

JAERI-M  
83-151

模擬炉心拘束バンドによる  
リラクセーション試験

1983年9月

国富 一彦・菱田 誠・田中 利幸

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。

入手の問合わせは、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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute. 1983

---

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

模擬炉心拘束バンドによるリラクセーション試験

日本原子力研究所東海研究所高温工学部

国富 一彦・菱田 誠・田中 利幸

(1983年8月23日受理)

多目的高温ガス実験炉の炉心周囲に配置されている固定反射体は炉心拘束機構によって締め付けられる設計となっている。現在、炉心拘束機構の形式としては、バンド方式、スプリング方式が考えられておりそれぞれの形式について検討が行われている。本報告書では、バンド方式炉心拘束機構のリラクセーション（残留応力の時間的变化）についての検討を行った。すなわち、 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo と SUS 304 で模擬炉心拘束バンドを製作し、リラクセーションの試験を行った。その結果を $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 標準試験片で行ったリラクセーション試験の結果と比較し、炉心拘束バンドのリラクセーションは標準試験片のリラクセーション挙動から予測できることを確認した。また同様の方法により、実験炉炉心拘束バンドのリラクセーション特性について検討した。

Relaxation test of the core restraint band model

Kazuhiko KUNITOMI, Makoto HISHIDA and Toshiyuki TANAKA

Department of High Temperature Engineering,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received August 23, 1983)

In VHTR, permanent reflectors around the core are restrained by core lateral restraint structure. There are two types of designs about core restraint structure. The one is band type and the other spring type.

This paper reports relaxation behavior of the band type core restraint structure made of SUS 304 and  $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo, and experimental correlation found between core restraint structure and  $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo specimen.

By the result of this experiment, relaxation of the core restraint band was confirmed to be estimated by the  $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo specimen.

Keywords : VHTR, Core Restraint Structure, Relaxation,  $2\frac{1}{4}$ Cr-Mo,  
SUS 304, Residual Stress, Reactor Core

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 炉心拘束バンドの構造 .....	2
2.1 機 能 .....	2
2.2 構 造 .....	2
2.3 バンド方式の炉心拘束機構における問題点 .....	3
3. 試験装置と試験方法 .....	7
3.1 概 要 .....	7
3.2 試 験 体 .....	7
3.3 試験装置 .....	8
3.4 試験方法 .....	8
4. 試験結果 .....	11
4.1 リラクセーション試験 .....	11
4.1.1 残留応力 .....	11
4.1.2 クリープひずみ .....	11
4.1.3 模擬炉心拘束バンドの残留応力の推定 .....	13
4.2 線膨張試験結果 .....	13
5. 実験炉の炉心拘束バンドにおけるリラクセーションの推定 .....	18
6. 結 論 .....	23
謝 辞 .....	23
参考文献 .....	23

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. Structure of the core restraint band .....	2
2.1 Performance .....	2
2.2 Structure .....	2
2.3 Problem of the band type core restraint structure .....	3
3. Testing machine and testing method .....	7
3.1 Abstract .....	7
3.2 Test piece .....	7
3.3 Testing machine .....	8
3.4 Testing method .....	8
4. Results of the test .....	11
4.1 Results of the relaxation .....	11
4.1.1 Residual stress .....	11
4.1.2 Creep strain .....	11
4.1.3 Presumption of the residual stress of the core restraint band model .....	13
4.2 Results of the thermal expansion test .....	13
5. Presumption of relaxation of the band type core restraint structure .....	18
6. Conclusions .....	23
7. Acknowledgement .....	23
References .....	23

## List of Figures

- Fig. 2.1 Vertical cross sectional view of VHTR
- Fig. 2.2 Horizontal cross sectional view of VHTR
- Fig. 2.3 The core restraint band of VHTR
- Fig. 2.4 Principle of the core restraint band
- Fig. 3.1 Model of the core restraint band and relaxation test specimen
- Fig. 3.2 Core restraint band model and test apparatus
- Fig. 4.1 Relaxation of the core restraint band
- Fig. 4.2 Model of the core restraint band
- Fig. 4.3 The relationship between creep strain and time
- Fig. 4.4 Comparison of experimental results and calculated results of the core restraint band model
- Fig. 4.5 Thermal expansion of the core restraint band model
- Fig. 5.1 Principle of the core restraint band of VHTR
- Fig. 5.2 Relaxation of the 1Cr - 0.5Mo - 0.25V specimen (450°C)
- Fig. 5.3 Relaxation of the 1Cr - 0.5Mo - 0.25V specimen (500°C)
- Fig. 5.4 Relaxation of the core restraint band of VHTR

## 1. ま え が き

多目的高温ガス実験炉の炉心周囲に配置されている固定反射体は炉心拘束機構によって締め付ける設計となっている。炉心拘束機構は地震時に固定反射体、燃料ブロック、可動反射体ブロック、断熱ブロック等から発生する水平荷重を支持し、炉心ブロック構成を維持するために設けられている。また、高温プレナム内に漏えいする低温ヘリウムガス流量を低減するため、固定反射体ブロック相互を締め付ける役割も果たしている。

炉心拘束機構は、炉心ブロックの周囲に円筒状に配置された固定反射体ブロックと更に外側にある金属円筒（コアバレル）の間に挿入される。炉心拘束機構の形式としては、現在バンド方式とスプリング方式が考えられているが、本報告書ではバンド方式の炉心拘束機構を取り上げ、そのリラクセーション挙動（残留応力の時間的変化）について検討を行った。

炉心拘束バンドは、長さ900mm、直径165mmの円筒形のバンド要素を円周方向に18個結合したものであり、高さ方向には20段あって、たるのたがのように炉心の周囲に配置された固定反射体を締め付ける。炉心拘束バンドは異種金属の中空円筒部材を同心円状に組み合わせ、炉心内部の黒鉛ブロックと線膨張係数を等しくし、運転中、停止中にかかわらず常時固定反射体ブロックに、一定の締め付け力を与える構造になっている。

この炉心拘束バンドは、1本当たり2.25Tonの引張り力が与えられ、1Cr-0.5Mo-0.3V鋼製の中空円筒には $2.25\text{kg}/\text{mm}^2$ の引張り力が加わる。原子炉運転中には、炉心拘束バンドは $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ のヘリウムガス雰囲気中に置かれるため1Cr-0.5Mo-0.3V鋼が応力緩和現象（リラクセーション）を起こし、固定反射体所定の締め付け力が得られなくなる可能性がある。高温における1Cr-0.5Mo-0.3V鋼のリラクセーションに関する試験研究は、ガス・タービン、蒸気タービンの組立ロータ、フランジの締め付けボルト等、実際の問題と関連があるため世界各国で行われてきた。<sup>1),2),3),4)</sup>しかし、その大部分は、標準試験片を対象としたものであり、炉心拘束バンドのような組み合わせ構造物に対する試験研究は行われていない。そこで、実験炉の炉心拘束バンドの長さ約1/2、異種金属中空円筒の組み合わせ層数が1層（実験炉では4層）からなる模擬炉心拘束バンドを試作しリラクセーション試験を実施した。同時にリラクセーション標準試験片を同じ素材から製作し、模擬炉心拘束バンドの結果との比較を行った。また、異種金属中空円筒の組み合わせ構造により、所定の線膨張係数が得られるかどうかを確認する試験も行った。



## 2 炉心拘束バンドの構造

### 2.1 機能

炉心拘束バンドに要求される機能は以下のとおりである。

- (1) 固定反射体の水平面内の位置決めを行う。
- (2) 固定反射体は地震時に、炉心の燃料ブロック、可動反射体ブロック、断熱ブロックからの水平荷重を受けるが、この場合にも固定反射体の半径方向の変位量を制限値（9 mm）以内とするような締め付け力を固定反射体間に与える。
- (3) 運転時、過渡時において、炉心拘束バンドが熱膨張した場合にも、固定反射体間に据え付け時と同じ面圧を加えることが可能であること。
- (4) 固定反射体間に面圧を与えることにより、炉心内へ漏えいするヘリウムガス流量を減少させる。

### 2.2 構造

Fig. 2.1, Fig. 2.2 に、多目的高温ガス実験炉の縦断面と横断面を示す。炉心は、燃料ブロック、可動反射体ブロック、プレナムブロック、断熱ブロック等の積層構造となっている。この炉心の周囲には、円周方向18分割、上下方向に10段に分割された黒鉛製固定反射体がある。固定反射体は各々のブロックがキーにより結合されており、全体としては円筒状になっている。炉心拘束機構は、この固定反射体と更に外側にある金属円筒（コアバレル）の間に挿入され初期締め付け時にはコアバレルに溶接されたラジアルキーで円周方向の位置決めがなされる。炉心拘束機構とラジアルキーは上下方向と半径方向に対してフリーになっており、黒鉛製固定反射体とコアバレルの相対的熱膨張差の吸収を行うことができる。炉心拘束バンドは、長さ約900mm、直径165mmの円筒形構造物（炉心拘束バンド要素、Fig. 2.3参照）に引張り力を加えて、円周方向に18個結合したものであり、上下方向については固定反射体1段当たり2段ずつ合計20段装備されており、全体としてたのたがのような役割で炉心周囲の固定反射体を締め付ける。炉心拘束バンドはFig. 2.3に示すように中心棒の回りに熱膨張係数の異なる2種類の金属中空円筒（SUS 304, 1Cr-0.5Mo-0.3V）を同心円状に4回交互に組み合わせた（4層）構造となっている。このため黒鉛と同じ線膨張係数を得ることができる。その原理をFig. 2.4に示す。実線が常温時、点線が高温時における状態を示す。400°Cにおける線膨張率は1Cr-0.5Mo-0.3Vが $1.26 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、SUS 304は $18 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であり、SUS 304のほうが大きい。このため、Fig. 2.4において③は①より左側になる。つまり、中心棒より一層目の中空円筒の伸びの起点は左側になる。この結果④は②より左側になるため①④の両端での線膨張係数は小さくなる。これを4回繰り返すと黒鉛と等しい線膨張係数が得られる。

この方式の特徴は、任意の温度で固定反射体に常時締め付け力を与え、固定反射体に面圧を与えることができることである。このため、地震時にも固定反射体間にすき間が開くことを防止することができると同時に、固定反射体間に面圧を与え、シール性能の向上も期待できる。

### 2.3 バンド方式の炉心拘束機構における問題点

炉心拘束バンドの問題点として以下の点が挙げられる。

- (1) 重量が重く（約160kg）かつ、据え付けのための作業空間が狭いため、円周方向18個の炉心拘束バンドに対して均一の引張り力を与えるのは困難であると考えられる。
- (2) 炉心拘束バンドには、1本当たり22.5Tonの引張り力が与えられ、引張り力が働く中空円筒（1Cr-0.5Mo-0.3V）材には、 $22.5\text{kg}/\text{mm}^2$ の応力が働く。しかも、運転中は、炉心拘束バンドが $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ になると考えられるため、リラクセーションによって引張り力が減少し、所要の締め付け力が得られなくなる可能性がある。
- (3) 炉心拘束バンドがリラクセーションを起こしたり破損した場合、再締め付けや修理が不可能である。

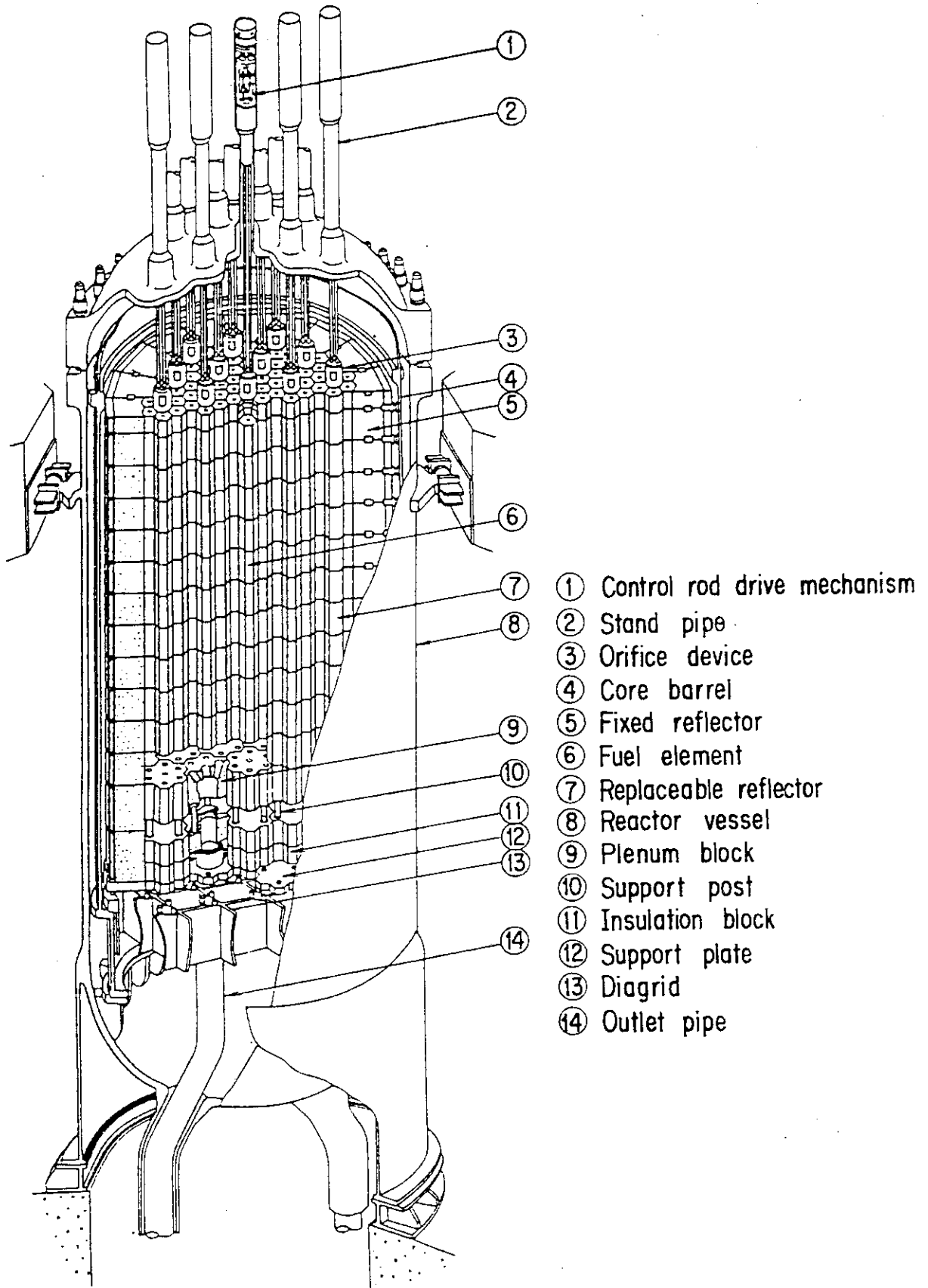


Fig. 2.1 Vertical cross sectional view of VHTR

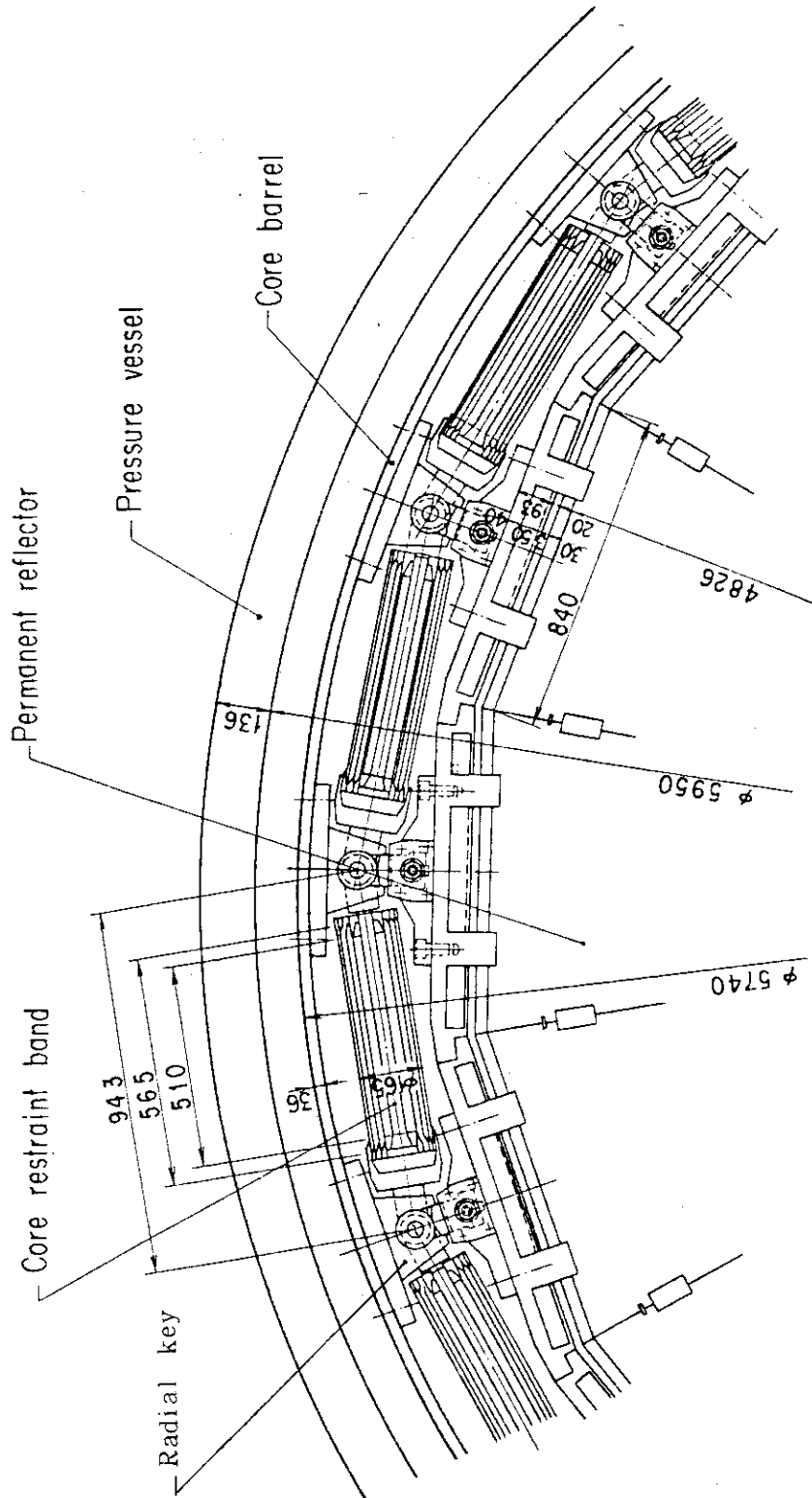


Fig. 2.2 Horizontal cross sectional view of VHTR

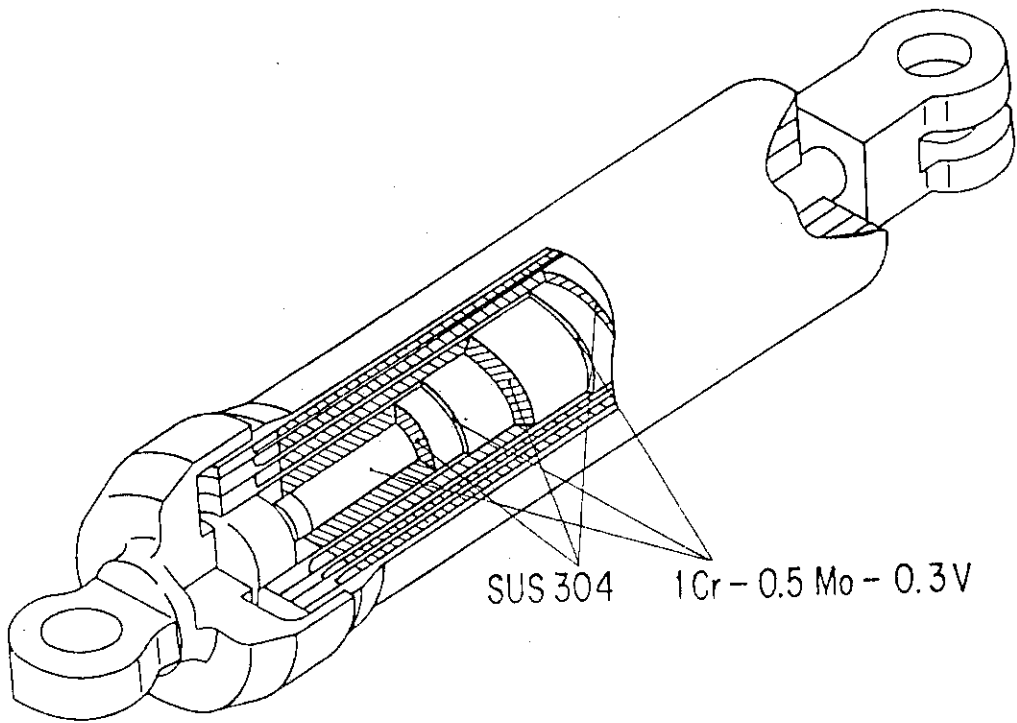


Fig. 2.3 The core restraint band of VHTR

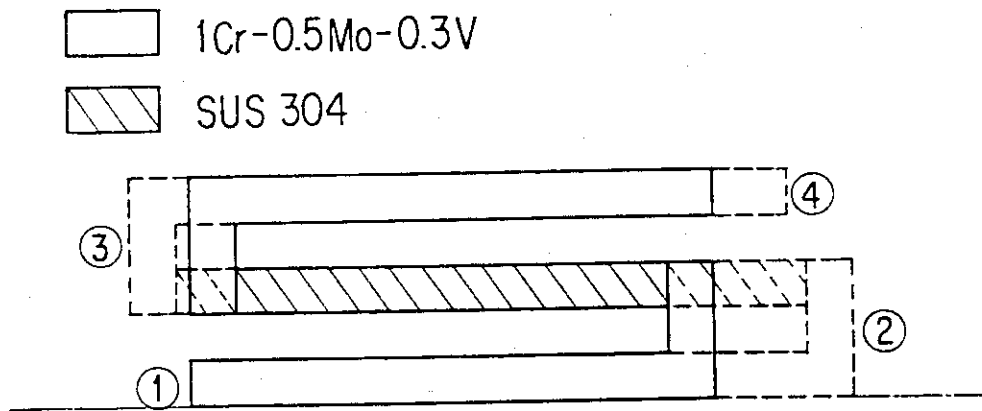


Fig. 2.4 Principle of the core restraint band

### 3. 試験装置と試験方法

#### 3.1 概 要

炉心拘束バンドを構成する部材である  $1\text{Cr}-0.5\text{Mo}-0.3\text{V}$  は、ガス・タービン、蒸気タービンの組立ロータ、あるいはフランジの締め付けボルトなどに利用されている。これらのリラクゼーションに関する試験研究は、実際問題と関連があるため古くから行われている。<sup>1),2),3),4)</sup> また、クリープとリラクゼーションの関係に関する試験についても多く行われている。<sup>5)</sup> しかし、このような研究のほとんどは標準試験片を用いて行われたものであり、炉心拘束バンドのように、2種類の金属を組み合わせて製作した構造物についての試験研究は行われていない。そこで、長さが実寸の約  $1/2$ 、異種金属の組み合わせ層数が1層（実験炉は4層）からなる模擬炉心拘束バンドを試作し、リラクゼーション試験を行った。また、同じ素材からリラクゼーションの標準試験片を製作し、模擬炉心拘束バンドと同じ試験条件（温度並びに初期応力）の等しい条件で試験を行い、両者の結果を比較検討した。

また、炉心拘束バンドの線膨張係数が黒鉛と等しくなるかどうかの確認を行った。

#### 3.2 試験体

試験体である模擬炉心拘束バンドの組立て図をFig. 3.1 に、写真をFig. 3.2 に示す。模擬炉心拘束バンドの特徴と実験炉炉心拘束バンドの相異点を以下に示す。

- (1) 長さは、実験炉炉心拘束バンドの約  $1/2$  である。
- (2) 異種金属の組み合わせ層数（中心棒のまわりに同心円状に組み合わせた2種類の中空円筒金属の対数）は、実験炉では4層であるが試験体は1層である。
- (3) 模擬炉心拘束バンドの両端部の構造は、試験装置との取り合い上、実験炉と完全に同一形状のものではない。また、異種金属が接触し荷重を伝える部分等の構造は実験炉と異なる（試験計画時に実験炉の詳細寸法等は未決定であったので、応力解析を行い決定した）。
- (4) 実験炉の炉心拘束バンドは、 $1\text{Cr}-0.5\text{Mo}-0.3\text{V}$  とSUS 304が使用されているが、模擬炉心拘束バンドでは  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-\text{Mo}$  とSUS 304を使用した。これは、 $1\text{Cr}-0.5\text{Mo}-0.3\text{V}$  は入手が困難であること、試験の主目的が標準試験片のリラクゼーション挙動と拘束バンドのリラクゼーション挙動の比較・検討を行うことであり、必ずしも実験炉と同じ材質で試験を行う必要がないことによる。

$2\frac{1}{4}\text{Cr}-\text{Mo}$  のリラクゼーション標準試験片をFig. 3.1に示す。試験部は直径10mmの円柱であり、標点距離は100mmである。模擬炉心拘束バンドとリラクゼーション標準試験片に用いた  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-\text{Mo}$  鋼は、ASTM規格A 387, Grade 22, Cl 2 (NT材) であり同じ素材から製作した。

模擬炉心拘束バンドの構成要素である SUS 304 円筒に生じる圧縮応力は  $5.5 \text{ kg/mm}^2$  であり、 $1\text{Cr}-0.5\text{Mo}-0.3\text{V}$  円筒に生じる引張り応力  $22.5 \text{ kg/mm}^2$  に比べて小さい。また、 $500^\circ\text{C}$  以下の温度領域では、SUS 304 は  $1\text{Cr}-0.5\text{Mo}-0.3\text{V}$  に比べてリラクセーションが起こりにくい。従って、模擬炉心拘束バンドのリラクセーション挙動を調べる場合、SUS 304 のリラクセーションは考慮に入れる必要がないと考えられるため、SUS 304 標準試験片によるリラクセーション試験は行わなかった。

### 3.3 試験装置

試験装置は主として、インストロン型万能試験機、加熱炉、計測制御装置から構成される。この装置では、リラクセーション試験の他に、引張り、クリープ試験が可能である。インストロン型万能試験機は最大荷重  $10 \text{ ton}$ 、リードスクリュー方式で  $\pm 0.25\%$  以下に制御することが可能である。変位の検出は差動トランスを用いて行い、最大変位  $0.5 \text{ mm}$ 、測定精度は  $\pm 1\%$  以下である。加熱炉は最高温度  $600^\circ\text{C}$  まで加熱することが可能である。均熱部（全長  $400 \text{ mm}$ ）の温度は、 $500^\circ\text{C}$  において  $\pm 5^\circ\text{C}$  以内に制御することが可能である。本試験は常圧の空気中で行ったが、ヘリウムガス中でも試験を行うことが可能である。試験装置を Fig. 3.3 に示す。

### 3.4 試験方法

#### (1) リラクセーション試験

模擬炉心拘束バンド、及びリラクセーション標準試験片共に  $450^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$  の空気中で試験を行った。 $400^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$  の温度領域で試験を行ったのは次の理由による。すなわち、実験炉の設計では、炉心拘束バンドの詳細な温度分布の計算は未だ行われておらず、従って想定使用温度を包含する温度範囲で実験を行っておく必要があることと、過渡時には炉心拘束バンドの温度が  $450^\circ\text{C}$  を超える恐れがあるためである。試験時の初期応力としては、模擬炉心拘束バンドの  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-\text{Mo}$  製円筒に生じる応力値を重視し、この部分の応力が実験炉炉心拘束バンドの  $1\text{Cr}-0.5\text{Mo}-0.3\text{V}$  製円筒に生じる応力 ( $22.5 \text{ kg/mm}^2$ ) にほぼ等しくなるように設定した。このとき、SUS 304 円筒に生じる応力も実験炉の炉心拘束バンドと模擬炉心拘束バンドの両者ではほぼ同一になる。試験手順は以下のとおりである。まず、加熱炉で試験体を均一な温度に加熱した後、所定の初期荷重が得られるように荷重を負荷する（初期変位を与える）。その後、変位を一定に保持し、荷重の時間的変化を計測する。

本試験では第 1 期リラクセーションにのみ注目したので試験時間は  $180 \text{ 時間} \sim 250 \text{ 時間}$  とした。

#### (2) 線膨張率の測定試験

模擬炉心拘束バンドの線膨張率を、常温  $100^\circ\text{C}$ 、 $200^\circ\text{C}$ 、 $300^\circ\text{C}$ 、 $400^\circ\text{C}$  の温度条件で測定し計算値と比較した。

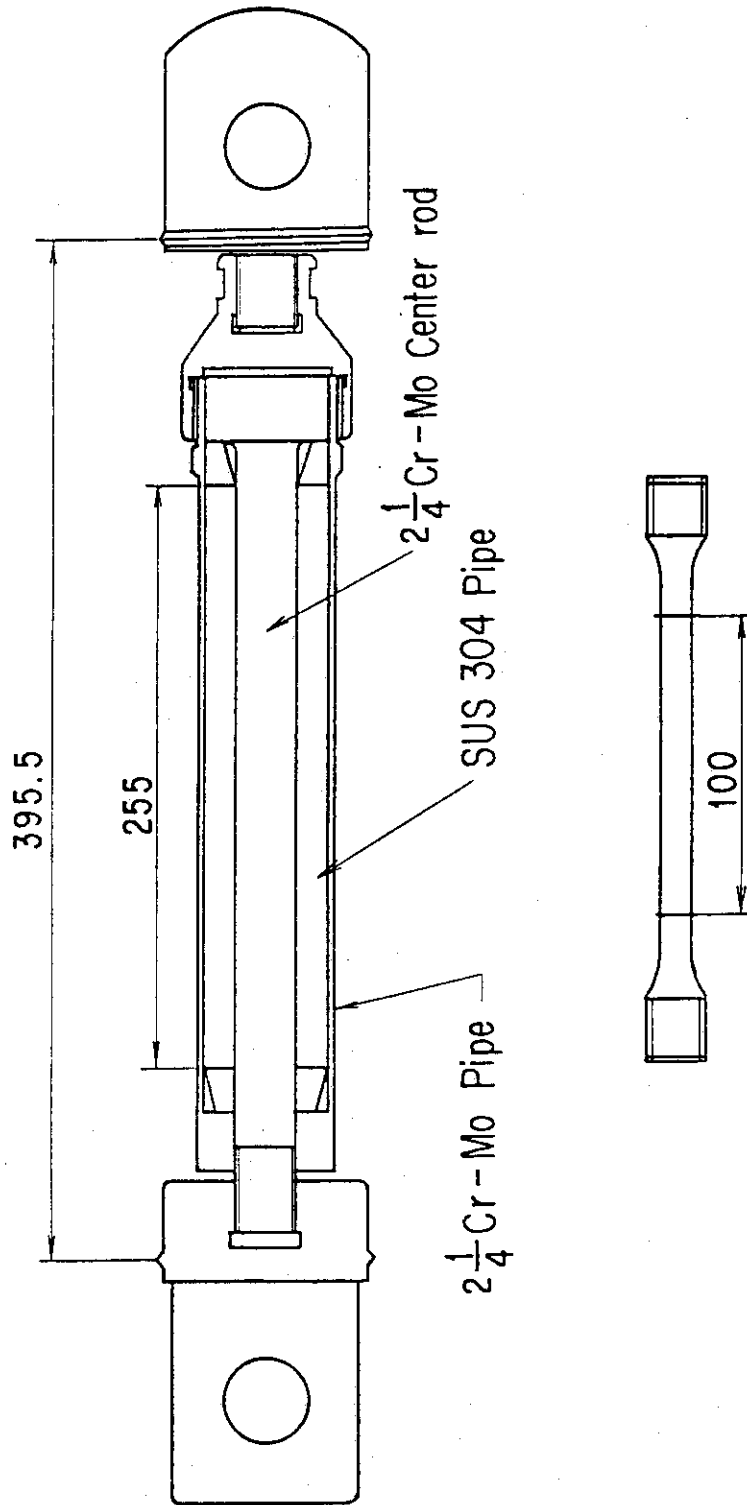


Fig. 3.1 Model of the core restraint band and relaxation test specimen



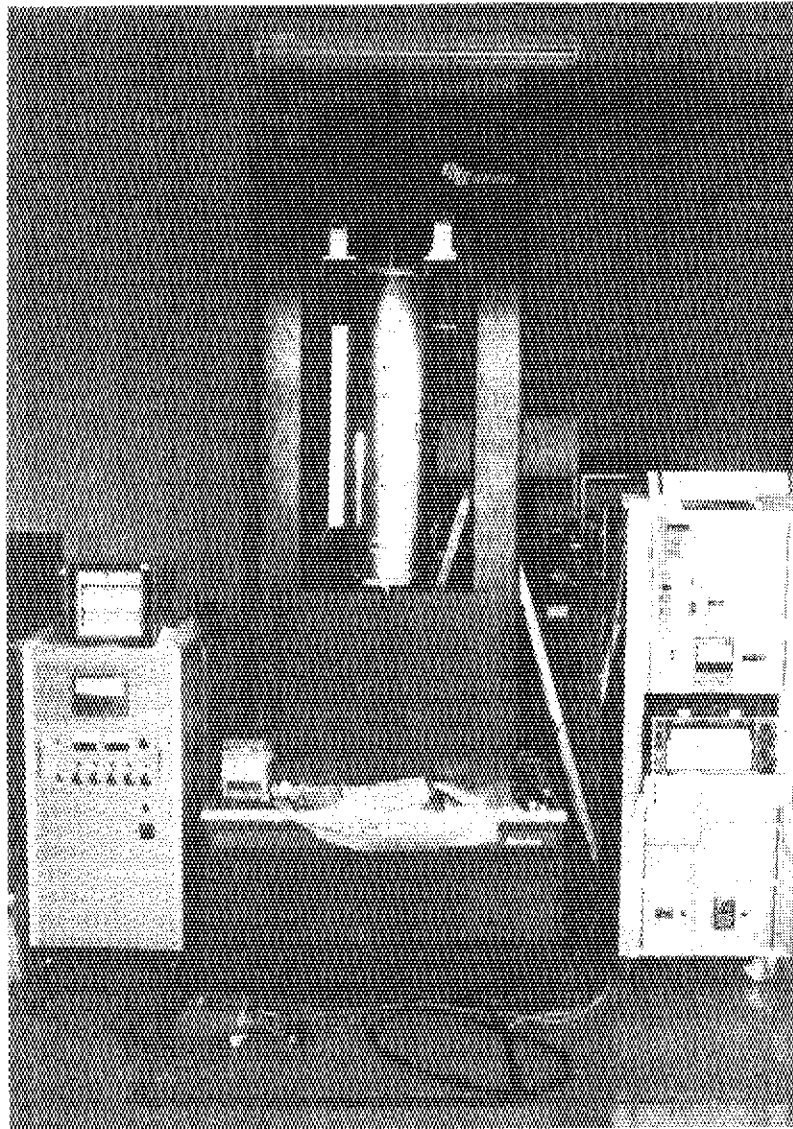
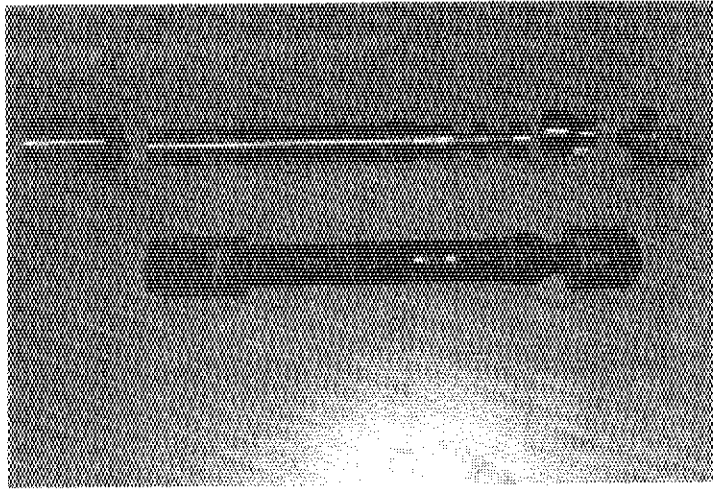


Fig. 3.2 Core restraint band model and test apparatus

## 4 試験結果

### 4.1 リラクゼーション試験

#### 4.1.1 残留応力

模擬炉心拘束バンドとリラクゼーション標準試験片について行った450°C及び500°Cのリラクゼーション試験の結果をFig. 4.1に示す。縦軸は、模擬炉心拘束バンドの2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Moの中空円筒（Fig. 3.1参照）の残留応力、又は標準試験片の残留応力を示す。初期応力は、模擬炉心拘束バンド及び標準試験片とも22kg/mm<sup>2</sup>である。模擬炉心拘束バンドの250時間経過後の残留応力は、温度が500°Cの場合、約10kg/mm<sup>2</sup>であり、450°Cの場合、約16kg/mm<sup>2</sup>であった。この結果を標準試験片による結果と比較すると450°Cにおいては、両者間にほとんど差がないが、500°Cにおいては模擬炉心拘束バンドの残留応力の方が0.5kg/mm<sup>2</sup>程大きいことが分かった。

#### 4.1.2 クリープひずみ

残留応力の時間的変化の測定結果より、以下の方法により、クリープひずみの時間的変化を求めた。模擬炉心拘束バンドの模式図をFig. 4.2に示す。模擬炉心拘束バンドの構成要素である2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中空円筒、SUS304製中空円筒、2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中心棒のひずみは次式で表される。但し、SUS304製中空円筒の初期応力は、-5.78kg/mm<sup>2</sup>と小さいこと及び450°C、500°Cにおいては2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo鋼に比べてリラクゼーションしにくいので、SUS304製中空円筒のクリープひずみは無視する。

$$\varepsilon_{1T}(t) = \varepsilon_{1e}(t) + \varepsilon_{1c}(t) \quad (4.1)$$

$$\varepsilon_{2T}(t) = \varepsilon_{2e}(t) \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{3T}(t) = \varepsilon_{3e}(t) + \varepsilon_{3c}(t) \quad (4.3)$$

ここで  $\varepsilon_T(t)$  : 全ひずみ

$\varepsilon_e(t)$  : 弾性ひずみ

$\varepsilon_c(t)$  : クリープひずみ

(添字の内数字は、1が2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中空円筒、2がSUS304中空円筒、3が2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中心棒を示す)

また、応力とひずみの関係は次式で示される。

$$\sigma_1(t) = E_1 \varepsilon_{1e}(t) \quad (4.4)$$

$$\sigma_2(t) = E_2 \varepsilon_{1e}(t) \quad (4.5)$$

$$\sigma_3(t) = E_1 \varepsilon_{3e}(t) \quad (4.6)$$

ここで、 $E$  ; ヤング率

$\sigma$  ; 応力

模擬炉心拘束バンド全体の伸び量は次式で示される。

$$\delta = \varepsilon_{1T}(t) \cdot l_1 - \varepsilon_{2T}(t) \cdot l_2 + \varepsilon_{3T}(t) \cdot l_3 \quad (4.7)$$

$\delta$  ; 模擬炉心拘束バンド全体の伸び量

$l$  ; 長さ

各部材の応力の関係は次式で示される。

$$\sigma_2(t) = -\frac{A_1}{A_2} \cdot \sigma_1(t) \quad (4.8)$$

$$\sigma_3(t) = \sigma_1(t) \quad (4.9)$$

$$A_3 = A_1$$

ここで、 $A$  ; 断面積

式(4.7)に式(4.1)～(4.6)及び、(4.8)、(4.9)を代入することにより、 $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo製中空円筒のクリープひずみと残留応力との関係が次式のように求められる。

$$\varepsilon_{1c}(t) = \left[ \delta - \sigma_1(t) \cdot \left( \frac{l_1 + l_3}{E_1} + \frac{A_1 l_2}{A_2 E_2} \right) \right] / (l_1 + l_3) \quad (4.10)$$

一方、標準試験片の応力とひずみの関係は次式で示される。

$$\varepsilon_{0T}(t) = \varepsilon_{0e}(t) + \varepsilon_{0c}(t) = \frac{\sigma_0(t)}{E_0} \quad (4.11)$$

$$\varepsilon_{0c}(t) = \frac{\sigma_0(0)}{E_0} - \frac{\sigma_0(t)}{E_0} \quad (4.12)$$

ここに、添字0は標準試験片を示す。 $\sigma_0(0)$ は標準試験片の初期応力を示す。Fig. 4.3にクリープひずみと経過時間の関係を示す。実線が模擬炉心拘束バンドの $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo製中空円筒のひずみを示し、点線が標準試験片のひずみを示す。図から分かるように、模擬炉心拘束バンドの $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo製中空円筒のひずみは標準試験片のひずみより若干大きい。これは、模擬炉心拘束バンドにおいては、 $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo製中空円筒及び $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo製中心棒のリラクゼーションに伴いSUS304製中空円筒の応力が減少し、弾性変形量(圧縮変形量)が回復することに起因すると考えられる。すなわち、標準試験片を用いたリラクゼーション試験では試験期間中 $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo試験片の全ひずみ量は一定であるのに対し、拘束バンドのリラクゼーション試験では期間の経過と共にSUS304製中空円筒の全ひずみ量は時間と共に徐々に増加する。そのため、拘束バンドにおける $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo製中空円筒のクリープひずみは標準試験片のクリープひずみより大きくなったと考えられる。

しかしながら、両者の差は10%以内であり、実用的な見地からは模擬炉心拘束バンドにおける $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo製のリラクゼーション挙動は、標準試験片の $2\frac{1}{4}$  Cr-Moのリラクゼーション挙動とほぼ同じであると考えられる。

本試験で使用した模擬炉心拘束バンドにおけるSUS 304製中空円筒の変形量（弾性圧縮変形量）は、500℃の場合、試験開始時において0.09mm、250時間後において0.043mmである。また、450℃の場合はそれぞれ0.089mm、0.066mmである。すなわち、SUS 304中空円筒の変形量は500℃の場合試験開始時から試験終了時までには模擬炉心拘束バンド全体の変形量の9.6%から7.2%まで変化する。また、450℃の場合は10.5%から7.9%まで変化するに過ぎない。従って、本試験で用いた模擬炉心拘束バンドにおいてはSUS 304製中空円筒が2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中空円筒のリラクセーション挙動に与える影響は小さく、実用上は無視できると考えられる。

#### 4.1.3 模擬炉心拘束バンドの残留応力の推定

4.1.2で述べたように、模擬炉心拘束バンドにおける2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中空円筒と、2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo標準試験片とでは、クリープひずみの時間的変化はほぼ等しいと考えて良い。そこで、標準試験片のクリープひずみを用い、(4.13)式から模擬炉心拘束バンドにおける2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中空円筒の残留応力を推定し、実験値との比較を行った。

4.1.2の結果から $\epsilon_{1c}(t)$ は $\epsilon_{0c}(t)$ に等しいと考えられるので、式(4.10)の左辺に $\epsilon_{0c}(t)$ の実験値を代入すれば、 $\sigma_1(t)$ （すなわち、模擬炉心拘束バンドの2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中空円筒の残留応力）を求めることができる。あるいは、式(4.10)の右辺と式(4.12)の右辺を等値し、

$$\delta = \sigma_1(0) \cdot \frac{l_1 + l_3}{E_1} + \frac{A_1 l_1}{A_2 E_2} \sigma_0(0) \quad \text{の関係式を用いれば、下式(4.13)が得られる。}$$

$$\sigma_1(t) = \sigma_1(0) - \frac{\sigma_0(0)}{E_0} - \frac{\sigma_0(t)}{E_0} \cdot \frac{l_1 + l_3}{\frac{l_1 + l_3}{E_1} + \frac{A_1 l_2}{A_2 E_2}} \quad (4.13)$$

上式を用いれば、標準試験片で得られた残留応力の測定値から模擬炉心拘束バンドにおける2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中空円筒の残留応力の時間的変化を求めることができる。式(4.13)から450℃、500℃における2<sup>1</sup>/<sub>4</sub>Cr-Mo製中空円筒の残留応力を求めると、それぞれ式(4.14)、式(4.15)が得られる。

$$\sigma_1(t) = 2.30 + 0.8956 \cdot \sigma_0(t) \quad (4.14)$$

$$\sigma_1(t) = 2107 + 0.9046 \cdot \sigma_0(t) \quad (4.15)$$

ここで、 $t$ は経過時間（単位：時間）を示す。

Fig. 4.4に計算値と実験値との比較を示す。図から分るように、450℃及び500℃のいずれにおいても両者は比較的良く一致している。つまり、模擬炉心拘束バンドのリラクセーション挙動は、標準試験片のリラクセーションの挙動より推定することが可能であることが分かった。

## 4.2 線膨張試験結果

模擬炉心拘束バンドの熱膨張量は、以下のようにして求めることができる。

(1) SUS 304 中空円筒の熱膨張量 ( $\delta_2$ )

$$\delta_2 = \alpha_s \ell_2 (T - T_i) \quad (4.16)$$

 $\alpha_s$  : SUS 304 の線膨張係数

T : 運転中の温度

 $T_i$  : 初期温度 (常温) $\ell_2$  : SUS 304 の長さ(2)  $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo 鋼の中空円筒の熱膨張量 ( $\delta_3$ )

$$\delta_3 = \alpha_c \ell_3 (T - T_i) \quad (4.17)$$

 $\alpha_c$  :  $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo 鋼の線膨張率 $\ell_3$  :  $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo 鋼中空円筒の長さ(3)  $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo 鋼中心棒の熱膨張量 ( $\delta_1$ )

$$\delta_1 = \alpha_c \ell_1 (T - T_i) \quad (4.18)$$

 $\alpha_c$  :  $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo 鋼の線膨張率 $\ell_1$  :  $2\frac{1}{4}$  Cr-Mo 鋼中心棒の長さ(4) 模擬炉心拘束バンドの熱膨張量( $\delta$ )

$$\delta = \delta_1 + \delta_3 - \delta_2 = \{ \alpha_c (\ell_1 + \ell_3) - \alpha_s \ell_2 \} (T - T_i) \quad (4.19)$$

計算結果と実験結果の比較を Fig. 4.5 に示す。計算結果と実験結果は、ほぼ一致しており、所定の線膨張係数の得られることが分かった。

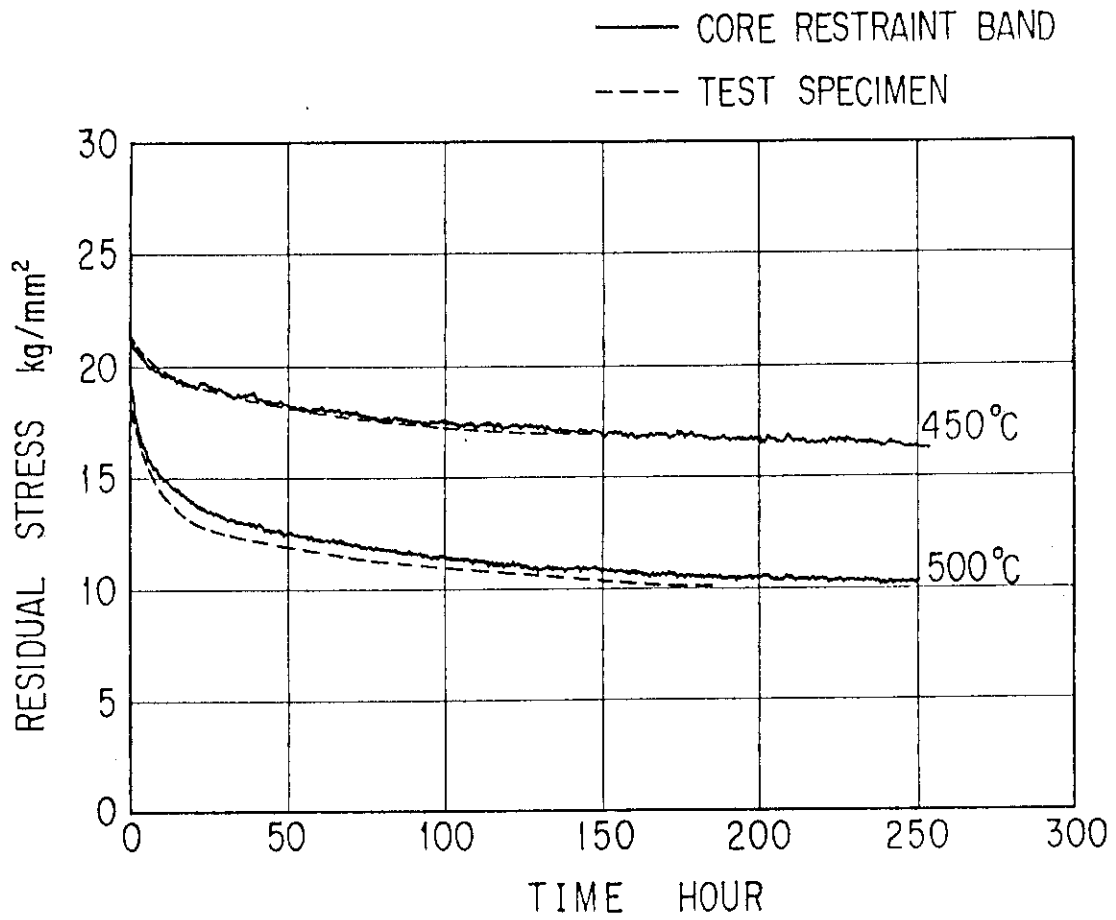


Fig. 4.1 Relaxation of the core restraint band

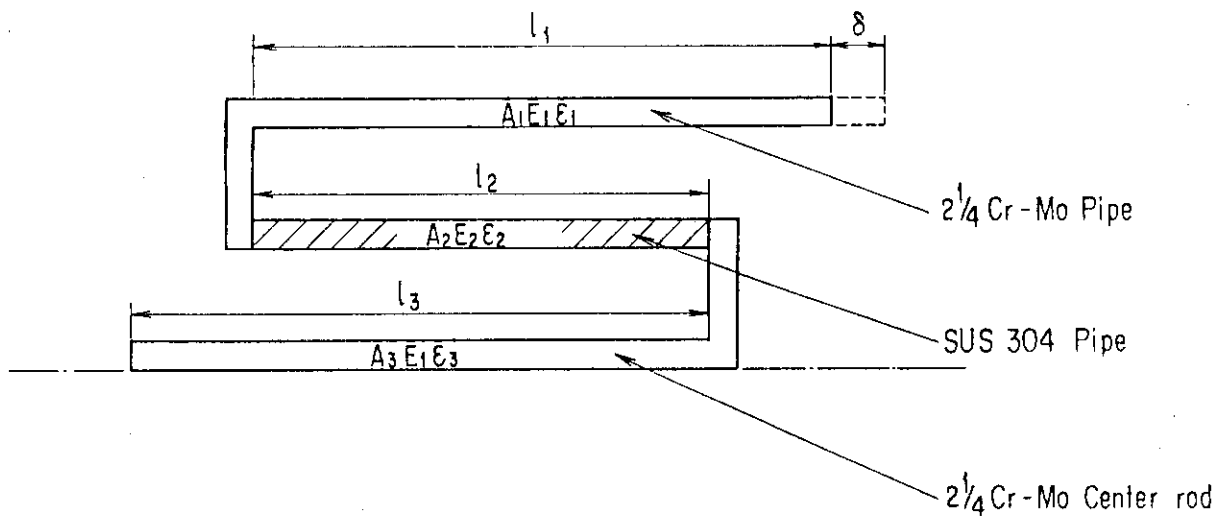


Fig. 4.2 Model of the core restraint band

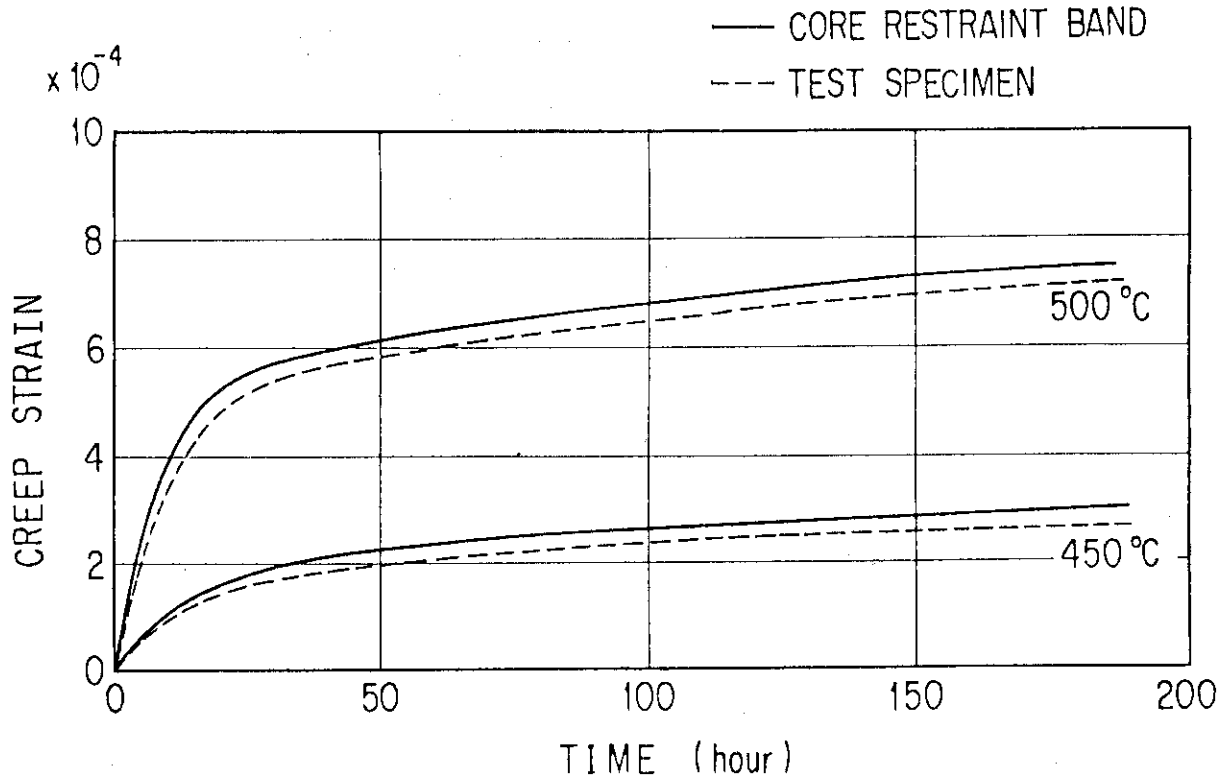


Fig. 4.3 The relationship between creep strain and time

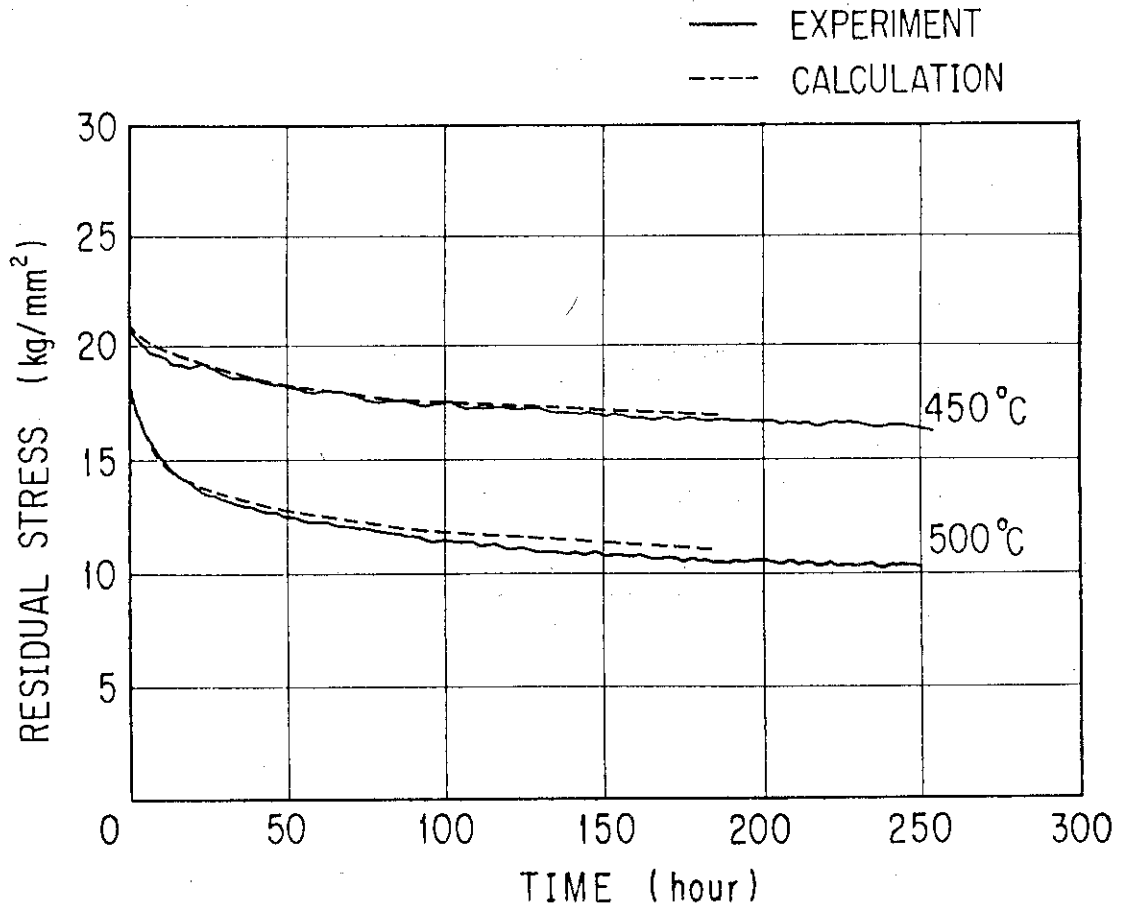


Fig. 4.4 Comparison of experimental results and calculated results of the core restraint band model

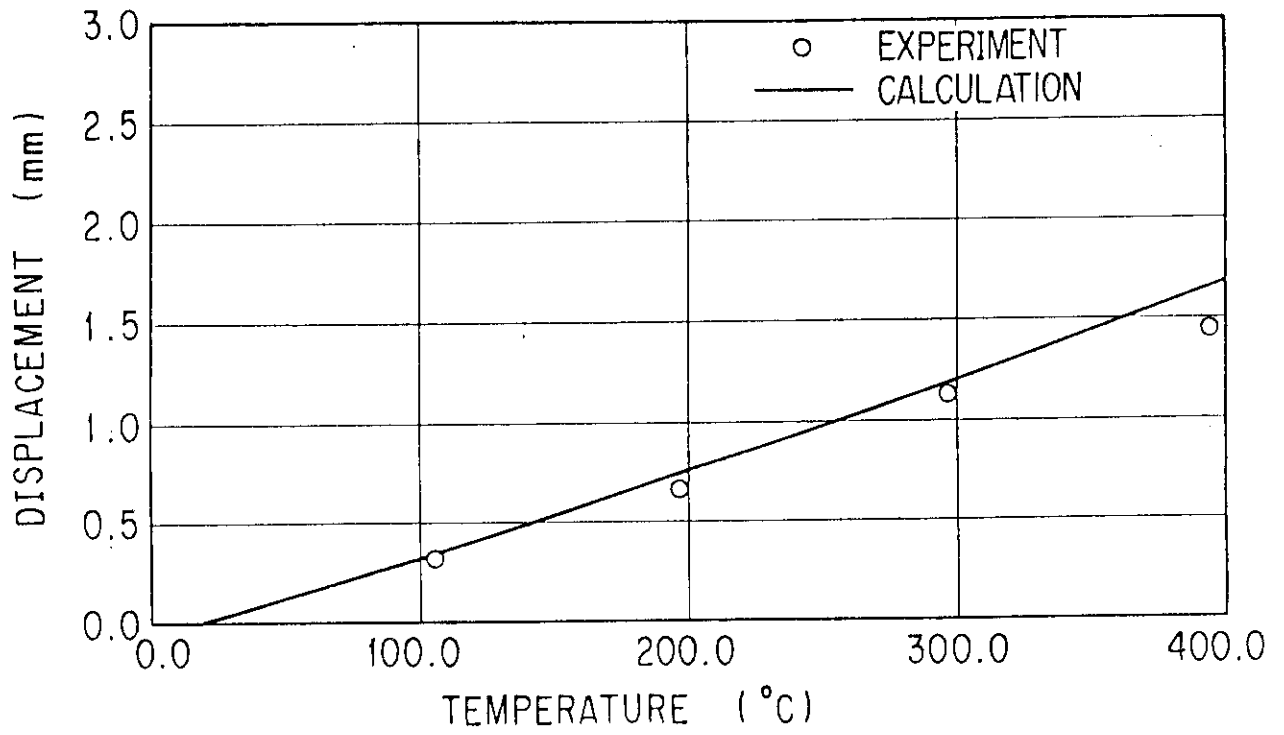


Fig. 4.5 Thermal expansion of the core restraint band model



## 5. 実験炉の炉心拘束バンドにおけるリラクセーションの推定

実験炉に使用される炉心拘束バンドは、1Cr-0.5Mo-0.3V製の中心棒の回りにSUS 304製中空円筒及び1Cr-0.5Mo-0.3V製中空円筒を交互に4層同心円状に組み合わせた構造となっている。これに対し、本試験で使用した模擬炉心拘束バンドは $2 \cdot \frac{1}{4}$ Cr-1Mo製中心棒の回りにSUS 304製中空円筒及び $2 \cdot \frac{1}{4}$ Cr-1Mo製中空円筒を1層同心円状に組み合わせた構造となっている。このように、中空円筒の材質及び組み合わせ層数が異なるため、本試験で測定したデータから直接に実験炉の炉心拘束バンドのリラクセーション挙動を求めることはできない。しかしながら、実験炉の炉心拘束バンドについても、模擬炉心拘束バンドと同様SUS 304製中空円筒の初期応力は $-5.5 \text{ kg/mm}^2$ と小さく、更に使用温度範囲は $500^\circ\text{C}$ 以下と想定されているのでSUS 304製中空円筒のクリープ変形は無視できる。従って、4.1.3と同様の方法により実験炉の炉心拘束バンドのリラクセーション挙動を推定することができると考えられる。

実験炉の炉心拘束バンドの模式図をFig. 5.1に示す。模擬炉心拘束バンドと同様に炉心拘束バンドの応力とクリープひずみの関係を求めると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma_1(t) &= \frac{\delta - \varepsilon_{1c}(t) \cdot (l_1 + 3l_2 + l_3)}{\frac{l_1 + 3l_2 + l_3}{E_1} + 4 \frac{A_1 l_2}{A_2 E_2}} \\ &= \sigma_1(0) - \varepsilon_{1c}(t) \cdot \frac{(l_1 + 3l_2 + l_3)}{\frac{l_1 + 3l_2 + l_3}{E_1} + 4 \frac{A_1 l_2}{A_2 E_2}} \end{aligned} \quad (5.1)$$

- ここで、 $\sigma_1(t)$  ; 1Cr-0.5Mo-0.3Vの応力  
 $\varepsilon_{1c}(t)$  ; 1Cr-0.5Mo-0.3Vのクリープひずみ  
 $l_1 + 3l_2 + l_3$  ; 1Cr-0.5Mo-0.3Vの合計の長さ  
 $A_1$  ; 1Cr-0.5Mo-0.3Vの断面積  
 $E_1$  ; 1Cr-0.5Mo-0.3Vのヤング率  
 $4l_2$  ; SUS 304の合計長さ  
 $A_2$  ; SUS 304の断面積  
 $E_2$  ; SUS 304のヤング率

一方、リラクセーション標準試験片の応力とクリープひずみの関係は次式で表される。

$$\varepsilon_{0c}(t) = \varepsilon_{0T}(t) - \varepsilon_{0e}(t) = \frac{\sigma_0(0)}{E_0} - \frac{\sigma_0(t)}{E_0} \quad (5.2)$$

式(5.2)を式(5.1)に代入すると、次式が得られる。

$$\sigma_1(t) = \sigma_1(0) - \left( \frac{\sigma_0(0) - \sigma_0(t)}{E_0} \right) \cdot \frac{l_1 + 3l_2 + l_3}{\frac{l_1 + 3l_2 + l_3}{E_1} + 4 \frac{A_1 l_2}{A_2 E_2}} \quad (5.3)$$

1Cr-0.5Mo-0.3Vの標準試験片によるリラクゼーション試験はFig. 5.2, Fig. 5.3に示すように、田中ら<sup>1)</sup>, James. W. Freeman<sup>2)</sup>, 篠田ら<sup>3)</sup>により行われている。J. W. Freemanの結果を式(5.3)に代入し、炉心拘束バンドの1Cr-0.5Mo-0.3V製中空円筒に $22.5\text{kg/mm}^2$ の初期応力を加えた場合の応力変化を求めると下式が得られる。

450°Cの場合；

$$\sigma_1(t) = 3.451 + 0.8476 \cdot \sigma_0(t) \quad (5.4)$$

500°Cの場合；

$$\sigma_1(t) = 3.421 + 0.8486 \cdot \sigma_0(t) \quad (5.5)$$

Fig. 5.4に式(5.4)及び式(5.5)から求めた1Cr-0.5Mo-0.3V製中空円筒の応力変化を示す。

炉心拘束バンドの温度が500°Cの場合、1000~10000時間経過後の応力は初期応力の60%~45%に減少し、450°Cの場合には88%~83%に減少すると考えられる。

このようなリラクゼーションによる応力（締め付け力）の低下を防止するためには冷却方法の改善、材質の検討等が必要であろう。

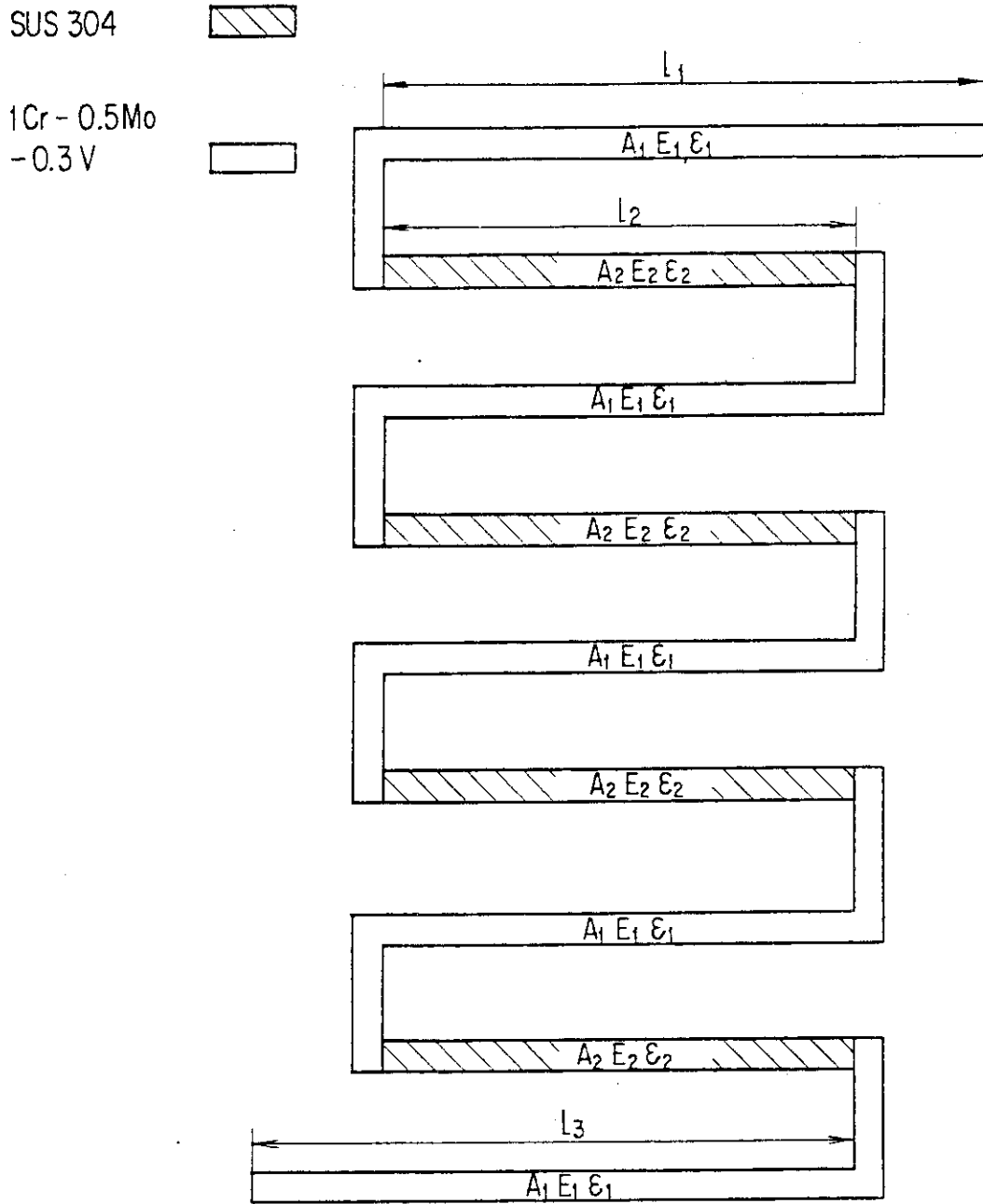


Fig. 5.1 Principle of the core restraint band of VHTR

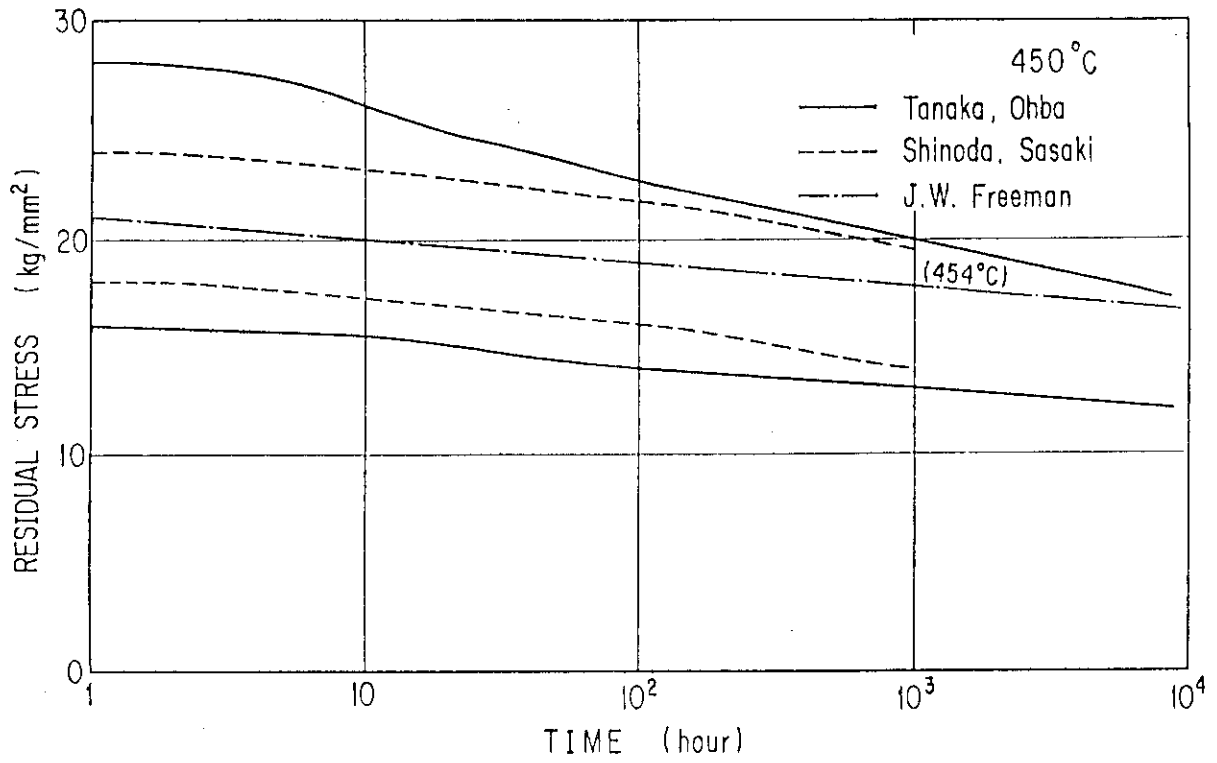


Fig. 5.2 Relaxation of the 1Cr - 0.5Mo - 0.25V specimen ( 450°C )

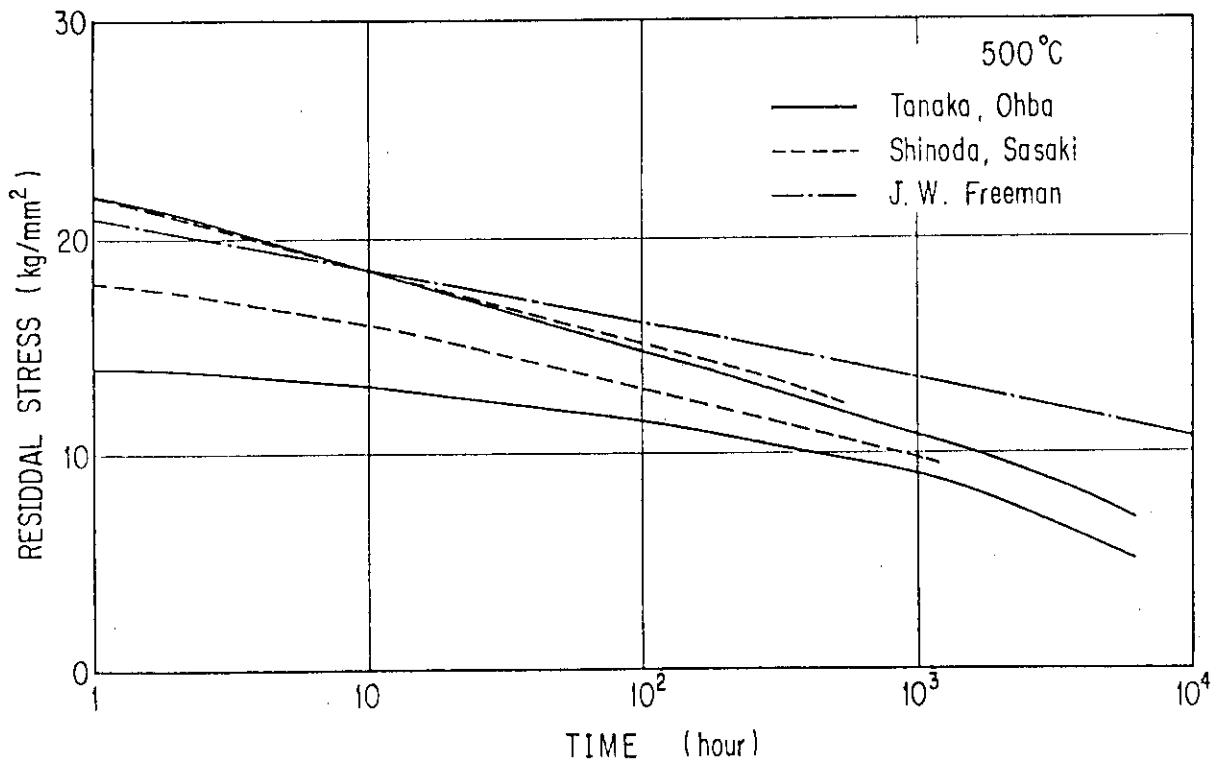


Fig. 5.3 Relaxation of the 1Cr - 0.5Mo - 0.25V specimen ( 500°C )

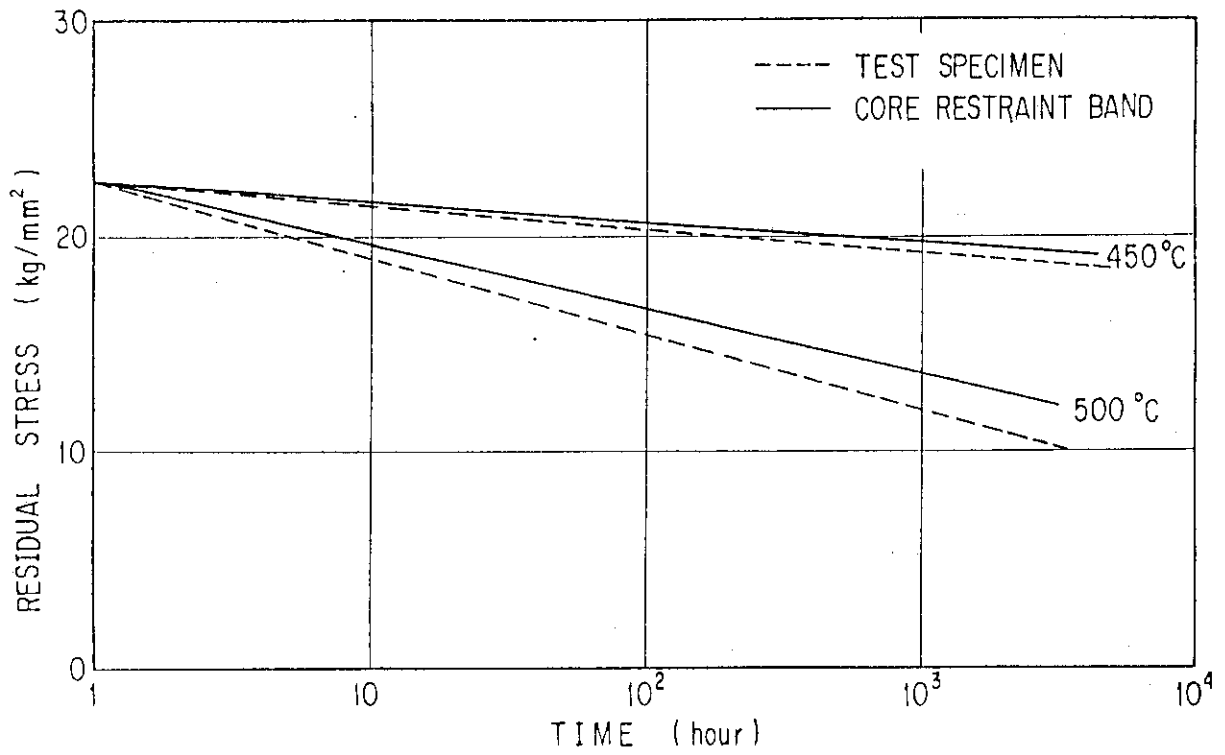


Fig. 5.4 Relaxation of the core restraint band of VHTR

## 6. 結 論

模擬炉心拘束バンドによりリラクセーションの試験を行い、次の結論が得られた。

- (1) 炉心拘束バンドのリラクセーション挙動は標準試験片によるリラクセーション試験の結果から求めることができる。
- (2) J. W. Freemanの実験結果から実験炉の炉心拘束バンドのリラクセーションを求めると、拘束バンドの締め付け力は温度が450℃の場合には $10^3 \sim 10^4$ 時間経過後初期締め付け力の88%~83%に減少し、500℃の場合には60%~45%に減少すると推定される。
- (3) 線膨張係数の異なる異種金属を組み合わせることで炉心拘束バンドを製作することにより所定の線膨張係数が得られることを確認した。

## 謝 辞

本試験を遂行するに当たり、下村 寛昭 HENDEL管理室長には多大の御協力をいただいた。特に、試験装置の導入に当たっては、有益な御助言をいただいた。また、岡本高温工学部長には、試験計画の立案時より御指導いただいた。ここに厚く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) C. Tanaka, T. Ohba : Trans. of National Research Institute for metals, VOL. 20, No. 2 (1978).
- 2) 篠田哲守, 佐々木良一 : 「材料」第18巻 第194号 (1969)
- 3) ASTM, STP, No. 187, Relaxation Properties of Steels and Super-Strength Alloys at Elevated Temperature (1956)
- 4) 平 修二 : 「金属材料の高温強度」 養賢堂
- 5) 深谷 清, 奥 達雄 : 所内資料

## 6 結 論

模擬炉心拘束バンドによりリラクセーションの試験を行い、次の結論が得られた。

- (1) 炉心拘束バンドのリラクセーション挙動は標準試験片によるリラクセーション試験の結果から求めることができる。
- (2) J. W. Freemanの実験結果から実験炉の炉心拘束バンドのリラクセーションを求めると、拘束バンドの締め付け力は温度が450℃の場合には $10^3 \sim 10^4$ 時間経過後初期締め付け力の88%~83%に減少し、500℃の場合には60%~45%に減少すると推定される。
- (3) 線膨張係数の異なる異種金属を組み合わせることで炉心拘束バンドを製作することにより所定の線膨張係数が得られることを確認した。

## 謝 辞

本試験を遂行するに当たり、下村 寛昭 HENDEL管理室長には多大の御協力をいただいた。特に、試験装置の導入に当たっては、有益な御助言をいただいた。また、岡本高温工学部長には、試験計画の立案時より御指導いただいた。ここに厚く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) C. Tanaka, T. Ohba : Trans. of National Research Institute for metals, VOL. 20, No. 2 (1978).
- 2) 篠田哲守, 佐々木良一 : 「材料」第18巻 第194号 (1969)
- 3) ASTM, STP, No. 187, Relaxation Properties of Steels and Super-Strength Alloys at Elevated Temperature (1956)
- 4) 平 修二 : 「金属材料の高温強度」 養賢堂
- 5) 深谷 清, 奥 達雄 : 所内資料

## 6 結 論

模擬炉心拘束バンドによりリラクセーションの試験を行い、次の結論が得られた。

- (1) 炉心拘束バンドのリラクセーション挙動は標準試験片によるリラクセーション試験の結果から求めることができる。
- (2) J. W. Freemanの実験結果から実験炉の炉心拘束バンドのリラクセーションを求めると、拘束バンドの締め付け力は温度が450℃の場合には $10^3 \sim 10^4$ 時間経過後初期締め付け力の88%~83%に減少し、500℃の場合には60%~45%に減少すると推定される。
- (3) 線膨張係数の異なる異種金属を組み合わせて炉心拘束バンドを製作することにより所定の線膨張係数が得られることを確認した。

## 謝 辞

本試験を遂行するに当たり、下村 寛昭 HENDEL管理室長には多大の御協力をいただいた。特に、試験装置の導入に当たっては、有益な御助言をいただいた。また、岡本高温工学部長には、試験計画の立案時より御指導いただいた。ここに厚く感謝致します。

## 参 考 文 献

- 1) C. Tanaka, T. Ohba : Trans. of National Research Institute for metals, VOL. 20, No. 2 (1978).
- 2) 篠田哲守, 佐々木良一 : 「材料」第18巻 第194号 (1969)
- 3) ASTM, STP, No. 187, Relaxation Properties of Steels and Super-Strength Alloys at Elevated Temperature (1956)
- 4) 平 修二 : 「金属材料の高温強度」 養賢堂
- 5) 深谷 清, 奥 達雄 : 所内資料