

高サイクル熱疲労特性に関する試験研究  
—高サイクル熱疲労試験装置の概要と試験計画—  
(研究報告)

2003年1月

核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184,

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2003

## 高サイクル熱疲労特性に関する試験研究

### － 高サイクル熱疲労試験装置の概要と試験計画 －

(研究報告)

長谷部慎一\*、小林澄男\*、安藤昌教\*\*、笠原直人\*\*

#### 要 旨

原子力プラントにおいて高温と低温の流体が合流する領域では、流体の不完全な混合に伴って温度変動が発生するため、接液する構造物の高サイクル熱疲労（サーマルストライピング現象）による破損を防止する必要がある。本研究では、サーマルストライピング現象による温度変動が構造物のき裂発生と進展挙動に及ぼす影響を解明するため、構造物熱過渡強度試験施設（TTS）を改造して、高サイクル熱疲労試験装置を開発した。試験装置の特徴は以下の通りである。

- (1) 循環ポンプを用いた流量制御方式により、高温ナトリウムと低温ナトリウムの流量比を連続的に変化させて、種々の周期において正弦波状の温度変動を試験体に与えることができる。
- (2) ミキシング構造を噴流混合方式にして、高温ナトリウムと低温ナトリウムの混合を促進させることで、軸対称性のある温度変動を発生させることができる。
- (3) 短周期と長周期を重畠させた温度変動についても制御が可能である。
- (4) 円筒状の試験体を用いるため、熱応力解析が容易で、き裂発生から進展までのデータを取得できる。

今後は、ステンレス鋼の試験体に対して正弦波温度変動試験、ランダム温度変動試験および溶接部強度試験を実施する計画である。

---

\* 大洗工学センター 要素技術開発部 新技術開発試験グループ

\*\*大洗工学センター 要素技術開発部 構造信頼性研究グループ

## Experimental Study on Properties of High Cycle Thermal Fatigue

- Outline and Test Plan of High Cycle Fatigue Test Equipment on Sodium —

S.Hasebe\*, S.Kobayashi\*, M.Ando\*\*, N.Kasahara\*\*

### Abstract

At a nuclear power plant, where fluids of high and low temperatures flow into each other, it is necessary to prevent structural failure damage caused by high cycle thermal fatigue (thermal striping phenomenon). High cycle fatigue test equipment on thermal can be developed by modifying the thermal transient test facility for structure (TTS) in order to clarify the effect of temperature fluctuation induced by the thermal striping phenomenon on crack initiation and their propagation behavior. The test equipment has the following characteristic.

- (1) Fluid is controlled by a circulation pump, and by continuously changing the flow quantity ratio of high and low temperature Sodium, sinusoidal temperature fluctuations at various period of the test samples can be taken.
- (2) Mixing is done by the jet flow mix, thus it can generate axisymmetric temperature fluctuations by accelerating the mixing process of high and low temperature Sodium.
- (3) It can also control the temperature fluctuation, in which short and long term changes are superimposed.
- (4) Because the test sample cylinder is hollow, analysis of thermal stress and data from crack initiation to crack propagation can easily be obtained.

Sinusoidal temperature fluctuations, random temperature fluctuations, and strength testing of the weld zone by test samples made of stainless steel are planned in the next stage.

---

\* New Technology Development Group, Advanced Technology Division, OEC

\*\* Structure and Material Research Group, Advanced Technology Division, OEC

## 目 次

1. 緒言	1
2. 試験装置の概要と構成	2
3. 試験装置の仕様	4
3.1 ナトリウムループ	4
3.2 ナトリウム機器	4
3.3 制御装置および計測装置	7
3.4 高サイクル熱疲労試験部	9
4. 試験装置の設計と強度評価	12
4.1 適用規格、基準	12
4.2 配管・機器の設計	12
4.3 試験部周辺の強度評価	13
5. 安全対策	14
6. 運転方法	16
7. 試験装置の性能	20
7.1 試験体の温度変動特性	20
7.2 試験体下流側の温度変動特性	22
8. 試験計画および最適試験条件の検討	23
8.1 試験計画	23
8.2 最適試験条件の検討	24
9. 結言	27
10. 謝辞	28
参考文献	29

## 表 リ ス ト

表 1.1 設計・製作・据付・運転の工程 .....	30
表 3.1 機器リスト .....	31
表 3.2 試験体の化学成分および機械的性質 .....	34
表 4.1 TTS 機器構造設計規格基準 .....	35
表 4.2 試験部周辺の予測破損寿命 .....	36
表 8.1 解析に用いた物性値(SUS304) .....	39
表 8.2 SUS304 鋼の動的応力-ひずみ関係式 .....	40
表 8.3 SUS304 鋼の最適疲労破損式 .....	41
表 8.4 試験体の出入口温度差 .....	42

## 図 リ ス ト

図 2.1 TTSにおける高サイクル熱疲労試験装置の系統図	43
図 2.2 ミキシングティの構造	44
図 2.3 ナトリウム流量制御装置の機器構成	45
図 3.1 TTSフローシート	46
図 3.2 ヘッドタンク循環ラインの改造	47
図 3.3 ヘッドタンク (HET, CET)	48
図 3.4 バッファタンク (BFT)	49
図 3.5 各周波数におけるバッファタンク出口温度の変化	50
図 3.6 ミキシングタンク (HMT, CMT)	51
図 3.7 高温系ナトリウム加熱器 (H-1)	52
図 3.8 低温系ナトリウム加熱器 (H-2)	53
図 3.9 ナトリウム冷却器 (C-1)	54
図 3.10 循環ポンプ (P-1, 6)	55
図 3.11 電磁流量計 (FI-101, 106, 107)	56
図 3.12 流量調節弁 (FCV-101, 106, 107, 111, 112)	57
図 3.13 サンプリング装置	58
図 3.14 TTS制御システム構成	59
図 3.15 監視フローグラフィック画面	60
図 3.16 運転工程画面	61
図 3.17 機器単独操作画面	62
図 3.18 温度設定画面	63
図 3.19 試験条件設定画面	64

図 3.20 メンテナンスメニュー画面	65
図 3.21 監視オーバービュー画面	66
図 3.22 ヒストリカルトレンド記録画面	67
図 3.23 循環ポンプ制御用信号発生装置の基準波形編集画面	68
図 3.24 試験体データ収録装置のシステム構成	69
図 3.25 試験部のナトリウム流動条件	70
図 3.26 ミキシングティおよび試験体	71
図 3.27 热遮蔽管の疲労寿命に及ぼす板厚の効果	72
図 3.28 温度計測試験体の熱電対取付け位置	73
図 3.29 試験体観察セル	74
図 4.1 ループ系統の熱過渡区分	75
図 4.2 試験部周辺の破損寿命比較	76
図 5.1 テストセルおよび観察セルの設置概要	77
図 5.2 防液堤、連通管およびNa受け容器の設置概要	78
図 5.3 ナトリウム漏洩検出器の基本構造	79
図 5.4 ナトリウム漏洩検出器の取付方法	80
図 6.1 全体工程フロー	81
図 6.2 緊急・最適ドレン範囲	82
図 6.3(1) 最適ドレン1範囲	83
図 6.3(2) 最適ドレン2範囲	84
図 6.3(3) 最適ドレン3範囲	85
図 6.3(4) 最適ドレン4範囲	86
図 6.3(5) 最適ドレン5範囲	87
図 7.1 温度計測試験体	88

図 7.2 温度計測試験体の熱電対取付け状況	89
図 7.3 ナトリウム流量の変化	90
図 7.4 試験体の温度変動特性（正弦波）	91
図 7.5 試験体の温度変動特性（周方向）	92
図 7.6 試験体の温度変動特性（軸方向）	92
図 7.7 板厚方向の温度振幅分布	93
図 7.8 重畠波の温度変動挙動	93
図 7.9 周期 2 秒のスペクトル	93
図 7.10 重畠波のスペクトル	93
図 7.11 試験体下流側の温度変動特性（周期 2 秒）	94
図 7.11 試験体下流側の温度変動特性（周期 20 秒）	95
図 8.1 試験体におけるき裂発生状況のイメージ	96
図 8.2 周波数応答関数のゲイン	97
図 8.3 SUS304 鋼の最適疲労曲線（425°C）	98
図 8.4 試験条件検討用チャート 1	99
図 8.5 試験条件検討用チャート 2	100
図 8.6 試験条件検討用チャート 3	101

## 1. 緒言

プラントの冷却系配管で温度の異なる流体が合流する配管ミキシング部では、高温／低温流体の混合によって温度ゆらぎが発生する。この温度変動を伴う流体に接する構造材では、膨張と収縮を繰返して高サイクル熱疲労（サーマルストライピング）を引起することが知られており、サーマルストライピングによる温度変動の振幅や繰返し数が大きい場合には、構造材が疲労破損する可能性がある。このような流体の温度ゆらぎによる熱疲労の発生を防止することは、原子力プラントにおける重要課題の一つとなっている。特にナトリウムのように液体金属を冷却材としている高速炉では、液体金属の高い熱伝達率により冷却材の温度変動が構造材に伝播し易く注意が必要とされる。

このため設計では、モックアップ試験ができない場合には構造材表面の温度変動幅を冷却材の混合前の最大温度差とし、この温度変動に構造材が 100% 応答して膨張・収縮を繰返すと仮定して、安全側へ過大に疲労損傷を評価している。「常陽」や「もんじゅ」では、サーマルストライピングの発生が予測される個所の構造材を熱疲労に強い材料を使用したり、予熱ヒータによる温度制御によって混合する冷却材の温度差を低減させる対策を施している。このように保守的な現行評価法については、過剰な安全裕度を有しており合理化する余地があると認識されていることから、サーマルストライピング現象のメカニズムに基づいた適正かつ合理的な評価法を開発することが望まれている。そこで、サーマルストライピングによる温度ゆらぎが構造材のき裂発生と進展挙動に与える影響を解明するために、既設の構造物熱過渡強度試験施設（TTS）を改造して、短周期のナトリウム温度変動を制御できる高サイクル熱疲労試験装置を設置した。

ナトリウム機器構造第 1 試験室に設置されている TTS は、高速炉の機器・配管等をモデル化した小型配管状供試体に、実機よりもはるかに厳しい長周期の熱過渡荷重を繰返し負荷し、構造物の熱荷重に対する強度を明らかにするための試験装置である。今回の改造で高サイクル熱疲労機能を附加したことにより、TTS は温度変動の周期を広範囲に設定できる総合的な熱過渡試験施設として機能強化された。

高サイクル熱疲労試験装置の設計、製作、据付、運転の工程を表 1.1 に示す。平成 10 年度に TTS の安全対策工事と併行して基本設計に着手し、高サイクル熱疲労機能を TTS に附加することの成立性、制御方法、計測方法、ヒートバランスおよび安全性などを予備検討した。そして、平成 12 年 3 月から本格的に着手し、製作設計、機器製作、据付工事および試運転を経て平成 13 年 9 月に完成した。その後、平成 15 年度から開始するステンレス鋼の高サイクル熱疲労試験に備えて、各機器の調整試験を行った。

本報告書では、高サイクル熱疲労試験装置の概要、構成、性能および調整試験で得られた温度変動特性について述べるとともに、今後の試験計画について報告する。

## 2. 試験装置の概要と構成

本装置は、高温と低温のナトリウム流量比を周期的に変動して温度変動を発生させることにより、試験体に繰返し熱荷重を与えてき裂を発生・進展させるものである。高温／低温ナトリウムの流量制御方法としては、大別して循環ポンプの吐出圧を制御する方式と、機械弁の開度を制御する方式がある。他機関のナトリウムを用いた高サイクル熱疲労試験装置としては、㈱日立製作所が所有する周波数制御ナトリウム中熱衝撃試験装置(TIFSS)およびフランスCEAカダラッシュ研究所の所有する周波数制御ナトリウム試験装置(FAENA)がある。TIFSSは機械弁による開度制御方式、FAENAは循環ポンプと機械弁を併用した吐出圧・開度制御方式を採用しているが、機械弁から発生する高調波が重畠することから、いずれも正弦波状の温度変動を発生させることが困難となっている。このように高調波が重畠して乱れた波形になると強度評価する際の熱応力解析が複雑になることから、温度変動の波形をスムーズな正弦波にすることが望まれていた。そこで、両方式の制御性や耐久性などを系統特性の観点から評価した結果、本装置では循環ポンプによる吐出圧制御方式のみを採用し、循環ポンプの出力をナトリウム流量制御装置でコントロールしながら温度変動の振幅、周期、波形などを制御することにした。

TTSに設置した高サイクル熱疲労試験装置の系統図を図2.1に示す。ループは、高温(600°C)のナトリウムを循環させる高温系、低温(250°C)のナトリウムを循環させる低温系、高温系／低温系から流れ込んだナトリウムの温度変動を緩和させて各系統に戻す合流系から構成されている。試験部は、高温ナトリウムと低温ナトリウムが合流する箇所に設置し、循環ポンプにより高温／低温ナトリウムの流量比を周期的に変動させながら温度の異なるナトリウムを供給できるようにしており、ミキシングティと試験体から成っている。ミキシングティは、図2.2のように高温系の配管に低温系のノズルを差し込んだ構造にして、ノズルに設けた1～2箇所の噴出し孔から低温ナトリウムを径方向に噴流して高温ナトリウムと混合させている。なお、低温ナトリウムが管壁に衝突する箇所には、コールドスポットによる破損を防止するために熱遮蔽管を設置し、下流側には噴流によって乱れたナトリウムの流れを整流する多孔板を設けている。このような温度変動を伴うナトリウムが厚肉円筒状の試験体の中を流れると、繰返し熱荷重が負荷されることになる。試験体を通過したナトリウムは、温度変動を緩和させるために、スタティックミキサおよびバッファタンクを通して高温／低温系にそれぞれ分岐させて戻しており、短周期側はスタティックミキサで、長周期側はバッファタンクで温度変動を吸収することになる。なお、低温系にはループ内のナトリウム純度管理を行うため、ヘッドタンク入口側にサンプリング装置を設置した。

試験部への流入流量の周期的な変動は、各系統の循環ポンプの吐出圧をプログラム制御することによって行い、試験体を流れる合計流量がほぼ一定となるように制御される。

ナトリウム流量制御装置の機器構成を図 2.3 に示す。循環ポンプの制御システムは、TTS 制御装置(YEWMAC)、ポンプ制御用信号発生装置、ポンプインバータ盤および試験体データ収録装置から構成されている。循環ポンプの吐出圧は、試験体を通過するナトリウム温度と流量を確認しながらポンプ出力値を設定することになるが、厳しい温度変動によりナトリウム温度計測用の熱電対を通す貫通穴周辺では熱荷重が集中して早期にき裂が発生するために、実際の強度試験では試験体に貫通型の熱電対を設置することができない。そこで、事前に熱電対を取り付けた温度計測試験体を用い調整試験を行い、ナトリウム温度変動を計測しながら循環ポンプの出力設定値を求める必要がある。強度試験では、YEWMAC とポンプ制御用信号発生装置に目標とする試験条件の設定値を入力することで、ポンプインバータ盤からの電圧出力で循環ポンプが稼動し、高サイクル熱疲労試験を実施することになる。

このように本装置は、高温／低温ナトリウム完全混合方式を採用したミキシング構造、および循環ポンプの出力をコントロールする周波数制御システムにより、ナトリウム流量条件を最大温度振幅 250°C、周期 2~40 秒の範囲で正弦波状の温度変動を設定することができる性能を有している。

本装置は、試験体に繰返し熱荷重を負荷してき裂を発生・進展させる破壊試験を行うことから、高サイクル熱疲労が発生する試験部を含めて厳しい熱過渡を受ける配管・機器は、鋼鉄製のテストセルで覆ってナトリウム漏洩時に外部に影響を及ぼさないように安全対策を施している。また、試験部は観察セルに収納して試験時の状況が確認できるとともに、ナトリウム漏洩時には不活性ガスを注入して窒息消火できるようになっている。早期にナトリウム漏洩を検知し、その漏洩箇所を同定できるようにナトリウムバンダリ部には通電式の漏洩検出器を設置しており、漏洩検知後は、最適緊急ドレン回路により自動でナトリウムをドレンする機能を有している。なお、架台には防液堤や連通管を設けて、大量にナトリウムが漏洩した場合にナトリウムが不活性ガスで満たした受容器に流れ込むようにしている。

### 3. 試験装置の仕様

ここでは、TTSに設置した高サイクル熱疲労試験装置の全体および各機器の仕様について述べる。

#### 3.1 ナトリウムループ

本装置は、高温ナトリウムが循環する高温系ループ、低温ナトリウムが循環する低温系ループ、そして高温／低温ナトリウムが交互に流れ込む合流系ループから構成されている。高温／低温系ループは試験部に一定条件のナトリウムを流入させること、合流系ループはナトリウムの温度変動を緩和させて各系統に戻すことを役割としている。TTSフローシートを図3.1に示す。循環ポンプより吐出されたナトリウムは、流量計、流量調節弁、試験部、スタティックミキサ、バッファタンク、ミキシングタンク、加熱器を経てヘッドタンクまで一巡して循環する。その他に低温系には、ナトリウム温度を降温する冷却器およびナトリウム不純物濃度を管理するサンプリング装置が設置されている。

- ・設計温度 : 高温系 620°C、低温系 470°C
- ・最高使用温度 : 高温系 600°C、低温系 300°C
- ・最大温度差 : 350°C (高温系ナトリウム 600°C、低温系ナトリウム 250°C)
- ・設計圧力 : 0.1~0.5MPa
- ・循環流量 : 0~400L/min
- ・主要配管口径 : 2B sch20s
- ・耐用年数 : 15 年 ただし、熱過渡条件の厳しい高サイクル熱疲労試験部からミキシングタンクまでの系統は 2 年
- ・ナトリウム充填量 : 約 11m<sup>3</sup>

#### 3.2 ナトリウム機器

本装置を構成するナトリウム機器の主な仕様を以下に述べる。ナトリウム機器リストを表3.1に示す。

##### (1) ヘッドタンク (高温系 : HET, 低温系 : CET)

従来のヘッドタンクは、ループ系統内におけるナトリウムの熱膨張を吸収するようにタンク下部にノズルを設けてナトリウムを停滞させていた。試験開始直後には、ナトリウム循環が切替わって高温系(600°C)と低温系(250°C)に 425°C のナトリウムが流れ込み加熱器と冷却器では急激な温度変化に応答できない。そこで、ヘッドタンクを用いて温度を安定化させる機能を付加するため、図3.2のように加熱器からヘッドタンク入口ノズルまでの系統を新たに設けて、タンク内のナトリウムが循環するように改造を行った。タンクの詳細構造を図3.3に示す。

- ・形式 : 横置円筒密閉型
- ・容量 : 約 5.0m<sup>3</sup>
- ・主要寸法 : 約 1.2m φ × 4.35m L
- ・材質 : 高温系 SUS304、低温系 316FR

#### (2) スタティックミキサ (STM)

試験体の出口には、高温／低温ナトリウムの混合を促進させて温度変動を小さくするために、スタティックミキサを設置している。これにより試験体からバッファタンクまでの配管が受ける疲労損傷を軽減すること可能となり、特に短周期(2～20 秒)では温度変動の緩和効果が大きい。

- ・型式 : 配管 (口径 6B sch10s)
- ・容量 : 0.03m<sup>3</sup>
- ・主要寸法 : 0.17m φ × 1.62m L
- ・材質 : SUS304

#### (3) バッファタンク (BFT)

スタティックミキサで緩和できなかった温度変動を完全に吸収して下流側の配管・機器の損傷を軽減するためにバッファタンクを設置している。バッファタンクでは、胴部の熱荷重を軽減するために図 3.4 に示すようにタンクを 2 重円筒胴にしている。そして、ノズルから流入する高温／低温ナトリウムを内部のナトリウムと混合させ、かつ流入ナトリウムが直接タンク壁に接触しないようにするために分散管を設けている。なお、高温／低温ナトリウムがタンク内で分離して成層化することを防ぐために、分散管を上側に据付けている。熱流動解析によりバッファタンクの容量(0.23m<sup>3</sup>)で温度変動を吸収する能力を確認したところ、図 3.5 に示すように温度変動が緩和し難い最大周期 50 秒、温度振幅 250℃ の条件でバッファタンクに流入したナトリウムは、約 40℃まで温度変動が減少しており、この程度の温度差で発生する熱応力は疲労限を大きく下回っていることから、ループの健全性は維持できると判断される。

- ・型式 : 横置円筒密閉型
- ・容量 : 約 0.23m<sup>3</sup>
- ・主要寸法 : 約 0.67m φ × 0.95m L
- ・材質 : SUS304

#### (4) ミキシングタンク (高温系 : HMT, 低温系 : CMT)

ミキシングタンクは、試験開始時や中断時など運転工程を切替える際に生じる大きな温度変動を緩和するために設置されている。基本構造は、バッファタンクと同じように 2 重円筒胴にしてタンクを防護する対策を施している。詳細構造を図 3.6 に示す。

- ・型式 : 横置円筒密閉型
- ・容量 : 約 0.66m<sup>3</sup>
- ・主要寸法 : 約 0.8m φ × 1.4m L

- ・材質 : SUS304

(5) ナトリウム加熱器 (高温系 : H-1, 低温系 : H-2)

既設のTTSに設置されていた機器であり、特に高温系加熱器(H-1)は、高サイクル熱疲労試験の際には合流系から流出した425°Cのナトリウムを600°Cまで連続して昇温しなければならないことから、基本設計により加熱能力があることを確認している。それぞれの詳細構造を図3.7と3.8に示す。

- ・型式 : シースヒータ内挿堅型円筒直接加熱式
- ・容量 : 高温系(H-1) 1,180kW、低温系(H-2) 60kW
- ・主要寸法 : 高温系 1.0m φ × 2.2m L、低温系 0.32m φ × 1.4m L
- ・材質 : SUS304

(6) ナトリウム冷却器 (C-1)

加熱器と同様に既設のTTSに設置されていた機器であり、高サイクル熱疲労時には合流系から流出した425°Cのナトリウムを250°Cまで連続して降温することから、基本設計により冷却能力があることを確認している。詳細構造を図3.9に示す。

- ・型式 : フィンチューブ空冷式
- ・容量 : 800,000kcal/hr
- ・主要寸法 : 1.5m W × 1.6m L × 2.0m H
- ・材質 : 伝熱管 SUS304、ケーシング SS41

(7) 循環ポンプ (高温系 : P-1, 低温系 : P-6)

高温系と低温系からナトリウムを高サイクル熱疲労試験部に移送する電磁ポンプであり、吐出圧を制御することによって、試験体に温度変動を与える。なお、小型化するため下部に6基の冷却ファンを内蔵している。詳細構造を図3.10に示す

- ・型式 : 環状流路型リニア誘導式電磁ポンプ
- ・使用流量 : ~0.4m<sup>3</sup>/min
- ・主要寸法 : ダクト口径 2B sch20s
- ・材質 : 主要部 SUS304

(8) 電磁流量計 (FI-101, FI-106, FI-107)

試験部に送り込む高温／低温ナトリウムの流量を計測するとともに、低温系から高温系に送ったナトリウムと同量を低温系に戻して高温／低温のヘッドタンク液位レベルを一定に維持するように監視する。詳細構造を図3.11に示す。

- ・型式 : 永久磁石電磁流量計
- ・容量 : 流量~0.5m<sup>3</sup>/min
- ・主要寸法 : 流路管口径 50A sch20
- ・材質 : 主要部 SUS304

(9) ナトリウム流量調節弁 (FCV-101, FCV-106, FCV-107, FCV-111, FCV-112)

試験部への送り込むナトリウム流量を調整するとともに、低温系から高温系に戻すナ

トリウム流量を調節する。特に合流系の流量調節弁(FCV-107)では、高温／低温のヘッドタンク液位レベルを安定化させるため、両者の液位偏差を計測して弁開度を自動調節する機能を有している。詳細構造を図 3.12 に示す。

- ・型式 : ベローシール流量調節弁
- ・呼び径 : 50A
- ・方式 : 空気圧作動弁
- ・材質 : SUSF304

#### (10) サンプリング装置

ナトリウム中の不純物濃度が高くなると高サイクル領域の疲労強度に影響を及ぼす可能性がある。そこで、定期的にナトリウムを採取し、酸素や炭素などの不純物濃度を測定してナトリウム純度管理を行うために、低温系にサンプリング装置を設置した。装置完成後にナトリウム分析を行ったところ、TTS 系統内のナトリウム不純物は酸素濃度 6ppm、炭素濃度<2ppm であり高純度に保たれていることを確認した。この程度の不純物濃度では、ナトリウム環境効果による疲労強度の低下を考慮する必要がないと推測される。詳細構造を図 3.13 に示す。

- ・型式 : フロースルー式 (貫流型)
- ・採取容量 : ナトリウム約 100g
- ・主要寸法 : サンプリング管 12.7mm φ × 1000mm L
- ・材質 : SUS304
- ・冷却能力 : 圧縮空気により常温まで 3min 以内に急冷し、ナトリウム不純物の偏析を抑える。

### 3.3 制御装置および計測装置

高サイクル熱疲労試験装置の制御と計測は、以下に述べるループ制御装置と循環ポンプ制御用信号発生装置、そして試験体データ収録装置から構成されている。これらの機器構成を図 2.3 に示している。

#### (1) ループ制御装置

既設の TTS は、ループの運転監視、警報、自動制御、遠隔操作およびデータ収集等を実行する制御装置 (YEWMAC500 システム) を使用しており、本装置の増設に伴い高サイクル熱疲労試験に必要な機能を本システムに追加した。制御装置には、同一の操作機能を持つ 2 台のラインコンピュータが設置され、双方どちらでも操作・監視ができるようになっており、故障等により 1 台が停止した場合でも別のラインコンピュータで TTS の運転操作が可能である。

本システムは、TTS の運転に必要な工程制御機能、運転監視機能、運転データ収集機能および定数ファイルメンテナンス機能を有している。システム構成を図 3.14 に示す。工程制御機能は、ループの自動運転および各機器の単独操作を行うもので、予熱、

ナトリウム充填、調整運転、試験運転、ドレン、ガス導通検査など一連の運転工程を実行する。運転監視機能は、ループの状態および運転データを表示すると共に異常発生時に警報を出力するものである。監視項目としては、機器・配管やナトリウムの温度、ナトリウムの流量、ヘッドタンクとダンプタンクの液位、アルゴンガス系のガス圧などが主なものである。これらが設定範囲を超えた場合、又は過電流・漏電・停電などの電気系トラブルおよびナトリウム漏洩などが発生した場合には、制御盤のブザーと表示灯で異常を運転員に知らせることになる。データ収集機能は、運転データを収集しデータの印字およびトレンド表示を行うもので、パソコンと TELNET 通信により収集したデータを CSV 形式のファイルとしてパソコンへ転送することができる。定数ファイルメンテナンス機能は、運転に必要な各種定数の設定および表示グループの変更を行うものである。図 3.15～22 にラインコンピュータに表示される監視フォローグラフィック画面、運転工程画面、単独操作画面、温度設定画面、試験条件設定画面、メンテナンスマニュ一画面、監視オーバービュー画面およびヒストリカルトレンド画面の一例を示す。

TTS 運転は、事前に設定された運転工程に従い自動制御で行われる。各運転工程には、誤操作防止のために工程間インターロックが組まれており、ループに異常が発生した場合には必要のある機器にインターロックが設けられる。例えば、ループに設置されたナトリウム漏洩検出器が 2 本同時に漏洩を検知した場合には、漏洩した系統に合わせて最適ドレンを自動で行うようにプログラムされており、工程に関係なく実行される。

### (2) 循環ポンプ制御用信号発生装置

温度変動を繰返し発生させて試験体に高サイクル熱疲労を与えるために、高温系と低温系の循環ポンプから温度の異なるナトリウムを交互に試験部に供給している。この循環ポンプの電圧出力を制御し、高温系／低温系のナトリウム流量比を周期的に変動させて、任意の温度変動を発生させるのが循環ポンプ制御用信号発生装置である。

流量変動の周期は 2～50 秒の範囲で選択でき、電圧出力は図 3.23 のように 1 サイクルを 20 分割して各ポイントの出力値を 0～100% で任意に設定できる。流動波形としては、正弦波、三角波、台形波および重畠波などに変動させることができ、それぞれの試験条件に合わせて設定した波形パターンは、保存や呼び出しができる。試験開始時には、ループ制御装置 YEWMAC からポンプ運転指令、ポンプ流量、流量変動幅、流量変動周期の信号を受けて起動させる。循環ポンプ制御用信号発生装置からの出力信号は、高温系と低温系のインバータ盤に送信され、それぞれの循環ポンプに周期的な電圧変動を与えている。

### (3) 試験体データ収録装置

温度計測試験体を用いた調整試験では、試験体のナトリウム温度と流量を確認しながら循環ポンプ制御用信号発生装置の出力値を調整することになる。このナトリウム温度と流量をリアルタイムで表示するのが試験体データ収録装置である。

試験体データ収録装置は 2 台のパソコンから構成され、128 点のデータを 0.05 秒間

隔で 120 秒に亘ってサンプリングすることが可能である。測定開始ボタンを押すと図 3.24 のように各パソコンへ 64 点ごとにデータを取り込んで、測定が完了した時点で 2 つのデータを合成してメインパソコンのハードディスクへ保管する。また、測定後にはデータ解析用ソフトにて収録データを用いて各種の解析やグラフ表示ができる機能を有している。

強度試験の際には、調整試験で設定した試験条件と差異が無く、正常に温度変動や流量変動が発生していることを確認するために、試験体の表面温度やナトリウム流量を監視することになる。また、試験体周辺のミキシングティやスタティックミキサの表面温度を計測して、想定外の温度変動が発生して内部構造物が破損していないかの確認も合わせて行う。

### 3.4 高サイクル熱疲労試験部

高温系と低温系の合流箇所に位置する試験部は、ミキシングティおよび試験体から構成されており、それらは観察セルに格納されている。

#### (1) 高サイクル熱疲労試験部のナトリウム流動条件

- ・ 流量制御方法 : 循環ポンプによる吐出圧制御方式により、高温(600°C)と低温(250°C)のナトリウムを交互に流動させて、図 3.25 のように繰返し温度変動を発生させる。
- ・ 最大温度振幅 : 200°C ただし、試験体の上流部とする。
- ・ 繰返し周期 : 2~40 秒 (0.5~0.025 Hz)
- ・ 最大温度変化速度 : 試験体上流において 40°C/sec 以上
- ・ ナトリウム流量 : 高温／低温ナトリウムを試験体入口でそれぞれ正弦波に変化させるが熱伝達率が変動しないように、合流後の流量の和を常に一定に保持する。また、長周期と短周期の重畠波、三角波、台形波についても制御が可能である。

#### (2) ミキシングティ

高温／低温ナトリウム流量の割合を変化させて正弦波状にかつ周方向に均一に温度変動を発生させるために、各種のミキシング構造を対象とした熱流動解析を行った。その結果、高温／低温ナトリウムを強制的に混合させるタイプが目標とする温度変動を発生させる能力があることがわかった。そこで、ミキシングティは図 3.26 のように高温系の配管に低温系のノズルを差し込んだ構造にして、効率よく混合できるようにノズルには 7 φ の噴出し孔を 12 箇所設けて、その孔から長手方向の配管内流速 1m/sec に対して、低温ナトリウムを径方向に約 10m/sec で噴流させて、強制的に高温ナトリウムと混合させることにした。なお、低温ナトリウムが管壁に衝突する箇所には、コールドスポットによる破損を防止するために熱遮蔽管を設置している。熱遮蔽管の板厚については、図 3.27 のように薄肉化すれば熱応力が軽減されて疲労寿命が向上することから

厚さ 1.5mm にするとともに、流力による振動を抑えるために 2 重管構造を採用した。下流側には噴流によって乱れたナトリウムの流れを整流化し、かつ混合を促進して周方向の温度分布を均一化にする多孔板を設けている。この領域は本装置の中で最も激しい温度変動が発生することから、疲労強度が低下する溶接部を避けるために、多孔板とノズルは棒材からの削り出し加工により製作するとともに、ミキシングティは試験体と一緒に試験毎に交換する。

- ・混合方式：外向き噴流方式
- ・構成部品：フルードヘッド、ノズル、多孔板、熱遮蔽管
- ・材質 : SUS304

#### (3) 試験体

試験体の化学成分、熱処理条件、機械的特性等を表 3.2 に示す。材料は住友金属工業㈱製の SUS304 であり、JIS 規格品(80A,SCH160)の管材を使用している。非金属介在物試験(JIS G0555)およびミクロ組織試験(JIS G0571)の結果は良好であった。ミキシングティと試験体の溶接部は、熱疲労による破損を避けることから熱遮蔽管の外側に設けている。ただし、試験体のき裂発生箇所を乱流域から外すため、多孔板から下流側に約 5 D 離れた個所までは熱荷重を抑えるために板厚を薄く旋盤加工し、下流側に厚肉部（内径 : 66.9mm, 板厚 : 11.1mm, 全長 : 1600mm）を設けて、き裂を発生・進展させる領域としている。内外表面は酸洗い処理されており、試験に有害な加工傷が無いことを確認した。

熱疲労が発生する箇所では、熱電対の据付部のように熱応力が集中し易い部位から破損する可能性が高いことから、実際の強度試験では熱電対を用いてナトリウムや鋼材内部の温度分布を計測することができない。そこで、事前に熱電対を取付けた温度計測試験体を用いて調整試験を行い、ナトリウムと鋼材内部の温度変動を計測しながら、循環ポンプの最適出力値および温度変動特性を明らかにしておく必要がある。

温度計測試験体の構造を図 3.28 に示す。温度計測箇所は、径方向に Na 流体(3mm,1mm)、試験体内表面、板厚内(1.5mm,2.8mm,5.5mm,8.3mm)および試験体外表面の計 8 箇所である。周方向は、Na 流体(3mm)と板厚内(1.5mm,2.8mm)を周方向 90° 每に 4 箇所を温度計測することとした。また、軸方向は、試運転により温度減衰傾向が直線的なことを確認していることから、主に上流と下流の 2 断面とし中流は 1 箇所の Na 流体(3mm)の温度計測を行う。鋼材内部の熱電対は、ナトリウムから試験体への熱伝達を妨げないように水平方向に取付けた。熱電対のシース径は 1.0mm であり、この熱電対の応答特性（時間遅れ）は温度計測に問題ないことを確認している。なお、調整試験中には、破損防止のために応力集中部である熱電対貫通穴周りの累積疲労損傷に注意しながら進めることになる。

#### (4) 観察セル

試験体の温度挙動およびき裂発生進展挙動を計測するセンサーを据付ける空間を確

保するために、図 3.29 に示す観察セルで試験部を覆っている。試験時や異常時には、試験部の状況を監視できるように、耐熱ガラス製の観察窓を設けている。試験体の交換時には観察セルの上側を 2 分割して取り外す構造になっており、試験中はセル内温度を一定に保持することができる。

試験部からのナトリウム漏洩を想定して、漏洩ナトリウムの拡大防止のために受け皿と漏洩検出器を設置するとともに、不活性ガス注入ノズルを設けて窒息消火できる機能を有している。

- ・設計温度 : 620°C
- ・観察窓 : 耐熱石英ガラス製（側面 4 箇所、上面 3 箇所）
- ・内容量 : 約 1.63m<sup>3</sup>
- ・主要寸法 : 1.4m W × 3.1m L × 1.4m H
- ・材質 : フレーム、カバー等 : SUS304、保温材 : ファインフレックスブランケット、セラミックファイバ

## 4. 試験装置の設計と強度評価

本装置は、試験体に高サイクル熱疲労を与えるために繰返し温度変動を発生させるところから、試験部周辺の配管・機器にも厳しい熱過渡が加わることになる。従って、装置の設計に当たっては、耐用期間中の健全性を確保するために各種の規格基準に従う必要がある。ここでは、本装置に適した法規、規格、基準の概要と熱過渡を受けるナトリウムループの構造設計について述べる。

### 4.1 適用規格、基準

本装置に適用した規格、基準を以下に示す。また、既設の TTS と併せて配管・機器の規格、基準を表 4.1 に示す。

- (1) 第 2 種圧力容器構造規格
- (2) 高速原型炉高温第 1 種機器の構造設計方針 (BDS)
- (3) TTS 専用設計基準 (高速原型炉高温第 1 種機器の構造設計方針ベース)
- (4) 発電用原子炉設備に関する構造等の技術基準 通産省告示第 501 号
- (5) 原子力発電所耐震設計技術指針

TTS は試験施設であり、核燃料や放射性物質を取扱う高速炉と比較してナトリウムを加熱する方法が根本的に異なることから、熱過渡の厳しい機器・配管に対しては、既存の高速炉用高温設計基準の安全裕度を合理的に切詰めた上記(3)の TTS 専用設計基準<sup>1)</sup>を使用している。

### 4.2 配管・機器の設計

ナトリウムループは、循環ポンプ、電磁流量計、加熱器、冷却器、ヘッドタンク、ミキシングタンク、バッファタンク、試験部、弁類および配管から構成されている。配管には、内圧・自重・地震荷重・熱膨張荷重が加わるとともに、各機器からの熱膨張変位を受けるため、これらの影響を評価して配管の引き回しやサポート位置を決定している。高温系は、運転温度がクリープ温度域となることから BDS に従って強度評価を行うことになるが、試験部周辺で厳しい熱過渡がかかる配管については、TTS 専用設計基準により評価を行う。設計寿命は、通常の配管で耐用年数 15 年（年間 8000hr 運転）を満足するように設計されている。ただし、厳しい熱過渡がかかる部位および緊急ドレンの熱過渡を受ける部位については耐用年数 2 年としている。

配管の強度解析は、運転条件に合わせて図 4.1 のように温度領域を 6 区分に分類を行っている。

- 区分 1 : 著しい熱過渡がかかる配管 (600°C)
- 区分 2 : 熱過渡は少ないがクリープ温度域 425°C を超える配管 (600°C)
- 区分 3 : クリープ温度域 425°C を超えない配管 (250°C)

区分4：熱過渡がかかり、クリープ温度域425°Cを超える配管(425°C) ただし、緊急ドレン時は(425°C→600°C)

区分5：熱過渡がかかり、クリープ温度域425°Cを超えない配管(250°C) ただし、緊急ドレン時は(250°C→600°C)

区分6：クリープ温度域425°Cを超えない配管(250°C) ただし、サンプリング運転時は(425°C)

上記の区分4、5のように、緊急ドレンの際に高温系から600°Cのナトリウムが逆流する低温系については、設計温度を620°Cとして、他の系統と同様に90回(6回×15年)の緊急ドレンに耐えられるように考慮して設計を行っている。また、高サイクル熱疲労試験の条件が周期20秒以上になると、配管が温度追従して温度差分の熱膨張応力が繰返し負荷されることを配管強度評価に追加している。

機器の強度解析は、熱応力が集中すると推測される試験部(ミキシングティ部、多孔板接続部)やバッファタンク入口ノズルなどの部位については、FEM解析によって構造強度評価を行い個々に要求される強度を満足することを確認している。

#### 4.3 試験部周辺の強度評価

高温／低温ナトリウムを交互に流動させて大きな温度振幅を繰返し発生させるため、試験部周辺の機器や配管は大きな疲労損傷を受けることになる。特にミキシングティやスタティックミキサでは、試験条件によっては試験体よりも早く破損する可能性があることから、試験を支障なく実行するには熱疲労に対する強度評価を十分に行っておく必要がある。

試験体やその周辺部位の予測寿命を比較したものを表4.2と図4.2に示す。試験体には、温度振幅の大きな上流側からき裂が発生し始めて時間の経過と共に下流側へとき裂発生点が移行する。そこで、試験期間を決める場合には、試験体の上流と下流の破損回数や日数の間に入るよう設定しなければならない。試験体に接続されたミキシングティとスタティックミキサは、1回の試験だけでも大きな損傷を受けるので試験毎に交換を行うことになる。従って、これらの部位は試験体下流より長寿命であれば問題ないと判断する。しかし、図4.2に示すようにスタティックミキサ上流側の溶接部では試験条件によって試験体下流より寿命が短くなる場合もあり、この繰返し回数を超えないように試験期間を考慮しなければならない。

スタティックミキサ下流配管からバッファタンクまでの部位は、耐用年数が2年以上で数回の強度試験において連続使用することから、試験毎に累積される疲労損傷が破損限界を超えないように注意するとともに、定期的に配管溶接部の非破壊検査を行って健全性を確認する必要がある。

## 5. 安全対策

TTSは、試験体に繰返し熱過渡を負荷してき裂を発生・進展させる破壊試験を行うことから、周囲の機器・配管も厳しい熱過渡を受けることになる。従って、ナトリウム漏洩に対しては十分な安全対策を施している。ここでは、それぞれの安全装置の概要を述べる。

### (1) テストセル

試験部および周辺の配管・機器は、厳しい熱過渡を受けて破損する可能性があるため、それらを図5.1に示す半機密構造のテストセルに格納して隔離、保護している。本セルは、床と天井に縞鋼板、壁に耐火性材料を用いており、試験部や周辺の配管・機器からナトリウム漏洩が発生しても外部に影響を及ぼさないように防護している。ナトリウムループの運転中は、セル内の温度上昇を防いで計測センサーやケーブル類を保護するため、空気を給排気するプロワを据付けている。ナトリウム漏洩時には自動的にプロワが停止し、ダンパーも閉となってナトリウムエアロゾルがセル外へ放出することを防止する。運転中はセル内が半気密構造となるため、酸素濃度計を設置して酸欠になった場合には警報を発するようになっている。

本装置をTTSに設置したことから、試験部周辺の作業スペースの確保と放熱容量を大きくするため、テストセルの天井を2m高くするとともに、排気プロワを増設した。

- ・主要寸法：9.2m L×5m W×8.5m H ただし、試験部周辺の天井は6.8m L×3.3mW  
×2.0m H を増設した。

- ・構造：運転中は半気密構造、ナトリウム漏洩時は完全密閉構造
- ・材質：床と天井は炭素鋼(SS)縞鋼板、壁は防火パネルを使用

### (2) 防液堤および連通管

各階の外周および機器・配管の床貫通部には原則として、その階以上の保有ナトリウムが全て漏洩したとしても受けられる高さの防液堤を設けている。また、大量のナトリウムが漏洩したことを想定して、図5.2のように装置各階の架台からダンプタンクピット内のナトリウム受け容器まで漏洩したナトリウムを誘導するために連通管を設置している。

- ・材質：炭素鋼(SS)
- ・連通管口径：4B配管 ただし、既設の母管は8B

### (3) ナトリウム漏洩検出器

ナトリウム配管および機器には、ナトリウム漏洩検出器を2本づつ設置する。漏洩検出器の基本構造を図5.3に、取り付け方法を図5.4に示す。漏洩検出器が1本作動した場合には漏洩注意警報が表示され、運転員によってナトリウム漏洩の有無が確認される。漏洩検出器が2本作動した場合には、ナトリウム漏洩が発生したものと断定して自動的に最適ドレンが実行される。

- ・型式 : 配管・機器部一通電式、碍子絶縁、ケーブル型、ステンレス保護メッシュ付  
弁ベローズ部一通電式、電極型

- ・心線 : 材質ニッケル、径 $\phi$  1.2mm

#### (4) 煙検出器

実験室内およびテストセル内の火災を早期に検知できるように、各階の天井に煙感知器を設置した。ナトリウム漏洩等によって火災が生じた場合には、警報が鳴って運転員に知らせることになる。

冷却器空気ダクト部には、冷却器からのナトリウム漏洩を早期に検知できるように煙検出器が2台設置されており、2台が同時に作動するとナトリウム漏洩検出器と同じように最適ドレンが自動的に行われる。

- ・員数 : 架台用－テストセル内2台、テストセル外16台、冷却器用－2台
- ・型式 : 架台用－煙感知型、冷却器用－光電感知型

#### (5) 監視カメラ

テストセル内および実験室の状況を監視するため、遠隔操作ができる監視カメラを試験部や主要機器の周辺に配置し、装置の状況を集中監視室で観察できる。

- ・員数 : テストセル内3台、テストセル外3台
- ・カメラ機能 : ズーム機能、水平・上下方向回転機能、フォーカス機能
- ・監視機能 : 画面分割表示機能、画面自動切替機能

#### (6) インターロック

運転中に異常が発生した場合には、装置を保護するためにインターロックを設けている。主な対象機器は、循環ポンプ、加熱器、冷却器プロワ、テストセル排気プロワ、冷却ファン、弁、コンプレッサーおよび真空ポンプであり、温度、流量、液位、電流等に異常を感じすれば緊急停止する。また、緊急停止中でも緊急ドレンを実行することは可能である。

#### (7) 電源設備

本装置の電源は、商用電源設備、非常用電源設備および無停電電源設備から供給されている。停電時でも監視や停止操作が安全に遂行できるように YEWMAC 制御装置やナトリウム漏洩検出装置の電源は無停電電源設備から、監視・警報装置、予熱ヒータ、弁類および冷却ファンなどの電源は、非常用電源設備から供給されている。

## 6. 運転方法

本装置を含むTTS全体の運転は、コンピュータ制御システム(YEWMAC)で自動的に実行される。ループの運転状況は、集中監視室の制御盤に設置されたパソコンのCRT画面に表示され、異常が生じた時には警報を鳴らして運転員に異常内容と発生箇所を知らせる。運転は工程毎に自動化され、操作はパソコンのキーボードで行われる。また、必要によって各機器を単独で手動操作することもできる。ここでは、図6.1の運転工程に沿って概要を述べる。

### 6.1 運転工程

#### (1) 運転前準備

TTSの運転前点検を実施して健全性が維持されていることを確認した後、電源投入によりYEWMACシステムを起動して運転に必要な条件の設定や確認等を行う。カバーガス圧を調整するため、コンプレッサーを起動させて操作用空気をガス系弁に供給し、ガス圧の上下限値を設定して自動操作に切替える。

#### (2) 試験方法の選択

TTSでは本装置の増設により、4タイプの熱過渡試験が可能となっている。工程選択画面にて「試験名」を選択し、試験目的に合わせて試験方法を選定する。高サイクル熱疲労試験を実行する場合には、下記のサーマル2を選択することになる。

- ・試験1 : コールドショック十ホットショック熱過渡試験
- ・試験2 : コールドショック熱過渡試験
- ・サーマル1 : 高温系／低温系合流試験
- ・サーマル2 : 高サイクル熱疲労試験

#### (3) 予熱

工程選択画面にて「予熱」を選択すると、予め設定した目標温度と昇温時間に従って予熱が開始される。予熱工程はダンプタンクとループに分けられ、各部位の温度差による熱応力の発生を極力抑えるために、10°C/hrの昇温速度で自動制御されて目標温度まで加熱される。

TTSが使用しているダンプタンクには、約85tonのナトリウムが貯蔵されているため、ナトリウム充填の約10日前からダンプタンクの予熱を先行して開始する。また、ナトリウム容量が大きく潜熱時間が長いことから、液面近傍の温度差が30°C以上になるとガス空間に接する上部タンクの予熱を一時停止して、全てのナトリウムが溶解するまでは待機状態となる。

#### (4) ナトリウム弁の開閉チェック

設定温度に到達した後、コンプレッサーからナトリウム弁に操作用空気を供給する。工程選択画面の「Na弁開閉チェック」にて開始を指示して、自動的にナトリウム弁が

正常に作動することを1台毎に確認する。

(5) 真空引き

工程選択画面の「真空引き」にて開始を指示すると、ナトリウム弁およびガス弁の開閉操作と真空ポンプの起動が自動的に行われる。ただし、真空ポンプの動作確認とピラニー真空計の電源投入や元弁開閉の操作は、運転員が行うようになっている。ループ内が設定した真空度に達すると自動で完了する。なお、真空工程時にはダンプタンクをループ系統から隔離している。

(6) ナトリウム充填

工程選択画面の「ナトリウム充填」により開始を指示すると、弁の開閉が自動的に設定されて充填開始状態となる。ただし、充填開始直後は運転員がドレン弁を操作しながら充填速度を調整する。その後、ダンプタンクにアルゴンガスを供給して差圧を大きくしてヘッドタンクまでナトリウムを充填する。運転員は充填中に温度、流量、タンク液位などの変化を監視して異常が無いことを確認する。ヘッドタンクの設定液位に達すると自動的にナトリウム弁が全閉となって充填が完了する。

(7) カバーガス供給

ナトリウム充填が完了すると、アルゴンガス弁が自動的に運転状態へ移行し、ガス圧は自動制御される。

(8) ナトリウム量調整

工程選択画面の「ナトリウム量調整」を選択すれば、余分に充填されたナトリウムのドレンを行うことができる。また、高温／低温系バイパス循環を指定すると、自動的にナトリウム弁が設定され、循環ポンプが起動してナトリウム循環が開始される。

(9) 昇温

工程選択画面の「昇温」を選定すると加熱器が起動し、予め設定された温度と時間に従って昇温が行われる。設定温度に達すると「昇温終了」が画面に表示され、運転員の指示で昇温が完了する。なお、昇温は予熱ヒータでも同時に行われている。

(10) 試験

工程選定画面にて「試験」を選択すると、上記(2)で選定した試験モードによって試験サイクル時間、サイクル回数、試験開始時間に従って試験が開始される。高サイクル熱疲労試験の場合は、試験体の出入口弁とバイパス弁が自動的に設定開度となり、高温／低温系の循環ポンプの出力を周期的に変化させて、繰返し温度変動するナトリウムを試験体に流し込むことになる。ループのナトリウム温度、流量、カバーガス圧およびヘッドタンクの液位は自動的に制御されて、安定した条件下で試験が継続できるようになっている。運転員は、ループ全体が設定通りに制御されていることを監視するとともに、試験体データ収録装置にて高温／低温ナトリウムの流量変動幅と試験部表面の温度変化が正常な挙動を示して試験条件が維持されていることを確認する。

(11) ドレン前降温

工程選択画面の「ドレン前降温」を選定すると、予め設定された温度と時間に従って降温が行われる。設定温度に達すると「降温終了」が画面に表示され、運転員の指示で昇温が完了する。

(12) 通常ドレン

工程選択画面にて「通常ドレン」を選択すると、循環ポンプ、加熱器および冷却器プロワが停止して予熱モードとなる。そして、全てのナトリウム弁が開となってループ側のナトリウムがダンプタンクにドレンされる。

(13) 導通確認

工程選択画面にて「導通確認」を選択すると、ナトリウム弁とアルゴンガス弁が自動操作されて、定められたルート毎にガスページが行われる。導通の確認は、ヘッドタンクの圧力変化率を自動計測することにより行われる。

(14) ドレン後降温

工程選択画面にて「ドレン後降温」を選択すると、予め設定された温度と時間に従って降温が行われる。

(15) ループ停止操作

降温後はループ内にアルゴンガスを封入し、ガス弁を停止状態にしてから機器電源を全て遮断する。

## 6.2 緊急停止および緊急・最適ドレン

工程選択画面にて「TTS緊急」を選択すれば緊急停止、緊急ドレン、最適ドレン、緊急停止、高サイクル中断を任意に行うことができる。また、緊急ドレン、緊急停止および高サイクル中断は、制御盤面に設置されたボタンを押すことにより、簡便に操作が実行できる。それぞれの概要を下記に述べる。

(1) 緊急停止

緊急停止を選択すると、循環ポンプ、加熱器、冷却器プロワの停止および弁操作が自動的に行われる。また、運転中に異常を検知するとインターロックが作動し、これらの機器は緊急停止し、ループの弁は設定された弁状態となり、ホールド状態に維持される。なお、停止中にナトリウム漏洩が発生した場合でも緊急ドレン操作ができる。

(2) 緊急・最適ドレン

ナトリウム漏洩時のドレン方法については、テストセル内で発生した場合には最適ドレンを、テストセル外で発生した場合には緊急ドレンを選択することになる。最適ドレンは、ドレン系配管やダンプタンクノズル部に熱衝撃を与えずに、かつ漏洩箇所から早急にナトリウムをドレンするように考慮したものであり、図 6.2 のように漏洩箇所により次の 5 パターンに分けている。

- ・最適ドレン 1：供試体周辺から漏洩した場合（図 6.3(1)）
- ・最適ドレン 2：試験体周辺および下流側から漏洩した場合（図 6.3(2)）

- ・最適ドレン3：低温系のバイパス系から漏洩した場合（図6.3(3)）
- ・最適ドレン4：テストセル外のループから漏洩した場合、緊急ドレン含む（図6.3(4)）
- ・最適ドレン5：ダンプタンクから漏洩した場合（図6.3(5)）

特に熱過渡条件が厳しくナトリウムが漏洩する可能性が高い合流系では、最適ドレン2を選択して合流系と低温系のナトリウムと一緒にドレンさせることにしている。これにより、合流系のナトリウムはドレン過程で低温系のナトリウムと混合して温度が降下し、ドレン系に与える熱衝撃の負荷を軽減できるとともに、ドレン時間も短縮して漏洩量を少なく抑えられる。高温系のナトリウムはドレン系と同一温度になるまで降温してからドレン操作を行う。なお、最適ドレン4は緊急ドレンと同じ方法であり、ループ全系統のナトリウムを同時にドレンして、ナトリウム漏洩による影響を周囲に拡大させないようしている。

### (3) 高サイクル中断

試験中に軽微な異常が発生して試験継続に支障があると判断した場合には、高サイクル中断を選択する。高サイクル中断は、試験部や周辺ループに熱過渡が負荷されないように高温／低温ナトリウムを一定流量に切替えて合流運転を維持するものである。問題が解決すれば、高温／低温ナトリウムを変動流量に戻して高サイクル熱疲労試験を直ちに再開することができる。

## 7. 試験装置の性能

本装置の高サイクル熱疲労性能を評価するため、試験部の計測試験を実施した。ここでは、得られた計測データの中から代表的な結果を報告する。

高温／低温のナトリウム温度をそれぞれ一定に維持して、温度変動の周期ごとに循環ポンプ制御用信号発生装置の電圧波形と流量変動を調節しながら、試験体および試験部周辺の温度と流量の変動状況を確認して計測試験を実施した。温度計測は、周期ごとに目標精度まで循環ポンプの出力値を調整して、数サイクル分の挙動データを収録した。流量計測は、試験体を通過するナトリウム合計流量を変動させずに熱伝達率を安定化させるとともに、ナトリウムが逆流して上流側の高温系と低温系の配管に損傷を与えないよう監視するために、温度計測と並行して行っている。

計測試験は、下記の条件下で各装置を用いて実行した。

- (1) ナトリウム温度：高温系 600°C, 低温系 250°C ただし周期 2 秒は 610°C/240°C
- (2) 目標温度振幅：200°C (試験体上流側のナトリウム温度)
- (3) 温度変動周期：2, 3, 4, 5, 10, 20, 40 秒
- (4) 平均ナトリウム温度：425°C (高温／低温ナトリウム合流後)
- (5) 平均ナトリウム流量：高温系 150L/min, 低温系 150L/min, 合計 300L/min
- (6) 温度計測試験体：図 7.1 および図 7.2 参照
- (7) 熱電対：JIS K 0.4 級 外径 1mm のシース熱電対, 素線径 0.32 の耐熱被覆熱電対
- (8) シグナルコンディショナ：MTT 社製 2901 型 0~800°C → 0~10V
- (9) 計測装置：横河電機製 WE7000 型(AD 分解能；16 ビット, サンプリング速度；100kHz)
- (10) データ収録間隔：0.05 秒(20Hz)

### 7.1 試験体の温度変動特性

上記の試験条件によって計測された結果の概略は以下の通りである。

#### (1) ナトリウム流量変化

図 7.3 は、周期 2, 20 秒において試験体に流入する高温／低温ナトリウムの流量を計測した結果である。図中の流量和は、高温／低温ナトリウムの流量の和であり、ほぼ試験体内を通過する流量に相当する。流量差は、高温ナトリウムの流量から低温ナトリウムの流量を差し引いた値であり、ミキシングティ部での温度変動と同期していると考えられる。流量和は、周期 20 秒の方が周期 2sce よりも安定しており、短周期側では変動し易い傾向にある。変動幅が±10%以下に抑えられていることから、試験体との熱伝達率に大きな変化はなく良好と思われる。

#### (2) 正弦波における温度変化

図 7.4 は、試験体上流部(断面 1)におけるナトリウム中および試験体板厚内の温度変動を計測した結果である。試験体の計測部は、上流から 200mm 間隔で 8 つに区切り、

その各断面に熱電対を施工したので、断面 1 は試験体最上流部、断面 8 は断面 1 から 1400mm 下流に位置する。各周期のナトリウム温度変動は、正弦波状に振幅 200°C となってほぼ目標通りの挙動を示している。ナトリウムから試験体に伝播した温度変動は、試験体の外表面に向かうに従って振幅が小さくなるとともに、時間的に遅れる傾向がある。振幅の減衰は短周期ほど顕著であり、時間遅れの程度は周期に依存しているように見えるが、周波数の変化は認められない。

### (3) 周方向におけるナトリウム温度変化

図 7.5 は、周期 2, 20 秒におけるナトリウムの最高温度と最低温度の周方向分布を計測した結果である。何れの周期においても 180° 方向近傍の温度が若干低くなる傾向が認められ、周期 2 秒の方がその傾向が強い。この図では示していないが、周方向の偏差は、4 秒以下の短周期で比較的大きくなり最大で 31°C 程度になっているが、5 秒よりも長周期の場合は最大で 11°C 程度に収まっている。これは高温ナトリウムと低温ナトリウムの浮力に違いがあるために、水平方向に据付けた試験体では上下で温度差が生じたものであり、短周期側になると図 7.3 で分かるように最低流量が低下していることから、高温／低温ナトリウムの混合が抑制されて、周方向に温度偏差が現れ易くなったものと推測される。また、短周期での周方向偏差は下流側(断面 8)で大きくなる傾向にあるが、長周期では試験体の上流と下流で偏差の違いはほとんど認められない。この程度の温度偏差であれば周方向に発生する熱応力の分布は小さく、試験に支障は無いと思われる。

### (4) 軸方向におけるナトリウム温度変化

図 7.6 は、周期 2, 20 秒におけるナトリウムの最高温度と最低温度の周方向分布を計測した結果である。温度振幅は、軸方向に対してほぼ直線的に減衰しており、短周期の方が大きく減衰する傾向にある。また、軸方向に対する勾配は、最高温度よりも最低温度の方が若干大きくなっている。試験体の上流と下流で温度振幅の差が大きい程、軸方向で熱応力の分布が大きくなり、1 体の試験体で広範囲の熱過渡を与えることが可能となる。特に短周期では、き裂発生から進展挙動まで多くの強度データを得られることが期待できる。

### (5) 試験体における板厚方向の温度変化

図 7.7 は、試験体内に埋め込まれた熱電対によって計測された板厚方向の温度振幅を計測した結果である。ナトリウム中(図中の-3mm) の温度振幅は一定であるが、周期によって温度変動の伝播が異なり、短周期ほど温度振幅が減衰し易い傾向が認められる。本装置で用いる試験体の板厚(11mm)では、周期 2~40 秒において様々なき裂挙動を得ることが可能である。

### (6) 重畠波における温度変化

上記で述べた単一周波数での正弦波の温度変動に加え、異なる周波数を重畠させた温度変動を発生させる熱過渡試験の可否を確認した。図 7.8 は周期 20 秒と 2 秒を重畠させた場合のナトリウム温度を測定した結果である。これは、高温側のナトリウム流量を

長周期で変動させながら低温側のナトリウム流量を短周期で変動させて得られたものであり、実際の重畠波形の適用に際してはナトリウム流量をさらに詳細に調節する必要がある。しかし、これにより異なる周期の温度変動を重畠できることが確認できた。

#### (7) 温度変動のスペクトル

図 7.9 は代表例として周期 2 秒における温度変動のスペクトルを示したものである。基本波成分の温度振幅は約 100°C であり、第 2 調波成分が約 11°C、第 3 調波成分が約 5°C、さらに第 4 調波成分として約 1°C の高調波成分が重畠している。それよりも高い周波数成分はほとんど無視できる程度である。この場合の波形のひずみ率を電気の交流波形に倣って求めた結果は約 12% である<sup>2)</sup>。ひずみ率は周期が長くなるほど小さくなる傾向があり、周期 20 秒では約 6% であった。図 7.10 は前述の重畠波のスペクトルである。基本波成分と重畠波成分が大きなピークを示している。以上の結果から、高調波は比較的低く抑えられて良好であることが分かった。

上記(1)～(7)の計測結果から、本装置は試験体に対してほぼ目標通りの温度変動を負荷できる性能を有していることを確認できた。

#### 7.2 試験体下流側の温度変動特性

図 7.11 と 7.12 は、周期 2 秒と周期 20 秒において試験体から下流側配管等の温度変動を計測した結果である。図中の(a)は試験体最下流部のナトリウム温度、(b)はスタティックミキサの外表面温度、(c)は下流側配管の外表面温度、(d)はバッファタンク内とバッファタンク出口配管表面の温度である。周期 2 秒では、スタティックミキサの効果で下流側配管の温度変動はほとんど認められない。周期 20 秒では、スタティックミキサの下流側配管でも若干の温度変動が残るが、最終的にはバッファタンクで均一化されている。

このように試験部で発生させた温度変動は、スタティックミキサおよびバッファタンクの緩和効果によって、ほぼ設計通りに温度変動を吸収できることを確認できた。

## 8. 試験計画および最適試験条件の検討

### 8.1 試験計画

サーマルストライピング評価法の検証に必要な強度データを取得するため、本装置を用いて下記の高サイクル熱疲労試験研究を実施する計画である。

#### (1) 正弦波温度変動試験（平成 15～16 年度上期）

流体の温度振幅が同じであっても、周波数によって構造材の応答性が変化して構造材の強度に影響を及ぼすことが解析的検討によって明らかになっている。そこで、このような周波数応答性が構造材のき裂発生と進展挙動に与える影響を解明するため、SUS304 試験体を用いて温度振幅 200°C、周期 2 ～40 秒の熱過渡条件で試験を実施する。得られた強度データにより、サーマルストライピング評価法を検証するとともに、高サイクル熱疲労の破損メカニズムを明らかにする。なお、試験条件の検討については、次の 8.2 章で詳細に述べる。

#### (2) ランダム温度変動試験（平成 16 年度下期）

短周期と長周期の波形を重畠させた熱過渡条件により、SUS304 試験体の高サイクル熱疲労試験を行い、ランダム温度変動に対する評価法の適用性を確認する。また、材料強度試験の結果と比較して、熱過渡試験と機械試験の破損メカニズムの相違点について検討を行う。

#### (3) 溶接部強度試験（平成 17 年度上期）

SUS304 溶接部試験体を用いて高サイクル熱疲労試験を行い、ステンレス鋼溶接部の不連続性（形状、材質）が疲労強度に与える影響を明確にする。試験体に各種溶接部（施工法、余盛り有無など）を設けて、き裂発生と進展挙動の違いを明らかにする。

#### (4) 温度・き裂計測技術の開発（平成 14～17 年度）

試験精度と効率を向上させるために、上記(1)～(3)の試験と並行してナトリウム温度と試験体に発生するき裂を正確に把握できる計測技術を開発する。

高サイクル熱疲労を発生させている領域において、貫通型の熱電対を用いると構造不連続部に熱応力が集中して早期に破損するため、ナトリウム温度を計測することが困難となっている。試験に支障を与えないに試験体を通過するナトリウム温度の変動挙動を計測することは、試験精度を維持するために望ましいことから、非貫通型の温度計測技術を開発する。

高サイクル熱疲労試験によって構造材のき裂発生・進展挙動を明らかにするためには、図 8.1 のように試験体にき裂未発生領域、初期き裂発生領域およびき裂進展領域を分布させる必要がある。き裂は、試験体の内表面から発生するため、試験を終了する前に内部の非破壊検査を行い、所定の箇所にき裂分布が得られていることを確認しておかなければならぬ。現状の非破壊検査技術では、高温状態で長時間に亘ってき裂を計測することが困難であることから、試験を中断して RT・UT 検査を行って、き裂が発生・進

展していることを確認することになる。しかし、試験中断の度にナトリウムドレンと充填を繰返すことになり、試験効率を向上させるには試験中にき裂計測できることが望ましいことから、本試験条件に適したき裂計測技術の開発を行う。

## 8.2 最適試験条件の検討

高サイクル熱疲労試験により構造材のサーマルストライピング評価法の開発に有効な強度データを得るために、試験体に対してき裂発生から進展に至るまでの損傷を与えるように試験条件を設定しておく必要がある。ここでは、来年度から開始する周波数応答性確認試験の最適試験条件を導くための検討内容について述べる。

使用した記号を以下に示す。

H	; 热伝達率
V	; 流量
Bi	; ビオ数
Re	; レイノルズ数
Pr	; プラントル数
t	; 板厚
$\lambda$	; 热伝導率
$\alpha$	; 線膨張係数
E	; ヤング率
$\Delta \sigma$	; 応力範囲
$\Delta \varepsilon_e$	; 弹性ひずみ範囲
$\Delta \varepsilon_{ep}$	; 全ひずみ範囲
Ke	; ひずみ集中係数
q	; 弹性追従係数

### (1) 热応力の発生原理と周波数応答関数による評価法

サーマルストライピングに対する热応力はビオ数と流体温度差で規定される。ビオ数 Bi 及び热伝達係数 H は以下の式[1]、[2]より求められる。

円管乱流 (Seban&Shimazaki) の式

$$\begin{aligned} Nu &= 5 + 0.025 \times Pe^{0.8} \\ Pe &= Pr \times Re \\ Re &= (V \times De) / \nu \\ H &= (Nu \times \lambda) / De \end{aligned} \quad [1]$$

ビオ数の算出

$$Bi = (H \times t) / \lambda \quad [2]$$

周波数応答関数は有効热伝達関数と有効热応力関数の積により求まる<sup>3)</sup>。板厚をパラメータとして周波数応答関数のゲインを、周波数を横軸にとりグラフ化したものを図 8.2

に示す。この図より構造物板厚の違いによりゲイン値がピークを示す周波数が異なることがわかる。計算に用いた物性値を表8.1に示す<sup>4)</sup>。ゲイン値は試験体の形状を考慮し、また保守的な評価を行うため曲げ拘束のみを考慮している。試験体に生じる熱応力は式[3]で求められ、ヤング率で割ることで式[4]の弾性ひずみ範囲  $\Delta \varepsilon_e$  が求まる。

$$\Delta\sigma = (E \times \alpha \times \Delta T \times Gain) / (1 - \nu) \quad [3]$$

$$\Delta\varepsilon_e = \Delta\sigma / E \quad [4]$$

## (2) ひずみ集中係数の適用

降伏応力を有する材料では弾性ひずみに対する塑性ひずみの割合が増加すると実効的な材料非線形性が増すため、ひずみ集中も大きくなる<sup>5)</sup>。これを考慮したひずみ集中係数として、塑性ひずみ単独の増加割合を示す弹性追従パラメータを使用した  $Ke'$  を用いた。

$Ke'$  の算出法を式[5]に示す。またこれを用いて全ひずみ範囲を式[6]により求めた。

$$Ke' = 1 + (q - 1)(1 - \sigma_{ep} / \sigma_e) \quad [5]$$

$$(q = 5/3)$$

$$\Delta\varepsilon_{ep} = Ke' \times \Delta\varepsilon_e \quad [6]$$

## (3) SUS304 鋼動的応力ーひずみ関係

SUS304鋼はひずみの繰返しにより材料が硬く（応力範囲が大きく）なる現象が、実験により確認されている<sup>4)</sup>。そのため今回の試験条件算出において、ひずみ範囲から応力範囲を求める場合、上記を考慮した動的応力ーひずみ関係式が必要となる。SUS304鋼の動的ー応力ひずみ関係式を表8.2に示す。

## (4) SUS304 鋼最適疲労損傷式

表8.3にSUS304鋼の最適疲労破損式を示す。また疲労破損式をグラフにしたもの図8.3に示す。疲労曲線算出の際用いた温度は試験平均温度425°C、ひずみ速度は各板厚のゲイン曲線から得られたピーク値から算出した。

## (5) 試験条件の考察

求めた周波数応答特性を評価する場合、ある試験期間を想定することで周波数から破損繰返し数を推定することができ、SUS304鋼の最適疲労曲線と重ね合わせて評価することができる。

試験期間を7日、30日、60日と限定した場合のひずみ範囲とサイクル数との関係を各板厚（9mm、11mm、13mm、15mm、17mm、20mm）について板材の最適疲労曲線にオーバープロットしたものを図8.4に示す。図から試験期間7日間を想定すると、周波数特性より得られた応答曲線はピーク付近において最適疲労曲線を下まわっており、板厚によっては試験体にき裂が発生しないことが予想できる。対して試験期間30日間または60日間を想定すると、すべての板厚において応答曲線のピークが最適疲労線

図を上まわっており、特定の周波数領域において試験期間中に試験体にき裂が生じる可能性を示している。試験周波数を広く取るためには応答曲線が広い範囲で疲労曲線を上まわることが必要となる（図8.5）。試験期間を60日間とした場合、応答曲線のピークを含むより広い周波数範囲で試験を行うことができる。また、一般的に板厚を厚くすると、発生熱応力が大きくなり、試験期間を短くすることができる。このことを試験体の製作効率と共に考慮し、本研究では試験期間60日間、板厚11mmと15mmのものに注目することとした。

温度計測試験の結果、7.1章で述べたように試験体の出口温度は入口温度に比べ温度差の振幅が減衰することが明らかとなっている。これは下流側に行くにしたがい内部流体の熱伝導により高温ナトリウムと低温ナトリウムの温度差が少なくなることに起因すると考えられる。代表的な温度データを表8.4に示す。今回の試験条件の考察には試験体内面から3mm離れたナトリウム中の温度データを用いた。試験体下流側では上流側に比べ温度振幅が小さいことより、発生する熱応力が低減することができる。これを利用し、上流側で発生、進展したき裂を下流側では抑えることができれば、一定試験期間内でき裂の発生から進展までの連続したデータを得ることができる。

図8.6に試験期間を60日と推定した場合の板厚11mm、15mmの応答曲線と、SUS304鋼の最適疲労曲線を示す。また応答曲線上には各周波数に対する試験体の上流部と下流部の温度振幅により生じる熱応力から推定したひずみ範囲をプロットした。試験体の上流部と下流部のひずみ範囲がそれぞれ疲労曲線を挟んで分布する場合、上流部ではき裂が発生するが下流部では発生までには至らないことを示唆しており、試験条件としては望ましいことになる。図8.6から試験体の板厚を11mmとした場合では、長周期側の周期40秒で上流部のひずみ範囲が疲労曲線に接近しているものの、短周期側では疲労曲線が上流部と下流部の中間に位置して良好であることがわかる。一方、試験体の板厚を15mmとした場合では、5秒～40秒の広範囲において上流部と下流部のひずみ範囲が疲労曲線を挟んでおり、より広く周波数条件を設定することが可能となる。しかし、周期2～40秒の範囲で応答性のピークを求める場合には板厚11mmの方が有利であり、15mmではさらに長周期側に試験範囲を拡張しなければならない。

以上の検討により、来年度から着手する正弦波温度変動試験では、板厚11mmでも十分に試験が可能であると判断し、SUS304鋼管を試験体に用いて、温度振幅200°C、周期2, 10, 20, 40秒、試験期間60日の試験条件で高サイクル熱疲労試験を実施することに決定した。

## 9. 結言

サーマルストライピング現象による温度変動が構造材のき裂発生と進展挙動に及ぼす影響を解明することを目的として、ナトリウム機器構造第1試験室に設置された構造物熱過渡強度試験施設（TTS）を改造して、高サイクル熱疲労試験装置を増設した。その後、試験精度の向上、熱伝達特性データの取得および健全性・安定性の確認を行ってきた。得られた成果を以下に述べる。

- (1) 循環ポンプにより高温と低温ナトリウムの流量比を連続的に変化させて、正弦波状の温度変動を発生させることができた。
- (2) 高温と低温ナトリウムをミキシング部で噴流混合させることで、高精度の温度変動（正確な波形、周方向に均一な温度分布）を試験体に与えることが可能となった。
- (3) 高温と低温ナトリウムを短周期と長周期に分けて制御することにより、重畠波の温度変動も発生させることができることを確認した。
- (4) ナトリウム流量制御装置により、任意に波形（正弦波、重畠波）、温度振幅（最大200°C）、周期（2~40秒）を発生させることができた。
- (5) 円筒状の試験体を用いることにより、熱応力解析が容易で、き裂発生から進展までのデータを取得できる。
- (6) ナトリウムから試験体への熱伝達特性（径・軸方向の温度分布、減衰挙動、位相遅れ）を明らかにし、熱応力解析に必要なデータを取得した。
- (7) 試験体の下流側にスタティックミキサおよびバッファタンクを設置することにより、温度変動を吸収してループの健全性を維持できることを確認した。
- (8) 周波数応答関数による強度評価により、有効な強度データを取得するための最適試験条件を設定することができた。

今後は、ステンレス鋼の試験体を用いて種々の周期における正弦波温度変動試験、ランダム温度変動試験および溶接部強度試験を実施し、得られた強度データはサーマルストライピング評価法の高度化に反映する予定である。また、試験精度と効率を向上させるために、試験中に温度とき裂を把握できる計測技術の開発を進める。

## 10. 謝辞

本装置の建設、運転および資料作成において多大な協力を頂いた常陽産業㈱の田中宏氏、茨城幸一氏に感謝いたします。また、本装置を設計するにあたり、サーマルストライピング試験技術に関して貴重な助言を頂いた流体計算工学研究 Gr の村松主任研究員および新技術開発試験 Gr の上出研究主管、五十嵐副主任研究員、木村副主任研究員に感謝いたします。さらに、FAENA 試験から得られた貴重な経験を伝えて頂いたフランス原子力庁の Y.Lejeail 博士に謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 中西征二他, 「構造物強度確性試験施設の概要」 PNC ZN941 84-170, 1984年12月
- (2) 新版電気工学ハンドブック 電気学会編 P184, 1988年2月
- (3) 笠原直人, 高正英樹「流体温度の多次元空間ゆらぎに対する接液構造物の周波数応答関数」 JNC TN9400 2001-085, 2001年9月
- (4) 日本原子力発電株式会社「高速増殖炉実証炉高温構造設計指針 材料強度基準等(案)」 平成11年3月
- (5) 笠原直人他「過渡熱応力を受ける平滑部材の歪み集中評価法」 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, P315, 1993年11月

**表1.1 設計・製作・据付・運転の工程**

	平成9年度	平成10年度	平成11年度	平成12年度	平成13年度	平成14年度
安全対策工事	[■]					
基本設計(配管系)						
基本設計(計測系)		[■]				
製作設計						
機器製作・据付工事				[■]		
試験装置の運転						

表3.1 機器リスト(1)

No.	機器名称	内部流体	型式	寸法	材質	設計条件		備考 (性能、主要付属品など)
						設計温度 °C	設計圧力 (MPa)	
1 HET 高温系ヘッドタンク	金属ナトリウム アルゴンガス	横置円筒型	内径1200φ ×長さ4350	SUS304	620	-0.1～0.5	温度計、液位計 予熱ヒータ	
2 CET 低温系ヘッドタンク	金属ナトリウム アルゴンガス	横置円筒型	内径1200φ ×長さ4350	SUS304	470	-0.1～0.5	温度計、液位計 予熱ヒータ	
3 HMT 高温系ミキシングタンク	金属ナトリウム	横置円筒型	内径800φ ×長さ1445	SUS304	620	-0.1～0.5	温度計 予熱ヒータ	
4 CMT 低温系ミキシングタンク	金属ナトリウム	横置円筒型	内径800φ ×長さ1445	SUS304	470	-0.1～0.5	温度計 予熱ヒータ	
5 BFT 高温系ハッファタンク	金属ナトリウム	縦置円筒型	200L	SUS304	620	-0.1～0.5	温度計 予熱ヒータ	
6 H-1 高温系ヒータ	金属ナトリウム	縦置円筒型	内径900φ ×高さ2075	SUS304	620	-0.1～0.5	温度計 予熱ヒータ	
7 H-2 低温系ヒータ	金属ナトリウム	縦置円筒型	12B ×高さ1400	SUS304	470	-0.1～0.5	温度計 予熱ヒータ	
8 C-1 空気冷却器	金属ナトリウム	フインチューブ U字管式	長さ1100×幅1100 高さ2400	SUS304 SS41	470	-0.1～0.5	間接式予熱ヒータ 手動ダンパー	
9 P-1 高温系循環ポンプ	金属ナトリウム	電磁ポンプ°	2B	SUS304	620	-0.1～0.5	400L/min at 2.5kg/cm <sup>2</sup> g	
10 P-3 高温系循環ポンプ	金属ナトリウム	電磁ポンプ°	2B	SUS304	620	-0.1～0.5	公称120L/min at 3.5kg/cm <sup>2</sup> g	
11 P-4 低温系循環ポンプ	金属ナトリウム	電磁ポンプ°	2B	SUS304	470	-0.1～0.5	公称120L/min at 3.5kg/cm <sup>2</sup> g	

表3.1 機器リスト(2)

No.	機器名称	内部流体	型式	寸法	材質	設計条件		備考 (性能、主要付属品など)
						設計温度 °C	設計圧力 (MPa)	
12 P-6 低温系循環ポンプ	金属ナトリウム	電磁ポンプ <sup>°</sup>	2B	SUS304	470	-0.1～0.5	400L/min at 2.5kg/cm <sup>2</sup> g	
13 FRC-101 高温系流量計	金属ナトリウム	電磁流量計	2B	SUS304	620	-0.1～0.5		
14 FRC-103 高温系流量計	金属ナトリウム	電磁流量計	2B	SUS304	620	-0.1～0.5		
15 FRC-104 低温系流量計	金属ナトリウム	電磁流量計	2B	SUS304	470	-0.1～0.5		
16 FRC-106 低温系流量計	金属ナトリウム	電磁流量計	2B	SUS304	470	-0.1～0.5		
17 FRC-107 移送系流量計	金属ナトリウム	電磁流量計	2B	SUS304	620	-0.1～0.5		
18 VT-1 高温系ベーパトラップ <sup>°</sup>	アルゴンガス Naミスト	メッシュ	10B × 高さ1500	SUS304	550	-0.1～0.5		
19 VT-2 低温系ベーパトラップ <sup>°</sup>	アルゴンガス Naミスト	メッシュ	10B × 高さ1500	SUS304	550	-0.1～0.5		
20 ST-1 高温系ストレーナ	アルゴンガス Naミスト	メッシュ	内径265φ × 高さ216	SUS304	150	-0.1～0.5		
21 ST-2 低温系ストレーナ	アルゴンガス Naミスト	メッシュ	内径265φ × 高さ216	SUS304	150	-0.1～0.5		
22 B-1 空気冷却器プロア	空気	ターボファン	C.S.	ケーシング			風量36000Nm <sup>3</sup> /h	

表3.1 機器リスト(3)

No.	機器名称	内部流体	型式	寸法	材質	設計条件		備考 (性能、主要付属品など)
						設計温度 °C	設計圧力 (MPa)	
23 B-2 テスセル排気プロア	空気	ターボファン			ケーシング C.S.			風量3000Nm <sup>3</sup> /h
24 T-1 タンク	金属ナトリウム	横置円筒型	内径4000φ × 高さ7000	SUS304	550	-0.1～0.5	温度計、液位計 予熱ヒータ	
25 真空ポンプ	アルゴンガス 空気	油回転式	配管口径2B				排気速度3000L/min 到達真空度10 <sup>-3</sup> Torr	
26 空気供給設備	空気	パッケージハビコン式				max:0.95		
27 FCV-111 ポンプP-1出口部流調弁	金属ナトリウム	ベローシール 流量調節弁	50A	SUSF304	620	max:0.5		
28 FCV-112 ポンプP-6ハイパス流調弁	金属ナトリウム	ベローシール 流量調節弁	50A	SUSF304	620	max:0.5		
29 FCV-101 試験体出口部流調弁	金属ナトリウム	ベローシール 流量調節弁	50A	SUSF304	620	max:0.5		
30 FCV-106 ポンプP-6出口部流調弁	金属ナトリウム	ベローシール 流量調節弁	50A	SUSF304	620	max:0.5		
31 FCV-107 移送ライン流調弁	金属ナトリウム	ベローシール 流量調節弁	50A	SUSF304	620	max:0.5		
32 EV-109 高温系ミキシングタンク出口弁	金属ナトリウム	ベローシール 止弁	100A	SUSF304	620	max:0.5		
33 EV-110 低温系ミキシングタンク出口弁	金属ナトリウム	ベローシール 止弁	100A	SUSF304	620	max:0.5		

表3. 2 試験体の化学成分および機械的性質

## 化学成分

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
規格値	$\leq 0.08$	$\leq 1.0$	$\leq 2.0$	$\leq 0.04$	$\leq 0.03$	18.0~20.0	8.0~11.0
分析値 溶鋼分析	0.02	0.28	1.80	0.031	0.006	18.35	8.17

## 引張試験

熱処理条件 固溶化熱処理 1060°C × 2min W.Q.

## 引張試験

	試験温度 (°C)	方向	0.2%耐力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸び (%)
規格値	室温	L	$\geq 205$	$\geq 520$	$\geq 35$
試験結果			387	664	56

表4.1 TTS機器構造設計規格基準

機器	部品	設計条件		荷重の種類	設計基準*				備考
		内圧(MPa)	温度(°C)		1次応力	座屈	ひずみ	クリープ 疲労	
試験部	ミキシングティ	-0.1～0.5	620	内圧、配管反力、定常温度分布、熱過渡	原+TTS	—	原+TTS	原+TTS	新設
	試験体	-0.1～0.5	620	内圧、熱過渡	—	—	—	—	
スタテックミキサ	管	-0.1～0.5	620	内圧、熱過渡	—	—	—	TTS**	新設
バッファータンク	胴、鏡	-0.1～0.5	620	内圧、温度分布、地震	501	2圧	—	—	新設
	ノズル	-0.1～0.5	620	内圧、配管反力、熱過渡	TTS	—	—	TTS	
	脚			自重、地震	JEAG	—	—	—	
ヘッドタンク (高温／低温)	胴、鏡	-0.1～0.5	620/470	内圧、温度分布	2圧	2圧	—	—	既設
	ノズル	-0.1～0.5	620/470	内圧、配管反力、熱過渡	2圧+原	—	原	原	
	脚			自重、地震、温度分布	501	—	—	—	
ミキシングタンク (高温／低温)	胴、鏡	-0.1～0.5	620/470	内圧、温度分布	JIS	JIS	—	—	既設
	ノズル	-0.1～0.5	620/470	内圧、配管反力、熱過渡	JIS	—	原	TTS	
	脚			自重、地震、温度分布	JIS	JIS	—	—	
加熱器 (高温／低温)	胴	-0.1～0.5	620/470	内圧、温度分布	ボイラ	ボイラ	原	原	既設
	鏡	-0.1～0.5	620/470	内圧	ボイラ	—	—	—	
	管板	-0.1～0.5	620/470	内圧、温度分布	ボイラ	—	—	—	
	ノズル	-0.1～0.5	620/470	内圧、配管反力	ボイラ+原	—	原	原	
	脚			自重、配管反力、地震	501	—	—	—	
冷却器	風胴	0.005	300	内圧、自重、地震	2圧	—	—	—	既設
	管	-0.1～0.5	470	内圧、自重、地震、熱過渡	2圧	—	原	原	
サンプリング装置	管	-0.1～0.5	470	内圧、自重、地震	原	—	原	原	新設
区分I配管	図〇参照	-0.1～0.5	620	内圧、自重、地震、熱過渡	原	—	原	原	新設
区分II配管		-0.1～0.5	470	内圧、自重、地震、熱過渡	501	—	—	501**	
区分III配管		-0.1～0.5	620	内圧、自重、地震、熱過渡	原+TTS	—	原	原+TTS	
区分IV配管		-0.1～0.5	620	内圧、自重、地震、熱過渡	原	—	原	原	
区分V配管		-0.1～0.5	470	内圧、自重、地震、熱過渡	501	—	—	501**	

\* 2圧 : 第2種圧力容器構造規格 労働省告示第23号

JIS : JIS圧力容器関連規格

原 : 原型炉高温構造設計方針 動燃事業団

ボイラ : ボイラ構造規格 労働省告示第10号

501 : 原電用原子力設備に関する構造等の技術基準 通産省告示第

TTS : TTS専用設計基準(原型炉高温構造設計方針ベース)

JEAG : 原子力発電所耐震設計技術指針 日本電気協会

\*\* 疲労損傷制限のみ

表4.2 試験部周辺の予測破損寿命(1)

試験条件		温度振幅:200°C、周期:2秒			
対象箇所	噴流部外管	試験体入口	試験体出口	試験体出口溶接部	スタテックミキサー入口溶接部 下流配管溶接部
材料	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
板厚 (mm)	4.7	11.1	11.1	3.0	3.4
Na温度振幅 (°C)	51	200	100	20	70
応力範囲 (kg/mm <sup>2</sup> )	8.6	38.3	19.1	4.4	10.7
ひずみ集中係数 K <sub>E</sub>	1.17	1.17	1.17	2.50	2.50
ひずみ範囲 (%)	0.063	0.28	0.14	0.07	0.17
破損回数	3.22E+81	7.26E+05	7.44E+10	1.66E+63	6.34E+08
破損日数	7.46E+76	1.70E+01	1.72E+06	3.85E+58	1.47E+04

試験条件		温度振幅:200°C、周期:5秒			
対象箇所	噴流部外管	試験体入口	試験体出口	試験体出口溶接部	スタテックミキサー入口溶接部 下流配管溶接部
材料	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
板厚 (mm)	4.7	11.1	11.1	3.0	3.4
Na温度振幅 (°C)	100	200	116	56	99
応力範囲 (kg/mm <sup>2</sup> )	18.1	44.9	26.1	7.8	15.0
ひずみ集中係数 K <sub>E</sub>	1.17	1.17	1.17	2.50	2.50
ひずみ範囲 (%)	0.13	0.33	0.19	0.12	0.24
破損回数	4.35E+10	1.78E+05	3.89E+07	5.62E+12	2.82E+06
破損日数	2.52E+06	1.00E+01	2.25E+03	3.25E+08	1.63E+02

表4.2 試験部周辺の予測破損寿命(2)

試験条件		温度振幅:200°C、周期:10秒			
対象箇所	噴流部外管	試験体入口	試験体出口	試験体出口 溶接部	スタテックミキサー 入口溶接部
材料	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
板厚 (mm)	4.7	11.1	11.1	3.0	3.4
Na温度振幅 (°C)	145	200	141	87	111
応力範囲 (kg/mm <sup>2</sup> )	24.3	48.9	34.6	10.9	15.2
ひずみ集中係数 K $\varepsilon$	1.17	1.17	1.17	2.50	2.50
ひずみ範囲 (%)	0.18	0.36	0.25	0.17	0.24
破損回数	3.05E+07	8.99E+04	1.08E+06	1.98E+08	1.95E+06
破損日数	3.53.E+03	1.00.E+01	1.25E+02	2.29E+04	2.26E+02
					3.66E+20

試験条件		温度振幅:200°C、周期:20秒			
対象箇所	噴流部外管	試験体入口	試験体出口	試験体出口 溶接部	スタテックミキサー 入口溶接部
材料	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
板厚 (mm)	4.7	11.1	11.1	3.0	3.4
Na温度振幅 (°C)	200	200	150	133	151
応力範囲 (kg/mm <sup>2</sup> )	29.9	48.3	36.1	14.1	17.7
ひずみ集中係数 K $\varepsilon$	1.17	1.17	1.17	2.50	2.50
ひずみ範囲 (%)	0.22	0.36	0.27	0.22	0.28
破損回数	1.54E+06	8.19E+04	5.95E+05	3.46E+06	4.06E+05
破損日数	3.59.E+02	1.90.E+01	1.38E+02	8.00E+02	9.40E+01
					2.22E+05

表4.2 試験部周辺の予測破損寿命(3)

試験条件		温度振幅:200°C、周期:40秒			
対象箇所	噴流部外管	試験体入口	試験体出口	試験体出口 溶接部	スタテックミキサー 入口溶接部
材料	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304	SUS304
板厚 (mm)	4.7	11.1	11.1	3.0	3.4
Na温度振幅 (°C)	248	200	159	170	160
応力範囲 (kg/mm <sup>2</sup> )	30.7	44.0	34.9	14.4	15.1
ひずみ集中係数 $K\xi$	1.17	1.17	1.17	2.50	2.50
ひずみ範囲 (%)	0.23	0.32	0.26	0.23	0.24
破損回数	9.02E+05	1.20E+05	6.53E+05	2.23E+06	1.35E+06
破損日数	4.18.E+02	5.50.E+01	3.02E+02	1.03E+03	6.26E+02
					3.52E+03

表 8.1 解析に用いた物性値(SUS304)

	板厚 (mm)	9.0	11.0	13.0	15.0	17.0	20.0
熱伝導率 (kcal/mm/sec/K)	5.057E-06						
比熱 (kcal/kg/K)	1.338E-01						
密度 (kg/mm <sup>3</sup> )	7.930E-06						
ヤング率 (kg/mm <sup>2</sup> )	1.689E+04						
ボアン比	3.000E-01						
線膨張係数 (1/K)	1.975E-05						
熱伝達率 (kcal/mm <sup>2</sup> /sec/K)	3.396E-06						
熱拡散係数 (kcal/mm <sup>2</sup> /sec)	1.175E+00	1.188E+00	1.198E+00	1.206E+00	1.211E+00	1.218E+00	1.221E+00

表 8.2 SUS304 鋼の動的応力ーひずみ関係式

$\Delta \sigma / 2 > \sigma_p$  の時

$$\log_{10}(\Delta\sigma - 2\sigma_p) = A_0 + A_1 \cdot \log_{10}(\Delta\varepsilon_t - \Delta\sigma/E)$$

$\Delta \sigma / 2 < \sigma_p$  の時

$$\Delta\sigma = E \cdot \Delta\varepsilon_t$$

#### 使用単位

$T$  : 温度 (°C) 425°C ~ 650°C

$\Delta\sigma$  : 応力範囲 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\Delta\varepsilon_t$  : 全ひずみ範囲 (mm/mm)

$E$  : 縦弾性係数 (kg/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_p$  : 比例限 (kg/mm<sup>2</sup>)

$A_0$	$0.9772687 + 0.6446708 \times 10^{-2} \times T - 0.4675557 \times 10^{-5} \times T^2 - 0.3724201 \times 10^{-8} \times T^3$
$A_1$	$3.690128 - 0.1847969 \times 10^{-1} \times T + 0.3544927 \times 10^{-4} \times T^2 - 0.2297822 \times 10^{-7} \times T^3$
$E$	$2.10236 \times 10^4 - 9.71895 \times T$
$\sigma_p$	$25.5655 - 5.58937 \times 10^{-2} \times T + 1.04384 \times 10^{-4} \times T^2 - 7.42535 \times 10^{-8} \times T^3$ $- (44.3068 - 1.78933 \times 10^{-2} \times T) \times (0.002)^{0.279395 + 7.749 \cdot 10^{-5} \cdot T}$

表 8.3 SUS304 鋼の最適疲労破損式

$$(\log_{10} N_f)^{-\frac{1}{2}} = A_0 + A_1 \cdot \log_{10} \Delta\varepsilon_t + A_2 \cdot (\log_{10} \Delta\varepsilon_t)^2 + A_3 \cdot (\log_{10} \Delta\varepsilon_t)^4$$

## 使用単位

- $T$  : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $\dot{\varepsilon}$  : ひずみ速度 ( $\text{mm/mm/sec}$ )  
 $\Delta\varepsilon_t$  : 全ひずみ範囲 ( $\text{mm/mm}$ )  
 $NF$  : 破損繰返し数

$A_0$	$1.621827 - 4.567850 \times 10^{-8} \times T^2 \times R$
$A_1$	$1.131346 + 8.665061 \times 10^{-9} \times T^2$
$A_2$	$3.439663 \times 10^{-1}$
$A_3$	$-1.374387 \times 10^{-2} + 4.910723 \times 10^{-5} \times R$

ただし  $R = \log_{10} \dot{\varepsilon}$  である。

表 8.4 試験体の出入口温度差

周期	配管内表面温度	Na内1mm					Na内3mm								
		497	490	492	494	491	497	493	488	488	492	522	527	529	
2秒	T1	497	490	492	494	491	497	493	488	488	492	522	527	529	
	T1	351	349	349	346	347 平均	328	326	325	327 平均	327	325	325	328 平均	
	ΔT1	146	141	143	148	144	144.5	169	167	163	161	165	199	194	202 198
	T8	480	476	475	480	472	480.5	440	448	443	439	442	501	494	500 486
	T8	392	399	400	401	394 平均	367	362	365	367	363 平均	372	385	386	391 375 平均
	ΔT8	88	77	75	79	78	79.75	73	86	78	72	79	77.25	129	109 114 111 111 115.75
	減衰	58	64	68	69	66		96	81	85	89	86	70	85	88 92 87
5秒	T1	528	526	527	529	527	532	531	528	535	533	533	549	549	550 552 555
	T1	325	325	324	328	326 平均	315	314	310	314	311 平均	312	308	304	307 307 平均
	ΔT1	203	201	203	199	203	201.5	217	217	218	221	222	218.25	241	245 243 244 248 243.25
	T8	507	507	504	508	508	508	484	489	490	485	493	525	524	522 525 526
	T8	370	366	370	370	371 平均	348	351	354	348	349 平均	349	358	350	351 360 357 平均
	ΔT8	137	141	134	138	137	137.5	136	138	136	137	144	136.75	167	174 171 165 169 169.25
	減衰	66	60	69	61	66		81	79	82	84	78	74	71	72 79 79
10秒	T1	527	529	526	526	527	526	528	526	525	530	530	549	549	546 546 547
	T1	319	319	318	317	318 平均	312	310	312	312	312 平均	312	306	309	307 306 306 平均
	ΔT1	208	210	208	209	209	208.75	214	218	214	213	218	214.75	243	240 239 240 241 240.5
	T8	503	505	504	504	504	504	493	494	494	493	490	516	520	520 519 523
	T8	355	350	352	354	349 平均	343	345	341	342	339 平均	339	344	337	344 340 337 平均
	ΔT8	148	155	152	150	155	151.25	150	149	153	151	151	150.75	172	183 176 179 186 177.5
	減衰	60	55	56	59	54		64	69	61	62	67	71	57	63 61 55
20秒	T1	532	533	531	534	534	533	533	537	535	536	536	545	548	546 549 549
	T1	310	311	307	307	307 平均	305	305	302	303	301 平均	303	300	298	298 296 平均
	ΔT1	222	222	224	227	227	223.75	228	48	235	232	235	185.75	245	250 248 251 253 248.5
	T8	509	509	509	508	512	507	505	509	505	504	504	521	528	523 521 525
	T8	345	337	342	339	338 平均	333	336	333	332	333 平均	333	324	329	329 328 平均
	ΔT8	164	172	167	169	174	168	174	169	176	173	171	173	190	204 194 192 197 195
	減衰	58	50	57	58	53		54	-121	59	59	64	55	46	54 59 56

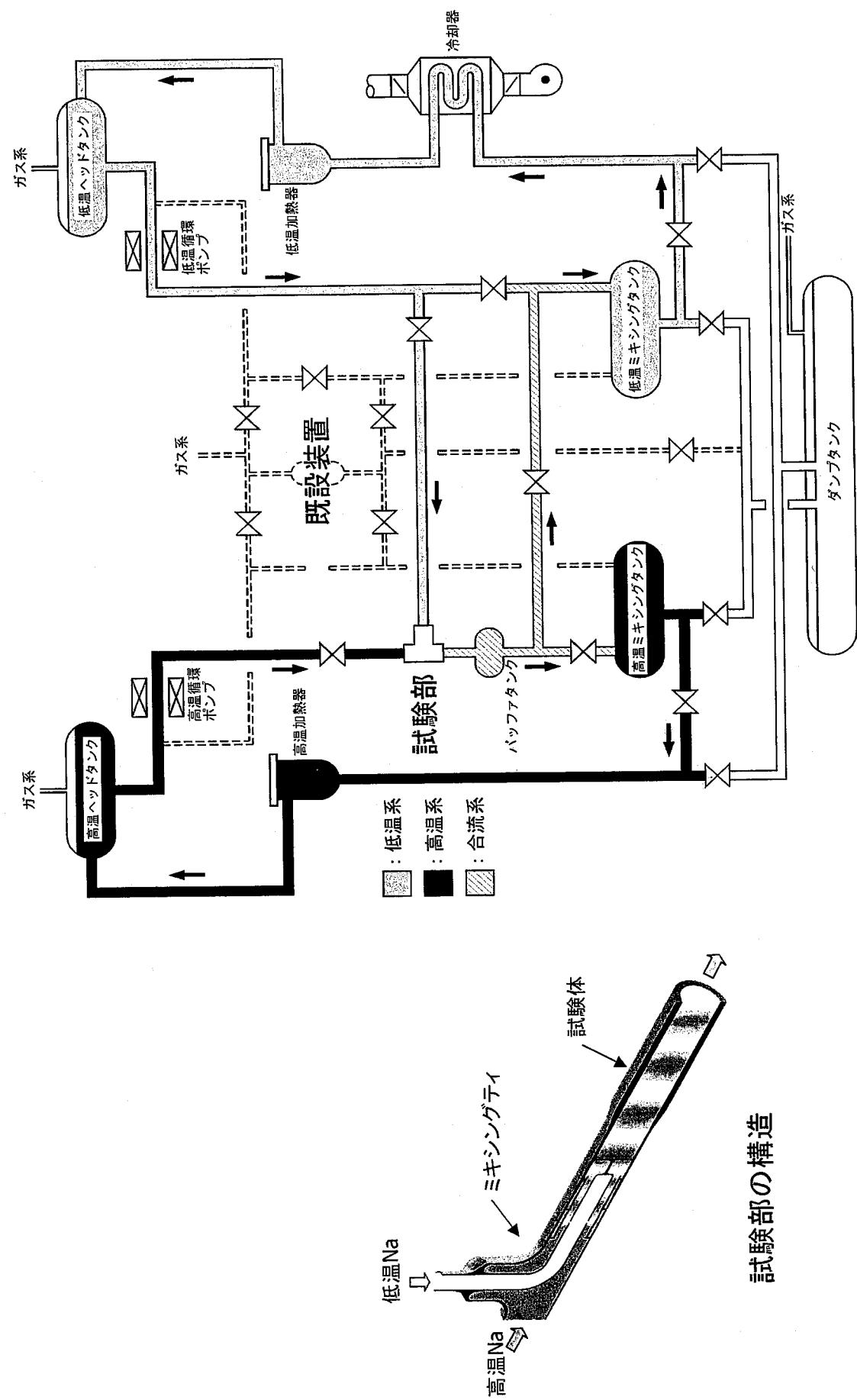


図2.1 TTSにおける高サイクル熱疲労試験装置の系統図

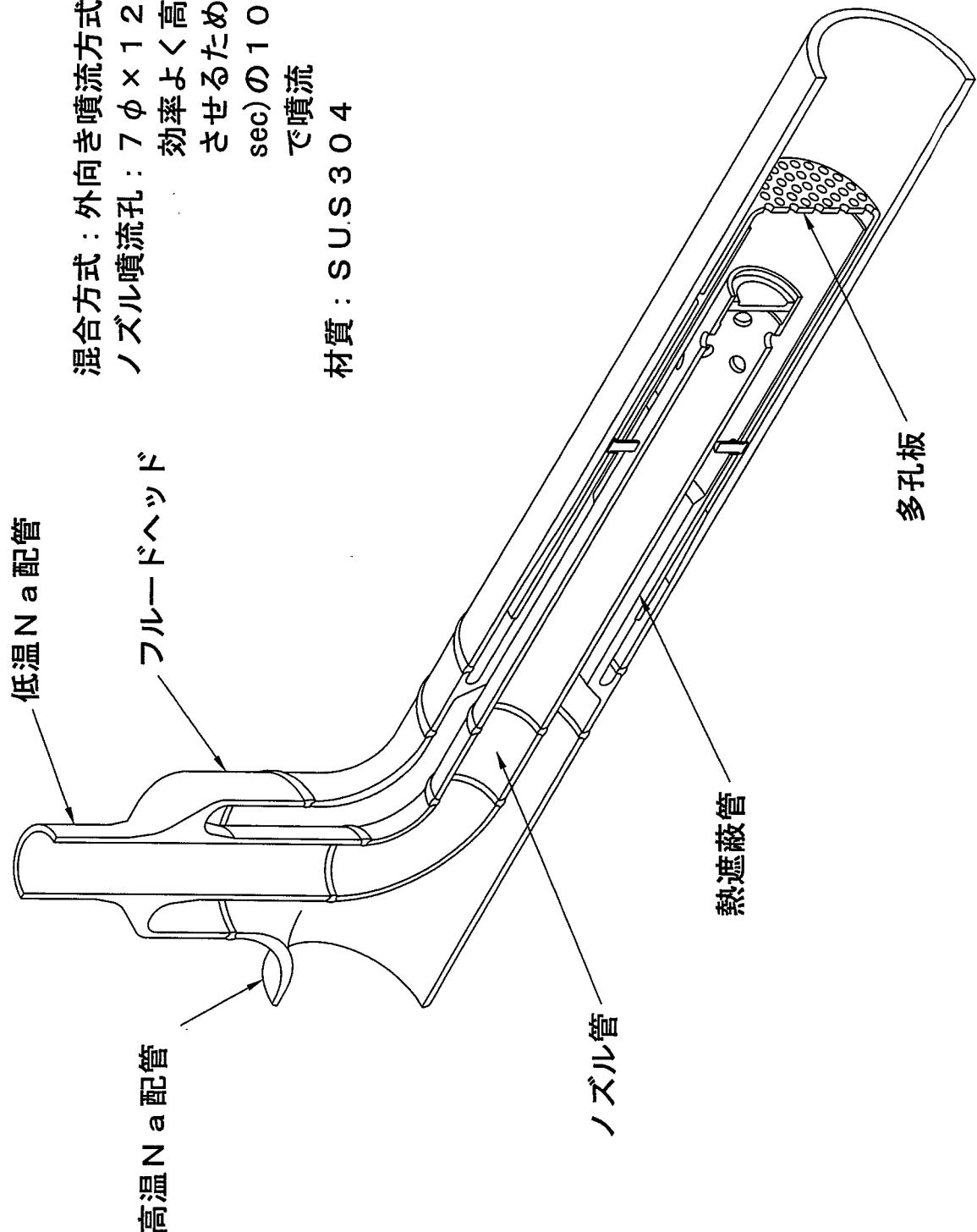


図2.2 ミキシングティの構造

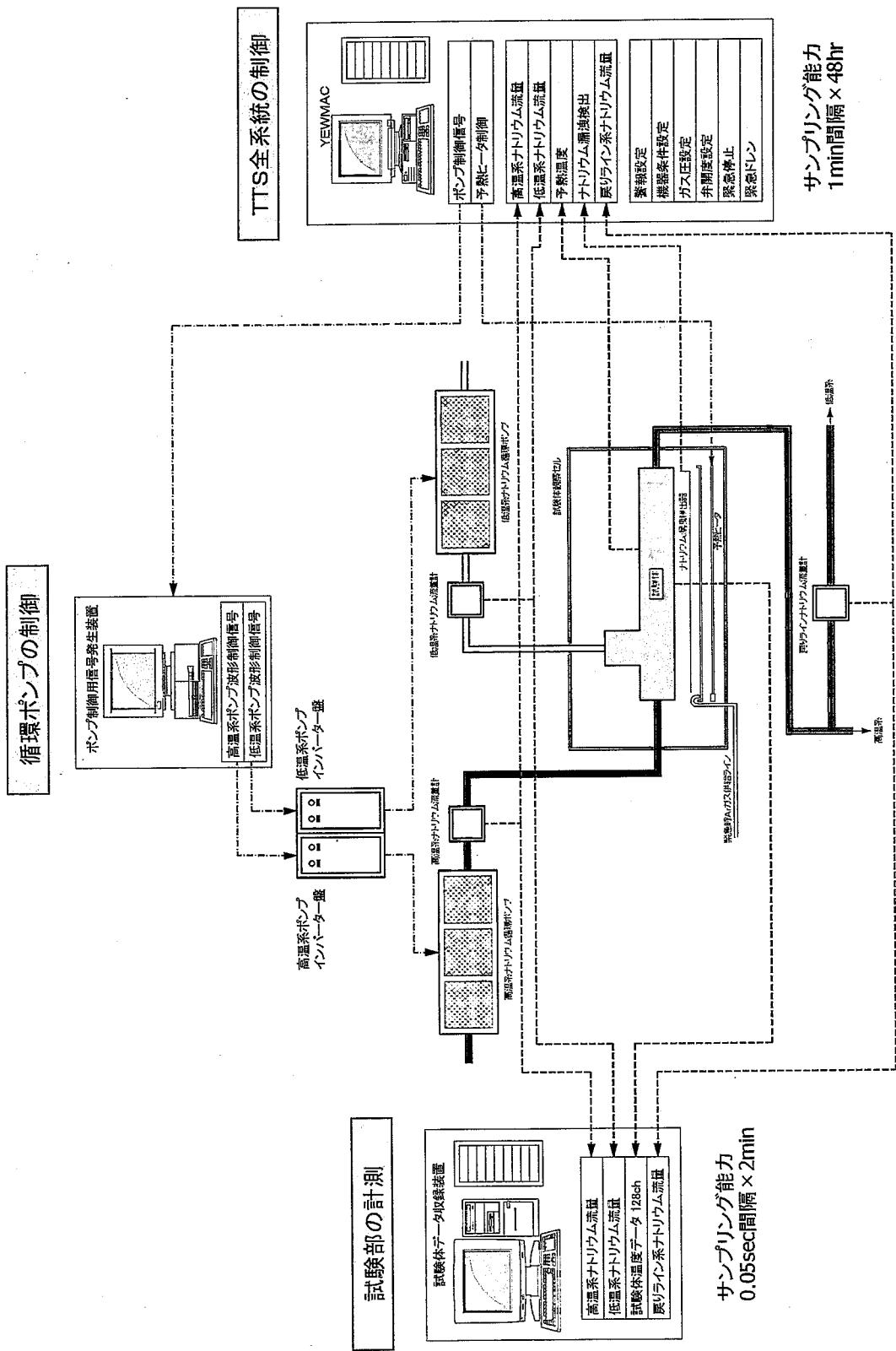
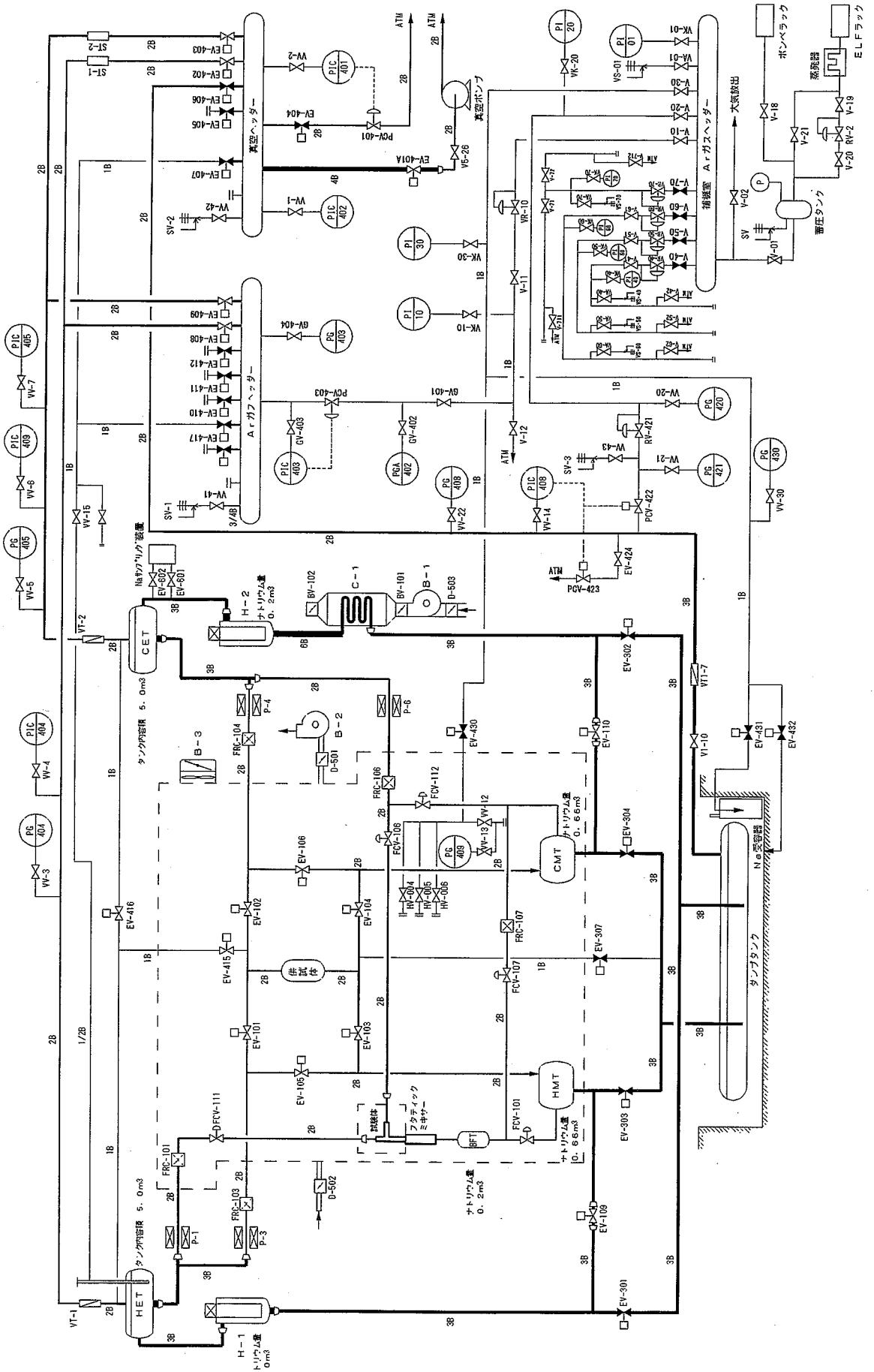
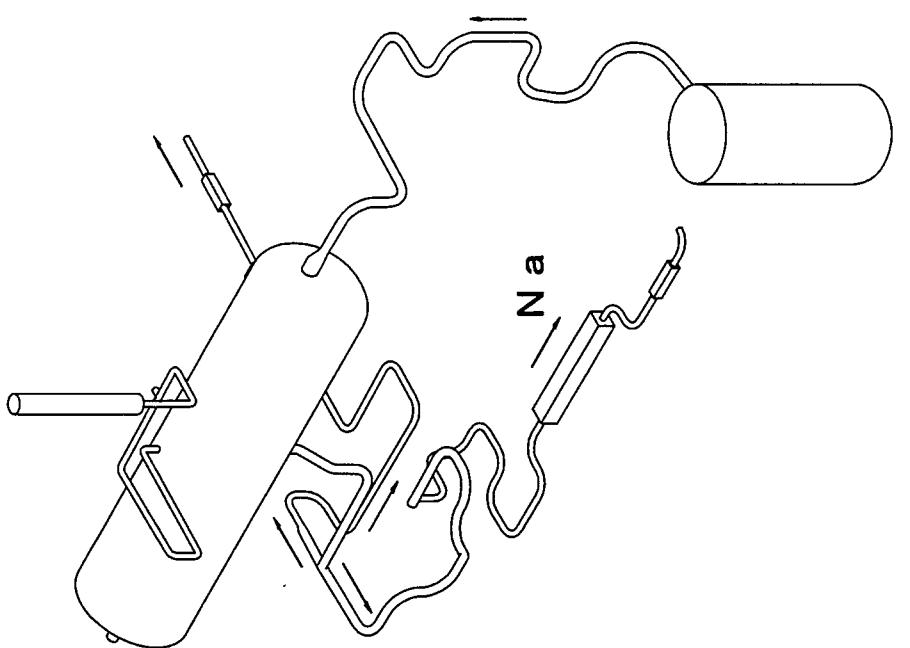


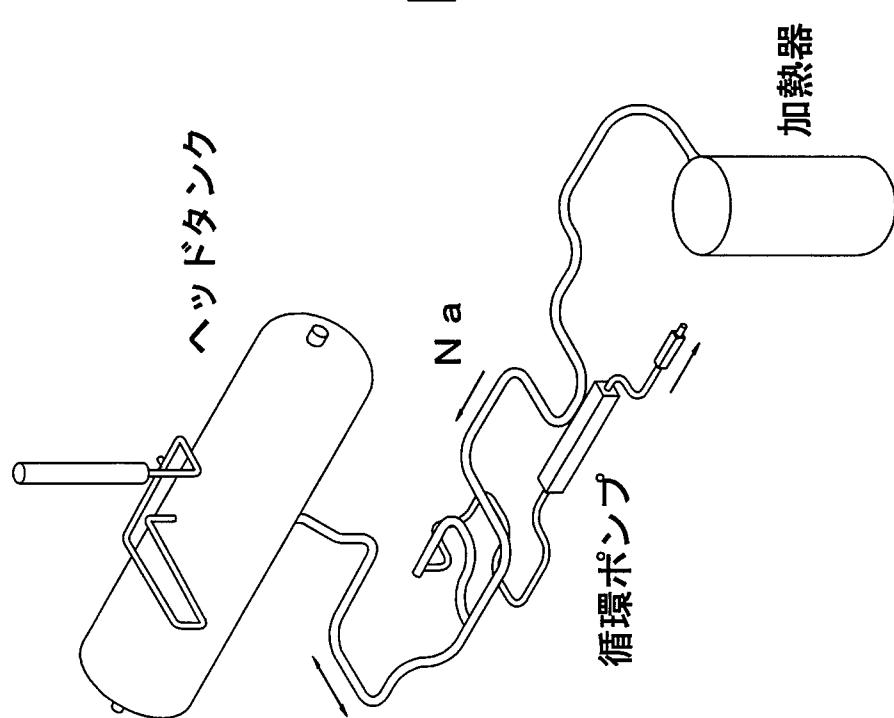
図2.3 ナトリウム流量制御装置の機器構成



### 図3.1 TTSフローチャート



〔改造後〕



〔改造前〕

図3.2 ヘッドタンク循環ラインの改造

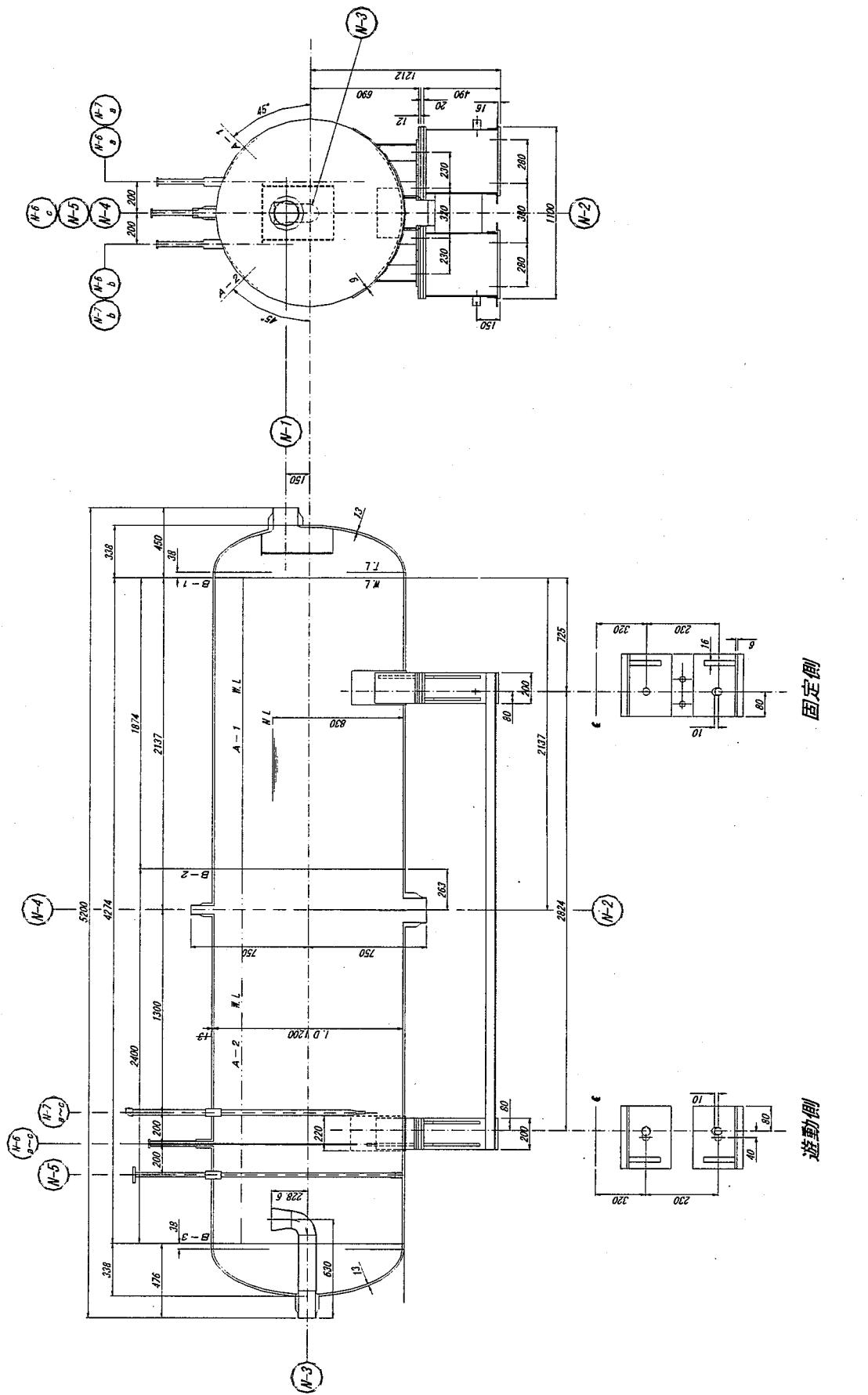
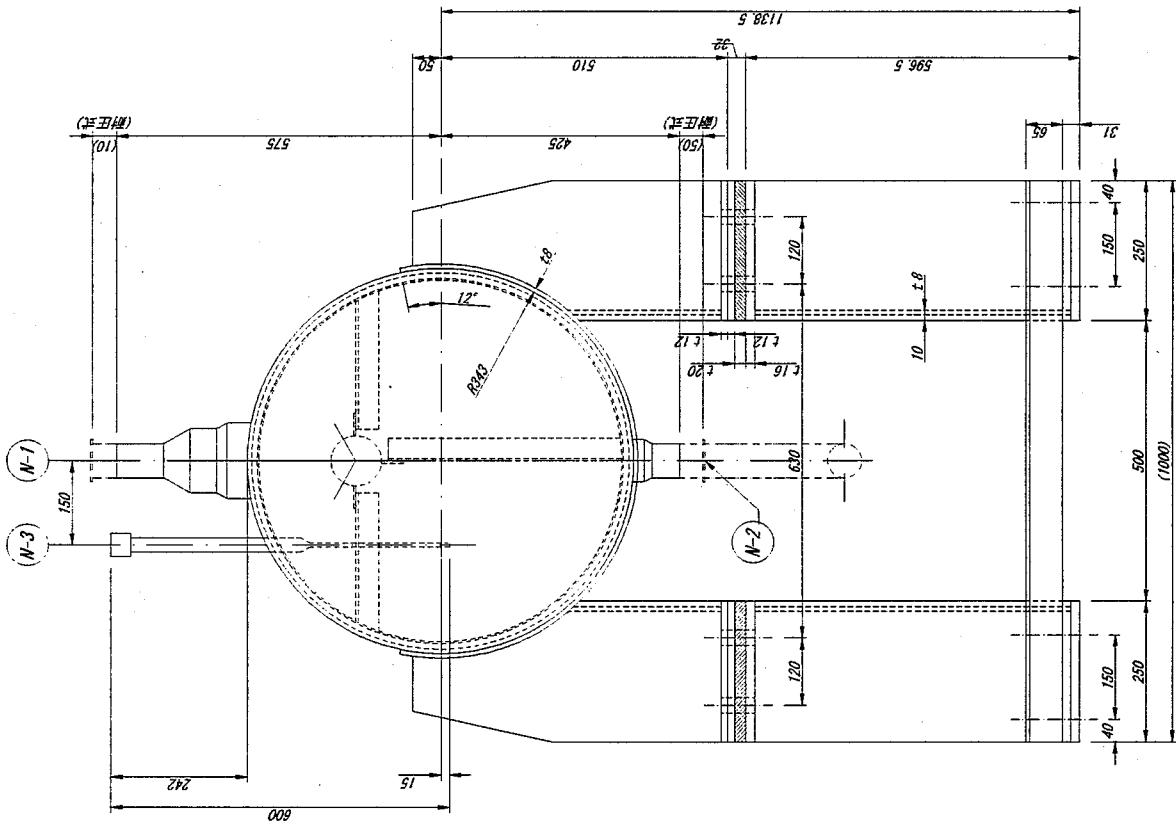
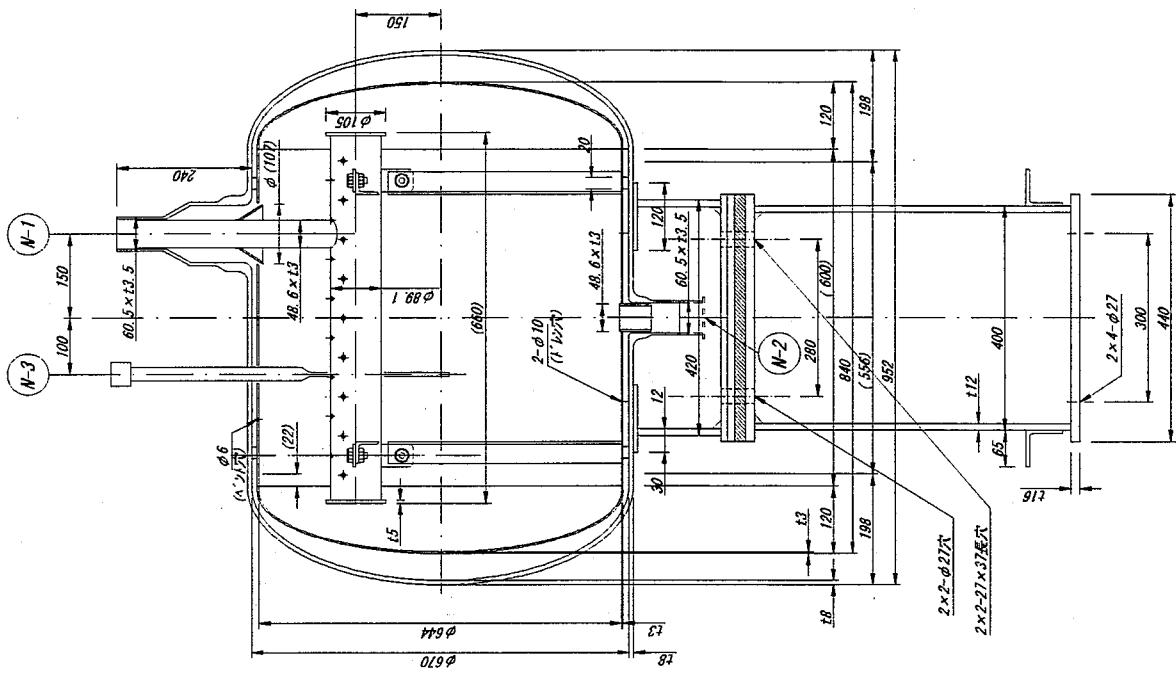
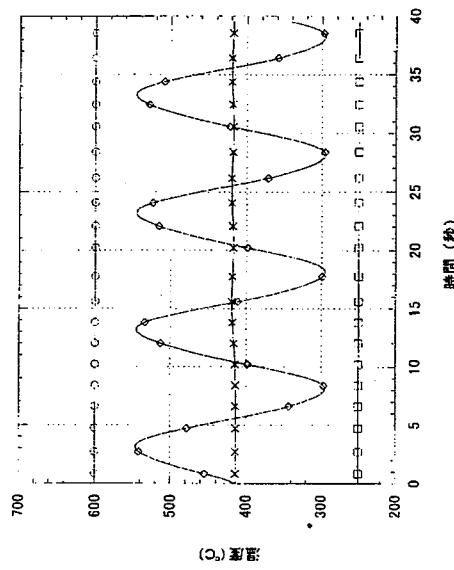


図3.3 ヘッドタンク(HET, CET)



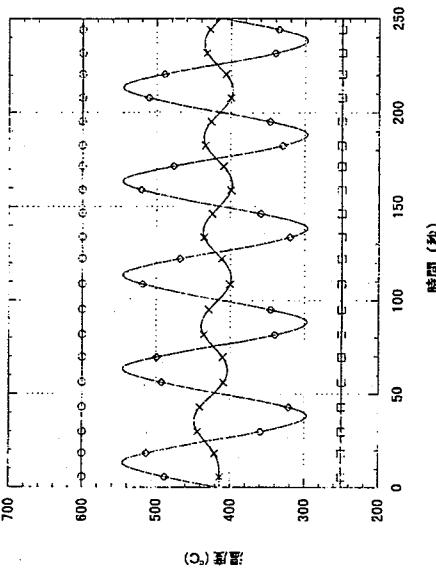
### 図3.4 バッファータンク(BFT)

---△--- 高温側温度 (°C)  
---○--- 低温側温度 (°C)  
---□--- 合流温度 (°C)  
---×--- バッファタンク温度 (°C)



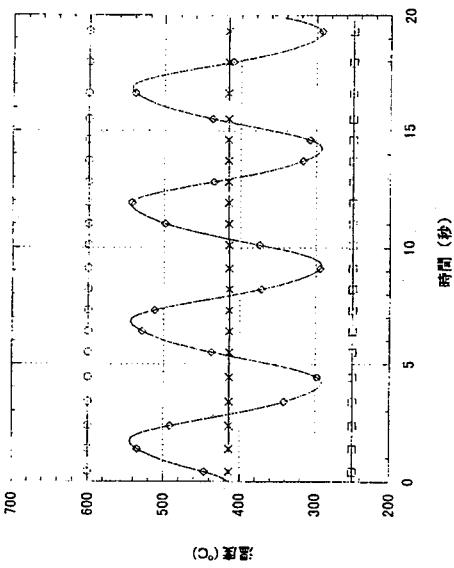
周期 10 秒条件 (バッファタンク温度差=2.5°C)

---△--- 高温側温度 (°C)  
---○--- 低温側温度 (°C)  
---□--- 合流温度 (°C)  
---×--- バッファタンク温度 (°C)



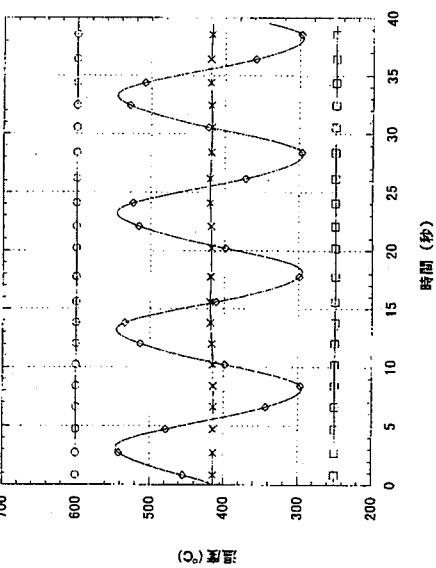
周期 5 秒条件 (バッファタンク温度差=0.8°C)

---△--- 高温側温度 (°C)  
---○--- 低温側温度 (°C)  
---□--- 合流温度 (°C)  
---×--- バッファタンク温度 (°C)



周期 20 秒条件 (バッファタンク温度差=0.6°C)

---△--- 高温側温度 (°C)  
---○--- 低温側温度 (°C)  
---□--- 合流温度 (°C)  
---×--- バッファタンク温度 (°C)



周期 10 秒条件 (バッファタンク温度差=38.9°C)

### 図3.5 各周波数におけるバッファタンク出口温度の変化

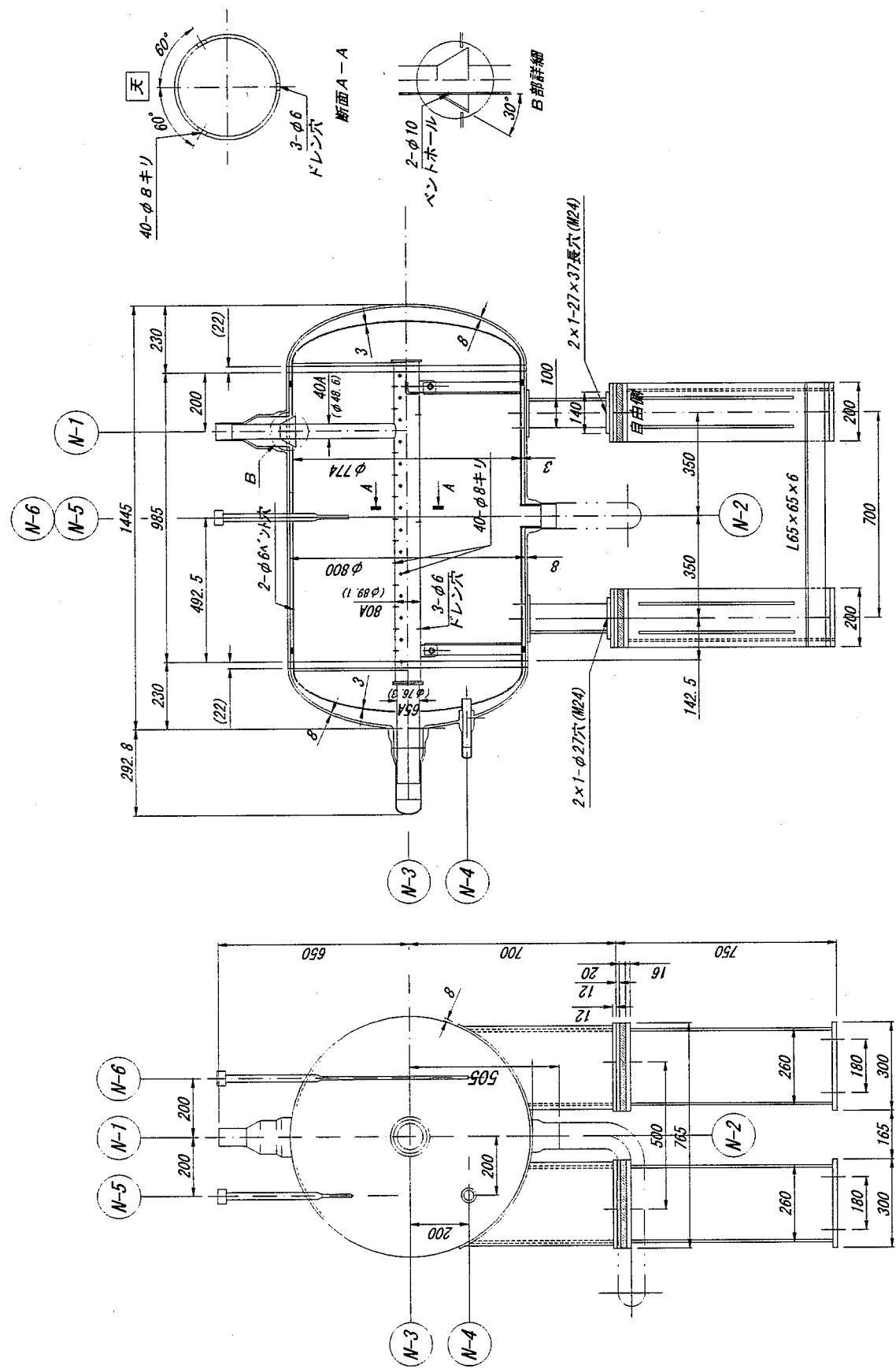
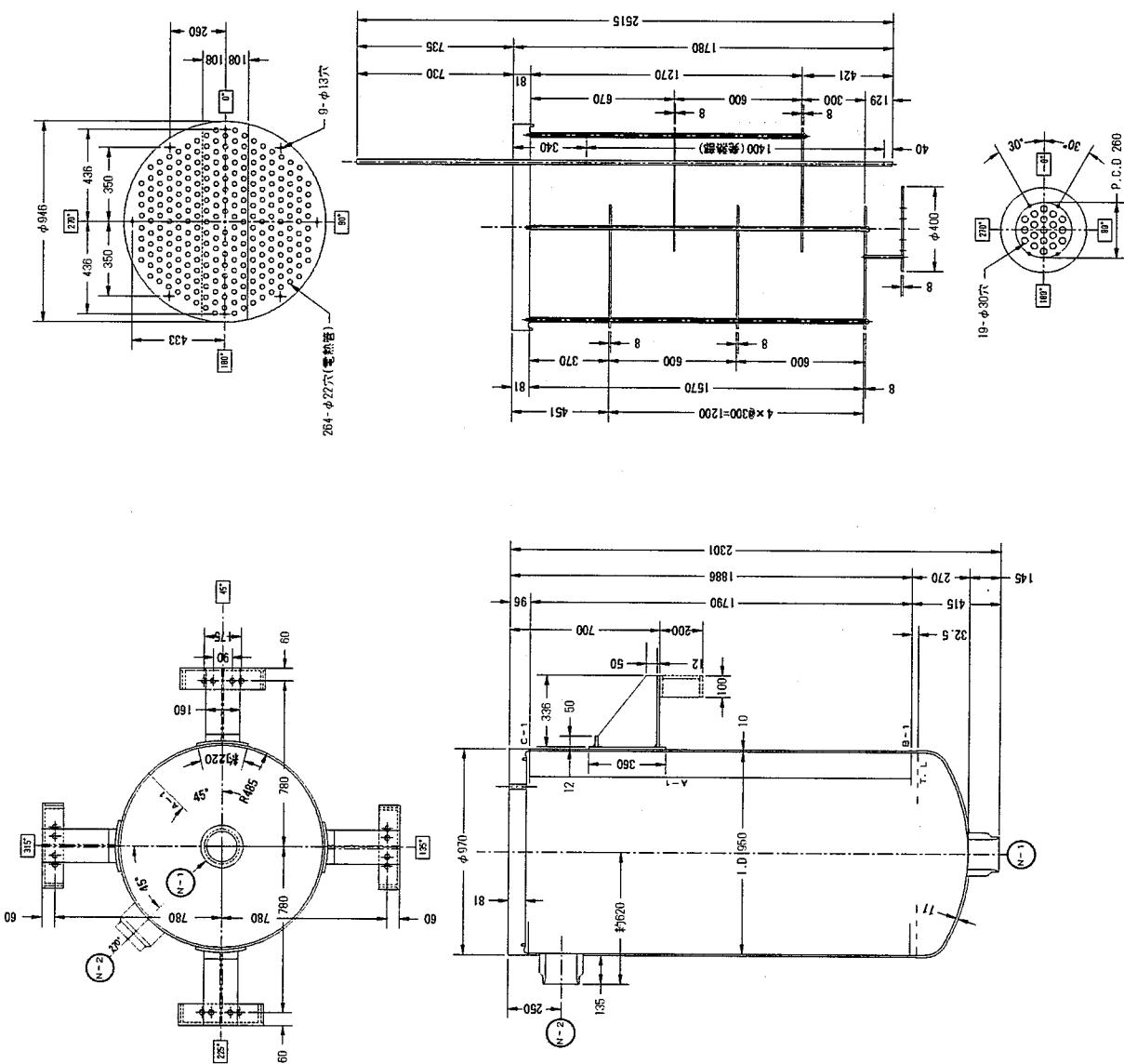
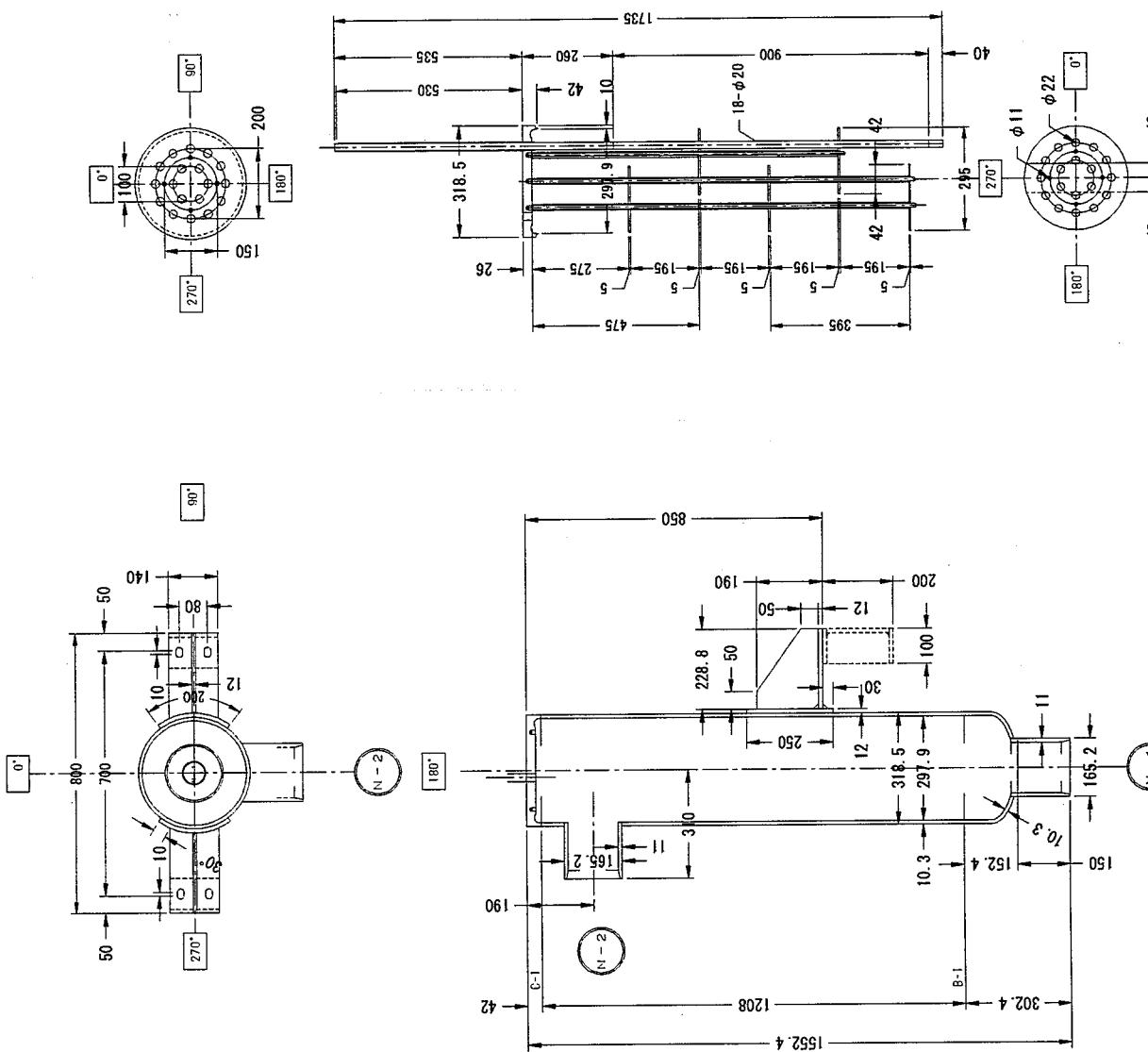


図3.6 ミキシングタンク(HMT, CMT)



### 図3.7 高温系ナトリウム加熱器(H-1)



### 図3.8 低温系ナトリウム加熱器(H-2)

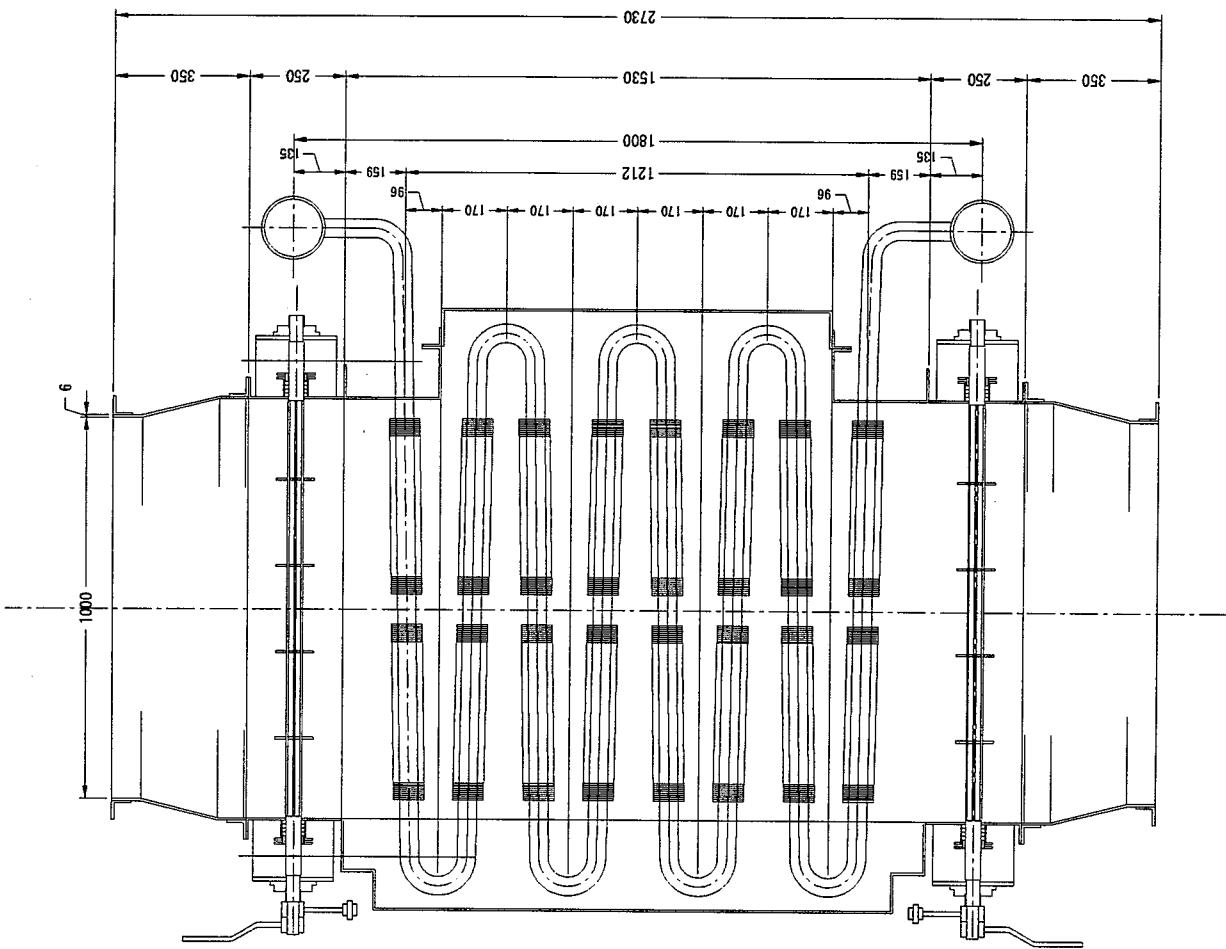


図3.9 ナトリウム冷却器(C-1)

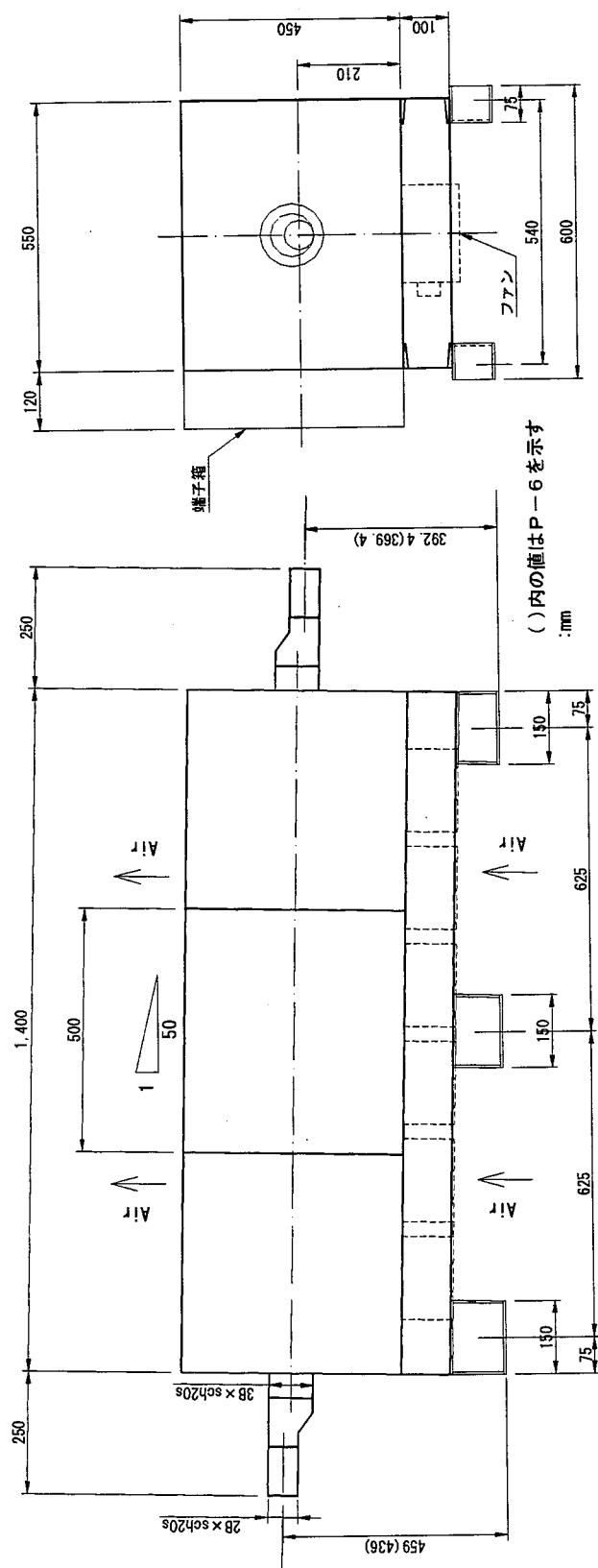


図3.10 循環ポンプ(P-1, 6)

図3.11 電磁流量計(FI-101, 106, 107)

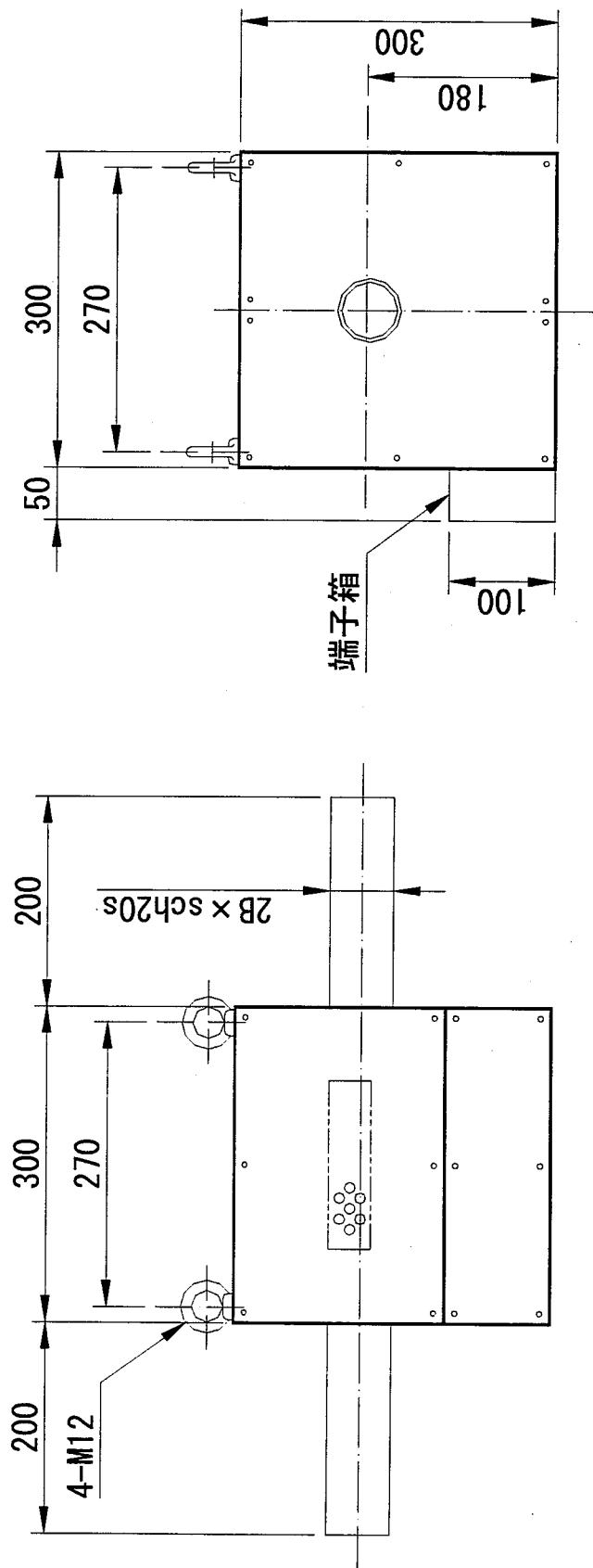
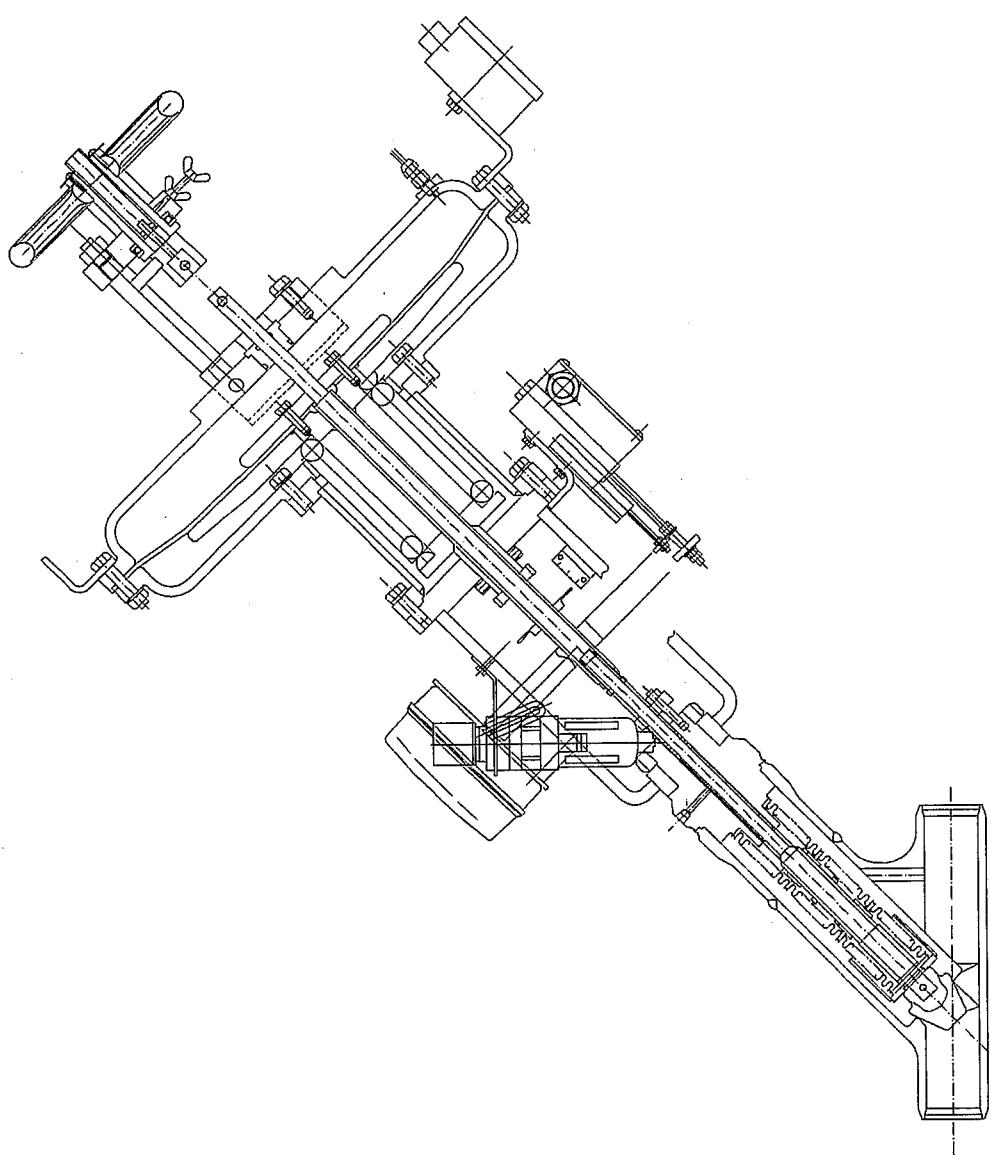
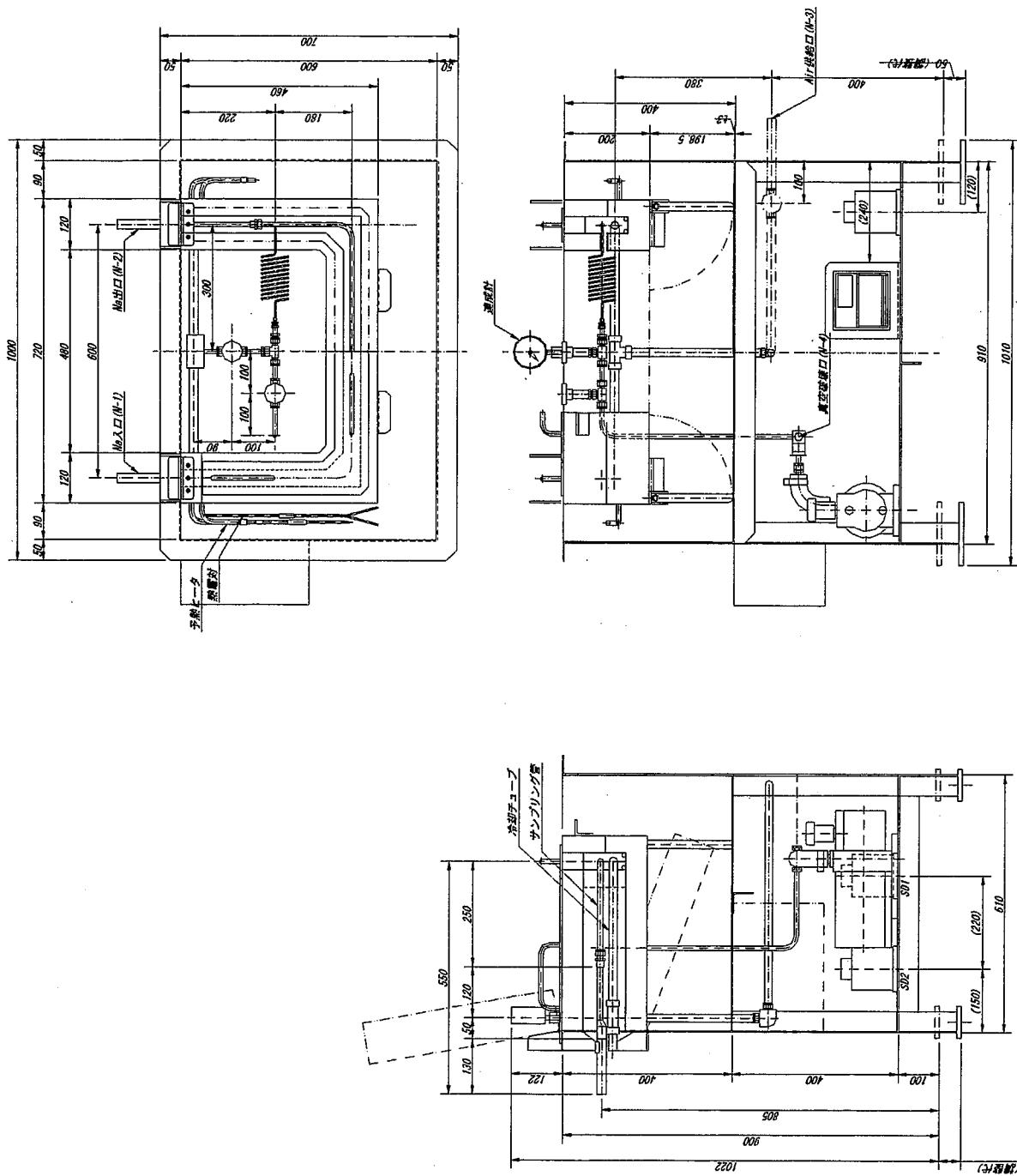


図3.12 流量調節弁(FCV-101,106,107,111,112)



## サンプリング装置



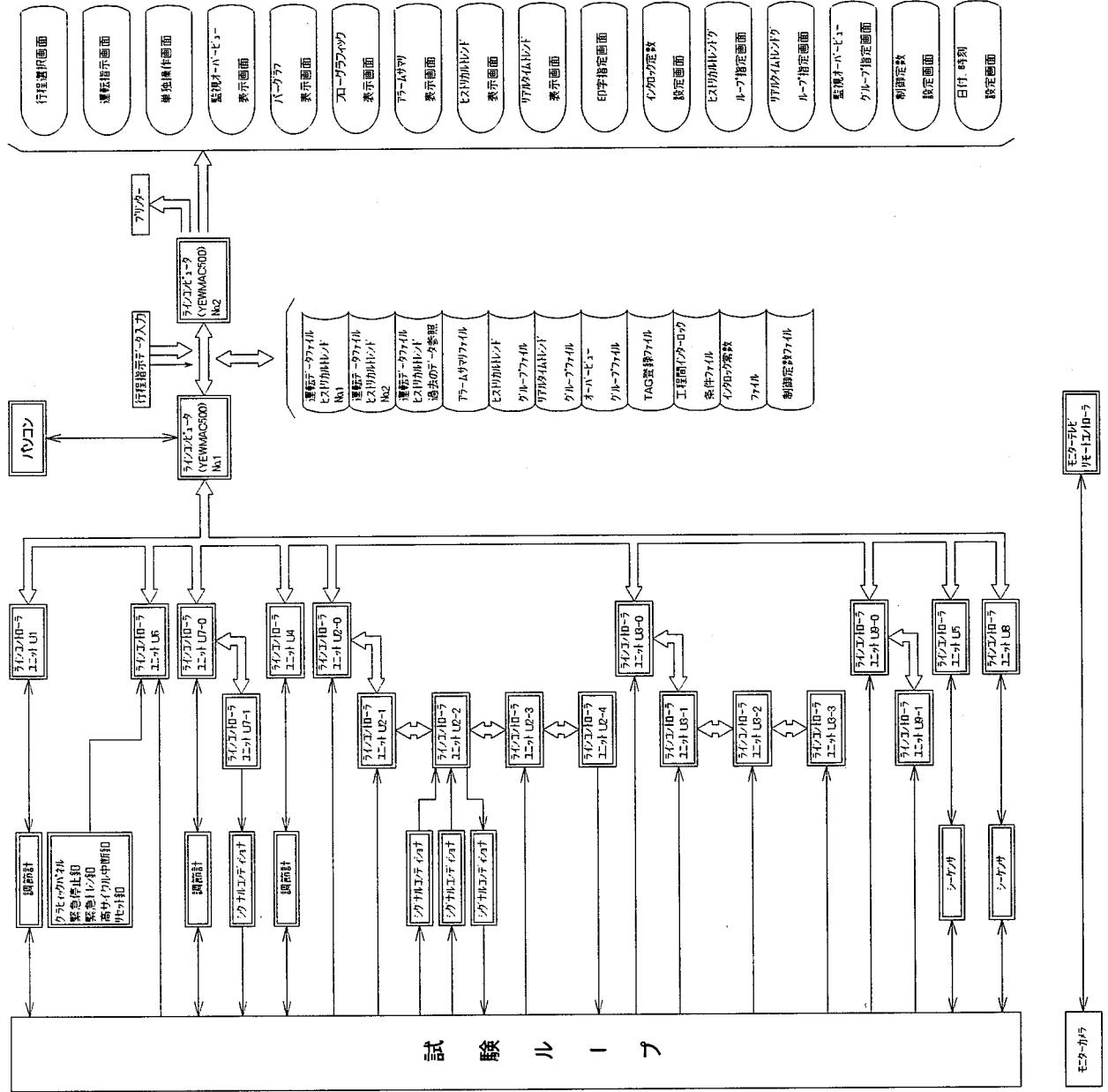


図3.14 TTS制御システム構成

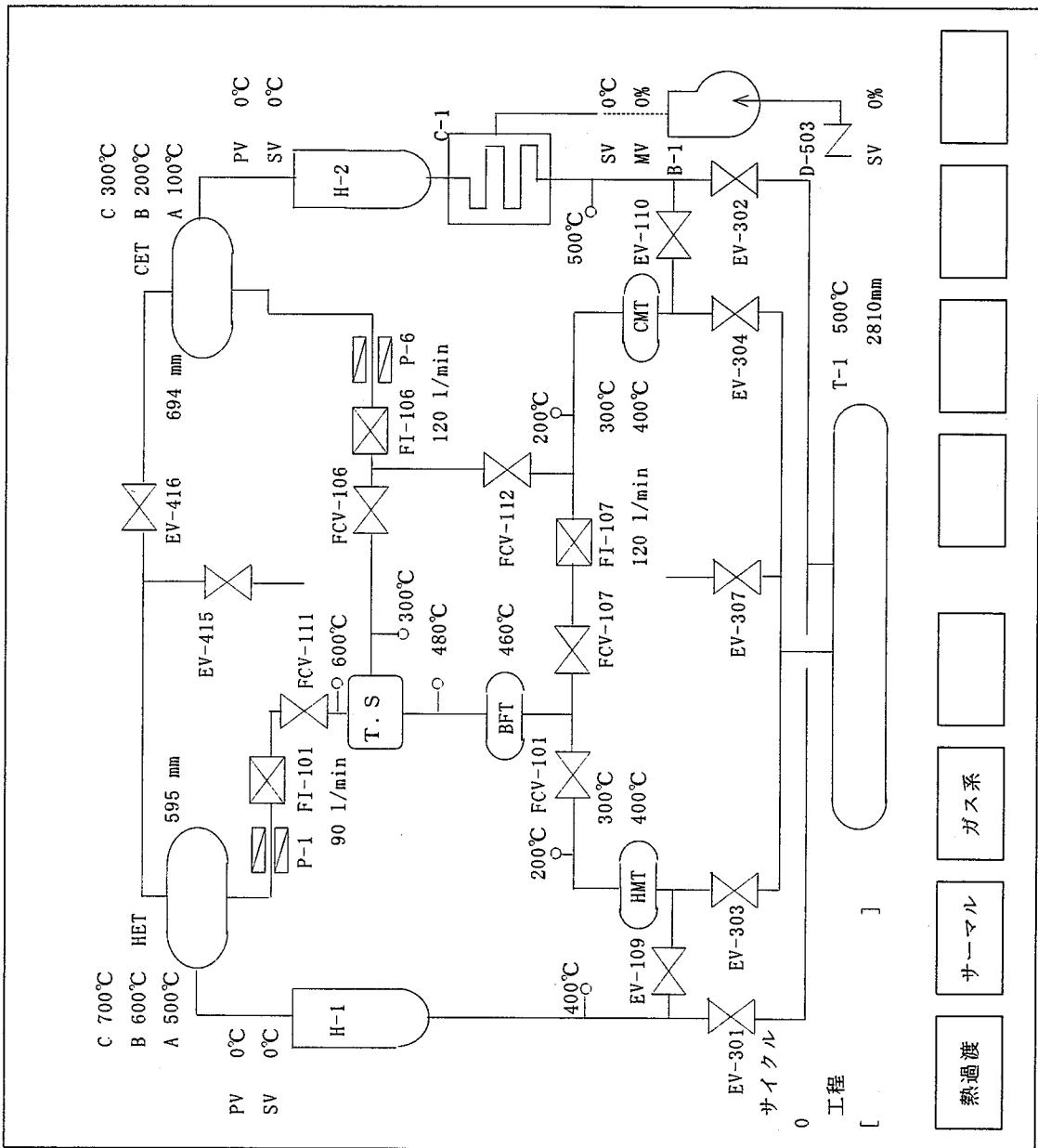


図3.15 監視フローグラフィック画面

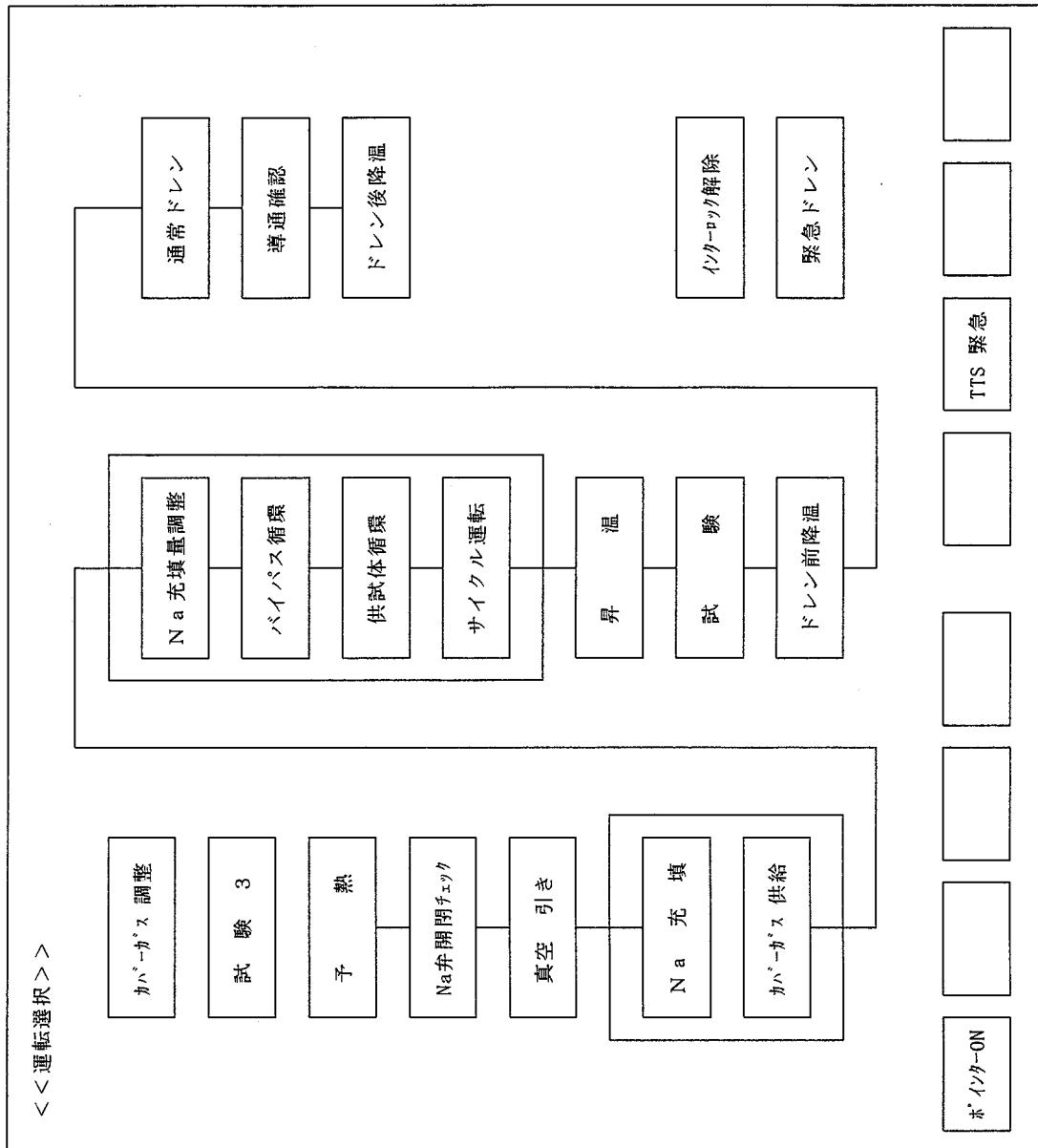


図3.16 運転工程画面

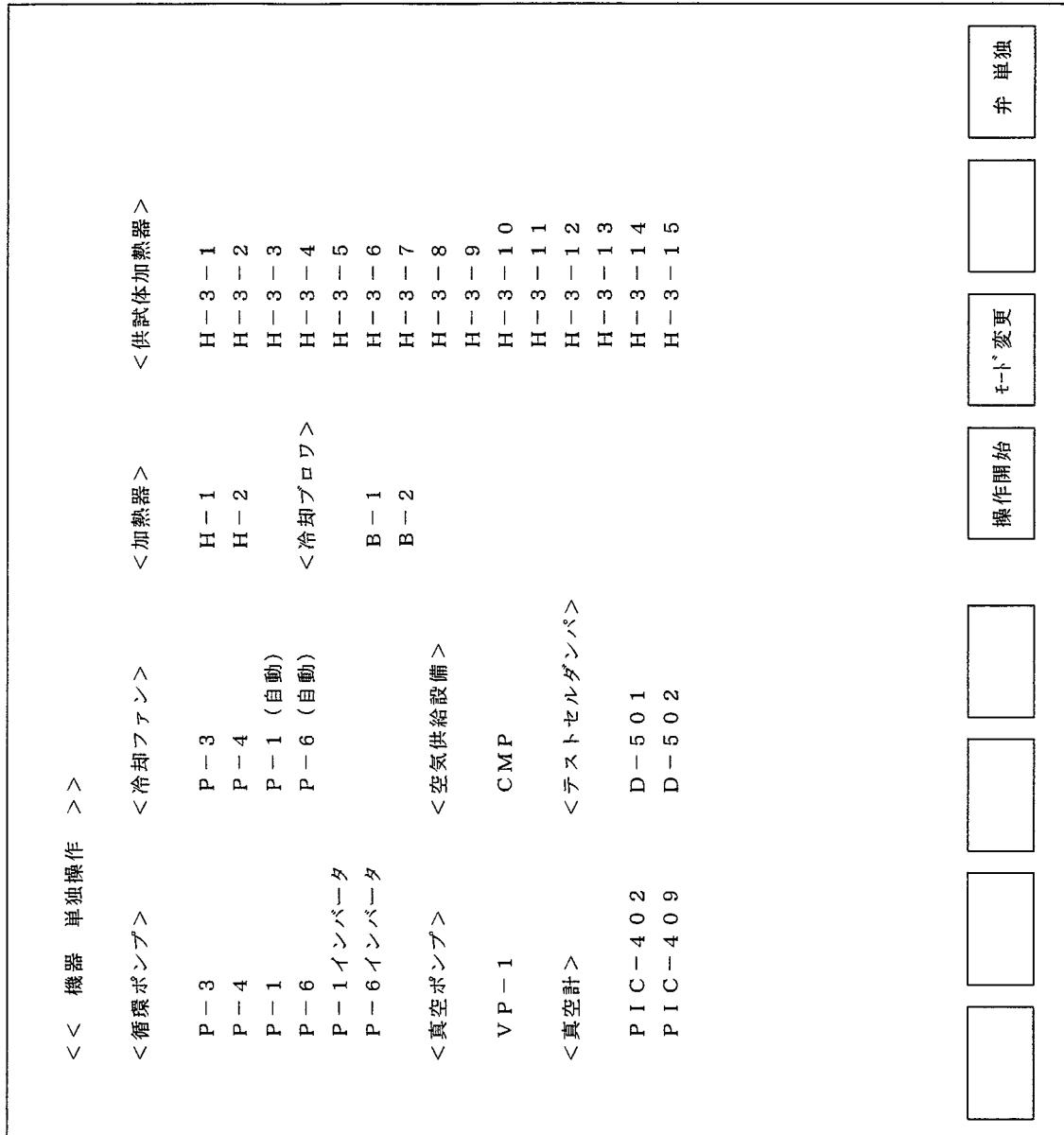


図3.17 機器単独操作画面

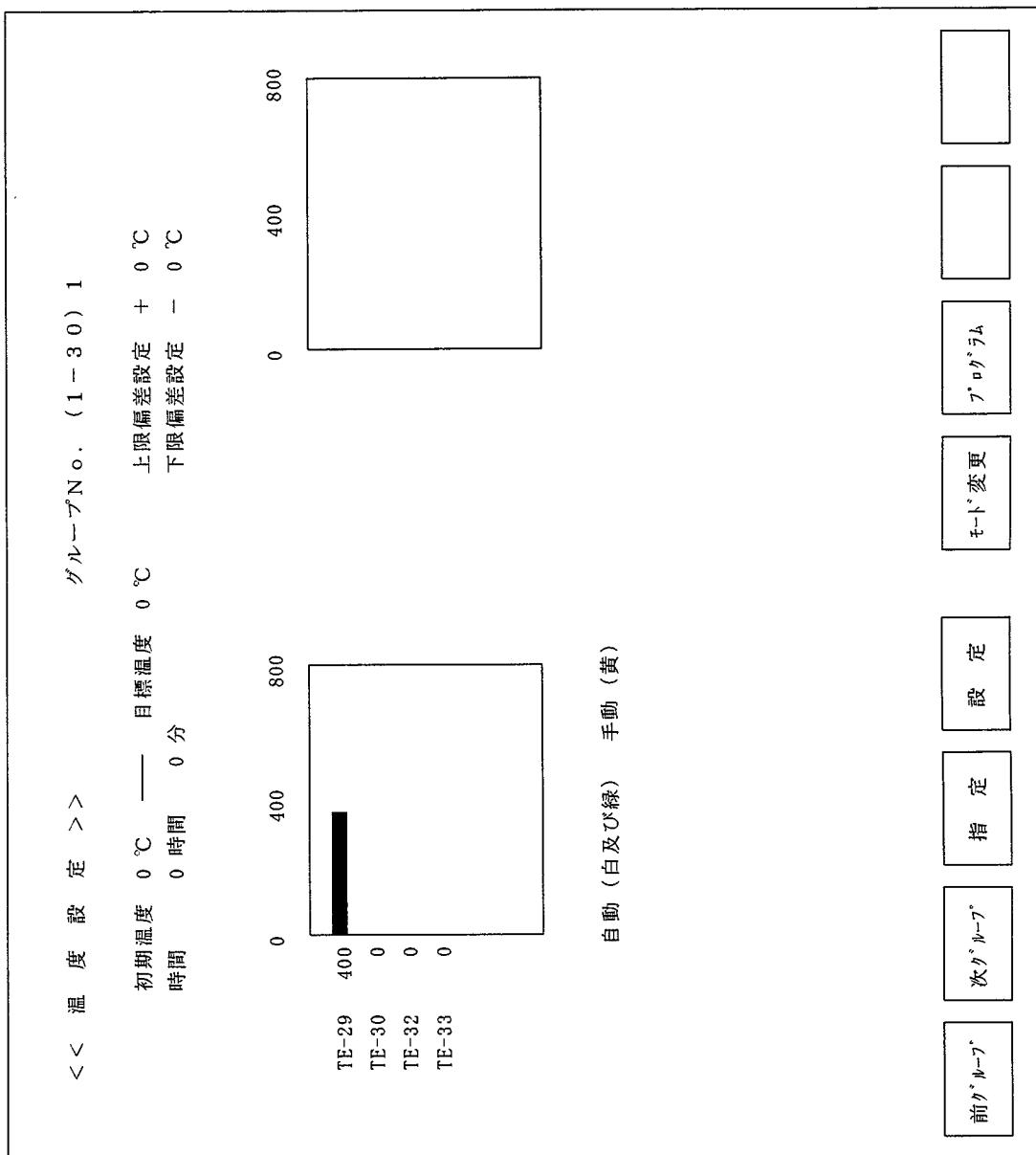


図3.18 溫度設定画面

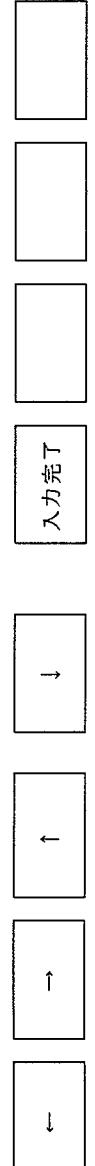
<< 試験 条件 (サーマルストライピング試験) >>	
1. 試験 サイクル設定	2. 試験開始時間設定
設定 : 0サイクル 実行 : 0サイクル 残り : 0サイクル	設定 : 0年 0月 0日 0時 0分 0秒 実行 : 0時間 0分 0秒 残り : 0時間 0分 0秒
< 高温系／低温系合流試験 >	
3. バルブ設定	4. 流量設定
FCV-111 開度 0% FCV-112 開度 0% FCV-101 開度 0% FCV-106 開度 0% FCV-107 開度 0% (自動) FCV-107 開動作 + 0% FCV-107 開動作 - 0% HET.CET 上限偏差 ± 0mm HET.CET 下限偏差 ± 0mm	FCV-111 開度 0% FCV-112 開度 0% FCV-101 開度 0% FCV-106 開度 0% FCV-107 開度 0%
< サーマルストライピング試験 >	
5. バルブ設定	6. 流量設定
	P - 1 0l/min P - 6 0l/min 変動周波数 50秒 変動幅 ± 200l/min
7. タイマ設定 (共通)	
P - 1 0l/min 400l/min 120秒	ポンプ運転待ち時間 10秒
P - 6 0l/min 400l/min 120秒	B - 1 運転待ち時間 10秒
	

図3.19 試験条件設定画面

&lt; &lt; 制御定数 &gt; &gt;

[弁開閉チェック]		開	閉	弁グループ
1	待時間・1	0秒	0秒	[EV-101, 102]
2	待時間・2	0秒	0秒	[EV-103, 104]
3	待時間・3	0秒	0秒	[EV-105, 106]
4	待時間・4	0秒	0秒	[FCV弁]
5	待時間・5	0秒	0秒	[その他のN a弁]・[ガス弁]

## [真空引き]

1	PIC-404	規定値	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>	1 加圧側圧力	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>
2	PIC-405	規定値	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>	2 排氣側圧力	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>
3	PIC-401	規定値	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>	3 加圧側変化率	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>
4	PIC-402	規定値	0.00 Torr	4 変化率待時間	0秒
5	PIC-409	規定値	0.00 Torr		
6	真空待時間	1	0分		
7	真空待時間	2	0分	1 上限圧力	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>
8	真空待時間	3	0分	2 下限圧力	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>
9	真空所要時間		0分		

## [導通確認]

1	ダンプタンクカバーガス圧力	0分	1 上限圧力	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>
2		0分	2 下限圧力	+0.00 kg/cm <sup>2</sup>
3		0分		
4		0分		

## [P-1, P-6インバータ予熱]

1	上限温度	0°C
2	下限温度	0°C

			入力				終了
--	--	--	----	--	--	--	----

図3.20 メンテナンスメニュー画面

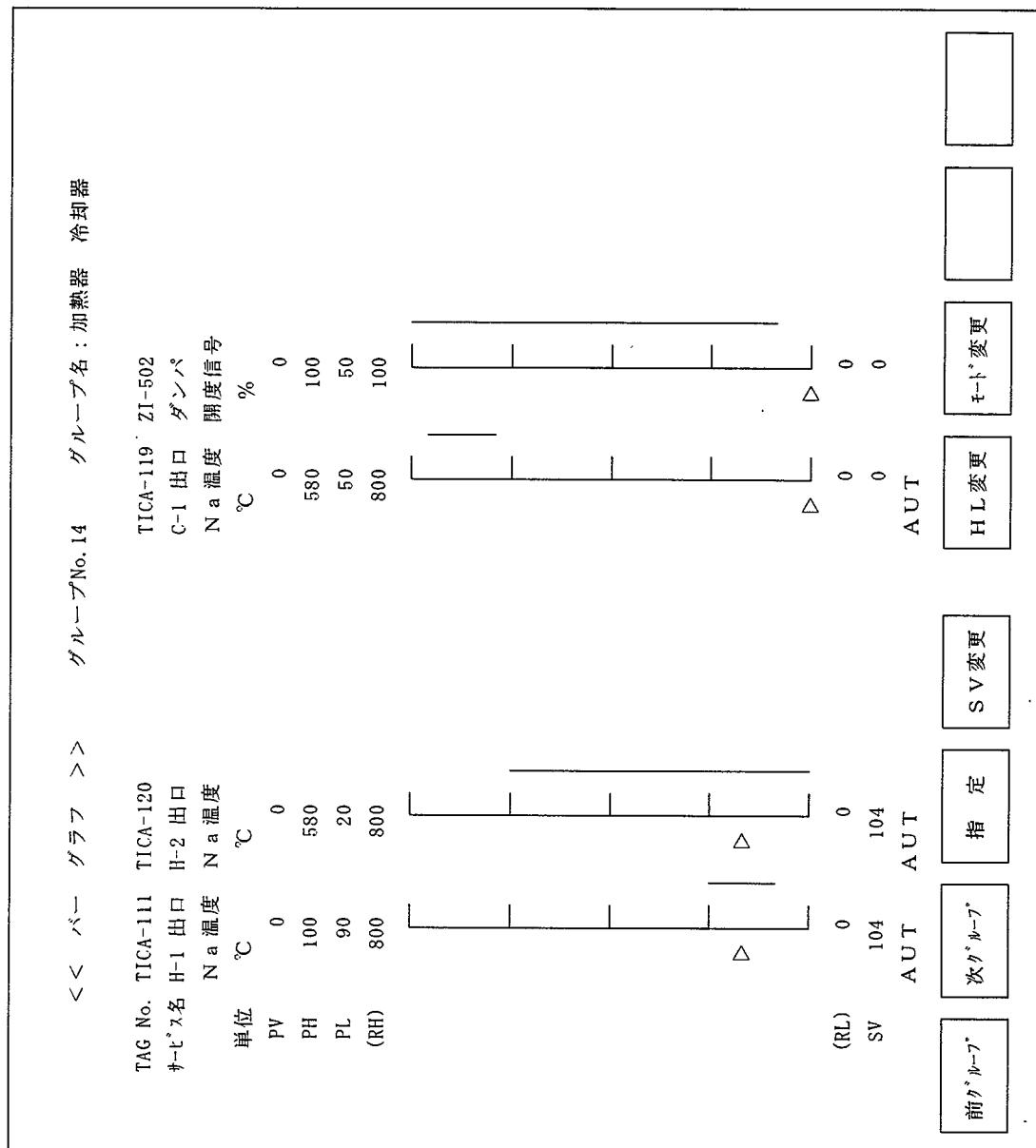


図3.21 監視才ーナビュ一画面

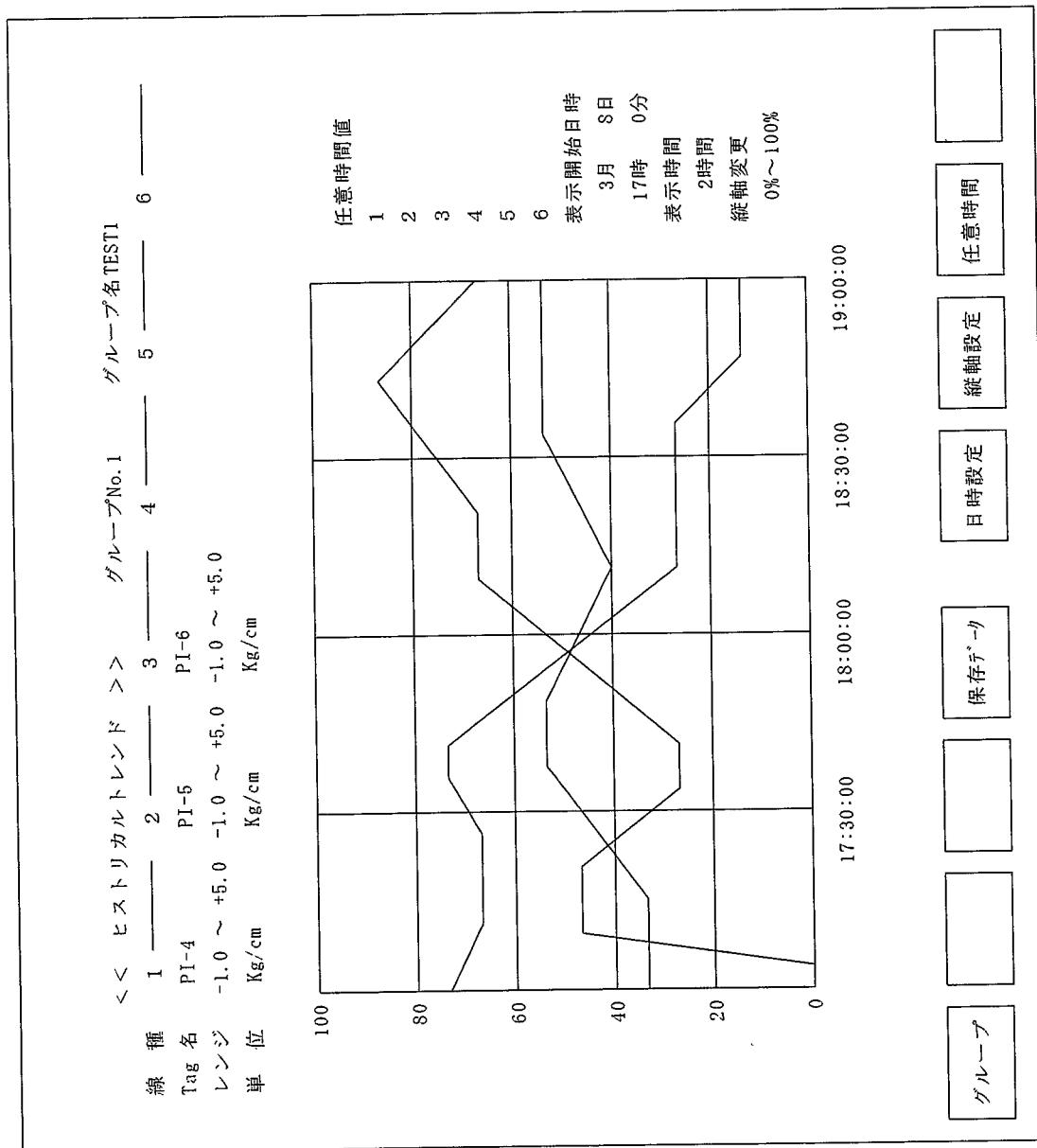


図3.22 ヒストリカルトレンド記録画面

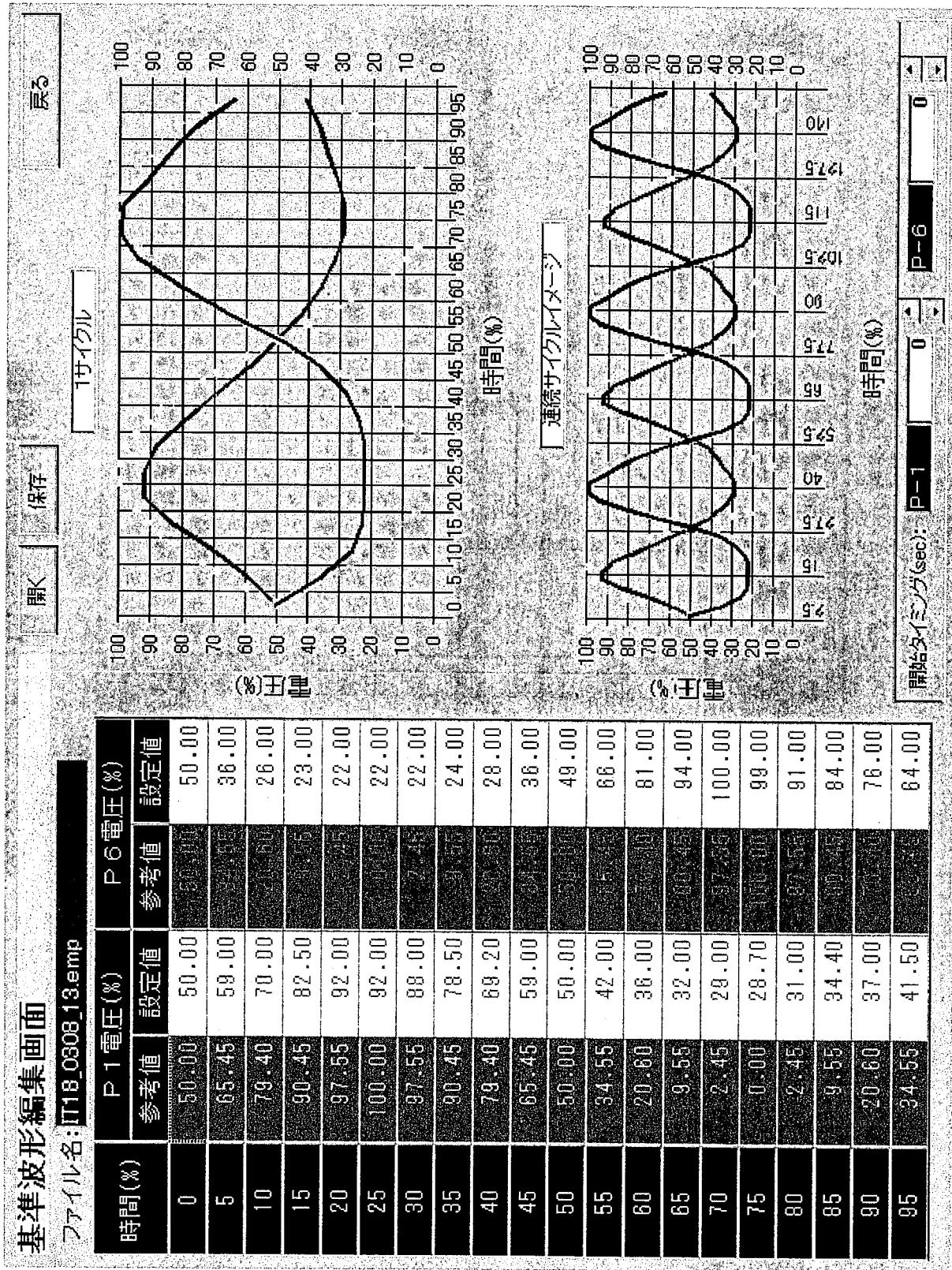


図3.23 循環式シブ制御用信号発生装置の基準波形編集画面

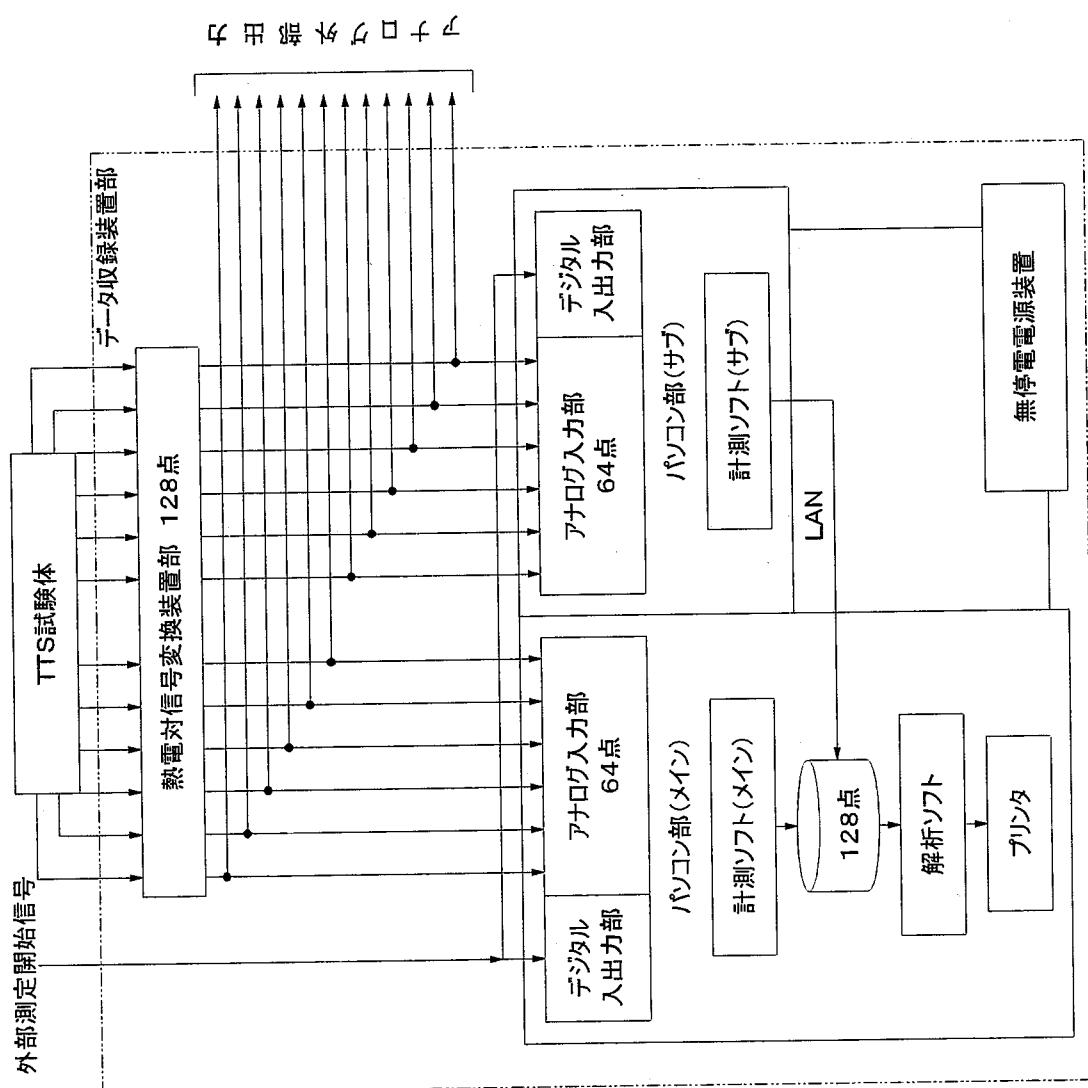


図3.24 試験体データ収録装置のシステム構成

- ↑ 試験自由度の拡大
- ↑ 試験条件の簡素化

低温Na  
↓

高温Na  
↑

流量制御方法：循環ポンプによる吐出圧制御方式  
最大温度振幅：試験体上流部において200°C  
繰返し周期：2～40秒 (0.5～0.025 Hz)  
Na流量：高温／低温Naを試験体入口でそれぞれ正弦波状に変化させ、合計流量の和を常に一定とする。また、長周期と短周期の重複波についても制御可能とする。

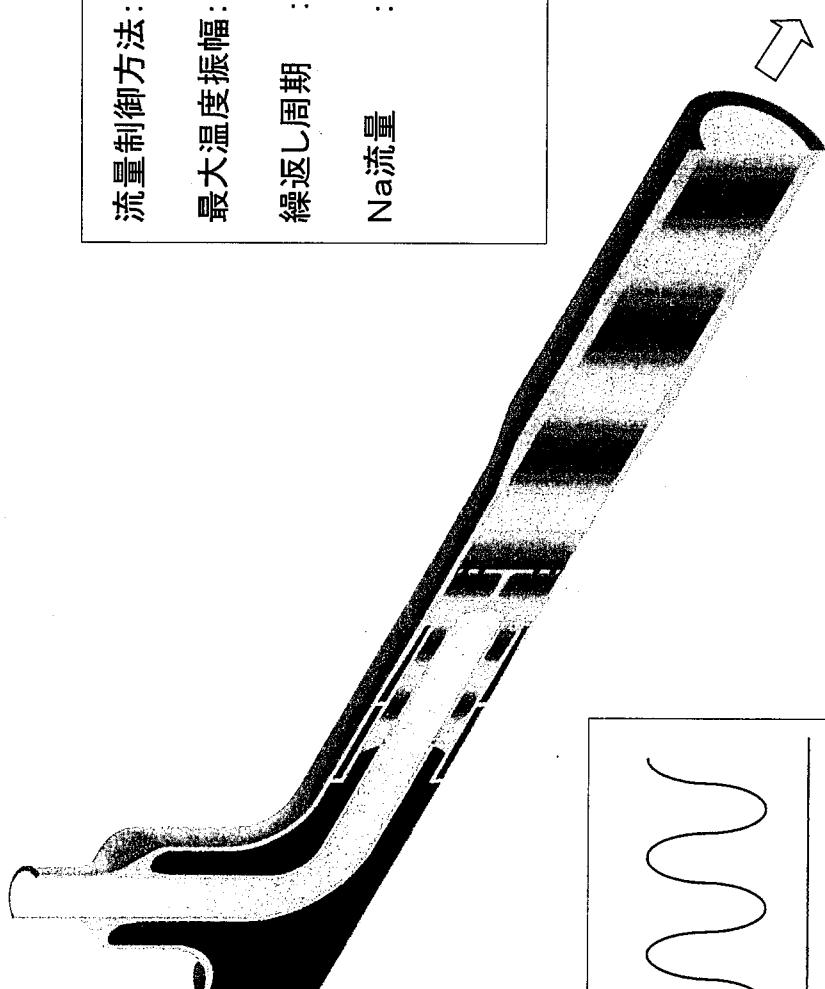
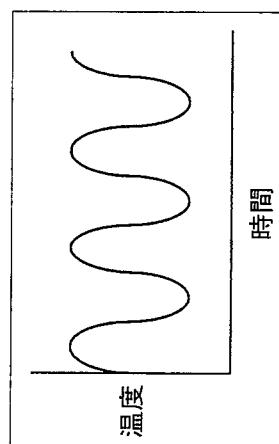


図3.25 試験部のナトリウム流动条件

ミキシングティイ詳細図

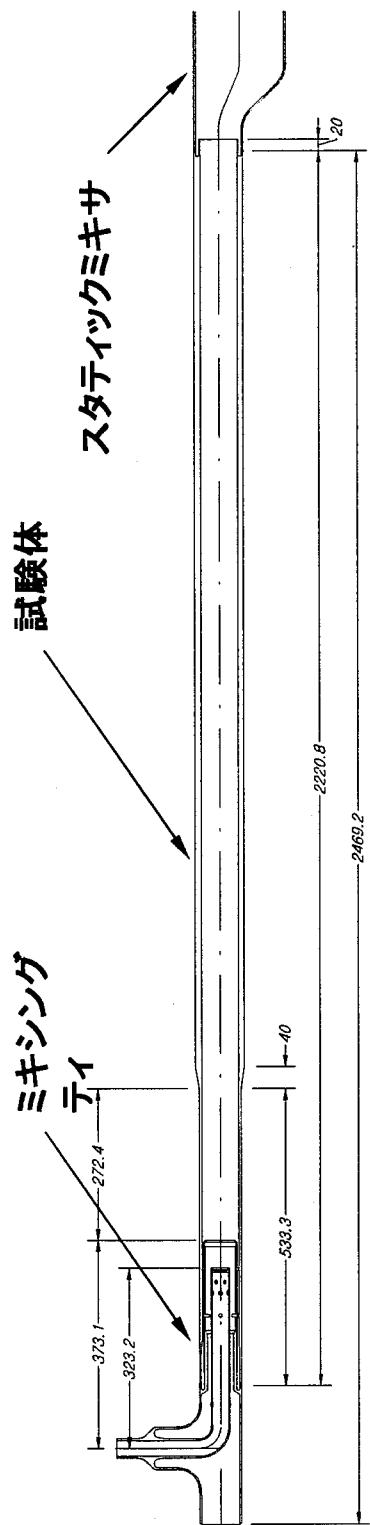
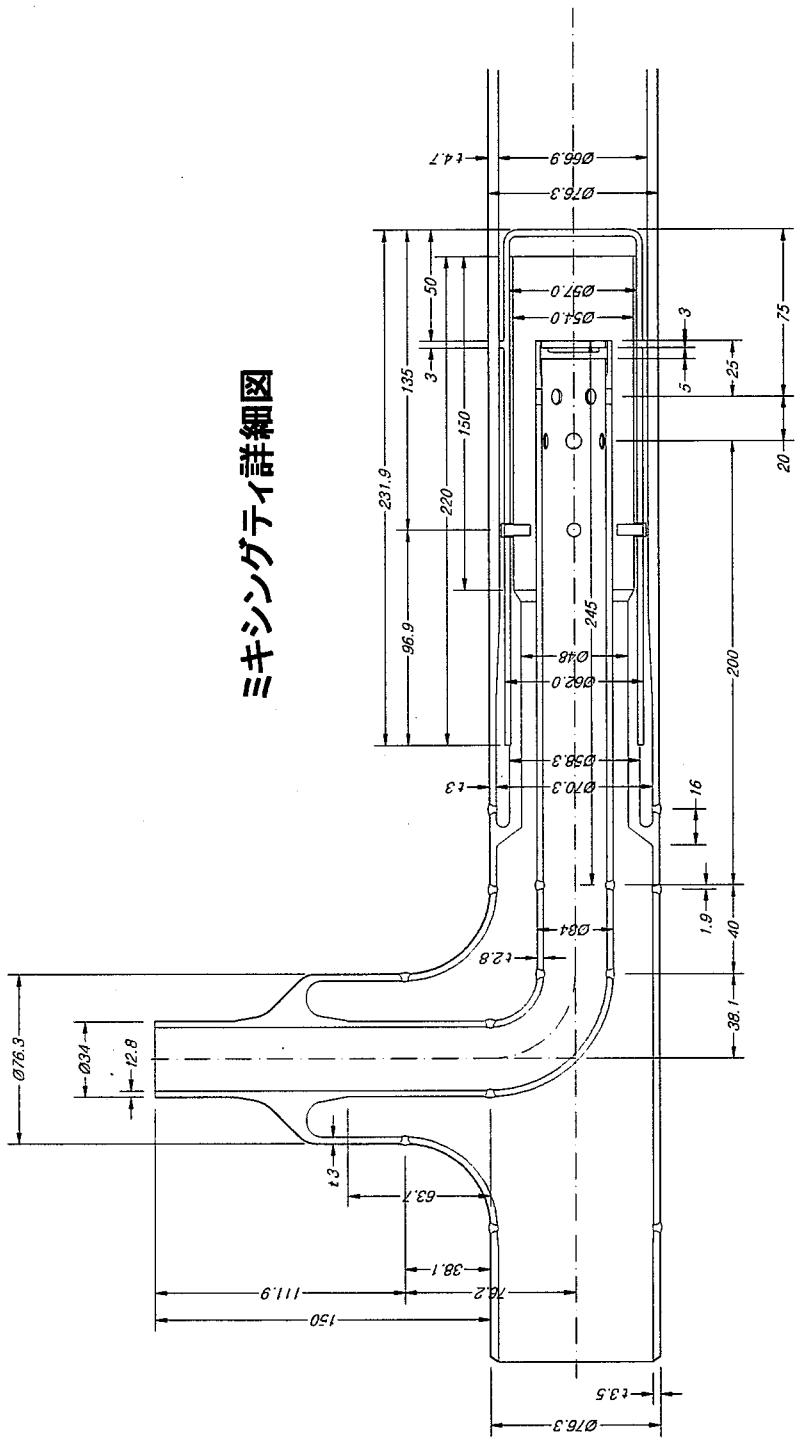


図3.26 ミキシングティイおよび試験体

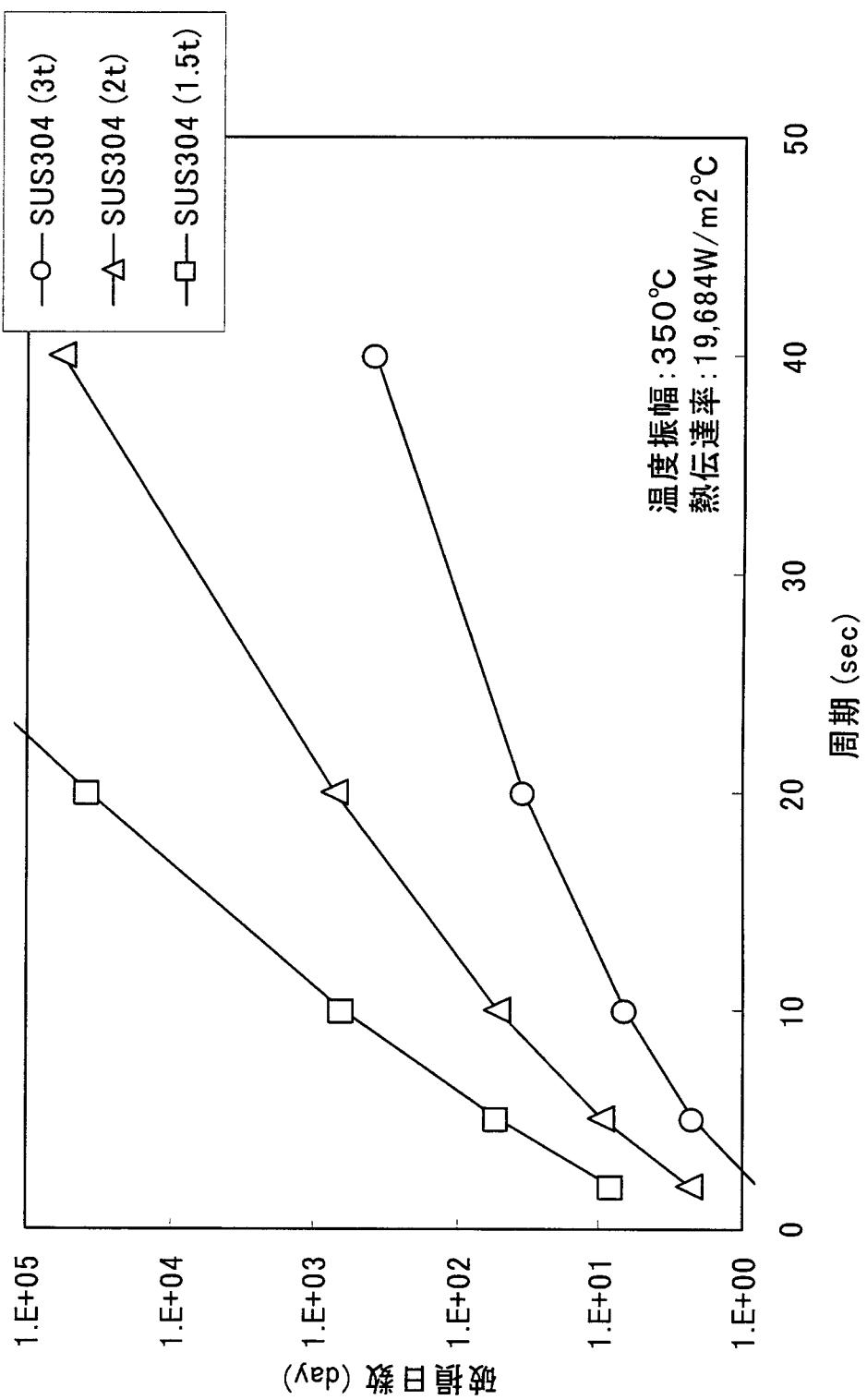
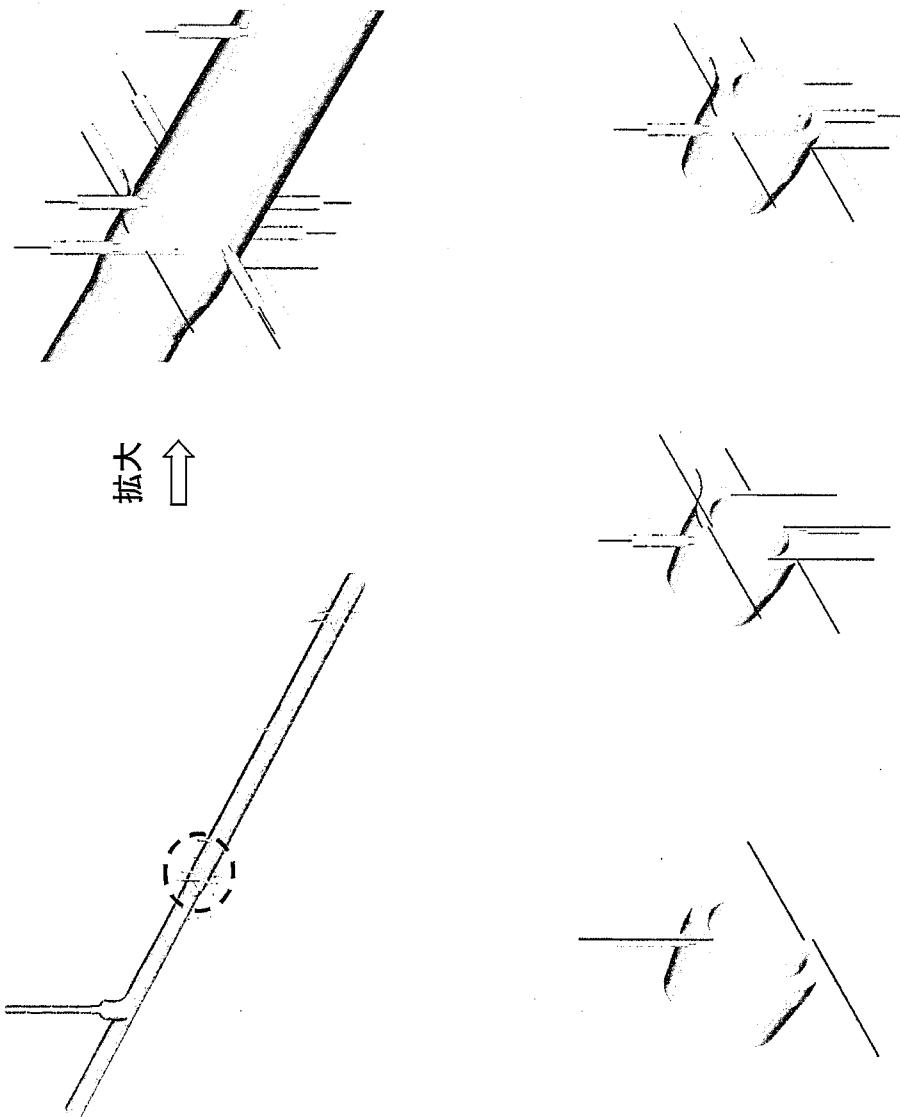


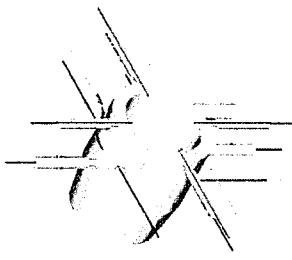
図3.27 热遮蔽管の疲労寿命に及ぼす板厚の効果

試験体	316FR鋼
材質:	316FR鋼
外径:	89.1 mm
内径:	66.9 mm
板厚:	11.1 mm
全長:	1600 mm

径方向 Na側	周方向		
	3 mm	0°, 90°, 180°	270°
1 mm		180°	
内表面		0°	
1.5 mm	0°	90°, 180°	270°
2.8 mm	0°	90°, 180°	270°
鋼材側	5.5 mm	0°	
8.3 mm		180°	
外表面		0°	



シース型熱電対(1mmφ): 各ブロック17点



各断面は15mm間隔で熱電対を設置

図3.28 溫度計測試験体の熱電対取付け位置

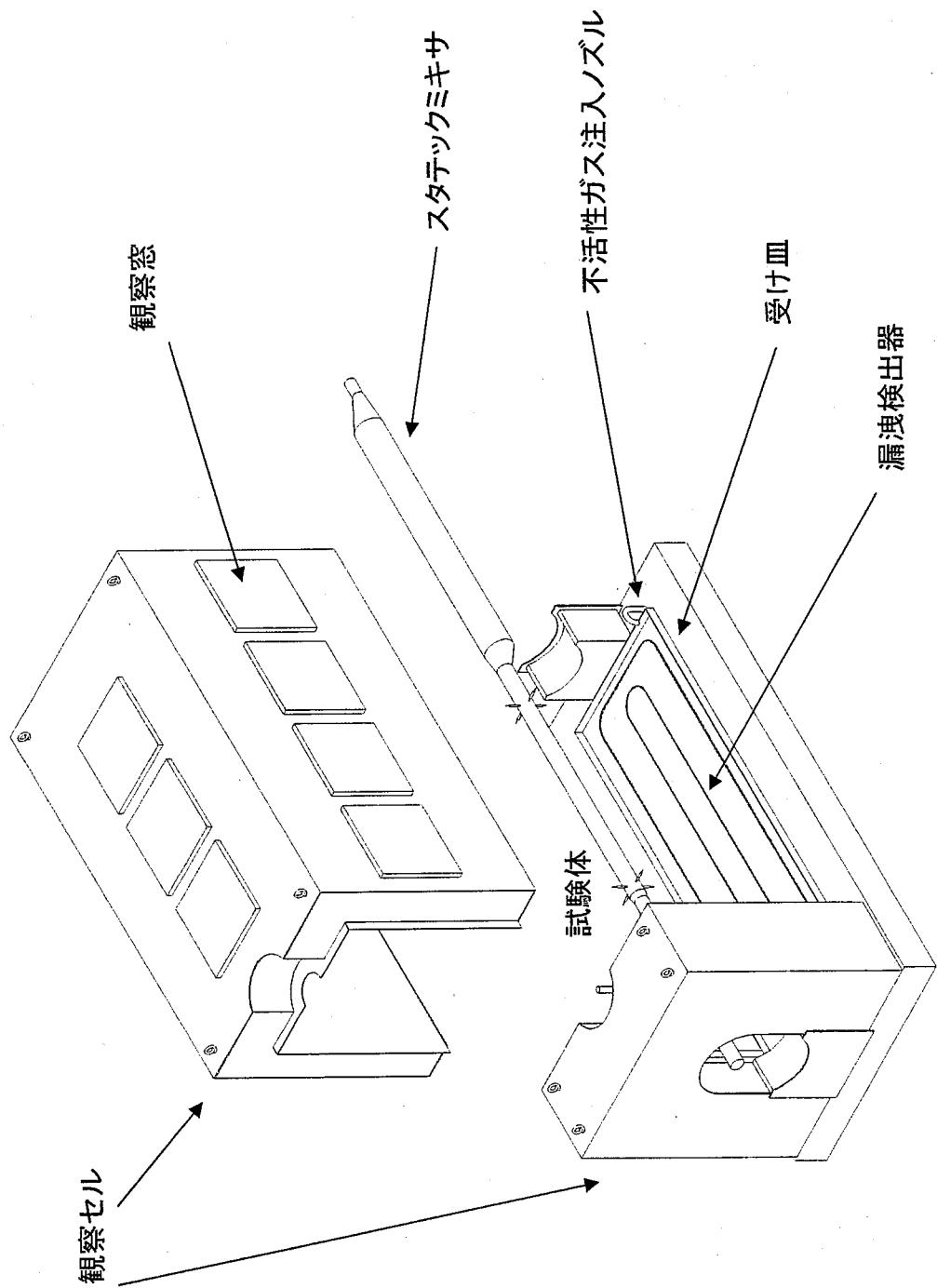


図3.29 試験体観察セル

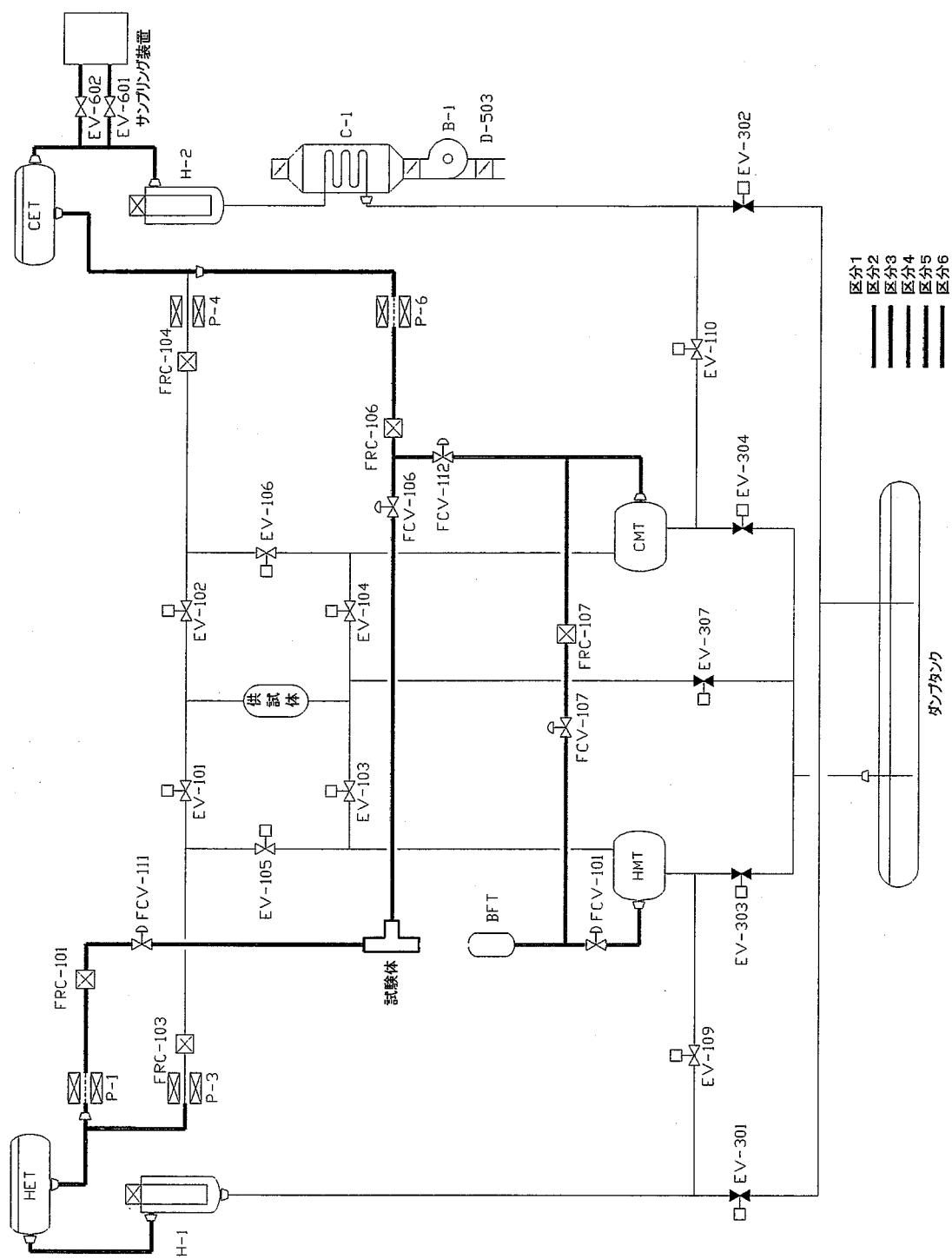


図4.1 ループ系統の熱過渡区分

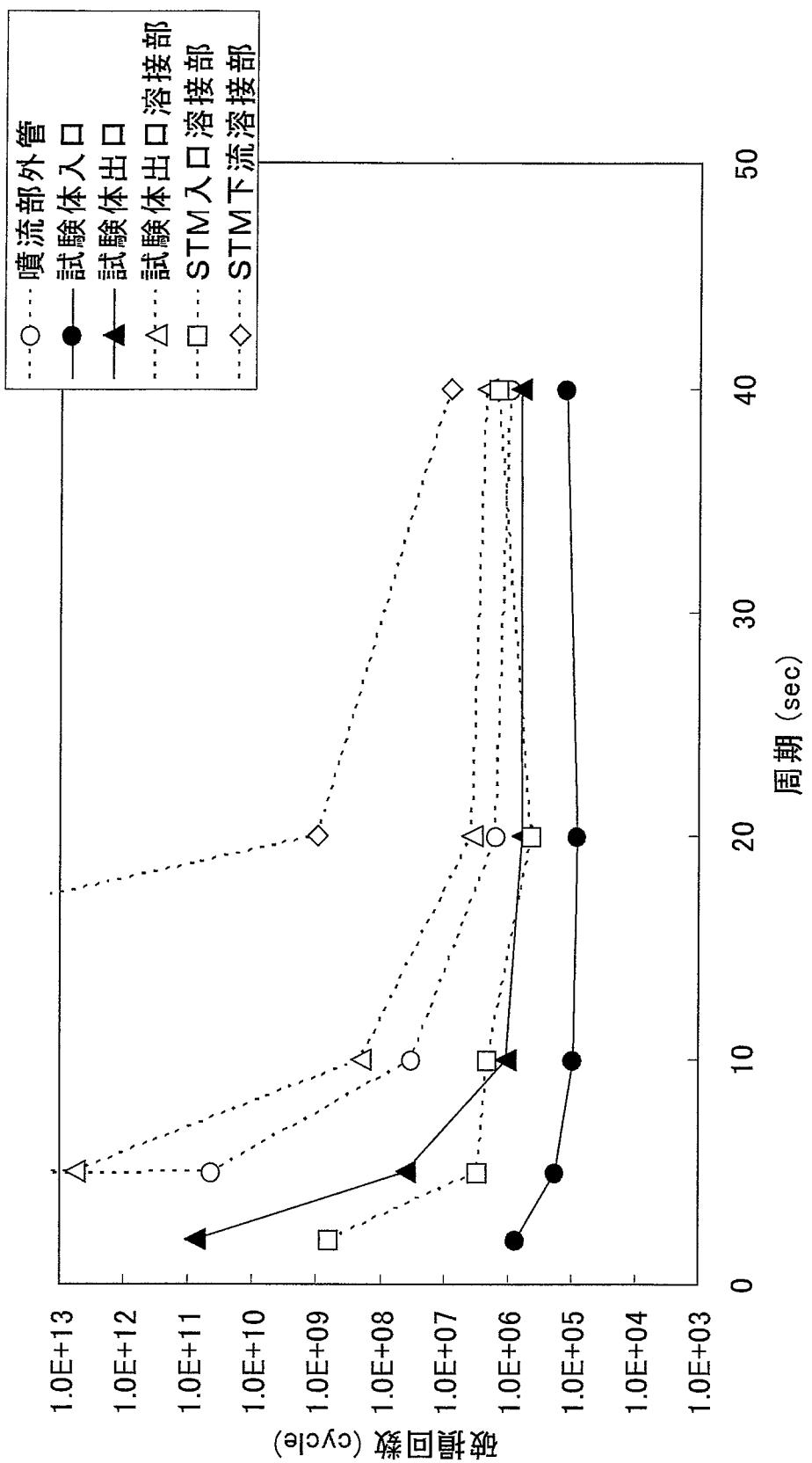


図4.2 試験部周辺の破損寿命比較

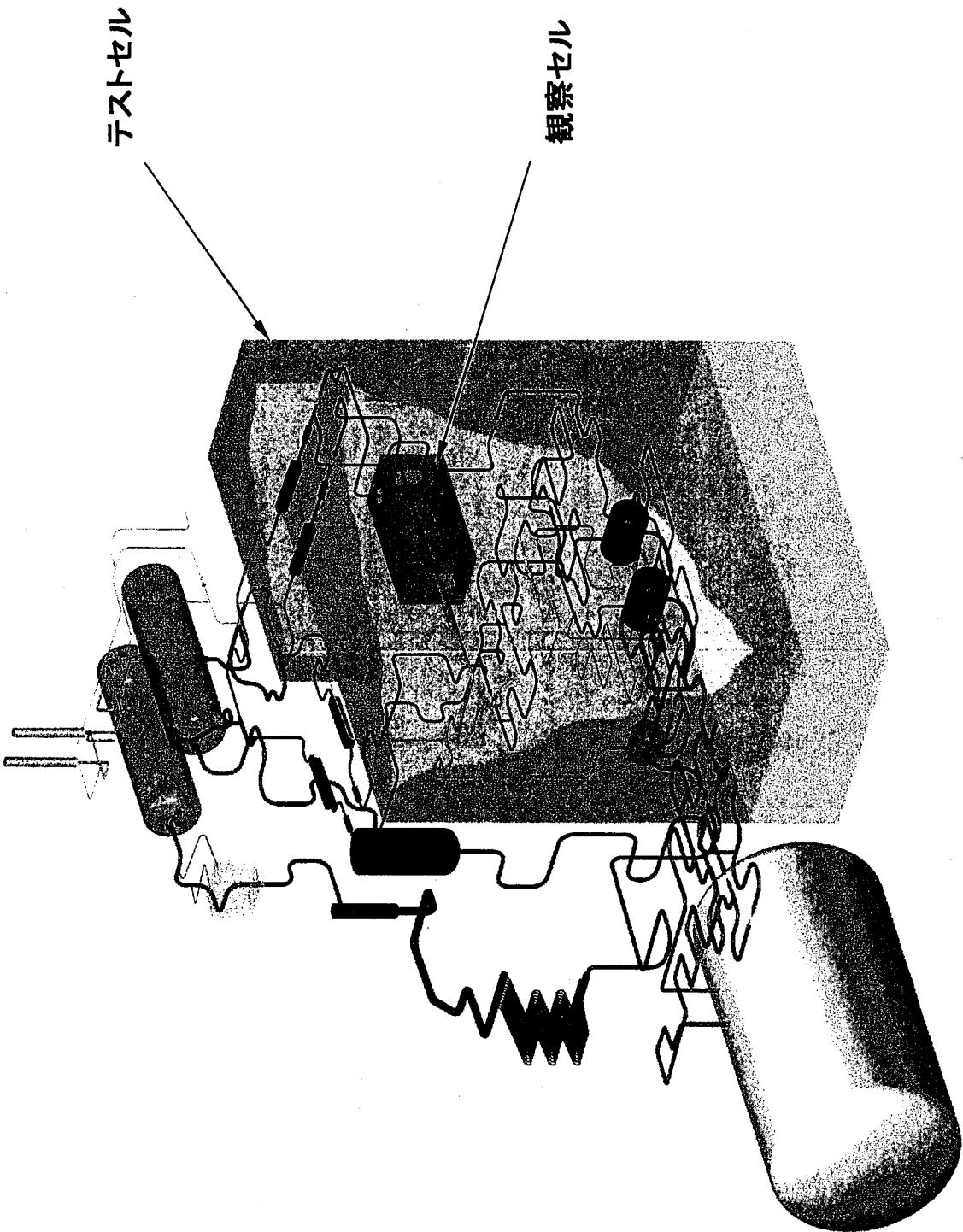
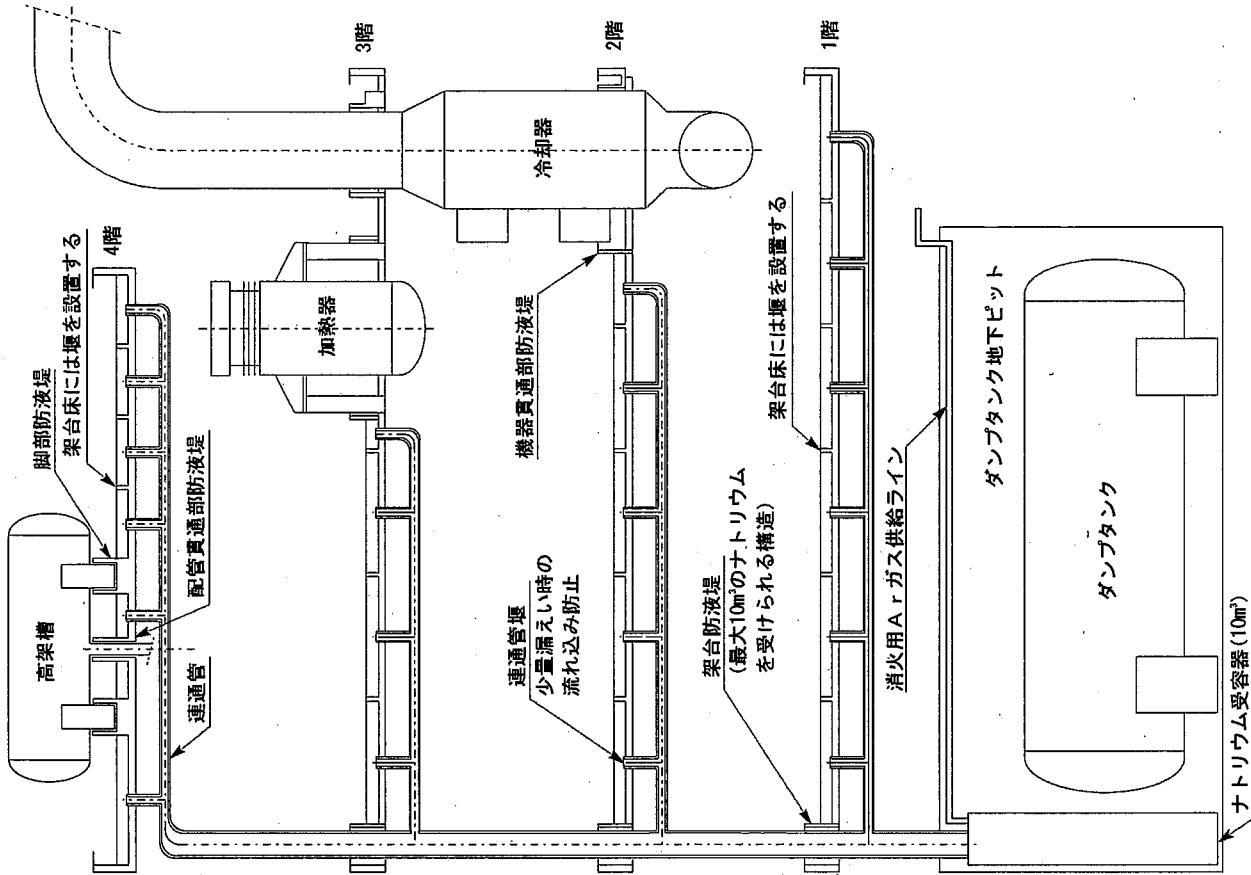
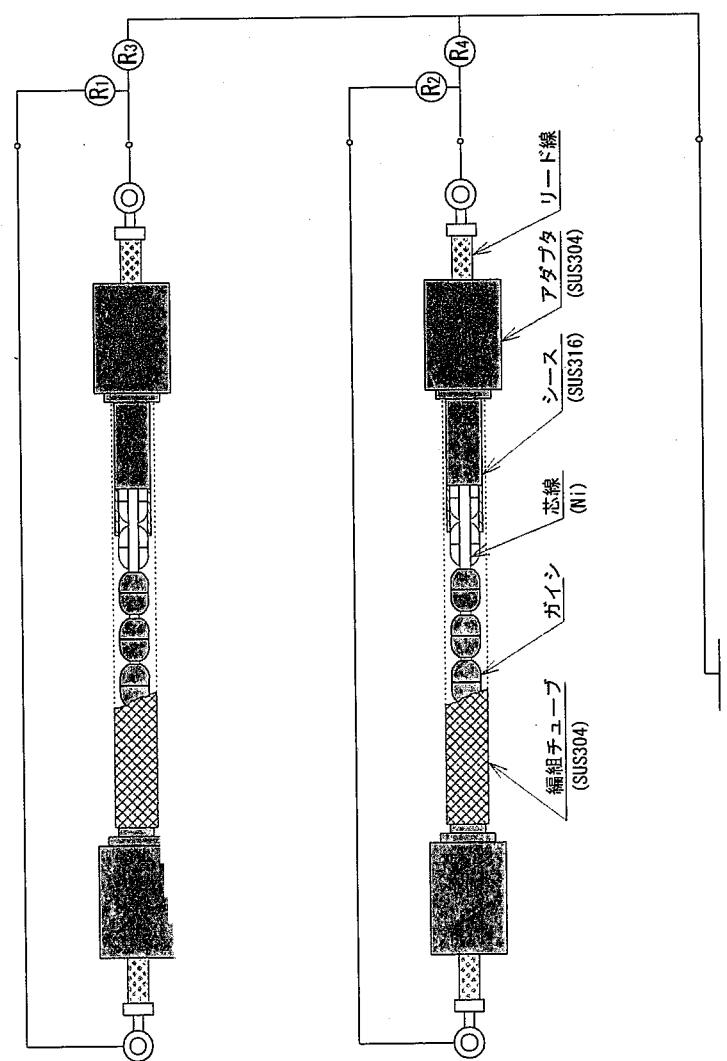


図5.1 テストセルおよび観察セルの設置概要

図5.2 防液堤、連通管およびNa受け容器の設置概要





ケーブル型通電式ナトリウム漏えい検出器（配管、機器外面に使用）

電極型通電式ナトリウム検出器（弁ベローズ部に使用）

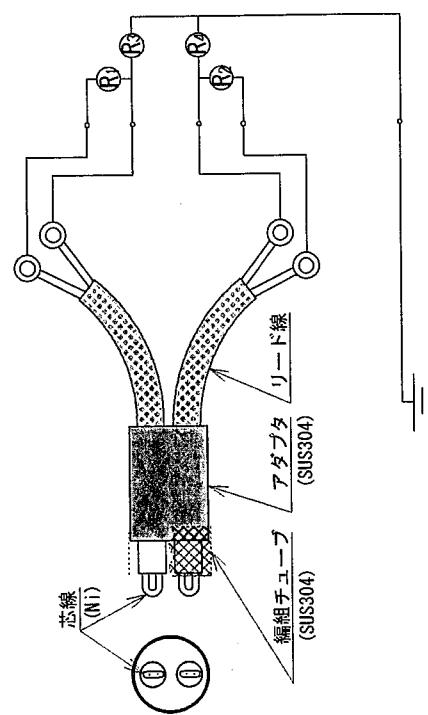


図5.3 ナトリウム漏洩検出器の基本構造

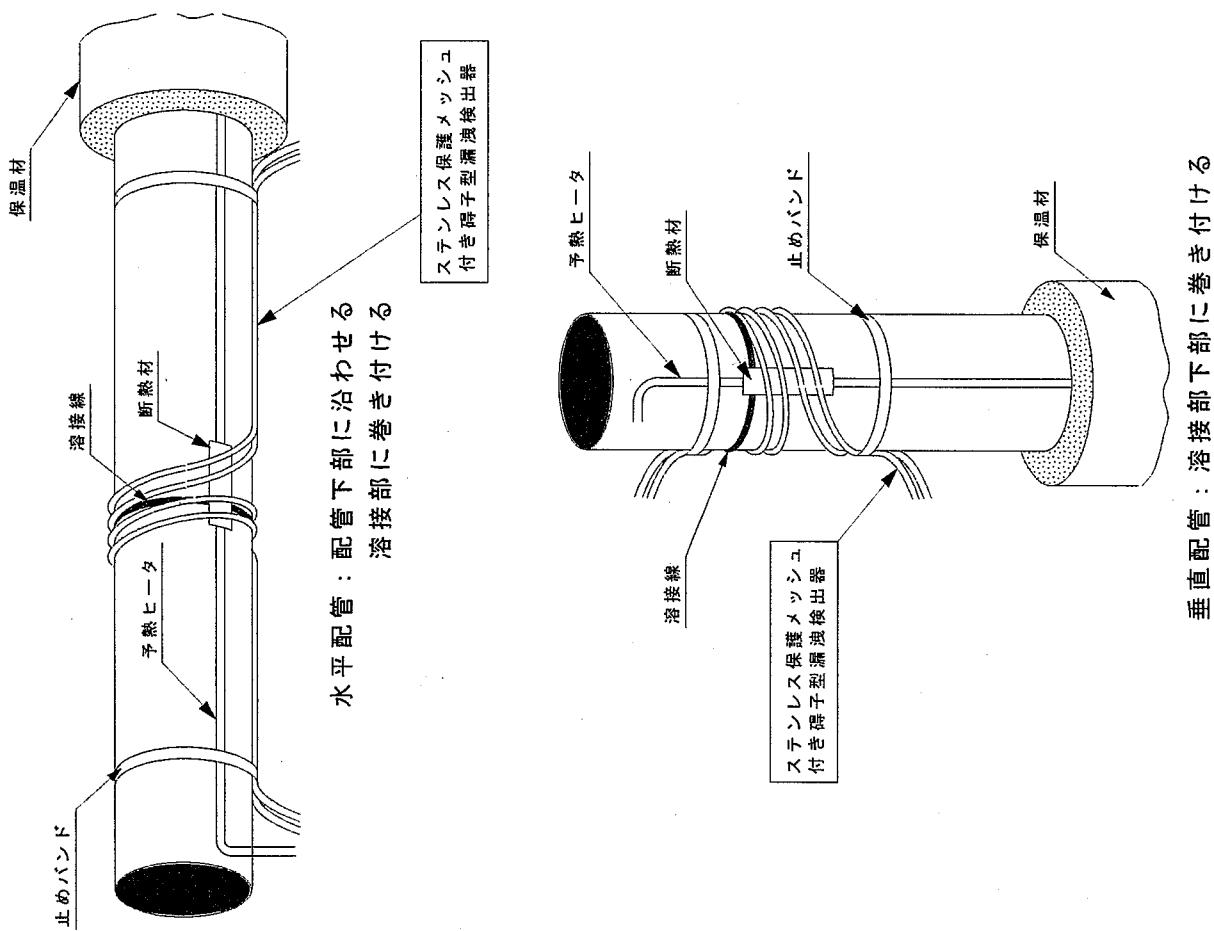


図5.4 ナトリウム漏洩検出器の取付方法

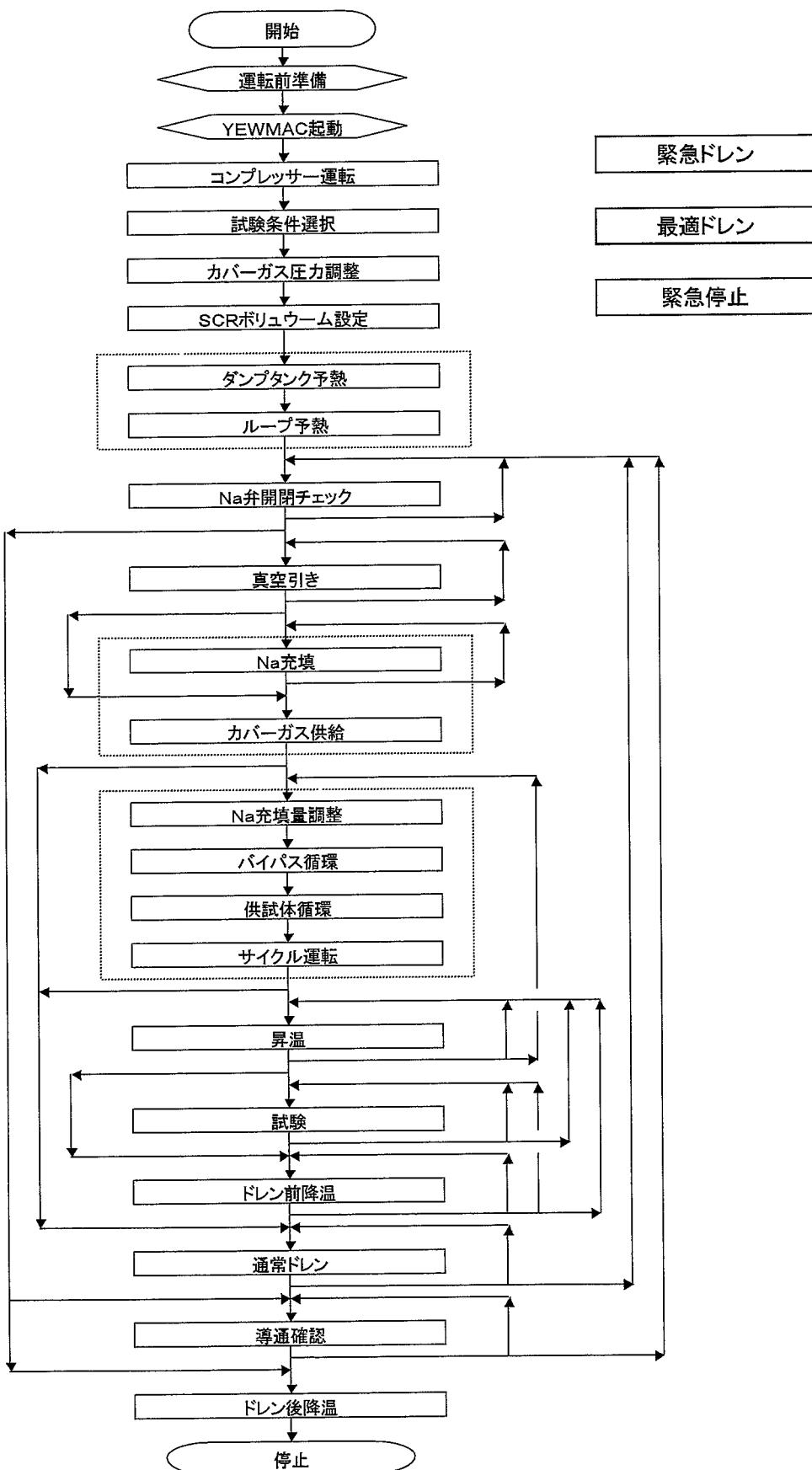


図6.1 全体工程フロー

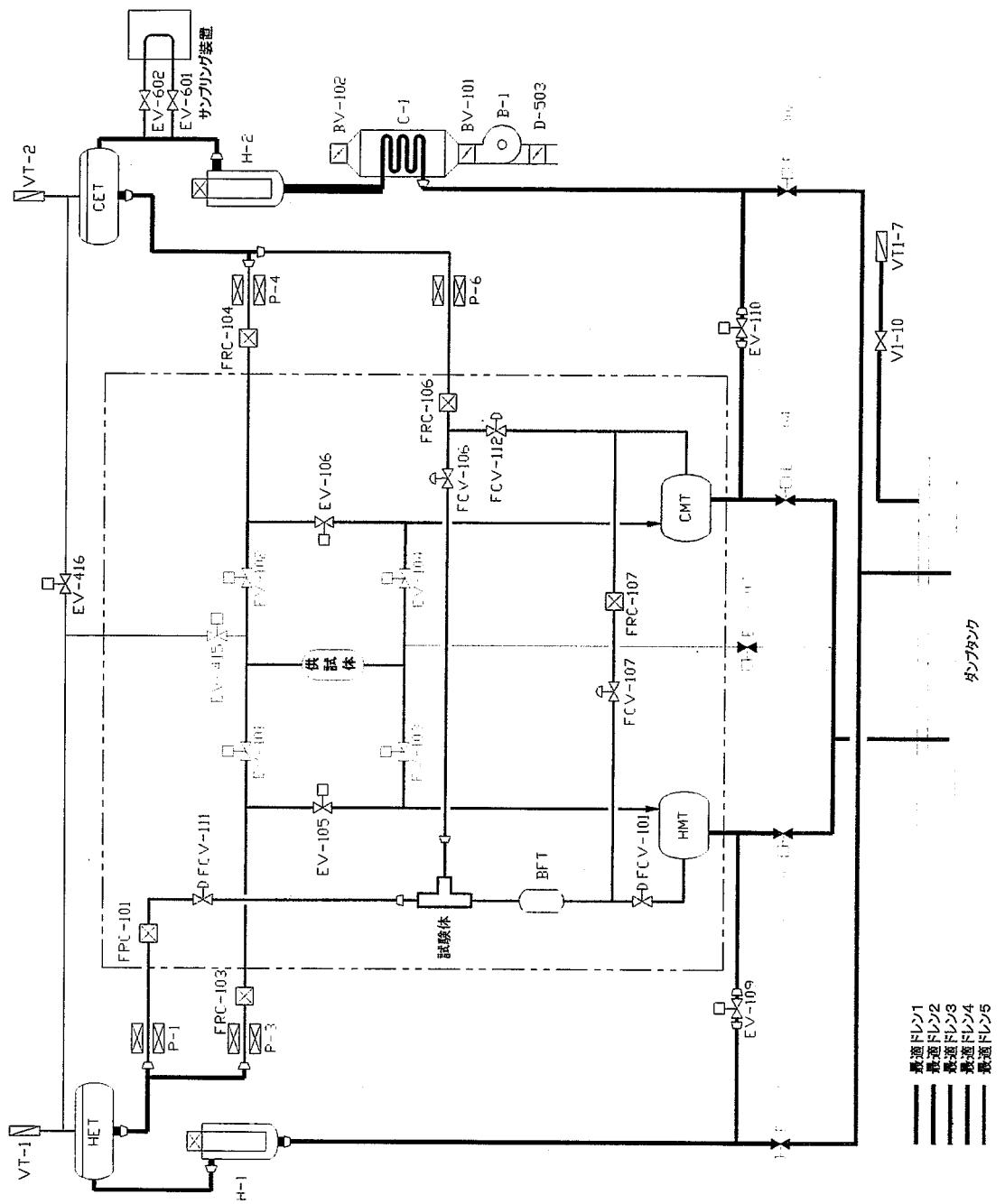


図6.2 緊急・最適ドレン範囲

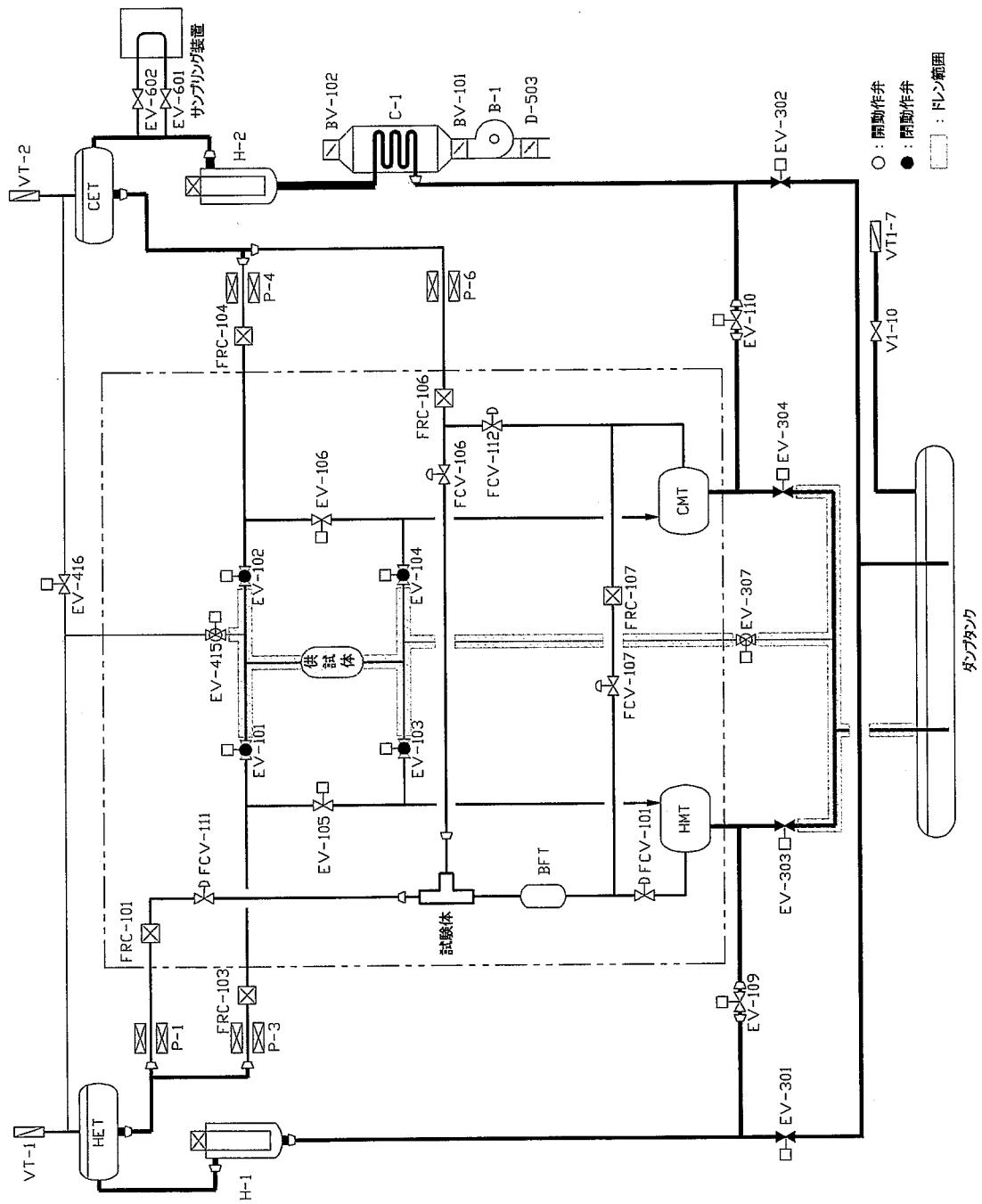


図6.3(1) 最適ドレン1範囲

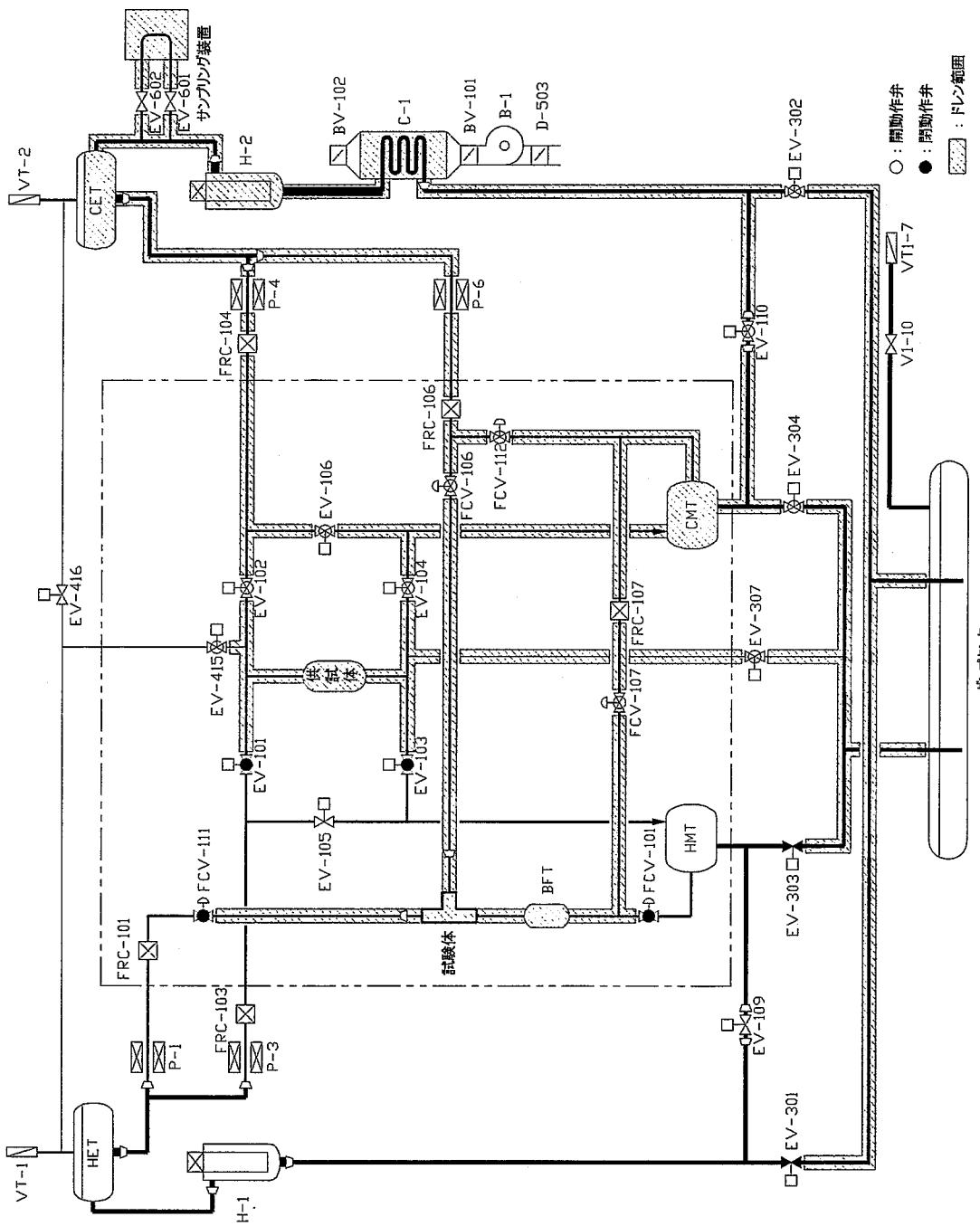


図6.3(2) 最適ドレン2範囲

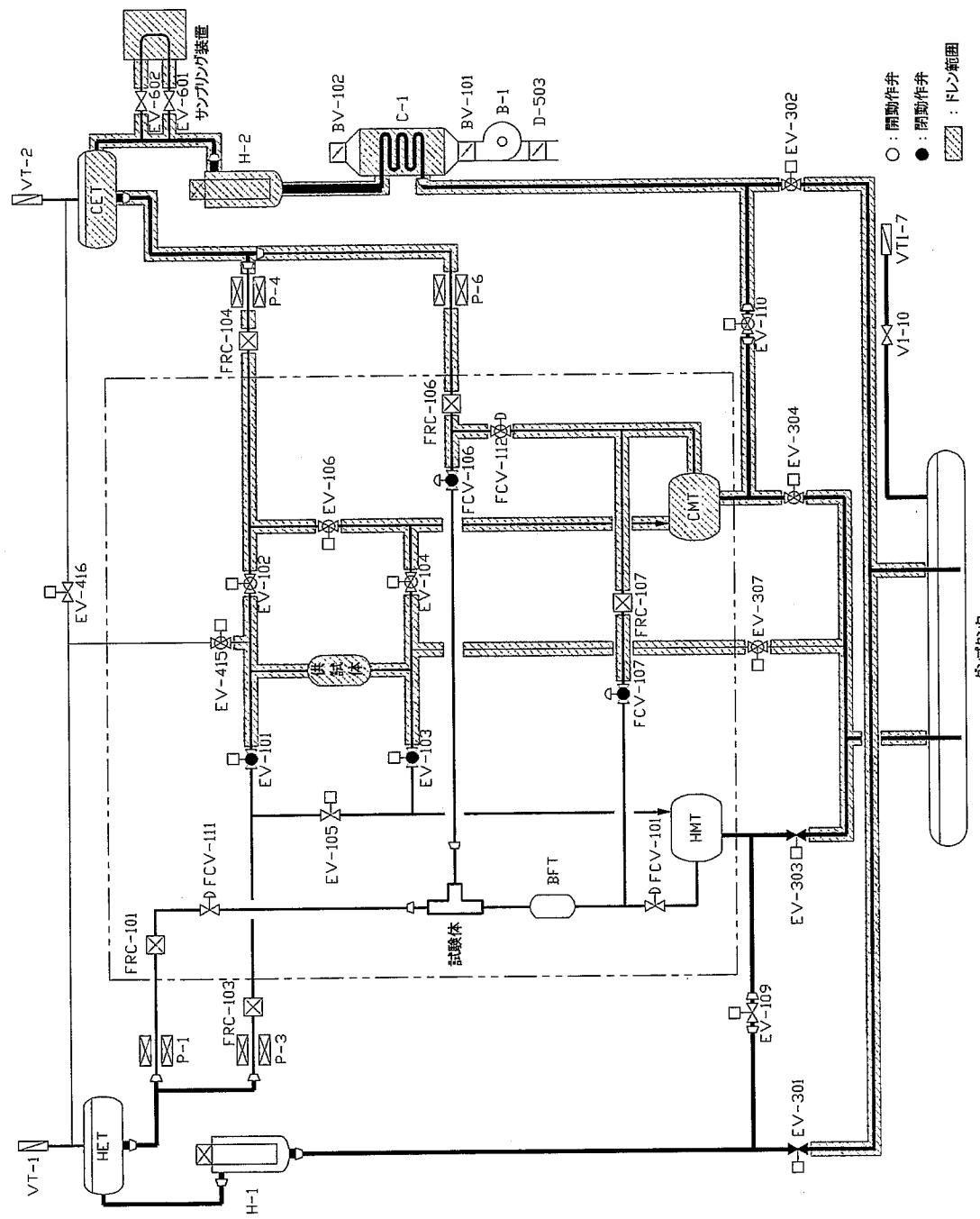


図6.3(3) 最適ドレン3範囲

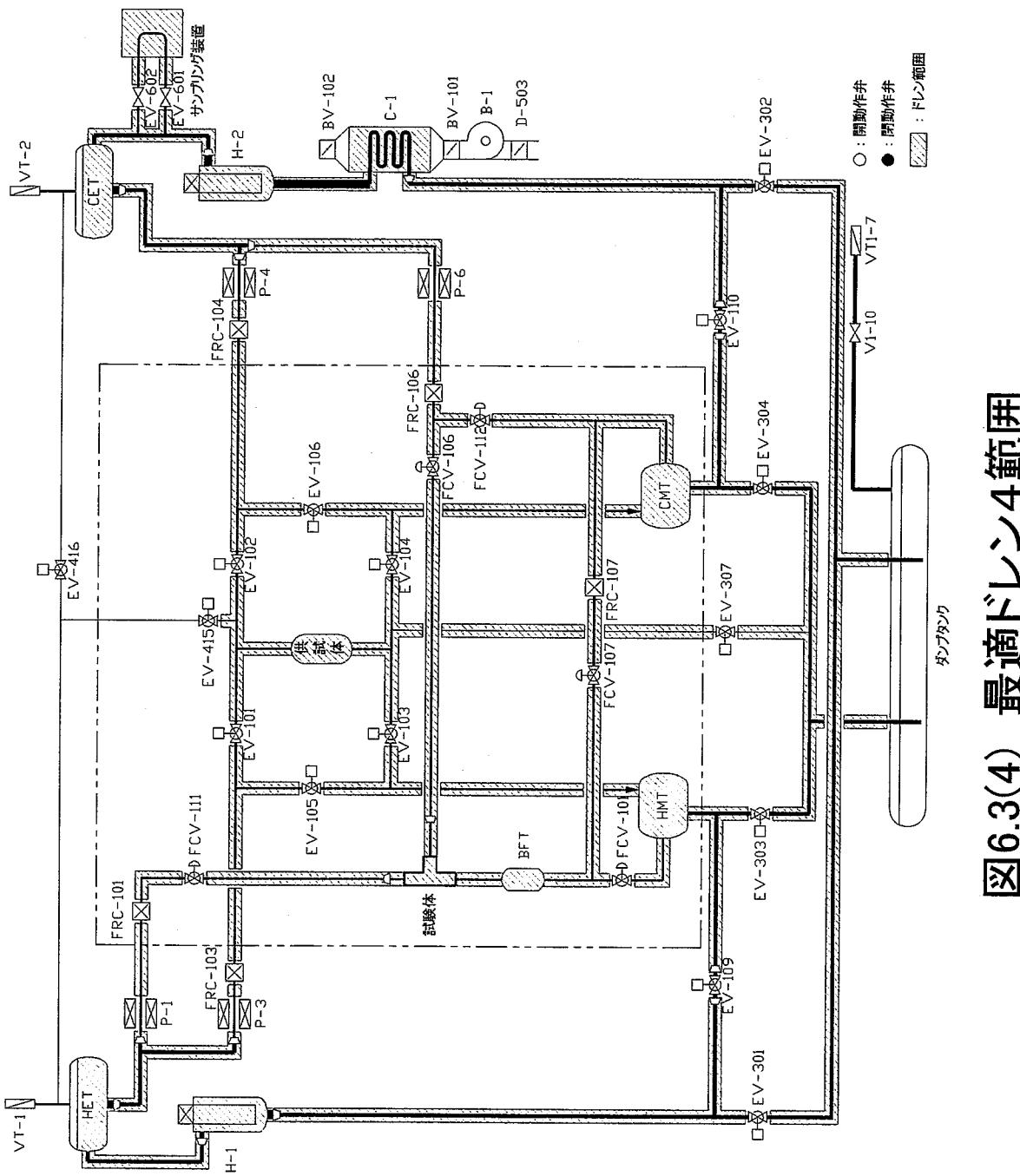


図6.3(4) 最適ドレンシステム4範囲

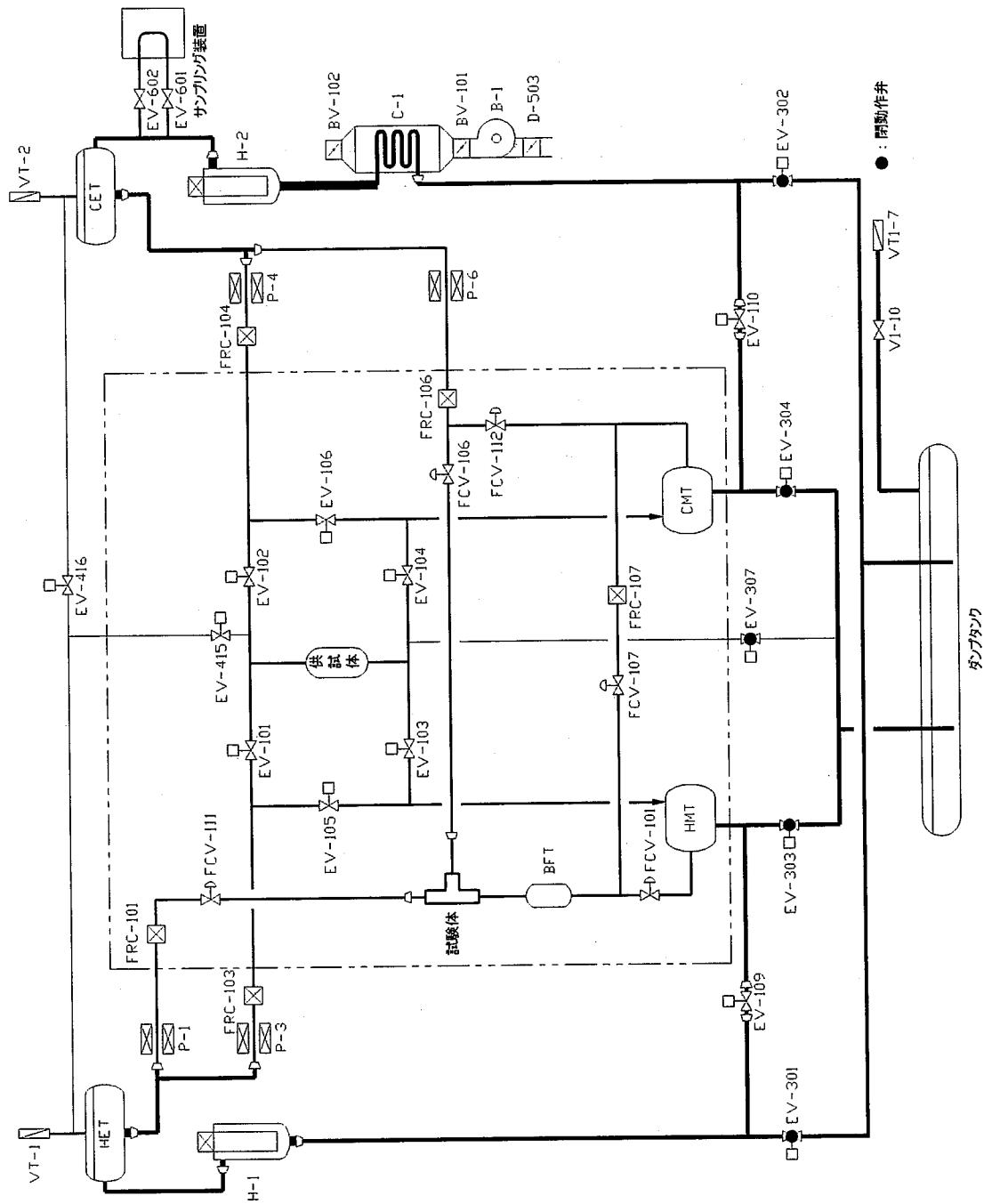
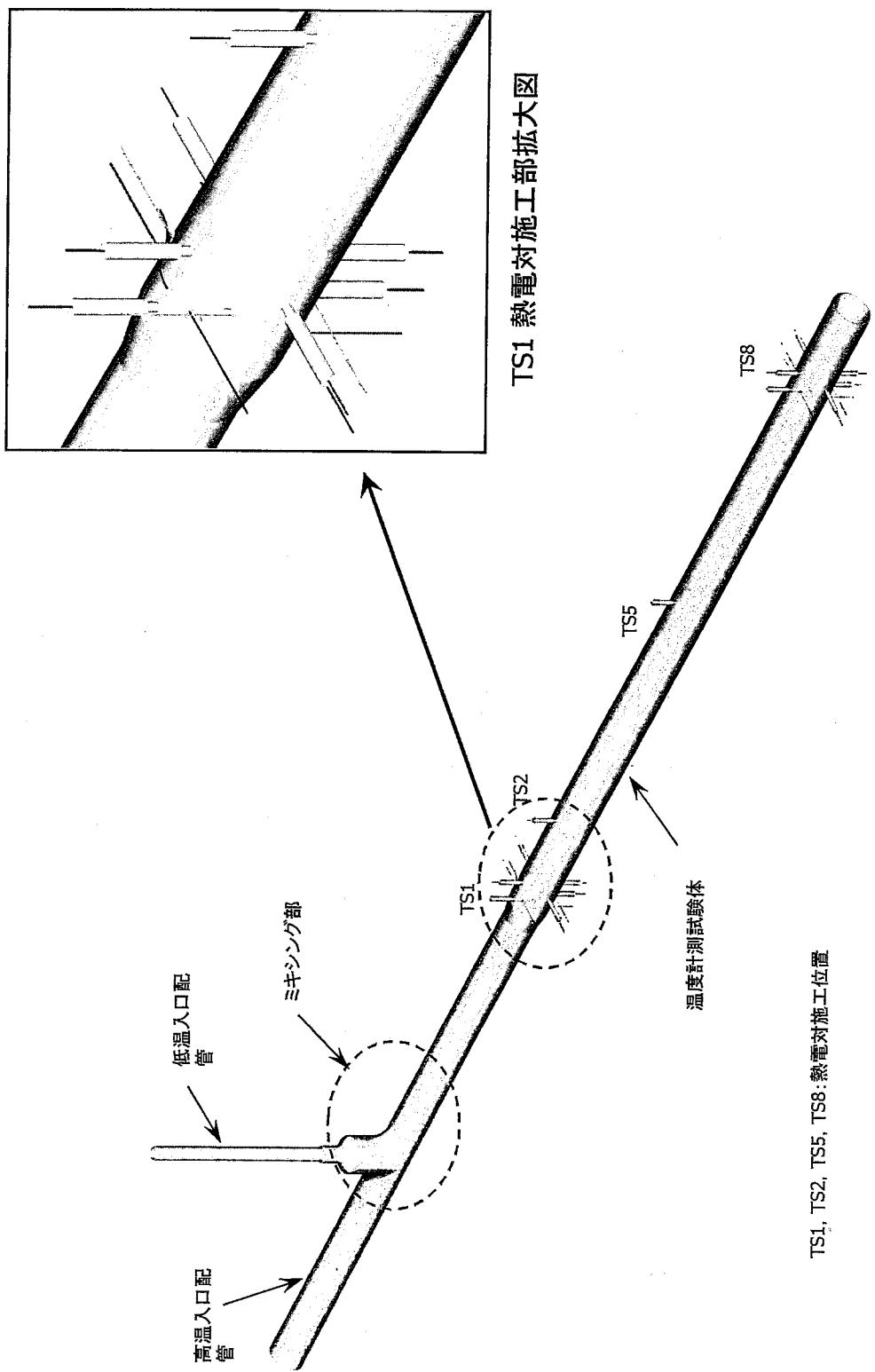


図6.3(5) 最適ドレン5範囲

図7.1 溫度計測試験体



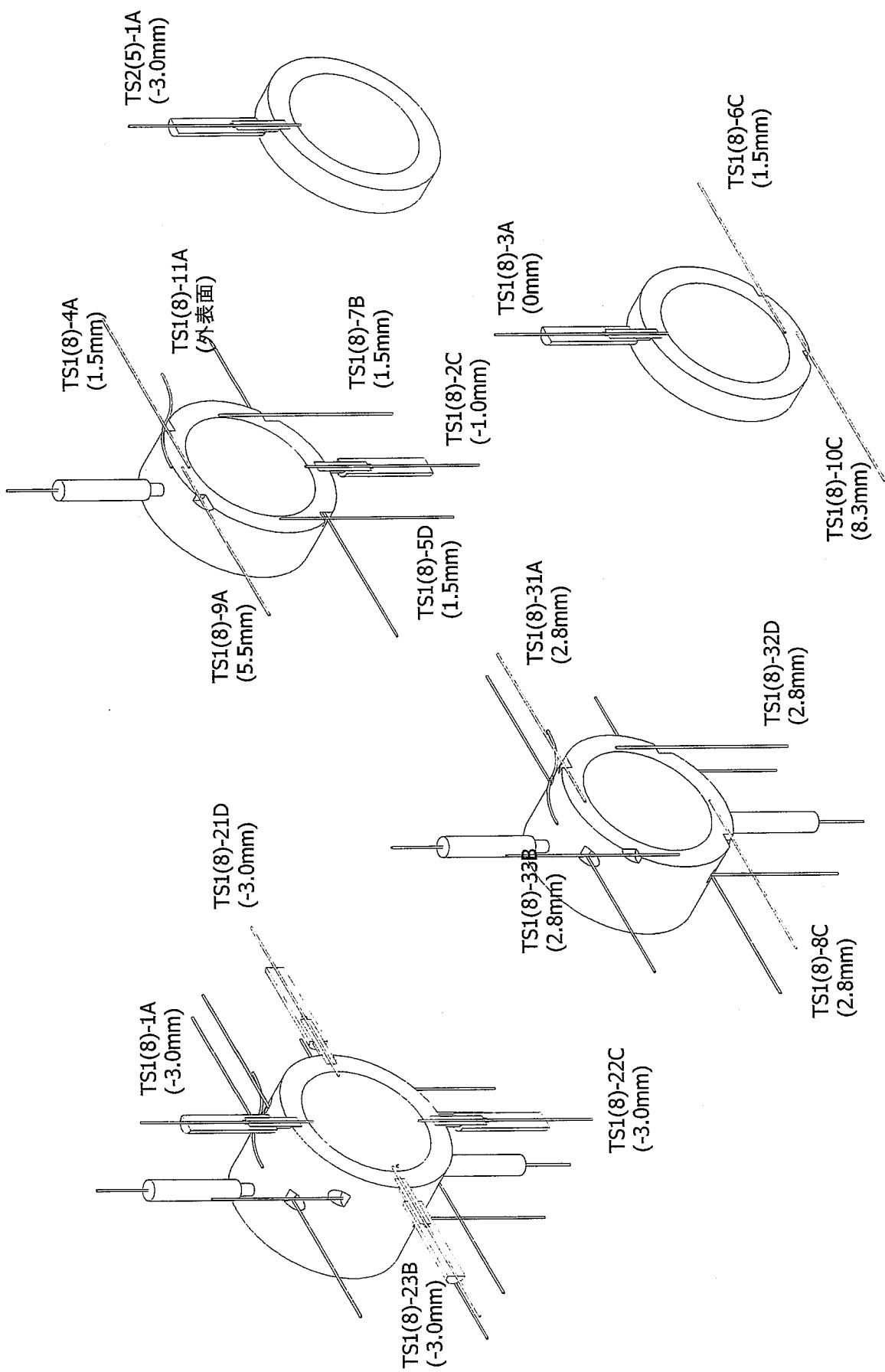


図7.2 溫度計測試験体の熱電対取付け状況

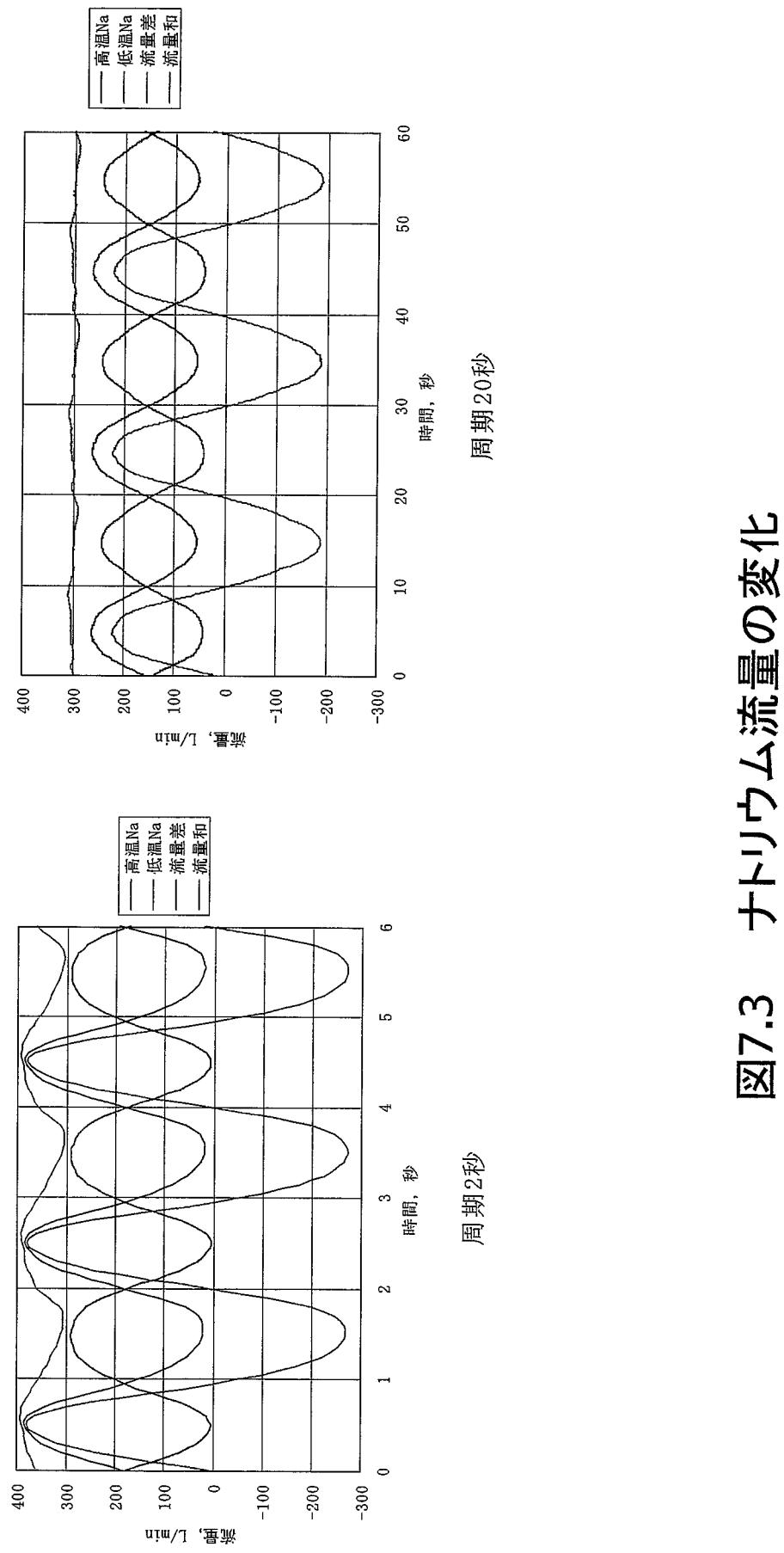


図7.3 ナトリウム流量の変化

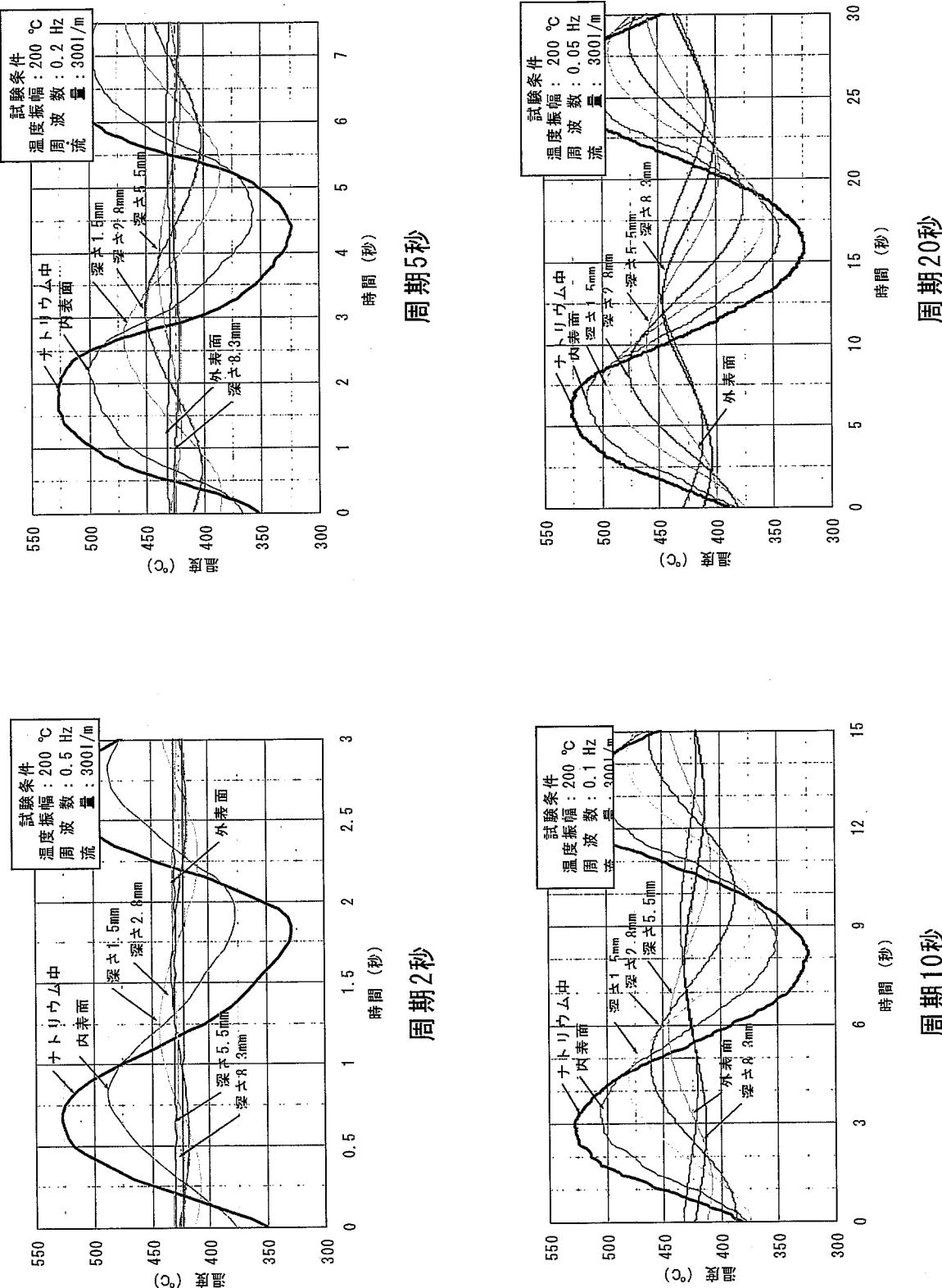


図7.4 試験体の温度変動特性(正弦波)

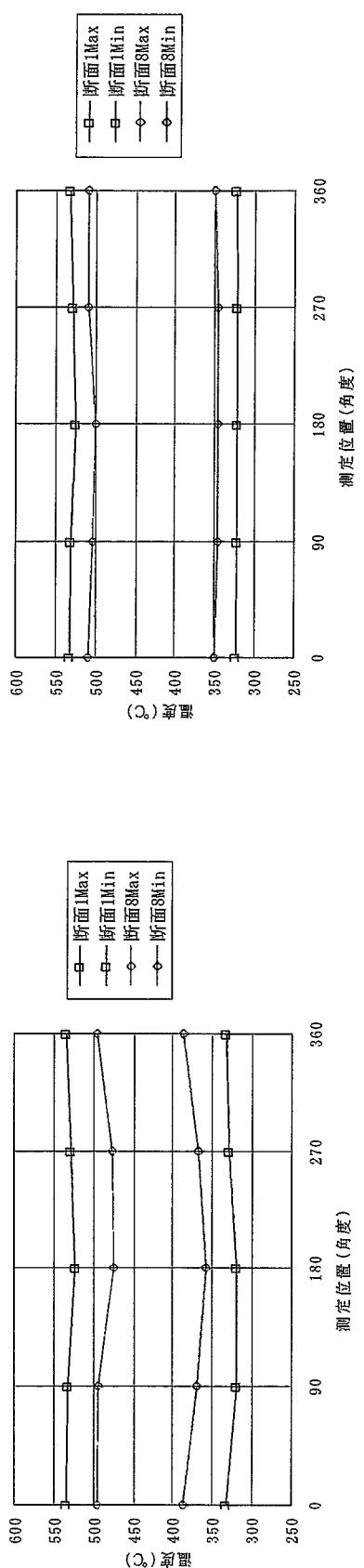


図7.5 試験体の温度変動特性(周方向)

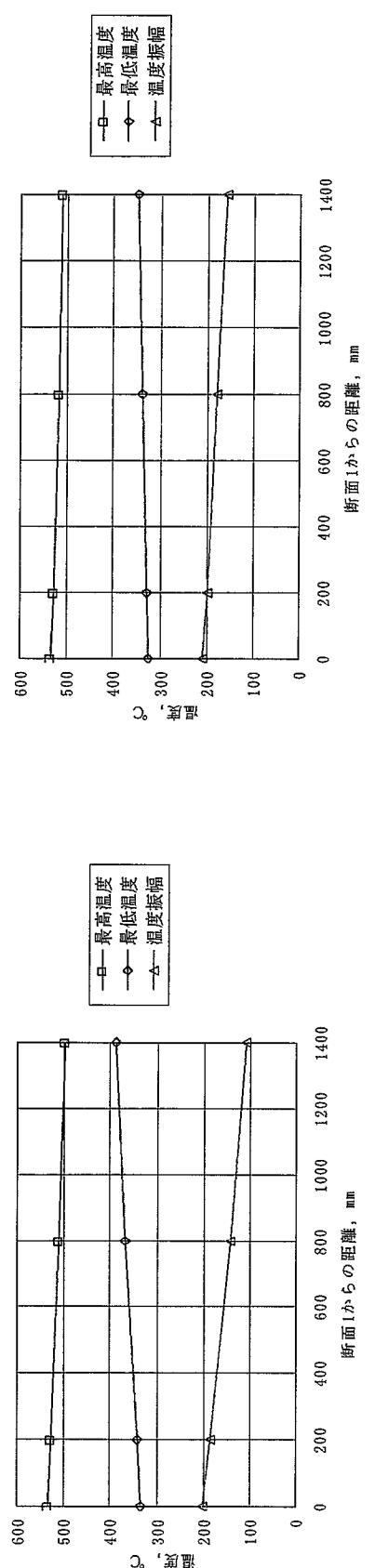


図7.6 試験体の温度変動特性(軸方向)

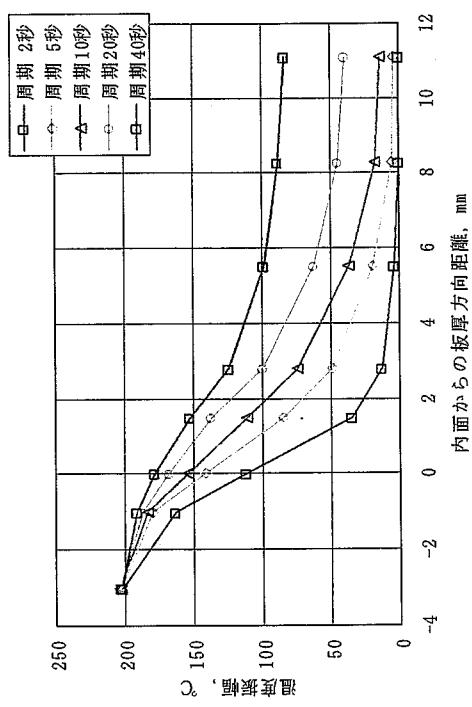


図7.7 板厚方向の温度振幅分布

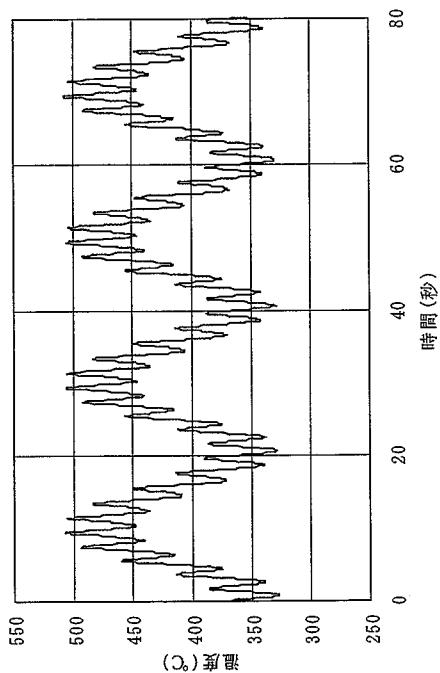


図7.8 重畠波の温度変動挙動

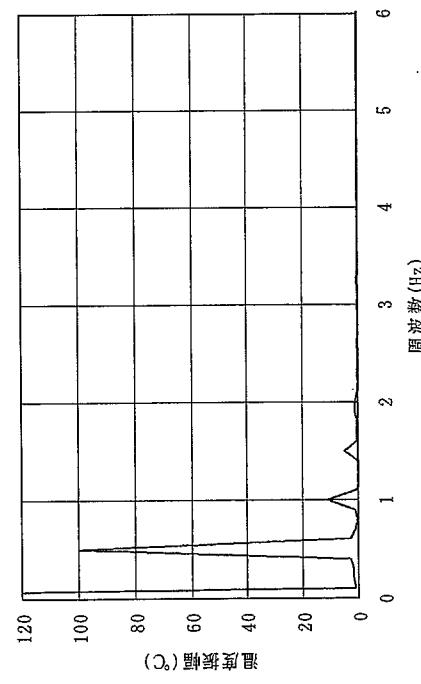


図7.9 周期2秒のスペクトル

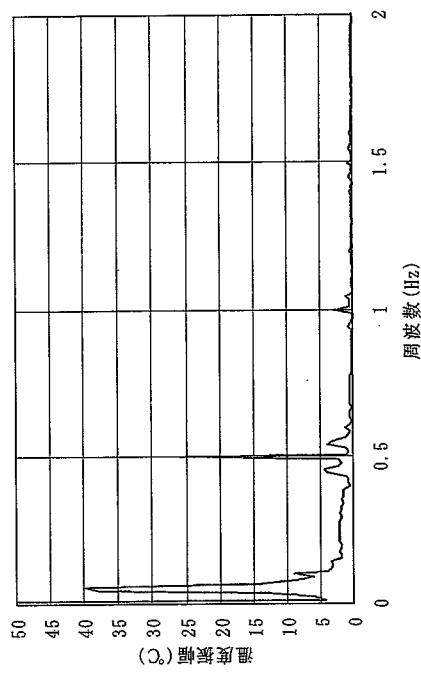


図7.10 重畠波のスペクトル

(b) シグナリミキサ上流部外面温度

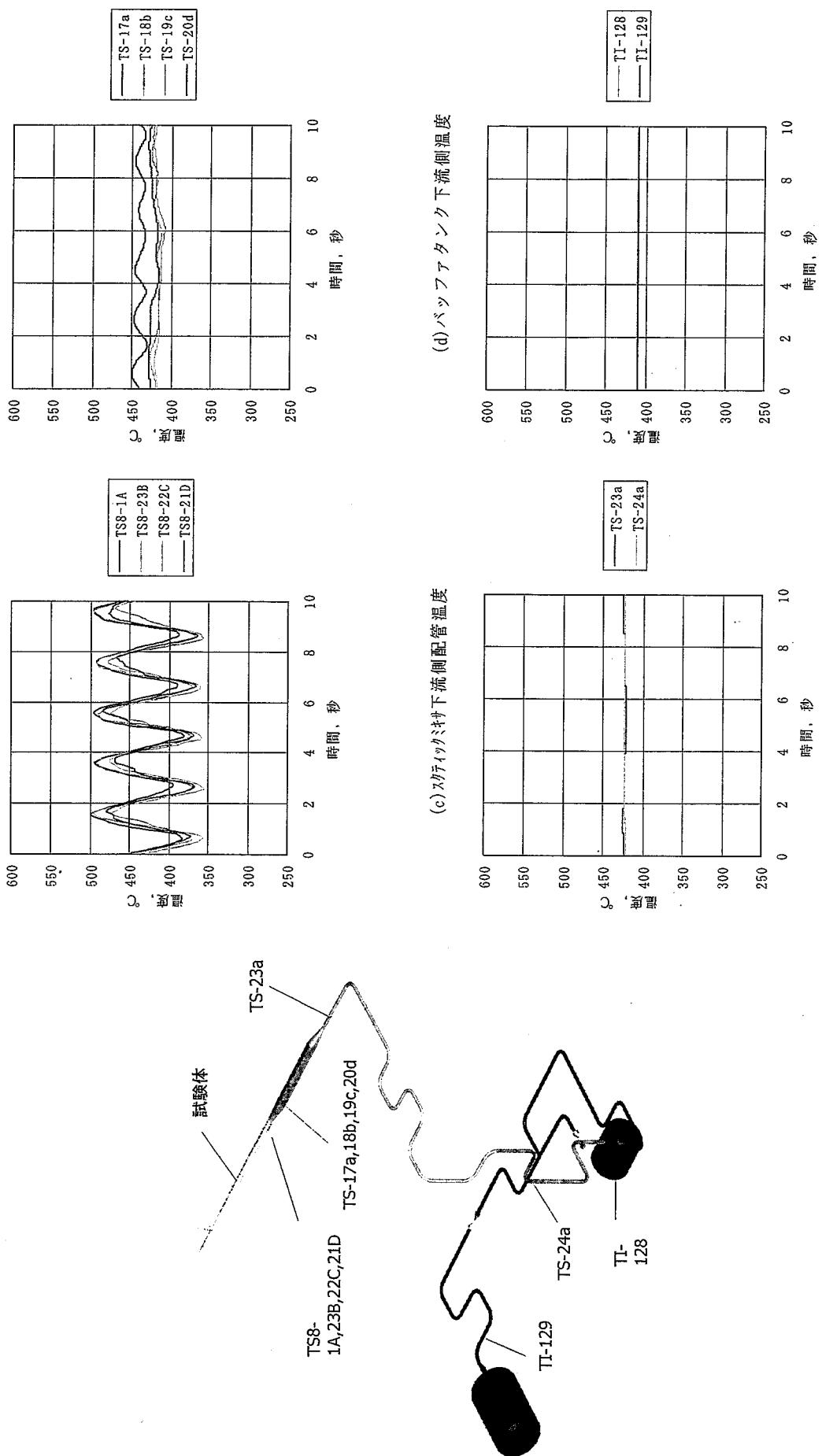
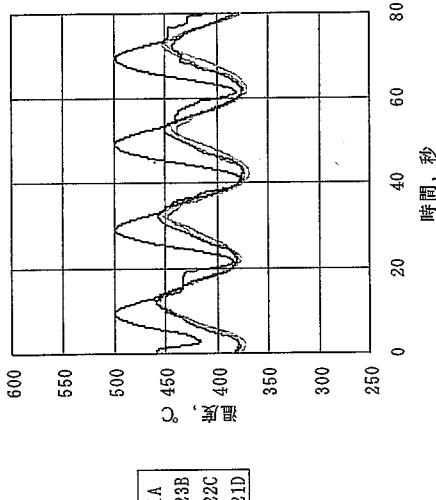
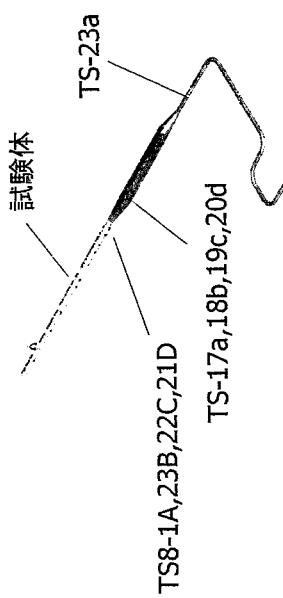
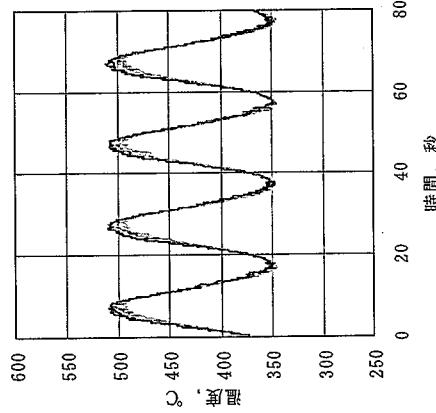


図7.11 試験体下流側の温度変動特性(周期2秒)

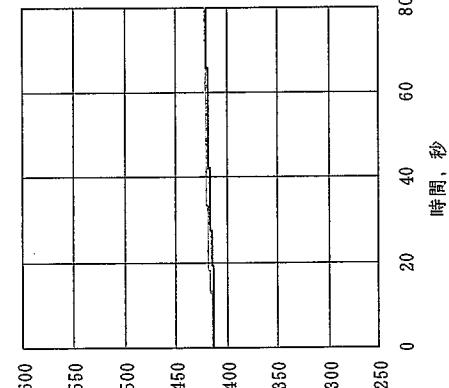
(b) スタティックミキサ上流部外面温度



(a) N a 中-3. 0mmの温度, 断面8



(d) スタティックミキサ下流側温度



(c) スタティックミキサ下流側温度

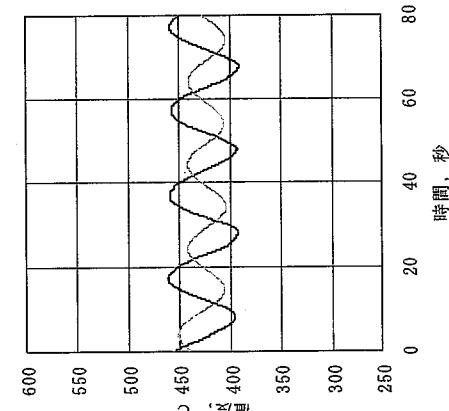


図7.12 試験体下流側の温度変動特性(周期20秒)

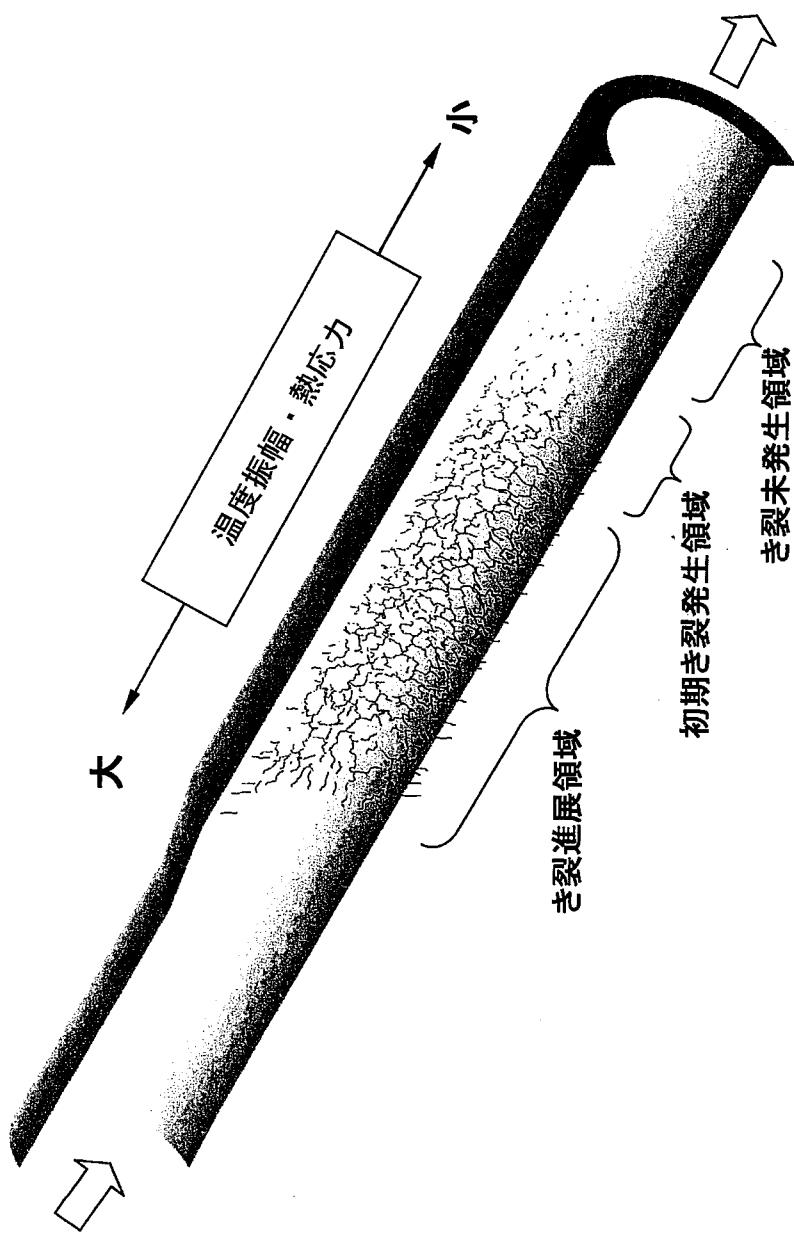


図8.1 試験体におけるき裂発生状況のイメージ

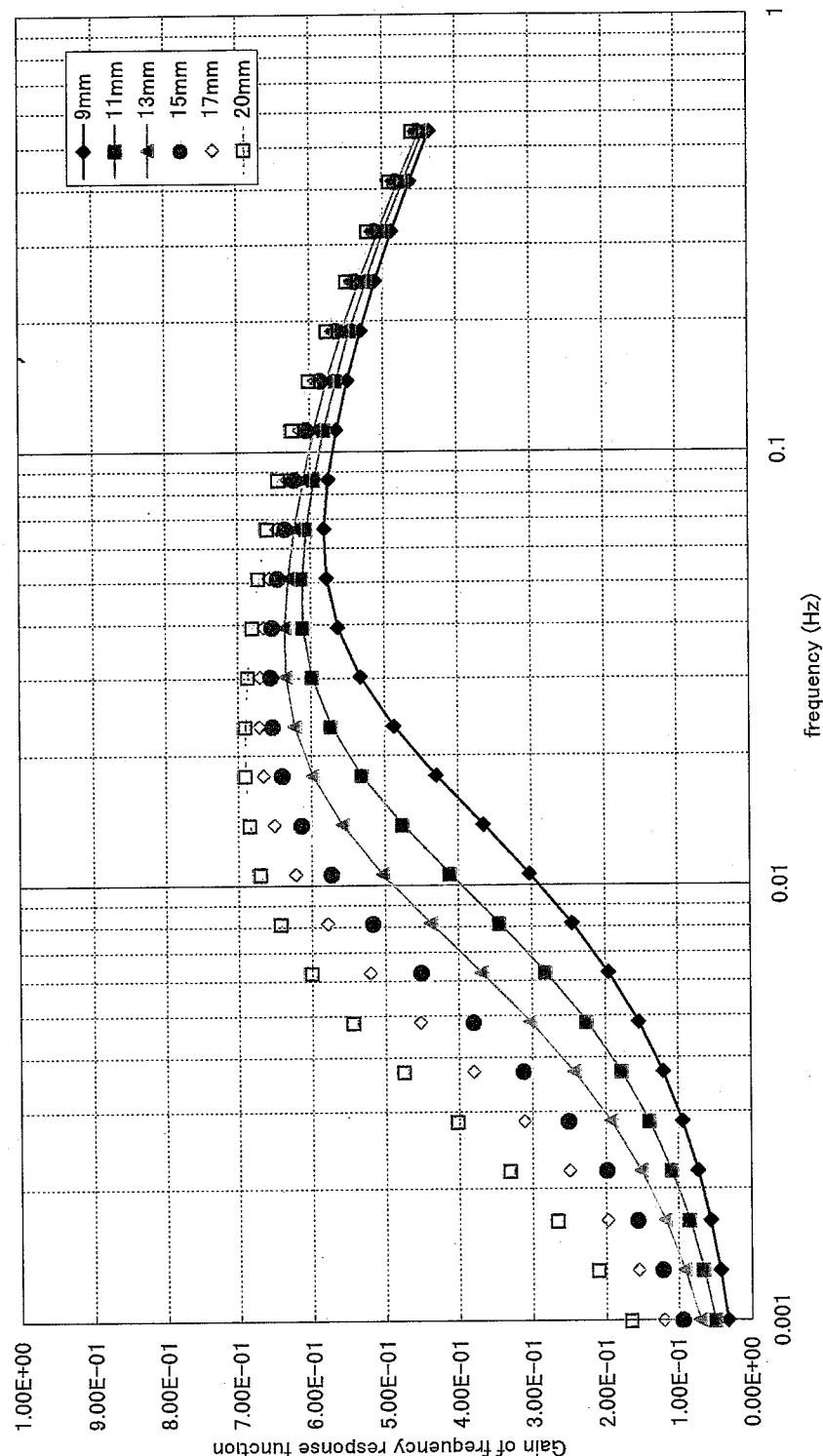


図 8.2 周波数応答関数のゲイン

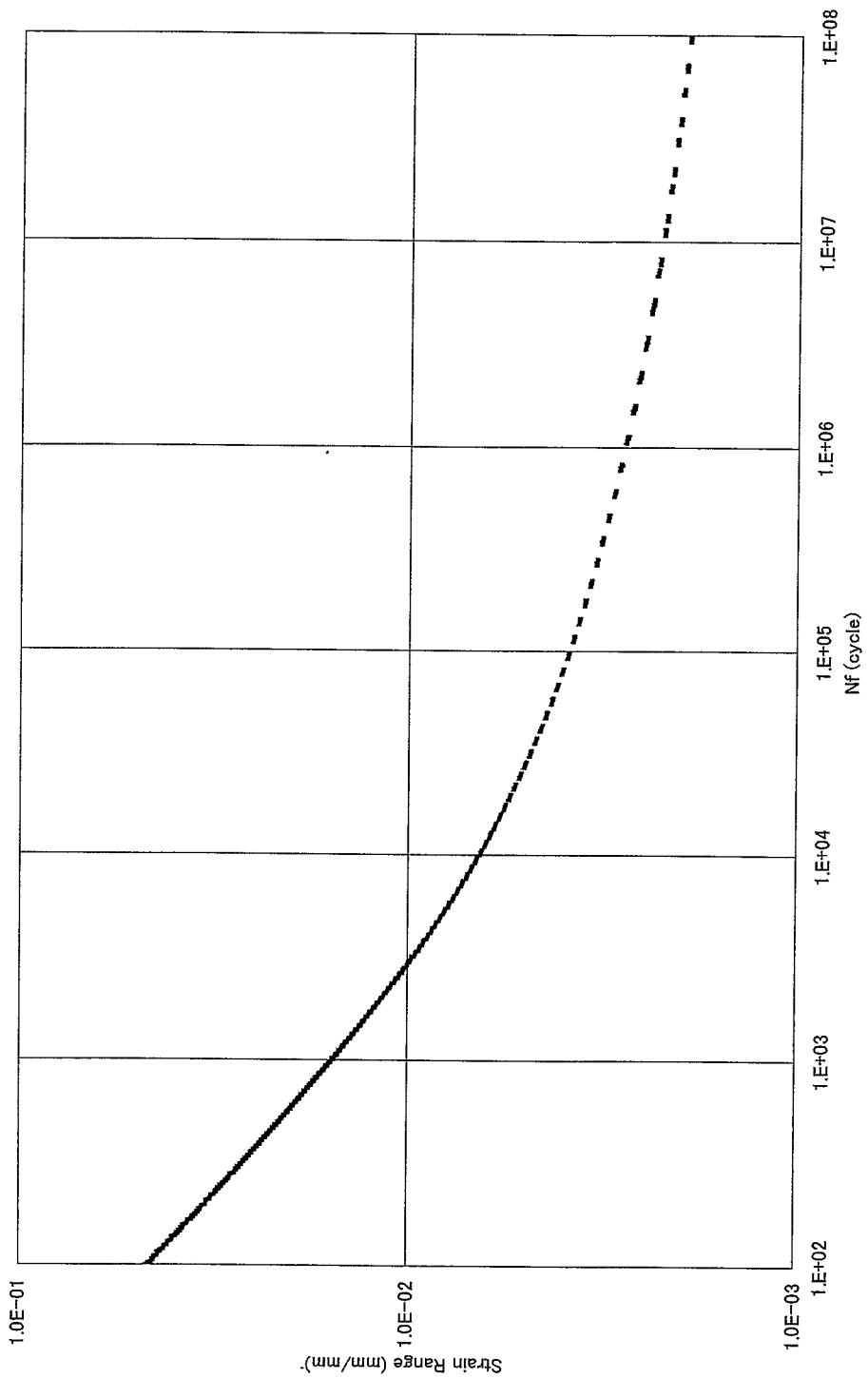


図 8.3 SUS304 鋼の最適疲労曲線 ( $425^\circ\text{C}$ )

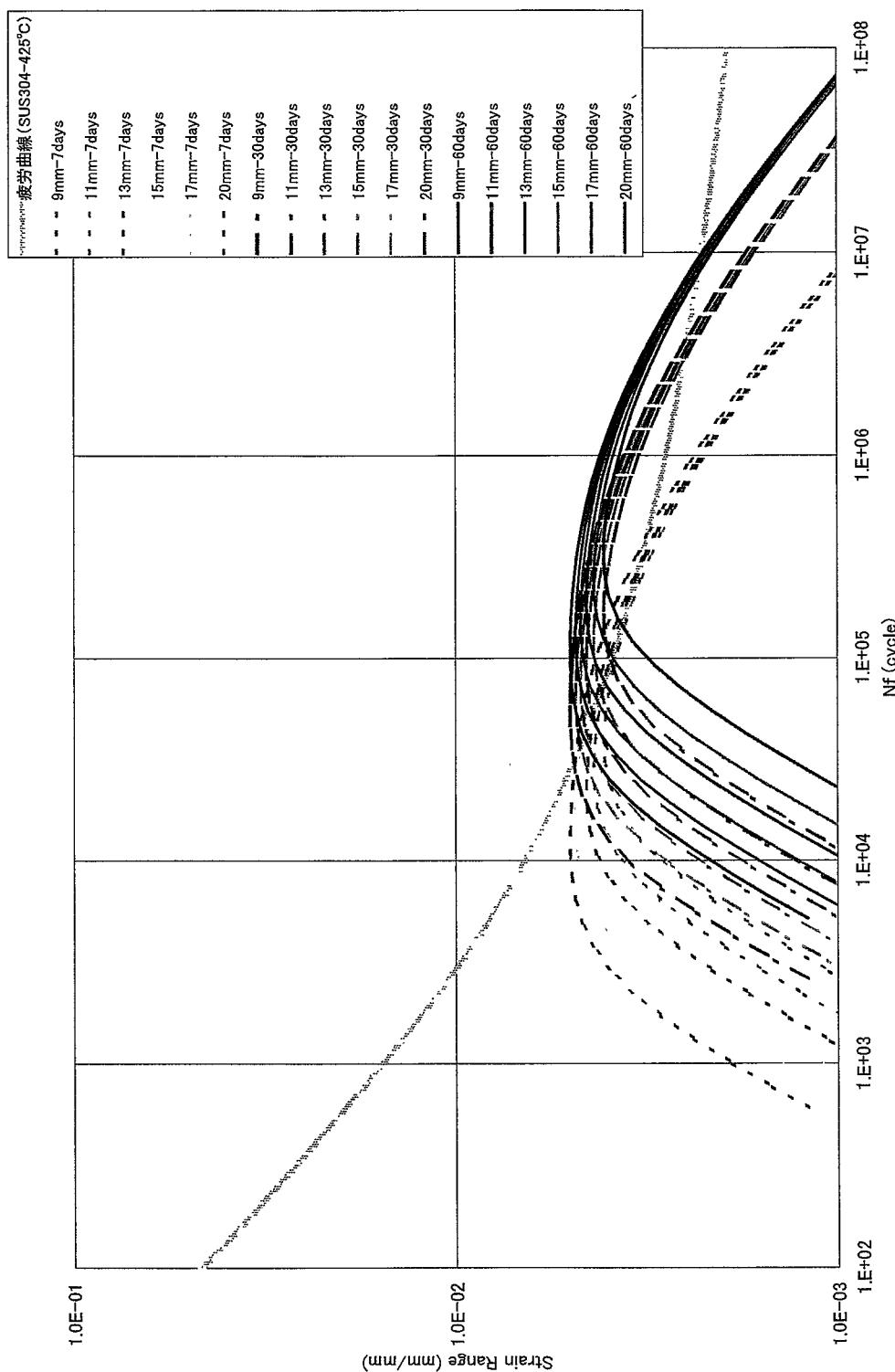


図 8.4 試験条件検討用チャート 1

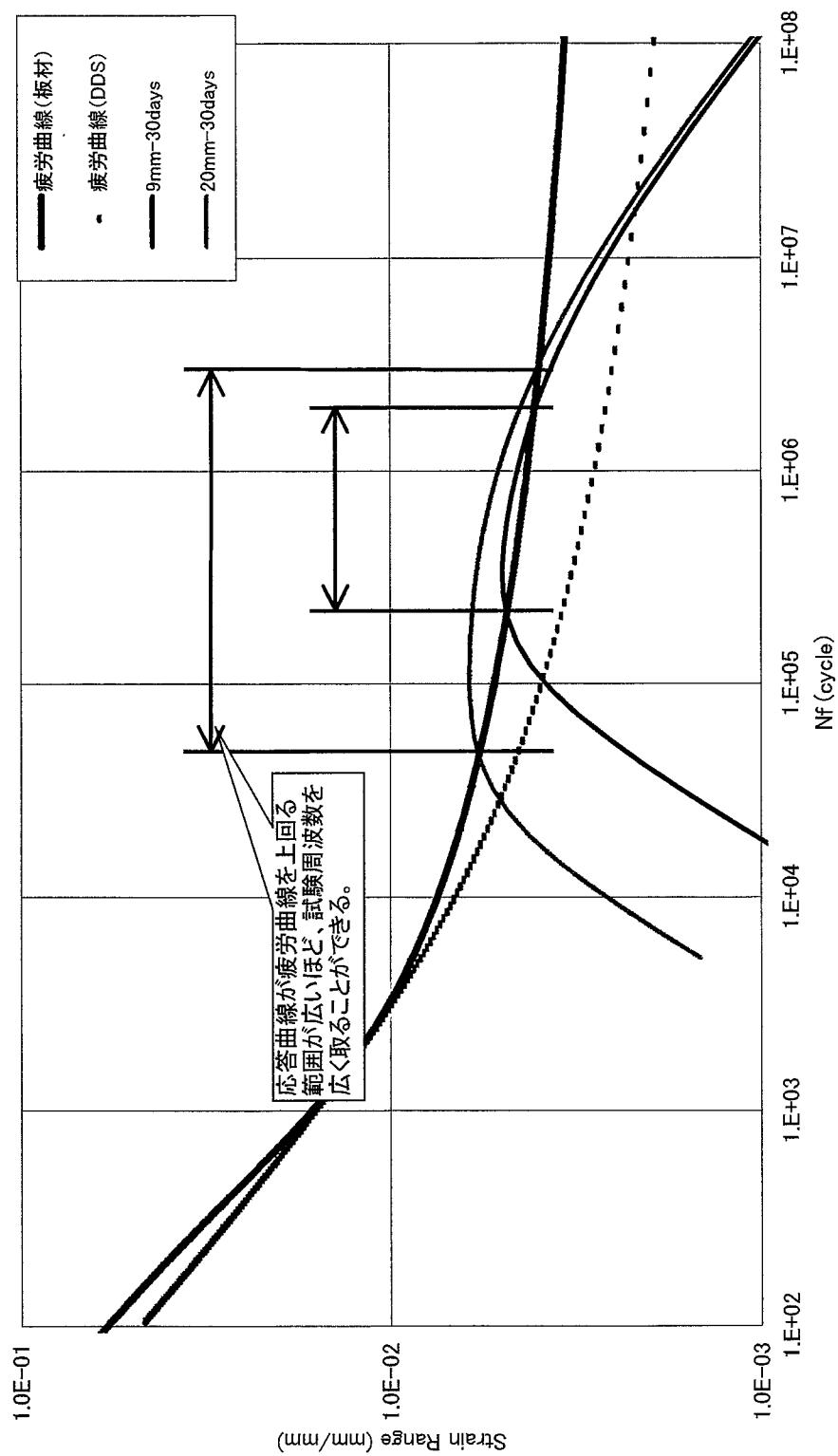


図 8.5 試験条件検討用チャート2

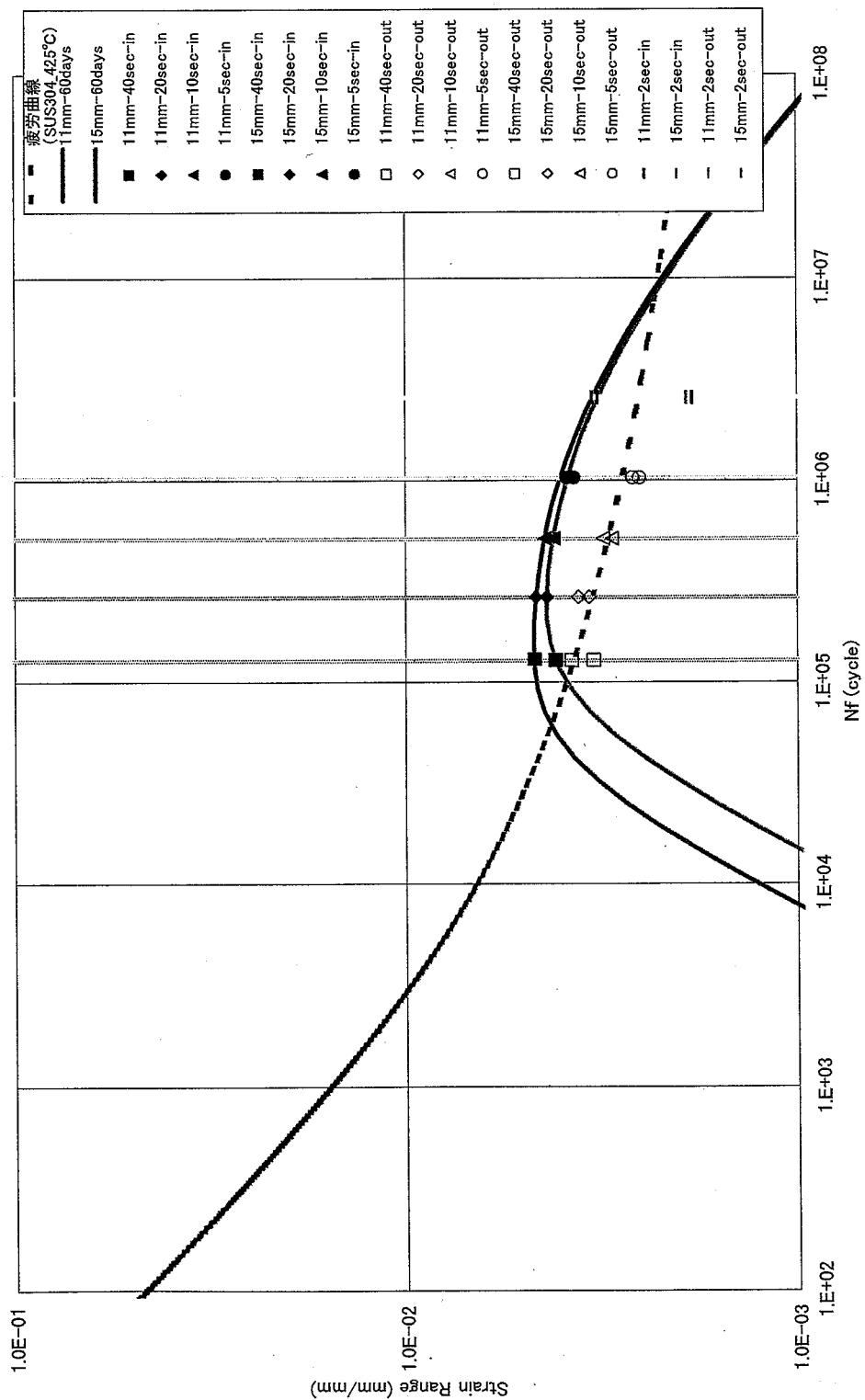


図 8.6 試験条件検討用チャート3