

JAERI-M
92-147

高温工学試験研究炉の中間熱交換器伝熱管強度評価

1992年10月

国富 一彦・篠崎 正幸・深谷 好夫・大久保 実
馬場 治・丸山 茂樹*・大谷 章仁**

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

JAERI-M 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、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11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。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

高温工学試験研究炉の中間熱交換器伝熱管強度評価

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

国富 一彦・篠崎 正幸・深谷 好夫・大久保 実

馬場 治・丸山 茂樹*・大谷 章仁**

(1992年8月27日受理)

高温工学試験研究炉（HTTR）の中間熱交換器は、10MWの熱交換能力を有するたて置きヘリカルコイル型の熱交換器であり、平成6年完成を目指して、現在、製作を進めている。最大900°Cを超える状況で使用される伝熱管の強度評価のために、原子炉の運転中に発生すると考えられるすべての運転状態の応力及び非弾性ひずみ等を解析により求めた。

本報は、伝熱管の強度評価の手法、クリープ解析の手法及び評価結果を示したものである。解析により、伝熱管に発生する非弾性ひずみ及びクリープ疲れ損傷は、原子炉出口温度850°C又は、950°Cの運転の第1～2サイクルで大幅に増加し、その後の増加は僅かであり、HTTRの寿命20年の間、許容値を超えないことが分かった。また、1次応力も全ての運転状態で許容値を満足した。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀3607

* 株式会社 東芝

** 石川島播磨重工業(株)

Stress and Strain Evaluation of the Heat Transfer
Tubes in the Intermediate Heat Exchanger for the HTTR

Kazuhiko KUNITOMI, Masayuki SHINOZAKI, Yoshio FUKAYA
Minoru OKUBO, Osamu BABA, Shigeki MARUYAMA^{*}
and Akihito OTANI^{**}

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received August 27, 1992)

An Intermediate heat exchanger (IHX) with a heat capacity of 10 MW for the High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) uses helically coil heat transfer tubes. The stress and strain evaluation for the heat transfer tubes which are used in over 900°C is performed by an elastic or creep analysis during the possible abnormal events.

This paper describes an evaluation procedure of the heat transfer tube, creep analysis method and evaluation results. The results showed that inelastic strain and creep fatigue increased rapidly in 1-2nd cycles of 850°C or 950°C operations, however, they did not increase in the following cycles. Therefore, they did not exceed the allowable limits for HTTR life time of 20 years. Primary stress is also under the limit in every abnormal event.

Keywords : HTTR, HTGR, IHX, Stress Valuation, Heat Transfer Tube, Creep, Elastic, Fatigue, Life Time

** Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co, Ltd

* Toshiba Corporation

目 次

1. 緒 言	1
2. HTTR の冷却設備	1
2.1 全体構成	1
2.2 1次冷却設備	2
3. IHX の機能と構造	5
3.1 機 能	5
3.2 構 造	5
4. 高温構造設計の基本的な考え方	13
5. 設計手法	15
5.1 弾性解析	15
5.2 弹クリープ解析	15
5.3 設計評価法	16
6. 伝熱管の強度評価	23
6.1 評価手順	23
6.2 解析コード	23
6.3 解析モデルと解析条件	23
6.4 解析結果	27
7. 結 言	76
謝 辞	76
参考文献	77

1. 緒言

高温工学試験研究炉⁽¹⁾（以下、HTTRと呼ぶ。）の1次冷却設備は、中間熱交換器（以下、IHXと呼ぶ。）及び1次加圧水冷却器（以下、1次PWCと呼ぶ。）の2種類の熱交換器を有し、原子炉で発生する熱を除去する。HTTRの1次冷却材（ヘリウムガス）の原子炉出口温度は約950°C、原子炉入口温度は約400°Cと高温であるため、熱交換器のような高温機器の設計にあたっては、構造物の使用温度を可能な限り低くするとともに、負荷荷重を極力低減する工夫をしている。

高温機器の構造設計は、「高温ガス炉第1種機器の高温構造設計指針」⁽²⁾（以下、「高温構造設計指針」と呼ぶ。）及び「黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉施設に関する構造等の技術基準」⁽³⁾（以下、「構造等の技術基準」と呼ぶ。）に基づいて実施している。

高温構造物のうち、IHXの胴部及び1次PWCを構成する構造物等は、その温度が約400°Cであり、構造物にとって必ずしもクリティカルな温度領域でない。従って、これらの構造物の設計解析は、軽水炉等と同様に弾性解析を用いている。一方、IHXの伝熱管、内筒、高温ヘッダ等は、その最高温度が900°Cを超えるため、材料のクリープが顕著になり、弾性解析に基づく評価方法では、「高温構造設計指針」の規定を満足できない。そこで、材料のクリープ挙動を解析することが可能な弾クリープ解析を用いる。

本報告書は、強度評価の概要、弾クリープ解析の手法を示すとともに、温度が最も高くなるIHXの伝熱管に着目し、伝熱管の強度評価の解析モデル、境界条件等を示す。さらに、強度評価の結果について示したものである。

2. HTTRの冷却設備

2. 1 全体構成

HTTRの冷却設備は、第2.1図に示すように、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備並びに原子炉スクラム時に原子炉の残留熱を除去する補助冷却設備と炉容器冷却設備からなる。主冷却設備は、1次冷却設備、2次ヘリウム冷却設備及び加圧水冷却設備からなり、原子炉から発生した熱を最終的には、加圧水冷却設備の空気冷却器より大気へ放散する。

補助冷却設備は、原子炉がスクラムした時に用いられ、補助ヘリウム循環機により1次ヘリウムを強制循環することにより、炉心の残留熱除去を行う。一方、炉容器冷却設備は、1次系の配管破断のように1次冷却材の流路が確保できない事故時の残留熱除去のために用いられる。炉容器冷却設備は、原子炉圧力容器の周囲に設けた冷却パネル及びこれらのパネルに水を送り込む循環装置により構成され、炉心の残留熱は、原子炉圧力容器の外表面から主として熱放射により間接的に冷却パネルに移動し除去される。高温ガス炉であるHTTRは、炉心の熱容

1. 緒言

高温工学試験研究炉⁽¹⁾（以下、HTTRと呼ぶ。）の1次冷却設備は、中間熱交換器（以下、IHXと呼ぶ。）及び1次加圧水冷却器（以下、1次PWCと呼ぶ。）の2種類の熱交換器を有し、原子炉で発生する熱を除去する。HTTRの1次冷却材（ヘリウムガス）の原子炉出口温度は約950°C、原子炉入口温度は約400°Cと高温であるため、熱交換器のような高温機器の設計にあたっては、構造物の使用温度を可能な限り低くするとともに、負荷荷重を極力低減する工夫をしている。

高温機器の構造設計は、「高温ガス炉第1種機器の高温構造設計指針」⁽²⁾（以下、「高温構造設計指針」と呼ぶ。）及び「黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉施設に関する構造等の技術基準」⁽³⁾（以下、「構造等の技術基準」と呼ぶ。）に基づいて実施している。

高温構造物のうち、IHXの胴部及び1次PWCを構成する構造物等は、その温度が約400°Cであり、構造物にとって必ずしもクリティカルな温度領域でない。従って、これらの構造物の設計解析は、軽水炉等と同様に弾性解析を用いている。一方、IHXの伝熱管、内筒、高温ヘッダ等は、その最高温度が900°Cを超えるため、材料のクリープが顕著になり、弾性解析に基づく評価方法では、「高温構造設計指針」の規定を満足できない。そこで、材料のクリープ挙動を解析することが可能な弾クリープ解析を用いる。

本報告書は、強度評価の概要、弾クリープ解析の手法を示すとともに、温度が最も高くなるIHXの伝熱管に着目し、伝熱管の強度評価の解析モデル、境界条件等を示す。さらに、強度評価の結果について示したものである。

2. HTTRの冷却設備

2. 1 全体構成

HTTRの冷却設備は、第2.1図に示すように、通常運転時に原子炉を冷却する主冷却設備並びに原子炉スクラム時に原子炉の残留熱を除去する補助冷却設備と炉容器冷却設備からなる。主冷却設備は、1次冷却設備、2次ヘリウム冷却設備及び加圧水冷却設備からなり、原子炉から発生した熱を最終的には、加圧水冷却設備の空気冷却器より大気へ放散する。

補助冷却設備は、原子炉がスクラムした時に用いられ、補助ヘリウム循環機により1次ヘリウムを強制循環することにより、炉心の残留熱除去を行う。一方、炉容器冷却設備は、1次系の配管破断のように1次冷却材の流路が確保できない事故時の残留熱除去のために用いられる。炉容器冷却設備は、原子炉圧力容器の周囲に設けた冷却パネル及びこれらのパネルに水を送り込む循環装置により構成され、炉心の残留熱は、原子炉圧力容器の外表面から主として熱放射により間接的に冷却パネルに移動し除去される。高温ガス炉であるHTTRは、炉心の熱容

量が大きく、また出力密度も小さいので、このような方法でも炉心を十分に冷却でき、炉心に冷却材を注入する必要はない。

2. 2 1次冷却設備

1次冷却設備は、IHX (Intermediate Heat Exchanger) と1次PWC (Primary Pressurized Water Cooler) の2種類の熱交換器を並列に配置し、原子炉で発生した熱を加圧水冷却設備又は2次ヘリウム冷却設備に伝達する。IHXは、ヘリカルコイル型の伝熱管を用いたヘリウム-ヘリウムの熱交換器であり、1次PWCは、Uチューブ型の伝熱管を用いたヘリウム-加圧水の熱交換器である。

原子炉圧力容器と1次PWC及びIHXを接続する配管は、二重管構造とし、原子炉からの950°Cの高温ヘリウムガスは内管の内側を流れ、1次PWCまたはIHXで冷却された約400°Cの低温ヘリウムガスは、内管と外管の間を流れる。内管の内側は、ハステロイXRによりライニングした、アルミナ・シリカを主成分とする纖維系断熱材(KAOWOOL)で断熱することにより、内管の温度は外管とほぼ等しく保たれる。

1次冷却設備の運転方法は、1次PWCで約20MW及びIHXで約10MWの除熱を行う並列運転と、IHXは使用せず1次PWCのみで約30MWの除熱を行う単独運転がある。IHXは10MWの交換熱量を有するが、これは将来、HTTRに核熱利用の試験プラントを接続して試験を行う場合に備えたものである。

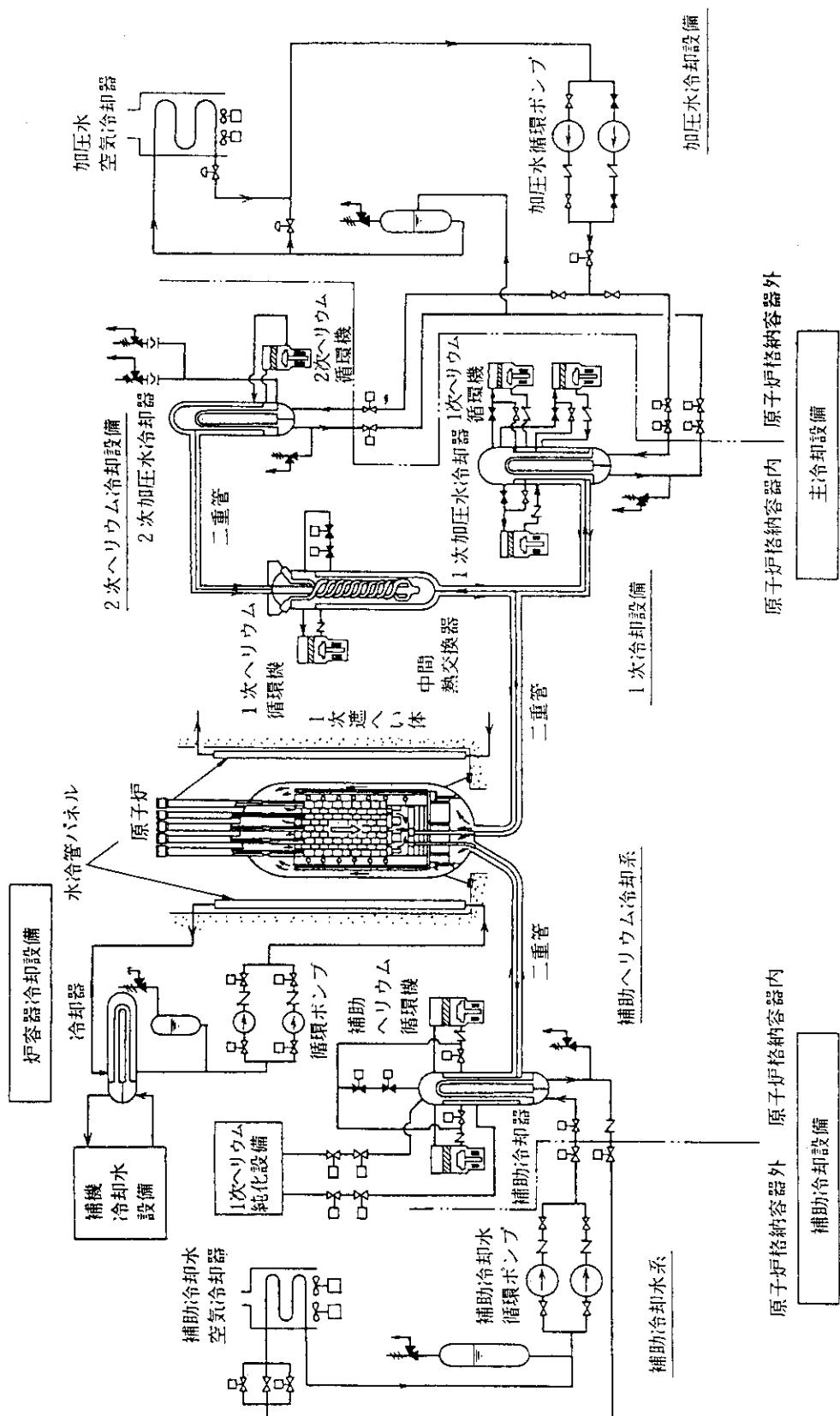
運転モードとしては、原子炉出口温度約850°C、熱出力30MWの定格運転と原子炉出口温度約950°C、熱出力30MWの高温試験運転の運転状態がある。定格運転及び高温試験運転時の1次冷却材の流量は、それぞれ約45t/h及び約37t/hに制御される。また、1次冷却材の圧力は、約4.0MPaに制御される。2次冷却材の圧力は、1次冷却材の圧力より約0.1MPa高く制御され、万一、1次冷却材と2次冷却材の間のバウンダリが破損しても、放射性廃棄物が2次系に漏えいしないようにしている。

これらの1次冷却設備の設計方針のうち主なものは、以下のとおりである。

- (1) 1次冷却設備は、IHX及び1次PWCの伝熱特性の経年変化や伝熱管のプラグ等を考慮しても、通常運転時において原子炉で発生した熱を2次ヘリウム冷却設備及び加圧水冷却設備に確実に伝え、加圧水冷却設備の空気冷却器から大気に放散するようとする。
- (2) 1次冷却設備の冷却材圧力は、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において、最高使用圧力の1.1倍以下となるようにする。
- (3) 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器、配管等は、適切な規格、基準に基づいて設計、製作、据付及び検査を行い、高い品質を確保する。
- (4) 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器、配管等は、非延性破壊を防止する。
- (5) 原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する機器、配管等は、通常運転時の起動、停止時における温度変化率を50°C/h以下に制限し、また、通常運転時、異常

状態時に想定される1次冷却材圧力、温度等を考慮し、地震時に生じる荷重をも適切に重ね合わせ、繰り返し回数等の過渡条件を想定し、疲労や高温下のクリープ、腐食等を考慮しても健全性を損なわない構造強度を有するようとする。

- (6) 1次冷却設備は、1次冷却材の漏えいを防止し・抑制するようとする。
- (7) 1次冷却材と大気の境界となる耐圧部は、使用温度を低くして、健全性を高めるようとする。
- (8) 1次冷却設備は、圧力、温度及び地震時に生じる荷重を考慮し、1次ヘリウム配管の適切な箇所に破断を想定しても、あるいは1次ヘリウム循環機のミサイルを想定しても、安全機能を有する構築物、系統及び機器の安全機能を損なわないようとする。



第2.1図 HTTRの冷却設備

3. IHX の機能と構造

3. 1 機能

IHX は、1次冷却材から熱を除去し、2次冷却材へ伝える。第3.1表は、IHX のヒートマスバランスを示したものである。2次加圧水冷却器が2次ヘリウム冷却設備に設置されている現プラントの高温試験運転時には、2次冷却材の IHX 出口温度は約870°Cになり、将来、2次ヘリウム冷却設備に熱利用系が接続された場合の2次冷却材の出口温度は、約900~905°Cとなる。2次冷却材の IHX 入口温度は2次加圧水冷却器の2次冷却材出口温度（熱利用系接続後では、接続した機器の冷却材出口温度）及び2次冷却材の流量を調節することにより、所定の値に制御される。

3. 2 構造

第3.2表に IHX の主要仕様を示す。また、IHX の構造断面図を第3.1図に示す。IHX の胴部は二重胴構造であり、炉心で加熱された高温の1次冷却材は、二重管の内管内を通って、内胴内に流入し、伝熱管の外側を上昇しながら2次冷却材へ熱を伝え、1次ヘリウム循環機に導かれ、昇圧される。昇圧された1次冷却材は、IHX 胴部を冷却しながら、内胴と外胴の間の環状部を下降して、原子炉圧力容器へ還流する。

低温の2次冷却材は、円周方向4箇所の2次冷却材入口室で低温管板に取り付けられた上部連絡管に分配され、ヘリカル状の伝熱管に入流する。伝熱管を下降しながら加熱された2次冷却材は、下部連絡管を経て高温ヘッダ内に再び集められた後、内筒内を上昇し、2次冷却材出口管に至る。

伝熱管は合計96本あり、第3.2図に示すように、最内層から最外層まで約47mmのピッチの6層で構成し、管束支持板により支持する。管束支持板は、低温の上部にある管束支持梁から吊り下げて下方に自由に熱膨張させる構造として熱膨張応力を低減する。

第3.3表は、伝熱管の長さ、角度、巻数等を示したものである。伝熱管は、水平線に対して約12~13°の角度を保って巻かれており、各層のヘリカル巻数を変えて全長をほぼ等しくしている。

IHX を構成する構造材は、内胴及び外胴には、強度の高い低合金鋼（2 1/4Cr-1Mo）を使用し、高温の冷却材に接する伝熱管、高温ヘッダ、内筒、断熱材のライナ、管束支持板等には、冷却材中の不純物による高温酸化腐食に対して、耐酸化性に優れ、高温強度の高いニッケル基耐食耐熱超合金（ハステロイXR）を使用する。また、内筒の上部の内側及び内筒の下部の外側には、アルミナ・シリカからなる繊維系の断熱材（カオウール）を設置して、1次冷却材と2次冷却材の間の熱交換を防止する。同様に、内胴の内側にもカオウールを設置して原子炉へ戻る1次冷却材と原子炉から流入した1次冷却材の熱交換を防止する。

伝熱管の溶接は、上部連絡管と低温管板部、上部連絡管とヘリカルコイル部、ヘリカルコイルの中央部、ヘリカルコイルと下部連絡管部及び下部連絡管と高温ヘッダ部にある。溶接部は、府令第74号⁽⁴⁾にしたがって、溶接検査を行うことにより、製作時の健全性を確保すると共に、定期的に供用期間中検査を行うことにより長期間の健全性を確認する。供用期間中検査では、渦電流探傷装置を伝熱管内に挿入し、遠隔で探傷装置を操作することにより、欠陥を発見する。これらの装置は、基本的には、軽水炉および高速増殖炉（もんじゅ）で用いられたものであるが、ハステロイXRに適用できるようにR&D⁽⁵⁾を実施している。

第3.3図は、IHXの製作の工事フロー図を示したものである。外胴、内胴、伝熱管等を別々に製作した後、工場で組立、その後、サイトに持ち込んで配管と溶接を行う。

第3.1表 IHXのヒートマスバランス

(ノミナル値)

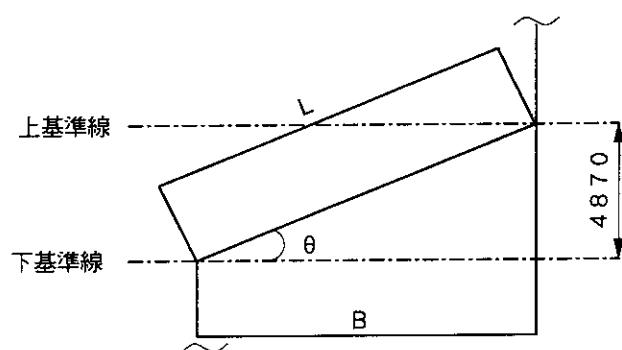
項 目		単 位	定 格 運 転	高 温 試 験 運 転	熱 利 系
	温度(入口／出口)	°C	850／387	950／389	950／389
1 次	圧力(入口／出口)	kg/cm ² G	39.9／39.8	39.9／39.8	39.9／39.8
ヘリウム	流 量	T/h (kg/s)	14.9 (4.14)	12.2 (3.39)	12.2 (3.39)
2 次	温度(入口／出口)	°C	244／782	237／869	191／901
ヘリウム	圧力(入口／出口)	kg/cm ² G	41.3／40.6	41.2／40.6	41.2／40.6
	流 量	T/h (kg/s)	12.8 (3.56)	10.8 (3.0)	9.56 (2.66)

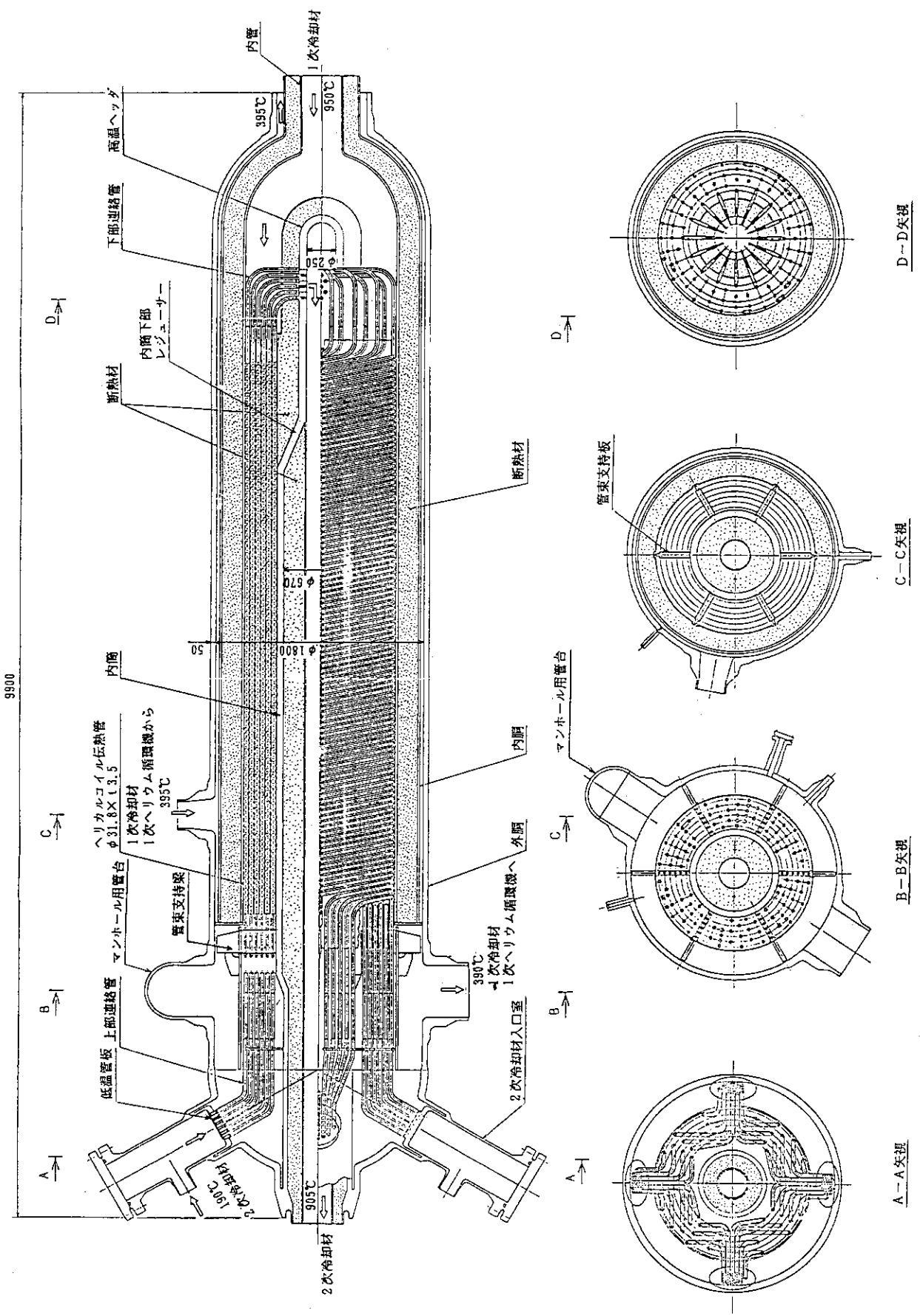
第3.2表 IHXの主要仕様

名 称		中間熱交換器	
種類		たて置ヘリカルコイル型	
機器種別		高温ガス炉第1種容器 (2次冷却材入口室は、 高温ガス炉第4種容器)	
容 量	MW	10	
伝熱面積	m ²	244	
伝熱管本数	本	96	
耐震クラス		As (2次冷却材入口室は、C)	
流体の種類	胴側	ヘリウムガス	
	管側		
外 脇	最高使用圧力 {kg/cm ² G}	MPa [gauge] {kg/cm ² G}	4.7 (48)
	最高使用温度	°C	430
伝 热 管	最高使用圧力 (内圧)	MPa {kg/cm ² }	0.29 (3)
	最高使用温度	°C	955
内 筒	最高使用圧力 (内圧)	MPa {kg/cm ² }	0.29 (3)
	最高使用温度	°C	940
低温管板	最高使用圧力	MPa {kg/cm ² }	0.29 (3)
	最高使用温度	°C	430
2次冷却 材入口室	最高使用圧力 {kg/cm ² G}	MPa [gauge] {kg/cm ² G}	5.0 (51)
	最高使用温度	°C	350
主 要 寸 法	外 脇 内 径	mm	1800
	外 脇 厚 さ	mm	50
	上 鏡 厚 さ	mm	60
	下 鏡 厚 さ	mm	50
	内 脇 内 径	mm	1700
	内 脇 厚 さ	mm	20
	低 温 管 板 厚 さ	mm	45
	伝 热 管 外 径	mm	31.8
	伝 热 管 厚 さ	mm	3.5
	内 筒 内 径	mm	670,520,250
	内 筒 厚 さ	mm	55,40,65
	全 高	mm	9990
主 要 材 料	外 脇 板	—	SCMV4-2 NT
	上 鏡	—	SCMV4-2 NT
	下 鏡	—	SCMV4-2 NT
	低 温 管 板	—	ハステロイ XR
	伝 热 管	—	ハステロイ XR
	内 筒	—	ハステロイ XR

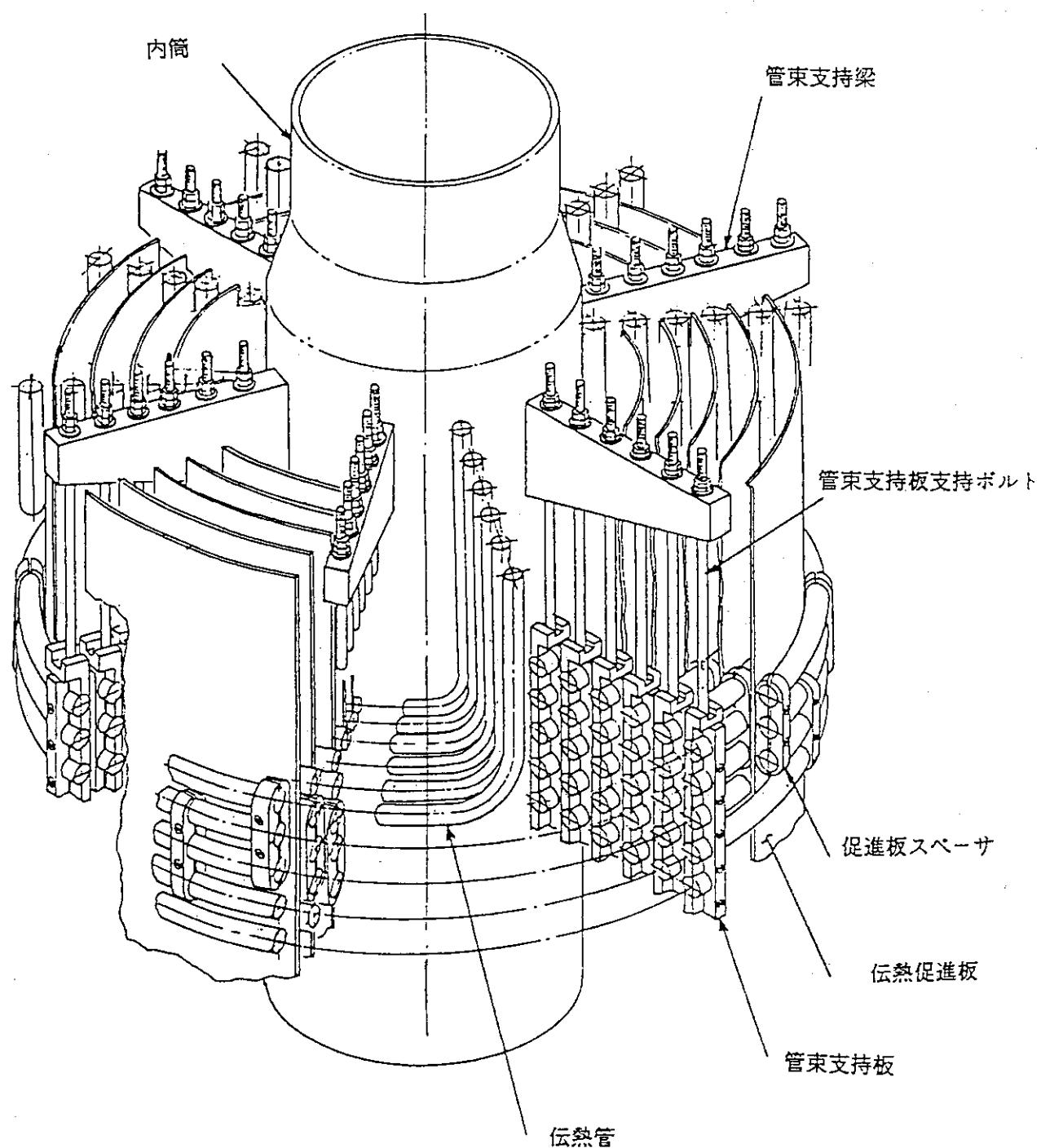
第3.3表 各層の伝熱管の寸法

層番号	本数	ヘリカル コイル径	傾斜角度	ヘリカル コイル長さ	巻数	ヘリカル コイル高さ
	N	Dcoil	θ	L	n	H
	(本)	(mm)	(deg)	(mm)	(巻)	(mm)
1	13	$\phi 840$	13.0	21590	8.0	4870
2	14	$\phi 934$	12.6	22260	7.4	
3	15	$\phi 1028$	12.3	22840	6.9	
4	17	$\phi 1122$	12.8	22030	6.1	
5	18	$\phi 1216$	12.5	22520	5.8	
6	19	$\phi 1310$	12.2	22970	5.5	

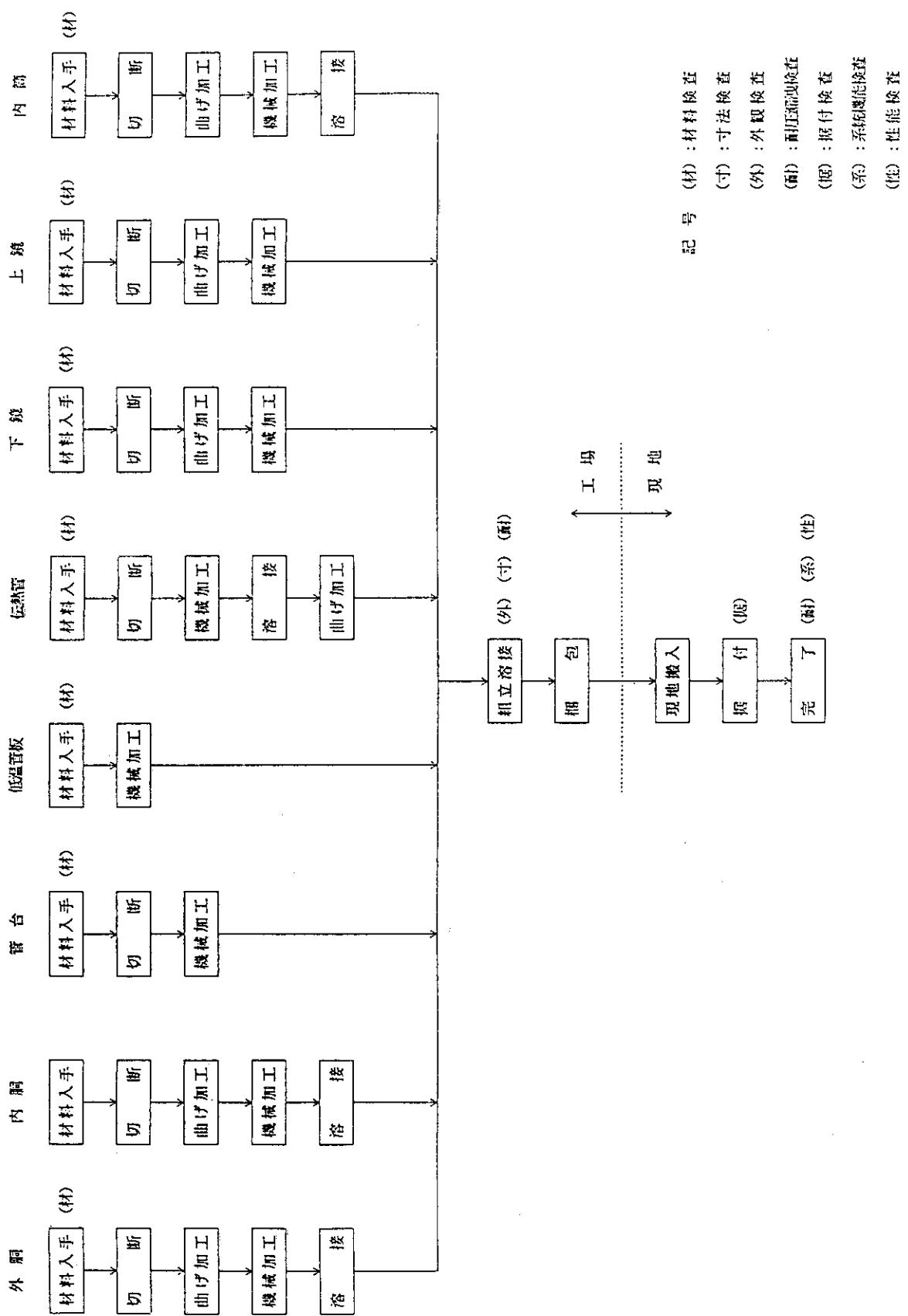




第3.1図 中間熱交換器（IHX）の構造断面図



第3.2図 中間熱交換器伝熱管支持概念図

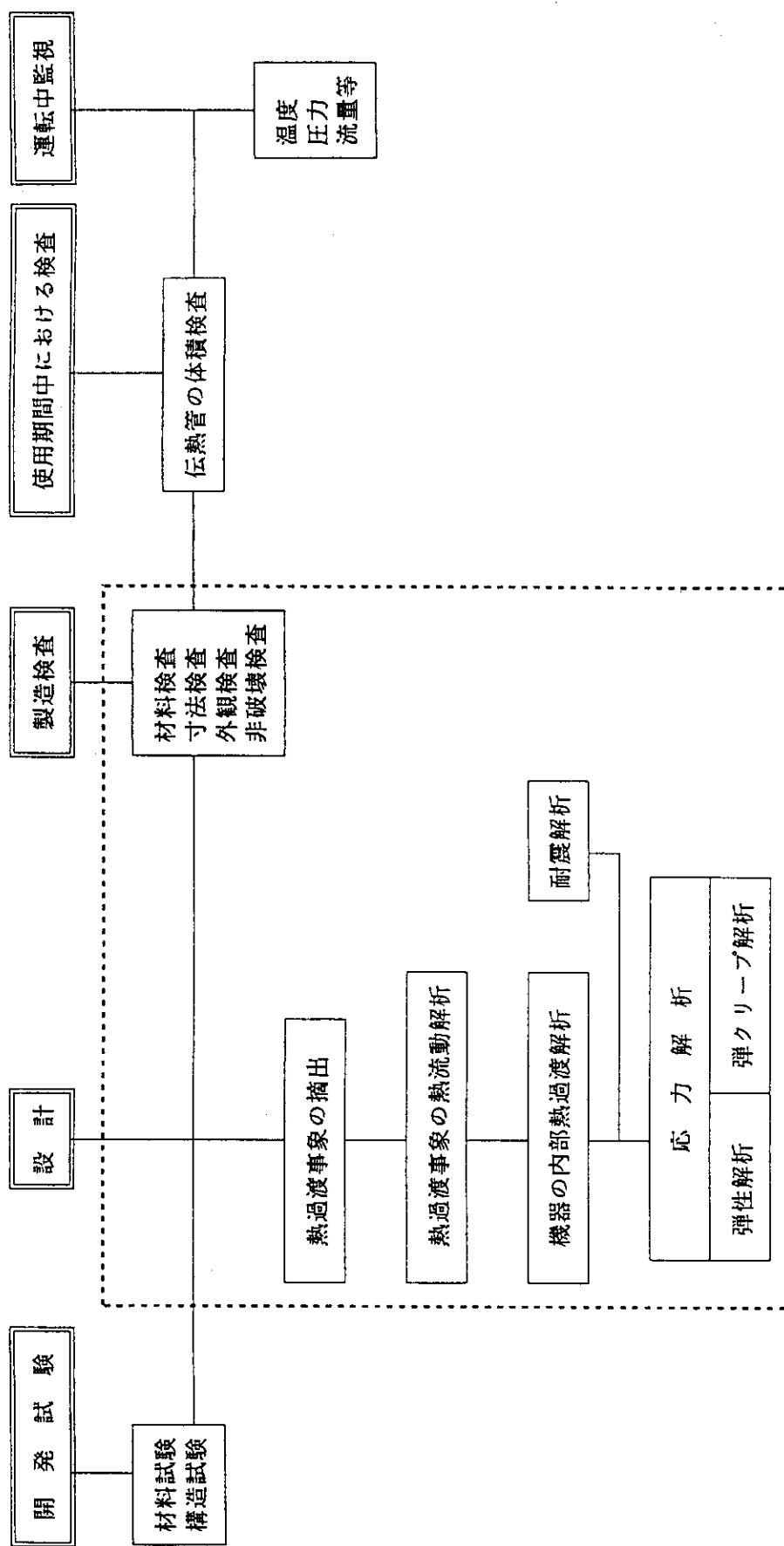


第3.3図 中間熱交換器の工事フロー図

4. 高温構造設計の基本的な考え方

第4.1図は、高温構造設計の手法及び検査と開発試験との関連を示したものである。「高温構造設計指針」は、高温機器が通常運転時及び想定されるあらゆる運転時の異常な過渡変化時及び事故時において健全性を確保できるように、機器に生じる応力、変形等の許容される範囲を定めたものである。本指針は、使用材料の高温機器の使用条件下での破損モードを想定し、その想定モードに対して破損を防止するための許容範囲を使用材料の特性を考慮し、安全余裕をもつようく定めている⁽⁶⁾。また、高温構造物の健全性を確保するために、製造時の検査、供用期間中の検査が行われる。

高温構造物の設計は、まず、評価箇所に対して、運転状態ごとに考えられる熱過渡事象を摘出する。これらの事象の熱過渡解析⁽⁷⁾により、IHX、1次PWC等の高温機器に流入する1次ヘリウムガス、加圧水等の流体の出入口温度、圧力、流量の代表値の時間変化を求める。その後、機器内部での熱流動解析を実施し、評価箇所の非定常の温度分布を求める。また、耐震解析を実施し、評価箇所に対して働くせん断力、曲げモーメントを求める。これらの温度分布、耐震解析の結果を入力条件として、弾性解析または弾クリープ解析により、応力解析を実施し、応力評価、ひずみ評価、クリープ疲れ損傷評価を実施する。



「高温構造設計指針」、「構造等の技術基準」により規定されている範囲

第4.1図 高温構造物の設計フロー

5. 設計手法

5. 1 弾性解析

伝熱管の構造評価で、弾性解析は、クリープ効果が顕著でない温度域における応力評価、時間と共に緩和することの無い1次応力の評価及び累積疲れ損傷の算出に用いられる。

5. 2 弾クリープ解析

5. 2. 1 適用方針

- (1) 「高温構造設計指針」においては、原則として解析による設計が要求されており、解析による設計法として、弾性解析及び非弾性解析に基づく評価方法が規定されている。
- (2) 弾性解析による設計評価法は、弾性解析の応力解析結果をベースとして、非弾性（塑性及びクリープ）の効果については、設計係数等の簡便な方法で保守的に考慮し、設計の許容限界を満足させるものである。
- (3) 弾性解析による設計評価法の範囲で、ひずみの制限、または、クリープ疲れ損傷の制限を満足させることができない場合は、非弾性解析によることができる。

IHX の高温部については、上記の(1)及び(3)を適用することにより、非弾性解析を実施する。非弾性解析には、材料のクリープ挙動を考慮する弾クリープ解析、材料の塑性を考慮する弾塑性解析等がある。IHX の高温部に発生する応力は、塑性域に入らないので、ここでは弾クリープ解析のみを実施する。

5. 2. 2 クリープ解析手法

クリープ曲線等の材料特性としては、その平均挙動を解析に使用する。材料特性のばらつきの影響は、「高温構造設計指針」の中に含まれる安全余裕により適切に評価する。

ハステロイ X R のクリープ解析法は、計算コードへ取り入れられた実績の多い状態方程式による解析の方法を用いる。状態方程式は、伝熱管の温度及び応力条件を考慮して、以下とする。

(1) 単軸クリープ

Garofaloタイプの式⁽²⁾を用いる。

$$\dot{\varepsilon}_c = \dot{\varepsilon}_t(1-e^{-rt}) + \dot{\varepsilon}_{min} \cdot t \quad (5.1)$$

ここで、
 $\dot{\varepsilon}_c$: クリープひずみ
 $\dot{\varepsilon}_t$: 最大1次クリープひずみ
 r : 1次クリープの時定数の逆数
 t : 時間
 $\dot{\varepsilon}_{min}$: 最小クリープひずみ速度

また、ハステロイXRは、等方性材料であることから、引張クリープ試験から定められる単軸クリープ則は、圧縮クリープについてもそのまま使用する。第5.1表は、解析に用いた値を示す。

(2) 流れ則

単軸クリープ則を多軸応力状態へ拡張する場合の流れ則として、(5.2)式に示すMisesの流れ則を使用する⁽²⁾。

$$\dot{\varepsilon}_{cij} = \lambda S_{ij} = \frac{3 \dot{\varepsilon}_{ceo}}{2 \sigma_{eo}} S_{ij} \quad (5.2)$$

ここで、
 $\dot{\varepsilon}_{cij}$: クリープひずみ速度テンソル
 λ : スカラ関数
 $\dot{\varepsilon}_{ceo}$: 相当クリープひずみ速度
 σ_{eo} : 相当応力
 S_{ij} : 偏差応力テンソル

(3) 硬化則

単軸クリープ則及び流れ則を変動応力温度状態に適用するのが硬化則である。硬化則は、ひずみ硬化則を使用する。

また、応力反転クリープに対する硬化則を考慮する必要がある場合は、材料の硬化の回復を記述するためのひずみ硬化則に対する補助則を使用することとし、ORNLが提案する法則を用いる⁽⁸⁾。

5. 3 設計評価法

5. 3. 1 非弾性ひずみの評価

第5.1図は、ひずみ制限に関する評価のフローについて示したものである。評価手順は、以下のとおりである。

- (1) 原子炉の寿命中に機器が受ける全ての熱過渡事象の中から、構造物にとって最も厳しくなるいくつかの熱過渡事象及びその発生順序、継続時間等選んで、荷重ヒステリシスを決定する。
HTTRでは、地震荷重により発生する応力は、十分に小さく、その持続時間も十分に短いため、弾クリープ解析には、地震荷重の組合せは行わない。
- (2) 設定した荷重ヒステリシスについて、弾クリープ解析を実施し、クリープひずみ成分の履歴を記録する。
- (3) 寿命末期における非弾性ひずみを外挿する時点を決定する。なお、この時点は、過大な非弾性変形を防止する観点から、定格運転等の定常期間後の点とする。なお、過渡時の瞬間的なひずみを評価する必要はない。
- (4) クリープひずみ成分を寿命末期まで外挿する。外挿の方法は以下のとおりとする。

$$\varepsilon_{ji}(eoh) = \varepsilon_{ji}(last) + \{ \varepsilon_{ji}(last) - \varepsilon_{ji}(last-1) \} \times (N-last)$$

ここで、 ε_{ji} : 荷重ヒステリシス j におけるクリープひずみ（3次元構造物では、 $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 、軸対称構造物では、 $i = 1, 2, 3, 5$ ）

eoh : 荷重ヒステリシス j の末期

$last$: 荷重ヒステリシス j について、解析を実施した最後のサイクル番号

N : 荷重ヒステリシス j の全荷重サイクル数

最後に、選定した荷重ヒステリシス j の末期におけるクリープひずみ成分 $\varepsilon_{ji}(eoh)$ を合計して、クリープひずみを求める。

$$\varepsilon_i(eoh) = \sum_j \varepsilon_{ji}(eoh)$$

なお、この外挿は、解析を実施した（最低3サイクル）最後のサイクルのクリープひずみの増分が、その前の2回のサイクルのものより減少または一定となっている場合に適用する。

(5) 外挿した寿命末期でのクリープひずみ成分の平均化処理及び等価線形化処理を実施し、各々主ひずみを計算する。

(6) 計算した各々の主ひずみの最大正值と制限値を比較する。

5. 3. 2 クリープ損傷評価

第5.2図は、クリープ損傷評価のフローについて示したものである。評価手順は、以下のとおりである。

(1) ひずみ制限に関する評価と同様に荷重ヒステリシスを設定し、弾クリープ解析を実施する。

(2) 評価点を含む評価断面におけるMisesの相当応力 (σ_{eq}) から評価点における σ_{eq} を解析時間ごとに空間外挿する。

(3) 評価点における σ_{eq} とその時の温度 (T) 及び設計クリープ破断応力強さ (S_R) から各サイクルのクリープ損傷係数 (Dc) cycle を求める。

$$(Dc)_{cycle} = 2 \sum \left(\frac{\Delta t_i}{T_{di^*}} \right)$$

ここで、
 $(Dc)_{cycle}$: サイクル番号 (cycle) におけるクリープ損傷係数
 T_{di^*} : $T_d(T, \sigma_{eq^*})$; 温度 (T) における σ_{eq^*} に対する S_R カーブからの許容時間
 σ_{eq^*} : $\max(\sigma_{eq,i}, \sigma_{eq,i+1})$
 $\sigma_{eq,i}$: 時点 i における σ_{eq}
 $\sigma_{eq,i+1}$: 時点 i+1 における σ_{eq}
 Δt_i : 時間 i から時間 i+1 までの時間増分

(4) 寿命末期までのクリープ損傷係数を外挿する。

$$(Dc)_{eoh,j} = \sum_1^{last} (Dc)_{cycle,j} + (Dc)_{last,j} \times (N - last)$$

ここで、
 $(Dc)_j$: 荷重ヒステリシス j でのクリープ損傷係数
 $(Dc)_{cycle,j}$: 荷重ヒステリシス j のサイクル番号 (cycle) におけるクリ

クリープ損傷係数

- eoh : 荷重ヒステリシス j の末期
 last : 荷重ヒステリシス j について、解析を実施した最後のサイクル番号
 N : 荷重ヒステリシス j の全荷重サイクル数

最後に、選定した荷重ヒステリシス末期におけるクリープ損傷係数 $(D_c)_{eoh, j}$ を合計して、クリープ損傷係数を下式により求める。

$$(D_c)_{eoh} = \sum_j (D_c)_{j, eoh}$$

なお、この外挿は、解析を実施した（最低 3 サイクル）最後のサイクルのクリープ損傷係数の増分が、その前の 2 回のサイクルのものより減少または一定となっている場合に適用する。

（5）算出した累積クリープ損傷と別途弾性解析による設計法に基づき定めた累積疲労損傷 (D_f) から、 $(D_c + D_f)$ を求め、制限値と比較する。

第5.1表 単軸クリープ則

$$\epsilon_c = \epsilon_t (1 - e^{-rt}) + \dot{\epsilon}_{min} \cdot t$$

ここで, ϵ_c : クリープひずみ (mm/mm)

t : 時間 (h)

ϵ_t : 最大1次クリープひずみ成分 (mm/mm)

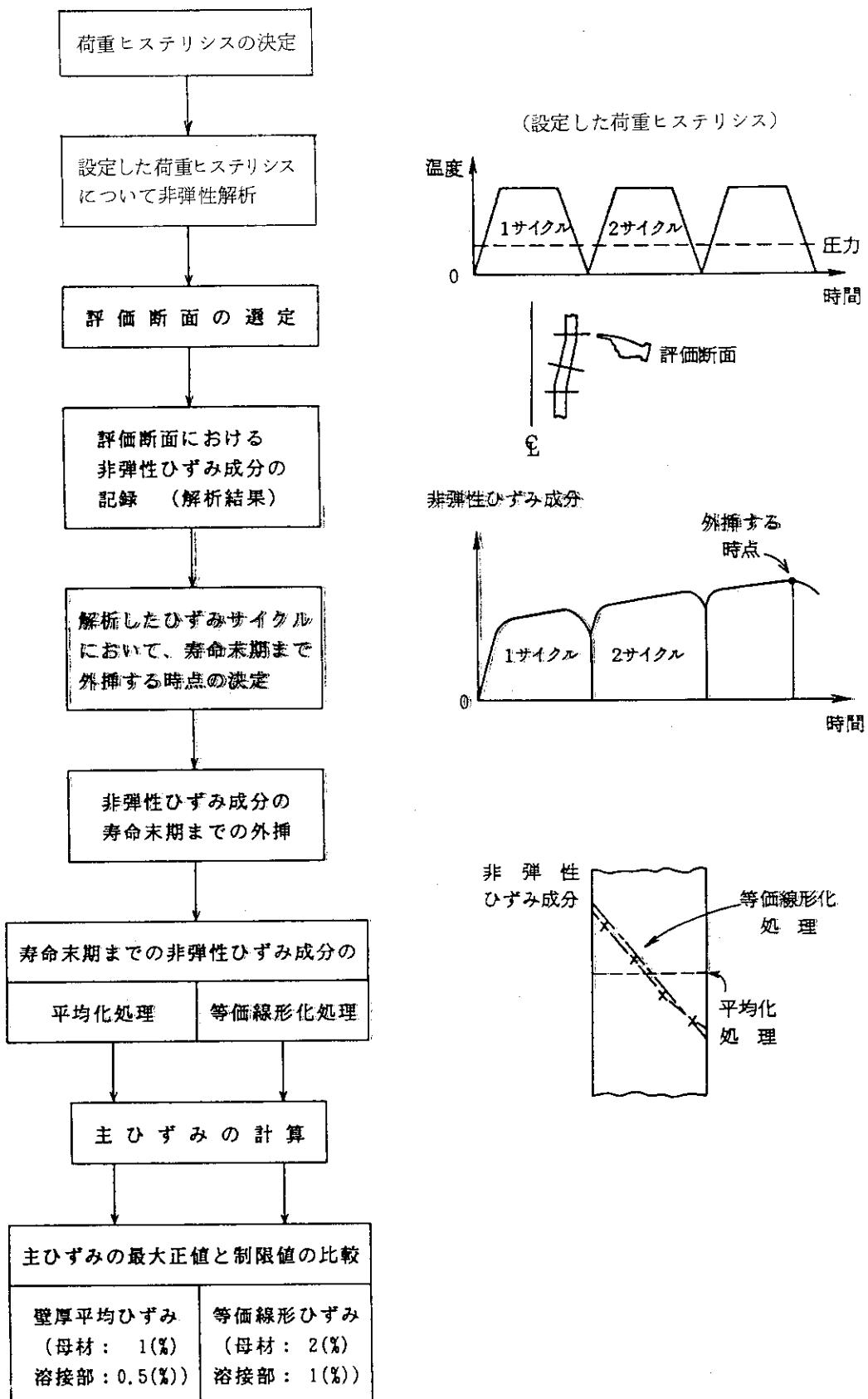
r : 1次クリープ時定数の逆数 (1/h)

$\dot{\epsilon}_{min}$: 最小クリープひずみ速度 (mm/mm/h)

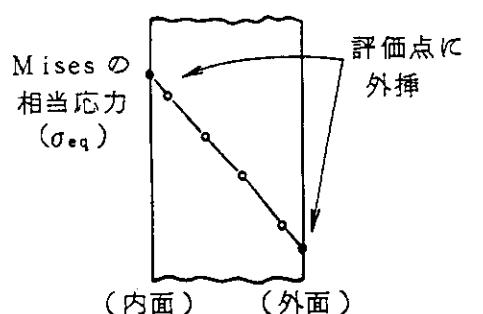
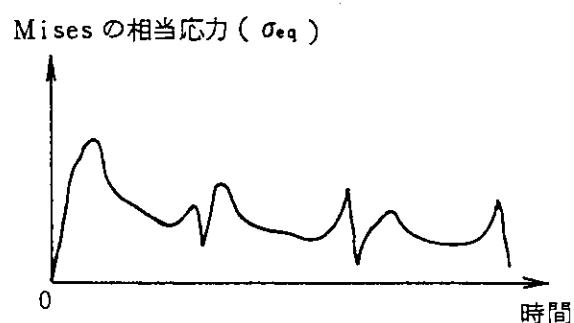
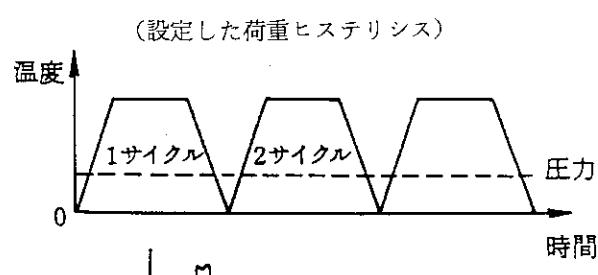
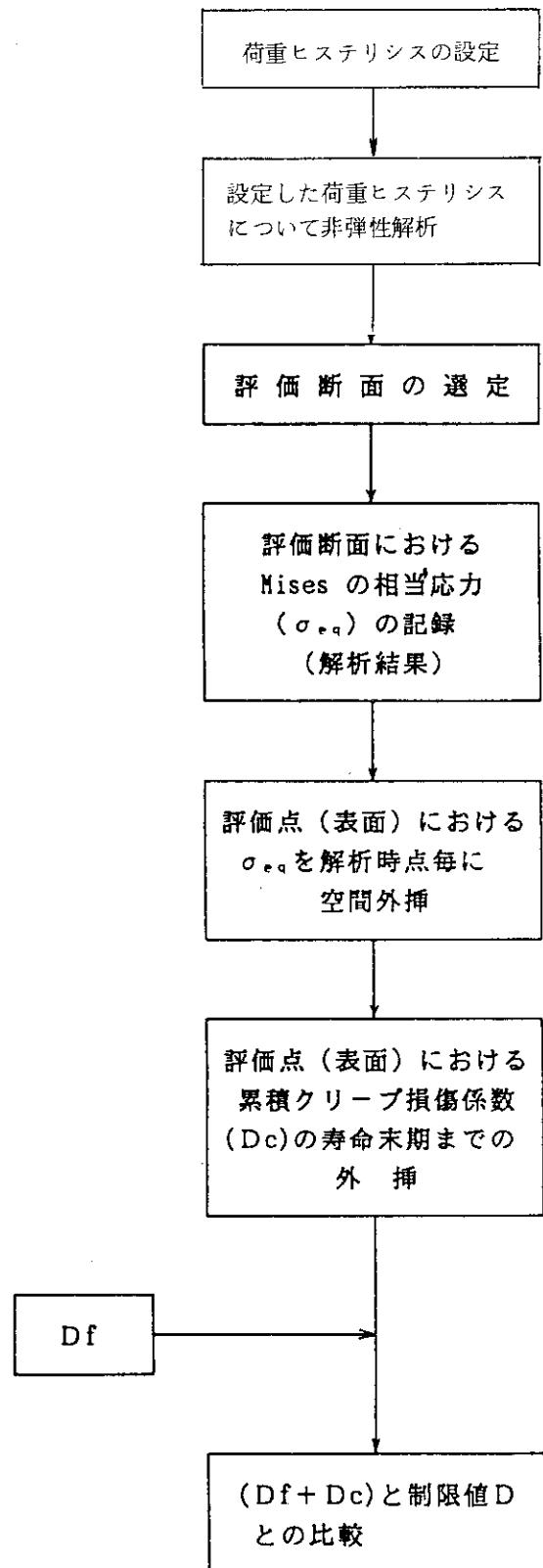
σ : 応力 (kg/mm^2)

T: 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

ϵ_t	$4.0 < \sigma : \epsilon_t = 0.056 \times 10^{-2}$ $2.0 < \sigma \leq 4.0 : \epsilon_t = (-0.0578 + 0.454/\sigma) \times 10^{-2}$ $0.5 < \sigma \leq 2.0 : \epsilon_t = 0.169 \times 10^{-2}$ $\sigma \leq 0.5 : \epsilon_t = \{0.169 \cdot (\sigma/0.5)\} \times 10^{-2}$
r	$0.5 \leq \sigma : r = 10^{p(\sigma, T)}$ $\sigma < 0.5 : r = 10^{p(\sigma=0.5, T)} \cdot (\sigma/0.5)$ <p>ここで, $p(\sigma, T) = f_1(T) + f_2(T) \cdot \sigma$</p> $f_1(T) = 4.854 - 2.415 \times 10^{-2} \cdot T + 1.674 \times 10^{-5} \cdot T^2$ $f_2(T) = 3.399 - 9.898 \times 10^{-3} \cdot T + 7.693 \times 10^{-6} \cdot T^2$
$\dot{\epsilon}_{min}$	$0.5 \leq \sigma : \dot{\epsilon}_{min} = 10^{f_a(\sigma, T)} \times 10^{-2}$ $0.1 \leq \sigma < 0.5 : \dot{\epsilon}_{min} = 10^{f_b(\sigma, T)} \times 10^{-2}$ $\sigma < 0.1 : \dot{\epsilon}_{min} = 10^{f_b(\sigma=0.1, T)} \cdot (\sigma/0.1) \times 10^{-2}$ <p>ここで, $f_a(\sigma, T) = 14.326 + 3.222 (\log_{10} \sigma) + 2.400 (\log_{10} \sigma)^2 - 2.246 \times 10^4 / (T + 273.15)$</p> $f_b(\sigma, T) = 1.777 (\log_{10} \sigma + 0.30103) + 13.574 - 2.246 \times 10^4 / (T + 273.15)$



第5.1図 ひずみの制限に対する評価手順



第5.2図 クリープ疲れ損傷の制限に対する評価手順

6. 伝熱管の強度評価

6. 1 評価手順

第6.1図は、伝熱管の構造評価のフローを示したものである。1次応力及び疲れ損傷は、弾性解析により求める。非弾性ひずみ及びクリープ損傷は、弾クリープ解析により求める。弾クリープ解析の手順は、以下のとおりである。

- (1) 熱過渡解析⁽⁷⁾の結果を入力条件として、内部熱過渡解析を実施する。
- (2) 内部熱過渡解析結果より求めた伝熱管の温度分布及び伝熱管の熱膨張量を全体梁モデルに入力する。
- (3) 全体梁モデルに対して、弾クリープ解析を実施することにより、伝熱管に加わる部材力（伝熱管の軸方向に働く力）の時間変化を求める。
- (4) 伝熱管の軸対称モデルに、温度分布解析により求めた伝熱管の肉厚方向の温度の時間変化、全体梁モデルより求めた部材力の時間変化及び伝熱管に加わる内圧及び外圧を入力する。
- (5) 伝熱管の軸対称モデルによる弾クリープ解析を実施する。これらの解析結果に基づいて、強度評価を実施し伝熱管の構造健全性を評価する。

6. 2 解析コード

解析コードは、汎用非線形構造解析システムFINASを使用する⁽⁸⁾。FINASは、有限要素法による解析コードであり、任意の構造物の弾性、非弾性、大変形、座屈解析、温度分布解析等が可能であり、高速増殖炉「もんじゅ」の設計に使用した実績がある。

6. 3 解析モデルと解析条件

(1) 全体梁モデル

全体梁モデルは、96本ある伝熱管のうち、熱膨張応力が最も大きくなる最内層（第1層）と、自重及び地震荷重による応力が最も大きくなる最外層（第6層）を選定してモデル化した。

最内層と最外層の全体梁モデルを第6.2図に示す。全体梁モデルは、下部連絡管を7分割、ヘリカルコイル伝熱管を円周方向に12分割し、ヘリカルコイル伝熱管の巻数は、ヘリカルコイル伝熱管の支持点の影響が及ばない範囲までを考慮し

た。

境界条件として、伝熱管の支持点に熱膨張による強制変位を与えた上、第6.2図に示すように拘束条件を入力した。

(2) 軸対称モデル

第6.3図に伝熱管軸対称モデルとその伝熱境界条件を示す。軸対称モデルは、伝熱管肉厚方向の温度差による熱応力、圧力により発生する応力及び上記全体梁モデルより求めた部材力による応力を求めるためのモデルである。伝熱管を肉厚方向に5分割し、内外面におけるピーク応力を正確に求めることができるように、内外面近傍を細かく分割した。伝熱管の温度計算のために、伝熱境界条件として、伝熱管の内面及び外面にヘリウムガス温度及び熱伝達率を与えた。

第6.4図は、伝熱管軸対称モデルの荷重条件と拘束条件を示したものである。内圧、部材力、圧力によるスラスト力等を与えた。

(3) 伝熱境界条件

伝熱管の温度計算に用いる伝熱管の境界条件は、以下のとおりである。

(i) ヘリカルコイル伝熱管外面（第6.3図①面）

$800 < Re \leq 7000$ の場合

$$Nu = Co \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot C \quad (6.1)$$

（ヘリカルコイル形状における基礎研究を反映した式）

$7000 < Re$ の場合

$$Nu = 0.33 \cdot Re^{0.6} \cdot Pr^{0.3} \cdot CH \cdot C \quad (6.2)$$

（Fishenden-Saundersの式）

ここで、Nu : ヌッセルト数

Re : レイノルズ数

Pr : プラントル数

C : 管配列、製作公差等に依存した係数

CH : 管群配列による係数

Co : 伝熱管偏平、偏心を考慮しない基準値による係数

また、流量喪失時には、自然対流等を考慮して、熱伝達率を $20 \text{ kcal}/\text{m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ とする。

(ii) ヘリカルコイル伝熱管内面(第6.3図②面)

管内乱流熱伝達の羽田(森、中山)の式⁽¹⁰⁾を用いる。

$$\text{Nu} = 0.0223 \cdot \frac{\text{Pr}}{(\text{Pr}^{0.6} - 0.057)} \cdot \text{Re}^{(5/6)} \cdot \left(\frac{d_i}{D_m} \right)^{(1/12)} \\ \times \left[1 + \frac{0.0615}{\{ \text{Re} \cdot \left(\frac{d_i}{D_m} \right)^{(2/5)} \}^{(1/6)}} \right] \quad (6.3)$$

ここで、 d_i : ヘリカルコイル伝熱管内径

D_m : ヘリカルコイル部の平均直径

また、流量喪失時は、自然対流等を考慮して、熱伝達率20kcal/m²h°Cを用いる。

(iii) 下部連絡管外面(第6.3図①面)

解析モデル図は、ヘリカルコイル部と同じだが、下部連絡管については、(6.4)式及び(6.5)式により熱伝達率を求める。

$$\text{Nu} = 0.023 \cdot \text{Red}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{(1/3)} \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{de}{L} \right)^{0.7} \right\} \quad (6.4)$$

ここで、 de : 伝熱管外部の相当直径

Red : 相当レイノルズ数

L : 下部連絡管部の長さ

また、流量喪失時は、自然対流等を考慮して、熱伝達率20kcal/m²h°Cを用いる。

(iv) 下部連絡管内面(第6.3図②面)

Colburnの管内乱流熱伝達の式を用いる。

$$\text{Nu} = 0.021 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{(1/3)} \quad (6.5)$$

また、流量喪失時は、自然対流等を考慮して、熱伝達率20kcal/m²h°Cを用いる。

(4) 荷重ヒステリシス

応力解析は、各運転状態の代表事象ごとに行う。運転状態の区分は、第6.1表に示す定義にしたがって分類しており、また、その想定回数は、HTTRの運転計画、特徴を考慮して決定した。また、原子炉のスクラム回数は、国内における軽水炉、炭酸ガス冷却炉及び高速増殖炉の実験炉「常陽」の原子炉スクラムの経験に基づいて決定した。

- (i) 新しい型の原子炉では、運転開始時にゼロ出力での原子炉スクラムが多いが、この状態での原子炉スクラムは有為な損傷を生ずることはなく、構造健全性評価上考慮する必要はない。従って、代表事象の想定回数は、出力運転時を対象とする。
- (ii) HTTRの1サイクルの最小日数は20日とする。これより、HTTRの耐用年数20年で想定する起動回数は最高300回とする。
- (iii) 手動スクラムの回数は相対的に多い。例えば、国内初の炭酸ガス冷却炉（「東海炉」）では、24年間の運転中、合計21回のスクラムがあったが、そのうち2/3が手動スクラムである。従って、手動スクラムの回数は、運転状態Ⅱの総想定回数200回のうち、最大として120回とする。
- (iv) 商用電源喪失の回数は、HTTRに商用電源を給電する大洗研究所の中央変電所の運転開始以来の停電回数に基づき40回とする。

HTTRに特徴的なことは、主冷却設備は原子炉スクラム後は自然放冷となることである。自然放冷時の機器の温度降下率（最大約15°C/h）は、通常運転時（約30°C/h）より低いため、原子炉スクラム時よりも通常停止時の方が厳しくなる。このことから、停止回数として通常停止の回数を固定せず、通常停止と手動スクラムが合計209回で、かつ通常停止は89回以上、手動スクラムは120回以下という制限条件のもとで、機器ごとに厳しい組合せを決定する。第6.2表に最も厳しくなる事象とその想定回数を示す。

さらに、第6.2表の事象の中から、次の観点に着目して、熱応力的に最も厳しくなる事象を選定する。

- (i) 伝熱管に接するヘリウムガスの温度変化率
- (ii) 伝熱管に接するヘリウムガスの温度変化幅
- (iii) 伝熱管に接するヘリウムガスの最高到達温度
- (iv) 伝熱管に接する1次側と2次側のヘリウムガスの温度差
- (v) 強度計算箇所に接するヘリウムガスの流量及び熱伝達率

さらに、上述の観点から決定された代表事象に加えて、過出力等の原因により、温度、圧力がゆっくりと上昇し、通常運転時の状態より高い状態で維持される状態を高温・高圧保持事象として代表事象に選定する。

第6.3表は、伝熱管の強度評価のために選定した代表事象とその選定の理由を示したものである。また、第6.4表は、代表事象とその想定回数をまとめて示し、対

応する熱過渡設計曲線（1次ヘリウム温度、2次ヘリウム温度）の図番を示したものである。

1次応力解析は、これらのすべての代表事象に対して実施した。一方、弾クリープ解析となる1次+2次（熱）応力解析は、選定した事象をさらに分類して、クリープ効果最も顕著となる事象をさらに選んだ。第6.18図に伝熱管の弾クリープ解析に用いる荷重ヒステリシスを示す。荷重ヒステリシスとして、定格運転、高温試験運転及び高温試験運転時の動特性試験を選定した。すべての熱過渡事象は、この3種類の荷重ヒステリシスで包絡することができる。

(5) 機械的荷重条件

機械的荷重条件としては、伝熱管に加わる内圧及び外圧、自重、熱膨張による荷重、モーメント、地震荷重を考慮する。伝熱管の熱膨張、地震荷重は、6.3(1)の全体梁モデルにより求めて、同(2)の軸対称モデルに入力する。第6.5表に機械的荷重条件を示す。

(6) 物性値^{(11), (12), (13)}

解析に用いたハステロイXR及びヘリウムの物性値の出典及び数式等を第6.6表から第6.8表に示す。また、これらの出典による物性値の温度依存性を第6.19図から第6.23図に示す。

6.4 解析結果

6.4.1 評価部位の選定

すべての伝熱管の中から、発生する1次応力および2次応力が最も大きくなる場所をそれぞれ選定して評価した。

伝熱管に発生する1次応力は、主に伝熱管の自重及び内圧により発生する。内圧は、すべての位置で一定のため、自重が最も大きくなる部分を選定した。伝熱管は、第6.2図に示すように、円周方向及び軸方向に数点の支持構造により支持されている。従って、支持点と支持点の間隔が長い部分の下部の支持点近傍で、自重による1次応力は、最大となる。

伝熱管に発生する2次応力は、伝熱管の内外面の温度差及び伝熱管と内筒部の温度差により発生する。伝熱管の第1層は、内筒に最も近い最内層であるため、高温ヘッダから第1ペンド部までの水平距離が短く、内筒と伝熱管の温度差に起因する熱膨張応力が最も大きくなる。

第6.9表は、第1層及び第6層の伝熱管の自重により発生する応力及び熱膨張により発生する応力を示したものである。自重により発生する応力は、第6層の下部連絡管自重サポート部において最大になり、熱膨張により発生する応力は、第1層の伝熱管の下部連絡管上部ペンド部で最大となる。

6. 4. 2 1次応力評価

1次応力は、高温雰囲気中においても緩和することができないため、弾性解析により評価した。第6.10表は、伝熱管の1次応力評価の結果を示したものである。第6.4表に示すように、運転状態Ⅰ、ⅡおよびⅢには、各々複数の評価事象があるが、この表では、発生応力の許容値に対する割合が最大となる1事象を記載した。なお、第6.11表は、記号の説明を示したものである。

各運転状態の評価部位の温度は、保守的にすべての伝熱管の最大温度を用いた。これは、最大温度の発生する部位と最大応力の発生する部位が必ずしも一致しないためであり、最大温度を用いることにより、1次応力及び2次応力等の制限値が最小となり、保守的に評価できる。設計条件の温度は、伝熱管の最高使用温度を用いている。また、試験状態の温度は、運転末期の耐圧試験の温度条件を考慮して100°Cとした。

評価結果は、全ての運転状態で、1次応力の制限を満足している。設計条件では、計算値と制限値の差が僅かであり、余裕がない。これは、設計条件が、最高使用温度における100000時間のクリープ破断応力に基づいて決定される S_{d} 値との比較になっているためである。しかし、IHXの実際の運転モードでは、最高使用温度で100000時間運転することが無いことを考慮すれば、十分に余裕を持っていると考えられる。

6. 4. 3 累積非弾性ひずみの評価

累積非弾性ひずみは、弾クリープ解析により評価した。第6.24図は、定格運転3サイクルにおける軸力（部材力とも言う）の時間変化を示している。軸力は、内筒と伝熱管の温度差に起因して発生し、全体梁モデル（6.3(1)参照）により求めた。第6.25図は、定格運転3サイクル時における伝熱管のミーゼスの相当応力の時間変化を示したものである。伝熱管の応力の時間変化は、軸力の時間変化を入力条件として、軸対称モデル（6.3(2)参照）で求めたものである。伝熱管内面に発生する熱応力は、リラクセーションすることにより第1サイクル約250時間で、約7.0kg/cm²から約1.2kg/cm²まで減少する。さらに、次の第2サイクルで約0.25kg/cm²まで減少する。第6.26図及び第6.27図は、伝熱管の軸方向及び周方向の応力変化を示したものである。軸方向応力は引張、周方向応力は、内面では引張、外側では圧縮であり、いずれもリラクセーションすることにより、第3サイクルの終わりには、ほぼ1次応力のレベルまで低下している。

第6.28図から第6.30図は、定格運転3サイクルのミーゼスの相当ひずみ、軸方向及び周方向のひずみの時間変化を示したものである。ミーゼスの相当ひずみは、主にリラクセーションの大きく進行する第1サイクル約250時間で増加し、第2、第3サイクルでのひずみの増加は、それほど大きくない。

第6.31図から第6.33図は、高温試験運転3サイクルの伝熱管に働く軸力の時間変化、伝熱管に発生するミーゼスの相当応力及び相当ひずみの時間変化を示したものである。高温試験運転時には、1次ヘリウムガスと2次ヘリウムガスの温度差が定格運転時に比べて小さくなるため、発生する初期応力は、内面で約2.0kg/cm²と小さくなる。しかし、伝熱管温

度は、定格運転時に比べて約140°C高くなるため、第1サイクルで急激にリラクセーションしている。また、ミーゼスの相当ひずみも第1サイクルで急激に増加し、第2サイクル及び第3サイクルにおけるリラクセーション及び非弾性ひずみの増加はわずかである。

第6.34図及び第6.35図は、高温試験運転時に動特性試験の組合せた場合のミーゼスの相当応力及びミーゼスの相当ひずみの時間変化を示したものである。動特性試験は、第1サイクル約250時間後に組み込んでいる。ミーゼスの相当応力は、試験中に最大約 0.6kg/cm^2 まで上昇するが、試験終了後は、試験前のレベルまで減少する。この間の非弾性ひずみの増加はないことが示された。

第6.12表は、定格運転、高温試験運転及び高温試験運転+動特性試験の3種類の荷重ヒステリシスから第5章の手法にしたがって計算した累積非弾性ひずみと制限値の比較を示したものである。累積非弾性ひずみは、伝熱管内面、外面とも制限値以下である。なお、表中の記号の説明は、第6.11表に示している。

6. 4. 4 クリープ疲れ損傷の評価

第6.13表は、伝熱管の疲れ損傷を示している。ひずみサイクルの番号は第6.17表の荷重の組合せ表に対応しており、ひずみ振幅が最も大きくなるものから記載した。また、表中のCは、低温停止状態を示している。-S1は、過渡事象と地震との組合せを示したものである。伝熱管の疲れ損傷は、内面、外面で、それぞれ0.072及び0.066である。なお、第6.14表は、伝熱管の疲れ損傷の算定に関する記号の説明を示したものである。

第6.36図、第6.37図及び第6.38図は、定格運転、高温試験運転及び高温試験運転に動特性試験を組み合わせた場合における、伝熱管のクリープ損傷の時間変化を示したものである。クリープ損傷は、第1サイクルに比べて第2及び第3サイクルは十分に小さく、従って、繰り返し高温運転を実施しても、クリープ損傷が著しく増加することはない。第6.15表は、クリープ損傷をひずみサイクル毎に計算したものである。クリープ損傷は、内面で0.187、外面で0.106である。

第6.16表は、クリープ疲れ損傷の合計値を示したものである。クリープ疲れ損傷は、伝熱管外面で0.18、内面で0.26であり、制限値の1.0に比べて十分の余裕をもって満足した。

第 6.1 表 運転状態区分

運転状態	定義	備考
I	原子炉施設の通常運転時の状態をいう。	具体的には、計画的な運転状態又はこれらの間の計画的移行をいう。
II	運転状態 I、運転状態 III、運転状態 IV 及び試験状態以外の状態をいう。	具体的には、原子炉施設の寿命程度の期間中に予想される機器の単一故障、運転員の単一誤操作等の事象によって、原子炉が通常運転状態からはずれるような状態をいう。
III	原子炉施設の故障、異常な作動等により原子炉の運転の停止が緊急に必要とされる状態をいう。	具体的には、発生頻度が十分に低い事象によって引き起こされる状態をいう。
IV	原子炉施設の安全設計上想定される異常な事態が生じている状態をいう。	具体的には、発生頻度が極めて低く、原子炉施設の寿命中に起ころるとは考えられない事象によって引き起こされる状態をいうが、万一発生した場合の設計の妥当性を評価するために特に設けたものをいう。
試験状態	耐圧試験により原子炉施設に最高使用圧力を超える圧力が加えられている状態をいう。	

第6.2表 热過渡解析用代表事象の想定回数 (1/2)

運転状態	代表事象	想定回数
運転状態 I	通常起動	300回
	出力変更	各100回 (下降と上昇)
	特殊運転	20回
	動特性試験	30回 {上昇15回 下降15回}
	通常停止	89回以上*
運転状態 II	手動スクラム	120回以上*
	原子炉出力制御系の異常 (出力低下)	合計40回
	原子炉入口温度制御系の 異常	
	加圧水冷却設備の隔離弁 の誤閉	
	特殊運転時の商用電源 喪失	10回
	高温、高圧保持事象 ¹⁾	
	商用電源喪失	40回
	耐圧漏えい試験 ²⁾	30回
運転状態 III	1次冷却設備二重管内管 での漏えい	合計10回
	加圧水配管の破損	
	補助ヘリウム循環機の1 基起動失敗	
	補助ヘリウム循環機の1 基停止失敗	
	手動スクラムでプラント 状態値を作成する事象	
	中間熱交換器ヘリウム循環機 制動装置故障	
	2次PWCヘリウム循環機 制動装置故障	
	高温、高圧保持事象 ¹⁾	1回

運転状態 I 及び II の
合計回数 869

第 6.2 表 热過渡解析用代表事象の想定回数 (2/2)

運 転 状 態 IV	出力運転中の制御棒の誤 引抜き	1回
	1次ヘリウム配管二重管 内・外管の同時破断	
	1次ヘリウム配管二重管 内管の破損	
	2次ヘリウム配管の破損	
	1次加圧水冷却器伝熱管 の破損	
試 驗 状 態	耐 圧 試 験 ^③	10回

(*) 通常停止と手動スクラムの回数は合計 209 回とし、本表に示す条件内で対象機器にとって最も厳しくな
るよう各機器の設計側が定めること。

注 1) 高温保持、高圧保持事象を別々に評価せず、高温、高圧で保持させる事象で包絡させる場合の回数。

注 2) 耐圧漏洩試験の試験圧力は、通常運転圧力の 1.1 倍とする。

注 3) 耐圧試験の試験圧力は、最高使用圧力の 1.25 倍とする。

第6.3表 考慮すべき熱過渡条件 (1/4)

運転状態	分類番号	事象名	運動形態	温度変化 (°C)	温度勾配 (°C/hr)	選定理由	選定事象	回数
I	I - 1b	通常起動	定格 (850°C)	P : 532 S : 469	P : 34.3 S : 31.3	基本的な熱過渡事象	○	226
	I - 1d	通常起動	高温試験 (950°C)	P : 602 S : 586	P : 39.6 S : 39.1	基本的な熱過渡事象	○	174
	I - 2b	通常停止	定格 (850°C)	P : - 533 S : - 464	P : - 34.4 S : - 29.9	基本的な熱過渡事象	○	106
	I - 2d	通常停止	高温試験 (950°C)	P : - 595 S : - 580	P : - 37.2 S : - 35.8	基本的な熱過渡事象	○	83
	I - 3c	出力変更 (30% → 100%) (上昇)	定格 (850°C)	P : 532 S : 469	P : 34.3 S : 33.5	通常起動 (I - 1b) とほぼ同様な熱過渡なので, I - 1bに含める。	-	-
	I - 3g	出力変更 (100% → 30%) (下降)	定格 (850°C)	P : - 533 S : - 464	P : - 34.4 S : - 29.9	通常停止 (I - 2b) とほぼ同様な熱過渡なので, I - 2bに含める。	-	-
	I - 3g	出力変更 (30% → 100%) (上昇)	高温試験 (950°C)	P : 602 S : 586	P : 39.6 S : 39.1	通常起動 (I - 1d) とほぼ同様な熱過渡なので, I - 1dに含める。	-	-
	I - 3h	出力変更 (100% → 30%) (下降)	高温試験 (950°C)	P : - 595 S : - 580	P : - 37.2 S : - 35.8	通常停止 (I - 2d) とほぼ同様な熱過渡なので, I - 2dに含める。	-	-

↑ P : 1次ヘリウム (入IT), S : 2次ヘリウム (出口)

第6.3表 考慮すべき熱過渡条件(2/4)

運転状態	分類番号	事象名	運形態	温度変化 (°C)	温度配 (°C/hr)	選定理由	選定事象	回数
I	I - 4a	定常運転	定格 (850 °C)	P: - S: -	P: - S: -	基本的な運転状態 (熱応力の点からMAXのケースを選定する。)	○	-
	I - 4b	定常運転	高温試験 (950 °C)	P: - S: -	P: - S: -	基本的な運転状態 (金属温度からMINのケースを選定する。)	-	-
	I - 7a	動特性試験(上昇) 10 %ステップ出力変更	高温試験 (950 °C)	P: 85 S: 56	P: 170.0 S: 67.2	動特性試験の上昇の熱過渡事象として 温度変化・勾配の点から選定する。	○	-
	I - 7b	動特性試験(下降) 0.5 %/min ランプ出力変更	高温試験 (950 °C)	P: -40 S: -45	P: -88.9 S: -64.3	動特性試験の下降の代表熱過渡事象と して選定する。	○	15
	I - 7c I - 7e	動特性試験(下降) 0.25 %/min ランプ出力変更	高温試験 (950 °C)	P: -45 S: -39	P: -65.9 S: -55.7	温度変化・勾配の点で、ほぼ同様な I - 7bで代表させる。	-	-
	I - 7d I - 7f	動特性試験(上昇) 0.25 %/min ランプ出力変更	高温試験 (950 °C)	P: 60 S: 47	P: 70.6 S: 62.7	温度変化・勾配の点から、I - 7aで 包絡できるので、I - 7aに含める。	-	-

↑ P: 1次ヘリウム (入口), S: 2次ヘリウム (出口)

第6.3表 考慮すべき熱過度条件(3/4)

運転状態	分類番号	事象名	運転形態	温度変化(°C)	温度勾配(°C/hr)	選定理由	選定事象	回数
	II - 1a	手動トリップ	定格(850°C)	P: 0 S: 10	P: 0.0 S: 1.00	運転状態IIの熱過度事象は、全て高温試験運転で代表させる。	-	-
	II - 1b	手動トリップ	高温試験(950°C)	P: 0 S: 18	P: 0.0 S: 1.80	原子炉出力制御系異常(出力下降)(II-18)で代表させる。	-	-
II	II - 18	原子炉出力制御系異常(出力下降)	高温試験(950°C)	P: -20 S: 18	P: -0.44 S: 1.80	運転状態IIの事象を包絡する事象として選定する。	○	190
	II - 20	原子炉入口温度制御系異常	高温試験(950°C)	P: - S: -	P: - S: -	高温部にとつては、有意な熱過度事象とならないので、選定しない。	-	-
	II - 23b	原子炉出力制御系異常(出力上昇)	高温試験(950°C)	P: 20 S: 25	P: 0.03 S: 0.03	実際には、起こりえない事象なので、選定しない。	-	-
	II - 28	商用電源喪失	高温試験(950°C)	P: 0 S: 6	P: 0.0 S: 0.60	原子炉出力制御系異常(出力下降)(II-18)で代表させる。	-	-
	II - 51	高温・高圧保持(957/912°C) × 1 (hr)	高温試験(950°C)	P: - S: -	P: - S: -	高温・高圧で保持させる特別な事象として選定する。	○	10
	-	耐圧漏えい試験	-	-	-	試験圧力として、通常運転時における圧力の1.1倍を考慮する。	○	30

↑ P: 1次ヘリウム (入口), S: 2次ヘリウム (出口)

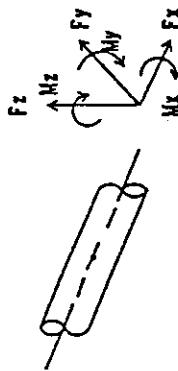
第6.3表 考慮すべき熱過度条件 (4/4)

運転状態	分類番号	事象名	運転形態	温度変化 (°C)	温度配 (°C/hr)	選定 理由	選定 事象	回数
	III - 1	1次ヘリウム循環機軸回 (=手動トリップ)	高温試験 (950 °C)	P: 0 S: 18	P: 0.0 S: 1.80	原子炉出力制御異常(出力下降) (II-18)で代表させる。	-	-
	III - 7	1次冷却設備内管漏えい	高温試験 (950 °C)	P: -90 S: -78	P: -90.0 S: -0.49	実際のスクラムでは厳しくないと 考えられるので選定しない。	-	-
	III - 12a	2次PWC用ヘリウム 循環機制動装置故障	高温試験 (950 °C)	P: 0 S: -10	P: 0.0 S: -0.33	運転状態Ⅲの事象を代表する事象とし て選定する。	○	9
III	III - 12b	2次PWC用ヘリウム 循環機制動装置故障	定期 (850 °C)	P: 0 S: -16	P: 0.0 S: -0.40	運転状態Ⅲ熱過渡事象は、全て高温 試験運転で代表される。	-	-
	III - 13b	加圧水冷却設備配管破損	高温試験 (950 °C)	P: 0 S: 15	P: 0.0 S: 1.15	原子炉出力制御系異常(出力下降) (II-18)で代表させる。	-	-
	III - 17	中間熱交換器用ヘリウム 循環機制動装置故障	高温試験 (950 °C)	P: 0 S: 15	P: 0.0 S: 1.50	原子炉出力制御系異常(出力下降) (II-18)で代表させる。	-	-
	III - 51	高温・高圧保持 (957/912 °C) × 10 (hr)	高温試験 (950 °C)	P: - S: -	P: - S: -	高温・高圧で保持させる特別な事象と して選定する。	○	1
IV	IV - 8	2次ヘリウム冷却設備 二重管破断	高温試験 (950 °C)	P: - S: -	P: - S: -	1次応力の制限及びクリープ座屈の 評価に使用	○	1

↑ P: 1次ヘリウム (入口), S: 2次ヘリウム (出力)

第6.4表 設計過渡条件

記号	事象名	回数	設計過渡曲線
I-a	通常起動(定格運転)	226	第6.5図
I-b	通常停止(定格運転)	106	第6.6図
I-c	通常起動(高温試験運転)	174	第6.7図
I-d	通常停止(高温試験運転)	83	第6.8図
I-e	動特性試験(上昇)	15	第6.9図
I-f	動特性試験(下降)	15	第6.10図
II-a	原子炉出力制御系異常	190	第6.11図
II-b	高温・高圧保持(定常1時間)	10	第6.12図
III-c	耐圧漏えい試験	30	第6.13図
III-a	2次PWC用ヘリウム循環機制動装置故障	9	第6.14図
III-b	高温・高圧保持(定常10時間)	1	第6.15図
IV-a	2次ヘリウム冷却設備二重管破断	1	第6.16図
T	耐圧試験	10	第6.17図



第 6.5 表 (1/2) ヘリカルコイル伝熱管及び下部連絡管に対する機械的荷重

圧力 ¹⁾ (kg/cm ² G)	自重 ⁴⁾						熱膨張 ⁴⁾						モーメント (kg·mm)			
	内压	外压	差压	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z	
設計条件	3.0	-	3.0	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	-	-	-	-	-	-	-
運転状態 I	42.65	41.5	1.15	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	8.52	12.61	-33.98	-5771	-3983	-2232	
運転状態 II	44.3	42.4	1.9	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	8.52	12.61	-33.98	-5771	-3983	-2232	
	37.0	40.0	-3.0	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	8.52	12.61	-33.98	-5771	-3983	-2232	
	46.92	45.65	1.27	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	-	-	-	-	-	-	
運転状態 III	44.3	42.4	1.9	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	8.52	12.61	-33.98	-5771	-3983	-2232	
	33.6	39.0	-5.4	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	8.52	12.61	-33.98	-5771	-3983	-2232	
運転状態 IV	0.0	41.5	-41.5	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	8.52	12.61	-33.98	-5771	-3983	-2232	
試験状態	5)	3.75	-	3.75	5)	0.19	-0.03	-1.38	-44	417	44	-	-	-	-	

- 1) (差圧) = (外圧) - (内圧) で示す。
- 2) 運転状態 IIにおいて、上段は高温・高圧保持事象、下段はそれ以外の代表事象を示す。
- 3) 運転状態 IIIにおいて、上段は高温・高圧保持事象、下段はそれ以外の代表事象を示す。
- 4) ヘリカルコイル伝熱管下端部（下部連絡管との境界部）における荷重を用いる。
- 5) 試験状態の圧力は、最高使用圧力の 1.25 倍とする。
- 6) クリープ解析に用いる圧力は、内圧 : 41.55 (kg/cm²G)、外圧 : 40.8 (kg/cm²G) における差圧 : 0.75 (kg/cm²) とする。

第 6.5 表 (2 / 2) ヘリカルコイル伝熱管及び下部連絡管に対する機械的荷重

		地 震 荷 重 ³⁾			
		S ₁	地 震	S ₂	地 震
設 置 条 件	せん断力 (kg)	曲げモーメント ($\times 10^3$ kg・mm)	せん断力 (kg)	曲げモーメント ($\times 10^3$ kg・mm)	
	—	—	—	—	—
運転状態 I	2.66 ⁴⁾	1.13 ⁴⁾	2.65 ⁵⁾	1.03 ⁵⁾	
	2.66 ⁴⁾	1.13 ⁴⁾	2.65 ⁵⁾	1.03 ⁵⁾	
	2.66 ⁴⁾	1.13 ⁴⁾	2.65 ⁵⁾	1.03 ⁵⁾	
運転状態 II	2.66 ⁴⁾	1.13 ⁴⁾	2.65 ⁵⁾	1.03 ⁵⁾	
	2.66 ⁴⁾	1.13 ⁴⁾	2.65 ⁵⁾	1.03 ⁵⁾	
	2.66 ⁴⁾	1.13 ⁴⁾	2.65 ⁵⁾	1.03 ⁵⁾	
運転状態 III	2.66 ⁴⁾	1.13 ⁴⁾	2.65 ⁵⁾	1.03 ⁵⁾	
	2.66 ⁴⁾	1.13 ⁴⁾	2.65 ⁵⁾	1.03 ⁵⁾	
運転状態 IV	—	—	—	—	
試験状態	—	—	—	—	

1) 運転状態 IIにおいて、上段は高温・高圧保持事象、下段はそれ以外の代表事象を示す。

2) 運転状態 IIIにおいて、上段は高温・高圧保持事象、下段はそれ以外の代表事象を示す。

3) 保守的に、伝熱管スタブ部における荷重を用いる。

4) 許容応力状態は、III^ASである。5) 許容応力状態は、IV^ASである。

第6.6表 2・1/4Cr-1Mo鋼の物性値

No	項目	物質性の出典等
1	熱伝導率	ASME Sec.III Dev.1 (1989) Appendices TABLE I - 4.0 ⁽¹⁾ の 2・1/4Cr-1MoのThermal Conductivity (熱伝導率) (第6.19図参照)
2	比重	JIS G 3193 (1977) にもとづき, 7850 (kgf/m ³) とする。
3	比熱	ASME Sec.III Dev.1 (1989) Appendices TABLE I - 4.0 ⁽¹⁾ の 2・1/4Cr-1MoのThermal Diffusivity (温度伝導率) の値 と上記の熱伝導率及び比重から次式により求める。 (比熱) = (熱伝導率) / (比重×温度伝導率) (第6.20図参照)
4	縦弾性係数	高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準等 ⁽²⁾ (科学技術庁 原子力安全局 内規 平成2年12月) の別表1.8の2・1/4Cr-1Moの値による。 (第6.21図参照)
5	ポアソン比	高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準等 ⁽²⁾ (科学技術庁 原子力安全局 内規 平成2年12月) の別表1.9の2・1/4Cr-1Moの値により, 0.3とする。
6	熱膨張係数	高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準等 ⁽²⁾ (科学技術庁 原子力安全局 内規 平成2年12月) の別表1.10の2・1/4Cr-1Moの値による。 (第6.22図及び第6.23図参照)

第6.7表 ハスティロイ XRの物性値

No	項目	物質性の出典等
1	熱伝導率	ASME Sec.III Div.1 (1989) Appendices TABLE I - 4 ⁽¹⁰⁾ の Ni - Cr - MoO - Fe (Alloy X) [ハスティロイ X] の Thermal Conductivity (熱伝導率) の値を用いる。 なお、815 (°C) 以上の温度については、外挿値を用いる。 (第6.19図参照)
2	比重	ASME Sec.II (1989) のハスティロイ X (SB - 435他) ⁽¹¹⁾ の値を用いる。すなわち、8230 (kgf/m³) とする。
3	比熱	ASME Sec.III Div.1 (1989) Appendices TABLE I - 4.0 ⁽¹⁰⁾ の Ni - Cr - MoO - Fe (Alloy X) [ハスティロイ X] の Thermal Diffusivity (温度伝導率) の値と上記の熱伝導率及び比重から次式により求める。 $(比熱) = (熱伝導率) / (比重 \times 温度伝導率)$ なお、815 (°C) 以上の温度については、外挿値を用いる。 (第6.20図参照)
4	縦弾性係数	高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準等 ⁽¹¹⁾ (科学技術庁 原子力安全局 内規 平成2年12月) の別表1.8のハスティロイ XRの値による。 (第6.21図参照)
5	ポアソン比	高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準等 ⁽¹¹⁾ (科学技術庁 原子力安全局 内規 平成2年12月) の別表1.9のハスティロイ XRの値により、0.3とする。
6	熱膨張係数	高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準等 ⁽¹¹⁾ (科学技術庁 原子力安全局 内規 平成2年12月) の別表1.8のハスティロイ XRの値による。 (第6.22図及び第6.23図参照)

第6.8表 ヘリウムの物性値

$$\left\{ \begin{array}{l} 0.2\text{bar} \leq P \leq 200\text{bar} \\ 0^\circ\text{C} \leq T \leq 3000^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

物性値	記号	計算式	単位	備考
密度	ρ	$\rho = \frac{P}{RT} - \rho^2 \cdot B(T) - \rho^3 \cdot C(T)$ $B(T) = 4.5 \times 10^{-4} + \frac{5.42}{1890 + T}$ $C(T) = 1.7 \times 10^{-7} + \frac{4.2 \times 10^{-3}}{1890 + T}$ $+ \frac{25.3}{(1890 + T)^2}$	kg/m^3	$R = \text{気体定数} = 0.0207723 \text{ bar} \cdot \text{m}^3 / \text{kg K}$ $P : \text{圧力 (bar)}$ $T : \text{温度 (K)}$ $C(T) = 0$ としたときの相対誤差 (%) $P = 40, T > 400^\circ\text{C}$ 0.004% 以下 $P = 100, T > 400^\circ\text{C}$ 0.03% 以下
定圧比熱	C_p	$C_p = \frac{5}{2} R = 1.240$	$\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$	
熱伝導率	k	$\frac{P \leq 1 \text{ bar}}{k = k_0}$ $\frac{P \leq 1 \text{ bar}}{k = k_0 + 2.33 \times 10^{-4} \rho + 2.39 \times 10^{-6} \cdot \rho^2}$ $k_0 = 2.97 \times 10^{-3} T^{0.69} + \frac{9.23 \times 10^9 \times (T - 273.16)}{(T - 273.16)^5 + 4.29 \times 10^{14}}$	$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$	$P : \text{圧力 (bar)}$ $T : \text{温度 (K)}$ $\rho : \text{密度 (kg/m}^3\text{)}$
粘性係数	η	$\frac{P \leq 1 \text{ bar}}{\eta = \eta_0}$ $\frac{P \leq 1 \text{ bar}}{\eta = \eta_0 + 2.67 \times 10^{-10} \rho^2}$ $\eta_0 = 3.78 \times 10^{-7} T^{0.69} + \frac{5 \times 10^{-7}}{0.52 \times \frac{T}{569.6}}$	$\text{N} \cdot \text{S/m}^2$	$P : \text{圧力 (bar)}$ $T : \text{温度 (K)}$ $\rho : \text{密度 (kg/m}^3\text{)}$

第6.9表 各応力及び伝熱管温度に関する各部位の関係

(a) 第1層

項目	伝熱管 部位 ↓	下部連絡 ^D 管自重サ ポート部	下部連絡管 下部R部	下部連絡管 上部R部	下部連絡管 第1支持位置
自重により発生する 応力 (kg/mm ²)	-	0.04	0.02	0.04	
熱膨張による発生する 応力 (kg/mm ²)	-	1.99	2.32	1.54	
伝熱管温度 (°C)	-	910	924	914	

(b) 第6層

項目	伝熱管 部位 ↓	下部連絡 ^D 管自重サ ポート部	下部連絡管 下部R部	下部連絡管 上部R部	下部連絡管 第1支持位置
自重により発生する 応力 (kg/mm ²)	0.21	0.08	0.05	0.10	
熱膨張による発生する 応力 (kg/mm ²)	1.14	0.65	0.90	0.65	
伝熱管温度 (°C)	908	910	924	908	

- 1) 第1層伝熱管には、自重サポートを設けない。
- 2) 熱過渡荷重により発生する応力は、伝熱管内外面の集伝達率により支配され、伝熱管内面の熱伝達率が各部で同程度の値であることから、伝熱管外面の熱伝達率を、各部位における熱過渡荷重により発生する応力の関係を表す値とする。

第 6.10 表 (1 / 2) 伝熱管 1 次応力の制限 (内面)

運転状態		評価値		項目		温度	時間	計算値	許容値	備考
						(°C)	(hr)			
設計条件	$\leq P_m >$ $\leq P_t + P_b >$	$\leq S_0$	$\leq 1.5 S_0$			955.	----	0.17	0.21	
						955.	----	0.27	0.31	
運転状態 I, II. (T)	$\leq P_m + P_m^* >$ $\leq P_m >$ $\leq P_L^* + P_L^* + P_b + P_b^* >$ $\leq P_L + P_b >$	$\leq S_m$	$\leq S_t$	$\leq K_s S_m$	$\leq K_t S_t$	933. 933. 933. 933.	9.50E+02 9.50E+02	0.2 0.3 0.3 0.3	8.3 0.90 12.5 1.0	$K_s = 1.50$ $K_t = 1.22$
運転状態 III	$\leq P_m + P_m^* >$ $\leq P_m >$ $\leq P_L^* + P_L^* + P_b + P_b^* >$ $\leq P_L + P_b >$	$\leq 1.2 S_m$	$\leq S_t$	$\leq 1.2 K_s S_m$	$\leq K_t S_t$	933. 933. 933. 933.	4.50E+01 4.50E+01	0.3 0.3 1.0 0.4	10.0 1.9 15.1 2.4	$K_s = 1.50$ $K_t = 1.22$
運転状態 I, II, III. (T)	$\sum (t_i / t_{ml})$ $\sum (t_j / t_{bj})$	$\leq B$	≤ 1.0			794. 793. 794.	5.61E+04 4.32E+04 2.26E+03	0.37 0.37 0.97	1.00 1.00 1.00	$B = 1.0$
運転状態 IV	$\leq P_m + P_m^* >$ $\leq P_m >$ $\leq P_L^* + P_L^* + P_b + P_b^* >$ $\leq P_L + P_b >$	$\leq S_{mw}$	$\leq 2 S_R / 3$	$\leq K_s S_{mw}$	$\leq 2 K_t S_R / 3$	933. 933. 933. 933.	5.00E+00 5.00E+00	2.4 2.4 1.7 1.7	16.7 3.3 25.0 3.7	$S_{mw} = 2 S_u / 3$
運転状態 I, II, III, IV. (T)	$\sum (t_i / t_{rl})$ $\sum (t_j / t_{rbj})$	$\leq B_R$	≤ 1.0			794. 933. 794.	5.61E+04 4.32E+04 2.26E+03	0.36 0.36 0.39	1.00 1.00 1.00	$B_R = 1.0$
試験状態	$\leq P_m + P_m^* >$ $\leq P_L^* + P_L^* >$ $\leq P_L + P_b + P_b^* >$	$\leq 0.95 S_y$	$\leq 1.35 S_y$	$\leq 1.35 S_y$		100, 100, 100,	----	0.2 0.2 0.3	19.9 29.9 29.9	

注記 (1) (T) は、試験状態のうち構造等の技術基準別表第2の適用温度範囲を超える試験状態を示す。

第6.10表 (2/2) 伝熱管 1次応力の制限(外面)

		評価項目		温度	時間	計算値	許容値	備考
運転状態				(°C)	(hr)			
段階条件	$\leq P_m >$ $\leq P_L + P_b >$	$\leq S_0$ $\leq 1.5 S_0$		955, 955,	---- ----	0.17 0.27	0.21 0.31	
運転状態 I, II. (T)	$\leq P_m + P_m^*$	$\leq S_m$		933, 933, 933,	$9.50E+02$ ---- $9.50E+02$	0.2 0.17 0.3	8.3 0.90 12.5	
	$\leq P_m$	$\leq S_t$						
	$\leq P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ $\leq P_L + P_b >$	$\leq K_s S_m$ $\leq K_t S_t$						$K_s = 1.50$ $K_t = 1.22$
運転状態 III	$\leq P_m + P_m^*$	$\leq 1.2 S_m$		933, 933, 933,	$4.50E+01$ ---- $4.50E+01$	0.3 0.3 0.4	10.0 1.9 15.1	
	$\leq P_m$	$\leq S_t$						
	$\leq P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ $\leq P_L + P_b >$	$\leq 1.2 K_s S_m$ $\leq K_t S_t$						$K_s = 1.50$ $K_t = 1.22$
運転状態 I, II, III. (T)	$\Sigma (t_i / t_{ml})$	$\leq B$		794, 933, 794,	$5.61E+04$ $4.32E+04$ $2.26E+03$	0.37 0.37 0.97	1.00 1.00 1.00	$B = 1.0$
	$\Sigma (t_j / t_{bj})$	≤ 1.0						
運転状態 IV	$\leq P_m + P_m^*$	$\leq S_{mW}$		933, 933, 933,	$5.00E+00$ ---- $5.00E+00$	2.4 2.4 1.7	16.7 3.3 25.0	$S_{mW} = 2 S_u / 3$
	$\leq P_m$	$\leq 2 S_R / 3$						
	$\leq P_L + P_L^* + P_b + P_b^*$ $\leq P_L + P_b >$	$\leq K_s S_{mW}$ $\leq 2 K_t S_R / 3$						$K_s = 1.50$ $K_t = 1.12$
運転状態 I, II, III, IV. (T)	$\Sigma (t_i / t_{RI})$	$\leq B_R$		794, 933, 794,	$5.61E+04$ $4.32E+04$ $2.26E+03$	0.36 0.36 0.39	1.00 1.00 1.00	$B_R = 1.0$
	$\Sigma (t_j / t_{RBj})$	≤ 1.0						
試験状態	$\leq P_m + P_m^*$	$\leq 0.9 S_Y$		100, 100, 100,	----	0.2 0.2 0.3	19.9 29.9 29.9	
	$\leq P_L + P_L^*$ $\leq P_L + P_t^* + P_b + P_b^*$	$\leq 1.35 S_Y$ $\leq 1.35 S_Y$						

注記 (1) (T) は、試験状態のうち構造等の技術基準別表第2の適用温度範囲を超える試験状態を示す。

第 6.11 表 記号の説明

記 号	内 容
B	運転状態 I, II 及び III にわたる使用分母の制限値
B _R	運転状態 I, II, III 及び IV にわたる使用分母の制限値
K _s	断面形状係数
K _t	クリープ材料に関する形状係数
P _b	一次曲げ応力又は長期荷重による一次曲げ応力
P _b *	短期荷重による一次曲げ応力
P _L	一次局部膜応力又は長期荷重による一次局部の膜応力
P _L *	短期荷重による一次局部膜応力
P _m	一次一般膜応力又は長期荷重による一次一般膜応力
P _m *	短期荷重による一次一般膜応力
S _o	最大許容応力強さ
S _m	材料の短時間特性に基づく設計応力強さ
S _m IV	運転状態 IV における応力強さ
S _R	設計クリープ破断応力強さ
S _t	材料のクリープ特性に基づく設計応力強さ
S _u	設計引張強さ
S _y	設計降伏点
t _{bi}	温度 T _j , 応力強さ ($\langle P_L + P_b \rangle / K_s$) j に対して別表 1.3 ⁽²⁾ に定める許容時間 (h)
t _i	壁厚平均金属温度が T _i , 一次一般膜応力強さが $\langle P_m \rangle$ i である負荷状態 i の異積持続時間 (h)
t _j	壁厚平均金属温度が T _j , 一次一般膜応力強さが $\langle P_L + P_b \rangle$ j である負荷状態 j の異積持続時間 (h)
t _{mi}	温度 T _i , 応力強さ $\langle P_m \rangle$ i に対して別表 1.3 ⁽²⁾ に定める許容時間 (h)
t _R	温度 T _j , 応力強さ $1.5 \langle P_m \rangle$ i に対して別表 1.5 ⁽²⁾ に定める許容時間 (h)
t _{Rbi}	温度 T _j , 応力強さ $1.5 (\langle P_L + P_b \rangle / k_s)$ j に対して別表 1.5 ⁽²⁾ に定める許容時間 (h)

第 6.12 表 (1 / 2) 伝熱管 累積非弾性ひずみの制限 (内面)

評価項目	計算値	許容値
$\varepsilon_{AV} \leq 0.01$	0.0013	0.0100
$\varepsilon_{SV} \leq 0.02$	0.0022	0.0200

ε_{AV} : 壁厚平均ひずみ
 ε_{SV} : 壁厚内の等価線形ひずみ分布により定める表面ひずみ

第 6.12 表 (2 / 2) 伝熱管 累積非弾性ひずみの制限 (外面)

評価項目	計算値	許容値
$\varepsilon_{AV} \leq 0.01$	0.0013	0.0100
$\varepsilon_{SV} \leq 0.02$	0.0016	0.0200

ε_{AV} : 壁厚平均ひずみ
 ε_{SV} : 壁厚内の等価線形ひずみ分布により定める表面ひずみ

第 6.13 表 (1 / 2) 伝熱管 累積渡れ損傷係数の算定 (内面)

$$\epsilon_t = K_t' \cdot \epsilon_n + K_t c + K_T \cdot \epsilon_F$$

$$K_t' = K^2 (S^* / \bar{S})$$

ひずみサイクル	最高金属 温度 (°C)	回数 n	ϵ_n	ϵ_c	ϵ_F	K	K_t'	ϵ_t	n/N_d	備考
			—	—	S_p (kg/mm ²)	—	K_e (kg/mm ³)	—		
1C03 T	932.	40	2.288E-04	7.650E-04	2.237E-06	1.02	1.02	1.017E-03	2384	0.017 C
1C03 C	932.	134	2.212E-04	7.650E-04	2.077E-06	1.02	1.02	1.010E-03	2465	0.054 C
1E02-S1 C	932.	1	3.674E-04	3.165E-05	4.748E-06	1.03	1.03	4.155E-04	1000000	0.000 C
1E02 C	932.	14	3.241E-04	1.583E-05	4.633E-06	1.03	1.03	3.560E-04	1000000	0.000 C
1F02 C	932.	15	3.005E-04	1.583E-05	6.905E-06	1.07	1.07	3.439E-04	1000000	0.000 C
1A02 C	789.	52	2.853E-04	2.524E-05	6.115E-06	1.03	1.03	3.252E-04	1000000	0.000 C
3A01 C	932.	9	2.702E-04	2.335E-05	1.712E-06	1.05	1.05	3.092E-04	1000000	0.000 B
1A01 C	789.	41	2.739E-04	1.031E-06	7.593E-06	1.03	1.03	2.896E-04	1000000	0.000 C
1A01 2B01	932.	11	7.655E-05	7.248E-06	6.741E-06	1.02	1.02	9.221E-05	1000000	0.000 C
1A01 2A01	932.	174	5.301E-05	2.002E-05	1.120E-05	1.05	1.05	8.779E-05	1000000	0.000 C
S1	932.	200	1.030E-04	0.0	0.0	1.00	1.00	1.030E-04	1000000	0.000 A

$$K_T = 1.00$$

$$D_f = \sum_i (n_i / N_d) = 0.072$$

注記 (1) 備考の記号の意味は、次のとおりである。

- A : 材料強度基準等に示す許容ひずみ範囲 (A)
- B : 材料強度基準等に示す許容ひずみ範囲 (B)
- C : 材料強度基準等に示す許容ひずみ範囲 (C)
- D : 林道等の技術基準別表第2による。

(2) 二段表示記号の下段 (S_p , K_e , S_1) は、ひずみサイクルが構造等の技術基準別表第2の温度範囲内にある場合に用いる。

第6.13表 (2/2) 伝熱管 累積疲れ損傷係数の算定(外面)

$$\epsilon_t = K_t' \epsilon_n + K_t c + K_t \epsilon_F$$

$$K_t' = K^2 (S^*/\bar{S})$$

ひずみサイクル	最高金属 温度 (°C)	回数 n	ϵ_n		ϵ_c		ϵ_F		K		K_t'		ϵ_t		Nd	n/Nd	備考
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
1C03	T	935.	40	1.520E-04	8.415E-04	2.249E-06	1.01	1.01	1.003E-03	2.459	0.016	C	—	—	—	—	—
1C03	1E02-S1	935.	1	1.108E-04	8.763E-04	2.112E-06	1.00	1.00	9.892E-04	2.628	0.000	C	—	—	—	—	—
1C03	1E02	935.	14	1.260E-04	8.589E-04	2.109E-06	1.00	1.00	9.870E-04	2.655	0.005	C	—	—	—	—	—
1C03	C	935.	1119	1.401E-04	8.415E-04	2.102E-06	1.00	1.00	9.837E-04	2.699	0.044	C	—	—	—	—	—
1A02	C	799.	51	1.701E-04	2.807E-05	5.800E-06	1.00	1.00	2.040E-04	1000000	0.000	C	—	—	—	—	—
1F02	C	935.	15	1.799E-04	1.743E-05	5.811E-06	1.00	1.00	2.032E-04	1000000	0.000	C	—	—	—	—	—
3A01	C	935.	9	1.751E-04	2.563E-05	1.713E-06	1.00	1.00	2.025E-04	1000000	0.000	B	—	—	—	—	—
2A01	C	935.	72	1.581E-04	2.087E-05	1.507E-06	1.00	1.00	1.805E-04	1000000	0.000	B	—	—	—	—	—
1A01	2A01	935.	1118	6.445E-05	2.202E-05	1.072E-05	1.00	1.00	9.720E-05	1000000	0.000	C	—	—	—	—	—
S1		935.	200	1.031E-04	0.0	0.0	1.00	1.00	1.031E-04	1000000	0.000	A	—	—	—	—	—
										Df = $\sum_i (n_i / Nd_i) = 0.066$							
										K _T = 1.00							

注記 (1) 備考の記号の意味は、次のとおりである。

- A: 材料強度基準等に示す許容ひずみ範囲 (A)
- B: 材料強度基準等に示す許容ひずみ範囲 (B)
- C: 材料強度基準等に示す許容ひずみ範囲 (C)
- D: 構造等の技術基準別表第2による。

(2) 二段表示記号の下段 (S_P, K_E, S₁) は、ひずみサイクルが構造等の技術基準別表第2の温度範囲内にある場合に用いる。

第6.14表 疲れ損傷に関する記号の説明

記 号	記 号 の 説 明
D _f	疲れ損傷
K	ピーク応力強さと一次+二次応力強さの比により定まる 応力集中係数
K _e	繰り返し応力強さ範囲 S _p の割増し係数
K _T	ピーク熱ひずみに関する弾性応力集中係数
K'	K ² (S* / \bar{S})
n	実際の繰り返し数
N _c	許容繰り返し数
S _e	繰り返しピーク応力強さ
S _p	ピーク応力強さ範囲
\bar{S}	公称ピーク応力範囲
S*	公称応力範囲
ϵ_c	相当クリープひずみ
ϵ_p	ピーク熱ひずみ
ϵ_n	公称ひずみ範囲
ϵ_t	ひずみ範囲

第 6.15 表 (1 / 2) 伝熱管 累積クリープ損傷係数の算定 (内面)

ひずみサイクル	温度 (°C)	時間 t^* (hr)	最高応力 (kg/mm ²)	Dc
1 A 0 1	782	2260	3.83	0.000
1 A 0 2	782	54870	6.90	0.141
1 B 0 1	782	2260	1.32	0.000
1 C 0 1	925	1740	1.47	0.001
1 C 0 3	925	42250	2.01	0.045
1 D 0 1	925	1740	0.31	0.000
1 E 0 2	925	150	0.14	0.000
1 F 0 2	925	150	0.13	0.000
$D_c = \sum_k (D_c)_k = 0.187$				

Dc : クリープ損傷

第 6.15 表 (2 / 2) 伝熱管 累積クリープ損傷係数の算定 (外面)

ひずみサイクル	温度 (°C)	時間 t^* (hr)	最高応力 (kg/mm ²)	Dc
1 A 0 1	794	2260	3.24	0.000
1 A 0 2	794	54870	3.94	0.071
1 B 0 1	794	2260	0.57	0.000
1 C 0 1	929	1740	0.52	0.001
1 C 0 3	929	42250	1.05	0.034
1 D 0 1	929	1740	0.16	0.000
1 E 0 2	929	150	0.75	0.000
1 F 0 2	929	150	0.88	0.000
$D_c = \sum_k (D_c)_k = 0.106$				

Dc : クリープ損傷

第 6.16 表 (1 / 2) 伝熱管 クリープ疲れ損傷の制限 (内面)

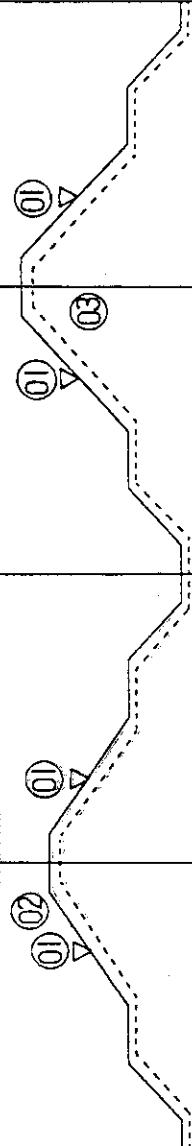
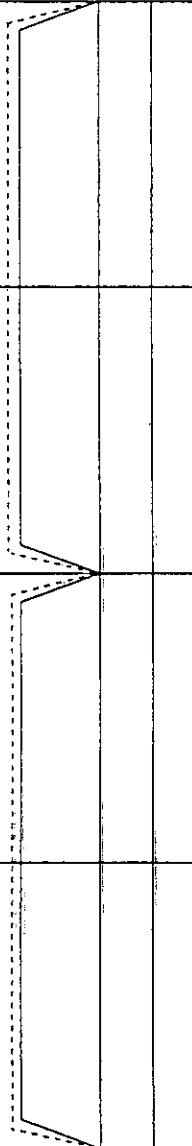
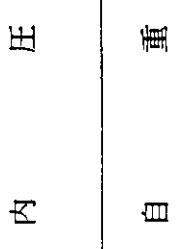
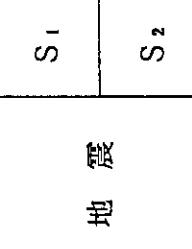
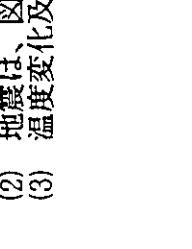
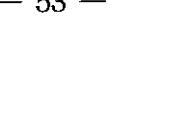
評価項目	D _f	D _c	D _f + D _c	許容値
D _f + D _c ≤ D	0.072	0.187	0.26	1.00

D_f : 疲れ損傷
D_c : クリープ損傷
D : クリープ疲れ損傷の制限値

第 6.16 表 (2 / 2) 伝熱管 クリープ疲れ損傷の制限 (外面)

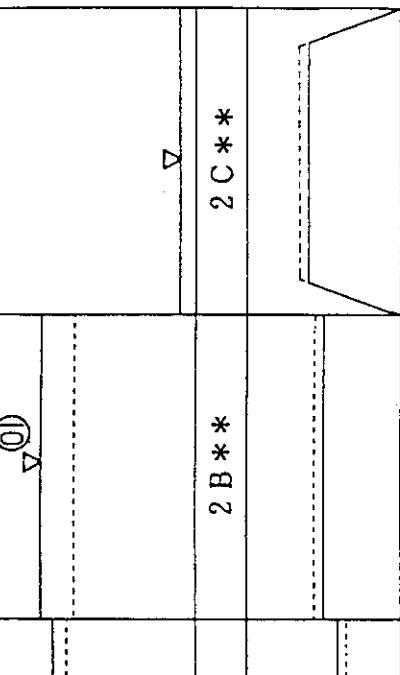
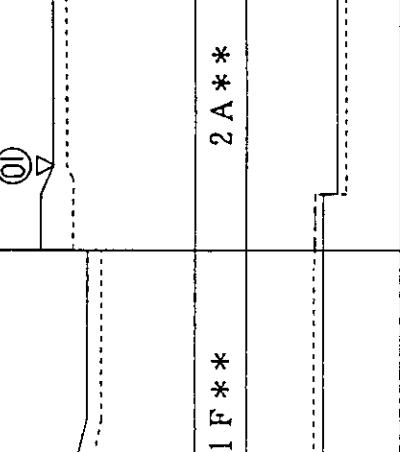
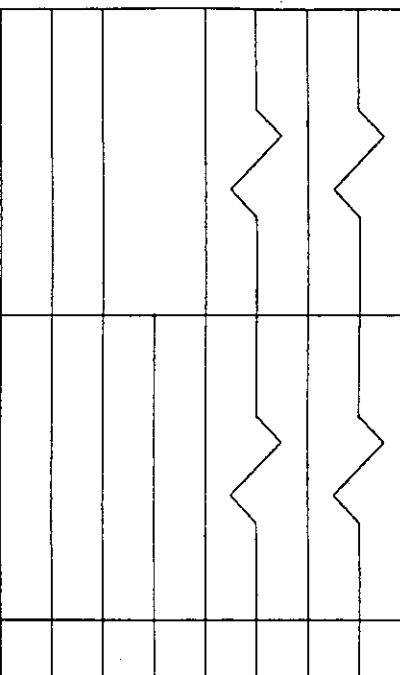
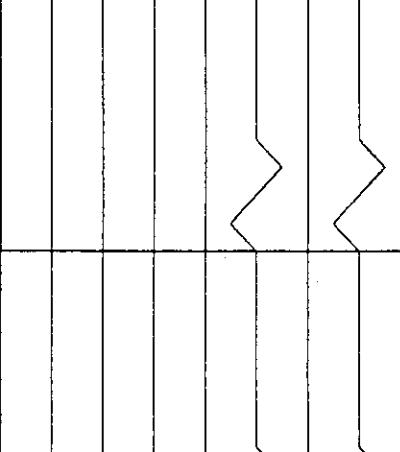
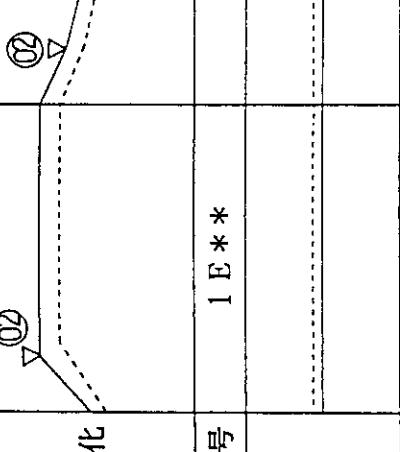
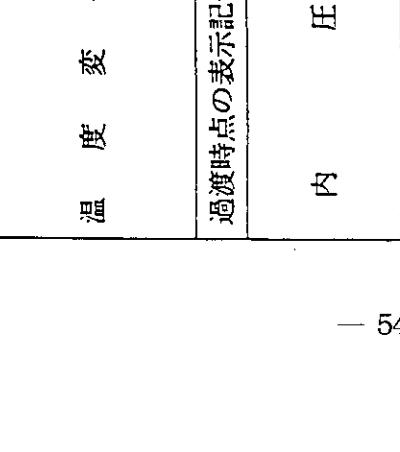
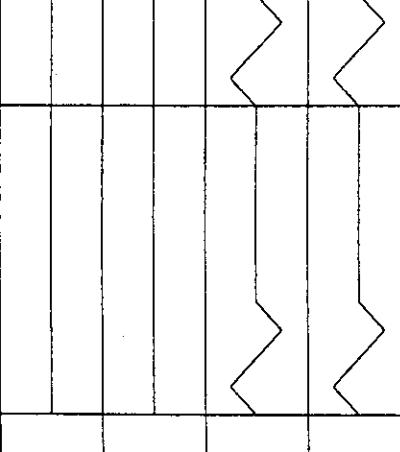
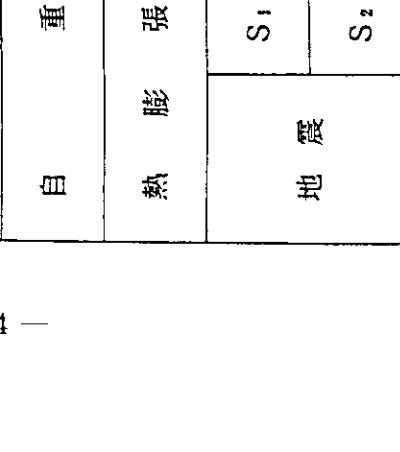
評価項目	D _f	D _c	D _f + D _c	許容値
D _f + D _c ≤ D	0.066	0.106	0.18	1.00

第 6.17 表 (1 / 2) 荷重ヒストグラム

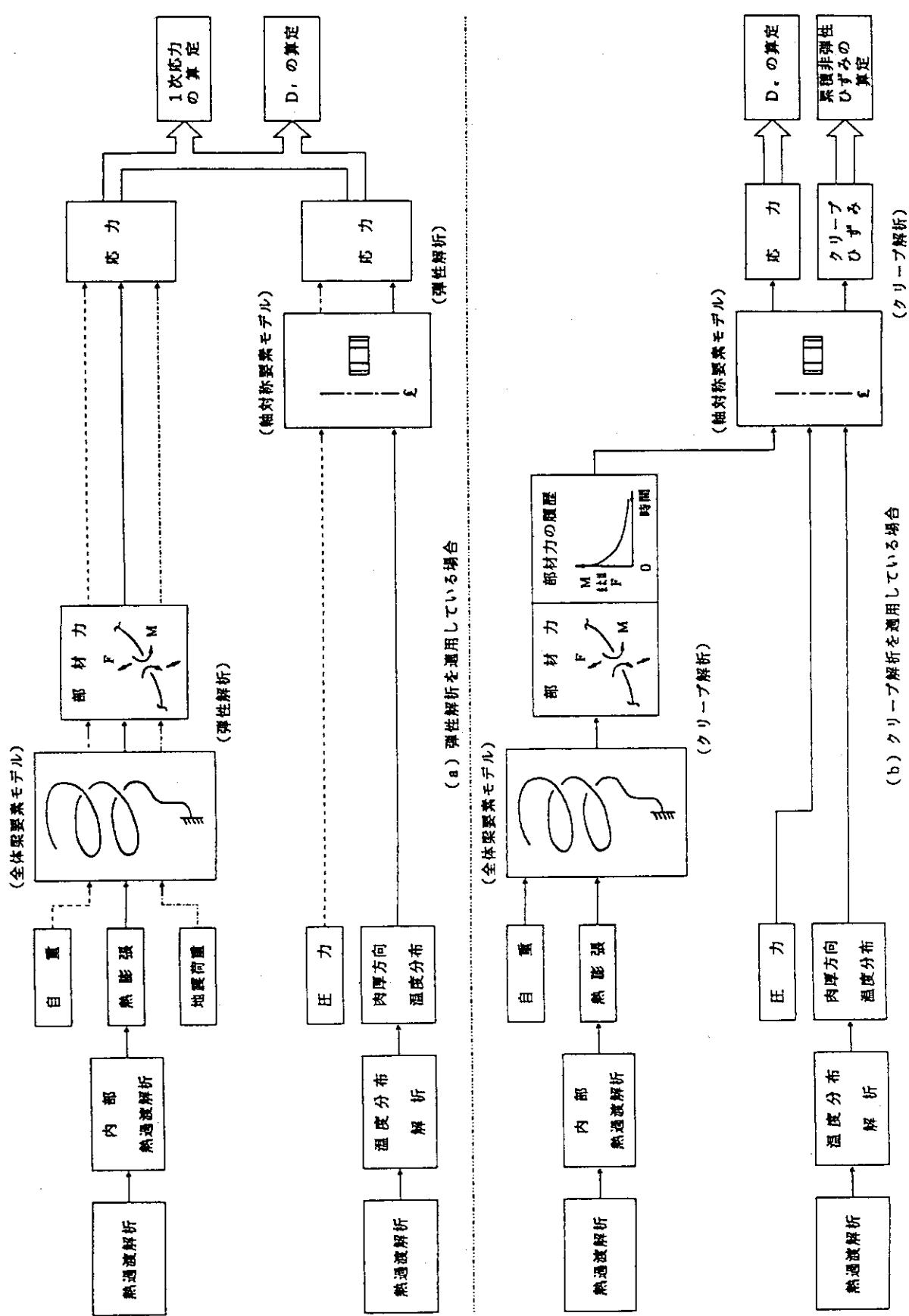
設計過渡条件	通常起動 (定格運転)	通常停止 (定格運転)	通常起動 (高温試験運転)	通常停止 (高温試験運転)
回数	226	106	174	83
温度変化				
過渡時点の表示記号	1 A **	1 B **	1 C **	1 D **
内圧				
自重				
熱膨張				
地震	S ₁	S ₂		

注記(1) 図中の○の数字は、過渡時点の表示記号の下2桁を示す。
 ただし、発生応力が小さく応力評価表に記載のない過渡時点の番号は記載しない。
 (2) 地震は、図に示す時点のうち、最も厳しい時点に1回重ね合わせる。
 (3) 温度変化及び内圧の欄の欄の実線は1次冷却材を、破線は2次冷却材を示す。

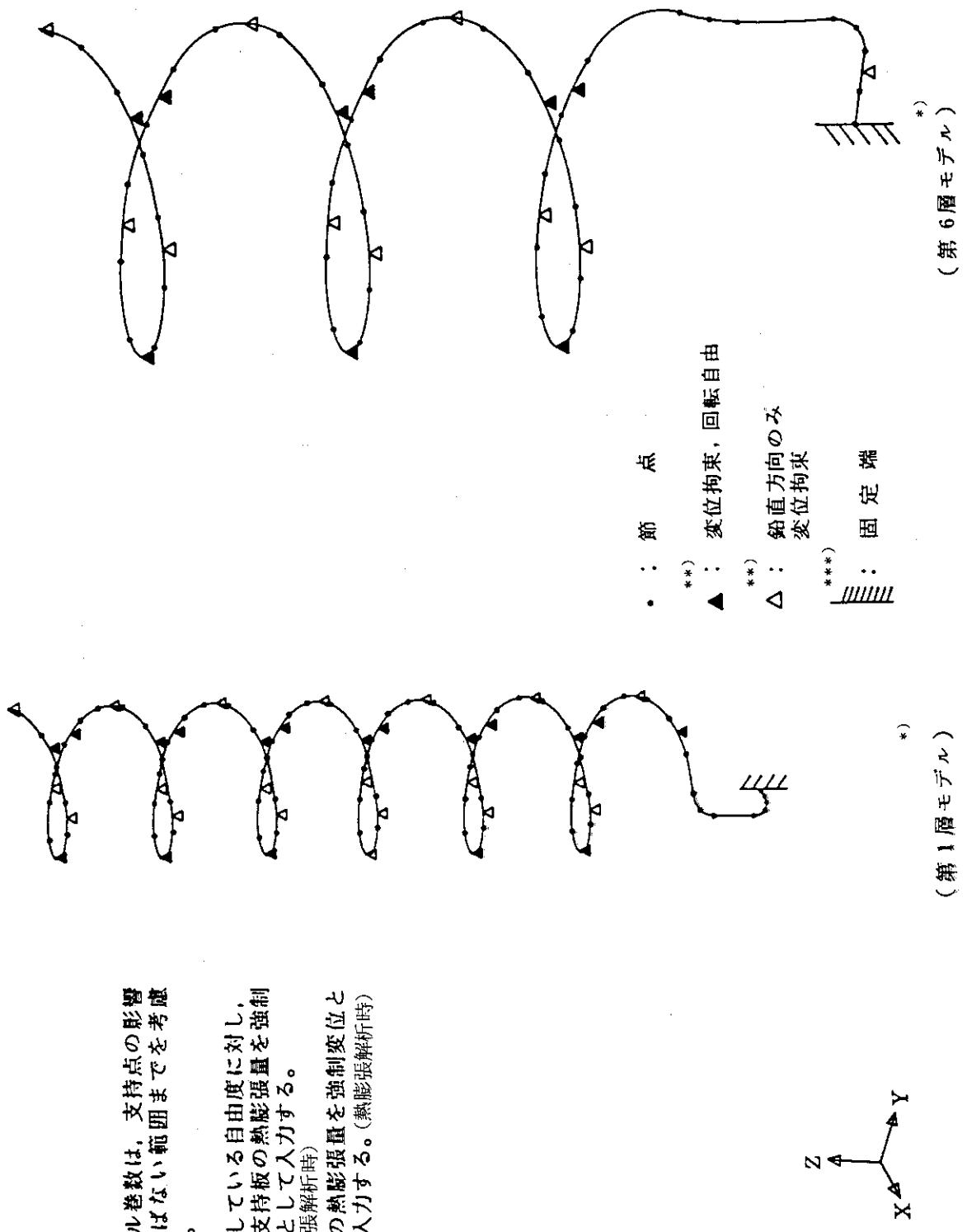
第 6.17 表 (2 / 2) 荷重ヒストグラム

設計過渡条件 回数	動特性試験(上昇) (10%ステップ出力変更)		動特性試験(下降) (0.5%/minシグ出力変更)		原子炉出力制御系異常 (定常1時間)	高温・高圧保持 (定常1時間)	耐圧漏えい試験
	15	15	15	190			
温度変化					⑩	⑪	⑫
過渡時点の表示記号	1 E **	1 F **	2 A **	2 B **	2 C **		
内圧							
自重							
熱膨張							
地震	S ₁	S ₂					

注記(1) 図中の○の数字は、過渡時点の表示記号の下2桁を示す。
 (2) ただし、発生応力が小さく応力評価表に記載のない過渡時点の番号は記載しない。
 (3) 地震は、図に示す時点のうち、最も厳しい時点に1回重ね合わせる。
 (3) 温度変化及び内圧の欄の実線は1次冷却材を、破線は2次冷却材を示す。



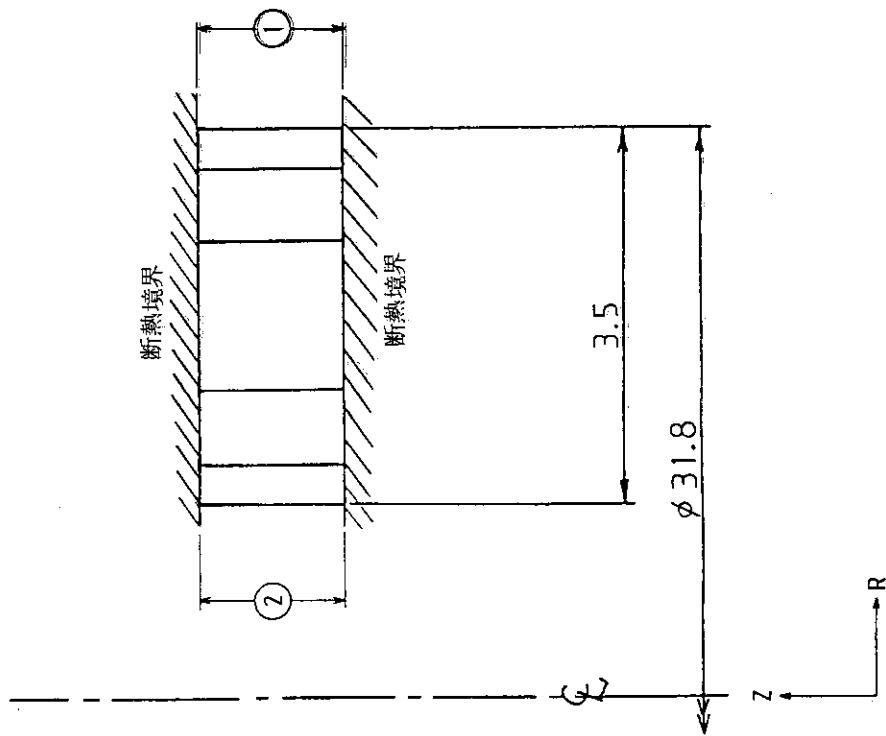
第6.1図 伝熱管の解析手順



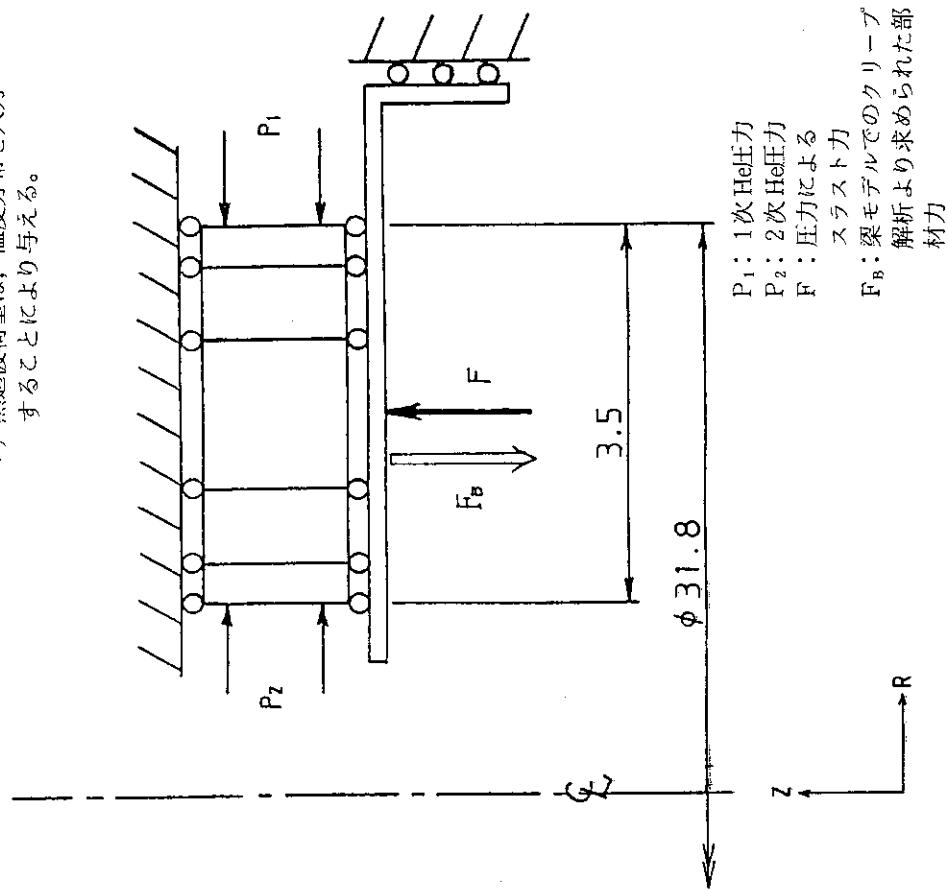
第 6.2 図 伝熱管全体梁モデル（自重、熱膨張及び地震荷重により伝熱管にかかる荷重を求める。）

①, ②に伝熱管の外側と内側の熱伝達率を入力する。

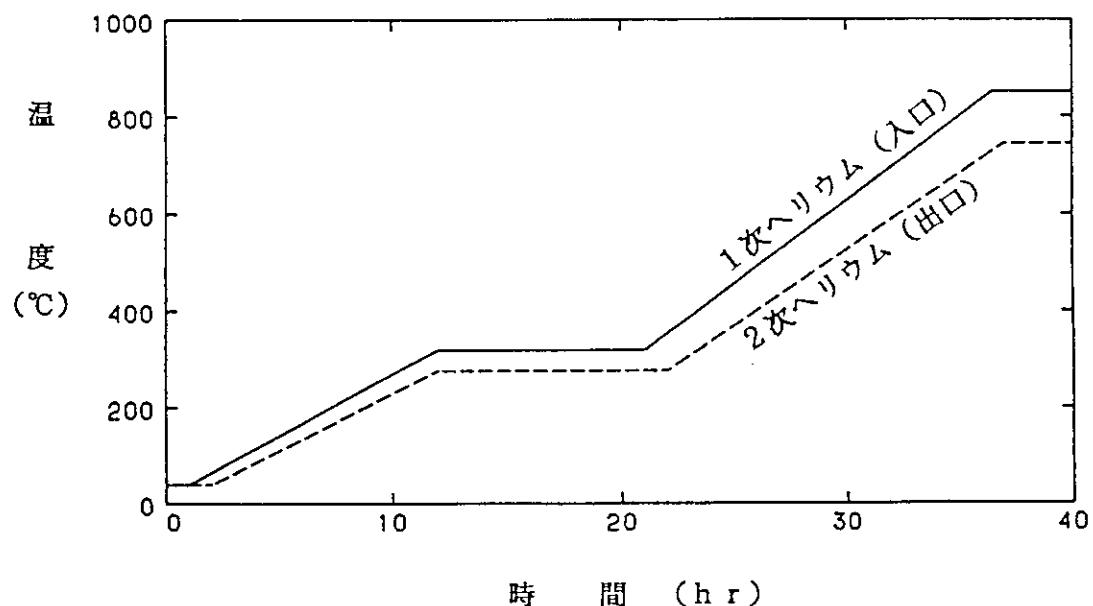
*) 熱過渡荷重は、温度分布を入力することにより与える。



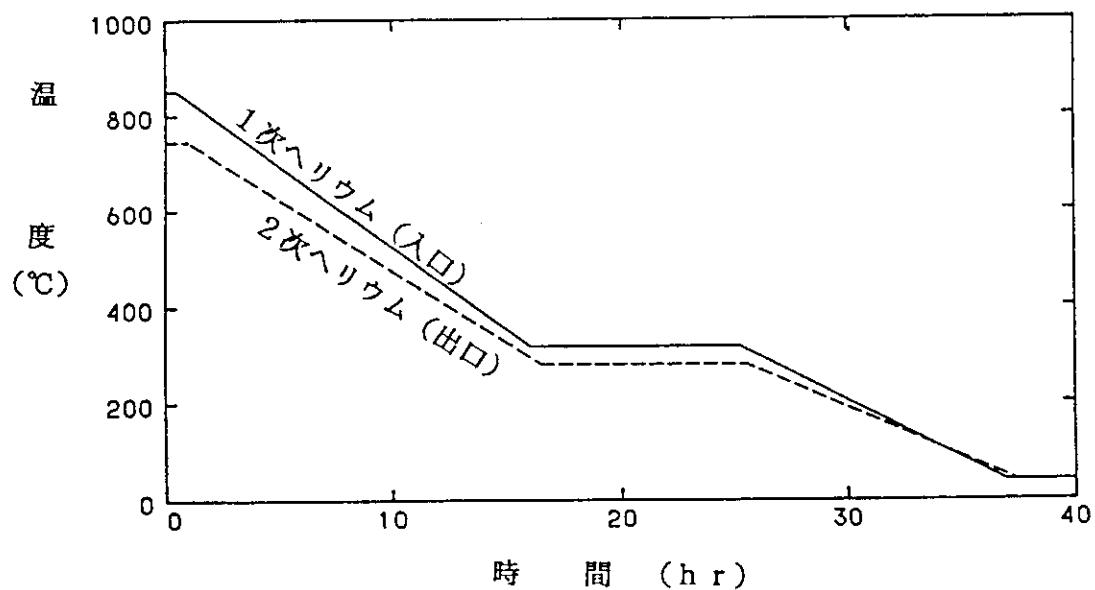
第 6.3 図 溫度分布解析モデル及び境界条件



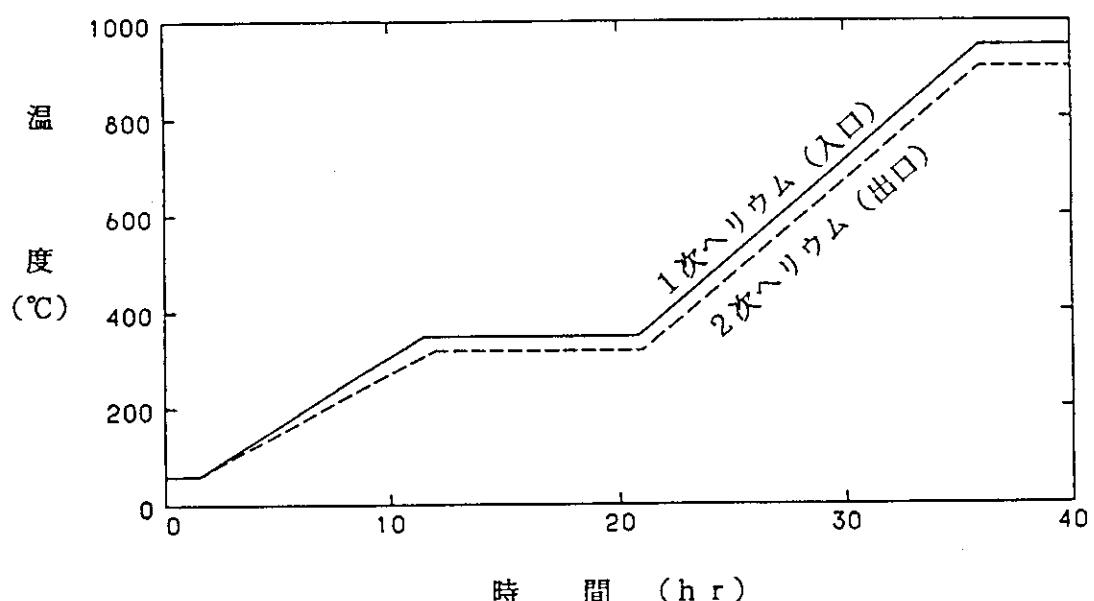
第 6.4 図 クリープ解析軸対称モデル及び境界条件



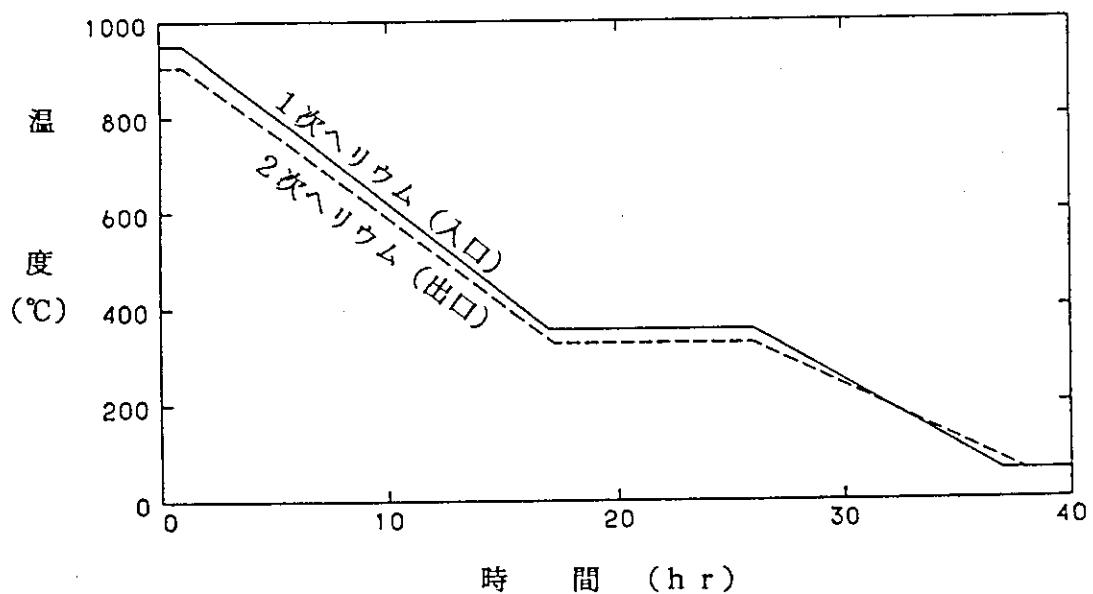
第 6.5 図 設計過渡曲線 (I-a)



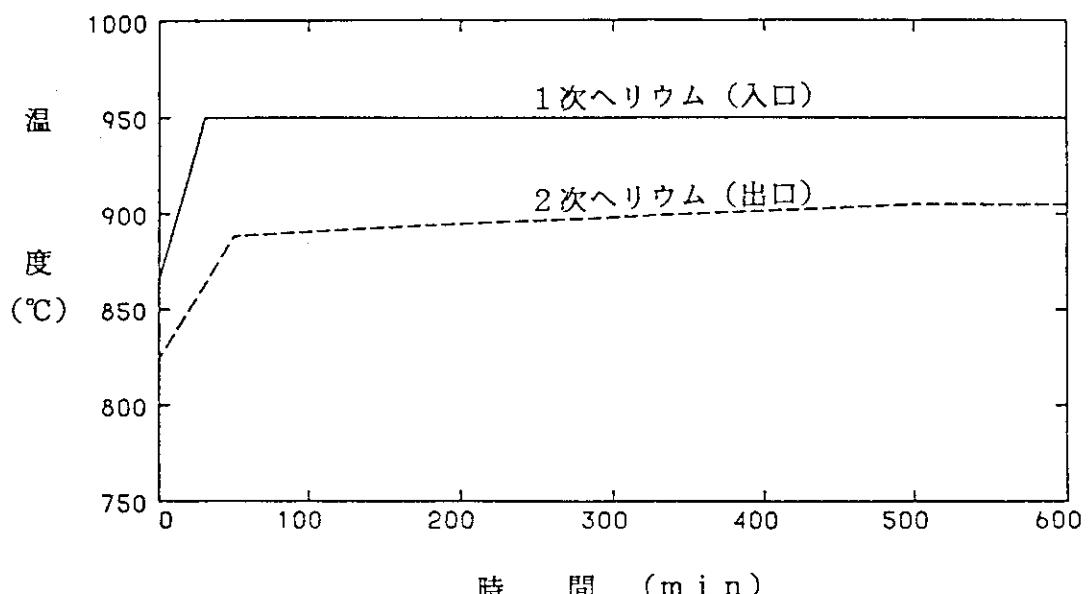
第 6.6 図 設計過渡曲線 (I-b)



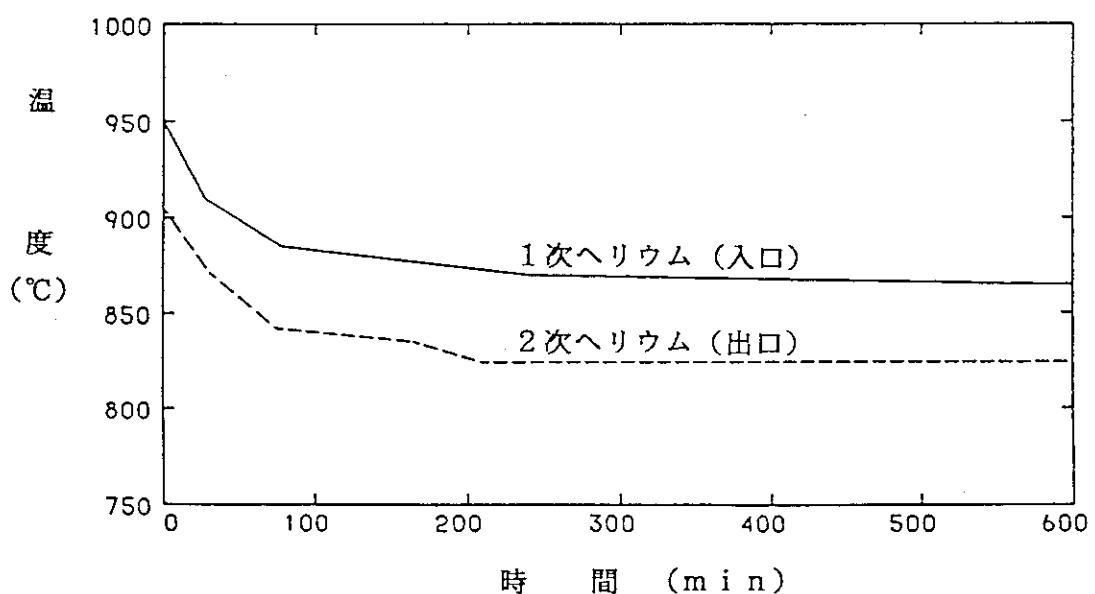
第 6.7 図 設計過渡曲線 (I - c)



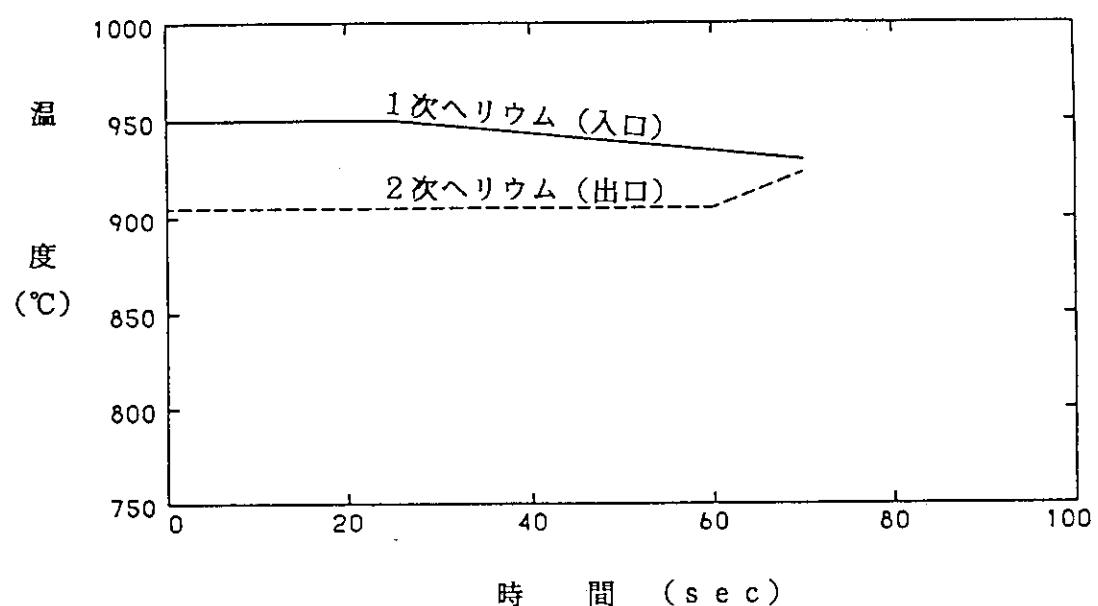
第 6.8 図 設計過渡曲線 (I - d)



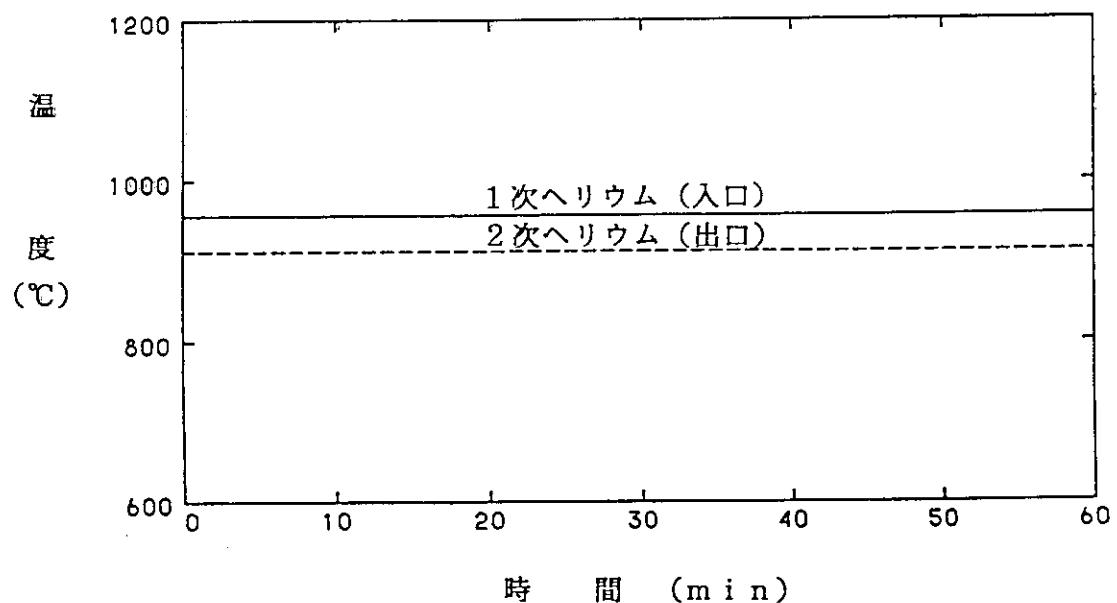
第 6.9 図 設計過渡曲線 (I - e)



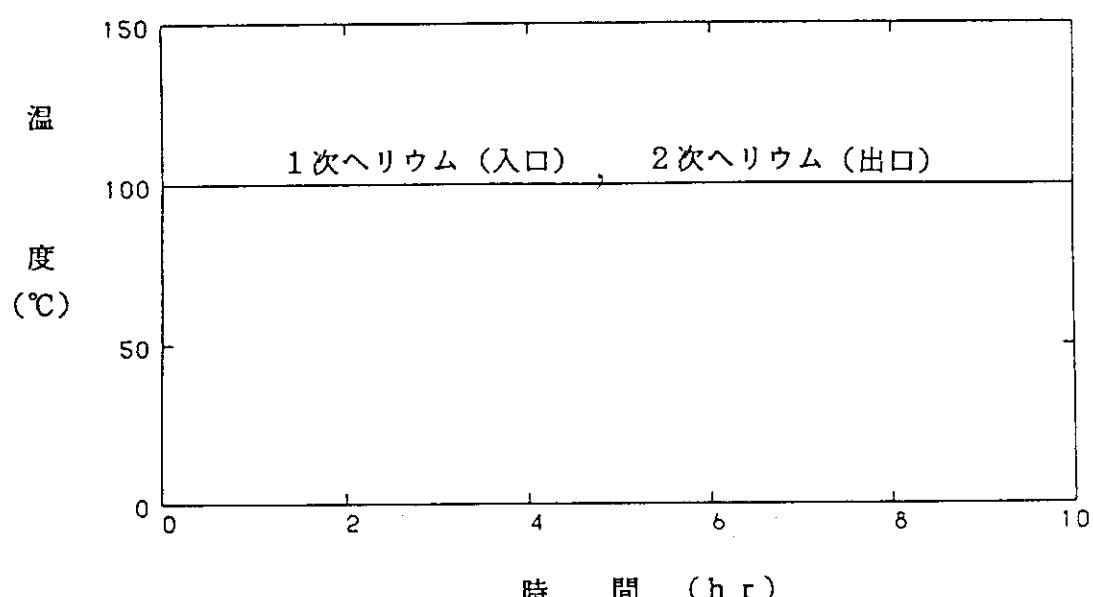
第 6.10 図 設計過渡曲線 (I - f)



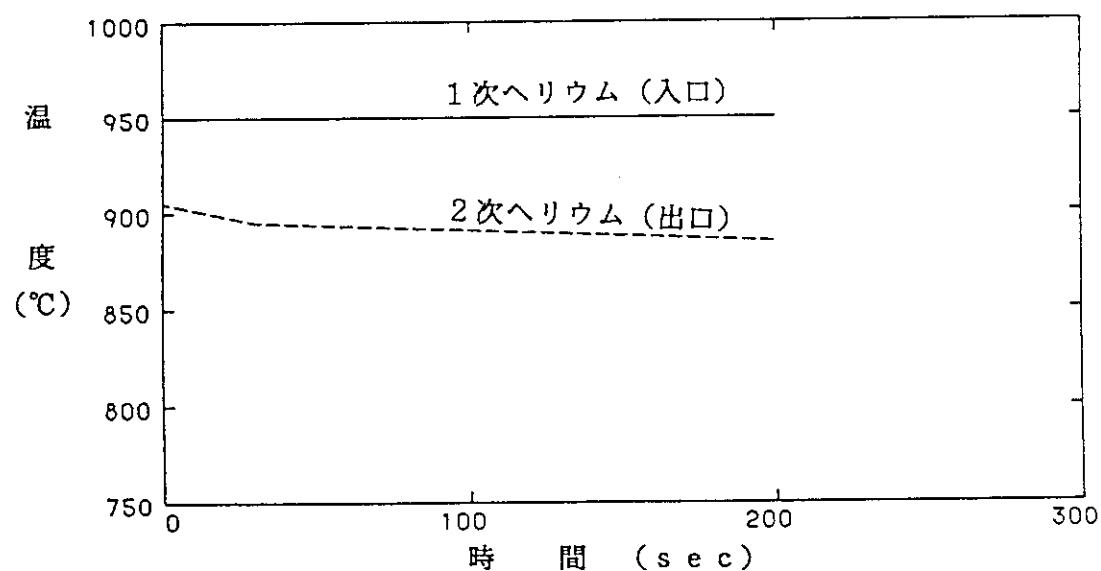
第 6.11図 設計過渡曲線 (III-a)



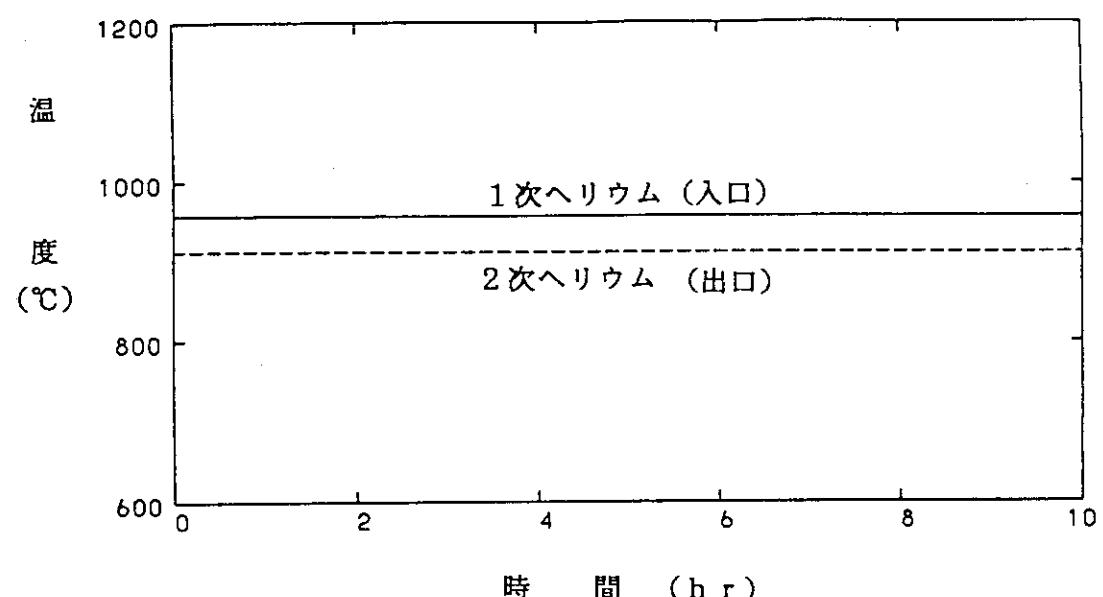
第 6.12図 設計過渡曲線 (II-b)



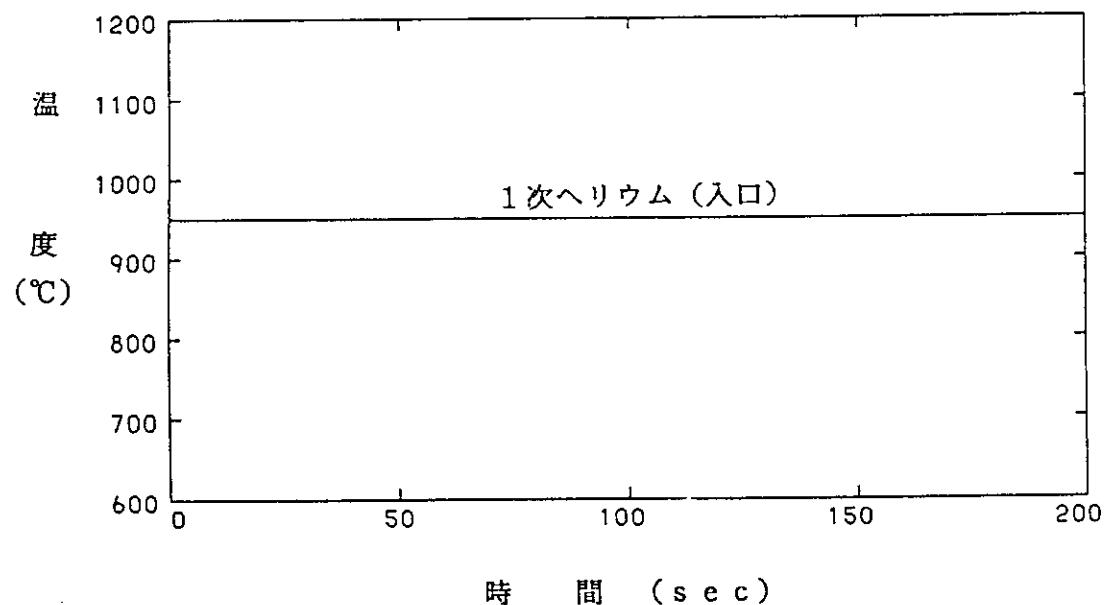
第 6.13 図 設計過渡曲線 (II-c)



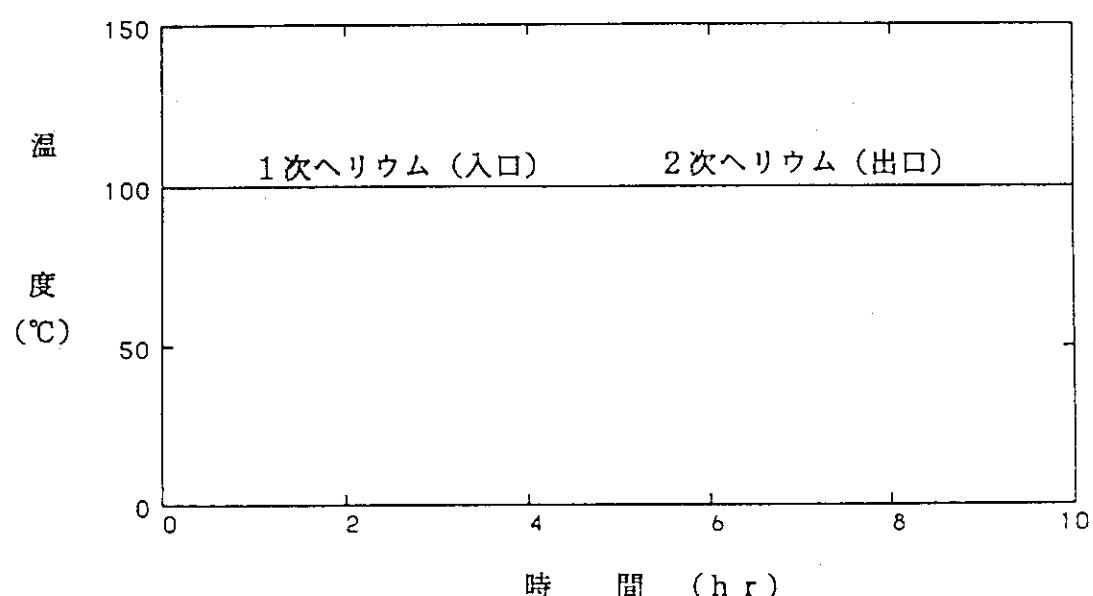
第 6.14 図 設計過渡曲線 (III-a)



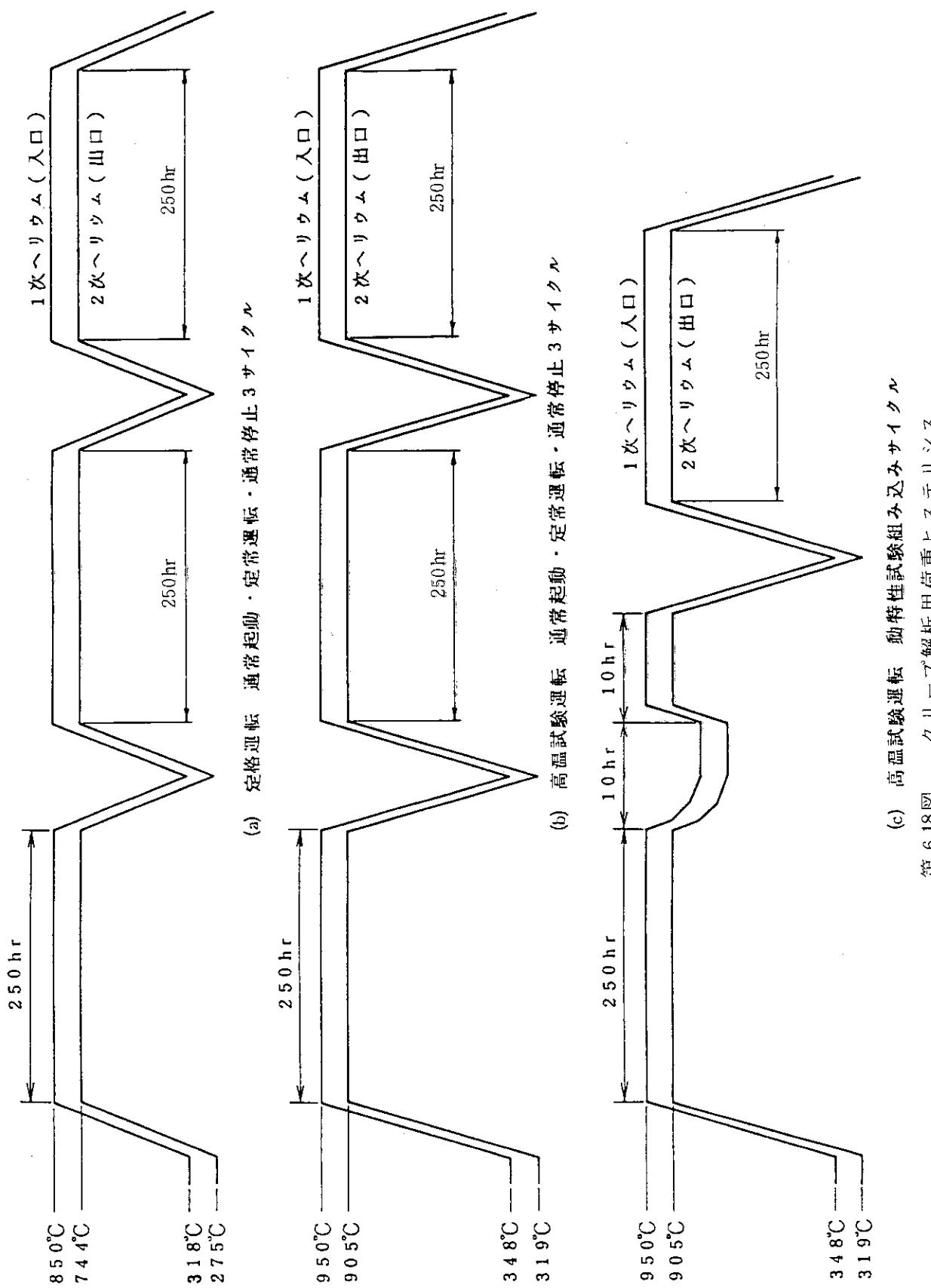
第 6.15図 設計過渡曲線 (III-b)



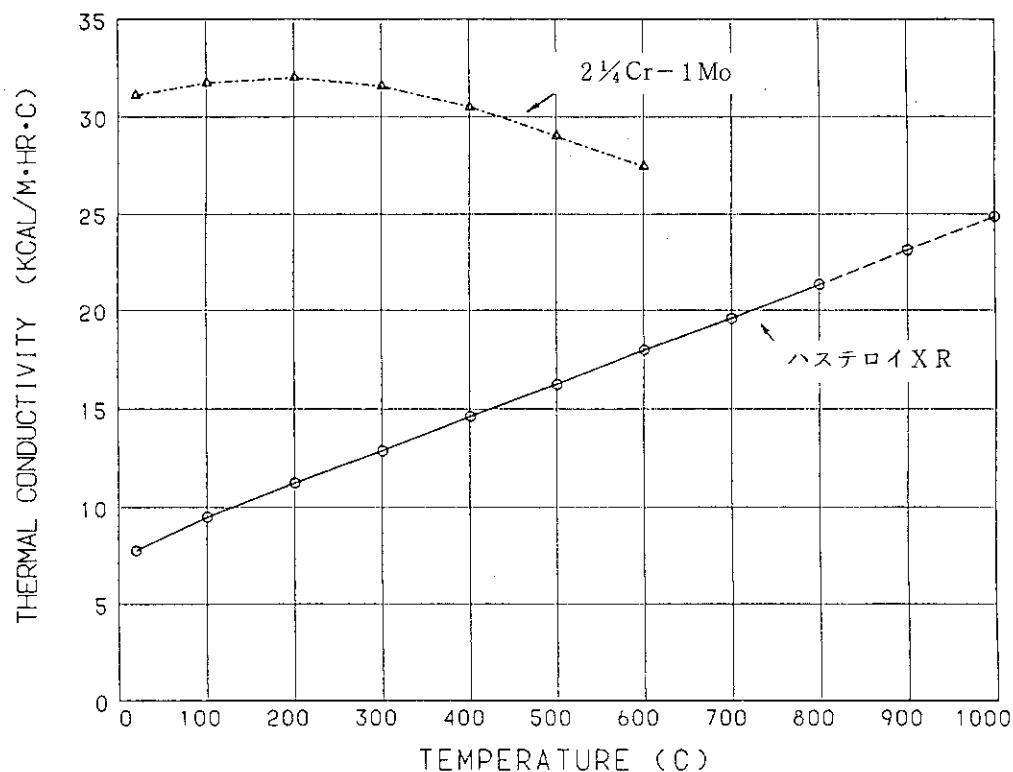
第 6.16図 設計過渡曲線 (IV-a)



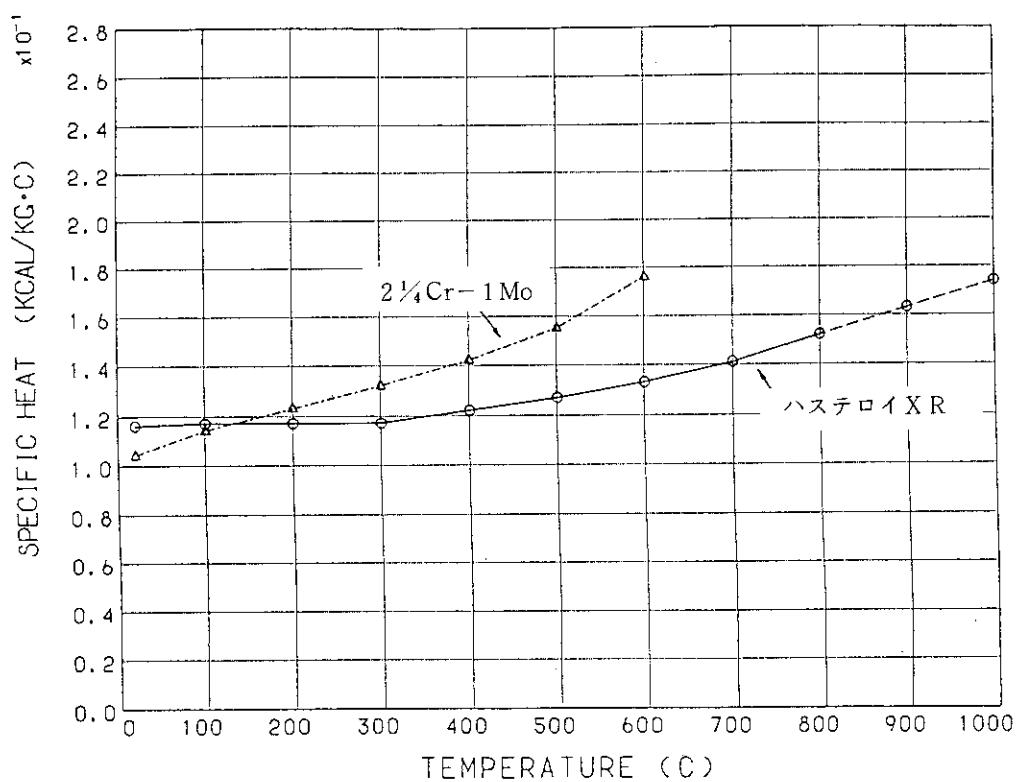
第 6.17 図 設計過渡曲線 (T)



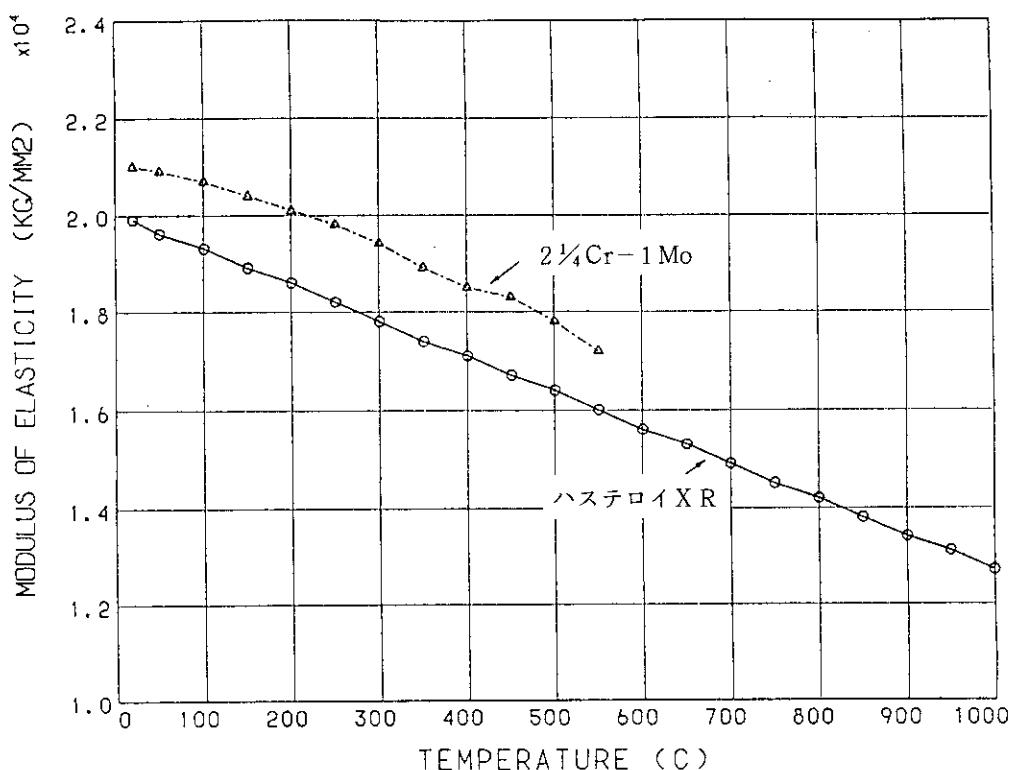
第 6.18 図 クリープ解析用荷重ヒステリシス



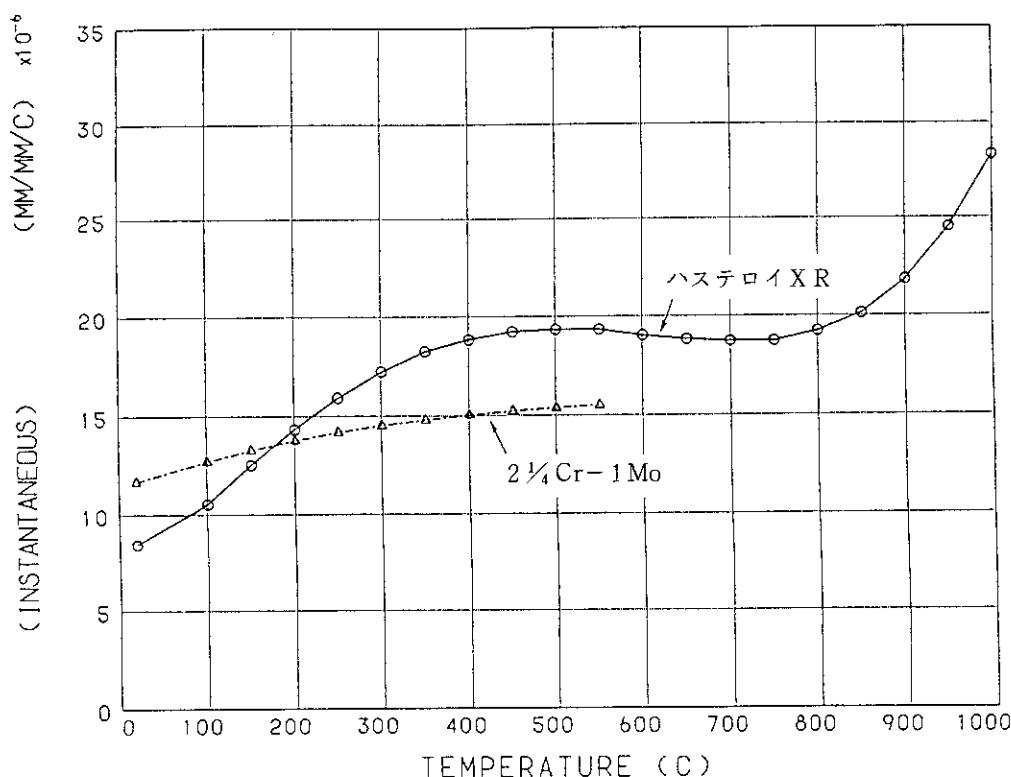
第 6.19 図 热 伝 导 率



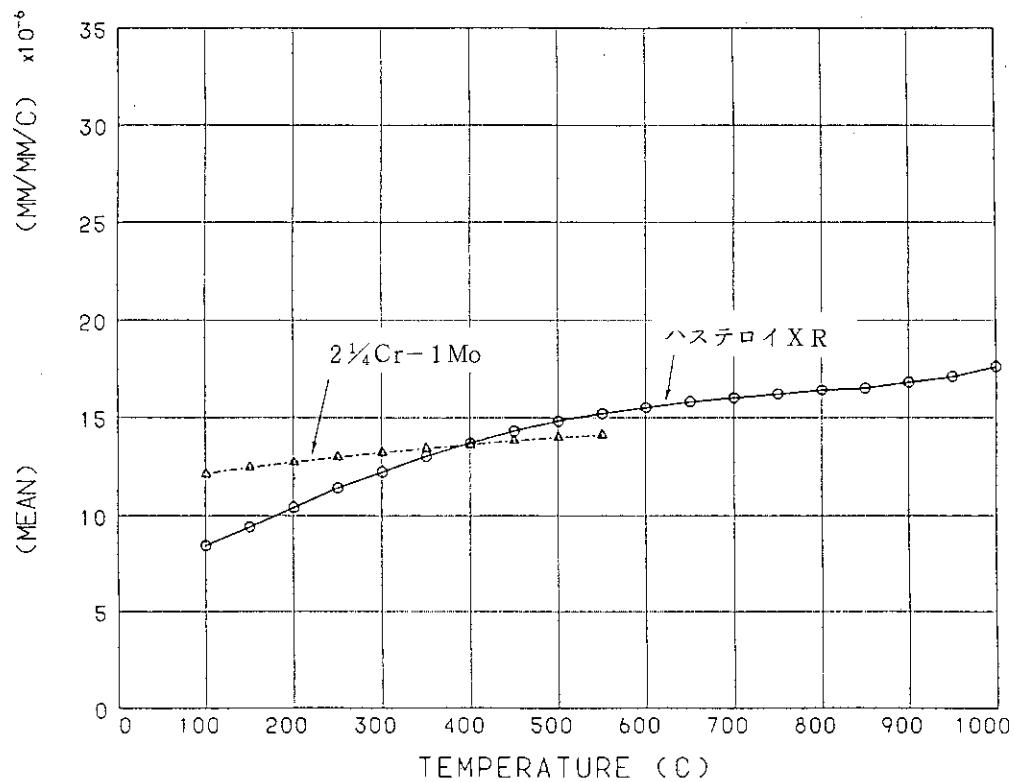
第 6.20 図 比 热



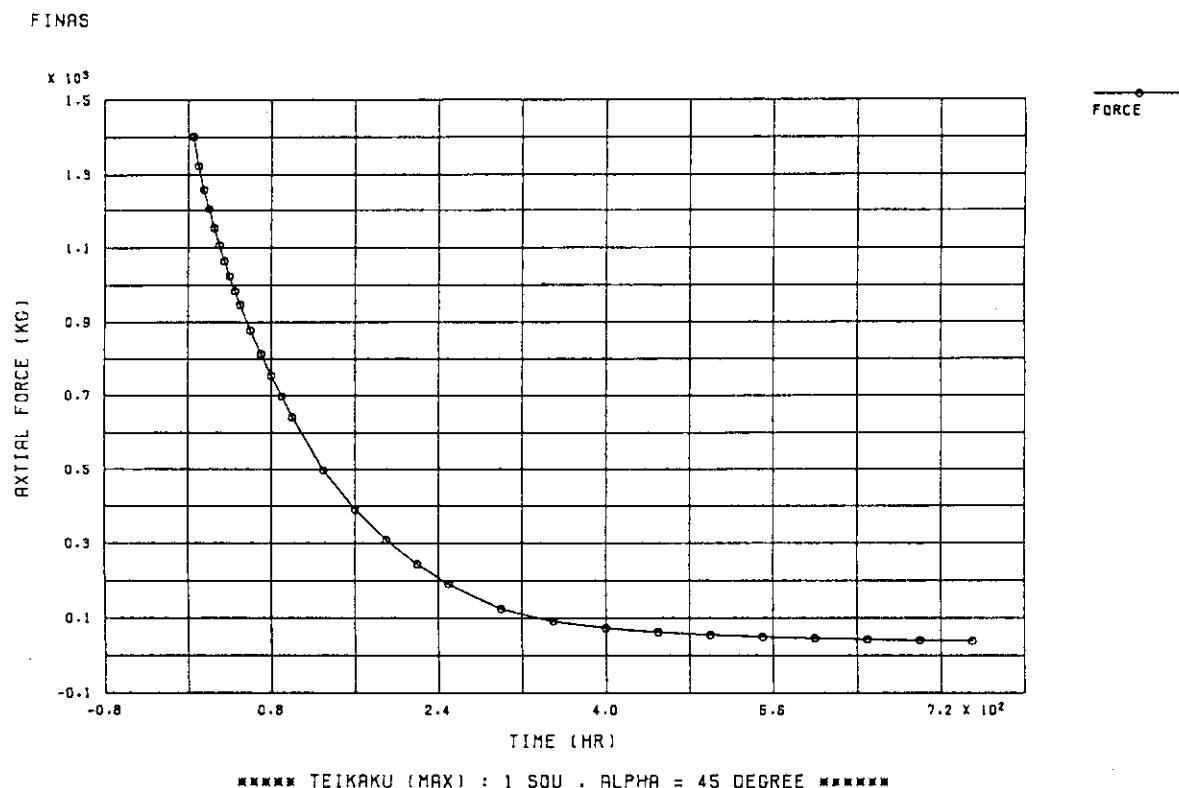
第 6.21 図 縦弾性係数



第 6.22 図 瞬時熱膨張係数



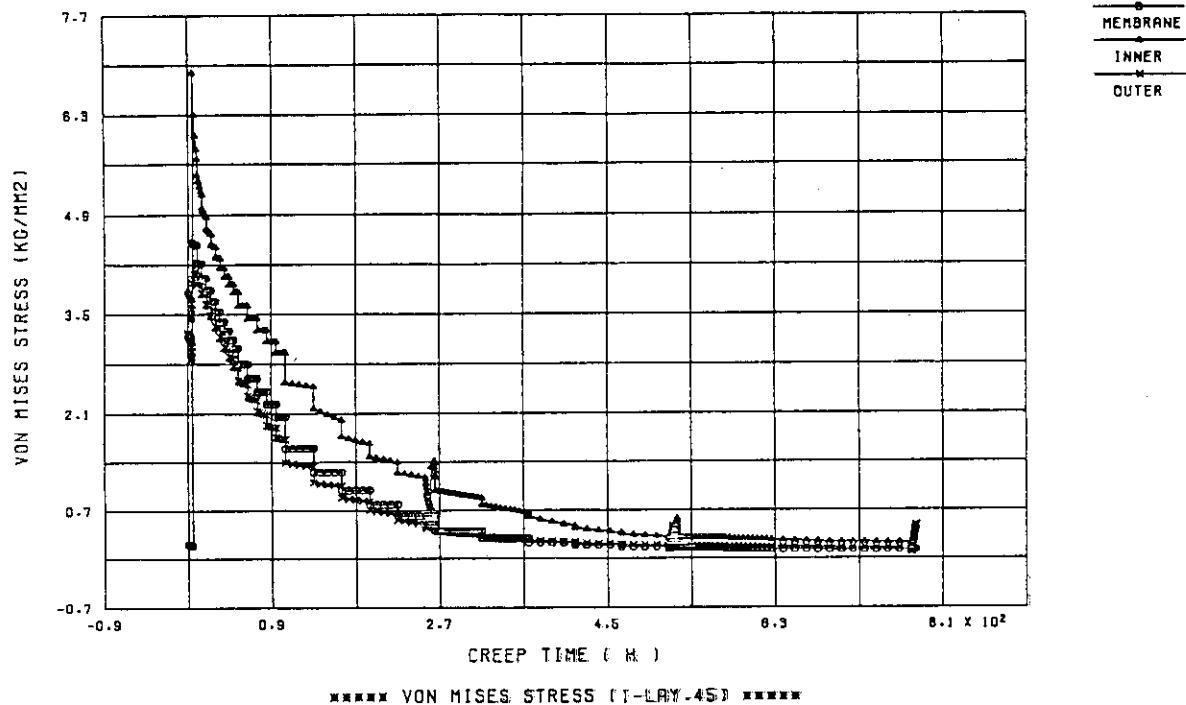
第 6.23 図 平均熱膨張係数



第 6.24 図 伝熱管に働く軸力の時間変化（定格運転 3 サイクル）

FINAS

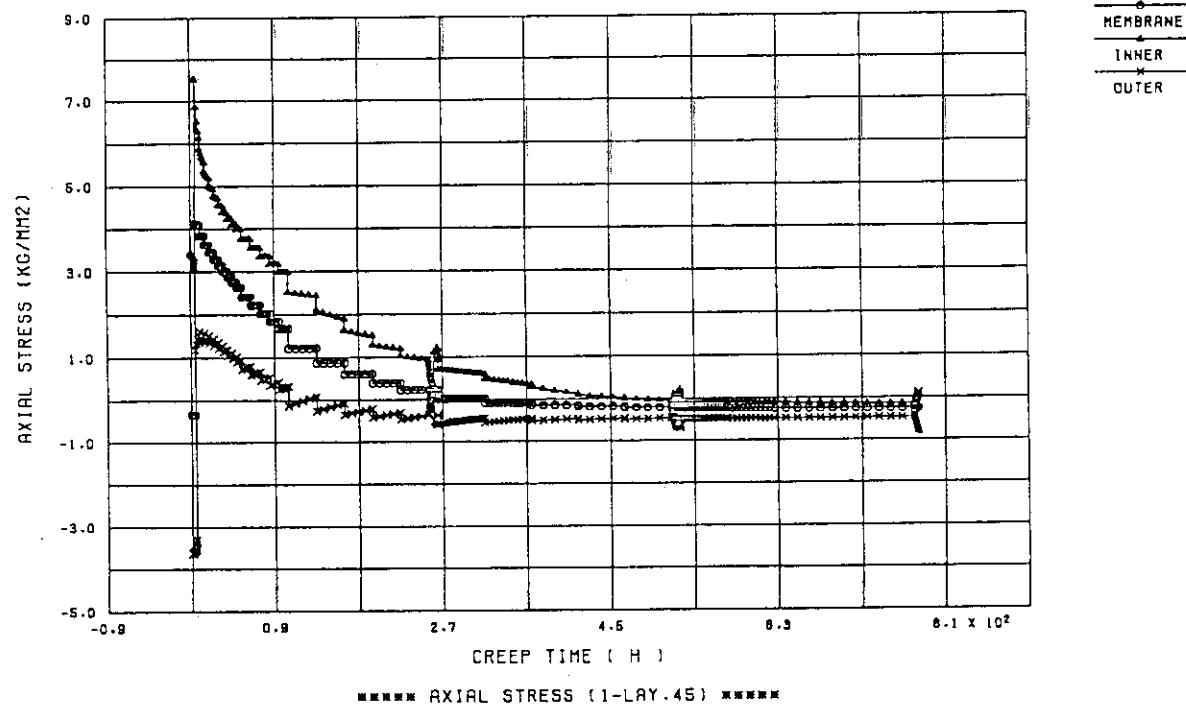
定格運転



第 6.25 図 伝熱管のミーゼスの相当応力の時間変化（定格運転 3 サイクル，第 1 層）

FINAS

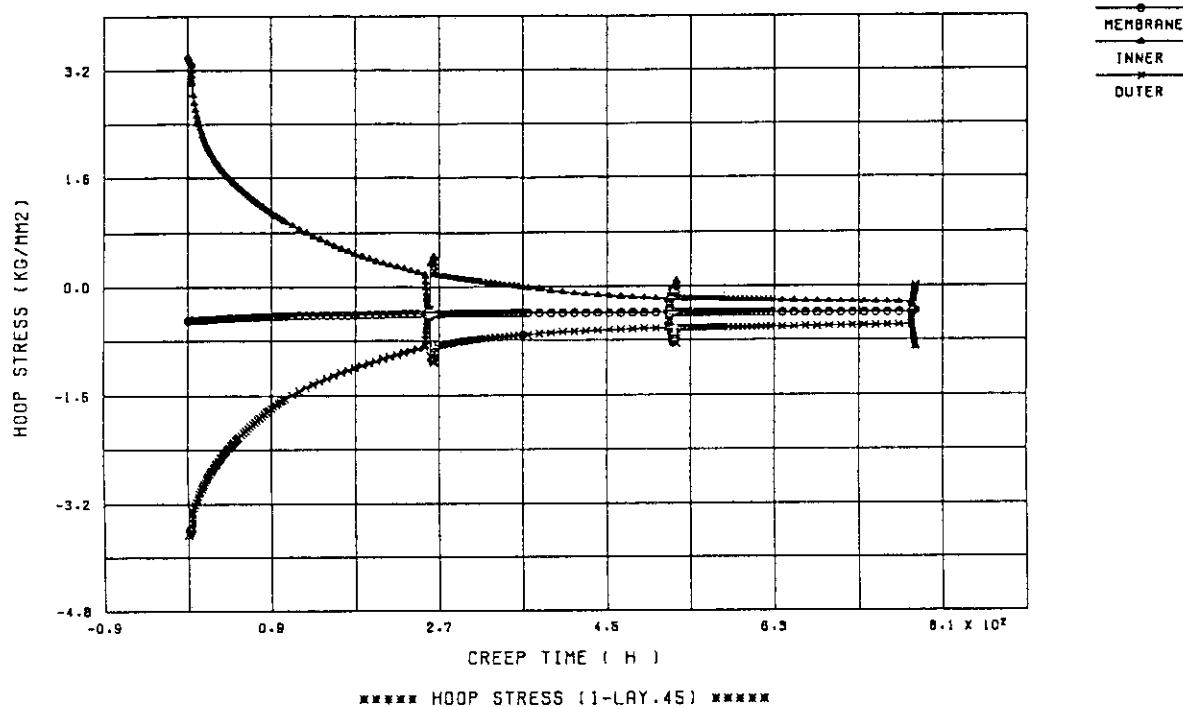
定格運転



第 6.26 図 伝熱管の軸方向応力の時間変化（定格運転 3 サイクル，第 1 層）

FINAS

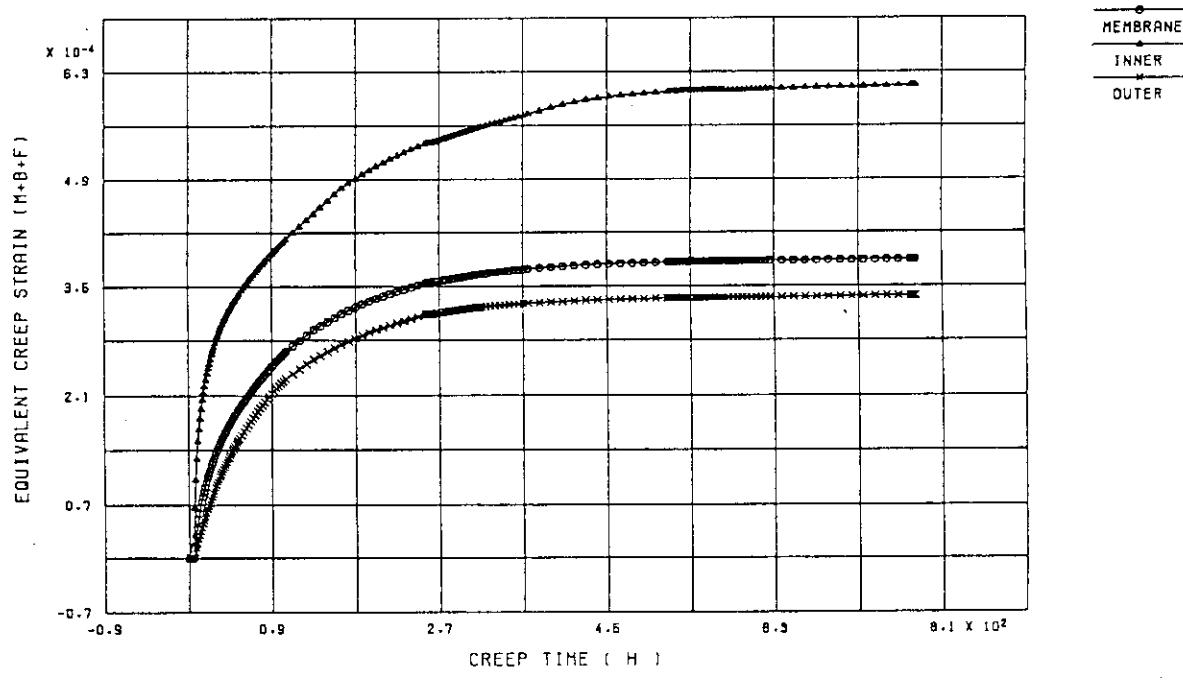
定格運転



第 6.27 図 伝熱管の周方向の応力の時間変化（定格運転 3 サイクル，第 1 層）

FINAS

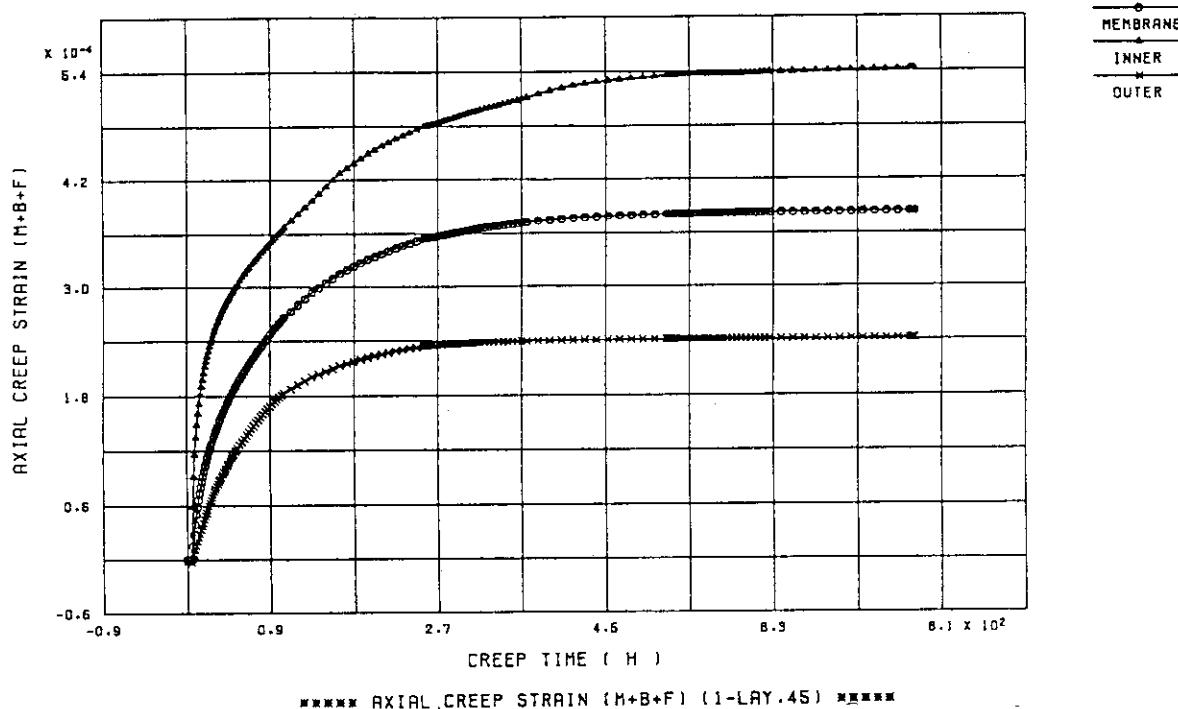
定格運転



第 6.28 図 伝熱管のミーゼスの相当ひずみの時間変化（定格運転 3 サイクル，第 1 層）

FINAS

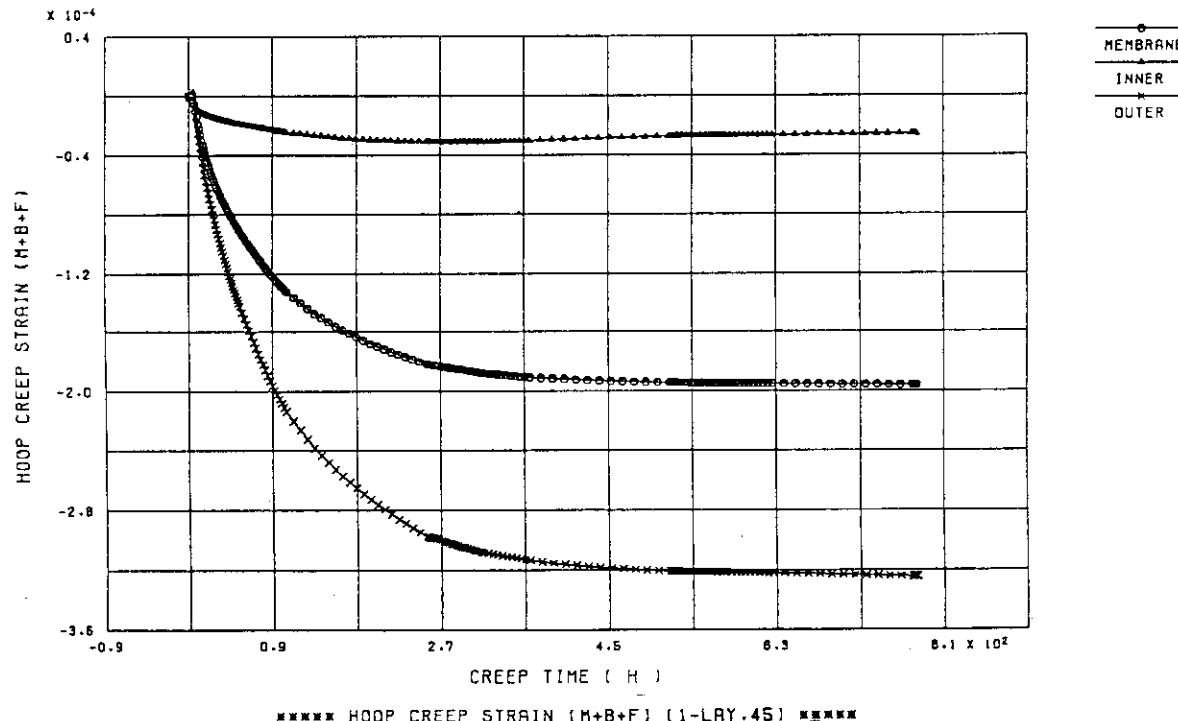
定格運転



第 6.29 図 伝熱管の軸方向ひずみの時間変化（定格運転 3 サイクル，第 1 層）

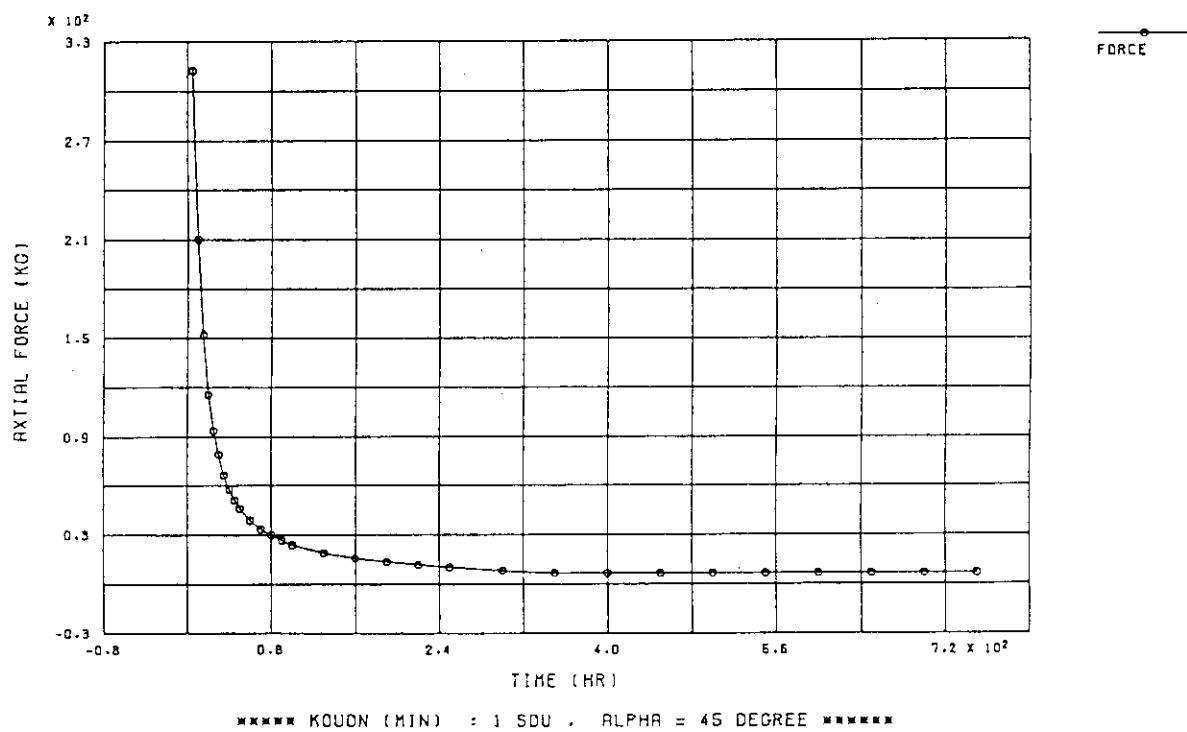
FINAS

定格運転



第 6.30 図 伝熱管の周方向ひずみの時間変化（定格運転 3 サイクル，第 1 層）

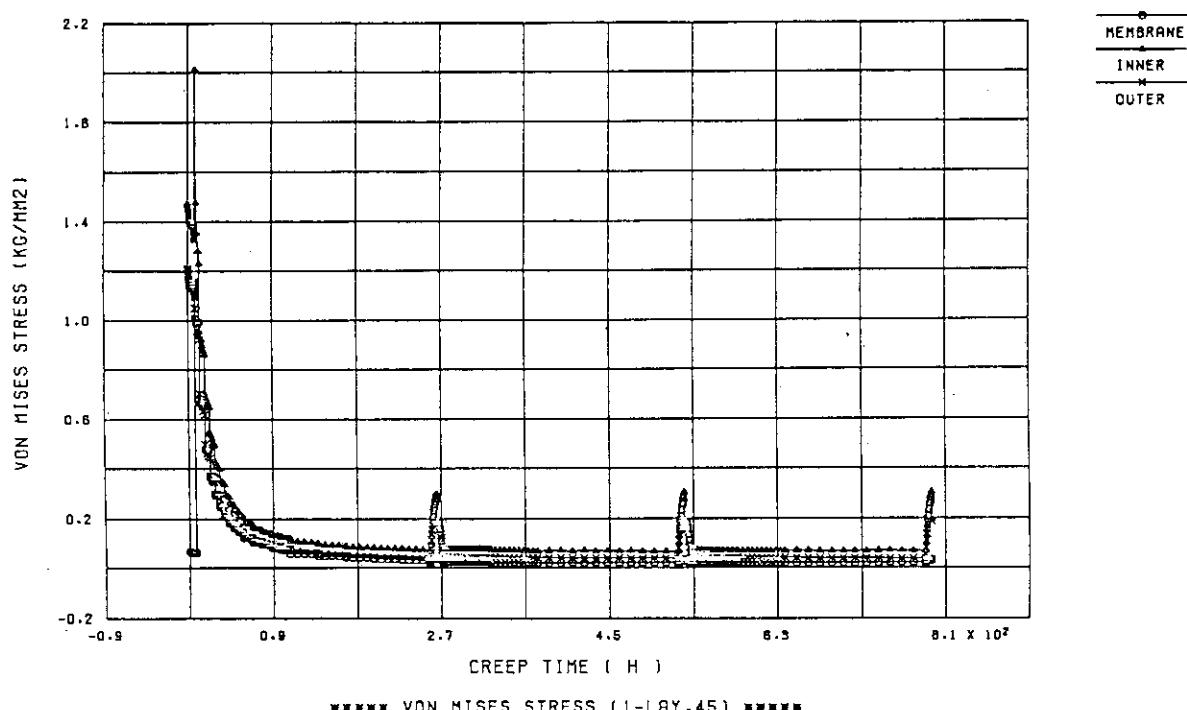
FINAS



第 6.31 図 伝熱管に働く軸力の時間変化（高温試験運転, 3 サイクル）

FINAS

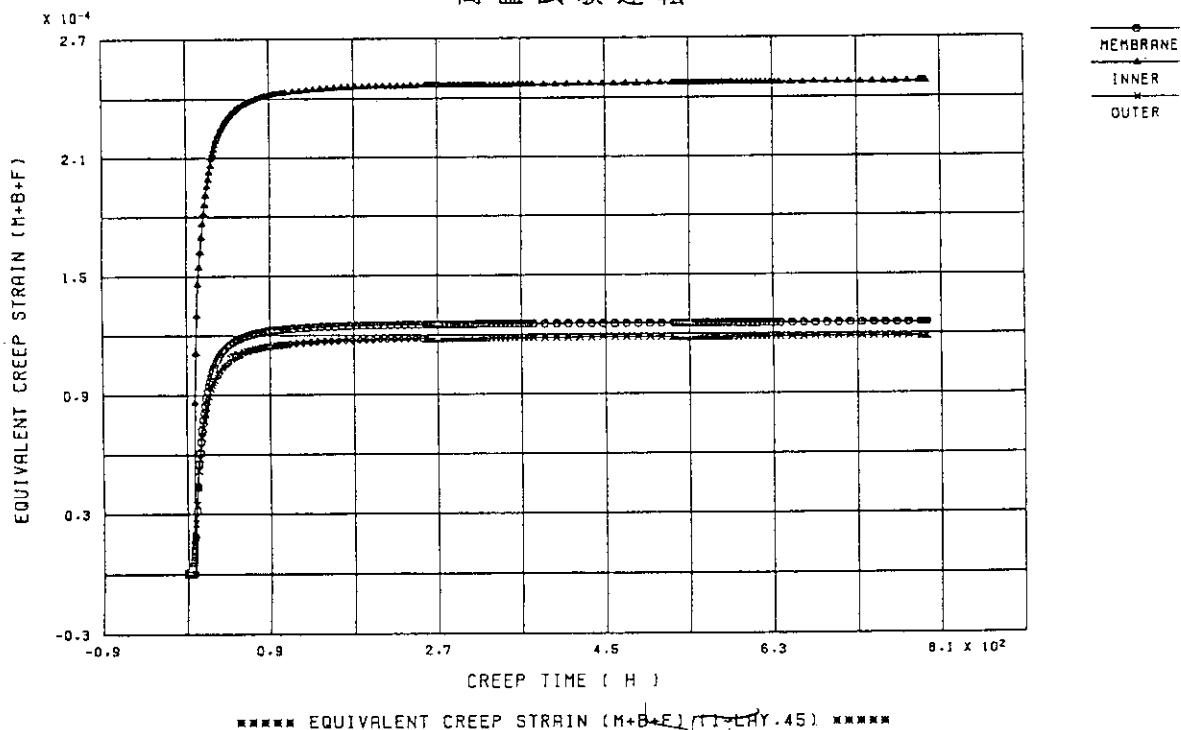
高温試験運転



第 6.32 図 伝熱管のミーゼスの相当応力の時間変化（高温試験運転）

FINAS

高温試験運転

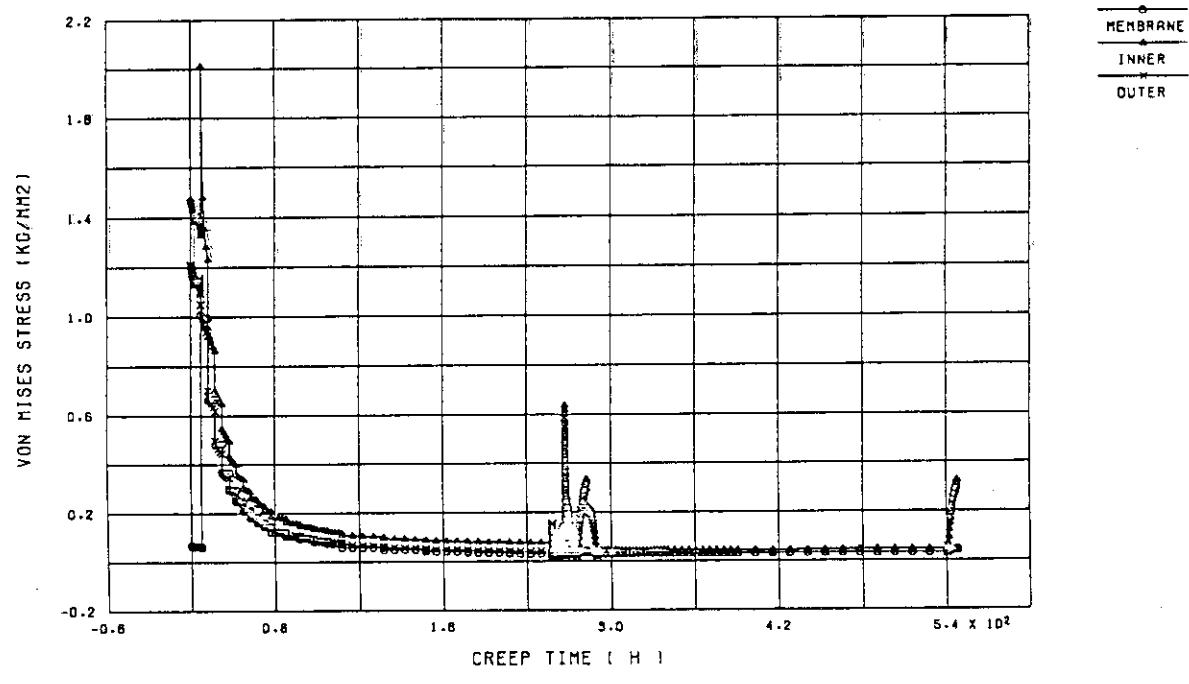


第 6.33 図 伝熱管のミーゼスの相当ひずみの時間変化
(高温試験運転 3 サイクル, 第 1 層)

FINAS

高温試験運転

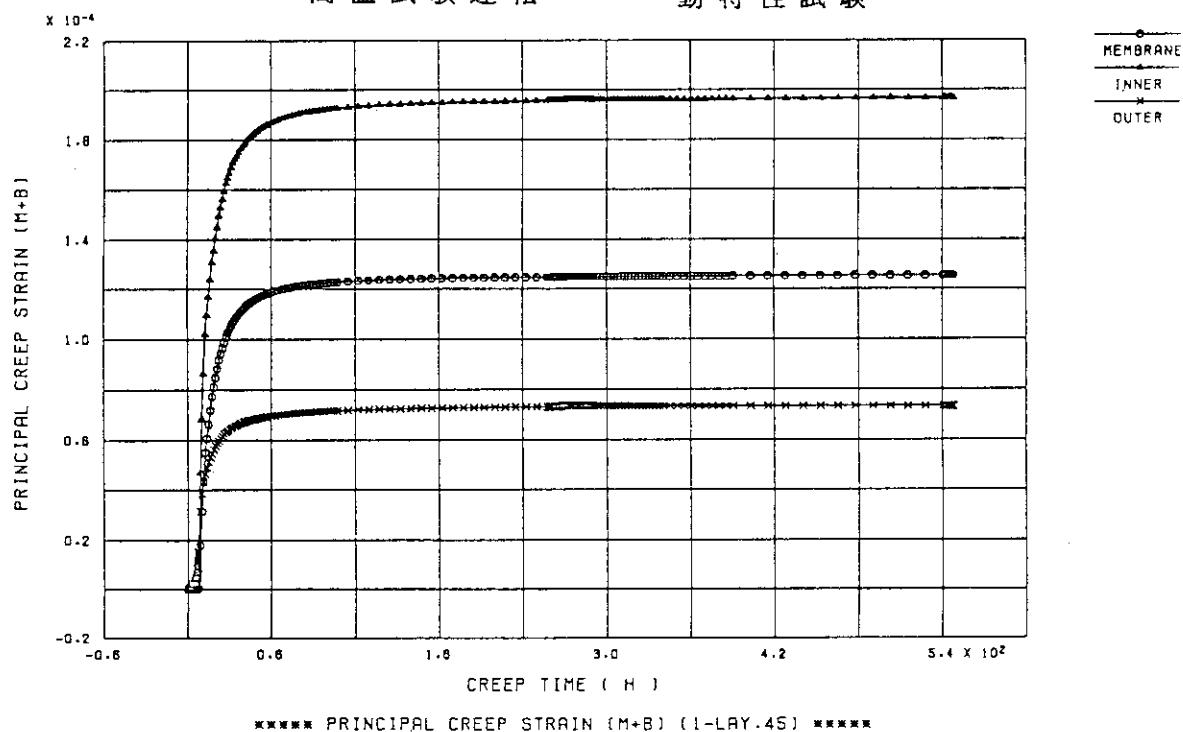
動特性試験



第 6.34 図 伝熱管のミーゼスの相当応力の時間変化
(高温試験運動特性試験組み込みサイクル, 第 1 層)

FINAS

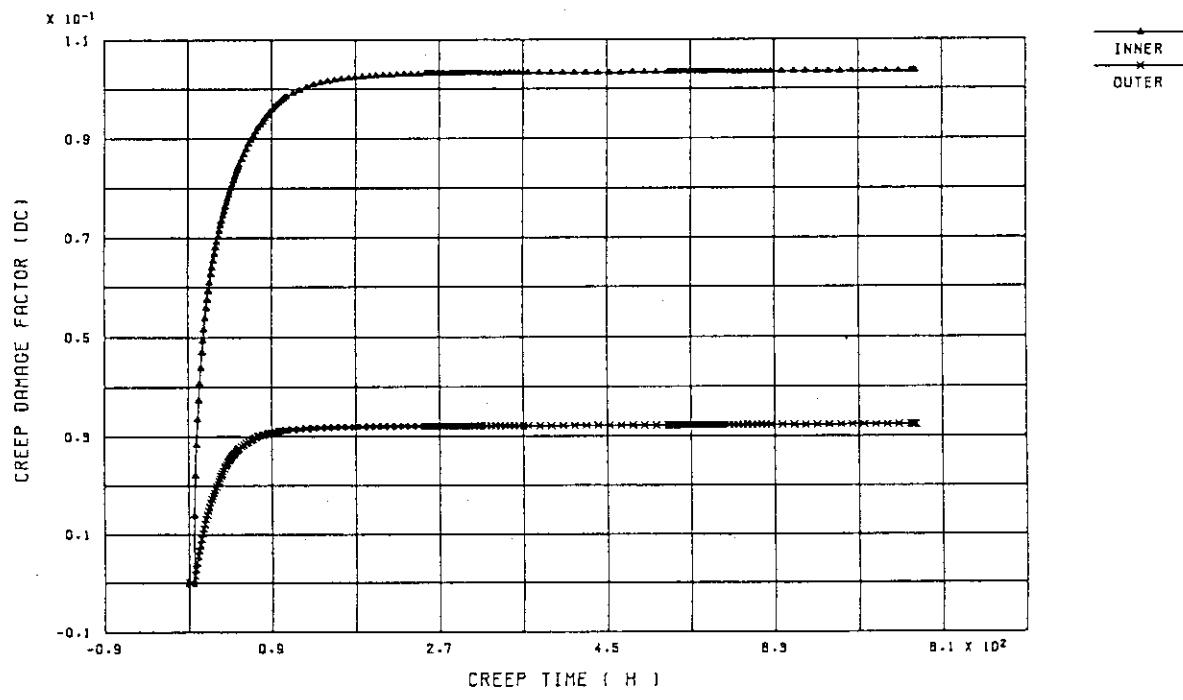
高温試験運転 動特性試験



第 6.35 図 伝熱管のミーゼスの相当ひずみの時間変化
(高温試験運転動特性試験組み込みサイクル, 第 1 層)

FINAS

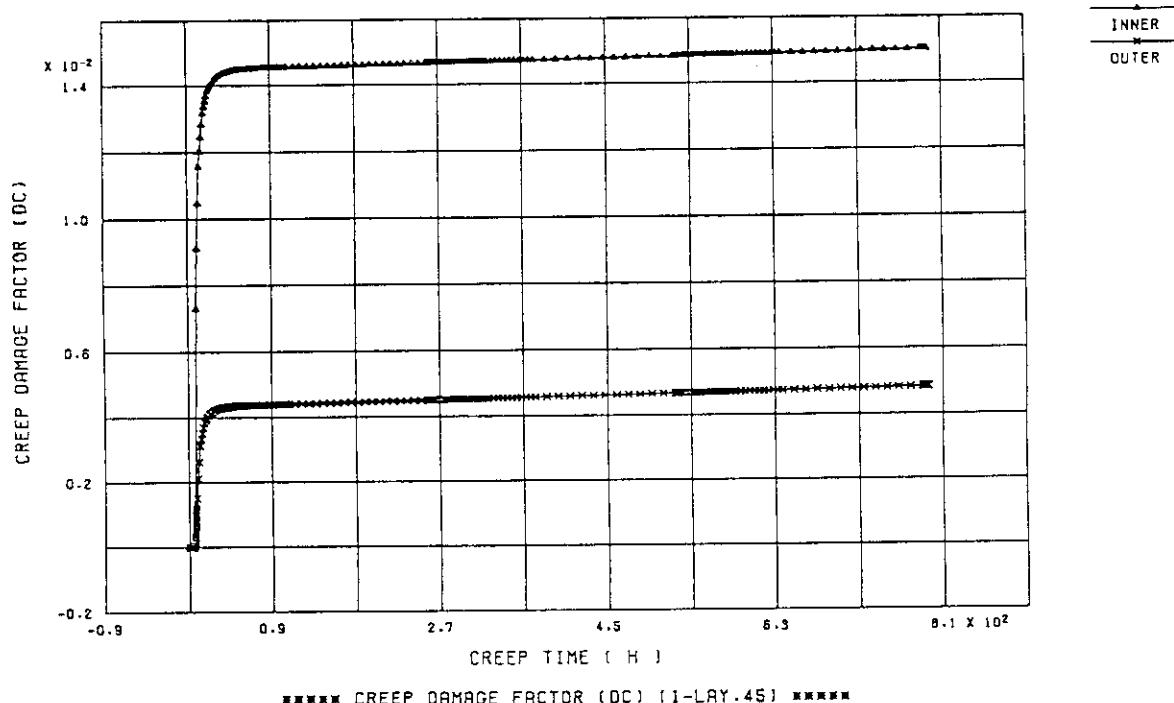
定格運転



第 6.36 図 伝熱管のクリープ損傷係数（定格運転 3 サイクル, 第 1 層）

FINS

高温試験運転

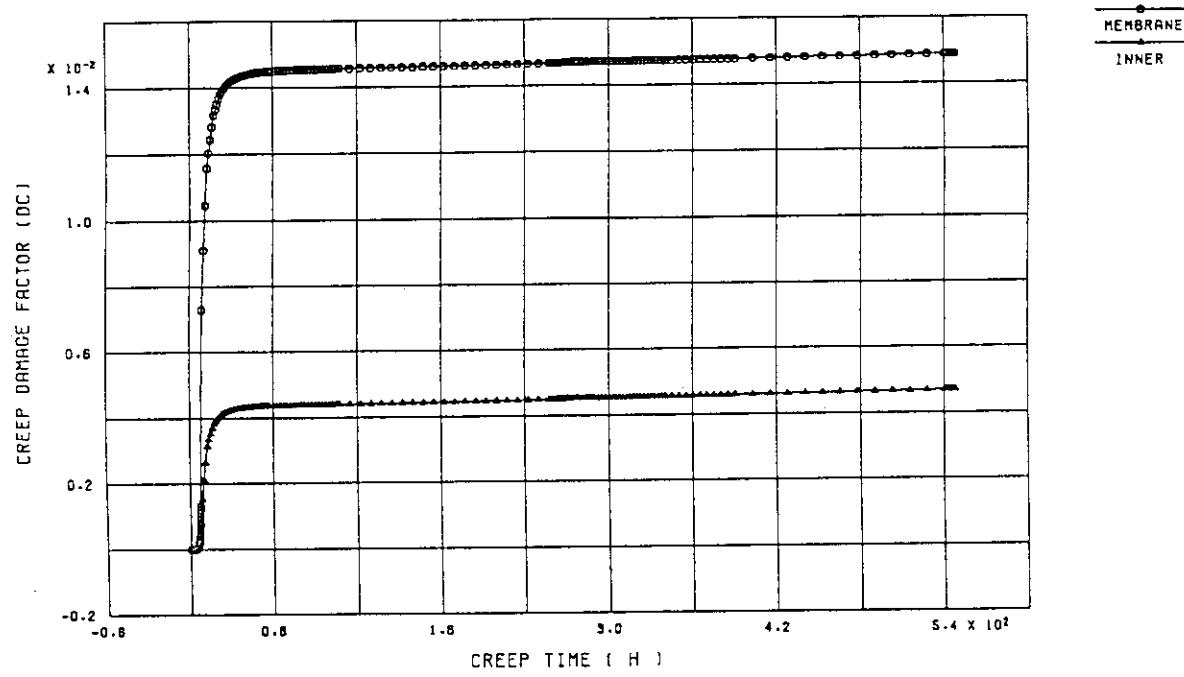


第 6.37 図 伝熱管のクリープ損傷係数（高温試験運転 3 サイクル, 第 1 層）

FINS

高温試験運転

動特性試験

第 6.38 図 伝熱管のクリープ損傷係数
(高温試験運動特性試験組み込みサイクル, 第 1 層)

7. 結言

「高温構造設計指針」に従って、中間熱交換器の伝熱管強度評価を実施した。強度評価では、材料のクリープ挙動を解析し、非弾性ひずみ及びクリープ損傷を求めた。

- (1) 1次応力は、全ての運転状態で制限値を満足する。
- (2) 非弾性ひずみは、定格運転（原子炉出口ガス温度850°C）または高温試験運転（原子炉出口ガス温度950°C）の第1サイクルで大幅に増加するが、その後の増加はわずかであり、累積非弾性ひずみは、「高温構造設計指針」に規定されている制限値を満足する。

$$\varepsilon_{\text{uu}} = 0.0013 \leq 0.01$$

$$\varepsilon_{\text{su}} = 0.0021 \leq 0.02$$

- (3) クリープ損傷は、非弾性ひずみと同様に、定格運転または高温試験運転の第1サイクルで増加するが、その後の増加は僅かである。クリープ疲れ損傷は0.26であり、十分に制限値(1.0)を満足する。

伝熱管に発生する熱応力は、高温試験運転または定格運転の初期の数サイクルで、大幅にリラクセーションするため、その後サイクルに発生する熱応力は、僅かである。従って、運転サイクルとともに非弾性ひずみ及びクリープ疲れ損傷は、増加しないことが分かった。

謝辞

本報まとめに当たり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部田中利幸次長、同原子炉開発室橋幸男氏に深く感謝致します。また、IHXの設計及び強度解析を実施するに当たり、終始ご指導、ご鞭撻頂いた高温工学試験研究炉開発部斎藤伸三部長及び同HTTR計画室羽田一彦副主任研究員に深謝致します。

7. 結言

「高温構造設計指針」に従って、中間熱交換器の伝熱管強度評価を実施した。強度評価では、材料のクリープ挙動を解析し、非弾性ひずみ及びクリープ損傷を求めた。

- (1) 1次応力は、全ての運転状態で制限値を満足する。
- (2) 非弾性ひずみは、定格運転（原子炉出口ガス温度850°C）または高温試験運転（原子炉出口ガス温度950°C）の第1サイクルで大幅に増加するが、その後の増加はわずかであり、累積非弾性ひずみは、「高温構造設計指針」に規定されている制限値を満足する。

$$\varepsilon_{\text{AU}} = 0.0013 \leq 0.01$$

$$\varepsilon_{\text{SU}} = 0.0021 \leq 0.02$$

- (3) クリープ損傷は、非弾性ひずみと同様に、定格運転または高温試験運転の第1サイクルで増加するが、その後の増加は僅かである。クリープ疲れ損傷は0.26であり、十分に制限値(1.0)を満足する。

伝熱管に発生する熱応力は、高温試験運転または定格運転の初期の数サイクルで、大幅にリラクセーションするため、その後サイクルに発生する熱応力は、僅かである。従って、運転サイクルとともに非弾性ひずみ及びクリープ疲れ損傷は、増加しないことが分かった。

謝辞

本報まとめに当たり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部田中利幸次長、同原子炉開発室橋幸男氏に深く感謝致します。また、IHXの設計及び強度解析を実施するに当たり、終始ご指導、ご鞭撻頂いた高温工学試験研究炉開発部斎藤伸三部長及び同HTTR計画室羽田一彦副主任研究員に深謝致します。

参考文献

- (1) 原研： 高温工学試験研究炉の現状、(1991).
- (2) 科学技術庁 原子炉安全局：内規「高温ガス炉第1種機器の高温構造設計指針」、(1990).
- (3) 科学技術庁 原子炉安全局：内規「黒鉛減速ヘリウムガス冷却型原子炉施設に関する構造等の技術基準」、(1990).
- (4) 科学技術庁 原子力安全局監修：「原子炉規制関係法令集」、(1989).
- (5) 宮本喜晟、稻垣嘉之他：「中間熱交換器の要素技術試験」、第2回高温ガス炉研究委員会、(1992).
- (6) K. Hada et al., Nucl. Engrg. Des. 132, P1-11, (1991).
- (7) 藤本望他、私信
- (8) J. M. Corum et al., ORNL-TM-5014, (1974).
- (9) 岩田耕司、動然技報 No.76, (1990).
- (10) M. Hirano and K. Hada, JAERI-M 90-071, (1990).
- (11) ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec III, Div 1, Appendix, (1989).
- (12) 科学技術庁 原子炉安全局：内規「高温ガス炉高温構造設計指針の材料強度基準」、(1990).
- (13) ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec II, (1989).