

JAERI - M  
90-152

高温工学試験研究炉の制御棒構造設計の考え方

1990年9月

西口 磯春・橘 幸男・元木 保男・塩沢 周策

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。  
入手の間合わせは、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、お申しこしてください。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, 1990

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

高温工学試験研究炉の制御棒構造設計の考え方

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

西口 磯春・橋 幸男・元木 保男・塩沢 周策

(1990年8月14日受理)

HTTRにおいては、その冷却材温度が最高約950°Cとなり、軽水炉等と比較して高温で使用されるため、特に、制御棒被覆管等の金属材料部は、その特殊性を考慮した設計を行う必要がある。本資料は、その基本的考え方についてまとめたものである。その特徴としては、制御棒の健全性評価においては繰り返し使用のための前提条件を設定し、これを満足しない事象に対しては制御棒を交換することとしている。

この基本的考え方に基づく設計方針案を併せて示した。

General Criteria for the Structural Design of the HTTR Control Rods

Isoharu NISHIGUCHI, Yukio TACHIBANA, Yasuo MOTOKI  
and Shusaku SHIOZAWA

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

(Received August 14, 1990)

General criteria for the structural design of the HTTR control rods are given. A notable benefit on the control rod design is that the control rods are replaceable. Therefore, damage to the structural metal is essentially acceptable as long as its functions to shut-down and control the reactivity are secured. In the general criteria, it is prescribed that a control rod should be replaced when it is subjected to a service condition which is severer than that set up for the integrity evaluation for repeated use. A design code based on the general criteria is also given.

Keywords: HTGR, HTTR, Control Rod, Design Code, Alloy 800H, Creep,  
Structural Design, ASME N-47, Failure Modes, Thermal Stress

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. HTTR制御棒の構造と使用条件 .....	2
3. HTTR制御棒構造設計の基本的考え方 .....	4
4. 結 言 .....	8
謝 辞 .....	8
参考文献 .....	9
付録 HTTR制御棒構造設計方針（案） .....	10

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Structure and service conditions of the HTTR control rod system .....	2
3. General criteria for the structural design of the HTTR control rods .....	4
4. Concluding remarks .....	8
References .....	9
Appendix Design code for the HTTR control rods (draft) .....	10

## 1. 緒 言

HTTRにおいては、その冷却材温度が最高約 950°C となり、軽水炉等と比較して高温で使用されるため、特に制御棒被覆管等の金属材料部は、その特殊性を考慮した設計を行う必要がある。このため、HTTRにおいては、制御棒を対象とする設計方針案を策定し、それに従って設計を進めている。具体的には制御棒被覆管、制御棒連結棒の制御棒金属材料部を対象とし、その構造健全性の評価法を定めている。

軽水炉の原子炉施設の構造等の技術基準としては、通産省告示 501 号〔1〕があり、容器、管、支持構造物等についてその構造設計の指針を与えている。

しかし、制御棒は必要に応じて交換可能であり、永久構造物としての評価を行う必要がないため、制御棒の構造設計についての基準は定められておらず、告示 501 号等を参考として設計が行われている。

HTTRの制御棒においても、交換が可能であり、安全上の位置付けも軽水炉の制御棒と同等であると考えられる。ちなみに、HTTRの制御棒に要求される機能は、次の通りである。

- 1) 通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時において燃料の許容設計限界を超えることなく炉心を未臨界にでき、かつ臨界未満を維持できること。
- 2) 通常運転時、運転時の異常な過渡変化時、事故時、地震時等において、安全、かつ確実に原子炉を停止できること。
- 3) 負荷変動、キセノン濃度変化、温度変化、燃料の燃焼度等によって生ずる反応度変化を補償できること。

本資料は、上記の機能要求を満足するために必要となる制御棒の構造設計評価の基本的考え方についてまとめたものである。

## 2. HTTR制御棒の構造と使用条件

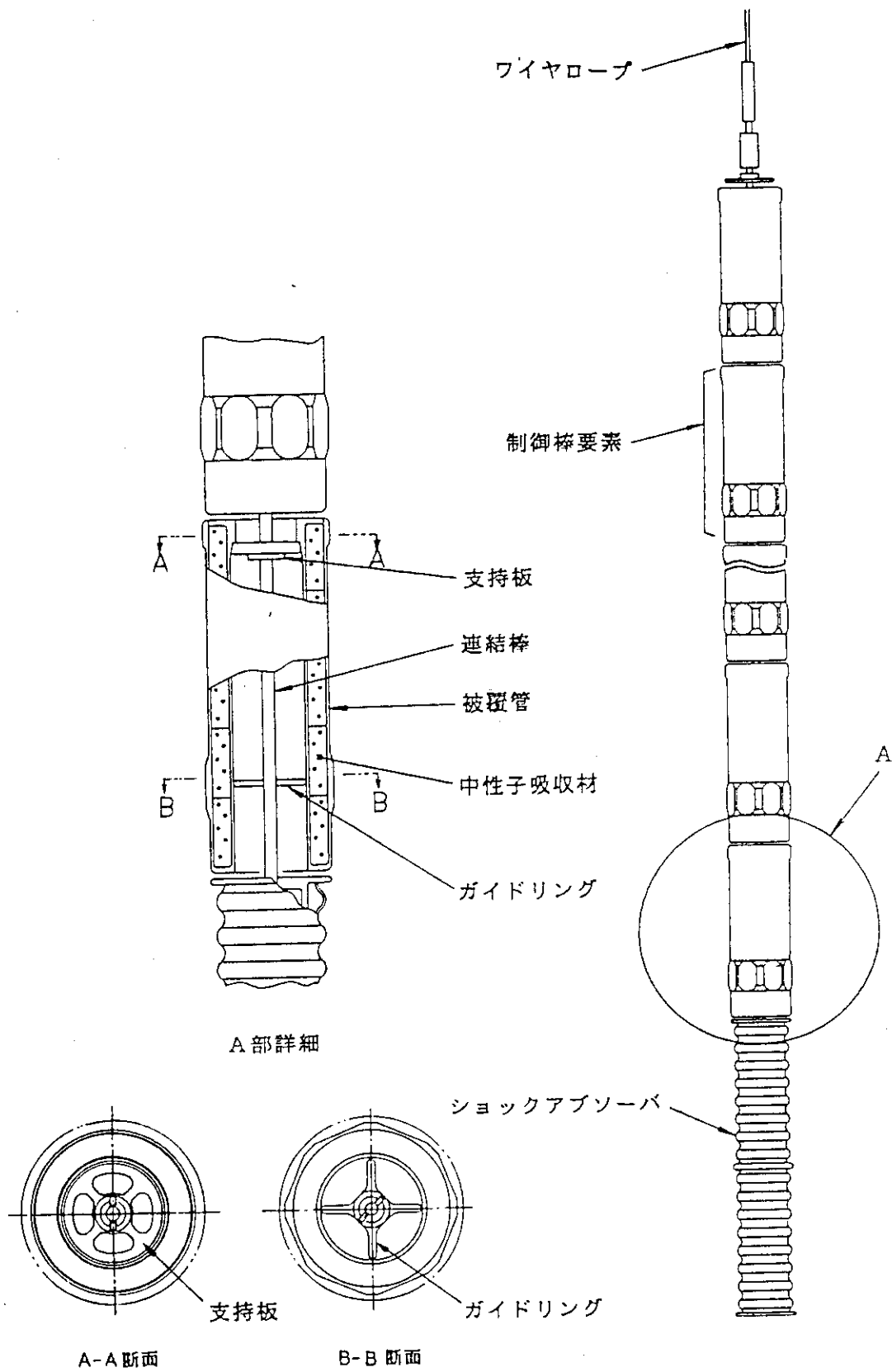
制御棒は制御棒駆動装置とともに制御棒系を構成する。

制御棒は、第 2.1 図に示すように、軸方向に多分割した二重円筒ベント型である。10個の制御棒要素を支持板を介して連結棒に連結し、各要素間は可とう性を有する構造であり、最下部には、ワイヤロープの万一の破断による制御棒の落下に備えて、ショックアブソーバを設ける。

制御棒の中性子吸収材は、炭化ほう素と黒鉛粉末を混合焼成したもので、Alloy 800H(NCF 800H)製の被覆管内に収納される。

制御棒要素の組立には機械式継手を採用し、溶接を用いない構造としている。このため、溶接による強度低下を考慮する必要はない。

制御棒は、2本を1対として、炉心内に16対配置し、1対ごとにスタンドパイプ内に設置する制御棒駆動装置により炉心内を上下に移動させる。スクラム時の制御棒の挿入は、制御棒の過度の高温化を防ぐため、まず冷却材温度の比較的低い可動反射体領域の9対を落下挿入し、ついで冷却材温度が低下した後、炉心領域の7対（中央カラムを使用する照射試験時は6対）を落下挿入させる2段階挿入方式を採用している〔2〕。



第 2.1 図 HTTR 制御棒の構造図



### 3. HTTR制御棒構造設計の基本的考え方

以下では、制御棒構造設計の基本的考え方を示す。

#### <基本方針>

制御棒は、所定の使用条件を満足する限り、所定の使用期間中繰り返し使用してもその機能をそこなわないこと。所定の使用条件を満足しない事象が生じた場合には原則としてその使用期間にかかわらず交換する。所定の使用条件とは、繰り返し使用のための健全性評価の前提条件であり、具体的には、金属温度がしきい温度を超えた場合、或は、あらかじめ想定したスクラム回数を超えた場合にはその使用期間にかかわらず交換する。制御棒の交換に至る事象に対しても制御棒は炉停止機能を確保できる設計とする。

制御棒の構造設計においては、制御棒が交換可能であることから、通常の機器の構造設計と異なり、その使用期間をプラント寿命より短く設定してもよいものとした。また、繰り返し使用に対して前提条件を設けた。

告示 501 号等の設計基準においても、繰り返し使用に対する健全性はプラントが通常時及び異常過渡時に留まる事象に対して評価しており、実質的には本規定と同じである。本規定は、前提条件としてその条件を明確に示し、その前提条件を満足しない場合には交換することを規定した点が異なっている。繰り返し使用のための前提条件を満足しない事象が発生した場合には、原則として制御棒の再使用は行わないが、その事象が終結するまでは制御棒の機能を確保しておく必要がある。このため、本規定ではこのような事象にたいしても炉停止機能の確認をすることとしている。

使用期間については、繰り返し使用の前提となるしきい温度は、制御棒の金属材料である Alloy 800 H の現状のデータベースに鑑み 900°C とする。制御棒温度が 900°C を超える可能性がある事象例を示せば、以下の通りである。

- 燃料領域制御棒誤挿入
- 原子炉出力制御系異常
- スクラム時補助ヘリウム循環機 1 基起動失敗
- 1 次冷却設備二重管破断事故
- 1 次冷却設備二重管内管破損事故

また、スクラム時に発生する熱応力が過度に繰り返された場合には、クリープ疲労損傷が蓄積される可能性がある。このため、これを防止するためにスクラム回数を制限している。

---

### <考慮すべき破損モード>

使用期間中の制御棒の構造健全性を確保するため、その使用条件及び構造の特徴を配慮し、破損モードとして以下のものを考慮し、これを防止する。

- 延性破断
- 過大な塑性変形
- 疲労破損
- 弾塑性座屈
- クリープ破断
- 過大なクリープ変形
- クリープ疲労破損
- クリープ座屈

---

上述の破損モードは、クリープ温度領域において考慮すべき破損モードとして一般性のあるものであり、原子炉冷却材圧力バウンダリの設計基準である、HTTRの高温構造設計方針〔3〕、高速原型炉第1種機器用の高温構造設計方針〔4〕及びASME Code Case N-47〔5〕のいずれにおいても同種の破損モードを想定している。

これらの設計基準のうちASME Code Case N-47において、Alloy 800Hを使用材料として規定している。その使用温度の上限値は760°Cであるが、金属材料技術研究所における1050°Cまでのクリープ破断等の強度データ〔6〕、950°Cまでのクリープ疲労データ〔7〕等より、高温強度は温度の上昇とともに単調に低下しており、上述の破損モード以外に新たな破損モードは考慮する必要がないと判断できる。

HTTRの制御棒は、通常時は炉心上部に位置しその温度は最高部でも500°C程度である。また、通常停止時にも同程度の温度に留まるため、クリープを考慮する必要があるのは、スクラム時に限られている。また、制御棒はベント形であるため内圧は発生せずまた他の一次荷重も小さく、支配的な応力はスクラム時に発生する熱応力である。このため、HTTRの制御棒の使用条件においては実質上は本規定の破損モードのすべてを考慮する必要はないが、規定の一般性を保つため、上述の設計基準と同種の破損モードを想定しそれを防止することとした。

---

### <設計評価の方法>

HTTR制御棒の構造設計は解析による設計を原則とするが、必要に応じて、解析以外の実験等の方法による設計を許容する。

---

解析による設計とは、具体的には有限要素法等による弾性或非弾性の応力解析に基づく設計をさす。解析以外の実験等の方法とは、構造物モデル試験等をいう。

---

#### <準拠する基準>

告示 501 号の炉心支持構造物の規定に準拠する。高温設計の評価法については H T T R の高温構造設計方針，高速原型炉第 1 種機器用の高温構造設計指針，および，ASME Code Case N-47 を参考にする。

---

本規定は，制御棒の構造健全性は告示 501 号の炉心支持構造物と同等の健全性で保証すれば十分である，との判断に基づく。制御棒は交換可能であり，また耐圧機器としての機能要求もない。基本的には，制御棒の変形等により挿入性に支障が生じることが無く，中性子吸収材が所定の位置に保持されれば，制御棒の炉停止機能は満足される。このため，圧力保持の点から過大な変形を防止することが要求される 1 次冷却材の圧力バウンダリを構成する機器と同等の規定で制限する必要はない。具体的には，炉心支持構造物の規定に準拠すれば，第一種容器の規定と比較して，一次応力の制限が緩和される。しかしながら，クリープ温度域における健全性評価法については，1 次冷却材の圧力バウンダリを構成する機器のための設計基準に倣うこととした。これは，これらの設計基準に定める高温構造の健全性評価法が一般性を有すること，保証すべき健全性については，許容応力線図等の安全率を適切に設定することにより対応可能であること等の理由による。

---

#### <強度データの環境効果>

照射及び時効の効果について，未照射未時効材のデータをもとに，これらの効果を補正して評価する。

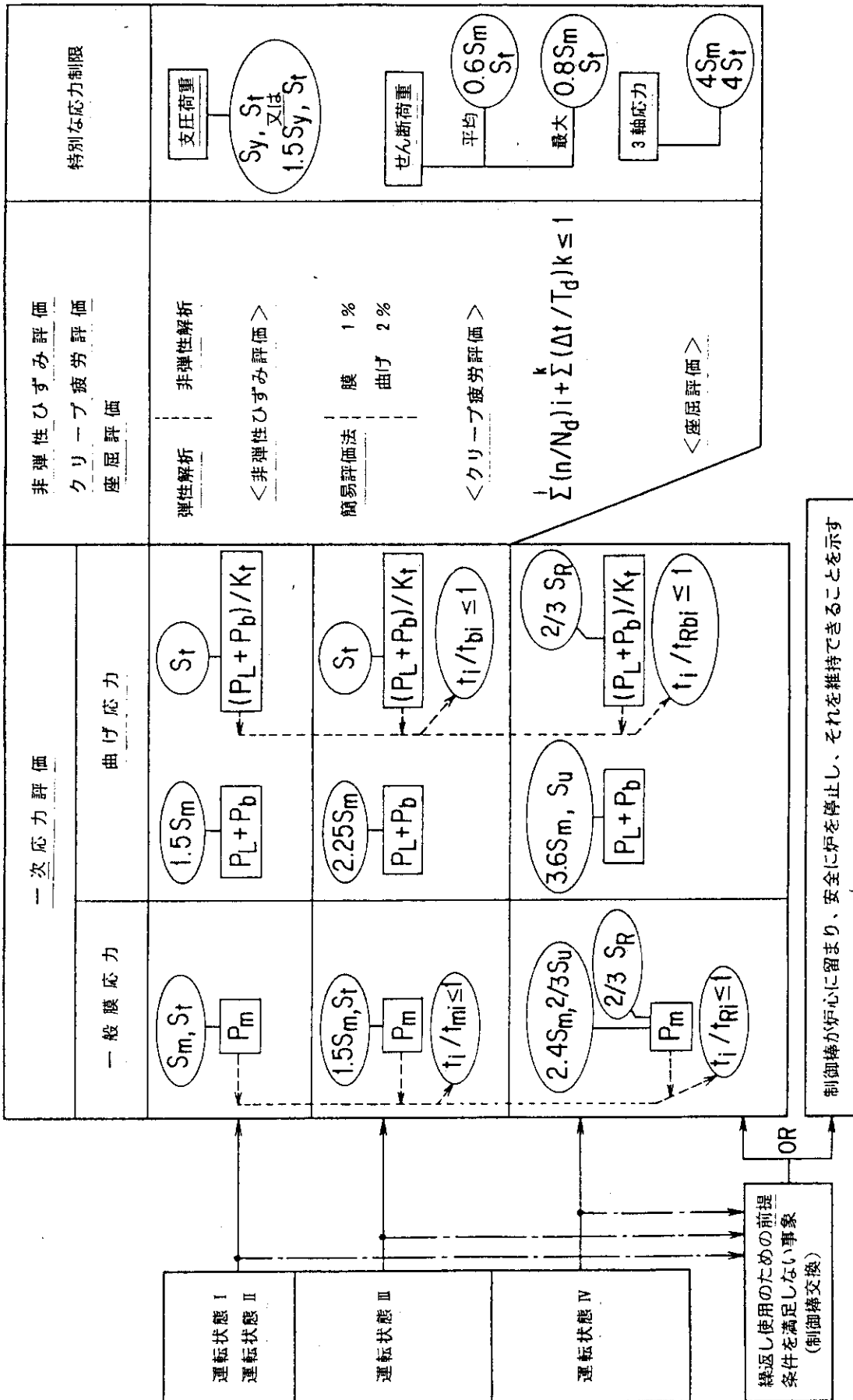
---

H T T R の制御棒において評価すべき環境効果としては，中性子照射及び時効の効果があげられる〔8,9〕。これらの影響を許容設計線図で考慮することとした。

以上の規定を具体化した H T T R 制御棒設計評価の流れ図を第 3.1 図に示す。

同図に示したように，繰り返し使用のための前提条件を満足しない事象については，一次応力制限の運転状態Ⅳ及びⅠ-Ⅳにわたる規定を満足すればよい。あるいは，制御棒が炉心に留まり，安全に炉を停止し，それを維持できる設計であることを別途示す。

第 3.1 図に基づく H T T R 制御棒構造設計方針（案）を巻末の付録に示した。なお，方針（案）で参照する材料強度基準については別途報告する予定である。



第 3.1 図 HTTR 制御棒構造設計評価の流れ図

## 4. 結 言

HTTR制御棒は、事象によっては高温状態におかれるという特殊性を有する。このため、制御棒の安全機能を最優先しつつ、交換可能でありかつ定期的な検査が可能であるという長所を十分生かした合理的な設計をすることが重要である。

本報告においては、制御棒の機能要求を満足するための構造設計評価の基本的考え方を明らかにし、それに基づく設計方針を示した。この設計方針はHTTRの設工認に役立てられる。

本設計方針は、制御棒の機能を保証する上で十分な保守性を有するが、将来のデータの蓄積により更に合理的な方向への変更は有り得ると考えられる。

## 謝 辞

本報告の内容は、昭和63年9月から11月にかけて開催された「HTTR制御棒高温構造設計方針の検討会」によるところが大きい（報告者のうち西口及び塩沢が参加）。そのメンバーであった、宮園昭八郎氏（故人、当時、構造強度研究室長）、武藤康氏（高温構造工学研究室長）、中島甫氏（材料応用工学研究室長）、渡辺勝利氏（材料応用工学研究室）、茂木春義氏（原子炉建設室）、羽田一彦氏（HTTR計画室）並びにオブザーバとして参加した、東芝の深倉寿一氏、松本富士男氏、荒木隆夫氏に感謝の意を表します。

## 4. 結 言

HTTR制御棒は、事象によっては高温状態におかれるという特殊性を有する。このため、制御棒の安全機能を最優先しつつ、交換可能でありかつ定期的な検査が可能であるという長所を十分生かした合理的な設計をすることが重要である。

本報告においては、制御棒の機能要求を満足するための構造設計評価の基本的考え方を明らかにし、それに基づく設計方針を示した。この設計方針はHTTRの設工認に役立てられる。

本設計方針は、制御棒の機能を保証する上で十分な保守性を有するが、将来のデータの蓄積により更に合理的な方向への変更は有り得ると考えられる。

## 謝 辞

本報告の内容は、昭和63年9月から11月にかけて開催された「HTTR制御棒高温構造設計方針の検討会」によるところが大きい（報告者のうち西口及び塩沢が参加）。そのメンバーであった、宮園昭八郎氏（故人、当時、構造強度研究室長）、武藤康氏（高温構造工学研究室長）、中島甫氏（材料応用工学研究室長）、渡辺勝利氏（材料応用工学研究室）、茂木春義氏（原子炉建設室）、羽田一彦氏（HTTR計画室）並びにオブザーバとして参加した、東芝の深倉寿一氏、松本富士男氏、荒木隆夫氏に感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- [1] 発電用原子力設備に関する構造等の技術基準（昭55年通商産業省告示501号）。
- [2] 村田他，高温工学試験研究炉における原子炉スクラム時の炉停止余裕の評価，  
（JAERI-Mとして発表予定）。
- [3] 高温工学試験研究炉設計室他，高温工学試験研究炉高温構造設計方針，JAERI-M  
89-005，昭和64年。
- [4] 動力炉・核燃料開発事業団，高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針，昭和59年。
- [5] 米国機械学会，Boiler and Pressure Vessel Code；Section III，Code Case  
N-47。
- [6] Y.Monma et al.，"Assessment of Elevated-Temperature Property  
Data for Alloy 800 H," Trans. National Research Institute for Metals,"  
vol. 26, No.3, 1984, pp. 33 - 47.
- [7] 深倉他，アロイ 800 Hの高温疲労特性，日本原子力学会 1990年秋の大会にて発表予  
定。
- [8] K.Watanabe et al.，"Postirradiation Tensile and Creep Properties  
of Heat-Resistant Alloys," Nucl. Technol. vol. 66, 1984, pp. 630 -  
638.
- [9] 渡辺他，アロイ 800 Hのクリープ特性に及ぼす試験雰囲気及び時効の影響，JAERI-  
M 90-061，平成2年。

## 付 録

## HTTR制御棒構造設計方針（案）

## 材料強度基準\*

別表 1.1	別図 1.1	設計応力強さ	$S_{mt}$
別表 1.2	別図 1.2	設計応力強さ（短時間）	$S_m$
別表 1.3	別図 1.3	設計応力強さ	$S_t$
別表 1.4	別図 1.4	設計降伏点	$S_y$
別表 1.5	別図 1.5	設計引張強さ	$S_u$
別表 1.6	別図 1.6	設計クリープ破断応力	$S_R$
	別図 1.7	許容繰返し数	$N_d$
		(a) 非弾性解析用	
		(b) 弾性解析用	
別表 1.8	別図 1.8	ポアソン比	$\nu$
	別図 1.9	等時応力-歪線図	
別表 1.10	別図 1.10	縦弾性係数	$E$

---

\* 上記の材料強度基準（別表 1，別図 1 を含む）は別途報告する予定である。



## 1. 序

本設計方針は、高温工学試験研究炉制御棒の使用期間中における構造健全性を確保することを目的とし、使用材料の特性を考慮して、以下に示す各様式の破損を防止するための設計規則を定めたものである。

- (1) 延性破断
- (2) 過大な塑性変形
- (3) 疲労破損
- (4) 弾塑性座屈
- (5) クリープ破断
- (6) 過大なクリープ変形
- (7) クリープ疲労破損
- (8) クリープ座屈

### 1.1 制御棒の構造

制御棒は、図 1.1.1（省略。本文第 2.1 図に同じ）に示すように、軸方向に多分割した二重円筒ベント型とする。制御棒の主要強度部材となる部分は、溶接構造とはせず、ねじ構造等の機械式継手とする。

制御棒の被覆管は二重円筒管で、円管部と外管部を下端のネジ部により連結する構造とする。中性子吸収材を被覆管に収納した各制御棒要素は、その中心を貫通する連結棒に、支持板により取り付け。支持板は連結棒に等間隔に配置し、その上面外周部近傍で被覆管内管を支持する。

### 1.2 制御棒の金属材料

制御棒の金属材料は耐食耐熱超合金 NCF 800 H とする。

## 2. 用語の定義

本設計方針において、運転状態及び応力解析に関する用語の定義は本章及び当該各章に定めるところによる。

### 2.1 運転状態に関する用語

#### (1) 運転状態 I

原子炉施設の通常運転時の状態をいう。

#### (2) 運転状態 II

運転状態 I，運転状態 III，運転状態 IV 以外の状態をいう。

#### (3) 運転状態 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。

## (4) 運転状態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。

## 2.2 応力評価に関する用語

## (1) 応力強さ

与えられた点における主応力の代数的な最大値と最小値との差をいう。(引張応力の符号は正とし、圧縮応力の符号は負として計算する。)

## (2) 膜応力

断面の垂直応力の平均値に等しい当該断面に垂直な応力成分をいう。

## (3) 曲げ応力

垂直応力の平均値からの変化成分をいう。

## (4) 一次応力

外力、内力及びモーメントに対して単純な平衡の法則を満足する垂直応力又はせん断応力をいう。

(5) 二次応力  $Q$ 

隣接部分の拘束により生ずる垂直応力又はせん断応力をいう。

(6) 一次一般膜応力  $P_m$ 

圧力又は機械的荷重によって生ずる膜応力であって、構造上の不連続性及び応力集中のない部分のものをいう。

(7) 一次局部膜応力  $P_L$ 

圧力又は機械的荷重によって生じる局部膜応力をいう。この場合において、「局部」とは、この応力が別表 1.1 (別図 1.1) に定める  $S_m$  値の 1.1 倍以上である範囲が当該機器の平均径と厚さとの積の平方根以内であり、かつ、この応力が別表 1.1 (別図 1.1) に定める  $S_m$  値の 1.1 倍を超える他の範囲と当該機器の平均半径と厚さとの積の平方根の 2.5 倍以上接近していない範囲をいう。

(8) 一次曲げ応力  $P_b$ 

一次応力の垂直応力成分のうち、 $P_m$  を除いた残りの分布応力。

(9) ピーク応力  $F$ 

応力集中又は局部応力により、一次応力又は二次応力に付加される応力の増加分をいう。

## (10) ピーク応力強さ

一次応力、二次応力及びピーク応力を組み合わせて求めた応力強さをいう。

## 3. 適用範囲

## 3.1 適用対象

1.1 に示した制御棒の金属材料部に適用する。

### 3.2 運転状態

本設計方針は、原子炉の運転状態としての運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及びⅣに対して適用するものとする。

### 3.3 使用期間及び使用温度範囲

制御棒の使用期間は5年を目安とする。但し、制御棒の繰返し使用のための前提条件を満足しない事象については、当該制御棒はその事象終了後、交換するものとする。すなわち、制御棒の金属温度が900°Cを超えた場合、あるいは、予め想定したスクラム回数を超えた場合にはその使用期間にかかわらず交換する。

### 3.4 使用環境

ヘリウム中とする。

## 4. 設計の方法

制御棒の設計評価は、原則として解析による設計とし、「5.設計評価方針」に従うものとする。但し、設計の妥当性が実験等により証明される場合には、その他の方法によっても設計することができる。

## 5. 設計評価方針

### 5.1 解析の方法

4.に定める解析による設計は、以下の(1)～(3)の方法に従って行なうものとする。

- (1) 5.2の規定に関しては、弾性解析によりこれを満足しなければならない。5.3、5.4及び5.5の規定に関しては弾性解析又は非弾性解析によりこれを満足しなければならない。
- (2) 材料強度基準は別表1及び別図1によるものとする。
- (3) 以下の規定は、使用期間中の運転状態Ⅰ～Ⅳに対して適用するものとする。

3.3で述べた制御棒の繰返し使用のための前提条件を満足しない事象については、一次応力制限の運転状態Ⅳ及びⅠ～Ⅳにわたる規定を満足することを示す。あるいは、他の方法で、制御棒が炉心に留まり、安全に炉を停止し、それを維持できる設計であることを示してもよい。

制御棒設計評価の流れ図を第5.1図（省略。本文第3.1図に同じ。）に示す。

### 5.2 一次応力の制限

一次応力に対し、下記の制限条件を満足すること。

本項に用いられる応力強さの限界は次のように定義される。

$S_{mt}$  = 実際の寿命に対して運転状態Ⅰ、Ⅱにおける応力計算に対する基準値として用いられる、一次一般膜応力強さの許容限界、許容値は別図1.1及び別表1.1に示されている。 $S_{mt}$ 値は2つの応力強さ値、 $S_m$ （非時間依存）及び $S_t$ （時間依存）の小

さい方の値である。

$S_m$  = 告示別表第2（備考）4に示されているいくつかの非時間依存強度値から定められる与えられた温度における非時間依存設計応力強さ（応力強さ限界）。

別図1.2（別表1.2）に示す。

$S_t$  = 温度及び時間依存の応力強さ限界。これらの値を確立するためのデータは、長時間、定荷重、単軸の試験から得られる。ある時間 $t$ に対して、 $S_t$ は下記を含む試験結果を考慮しなければならない。

- (a) 1%の全（弾性、塑性、1次及び2次クリープ）ひずみを生じさせるのに必要な応力。
- (b) 3次クリープを開始させるのに必要な応力。
- (c) 破断応力。

別図1.3（別表1.3）に示す。

$S_y$  = 与えられた温度における材料の降伏応力。

別図1.4（別表1.4）に示す。

(1) 運転状態I及びIIに対する制限

運転状態I、IIに関して、以下の(a)から(f)までの条件を満足しなければならない。

(a) 運転状態I及びIIに対する $P_m$ から導出された一次一般膜応力強さは $S_{mt}$ を超えてはならない。

$$P_m \leq S_{mt}$$

ここで $S_{mt}$ は全使用寿命中における特定の加わる荷重の全期間に相当する時間 $t$ とその特定の荷重事象中の最高壁厚平均温度 $T$ に対して決定される。

(b) 時間 $t$ 〔上記(a)における〕が機器の定められた全使用寿命より短い場合には、全荷重の累積効果は5.2(2)(b)の使用分数和により評価すること。更に荷重の履歴をいくつかの荷重レベルに分け、さらにその任意の荷重レベルについていくつかの温度に細分割しても良い。

(c) 運転状態I、IIに対すると $P_L$ と $P_b$ によって導出された組合せ一次膜プラス曲げ応力強さは $1.5 S_m$ と $K_t S_t$ の小さい方を超えてはならない。

$$P_L + P_b \leq \begin{cases} 1.5 S_m \\ K_t S_t \end{cases}$$

ここで

$$K_t = 1 + K_s \left( 1 - \frac{P_L}{S_t} \right)$$

$$K_s = \alpha (K - 1)$$

係数 $K$ は考えている断面の断面形状係数である。この係数は、全断面降伏を生じる荷重セットに対する当該断面の最外面層が初期降伏を起し始める荷重セットの比である。初期降伏と全断面降伏時の耐荷能力を評価するにあたっては、各荷重セット内の相互間の比は、仕様を示される運転荷重セット内の荷重の相互間の比と同一とする。 $\alpha$ は0.5とする。

(d) 胴型構造物の壁厚内の曲げを評価する際には $K = 1.5$ （長方形の断面に対して）とする。

(e)  $K_t$ の式において、 $S_t$ 値は $P_L$ と $P_b$ から誘導される組合せ応力強さの全持続期間に相当

する時間  $t$  と機器の全使用寿命中の壁厚平均温度の最高値  $T$  に対し決定される。

- (f)  $t$  が機器の全使用寿命よりも短い場合には、すべての  $(P_L + P_b)$  荷重の累積効果は 5.2 (2)(d) の使用分数総和によって評価するものとする。荷重の履歴をいくつかの荷重レベルに分け、さらにその任意の荷重レベルについていくつかの温度に細分割しても良い。

(2) 運転状態Ⅲに対する制限

運転状態Ⅲに関して、次の(a), (b)の条件を満足しなければならない。

- (a) 運転状態Ⅲに対して  $P_m$  から導出された一次一般膜応力強さは  $1.5 S_m$  と  $1.0 S_t$  の小さい方を超えてはならない。

$$P_m \leq \begin{cases} 1.5 S_m \\ 1.0 S_t \end{cases}$$

- (b) 更に運転状態Ⅰ, Ⅱ, Ⅲの運転荷重における一次荷重に対し、一次一般膜応力の使用分数和は、次の要求を満足しなければならない。

$$\sum_i \left( \frac{t_i}{t_{mi}} \right) \leq B$$

ここに

$t_i$  = 機器の全使用寿命中のうち高温  $T_i$  において特定の荷重  $P_{mi}$  にある全時間。  
 $\sum_i (t_i)$  は機器の全使用寿命中高温 ( $425^\circ\text{C}$  以上の温度) にある時間であることに注意すること。

$t_{mi}$  = 負荷応力強さ  $S_i$  に対して  $S_t$  対時間のグラフ (別図 1.3) から決定される最大許容時間。

$B$  = 使用分数係数であり、1.0 に等しい。

- (c) 運転状態Ⅲに対して  $P_L$  と  $P_b$  から導出された組合せ一次膜プラス曲げ応力強さは  $2.25 S_m$  と  $K_t S_t$  の小さい方を超えてはならない。

$$(P_L + P_b) \leq \begin{cases} 2.25 S_m \\ K_t S_t \end{cases}$$

ここに  $K_t$  は 5.2 (1)(c) で定義したものである。

- (d) 更に、運転状態Ⅰ, Ⅱ, Ⅲにおける一次荷重に対し、一次膜プラス曲げ応力の使用分数和は 1.00 を超えてはならない。

$$\sum_i \left( \frac{t_i}{t_{bi}} \right) \leq 1.00$$

ここに  $t_i$  は温度  $T_i$  における荷重の全持続期間であり、 $t_{bi}$  は  $(P_L + P_b) / K_t$  に等しい応力値に対して別図 1.3 により定められる時間である。

(3) 運転状態Ⅳに対する制限

運転状態Ⅳに関して次の条件を満足しなければならない。

- (a) 運転状態Ⅳに対して  $P_m$  から導出された一次一般膜応力強さは以下の制限値のうち最も小さいものを超えてはならない。

$$P_m \leq \begin{cases} \frac{2}{3} S_u \\ 2.4 S_m \\ \frac{2}{3} S_R \end{cases}$$

$S_R$  : 別図 1.6 に示す時間  $t$  に対応する破断応力

(b) 更に、全運転状態にわたる一次膜応力の使用分数和は、次の要求を満足しなければならない。

$$\sum_i \left( \frac{t_i}{t_{Ri}} \right) \leq B_r$$

ここで、

$t_i$  = その機器の全使用寿命のうち高温  $T$  で、ある特定の荷重による  $P_{mi}$  の加わる全時間。 $\sum_i (t_i)$  はその機器の使用寿命中高温（425°C 以上の温度）である部分であることを注意すること。

$t_{Ri}$  = 負荷応力強さ  $1.5 P_{mi}$  に対して最小応力破断時間のグラフ（別図 1.6 を参照）から定められる最大許容時間。

$B_r$  = 使用分数係数であり、1.0 に等しい。

(c) 運転状態Ⅳの荷重に対し計算される一次膜+曲げ応力強さは、以下の制限値のうち最も小さいものを超えてはならない。

$$(P_L + P_b) \leq \begin{cases} S_u \\ 3.6 S_m \\ \frac{2}{3} K_t S_R \end{cases}$$

(d) 更に、全運転状態にわたる一次膜プラス曲げ応力の使用分数和は、1.00 を超えてはならない。

$$\sum_i \left( \frac{t_i}{t_{Rbi}} \right) \leq 1.00$$

ここに  $t_i$  は温度  $T_i$  における全負荷時間であり、 $t_{Rbi}$  は  $1.5 (P_L + P_b) / K_t$  に等しい応力値に対して別図 1.6 によって定められる時間である。

### 5.3 特別な応力制限

5.3 の規定は運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに対し適用するものとする。

#### 5.3.1 純せん断応力の制限

純せん断荷重を受ける部分にあっては、次の(1)及び(2)の制限で、それぞれ小さい方の値を超えてはならない。

$$(1) \quad \tau_m \leq \begin{cases} 0.6 S_m \\ S_t \end{cases}$$

$\tau_m$  : 純せん断荷重による断面平均せん断応力。

$S_m, S_t$  : 別図1(別表1)に定めるところによる。ただし壁厚平均金属温度を断面平均金属温度に読み替えるものとする。

(2) 中実円断面の部分がねじり荷重を受ける場合

$$\tau_o \leq \begin{cases} 0.8 S_m \\ S_t \end{cases}$$

$\tau_o$  : ねじり荷重による最大せん断応力。ただし応力集中によるものを除く。

### 5.3.2 支圧応力の制限

支圧荷重を受ける部分にあっては次の(1)及び(2)の制限で、それぞれ小さい方の値を超えてはならない。

(1) 支圧荷重作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合。

$$\sigma_{BL} \leq \begin{cases} 1.5 S_y \\ S_t \end{cases}$$

$\sigma_{BL}$  : 支圧荷重による平均支圧応力

$S_y$  : 支圧荷重を受ける部分の金属温度に対して別表1.4(別図1.4)に定める値。

$S_t$  : 考えている負荷状態における支圧荷重を受ける部分の金属温度及びその状態の累積持続時間に対して別表1.3(別図1.3)に定める値。

(2) (1)以外の場合

$$\sigma_{BL} \leq \begin{cases} S_y \\ S_t \end{cases}$$

### 5.3.3 3軸応力の制限

一次応力に関して次の制限のうち小さい方の値を超えてはならない。

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq \begin{cases} 4 S_m \\ 4 S_t \end{cases}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  : 一次応力の主応力

$S_m, S_t$  : 5.2に定めるところによる。

### 5.4 ひずみの制限

5.4の規定は運転状態I, II, IIIに対し適用するものとする。

#### 5.4.1 非弾性解析に対するひずみの制限

高温状態が予想される部分において、最大の累積非弾性ひずみは次の値を超えないものとする。

(a) 壁厚を通して平均されたひずみ 1%

(b) 壁厚を横切るひずみの等価線形分布に基づく表面ひずみ 2%

上記の制限は、考えている部位の予定運転期間中に累積するひずみの計算値に対して適用し、かつ、期間中に顕著な過渡変化が生じないような、比較的安定した時期において計算されるひずみに適用される。これらの制限は、三つの主ひずみのうち正ひずみの最大値に適用される。正ひ

ずみは、ひずみの方向に要素の長さが増大するものとして定義される。主ひずみはひずみ成分 ( $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{zx}$ ) を用いて計算される。ひずみが壁厚にわたるいくつかの位置で計算される場合、それらはまずひずみの成分の段階で平均化、または線形化される。次に、上に定めた平均及び表面のひずみについての制限値と比較するため、ひずみの値を組み合わせ主ひずみを決定する。

#### 5.4.2 弾性解析を用いてひずみ制限を満足させる場合

##### (1) 一般的要求事項

弾性解析が用いられる場合、5.4.2(2)(3)(4)のいずれかが満足されるならば、5.4.1のひずみ制限は満足されているとしてよい。以下の(a)から(f)の指針は、5.4.2(2)(3)(4)において評価すべき適切なサイクルを設定する際に用いるものとする。

- (a) 設計仕様書に定められている個々のサイクルを、ここでの要求事項を満足させるために、さらにいくつかのサブ・サイクルに分割することはできない。
- (b) 最大二次応力範囲  $Q_R$  及び、すべての運転状態 I, II の運転荷重が作用している間に生じる  $(P_L + P_b / K_t)$  の最大値を含むサイクルが少なくともひとつ定められなければならない。 $K_t$  の値は 5.2(1)(c) に示した式を用いて決定される。
- (c) サイクルのいくつかは、グループとしてまとめることができ、5.4.2(2)(3)(4)のいずれかの適用可能な条件に基づいて評価することができる。5.4.2(4)は、選ばれた運転サイクルに対して別の非弾性評価を与えていることに注意すること。
- (d) 上に定めたすべてのサイクルが 5.4.2(2)又は 5.4.2(3)の条件を満足するならば 5.4.1のひずみ制限は満足されている。5.4.2(4)は、5.4.1のひずみ制限に見合うひずみの決定法を示している。上記(c)項の規定において、5.4.2(2)及び 5.4.2(3)の制限を満足しているサイクル又はそのグループに対しては、ラチェッティング又は促進クリープによるひずみの増分を考慮する必要はない。
- (e) 5.4.2(4)の等時応力-ひずみ曲線を選択する際に用いる時間及び温度のパラメータは、5.4.2(4)の手法に基づいてサイクルの全体を評価するか一部を評価するかにかかわらず、その総和が全運転時間となる。
- (f) 次の定義が 5.4.2(2)及び 5.4.2(3)に適用される。

$$X \equiv (P_L + \frac{P_b}{K_t})_{\max} \div S_y$$

ここで、 $S_y$  は、評価する運転荷重が作用している間の、最高及び最低の壁厚平均温度における  $S_y$  値の平均であり、 $(P_L + (P_b / K_t))_{\max}$  は、評価する運転荷重が作用している間の一次応力の最大値で、 $K_t$  により曲げに対する補正を施したものである。

$$Y \equiv \frac{(Q_R)_{\max}}{S_y}$$

ここで、 $(Q_R)_{\max}$  は、考えている運転荷重が作用している間の二次応力の最大範囲であり、 $S_y$  は期間中の最高及び最低の壁厚平均温度における  $S_y$  値の平均である。

- (g) 5.4.2(4)においては、 $S_y$  値が、二次応力範囲  $Q_R$  を規定する応力の極値に対する壁厚平



均温度の低い方の値に対応していることを除いて、上記(f)の規定を適用する。

## (2) 判定 1

判定 1 は

$$X + Y \leq S_a / S_y \quad (1)$$

ここで、 $S_a$  は次のうち小さい方の値である。

- (a) サイクル中の最高壁厚平均温度及び  $10^4$  hr の時間を用いた  $1.25 S_t$ 、及び
- (b) サイクル中の、最高及び最低の壁厚平均温度に対する  $S_y$  値の平均

## (3) 判定 2

判定 2 は

$$X + Y \leq 1 \quad (2)$$

この判定は各二次応力範囲  $Q_R$  を規定する応力の極値の一つにおける壁厚平均温度がクリープ領域以下の場合に適用される。この場合、クリープ領域を定める限界温度は、 $S_m$  が  $10^6$  hr に対する  $S_t$  に等しくなる温度として定義される。

## (4) 判定 3

(a) 局部的構造不連続部から離れたところで軸対称荷重を受ける軸対称構造物については、各二次応力範囲  $Q_R$  を規定する応力の極値のひとつに対応する壁厚平均温度がクリープ領域以下である場合は、上記 5.4.2 (2) 及び 5.4.2 (3) の基準は以下で述べるように取って代えることができる。この場合もクリープ領域を定める限界温度は、 $S_m$  が  $10^6$  hr に対応する  $S_t$  に等しくなる温度として定義される。管または容器の曲げなどの非軸対称の荷重は、しばしば控え目に軸対称荷重として含められ、この規定を適用することができる。5.4.2 (2) の制限は、熱サイクルによるラッチェティング及びクリープの促進を防止するものであるが、この以下に示す制限は、機器の運転期間中に累積され得る非弾性ひずみ量を、5.4.1 のひずみ制限値を超えないように抑えるものである。したがって、この以下に示す制限は、材料のクリープ特性及び運転の時間と温度に依存するものである。以下では、弾性的に計算される一次及び二次応力が、有効クリープ応力  $\sigma_c$  を決定するために用いられ、さらに  $\sigma_c$  は全ラッチェティングひずみを決定するために用いられる。荷重のあらゆる組合せに対する有効クリープ応力  $\sigma_c$  は、無次元化した形で図 5.4.2.1 に与えられている。

(b) クリープ・ラッチェティングひずみは、 $\sigma_c$  を 1.25 倍し、全運転期間の温度-時間履歴を通して一定の  $1.25 \sigma_c$  の応力がかかる場合に生じるクリープひずみを評価して決定される。別図 1.9 の等時応力-ひずみ曲線は、クリープ・ラッチェティングひずみを得るために使用するものとする。全運転期間を温度-時間によりいくつかに分け、各区分ごとのクリープひずみ増分を個別に評価してもよい。等時応力-ひずみ曲線を選択する際に用いた時間の合計は、全運転時間となる。各温度-時間区分ごとのクリープひずみ増分は、全クリープラッチェティングひずみを得るために加算されるものとする。こうして得られる値は、1% に制限するものとする (下の(d)を参照)。

(c) 図 5.4.2.1 の領域  $S_1$ 、 $S_2$  及び P における有効クリープ応力の無次元表示  $Z = \sigma_c / S_y$  は、 $S_2$  及び P において

$$Z = X \cdot Y \quad (3)$$

また、領域  $S_1$  において

$$Z = Y + 1 - 2\sqrt{(1-X)Y} \quad (4)$$

で与えられる。

領域  $P$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  の境界を定める式は図 5.4.2.1 に示されている。この方法は、 $\sigma_c$  が降伏応力  $S_y$  より低い場合にのみ適用することができる（領域  $E$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  を参照）。

(d) 弾性追従を伴う応力（たとえば、半径方向の壁厚内温度変化によって生じる応力を除く二次応力）は、別途正当化されない限り、この評価のためにすべて一次応力として分類しなければならない。あるいはまた、そのような応力によるひずみを計算して、 $\sigma_c$  によるひずみに加算し、その合計を 5.4.1 の値に制限してもよい。後の方法がとられる場合、弾性追従を伴う応力は、二次応力として扱われることになる。

(e) 上記(b)の制限の別法として、選択されたいくつかの運転サイクルにより生じる全非弾性ひずみは、非弾性解析を用いて別個に評価してもよい。これらのひずみの和に、弾性追従によるひずみ（上に述べた方法により評価される）と  $\sigma_c$  によるひずみを加算した合計は、1%を超えてはならない。

#### (5) 判定 4

告示第 17 章第 96 条第 1 項第 1 号ニ及び告示第 2 章第 13 条第 1 項第 1 号への制限が満たされ、さらに以下の(a)から(c)の要求事項が満たされるならば、5.4.1 のひずみ制限は満足しているとみなされる。

$$(a) \quad \sum_i \frac{t_i}{t_{di}} \leq 0.1$$

ここで

$t_i$  = 金属が温度  $T_i$  にある運転期間中の全時間。実際の運転時間は、すべての  $t_i$  の合計より大きくならないことに留意すること。

$t_{di}$  = 温度  $T_i$ 、及び  $T_i$  に対する  $S_y$  を 1.5 倍した  $1.5 S_y | T_i$  で表わされる応力値を別図 1.6 に当てはめることにより決定される最大許容時間。

$1.5 S_y | T_i$  が別図 1.6 に示される応力値を超える場合は、この判定を満足することはできない。 $1.5 S_y | T_i$  が別図 1.6 に与えられている応力の最低値よりも低い場合は、一定温度の線はその材料に対する別図 1.6 の最大勾配を用いて、より大きな  $t_{di}$  の側に外挿することができる。

$$(b) \quad \sum_i \epsilon_i \leq 0.2\%$$

ここで  $\epsilon_i$  は、金属温度が  $T_i$  にある運転期間中の全時間に対して作用した  $1.25 S_y | T_i$  の応力レベルにより生じるクリープひずみ。設計運転期間がいくつかの時間区間に区分される場合には、運転期間はすべての時間区間の合計より大きくないものとする。すなわち

$$\sum_i t_i | T_i \leq \text{運転期間}$$

(c) 告示第 17 章第 96 条第 1 項第 1 号ニの  $3 \bar{S}_m$  制限に対しては  $3 \bar{S}_m$  あるいは  $3 S_m$  の小さい方の値を用いる。ここで

$$3 \bar{S}_m = \text{応力差（一次プラス二次応力強さ } P+Q \text{ の最大範囲を生じさせる）の}$$

一方の極値のみが  $425^{\circ}\text{C}$  を超える温度で起こる場合 ( $1.5 S_m + S_{rH}$ )、  
 $3 S_m$  = 応力差 ( $P+Q$  の最大範囲を生じさせる) の両方の極値が  $425^{\circ}\text{C}$  を超える温度で起こる場合 ( $S_{rH} + S_{rc}$ )。

$S_{rH}, S_{rc}$  = 応力サイクルのホットとコールドの極値の温度における緩和強さ。

ホットの温度条件は、応力サイクルの最高運転温度として定義される。ホットな時間は、運転期間中、壁厚平均温度が  $425^{\circ}\text{C}$  を超える時間に等しい。コールドな温度とは、応力サイクルにおける二つの極限に対応する温度のうち低い方の温度として定義される。コールドな時間はここでも、運転期間中、壁厚平均温度が  $425^{\circ}\text{C}$  を超える時間に等しい。本項の基準では、全運転期間はさらに温度-時間ブロックに区分する必要はない。二つの緩和強さ  $S_{rH}$  及び  $S_{rc}$  は、 $1.5 S_m$  の初期応力より出発し、初期ひずみを  $425^{\circ}\text{C}$  以上の運転時間に等しい間だけ保持する純粋な単軸緩和解析を行なうことにより決定することができる。

## 5.5 クリープ疲労評価

### 5.5.1 一般的要求事項

#### (1) 損傷式

運転状態 I, II, III の運転荷重の組合せは、保持時間とひずみ速度の効果を含むクリープ及び疲労の累積損傷について評価しなければならない。設計が受け入れられるためには、クリープ疲労損傷は次の関係を満足しなければならない。

$$\sum_{j=1}^p \left( \frac{n}{N_d} \right)_j + \sum_{k=1}^q \left( \frac{\Delta t}{T_d} \right)_k \leq D \quad (5)$$

ここで

$D$  = 全クリープ・疲労損傷

$n$  = 荷重状態  $j$  の負荷サイクル数

$(N_d)_j$  = サイクル中の最高金属温度に対応する設計疲労曲線 (別図 1.7 (a) 及び別図 1.7 (b)) の一つから求められる荷重  $j$  に対する設計許容サイクル数、設計疲労曲線は、曲線上に記されたひずみ速度より大きいか、あるいは等しいひずみ速度による完全両振り荷重条件から決定されたものである。一方、別図 1.7 (b) の設計疲労曲線は保持時間及び低ひずみ速度の効果を含んでおり、弾性解析の場合に用いられる。

$q$  = クリープ損傷計算の対象となる点における、特定の高温運転期間を表わすために必要な時間区間 (それぞれが固有の応力と温度の組合せをもつ) の数。

$t$  = 荷重条件  $k$  の継続時間

$(T_d)_k$  = 時間区間  $k$  の間に生じる、対象とする点の与えられた応力及び最高温度に対して別図 1.6 (応力-破断曲線) から決定される許容時間。弾性解析に対する適当な応力の量は応力強さである。非弾性解析に対する適当な応力の量

は次に表わすような相当応力である。

$$\sigma_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

ここで $\sigma_i$ は主応力である。

いずれの解析の型式にしても、許容時間は最大応力（時間区間kの間の対象とする点における）を係数 $K^*$ （0.9とする）で除した応力値を別図1.6に当てはめることにより決定される。

$(\Delta t)_k$  = 時間区間kの期間

“q”の時間区間の合計は指定された全高温運転期間に等しいか、あるいはこれを超えなければならない。

## (2) 等価ひずみ範囲

等価ひずみ範囲は、弾性解析においても非弾性解析においても、疲労損傷和を評価するために用いられる。設計仕様書に特定の順序を描いたヒストグラムが含まれる場合には、ひずみ範囲はヒストグラムに記述されたサイクルに対して計算するものとする。

等価ひずみ範囲は以下のように計算される。

ステップ1 完全なサイクルに対してすべてのひずみ成分の履歴（ $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 対時間）を計算する。応力集中係数はこのステップで加える。

ステップ2 サイクル中、最大あるいは最小となる一つの時点を選ぶ。このとき点を添字iで示す。

ステップ3 サイクル中の各時点における各ひずみ成分から、時点iにおける対応ひずみ成分を差し引くことにより、ひずみ成分の変化の履歴を計算する。

$$\Delta \epsilon_x = \epsilon_x - \epsilon_{xi}$$

$$\Delta \epsilon_y = \epsilon_y - \epsilon_{yi}$$

等々。

ステップ4 各時点ごとの等価ひずみ範囲を計算する。

$$\Delta \epsilon_{\text{equiv}} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\Delta \epsilon_x - \Delta \epsilon_y)^2 + (\Delta \epsilon_y - \Delta \epsilon_z)^2 + (\Delta \epsilon_z - \Delta \epsilon_x)^2 + \frac{3}{2} (\Delta \gamma_{xy}^2 + \Delta \gamma_{yz}^2 + \Delta \gamma_{zx}^2)] \quad (6)$$

ステップ5 この等価ひずみ範囲の最大値をひずみ範囲（ $\epsilon_t = \Delta \epsilon_{\text{equiv}}$ ）として疲労曲線に当てはめる。

(a) 上記の手順は、主ひずみが方向を変えると変えないとにかかわらず使用してよい。

(b) 上記の方法の別法として、主ひずみが回転しない場合にのみ適用可能な方法が次に示す(3)に与えられている。

## (3) 別の計算法—等価ひずみ範囲

等価ひずみ範囲に関する別の計算方法は以下の通りである。

ステップ1 5.5.1(2)のステップ1に変更なし。

ステップ2 サイクル中の各時点における主ひずみを決定する。

ステップ3 ステップ2の各時間間隔ごとに、ひずみ差  $\epsilon_1 - \epsilon_2$ ,  $\epsilon_2 - \epsilon_3$ ,  $\epsilon_3 - \epsilon_1$ , を決定する。

ステップ4 サイクル中の各時点におけるそれぞれの値から、時間  $i$  における対応する値を減ずることにより、みずみ差の変化の履歴を決定する。これらのひずみ差を次のように表わす。

$$\Delta(\epsilon_1 - \epsilon_2) = \epsilon_{12} - \epsilon_{12i}$$

$$\Delta(\epsilon_2 - \epsilon_3) = \epsilon_{23} - \epsilon_{23i}$$

$$\Delta(\epsilon_3 - \epsilon_1) = \epsilon_{31} - \epsilon_{31i}$$

ステップ5 等価ひずみ範囲を次のように計算する。

$$\Delta \epsilon_{\text{equiv}} = \frac{\sqrt{2}}{3} \{ [\Delta(\epsilon_1 - \epsilon_2)]^2 + [\Delta(\epsilon_2 - \epsilon_3)]^2 + [\Delta(\epsilon_3 - \epsilon_1)]^2 \}$$

ステップ6 この等価ひずみ範囲の最大値をひずみ範囲 ( $\epsilon_t = \Delta \epsilon_{\text{equiv}}$ ) として疲労曲線に当てはめる。

## 5.5.2 非弾性解析を用いる場合の制限

5.5.1(1)の要求事項を満足させるために非弾性解析が用いられる場合、以下の(a), (b), 及び(c)の規則が適用される。

(a) クリープ損傷は次の積分形の式を用いて計算することもできる。

$$\int_0^t \frac{dt}{T_d}$$

ここで、

$T_d$  = 荷重  $k$  において、与えられた応力強さ（弾性解析に対して）又は与えられた相当応力（非弾性解析に対して）における許容時間。 $T_d$  値は応力対破断時間曲線（別図 1.6）において、（荷重  $k$  における）計算応力を係数  $K' = 0.9$  で除した応力値をあてはめることにより得られる。

(b) 疲労損傷和は、別図 1.7(a)の設計疲労曲線に当てはめる際に等価ひずみ範囲を用いることにより評価するものとする。

(c) 全損傷  $D$  は 1.0 を超えないものとする。

## 5.5.3 弾性解析を用いる場合の制限

(1) 一般的要求事項

(a) 本節の弾性解析規則は 5.4.2 の弾性ラチェッティング規則が満足された場合にのみ使用することができる。しかし、半径方向温度勾配による二次応力範囲は弾性クリープ・疲労規則の適用性について決定する際に 5.4.2(2)又は 5.4.2(3)の  $(Q_R)_{\text{max}}$  から除外してもよい。

- (b) 5.5.1(1)の要求事項を満足させるために弾性解析が用いられる場合、疲労及びクリープ損傷は線形に合計されるものとし、全クリープ疲労損傷はDは1を超えないものとする。個々の損傷項は次節に従って評価するものとする。
- (c) 局部熱応力に対して応力およびひずみの成分を弾性的に計算する場合、ポアソン比に代る数値を次式によって定めるほかは弾性の式を用いるものとする。

$$\nu = 0.5 - (0.5 - \nu_e) \left( \frac{3 \bar{S}_m}{E \epsilon_t} \right)$$

ただし、 $\nu$ は $\nu_e$ より小とはしない。

ここで

$\nu_e$  = ポアソン比の弾性の値

$3 \bar{S}_m$  = 5.4.2(5)で定められる値

$E$  = サイクル中の最高金属温度に対する縦弾性係数(別表 1.10 から得られる。)

$\epsilon_t$  は考えている指定の繰り返し回数に対して別図 1.7 (b)の疲労曲線から得られる許容ひずみ範囲である。

## (2) 疲労損傷評価

- (a) 疲労損傷項に対して、 $N_d$ を決定するために疲労曲線と併せてひずみ範囲 $\epsilon_t$ が用いられる。適切な疲労曲線は、別図 1.7 (a)又は別図 1.7 (b)から選ばれ、また、サイクル中に経験する最高金属温度に対応するものが用いられる。別図 1.7 (b)の曲線は低ひずみ速度及び保持時間に対する疲労寿命の低下を含んでいる。別図 1.7 (a)の曲線は上図に記された値よりも大きいかあるいは等しいひずみ速度による連続的なサイクルの場合にのみ用いることができる。
- (b) 疲労損傷の計算に弾性解析を用いる場合、計算された最大ひずみ成分は、塑性またはクリープの流動による真のひずみの累積を表わしていない。したがって、考えている領域の非弾性挙動によるひずみの増大を考慮するために次の方法を用いることができる。

$$\epsilon_t = \left( \frac{S^*}{\bar{S}} \right) K^2 \epsilon_n + K \epsilon_c + K_T \epsilon_F \quad (7)$$

ここで (図 5.5.3.1 参照)

$\epsilon_t$  = 荷重サイクルに対して得られる最大全等価ひずみ

$K$  = 局部形状不連続に対する理論的弾性応力集中係数、又は温度と荷重の両方の履歴を考慮して局部形状不連続部に対して適用できる疲労強度減少係数。低温連続サイクルの疲労強度係数は、低ひずみ速度又はサイクル間の断続的な保持時間を伴う高温サイクルに適用してはならない。

$S^*$  = 応力集中係数を除く公称応力指標であり、図 5.5.3.1 の応力-ひずみ曲線においてひずみ $\epsilon_n$ を当てはめることにより決定される。

$\bar{S}$  = 図 5.5.3.1 の応力-ひずみ曲線において $K \epsilon_n$ を当てはめることにより決定される応力指標。

$\epsilon_n$  = ある荷重条件に対して形状により発生する局部応力集中、ピーク熱ひずみ及びクリープひずみを除く弾性プラス塑性の公称全等価ひずみ。

$$\dot{\epsilon}_n = \epsilon_{\text{荷重制御型}} + \frac{1}{E} (S_{\text{ひずみ制御型}}) \quad (8)$$

荷重制御型ひずみは、時間に依存しない等時応力-ひずみ曲線において、考えている領域の荷重制御型応力強さに等価な応力強さを当てはめることにより決定される。変形制御型ひずみは、加えられた変形に対して弾性的に計算される応力強さから決定される。

$\epsilon_c$  = 荷重制御型応力から生じるクリープひずみであり、荷重制御型応力強さを用いて等時応力-ひずみ曲線（別図 1.9）から決定される。クリープひずみは、考えている荷重作用時間に対する時間依存の等時応力-ひずみ曲線から得られるひずみから、零時間の等時応力-ひずみ曲線から得られるひずみを差し引いた値である。

$\epsilon_p$  = 形状により生じる応力集中を除くピーク熱ひずみ。

$K_T$  = 局部形状不連続との相互作用を考慮するための、ピーク熱ひずみ成分 $\epsilon_p$ に与えられる弾性応力集中係数。

(c) 5.5.1(2)又は5.5.1(3)の手順に従って $\Delta \epsilon_{\text{equiv}}$ を求める場合、次の二つの方法を用いることができる。

① 5.5.1(2)又は5.5.1(3)により、局部応力集中、クリープひずみ及びピーク熱ひずみを除いて $\Delta \epsilon_{\text{equiv}}$ を計算する。このようにして $\Delta \epsilon_{\text{equiv}}$ を求めたのち、全等価ひずみ範囲を決定するために、 $\Delta \epsilon_{\text{equiv}}$ を $\epsilon_n$ とにおいて式(7)を適用する。

② サイクル中の各時点ごとに式(7)を用いて、成分ごとに、局部応力集中、クリープひずみ、及びピーク熱ひずみを含めてひずみを計算したのち、5.5.1(2)又は5.5.1(3)により $\Delta \epsilon_{\text{equiv}}$ を計算する。

方法①を用いる場合、使用するK値は、実験によって定められた等価応力集中係数( $K_{\text{equiv}}$ )、又は考えている局部領域における各方向のKの最大値のいずれかにしなければならない。方法①においては、図 5.5.3.1 に示すような原点Oをもつ合成等時応力-ひずみ曲線が用いられる。

解析に用いる図 5.5.3.1 に示された合成等時応力-ひずみ曲線は、別図 1.9 から得られる適当な非時間依存の等時応力-ひずみ曲線 ( $\sigma'$ ,  $\epsilon'$ ) に応力範囲 $S_{RH}$ の弾性応力-ひずみ曲線を加えることにより作成されている。

$\sigma'$  = 別図 1.9 の等時応力-ひずみ曲線の応力を表わす縦座標

$\epsilon'$  = 別図 1.9 の等時応力-ひずみ曲線のひずみを表わす横座標

$O'$  = 別図 1.9 の等時応力-ひずみ曲線の原点

$O$  = 解析に用いる合成等時応力-ひずみ曲線図 5.5.3.1 の原点

$S_{RH}$  = 5.4.2(5)に規定される値

方法②を用いる場合、K値は成分ごとにとられ、ピーク熱ひずみは成分ごとに計算される。方法②においては、等時応力-ひずみ曲線は、図 5.5.3.1 に示される原点 $O'$ を用いた別図 1.9 のものを使用するものとする。

(d) 式(7)を用いると、ノイバーの式を用いて得られる値と比較して、公称ひずみレベル $\epsilon_n$ に関して導かれる最大等価ひずみ $\epsilon_1$ を大き目に決定する結果となる。全ひずみに関する、

より正確で、かつ余裕の過剰性をより少なくする決定法は、図 5.5.3.1 に示すように、適用される非時間依存の等時応力-ひずみ曲線上に、ノイバーの式  $\sigma \epsilon = S^* K^2 \epsilon_n$  の交点を求めることにより得られる  $\epsilon_M$  値を式(7)の第1項に置き換える方法である。

ノイバーの式を用いる場合、サイクル中の最高金属温度に対する零時間の等時応力-ひずみ曲線を用いるものとする。

$\epsilon_M$  = 形状不連続部の最大ひずみ

$\sigma_M$  = 非時間依存の等時応力-ひずみ曲線から得られる最大ひずみ  $\epsilon_M$  に対応する応力。

ノイバーの式と等時応力-ひずみ曲線との交点においては、 $\sigma = \sigma_M$  かつ  $\epsilon = \epsilon_M$  となる。

$\sigma$  = 形状不連続部の局所応力

(e) 非時間依存の等時応力-ひずみ曲線上にノイバーの式  $\sigma \epsilon = S^* K^2 \epsilon_n$  との交点を求めるためには、次のステップを踏む計算手順をとることもできる。

- ①  $\epsilon_n$  を決定する (式(8))。
- ② サイクル中の最高金属温度に対して、適当な非時間依存の等時応力-ひずみ曲線 ( $\sigma'$ ,  $\epsilon'$ ) を決定する (別図 1.9)。
- ③ 5.5.3(2)(c)①の計算法を用いる場合、 $S_{rH}$  の応力範囲に対する弾性の応力-ひずみ曲線に、ステップ②で選ばれた等時応力-ひずみ曲線 ( $\sigma'$ ,  $\epsilon'$ ) を加えることにより、合成等時応力-ひずみ曲線を作成する (図 5.5.3.1 参照)。
- ④ 適用する等時応力-ひずみ曲線 (図 5.5.3.1 参照) において、 $\epsilon_n$  のひずみ値を当てはめることにより  $S^*$  を決定する (図 5.5.3.1 参照)。
- ⑤ 形状不連続部に対して適切な K 値を定める。
- ⑥  $S^* K^2 \epsilon_n$  の積を計算する。
- ⑦  $\sigma > S^*$  なる  $\sigma$  の値を仮定する。
- ⑧  $\epsilon = \frac{S^* K^2 \epsilon_n}{\sigma}$  を計算する。
- ⑨ 等時応力-ひずみ曲線を含む座標系に  $\sigma$  と  $\epsilon$  をプロットする。
- ⑩ 等時応力-ひずみ曲線とより良好な一致をみるように  $\sigma$  の値を修正して  $\epsilon$  を再計算する。
- ⑪  $\sigma$  及び  $\epsilon$  の新しい値をプロットする。
- ⑫  $\sigma$  及び  $\epsilon$  の値が等時応力-ひずみ曲線に一致するまで、ステップ⑨及び⑩を繰り返す。  
交点において  $\sigma = \sigma_M$  かつ  $\epsilon = \epsilon_M$  となる。
- ⑬ 式(7)の第1項に  $\epsilon_M$  を代入する。

(f) 等時応力-ひずみ曲線が指数則あるいは多項式などにより数学的に表示できる場合には、反復を含まない別の方法を用いることができる。このときの計算手順は次のようになる。

- ①  $\epsilon_n$  を決定する (式(8))。
- ② サイクル中の最高金属温度に対して、適当な非時間依存の等時応力-ひずみ曲線を決定する。
- ③ 5.5.3(2)(c)①の計算法を用いる場合、 $S_{rH}$  の応力範囲に対する弾性の応力-ひずみ曲



線に、ステップ②で選ばれた等時応力-ひずみ曲線 ( $\sigma'$ ,  $\epsilon'$ ) を加えることにより、合成等時応力-ひずみ曲線を作成する (図 5.5.3.1 参照)。

- ④ 数式  $\epsilon = f(\sigma)$  により、合成等時応力-ひずみ曲線を表示する。
- ⑤ 等時応力-ひずみ曲線の式の  $\epsilon$  に  $\epsilon_n$  を代入するか、又は図 5.5.3.1 の曲線上で読み取ることにより  $S^*$  を決定する。
- ⑥ 形状不連続部に対して適切な  $K$  値を定める。
- ⑦  $S^* K^2 \epsilon_n$  の積を計算する。
- ⑧ 次の二式を組立てる。

$$\epsilon = \frac{S^* K^2 \epsilon_n}{\sigma} \quad (\text{ノイバーの式})$$

$$\epsilon = f(\sigma) \quad (\text{適用する等時応力-ひずみ曲線の式})$$

- ⑨ 二つの連立方程式を  $\sigma$  について解く。 ( $\sigma = \sigma_M$ )。
- ⑩ 計算されたこの  $\sigma$  の値を上の二式のいずれかに代入することにより  $\epsilon$  を求める ( $\epsilon = \epsilon_M$ )。
- ⑪ 式(7)の第1項を  $\epsilon_M$  で置き換える。

### (3) クリープ損傷評価

運転状態 I, II 及び III のすべての運転荷重に対する全クリープ損傷は、各荷重サイクル  $k$  について 5.5.2(a) の式を用いて評価するものとする。与えられた荷重サイクル  $k$  に対して、評価手順は概略以下の通りである。

- (a) 荷重サイクルの最高及び最低の壁厚平均温度における期待される最小降伏強さの平均値  $S_{y|k}$  を計算する。
- (b) 荷重サイクルの全時間に対して、弾性的に応力強さ ( $P_L + P_b + Q$ ) を計算する。この時間に依存する量は一次プラス二次応力強さである。
- (c)  $S_{y|k} \geq (P_L + P_b + Q)$  が全時間に対して成立するならば、 $S_k$  を時間的に変動する ( $P_L + P_b + Q$ ) の値として定めて、以下の(h)へ進む。
- (d) 荷重サイクル中の最大の一次膜応力  $P_m|k$  を計算する。
- (e) 荷重サイクル中の一次プラス二次応力強さの最大範囲  $S_r|k$  を計算する。
- (f) (b) から、荷重サイクルのうち保持された (すなわち定常状態) 期間中の応力強さの最大値  $(P_L + P_b + Q)_{ss}$  を選ぶ。
- (g) 荷重サイクル  $k$  中のある時点において  $(P_L + P_b + Q) > S_{y|k}$  となるとき、その荷重サイクルに対する  $S_k$  は下記の値のうちひとつをとる。
  - ①  $(P_m + 0.5 S_r)$  が  $(P_L + P_b + Q)_{ss}$  に等しいかあるいはそれを超えるならば、 $S_k$  は  $1.25 S_{y|k}$  あるいは  $(P_m + 0.5 S_r)_k$  のうち小さい方の値とする。
  - ② 上記①が適用できない場合は、 $S_k$  は  $1.25 S_{y|k}$  あるいは  $(P_L + P_b + Q)_{ss}$  のうち小さい方の値とする。
- (h) 係数  $K' = 0.9$  とする。
- (i) 応力強さ ( $S_k / K'$ ) を用いることにより、別図 1.6 の期待される最小応力-破断曲線から 5.5.2(a) の基準期間  $T_d$  が求められる。  $S_k$  が上記(c)により時間的に変動する場合は、

荷重サイクル中のクリープ損傷を評価するために次の積分形を用いることができる。

$$\int_0^t \frac{dt}{T_d}$$

## 5.6 座屈および不安定

### 5.6.1 一般要求事項

- (a) 本規則は、材料の非時間依存の挙動及び時間依存のクリープ挙動による座屈あるいは不安定を起す可能性のある一般的な形状と荷重条件に対して適用できる制限を与えるものである。これらの制限は指定された全ての設計荷重と運転荷重に適用することができる。
- (b) 5.6.2に定められる制限には、荷重制御型座屈とひずみ制御型座屈に区別がなされる。荷重制御型座屈は外荷重が座屈後の領域において引き続き作用することに特徴があり、例えば外圧による管の崩壊のような破損に導くものである。ひずみ制御型座屈は座屈の開始とともに、ひずみにより引き起こされる荷重が直ちに減少し、また、結果として生じる変形が自己制限的な性質を有することに特徴がある。ひずみ制御型座屈は、それが自己制限的であるにせよ、疲労、過大なひずみ、及び荷重制御型不安定との相互作用による破損を防止するために避けなければならない。
- (c) ひずみ制御型座屈と荷重制御型座屈が相互作用する可能性のある条件の場合には、荷重制御型荷重とひずみ制御型荷重の組合せに対して、荷重制御型座屈に適用される荷重係数を用いて、相互作用する様式の座屈を防止するものとする。
- (d) 顕著な弾性追従が生じる可能性のある条件の場合には、ひずみ制御型座屈に対しても、荷重制御型座屈に適用される荷重係数を使用するものとする。
- (e) 荷重制御型座屈に対しては、5.6.2(1)の非時間依存の計算において初期形状不整や公差が始めから存在するにせよ運転中に生じるにせよ、形状不整と公差の影響を考慮するものとする。
- (f) 純粋なひずみ制御型座屈の場合には、不安定ひずみの計算において、形状不整や公差が始めから存在するにせよ運転中に生じるにせよ、その影響を考慮する必要はない。しかし、顕著な形状不整が始めから存在する場合には、これがクリープにより促進され過大な変形やひずみを生じることがある。このような影響は5.4.1の変形及びひずみの制限を適用する場合に考慮するものとする。
- (g) 特定温度における材料の期待される最小応力-ひずみ曲線を使用するものとする。
- (h) 5.6.2(1)、5.6.2(2)の両方の制限は、指定された設計荷重と運転荷重に対して満足されるものとする。

### 5.6.2 座屈の制限

#### (1) 非時間依存の座屈

非時間依存の（瞬間的な）座屈を防止するために、荷重制御型座屈については荷重係数が、ひずみ制御型座屈についてはひずみ係数が、表5.6.2.1に与えられる特定の設計荷重と運転荷重に対する値に等しいか、あるいはこれを超えるようにするものとする。

## (2) 時間依存の座屈

荷重制御型の時間依存のクリープ座屈を防止するため、定められた運転荷重に、表 5.6.2.2 で与えられる係数を乗じて得られる荷重履歴に対して、特定の運転期間中に不安定が生じることが無いとすることを示すものとする。クリープが顕著な場合、ひずみ制御型応力は座屈に対する構造物の抵抗と共に減少するものであるため、純粋なひずみ制御型座屈については設計係数を必要としない。

表 5.6.2.1 非時間依存の座屈係数

	荷重係数	ひずみ係数
設計荷重	3.0	1.67
運転荷重		
運転状態Ⅰ	3.0	1.67
運転状態Ⅱ	3.0	1.67
運転状態Ⅲ	2.5	1.4
運転状態Ⅳ	1.5	1.1
試験	2.25	1.67

## 注記

- 荷重（ひずみ）係数 = { 設計（あるいは実際の運転）温度において瞬時不安定を引き起こす荷重（ひずみ） } ÷ { 設計荷重（ひずみ）または予想される荷重（ひずみ） }

運転により引き起こされる形状変化は座屈荷重の計算に考慮する必要はない。

- 熱に起因するひずみ制御型座屈に対しては、熱ひずみにより引き起こされる荷重にひずみ係数を適用する。座屈ひずみを決定するために、実際にあった剛性を用いながら、人為的に大きなひずみを生じさせる必要がある場合がある。剛性を変化させないで付加した熱ひずみを高めるには熱膨張係数を調整するのが一つの方法である。

表 5.6.2.2 時間依存の荷重制御型座屈係数

運転荷重	
運転状態Ⅰ	1.5
運転状態Ⅱ	1.5
運転状態Ⅲ	1.5
運転状態Ⅳ	1.25

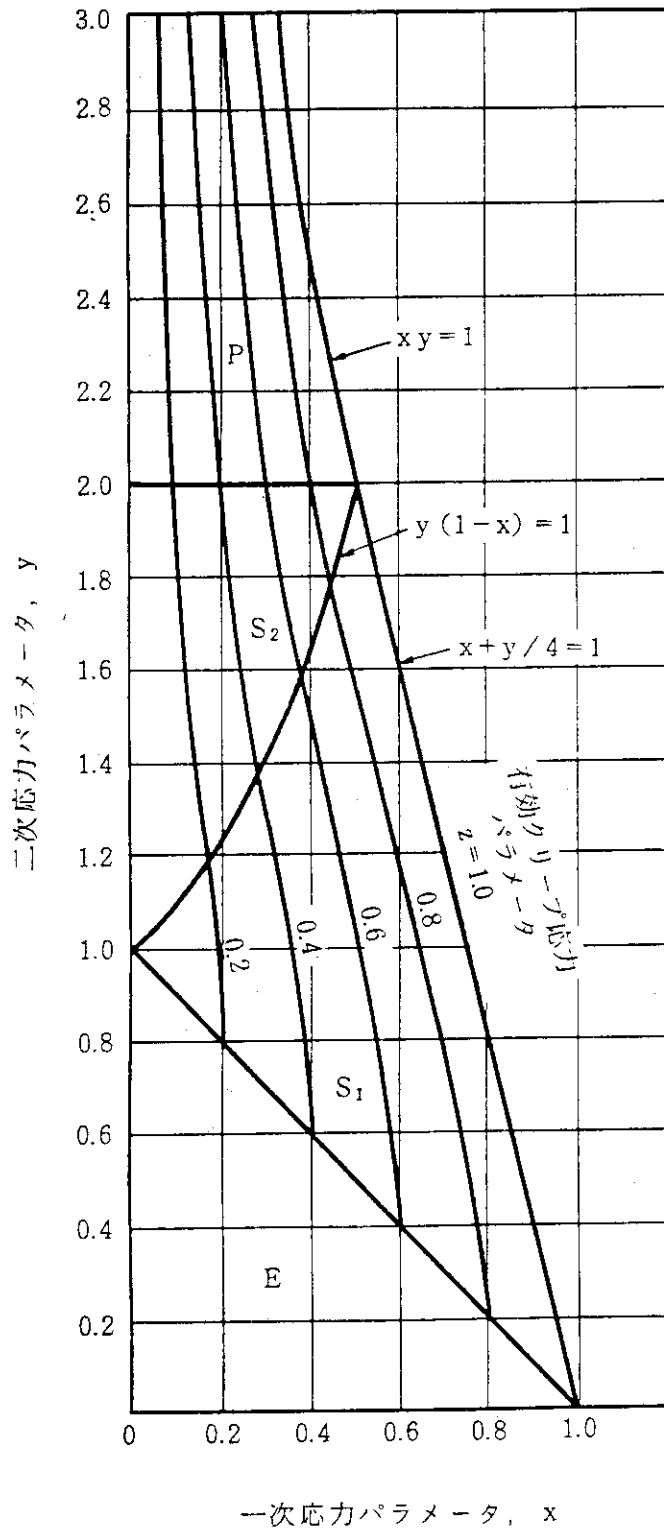


図 5.4.2.1 弾性解析に使用するひずみ制限

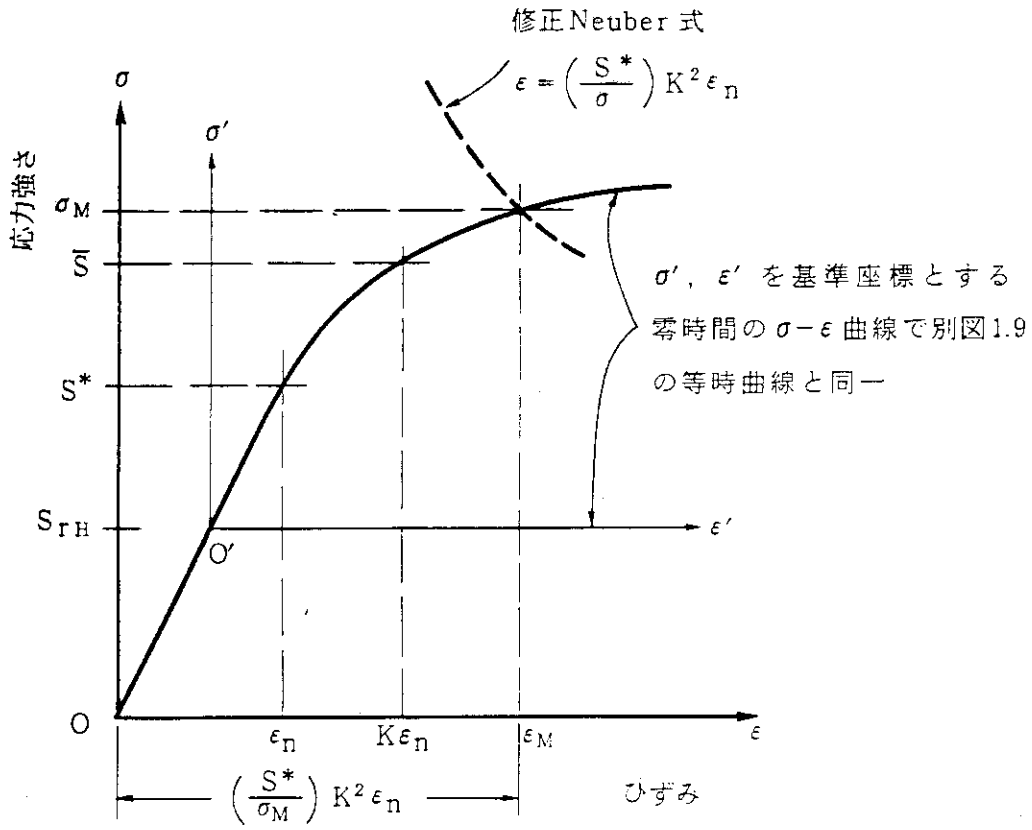


図 5.5.3.1 応力-ひずみ関係