

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。

2001. 7. 31<sup>†</sup>

[技術情報室]

IN 25172-28

## 高温材料特性の構造設計規則への変換

昭和47年11月

動力炉・核燃料開発事業団

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

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

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

## 高温材料特性の構造設計規則への変換

M. T. JAKUV, R. A. MOEN.

WADCO Corporation, Hanford Engineering Development  
Laboratory, Richland, Washington, U. S. A.

(from: Preprint of First International Conference  
on STRUCTURAL MECHANICS IN REACTOR TECHNOLOGY.  
Berlin, Germany, 20-24. September. 1971, L3/6 )

本資料は上記文献の全訳である。表題は上記の通りであるが、その内容は、  
実質的には、米国における高温設計基準作成の思想を述べており、ASME  
Code Sec. III Case 1331-5, 6, 7 を理解する上にも有益な参考資料になると  
考えて全訳した。

高速増殖炉開発本部

加 納 巖

# 目 次

	アブストラクト .....	1
I	要 約 .....	2
II	序 論 .....	4
III	延性破損に関する特性 .....	6
	1. 背景と開発 .....	6
	2. 一次荷重に対する限界応力強さ .....	7
	3. 累積負荷と寿命分数の規則 .....	16
IV	ひずみと変形に関する特性 .....	18
	1. 背景と開発 .....	18
	2. 非弾性材料モデルの材料データ .....	19
	3. 機能上の制限 .....	19
	4. 全非弾性ひずみに対する制限 .....	20
	5. クリープと疲労の相乗効果に対する規則 .....	23
	6. 不安定座屈の制限 .....	27
V	照射に対する考慮 .....	28
VI	質量移行に対する考慮 .....	29
VII	将来の開発 .....	31
VIII	参考文献 .....	33

## アブストラクト (ABSTRACT)

本論文は高速実験炉 (FFTF) の構造設計規則を作るために、どのようにしてオーステナイトステンレス鋼材料の既存データが用いられたかということについて記す。これらの規則はコアサポートおよびコアホールドダウン構造物を含むすべての熱輸送システム圧力バウンダリーの設計に適用される。質量移行と照射損傷による材料劣化に加えて、この規則は、延性破壊、ラチエッティング、全体的変形、不安定座屈およびクリープと疲労の相乗効果に対しても安全であることを目指している。

## I 要 約 (SUMMARY)

この論文は FFTF の高温機器に対する構造設計規則が、どのようにして 304 および 316 オーステナイトステンレス鋼の材料データから作られたかについて記す。これらの規則は (燃料クラディングを除き、コアサポート、コアホールドダウン構造を含む) 800 °F (427 °C) 以上の温度で運転されるすべての熱輸送系中の圧力バウンダリの機器に対して適用される。各種の破損モードに対して安全となるために、FFTF の規則は従来の ASME 規程からかなり変化した解析による設計法となった。熱衝撃荷重等の過渡的影響が、ひずみ制限と変形制限によって強調された。弾性計算にもとづく制限を用いた単純な適格テスト (Screening test) が適用できない場合には、非弾性解析法を設計に利用するのが適当であると思われる。これらの各規則は直接材料の破損モードと結びついているから、より安全かつ信頼性のある FFTF コンポーネントの設計は、これらの規則の適用からさらに発展させて行なうべきである。

延性破損 (Ductile Rupture) 与えられた温度に対して、負荷時間に依存して用いられる応力強さ限界値が与えられた。応力強さは

- (a) 破断応力のある一定パーセント
- (b) 3次クリープの開始と関連する応力のある一定パーセント
- (c) 寿命中の1%ひずみと関連する応力のある一定パーセント

以下でなければならない。負荷の累積効果は、線形時間分数制限 (linear time-fraction limit) によって考慮される。

ラチェッティング (Rachetting) 寿命中の非弾性ひずみに対する制限が加えられる。膜断面に対しては、母材は1%、溶接部は $\frac{1}{2}$ %の全ひずみに制限される。

クリープ疲労 (Creep-Fatigue) 修正線形被害則が用いられ、累積サイクル分数が疲労損傷を評価し、累積時間分数がクリープ保持時間による損傷を評価する。

座屈 (Buckling) 理論的ならびに実験的方法に対する最小安全係数が与えられる。

全体的変形 (Gross Deformation) もし任意の1%ひずみが生じたときに困る領域があるなら、それらの機能上からの変形制限を設計者および解析者に対して指示しなければなら

ない。

照射効果 (Irradiation Effects) 高応力部分は使用期間の終りの時点で、10%の残留全延性(引張り)を保たねばならない。

質量移行効果 (Mass Transfer Effects) もし拡散効果 (diffusion effects)が合金成分を通常の仕様範囲外に変える場合には、その材料特性の影響を設計手法に反映させねばならない。

## Ⅱ 序 論 (INTRODUCTION)

米国における発電炉は専門的技術団体 (Professional engineering societies) によって認められた建設コードの規則に反しないように設計されてきた。軽水炉の場合には、圧力バウンダリ構造物に対する進んだ設計解析法の要求が、現在の Sec. III のような原子力コードを生み出した。液体金属冷却高速炉 (LMFBR) の進歩につれて、新しい構造設計問題は Sec. III で扱う範囲外となった。

筆者らは LMFBR の燃料および技術開発のための 400 MW 実験炉、すなわち高速実験炉 (FFTF) の概念設計のためにこの分野に関係するようになった。構造設計規則を作るにあたって、初期の段階での努力によっていくつかの新しい問題領域が明らかになった。

供用寿命 (Service Life) 既存の、高温に対する ASME の設計規則<sup>(1)</sup>においては、機器の供用期待期間は許容荷重の制限において考えられていなかった。たとえば供用寿命が一年間の機器は  $10^5$  時間材料特性にもとづく制限をうけるであろう。

負荷のパラメーター (Loading Parameters) FFTF の新しい設計問題には強い熱衝撃荷重が含まれる。既存の ASME 規則<sup>(1,2)</sup>はこのような負荷の速度や回数に関連した材料特性を用いた荷重制限を設けていない。これは Section III の場合には、時間依存の材料挙動とは無関係であったからそれでよかったが、高温においては、特に疲労の評価において新しい規則を必要とする。

ひずみ (Strain) Section III では、最初の数サイクルの後には材料が非弾性ひずみを生じるとは考えられていなかった。高温では、クリープひずみが供用寿命中を通じてきわだったものとなると考えられるから、ひずみに対する制限が必要となる。

溶接 (Welds) 既存のコードは多くの溶接施工規則を含んでいるが、解析設計のための指針を与えているものはない。溶接部は明らかに母材とは異なった材料特性を持つ。

材料特性劣化 (Material Property Degradation) 質量移行の影響により、ナトリウムに接するある種の構造用合金鋼から炭素と窒素が拡散する。さらに、FFTF は炉心の近くで中性子束にさらされた長寿命コンポーネントを持っている。既存のコードはこれらの影響



について設計者に対して何の指針も与えていない。

明らかに F F T F は高温における構造設計理念の再検討を要求した。大部分の F F T F のコンポーネントの供用寿命は 20 年間であるために、多くの試験あるいは確性試験結果は利用できないが、いづれにせよ、解析のための新しい指針は既存のデータによる他はないであろう。

本論文は F F T F 規則の背景およびその開発法を記すものであり、その規則は

- 高温での解析設計の指針を提供する。
- より安全かつ信頼性のあるコンポーネントを提供する。
- 原子炉安全性計算に対する指針を提供する。
- 将来の L M E B R 設計法として成長しうる出発点を提供する。
- できるかぎり、近い将来 A S M E Code として出版される規則を予見する規則を提供する。

F F T F の各破損モードは本論文では別々に扱われている。

### Ⅲ 延性破断に関する特性 (PROPERTIES RELATED TO DUCTILE RUPTURE)

#### 1. 背景と開発 (Background and Development)

延性破断は最も一般に知られている破断メカニズムである。低温度では構造物の破断は短期間の引張り試験の破断と結びつけることができる。高温では、応力-破断 (あるいはクリープ-破断) 試験が使いやすい材料特性を与える。高温における既存の A S M E Code では、一次荷重 (すなわち圧力と重量) は応力強さ制限に関する規則で制限されている。この応力限界は次の材料特性と結びついている。

- 定荷重の一軸試験のもとで  $10^5$  時間内に破断を生じる最小応力の平均 [  $10^5$  時間での試験データはそれより短期間の  $2 \times 10^4$  時間での実際のテストデータから外挿された ]
- 定荷重の一軸試験で 1000 時間に 0.01 % の二次クリープ速度を生じる応力の平均値 [ 低クリープ速度の試験データは、その数倍の応力時の実際のデータから外挿された ]

これら2つの特性は、一軸定荷重のクリープ破断試験によって定めることができるであろう。この試験のデータは (a) 負荷応力、(b) 二次クリープ速度、(c) 温度、(d) 破断時間からなる。ひとたび上の2つのクライテリアが定められると、その後の大部分の高温試験は同様なデータを出すための同じ試験が行なわれ、クリープ曲線全体、とりわけ実験的に測定するのが困難な一次クリープ部分の特性について調べる努力はほとんどされなくなった。

FFTFではナトリウム冷却系の圧力は低くなる傾向にあるため、不連続部付近の応力が重視された。FFTFの一次荷重限界を評価するには、まず最初にそのコンポーネントの寿命を考える必要がある。LMFBRプラントの中には、前に述べた材料特性の基準期間、 $10^5$  時間よりも長期にわたって使用しようとするものもある。第2に、たいていのコンポーネントにおいて、地震および熱衝撃が最も厳しい負荷となるから、過渡的な荷重を考慮しなければならない。

1969年5月までには、LMFBR Piping Design Guide ( by C.F. Braun and United Nuclear Corp. ) の草案を作っていた人々は、FFTFでは2つの応力強さ限界；一つは ( $2 \times 10^5$  時間特性にもとづく) 長期荷重に対するもの、そしてもう一つは数時間以下しか続かない過渡的の荷重に対するものを提案した。同様な方法はFFTF構造設計基準としての最初の詳細な提案にも採られている。Moenによる各種のひずみ速度での数少ないデー

タの評価から、非常に急激な負荷は結局同様な高ひずみ速度の引張り試験によって評価されるべきであるという考えが最初からあった。この希望は、試験ひずみ速度が増すにつれて、一定のひずみを生じるのに必要な応力も、図1に示すように増加するであろうということであった。

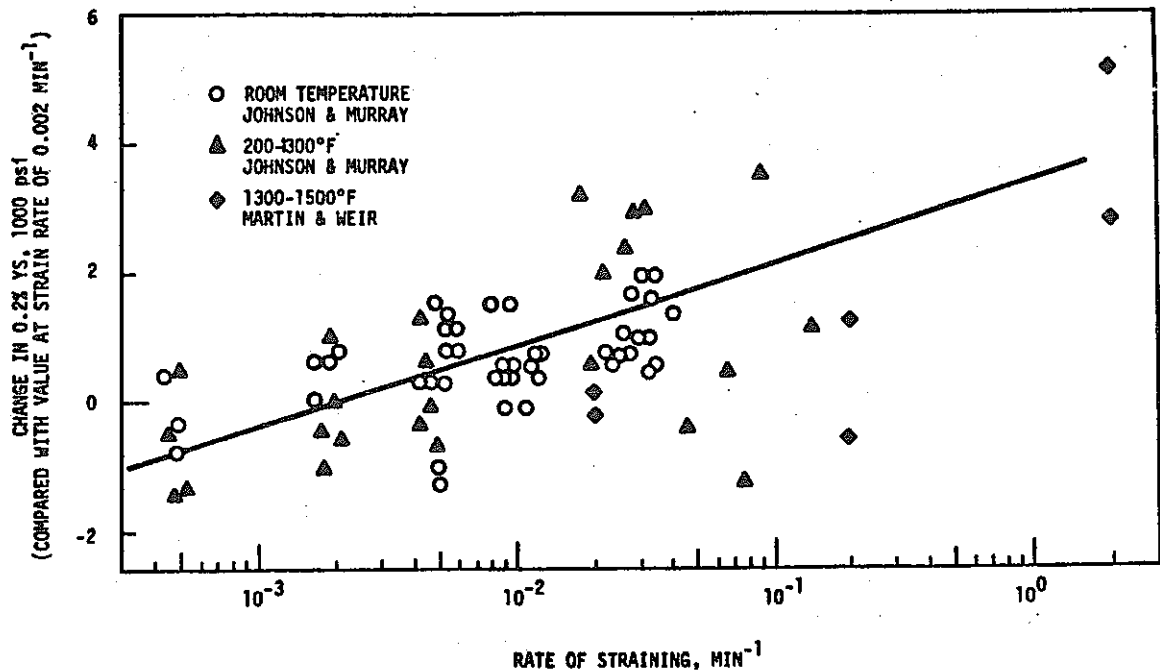


FIGURE 1. Changes in Yield Strength versus Rate of Straining for Austenitic Stainless Steels

F F T F 開発の一環として、高ひずみ速度試験が Steichen によってなされた。その結果は、図2に示すように、通常の0.2%オフセット降伏応力よりも高い応力値を使用するのは正しくないことを示している。

A S M E では、高温設計に関するサブグループ ( Subgroup on Elevated Temperature Design ) の人々 ( 特に W. J. O' Donnell ) は荷重の作用時間と同じ時間の材料特性値にもとづく応力限界の使用に賛意を表明した。この観点は F F T F の規則に採用された。一次膜応力強さの限界  $\bar{S}_m$  の詳細が次に述べられる。

## 2. 一次荷重に対する限界応力強さ ( Limit Stress Intensity for Primary Loads )

F F T F の“一次”荷重の定義は Section III ( 参考文献1 ) で一次と定義された荷重を含む。しかしながら高温ではクリープ変形の可能性のために新しい一次応力源 — すなわち、たとえ小さな非弾性変形が生じても構造物の弾性的追随 ( elastic followup ) のために高応

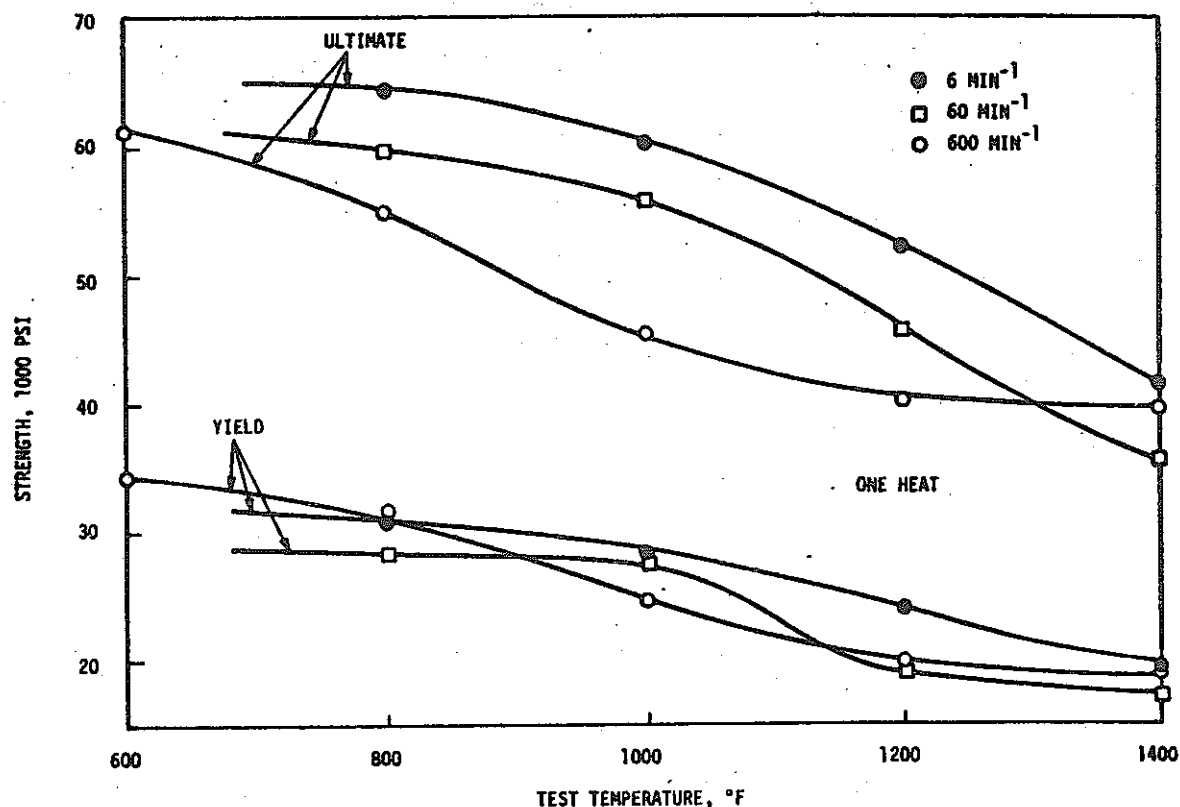


FIGURE 2. The Effect of Strain Rate at Temperature on the Strength of Type 304 Stainless Steel Plates

力が保たれる場所の熱膨張による応力、を考える必要がある。すべての構造物に対して、構造物断面で平均された熱応力は一次荷重に含まれる。

炉容器ノズル附近では、それに接続する配管が熱膨張によって正味断面曲げ応力をもたらすとき、もう一つ別種の一次熱応力をうける。しかし、配管はいまのところこのような熱膨張により生じた曲げ荷重を一次とは考えたい。配管設計における過去の経験は、このような応力による非弾性ひずみは、一要素（たとえばエルボ）に集中することなく、配管のいたるところに分散するという見解を支持しているようである。

一般一次膜応力は  $\bar{S}_m$  で制限される。これは数個の材料特性クライテリアから与えられる値の最低応力である。まず第1に、Section III の  $S_m$  値に対して用いられた時間に依存しないクライテリアが高温領域（オーステナイトステンレス鋼に対しては  $800^\circ\text{F}$  ( $427^\circ\text{C}$ ) 以上) に拡張された。このクライテリアは次の通りである。

- 室温において指定された最小引張り強さの  $\frac{1}{2}$
- 金属温度引張り強さの  $\frac{1}{2} \times 1.10$

- 室温において指定された最小降伏応力の  $\frac{1}{2}$
- 金属温度の降伏強さの 90 %

高温における極限引張り強さと降伏強さの最小値を得る方法は文献 4 に示されるように室温における強さと高温における強さの比を用いる方法であった。これらの比に（材料仕様に示された）室温での降伏および最大強さの最小値を乗じて 1500° F までの温度での強さの最小値が得られる。極限引張り強さの  $\frac{1}{2}$  や、降伏強さの 90 % といった適当なクライテリアによって、次に（図 3 に示す） $\bar{S}_m$  曲線の引張り部分が与えられる。

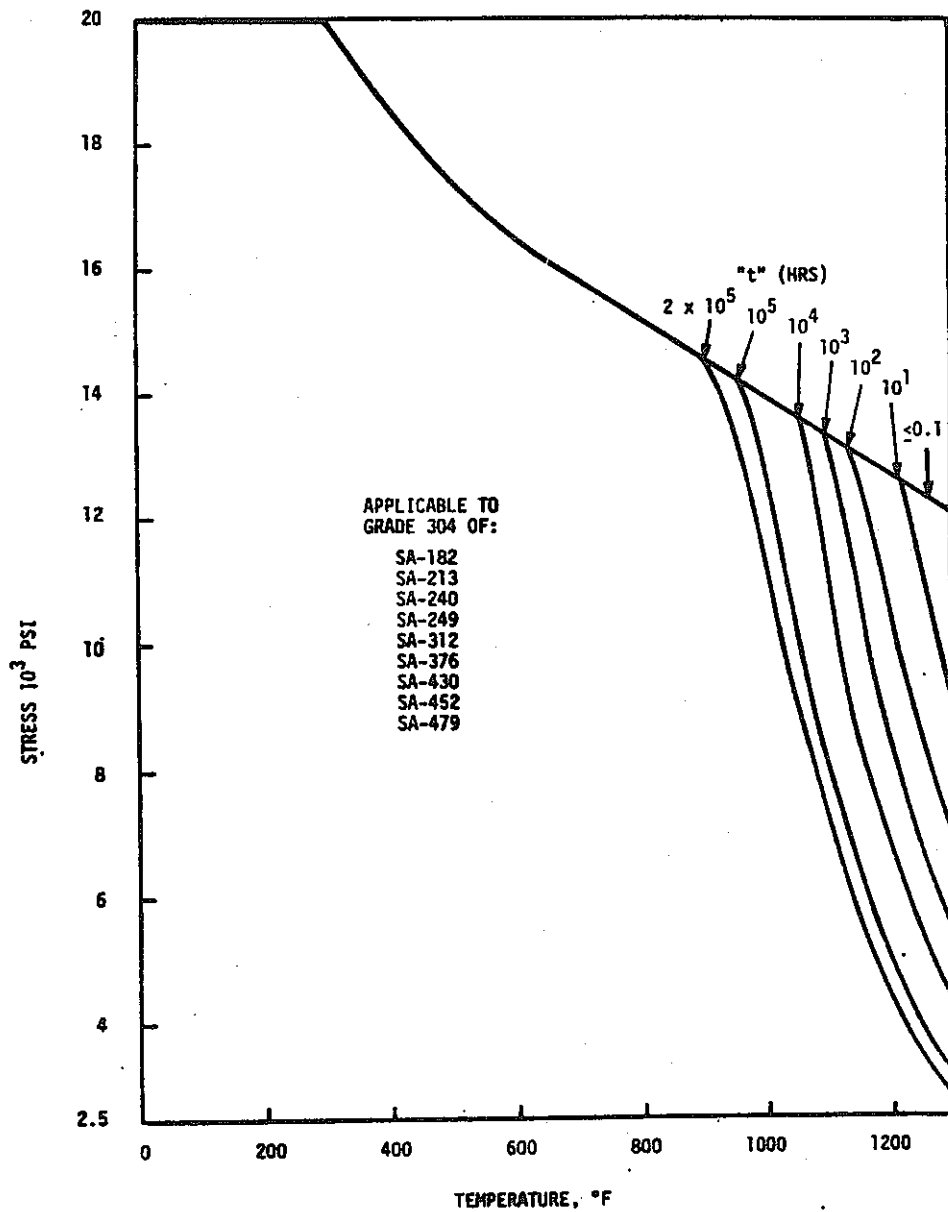


FIGURE 3.  $\bar{S}_m$  Values versus Temperature - 304 Austenitic Stainless Steel

文献4での“最小”という言葉は確率的な方法によって定義されている。すなわち観察された値（たとえば、各温度データに対するlog-logプロットの外挿値）の平均値から標準偏差のある倍数を引いて得られた。特に、最小値はすべての試験データの95%がこれを越える値をとるべきである。初期の目標は、いま述べた最小値特性を95%のデータが越える確率が95%であるとして最小値を定義することであったが、データの不足からFFTFに対してそのような定義を用いることができなかつた。

降伏応力は、文献4では0.2%残留ひずみを生じる降伏応力として定義されているが、筆者は、ある一定のひずみ値を用いると応力ひずみ曲線の勾配を定めるにあたって実際的な不都合(3)なくすことを求めた。高温でのオーステナイト・ステンレス鋼の場合、800°Fで文献4の値に対応するひずみの値は約0.27%となる。

第2に、一軸定荷重の応力-破断データの使用が、低温における最大強さと幾分似た方法で、時間依存の応力クライテリアとして考慮された。

・金属温度で、時間“ $t$ ”で破断を生じる最小応力の $\sigma$

他のASMEコードでは10<sup>5</sup>時間(2)で破断を生じる最小応力の80%を使用しているが、同じコードでまた、低温では最小極限強さの $\sigma_u$ の使用を優先させている。 $\sigma$ というアフクターは、構造設計コードの多くのファクターと同様に、異なる技術的判断の一つの妥協値である。

必要な指定時間における最小破断応力を定めるためには、文献4に与えられた参考値から、かなり長い範囲について外挿する必要がある（たとえば、10<sup>4</sup>時間の平均値と、10<sup>5</sup>時間での最小値および平均値の間）。100時間から200,000時間までの破断を生じさせる最小応力曲線を作るには、次のステップがとられる。

- Step 1 応力対時間の両対数グラフ上に図4に示すように、文献4から、 $A = 10^5$ 時間で破断を生じる平均応力； $B = 10^5$ 時間で破断を生じる最小応力、および $C = 10^4$ 時間で破断を生じる平均応力の値を定める。
- Step 2 参考文献4のデータプロットを用いて100時間での破断データの直観的平均値を得る。
- Step 3 図4に挿入された対数応力対温度プロットの各温度に対する100時間破断強度を定める。“100時間での破断応力値を平滑化(normalize)”す

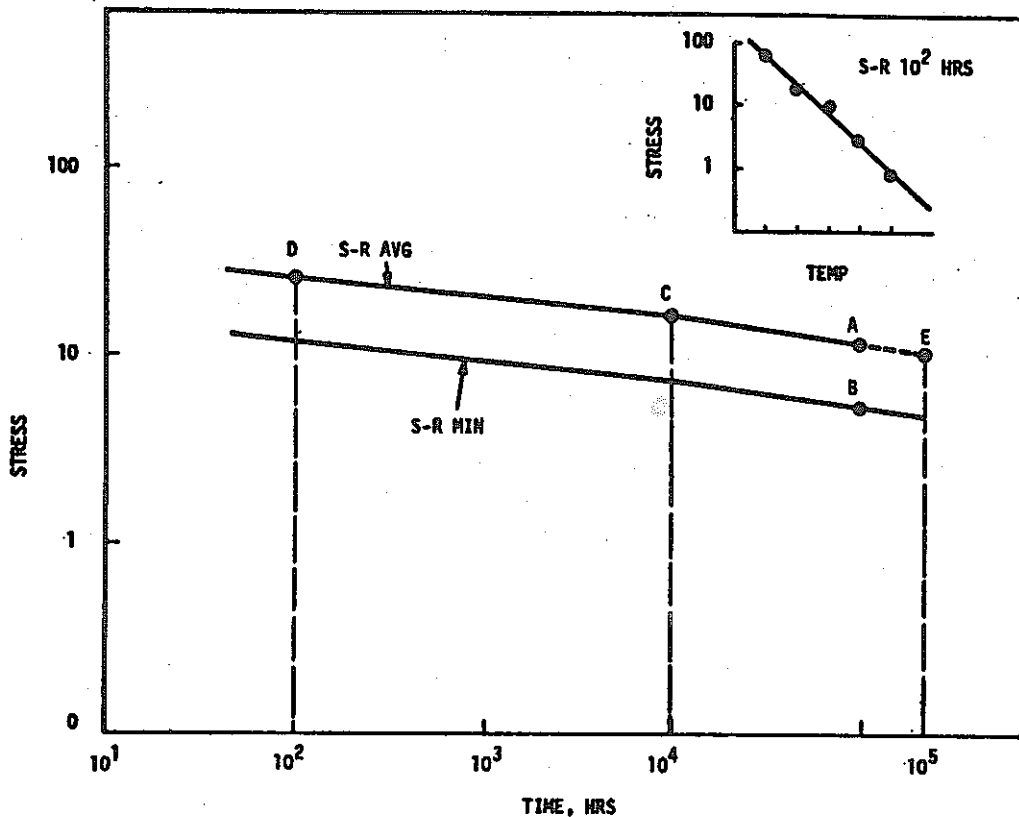


FIGURE 4. Derivation of Stress-to-Rupture Curves

るために、各データの点に対して直線をひく。

- Step 4 与えられた温度で、図4の両対数応力・時間プロット上に、上のステップ3で定められた平滑化された値を定める——点D。
- Step 5 点CとDを直線で結び、もう一つの直線を点Cから点Aを通過して、200,000時間の点Eまで伸ばす。これが、与えられた温度で、100時間から200,000時間でのラプチュア対平均応力曲線である。
- Step 6 点Bを通過して、上記Step 5で作られた“平均”カーブに平行な第2のカーブを書く。これが、与えられた温度で、100~200,000時間での破断対最小応力の関係を表わす。
- Step 7 上記の過程が1000°Fから1500°Fまで50°Fおきに(すなわち、538°Cから815°Cまで28°Cおきに)くり返される。
- Step 8 1000°F(538°C)以下の破断強さ最小応力を外挿するには、図4の挿入図に示される方法が、与えられた各破断時間に対して、対数応力対温度をプロットして利用される。

3番目のクライテリアは、与えられた温度での一軸定荷重クリープ試験から得られるもう一つの特性、すなわち3次クリープの開始点の時間と関連している(図5参照)。

- 金属温度で、時間“ $t_0$ ”のときに3次クリープが開始する最小応力の80%

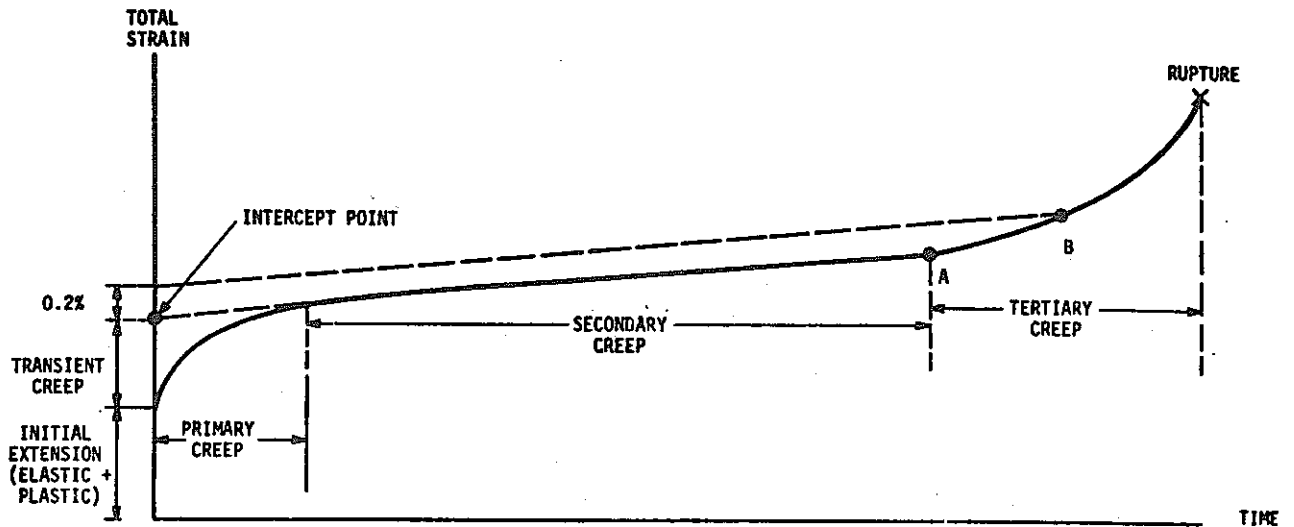


FIGURE 5. Creep Rupture Test Definitions

3次クリープ領域は、重要な構造物に使用される材料には望ましくないとされる。多くの合金鋼は3次クリープの段階を示しており、ここでは、内部クラック、sub-surfaceの結晶粒界分離や、その材料に対して普通の解析的モデル化の手法が使用できないような現象が生じている。<sup>(5)</sup>

材料特性のデータは破断時間よりもむしろ、3次クリープの開始点とよく関連していることが多い。このことは図6からわかる。

このクライテリアに対して材料データを評価するにあたって、既存のクリープデータは主として、2次クリープ速度と破断時間という形であった。文献6には3次クリープの開始点(図5の点A)が、材料が1次+2次クリープ中に消費した全寿命分数によって間接的に記述されている。この実験結果がこのクライテリアの評価のための主要データとなった。

3次クリープの開始点に対する最小応力の決定は、上に述べた最小応力対破断の曲線<sup>(6)</sup>の利用から始める。LeydaとRoweによって記述された部分分数 $F_s$ (破断寿命中、2次クリープからずれてゆく点以降に消費した部分)を用いて、図7に示すように、最小応力対破断の曲線が、その値だけ左に移される。

これは時間の関数として3次クリープの開始点と最小応力の関係を示す曲線を与える。筆者らによって用いられた304と316ステンレス鋼の $F_s$ 値はLeydaとRoweが304、316、321、347ステンレス鋼に対して得た値の平均値である。



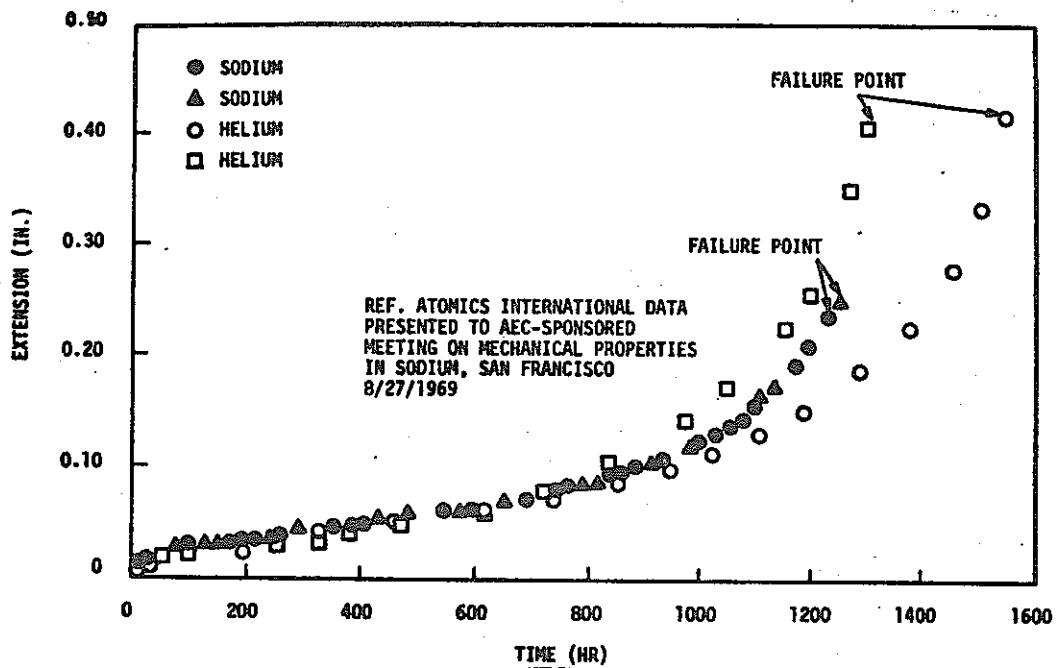


FIGURE 6. *Uniaxial Creep of Annealed Type 304 Stainless Steel in 1200°F Sodium and Helium Environments - 21,000 psi Stress*

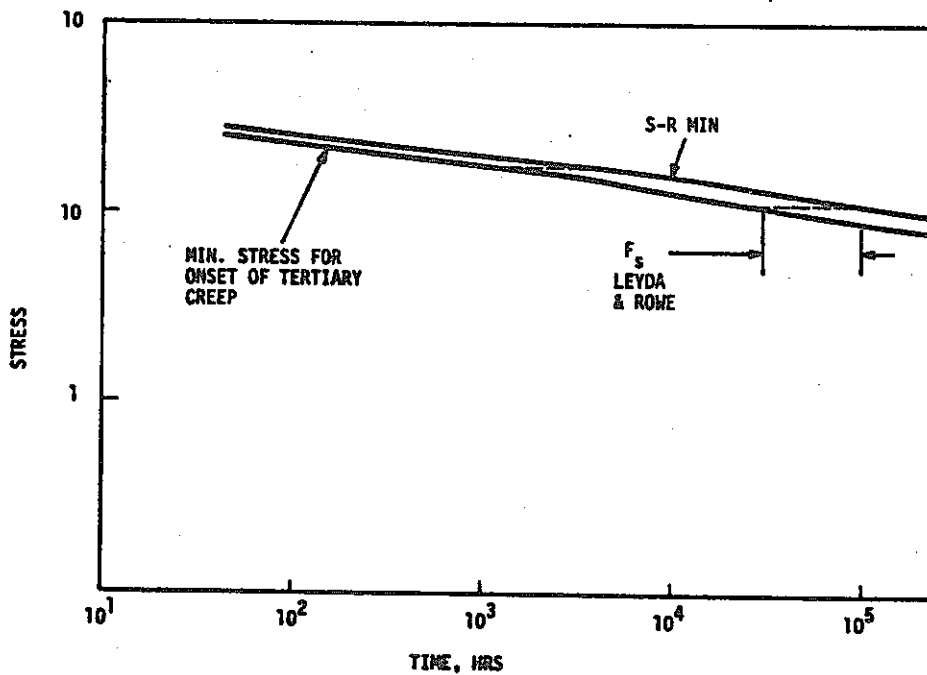


FIGURE 7. *Derivation of Values for Initiation-of-Tertiary Creep*

実際のクリープ曲線から図5の点Aを選ぼうとする場合、筆者らは、3次クリープの正確な開始点を決定するのがむづかしいことに気がついた。同様な事態は降伏応力を定める場合にも生じるので、筆者らは同じような方法を提案した。その曲線の2次クリープの部分に、ひずみで0.2%ずらして平行線を引くことによって点B(図5)を容易に見つけることができる。いずれにせよ、クリープ試験を行なおうとする者は、過去に報告されたクリープ曲線よりも技術

団体 (technical community) が重要視している点について認識すべきであろう。

第4のクライテリアは、与えられた温度で一軸定荷重引張りクリープ試験の全ひずみと関連している。

- 金属温度で、時間“t”の後1%の全ひずみを生じる平均応力の80%

上記のクライテリアは、高温設計に関するASMEのサブグループの人々の意見の妥協点を表わす。このクライテリアは、平衡応力 (equilibrium stress) から生じる変形を制限する手段であると考えられた。1%という数字の基礎はSection VIII で用いられているクライテリオン (1000時間での2次クリープひずみが0.01%) が  $10^5$  時間 (だいたいFFTFの高温での寿命) 後に1%の2次クリープひずみが生じることを意味していることと関連している。さらに、このひずみ値は、原子炉圧力バウンダリに使用される構造物の変形制限として妥当であると信じられた。

1%の全ひずみを生じる平均応力の決定はすでに述べた2つの特性を定める方法よりもずっとやっかいである。理想的にはその手法は次の通りである。

- Step 1 図5に記されたように、各温度および応力範囲で、一連の代表的なクリープ曲線を得る。
- Step 2 一連のクリープ曲線を用いて、図8に示すような等時応力ひずみ曲線 (isochronous stress strain curves) を得る。
- Step 3 各温度で、等時応力ひずみ曲線上の1%のひずみ値を通して垂直な線を引くことによつて、図9に示されるような一連の曲線が作られる。
- Step 4 各温度における対数応力対対数時間の図上に、図10に示すような1%の全ひずみを生じる応力図が作られる。

この方法によつて得られた設計値は、一般に低温 (1000°F以下) および低応力レベルでは不適當であると考えられている。低応力レベルでは、最初のクリープ曲線を作るのに必要なひずみの測定において、いつもかなりの不確定性がある。高応力レベル (すなわち短時間) の場合には、全ひずみの大きな割合を占める1次クリープひずみの実験的測定が実際には困難である。

実際にFFTFに用いられた手法は文献7でSmithによつて作られた等時応力ひずみ曲線を用いることから始められた。1%全ひずみを生じさせる応力はStep3と4で概説したよう

にして得られる。

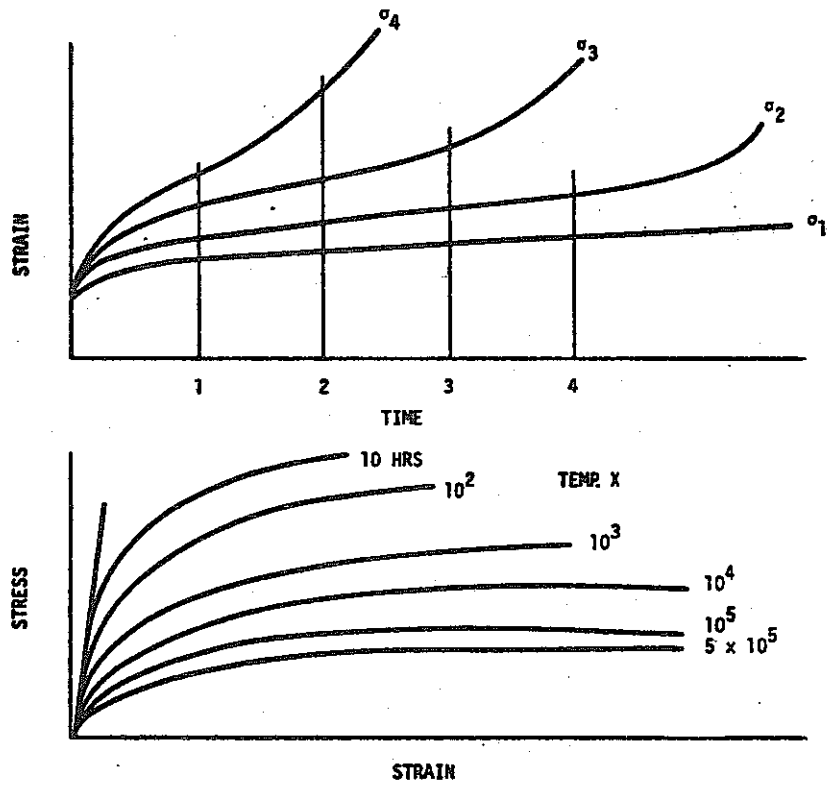


FIGURE 8. Derivation of Isochronous Stress-Strain Curves

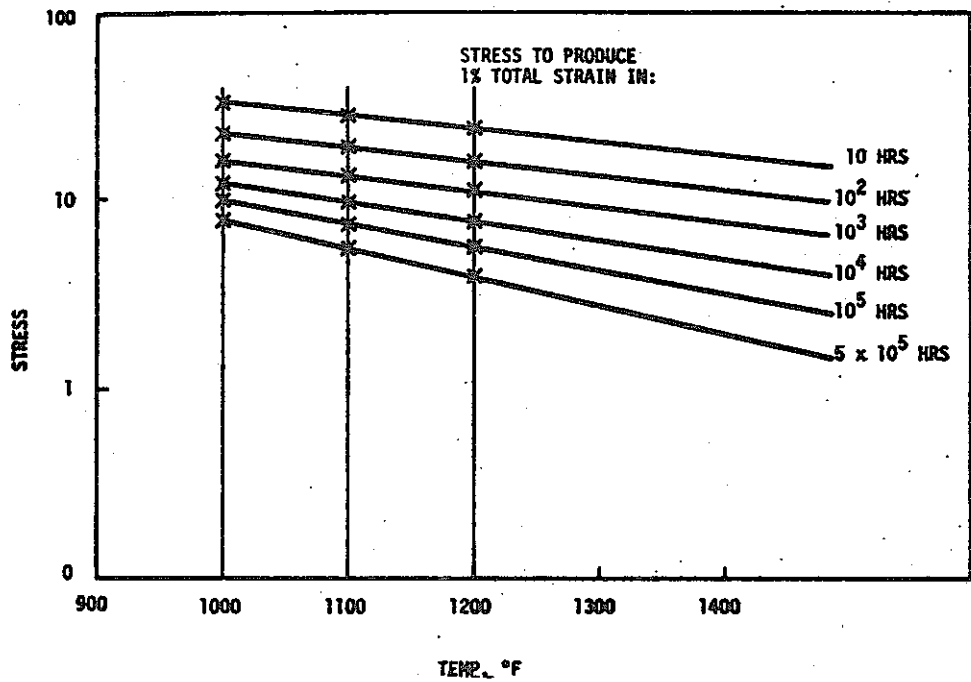


FIGURE 9. Extrapolation Technique for 1% Total Strain Values

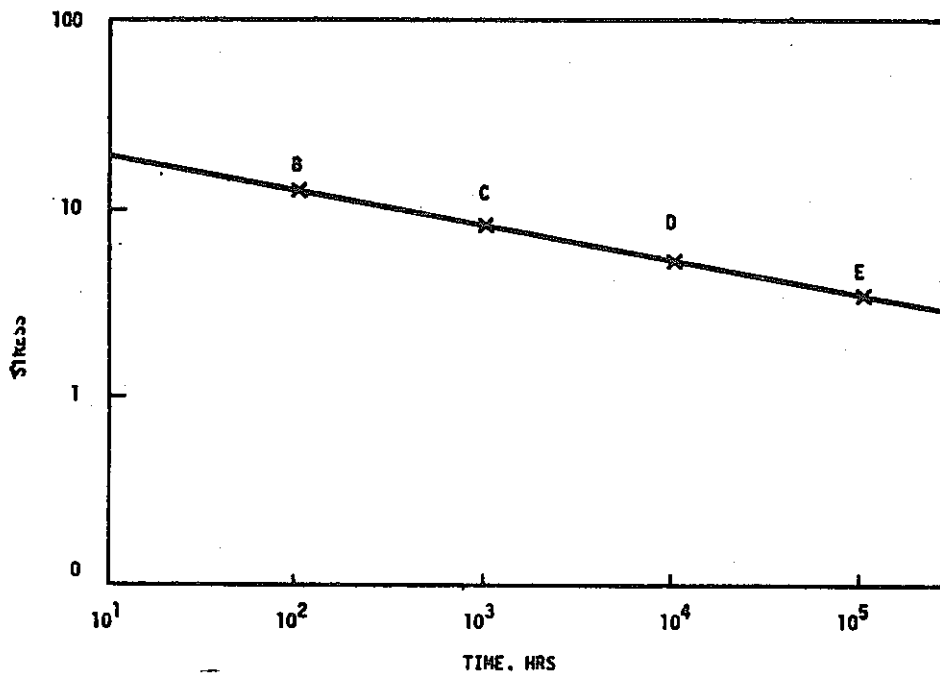


FIGURE 10. Stress to Produce 1% Total Strain at Temperature,  $T$

上に述べた4つの高温でのクライテリアを Section VIII<sup>(2)</sup> で用いられたものと比較すると、F F T Fの規則にないものが2つある。破断を生じさせる平均応力のデータは、延性破断に対する設計は十分なデータが存在する指定された合金鋼の最小値特性を用いて行なうべきであるから、使用されない。また Section VIII のクリープ速度のクライテリアは次の理由によってとり除かれた。(a) 特定の破損メカニズムと結びつかない。(b) 3次クリープと1%の全ひずみクライテリアでカバーされる。(c) 問題となる応力範囲で実際の試験中に測定することが困難である。

Smith はこの問題を文献8で詳細に論じている。

Section III と同様に、F F T F規則の母材の特性は一軸データにより、トレスカの流れ則によって多軸応力場と結びつけられた。この方法は Section III において長い使用の歴史を持っている。解析にあたっては(図11)に示す) Von Mises の方法(有効応力)も許される。

### 3. 累積負荷と寿命分数の規則 (Cumulative Loading and the Life Fraction Rule)

一次荷重に対する応力制限は、一定温度で一つの長期間の荷重がかかった場合について適用されるが、原子炉は温度および応力のくりかえしをうけるから、前節の応力制限を、累積荷重を扱えるように変更する必要がある。

与えられた荷重サイクルに対して、その時間を、各種の一定荷重——温度の期間に分割することができる。こうして  $\bar{S}_m$  のクライテリア中の時間“ $t$ ”が、与えられた荷重および温度で

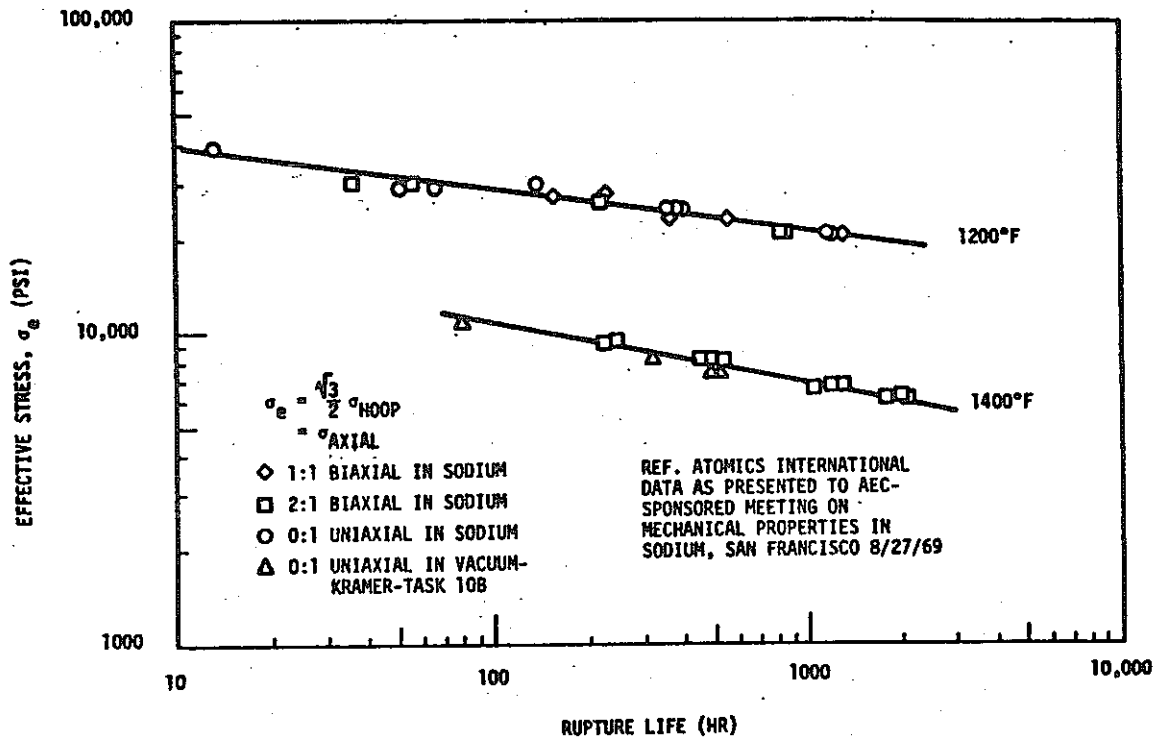


FIGURE 11. Correlation of Stress State with Rupture Life Using Von Mises' Yield Theory - Annealed 304 Stainless Steel

の全累積供用期間に対して適用される。これらの一次応力は、各々異なった荷重、温度条件に対して線形時間分数和によって適当な重みをつけられる。

$$\sum_i (t/t_m)_i \leq 1.0$$

ここで*i*番目の荷重中の時間“*t*”は、(同様な温度および応力条件下で)3次クリープ開始か、破断を生じる最小時間の小さい方から得られる時間依存の $\bar{\sigma}_m$ クライテリアから得られる $t_m$ と比較される。

この総和は、破断損傷の和のように見えるが、その意図は単に、負荷時間が重要となる高温での一次応力強さを合理的にコントロールしようとするものである。

## Ⅳ ひずみと変形に関する特性 (PROPERTIES RELATED TO STRAIN AND DEFORMATION)

### 1. 背景と開発 (Background and Development)

Section III<sup>(1)</sup>では、材料に対する基本的な仮定として、材料は延性的であるとしている。そこにはひずみに対する制限は記されていないが、応力限界のクライテリアと設計規則そのものによるひずみの制限がある。たとえば、この設計規則のカギとなる前提は、数回の荷重サイクルの後には非弾性ひずみは生じないことの保障である。応力は引張りと圧縮の降伏強さの間でくり返され(1次+2次応力限界)、したがって、材料は寿命の終りにおいても延性を失わず、疲労解析は、全体的な非弾性ひずみの発生しない試験データを用いることができた。

Section IIIは(一次元モデルにもとづく)ラチェッティングに関する規則も含んでいる。Section IIIの高温でのCode Case 1331は、もう一つの方法——非弾性解析を許している。しかしながら、何らその指針は含まれていない。

Section IIIの疲労規則は、低サイクル被労データがもともとひずみ制御で求められたものであっても、常に等価応力範囲を用いてきた。Code Case 1331では、低サイクル疲労データは1200°F(650°C)まで拡張されたが、保持時間あるいはクリーブ効果についての考慮は含まれなかった。

解析するには最も複雑な破損現象である不安定座屈に対する規則は、Section IIIにおいてさえ、現在開発中である。現在の規則は弾性材料モデルの解析に適用できるだけである。

このようなASME Codeの背景から、FFTFの規則は、設計規則の理念についていくつかのカギとなる問題を解くことを必要とした。

- 弾性材料のモデルが非弾性現象をうまく定めるのに使えるだろうか？(もしそうなら、その限界が指定できる。
- 米国の企業で行なわれている現在の解析能力で、何らかの詳細な非弾性解析を要求することが実際的であるかどうか？
- もし材料データが少なく、はっきりと破損メカニズムを定めることができない場合に、その規則は設計者の一般的な指針としての言葉だけに限定されるべきかどうか？

これらの3つの問題はFFTF設計規則のために作業をしている人々のグループ間で常に論じられた。1971年の初期においても、その状況は必ずしも完全に明確にはなっていない。しかしながら、非常に大きなステップが踏み出された。すなわち、FFTFの規則は、実際の

複雑な材料モデルを用いた解析がないにしても、弾性材料モデルによる試験は、すべてのコンポーネントをカバーしないであろうという認識に立っている。すべての F F T F のクリティカルなコンポーネントに対して、要求される場所はどこでも、非弾性解析が行なわれるであろう。もし製作者がこのような解析を行なえないときには、別の政府と直接契約した機関がこれを行なうであろう。制限あるいは規則がこの非弾性解析に対して適用され、この規則は指定されるであろう。

F F T F の制限規則は、ひずみ履歴の誤差が長期荷重のために増大する場合に特に大きな誤差を含むかもしれない。しかしながら、特定の制限を用いることは、すべての F F T F のコンポーネントの評価に対して、設計および運転の上で、一つの出発点を提供するだろう。この設計限界はまたより有効な制限法や、今までにない新しい設計法を提供する。たとえば、もし溶接部に対して、母材よりも低い許容ひずみが与えられるようなら、“……設計者は溶接部の低延性を考慮して、大きな荷重をうける部分には溶接部をなくすように心がけなければならない”といった言葉で述べたガイダンスよりも、良い設計ができるであろう。

## 2. 非弾性材料モデルの材料データ ( Material Data for Inelastic Material Models )

非弾性解析から得たひずみに対する要求は、最近の米国における有限要素構造解析計算機プログラムの進歩から考えて、妥当であると判断された。これらのプログラムでは、弾性、塑性、クリープ挙動（応力およびひずみに対する影響）が、ある時間増分に対して評価された。出力されるひずみの時間履歴は、材料モデルに大きく依存するので、F F T F では非弾性解析に対して材料モデルを指定することを試みた。304と316ステンレス鋼の基準構成方程式を定めるだけで、すべての F F T F の設計解析に対して必要な適合性が得られる。この作業にあたって当面した主要な問題は計算機プログラムの要求に適合する構成方程式を導くことであった。その式を制限条件内に保つことに失敗すると、応力およびひずみのアウトプットは不安定となり、結局、設計解析のコストが一段と高くなる。

これを書いている時点で、問題としている材料の基準方程式は W A D C O の研究者グループによって F F T F 用に作成されている最中である。これらの作業に用いられる材料データは一軸試験によるものである。さらに多くの試験が、いくつかの A E C が援助している研究室で続けられている。

## 3. 機能上の制限 ( Functional Limits )

ある種の機器（たとえば、フランジ、バルブ本体、炉内制御棒）は、材料が実際に破壊する

よりもずっと前に、変形のためにその機能を失なうことがある。このような破損モードは設計依存型であり、オーナーはこのような機能上の制限を（設計者に対して）機器仕様書（Equipment Specification）の中で示さなければならない。F F T Fでは、最大ひずみの理念がすでに他の破損モードに含まれているから、その制限より低い値におさえたいときだけ機能上の制限を示す必要がある。

たとえば、1%全膜ひずみは、一次荷重およびひずみ制限から要求される寿命中の許容限界である。機能上の制限が伴う部分については、その荷重方向に適合する範囲内で最も悪い状態で1%のひずみが生じると仮定すれば、非弾性解析をしなくてよい。もし、それによって得られた変形が機能上の制限を満たすなら、その要求は、満たされる。そうでない場合に、機能上の制限は設計者に非弾性材料モデルを用いた詳細解析を要求する。

#### 4. 全非弾性ひずみに対する制限 (Limits on Total Inelastic Strain)

非弾性解析の結果、最も直接的な制限はひずみについてであろうから、高温の規則に対しては、ひずみ制限が最も便利である。しかしながら、これと同じモードの破損は、一次荷重応力制限に対する一つのクライテリアとクリープ-疲労の相乗効果（次節）によって、間接的にカバーされている。新しく別の制限を使用するのは次の必要性にもとづいている。

- 溶接部のひずみをコントロールすること
- 一次応力制限よりも、より正確なモデルを用いて解析し、非弾性モデルを用いることもできること。
- クリープ-疲労の規則に生じるかも知れない危険側の誤差に対してバックアップすること。
- 高温では全ひずみが設計パラメーターのカギとなるものであることを設計者に認識させること。
- コンポーネントの寿命中にわたってモニターされる測定可能な量と破損モードを結びつけること。

実際のひずみ制限の設定は、実際のデータによるというよりも、関連していた人々の“心づもりに合わせる”ことによった。Blackburnのデータ（図12）は、クリープ温度で長期間供用すると引張り延性が低くなることを示している。クリープと引張り延性の差は、利用できる延性にとって負荷時間が重要であることを示している。しかしながら現在のF F T Fの立場は、長期間のクリープひずみを生じさせる高い残留負荷を生じせしめるものは、ある短期間の出来事であるという立場をとっている。



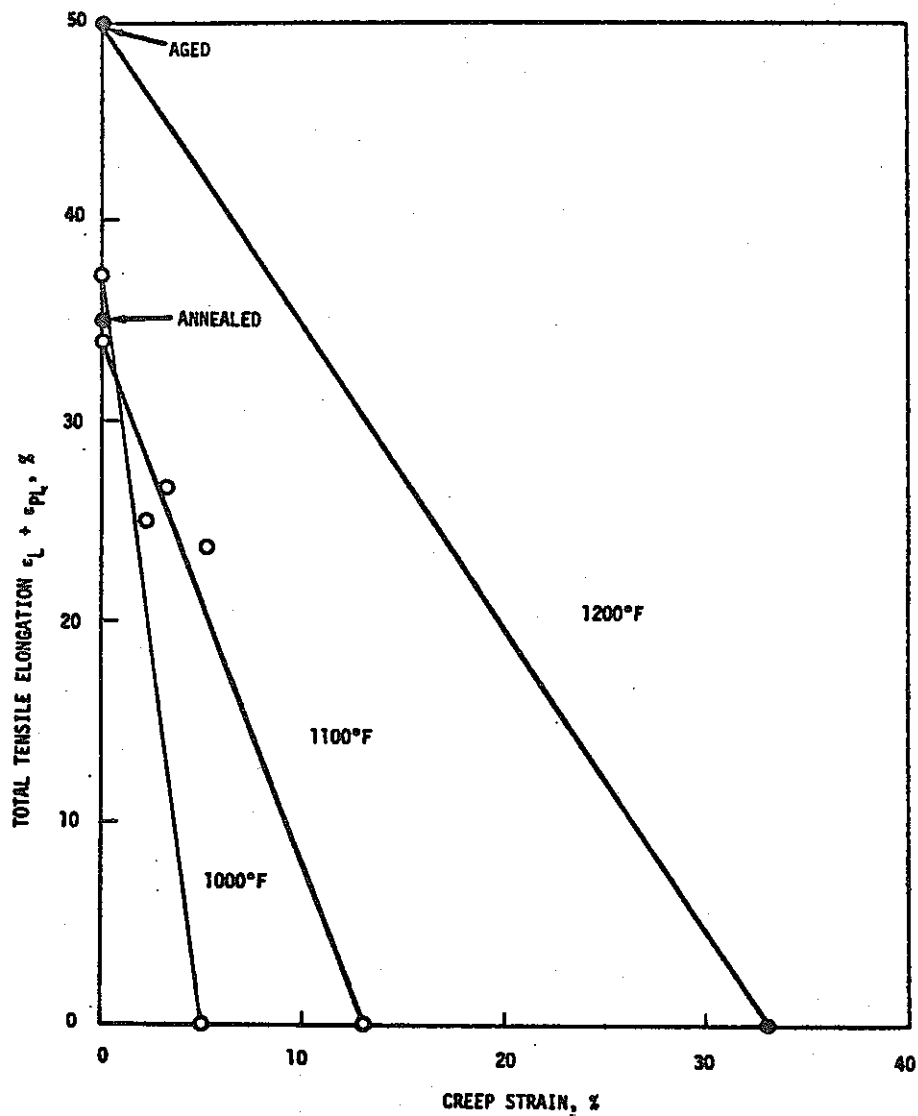


FIGURE 12. Effect of Prior Creep Deformation on Tensile Elongation of 304 SS

実際に用いている制限は次の通りである。

- 全膜ひずみ制限 = 1%
- 全表面ひずみ(曲げ+膜)制限 = 2%
- (幾何学的あるいはその他の)局部不連続点での全ひずみ制限 = 5%

これらの制限は Section III の同様な応力部類(すなわち、一次、二次およびピーク)と同様な部類に対応している。

典型的な溶接部についての有限要素法解析の結果、溶接部に重要な冶金学的応力が発生することがわかった。溶接の材料分析は非常に少ない上、溶接プロセスによって多くのパラメータが

入るために複雑である。F F T Fでは、溶接母材の特性と一致させるために、溶接プロセスの指定に多くの努力を払っている。溶接によって普通生じる破損モードは隣接母材部（すなわち熱影響部）の引き裂きによる破損である。

F F T Fの溶接部に対する規則は、すべてのひずみ計算において母材の特性が使用されるが、それによって生じる全ひずみは、上に示した母材の値の半分に制限されるとしている。これを支持するデータは図13に示されており、これは、溶接部を横ぎる試験片（cross-weld-region specimen）から得られたものであり、解析的モデルと同様に全体として局部的に特

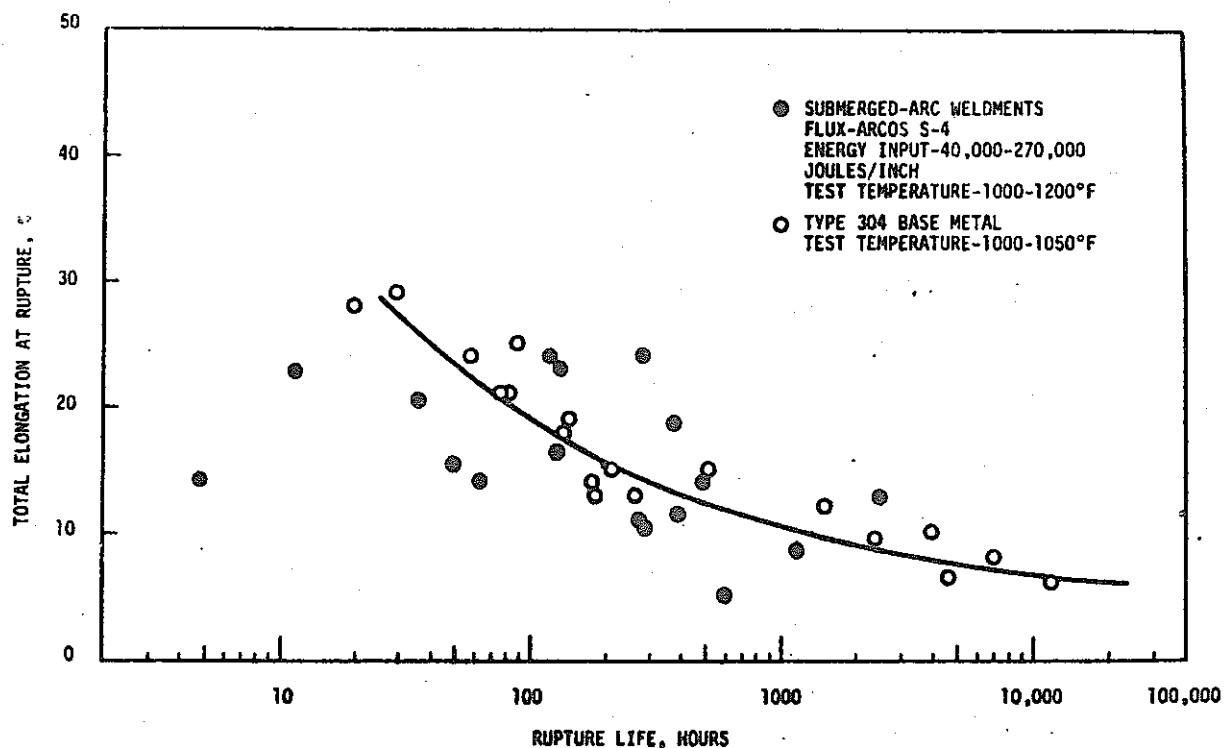


FIGURE 13. Variation of Creep Ductility with Rupture Life for Selected Austenitic Stainless Steel Submerged - Arc Weldments

有な挙動を示している。実際この溶接部に対する制限は、溶接プロセスを慎重に選択させ、設計者に高ひずみ領域での溶接を避けることを促し、原子炉構造物におけるカギとなる役割を果たすであろう。

F F T Fの規則はまた、大規模に非弾性解析を使用することは高くつくことを認めている。与えられたコンポーネントに対して、非弾性解析の数を最小にするための、簡単な適格テスト（Screening test）が求められた。ひずみ制限に対する弾性試験は主として、図14のプロットを用いて安全な領域“E”を定めている Burgreen と Bree の論文によっている。これらの試験の背景となる理論は、多軸ひずみ場は“有効”ひずみの概念による一軸試験の結果と関連している、と仮定している。この仮定には、同じような手法を応力に対して用いた場合よりも多くの疑問が残されている。これが単純な適格試験の場合の主要な材料特性の入力であ

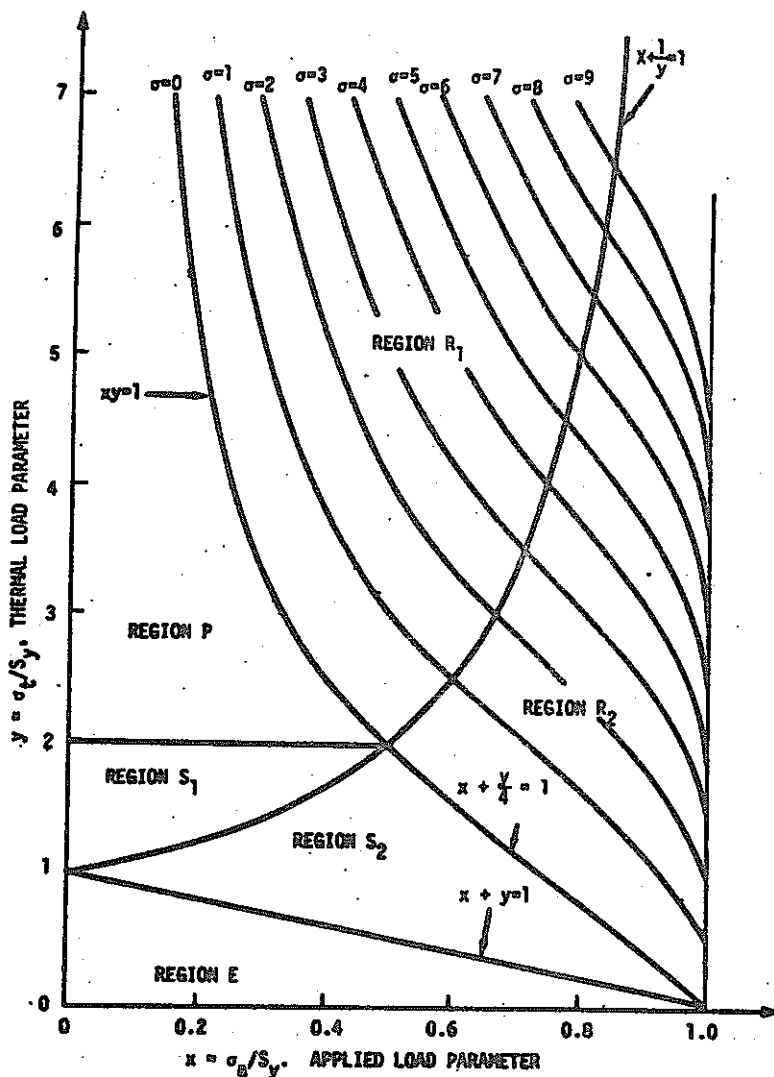


FIGURE 14. Stress Regimes for One-Dimensional Element

る。非弾性解析の数を減らすために有効であることから、この適格テストは図14の領域“E”より広い領域を認めるべきであろう。FFTFの規則は、その正当性が得られるかぎり、そのようなテストを利用するであろう。筆者はこのような適格テストの解説として文献10を推せんする。

5. クリープと疲労の相乗効果に対する規則 (Rules for Combined Creep Fatigue)

低温での疲労クラックは、高温では保持時間の影響を考慮せねばならない。ごく最近では、これはGE-NSP<sup>(1)</sup>(図15)においてConway, Berlingらによって求められた低サイクル疲労データのプロジェクトによって示された。

1969年2月の1000°F(538°C)のFFTF原子炉容器に対する最初の提案規則中に、良く知られた線形クリープ—疲労関係式が含まれている。

$$\sum_i (t/t_{rupture})_i + \sum_i (n/n_{failure})_i \leq 1$$

この第一項は破断損傷を表わし、第二項は疲労損傷を表わす。ここには事象の順序に対

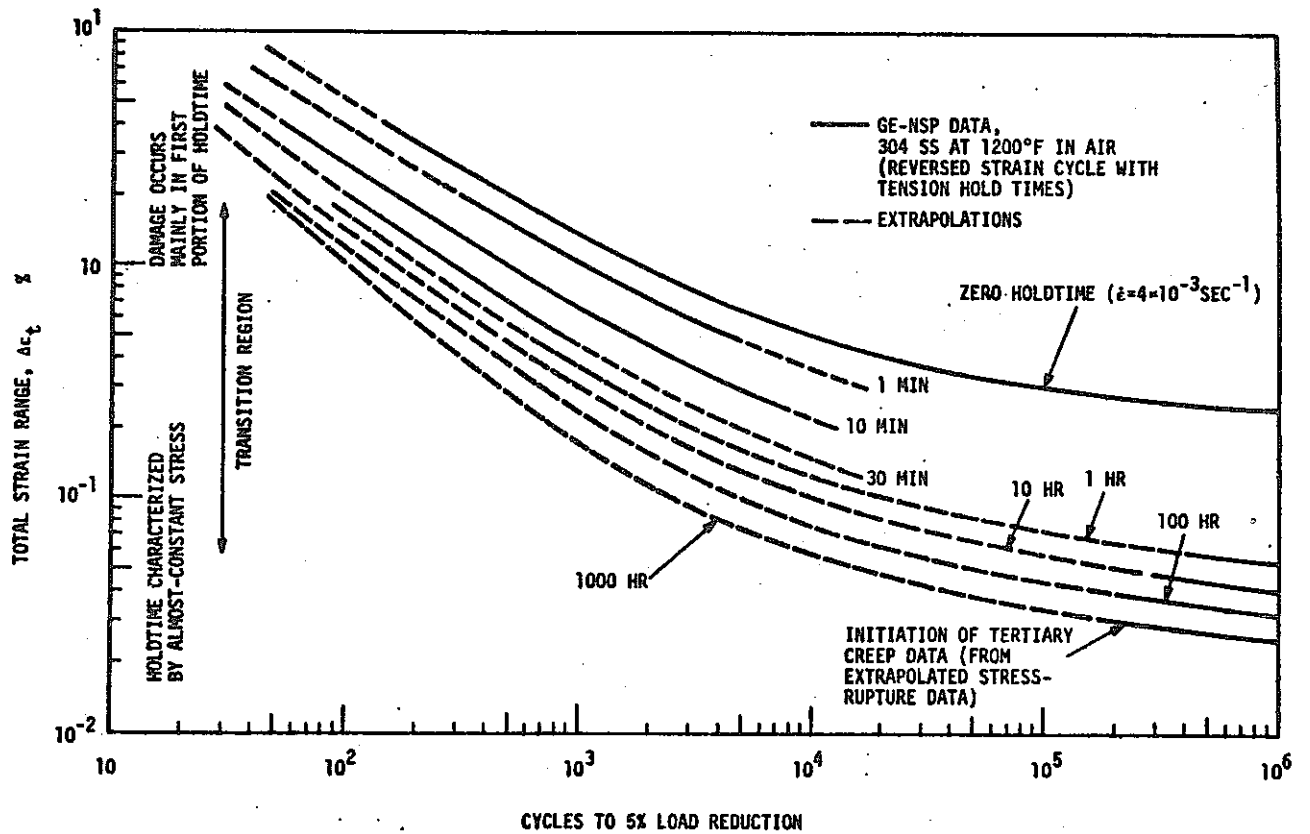


FIGURE 15. Effect of Holdtime on Low-Cycle Fatigue Data

する依存性、あるいは非線形効果に対する依存性がまったくないことに注目されたい。

その後、この式はより一般的な形で表わされた。<sup>(12)</sup>

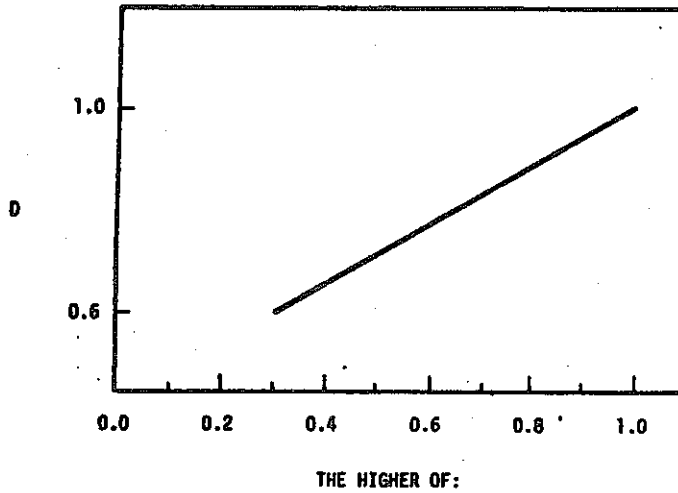
$$\sum_i (n/n)_i^u + \sum_i (t/t_r)_i^v \leq K_e$$

ここでクリープと疲労の有益な（回復プロセス）あるいは有害な相乗効果は定数  $K_e$  と、指数  $u$ 、 $v$  によって表わされた。速度、くり返し波形、保持時間はその式の中で、定数  $\alpha$ 、 $\beta$  によって評価されることになる。

F P T F に対する一般式は次のように定められた。

$$\sum_i (t/t_r)_i + \sum_i (n/N_d)_i \leq D$$

ここで  $D$ （図 16）は非線形のクリープと疲労の相乗効果の危険性を除くためのものである。  
 $t_r$  の項はラプチュア応力の 100% と関連している。 $N_d$  は設計疲労曲線によるものであり、この場合には疲労損傷のひずみ速度依存性を含むために、いくつかの曲線が含まれる予定であ



$$\sum_{i=1}^p \left(\frac{t}{T_D}\right)_i \quad \text{OR} \quad \sum_{k=1}^q \left(\frac{n}{N}\right)_k$$

FIGURE 16. *Limits for Creep-Fatigue Interaction Using Inelastic Analysis*

関数として図 17 のように準備された。図 17 で示されたようなカーブから得られたデータを用いて、各種の材料について（対数軸ひずみ範囲対対数破損までのくり返し数の）“展型的な”疲労曲線、図 18 が作られた。ASME Code グループで使用された安全率、すなわち破損サイクルについて 20、軸ひずみ範囲について 2 が、一連の材料、ひずみ速度および温度に対する“設計”疲労曲線を作るのに使用された。各温度に対して、これらの曲線は図 19 に示すよ

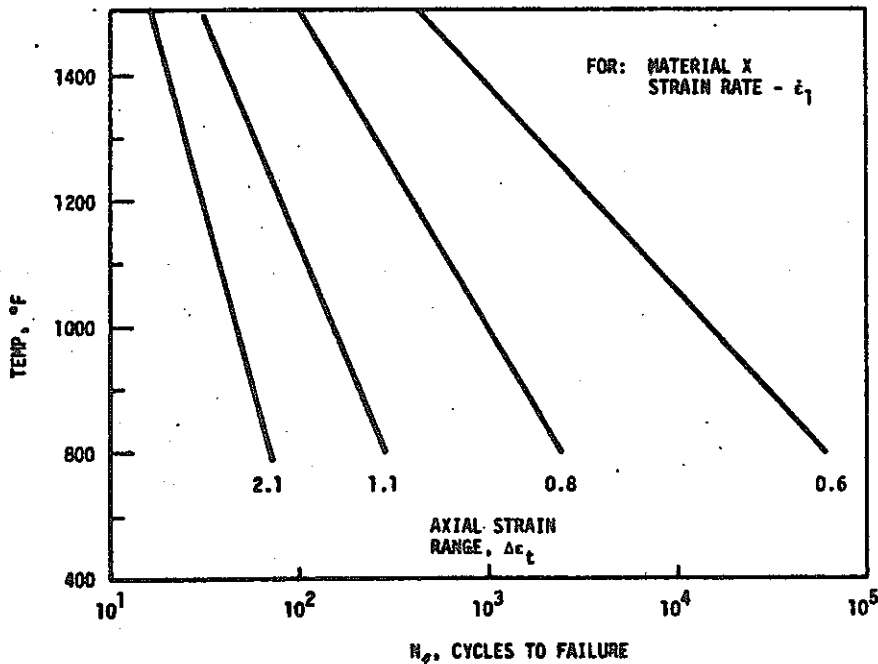


FIGURE 17. *Basic Fatigue Data Plot*

った。

Section III の Code Case 1331-4 は弾性解析を用いる場合の設計疲労曲線を提供する。FFTF の非弾性解析を行なうためには、全ひずみ範囲対破損までのくり返し数が、ひずみ速度の関数として、必要になる。ASME Code グループによって用いられたと同じ疲労データ群を用いて、各材料およびひずみ速度に対して、温度対破損までのくり返し数の対数のプロットが、軸ひずみ範囲の

りに、ひずみ速度の影響を示すようにまとめられた。

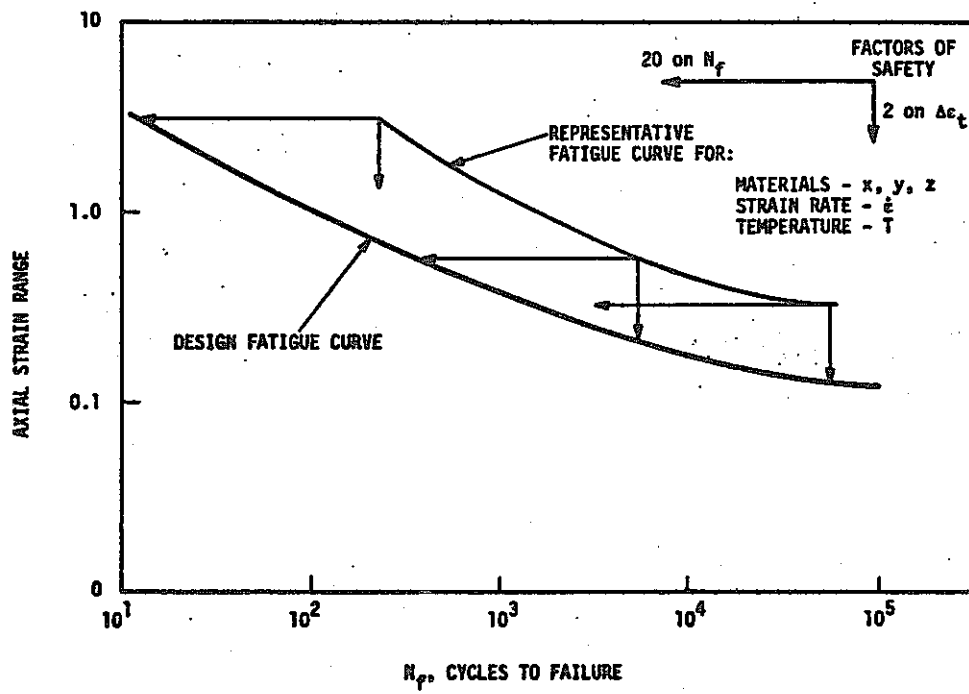


FIGURE 18. Fatigue Design Curve Generation

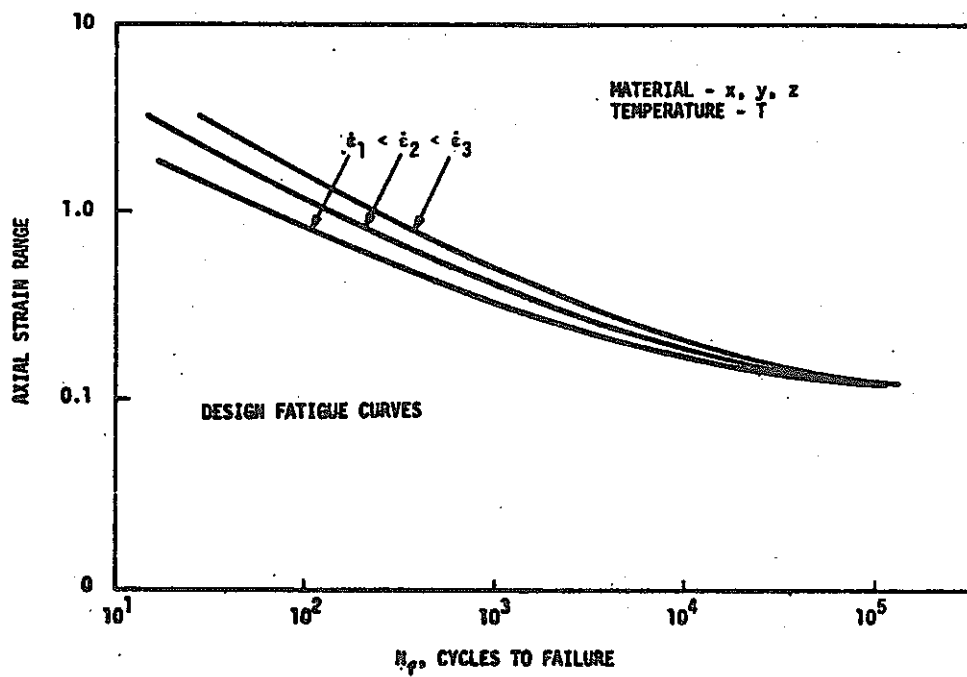


FIGURE 19. Design Curves for Fatigue

6. 不安定座屈の制限 ( Buckling Instability Limit )

過去の原子力コード<sup>(1, 2)</sup>の規則は時間に依存しない座屈モードに限られている。クリープおよび応力緩和のために、構造物の最初の形状および荷重分布は寿命中に変化するであろう。不安定破壊はこれら両方の大きさに依存し、したがって解析的なアプローチでは非弾性材料モデルの全荷重履歴を考えなければならない。もし非弾性材料モデルによって形状および荷重分布が評価できれば、弾性材料のモデルを用いて、寿命中の任意の特定の段階で不安定座屈解析を行なうことができる。

この理論的なアプローチの複雑さのために再び別の方法の必要性が生じてくる。このためには、一定の安全率を考慮した上での実験的なアプローチが唯一のものであった。現在 FFTF プロジェクトは、表 1 に示された安全率を用いている。

表 1

不安定座屈に対する最小安全率

材料モデルの型	理論的荷重安全率	実験的荷重安全率
弾 性	3.0	2.5
弾 塑 性	2.5	2.0
弾塑性クリープ	2.5	2.0

( 時間に対する安全率 1.0 )                      ( 時間に対する安全率 1.0 )

この破損モードに対して、その他の新しい材料試験データは使用されない。

## V 照射に対する考慮

F F T Fの炉心内のすべての構造要素(すなわち、燃料被覆管、燃料集合体、制御棒)は比較的短い寿命(約1年)の要素であり、その設計規則は筆者らの主要目的外であった。この会議でも他の論文が照射によるクリープやスウェリングに対する設計指針を示すであろう。

ここでは、炉心内の設計にはひずみおよび変形制限に重点が置かれ、応力制限は比較的重要度が低いと言うだけにとどめる。

照射による効果は、中性子束、照射量、特に高エネルギー照射量が低くなるために、炉心の外では急速に減少する。このような状況のもとで、いくつかの重要な構造要素(炉心の横方向拘束装置、燃料集合体支持パッド、炉心サポート板、炉心ホールドダウン構造物)は、一次冷却系コンポーネントの寿命と同等な寿命を持たねばならない。F F T Fは照射損傷の尺度として、材料の延性特性に注目した。

構造設計者にとって延性とは、金属が破壊前に塑性的に流動することのできる能力を意味する。延性の尺度は設計において質的に考慮されてはいないが、高引張延性は、もし設計者が応力計算あるいは負荷荷重の予測に誤りをおかしても、その金属が寛容(forgiving)であり、破壊せずに局所的に<sup>03</sup>変形することを示す。したがって、十分な延性は、一次冷却系バウンダリ材料にとって一つの本質的な要求事項である。オーステナイトステンレス鋼の場合には、一軸試験の残留全伸び能力10%が、それより低いと、材料は多軸応力下で延性的に変形できない点として独断的に定められる。照射損傷限界として10%の全伸びを選ぶことの議論は文献<sup>04</sup>からとられたものであるが、そこでは、金属を全伸びを基準にして、十分な……10%~15%、限定された……1%~10%、ぜい性的な……1%以下、の3つに分類している。



## VI 質量移行に対する考慮

原子炉熱伝達ループ中のナトリウム冷却材は拡散および質量移行メカニズムを生ぜしめ、このため、炭素および窒素はループの高温部の構造材料から溶けだし、これらの元素はループの低温部構造要素に集積される。炭素は（おそらく窒素も）ステンレス鋼や合金鋼では強度増加のための重要な役割りを果しているから、設計者はループの高温要素の設計規則にあたってこれらの現象を考慮しなければならない。さらに、これらの元素は、炭素（クロミウムカーバイドの形で）および窒素が構造物の表面にたまる時、コールドレグの特定要素の機能を低下させることがある。

炭素の拡散に対して、FFTF一次冷却系のナトリウムは、コア内外部で大部分がさらされた最高温度のために、炭素が飽和している状態にあると仮定している。飽和ナトリウム中では、拡散の大部分は、流体温度が増加し（たとえば炉心）そして十分な拡散係数（図20）を持つようになる所で生じる。FFTFでは、炉心構造物は約 $1150^{\circ}\text{F}$ （約 $621^{\circ}\text{C}$ ）に達する短寿命構造物でできている。もう一つの温度上昇流体領域は、バイパス冷却材流れが、主冷却材流れ（温度 $1050^{\circ}\text{F}$ ）に再入する長期寿命構造物である出口ノズル部であり、ここではすぐに低下する。これらの領域では304ステンレス鋼材料の通常的设计値からの品質低下を防ぐ唯一の方法は、壁の平均炭素量が合金グレードに指定された最小値（304SS材に対して0.04%）以下に下がらないように、最初に炭素量を充分多くすることである。FFTFのホットレグ配管は、カーボン量を0.06%以上に指定することによって設計値のいかなる低下も防げるであろう。

窒素拡散現象は304、316、S.S材の強度に対する影響について比較的調べられていない。

合金のグレード仕様は窒素の最低量について示していないから、窒素の拡散によって設計のための最小特性値が低下することはない。したがって、FFTFの設計でも設計特性を低下させない。最も拡散の激しい炉心にはもともと低窒素（ $\leq 0.01\%$ ）と指定された構造材料を使用する。この指定の理由は窒素の拡散とは関係なく、窒素と中性子束の相互作用によって生じるガス生成を減らすことを目的としたものであった。窒素拡散によるFFTF設計の主要な問題は、一次系の高温冷却材領域で窒化した硬表面（nitrided hard-facy surfaces）を使用することに対する制限であった。

一次冷却系のコールドレグでは（クロミウムカーバイドの形になった）炭素が熱交換器の管内にたまる。このとき多少衝撃強度が低下するが、重要な疲労強度への影響を評価するべき証

扱はほとんどない。現在のところ、FFTF設計規則はこの点について何ら指針を与えていない。この問題に対する実験的な研究が勧められている。

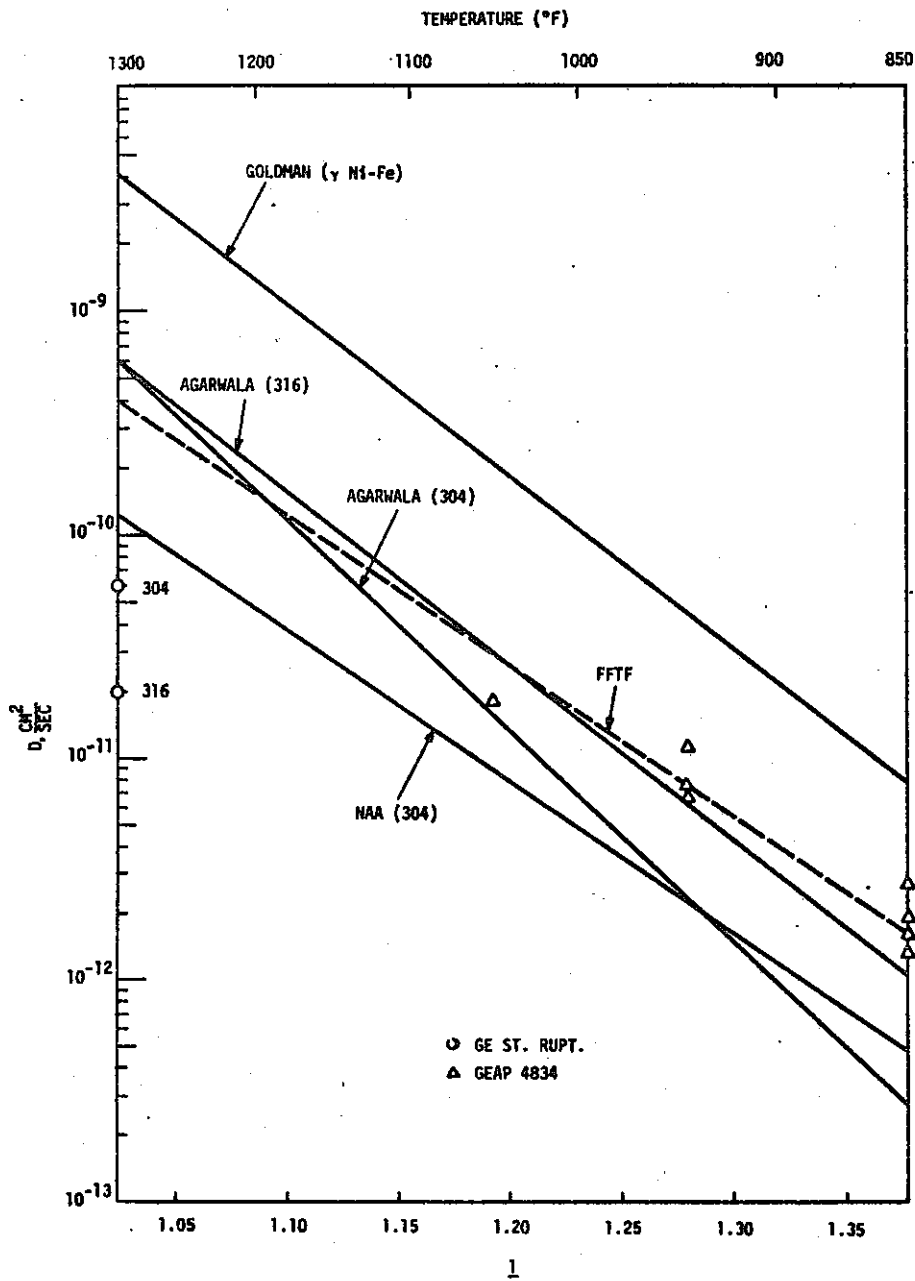


FIGURE 20. Diffusion Coefficient for Carbon into Liquid Sodium

## Ⅶ 将来の開発

FFTFの運転が始まると、思いがけない事故の影響を測定するために、ひずみ制限が便利な参考点となるであろう。もしその事故中の温度および荷重履歴がわかっておれば、ひずみ制限はあらかじめ次の2つのカギとなる質問に答えるための基準を示す。

- そのコンポーネントを再び使っても安全か？
- もしそうなら、その安全な寿命はどれだけか？

FFTFの構造設計規則の中でふれられていない一つの領域は、最初の設計における破壊力学の使用である。破壊力学は、運転中のコンポーネントにクラックが発見されてから後に使用される。<sup>\*</sup> <sup>\*</sup>(注) FFTFでは破壊力学は次の重要な設計および安全性への問題に対して答えようとするのに使用された：“配管中に小さなクラックが生じたとき、クラックが急速な伝播をするまえにFFTFの計器がナトリウムのリークを探知できるに十分な大きさになるかどうか”)

設計規則はクラックが存在しないと仮定している。これは次の理由によってなされた明らかに単純化した仮定である。

- 過去のASMEコードが同じ仮定をした。
- 多軸応力下で高温でのクラック伝播は理論的にも実験的にもその知識が不十分である。
- ある種の官庁は、注意深く設計され、製作され、試験された材料に、寿命の最初からクラックが入っているかも知れないという仮定をすることをきらう。

FFTFの構造設計規則を開発するにあたって、多くの材料挙動に対する現在の設計規則がより一層の研究によって有益なものとなることが明らかになった。

米国において材料情報開発プログラムが次のゴールを目指してすでにスタートしている。

- 構造材料に対するより正確な構成方程式を確立する。
- (母材に対して) 応力とひずみのクライテリアの基礎データを増大させる。
- 溶接特性について現在手に入れられるわずかのデータをもっと拡大させる。
- 三次元構造解析に対して用いられる計算機コードの容量と可能性を増大する。
- 実際の構造物形状のものに加えられるくり返し熱荷重にもとづくひずみ履歴を与える参考

試験 (reference test) を行なうことによつて、計算機コードと材料モデルの適正さを確認する。

- 新しい単純化した試験法を開発するためにラチェットおよびクリープ——疲労の領域を研究する。

将来、おそらく1980年までには、高温構造設計規則は、その合金の構成方程式と、そのコンポーネントの予想されるヒストグラムを用いて、2、3のカギとなる領域のひずみの非弾性解析に限定されるだろう。計算されたひずみ履歴がひずみおよび変形制限と比べて評価される。クリープ——疲労規則と、一次応力および全ひずみの2つの制限領域の間の余裕 (redundancies) はクリープ——疲労の評価規則が信頼のできるものとなるにつれて小さくなるであろう。

## VIII 参 考 文 献

1. ASME Boiler and Pressure Vessel Code , Section III, Division 1, Nuclear Power Plant Components, American Society of Mechanical Engineers (1971 Edition).
2. ASME B & PV Code, Section VIII , Division 1 , Pressure Vessels, American Society of Mechanical Engineers (1971 Edition).
3. Jakub , M.T., et al, "Suggested Interim Structural Design Criteria for the FTR Primary Piping System , "BNWL-1236 , Battelle-Northwest Laboratories (December 1969).
4. Smith , G.V., "An Evaluation of the Yield , Tensile, Creep and Rupture Strength of Wrought 304, 316, 321 and 347 Stainless Steels at Elevated Temperatures," ASTM DS5-S2 , 1969.
5. Garafolo, F., Fundamentals of Creep and Creep Rupture in Metals, Chapter 7, Macmillan Co., New York (1966).
6. Leyda, W.E. and Rowe, J.P., "A Study of the Time for Departure from Secondary Creep for Eighteen Steels, "TP-9-57, presented at ASM Meeting, October 1969.
7. Smith, G.V., "Isochronous Stress-Strain Curves for 2-1/4 Cr-1Mo, Type 304-304H , and Type 316-316H Steels," Technical Report 2012, Part 1, C.F. Braun & Co. (1970).
8. Smith , G.V., "Creep Rate versus Total Creep Deformation: A Perspective Summary of the Symposium , "part of ASTM-STP series document to be published.
9. Miller, D.R., "Thermal Stress Ratchet Mechanism in pressure Vessels, " (ASME) Journal of Basic Engineering , pp 190-196 (1959).
10. SLEMBER , R.V., "Developments in High-Temperature Design Criteria, " paper to be presented at ASME Nuclear Conference.
11. Berling , J.T., and Conway, J.B., "Effect of Holdtime on the Low-Cycle Fatigue Resistance of 304 Stainless Steel at 1200°F, " Paper II-96 of Delft Conference (1969).

12. Esztergar, E.P., "Interim Design Basis for Creep and Fatigue Conditions," Gulf General Atomic Report GAP 1230.1 (1969).
13. Papirno, R., "Ductility in Structural Design," Ductility, American Society for Metals, p.345 (1968)
14. Dieter, G.E., "Introduction to Ductility," Ductility, American Society for Metals, p.2 (1968).
15. Goldman, K., "Environmental Design Factors for Sodium-Cooled Fast Reactor Components," IAEA-SM-130/62, presented at International Symposium on Sodium-Cooled Fast Reactor Engineering, Mtnaco (1970).