340sec) ... DP-6発振 を起点時	指示不良 ・CUT液位低下 (1.7mまでは 速い)	h <sub>1</sub> = 9 cm h <sub>2</sub> = 18 cm T-16 (44.708s)	h <sub>1</sub> = 30.5 cm h <sub>2</sub> = 42.5 cm T-16 (100.8s)
T-1.8 (構造材有) ・均圧管上端部温度 (~87°C) (サブクール度 103°C) ・抽出流量 5 l/min ・注入弁手動閉 (均圧管水頭が満水時の1/2 で閉)	t <sub>1</sub> = 323sec (300sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>2</sub> = 305sec (295sec) ... DP-6発振 を起点時	・DP-3振動 (50 cmHg) ・CUT液位低下 は安定的 (1.9mまで は速い)	h <sub>1</sub> = 5 cm h <sub>2</sub> = 17 cm T-16 (21.9s)	h <sub>1</sub> = 25 cm h <sub>2</sub> = 42.5 cm T-16 (45.608s)
				h <sub>1</sub> = 16 cm (始和水層) h <sub>2</sub> = 48.1 cm T-16 (100.8s)	h <sub>1</sub> = 23 cm (始和水層) h <sub>2</sub> = 49 cm T-16 (100.8s)

表2. 実験結果の概要 (2/4)

観察項目 Test No. 及び試験条件 (初期圧力は ~17kg/cm <sup>2</sup> 共通)	均圧管上端初期サブクール度 による分類	注入時間 (t <sub>1</sub> ) = time <DP-3振れ開始 (t <sub>2</sub> ) = time <均圧管下端露 出開始 注入F用 DP-2拡大 図より判定	均圧管内水頭 差が満水時か ら1/2に減少 するまでの時 間(=t <sub>2</sub> ) (均圧管水頭 差値で-1.73 mmに要する 時間)	注入流量の大きさと安定性 (DP-3指示値)		h <sub>1</sub> : 水温が220°C以上の層厚み、h <sub>2</sub> : 水の温度が150°C以上の層厚み、カッコ( )内は注入開始後時間
				h <sub>1</sub> : 水面が205cmのとき	水面が195cmのとき	
T-3-4 (構造材無)	t <sub>1</sub> = 290sec (260sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>2</sub> = 290sec (260sec) ... DP-6発振 を起点時	・初期に急激 に注水 (1.8 cmH2O) 以降 漸次減少	h <sub>1</sub> = 21cm h <sub>2</sub> = 47cm T-34 (260sec)	h <sub>1</sub> = 48cm (飽和水層) h <sub>2</sub> = 79cm T-34 (195cm)	h <sub>1</sub> = 48cm (飽和水層) h <sub>2</sub> = 78cm T-34 (180cm)
サブクール度；大群	t <sub>1</sub> = 410sec (311sec) ... DP-6発振 を起点時	$\frac{t_2}{2} = 278sec$ (180sec) ... DP-6発振 を起点時	・指示不良 ・CMT液位低下 (1.7mまでは は安定的 速い)	h <sub>1</sub> = 5cm h <sub>2</sub> = 175cm T-17 (278sec)	h <sub>1</sub> = 9cm h <sub>2</sub> = 11.5cm T-17 (180sec)	h <sub>1</sub> = 22cm (飽和水層) h <sub>2</sub> = 59cm T-17 (180cm)
T-1-7 (構造材有)	t <sub>1</sub> = 410sec (311sec) ... DP-6発振 を起点時	$\frac{t_2}{2} = 278sec$ (180sec) ... DP-6発振 を起点時	・注入弁手動開 (均圧管水頭が満水時の1/2 で閉)	h <sub>1</sub> = 1.7m h <sub>2</sub> = 10.5m T-17 (180sec)	h <sub>1</sub> = 1.7m h <sub>2</sub> = 10.5m T-17 (180sec)	h <sub>1</sub> = 1.7m h <sub>2</sub> = 10.5m T-17 (180cm)

表2. 実験結果の概要 (3/4)

均圧管上端初期サブクール度による分類	注入時間 ( $t_1$ ) -time (DP-3指示値) 観察項目	CMT内水温分布(満水時は213°C)	
		$h_1$ : 水温が220°C以上の層厚み, $h_2$ : 水の温度が150°C以上の層厚み, カッコ( )内は注入開始後時間	
均圧管内水頭 差が満水時から1/2に減少 するまでの時 間( $t_2$ ) -time (DP-3指示値) 均圧管下端露 出開始 注入F用 差圧 DP-2差圧大 図より判定 Test No 及び試験条件 (初期圧力は ~17kg/cm <sup>2</sup> 共通)	水面が205cmのとき $h_1 = 5.5\text{cm}$ $h_2 = 13.5\text{cm}$	水面が195cmのとき $h_1 = 7\text{cm}$ $h_2 = 8.5\text{cm}$	水面が180cmのとき (内部構造物上端 より-10cm) $h_1 = h_2 = 46\text{cm}$
$t_1 = 207\text{sec}$ (185sec) ... DP-6発振 を起点時 (均圧管水頭が満水時の1/2 で閉)	$t_2 = 190\text{sec}$ (170sec) ... DP-6発振 を起点時 を起點時 (均圧管水頭が満水時の1/2 で閉)	$t_1 = 190\text{sec}$ ... DP-3振切(5.0 cmHg以上) ... CMT液位低下 は安定的 (1.9cmまでは 速い)	$t_1 = 190\text{sec}$ ... DP-3振切(5.0 cmHg以上) ... CMT液位低下 は安定的 (1.9cmまでは 速い)
T-1.9 (構造材有) ・均圧管上端部温度(~60°C) (サブクール度 130°C) ・抽出流量 10 l/min ・注入弁手動開 (均圧管水頭が満水時の1/2 で閉)			
T-3.1 (構造材有) ・均圧管上端部温度(~45°C) (サブクール度 145°C) ・抽出流量 5 l/min ・受動弁使用			

表2. 実験結果の概要 (4/4)

観察項目 Test No 及び試験条件 (初期圧力は ~17kg/cm <sup>2</sup> 共通)	均圧管上端初期サブクール度 による分類	注入時間 (t <sub>1</sub> ) = time (DP-3指示値) 均圧管内水頭 差が満水時か ら1/2に減少 するまでの時 間(均圧管下端露 出開始) (t <sub>2</sub> ) 均圧管水頭 (均圧管水頭 差値で-1.73 mH <sub>2</sub> Oに要する 時間)	注入流量の大きさと安定性 (DP-3指示値)	注入時間 (t <sub>1</sub> ) = time (DP-3指示値) 均圧管上端部温度 (~57°C) (サブクール度 133°C) 抽出流量 5 g/min 注入弁手動開 (均圧管水頭が満水時の1/2 で開)	h <sub>1</sub> : 水温が220°C以上の層厚み, h <sub>2</sub> : 水の温度が150°C以上の層厚み, カッコ( )内は注入開始後時間	水面が205cmのとき (内部構造物上端 より-10cm)	水面が195cmのとき	水面が180cmのとき (内部構造物上端 より-10cm)	注水開始から 10秒後
				t <sub>1</sub> = 355sec (350sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>2</sub> = 350sec (345sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>1</sub> = 355sec (350sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>2</sub> = 350sec (345sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>1</sub> = 355sec (350sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>2</sub> = 350sec (345sec) ... DP-6発振 を起点時
サブクール度: 無群	T - 3 - 3 (構造材無)	t <sub>1</sub> = 355sec (350sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>2</sub> = 350sec (345sec) ... DP-6発振 を起点時	初期に急激 に注水 (1.8 cmH <sub>2</sub> O) 以降 漸次減少	h <sub>1</sub> = 5cm h <sub>2</sub> = 27cm	h <sub>1</sub> = 5cm h <sub>2</sub> = 22.5cm	h <sub>1</sub> = 7cm h <sub>2</sub> = 22.5cm	h <sub>1</sub> = 30cm h <sub>2</sub> = 55cm	h <sub>1</sub> = 40cm (飽和水層) h <sub>2</sub> = 61cm
T - 3 - 2 (構造材有)	T - 3 - 2 (構造材有)	t <sub>1</sub> = 325sec (320sec) ... DP-6発振 を起点時	t <sub>2</sub> = 320sec (310sec) ... DP-6発振 を起点時	初期に急激 に注水 (1.8 cmH <sub>2</sub> O) 以降 漸次減少	h <sub>1</sub> = 31cm h <sub>2</sub> = 36cm	h <sub>1</sub> = 31cm h <sub>2</sub> = 36cm	h <sub>1</sub> = 35cm h <sub>2</sub> = 26.5cm	h <sub>1</sub> = 35cm h <sub>2</sub> = 29cm	h <sub>1</sub> = 47cm (飽和水層)

\* 本例ではCMT上部の飽和水  
が均圧管に逆流したため  
他例と比較時は要注意

This is a blank page.

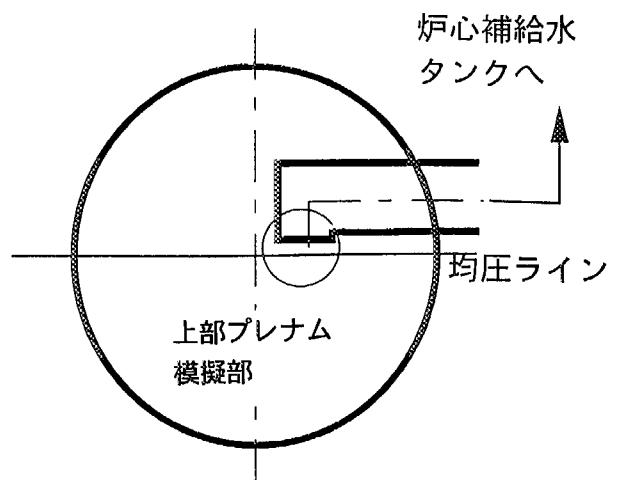
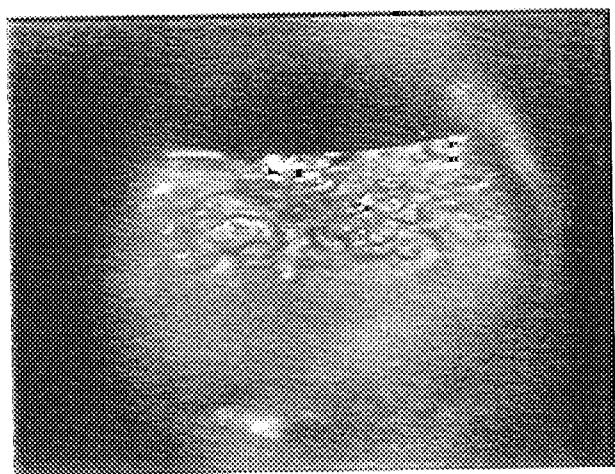


写真2. 上部プレナム模擬部内均圧管下端吸水部観察写真

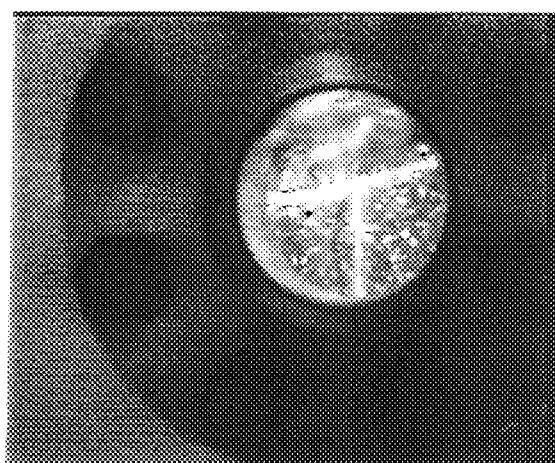
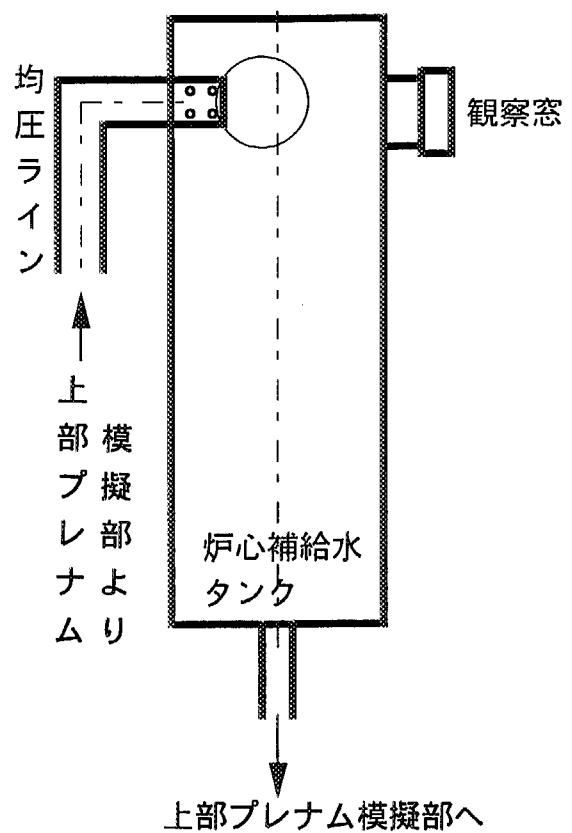
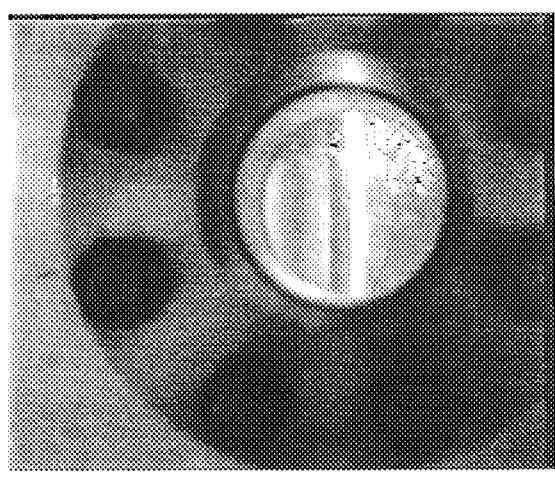


写真3. 炉心補給水タンク頂部水位観察写真

This is a blank page.

## 5. 結論

受動的安全炉 JPSR で採用を想定した冷却材均圧注入系の注入時熱水力挙動を把握するための実験を実施し、以下の結論を得た。

### (1) 均圧管内冷却材サブクール度の影響

均圧管における冷却材のサブクール度の違いによって注水弁の作動条件に達するまでの時間が異なる。即ち、サブクール度の大きい方が小さい場合に比べて冷却材注入開始が遅れる。（高サブクール度ケース T-33 と低サブクール度ケース T-34（いづれも CMT 内に構造材なし）の比較）

### (2) 構造材装填による CMT 内小領域分割の影響

構造材の装着により CMT 内を小さな領域に分割する事により高温熱水層の拡散を抑制でき、CMT 内での凝縮を抑制できる。（構造材ありのケース T-18 と構造材なしのケース T-34 の注入開始後 100 秒後の熱水層厚さの比較）

### (3) 抽出流量の影響、

上部プレナム模擬部水面が均圧管下端位置に到達してから、注入弁が作動条件に到達するのに要する時間は、抽出流量の増加により短くなるものの、抽出流量との間には単純な線形の関係ではない。これは、作動開始までの時間が、均圧管下端が蒸気中に露出して以後に均圧管内で生じる蒸気凝縮に基づく気液対向流によって影響されるためと考えられる。（抽出流量が 10 l/min のケース T-19 と、5 l/min のケース T-17 の比較）。

### (4) 差圧作動弁の作動特性

今回試作した受動弁を用いた場合の注入特性に関しては、弁にかかる差圧の増減につれて弁が開閉し、注入が断続的になる。また、この試作弁の性能に関しては、想定した設定差圧で開放しなかったり、ケースによっては差圧が弁の開設定差圧近傍に近づいたとき、弁がびびり音を発し続ける場合もあり、想定通りの性能が得られなかった。（差圧作動弁使用ケース T-31）更に、この試作弁の作動設定差圧が大きいと注入されずに CMT 内に残る冷却材が多くなり、冷却材の補給という観点からは無駄が多くなる不利な要因も本質的に有する。こうした問題点は、弁体の締め付け力変更方式の他の方式への変更と、再閉止防止機構の設置により改善可能と考えられるところから、この両方を実現する改善案の提案も行った。

## 謝　　辞

本実験を実施するに当たり、装置の製作から調整まで携わってくれた大昭化熱工業（株）及び装置の運転からデータ処理まで献身的にサポートしてくれた原子力エンジニアリング（株）の方々に心から感謝致します。

### 参考文献

- 1) Murao,Y., et al., "A Concept of Passive Safety Pressurized Water Reactor System with Inherent Matching Nature of Core Heat Generation and Heat Removal," J. of Nuclear Science and Technology, Vol. 32, No. 9, pp. 855-867, September 1995.
- 2) Bagnal C. W., et al., "Westinghouse Advanced Passive 600 Plant," Nuclear Safety, Vol. 33, No. 1, pp. 36-46, January-March, 1992.
- 3) Oikawa, T., et al., "Review of Updated Design of SPWR with PSA Methodology," proceedings of ICONE-3, S309-2, Kyoto, Japan, April 23-27, 1995.
- 4) Araya, F., et al., "Transient Thermal-Hydraulic Analyses for Design of JAERI Passive Safety Reactor (JPSR)," proceedings of ICONE-3, S216-2, Kyoto, Japan, April 23-27, 1995.

## 付録 A 炉心補給水タンク特性に関する予備試験

本項は、冷却材均圧注入実験に先駆けて平成5年度に実施した受動的安全炉JPSRの工学的安全設備としての炉心補給水タンクの挙動に関する予備試験の結果をまとめたものである。

JPSR概念における工学的安全設備全体のチューニングは、事故解析を進めながら実施しているが、炉心補給水タンクの挙動については、十分把握できていないので実験的に検討した。炉心補給水タンクと原子炉圧力容器との位置関係は、図A-1に示すような関係にあり、原理的には、原子炉容器の水面が下がり、垂直配管内の流体密度がある程度低下すると、弁が受動的に解放され、炉心補給水タンク内の硼酸水が原子炉圧力容器内に流入するというものである。図A-1中の右図に示すような予備実験を行ったところ、原子炉圧力容器を模擬したフラスコAから、配管aを通り、炉心補給水タンクを模擬したフラスコBに流入した蒸気がB内で多量に凝縮し、Bの内部が負圧になり、Bの内部の水は配管bを通りAに戻らず、B内に保持されたケースもあった。これはB内での凝縮が大きく、多量の蒸気が配管aを流れ、大きな圧力損失を発生させたためであると考えられる。このように、炉心補給水タンクの性能評価のためには、タンク内での蒸気凝縮量の正確な評価の必要性が示唆されているので、より大きい規模の実験を行うこととした。

図A-2には、次に用いたスケールアップ型の炉心補給水タンク作動特性試験装置を示す。試験の方法は前述の小型装置と同様であるが、炉心補給水タンク部の容量は約40lで、模擬炉心部ともポリカーボネイト製の可視容器である。前回と同様、炉心補給水タンクには冷水を、模擬炉心部には近接する電気式ボイラーから飽和水と飽和蒸気を導入した。蒸気弁、注水弁、排水弁を同時に開くことにより試験を開始した。試験中は、模擬炉心部気相部圧力が一定(2kg/cm<sup>2</sup>g)となるように、蒸気流量の相対値を手動弁で調節し、また、蒸気管に取り付けたオリフィスの差圧により蒸気流量の相対値を計測した。炉心補給水タンクには、内部の流体温度を計測できるように高さ方向5カ所に熱電対を取り付け、水位は差圧計で計測した。これらの試験データはデジタル指示記録計(YEW LR8100 8ch inputタイプ)に取り込んだ。試験では、炉心補給水タンクでの凝縮を抑制することを目的としてタンク内を縦長セルを分割するための内部構造材(ガラスパイプ)を入れた場合と入れない場合の比較試験を行い、その効果を調べた。

図A-3には炉心補給水タンク作動中の補給水温度の変化を内部構造材なしの場合について示した。下図は注入開始からの経過時間と、タンク上端からほぼ20cm間隔で取り付けた熱電対による温度変化を示す。注水開始初期から120秒までの間に熱水の層が2~3cmの厚さで形成されていることが示されている。上図は模擬炉心部から補給水タンクに流入した蒸気流量の相対値である。注水初期から50秒後までに於いて、大きな幅をもって振れていることから、炉心補給水タンク内では大量の蒸気が凝縮していることを知ることができる。

図A-4は炉心補給水タンク作動中の補給水温度変化を内部構造材がありの場合について示した。注水開始初期より120秒までの間に、熱水の層が0.57~2cmの厚さで形成されており、特に初期に於いては、著しく薄いが、これは内部構造材なしの場合に比べて全般的にも薄い。蒸気流量についても全体的に小流量であり、図A-3に現れている初期の突出した傾向は全く見られない。(試験後半の安定的な蒸気流量はタンク表面からの放熱による凝縮に対応していることが別の較正試験により明らかにされている。)

これから炉心補給水タンク特性試験で内部構造物の有効性が明らかにできたが、注水の時間遅れや蒸気管内（均圧管）流体挙動を始めとする作動特性については、更に規模が大きい実験を行うこととする。

また、試験中の模擬炉心部の水位の観察からは、均圧管下端が2cm位露出してから注水が始まり、これにつれて水位が上昇し、下端から2cm位冠水してから水位が下降するという繰り返しがあった。これは蒸気管（均圧管）が細すぎて（～12mm径であった）管内で気液対向二相流が形成されなかつたためである。従ってこの点からも、次期実験装置では、可能な限り大きい管径の設計することが要求される。

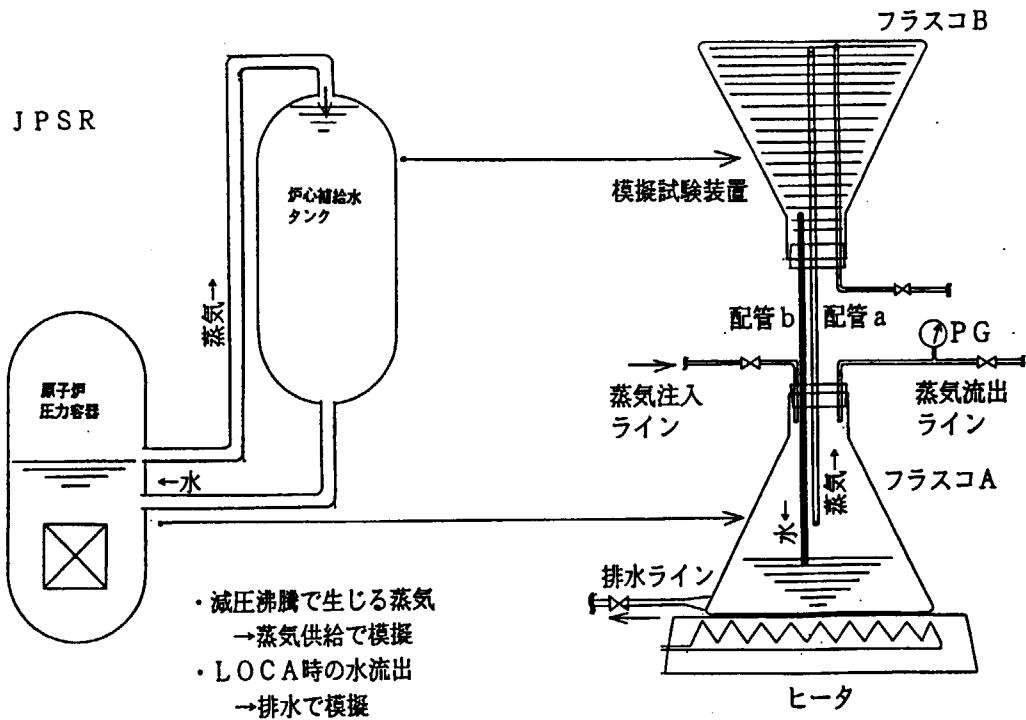


図 A-1 冷却材均圧注入系と小型予備試験装置との対応

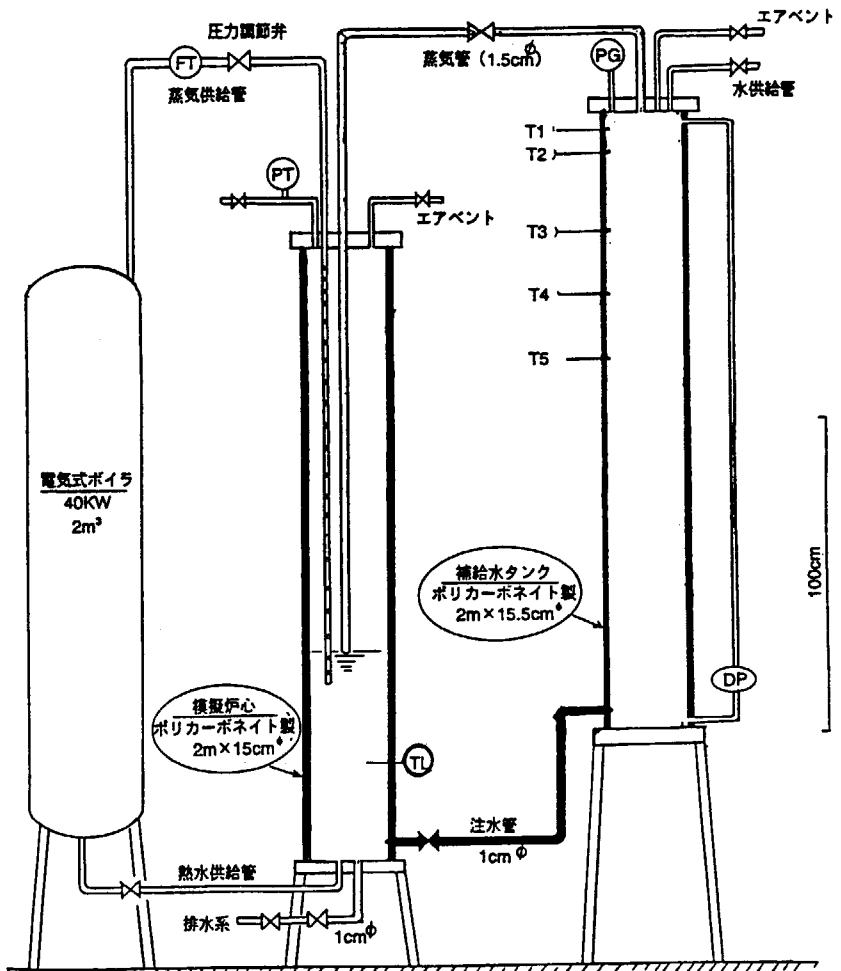


図 A-2 冷却材均圧注入系予備作動特性試験装置の構成

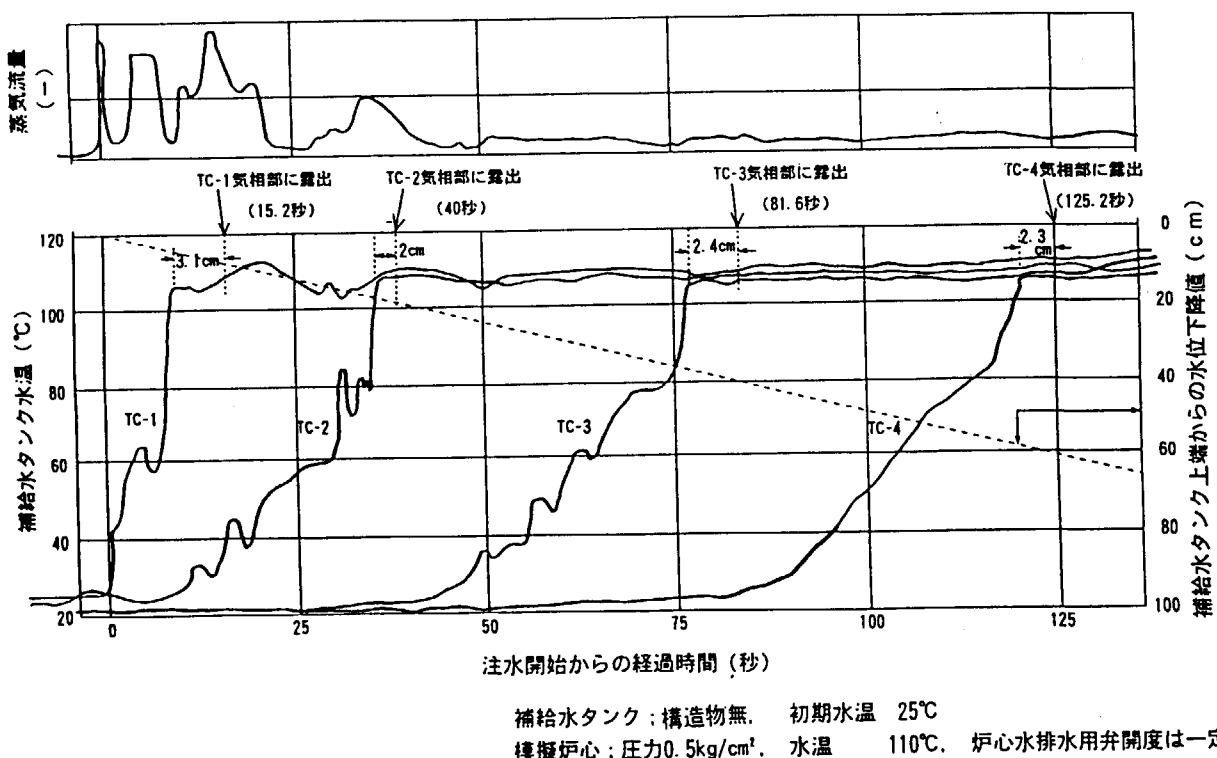


図 A-3 構造物無しでの蒸気流量と炉心補給水タンク模擬部流体温度

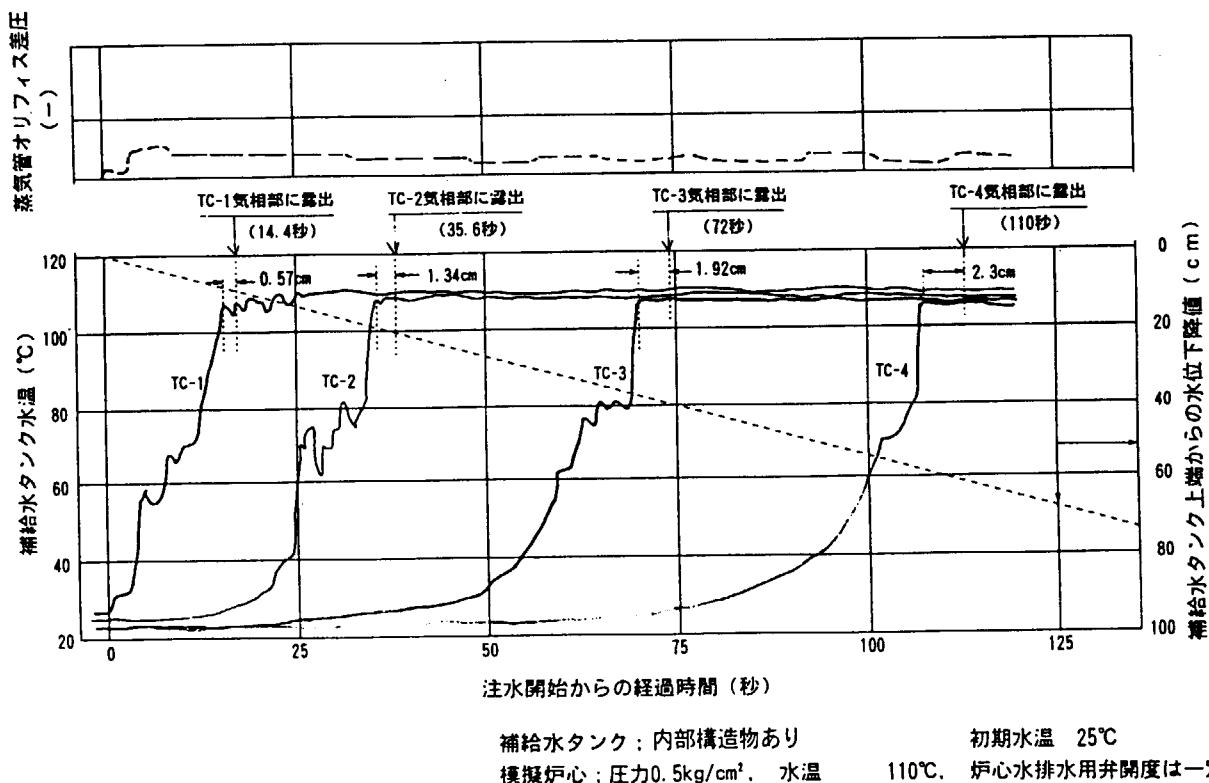


図 A-4 構造物挿入時の蒸気流量と炉心補給水タンク模擬部流体温度

## 付録 B 各実験ケースの計測データ

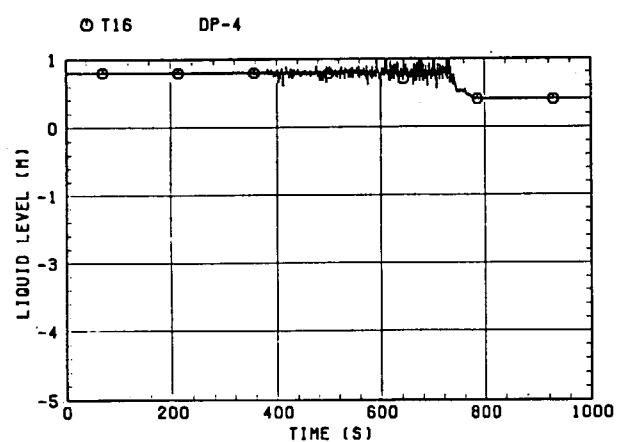
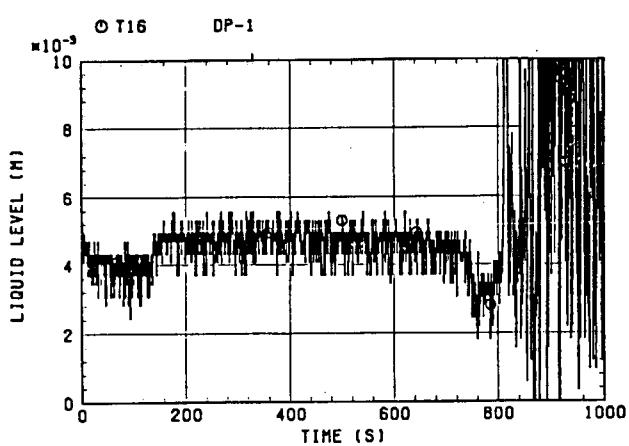
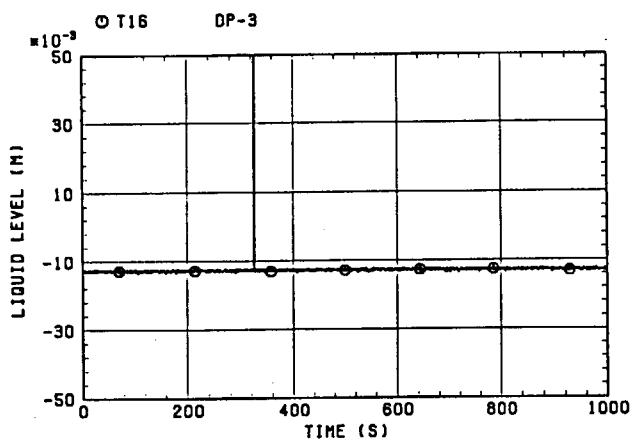
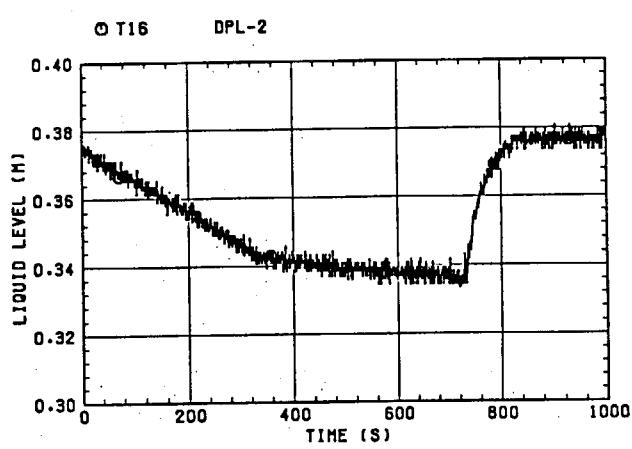
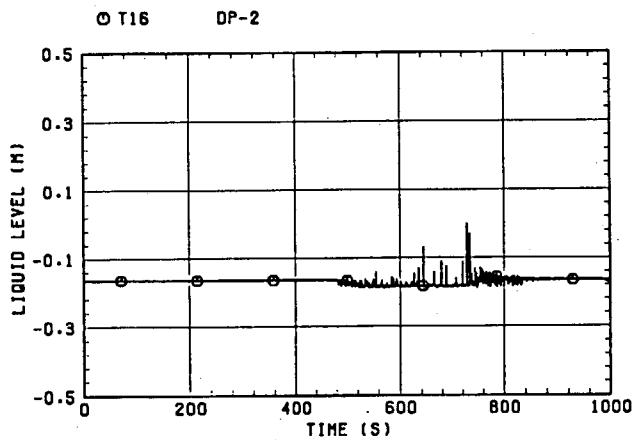
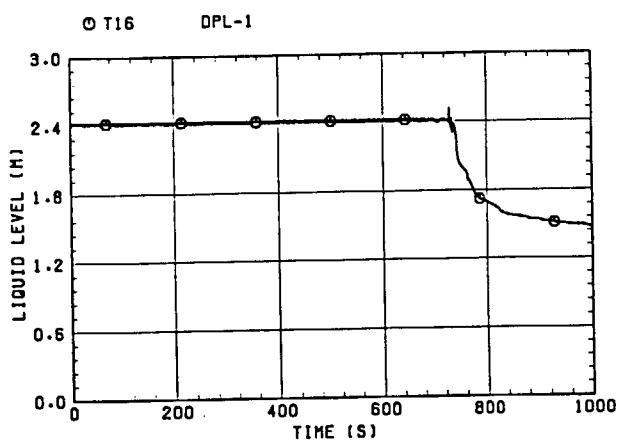
以下には本実験で実施した各ケースの計測データの図を各ケース毎に掲載する。以下に示す各図のデータのタグ名は以下の通りである。

- DPL… 水位
- DP… 差圧
- PT… 圧力
- TA… 流体温度 (CMT 内中心部)
- TC… 流体温度 (CMT 内容器壁面近傍)

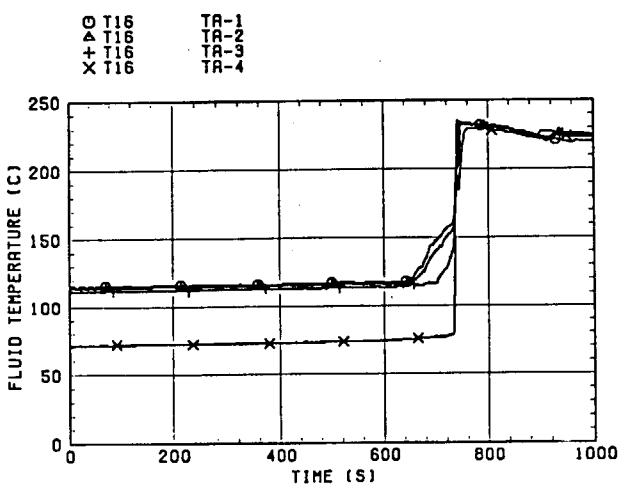
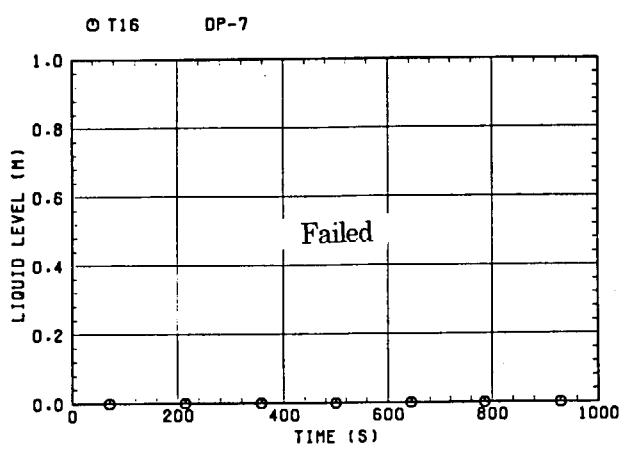
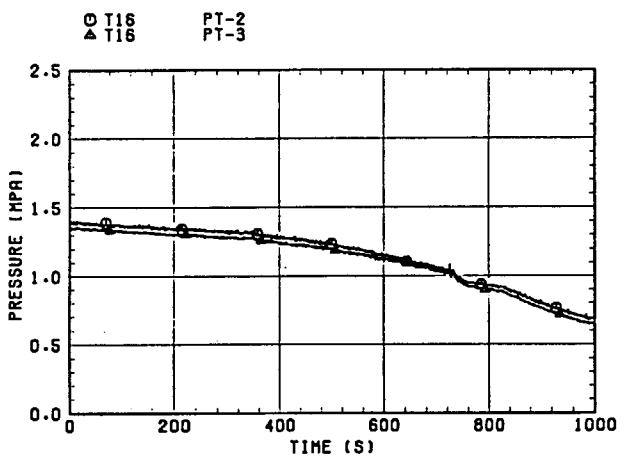
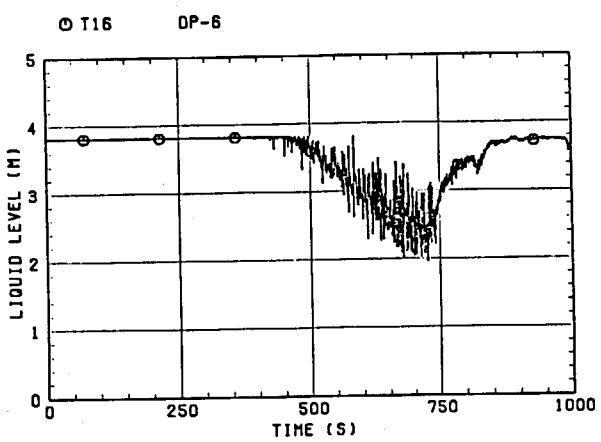
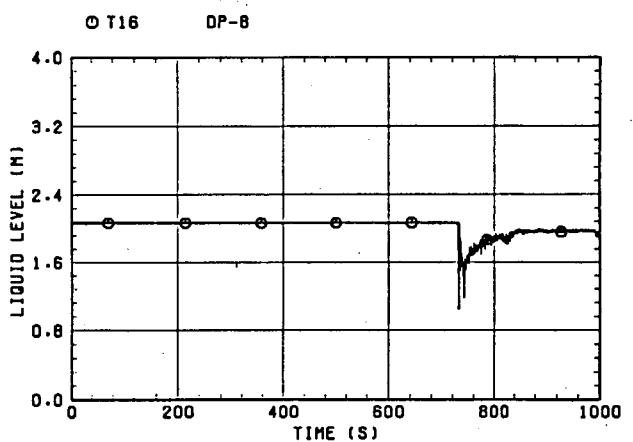
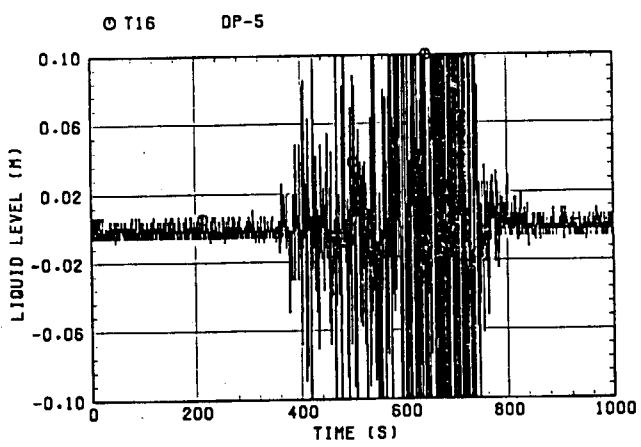
また、各計測位置は本文の図3～図9を参照していただきたい。

以下に示す図では、各ケース毎に図の番号を次の通りにして掲載している。

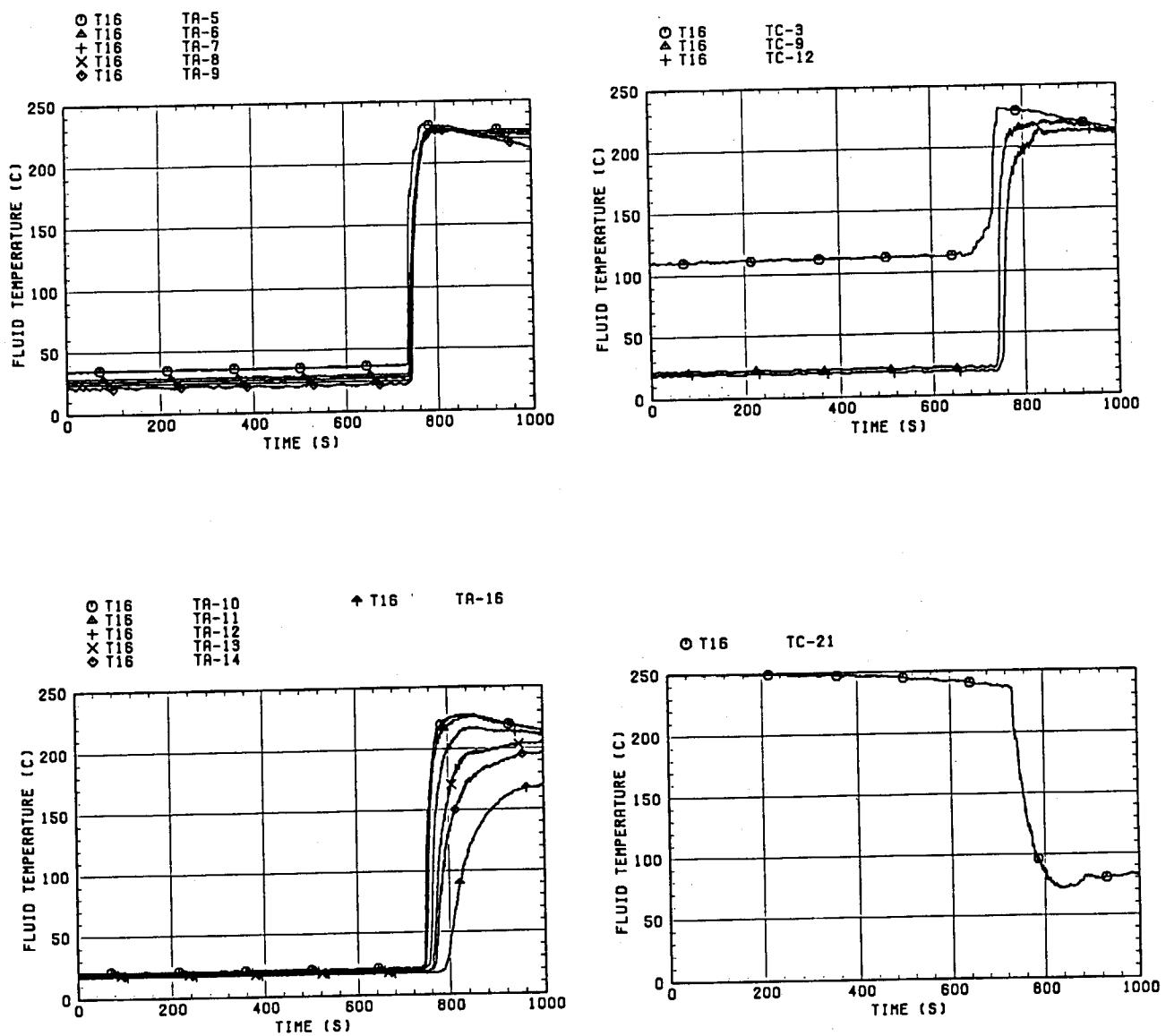
- 図 B-1 ケース T-1 6 の計測データ
- 図 B-2 ケース T-1 7 の計測データ
- 図 B-3 ケース T-1 8 の計測データ
- 図 B-4 ケース T-1 9 の計測データ
- 図 B-5 ケース T-3 1 の計測データ
- 図 B-6 ケース T-3 2 の計測データ
- 図 B-7 ケース T-3 3 の計測データ
- 図 B-8 ケース T-3 4 の計測データ



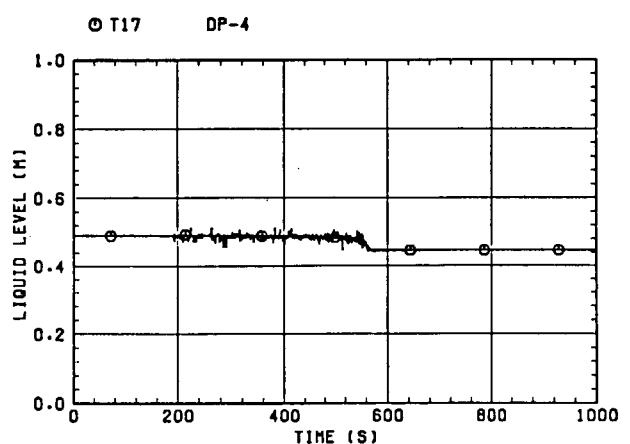
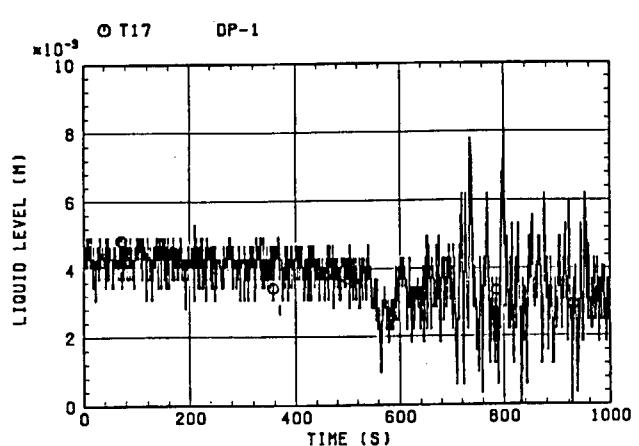
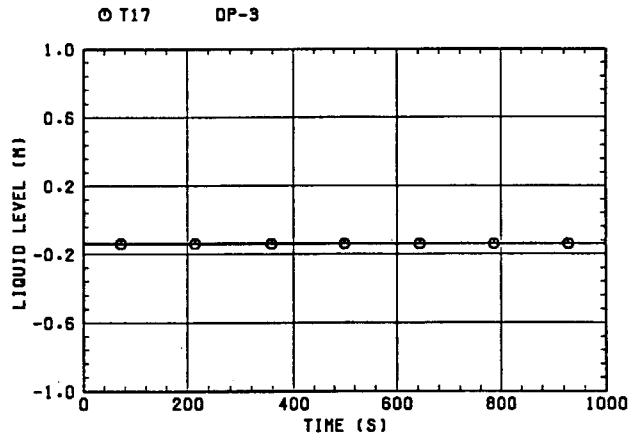
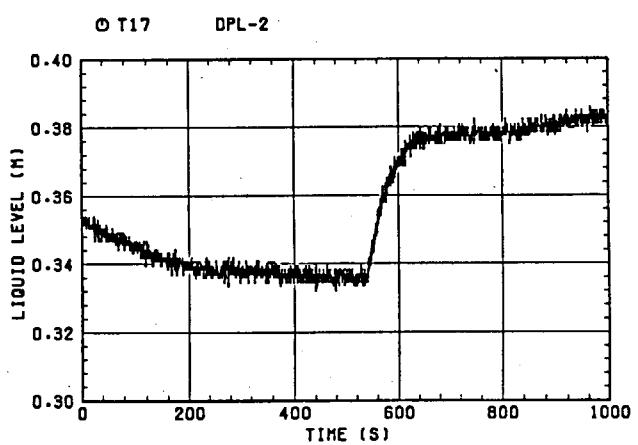
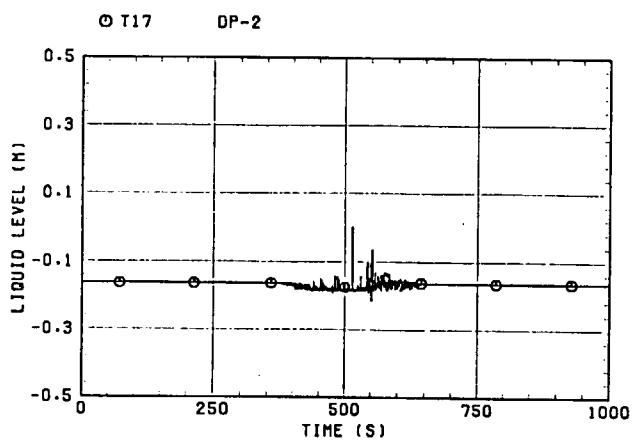
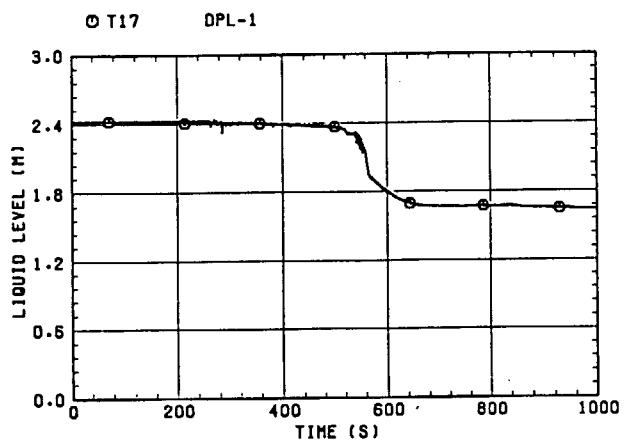
図B-1 ケースT-16の計測データ (1/3)



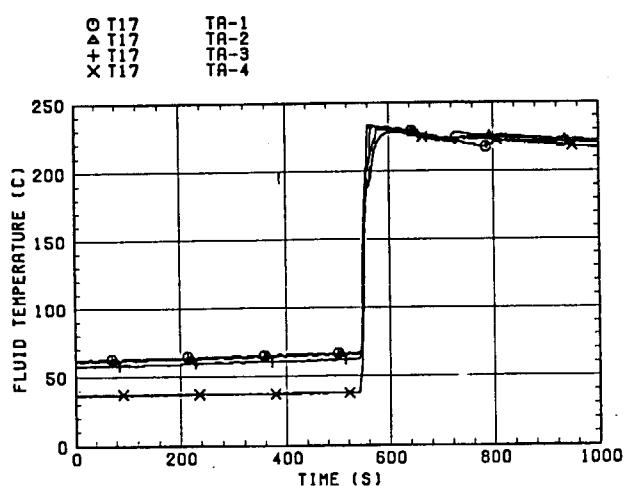
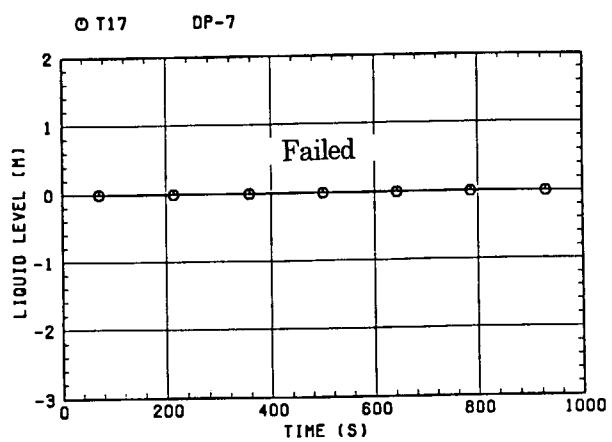
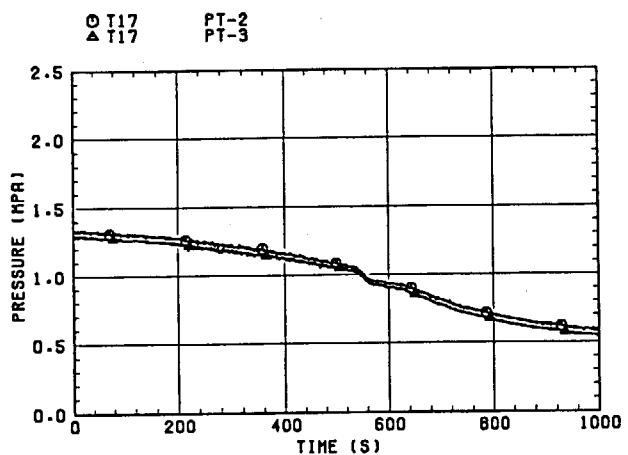
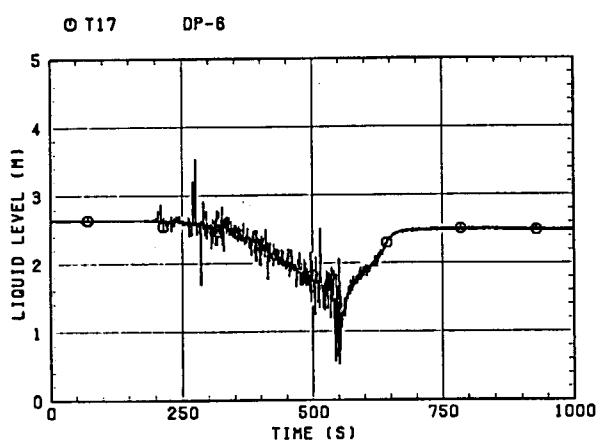
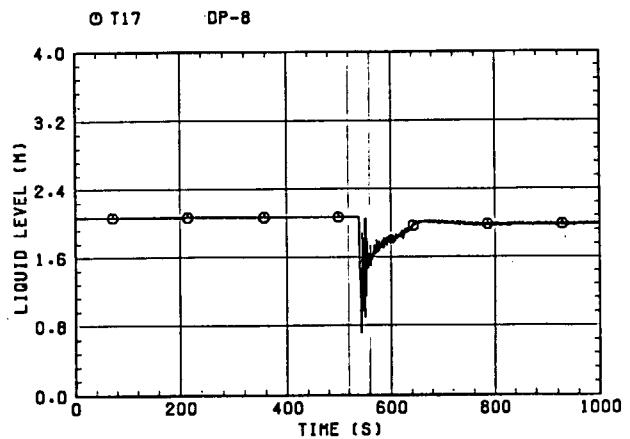
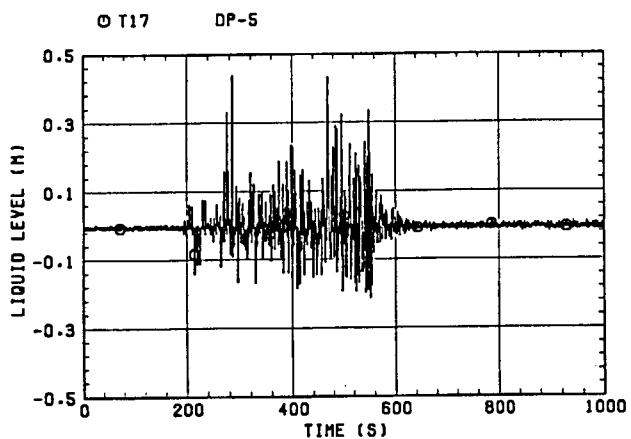
図B-1 ケースT-16の計測データ (2/3)



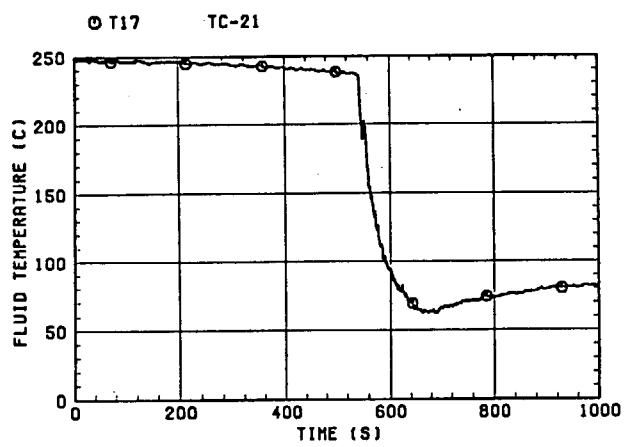
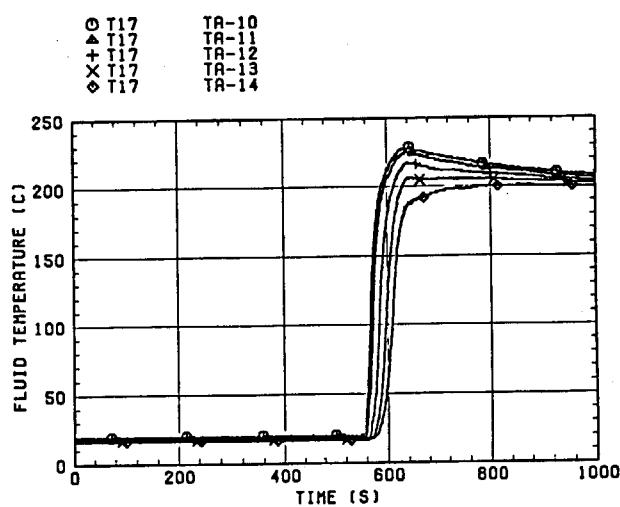
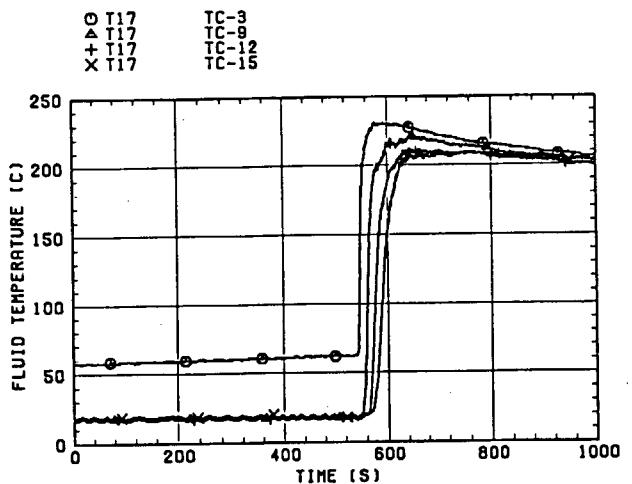
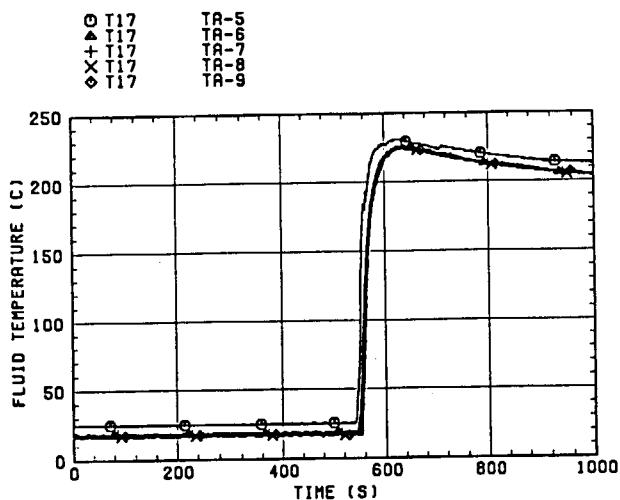
図B-1 ケースT-16の計測データ (3/3)



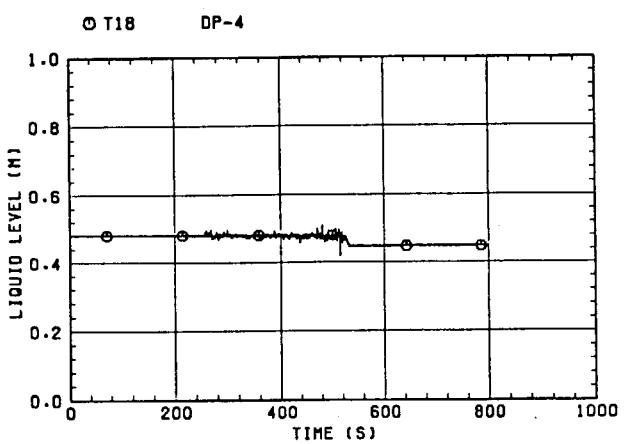
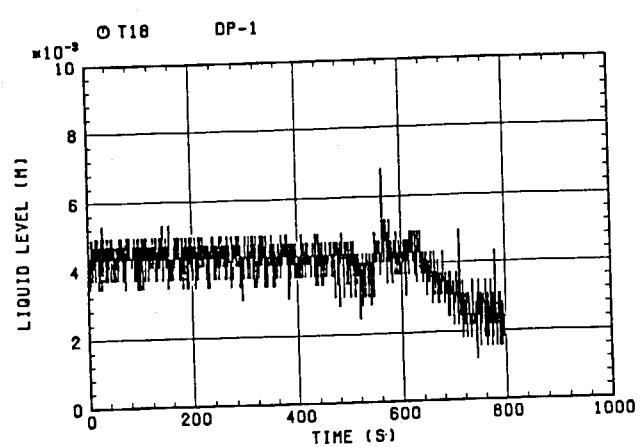
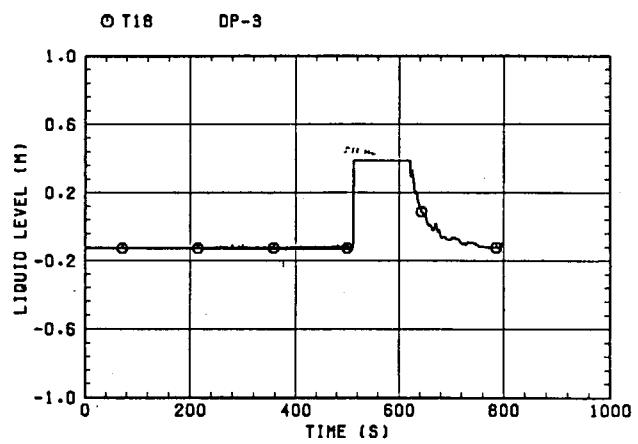
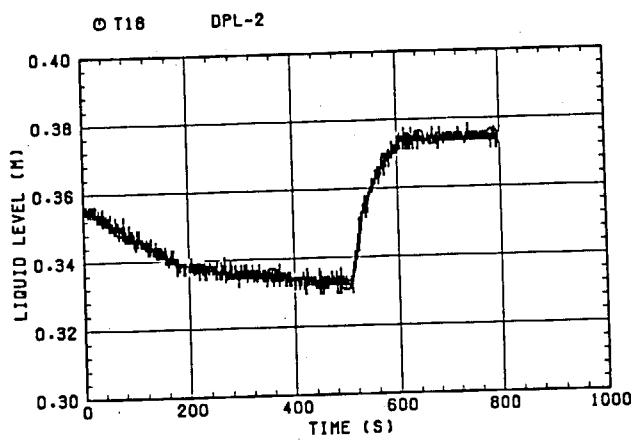
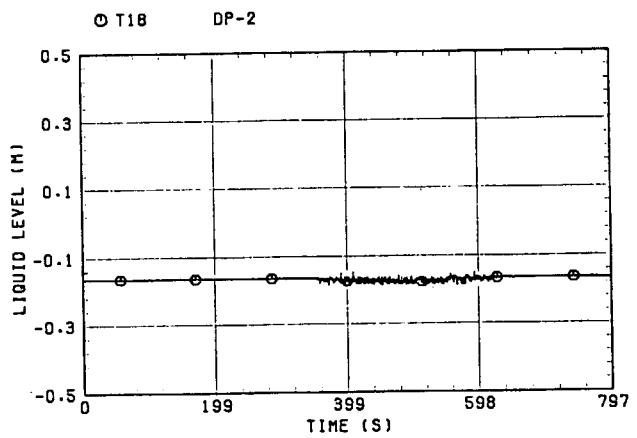
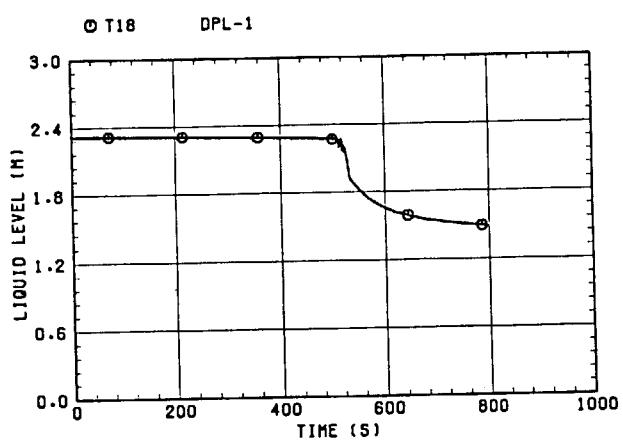
図B-2 ケースT-17の計測データ (1/3)



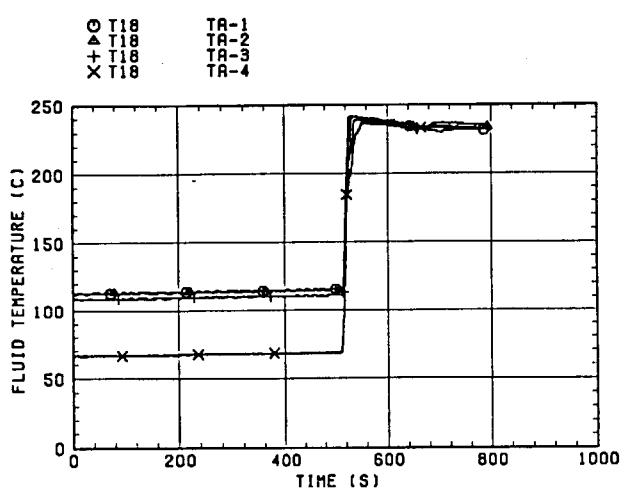
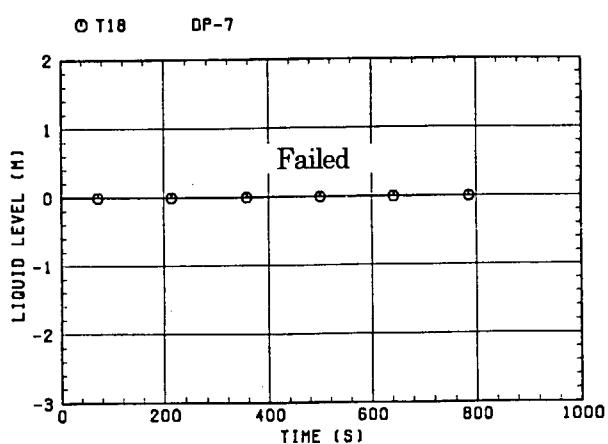
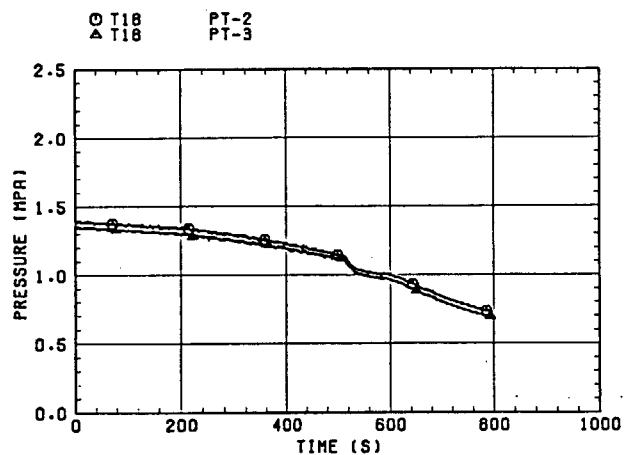
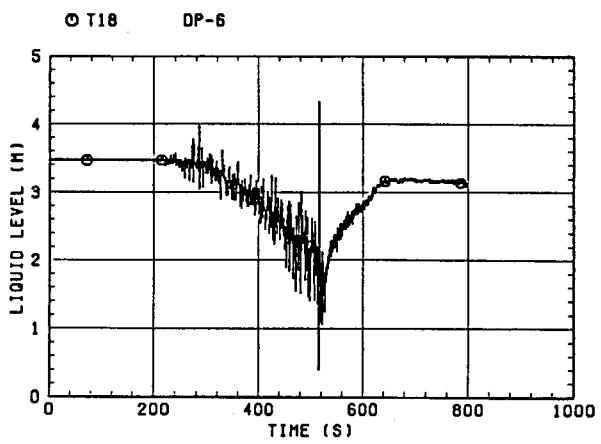
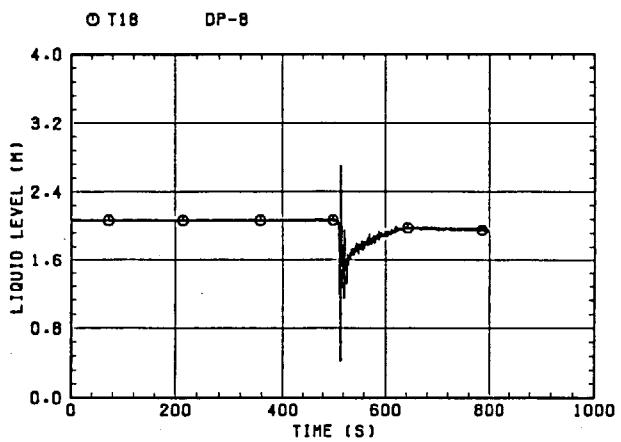
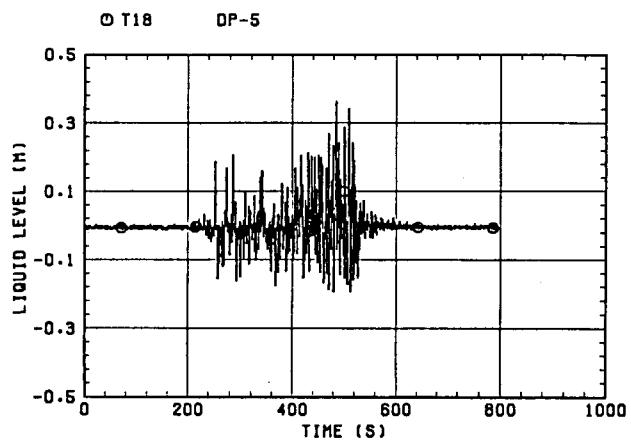
図B-2 ケースT-17の計測データ (2/3)



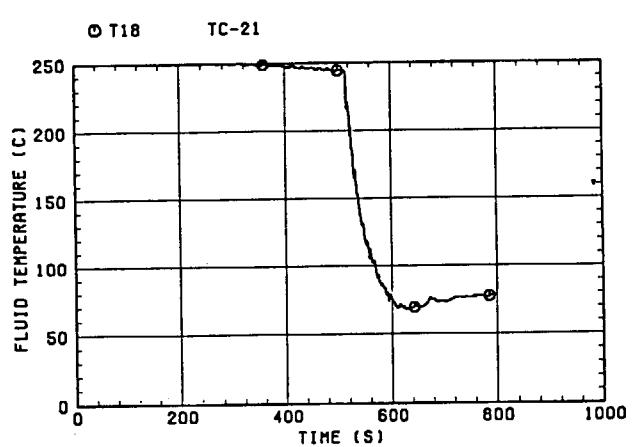
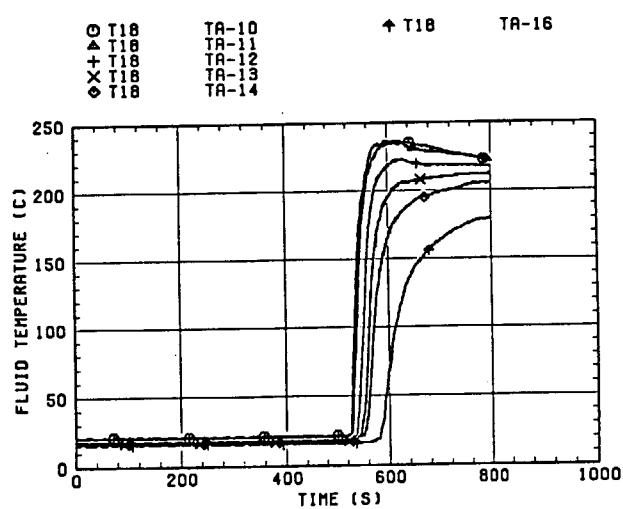
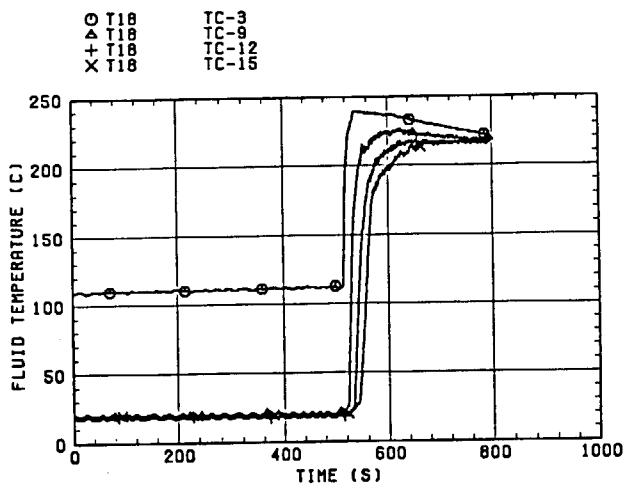
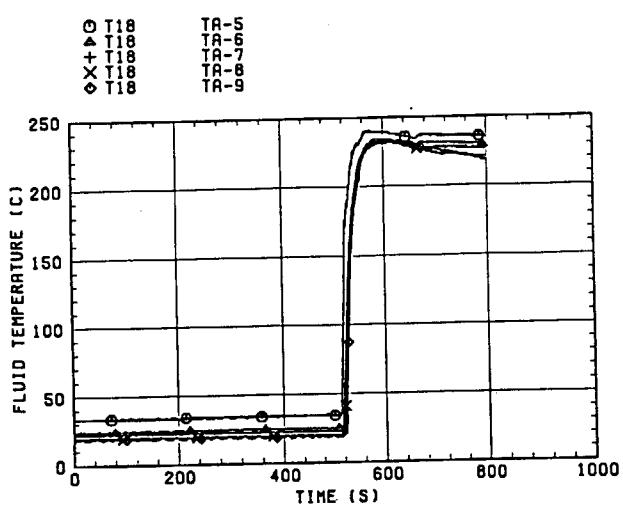
図B-2 ケースT-17の計測データ (3/3)



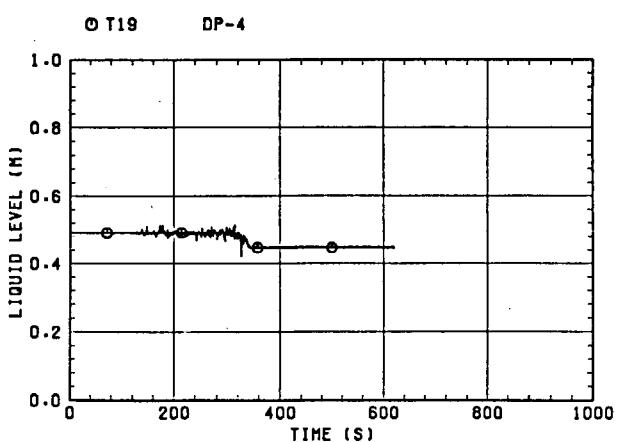
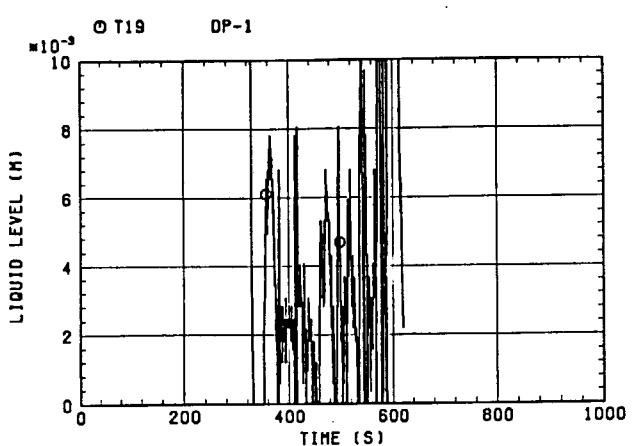
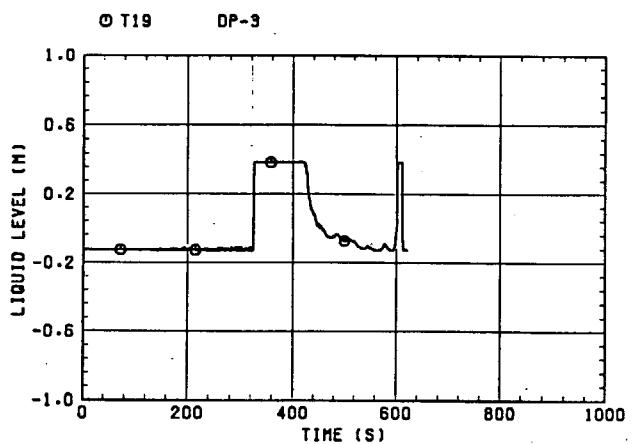
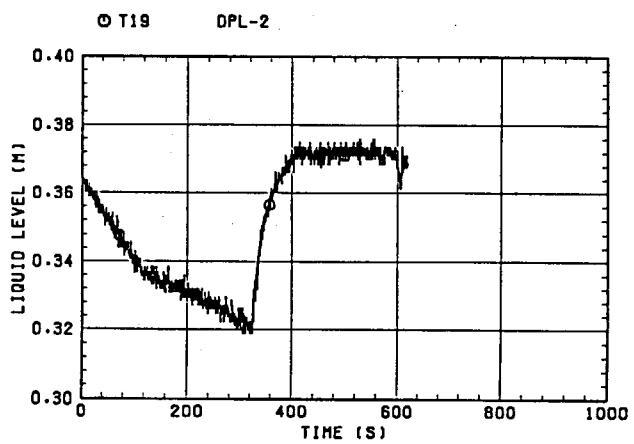
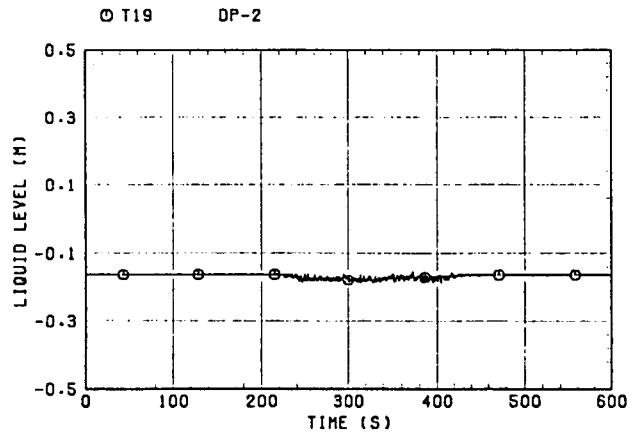
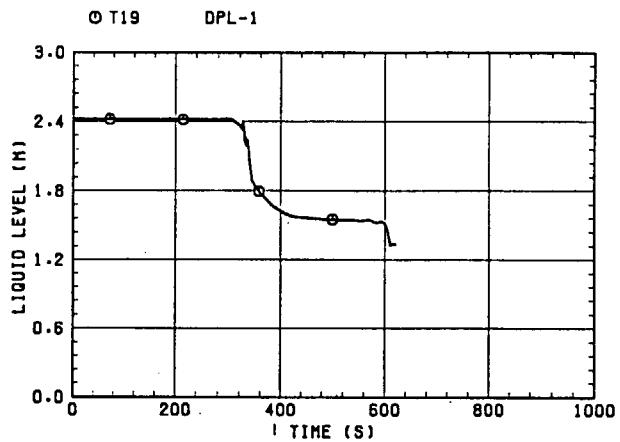
図B-3 ケースT-18の計測データ (1/3)



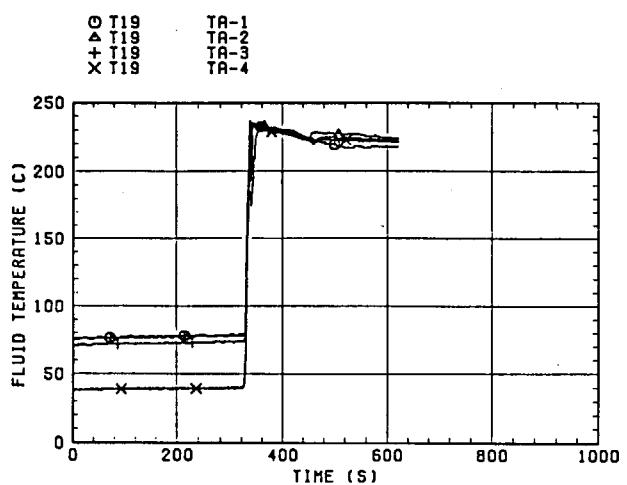
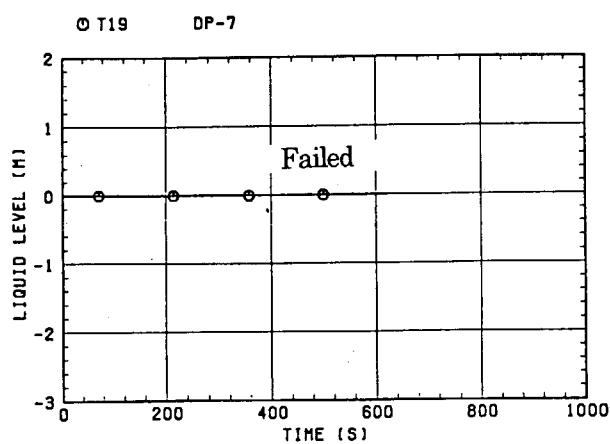
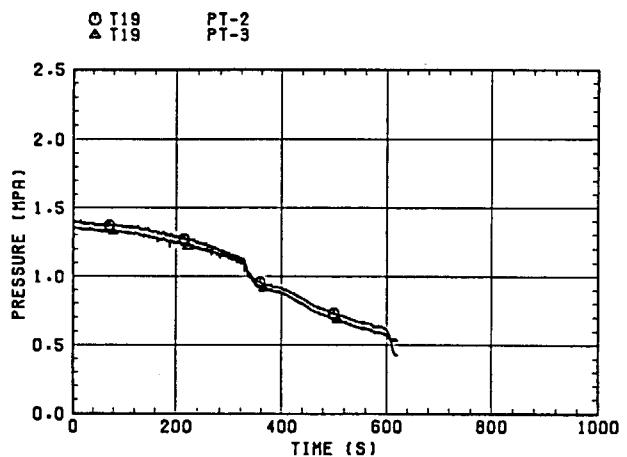
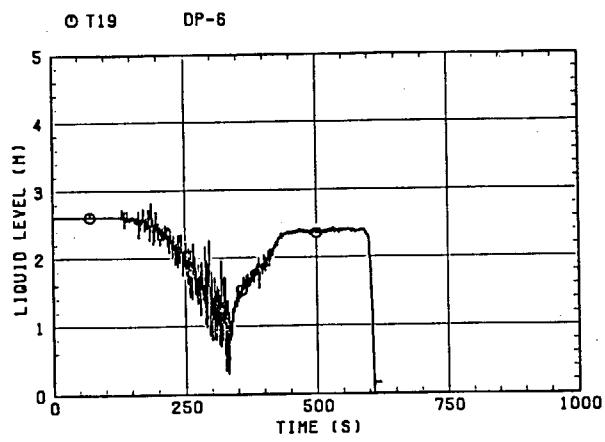
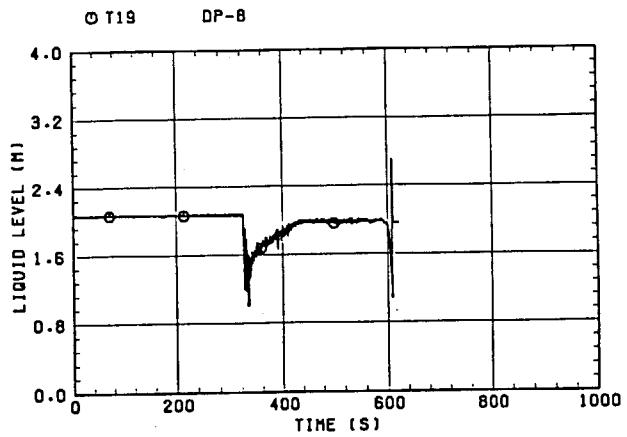
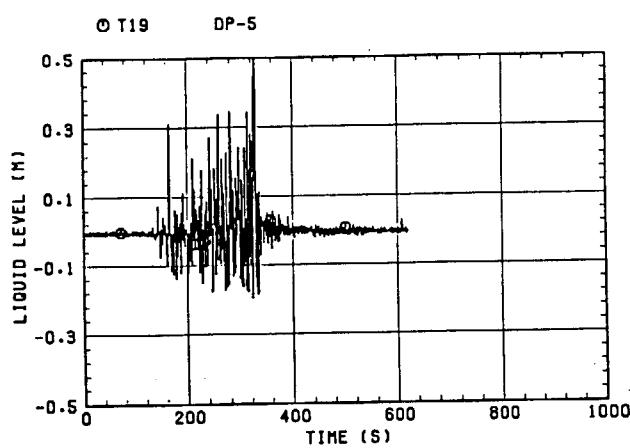
図B-3 ケースT-18の計測データ (2/3)



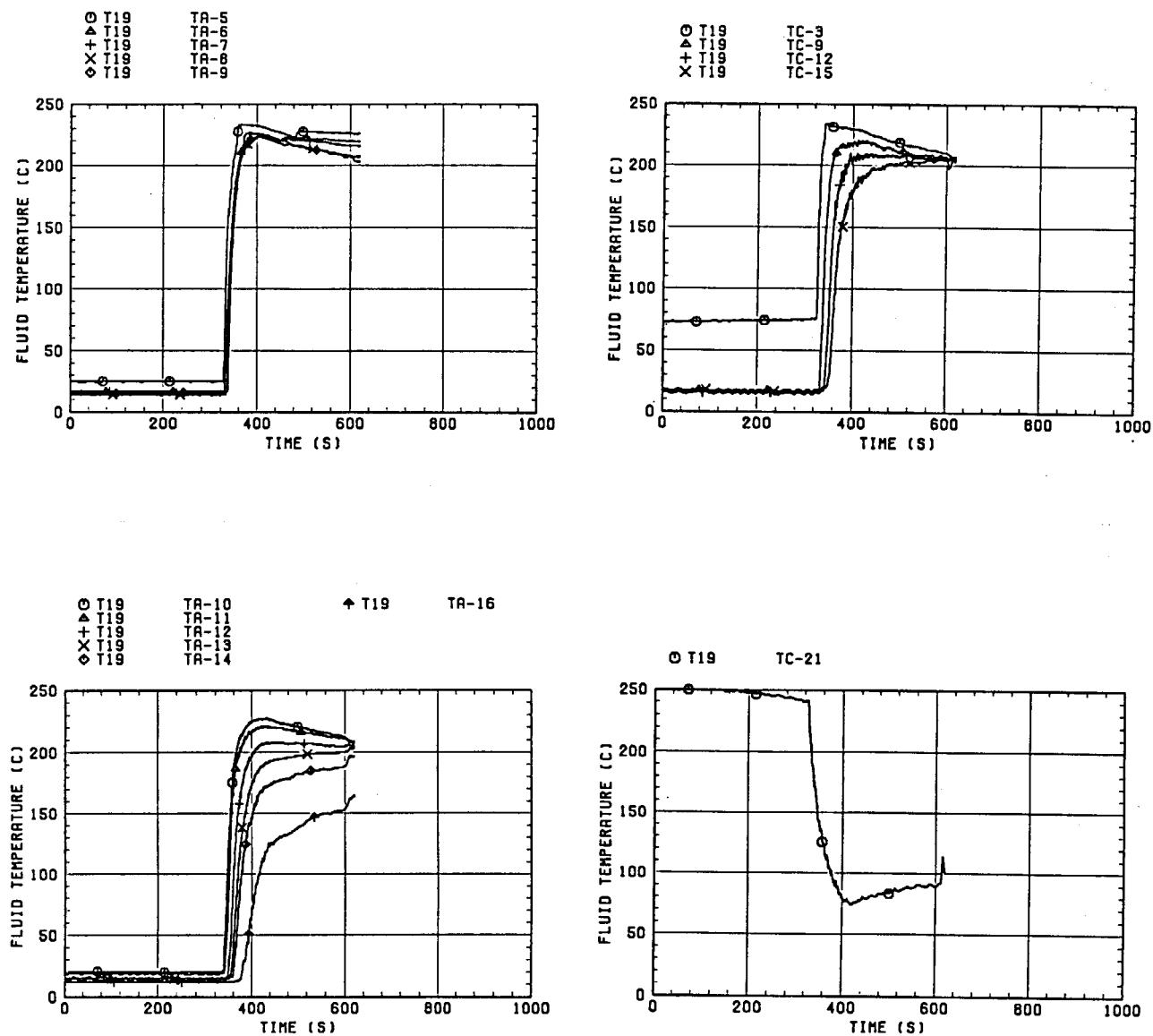
図B-3 ケースT-18の計測データ (3/3)



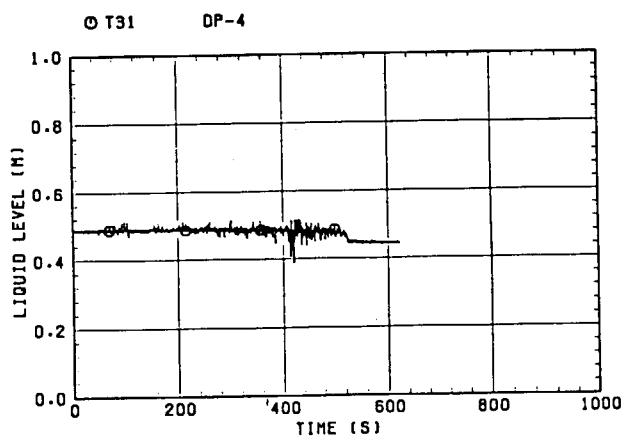
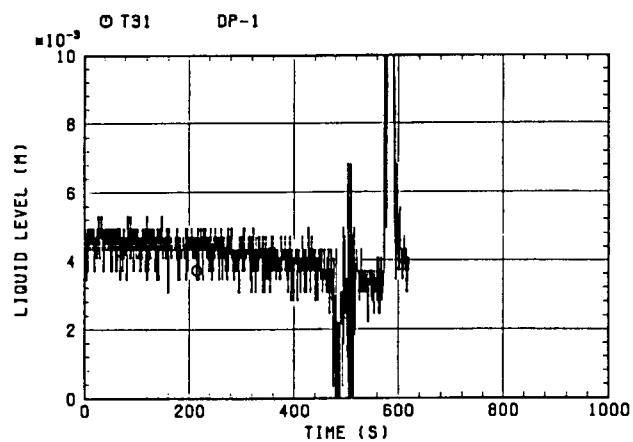
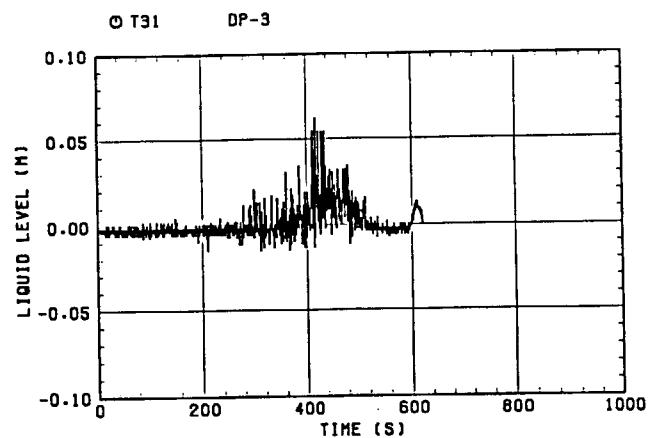
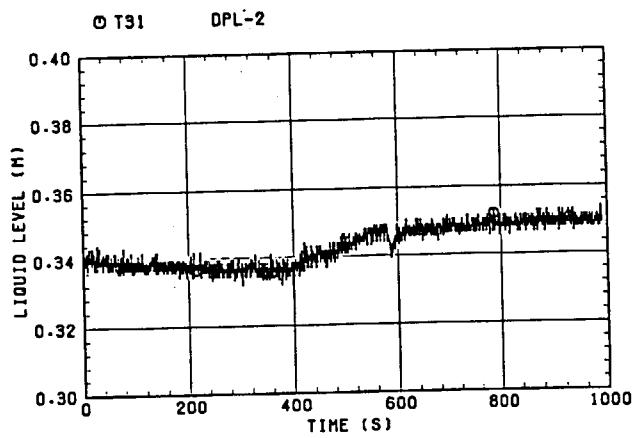
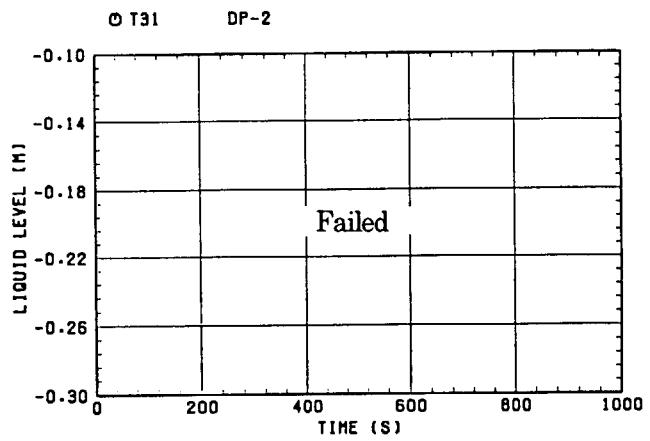
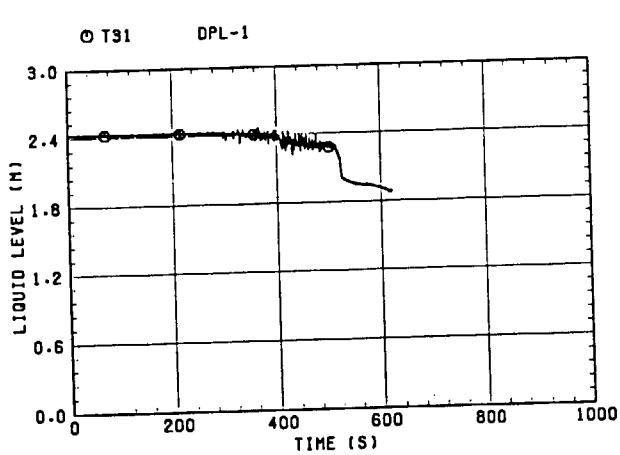
図B-4 ケースT-19の計測データ (1/3)



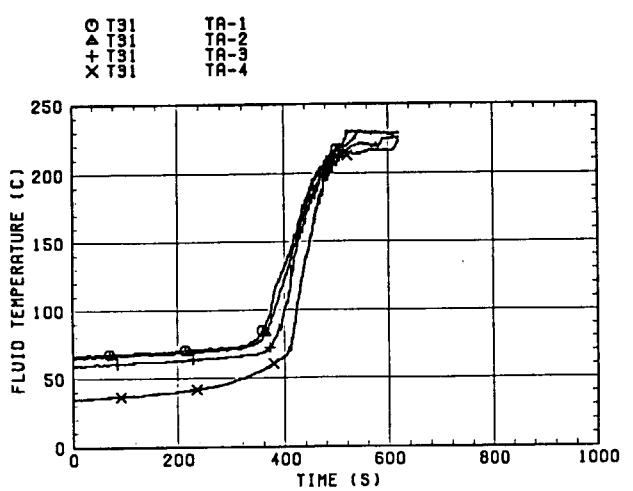
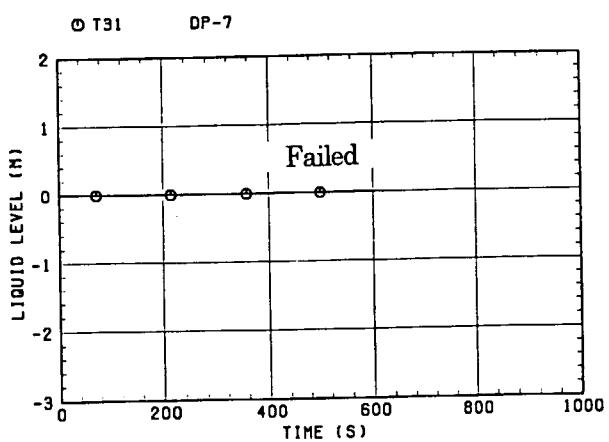
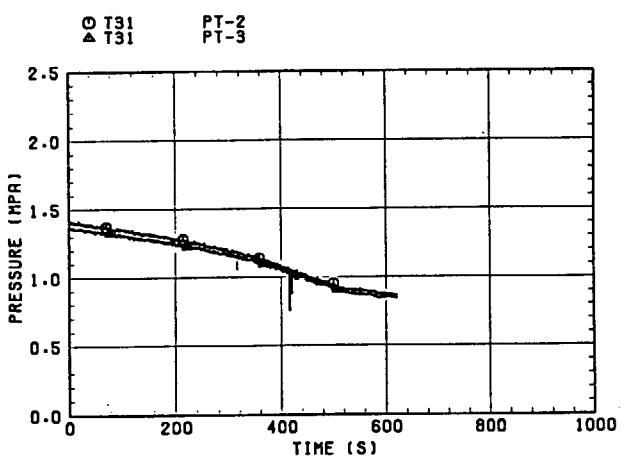
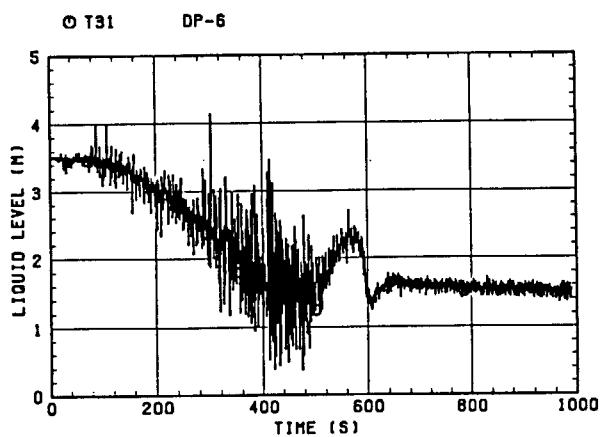
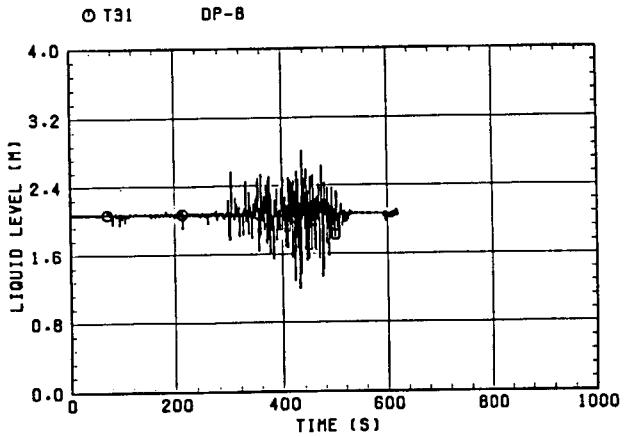
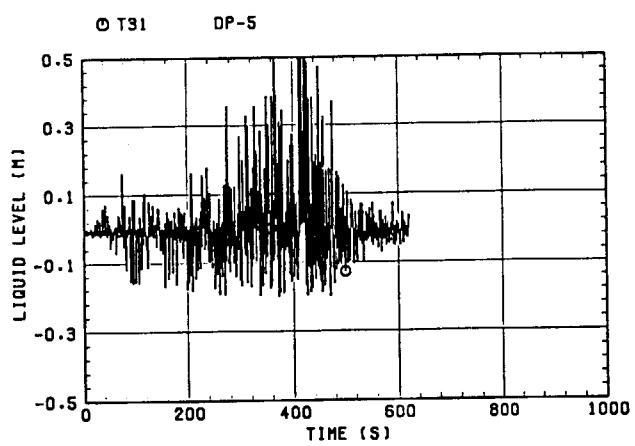
図B-4 ケースT-19の計測データ (2/3)



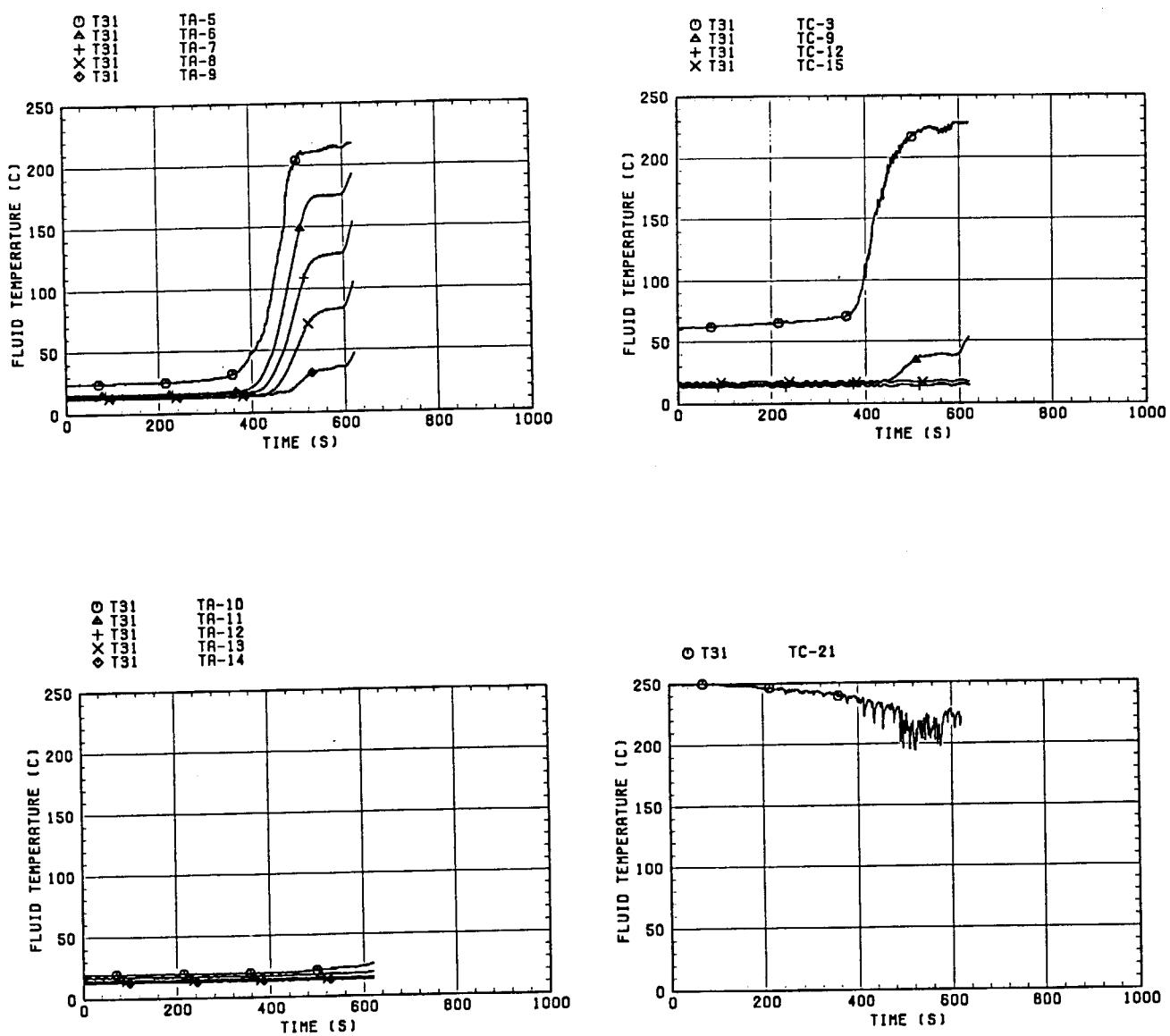
図B-4 ケースT-19の計測データ (3/3)



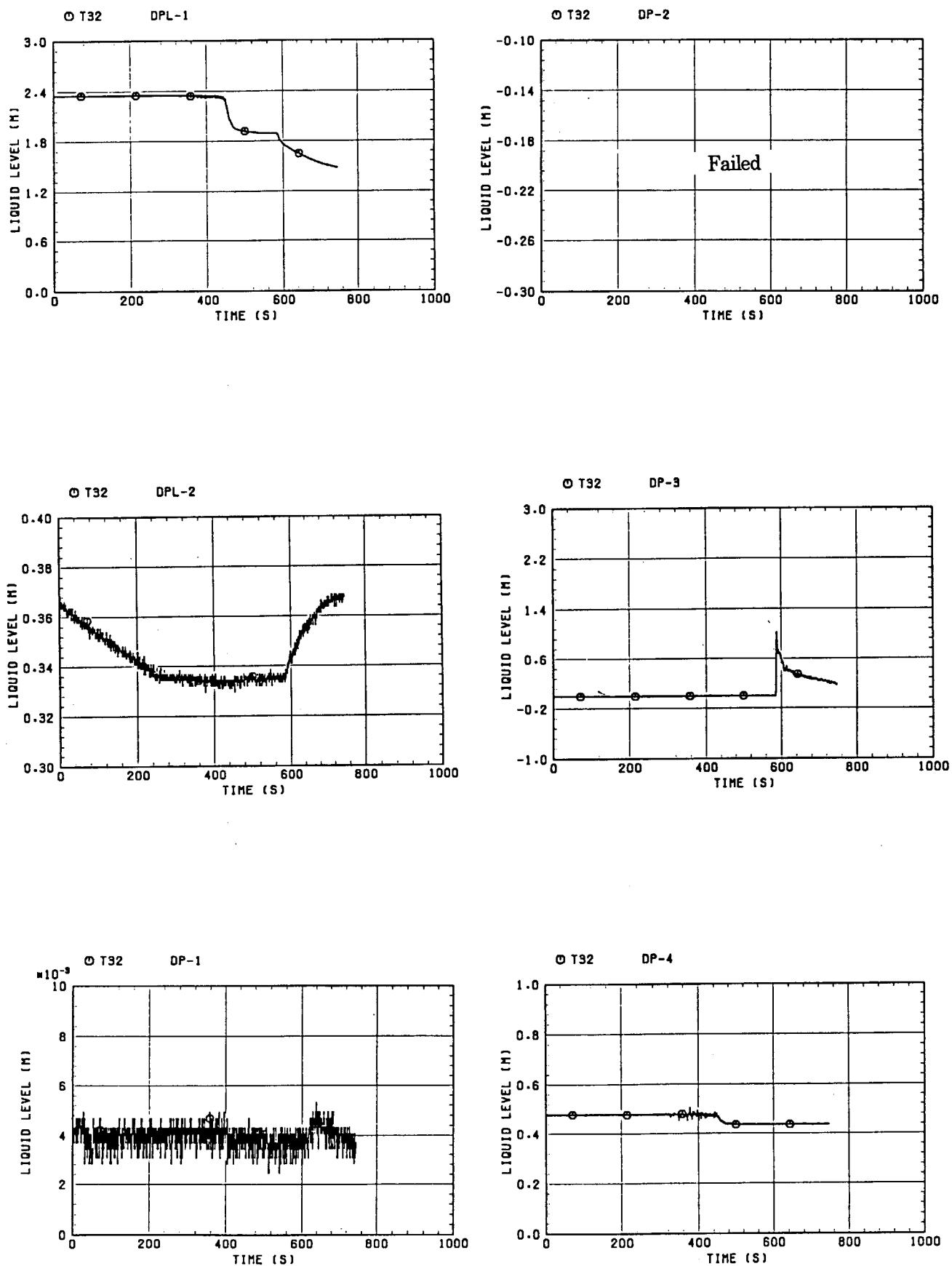
図B-5 ケースT-31の計測データ (1/3)



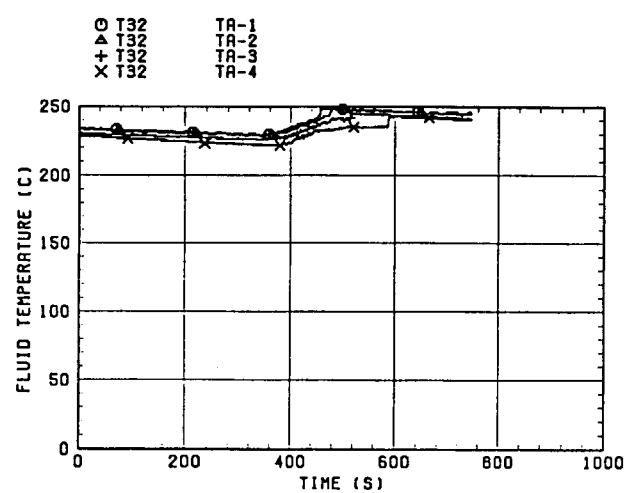
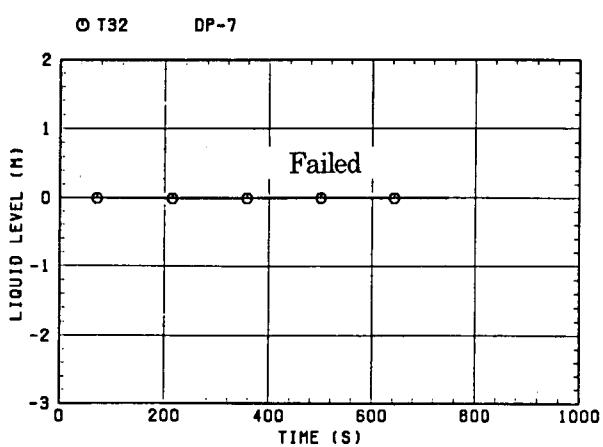
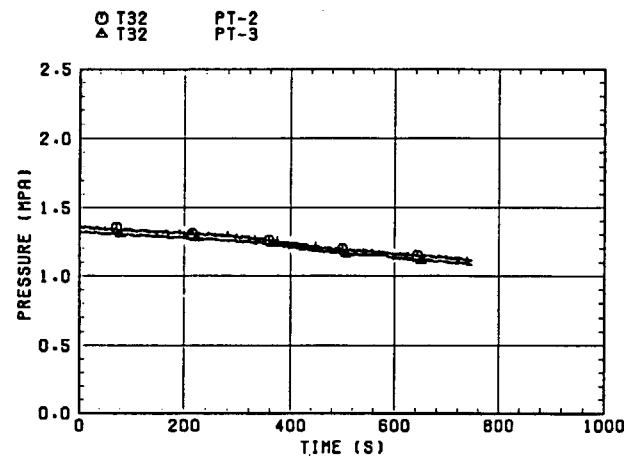
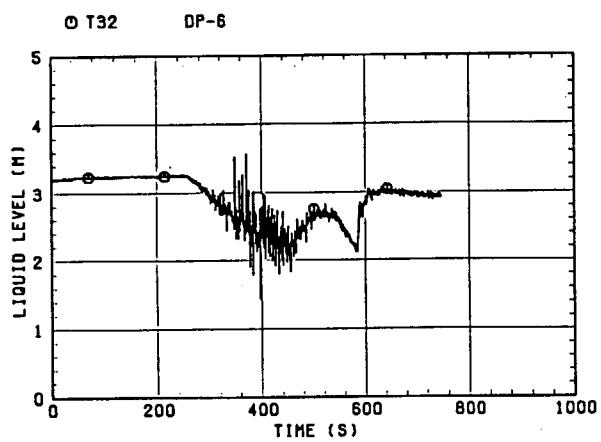
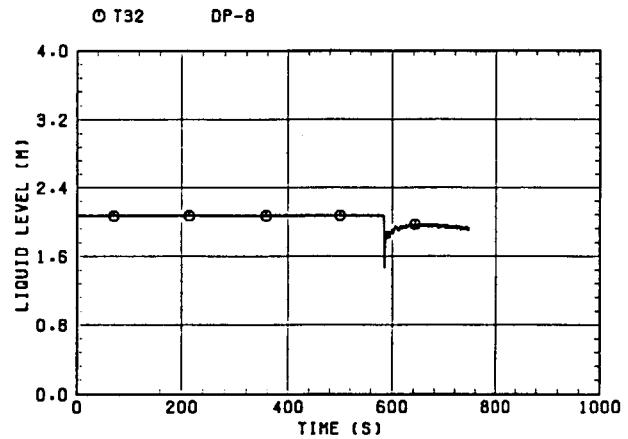
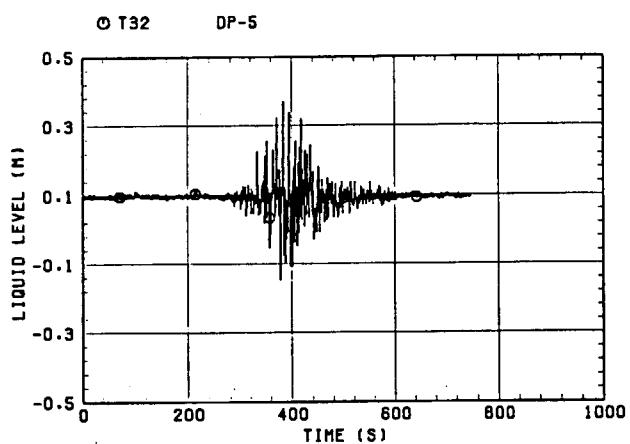
図B-5 ケースT-31の計測データ (2/3)



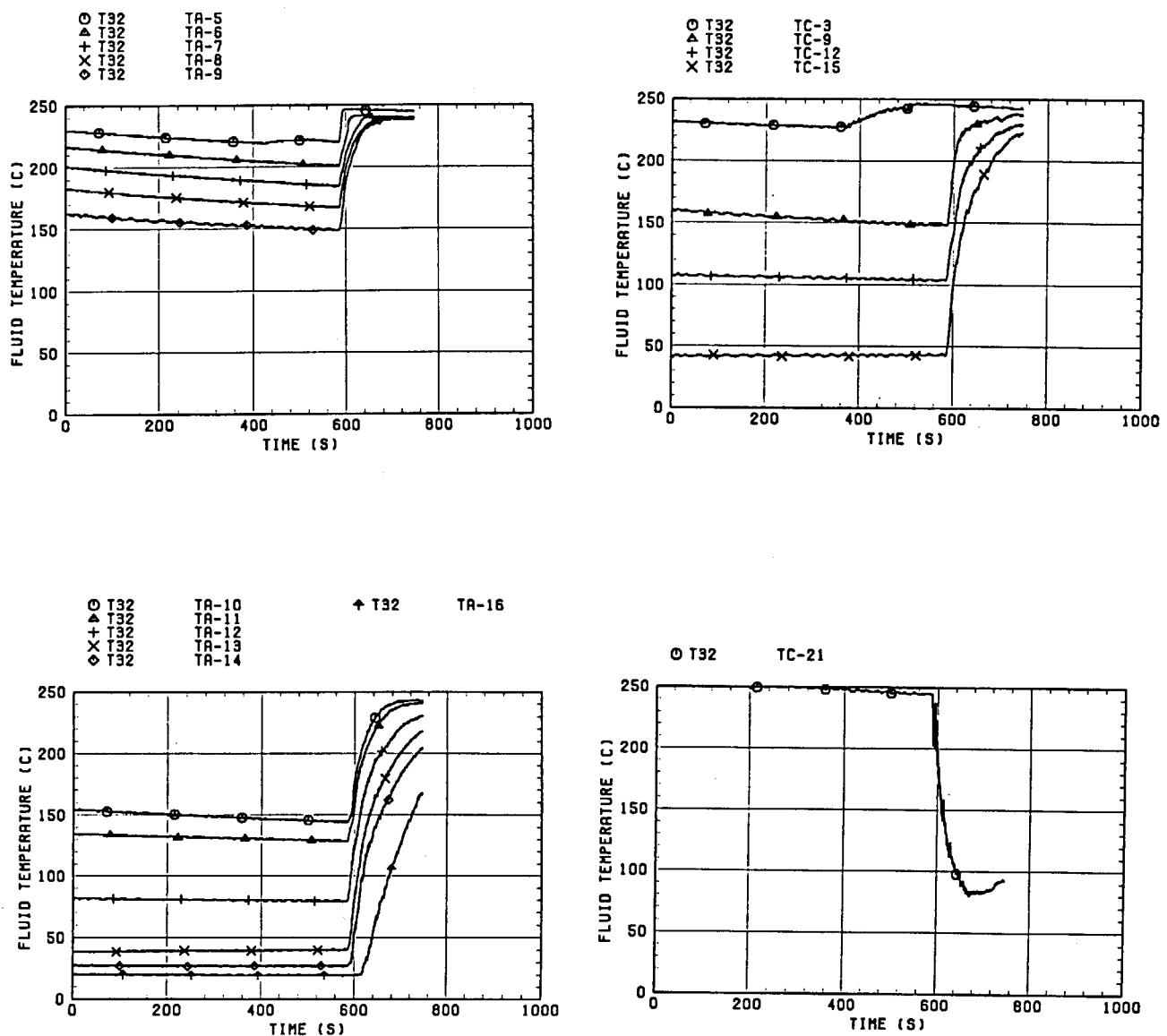
図B-5 ケースT-31の計測データ (3/3)



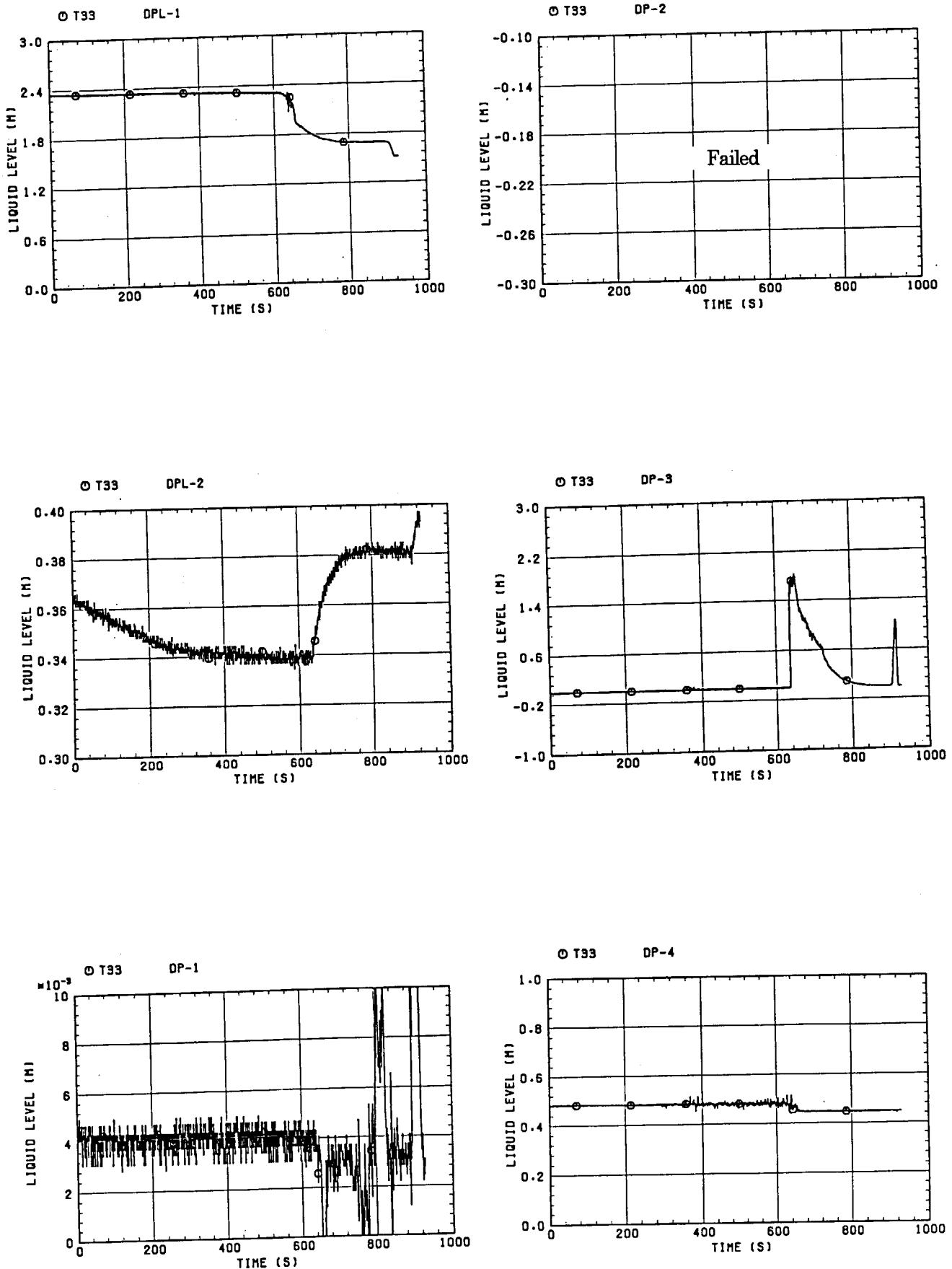
図B-6 ケースT-32の計測データ (1/3)



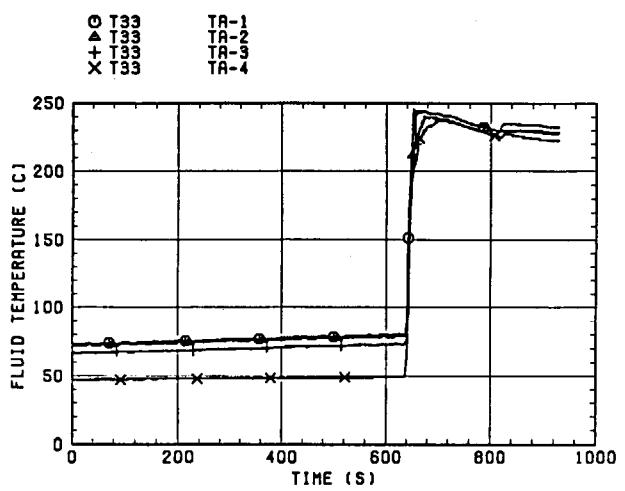
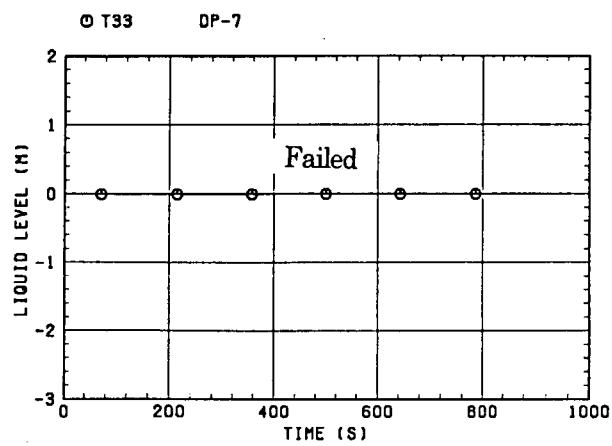
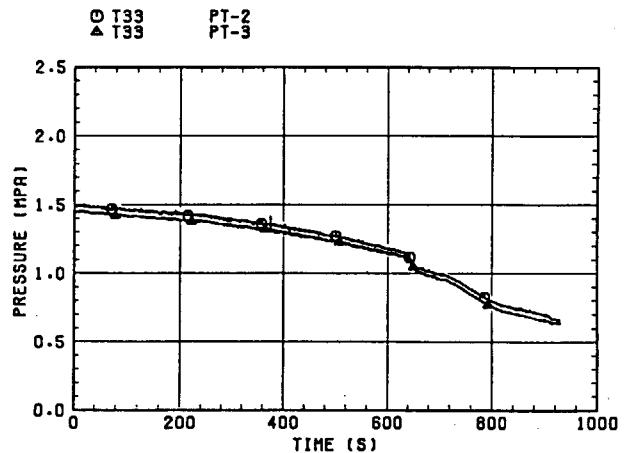
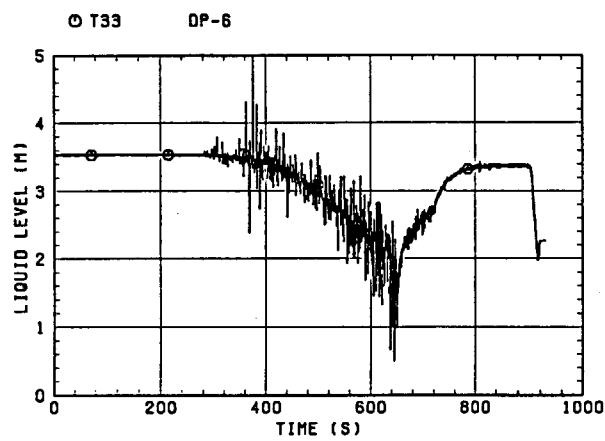
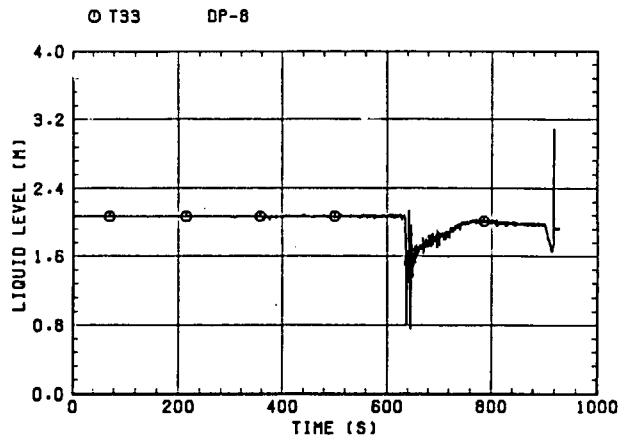
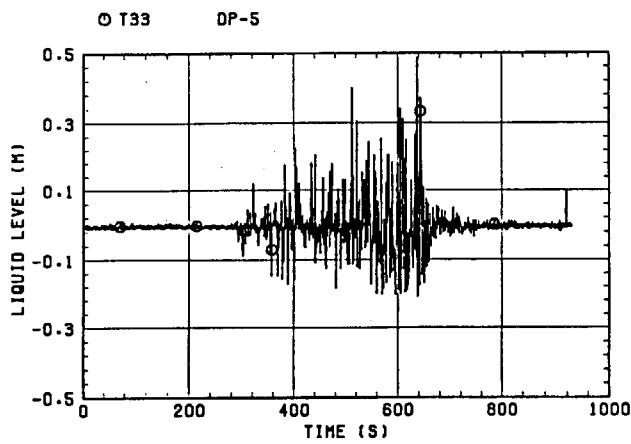
図B-6 ケースT-32の計測データ (2/3)



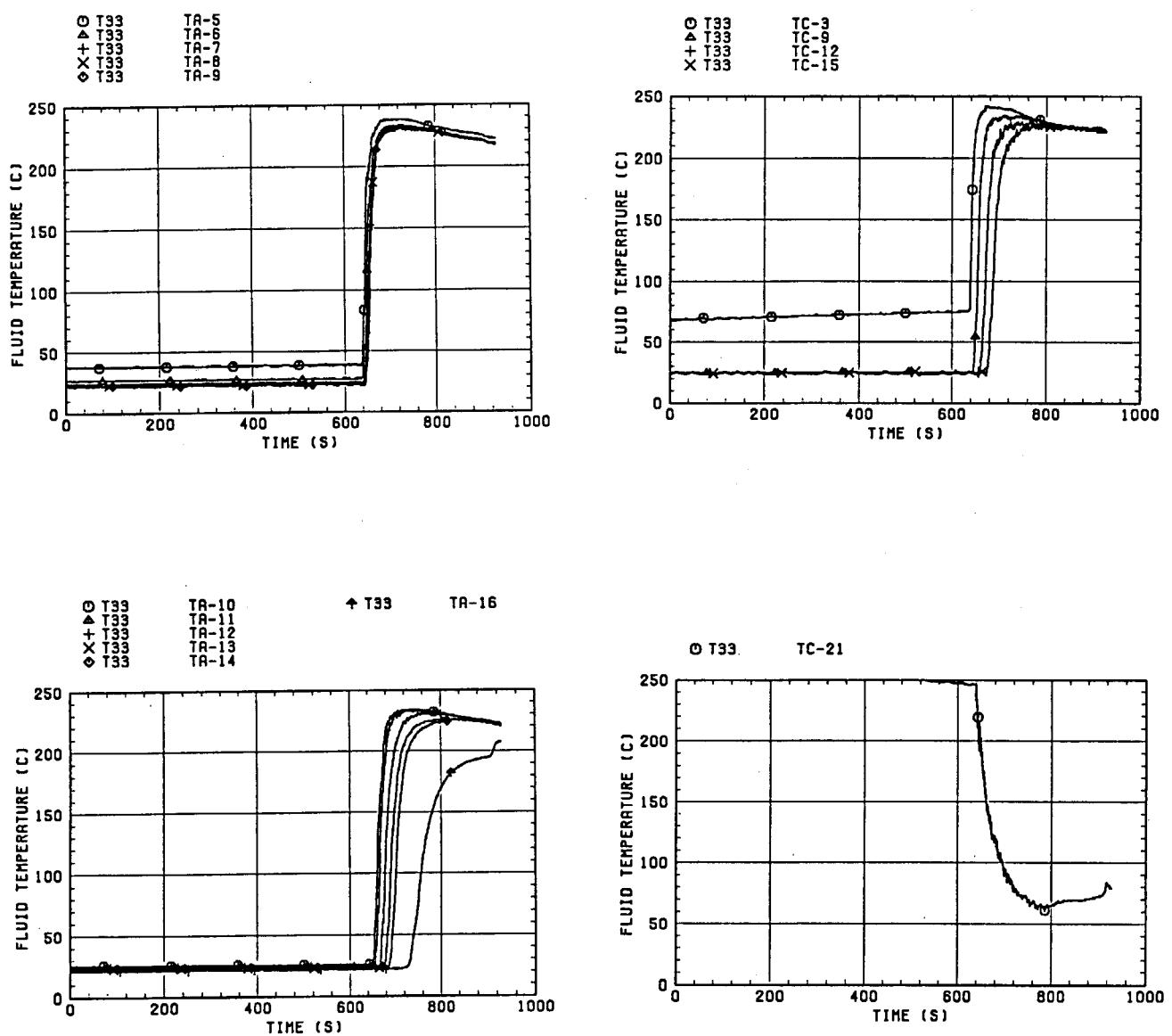
図B-6 ケースT-32の計測データ (3/3)



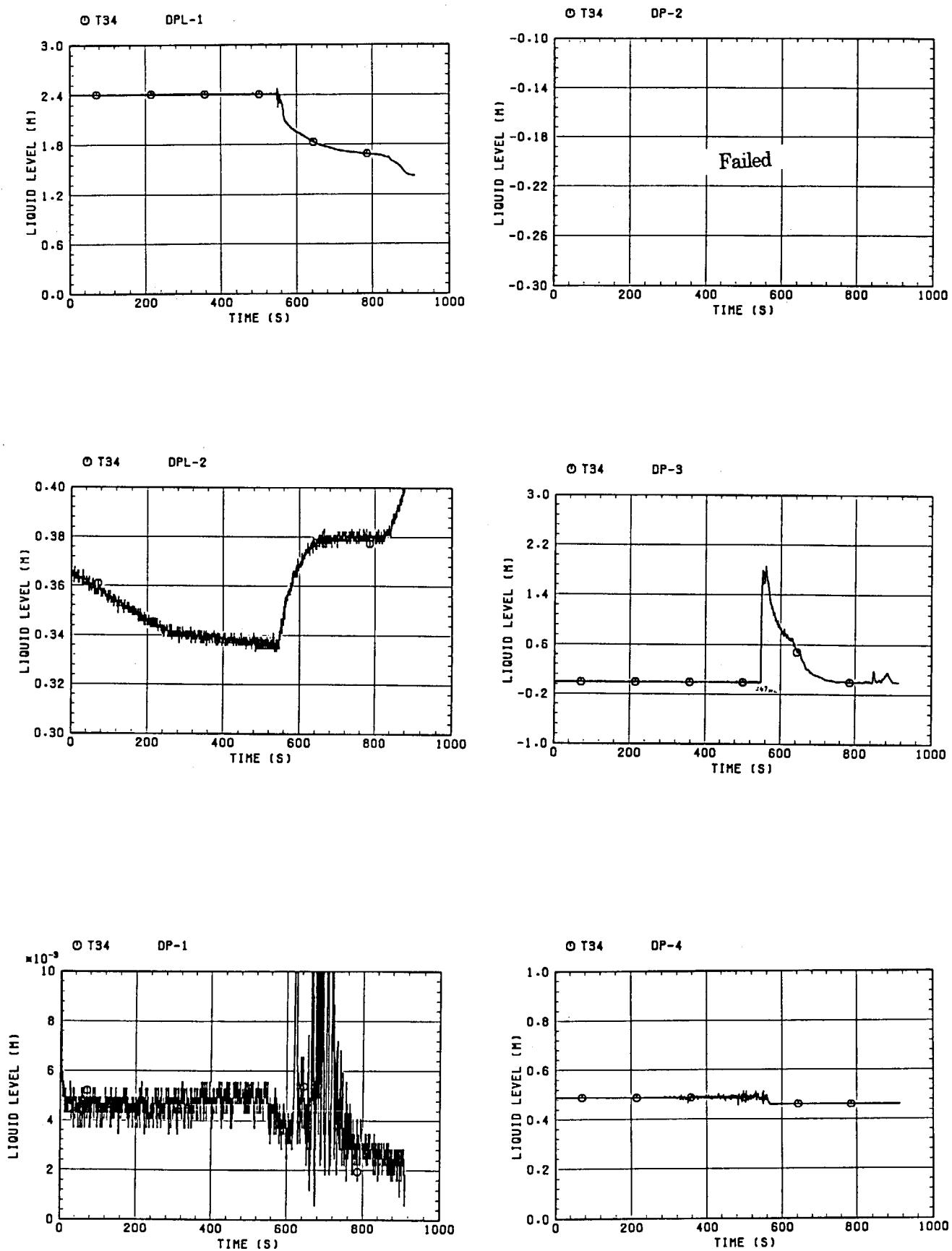
図B-7 ケースT-33の計測データ (1/3)



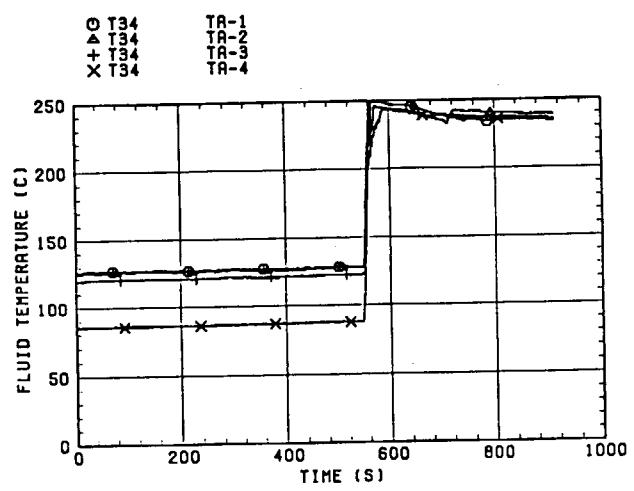
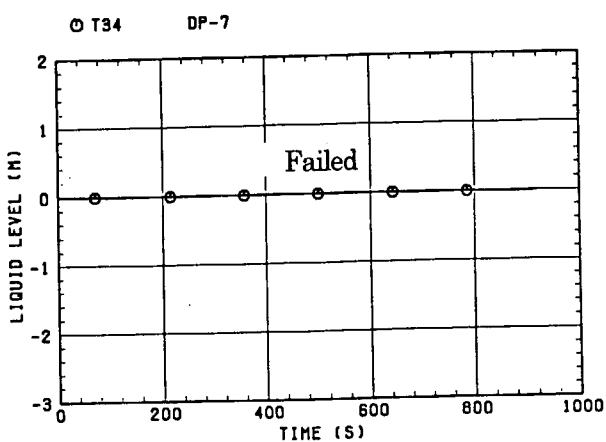
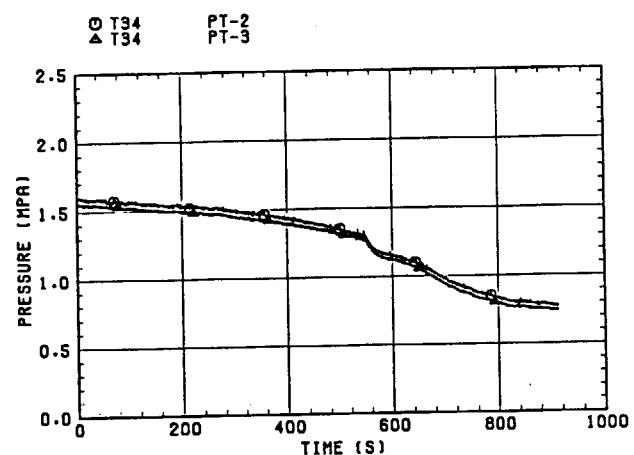
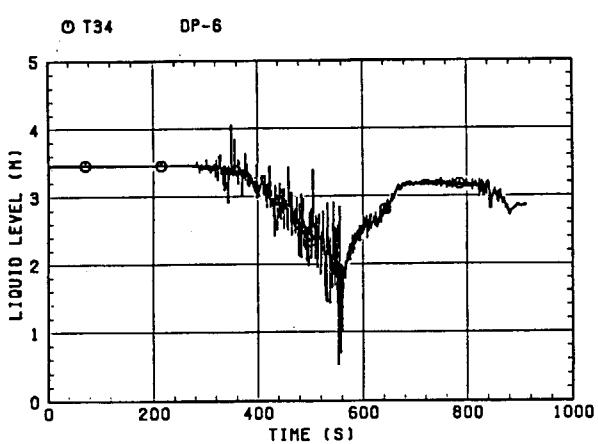
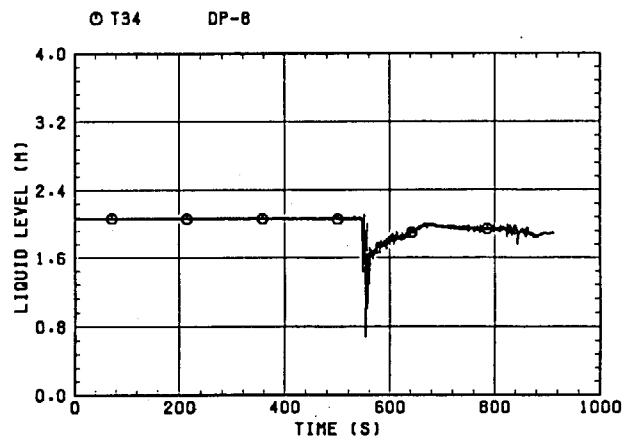
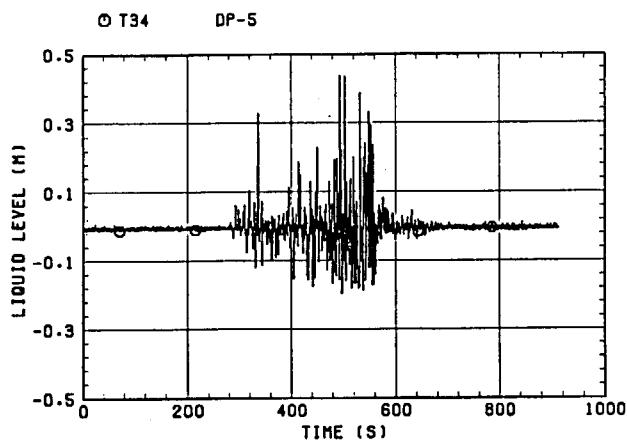
図B-7 ケースT-33の計測データ (2/3)



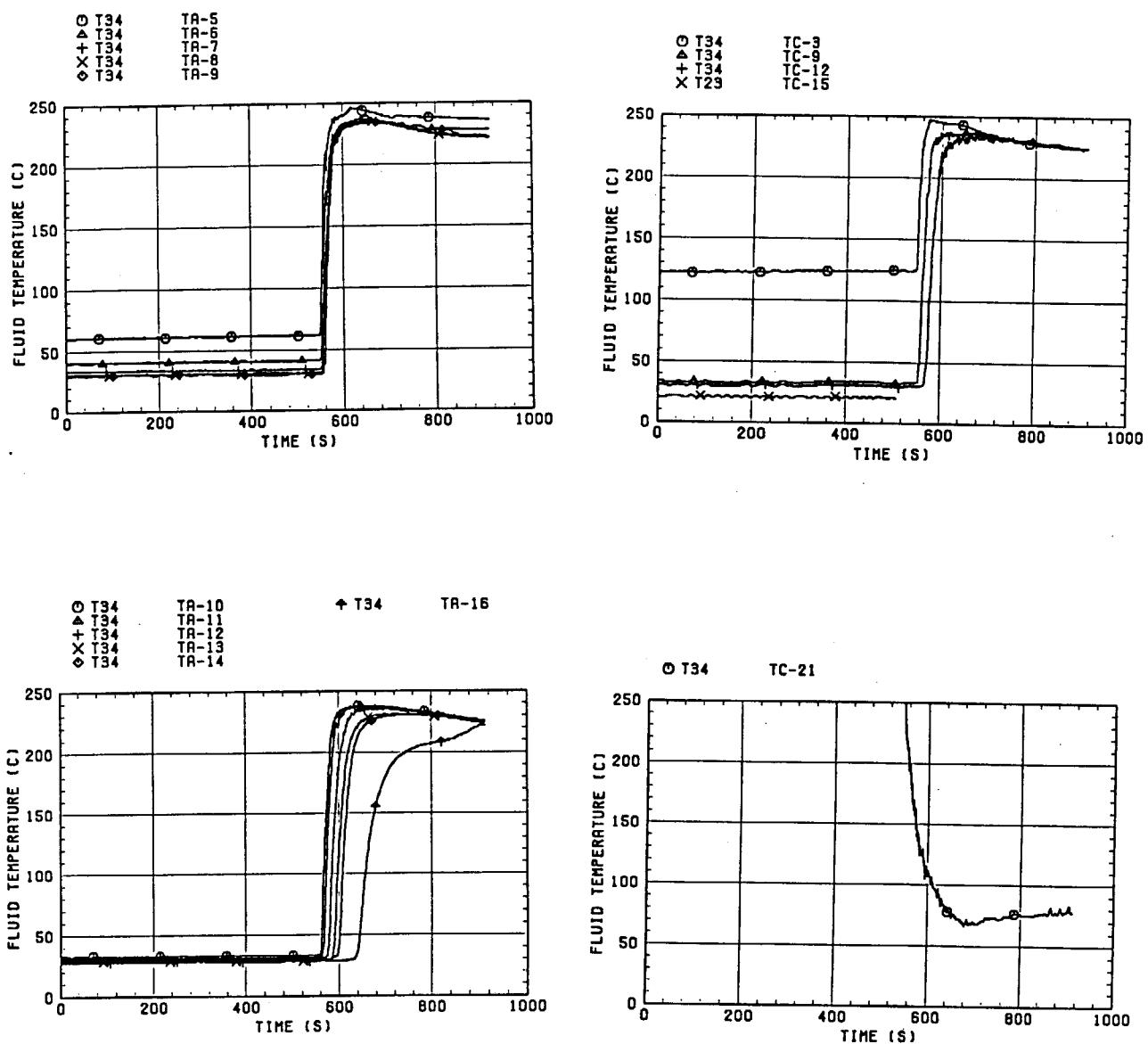
図B-7 ケースT-33の計測データ (3/3)



図B-8 ケースT-34の計測データ (1/3)



図B-8 ケースT-34の計測データ (2/3)



図B-8 ケースT-34の計測データ (3/3)

This is a blank page.

## 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	アト	a

(注)

- 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- ECC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ボアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 <sup>-4</sup>	1.35951 × 10 <sup>-3</sup>	1.31579 × 10 <sup>-3</sup>	1	1.93368 × 10 <sup>-2</sup>
	6.89476 × 10 <sup>-3</sup>	7.03070 × 10 <sup>-2</sup>	6.80460 × 10 <sup>-2</sup>	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>
9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS(仏馬力)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W
1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
3.7 × 10 <sup>10</sup>	1	

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

受動的安全炉JPSSRにおける冷却材均圧注入系の熱水力挙動に関する実験的検討